

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ (Α.Μ. 4796)

ΓΕΩΡΓΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ (Α.Μ. 5117)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΛΑΡΑΚΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την πτυχιακή εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στα συστήματα ψύξης των πυρηνικών αντιδραστήρων.

Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η μελέτη και η ανάλυση των διαφόρων συστημάτων ψύξης που χρησιμοποιούνται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες και των ατυχημάτων που σχετίζονται με το σύστημα ψύξης καθώς και γενικότερα η αποτίμηση της πυρηνικής ενέργειας ως μία αξιόπιστη λύση στο εντεινόμενο, σε παγκόσμιο επίπεδο, ενεργειακό πρόβλημα.

Θέλουμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μας κ. Αλέξανδρο Καλαράκη για την υπόδειξη του θέματος καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μας προσέφερε κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Βασιλόπουλος Βασίλειος
Γεωργακόπουλος Κωνσταντίνος

Ιανουάριος 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει σαν θέμα τα συστήματα ψύξης των πυρηνικών αντιδραστήρων. Κύριος στόχος είναι η ανάλυση των διαφόρων συστημάτων ψύξης, οι πιθανές αστοχίες των συστημάτων αυτών, οι επιπτώσεις των πυρηνικών ατυχημάτων στον άνθρωπο και το περιβάλλον καθώς και η περιβαλλοντική και οικονομική αποτίμηση των πυρηνικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται συνοπτικά κάποιες βασικές έννοιες της πυρηνικής φυσικής που αποτελούν το αναγκαίο υπόβαθρο για την κατανόηση της λειτουργίας του πυρηνικού αντιδραστήρα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται λεπτομερώς η βασική δομή ενός πυρηνικού αντιδραστήρα, γίνεται μία εισαγωγή στις βασικές έννοιες της θεωρίας των αντιδραστήρων και δίνονται αναλυτικά πληροφορίες για τα πυρηνικά καύσιμα.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται ο ρόλος και η σημασία του συστήματος ψύξης και περιγράφονται αναλυτικά όλα τα βασικά συστήματα ψύξης των πυρηνικών αντιδραστήρων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στη θερμοϋδραυλική ανάλυση των πυρηνικών αντιδραστήρων, δηλαδή στη θεωρία που έχει σαν στόχο τη μελέτη της απαγωγής θερμότητας από την καρδιά του αντιδραστήρα προς εκμετάλλευση για την παραγωγή ωφέλιμης ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα εφεδρικά συστήματα ψύξης που έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση του ατυχήματος απώλειας ψυκτικού του πιο σημαντικού ατυχήματος που μπορεί να συμβεί με καταστροφικές συνέπειες.

Στο έκτο κεφάλαιο περιγράφονται οι βιολογικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ραδιενέργειας.

Στο έβδομο κεφάλαιο αναλύονται λεπτομερώς τα τρία μεγαλύτερα πυρηνικά ατυχήματα που έχουν συμβεί.

Στο όγδοο κεφάλαιο δίνονται κάποια βασικά κατασκευαστικά και οικονομικά στοιχεία των πυρηνικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμη δίνεται μία εικόνα της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας σήμερα σε διεθνές επίπεδο και γίνεται μία αναφορά στη δυνατότητα

κατασκευής πυρηνικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα.

Τέλος, στο ένατο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

1.1 Ιδιότητες του Πυρήνα.....	1
1.2 Ραδιενέργεια.....	5
1.3 Πυρηνικές Αντιδράσεις.....	8
1.4 Πυρηνική Σχάση.....	11
1.5 Πυρηνική Σύντηξη.....	13

2. ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ

2.1 Ιστορική Αναδρομή.....	17
2.2 Συγκρότηση του Πυρηνικού Αντιδραστήρα	19
2.3 Βασικές Έννοιες Θεωρίας Αντιδραστήρων.....	27
2.4 Πυρηνικά Καύσιμα	29
2.5 Επιβράδυνση Νετρονίων.....	36
2.6 Πιθανές Καταστάσεις Λειτουργίας.....	38

3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ ΚΑΙ ΤΥΠΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ

3.1 Το Ψυκτικό Κύκλωμα.....	40
3.2 Ιδιότητες Ψυκτικών Μέσων.....	44
3.3 Ψυκτικά Μέσα.....	45
3.3.1 Αέρια Ψυκτικά Μέσα.....	45

3.3.2 Υγρά Ψυκτικά Μέσα.....	47
3.3.3 Συγκριτικά Στοιχεία.....	48
3.4 Αντιδραστήρες Ελαφρού Ύδατος.....	50
3.4.1 Γενικά.....	50
3.4.2 Αντιδραστήρες Πεπιεσμένου Ύδατος.....	50
3.4.3 Αντιδραστήρες Ζέοντος Ύδατος.....	54
3.5 Αντιδραστήρες Βαρέως Ύδατος.....	55
3.5.1 Γενικά.....	55
3.5.2 Ο Αντιδραστήρας CANDU.....	56
3.5.3 Ο Αντιδραστήρας SGHWR.....	58
3.6 Αντιδραστήρες Γραφίτη-Ύδατος.....	60
3.7 Αερίψυκτοι Αντιδραστήρες με Επιβραδυντή Γραφίτη.....	61
3.7.1 Γενικά.....	61
3.7.2 Ο Αντιδραστήρας MAGNOX.....	62
3.7.3 Ο Αντιδραστήρας AGR.....	64
3.7.4 Ο Αντιδραστήρας HTGR.....	65
3.8 Αναπαραγωγικοί Αντιδραστήρες Ταχέων Νετρονίων.....	68
3.8.1 Γενικά.....	68
3.8.2 Ο Αντιδραστήρας LMFBR.....	70

4. ΘΕΡΜΟΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

4.1 Γενικά.....	73
4.2 Ισοζύγιο Θερμότητας.....	76
4.3 Γεωμετρία της Ροής του Ψυκτικού.....	78
4.4 Μεταφορά Θερμότητας.....	80
4.5 Πτώση Πίεσης.....	82
4.6 Υπολογιστικοί Κώδικες στη Θερμοϋδραυλική Ανάλυση των Πυρηνικών Αντιδραστήρων.....	83
4.7 Το Ατύχημα Απώλειας Ψυκτικού.....	84

5. ΕΦΕΔΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ

5.1 Γενικά.....	87
5.2 Διεθνείς Κανονισμοί.....	87
5.3 Δομή του Εφεδρικού Συστήματος.....	88
5.4 Λειτουργία του Εφεδρικού Συστήματος	89
5.4.1 Γενικά.....	89
5.4.2 Μεγάλης Έκτασης LOCA.....	90
5.4.3 Μικρής Έκτασης LOCA.....	91
5.5 Επανάψυξη Ράβδων Πυρηνικού Καυσίμου.....	92
5.6 Παράμετροι που Επηρεάζουν την Επανάψυξη.....	97

6. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

6.1 Δόσεις Ραδιενέργειας.....	99
6.2 Βιολογικές Επιπτώσεις της Ραδιενέργειας.....	102
6.3 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις της Ραδιενέργειας.....	106
6.4 Κίνδυνοι από την Εξόρυξη του Ουρανίου.....	109
6.5 Ραδιενεργά Κατάλοιπα.....	111
6.5.1 Κατηγορίες Ραδιενεργών Καταλοίπων.....	111
6.5.2 Βραχυπρόθεσμη Διαχείριση των Πυρηνικών Καταλοίπων....	112
6.5.3 Μεσοπρόθεσμη Διαχείριση των Πυρηνικών Καταλοίπων.....	114
6.5.4 Μακροπρόθεσμη Διαχείριση των Πυρηνικών Καταλοίπων...	116

7. ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ

7.1 Γενικά.....	121
7.2 Το Ατύχημα στο ΤΜΙ.....	122
7.3 Το Ατύχημα στο Chernobyl.....	126
7.4 Το Ατύχημα στη Φουκουσίμα.....	131

8. ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

8.1 Κτιριακές Εγκαταστάσεις Πυρηνικού Σταθμού.....	134
8.2 Χρονοδιάγραμμα Πυρηνικού Σταθμού.....	135
8.2.1 Κατασκευή του Πυρηνικού Σταθμού.....	136
8.2.2 Λειτουργία του Πυρηνικού Σταθμού.....	137
8.2.3 Αδρανοποίηση του Αντιδραστήρα.....	138
8.3 Χωροθέτηση των Πυρηνικών Σταθμών.....	138
8.4 Οικονομικά Στοιχεία.....	140
8.5 Χρήση Πυρηνικής Ενέργειας.....	142
8.6 Πυρηνική Ενέργεια και Ενεργειακές Ανάγκες της Ελλάδας.....	146

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

9.1 Συμπεράσματα.....	148
9.2 Προοπτικές της Πυρηνικής Ενέργειας.....	149

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	150
--------------------------	------------

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει σαν θέμα τους πυρηνικούς αντιδραστήρες και την εκμετάλλευση της πυρηνικής ενέργειας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα συστήματα ψύξης των αντιδραστήρων.

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες είναι διατάξεις με τις οποίες η ενέργεια που εκλύεται από μία ελεγχόμενη και αυτοσυντηρούμενη αλυσιδωτή αντίδραση πυρηνικής σχάσης μετατρέπεται σε ωφέλιμη ενέργεια. Πυρηνικός αντιδραστήρας ισχύος (Nuclear Power Reactor) ονομάζεται ο αντιδραστήρας που έχει μεγάλη θερμική ισχύ. Αντιδραστήρες ισχύος χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε μικρό αριθμό αντιδραστήρων ισχύος γίνεται χρήση της θερμότητας που παράγεται στον αντιδραστήρα σε βιομηχανικές διαδικασίες ή/και για τη θέρμανση πόλεων. Πυρηνικοί αντιδραστήρες ισχύος χρησιμοποιούνται επίσης για την πρόωση πλοίων και υποβρυχίων.

Στην εποχή μας οι ενεργειακές ανάγκες συνεχώς αυξάνονται κάνοντας επιτακτική την εύρεση άμεσης λύσης στο ενεργειακό πρόβλημα. Η πυρηνική ενέργεια είναι οπωσδήποτε μία σημαντική επιλογή για την αδιάλειπτη παροχή μεγάλων τιμών ισχύος υπό τον όρο βέβαια ότι τα μέτρα ασφαλείας είναι τέτοια που να καθίσταται μηδαμινή η πιθανότητα ενός καταστροφικού πυρηνικού ατυχήματος.

Το σύστημα ψύξης του αντιδραστήρα έχει διπλό ρόλο αφού απάγει την παραγόμενη από το πυρηνικό καύσιμο θερμότητα και τη μεταφέρει προς περαιτέρω εκμετάλλευση προστατεύοντας συγχρόνως το πυρηνικό καύσιμο από επικίνδυνη υπερθέρμανση. Η θεωρητική μελέτη του ψυκτικού κυκλώματος απαιτεί προχωρημένες γνώσεις μηχανικής ρευστών και μετάδοσης θερμότητας καθώς και εξειδικευμένες μαθηματικές μεθόδους.

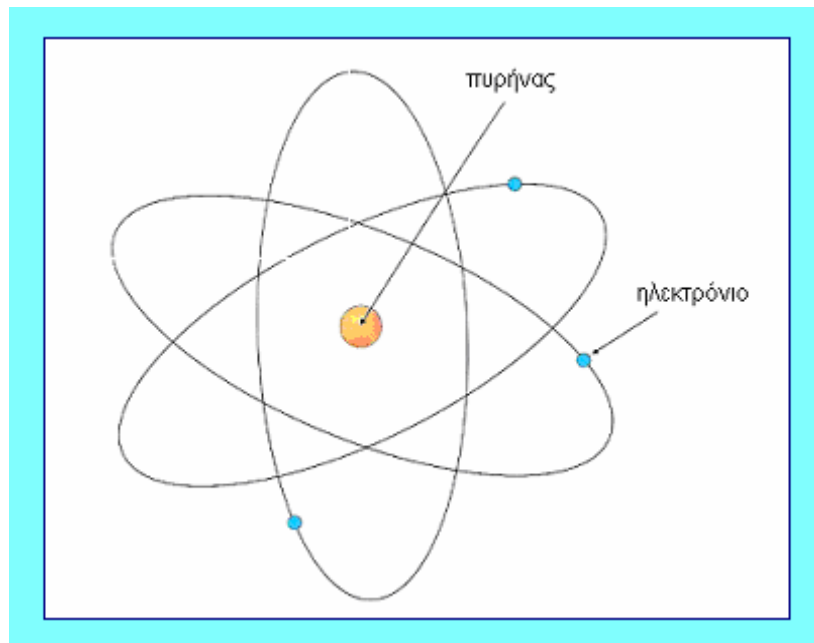
Το πιο επικίνδυνο ατύχημα που μπορεί να συμβεί σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα είναι το ατύχημα απώλειας ψυκτικού για την αντιμετώπιση του οποίου έχουν αναπτυχθεί ειδικά εφεδρικά συστήματα ψύξης. Γενικά όλος ο σχεδιασμός ενός πυρηνικού αντιδραστήρα έχει βασιστεί σε μεγάλο βαθμό στη δυνατότητα αποφυγής του ατυχήματος αυτού. Είναι ευρέως γνωστό ότι ένα πυρηνικό ατύχημα μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες για τα έμβια όντα και το περιβάλλον. Αυτό δικαιολογεί τη διστακτικότητα της κοινής γνώμης απέναντι στη λύση της πυρηνικής ενέργειας.

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες μπορούν να προσφέρουν ενέργεια με σχετικά χαμηλότερο κόστος από τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Πρέπει ακόμη να σημειωθεί ότι η ανάπτυξη της τεχνολογίας αφενός και η αξιοποίηση της εμπειρίας πολλών δεκαετιών αφετέρου έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη συστημάτων ασφαλείας που καθιστούν απίθανη την εμφάνιση ατυχήματος και τη διαρροή ραδιενέργειας από έναν πυρηνικό αντιδραστήρα.

1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

1.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ

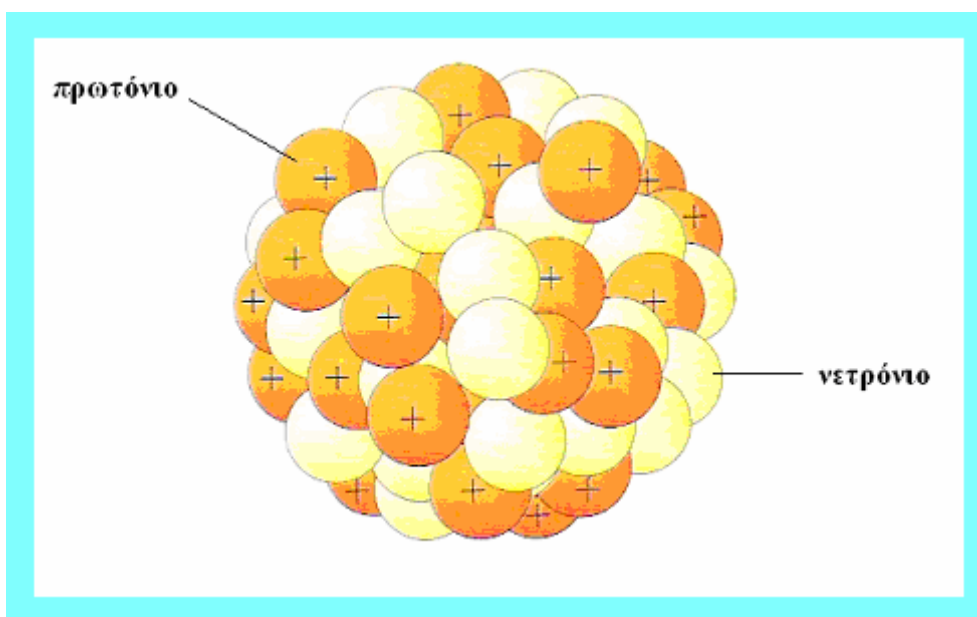
Το άτομο σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr αποτελείται από τον θετικά φορτισμένο πυρήνα και τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια που κινούνται γύρω από τον πυρήνα σε καθορισμένες τροχιές. Η ακτίνα του ατόμου είναι της τάξης των $10^{-10} m$ ενώ του πυρήνα είναι μεταξύ των $10^{-15} m$ και $10^{-14} m$. Ο χώρος μεταξύ ηλεκτρονίων και πυρήνα είναι κενός. Ο πυρήνας έχει ακτίνα μερικές δεκάδες χιλιάδες φορές μικρότερη από την ακτίνα του ατόμου. Συνεπώς το άτομο είναι σχεδόν άδειο στο εσωτερικό του.



Σχήμα 1.1 Η δομή του ατόμου. Τα ηλεκτρόνια περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα [1].

Ο ατομικός πυρήνας αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια τα οποία μαζί ονομάζονται νουκλεόνια. Το πρωτόνιο είναι φορτισμένο θετικά με φορτίο $1,6 \cdot 10^{-19} C$ ίσο κατά απόλυτη τιμή με το φορτίο του ηλεκτρονίου. Η μάζα του πρωτονίου είναι περίπου 1836 φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου. Το νετρόνιο δεν έχει ηλεκτρικό φορτίο και η μάζα του είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από τη μάζα του πρωτονίου. Το ελεύθερο νετρόνιο είναι ασταθές σωματίδιο. Ο μέσος

χρόνος ζωής του είναι 10 λεπτά και διασπάται σε ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο. Η μέση ταχύτητα των ελεύθερων νετρονίων με τη μικρότερη κινητική ενέργεια είναι περίπου $2200 \frac{m}{s}$ ενώ η τυπική διάσταση των αντιδραστήρων ισχύος είναι περίπου 4,5 m. Έτσι το πιο αργό νετρόνιο διασχίζει τον αντιδραστήρα σε χρόνο της τάξης των 2 ms. Ακόμα, οι αντιδράσεις πυρήνων με νετρόνια πραγματοποιούνται σε χρόνο της τάξης των 10^{-14} s. Η αστάθεια λοιπόν του νετρονίου είναι χωρίς καμιά πρακτική σημασία στους αντιδραστήρες και συνεπώς θεωρούμε το νετρόνιο ευσταθές σωματίδιο.



Σχήμα 1.2 Ο ατομικός πυρήνας [1].

Η ευστάθεια του πυρηνικού συστήματος οφείλεται στην ύπαρξη των ελκτικών πυρηνικών δυνάμεων που συγκρατούν τα νουκλεόνια στον μικρό χώρο του πυρήνα παρά την ηλεκτρική άπωση μεταξύ των πρωτονίων. Τα νετρόνια έχουν μία ιδιαίτερη συνεισφορά στην ευστάθεια του πυρήνα αφού συμμετέχουν στις πυρηνικές αλληλεπιδράσεις ενώ δεν συμμετέχουν στις ηλεκτρικές. Οι πυρηνικές δυνάμεις δεν κάνουν διάκριση μεταξύ πρωτονίων και νετρονίων, είναι πολύ ισχυρές αλλά έχουν πολύ μικρή εμβέλεια, της τάξης μεγέθους της πυρηνικής ακτίνας.

Ο αριθμός Z των πρωτονίων στον πυρήνα που καθορίζει τις χημικές ιδιότητες του στοιχείου και αποτελεί ουσιαστικά την χημική ταυτότητα του ατόμου ονομάζεται ατομικός αριθμός. Ο αριθμός των νετρονίων συμβολίζεται με N και ονομάζεται νετρονικός αριθμός ενώ ο συνολικός αριθμός των νουκλεονίων ενός πυρήνα συμβολίζεται με A και ονομάζεται μαζικός αριθμός. Προφανώς ισχύει:

$$A=Z+N$$

Η ακτίνα R των περισσότερων πυρήνων εκφράζεται πολύ καλά από την εξίσωση:

$$R = 1,2 \cdot 10^{-15} \cdot A^{1/3} \text{ (m)}$$

Οποιοσδήποτε πυρήνας συμβολίζεται με την έκφραση: ${}^A_Z X$ όπου X είναι το σύμβολο του χημικού στοιχείου. Πυρήνες που έχουν τον ίδιο ατομικό αλλά διαφορετικό μαζικό αριθμό ονομάζονται ισότοπα. Τα ισότοπα ενός στοιχείου έχουν τον ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων αφού αυτός, στα ουδέτερα άτομα, είναι ίδιος με τον αριθμό των πρωτονίων. Συνεπώς τα ισότοπα ενός στοιχείου έχουν τις ίδιες χημικές ιδιότητες αφού αυτές καθορίζονται από το πλήθος των ηλεκτρονίων. Τα ισότοπα ενός στοιχείου δεν βρίσκονται με την ίδια αφθονία στη φύση. Έτσι, το ισότοπο ${}^{12}_6 C$ του άνθρακα αποτελεί περίπου το 99% του άνθρακα που υπάρχει στη φύση ενώ τα ισότοπα ${}^{13}_6 C$ και ${}^{14}_6 C$ μοιράζονται το υπόλοιπο 1%. Πυρήνες με τον ίδιο μαζικό αριθμό αλλά διαφορετικό ατομικό αριθμό ονομάζονται ισοβαρείς ενώ πυρήνες με τον ίδιο αριθμό νετρονίων ονομάζονται ισότονοι.

Για τη μέτρηση των μαζών των πυρήνων χρησιμοποιείται η ατομική μονάδα μάζας u . Μάζα ίση με $1u$ έχει οριστεί να είναι ίση με το $\frac{1}{12}$ της μάζας του ατόμου του ${}^{12}_6 C$. Ισχύει ότι $1u = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$. Σύμφωνα με τη θεωρία της σχετικότητας η μάζα οποιουδήποτε σώματος είναι ισοδύναμη με μία ποσότητα ενέργειας σύμφωνα με τη σχέση:

$$E = m \cdot c^2$$

όπου $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Πολύ συχνά λόγω ακριβώς αυτής της αντιστοιχίας μάζας και ενέργειας μετράμε τη μάζα ενός πυρήνα ή ενός σωματιδίου σε μονάδες ενέργειας. Για τη μέτρηση της ενέργειας στην πυρηνική φυσική χρησιμοποιείται ευρέως η μονάδα 1 MeV όπου $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Από την παραπάνω σχέση με κατάλληλες μετατροπές των μονάδων βρίσκουμε ότι μάζα ίση με $1u$ αντιστοιχεί σε ενέργεια $931,48 \text{ MeV}$.

Πειραματικά έχει βρεθεί ότι η μάζα των πυρήνων είναι μικρότερη από το άθροισμα των μαζών των νουκλεονίων που τους αποτελούν. Η διαφορά της συνολικής μάζας των ελεύθερων νουκλεονίων μείον τη μάζα του πυρήνα ονομάζεται έλλειμμα μάζας του πυρήνα και συμβολίζεται με Δm :

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M(A, Z)$$

όπου m_p , m_n είναι οι μάζες του πρωτονίου και του νετρονίου αντίστοιχα και $M(A, Z)$ η μάζα του πυρήνα με μαζικό αριθμό A και ατομικό αριθμό Z .

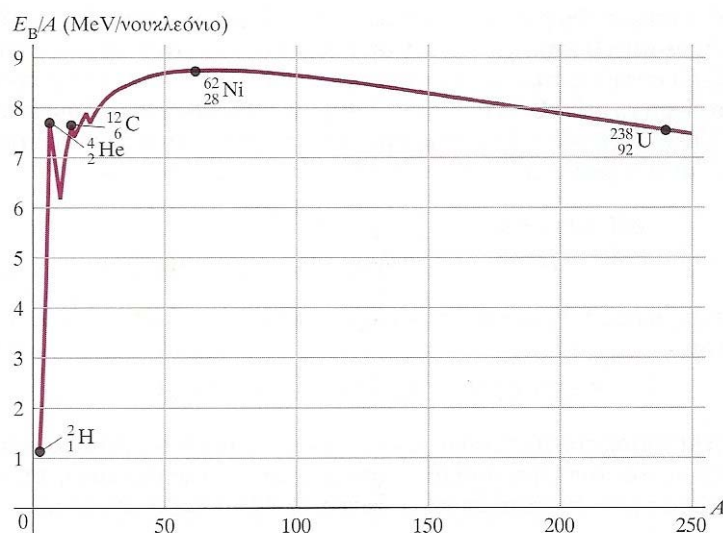
Αν ο πυρήνας είναι σταθερός, αυτό σημαίνει ότι κατά τη συγκρότησή του από πρωτόνια και νετρόνια απελευθερώθηκε ενέργεια.

Η ενέργεια αυτή θα πρέπει να καταβληθεί αν θελήσουμε να διαλύσουμε τον πυρήνα σε ελεύθερα νουκλεόνια. Η ενέργεια που απαιτείται για τη διάσπαση του πυρήνα ονομάζεται ενέργεια σύνδεσης, συμβολίζεται με E_B και είναι το ποσό της ενέργειας που αντιστοιχεί στο έλλειμμα μάζας του πυρήνα. Δηλαδή έχουμε τη σχέση:

$$E_B = \Delta m \cdot c^2$$

Γίνεται φανερό ότι στην πυρηνική φυσική όταν γράφουμε την αρχή διατήρησης της ενέργειας πρέπει να συμπεριλαμβάνουμε και την ενέργεια που αντιστοιχεί στη μάζα ηρεμίας των πυρήνων.

Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο τόσο πιο σταθερός είναι ο πυρήνας. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο συναρτήσει του μαζικού αριθμού.



Σχήμα 1.3 Ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο των πυρήνων συναρτήσει του μαζικού αριθμού [4].

Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο των περισσότερων πυρήνων κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 7MeV/νουκλεόνιο και 9MeV/νουκλεόνιο. Η καμπύλη έχει μέγιστη τιμή περί τα 8,8MeV/νουκλεόνιο στο $A=62$ που αντιστοιχεί στο στοιχείο νικέλιο. Στο σχήμα 1.3 παρατηρούμε ότι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο αυξάνεται γρήγορα στους ελαφρούς πυρήνες, έχει ένα πλατύ μέγιστο στους πυρήνες με μαζικό αριθμό μεταξύ του 56 και του 60 και μειώνεται αργά στους πυρήνες μεσαίου και μεγάλου μαζικού αριθμού. Οι διαφορές αν και φαίνονται μικρές, είναι σημαντικές. Πυρήνες με μαζικούς αριθμούς αρκετά μεγάλους ή αρκετά μικρούς δεν είναι τόσο σταθεροί όσο οι πυρήνες της μεσαίας περιοχής και προτιμούν να μεταπίπτουν σε πυρήνες μεσαίου μαζικού αριθμού, οι πρώτοι με θραύση τους σε μικρότερους πυρήνες (σχάση), ενώ οι

δεύτεροι με συνένωσή τους προς μεγαλύτερους (σύντηξη) αποδεσμεύοντας αντίστοιχα ποσά ενέργειας. Και στη σχάση και στη σύντηξη η μάζα των πυρήνων που παράγονται είναι μικρότερη από τη μάζα των αντιδρώντων. Η διαφορά αυτή των μαζών μετατρέπεται σε ενέργεια που εκλύεται κατά τις αντιδράσεις αυτές όπως θα δούμε και στις επόμενες ενότητες. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η αιχμή της καμπύλης του σχήματος 1.3 στο $A=4$ δείχνει την ιδιαίτερη σταθερότητα της δομής του σωματιδίου α (πυρήνας ηλίου).

Η ενέργεια των νουκλεονίων του πυρήνα δεν μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή, αλλά, όπως συμβαίνει και με την ενέργεια των ηλεκτρονίων των ατόμων, είναι κβαντωμένο μέγεθος και μπορεί να πάρει μόνο διακριτές τιμές. Η στάθμη που αντιστοιχεί στη μικρότερη δυνατή ενέργεια ονομάζεται θεμελιώδης στάθμη ενώ οι υπόλοιπες ενεργειακές στάθμες ονομάζονται διεγερμένες. Οι διαφορές ενέργειας μεταξύ των πυρηνικών καταστάσεων είναι μερικά MeV δηλαδή εκατομμύρια φορές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες διαφορές ενέργειας των ατομικών καταστάσεων.

1.2 ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ

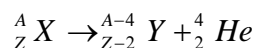
Πολλοί από τους φυσικούς πυρήνες είναι ασταθείς. Δηλαδή παθαίνουν από μόνοι τους, χωρίς καμιά εξωτερική διέγερση, μετατροπή σε κάποιο άλλο πυρήνα εκπέμποντας σωματίδια ή και μετάβαση από κάποια στάθμη διέγερσης σε κάποια άλλη χαμηλότερη, εκπέμποντας φωτόνια. Μιλάμε τότε για ραδιενεργό διάσπαση του ασταθούς πυρήνα. Ο διασπώμενος πυρήνας ονομάζεται μητρικός και ο πυρήνας που προκύπτει από τη διάσπαση ονομάζεται θυγατρικός.

Τα σωματίδια εκπέμπονται με σημαντική ενέργεια και η εκπομπή τους χαρακτηρίζεται ραδιενεργός ακτινοβολία. Ραδιενέργεια ονομάζεται η ιδιότητα της αυθόρμητης διάσπασης, δηλαδή της διάσπασης χωρίς εξωτερική διέγερση, των ραδιενεργών πυρήνων, με ταυτόχρονη εκπομπή ραδιενεργών ακτινοβολιών.

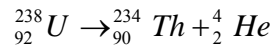
Οι σημαντικότερες ραδιενεργές διασπάσεις είναι οι ακόλουθες:

A) Διάσπαση α

Το σωματίδιο α είναι ένας πυρήνας ηλίου (${}^4_2\text{He}$) και αποτελείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια. Στη διάσπαση α ο μαζικός αριθμός του θυγατρικού πυρήνα είναι μειωμένος κατά 4 και ο ατομικός αριθμός κατά 2 σε σχέση με τον μητρικό πυρήνα. Η γενική μορφή της διάσπασης αυτής είναι:



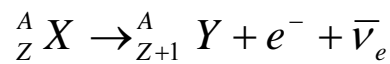
Για παράδειγμα η διάσπαση α του ουρανίου-238 είναι:



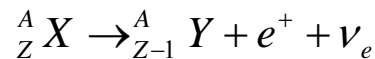
Σε κάθε διάσπαση α η μάζα του μητρικού πυρήνα είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των μαζών του θυγατρικού πυρήνα και του σωματίου α. Η μάζα που χάνεται μετατρέπεται σε ενέργεια η οποία δίνεται στα προϊόντα της αντίδρασης με τη μορφή της κινητικής ενέργειας.

