

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
 ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

460

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΕΣΒΙΟ
 ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ - ΤΜΗΜΑ
 ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
 ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ &
 ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ
 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
 ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

ΚΥΠΡΙΑΝΙΔΟΥ ΠΑΤΡΙΤΣΙΑ
 ΧΗΜΙΚΟΣ



00140607

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ	
ΑΡ.ΕΙΣ.	40607
ΟΜΠ.	24266 in 22759
ΛΕΙΝ.	333.793 2 KY
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ	

ΑΘΗΝΑ 2000

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του διετούς Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Οργάνωση και Διοίκηση Βιομηχανικών Συστημάτων» - ειδίκευση «Συστήματα Προστασίας Περιβάλλοντος και Ενέργειας», που οργάνωσαν το Πανεπιστήμιο Πειραιά (Τμήμα Τεχνολογίας και Συστημάτων Παραγωγής) και το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Τμήμα Χημικών Μηχανικών).

Η εργασία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του αναπληρωτή καθηγητή του Πανεπιστημίου Πειραιά κ. Φραγκίσκου Μπατζιά, τον οποίο και ευχαριστώ βαθύτατα για την εξαιρετικά ουσιαστική βοήθεια και την άψογη καθοδήγησή του. Για την υποστήριξή τους, ευχαριστώ επίσης θερμά τον κ. Ε. Χιωτέλλη και την κα Α. Βαρβαρήγου, ερευνητές Α΄ βαθμίδας του Ινστιτούτου Ραδιοϊσοτόπων και Ραδιοδιαγνωστικών Προϊόντων του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος», όπως και τους συναδέλφους μου στο Ινστιτούτο, για την συμπαράστασή τους.

Για το υπολογιστικό μέρος της εργασίας, ιδιαίτερα ευχαριστώ τον αναλυτή συστημάτων κ. Α. Μπατζιά, ο οποίος διέθεσε χρόνο και τμήμα του αναπτυχθέντος από τον ίδιο υπολογιστικού προγράμματος H/Y IPES. Επίσης ευχαριστώ, τον φυσικό κ. Γ. Νικολάου, και έμπειρο σε θέματα του κύκλου ζωής του πυρηνικού καυσίμου, καθώς και την φιλόλογο κα Κ. Μακρυγιαννάκη για την σημαντική βοήθειά της.

Στην προσπάθεια αυτή, είχα την ουσιαστική, ολόπλευρη και πολύπλευρη συμπαράσταση της οικογένειάς μου και των καλών μου φίλων: τους ευχαριστώ από καρδιάς για τη γενναιοδωρία τους.

Νοέμβριος 2000

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	1-6
ΜΕΡΟΣ Α: Πυρηνική Ενέργεια και Παραγωγή Ηλεκτρισμού	7-10
1. Εισαγωγή	
2. Στοιχεία πυρηνικής τεχνολογίας	
Κεφάλαιο 1ο: Τύποι Αντιδραστήρων Ισχύος	
1. Πυρηνικοί αντιδραστήρες (Π.Α.).....	10-25
1.1. Οι κύριες συνιστώσες ενός Π.Α.	
1.2. Η κατάσταση των πυρηνικών σταθμών για ηλεκτροπαραγωγή παγκοσμίως	
2. Τύποι αντιδραστήρων ισχύος	26-63
2.1. Αεριόψυκτοι αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων	
2.1.1. Αεριόψυκτος αντιδραστήρας γραφίτη φυσικού ουρανίου	
2.1.2. Εξελιγμένος αεριόψυκτος αντιδραστήρας	
2.1.3. Αεριόψυκτος αντιδραστήρας υψηλής θερμοκρασίας (HTGR)	
2.2. Αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (Light Water Reactors, LWR)	
2.2.1. Αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος	
2.2.2. Αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος	
2.2.3. Συμπεράσματα για τους αντιδραστήρες τύπου LWR	
2.2.4. Σχόλια για τους αντιδραστήρες LWR και HTGR	
2.3. Αντιδραστήρες βαρέος ύδατος (Heavy Water Reactors, HWR)	
2.3.1. Αντιδραστήρες πεπιεσμένου βαρέος ύδατος	
2.3.2. Αντιδραστήρες βαρέος-ελαφρού ύδατος	
2.3.3. Αεριόψυκτοι αντιδραστήρες βαρέος ύδατος	
2.3.4. Συμπεράσματα για τους HWR	
2.4. Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες (Breeders)	
2.4.1. Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων ψυχόμενοι με υγρό μέταλλο	
2.4.2. Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων ψυχόμενοι με αέριο	
2.4.3. Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες τετηγμένου άλατος	
2.4.4. Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος	
3. Σχολιασμός τύπων αντιδραστήρων	

Ισχύος

1. **Ασφάλεια και αξιοπιστία αντιδραστήρων**.....64-87
 - 1.1. Εισαγωγή - Ορολογία
 - 1.2. Πόση ασφάλεια είναι αρκετή;
 - 1.2.1. Αρχές ασφάλειας
 - 1.2.2. Συστήματα ασφάλειας
 - 1.2.3. Αξιολόγηση κινδύνου και πρόγνωση
 - 1.2.4. Ασφάλεια κατά τη σχεδίαση και τη λειτουργία
 - 1.2.5. Ενίσχυση της ασφάλειας - Προηγμένοι τύποι αντιδραστήρων
 - 1.2.6. Σύγχρονες τάσεις
 - 1.3. Μελέτη ατυχημάτων και αλληλουχίας γεγονότων κατά το ατύχημα
 - 1.4. “Hidden” Κριτήρια
 - 1.5. Θέματα ασφάλειας και μεταφοράς ραδιενεργού υλικού μέσω του περιβάλλοντος
2. **Τεχνικά χαρακτηριστικά αντιδραστήρων**88-95
 - 2.1. Η παραγωγικότητα/απόδοση ή αξιοπιστία της λειτουργίας αντιδραστήρα ισχύος
 - 2.2. Προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας
 - 2.3. Μη προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας
 - 2.4. Ανάλυση της λειτουργίας και απόδοσης ενός πυρηνικού σταθμού
 - 2.5. Βελτίωση της απόδοσης
3. **Ο κύκλος του πυρηνικού καυσίμου**96-108
 - 3.1. Εισαγωγή- Ορολογία
 - 3.2. Τα εμπορικά χαρακτηριστικά του πυρηνικού καυσίμου
 - 3.3. Διαθεσιμότητα και εξοικονόμηση πυρηνικού καυσίμου
 - 3.4. Το εξαντλημένο καύσιμο
 - 3.5. Ο «κύκλος» ή η αλυσωτή αντίδραση του θορίου
 - 3.6. Ανακύκλωση και επανεπεξεργασία
4. **Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και διαχείριση αποβλήτων**109-130
 - 4.1. Ραδιενεργά απόβλητα
 - 4.2. Ασφαλής διαχείριση των αποβλήτων

- 4.3. Κατηγορίες αποβλήτων**
- 4.3.1. Υψηλής ραδιενέργειας απόβλητα
- 4.3.2. Χαμηλής ραδιενέργειας απόβλητα
- 4.4. Απόβλητα και ραδιενεργός μόλυνση από τον κύκλο ζωής του καυσίμου**
- 4.5. Επιπτώσεις από την κανονική λειτουργία**
- 4.5.1. Εκπομπές από την κανονική λειτουργία
- 4.5.2. Κλιματική αλλαγή και συμβολή στο φαινόμενο του θερμοκηπίου
- 4.6. Ραδιενεργός μόλυνση από ατύχημα**
- 4.7. Ασφαλής διαχείριση αποβλήτων αντιδραστήρων και καταναλωθέντος καυσίμου**
- 4.8. Επανεπεξεργασία του εξαντλημένου καυσίμου και ανακύκλωση**
- 4.9. Απόβλητα παροπλισμού**
- 5. Παροπλισμός131-135**
- 5.1. Εισαγωγή- Ορολογία
- 5.2. Πλαίσιο και ισχύουσες απαιτήσεις
- 5.3. Κόστους παροπλισμού και διάλυσης των πυρηνικών σταθμών
- 6. Θεσμικό και κανονιστικό πλαίσιο136-141**
- 6.1. Διεθνής συνεργασία και διεθνείς οργανισμοί
- 6.1.1. Η Διεθνής Υπηρεσία Ατομικής Ενέργειας
- 6.1.2. Η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας
- 6.1.3. Η Υπηρεσία Πυρηνικής Ενέργειας του ΟΟΣΑ
- 6.1.4. Η Διεθνής Επιτροπή Ραδιολογικής Προστασίας
- 6.1.5. Η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ)
- 6.2. Πρότυπα διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων
- 6.3. Διασφάλιση πυρηνικών υλικών (safeguards)
- 7. Τα οικονομικά της πυρηνικής ενέργειας142-161**
- 7.1. Συνιστώσες του ολικού κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας
- 7.2. Το κόστος του καυσίμου
- 7.3. Στοιχεία ιστορικής αναφοράς
- 7.4. Στοιχεία κόστους πυρηνικού σταθμού ισχύος
- 7.4.1. Κόστος κατασκευής
- 7.4.2. Κόστος λειτουργίας και συντήρησης (O & M)
- 7.4.3. Κόστος σύγχρονων αντιδραστήρων και προηγμένων τύπων

	7.4.4. Κόστος διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων	
	7.4.5. Κόστος ανακύκλωσης και επανεπεξεργασίας του καυσίμου	
	7.4.6. Το κόστος των οικονομικών αποταμιεύσεων για την διαχείριση των αποβλήτων και τον παροπλισμό	
	7.4.7. Κόστος διαχωρισμού και μεταστοιχείωσης	
	7.5. Ασφάλεια versus κόστος	
	7.6. Μείωση κόστους μέσω τεχνικής αναβάθμισης των υπαρχόντων σταθμών	
	7.7. Παράγοντες αβεβαιότητας στην εκτίμηση του κόστους	
8.	Θέματα Κοινωνικής Αποδοχής	162-167
	8.1. Η αντίληψη ασφάλεια και το αντίληπτό όφελος	
	8.2. Συμμόρφωση των πυρηνικών σταθμών με τις κανονιστικές απαιτήσεις και το θεσμικό πλαίσιο	
	8.3. Άλλοι παράγοντες	
	8.3.1. Μεταφορά ραδιενεργών υλικών	
	8.3.2. Μη εξάπλωση πυρηνικών όπλων	
9.	Ευρύτερες εφαρμογές	167-170
	9.1. Δυνατότητες και Προοπτικές	
	9.2. Ο ελληνικός ερευνητικός αντιδραστήρας	

ΜΕΡΟΣ Β: Ενδεικτική Εφαρμογή με Πολυκριτηριακή Ανάλυση171-230

1.	Εισαγωγή	171-173
2.	Το Πρόβλημα	173
3.	Η Μεθοδολογία	174-192
	3.1. Περιγραφή της μεθόδου	
	3.2. Τύποι γενικευμένου κριτηρίου	
	3.3. Προβλήματα με στοχαστικά χαρακτηριστικά	
	3.4. Συνάρτηση Χρησιμότητας Ενός Κριτηρίου	
	3.4.1. Προετοιμασία των δεδομένων του προβλήματος	
	3.4.2. Μεθοδολογία υπολογισμού συνάρτησης χρησιμότητας ενός κριτηρίου	
	3.5. Συνάρτηση Χρησιμότητας Πολλών Κριτηρίων	
	3.5.1. Υπολογισμός των σταθερών K_i	
	3.5.2. Διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό της συνάρτησης χρησιμότητας πολλών κριτηρίων	

4.	Μελέτη Περίπτωσης – Ενδεικτική Εφαρμογή	193-211
4.1.	Οι εναλλακτικές λύσεις	
4.2.	Τα κριτήρια	
4.2.1.	Σταθερό κόστος	
4.2.2.	Μεταβλητό κόστος	
4.2.3.	Ασφάλεια	
4.2.4.	Διαθεσιμότητα και αξιοπιστία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας	
4.2.5.	Διαθεσιμότητα και δυνατότητες πυρηνικού καυσίμου	
4.2.6.	Διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων	
4.2.7.	Κόστος και απαιτήσεις παροπλισμού	
4.2.8.	Κοινωνική αποδοχή	
4.2.9.	Επίπεδο τεχνογνωσίας και ειδίκευσης προσωπικού	
4.2.10.	Δυνατότητες τεχνολογικής βελτίωσης και αναβάθμισης	
4.2.11.	Καθορισμός βαρών	
4.2.12.	Βαθμολόγηση λύσεων ως προς τα κριτήρια	
4.3.	Τεχνική βαθμολόγησης εναλλακτικών λύσεων και οικοδόμηση της μήτρας προτίμησης	
4.4.	Ταξινόμηση των λύσεων με βάση τις ροές εισόδου και εξόδου	
5.	Εφαρμογή μοντέλου –Βασικά Σενάρια	212-221
5.1.	Βασικό Σενάριο 1	
5.2.	Βασικό Σενάριο 2	
6.	Ανάλυση Ευαισθησίας	222-228
6.1.	Η ανάλυση	
6.2.	Τα αποτελέσματα	
7.	Συζήτηση – Συμπεράσματα.....	229-230

ΜΕΡΟΣ Γ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1. Τα σημαντικότερα συμβάντα και ατυχήματα
2. Το βασικό θεσμικό πλαίσιο του παροπλισμού
3. Το βασικό θεσμικό πλαίσιο της ασφάλειας
4. Γλωσσάριο Όρων
5. Ακρωνύμια και Συντμήσεις

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι αλλαγές που επίκεινται στην αγορά της ενέργειας στην Ευρώπη και στην Ελλάδα με την απελευθέρωσή της (deregulation) αναμένεται να επηρεάσουν σημαντικά τη βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρισμού. Στις νέες συνθήκες, το καινούργιο στοιχείο θα αποτελέσει ο ελεύθερος ανταγωνισμός, ο οποίος θα εισαχθεί σε μία αγορά που μέχρι σήμερα αποτέλεσε κατά κανόνα κρατικό μονοπώλιο. Η απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας αναμένεται επίσης, να μεταβάλλει το πλαίσιο των ρυθμιστικών σχέσεων μεταξύ κράτους και ελεύθερης αγοράς.

Οι αλλαγές αυτές θα έχουν σοβαρό αντίκτυπο και στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας. Ο άμεσος αντίκτυπος θα είναι στις ήδη σε λειτουργία μονάδες, οι οποίες θα χρειασθεί να πουλήσουν την ενέργεια που θα παράγουν σε μία ανταγωνιστική αγορά. Η αλλαγή επίσης, στις δομές της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας θα παίξει σημαντικό ρόλο στις αποφάσεις για δημιουργία νέων μονάδων, οι οποίες θα κατασκευαστούν μόνον εάν εξασφαλίζουν ανταγωνιστικές οικονομικές συνθήκες [UI Trading Briefing, 1998], δεδομένου ότι μέχρι τώρα, η πυρηνική βιομηχανία κινήθηκε κυρίως με βάση τη φιλοσοφία της ασφάλειας και δεν ήταν προσανατολισμένη στην οικονομική ανταγωνιστικότητα.

Σήμερα, σημαντικό ποσοστό της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από πυρηνικούς αντιδραστήρες και αυτό αφορά πολλές βιομηχανικές χώρες. Ο ανταγωνισμός αναμένεται να αλλάξει την προσέγγιση της διαχείρισης των πυρηνικών σταθμών, ακόμα περισσότερο, στη βάση του κόστους. Αναμένεται να αναζητηθούν τρόποι να μειωθεί το κόστος όλων των δραστηριοτήτων του κύκλου ζωής των πυρηνικών σταθμών και κυρίως, να μειωθεί το σταθερό κόστος, το οποίο συγκριτικά με το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι πολύ μεγαλύτερο – έτσι ώστε να παράγεται ηλεκτρική ενέργεια σε χαμηλή τιμή. Ήδη, η Βρετανία έχει κινηθεί σε τέτοια βάση από το 1990. Στα πλαίσια της ανασυγκρότησης όλου του ενεργειακού της συστήματος, ιδιωτικοποίησε και τους πυρηνικούς σταθμούς και μείωσε την περίοδο 1992-96 το κόστος της παραγόμενης μονάδας ενέργειας κατά περίπου 27% [UI Trading Briefing, 1998].

Στα πλαίσια αυτά, η ανταγωνιστικότητα της πυρηνικής ενέργειας έναντι άλλων μορφών ηλεκτροπαραγωγής ενδέχεται να αντιπαρατεθεί στο αυστηρό κανονιστικό και θεσμικό περιβάλλον, στις αυξημένες τεχνικές απαιτήσεις ασφάλειας, στους μεγάλους χρόνους αδειοδότησης που μεγαλώνουν το σταθερό κόστος και στο ισχύον

ιδιοκτησιακό καθεστώς των σταθμών ισχύος. Σημαντικό ρόλο θα παίξουν επίσης, η στάση των κοινωνιών και η κοινή αποδοχή, παράγοντες πολιτικής και θέσεις κυβερνήσεων, όπως και η τεχνολογική πρόοδος που θα συντελεστεί στον τομέα της διαχείρισης των αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας και στον τομέα της ασφάλειας των εγκαταστάσεων. Για τους υποστηρικτές της πυρηνικής ενέργειας, πλεονεκτήματά της αποτελούν: η απουσία εκπομπών αερίων ρύπων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, οι χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τον συνολικό κύκλο ζωής του πυρηνικού καυσίμου, η αξιοπιστία και η υψηλή διαθεσιμότητα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, η πολύτιμη ανεξαρτησία από πετρελαϊκές ενεργειακές πηγές και η μεγάλη επάρκεια των αποθεμάτων ουρανίου.

Όσον αφορά στο πυρηνικό καύσιμο, είναι γεγονός ότι, τα αποθέματα φυσικού ουρανίου, με την υπάρχουσα τεχνολογία και τη σημερινή ζήτηση, εκτιμώνται διαθέσιμα για τουλάχιστον 60 έτη, χωρίς να ληφθεί υπόψη η βιομηχανική αξιοποίηση ήδη καταγεγραμμένων αποθεμάτων, η επανεπεξεργασία και ανακύκλωση του πυρηνικού καυσίμου και η ενδεχόμενη εμπορική αξιοποίηση αναπαραγωγικών αντιδραστήρων ταχείων νετρονίων. Εάν ληφθούν υπόψη και αυτές οι υποθέσεις, τα γνωστά αποθέματα ουρανίου αρκούν για πάνω από 200 έτη.

Όσον αφορά στην σχέση οικονομικότητας της ενέργειας και προστασίας του περιβάλλοντος με την έννοια της αειφορίας (sustainability) - όπως αναφέρεται στη Λευκή Βίβλο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) για την Ενέργεια [White Paper - An Energy Policy for the EE, 1995] - «η ανταγωνιστικότητα και η προστασία του περιβάλλοντος πρέπει να είναι συμπληρωματικές έννοιες». Η συζήτηση για την έννοια της «αειφορίας» ή της βιώσιμης ανάπτυξης αποκτά ιδιαίτερη σημασία στα παραπάνω πλαίσια. Η ΕΕ θεωρεί ήδη, ότι η έννοια της βιώσιμης ανάπτυξης περιλαμβάνει και την εργασία ως βασική συνιστώσα¹. Επίσης, η μείωση της ανθρώπινης ή της κοινωνικής ανησυχίας ή εντάσεως μπορεί να αποτελέσει μέρος μιας τέτοιας αντίληψης [Bourdairre and Paffenbarger, 1997].

Οι περισσότεροι υποστηρικτές της βιώσιμης ανάπτυξης δεν συμπεριλαμβάνουν τα συμβατικά καύσιμα στην λίστα των μορφών ενέργειας που θεωρούνται βιώσιμες, ενώ στις πρώτες θέσεις βρίσκονται οι ανανεώσιμες μορφές (ηλιακή, αιολική, βιομάζα), η αύξηση της απόδοσης των σταθμών και η εξοικονόμηση ενέργειας. Η πυρηνική ενέργεια επίσης, δεν συμπεριλαμβάνεται σε μία τέτοια θεώρηση. Για παράδειγμα, το

Αναπτυξιακό Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών (UNDP) δεν προβλέπει ρόλο για την πυρηνική ενέργεια, ενώ η Σουηδία και η Γερμανία, έχουν εξαγγείλει και αρχίσει την κατάργηση των πυρηνικών σταθμών τους από το 1997 και το 2000, αντιστοίχως.

Η συζήτηση αυτή επέδρασε και σε αυτούς που βλέπουν πλεονεκτήματα από την χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Ιδιαίτερα, σε συνδυασμό με το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής και την Διάσκεψη του Κυότο (1997). Η έννοια της βιώσιμης ανάπτυξης ενσωματώθηκε σαν προβληματική στα κείμενα της American Nuclear Society, της IAEA και της NEA (OECD). Σήμερα, αναζητώνται ενεργειακές λύσεις και σενάρια που συμπεριλαμβάνουν την πυρηνική ενέργεια ("sustainable energy-mix"), ενώ ταυτόχρονα αποδίδεται μακροπρόθεσμα στην πυρηνική ενέργεια σημαντικός ρόλος, σε σχέση με την αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Συμπερασματικά, η βιωσιμότητα της πυρηνικής ενέργειας πρέπει να εξετασθεί στη βάση των χαρακτηριστικών της πυρηνικής ενέργειας αφ'εαυτού - και όχι στη βάση της βιωσιμότητας ή μη, άλλων μορφών ενέργειας - υπό το πρίσμα των παρακάτω κριτηρίων (τα τρία "E") [Matsuura, 1999]:

- την ασφάλεια της ενέργειας (*Energy Security and supply*)
- την οικονομικότητα (*Economic Growth*) και
- την προστασία του περιβάλλοντος (*Environmental Protection*)

Είναι γεγονός ότι, οι ενεργειακές απαιτήσεις αυξάνονται. Έως το 2020, η ΕΕ προβλέπει ότι η ενεργειακή ζήτηση παγκοσμίως θα αυξηθεί από 8,5 δισεκατ. τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (btoc) σήμερα, σε 13 btoc². Με τα δεδομένα αυτά, και χωρίς δραστηκές παρεμβάσεις, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αναμένεται να αυξηθούν σημαντικά τα επόμενα 25 χρόνια, πολύ πάνω από τα επίπεδα του 1990 (τυπικά ο τομέας των μεταφορών είναι υπεύθυνος για το 28% των εκπομπών και ο τομέας της ηλεκτροπαραγωγής για το 32% των εκπομπών).

Η Λευκή Βίβλος αναφέρει ότι πρέπει να γίνει σημαντική στροφή σε μορφές ηλεκτροπαραγωγής που δεν εκπέμπουν CO₂ (ανανεώσιμες και πυρηνική), ώστε να αλλάξει αυτή η πρόγνωση [White Paper - An Energy Policy for the EE, 1995].

¹ White Paper on Growth, Competitiveness and Unemployment, Document COM(93)700/Europ. Commission, 1993.

² Η ΕΕ προβλέπει ότι θα αυξήσει την εξάρτησή της από εισαγόμενες ενεργειακές πηγές και ότι μεσοπρόθεσμα το φυσικό αέριο θα ανταγωνιστεί το πετρέλαιο στη συμπαράγωγή. Επίσης, ότι το βάρος θα δοθεί στις επιπτώσεις της τεχνολογίας στον τομέα της ενέργειας, στην κλιματική αλλαγή, στην απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας και στο γεγονός ότι κάποιες ανανεώσιμες πηγές είναι στο κατώφλι του να γίνουν βιώσιμες οικονομικά [White Paper - An Energy Policy for the EE, 1995].

Στα πλαίσια αυτά, το Παγκόσμιο Συμβούλιο Ενέργειας (World Energy Council, WEC) και η Υπηρεσία Πυρηνικής Ενέργειας του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Nuclear Energy Agency, NEA/OECD) σε διάφορα ενεργειακά σενάρια που έχουν εκπονήσει, τονίζουν την αναγκαιότητα να παραμείνει η πυρηνική ενέργεια μία ανοιχτή επιλογή, με βάση και την συμβολή της στο πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής [Doucet, 1999].

Το έτος 1999 υπήρξε δύσκολο για την πυρηνική ενέργεια, σε συνδυασμό με τον αρνητικό αντίκτυπο που είχε το ατύχημα στο Tokai Mura (Ιαπωνία), την απουσία αποδοχής από την κοινή γνώμη και τις πολιτικές πιέσεις σε μερικές χώρες. Στην ΕΕ, η παραγωγή ηλεκτρισμού παρόλα αυτά, παρέμεινε στα ίδια επίπεδα, ενώ σε μερικές περιπτώσεις αυξήθηκε ελαφρά λόγω βελτιώσεων της λειτουργίας και της διαθεσιμότητας των σταθμών. Στην ΕΕ, έκλεισε μόνο ένας σταθμός (Barsebäck 1, Σουηδία). Συνολικά, παρήχθη περίπου το 1/3 της ηλεκτρικής ενέργειας των χωρών της ΕΕ και περίπου το 17% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρισμού. Όσο για τα αέρια του θερμοκηπίου, σύμφωνα με μία βιομηχανική μελέτη που υιοθετήθηκε από την Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας (Euratom), υπολογίζεται ότι εξοικονομούνται στις χώρες της ΕΕ, εκπομπές περίπου 600 εκατομ. τόνων CO₂ ετησίως [Euratom Supply Agency, 1999].

Όσον αφορά την παγκόσμια ζήτηση πυρηνικής ενέργειας, ο ΟΟΣΑ προέβλεπε ότι το διάστημα 1995-2020 αναμενόταν να αυξηθεί η παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση κατά περίπου 55% - από 3079 σε 5915 GW. Στο μοντέλο πρόβλεψης του ΟΟΣΑ, η ζήτηση πυρηνικής ενέργειας αναμένεται να είναι ελαφρά αύξουσα έως το 2010, ενώ έως το 2020 θα είναι πτωτική ή στα ίδια επίπεδα που ήταν το 1995, ενώ τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής είναι λίγο πιο αισιόδοξα για την πυρηνική ενέργεια σε σχέση με τις προβλέψεις της ΕΕ και του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ [Biroi and Argiri, 1999].

Έως το 2020, εκτιμάται επίσης ότι θα υπάρξουν αλλαγές στην παγκόσμια γεωγραφική κατανομή, καθώς νέες μονάδες κατασκευάζονται στην Ασία (Κίνα, Κορέα, Ιαπωνία), ενώ σε Ευρώπη και ΗΠΑ αναβαθμίζονται παλαιές μονάδες με επιπλέον ισχύ, κλείνουν κάποιες άλλες, κλπ. Στα πλαίσια των χωρών του ΟΟΣΑ, το 2010 αναμένεται επιπλέον πτώση της παραγωγής πυρηνικής ενέργειας (Λ. Αμερική), λόγω του ότι τότε, πολλοί πυρηνικοί σταθμοί θα κλείσουν λόγω παλαιότητας (υπολογίζονται ~ 40 χρόνια κύκλου ζωής) [Biroi, 1999, Biroi and Argiri, 1999].

Το βασικότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει η πυρηνική ενέργεια – όπως αναφέρεται και στη Λευκή Βίβλο της ΕΕ για την Ενέργεια – είναι η έλλειψη αποδοχής που υπάρχει στις κοινωνίες και που οφείλεται στην ανησυχία των πολιτών για θέματα ασφάλειας και για θέματα μεταφοράς και διάθεσης των ραδιενεργών υλικών και σε σχέση με την μη εξάπλωση των πυρηνικών όπλων.

Η Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency, ΙΑΕΑ) αναφέρει ότι το 1998, 43 πυρηνικοί σταθμοί σε 14 χώρες-μέλη αντιμετώπισαν καθυστερήσεις στην κατασκευή διάρκειας πάνω των 5 ετών, σαν αποτέλεσμα οικονομικών προβλημάτων και - κυρίως - προβλημάτων από την έλλειψη αποδοχής των πολιτών [ΙΑΕΑ Annual Report, 1998]. Σύμφωνα με την Συνθήκη της Euratom, οι ευρωπαϊκοί θεσμοί έχουν ευθύνη για τα πυρηνικά προγράμματα των κρατών-μελών, για τα οποία όμως τα κράτη-μέλη αποφασίζουν σε εθνικό επίπεδο.

Η Ελλάδα δεν έχει πυρηνικούς σταθμούς ισχύος. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται κυρίως από την καύση του λιγνίτη, αλλά και από πετρέλαιο, φυσικό αέριο και υδροηλεκτρικές μονάδες. Πριν είκοσι περίπου χρόνια, το 1977-1979, υπήρξε σοβαρή συζήτηση για την κατασκευή πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος και στα πλαίσια αυτά, διοργανώθηκαν ενεργειακό συνέδριο (1977) και πανελλήνιο συνέδριο ειρηνικών εφαρμογών της πυρηνικής ενέργειας (1979), αλλά η υπόθεση δεν προχώρησε για διάφορους λόγους. Στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών “Δημόκριτος” λειτουργεί ερευνητικός αντιδραστήρας 5 MW (GRR-1), με σκοπό την βασική και εφαρμοσμένη έρευνα, την παραγωγή ραδιοϊσοτόπων για ιατρικούς και άλλους σκοπούς και άλλες εφαρμογές. Επίσης, υπάρχουν δύο υποκρίσιμες εγκαταστάσεις για εκπαιδευτικούς σκοπούς, στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και στο Πανεπιστήμιο της Θεσσαλονίκης. Το καταναλωθέν καύσιμο αποστέλλεται θαλασσίως στις ΗΠΑ, σύμφωνα με την συμφωνία για επιστροφή καυσίμου αμερικάνικης προέλευσης από ερευνητικούς αντιδραστήρες, με σκοπό την τελική διάθεση.

Η Ελλάδα διαθέτει στη Μακεδονία και τη Θράκη καταγεγραμμένα και ερευνημένα, αλλά μη αξιοποιημένα αποθέματα φυσικού ουρανίου σε μορφή ουρανιούχων ορυκτών και μεταλλευμάτων. Η αξιοποίηση των κοιτασμάτων αυτών με την διαθέσιμη τεχνολογία σήμερα, για παραγωγή κίτρινου ουρανιούχου συμπυκνώματος (yellow cake) θα μπορούσε ενδεχομένως να έχει σημαντικό εμπορικό και οικονομικό ενδιαφέρον. Στην Ελλάδα παράγονται μόνο χαμηλής και μεσαίας ραδιενέργειας απόβλητα, τα οποία αποθηκεύονται στις εγκαταστάσεις του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος”. Η πυρηνική πολιτική της Ελλάδας είναι θεσμοθετημένη σήμερα, σε

ό,τι αφορά στην προστασία έναντι της ακτινοβολίας και στην ετοιμότητα της χώρας σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης [Euratom Supply Agency, 1999].

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται πολυκριτηριακή προσέγγιση του προβλήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικά καύσιμα. Μελετάται ενδεικτικό μοντέλο πολυκριτηριακής επιλογής του βέλτιστου τύπου αντιδραστήρα ισχύος με βάση την έννοια του κύκλου ζωής ενός αντιδραστήρα ισχύος και με εργαλείο τις τεχνικές της Μερικής και Συνολικής Ταξινόμησης (Ιεράρχησης) των λύσεων PROMETHEE. Η μελέτη ευαισθησίας που πραγματοποιείται, καλείται επίσης να καταδείξει πώς, μικρές αποκλίσεις της βαθμολογίας των εναλλακτικών λύσεων ως προς τα ορισθέντα κριτήρια επηρεάζουν τη βέλτιστη λύση στις περιπτώσεις α) αποκλίσεων της βαθμολογίας μεταξύ κρίσιμων κριτηρίων και β) αποκλίσεων της βαθμολογίας του βαρύτερου κριτηρίου λόγω αβεβαιότητας της εκτίμησης. Κάθε λύση έχει διαφορετικές επιπτώσεις στην οικονομική συμπεριφορά, στην ενεργειακή απόδοση, στην ασφάλεια και αξιοπιστία του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, επιπτώσεις στην κοινωνία, στο περιβάλλον κλπ. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων με το υπολογιστικό πρόγραμμα IPES έδωσε ως βέλτιστες λύσεις τους αερίωνυκτους αντιδραστήρες υψηλής θερμοκρασίας (Modular High Temperature Gas Cooled Reactors, MHTGR) και τους αντιδραστήρες πεπιεσμένου βαρέος ύδατος (CANDU). Η εργασία χωρίζεται στα εξής μέρη:

- Το Μέρος Α' (Πυρηνική Ενέργεια και Παραγωγή Ηλεκτρισμού), το οποίο περιλαμβάνει την περιγραφή και την συγκριτική αξιολόγηση των διαθέσιμων τύπων (Κεφάλαιο 1ο) και τον καθορισμό των παραμέτρων του κύκλου ζωής ενός αντιδραστήρα ισχύος (Κεφάλαιο 2ο).
- Το Μέρος Β' (Ενδεικτική Εφαρμογή με Πολυκριτηριακή Ανάλυση), το οποίο περιλαμβάνει τον καθορισμό των εναλλακτικών λύσεων και των κριτηρίων, την ποσοτικοποίηση των επιδόσεων των λύσεων ως προς τα κριτήρια, την ιεράρχηση των λύσεων με την μέθοδο PROMETHEE, την ανάλυση ευαισθησίας και τα τελικά συμπεράσματα.
- Το Μέρος Γ', το οποίο περιλαμβάνει τις βιβλιογραφικές αναφορές και τέλος,
- Το Παράρτημα, το οποίο περιλαμβάνει χρήσιμες πληροφορίες του θεσμικού πλαισίου (ασφάλεια και παροπλισμός), αναφορά στα ατυχήματα και συμβάντα σε πυρηνικές εγκαταστάσεις, καθώς και μικρό γλωσσάριο των όρων και κατάλογο των συντμήσεων.

1. Εισαγωγή

Η πυρηνική ενέργεια σήμερα, παράγει το 17% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρισμού. Παρόλα αυτά, η μελλοντική παραγωγή είναι δύσκολο να προβλεφθεί, εφόσον εξαρτάται, τόσο από τη καλύτερη διαθέσιμη τεχνολογία, όσο και από διάφορους οικονομικούς, κοινωνικούς και πολιτικούς παράγοντες.

Μελέτες για την μελλοντική ζήτηση ενέργειας, που έγιναν τον Σεπτέμβριο 1992 στο 15ο Συνέδριο του Παγκόσμιου Συμβουλίου Ενέργειας (World Energy Council) προβλέπουν τον ρυθμό αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού να μειώνεται – σύμφωνα με μελέτες του ΟΗΕ – σε ένα μέσο ποσοστό αύξησης 1,4% ετησίως - το οποίο αντιστοιχεί σε παγκόσμιο πληθυσμό 8100 εκατ. το 2020 - ενώ ποσοστό σχεδόν 90% της αύξησης αυτής αντιστοιχεί στις αναπτυσσόμενες χώρες. Οι μελέτες συμπεραίνουν ότι οι ενεργειακές ανάγκες θα εξακολουθήσουν να αυξάνονται, παρά τις αναμενόμενες βελτιώσεις στην απόδοση των ενεργειακών συστημάτων και τις πολιτικές διαχείρισης των πόρων, που στοχεύουν στην εξοικονόμηση ενέργειας και την προστασία του περιβάλλοντος [Kurpitz, 1995].

Η συζήτηση για το ενεργειακό πρόβλημα έχει αρχίσει ήδη από τα τέλη του 1ου Παγκοσμίου πολέμου. Πιθανές νέες πηγές ενέργειας αποτέλεσαν από τότε το ζητούμενο. Μεταξύ άλλων, οι «απίστευτες» ταχύτητες περιφοράς των ηλεκτρονίων γύρω από τους πυρήνες των ατόμων, οι «τεράστιες» ηλεκτρικές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των ηλεκτρονίων και των πυρήνων, τα πειραματικά αποτελέσματα του Rutherford³ σχετικά με τις πυρηνικές αντιδράσεις, γοήτευσαν και ενέπνευσαν την άποψη ότι, όπου υπάρχει ύλη, εκεί υπάρχουν ανεξερεύνητα και τεράστιας εκτάσεως ενεργειακά αποθέματα, που δεν απαιτούν οξυγόνο για «καύση» [Λεωνίδου, 1978].

Στην ατομική εποχή, που σηματοδότησε το τέλος του 2ου Παγκόσμιου πολέμου με τον βομβαρδισμό της Χιροσίμα και του Ναγκασάκι, υπάρχουν δύο δυνατότητες άντλησης ενέργειας από τους πυρήνες των ατόμων⁴:

³ Η ιστορία αρχίζει το 1896, όταν ο γάλλος φυσικός Becquerel ανακάλυψε ότι το ουράνιο εκπέμπει ακτινοβολία που ανιχνεύεται σε φωτογραφικές πλάκες και στη συνέχεια, η Marie Curie όρισε και εισήγαγε την έννοια και το φαινόμενο της «ραδιενέργειας». Το 1900, ο Ernest Rutherford ανακάλυψε ότι το θόριο εξέπεμπε ένα ραδιενεργό αέριο: το αργό, και έτσι ανακαλύφθηκαν η μεταστοιχείωση και η ραδιενεργός μετάπτωση.

1. Με συνένωση ελαφρών πυρήνων προς δημιουργία βαρύτερων (σύντηξη, *fusion*) και
2. Με σχάση βαρέων πυρήνων προς ελαφρύτερους (σχάση, *fission*).

Σήμερα, μόνο η δεύτερη διαδικασία αποτελεί πρακτικά πηγή ενέργειας, ενώ η έρευνα συνεχίζεται όσον αφορά την πρώτη διαδικασία, η οποία έχει κυρίως χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα για πολεμικούς σκοπούς.

2. Στοιχεία πυρηνικής τεχνολογίας

Η πυρηνική τεχνολογία έχει αναπτυχθεί πολύ σήμερα και θεωρείται ώριμη τεχνολογία σε σχέση με τις αρχές του αιώνα. Σκοπός της παραμένει η προσπάθεια εκμετάλλευσης της σχάσεως των βαρέων πυρήνων, στους πυρηνικούς αντιδραστήρες σχάσεως ή απλώς, **πυρηνικούς αντιδραστήρες**.

Η σχάση βαρέος πυρήνα είναι φαινόμενο που μπορεί να συμβεί ή αυτόματα ή με πρόσδωση έξωθεν ενέργειας στον πυρήνα και συνοδεύεται με έκλυση ενέργειας περίπου 200 MeV. Η αυτόματη σχάση είναι σπάνιο φαινόμενο, ενώ η σχάση με πρόσδωση ενέργειας - πχ. κατά την απορρόφηση της ενέργειας φωτονίου ή κατά την απορρόφηση νετρονίου -, μεγαλύτερης από ορισμένη ποσότητα που λέγεται **κατώφλι ενεργείας σχάσεως**, είναι ένα πολύ πιθανό φαινόμενο. Οι βαρείς πυρήνες που μπορούν να υποστούν σχάση αναφέρονται στον Πίνακα 1. **Σχάσιμοι πυρήνες**, είναι οι πυρήνες που δύνανται να σχασθούν ακόμα και με νετρόνια μηδενικής ενέργειας. Οι υπόλοιποι πυρήνες χαρακτηρίζονται ως **πυρήνες δυνάμενοι να σχασθούν με νετρόνια κατάλληλης ενέργειας**.

Πίνακας 1: Πυρήνες που υφίστανται σχάση με νετρόνια

Πυρήνας-Στόχος	Σύνθετος πυρήνας	*E _{κ.σ.} (MeV)	**ν _{κ.σ.}	Σχάσιμοι πυρήνες
Th-232	Th-233	1,3	2,1	
U-233	U-234	0,0	2,5	Ναι
U-234	U-235	0,4	-	
U-235	U-236	0,0	2,4	Ναι
U-236	U-237	0,8	-	
U-238	U-239	1,2	2,5	
Np-237	Np-238	0,4	-	
Pu-239	Pu-240	0,0	2,9	Ναι
Pu-241	Pu-242	0,0	3,0	Ναι

* Η ελάχιστη κινητική ενέργεια που πρέπει να διαθέτει ένα νετρόνιο, ώστε να προκαλέσει σχάση του αντίστοιχου πυρήνα ** Το πλήθος των νετρονίων που εκλύονται κατά μ.ό. ανά σχάση, για ενέργεια νετρονίου ίση προς την ενέργεια κατωφλίου.

⁴ Τα βασικά είδη πυρηνικών αντιδράσεων είναι: η ελαστική σκέδαση, η μη-ελαστική σκέδαση, η αντίδραση σχηματισμού σύνθετου πυρήνα (compound nucleus model), η άμεση αντίδραση (direct reaction), η σχάση (fission) και η σύντηξη (fusion) [Γαζής, 1999].

Η απορρόφηση νετρονίου κατάλληλης ενέργειας από βαρύ πυρήνα, δεν οδηγεί πάντα σε σχάση του προκύπτοντος πυρήνα: είναι δυνατόν ο πυρήνας να αποδιεγερθεί, με εκπομπή φωτονίου. Το μέγεθος που δίνει το πλήθος των νετρονίων που εκλύονται κατά μέσον όρο από σχάσεις σχάσιμου πυρήνα, ανά απορροφούμενο νετρόνιο, $\eta(E)$, εκφράζεται συναρτήσει του μεγέθους $\nu(E)$ με τη σχέση:

$$H(E) = \frac{\sigma_f(E)}{\sigma_a(E)} \cdot \nu(E)$$

όπου, $\sigma_f(E)$ και $\sigma_a(E)$ είναι οι μικροσκοπικές ενεργές διατομές σχάσεως⁵ και απορροφήσεως αντίστοιχα του σχάσιμου πυρήνα. Εάν, σε ένα σύστημα που περιλαμβάνει ποσότητα σχάσιμων πυρήνων θεωρήσουμε ότι, συμβαίνει κάποια χρονική στιγμή ένας αριθμός σχάσεων, τότε ακολουθεί η εξής σειρά γεγονότων:

- Εκλύονται νετρόνια
- Ένα μέρος αυτών προκαλεί νέες σχάσεις
- Από τις νέες σχάσεις προκύπτει νέα γενιά νετρονίων
- Από αυτά τα νετρόνια, ένα μέρος προκαλεί νέες σχάσεις, κ.ο.κ.

Η παραπάνω αλληλουχία γεγονότων χαρακτηρίζεται ως **αλυσωτή αντίδραση σχάσεων** (chain reaction).

Η δυνατότητα επίτευξης και διατήρησης αλυσωτής αντίδρασης σχάσεων σε σύστημα που περιέχει σχάσιμους πυρήνες, περιγράφεται από τον **συντελεστή πολλαπλασιασμού του συστήματος** k_e ,⁶ ο οποίος εκφράζει τον λόγο του πλήθους των σχάσεων μίας γενιάς προς το πλήθος των σχάσεων της προηγούμενης γενιάς. Ο συντελεστής k_e εξαρτάται από τη γεωμετρία (μέγεθος, σχήμα) και τη σύσταση του συστήματος. Η σύγκριση του συντελεστή με τη μονάδα απαντά στο ερώτημα: κατά πόσο η αλυσωτή αντίδραση σχάσεων στο εν λόγω σύστημα είναι φθίνοντος ($k_e < 1$), αύξοντος ($k_e > 1$), ή σταθερού ρυθμού ($k_e = 1$), οπότε το σύστημα χαρακτηρίζεται αντίστοιχα, ως **υποκρίσιμο, υπερκρίσιμο ή κρίσιμο**.

⁵ Διακρίνονται δύο μηχανισμοί αλληλεπίδρασης των φωτονίων με την ύλη [Γαζής, 1999]: εκκίνος της μεταφοράς ενέργειας από την ακτινοβολία στην ύλη και ο άλλος, της αλλαγής της κατεύθυνσης των φωτονίων, όταν εισέρχονται σε ένα άλλο άτομο και αλληλεπιδράσουν με αυτό. Συνοπτικά, αναφερόμαστε στην απορρόφηση και στη σκέδαση. Η περιγραφή της πιθανότητας μίας τέτοιας αλληλεπίδρασης καθορίζεται από την ενεργό διατομή της διαδικασίας. Θεωρείται μία ενεργός επιφάνεια που παρουσιάζεται από ένα άτομο στην εισερχόμενη δέσμη και εάν το υλικό του στόχου αποτελείται από ένα πολύ λεπτό φύλλο-υμένιο με αριθμό ατόμων a ανά μονάδα όγκου και με πάχος d_x , τότε η εξασθένιση που υφίσταται η δέσμη ακτίνων- γ διερχόμενη μέσα από την ύλη ανεξάρτητα του φαινομένου απορρόφησης ή σκέδασης, έχει εκθετικό χαρακτήρα: $dN/N = -\sigma_a dx$, όπου N_i , ο αριθμός των ακτίνων- γ της αρχικής δέσμης, $a d_x$, ο αριθμός των ατόμων ανά μονάδα επιφάνειας και σ , η ενεργός διατομή της εξασθένισης των φωτονίων. Η ολοκλήρωση της σχέσης αυτής για πάχος ύλης από μηδέν μέχρι x , δίνει: $N = N_0 e^{-\sigma_a x}$. Η ποσότητα $\sigma_a x$ συμβολίζεται με Σ και αποτελεί τη μακροσκοπική ενεργό διατομή.

⁶ Effective multiplication factor, Criticality factor

Κεφάλαιο 1ο: Τύποι Αντιδραστήρων Ισχύος

1. Πυρηνικοί Αντιδραστήρες (Π.Α.)

Οι Πυρηνικοί Αντιδραστήρες είναι πυρηνικές εγκαταστάσεις⁷ και αποτελούν συστήματα που περιέχουν σχάσιμους πυρήνες σε κατάλληλη γεωμετρική διάταξη και συγκέντρωση, στα οποία μπορεί να αποκατασταθεί ελεγχόμενη αλυσωτή αντίδραση σχάσεων [Λεωνίδου, 1978]. Στο Σχήμα 1 αναπαρίστανται γραφικά οι δύο βασικοί τύποι πυρηνικών αντιδράσεων: η σχάση του U-235 και η δέσμευση ενός νετρονίου από το U-238 για την μετατροπή του U-238 σε Pu-239. Από τη στιγμή που οι αντιδραστήρες τίθεται σε λειτουργία, είναι απλά απαραίτητο, ένα κατά μέσον όρο από τα νετρόνια που παράγονται από την σχάση να προκαλεί νέα σχάση, έτσι ώστε ο αριθμός των νετρονίων στις διαδοχικές «γενεές» να παραμένει σταθερός. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται κατάσταση «κρισιμότητας» [Nero, 1987].

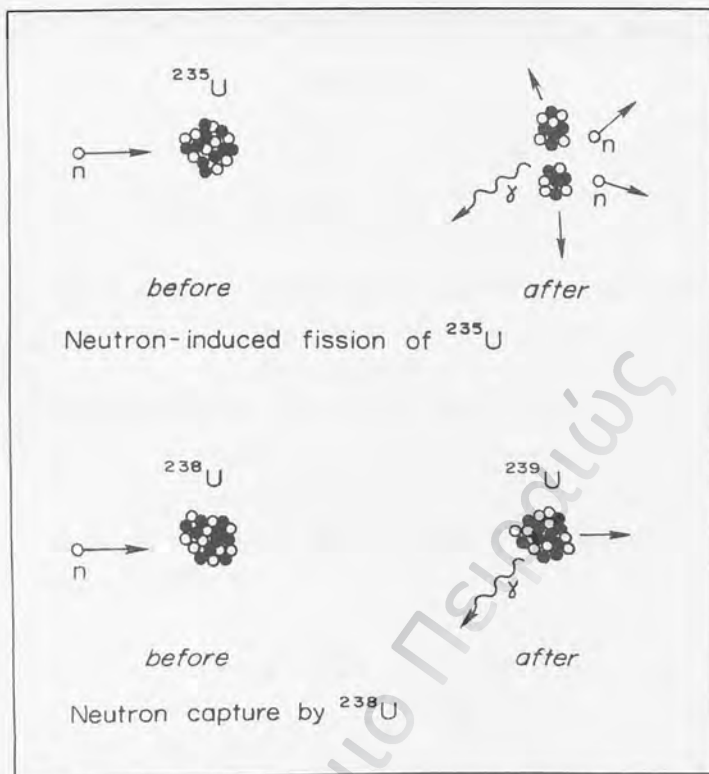
Ο έλεγχος της αλυσωτής αντίδρασης στους Π.Α. πραγματοποιείται με μεταβολή του συντελεστή πολλαπλασιασμού k_e του συστήματος. Για να επιτευχθεί ισοζύγιο παραγωγής και απώλειας νετρονίων, ώστε να διατηρείται ο αριθμός σχάσεων από γενεά σε γενεά και να αποκαθίστανται τυχόν απορροφήσεις ή διαρροές από το σύστημα, επιδιώκεται να καταστεί ένας Π.Α. κρίσιμος ($k_e=1$). Η μεταβολή του ($k_e=1$) επιτυγχάνεται με τροποποίηση του ρυθμού απώλειας νετρονίων στο σύστημα, συνήθως με βύθιση ή απομάκρυνση κατάλληλων υλικών που απορροφούν νετρόνια.

Οι Π.Α., ανάλογα με τη μέση ενέργεια E_m των νετρονίων που επάγουν το μεγαλύτερο ποσοστό των σχάσεων, διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων ($E_m < 1$ eV)
- Αντιδραστήρες νετρονίων μέσης ενέργειας (1 eV $< E_m < 1$ keV)
- Αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων (100 keV $< E_m < 1,5$ MeV)

Οι περισσότεροι εμπορικοί αντιδραστήρες, που χρησιμοποιούνται σήμερα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ανήκουν στην πρώτη κατηγορία.

⁷ Πυρηνική εγκατάσταση (Nuclear Installation): Ως πυρηνική εγκατάσταση, ορίζονται κατά την ΙΑΕΑ, οι μονάδες παρασκευής καυσίμου, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες (εγκαταστάσεις κρίσιμες και υποκρίσιμες), οι ερευνητικοί αντιδραστήρες, οι πυρηνικοί σταθμοί ισχύος, οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης εξαντλημένου καυσίμου, οι εγκαταστάσεις εμπλουτισμού και επανεπεξεργασίας.



Σχήμα 1: Αναπαράσταση των δύο βασικών τύπων πυρηνικών αντιδράσεων: - η σχάση του U-235, η αντίδραση που απελευθερώνει την περισσότερη ενέργεια σε αντιδραστήρες με καύσιμο το ουράνιο και - η δέσμευση ενός νετρονίου από το U-238, που αποτελεί το πρώτο βήμα για τη μετατροπή του U-238 σε Pu-239 [Nero, 1987].

1.1. Οι κύριες συνιστώσες ενός Π.Α.

Κάθε αντιδραστήρας αποτελείται από τις παρακάτω κύριες συνιστώσες [Λεωνίδου, 1978 και Nero, 1979]:

1. Ο πυρήνας

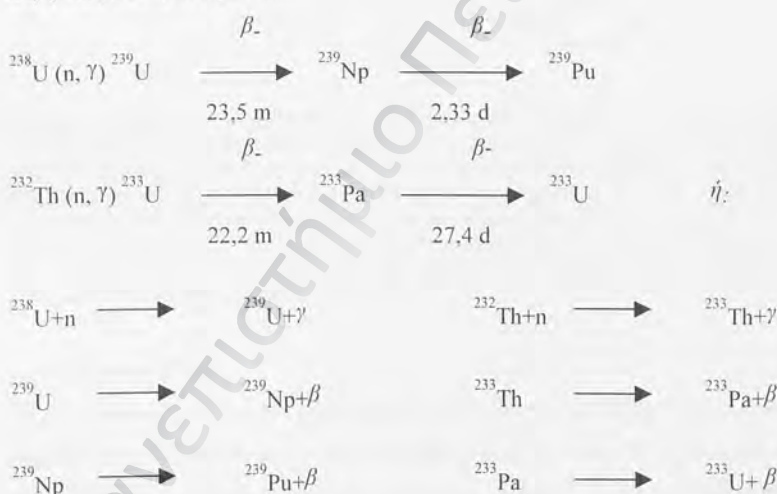
Ο πυρήνας είναι η καρδιά του αντιδραστήρα, η περιοχή όπου είναι τοποθετημένο το πυρηνικό καύσιμο (fuel), ένα μέρος του ψυκτικού μέσου (coolant) και - στους αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων - ο επιδραδυντής (moderator). Το πυρηνικό καύσιμο περιλαμβάνει σχάσιμους πυρήνες, αλλά συχνά και πυρήνες δυνάμενους να σχασθούν, οι οποίοι δι' επώασης μπορούν να μετατραπούν σε σχάσιμους.

Πυρηνικά καύσιμα μπορούν να αποτελέσουν τα φυσικά ισότοπα του ουρανίου και του θορίου (Πίνακας 2, Σχήμα 2).

Πίνακας 2: Σειρές ραδιονουκλιδίων στη φύση [Bodansky, 1996]

Όνομα σειράς	Νουκλίδιο	Χρόνος υποδιπλασιασμού (10^9 y)	Ακτινοβολία ⁸	Σταθερός πυρήνας
Thorium	Th-232	14.05	α, β^-	Pb-208
Uranium	U-238	4.47	α, β^-	Pb-206
Actinium	U-235	0.704	α, β^-	Pb-207

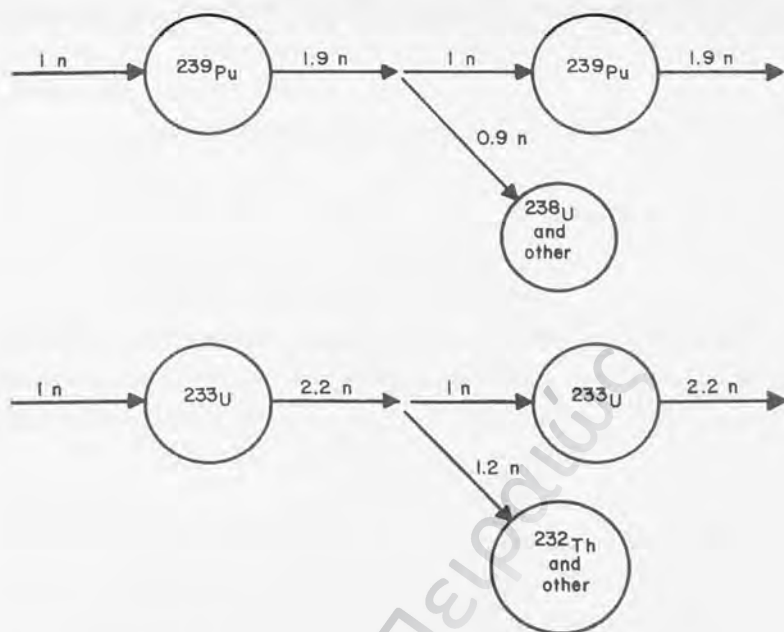
Για παράδειγμα, στους αερίψυκτους αντιδραστήρες γραφίτη φυσικού ουρανίου (Magnox), το πυρηνικό καύσιμο είναι φυσικό ουράνιο (U-235 0,72%, U-238 99,27%, U-234 ίχνη) και ένα σημαντικό ποσοστό πυρήνων U-238 μετατρέπεται δι' ενσωματώσεως νετρονίων και δύο διαδοχικών β^- διασπάσεων⁹ σε Pu-239. Το φαινόμενο αυτό, κατά το οποίο έχουμε δημιουργία νέων σχάσιμων πυρήνων – όπως Pu-239 και U-233¹⁰, από σύλληψη νετρονίων σε επώασιμους πυρήνες (όπως, το U-238 και το Th-232) χαρακτηρίζεται ως **επόαση ή αναπαραγωγή**. Οι αντίστοιχες πυρηνικές αντιδράσεις είναι:



⁸ Στην μεταστοιχείωση με εκπομπή σωματιδίων α , ο μαζικός αριθμός A μειώνεται κατά 4, ενώ στην εκπομπή β^- , ο μαζικός αριθμός A μένει σταθερός.

⁹ Οι ακτίνες γ είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η μετάπτωση ακτίνων β αντιστοιχεί σε μεταβολή του πυρήνα ενός πρωτονίου σε νετρόνιο και το ανάποδο, συνοδευόμενη συνήθως από εκπομπή σωματιδίου β^- - ενός θετικά ή αρνητικά φορτισμένου ηλεκτρονίου.

¹⁰ Το ουράνιο (U) και το πλουτόνιο (Pu) είναι στοιχεία που περιέχουν 92 και 94 πρωτόνια στον πυρήνα τους, αντίστοιχως (ατομικός αριθμός). Το ιδιαίτερο ισότοπο του κάθε στοιχείου διαφέρει από τον μαζικό του αριθμό (το άθροισμα πρωτονίων και νετρονίων του πυρήνα).



Σχήμα 2: Σχηματική αναπαράσταση των διαδικασιών που συμβαίνουν με το Pu-239 και το U-233 σε αντιδραστήρα θερμικών νετρονίων: η επάνω σειρά δείχνει 1 νετρόνιο να απορροφάται από τον πυρήνα του Pu-239, ενώ από τα 1,9 νετρόνια που αποδίδονται μόνο 0,9 είναι διαθέσιμα για να δεσμευθούν από το U-238 και άλλα μη σχάσιμα υλικά, όχι αρκετά για να αντικαταστήσουν τους πυρήνες Pu-239 που έχουν καταστραφεί. Από την άλλη, με το U-233 και το Th-232, τα 2,2, νετρόνια είναι αρκετά για να συνεχίσουν την αλυσωτή αντίδραση και να αντικαταστήσουν τους καταστραμμένους πυρήνες U-233, αφού 1 από τα 1,2 νετρόνια μετατρέπει έναν πυρήνα Th-232 [Neto, 1987].

2. Το ψυκτικό μέσον

Είναι το μέσον, με το οποίο παράγεται έξω από τον αντιδραστήρα η θερμότητα που παράγεται στον πυρήνα ή σε άλλα τμήματα (μανδύα, θερμική θωράκιση). Στους αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων, το ύδωρ ή “ελαφρύ” ύδωρ, το βαρύ ύδωρ και διάφορα αέρια (CO_2 , He) χρησιμοποιούνται συνήθως, ως ψυκτικά. Στους αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων το ύδωρ ή το βαρύ ύδωρ δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ψυκτικά – τουλάχιστον σε υγρή μορφή - γιατί επιβραδύνουν τα ταχέα νετρόνια. Σε τέτοιου τύπου αντιδραστήρες χρησιμοποιείται συνήθως τετηγμένο μέταλλο και ειδικότερα τετηγμένο νάτριο, ως ψυκτικό μέσον.

3. Ο επιδραδυντής

Είναι το υλικό που τοποθετείται στους αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων (και στους αντιδραστήρες νετρονίων μέσης ενέργειας) για να επιβραδύνονται μέσω μη ελαστικών ή ελαστικών σκεδάσεων τα νετρόνια με την ενέργεια που εκλύονται κατά

τις σχέσεις, μέχρις ότου καταστούν θερμικά (ή μέχρι την περιοχή ενεργειών που χαρακτηρίζει τους αντιδραστήρες νετρονίων μέσης ενεργείας). Ως επιβραδυντές πρέπει να χρησιμοποιούνται υλικά:

- με μεγάλη ικανότητα μείωσης της ενέργειας των νετρονίων ανά ελαστική σκέδαση
- με μεγάλη πιθανότητα πραγματοποίησης ελαστικής σκέδασης κατά τις συγκρούσεις νετρονίων με πυρήνες του μέσου και
- με ασθενή ικανότητα απορροφήσεως νετρονίων.

Τέτοιες ιδιότητες παρουσιάζουν οι πυρήνες με μικρούς μαζικούς αριθμούς. Σήμερα, χρησιμοποιούνται το ύδωρ, το βαρύ ύδωρ, ο γραφίτης, το βηρύλλιο (Be) και το οξειδίο του βηρυλλίου (BeO).

4. Ο μανδύας

Σε ορισμένους τύπους αντιδραστήρων, τους αναπαραγωγικούς (breeders), τον πυρήνα περιβάλλει μία περιοχή με επώασμο υλικό, που λέγεται μανδύας. Στην περιοχή αυτή γίνεται η επώαση ή αναπαραγωγή - όπως αναφέρθηκε - δηλαδή η δημιουργία νέων σχάσιμων πυρήνων.

5. Ο ανακλαστής

Είναι το υλικό που περιβάλλει τον πυρήνα (ή τον μανδύα - σε αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες) και χρησιμοποιείται για τη μείωση των απολειών νετρονίων από την ελεύθερη επιφάνεια του πυρήνα (ή του μανδύα) με οπισθοσκέδασή τους (ανάκλαση) προς την κεντρική περιοχή του πυρήνα. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται κρισιμότητα του συστήματος δεδομένης σύστασης υπό μικρότερο όγκο από τον όγκο του συστήματος χωρίς ανακλαστή.

6. Οι ράβδοι ελέγχου

Είναι κινητές μάζες υλικών, που απορροφούν εντόνως νετρόνια. Με τις ράβδους ελέγχου επιτυγχάνεται ο έλεγχος του αντιδραστήρα, η θέση σε λειτουργία, η διακοπή της λειτουργίας, η μεταβολή της ισχύος ή η διατήρηση της ισχύος σε σταθερή τιμή, δεδομένου ότι με τον χρόνο ελαττώνονται οι σχάσιμοι πυρήνες στον πυρήνα του αντιδραστήρα και μεταβάλλονται οι πληθυσμοί των διαφόρων προϊόντων της σχάσης. Ως υλικά των ράβδων ελέγχου έχουν χρησιμοποιηθεί το βόριο, ο βοριομένος χάλυβας, το άφνιο, το κάδμιο και μεταλλικά στοιχεία που παρουσιάζουν μεγάλες μικροσκοπικές ενεργές διατομές απορροφήσεως - όπως ο άργυρος - και διάφορα κράματά τους. Από γεωμετρικής απόψεως, οι ράβδοι μπορούν να είναι κυλινδρικής

μορφής ή πρισματικής, να είναι επίπεδα ελάσματα ή επίπεδα ελάσματα σταυροειδώς τοποθετημένα.

7. Η θερμική θωράκιση

Αποτελεί μέρος της θωράκισης του αντιδραστήρα και προορίζεται να προκαλέσει επαρκή εξασθένιση της γάμμα ακτινοβολίας και των νετρονίων που προέρχονται από τον πυρήνα, προς ανακούφιση της βιολογικής θωράκισης από θερμική καταπόνηση.

8. Το δοχείο του αντιδραστήρα

Είναι το «δοχείο», μέσα στο οποίο βρίσκονται ο πυρήνας, ο ανακλαστής, οι ράβδοι ελέγχου και η θερμική θωράκιση. Σε τύπους αντιδραστήρων όπου τα περιεχόμενα του δοχείου πρέπει να βρίσκονται υπό πίεση, το δοχείο καλείται και δοχείο πίεσης (pressure vessel).

9. Η βιολογική θωράκιση

Αποτελείται από κατάλληλο υλικό, το οποίο είναι κατάλληλα τοποθετημένο γύρω από το δοχείο του αντιδραστήρα, προκαλεί εξασθένιση και μείωση της ακτινοβολίας, που προέρχεται από το δοχείο του αντιδραστήρα προς τον εξωτερικό αυτής χώρο, σε ανεκτά επίπεδα, ώστε να εξασφαλίζεται η ασφαλής παρουσία του προσωπικού κοντά στον αντιδραστήρα.

10. Το περίβλημα

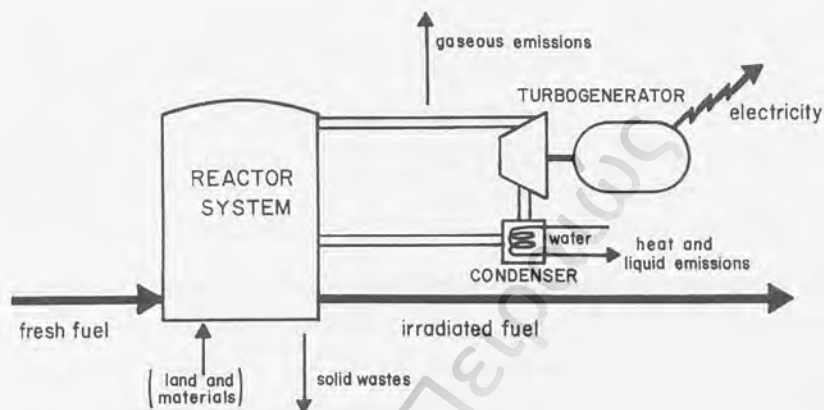
Είναι η στεγανή κτιριακή κατασκευή που στεγάζει το σύστημα αντιδραστήρα-θωράκισης και – όταν υπάρχει – το σύστημα παραγωγής ατμού. Το περίβλημα πρέπει να είναι σε θέση να συγκρατήσει τα προϊόντα σχάσεως σε περίπτωση ατυχήματος, ώστε να αποφευχθεί διαρροή ραδιενέργειας στο φυσικό περιβάλλον.

11. Άλλα συστήματα

Υπάρχουν και πολλά άλλα συστήματα και διατάξεις: συστήματα ασφαλείας, διατάξεις χειρισμού, μεταφοράς ή αποθήκευσης υλικών, διατάξεις ελέγχου και παρακολούθησης της λειτουργίας του συστήματος, των επιπέδων ραδιενέργειας, κλπ.

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες ισχύος (ΠΑΙ), δηλαδή οι αντιδραστήρες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελούνται από τις παραπάνω συνιστώσες. Η βασική αρχή της λειτουργίας τους είναι ότι, η ενέργεια που εκλύεται από την πυρηνική σχάση χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού, είτε απευθείας στον αντιδραστήρα, είτε σε βοηθητικά συστήματα, τις γεννήτριες ατμού.

Στο Σχήμα 3 αναπαρίσταται σχηματικά το κύκλωμα σε πυρηνοληλεκτρικό σταθμό: ο ατμός εγκαταλείπει τον αντιδραστήρα ή τη γεννήτρια ατμού και επιστρέφει ως νερό τροφοδοσίας για να μετατραπεί σε ατμό. Στη συνέχεια, ο ατμός κινεί τους στροβίλους που είναι σε ζεύξη με γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρισμού.



Σχήμα 3: Σχηματική αναπαράσταση χαρακτηριστικών εισόδου-εξόδου συστήματος αντιδραστήρα ισχύος: η βασική ροή εισόδου είναι το καύσιμο, ενώ οι βασικές ροές εξόδου είναι η ηλεκτρική ενέργεια και το ακτινοβολημένο καύσιμο, καθώς και οι ραδιενεργές ή μη ουσίες που περιλαμβάνονται στις αέριες και υγρές εκπομπές [Nero, 1987].

1.2. Πυρηνικοί σταθμοί ισχύος στον κόσμο

Σύμφωνα με στοιχεία του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (IAEA), το 1999 ήταν σε λειτουργία 436 συνολικά σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής διαφόρων τύπων σε όλο τον κόσμο. Οι σε λειτουργία ή υπό κατασκευή σταθμοί το 1999 παρατίθενται στον Πίνακα 4. Τα νούμερα με αστερίσκους είναι από εκτιμήσεις (Η IAEA δημοσιεύει τα πρόσφατα σχετικά στοιχεία για το κάθε έτος, μετά τον Μάρτιο) [ιστοσελίδα IAEA, 2000].

Το 1999, συνδέθηκαν στο δίκτυο τέσσερις πυρηνικοί σταθμοί καθαρής συνολικής ισχύος 2700 MWe¹¹ (Γαλλία, Ινδία, Δημοκρατία της Κορέας και Σλοβακία). Επίσης, το 1999 άρχισε η κατασκευή επτά νέων σταθμών - ένας στη Κίνα (και άλλοι δύο στη Ταϊβάν-Κίνα), δύο στην Ιαπωνία και δύο στη Δημοκρατία της Κορέας) με συνέπεια, ο

¹¹ MegaWatts, electrical/thermal: συνήθως η ηλεκτρική ισχύς των αντιδραστήρων είναι περίπου το 1/3 της θερμικής, ανάλογα με την αποτελεσματικότητα του συγκεκριμένου σταθμού.

συνολικός αριθμός των πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος υπό κατασκευή να φθάνει τους 38. Οι δέκα χώρες με τη μεγαλύτερη εξάρτηση από την πυρηνική ενέργεια παρατίθενται στον Πίνακα 3.

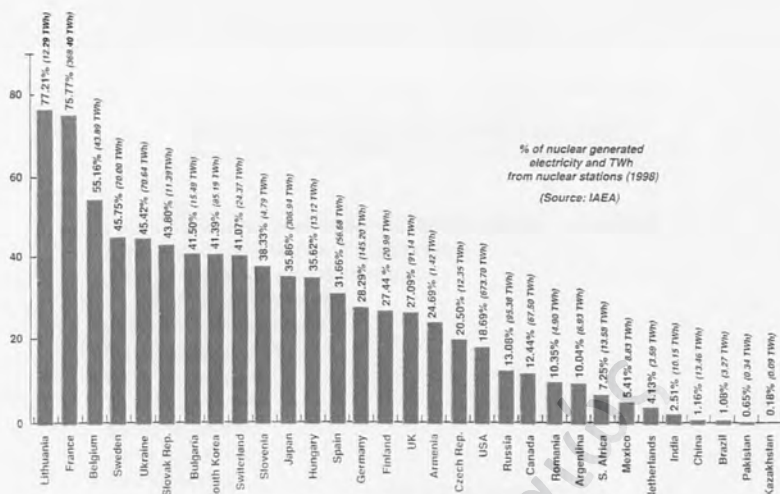
Πίνακας 3: Χώρες με τη μεγαλύτερη ενεργειακή εξάρτηση από την πυρηνική ενέργεια [Πηγή: IAEA 1999]

Γαλλία	75 %
Λιθουανία	73,1 %
Βέλγιο	57,7 %
Βουλγαρία	47,1 %
Σλοβακία	47 %

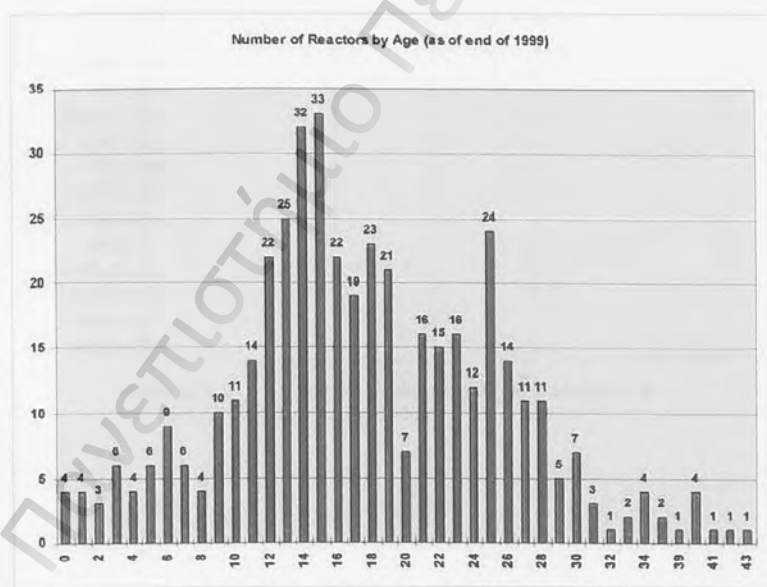
Σουηδία	46,8 %
Ουκρανία	43,8 %
Δημ. Κορέας	42,8 %
Ουγγαρία	38,3 %
Αρμενία	36,4 %

Συνολικά, 17 χώρες και η Ταϊβάν-Κίνα βασίζονται στη πυρηνική ενέργεια για την κάλυψη του ¼ τουλάχιστον των αναγκών τους σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε παγκόσμια βάση το 1999 παρήχθησαν συνολικά 2394,6 terawatt-hours ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικούς σταθμούς. Η εμπειρία που έχει συσσωρευτεί μέχρι το τέλος του 1999, βασιζόταν στη λειτουργία πάνω από 9400 πυρηνικών σταθμών για ηλεκτροπαραγωγή (9414 reactor-years).

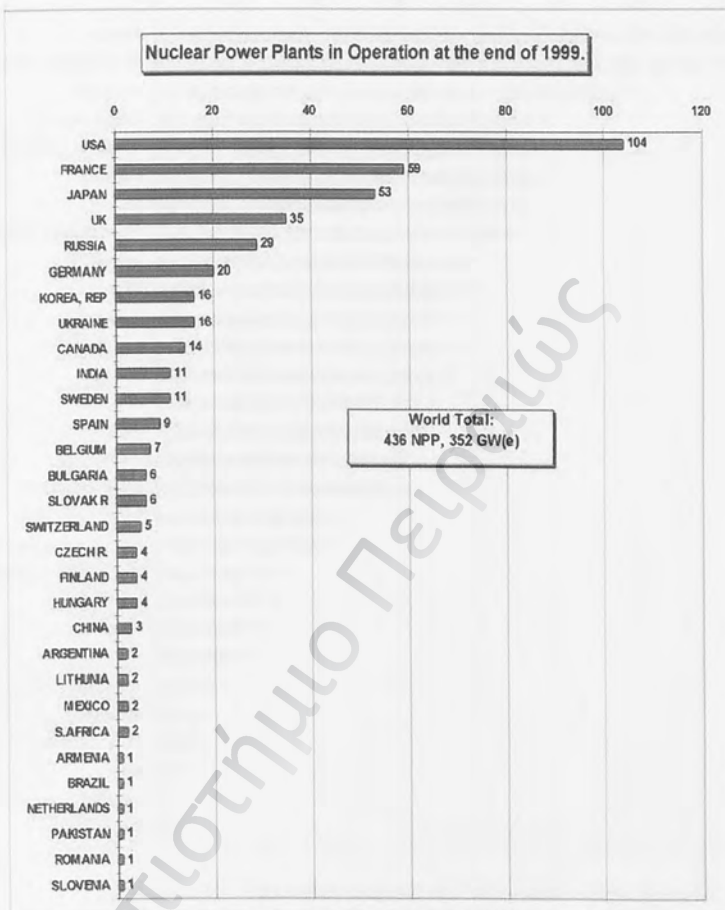
Στο Διάγραμμα 1 παρίσταται η % η πυρηνική ενέργεια που παρήχθη ανά χώρα στον κόσμο το 1998, ενώ στο Διάγραμμα 2 παρίσταται η πυρηνική ενέργεια που παρήχθη το 1999 ανά χώρα (με βάση gross capacities). Στο Διάγραμμα 3 παρίστανται οι Πυρηνικοί Σταθμοί Ισχύος που βρίσκονταν σε λειτουργία στο τέλος του 1999. Στο Διάγραμμα 4 παρίσταται ο αριθμός των πυρηνικών σταθμών ανά ηλικία.



Διάγραμμα 1: Η (%) παραγωγή πυρηνικής ενέργειας ανά χώρα με στοιχεία της ΙΑΕΑ [Πηγή: Nuclear Engineering International, 2000]

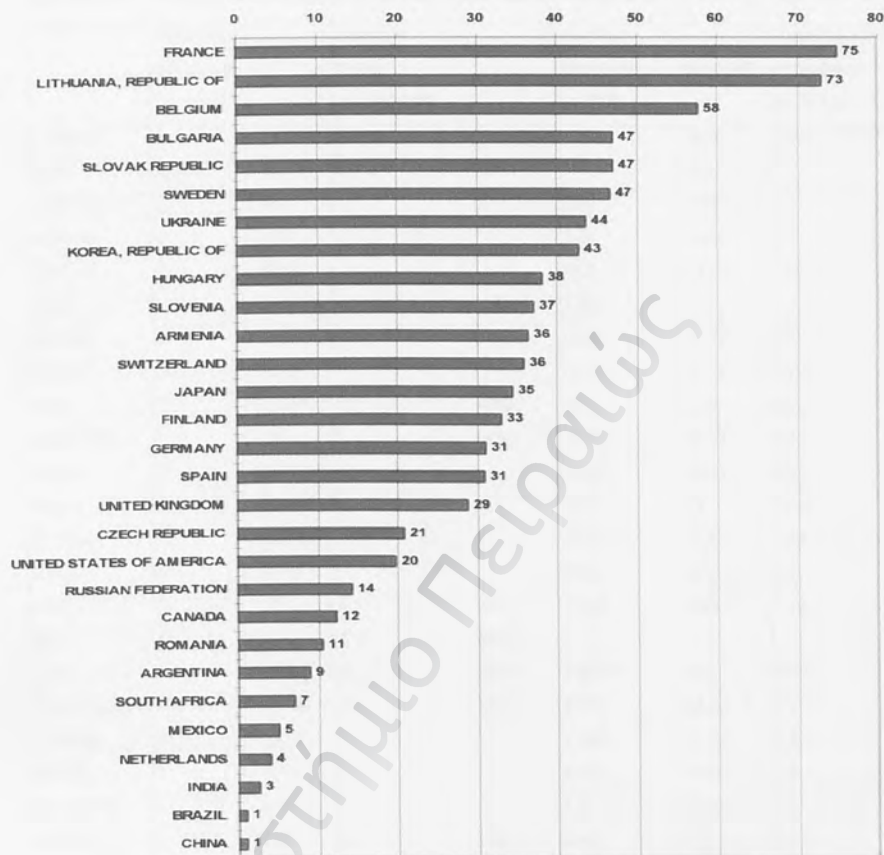


Διάγραμμα 4: Αριθμός πυρηνικών σταθμών ισχύος ανά ηλικία [Πηγή: ΙΑΕΑ 1999]



Διάγραμμα 3: Πυρηνικοί Σταθμοί Ισχύος σε λειτουργία το τέλος του 1999 [Πηγή: IAEA 1999]

Nuclear Share of Electricity Generation in 1999



Διάγραμμα 2: Ηλεκτρική ενέργεια από πυρηνικούς σταθμούς ισχύος που παρήχθη το 1999 ανά χώρα [Πηγή: ΙΑΕΑ 1999]

Πίνακας 4: Πυρηνικοί σταθμοί ισχύος σε λειτουργία και υπό κατασκευή το 1999 [Πηγή: IAEA 2000]

Country name	Reactors in operation		Reactors under construction		Nuclear electricity in 1999	supplied	Total operating experience to 31 Dec. 1999	
	No. of units	Total MWe	No. of units	Total MWe	TWe.h	% of total	Years	Months
Argentina	2	935	1	692	6,59	9.04	42	7
Armenia	1	376			2,08	36.36	32	3
Belgium	7	5712			46,6	57.74	163	7
Brazil	1	626	1	1229	3,98	1.32	17	9
Bulgaria	6	3538			14,53	47.12	107	2
Canada	14	9998			70,4*	12.7*	419	2
China	3	2167	7	5420	14.1	1.15	20	5
Czech Rep.	4	1648	2	1824	13,36	20.77	54	8
Finland	4	2656			22,07	33.05	83	4
France	59	63103			375	75	1110	2
Germany	20	22282			160.4	31.21	590	7
Hungary	4	1729			14.1	38.3	58	2
India	11	1897	3	606	11.45	2.65	169	2
Iran			2	2111				
Japan	53	43691	4	4515	306.9*	36*	909	8
Korea Rep.of	16	12990	4	3820	97.82	42.84	153	1
Lithuania	2	2370			9.86	73.11	28	6
Mexico	2	1308			9.56	4.98	15	11
Netherlands	1	449			3.4	4.02	55	0
Pakistan	1	125	1	300	0.69	1.2	28	6
Romania	1	650	1	650	4.81	10.69	3	6
Russia	29	19843	4	3375	110.91	14.41	642	6
South Africa	2	1842			13.47	7.41*	30	3
Slovak Rep.	6	2408	2	776	13.12	47.02	79	0
Slovenia	1	632			4.49	36.23*	18	3
Spain	9	7470			56.47	30.99	183	2
Sweden	11	9432			70.1	46.8	267	2
Switzerland	5	3079			23.52	36.03	123	10
U.K.	35	12968			91.19	28.87	1203	4
Ukraine	16	13765	4	3800	67.35	43.77	238	1
USA	104	97145			719.4*	19.54*	2455	8
Total *	436	351718	38	31718	2394,63		9414	137

Number with asterisk are estimates

* The Total includes 6 units in operation and 2 under construction in Taiwan, China

Η ηλικία των αντιδραστήρων ισχύος διαφέρει από ένα χρόνο (σε ό,τι αφορά τους πρόσφατα κατασκευασμένους) έως 42 χρόνια (η περίπτωση του βετεράνου βρετανικού σταθμού Calder Hall) [Laraia and Dlouhy, 2000]. Συνολικά, 63 αντιδραστήρες σε λειτουργία (14%) είναι πάνω από 30 ετών, 143 (32%) είναι πάνω από 20 ετών και το υπόλοιπο 54% (237 αντιδραστήρες) είναι μικρότερο από 20 ετών. Στο Διάγραμμα 3 γίνεται επίσης αντιληπτή η ιδιαίτερη αύξηση που παρουσίασε η πυρηνική βιομηχανία τη δεκαετία '70-'80 και η εν συνεχεία πτώση της.

Σε ό,τι αφορά τους τύπους των αντιδραστήρων, η κατάσταση παρουσιάζεται στους Πίνακες 5 (τύποι αντιδραστήρων ισχύος) και 6 (αριθμός αντιδραστήρων παγκοσμίως σε σχέση με τον τύπο τους). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6, ο επικρατέστερος τύπος εν λειτουργία είναι οι πεπιεσμένοι ύδατος (PWR) και στη συνέχεια ακολουθούν οι BWR, οι ανατολικού σχεδιασμού WWER¹ και οι PHWR (CANDU).

Πίνακας 6: Αριθμός αντιδραστήρων ισχύος σε σχέση με τον τύπο τους
(Πηγή: EURELECTRIC Report, 2000)

Τύποι αντιδραστήρων	Σύνολο	Τύποι	Σύνολο
HWLWR	1	PHWR	30
FBR	5*	WWER	47
AGR	14	BWR	93
LWGR	20	PWR	206
GCR (Magnox)	21		

* 3 εκτός ΗΠΑ και 2 στις ΗΠΑ

Η διάρκεια ζωής ενός αντιδραστήρα και κατά συνέπεια, οι ανάγκες για τον παροπλισμό του - μπορεί θεωρητικά να προβλεφθούν μέσω του τύπου και της αδειοδότησής του. Για παράδειγμα, αντιδραστήρες τύπου WWER ή LWGR έχουν σχεδιαστικό χρόνο ζωής 20-30 χρόνια, ενώ οι περισσότεροι BWRs και PWRs, τουλάχιστον στις ΗΠΑ, παίρνουν άδεια για 30-40 χρόνια. Στην πράξη όμως, η κατάσταση είναι διαφορετική, εφόσον πολλοί και διάφοροι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν την πραγματική διάρκεια ζωής των αντιδραστήρων [Laraia and Dlouhy, 2000]. Το 1997 οι ΗΠΑ είχαν πάνω από 100 αντιδραστήρες ισχύος εν λειτουργία και όλοι είχαν παραγγελθεί πριν το 1975. Πάνω από το 20% της παραγόμενης ενέργειας

¹ WWER (water-moderated water-cooled energy reactors): οι πρώτης γενιάς WWER-440/230 σχεδιάστηκαν στη δεκαετία '60 και παρουσιάζουν σημαντικές ελλείψεις ως προς την ασφάλεια σε σχέση με τους δυτικούς PWR, οι δεύτερης γενιάς WWER-440/213 περιλαμβάνουν πολλές σχεδιαστικές βελτιώσεις, ενώ οι WWER-1000 έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά ασφαλείας, όπως οι σύγχρονοι PWR [Αντωνόπουλος-Ντόμης, 1993].

στη χώρα είναι πυρηνική. Το μερίδιο αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στον ιδιωτικό τομέα: στους ομίλους General Electric και Westinghouse [Pool, 1997].

Στα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης οι σταθμοί ισχύος (Σχήματα 4 και 5) είναι κατά κύριο λόγο ελαφρού ύδατος, μέσης ισχύος 1000 MWe. Η εγκατεστημένη ισχύς στα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης παρατίθεται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7: Πυρηνικά Προγράμματα στα κράτη-μέλη [Eur.Comm.COM(98)799, 1999]

Χώρα ¹	Καθαρή ² εγκατεστημένη ισχύς στο τέλος του έτους (GWe) (από σταθμούς ισχύος σε λειτουργία ή παροπλισμένους)					
	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Βέλγιο	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	4,7
Φιλανδία	2,3	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Γαλλία	59	62	67,3	67,3	67,3	67,3
Γερμανία	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1
Ιταλία	Απόφαση να σταματήσει η λειτουργία των πυρηνικών σταθμών ισχύος					
Ολλανδία	0,5	0,5	0			
Ισπανία	7,1	7,5	Δεν υπάρχει επίσημο σχέδιο για μετά το 2000			
Σουηδία	10	10	10	10	0	0
Βρετανία	14,1	12,0	9,3	7,0	3,7	1,2

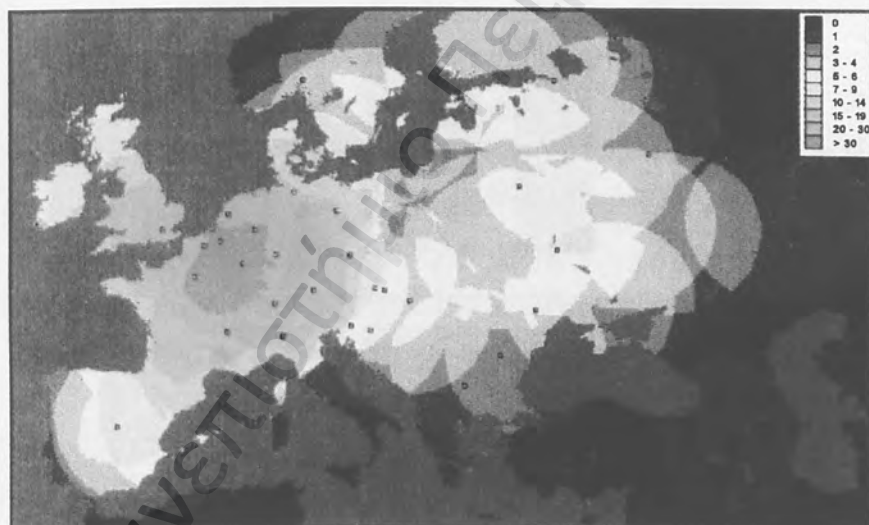
¹ Μόνο κράτη-μέλη της ΕΕ με πυρηνικά προγράμματα

² Η μικτή ισχύς είναι περίπου 4% μεγαλύτερη της καθαρής

³ Υπάρχει απόφαση των κοινοβουλίων για σταδιακή κατάργηση της πυρηνικής ενέργειας (Σουηδία, έως το 2010, Γερμανία, έως το 2020)

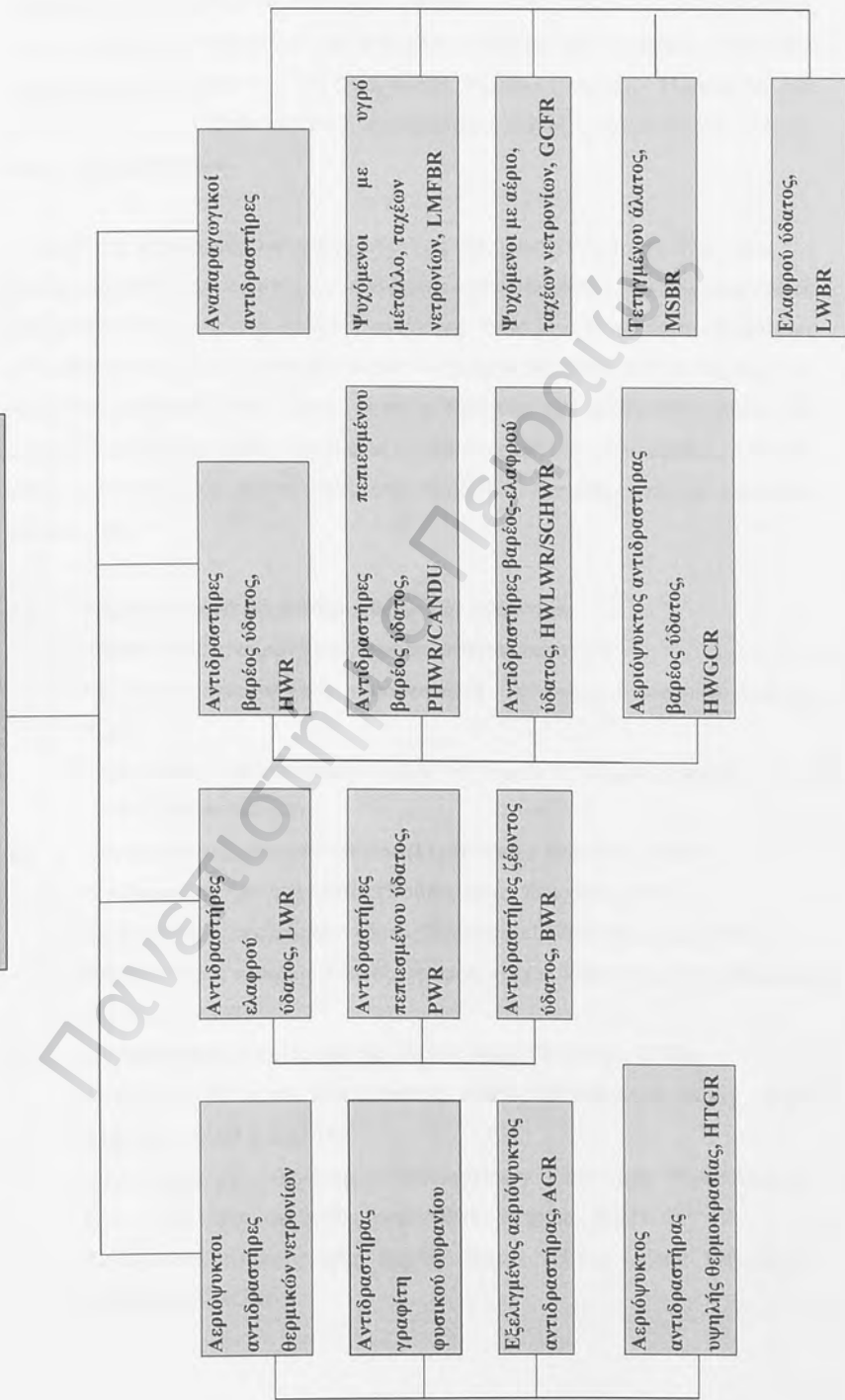


Σχήμα 4: Χάρτης πυρηνικών σταθμών στην Ευρώπη (το εμβαδόν του τετραγώνου είναι ανάλογο της ισχύος) [Κρητίδης, 2000]



Σχήμα 5: Απεικόνιση πυρηνικών σταθμών σε ακτίνα 500 km για κάθε σημείο της Ευρώπης [Κρητίδης, 2000]

Πίνακας 5: Τύποι Αντιδραστήρων Ισχύος
(Πηγή: Λεωνίδου, 1978)



2. Τύποι αντιδραστήρων ισχύος

Σύμφωνα με τον ορισμό του Uranium Institute: «ένας πυρηνικός αντιδραστήρας ισχύος παράγει και ελέγχει την απελευθέρωση ενέργειας από τα άτομα – με σχάση των ατομικών πυρήνων, την πυρηνική σχάση (nuclear fission)». Η ενέργεια που απελευθερώνεται σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα ισχύος χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Οι αρχές της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή είναι ίδιες, για όλους τους τύπους αντιδραστήρων: η ενέργεια απελευθερώνεται από τη σχάση καθώς συντηρείται στον πυρήνα η αλυσωτή αντίδραση. Μία μεγάλη ποσότητα θερμότητας απελευθερώνεται η οποία μεταφέρεται από τον πυρήνα δια μέσου του κυκλοφορούντος στον αντιδραστήρα ψυκτικού μέσου. Ο ατμός παράγεται είτε άμεσα στο ψυκτικό, είτε έμμεσα, δια μέσου μεταφοράς θερμότητας σε ένα δευτερεύον ψυκτικό σύστημα. Ο ατμός αυτός, χρησιμοποιείται τελικά στους αμοστροβίλους (turbines) για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

2.1. Αερίψυκτοι αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων

- Αερίψυκτος αντιδραστήρας γραφίτη φυσικού ουρανίου
- Εξελιγμένος αερίψυκτος αντιδραστήρας (Advanced Gas-cooled Reactor, AGR)
- Αερίψυκτος αντιδραστήρας υψηλής θερμοκρασίας (High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR)

2.2. Αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (Light Water Reactors, LWR)

- Αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος (Boiling Water Reactors, BWR)
- Αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος (Pressurized Water Reactors, PWR)
- Αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος, γραφίτη (Light Water Graphite-moderated Reactors, LWGR)

2.3. Αντιδραστήρες βαρέος ύδατος (Heavy Water Reactors, HWR)

- Αντιδραστήρες πεπιεσμένου βαρέος ύδατος (Pressurized Heavy Water Reactors, PHWR ή CANDU)
- Αντιδραστήρες βαρέος-ελαφρού ύδατος (Heavy Water Light Water Reactors, HWLWR ή Steam Generating Heavy Water Reactors, SGHWR)
- Αερίψυκτοι αντιδραστήρες βαρέος ύδατος (Heavy Water Gas-Cooled Reactors, HWGCR)

2.4. Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες

- Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ψυχόμενοι με υγρό μέταλλο, ταχείων νετρονίων (Liquid Metal Fast Breeder Reactor, LMFBR)
- Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ψυχόμενοι με αέριο, ταχείων νετρονίων (Gas Cooled Fast-breeder Reactor, GCFR)
- Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες τετηγμένου άλατος (Molten Salt Breeder Reactor, MSBR)
- Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (Light Water Breeder Reactor, LWBR)

2.1. Αερίψυκτοι αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων

2.1.1. Αερίψυκτος αντιδραστήρας γραφίτη φυσικού ουρανίου

Ο τύπος αυτός λέγεται και Magnox και χρησιμοποιείται κυρίως στη Βρετανία. Το πυρηνικό καύσιμο είναι φυσικό ουράνιο, ο επιβραδυντής είναι γραφίτης και το ψυκτικό μέσον είναι διοξείδιο του άνθρακα. Ιστορικά, ο τύπος αυτός ήταν ο πρώτος αντιδραστήρας που χρησιμοποιήθηκε στις ΗΠΑ για στρατιωτικούς σκοπούς με ψυκτικό όμως μέσον, το φυσικό νερό. Το CO₂ είναι αέριο με πολύ καλές ιδιότητες ως ψυκτικό μέσον, είναι αδρανές από χημική άποψη, χημικά σταθερό σε θερμοκρασίες μικρότερες από ~540 °C και παρουσιάζει χαμηλή μικροσκοπική ενεργή διατομή απορρόφησης [Λεωνίδου, 1978].

Τα στοιχεία πυρηνικού καυσίμου είναι κυλινδρικές ράβδοι μεταλλικού φυσικού ουρανίου, τοποθετημένες σε σωλήνες ενός κράματος μαγνησίου (magnesium alloy-βλ. και ονομασία Magnox) που περιέχει Al. Η διάβρωση του περιβλήματος από το CO₂ και η α-β μετατροπή φάσεως² του μεταλλικού ουρανίου περιορίζουν την μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία περιβλήματος σε ~450 °C. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού μέσου ~410 °C και θερμοκρασία ατμού στον εναλλάκτη θερμότητας ~370 °C. Τα μειονεκτήματα των αντιδραστήρων Magnox είναι τα ακόλουθα:

² Το ουράνιο ως μέταλλο, ευρίσκεται στις εξής αλλοτροπικές μορφές: την α-φάση, που κρυσταλλώνει σε ορθορομβικό σύστημα και είναι σταθερή έως τους 600°C, την β-φάση, που έχει δομή τετραγωνικού κρυστάλλου και υπάρχει μεταξύ 660 και 700°C και την γ-φάση, που είναι κύβος και υπάρχει πάνω από τους 760°C έως το σημείο τήξεως των ~1130°C [Cochran and Tsoufanidis, 1992].

- Το περιβλήμα, αλλά και το πυρηνικό καύσιμο, αντιδρούν όχι μόνο με τον ατμοσφαιρικό αέρα, αλλά και με το CO_2 ιδίως σε υψηλές θερμοκρασίες
- Λόγω του μεγάλου μήκους επιβραδύνσεως του γραφίτη (~18,5 m), ο αντιδραστήρας έχει μεγάλες διαστάσεις, με αποτέλεσμα να απαιτείται υψηλό κεφάλαιο επένδυσης.
- Λόγω μεταλλουργικών περιορισμών, οι επιτρεπόμενες θερμοκρασίες λειτουργίας είναι χαμηλές.

Για τους παραπάνω λόγους, ο τύπος αυτός αντικαταστάθηκε από τους δύο άλλους τύπους των αερίψυκτων αντιδραστήρων: τον εξελιγμένο αερίψυκτο αντιδραστήρα (Advanced Gas-cooled Reactor, AGR) και τον αερίψυκτο αντιδραστήρα υψηλής θερμοκρασίας (High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR).

2.1.2. Εξελιγμένος αερίψυκτος αντιδραστήρας (Advanced Gas-cooled Reactor, AGR)

Ο εξελιγμένος αερίψυκτος αντιδραστήρας [Λεωνίδου, 1978] αναπτύχθηκε στη Βρετανία για να αξιοποιηθούν οι μεγάλες θερμοκρασιακές δυνατότητες του συνδυασμού γραφίτη/ CO_2 . Αντί του φυσικού ουρανίου, στον AGR χρησιμοποιείται ως καύσιμο ελαφρά εμπλουτισμένο ουράνιο υπό μορφή οξειδίου του ουρανίου (UO_2) και το περιβλήμα αντικαταστάθηκε από ανοξείδωτο χάλυβα. Το UO_2 δεν υφίσταται μετατροπή φάσεως και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι τους ~2500 °C. Ο ανοξείδωτος χάλυβας μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρακτικά μέχρι και τους 850 °C, γεγονός που επιτρέπει το ψυκτικό μέσο να εξέρχεται με θερμοκρασία 650-700 °C και κατά συνέπεια, η θερμοκρασία του παραγόμενου ατμού να είναι ~550 °C.

Λόγω των μεγάλων θερμοκρασιακών διαφορών και της μικρής θερμικής αγωγιμότητας του UO_2 , το στοιχείο πυρηνικού καυσίμου δεν έχει πλέον τη μορφή ράβδου, αλλά δέσμης ραβδίων. Ο πυρηνοληκτρικός σταθμός του Hinkley Point B (Somerset, Βρετανία) παράγει υπέρθερμο ατμό θερμοκρασίας 540 °C και πίεσεως 160 atm και λειτουργεί με απόδοση σχεδόν 43%. Το καύσιμο είναι ελαφρά εμπλουτισμένο ουράνιο, 1,4% έως 2,6% σε διάφορες ζώνες, σε μορφή κυλινδρίσκων μέσα σε σωλήνες ανοξείδωτου χάλυβα περιβαλλόμενους από μανδύα γραφίτη: έτσι συγκροτείται στη περίπτωση αυτή, το “στοιχείο πυρηνικού καυσίμου”. Τα στοιχεία αυτά τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο μέσα σε διαίλους γραφίτη, ώστε το CO_2 να περνάει ομαλά μεταξύ των ραβδίων του πυρηνικού καυσίμου και του επιβραδυντή.

2.1.3. Αερίψυκτος αντιδραστήρας υψηλής θερμοκρασίας (HighTemperature Gas-cooled Reactor, HTGR)

Ο HTGR [Λεωνίδου, 1978, Nero, 1979] είναι ο πιο προηγμένος τεχνολογικά τύπος μεταξύ των αερίψυκτων αντιδραστήρων θερμικών νετρονίων (κατασκευαστής: General Atomics/GA, ΗΠΑ). Στον τύπο αυτό, ως επιβραδυντής χρησιμοποιείται πάλι ο γραφίτης, αλλά ως ψυκτικό μέσο χρησιμοποιείται ήλιο (He) αντί του CO₂. Το ήλιο, ως ψυκτικό μέσο, έχει καλύτερες δυνατότητες σε σχέση με το CO₂. Είναι πιο αδρανές και δεν αντιδρά με τον γραφίτη ή το πυρηνικό καύσιμο, και δεν απορροφά νετρόνια (επομένως, δεν καθίσταται ραδιενεργό). Η θερμοκρασία εξόδου του ηλίου μπορεί να φθάσει τους 800-950 °C. Υπάρχουν παραδείγματα λειτουργίας HTGR, όπου ο ατμός είναι θερμοκρασίας 540 °C και πίεσεως 160 atm και η ολική απόδοση είναι 40%, όσο περίπου και οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρισμού.

Το πυρηνικό καύσιμο του HTGR είναι κατά την εκκίνησή του, μείγμα θορίου και ουρανίου υψηλού εμπλουτισμού (20%). Το U-233 που παράγεται από το θόριο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του αντιδραστήρα αντικαθιστά μερικώς το καταναλωθέν ισότοπο U-235. Το πυρηνικό καύσιμο έχει την μορφή κόκκων διακαρβιδίων του ουρανίου και του θορίου - (U,Th)C₂ - καλυμμένων από αλληπάλληλα στρώματα γραφίτη, προς παρεμπόδιση διαφυγής προϊόντων σχάσεως. Οι κόκκοι αυτοί τοποθετούνται συνήθως μέσα σε κυλινδρικούς αυλούς, σε εξαγωνικά πρίσματα από γραφίτη και συνιστούν τα στοιχεία του πυρηνικού καυσίμου. Τα πρίσματα αυτά φέρουν και παράλληλους αυλούς για την δίοδο του He.

Ο τύπος HTGR έχει παρουσιάσει συντελεστή μετατροπής (conversion ratio, CR³) περίπου 0,7, αλλά μπορούν να σχεδιαστούν και προηγμένοι τύποι με υψηλότερο CR. Ο HTGR παρουσιάζει επίσης καλή θερμική απόδοση (thermal efficiency) - περίπου 39%, πράγμα που υποδηλώνει καλή χρήση του πυρηνικού καυσίμου. Οι απαιτήσεις ενός HTGR σε ουράνιο καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του ανέρχονται σε 3000 τόνους U₃O₈, υπό την προϋπόθεση ότι το εξαντλημένο καύσιμο υπόκειται σε ανακύκλωση [Nero, 1979]. Ο HTGR έχει τυπικό burnup⁴ καυσίμου περίπου 96000 MWd/Te και

³ Conversion Ratio, CR (ή breeding ratio): συντελεστής μετατροπής. Για θερμικούς αντιδραστήρες, το πηλίκιο του σχίσμου υλικού που παράγεται προς αυτό που καταναλώνεται. Για το U, είναι το πηλίκιο του Pu-239 που παράγεται προς το U-235 που καταστρέφεται. Εάν το CR είναι μικρό, ο αντιδραστήρας καλείται και burner, εάν είναι μεταξύ 0.7 και 1.0, λέγεται converter, και εάν CR>1, ο αντιδραστήρας λέγεται breeder [Bodansky, 1996].

⁴ Το συνολικό μέτρο της ενέργειας που παράγεται από το πυρηνικό καύσιμο εκφράζεται από τον όρο burnup (Megawatt days of thermal output per metric tone of initial heavy metal, MWDT/MTHM or GWd/t)

απαιτεί ανατροφοδότηση με καύσιμο κατά το $\frac{1}{4}$ αυτού ετησίως. Οι HTGR που έχουν σχεδιαστεί για υψηλότερο CR, περιέχουν μεγαλύτερη ποσότητα θορίου, κατά συνέπεια, στην περίπτωση αυτή, το καύσιμο θα ακτινοβολείται σε χαμηλότερο burnup. Ο πυρήνας, οι εναλλάκτες θερμότητας και οι κυκλοφορητές βρίσκονται σε ένα μεγάλο δοχείο από σκυρόδεμα (και όχι ατσάλι), μέσα στο οποίο ευρίσκεται και ο πυρήνας του αντιδραστήρα (PCR, prestressed concrete reactor vessel) [Nero, 1979]. Τέτοιοι αντιδραστήρες έχουν σχεδιαστεί εμπορικά στις ΗΠΑ, όπου και επικρατούσαν στη δεκαετία του '70. Οι HTGR έχουν μακρά ιστορία εφαρμογής και θεωρούνται πλεονεκτικοί, ως ιδιαίτερα ασφαλείς εγγενώς. Πιστεύεται ότι, με τον προηγμένο τύπο HTGR και ήλιο ως ψυκτικό (το ήλιο δεν μπορεί να γίνει δηλητήριο), ο τύπος αυτός θα είναι ο "υπέρ-ασφαλής" αντιδραστήρας του μέλλοντος [Bodansky, 1996].

Modular HTGR (MHTGR)

Σήμερα, έχει σχεδιαστεί ο προηγμένος τύπος του HTGR, ο οποίος έχει ως βασικό χαρακτηριστικό τα παθητικά συστήματα ασφαλείας του και ο οποίος καλείται Modular HTGR (MHTGR). Έχει σχεδιαστεί σε ισχύ ~200-350 MW(t) [έως 135 MWe] ανά διαμορφωμένη μονάδα (module), ενώ ο σταθμός αποτελείται από τέσσερις ξεχωριστές διαμορφωμένες μονάδες. Ο σταθμός είναι σχεδιασμένος να "σβήνει" αυτόματα σε περίπτωση απώλειας ψυκτικού, και η θερμότητα που θα παραχθεί κατά την σβέση (decay heat⁵) διοχετεύεται με ασφάλεια για τον πυρήνα, αυτόματα και χωρίς την ανάγκη επέμβασης από χειριστές [LaBar and Simon, 1997, Rütten and Haas, 2000].

Περιγράφεται στη βιβλιογραφία η ανάπτυξη ενός MHTGR (GH-MHR, gas-turbine cycle MHR 600 MWt⁶), ο σχεδιασμός του οποίου βασίστηκε στην εμπειρία από πάνω από 50 αερίψυκτους αντιδραστήρες στον κόσμο: Περίπου 3000 στοιχεία καυσίμου υπάρχουν στον GH-MHR, τα οποία δείχνουν καλή σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες (υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας <~1250°C και σε ενδεχόμενο ατύχημα <~1600°C). Το ήλιο, θερμαινόμενο στον αντιδραστήρα, εκτονώνεται σε ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Διάγραμμα 5). Από την εκτόνωση, το ήλιο ρέει από την θερμή πλευρά ενός εναλλάκτη (recuperator) μεταφέροντας την υπολειπόμενη θερμότητά του στο ήλιο από την κρύα πλευρά (η οποία επιστρέφει πίσω στον αντιδραστήρα) και το ήλιο ρέει από ένα ψύκτη

⁵ Decay heat: θερμική ισχύς μετά το κλείσιμο του αντιδραστήρα

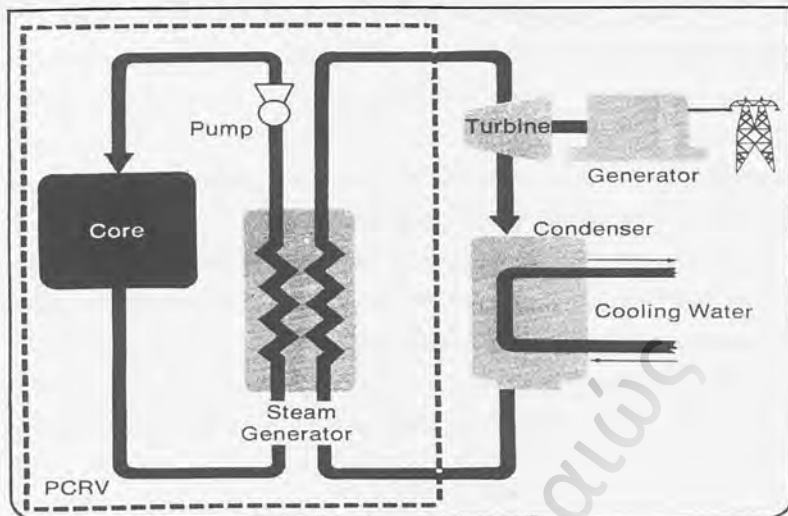
⁶ Cooperative program; General Atomics USA, Minatom Russia, Framatome France, Fuji Electric Japan.

(precooler), όπου ψύχεται περαιτέρω. Το ψυχρό ήλιο πλέον, διέρχεται από την ψυχρή και σε υψηλή πίεση πλευρά του εναλλάκτη (recuperator), όπου θερμαίνεται για να επιστρέψει στον αντιδραστήρα (απόδοση ~47%) [LaBar and Simon, 1997].

Υπάρχει επίσης και περιγράφεται στη βιβλιογραφία, ένας συγγενής στον modular τύπος (pebble-bed modular reactor), στον οποίο το καύσιμο είναι PuO_2 και $(\text{U-Th})\text{O}_2$ σε μορφή κροκάλης διαμέτρου 6 cm (pebbles) διασκορπισμένο σε περίβλημα καψουλοειδές επικαλυμμένο με αρκετά στρώματα γραφίτη. Εξωτερικά, υπάρχει πάλι ανθεκτικό περίβλημα. Στον τύπο αυτό έχει μελετηθεί η καύση πλουτονίου περιεκτικότητας αντίστοιχης με αυτήν που χρησιμοποιείται σε πυρηνικά όπλα (weapons grade plutonium, WPU) [Rütten and Haas, 2000].

Σύμφωνα με τους σχεδιαστές, ο τύπος modular HR είναι τόσο ασφαλής, ώστε δεν θα απαιτούνται ούτε μέτρα έκτακτης εκκένωσης του γειτονικού πληθυσμού σε περίπτωση ατυχήματος [Nero, 1979]. Η εκτιμώμενη πιθανότητα για σημαντική απελευθέρωση ραδιενέργειας είναι πολύ μικρότερη από 10^{-8} ετησίως [Bodansky, 1996]. Εκτός από πλεονέκτημα σε θέματα ασφαλείας, ο τύπος αυτός φαίνεται ότι έχει και άλλα πλεονεκτήματα, όπως ασυνήθιστα χαμηλές εκπομπές ραδιενεργών στοιχείων: το ήλιο είναι αδρανές αέριο, μονοφασικό και δεν καθίσταται ραδιενεργό, ούτε μεταφέρει προσμίξεις που ενδεχομένως να γίνουν ραδιενεργές. Επίσης, ο τρόπος εγκλεισμού του καυσίμου σε κάψουλα είναι πιο ασφαλής σε σχέση με τον εγκλεισμό του οξειδίου του ουρανίου στα κράματα ζirkονίου, γιατί αυτά ενδέχεται να παρουσιάσουν κάποιες διαρροές. Επομένως, αναμένεται λιγότερη διαφυγή πτητικών προϊόντων σχάσεως. Τέλος, οι ρυθμοί απελευθερώσεων ρύπων σε φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας είναι πολύ χαμηλές, για να θεωρηθούν σημαντικές οι εκπομπές αυτές [Bodansky, 1996].

Τέλος, εκτός από την υπεροχή του τύπου αυτού, όσον αφορά τα απόβλητα από την κανονική λειτουργία και την ασφάλειά του έναντι μεγάλου ατυχήματος, φαίνεται ότι παρουσιάζει κι ένα ακόμα πλεονέκτημα: το χαμηλό σταθερό του κόστος λόγω της κατασκευής του σε modules, καθώς και του μικρού ποσοστού κατασκευαστικών εργασιών που απαιτούνται να γίνουν επί τόπου στην εγκατάσταση. Επίσης, σημαντικό πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι οι MHTGR μπορούν να «κάψουν» WPU. Τύποι MHTGR έχουν σχεδιαστεί και αναπτυχθεί στις ΗΠΑ, στη Γερμανία (Interatom Company, pebble-bed modular reactor), στην Ιαπωνία, στη Νότιο Αφρική (pebble-bed modular reactor) και στη Ρωσία και αναμένεται να αναπτυχθούν ιδιαίτερα εμπορικά μετά από 20 έτη (2020).



Διάγραμμα 5: Σχηματική αναπαράσταση μονάδας HTGR, όπου το καύσιμο είναι ουράνιο και θόριο ως ψυκτικό χρησιμοποιείται ήλιο, ενώ πυρήνας, γεννήτριες ατμού, κυκλοφορητές ηλίου και λοιπός εξοπλισμός περιέχονται σε ειδικό συμπαγές περίβλημα (PCRIV)

2.2. Αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (Light Water Reactors, LWR)

Οι LWR είναι αντιδραστήρες, στους οποίους χρησιμοποιείται ελαφρύ ύδωρ ως ψυκτικό, αλλά και ως επιβραδυντής και ανακλαστής. Είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος αντιδραστήρων, που παράγεται με σημαντικό βαθμό τυποποίησης και έχει μελετηθεί ικανοποιητικά [Λεωνίδου, 1978, Nero, 1979].

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι: ο αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος και ο αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος. Υπάρχει και ο τύπος που ψύχεται μεν από ελαφρύ ύδωρ αλλά χρησιμοποιεί ως επιβραδυντή γραφίτη (αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος/γραφίτη (Light Water Graphite-moderated Reactors, LWGR), αλλά δεν έχει ιδιαίτερη εφαρμογή.

Στους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος που λειτουργούν σήμερα, το πλήικο μετατροπής του πυρηνικού καυσίμου (CR, conversion ratio) είναι περίπου 0,6. Για περίπου κάθε ένα βραδυ νετρόνιο που απορροφάται από το U-235, παράγονται περίπου 2,0 ταχεία νετρόνια, των οποίων η θερμική ενέργεια μειώνεται άμεσα από τον επιβραδυντή (νερό), ενώ στη διαδικασία αυτή, ένας σημαντικός αριθμός νετρονίων ενσωματώνεται στο U-238 (το οποίο μεταστοιχειώνεται σε Pu-239). Από τα νετρόνια

που φθάνουν τις απαραίτητες θερμικές ενέργειες, μερικά απορροφώνται από το U-238, αλλά τα περισσότερα απορροφώνται από το U-235, το νερό, τα δομικά υλικά, τα δηλητήρια της σχάσης και τις ράβδους ελέγχου.

Ας σημειωθεί ότι, η αναλογία των απορροφούμενων από το U-238 νετρονίων προς τα απορροφούμενα από το U-235, είναι περίπου 0,6. Όσο λειτουργεί ο αντιδραστήρας, σχηματίζονται περισσότερα δηλητήρια σχάσεως⁷, το ποσοστό του σχάσιμου υλικού μειώνεται ελαφρά, έτσι, η απορρόφηση των νετρονίων αλλάζει. Παρόλα αυτά, δεν αλλάζει δραστικά και η αναλογία μετατροπής του πυρηνικού καυσίμου, ακόμα και αν τα είδη του καυσίμου έχουν αλλάξει (αρχικά, το μόνο σχάσιμο υλικό ήταν το U-235, αλλά πλέον έχει δημιουργηθεί μία αποθήκη από Pu-239 και άλλα ισότοπα) [Nero, 1979].

Όσον αφορά στα δηλητήρια της σχάσεως, αυτά είτε απορροφούν νετρόνια και μπορούν να δημιουργήσουν - εκτός από περιβαλλοντικά προβλήματα - προβλήματα λειτουργίας στον αντιδραστήρα. Το ιώδιο προκαλεί αλληλεπιδράσεις του πυρηνικού καυσίμου με το clad (pellet-clad interaction failure), το τρίτο δημιουργεί μικρά προβλήματα κυρίως στους BWRs, ενώ το ξέnon (Xe-135) δημιουργεί το σοβαρότερο πρόβλημα, καθώς απορροφά νετρόνια και μπορεί να προκαλέσει ταλαντώσεις στην παραγωγή του ρεύματος και στη σύνδεσή του με το δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, όταν το καύσιμο είναι MOX, οι LWRs συναντούν μικρότερα προβλήματα: το MOX είναι πίο σταθερό σε ό,τι αφορά ταλαντώσεις της ισχύος εξαιτίας του Xe-135 [Bairiot and Vandenberg, 1989]. Στην ουσία, η διαφορά του ηλικίου μετατροπής του πυρηνικού καυσίμου από τη μονάδα (1-CR) - και όχι ο ίδιος ο CR - είναι δείκτης χρήσης του καυσίμου και η διαφορά αυτή είναι μικρή στους LWRs. Παρόλα αυτά, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τον βαθμό αξιοποίησης του καυσίμου, όπως για παράδειγμα, εάν το πυρηνικό καύσιμο έχει φθάσει το υπολογισθέν κατά τον σχεδιασμό σημείο burnup και εάν το υλικό στο καταναλωθέν καύσιμο είναι επανεπεξεργασμένο (reprocessed).

Οι LWR σήμερα, χρησιμοποιούν το παραγόμενο σε αυτούς πλουτόνιο κατά την κανονική λειτουργία τους μερικώς, ως καύσιμο MOX, μερικές φορές συνεισφέροντας 20% της ισχύος. Το 1990, πρώτη η Γαλλία ξεκίνησε την ανακύκλωση του πλουτωνίου στους LWR.

⁷ Κύρια δηλητήρια σχάσεως (απορροφούν νετρόνια): ιώδιο, τρίτιο και ξέnon (Xe-135).

2.2.1. Αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος (Pressurized Water Reactors, PWR)

Οι περισσότεροι αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος εν λειτουργία ή υπό κατασκευή σήμερα, είναι πεπιεσμένου ύδατος [Λεωνίδου, 1978, Nero, 1979]. Κατασκευαστές είναι οι οίκοι: Westinghouse, Babcock & Wilcox, Combustion Engineering κλπ. Στον PWR, το ελαφρύ νερό βρίσκεται υπό πίεση εντός του δοχείου του αντιδραστήρα, προς αποφυγή βρασμού.

Στους PWR χρησιμοποιείται ως καύσιμο, ελαφρά εμπλουτισμένο ουράνιο. Ένας PWR των 1000 MWe περιέχει 110 τόνους διοξειδίου του ουρανίου και μπορεί να χρησιμοποιήσει στον κύκλο ζωής του πυρηνικού καυσίμου του, ποσότητα περίπου 4100 τόνων U_3O_8 που οφείλεται κυρίως στο χαμηλό πηλίκο μετατροπής του πυρηνικού καυσίμου στους PWRs [Nero, 1979]. Το σχεδιαστικό μέσο burnup στους PWR είναι 32000 megawatt-days (thermal) per metric ton (MWd/Te), το οποίο αντιστοιχεί σε έναν παράγοντα ικανότητας της μονάδας της τάξεως του 80% (capacity factor)¹, εάν η μονάδα επανατροφοδοτείται σε κανονικές περιόδους με καύσιμο. Οι περισσότεροι PWR έχουν σχεδιαστεί για επανατροφοδοσία μία φορά τον χρόνο, σε περιόδους χαμηλής ζήτησης (διακοπή περίπου δύο εβδομάδων), που του επιτρέπουν να “κλείσει”. Εάν όμως ο αντιδραστήρας λειτουργεί σε burnup των 10000 MWd/Te, μπορεί να καθυστερήσει η επανατροφοδοσία του καυσίμου.

Το Διάγραμμα 6 αναπαριστά σχηματικά την λειτουργία ενός PWR: το νερό εισέρχεται στο δοχείο πίεσεως στους $-288\text{ }^\circ\text{C}$ και ρέει προς το κάτω μέρος του δοχείου πίεσεως και μάλιστα στο εξωτερικό διαμέρισμά του, γύρω από τον πυρήνα, χρησιμεύοντας έτσι ως ανακλαστής. Στη συνέχεια ανέρχεται, περνώντας μέσα από τον πυρήνα, όπου θερμαίνεται και τέλος, εξέρχεται από το δοχείο πίεσεως σε θερμοκρασία περίπου $316\text{ }^\circ\text{C}$. Το νερό διατηρείται σε υψηλή πίεση και συγκεκριμένα στην περιοχή περίπου των 136-170 atm.

Επειδή το νερό δεν βράζει στον αντιδραστήρα, ο ατμός παράγεται έξω από αυτόν, στις γεννήτριες ατμού, δηλαδή σε εναλλάκτες θερμότητας, στο πρωτεύον σύστημα των οποίων κυκλοφορεί το υψηλής θερμοκρασίας πεπιεσμένο νερό που προέρχεται από τον αντιδραστήρα, ενώ στο δευτερεύον, το προς εξάτμιση νερό. Οι μεγάλοι σταθμοί PWR διαθέτουν μέχρι και τέσσερις γεννήτριες ατμού, στις οποίες παράγεται

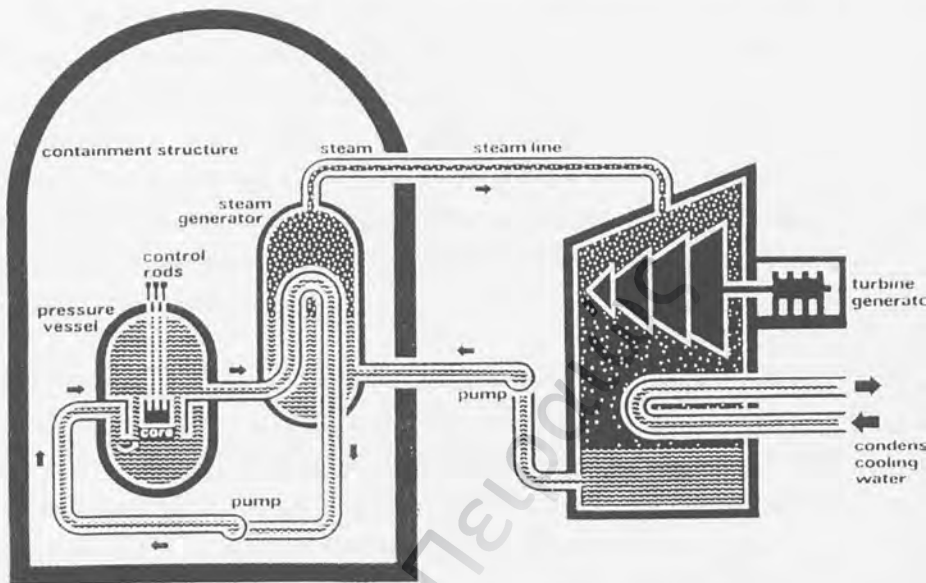
¹ Capacity factor: Αποτελεί ένα συνολικό μέτρο του πόσο καλά λειτουργεί ένας αντιδραστήρας. Είναι το πηλίκο της παραγόμενης ισχύος προς την ισχύ που θα παραγόταν εάν

ατμός θερμοκρασίας $-293\text{ }^{\circ}\text{C}$ και πίεσεως $\sim 61\text{ atm}$, καθώς και δύο ή περισσότερα πρωτεύοντα συστήματα ψύξεως (primary coolant loops with piping, pumps and steam generators). Η ολική απόδοση κυμαίνεται σε 32-33% (overall thermal efficiency) [Nero, 1979].

Επειδή το νερό είναι πρακτικά ασυμπίεστο υγρό, ακόμα και μικρές μεταβολές του όγκου του ενδέχεται να έχουν καταστρεπτικές συνέπειες για όλο το κύκλωμα. Προς αποφυγή τέτοιων κινδύνων, χρησιμοποιείται ρυθμιστής πίεσεως, συνδεδεμένος στο κύκλωμα ψύξεως μίας από τις γεννήτριες ατμού. Το πυρηνικό καύσιμο είναι ελαφρά εμπλουτισμένο ουράνιο (UO_2) 2,4 % κατά βάρος (κ.β.) υπό μορφή μικρών κυλίνδρων (pellets) και είναι τοποθετημένο μέσα σε σωλήνες ανοξειδωτου χάλυβα ή κράματος ζirkονίου², αεροστεγώς κλεισμένους (cladding material). Οι ράβδοι αυτές τοποθετούνται σε τετραγωνική εσχάρα, έτσι ώστε με τη μορφή δέσμης ράβδων, να συγκροτούν το “στοιχείο πυρηνικού καυσίμου”. Οι ράβδοι διατηρούνται με τη βοήθεια της εσχάρας σε σταθερές μεταξύ τους αποστάσεις, πράγμα απαραίτητο, γιατί τυχόν επαφή των ράβδων μπορεί να οδηγήσει σε τοπική υπερθέρμανση, τήξη του περιβλήματος και διαφυγή προϊόντων σχάσεως. Τα στοιχεία πυρηνικού καυσίμου τοποθετούνται κατακόρυφα στο δοχείο πίεσεως, μέσα σε κατάλληλο πλέγμα υποστηρίξεως, και σε σχηματισμό τέτοιον ώστε ο διαμορφωνόμενος πυρήνας του αντιδραστήρα να έχει περίπου κυλινδρική μορφή. Ο έλεγχος του PWR (ECC systems) πραγματοποιείται είτε με ράβδους ελέγχου, οι οποίες εισάγονται στον πυρήνα από πάνω, είτε με μεταβολή της συγκεντρώσεως ισχυρού απορροφητή νετρονίων (π.χ. βορικού οξέος) διαλελυμένου στο ψυκτικό μέσον. Γενικά, οι PWR παρουσιάζουν κάποια ευκινησία ως προς την προσαρμογή της λειτουργίας τους σε διάφορα φορτία, η οποία οφείλεται κυρίως στην χρήση των ράβδων ελέγχου.

η μονάδα λειτουργούσε συνεχώς και στο 100% της ονομαστικής ισχύος της σε ένα ορισμένο διάστημα [Bodansky, 1996].

² Τα κράματα ζirkονίου έχουν καλή συμπεριφορά ως cladding materials επειδή έχουν μικρή ενεργειακή διατομή (low neutron cross-section)



Διάγραμμα 6: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας PWR [Bodansky, 1996]

Αντιπροσωπευτικά χαρακτηριστικά ενός PWR [Nero, 1979]

Plant electrical output	1100 MWe
Plant efficiency	32%
Total amount of fuel (UO_2)	217,000 lb (98 Mg)
Core weight (mass)	276000 lb (125 Mg)
Cladding material	zircaloy-4
Fuel material	uranium dioxide
Control rod type	B_4C or Ag-In-Cd in cylindrical rod
Coolant pressure	2250 psi (15,5 Mpa)
Design fuel burnup	32000 MWd/Te (heavy metal) ποικίλλει
Spent fuel assay (design)	0,9% U-235, 0,6% Pu-239, Pu-241
Refueling sequence	1/3 of the fuel per year
Refueling time	17 days (min)
Plant capacity factor ³	80%

³ Plant Capacity Factor (Παράγοντας Ικανότητας Σταθμού): είναι ο ποσοστό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην έξοδο, εάν ο σταθμός λειτουργεί συνεχώς στο 100% της ισχύος του.

2.2.2. Αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος (Boiling Water Reactors, BWR)

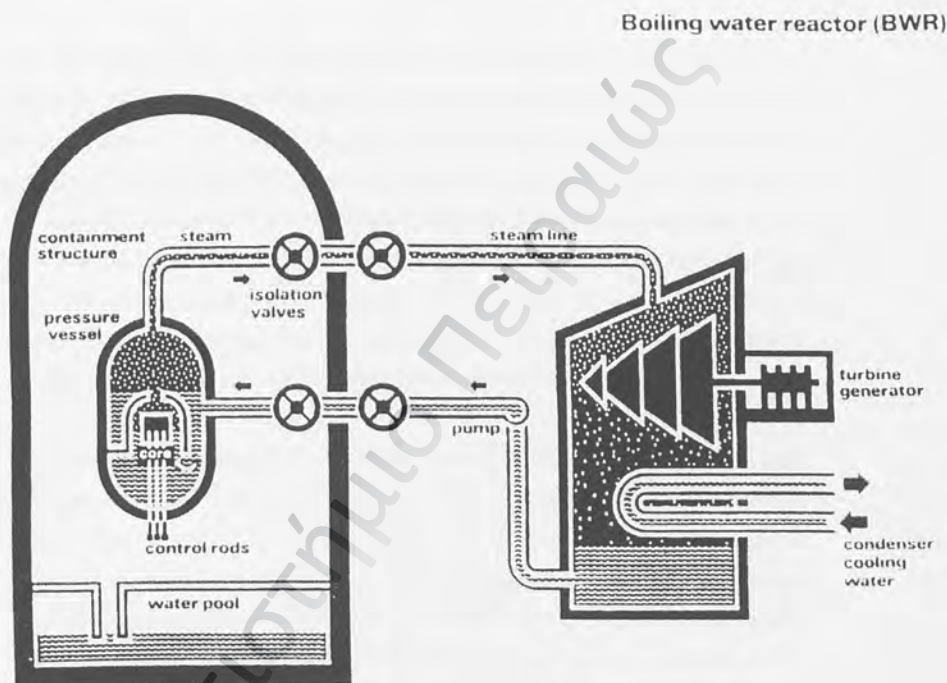
Η ιδέα να επιτραπεί ο βρασμός του ύδατος και η παραγωγή ατμού μέσα στον αντιδραστήρα δεν ήταν δυνατόν για χρόνια να υλοποιηθεί, γιατί υπήρχε το πρόβλημα του ανομοιομορφου σχηματισμού αλλά και της ανομοιομορφης μετακίνησης των φυσαλίδων ατμού, το οποίο δυσχέραινε τον έλεγχο του αντιδραστήρα. Απεδείχθη στη συνέχεια ότι, το πρόβλημα υπήρχε μόνο όταν ο βρασμός συνέβαινε σε χαμηλές πιέσεις, ενώ σε υψηλές πιέσεις ο βρασμός καθίσταται σταθερός και ο αντιδραστήρας είναι δυνατόν να ελεγχθεί. Έτσι διαμορφώθηκε ο αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος [Λεωνίδου, 1978, Nero, 1979].

Στους BWR χρησιμοποιείται ελαφρά εμπλουτισμένο ουράνιο ως πυρηνικό καύσιμο (UO_2), ενώ το ελαφρύ νερό βρίσκεται μέσα στο δοχείο του αντιδραστήρα σε κατάσταση βρασμού, όταν αυτός λειτουργεί. Η εσωτερική διαμόρφωση του BWR αναπαριστάται στο Διάγραμμα 7. Αρχίζοντας από το κάτω διαμέρισμα, το ύδωρ ανέρχεται προς τα πάνω μέσω του πυρήνα. Όταν πλησιάζει το πάνω μέρος του πυρήνα και εισέρχεται στο άνω διαμέρισμα, ένα μέρος αυτού έχει ήδη εξαερωθεί. Το μείγμα ατμού-ύδατος διέρχεται μέσω των διαχωριστών ατμού, όπου αφαιρείται ένα μεγάλο ποσοστό ύδατος. Στη συνέχεια, ο ατμός διέρχεται μέσω συστοχίας ξηραντών, όπου αφαιρείται το υπόλοιπο ύδωρ, εξέρχεται από το δοχείο του αντιδραστήρα και μέσω ατμαγωγών σωλήνων, οδηγείται στον ατμοστρόβιλο. Το ύδωρ, που διαχωρίζεται στους διαχωριστές και ξηραντές ατμού, ενώνεται με το ύδωρ τροφοδοσίας, το οποίο επιστρέφει από τον συμπυκνωτή και οδηγείται μέσω του δακτυλίου καθοδικής ροής, που υπάρχει μεταξύ του περιβλήματος του πυρήνα και του δοχείου του αντιδραστήρα, στο κάτω διαμέρισμα.

Η κυκλοφορία του ψυκτικού μέσου μέσα στον πυρήνα εξασφαλίζεται μέσω συστήματος επανακυκλοφορίας, το οποίο αποτελείται από δύο κυκλώματα: το καθένα περιλαμβάνει μία αντλία επανακυκλοφορίας εξωτερικά του δοχείου του αντιδραστήρα, και ένα πλήθος αντλιών φλεβός, που βρίσκονται μέσα στον δακτύλιο καθοδικής ροής του δοχείου. Ο αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος παράγει κορεσμένο ατμό θερμοκρασίας 285 °C και πίεσεως 1000 psi (7 MPa). Η ολική απόδοση είναι της τάξεως του 33-34% (overall thermal efficiency) [Nero, 1979].

Οι ράβδοι ελέγχου εισάγονται στον πυρήνα πάντοτε από κάτω, γιατί στο πάνω μέρος του πυρήνα επικρατεί η αέρια φάση του ψυκτικού και κατά συνέπεια η αποτελεσματικότητα των ράβδων γίνεται μικρότερη σε σχέση με το κάτω μέρος του

πυρήνα, όπου το ψυκτικό βρίσκεται σε υγρή φάση. Ένα σοβαρό μειονέκτημα των BWR είναι ότι το ενεργοποιούμενο ψυκτικό μέσον διατρέχει όλο το κύκλωμα: αντιδραστήρα, ατμοστρόβιλο, συμπυκνωτή, επαναθερμαντές, αντλίες, σωληνώσεις κλπ, ο δε ατμός, επειδή παράγεται μέσα στο δοχείο του αντιδραστήρα, είναι ραδιενεργός⁴, κατά συνέπεια πρέπει να υπάρχει κατάλληλη θωράκιση.



Διάγραμμα 7: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας BWR [Bodansky, 1996]

⁴ Ο ατμός περιέχει κυρίως άζωτο-16, με $T_{1/2}=7$ sec.

2.2.3. Συμπεράσματα για τους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (LWR)

Η λειτουργία ενός BWR και η χρήση του πυρηνικού καυσίμου σε αυτόν, είναι συγκρίσιμη με αυτή ενός PWR ίδιας ικανότητας. Μελέτες ασφάλειας στις ΗΠΑ έδειξαν ότι τα συστήματα ασφαλείας τους (ECC systems) είναι επίσης συγκρίσιμα (στον BWR τα συστήματα ασφαλείας είναι πιο απλά σχεδιασμένα και δεν παρουσιάζουν την πολυπλοκότητα των PWR).

Κοινό χαρακτηριστικό των BWR και PWR είναι επίσης, το ότι το actual burnup τους εξαρτάται από τον τρόπο που λειτουργούν οι αντιδραστήρες: στο σημείο όμως αυτό, ο BWR υπερτερεί στο ότι, κατά έναν περίεργο τρόπο, η μεταβολή του ρυθμού της ροής του ψυκτικού μπορεί να αλλάξει τον ρυθμό της αλυσωτής αντίδρασης, πράγμα που δεν συμβαίνει ούτε στον PWR, αλλά και σε κανέναν άλλο τύπο αντιδραστήρα. Και οι δύο τύποι, για να επιτύχουν υψηλότερο burnup του καυσίμου τους, έχουν υιοθετήσει στις πρόσφατες εκδοχές τους διατάξεις τέτοιες, ώστε να αντιμετωπίζονται οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης του cladding και των κυλινδρίσκων του πυρηνικού καυσίμου, με φράγμα ζirkονίου στο clad, κλπ [Nechaev, 1989]⁵.

Μία άλλη διαφορά των BWR και PWR είναι ότι ο BWR έχει μεγαλύτερο όγκο καυσίμου διαθέσιμο για μία δεδομένη ονομαστική ισχύ. Κατά συνέπεια, το καύσιμο μπορεί να παραμείνει στον αντιδραστήρα μεγαλύτερο χρόνο. Μπορεί επίσης, να επιτευχθεί χαμηλότερη πυκνότητα παραγωγής ισχύος για συγκρίσιμα burnups⁶ (power generation density in the core of a BWR: 54 kW/liter – PWR: 98 kW/liter). Η General Electric συνιστά ανατροφοδοσία των BWR κάθε 18 μήνες με αντικατάσταση του 1/3 του πυρήνα. Στους προηγμένους BWR ο αντιδραστήρας μπορεί μέσα σε μία εβδομάδα να ανατροφοδοτηθεί, ενώ στους παλαιότερους σε ηλικία, απαιτείται περισσότερος χρόνος.

⁵ Στους PWR, διάταξη καυσίμου 18X18 array, και στους BWR, διατάξεις 9X9 και 10X10 array.

2.2.4. Σχόλια για τους αντιδραστήρες τύπου LWR και HTGR

Ο ψυχόμενος με νερό αντιδραστήρας τύπου LWR είναι τελείως διαφορετικός από τον αεριοψυκτο αντιδραστήρα υψηλής θερμοκρασίας (High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR). Ο HTGR χρησιμοποιεί τον άνθρακα σαν επιβραδυντή και αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα νετρόνια της σχάσης να πρέπει να ταξιδέψουν πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις για να φθάσουν τις αναγκαίες θερμικές ενέργειες. Η κατανομή του καυσίμου στους HTGR έχει ως αποτέλεσμα η κατανομή της ενέργειας των νετρονίων στους κυλινδρικούς του καυσίμου να είναι παρόμοια με αυτή στον επιβραδυντή.

Κατά συνέπεια, το καύσιμο στους HTGR υπόκειται σε περισσότερα νετρόνια μεσαίας ενέργειας από ότι το καύσιμο στους LWR, και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη απορρόφηση νετρονίων από το “εύφορο” υλικό (fertile material)⁷, το οποίο στην περίπτωση μας είναι το θόριο (Th-232). Η ιδιότητα αυτή, μπορεί να οδηγήσει σε σχεδιασμό HTGR με καλύτερο CR.

Πρακτικά, οι HTGR παρουσιάζουν λίγο καλύτερο CR σε σχέση με τους LWR και αρκετά καλύτερη θερμική απόδοση (39% οι HTGR έναντι 33% των LWR). Κατά συνέπεια, έχουμε καλύτερη χρήση του καυσίμου στους HTGR (3000 τόνοι U_3O_8 στους HTGR, έναντι 4000 τόνων U_3O_8 στους LWR, για όλη τη ζωή τους και με την προϋπόθεση ανακύκλωσης). Τέλος, οι HTGR έχουν καλύτερο burnup σε σχέση με τους LWR (96000 MWd/Te για τους HTGR, περίπου τρεις φορές το burnup ενός LWR) και κατά συνέπεια η ανατροφοδότησή τους απαιτείται σε ποσότητα περίπου 1/3 της ποσότητας που απαιτείται να αντικατασταθεί στους LWR [Nero, 1979].

2.3. Αντιδραστήρες βαρέος ύδατος (Heavy Water Reactors, HWR)

Στην κατηγορία αυτή υπάγονται οι αντιδραστήρες στους οποίους χρησιμοποιείται το βαρύ νερό⁸, ως ψυκτικό ή ως επιβραδυντής ή και για τα δύο [Λεωνίδου, 1978, Nero, 1979]. Θεωρητικά, διακρίνουμε τους εξής τύπους:

⁶ Οι PWR σχεδιάζονται συνήθως για μεγαλύτερο burnup (32000 MWd/Te) σε σχέση με τους BWR (27500 MWd/Te)

⁷ Fertile material: U-238 & Th-232

⁸ Βαρύ νερό: Μία μορφή νερού, όπου τη θέση των υδρογόνων κατέχουν άτομα δευτερίου.

- Αντιδραστήρες πεπιεσμένου βαρέος ύδατος (Pressurized Heavy Water Reactors, PHWR ή CANDU)
- Αντιδραστήρες βαρέος-ελαφρού ύδατος (Heavy Water Light Water Reactors, HWLWR ή Steam Generating Heavy Water Reactors, SGHWR)
- Αερίοψυκτοι αντιδραστήρες βαρέος ύδατος (Heavy Water Gas-Cooled Reactors, HWGCR)

Ο επικρατέστερος τύπος HWR είναι ο PHWR (CANDU).

2.3.1. Αντιδραστήρες πεπιεσμένου βαρέος ύδατος (Pressurized Heavy Water Reactors, PHWR ή CANDU)

Οι CANDU χρησιμοποιούν φυσικό ουράνιο, ως πυρηνικό καύσιμο και βαρύ νερό ως ψυκτικό, ή/και επιβραδυντή. Η χρήση του βαρέος ύδατος ως ψυκτικού ή ως επιβραδυντή επιβλήθηκε κυρίως στον Καναδά⁹ με την κατασκευή και λειτουργία των αντιδραστήρων φυσικού ουρανίου/βαρέος ύδατος (Canadian Deuterium Uranium ή CANDU). Χαρακτηριστικό του τύπου CANDU είναι η χρησιμοποίηση *αυλών πίεσεως*, δηλαδή συστήματος ομοαξονικών αυλών, μέσα στους οποίους τοποθετούνται οι ράβδοι πυρηνικού καυσίμου, με τρόπο ώστε να επιτρέπεται η κυκλοφορία του ψυκτικού μέσου (του βαρέος ύδατος μέσα από τους αυλούς και γύρω από τις ράβδους πυρηνικού καυσίμου (Διάγραμμα 8).

Το στοιχείο του πυρηνικού καυσίμου στους CANDU μοιάζει με αυτό των LWR: Το πυρηνικό καύσιμο είναι υπό μορφή μικρών κυλίνδρων (pellets) διοξειδίου του ουρανίου και είναι τοποθετημένο μέσα σε σωλήνες κράματος ζirkονίου, αεροστεγώς κλεισμένους (cladding material). Όμως, η δομή του πυρηνικού καυσίμου στον CANDU είναι απλούστερη και επιτρέπει την ανατροφοδοσία του καυσίμου χωρίς διακοπή της λειτουργίας του αντιδραστήρα.

Εκτός αυτού, υπάρχει και μία άλλη σημαντική επίπτωση στα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του CANDU: απαιτούνται λιγότερες ποσότητες υλικών για απορρόφηση νετρονίων κατά την λειτουργία του αντιδραστήρα, γιατί δεν συμβαίνουν απότομες μεταβολές στο σχάσιμο υλικό και στα δηλητήρια της σχάσης κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του καυσίμου. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε υψηλότερο

⁹ Βαρύ νερό: Μία μορφή νερού, όπου τη θέση των υδρογόνων κατέχουν άτομα δευτερίου.

συντελεστή μετατροπής (conversion ratio, CR) και – υπό κάποιες συνθήκες, όπως αναφέρεται παρακάτω – σε καλύτερη χρήση της πρώτης ύλης.

Η ολική απόδοση στους CANDU είναι της τάξεως του 29% (overall thermal efficiency), χαμηλή σε σχέση με όλους τους εμπορικά διαθέσιμους αντιδραστήρες σήμερα [Nero, 1979].

Το πρωτεύον κύκλωμα του ψυκτικού μέσου είναι κλειστό και προσομοιάζει σε αυτό των PWR, με τη διαφορά της ύπαρξης των αυλών πίεσεως. Πρέπει να σημειωθεί ότι, η χρήση των αυλών πίεσεως, αντί δοχείου πίεσεως, μειώνει σημαντικά το κόστος κατασκευής του αντιδραστήρα. Το βαρύ νερό που χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσον (πίεση 1500 psi-10 MPa, θερμοκρασία 310 °C), δεν έρχεται σε επαφή με το βαρύ νερό που χρησιμοποιείται ως επιβραδυντής και το οποίο ευρίσκεται σε πίεση κοντά στην ατμοσφαιρική.

Στους σύγχρονους τύπους CANDU, το βαρύ νερό ευρίσκεται υπό πίεση με συμπίεστη, για να μην επιτρέπεται ο βρασμός του, ενώ υπάρχουν τέσσερα ζευγάρια ατμογεννήτριες και αντλίες, ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ροή. Το πρωτεύον ψυκτικό μέσον από την πρωτεύουσα αντλία διέρχεται μέσα από τον αντιδραστήρα και η θερμότητα που απάγεται προκαλεί την εξαέρωση ελαφρού ύδατος στην γεννήτρια ατμού.

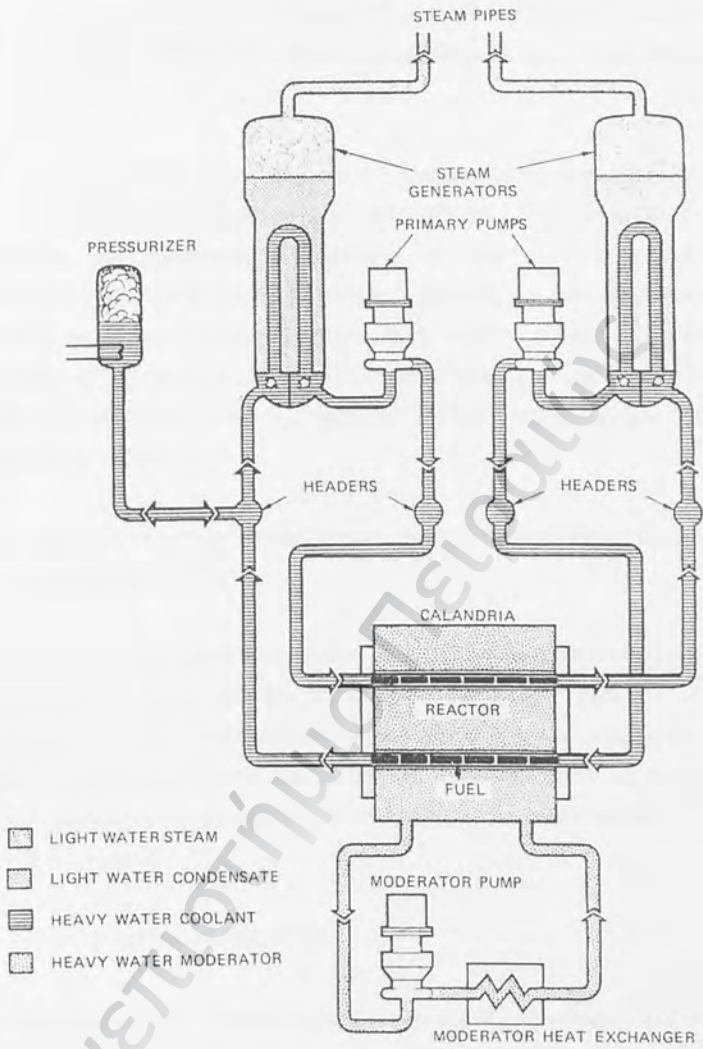
Οι CANDU διαθέτουν ECC systems για αποφυγή ατυχημάτων απώλειας ψυκτικού, ενώ το σύστημα πολλών αυλών πίεσεως (pressure tubes) που διαθέτουν, αποτελούν πλεονέκτημα από πλευράς ασφάλειας, εφόσον αποκλείεται ρήξη ενός μεγάλου δοχείου πίεσεως. Πλεονέκτημα είναι επίσης, η ύπαρξη εξωτερικού περιβλήματος από ενισχυμένο σκυρόδεμα, ενώ σε μερικές εκδοχές, το εσωτερικό ευρίσκεται υπό αρνητική πίεση σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον.

Εκτός των παραπάνω και εκτός του γεγονότος ότι στους CANDU επιτρέπεται η ανατροφοδοσία του καυσίμου χωρίς διακοπή της λειτουργίας του, οι CANDU παρουσιάζουν και δύο άλλα βασικά πλεονεκτήματα: έχουν χαμηλό κόστος πυρηνικού καυσίμου, λόγω της απουσίας εμπλουτισμού, καθώς και χαμηλό κόστος κατασκευής.

⁹ Ο Καναδάς, επειδή διαθέτει πλούσια κοιτάσματα φυσικού ουρανίου και επειδή δεν ήθελε να εμπλακεί στην ακριβή και με εξαρτήσεις από ξένους προμηθευτές τεχνολογία του εμπλουτισμού, πρόωθησε τους αντιδραστήρες CANDU.

Όμως, παρουσιάζουν και τα εξής μειονεκτήματα:

- έχουν τους θετικούς συντελεστές θερμοκρασίας και ισχύος που παρουσιάζουν όλοι οι αντιδραστήρες βαρέος ύδατος, πράγμα που αποκλείει την “ενδογενή” ασφάλειά τους. Εάν, λόγω κάποιου τυχαίου γεγονότος, αυξηθεί κατά τι η ισχύς του συστήματος, η κατάσταση αυτή θα οδηγήσει αυτομάτως σε περαιτέρω αύξηση της ισχύος, οπότε είναι αναγκαίο να ληφθούν ταχύτατα δραστικά μέτρα, ώστε να επαναφερθεί το σύστημα υπό έλεγχο, και
- το κόστος λειτουργίας τους επιβαρύνεται από το κόστος του βαρέος ύδατος και το κόστος της συλλογής, καθαρισμού και αναβάθμισής του για επαναχρησιμοποίηση σαν απόθεμα.



Διάγραμμα 8: Σχηματικό διάγραμμα ροής σε μονάδα CANDU [Nero, 1979]

2.3.2. Αντιδραστήρες βαρέος-ελαφρού ύδατος (Heavy Water Light Water Reactors, HWLWR ή Steam Generating Heavy Water Reactors, SGHWR)

Είναι ο τύπος αντιδραστήρα, στον οποίο χρησιμοποιείται φυσικό ουράνιο ως πυρηνικό καύσιμο και ως επιβραδυντής και ψυκτικό μέσο, ελαφρύ νερό. Ο ατμός για την κίνηση του ατμοστρόβιλου παράγεται απ' ευθείας στον πυρήνα του αντιδραστήρα, μέσα στον οποίο επιτρέπεται ο βρασμός του ψυκτικού μέσου. Ο βρετανικός τύπος αντιδραστήρα βαρέος-ελαφρού ύδατος λέγεται αντιδραστήρας βαρέος ύδατος για την παραγωγή ατμού (Steam Generating Heavy Water Reactor, SGHWR). Στον τύπο αυτόν, ως πυρηνικό καύσιμο χρησιμοποιείται ελαφρά εμπλουτισμένο ουράνιο.

2.3.3. Αερίψυκτοι αντιδραστήρες βαρέος ύδατος (Heavy Water Gas-Cooled Reactors, HWGCR)

Ο τύπος αυτός είναι αερίψυκτος αντιδραστήρας (CO_2), στον οποίο ως επιβραδυντής χρησιμοποιείται το βαρύ νερό και ως πυρηνικό καύσιμο, το φυσικό ή ελαφρά εμπλουτισμένο ουράνιο. Αντιδραστήρες τέτοιου τύπου υπάρχουν στη Γαλλία, στη Γερμανία, στη Τσεχοσλοβακία και αλλού, αλλά δεν μπορούν να θεωρηθούν αποδοτικοί παρά μόνο σε μικρά μεγέθη (80-140 MW) και δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο εμπορικό ενδιαφέρον.

2.3.4. Συμπεράσματα για τους HWR

Οι αντιδραστήρες βαρέος ύδατος υπερτερούν έναντι αυτών με ελαφρύ νερό, στο ότι σχετικά λίγα νετρόνια χάνονται απορροφούμενα από τον επιβραδυντή. Σε συνδυασμό με τη δυνατότητα των CANDU να ανατροφοδοτούνται εν λειτουργία, παρουσιάζουν υψηλό συντελεστή μετατροπής (CR) που πλησιάζει το 0,75-0,80. Το γεγονός ότι η διαφορά (1-CR) είναι μόνον 0,2-0,25 σημαίνει ότι η λειτουργία ενός CANDU απαιτεί σημαντικά λιγότερη κατανάλωση καυσίμου σε σχέση με έναν LWR, για τον οποίο η διαφορά (1-CR) είναι περίπου 0,4. Όμως, το πλεονέκτημα αυτό αξιοποιείται μόνον υπό την προϋπόθεση ότι γίνεται ανακύκλωση των σχάσιμων υλικών του εξαντλημένου καυσίμου. Εάν δεν γίνεται ανακύκλωση του ανακτημένου σχάσιμου υλικού, η κατανάλωση του καυσίμου στον CANDU είναι παρόμοια με αυτή ενός LWR στον οποίο γίνεται ανακύκλωση.

Το καύσιμο στον CANDU είναι φυσικό ουράνιο με 0,7% περιεκτικότητα σε U_3O_8 . Το σχεδιαστικό burnup είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με τον LWR – περίπου 8000 MWd/Te. Το περιεχόμενο του καταναλωθέντος καυσίμου σε σχάσιμα υλικά είναι κατά 0,5 % παραπάνω, από το οποίο το ήμισυ είναι πλουτόνιο. Οι ανάγκες σε ουράνιο για έναν CANDU 1000 MWe είναι περίπου 4200 τόνοι U_3O_8 για όλο τη διάρκεια ζωής του, ενώ αυτές μπορούν να μειωθούν στο ήμισυ, εάν χρησιμοποιηθεί ανακτημένο πλουτόνιο. Πρέπει όμως να σημειωθεί από οικονομική άποψη, ότι εξαιτίας του κόστους της επανεπεξεργασίας των υλικών, μεγαλύτερο κίνητρο υπάρχει να ανακυκλωθεί σχάσιμο υλικό στους LWR παρά στους CANDU.

Συμπερασματικά, οι CANDU παρουσιάζουν και ένα ακόμα βασικό πλεονέκτημα σε σχέση με τους LWR: έχουν χαμηλότερο κόστος ζωής του πυρηνικού καυσίμου, παρότι χρειάζονται μεγάλες ποσότητες βαρέος νερού (0,4 Mg/MWe). Οι μεγάλες ποσότητες νερού απαιτούνται κυρίως στην αρχή της λειτουργίας του και επιβαρύνουν το αρχικό κόστος της εγκατάστασης, με αποτέλεσμα, τα δύο αυτά χαρακτηριστικά του CANDU να εξισορροπούνται τελικά.

2.4. Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες

Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες (breeders) καλούνται εκείνοι, στους οποίους ο ρυθμός παραγωγής νέων σχάσιμων πυρήνων με επώαση, είναι ίσος ή μεγαλύτερος από τον ρυθμό κατανώσεως σχάσιμων πυρήνων¹⁰ [Bodansky, 1996]. Σύμφωνα με το γλωσσάριο του NRC (DOE): «*αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες καλούνται εκείνοι, που παράγουν περισσότερο σχάσιμο υλικό από εκείνο που καταναλώνουν, ενώ ένα εύφορο υλικό, όπως το U-238, όταν βομβαρδίζεται με νετρόνια, μετατρέπεται σε σχάσιμο υλικό, όπως το Pu-239, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο*».

Σύμφωνα με το γλωσσάριο του Ινστιτούτου Ουρανίου (Βρετανία): «*αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων είναι οι αντιδραστήρες χωρίς επιβραδυντή, στους οποίους η αλυσωτή αντίδραση συντηρείται με νετρόνια υψηλών ταχυτήτων. Είναι σε θέση να μετατρέψουν το μη χρησιμοποιημένο ουράνιο (U-238) σε καύσιμο πλουτόνιο – αναπαραγωγή -, το οποίο σημαίνει ότι οι FBRs μπορεί να παίζουν σημαντικό ρόλο στο μέλλον, σαν μέσο για την επιμήκυνση των φυσικών αποθεμάτων ουρανίου*».

¹⁰ Breeder reactor (or Breeder): a reactor in which fissile material is produced by neutron capture reactions at a rate which equals or exceeds the rate at which fissile fuel is consumed.

Οι αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων χρησιμοποιούν τη διαθέσιμη ενέργεια από το φυσικό ουράνιο σε ποσοστό μόνον 2%. Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας παραμένει αναξιοποίητο στο απεμπλουτισμένο ουράνιο (depleted uranium). Οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες μπορούν να υπερβούν το μειονέκτημα αυτό με δύο τρόπους: 1) ανακυκλώνοντας το παραγόμενο σε θερμικούς αντιδραστήρες πλουτόνιο, και 2) μετατρέποντας το σχάσιμο U-238, που συνήθως συγκεντρώνεται στο απεμπλουτισμένο ουράνιο, σε σχάσιμο πλουτόνιο (είναι επίσης δυνατός, ένας αναπαραγωγικός κύκλος με μίγμα θορίου-ουρανίου) [IEA Report, 1998-99].

Το μεγάλο πλεονέκτημα των αναπαραγωγικών αντιδραστήρων έγκειται στο ότι χρησιμοποιούν άψογα το πυρηνικό καύσιμο: ενώ οι θερμικοί αντιδραστήρες χρησιμοποιούν το U-235 που αποτελεί μόνο το 0,711% του φυσικού ουρανίου, οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες χρησιμοποιούν U-238, πράγμα που πολλαπλασιάζει την ενέργεια που μπορεί να εξαχθεί από το καύσιμο κατά 70 περίπου φορές σε σχέση με τους θερμικούς αντιδραστήρες. Οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες πλεονεκτούν επίσης στο ότι δεν απαιτούν τον εμπλουτισμό του καυσίμου, εκτός από την φάση της εκκίνησης του αντιδραστήρα. Απαιτούν όμως, την επανεπεξεργασία του ακτινοβολημένου καυσίμου για την παραγωγή πλουτονίου [Cochran and Tsoufanidis, 1992].

Το πλήθος των σχάσιμων πυρήνων που παράγονται κατά μ.ό. ανά καταστρεφόμενο σχάσιμο πυρήνα, λόγω ραδιενεργού ενσωματώσεως ή σχάσεως, καλείται συνήθως σχέση επώσεως και ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$c = (n_{σχ.π.} - 1) \cdot F$$

όπου, $n_{σχ.π.}$ είναι το πλήθος των νετρονίων που εκλύονται κατά μ.ό. από σχάσεις ανά νετρόνιο που απορροφάται από σχάσιμο πυρήνα και F , είναι το ποσοστό του πλεονάσματος νετρονίων ($n_{σχ.π.} - 1$), που απορροφώνται από επώαστους πυρήνες

Όταν $c > 1$, έχουμε το φαινόμενο της αναπαραγωγής. Το φαινόμενο αυτό, κατά το οποίο δηλαδή, έχουμε δημιουργία νέων σχάσιμων πυρήνων – όπως Pu-239 και U-233, από σύλληψη νετρονίων από επώαστους πυρήνες (όπως, το U-238 και το Th-232) χαρακτηρίζεται ως επώαση ή αναπαραγωγή.

Σήμερα, μικρή εμπειρία υπάρχει από αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες. Το Παγκόσμιο Συμβούλιο Ενέργειας εκτιμάει ότι η ανάγκη για αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες θα είναι έντονη το 2030-2050 ανάλογα με τη ζήτηση ενέργειας και την

πορεία της πυρηνικής ενέργειας [IEA Report, 1998-99]. Υπάρχει επομένως χρόνος για να ωριμάσει και η σχετική τεχνολογία, εάν χρειασθεί. Οι υπό εξέλιξη τύποι αναπαραγωγικών αντιδραστήρων είναι οι εξής:

1. Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ψυχόμενοι με υγρό μέταλλο, ταχέων νετρονίων (Liquid Metal Fast Breeder Reactor, LMFBR)
2. Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ψυχόμενοι με αέριο, ταχέων νετρονίων (Gas Cooled Fast-breeder Reactor, GCFR)
3. Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες τετηγμένου άλατος (Molten Salt Breeder Reactor, MSBR)
4. Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (Light Water Breeder Reactor, LWBR)

Η χρήση των αναπαραγωγικών αντιδραστήρων προϋποθέτει και συνεπάγεται την επανεπεξεργασία του καυσίμου (Reprocessing) στο κύκλο ζωής του. Η επανεπεξεργασία του καυσίμου θεωρείται σήμερα τεχνολογικά δυνατή διαδικασία, δεν υπάρχουν όμως ακριβή στοιχεία για το κόστος που συνεπάγεται η διαδικασία αυτή, ούτε για την επιβάρυνση που θα έχει το κόστος των επιπλέον μέτρων ασφαλείας που επιβάλλονται από την επιμήκυνση των εργασιών στον κύκλο ζωής του καυσίμου (long-term fuel cycle operation) [IEA Report, 1998-99].

Η επανεπεξεργασία του καυσίμου όμως θεωρείται από περιβαλλοντική άποψη ως επιθυμητή διαδικασία, για τον κύριο λόγο ότι μέσω αυτής είναι δυνατόν να γίνει ασφαλέστερη διαχείριση των υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων (high-level nuclear waste).

Οι FBR αναμένεται να γίνουν εμπορικά διαθέσιμοι έως το 2030, και να επικρατήσουν λόγω της μεγάλης διαθεσιμότητάς τους σε παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, του υψηλού παράγοντα ικανότητάς τους και της αναμενόμενης οικονομικότητάς τους [Aizawa, 1998]. Όσον αφορά στην ασφάλειά τους, η εμπειρία από το ατύχημα διαρροής νατρίου στο δευτερεύον σύστημα μεταφοράς θερμότητας στον πρωτότυπο LMFBR Μονζι στην Ιαπωνία (Δεκέμβριος, 1995), κατέδειξε την αναγκαιότητα περαιτέρω μελέτης των συστημάτων ασφαλείας των αναπαραγωγικών αντιδραστήρων [Kaya, 1997]. Επίσης, ανοιχτό παραμένει το θέμα της κοινωνικής εμπιστοσύνης έναντι των FBR, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της βασικής τεχνολογίας του νατρίου, ως προϋπόθεση για την εμπορική αξιοποίηση των FBRs [Aizawa, 1998]. Σημαντικό πλεονέκτημα των FBRs είναι το γεγονός ότι μπορούν να «κάψουν» WPu,

Συμπερασματικά, αυτοί που αντιτίθενται στην εμπορική χρήση και διάδοση των αναπαραγωγικών αντιδραστήρων, προβάλλουν κυρίως ως λόγους, την αποφυγή εξάπλωσης πυρηνικών όπλων μέσω της παραγωγής Pu-239, καθώς και τρομοκρατικών ενεργειών και την μη διαπιστωμένη οικονομικότητά τους [Wilson, 1999]. Επίσης, δεν θεωρείται επείγουσα η ανάγκη ανακύκλωσης του ουρανίου, λόγω της ύπαρξης μεγάλων αποθεμάτων, αλλά και πτώσης στη ζήτηση της πυρηνικής ενέργειας [Bodansky, 1996].

2.4.1. Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων ψυχόμενοι με υγρό μέταλλο (Liquid Metal Fast Breeder Reactor, LMFBR)

Η λειτουργία του LMFBR βασίζεται στον “κύκλο” ουρανίου-πλουτωνίου¹¹: ο αντιδραστήρας τροφοδοτείται στην αρχή με U-235 και U-238, οπότε τα νεοπαραγόμενα με επώαση ισότοπα Pu-239 και Pu-241 αντικαθιστούν σταδιακά τους αρχικούς σχάσιμους πυρήνες. Στον τύπο αυτό, ο πυρήνας του αντιδραστήρα και ο μανδύας, περιέχουν μόνο το πυρηνικό καύσιμο και το ψυκτικό μέσο και όχι τον επιβραδυντή.

Ως ψυκτικό μέσο έχει επιλεγεί το νάτριο, γιατί η μείωση της ενεργείας σκεδαζομένου ελαστικά νετρονίου σε πυρήνα νατρίου είναι μικρή, όπως μικρή είναι και η πιθανότητα πραγματοποίησης μη ελαστικών σκεδάσεων. Επίσης, οι ιδιότητες του νατρίου, ως μέσου μεταφοράς θερμότητας είναι πολύ καλές, έτσι ώστε να επιτρέπεται η λειτουργία του αντιδραστήρα υπό υψηλή συχνότητα ισχύος και επομένως, επιτρέπεται μικρό μέγεθος πυρήνα. Το υψηλό σημείο ζέσεως του νατρίου (881 °C υπό ατμοσφαιρική πίεση) επιτρέπει επίσης τη λειτουργία του συστήματος σε υψηλές θερμοκρασίες και κατά συνέπεια, την παραγωγή ατμού υψηλής θερμοκρασίας και πίεσεως, με συνέπεια, την υψηλή απόδοση του σταθμού (συνήθως ~40%). Τέλος, το νάτριο δεν δρα διαβρωτικά πάνω στα υλικά της όλης κατασκευής, με τα οποία έρχεται σε επαφή. Τα μειονεκτήματα της χρήσης του νατρίου είναι:

¹¹ “Κύκλος” ουρανίου-πλουτωνίου: $^{238}\text{U} + n \xrightarrow{\gamma} ^{239}\text{U} \xrightarrow{\beta} ^{239}\text{Np} \xrightarrow{\beta} ^{239}\text{Pu}$
 “Κύκλος” θορίου-ουρανίου: $^{232}\text{Th} + n \xrightarrow{\gamma} ^{233}\text{Th} \xrightarrow{\beta} ^{233}\text{Pa} \xrightarrow{\beta} ^{233}\text{U}$

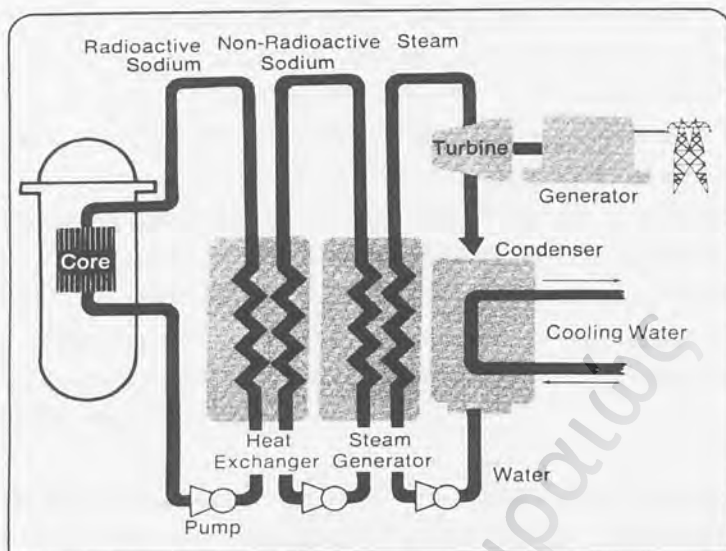
- έχει υψηλό σημείο πήξεως (98 °C υπό ατμοσφαιρική πίεση), κατά συνέπεια το όλο κύκλωμα του ψυκτικού πρέπει να θερμαίνεται συνεχώς, για να αποφευχθεί η στερεοποίηση
- αντιδρά εντόνως με το νερό, ακόμα και σε στερεά κατάσταση και
- απορροφά νετρόνια, ακόμα και ταχέα, σε μεγάλη έκταση, σχηματίζοντας το β, γ ραδιενεργό ισότοπο Na-24, χρόνου υποδιπλασιασμού 15 ωρών.

Για τους δύο τελευταίους λόγους αποφεύγεται η κυκλοφορία του ψυκτικού μέσω της γεννήτριας ατμού, γιατί εάν εξαιτίας κάποιας διαρροής ύδατος, έρθει σε επαφή το νερό με το ραδιενεργό νάτριο, η βλάβη που θα προκληθεί θα έχει ως επακόλουθο την διασπορά του ραδιενεργού νατρίου σε μεγάλη έκταση. Κατά συνέπεια, η μετάδοση της θερμότητας στο προς εξάτμιση νερό γίνεται σε δύο στάδια (Διάγραμμα 9): Το κύκλωμα του ψυκτικού του αντιδραστήρα χρησιμοποιείται ως πρωτεύον κύκλωμα εναλλάκτη θερμότητας, του οποίου το δευτερεύον, γεμάτο από νάτριο, αποτελεί το πρωτεύον ενός άλλου εναλλάκτη θερμότητας της γεννήτριας ατμού. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγεται η διασπορά ραδιενεργού νατρίου σε περίπτωση διαρροής ύδατος από το δευτερεύον της γεννήτριας ατμού προς το πρωτεύον, όπου κυκλοφορεί μη ραδιενεργό νάτριο. Διαρροή στον εναλλάκτη θερμότητας νατρίου-νατρίου δεν είναι πιθανή, επειδή οι πιέσεις και στα δύο κυκλώματα είναι χαμηλές. Ο LMFBR έχει συνήθως χρόνο διπλασιασμού¹² μικρότερο από 10 έτη, σχέση επώασης της τάξεως του 1,2 και αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης.

Στις ΗΠΑ, υπάρχουν δύο LMFBR σε πειραματική λειτουργία (1988): ο Experimental Breeder Reactor II, EBR-II στο Idaho και ο Fast Flux Test Facility (FFTF) στην πολιτεία της Ουάσινγκτον. Στην Ευρώπη, έχουν κατασκευασθεί μερικές μονάδες: στη Γαλλία, ο Phénix (prototype reactor) και οι μονάδες του Superphénix (demonstration plants) που έκλεισαν για οικονομικούς λόγους, καθώς και η μονάδα Beloyarsk στη Ρωσία. Επίσης υπάρχει ο αντιδραστήρας Monju στην Ιαπωνία¹³ (που έκλεισε λόγω τεχνικών προβλημάτων).

¹² Χρόνος διπλασιασμού είναι η χρονική διάρκεια από την έναρξη λειτουργίας του σταθμού, κατά την οποία η ολική ποσότητα του εξ επώασης παραγόμενου σχάσιμου υλικού γίνεται ίση με την αρχική ποσότητα σχάσιμου υλικού, με το οποίο τροφοδοτήθηκε ο αντιδραστήρας.

¹³ Monju FBR: prototype reactor, average fuel burnup 80000 MWd/t, three-loop cooling system, 280 MWe.



Διάγραμμα 9: Σχηματική αναπαράσταση LMFBR: ένας εναλλάκτης θερμότητας μεταφέρει τη θερμότητα από το υγρό νάτριο (ψυκτικό) σε ένα ενδιάμεσο κύκλωμα (intermediary loop), στο οποίο το νάτριο παράγει ατμό σε γεννήτρια ατμού. Ο ατμός αυτός κινεί τελικά την γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρισμού [Nero, 1979]

Η εν λειτουργία ικανότητα των αναπαραγωγικών αντιδραστήρων σήμερα είναι 2400 MWe, ενώ τα ακυρωμένα προγράμματα ανέρχονται συνολικά σε 2500 MWe. Οι γαλλικές και γιαπωνέζικες μονάδες απεδείχθησαν πολύ ασύμφωρες οικονομικά σε σύγκριση με τους συμβατικούς αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων. Πολλά από τα βασικά συστατικά τους μέρη (αντιδραστήρας, το σύστημα μεταφοράς θερμότητας και τα συστήματα ασφαλείας) είναι τελείως διαφορετικά από ό,τι στους εμπορικούς αντιδραστήρες, κατά συνέπεια δεν μπορούν να αξιοποιήσουν τον γνωστό μέχρι σήμερα σχεδιασμό και την συγκεντρωμένη εμπειρία. Οι τεχνικές δυνατότητες των αναπαραγωγικών αντιδραστήρων έχουν μερικώς καταδειχθεί, όμως δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για την εκτίμηση του κόστους και της τεχνικής συμπεριφοράς ώριμων μονάδων [IEA Report, 1998-99].

Σε ερευνητικό στάδιο ευρίσκονται επίσης, οι παρακάτω τύποι:

2.4.2. Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων ψυχόμενοι με αέριο (Gas Cooled Fast-breeder Reactor, GCFR)

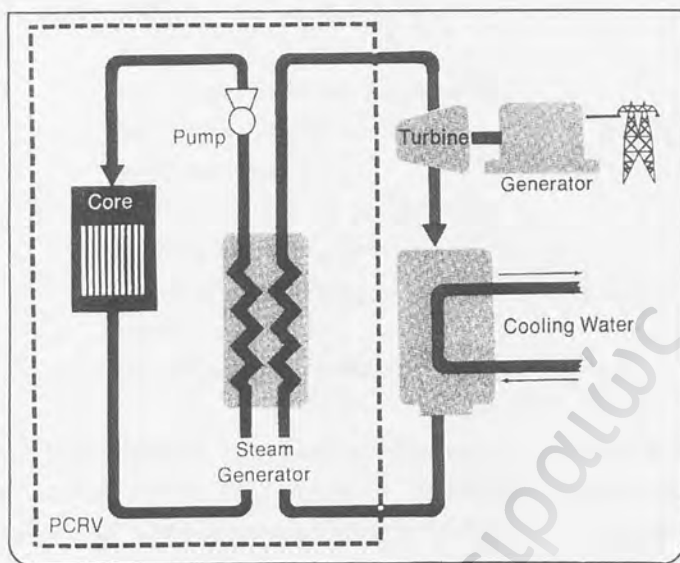
Ο αντιδραστήρας GCFR αποτελεί εξέλιξη του αερίονυκτου αντιδραστήρα υψηλής θερμοκρασίας (High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR). Ο πυρήνας του GCFR

αποτελείται από μεγάλο αριθμό λεπτών ράβδων πυρηνικού καυσίμου. Οι ράβδοι αυτές είναι σωλήνες ανοξείδωτου χάλυβα γεμάτοι με κυλινδρικούς UO_2 και PuO_2 , όπως και στον LMFBR. Ο μανδύας συγκροτείται από παρόμοιες ράβδους με κυλινδρικούς UO_2 (Διάγραμμα 10). Ως ψυκτικό μέσο χρησιμοποιείται το ήλιο, το οποίο εισέρχεται στον πυρήνα από πάνω σε θερμοκρασία 338 °C και πίεση 85 atm, ρέει προς τα κάτω μεταξύ των ράβδων πυρηνικού καυσίμου, θερμαίνεται μέχρι τους 610 °C και εξέρχεται από το κάτω τύμπανο δίπλα στη βάση του αντιδραστήρα. Από εκεί, διακλαδώνεται προς τέσσερις γεννήτριες ατμού και στη συνέχεια επιστρέφει με τη βοήθεια κυκλοφορητών ήλιου, στον πυρήνα. Στις γεννήτριες ατμού παράγεται ατμός θερμοκρασίας 524°C και πίεσεως 163 atm, ενώ η ολική απόδοση του σταθμού κυμαίνεται από 38%-39%.

Στα πλεονεκτήματα του GCFR συγκαταλέγονται τα εξής: Το ήλιο δεν αντιδρά σχεδόν καθόλου με τη μορφή του φάσματος των νετρονίων σχάσεως, πράγμα που έχει σαν αποτέλεσμα το φάσμα των νετρονίων στον GCFR να είναι σκληρότερο¹⁴ από ό,τι στον LMFBR. Αυτό σημαίνει ότι: α) η σχέση επώασης θα είναι μεγαλύτερη από του LMFBR, γιατί θα είναι μεγαλύτερη η μέση τιμή του μεγέθους η και β) ο χρόνος διπλασιασμού θα είναι αντίστοιχα, βραχύτερος.

Επίσης, ο τύπος GCFR υπερτερεί έναντι του LMFBR σε ό,τι αφορά τη μεγαλύτερη διαθεσιμότητα του σταθμού, που αποτελεί ένα σημαντικό οικονομικό κριτήριο. Το πλεονέκτημα αυτό οφείλεται στο ότι, η χρονική διάρκεια που ο σταθμός κλείνει για τακτική συντήρηση ή για αποκατάσταση βλαβών είναι συγκριτικά μικρότερο στον GCFR. Αυτό συμβαίνει, επειδή το ήλιο δεν καθίσταται ραδιενεργό, κατά συνέπεια οποιοδήποτε σημείο του κυκλώματος ψύξεως είναι επισκέψιμο αμέσως μετά τη διακοπή της λειτουργίας του σταθμού. Επειδή μάλιστα, το ήλιο είναι διαφανές αέριο, είναι δυνατή και η τηλεοπτική παρακολούθηση του εσωτερικού του αντιδραστήρα. Πιστεύεται ότι ο GCFR θα δώσει το χαμηλότερο κόστος κιλοβατώρας από κάθε άλλο τύπο διαθέσιμο εμπορικά μέχρι το τέλος του αιώνα.

¹⁴ Σε σκλήρυνση του ενεργειακού φάσματος των νετρονίων οδηγεί η εξασθένιση του μηχανισμού επιβραδύνσεως των νετρονίων, με αποτέλεσμα ένα μεγάλο ποσοστό τους (με ενέργεια στην ενδιάμεση περιοχή των 1 eV-10 keV, να απορροφάται από πυρήνες U-233.



Διάγραμμα 10: Σχηματική αναπαράσταση GCFR [Nero, 1979]

2.4.3. Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες τετηγμένου άλατος (Molten Salt Breeder Reactor, MSBR)

Ο MSBR (Διάγραμμα 11) είναι ένας τύπος αντιδραστήρα θερμικών νετρονίων, που λειτουργεί με βάση τον κύκλο του θορίου-ουρανίου-233 [Λεωνίδου, 1978]. Στον MSBR το πυρηνικό καύσιμο, το επωάσιμο υλικό και το ψυκτικό μέσο αποτελούν ένα ομογενές ρευστό μείγμα χαμηλού ιξώδους ευρισκόμενο σε θερμοκρασία υψηλότερη του περιβάλλοντος, το οποίο είναι γνωστό ως *μείγμα τετηγμένων αλάτων*. Η σύνθεση ενός τυπικού τέτοιου μείγματος παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8: Τυπική σύνθεση μείγματος τετηγμένων αλάτων [Λεωνίδου, 1978]

Άλας	Γραμμομόρια (%)
LiF	72
BeF ₂	16
ThF ₄	11,7
U ²³³ F ₄	0,3

Τα άλατα του φθορίου έχουν τις εξής ιδιότητες:

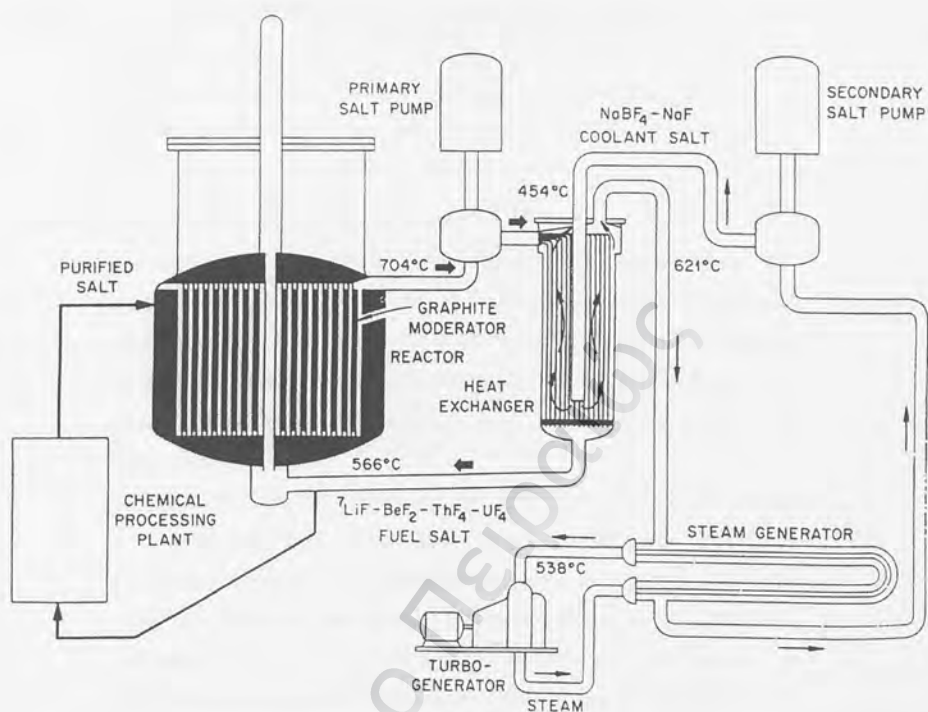
- Είναι από τις πιο σταθερές χημικές ενώσεις
- Ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες, η τάση των κεκορεσμένων ατμών τους είναι πολύ χαμηλή.
- Δεν καταστρέφονται από τις ακτινοβολίες
- Δεν αντιδρούν εντόνως με τον αέρα ή το νερό
- Δεν αντιδρούν χημικά με τα διάφορα υλικά της κατασκευής, ή τον γραφίτη και
- Εμφανίζουν πολύ καλές ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας

Ο πυρήνας του MSBR αποτελείται από στήλη γραφίτη, η οποία φέρει παράλληλους κυλινδρικούς αυλούς, μέσω των οποίων κυκλοφορεί το μείγμα των τετηγμένων αλάτων. Το σύστημα γραφίτη/τετηγμένων αλάτων που πληροί το δοχείο του αντιδραστήρα είναι κρίσιμο και η εκλυόμενη ενέργεια κατά τις σχάσεις απορροφάται απευθείας από το μείγμα και μεταφέρεται μέσω εναλλάκτη θερμότητας σε δευτερεύον ψυκτικό κύκλωμα. Ένα μέρος του μείγματος που επιστρέφει, διοχετεύεται στο *τμήμα χημικής επεξεργασίας*, και από εκεί, αποστέλλεται κατάλληλα επεξεργασμένο, στον αντιδραστήρα.