B) Διάσπαση β

Έχουμε δύο διασπάσεις β, την β⁻ και τη β⁺. Τα σωματίδια β⁻ είναι ηλεκτρόνια τα οποία εκπέμπονται από ραδιενεργούς πυρήνες κατά τη μετατροπή ενός νετρονίου του πυρήνα σε πρωτόνιο με ταυτόχρονη εκπομπή ενός αντινετρίνου (το αντισωματίο του νετρίνου). Κατά τη διάσπαση β⁻ ο μαζικός αριθμός του πυρήνα παραμένει αναλλοίωτος ενώ ο ατομικός αριθμός αυξάνεται κατά 1. Η γενική μορφή της διάσπασης β⁻ είναι:

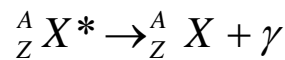


Τα σωματίδια β⁺ είναι ποζιτρόνια (το αντισωματίο του ηλεκτρονίου) τα οποία εκπέμπονται από ραδιενεργούς πυρήνες κατά τη μετατροπή ενός πρωτονίου σε νετρόνιο με ταυτόχρονη εκπομπή ενός νετρίνου. Κατά τη διάσπαση β⁺ ο μαζικός αριθμός του πυρήνα παραμένει αναλλοίωτος ενώ ο ατομικός αριθμός μειώνεται κατά 1. Η γενική μορφή της διάσπασης β⁺ είναι:



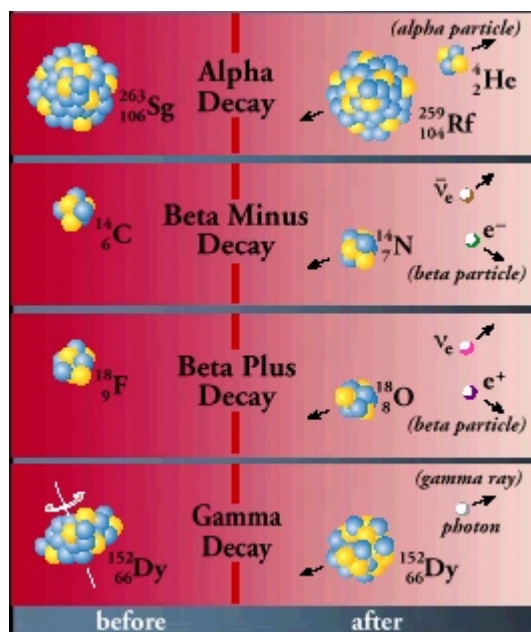
Γ) Διάσπαση γ

Πολύ συχνά ο θυγατρικός πυρήνας που παράγεται σε μία διάσπαση α ή β βρίσκεται σε μία διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση και στη συνέχεια μεταπίπτει σε μία χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη με ταυτόχρονη εκπομπή ενός ή περισσότερων φωτονίων. Τα φωτόνια που εκπέμπονται κατά τις αποδιεγέρσεις των πυρήνων έχουν ενέργεια πάνω από 1MeV και ονομάζονται ακτίνες ή σωματίδια γ. Η γενική μορφή της αποδιέγερσης γ είναι:



όπου το σύμβολο (*) δηλώνει διεγερμένη στάθμη.

Στις διασπάσεις α και β έχουμε μεταστοιχείωση γιατί προκύπτουν πυρήνες διαφορετικού ατομικού αριθμού από τους μητρικούς ενώ στη διάσπαση γ αυτό δεν συμβαίνει. Για τη διάσπαση α υπεύθυνη είναι η ισχυρή αλληλεπίδραση ενώ για τη διάσπαση β η ασθενής και για τη διάσπαση γ η ηλεκτρομαγνητική.



Σχήμα 1.4 Σχηματική αναπαράσταση των βασικών ραδιενεργών διασπάσεων [1].

Η ποσοτική περιγραφή της διάσπασης των ασταθών πυρήνων προς σταθερότερους πυρήνες γίνεται μέσω της διαφορικής εξίσωσης:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N$$

όπου $\frac{dN}{dt}$ ο ρυθμός με τον οποίο διασπώνται οι πυρήνες, λ η σταθερά αποδιέγερσης που εκφράζει την ανά μονάδα χρόνου πιθανότητα διάσπασης και N ο πληθυσμός των ασταθών πυρήνων. Η λύση της προηγούμενης εξίσωσης δίνει σαν αποτέλεσμα ότι ο πληθυσμός των ασταθών πυρήνων μειώνεται εκθετικά:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

με N_0 το πλήθος των ασταθών πυρήνων τη χρονική στιγμή $t=0$.

Ο μέσος χρόνος ζωής, τ , των πυρήνων είναι:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

ενώ ο χρόνος ημιζωής ή χρόνος υποδιπλασιασμού, $T_{1/2}$, εκφράζει το χρόνο που απαιτείται για τον υποδιπλασιασμό ενός πληθυσμού ασταθών πυρήνων και δίνεται από τη σχέση:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

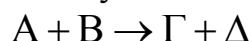
Η ποσότητα $\lambda \cdot N$ ονομάζεται ενεργότητα, ή πιο απλά ραδιενέργεια, και εκφράζει το πλήθος των διασπάσεων που συμβαίνουν

στη μονάδα του χρόνου και κατ' επέκταση το πλήθος των σωματιδίων α ή β ή γ που εκπέμπονται στη μονάδα του χρόνου. Στο διεθνές σύστημα μονάδων η μονάδα μέτρησης της ενεργότητας είναι το 1Becquerel (1Bq) που ορίζεται ως μία διάσπαση το δευτερόλεπτο. Παλαιότερη μονάδα μέτρησης είναι το 1Curie (1Ci) που είναι πολύ μεγαλύτερη από το Bq και δεν χρησιμοποιείται πάρα πολύ σήμερα. Ισχύει ότι: $1Ci = 3,7 \cdot 10^{10} Bq$

1.3 ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ

Στην πλέον συνήθη μορφή μία πυρηνική αντίδραση προκαλείται με το βομβαρδισμό πυρήνων-στόχων με δέσμες κινούμενων σωματιδίων. Τα σωματίδια αυτά μπορεί να είναι νετρόνια, φωτόνια, πρωτόνια, σωματίδια α ή βαρύτεροι πυρήνες. Κάθε τέτοια κρούση μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη σκέδαση του σωματιδίου-βλήματος, την απορρόφησή του ή την ανακατάταξη των νουκλεονίων που συγκροτούν το βλήμα και το στόχο σε νέα πυρηνικά συστήματα. Επιπλέον, οι πυρήνες που παράγονται μπορεί να βρίσκονται στη θεμελιώδη ή σε κάποια διεγερμένη ενεργειακή στάθμη.

Η ενέργεια, Q , που απελευθερώνεται σε μία πυρηνική αντίδραση υπολογίζεται από τη διαφορά των μαζών ηρεμίας των αντιδρώντων και των προϊόντων σύμφωνα με την ισοδυναμία μάζας και ενέργειας. Συνεπώς, αν αποδώσουμε μία πυρηνική αντίδραση, σε αναλογία με τις χημικές αντιδράσεις, συμβολικά ως:



τότε η ενέργεια, Q , της αντίδρασης θα είναι:

$$Q = (M_A + M_B - M_\Gamma - M_\Delta) \cdot c^2$$

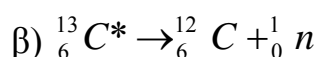
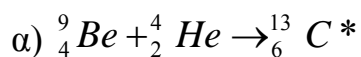
Όταν $Q > 0$ τότε η μάζα των προϊόντων είναι μικρότερη από τη μάζα των αντιδρώντων. Η μάζα που λείπει έχει μετατραπεί σε ενέργεια οπότε τα προϊόντα έχουν μεγαλύτερη κινητική ενέργεια από τα αντιδρώντα. Μία τέτοια πυρηνική αντίδραση ονομάζεται εξώθερμη και πραγματοποιείται χωρίς δαπάνη ενέργειας. Αντίθετα, κερδίζουμε ενέργεια από μία εξώθερμη αντίδραση. Αν $Q < 0$ η αντίδραση ονομάζεται ενδόθερμη και πρέπει να δώσουμε ενέργεια για να πραγματοποιηθεί.

Σχετικά με το μηχανισμό των πυρηνικών αντιδράσεων δεν υπάρχει θεωρία ικανή να ερμηνεύσει όλες τις αντιδράσεις. Υπάρχουν μοντέλα και καθένα από αυτά ερμηνεύει ορισμένες κατηγορίες αντιδράσεων, ενώ αποτυγχάνει σε άλλες. Το μοντέλο του Bohr (1936) ερμηνεύει τις περισσότερες από τις πυρηνικές αντιδράσεις και το σύνολο σχεδόν από τις αντιδράσεις με νετρόνια στους πυρηνικούς αντιδραστήρες. Σύμφωνα με αυτό η αντίδραση πραγματοποιείται σε δύο στάδια:

α) το σωματίδιο-βλήμα ενσωματώνεται στον αρχικό πυρήνα και σχηματίζεται έτσι νέος πυρήνας, ο σύνθετος πυρήνας, σε κατάσταση διέγερσης.

β) Ο σύνθετος πυρήνας αποδιεγείρεται με διάσπαση στα τελικά προϊόντα της αντίδρασης.

Για παράδειγμα η εφαρμογή του μοντέλου αυτού στο βομβαρδισμό πυρήνων ${}^9_4\text{Be}$ με σωματάρια δίνει τον παρακάτω μηχανισμό:



Η ενέργεια διέγερσης του σύνθετου πυρήνα είναι το άθροισμα της κινητικής ενέργειας του σωματιδίου βλήματος και της ενέργειας σύνδεσής του με το σύνθετο πυρήνα. Με την είσοδο του σωματιδίου στον πυρήνα αυτή η περίσσεια, δηλαδή πάνω από τη θεμελιώδη, ενέργεια κατανέμεται γρήγορα και με τυχαίο τρόπο στα άλλα σωματίδια του σύνθετου πυρήνα. Η διαδικασία της αντίδρασης συνεχίζεται με συνεχή, τυχαία ανακατανομή της ενέργειας. Κάποια στιγμή η ενέργεια διέγερσης μπορεί να είναι συγκεντρωμένη σε μερικά νουκλεόνια, την επόμενη σε άλλα κ.ο.κ. Ο σύνθετος πυρήνας ξεχνάει έτσι γρήγορα τον τρόπο σχηματισμού του. Είναι δυνατό σε κάποια στιγμή να βρεθεί αρκετή ενέργεια συγκεντρωμένη σε ένα νουκλεόνιο (ή σε ένα συγκρότημα νουκλεονίων) ώστε το τελευταίο να μπορεί να αποσπαστεί από τον πυρήνα, οπότε και πραγματοποιείται η διάσπαση στα τελικά προϊόντα της αντίδρασης.

Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος που έχει μεγάλη σημασία κατά τη μελέτη των πυρηνικών αντιδράσεων είναι η πιθανότητα ώστε μία αντίδραση να συμβεί υπό ορισμένες συνθήκες. Η πιθανότητα αυτή εκφράζεται πολλές φορές μέσω της ενεργού διατομής. Η ενεργός διατομή, σ , ορίζεται ως η επιφάνεια που κάθε πυρήνας-στόχος παρεμβάλει στη δέσμη των σωματιδίων-βλημάτων. Αν θεωρήσουμε τον πυρήνα-στόχο σφαιρικό με ακτίνα R , τότε μία πρώτη εκτίμηση της ενεργού διατομής είναι:

$$\sigma = \pi \cdot R^2$$

Η ενεργός διατομή αντιπροσωπεύει το πλήθος των συγκρούσεων ανά μονάδα χρόνου για μοναδιαία ροή σωματιδίων-βλημάτων και μοναδιαία πυκνότητα πυρήνων στο υλικό του στόχου.

Ιδιαίτερη σημασία για την πυρηνική τεχνολογία έχουν οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται με νετρόνια ως σωματίδια-βλήματα. Στην περίπτωση των αντιδράσεων με νετρόνια οι τρόποι αποδιέγερσης του σύνθετου πυρήνα καθορίζουν το είδος των αντιδράσεων αυτών. Έχουμε τις παρακάτω περιπτώσεις:

α) **ραδιενεργός σύλληψη (n, γ):** ο σύνθετος πυρήνας αποδιεγείρεται εκπέμποντας φωτόνια (ακτινοβολία γ). Οι συχνότητες της ακτινοβολίας αυτής είναι της τάξης των $2 \cdot 10^{20}$ Hz. Συχνά, μετά την εκπομπή της ακτινοβολίας γ , ο πυρήνας εξακολουθεί να βρίσκεται σε διέγερση και εκπέμπει ακτινοβολία β .

β) **εκπομπή φορτισμένων σωματιδίων:** ο σύνθετος πυρήνας αποδιεγείρεται εκπέμποντας ένα πρωτόνιο ή σωματίδιο α ή δευτέριο ή β^- .

γ) **ανελαστική σκέδαση:** Ο σύνθετος πυρήνας εκπέμπει ένα νετρόνιο (όχι αναγκαστικά το ίδιο με αυτό που ενσωματώθηκε) οπότε το άλλο προϊόν της αντίδρασης έχει το ίδιο ζεύγος (Z, N), όπως ο αρχικός πυρήνας της αντίδρασης. Μακροσκοπικά λοιπόν η αντίδραση εμφανίζεται ως σκέδαση. Μετά την εκπομπή του νετρονίου ο πυρήνας βρίσκεται σε κατάσταση διέγερσης και αποδιεγείρεται τελικά με εκπομπή γ . Μπορούμε λοιπόν να θεωρήσουμε το φαινόμενο μακροσκοπικά ως σκέδαση του αρχικού νετρονίου, στην οποία χάνει εξαιρετικά μεγάλο ποσοστό της κινητικής του ενέργειας, η ενέργεια που χάνει παραπάνω από εκείνη που θα έχανε σε απλή σκέδαση με τον πυρήνα, είναι η ενέργεια του φωτονίου που εκπέμπει ο πυρήνας.

δ) **ελαστική σκέδαση (n, n):** Εκπέμπεται και πάλι νετρόνιο (όχι αναγκαστικά το ίδιο με το αρχικό) και ο πυρήνας επανέρχεται στην αρχική του θεμελιώδη κατάσταση. Ο χρόνος ζωής του σύνθετου πυρήνα είναι της τάξης των 10^{-12} s και η συνολική κινητική ενέργεια νετρονίου και πυρήνα είναι η ίδια, πριν και μετά την αντίδραση. Έτσι, η «ελαστική σκέδαση συντονισμού», όπως ονομάζεται αυτή η (σχετικά σπάνια) αντίδραση, είναι πρακτικά ισοδύναμη με τη δυναμική ελαστική σκέδαση. Στη δυναμική ελαστική σκέδαση το νετρόνιο συγκρούεται με τον πυρήνα χωρίς σχηματισμό σύνθετου πυρήνα, το νετρόνιο βλέπει τον πυρήνα στόχο ως μία μεγάλη ενιαία μάζα, κατά τη σύγκρουση (που διαρκεί περίπου 10^{-22} s) αποδίδει στον πυρήνα ένα μέρος από την κινητική του ενέργεια και ορμή και κινείται στη συνέχεια σε κάποια κατεύθυνση διαφορετική από την αρχική.

ε) **αντίδραση ($n, 2n$):** Ο σύνθετος πυρήνας αποδιεγείρεται εκπέμποντας δύο νετρόνια. Για την αντίδραση αυτή πρέπει το αρχικό νετρόνιο να έχει εξαιρετικά μεγάλη ενέργεια. Η αντίδραση αυτή είναι σπάνια.

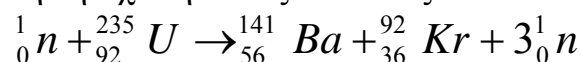
στ) **σχάση:** Ο σύνθετος πυρήνας τεμαχίζεται σε δύο μεγάλα θραύσματα και εκπέμπονται σχεδόν ταυτόχρονα δύο ως τρία νετρόνια και πολλά φωτόνια. Τα δύο θραύσματα της σχάσης είναι πυρήνες ασταθείς, εξακολουθούν να βρίσκονται σε διέγερση και αποδιεγείρονται με σειρές εκπομπής σωματιδίων β^- και γ . Το είδος και η τύχη των προϊόντων της σχάσης είναι καθοριστικής σημασίας για τη συμπεριφορά στο χρόνο του

πυρηνικού αντιδραστήρα και γι' αυτό θα περιγραφούν στην επόμενη ενότητα

1.4 ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΣΧΑΣΗ

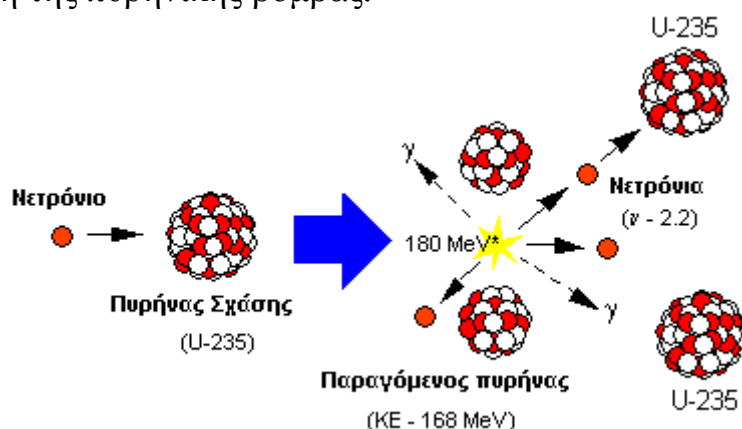
Όπως ήδη αναφέρθηκε πυρηνική σχάση έχουμε όταν ένας βαρύς πυρήνας απορροφά ένα νετρόνιο και στη συνέχεια διασπάται σε δύο μικρότερους πυρήνες. Σε μία τέτοια αντίδραση η ολική μάζα ηρεμίας των προϊόντων είναι μικρότερη από την αρχική μάζα ηρεμίας και άρα πρόκειται για εξώθερμη αντίδραση.

Η πρώτη πυρηνική σχάση παρατηρήθηκε το 1939 από τους Otto Hahn και Fritz Strassman μετά από βομβαρδισμό με νετρόνια του $^{235}_{92}\text{U}$. Υπάρχουν περίπου 90 διαφορετικοί συνδυασμοί των δύο πυρήνων που παράγονται σε αυτή τη σχάση. Ένας από τους πιο πιθανούς είναι:



Η αντίδραση αυτή είναι ισχυρά εξώθερμη. Παράγονται περίπου 200MeV ανά πυρήνα ουρανίου.

Τα νετρόνια που παράγονται κατά τη σχάση ενός πυρήνα είναι δυνατό να προκαλέσουν τη σχάση και άλλων πυρήνων και έτσι να έχουμε μία αλυσιδωτή αντίδραση. Αν αυτή η αλυσιδωτή αντίδραση δεν ελεγχθεί, δηλαδή δεν προχωρήσει αργά με ελεγχόμενη ταχύτητα, τότε έχει ως αποτέλεσμα μία βίαιη έκρηξη με ταυτόχρονη έκλυση τεράστιων ποσών ενέργειας. Σε αυτήν τη μη ελεγχόμενη πυρηνική σχάση στηρίζεται η κατασκευή της πυρηνικής βόμβας.

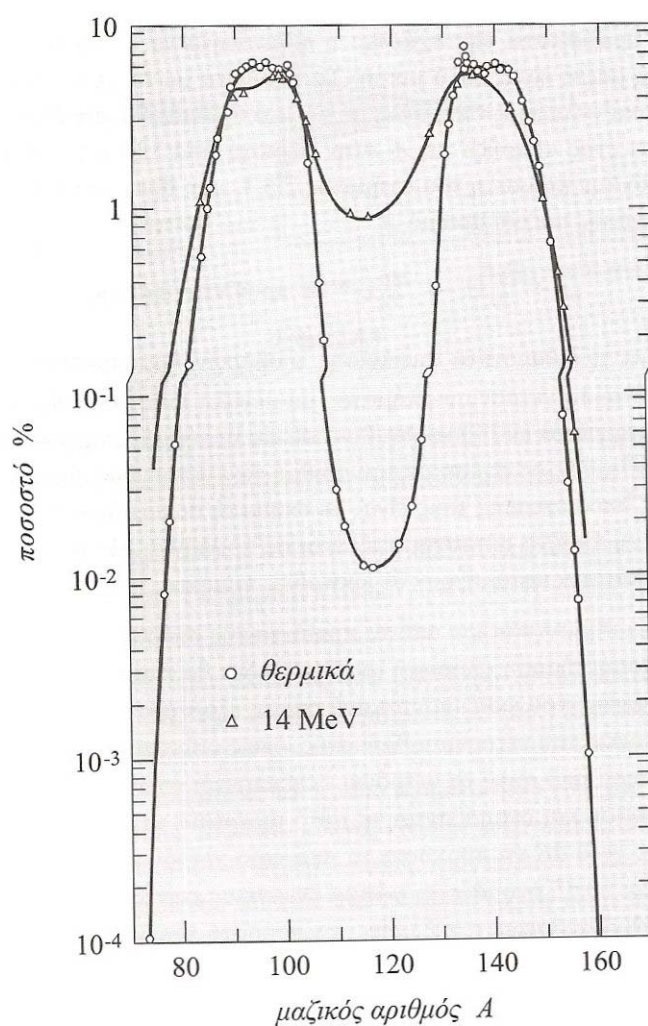


Σχήμα 1.5 Σχηματική αναπαράσταση μιας αλυσιδωτής αντίδρασης πυρηνικής σχάσης [1].

Αντίθετα, σε έναν αντιδραστήρα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος τα παραγόμενα νετρόνια επιβραδύνονται με κατάλληλο μηχανισμό ώστε να

διατηρούν μία αυτοσυντηρούμενη αλυσιδωτή αντίδραση η οποία θα είναι πλήρως ελεγχόμενη ώστε να μην οδηγήσει σε έκρηξη.

Για ορισμένα ισότοπα (U-233, U-235, Pu-239, Pu-241) είναι δυνατή η σχάση με νετρόνια ασήμαντης κινητικής ενέργειας. Τα ισότοπα αυτά ονομάζονται σχάσιμα και από αυτά, μόνο το U-235 βρίσκεται στη φύση σε αξιόλογες ποσότητες, τα υπόλοιπα τρία είναι κατασκευάσματα του ανθρώπου. Για τη σχάση άλλων ισωτόπων, όπως το Th-232 και το U-238, το νετρόνιο πρέπει να έχει κινητική ενέργεια μεγαλύτερη από κάποια τιμή κατωφλίου που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι της τάξης των 1,5 MeV.



Σχήμα 1.6 Εκατοστιαία κατανομή των προϊόντων της σχάσης του U-235 [2].

Τα νετρόνια-βλήματα διακρίνονται σε θερμικά (χαμηλής ταχύτητας και ενέργειας) και ταχεία (υψηλής ταχύτητας και ενέργειας). Τα προϊόντα ή αλλιώς θραύσματα της σχάσης εξαρτώνται σε μεγάλο

βαθμό από την ενέργεια των νετρονίων-βλημάτων. Στο σχήμα 1.6 φαίνεται η πιθανότητα να έχει ο πυρήνας-προϊόν της σχάσης του U-235 μαζικό αριθμό A για θερμικά και ταχέα νετρόνια. Η καμπύλη αυτή είναι γνωστή και ως καμπύλη απόδοσης των προϊόντων της σχάσης.

Ο αριθμός, ν, των νετρονίων που παράγονται κατά τη σχάση ενός πυρήνα εξαρτάται από το είδος του πυρήνα που παθαίνει σχάση και την ενέργεια των νετρονίων-βλημάτων. Τα περισσότερα από αυτά τα νετρόνια εκπέμπονται σχεδόν ταυτόχρονα με τη σχάση και γι' αυτό ονομάζονται ακαριαία νετρόνια. Τα υπόλοιπα νετρόνια εκπέμπονται με κάποια καθυστέρηση σε σχέση με τη σχάση και γι' αυτό το λόγο ονομάζονται και καθυστερημένα νετρόνια. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται ενδεικτικά οι μέσοι αριθμοί παραγόμενων νετρονίων για τρεις διαφορετικούς πυρήνες και τρεις διαφορετικές τιμές ενέργειας των νετρονίων-βλημάτων.

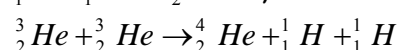
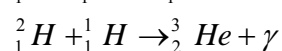
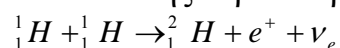
Πίνακας 1.1 Μέσος αριθμός νετρονίων που εκπέμπονται ανά σχάση

Ενέργεια νετρονίου-βλήματος		U-233	U-235	Pu-239
Θερμικά	0,025eV	2,50	2,43	2,89
Ταχέα	1MeV	2,62	2,58	3,00
	2MeV	2,73	2,70	3,11

Όπως είδαμε οι σχάσεις στους πυρηνικούς αντιδραστήρες προκαλούνται με νετρόνια και έτσι οι αντιδράσεις της ύλης με νετρόνια και ειδικότερα η τύχη του νετρονικού πληθυσμού στον αντιδραστήρα είναι το κεντρικό θέμα της θεωρίας των αντιδραστήρων.

1.5 ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΣΥΝΤΗΞΗ

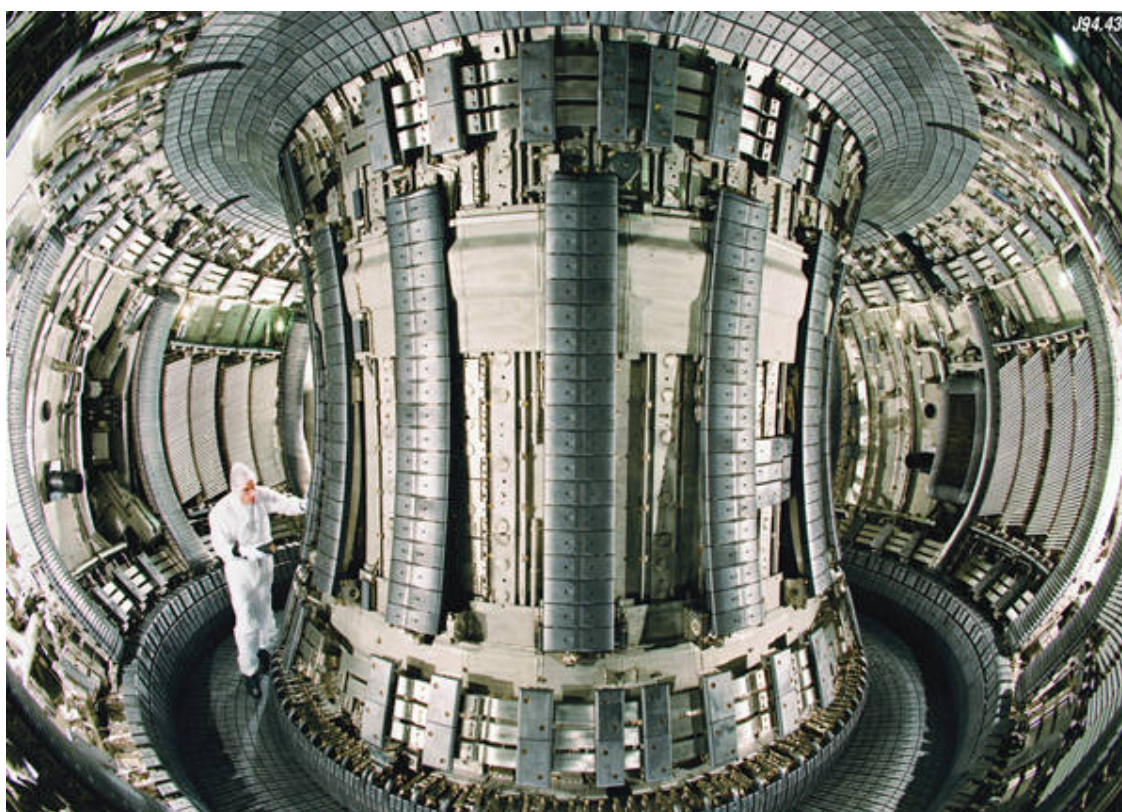
Πυρηνική σύντηξη ονομάζεται η διαδικασία της συνένωσης δύο ελαφρών πυρήνων για το σχηματισμό ενός βαρύτερου πυρήνα. Επειδή η μάζα ηρεμίας του τελικού πυρήνα είναι μικρότερη από το άθροισμα των μαζών των αρχικών πυρήνων υπάρχει μία απώλεια μάζας η οποία συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση της ενέργειας της τελικής κατάστασης. Τρία παραδείγματα σύντηξης είναι τα παρακάτω:



Η αλυσίδα των παραπάνω αντιδράσεων ισοδυναμεί με σύνδεση τεσσάρων πυρήνων υδρογόνου (πρωτονίων) και γένεση ενός πυρήνα

ηλίου με ταυτόχρονη εκπομπή ακτινοβολίας γ και νετρίνων. Σε κάθε μία τέτοια αλυσίδα αντιδράσεων σύντηξης παράγεται ενέργεια ίση με περίπου 25,7MeV. Αυτή η σειρά αντιδράσεων σύντηξης ονομάζεται αλυσίδα πρωτονίου-πρωτονίου και πιστεύεται ότι συμβαίνει στο εσωτερικό του Ήλιου αλλά και άλλων αστέρων.

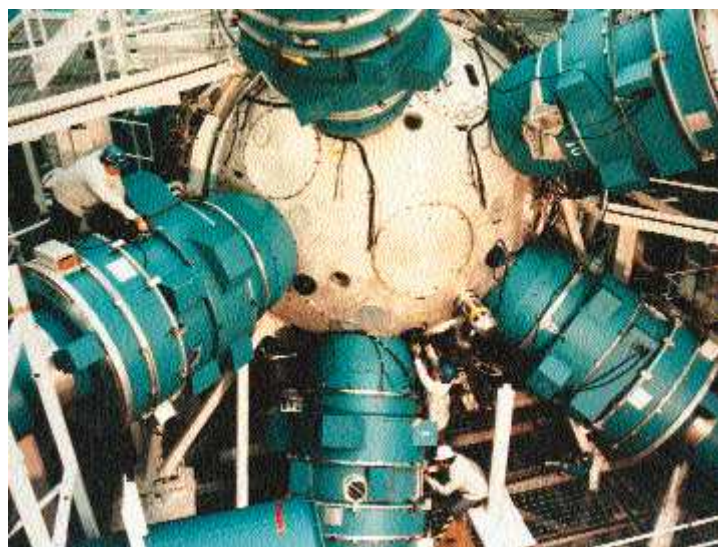
Για να συμβεί σύντηξη μεταξύ δύο πυρήνων, πρέπει αυτοί να πλησιάσουν πάρα πολύ ώστε να βρεθούν εντός της εμβέλειας της πυρηνικής δύναμης. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να έχουν πολύ μεγάλη κινητική ενέργεια, της τάξης των 0,5MeV, για να υπερικήσουν την ηλεκτρική άπωση που οφείλεται στα θετικά τους φορτία. Η ενέργεια αυτή είναι πραγματικά τεράστια για την πολύ μικρή μάζα των πυρήνων αφού οι ταχύτητες που προκύπτουν είναι συγκρίσιμες με την ταχύτητα του φωτός. Για να αποκτήσουν αυτή την τεράστια ενέργεια πρέπει να βρίσκονται σε θερμοκρασία της τάξης των 10^8 K. Για αυτόν το λόγο πολύ συχνά οι αντιδράσεις σύντηξης αναφέρονται και ως θερμοπυρηνικές αντιδράσεις. Στις θερμοκρασίες αυτές, που είναι χαρακτηριστικές του εσωτερικού των αστέρων, τα άτομα είναι πλήρως ιονισμένα και η προκύπτουσα κατάσταση της ύλης ονομάζεται πλάσμα.



Εικόνα 1.1 Διάταξη ΤΟΚΑΜΑΚ για το μαγνητικό περιορισμό του πλάσματος [10].