Στο *τμήμα χημικής επεξεργασίας* εκτελούνται οι εξής εργασίες:

- Απομακρύνεται το ισότοπο Pa-233
- Διαχωρίζεται το θυγατρικό ισότοπο U-233 από το μητρικό Pa-233
- Απομακρύνονται τα προϊόντα σχάσεως.

Η συνεχής απομάκρυνση των προϊόντων σχάσεως αποτελεί ένα από τα σπουδαιότερα πλεονεκτήματα του αντιδραστήρα τύπου MSBR, δεδομένου ότι στους περισσότερους τύπους αντιδραστήρα, πρέπει να διακοπεί η λειτουργία τους για να αντικατασταθούν τα χρησιμοποιημένα στοιχεία πυρηνικού καυσίμου.



Διάγραμμα 11: Σχηματική αναπαράσταση MSBR [Nero, 1979]

Πλεονεκτήματα επίσης του MSBR, είναι τα εξής:

- Λόγω της μεγάλης οικονομίας στον πληθυσμό των νετρονίων, η οποία πραγματοποιείται από την αποφυγή παρασιτικών απορροφήσεων, η απαιτούμενη ποσότητα σχάσιμο υλικού είναι συγκριτικά μικρή, σε σχέση με τους τύπους LWR και LMFBR (Πίνακας 9).
- Λόγω της χαμηλής τάσης των κεκορεσμένων ατμών των αλάτων του μείγματος, ο αντιδραστήρας λειτουργεί υπό πιέσεις λίγο μεγαλύτερες από την ατμοσφαιρική, πράγμα που σημαίνει από τη μία, ότι δεν απαιτείται κατασκευή ακριβού δοχείου πίεσεως και από την άλλη, ότι το σύστημα παρουσιάζει ικανοποιητικότερη αξιοπιστία.
- Επειδή είναι δυνατή η λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες, ο MSBR μπορεί να δώσει ατμό θερμοκρασίας 540 °C και πίεσεως 240 atm, με ολικό βαθμό απόδοσης του σταθμού περίπου 44%.

Πίνακας 9: Ποσότητα σχάσιμου υλικού ανά τύπο αντιδραστήρα [Λεωνίδου, 1978]

Τύπος αντιδραστήρα	Ποσότητα σχάσιμου υλικού σε kg/MWe
MSBR	1,0-1,2
LWR	~3
LMFBR	~5

Τα μειονεκτήματα του MSBR είναι τα παρακάτω:

- Το μέρος του μείγματος που ρέει έξω από τον αντιδραστήρα, στις σωληνώσεις και τον εναλλάκτη θερμότητας, φέρει τους πρόδρομους πυρήνες, οι οποίοι αποδίδουν τα καθυστερημένα νετρόνια. Τα νετρόνια αυτά, ενεργοποιούν την όλη κατασκευή του κυκλώματος ψύξεως: έτσι, γίνεται προβληματική η συντήρηση ή η αποκατάσταση βλαβών στα διάφορα τμήματά της.
- Η σχέση επωάσεως του MSBR έχει τιμή στην περιοχή 1,05-1,07, η οποία είναι πολύ μικρότερη από ό,τι στους τύπους LMFR και GCFR. Κατά συνέπεια, ο χρόνος διπλασιασμού είναι μεγάλος (της τάξεως των 13-20 ετών) και δεδομένου ότι ο χρόνος διπλασιασμού της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος είναι της τάξεως των 10 ετών, είναι φανερό ότι, δεν μπορεί κανείς να βασιστεί μόνον στον MSBR για την ηλεκτροπαραγωγή.

2.4.4. Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (Light Water Breeder Reactor, LWBR)

Ο LWBR είναι αναπαραγωγικός αντιδραστήρας, στον οποίο χρησιμοποιείται φυσικό νερό, ως επιβραδυντής και ψυκτικό μέσο, παρ' ότι το νερό απορροφά έντονα θερμικά νετρόνια, γιατί ο αντιδραστήρας σχεδιάζεται έτσι ώστε να ελέγχονται οι απώλειες νετρονίων. Η λειτουργία του LWBR βασίζεται στη μετατροπή του θορίου-232 σε ουράνιο-233. Ο πυρήνας συγκροτείται από εξαγωνικές κυψελίδες, των οποίων η εσωτερική περιοχή, που περιέχει ThO_2 και U^{233}O_2 (0-6% κ.β.), είναι κινητή, ενώ η εξωτερική περιοχή είναι σταθερή και περιέχει επίσης, ThO_2 και U^{233}O_2 (0-3% κ.β.) και καλείται *μανδύας της κυψελίδας*. Τα διοξειδία του θορίου και του ουρανίου είναι τοποθετημένα στον πυρήνα υπό μορφή κυλινδρικών μέσα σε σωλίνες, συγκροτώντας έτσι, τις ράβδους πυρηνικού καυσίμου. Ο έλεγχος του αντιδραστήρα επιτυγχάνεται με τη μετακίνηση των κινητών εσωτερικών περιοχών των κυψελίδων μέσα ή έξω από τους σταθερούς μανδύες και με τον τρόπο αυτό ελέγχονται και οι απώλειες νετρονίων από τον πυρήνα, έτσι, επιτυγχάνεται σταθερή κατάσταση στο σύστημα.

Το ψυκτικό μέσο (νερό) κυκλοφορεί μέσα στον πυρήνα, μεταξύ των ράβδων πυρηνικού καυσίμου και του χώρου που δημιουργείται μεταξύ των κινητών και σταθερών τμημάτων των κυψελίδων. Η χρήση συνήθων ράβδων αποκλείεται, γιατί θα απορροφούσαν νετρόνια και η παρουσία τους στον πυρήνα θα απέκλειε το φαινόμενο της αναπαραγωγής. Μειονεκτήματα του LWBR είναι:

- Η σχέση επωάσεως – παρά τις προσπάθειες – έχει μικρή τιμή, γεγονός που αποκλείει τη λειτουργία του LWBR με σκοπό την παραγωγή U-233 ως πυρηνικού καυσίμου για άλλο αντιδραστήρα ίδιου τύπου. Κατά συνέπεια, οι LWBR προορίζονται να χρησιμοποιηθούν μόνο για την εκμετάλλευση των τεράστιων αποθεμάτων θορίου, μετατρέποντας τόση ποσότητα Th σε U-233, όση χρειάζεται για να αντικατασταθεί το καταναλισκόμενο U-233 και να αντιμετωπιστούν οι απώλειές του κατά την επεξεργασία ανακτήσεώς του από τους χρησιμοποιημένους κυλινδρικούς πυρηνικού καυσίμου.

Παρ' όλα αυτά, η τεχνολογία του LWBR παρουσιάζει ενδιαφέρον και προοπτικές για το μέλλον. Έχουν μελετηθεί δυνατότητες χρησιμοποίησης του πυρήνα του LWBR σε παλιότερους τύπους, με σκοπό να αξιοποιηθούν οι τεράστιες ποσότητες θορίου που υπάρχουν στη φύση, αντί να καταναλίσκεται το σχεδόν σπάνιο ισότοπο U-235. Πολλοί πιστεύουν ότι, η χρήση του θορίου θα ανοίξει νέες μελλοντικές δυνατότητες στη πυρηνική βιομηχανία.

3. Σχολιασμός τύπων αντιδραστήρων

Υπάρχουν έξι τύποι αντιδραστήρων που είναι δραστήριοι εμπορικά: Οι PWR, οι BWR, οι PHWR (CANDU), οι GCR και οι ανατολικού σχεδιασμού RBMK και WWER 230¹⁵ [Bodansky, 1996, The Uranium Institute, 2000]. Οι αντιδραστήρες τύπου RBMK και WWER, λειτουργούν σε Ρωσία, Ουκρανία, Δημ. Τσεχίας, Βουλγαρία, κλπ [Thomas, 1999]. Σήμερα, οι περισσότεροι αντιδραστήρες που υπάρχουν εν λειτουργία (Πίνακας 10) είναι ψυχόμενοι με νερό-LWRs: PWRs (Γαλλία, Γερμανία, Ρωσία, ΗΠΑ) και BWRs (Γερμανία, Ιαπωνία, ΗΠΑ). Δεν είναι σαφές εάν αυτό συμβαίνει λόγω των τεχνικών ή των οικονομικών πλεονεκτημάτων που διαθέτουν οι τύποι αυτοί ή για ιστορικούς ή/και εμπορικούς λόγους. Συγκριτικά

¹⁵ RBMK: light-water cooled-graphite moderated reactors, LGR (Chernobyl), WWER 230: the older pressurized-water reactor without containment.

μάλιστα, υπερτερούν οι PWR έναντι των BWRs [Bodansky, 1996]. Στον Πίνακα 11 παρατίθενται τα κύρια χαρακτηριστικά των βασικών τύπων αντιδραστήρων.

Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά των βασικών τύπων αντιδραστήρων (Πηγή: Cochran and Tsoulfanidis, 1992)

	BWR	PWR	HTGR	CANDU	LMFBR
MWe	1100	1100	330	508	1200
Efficiency (%)	33	33	39	30	40
Assembly Geometry	8x8 9x9	17x17	Hexagonal	Cylindrical	Hexagonal array
Assembly length (m)	3,8	3,70	0,78	0,50	1
No. of assemblies	590	180	1482 (6 per column)	4680 (12 per channel)	360
Core height (m)	3,8	3,7	4,75	5,95	1
Mass of fuel/assembly (kg)	270	600	22	37	80
Total mass of fuel in core (kg)	138,000	90,000-100,000	²³⁵ U+ ²³² Th ^a 773+16,000	105,000	29,000
Burnup (MWd/MTU)	30,000	30,000	100,000	8,000	100,000
Fuel replaced per year	1/4	1/3	1/6	Continuous	Varied
Enrichment (%)	1,8	2,8	93	0,711	
Power density (kW/ft)	54	100	8	12	280
Linear Heat Rate (kW/m)	19	17	8	26	29

^a Initial Loading

Στο ερώτημα, ποιος τύπος αντιδραστήρα υπερτερεί, δεν είναι εύκολο να δοθεί απάντηση από τεχνική άποψη: όλοι οι τύποι αντιδραστήρα έχουν προβλήματα – με το ένα ή τον άλλο τρόπο [Pool, 1987]. Εάν χρησιμοποιείται μη εμπλουτισμένο ουράνιο ως καύσιμο, υπάρχουν πρακτικά μόνο δύο επιλογές επιβραδυντή (moderator): ο γραφίτης ή το βαρύ νερό. Και οι δύο εκδοχές έχουν τα μειονεκτήματά τους. Ο γραφίτης δεν είναι ιδιαίτερα καλός επιβραδυντής κατά συνέπεια ο πυρήνας πρέπει να είναι πολύ μεγάλος για να αντισταθμιστεί η αδυναμία αυτή. Όμως, η ύπαρξη μεγάλου πυρήνα θέτει όρια και για άλλες συνιστώσες κατά τον σχεδιασμό, ιδιαίτερα όσον αφορά στην ασφάλεια. Το βαρύ νερό επίσης, είναι μεν πολύ καλύτερος επιβραδυντής, αλλά παράγεται από θαλάσσιο νερό με μία πολύ ακριβή και χρονοβόρα διαδικασία. Από την άλλη, εάν ως καύσιμο είναι διαθέσιμο εμπλουτισμένο ουράνιο, οι επιλογές επιβραδυντή είναι πάρα πολλές. Με ένα μεγαλύτερο ποσοστό του ευκόλως σχάσιμου

U-235 στον πυρήνα, κάθε παραγόμενο νετρόνιο έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να σχάσει ένα άτομο U-235 και κατά συνέπεια, η αποτελεσματικότητα του επιβραδυντή καθίσταται λιγότερο κρίσιμη. Εάν – για παράδειγμα – το καύσιμο του ουρανίου περιέχει πάνω από περίπου 1% U-235, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν επιβραδυντής το νερό (ή αλλιώς «ελαφρύ» νερό). Το νερό δεν μπορεί όμως να λειτουργήσει σαν επιβραδυντής σε αντιδραστήρες φυσικού ουρανίου, γιατί απορροφά νετρόνια, τουλάχιστον τόσα, όσα χρειάζονται για να μην συντηρείται η αλυσωτή αντίδραση [Pool, 1987].

Το ουράνιο μπορεί να εμπλουτισθεί από 1-2% έως και σχεδόν 100% και η δυνατότητα αυτή δίνει στους σχεδιαστές αντιδραστήρων άπειρους τρόπους να συνδυάσουν το καύσιμο με τον επιβραδυντή και το ψυκτικό μέσον. Υψηλός εμπλουτισμός ουρανίου δίνει - για παράδειγμα - τη δυνατότητα σχετικά μικρού αντιδραστήρα, εφόσον μικρότερος όγκος είναι απαραίτητος για να συντηρηθεί η αλυσωτή αντίδραση.

Ελαφρά εμπλουτισμένο ουράνιο χρησιμοποιείται μερικές φορές σε αντιδραστήρες γραφίτη ή βαρέος ύδατος, για να βελτιώσει την απόδοσή τους. Τέλος, εμπλουτισμένο ουράνιο επιτρέπει και σε πιο «εξωτικά» υλικά - όπως τα υγρά μέταλλα - να λειτουργήσουν σαν επιβραδυντές και ψυκτικά. Και ακόμα, με υψηλά εμπλουτισμένο ουράνιο, μπορεί να μην χρησιμοποιηθεί και καθόλου επιβραδυντής [Pool, 1987].

Παρά την ευελιξία που προσφέρει το εμπλουτισμένο ουράνιο, πρέπει να παρατηρηθεί ότι, τα ατομικά όπλα και όχι η ηλεκτροπαραγωγή, είναι η βασική αιτία για την ανάπτυξη της τεχνολογίας εμπλουτισμού του ουρανίου: Ο Καναδάς, που είναι για παράδειγμα μία χώρα που δεν ενδιαφέρθηκε ποτέ για ατομικά όπλα, αλλά χρησιμοποιεί πυρηνική ενέργεια για παραγωγή ηλεκτρισμού, έχει αντιδραστήρες που έχουν καύσιμο φυσικό ουράνιο, ψύχονται με ελαφρύ νερό και επιβραδύνονται με βαρύ νερό (HWR's).

Η Βρετανία, παρ' ότι έχει πυρηνικά όπλα, επέλεξε να αποφύγει την δυσκολία και το κόστος του εμπλουτισμού του ουρανίου και εγκατέστησε αντιδραστήρες με γραφίτη ως επιβραδυντή και ως ψυκτικό, αέριο υπό πίεση. Τον ίδιο δρόμο ακολούθησε και η Γαλλία (με τους PWRs) και κατά συνέπεια, οι δύο αυτές χώρες μπορούν να παράγουν τόσο ηλεκτρική ενέργεια, όσο και WPu [Pool, 1987]. Από την αρχή και ιδίως μετά το Σχέδιο Μανχάταν (The Manhattan Project¹⁶), η πυρηνική βιομηχανία των ΗΠΑ

¹⁶ The Manhattan Project: το όνομα του προγράμματος για την ανάπτυξη της βόμβας ουρανίου στις ΗΠΑ, 1941. Σε αυτό, συμμετείχε και ο R. Oppenheimer. Το Σχέδιο Μανχάταν και η καταστροφή στη

επέλεξε τους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (LWRs) με εμπλουτισμένο ουράνιο και γι' αυτό αυτός ο τύπος αντιδραστήρα – και κατά συνέπεια, καυσίμου - επεκράτησε στην αρχή (με εξαίρεση τον Καναδά).

Στους LWR, το υδρογόνο του νερού μπορεί να απορροφήσει νετρόνια και να σχηματίζει δευτέριο, πράγμα που οδηγεί σε απώλεια νετρονίων στο σύστημα. Η πιθανότητα αυτή είναι πολύ μεγάλη, γι' αυτό δεν επιτρέπεται η χρήση του φυσικού ουρανίου στους LWR, παρά μόνο του εμπλουτισμένου ουρανίου (από το ποσοστό του 0,7% σε U-235 που περιέχει το φυσικό ουράνιο μέχρι σχεδόν 3%) και όπως αναφέρθηκε, ο εμπλουτισμός είναι δύσκολη, πολυέξοδη και ενεργοβόρα διαδικασία.

Οι δύο τύποι των LWR (PWR και BWR) παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές: Το μέσο burnup του καυσίμου είναι περίπου 40-50 GWd/tU για τους PWRs και 30-40 GWd/tU για τους BWRs, σε όλες τις χώρες [Nechaev, 1989]. Τα συστήματα μεταφοράς θερμότητας διαφέρουν σημαντικά. Ο τύπος BWR είναι σχεδιαστικά πιο απλός από τον PWR, γιατί σε αυτόν, ο ατμός παράγεται μέσα στο δοχείο του αντιδραστήρα και στη συνέχεια κινεί τις γεννήτριες, ενώ στον PWR, το ψυκτικό ευρίσκεται υπό υψηλή πίεση, ώστε να μην συμβεί βρασμός, ενώ το πρωτεύον ψυκτικό σύστημα χρησιμοποιείται για να μεταφέρει τον ατμό σε ένα δεύτερο ψυκτικό σύστημα, το οποίο οδηγεί στην ηλεκτρογεννήτρια.

Στους αντιδραστήρες που χρησιμοποιούν βαρύ νερό σαν επιβραδυντή και σαν ψυκτικό (CANDU), έχουμε λιγότερη απώλεια νετρονίων σε σχέση με τους LWR, και επομένως, απαιτείται μικρότερη ποσότητα σχάσιμου υλικού για να επιτευχθεί κρισιμότητα (υπάρχει λιγότερο υλικό που απορροφά νετρόνια), ενώ το σχάσιμο ποσοστό του φυσικού ουρανίου είναι υψηλό. Στους CANDU, τα συστήματα του επιβραδυντή και του ψυκτικού είναι ξεχωριστά. Ο επιβραδυντής γεμίζει ένα μεγάλο δοχείο χαμηλής πίεσης, μέσα από το οποίο σχηματίζονται ένας μεγάλος αριθμός μεμονωμένων καναλιών καυσίμου, που είναι ψυχόμενα και υπό πίεση.

Ο τύπος CANDU είναι σχεδιαστικά τελείως διαφορετικός από τους LWR. Το βαρύ νερό, θερμασμένο στα υπό πίεση κανάλια, περνάει από τις γεννήτριες ατμού, παράγοντας συνηθισμένο ατμό για τις ηλεκτρογεννήτριες. Ο τύπος CANDU δεν απαιτεί εμπλουτισμένο ουράνιο ως καύσιμο. Επίσης, το ποσοστό των σχάσιμων

Χιροσίμα και το Ναγκασάκι αποτέλεσαν τον καθοριστικό παράγοντα που συνέδεσε στη συνείδηση των ανθρώπων την ατομική ενέργεια με την ολοκληρωτική καταστροφή και ήταν η αρχή της αρνητικής ψυχολογικής κληρονομιάς της πυρηνικής ενέργειας.

U-235 στον πυρήνα, κάθε παραγόμενο νετρόνιο έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να σχάσει ένα άτομο U-235 και κατά συνέπεια, η αποτελεσματικότητα του επιβραδυντή καθίσταται λιγότερο κρίσιμη. Εάν – για παράδειγμα – το καύσιμο του ουρανίου περιέχει πάνω από περίπου 1% U-235, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν επιβραδυντής το νερό (ή αλλιώς «ελαφρύ» νερό). Το νερό δεν μπορεί όμως να λειτουργήσει σαν επιβραδυντής σε αντιδραστήρες φυσικού ουρανίου, γιατί απορροφά νετρόνια, τουλάχιστον τόσα, όσα χρειάζονται για να μην συντηρείται η αλυσωτή αντίδραση [Pool, 1987].

Το ουράνιο μπορεί να εμπλουτισθεί από 1-2% έως και σχεδόν 100% και η δυνατότητα αυτή δίνει στους σχεδιαστές αντιδραστήρων άπειρους τρόπους να συνδυάσουν το καύσιμο με τον επιβραδυντή και το ψυκτικό μέσον. Υψηλός εμπλουτισμός ουρανίου δίνει - για παράδειγμα - τη δυνατότητα σχετικά μικρού αντιδραστήρα, εφόσον μικρότερος όγκος είναι απαραίτητος για να συντηρηθεί η αλυσωτή αντίδραση.

Ελαφρά εμπλουτισμένο ουράνιο χρησιμοποιείται μερικές φορές σε αντιδραστήρες γραφίτη ή βαρέος ύδατος, για να βελτιώσει την απόδοσή τους. Τέλος, εμπλουτισμένο ουράνιο επιτρέπει και σε πιο «εξωτικά» υλικά - όπως τα υγρά μέταλλα - να λειτουργήσουν σαν επιβραδυντές και ψυκτικά. Και ακόμα, με υψηλά εμπλουτισμένο ουράνιο, μπορεί να μην χρησιμοποιηθεί και καθόλου επιβραδυντής [Pool, 1987].

Παρά την ευελιξία που προσφέρει το εμπλουτισμένο ουράνιο, πρέπει να παρατηρηθεί ότι, τα ατομικά όπλα και όχι η ηλεκτροπαραγωγή, είναι η βασική αιτία για την ανάπτυξη της τεχνολογίας εμπλουτισμού του ουρανίου: Ο Καναδάς, που είναι για παράδειγμα μία χώρα που δεν ενδιαφέρθηκε ποτέ για ατομικά όπλα, αλλά χρησιμοποιεί πυρηνική ενέργεια για παραγωγή ηλεκτρισμού, έχει αντιδραστήρες που έχουν καύσιμο φυσικό ουράνιο, ψύχονται με ελαφρύ νερό και επιβραδύνονται με βαρύ νερό (HWR's).

Η Βρετανία, παρ' ότι έχει πυρηνικά όπλα, επέλεξε να αποφύγει την δυσκολία και το κόστος του εμπλουτισμού του ουρανίου και εγκατέστησε αντιδραστήρες με γραφίτη ως επιβραδυντή και ως ψυκτικό, αέριο υπό πίεση. Τον ίδιο δρόμο ακολούθησε και η Γαλλία (με τους PWRs) και κατά συνέπεια, οι δύο αυτές χώρες μπορούν να παράγουν τόσο ηλεκτρική ενέργεια, όσο και WPu [Pool, 1987]. Από την αρχή και ιδίως μετά το Σχέδιο Μανχάταν (The Manhattan Project¹⁶), η πυρηνική βιομηχανία των ΗΠΑ

¹⁶ The Manhattan Project: το όνομα του προγράμματος για την ανάπτυξη της βόμβας ουρανίου στις ΗΠΑ, 1941. Σε αυτό, συμμετείχε και ο R. Oppenheimer. Το Σχέδιο Μανχάταν και η καταστροφή στη

στοιχείων στο ακτινοβολημένο ουράνιο είναι πολύ μικρό, ώστε θεωρείται σχεδόν αδύνατον να ανακτηθεί από αυτό, ουράνιο ή πλουτόνιο.

Το καύσιμο που καταναλώνεται για την τροφοδοσία του CANDU σε όλη τη ζωή του, είναι συγκρίσιμο με το αντίστοιχο των LWR, εφόσον αυτοί χρησιμοποιούν ανακτημένο ουράνιο και πλουτόνιο. Όμως, η θερμική απόδοση στους CANDU (το κλάσμα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς την θερμική) είναι μικρότερη (28-30%) σε σχέση με τους LWR (32-34%) [Nero, 1979].

Ο τύπος HTGR διαφέρει σχεδιαστικά από τους αναφερθέντες τύπους, ως προς τον σχεδιασμό του στοιχείου του πυρηνικού καυσίμου: εδώ υπάρχει ένας πυρήνας που αποτελείται από σταθερά στοιχεία άνθρακα, των οποίων μικρές περιοχές περιέχουν στοιχεία καυσίμου επικαλυμμένα με σκληρό κεραμικό. Ο άνθρακας επιβραδύνει τα νετρόνια, ενώ ο πυρήνας ψύχεται με ήλιο, το οποίο ρέει μέσα από τα στοιχεία του άνθρακα. Το θερμασμένο ήλιο ανεβάζει τον ατμό που κινεί τις ηλεκτρογεννήτριες, όπως και στους τύπους των αντιδραστήρων με νερό, ενώ οι αντλίες ψύξεως εμπεριέχονται όλες μέσα σε ένα και μοναδικό δοχείο από σκυρόδεμα, πράγμα που δίνει τελικά, μία τελείως διαφορετική εικόνα στον αντιδραστήρα [Nero, 1979].

Ο τύπος HTGR διαφέρει επίσης και ως προς το καύσιμο: ως “εύφορο” υλικό (fertile material) χρησιμοποιείται το θόριο (Th-232), αντί του ουρανίου (U-238). Το ουράνιο, με το οποίο τροφοδοτείται ο αντιδραστήρας, είναι εμπλουτισμένο σε υψηλό ποσοστό σε U-235 (93%). Το παραγόμενο από απορρόφηση νετρονίων U-233 στα στοιχεία του θορίου, ανακυκλώνεται στον αντιδραστήρα, αφού γίνει επανεπεξεργασία του σε άλλες εγκαταστάσεις (το πλουτόνιο που παράγεται ανακτάται από τα αποθηκευμένα απόβλητα). Πρέπει να σημειωθεί ότι, το καύσιμο που καταναλώνεται για την τροφοδοσία του HTGR σε όλη τη ζωή του, είναι μικρότερο σε σχέση με όλους τους προαναφερθέντες τύπους αντιδραστήρων. Αυτό δε, οφείλεται σε σημαντικό βαθμό, στην μεγάλη θερμική απόδοση που παρουσιάζουν οι HTGR: για κάθε ποσότητα θερμότητας που παράγεται ανά τόνο ουρανίου, ο HTGR παράγει περισσότερο ηλεκτρισμό [Nero, 1979].

Και οι τέσσερις προαναφερθέντες τύποι αντιδραστήρων – PWR, BWR, CANDU, HTGR – εξαρτώνται από το U-235 για την αρχική τους τροφοδοσία, ενώ το ποσοστό εμπλουτισμού του ουρανίου διαφέρει σημαντικά. Παρόλα αυτά, σε όλους τους τύπους, το ουράνιο ευρίσκεται σε κάποια κεραμική δομή ως οξειδίο (UO₂) ή - στον HTGR - ως καρβίδιο. Η χρήση του διοξειδίου του ουρανίου, αντί του μεταλλικού

ουρανίου, μειώνει την πυκνότητα των ατόμων του ουρανίου στο καύσιμο και κατά συνέπεια, μειώνει την θερμική αγωγιμότητα του καυσίμου, τα οποία αποτελούν – και τα δύο - μειονέκτημα για τους αντιδραστήρες.

Τα κεραμικά σε μορφή διοξειδίου υπερέχουν ως προς την αντοχή τους έναντι της ακτινοβολίας και της χημικής διάβρωσης. Επίσης, το διοξείδιο κατακρατά ένα σημαντικό ποσοστό των αερίων προϊόντων της σχάσεως, τα οποία σε κάποιο άλλο περιβάλλον θα διέφευγαν ευκολότερα. Το UO_2 έχει επίσης, υψηλό σημείο τήξεως (2800 °C), πράγμα που επιτρέπει τη λειτουργία του αντιδραστήρα σε υψηλές θερμοκρασίες, και την αποκατάσταση κατά κάποιον τρόπο, του μειονεκτήματος της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας [Nero, 1979].

Τα άλλα σημαντικά πυρηνικά υλικά με ενδεχόμενη χρήση ως καύσιμα στους εμπορικούς αντιδραστήρες που αναφέρθηκαν – το πλουτόνιο και το θόριο – μπορούν να ευρισκονται επίσης ως διοξειδία και καρβίδια. Όμως, όσον αφορά προηγμένους τύπους των αντιδραστήρων αυτών, τα πυρηνικά αυτά καύσιμα μπορούν να ευρισκονται και σε άλλες χημικές μορφές.

	PWR		VVER		BWR		PHWR		AGR		Magnox		RBMK		FBR		Other		
	Units	MWe	Units	MWe	Units	MWe	Units	MWe	Units	MWe	Units	MWe	Units	MWe	Units	MWe	Units	MWe	Units
Argentina	0	0	0	0	0	0	2	1.005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Armenia	0	0	1	408	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Belgium	7	5.836	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Brazil	1	657	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bulgaria	0	0	6	3.760	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Canada	0	0	0	0	0	0	14	10.915	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
China	3	2.268	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cuba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Czech Rep.	0	0	4	1.752	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Finland	0	0	2	1.090	2	1.630	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
France	58	65.596	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	250	0	0
Germany	13	15.404	0	0	6	6.629	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hungary	0	0	4	1.840	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
India	0	0	0	0	2	320	10	1.960	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Japan	23	19.366	0	0	28	25.551	0	0	0	0	1	166	0	0	1	280	0	0	1
Kazakhstan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
South Korea	12	11.045	0	0	0	0	4	2.794	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lithuania	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mexico	0	0	0	0	2	1.329	0	0	0	0	0	0	2	2600	0	0	0	0	0
Netherlands	1	481	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pakistan	0	0	0	0	0	0	1	137	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Romania	0	0	0	0	0	0	1	706	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Russia	0	0	13	9.594	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Slovakia	0	0	4	1.760	0	0	0	0	0	0	0	0	11	11000	1	600	0	0	4
Slovenia	1	652	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
South Africa	2	1.930	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Spain	7	5.950	0	0	2	1.450	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sweden	3	2.835	0	0	9	7.603	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Switzerland	3	1.767	0	0	2	1.457	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Taiwan	2	1.902	0	0	4	3.242	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Taiwan	2	1.902	0	0	4	3.242	0	0	14	9.164	20	3.786	0	0	0	0	0	0	0
UK	1	1.258	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ukraine	0	0	13	11.808	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1000	0	0	0	0	0
USA	69	68.577	0	0	35	33.156	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totals	206	205.524	47	31.922	92	82.367	32	17.517	14	9.164	21	3.952	14	14.600	3	1.130	0	0	5

Ισχύος

1. Ασφάλεια και αξιοπιστία αντιδραστήρων

1.1. Εισαγωγή - Ορολογία

Η πυρηνική βιομηχανία είναι μία ιδιαίτερη βιομηχανία παγκοσμίως, στην οποία ισχύει ως βασική αρχή – τουλάχιστον μέχρι σήμερα – η αρχή της «μέγιστης ασφάλειας». Ακόμα και η καλύτερη τεχνική πρόταση, από οικονομική άποψη, δεν θα γίνει αποδεκτή από τους αδειοδότες, τους σχεδιαστές, τους χειριστές, τους τεχνικούς επιστήμονες και το κοινό, εάν δεν ικανοποιεί τις μέγιστες τεχνικές απαιτήσεις ασφάλειας. Το ερώτημα που τίθεται δεν είναι απλά: η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά η *ασφαλής* παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κατ' όμοιο τρόπο, δεν τίθεται απλά θέμα για την αποθήκευση του εξαντλημένου καυσίμου, αλλά για την *ασφαλή* αποθήκευση του εξαντλημένου καυσίμου.

Η Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency, IAEA) τονίζει ότι, από την αρχή της χρήσης των ακτινοβολιών, τα θέματα της ασφάλειας αποτέλεσαν και αποτελούν τη μέγιστη προτεραιότητα όσον αφορά δραστηριότητες που εμπλέκουν την πυρηνική ενέργεια [IAEA Conference, 1997]. Στα πλαίσια αυτά, η IAEA έχει υιοθετήσει τον όρο «παγκόσμια κουλτούρα της ασφάλειας» (global safety culture) και έχει ορίσει το θεσμικό και κανονιστικό πλαίσιο (Nuclear Safety Standards), το οποίο εφόσον τηρείται, μπορεί να αποτελέσει την βάση για την αύξηση της εμπιστοσύνης της κοινωνίας έναντι της πυρηνικής ενέργειας .

Η «κουλτούρα της ασφάλειας» είναι μία έννοια που, και στον τομέα της επιχειρησιακής έρευνας, ενέχει πολλούς ορισμούς. Οι περισσότερες βιομηχανίες υψηλού κινδύνου στον κόσμο εννοούν με τον όρο αυτό, την αντίληψη της μείωσης της πιθανότητας να συμβούν μεγάλης κλίμακας καταστροφές και ατυχήματα, που να συνδέονται με τις λειτουργίες ρουτίνας των εγκαταστάσεών τους. Μεγάλη προσπάθεια έχει γίνει και γίνεται, ώστε να υιοθετηθεί μία κοινή αντίληψη, ιδιαίτερα στους τομείς της πυρηνικής ενέργειας, της ναυτιλίας και των μεταφορών [Cooper, 2000].

Η έννοια της «κουλτούρας της ασφάλειας» στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 1988 στα κείμενα της Υπηρεσίας για την Πυρηνική Ενέργεια (ΝΕΑ) του ΟΟΣΑ μετά το ατύχημα στο Chernobyl (1986).

Η ΙΑΕΑ (1991) ορίζει ως «κουλτούρα της ασφάλειας», το σύνολο των χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων σε οργανισμούς και άτομα, το οποίο εγκαθιδρύει σαν βασική προτεραιότητα, ότι τα θέματα ασφάλειας μίας πυρηνικής εγκατάστασης θα τύχουν προσοχής ανάλογα με τη σημασία τους [Cooper, 2000]. Η ασφάλεια, ορίζεται ως «ελευθερία από κίνδυνο ή βλάβη» και συνεπώς η πυρηνική ασφάλεια ορίζεται σαν «ελευθερία από κίνδυνο ή βλάβη» αναφερόμενη σε πυρηνικούς αντιδραστήρες. Η πυρηνική ασφάλεια έχει ως αντικείμενο τον αποκλεισμό των εκλύομενων ραδιενεργών ακτινοβολιών από τον άνθρωπο και το φυσικό περιβάλλον και την προστασία του πυρηνικού σταθμού από ενδεχόμενες βλάβες [Λεωνίδου, 1978].

Συμπληρωματικά λειτουργεί και ο όρος **nuclear security**. Κατά την κρατική *Électricité de France*, ο γενικός όρος "πυρηνική ασφάλεια" (nuclear security) καλύπτει κάθε διοικητική και τεχνική προϋπόθεση, η οποία έχει ως σκοπό να προστατέψει μία χώρα και τους κατοίκους της από τους κινδύνους που σχετίζονται με την ύπαρξη πυρηνικών υλικών και τις διάφορες χρήσεις τους. Η ασφάλεια των εγκαταστάσεων, η ραδιολογική προστασία, η διαχείριση κρίσιμων καταστάσεων και ο έλεγχος και η φυσική προστασία των πυρηνικών υλικών είναι τα βασικά πεδία που καλύπτει η έννοια της "πυρηνικής ασφάλειας" [Ιστοσελίδα *Électricité de France*, 2000].

Οι πυρηνικοί σταθμοί πρέπει να λειτουργούν με υψηλό βαθμό αξιοπιστίας (**reliability**). Η αξιοπιστία βασίζεται στην μελέτη της λειτουργίας των συστημάτων του αντιδραστήρα και στην αξιολόγηση κινδύνων και πρέπει να λαμβάνει υπόψη ένα ευρύ πλέγμα προβλημάτων, που ανάμεσα στα άλλα, αφορούν και:

- Στη μελέτη του κινδύνου κατά την τροφοδοσία καυσίμου (at-power risk studies-PRA - probabilistic risk assessment - for refueling outages) [Rohrer and Nierode, 1996]
- Στη μελέτη της γήρανσης¹ των υλικών και την αντοχή και την ακεραιότητα των υλικών σε θερμική καταπόνηση, σε οξειδωση κλπ. [Tipping, 1996, Bhandari, 1998, Hugot, 1995]

¹ Γήρανση (ageing) είναι η τάση και η επιδεκτικότητα των συστατικών μερών ενός πυρηνικού σταθμού ισχύος να μεταβάλλουν τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητές τους με την αύξηση της παλαιότητας και της ηλικίας του σταθμού [Tipping, 1996].

- Στη μελέτη της συμπεριφοράς των δομικών μερών με τη βοήθεια PRA σε σεισμικές δονήσεις [Ozaki et al, 1998] και σε άλλες φυσικές καταστροφές (τυφώνες κλπ).

Ιδιαίτερη σημασία επίσης, έχει η μελέτη της αξιοπιστίας του ανθρώπινου παράγοντα σε συνθήκες λήψης αποφάσεων ή συνθήκες συμβάντων σε πυρηνικούς σταθμούς (accident management) [Pyu, 2000]. Τέλος, μεγάλη σημασία για την αξιοπιστία του συστήματος, έχει ο τρόπος διοίκησης του σταθμού (management) και άλλοι επιχειρησιακοί παράγοντες, οι οποίοι έχουν σημαντική, αλλά “κρυφή” επίπτωση στην αξιοπιστία και στην ασφάλεια του συστήματος και δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν με πιθανοτική ανάλυση [Miller et al, 2000].

1.2. Πόση ασφάλεια είναι αρκετή;

Οι αντιδραστήρες είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα συστήματα, των οποίων ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η λειτουργία και συντήρηση και ο παροπλισμός έχουν ιδιαίτερες και ειδικές απαιτήσεις ασφάλειας. Η ασφάλεια και η αξιοπιστία του συστήματος, λόγω της μεγάλης σημασίας που έχουν οι παράμετροι αυτοί, εξετάζονται συνήθως συνολικά, σαν ένα ξεχωριστό κεφάλαιο. Τα θέματα ασφάλειας στους αντιδραστήρες ισχύος αποτελούν σήμερα ένα σημαντικό πεδίο έρευνας και εφαρμοσμένης τεχνολογίας σχετικά με όλες τις φάσεις: από τον σχεδιασμό και την κατασκευή του αντιδραστήρα, έως τη διαχείριση των αποβλήτων και του καταναλωθέντος καυσίμου.

Συχνά τίθεται το ερώτημα: *Πόση ασφάλεια είναι αρκετή*; Αναφερόμενοι πάντοτε στην ηλεκτροπαραγωγή, πρέπει να εξετάσουμε εάν τα οφέλη της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος δικαιολογούν τους κινδύνους, στους οποίους πρέπει να εκτεθούν οι ανθρώπινες κοινωνίες. Η μελέτη της σημαντικής οικονομικής πλευράς που εμπεριέχεται σε μία τέτοια προσέγγιση, πρέπει να συνυπολογίσει και τις εξωτερικές οικονομίες που υπάρχουν τόσο στην χρήση της πυρηνικής ενέργειας, όσο και στη χρήση άλλων μορφών ενέργειας σήμερα.

Όσο το μέγεθος των αντιδραστήρων ήταν μικρό (μέχρι τη δεκαετία του '70), το βάρος της πυρηνικής ασφάλειας δινόταν στα μέσα συγκρατήσεως των ραδιενεργών προϊόντων σχάσεως, κυρίως μέσα στο περίβλημα του αντιδραστήρα, αποκλείοντας με αυτόν τον τρόπο την διαρροή της ραδιενέργειας στη βιόσφαιρα, ακόμα και στην περίπτωση που θα έλυνε ολοκληρωτικά ο πυρήνας εξαιτίας μίας ενδεχόμενης

ανεξέλεγκτης απώλειας του ψυκτικού μέσου. Η αύξηση όμως του μεγέθους (ισχύος) των αντιδραστήρων δημιούργησε αμφιβολίες για την ικανότητα συγκράτησης των ραδιενεργών προϊόντων σάσης σε περίπτωση σοβαρού ατυχήματος και το βάρος έπεσε στην παροχή συστημάτων που διατηρούν την ψύξη του πυρήνα ακόμα και όταν συμβεί απώλεια ψυκτικού. Έτσι, το σύστημα επείγουσας (έκτακτης) ψύξεως του πυρήνα – που παλαιότερα αποτελούσε συμπληρωματικό σύστημα ασφάλειας – θεωρείται πλέον πολύ σημαντικό και απαραίτητο. Η αύξηση του μεγέθους των σταθμών είχε ανάλογη επίδραση και σε άλλα παρόμοια προβλήματα.

Από την άλλη, σήμερα, που οι πυρηνικοί σταθμοί σε λειτουργία έχουν μεγάλη ηλικία, κρίσιμα από πλευράς ασφάλειας είναι: τα προβλήματα γήρανσης των υλικών και δομικών μερών, η στατιστική επεξεργασία αστοχιών με βάση την ικανοποιητική εμπειρία από τη λειτουργία των σταθμών, μελέτες πάνω στην ανθρώπινη συμπεριφορά, η ενσωμάτωση παθητικών συστημάτων ασφαλείας - που δεν προϋποθέτουν την ανθρώπινη αντίδραση σε συνθήκες ατυχήματος και μέσα σε δευτερόλεπτα - η μελέτη περιβαλλοντικών παραγόντων στις ενδεχόμενες αιτίες ατυχήματος, οι οποίοι δεν μπορούν να ανιχνευθούν κατά τις επιθεωρήσεις, η μελέτη και ο χρονοπρογραμματισμός της συντήρησης και η αλληλεπίδρασή της με τον ανθρώπινο παράγοντα, κλπ [Miller et al, 2000].

1.2.1. Αρχές ασφάλειας

Η πυρηνική ασφάλεια βασίζεται στις εξής αρχές [Λεωνίδου, 1978]:

1. Στη μείωση της πιθανότητας ατυχήματος, που βασίζεται στον καλό αρχικό σχεδιασμό, στη καλή κατασκευή και στη καλή λειτουργία του σταθμού, και
2. Στη χρήση προστατευτικών διατάξεων και συστημάτων, που εξουδετερώνουν ή μειώνουν τις συνέπειες ατυχήματος².

Η φιλοσοφία της ασφάλειας περιλαμβάνει:

1. Τη χρήση στέρεων και συντηρητικών προσεγγίσεων στον σχεδιασμό, στην κατασκευή, στη λειτουργία και στη συντήρηση πυρηνικών σταθμών, για συνθήκες κανονικής λειτουργίας.

²Κατά τη ορολογία της ΙΑΕΑ, **ατύχημα (accident)** είναι κάθε προγραμματιστο γεγονός, συμπεριλαμβανομένων και των λαθών χειρισμού, των αστοχιών του εξοπλισμού ή άλλων ατυχιών, των οποίων οι άμεσες συνέπειες ή οι ενδεχόμενες συνέπειες δεν μπορούν να αγνοηθούν από πλευράς προστασίας ή ασφάλειας [Γλωσσάριο ΙΑΕΑ, 2000].

- II. Την πρόβλεψη μέτρων κατά τον σχεδιασμό για την ασφαλή διακοπή και τον περιορισμό των συνεπειών ανώμαλων γεγονότων - που υποτίθεται ότι συμβαίνουν κατά τη διάρκεια ζωής ενός σταθμού.
- III. Την παροχή πρόσθετων τεχνολογικών χαρακτηριστικών ασφάλειας, για προστασία έναντι απίθανων γεγονότων, που δεν αναμένεται να συμβούν κατά τη διάρκεια ζωής ενός σταθμού.

Η φιλοσοφία αυτή υλοποιείται με την εφαρμογή τριών επιπέδων ασφάλειας [Κολλάς, 1978]:

Το **πρώτο επίπεδο** απαιτεί την παροχή της μέγιστης δυνατής ασφάλειας στον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία του σταθμού για κανονική λειτουργία, όπως και τη μέγιστη δυνατή ανοχή του συστήματος σε βλάβες. Η ασφάλεια αρχίζει στον σχεδιασμό και παραμένει ένας πολύ σημαντικός παράγοντας σε όλα τα στάδια. Οι Π.Α. πρέπει να λειτουργούν με υψηλό βαθμό αξιοπιστίας (reliability) και αυτό συνεπάγεται τη χρήση υλικών υψηλής ποιότητας και δοκιμές υψηλού επιπέδου.

Το **δεύτερο επίπεδο** ασφάλειας απαιτεί την παρουσία αξιόπιστων συσκευών και συστημάτων προστασίας, που να εγγυώνται την πρόληψη ή την ασφαλή εξέλιξη ενδεχόμενων βλαβών και των μη ομαλών συνθηκών. Το σύστημα ελέγχου ρυθμίζει και ελέγχει τον αντιδραστήρα, ώστε οι παράμετροί του να παραμένουν μέσα στα όρια λειτουργίας, ενώ είναι σε θέση να παρεμβαίνει αποτελεσματικά, όταν καταγράφονται ανώμαλες συνθήκες. Τα συστήματα ασφαλείας είναι πλεονάζοντα, ώστε να εξασφαλίζουν ότι μία απλή βλάβη δεν θα προκαλέσει αστοχία αναγκαίας δράσης ασφάλειας.

Το **τρίτο επίπεδο** ασφάλειας παρέχεται από αξιόπιστα ειδικά συστήματα ασφάλειας και συμπληρώνει τα δύο πρώτα. Τα συστήματα αυτά είναι σχεδιασμένα έτσι, ώστε να εξασφαλίζουν ότι οποιοδήποτε συμβάν, είτε θα εμποδιστεί, είτε θα ανακοπεί, είτε θα εξελιχτεί με ασφάλεια. Σχεδιάζονται με βάση την υπόθεση ότι συμβαίνουν ισχυρά φυσικά φαινόμενα (ανεμοστρόβιλοι, σεισμοί, πλημμύρες), ή ότι συνιστώσες του σταθμού έχουν υποστεί μέγιστη βλάβη και αναλύονται τα αίτια του ατυχήματος που ακολουθεί, κλπ.

Από την ανάλυση ατυχημάτων (nuclear accident, incident or a radiological emergency) προκύπτει ότι, η πιο σημαντική πηγή έκλυσης ραδιενέργειας είναι τα προϊόντα σχάσεως, που παράγονται στον πυρήνα του αντιδραστήρα. Σημαντικά ποσά ραδιενέργειας μπορούν να απελευθερωθούν στο περιβάλλον μόνο από τήξη του

πυρήνα του αντιδραστήρα, μετά από απώλεια ψυκτικού στα συστήματα ψύξεως, εξαιτίας ανθρώπινου λάθους, ή λόγω ανωτέρας βίας (σεισμοί και άλλες φυσικές καταστροφές).

Η Διεθνής Κλίμακα Πυρηνικών Συμβάντων (The International Nuclear Event Scale, INES)

Η Διεθνής Κλίμακα Πυρηνικών Συμβάντων (1990) είναι ένα εργαλείο κοινής και εναρμονισμένης διεθνώς γλώσσας, σχετικά με τα ενδεχόμενα γεγονότα σε πυρηνικές εγκαταστάσεις (Πίνακας 12). Σχεδιάστηκε από μία διεθνή ομάδα ειδικών των ΙΑΕΑ και ΝΕΑ/OECD [Ιστοσελίδα UI, 2000]. Τα γεγονότα σε έναν πυρηνικό σταθμό κατηγοριοποιούνται σε 7 επίπεδα, με βάση τα εξής κριτήρια: επιπτώσεις εκτός εγκατάστασης, επιπτώσεις εντός εγκατάστασης και υποβάθμιση της “άμυνας σε βάθος”. Στο κατώτερο επίπεδο (1-3) τα γεγονότα καλούνται συμβάντα (Incidents) και στα ανώτερα επίπεδα (4-7), ατυχήματα (accidents). Γεγονότα, που δεν παρουσιάζουν σημασία από πλευράς ασφάλειας, κατηγοριοποιούνται στο επίπεδο 0 ή εκτός κλίμακας.

Οι επιπτώσεις από τα γεγονότα, με βάση την INES, ποσοτικοποιούνται με συγκεκριμένο τρόπο. Για παράδειγμα, επίπεδο 2, μπορεί να σημαίνει μόλυνση και/ή υπερβολική έκθεση ενός εργαζομένου - επίπεδο 5, μπορεί να σημαίνει σοβαρή ζημία στην μονάδα, όπως τήξη του πυρήνα³.

³ Το ατύχημα στο Chernobyl (1986) χαρακτηρίστηκε σαν επίπεδο 7, με βάση τις εκτεταμένες επιπτώσεις του στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία. Το ατύχημα στο ΤΜΙ (1979) επίπεδο 5, με βάση τις επιπτώσεις που είχε μέσα στην εγκατάσταση (βλ. Παράρτημα).

Πίνακας 12: Η Διεθνής Κλίμακα Πυρηνικών Γεγονότων (The International Nuclear Event Scale, INES)

ACCIDENT	7 Major Accident
	6 Serious Accident
	5 Accident with off-site risk
	4 Accident without significant off-site risk
INCIDENT	3 Serious accident
	2 Incident
	1 Anomaly
DEVIATION	0 Below scale No safety significance

1.2.2. Συστήματα ασφάλειας

Σε κάθε σύστημα πυρηνικού αντιδραστήρα υπάρχει ένας αριθμός φυσικών φραγμάτων, που εμποδίζει την έκλυση ή διαφυγή των ραδιενεργών προϊόντων σχάσεως, όπως και ειδικά συστήματα έκτακτης ψύξεως (ECC systems, Emergency Core Cooling systems) [Κολλάς, 1978]:

1. Το ίδιο το πυρηνικό καύσιμο, που κατασκευάζεται συνήθως σε μορφή δισκίων διοξειδίου του ουρανίου, UO_2 (κεραμικό υψηλής πυκνότητας), επειδή το νερό αντιδρά χημικά με το ουράνιο. Το UO_2 συγκρατεί τα περισσότερα προϊόντα σχάσεως στο κρυσταλλικό πλέγμα του, είναι ανθεκτικό στην οξειδωση και στη διάβρωση και έχει πολύ υψηλή θερμοκρασία τήξεως.
2. Το μεταλλικό περίβλημα του πυρηνικού καυσίμου (clad), μέσα στο οποίο τοποθετούνται τα δισκία του UO_2 . Κατασκευάζεται από ειδικό κράμα ζirkονίου (zirkaloy), με αντοχή στην οξειδωση και στη διάβρωση, όπως και στις τάσεις που προκαλούνται από τη διαστολή του UO_2 , την πίεση των αερίων προϊόντων σχάσεως, τις εξωτερικές υδραυλικές πιέσεις και τα μηχανικά φορτία που

συνεπάγεται η διαχείριση του καυσίμου. Το περίβλημα αυτό, εμποδίζει επίσης τη διάβρωση του καυσίμου από το ψυκτικό υγρό.

3. Το κλειστό σύστημα ψύξεως, που μεταφέρει θερμότητα από το καύσιμο. Αποτελείται από το δοχείο πίεσεως (αντιδραστήρες με ελαφρύ νερό, LWR) ή τους αγωγούς πίεσεως (αντιδραστήρες με βαρύ νερό, HWR), από σωληνώσεις, αντλίες, ατμολέβητες κλπ. Εάν το σύστημα υποστεί βλάβη, το σύστημα ψύξεως συγκρατεί τα τυχόν εκλυόμενα προϊόντα σχάσεως.
4. Το περίβλημα του αντιδραστήρα, το οποίο είναι ένα κτιριακό στεγανό κέλυφος από ομόκεντρους φράκτες, που περικλείουν εξωτερικά τον αντιδραστήρα και συνήθως, το κλειστό σύστημα ψύξεως. Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας το περίβλημα δεν παίζει ιδιαίτερο ρόλο.
5. Το πέμπτο φράγμα είναι η απόσταση. Συνήθως, οι πυρηνικοί σταθμοί κατασκευάζονται μακριά από κατοικημένα κέντρα, σε απόσταση τουλάχιστον ενός χιλιομέτρου μεταξύ σταθμού και πρώτων κατοικιών. Η απόσταση αυτή ελαττώνει τη συγκέντρωση των ραδιενεργών προϊόντων σχάσεως, που έχουν ενδεχομένως διαφύγει, κατά ένα παράγοντα της τάξης του 10^2 έως 10^3 .

Όταν αποτυχαίνει η λειτουργία των μεγάλων συστημάτων προκαλούνται μεγάλες καταστροφές. Μετά από ένα μεγάλο ατύχημα, συνήθως οι αιτίες αποδίδονται σε ανθρώπινο λάθος, ιδιαίτερα όταν οι χειριστές δεν επιβιώνουν του ατυχήματος. Η ασφάλεια ενός μεγάλου συστήματος πρέπει να ελέγχεται και να παρακολουθείται με ηλεκτρονικό τρόπο με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού, το οποίο μπορεί να καταδειξει στη συνέχεια τις αιτίες ενός μεγάλου ατυχήματος.

1.2.3. Αξιολόγηση κινδύνου και πρόγνωση

Μεγάλο έργο γίνεται προς αυτή την κατεύθυνση από τους ερευνητές, σε ό,τι δηλαδή αφορά το θέμα «πρόληψη» ή «πρόγνωση» ενδεχόμενου ατυχήματος και της ασφαλούς λειτουργίας και αξιοπιστίας μονάδων αντιδραστήρων ισχύος. Πολλές εργασίες δημοσιεύονται και επιτελείται σοβαρό έργο, στο οποίο συνεργάζονται διάφορες ειδικότητες επιστημόνων.

Ανάμεσα στις άλλες συνιστώσες του προβλήματος, περιλαμβάνονται οι παρακάτω:

- Αξιοπιστία μεγάλων συστημάτων (reliability)
- Αξιολόγηση και εκτίμηση κινδύνου (risk assessment)
- Σεισμολογική συμπεριφορά των σταθερών μερών

- Μελέτες περιπτώσεων (συμβάντα & ατυχήματα)
- Μελέτες κατασκευαστικών μερών & Προσομοιώσεις λειτουργίας μερών του συστήματος
- Ανάπτυξη λογισμικού για συστήματα ασφάλειας πυρηνικών σταθμών ισχύος.

Υπάρχουν πολλές πλευρές σε κάθε μία από τις παραπάνω διαστάσεις: Για παράδειγμα, προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία του συστήματος, αυτό σχεδιάζεται ανάλογα και προστίθενται παραπάνω λειτουργίες, οι οποίες καθιστούν το σύστημα ιδιαίτερα πολύπλοκο.

Όμως, η πολυπλοκότητα (complexity) ενός συστήματος είναι σοβαρός παράγοντας δυσκολίας κατά την κατασκευή και κατά τη λειτουργία του: είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί η τέλεια λειτουργία ενός πολύπλοκου και σύνθετου συστήματος, δεδομένου ότι είναι ιδιαίτερα δύσκολο να αποκλείσεις απολύτως και την περίπτωση του ανθρώπινου λάθους. Είναι ενδιαφέρον ότι ιάπωνας ειδικός αναφέρεται σε δημοσίευσή του στον ρόλο της «πνευματικής εκπαίδευσης» και της «κουλτούρας της ασφάλειας» στη βάση της αρχαίας γιαπωνέζικης φιλοσοφίας και κοσμοθεωρίας του Ζεν, ως σημαντικές παραμέτρους για την πρόληψη ατυχήματος σε ΠΑΙ [Kondo, 1996].

1.2.4. Ασφάλεια κατά τη σχεδίαση και τη λειτουργία

Όσον αφορά τη σχεδίαση και τη λειτουργία ενός πυρηνικού σταθμού, έχει καθιερωθεί ο όρος «defense-in-depth» ή «άμυνα σε βάθος». Κατά τη ορολογία της ΙΑΕΑ, άμυνα σε βάθος είναι «η εφαρμογή περισσότερων του ενός προστατευτικών μέτρων για ένα αντικειμενικό σκοπό με στόχο με την ασφάλεια, τέτοιων ώστε, ο αντικειμενικός σκοπός να επιτευχθεί, ακόμα και εάν, ένα από τα προστατευτικά μέτρα αποτύχει» [Γλωσσάριο ΙΑΕΑ, 2000].

Σύμφωνα με το λεξικό της Nuclear Regulatory Commission των ΗΠΑ [Γλωσσάριο NRC, 2000], η έννοια «άμυνα σε βάθος» είναι «μία φιλοσοφία κατά τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των πυρηνικών εγκαταστάσεων, η οποία θέτει πολλαπλά στρώματα προστασίας, ώστε να αποτραπούν ή να ελαφρυνθούν οι επιπτώσεις από ατυχήματα. Περιλαμβάνει τη χρήση ελέγχων, πολλαπλών φυσικών εμποδίων για την αποτροπή έκλυσης ραδιενέργειας, πλεονάζοντα και διαφορετικά λειτουργικά συστήματα-κλειδιά και μέτρα ανταπόκρισης σε επείγουσες καταστάσεις.

Σύμφωνα με το λεξικό του Ινστιτούτου Ουρανίου [Γλωσσάριο UI, 2000], η έννοια «άμυνα σε βάθος» είναι η διασφάλιση και οι εγγυήσεις της ύπαρξης ασφάλειας (safety), μέσω τριών επιπέδων μέτρων ασφαλείας:

- Αποτρεπτικών
- Προστατευτικών και
- Ελαφρυντικών των ενδεχόμενων συνεπειών.

Κατά την σχεδίαση ενός πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος, τίθενται αρκετά σοβαρά τεχνικά προβλήματα από πλευράς ασφάλειας και αξιοπιστίας:

- Το πυρηνικό καύσιμο (ουράνιο, UO_2 ή εμπλουτισμένο ουράνιο UO_2 , πλουτόνιο ή θόριο)
- Η αντοχή και η συμπεριφορά των υλικών
- Υλικό περιβλήματος (Zircaloy κλπ)
- Το ψυκτικό μέσο, κλπ.

Κατά τη λειτουργία ενός πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος, τίθενται επίσης σοβαρά τεχνικά προβλήματα από πλευράς ασφάλειας και αξιοπιστίας. Στα πλαίσια αυτά, η ΙΑΕΑ έχει δημιουργήσει πέντε Τεχνικές Ομάδες Εργασίας (Principal Working Groups, PWG), στα παρακάτω βασικά πεδία [NEA Report, 2000, Miller et al, 2000]:

1. Εμπειρία από τη Λειτουργία και Ανθρώπινοι Παράγοντες (Operating Experience and Human Factors - PWG 1)
2. Συμπεριφορά συστήματος ψύξεως (Coolant System Behaviour - PWG 2)
3. Ακεραιότητα δομικών και συστατικών μερών (Integrity of Structures and Components -PWG 3)
4. Περιορισμός εκλύσεων ραδιενέργειας από ατύχημα (Confinement of Accidental Radioactive Releases -PWG 4)
5. Αξιολόγηση κινδύνου (Risk Assessment -PWG 5).

Η θερμοϋδραυλική συμπεριφορά του συστήματος

Ιδιαίτερα, η μελέτη της θερμοϋδραυλικής συμπεριφοράς του συστήματος έχει ένα ιδιαίτερο ρόλο στην αξιοπιστία του. Αφορά στην μελέτη των μηχανισμών μεταδόσεως της θερμότητας από τον πυρήνα του αντιδραστήρα προς το περιβάλλον του σε σχέση πάντα με τους καθαρά πυρηνικούς μηχανισμούς παραγωγής ενέργειας στο σύστημα, όπως και τους μηχανισμούς ψύξεως του πυρήνα σε καταστάσεις μεγάλης θερμικής φορτίσεως [Χίνης, 1987]. Η θερμοϋδραυλική συμπεριφορά του συστήματος ενός πυρηνικού σταθμού έχει άμεση επίδραση στον καθορισμό τριών πολύ βασικών παραγόντων της λειτουργίας του αντιδραστήρα:

- Της παραγόμενης ισχύος
- Του βαθμού αποδόσεως του θερμοδυναμικού κύκλου και
- Του συντελεστή ασφάλειας της εγκατάστασης

Η μελέτη του συστήματος σε μόνιμη κατάσταση, αλλά και κατά τη διαδικασία ψύξης του αντιδραστήρα μετά από υποτιθέμενη απώλεια ψυκτικού (ατύχημα απώλειας ψυκτικού- LOCA, Loss of Coolant Accident), αποτελούν σημαντική συνεισφορά στην ανάπτυξη ασφαλέστερων συστημάτων λειτουργίας και στον σχεδιασμό μέτρων άμεσης αντιμετώπισης ατυχημάτων.

Η απώλεια ψυκτικού συνοδεύεται από φαινόμενα που διαφέρουν σε μορφή και σε ένταση ανάλογα με το μέγεθος του συμβάντος ή του ατυχήματος, δηλαδή ανάλογα με την παροχή μάζας του ψυκτικού που απωλέσθηκε, την πτώση της πίεσης σε σχέση με τη κανονική λειτουργία, καθώς και τον χρόνο που παρήλθε από τη στιγμή του συμβάντος ή του ατυχήματος.

Σε γενικές γραμμές, τα φαινόμενα που ακολουθούν την απώλεια ψυκτικού είναι:

- Πτώση της παραγόμενης ισχύος σε σχέση με την ισχύ της κανονικής λειτουργίας, λόγω πτώσης των ράβδων ελέγχου του αντιδραστήρα
- Πτώση της πίεσης κάτω από την τιμή της κανονικής λειτουργίας
- Πτώση της παροχής μάζας εισόδου του ψυκτικού στο κανάλι
- Πτώση του συντελεστή μεταδόσεως της θερμότητας από το περιβλήμα της ράβδου προς το ψυκτικό μέσο.

Το ατύχημα απώλειας ψυκτικού σε ένα κανάλι αντιμετωπίζεται συνήθως με τη βοήθεια εφεδρικών συστημάτων ψύξεως, τα οποία ενεργοποιούνται αμέσως, μόλις η μείωση της παροχής ψυκτικού στο βασικό κανάλι γίνει αισθητή από τον αυτόματο

έλεγχο, έτσι ώστε να επαναψυχθεί η ράβδος του πυρηνικού καυσίμου και να μην ανέλθει η θερμοκρασία του τοιχώματος του πυρηνικού καυσίμου σε πολύ υψηλά επίπεδα και προκληθεί αστοχία του περιβλήματος του πυρηνικού καυσίμου (containment failure). Για να μην ξεπεραστούν τα όρια αστοχίας του περιβλήματος της ράβδου είναι απαραίτητη η ενεργοποίηση της έκτακτης ψύξης του αντιδραστήρα, η οποία περιλαμβάνει ένα σύνολο συστημάτων (ECC systems) που ενεργοποιούνται ανάλογα με το είδος τους σε υψηλή ή χαμηλή πίεση και ή ψεκάζουν από τη κορυφή του αντιδραστήρα τις ράβδους του καυσίμου, ή πλημμυρίζουν τον πυρήνα από τον πυθμένα του [Nero, 1979].

Η επανάψυξη των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου γίνεται ουσιαστικά από ένα λεπτό φιλμ ψυκτικού, το οποίο προωθείται κατά περίπτωση από το σημείο εισόδου του ψυκτικού προς τα κατάντη της ροής. Θεωρείται ότι η επανάψυξη της ράβδου έχει επιτευχθεί, όταν το υγρό φιλμ έχει αποκαταστήσει επαφή με την επιφάνεια του περιβλήματος στην περιοχή αυτή. Το περίβλημα του πυρηνικού καυσίμου (cladding materials) έχει επίσης ένα ανώτατο επιτρεπτό όριο θερμοκρασιών, το οποίο ποικίλλει ανάλογα με την αντοχή του υλικού και τις απαιτήσεις ασφαλείας, σε σχέση με την ενδεχόμενη διαρροή ραδιενέργειας στο περιβάλλον του αντιδραστήρα.

Κατά τη μελέτη της ανταπόκρισης ενός συστήματος ψύξεως μετά από ατύχημα, ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα είναι η ακριβής εκτίμηση της παραγόμενης ισχύος μετά την πτώση των ράβδων ελέγχου – που πέφτουν ακαριαία για να μειωθεί ο πληθυσμός των νετρονίων - και το σταμάτημα της λειτουργίας του αντιδραστήρα (παρά τις ράβδους ελέγχου, η παραγωγή ισχύος από το πυρηνικό καύσιμο συνεχίζεται, αν και με ελαττούμενο ρυθμό, λόγω των συνεχιζόμενων σχάσεων και άλλων ραδιενεργών διασπάσεων στον αντιδραστήρα-decay heat). Μπορεί επίσης να υποθεθεί και συνέχιση της παραγωγής θερμότητας μετά τη σβέση και μέσα στο περίβλημα του πυρηνικού καυσίμου [Nero, 1979].

1.2.5. Ενίσχυση της ασφάλειας - Προηγμένοι τύποι αντιδραστήρων

Τα δύο ατυχήματα, στους σταθμούς Three Mile Island και Chernobyl επέφεραν αλλαγές στην φιλοσοφία ασφάλειας των πυρηνικών σταθμών και εισήγαγαν [Kroger and Fischer, 2000]:

- την στοχαστική ανάλυση στην ασφάλεια (probabilistic safety analysis)
- την προσέγγιση “risk-oriented safety” αντί της “rule-based safety” και
- την αντίληψη ALARA/P (As-Low-As-Reasonably-Achievable/Practicable)⁴.

Ο σκοπός της πυρηνικής ασφάλειας διευρύνθηκε και πολλοί σταθμοί αναγκάστηκαν να κλείσουν πρόωρα – περίπου 60 – γιατί δεν άντεξαν το κόστος των βελτιώσεων που τους επιβαλλόταν, ώστε να ικανοποιήσουν τα κριτήρια ασφάλειας [Laraia and Dlouhy, 2000]. Ο όρος “ζημιά” (damage) διευρύνθηκε, ώστε να καλύπτει σήμερα, όχι μόνο άμεσες και μεσοπρόθεσμες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, αλλά και την ενδεχόμενη μόλυνση του περιβάλλοντος της περιοχής, την ανάγκη για λήψη μέτρων σε επείγουσες καταστάσεις, συμπεριλαμβανομένων και απαγορεύσεων στη χρήση τροφίμων [Kröger and Fischer, 2000]. Έχουν εκπονηθεί σημαντικές εργασίες πάνω σε στοχαστικές μεθόδους ανάλυσης επικινδυνότητας αντιδραστήρων κατά τη κανονική λειτουργία τους ή σε συνθήκες ατυχήματος

Η εργασία των H. Slaper and R. Blaauboer (1998) σχετικά με την στοχαστική αξιολόγηση θανάτων από υποτιθέμενο ατύχημα σε πυρηνικό σταθμό στην Ευρώπη με στοιχεία του 1992, αναφέρει, ότι οι σταθμοί στην ανατολική Ευρώπη υστερούν σε προδιαγραφές ασφάλειας και σε παρακολούθηση και παρουσιάζουν και μεγαλύτερη αβεβαιότητα λόγω έλλειψης γνώσης πάνω σε πιθανότητες ατυχήματος και εκλύσεων ραδιενέργειας σε συνθήκες λειτουργίας ή ενδεχόμενου ατυχήματος. Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες στην Ευρώπη (217) χωρίστηκαν σε τέσσερις κατηγορίες, με βάση την πιθανότητα για σοβαρό ατύχημα (τήξη του πυρήνα):

- σταθμοί με πιθανότητα 10^{-3} τον χρόνο (29 σταθμοί)
- σταθμοί με πιθανότητα 10^{-4} τον χρόνο (146 σταθμοί)
- σταθμοί με πιθανότητα 10^{-5} τον χρόνο (39 σταθμοί)
- σταθμοί με πιθανότητα 10^{-6} τον χρόνο (3 σταθμοί).

Η μέση πιθανότητα τέτοιου ατυχήματος τον χρόνο υπολογίσθηκε σε 2×10^{-4} (με βάση τα 2 ατυχήματα - TMI και Chernobyl – δηλαδή, 2 ατυχήματα σε περίπου 8000 reactor years παγκόσμιας εμπειρίας). Τύποι αντιδραστήρων που παρουσιάζουν υψηλότερο κίνδυνο θεωρούνται οι αντιδραστήρες της ανατολικής Ευρώπης, με αποτέλεσμα να

⁴ ALARA (As Low As Reasonably Achievable): Σημαίνει κάθε λογική προσπάθεια να διατηρηθεί η έκθεση σε ραδιενέργεια όσο πιο κάτω γίνεται από τα όρια της δόσης

εκπονηθεί χάρτης επικινδυνότητας, στον οποίο παρουσιάζονται οι περιοχές στην Ευρώπη που παρουσιάζουν τον υψηλότερο κίνδυνο, τόσο με βάση πραγματικά στοιχεία του 1992, όσο και με βάση το σενάριο, ότι οι αντιδραστήρες της ανατολικής Ευρώπης εναρμονίζονται σε θέματα ασφάλειας με αυτούς της δυτικής Ευρώπης.

Αναβάθμιση (backfitting) των παλαιότερων πυρηνικών σταθμών

Η Eurelectric ομολογεί ότι, η πυρηνική βιομηχανία υπέστη πιέσεις για να αυξήσει την απόδοση των αντιδραστήρων από πλευράς ασφάλειας, ενώ το θεσμικό και κανονιστικό πλαίσιο έγινε αυστηρότερο σε θέματα πυρηνικής ασφάλειας και προστασίας του περιβάλλοντος [Eurelectric Report, 2000].

Είναι χαρακτηριστικό επίσης ότι, σήμερα η ΙΑΕΑ θεωρεί ότι η πρωταρχική απαίτηση για να συνεχίσει να λειτουργεί ένας σταθμός είναι η ικανότητά του να ικανοποιεί τα κριτήρια ασφαλείας του, ανεξάρτητα από την ηλικία του. Και εάν απαιτούνται τροποποιήσεις για θέματα ασφάλειας, των οποίων το κόστος είναι υψηλό, ο σταθμός μπορεί να «κλείσει» και νωρίτερα από τον χρόνο ζωής του [Laraia and Dlouhy, 2000]. Όπως αναφέρεται σε μία εργασία που πραγματοποιείται την τεχνική αναβάθμιση των παλαιών πυρηνικών σταθμών στη Σουηδία [Carlsson et al, 1999], οι σταθμοί που σχεδιάστηκαν κατά τη δεκαετία του '60, θα πρέπει να μελετηθούν με Probabilistic Safety Analysis (PSA), ώστε να ενσωματώσουν την πρόοδο της επιστήμης και της τεχνικής σχετικά με την διαθεσιμότητα της ενέργειας που παράγουν, την συντηρησιμότητα, την ασφάλεια και την αξιοπιστία τους, καθώς και – μακροπρόθεσμα – την ικανότητά τους να είναι φιλικό στο περιβάλλον.

Η τεχνική αναβάθμιση των παλαιών πυρηνικών σταθμών (backfitting) συνδυάζεται με την επέκταση του χρόνου ζωής τους, σαν μέσον για την αντιστάθμιση του υψηλού κόστους για την κατασκευή νέων αντιδραστήρων που θα ικανοποιούσαν τα κριτήρια ασφαλείας. Παλαιότερα, η τεχνική αναβάθμιση λειτούργησε σαν τρόπος για να γεφυρωθεί το χάσμα μεταξύ της ασφάλειας κατά τον σχεδιασμό και μετά τον σχεδιασμό ή/και για να ενσωματωθούν νεότερες τεχνικές κανονιστικές απαιτήσεις. Με αυτές τις αλλαγές, σε ό,τι αφορά τους προηγμένους τύπους αντιδραστήρων – η συχνότητα ζημίας στον σταθμό (frequency of plant damage) έχει σήμερα μειωθεί σε λιγότερο από 1.E-5 per reactor-year όσον αφορά σε ατυχήματα από τήξη του πυρήνα [Kröger & Fischer, 2000].

1.2.6. Σύγχρονες τάσεις στους εμπορικούς σταθμούς και στην έρευνα

Η σύγχρονη τάση στις βιομηχανικές χώρες που χρησιμοποιούν την πυρηνική ενέργεια, είναι ο σχεδιασμός μεγαλύτερου μεγέθους αντιδραστήρων, ώστε να αξιοποιηθούν όλα τα δοκιμασμένα και επιτυχή χαρακτηριστικά των συστατικών μερών τους και να επιτευχθούν οικονομίες κλίμακας. Στους σύγχρονους αντιδραστήρες ισχύος περίπου 1000 MWe και με βάση τις Αναφορές Ασφάλειας των εν λειτουργία σταθμών, η αύξηση της ασφάλειας επικεντρώνεται στην αναβάθμιση των συστημάτων με την προσθήκη τεχνικών συστατικών μερών, όπως, βελτιωμένα συστήματα ασφάλειας και πρόληψης ατυχημάτων, αναβαθμίσεις, αντικατάσταση εξοπλισμού, λογισμικού, κλπ.

Επίσης, εφαρμόζονται βελτιώσεις στην οργανωτική διαχείριση των σταθμών, στις μετρήσεις της ποιότητας του αέρα, ενισχύονται οι κανονισμοί ραδιοπροστασίας, ο έλεγχος των ραδιομολύνσεων και η εφαρμογή της αρχής ALARA (As Low As Reasonably Accepted) για την ραδιοπροστασία του προσωπικού [Nero, 1979, Kupitz, 1995]. Τέλος, σημαντικό συστατικό μέρος από οικονομική και περιβαλλοντική άποψη, αποτελούν πλέον, η διαχείριση των αποβλήτων και η διάθεσή τους [Laraia and Dlouhy, 2000]. Η αισιόδοξη άποψη είναι ότι, εφόσον οι αντικειμενικοί σκοποί της ανάπτυξης νέων προηγμένων τύπων αντιδραστήρων ολοκληρωθούν, θα διασφαλιστεί στο μέλλον η αξιόπιστη, ασφαλής και οικονομική παροχή ηλεκτρισμού, και σε συνέργια με την ασφαλή διαχείριση των αποβλήτων, η συμβολή της πυρηνικής ενέργειας στη βιώσιμη ανάπτυξη [Kupitz, 1995]. Προηγμένοι αντιδραστήρες κατασκευάζονται σήμερα για όλους τους βασικούς εμπορικούς τύπους (light & heavy water-cooled reactors, liquid-metal-cooled reactors, gas-cooled reactors).

Στα παραπάνω πλαίσια, εξίσου μεγάλη βαρύτητα δίνεται στην ενσωμάτωση νέων **παθητικών συστημάτων ασφαλείας** [Juhn, et al, 2000, Kröger and Fischer, 2000, Mehedinteanu, 2000]. Τα παθητικά συστήματα ασφαλείας βασίζονται σε φυσικές δυνάμεις, όπως η επαγωγή και η βαρύτητα, κάνοντας με τον τρόπο αυτό τα συστήματα ασφαλείας να είναι λιγότερο εξαρτημένα από ενεργητικά συστήματα και άλλα συστατικά μέρη, όπως είναι οι αντλίες, οι γεννήτριες ντίζελ κλπ. Η ΙΑΕΑ πιστεύει ότι, η χρήση παθητικών συστημάτων ασφαλείας – σε όλους τους τύπους αντιδραστήρων - είναι η επιθυμητή μέθοδος για να επιτευχθεί αύξηση της αξιοπιστίας της απόδοσης των βασικών λειτουργιών ασφαλείας σε έναν αντιδραστήρα

ισχύος και έχει εκπονήσει πολλές μελέτες αξιοπιστίας και οικονομικότητας τέτοιων συστημάτων [Juhn, et al, 2000]. Έχει μάλιστα δοθεί, ιδιαίτερο βάρος στην υιοθέτηση τέτοιων συστημάτων ασφάλειας κυρίως στους εν λειτουργία LWRs, ώστε να αξιοποιηθεί το μέγιστο της υπάρχουσας εμπειρίας [Kupitz, 1995].

Στα πλαίσια αυτά, υλοποιούνται σχετικά ευρωπαϊκά προγράμματα και η ύπαρξη παθητικών συστημάτων ασφάλειας έχει ήδη ενσωματωθεί στις προδιαγραφές σχεδιασμού αντιδραστήρων της Ε.Ε. (European Utilities Requirements, EUR Revision B, 1995), όσον αφορά μεγάλους και μεσαίου μεγέθους LWRs (1200-1300 MWe και 600 MWe αντίστοιχα) [Juhn, et al, 2000]. Η τεχνολογία των LWRs σε σχέση με την ασφάλεια, θεωρείται σήμερα ώριμη και η εμπειρία ικανοποιητική (πάνω από 7000 reactor-operating years). Τα εργαλεία για PSA έχουν αναπτυχθεί και περαιτέρω βελτιωθεί, ενώ ήδη έχουν πραγματοποιηθεί σχετική ανάλυση στους περισσότερους υπάρχοντες σταθμούς. Η R&D σε θέματα ασφάλειας στους LWRs έχει ήδη οδηγήσει σε ενσωμάτωση βελτιώσεων (ALWRs) [Kröger & Fischer, 2000, Kupitz, 1995].

Όσον αφορά τους PWRs στα 1300-1500 MWe, η εταιρεία Mitsubishi, η οποία έχει αναπτύξει σε συνεργασία με την εταιρεία Westinghouse των ΗΠΑ τον προηγμένο τύπο APWR στην Ιαπωνία, και σχεδιάζει ήδη τον PWR “νέας γενεάς” (1500 MWe), έχει υιοθετήσει έναν συνδυασμό παθητικών και ενεργητικών συστημάτων ασφαλείας - AP600 mid-size 600 MWe Advanced Pressurized Water Reactor, Westinghouse) [Tujikura et al, 2000, Kupitz, 1995]. Άλλα παραδείγματα προηγμένων τύπων αντιδραστήρων LWR είναι ο System 80 Plus (1300 MWe, ABB-CE) και ο European Pressurized Water Reactor (EPR, Framatome-Siemens). Παραδείγματα επίσης, προηγμένων τύπων BWR είναι ο Advanced Boiling Water Reactor (ABWR-1360 MWe, Gen.Electric-Hitachi-Toshiba) και ο BWR 90 (ABB, Φινλανδία, 1500 MWe) [Kupitz, 1995, Pedersen, 1998].

Οι προηγμένοι τύποι αντιδραστήρων είναι παραδείγματα της εξέλιξης προς τον ασφαλέστερο σχεδιασμό, στη βάση απλούστερων συστημάτων, εξοπλισμένα με παθητικά συστήματα ασφαλείας και με μεγάλο βαθμό προτυποποίησης κατά τον σχεδιασμό (η προτυποποίηση μειώνει την πιθανότητα κακοτεχνίας κατά την κατασκευή, η οποία συνεπάγεται κινδύνους ασφάλειας και μείωση της αξιοπιστίας, όπως και το κόστος κατασκευής) [Nero, 1979, Kupitz, 1995, Sengler et al, 1999, Pedersen, 1998].

Ειδικότερα, οι σύγχρονες απαιτήσεις για τον σχεδιασμό και τη κατασκευή αντιδραστήρων ισχύος της επόμενης γενεάς επιβάλλουν στις τεχνικές προδιαγραφές ασφαλείας τα παρακάτω χαρακτηριστικά [Hofmann, 1999, Sengler et al, 1999, Kupitz, 1995]:

- Σχεδιασμό με δυνατότητες εξέλιξης, ώστε να επιτυγχάνεται αξιοποίηση της συσσωρευμένης εμπειρίας.
- Σημαντικές βελτιώσεις στα θέματα ασφάλειας, με μείωση της πιθανότητας τήξης του πυρήνα και με βελτίωση της συμπεριφοράς και αντοχής του περιβλήματος σε συνθήκες ατυχήματος.
- Βελτίωση των συνθηκών λειτουργίας σχετικά με την προστασία έναντι της ακτινοβολίας, τη συντήρηση και την αποφυγή ανθρώπινου λάθους.
- Βελτιωμένη αλληλεπίδραση ανθρώπου-μηχανής.
- Διαχειρισιμότητα και συντήρηση των εγκαταστάσεων του πυρηνικού σταθμού, σχετικά με τη γήρανση, φυσική φθορά και υποβάθμιση των συνιστωσών, των δομικών μερών, κλπ [Tipping, 1996].
- Στοχαστική αξιολόγηση συστημάτων ασφαλείας και αξιοπιστία.

Οι αντιδραστήρες τελευταίας γενεάς, όπως ισχυρίζονται οι κατασκευαστές τους, θα πληρούν τις παραπάνω απαιτήσεις με λογικό κόστος με τη βοήθεια της σημερινής προόδου της πυρηνικής τεχνολογίας. Με αυτές τις αρχές σχεδιάστηκε ο νέος αντιδραστήρας της γάλλο-γερμανικής Nuclear Power International (NPI), θυγατρικής της γαλλικής Framatome και της γερμανικής Siemens:

Η ανάπτυξη του νέου αντιδραστήρα (European Pressurized Water Reactor, EPR) ξεκίνησε το 1989 και ο σχεδιασμός του [Sengler et al, 1999] – τα πρώτα αποτελέσματα ήταν έτοιμα το 1997 - περιλαμβάνει τα κριτήρια ασφάλειας αντιδραστήρων της νέας γενεάς, οι οποίοι σχεδιάζονται να έχουν 60 χρόνια ζωής και να αντικαταστήσουν τους ήδη υπάρχοντες. Το κόστος κατασκευής (overnight cost) θα ανέλθει πάνω από 1100 ECU/kW με τιμές 1995, με βάση τις παραπάνω απαιτήσεις ασφαλείας. Μελέτες ανταγωνιστικότητας της τιμής της κιλοβατώρας σε σχέση με άλλες μορφές ηλεκτροπαραγωγής, συνεχίζονται, όπως και μελέτες για την τεχνολογική ευελιξία του αντιδραστήρα στο μέλλον (ανακύκλωση πλουτωνίου, μεγαλύτερος κύκλος ζωής του καυσίμου, δυνατότητες αύξησης ισχύος κλπ) [Fischer, 1999].

Αντικείμενα συνεχούς έρευνας αποτελεί η μελέτη και τεχνική βελτίωση της αντοχής του περιβλήματος του δοχείου πίεσης ενός αντιδραστήρα, όπως και η εφαρμογή πρόσθετων μέτρων ασφαλείας, όπως π.χ. η προφύλαξη του δοχείου με διπλό τοίχο και το φίλτράρισμα της ενδεχόμενης ραδιενέργειας που διαρρέει στον ενδιάμεσο χώρο [Kessler, 1995, Huh, 1999].

Οι μέθοδοι των δέντρων συμβάντων και αποτυχιών, που χρησιμοποιήθηκαν και στη μελέτη Rasmussen (WASH-1400)⁵ [Μελέτη Rasmussen/Μτφ Ε. Τσίγκα, 1978] μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον συγκριτικό προσδιορισμό των ισχυρών και ασθενών σημείων συστημάτων πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος.

Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες

Οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες σχεδιάζονται έτσι, ώστε να είναι πιο ασφαλείς και πιο οικονομικοί. Ως προηγμένοι τύποι αντιδραστήρων, διαθέτουν ασφαλέστερο σχεδιασμό και μεγάλη διαθεσιμότητα ενέργειας και MOX καύσιμο. Σχεδιάζονται στα 1500-1600 MWe (Ευρώπη, Ρωσία, Ιαπωνία) στη βάση της πλοτικής εφαρμογής των Phénix και Superphénix (Γαλλία), τον πρότυπο PFR στη Βρετανία και τους BN-350 BN-600 της Ομοσπ. Δημ. Ρωσίας [Kupitz, 1995]. Προσπάθεια γίνεται να βελτιωθούν τα παθητικά συστήματα ασφαλείας, στη βάση του πλοτικού σχεδιασμού του EPR (Γαλλία, Γερμανία). Στην Ιαπωνία και Ινδία σχεδιάζονται μικρότερες μονάδες (Μοηju 280 MWe, Ιαπωνία – 10 MWe, 500 MWe, Ινδία). Στις ΗΠΑ αναπτύσσεται ο ALMR (G.E.)

Η εμπορική αξιοποίηση των αναπαραγωγικών αντιδραστήρων θα μπορούσε να επιφέρει νέους κινδύνους και προβλήματα σε θέματα ασφαλείας, εξαιτίας του τελείως διαφορετικού σχεδιασμού τους και της έλλειψης εμπειρίας σχετικά με τη νέα

⁵ *Rasmussen Report, 1974*: Μελέτη των επιπτώσεων στον άνθρωπο και το περιβάλλον ενός μεγάλου ατυχήματος σε πυρηνικό αντιδραστήρα ισχύος από την Atomic Energy Commission, AEC (ΗΠΑ), που εκπόνησε ο καθηγητής του MIT, πυρηνικός μηχανικός Norman Rasmussen, με στόχο να ηρεμήσει την κοινή γνώμη. Όντως, τα αποτελέσματα της μελέτης ήταν καθησυχαστικά. Όμως, 5 χρόνια αργότερα συνέβη το ατύχημα στη μονάδα 2 του Three Mile Island. Η μελέτη των αιτιών έδειξε ότι το ατύχημα συνέβη από έναν συνδυασμό αστοχιών. Ο Rasmussen είχε επισημάνει τέτοιες περιπτώσεις, αλλά είχε υποβαθμίσει την πιθανότητα να συμβούν τέτοιου τύπου ατυχήματα [Huh, 1999]. Η μελέτη Rasmussen είναι η πρώτη σε μεγάλη έκταση και βάθος προσπάθεια ποσοτικής εκτίμησης των κινδύνων από ατυχήματα σε εμπορικές πυρηνικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής και έχει σχολιασθεί ευρέως, τόσο θετικά όσο και αρνητικά.

αυτή τεχνολογία. Εκτός αυτού, με τη λειτουργία αναπαραγωγικών αντιδραστήρων θα υπάρξουν αύξηση στις μεταφορές πλουτωνίου - κατά συνέπεια - μεγαλύτεροι κίνδυνοι [IEA Report, 1998-99] και ενδεχομένως απόρριψη από τις κοινωνίες, εφόσον αυτές, δεν θα έχουν πειστεί για την αυξημένη ασφάλειά τους.

Νέες κατευθύνσεις έρευνας στην πυρηνική τεχνολογία

Η έρευνα εστιάζεται σε ζητήματα που εμποδίζουν σήμερα την πληρέστερη εκμετάλλευση της πυρηνικής ενέργειας (π.χ. κόστος, ασφάλεια, διάθεση αποβλήτων, κοινωνική αποδοχή), με σκοπό να καταδειχθεί ότι υπάρχουν πρακτικές λύσεις για τα σημαντικότερα επιστημονικά και τεχνικά προβλήματα αλλά και για τις ανησυχίες της κοινής γνώμης [CORDIS, 2000].

1. Με στόχο την επιχειρησιακή ασφάλεια των εγκαταστάσεων που ήδη υπάρχουν, ερευνώνται:

Βελτιωμένες μέθοδοι

- για την κατανόηση και διαχείριση της γήρανσης του εξοπλισμού και των δομικών μερών
- για παρακολούθηση on-line για προσεγγίσεις του ζητήματος του εκσυγχρονισμού των εγκαταστάσεων και της επιθεώρησης αυτών που να έχουν ως κριτήριο τους δυνητικούς κινδύνους
- για αξιολόγηση του ρόλου των οργανισμών στη βελτίωση της ασφάλειας.

Βελτιωμένες μέθοδοι και εργαλεία για τη διαχείριση σοβαρών ατυχημάτων και για την πληρέστερη κατανόηση των επιπτώσεων. Βελτιώσεις στην τρέχουσα πυρηνική τεχνολογία που να παρουσιάζουν δυνάμει πλεονεκτήματα από πλευράς κόστους και ασφάλειας.

2. Με στόχο την ασφάλεια του κύκλου του πυρηνικού καυσίμου⁶, ερευνώνται:

- Απόδειξη του τεχνικώς εφικτού της αποθήκευσης σε βαθείς γεωλογικούς σχηματισμούς και βελτιωμένη επιστημονική βάση για την αξιολόγηση της ασφάλειας.
- Βελτιωμένες μέθοδοι κατάκτησης της εμπιστοσύνης του ευρύτερου πληθυσμού.

⁶Η ασφάλεια του κύκλου του πυρηνικού καυσίμου αφορά στη διαχείριση και διάθεση του εξαντλημένου καυσίμου και των μακρόβιων και υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων καθώς και σε ό,τι αφορά τον παροπλισμό των εγκαταστάσεων.

- Μια βάση επί της οποίας να εκτιμώνται οι σε βιομηχανική κλίμακα πρακτικές δυνατότητες διαχωρισμού και μεταστοιχείωσης
- Βάσεις δεδομένων για τον παροπλισμό.

3. Με στόχο την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα των μελλοντικών συστημάτων, ερευνώνται τεχνικές λύσεις για τον αντιδραστήρα, το καύσιμο και τον κύκλο του καυσίμου, οι οποίες να προσφέρουν πιο μακροπρόθεσμα οφέλη σε ό,τι αφορά το κόστος, την ασφάλεια, την διαχείριση των αποβλήτων, τη χρησιμοποίηση του σχάσιμου υλικού, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τη μείωση του κινδύνου εκτροπής σχάσιμων υλικών και τη βιώσιμη ανάπτυξη.