Για την επίτευξη ελεγχόμενων αντιδράσεων σύντηξης έχουν προταθεί δύο μέθοδοι. Στην πρώτη μέθοδο που ονομάζεται Σύντηξη Μαγνητικού Περιορισμού (Magnetic Confinement Fusion, MCF) το πλάσμα θερμαίνεται σε εξαιρετικά υψηλή θερμοκρασία με ηλεκτρική εκκένωση, ενώ περιορίζεται χωρικά και συγκρατείται με κατάλληλα διαμορφωμένα μαγνητικά πεδία. Από τις διάφορες διατάξεις μαγνητικού περιορισμού του πλάσματος που έχουν κατά καιρούς προταθεί για την υλοποίηση της μεθόδου MCF η πιο αποδοτική και σχετικά απλή σε κατασκευή είναι η τοροειδής διαμόρφωση μαγνητικού πεδίου, γνωστή με την ονομασία TOKAMAK που φαίνεται στην εικόνα 1.1.

Στη δεύτερη μέθοδο που ονομάζεται Σύντηξη Αδρανειακού Περιορισμού (Inertial Confinement Fusion, ICF) η σύντηξη επιτυγχάνεται με την ισχυρή συμπίεση μικρών ποσοτήτων του υλικού. Μείγμα των προς σύντηξη ατόμων προσροφημένο σε μικροσκοπικούς κόκκους ύλης υποχρεώνεται σε τρομακτική συμπίεση μέσω παλμών λέιζερ πολύ μεγάλης έντασης.



Εικόνα 1.2 Το σύστημα αδρανειακού περιορισμού NOVA [11].

Ιδιαίτερα ελκυστική είναι και η ιδέα της λεγόμενης ψυχρής σύντηξης δηλαδή της επίτευξης της πυρηνικής σύντηξης σε θερμοκρασίες σημαντικά χαμηλότερες από τις προαναφερθείσες. Δυστυχώς, το ενδεχόμενο να αποτελέσει αυτή η διεργασία μια αξιόπιστη εναλλακτική πηγή ενέργειας στην πράξη, είναι ακόμη πολύ απομακρυσμένο.

Η χρήση της σύντηξης για την παραγωγή ενέργειας έχει πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την σχάση. Τα σημαντικότερα είναι:

- Τα καύσιμα της σύντηξης είναι διαθέσιμα σε αφθονία παντού στη Γη.
- Είναι πολύ πιο φιλική προς το περιβάλλον.
- Ο κίνδυνος ατυχήματος είναι αμελητέος.
- Έχει μικρότερο κόστος.

Για την ώρα όμως η σχετική τεχνολογία παραμένει σε ερευνητικό στάδιο και έτσι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνική ενέργεια περιορίζεται στην εκμετάλλευση της πυρηνικής σχάσης.

2. ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ

2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

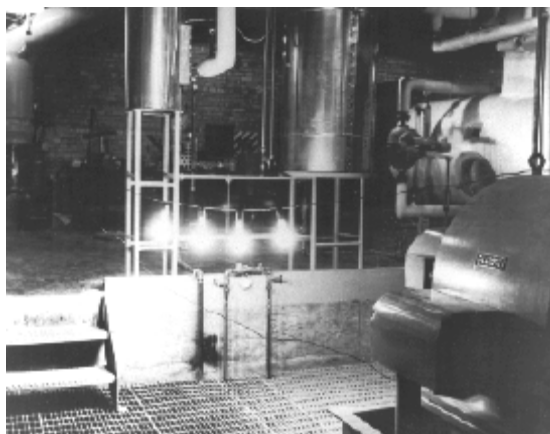
Παρά το γεγονός ότι οι επιστήμονες μόλις τις τελευταίες δεκαετίες κατάφεραν να κατασκευάσουν τεχνητούς πυρηνικούς αντιδραστήρες όπου γίνεται ελεγχόμενη σχάση, εντούτοις φυσικοί πυρηνικοί αντιδραστήρες προϋπήρξαν περίπου ενάμισι δισεκατομμύριο χρόνια πριν. Ανακαλύφθηκαν το 1972 από τον Γάλλο φυσικό Φρανσίς Περέν στα ορυχεία ουρανίου του Όκλο στην Γκαμπόν της Δυτικής Αφρικής. Σε περίπου δεκαπέντε τοποθεσίες, η αναλογία μεταξύ U^{235} και U^{238} , αλλά και άλλων ραδιενεργών ισοτόπων σε σχέση με τις κανονικές τους συγκεντρώσεις στο φλοιό της γης, οδήγησε στο συμπέρασμα ότι κάποτε στα συγκεκριμένα σημεία έλαβαν χώρα πυρηνικές αντιδράσεις σχάσης πολύ παρόμοιες με αυτές που συμβαίνουν στο εσωτερικό ενός σύγχρονου αντιδραστήρα. Οι αντιδραστήρες αυτοί "λειτούργησαν" για περίπου 150 εκατομμύρια χρόνια, "παράγοντας" μέση ισχύ περίπου 100 kW σε αυτό το διάστημα.

Ο πρώτος πυρηνικός αντιδραστήρας κατασκευάστηκε στο πλαίσιο του σχεδίου Μανχάτταν, το 1942, υπό την καθοδήγηση του Ενρίκο Φέρμι στο Πανεπιστήμιο του Σικάγο. Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε ήταν φυσικό ουράνιο, το οποίο περιέχει σε ποσοστό μικρότερο του 1% το ισότοπο του ουρανίου U-235 και κατά 99% αποτελείται από U-238 το οποίο δεν υφίσταται εύκολη σχάση.

Ο Φέρμι είχε παρατηρήσει ότι η σχάση αυξανόταν όταν κάποιο μέσο επιβράδυνε τα νετρόνια και έτσι στον πρώτο πυρηνικό αντιδραστήρα που κατασκεύασε χρησιμοποιήθηκαν επιβραδυντές αποτελούμενοι από γραφίτη. Το ουράνιο που αποτελούσε το καύσιμο λαμβανόταν από οξείδιο του ουρανίου που τοποθετούνταν σε μεγάλες ποσότητες πάνω στους στύλους του γραφίτη. Ρυθμιστικές ράβδοι καδμίου που εισέρχονταν στον αντιδραστήρα χρησίμευαν στο να προλαμβάνεται η αλυσιδωτή αντίδραση όταν αυτή δεν ήταν επιθυμητή. Ο Φέρμι, πριν τη λειτουργία του αντιδραστήρα, έδωσε εντολή να αφαιρεθούν όλες οι ρυθμιστικές ράβδοι εκτός από μία η οποία ήταν ικανή να σταματήσει τη δημιουργία αλυσιδωτής αντίδρασης. Μετά αφαιρέθηκε και αυτή σταδιακά και σε κάθε στάδιο ελεγχόταν ο ρυθμός της σχάσης για να διαπιστωθεί αν ήταν ίδιος με αυτόν που είχε υπολογιστεί θεωρητικά. Όταν αφαιρέθηκε και το τελευταίο τμήμα της ρυθμιστικής ράβδου, η έκλυση της ενέργειας ανοδικά έφτασε σε ένα

σταθερό επίπεδο και αυτό αποτέλεσε τον πρώτο (τεχνητό) έλεγχο πυρηνικής σχάσης.

Στη διάρκεια της δεκαετίας του '40 πολλές χώρες ανέπτυξαν πυρηνικά προγράμματα προσανατολισμένα στην κατασκευή πυρηνικών όπλων. Μόλις το 1951 χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά πυρηνικός αντιδραστήρας για ειρηνικούς σκοπούς και συγκεκριμένα για τη δοκιμαστική παραγωγή μικρής ποσότητας ηλεκτρικού ρεύματος (ΗΠΑ, Αϊντάχο). Στις 27 Ιουνίου 1954 πρώτη φορά πυρηνικός αντιδραστήρας συνδέθηκε με εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (ΕΣΣΔ, Ομπνίσκ) παρέχοντάς του σε μόνιμη βάση ηλεκτρικό ρεύμα.



Εικόνα 2.1 Ο αντιδραστήρας που χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος στις 20 Δεκεμβρίου του 1951 στο Αϊντάχο των Η.Π.Α [7].

Στη διάρκεια της δεκαετίας του '50 ήταν διάχυτη η αισιοδοξία ότι η πυρηνική αποτελούσε τη νέα "μαγική" ενέργεια που θα κάλυπτε τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες με πολύ χαμηλό κόστος. Μάλιστα ο πρόεδρος της Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας των ΗΠΑ Λιούις Στράους έμεινε στην ιστορία για τη λανθασμένη του πρόβλεψη όταν στις 16 Σεπτεμβρίου του 1954 μπροστά σε ακροατήριο επιστημόνων στη Νέα Υόρκη δήλωσε: «στο μέλλον η πυρηνική ενέργεια θα είναι τόσο φθηνή, που δεν θα κάνουμε τον κόπο να την κοστολογούμε». Ο ίδιος άνθρωπος είχε επίσης προβλέψει ότι το 2000 στις ΗΠΑ θα λειτουργούσαν 1000 πυρηνικοί σταθμοί. Έπεσε και σε αυτό έξω (λειτουργούν 103), καθώς από τα μέσα της δεκαετίας του '70 και μετά η κατασκευή νέων πυρηνικών σταθμών ουσιαστικά αναστάλη στις μεγαλύτερες πυρηνικές χώρες ακριβώς λόγω του υψηλού λειτουργικού τους κόστους.

Άλλα ζητήματα που καθιστούν την πυρηνική ενέργεια λιγότερο δημοφιλή από όσο τη φαντάζονταν επιστήμονες και πολιτικοί πενήντα χρόνια πριν, είναι ο διαρκής κίνδυνος σοβαρών ατυχημάτων και το,

ουσιαστικά, άλυτο πρόβλημα της ανάγκης για επ' αόριστο αποθήκευση των πυρηνικών αποβλήτων.

2.2 ΣΥΓΚΡΟΤΗΣΗ ΤΟΥ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ

Σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα ισχύος η ενέργεια που απελευθερώνεται από τη συνεχή διάσπαση των ατόμων ως θερμότητα, χρησιμοποιείται για να παράγει ατμό. Ο ατμός χρησιμοποιείται για να οδηγήσει τους στροβίλους που παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια, όπως στις περισσότερες εγκαταστάσεις ορυκτών καυσίμων, αλλά χωρίς την καύση των ορυκτών καυσίμων και τις επακόλουθες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες διακρίνονται καταρχήν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τους θερμικούς και τους αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων ανάλογα με το αν το μεγαλύτερο ποσοστό των σχάσεων γίνεται με θερμικά ή ταχέα νετρόνια. Οι περισσότεροι από τους αντιδραστήρες που λειτουργούν σήμερα είναι θερμικοί και έτσι η ανάλυση που ακολουθεί αναφέρεται κυρίως στους θερμικούς αντιδραστήρες.

Τα περισσότερα στοιχεία που συνθέτουν έναν αντιδραστήρα είναι κοινά στους διάφορους τύπους αντιδραστήρων. Αυτά τα στοιχεία εξετάζονται στη συνέχεια.

Πυρηνικό καύσιμο ή απλώς καύσιμο (fuel) ονομάζεται το «σχάσιμο» υλικό μαζί με τα αντίστοιχα ισότοπα που το συνοδεύουν και στη χημική μορφή με την οποία τοποθετείται στον αντιδραστήρα. Έτσι στους αντιδραστήρες που χρησιμοποιούν ουράνιο, και που αποτελούν σήμερα τη μεγάλη πλειοψηφία, το καύσιμο είναι UO_2 ή UC . Ένα μικρό ποσοστό του ουρανίου στο UO_2 (αντίστοιχα στο UC) είναι U-235 ενώ το υπόλοιπο είναι U-238 .



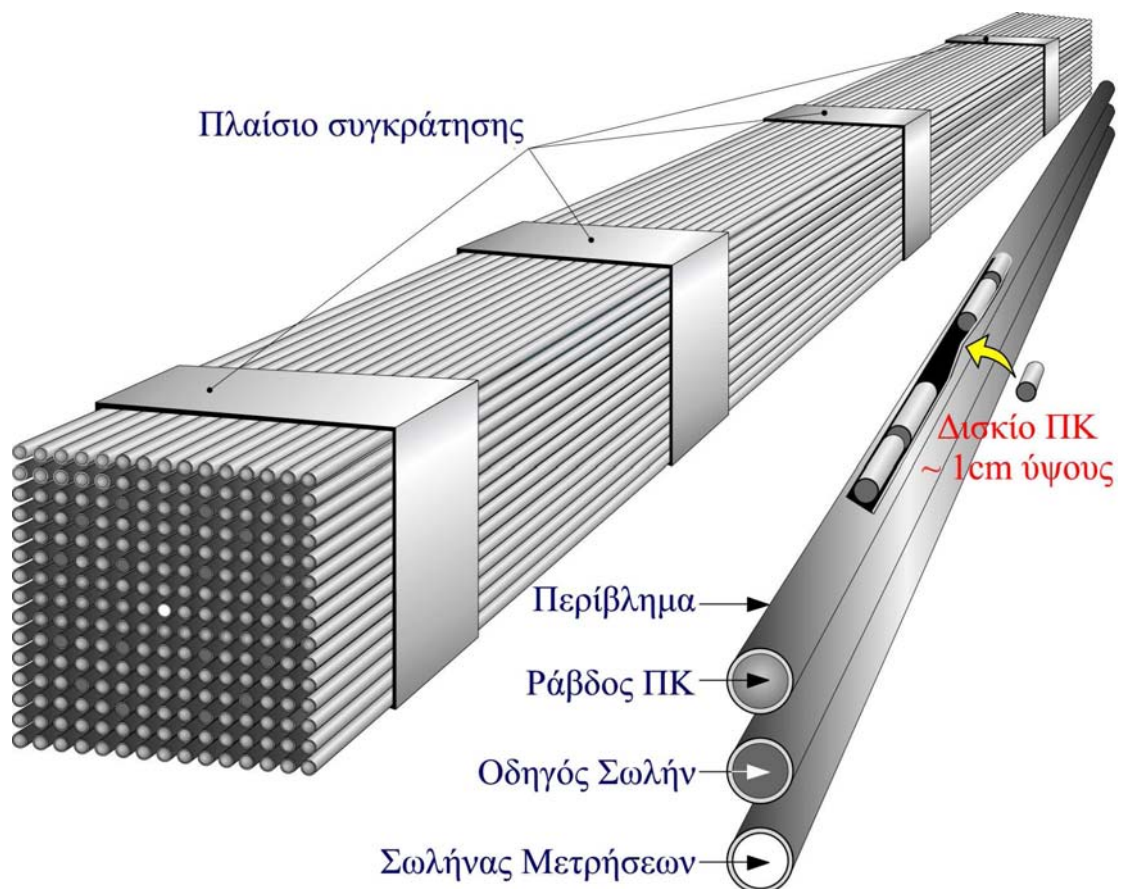
Εικόνα 2.2 Δισκία καυσίμου UO_2 [1].

Στους περισσότερους τύπους αντιδραστήρων το καύσιμο είναι σε δισκία, όπως αυτά της εικόνας 2.2, τα οποία συγκρατούν τα στερεά προϊόντα της σχάσης.

Τα δισκία είναι τοποθετημένο μέσα σε λεπτό, μεταλλικό, κυλινδρικό περίβλημα (fuel can). Σκοπός του περιβλήματος είναι να εγκλωβίσει τα ραδιενεργά προϊόντα της σχάσης, να μην επιτρέψει τη διαρροή τους στο ψυκτικό της καρδιάς του αντιδραστήρα. Το σύνολο του περιβλήματος και του καυσίμου που περιέχεται σε αυτό, ονομάζεται ράβδος καυσίμου (εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3 Τυπική μορφή ράβδων πυρηνικού καυσίμου [1].

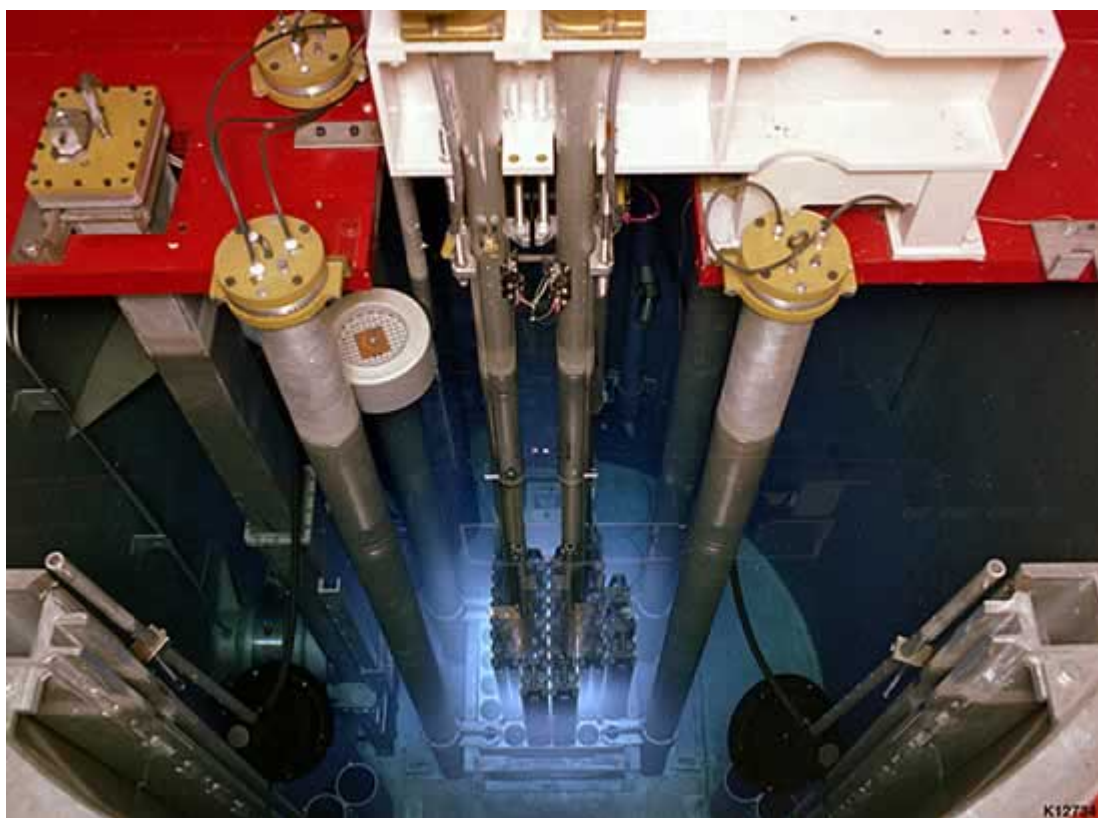


Σχήμα 2.1 Συστάδα πυρηνικού καυσίμου [1].

Συστάδα ή υποσυστάδα καυσίμου (fuel assembly, fuel subassembly) ονομάζεται το σύνολο των ράβδων που έχουν συναρμολογηθεί και στερεωθεί σε ενιαίο συγκρότημα, με κατάλληλη (συνήθως μεταλλική) δομή ώστε να διατηρείται η μεταξύ των ράβδων απόσταση. Περιέχει, συνήθως, μερικές δεκάδες ράβδων καυσίμου. Αποτελεί τη μικρότερη μονάδα τοποθέτησης (ή απομάκρυνσης) καυσίμου στην καρδιά του αντιδραστήρα, η οποία περιέχει μερικές εκατοντάδες συστάδων. Σε ορισμένους τύπους αντιδραστήρων η συστάδα καυσίμου είναι τοποθετημένη μέσα σε μεταλλικό πολυγωνικό σωλήνα, που αποτελεί δομικό στοιχείο της συστάδας και ταυτόχρονα οδηγό του ψυκτικού. Αυτός ο σωλήνας λέγεται περιτύλιγμα (wrapper) ή χιτώνιο της συστάδας. Συνήθως το ύψος των συστάδων πυρηνικού καυσίμου κυμαίνεται μεταξύ των 3 και 4 μέτρων.

Το ψυκτικό ρέει γύρω από τις ράβδους καυσίμου και απάγει τη θερμότητα, που παράγεται μέσα σ' αυτές, από τις σχάσεις. Τα ψυκτικά μέσα που χρησιμοποιούνται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες καθώς και τα συστήματα ψύξης εξετάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Καρδιά ή πυρήνας (core) του αντιδραστήρα ονομάζεται το σύνολο της διάταξης καυσίμου, επιβραδυντή και ράβδων ελέγχου, μέσα στη οποία πραγματοποιούνται οι σχάσεις.



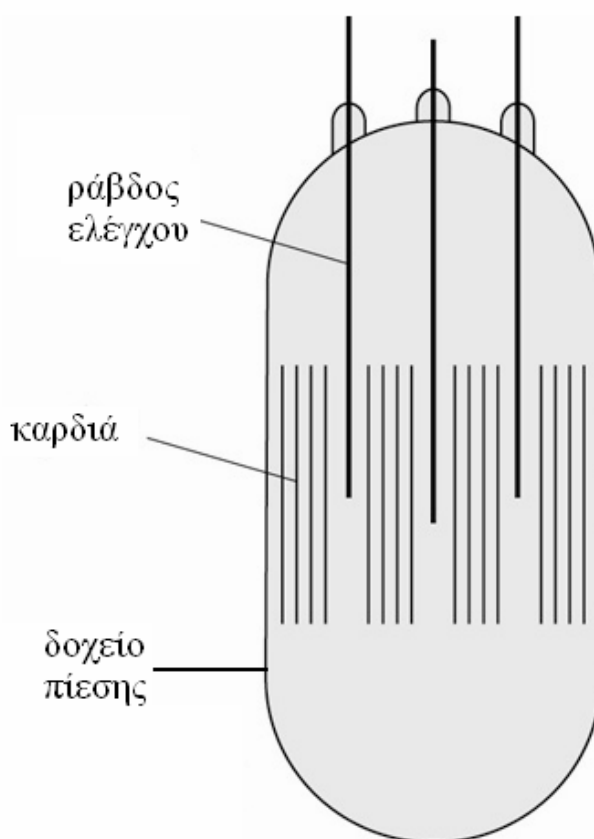
Εικόνα 2.4 Η καρδιά ενός πυρηνικού αντιδραστήρα [7].

Οι ράβδοι ελέγχου είναι ράβδοι από υλικά με μεγάλη διατομή απορρόφησης νετρονίων. Τέτοιες κινητές ράβδοι αποτελούν τον πλέον συνήθη τρόπο ελέγχου του ρυθμού σχάσεων στην καρδιά του αντιδραστήρα (σχήμα 2.2). Η βύθιση στην καρδιά ή η απομάκρυνση από αυτήν των ράβδων ελέγχου, μεταβάλλει τον αριθμό νετρονίων που απορροφούνται, οπότε μεταβάλλει τον αριθμό νετρονίων που είναι διαθέσιμα για την πρόκληση σχάσεων. Μεταβάλλει έτσι τον συντελεστή πολλαπλασιασμού του αντιδραστήρα.

Ο έλεγχος του ρυθμού σχάσεων μπορεί να γίνει και με άλλους τρόπους, όπως π.χ. με τη διάλυση ισχυρών απορροφητών νετρονίων στο ψυκτικό. Τα πλέον συνήθη υλικά των ράβδων ελέγχου, και γενικότερα των στοιχείων ελέγχου (control elements), είναι κράματα ή χημικές ενώσεις βορίου, γαδολινίου και καδμίου.

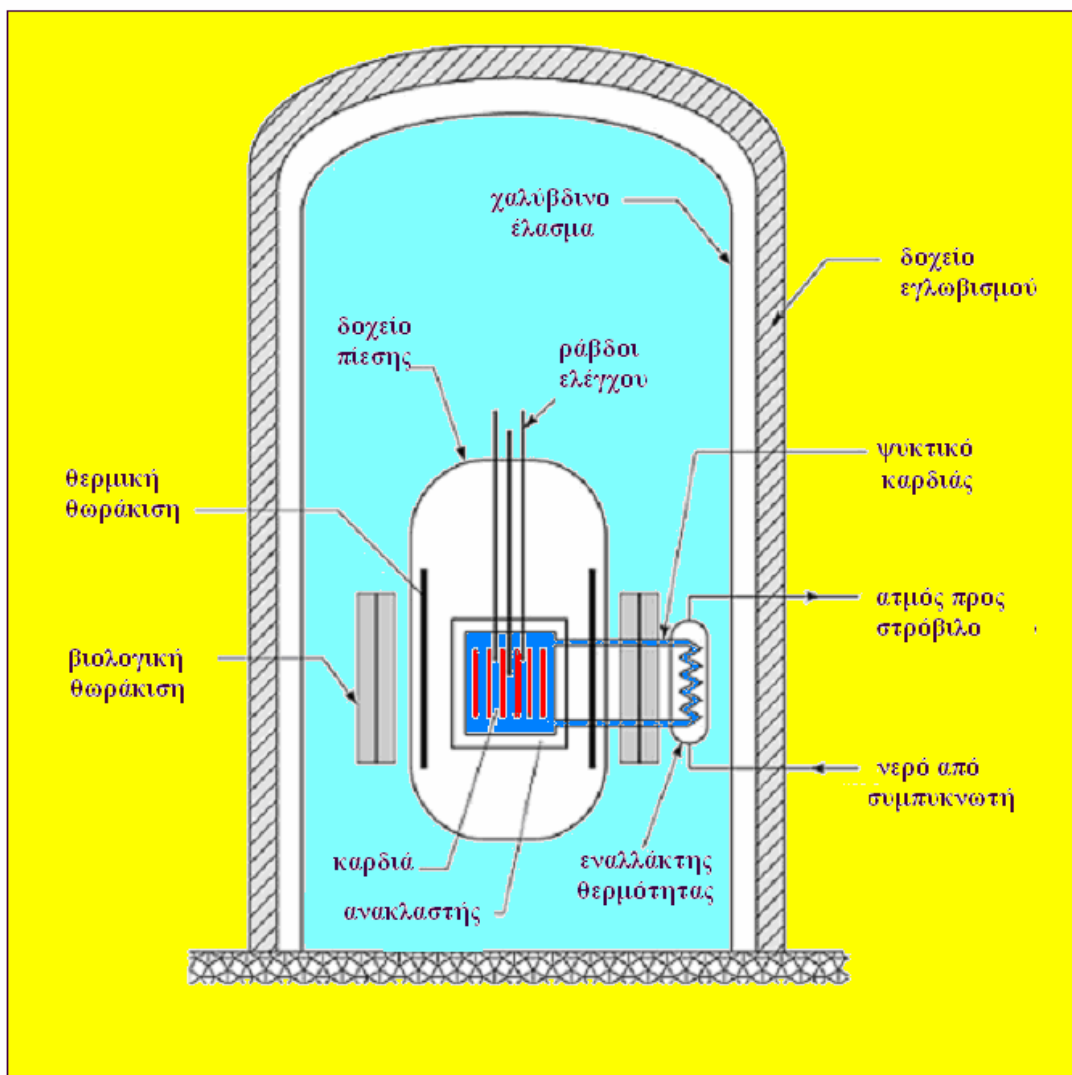
Δοχείο πίεσης είναι το δοχείο μέσα στο οποίο περιέχονται η καρδιά του αντιδραστήρα και ο σχετικός εξοπλισμός του πρωτεύοντος κυκλώματος του ψυκτικού.

Η βιολογική θωράκιση (συνήθως κοινό νερό ή σκυρόδεμα πάχους ολίγων μέτρων) περιβάλλει το δοχείο του αντιδραστήρα, με σκοπό την εξασθένηση των ακτινοβολιών, για την προστασία των εργαζομένων στον αντιδραστήρα.



Σχήμα 2.2 Σχηματικό διάγραμμα των ράβδων ελέγχου [1].

Ο κύριος στόχος των συστημάτων ασφάλειας είναι η εξασφάλιση πολλαπλών διαδοχικών φραγμάτων εγκλωβισμού των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας διαρροής των στο περιβάλλον. Η υλοποίηση της αρχής αυτής είναι διαφορετική στους διαφόρους τύπους αντιδραστήρων, έχει όμως τα παρακάτω κοινά χαρακτηριστικά σε όλους σχεδόν τους αντιδραστήρες.



Σχήμα 2.3 Η δομή ενός πυρηνικού αντιδραστήρα [1].

Το πρώτο φράγμα είναι το ίδιο το καύσιμο. Στους περισσότερους αντιδραστήρες το καύσιμο είναι στερεό, συνήθως κεραμικό UO_2 (σημείο τήξης $2860^{\circ}C$), στη μορφή των μικρών κυλινδρικών δισκίων της εικόνας 2.2. Τα στερεά προϊόντα της σχάσης εγκλωβίζονται μέσα στο ίδιο το δισκίο. Τα αέρια όμως προϊόντα της σχάσης, όπως είναι τα ραδιοϊσότοπα του κρυπτού, του ξένου και του ιωδίου, διαφεύγουν από τα δισκία με αργό ρυθμό.

Το δεύτερο φράγμα είναι το ερμητικά κλεισμένο περίβλημα της ράβδου καυσίμου, το οποίο εγκλωβίζει τα αέρια προϊόντα της σχάσης. Το δακτυλιοειδές κενό μεταξύ των δισκίων και του περιβλήματος, καθώς επίσης και ο χώρος πάνω από τα δισκία, περιέχουν αδρανές αέριο ήλιο. Στην αρχή της παραμονής της ράβδου καυσίμου στην καρδιά του αντιδραστήρα η πιθανότητα διαρροής αερίων από το περίβλημα είναι ασήμαντη. Καθώς όμως η ράβδος παραμένει 3 ή 4 έτη στην καρδιά, δηλαδή σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας και έντονου βομβαρδισμού με νετρόνια, το υλικό του περιβλήματος καταπονείται, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μικρών ρωγμών και οπών από τις οποίες διαφεύγουν ραδιενεργά αέρια στο ψυκτικό. Το ποσοστό των ράβδων από τις οποίες διαφεύγουν αέρια είναι της τάξης του 0,2%, κοντά στο τέλος της παραμονής των στην καρδιά του αντιδραστήρα.

Το τρίτο φράγμα εγκλωβισμού των προϊόντων της σχάσης είναι το δοχείο πίεσης και το κύκλωμα του ψυκτικού (σχήμα 2.3). Ενδέχεται όμως να μην παραμείνει το κύκλωμα του ψυκτικού (σωληνώσεις κ.τ.λ.) 100% στεγανό, χωρίς την παραμικρή διαρροή, σε όλη τη διάρκεια ζωής του αντιδραστήρα και να υπάρξουν μικρές διαρροές ραδιενεργών προϊόντων από το πρωτεύον κύκλωμα του ψυκτικού, ακόμα και κατά τη διάρκεια της ομαλής λειτουργίας του αντιδραστήρα. Ως εκ τούτου, εγκαθίσταται, στο εξωτερικό όλης της έκτασης του πρωτεύοντος κυκλώματος, σύστημα ανιχνευτών ραδιενέργειας για την έγκαιρη διάγνωση διαρροών ραδιενεργών προϊόντων ακόμα και σε χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας. Εγκαθίστανται επίσης αισθητήρες διαρροής ψυκτικού για τη έγκαιρη διάγνωση μικρών διαρροών, ώστε να διορθωθούν εγκαίρως.