4. Με στόχο την Ακτινοπροστασία, ερευνώνται, η αντιμετώπιση των κινδύνων, με στόχο να αναπτυχθούν νέες προσεγγίσεις σε ό,τι αφορά την αντιμετώπιση (αξιολόγηση, διαχείριση και ρύθμιση) των κινδύνων, οι οποίες να είναι πιο αποτελεσματικές ώστε να κερδηθεί η εμπιστοσύνη του ευρύτερου πληθυσμού, όπως επίσης να έχουν εφαρμογή σε όλο τον κύκλο του καυσίμου. Η ανάπτυξη προσεγγίσεων για την αντιμετώπιση των πιθανών κινδύνων (όπως π.χ. οι διαδικασίες εκτίμησης, διαχείρισης και κανονιστικών ρυθμίσεων), οι οποίες να είναι αποτελεσματικότερες (σε κατανάλωση χρόνου και πόρων), λιγότερο διαμφισβητούμενες και ικανές να κερδίσουν την εμπιστοσύνη του ευρύτερου πληθυσμού, με παράλληλη παροχή κατευθυντήριων γραμμών για την εφαρμογή τους στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας. Η εμπιστοσύνη του κοινού, η διαφάνεια, η συμμετοχή ενός παράγοντα που απολαύει της κοινής εμπιστοσύνης και η αποτελεσματική επικοινωνία έχουν, μεταξύ άλλων, χαρακτηριστεί ως βασικά στοιχεία για την καλύτερη αντιμετώπιση των πιθανών κινδύνων και θα έπρεπε να τεθούν σε εφαρμογή.

Η παρακολούθηση και η αξιολόγηση της επαγγελματικής έκθεσης, με στόχο να βελτιωθεί η παρακολούθηση και αξιολόγηση των περιπτώσεων έκθεσης σε ακτινοβολία στον χώρο δουλειάς, για την ορθότερη προστασία και αξιοποίηση του ανθρώπινου δυναμικού (Ανάπτυξη ατομικών συστημάτων παρακολούθησης της έκθεσης σε σύνθετα πεδία ακτινοβολίας -νετρόνια και ακτίνες γάμμα, που απαντούν στον κύκλο του καυσίμου και μεθόδων αξιολόγησης της δόσης στον εργασιακό χώρο προς χρήση για βελτίωση σχεδιασμού και λειτουργίας, και ανάπτυξη ταχύτερων και πιο αξιόπιστων τεχνικών μεθόδων παρακολούθησης in-vivo και βιοδοκιμών, ορθότερη παρακολούθηση των ατομικών δόσεων πρόσληψης και εφαρμόσιμες μέθοδοι βελτιστοποίησης της εσωτερικής έκθεσης).

Η διαχείριση έκτακτων περιστατικών εξωτερικής προέλευσης, με στόχο να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα και συνεκτικότητα του τρόπου με τον οποίο αντιμετωπίζονται στην Ευρώπη οι καταστάσεις έκτακτης ανάγκης που οφείλονται σε εξωτερικά αίτια. Η υποστήριξη λήψης αποφάσεων με βελτιώσεις σε ενισχυμένα εργαλεία υποστήριξης της λήψης αποφάσεων, ανάπτυξη βελτιωμένων μεθόδων πρόβλεψης περιστατικών έκλυσης ραδιενέργειας στο περιβάλλον, ανάλογα με την κατηγορία της εγκατάστασης, για την εμπέδωση των διαθέσιμων πληροφοριών (απόψεις εμπειρογνομόνων, προβλέψεις βάσει μοντέλων, μετρήσεις), για την αντιμετώπιση αστάθμητων παραγόντων και τη διαχείριση ανόμοιων προβλέψεων ως προς τη μέσο-μακροπρόθεσμη διασπορά στην ατμόσφαιρα, τέλος δε για την ανταλλαγή δεδομένων και πληροφοριών.

Η παρακολούθηση του περιβάλλοντος, με ανάπτυξη στρατηγικών και τεχνικών παρακολούθησης οι οποίες να εξασφαλίζουν πιο επίκαιρες, κατατοπιστικές, αξιόπιστες και συμφέρουσες από πλευράς κόστους πληροφορίες για τη λήψη αποφάσεων (Ανάπτυξη πρωτοκόλλων συγκριτικής μέτρησης της ακτινοβολίας γάμμα στην ατμόσφαιρα και άλλων μορφών μεταβλητής παρακολούθησης). Η αποκατάσταση και μακροπρόθεσμη διαχείριση του περιβάλλοντος σε περιοχές ραδιενεργού ρύπανσης, με στόχο να αναπτυχθούν ακμαίες και εφαρμόσιμες στρατηγικές και τεχνολογίες βιώσιμης διαχείρισης σε αγροτικό, αστικό και βιομηχανικό περιβάλλον βεβαρημένο με ραδιενεργό ρύπανση εξαιτίας πυρηνικού ατυχήματος.

1.3. Μελέτη ατυχημάτων και αλληλουχίας γεγονότων κατά το ατύχημα

Η συμβολή της έρευνας για κινδύνους που ενέχονται από τη λειτουργία αντιδραστήρων ισχύος βασίζεται κατά κύριο λόγο, στην μελέτη σοβαρών ατυχημάτων που έχουν συμβεί, τα οποία οδήγησαν σε τήξη του πυρήνα (Core melting, Reactor Pressure Vessel failure, failure of cooling recovery actions - i.e. Of the flooding of the core etc). Για να συμβεί ένα σοβαρό ατύχημα σε ένα μεγάλο σύστημα, τουλάχιστον δύο αιτίες-γεγονότα πρέπει να αναζητηθούν, οι οποίες πρέπει να συνέβησαν ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, αποκάλυψη του πυρήνα μπορεί να συμβεί όταν υπάρχει μία μικρή διαρροή στο σύστημα ψύξης του βασικού κυκλώματος, ενώ παράλληλα έχει παρουσιαστεί προσωρινή αστοχία του συναγερμού του συστήματος ψύξης. Η συνεχής υπερθέρμανση του πυρήνα από την θερμότητα των προϊόντων από τη σχάση μπορούν να προκαλέσει ακόμα και τη τήξη του. Ατυχήματα ενδέχεται επίσης να συμβούν από την αστοχία του δοχείου πίεσης του αντιδραστήρα (reactor pressure vessel, RPV), ή επίσης από την αστοχία του εξωτερικού περιβλήματος.

Ατυχήματα που προέρχονται από τήξη του πυρήνα, τα οποία μπορούν κατά συνέπεια να οδηγήσουν στη ρήξη του εξωτερικού περιβλήματος, είναι [Kessler, 1995, Λεωνίδου, 1978, Hofmann, 1999]:

- Παραγωγή υδρογόνου (από την οξείδωση των στερεών υλικών του πυρήνα λόγω του ατμού)
- Έκρηξη ατμού
- Λιώσιμο του δοχείου πίεσης κάτω από υψηλή πίεση
- Παρακάμψεις του περιβλήματος
- Ατυχήματα διαρροής ραδιενέργειας
- Τήξη πυρήνα μέσω παράκαμψης του περιβλήματος κα.

Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την αρχή ενός ατυχήματος μέχρι την αποκάλυψη του πυρήνα κυμαίνεται από χρόνους μικρότερους των 10 λεπτών έως μεγαλύτερους χρόνους, της τάξης των 6 έως 10 ωρών [Hofmann, 1999]. Η πίεση του συστήματος επίσης κυμαίνεται από 0.3 έως 15 MPa κατά τη διάρκεια συμβάντων χωρίς πτώση πίεσης.

Μετά την αποκάλυψη του πυρήνα, το μίγμα των υλικών συσσωρεύεται στη κατώτερη περιοχή στη περίπτωση υγρού πυρήνα ("wet" core), ή στη περίπτωση BWR κάτω από τον πυρήνα ("dry" core). Κατά συνέπεια, παράγεται λίγος ατμός, ο οποίος διοχετεύεται στον πυρήνα. Η μεταφορά θερμότητας από το καύσιμο στον ατμό είναι

πολύ μικρή συγκριτικά με τη θερμότητα της μεταστοιχείωσης από τη σχάση, οπότε η θερμότητα του καυσίμου αυξάνει. Η φάση της υπερθέρμανσης συνεχίζεται ανάλογα με τα υλικά του πυρήνα, μέχρις ότου αυτά φθάσουν σε κάποια σταθερή κατάσταση, μέσα από πολύπλοκες χημικές αντιδράσεις, ενώ έχουμε ρευστοποίηση του υλικού και τελικά, τήξη του.

Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά το ατύχημα οδηγούν και σε άλλα φαινόμενα, όπως την οξειδωση υλικών (Zircaloy cladding materials σε PWRs, BWRs, VVERs) από τον ατμό, η οποία ανεβάζει ακόμα πιο πολύ την θερμοκρασία, και εάν η θερμοκρασία δεν πέσει εν τω μεταξύ, το φαινόμενο ανακυκλώνεται (temperature increase-cladding oxidation). Η επανατοποθέτηση του λιωμένου υλικού σε ψυχρότερα σημεία μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη αύξηση της θερμοκρασίας σε εκείνα τα σημεία. Κατά συνέπεια, έχει μεγάλη σημασία για την πρόληψη ατυχήματος, η ικανότητα να προβλέψει κανείς τη συμπεριφορά του υλικού σε συνθήκες ατυχήματος, να διαθέτει δηλαδή κανείς, μία ποσοτική περιγραφή των αλληλεπιδράσεων των διαφόρων υλικών σε σχέση με τη θερμοκρασία και τον χρόνο.

Για τον σκοπό αυτό, εκπονήθηκε το 1996, με την οικονομική υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, ένα κοινό ευρωπαϊκό πρόγραμμα με τίτλο «Core Degradation». Στόχος του προγράμματος ήταν η κατανόηση και αναλυτική περιγραφή των φαινομένων υποβάθμισης του πυρήνα (in-vessel) σε έναν αντιδραστήρα LWR, μέσω πειραματικών μελετών και μοντελοποίησης [Hofmann, 1999]. Εκτός αυτού, ιδιαίτερη υποστήριξη δόθηκε σε τέτοιες μελέτες από την Ευρωπαϊκή Ένωση στα πλαίσια του 4ου Προγράμματος-Πλαισίου.

Η περίπτωση του Κοζλοντούι

Ο πυρηνικός σταθμός ισχύος στο Κοζλοντούι (Βουλγαρία) βρίσκεται κοντά στα βορειοδυτικά σύνορα της Βουλγαρίας με τη Ρουμανία, δίπλα στον ποταμό Δούναβη. Απέχει 225 km από τα βόρεια σύνορα της Ελλάδας και είναι ο κοντινότερος πυρηνικός σταθμός στη χώρα. Ο σταθμός αποτελείται από έξι αντιδραστήρες ισχύος τύπου WWER-440 μοντέλο 230 (πεπιεσμένου ύδατος), οι τέσσερις των οποίων είναι ισχύος 440 MWe έκαστος, ενώ οι άλλοι δύο είναι νεότερου τύπου WWER-1000 ισχύος 1000 MWe έκαστος. Μελέτες δυνητικών επιπτώσεων από ατύχημα στον σταθμό στην κατηγορία 7 της Διεθνούς Κλίμακας Πυρηνικών Συμβάντων του ΔΟΑΕ/NEA (OECD) έχουν πραγματοποιηθεί για τις μονάδες των 1000 MW, επειδή λόγω του μεγέθους τους, μπορούν να προκαλέσουν δυνητικά μεγαλύτερες

ραδιολογικές επιπτώσεις [Κολλάς, 1993]. Ενώ, μελέτες επικινδυνότητας έχουν πραγματοποιηθεί για τις παλαιότερες τεχνολογίες για τις μονάδες WWER-440 (μοντέλο 230).

1.4. “Hidden” (Κρυφά) Κριτήρια

Τα θέματα ασφάλειας στους αντιδραστήρες ισχύος είναι πολλές φορές συνδεδεμένα με την πολιτική. Εκτός από πλευρές που αφορούν τα οικονομικά της ενέργειας, την εξάρτηση από ενεργειακούς προμηθευτές, τις πλευρές της γεωπολιτικής κλπ, υπάρχουν και καθαρά πολιτικές παράμετροι, οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη (για παράδειγμα, η κυβέρνηση της Λιθουανίας δήλωσε ότι η μονάδα της Ignalina θα παραμείνει σε λειτουργία όσο είναι ασφαλής και οικονομικά συμφέρουσα, όμως, παρότι δεν υπάρχουν εγγυήσεις για το κλείσιμο της μονάδας πριν το 2004, θεωρείται ότι το κλείσιμο του σταθμού θα αποτελέσει προϋπόθεση για την ένταξη της Λιθουανίας στην Ε.Ε.) [Laraia and Dlouhy, 2000]. Από την άποψη αυτή, οι παλαιότεροι σε ηλικία σταθμοί θεωρούνται πιο επισφαλείς, ενώ κάθε αναβάθμιση (backfitting) απαιτεί τεράστια χρηματικά ποσά και επιχορηγήσεις.

1.5. Θέματα ασφάλειας και μεταφοράς ραδιενεργού υλικού μέσω του περιβάλλοντος

Στόχος της έρευνα σήμερα, είναι η πληρέστερη κατανόηση της συμπεριφοράς του ραδιενεργού υλικού στο περιβάλλον, με απώτερο σκοπό την ανάπτυξη μιας ορθής πρακτικής για τη διαχείριση των επιπτώσεων των φυσικών και τεχνητών πηγών ακτινοβολίας στον άνθρωπο και στο περιβάλλον [CORDIS, 2000, Fischer, 1999]. Η έρευνα που επιτελείται αφορά στα πεδία σχετικά με:

- την αξιολόγηση και μοντελοποίηση των μηχανισμών συσσώρευσης, περιοδικής επανεμφάνισης και ανακατανομής των ραδιονουκλιδίων που αποτίθενται στα οικοσυστήματα θεωρούμενα ως ενιαία συστήματα (π.χ. χερσαία, υδατικά, κλπ),
- την αξιολόγηση κρίσιμων περιβαλλοντικών παραμέτρων (υδρολογικών, φυσικοχημικών, βιολογικών παραγόντων) που διέπουν τη μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη ροή ραδιονουκλιδίων που εισέρχονται σε συστήματα γλυκέων υδάτων (λεκάνες απορροής, ποταμοί, λίμνες, ποταμόκολποι, κ.ά.), σε αβαθείς θαλάσσιες ζώνες και σε λεκάνες της Αρκτικής κλπ.

- την αποτελεσματικότητα και τη διάρκεια της ενδεχόμενης αποκατάστασης σε σχέση και με άλλους ρύπους, παλαιότερες γεωργικές πρακτικές, υγρά απόβλητα της βιομηχανίας, κ.λπ.

2. Τεχνικά χαρακτηριστικά αντιδραστήρων

2.1. Η παραγωγικότητα/απόδοση ή αξιοπιστία της λειτουργίας ενός αντιδραστήρα ισχύος (Operational Performance)

Η παραγωγικότητα για τους πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος είναι μία από τις πλέον σημαντικές παραμέτρους, για πολύ φανερούς λόγους: το κόστος επένδυσης είναι πολύ υψηλό, σε σχέση με άλλες εγκαταστάσεις και μεθόδους ηλεκτροπαραγωγής. Ιδιαίτερα από τα τέλη του 1980 μέχρι σήμερα, γίνεται μεγάλη προσπάθεια να αυξηθεί η απόδοση και η καλή λειτουργία των αντιδραστήρων, με σκοπό τη μείωση και του συνεχώς αυξανόμενου κόστους λειτουργίας τους.

Για να είναι η πυρηνική ενέργεια ανταγωνιστική, πρέπει να μπορεί να παράγει με αξιόπιστη λειτουργία και χωρίς διακοπή, για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Τέτοια απόδοση εγκατάστασης προϋποθέτει συγκεκριμένες τεχνολογικές απαιτήσεις υλικών και συστατικών μερών, όπως και αξιόπιστο καύσιμο, ώστε να διασφαλίζεται η λειτουργία χωρίς αστοχίες (failures) και επομένως να μην χρειάζεται να «κλείνουν» ο αντιδραστήρας (shut down) εκτός προγραμματισμού για επισκευές και συντήρηση (maintenance). Υπάρχουν πολλοί έμμεσοι δείκτες της καλής λειτουργίας και της οικονομικής απόδοσης των πυρηνικών σταθμών [IEA Report, 1998-99]:

- Μείωση των γενικών εξόδων σε επίπεδο μονάδας ή επιχείρησης
- Μείωση της χρονικής απόστασης μεταξύ δύο συνεχών ανανεώσεων του καυσίμου
- Μείωση της χρονικής διάρκειας ανανέωσης του καυσίμου
- Υψηλότερη αξιοποίηση της ενέργειας του πυρηνικού καυσίμου
- Υψηλότερο ποσοστό χρήσης της μονάδας (capacity factor)
- Μείωση του προσωπικού
- Λιγότερα μη-προγραμματισμένα «κλεισίματα» του αντιδραστήρα
- Χαμηλότερη συλλογική έκθεση του προσωπικού στην ακτινοβολία.

Οι παραπάνω δείκτες έχουν ιδιαίτερο ρόλο και στην μελέτη της οικονομικότητας των πυρηνικών σταθμών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η βρετανική British Energy, η οποία κατάφερε από το 1992 έως το 1997 να αυξήσει κατά 64% την

ικανότητα των σταθμών της, που παρήγαγαν από 41 TWh το 1992, 67 TWh το 1997, με παράλληλη μείωση προσωπικού και με χρήση των εξής δεικτών: capacity factor, συχνότητα βιομηχανικών ατυχημάτων, έκθεση του προσωπικού στη ραδιενέργεια κλπ. Το κόστος παραγωγής κυμάνθηκε από 80 USD/MWh το 1992 σε 33 USD/MWh το 1997 (0,02 £/kWh). Στις ΗΠΑ, σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας, το κόστος παραγωγής κυμάνθηκε από 23 USD/MWh το 1990 σε 21 USD/MWh το 1996 (0,02 £/kWh) [IEA Report 1998-99]. Η απόδοση των πυρηνικών σταθμών εκφράζεται κατά κανόνα, με όρους «παραγωγικότητας/διαθεσιμότητας» ή με capacity factors.

Capacity factor gross ή Load factor: Σύμφωνα με το λεξικό της Nuclear Regulatory Commission των ΗΠΑ, ο (μικτός) παράγοντας ικανότητας ή φορτίου ενός αντιδραστήρα είναι «ο λόγος της μικτής (gross) ηλεκτρικής ενέργειας που παρήχθηκε σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, προς την ενέργεια που θα παραγόταν, εάν ο αντιδραστήρας λειτουργούσε συνεχώς και σε πλήρη ισχύ κατά το ίδιο χρονικό διάστημα».

Σύμφωνα επίσης, με το λεξικό του Ινστιτούτου Ουρανίου [Γλωσσάριο UI, 2000], ο παράγοντας ικανότητας ή φορτίου (Load factor) ενός αντιδραστήρα είναι: «το ποσοστό ενέργειας που εν δυνάμει παράγει στο διάστημα ενός έτους και χρησιμεύει ως κοινό μέτρο παγκοσμίως για την μέτρηση της παραγωγικότητας ενός αντιδραστήρα (*power station performance*)». Συνήθως, ο παράγοντας ικανότητας ή φορτίου (Load factor, LF) ενός αντιδραστήρα αντιπροσωπεύει τη μικτή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μία δεδομένη περίοδο 365 ημερών, π.χ. έως το τέλος Ιουνίου κάθε έτους, ή για όλη τη ζωή του σταθμού, και εκφράζεται σαν το ποσοστό της μέγιστης δυνατής μικτής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που θα πετύχαινε κάθε μία μονάδα εάν λειτουργούσε στις μέγιστες σχεδιαστικές της συνθήκες ή στις μέγιστες αδειοδοτημένες δυνατότητές της ικανότητάς της (capacity) κατά την ίδια περίοδο (Annual LF, % ή Lifetime LF, %).

Capacity factor net: Σύμφωνα με το λεξικό της Nuclear Regulatory Commission των ΗΠΑ, ο (καθαρός) παράγοντας ικανότητας ενός αντιδραστήρα είναι «ο λόγος της καθαρής (net) ηλεκτρικής ενέργειας που παρήχθηκε σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, προς την ενέργεια που θα παραγόταν, εάν ο αντιδραστήρας λειτουργούσε συνεχώς και σε πλήρη ισχύ κατά το ίδιο χρονικό διάστημα».

Ικανότητα (Capability): Σύμφωνα με το λεξικό της Nuclear Regulatory Commission των ΗΠΑ, η ικανότητα (Capability) ενός αντιδραστήρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι το μέγιστο φορτίο στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει υπό

καθορισμένες συνθήκες και για ένα ορισμένο διάστημα, χωρίς να υπερβεί τα εγκεκριμένα όρια θερμοκρασίας και καταπόνησης.

Από στοιχεία του περιοδικού Nuclear Engineering International (1999) (Πίνακας 13), το οποίο δημοσιεύει ετησίως στατιστικά στοιχεία για τους load factors αντιδραστήρων ισχύος άνω των 150 MWe, περίπου στα τέλη κάθε Ιουνίου, φαίνεται πως την καλύτερη απόδοση (performance) με βάση load factors, παρουσιάζουν οι PWRs και ακολουθούν οι BWRs και οι PHWRs (Ινδία και 1 μονάδα στον Καναδά).

Η ΙΑΕΑ δίνει στοιχεία, που χωρίζουν την απόδοση ενός σταθμού σε τέσσερις κατηγορίες, οι οποίες εκφράζονται σε ποσοστό επί της λειτουργίας του σταθμού εάν λειτουργούσε σε πλήρη σχεδιαστική ισχύ και χωρίς διακοπές [Thomas, 1999]:

- **Load factor** - η ισχύς που παράγεται στην πραγματικότητα από τον σταθμό.
- **Outages losses** - η ισχύς που χάνεται από απρογραμματίιστα «shutdowns» του σταθμού.
- **Derating losses** - η ισχύς που χάνεται (ή κερδίζεται) εάν η μονάδα είναι αδειοδοτημένη από τις αρχές να λειτουργεί σε μικρότερη (ή μεγαλύτερη) ισχύ από αυτή του σχεδιασμού της (συνήθως, οι derating losses θεωρούνται μηδενικές, εκτός εάν αναφέρεται διαφορετικά).
- **Operating losses** - απώλειες ισχύος (ή κέρδη) κατά την λειτουργία του σταθμού, σε ισχύ μικρότερη (ή μεγαλύτερη) από την αδειοδοτημένη ηλεκτρική ισχύ.

Derating losses: Υπάρχουν πολλοί λόγοι για να λειτουργεί μία μονάδα κάτω από την σχεδιαστική ισχύ της: αποφυγή υπερβολικής κόπωσης των υλικών, προβλημάτων διάβρωσης κλπ (Βρετανία, αντιδραστήρες 1ης γενιάς, προβλήματα διάβρωσης από το ψυκτικό αέριο), αδυναμία να λειτουργεί η μονάδα με ασφάλεια σε πλήρη ισχύ κλπ. Μερικές μονάδες - όπως οι περισσότερες γαλλικές - δεν λειτουργούν επίσης, στο μέγιστο των δυνατοτήτων τους γιατί η εγκατεστημένη ισχύς του πυρηνικού σταθμού είναι πάνω από τις απαιτήσεις το φορτίου βάσης που θέτει ο χρήστης της ηλεκτρικής ενέργειας [IEA Report, 1998-99]. Πρέπει να σημειωθεί ότι, ως απώλειες από την λειτουργία σε χαμηλότερη ισχύ θεωρούνται μόνον αυτές που αντιστοιχούν σε μικροπρόθεσμες αλλαγές της ισχύος - Αυτές που διαρκούν πάνω από 1 έτος, φαίνονται σαν απώλειες ισχύος κατά τη λειτουργία (Operating losses). Στους προηγμένους τύπους αντιδραστήρων, εισαγάγονται βελτιώσεις και αναβαθμίσεις στην τεχνολογία των γεννητριών ή των εναλλακτών θερμότητας, με σκοπό την αύξηση της ηλεκτρικής απόδοσης από μία δεδομένη θερμική απόδοση του αντιδραστήρα [Thomas, 1999].

Operating losses: Αιτίες για απώλειες ισχύος κατά τη λειτουργία υπάρχουν επίσης πολλές: μικροπρόθεσμες μειώσεις της ισχύος λόγω ασφάλειας, οικονομία καυσίμου ή οικονομικοί παράγοντες που δεν επιτρέπουν έγκαιρη αντικατάσταση του εξαντλημένου καυσίμου, χαμηλή ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, κάποιες εργασίες συντήρησης που επιβάλλουν μειωμένη λειτουργία, κλπ [Thomas, 1999].

Πίνακας 13: Μέσοι παράγοντες ικανότητας ή φορτίου (LF) στα τέλη Ιουνίου 1998 (Πηγή: Nuclear Engineering International 1999)

Εγκατάσταση	Χώρα	Αρ. Μονάδων	Σύνολο MWe	Ετήσιος LF (%)	LF(%) για όλη τη διάρκεια ζωής	TWh στη διάρκεια ζωής	Reactor years
<i>PWRs</i>							
EBES	B	4	2940	91,9	81,7	369,2	80,2
MVMT	HU	4	1843	89,2	85,5	190,8	56,2
Comm.Ed.	US	4	4700	89,0	73,9	378,0	49,9
Florida	US	4	3314	89,0	71,5	453,0	92,0
Virginia	US	4	3700	88,8	68,3	503,3	93,5
CEZ	CZ	4	1804	85,7	79,6	164,6	52,7
KEPCO	SK	11	10139	82,8	78,9	742,2	124,3
Kyushu	J	6	5258	80,5	77,3	412,3	81,9
Duke	US	7	8022	79,8	70,5	902,0	138,3
Kansai	J	11	9768	78,5	68,0	1031,0	216,6
EDF	F	54	59902	72,1	68,5	5270,0	829,5
SEP	SL	4	1760	65,6	73,9	194,1	68,8
NEK	BU	6	3760	54,1	54,9	279,4	104,5
<i>BWRs</i>							
PECO	US	4	4624	89,3	67,7	479,9	74,3
Tokyo EC	J	17	17308	83,4	74,3	1488,1	255,6
Vatenfall	S	4	4083	80,5	75,9	486,3	76,7
Chubu	J	4	3617	77,6	73,4	331,8	65,1
Comm.Ed.	US	6	5576	77,2	57,1	648,5	143,7
Taiwan PC	TW	5	4227	69,1	68,3	444,6	89,8
<i>Other Types</i>							
British En. (AGR)	GB	14	9324	80,0	58,3	767,7	226,3
NPCorp. (PHWR)	IN	8	1850	65,0	44,7	83,7	103,8
Magnox Elect.	GB	12	4066	59,4	60,7	684,6	395,2
Ontario H (PHWR)	C	9	14440	48,2	71,6	1380,5	318,6

2.2. Προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας

Οι περισσότεροι αντιδραστήρες – και οι LWRs – πρέπει να «κλείνουν» σε κανονικά διαστήματα για ανατροφοδοσία του καυσίμου - περίπου για 1-2 μήνες – κατά τα οποία πραγματοποιούνται όλες οι σημαντικές επισκευές, επιθεωρήσεις, εργασίες συντήρησης, κλπ. Αναφέρεται ότι, στο διάστημα 1980-91, οι διακοπές που συνέβησαν σε όλους τους αντιδραστήρες στον κόσμο - εκτός των ΗΠΑ – για ανατροφοδοσία του καυσίμου, αποτέλεσαν το 70% των απωλειών ισχύος (outage losses). Στην πράξη δηλαδή, οι διακοπές αυτές μπορεί να αποτελούν το βασικό κριτήριο στην οικονομική απόδοση του σταθμού.

Το διάστημα μεταξύ δύο διακοπών ανατροφοδοσιών καυσίμου (operating cycle) υπήρξε στην Ευρώπη κατά κανόνα περί τους 12 μήνες (μαζί με τη διάρκεια της ανατροφοδοσίας) με βάση τις αντίστοιχες τεχνικές και κανονιστικές απαιτήσεις. Η τυπική απόκλιση για το διάστημα μεταξύ δύο διακοπών ανατροφοδοσιών καυσίμου υπολογίζεται να είναι περίπου 2 μήνες, για αντιδραστήρες με ετήσιους κύκλους ανατροφοδοσίας. Οι εποχικές διακυμάνσεις (πχ, χαμηλή ζήτηση τον χειμώνα και κατά συνέπεια λιγότερη κατανάλωση καυσίμου) μπορεί να αντισταθμιστούν από συχνές ανάγκες για ανατροφοδοσία (μεταβολές στην αγορά καυσίμου, κλπ) [Stump, 1995]. Η εργασία του R. Stump (1995) μελέτησε ένα στοχαστικό μοντέλο πρόβλεψης του κόστους των μη προγραμματισμένων και των προγραμματισμένων διακοπών LWRs σε διάφορες χώρες.

2.3. Μη προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας

Οι μη προγραμματισμένες διακοπές συμβαίνουν εξαιτίας αστοχιών του εξοπλισμού του συστήματος με μεγαλύτερη συχνότητα σε σχέση με τις προγραμματισμένες, αλλά διαρκούν λιγότερο χρονικό διάστημα και κατά συνέπεια, η συνεισφορά τους στις απώλειες ισχύος θεωρείται σχετικά μικρή. Σε αντίθεση όμως, με τη διάρκειά τους, η συχνότητα των μη προγραμματισμένων διακοπών παραμένει πολύ σημαντικός παράγοντας για τη λειτουργία των σταθμών, λόγω της σχέσης του με την πραγματική και αντίληπτη ασφάλεια (actual-perceived safety).

2.4. Ανάλυση της λειτουργίας και απόδοσης ενός πυρηνικού σταθμού

Η ΙΑΕΑ δημοσιεύει τακτικά στοιχεία που επιτρέπουν την καταγραφή των περιόδων και τις αιτίες, για τις οποίες διάφοροι σταθμοί παραμένουν «κλειστοί» για κάποιο

διάστημα. Σε συνδυασμό με τους δείκτες της παραγόμενης ισχύος και του χρόνου λειτουργίας (on-line time) μπορεί κανείς να υπολογίσει την **αξιοπιστία της λειτουργίας** της μονάδας (plant reliability) υπολογίζοντας τον δείκτη *forced outage frequency* [Thomas, 1999].

Ο δείκτης «**συχρότητα αναγκαστικών διακοπών**» (*forced outage frequency*) πόσες φορές σε ένα δεδομένο χρόνο, οι ιδιοκτήτες της μονάδας αναγκάστηκαν να «κλείσουν» τον αντιδραστήρα εκτός προγραμματισμού. Ο αριθμός αυτός κανονικοποιείται για 6000 ώρες λειτουργίας και έτσι, για παράδειγμα, εάν μία μονάδα ήταν σε λειτουργία επί 3000 h και παρατηρήθηκαν δύο αναγκαστικές διακοπές (forced outages), η κανονικοποιημένη συχρότητα απρογραμματίστων διακοπών θα είναι 4 [Thomas, 1999]. Το ποσοστό των μη-προγραμματισμένων διακοπών των σταθμών μπορεί να μελετηθεί μόνο με κάποιες τεχνικές παραδοχές, οι οποίες επιβάλλονται, προκειμένου να συγκριθούν δεδομένα συγκρίσιμων από τεχνική άποψη αντιδραστήρων, οι οποίοι, εννοείται ότι, λειτουργούν υπό παρόμοιες συνθήκες σε στατικό περιβάλλον. Παρόμοια μελέτη που έχει πραγματοποιηθεί σε μεγάλους LWRs (PWRs και BWRs), δείχνει την σχέση (Πίνακες 14 και 15) μεταξύ της αξιοπιστίας της λειτουργίας ενός σταθμού (reliability) και της παραγωγικότητας/διαθεσιμότητάς του (productivity/availability) [Sturm, 1995]. Πρέπει να σημειωθεί ότι, οι αντιδραστήρες BWR και PWR (LWRs) παρουσιάζουν συγκρίσιμη τεχνική απόδοση και συμπεριφορά [Bodansky, 1996].

Πίνακας 14: Στατιστικά στοιχεία λειτουργίας σταθμών (Πηγή: Sturm, 1995)

Χώρα Αρ. Αντιδρ. τύπου LWR	Αρ. Διακοπών για ανατροφοδοσία καυσίμου	Μέση διάρκεια ανατροφοδοσίας (ημέρες)	Αρ. μη προγραμ- ματισμένων διακοπών (αστοχίες εξοπλισμού)	Μέση διάρκεια μη προγραμματι- σμένων διακοπών (ημέρες)
Βέλγιο 3 PWRs	14	47	58 (41)	2,4
Γαλλία 11 PWRs	44	52	264 (224)	4,9
Γερμανία 5 PWRs	31	43	27 (21)	3,5
Ελβετία 3 PWRs	19	33	11 (11)	4,4
Σουηδία 6 BWRs	34	32	130 (120)	2,5

Πίνακας 15: Στατιστικά στοιχεία λειτουργίας σταθμών (availability & capacity factors, unplanned Outage rate) (Πηγή: Stum, 1995)

Χώρα Αρ. Αντιδρ.τύπου LWR	Availability Factor	Capacity Factor	Unplanned outage rate (Reactor year)
Βέλγιο 3 PWRs	81,5	78,8	2,94
Γαλλία 11 PWRs	76,2	70,0	5,08
Γερμανία 5 PWRs	82,7	79,1	1,0
Ελβετία 3 PWRs	88,2	85,8	0,67
Σουηδία 6 BWRs	86,2	77,9	3,90
Όλοι οι αντιδραστήρες παγκοσμίως, εκτός ΗΠΑ 1981-1991	77,7	71,0	not calculated
Αντιδραστήρες ΗΠΑ 1981-1991	70,8	65,4	not calculated

2.5. Βελτίωση της απόδοσης

Οι πυρηνικοί σταθμοί σχεδιάζονται για να παράγουν μία συγκεκριμένη ποσότητα θερμότητας (νετρονίων). Κατά συνέπεια, η αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί με συγκεκριμένους τρόπους: βελτίωση της απόδοσης των ατμογεννητριών ή μείωση της θερμοκρασίας του ψύχοντος νερού που χρησιμοποιεί ο συμπυκνωτής της ατμογεννήτριας.

Στη τελευταία περίπτωση, εάν η θερμοκρασία του ψύχοντος νερού είναι χαμηλή (χειμώνας) μπορεί αν παραχθεί πολύ περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από την ίδια θερμότητα (νετρονίων) σε σχέση με το καλοκαίρι, που η θερμοκρασία του νερού είναι υψηλότερη. Εάν όμως, μία μονάδα λειτουργούσε το χειμώνα με αυξημένη ισχύ, αλλά το καλοκαίρι με μειωμένη - λόγω πχ. μείωσης της ζήτησης - σε ετήσια βάση η διαφοροποίηση αυτή δεν γίνεται αισθητή και οι ετήσιες απώλειες ισχύος κατά την λειτουργία εξισορροπούνται. Στην πράξη, οι εποχικές διακυμάνσεις στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικούς σταθμούς είναι πολύ μικρές και σε μερικές

περιπτώσεις – όπως στην Ιαπωνία – αμελητέες. Στην Ιαπωνία, ο σταθμός Fukushima Daiichi 2 λειτούργησε ανελλιπώς το 1996 καθ' όλο το έτος. Η διακύμανση των μηνιαίων Load factors ήταν ελάχιστη, κυμαινόμενη μεταξύ 99,4% και 99,6%. Στη Γερμανία, η διακύμανση αυτή ήταν λίγο μεγαλύτερη: π.χ. ο σταθμός του Grohnde λειτούργησε ανελλιπώς επί 8 μήνες το 1996 και σε αυτούς τους μήνες, οι μηνιαίοι load factors κυμάνθηκαν από 86,6 % σε 105,9%. Μία διακύμανση δηλαδή 6 ποσοστιαίων μονάδων στους μηνιαίους load factors μηνών κατά τους οποίους ο σταθμός λειτουργούσε συνεχώς, είναι λογική και τυπική σε παγκόσμια βάση [Thomas, 1999].

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

3. Ο κύκλος του πυρηνικού καυσίμου (nuclear fuel cycle)

3.1. Εισαγωγή- Ορολογία

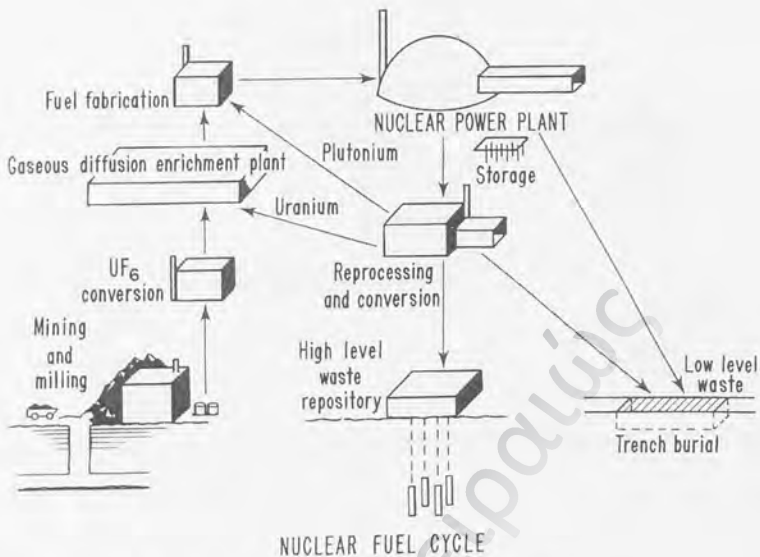
Κατά τη ορολογία της ΙΑΕΑ, ο κύκλος του πυρηνικού καυσίμου είναι όλες οι λειτουργίες που συνδέονται με την παραγωγή της πυρηνικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων της εξόρυξης και επεξεργασίας και του εμπλουτισμού του ουρανίου ή του θορίου, την κατασκευή του πυρηνικού καυσίμου, την λειτουργία των πυρηνικών σταθμών, την επανεπεξεργασία του πυρηνικού καυσίμου, τον παροπλισμό και κάθε δραστηριότητα σχετική με την διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων, καθώς και κάθε δραστηριότητα για έρευνα ή ανάπτυξη σχετική με τα παραπάνω.

Ο κύκλος του πυρηνικού καυσίμου, όπως τον εννοούμε σήμερα, περιλαμβάνει όλες τις δραστηριότητες που σχετίζονται με τη χρήση σχάσιμων υλικών, ως κυρίου καυσίμου στους αντιδραστήρες σχάσεως. Οι περισσότεροι αντιδραστήρες της κατηγορίας αυτής - με εξαίρεση μόνο τους ερευνητικούς αντιδραστήρες - χρησιμοποιούν ουράνιο ως κύριο καύσιμο. Επίσης, χρησιμοποιούν θόριο - το προϊόν αναπαραγωγής του U-233, ή πλουτώνιο - το προϊόν αναπαραγωγής του U-238. Όπως αναπαρίσταται σχηματικά στα Σχήματα 6 και 7, ο κύκλος ζωής του πυρηνικού καυσίμου αρχίζει με την εξόρυξη των κοιτασμάτων φυσικού ουρανίου ή θορίου από το έδαφος και τελειώνει με την διάθεση και τελική εναπόθεση των ραδιενεργών αποβλήτων.

Το φυσικό ουράνιο εξορύσσεται και καθαρίζεται σε ειδικούς μύλους για να μετατραπεί σε U_3O_8 κίτρινο ουρανιούχο συμπύκνωμα (yellow cake). Σε αυτή τη φάση, το οξειδίο του ουρανίου (yellow cake) έχει την παρακάτω σύσταση [Cochran and Tsoufanidis, 1992]:

Πίνακας 16: Σύσταση U_3O_8 (yellow cake)

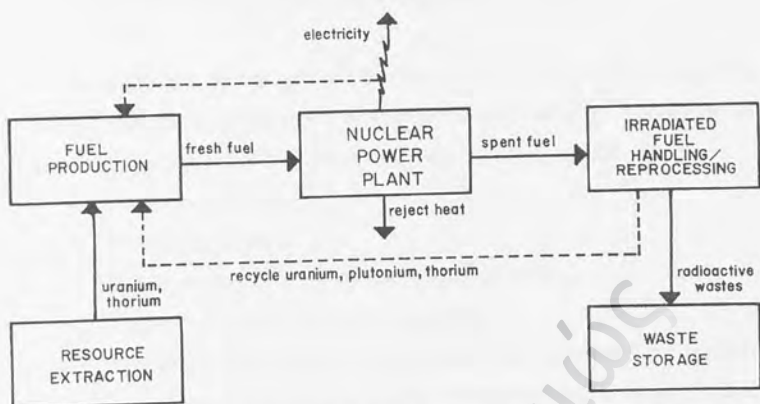
U-238	99,28%
U-235	0,71%
U-234	0,006%



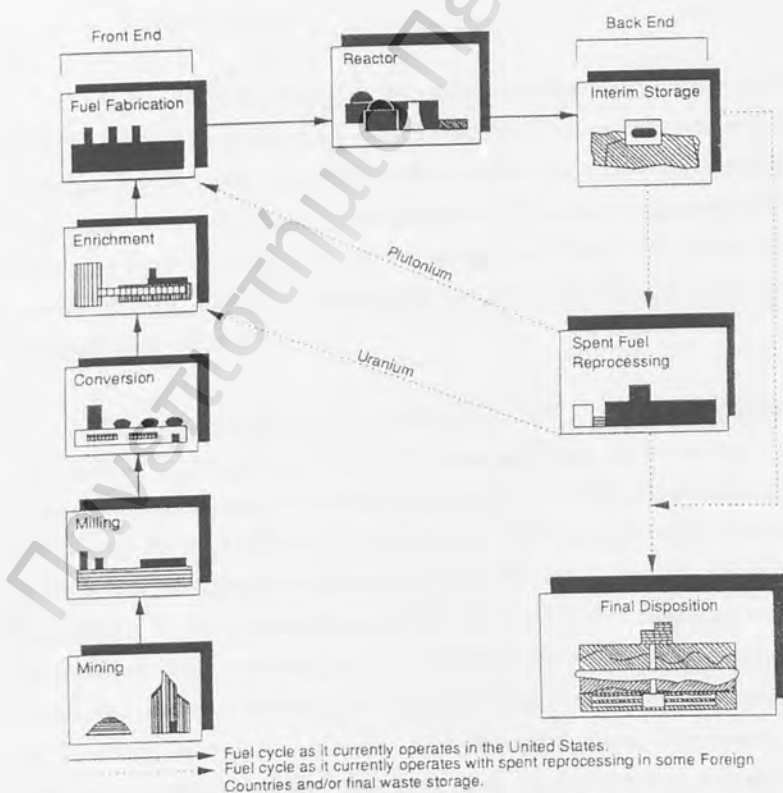
Σχήμα 6: Ο κύκλος ζωής του πυρηνικού καυσίμου (Nero, 1979)

Το πυρηνικό καύσιμο έχει μακρύτερη ζωή σε σχέση με κάθε άλλο καύσιμο: πρακτικά, ο διευθυντής ενός πυρηνικού εργοστασίου εξασφαλίζει την αγορά νέου καυσίμου, δύο χρόνια πριν να το χρειασθεί, η παράδοσή του στον σταθμό είναι δύο τουλάχιστον μήνες πριν τον ανεφοδιασμό, ενώ μέλλεται να καίει με σκοπό να παράγει ηλεκτρική ενέργεια για τρία χρόνια (αν ακολουθείται ετήσιο πρόγραμμα ανεφοδιασμού) ή για πέντε χρόνια (αν ακολουθείται 18μηνο πρόγραμμα ανεφοδιασμού). Μετά την απομάκρυνση του καυσίμου από τον πυρήνα, η συνήθης πρακτική είναι να παραμένει αποθηκευμένο στην εγκατάσταση για πολλά χρόνια, πριν εναποθεθεί σε ειδικούς χώρους.

Στο Σχήμα 8 αναπαρίσταται σχηματικά ο κύκλος ζωής του πυρηνικού καυσίμου σε σχέση με τον πυρηνικό αντιδραστήρα: ορίζονται ποιες δραστηριότητες θεωρούνται **front end** (εξόρυξη, επεξεργασία, μετατροπή, εμπλουτισμός και παρασκευή του στοιχείου του πυρηνικού καυσίμου) και ποιες θεωρούνται **back end** (προσωρινή αποθήκευση, επανεπεξεργασία εξαντλημένου καυσίμου, τελική εναπόθεση).



Σχήμα 7: Ο γενικευμένος κύκλος ζωής του πυρηνικού καυσίμου με τις βασικές ροές υλικών και ενέργειας (Nero, 1979)



Σχήμα 8: Ο κύκλος ζωής του πυρηνικού καυσίμου σε σχέση με τον πυρηνικό αντιδραστήρα (Bodansky, 1996)

3.2. Τα εμπορικά χαρακτηριστικά του πυρηνικού καυσίμου

Τα παρακάτω χαρακτηριστικά του πυρηνικού καυσίμου είναι σημαντικά για το εμπόριό του, αλλά και για τους περιορισμούς που υπόκειται η κυκλοφορία και εμπορική ανταλλαγή του [UI's Trade Issues Working Group, 2000]:

- Φυσικοχημική μορφή
- Ισοτοπική σύνθεση
- Τοποθεσία που εξορύχθηκε και ορυχείο εξόρυξης
- Χρόνος στον οποίο το υλικό αγοράστηκε
- Εγκατάσταση στην οποία εμπλουτίστηκε (για εμπλουτισμένο ουράνιο)
- Εγκατάσταση στην οποία παρασκευάστηκε ή τροποποιήθηκε σημαντικά (μετατροπή, εμπλουτισμός, παρασκευή, επανεπεξεργασία)
- Τελωνεία από τα οποία μετακινήθηκε
- Υποχρεώσεις πυρηνικών διασφαλίσεων (safeguards)
- Τίτλοι ιδιοκτησίας.

Οι συμβατικοί αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων καταναλώνουν σχετικά μικρές ποσότητες καυσίμου σε μορφή εμπλουτισμένου ουρανίου σε ισότοπο U-235. Υπάρχουν πολλοί τρόποι να εμπλουτισθεί το ουράνιο έως το επιθυμητό ισοτοπικό περιεχόμενο. Η κυρίαρχη μέθοδος σήμερα είναι η αέρια διάχυση (gaseous diffusion process), η οποία χρησιμοποιεί UF_6 σαν αρχική μορφή. Επειδή το UF_6 μετατρέπεται σε αέριο σε θερμοκρασία λίγο μεγαλύτερη του περιβάλλοντος, το U_3O_8 μετατρέπεται με χημική διεργασία σε UF_6 .

Ο εμπλουτισμός του φυσικού ουρανίου (0,711% ^{235}U) στους LWR κυμαίνεται από 2-4% ^{235}U (το ποσοστό του ^{234}U είναι αμελητέο). Μετά τη διαδικασία εμπλουτισμού, αυτό που μένει καλείται απεμπλουτισμένο ουράνιο (depleted uranium) και περιέχει ποσοστό 0,2-0,3% ^{235}U (συνήθως καλείται και υπόλειμμα ουρανίου, *uranium tails*). Το απεμπλουτισμένο ουράνιο φυλάσσεται σε ατσάλινα δοχεία, δεν είναι χρήσιμο σε θερμικούς αντιδραστήρες, αλλά μπορεί να είναι εξαιρετικό καύσιμο σε αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες. Ο εμπλουτισμός του ουρανίου είναι ενεργοβόρα διαδικασία, με υψηλό κόστος, το οποίο αυξάνει, όσο αυξάνει το ποσοστό εμπλουτισμού. Επίσης, η διαδικασία αυτή δημιουργεί στους διαχειριστές των πυρηνικών σταθμών ισχύος εξαρτήσεις από συγκεκριμένους προμηθευτές-παραγωγούς. Το κόστος του εμπλουτισμού εκφράζεται με την εργασία που απαιτείται για την επίτευξη ενός συγκεκριμένου ποσοστού εμπλουτισμού. Αντίστοιχα, η εργασία αυτή εκφράζεται με μία μονάδα που καλείται Separative Work Unit (SWU). Το

εμπλουτισμένο ουράνιο αποστέλλεται στην εγκατάσταση παρασκευής του καυσίμου⁷, όπου το UF_6 μετατρέπεται σε UO_2 και παρασκευάζεται το στοιχείο του πυρηνικού καυσίμου, στη μορφή που θα τοποθετηθεί μέσα στον πυρήνα. Το καύσιμο που φεύγει από την εγκατάσταση παρασκευής είναι ελαφρώς ραδιενεργό και σχεδόν στείρο, εφόσον κάθε πρόσμιξη θα καταστεί ραδιενεργή από τη στιγμή που το υλικό θα απορροφήσει νετρόνια μέσα στον πυρήνα. Το κόστος παρασκευής συνήθως περιλαμβάνει και το κόστος μεταφοράς του καυσίμου και όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία, ανέρχεται σε περίπου 130 \$/kg για τη μεταφορά και σε περίπου 100 \$/kg για την παρασκευή του καυσίμου, με συνολικό κόστος από 190 – 230 \$/kg – τιμές 1992 [Cochran and Tsoulfanidis, 1992].

Το στοιχείο του πυρηνικού καυσίμου αφού τοποθετηθεί στον πυρήνα του αντιδραστήρα, είναι έτοιμο να παράγει ενέργεια. Οι αντιδραστήρες ισχύος ανανεώνουν το καύσιμό τους κατά το 1/3 ή 1/4 κάθε 12 έως 18 μήνες. Η ενέργεια που παράγεται από το πυρηνικό καύσιμο εκφράζεται από τον όρο $burnup$ (MWd/MT)⁸ (ένα MWd/MT αντιπροσωπεύει την σχάση 1,3 g σχάσιμου υλικού, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής του U-236 από απορρόφηση νετρονίων). Συμβατικό $burnup$ ανέρχεται σε 33.000 MWd/MT, ενώ προηγμένοι τύποι αντιδραστήρων φθάνουν τα 40.000-50.000 MWd/MT. Είναι προφανές ότι, υψηλότερο $burnup$ σημαίνει φθηνότερη ενέργεια.

3.3. Διαθεσιμότητα και εξοικονόμηση του πυρηνικού καυσίμου

Όπως και σε κάθε μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, τα αποθέματα φυσικού ουρανίου δεν είναι ανεξάντλητα. Τα διαθέσιμα - με τη σημερινή τεχνολογία - αποθέματα ουρανίου ανέρχονται σε 4,3 εκατ. τόνους με βάση στοιχεία της Nuclear Energy Agency του ΟΟΣΑ (1997). Σύμφωνα πάντα με την ίδια πηγή, στο σημερινό ποσοστό χρήσης ουρανίου καταναλώνονται σε ετήσια βάση παγκοσμίως περίπου 70 εκατ. τόνοι, κατά συνέπεια υπάρχει επάρκεια καυσίμου για περίπου 60 έτη με τα υπάρχοντα αξιοποιήσιμα αποθέματα, ενώ εάν προστεθούν 11 εκατ. τόνοι εκτιμώμενων αποθεμάτων, φθάνουμε στα 220 έτη [IEA Report, 1998-99]. Το 1998, το Uranium Institute ανέφερε την ύπαρξη περίπου 18 εκατ. διαθέσιμων τόνων ουρανίου σε ορυκτά κοιτάσματα (με τιμές έως 200 USD ανά kgU - (Πίνακας 17)⁹

⁷ Ευρωπαϊκές εγκαταστάσεις παρασκευής καυσίμου (fabrication): της εταιρείας BNFL για παραγωγή MOX (Βρετανία) και της εταιρείας COGEMA (Γαλλία)

⁸ Megawatt days thermal per metric ton of uranium fuel

⁹ ενώ το 1998-99, η IEA αναφέρει κόστος εκμετάλλευσης των κοιτασμάτων ουρανίου λιγότερο από 130 USD/kg.

[Wilson, 1999], (Το 1970 οι μελετητές αναφέρονταν σε 500.000 τόνους διαθέσιμου ουρανίου στη τιμή των 8 USD/round και εκτιμούσαν την ύπαρξη 20 εκατ. τόνων ουρανίου, εάν η τιμή ανέβαινε σε 100 USD/round. Με βάση τις τιμές αυτές και για το μέγιστο κόστος ουρανίου, το ολικό κόστος λειτουργίας ενός LWR θα ανερχόταν το 1970 σε 0,5 US cents ανά kWh).

Σε σχέση με την εξοικονόμηση ουρανίου πιστεύεται ότι, οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες θα μπορούσαν να αυξήσουν την χρησιμοποιούμενη ενέργεια από το φυσικό ουράνιο κατά 75% ή και περισσότερο, έναντι των συμβατικών πυρηνικών σταθμών. Στην περίπτωση αυτή, τα αποθέματα του ουρανίου που αναφέρθηκαν, θα επεκτεινότουσαν κατά 40 φορές [NEA Report, 1997]. Πιστεύεται επίσης, ότι η ενδεχόμενη ανακύκλωση σε όλους τους εν λειτουργία αντιδραστήρες LWR, όλου του ουρανίου και του πλουτωνίου που μπορούν να ληφθούν με τη γνωστή μέχρι σήμερα τεχνολογία από το εξαντλημένο καύσιμο με επανεπεξεργασία (MOX fuel)¹⁰, θα οδηγούσε σε εξοικονόμηση συνολικά 600.000 τόνων περίπου φυσικού ουρανίου έως το 2050 [NEA Report, 1999]. Εκτιμήσεις για εναλλακτικούς κύκλους καυσίμου, με όρους τόνων ουρανίου που θα απαιτούνταν για έναν αντιδραστήρα 1000 MWe επί 30 χρόνια λειτουργίας με παράγοντα ικανότητας 70% είναι οι εξής [Bodansky, 1996]:

LWR: 4620 τόννοι χωρίς ανακύκλωση επανεπεξεργασμένου καυσίμου και 3000 τόννοι με ανακύκλωση

HTGR: 3320 τόννοι (χωρίς ανακύκλωση)

HTGR ή PHWR (με 90% conversion ratio):

1360 τόννοι (με ανακύκλωση)

Breeders: 35 τόννοι (με εσωτερική ανακύκλωση)

Τα πρώτα 10 σε παραγωγή ορυχεία ουρανίου στον κόσμο βρίσκονται στις εξής χώρες: Καναδάς, Αυστραλία, Ναμίμπια, Νίγηρας, Νότια Αφρική και ΗΠΑ [Ιστοσελίδα UI, 2000].

Πίνακας 17: Διαθέσιμα αποθέματα Ουρανίου (Πηγή: Wilson, 1999)

Τιμή Ουρανίου (\$/lb U ₃ O ₈)	Απόθεμα (τόνους)	Αύξηση κόστους (cents/kWh)		Ηλεκτρ. ενέργεια που παράγεται (GWe/yr)	
		LWR	Breeder	LWR	Breeder
8 (base)	594.000	0,0	0,0	3.470	460.000
10	940.000	0,01	0,0	5.500	720.000
15	1.450.000	0,04	0,0	8.480	1.120.000
30	2.240.000	0,13	0,0	13.100	1.720.000
50	10.000.000	0,25	0,0	58.300	7.700.000
100	25.000.000	0,55	0,0	146.000	19.200.000

Σύμφωνα με την Euratom Supply Agency, το 1999 παρήχθησαν παγκοσμίως περίπου 31.000 τόνοι ουρανίου (έναντι 33.800 τόνων το 1998)¹¹, ενώ η ζήτηση κυμάνθηκε στους 60.000 τόνους. Η μείωση αυτή αποδόθηκε – εκτός από την χρήση ανακυκλωμένου καυσίμου MOX - σε καθυστέρηση της έναρξης λειτουργίας μίας νέας παραγωγικής μονάδας στον Καναδά, στην κατάργηση της παραγωγής στην Γκαμπόν και σε μείωση της παραγωγής στον Νίγηρα, με μόνη αυξημένη παραγωγή, αυτή της Αυστραλίας). Επίσης, το 1999 περίπου 2.900 τόνοι φρέσκου καυσίμου (ουρανίου) «φορτώθηκαν» στους ευρωπαϊκούς αντιδραστήρες (ερευνητικούς και εμπορικούς), που προήλθαν από 12 χώρες εκτός ΕΕ (κατά σειρά μεγέθους προμήθειας: Ρωσία, Καναδάς, Γκαμπόν-Νίγηρας, Ναμίμπια-Ν. Αφρική). Όσον αφορά στο πλουτόνιο για καύσιμο MOX, το 1999 χρησιμοποιήθηκαν 7230 kg Pu, το οποίο αντιστοιχεί σε εξοικονόμηση 870 τόνων φυσικού και 580 τόνων SW (υπολογίζεται ότι 1 t Pu εξοικονομεί 120 tU και 80 t SW) [Euratom Supply Agency, 1999].

Σοβαρό ανταγωνισμό αναμένεται να αντιμετωπίσει το καύσιμο MOX, του οποίου η τιμή εκτιμάται ότι είναι πολύ μεγαλύτερη του ουρανίου.

Στον τομέα της προμήθειας του πυρηνικού καυσίμου, πολλές συγχωνεύσεις έλαβαν χώρα το 1999, στην προοπτική της απελευθέρωσης της αγοράς ενέργειας: η ABB συμφώνησε να πουλήσει το πυρηνικό της τμήμα στην αγγλική BNFL, η οποία αγόρασε το 1998 το πυρηνικό τμήμα της Westinghouse σε συνεργασία με τον αμερικάνικο όμιλο Morrison Knudsen. Επίσης, η γαλλική FRAMATOME SA και η γερμανική Siemens ανακοίνωσαν την σύμπραξη τους στον πυρηνικό τομέα μέσα στο 2000 [Euratom Supply Agency, 1999].

¹⁰ Οι LWRs δέχονται έως και 30% του πυρήνα τους σε MOX και το 70% UO₂.

Σε ό,τι αφορά στην πολιτική προμήθειας πυρηνικού καυσίμου της Euratom, αυτή βασίζεται στο να διασφαλίζονται πολλές πηγές προμήθειας καυσίμου στους χρήστες (diversification of sources of supply), ώστε να τηρούνται χαμηλές οι τιμές και να μην δημιουργείται υπέρ-εξάρτηση των χρηστών από συγκεκριμένους προμηθευτές [Euratom Supply Agency, 1999]. Στοιχεία της παγκόσμιας παραγωγής ουρανίου ανά χώρα παρατίθενται στον Πίνακα 18.

Η Ελλάδα διαθέτει στη Μακεδονία και τη Θράκη καταγεγραμμένα και ερευνημένα, αλλά μη αξιοποιημένα, αποθέματα φυσικού ουρανίου σε μορφή ουρανιούχων ορυκτών και μεταλλευμάτων [Σταυροπόδης, 1979, Μινατίδης, 1979, Taupitz, 1979]. Οι ελληνικοί βωξίτες περιέχουν επίσης ουράνιο, όπως της Ελευσίνας [Σταυροπόδης & Μινατίδης, 1979] και τα κοιτάσματα αυτά μπορούν αντικειμενικά να αξιοποιηθούν για την παραγωγή του κίτρινου ουρανιούχου συμπυκνώματος (U_3O_8 , yellow cake). Η Τουρκία επίσης διαθέτει κοιτάσματα ουρανίου.

¹¹ Σύμφωνα με στοιχεία που δημοσίευσε το The Uranium Institute, η παραγωγή ουρανίου φθίνει από το 1985 [Euratom Supply Agency, 1999].

Πίνακας 18: Στοιχεία παραγωγής ουρανίου ανά χώρα (Πηγή: Core Issues UI, 2000)

Country or area	Production (tU)							% change 1998-99
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	
Argentina	125	64	65	28	28	28	28	0
Armenia	na	na	na	na	na	na	na	na
Australia	2268	2183	3712	4974	5520	4885	5979	-22,4
Belgium	34	40	23	28	27	15	0	-100
Brazil	50	50	125	0	0	0	0	0
Bulgaria	50	50	20	0	0	0	0	0
Canada	9178	9694	10515	11788	12029	10924	8214	-24,8
China^	780	780	500	500	500	500	500	0
Czech Rep.	950	541	600	598	590	610	612	0
Finland	na	na	na	na	na	na	na	na
France	1710	1028	980	940	748	508	439	-13,6
Gabon	556	650	630	560	472	731	294	-59,8
Germany	116*	395*	40*	40*	40*	40*	33*	-17,5
Hungary	381	402	205	200	200	10	10	0
India^	290	200	200	200	200	200	200	0
Japan	na	na	na	na	na	na	na	na
Kazakhstan	2700	2240	1630	1320	1000	1350	8,0	
Korea, S.	na	na	na	na	na	na	na	na
Lithuania	na	na	na	na	na	na	na	na
Mexico	na	na	na	na	na	na	na	na
Namibia	1665	1901	2007	2452	2905	2762	2689	-2,6
Netherlands	na	na	na	na	na	na	na	na
Niger	2914	2975	2970	3160	3497	3731	2918	-21,8
Pakistan^	23	23	23	23	23	23	23	0
Portugal	28	24	18	15	17	19	10	-47,3
Romania^	120	120	100	100	100	100	100	0
Russia^	2399	2968	2250	2000	2000	2000	2000	0
Slovakia	na	na	na	na	na	na	na	na
Slovenia	na	na	na	na	na	na	na	na
S. Africa	1700	1690	1424	1436	1100	962	981	2,0
Spain	183	255	255	255	255	255	255	0
Sweden	na	na	na	na	na	na	na	na
Switzerland	na	na	na	na	na	na	na	na
Taiwan	na	na	na	na	na	na	na	na
UK	na	na	na	na	na	na	na	na
Ukraine^	500	500	500	500	500	500	500	0
USA	1192	1400	2324	2420	2170	1872	1807	-3,5
Uzbekistan	2600	2015	1800	1459	1764	2000	2130	6,5
Totals	32512	32188	32916	34996	35692	33932	31072	-8,4

Legend
na not applicable
... not yet available
* from decommissioning
^ UI estimate

NB: The figures in this table are liable to change as new data become available.

3.4. Το εξαντλημένο καύσιμο

Το ακτινοβολημένο καύσιμο, όταν απομακρυνθεί από τον πυρήνα, αποθηκεύεται συνήθως – όταν δεν προβλέπεται επανεπεξεργασία – σε ειδικό χώρο της εγκατάστασης κάτω από νερό σε βαθιά δεξαμενή. Είναι υψηλής ραδιενέργειας και πρέπει να μετακινηθεί από τη δεξαμενή για να τύχει επανεπεξεργασίας ή εναπόθεσης. Εάν το ακτινοβολημένο καύσιμο δεν υποστεί επανεπεξεργασία, θεωρείται απόβλητο υψηλής ραδιενέργειας και τοποθετείται σε ειδικούς χώρους τελικής εναπόθεσης (repositories), όπου παραμένει για όσα χρόνια απαιτηθεί απομονωμένο από την βιόσφαιρα και σύμφωνα με τους κανονισμούς.

Εάν εκτιμηθεί ότι, το ακτινοβολημένο καύσιμο περιέχει χρήσιμα ραδιονουκλίδια, υπόκειται σε επανεπεξεργασία σε ειδικές εγκαταστάσεις. Τα κύρια χρήσιμα ισότοπα που μπορεί να ανακτηθούν από το ακτινοβολημένο καύσιμο είναι αυτά του ουρανίου και του πλουτωνίου, αλλά και άλλα, με εφαρμογή στη βιομηχανία, την ιατρική κλπ, όπως το καίσιο-137 (Cs-137). Το εξαντλημένο καύσιμο περιέχει επίσης το μεγαλύτερο ποσοστό του αρχικού U-238 και περίπου 0,6-0,8% του U-235. Το U-238 αναπαρήγαγε πλουτόνιο (Pu-239, Pu-240, Pu-241 και Pu-242) σε αναλογία περίπου 6 έως 10 g/kg εξαντλημένου καυσίμου [Cochran and Tsoulfanidis, 1992]. Μετά την ενδεχόμενη επανεπεξεργασία, τα ισότοπα του ουρανίου και του πλουτωνίου που ανακτώνται, μπορεί να χρησιμοποιηθούν ξανά ως καύσιμα σε θερμικούς ή σε αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες. Στην πρώτη περίπτωση, το πλουτόνιο που ανακτήθηκε από την επανεπεξεργασία κατευθύνεται στις μονάδες παρασκευής καυσίμου. Το επανεπεξεργασμένο ουράνιο, μπορεί με τη σειρά του: α) να σταλεί σε μονάδες παρασκευής καυσίμου, β) να σταλεί σε μονάδες εμπλουτισμού ή γ) να αποθηκευθεί ως έχει. Τα υπολείμματα της διαδικασίας επανεπεξεργασίας είναι υγρά ραδιενεργά απόβλητα (HLW) και πρέπει να αποθηκευθούν με ασφάλεια για χρόνια, απομονωμένα από την βιόσφαιρα και σύμφωνα με τους κανονισμούς.

3.5. Ο «κύκλος» ή η αλυσωτή αντίδραση του θορίου

Σύμφωνα με εκτιμήσεις του 1999, τα αποθέματα θορίου στη φύση είναι 6 φορές μεγαλύτερα σε σχέση με αυτά του ουρανίου. Είναι δε μάλλον απίθανο, το κόστος ανά kWh να φθάσει τη τιμή των 0,5 US cents. Το μεγάλο πλεονέκτημα όμως του «κύκλου» του θορίου έγκειται στην επανεπεξεργασία (reprocessing) του καυσίμου για την επανάκτηση του U-233. Υπάρχουν σήμερα διάφορες ιδέες για τη χρήση του θορίου, που περιλαμβάνουν και τη χρήση ενός μίγματος θορίου, U-235 και U-238 ως

καυσίμου [Wilson, 1999]. Όλοι οι εμπορικοί αντιδραστήρες - LWRs - θα μπορούσαν να λειτουργήσουν με τον «κύκλο» του θορίου¹² αντί με καύσιμο ουρανίου, έτσι ώστε να μειωθεί η ετήσια παραγωγή πλουτωνίου από αντιδραστήρες ισχύος κατά 85-90%, ενώ η ισοτοπική του σύσταση θα το καθιστά ακατάλληλο για παραγωγή όπλων. Επίσης, με τον κύκλο του θορίου μειώνονται τα υψηλής ραδιενέργειας απόβλητα, γιατί δεν παράγονται υπερουράνιες ακτινίδες. Πλεονέκτημα επίσης μπορεί να αποτελέσει ότι, ο κύκλος του θορίου μπορεί να προσαρμοστεί έτσι, ώστε να «καίει» WPu εκτός από πλουτώνιο αντιδραστήρων (reactors grade plutonium) [Radkowsky, 2000].

Μερικοί εμπειρογνώμονες σήμερα έχουν την άποψη ότι, η χρήση του θορίου ως καυσίμου στους LWR θα μπορούσε να αναβάλλει για το μακρύτερο μέλλον την ανάπτυξη αναπαραγωγικών αντιδραστήρων ταχέως νετρονίων (πλουτωνίου) [Wilson, 1999]. Ενώ από την άλλη, υπάρχει η άποψη ότι, οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες αποτελούν το πρώτο βήμα-«κλειδί» για την μακρόχρονη χρήση της πυρηνικής ενέργειας που θα βασίζεται σε νέα τεχνολογία, ήδη αναπτυσσόμενη ερευνητικά.

Το πυρηνικό καύσιμο μπορεί να παραμείνει σήμερα στον αντιδραστήρα πολύ περισσότερο από ό,τι πριν 25-30 χρόνια, όταν το σύννηθες burnup ήταν 20.000 MWd/t. Από το 1970 και μέχρι σήμερα, έχουν επιτευχθεί σημαντικές τεχνολογικές αλλαγές, που καθιστούν τις ράβδους καυσίμου πιο ακέραιες, ενώ τα burnups έχουν φθάσει τα 40.000 MWd/t. Ερευνώνται καύσιμα με ακόμα υψηλότερο burnup (ενδεχομένως με υψηλότερο εμπλουτισμό σε ουράνιο), πράγμα που θα μειώσει τις αλλαγές των ράβδων καυσίμου, θα αυξήσει την αποτελεσματικότητα και την παραγωγικότητα του σταθμού και θα μειώσει το κόστος λειτουργίας του [Wilson, 1999].

Τι σημαίνει υψηλότερο burnup καυσίμου

Όσο αυξάνει το burnup, απαιτείται υψηλότερο ποσοστό εμπλουτισμού του καυσίμου, ενώ η μάζα του απαιτούμενου ουρανίου μειώνεται¹³. Όσο αυξάνει το burnup και για την ίδια παραγόμενη ενέργεια, ο αριθμός των στοιχείων καυσίμου μειώνεται. Κατά συνέπεια, το υψηλότερο burnup συνεισφέρει στην μικρότερη κατανάλωση καυσίμου, γεγονός που εκτός από οικονομικές επιπτώσεις στον κύκλο του καυσίμου και στο κόστος λειτουργίας του αντιδραστήρα, έχει και σοβαρή περιβαλλοντική σημασία: μικρότερες ποσότητες εξορύσσονται και επεξεργάζονται σε καύσιμο, προσωπικού και

¹² (U+Th)Oxide, U enrichment<20% (proliferation limits)

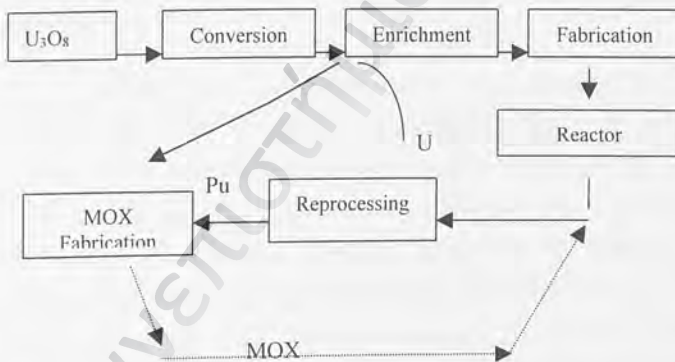
κοινό εκτίθενται σε μικρότερη ακτινοβολία, μειώνονται οι ποσότητες των ραδιενεργών αποβλήτων, κλπ [Cochran and Tsoulfanidis, 1992].

3.6. Ανακύκλωση και επανεπεξεργασία

Η επανεπεξεργασία (**reprocessing**) του καυσίμου είναι η διαδικασία της ανάκτησης των ισοτόπων ουρανίου και πλουτωνίου από το εξαντλημένο καύσιμο, ενώ το υπόλοιπο (cladding, προϊόντα σχάσεως, υπερουράνια στοιχεία, μολυσμένα χημικά κλπ) αποτελούν απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας (HLW) [Cochran and Tsoulfanidis, 1992]. Το ανακτηθέν υλικό από την διαδικασία της επανεπεξεργασίας ξαναγουρίζει στον αντιδραστήρα για την παραγωγή ισχύος (Διάγραμμα 12).

Η ανακύκλωση (**recycling**) είναι η επανεισαγωγή του ουρανίου και πλουτωνίου που έχουν ανακτηθεί, πίσω στον αντιδραστήρα για παραγωγή ενέργειας. Το πυρηνικό καύσιμο που αποτελείται από ανακυκλωμένο ουράνιο και πλουτώνιο, ονομάζεται **Mixed-Oxide Fuel (MOX)** και είναι ένα μίγμα διοξειδίου του ουρανίου (UO_2) και διοξειδίου του πλουτωνίου (PuO_2).

Διάγραμμα 12: Επανεπεξεργασία καυσίμου (Πηγή: Cochran and Tsoulfanidis, 1992)



Το MOX μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη σύγχρονη γενιά των LWRs (BWR, PWR), σαν συμπλήρωμα του καυσίμου (εξοικονόμηση ουρανίου κατά 35-40%) ή σαν κατ'εξοχήν καύσιμο στους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες¹⁴. Από την άλλη όμως,

¹³ Το αντίστροφο του burnup είναι η απαιτούμενη μάζα ουρανίου ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας.

¹⁴ Οι χώρες με πυρηνική ενέργεια μπορούν να χωρισθούν σε δύο ομάδες: αυτές που ακολουθούν την επανεπεξεργασία και τη χρήση mOX (Γαλλία, Κίνα, Γερμανία, Ιαπωνία, Βρετανία, Ρωσία), οι οποίες έχουν ενσωματώσει τέτοιες μονάδες στις χώρες τους, μαζί με μονάδες επεξεργασίας HLW και έχουν και οικονομικό όφελος και σε αυτές που ακολουθούν την μακρόχρονη αποθήκευση του εξαντλημένου καυσίμου πριν την τελική εναπόθεση σε γεωλογικούς σχηματισμούς (Καναδάς, Ισπανία, Σουηδία, ΗΠΑ) [Nechaev, 1989].

υπάρχουν απόψεις που θεωρούν την ευρύτερη χρήση MOX επικίνδυνη σχετικά με την εξάπλωση πυρηνικών όπλων, εφόσον η χρήση MOX συνεπάγεται την παραγωγή 60% νέου πλουτωνίου, γεγονός που δημιουργεί προβλήματα πυρηνικών διασφαλίσεων. Από την άποψη αυτή, μερικοί πιστεύουν ότι ικανοποιητική απάντηση δίνει η διευρυμένη χρήση στους LWRs πυρηνικού καυσίμου με βάση τον κύκλο του θορίου [Radkowsky, 2000].

Γενικά, η επανεπεξεργασία του καυσίμου είναι διαδικασία χρήσιμη για την ανάκτηση χρήσιμων νουκλιδίων από το εξαντλημένο καύσιμο. Είναι προφανές ότι επανεπεξεργασία χωρίς ανακύκλωση είναι δυνατή (π.χ. για χρήση των υλικών σε πυρηνικά όπλα), αλλά όχι ανακύκλωση χωρίς επανεπεξεργασία. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, οι έννοιες της ανακύκλωσης και της επανεπεξεργασίας αναφέρονται στην παραγωγή ηλεκτρισμού από αντιδραστήρες ισχύος. Στο επανεπεξεργασμένο καύσιμο περιέχονται σε μικρές συγκεντρώσεις τα ισότοπα U-232, U-234 και U-23. Η παρουσία τους δυσκολεύει τον χειρισμό του επανεπεξεργασμένου καυσίμου και επίσης, επιβάλλει τον επανεμπλουτισμό του καυσίμου σε U-235 πριν την χρήση, σε ποσοστά υψηλότερα σε σχέση με το φυσικό ουράνιο. Αυτό, καθιστά την χρήση ανακυκλωμένου καυσίμου σε LWRs ιδιαίτερα προβληματική [Cochran and Tsoulfanidis, 1992].

Συμπερασματικά, η ανακύκλωση του καυσίμου παρουσιάζει πλεονεκτήματα, ως προς την μείωση των αναγκών σε ουράνιο και την μείωση των ποσοτήτων του εξαντλημένου καυσίμου προς επεξεργασία ή εναπόθεση. Παρόλα αυτά, δεν είναι σήμερα γνωστό, εάν η ανακύκλωση οδηγεί σε ολική μείωση των υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων. Ενδεχόμενο μειονέκτημα της ανακύκλωσης μπορεί να θεωρηθεί η ανάγκη της επανεπεξεργασίας του καυσίμου και οι κίνδυνοι της διαδικασίας αυτής στην εξάπλωση των πυρηνικών όπλων, παρά τις αυστηρές διαδικασίες πυρηνικών διασφαλίσεων (safeguards). Η επανεπεξεργασία του καυσίμου περιέχει τα εξής γενικά βήματα, τα οποία διαφέρουν από εγκατάσταση σε εγκατάσταση [Cochran and Tsoulfanidis, 1992]:

- Μηχανικό τεμάχισμα του εξαντλημένου στοιχείου πυρηνικού καυσίμου σε μικρότερα τεμάχια
- Διάλυση των τεμαχίων της προηγούμενης φάσης σε νιτρικό οξύ
- Διαχωρισμός σε ρεύματα χρήσιμων προϊόντων και αποβλήτων με μεθόδους εκχύλισης του διαλύτη
- Χειρισμός των αποβλήτων (HLW).

4. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και διαχείριση αποβλήτων

Η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων με περιβαλλοντικά αποδεκτό τρόπο είναι ένα πρόβλημα-κλειδί για τις χώρες που έχουν αντιδραστήρες ισχύος. Σε πολλές χώρες αποτέλεσε σοβαρό πολιτικό πρόβλημα κατά καιρούς και σοβαρή αιτία για την κοινωνική απόρριψη της πυρηνικής ενέργειας [IAEA TecDoc-948, 1997]. Την κύρια πηγή ραδιενεργών αποβλήτων από αντιδραστήρες ισχύος αποτελεί το εξαντλημένο καύσιμο, το οποίο περιέχει σχάσιμα ισότοπα και κατά συνέπεια ο χειρισμός τους και η διαχείρισή τους χρειάζεται προσοχή, τόσο για λόγους προστασίας του ανθρώπου και του περιβάλλοντος, όσο και προς αποφυγή εξάπλωσης των πυρηνικών όπλων.

Τα απόβλητα της πυρηνικής ενέργειας διαφοροποιούνται από τα υπόλοιπα βιομηχανικά και επικίνδυνα, όσον αφορά ποσότητες, αλλά και ποιότητα. Οι ποσότητες των ραδιενεργών αποβλήτων και οι όγκοι τους είναι μικρότερα σε σχέση με άλλες βιομηχανίες ως προς το ίδιο προϊόν, πχ. την κιλοβατώρα -, εφόσον η ενεργειακή πυκνότητα της πυρηνικής ενέργειας (η ποσότητα του καυσίμου που απαιτείται για την παραγωγή ενός συγκεκριμένου ποσού ηλεκτρικής ενέργειας) είναι πολύ μικρή, σε σχέση με άλλες μορφές ηλεκτροπαραγωγής [Rashad et al, 2000]. Τα πυρηνικά απόβλητα όμως, ενέχουν ιδιαίτερης φύσης κίνδυνο για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, ο οποίος μειώνεται μόνον με τον χρόνο [Cochran and Tsoulfanidis, 1992].

4.1. Ραδιενεργά απόβλητα

Ραδιενεργό απόβλητο - σύμφωνα με ορισμό της IAEA - θεωρείται κάθε υλικό που περιέχει ραδιονουκλίδια σε συγκέντρωση μεγαλύτερη από αυτή που θεωρούν ασφαλή οι εθνικές αρχές, και για το οποίο δεν προβλέπεται καμία χρήση. Ραδιενεργά απόβλητα παράγονται από τις παρακάτω βασικές δραστηριότητες [Beghin, 1997]:

- Την εξόρυξη και την επεξεργασία του των κοιτασμάτων ουρανίου και θορίου
- Τον κύκλο ζωής του πυρηνικού καυσίμου, όπως η μετατροπή (conversion) και ο εμπλουτισμός (enrichment) του ουρανίου, η παραγωγή του πυρηνικού καυσίμου και η κατεργασία του εξαντλημένου καυσίμου (spent fuel) κλπ
- Τη λειτουργία των εγκαταστάσεων αντιδραστήρων ισχύος

- Την απομόλυνση και τον παροπλισμό (decommissioning) των αντιδραστήρων ισχύος, η ζωή των οποίων έχει λήξει, και
- Τις άλλες, εκτός της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εφαρμογές της πυρηνικής ενέργειας, στην ιατρική, την έρευνα, τη βιομηχανία και την γεωργία.

Τα απόβλητα όλων των τύπων αντιδραστήρων εντάσσονται στις παραπάνω κατηγορίες. Συνήθως απαιτείται να συγκεντρωθούν, ώστε να τύχουν ενιαίας μεταχείρισης, λόγω του μικρού σχετικά όγκου τους και της μεγάλης γεωγραφικής απόστασης των μονάδων μεταξύ τους. Επίσης, το κόστος του ασφαλούς χειρισμού των υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων ανά μονάδα είναι πολύ μεγάλο (πρέπει να παραμείνουν απομονωμένα από τη βιόσφαιρα και σύμφωνα με τους κανονισμούς περίπου 10000 έτη) [IEA Report, 1998-99].

Αν και οι ποσότητες των αποβλήτων ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας από τους πυρηνικούς σταθμούς ισχύος είναι μάλλον μικρές (2 περίπου μετρικοί τόνοι υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων ανά τροφοδοσία) η ραδιοτοξικότητα των αποβλήτων αυτών είναι απαραίτητο να μειωθεί όσο είναι δυνατόν, πριν την τελική τους εναπόθεση. Οι ποσότητες, η φύση και ο τύπος των ραδιενεργών αποβλήτων ποικίλει: μερικά απόβλητα μπορεί να παραμείνουν ραδιενεργά για εκατοντάδες ή χιλιάδες χρόνια, ενώ άλλα μπορεί να χρειάζονται αποθήκευση μόνο για δεκαετίες πριν την συμβατική τους εναπόθεση. Τα ραδιενεργά απόβλητα μπορούν να είναι υγρά, στερεά ή αέρια. Με βάση ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια, η IAEA έχει κατηγοριοποιήσει τα ραδιενεργά απόβλητα στις εξής κατηγορίες:

- **Τα απαλλασσόμενα απόβλητα (exempt waste, EW)**, τα οποία περιέχουν ελάχιστες ποσότητες μακρόβιων ραδιονουκλιδίων και τα οποία μπορούν να εξαιρεθούν από τους κανονιστικούς ελέγχους εφόσον δεν παρουσιάζουν ραδιολογικό κίνδυνο.
- **Τα μέσης και χαμηλής ραδιενέργειας απόβλητα (Low and Intermediate Level Waste, LILW)**, τα οποία περιέχουν σχετικά μικρότερες συγκεντρώσεις ραδιονουκλιδίων χαμηλότερης θερμικής ισχύος. Η κατηγορία αυτή περιέχει ένα μεγάλο εύρος αποβλήτων, από σχεδόν απαλλασσόμενα, έως σχετικά υψηλής ραδιενέργειας απόβλητα, τα οποία πρέπει να φυλάσσονται σε θωρακισμένους περιέκτες και μερικές φορές, πρέπει να παραμείνουν σε ψύξη για κάποια χρονική περίοδο. Η κατηγορία αυτή των αποβλήτων μπορεί να υποδιαιρεθεί - ανάλογα με τον

χρόνο υποδιπλασιασμού¹ των ραδιονουκλιδίων που περιέχει - σε μακρόβια ($T_{1/2} > 30$ χρόνια) ή σε βραχύβια ($T_{1/2} < 30$ χρόνια).

- Τα υψηλής ραδιενέργειας απόβλητα (**High-Level Waste, HLW**), τα οποία περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις ραδιενεργών υλικών και ενώσεων, ώστε απαιτείται μεγάλος βαθμός απομόνωσής τους από τη βιόσφαιρα - συνήθως σε γεωλογικό χώρο εναπόθεσης - και επί μακρό χρονικό διάστημα. Η κατηγορία αυτή αποβλήτων απαιτεί και ειδική θωράκιση, αλλά και παραμονή υπό ψύξη. Σε αυτήν υπάγονται το ακτινοβολημένο καύσιμο από αντιδραστήρες και απόβλητα που προέρχονται από την επανεπεξεργασία (reprocessing) του εξαντλημένου καυσίμου.

Στις ΗΠΑ ισχύει ένα σχετικά διαφορετικό σύστημα ταξινόμησης ραδιενεργών αποβλήτων, το οποίο είναι πιο λεπτομερές και λαμβάνει υπόψη του κατά την κατηγοριοποίηση και τον κίνδυνο που ενέχουν οι κατηγορίες των αποβλήτων στον άνθρωπο και στο περιβάλλον. Στην κατηγοριοποίηση αυτή, ξεχωριστή κατηγορία αποτελούν πχ. τα απόβλητα με υπερουράνια στοιχεία (με χρόνους ημιζωής > 20 έτη και συγκεντρώσεις > 100 nCi/g τη στιγμή της ανάλυσης), τα απόβλητα που προκύπτουν από την κατεργασία του ορυκτού ουρανίου ή θορίου (mining and mill tailings), κλπ [Lowenthal, 1998].

4.2. Ασφαλής διαχείριση των αποβλήτων

Η διάθεση των υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων – μαζί με την τύχη των υλικών από τον παροπλισμό εγκαταστάσεων – αποτελούν το μέγιστο πρόβλημα της πυρηνικής ενέργειας. Τα πυρηνικά απόβλητα αποτελούν για πολλούς ένα άλυτο περιβαλλοντικό πρόβλημα του οποίου τις συνέπειες θα υποστούν οι μελλοντικές γενεές, όπως υποστηρίζει η International Energy Agency του ΟΟΣΑ [IEA Report, 1998-99].

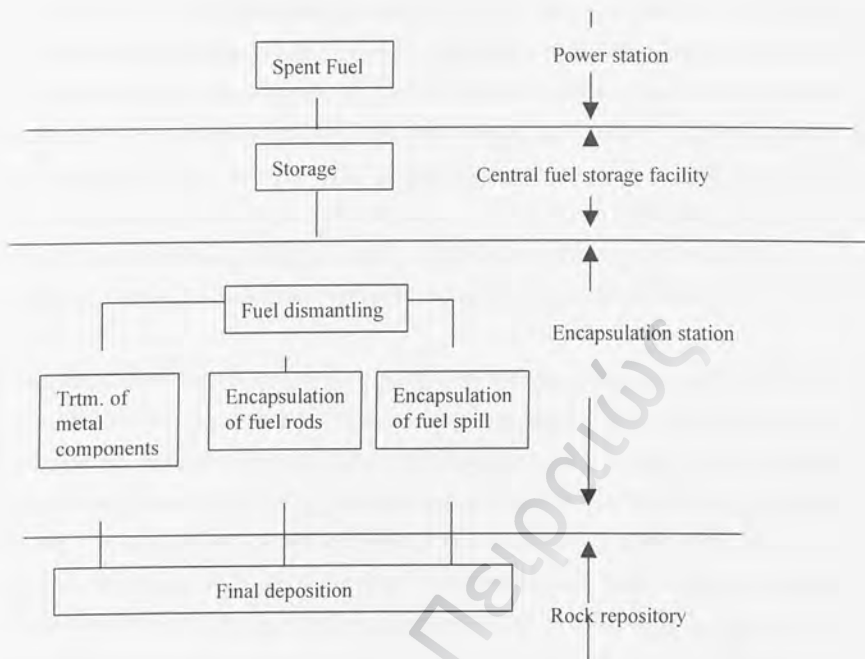
Σύμφωνα με ορισμό της IAEA [IAEA Convention, 1997], **διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων** (radioactive waste management) καλούνται όλες οι δραστηριότητες, συμπεριλαμβανομένου και του παροπλισμού, οι οποίες σχετίζονται με τον χειρισμό, την προ-επεξεργασία, την επεξεργασία, την οποιαδήποτε τροποποίηση, ώστε να

¹ Χρόνος υποδιπλασιασμού είναι το χρονικό διάστημα στον οποίο ο ρυθμός ραδιενεργού μετάπτωσης μικραίνει κατά ένα παράγοντα της τάξης του 2. Για παράδειγμα, σε 10 ημιζωές, η ενεργότητα (activity) του ραδιονουκλιδίου πέφτει σε $2^{10}=1024$. Η ενεργότητα (activity) ενός ραδιενεργού δείγματος είναι ο αριθμός των μεταπτώσεων του δείγματος στην μονάδα του χρόνου [Bodansky, 1996].

έρθουν σε μία δεδομένη κατάσταση και την αποθήκευση ή τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων. Ο όρος μπορεί να περιλαμβάνει επίσης και αποθέσεις ραδιενεργών αποβλήτων.

Το ερώτημα “*μπορούν τα πυρηνικά απόβλητα όλων των τύπων να αποθηκευτούν ή να απομονωθούν με ασφάλεια, έως ότου η ραδιενέργειά τους πάψει να είναι επικίνδυνη στους ανθρώπους και στο περιβάλλον*” απαιτεί ασφαλείς και πειστικές τεχνικά απαντήσεις. Πρέπει επίσης να τονιστεί η πλευρά της ασφάλειας και αξιοπιστίας: η ασφάλεια των πυρηνικών αντιδραστήρων αφορά εξίσου τη κατασκευή της μονάδας και τη λειτουργία της, όπως και τις καταναλωθείσες πρώτες ύλες και τα απόβλητα. «Καμία τεχνολογία – τονίζει η ΙΑΕΑ –, όσα πλεονεκτήματα και να παρουσιάζει, δεν μπορεί να θεωρείται πραγματικά βιώσιμη (sustainable), αν δεν περιλαμβάνει **την ασφαλή διαχείριση** των αποβλήτων και των παραπροϊόντων που παράγονται από αυτή. Μάλιστα, για να τύχει η τεχνολογία αυτή κοινής αποδοχής σε διεθνές επίπεδο, εξίσου σημαντικό είναι να φαίνεται ότι η διαχείριση των αποβλήτων είναι ασφαλής. Και αυτό είναι ασφαλώς σωστό σε ό,τι αφορά τα ραδιενεργά απόβλητα και το καταναλωθέν καύσιμο» [IAEA Conference, 1997].