Ο σχεδιασμός, η κατασκευή και οι διαδικασίες λειτουργίας των πυρηνικών αντιδραστήρων διέπονται από την ονομαζόμενη, στην τεχνική γλώσσα, άμυνα σε βάθος. Σύμφωνα με αυτήν:

- πρέπει να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα να εκκινήσει οποιοδήποτε πιθανό ατύχημα. Επιβάλλεται η πιθανότητα αυτή να είναι μικρότερη από προδιαγεγραμμένη τιμή.
- επιπλέον αυτού, επιβάλλεται το σύστημα να έχει σχεδιαστεί και να λειτουργεί έτσι, ώστε αν το ατύχημα εκκινήσει, να αποτρέψει την ανάπτυξη του ατύχηματος και να επαναφέρει τον αντιδραστήρα σε ασφαλή κατάσταση. Η πιθανότητα να συμβεί μεγάλο ατύχημα πρέπει να είναι μικρότερη από τιμή προδιαγεγραμμένη από τους κανονισμούς της χώρας στην οποία εγκαθίσταται ο αντιδραστήρας
- επιπλέον της ελαχιστοποίησης της πιθανότητας να συμβεί μεγάλο ατύχημα, αν παρόλα αυτά το ατύχημα συμβεί, επιβάλλεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή να είναι τέτοιες, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι συνέπειες στο περιβάλλον και την υγεία του πληθυσμού.

Από την τρίτη απαίτηση προκύπτει η ανάγκη του τελευταίου φράγματος, του δοχείου εγκλωβισμού (containment vessel, σχήμα 2.3). Αυτό είναι κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους τουλάχιστον ενός μέτρου και επενδυμένο εσωτερικά με στεγανό χαλύβδινο έλασμα. Το δοχείο εγκλωβισμού σχεδιάζεται και κατασκευάζεται έτσι, ώστε να αντέχει τις αναμενόμενες μεγάλες πιέσεις και να εγκλωβίσει εντός αυτού τα ραδιενεργά προϊόντα, να μην επιτρέψει τη διαρροή τους στο περιβάλλον, στην περίπτωση μεγάλου ατυχήματος κατά το οποίο θα έχουν διαρρεύσει μέσα στο δοχείο εγκλωβισμού μεγάλες ποσότητες ραδιενεργών υλικών, ατμών και αερίων.

Η πίεση μέσα στο δοχείο εγκλωβισμού διατηρείται, υπό συνθήκες συνθήκες ομαλής λειτουργίας, ελαφρά χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική ώστε να μην υπάρχουν διαρροές αέρα από το δοχείο προς το περιβάλλον. Δεδομένου ότι το εσωτερικό του δοχείου είναι χώρος εργασίας προσωπικού, η ατμόσφαιρα του δοχείου καθαρίζεται συνεχώς με κατάλληλα φίλτρα που συγκρατούν αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία ενδέχεται να είναι ραδιενεργά, να έχουν προκύψει από μικρές διαρροές από το πρωτεύον κύκλωμα. Στο εσωτερικό του δοχείου υπάρχουν κατάλληλα συστήματα ανιχνευτών και έγκαιρης προειδοποίησης, για τυχόν σημαντική αύξηση της ραδιενέργειας. Το δοχείο είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε σε κάθε περίπτωση, ακόμα και σε συνθήκες ατυχήματος, να μην επιτρέψει τη διαρροή ραδιενεργών υλικών προς το περιβάλλον.

Με τη λειτουργία του αντιδραστήρα μειώνεται, λόγω των σχάσεων, η ποσότητα του σχάσιμου υλικού, μειώνεται ο εμπλουτισμός του καυσίμου και αυξάνεται η ποσότητα των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης στις ράβδους καυσίμου. Εξάντληση καυσίμου (fuel burnup) ονομάζεται η μείωση του εμπλουτισμού του καυσίμου, λόγω των σχάσεων, στις ράβδους καυσίμου. Όταν η εξάντληση συστάδων καυσίμου υπερβεί δεδομένη τιμή, όταν δηλαδή ο εμπλουτισμός των γίνει μικρότερος από δεδομένη τιμή, οι συστάδες αυτές είναι ακατάλληλες για τη διατήρηση της κρισιμότητας του αντιδραστήρα. Πραγματοποιείται λοιπόν περιοδική αντικατάσταση εξαντλημένου καυσίμου με φρέσκο. Οι συστάδες που περιέχουν εξαντλημένο καύσιμο απομακρύνονται από την καρδιά και αποθηκεύονται σε δεξαμενή νερού (δεξαμενή εξαντλημένου καυσίμου, spent fuel pond), όπου και παραμένουν μερικούς μήνες μέχρις ότου η ραδιενέργεια που εκπέμπουν πέσει σε ανεκτά επίπεδα.

Μετά από αυτό, απομακρύνονται από τον αντιδραστήρα και μεταφέρονται σε εργοστάσιο ανακύκλωσης καυσίμου και επεξεργασίας ραδιενεργών καταλοίπων ή, σε περίπτωση που πολιτική είναι η αντιμετώπιση του καμένου καυσίμου ως κατάλοιπου, αυτό μεταφέρεται σε εγκατάσταση διαχείρισης καταλοίπων. Το νερό της δεξαμενής εξαντλημένου καυσίμου έχει διπλό ρόλο: τη βιολογική θωράκιση των εργαζομένων και την ψύξη των ράβδων του καυσίμου.

Η εξάντληση καυσίμου είναι αύξουσα συνάρτηση του λόγου της συνολικής θερμικής ενέργειας που παρήγαγε μία ποσότητα καυσίμου, σε όλη τη διάρκεια παραμονής της ποσότητας αυτής στην καρδιά, δια της μάζας αυτής. Ως εκ τούτου, ο λόγος αυτός χρησιμοποιείται, στην πράξη, ως μέτρο της εξάντλησης καυσίμου, με μονάδα 1MW επί 1 ημέρα ανά τόνο ουρανίου και συμβολίζεται MWD/TU (MWatt Days / Tone of Uranium).

Νετρονική ακτινοβόληση (neutron fluence) ή απλώς ακτινοβόληση ενός υλικού ονομάζεται ο συνολικός αριθμός νετρονίων που έχει διέλθει ανά μονάδα επιφάνειας του υλικού. Είναι δηλαδή η ακτινοβόληση, σε κάποιο σημείο του υλικού, το ολοκλήρωμα της ροής νετρονίων στο χρόνο, στο σημείο αυτό του υλικού. Αν π.χ. κάποιο σημείο του υλικού δεχθεί σταθερή ροή Φ επί χρόνο t , τότε η ακτινοβόληση στο σημείο αυτό είναι Φt . Η φυσική μονάδα της ακτινοβόλησης είναι νετρόνια/cm². Η καταπόνηση των υλικών είναι αύξουσα συνάρτηση της νετρονικής ακτινοβόλησης που έχουν δεχθεί. Η δε ακτινοβόληση είναι, και αυτή, αύξουσα συνάρτηση του λόγου της συνολικής θερμικής ενέργειας που παρήγαγε μία ποσότητα καυσίμου, σε όλη τη διάρκεια παραμονής της ποσότητας αυτής στην καρδιά, δια της μάζας αυτής. Ως εκ τούτου, ο λόγος αυτός χρησιμοποιείται στην πράξη και ως μέτρο της ακτινοβόλησης, με μονάδα και πάλι MWD/TU.

Ο επιβραδυντής χρησιμοποιείται στους θερμικούς αντιδραστήρες για την επιβράδυνση των ταχέων νετρονίων της σχάσης. Τυπικά υλικά επιβραδυντών είναι το ελαφρύ νερό, το βαρύ νερό και ο γραφίτης (C).

Ο ανακλαστής είναι υλικό που περιβάλλει την καρδιά του αντιδραστήρα, με σκοπό την ανάκλαση πίσω σ' αυτήν νετρονίων που διαφεύγουν από την καρδιά. Πραγματοποιείται έτσι οικονομία νετρονίων. Το υλικό του ανακλαστή πρέπει να έχει μικρή διατομή απορρόφησης και μεγάλη διατομή σκέδασης νετρονίων, ιδιότητες δηλαδή ίδιες με αυτές του επιβραδυντή. Γι' αυτό τα υλικά επιβραδυντή και ανακλαστή είναι, σχεδόν πάντα τα ίδια.

Η καρδιά περιέχει τα προϊόντα της σχάσης και αποτελεί ισχυρή πηγή ραδιενέργειας. Διαφεύγουν από αυτήν νετρόνια και άλλες ακτινοβολίες όπως β και γ , με αποτέλεσμα την καταπόνηση των υλικών των εξαρτημάτων που βρίσκονται γύρω της. Η σύγκρουση των νετρονίων με τους πυρήνες των υλικών προκαλεί αλλοιώσεις της δομής, και κατά συνέπεια αλλοιώσεις των ιδιοτήτων, των υλικών. Τόσο τα νετρόνια όσο και τα άλλα σωματίδια που διαφεύγουν από την καρδιά εναποθέτουν ενέργεια στα υλικά καθώς συγκρούονται με, ή απορροφούνται από, τους πυρήνες τους. Δημιουργούνται έτσι διάσπαρτες πηγές θερμότητας στα υλικά γύρω από την καρδιά, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη διαφορικών θερμικών τάσεων και την καταπόνηση των υλικών. Παρεμβάλλεται λοιπόν μεταξύ καρδιάς και των εξαρτημάτων του αντιδραστήρα

σιδερένιο ή χαλύβδινο έλασμα, πάχους μερικών εκατοστών, με σκοπό την απορρόφηση ακτινοβολιών και τη μείωση της έντασής τους σε επίπεδα ανεκτά, όσον αφορά στην προστασία των εξαρτημάτων. Το έλασμα αυτό ονομάζεται θερμική θωράκιση (thermal shielding, σχήμα 2.3).

Σε όλους τους εν λειτουργία αντιδραστήρες ισχύος παράγεται, άμεσα ή έμμεσα, ατμός. Το πυρηνικό σύστημα παραγωγής ατμού (nuclear steam supply system, NSSS) αποτελείται από την καρδιά, το κύκλωμα του ψυκτικού (αντλίες, σωληνώσεις κ.τ.λ.), τους ατμοπαραγωγούς και από εναλλάκτες θερμότητας, που υπερθερμαίνουν τον ατμό πριν αυτός οδηγηθεί στον ατμοστρόβιλο.

Τέλος, οι τυπικές παράμετροι σχεδιασμού των πυρηνικών αντιδραστήρων είναι:

- Απόδοση της πυρηνικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής είναι το πηλίκο της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς τη θερμική ισχύ του αντιδραστήρα.
- Πυκνότητα ισχύος (power density) ονομάζεται η παραγόμενη θερμική ισχύς ανά μονάδα όγκου της καρδιάς. Μετριέται σε KW/lt
- Γραμμική πυκνότητα ισχύος (linear power density) ονομάζεται η παραγόμενη θερμική ισχύς ανά μονάδα μήκους του ψυκτικού καναλιού στην καρδιά. Μετριέται σε KW/m
- Ειδική ισχύς (specific power) ονομάζεται η παραγόμενη θερμική ισχύς ανά μονάδα μάζας καυσίμου. Μετριέται σε KW/Kg

2.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ

Με τον όρο Θεωρία Αντιδραστήρων αναφερόμαστε στη θεωρία που έχει σαν στόχο τη μελέτη της φυσικής των νετρονικών πληθυσμών και οδηγεί σε γνώση σχετικά την εξασφάλιση του σταθερού ρυθμού των σχάσεων και συνακόλουθα στην επιθυμητή σταθερή παραγωγή ισχύος.

Ο συντελεστής πολλαπλασιασμού k ενός αντιδραστήρα αναφέρεται στο συνολικό ισοζύγιο παραγωγής-καταστροφής νετρονίων και ορίζεται ως εξής:

$$k = \frac{\text{ρυθμός παραγωγής νετρονίων}}{\text{ρυθμός απωλειών νετρονίων}}$$

Με τον όρο απώλεια νετρονίων εννοούμε τα νετρόνια που απορροφούνται από σχάσιμα ή μη σχάσιμα υλικά καθώς και τα νετρόνια που διαφεύγουν έξω από την καρδιά του αντιδραστήρα.

Αν $k=1$ ο ρυθμός των σχάσεων είναι σταθερός, ανεξάρτητος του χρόνου, άρα σταθερή είναι και η ισχύς του αντιδραστήρα. Στην περίπτωση αυτή ο αντιδραστήρας ονομάζεται κρίσιμος. Αν $k>1$ ο ρυθμός

παραγωγής νετρονίων είναι μεγαλύτερος του ρυθμού απωλειών νετρονίων, οπότε ο αριθμός των νετρονίων αυξάνεται με το χρόνο. Κατά συνέπεια ο ρυθμός των σχάσεων (άρα και η ισχύς του αντιδραστήρα) είναι αύξουσα συνάρτηση του χρόνου. Στην περίπτωση αυτή ο αντιδραστήρας ονομάζεται υπερκρίσιμος. Τέλος, αν $k < 1$ ο αριθμός νετρονίων, ο ρυθμός σχάσεων και η ισχύς είναι φθίνουσες συναρτήσεις του χρόνου, οπότε ο αντιδραστήρας ονομάζεται υποκρίσιμος.

Ο συντελεστής k αναφέρεται στον πολλαπλασιασμό του συνολικού αριθμού νετρονίων σε ολόκληρο τον όγκο της καρδιάς. Σχετίζεται λοιπόν με τον συνολικό ρυθμό σχάσεων και τη συνολική ισχύ του αντιδραστήρα. Ο ρυθμός όμως των σχάσεων και η πυκνότητα ισχύος (ισχύς ανά μονάδα όγκου) διαφέρει από θέση σε θέση της καρδιάς. Η τοπική τιμή των μεγεθών αυτών είναι το ίδιο σημαντική με τη συνολική.

Θεωρούμε υποθετική διάταξη απείρων διαστάσεων. Σε τέτοια διάταξη είναι φανερό ότι οι διαφυγές νετρονίων είναι μηδέν. Ο k ονομάζεται τότε συντελεστής πολλαπλασιασμού απείρου συστήματος, συμβολίζεται με k_{∞} και ορίζεται ως εξής:

$$k_{\infty} = \frac{\text{ρυθμός παραγωγής νετρονίων από όλες τις σχάσεις}}{\text{ρυθμός απορρόφησης νετρονίων}}$$

Στη συνέχεια ορίζουμε τέσσερις, πολύ σημαντικούς για τη λειτουργία του αντιδραστήρα, συντελεστές.

1. Συντελεστής σχάσεων με ταχεία νετρόνια (συντελεστής ϵ)

$$\epsilon = \frac{\text{ρυθμός παραγωγής νετρονίων από όλες τις σχάσεις}}{\text{ρυθμός παραγωγής νετρονίων από σχάσεις με θερμικά νετρόνια}}$$

Τυπικές τιμές του ϵ είναι μεταξύ $\epsilon = 1,03$ και $\epsilon = 1,15$.

2. Συντελεστής η του πυρηνικού καυσίμου

$$\eta = \frac{\text{ρυθμός παραγωγής νετρονίων από σχάσεις με θερμικά νετρόνια}}{\text{ρυθμός απορρόφησης θερμικών νετρονίων στο καύσιμο}}$$

Πίνακας 2.1 Τιμές του συντελεστή η για διάφορα πυρηνικά καύσιμα

Καύσιμο	U-233	U-235	Φυσικό ουράνιο (0,7% U-235)	Εμπλουτισμένο ουράνιο (5% U-235)	Pu-239
η	2,29	2,08	1,33	1,90	1,90

Να σημειωθεί ότι πάντα ισχύει $\eta < \nu$ όπου ν είναι ο αριθμός των νετρονίων που παράγονται κατά τη σχάση και οι τιμές του φαίνονται στον πίνακα 1.1.

3. Συντελεστής χρησιμοποίησης θερμικών νετρονίων (συντελεστής f)

$$f = \frac{\text{ρυθμός απορρόφησης θερμικών νετρονίων στο καύσιμο}}{\text{ρυθμός απορρόφησης θερμικών νετρονίων στην καρδιά}}$$

4. Πιθανότητα διαφυγής της εκλεκτικής απορρόφησης (συντελεστής p)

$$p = \frac{\text{ρυθμός απορρόφησης θερμικών νετρονίων στην καρδιά}}{\text{ρυθμός απορρόφησης νετρονίων όλων των ενεργειών στην καρδιά}}$$

Με βάση τους παραπάνω ορισμούς είναι δυνατό να αποδείξουμε το λεγόμενο τύπο των τεσσάρων συντελεστών:

$$k_{\infty} = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f$$

Είναι αδύνατον να κατασκευαστεί κρίσιμος ομογενής αντιδραστήρας με φυσικό ουράνιο, ακόμα και αν οι διαστάσεις του είναι άπειρες. Σε καρδιά πεπερασμένων διαστάσεων ο συντελεστής πολλαπλασιασμού θα είναι ακόμα μικρότερος, λόγω των διαφυγών νετρονίων έξω από την καρδιά. Σε πεπερασμένο αντιδραστήρα πρέπει να συμπεριληφθεί και η πιθανότητα διαφυγής νετρονίων από τον αντιδραστήρα. Τα νετρόνια κατατάσσονται σε δύο ομάδες, θερμικά και ταχεία, και ορίζονται δύο πιθανότητες:

P_{FNL} = πιθανότητα να μη διαφύγει από την καρδιά ταχύ νετρόνιο

P_{TNL} = πιθανότητα να μη διαφύγει από την καρδιά θερμικό νετρόνιο

Ο ισοδύναμος συντελεστής πολλαπλασιασμού ή απλά ο συντελεστής πολλαπλασιασμού k_e συστήματος πεπερασμένων διαστάσεων δίνεται από τη λεγόμενη σχέση των έξι συντελεστών:

$$k_e = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f \cdot P_{FNL} \cdot P_{TNL}$$

και έχουμε:

- Αν $k_e=1$: κρίσιμος αντιδραστήρας
- Αν $k_e>1$: υπερκρίσιμος αντιδραστήρας
- Αν $k_e<1$: υποκρίσιμος αντιδραστήρας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο αντιδραστήρας πρέπει να εργάζεται σε κρίσιμες συνθήκες γιατί τότε η αλυσιδωτή αντίδραση της σχάσης είναι πλήρως ελεγχόμενη. Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός των σχάσεων και ο ρυθμός των παραγόμενων νετρονίων είναι σταθεροί και άρα και ο ρυθμός παραγωγής ενέργειας είναι επίσης σταθερός. Οι τύποι των τεσσάρων και των έξι συντελεστών, για τον συντελεστή k , αφορούν στους θερμικούς αντιδραστήρες φυσικού ή εμπλουτισμένου ουρανίου.

2.4 ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Οι μόνοι πυρήνες που μπορούν να δώσουν αυτοσυντήρητη αλυσιδωτή αντίδραση είναι οι σχάσιμοι πυρήνες: U-233, U-235, Pu-239, Pu-241. Από αυτούς μόνο το U-235 βρίσκεται στη φύση σε αξιόλογες ποσότητες ως συστατικό του φυσικού ουρανίου σε ποσοστό 0,7% κατά

βάρος. Το φυσικό ουράνιο αποτελείται κατά κύριο λόγο από U-238 (σε ποσοστό πάνω από 99%).

Το ουράνιο είναι ένα ελαφρώς ραδιενεργό μέταλλο που εμφανίζεται σε όλη τη Γη. Είναι περίπου 500 φορές αφθονότερο από το χρυσό και περίπου τόσο κοινό όσο ο κασσίτερος. Είναι παρόν στους περισσότερους βράχους και χώματα καθώς επίσης και σε πολλούς ποταμούς και στο θαλασσινό νερό. Το μεγαλύτερο μέρος της ραδιενέργειας που συνδέεται με το ουράνιο στη φύση οφείλεται στην πραγματικότητα σε άλλα μεταλλεύματα που προέρχονται απ' αυτό μέσω των ραδιενεργών διαδικασιών αποσύνθεσης, και που αφήνονται πίσω κατά τη μεταλλεία και την άλεση.

Υπάρχουν διάφορες περιοχές σε όλο τον κόσμο όπου η συγκέντρωση του ουρανίου στο έδαφος είναι αρκετά υψηλή με αποτέλεσμα η εξαγωγή του για τη χρήση ως πυρηνικό καύσιμο να είναι οικονομικά εφικτή. Σήμερα μεταλλεία ουρανίου υπάρχουν μόνο σε 9 χώρες. Οι δύο μεγαλύτεροι παραγωγοί του ουρανίου είναι Καναδάς και Αυστραλία που μαζί καλύπτουν πάνω από το 50% της παγκόσμιας παραγωγής και ακολουθεί το Καζακστάν. Από κάθε τόνο ορυκτού παράγονται από 1 έως 10Kg ουρανίου ενώ η συνολική παγκόσμια παραγωγή ουρανίου ανέρχεται σε 35000 τόνους ετησίως.

Στην Ελλάδα έχουν εντοπιστεί σημαντικά κοιτάσματα ουρανίου στην Μακεδονία, κυρίως στους νόμους Δράμας και Σερρών. Τα βεβαιωμένα αποθέματα είναι 1525 τόνοι αλλά σύμφωνα με το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) είναι πολύ πιθανό να φτάνουν τους 10000 τόνους. Σύμφωνα με μελέτη του ΙΓΜΕ, που παρουσιάστηκε στο πλαίσιο του 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, το υπέδαφος της Ελλάδας και οι υποθαλάσσιες περιοχές του Αιγαίου διαθέτουν μεγάλα αποθέματα ουρανίου, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν από την Ελλάδα, σε κάποια ενδεχόμενη παγκόσμια ενεργειακή κρίση.

Επιπλέον, στα δικά μας κοιτάσματα υπάρχει και θόριο, το στοιχείο που χρησιμοποιούν ως καύσιμο πυρηνικοί αντιδραστήρες νέας τεχνολογίας. Το ΙΓΜΕ έχει πραγματοποιήσει και οικονομοτεχνικές μελέτες, από τις οποίες διαπιστώθηκε ότι σε αρκετές περιπτώσεις είναι οικονομικά πρόσφορη η εκμετάλλευση των κοιτασμάτων.

Σύμφωνα με το ΙΓΜΕ, τα βεβαιωμένα κοιτάσματα ουρανίου στη Βόρεια Ελλάδα επαρκούν για 20ετή αυτόνομη λειτουργία πυρηνικού αντιδραστήρα με δυνατότητα παραγωγής 1.000 MW ημερησίως. Το μεγαλύτερο και καλύτερα μελετημένο κοιτάσμα είναι αυτό στο Παρανέστι της Δράμας. Εκεί, στην περιοχή Αρχοντοβούνι, το ΙΓΜΕ λειτούργησε με επιτυχία στα μέσα της δεκαετίας του '80 πιλοτικό εργοστάσιο παραγωγής κίτρινου συμπυκνώματος ουρανίου.



Εικόνα 2.5 Κίτρινο συμπύκνωμα ουρανίου [1].

Το κίτρινο συμπύκνωμα ουρανίου, είναι προϊόν του εμπλουτισμού του μεταλλεύματος. Προφανώς μετά συνέβη το ατύχημα στο Τσέρνομπιλ και το φιλόδοξο πρόγραμμα σταμάτησε. Επρόκειτο για εμπλουτισμό του μεταλλεύματος κι όχι για ισοτοπικό εμπλουτισμό, ο οποίος δεν ήταν δυνατόν να γίνει στην Ελλάδα.



Εικόνα 2.6 Το μεταλλείο ουρανίου Ranger στην Αυστραλία [7].

Εμπλουτισμένο ονομάζεται το ουράνιο με περιεκτικότητα σε U-235 μεγαλύτερη από το 0,7% του φυσικού ουρανίου. Οι περισσότεροι αντιδραστήρες χρησιμοποιούν τα καύσιμα που εμπλουτίζονται με το ισότοπο U-235. Το στερεό οξείδιο του ουρανίου από το ορυχείο μετατρέπεται στο αέριο UF_6 το οποίο εμπλουτίζεται έπειτα στο ισότοπο

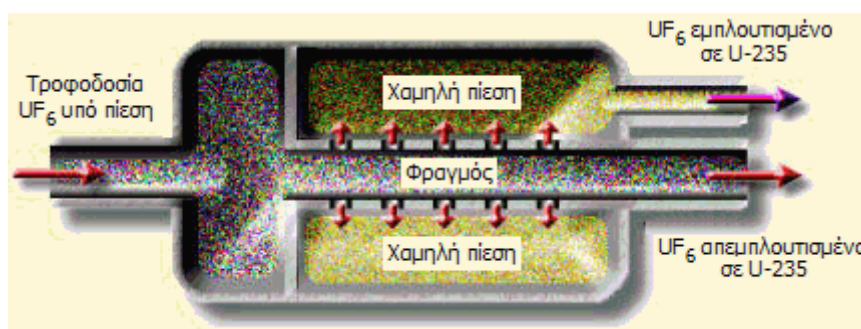
U-235 με μια από τις δύο φυσικές μεθόδους εμπλουτισμού: η φυγοκέντριση αερίου και η αέρια διάχυση. Για τις τεχνικές αυτές απαιτείται η παρασκευή μιας πτητικής ένωσης του ουρανίου και η μόνη πτητική ένωση του ουρανίου, που παραμένει στην αέρια φάση σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και μπορεί να παρασκευασθεί εύκολα σε βιομηχανική κλίμακα, είναι το εξαφθοριούχο ουράνιο (UF_6).

Εμπλουτισμός (enrichment) του καυσίμου ονομάζεται ο λόγος:

$$e = \frac{N_5}{N_5 + N_8}$$

όπου N_5 και N_8 είναι η συγκέντρωση των ατόμων (άτομα/ cm^3) U-235 και U-238 αντίστοιχα. Ο εμπλουτισμός του ουρανίου στους σύγχρονους θερμικούς αντιδραστήρες φτάνει περίπου μέχρι 3%.

Ο εμπλουτισμός με αέρια διάχυση (gaseous diffusion) εκμεταλλεύεται τις διαφορετικές ταχύτητες στις οποίες τα U-235 και U-238 περνούν μέσω μιας μεμβράνης. Η αέρια διάχυση βασίζεται στο γεγονός ότι σε ένα κλειστό δοχείο όλα τα μόρια του μίγματος $^{238}\text{UF}_6$ και $^{235}\text{UF}_6$ έχουν την ίδια ενέργεια και επομένως κατά μέσον όρο τα μόρια $^{235}\text{UF}_6$ κινούνται κατά τι ταχύτερα από τα μόρια $^{238}\text{UF}_6$. Συνεπώς τα μόρια $^{235}\text{UF}_6$ προσκρούουν στα τοιχώματα του δοχείου λίγο πιο συχνά απ' όση τα μόρια $^{238}\text{UF}_6$. Εάν μέρος των τοιχωμάτων διαθέτει μικρές οπές μεγέθους αρκετού για να διέλθουν τα μόρια του αερίου UF_6 (π.χ. ένα πορώδες διάφραγμα), τότε μεγαλύτερο ποσοστό μορίων $^{235}\text{UF}_6$ θα διέλθει από τις οπές αυτές παρά από τα μόρια $^{238}\text{UF}_6$. Επομένως, το εξερχόμενο UF_6 είναι λίγο πλουσιότερο σε $^{235}\text{UF}_6$, ενώ το UF_6 που παραμένει στο εσωτερικό του δοχείου είναι λίγο φτωχότερο $^{235}\text{UF}_6$. Μετά από 1000 στάδια επαναλαμβανόμενης διάχυσης η περιεκτικότητα του UF_6 σε $^{235}\text{UF}_6$ από 0,7% φθάνει στο 3 έως 4%.

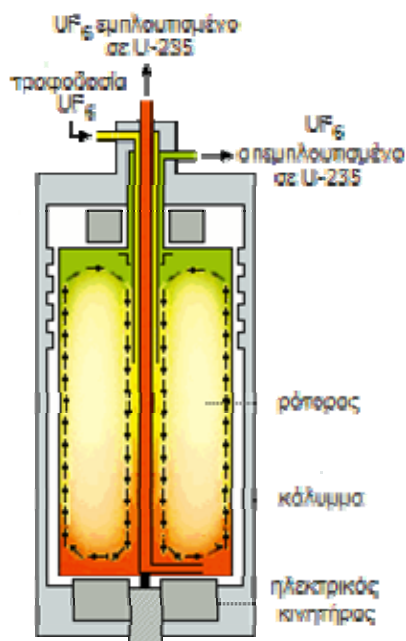


Σχήμα 2.4 Αρχή λειτουργίας του εμπλουτισμού του ουρανίου με την τεχνική της αέριας διάχυσης [1].

Ο εμπλουτισμός με φυγοκέντριση αερίου (gas centrifugation) δουλεύει περνώντας το αέριο μέσω περιστρεφόμενων κυλίνδρων. Η

φυγόκεντρος δύναμη ωθεί το βαρύτερο U-238 προς το εξωτερικό του κυλίνδρου, αφήνοντας μια υψηλότερη συγκέντρωση του U-235 στο εσωτερικό του. Οι κατακόρυφοι κύλινδροι περιστρέφονται ταχύτατα (50.000-70.000 rpm) με αέριο UF_6 . Για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας η περιστροφή τους πραγματοποιείται σχεδόν χωρίς τριβές (σε θάλαμο κενού και με μαγνητική ανάρτηση-εναιώρηση των κυλίνδρων). Υπό την επίδραση της φυγοκέντρης δύναμης τα βαρύτερα μόρια $^{238}UF_6$ έχουν λίγο μεγαλύτερη τάση να κινηθούν προς τα τοιχώματα του κυλίνδρου-ρότορα σε σχέση με τα ελαφρύτερα μόρια $^{235}UF_6$. Υπό την επίδραση διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των χαμηλότερων και υψηλότερων τοιχωμάτων του περιστρεφόμενου κυλίνδρου δημιουργείται μια συνεχής ροή του UF_6 και το εμπλουτισμένο UF_6 σωρεύεται στο κάτω μέρος του κυλίνδρου, ενώ το απεμπλουτισμένο σωρεύεται στο επάνω μέρος, απ' όπου και συλλέγεται.

Ο βαθμός εμπλουτισμού από ένα μόνο κύλινδρο-ρότορα είναι ελάχιστος και για τον λόγο αυτό σε ένα εργοστάσιο εμπλουτισμού του ουρανίου υπάρχουν συστοιχίες εκατοντάδων φυγοκεντρικών διαχωριστήρων συνδεδεμένων μεταξύ τους έτσι, ώστε το εξερχόμενο και ελαφρά εμπλουτισμένο UF_6 του ενός να τροφοδοτεί τον επόμενο διαχωριστήρα. Τα συστήματα αυτά απαιτούν υψηλή τεχνολογία, αφού μια βλάβη σε ένα και μόνο κύλινδρο θα διακόψει τη συνολική λειτουργία μιας συστοιχίας διαχωριστήρων. Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι υπάρχουν συστοιχίες που λειτουργούν για δέκα χρόνια χωρίς να χρειαστούν συντήρηση.



Σχήμα 2.5 Αρχή λειτουργίας των φυγοκεντρικών διαχωριστήρων.



Εικόνα 2.7 Συστοιχία εκατοντάδων διαχωριστήρων για την παραγωγή εμπλουτισμένου ουρανίου με φυγοκέντρηση αερίου.

Ο εμπλουτισμός μέσω αέριας διάχυσης είναι η μόνη τεχνική διαχωρισμού που χρησιμοποιείται στις ΗΠΑ, ωστόσο η τεχνική αυτή είναι κατά πολύ ενεργοβόρα σε σχέση με τη φυγοκέντρηση αερίου, η οποία προβλέπεται ότι θα είναι η τεχνική που θα επικρατήσει στο μέλλον



Εικόνα 2.8 Εργοστάσιο εμπλουτισμού ουρανίου με τη μέθοδο της αέριας διάχυσης στο Κεντάκι των Η.Π.Α [7].



Σχήμα 2.6 Ο κλασικός κύκλος του πυρηνικού καυσίμου.

Οι πυρήνες $U-233$ και $Pu-239$ δεν απαντώνται στη φύση σε σημαντικές ποσότητες αλλά είναι κατασκευάσματα του ανθρώπου και προκύπτουν από κατάλληλες αντιδράσεις. Το $Pu-239$ προκύπτει από αντίδραση του $U-238$ με νετρόνιο και το $U-233$ από αντίδραση του $Th-232$ με νετρόνιο. Οι πυρήνες, όπως το $U-238$ και το $Th-232$, που μετασχηματίζονται σε σχάσιμους με απορρόφηση νετρονίου ονομάζονται γόνιμοι. Οι πυρήνες $U-238$ και $Th-232$ μάλιστα είναι οι πιο σημαντικοί γόνιμοι πυρήνες γιατί υπάρχουν στη φύση σε μεγάλη αφθονία.

Ακόμη και σε περιπτώσεις υψηλού εμπλουτισμού το ποσοστό του $U-238$ στο πυρηνικό καύσιμο είναι πολύ μεγάλο. Έτσι, όπως είναι αναμενόμενο, σε όλους τους αντιδραστήρες ουρανίου πραγματοποιείται μετατροπή του $U-238$ σε σχάσιμο $Pu-239$. Ο λόγος μετατροπής (conversion ratio) ορίζεται ως:

$$CR = \frac{\text{μέσος ρυθμός παραγωγής σχάσιμων πυρήνων}}{\text{μέσος ρυθμός καταστροφής σχάσιμων πυρήνων}}$$

Για αντιδραστήρες φυσικού ουρανίου: $CR \approx 0,83$ ενώ για αντιδραστήρες εμπλουτισμένου ουρανίου: $CR \leq 0,65$.

Στην περίπτωση που $CR > 1$ ο αντιδραστήρας παράγει περισσότερο σχάσιμο υλικό από όσο καταναλώνει, οπότε ονομάζεται αναπαραγωγικός αντιδραστήρας και ο λόγος μετατροπής ονομάζεται λόγος

αναπαραγωγής. Για να είναι δυνατή η αναπαραγωγή είναι προφανές ότι πρέπει ο συντελεστής η του σχάσιμου υλικού να είναι $\eta > 2$.

2.5 ΕΠΙΒΡΑΔΥΝΣΗ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ

Όταν νετρόνιο συγκρούμενο με πυρήνα σκεδάζεται, αποδίδει ένα μέρος της κινητικής του ενέργειας στον πυρήνα και κινείται σε κατεύθυνση διαφορετική από την αρχική. Έτσι, μετά από κάθε σκέδαση το νετρόνιο επιβραδύνεται, χάνει δηλαδή ένα μέρος της κινητικής του ενέργειας.

Ένα χρήσιμο μέγεθος για την περιγραφή των σκεδάσεων αυτών είναι η μέση λογαριθμική μείωση ενέργειας ανά σύγκρουση, ξ . Αυτή ορίζεται ως εξής:

$$\xi = \left\langle \ln \frac{E_1}{E_2} \right\rangle$$

όπου E_1 , E_2 η ενέργεια του νετρονίου πριν και μετά τη σύγκρουση αντίστοιχα. Η παράμετρος ξ εξαρτάται από τον μαζικό αριθμό, A , του πυρήνα που σκεδάζει το νετρόνιο. Με εξαίρεση τις πολύ μικρές τιμές του A , το ξ δίνεται με πολύ καλή προσέγγιση από τον τύπο:

$$\xi = \frac{2}{A + \frac{2}{3}}$$

Να σημειωθεί ότι ακόμη και για $A=2$ το σφάλμα της παραπάνω σχέσης είναι περίπου 3%.

Ο ρόλος του επιβραδυντή (moderator) είναι η επιβράδυνση των ταχέων νετρονίων της σχάσης (μέσης ενέργειας 2 MeV) σε ενέργειες μικρότερες από 1 eV. Τα ταχέα νετρόνια της σχάσης επιβραδύνονται με διαδοχικές σκεδάσεις μέχρις ότου έλθουν σε θερμική ισορροπία με το υλικό της καρδιάς του αντιδραστήρα (θερμικά νετρόνια). Ορίζουμε την ενεργό διατομή σκέδασης, σ_s , και την ενεργό διατομή απορρόφησης, σ_a , οι οποίες εκφράζουν την πιθανότητα ο πυρήνας-στόχος να σκεδάσει ή να απορροφήσει αντίστοιχα το προσπίπτον νετρόνιο. Οι αντίστοιχες μακροσκοπικές διατομές:

$$\Sigma_s = N \cdot \sigma_s \text{ και } \Sigma_a = N \cdot \sigma_a$$

όπου N ο αριθμός των πυρήνων ανά μονάδα όγκου του υλικού του επιβραδυντή εκφράζουν την πιθανότητα σκέδασης και απορρόφησης αντίστοιχα ανά μονάδα μήκους διαδρομής και έχουν μονάδες αντιστρόφου μήκους.

Οι ιδιότητες που επιδιώκεται να έχει ο επιβραδυντής είναι:

1. Μικρός όγκος: απαιτείται δηλαδή επιβράδυνση στη μικρότερη δυνατή απόσταση από το σημείο παραγωγής του ταχέως νετρονίου. Ο αριθμός των σκεδάσεων που χρειάζονται, κατά μέσο όρο, για να γίνει θερμικό το νετρονίο που παράχθηκε από τη σχάση (δηλαδή για τη μείωση της ενέργειάς του από 2 MeV σε 1 eV) είναι αντιστρόφως ανάλογος του ξ .

$$\text{μέσος αριθμός σκεδάσεων} = \frac{14,5}{\xi}$$

Ο αριθμός αυτός είναι τόσο μικρότερος, όσο μεγαλύτερο είναι το ξ , δηλαδή όσο ελαφρύτερος είναι ο πυρήνας του επιβραδυντή όπως φαίνεται και από τον πίνακα 2.2. Για να ικανοποιηθεί το κριτήριο του μικρού όγκου πρέπει ο επιβραδυντής να έχει εκτός από μεγάλο ξ , και μεγάλη ενεργό διατομή σκέδασης Σ_s . Άρα, μέτρο της ικανότητας επιβράδυνσης ενός υλικού είναι το γινόμενο $\xi \cdot \Sigma_s$ το οποίο ονομάζεται ικανότητα επιβράδυνσης του υλικού:

$$\text{ικανότητα επιβράδυνσης του υλικού} = \xi \cdot \Sigma_s$$

2. Μικρές απώλειες νετρονίων: Κάθε νετρόνιο που απορροφάται στον επιβραδυντή είναι απώλεια, αφού δεν είναι πια διαθέσιμο για πρόκληση σχάσης. Πρέπει λοιπόν ο επιβραδυντής να έχει μικρή διατομή απορρόφησης Σ_a . Έτσι, όσον αφορά στην οικονομία νετρονίων, κριτήριο ποιότητας του επιβραδυντή είναι ο λόγος επιβράδυνσης που ορίζεται ως:

$$\text{λόγος επιβράδυνσης} = \frac{\xi \cdot \Sigma_s}{\Sigma_a}$$

Πίνακας 2.2 Παράμετροι επιβράδυνσης διαφόρων υλικών

Επιβραδυντής	H	D	H ₂ O	D ₂ O	Be	C	U-238
A	1	2	-	-	9	12	238
ξ	1	0,725	0,920	0,509	0,209	0,158	0,008
Πυκνότητα g/cm ³	αέριο	αέριο	1,00	1,10	1,85	1,60	19,10
Αριθμός σκεδάσεων από 2MeV σε 1eV	14	20	16	29	69	91	1730
Ικανότητα επιβράδυνσης cm ⁻¹	-	-	1,350	0,176	0,158	0,060	0,003
Λόγος επιβράδυνσης	-	-	71	5670	143	192	0,0092

Από τον πίνακα 2.2 βλέπουμε ότι, από νετρονική άποψη, ο καλύτερος επιβραδυντής είναι το βαρύ νερό, D_2O . Οι νετρονικές ιδιότητες του D_2O (μεγάλη ικανότητα επιβράδυνσης, ασθενής απορρόφηση) επιτρέπουν την κατασκευή αντιδραστήρα με φυσικό ουράνιο, πράγμα που αποτέλεσε τον καθοριστικό παράγοντα στο σχεδιασμό των αντιδραστήρων CANDU στον Καναδά. Το νετρονικό κριτήριο όμως δεν είναι το μόνο στο σχεδιασμό του αντιδραστήρα. Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του επιβραδυντή και τα οικονομικά κριτήρια είναι το ίδιο σημαντικά. Οι εγκαταστάσεις παραγωγής D_2O είναι εξαιρετικά δαπανηρές. Όπως φαίνεται από τον πίνακα η καλύτερη, από την άποψη οικονομίας νετρονίων, επιλογή μετά το D_2O είναι ο γραφίτης, που είναι πολύ φτηνότερο υλικό από το D_2O . Τέτοιοι αντιδραστήρες κατασκευάστηκαν στην Αγγλία (ψύξη με CO_2) και την πρώην Σοβιετική Ένωση (ψύξη με H_2O). Τέλος, αντιδραστήρες νερού σχεδιάστηκαν στην Αμερική και στην πρώην Σοβιετική Ένωση. Σημειώνεται ότι με επιβραδυντή ελαφρύ νερό δεν είναι δυνατή η χρησιμοποίηση φυσικού ουρανίου.

2.6 ΠΙΘΑΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Κατά το σχεδιασμό ενός πυρηνικού αντιδραστήρα για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος πρέπει να ληφθούν υπόψη οι διάφορες πιθανές καταστάσεις λειτουργίας στις οποίες μπορεί να βρεθεί κατά τη διάρκεια της ζωής του τόσο όταν λειτουργεί ομαλά όσο και όταν δυσλειτουργεί. Αυτές οι πιθανές καταστάσεις είναι:

1. Ομαλή λειτουργία (Normal operation)

Ομαλή λειτουργία είναι η κατάσταση στην οποία ο αντιδραστήρας λειτουργεί σε σταθερή ισχύ στις συνθήκες για τις οποίες έχει σχεδιαστεί.

2. Μεταβατική λειτουργία (Operational transients)

Με τον όρο μεταβατική λειτουργία νοείται η διαδικασία με την οποία ο αντιδραστήρας μεταβαίνει από μία κατάσταση λειτουργίας σε μία άλλη. Κάθε αντιδραστήρας πρέπει να έχει σχεδιαστεί ώστε να παρέχει τη δυνατότητα για την κατά βούληση μεταβολή της θερμικής του ισχύος. Για παράδειγμα η μετάβαση του αντιδραστήρα από την κατάσταση λειτουργίας παραγωγής χαμηλής ισχύος σε λειτουργία παραγωγής υψηλής ισχύος, η εκκίνηση και η διακοπή της λειτουργίας του αποτελούν μεταβατικά στάδια.

3. Αναπάντεχες καταστάσεις (Upset conditions)

Με τον όρο αυτό περιγράφονται όλες οι ανεπιθύμητες δυσλειτουργίες που είναι πιθανό να συμβούν κατά τη διάρκεια ζωής του αντιδραστήρα εξαιτίας μιας πληθώρας εξωτερικών παραγόντων. Ένα παράδειγμα αναπάντεχης κατάστασης αποτελεί η ύπαρξη προβλημάτων στις γραμμές μεταφοράς της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Αν η γεννήτρια αποσυνδεθεί από το δίκτυο, ο ατμοστρόβιλος που την κινεί τείνει να επιταχυνθεί σε επικίνδυνα υψηλές ταχύτητες. Για να αποφευχθεί αυτή η εξέλιξη θα πρέπει ο ατμός να διοχετευτεί απευθείας στον συμπυκνωτή ενώ πρέπει άμεσα να μειωθεί η ατμοπαραγωγή.

4. Επείγουσες καταστάσεις (Emergency events)

Κατά τη διάρκεια ζωής ενός πυρηνικού αντιδραστήρα πέραν των καταστάσεων μεταβατικής λειτουργίας που είναι βέβαιο ότι θα συμβούν και των αναπάντεχων καταστάσεων που πρακτικά είναι σχεδόν βέβαιο ότι επίσης θα συμβούν υπάρχει και μία κατηγορία γεγονότων τα οποία ονομάζονται επείγουσες καταστάσεις και η πιθανότητα εμφάνισής τους είναι 10%. Αν δηλαδή υποθέσουμε ότι υπάρχουν 10 αντιδραστήρες είναι σχεδόν βέβαιο ότι σε έναν από αυτούς θα εμφανιστεί μία επείγουσα κατάσταση κατά τη διάρκεια της ζωής του. Συνεπώς, ο αντιδραστήρας θα πρέπει από το σχεδιασμό του να έχει τη δυνατότητα να ανταποκριθεί στις καταστάσεις αυτές οι οποίες μπορεί να προκληθούν από βλάβες σε δευτερεύοντα κυκλώματα του αντιδραστήρα, μηχανική αστοχία σε βαλβίδες ή φωτιά σε κάποιο από τα ηλεκτρικά συστήματα ελέγχου.

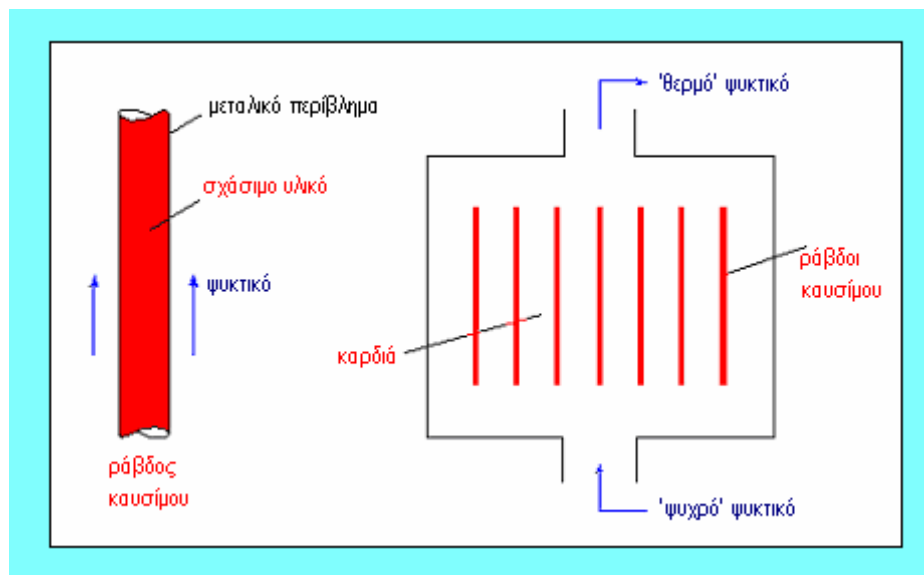
5. Μικρής πιθανότητας βλάβες (Limiting fault conditions)

Είναι πιθανό κάποια γεγονότα όπως ένας σεισμός ή η ολική αποκοπή ενός σωλήνα που οδηγεί ατμό στον ατμοστρόβιλο να οδηγήσουν σε ένα σοβαρό ατύχημα. Τα ατυχήματα αυτά ίσως συμβούν μία φορά στα 10.000 χρόνια λειτουργίας ενός αντιδραστήρα ή αλλιώς μία φορά στα 100 χρόνια λειτουργίας 100 αντιδραστήρων. Όμως οι αντιδραστήρες πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να ανταπεξέρχονται σε τέτοιου είδους καταστάσεις γιατί αν αυτές συμβούν ανεξέλεγκτα είναι πολύ πιθανό να οδηγήσουν σε απελευθέρωση ραδιενέργειας στο περιβάλλον με οδυνηρές συνέπειες.

3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ ΚΑΙ ΤΥΠΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ

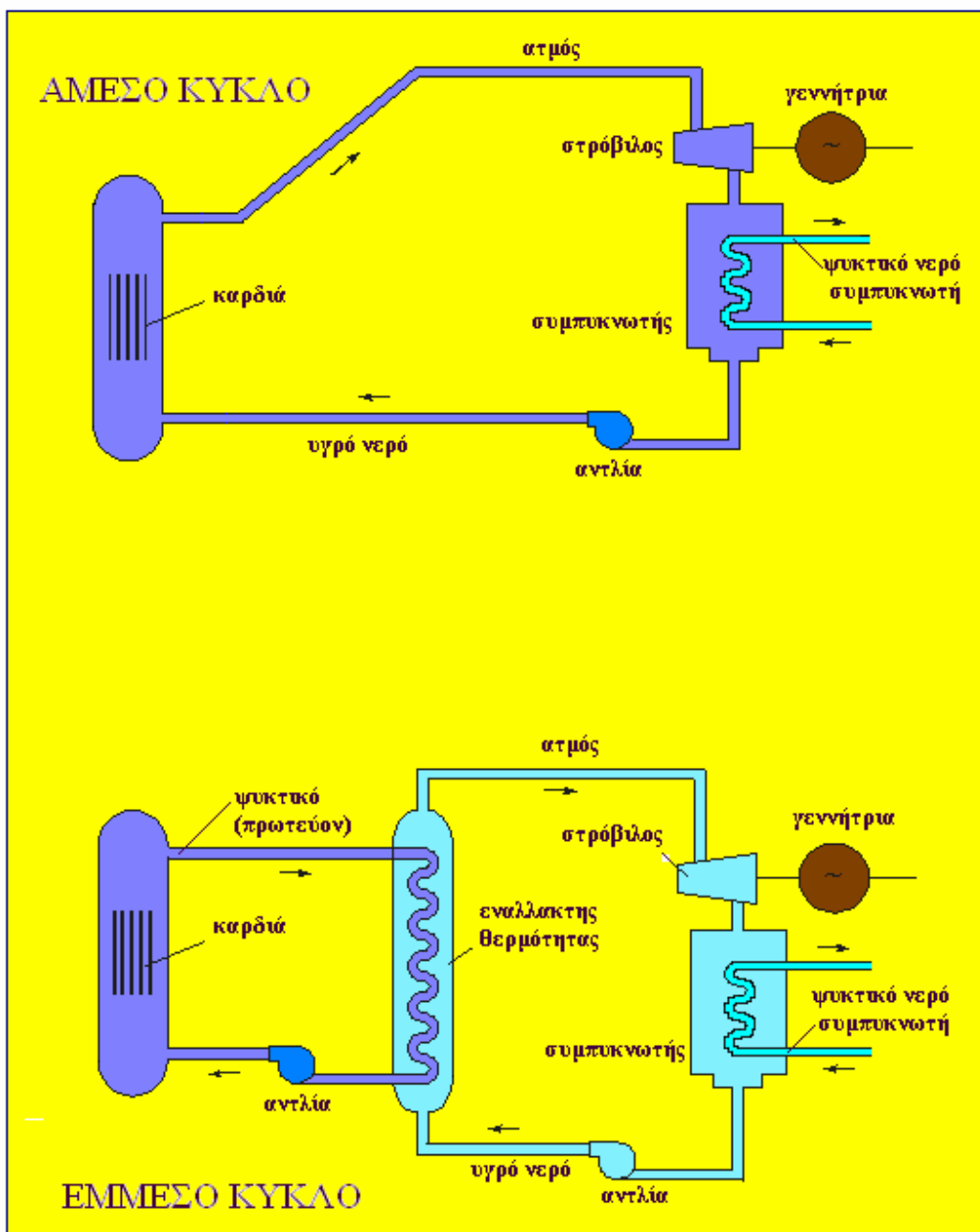
3.1 ΤΟ ΨΥΚΤΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ

Το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας των σχάσεων (άνω του 80%) εμφανίζεται ως θερμότητα στις θέσεις όπου γίνονται οι σχάσεις, δηλαδή, μέσα στις ράβδους καυσίμου, πρακτικά ταυτόχρονα με τη σχάση. Γύρω από τις ράβδους του πυρηνικού καυσίμου ρέει κάποιο ψυκτικό μέσο (coolant) που απάγει την θερμότητα που παράγεται από τις σχάσεις. Το ψυκτικό εισέρχεται σχετικά "ψυχρό" στην καρδιά του αντιδραστήρα και, απάγοντας τη θερμότητα που παράγεται από τις σχάσεις στις ράβδους του καυσίμου, εξέρχεται από την καρδιά σχετικά "θερμό". Το ψυκτικό βγαίνει από την καρδιά του αντιδραστήρα σε πολύ υψηλή θερμοκρασία και πίεση και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού. Δηλαδή, ο ρόλος του αντιδραστήρα, όπως και ο ρόλος του λέβητα είναι η παραγωγή θερμικής ενέργειας για την παραγωγή ατμού.



Σχήμα. 3.1 Σχηματικό διάγραμμα της απαγωγής θερμότητας από την καρδιά αντιδραστήρα [1].

Διακρίνουμε δύο θερμοδυναμικούς κύκλους ή κύκλα με τα οποία γίνεται η παραγωγή του ατμού.



Σχήμα 3.2 Θερμοδυναμικοί κύκλοι των ηλεκτροπαραγωγών πυρηνικών αντιδραστήρων [1].

Στο έμμεσο κύκλο το ψυκτικό που εξέρχεται από την έξοδο της καρδιάς σε υψηλή θερμοκρασία οδηγείται στο πρωτεύον ενός εναλλάκτη θερμότητας. Εκεί μεταφέρει τη θερμότητα σε κύκλωμα νερού, στο δευτερεύον κύκλωμα ψυκτικού, όπως ονομάζεται. Έτσι το νερό του δευτερεύοντος βράζει και παράγεται ατμός. Το ψυκτικό της καρδιάς, έχοντας δώσει τη θερμική του ενέργεια στο δευτερεύον, βγαίνει από τον εναλλάκτη σχετικά “ψυχρό” και επιστρέφει στην είσοδο της καρδιάς για

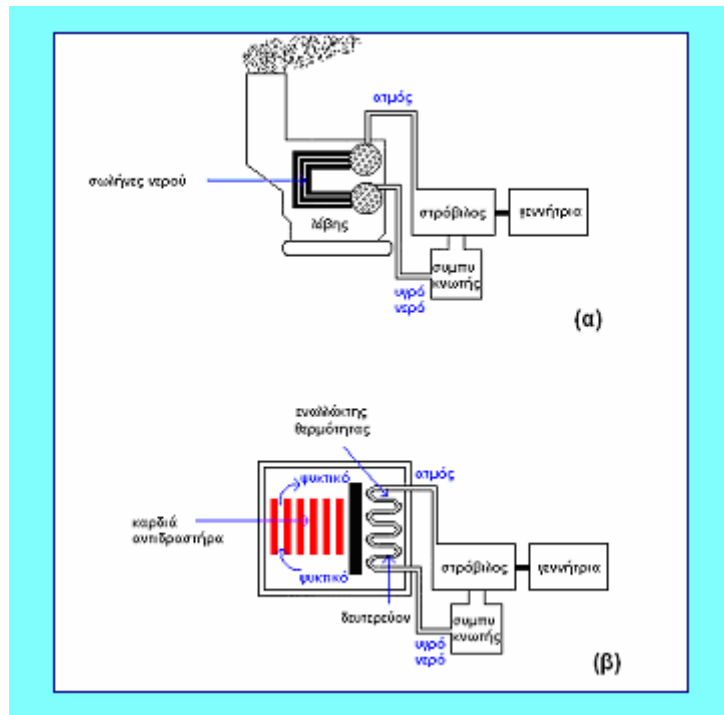
τη συνέχιση της ψύξης της καρδιάς. Ο εναλλάκτης θερμότητας ονομάζεται ατμοπαραγωγός (steam generator).

Ο ατμός που βγαίνει από το δευτερεύον οδηγείται και κινεί το στρόβιλο, όπου η ενέργειά του μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια της φτερωτής του ατμοστροβίλου, ο οποίος κινεί τη γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος. Ο ατμός που εξέρχεται από τον ατμοστρόβιλο έχει χαμηλή θερμοκρασία και πίεση. Στη συνέχεια ο ατμός από την έξοδο του ατμοστροβίλου οδηγείται στον συμπυκνωτή όπου ψυχόμενος μετατρέπεται σε κορεσμένο νερό για να οδηγηθεί και πάλι στην είσοδο του δευτερεύοντος κυκλώματος για την περαιτέρω παραγωγή ατμού. Το ψυκτικό νερό του συμπυκνωτή αντλείται από ποταμό ή θάλασσα ή αποτελεί μέρος κλειστού κυκλώματος, οπότε ψύχεται με ατμοσφαιρικό αέρα σε πύργους ψύξης.



Εικόνα 3.1 Πυρηνικός σταθμός ενέργειας στο Κατενόμ της Γαλλίας. Μη ραδιενεργός ατμός εξέρχεται από τους πύργους ψύξης [7].

Στο άμεσο κύκλο δεν μεσολαβεί εναλλάκτης θερμότητας μεταξύ της καρδιάς του αντιδραστήρα και του ατμοστροβίλου. Είναι φανερό ότι σε αυτήν την περίπτωση το ψυκτικό μέσο πρέπει να είναι νερό το οποίο απάγοντας θερμότητα από την καρδιά, θερμαίνεται και μετατρέπεται σε ατμό και στη συνέχεια οδηγείται στον ατμοστρόβιλο.



Σχήμα 3.3 Απλοποιημένο διάγραμμα (α) συμβατικής και (β) πυρηνικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής [1].

Στον πυρηνικό αντιδραστήρα δεν υπάρχει, καταρχήν, πρακτικά, ανώτατο όριο της θερμικής ισχύος που μπορεί να παραχθεί στο πυρηνικό καύσιμο. Τούτο δε διότι το ανώτατο όριο της πυκνότητας ισχύος, που μπορεί να παραχθεί, είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από τη μέγιστη ικανότητα απαγωγής του από το καύσιμο, με τη σύγχρονη τεχνολογία. Το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο παραγωγής θερμικής ισχύος στον αντιδραστήρα, καθορίζεται: (α) από την ανώτατη επιτρεπόμενη θερμοκρασία του υλικού του περιβλήματος των ράβδων καυσίμου και (β) από το όριο θερμικής ισχύος που μπορεί να μεταφερθεί από το καύσιμο στο ψυκτικό. Ωστε, σε αντίθεση με τους λέβητες, στον πυρηνικό αντιδραστήρα η πυκνότητα ισχύος πρέπει να συγκρατηθεί κάτω από ορισμένα επιτρεπόμενα όρια.

Στον αντιδραστήρα, η θερμότητα παράγεται μέσα στις ράβδους καυσίμου και, όπως είπαμε, πρακτικά δεν υπάρχει ανώτατο όριο της θερμικής ισχύος που μπορεί να παραχθεί. Έτσι, κάποια αθέλητη μεγάλη αύξηση της ισχύος του αντιδραστήρα, ή σημαντική μείωση της ροής του ψυκτικού, μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από το σημείο τήξης του περιβλήματος της ράβδου και εισαγωγή στο ψυκτικό των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης. Ακόμα και μετά την παύση της λειτουργίας του αντιδραστήρα εξακολουθεί να παράγεται θερμότητα, από τη διάσπαση των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης. Οι συνέπειες ενός

τέτοιου ατυχήματος μπορεί να είναι πολύ σοβαρές. Οι απαιτήσεις αξιοπιστίας του συστήματος ψύξης και των υλικών, είναι λοιπόν ιδιαίτερα αυστηρές. Ακόμα και αν δεν συμβεί ρύπανση του περιβάλλοντος, οι οικονομικές συνέπειες ενός ατυχήματος μπορεί να είναι μεγάλες.

Προκύπτει έτσι η τελευταία ουσιαστική διαφορά των δύο συστημάτων. Στην πυρηνική μονάδα η ανάγκη για εξαιρετικά προηγμένη τεχνολογία ψύξης, ασφάλειας, συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης, θωράκισης από τις ακτινοβολίες κ.τ.λ. οδηγούν σε μεγάλο κόστος κατασκευής της μονάδος.

3.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΜΕΣΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες ισχύος χρησιμοποιούν ψυκτικά κυκλώματα για την απαγωγή της θερμότητας που αναπτύσσεται στον πυρήνα τους λόγω ραδιενεργών σχάσεων και λοιπών διασπάσεων. Τα γενικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει το ψυκτικό μέσο ενός πυρηνικού αντιδραστήρα είναι τα εξής:

1. Υψηλή ειδική θερμότητα

Κατά τη λειτουργία του πυρηνικού αντιδραστήρα, ο πυρήνας του δεν θα πρέπει να υπερβεί συγκεκριμένα θερμοκρασιακά όρια γιατί αυτό μπορεί να οδηγήσει τόσο στην καταστροφή των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου όσο και των δομικών υλικών του πυρήνα. Για δεδομένη θερμοκρασία εισόδου, T_{in} του ψυκτικού μέσου στον πυρήνα και για δεδομένη θερμική ισχύ του καυσίμου, \dot{Q} , το ψυκτικό μέσο θα πρέπει να εξέρχεται από τον πυρήνα με συγκεκριμένη θερμοκρασία, T_{out} . Για σταθερή παροχή μάζας, \dot{m} , του ψυκτικού μέσου, η απαγόμενη από το ψυκτικό μέσο θερμική ισχύς είναι:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p (T_{out} - T_{in})$$

όπου c_p η ειδική θερμότητα του ψυκτικού. Γίνεται φανερό ότι χρησιμοποιώντας ψυκτικό με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ειδική θερμότητα η θερμοκρασία εξόδου, T_{out} , γίνεται ελάχιστη αν βέβαια τα υπόλοιπα μεγέθη διατηρούν σταθερές τιμές.

2. Κατάλληλες πυρηνικές ιδιότητες

Είναι πολύ σημαντικό το ψυκτικό μέσο του αντιδραστήρα να έχει χαμηλή απορροφητικότητα νετρονίων ώστε να μην προκαλείται μείωση του αριθμού των νετρονίων που είναι διαθέσιμα για να προκαλέσουν σχάσεις. Επίσης το ψυκτικό μέσο αφενός πρέπει να μην αντιδρά με τα νετρόνια σχηματίζοντας ραδιενεργά ισότοπα και αφετέρου, στην περίπτωση που

χρησιμοποιείται και ως επιβραδυντής νετρονίων, θα πρέπει να έχει καλές επιβραδυντικές ικανότητες.

3. Χαμηλό κόστος και υψηλή διαθεσιμότητα

Τα τυπικά συστήματα πυρηνικών αντιδραστήρων απαιτούν εκατοντάδες τόνους ψυκτικού μέσου. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το ότι σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να συμβεί διαρροή ψυκτικού από τα κυκλώματα του αντιδραστήρα (πράγμα που συχνά συνεπάγεται υψηλό κόστος), καθιστά απαραίτητη τη χρήση ψυκτικών μέσων με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Επίσης, στην ιδανική περίπτωση, το ψυκτικό μέσο θα πρέπει να είναι επαρκώς διαθέσιμο και μάλιστα σε τέτοια μορφή ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα, χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερη προεπεξεργασία.