Όσον αφορά στην εναπόθεσή τους, τα βραχύβια και χαμηλής ραδιενέργειας απόβλητα μπορούν να εναποτεθούν σε απομόνωση σε γεωλογικούς σχηματισμούς κοντά στην επιφάνεια της γης, ενώ τα μακρόβια, μεσαία και υψηλής ραδιενέργειας, αφού υποστούν σταθεροποίηση (conditionning, vitrification) πρέπει να αποθηκευτούν σε βαθείς γεωλογικούς σχηματισμούς, προστατευμένα για λόγους ασφαλείας σε ιδιαίτερα ανθεκτικούς περιέκτες από ασάλι, χαλκό ή τιτάνιο, με αναμενόμενο χρόνο ζωής από 500 έως χιλιάδες έτη. Οι προδιαγραφές και οι έλεγχοι για την τελική αυτή εναπόθεση, η καταλληλότητα των χώρων και τα φυσικά και τεχνητά εμπόδια που πρέπει να υπάρχουν για την πλήρη και μακρόχρονη απομόνωση των αποβλήτων περιγράφονται αναλυτικά στα τεχνικά κείμενα και οδηγίες της ΙΑΕΑ [IAEA Tecdoc-909, 1996].



Σχήμα 10: Αλυσίδα χειρισμού του εξαντλημένου καυσίμου από τον πυρηνικό σταθμό έως τον χώρο τελικής εναπόθεσης (Πηγή: Μελέτη Kärn-Bränsle Säkerhet, 1978)

Με δεδομένο ότι, οι σταθμοί ισχύος στα κράτη-μέλη της ΕΕ είναι κυρίως ελαφρού ύδατος μέσης ισχύος περίπου 1000 MW_e, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εκτιμά ότι, παράγονται ετησίως περίπου οι παρακάτω ποσότητες αποβλήτων [Eur. Comm. COM(98)799, 1998]:

- 100 m³ βραχύβια απόβλητα από την κανονική λειτουργία (στις νέες μονάδες είναι ~50 m³).
- 20-30 τόνοι εξαντλημένου καυσίμου σε μορφή βαρέων μετάλλων (ανάλογα με τον εμπλουτισμό του καυσίμου και την διαθεσιμότητα της μονάδας)
- 10.000 m³ ραδιενεργών αποβλήτων από τον παροπλισμό των μονάδων (στην ΕΕ, υπολογίζεται επίσημως, μόνο ένα μικρό ποσοστό της ποσότητας αυτής, δεδομένου ότι ο παροπλισμός των μονάδων μπορεί να καθυστερήσει δεκαετίες - οι μεγάλες ποσότητες των αποβλήτων του παροπλισμού αναμένονται στην ΕΕ περί το 2020-2050).

Στην ΕΕ, οι επεξεργασμένες ποσότητες όλων των κατηγοριών ραδιενεργών αποβλήτων (conditioned wastes) ετησίως, ανέρχονται σε 50.000 m³ περίπου, με τάση αύξησης για τα επόμενα μέχρι το 2000 έτη. Μετά το 2000, αναμένεται μία μικρή μείωση των αποβλήτων από την κανονική λειτουργία - λόγω του αναμενόμενου κλεισίματος παλιών σταθμών, της ακύρωσης κατασκευής νέων μονάδων και της προσπάθειας ελαχιστοποίησης των αποβλήτων στην πηγή από τους διαχειριστές των σταθμών. Αναμένεται επίσης, μία μικρή αύξηση των αποβλήτων από την διάλυση και τον παροπλισμό των παλαιών μονάδων [Eur.Comm.COM(98)799, 1998].

Μερικές ευρωπαϊκές χώρες έχουν επιλέξει την επανεπεξεργασία (vitrification) των αποβλήτων πριν την εναπόθεσή τους, με σκοπό την μείωση του όγκου τους και την αξιοποίηση χρήσιμων ραδιονουκλιδίων (Γαλλία, Βρετανία), ενώ άλλες, ακολουθούν την οδό της άμεσης εναπόθεσης (conditioning, Σουηδία, Φινλανδία, Ισπανία). Παρόλα αυτά, η ανακύκλωση του επανεπεξεργασμένου ουρανίου και πλουτωνίου, μέσω της χρήσης καυσίμου MOX (mixed oxide fuel) στους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος, θεωρείται στην ΕΕ εγκατεστημένη τεχνολογία. Στα πλαίσια αυτά, η επιλογή της ανακύκλωσης αυτών των σχάσιμων υλικών στους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες ταχείων νετρονίων αναμένεται να εφαρμοσθεί, είτε μεσοπρόθεσμα, είτε μακροπρόθεσμα.

Σήμερα, η επανεπεξεργασία των αποβλήτων πριν την εναπόθεσή τους δεν θεωρείται οικονομικά συμφέρουσα, εφόσον υπάρχει μειωμένο εμπορικό ενδιαφέρον για ανακυκλωμένο καύσιμο, ειδικά Pu, για τους εξής λόγους: η μεν ανάπτυξη των αναπαραγωγικών αντιδραστήρων δεν φαίνεται να προχωρεί γρήγορα από τη μία, και από την άλλη το κόστος της επανεπεξεργασίας είναι υψηλό [Decamps and Dujacquier, 1997]. Υπάρχει επίσης η άποψη ότι με τον τρόπο αυτό μεγαλώνει η έκθεση των ανθρώπων σε ακτινοβολία, και ενδεχομένως να παράγονται και άλλα ραδιενεργά απόβλητα, εφόσον μεγαλώνει η διάρκεια του κύκλου ζωής (backend).

Όμως, η διαδικασία επανεπεξεργασίας των αποβλήτων πριν την τελική εναπόθεσή τους είναι καθοριστική στο να διασφαλίζεται ένα τεχνικό πλαίσιο πειστικό για την ασφαλή διαχείριση του εξαντλημένου καυσίμου και των υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων, ιδιαίτερα στην Ευρώπη, δεδομένου ότι, αποτελεί διεθνώς αποδεκτή αρχή, η διάθεση των ραδιενεργών αποβλήτων, είτε είναι πυρηνικά είτε όχι, να είναι υπόθεση των κρατών τα οποία τα παράγουν, από το σημείο που παράγονται έως την τελική τους εναπόθεση.

Η Γαλλία αναμένεται να παράγει μέχρι το τέλος του 21ου αιώνα περίπου 1,6 εκατ. τόνους αποβλήτων πολύ χαμηλής ραδιενέργειας (μεταξύ 1-100 Bq/g) που θα αντιστοιχούν κυρίως σε απόβλητα από τη διάλυση κάποιων σταθμών, ενώ τα χαμηλής ραδιενέργειας απόβλητα από τη λειτουργία όλων των σταθμών συνολικά στη Γαλλία εκτιμάται σε μερικές χιλιάδες τόνους ετησίως [Lacoste, 1997]. Μέχρι το τέλος του 1994, είχαν εναποθεθεί συνολικά από την ΕΕ, 1.640.000 m³ ραδιενεργών αποβλήτων, είτε με εναπόθεση στον ωκεανό (μέχρι το 1982), είτε σε επιφανειακούς ρηχούς και σε βαθείς γεωλογικούς σχηματισμούς. Η Φινλανδία, η Γαλλία, η Σουηδία, η Βρετανία και η Ισπανία διαθέτουν επιφανειακούς ρηχούς χώρους εναπόθεσης για απόβλητα που περιέχουν μικρές ποσότητες βραχύβιων ραδιονουκλιδίων. Στη Γερμανία λειτουργεί βαθύς γεωλογικός σχηματισμός σε παλαιό αλατωρυχείο. Τα βραχύβια απόβλητα εναποτίθενται στους επιφανειακούς ρηχούς χώρους εναπόθεσης, μέχρι να είναι διαθέσιμοι βαθείς γεωλογικοί σχηματισμοί [Eur.Comm.COM(98)799, 1998].

4.3. Κατηγορίες αποβλήτων

4.3.1. Υψηλής ραδιενέργειας απόβλητα

Σύμφωνα με το γλωσσάριο της Nuclear Regulatory Commission των ΗΠΑ, τα υψηλής ραδιενέργειας απόβλητα (**high-level waste, HLW**) περιλαμβάνουν:

- (1) το ακτινοβολημένο πυρηνικό καύσιμο
- (2) τα υγρά κατάλοιπα, που προέρχονται από την λειτουργία του συστήματος διαχωρισμού στον πρώτο κύκλο ζωής του πυρηνικού καυσίμου, καθώς και τα συμπυκνώματα από διαδοχικούς κύκλους διαχωρισμού στις εγκαταστάσεις επανεπεξεργασίας (reprocessing) εξαντλημένου πυρηνικού καυσίμου
- (3) τα στερεά, στα οποία έχουν μετατραπεί τα παραπάνω υγρά.

Τα υψηλής ραδιενέργειας απόβλητα είναι κυρίως στη μορφή του καταναλωθέντος καυσίμου από τους εμπορικούς πυρηνικούς σταθμούς. Περιλαμβάνουν επίσης, μερικά επανεπεξεργασμένα HLW από αμυντικές δραστηριότητες και μικρές ποσότητες επανεπεξεργασμένων εμπορικών HLW. Σύμφωνα με το γλωσσάριο του Ινστιτούτου Ουρανίου, τα υψηλής ραδιενέργειας απόβλητα διακρίνονται από δύο επίπεδα:

- Τα υγρά απόβλητα από την επανεπεξεργασία, τα οποία περιέχουν τα προϊόντα της σχάσεως και
- Όλο το μη επανεπεξεργασμένο καταναλωθέν καύσιμο (εφόσον προβλέπεται η άμεση διάθεσή του).

Το γλωσσάριο αναφέρει ότι τα HLW είναι πολύ ραδιενεργά και περιέχουν μακρόβια ραδιοουκλίδια. Παράγουν ένα σημαντικό ποσό θερμότητας και απαιτούν σταθερή ψύξη για πολλά χρόνια.

4.3.2. Χαμηλής ραδιενέργειας απόβλητα

Σύμφωνα με το γλωσσάριο της Nuclear Regulatory Commission των ΗΠΑ, ο όρος «απόβλητα χαμηλής ραδιενέργειας» (**low-level waste, LLW**) είναι ένας γενικός όρος, που περιλαμβάνει πολλές κατηγορίες αποβλήτων: απόβλητα από βιομηχανίες, ιατρικά απόβλητα από νοσοκομειακές και άλλες μονάδες, απόβλητα από εκπαιδευτικά ή ερευνητικά ιδρύματα, από κρατικά ή ιδιωτικά εργαστήρια και από μονάδες κατεργασίας πυρηνικού καυσίμου σε όλο τον κύκλο ζωής του, από μονάδες δηλαδή, που χρησιμοποιούν ραδιενεργά υλικά και παράγουν απόβλητα χαμηλής ραδιενέργειας στα πλαίσια της φυσιολογικής τους λειτουργίας. Τα απόβλητα αυτά παράγονται σε πολλές φυσικές και χημικές μορφές και επίπεδα μόλυνσης.

4.4. Απόβλητα και ραδιενεργή μόλυνση από τον κύκλο ζωής του καυσίμου

Ο κύκλος ζωής ενός αντιδραστήρα ισχύος παράγει απόβλητα που προέρχονται κυρίως από την κανονική λειτουργία του σταθμού και από τον παροπλισμό του. Ο κύκλος όμως ζωής του πυρηνικού καυσίμου αρχίζει νωρίτερα και παράγει επίσης απόβλητα, τόσο συμβατικά όσο και ραδιενεργά. Στις μονάδες επεξεργασίας και παρασκευής του καυσίμου τα απόβλητα είναι διαχειρίσιμα με τους συμβατικούς τρόπους και δεν αποτελούν ιδιαίτερο περιβαλλοντικό πρόβλημα. Ιδιαίτερο πρόβλημα για τη διαχείρισή τους παρουσιάζουν τα απόβλητα από τη λειτουργία του αντιδραστήρα και την επανεπεξεργασία του εξαντλημένου πυρηνικού καυσίμου [Kennedy, 1969].

Κατά την παραγωγή και επεξεργασία του ουρανίου, ως πυρηνικού καυσίμου, παράγεται ράδιο, το οποίο δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για ανακύκλωση, ενώ επιβάλλεται να διατεθεί με ασφάλεια, σε αντίθεση με το θόριο, το οποίο είναι παραπροϊόν του ουρανίου, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πυρηνικό καύσιμο. Πριν από τη χρήση τους όμως, ως πυρηνικά καύσιμα, το ουράνιο και το θόριο δεν αποτελούν περιβαλλοντική απειλή.

Τα απόβλητα των μονάδων επανεπεξεργασίας καυσίμου περιέχουν συνήθως [Kennedy, 1969]:

- Τα ραδιονουκλίδια-προϊόντα σχάσεως, όπως το ιώδιο-131, το ξένον και το κρυπτόν-85, σε αέριο μορφή,
- Τα μικρού όγκου πυκνά διαλύματα των προϊόντων σχάσεως, που αντιπροσωπεύουν πάνω από το 99% των προϊόντων σχάσεως του πυρηνικού καυσίμου,
- Αραιά διαλύματα προϊόντων σχάσεως, και
- Στερεά απόβλητα.

Το πλουτόνιο

Το πλουτόνιο είναι σχεδόν άγνωστο στη φύση ανθρωπογενές υλικό, που κατασκευάζεται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες (από το σχάσιμο ουράνιο-238: με απορρόφηση ενός νετρονίου που απελευθερώνεται από τη σχάση παράγεται U-239 το οποίο χάνει ένα ηλεκτρόνιο και μεταπίπτει σε Np-239, το οποίο χάνει επίσης ένα ηλεκτρόνιο και μεταπίπτει σε Pu-239 - και Pu-240). Το πλουτόνιο είναι σχάσιμο υλικό και αυτό, του οποίου η σχάση απελευθερώνει ενέργεια. Θεωρείται από τα πιο επικίνδυνα και τοξικά υλικά. Είναι τοξικό, εάν καταποθεί, όπως συμβαίνει και με άλλες βιομηχανικές ουσίες, π.χ. τα βαρέα μέταλλα και απαιτεί ειδικό χειρισμό. Συνήθως φυλάσσεται σε μορφή οξειδίου, που είναι αδιάλυτο στα ανθρώπινα υγρά και πρακτικά μη-τοξικό. Το πλουτόνιο που χρησιμοποιείται για την παρασκευή καυσίμου MOX είναι σε μορφή στερεών δισκίων από σκόνη οξειδίου του πλουτωνίου (PuO_2). Το PuO_2 είναι πολύ σταθερό κεραμικό υλικό, σχεδόν αδιάλυτο στο νερό ή στα ανθρώπινα υγρά και δεν είναι τοξικό, εκτός εάν εισπνευστεί (έχει κατηγορηθεί για αύξηση του καρκίνου των πνευμόνων στον απασχολούμενο σε σχετικές εργασίες πληθυσμό). Το πλουτόνιο είναι ραδιενεργό. Εκπέμπει α ακτινοβολία, που έχει μικρή διεισδυτικότητα (ένα ζευγάρι γάντια προστατεύει τον άνθρωπο από το πλουτόνιο) [UI Core Issues, 1995]. Τα απόβλητα όμως που περιέχουν πλουτόνιο παραμένουν ραδιενεργά για εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια και απαιτούν μακρόβια και ασφαλή αποθήκευση, σε πλήρη απομόνωση από τη βιόσφαιρα.

4.5. Επιπτώσεις από την κανονική λειτουργία

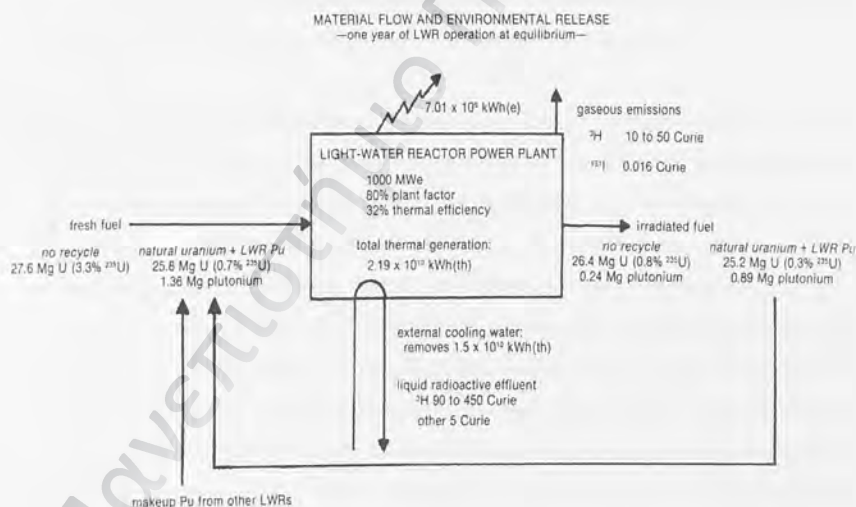
4.5.1. Εκπομπές από την κανονική λειτουργία

Κατά τη λειτουργία του αντιδραστήρα, παράγονται εκπομπές ραδιονουκλιδίων χαμηλής ραδιενέργειας αέριες και υγρές, εξαιτίας νετρονικής ενεργοποίησης των φυσιολογικών συστατικών του ψυκτικού ή λόγω παρουσίας προϊόντων διάβρωσης των υλικών από νετρονική ενεργοποίηση στο ψυκτικό και σε λιγότερο βαθμό, εξαιτίας των προϊόντων σχάσεως του ουρανίου που μπορεί να έρθουν κατευθείαν σε επαφή με το ψυκτικό.

Στις περιπτώσεις που το ψυκτικό είναι αέριο ή υγρό, η περιβαλλοντική μόλυνση θέτει δύο προβλήματα: εάν η αρχική διασπορά στο περιβάλλον είναι ικανοποιητική για να μειώσει τις επιπτώσεις σε αποδεκτά επίπεδα και εάν η μακροπρόθεσμη και σε μεγαλύτερες αποστάσεις συγκέντρωση των ρύπων σε συγκεκριμένα σημεία είναι αρκετά υψηλή, ώστε να υπερβαίνει τα επιτρεπτά όρια. Κατά τη λειτουργία του αντιδραστήρα υπάρχει η τεχνική και επιστημονική δυνατότητα να πραγματοποιούνται με ακρίβεια μελέτες συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων στους υδατικούς ταμιευτήρες κοντά στον σταθμό, στα ζωικά είδη, στον αέρα και στο έδαφος [Kenney, 1969]. Ιδιαίτερα, όσον αφορά στους υγρούς ρύπους, είναι σημαντικός ο ρόλος των συστηματικών μελετών των απορροών σε ποτάμια, λίμνες και θάλασσες, όπου συνήθως βρίσκονται οι πυρηνικοί σταθμοί, προκειμένου να υπολογισθεί η έκθεση του πληθυσμού στην ακτινοβολία εκτός από την εισπνοή και μέσω της τροφικής αλυσίδας και του ποσίμου νερού και προκειμένου - λόγω αβεβαιότητας - να επιβεβαιώνονται τα ευρήματα [Blanchard and Kahn, 1973] και να λαμβάνονται έγκαιρα μέτρα.

Στους ψυχόμενους με αέρια αντιδραστήρες το μεγαλύτερο πρόβλημα αέριας ρύπανσης αποτελούν το Αργόν-41, σαν πηγή εξωτερικής ραδιενέργειας και σημαντικής παραμέτρου για την εκτίμηση της διεύθυνσης του ανέμου και ο άνθρακας-14. Στα υγρά απόβλητα περιέχονται τρίτιο, προϊόντα διάβρωσης που περιέχουν θείο-35 και προϊόντα σχάσεως, κυρίως καίσιο-137. Η σύνθεση αυτή αλλάζει, όσο αυξάνεται ο χρόνος ακτινοβολήσης του καυσίμου και επομένως, όσο μεγαλώνει η ηλικία του αντιδραστήρα.

Με τους ψυχόμενους με υγρά αντιδραστήρες (Σχήμα 11), η αξιολόγηση της περιβαλλοντικής ρύπανσης γίνεται σε σχέση με τη σύνθεση των φυσικών νερών σε συγκεκριμένα σημεία (φώσφορος-32 στη τροφική αλυσίδα μέσω ψαριών, ή ψευδάργυρος-65 μέσω στρειδιών, σύνθεση του ποτίμου νερού, κλπ). Σοβαροί ρύποι είναι το τρίτιο και τα προϊόντα διάβρωσης (τα οποία όμως, μπορούν να απομακρυνθούν με διήθηση ή ιοντοανταλλαγή). Ιδιαίτερα στους PWR, μόλυνση μπορεί να προκύψει από το δευτερεύον ψυκτικό σύστημα, λόγω διαρροής, ή όταν δεν υπάρχει αρκετή ποσότητα νερού για ψύξη (οπότε απαιτείται επανακυκλοφορία του νερού ψύξεως και κατά συνέπεια, η συγκέντρωση του τριτίου μπορεί να υπερβεί τα επιτρεπτά όρια) [Kenny, 1969]. Επίσης, ενδεχόμενους ρύπους αποτελούν τα αέρια Xe-133 ή Xe-135 και στις υγρές απορροές, τα ραδιονουκλίδια Cr-51, Mn-54, Fe-55, Co-57, Co-58, Fe-59, Co-60, Sr-90, Zr-95, Nb-95, Mo-99, I-131, I-133, Cs-134, Cs-135, Cs-136 και Cs-137 [Blanchard and Kahn, 1973].



Σχήμα 11: Ροές υλικών και περιβαλλοντικές εκπομπές σε LWRs [Nero, 1979]

Για την αξιολόγηση του κινδύνου στο περιβάλλον και στον άνθρωπο, πρέπει να συνυπολογισθούν οι φυσικές ιδιότητες του κάθε ραδιονουκλιδίου, η περιβαλλοντική του συμπεριφορά και η μεταβολική συμπεριφορά του σε ζώα και ανθρώπους, οι

συνήθειες ζωής και διατροφής του εκτιθέμενου πληθυσμού έναντι της συμπεριφοράς του κρίσιμου ραδιονουκλιδίου, κλπ.

Οι πραγματικές εκθέσεις που θα λάβει ο πληθυσμός γύρω από έναν αντιδραστήρα ισχύος έχουν υπολογισθεί πολύ μικρότερες από την επιτρεπόμενη δόση (0,25 mSv/yr για πληθυσμό κοντά στην περίμετρο του αντιδραστήρα)². Υπολογίζεται ότι, η αθροιστική δόση από έναν αντιδραστήρα ισχύος που εκλύει το μέγιστο 10 mwem τον χρόνο, για κάθε γενιά, είναι λιγότερη από 350 mwem περίπου [Καρουσάκης, 1979]. Παρόλα αυτά, οι επιπτώσεις από την έκθεση ανθρώπων σε μικρές δόσεις ακτινοβολίας, είναι στοχαστικές και δεν υπάρχει επαρκής γνώση για αυτές. Ο μηχανισμός βιολογικών επιδράσεων των ακτινοβολιών δεν είναι επαρκώς γνωστός. Οι επιδράσεις χαμηλών δόσεων δεν μπορούν να καταμετρηθούν, αλλά να εκτιμηθούν, κατ' ανάγκη μέσω πειραματόζων³.

Το αποτέλεσμα της έκθεσης σε ιονίζουσα ακτινοβολία είναι λευχαιμία και γενετικές μεταλλάξεις. Η πιο σημαντική παράμετρος είναι η αθροιστική ενεργή ισοδύναμη δόση (collective effective dose equivalent) (σε ανθρώπους-σε Sieverts, Sv⁴).

Για την αξιολόγηση του κινδύνου στο περιβάλλον, ιδιαίτερες μελέτες επιβάλλονται σε σχέση με την συμπεριφορά και την κινητική των ραδιονουκλιδίων στον αέρα, στα νερά και στο έδαφος (ραδιοοικολογία). Έχει εκτιμηθεί ότι, οι ραδιενεργές αέρειες εκπομπές από αντιδραστήρες πεπλεγμένου ύδατος είναι μικρότερες σε σχέση με τους αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος, εφόσον σε αυτούς, ο ατμός που περνάει από την καρδιά του αντιδραστήρα είναι ραδιενεργός και περιέχει πτητικά παράγωγα της σχάσεως. Για τον λόγο αυτό, τα απόβλητα αέρια στον BWR που περνούν από τον στρόβιλο με τον ατμό, αποθηκεύονται για 30 περίπου λεπτά ώστε να διασπασθούν τα βραχύβια, και αφού περάσουν από φίλτρα, απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα μέσω καμινάδας με ελεγχόμενο ρυθμό, σύμφωνα με τους κανονισμούς [Καρουσάκης, 1979].

² Η ολική φυσική ακτινοβολία που παίρνει ένας μέσος άνθρωπος στον πλανήτη, είναι περίπου 150 mwem/χρόνο, αριθμός που διαφέρει από τόπο σε τόπο και για κάθε 1500 μέτρα υψόμετρο, εκτός εάν υπάρχει σε κάποιες περιοχές περιεκτικότητα πετρωμάτων σε θόριο ή ουράνιο [Καρουσάκης, 1979].

Τα όρια της επαγγελματικής έκθεσης σε τεχνητή ραδιενέργεια ήταν για πολλά χρόνια στα 50 mSv/yr, ενώ η ICRP τα αναθεώρησε σε 100 mSv/yr (10 rem) για περίοδο 5 ετών και 20 mSv ετησίως. Για κάθε χρόνο ξεχωριστά ισχύει το όριο των 50 mSv/yr. Για εγκύους, το όριο είναι 5 mSv. Για το κοινό κοντά σε πυρηνικό σταθμό, τα όρια είναι 0,25 mSv/yr [Bodansky, 1996].

³ Biological damage: deterministic and stochastic.

Μελέτη των J.A. Sanchez-Cabeza & J. Molero (Ισπανία) σχετικά με την ραδιολογικές επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον της Μεσογείου στην ευρύτερη περιοχή του πυρηνικού σταθμού Vandellós I (Καταλονία) συμπεραίνει ότι οι συγκεντρώσεις των τεχνητών ραδιονουκλιδίων στο θαλάσσιο περιβάλλον (Cs-137, Cs-134, Co-60, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pb-210 και Am-241), οι οποίες οφείλονται στις υγρές απορροές του ψυκτικού του πυρηνικού σταθμού μετά από μη-προγραμματισμένη παύση της λειτουργίας του, όπως και η ραδιοϊσοτοπική αναλογία των υπερουρανίων στοιχείων ($^{239,240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$, $^{241}\text{Am}/^{137}\text{Cs}$, $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$, $^{241}\text{Am}/^{239,240}\text{Pu}$) παρατηρήθηκαν αυξημένες μόνο στην περιοχή γεινιάσης με τον σταθμό και σε επίπεδα κοντά στο επίπεδο υποστρώματος [Sanchez-Cabeza and Molero, 2000].

4.5.2. Κλιματική αλλαγή και συμβολή στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (Greenhouse Gas Emissions, GHGs)

Η πυρηνική ενέργεια θεωρείται καθαρή μορφή ως προς ενδεχόμενους ρύπους, ικανή να συνεισφέρει στην μείωση ή στην σταθεροποίηση των εκπομπών των αερίων που συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Θεωρείται ότι οι πυρηνικοί σταθμοί ισχύος δεν εκπέμπουν CO_2 , ούτε CH_4 (methane) και NO_x (nitrogen monoxide) κατά την λειτουργία τους για παραγωγή ενέργειας, όπως συμβαίνει με τους σταθμούς συμβατικών καυσίμων.

Σε παγκόσμια βάση, με την χρήση πυρηνικής ενέργειας κατ' έτος, αποφεύγεται ποσοστό 10% των ολικών εκπομπών CO_2 ή το ισοδύναμο 2.3 δισεκατομ. τόνων CO_2 . Στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρισμού χωρίς το μερίδιο της πυρηνικής ενέργειας, οι παγκόσμιες εκπομπές CO_2 θα ήταν κατά 33% υψηλότερες [NEA Study, 1999].

Μετά τη Διάσκεψη για την Κλιματική Αλλαγή στο Κιότο (1997) και την υπογραφή του ομώνυμου πρωτοκόλλου για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου από τις χώρες του Annex I⁵, πραγματοποιήθηκαν μελέτες στα πλαίσια του ΟΟΣΑ σχετικά με τον διαμορφωνόμενο ρόλο της πυρηνικής ενέργεια, ως κατά βάση ελεύθερης εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

⁴ Ένα Sievert είναι η μονάδα της ισοδύναμης ενεργού δόσεως που αντιστοιχεί σε απορροφούμενη δόση 1 gray (αντιστοιχώς, 1 Rem αντιστοιχεί σε 1 rad) και 1 Sievert = 100 Rem.

⁵ Οι χώρες που υπογράφουν το Πρωτόκολλο (Annex I) δεσμεύονται να μειώσουν κάθε μία χωριστά ή μαζί, τις εκπομπές τους σύμφωνα με στόχους ανά χώρα, με σκοπό να μειώσουν τις ολικές εκπομπές τους κατά 5,2% κάτω από τα επίπεδα του 1990, την περίοδο 2008-2012.

Η ΝΕΑ (OECD) πραγματοποίησε στα πλαίσια αυτά σχετική μελέτη [NEA Study, 1999], στην οποία μελετήθηκαν τρία σενάρια για την κλιματική αλλαγή:

- I. της συνεχιζόμενης ανάπτυξης της πυρηνικής ενέργειας (προϋποθέτοντας την σταθερή αύξηση της συνολικής ικανότητας της πυρηνικής ενέργειας έως τα 1120 GWe μέχρι το 2050).
- II. Κατάργηση της πυρηνικής ενέργειας (προϋποθέτοντας την πλήρη κατάργηση της πυρηνικής ενέργειας έως το 2045) και
- III. Στασιμότητα ακολουθούμενη από αναζωογόνηση (προϋποθέτοντας την πρόωρη απόσυρση πυρηνικών αντιδραστήρων μικροπρόθεσμα-έως το 2015, και στη συνέχεια, αναζωπύρωση της πυρηνικής επιλογής μέχρι το 2020, μέχρι την συνολική ικανότητα που θα είχε επιτευχθεί το 2050 με το σενάριο I).

Η μελέτη αυτή βασίζεται στην παραδοχή ότι ο κύκλος ζωής των πυρηνικών αντιδραστήρων προκαλεί εκπομπές περίπου 25 g ισοδύναμων CO₂/kWh (gCO₂ equiv./kWh), έναντι 450-1250 gCO₂ equiv./kWh των κύκλων ζωής των συμβατικών καυσίμων. Στα συμπεράσματα περιλαμβάνονται οι παρακάτω εκτιμήσεις:

Στο σενάριο I, οι ετήσιες εκπομπές GHGs (ως ισοδύναμα CO₂) αναμένεται να μειωθούν κατά 6,3 gigatonnes το 2050, δηλαδή κατά περίπου το 1/3 των ολικών εκπομπών GHGs του ενεργειακού τομέα του σεναρίου III και κατά περίπου 55 gigatonnes του σεναρίου II. Στο σενάριο I έχουμε 4 φορές μεγαλύτερη μείωση εκπομπών GHGs σε σχέση με το σενάριο II, ενώ στο σενάριο III, οι εξοικονομούμενες εκπομπές GHGs το 2050, είναι μόνο οι μισές αυτών του σεναρίου I, αν και τα δύο σενάρια (I, III) φθάνουν στα ίδια επίπεδα παραγόμενου ηλεκτρισμού το 2050. Η μελέτη αυτή αποτελεί βάση για την άποψη, ότι η πυρηνική ενέργεια πρέπει να μένει ανοικτή επιλογή, σε θέση να είναι τεχνικά εφικτή εγκαίρως, σε σχέση με την προώθηση τεχνολογιών για τη μείωση των εκπομπών GHGs.

Στον αντίποδα αυτής της άποψης, υποστηρίζεται ότι διάφορες ενεργειακές καταναλώσεις στα πλαίσια του κύκλου ζωής του πυρηνικού καυσίμου βασίζονται σε συμβατικά καύσιμα και επομένως έχουν σημαντικές εκπομπές CO₂. Υποστηρικτές της άποψης ότι έμμεσα η πυρηνική ενέργεια συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι διάφορες αντιπυρηνικές ομάδες, οι οποίες βασίζονται κυρίως στην εργασία του

Δρ. Nigel Mortimer⁶, που εκπονήθηκε με αφορμή την κατασκευή ενός PWR Hinkley Point, στη Βρετανία και εκπροσωπήθηκε δημοσίως από τους “Φύλους της Γης” (Friends of the Earth) [The Uranium Institute GHGs paper, 2000]. Διάφορες μελέτες που έγιναν για να αντιμετωπίσουν το παραπάνω επιχείρημα, ανέλυσαν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε μονάδες επεξεργασίας και παρασκευής πυρηνικού καυσίμου στη Γερμανία (Πίνακας 19) και στις ΗΠΑ και συμπέραναν ότι οι εκπομπές αυτές κυμαίνονται σε ποσοστό 0,5%-4% των εκπομπών από ισοδύναμους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με άνθρακα [The Uranium Institute GHGs paper, 2000].

Πίνακας 19: Εκπομπές CO₂ από τον κύκλο του πυρηνικού καυσίμου στη Γερμανία 1995 (The Uranium Institute GHGs paper, 2000)

Nuclear Fuel Cycle Process	Specific Energy consumed (kWh/kg U nat)	Energy consumed as % of electric energy content	Specific CO ₂ Emissions from energy consumed (kg CO ₂ /kg U nat)	Annual CO ₂ emissions to fuel a typical 1300 MWe LWR (tones)
Mining & Milling	59	0,1	47	9100
Conversion	7	0,01	<7	<1400
Enrichment	310	0,6	140	27200
Fuel Fabrication	7	0,01	3	600
TOTAL	383	0,7	197	38300

4.6. Ραδιενεργός μόλυνση από ατύχημα

Η άμεση ή έμμεση έκθεση ανθρώπων και ζώων σε υψηλές δόσεις ραδιενέργειας προκαλεί θάνατο (deterministic effects). Στον βομβαρδισμό της Χιροσίμα, με δόση περίπου 3 Gy⁷ αναμενόταν 50% θνησιμότητα, ενώ, για πάνω από 6 Gy, σχεδόν 100%. Για δόσεις μεταξύ 1-4 Gy, αναμένονται κλινικά συμπτώματα του φαινομένου “radiation sickness” και μερικοί θάνατοι, στις υψηλές δόσεις. Για δόσεις κάτω από 1 Gy, δεν αναμένονται κλινικά συμπτώματα [Bodansky, 1996].

⁶ Mortimer N., Aspects of the greenhouse effect, Friends of the Earth evidence to Hinkley Point C enquiry, 1989 (FOE9)

⁷ Absorbed dose in human or animal tissue in SI: Gray, Gy = 100 rad (1 gray=the absorbed dose corresponding to the deposition of 1 Joule/kg in the absorber)

Το απόθεμα ραδιενέργειας ενός αντιδραστήρα σε λειτουργία, ισχύος 1000 MWe (3000 MWth), είναι περίπου 15 δισεκατομύρια Ci⁸, ποσό το οποίο ενδέχεται να απελευθερωθεί στη βιόσφαιρα σε περίπτωση ατυχήματος που οφείλεται σε τήξη του πυρήνα [Nero, 1979]. Αξίζει να επισημανθεί ότι, οι σταθμοί που αποτελούνται από έναν αριθμό μονάδων μικρότερης ισχύος θεωρούνται ιδιαίτερα ασφαλείς σε περίπτωση ατυχήματος.

4.7. Ασφαλής διαχείριση αποβλήτων αντιδραστήρων και καταναλωθέντος καυσίμου

Οι αντιδραστήρες ισχύος παράγουν απόβλητα κατά τον κύκλο ζωής τους, τα οποία χρήζουν ειδικής μεταχείρισης, με σκοπό την προστασία του ανθρώπου και του περιβάλλοντος. Η ΙΑΕΑ αναφέρει ότι από ένα τυπικό πυρηνικό σταθμό ισχύος 1000 MWe – ο οποίος μπορεί να καλύψει τις ανάγκες σε ηλεκτρισμό μίας πόλης σαν το Άμστερνταμ – παράγονται ετησίως περίπου 300 m³ ραδιενεργών αποβλήτων χαμηλής και μεσαίας ραδιενέργειας και περίπου 30 τόνοι στερεών αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας⁹ [ιστοσελίδα ΙΑΕΑ, 2000]. Σύμφωνα επίσης, με τα στοιχεία καυσίμου που περιέχουν οι αντιδραστήρες, ένας PWR 1000 MWe θα έχει ως απόβλητο 40-70 στοιχεία καυσίμου, ενώ ένας ισοδύναμος BWR, 120-200 στοιχεία καυσίμου. Άλλες εκτιμήσεις της ΙΑΕΑ, με στοιχεία του 1999, αναφέρουν ότι, ετησίως, όλοι οι εν λειτουργία πυρηνικοί σταθμοί στον κόσμο παράγουν περίπου 200.000 m³ LILW και 10.000 m³ HLW (συμπεριλαμβανομένου και του εξαντλημένου καυσίμου που χαρακτηρίζεται ως απόβλητο).

Η NEA/OECD εκτιμάει ότι, στην εκδοχή της εμπορικής αξιοποίησης των αναπαραγωγικών αντιδραστήρων, εκτιμάται ότι η συγκέντρωση μη επανεπεξεργασμένου καυσίμου και πλουτωνίου προς αποθήκευση στους αντιδραστήρες και στις εγκαταστάσεις του κύκλου ζωής του καυσίμου, θα μειωθεί σημαντικά. Η NEA/OECD εκτιμάει επίσης ότι, τα ραδιενεργά στερεά απόβλητα που παράγονται συνολικά από τη λειτουργία των πυρηνικών σταθμών ισχύος και από τον κύκλο ζωής του καυσίμου, ανέρχονται σε περίπου 500 κυβικά μέτρα ανά GWe-year, όσον αφορά σε χαμηλής και μεσαίας ραδιενέργειας. Ο όγκος αυτός των αποβλήτων

⁸ Ciurie, Ci (SI, Bequerel, Bq): μονάδα ραδιενέργειας. 1 Ciurie = 3,7x10¹⁰ disintegrations per second – 1 Bequerel = 1 disintegration per second = 2,703 x10⁻¹¹Ci.

⁹ Ένας συμβατικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής 1000 MWe με άνθρακα, καίει ~11000 τόνους άνθρακα κάθε 24 ώρες και απελευθερώνει κατευθείαν στην ατμόσφαιρα ~300 τόνους SO₂ και ~ 5 τόνους τέφρας, η οποία περιέχει κάδμιο, αρσενικό, υδράργυρο, μόλυβδο και ραδιενεργά στοιχεία σε μικρές συγκεντρώσεις [Cohran and Tsoulfanidis, 1992].

είναι αρκετές φορές πιο μικρός σε σχέση με τα απόβλητα που παράγονται από σταθμούς συμβατικών καυσίμων και αυτό επιτρέπει την με αποδεκτό κόστος ασφαλή διαχείρισή τους σε απομόνωση από το ανθρώπινο περιβάλλον [NEA/OECD Study, 1999]. Στον Πίνακα 20 αναφέρονται τα παραγόμενα ραδιενεργά απόβλητα από τον κύκλο ζωής των τύπων PWR και BWR.

Πίνακας 20: Παραγόμενα ραδιενεργά απόβλητα από τον κύκλο ζωής των τύπων PWR και BWR (Πηγή: Cochran & Tsoulfanidis, 1992)

Waste type	Reference PWR, 1 GWe		Reference BWR, 1 GWe	
	Volume (m ³)	Radioactivity (undecayed curies)	Volume (m ³)	Radioactivity (undecayed curies)
Once-through fuel cycle wastes				
Mill tailings	4,353 x10 ⁶	3,710x10 ⁴	4,867x10 ⁶	4,149x10 ⁴
LLW from U conversion a	3,411 x10 ²	9,813x10 ³	3,814x10 ²	1,097x10 ⁴
LLW from U enrichment b	1,328 x10 ²	9,716x10 ³	1,365x10 ²	1,080x10 ⁴
LLW from fuel fabrication	3,063 x10 ³	7,288x10 ⁰	4,110x10 ³	9,781x10 ⁰
LLW from reactor power generation	3,032 x10 ⁴	2,866x10 ⁴	5,217x10 ⁴	7,956x10 ⁴
Reactor spent fuel	5,213 x10 ²	3,270x10 ⁹ c	6,996x10 ²	3,342x10 ⁹ c
Decommissioning wastes				
LLW	1,510 x10 ⁴	1,057x10 ⁵	1,640x10 ⁴	2,532x10 ⁵
Greater than Class C	1,130 x10 ²	4,070x10 ⁶	4,070x10 ¹	3,300x10 ⁶
TOTALS	4,403x10⁶	3,274x10⁹	4,941x10⁶	3,348x10⁹

a applies to the fluorination/fractionation process

b applies to the gaseous diffusion process

c based on activity levels measured 1 year after reactor discharge & burnup of a PWR 33,000 MWd/MTIHM-burnup of a BWR of 27,500 MWd/MTIHM

Note: Class C is the most radioactive wastes of the LLW category-remains hazardous >300 yr

Ραδιοτοξικότητα αποβλήτων

Ο κίνδυνος από τα ραδιενεργά απόβλητα αναφέρεται με όρους ραδιενέργειας που εκφράζεται σε Curie ή Bequerel. Ο όρος όμως, που υποδηλώνει την ενδεχόμενη ζημία στον άνθρωπο και στο βιολογικό περιβάλλον είναι η τοξικότητα ή **ραδιοτοξικότητα** των αποβλήτων. Ο όρος αυτός συνυπολογίζει την ευαισθησία του ανθρώπου στα ραδιονουκλίδια που εισπνέονται ή καταπίνονται. Εάν περιέχονται πάνω από ένα ραδιονουκλίδια σε ένα μίγμα, η τοξικότητα αθροίζεται. Τα όρια της έκθεσης για τον άνθρωπο είναι 500 mrem/yr για συνεχή έκθεση [Cochran and Tsoulfanidis, 1992]. Επιστημονικά δεδομένα καταδεικνύουν ότι, οι περισσότερες από τις ακτινίδες και μερικά μακρόβια προϊόντα σχάσεως μπορούν να μεταστοιχειωθούν (transmutation) σε

νουκλίδια των οποίων οι χρόνοι υποδιπλασιασμού είναι παρόμοιοι με αυτούς των στρόντιου [^{90}Sr] και καυσίου [^{137}Cs] ή και μικρότεροι¹⁰. Επίσης, έχουν επιτυχώς αναπτυχθεί για τον σκοπό αυτό, μέθοδοι διαχωρισμού των στοιχείων (partitioning), τουλάχιστον σε εργαστηριακή κλίμακα.

Διαχωρισμός και μεταστοιχείωση (Δ & Μ)

Σήμερα, ερευνώνται στην Ε.Ε. οι πρακτικές δυνατότητες να εφαρμοσθούν σε βιομηχανική κλίμακα μέθοδοι διαχωρισμού και μεταστοιχείωσης (Σχήμα 12). Το κόστος τέτοιων μεθόδων δεν έχει ακόμα μελετηθεί. Δυνητικά όμως, οι μέθοδοι αυτές μπορούν να δώσουν πειστική απάντηση στο σοβαρό πρόβλημα της ασφαλούς διαχείρισης και διάθεσης του εξαντλημένου καυσίμου και των υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων. Η ΙΑΕΑ πιστεύει ότι, η πυρηνική ενέργεια μπορεί να τύχει ευκολότερα κοινωνικής αποδοχής, εάν ο χρόνος απομόνωσης που απαιτείται για την μετάπτωση των περισσότερων ραδιονουκλιδίων των υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων, μειωθεί σε 200-300 χρόνια [ΙΑΕΑ TecDoc-948, 1997].

Στόχος της διεξαγόμενης έρευνας είναι να εξασφαλιστεί μια βάση, επί της οποίας να εκτιμώνται οι σε βιομηχανική κλίμακα πρακτικές δυνατότητες διαχωρισμού και μεταστοιχείωσης, με σκοπό να μειωθούν τα προς διάθεση ραδιονουκλίδια μεγάλης διάρκειας ζωής. Μελετώνται η διερεύνηση του οφέλους λόγω Δ&Μ και των διαφόρων μεθόδων Δ&Μ (π.χ. υποκρίσιμα ή κρίσιμα συστήματα) αναφορικά με τον όλο κύκλο του καυσίμου, με συνεκτίμηση παραμέτρων όπως κόστος, δευτερογενή απόβλητα, δόση και ασφάλεια. Ιδιαίτερη σημασία έχει η αναζήτηση νέων αποτελεσματικών διεργασιών διαχωρισμού κρίσιμων ραδιονουκλιδίων μεγάλης διάρκειας ζωής που προέρχονται από υγρά απόβλητα υψηλής και μέσης ραδιενέργειας, π.χ. υδρομεταλλουργικές διεργασίες, χρωματογραφία και πυροχημικές διεργασίες. Γίνονται μελέτες μεταστοιχείωσης για κρίσιμους ή υποκρίσιμους αντιδραστήρες συνεζευγμένους με επιταχυντές (ADS) και προκαταρκτικές μελέτες σχεδιασμού μιας πειραματικής εφαρμογής επίδειξης ADS, μελέτες υποστήριξης για έρευνα και ανάπτυξη και μελέτες για θέματα ασφάλειας [Euratom Work Programme, 1999].

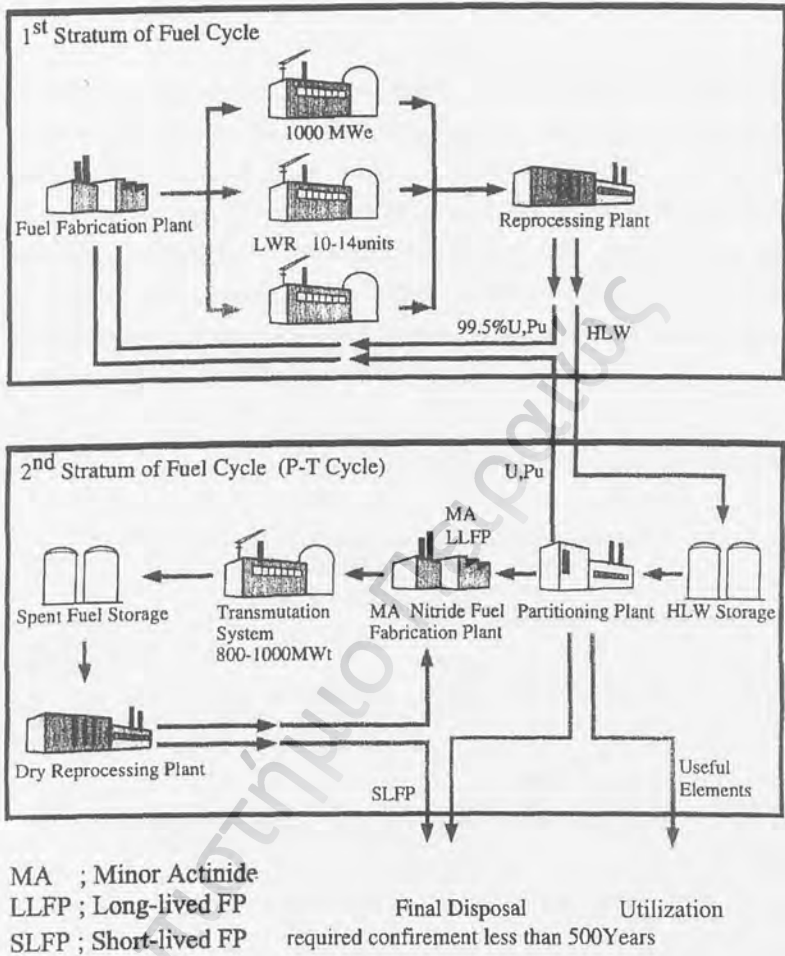
Επιδιώκεται πληρέστερη κατανόηση των βλαβών που επάγονται στα υλικά εξαιτίας ακτινοβολίας που εκλύεται από αντιδράσεις θραύσης, απόκτηση βασικών πυρηνικών

¹⁰ [^{137}Cs] $T_{1/2} = 30$ y, [^{90}Sr] $T_{1/2} = 28,5$ y (β^-)

δεδομένων ουσιαστικής σημασίας για τον σχεδιασμό ADS, μελέτη συμβατότητας υλικών (π.χ. μολύβδου-χάλυβα), δοκιμή καυσίμων και στόχων για την αποτέφρωση ακτινιδίων και μακρόβιων προϊόντων σχάσεως κλπ. Αναζητώνται στα πλαίσια αυτά, τεχνικές λύσεις, οι οποίες δυνάμει να προσφέρουν πιο μακροπρόθεσμα οφέλη από πλευράς κόστους, ασφάλειας, βιώσιμης λειτουργίας, διαχείρισης αποβλήτων, χρησιμοποίησης σχάσιμου υλικού και πυρηνικών διασφαλίσεων (π.χ. αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων και αντιδραστήρες υψηλής θερμοκρασίας) και να αξιοποιήσουν το δυναμικό της αγοράς για μικρούς ή/και άλλου τύπου αντιδραστήρες προς χρήση στην αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή σε άλλες εφαρμογές, μεταξύ των οποίων και ο προσδιορισμός περαιτέρω αναγκών στον χώρο της έρευνας [Euratom Work Programme 1999].

Τέλος, αναζητώνται εναλλακτικά καύσιμα για αντιδραστήρες ισχύος και έρευνας, τα οποία να παρουσιάζουν πλεονεκτήματα ως προς τη χρήση του σχάσιμου υλικού, την αντοχή σε σοβαρά ατυχήματα, τους κινδύνους εξάπλωσης και την αποθήκευση σε μακροπρόθεσμη βάση και νέες, συνολικότερα ορθότερες λύσεις στο ζήτημα του κύκλου του καυσίμου (π.χ. κύκλος καυσίμου του θορίου προκειμένου να μειωθούν τα παραπροϊόντα της σχάσεως και επομένως, τα παραγόμενα μακρόβια απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας, ακέραιος αντιδραστήρας με επανεπεξεργασία και παραγωγή καυσίμου on-line).

Αξίζει να σημειωθεί ότι, και στην Ιαπωνία, όπου το 1/3 της ολικής ενέργειας παράγεται από αντιδραστήρες ισχύος, σημαντικά έργα έρευνας και ανάπτυξης εστιάζονται σε διαδικασίες μεταστοιχείωσης και συστήματα διαμερισμού (διανύεται η πρώτη φάση του προγράμματος OMEGA, σε συνδυασμό με ανακύκλωση του πλουτωνίου και χρήση καυσίμου MOX σε όλους τους LWR, με σκοπό να μειωθεί η ραδιοτοξικότητα των υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων σε λιγότερο από 1/100 της αρχικής μετά την πάροδο μερικών εκατοντάδων ετών [Matsuura, 1999].



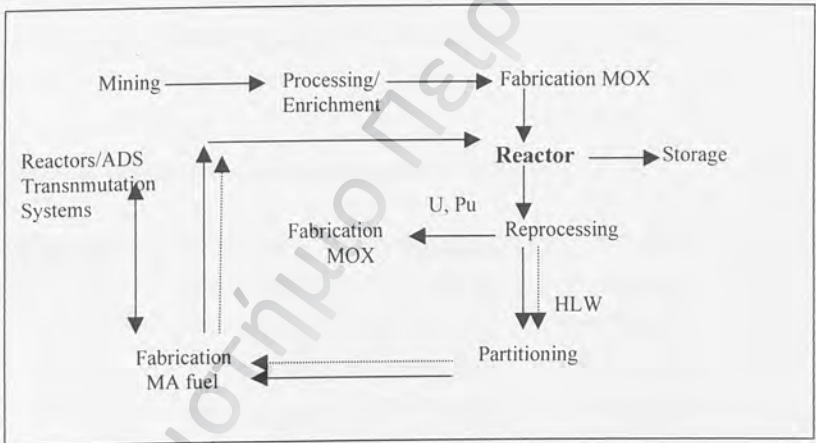
Σχήμα 12: Κύκλος ζωής καυσίμου με διαχωρισμό και μεταστοιχείωση (double strata) [Matsuura, 1999].

4.8. Επανεπεξεργασία του εξαντλημένου καυσίμου και ανακύκλωση (Reprocessing -Recycling)

Η επανεπεξεργασία του εξαντλημένου καυσίμου επιτρέπει τον διαχωρισμό του μη χρησιμοποιημένου ουρανίου και του πλουτωνίου από το πυρηνικό καύσιμο. Και τα δύο μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παρασκευή νέου πυρηνικού καυσίμου. Οι χώρες της ΕΕ που έχουν υιοθετήσει μεθόδους επανεπεξεργασίας του εξαντλημένου

καυσίμου των σταθμών τους είναι: Βέλγιο, Γαλλία, Γερμανία, Ιαπωνία, Ρωσία, Ελβετία και Βρετανία.

Η ανακύκλωση εξοικονομεί το εξορυσσόμενο ποσοστό φρέσκου ουρανίου και πλουτωνίου, και κατά συνέπεια μειώνει τα παραγόμενα απόβλητα από τις σχετικές διαδικασίες. Η επανεπεξεργασία παράγει περισσότερα υψηλής και μεσαίας ραδιενέργειας απόβλητα σε σχέση με την άμεση εναπόθεση. Υπολογίζεται ότι παράγει – κατά την αγγλική BNFL – 15200 κυβικά μέτρα συνολικών αποβλήτων για κάθε GWatt ηλεκτρικής ενέργειας έναντι 20100 κυβικών μέτρων που παράγονται κατ'εκτίμηση από την άμεση εναπόθεση. Η ανακύκλωση βοηθά επίσης στην αύξηση της κοινωνικής αποδοχής και εμπιστοσύνης.



Σχήμα 13: Κύκλος ζωής πυρηνικού καυσίμου με ανακύκλωση, διαχωρισμό και μεταστοιχείωση

Ραδιονουκλίδια που περιέχονται στο εξαντλημένο καύσιμο

Στο εξαντλημένο καύσιμο αντιδραστήρα PWR ισχύος 1000 MWe, με burnup ~33,000 MWd/MTU, περιέχονται χρήσιμα ισότοπα των ακτινιδών¹¹, τα οποία έχουν μεγάλους χρόνους υποδιπλασιασμού (HLW):

Ραδιονουκλίδιο	T _{1/2}	Ραδιονουκλίδιο	T _{1/2}
U-234	2.47x10 ⁵ yr	Pu-241	13.2 yr
U-236	2.39x10 ⁷ yr	Pu-242	3.79x10 ⁵ yr
Np-237	2.14x10 ⁶ yr	Am-241	458 yr
Pu-236	2.85 yr	Am-243	7,950 yr
Pu-238	86 yr	Cm-242	163 d
Pu-239	24,400 yr	Cm-244	17.6 yr
Pu-240	6,580 yr		

Περιέχονται επίσης, τα παρακάτω βασικά προϊόντα σχάσεως:

Ραδιονουκλίδιο	T _{1/2}	Ραδιονουκλίδιο	T _{1/2}
³ H	12.3 yr	¹³³ Xe	5.27 d
⁸⁵ Kr	10.8 yr	¹³⁴ Cs	2.05 yr
⁹⁰ Sr	27.7 yr	¹³⁷ Cs	30.0 yr
⁹⁵ Zr	65.5 d	¹⁴⁴ Ce	284 d
¹⁰⁶ Ru	368 d	¹⁴⁷ Pm	4.4 yr
¹²⁵ Sb	2.7 yr	¹⁵¹ Sm	87 yr
¹²⁹ I	1.7x10 ⁷ yr	¹⁵⁴ Eu	16 yr
¹³¹ I	8.05 d		

¹¹ Ακτινίδες (actinides): στοιχεία με ατομικό αριθμό >90 (Th) έως Z=103, περιλαμβάνει τους "εύφορους" και σχάσιμους πυρήνες που χρησιμοποιούνται στους αντιδραστήρες και τα βασικά προϊόντα από την σύλληψη νετρονίων (neutron capture) [Bodansky, 1996]

Υπερουράνια στοιχεία (transuranic elements): ισότοπα που εκπέμπουν α ακτινοβολία με ατομικό αριθμό >92 (U) και χρόνους υποδιπλασιασμού μακρύτερους από 5 έτη, κυρίως Np-237, Am-241.

5. Παροπλισμός

5.1. Εισαγωγή- Ορολογία

Σύμφωνα με την ΙΑΕΑ, παροπλισμός (decommissioning) είναι «όλες εκείνες οι ενέργειες, που λαμβάνουν χώρα μετά το τέλος της χρήσιμης ζωής μίας πυρηνικής εγκατάστασης, οι οποίες οδηγούν στην απόσυρσή της από την ενεργό δράση, με την απαραίτητη προσοχή στην ασφάλεια και την υγεία των εργαζομένων και του κοινού, καθώς και στην προστασία του περιβάλλοντος» [γλωσσάριο ΙΑΕΑ, 2000].

Κατά την Κοινή Σύμβαση για την Διαχείριση του Εξαντλημένου Καυσίμου και την Ασφαλή Διάθεση των Ραδιενεργών Αποβλήτων (ΙΑΕΑ Convention, 1999), παροπλισμός, καλούνται *“όλα τα βήματα εκείνα που οδηγούν στην απελευθέρωση μίας πυρηνικής εγκατάστασης – εκτός των εγκαταστάσεων διάθεσης αποβλήτων – από τον κανονιστικό έλεγχο. Τα βήματα αυτά συμπεριλαμβάνουν τις διαδικασίες απομόλυνσης και διάλυσης των εγκαταστάσεων, με σκοπό την ικανοποίηση των απαραίτητων κριτηρίων ασφαλείας και προστασίας του περιβάλλοντος”*. «Κλείσιμο πυρηνικού σταθμού» (closure) καλείται *«η ολοκλήρωση όλων των λειτουργιών μετά την τοποθέτηση του ακτινοβολημένου καυσίμου σε ειδικό χώρο διάθεσης-αποθήκευσης»*. Ο όρος συμπεριλαμβάνει την τελική τεχνική υποστήριξη ή άλλες εργασίες που απαιτούνται ώστε να καταστεί η εγκατάσταση ασφαλής μακροπρόθεσμα [ΙΑΕΑ Convention, 1999]. Ο απώτερος σκοπός του παροπλισμού είναι η χωρίς όρους απελευθέρωση ή χρήση του χώρου της εγκατάστασης. Ο αναγκαίος χρόνος για να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός, μπορεί να κυμαίνεται από μερικά χρόνια έως μερικές εκατοντάδες χρόνια.

Στα πλαίσια των εθνικών και κανονιστικών απαιτήσεων, μία πυρηνική εγκατάσταση ή τα εναπομείναντα μέρη της, μπορεί να θεωρηθεί παροπλισμένη, εάν ενσωματωθεί σε μία νέα ή ήδη υπάρχουσα εγκατάσταση, ή ακόμα και εάν, ο χώρος της εγκατάστασης ευρίσκεται υπό κανονιστικό ή θεσμικό έλεγχο» [Laraia, 1999]. Σύμφωνα με το γλωσσάριο της Nuclear Regulatory Commission των ΗΠΑ, ο παροπλισμός ενός πυρηνικού σταθμού είναι *«η διαδικασία του κλεισίματός του, η οποία ακολουθείται από τη μείωση της ραδιενέργειας που έχει απομείνει σε επίπεδα που επιτρέπουν την χρήση των εγκαταστάσεων για άλλους σκοπούς, που δεν υπόκεινται σε περιορισμούς»* [γλωσσάριο NRC, 2000].

Σύμφωνα επίσης, με το γλωσσάριο του Ινστιτούτου Ουρανίου, παροπλισμός είναι όλες εκείνες οι λεπτομερείς δραστηριότητες και λειτουργίες, που εμπλέκονται στην προσπάθεια να μειωθεί η ραδιενέργεια ενός σταθμού σε ασφαλή επίπεδα, μετά το τέλος της χρήσιμης ζωής του εν λειτουργία [γλωσσάριο UI, 2000].

5.2. Πλαίσιο και ισχύουσες απαιτήσεις

Ο παροπλισμός ενός σταθμού ισχύος θεωρείται από πλευράς κανονισμών και θεσμικού πλαισίου, ένα στάδιο της ζωής του σταθμού και σαν τέτοιο υπόκειται στους ίδιους κανονισμούς από τις αντίστοιχες αρχές, στη βάση της ικανοποίησης των κριτηρίων της πυρηνικής ασφάλειας, της ραδιοπροστασίας των εργαζομένων – σύμφωνα με την αρχή ALARA (As Low As Reasonably Possible) για την προστασία της ανθρώπινης υγείας - και της επίπτωσης στο περιβάλλον [Kessler, 1995]. Στο Παράρτημα παρατίθενται οι βασικότερες σχετικές οδηγίες του θεσμικού πλαισίου, που αφορούν στον παροπλισμό.

Η Union of Electricity Industry (EURELECTRIC) εκπόνησε το 2000 μία πλήρη μελέτη για τον παροπλισμό των πυρηνικών σταθμών [Eurelectric 116-0004, 2000], στην οποία εξετάζεται όλο το ισχύον πλαίσιο:

- Η διαθέσιμη τεχνολογία
- Πολιτικές και στρατηγικές για τον παροπλισμό
- Κανονιστικό και θεσμικό πλαίσιο
- Εκτιμήσεις κόστους και χρηματοδοτήσεων
- Απαιτήσεις σε προσωπικό, και
- Θέματα κοινωνικής αποδοχής.

Σύμφωνα με στοιχεία της ΙΑΕΑ, από το σύνολο των 523 πυρηνικών σταθμών ισχύος που έχουν κατασκευαστεί και έχουν τεθεί σε λειτουργία συνολικά στον κόσμο, ποσοστό 15% έχει σταματήσει τη λειτουργία του. Η κατάσταση των σταθμών αυτών ποικίλει: σε κάποιους, έχει απλώς απομακρυνθεί το πυρηνικό καύσιμο, ενώ άλλοι έχουν απομολυνθεί τελείως (διαδικασία που λέγεται επίσης “return to green grass”). Για να μελετηθεί η μέχρι τώρα μικρή εμπειρία, έχει συσταθεί στα πλαίσια της Nuclear Energy Agency (The Technical Advisory Group on Decommissioning, NEA, OECD)

ειδική ομάδα εργασίας, με σκοπό την παρακολούθηση 26 έργων παροπλισμού¹² αντιδραστήρων, από την άποψη των παρακάτω παραμέτρων:

- Κόστους
- Απομόλυνσης
- Ανακύκλωσης Επαναχρησιμοποίησης Υλικών, και
- Μετρήσεων (ραδιολογικός χαρακτηρισμός).

5.3. Κόστος παροπλισμού και διάλυσης των πυρηνικών σταθμών

Όλοι οι εν λειτουργία πυρηνικοί σταθμοί αποταμιεύουν ένα ποσό χρημάτων σε ειδικό λογαριασμό, που αφορά στη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων τους και στον μελλοντικό παροπλισμό τους. Αυτό αποτελεί για τους υποστηρικτές της πυρηνικής ενέργειας ένα σημαντικό επιχείρημα για την ικανοποίηση των απαιτήσεων της αειφορίας (sustainability), τουλάχιστον σε ό,τι αφορά την εγκατάσταση: *οι σημερινοί πελάτες και χρήστες πληρώνουν για τις μελλοντικές γενιές.*

Οι προβλέψεις του κόστους παροπλισμού και διάλυσης των πυρηνικών σταθμών αφορούν ένα μεγάλο μέρος των σταθμών που λειτουργούν σήμερα. Για την εκτίμηση του κόστους αυτού, την προτυποποίησή του προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι υπάρχουσες σοβαρές διαφορές από χώρα σε χώρα, αλλά και για την εκτίμηση των αναγκαίων χρηματοδοτήσεων, έχει συσταθεί κοινή ομάδα εργασίας μεταξύ των ΙΑΕΑ, ΝΕΑ και της Ε.Ε. Η ομάδα αυτή, δημοσίευσε τελικά το 1999, μία πρότυπη λίστα ομάδων κόστους παροπλισμού¹³, σαν ένα ενδιάμεσο έγγραφο για περαιτέρω επεξεργασία. Το έγγραφο αυτό θα συζητείται για 3 χρόνια και εφόσον υιοθετηθεί, θα αποτελέσει τη βάση για πολλές αξιόπιστες οικονομοτεχνικές μελέτες σχετικά με τον παροπλισμό πυρηνικών εγκαταστάσεων (αντιδραστήρων, εγκαταστάσεων επανεπεξεργασίας, εγκαταστάσεων πυρηνικών καυσίμων και χειρισμού ισotόπων). Στο έγγραφο αυτό, αναφέρονται και μελετώνται τα κόστη των εξής επιμέρους διαδικασιών, που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία του παροπλισμού [Lazo, 1999]:

¹² Καναδάς, Γερμανία, Γαλλία, Ιταλία, Ιαπωνία, Βρετανία, Βέλγιο και ΗΠΑ

1. Ενέργειες προ του παροπλισμού
2. Δραστηριότητες για το «κλείσιμο» του αντιδραστήρα (ή της εγκατάστασης)
3. Προμήθεια εξοπλισμού και υλικών
4. Δραστηριότητες διάλυσης του σταθμού (dismantling)
5. Επεξεργασία αποβλήτων, αποθήκευση και διάθεση
6. Ασφάλεια χώρου, επίβλεψη και συντήρηση
7. Ανάπλαση χώρου, καθαρισμός και αποκατάσταση τοπίου (landscaping)
8. Διαχείριση Έργου, engineering και υποστήριξη χώρου
9. Έρευνα και Ανάπτυξη
10. Καύσιμο και πυρηνικά υλικά
11. Άλλα κόστη

Ο παροπλισμός αποτελεί ένα δύσκολο και υψηλού κόστους εγχείρημα, ιδιαίτερα εάν συμπεριλάβει κανείς το κόστος της επί τόπου αποθήκευσης του εξαντλημένου καυσίμου και το κόστος της διάθεσης των χαμηλής ραδιενέργειας αποβλήτων από τον παροπλισμό. Γι' αυτό σήμερα, σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος κεφαλαίου για την κατασκευή νέων αντιδραστήρων, το θέμα της επιμήκυνσης της ζωής των υπαρχόντων αντιδραστήρων από 20-30 χρόνια σε 50-60, τίθεται επιτακτικά από την πυρηνική βιομηχανία (backfitting).

¹³ The Proposed Standardized List of Items for Costing Purposes

6. Θεσμικό και κανονιστικό πλαίσιο

Η διεθνής κοινότητα, προκειμένου να προστατεύσει τον άνθρωπο και το περιβάλλον, συμβάλλει στον έλεγχο και την παρακολούθηση των θεμάτων ασφάλειας των αντιδραστήρων ισχύος έχοντας θεσπίσει ένα αυστηρό θεσμικό και κανονιστικό πλαίσιο σχετικά με την ασφάλεια των αντιδραστήρων και τις διασφαλίσεις των πυρηνικών υλικών, το οποίο ανανεώνεται συνεχώς και ενσωματώνεται σε υποχρεωτικές τεχνικές οδηγίες (safety, security, safeguards). Το πλαίσιο αυτό αποτελείται από τις παρακάτω κατηγορίες εγγράφων [Beghin, 1999]:

- Διεθνή πρότυπα και κανονισμούς σε θέματα πυρηνικής ενέργειας (Euratom, Worldatom, IAEA)
- Δεσμευτικές Συμφωνίες και Διεθνείς Συμβάσεις σε θέματα ασφάλειας (ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ/ΙΑΕΑ) εγκαθίδρυσε τα Συστήματα Ασφάλειας και Εγγυήσεων - *The IAEA safeguards systems*-, τα οποία βοηθούν στην εφαρμογή και την επαλήθευση της τήρησης των δεσμευτικών συμφωνιών που υπογράφονται).
- Συγγενείς διεθνείς συμφωνίες και συμβάσεις πχ. για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος, των ωκεανών, της Ανταρκτικής και της Αρκτικής κλπ. (London Convention of 1972-Revision 1993, για την πρόληψη της θαλάσσιας ρύπανσης από την καταβύθιση ραδιενεργών αποβλήτων στα βάθη των ωκεανών κλπ).
- Νομοθεσία για την προστασία έναντι της ακτινοβολίας (Ακτινοπροστασία)
- Νομοθεσία και Οδηγίες για την προστασία του περιβάλλοντος¹⁴

Το παραπάνω πλαίσιο αποτελεί τον πυρήνα των στοιχείων που η ΙΑΕΑ χαρακτηρίζει βασικά στοιχεία που βοηθούν στην προώθηση μίας παγκόσμιας κουλτούρας για την Ασφάλεια (global safety culture) [IAEA Convention, 1999] και τα οποία - εφόσον τηρούνται - μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για την αύξηση της εμπιστοσύνης της κοινωνίας έναντι της πυρηνικής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού. Είναι χαρακτηριστικό ότι, το θεσμικό πλαίσιο έχει εξαρχής διεθνή χαρακτήρα και επιβάλλει διακρατικές και πολυμερείς συνεργασίες. Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζουν οι παρακάτω αποφάσεις, που εντάσσονται στα μέτρα που έλαβε η Κοινότητα μετά το ατύχημα του Chernobyl (Ουκρανία, 1986).

Απόφαση 87/600/ΕΟΚ (14 Δεκεμβρίου 1987) σχετικά με τις συμφωνίες στα πλαίσια της Κοινότητας για άμεση ενημέρωση σε περίπτωση επείγοντος ραδιολογικού γεγονότος (event of radiological emergency).

Οδηγία 89/618/ΕΟΚ (27 Νοεμβρίου 1989) σχετικά με την ενημέρωση του κοινού για τα μέτρα που εφαρμόζονται για την προστασία της υγείας και για τις ενέργειες που πρέπει να γίνονται σε περιπτώσεις επείγοντος ραδιολογικού γεγονότος.

Το θεσμικό πλαίσιο (ενδεικτικά, βλ. Παράρτημα) κινείται σε τρία επίπεδα: τόσο σε διεθνές, όσο σε επίπεδο περιοχής όσο και σε εθνικό. Πλαισιώνεται από μία σειρά νόμους και οδηγίες που κάθε χώρα ξεχωριστά νομοθετεί. Σε ό,τι αφορά στις Οδηγίες Seveso, I & II¹⁵, πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές, δεν αφορούν πυρηνικούς σταθμούς, εφόσον εξαιρούνται της εφαρμογής τους¹⁶ οι στρατιωτικές μονάδες, εγκαταστάσεις ή αποθήκες και οι κίνδυνοι από ιοντίζουσα ακτινοβολία.

Η πρακτική εφαρμογή του θεσμικού πλαισίου και ο έλεγχος της εφαρμογής του είναι μία άλλη σοβαρή παράμετρος, η οποία επιβάλλεται με ιδιαίτερη αυστηρότητα. Η πλευρά αυτή ευρίσκεται στο στόχαστρο των κοινωνιών και σχετίζεται άμεσα:

- με την κοινωνική αποδοχή ή την απόρριψη της πυρηνικής ενέργειας και
- με την μελλοντική εξέλιξη της πυρηνικής ηλεκτροπαραγωγής στα πλαίσια της βιώσιμης ανάπτυξης.

Σήμερα, που η πυρηνική βιομηχανία δεν ευρίσκεται πλέον στη παιδική ηλικία, έχουν αναδειχτεί πολλές πλευρές και προβλήματα που χρήζουν αποτελεσματικής θεσμικής και νομοθετικής αντιμετώπισης, όπως το πρόβλημα της διάθεσης των υψηλής ραδιενέργειας ραδιενεργών αποβλήτων, της διαχείρισης των χώρων τελικής εναπόθεσης, του κλεισίματος και του παροπλισμού αντιδραστήρων παλαιάς τεχνολογίας, κλπ. Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας δεν ήταν δυνατόν να μελετηθούν όλες οι πλευρές που αφορούν το θεσμικό πλαίσιο που διέπει την πυρηνική ενέργεια, αλλά μόνον οι βασικότερες, οι οποίες βοηθούν στη κατανόηση και στον ορισμό των κριτηρίων και των εναλλακτικών λύσεων που μελετώνται στο Μέρος Β (Μελέτη Προβλήματος Πολυκριτηριακής Επιλογής).

¹⁵ Στην Οδηγία Seveso II περιέχεται το σημερινό νομοθετικό και ρυθμιστικό πλαίσιο της Ε.Ε. αναφορικά με τη πρόληψη μεγάλων ατυχημάτων και την αποτροπή της εξάπλωσης των συνεπειών τους. Η Οδηγία Seveso II αποτελεί την αναθεώρηση της Οδηγίας Seveso I (1992).

6.1. Διεθνής συνεργασία και διεθνείς οργανισμοί

Εξαρχής, η αντιμετώπιση της πυρηνικής ενέργειας είχε διεθνή χαρακτήρα και επέβαλε διεθνή συνεργασία και έλεγχο. Στη δεκαετία του '50 δημιουργήθηκαν τρεις μεγάλοι οργανισμοί στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας [Beghin, 1997]:

- Ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency, IAEA)
- Η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας (European Atomic Energy Community, EAEC ή EURATOM) και
- Η Υπηρεσία Πυρηνικής Ενέργειας του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (OECD Nuclear Energy Agency, NEA)

6.1.1. Η Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας

Ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency, IAEA) ιδρύθηκε στα πλαίσια των Ηνωμένων Εθνών το 1956. Ο ρόλος της IAEA είναι να προωθεί και επιβλέπει την χρήση της πυρηνικής ενέργειας: "*...to promote and extend the contribution made by atomic energy to peace, health and prosperity all over the world*" (άρθρο II του Καταστατικού) και "*...to set up and apply measures towards safeguarding that the special fissile materials and other materials... are not used for military purposes*" (άρθρο III.5 του Καταστατικού).

Υπό την αιγίδα της IAEA υπεγράφη τον Μάιο 1963 από τα κράτη-μέλη του ΟΗΕ η Συνθήκη της Βιέννης (The Vienna Convention) και ετέθη σε ισχύ τον Νοέμβριο του 1977. Η Συνθήκη καθορίζει ειδικούς κανόνες για τις ευθύνες της πολιτείας σε θέματα πυρηνικής καταστροφής, ορίζει ως υποχρέωση την αποζημίωση των θυμάτων κλπ. Μέχρι το 1997, 28 κράτη-μέλη του ΟΗΕ είχαν υπογράψει τη Συνθήκη. Η Συνθήκη της Βιέννης¹⁷ είναι κατ'ουσία, συνέχεια της προθύτερης Συνθήκης των Παρισίων. Οι δύο Συνθήκες είναι συνδεμένες μέσω του κοινού Πρωτοκόλλου του 1988, που ετέθη σε ισχύ το 1992. Η IAEA έχει εκδώσει υποχρεωτικού χαρακτήρα πρότυπα, κανονισμούς, κώδικες και κατευθυντήριες οδηγίες, αλλά και γενικές συστάσεις και τεχνικές οδηγίες για κάθε δραστηριότητα στα πλαίσια εφαρμογών της πυρηνικής ενέργειας.

¹⁶ Άρθρο 3 της Οδηγίας Seveso II

¹⁷ The Paris Convention on Third Party Liability in the field of nuclear energy (Ιούλιος 1960)

6.1.2. Η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας (EYPATOM)

Όσον αφορά τα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αυτά υποχρεούνται να συμμορφώνονται με τα πρότυπα της Συνθήκης του 1957 (The Euratom Treaty), με την οποία παράλληλα με την ίδρυση της ΕΟΚ ιδρύεται και η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας (European Atomic Energy Community, EAEC ή EURATOM). Σε ό,τι αφορά τα περιβαλλοντικά θέματα, η Συνθήκη συμπληρώθηκε το 1987, με τη Single European Act και το 1992, με τη Συμφωνία του Maastricht. Τα θεσμικά όργανα της Ευρωπαϊκής Ένωσης σήμερα (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, Συμβούλιο και Επιτροπή) νομοθετούν για θέματα σχετικά με την ενέργεια και το περιβάλλον και εκδίδουν σχετικές οδηγίες, αποφάσεις, συστάσεις και γνωμοδοτήσεις (Παράρτημα).

Τα βασικά πρότυπα που ισχύουν σήμερα περιλαμβάνονται στην Οδηγία 80/836/Euratom 915 Ιουλίου 1980), όπως τροποποιήθηκε το 1984, σχετικά με την υγιεινή και ασφάλεια των εργαζομένων και του κοινού έναντι των κινδύνων που προκύπτουν από ιοντίζουσες ακτινοβολίες και η οποία συμπεριλαμβάνει τις συστάσεις της ICRP (ICRP Issue 60, 1991).

6.1.3. Η Υπηρεσία Πυρηνικής Ενέργειας του ΟΟΣΑ

Η Υπηρεσία Πυρηνικής Ενέργειας του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (OECD Nuclear Energy Agency, NEA) ιδρύθηκε το 1958 και ιδρυτικός σκοπός της είναι η προώθηση της συνεργασίας μεταξύ των μελών-κρατών για την ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας ως πηγής ασφαλούς, οικονομικής και αποδεκτής μορφής ενέργειας από περιβαλλοντικής πλευράς. Η υπηρεσία αυτή βοηθά κυρίως στην εναρμόνιση των εθνικών νομοθεσιών.

6.1.4. Η Διεθνής Επιτροπή Ραδιολογικής Προστασίας

Στον τομέα της προστασίας του ανθρώπου και του περιβάλλοντός του από ιοντίζουσες ακτινοβολίες σημαντικό έργο προσφέρει η Διεθνής Επιτροπή Ραδιολογικής Προστασίας (International Commission for Radiological Protection, ICRP). Η ICRP ιδρύθηκε το 1928 από την Διεθνή Ένωση Ραδιολογίας (International Radiological Union, IRU), μία συνεργασία ιατρικών και κυρίως νοσοκομειακών ειδικοτήτων, που ασχολούνταν με τη χρήση ιοντίζουσών ακτινοβολιών στις πιο ανεπτυγμένες χώρες. Με τη λήξη του 2ου παγκοσμίου πολέμου, η ICRP επέκτεινε τη δραστηριότητά της στην αντιμετώπιση προβλημάτων, που προέρχονται από την

ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας, τόσο για στρατιωτικούς όσο και για ειρηνικούς σκοπούς. Η ICRP καθορίζει τα πρότυπα για την Ακτινοπροστασία¹⁸ (προστασία έναντι ιοντιζουσών ακτινοβολιών) και τα όρια έκθεσης στην ακτινοβολία ενός ατόμου – για επαγγελματικούς ή άλλους σκοπούς – αλλά και του περιβάλλοντός του. Οι μελέτες της ICRP βασίζονται σε στατιστικά δεδομένα με βάση κάθε φορά τη στάθμη της τεχνικής και της επιστήμης στον τομέα της προστασίας από την ακτινοβολία και τα όρια δόσεων που καθορίζει επανεξετάζονται συνεχώς.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, οι δόσεις έκθεσης που συνιστά η ICRP αφορούν συνήθως φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας μονάδων με ιοντιζουσες ακτινοβολίες. Ισχύουν για παράδειγμα στη περίπτωση της λειτουργίας ενός χώρου εναπόθεσης ραδιενεργών αποβλήτων, αλλά δεν ισχύουν στη φάση μετά το κλείσιμό του, λόγω αβεβαιότητας των παραγόντων κινδύνου, οι οποίοι πρέπει να μελετηθούν με στοχαστικές μεθόδους, λαμβάνοντας επίσης υπόψη ότι δεν είναι δυνατόν να γίνουν μετρήσεις στο πεδίο. Για τον λόγο αυτό, η Επιτροπή υιοθέτησε ένα σύστημα βασισμένο όχι στην μείωση των δόσεων έκθεσης, αλλά στη μείωση των αποδεκτών κινδύνων¹⁹.

Το έργο της ICRP αποτελεί σημαντική πηγή πληροφορίας για το Διεθνές Γραφείο Εργασίας (International Labor Office, ILO) σε θέματα Υγιεινής και Ασφάλειας κατά την Εργασία, της ΙΑΕΑ, της Ε.Ε. του ΝΕΑ, κλπ.

6.1.5. Η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ)

Η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) ιδρύθηκε το 1954. Η ίδρυσή της τότε υπαγορεύθηκε από την ανάγκη για την προώθηση των ειρηνικών εφαρμογών της πυρηνικής ενέργειας στην Ελλάδα και της ακτινοπροστασίας. Ήδη είχε αρχίσει να διαφαίνεται διεθνώς, η αδιαμφισβήτητη χρησιμότητά τους, ιδιαίτερα σε τομείς όπως, η ιατρική, η έρευνα και η βιομηχανία. Παράλληλα στην ΕΕΑΕ ανετέθη και η αρμοδιότητα της διασφάλισης της προστασίας του πληθυσμού και των εργαζομένων από την χρήση των ιοντιζουσών ακτινοβολιών.

Η ανάγκη ρυθμιστικού ελέγχου και παρακολούθησης των ειρηνικών εφαρμογών της πυρηνικής ενέργειας στην Ελλάδα και της ακτινοπροστασίας του πληθυσμού, έγινε πιο επιτακτική με το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl το 1986 και τις συνέπειές του

¹⁸ α) International Basic Safety Standards for Protection against Ionising Radiations and for the Safety of Radiation Sources, ICRP, 1996 και β) ICRP Issue 60, 1991.

στη χώρα μας και διεθνώς. Έτσι, η λειτουργία της ΕΕΑΕ μπορεί να χωριστεί σε δύο περιόδους: στην περίοδο από την ίδρυσή της μέχρι το 1987, κατά την οποία υπαγόταν σε αυτήν το (τότε) ΚΠΕ Δημόκριτος, και στην περίοδο από το 1987 μέχρι σήμερα, οπότε η ΕΕΑΕ επανασυστήθηκε και λειτουργεί σύμφωνα με το άρθρο 28 του Ν.1733/87, σαν ανεξάρτητη αποκεντρωμένη Δημόσια Υπηρεσία. Πρόσφατα στην ΕΕΑΕ ανετέθη και η αρμοδιότητα της προστασίας του πληθυσμού από τις τεχνητά παραγόμενες μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες [Μαλτέζος, ΕΕΑΕ, 1999]. Η ΕΕΑΕ μετά την επανασύστασή της είναι όργανο της ελληνικής πολιτείας για θέματα πυρηνικής τεχνολογίας και ακτινοπροστασίας και έχει μεταξύ άλλων τις παρακάτω νομοθετημένες αρμοδιότητες:

- προγραμματισμό, εκτέλεση και αξιολόγηση των μετρήσεων ραδιενέργειας περιβάλλοντος
- αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης που προκαλούνται από ραδιορύπανση
- διεξαγωγή ελέγχων ακτινοπροστασίας στις εφαρμογές ακτινοβολιών και έκδοση σχετικών πιστοποιητικών καταλληλότητας.
- χορήγηση αδειών εισαγωγής, εξαγωγής, κατοχής, χρήσης, μεταφοράς και απόρριψης ραδιενεργών υλικών συμπεριλαμβανομένων και των σχάσμων υλικών.

Η ΕΕΑΕ εκπροσωπεί την χώρα στους Διεθνείς Οργανισμούς για θέματα της αρμοδιότητάς της. Συντάσσει και εκδίδει οδηγίες και κανονισμούς ασφαλείας καθώς και τον κανονισμό έκτακτης ανάγκης για την αντιμετώπιση ατυχημάτων. Από την εποχή της ίδρυσής της, έδωσε ιδιαίτερη προσοχή στα ζητήματα της ραδιενέργειας περιβάλλοντος στην Ελλάδα. Ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του '60, το Εργαστήριο Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος εγκατέστησε και λειτούργησε δίκτυο μετρήσεων ραδιενέργειας περιβάλλοντος με 12 σταθμούς μετρήσεων (δείγματα αέρα, νερόν των ποταμών της Β. Ελλάδας, κλπ), το οποίο εκσυγχρονίζεται συνεχώς με νέο εξοπλισμό και ήδη επεκτείνεται, με σύγχρονο δίκτυο τηλεμετρικών σταθμών για ολική ακτινοβολία γάμμα αέρος [Μαλτέζος, 1999].

Πρέπει εξάλλου να σημειωθεί ότι, στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» λειτουργεί επίσης, Εργαστήριο Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος, ΕΠΠ (Ινστιτούτο Πυρηνικής Τεχνολογίας και Ακτινοπροστασίας), το οποίο αναπτύσσει μεθόδους μέτρησης και διεξάγει μελέτες της ραδιενέργειας του περιβάλλοντος (ραδιενέργεια εδαφών, ραδόνιο σε κλειστούς

¹⁹ *Κίνδυνος (risk)* θεωρείται κατά την ICRP ο συνδυασμός της πιθανότητας έκθεσης και του

χώρους, ραδιενέργεια θαλασσίου περιβάλλοντος, ραδιενέργεια του ατμοσφαιρικού αερολύματος). Στο ΕΡΠ λειτουργεί εθνικό δίκτυο 40 σταθμών τακτικής δειγματοληψίας και μετρήσεων ραδιενέργειας περιβάλλοντος, με έμφαση στα βόρεια σύνορα. και εκτελούνται έλεγχοι ραδιενέργειας σε εισαγόμενα και εξαγόμενα προϊόντα. Οι μετρήσεις αφορούν την ραδιενέργεια του αέρα, των επιφανειακών υδάτων, την εναπόθεση ραδιενεργών υλικών στο έδαφος, την ένταση της ακτινοβολίας γάμμα και την ραδιενέργεια ορισμένων τροφίμων-δεικτών. Τα αποτελέσματα στέλνονται στην ΕΕΑΕ, η οποία έχει την ευθύνη για την ραδιολογική προστασία της χώρας και κοινοποιούνται κατά διαστήματα σε εθνικά και κοινοτικά όργανα [Κρητίδης, 2000].

6.2. Διασφάλιση πυρηνικών υλικών (safeguards)

Οι διασφαλίσεις είναι ένα πλαίσιο διεθνών μέτρων που σκοπεύουν να ελέγξουν και να αποκλείσουν τη πιθανότητα πυρηνικά υλικά να παρεκκλίνουν προς μη εγκεκριμένες δραστηριότητες. Τα μέτρα αυτά βασίζονται κυρίως στο Καταστατικό της ΙΑΕΑ (άρθρο 12) και - για τα κράτη-μέλη της ΕΕ - στη Συνθήκη Euratom²⁰ και αφορούν όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής του πυρηνικού καυσίμου [Beghin, 1997]. Οι εμπλεκόμενες πυρηνικές εγκαταστάσεις είναι:

1. Τα εργοστάσια εμπλουτισμού ουρανίου.
2. Τα εργοστάσια κατασκευής στοιχείων.
3. Οι αντιδραστήρες (ισχύος και ερευνητικοί).
4. Τα εργοστάσια επεξεργασίας χρησιμοποιημένου σχάσιμου υλικού και ραδιενεργών καταλοίπων.
5. Οι αποθήκες φύλαξης σχάσιμου υλικού και στοιχείων.

επιβλαβούς αποτελέσματος από αυτή την έκθεση [Beghin, 1997]

²⁰ EURATOM 3227/76 (19 Οκτωβρίου 1976)

7. Τα οικονομικά της πυρηνικής ενέργειας

Πρωταρχική σημασία για την επιλογή και τον σχεδιασμό ενός αντιδραστήρα ισχύος έχει το ολικό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που θα παράγει. Σε αυτό συμπεριλαμβάνονται το κόστος κεφαλαίου για την επένδυση, το κόστος κατασκευής του σταθμού, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του αντιδραστήρα, το κόστος των καυσίμων υλικών, κλπ.. Όσον αφορά την πυρηνική ενέργεια, όπως και σε άλλες μορφές ενέργειας, τα επιμέρους κόστη αλλάζουν πολύ γρήγορα και εμπεριέχουν αντιφάσεις. Οι σταθμοί πυρηνικής ενέργειας ως επένδυση, χαρακτηρίζονται σήμερα από πολύ υψηλό κόστος κεφαλαίου, μεγάλες περιόδους αδειοδότησης και κατασκευής και μεγάλες περιόδους αποπληρωμής. Δεν είναι φυσικά γνωστό, εάν οι ίδιες οικονομικές συνθήκες θα εξακολουθούν να ισχύουν και μετά την απελευθέρωση του τομέα της ενέργειας [IEA Report, 1998-99].

7.1. Συνιστώσες του ολικού κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας

Οι βασικές συνιστώσες του ολικού κόστους ηλεκτροπαραγωγής είναι οι εξής [Nero, 1979]:

- Το κόστος επένδυσης (ή κόστος κεφαλαίου).
- Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης (operation and maintenance costs, O & M), στο οποίο συνήθως συμπεριλαμβάνεται το κόστος του πυρηνικού καυσίμου.

Αναλυτικότερα, τα επιμέρους κόστη που πρέπει να συνυπολογισθούν είναι:

1. Κόστος αδειοδότησης και ρυθμιστικών και κανονιστικών απαιτήσεων κατά την κατασκευή και τη λειτουργία
2. Κόστος γης
3. Κόστος σχεδιασμού μονάδας εγκατάστασης
4. Κόστος κεφαλαίου για την κατασκευή του σταθμού και τις αναγκαίες τροποποιήσεις μετά την κατασκευή
 - Κόστος συστημάτων έκτακτης ανάγκης
 - Κόστος συμπληρωματικών διατάξεων ασφάλειας
 - Κόστος περιβλήματος
 - Κόστος συστήματος αποθήκευσης αποβλήτων, κλπ.
5. Κόστος πυρηνικού καυσίμου (front end, back end)
6. Κόστος λειτουργίας και συντήρησης

7. Κόστη διαχείρισης και επεξεργασίας – εφόσον προβλέπεται - του εξαντλημένου καυσίμου και των υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων και
8. Κόστος παροπλισμού του σταθμού

Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας (Πίνακας 21) πρέπει να υπολογίζεται πάντα με την προϋπόθεση ότι, υπάρχει συμμόρφωση με τις τεχνικές απαιτήσεις ασφάλειας. Αναφέρεται ότι, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας μίας τυπικής μονάδας που ικανοποιεί τις απαιτήσεις ασφάλειας κυμαίνεται μεταξύ 3,5-4 US cents ανά kWh [Kröger and Fischer, 2000].