4. Συμβατότητα με το ψυκτικό κύκλωμα του αντιδραστήρα

Με τον όρο συμβατότητα ψυκτικού μέσου και ψυκτικού κυκλώματος εννοούμε ότι το ψυκτικό μέσο θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μην προκαλεί διαβρώσεις στο ψυκτικό κύκλωμα του αντιδραστήρα ακόμα και υπό την επίδραση των ακτινοβολιών του πυρήνα.

5. Ευκολία στην άντληση

Υγρά με υψηλό δυναμικό ιξώδες απαιτούν αντλίες μικρότερης ισχύος για την άντληση και την κυκλοφορία τους στο ψυκτικό κύκλωμα του αντιδραστήρα.

Όπως είναι φυσικό, στην πράξη καμία ουσία δεν πληροί όλες τις παραπάνω προϋποθέσεις. Έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα ψυκτικά μέσα, υγρά και αέρια. Τα χαρακτηριστικά καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των σημαντικότερων από αυτά αναφέρονται στη συνέχεια.

3.3 ΨΥΚΤΙΚΑ ΜΕΣΑ

3.3.1 Αέρια Ψυκτικά Μέσα

Τα αέρια ψυκτικά μέσα έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό το ότι δεν υφίστανται αλλαγή φάσης σε καταστάσεις που ο αντιδραστήρας δεν λειτουργεί κανονικά. Η ιδιότητά τους αυτή αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα γιατί μία ενδεχόμενη αλλαγή φάσης θα οδηγούσε σε δημιουργία διαφασικής ροής η οποία μεταβάλλει και περιπλέκει σημαντικά τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Όμως, τα αέρια ψυκτικά μέσα έχουν το σημαντικό μειονέκτημα ότι χαρακτηρίζονται από χαμηλή ειδική θερμότητα και χαμηλές τιμές συντελεστών μετάδοσης θερμότητας, ιδιότητες που περιορίζουν τη θερμοκρασία λειτουργίας των αντιδραστήρων σε χαμηλά επίπεδα. Τα

κυριότερα αέρια ψυκτικά μέσα που έχουν χρησιμοποιηθεί σε πυρηνικούς αντιδραστήρες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

1. Αέρας

Ο αέρας χρησιμοποιήθηκε ως ψυκτικό μέσο σε πυρηνικούς αντιδραστήρες που κατασκευάστηκαν στη Μεγάλη Βρετανία και στις Η.Π.Α. στη δεκαετία του 1940 και χρησιμοποιούσαν γραφίτη ως επιβραδυντή. Παρά την υψηλή διαθεσιμότητά του ο αέρας δεν χρησιμοποιείται πλέον στους σύγχρονους πυρηνικούς αντιδραστήρες ως ψυκτικό λόγω του ότι προκαλεί οξειδώσεις.

2. Διοξείδιο του Άνθρακα (CO₂)

Εξαιτίας των φυσικών του ιδιοτήτων το διοξείδιο του άνθρακα είναι το ιδανικότερο αέριο ψυκτικό μέσο. Χρησιμοποιήθηκε μεταξύ άλλων σε αντιδραστήρες που χρησιμοποιούν γραφίτη ως επιβραδυντή γιατί δεν αντιδρά με το γραφίτη σε χαμηλές θερμοκρασίες αλλά ούτε και με το υλικό του περιβλήματος. Επίσης δεν αντιδρά με τα ψυκτικά κυκλώματα του αντιδραστήρα που είναι κατασκευασμένα από χάλυβα ούτε με το πυρηνικό καύσιμο. Όμως σε υψηλές θερμοκρασίες ή σε περιβάλλον με αυξημένα επίπεδα ακτινοβολίας αντιδρά με το γραφίτη σύμφωνα με την αντίδραση: $CO_2 + C \rightarrow 2CO$ παράγοντας μονοξείδιο του άνθρακα και μειώνοντας την ποσότητα του επιβραδυντή που βρίσκεται στον αντιδραστήρα. Ακόμη, η μείωση της ποσότητας του γραφίτη έχει σαν άμεσο επακόλουθο και τη μείωση της μηχανικής αντοχής του πυρήνα. Στους σύγχρονους αντιδραστήρες τα παραπάνω προβλήματα αντιμετωπίζονται διατηρώντας τη θερμοκρασία του επιβραδυντή σε χαμηλότερα επίπεδα ή προσθέτοντας ουσίες οι οποίες αναστέλλουν τη χημική αντίδραση του CO₂ με το γραφίτη.

3. Ήλιο (He)

Το ήλιο, το οποίο βρίσκεται σε μικρές ποσότητες στην ατμόσφαιρα αλλά συνήθως εξάγεται από το πετρέλαιο έχει χρησιμοποιηθεί στους αεριοψυκτους αντιδραστήρες υψηλών θερμοκρασιών (High Temperature Reactors, HTR) στους οποίους χρησιμοποιείται γραφίτης ως επιβραδυντής. Η χρήση του ηλίου ως ψυκτικό μέσο επιτρέπει θεωρητικά τη λειτουργία των αντιδραστήρων αυτών σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από 800°C) χωρίς να αντιδρά με το γραφίτη. Όμως είναι συχνά αδύνατο να αποφευχθεί η ανάμειξη του ηλίου με ατμό, αέρα και άλλα συστατικά, κυρίως λόγω διαρροών του ψυκτικού κυκλώματος αλλά και λόγω απελευθέρωσης αερίων που αρχικά είχαν απορροφηθεί από το γραφίτη. Έτσι, παρόλο που το ήλιο δεν αντιδρά με το γραφίτη ή το χάλυβα, οι τυχόν προσμείξεις του αντιδρούν, γεγονός που δρα ως περιοριστικός παράγοντας στο σχεδιασμό των αντιδραστήρων που το χρησιμοποιούν καθώς δεν είναι δυνατό να επιτευχθούν πολύ υψηλές θερμοκρασίες.

3.3.2 Υγρά Ψυκτικά Μέσα

Σε αντίθεση με τα αέρια, τα υγρά ψυκτικά μέσα έχουν το μειονέκτημα να υφίστανται αλλαγή φάσης (ατμοποίηση) όταν η θερμοκρασία τους αυξηθεί πάνω από το σημείο βρασμού τους. Όμως λόγω του ότι χαρακτηρίζονται από αρκετά υψηλότερη ειδική θερμότητα και από καλύτερες ιδιότητες μετάδοσης θερμότητας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απαγωγή πολύ υψηλότερων θερμικών ροών σε σχέση με τα αέρια ψυκτικά μέσα. Τα κυριότερα υγρά ψυκτικά μέσα που έχουν χρησιμοποιηθεί σε πυρηνικούς αντιδραστήρες εξετάζονται στη συνέχεια.

1. Βαρύ Νερό (D₂O)

Το βαρύ νερό προκύπτει αν στο ελαφρύ (συνηθισμένο) νερό αντικαταστήσουμε τα άτομα πρωτίου υδρογόνου με άτομα δευτερίου. Το πρώτιο και το δευτέριο είναι ισότοπα του υδρογόνου. Ο πυρήνας του πρωτίου είναι ένα μόνο πρωτόνιο ενώ ο πυρήνας του δευτερίου αποτελείται από ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο. Το βαρύ νερό βρίσκεται μέσα στο φυσικό νερό σε ποσοστό 0,016%. Για το διαχωρισμό του βαρέως νερού από το φυσικό νερό απαιτούνται δαπανηρές διαδικασίες και μεγάλες εγκαταστάσεις. Παρόλα αυτά το βαρύ νερό χρησιμοποιείται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες λόγω ενός πολύ σημαντικού πλεονεκτήματος. Χαρακτηρίζεται από πολύ μικρότερη απορροφητικότητα θερμικών νετρονίων σε σχέση με το ελαφρύ νερό πράγμα που επιτρέπει τη λειτουργία του αντιδραστήρα με μη εμπλουτισμένο ουράνιο. Με εξαίρεση την απορροφητικότητα των νετρονίων, το βαρύ νερό έχει πρακτικά τις ίδιες θερμοφυσικές ιδιότητες με το ελαφρύ νερό και κατά συνέπεια τα ίδια μειονεκτήματα με αυτό.

Λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής του D₂O τόσο οι διαρροές του όσο και οι προσμείξεις με φυσικό νερό, μέσω του υδραυλικού κυκλώματος και κυρίως του κυκλώματος της ατμοπαραγωγής, θα πρέπει να περιορίζονται στο ελάχιστο δυνατό. Στην πράξη οι ετήσιες απώλειες ενός αντιδραστήρα βαρέως ύδατος είναι περίπου 2%. Επιπλέον, σε περιβάλλον υψηλών νετρονικών ροών ένα μικρό αλλά σημαντικό μέρος του δευτερίου μετατρέπεται σε τρίτιο. Το τρίτιο είναι το τρίτο ισότοπο του υδρογόνου με ένα πρωτόνιο και δύο νετρόνια στον πυρήνα του, είναι ραδιενεργό και έχει μεγάλο χρόνο ημιζωής (12 χρόνια). Για το λόγο αυτό πρέπει να λαμβάνονται επιπλέον μέτρα για την ελαχιστοποίηση διαρροών τρίτιου στο περιβάλλον.

2. Υγρά Μέταλλα

Τα υγρά μέταλλα αφενός προσφέρουν τη δυνατότητα λειτουργίας του αντιδραστήρα σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες από ότι το νερό, αφετέρου χαρακτηρίζονται από πολύ καλές ιδιότητες μετάδοσης θερμότητας. Τα μόνα μέταλλα που συνδυάζουν τα παραπάνω

πλεονεκτήματα με σχετικά χαμηλό σημείο τήξης, χαμηλή πίεση ατμών και επιπλέον χαμηλή απορροφητικότητα νετρονίων είναι το νάτριο (Na) και το κάλιο (K). Και τα δύο είναι συμβατά με τον ανοξειδωτο χάλυβα ακόμα και σε θερμοκρασίες της τάξης των 800°C, υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν προσμείξεις οξυγόνου. Αρχικά, ως ψυκτικά χρησιμοποιούνταν κυρίως διαλύματα νατρίου και στη συνέχεια επικράτησαν τα διαλύματα μειγμάτων νατρίου-καλίου (NaK). Τα μείγματα αυτά έχουν το πλεονέκτημα ότι βρίσκονται σε υγρή μορφή σε θερμοκρασία δωματίου, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται έμμεση θέρμανση των σωληνώσεων του ψυκτικού κυκλώματος κατά τις περιόδους σβέσης του αντιδραστήρα. Σημαντικά εμπόδια στη χρήση των υγρών μετάλλων νατρίου-καλίου ως ψυκτικά μέσα αποτελούν αφενός το γεγονός ότι καθίστανται ραδιενεργά και αφετέρου το γεγονός ότι εμφανίζουν υψηλή χημική αντιδραστικότητα.

3. Ελαφρύ Νερό (H₂O)

Το ελαφρύ νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ψυκτικό μέσο και ως επιβραδυντής ταυτόχρονα. Επίσης χαρακτηρίζεται από υψηλή διαθεσιμότητα ενώ πρόσθετο πλεονέκτημα αποτελεί η ανεπτυγμένη τεχνολογία των μετάλλων που χρησιμοποιούνται κατά τη μεταφορά θερμότητας με νερό (λέβητες, εναλλάκτες θερμότητας, κ.τ.λ.). Βέβαια το ελαφρύ νερό ως ψυκτικό έχει και πολλά μειονεκτήματα όπως χαμηλό σημείο βρασμού και υψηλή απορροφητικότητα νετρονίων. Επίσης παρουσία νετρονικών ροών διασπάται σε οξυγόνο και υδρογόνο και επιπλέον έχει και διαβρωτικές ιδιότητες.

Πάντως, πέραν των μειονεκτημάτων του, το ελαφρύ νερό αποτελεί σήμερα το κυριότερο ψυκτικό μέσο των πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος. Οι αντιδραστήρες που χρησιμοποιούν ελαφρύ νερό ως ψυκτικό μέσο και ως επιβραδυντή ονομάζονται αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (Light Water Reactors, LWR ή στη ρωσική βιβλιογραφία Water Water Energy Reactors, WWER).

Στις επόμενες ενότητες του κεφαλαίου αυτού παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι πυρηνικών αντιδραστήρων. Οι αντιδραστήρες, όπως έχει ήδη αναφερθεί, χωρίζονται γενικά σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τους θερμικούς οι οποίοι χρησιμοποιούν θερμικά νετρόνια και τους αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων. Οι θερμικοί αντιδραστήρες διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούν ως ψυκτικό μέσο και ως επιβραδυντή.

3.3.3 Συγκριτικά Στοιχεία

Για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με τις θερμοδυναμικές ιδιότητες καθώς και τις ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας

των διαφόρων διαθέσιμων ψυκτικών μέσων χρησιμοποιείται η αδιάστατη παράμετρος F (figure of merit) η οποία ορίζεται ως:

$$F = \frac{c_p^{2,8} \cdot \rho}{\mu^{0,2}}$$

όπου c_p η ειδική θερμότητα σε $J/Kg \cdot K$, ρ η πυκνότητα σε Kg/m^3 και μ το δυναμικό ιξώδες σε $N \cdot s/m^2$. Στον πίνακα 3.1 γίνεται σύγκριση των κυριότερων ψυκτικών μέσων με βάση την αδιάστατη παράμετρο F.

Πίνακας 3.1 Σύγκριση των ιδιοτήτων των κυριότερων ψυκτικών μέσων των πυρηνικών αντιδραστήρων

	Ελαφρύ Νερό	Βαρύ Νερό	Νάτριο	Ήλιο	Διοξείδιο του Άνθρακα
Θερμοκρασία (°C)	270	270	550	450	450
Πίεση (bar)	55	55	1	41	41
Σημείο Βρασμού (°C)	100	101	883	-269	-57
Πυκνότητα (Kg/m^3)	767	845	817	3,08	29,5
Δυναμικό Ιξώδες ($10^{-6} N \cdot s/m^2$)	102	113	230	36	30
Ειδική Θερμότητα ($KJ/Kg \cdot K$)	5,14	5,27	1,26	5,2	1,2
Παράμετρος F	53	67	1	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$

3.4 ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΕΛΑΦΡΟΥ ΥΔΑΤΟΣ

3.4.1 Γενικά

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (LWR) χρησιμοποιούν ελαφρύ νερό και ως ψυκτικό και ως επιβραδυντή. Η μεγάλη ικανότητα επιβράδυνσης του νερού παρέχει τη δυνατότητα σχεδιασμού και κατασκευής καρδιάς αντιδραστήρα με σχετικά μικρό όγκο. Τα πλεονεκτήματα του μικρού όγκου είναι:

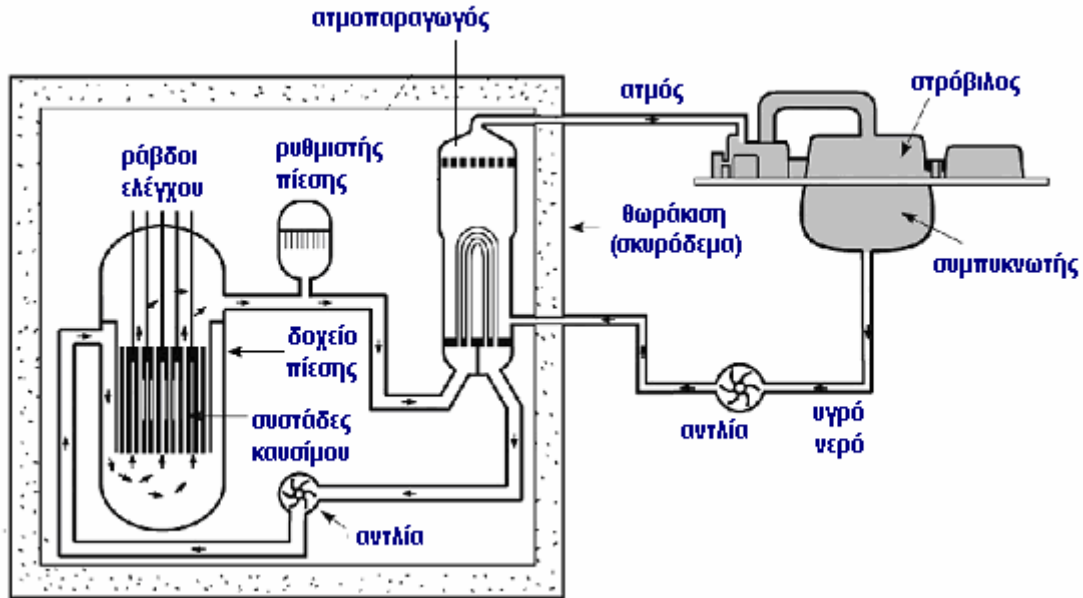
- Χαμηλό κόστος της καρδιάς του αντιδραστήρα
- Είναι εφικτή η μεταφορά του δοχείου πίεσης του αντιδραστήρα, μπορεί δηλαδή να κατασκευασθεί στο εργοστάσιο και να μεταφερθεί στη θέση εγκατάστασης του αντιδραστήρα.

Η σχετική ευκολία μετάβασης του νερού από την υγρή φάση στην αέρια φάση δημιουργεί σημαντικές απαιτήσεις όσον αφορά στα συστήματα ασφάλειας και το σχεδιασμό του αντιδραστήρα

Έχουν αναπτυχθεί δύο τύποι αντιδραστήρων ελαφρού ύδατος: οι αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος (Pressurised Water Reactor, PWR) όπου το νερό διατηρείται στην υγρή φάση λόγω της υψηλής πίεσης που επικρατεί στον πυρήνα του αντιδραστήρα και οι αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος (Boiling Water Reactors, BWR) όπου το νερό υφίσταται αλλαγή φάσης κατά τη διέλευσή του μέσα από τον πυρήνα του αντιδραστήρα.

3.4.2 Αντιδραστήρες Πεπιεσμένου Ύδατος

Οι αντιδραστήρες πεπιεσμένου νερού (PWR) αναπτύχθηκαν από τις ΗΠΑ και τη Σοβιετική Ένωση, για την πρόωση υποβρυχίων (λόγω του μικρού όγκου καρδιάς). Είναι σήμερα ο πιο διαδεδομένος τύπος αντιδραστήρα και παράγεται από τις ΗΠΑ, ΕΣΣΔ, Γερμανία και Γαλλία. Το ψυκτικό της καρδιάς είναι κοινό ύδωρ, που λειτουργεί ταυτόχρονα και ως επιβραδυντής, ευρίσκεται υπό ικανή πίεση (150 atm), ώστε να αποφεύγεται ο βρασμός στην καρδιά του αντιδραστήρα. Το κύκλο του αντιδραστήρα είναι έμμεσο. Ολόκληρο το πρωτεύον κύκλωμα, συμπεριλαμβανομένων και των αμοπαγωγών μονάδων (συνήθως τέσσερις εναλλάκτες θερμότητας), περιβάλλεται από βιολογική θωράκιση, κατασκευασμένη με σκυρόδεμα (σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4 Αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος [1].

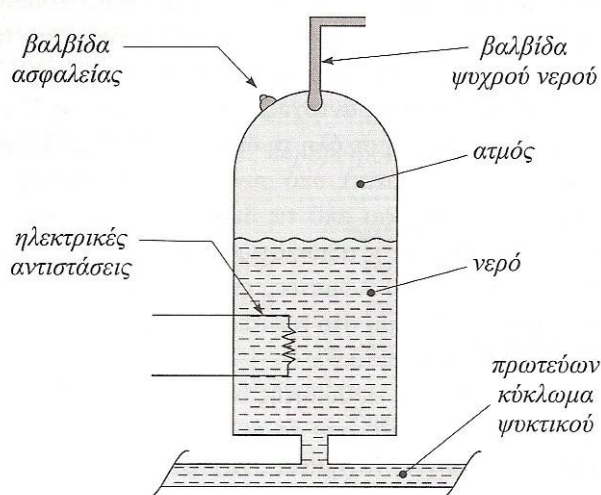
Η θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού στην καρδιά είναι 289°C και η θερμοκρασία εξόδου από την καρδιά είναι 325°C . Το καύσιμο είναι UO_2 με εμπλουτισμό $e \cong 3,2\%$, και το υλικό του περιβλήματος της ράβδου καυσίμου είναι κράμα ζirkονίου. Κάθε συστάδα περιέχει 225 ράβδους καυσίμου. Περίπου 30% από τις συστάδες καυσίμου χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του αντιδραστήρα. Σε αυτές, 20 περίπου από τις θέσεις ράβδων της συστάδας δεν περιέχουν καύσιμο, αλλά τους οδηγούς ράβδων ελέγχου. Οι ράβδοι ελέγχου βυθίζονται στη συστάδα από το επάνω μέρος του δοχείου πίεσης και μετακινούνται μέσα ή έξω όλες μαζί αποτελώντας τη δέσμη ράβδων ελέγχου.

Ο βαθμός απόδοσης, δηλαδή ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς τη θερμική ισχύ της καρδιάς είναι αύξουσα συνάρτηση της θερμοκρασίας εξόδου του ψυκτικού από την καρδιά του αντιδραστήρα. Η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία του ψυκτικού πρέπει να είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία κορεσμού του νερού στη συγκεκριμένη πίεση λειτουργίας του ψυκτικού, ώστε να αποκλείεται ο βρασμός του ψυκτικού στην καρδιά. Αυτό σημαίνει ότι για να έχουμε έναν ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης πρέπει η πίεση λειτουργίας να είναι μεγάλη (περίπου 150 atm στους σύγχρονους PWR).

Ο δεύτερος περιοριστικός παράγοντας, γενικά στους LWR, είναι η μεγάλη διατομή απορρόφησης νετρονίων του ελαφρού νερού, η οποία επιβάλλει τη χρήση εμπλουτισμένου ουρανίου. Η αναγκαιότητα οικονομίας νετρονίων, προκειμένου να περιοριστεί ο εμπλουτισμός σε οικονομικά επίπεδα ($\sim 3\%$), επιβάλλει την ελαχιστοποίηση, στην καρδιά, υλικών που απορροφούν νετρόνια. Επιβάλλεται λοιπόν η τοποθέτηση

ολόκληρης της καρδιάς σε ένα δοχείο πίεσης. Η μεγάλη πίεση και η μεγάλη διάμετρος (~4,6 m) του δοχείου πίεσης θέτουν μεγάλες απαιτήσεις αντοχής του υλικού του. Κατασκευάζεται από χάλυβα μεγάλης αντοχής, πάχους 20 έως 23 cm. Η αντοχή του πρέπει να παραμείνει αξιόπιστη σε όλη τη διάρκεια της προβλεπόμενης ζωής του αντιδραστήρα (τουλάχιστον 25 χρόνια), υπό συνθήκες καταπόνησης του υλικού του, από τον βομβαρδισμό νετρονίων και από τις διαφορικές θερμικές τάσεις που αναπτύσσονται. Το ζήτημα της αξιοπιστίας του δοχείου πίεσης, και γενικά του υπό μεγάλη πίεση πρωτεύοντος κυκλώματος, είναι κρίσιμο για την ασφάλεια των PWR, δεδομένου ότι μεγάλη θραύση στο πρωτεύον κύκλωμα μπορεί να προκαλέσει το σοβαρότατο ατύχημα απώλειας του ψυκτικού.

Η ρύθμιση της διατήρησης της επιθυμητής υψηλής πίεσης λειτουργίας του πρωτεύοντος κυκλώματος εξασφαλίζεται από το ρυθμιστή πίεσης (pressuriser). Αυτός είναι ένα χαλύβδινο κυλινδρικό δοχείο (σχήμα 3.5) συνδεδεμένο στη σωλήνωση που συνδέει την έξοδο του ψυκτικού από το δοχείο πίεσης με μία από τις αμοπαγωγούς μονάδες. Το 60% περίπου του όγκου του ρυθμιστή πίεσης καταλαμβάνεται από υγρό νερό και το υπόλοιπο από ατμό. Το νερό μπορεί να θερμανθεί από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις που είναι βυθισμένες μέσα στον νερό στο κάτω μέρος του δοχείου. Με το άνοιγμα της βαλβίδας νερού που βρίσκεται στο πάνω μέρος του δοχείου διασκορπίζεται ψυχρό νερό μέσα στο δοχείο. Τόσο η θέρμανση όσο και το άνοιγμα της βαλβίδας νερού ενεργοποιούνται από σήματα πίεσης.



Σχήμα 3.5 Ο ρυθμιστής πίεσης [1].

Αν η πίεση μειωθεί κάτω από την προκαθορισμένη πίεση λειτουργίας του πρωτεύοντος κυκλώματος ενεργοποιείται η θέρμανση του νερού από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις οπότε παράγεται ατμός και

αυξάνεται έτσι η πίεση στο ρυθμιστή και κατά συνέπεια σε ολόκληρο το πρωτεύον κύκλωμα.

Αν η πίεση αυξηθεί πάνω από την προκαθορισμένη πίεση λειτουργίας του πρωτεύοντος κυκλώματος ενεργοποιείται το άνοιγμα της βαλβίδας νερού. Το ψυχρό νερό συμπυκνώνει ένα μέρος του ατμού στο ρυθμιστή πίεσης και έτσι μειώνεται η πίεση στο ρυθμιστή και κατά συνέπεια σε ολόκληρο το πρωτεύον κύκλωμα.

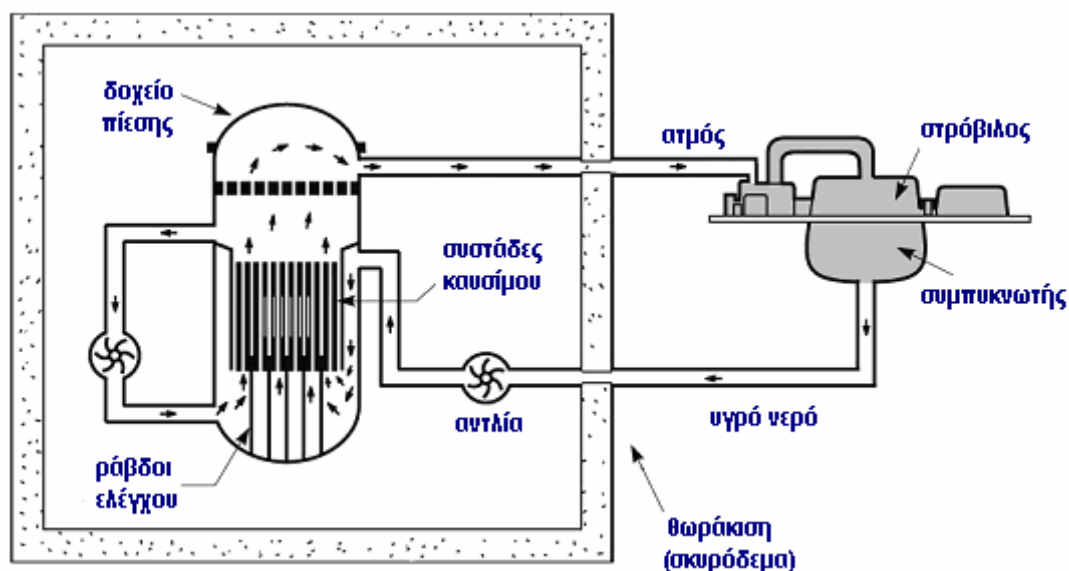
Αν η αύξηση της πίεσης στο πρωτεύον κύκλωμα είναι τόσο μεγάλη που το σύστημα διασκορπισμού ψυχρού νερού του ρυθμιστή πίεσης αδυνατεί να την μειώσει στα επιθυμητά επίπεδα τότε θα ανοίξουν μία ή περισσότερες βαλβίδες ασφαλείας του ρυθμιστή πίεσης (στο σχήμα 3.5 φαίνεται μόνο μία βαλβίδα ασφαλείας). Με το άνοιγμα της βαλβίδας ασφαλείας εκτονώνεται μέρος του ατμού του ρυθμιστή πίεσης σε δοχείο νερού που βρίσκεται στο θάλαμο εγκλωβισμού, με αποτέλεσμα την πτώση της πίεσης στο πρωτεύον κύκλωμα. Μόλις η πίεση επανέλθει στο προκαθορισμένο επίπεδο λειτουργίας τότε η βαλβίδα ασφαλείας θα πρέπει να κλείσει ξανά.



Εικόνα 3.2 Ο αντιδραστήρας πεπιεσμένου νερού Rancho Seco στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α [7].

3.4.3 Αντιδραστήρες Ξέοντος Ύδατος

Οι αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος (BWR) είναι άμεσου κύκλου. Το ψυκτικό ύδωρ βράζει, και ο ατμός παράγεται, στην καρδιά του αντιδραστήρα (σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6 Αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος (BWR) [1].

Το κίνητρο για τη χρησιμοποίηση άμεσου κύκλου είναι η αποφυγή των ατμοπαραγωγών μονάδων, με σκοπό τη μείωση του κόστους του αντιδραστήρα. Εν τούτοις, λόγω των απαιτούμενων συστημάτων ασφαλείας, το κόστος ενός BWR δεν είναι μικρότερο από το κόστος ενός PWR, ίδιας ισχύος.

Η πίεση στο δοχείο πίεσης είναι 70 atm, η μισή περίπου από αυτήν των PWR. Στην πίεση αυτή το νερό βράζει στους 285°C περίπου, και η πίεση και η θερμοκρασία του ατμού στην έξοδο της καρδιάς είναι περίπου ίδιες με αυτές των ατμοπαραγωγών μονάδων των PWR. Το καύσιμο των BWR είναι πρακτικά το ίδιο με το καύσιμο των PWR, δηλαδή εμπλουτισμένο ($e \cong 2,8\%$) UO_2 , σε ράβδους με περίβλημα από κράμα ζirkονίου.

Στους BWR, όπως και σε κάθε πυρηνικό αντιδραστήρα άμεσου κύκλου, ο στρόβιλος και ο συμπυκνωτής αποτελούν τμήμα του κυκλώματος του ψυκτικού. Αφού ο ατμός παράγεται στην καρδιά, είναι ραδιενεργός: περιέχει μικρές ποσότητες προϊόντων της σχάσης και κυρίως N-16 (β , γ , $t_{1/2} = 7$ s), προϊόν της αντίδρασης του οξυγόνου του H_2O με νετρόνια. Άμεση συνέπεια είναι η εκπομπή σημαντικής ακτινοβολίας γ από τον στρόβιλο, οπότε είναι απαραίτητη η βιολογική

θωράκιση και της στροβιλογεννήτριας (στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η θωράκιση μόνο του δοχείου πίεσης).



Εικόνα 3.3 Ο πυρηνικός σταθμός Oskarshamn στη Σουηδία που χρησιμοποιεί τεχνολογία BWR [7].

3.5 ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΒΑΡΕΟΣ ΥΔΑΤΟΣ

3.5.1. Γενικά

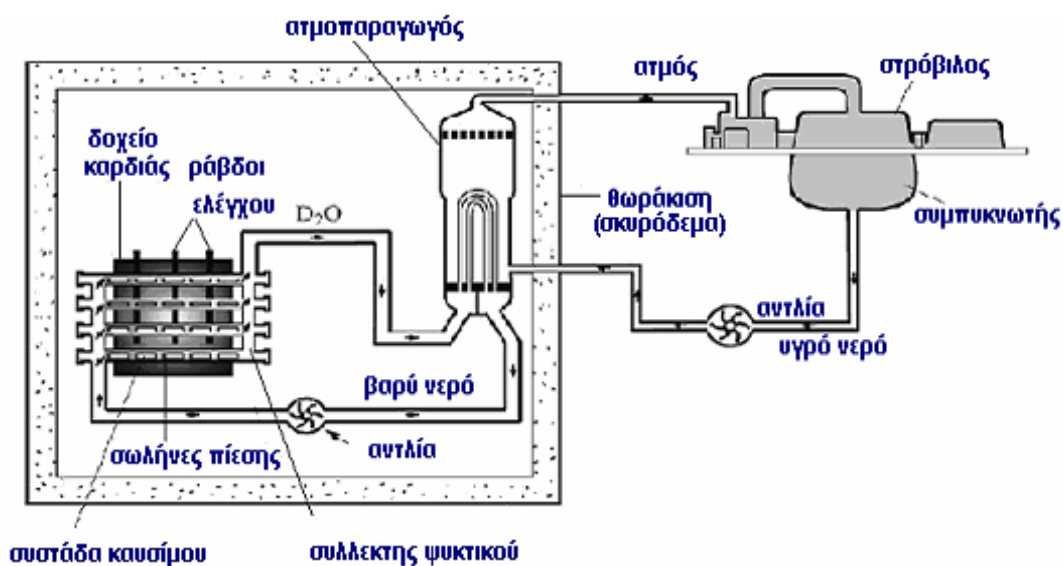
Οι αντιδραστήρες βαρέος ύδατος (Heavy Water Reactor, HWR), όπως δηλώνει και το όνομά τους χρησιμοποιούν βαρύ νερό ως επιβραδυντή. Το βαρύ νερό έχει μικρότερη διατομή απορρόφησης νετρονίων και μικρότερη ικανότητα επιβράδυνσης από το ελαφρύ νερό. Οι ιδιότητες αυτές επέτρεψαν τη χρήση πολλών ανεξάρτητων σωλήνων πίεσης αντί του ενός δοχείου πίεσης των LWR με σημαντικές θετικές συνέπειες για την ασφάλεια των αντιδραστήρων. Άλλη συνέπεια είναι η δυνατότητα αντικατάστασης του εξαντλημένου καυσίμου με φρέσκο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του αντιδραστήρα σε αντίθεση με τους LWR, στους οποίους για την αλλαγή του καυσίμου απαιτείται η διακοπή της λειτουργίας του αντιδραστήρα με προφανείς οικονομικές συνέπειες. Έχουν αναπτυχθεί δύο τύποι αντιδραστήρων HWR. Ο αντιδραστήρας CANDU (Canadian Deuterium-Uranium) που χρησιμοποιεί το βαρύ νερό

και ως ψυκτικό και ο SGHWR (Steam Generating Heavy Water Reactor) που ως ψυκτικό χρησιμοποιεί ελαφρύ νερό.

3.5.2 Ο Αντιδραστήρας CANDU

Ο αντιδραστήρας CANDU είναι αντιδραστήρας έμμεσου κύκλου (σχήμα 3.7). Το ψυκτικό είναι D_2O και βρίσκεται υπό ικανή πίεση, ώστε να αποφεύγεται ο βρασμός του. Το καύσιμο είναι φυσικό ουράνιο στη μορφή δισκίων UO_2 , τοποθετημένων σε ράβδους με περίβλημα από κράμα ζirkονίου. Η καρδιά του αντιδραστήρα CANDU συγκροτείται από εκατοντάδες οριζόντια κανάλια ψυκτικού (στο σχήμα 3.7 εμφανίζονται τέσσερα μόνον από αυτά), καθένα από τα οποία περιέχεται στο δικό του σωλήνα πίεσης.

Το δοχείο της καρδιάς περιέχει τον επιβραδυντή (D_2O) και το διαπερνούν οριζόντια εκατοντάδες σωλήνες πίεσης (αυλοί), κατασκευασμένοι από κράμα ζirkονίου. Το ψυκτικό (D_2O) είναι ανεξάρτητο από τον επιβραδυντή και ρέει μέσα στο σωλήνα πίεσης όπου τοποθετούνται συστάδες καυσίμου, η μια μετά την άλλη, στη σειρά. Σχηματίζεται έτσι κανονικός κánaβος καναλιών ψυκτικού-καυσίμου, βυθισμένος στον επιβραδυντή (D_2O).



Σχήμα 3.7 Ο αντιδραστήρας CANDU [1].

Δεδομένου ότι το ψυκτικό είναι ανεξάρτητο από τον επιβραδυντή, δεν υπάρχει λόγος να βρίσκεται ο επιβραδυντής υπό πίεση. Διατηρείται σε ατμοσφαιρική σχεδόν πίεση, οπότε το δοχείο της καρδιάς είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα πάχους 2,5cm περίπου (το

αντίστοιχο πάχος στους PWR είναι 23cm), οι δε διαστάσεις του είναι: 7,6m διάμετρος και 7,6m ύψος.

Ο επιβραδυντής έχει το δικό του σύστημα ψύξης που διατηρεί τη θερμοκρασία του στους 10°C περίπου. Οι θερμοκρασίες του ψυκτικού είναι 267°C στην είσοδο και 312°C στην έξοδο της καρδιάς, υπό μέση πίεση στους σωλήνες πίεσης περίπου 100atm.

Το ψυκτικό από την έξοδο των σωλήνων πίεσης οδηγείται στις ατμοπαραγωγές μονάδες (συνήθως είναι 4 αλλά στο σχήμα φαίνεται μόνο η μία). Στο δευτερεύον κάθε ατμοπαραγωγού (εναλλάκτη θερμότητας) ρέει κοινό νερό. Με την μεταφορά θερμότητας από το ψυκτικό D₂O, παράγεται, στο δευτερεύον του εναλλάκτη, ατμός H₂O υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, ο οποίος οδηγείται στον αμοστρόβιλο. Το ψυκτικό D₂O, από την έξοδο των ατμοπαραγωγών μονάδων οδηγείται στην είσοδο των αυλών της καρδιάς.



Εικόνα 3.4 Ο πυρηνικός σταθμός Qinshan στην Κίνα περιλαμβάνει δύο αντιδραστήρες τύπου CANDU 728MW [7].

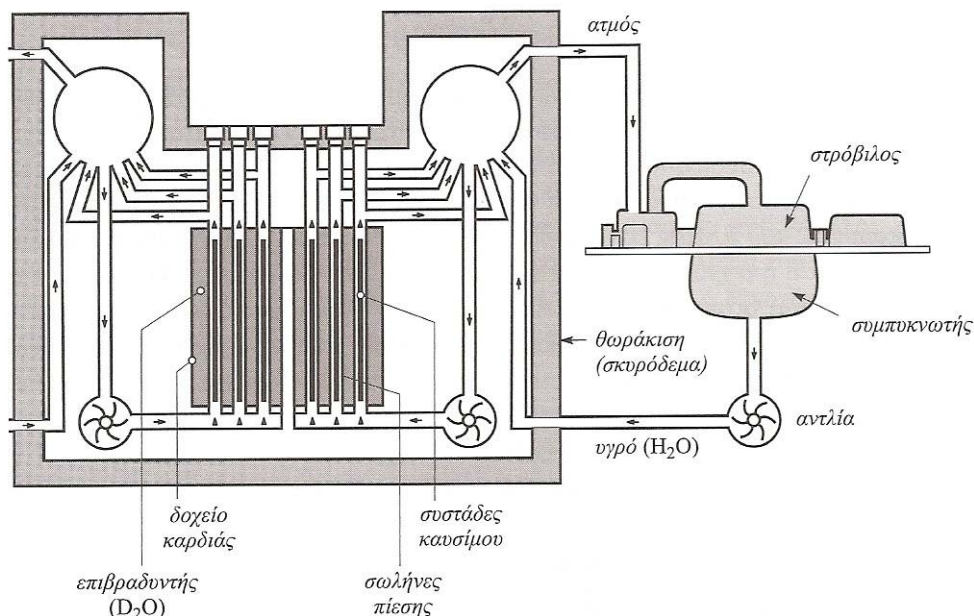
Τα πλεονεκτήματα του μεγάλου αριθμού σωλήνων πίεσης και του ανεξάρτητου επιβραδυντή είναι:

- η μικρή διάμετρος του σωλήνα πίεσης εξασφαλίζει αντοχή σε πολύ μεγαλύτερες πιέσεις από ότι το μεγάλο δοχείο πίεσης των LWR. Αυτό συνεπάγεται πολύ μεγαλύτερη αξιοπιστία αντοχής των σωλήνων πίεσης.

- οι συνέπειες θραύσης ενός σωλήνα πίεσης είναι πολύ μικρότερες από τη θραύση του δοχείου πίεσης των LWR. Είναι όμως πιθανό να συμβεί ατύχημα απώλειας ψυκτικού και στους CANDU, π.χ. με τη θραύση ενός από τους συλλέκτες εξόδου (σχήμα 3.7). Βεβαίως, και οι CANDU διαθέτουν δοχείο εγκλωβισμού.
- τα ανεξάρτητα κανάλια του ψυκτικού μπορούν να ανοίγουν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του αντιδραστήρα για την αντικατάσταση του καυσίμου.

3.5.3 Ο Αντιδραστήρας SGHWR

Σημαντικό μειονέκτημα των αντιδραστήρων CANDU που χρησιμοποιούν ψυκτικό D_2O είναι το μεγάλο κόστος του D_2O . Οι εγκαταστάσεις παραγωγής βαρέος ύδατος είναι εξαιρετικά ενεργοβόρες. Δεδομένου ότι συνεχώς υπάρχουν απώλειες D_2O , κυρίως στο υψηλής θερμοκρασίας κύκλωμα του ψυκτικού, χρειάζεται συνεχής αναπλήρωση του D_2O . Σημαντική μείωση του κόστους μπορούμε να έχουμε αν ως ψυκτικό αντί του D_2O χρησιμοποιηθεί H_2O .



Σχήμα 3.8 Ο αντιδραστήρας SGHWR [1].

Ο σχεδιασμός SGHWR είναι παρόμοιος με αυτόν του CANDU, δηλαδή, το δοχείο της καρδιάς περιέχει τον επιβραδυντή, ο οποίος είναι D_2O και το διαπερνούν κατακόρυφα σωλήνες πίεσης (αυλοί, σχήμα 3.8). Στο

εσωτερικό των σωλήνων πίεσης τοποθετούνται οι συστάδες καυσίμου και ρέει το ψυκτικό.

Οι ουσιαστικές διαφορές μεταξύ του SGHWR και του CANDU είναι:

- το ψυκτικό στους σωλήνες πίεσης είναι ελαφρό νερό.
- Η παραγωγή ατμού πραγματοποιείται στην καρδιά του αντιδραστήρα με βρασμό του ψυκτικού στους σωλήνες πίεσης
- Οι σωλήνες πίεσης είναι κατακόρυφοι.
- Το καύσιμο είναι εμπλουτισμένο ($e \approx 2,2\%$).

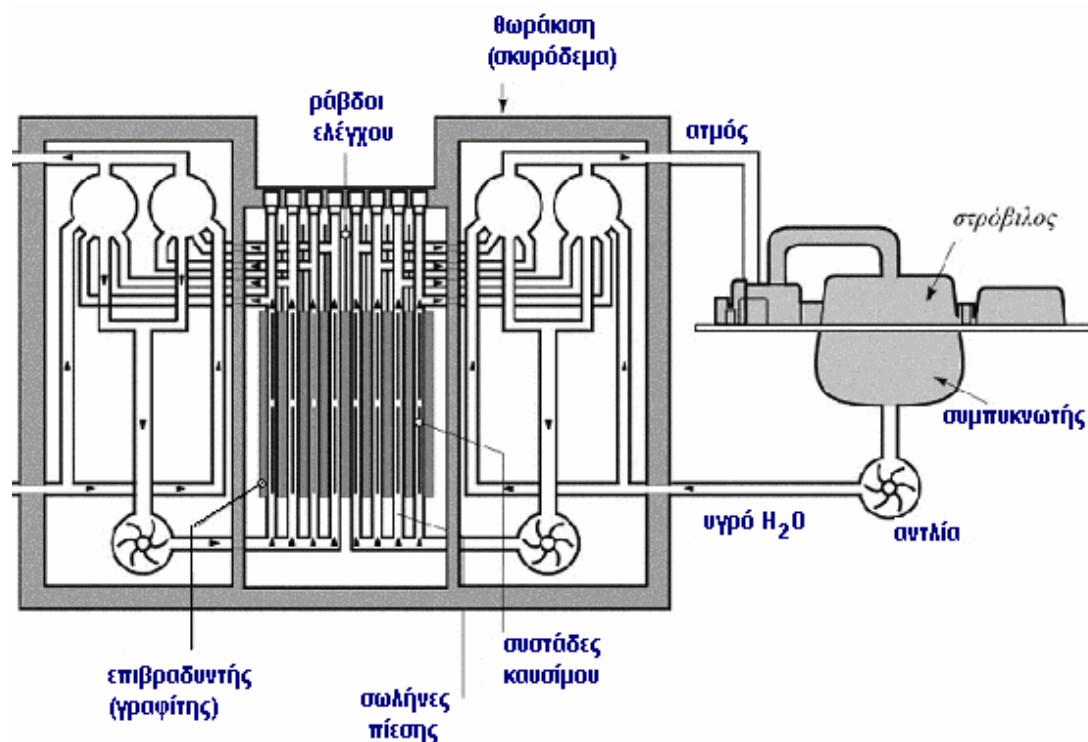


Εικόνα 3.5 Ο αντιδραστήρας SGHWR στο Winfrith της Αγγλίας [7].

Αυτός ο τύπος αντιδραστήρα αναπτύχθηκε στην Αγγλία. Λίγοι αντιδραστήρες SGHWR λειτουργούν σήμερα. Ο σημαντικότερος αυτού του τύπου ήταν ο αντιδραστήρας που βρισκόταν στο Winfrith της Αγγλίας και είχε ισχύ 100MW. Λειτουργήσε με επιτυχία από το 1967 έως το 1990. Η λειτουργία του διακόπηκε για οικονομικούς λόγους οπότε και ελήφθη η πολιτική απόφαση εγκατάστασης των ήδη ανεπτυγμένων αντιδραστήρων LWR στην Αγγλία.

3.6 ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΓΡΑΦΙΤΗ-ΥΔΑΤΟΣ

Ένα ακόμη βήμα για τη διατήρηση των πλεονεκτημάτων του συστήματος πολλαπλών σωλήνων πίεσης, με ταυτόχρονη αποφυγή του κόστους του D_2O , αποτελεί ο αντιδραστήρας RBMK, ο οποίος αναπτύχθηκε στην πρώην Σοβιετική Ένωση. Ο RBMK είναι καταρχήν παρόμοιος με τον SGHWR (σχήμα 3.9). Η βασική διαφορά τους είναι ότι ο RBMK χρησιμοποιεί γραφίτη ως επιβραδυντή. Ο γραφίτης είναι γενικά παντού διαθέσιμος, φτηνός, και η τεχνολογία του απλή. Ο γραφίτης διαπερνάται από σωλήνες πίεσης. Το ψυκτικό που ρέει στους σωλήνες πίεσης, όπου βρίσκονται οι ράβδοι καυσίμου, είναι H_2O . Τυπική ηλεκτρική ισχύς τέτοιων αντιδραστήρων είναι 1000 MW. Το καύσιμο είναι UO_2 , με εμπλουτισμό $e \approx 1,8\%$. Οι αντιδραστήρες αυτοί δεν διαθέτουν δοχείο εγκλωβισμού.



Σχήμα 3.9 Σχηματικό διάγραμμα αντιδραστήρα γραφίτη-νερού τύπου RBMK [1].



Εικόνα 3.6 Ο αντιδραστήρας RBMK Ignalina στη Λιθουανία δυναμικότητας 1300MW ηλεκτρικής ισχύος (έκλεισε το 2009) [7].

3.7 ΑΕΡΙΟΨΥΚΤΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΜΕ ΕΠΙΒΡΑΔΥΝΤΗ ΓΡΑΦΙΤΗ

3.7.1 Γενικά

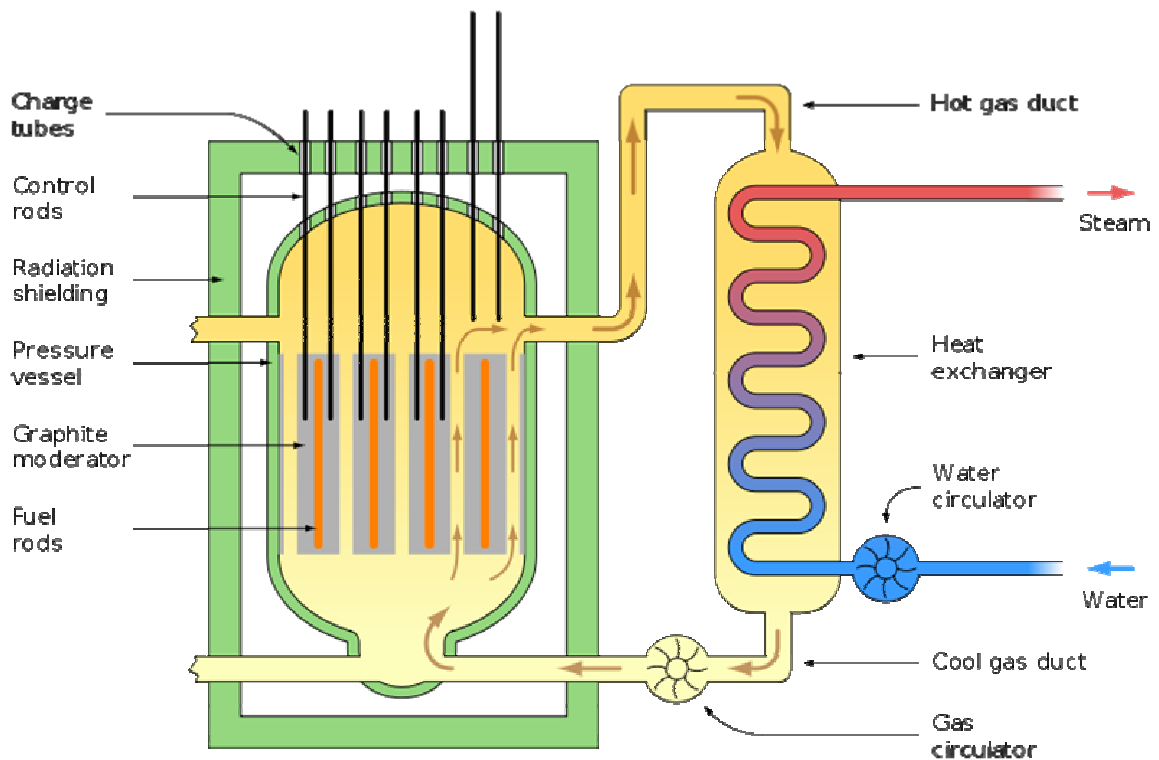
Ο γραφίτης έχει λόγο επιβράδυνσης μεγαλύτερο από το H_2O και μικρότερο από το D_2O . Αυτό σημαίνει ότι είναι καλύτερος επιβραδυντής από το H_2O και χειρότερος από το D_2O . Το κίνητρο για τη χρησιμοποίηση γραφίτη αντί του D_2O είναι το χαμηλό κόστος, η διαθεσιμότητα και η σχετικά απλή τεχνολογία του γραφίτη. Λόγω της μικρής διατομής απορρόφησης νετρονίων του γραφίτη είναι η δυνατή η συγκρότηση αντιδραστήρα γραφίτη-φυσικού ουρανίου με λόγο μετατροπής πολύ μεγαλύτερο από τους αντιδραστήρες ελαφρού νερού, οι οποίοι χρησιμοποιούν εμπλουτισμένο ουράνιο. Το αποτέλεσμα είναι

σημαντικά μεγαλύτερη παραγωγή Pu-239 στους αντιδραστήρες γραφίτη-ουρανίου σε σχέση με τους LWR.

Οι αεριοψυκτοί αντιδραστήρες με επιβραδυντή γραφίτη (gas-cooled, graphite-moderated reactors, GCR) είναι αντιδραστήρες έμμεσου κύκλου με επιβραδυντή γραφίτη και αέριο ψυκτικό.

3.7.2 Ο Αντιδραστήρας MAGNOX

Οι πρώτοι πυρηνικοί αντιδραστήρες ισχύος στον κόσμο, οι αντιδραστήρες τύπου MAGNOX, ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία και λειτούργησαν στην Αγγλία με σχεδίαση επικεντρωμένη στην παραγωγή πλουτωνίου και παράλληλο προϊόν την ηλεκτρική ενέργεια. Αντιδραστήρες τύπου MAGNOX αναπτύχθηκαν και στη Γαλλία με το ίδιο σκεπτικό.



Σχήμα 3.10 Σχηματικό διάγραμμα αντιδραστήρα MAGNOX. Ο εναλλάκτης θερμότητας βρίσκεται έξω από τη θερμική θωράκιση [3].

- Το ψυκτικό των MAGNOX είναι CO_2 και το καύσιμο είναι μεταλλικό ουράνιο (φυσικό ουράνιο με $e=0,7\%$), σε ράβδους με περίβλημα από κράμα μαγνησίου (από όπου και το όνομα του αντιδραστήρα). Η σχεδίαση των MAGNOX υπήρξε εξαιρετικά συντηρητική (χαμηλές θερμοκρασίες ψυκτικού, χαμηλές πιέσεις

κ.τ.λ.) δεδομένου ότι ήταν οι πρώτοι πυρηνικοί αντιδραστήρες ισχύος. Αποτέλεσμα της συντηρητικής σχεδίασης είναι ότι ξεπέρασαν κατά πολύ τον προβλεπόμενο χρόνο λειτουργίας, απόσβεσαν το κεφάλαιο εγκατάστασης και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια πολύ χαμηλού κόστους. Το 2003 ήταν συνδεδεμένοι στο ηλεκτρικό δίκτυο της Μεγάλης Βρετανίας 16 τέτοιοι αντιδραστήρες που παρήγαγαν συνολικά ηλεκτρική ισχύ 2684MW. Η ικανότητα επιβράδυνσης του γραφίτη είναι κατά μία τάξη μεγέθους μικρότερη από την ικανότητα επιβράδυνσης του H₂O. Συνεπώς χρειάζεται πολύ μεγαλύτερος όγκος γραφίτη από ότι νερού για την επιβράδυνση των νετρονίων.



Εικόνα 3.7 Ο πυρηνικός σταθμός Magnox στο Chapelcross της Σκωτίας [7].

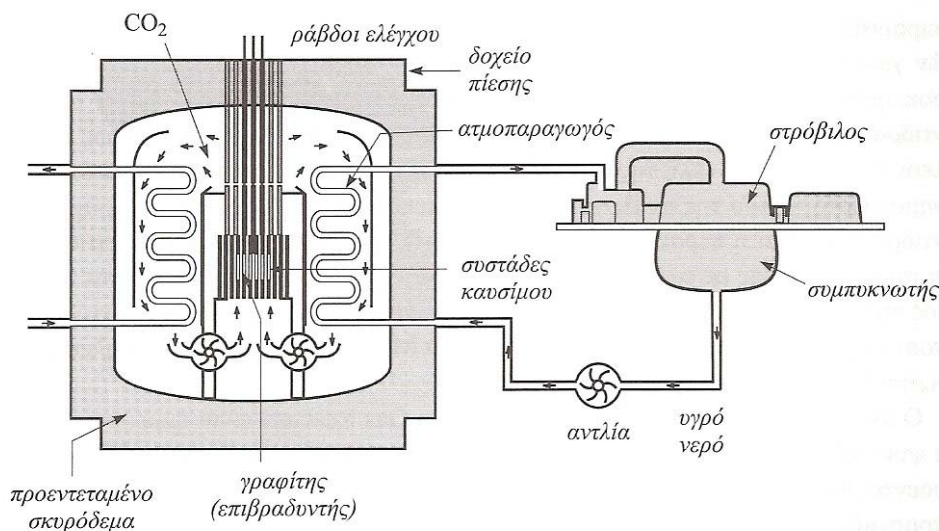
Οι συνέπειες του μεγάλου όγκου των αντιδραστήρων γραφίτη είναι:

- Δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστούν σε εργοστάσιο και να μεταφερθούν. Συναρμολογούνται στον τόπο εγκατάστασης.
- Μεγάλο κόστος αντιδραστήρα.
- Η τεράστια θερμοχωρητικότητα της μεγάλης μάζας του επιβραδυντή αποτελεί σημαντικό στοιχείο που ενισχύει την ασφάλεια. Το κύριο πλεονέκτημα των αέριων ψυκτικών είναι ότι δεν αλλάζουν φάση. Άρα, δεν υπάρχουν τα σημαντικά προβλήματα

ασφάλειας που παρουσιάζει η εύκολη μετάβαση του νερού από την υγρή στην αέρια φάση. Άμεσο αποτέλεσμα είναι η δυνατότητα επίτευξης υψηλών θερμοκρασιών εξόδου του ψυκτικού γεγονός που έχει σαν συνέπεια την επίτευξη και υψηλών βαθμών απόδοσης.

3.7.3 Ο Αντιδραστήρας AGR

Ο προηγμένος αεριοψυκτος αντιδραστήρας (Advanced Gas-Cooled Reactor, AGR) αναπτύχθηκε στην Αγγλία και αποτελεί εξέλιξη του MAGNOX. Όπως και στον MAGNOX ο επιβραδυντής είναι γραφίτης και το ψυκτικό είναι CO₂. Ο αντιδραστήρας AGR είναι έμμεσου κύκλου. Το ψυκτικό, από την έξοδο της καρδιάς, οδηγείται στην είσοδο των ατμοπαραγωγών μονάδων όπου μεταφέρεται θερμότητα από το ψυκτικό στο H₂O του δευτερεύοντος και παράγεται ατμός ο οποίος οδηγείται στον ατμοστρόβιλο. Το ψυκτικό από την έξοδο των ατμοπαραγωγών μονάδων επιστρέφει στην καρδιά του αντιδραστήρα. Ολόκληρο το πρωτεύον κύκλωμα είναι εγκλωβισμένο σε δοχείο πίεσης από προεντεταμένο σκυρόδεμα για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας διαρροής ραδιενέργειας.



Σχήμα 3.11 Ο αντιδραστήρας AGR [1].

Το καύσιμο (δισκία UO₂ με εμπλουτισμό e=2,3%) περιέχεται σε ράβδους καυσίμου με περίβλημα από ανοξείδωτο χάλυβα. Η καρδιά συγκροτείται από πλίνθους γραφίτη οι οποίοι έχουν οπή κατά τον άξονά τους και τοποθετούνται ο ένας πάνω στον άλλο. Μέσα σε κάθε οπή

τοποθετούνται οι συστάδες του καυσίμου οι οποίες φέρουν κυλινδρικό περίγυλιμα από γραφίτη. Σχηματίζεται έτσι ένα κανάλι ψυκτικού. Με την επανάληψη τέτοιων καναλιών σχηματίζεται η καρδιά του αντιδραστήρα. Τυπική ηλεκτρική ισχύς ενός αντιδραστήρα AGR είναι 600MW. Στην καρδιά ενός AGR περιέχονται περίπου 120 τόνοι ουρανίου και 1250 τόνοι γραφίτη.

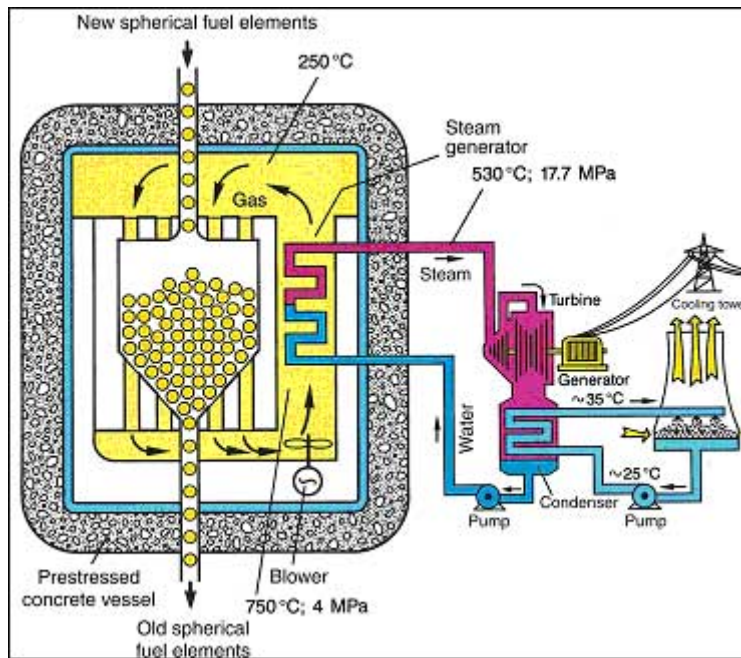


Εικόνα 3.8 Ο αντιδραστήρας AGR Hunterston B στη Σκωτία [7].

Αντιδραστήρες AGR λειτουργούν μόνο στη Μεγάλη Βρετανία και είναι συνολικά 14 με ολική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ 8380MW.

3.7.4 Ο Αντιδραστήρας HTGR

Ο αερίψυκτος αντιδραστήρας υψηλής θερμοκρασίας (high temperature gas-cooled reactor, HTGR) είναι έμμεσου κύκλου με ψυκτικό το αδρανές αέριο ήλιο και επιβραδυντή γραφίτη. Το πρωτεύον κύκλωμα περιέχεται σε δοχείο από προεντεταμένο σκυρόδεμα όπως και στον AGR. Έχει πολλές ομοιότητες με τον AGR, διαφέρει όμως ριζικά και από τον AGR και από όλους τους άλλους αντιδραστήρες στη μορφή του καυσίμου.



Σχήμα 3.12 Σχηματικό διάγραμμα του αντιδραστήρα HTGR [3].