Το κόστος κεφαλαίου είναι το μεγαλύτερο συγκριτικά κόστος, αποτελώντας περίπου τα 2/3 του ολικού. Όλες οι πηγές στη βιβλιογραφία συμφωνούν ότι, το κόστος για την κατασκευή του σταθμού είναι το μεγαλύτερο συγκριτικά κόστος, σε ποσοστό περίπου 60% του ολικού. Τα ποσά για O&M είναι περίπου το 20%, από το οποίο 40-45% αντιστοιχούν στην συντήρηση (συμπεριλαμβάνονται περιοδικοί έλεγχοι των συστημάτων ασφαλείας, κλπ). Το κόστος του κύκλου του καυσίμου υπολογίζονται περίπου στο 15%, από το οποίο ένα σημαντικό ποσοστό αντιστοιχεί στο ειδικό ταμείο για το τελικό κόστος διάθεσης των αποβλήτων και του παροπλισμού [Kröger and Fischer, 2000]. Πρέπει να σημειωθεί ότι, μεγάλη σημασία σε σχέση με το κόστος κατασκευής έχουν τα παρακάτω:

- Η δυνατότητα κατασκευής μονάδων σε σειρά
- Θέματα πολιτικής σταθερότητας και σταθερότητας του κανονιστικού πλαισίου (που μπορεί να αυξήσουν τον χρόνο αδειοδότησης και κατασκευής)
- Συμβατότητα με τεχνικές δυνατότητες αύξησης της ισχύος
- Η διάρκεια της χρήσιμης ζωής του σταθμού και
- Η υπάρχουσα υποδομή για την τελική διάθεση των αποβλήτων.

Πίνακας 21: Τυπικά κόστη ηλεκτροπαραγωγής (Πηγή: Kröger & Fischer, 2000)

<i>Assumptions</i>				
Power	(MWe)	1300		
Depreciation	(years)	30		
Interest Rate	(%)	6	8	
Annuity	(%)	7,5	9	
Capacity Factor	(%)	90		
Fuel burnup	MWday/kg	50		
Capital cost		OVER-NIGHT	AT STARTUP	
Construction cost (single plant)	(\$/kW)	1800	2110	2180
Owner costs	(\$/kW)	200	268	294
Decommissioning	(\$/kW)	500	42	18
			2420	2493
Subtotal	(c/kWh)		2,30	2,84
Operating & Maintenance (O&M)				
Material to operate	(M\$/year)	5		
Insurance	(M\$/year)	13		
Personnel	(M\$/year)	23		
Maintenance including material replacement	(M\$/year)	30		
		71		
Subtotal	(c/kWh)	0,69		
Fuel costs				
Are requirements	(M\$)	14	14	
Sep. work & conversion	(M\$)	15	15	
Fuel fabrication	(M\$)	8	8	
Disposal (2000 \$/kg, 15 years discounted)		19	15	
	(M\$)			
		57	53	
Subtotal	(c/kWh)	0,55	0,50	
		3,5	4,0	
TOTAL COSTS	(c/kWh)			

7.2. Το κόστος του καυσίμου

Η επίδραση του κόστους του καυσίμου στη διαχείριση των οικονομικών της ηλεκτροπαραγωγής, συνεπάγεται κατά κανόνα προσπάθειες για τη βελτίωση της λειτουργίας του σταθμού, καθώς και για βελτίωση της αξιοπιστίας του: *Η μείωση του κόστους θα επιτευχθεί είτε από την αύξηση του burnup του καυσίμου, είτε από τη βελτιωμένη χρήση του αντιδραστήρα – με την αύξηση του παράγοντα ικανότητας της εγκατάστασης (plant capacity factor).*

Αξίζει να αναφερθεί ότι, μία αύξηση του παράγοντα ικανότητας ενός αντιδραστήρα 1000 MWe από 70% σε 75%, θα ήταν δυνατόν να επιφέρει εξοικονόμηση 5 εκατομ. \$ ετησίως, εάν η επιπλέον παραγόμενη ενέργεια αφαιρούνταν από σταθμό συμβατικών καυσίμων με πετρέλαιο, σε τιμές 1987 [Nechaev, 1989], ενώ για να επιτευχθεί η ίδια εξοικονόμηση με άλλους τρόπους, θα έπρεπε να μειωθεί το κόστος του ουρανίου κατά 40%, το κόστος του εμπλουτισμού του κατά 35% ή της παρασκευής του καυσίμου κατά 75%. Επίσης αναφέρεται ότι, η επίτευξη υψηλότερου burnup στους LWRs, θα μπορούσε να εξοικονομήσει κατανάλωση ουρανίου κατά 20% περίπου και τις απαιτήσεις του εμπλουτισμού κατά 10-14%. Αναφέρεται επίσης στη βιβλιογραφία ότι, αύξηση του παράγοντα ικανότητας από 60 σε 80% μπορεί να φέρει εξοικονόμηση του συνολικών ετήσιων εξόδων ενός σταθμού κατά 25% [Bodansky, 1996]. Στα πλαίσια αυτά, η γερμανική Siemens βελτίωσε το καύσιμο στους γερμανικούς PWRs και BWRs, ώστε να επιτυγχάνεται burnup της τάξης των 45 MWd/kgU και 41 MWd/kgU αντίστοιχα [Winnik et al, 1994]. Άλλες επίσης βελτιώσεις έχουν επιτευχθεί που αφορούν σε νέα υλικά για cladding, κλπ.

Στον Πίνακα 22, παρουσιάζονται τα κόστη του κύκλου του καυσίμου ενός PWR ισχύος 900 MWe. Όλα τα κόστη βασίζονται σε τιμές αγοράς, εκτός από το κόστος διάθεσης του εξαντλημένου καυσίμου (Spent fuel disposal), το οποίο υπολογίστηκε με πρόβλεψη βάσει των στοιχείων του σεναρίου χωρίς επεξεργασία, λόγω έλλειψης εμπειρίας στην σχετική αγορά το 1989. Οι τιμές στον ανοιχτό κύκλο (χωρίς επεξεργασία) παρουσιάζουν την πρόταση της Κίνας για την τελική διάθεση του εξαντλημένου καυσίμου της Γερμανίας και αντικαθρεφτίζουν τον κίνδυνο που ενέχουν οι οικονομικές εκτιμήσεις, όταν δεν έχουν εκτιμηθεί εμπορικά άλλοι σημαντικοί παράγοντες. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται επίσης ότι, τα κόστη του καυσίμου σε αντιδραστήρες τύπου PWR και BWR είναι συγκρίσιμα [Cochran and Tsoulfanidis, 1992].

Πίνακας 22: Κόστη κύκλου του καυσίμου για τους PWRs (τιμές 1984, σε εκατ.\$/kWh)
(Πηγή: Bairiot & Vandenberg, 1989)

Cost item	Closed cycle		Once-through cycle	
	OECD/NEA	1985	REVISED	
Uranium	3,48			
Conversion	0,17			
Enrichment	2,28			
Fuel fabrication	0,88			
Total front end	6,81			
Transport of spent fuel	0,14			
Spent fuel storage	0,17	0,65		
Reprocessing+	2,18	-		
+Vitrification				
Spent fuel disposal	-	0,18	0,75	
Waste disposal	0,08	-		
Total back end	2,57	0,97	1,54	
Uranium credit	-0,54	-		
Plutonium credit	-0,28	-		
Total credits	-0,82	-		
Grand total	8,56	7,78	8,35	

7.3. Στοιχεία ιστορικής αναφοράς

Η εταιρεία General Electric – από τους πρώτους κατασκευαστές αντιδραστήρων τη δεκαετία του '60 στις ΗΠΑ – δημοσίευσε τον Σεπτέμβριο 1964 έναν τιμοκατάλογο: Ένας αντιδραστήρας 50 MW κόστιζε τότε περί τα 15 εκατομ. δολάρια (300\$ ανά kW ισχύος). Η τιμή αυτή δεν ήταν φτηνή τότε - το κόστος της παραγόμενης ισχύος ήταν περίπου 10.4 εκατομ. ανά κιλοβατώρα -, αλλά οι σταθμοί, όπως συνιστούσε η GE, θα μπορούσαν να παράγουν πολύ φθηνότερη ηλεκτρική ενέργεια, εάν αγόραζαν μεγαλύτερους αντιδραστήρες: μία μονάδα 300 MW θα κόστιζε μόνο 152\$ ανά kW ισχύος και θα παρήγαγε ενέργεια με κόστος 5.2 εκατομ. ανά κιλοβατώρα, ενώ μία μονάδα 600 MW θα κόστιζε μόνο 117 \$ ανά kW ισχύος για να χτιστεί και 4.2 εκατομ. ανά κιλοβατώρα παραγόμενης ισχύος [Pool, 1997]. Παρά την αισιοδοξία που επικρατούσε τότε, η πυρηνική ενέργεια δεν αποδείχτηκε όσο φτηνή φαινόταν. Καθυστερήσεις στην κατασκευή, τεχνολογικά προβλήματα και υπερβάσεις του προϋπολογισμού οδήγησαν το κόστος από 120 \$ σε 200 \$ ανά kW ισχύος μέχρι τα τέλη του '60. Όμως, η συνεχής αύξηση των τιμών του άνθρακα και του πετρελαίου διατήρησε το συγκριτικό πλεονέκτημα της πυρηνικής ενέργειας.

Επιπλέον, ενώ οι τιμές των συμβατικών καυσίμων αναμενόταν να αυξάνονται συνεχώς, το κόστος της πυρηνικής ενέργειας αναμενόταν να μειωθεί, όσο η πυρηνική τεχνολογία ωριμάζε και αποκτούσε εμπειρία. Έτσι, τη δεκαετία του '70, η πυρηνική βιομηχανία στις ΗΠΑ άκμασε (το 1972-73 πουλήθηκαν 65 αντιδραστήρες). Το 1974, οι ΗΠΑ διέθεταν 200 αντιδραστήρες - εν λειτουργία, υπό κατασκευή ή σε παραγγελία. Με βάση τιμές 1970 και για το μέγιστο κόστος ουρανίου, το ολικό κόστος λειτουργίας ενός LWR θα ανερχόταν σε 0,5 US cents ανά kWh [Wilson, 1999].

Στη δεκαετία του '80, οι αυξανόμενες ρυθμιστικές απαιτήσεις στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη, αλλά και άλλοι παράγοντες, όπως η απόρριψη των κοινωνιών, μείωσαν πολύ τη ζήτηση. Λόγω του εμπάργκο πετρελαίου, των πολιτικών εξοικονόμησης ενέργειας, των αυξανόμενων ρυθμιστικών απαιτήσεων, του αντιπυρηνικού κινήματος, της έλλειψης κοινωνικής αποδοχής, - ιδιαίτερα μετά τα ατυχήματα στο Three Mile Island (ΗΠΑ) και στο Chernobyl (Ουκρανία) (βλ. Παράρτημα), οι πυρηνικοί σταθμοί είδαν την ενεργειακή ζήτηση να μειώνεται και πολλές παραγγελίες ακυρώθηκαν. Το κόστος των πυρηνικών σταθμών για παραγωγή ενέργειας άρχισε να αυξάνει. Η τιμή της ενέργειας ήταν ακριβή και η αβεβαιότητα μεγάλη. Μονάδες σχεδιάζονταν να κοστίσουν 800 εκατομ. USD και κόστιζαν τελικά 2 ή 3 δις USD. Θα χρειάζονταν 5 ή 8 χρόνια για την κατασκευή. Το ασταθές θεσμικό και κανονιστικό περιβάλλον δημιουργούσε μεγάλες αβεβαιότητες, ιδιαίτερα στη φάση αδειοδότησης. Το γαλλικό πυρηνικό πρόγραμμα - το οποίο θεωρείται από τα πιο οικονομικά - ακολούθησε έναν μάλλον διαφορετικό δρόμο. Περιλάμβανε το 1997, σταθμούς βάσης κόστους από 1 - 1.5 δις \$ ο ένας (περίπου 1,000 \$ ανά kW ισχύος) - που είναι το μισό του μέσου κόστους των σταθμών στις ΗΠΑ, με στοιχεία του 1997 [Pool, 1997]. Θεωρείται ότι στη Γαλλία δεν είναι τόσο δυσκίνητο το κανονιστικό πλαίσιο και απαιτείται λιγότερη δημόσια συμμετοχή για τη λήψη σοβαρών αποφάσεων, ώστε αυτές να νομιμοποιούνται στη κοινή γνώμη. Επίσης, το δίκτυο «καύσιμο-εμπλουτισμός-σχεδιασμός-κατασκευή-λειτουργία» είναι ενιαίο και συγκεντρωτικό, με σοβαρή τη παρέμβαση του κράτους. Η κρατική Electricité de France (EDF) κατασκευάζει σταθμούς μέσα σε 6 χρόνια ή και λιγότερο, πολύ γρηγορότερα απ' ό,τι η αμερικανική πυρηνική βιομηχανία, γεγονός που επίσης μειώνει σημαντικά το σταθερό κόστος. Οι γαλλικοί σταθμοί θεωρούνται επίσης, αξιόπιστοι σε διαθεσιμότητα παροχής ενέργειας, από τη στιγμή που θα τεθούν σε λειτουργία²¹ [Pool, 1997].

²¹ Λειτουργία, εννοείται από τη στιγμή που επιτυγχάνεται κρισιμότητα στον αντιδραστήρα και ο σταθμός τίθεται σε εμπορική λειτουργία.

7.4. Στοιχεία κόστους

7.4.1. Κόστος κατασκευής πυρηνικού σταθμού ισχύος

Η κατασκευή μίας μονάδας πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος διαρκεί 10 έως 15 έτη στις ΗΠΑ και 6-7 έτη στην Ευρώπη και αλλού. Για την αξιολόγηση μίας τέτοιας επένδυσης, τα κόστη πρέπει να αναχθούν στην παρούσα αξία και να συνυπολογισθούν οι κλιμακώσεις των τιμών κατά την περίοδο κατασκευής. Στον Πίνακα 24 παρατίθενται στοιχεία του κόστους κεφαλαίου μίας μονάδας ισχύος με τιμές του 1984 (σε δολάρια). Από τα δεδομένα του Πίνακα 23 σχετικά με το εκτιμώμενο κόστος κεφαλαίου για μονάδα πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος με βάση την μεσαία και καλύτερη περίπτωση σταθμού ισχύος 1100 MWe, συνάγεται η ομοιότητα των περιπτώσεων ευρωπαϊκών αντιδραστήρων με την οικονομικότερη εκδοχή (better experience). Ως κόστος επένδυσης, αναφέρεται το ποσό των 4012 εκατ.\$ ή 3645 \$/kWh ή 1935 \$/kW (σε τιμές 1987).

Πίνακας 23: Εκτιμώμενο κόστος κεφαλαίου για μονάδα πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος με βάση την μεσαία και καλύτερη περίπτωση σταθμού ισχύος 1100 MWe στο Σικάγο, ΗΠΑ (Πηγή: Cochran and Tsoufanidis, 1992)

	Median Experience ^a	Better Experience ^b (Reference)
<i>Direct costs (millions of January 1987 dollars)</i>		
Land & land rights	5	5
Structures and improvements	278	184
Reactor/Boiler plant equipment	351	290
Turbine plant equipment	251	213
Electric plant equipment	110	76
Miscellaneous plant equipment	65	44
Main heat rejection system	53	46
Subtotal (direct costs)	1112	858
<i>Indirect costs (millions of January 1987 dollars)</i>		
Construction services	371	205
Home office engineering and services	483	211
Field office engineering and services	434	109
Owner's costs	240	138
Subtotal (indirect costs)	1529	663
<i>Total costs</i>		
Direct & indirect costs (January 1987 dollars)	2641	1521
Contingency allowance (January 1987 dollars)	396	152
Total overnight costs (January 1987 dollars)	3037	1673
Allowance for escalation (as spent dollars)	1413	935
Allowance for interest (as spent dollars)	3472	1403
Plant capital investment cost at commercial operation (as spent dollars)		
Millions of dollars	7921	4012
Dollars per kilowatt	7200	3645
1987 dollars per kilowatt	3820	1935

Source: Nuclear Energy Cost DataBase, DOE/NE-0095, US Dept of Energy, Sept. 1988

^a 12-year design and construction lead time and 26 craft manhours/kWe

^b 8-year design/construction lead time, 14 craft manhours/kWe, includes regulatory reforms.

Πίνακας 24: Ολικό κόστος κατασκευής ενός PWR ισχύος 1100 MWe SNUPPS* (σε \$ 1984)
(Πηγή: Cochran and Tsoulfanidis, 1992)

Μείζονα συστατικά μέρη:	
αντιδραστήρας, αντλίες, γεννήτρια ατμού, κτίρια	74,000,000
υπόλοιπος εξοπλισμός και υλικά	45,000,000
	530,100,000
Εργασίες κατασκευής (εργολάβου)	344,850,000
Διαχείριση κατασκευής	350,550,000
Διαχείριση μηχανολογικών εργασιών (engineering management)	125,400,000
Νομοθετικά, κανονιστικά θέματα, εμπορικές συμφωνίες	219,450,000
Γη, ασφάλιση, διάφορα	34,200,000
Κόστος έναρξης σταθμού (startup costs)	76,950,000
Φόροι	31,350,000
Τόκοι κατά την κατασκευή ^α	1,017,450,000
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΜΟΝΑΔΑΣ	\$2,849,300,000

* Standardized Nuclear Unit Plant System (Callaway, Missouri & Wolf Creek, Kansas)

^α interest during construction is considered an expense and not an investment, however this expense does increase the overall costs of a nuclear generating plant

Αξίζει να αναφερθεί ότι, το κόστος των μηχανολογικών εργασιών κατά τον σχεδιασμό της μονάδας κυμαίνεται από 5 έως 15% του συνολικού κόστους κεφαλαίου της μονάδας, ενώ οι τόκοι κατά την περίοδο κατασκευής αντιπροσωπεύουν περίπου το ένα τρίτο του ολικού κόστους, λόγω της μεγάλης περιόδου κατασκευής (12 έτη στις ΗΠΑ και αλλού).

7.4.2. Κόστος λειτουργίας και συντήρησης (O & M)

Σήμερα, τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης ενός πυρηνικού σταθμού θεωρείται συγκρίσιμο με το κόστος ενός συμβατικού σταθμού με στερεά καύσιμα (coal). Ένα γράφημα του Nuclear Energy Institute συγκρίνει το μέσο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνική ενέργεια και από άνθρακα από το 1981 έως το 1996: Το κόστος του πυρηνικού καυσίμου είναι μικρότερο από του άνθρακα, αλλά το κόστος λειτουργίας και συντήρησης για τον άνθρακα είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα κόστη της πυρηνικής ενέργειας.

Το 1999 αναφέρεται ότι, το κατώτερο κόστος της πυρηνικής ενέργειας στις ΗΠΑ, - το οποίο αυξήθηκε με τα χρόνια για διάφορους λόγους - ήταν περίπου 5 US cents/kWh (μαζί με το κόστος δανείου), περίπου 10 φορές περισσότερο σε σχέση με στοιχεία του

1973. Ακόμα και αυτό το κόστος θεωρείται ανταγωνιστικό ως προς τις περισσότερες εναλλακτικές λύσεις ηλεκτροπαραγωγής με μη-συμβατικά καύσιμα, αλλά όχι όσον αφορά τα συμβατικά [Wilson, 1999].

Το 1974 ένας LWR στις ΗΠΑ (Maine Yankee NPP, Connecticut, USA) κόστισε συνολικά 180 εκατ. USD για να ολοκληρωθεί, ενώ δαπανήθηκαν επιπλέον 20 εκατ. USD για να τροποποιηθεί την τελευταία στιγμή το σύστημα ψύξεως (ένα κόστος που δεν επιβάλλεται σε καμία μονάδα με συμβατικά καύσιμα), ή αλλιώς, 200 USD ανά kWh εγκατεστημένης ισχύος. Η ηλεκτρική ενέργεια του σταθμού αυτού κόστιζε 0,55 US cents/kWh (συμπεριλαμβανομένης της υποθήκης ή του δανείου). Το 1972, αναφερόταν στη βιβλιογραφία ότι, το εκτιμώμενο λειτουργικό κόστος κυμαινόταν λίγο κάτω από την παραπάνω αναφερθείσα τιμή, ενώ το μέσο κόστος κεφαλαίου κυμαινόταν περίπου 25% πάνω από το κόστος κεφαλαίου του Maine Yankee. Με βάση τον πληθωρισμό, αναφέρεται ότι το 1999 το κόστος λειτουργίας θα μπορούσε να είναι λιγότερο από 1 US cent/kWh και - εφόσον παραμένουν μικροί οι χρόνοι κατασκευής - το κόστος κεφαλαίου θα μπορούσε να είναι λιγότερο από 2 US cents/kWh [Wilson, 1999].

Παρόλα αυτά, το 1999, το μέσο κόστος λειτουργίας ήταν 1,9 US cents/kWh, - για μία καλώς λειτουργούσα μονάδα θα μπορούσε να είναι και λιγότερο: της τάξεως του 1,4-1,7 US cents/kWh. Το κόστος κατασκευής ήταν 1690 USD ανά kWh εγκατεστημένης ισχύος για έναν αντιδραστήρα που κατασκευάστηκε στη Ταϊβάν μέσα σε 4 περίπου χρόνια (που επιβάρυνε το κόστος κεφαλαίου με 4 US cents/kWh). Το κόστος αυτό είναι αρκετά υψηλό, πολύ περισσότερο εάν συνυπολογισθεί ότι η κατασκευή μπορεί να διαρκέσει πολύ πάνω από 4 έτη.

Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες

Πολλοί πίστεψαν ότι ένας αντιδραστήρας ταχέων νετρονίων ψυχόμενος με νάτριο θα μπορούσε να είναι οικονομικότερος σε σχέση με έναν αντιδραστήρα θερμικών νετρονίων τύπου LWR. Η θερμοκρασία εργασίας μπορεί να είναι μεγαλύτερη, ενώ οι θερμικές αποδόσεις είναι της τάξης του 40% αντί 30%. Το νάτριο είναι λιγότερο διαβρωτικό από το νερό και επίσης βράζει σε υψηλότερες θερμοκρασίες και δεν απαιτεί υψηλές πιέσεις. Όμως, η εμπειρία που αναφέρεται με τους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες - οι οποίοι είτε έκλεισαν οριστικά είτε παρουσιάζουν προβλήματα - δείχνει ότι το κόστος λειτουργίας των αναπαραγωγικών αντιδραστήρων είναι υψηλότερο συγκριτικά με το κόστος λειτουργίας των LWR [Wilson, 1999].

Όσον αφορά τους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων που ψύχονται με υγρό μέταλλο, αυτοί θεωρούνται οικονομικότεροι του αντιδραστήρα σύντηξης και επίσης άλλων ανανεώσιμων μορφών ηλεκτροπαραγωγής. Το κόστος τους όμως θεωρείται υψηλό σε σχέση με άλλους συμβατικούς τύπους αντιδραστήρων (πχ. LWRs) [Wilson, 1999].

Ο ΟΟΣΑ θεωρεί ότι το οριακό κόστος παραγωγής (the marginal cost of production or the short-term variable cost) για τους εν λειτουργία πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής στις χώρες του ΟΟΣΑ είναι μικρό, αν και ποικίλλει. Συνήθως, το σταθερό κόστος λειτουργίας ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (fixed operating costs per unit electrical output) είναι μικρότερο, όταν σε έναν σταθμό λειτουργούν πάνω από ένας αντιδραστήρες, λόγω του ότι έτσι, μοιράζονται διάφορα κόστη (ειδική υποδομή, προσωπικό, κανονιστικές υποχρεώσεις που δεν εξαρτώνται από το μέγεθος κλπ).

Στις ΗΠΑ, οι καλύτερες μονάδες (καλύτερη λειτουργία) παρουσίασαν οριακά έξοδα από 11 έως 15 USD/MWh και ο μ.ό. για όλους τους πυρηνικούς σταθμούς των ΗΠΑ ήταν 21 USD/MWh το 1996 με τυπική τιμή χονδρικής πώλησης της μεγαβατώρας 25 USD.

Πίνακας 25: Κόστος πυρηνικής ενέργειας το 1971 στον πυρηνικό σταθμό Virginia Power & Light, ΗΠΑ (Πηγή: Wilson, 2000)

Περιγραφή κόστους	Ανθρακας	Πυρηνική ενέργεια
Κόστος επένδυσης μονάδας (USD/kW)	202	255
Ετήσιο επιτόκιο επιβάρυνσης κεφαλαίου (annual capital charge rate per year)	0,13	0,13
Ετήσιες παραγόμενες κιλοβατώρες ανά kW ισχύος	5.256	5.256
Ποσοστό παραγωγής θερμότητας (million Btu/kWh)	0,009	0,0104
Ποσοστό παραγωγής θερμότητας από το καύσιμο (Heat rate from fuel) US cents/million Btu	45	18
Κόστος ηλεκτρ. ενέργειας²² (US cents/kWh):		
Επένδυση (plant investment)	0,500	0,631
Κόστος λειτουργίας και συντήρησης	0,030	0,038
Κόστος καυσίμου	0,405	0,187
ΣΥΝΟΛΟ	0,935	0,856

7.4.3. Κόστος σύγχρονων αντιδραστήρων και προηγμένων τύπων

Στην πρόσφατη βιβλιογραφία, μελετητές των οικονομικών της πυρηνικής ενέργειας θεωρούν ως αναφορά του ελάχιστου κόστους της πυρηνικής ενέργειας, τα 36 εκατομ. ανά kWh, για σταθμούς με παράγοντα ικανότητας 90% και επένδυση με 10% επιτόκιο (το αισιόδοξο σενάριο) [Florido et al, 2000]. Το ελάχιστο κόστος λειτουργίας και συντήρησης ανέρχεται σε 7 εκατομ. ανά kWh, ποσό που είναι συγκρίσιμο με αυτό των προηγμένων αντιδραστήρων, ενώ το κόστος του κύκλου του πυρηνικού καυσίμου στους προηγμένους τύπους, ανέρχεται κατ' ελάχιστον σε 6,36 εκατομ. ανά kWh (με βάση τον advanced pressurized water reactor AP600). Το κόστος κεφαλαίου για περίοδο λειτουργίας 30 ετών υπολογίσθηκε σε 21,35 εκατομ. ανά kWh για λειτουργία 8760 ωρών ετησίως. Στη Γαλλία, η κρατική EDF αναφέρει ότι οι μονάδες της παρουσιάζουν οριακά κόστη της τάξης των 22 USD/MWh (0,13 FF/kWh) [IEA Report, 1998-99].

²² Θεωρείται κατά την IEA (ΟΟΣΑ) ότι το οριακό κόστος παραγωγής (the marginal cost of production or the short-term variable cost) της μεμονωμένης μονάδας ηλεκτροπαραγωγής είναι ο δείκτης που ορίζει την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας (bulk price) στις ανταγωνιστικές συνθήκες της απελευθέρωσης της ενέργειας (το κόστος του καυσίμου και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης - O & M - αποτελούν τις συνιστώσες του μικροπρόθεσμου κόστους (short-term cost). Μικροπρόθεσμα, η οικονομική βιωσιμότητα διασφαλίζεται όταν το κόστος παραγωγής κρατείται κάτω από την τιμή της αγοράς. Μεσοπρόθεσμα, οι τιμές πρέπει να είναι επαρκώς χαμηλές ώστε να πληρώνονται τα δάνεια και οι επιβαρύνσεις του αρχικού κεφαλαίου. Μακροπρόθεσμα, για νέες επενδύσεις, η τιμή της αγοράς πρέπει να παρέχει το αναγκαίο

7.4.4. Κόστος διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων

Το κόστος διαχείρισης των ραδιενεργών αποβλήτων από πυρηνικούς σταθμούς ισχύος αποτελείται βασικά από τα εξής μέρη [ιστοσελίδα Ινστιτούτου Ουρανίου, 2000]:

- Το κόστος της επεξεργασίας του εξαντλημένου καυσίμου (επανεπεξεργασία, ακινητοποίηση, εγκιβωτισμός²³)
- Το κόστος κατασκευής και λειτουργίας των τελικών χώρων εναπόθεσης (final repositories)
- Το κόστος παροπλισμού και διάλυσης των πυρηνικών σταθμών.

Αναφέρεται στη βιβλιογραφία ότι, το κόστος της διάθεσης των χαμηλής ραδιενέργειας αποβλήτων κυμαίνεται πολύ, από 2500 σε 20.000 USD/m³ ανά μονάδα διάθεσης (στο κόστος διάθεσης πρέπει να προστεθεί και το σταθερό κόστος της εγκατάστασης, όπως και το λειτουργικό) [Park and Song, 1998].

Το Ινστιτούτο Ουρανίου (Λονδίνο, Βρετανία) αναφέρει δύο περιπτώσεις που πραγματοποιήθηκαν μελέτες εκτίμησης κόστους διαχείρισης αποβλήτων υψηλής και χαμηλής ραδιενέργειας: στη Γερμανία και στη Φινλανδία [ιστοσελίδα Ινστιτούτου Ουρανίου, 2000].

Στη Γερμανία, επιλέχθηκαν, ο χώρος τελικής εναπόθεσης στο Gorleben για - κυρίως - υψηλής ραδιενέργειας απόβλητα και ο χώρος τελικής εναπόθεσης στο Konrad για χαμηλής ραδιενέργειας απόβλητα. Για την κατασκευή των δύο αυτών χώρων εναπόθεσης για τη διάθεση συνολικά αποβλήτων παραγωγής 4000 TWh, εκτιμήθηκε ένα κόστος 2500 εκατ. USD (5000 million DM) και για την ετήσια λειτουργία τους εκτιμήθηκε κόστος 90 εκατ. USD (170 million DM). Τα κόστη κατασκευής και λειτουργίας αυτών των χώρων εναπόθεσης υπολογίσθηκε σε περίπου 1 mill / kWh (0,002 DM/kWh). Στη Φινλανδία, υπολογίσθηκε το κόστος για συνολική επεξεργασία των αποβλήτων από την παραγωγή 430 TWh (οι 2 μονάδες στο Olkiluoto). Τα κόστη περιελάμβαναν το κόστος διαχείρισης του καυσίμου (αποθήκευση, εγκιβωτισμός και άμεση απόθεση), το κόστος της τελικής εναπόθεσης των χαμηλής και μεσαίας ραδιενέργειας αποβλήτων από τη λειτουργία του σταθμού, το κόστος του παροπλισμού και της τελικής διάθεσης των αποβλήτων από τον παροπλισμό, όπως και

περιθώριο ώστε να καλύπτονται πλήρως και το κόστος παραγωγής και το συνολικό κόστος κεφαλαίου.

²³ (reprocessing, immobilization, encapsulation)

το κόστος της έρευνας και ανάπτυξης. Το συνολικό κόστος εκτιμήθηκε σε 1600 εκατ. USD (FIM 5800 million) ή 4 mills/kWh.

7.4.5. Κόστος ανακύκλωσης και επανεπεξεργασίας του πυρηνικού καυσίμου

Εάν δεν ληφθεί υπόψη η - ιδιαίτερης σημασίας - πλευρά της προστασίας του περιβάλλοντος και της υπό συζήτηση «αειφορίας, καθώς και πλευρές εξοικονόμησης καυσίμου, είναι ακόμα ασαφές εάν και κατά πόσον οι μέθοδοι επανεπεξεργασίας και ανακύκλωσης του πυρηνικού καυσίμου είναι συμφέρουσες οικονομικά. Δεν υπάρχουν απόλυτα νούμερα διαθέσιμα στη βιβλιογραφία. Ο Πίνακας 26 δίνει παρόλα αυτά, όλους εκείνους τους παράγοντες που πρέπει να συνυπολογισθούν για τον καθορισμό της καλύτερης δυνατής τιμής κόστους στις ΗΠΑ.

Πίνακας 26: Εκτιμήσεις κόστους δραστηριοτήτων που σχετίζονται με το πυρηνικό καύσιμο * (Πηγή: Cochran, Tsoulfanidis, 1992)

Component	Once-through	With recycling
U ₃ O ₈	\$ 40/kg	\$ 40/kg
Conversion	\$ 4/kg	\$ 4/kg
SWU price ²⁴	\$ 80	\$ 80
Reprocessing	-	\$ 1070/kg
Fabrication ^a	\$ 190 - \$ 230 /kg	\$ 270/kg
transportation	-	\$ 150/kg

^a in the USA, fabrication and transportation costs are given together

* in 1988 dollars

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 26, στον κύκλο λειτουργίας χωρίς ανακύκλωση καυσίμου (once-through cycle) σε LWRs, το κόστος του πυρηνικού καυσίμου αποτελείται από τρεις κύριες συνιστώσες: το κόστος του U₃O₈, το κόστος του εμπλουτισμού και το κόστος της παρασκευής του στοιχείου του πυρηνικού καυσίμου (cost of fabrication). Για άλλες χώρες, εκτός των ΗΠΑ, θα πρέπει να συνυπολογισθεί το κόστος διάθεσης των αποβλήτων ως ξεχωριστή συνιστώσα, ενώ στις ΗΠΑ αυτό είναι σταθερά καθορισμένο νομοθετικά (ασφαλής εναπόθεση σε κρατικούς γεωλογικούς σχηματισμούς - repositories - με αντίτιμο την πληρωμή \$0,001 ανά kWh παραγόμενης ενέργειας από κάθε πυρηνικό σταθμό²⁵).

²⁴ SWU (separative work units): μονάδα που εκφράζει την εργασία που απαιτείται για την επίτευξη ενός συγκεκριμένου ποσοστού εμπλουτισμού

²⁵ USA Nuclear Waste Policy Act, NWP, 1982

Στον κύκλο λειτουργίας με ανακύκλωση καυσίμου, εισάγονται δύο βασικές αλλαγές: το κόστος της επανεπεξεργασίας και το κόστος του καυσίμου MOX. Στο τελευταίο, πρέπει να συνυπολογισθεί και το κόστος μεταφοράς μαζί με την παρασκευή, ενώ το κόστος παρασκευής και μεταφοράς είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με τον κύκλο λειτουργίας χωρίς ανακύκλωση (LWRs). Αναφέρεται στη βιβλιογραφία ότι, στις ΗΠΑ, το κόστος επανεπεξεργασίας το 1977 κυμαινόταν σε 280 \$/kg - σε τιμές 1977 (από μελέτη της Energy Research and Development Administration, πρώην Υπουργείο Ενέργειας) [Cochran and Tsoulfanidis, 1992]. Εκτιμήσεις του 1992 για τις χώρες της Ευρώπης, αναφέρουν ότι, το κόστος επανεπεξεργασίας κυμαινόταν σε 1070 \$/kg (μαζί με το κόστος της συσκευασίας των αποβλήτων), ενώ το κόστος παρασκευής ανερχόταν σε 270 \$/kg (σε τιμές 1988). Εκτιμήσεις επίσης, σχετικά με το κόστος μεταφοράς του MOX αναφέρουν κόστος περίπου τριπλάσιο του κόστους μεταφοράς του μη ακτινοβολημένου καυσίμου του LWR, δηλαδή περίπου 150\$.

7.4.6. Το κόστος των οικονομικών αποταμιεύσεων για τη διαχείριση των αποβλήτων και για τον παροπλισμό

Η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας από τους πυρηνικούς σταθμούς ισχύος συμπεριλαμβάνει και το κόστος της επεξεργασίας των ραδιενεργών αποβλήτων, της αποθήκευσής τους και το κόστος παροπλισμού του σταθμού μετά το τέλος της χρήσιμης ζωής του. Όλοι οι εν λειτουργία πυρηνικοί σταθμοί κρατούν ένα ποσό χρημάτων σε ειδικό λογαριασμό που αφορά τη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων τους και τον παροπλισμό τους και αυτό το ποσό αντιστοιχεί στις εξωτερικές οικονομίες από την πυρηνική ενέργεια: *τα εξωτερικά κόστη είναι ενσωματωμένα στην τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας*. Αυτό σημαίνει ότι, τα κόστη αυτά πρέπει να είναι προβλέψιμα όσο πιο αξιόπιστα γίνεται.

Τα εκτιμώμενα κόστη παροπλισμού (decommissioning cost), βασίζονται στην υπάρχουσα μέχρι σήμερα εμπειρία. Διεθνώς, αναγνωρίζεται ότι, αποτελούν περίπου το 15% της συνολικής επένδυσης, ενώ μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από χώρα σε χώρα, ανάλογα με την πολιτική αδειοδότησης, τις απαιτήσεις προδιαγραφών και τις αντίστοιχες πρακτικές [Eurelectric Report, 2000]. Το κόστος παροπλισμού ενός σταθμού ποικίλει επίσης, ανάλογα με το επιτρεπόμενο επίπεδο της ραδιενέργειας που έχει απομείνει, σε συνδυασμό πάντα με το κανονιστικό πλαίσιο της κάθε χώρας και την αντίληψη περί υγείας και ασφάλειας. Η IEA αναφέρει ότι, το εκτιμώμενο κόστος παροπλισμού μπορεί να διαφέρει από χώρα σε χώρα του ΟΟΣΑ κατά 6 ποσοστιαίες μονάδες και ότι λίγη εμπειρία υπάρχει, δεδομένου ότι ελάχιστες μονάδες έχουν

πλήρως παροπλισθεί (1998-99). Μεγάλη αβεβαιότητα στον υπολογισμό του κόστους παροπλισμού υπάρχει επίσης, για τον λόγο ότι, δεν είναι προβλέψιμη η πολιτική παροπλισμού και οι αντίστοιχοι όροι που θα ισχύουν μετά από 35-40 έτη λειτουργίας ενός σταθμού (για λειτουργία σε πλήρη ισχύ), αυτό όμως είναι ευθύνη των κανονιστικών οργανισμών και του κάθε κράτους [IEA Report, 1998-99].

Για την εκτίμηση του κόστους παροπλισμού και την προτυποποίησή του προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι υπάρχουσες σοβαρές διαφορές από χώρα σε χώρα - όπως ήδη έχει αναφερθεί - έχει συσταθεί κοινή ομάδα εργασίας μεταξύ των ΙΑΕΑ, ΝΕΑ και της Ε.Ε. η οποία δημοσίευσε το 1999, μία πρότυπη λίστα ομάδων κόστους παροπλισμού, σαν ένα ενδιάμεσο έγγραφο για συζήτηση [Eurelectric Report, 2000].

Για παράδειγμα, από στοιχεία σταθμών που συμμετέχουν στο Co-operative Programme on Decommissioning από το 1985 [Lazo, 1999, Eurelectric Report, 2000], ένας PWR ισχύος 41 MWt (Βέλγιο, BR-3, Mol) που ήταν σε λειτουργία από το 1962-1987, προγραμματίζεται να παροπλισθεί στο διάστημα 1989-2010 με σκοπό και την εκτίμηση του κόστους ως πιλοτικό πρόγραμμα της ΕΕ (ευρίσκεται τώρα στο στάδιο 3 του παροπλισμού-μερική διάλυση).

Επίσης, ένας PHWR (CANDU prototype) ισχύος 25 MWe (NPD, Καναδάς) που ήταν σε λειτουργία από το 1967-1987, προγραμματιζόταν να παροπλισθεί στο διάστημα 1987-1988 (ευρίσκεται τώρα στο στάδιο 1 του παροπλισμού) και το εκτιμώμενο κόστος ήταν το 1986, 25.3 MCAD. Στα ίδια περίπου πλαίσια κόστους φαίνονται να κινούνται και οι υπόλοιποι αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων ψυχόμενοι με νερό: Ένας heavy-water moderated/boiling light-water cooled prototype (Gentilly-1, Καναδάς) ισχύος 250 MWe, που ήταν σε λειτουργία από το 1967-1982, προγραμματιζόταν να παροπλισθεί στο διάστημα 1984-1986 (ευρίσκεται τώρα στο στάδιο 1 του παροπλισμού) και το εκτιμώμενο κόστος ήταν το 1986, 25 MCAD.

Αντιθέτως, ένας διπλός GCR (G2/G3, Marcoule, Γαλλία) ισχύος 250 MWt ο καθένας, που ήταν σε λειτουργία από το 1958-1980, προγραμματιζόταν να παροπλισθεί στο διάστημα 1982-1993 (ευρίσκεται τώρα στο στάδιο 2 του παροπλισμού) και το εκτιμώμενο κόστος ήταν 150 MFRF και για τους δύο (1990), όπως επίσης και όσον αφορά τους Gas-cooled/Heavy-water moderated αντιδραστήρες: Ο EL4 (Γαλλία), ισχύος 70 MWe, που ήταν σε λειτουργία από το 1966-1985, προγραμματιζόταν να παροπλισθεί στο διάστημα 1989-1999 (ευρίσκεται τώρα στο στάδιο 2 του παροπλισμού) και το εκτιμώμενο κόστος ήταν 550 MFRF (1995), ενώ ο KKN

(Niwederaichbach, Γερμανία), ισχύος 106 MWe, που ήταν σε λειτουργία από το 1972-1974, προγραμματιζόταν να παροπλισθεί το 1994 και μετά, (ευρίσκεται τώρα στο στάδιο 3 του παροπλισμού) και το εκτιμώμενο κόστος ήταν 190 MDEM.

Ένας αναπαραγωγικός αντιδραστήρας αναμένεται να επίσης, να έχει μεγάλο κόστος παροπλισμού: Π.χ. ένας πειραματικός αναπαραγωγικός αντιδραστήρας ψυχόμενος με νάτριο (Rapsodie, Cadarache, Γαλλία) ισχύος 25 MWt, που ήταν σε λειτουργία από το 1967-1982, προγραμματιζόταν να παροπλισθεί στο διάστημα 1983-1994 (ευρίσκεται τώρα στο στάδιο 2 του παροπλισμού του, με αρχή του έργου το 1985) και το εκτιμώμενο κόστος ήταν το 1989, 131.7 MFRF.

Το Ινστιτούτο Ουρανίου (Λονδίνο, Βρετανία) αναφέρει ότι το εκτιμώμενο κόστος παροπλισμού στις περισσότερες χώρες, για σταθμό ισχύος 1000 MW με αντιδραστήρα LWR κυμαίνεται μεταξύ 100-200 εκατομ. USD. Ενώ το κόστος του παροπλισμού μαζί με το κόστος της τελικής εναπόθεσης των αποβλήτων του παροπλισμού ανέρχονται περίπου στα 0,5 εκατομ./kWh του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας [ιστοσελίδα The Uranium Institute, 2000].

7.4.7. Κόστος διαχωρισμού και μεταστοιχείωσης

Σήμερα, στην Ε.Ε., οι πρακτικές δυνατότητες να εφαρμοσθούν σε βιομηχανική κλίμακα μέθοδοι διαχωρισμού και μεταστοιχείωσης (transmutation) των πυρηνικών αποβλήτων βρίσκονται ακόμα στο στάδιο της έρευνας. Το κόστος τέτοιων μεθόδων δεν έχει ακόμα μελετηθεί. Δυνητικά όμως, οι μέθοδοι αυτές μπορούν να δώσουν πειστική απάντηση στο σοβαρό πρόβλημα της ασφαλούς διαχείρισης και διάθεσης του εξαντλημένου καυσίμου και των υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων.

7.5. Ασφάλεια vs κόστος

Η εξισορρόπηση των αποτελεσμάτων των απαιτήσεων της ασφάλειας ως προς το κόστος τους θεωρείται από τους περισσότερους ειδικούς ένα από τα πιο σημαντικά θέματα, ως προς την επίδρασή του στο ολικό κόστος κατασκευής και λειτουργίας των αντιδραστήρων όλων των τύπων. Είναι γενική εκτίμηση, ότι το κόστος σχεδιασμού, κατασκευής και λειτουργίας ανέβηκε σημαντικά όταν σε αυτό ενσωματώθηκαν κανονισμοί και προδιαγραφές ασφαλείας [IEA Report, 1998-99, Pool, 1997].

Μία μελέτη που συγκρίνει τα κόστη συντήρησης ενός γερμανικού και ενός σουηδικού σταθμού [Brocker and Hanson, 1996] αναφέρει ότι το κόστος συντήρησης για τον γερμανικό σταθμό ήταν μεγαλύτερο, εξαιτίας του αυστηρότερου κανονιστικού πλαισίου για την ασφάλεια που ίσχυε στη Γερμανία (απαιτήσεις πολλών ελέγχων, επιθεωρήσεων, επισκέψεων εξωτερικών εμπειρογνομόνων κλπ). Σε μία παρόμοια μελέτη [Hibbs, 1997], τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης των γερμανικών σταθμών βρέθηκε να είναι τρεις φορές υψηλότερο έναντι ενός συγκρίσιμου γαλλικού σταθμού της EDF. Εάν προστεθεί σε αυτά τα κόστη και το κόστος των οικονομικών αποταμιεύσεων για τη διαχείριση των αποβλήτων και τον παροπλισμό, αναφέρεται ότι το ολικό κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από γερμανικούς σταθμούς κοστίζει τα διπλά σε σχέση με τον γαλλικό σταθμό της EDF [IEA Report 1998-99].

Δραματικά επίσης αυξήθηκε το κόστος διάθεσης των χαμηλής ραδιενέργειας αποβλήτων. Για παράδειγμα, στις ΗΠΑ, αυτά τα κόστη ανέβηκαν κατά 13% την περίοδο 1980-85 με βάση τα στοιχεία της ΙΕΑ, λόγω των υψηλότερων κανονιστικών απαιτήσεων σχετικά με τους χώρους εναπόθεσης και σε συνδυασμό με την έλλειψη διαθέσιμων τοποθεσιών.

Στις χώρες του ΟΟΣΑ²⁶, όπως αναφέρει η ΙΕΑ, δεν έχει επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ κόστους και ασφάλειας. Όπως ισχύει και σε άλλες βαριές βιομηχανικές δραστηριότητες υψηλού κινδύνου (παραγωγή συμβατικών καυσίμων, χημικών, ορυχεία κλπ) οι κανονισμοί ασφαλείας πρέπει να βασίζονται σε μία αποτίμηση του ενδεχόμενων επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον από τη μία, και στο κόστος της ελαχιστοποίησής των επιπτώσεων αυτών, από την άλλη. Αυτό όμως δεν είναι απολύτως εφαρμόσιμο σε ό,τι αφορά την πυρηνική ενέργεια για τεχνικούς και άλλους λόγους. Για παράδειγμα, δεν υπάρχει δυνατότητα επιστημονικής εκτίμησης του κινδύνου από την έκθεση σε χαμηλή ακτινοβολία, κλπ. Η ποσοτικοποίηση του κινδύνου είναι επομένως μία σημαντική υπόθεση για την πυρηνική βιομηχανία, και αποτελεί ένα συνδυασμό τεχνικής ικανότητας, επιστημονικής δυνατότητας και πολιτικών και οικονομικών επιλογών.

²⁶ Χώρες του ΟΟΣΑ με πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος (1998): Βέλγιο, Καναδάς, Τσεχία, Φινλανδία, Γαλλία, Γερμανία, Ουγγαρία, Ιαπωνία, Κορέα, Μεξικό, Ολλανδία, Ισπανία, Σουηδία, Ελβετία, Βρετανία και ΗΠΑ. Από αυτές, αποφάσισαν την κατάργηση της πυρηνικής ενέργειας, η μεν Σουηδία από το 1997, η δε Γερμανία, από το 2000.

7.6. Μείωση κόστους μέσω τεχνικής αναβάθμισης των υπαρχόντων σταθμών (backfitting cost)

Η αύξηση της ικανότητας υπαρχόντων σταθμών και η επιμήκυνση του χρόνου ζωής τους είναι ένας τρόπος μείωσης του κόστους της κλιματικής αλλαγής, εφόσον παράγεται περισσότερη ενέργεια με μικρότερη επένδυση και - κυρίως - εξοικονομείται το μεγάλο κόστος κεφαλαίου μίας νέας και πλήρους μονάδας. Ιδιαίτερα στις συνθήκες μεγαλύτερου ανταγωνισμού και απελευθέρωσης της αγοράς στον τομέα της ενέργειας που θα ακολουθήσουν. Στα πλαίσια αυτά, η Ισπανία αύξησε κατά 4% (220 MWe) την ηλεκτροπαραγωγή πυρηνικού σταθμού της το διάστημα 1995-97 προσθέτοντας γεννήτριες ατμού και ατμοστρόβιλους. Το ίδιο και η Σουηδία (BWR), η οποία πρόσθεσε 600 MWe και οι ΗΠΑ [IEA Report, 1998-99].

7.7. Παράγοντες αβεβαιότητας στην εκτίμηση του κόστους

Ένας σημαντικός παράγοντας αβεβαιότητας στην εκτίμηση του κόστους κατά το παρελθόν, υπήρξε ο παράγοντας της έλλειψης εμπειρίας: στην σύνθετη και εξειδικευμένη αυτή τεχνολογία, δεν υπήρχε άλλος τρόπος από το learning by doing [Pool, 1997]. Όμως, ακόμα και σήμερα, που η πυρηνική τεχνολογία θεωρείται ώριμη τεχνολογία, στη διάρκεια ζωής του αντιδραστήρα (30-40 έτη) όλα είναι πιθανά και τίποτα δεν είναι σίγουρο. Η επένδυση στη γνώση και στην έρευνα εξακολουθεί και απορροφά σημαντικά κονδύλια.

2. Ένας δεύτερος πολύ σημαντικός παράγοντας υπήρξε η αλλαγή της κλίμακας (the scaling up): όπως σε κάθε τεχνολογία, έτσι και στη πυρηνική, ο σχεδιασμός μεγαλύτερων αντιδραστήρων έφερε διάφορα προβλήματα, το κόστος των οποίων δεν φάνηκε να αντισταθμίζεται από οικονομίες κλίμακας. Για παράδειγμα, στους μικρούς αντιδραστήρες (ισχύς <100 MW) δεν υπήρχε ανάγκη για εναλλακτικά (δευτερεύοντα) συστήματα: οι πυρήνες τους ήταν τόσο μικροί, που σε περίπτωση απώλειας ψυκτικού δεν θα μπορούσαν να απελευθερώσουν αρκετή θερμότητα ώστε να λιώσει το καύσιμο και να του επιτραπεί να διαφύγει από το περίβλημα. Επομένως, υπάρχει η ανάγκη για επιπλέον διατάξεις ασφαλείας και εναλλακτικών συστημάτων (back-up) με σκοπό την αποφυγή αστοχιών και ατυχήματος. Οι διατάξεις αυτές, οι οποίες προσθέτουν ένα παραπάνω στρώμα συνθετότητας σε ένα ήδη σύνθετο σύστημα - αυξάνουν το κόστος σχεδιασμού και κατασκευής, αλλά και λειτουργίας και συντήρησης.

3. Η έλλειψη προτυποποίησης (standardization): ενός σημαντικού από πλευράς κόστους τρόπου μείωσης του κόστους κατασκευής. Με την προτυποποίηση, τυποποιούνται μέρη του αντιδραστήρα και διαδικασίες, έτσι ώστε να μειώνεται το κόστος σχεδιασμού και κατασκευής τους [Kröger and Fischer, 2000, Pool, 1997]. Παράλληλα, αξιοποιείται και μεγιστοποιείται η υπάρχουσα γνώση και εμπειρία. Όμως, η πυρηνική τεχνολογία δεν είναι εύκολο να προτυποποιηθεί: π.χ. για τις ΗΠΑ, υπάρχει συνεχής βελτίωση και τεχνολογική εξέλιξη στον σχεδιασμό και κανένα σημείο δεν είναι ικανοποιητικό για να σταματήσει η εξέλιξη και να αρχίσει η προτυποποίηση²⁷.

4. Οι ιδιαίτερες απαιτήσεις των συμβατικών μερών του συστήματος: το τσιμέντο για τα κτιριακά, οι συγκολλήσεις των μερών των αγωγών κλπ, πρέπει να κατασκευασθούν με βάση αυστηρότερες προδιαγραφές από αυτές που ακολουθούν οι κατασκευαστές τους, γεγονός που αυξάνει το κατασκευαστικό κόστος, ιδιαίτερα σε σχέση με τις αυξανόμενες ρυθμιστικές και κανονιστικές απαιτήσεις ασφαλείας.

5. Οι αυξανόμενες απαιτήσεις για μείωση της επικινδυνότητας και αύξηση της αξιοπιστίας: οι συνεχείς αλλαγές στα πρότυπα και στους κανονισμούς ασφαλείας αυξάνουν το κόστος λειτουργίας και συντήρησης.

6. Άλλες αβεβαιότητες, που σχετίζονται με μη-τεχνικούς παράγοντες: πολιτικές εξελίξεις και ζητήματα διεθνούς πολιτικής, θέματα γεωπολιτικής σημασίας, επιχειρηματικές παράμετροι, η επίδραση της κοινής γνώμης, απρόβλεπτα γεγονότα, κλπ.

²⁷ Το παράδειγμα της Γαλλίας: η γαλλική πυρηνική βιομηχανία έχει προχωρήσει σε προτυποποίηση και έχει τυποήσει και το δίκτυο σχεδιασμού, κατασκευής και λειτουργίας και έχει ένα εκτεταμένο πρόγραμμα ενημέρωσης του κοινού.

8. Θέματα Κοινωνικής Αποδοχής

Η κοινωνική αποδοχή, μαζί με την ανταγωνιστικότητα και την ασφάλεια, συμπεριλαμβανομένης της ασφαλούς διαχείρισης των αποβλήτων (the backend of fuel cycle), αποτελούν τους πλέον κρίσιμους παράγοντες για τη βιωσιμότητα της πυρηνικής ενέργειας στο μέλλον [ElBaradei, 1999] και την αύξηση της εμπιστοσύνης εκ μέρους της κοινωνίας. Οι πολίτες ανησυχούν για την μεταφορά των ραδιενεργών υλικών στο έδαφος της χώρας τους, για την επικινδυνότητα των εγκαταστάσεων, για την δυνατότητα ή μη, εξάπλωσης των πυρηνικών όπλων, για τη διάθεση των ραδιενεργών αποβλήτων, κλπ. Πράσινες και αντιπυρηνικές ομάδες πολιτών δραστηριοποιούνται εναντίον της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας σε πολλές χώρες, ενώ την ίδια στιγμή, οι πυρηνικοί σταθμοί ισχύος ως σταθμοί βάσης, καλύπτουν σημαντικές ενεργειακές ανάγκες του πληθυσμού (Καναδάς, Βρετανία, Γαλλία, ΗΠΑ).

Οι περισσότερες κοινωνίες σήμερα, ακόμα κι αυτές που καταναλώνουν ηλεκτρισμό που παράγεται από πυρηνικούς σταθμούς ισχύος, αντιμετωπίζουν είτε με επιφυλακτικότητα, είτε με πλήρη άρνηση την πυρηνική ενέργεια. Η στάση αυτή, εκτός των άλλων σχετίζεται και με την πρόοδο των απόψεων για την προστασία του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας, τουλάχιστον στις ανεπτυγμένες βιομηχανικά χώρες. Στην Ιαπωνία για παράδειγμα, η οποία είναι μία χώρα με μεγάλες ενεργειακές ανάγκες που δεν διαθέτει συμβατικά καύσιμα – και η οποία για ένα σύνολο γεωπολιτικών και οικονομικών αιτιών έχει επιλέξει την πυρηνική ενέργεια ως λύση – πρόσφατα δημοψηφίσματα έδειξαν ότι ένα ποσοστό 70% του πληθυσμού πιστεύει μεν ότι, η χρήση της πυρηνικής ενέργειας είναι αναπόφευκτη για τη χώρα, αλλά από την άλλη, ένα ίδιο ποσοστό του πληθυσμού δήλωσε ότι ανησυχεί για την πυρηνική ασφάλεια και για την διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων [Matsuura, 1999]. Και αυτό, πριν το ατύχημα στην εγκατάσταση επεξεργασίας στο Tokaimura (30-9-1999, βλ. Παράρτημα). Είναι επίσης γνωστό ότι, κάθε εταιρεία ηλεκτροπαραγωγής που αναλαμβάνει ένα καινούργιο πυρηνικό σταθμό δυσκολεύεται ιδιαίτερα να βρει τοποθεσία για την εγκατάστασή του. Οι εταιρείες στα πλαίσια αυτά, κάνουν τα πάντα για να επιτύχουν την αποδοχή του πληθυσμού [Matsuura, 1999].

Ιστορικά, οι κοινωνίες της δεκαετίας του '70-'80 διαμόρφωσαν ένα είδος «πυρηνικής φοβίας». Αυτή η στάση της απόρριψης οφειλόταν κατά κύριο λόγο στην πρώτη εφαρμογή της ατομικής ενέργειας - τον βομβαρδισμό της Χιροσίμα και του Ναγκασάκι - που σηματοδότησε το δραματικό τέλος του δεύτερου παγκόσμιου πολέμου και την αρχή μίας νέας, «πυρηνικής» εποχής. Στα ιστορικά εκείνα πλαίσια, η

πυρηνική ενέργεια συνδέθηκε με την παραγωγή πυρηνικών όπλων. Στη συνέχεια, η πρώτη σημαντική στροφή στη στάση του κοινού έγινε μετά το ατύχημα στο Three Mile Island (ΗΠΑ) τον Μάρτιο του 1979 (βλ. Παράρτημα). Τότε, η αντίδραση του κοινού στην Ιρλανδία ακύρωσε την κατασκευή ενός σταθμού στο Carsnore (County Wexford), ενώ ταυτόχρονα, στη Σουηδία, τα πολιτικά κόμματα πρότειναν δημοψήφισμα, το αποτέλεσμα του οποίου οδήγησε την κυβέρνηση στην απόφαση για σταδιακή κατάργηση της πυρηνικής ενέργειας έως το 2010. Το ατύχημα στο Chernobyl (Ουκρανία) τον Απρίλιο του 1986, οδήγησε με τη σειρά του σε κατακόρυφη πτώση τα ποσοστά της αποδοχής της πυρηνικής ενέργειας. Στην Ιταλία διενεργήθηκε τότε δημοψήφισμα, με το οποίο καταργήθηκε κάθε πυρηνικής δραστηριότητας στη χώρα. Στη Γαλλία, οι ετήσιες δημοσκοπήσεις δείχνουν μικρή αύξηση της κοινωνικής αποδοχής γενικότερα όσον αφορά την πυρηνική ενέργεια, αλλά η κοινή γνώμη είναι πολύ επιφυλακτική σχετικά με την διάθεση των ραδιενεργών αποβλήτων, ενώ πάνω από τα 2/3 των ερωτηθέντων πίστευαν ότι δεν ήταν καλά ενημερωμένοι για τα πυρηνικά θέματα [Eur. Comm.COM(98)799, 1999].

Τα δημοψηφίσματα είναι ο συνήθης τρόπος καταγραφής της άποψης του κοινού, αλλά η καταγραφή της πραγματικής άποψης του κοινού είναι ένα σύνθετο πρόβλημα. Είναι γεγονός ότι, ο τρόπος που διατυπώνεται η ερώτηση σε αυτά, έχει μεγάλη σημασία. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι, άλλα αποτελέσματα λαμβάνονται εάν το κοινό ρωτηθεί εάν υποστηρίζει την πυρηνική ενέργεια και άλλα στο ερώτημα εάν είναι υπέρ της (do you support nuclear energy?" or "do you favour nuclear energy?") [Blee, 2000]. Εκτός αυτού, η κοινή γνώμη, ακόμα κι όταν είναι καλά ενημερωμένη (συγκεκριμένες κοινωνικές ομάδες) δεν δείχνει το ίδιο επίπεδο εμπιστοσύνης έναντι τεχνικών ασφαλείας που μπορεί να υφίστανται ή έναντι της τεχνολογικής προόδου που μπορεί να έχει συντελεστεί, σε σύγκριση με τους ειδικούς και εμπειρογνώμονες [Choi et al, 2000, IAEA TecDoc909, 1996]. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας, ο οποίος είναι υψηλής τεχνολογίας και ενέχει μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας.

Από την άλλη, τα ατυχήματα που έχουν συμβεί έχουν δείξει στο κοινό ότι, η φύση και οι επιπτώσεις πυρηνικών ατυχημάτων είναι τρομακτικές. Η καταστροφή του Chernobyl (Ουκρανία, 1986) οδήγησε στη συνειδητοποίηση του τι μπορεί να σημαίνει «ατύχημα» σε παρόμοιες μονάδες και τι κλίμακας επιπτώσεις αναμένονται, όταν υπήρξαν δεκάδες άμεσοι θάνατοι και εκατοντάδες έμμεσοι.

Στα πλαίσια αυτά, για την πυρηνική βιομηχανία υπάρχουν κάποια θέματα-κλειδιά, τα οποία θεωρούνται βασικά για την διασφάλιση της ευρύτερης δυνατόν κοινωνικής αποδοχής:

- το θέμα της ασφαλούς διαχείρισης των υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων
- το θέμα της ασφαλούς μεταφοράς πυρηνικών υλικών και
- το θέμα της ασφάλειας των πυρηνικών εγκαταστάσεων.

Πολλοί εμπειρογνώμονες πιστεύουν σήμερα ότι, μόνο εάν δοθεί ικανοποιητική απάντηση στο πρόβλημα της ασφαλούς μακρόχρονης διάθεσης των υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων, θα μπορέσει η πυρηνική ενέργεια να γίνει κοινωνικά αποδεκτή και ενδεχομένως να αποτελέσει μέρος ενός προγράμματος παραγωγής ενέργειας στα πλαίσια της βιώσιμης ανάπτυξης, όπως αυτή ορίζεται σήμερα στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Στην κοινωνική απόρριψη συνέβαλαν, αλλά και συμβάλλουν επίσης [Beghin, 1997]:

- Οι σοβαρές δυσκολίες που υπάρχουν στην ασφαλή διάθεση των αποβλήτων. Ήδη, χώρες που παράγουν ηλεκτρισμό από πυρηνική ενέργεια αντιμετωπίζουν προβλήματα με την διάθεση των αποβλήτων των μονάδων τους (εύρεση γης για τελική εναπόθεση, κόστος, έλλειψη αποδοχής σε τοπικό και εθνικό επίπεδο, κλπ).
- Η αυξανόμενη απήχηση της κουλτούρας, αλλά και της τεχνολογίας της προστασίας του περιβάλλοντος.
- Η αυξανόμενη απήχηση και ευαισθησία της διεθνούς κοινότητας σε θέματα υγείας.
- Η έλλειψη εμπιστοσύνης των πολιτών έναντι των πολιτικών και κρατικών ή διακρατικών θεσμών.
- Η έλλειψη γνώσης του κόσμου σχετικά με μία τόσο σύνθετη τεχνολογία και η έλλειψη ενημέρωσης και πληροφόρησης.
- Η καθ' εαυτού φύση της ραδιενέργειας και των ιοντιζουσών ακτινοβολιών.

8.1. Η αντιληπτή ασφάλεια και το αντιληπτό όφελος (Perceived risk and benefit – Perceived Safety)

Η σχέση του αντιληπτού κινδύνου ως προς το όφελος είναι ένας μετρήσιμος παράγοντας-κλειδί για την εκτίμηση της αποδοχής του κοινού. Ο κίνδυνος από τους πυρηνικούς σταθμούς ισχύος γίνεται συνήθως αντιληπτός στο κοινό σαν συσχέτιση με ατυχήματα που έχουν συμβεί και ανησυχία για ατυχήματα που ίσως συμβούν και

αφορά κίνδυνο είτε για θάνατο είτε για ασθένεια από ραδιενέργεια, είτε για μόλυνση από ραδιενέργεια (Perceived environmental safety) [Choi et al, 2000]. Ο κίνδυνος αυτός γίνεται επίσης αντιληπτός με διαφορετικό τρόπο σε τοπικό επίπεδο, εάν για παράδειγμα ερωτηθούν οι πολίτες εάν συμφωνούν να κατασκευαστεί ένας νέος σταθμός στην περιοχή τους ή γενικότερα στην χώρα τους (σε αυτήν τη διαδικασία υπαισέρχεται και το σύνδρομο NIMBY) ή για το πώς αντιλαμβάνεται το κοινό τον κίνδυνο από ενδεχόμενα πυρηνικά ατυχήματα σε γειτονικές χώρες [Eränen, 1997].

Το ενδεχόμενο όφελος μπορεί να οριστεί ως αξιοπιστία παροχής ηλεκτρισμού, οικονομικότητα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, απουσία εκπομπών CO₂ και αρνητική συνεισφορά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

8.2. Συμμόρφωση των πυρηνικών σταθμών με τις κανονιστικές απαιτήσεις και το θεσμικό πλαίσιο - Διαφάνεια

Το θεσμικό και κανονιστικό πλαίσιο που διέπει την κατασκευή και λειτουργία των πυρηνικών σταθμών ισχύος περιέχει μία σειρά μέτρων και δικτύων για τον αυστηρό έλεγχο, την πλήρη καταγραφή και παρακολούθηση της λειτουργίας των αντιδραστήρων ισχύος, της χρήσης σχάσιμων και άλλων πυρηνικών υλικών, της διαχείρισης των αποβλήτων, κλπ. Η τήρηση των διεθνών αυτών κανόνων και η συμμετοχή στα προγράμματα που οργανώνουν οι διεθνείς εξουσιοδοτημένοι οργανισμοί αποτελούν εγγυήσεις για την ασφαλή και σύννομη λειτουργία και διαχείριση του όλου κύκλου ζωής των αντιδραστήρων ισχύος και κατά συνέπεια, δημιουργεί στο κοινό την αίσθηση της ασφάλειας.

Με σκοπό την διαφάνεια και την ενημέρωση του κοινού, η NEA/OECD και η IAEA ως οργανισμοί-ομπρέλες, έχουν οργανώσει τη συλλογή πληροφοριών και στοιχείων για την ασφάλεια και την αξιοπιστία των σε λειτουργία πυρηνικών σταθμών σε ειδικές βάσεις δεδομένων, οι οποίες χρησιμεύουν και σε μελέτες πιθανότητας, αλλά και στην ανταλλαγή εμπειρίας, εκτός από τον ρόλο τους στον έλεγχο και στην παρακολούθηση [IRS/Incident Reporting System, 1996-1999]²⁸. Υπό ανάπτυξη βρίσκονται και άλλες ειδικότερες βάσεις δεδομένων σχετικά με την ασφάλεια, με ανάλυση συμβάντων που αναφέρονται, κλπ. Ευρύτερες δημοσιεύσεις και περιοδικές ανακοινώσεις γίνονται επίσης, με παρόμοια στοιχεία κατανοητά σε μη ειδικό κοινό έτσι, ώστε να αντιμετωπίζεται το θέμα της αποδοχής και της καχυποψίας

των πολιτών έναντι της πυρηνικής ενέργειας. Στα πλαίσια αυτά, οι διαχειριστές της πυρηνικής ενέργειας παρέχουν αναλυτικές πληροφορίες και στοιχεία με εκδόσεις τους, με συνεχή ενημέρωση ιστοσελίδων στο Διαδίκτυο (EDF, BNFL, κλπ), με υποδοχή επισκεπτών στους πυρηνικούς σταθμούς σε οργανωμένες επισκέψεις/ξεναγήσεις, κλπ.

Η ενημέρωση του κοινού αποτελεί κατ' ένα μέρος, βασική υποχρέωση των χρηστών και των διαχειριστών των πυρηνικών σταθμών ισχύος, η οποία μπορεί να απορρέει και από το εθνικό θεσμικό και κανονιστικό πλαίσιο. Εκτός αυτού όμως, φαίνεται πως η συστηματική ενημέρωση του κοινού από τους διαχειριστές της πυρηνικής ενέργειας με δημοσίευση υλικών και φυλλαδίων, καθώς και οι οργανωμένες επισκέψεις κοινού στους αντιδραστήρες ισχύος αποτελούν τους αποδοτικότερους τρόπους για να αυξηθεί η κοινωνική αποδοχή [Choi et al, 2000, ElBaradei, 1999].

8.3. Άλλοι παράγοντες

8.3.1 Μεταφορά ραδιενεργών υλικών (Nuclear Material Transportation)

Η μεταφορά ραδιενεργών υλικών δια μέσου κατοικημένων περιοχών ενέχει σοβαρούς κινδύνους για μεγάλο ατύχημα και είναι από τους βασικούς λόγους κοινωνικής ανησυχίας και απόρριψης της πυρηνικής ενέργειας, ιδιαίτερα όσον αφορά σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπως η Ευρώπη.

8.3.2. Μη εξάπλωση πυρηνικών όπλων (Non-Proliferation)

Τα πυρηνικά υλικά και ειδικά το πλουτόνιο Pu-239, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε παραγωγή πυρηνικών όπλων - υπόκεινται σε συνεχείς και αυστηρούς ελέγχους ως προς την τεχνοεφοδιαστική υποστήριξη των σταθμών ισχύος (logistics management), με σκοπό την διασφάλιση ότι δεν θα χρησιμοποιηθούν για άλλους σκοπούς (πυρηνικές διασφαλίσεις). Για τον έλεγχο και την μη εξάπλωση των πυρηνικών όπλων έχουν υπογραφεί ειδικές διεθνείς συμφωνίες και συμβάσεις και η ΙΑΕΑ, όπως και η Euratom, διατηρούν αυστηρό σύστημα πυρηνικών διασφαλίσεων (safeguards), που αφορά σε όλες τις χώρες που τηρούν πυρηνικά προγράμματα συμπεριλαμβανομένων και των εμπορικών αντιδραστήρων ισχύος, τα οποία επιθεωρούνται και ελέγχονται συστηματικά.

²⁸ Το IRS περιέχει πάνω από 2800 αναφορές των συμμετεχόντων χωρών, εδώ και τουλάχιστον 20 χρόνια (31 χώρες).

Το πλουτόνιο που περιέχεται στο εξαντλημένο καύσιμο [Pu-239] μετά τα πολλά χρόνια ακτινοβόλησης στους αντιδραστήρες, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή πυρηνικών όπλων γιατί περιέχει σημαντικές ποσότητες Pu-240 (40%), το οποίο έχει φυσικές ιδιότητες που το καθιστούν ακατάλληλο. Το WPu κατασκευάζεται συνήθως σε ειδικούς αντιδραστήρες και υπό ειδικές συνθήκες, ώστε να μην παράγεται παρά ένα μικρό ποσοστό Pu-240 [UI Core Issues, 1995].

Παρότι, το πλουτόνιο που παράγεται στους εμπορικούς αντιδραστήρες ισχύος δεν μπορεί κατά κανόνα να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή πυρηνικών όπλων, το WPu μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν καύσιμο στους αντιδραστήρες ισχύος (MHTGRs, LMFBRs). Μεγάλες ποσότητες ηλεκτρισμού μπορούν κατά συνέπεια να παραχθούν από αυτό το πλουτόνιο, εάν καταστεί δυνατόν να παύσει η παραγωγή όπλων, ενώ μία τέτοια χρήση του πλουτονίου θα το κάνει ακατάλληλο για κάθε επαναχρησιμοποίησή του σε πυρηνικά όπλα [UI Core Issues, 1995].

9. Ευρύτερες εφαρμογές

Οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες έχουν σήμερα πολλές και διάφορες χρήσεις και εφαρμογές, στην ιατρική, στην βιομηχανία, στην αγροτική τεχνολογία, κλπ. Ιδιαίτερα η χρήση ιχνηθετών είναι ευρέως διαδεδομένη στην φυσική, τη χημεία, τη βιομηχανία, τις επιστήμες του περιβάλλοντος, την ιατρική, κ.ά.

Λέξει ενδεικτικά να αναφερθούν:

- Η χρήση ακτινοβολιών για επεξεργασία επικινδύνων αποβλήτων
- Οι εφαρμογές στην Πυρηνική Ιατρική (Nuclear Medicine): Στους αντιδραστήρες (όπως και σε κυκλοτρόνια) παράγονται πολλά βραχύβια ραδιονουκλίδια. Τα ραδιονουκλίδια αυτά, αποτελούν τη βάση, είτε για νέα, πολύ εξειδικευμένα ραδιοφάρμακα για μελέτες εγκεφάλου, καρδιάς κλπ, που χρησιμοποιούνται για διάγνωση ή/και για θεραπεία (τεχνητίο, ρήνιο, σαμάριο, ιώδιο κλπ), είτε για την παρασκευή ραδιοανοσοαντιδραστηρίων (τεχνολογίες RIA, IRMA) για διάγνωση *in vitro*.
- Οι εφαρμογές στην χημεία, στη θεωρητική φυσική, στη μελέτη υλικών, κ.ά.

9.1. Δυνατότητες και Προοπτικές

Μακροπρόθεσμα, ιδιαίτερη σημασία αποκτούν και άλλες χρήσεις των αντιδραστήρων σε συνδυασμό με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως [OECD/NEA Study, 1999]:

- η παραγωγή θερμότητας για θέρμανση
- η αφαλάτωση θαλασσινού νερού για παραγωγή ποσίμου
- η παραγωγή υδρογόνου, ως καύσιμου²⁹.

Σημαντική έρευνα και ανάπτυξη πραγματοποιείται ήδη, με σκοπό να εφαρμοστούν τέτοιες τεχνολογίες σε μεγάλη κλίμακα και να μελετηθεί η οικονομικότητά τους έναντι άλλων, συμβατικών και ανανεώσιμων μορφών ενέργειας. Οι θερμοκρασίες σε τέτοιες εφαρμογές ποικίλουν πολύ: από 80 βαθμούς Celsius για ζεστό νερό θέρμανσης για νοικοκυριά, μέχρι 800 βαθμούς Celsius που απαιτούνται σε μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού.

Μελετάται επίσης, η αξιοποίηση του δυναμικού της πυρηνικής ενέργειας για την συμπαραγωγή ηλεκτρισμού, ατμού και θερμότητας για οικιακές και βιομηχανικές ενεργειακές ανάγκες (water-cooled reactors). Τέτοια εμπειρία έχουν ήδη μερικές χώρες, όπως η Κίνα, η Ρωσία, ο Καναδάς, η Τσεχία και η Σλοβακία, η Γερμανία και η Ελβετία [Kupitz, 1995].

9.2. Ο ελληνικός ερευνητικός αντιδραστήρας

Στην Ελλάδα λειτουργεί ο μοναδικός στη χώρα ερευνητικός πυρηνικός αντιδραστήρας στο Ινστιτούτο Πυρηνικής Τεχνολογίας και Ακτινοπροστασίας του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος». Ο Ερευνητικός Αντιδραστήρας λειτουργεί με μέγιστη θερμική ισχύ 5 MW και παράγει υψηλή νετρονική ροή για εξυπηρέτηση ερευνητικών και αναπτυξιακών προγραμμάτων του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» και άλλων ερευνητικών ιδρυμάτων, οργανισμών και ΑΕΙ της χώρας σε διάφορους τομείς όπως οι παρακάτω:

²⁹ Applications of nuclear generated heat in the chemical industry (IAEA, Annual reports, 1994-1999)

(Possibility of applying heat at temperatures of 550 to 950 degrees Celsius from high temperature gas cooled reactors directly to endothermic chemical processes – the case of the Japanese High temperature Engineering Test Reactor, HTTR)-Processes: Hydrogen or/and methanol production using methods such as steam reforming, thermochemical water splitting and high temperature electrolysis).

- πολυστοιχειακή ανάλυση δειγμάτων με νετρονική ενεργοποίηση
- επίδραση ακτινοβολιών στην ύλη
- μετρήσεις και υπολογισμούς Φυσικής Αντιδραστήρα και Ακτινοπροστασίας
- παραγωγή ραδιοϊσοτόπων
- αποστείρωσεις ιστικών μοσχευμάτων και άλλων υλικών σε ισχυρό πεδίο ακτινοβολίας γ
- ανάπτυξη πυρηνικών αναλυτικών τεχνικών για τη μελέτη της σύστασης του ανθρώπινου σώματος
- εκπαίδευση σπουδαστών ΑΕΙ

Το σύστημα ελέγχου και ασφάλειας του Αντιδραστήρα έχει αναβαθμιστεί το 1997, με την κατασκευή νέου συστήματος συγκράτησης των ράβδων ελέγχου εξασφαλίζοντας έτσι, απρόσκοπτη λειτουργία. Έχει πραγματοποιηθεί αποστολή μεγάλου αριθμού εξαντλημένων στοιχείων σχάσιμου στις ΗΠΑ σε εφαρμογή της Σύμβασης μεταξύ ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» και του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ, ενώ υπάρχει αρκετό καύσιμο για πολλά χρόνια λειτουργίας. Τέλος έχει εγκατασταθεί σύγχρονο περιθλασίμετρο νετρονίων.

Στα πλαίσια αξιοποίησης του αντιδραστήρα [ΕΚΕΦΕ “Δ”/ΠΠΤ-Α, 1999]:

- συντηρείται ελληνική τεχνογνωσία στην τεχνολογία πυρηνικών αντιδραστήρων από το ερευνητικό προσωπικό της χώρας, αλλά και της ευρύτερης περιοχής των Βαλκανίων και της Ευρώπης
- παρέχονται υπηρεσίες και εφαρμογές (παραγωγή ραδιοϊσοτόπων-ραδιοφαρμάκων, αποστείρωση βιολογικών ιστών, στοιχειακές αναλύσεις με νετρονική ενεργοποίηση) για βιομηχανικές και άλλες εφαρμογές
- υπάρχει ο μοναδικός στη χώρα ολοκληρωμένος τομέας ακτινοπροστασίας, του οποίου η ύπαρξη πρέπει να θεωρείται ζωτικής σημασίας για τη χώρα, δεδομένης της ύπαρξης μεγάλου πλήθους εφαρμογών των ιοντιζουσών ακτινοβολιών στη βιομηχανία και στην ιατρική. Η ζωτική σημασία της ύπαρξης ολοκληρωμένης τεχνογνωσίας στην Πυρηνική Τεχνολογία και Ακτινοπροστασία, κατέστη προφανής κατά την αντιμετώπιση των επιπτώσεων του ατυχήματος στο Chernobyl
- λειτουργεί εργαστήριο διαχείρισης ραδιενεργών καταλοίπων
- λειτουργεί το μόνο ολοκληρωμένο στη χώρα Εργαστήριο Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος (ΕΡΠ) με σχετικό δίκτυο δειγματοληψιών και ελέγχου που καλύπτει όλη τη χώρα

- υποστηρίζεται επιστημονικά και τεχνικά, μεγάλο μέρος των σκοπών της ΕΕΑΕ.
- δραστηριοποιείται το επιστημονικό δυναμικό της χώρας στον τομέα της πυρηνικής σύντηξης με κύρια χρηματοδότηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση
- υλοποιούνται μελέτες αντοχής υλικών (ακτινοβόληση των υλικών με νετρόνια στον αντιδραστήρα)
- λειτουργεί το εργαστήριο Υγιοφυσικής και Περιβαλλοντικής Υγιεινής, το μοναδικό στη χώρα με τεχνογνωσία για αξιολόγηση και εκτίμηση επιπτώσεων υπερεκθέσεων σε ιοντίζοντα ακτινοβολισμό με μεθόδους βιολογικής δοσιμετρίας και ένα από τα επιλεγμένα από την ΙΑΕΑ για την προτυποποίηση των μεθόδων αυτών.

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

1. Εισαγωγή

Η λήψη βέλτιστων αποφάσεων με πολλαπλά κριτήρια είναι συνήθως για τον λήπτη της απόφασης ένα σύνθετο πρόβλημα που απαιτεί ποσοτικοποίηση και μοντελοποίηση για την επίλυσή του. Η πολυκριτηριακή ανάλυση (MultiCriteria Decision Making, MCDM) είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την αξιολόγηση και την επιλογή των βέλτιστων λύσεων σε προβλήματα με στοχαστικό ή ντετερμινιστικό χαρακτήρα.

Έχουν προταθεί και αναπτυχθεί διάφορες προσεγγίσεις και μεθοδολογίες πολυκριτηριακής ανάλυσης, οι οποίες παρουσιάζουν ικανοποιητικά ή όχι αποτελέσματα, ανάλογα με το συγκεκριμένο κάθε φορά πρόβλημα προς λύση. Τα δεδομένα του προβλήματος μπορεί να είναι ποσοτικά ή/και ποιοτικά. Στην πρώτη περίπτωση η αξιολόγηση είναι προφανώς απλούστερη, ενώ στη δεύτερη περίπτωση απαιτούνται ποιοτικές εκτιμήσεις με βάση μία δεδομένη προτίμηση εκ μέρους του λήπτη της απόφασης, οι οποίες πρέπει στη συνέχεια να εκφραστούν με κάποιο ποσοτικό τρόπο. Στην περίπτωση αυτή, ο λήπτης της απόφασης απαιτείται να έχει καλά μελετήσει το πρόβλημα, αλλά και τη μέθοδο που θα εφαρμόσει για την επίλυσή του.

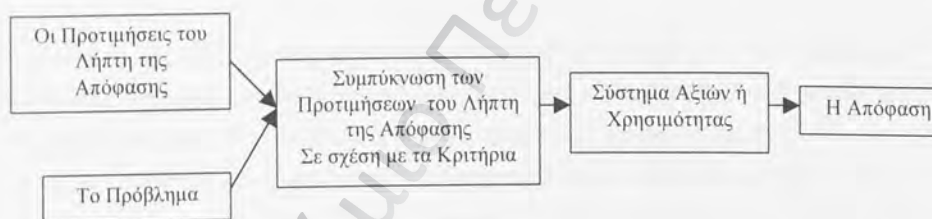
Η επιλογή της πλέον κατάλληλης μεθοδολογίας για την επίλυση προβλημάτων και την αξιολόγηση των βέλτιστων λύσεων βασίζεται στην ιεραρχική αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων και στην κατάταξή τους σε σειρά προτίμησης (optimal ranking). Στην επιλογή των λύσεων και στην ιεράρχησή τους, πρέπει να ληφθούν υπόψη όλοι οι εμπλεκόμενοι στο πρόβλημα παράμετροι με βάση την πραγματική ζωή (κοινωνικοοικονομικοί, περιβαλλοντικοί, τεχνολογικοί, οικονομικοί, κλπ), οι οποίοι πολλές φορές είναι αντικρουόμενοι και αντιφατικοί, ενώ η μεθοδολογία που θα εφαρμοσθεί, πρέπει να είναι ικανοποιητικά αξιόπιστη σύμφωνα με την πολυπλοκότητα του προβλήματος.

Πρακτικά, διαφορετικές μεθοδολογίες εφαρμοζόμενες στο ίδιο πρόβλημα μπορούν να δώσουν διαφορετικές βέλτιστες λύσεις [Al-Shemmeri et al, 1997]. Για την επιλογή και αξιολόγηση της κατάλληλης μεθοδολογίας (decision aid models) υπάρχουν επίσης, διάφορες προσεγγίσεις και τεχνικές [Guitouni and Martel, 1998].

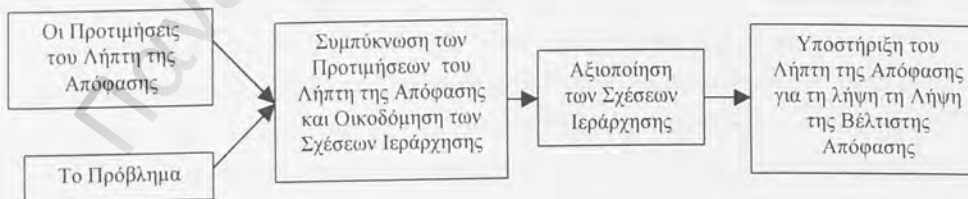
Τα συστήματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης περιλαμβάνουν τις εξής κύριες θεωρητικές προσεγγίσεις [Siskos and Spyridakos, 1999]:

Την αμερικάνικη σχολή του **Συστήματος Αξιών ή Χρησιμότητας** (Value System) [Keeny and Raiffa, 1986], η οποία βασίζεται στην κατασκευή ενός συστήματος αξιών που συμπεκνώνει τις προτιμήσεις του λήπτη της απόφασης, όσον αφορά σε κριτήρια που βασίζονται σε αυστηρές παραδοχές και στη συνέχεια, το εκτιμώμενο σύστημα αξιών ποσοτικοποιείται με σκοπό τη λήψη της τελικής απόφασης (Σχήμα 14 – παράγρ. 3.4, 3.5), και

Τη γαλλική σχολή της **ιεράρχησης των λύσεων** [Mareschal, 1986], η οποία βασίζεται στην οικοδόμηση μίας σχέσης (outranking relation) που αποτελεί εργαλείο του λήπτη της απόφασης για την επιλογή της βέλτιστης λύσης (Σχήμα 15).



Σχήμα 14: Σύστημα Αξιών ή Χρησιμότητας (Value or Utility System) [Siskos and Spyridakos, 1999]



Σχήμα 15: Η προσέγγιση της ιεράρχησης των λύσεων (The Outranking relation Approach) [Siskos and. Spyridakos, 1999]

Οι παραπάνω, αλλά και άλλες προσεγγίσεις που έχουν αναπτυχθεί, βασίζονται σε μεθοδολογίες και υπολογιστικά προγράμματα με διάφορες δομές και σχεδιασμούς σχετικά με την επεξεργασία των δεδομένων (input). Από τις τεχνικές αυτές, οι πιο διαδεδομένες είναι οι παρακάτω [Guitouni and Martel, 1998]: SMART (simple multi-attribute rating technique), MAUT (multiattribute utility theory), AHP (analytical hierarchy process), fuzzy weighted sum, κλπ, καθώς και οι τεχνικές ιεράρχησης (outranking); ELECTRE, PROMETHEE, ORESTE, REGIME, κλπ.

Οι τεχνικές αυτές – ιδίως οι τεχνικές ιεράρχησης των λύσεων, έχουν εφαρμοστεί σε πολλά και διαφορετικά προβλήματα πολυκριτηριακής επιλογής [Salminen et al, 1998, Al-Rashdan et al, 1999, Raju and Pillai, 1999, Petrās, 1997, Güngör and Arıcan, 2000].

2. Το πρόβλημα

Στα πλαίσια της επιλογής της κατάλληλης ενεργειακής τεχνολογίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αρκετές εργασίες έχουν μελετήσει και την εναλλακτική λύση της πυρηνικής ενέργειας. Παρόλα αυτά, η επιλογή όμως τύπου αντιδραστήρα ισχύος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα αυτόνομο σύνθετο και πολύπλοκο πρόβλημα στον ενεργειακό σχεδιασμό, το οποίο βαρύνει ιδιαίτερα όσον αφορά βασικές παραμέτρους της αξιολόγησης, όπως η αξιοπιστία παροχής ενέργειας, η ασφάλεια και η οικονομικότητα. Στην πράξη, η επιλογή μπορεί να γίνει μονοκριτηριακά, στη βάση δηλαδή ενός και μόνου κριτηρίου, είτε αυτό είναι η μείωση του κόστους επένδυσης, είτε η εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία, είτε κάποιοι οικονομικοί ή/και γεωπολιτικοί παράγοντες.

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να μελετήσει με ρεαλιστικότητα το πρόβλημα της πολυκριτηριακής επιλογής του βέλτιστου τύπου αντιδραστήρα ισχύος για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ευρεία προσέγγιση και με την εφαρμογή ενός ενδεικτικού μοντέλου στη βάση της εργασίας του B. Mareschal (1986). Η μελέτη ευαισθησίας που πραγματοποιείται καλείται επίσης να καταδείξει πώς, μικρές αποκλίσεις της βαθμολογίας μπορούν να επηρεάσουν τη βέλτιστη λύση στις περιπτώσεις α) αποκλίσεων της βαθμολογίας μεταξύ κρίσιμων κριτηρίων και β) αποκλίσεων της βαθμολογίας του βαρύτερου κριτηρίου λόγω αβεβαιότητας της εκτίμησης.

3. Η μεθοδολογία

Το παραπάνω πρόβλημα εξετάζεται με τη μεθοδολογία PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation), όπως αναλύθηκε από τον B. Mareschal (1986) και αναπτύχθηκε από τους Brans et al (1986), με κριτήρια:

- Την σταθερότητα των αποτελεσμάτων (η επίδραση μικρών αποκλίσεων των τιμών κρίσιμων παραμέτρων στην τελική βέλτιστης επιλογή).
- Τον βαθμό ευκολίας και απλότητας της τεχνικής.
- Τον τρόπο ερμηνείας των παραμέτρων που συμμετέχουν στο πρόβλημα. (ποσοτικές ή ποιοτικές).

Έστω ένα πρόβλημα στο οποίο θεωρούμε ένα μεμονωμένο λήπτη απόφασης, ο οποίος καλείται να αξιολογήσει (βαθμολογήσει) ένα πεπερασμένο σύνολο εναλλακτικών λύσεων $K = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ως προς k κριτήρια $f_i, i=1, \dots, k$, τα οποία θεωρείται ότι πρέπει να μεγιστοποιηθούν (όσο μεγαλύτερη είναι η βαθμολογία, τόσο καλύτερη η λύση) στο παρακάτω πρόβλημα:

$$\text{Max } \{f_1(a), \dots, f_k(a) \mid a \in K\} \quad (1)$$

Κάθε κριτήριο είναι απεικόνιση του συνόλου K στο σύνολο των πραγματικών αριθμών \mathbb{R} ή σε οποιοδήποτε άλλο διατεταγμένο σύνολο (για κάθε εναλλακτική λύση a_j που ανήκει στο K , η τιμή $f_i(a_j) = X_{ij}$, που είναι η βαθμολογία της ως προς το κριτήριο f_i , είναι πραγματικός αριθμός ή παίρνει τιμές από οποιοδήποτε άλλο διατεταγμένο σύνολο). Κάθε εναλλακτική λύση a_j μπορεί να περιγραφεί πλήρως από ένα διάνυσμα του k -διάστατου χώρου.

Εάν $e_j = f_j(a_j)$, όπου e_j είναι η αξιολόγηση (βαθμολογηση) της λύσης a_j για το κριτήριο f_j και εάν E είναι η μήτρα των αξιολογήσεων e_{ij} έχουμε $E = (e_{ij}) \in \mathbb{R}^{n \times k}$ (2)

Η μεθοδολογία PROMETHEE, η οποία ανήκει στην οικογένεια των μεθόδων ιεράρχησης λύσεων, περιλαμβάνει τις εξής φάσεις (Brans, Vincke and Mareschal, 1986):

- Την οικοδόμηση μιάς σχέσης ιεράρχησης (outranking relation) των λύσεων στο K , με βάση τη σύγκριση των λύσεων ανά δύο ως προς κάθε κριτήριο ξεχωριστά και με τη βοήθεια έξι τύπων γενικευμένων κριτηρίων που μπορούν να ορίσουν την προτίμηση ή/και την αδιαφορία του λήπτη της απόφασης.
- Την αξιοποίηση της σχέσης αυτής για να επιλυθεί το πολυκριτηριακό πρόβλημα της σχέσης (I).

Στην πρώτη φάση, λαμβάνεται μιά σχέση ποσοτικοποίησης της ιεράρχησης (valued outranking relation) με βάση μία γενίκευση της έννοιας του κριτηρίου (συνάρτηση $H(d_{ij})$ -generalized criterion) και την απόδοση σχετικών βαρών στα κριτήρια, με βάση τη σημασία τους για τον λήπτη της απόφασης: οι εναλλακτικές λύσεις συγκρίνονται ανά ζεύγος για κάθε κριτήριο ξεχωριστά χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση προτίμησης $P(x_{ij})$, $P: K \times K \rightarrow [0, 1]$ και το αριθμητικό αποτέλεσμα της σύγκρισης ορίζεται ως δείκτης προτίμησης $\Pi(a, \beta)$, ο οποίος δείχνει την προτίμηση της λύσης a ως προς την λύση β για όλα τα κριτήρια (preference index). Στη συνέχεια, λαμβάνεται ένα γράφημα της ιεράρχησης (valued outranking graph), το οποίο αναπαριστά τις προτιμήσεις του λήπτη της απόφασης.

Στη δεύτερη φάση, η σχέση ποσοτικοποίησης της ιεράρχησης (valued outranking relation) αξιοποιείται ως εξής: αθροίζονται οι δείκτες προτίμησης $\Pi(a, i)$, που δείχνουν την προτίμηση της λύσης a ως προς όλες τις υπόλοιπες λύσεις και υπολογίζεται για κάθε εναλλακτική λύση a_i μία ροή εξόδου $\varphi^+(a_i)$ (leaving flow), η οποία δείχνει στην ουσία πόσο καλή είναι η λύση a . Η λύση με τη μεγαλύτερη αριθμητικά ροή εξόδου είναι η ανώτερη.

Ως ροή εισόδου $\varphi^-(a)$ (entering flow) στο γράφημα της κατάταξης (valued outranking graph), ορίζεται το άθροισμα των δεικτών προτίμησης $\Pi(i, a)$, που δείχνουν την προτίμηση όλων των υπόλοιπων λύσεων σε σύγκριση με την λύση a . Η ροή εισόδου δείχνει πόσο κατώτερη είναι η λύση a . Η λύση με τη μικρότερη αριθμητικά ροή εξόδου είναι η ανώτερη.

Μπορεί να υπολογισθεί στη συνέχεια από τον λήπτη της απόφασης, είτε μία **Μερική Ταξινόμηση** (partial preorder, PROMETHEE I), είτε μία **Απόλυτη ή Συνολική Ταξινόμηση** (complete preorder, PROMETHEE II) του συνόλου των εναλλακτικών λύσεων.

A) Για την Μερική Ταξινόμηση (PROMETHEE I) η λύση α είναι ανώτερη της λύσης β , εφόσον η ροή εξόδου της λύσης α είναι αριθμητικά μεγαλύτερη της ροής εξόδου της λύσης β και εφόσον η ροή εισόδου της α είναι αριθμητικά μικρότερη της ροής εισόδου της β .

Δηλαδή,

$$\text{η } \alpha \text{ κυριαρχεί της } \beta \text{ εάν: } \varphi^+(a) \geq \varphi^+(\beta) \text{ και } \varphi^-(a) \leq \varphi^-(\beta) \quad (3)$$

Ισότητα στη σχέση (3) δείχνει αδιαφορία ανάμεσα στις δύο συγκρινόμενες λύσεις.

Στην περίπτωση που οι ροές εξόδου υποδεικνύουν ότι η λύση α είναι ανώτερη της β , ενώ οι ροές εισόδου υποδεικνύουν το ανάποδο, οι δύο λύσεις θεωρούνται μη συγκρίσιμες. Δηλαδή,

$$\begin{aligned} \text{Οι } \alpha \text{ και } \beta \text{ είναι μη συγκρίσιμες εάν: } & \varphi^+(a) > \varphi^+(\beta) \text{ και } \varphi^-(a) > \varphi^-(\beta) & \text{ή} \\ & \varphi^+(a) < \varphi^+(\beta) \text{ και } \varphi^-(a) < \varphi^-(\beta) & \end{aligned} \quad (3a)$$

B) Για την Απόλυτη ή Συνολική Ταξινόμηση (PROMETHEE II) υπολογίζεται η καθαρή ροή (net flow) ως η διαφορά της ροής εξόδου μείον τη ροή εισόδου), η οποία επιτρέπει την απόλυτη ταξινόμηση των λύσεων. Δηλαδή,

$$\varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a) \quad \text{και} \quad \varphi(\beta) = \varphi^+(\beta) - \varphi^-(\beta)$$

Η λύση α κυριαρχεί της λύσης β , εάν $\varphi(a) > \varphi(\beta)$. Στην περίπτωση που ισχύει $\varphi(a) = \varphi(\beta)$, έχουμε αδιαφορία.

Η μέθοδοι PROMETHEE είναι δημοφιλείς ανάμεσα στις μεθόδους ιεράρχησης λύσεων και έχουν ευρέως εφαρμοστεί σε διάφορες μελέτες περιπτώσεων, ειδικότερα σε ενεργειακά πολυκριτηριακά προβλήματα [Goumas and Lygerou, 2000, Batzias and Roumpos, 2000, Al-Shemmeri et al, 1997, Georgopoulou et al, 1998].

Η μελέτη των μεθόδων αυτών έχει επίσης επεκταθεί και σε περιπτώσεις που εμπλέκονται πάνω από ένας λήπτες της απόφασης (εμπειρογνώμονες), σε μελέτες ευαισθησίας όσον αφορά σε αποκλίσεις βαθμολογίας που μπορούν να αλλάξουν εντελώς την εικόνα της βέλτιστης λύσης [Wolters and Mareschal, 1995] ή στην επίλυση σύνθετων προβλημάτων με στοχαστικό χαρακτήρα [Radojevic and Petrovic, 1997].

Σε πραγματικές συνθήκες, στις οποίες συνήθως υπάρχει μεγάλος βαθμός αβεβαιότητας, είτε λόγω έλλειψης ακριβούς πληροφόρησης, είτε λόγω του βαθμού συνθετότητας των προβλημάτων προς επίλυση, η εφαρμογή των μεθόδων PROMETHEE δίνει τη δυνατότητα στον (στον) λήπτη(-ες) της απόφασης να μοντελοποιήσουν το πρόβλημα και να το επιλύσουν με την βοήθεια απλού και συνήθως εύχρηστου υπολογιστικού προγράμματος.

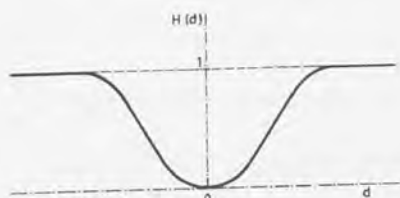
Η εφαρμογή των μεθόδων PROMETHEE προϋποθέτει επίσης, κάποιες απλές παραδοχές, οι οποίες αφορούν κυρίως στις δυνατότητες ποσοτικής έκφρασης σε κάποια αναλογική κλίμακα (ratio scale), είτε των βαρών των κριτηρίων είτε της προτίμησης του λήπτη της απόφασης ανάμεσα σε δύο λύσεις, στην αναγκαιότητα να είναι στοιχειωδώς σημαντική η διαφορά μεταξύ δύο βαθμολογήσεων, κ.ά. [DeKeyser, Peeters, 1996].

Στα πλαίσια αυτά, η Μερική Ταξινόμηση παρέχει πιο ρεαλιστικές και λεπτομερέστερες πληροφορίες για την βέλτιστη λύση του πολυκριτηριακού προβλήματος, σε σχέση με την Συνολική Ταξινόμηση, όπως επίσης, προβλέπει και την περίπτωση της μη συγκρισιμότητας δύο λύσεων. Όμως, η Απόλυτη Ταξινόμηση παραμένει ένα απλό και εύχρηστο εργαλείο για τον λήπτη της απόφασης, ώστε να ταξινομήσει τις λύσεις από την καλύτερη στη χειρότερη, του οποίου τα αποτελέσματα παρουσιάζουν σχετική σταθερότητα έναντι άλλων μεθόδων λήψης αποφάσεων [Brans et al, 1986, Wolters and Mareschal, 1995].

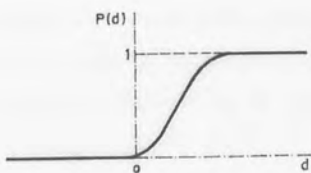
3.1. Τύποι γενικευμένου κριτηρίου (The generalized criterion)

Έχουν υιοθετηθεί έξι αντιπροσωπευτικοί τύποι γενικευμένων κριτηρίων (Πίνακας 27). Για την αναπαράσταση της περιοχής αδιαφορίας, θεωρούμε τη συνάρτηση $H(d)$, η οποία είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη συνάρτηση προτίμησης P :

$$H(d) = \begin{cases} P(a,b), & d \geq 0 \\ P(b,a), & d \leq 0 \end{cases}$$



Συνάρτηση $H(d)$



Συνάρτηση
Προτίμησης $P(d)$

<p>Type I Usual criterion</p>	
<p>Type II Quasi-criterion</p>	
<p>Type III Criterion with linear preference</p>	
<p>Type IV Level criterion</p>	
<p>Type V Criterion with linear preference and indifference interval</p>	
<p>Type VI Gaussian criterion</p>	

Πίνακας 27: Τύποι γενικευμένου κριτηρίου [Radojevic and Petrovic, 1997]

3.3. Προβλήματα με στοχαστικά χαρακτηριστικά

Όταν τα δεδομένα του προβλήματος είναι ποιοτικά ή ενέχουν αβεβαιότητα (the experts case) χρησιμοποιείται η έννοια της αναμενόμενης προτίμησης (expected preference function). Η μοντελοποίηση της αβεβαιότητας σε προβλήματα με στοχαστικό χαρακτήρα περιγράφεται από τον B. Mareschal (1986).

Στο πρόβλημα προς επίλυση – βλ. εξίσωση (1) – της αξιολόγησης δηλαδή, n διακεκριμένων εναλλακτικών λύσεων a_i ($i = 1, \dots, n$), ως προς k κριτήρια – θεωρούμε ότι οι βαθμολογήσεις $e_{ij} = f_j(a_i)$ είναι τυχαίες μεταβλητές:

$$f_j: K \rightarrow T,$$

όπου, T ένα σύνολο πραγματικών τυχαίων μεταβλητών, ενώ η συνάρτηση κατανομής των e_{ij} είναι η F_{ij} .

Η E γίνεται στην περίπτωση αυτή, μία πραγματικά στοχαστική μήτρα, της οποίας η κοινή συνάρτηση κατανομής συμβολίζεται με F :

$$F(E_0) = P(E \leq E_0), E_0 \in \mathbb{R}^{n \times k} \quad (4)$$

Η σχέση (4) δίνει τον στοχαστικό χαρακτήρα του πολυκριτηριακού προβλήματος.

Ο συνήθης τρόπος να επιλυθεί ένα πρόβλημα είναι να αντικατασταθούν οι βαθμολογήσεις e_{ij} από τις αναμενόμενες τιμές τους και να επιλυθεί το πρόβλημα με τον κλασσικό τρόπο. Με τον τρόπο αυτό όμως, χάνεται πολύτιμη πληροφορία, εφόσον δεν λαμβάνουμε υπόψη τον στοχαστικό χαρακτήρα του προβλήματος. Στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις, η κοινή συνάρτηση κατανομής F των βαθμολογιών δεν είναι γνωστή, και γίνεται η υπόθεση ότι όλες οι βαθμολογήσεις e_{ij} είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Η γενική μέθοδος επίλυσης ενός τέτοιου προβλήματος αφορά στον υπολογισμό της κατανομής των διαφορών:

$$e_{i_1 j} - e_{i_2 j}, \quad \forall i_1, i_2, j \quad (5)$$

και στη συνέχεια, να υπολογισθεί η αναμενόμενη συνάρτηση προτίμησης $E(P(d))$ (expected preference function, EPF).

Στη σχέση (4) προϋποτίθεται ανεξαρτησία μεταξύ των βαθμολογιών δύο μεμονωμένων κριτηρίων, υπόθεση που είναι πίο ρεαλιστική από την υπόθεση ότι τα κριτήρια είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, κυρίως όταν η αβεβαιότητα ενδέχεται να οφείλεται στην αξιολόγηση και επομένως, στη βαθμολόγηση.

Η συνάρτηση EPF υπολογίζεται ως εξής:

Ορίζουμε, $d = e_{i1,j} - e_{i2,j}$ και $\Delta(d) = P(d \leq \delta)$

Κάποια άμεσα συμπεράσματα, συνάγονται για την EPF - $E(P_f(d))$ - από την μορφή της P_f .

α) Level criterion

$$P_f(d) = \begin{cases} 0 & , d \leq q \\ \frac{1}{2} & , q < d < p \\ 1 & , p < d \end{cases}$$

Για μία τέτοια συνάρτηση προτίμησης, η EPF δίνεται από τη σχέση:

$$EPF = 1 - \frac{\Delta(q) + \Delta(p)}{2} \quad (6)$$

β) Linear criterion

$$P_f(d) = \begin{cases} 0 & , d \leq q \\ \frac{(d-q)}{(p-q)} & , q < d \leq p \\ 1 & , p < d \end{cases}$$

Για μία τέτοια συνάρτηση προτίμησης, η EPF δίνεται από τη σχέση:

$$EPF = 1 - \Delta(p) + \int_q^p \frac{\delta - q}{p - q} d\Delta(\delta) \quad (7)$$

Εάν η Δ είναι η συνάρτηση μιάς κανονικής κατανομής με μέση τιμή μ , και τυπική απόκλιση σ , έχουμε:

$$EPF = 1 + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi(\pi - q)}} \times (\exp^{-[(q-p)2/2\sigma^2]} - \exp^{-[(p-q)2/2\sigma^2]}) + \Delta(p) \left(\frac{\mu - q}{p - q} \right) \quad (8)$$

γ) Gaussian criterion

$$P(d) = \begin{cases} 1 - \exp^{-\frac{2d^2}{2\sigma^2}} & , d > 0 \\ 0 & , d \leq 0 \end{cases}$$

και η EPF δίνεται από τη σχέση:

$$EPF = \int_0^{\infty} (1 - \exp^{-\frac{2d^2}{2\sigma^2}}) d\Delta(\delta) \quad (9)$$

3.4. Συναρτήσεις Χρησιμότητας - Συνάρτηση Χρησιμότητας Ενός Κριτηρίου

Σύμφωνα με τις μεθόδους MAUT, για την αξιολόγηση μίας λύσης ως προς κάθε κριτήριο ξεχωριστά, ο λήπτης της απόφασης έχει λάβει υπόψη του - συνειδητά ή ασυνειδητά - μία συνάρτηση χρησιμότητας, ενώ για τη λήψη της πολυκριτηριακής απόφασης, δημιουργεί μία προσθετική, πολλαπλασιαστική ή κανονικής κατανομής συνολική συνάρτηση χρησιμότητας.

3.4.1. Προετοιμασία των δεδομένων του προβλήματος

Ο λήπτης της απόφασης, μετά τον προσδιορισμό των κριτηρίων K_1, K_2, \dots, K_6 πρέπει να ορίσει τις αντίστοιχες μεταβλητές X_1, X_2, \dots, X_6 που θα παίρνουν τιμές για κάθε στοιχείο του συνόλου Σ . Για τις μεταβλητές που αντιστοιχούν σε ποσοτικά κριτήρια δεν παρουσιάζεται κανένα πρόβλημα. Όσον αφορά τις μεταβλητές που αντιστοιχούν σε ποιοτικά κριτήρια ενεργούμε με τον ακόλουθο τρόπο: Ζητάμε από το λήπτη της απόφασης να δώσει για κάθε στοιχείο σ_i του συνόλου Σ στη μεταβλητή X_j που αντιστοιχεί στο ποιοτικό κριτήριο K_j μια τιμή X_j^i που κυμαίνεται μεταξύ 0 και 10 και που εκφράζει τον βαθμό ικανοποίησης που παρέχει το στοιχείο σ_i στον λήπτη απόφασης ως προς το κριτήριο K_j .

Αφού περατωθεί αυτή η εργασία, συντάσσουμε έναν πίνακα (Πίνακας 28) που δείχνει για κάθε μεταβλητή X_i δύο τιμές: Την καλύτερη, που συμβολίζεται X_i^* και τη χειρότερη που συμβολίζεται X_i^0 . Η ποσότητα X_i^* (αντίστοιχα X_i^0) παριστάνει την τιμή που παίρνει η μεταβλητή X_i για το καλύτερο (αντίστοιχα χειρότερο) στοιχείο του συνόλου Σ ως προς το κριτήριο K_i .

Κριτήριο K_j	Μεταβλητή X_i	Καλύτερη τιμή X_i^*	Χειρότερη τιμή X_i^0
K_1	X_1	4.3	8.5
K_2	X_2	0.6	3
K_3	X_3	150	90
K_4	X_4	10	6
K_5	X_5	9	5
K_6	X_6	10	7

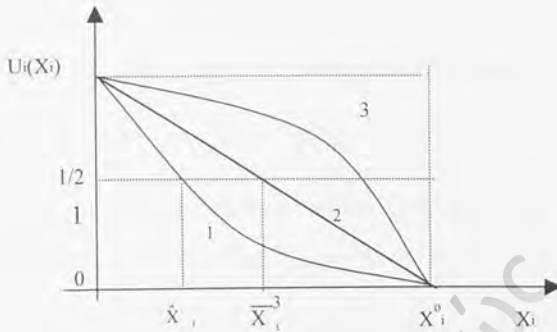
Πίνακας 28: Καλύτερες και χειρότερες τιμές των κριτηρίων για το σύνολο των προτεινόμενων λύσεων

Στο εξής, σε κάθε στοιχείο σ_i του συνόλου Σ θα αντιστοιχεί το διάνυσμα $(X_1^i, X_2^i, \dots, X_6^i)$ των τιμών που παίρνουν οι μεταβλητές X_1, X_2, \dots, X_6 για το στοιχείο σ_i .

3.4.2. Μεθοδολογία υπολογισμού συνάρτησης χρησιμότητας ενός κριτηρίου

Για το σύνολο των προτεινόμενων εναλλακτικών λύσεων, η μεταβλητή X_i παίρνει τιμές από την καλύτερη X_i^* έως τη χειρότερη X_i^0 . Αυτό σημαίνει ότι ο λήπτης της απόφασης προτιμάει εκείνη τη λύση, για την οποία η μεταβλητή X_i ισούται με X_i^* έναντι οποιοδήποτε άλλης λύσης, υπό την προϋπόθεση ότι επιλέγει μόνο με το κριτήριο K_i . Με την ίδια προϋπόθεση, η λύση όπου, η μεταβλητή X_i παίρνει την τιμή X_i^0 έρχεται τελευταία στη σειρά προτίμησής του. Αυτή η μεταβολή στις προτιμήσεις του λήπτη της απόφασης για ένα κριτήριο K_i παριστάνεται με τη βοήθεια μίας συνάρτησης $U_i(X_i)$, η οποία λέγεται **συνάρτηση χρησιμότητας** του κριτηρίου K_i και έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

1. $U_i(X_i^*)=1$
2. $U_i(X_i^0)=0$
3. Είναι αυστηρά μονότονη (αύξουσα ή φθίνουσα).
4. Είναι κοίλη, κυρτή ή γραμμική (Σχήμα 16).



Σχήμα 16: Συνάρτηση Χρησιμότητας $U_i(X_i)$

Εάν ισχύει $X_i^* > X_i^0$, τότε η συνάρτηση χρησιμότητας $U_i(X_i)$ είναι αύξουσα, εάν όχι, τότε είναι φθίνουσα. Στο εξής, θα αναφερόμαστε σε φθίνουσες συναρτήσεις χρησιμότητας. Το σημείο \hat{X}_i του άξονα X_i για το οποίο έχουμε $U_i(X_i)=1/2$ λέγεται **σημείο αδιαφορίας** της συνάρτησης και ο προσδιορισμός του οδηγεί στην εύρεση της εξίσωσης της καμπύλης της συνάρτησης χρησιμότητας.

Ο προσδιορισμός του σημείου αδιαφορίας \hat{X}_i γίνεται με τη μέθοδο που ακολουθεί: Θεωρούμε τον λαχνό στον οποίο εμφανίζονται δύο ενδεχόμενα: Η εναλλακτική λύση για την οποία η μεταβλητή X_i παίρνει την καλύτερη τιμή X_i^* και η εναλλακτική λύση για την οποία η μεταβλητή X_i παίρνει τη χειρότερη τιμή X_i^0 . Τα δύο ενδεχόμενα εμφανίζονται με ίσες πιθανότητες. Ο λαχνός συμβολίζεται με $\lambda_i \equiv (X_i^*, 1/2 ; X_i^0, 1/2)$.

Η **αναμενόμενη χρησιμότητα** (expected utility) ενός λαχνού $\lambda_i \equiv (X_i^*, \rho ; X_i^0, 1-\rho)$ είναι ίση με $U(\lambda_i) = \rho U_i(X_i^*) + (1-\rho) U_i(X_i^0)$.

Θεωρούμε την εναλλακτική λύση για την οποία η μεταβλητή X_i παίρνει την τιμή \bar{X}_i ίση με $1/2 \cdot (X_i^0 + X_i^*)$, δηλαδή το σημείο \bar{X}_i είναι το μέσον του διαστήματος (X_i^0, X_i^*) .

Προτείνουμε στο λήπτη της απόφασης να επιλέξει ανάμεσα στον λαχνό της παραγράφου α και στην εναλλακτική λύση της παραγράφου β. Η απάντηση του δεν μπορεί παρά να είναι μία από τις τρεις που ακολουθούν:

871. Ο λήπτης της απόφασης προτιμάει το λαχνό. Αυτό συνεπάγεται την σχέση $U(\lambda_i) > U_i(\bar{X}_i)$, δηλαδή $1/2 U(X_i^*) + 1/2 U_i(X_i^0) > U_i(\bar{X}_i)$
- άρα, $U_i(\bar{X}_i) < 1/2$, που σημαίνει ότι, το σημείο αδιαφορίας \bar{X}_i βρίσκεται μεταξύ των σημείων X_i^* και \bar{X}_i (βλ. καμπύλη 1, του Σχήματος 16)
2. Ο λήπτης της απόφασης προτιμάει την εναλλακτική λύση. Αυτό συνεπάγεται την σχέση $U(\lambda_i) < U_i(\bar{X}_i)$, που οδηγεί στην ανισότητα $U_i(\bar{X}_i) > 1/2$, που σημαίνει ότι το σημείο αδιαφορίας \bar{X}_i βρίσκεται μεταξύ των σημείων \bar{X}_i και X_i^0 (βλ. καμπύλη 2 του Σχήματος 16).
3. Ο λήπτης της απόφασης μένει αδιάφορος μπροστά στην επιλογή. Ισχύει λοιπόν, $U(\lambda_i) = U_i(\bar{X}_i)$, άρα $U_i(\bar{X}_i) = 1/2$, δηλαδή το σημείο της αδιαφορίας \bar{X}_i είναι το μέσον του διαστήματος $[X_i^*, X_i^0]$ (βλ. καμπύλη 3 του Σχήματος 16).

Είναι ενδιαφέρον, να δούμε το σκεπτικό που ακολουθεί ο λήπτης της απόφασης προκειμένου να επιλέξει τον λαχνό ή την εναλλακτική λύση. Όταν επιλέγει τον λαχνό, το κάνει γιατί αποστρέφεται τόσο πολύ τη λύση που του προσφέρεται, ώστε προτιμάει να διακινδυνεύσει στο απρόοπτο μιας καλύτερης ή χειρότερης λύσης με ίσες πιθανότητες εμφάνισης. Στην περίπτωση αυτή, λέμε ότι ο λήπτης της απόφασης είναι **ρισοκίνδυνος** (risk-prone).

Όταν επιλέγει την εναλλακτική λύση, το κάνει γιατί η χειρότερη λύση που θα του προσέφερε ενδεχομένως ο λαχνός, του είναι τόσο αποκρουστική, ώστε προτιμάει τη λύση που του προσφέρεται δίχως τον κίνδυνο του τυχαίου. Στην περίπτωση αυτή, ο λήπτης της απόφασης λέγεται **συντηρητικός** (risk-averse).

Τέλος, στην τρίτη περίπτωση, στην οποία δεν έχει λόγους να προτιμήσει τη μία από την άλλη λύση, ο λήπτης της απόφασης λέγεται **αδιάφορος** (risk-neutre).

Αφού λάβουμε την απάντηση του λήπτη της απόφασης, εάν είναι αδιάφορος έχουμε εντοπίσει το σημείο αδιαφορίας του για το κριτήριο K_i , εάν όχι, τότε περιορίζουμε το διάστημα έρευνας του σημείου αυτού στο διάστημα $[X_i^*, \bar{X}_i]$ ή $[\bar{X}_i, X_i^0]$ ανάλογα με το εάν ο λήπτης της απόφασης είναι ρισοκίνδυνος ή συντηρητικός αντίστοιχα. Στη συνέχεια, επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία, μέχρις ότου εντοπίσουμε το σημείο αδιαφορίας \bar{X}_i . Η μέθοδος αυτή ονομάζεται **διχοτομική αναζήτηση**.

Για έναν λήπτη αποφάσεων συντηρητικό, αδιάφορο ή ριψοκίνδυνο, η συνάρτηση χρησιμότητας $U(X)$ είναι αντίστοιχα της μορφής :

$$U(X) = a - be^{-cx} \quad (9.a)$$

$$U(X) = a + \beta x \quad (9.β)$$

$$U(X) = a + be^{cx} \quad (9.γ)$$

όπου, οι σταθερές $a, b (>0)$ παίρνουν τιμές τέτοιες, που να περιορίζουν το πεδίο τιμών της συνάρτησης στο διάστημα $[0,1]$ και η σταθερά c είναι θετική για αύξουσες συναρτήσεις χρησιμότητας και αρνητική για φθίνουσες. Πιο αναλυτικά, η μορφή της συνάρτησης χρησιμότητας $U(X)$ δίνεται στον Πίνακα 29.

Πίνακας 29: Μορφή της συνάρτησης χρησιμότητας $U(X)$

$U(X)$ φθίνουσα $\Leftrightarrow x^* < x^0$			
Θέση σημείου αδιαφορίας	Λήπτης της απόφασης	Μορφή της καμπύλης	Εξίσωσης της καμπύλης $C < 0$
$\hat{x} < 1/2(x^* + x^0)$	ριψοκίνδυνος	κοίλη	$u(x) = a + be^{cx}$
$\hat{x} > 1/2(x^* + x^0)$	συντηρητικός	κυρτή	$u(x) = a - be^{cx}$
$\hat{x} = 1/2(x^* + x^0)$	αδιάφορος	ευθεία	$u(x) = a + bx$
$U(X)$ αύξουσα $\Leftrightarrow x^* > x^0$			
Θέση σημείου αδιαφορίας	Λήπτης της απόφασης	Μορφή της καμπύλης	Εξίσωσης της καμπύλης $C < 0$
$\hat{x} < 1/2(x^* + x^0)$	συντηρητικός	κυρτή	$u(x) = a - be^{cx}$
$\hat{x} > 1/2(x^* + x^0)$	ριψοκίνδυνος	κοίλη	$u(x) = a + be^{cx}$
$\hat{x} = 1/2(x^* + x^0)$	αδιάφορος	ευθεία	$u(x) = a + bx$

Στην περίπτωση που ο λήπτης της απόφασης είναι αδιάφορος, οι σταθερές α , β της συνάρτησης χρησιμότητας υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\alpha = \frac{x^0}{x^0 - x^*} \quad (10.α)$$

$$\beta = \frac{1}{x^* - x^0} \quad (10.β)$$

Στην περίπτωση που ο λήπτης της απόφασης είναι ρισοκίνδυνος ή συντηρητικός, οι σταθερές α , b , c της συνάρτησης χρησιμότητας υπολογίζονται με την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων:

$$u(x^0) = \alpha + be^{cx^0} = 0$$

$$u(x^*) = \alpha + be^{cx^*} = 1$$

$$u(\hat{x}) = \alpha + be^{c\hat{x}} = 1/2$$

από το οποίο συνεπάγονται οι σχέσεις:

$$\alpha = \frac{e^{cx^0}}{e^{cx^*} - e^{cx^0}} \quad (11.α)$$

$$b = \frac{1}{e^{cx^*} - e^{cx^0}} \quad (11.β)$$

$$c = \frac{1}{\hat{x}} \log\left(\frac{e^{cx^*} - e^{cx^0}}{2} - e^{cx^0}\right) \quad (11.γ)$$

Με την εφαρμογή της μεθόδου των κυκλικών υπολογισμών (iteration method) υπολογίζουμε τη σταθερά c από τη σχέση (11.γ). Στη συνέχεια, με τη βοήθεια των σχέσεων (11.α) και (11.β) υπολογίζουμε τις σταθερές α και b αντίστοιχα.

3.4.2. Συναρτήσεις Χρησιμότητας - Συνάρτηση Χρησιμότητας Πολλών Κριτηρίων

Ο βαθμός χρησιμότητας μιας εναλλακτικής λύσης (X_1, X_2, \dots, X_6) για τον λήπτη της απόφασης εκφράζεται με τη συνάρτηση χρησιμότητας πολλών κριτηρίων $U(X_1, X_2, \dots, X_6)$, η οποία εάν τα κριτήρια επιλογής είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, πληροί την σχέση:

$$Ku(X_1, X_2, \dots, X_6) + 1 = \prod_{i=1}^6 [K - Ki, Ui(Xi) + 1] \quad (12)$$

Οι σταθερές K_i εκφράζουν τη σπουδαιότητα των κριτηρίων K_i για τον λήπτη της απόφασης. Η σταθερά K ικανοποιεί τη σχέση:

$$1 + K = \prod_{i=1}^6 (K \cdot K_i + 1) \quad (13)$$

Επίσης αποδεικνύεται ότι, εάν ισχύει $\sum_{i=1}^6 K_i = 1$, τότε η σταθερά K ισούται με 0 και η συνάρτηση χρησιμότητας $U(X_1, X_2, \dots, X_6)$ δίνεται από τη σχέση:

$$U(X_1, X_2, \dots, X_6) = \sum_{i=1}^6 K_i U_i(X_i) \quad (14)$$

Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι η συνάρτηση χρησιμότητας πολλών κριτηρίων είναι **προσθετική** (additive).

3.5.1. Υπολογισμός των σταθερών K_i

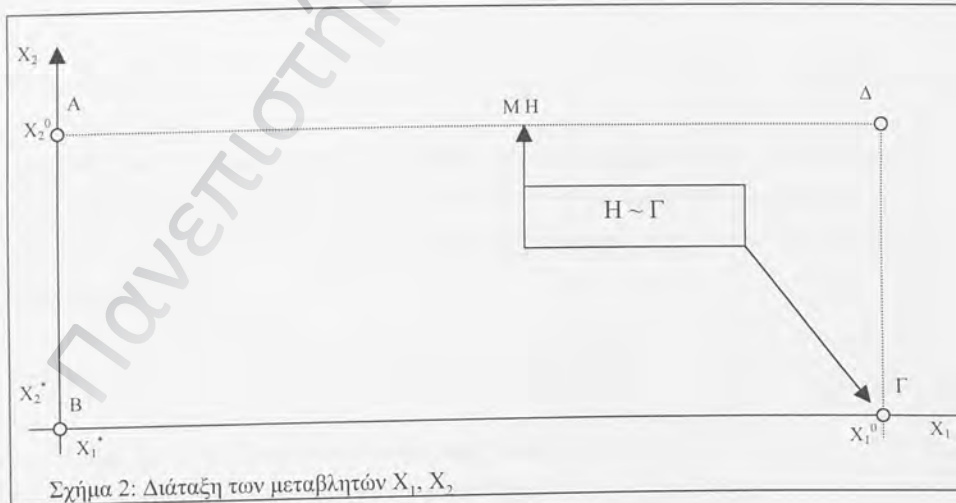
Για δύο εναλλακτικές λύσεις: $\sigma' = (X'_1, X'_2, \dots, X'_6)$ και $\sigma'' = (X''_1, X''_2, \dots, X''_6)$, ισχύει μια από τις παρακάτω σχέσεις:

1. $U(X'_1, X'_2, \dots, X'_6) > U(X''_1, X''_2, \dots, X''_6)$
2. $U(X'_1, X'_2, \dots, X'_6) < U(X''_1, X''_2, \dots, X''_6)$
3. $U(X'_1, X'_2, \dots, X'_6) = U(X''_1, X''_2, \dots, X''_6)$

- Στην πρώτη περίπτωση, η εναλλακτική λύση σ' είναι πιο συμφέρουσα από την εναλλακτική λύση σ'' (συμβολικά, $\sigma' > \sigma''$).
- Στη δεύτερη περίπτωση, η εναλλακτική λύση σ' είναι λιγότερο συμφέρουσα από την εναλλακτική λύση σ'' (συμβολικά $\sigma' < \sigma''$).
- Στην τρίτη περίπτωση, καμιά από τις δύο προηγούμενες προτάσεις δεν αληθεύει (συμβολικά $\sigma' \sim \sigma''$).

Για να εκτιμήσουμε την χρησιμότητα μιας εναλλακτικής λύσης, δεν έχουμε παρά να υπολογίσουμε τις συναρτήσεις χρησιμότητας $U_i(X_i)$ κάθε κριτηρίου K_i , τις σταθερές K_i και στη συνέχεια, να υπολογίσουμε τη συνάρτηση χρησιμότητας πολλών κριτηρίων $U(X_1, X_2, \dots, X_6)$ με τη βοήθεια των σχέσεων (12) ή (14).

Ας δούμε όμως, πώς πραγματοποιείται ο υπολογισμός των σταθερών K_i . Κατ' αρχήν, ζητάμε από το λήπτη της απόφασης να μας πει ποίο κριτήριο απ' όλα θεωρεί το πιο σημαντικό. Έστω ότι το κριτήριο αυτό είναι το K_1 . Σε ένα ορθοκανονικό σύστημα αξόνων $X_1 O X_2$, ο άξονας των τεταγμένων $O X_1$ περιέχει τις τιμές της μεταβλητής X_1 , ενώ ο άξονας των τεταγμένων $O X_2$ περιέχει τις τιμές της μεταβλητής X_2 . Οι τιμές των δύο μεταβλητών κυμαίνονται στα διαστήματα $[X_1^*, X_1^0]$ και $[X_2^*, X_2^0]$ όπως δείχνει το Σχήμα 17.



Σχήμα 17: Διάταξη των μεταβλητών X_1, X_2

Θεωρώντας ότι όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές X_3, \dots, X_6 βρίσκονται στο χειρότερο επίπεδο X_3^0, \dots, X_6^0 , διατυπώνουμε τις παρακάτω προφανείς προτάσεις:

1. $(X_1^0, X_2^*) = \Gamma > \Delta = (X_1^0, X_2^0)$
2. $(X_1^0, X_2^*) = \Gamma < \Lambda = (X_1^*, X_2^0)$
3. Υπάρχει ένα σημείο H επάνω στο ευθύγραμμο τμήμα $A\Delta$ τέτοιο ώστε $\Gamma \sim H$.

Εάν $(X_1^{(2)}, X_2^0)$ είναι οι συντεταγμένες του σημείου H στο σύστημα αξόνων $X_1 O X_2$, τότε από τη σχέση $\Gamma \sim H$ συνεπάγεται: $U(X_1^0, X_2^*, X_3^0, \dots, X_6^0) = U(X_1^{(2)}, X_2^0, \dots, X_6^0)$ και σύμφωνα με τη σχέση (12) $K_2 = K_1 U_1(X_1^{(2)})$.

Θα αναφέρουμε εδώ ότι ο προσδιορισμός του σημείου H γίνεται από το λήπτη της απόφασης με τη γνωστή μέθοδο της διχοτομικής αναζήτησης επάνω στο ευθύγραμμο τμήμα $A\Delta$. Επαναλαμβάνοντας την ίδια ακριβώς διαδικασία και για τα κριτήρια K_3, K_4, K_5 και K_6 συγκροτούμε το παρακάτω απλό σύστημα εξισώσεων:

$$\begin{aligned} K_2 &= K_1 U_1(X_1^{(2)}) \\ K_3 &= K_1 U_1(X_1^{(3)}) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ K_6 &= K_1 U_1(X_1^{(6)}) \end{aligned} \tag{15}$$

Απομένει, λοιπόν, ο προσδιορισμός της σταθεράς K_1 για να οριστεί πλήρως η συνάρτηση χρησιμότητας πολλών κριτηρίων $U(X_1, X_2, \dots, X_6)$. Για το σκοπό αυτό, ενεργούμε πάλι με τη μέθοδο της επιλογής από το λήπτη της απόφασης ανάμεσα σε ένα λαχνό και σε μία εναλλακτική λύση.

Ορίζουμε ένα λαχνό λ στον οποίο εμφανίζονται δύο ενδεχόμενα:

1. Όλες οι μεταβλητές βρίσκονται στο καλύτερο επίπεδο.
2. Όλες οι μεταβλητές βρίσκονται στο χειρότερο επίπεδο.

Τα δύο ενδεχόμενα εμφανίζονται με αντίστοιχες πιθανότητες p και $1-p$. Η αναμενόμενη χρησιμότητα του λαχνού ισούται με:

$U(\lambda) = \rho U(X_1^*, \dots, X_6^*) + (1-\rho) U(X_1^0, \dots, X_6^0)$, οπότε $U(\lambda) = \rho$

Θεωρούμε την εναλλακτική λύση $\sigma = (X_1^*, X_2^0, \dots, X_6^0)$.

Η συνάρτηση χρησιμότητας παίρνει για αυτήν, την τιμή: $U(\sigma) = K_1$

Θέτουμε λοιπόν στον λήπτη της απόφασης το ακόλουθο ερώτημα: Για ποια τιμή της πιθανότητας ρ μένει αδιάφορος μπροστά στο πρόβλημα επιλογής ανάμεσα στο λαχνό λ και στην εναλλακτική λύση σ . Η απάντηση δίνει την τιμή της σταθεράς K_1 αφού $K_1 = u(\sigma) = u(\lambda) = \rho$. Έτσι, γνωρίζοντας την σταθερά K_1 προσδιορίζουμε τις K_2, \dots, K_6 με τη βοήθεια του συστήματος εξισώσεων (15).

Ο προσδιορισμός της πιθανότητας ρ για την οποία ισχύει $\lambda \sim \sigma$ γίνεται και πάλι με τη μέθοδο της διχοτομικής αναζήτησης στο διάστημα $[0, 1]$.

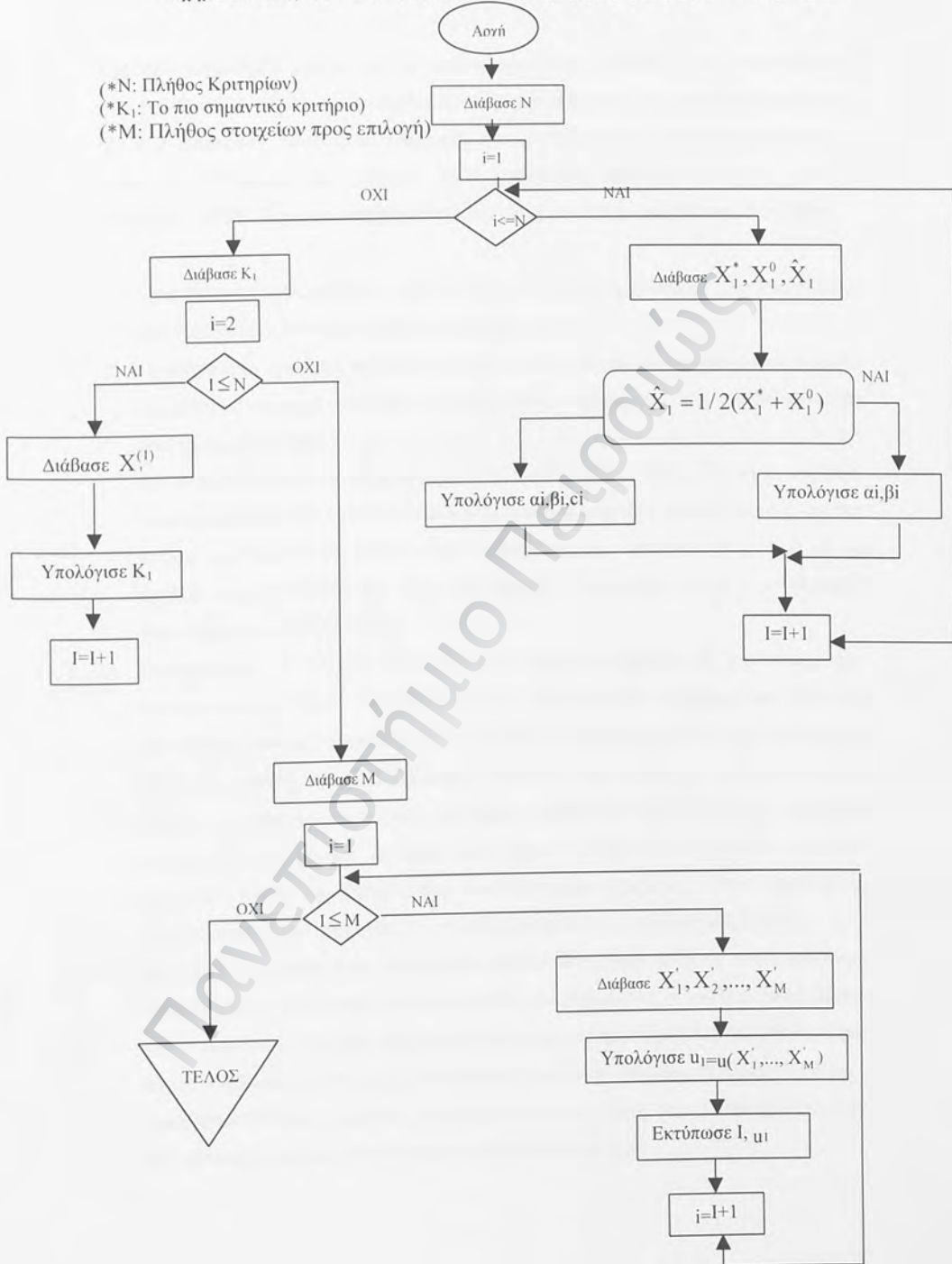
3.5.2. Διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό της συνάρτησης χρησιμότητας πολλών κριτηρίων

Ο αλγόριθμος υπολογισμού της συνάρτησης χρησιμότητας για κάθε στοιχείο του συνόλου Σ διακρίνεται σε 3 τμήματα:

1. **Προσδιορισμός της συνάρτησης χρησιμότητας κάθε κριτηρίου.**
Επιτυγχάνεται με την ανάγνωση των ποσοτήτων X^*_1, X^0_1, \hat{X}_1 για κάθε κριτήριο K_1 και με τη βοήθεια αυτών του υπολογισμού των σταθερών a, b, c – εάν πρόκειται για μη γραμμική συνάρτηση.
2. **Προσδιορισμός των σταθερών K_1 .** Γίνεται με τον τρόπο που περιγράφηκε. Εάν το άθροισμά τους είναι διάφορο της μονάδας, τότε υπολογίζουμε τη σταθερά K από τη σχέση (13) με τη μέθοδο των κυκλικών υπολογισμών.
3. **Ανάγνωση των τιμών που παίρνουν οι μεταβλητές X_1, X_2, \dots για κάθε στοιχείο σ του συνόλου Σ .** Με τη βοήθεια των τιμών αυτών και των σταθερών που υπολογίστηκαν στα δύο προηγούμενα τμήματα, προβαίνουμε στον υπολογισμό της συνάρτησης χρησιμότητας για κάθε στοιχείο σ . Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου δίνεται στο Σχήμα 18.

Σχήμα 18. Διάγραμμα υπολογισμού της συνάρτησης χρησιμότητας πολλών κριτηρίων

- (*N: Πλήθος Κριτηρίων)
- (*K₁: Το πιο σημαντικό κριτήριο)
- (*M: Πλήθος στοιχείων προς επιλογή)



4. Μελέτη Περίπτωσης – Ενδεικτική Εφαρμογή

Για την ενδεικτική εφαρμογή της πολυκριτηριακής μεθόδου στην συγκεκριμένη περίπτωση επίλυσης του προβλήματος πολυκριτηριακής επιλογής αντιδραστήρα ισχύος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα με βάση το ντετερμινιστικό μοντέλο πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων του B. Mareschal (1986), όπως αναπτύχθηκε από τους Brans, Vincke and Mareschal (1986):

1. Ορίστηκαν οι συγκρινόμενες εναλλακτικές λύσεις του προβλήματος, από το σύνολο των διαθέσιμων πιθανών εναλλακτικών λύσεων.
2. Ορίστηκαν τα κριτήρια, ως προς τα οποία αξιολογήθηκαν οι συγκρινόμενες λύσεις, με γνώμονα να περιλαμβάνουν τις βασικότερες παραμέτρους του προβλήματος σε ρεαλιστικές συνθήκες.
3. Ορίστηκαν τα βάρη του κάθε κριτηρίου με έμμεσο τρόπο, έτσι ώστε να περιοριστεί η υποκειμενικότητα κατά τη διαδικασία καθορισμού των βαρών και να ληφθεί υπόψη – μέσω και της λεπτομερούς περιγραφής των κριτηρίων σύμφωνα με τη στάθμη της επιστήμης και της τεχνολογίας (knowledge base) - ο τεχνικός χαρακτήρας του προβλήματος.
4. Συγκρίθηκαν οι λύσεις ανά δύο και βαθμολογήθηκαν οι επιδόσεις των συγκρινόμενων λύσεων για κάθε κριτήριο. Στη συνέχεια οικοδομήθηκε η μήτρα προτίμησης των εναλλακτικών λύσεων (τύποι αντιδραστήρων έναντι κριτηρίων) με βάση την ακριβή και μη παραμετρική έκφραση της επίδοσης των εναλλακτικών λύσεων ως προς τα μεμονωμένα κριτήρια (βαθμολογία από 1 έως 5 με ακρίβεια δεκαδικού). Ως βασικό σενάριο, μελετήθηκε η βέλτιστη λύση ως προς ένα οριζόμενο εύρος της βαθμολογίας του βαρύτερου κριτηρίου, λόγω σημαντικής αβεβαιότητας στην εκτίμηση της επίδοσης μίας από τις εναλλακτικές λύσεις.
5. Με τον υπολογισμό των ροών εξόδου και εισόδου κάθε ζεύγους συγκρινόμενων λύσεων, έγινε κατορθωτό να ταξινομηθούν (ιεραρχηθούν) οι εναλλακτικές λύσεις με τις τεχνικές α) της Μερικής Ταξινόμησης (partial preorder, PROMETHEE I) και β) της Απόλυτης ή Συνολικής Ταξινόμησης (complete preorder, PROMETHEE II).
6. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας και ως προς την επίδοση μίας των εναλλακτικών λύσεων στο δεύτερο σε βαρύτητα κριτήριο.

Το υπολογιστικό μέρος της πολυκριτηριακής ανάλυσης στηρίχθηκε σε τμήμα του προγράμματος H/Y IPES (Industrial Prognosis Expert System), το οποίο, μεταξύ άλλων, περιλαμβάνει τα εξής:

1. Εισαγωγή των αριθμητικών στοιχείων της πολυκριτηριακής μήτρας και του διανύσματος των βαρών, με δυνατότητα σταδιακής εισαγωγής/αναθεώρησης, σύμφωνα με μία μέθοδο DELPHI τριών σταδίων.
2. Παραμετρική και μη παραμετρική στατιστική ανάλυση των δεδομένων εισαγωγής, σύμφωνα με την ακριβή μέθοδο.
3. Παραμετρική και μη παραμετρική στατιστική ανάλυση των δεδομένων εισαγωγής, σύμφωνα με την προσεγγιστική μέθοδο.
4. Επιλογή γενικευμένων κριτηρίων για την πολυκριτηριακή ανάλυση.
5. Υπολογισμός των στοιχείων της ορθογωνικής μήτρας προτίμησης για κάθε εμπειρογνώμονα, σύμφωνα με τη μέθοδο PROMETHEE II.
6. Υπολογισμός των στοιχείων του αντίστοιχου διανύσματος συνολικής ταξινόμησης (complete preorder).
7. Κατασκευή της μήτρας που προκύπτει από τα διανύσματα του προηγούμενου σταδίου 6, για όλους τους εμπειρογνώμονες.
8. Υπολογισμός του τελικού διανύσματος της συνολικής ταξινόμησης.
9. Επανάληψη των προηγούμενων σταδίων 6, 7 και 8, με την προσεγγιστική μέθοδο.
10. Ανάλυση ευαισθησίας του αποτελέσματος, ως προς τα στοιχεία της πολυκριτηριακής μήτρας εισαγωγής (input).
11. Ανάλυση ευαισθησίας του αποτελέσματος, ως προς τα στοιχεία του διανύσματος εισαγωγής των βαρών.
12. Παραμετρική και μη παραμετρική στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων, σύμφωνα με την ακριβή μέθοδο.
13. Παραμετρική και μη παραμετρική στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων, σύμφωνα με την προσεγγιστική μέθοδο.
14. Υπολογισμός των στοιχείων της τριγωνικής μήτρας σημείων συγκρισιμότητας (sign matrix) για κάθε εμπειρογνώμονα, σύμφωνα με τη μέθοδο PROMETHEE I.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένας εμπειρογνώμονας, ο οποίος μετέφερε τη γνώση περισσότερων χωρίς όμως αυτή να χρησιμοποιείται σαν χωριστή είσοδος (input) στο πρόγραμμα. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε μόνο η ακριβής (μη προσεγγιστική) μέθοδος, σύμφωνα με την οποία αξιολογούνται τα πραγματικά δεδομένα ή εξαγόμενα και όχι οι ενδεικτικοί της ταξινόμησης φυσικοί αριθμοί.

4.1. Οι εναλλακτικές λύσεις

Οι εναλλακτικές λύσεις ($X_i, i=1, \dots, 5$) αποτελούν ένα σύνολο διακριτών λύσεων (τύποι αντιδραστήρων ισχύος). Κάθε λύση έχει διαφορετικές επιπτώσεις στην οικονομική συμπεριφορά, στην ενεργειακή απόδοση, στην ασφάλεια και αξιοπιστία του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, επιπτώσεις στην κοινωνία, στο περιβάλλον κλπ. Οι διάφοροι αυτοί παράμετροι είναι μεταξύ τους αντιφατικοί, κατά συνέπεια ο λήπτης της απόφασης δύσκολα μπορεί να επιλέξει τη λύση που είναι βέλτιστη έναντι όλων των παραμέτρων.

Ω εναλλακτικές λύσεις επιλέγονται να μελετηθούν πέντε αντιπροσωπευτικοί τύποι αντιδραστήρων ισχύος (Πίνακας 30) με δεδομένο ότι οι πυρηνικοί αντιδραστήρες ισχύος αποτελούν υψηλή τεχνολογία και σύμφωνα με τις παρακάτω συνιστώσες:

- την βέλτιστη διαθέσιμη τεχνολογία (best available technique)
- το εύρος της εμπορικής διαθεσιμότητας και εφαρμογής
- την υπάρχουσα εμπειρία από τη λειτουργία
- την κάλυψη των εναλλακτικών πυρηνικών καυσίμων
- την έρευνα και ανάπτυξη που συντελείται σε σχέση με τα βασικά χαρακτηριστικά τους.

Στα πλαίσια αυτά, μελετήθηκαν οι εξής πέντε τύποι: PWR, BWR, Modular HTGR, CANDU, καθώς και ο πιο ανεπτυγμένος τύπος αναπαραγωγικού αντιδραστήρα, οι LMFBR.

Πίνακας 30: Οι εναλλακτικές λύσεις

	Τύπος	Μέση Ισχύς
X_1	Αεριοψυκτός αντιδραστήρας υψηλής θερμοκρασίας (Modular High Temperature Gas-cooled Reactor, MHTGR)	(4x200) 800 MWe
X_2	Αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος (Pressurized Water Reactor, PWR)	1000 MWe
X_3	Αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος (Boiling Water Reactor, BWR)	1000 MWe
X_4	Αντιδραστήρας πεπιεσμένου βαρέος ύδατος (Pressurized Heavy Water Reactor, PHWR ή CANDU)	900 MWe
X_5	Αναπαραγωγικός αντιδραστήρας ταχέων νετρονίων ψυχόμενος με υγρό μέταλλο (Liquid Metal Fast Breeder Reactor, LMFBR)	>1000 MWe

Οι PWR και οι BWR (αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος), παρότι αποτελούν μαζί την κατηγορία των ψυχόμενων με ελαφρύ νερό αντιδραστήρων (LWRs) εξετάζονται χωριστά, διότι έχουν ευρεία και μακρόχρονη εμπορική εφαρμογή (περίπου 8500 reactor-years), έχουν μελετηθεί ξεχωριστά σε ικανοποιητικό βαθμό και έχουν αναδειχθεί κάποιες ομοιότητες και διαφορές, οι οποίες γίνεται προσπάθεια να συμπεριληφθούν στο μοντέλο λήψης απόφασης.

Ο Modular HTGR (MHTGR) είναι ο προηγμένος τύπος του αερίψυκτου αντιδραστήρα υψηλής θερμοκρασίας (HTGR), ο οποίος είναι ο πιο προηγμένος τεχνολογικά τύπος μεταξύ των αερίψυκτων αντιδραστήρων θερμικών νετρονίων και αρκετά διαφορετικός από τους υπόλοιπους συγκρινόμενους τύπους, ως προς τα τεχνικά του χαρακτηριστικά. Υπενθυμίζουμε ότι, ο MHTGR έχει ως βασικό χαρακτηριστικό τα παθητικά συστήματα ασφαλείας του και συνήθως αποτελείται από τέσσερις ξεχωριστές διαμορφωμένες μονάδες μικρότερης ισχύος. Ο αντιδραστήρας αυτός χρησιμοποιεί ως καύσιμο και θόριο, χαρακτηριστικό το οποίο έχει ενδιαφέρον για το πολυκριτηριακό μοντέλο, όταν οι υπόλοιποι τύποι “καίουν” ουράνιο. Αυτό το χαρακτηριστικό ενίσχυσε την επιλογή του MHTGR έναντι του βρετανικού τύπου Magnox, ο οποίος παρουσιάζει μειονεκτήματα, σχετικά με το περιβλήμα του και το πυρηνικό καύσιμο - τα οποία αντιδρούν όχι μόνο με τον ατμοσφαιρικό αέρα, αλλά και με το CO₂ ιδίως σε υψηλές θερμοκρασίες-, έχει μεγάλες διαστάσεις και οι επιτρεπόμενες θερμοκρασίες λειτουργίας είναι χαμηλές. Επίσης, στον MHTGR το ήλιο (ψυκτικό μέσο) έχει καλύτερες δυνατότητες σε σχέση με το CO₂.

Οι CANDU, οι οποίοι χρησιμοποιούν φυσικό ουράνιο ως πυρηνικό καύσιμο και βαρύ νερό ως ψυκτικό (ή/και επιβραδυντή) έχουν σημαντική εμπορική εφαρμογή σήμερα και βασικό πλεονέκτημα ότι ανατροφοδοτούνται εν λειτουργία. Οι LMFBR (ψυχόμενοι με υγρό νάτριο) αποτελούν τον κύριο εφαρμοσμένο τύπο αναπαραγωγικών αντιδραστήρων, οι οποίοι έχουν μεγάλη διαθεσιμότητα σε παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, (υψηλός βαθμός απόδοσης), χρησιμοποιούν πολύ καλά το πυρηνικό καύσιμο λόγω της αναπαραγωγής και επίσης, προϋποθέτουν και συνεπάγονται την επανεπεξεργασία του καυσίμου (Reprocessing) στο κύκλο ζωής τους.

Οι MHTGR και οι LMFBR αποτελούν στην ουσία, τύπους υπό μελέτη και ανάπτυξη, αν και έχουν κατασκευασθεί και λειτουργήσει μοντέλα επίδειξης. Από αυτή την άποψη, οι LMFBR είναι πιο μελετημένος τύπος σε σχέση με τον MHTGR, όμως οι MHTGR βασίζονται στην ήδη μακρόχρονη εμπειρία από την εμπορική λειτουργία των αερίψυκτων τύπων (HTGR και AGR/Magnox). Επίσης, ο τύπος MHTGR βασίζεται

στον κύκλο ουρανίου-θωρίου, ο LMFBR στον κύκλο ουρανίου-πλουτωνίου, ενώ οι LWRs στο ουράνιο [U-238], κατά συνέπεια το μοντέλο κινείται σε όλους τους τεχνολογικά δυνατούς κύκλους καυσίμου.

Ως προς την ισχύ, συγκρίνονται αντιδραστήρες μέσης ισχύος περίπου 1000 MWe με αποκλίσεις, σύμφωνα με την τυπική μέγιστη ισχύ που σχεδιαστικά διατίθεται ο κάθε τύπος (Πίνακας 30). Ως προς τα τυπικά χαρακτηριστικά των συγκρινόμενων τύπων, αυτά περιγράφονται αναλυτικά στο Μέρος Α και συνοψίζονται στους Πίνακες 31 και 32. Ως προς τα μη ποσοτικά χαρακτηριστικά των συγκρινόμενων τύπων και τις επιδόσεις τους ως προς τις βασικές παραμέτρους του κύκλου ζωής τους, αυτά αξιολογούνται ποιοτικά με βάση το Μέρος Α της εργασίας και έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη η βέλτιστη διαθέσιμη τεχνολογία και η μέχρι τώρα εμπειρία.

Τα στοιχεία για τους LWR (PWR, BWR) που αναφέρονται στον Πίνακα 31, προϋποθέτουν την επανεπεξεργασία και την ανακύκλωση του ουρανίου και του πλουτωνίου στις μονάδες παρασκευής του πυρηνικού καυσίμου, ως αναπόσπαστο μέρος του κύκλου ζωής του καυσίμου με βάση την βέλτιστη διαθέσιμη τεχνολογία. Η επανεπεξεργασία και την ανακύκλωση του ουρανίου και του πλουτωνίου στους LWR αναφέρεται ότι, μπορούν να μειώσουν τις απαιτήσεις για καύσιμο κατά 15% για έκαστο ισότοπο [Nero, 1979]. Επομένως, οι ανάγκες σε καύσιμο που αναφέρονται, έχουν συμπεριλάβει αυτή την μείωση, όπως και την ετήσια εξισορρόπηση αναγκών για την αντικατάσταση του καυσίμου (refueling) και ένα μικρό ποσοστό εμπλουτισμού του φυσικού ουρανίου.

Όσον αφορά στους LMFBRs, οι οποίοι δεν συμπεριλαμβάνονται στον Πίνακα 31, τα τυπικά τεχνικά τους χαρακτηριστικά – όπως έχουν αναλυθεί στο Μέρος Α (Κεφάλαιο 1ο) - παρατίθενται στον Πίνακα 32.

Πίνακας 31: Τυπικά χαρακτηριστικά αντιδραστήρων ισχύος στα 1000 MWe
(Πηγή: Nero, 1979)

	PWR <i>Pressurized- Water Reactor</i>	BWR <i>Boiling-Water Reactor</i>	CANDU <i>Canadian Deuterium Uranium</i>	MHTGR <i>High- Temperature Gas-Cooled Reactor</i>
Coolant	Ordinary water	Ordinary water	Heavy water	Helium gas
Moderator	Ordinary water	Ordinary water	Heavy Water ^a	Graphite
% U-235 enrichment	2-4%	2-4%	0,7%	93% (initial load)
Fertile (bred) nuclide	U-238 (Pu-239)	U-238 (Pu-239)	U-238 (Pu-239)	Th-232 (U-233)
Yearly Uranium requirement at equilibrium (tons of U ₃ O ₈) ^b	129	121	125	85
Lifetime Uranium requirements (tons of U ₃ O ₈) ^b	4,100	4,020	4,160	2,980
Thermal efficiency (%)	32-33%	33-34%	28-30%	39%
Approx. once through external cooling water requirements (gal/min with 15°F temp. rise)	1,000,000	960,000	1,220,000	740,000
Core type	Fuel rods (bundled into assemblies)	Fuel rods assemblies	Fuel rods Assemblies (individually pressurized)	Fuel particles dispersed in graphite blocks)
Coolant pressure, psi (MPa)	2,250 (15.5)	1,020 (7.0)	1,490 (10.3)	700 (4.8)
Coolant temp. at exit from core, °F (°C)	620 (327)	545 (285)	590 (310)	1,370 (743)

- a. Το βαρύ νερό ως επιβραδυντής, είναι ξεχωριστά από το ψυκτικό και ευρίσκεται βασικά σε ατμοσφαιρική πίεση (15 psi)
- b. Οι ανάγκες αυτές του ουρανίου προϋποθέτουν την ανακύκλωση του πλουτωνίου και του ουρανίου στους LWR και BWR, την ανακύκλωση του ουρανίου στους HTGR, ενώ δεν προϋποτίθεται ανακύκλωση στους CANDU (στην πράξη, οι απαιτήσεις των CANDU είναι μεγαλύτερες από αυτές που δίνονται στον Πιν. 31).

Πίνακας 32: Τυπικά χαρακτηριστικά LMFBR (1200 MWe) (Πηγή: Cochran and Tsoulfanidis, 1992)

Coolant	Liquid sodium
Moderator	none
Fertile (bred) nuclide	U235/233-Pu239
Thermal Efficiency (%)	40
Assembly Geometry	Hexagonal array
Assembly length (m)	1
No. of assemblies	360
Core height (m)	1
Mass of fuel/ assembly (kg)	80
Burnup (MWd/MTU)	100,000
Power density (kW/ft)	280
Core type	Fuel rods Assemblies
Coolant pressure, psi (MPa)	Atmospheric
Coolant temp. at exit from core, °F	1000

Οι βασικές επιδόσεις των συγκρινόμενων τύπων αντιδραστήρων σε σχέση με τις βασικές παραμέτρους του κύκλου ζωής τους, αναλύθηκαν στο Μέρος Α.(Κεφάλαια 1ο και 2ο).

4.2. Τα κριτήρια

Τα κριτήρια αποτελούν τις βασικές παραμέτρους για την αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων. Το σύνολο των κριτηρίων για την επίλυση του προβλήματος επιλέχθηκε σύμφωνα με τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Να είναι πλήρη και περιεκτικά όλων των βασικών παραμέτρων του κύκλου ζωής των αντιδραστήρων.
- Να βασίζονται στη ρεαλιστική πραγματικότητα.
- Να μην αλληλοεπικαλύπτονται.
- Να ανταποκρίνονται όσο το δυνατόν στην αρχή της απλότητας.
- Να μην είναι πάρα πολλά σε αριθμό.

Οι εναλλακτικές λύσεις μελετήθηκαν ως προς τα παρακάτω δέκα (10) κριτήρια, τα οποία παρουσιάζουν σχετική ανεξαρτησία, είναι αντιπροσωπευτικά του προβλήματος και καλύπτουν όλες τις βασικές πλευρές του:

1. Το κριτήριο του Σταθερού Κόστους
2. Το κριτήριο του Μεταβλητού Κόστους
3. Το κριτήριο της Ασφάλειας
4. Το κριτήριο της Διαθεσιμότητας και Αξιοπιστίας στην Παροχή Ηλεκτρικής Ενέργειας
5. Το κριτήριο της Διαθεσιμότητας και των Δυνατοτήτων του Πυρηνικού Κανσίμου
6. Το κριτήριο της Ελαχιστοποίησης των Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων και της Διαχείρισης των Αποβλήτων
7. Το κριτήριο του Κόστους και των Απαιτήσεων του Παροπλισμού
8. Το κριτήριο της Κοινωνικής Αποδοχής
9. Το κριτήριο της Τεχνογνωσίας και Ειδίκευσης του Προσωπικού
10. Το κριτήριο των Δυνατοτήτων Τεχνολογικής Βελτίωσης και Αναβάθμισης.

4.2.1. Το κριτήριο του Σταθερού Κόστους (f_1)

Το σταθερό κόστος ενός πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος – όπως αυτό ορίστηκε και αναλύθηκε στο Μέρος Α - αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς παράγοντες/κριτήρια για την πυρηνική ενέργεια, ιδιαίτερα στην προοπτική της απελευθέρωσης του τομέα ενέργειας. Στα πλαίσια της συζήτησης που γίνεται σχετικά με την ανταγωνιστικότητα και τη βιωσιμότητα της πυρηνικής ενέργειας έναντι άλλων μορφών ηλεκτροπαραγωγής, μπορεί να θεωρηθεί ότι το κριτήριο αυτό βαρύνει σημαντικά. Συνιστώσες του σταθερού κόστους λαμβάνονται οι εξής (αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2ο-παράγρ.7):

- Κόστος γής και ιδιοκτησίας
- Κόστος σχεδιασμού μονάδας
- Κόστος αδειοδότησης και ρυθμιστικών απαιτήσεων κατά την κατασκευή
- Κόστος μηχανολογικού εξοπλισμού
 - Κόστος εξοπλισμού πυρήνα
 - Κόστος συστημάτων παραγωγής ατμού
 - Κόστος συστημάτων παραγωγής θερμότητας
 - Κόστος συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
 - Κόστος συστημάτων έκτακτης ανάγκης (ECC)
 - Κόστος συμπληρωματικών διατάξεων ασφάλειας

- Κόστος περιβλήματος
- Κόστος συστήματος αποθήκευσης αποβλήτων
- Κόστος κατασκευής
 - Κόστος εργολάβου, ηλεκτρολογικών και μηχανολογικών εργασιών
 - Κόστος εργασιών πολιτικού μηχανικού
- Κόστος αναγκαίων τροποποιήσεων μετά την κατασκευή
- Κόστος δανείου επένδυσης-Τόκοι κατά την κατασκευή-Φόροι.

Για λόγους δυνατότητας σύγκρισης των διαφόρων σεναρίων, θεωρήθηκε μέση περίοδος κατασκευής για κάθε σταθμό 7-10 έτη και συνθήκες δανεισμού με παρόμοιους χρηματοοικονομικούς όρους.

4.2.2. Το κριτήριο του Μεταβλητού Κόστους (f_2)

Στο κριτήριο του μεταβλητού κόστους συμπεριλαμβάνεται η οικονομική πλευρά της διαθεσιμότητας και της αξιοπιστίας των συγκρινόμενων αντιδραστήρων σχετικά με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Ως συνιστώσες του σταθερού κόστους λαμβάνονται οι εξής (όπως αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2ο-παράγρ. 7):

- Κόστος λειτουργίας και συντήρησης (ανατροφοδοσία καυσίμου, αντικατάσταση εξοπλισμού, κλπ)
- Κόστος διαχείρισης του σταθμού (management, μισθοδοσία προσωπικού, δημόσιες σχέσεις, κλπ)
- Κόστος πυρηνικού καυσίμου (front end–separative work and conversion, fuel fabrication, transportation)
- Κόστος ρυθμιστικών και κανονιστικών απαιτήσεων κατά την λειτουργία (εξωτερικές επιθεωρήσεις, συμμόρφωση με νέες τεχνικές απαιτήσεις, κλπ)
- Κόστη αποταμιεύσεων για την τελική διάθεση
 - του εξαντλημένου καυσίμου (back end) και
 - των υψηλής (και μεσαίας) ραδιενέργειας αποβλήτων (μεταφορά, επεξεργασία, τελική διάθεση)
- Κόστος αποταμιεύσεων για τον παροπλισμό του σταθμού
 - κόστος διάλυσης και απομόλυνσης
 - κόστος διαχείρισης και διάθεσης των υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων από τον παροπλισμό
- Κόστος ασφάλειας.

Για λόγους δυνατότητας σύγκρισης των διαφόρων σεναρίων, θεωρείται ότι οι σταθμοί λειτουργούν 30-35 έτη, σύμφωνα με τον μέσο παράγοντα ικανότητάς τους, στο σχεδιαστικό burnup του καυσίμου και με προγραμματισμένες διακοπές, αυτές που προβλέπονται για την ανατροφοδοσία του καυσίμου κάθε τύπου.

Σχετικά με την χρήση του πυρηνικού καυσίμου και την διάθεσή του, προϋποτίθεται η εφαρμογή της βέλτιστης διαθέσιμης τεχνολογίας (BAT) για κάθε τύπο. Είναι γεγονός ότι, οι αντιδραστήρες ισχύος αναγκάζονται συνήθως να διακόψουν τη λειτουργία τους και σε μη προγραμματισμένη βάση ετησίως (για έκτακτη συντήρηση, επισκευές, κλπ) για λόγους ασφάλειας και καλής λειτουργίας. Στην μελέτη αυτή, θεωρούμε ότι συμβαίνουν μόνο προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας. Επίσης, ότι οι αριθμητικές ανάγκες σε προσωπικό είναι συγκρίσιμες για όλους τους εξεταζόμενους τύπους αντιδραστήρων.

4.2.3. Το κριτήριο της Ασφάλειας (f_3)

Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2 (παράγρ. 1) η πυρηνική ασφάλεια εννοείται σαν «ελευθερία από κίνδυνο ή βλάβη» και αφορά στην προστασία του πυρηνικού σταθμού από ενδεχόμενες βλάβες και στον αποκλεισμό των εκλύμενων ραδιενεργών ακτινοβολιών από τον άνθρωπο και το φυσικό περιβάλλον. Η ασφαλής παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αντιδραστήρες ισχύος αποτελεί ένα ιδιαίτερης σημασίας κριτήριο και προϋποθέτει την εφαρμογή των τριών επιπέδων ασφάλειας:

- στον σχεδιασμό, στην κατασκευή και στη λειτουργία των σταθμών
- σε ανώμαλες συνθήκες ή βλάβες και
- στην περίπτωση ατυχήματος.

Συγκεκριμένα, το κριτήριο αυτό αφορά:

- στα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά των συγκρινόμενων τύπων
- στην αξιοπιστία των συστημάτων τους
- στην υπάρχουσα εμπειρία από τη λειτουργία σε κανονικές συνθήκες
- στην υπάρχουσα εμπειρία από συμβάντα ή ατυχήματα
- στις αναφορές των ερευνητών, των χρηστών και των κατασκευαστών
- στις τεχνολογικές δυνατότητες βελτίωσης της ασφάλειας.

Θεωρείται δεδομένο ότι, οι συγκρινόμενοι τύποι αντιδραστήρων λειτουργούν σύμφωνα με τις τεχνικές απαιτήσεις ασφαλείας, ότι ελέγχονται συστηματικά από τους αρμόδιους διεθνείς οργανισμούς σε θέματα ασφάλειας και ότι, διαθέτουν ενεργά και ελεγχόμενα όλα τα συστήματα ασφαλείας τους (ενεργητικά ή παθητικά). Στο κριτήριο αυτό δεν μελετώνται “κρυφά κριτήρια” (hidden criteria) που ενδεχομένως υπάρχουν σε πραγματικές συνθήκες, στην ποιότητα της διαχείρισης της λειτουργίας των σταθμών (management) και στο επίπεδο ειδίκευσης και εκπαίδευσης των χειριστών που απαιτείται ώστε να διασφαλίζεται η σφαλής λειτουργία των σταθμών (μελετάται στο κριτήριο f_9).

4.2.4. Το κριτήριο της Διαθεσιμότητας και της Αξιοπιστίας στην Παροχή Ηλεκτρικής Ενέργειας (f_7)

Η αξιοπιστία και η διαθεσιμότητα της μονάδας, όσον αφορά στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα επίσης σημαντικό κριτήριο για την τεχνικοοικονομική αξιολόγηση της πυρηνικής ενέργειας. Στο κριτήριο αυτό περιλαμβάνεται κατ' αρχήν, η τεχνική έννοια της απόδοσης και της παραγωγικής ικανότητας του πυρηνικού σταθμού (operability, sensitivity) με όρους διαθεσιμότητας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας βάσης από την ετήσια λειτουργία στον αναφερόμενο για κάθε τύπο παράγοντα ικανότητας (θεωρούνται περίπου 8670 ώρες λειτουργίας ετησίως). Το οικονομικό μέρος μιάς τέτοιας προσέγγισης δεν περιλαμβάνεται στο κριτήριο αυτό, μιάς και επιμερίζεται στα κριτήρια του σταθερού και του μεταβλητού κόστους (f_1, f_2) Ως παράμετροι αναφοράς της τεχνικής αξιοπιστίας και της διαθεσιμότητας της μονάδας λαμβάνονται οι εξής τεχνικοί παράμετροι:

- ο μέσος παράγοντας ικανότητας (load factor)
- το σχεδιαστικό burnup του πυρηνικού καυσίμου
- οι ανάγκες σε ανατροφοδοσία του πυρηνικού καυσίμου (ποσότητα καυσίμου που αντικαθίσταται και συχνότητα ετησίως)
- Η ολική θερμική απόδοση του σταθμού
- Ο σχεδιαστικός χρόνος ζωής.

4.2.5. Το κριτήριο της Διαθεσιμότητας και των Δυνατοτήτων του Πυρηνικού Καυσίμου (f_5)

Είναι γνωστό ότι, ενώ πολλές χώρες έχουν εμπορικούς πυρηνικούς αντιδραστήρες, η υπόθεση της εξόρυξης και επεξεργασίας του ουρανίου αφορά πολύ λίγα κράτη, όπως και η ροή των υπόλοιπων πυρηνικών υλικών [UI Trade Issues Working Group Report, 2000]. Εγκαταστάσεις μετατροπής (conversion) του ουρανίου υπάρχουν μόνο σε πέντε χώρες, ενώ υπηρεσίες εμπορικού εμπλουτισμού παρέχουν μόνο τέσσερις οργανισμοί σε μονάδες που βρίσκονται σε έξι χώρες. Η παρασκευή (fabrication) είναι πιά ευρέως διαδεδομένη, εφόσον σχετικές εγκαταστάσεις υπάρχουν στις περισσότερες χώρες με πυρηνική ενέργεια. Στα πλαίσια αυτά, η διαθεσιμότητα πυρηνικού καυσίμου στην αγορά σε λογικές τιμές και η ανεξαρτησία των παραγωγών πυρηνικής ενέργειας (χρηστών) από τους προμηθευτές αποτελούν σοβαρό θέμα, με πολύπλοκες επιδράσεις γεωπολιτικής σημασίας. Εάν ένας σταθμός χρησιμοποιεί εμπλουτισμένο ή όχι καύσιμο, ή εάν ενέχεται μετατροπή του κύκλου του πυρηνικού του καυσίμου, έχει σημαντική επίπτωση – εκτός από το κόστος – και στον βαθμό εξάρτησής του από συγκεκριμένες χώρες-προμηθευτές και συγκεκριμένες τεχνολογίες και τεχνογνωσίες.

Στο κριτήριο αυτό, συνυπολογίζονται επίσης:

- η φύση του καυσίμου υλικού, η οποία δημιουργεί δυνατότητες για εξοικονόμηση καυσίμου, για καλύτερη χρήση κλπ ή δημιουργεί δεσμεύσεις τεχνικού ή άλλου χαρακτήρα
- οι αναγκαίες ποσότητες για την λειτουργία του σταθμού, οι οποίες δημιουργούν τις ανάγκες ανατροφοδосίας και τις ανάγκες προγραμματισμένων διακοπών και επηρεάζουν άμεσα και έμμεσα το κόστος λειτουργίας και συντήρησης
- οι δυνατότητες χρήσης ανακυκλωμένου καυσίμου (με τη βέλτιστη διαθέσιμη τεχνολογία)
- ο βαθμός τεχνικής δυσκολίας που συνεπάγεται το πυρηνικό καύσιμο, η πολυπλοκότητα στην παρασκευή του (εμπλουτισμένο ή όχι, MOX, burnup, κλπ).

4.2.6. Το κριτήριο της Ελαχιστοποίησης των Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων και της Ασφαλούς Διαχείρισης των Αποβλήτων (f_6)

Η ασφαλής παραγωγή πυρηνικής ενέργειας προϋποθέτει:

- την ασφαλή διαχείριση του εξαντλημένου καυσίμου και των υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων
- την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά την κανονική λειτουργία
- την ελαχιστοποίηση των ραδιολογικών επιπτώσεων στον άνθρωπο και στο περιβάλλον σε συνθήκες ατυχήματος.

Σχετικά με την ασφαλή διαχείριση του εξαντλημένου καυσίμου και των υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων, όπως και για λόγους πυρηνικών διασφαλίσεων, το κριτήριο εξετάζει τα εξής θέματα:

- τη δυνατότητα επανεπεξεργασίας και την ανακύκλωσης του πυρηνικού καυσίμου (χρήση καυσίμου MOX).
- εάν είναι τεχνικά δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ο κύκλος του θορίου.
- εάν παράγεται weapons grade πλουτόνιο ή εάν μπορεί αν καεί weapons grade πλουτόνιο ως καύσιμο.
- τις παραγόμενες ποσότητες και την ποιότητα των αποβλήτων (υγρά και στερεά απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας) – εφόσον αυτή διαφοροποιείται από τύπο σε τύπο – και τα αντίστοιχα απόβλητα από τον παροπλισμό και τη διάλυση των εγκαταστάσεων.

Σχετικά με την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά την κανονική λειτουργία, το κριτήριο εξετάζει:

- τις απορροές αέριας ή/και υγρής ρύπανσης.
- τις ιδιαιτερότητες των παραγομένων ραδιονουκλιδίων.

Σχετικά με την ελαχιστοποίηση των ραδιολογικών επιπτώσεων στον άνθρωπο και στο περιβάλλον σε συνθήκες ατυχήματος, το κριτήριο εξετάζει:

- τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πυρήνα.

4.2.7. Το κριτήριο του Κόστους και των Απαιτήσεων του Παροπλισμού (f_7)

Στο κριτήριο αυτό εξετάζονται:

- Το κόστος του παροπλισμού και διάλυσης των σταθμών.
- Οι τεχνικές απαιτήσεις για τον ασφαλή παροπλισμό των συγκρινόμενων τύπων.
- Ο βαθμός δυσκολίας και πολυπλοκότητας της διαδικασίας παροπλισμού.

4.2.8. Το κριτήριο της Κοινωνικής Αποδοχής (f_8)

Το κριτήριο της κοινής αποδοχής αποτελεί – μαζί με την ασφάλεια της λειτουργίας, την οικονομικότητα και την ασφαλή διαχείριση των αποβλήτων – ένα από τα βασικότερα κριτήρια για την ανταγωνιστικότητα της πυρηνικής ενέργειας και την σύνδεσή της ή όχι, με την έννοια της αειφορίας (sustainability) [Kupitz, 1995]. Γενικότερα, ο παράγοντας της αποδοχής της κοινωνίας είναι ιδιαίτερα κρίσιμος για την επιτυχή έγκριση, υλοποίηση και λειτουργία πολλών ενεργειακών έργων. Ιδιαίτερα στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας, μπορεί να γίνει απολύτως αποφασιστικός. Στο κριτήριο αυτόν εξετάζονται:

- Η αντιληπτή ζημία και το αντιληπτό όφελος
- Η αντιληπτή ασφάλεια
- Η συμμόρφωση των πυρηνικών σταθμών με τις κανονιστικές απαιτήσεις και το θεσμικό πλαίσιο
- Θέματα μεταφοράς ραδιενεργών υλικών από κατοικημένες περιοχές
- Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις
- Θέματα μη εξάπλωσης των πυρηνικών όπλων.

Στη μελέτη του κριτηρίου αυτού, λαμβάνεται υπόψη ότι είναι δύσκολο να μετρηθεί η αντιμετώπιση του κοινού έναντι των τύπων των αντιδραστήρων. Η προσέγγιση στο κριτήριο αυτό είναι τελείως υποθετική και προϋποθέτει ότι το κοινό έχει ενημερωθεί για τον κάθε τύπο αντιδραστήρα με όμοιο τρόπο και ισοβαρώς. Η υπόθεση αυτή, δεν προσπαθεί να ενσωματώσει το πολύ σοβαρό κριτήριο της αποδοχής ή όχι γενικά της πυρηνικής ενέργειας έναντι άλλων μορφών ηλεκτροπαραγωγής από το κοινό (ναι ή όχι:), αλλά επιχειρεί μία ενδεικτική αποτίμηση εκ μέρους του, των εξεταζόμενων τύπων αντιδραστήρων (εάν ναι, τότε ποιός τύπος:). Είναι φανερό ότι, δύσκολα ένα τέτοιο ερώτημα μπορεί να απαντηθεί από ερωτώμενους πολίτες σε ρεαλιστικές συνθήκες, ακόμα και από ειδικές κοινωνικές ομάδες.

Παρόλα αυτά, κρίθηκε απαραίτητο να συμπεριληφθεί το κριτήριο αυτό με τη σχετική βαρύτητά του, ώστε να είναι πλήρες το μοντέλο από πλευράς σχεδιασμού και να προσεγγίζει όσο το δυνατόν τις πραγματικές συνθήκες.

4.2.9. Το κριτήριο της τεχνογνωσίας και ειδικευσης του προσωπικού (f_9)

Στο κριτήριο αυτό εξετάζονται:

- Το απαιτούμενο επίπεδο της τεχνογνωσίας για τον σχεδιασμό και την κατασκευή των εξεταζόμενων τύπων
- Το επίπεδο της απαιτούμενης ειδικευσης και συνεχούς εκπαίδευσης του προσωπικού, ώστε να διασφαλίζεται η καλή λειτουργία των εξεταζόμενων τύπων, σύμφωνα με την στάθμη της τεχνικής.

Το κριτήριο αυτό μελετάται λαμβάνοντας υπόψη ότι, η πυρηνική τεχνολογία είναι υψηλή τεχνολογία με μεγάλες απαιτήσεις εκπαίδευσης και κατάρτισης και ότι, ο ανθρώπινος παράγοντας έχει ιδιαίτερη σημασία σε συνθήκες ατυχήματος.

4.2.10. Δυνατότητες τεχνολογικής βελτίωσης και αναβάθμισης (f_{10})

Στο κριτήριο αυτό εξετάζονται:

- Η τεχνική ευελιξία και δυνατότητα των συγκρινόμενων τύπων για συνεχή αναβάθμιση (backfitting), η οποία συνεπάγεται την επέκταση της ζωής του σταθμού, την αύξηση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας του, την ανταγωνιστικότητά του, κλπ.
- Η δυνατότητα των εξεταζόμενων τύπων να ενσωματώσουν σημαντικές τεχνολογικές αλλαγές στο μέλλον, οι οποίες θα αντικατοπτρίζουν την στάθμη της τεχνικής και τεχνολογίας.

Το κριτήριο αυτό μελετάται λαμβάνοντας υπόψη ότι, όλοι οι εξεταζόμενοι αντιδραστήρες διαθέτουν πιά προηγμένους τύπους σε ερευνητικό ή πειραματικό στάδιο. Στην περίπτωση αυτή, αξιολογούνται οι δυνατότητες των εξεταζόμενων τύπων να αξιοποιήσουν άμεσα και γρήγορα την τεχνολογική πρόοδο, όσον αφορά στο καύσιμο (κυρίως στο backend του καυσίμου), στην ασφάλεια, στην αύξηση της ισχύος, κλπ.

4.2.11. Καθορισμός βαρών

Το κάθε κριτήριο αποτελεί μία χαρακτηριστική παράμετρο της τελικής απόφασης. Η σχετική βαρύτητα και σημασία (importance) του έναντι των άλλων κριτηρίων, είναι επίσης μία σημαντική παράμετρος στην επιλογή της τελικής απόφασης [Roy, 1981]. Μεγαλύτερη ή μικρότερη προτίμηση σε ένα κριτήριο έναντι ενός άλλου κατά μια μονάδα, μπορεί να αλλάξει τελειώς τη τελική απόφαση. Και αυτό συμβαίνει κατά κανόνα και στην πραγματική ζωή. Διαφορετικοί λήπτες της απόφασης – ανάλογα με την υποκειμενική τους άποψη - ενδέχεται να δώσουν διαφορετική προτίμηση σε σημαντικά κριτήρια (ιδιαίτερα σε εκείνα που δεν αξιολογούνται με απόλυτα νούμερα) προσεγγίζοντάς τα από διαφορετική σκοπιά.

Στην περίπτωση μας, ο λήπτης της απόφασης εξέτασε ανά δύο τα κριτήρια και κατέληξε στη ιεράρχηση της σχετικής βαρύτητας των κριτηρίων, όπως περιγράφεται στον Πίνακα 33. Στη σχετική αυτή ιεράρχηση των κριτηρίων, το βαρύτερο κριτήριο είναι το κριτήριο του σταθερού κόστους (f_7). Στην διαδικασία ιεράρχησης των κριτηρίων, ο λήπτης της απόφασης, εξέτασε τη σημασία των κριτηρίων ανά δύο μεταξύ τους και μελέτησε ιδιαίτερα τα δύο σημαντικότερα κριτήρια: το κριτήριο της ασφάλειας και το κριτήριο του σταθερού κόστους. Η ιεράρχηση που τελικά επιλέγη, θεωρήθηκε ενδιαφέρουσα για την μελέτη του προβλήματος στις επικείμενες νέες συνθήκες απελευθέρωσης της αγοράς ενέργειας, στις οποίες οι αντιδραστήρες που λειτουργούν στην Ευρωπαϊκή Ένωση θα παράγουν και θα πωλούν ηλεκτρική ενέργεια από το 2001.

Διάφορες μέθοδοι – άμεσες ή έμμεσες - έχουν προταθεί για τον καθορισμό των προτιμήσεων του λήπτη της απόφασης ως προς τα κριτήρια. Στην περίπτωση μας, ο λήπτης της απόφασης επέλεξε την έμμεση μέθοδο και απέδωσε τα βάρη μέσω της ιεραρχικής σχετικής κατάταξης των κριτηρίων σε φθίνουσα σειρά κατάταξης και συγκρίνοντάς τα ανά δύο μέσα στο σύνολο k . Το σπουδαιότερο τελικά κριτήριο του σετ, έχει το μεγαλύτερο επί τοις εκατό βάρος.

Η τεχνική καθορισμού των βαρών και ταξινόμησης των κριτηρίων που ακολουθήθηκε, βασίστηκε στα εξής βήματα:

1. Ταξινομήθηκαν τα βάρη κατά σειρά σπουδαιότητας και σημασίας για τον λήπτη της απόφασης αρχίζοντας από το ασθενέστερο σε σημασία:

$$f_9 \rightarrow f_{10} \rightarrow f_7 \rightarrow f_6 \rightarrow f_5 \rightarrow f_4 \rightarrow f_8 \rightarrow f_2 \rightarrow f_3 \rightarrow f_1$$

2. Συσχετίσθηκαν τα κριτήρια με την παραπάνω σειρά κατάταξης ανά ζεύγη μέσω του υπολογισμού της διαφοράς διαστήματος (μικρότερη διαφορά διαστήματος δύο κριτηρίων: $1d$) αρχίζοντας από τα ασθενέστερα σε σημασία. Με τον τρόπο αυτό υπολογίσθηκαν οι διαφορές των κριτηρίων ανά ζεύγη, ως εξής:

$$(f_9, f_{10}) = 1 d$$

$$(f_{10}, f_7) = 1 d$$

$$(f_7, f_6) = 2 d$$

$$(f_{10}, f_5) = 1 d$$

$$(f_5, f_4) = 1,5 d$$

$$(f_4, f_8) = 2 d$$

$$(f_8, f_2) = 2 d$$

$$(f_2, f_3) = 2,5 d$$

$$(f_3, f_1) = 2 d$$

3. Τα βάρη κανονικοποιήθηκαν και εκφράστηκαν επί τοις εκατό όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 34. Τα κριτήρια f_9 και f_{10} , όπως και τα f_6 και f_7 ευρέθησαν ισοβαρή μεταξύ τους. Η σχετική βαθμολογία των κριτηρίων ήταν επίσης συμβατή και με το υπολογιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της βέλτιστης λύσης. Η τεχνική απόδοσης βαρών που χρησιμοποιήθηκε, αντιμετώπισε τα κριτήρια σαν ένα σύνολο διακριτών παραμέτρων και θεωρήθηκε λιγότερο τυχαία από την άμεση απόδοση βαρών σε κάθε κριτήριο ξεχωριστά [Georgoroulou et al, 1998].

33: Βάρος Κριτηρίων σε φθίνουσα σειρά (priority ranking)

1	f_7 Σταθερό Κόστος	23	MINIMUM
2	f_3 Ασφάλεια	20	MAXIMUM
3	f_2 Μεταβλητό Κόστος	16	MINIMUM
4	f_8 Κοινωνική Αποδοχή	13	MAXIMUM
5	f_4 Διαθεσιμότητα και Αξιοπιστία Παροχής Ηλεκτρικής Ενέργειας	9	MAXIMUM
6	f_5 Διαθεσιμότητα & Δυνατότητες Πυρηνικού Καυσίμου	7	MAXIMUM
7	f_6 Ελαχιστοποίηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων και Διαχείριση Αποβλήτων	4	MAXIMUM
8	f_1 Κόστος και Απαιτήσεις Παροπλισμού	4	MINIMUM
9	f_9 Επίπεδο Τεχνογνωσίας και Ειδικευσης Προσωπικού	2	MAXIMUM
10	f_{10} Δυνατότητες Τεχνολογικής Βελτίωσης και Αναβάθμισης	2	MINIMUM
		100	

4.2.12. Βαθμολόγηση λύσεων ως προς τα κριτήρια

Για την αξιολόγηση (βαθμολόγηση) της συμπεριφοράς των εναλλακτικών λύσεων ως προς το ορισθέν σύνολο των κριτηρίων, ορίστηκε επίσης, η αντίστοιχη κλίμακα βαθμολόγησης για κάθε κριτήριο. Τα κριτήρια του δεδομένου προβλήματος δεν ήταν δυνατόν να βαθμολογηθούν με απόλυτα νούμερα, εφόσον υπήρχε αβεβαιότητα στην αξιολόγησή τους. Οι επιδόσεις των λύσεων ως προς τα κριτήρια βαθμολογήθηκαν κατά συνέπεια ποιοτικά, σε μία κλίμακα από το 1 έως το 5 με ακρίβεια δεκαδικού, θεωρώντας την μέγιστη βαθμολογία ως βέλτιστη ασχέτως της κατεύθυνσης του κριτηρίου (εάν δηλαδή η βέλτιστη συμπεριφορά του συγκεκριμένου κριτηρίου πρέπει να μεγιστοποιηθεί ή να ελαχιστοποιηθεί).

4.3. Τεχνική βαθμολόγησης εναλλακτικών λύσεων και οικοδόμηση της μήτρας προτίμησης

Η ορθογωνική μήτρα της προτίμησης των λύσεων, που αντικατοπτρίζει το πολυκριτηριακό πρόβλημα, παρίσταται στον Πίνακα 34. Οι εναλλακτικές λύσεις συγκρίθηκαν ανά δύο ως προς κάθε κριτήριο ξεχωριστά με βάση τη συνάρτηση προτίμησης $P(a_{ij})$, $P: K \times K \rightarrow [0,1]$ με σκοπό να οικοδομηθεί μία ιεραρχική σχέση με βάση την έννοια του γενικευμένου κριτηρίου.

Για όλα τα κριτήρια επιλέχθηκε ως τύπος γενικευμένου κριτηρίου το Gaussian Criterion, $H(d) = 1 - \exp\{-d^2/2\sigma^2\}$, το οποίο δεν παρουσιάζει ασυνέχειες και εξασφαλίζει σταθερότητα των αποτελεσμάτων [Brans et al, 1986]. Ως σ_i , ορίστηκε η διαφορά της μικρότερης από τη μέγιστη αριθμητική κανονικοποιημένη βαθμολογία της κάθε λύσης ανά κριτήριο.

Το αριθμητικό αποτέλεσμα της σύγκρισης των λύσεων ανά κριτήριο ορίστηκε ως δείκτης προτίμησης (preference index) και ως αριθμός στο διάστημα $[0,1]$ που αντιπροσωπεύει τη διαφορά των αξιολογήσεων (βαθμολογιών) του συγκρινόμενου ζεύγους των λύσεων. Ο πολυκριτηριακός δείκτης προτίμησης της κάθε λύσης ορίστηκε ως ο μέσος όρος του αθροίσματος των συναρτήσεων προτίμησης ανά κριτήριο πολλαπλασιασμένων επί το αντίστοιχο βάρος του κάθε κριτηρίου [Brans et al, 1986]:

$$\Pi(a, \beta) = \frac{\sum_{i=1}^k \pi_i P_i(a, b)}{\sum_{i=1}^k \pi_i}$$

Ο πολυκριτηριακός δείκτης προτίμησης της κάθε λύσης καθορίζει την ταξινόμηση του συνόλου των K λύσεων, η οποία μπορεί να παρασταθεί γραφικά μέσω των κόμβων (valued outranking graph), όπου αναπαρίστανται οι ροές εισόδου και εξόδου για κάθε ζεύγος συγκρινόμενων λύσεων.

Πίνακας 34: Ορθογωνική μήτρα προτίμησης λύσεων – Βασικά Σενάρια

	$X1$	$X2$	$X3$	$X4$	$X5$
	<i>MHTGR</i>	<i>PWR</i>	<i>BWR</i>	<i>CANDU</i>	<i>LMFBR</i>
<i>f1</i> σταθερό κόστος	3,0-4,0	3,5	3,6	3,8	2,9
<i>f2</i> μεταβλητό κόστος	3,2	3,4	3,6	3,9	2,5
<i>f3</i> ασφάλεια	3,5	3,4	3,3	3,6	3,5
<i>f4</i> διαθεσιμότητα & αξιοπιστία παραγωγής ενέργειας	3,6	3,0	3,2	2,9	4,0
<i>f5</i> διαθεσιμότητα & δυνατότητες πυρην καυσίμου	4,1	3,5	3,8	4,0	4,2
<i>f6</i> ελαχιστοποίηση περιβαλλ. επιπτώσεων και διαχείριση αποβλήτων	3,7	3,3	3,1	3,5	3,8
<i>f7</i> κόστος & τεχνικές απαιτήσεις παροπλισμού	3,5	3,1	3,1	3,5	3,5
<i>f8</i> κοινωνική αποδοχή	3,6	3,4	3,4	3,1	3,0
<i>f9</i> επίπεδο τεχνολογίας και ειδίκευσης προσωπικού	2,7	3,9	3,9	3,1	2,1
<i>f10</i> δυνατότητες τεχνολογικής βελτίωσης και αναβάθμισης	3,5	3,1	3,1	3,3	3,6

4.4. Ταξινόμηση των λύσεων με βάση τις ροές εισόδου και εξόδου

Υπολογίστηκαν για κάθε εναλλακτική λύση μία ροή εισόδου $\varphi^-(x)$ (entering flow) και μία ροή εξόδου $\varphi^+(x)$ (leaving flow): Η ροή εξόδου είναι το άθροισμα των δεικτών προτίμησης ανά κριτήριο, ενώ η ροή εισόδου είναι το άθροισμα των δεικτών προτίμησης ανά λύση. Με βάση τις υπολογισθείσες ροές, ταξινομήθηκαν οι λύσεις με α) τη Μερική Ταξινόμηση (partial preorder, PROMETHEE I) και β) με την Απόλυτη ή Συνολική Ταξινόμηση (complete preorder, PROMETHEE II) σύμφωνα με τον υπολογισμό της καθαρής ροής.

5. Εφαρμογή μοντέλου –Βασικά Σενάρια

Τα βασικά σενάρια που μελετήθηκαν περιγράφονται στον Πίνακα 34 και ενέχουν μία αβεβαιότητα ως προς την αξιολόγηση (βαθμολογία) του σταθερού κόστους (f_i) (το βαρύτερο κριτήριο), το οποίο βαθμολογήθηκε στα όρια του εύρους 3,0-4,0 (μέγιστη βαθμολογία 5).

Η αβεβαιότητα στην βαθμολογία του κριτηρίου αυτού προέρχεται από το γεγονός ότι, ο τύπος Modular HTGR δεν έχει ακόμα ευρεία βιομηχανική εφαρμογή. Αποτελεί προηγμένο τύπο του αντιδραστήρα HTGR, ο οποίος έχει εφαρμοσθεί επί δεκαετίες και σε αυτόν έχουν ενσωματωθεί βελτιώσεις που έχουν σημαντική επίπτωση στο σταθερό κόστος και στην ασφάλειά του. Παρόλα αυτά, δεν υπάρχουν ακριβή νούμερα ή σαφείς εκτιμήσεις περί του σταθερού κόστους, που να βασίζονται στην εμπειρία..

Το απλό μοντέλο

Παράλληλα με την εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE, επιχειρήθηκε η ιεράρχηση των λύσεων του προβλήματος με απλούστερο τρόπο, με βάση το υπολογιστικό Excel (το Απλό Μοντέλο). Σύμφωνα με το απλό Μοντέλο, οι λύσεις ταξινομήθηκαν με βάση τον υπολογισμό του αθροίσματος των επιμέρους βαθμολογιών ανά κριτήριο και για κάθε εναλλακτική λύση, πολλαπλασιασμένων επί το αντίστοιχο βάρος του κριτηρίου. Η ιεράρχηση των λύσεων σύμφωνα με το απλό μοντέλο για κάθε σενάριο παρατίθεται ταυτόχρονα με τα αποτελέσματα της μεθόδου PROMETHEE (Βασικά Σενάρια: Πίνακες 35α και 36α, Σενάρια 3 και 4: Πίνακες 37α και 38α, αντιστοίχως). Σύμφωνα με το απλό μοντέλο, το φαινόμενο είναι γραμμικό και ως βέλτιστη λύση εμφανίζεται η λύση των MHTGR (Διάγραμμα 13).

5.1. Βασικό Σενάριο 1 (το αισιόδοξο σενάριο)

Στο Βασικό Σενάριο 1, η βαθμολογία της λύσεως X_1 (MHTGR) ως προς το κριτήριο του σταθερού κόστους (f_i) βαθμολογήθηκε με 4,0 (μέγιστη βαθμολογία 5). Η βαθμολογία αυτή υποστηρίζει την οικονομικότητα των MHTGR ως modular τύπου, αποτελούμενου δηλαδή από αυτόνομα τμήματα μικρότερης ισχύος, ως συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι των υπόλοιπων τύπων αντιδραστήρων.

Η μήτρα προτίμησης των λύσεων παρατίθεται στον Πίνακα 35, ενώ τα αποτελέσματα της Μερικής και της Συνολικής Ταξινόμησης των λύσεων στους Πίνακες 35γ και 35δ αντίστοιχος μαζί με τις αντίστοιχες γραφικές απεικονίσεις.

Στο σενάριο αυτό, τόσο με τη τεχνική της Συνολικής Ταξινόμησης, όσο και με τη Μερική Ταξινόμηση, έχουμε ως σταθερή βέλτιστη λύση την X_7 (MHTGR) και αμέσως καλύτερη λύση, την X_7 (CANDU).

Πίνακας 35: Βασικό Σενάριο 1 – Ορθογωνική μήτρα προτίμησης λύσεων

	W%		X_1	X_2	X_3	X_7	X_5
f_1	23	max	4,0	3,5	3,6	3,8	2,9
f_2	16	max	3,2	3,4	3,6	3,9	2,5
f_3	20	max	3,5	3,4	3,3	3,6	3,5
f_4	9	max	3,6	3,0	3,2	2,9	4,0
f_5	7	max	4,1	3,5	3,8	4,0	4,2
f_6	4	max	3,7	3,3	3,1	3,5	3,8
f_7	4	max	3,5	3,1	3,1	3,5	3,5
f_8	13	max	3,6	3,4	3,4	3,1	3,0
f_9	2	max	2,7	3,9	3,9	3,1	2,1
f_{10}	2	max	3,5	3,1	3,1	3,3	3,6

Πίνακας 35α: Βασικό Σενάριο 1 – Υπολογισμός με το Απλό Μοντέλο (υπολογιστικό Excel)

	$w\%$	X_1 HTGR	X_2 PWR	X_3 BWR	X_4 CANDU	X_5 LMFBR	σ_i max-min
f_1	23	4,0	92,00	80,5	3,8	87,4	66,7
ψf_2	16	3,2	51,20	54,4	3,9	62,4	40
f_3	20	3,5	70,00	68,0	3,6	72	70
f_4	9	3,6	32,40	27,0	2,9	26,1	36
f_5	7	4,1	28,70	24,5	4,0	28	29,4
f_6	4	3,7	14,80	13,2	3,5	14	15,2
f_7	4	3,5	14,00	12,4	3,5	14	14
f_8	13	3,6	46,80	44,2	3,1	40,3	39
f_9	2	2,7	5,40	7,8	3,1	6,2	4,2
f_{10}	2	3,5	7,00	6,2	3,3	6,6	7,2
	100		362,30	338,2	357	344,8	321,7

Πίνακας 35β: Βασικό Σενάριο 1- Multicriteria Preference Index

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	$\varphi^+(x)$
X_1	0	0,1016091	0,1070058	0,0622509	0,1615302	0,4323961
X_2	0,0056096	0	0,0124079	0,0175275	0,0954342	0,1309792
X_3	0,0103844	0,0101904	0	0,0204420	0,1184244	0,1594412
X_4	0,0300964	0,0927722	0,1121973	0	0,1438409	0,3789068
X_5	0,0072707	0,1014293	0,1106582	0,0450163	0	0,2643745
$\varphi^-(x)$	0,0533611	0,3060009	0,3422693	0,1452366	0,5192298	

Πίνακας 35γ: Βασικό Σενάριο 1 - Συνολική Ιεράρχηση Λύσεων

Λύσεις χωρίς ιεράρχηση	Λύσεις με ιεράρχηση				
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
X_1	0,3790350				0,3790350
X_2	-0,1750217				0,2336702
X_3	-0,1828281				0,1750217
X_4	0,2336702				0,1828281
X_5	-0,2548553				0,2548553

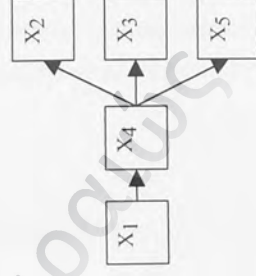
COMPLETE PREORDER - PROMETHEE II



Πίνακας 35δ: Βασικό Σενάριο 1 - Συμβολική απεικόνιση της Μερικής Ιεράρχησης Λύσεων

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
X_1	00	++	++	++	++
X_2	--	00	-+	--	-+
X_3	--	+-	00	--	+-
X_4	--	++	++	00	++
X_5	--	+-	+-	--	00

PARTIAL PREORDER - PROMETHEE I



5.2. Βασικό Σενάριο 2 (το απαισιόδοξο σενάριο)

Στο Βασικό Σενάριο 2, η βαθμολογία της λύσεως X_1 (MHTGR) ως προς το κριτήριο του σταθερού κόστους (f_1) βαθμολογήθηκε μέσα με 3,0 (μέγιστη βαθμολογία 5). Η βαθμολογία αυτή αμφισβητεί την οικονομικότητα των MHTGR ως νέου τύπου με μικρή εφαρμογή, έναντι των πιο διαδεδομένων εμπορικά τύπων αντιδραστήρων (ψυχόμενων με νερό). Η μήτρα προτίμησης των λύσεων παρατίθεται στον Πίνακα 36, ενώ η Μερική και η Συνολική Ταξινόμηση των λύσεων στους Πίνακες 36γ και 36δ αντιστοίχως, μαζί με την αντίστοιχη γραφική απεικόνιση. Στο σενάριο αυτό και με την Μερική και με τη Συνολική Ταξινόμηση έχουμε ως βέλτιστη λύση την X_4 (CANDU) και αμέσως καλύτερη, την λύση X_7 (MHTGR)

Πίνακας 36: Βασικό Σενάριο 2 – Ορθογωνική μήτρα προτίμησης λύσεων

	W%		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
f_1	23	max	3,0	3,5	3,6	3,8	2,9
f_2	16	max	3,2	3,4	3,6	3,9	2,5
f_3	20	max	3,5	3,4	3,3	3,6	3,5
f_4	9	max	3,6	3,0	3,2	2,9	4,0
f_5	7	max	4,1	3,5	3,8	4,0	4,2
f_6	4	max	3,7	3,3	3,1	3,5	3,8
f_7	4	max	3,5	3,1	3,1	3,5	3,5
f_8	13	max	3,6	3,4	3,4	3,1	3,0
f_9	2	max	2,7	3,9	3,9	3,1	2,1
f_{10}	2	max	3,5	3,1	3,1	3,3	3,6

Πίνακας 36α: Βασικό Σενάριο 2 – Υπολογισμός με το Απλό Μοντέλο (υπολογιστικό Excel)

f_i	$w\%$	X_1 HTGR	X_2 PWR	X_3 BWR	X_4 CANDU	X_5 LMFBR	σ_i max-min
f_1	23	3,0	69,00	80,5	82,8	87,4	66,7
f_2	16	3,2	51,20	54,4	57,6	62,4	40
f_3	20	3,5	70,00	68,0	66,0	72	70
f_4	9	3,6	32,40	27,0	28,8	26,1	36
f_5	7	4,1	28,70	24,5	26,6	28	29,4
f_6	4	3,7	14,80	13,2	12,4	14	15,2
f_7	4	3,5	14,00	12,4	12,4	14	14
f_8	13	3,6	46,80	44,2	44,2	40,3	39
f_9	2	2,7	5,40	7,8	7,8	6,2	4,2
f_{10}	2	3,5	7,00	6,2	6,2	6,6	7,2
	100		339,30	338,2	344,8	357	321,7

Πίνακας 36β : Βασικό Σενάριο 2 - Multicriteria Preference Index

Υπολογισμός ιεράρχησης των λύσεων με τη τεχνική PROMETHEE

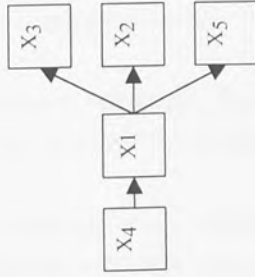
X_i	X_2	X_3	X_4	X_5	$\varphi^+(x)$	
X_1	0	0,0790349	0,0922910	0,0584805	0,0724477	0,3022540
X_2	0,0395003	0	0,0124079	0,0175275	0,1094730	0,1779087
X_3	0,0562148	0,0106573	0	0,0204420	0,1362982	0,2236122
X_4	0,1051595	0,0968049	0,1140364	0	0,1689143	0,4849150
X_5	0,0072707	0,1014293	0,1106582	0,0450163	0	0,2643745
$\varphi^-(x)$	0,2071453	0,2879263	0,3293935	0,1414662	0,4871331	

Πίνακας 367: Βασικό Σενάριο 2 - Συμβολική απεικόνιση της

Μερικής Ιεράρχησης λύσεων

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
X_1	00	++	++	--	++
X_2	--	00	-+	--	-+
X_3	--	+-	00	--	+-
X_4	++	++	++	00	++
X_5	--	+-	+-	--	00

PARTIAL PREORDER - PROMETHEE I



Πίνακας 368: Βασικό Σενάριο 2 - Συνολική

Ιεράρχηση Λύσεων

Λύσεις χωρίς ιεράρχηση	Λύσεις με ιεράρχηση	
	X_4	X_1
X_1	0,0951087	X_4 0,3434488
X_2	-0,1100177	X_1 0,0951087
X_3	-0,1057813	X_3 -0,1057813
X_4	0,3434488	X_2 -0,1100177
X_5	-0,2227586	X_5 -0,2227586

COMPLETE PREORDER - PROMETHEE II



5.3. Συμπεράσματα

Α. Στο αισιόδοξο σενάριο (Βασικό Σενάριο 1), όπου το κόστος των αντιδραστήρων ΜΗΤΓΡ είναι φθηνότερο από αυτό των CANDU, βέλτιστη λύση στο πρόβλημα της πολυκριτηριακής επιλογής με την τεχνική της Συνολικής Ταξινόμησης είναι οι ΜΗΤΓΡ και στη συνέχεια έρχεται ως καλύτερη, η λύση των CANDU.

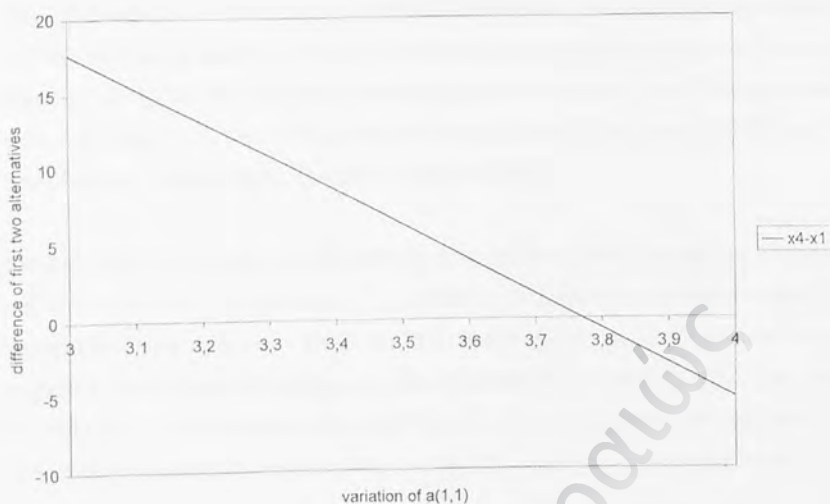
Τρίτη και τέταρτη σε προτίμηση λύση είναι οι PWRs και οι BWRs αντιστοίχως, ενώ τελευταία λύση είναι οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες (LMFBR).

Με τη Μερική Ταξινόμηση, βέλτιστη λύση είναι πάλι οι ΜΗΤΓΡ και η αμέσως καλύτερη είναι οι CANDU, ενώ μη συγκρίσιμες είναι όλες οι επόμενες λύσεις.

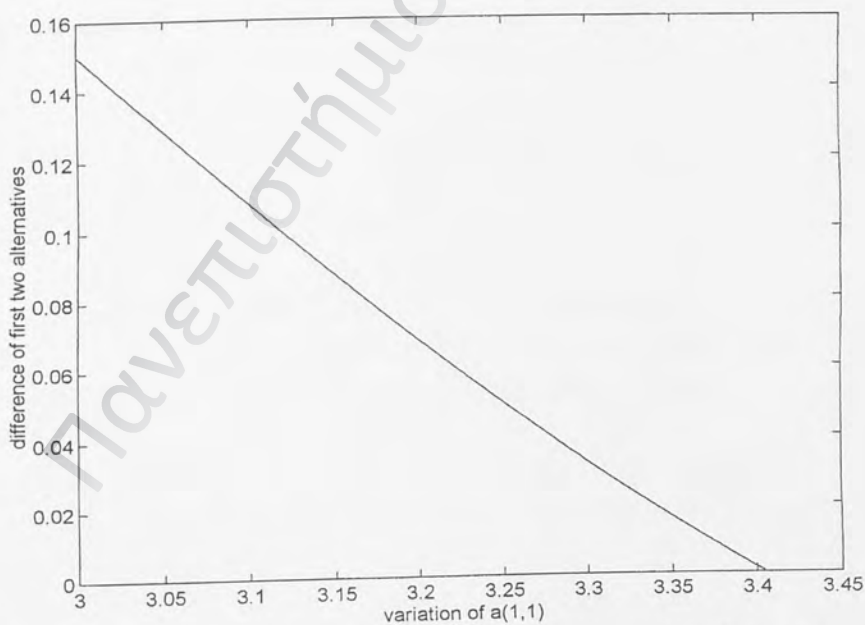
Β. Στο απαισιόδοξο σενάριο (Βασικό Σενάριο 2), όπου το κόστος των αντιδραστήρων ΜΗΤΓΡ είναι μεγαλύτερο έναντι των CANDU, βέλτιστη λύση στο πρόβλημα της πολυκριτηριακής επιλογής με την τεχνική της Συνολικής Ταξινόμησης είναι οι CANDU και στη συνέχεια, καλύτερη λύση είναι οι ΜΗΤΓΡ.

Τρίτη και τέταρτη σε προτίμηση λύση είναι οι BWRs και οι PWRs αντιστοίχως - αντιστρέφεται η προτίμηση των δύο τύπων σε σχέση με το Βασικό Σενάριο 1 - ενώ τελευταία λύση πάντοτε είναι οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες (LMFBR).

Με τη Μερική Ταξινόμηση, βέλτιστη λύση είναι οι CANDU και η αμέσως καλύτερη είναι οι ΜΗΤΓΡ, ενώ μη συγκρίσιμες παραμένουν όλες οι επόμενες λύσεις, όπως και στη Μερική Ταξινόμηση του Βασικού Σεναρίου 1.



Διάγραμμα 13: Γραφική αναπαράσταση της κατανομής της διαφοράς επίδοσης των δύο καλύτερων λύσεων ως προς το κριτήριο f_1 με το απλό μοντέλο (υπολογιστικό Excel)



Διάγραμμα 14: Γραφική αναπαράσταση της κατανομής της διαφοράς επίδοσης των δύο καλύτερων λύσεων ως προς το κριτήριο f_1 με τη τεχνική PROMETHEE

Στο Διάγραμμα 13, αναπαρίσταται γραφικά η διαφορά της πολυκριτηριακής επίδοσης των δύο καλύτερων λύσεων ως προς τη μεταβολή του βαρύτερου κριτηρίου μέσα στο εύρος 3,0-4,0 με το Απλό Μοντέλο στη βάση του υπολογιστικού Excel. Η προσέγγιση είναι γραμμική, ενώ η άνω περιοχή υποδηλώνει ως βέλτιστη λύση τους MHTGR και η κάτω περιοχή - της αρνητικής διαφοράς - τους CANDU.

Στο Διάγραμμα 14, αναπαρίσταται γραφικά η διαφορά της πολυκριτηριακής επίδοσης των δύο καλύτερων λύσεων ως προς τη μεταβολή του βαρύτερου κριτηρίου μέσα στο εύρος 3,0-4,0 με τη μέθοδο PROMETHEE. Φαίνεται ότι, το φαινόμενο δεν είναι γραμμικό, ενώ η αριστερή περιοχή της καμπύλης υποδηλώνει ως βέλτιστη λύση τους CANDU και η δεξιά περιοχή, τους MHTGR. Η οριακή βαθμολογία του κριτηρίου f_i κάτω από την οποία βέλτιστη λύση είναι οι CANDU, φαίνεται να είναι κοντά στο 3,4.

Συμπερασματικά, στο πρόβλημα της πολυκριτηριακής επιλογής που εξετάστηκε, οι δύο καλύτερες λύσεις είναι οι τύποι MHTGR και CANDU. Η αβεβαιότητα που ενέχεται στην αξιολόγηση της επίδοσης μίας από τις εναλλακτικές λύσεις ως προς το βαρύτερο κριτήριο σύμφωνα με τη τεχνική PROMETHEE II, μπορεί να οδηγήσει σε αντιστροφή της επιλογής μεταξύ των δύο πρώτων λύσεων.

6. Ανάλυση Ευαισθησίας ως προς το κριτήριο f_3

6.1. Η Ανάλυση

Στα Βασικά Σενάρια 1 και 2 μελετήθηκε πώς, η απόκλιση της βαθμολογίας μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων ως προς το βαρύτερο κριτήριο (το κριτήριο του σταθερού κόστους, f_1) μεταβάλλει την επιλογή της βέλτιστης λύσης. Η ανάλυση ευαισθησίας μελετά πώς επηρεάζει τη βέλτιστη λύση, η ταυτόχρονη μεταβολή της αξιολόγησης (βαθμολογίας) μίας από τις εναλλακτικές λύσεις και ως προς το δεύτερο σε βαρύτητα κριτήριο, δηλαδή ως προς το κριτήριο της ασφάλειας (f_3).

Η επίδοση της λύσεως X_1 (MHTGR) ως προς το κριτήριο της ασφάλειας (f_3) βαθμολογήθηκε με $(3,5 + 0,5)$ (η βαθμολογία του στα δύο βασικά σενάρια ήταν 3,5), ενώ ως προς το κριτήριο του σταθερού κόστους (f_1) η επίδοση της λύσεως X_1 (MHTGR) παρέμεινε στα όρια του καθορισμένου από τα δύο Βασικά Σενάρια εύρους: 3,0 και 4,0 (Σενάριο 3 και Σενάριο 4, αντιστοίχως).

Το Σενάριο 3 απεικονίζει την περίπτωση, στην οποία οι αντιδραστήρες τύπου MHTGR έχουν σταθερό κόστος μεγαλύτερο από αυτό του τύπου CANDU, είναι όμως πιο ασφαλείς και πιο αξιόπιστοι από τους CANDU. Το Σενάριο 4 απεικονίζει την περίπτωση, στην οποία οι αντιδραστήρες τύπου MHTGR έχουν σταθερό κόστος μικρότερο από αυτό του τύπου CANDU και ταυτόχρονα είναι πιο ασφαλείς.

Η μήτρα προτίμησης των λύσεων στο Σενάριο 3 παρατίθεται στον Πίνακα 37, ενώ η Συνολική και η Μερική Ταξινόμηση (Ιεράρχηση) των λύσεων παρουσιάζεται στους Πίνακες 37γ και 37δ αντιστοίχως, μαζί με τις αντίστοιχες γραφικές απεικονίσεις.

Η μήτρα προτίμησης των λύσεων στο Σενάριο 4 παρατίθεται στον Πίνακα 38, ενώ η Συνολική και η Μερική Ταξινόμηση των λύσεων παρατίθεται στους Πίνακες 38γ και 38δ αντιστοίχως, μαζί με τις αντίστοιχες γραφικές απεικονίσεις.

Πίνακας 37: Σενάριο 3 - Ορθογωνική μήτρα προτίμησης λύσεων

	W%	X_1 HTGR	X_2 PWR	X_3 BWR	X_4 CANDU	X_5 LMFBR
f_1	23	3,0	3,5	3,6	3,8	2,9
f_2	16	3,2	3,4	3,6	3,9	2,5
f_3	20	4,0	3,4	3,3	3,6	3,5
f_4	9	3,6	3,0	3,2	2,9	4,0
f_5	7	4,1	3,5	3,8	4,0	4,2
f_6	4	3,7	3,3	3,1	3,5	3,8
f_7	4	3,5	3,1	3,1	3,5	3,5
f_8	13	3,6	3,4	3,4	3,1	3,0
f_9	2	2,7	3,9	3,9	3,1	2,1
f_{10}	2	3,5	3,1	3,1	3,3	3,6

Πίνακας 38: Σενάριο 4 - Ορθογωνική μήτρα προτίμησης λύσεων

	W%	X_1 HTGR	X_2 PWR	X_3 BWR	X_4 CANDU	X_5 LMFBR
f_1	23	4,0	3,5	3,6	3,8	2,9
f_2	16	3,2	3,4	3,6	3,9	2,5
f_3	20	4,0	3,4	3,3	3,6	3,5
f_4	9	3,6	3,0	3,2	2,9	4,0
f_5	7	4,1	3,5	3,8	4,0	4,2
f_6	4	3,7	3,3	3,1	3,5	3,8
f_7	4	3,5	3,1	3,1	3,5	3,5
f_8	13	3,6	3,4	3,4	3,1	3,0
f_9	2	2,7	3,9	3,9	3,1	2,1
f_{10}	2	3,5	3,1	3,1	3,3	3,6

Πίνακας 37α: Σενάριο 3 - Υπολογισμός με το Απλό Μοντέλο (υπολογιστικό Excel)

	w%	X_j HTGR	X_2 PWR	X_3 BWR	X_4 CANDU	X_5 LMFBR	σ_i max-min
f_1	23	3,0	3,5	3,6	3,8	2,9	0,9
f_2	16	3,2	3,4	3,6	3,9	2,5	1,4
f_3	20	4,0	3,4	3,3	3,6	3,5	0,7
f_4	9	3,6	3,0	3,2	2,9	4,0	1,1
f_5	7	4,1	3,5	3,8	4,0	4,2	0,7
f_6	4	3,7	3,3	3,1	3,5	3,8	0,7
f_7	4	3,5	3,1	3,1	3,5	3,5	0,4
f_8	13	3,6	3,4	3,4	3,1	3,0	0,6
f_9	2	2,7	3,9	3,9	3,1	2,1	1,8
f_{10}	2	3,5	3,1	3,1	3,3	3,6	0,5
	100		349,30	338,2	357	321,7	

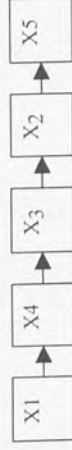
Πίνακας 37β: Σενάριο 3 - Multicriteria Preference Index
Υπολογισμός ιεράρχησης των λύσεων με τη τεχνική PROMETHEE

X_j	X_2	X_3	X_4	X_5	$\phi^+(x)$	
X_1	0	0,1297129	0,1311323	0,0886074	0,1174802	0,4669328
X_2	0,0385003	0	0,0036302	0,0175275	0,1094730	0,1691310
X_3	0,0562148	0,0106573	0	0,0204420	0,1362982	0,2236122
X_4	0,0943514	0,0649513	0,0528917	0	0,1601366	0,3723311
X_5	0,0072707	0,0926516	0,0788046	0,0450163	0	0,2237432
$\phi^-(x)$	0,1963372	0,2979732	0,2664589	0,1715931	0,5233880	

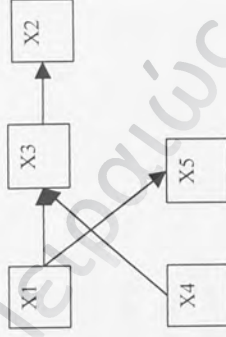
Πίνακας 37γ: Σενάριο 3 - Συνολική Ιεράρχηση Λύσεων

Λύσεις χωρίς ιεράρχηση	Λύσεις με ιεράρχηση
X_1	X_1
0.2705956	0.2705956
X_2	X_4
-0.1288422	0.2007381
X_3	X_3
-0.0428467	-0.0428467
X_4	X_2
0.2007381	-0.1288422
X_5	X_5
-0.2996448	-0.2996448

COMPLETE PREORDER - PROMETHEE II



PARTIAL PREORDER - PROMETHEE I



Πίνακας 37δ: Σενάριο 3 - Συμβολική απεικόνιση της

Μερικτής Ιεράρχησης Λύσεων					
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
X_1	00	++	++	+-	++
X_2	--	00	--	--	-+
X_3	--	++	00	--	++
X_4	-+	++	++	00	++
X_5	--	+-	+-	--	00

Πίνακας 38α: Σενάριο 4 - Υπολογισμός με το Απλό Μοντέλο (υπολογιστικό Excel)

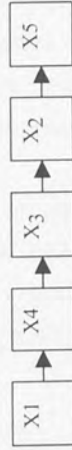
	w%	X_1 HTGR	X_2 PWR	X_3 BWR	X_4 CANDU	X_5 LMFBR	σ_i max-min
f_1	max	4,0	92,00	80,5	82,8	87,4	66,7
f_2	max	3,2	51,20	54,4	57,6	62,4	40
f_3	max	4,0	80,00	68,0	66,0	72	70
f_4	max	3,6	32,40	27,0	28,8	26,1	36
f_5	max	4,1	28,70	3,5	26,6	28	29,4
f_6	max	3,7	14,80	3,3	12,4	14	15,2
f_7	max	3,5	14,00	3,1	12,4	14	14
f_8	max	3,6	46,80	3,4	44,2	40,3	39
f_9	max	2,7	5,40	3,9	7,8	6,2	4,2
f_{10}	max	3,5	7,00	3,1	6,2	6,6	7,2
			372,30	338,2	344,8	357	321,7

Πίνακας 38β: Σενάριο 4 - Multicriteria Preference Index
Υπολογισμός ιεράρχησης των λύσεων με τη τεχνική PROMETHEE

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	$\phi^+(x)$
X_1	0	0,1522871	0,1458472	0,0923778	0,2065628	0,5970748
X_2	0,0056096	0	0,0036302	0,0175275	0,0954342	0,1222015
X_3	0,0103844	0,0101904	0	0,0204420	0,1184244	0,1594412
X_4	0,0192883	0,0609186	0,0510527	0	0,1350633	0,2663229
X_5	0,0072707	0,0926516	0,0788046	0,0450163	0	0,2237432
$\phi^-(x)$	0,0425530	0,3160478	0,2793347	0,1753635	0,5554847	

Πίνακας 38γ: ; Σενάριο 4 - Συνολική Ιεράρχηση Λύσεων

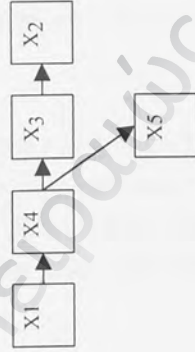
Λύσεις χωρίς ιεράρχηση	Λύσεις με ιεράρχηση	
X_1	0,5545218	X_1
X_2	-0,1938463	X_4
X_3	-0,11198935	X_3
X_4	0,0909594	X_2
X_5	-0,3317415	X_5



COMPLETE PREORDER - PROMETHEE II

Πίνακας 38δ: ; Σενάριο 4 - Συμβολική Απεικόνιση της

Μερικής Ιεράρχησης Λύσεων					
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	
X_1	00	++	++	++	++
X_2	--	00	--	--	--
X_3	--	++	00	--	--
X_4	--	++	++	00	++
X_5	--	+-	+-	--	00



PARTIAL PREORDER - PROMETHEE I

6.2. Τα Αποτελέσματα

Στο Σενάριο 3, όπου οι ΜΗΤΓΡ έχουν σταθερό κόστος μεγαλύτερο από τους CANDU, έχουν όμως καλύτερη επίδοση στην ασφάλεια και αξιοπιστία, με τη τεχνική της Συνολικής Ταξινόμησης λαμβάνεται ως βέλτιστη λύση στο πρόβλημα της πολυκριτηριακής επιλογής η X_1 (ΜΗΤΓΡ), ενώ αμέσως καλύτερη λύση είναι η X_4 (CANDU). Αντιθέτως, με τη τεχνική της Μερικής Ταξινόμησης οι λύσεις X_1 (ΜΗΤΓΡ) και X_4 (CANDU) είναι μη συγκρίσιμες λύσεις (σε κάποια κριτήρια υπερτερούν οι μεν και σε κάποια άλλα η άλλη).

Η ιεράρχηση των λύσεων στη Μερική Ταξινόμηση είναι πιο αναλυτική και σε ό,τι αφορά στις λύσεις X_2 (PWR) και X_3 (BWR), οι οποίες είναι μη συγκρίσιμες λύσεις με τη λύση X_5 (LMFBR) - συγκρινόμενες ανά δύο με τη λύση X_5 δεν υπάρχει κανένα ζεύγος του οποίου η ροή εξόδου να είναι η μεγαλύτερη, ενώ ταυτόχρονα, η ροή εισόδου να είναι η μικρότερη.

Στο Σενάριο 4, όπου οι ΜΗΤΓΡ έχουν και μικρότερο σταθερό κόστος έναντι των CANDU, αλλά και καλύτερη επίδοση ως προς την ασφάλεια και αξιοπιστία τους, με τη τεχνική της Συνολικής Ταξινόμησης λαμβάνεται σταθερά, όπως και στο Σενάριο 3, ως βέλτιστη η X_1 (ΜΗΤΓΡ), ενώ αμέσως καλύτερη λύση είναι πάντοτε η X_4 (CANDU). Με τη τεχνική της Μερικής Ταξινόμησης η λύση X_1 (ΜΗΤΓΡ) παραμένει η βέλτιστη και X_4 (CANDU) δεύτερη σε προτίμηση. Με τη δε τεχνική της Μερικής Ταξινόμησης, οι λύσεις X_2 (PWR) και X_3 (BWR) παραμένουν μη συγκρίσιμες λύσεις σε σχέση με τη λύση X_5 (LMFBR).

Συμπερασματικά, με τη τεχνική PROMETHEE που ακολουθήθηκε για την επίλυση του προβλήματος πολυκριτηριακής επιλογής αντιδραστήρα ισχύος, ελήφθη ως βέλτιστη η λύση των αντιδραστήρων τύπου Modular HTGR (ΜΗΤΓΡ) με ικανοποιητική σταθερότητα, ενώ δεύτερη λύση αναδείχθηκε η λύση των CANDU.

7. Συζήτηση – Συμπεράσματα

Το πρόβλημα της πολυκριτηριακής επιλογής αντιδραστήρα ισχύος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μελετάται στην παρούσα εργασία με τη βοήθεια ενός ενδεικτικού μοντέλου πολυκριτηριακής ανάλυσης με την μέθοδο ιεράρχησης των λύσεων PROMETHEE. Το μοντέλο είναι ενδεικτικό. Οι πέντε εναλλακτικές λύσεις που επιλέγηκαν, αξιολογήθηκαν από τον λήπτη της απόφασης ως προς την επίδοσή τους σε 10 σαφώς καθορισμένα και περιεκτικά κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά δεν είναι μοναδικά. Θα μπορούσαν να επιλεγούν άλλα κριτήρια, που ενδεχομένως θα άλλαζαν την εικόνα του μοντέλου και σίγουρα θα έδιναν διαφορετικές βέλτιστες λύσεις. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να θεθεί ως κριτήριο, ο βαθμός έκθεσης του προσωπικού στην ακτινοβολία ή ο κίνδυνος ατυχήματος. Το μοντέλο που μελετήθηκε, είναι μία απόπειρα να συμπεριληφθούν όλοι οι βασικοί παράμετροι του κύκλου ζωής των αντιδραστήρων και για τον λόγο αυτό, τα κριτήρια ήταν ιδιαίτερα περιεκτικά και πολύπλευρα, γεγονός που κάνει την αξιολόγηση δυσκολότερη και το μοντέλο πίο σύνθετο. Μία απλούστερη προσέγγιση μπορεί να έδινε σαφέστερη μήτρα προτίμησης, όμως, δεν θα ήταν ρεαλιστικό. Στην ανάλυση ευαισθησίας μελετήθηκαν η μεταβολή της επίδοσης μίας εναλλακτικής λύσης ως προς ένα ή περισσότερα κριτήρια λόγω αβεβαιότητας στην αξιολόγηση και λόγω έλλειψης απόλυτων ποσοτικών δεδομένων. Θα είχε επίσης ενδιαφέρον να μελετηθούν η συνέργεια μεταξύ δύο σημαντικών κριτηρίων (trade-offs) ή ο τρόπος επίδρασης της μεταβολής των βαρών των κριτηρίων στη λήψη της τελικής απόφασης.

Όσον αφορά στη βέλτιστη λύση (MHTGR) είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε την υπεροχή του τύπου αυτού ως προς την ασφάλεια σε περίπτωση ατυχήματος και ως προς το πυρηνικό καύσιμο (θόριο). Εφόσον ο τύπος αυτός συνδυάζει την ανταγωνιστικότητα με τα υψηλά τεχνικά του χαρακτηριστικά και τις επιδόσεις του, όσον αφορά στην ασφαλή, αξιόπιστη και χωρίς εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να αποτελέσει τον αντιδραστήρα της βέλτιστης επιλογής [LaBar and Simon, 1997]. Είναι γεγονός ότι, αρκετοί εμπειρογνώμονες είναι υπέρ των μικρού και μεσαίου μεγέθους αντιδραστήρων [Kupitz and Mourogov, 1998], κυρίως γιατί συνδυάζονται και με άλλες εφαρμογές, εκτός από την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Στο σενάριο όπου οι MHTGR δεν ανταποκρίνονται στο κριτήριο της ανταγωνιστικότητας, βέλτιστη λύση είναι οι CANDU, οι οποίοι θεωρούνται σχετικά ασφαλείς τύποι και ιδιαίτερα ανταγωνιστικοί, λόγω κυρίως του χαμηλού μεταβλητού

κόστους τους και του χαμηλότερου κόστους του φυσικού ουρανίου έναντι του εμπλουτισμένου. Οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες έρχονται μάλλον τελευταία λύση, εξαιτίας κυρίως της μη οικονομικότητάς τους, της αβεβαιότητας που ενέχει η ασφάλειά τους και της αυξημένης μεταφοράς και διακίνησης πλουτωνίου που συνεπάγονται, παρά τα υπερέχοντα τεχνικά τους χαρακτηριστικά.

Σε ό,τι αφορά στην αποδοχή του κοινού, με όλες τις παραδοχές που έγιναν, το μοντέλο αξιολογεί ως βέλτιστη την επίδοση του ΜΗΤGR, κυρίως με βάση την καταγεγραμμένη ανησυχία του κοινού για την περίπτωση ατυχήματος στους πυρηνικούς σταθμούς - ιδιαίτερα όσον αφορά τις ευρωπαϊκές κοινωνίες μετά το σοβαρό ατύχημα στο Chernobyl (Ουκρανία) -, καθώς και για τους κινδύνους που ενέχει ο CANDU στην εξάπλωση των πυρηνικών όπλων (παραγωγή πλουτωνίου) .

Σε ό,τι αφορά στην διαχείριση των αποβλήτων, οι ΜΗΤGR υπερέχουν ελαφρά έναντι των CANDU, βασικά διότι παράγουν λιγότερο εξαντλημένο καύσιμο, μπορούν να κάψουν WPU και επίσης, διότι παράγονται κατά τη λειτουργία τους λιγότερες ραδιενεργές προσμίξεις εφόσον το ψυκτικό μέσον (ήλιον) είναι αδρανές αέριο.

Ως προς το απαιτούμενο επίπεδο τεχνογνωσίας, και οι δύο τύποι έχουν υψηλές απαιτήσεις ως σύνθετη τεχνολογία με αυστηρές προδιαγραφές λειτουργίας και συντήρησης. Μία ελαφρά επιβάρυνση του CANDU ερμηνεύεται από το γεγονός ότι, οι CANDU είναι εξειδικευμένης канаδικής τεχνολογίας και διαφέρουν στον σχεδιασμό. Τέλος, οι ΜΗΤGR υπερέχουν ελαφρά των CANDU ως προς τις δυνατότητες τεχνολογικής βελτίωσης και αναβάθμισης, εφόσον οι ΜΗΤGR είναι νεότερου και απλούστερου σχεδιασμού.

Το μοντέλο, όπως διαμορφώθηκε, είναι ρεαλιστικό και πραγματικό: η ανάπτυξη ή όχι της πυρηνικής ενέργειας στο μέλλον εξαρτάται τα μεγάλα προβλήματα που αντιμετωπίζει σήμερα [Μουρογον, 2000] και τα οποία είναι άμεσα συνδεδεμένα με την κοινωνική αποδοχή, την ασφάλεια, την ανταγωνιστικότητα και την διαχείριση των υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων (κυρίως του εξαντλημένου καυσίμου).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα παραπάνω πλαίσια, θα είχε η εφαρμογή του μοντέλου σε στοχαστικές συνθήκες, όπου πάνω από ένας λήπτες της απόφασης, ειδικοί εμπειρογνώμονες (the expert case) καλούνται να αξιολογήσουν την επίδοση των λύσεων ως προς τα κριτήρια: οι εμπειρογνώμονες είναι σε θέση να συμπυκνώσουν την στάθμη της επιστήμης και της τεχνολογίας και να εκφράσουν ποσοτικά και με ρεαλιστικότητα την επίδοση των λύσεων σε συνθήκες αβεβαιότητας. Μία τέτοια εφαρμογή παραμένει ανοιχτή για τη συνέχιση της παρούσας εργασίας στο μέλλον.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΤΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΑ ΣΥΜΒΑΝΤΑ ΚΑΙ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ (ΚΑΤΑ ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΚΗ ΣΕΙΡΑ)
2. ΒΑΣΙΚΟ ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΠΑΡΟΠΛΙΣΜΟΥ
3. ΒΑΣΙΚΟ ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ
4. ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ ΟΡΩΝ
5. ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ

1. ΤΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΑ ΣΥΜΒΑΝΤΑ ΚΑΙ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ (ΚΑΤΑ ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΚΗ ΣΕΙΡΑ)

α) Το συμβάν στη μονάδα Mihama Unit No. 2, Ιαπωνία [Kondo, 1996]

Στις 9 Φεβρουαρίου 1991, περίπου στις 12.40, όταν η μονάδα ήταν σε πλήρη λειτουργία (a pressurized water reactor με ισχύ 500 MWe) , ένα χειριστής επεσήμανε ότι η ένδειξη ενός οργάνου, που έδειχνε την θερμοκρασία του νερού ψύξης του παραγόμενου ατμού, ήταν ελαφρώς υψηλότερη από ό,τι συνήθως. Περίπου στις 13.40, κατά την χημική ανάλυση του νερού, στη δευτερεύουσα γεννήτρια ατμού (steam generator B, B-SG) ο συναγερμός του μετρητή του οργάνου του συμπυκνωτή του αερίου (ρυθμισμένου στις 2000 counts/min) χτύπησε και στη συνέχεια χτύπησε και ο συναγερμός του μετρητή του οργάνου παρακολούθησης του νερού ψύξης του παραγόμενου ατμού στη γεννήτρια A (ρυθμισμένου στις 400 counts/min).

Έτσι, στις 13.48 άρχισε η προσπάθεια μείωσης της ισχύος του αντιδραστήρα και το κλείσιμό του λόγω της χαμηλής πίεσης του νερού επήλθε στις 13.50 (450 MWe). Επειδή το σύστημα ήταν εξοπλισμένο με εργαλείο παρακολούθησης της ασφαλούς λειτουργίας του (process decision program chart, PDPC) έγινε κατορθωτό να διαγνωσθεί η αιτία του συμβάντος, η οποία ήταν διαρροή νερού στη γεννήτρια ατμού A. Η γεννήτρια ετέθη σε απομόνωση και ακολούθησαν εργασίες επισκευής, με σκοπό τη μείωση της πίεσης στο σύστημα ψύξης του αντιδραστήρα, ώστε να επανέλθει το σύστημα σε σταθερή κατάσταση. Ο αντιδραστήρας έκλεισε για τον σκοπό αυτό, στις 10 Φεβρουαρίου, ώρα 2.30. Στο μεταξύ, δεν παρατηρήθηκε καμία ένδειξη διαρροής ραδιενέργειας στο σύστημα ή στο περιβάλλον.

β) Το ατύχημα στο Tokaimura, Ιαπωνία [IAEA Report, 1999]

Στις 30 Σεπτεμβρίου του 1999 και τοπική ώρα 10:35 (01:35 GMT) συνέβη ατύχημα κρισιμότητας¹ σε κτίριο μετατροπής (conversion²) πυρηνικού καυσίμου (βοηθητικό κτίριο) της JCO Company Limited στο Tokaimura της Ιαπωνίας (Νομαρχία Ibaraki) 150 χλμ βορειοανατολικά του Τόκιο. Ένα διάλυμα 16 kg

¹ Υπενθυμίζεται ότι, κρισιμότητα λέγεται η κατάσταση ενός μέσου που μπορεί να φιλοξενήσει αλυσωτή αντίδραση, όταν η αυτή, προερχόμενη από σχάση, έχει μόλις καταστεί αυτοσυντηρούμενη (ή κρίσιμη).

² Το εμπλουτισμένο εξαφθοριούχο ουράνιο μετατρέπεται σε σκόνη διοξειδίου του ουρανίου

εμπλουτισμένου υγρού ουρανίου – uranyl nitrate (18,8% U-235 κατά βάρος), το οποίο παρασκευαζόταν για τον πειραματικό αναπαραγωγικό αντιδραστήρα FBR Joyo, ρίχτηκε κατευθείαν σε δοχείο καθίζησης χωρίς να διέλθει από ένα δοχείο διαλυτοποίησης και μία στήλη ρυθμιστικού διαλύματος - στάδια, τα οποία επιβάλλονταν για να αποφεύγεται κρισιμότητα. Η ποσότητα που ρίχτηκε ήταν περίπου 7 φορές μεγαλύτερη από την προκαθορισμένη σύμφωνα με την εγκεκριμένη διαδικασία για λόγους ασφαλείας. Στις 11:40, μετρήθηκε μέγιστος ρυθμός γάμμα ακτινοβολίας 0,84 mSv/h, ενώ μετά τις 17:00, οι ρυθμοί δόσης νετρονίων στα όρια της εγκατάστασης μετρήθηκαν περίπου στα 4 mSv/h, γεγονός που υποδείκνυε την συνεχιζόμενη κατάσταση της κρισιμότητας (η κρισιμότητα διήρκεσε έως τις 06:30 της 1ης Οκτωβρίου, 17 ώρες, ενώ έλεγχος του συμβάντος επιτεύχθηκε μετά από 24 ώρες).

Το ατύχημα έγινε από ανθρώπινο λάθος, κατά παρέκκλιση των μέτρων ασφαλείας και των εγκεκριμένων διαδικασιών ελέγχου της κρισιμότητας και είχε σαν αποτέλεσμα, τρεις εργαζόμενοι της JCO να εκτεθούν σε μεγάλες δόσεις ραδιενέργειας και να παρουσιάσουν οξεία συμπτώματα του συνδρόμου ραδιενέργειας, ενώ ένας αριθμός άλλων εργαζομένων και κοινού έλαβαν επίσης, δόσεις ραδιενέργειας. Περίπου 161 άνθρωποι μετακινήθηκαν κατά την εκκένωση της περιοχής στα 350 m από την εγκατάσταση και περίπου 310.000 άνθρωποι σε ακτίνα 10 χλμ δέχτηκαν οδηγίες να παραμείνουν στα σπίτια τους για περίπου 18 ώρες, σαν προληπτικό μέτρο. Η Ιαπωνία εκτίμησε το ατύχημα στο Επίπεδο 4 της Κλίμακας INES της IAEA (Level 4, accident without significant off-site risk).

Προκαταρκτική Έκθεση της IAEA μετά το ατύχημα αναφέρει ότι, αυτό δεν είχε διασυννοριακές επιπτώσεις όσον αφορά στην έκλυση ραδιενέργειας. Η Έκθεση χαρακτηρίζει το ατύχημα ως ατύχημα κυρίως «ακτινοβόλησης» και όχι «ραδιενεργού μόλυνσης». Δεν παρατηρήθηκε εκτεταμένη έκλυση ραδιενέργειας στο περιβάλλον, ενώ με το πέρασ της κατάστασης κρισιμότητας, τα επίπεδα ραδιενέργειας έπεσαν στα φυσιολογικά επίπεδα. Παρόλα αυτά, και λόγω της ανησυχίας της κοινωνίας και του επιχειρηματικού ιστού, οι έμμεσες συνέπειες του ατυχήματος ήταν σημαντικές, καθώς επλήγη η οικονομία της περιοχής, έπεσαν οι αξίες της γης και των ακινήτων και οι τιμές των αγροτικών προϊόντων. Το ατύχημα είχε σημαντικές επιπτώσεις υγείας, όσον αφορά στους τρεις υπερεκτεθημένους εργαζόμενους και έθεσε σοβαρά ζητήματα για την ασφάλεια, τον έλεγχο και την επιθεώρηση και τα κενά που υπήρχαν στην εγκατάσταση της JCO, σχετικά με την τήρηση των αρχών ασφαλείας.

γ) Το ατύχημα στον αντιδραστήρα Chernobyl 4, Ουκρανία [ΕΕΑΕ/Δημόκριτος, 1986]

Στις 26 Απριλίου 1986, τοπική ώρα 1:23 π.μ. συνέβη το σοβαρότερο ατύχημα που έχει συμβεί σε πυρηνικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής, στον αντιδραστήρα Chernobyl 4³ στην Ουκρανία (130 χλμ από το Κίεβο). Σύμφωνα με προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας, ο αντιδραστήρας βρισκόταν σε κράτηση και είχε ισχύ 7% της ονομαστικής, δηλαδή περίπου 200 MWe. Ξαφνικά, η ισχύς του αντιδραστήρα αυξήθηκε απότομα, με αποτέλεσμα να εκλυθούν σημαντικές ποσότητες ατμού, ο οποίος αντέδρασε χημικά με το ζιρκόνιο και δημιουργήθηκε υδρογόνο. Ακολούθησε ισχυρή έκρηξη που κατέστρεψε το κτίριο του αντιδραστήρα και εκδηλώθηκε πυρκαγιά, με αποτέλεσμα την κατάρρευση της οροφής του κτιρίου. Η μηχανή φόρτισης καυσίμου έπεσε στο πάνω μέρος του αντιδραστήρα και μία μεγάλη ποσότητα ψυκτικού διέφυγε, ενώ τα συστήματα ψύξης έκτακτης ανάγκης του αντιδραστήρα κατέστησαν αναποτελεσματικά.

Στη συνέχεια, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, άρχισε να καίγεται ο γραφίτης. Η πυρκαγιά διήρκησε μερικές μέρες και σβήστηκε με μεγάλες ποσότητες άμμου, άργιλου, βόριου και μόλυβδου, που έριξαν ελικόπτερα. Το πυρηνικό καύσιμο έλυνε και έλαβαν χώρα αντιδράσεις μεταξύ του λυωμένου πυρήνα και του δάπεδου κάτω από τον πυρήνα.

Η θερμοκρασία του γραφίτη εκτιμάται ότι έφτασε τους 5000 °C, ενώ ταυτόχρονα, οι ξηρές ατμοσφαιρικές συνθήκες στην περιοχή του σταθμού οδήγησαν το νέφος των εκλυθέντων ραδιενεργών στοιχείων σε μεγάλη ύψη (1000 m), με αποτέλεσμα την διασπορά του σε όλη τη βόρεια Ευρώπη και σε αρκετές περιοχές της νότιας.

Οι άλλες τρεις μονάδες κρατήθηκαν έγκαιρα και διατηρήθηκαν σε ασφαλή κατάσταση. Ο εξοπλισμός τους δεν υπέστη ζημιές από την έκρηξη στον σταθμό 4, αλλά είναι πιθανόν να μολύνθηκαν από την εκλυθείσα ραδιενέργεια. Σε μία ζώνη 30 χλμ γύρω από τον σταθμό εκκενώθηκαν περίπου 100.000 άτομα.

Το ατύχημα επισημάνθηκε πρώτα στη Σουηδία, το πρωί της 28ης Απριλίου 1986, από μετρήσεις που ευρέθησαν πολύ υψηλές. Από το ατύχημα, υπήρξαν δύο ακαριαίοι θάνατοι εξαιτίας της έκρηξης, ενώ υπήρξαν συνολικά 31 άμεσοι θάνατοι

³ Ο αντιδραστήρας 4 ήταν ισχύος 1000 MWe και άρχισε να κατασκευάζεται το 1975. Τέθηκε σε εμπορική λειτουργία το 1984. Ανήκει στη δεύτερη γενιά των RBMK, ήταν δηλαδή ένας τύπος με αυλούς πίεσης, ελαφρά εμπολουτισμένο ουράνιο, επιβραδυνή και

(εντός δύο μηνών) και 145 έμμεσοι (έλαβαν υψηλή ακτινοβολία). Το ατύχημα χαρακτηρίστηκε στο Επίπεδο 7 της Κλίμακας INES της ΙΑΕΑ με βάση τις διασυνωριακές εκτεταμένες επιπτώσεις του στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία.

Όπως αναφέρεται στην Έκθεση της ΕΕΑΕ και του «Δημόκριτου» το 1986, σχετικά με τις επιπτώσεις του ατυχήματος στην Ελλάδα, δεν είναι δυνατόν για αποστάσεις 1500 χλμ να μελετηθούν ποσοτικά οι διαδικασίες μεταφοράς και διάχυσης του ραδιενεργού υλικού στον ελληνικό χώρο. Πραγματοποιήθηκαν μελέτες της διασποράς με το μοντέλο Gauss, δόθηκαν εκτιμήσεις για τις δόσεις του πληθυσμού και αποτελέσματα μετρήσεων τόσο για το περιβάλλον, όσο και για την αλυσίδα τροφής. Το ραδιενεργό νέφος έφθασε στον ελληνικό χώρο από τις εκλύσεις στις 2 και 3 Μαΐου (οι πρώτες ενδείξεις αυξημένης ραδιενέργειας στους σταθμούς μέτρησης της Ελλάδας).

δ) Το ατύχημα στο Three Mile Island, ΗΠΑ [Pool, 1987]

Στις 28 Μαρτίου 1979 και τοπική ώρα 4,00 μ.μ. συνέβη το ατύχημα στον δεύτερο αντιδραστήρα (Unit 2) της μονάδας του Three Mile Island, στο Middletown της Πενσυλβάνια των ΗΠΑ. Οι αντλίες που έστελναν νερό στις γεννήτριες ατμού του αντιδραστήρα (δευτερεύον κύκλωμα) έκλεισαν, σαν αποτέλεσμα σειράς ανθρώπινων λαθών και αστοχιών των μηχανικών εξαρτημάτων. Ο αντιδραστήρας ήταν τύπου πεπιεσμένου ύδατος (PWR) και είχε δύο πρωτεύοντα συστήματα κυκλοφορίας νερού ψύξεως. Το πρωτεύον κύκλωμα δεν είχε πώς να μεταφέρει την θερμότητα από τον πυρήνα και κατά συνέπεια ανέβασε τη θερμοκρασία και την πίεσή του.

Ο αντιδραστήρας έκλεισε αυτόματα, με την εισαγωγή των ράβδων ελέγχου, ενώ μία βαλβίδα ασφαλείας άνοιξε αυτόματα, ώστε να εκτονωθεί η πίεση στο πρωτεύον κύκλωμα. Μέχρι εδώ, τα συστήματα λειτούργησαν όπως έπρεπε. Όμως, η βαλβίδα ασφαλείας, αφού εκτόνωσε την πίεση, έπρεπε να κλείσει πάλι. Στο πίνακα ελέγχου, όντως, καταγράφηκε η σχετική εντολή. Για κάποιο λόγο όμως, η βαλβίδα δεν έκλεισε, και κανείς ελεγκτής στο control room δεν μπορούσε να το ξέρει αυτό. Για πάνω από δύο ώρες, καταρχήν ο ατμός και στη συνέχεια, ένα μίγμα ατμού και νερού, διέφευγαν από την ανοικτή βαλβίδα.

ανακλαστή γραφίτη και ψυκτικό μέσο νερό, το οποίο έβραζε κατά τη διόδου του μέσα από τον πυρήνα του αντιδραστήρα.

Η πίεση έπεφτε συνεχώς στο πρωτεύον ψυκτικό, ώσπου ενεργοποιήθηκαν οι αντλίες ενέσεων ψυκτικού, οι οποίες ψέκασαν νερό στο σύστημα. Εν τω μεταξύ, επειδή οι χειριστές δεν διέγνωναν σωστά το τι συνέβαινε στον αντιδραστήρα, έκλεισαν την μία αντλία και μείωσαν την άλλη, έτσι ώστε δεν ήταν δυνατόν να αντισταθμιστεί το νερό που διέρρευε από την ανοιχτή βαλβίδα. Σταδιακά, το πρωτεύον νερό ψύξεως έγινε ένα τυρβώδες μίγμα νερού και ατμού και τελικά, μετά 1 ½ ώρα από την έναρξη του ατύχηματος, οι χειριστές αποφάσισαν να κλείσουν τελείως τις αντλίες που βοηθούσαν το ψυκτικό να κυκλοφορεί από τον πυρήνα έως τις γεννήτριες ατμού και ξανά πίσω, πιστεύοντας ότι, τηρούν τις καθορισμένες διαδικασίες (standard procedures). Η ενέργειά τους αυτή, απέκλεισε και το τελευταίο εναπομείναν ενδεχόμενο ψύξεως του πυρήνα. Σύντομα, αποκαλύφθηκε ο μισός πυρήνας, η θερμοκρασία του αυξήθηκε υπερβολικά και μέρος του καυσίμου ετάκη απελευθερώνοντας υλικά υψηλής ραδιενέργειας. Ραδιενεργά αέρια διέρρευσαν στο εσωτερικό περιβάλλον και ευτυχώς, σε μικρή έκταση διέρυσαν και του εξωτερικού περιβλήματος, έτσι ώστε να μην απειληθεί η περιοχή. Τελικά, 2 ½ ώρες μετά το ατύχημα, κάποιος χειριστής αντιλήφθηκε ότι η βαλβίδα δεν είχε κλείσει ποτέ και την έκλεισε. Χρειάστηκαν άλλες 12 ώρες για να επανέλθει η λειτουργία του ψυκτικού κυκλώματος στον πυρήνα και να αρχίσει το σύστημα να αποκαθιστά τις θερμοκρασίες του.

Το ατύχημα χαρακτηρίστηκε στο Επίπεδο 5 της Κλίμακας INES της IAEA (Level 5) με βάση τις επιπτώσεις που είχε μέσα στην εγκατάσταση και συνέβη λιγότερο από 5 έτη μετά την δημοσίευση της Μελέτης Rasmussen (1975), η οποία εκτιμούσε (probabilistic risk assessment) ότι, ατύχημα με τήξη του πυρήνα σε αμερικάνικους σταθμούς ισχύος LWRs, θα αναμενόταν μόνο μία φορά στα 17.000 χρόνια λειτουργίας τους (και όχι μία φορά στα 1.000.000 χρόνια λειτουργίας, όπως είχε δημοσιεύσει η Atomic Energy Commission πριν τη δημοσίευση της Μελέτης Rasmussen). Εφόσον τότε, οι ΗΠΑ είχαν σε λειτουργία περίπου 12 σταθμούς, σύμφωνα με τη Μελέτη, θα απαιτούνταν αιώνες για ένα τέτοιο ατύχημα: δεν χρειάστηκαν στην πράξη παρά κάποια χρόνια. Οι κάτοικοι της περιοχής αναγκάστηκαν να εγκαταλείψουν τα σπίτια τους και η κοινή γνώμη συγκλονίστηκε. Μετά το ατύχημα, έγινε επιτακτική η αναθεώρηση των απόψεων περί ασφάλειας και δημόσιας υγείας. Το ατύχημα κατέδειξε ότι, οι χειριστές δεν ήταν οι μόνοι υπεύθυνοι: η πολυπλοκότητα του συστήματος και η ανεπάρκεια των μηχανισμών ελέγχου του και πρόληψης αστοχιών, δημιούργησαν την κατάσταση όπου πολλά και φαινομενικά ασήμαντα γεγονότα, οδήγησαν σε ένα πολύ σοβαρό ατύχημα.

2. ΒΑΣΙΚΟ ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΠΑΡΟΠΛΙΣΜΟΥ

Οι βασικές και ενδεικτικές Οδηγίες που διέπουν το θεσμικό πλαίσιο του παροπλισμού στην ΕΕ, είναι οι εξής [Eurelectric Report, 2000]:

Ευρωπαϊκό Συμβούλιο

- Directive 96/29/13 May 1996 – Authorizations and clearance for disposal, recycling and reuse of materials containing radioactive substances (Transportation in national regulation by 13 May 2000).
- Directive 97/11/EC – 3 March 1997 – Application of another Directive to NPP and other Nuclear reactors including dismantling and decommissioning.

Ευρωπαϊκή Επιτροπή

EC Radiation Protection 89: Recommended Radiological Protection Criteria for the Recycling of Metals from the dismantling of Nuclear Installations, 1998

EUR 12570 EN: Objectives, Standards and Criteria for Radwaste Disposal in the EC, 1989

EUR 13642 EN: Inventory of Information for the Identification of Guiding Principles in the Decommissioning of Nuclear Installations, 1991

EUR 14950 EN: Waste Management Study for Large VLLW from Decommissioning, 1993

EUR 15355 EN: Euradwaste series no. 7-Policies, Regulations and Recommendations for Decommissioning of Nuclear Installations in the EC, 1994

EUR 16004 FR: Définition des autorisations de sortie pour les bétons venant du démantèlement, 1995

EUR 16549 EN: Survey of WWER Reactors with a view to Decommissioning Requirements

Framework programmes on R+D: Databases on tools (Performance data of decontamination and dismantling techniques) and costs

COM 98.799 final: Communication and 4th report on actual situation and radioactive management in EU.

3. ΒΑΣΙΚΟ ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Conventions and Agreements under IAEA Auspices

Convention on Early Notification of a Nuclear Accident

Convention on Assistance in the Case of a Nuclear Accident or Radiological Emergency

Convention on Physical Protection of Nuclear Material

Convention on Nuclear Safety - Adopted in Vienna on 17 June 1994, The Convention on Nuclear Safety was opened for signature on 20 September 1994 and entered into force on 24 October 1996).

Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management

Vienna Convention on Civil Liability for Nuclear Damage

Protocol to Amend the 1963 Vienna Convention on Civil Liability for Nuclear Damage; and Annex

Convention on Supplementary Compensation for Nuclear Damage

Optional Protocol Concerning the Compulsory Settlement of Disputes to the Vienna Convention On Civil Liability For Nuclear Damage (reproduced in document INFCIRC/500/Add. 3)

Joint Protocol Relating to the Application of the Vienna Convention and the Paris Convention (reproduced in document INFCIRC/402)

Code of Practice On the International Transboundary Movement of Radioactive Waste: The IAEA Code of Practice (reproduced in document INFCIRC/386)

Agreement on the Privileges and Immunities of the IAEA (reproduced in document INFCIRC/9/Rev. 2)

African Regional Co-operative Agreement for Research, Development and Training Related to Nuclear Science and Technology (AFRA) (reproduced in document INFCIRC/377)

Co-operation Agreement for the Promotion of Nuclear Science and Technology in Latin America and the Caribbean (ARCAL) (reproduced in document INFCIRC/582)

Second Agreement to Extend the 1987 Regional Co-operative Agreement for Research, Development and Training Related to Nuclear Science and Technology (RCA) (reproduced in document INFCIRC/167/Add. 18) – Latest Status (106KB .pdf file)

Revised Supplementary Agreement Concerning the Provision of Technical Assistance by the IAEA (RSA) (reproduced in document INFCIRC/267) - Latest Status

Nordic Mutual Emergency Assistance Agreement in Connection with Radiation Accidents (reproduced in document INFCIRC/49)

Measures to Strengthen International Co-operation in Nuclear, Radiation and Waste Safety Resolution adopted on 3 October 1997 during the 9th plenary meeting

International Atomic Energy Agency - General Conference GC(41)/RES/10, October 1997

Conventions and Agreements under the Auspices of the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)

Paris Convention on Third Party Liability in the Field of Nuclear Energy

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

4. ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ ΟΡΩΝ

Accident sequence: Αλληλοχία γεγονότων κατά το ατύχημα

Actinides: Ακτινίδες - στοιχεία με ατομικό αριθμό >90 (Th) έως Z=103 - περιλαμβάνουν τους "εύφορους" και σχάσιμους πυρήνες που χρησιμοποιούνται στους αντιδραστήρες

Activity: Η ενεργότητα ενός ραδιενεργού δείγματος - ο αριθμός των μεταπτώσεων του δείγματος στην μονάδα του χρόνου

Actual safety: Πραγματική ασφάλεια

Advanced Reactors: Προηγμένοι τύποι αντιδραστήρων

Back end (of the fuel cycle): Προσωρινή αποθήκευση, επανεπεξεργασία εξαντλημένου καυσίμου, τελική εναπόθεση

Backfitting cost: Το κόστος της τεχνικής αναβάθμισης των υπάρχοντων σταθμών με σκοπό την μείωση του κόστους λειτουργίας τους

Backfitting: Αναβάθμιση των παλαιότερων πυρηνικών σταθμών

Biological shield: Βιολογική θωράκιση - Μία μάζα απορροφητικού υλικού τοποθετημένη γύρω από έναν αντιδραστήρα ή μία πηγή ραδιενέργειας, με σκοπό να μειώσει την ακτινοβολία στους ανθρώπους σε ασφαλή επίπεδα.

Breeder reactor: Αναπαραγωγικός αντιδραστήρας - παράγει περισσότερο πυρηνικό καύσιμο, απ' ό,τι καταναλώνει. Ένα «εύφορο» υλικό (fertile material), όπως το ουράνιο-238, βομβαρδίζεται με νετρόνια και μετατρέπεται σε σχάσιμο πλουτόνιο-239

Burnup: Εκφράζει το συνολικό μέτρο της ενέργειας που παράγεται από το πυρηνικό καύσιμο (Megawatt days of thermal output per metric tone of initial heavy metal, MWDT/MTIHM or GWd/t)

Capability: Ικανότητα αντιδραστήρα ισχύος - το μέγιστο φορτίο στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει υπό καθορισμένες συνθήκες και για ένα ορισμένο διάστημα, χωρίς να υπερβεί τα εγκεκριμένα όρια θερμοκρασίας και καταπόνησης

Capacity factor gross ή Load factor: Ο (μικτός) παράγοντας ικανότητας ή φορτίου ενός αντιδραστήρα είναι «ο λόγος της μικτής (gross) ηλεκτρικής ενέργειας που παρήχθηκε σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, προς την ενέργεια που θα παραγόταν, εάν ο αντιδραστήρας λειτουργούσε συνεχώς και σε πλήρη ισχύ κατά το ίδιο χρονικό διάστημα

Capacity factor: Το πηλίκο της παραγόμενης ισχύος προς την ισχύ που θα παραγόταν εάν η μονάδα λειτουργούσε συνεχώς και στο 100% της ονομαστικής ισχύος της σε ένα ορισμένο διάστημα

Chain reaction: Αλυσωτή αντίδραση σχάσεων

Ciurie, Ci (SI, Bequerel, Bq): Μονάδα ραδιενέργειας. 1 Ciurie = $3,7 \times 10^{10}$ disintegrations per second – 1 Bequerel = 1 disintegration per second = $2,703 \times 10^{11}$ Ci

Cladding: Ο λεπτό τοιχώματος μεταλλικός σωλήνας που σχηματίζει το εξωτερικό περίβλημα της ράβδου του πυρηνικού καυσίμου. Κοινά υλικά για το Cladding είναι το αλουμίνιο, το αστάλι και τα κράματα του ζirkονίου (zirkalloys).

Conditioned wastes: Επεξεργασμένες ποσότητες όλων των κατηγοριών ραδιενεργών αποβλήτων (αφού υποστούν σταθεροποίηση)

Conversion Ratio, CR (ή breeding ratio): Συντελεστής μετατροπής. Για θερμικούς αντιδραστήρες, το πηλίκιο του σχάσιμου υλικού που παράγεται προς αυτό που καταναλώνεται.

Conversion: Μετατροπή του U_3O_8 με χημική διεργασία σε UF_6

Coolant: ψυκτικό μέσον

Core melting: Τήξη του πυρήνα του αντιδραστήρα

Critical mass: Κριτική μάζα - Η μικρότερη μάζα σχασίμου υλικού, που μπορεί να συντηρήσει αλυσωτή αντίδραση.

Criticality factor (Effective multiplication factor): Συντελεστής πολλαπλασιασμού του συστήματος

Decay Heat: Η θερμότητα που παράγεται από την μετάπτωση των ραδιενεργών προϊόντων σχάσεως, αφού ο αντιδραστήρας έχει σβήσει (shut down).

Decay heat: Θερμική ισχύς μετά το κλείσιμο του αντιδραστήρα

Decommissioning: Παραπλισμός αντιδραστήρα - οι ενέργειες, που λαμβάνουν χώρα μετά το τέλος της χρήσιμης ζωής γενικότερα μίας πυρηνικής εγκατάστασης

Defense-in-depth: Άμυνα σε βάθος

Depleted uranium: Απεμπλουτισμένο ουράνιο - περιέχει ποσοστό 0,2-0,3% ^{235}U (καλείται και υπόλειμμα ουρανίου, *uranium tails*)

Derating losses: Η ισχύς που χάνεται (ή κερδίζεται) εάν η μονάδα είναι αδειοδοτημένη από τις αρχές να λειτουργεί σε μικρότερη (ή μεγαλύτερη) ισχύ από αυτή του σχεδιασμού της

Deterministic effects of radiation: Ντετερμινιστικές επιπτώσεις ακτινοβολίας

Dismantling: Η διάλυση πυρηνικών σταθμών (παραπλισμός)

Emergency Core Cooling systems: Ειδικά συστήματα έκτακτης ψύξεως

Enrichment (of natural uranium): Ο εμπλουτισμός του φυσικού ουρανίου (0,711% ^{235}U) έως 2-4% σε ^{235}U

Exempt waste, EW: Τα απαλλασσόμενα απόβλητα - περιέχουν ελάχιστες ποσότητες μακρόβιων ραδιονουκλιδίων και δεν παρουσιάζουν ραδιολογικό κίνδυνο (βραχυβία απόβλητα)

Fabrication (of fuel assemblies): Παρασκευή των στοιχείων του πυρηνικού καυσίμου - το UF_6 μετατρέπεται σε UO_2 και στη συνέχεια, παρασκευάζεται το στοιχείο του πυρηνικού καυσίμου στη μορφή που θα τοποθετηθεί μέσα στον πυρήνα

Feasible plutonium: Σχάσιμο πλουτωνίου

Fertile material: "Εύφορο" υλικό (U-238 & Th-232)

Fission products: Προϊόντα σχάσεως

Forced outage frequency: Δείκτης της συχνότητας αναγκαστικών διακοπών

Frequency of plant damage: Συχνότητα ζημίας στον σταθμό

Front end (of the fuel cycle): Εξόρυξη, επεξεργασία, μετατροπή, εμπλουτισμός και παρασκευή του στοιχείου του πυρηνικού καυσίμου

Fuel assemblies: Στοιχεία πυρηνικού καυσίμου

Fuel life cycle: Κύκλος ζωής του πυρηνικού καυσίμου

Gaseous diffusion process: Αέρια διάχυση – η κυρίαρχη μέθοδος για να εμπλουτισθεί το ουράνιο έως το επιθυμητό ισοτοπικό περιεχόμενο

Half life: Ο χρόνος υποδιπλασιασμού - το χρονικό διάστημα στον οποίο ο ρυθμός ραδιενεργού μετάπτωσης μικραίνει κατά ένα παράγοντα της τάξης του 2. Για παράδειγμα, σε 10 ημιζωές, η ενεργότητα (activity) του ραδιονουκλιδίου πέφτει σε $2^{10}=1024$.

Heavy water: Βαρύ νερό - Μία μορφή νερού, όπου τη θέση των υδρογόνων κατέχουν άτομα δευτερίου

High-level nuclear waste: Υψηλής ραδιενέργειας απόβλητα

High-Level Waste, HLW: Τα υψηλής ραδιενέργειας απόβλητα - περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις ραδιενεργών υλικών και ενώσεων, ώστε απαιτείται μεγάλος βαθμός απομόνωσής τους από τη βιόσφαιρα

Incident: Πυρηνικό γεγονός (συμβάν)

Ionizing radiation: Ιοντίζουσα ακτινοβολία

Loss of Coolant Accident: Ατύχημα απόλειας ψυκτικού (LOCA)

Low and Intermediate Level Waste, LILW: Τα μέσης και χαμηλής ραδιενέργειας απόβλητα - περιέχουν σχετικά μικρότερες συγκεντρώσεις ραδιονουκλιδίων χαμηλότερης θερμικής ισχύος (μακρόβια)

Mining and mill tailings: Τα απόβλητα που προκύπτουν από την κατεργασία του ορυκτού ουρανίου ή θορίου

Mixed-Oxide Fuel (MOX): Το πυρηνικό καύσιμο που αποτελείται από ανακυκλωμένο ουράνιο και πλουτώνιο - μίγμα διοξειδίου του ουρανίου (UO_2) και διοξειδίου του πλουτωνίου (PuO_2)

Moderator: Ο επιβραδυντής νετρονίων

Natural uranium (φυσικό ουράνιο): Το ουράνιο που βρίσκεται στη φύση και το οποίο περιέχει 0,7% U-235, 99,3% U-238 και ίχνη U-234

Neutron (νετρόνιο): Στοιχειώδες σωματίδιο χωρίς φορτίο με μάζα ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή του πρωτονίου - βρίσκεται στον πυρήνα κάθε ατόμου βαρύτερου του υδρογόνου

Nuclear accident: Πυρηνικό ατύχημα

Nuclear fuel: Το πυρηνικό καύσιμο

Nuclear reactor: Πυρηνικός αντιδραστήρας - μία διάταξη, στην οποία η πυρηνική σχέση συντηρείται και ελέγχεται με μία αυτοσυντηρούμενη αλυσωτή αντίδραση.

Nuclear safeguards: Πυρηνικές διασφαλίσεις

Operating losses: Απώλειες ισχύος (ή κέρδη) κατά την λειτουργία του σταθμού, σε ισχύ μικρότερη (ή μεγαλύτερη) από την αδειοδοτημένη ηλεκτρική ισχύ

Operational Performance: Η παραγωγικότητα/απόδοση ή αξιοπιστία της λειτουργίας ενός αντιδραστήρα ισχύος

Outages losses: Η ισχύς που χάνεται από απρογραμματίιστα «shutdowns» του σταθμού

Overall thermal efficiency: Ολική θερμική απόδοση

Overnight cost: Το κόστος κατασκευής

Partitioning: Διαχωρισμός των κρίσιμων ραδιονουκλιδίων μεγάλης διάρκειας ζωής που προέρχονται από υγρά απόβλητα υψηλής και μέσης ραδιενέργειας

Passive safety systems: Παθητικά συστήματα ασφαλείας

Perceived safety: Αντιληπτή ασφάλεια

Plant capacity factor (Παράγοντας Ικανότητας Σταθμού): το % ποσοστό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην έξοδο, εάν ο σταθμός λειτουργεί συνεχώς στο 100% της ισχύος του

Plant reliability: Η αξιοπιστία της λειτουργίας της μονάδας

Probabilistic risk assessment: Αξιολόγηση και εκτίμηση κινδύνου

Probabilistic safety analysis: Στοχαστική ανάλυση στην ασφάλεια

Proliferation: Η εξάπλωση των πυρηνικών όπλων

Protection against radiation: Ακτινοπροστασία

Radioactive contamination: Ραδιενεργός μόλυνση

Radioactive waste disposal (final): Τελική εναπόθεση των ραδιενεργών αποβλήτων

Radioactive waste management: Διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων

Radioactive waste management: Διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων

Radiological emergency: Επείγον ραδιολογικό γεγονός

Radiotoxicity: Η ραδιοτοξικότητα των πυρηνικών αποβλήτων - Ο όρος που υποδηλώνει την ενδεχόμενη ζημία στον άνθρωπο και στο βιολογικό περιβάλλον

Reactor maintenance: Συντήρηση αντιδραστήρα

Reactor Pressure Vessel failure: Αστοχία του δοχείου πίεσης του αντιδραστήρα

Reactor's shut down: Σβήσιμο του αντιδραστήρα - μείωση του ρυθμού της σχάσεως (και επομένως, της παραγωγής θερμότητας) σε έναν αντιδραστήρα συνήθως, με την εισαγωγή στον πυρήνα των ράβδων ελέγχου

Reactors grade plutonium: Πλουτόνιο που αποτελεί καύσιμο αντιδραστήρων

Recycling (fuel): Ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση σχασίμου υλικού (ουρανίου και πλουτωνίου) για παραγωγή ενέργειας, αφού έχει ανακτηθεί με χημικές διεργασίες από το εξαντλημένο καύσιμο του αντιδραστήρα, έχει εμπλουτισθεί ξανά και έχει επαναχρησιμοποιηθεί στην παρασκευή νέων στοιχείων πυρηνικού καυσίμου

Refueling outages: Διακοπές λειτουργίας για ανατροφοδοσία πυρηνικού καυσίμου

Refueling: Ανατροφοδοσία πυρηνικού καυσίμου

Repositories: Ειδικοί χώροι τελικής εναπόθεσης υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων και ακτινοβολημένου καυσίμου

Reprocessing: Επανεπεξεργασία του καυσίμου - η διαδικασία της ανάκτησης των ισοτόπων ουρανίου και πλουτωνίου από το εξαντλημένο καύσιμο

Safety and reliability: Ασφάλεια και αξιοπιστία αντιδραστήρων

Separative Work Unit (SWU): Η εργασία που απαιτείται για την επίτευξη ενός συγκεκριμένου ποσοστού εμπλουτισμού - εκφράζει το κόστος του εμπλουτισμού

Sievert (Sv) Μονάδα του Διεθνούς Συστήματος (SI) για το ισοδύναμο δόσεως ίσου με 1 Joule/kilogram. 1 Sievert = 100 rem.

Social acceptance: κοινωνική αποδοχή

Spent nuclear fuel (or depleted): Εξαντλημένο (ή απεμπλουτισμένο) πυρηνικό καύσιμο - το καύσιμο που έχει απομακρυνθεί από τον πυρηνικό αντιδραστήρα, γιατί δεν είναι σε θέση να συντηρήσει αποτελεσματικά αλυσωτή αντίδραση για οικονομικούς ή άλλους λόγους

Stochastic effects of radiation: Στοχαστικές επιπτώσεις ακτινοβολίας - συμβαίνουν χωρίς κάποιο όριο στο επίπεδο της δόσης, η δε πιθανότητά τους είναι ανάλογη με τη δόση και η σοβαρότητά τους ανεξάρτητη από τη δόση

Thermal reactors: Θερμικοί αντιδραστήρες

Transmutation: Μεταστοιχείωση μακρόβιων υψηλής ραδιενέργειας ραδιονουκλιδίων, ώστε ο χρόνος απομόνωσης που θα απαιτείται για την μετάπτωσή τους σε ασφαλή επίπεδα να μειωθεί σε 200-300 χρόνια

Transuranic elements: Υπερουράνια στοιχεία - με χρόνους ημιζωής >20 έτη - ισότοπα που εκπέμπουν α ακτινοβολία με ατομικό αριθμό >92 (U) και χρόνους υποδιπλασιασμού μακρύτερους από 5 έτη, κυρίως Np-237, Am-241

Uranium: Ουράνιο - Ραδιενεργό στοιχείο με ατομικό αριθμό 92 και - στη μορφή που βρίσκεται σε φυσικά κοιτάσματα - με ατομικό βάρος περίπου 238. Τα δύο βασικά ισότοπά του είναι το ουράνιο-235 (0,7% φυσικού ουρανίου) το οποίο είναι σχάσιμο, και το ουράνιο-238 (99,3% φυσικού ουρανίου), το οποίο είναι σχάσιμο μόνο από ταχέα νετρόνια και καλείται «εύφορο». Ο φυσικό ουράνιο περιέχει επίσης μικρό ποσοστό ουρανίου-234.

Weapons grade plutonium, WPu: πλουτόνιο περιεκτικότητας αντίστοιχης με αυτήν που χρησιμοποιείται σε πυρηνικά όπλα

Yellowcake (U₃O₈): κίτρινο ουρανιούχο συμπύκνωμα - στερεά ένωση ουρανίου με το οξυγόνο

5. ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ

ABWRs	Advanced Boiling Water Reactors
AGR	Advanced Gas-cooled Reactors
ALARA/P	As-Low-As-Reasonably-Achievable/Practicable
ALWRs	Advanced Light Water Reactors
APWRs	Advanced Pressurized Water Reactors
BNFL	British Nuclear Fuel Limited (now BNF plc)
BWR	Boiling Water Reactors
COGEMA	Compagnie Générale des Matières Nucléaires
ECC systems	Emergency Core Cooling systems
EDF	Électricité de France
EPR	European Pressurized Water Reactor
EURATOM	European Atomic Energy Community
EW	Exempt Waste
GCFR	Gas Cooled Fast-breeder Reactors
GHGs	Greenhouse Gas Emissions
HLW	High level radioactive waste
HTGR	High Temperature Gas-cooled Reactors
HWGCR	Heavy Water Gas-Cooled Reactors
HWR	Heavy Water Reactors
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission for Radiological Protection
IEA	International Energy Agency
ILO	International Labor Office
INES	The International Nuclear Event Scale
IRS	Incident Reporting System
LILW	Low and Intermediate Level Waste
LLW	Low level radioactive waste
LMFBR	Liquid Metal Fast Breeder Reactors
LOCA	Loss of Coolant Accident
LWBR	Light Water Breeder Reactors
LWGR	Light Water Graphite-moderated Reactors
LWRs	Light Water Reactors
MCDMA	MultiCriteria Decision Making Analysis
MHTGR (Modular HTGR)	High Temperature Gas-cooled Reactors

MOX	Mixed Oxide (Fuel)
MSBR	Molten Salt Breeder Reactors
NEA	Nuclear Energy Agency
NPI	Nuclear Power International
NRC	Nuclear Regulatory Commission
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
PHWR/CANDU	Pressurized Heavy Water Reactors
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation
PSA	Probabilistic Safety Analysis
PWR	Pressurized Water Reactors
RBMK (LGR)	Light-water cooled-graphite moderated reactors
RPV	Reactor Pressure Vessel
SGHWR	Steam Generating Heavy Water Reactors
SWU	Separative Work Unit
TECDOC	Technical Document
UI	The Uranium Institute
WWER	Water-moderated water-cooled energy reactors (Russian design)
EEAE	Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας
I-ITTA	Ινστιτούτο Πυρηνικής Τεχνολογίας & Ακτινοπροστασίας