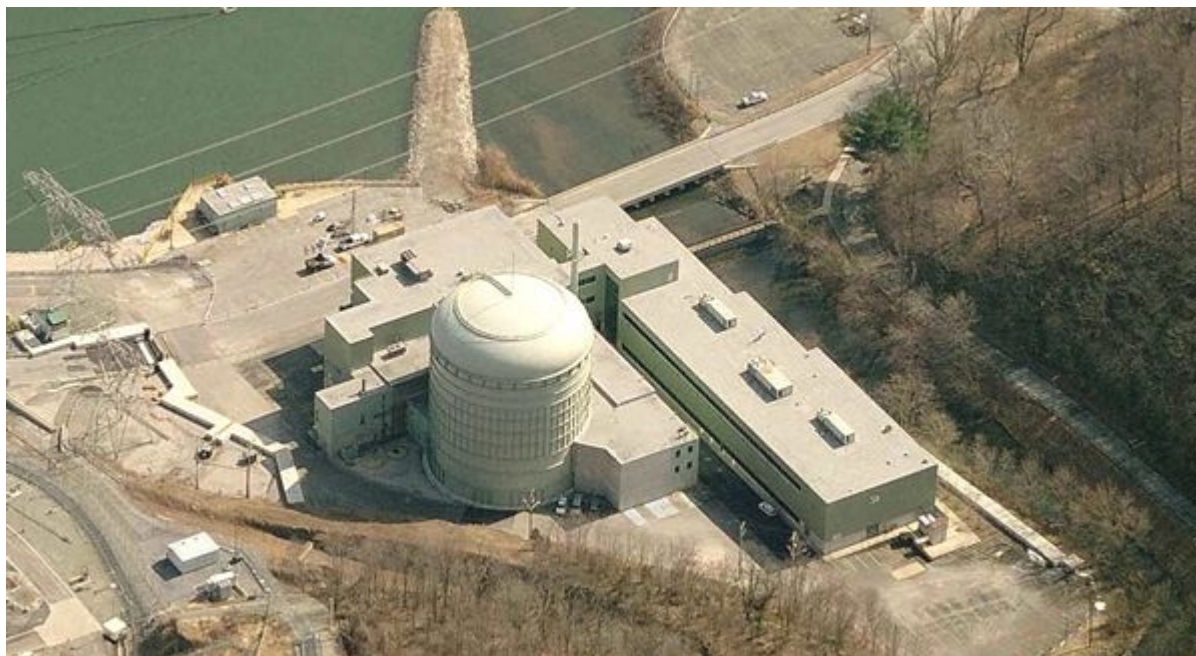
Το σχάσιμο υλικό (UO_2 ή UC) με πολύ υψηλό εμπλουτισμό σε $U-235$ (περίπου 93%) είναι μικρό σφαιρίδιο διαμέτρου 100 έως 400 μm καλυμμένο με διάφορες επιστρώσεις πάχους από 50 έως 60 μm . Η πρώτη επίστρωση είναι από πορώδη γραφίτη. Εκεί εγκλωβίζονται τα αέρια προϊόντα της σχάσης και ακόμη, λόγω συγκρούσεων, σε αυτό το στρώμα μειώνεται η κινητική ενέργεια των θραυσμάτων της σχάσης. Η δεύτερη επίστρωση είναι από πυρολυτικό γραφίτη μεγάλης πυκνότητας και αποτελεί το πρώτο δοχείο πίεσης του σφαιριδίου. Συγκρατεί δηλαδή τα αέρια προϊόντα της σχάσης και την υψηλή πίεση που αναπτύσσεται από τα αέρια αυτά. Δεν συγκρατεί όμως με μεγάλη επιτυχία τα μεταλλικά προϊόντα της σχάσης. Αυτός είναι ο σκοπός ύπαρξης του επόμενου στρώματος από καρβίδιο του πυριτίου. Το εξωτερικό στρώμα από πυρολυτικό γραφίτη αποτελεί το τελικό δοχείο πίεσης του σφαιριδίου.

Αυτή η δομή του σφαιριδίου παρέχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Επιτρέπει τη λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Επιτρέπει τη μεγάλη εκμετάλλευση του καυσίμου
- Εξασφαλίζει εξαιρετικά μικρή πιθανότητα διαρροής των προϊόντων της σχάσης από τα σφαιρίδια.

Εκτός από τα σφαιρίδια του σχάσιμου υλικού ($U-235$) υπάρχουν και τα σφαιρίδια γόνιμου υλικού ($Th-232$) με παρόμοια δομή. Τα σφαιρίδια σχάσιμου και γόνιμου υλικού συγκολλώνται με συγκολλητικό υλικό το γραφίτη σε ράβδους καυσίμου. Δεκαπέντε τέτοιες ράβδοι περιέχονται σε κάθε μία από τις οπές που υπάρχουν κατά μήκος του άξονα της συστάδας για την τοποθέτηση του καυσίμου και τη δίοδο (αυλό) του ψυκτικού. Η συστάδα είναι πλίνθος γραφίτη που εκτός από

δομικό στοιχείο αποτελεί ταυτόχρονα και τον επιβραδυντή. Οκτώ συστάδες τοποθετημένες η μία πάνω στην άλλη συνιστούν μία εξαγωνική κολώνα καυσίμου-επιβραδυντή. Επαναλαμβάνοντας αυτές τις κολώνες, τη μία δίπλα στην άλλη σχηματίζεται η καρδιά του αντιδραστήρα με το καύσιμο, τον επιβραδυντή και τους αυλούς του ψυκτικού.



Εικόνα 3.9 Αντιδραστήρας HTGR στην Πενσυλβάνια των Η.Π.Α [7].

Τα πλεονεκτήματα του αντιδραστήρα HTGR είναι:

- Συγκράτηση των προϊόντων της σχάσης στα σφαιρίδια του καυσίμου. Το ψυκτικό είναι έτσι πρακτικά καθαρό από ραδιενεργά προϊόντα της σχάσης.
- Το αδρανές αέριο ήλιο δεν απορροφά νετρόνια και έτσι δεν γίνεται ραδιενεργό.
- Μοναδικό δομικό υλικό της καρδιάς είναι ο γραφίτης του οποίου η αντοχή αυξάνεται με τη θερμοκρασία.
- Το ήλιο που χρησιμοποιείται ως ψυκτικό είναι χημικά αδρανές και βρίσκεται στον αντιδραστήρα μόνο στην αέρια φάση.
- Η σχετικά χαμηλή πίεση (περίπου 50 atm) του ψυκτικού σε συνδυασμό με κατάλληλο σχεδιασμό του δοχείου πίεσης μπορεί να δώσει εξαιρετικά μικρή πιθανότητα εμφάνισης ατυχήματος απώλειας ψυκτικού. Το ατύχημα αυτό θα μελετηθεί εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια.
- Είναι καταρχήν δυνατό να χρησιμοποιηθεί ο HTGR σε μονάδα άμεσου κύκλου. Στην περίπτωση αυτή το ήλιο (πρακτικά καθαρό από ραδιενέργεια, σε αντίθεση με τον ατμό των αντιδραστήρων

νερού) θα οδηγηθεί από την έξοδο της καρδιάς κατευθείαν στους αεριοστροβίλους.

Αυτός ο τύπος αντιδραστήρα θεωρείται σήμερα ως ένας εκ των «ασφαλών αντιδραστήρων νέας γενιάς» και είναι υποψήφιος για ανάπτυξη.

3.8 ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΤΑΧΕΩΝ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ

3.8.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, αναπαραγωγικοί ονομάζονται οι αντιδραστήρες που παράγουν περισσότερο σχάσιμο υλικό από όσο καταναλώνουν, δηλαδή έχουν $CR > 1$. Η σημαντική παράμετρος στους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες είναι ο χρόνος διπλασιασμού στον αντιδραστήρα, D_R . Αυτός ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται ο αντιδραστήρας για να παράγει ποσότητα σχάσιμου υλικού, επιπλέον αυτής που χρειάζεται ο ίδιος για τη συνεχή λειτουργία του, ίση προς την αρχική ποσότητα σχάσιμου υλικού του αντιδραστήρα. Ποσότητα δηλαδή ικανή για τη συνέχιση της λειτουργίας του και επιπλέον αυτής για την παραγωγή του σχάσιμου υλικού που απαιτείται για να αρχίσει να λειτουργεί ένας άλλος ίδιος αντιδραστήρας.

Οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες θα έχουν αξιόλογη συμβολή στη λύση του ενεργειακού προβλήματος αν ο χρόνος D_R είναι περίπου ίσος με το χρόνο διπλασιασμού της ζήτησης ενέργειας στη σύγχρονη κοινωνία. Ο τελευταίος είναι της τάξης των 10 με 15 έτη περίπου. Ο χρόνος D_R εξαρτάται από το λόγο αναπαραγωγής και από άλλες παραμέτρους όπως είναι η ισχύς του αντιδραστήρα, η θερμική απόδοση κ.α. Για θερμικό αντιδραστήρα με U-233 και Th-232 και με $CR=1,05$ υπολογίζεται ότι $D_R \approx 46$ έτη. Ακόμη, αναπαραγωγή με καύσιμο U-235 ή Pu-239 σε θερμικό αντιδραστήρα δεν είναι δυνατή. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η κατασκευή αναπαραγωγικού θερμικού αντιδραστήρα δεν αποτελεί πρόταση με πρακτικό ενδιαφέρον.

Για αναπαραγωγικό αντιδραστήρα, που παράγει περισσότερο σχάσιμο υλικό από όσο καταναλώνει, απαιτείται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, μεγάλος συντελεστής η του καυσίμου, οπότε και μεγάλος αριθμός ν των νετρονίων που προκύπτουν ανά σχάση. Δεδομένου ότι οι σχάσεις με ταχέα νετρόνια δίνουν μεγαλύτερο ν από ότι οι σχάσεις με θερμικά, οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες σχεδιάζονται έτσι, ώστε τα περισσότερα από τα ταχέα νετρόνια να μην θερμοποιούνται, να παραμένουν ταχέα και το μεγαλύτερο ποσοστό των σχάσεων να

πραγματοποιείται με ταχέα νετρόνια. Ονομάζονται γι' αυτό αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων (Fast Breeder Reactor, FBR). Επίσης, για αυτούς τους αντιδραστήρες επελέγη ως σχάσιμο υλικό το Pu-239 διότι έχει μεγαλύτερο ν από τα άλλα σχάσιμα υλικά. Δεδομένου όμως ότι η διατομή σχάσης του Pu-239 με ταχέα νετρόνια είναι μικρή, απαιτείται μεγάλος εμπλουτισμός.

Στους σύγχρονους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων που ψύχονται με υγρό νάτριο υπολογίζεται ότι είναι πραγματοποιήσιμος λόγος αναπαραγωγής περίπου ίσος με 1,2. Ο χρόνος διπλασιασμού σε τέτοιο αντιδραστήρα εκτιμάται ότι είναι περίπου 10 με 15 έτη. Μελετάται τέλος αντιδραστήρας ταχέων νετρονίων με καύσιμο U-233 και ψυκτικό αέριο ήλιο. Το ήλιο επιβραδύνει πολύ λιγότερο και απορροφά πολύ λιγότερα νετρόνια από ότι το υγρό νάτριο, οπότε υπολογίζεται ότι σε αυτούς τους αντιδραστήρες ο λόγος αναπαραγωγής μπορεί να φτάσει το 1,4.



Εικόνα 3.10 Ο αντιδραστήρας Superphenix στη Γαλλία. Ο μεγαλύτερος αντιδραστήρας τύπου FBR στον κόσμο με παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ 1200MW [7].

3.8.2 Ο Αντιδραστήρας LMFBR

Στους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων-υγρού μετάλλου (Liquid Metal Fast Breeder Reactors, LMFBR) ο εμπλουτισμός είναι 20% ως 25%. Από την ανυπαρξία επιβραδυντή (αφού επιδιώκεται η αποφυγή της επιβράδυνσης των νετρονίων) προκύπτει πυκνή και μικρή καρδιά του αντιδραστήρα. Η καρδιά του PFR (Prototype Fast Reactor, Σκωτία, έχει τεθεί εκτός λειτουργίας) είναι κύβος πλευράς 1 m περίπου. Ο μικρός όγκος της καρδιάς συνεπάγεται μεγάλες διαρροές νετρονίων έξω από την καρδιά. Περιβάλλεται λοιπόν η καρδιά με επίστρωμα (blanket) από U-238, το οποίο με την απορρόφηση νετρονίου μετασχηματίζεται τελικά σε Pu-239.

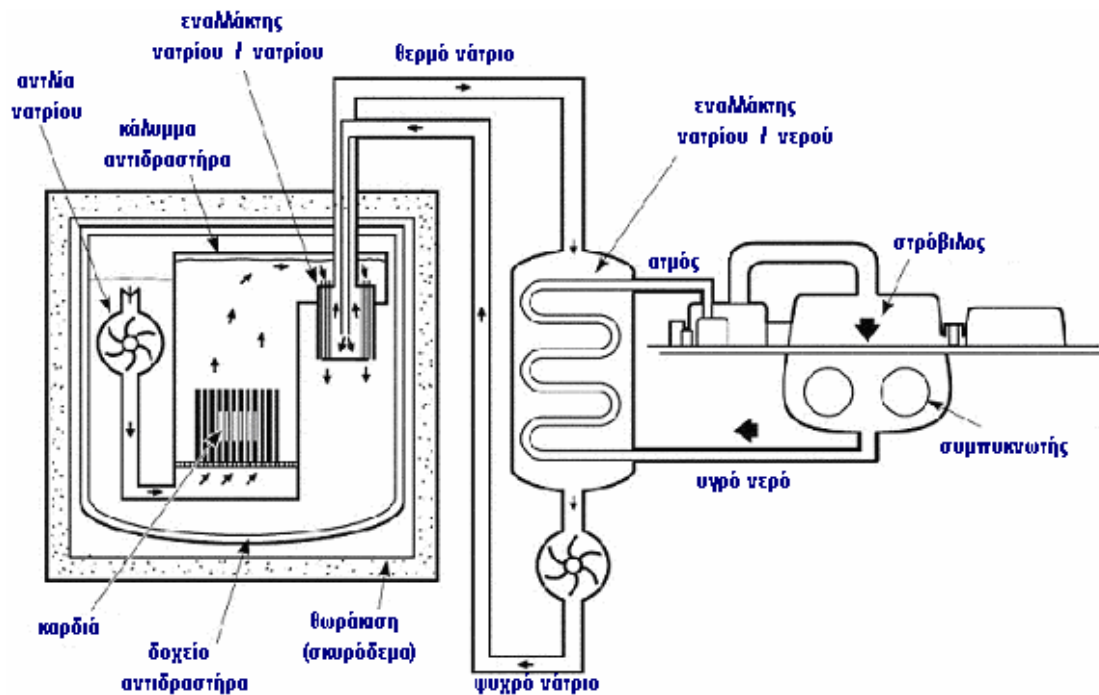
Άλλη συνέπεια του μικρού όγκου είναι η μεγάλη πυκνότητα ισχύος: η θερμική ισχύς στο ένα κυβικό μέτρο της καρδιάς του PFR είναι 600 MW. Χρειάζεται λοιπόν ψυκτικό με αντίστοιχη ικανότητα απαγωγής της θερμότητας. Και στις τρεις χώρες (Αγγλία, Γαλλία, ΕΣΣΔ) στις οποίες αναπτύχθηκαν οι αντιδραστήρες αυτοί, επελέγη το ίδιο ψυκτικό, υγρό νάτριο για τους παρακάτω λόγους:

- Ως μέταλλο έχει καλές ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας.
- Είναι υγρό σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες
- Επιτρέπει τη λειτουργία του κυκλώματος ψυκτικού σε χαμηλές πιέσεις.

Ο ανεξάρτητος σχεδιασμός στις τρεις αυτές χώρες κατέληξε πρακτικά στον ίδιο τύπο αντιδραστήρα. Στη συνέχεια θα περιγραφεί ο PFR.

Το καύσιμο είναι μίγμα UO_2 και PuO_2 στη γνωστή μορφή δισκίων τοποθετημένων σε λεπτές (για την καλύτερη μεταφορά θερμότητας) ράβδους καυσίμου εξωτερικής διαμέτρου 5,84mm. Το περίβλημα της ράβδου είναι από ανοξείδωτο χάλυβα και το μήκος της είναι 2,25m. Στη ράβδο του καυσίμου, μόνο το μεσαίο μέρος, μήκους 914 mm, περιέχει δισκία σχάσιμου υλικού. Πάνω και κάτω από την περιοχή σχάσιμου υλικού της ράβδου, βρίσκονται δισκία του γόνιμου υλικού (U-238). Σχηματίζεται έτσι επίστρωμα γόνιμου υλικού πάνω και κάτω από την καρδιά. Η συστάδα του καυσίμου περιέχει 325 ράβδους καυσίμου σε περιτύλιγμα από ανοξείδωτο χάλυβα.

Το περιτύλιγμα της συστάδας αποτελεί και οδηγό του ψυκτικού υγρού νατρίου, το οποίο ρέει γύρω από τις ράβδους του καυσίμου. Με την επανάληψη των συστάδων σχηματίζεται η καρδιά του αντιδραστήρα. Αυτή χωρίζεται σε δύο ζώνες. Η εσωτερική έχει 30 συστάδες με εμπλουτισμό 20% και η εξωτερική έχει 48 συστάδες με εμπλουτισμό 25%. Η εξωτερική ζώνη της καρδιάς περιβάλλεται από ζώνη με συστάδες που περιέχουν U-238. Σχηματίζεται έτσι το επίστρωμα γόνιμου υλικού και κατά την ακτίνα της καρδιάς.



Σχήμα 3.13 Σχηματικό διάγραμμα αναπαραγωγικού αντιδραστήρα ταχέων νετρονίων με ψυκτικό υγρό νάτριο [1].

Από τις χημικές ιδιότητες του νατρίου προκύπτει σχεδόν μονοσήμαντα ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα (σχήμα 3.13), εξ ου και ο πανομοιότυπος σχεδιασμός στις τρεις χώρες που έχει αναπτυχθεί. Το νάτριο είναι εξαιρετικά δραστικό. Αναφλέγεται αν έλθει σε επαφή με τον αέρα και αντιδρά βίαια με το νερό. Πρέπει λοιπόν να αποκλειστεί η επαφή νατρίου και νερού στο πρωτεύον κύκλωμα του ψυκτικού. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να επιφέρει ατύχημα απώλειας του ψυκτικού. Το υγρό νάτριο από την έξοδο της καρδιάς (θερμοκρασία 562°C) οδηγείται στο πρωτεύον εναλλάκτη θερμότητας νατρίου-προς-νάτριο. Εκεί, μεταφέρει θερμότητα στο δευτερεύον κύκλωμα νατρίου του εναλλάκτη και, από την έξοδο του εναλλάκτη, επιστρέφει στην είσοδο της καρδιάς με θερμοκρασία 400°C. Το δευτερεύον θερμό νάτριο, από την έξοδο του εναλλάκτη, οδηγείται σε αμοπαγωγό μονάδα, όπου με τη μεταφορά της θερμότητας σε νερό παράγεται ατμός. Από κει και πέρα το κύκλο είναι τυπικό: στροβιλογεννήτρια, συμπυκνωτής κ.τ.λ.

Τόσο στον PFR στη Σκωτία όσο και στον σχεδόν παρόμοιο αντιδραστήρα Phenix2 της Γαλλίας υπήρξαν επανειλημμένες διαρροές νερού στις αμοπαγωγές μονάδες, και εκρήξεις από την επαφή ύδατος και υγρού νατρίου, με αποτέλεσμα τη βλάβη των μονάδων αυτών και τη διακοπή της λειτουργίας του αντιδραστήρα. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, το πρωτεύον κύκλωμα νατρίου παρέμεινε ανέπαφο και σε καμιά περίπτωση δεν υπήρξε θέμα ασφάλειας του αντιδραστήρα.



Εικόνα 3.11 Ο αντιδραστήρας PFR στο Dounreay της Σκωτίας [7].

Στον PFR υπάρχουν τρία ανεξάρτητα κυκλώματα πρωτεύοντος-δευτερεύοντος νατρίου (στο σχήμα εμφανίζεται μόνο το ένα από αυτά), ώστε αν για κάποιο λόγο διακοπεί η λειτουργία του ενός, να συνεχίσει η καρδιά να ψύχεται από τα άλλα δύο. Ολόκληρο το πρωτεύον κύκλωμα (η καρδιά, οι τρεις ενδιάμεσοι εναλλάκτες θερμότητας και οι αντίστοιχες αντλίες) είναι βυθισμένο σε τεράστια δεξαμενή υγρού Νατρίου, η οποία ευρίσκεται υπό σχεδόν-ατμοσφαιρική πίεση και περιέχεται σε δοχείο από ανοξείδωτο χάλυβα. Η τεράστια θερμοχωρητικότητα της δεξαμενής μπορεί να απορροφήσει μεγάλες ποσότητες θερμότητας, κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων ή ακόμα και ατυχημάτων. Ακόμα και στην απίθανη περίπτωση αποτυχίας όλων των αντλιών του πρωτεύοντος κυκλώματος, η φυσική κυκλοφορία του υγρού νατρίου, σε συνδυασμό με τη μεγάλη θερμοχωρητικότητα της δεξαμενής, εξασφαλίζει ασφαλή ψύξη της καρδιάς μετά το μηδενισμό της ροής νετρονίων, όπως αποδείχθηκε στην πράξη με σχετικά πειράματα στον PFR.

4. ΘΕΡΜΟΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Θερμοϋδραυλική ανάλυση (thermal-hydraulics analysis) ονομάζεται η θεωρία που έχει σαν αντικείμενο τη μελέτη της απαγωγής θερμότητας από τον πυρηνικό αντιδραστήρα, προς περαιτέρω εκμετάλλευσή της. Ένα πολύ σημαντικό θέμα στην ανάλυση της καρδιάς ενός πυρηνικού αντιδραστήρα είναι ο υπολογισμός των βέλτιστων παραμέτρων της ροής του ψυκτικού. Υψηλές τιμές της παροχής του ψυκτικού οδηγούν από τη μία πλευρά σε καλύτερες τιμές των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας ενώ από την άλλη πλευρά έχουν σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη πτώση πίεσης κατά μήκος της καρδιάς με αποτέλεσμα την απαίτηση αντλιών μεγαλύτερης ισχύος. Έτσι, ο ρόλος της υδροδυναμικής και θερμοϋδραυλικής ανάλυσης της καρδιάς του αντιδραστήρα είναι η εύρεση των κατάλληλων συνθηκών λειτουργίας με γνώμονα την ασφαλή και οικονομική λειτουργία του πυρηνικού σταθμού.

Η ενέργεια που απελευθερώνεται από την πυρηνική σχάση εμφανίζεται αρχικά ως κινητική ενέργεια των προϊόντων της σχάσης και τελικά ως θερμότητα στα στοιχεία πυρηνικού καυσίμου. Η θερμότητα αυτή πρέπει να απομακρυνθεί από τον πυρήνα του αντιδραστήρα και να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.

Οι βασικοί στόχοι του σχεδιασμού του πυρήνα του αντιδραστήρα είναι η επίτευξη:

- Υψηλής πυκνότητας ισχύος (με σκοπό την ελαχιστοποίηση του μεγέθους του πυρήνα).
- Υψηλής ειδικής ισχύος (με σκοπό την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης πυρηνικού καυσίμου).
- Υψηλής θερμοκρασίας εξόδου του ψυκτικού (με σκοπό την μεγιστοποίηση της θερμοδυναμικής απόδοσης).

Ο σχεδιασμός του πυρήνα και η θερμοϋδραυλική ανάλυσή του υπόκεινται επίσης σε κάποιους πολύ σημαντικούς περιορισμούς. Οι περιορισμοί είναι οι εξής:

- Η θερμοκρασία του πυρήνα πρέπει να παραμένει χαμηλότερη από τις θερμοκρασίες τήξης των συνιστωσών του πυρήνα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα στοιχεία καυσίμου.
- Υπάρχουν όρια στο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας από το καύσιμο στο ψυκτικό. Αν ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας γίνει πολύ

μεγάλος υπάρχει ο κίνδυνος να έχουμε κρίσιμη μεταφορά θερμότητας που θα οδηγήσει σε εμφάνιση ατμών. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την τοπική υπερθέρμανση σε διάφορα σημεία του περιβλήματος του πυρήνα.

- Η πτώση πίεση του ψυκτικού κατά μήκος του πυρήνα πρέπει να διατηρείται χαμηλή ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι αντλητικές απαιτήσεις καθώς και οι διατμητικές τάσεις στα διάφορα εξαρτήματα του πυρήνα.

Οι παραπάνω περιορισμοί πρέπει να εξετάζονται σε όλη τη διάρκεια ζωής του αντιδραστήρα. Επιπλέον, επειδή οι ενεργές διατομές των νετρονίων εξαρτώνται ισχυρά από τη θερμοκρασία, υπάρχει μία σημαντική αλληλοεξάρτηση της θερμοϋδραυλικής και της νετρονικής συμπεριφοράς του πυρήνα του αντιδραστήρα.

Στη συνέχεια θα σκιαγραφήσουμε το πρόβλημα της θερμοϋδραυλικής ανάλυσης ενός πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος.

Δεδομένα:

- Ο τύπος του αντιδραστήρα και συνεπώς οι βασικές συνιστώσες του: πυρηνικό καύσιμο (είδος και εμπλουτισμός), φάσμα νετρονίων των σχάσεων (ταχεία ή θερμικά), επιβραδυντής, ψυκτικό μέσο, κύκλος (έμμεσος ή άμεσος), γεωμετρία.
- Η απαιτούμενη καθαρή ηλεκτρική ισχύς.
- Οι βασικές θεωρητικές παραδοχές για τη μελέτη και την ανάλυση των εμπλεκόμενων φυσικών φαινομένων και διαδικασιών, στη μόνιμη κατάσταση.

Ζητούμενα:

- Οι βασικές γεωμετρικές διαστάσεις.
- Η ποσότητα (κρίσιμη μάζα) του πυρηνικού καυσίμου.
- Οι θερμοκρασίες των συνιστωσών της κατασκευής (πυρηνικό καύσιμο, περίβλημα του καυσίμου, ψυκτικό μέσο κ.τ.λ.).
- Η παροχή του ψυκτικού μέσου, μέσα από τον πυρήνα του πυρηνικού αντιδραστήρα.

Οι αναγκαίες φυσικές σταθερές. Είναι ουσιαστικά οι θερμοφυσικές ιδιότητες των εμπλεκόμενων στην κατασκευή υλικών:

- Νετρονικές, συμπεριλαμβανομένων των ενεργών διατομών των διάφορων αντιδράσεων.
- Θερμοδυναμικές ιδιότητες.
- Ιδιότητες Μεταφοράς.
- Ιδιότητες αντοχής, από τις οποίες περιορίζονται και οι μέγιστες επιτρεπτές θερμοκρασίες στο σύστημα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές των περισσότερων, αν όχι όλων, των αναγκαίων για τους υπολογισμούς φυσικών σταθερών εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του συστήματος, η οποία, ταυτόχρονα, αποτελεί και ζητούμενο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα θεμελιωδών για τους

υπολογισμούς φυσικών σταθερών που εξαρτώνται άμεσα και ισχυρά από τη θερμοκρασία, είναι οι 4 παράγοντες οι οποίοι διαμορφώνουν την τιμή του συντελεστή πολλαπλασιασμού νετρονίων του απείρου συστήματος.

Συνεπώς γίνεται προφανές ότι:

- Οι τιμές των αναγκαίων για τους υπολογισμούς φυσικών σταθερών, που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του συστήματος, αποτελούν παραμετρικά δεδομένα που εξαρτώνται από την ίδια τη λύση του προβλήματος.
- Το γεγονός αυτό είναι ένας από τους λόγους που οδηγεί μονοσήμαντα στην ανάγκη της υιοθέτησης μιας τεχνικής επαναληπτικής διαδικασίας μέχρι σύγκλισης, για την επίλυση του προβλήματος.



Εικόνα 4.1 Το θερμοϋδραυλικό κύκλωμα του ΕΜΠ με εργαζόμενο μέσο νερό στο οποίο είναι δυνατή η πλήρης προσομοίωση της θερμοϋδραυλικής συμπεριφοράς του ψυκτικού κατά την ψύξη μιας από τις ράβδους του πυρήνα ενός πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος σε όλες τις συνθήκες διαφασικής ροής νερού-ατμού, σε πιέσεις έως 7 bar [9].

4.2 ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η πυκνότητα της παραγόμενης θερμικής ισχύος από το πυρηνικό καύσιμο, σε ένα υποθετικό σύστημα με μονοενεργειακά νετρόνια, παρέχεται από τη σχέση:

$$q_f = F \cdot E_{σχ}$$

όπου F είναι ο ρυθμός σχάσεων ανά μονάδα όγκου (σε $s^{-1} \cdot m^{-3}$), $E_{σχ}$ είναι η ενέργεια που παράγεται από μία σχάση (σε J) και η πυκνότητα της θερμικής ισχύος, q_f , υπολογίζεται σε W/m^3 .

Ο ανά μονάδα όγκου του συστήματος ρυθμός σχάσεων δίνεται από τη σχέση:

$$F = \sigma_f \cdot N \cdot \Phi$$

όπου σ_f είναι η ενεργός διατομή σχάσης (σε cm^2), N είναι η πυκνότητα των σχάσιμων πυρήνων (σε cm^{-3}) και Φ είναι η ροή νετρονίων (σε $cm^{-2} \cdot s^{-1}$).

Η ροή νετρονίων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Phi = n \cdot v$$

όπου n είναι η πυκνότητα των νετρονίων (σε cm^{-3}) και v είναι η ταχύτητα των νετρονίων (σε cm/s).

Τελικά η πυκνότητα της παραγόμενης θερμικής ισχύος στο πυρηνικό καύσιμο δίνεται από τη σχέση:

$$q_f = \sigma_f \cdot N \cdot \Phi \cdot E_{σχ}$$

Από τη σχέση αυτή υπολογίζεται η απαραίτητη πυκνότητα νετρονίων στο σύστημα, ώστε να παράγεται η επιθυμητή θερμική ισχύς.

Η συνολική παραγόμενη θερμική ισχύς στο πυρηνικό καύσιμο του αντιδραστήρα είναι:

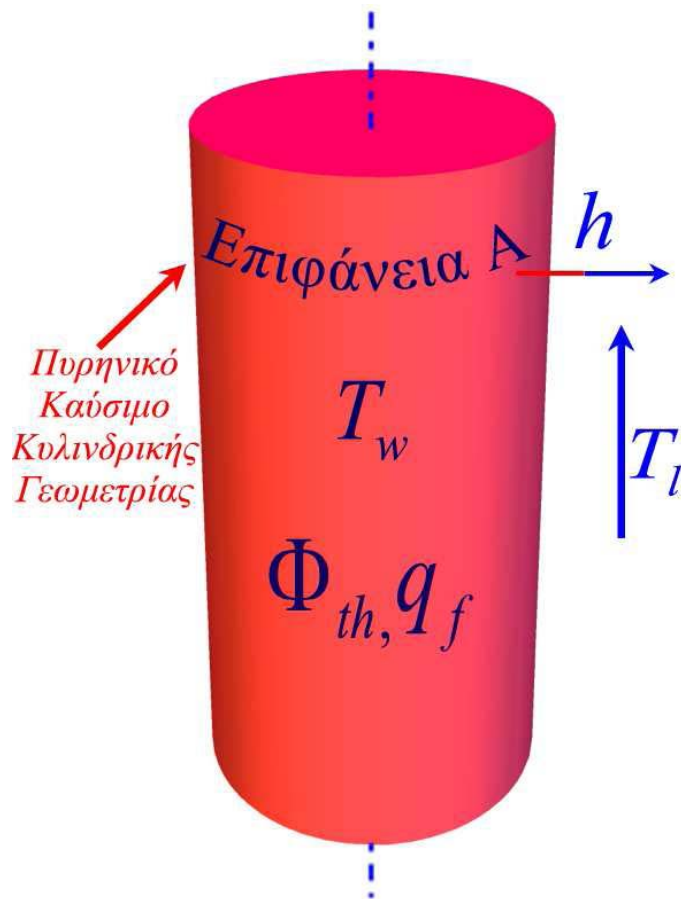
$$Q_f = q_f \cdot V_f$$

όπου V_f ο όγκος του πυρηνικού καυσίμου (σε m^3) και η συνολική ισχύς υπολογίζεται σε W.

Η απαγόμενη θερμική ισχύς από τη ράβδο του πυρηνικού καυσίμου δίνεται από τη σχέση:

$$Q = h \cdot (T_l - T_c) \cdot A$$

όπου h είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή, T_l η θερμοκρασία της ράβδου, T_c η θερμοκρασία του ψυκτικού και A η επιφάνεια της ράβδου (σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Σχηματική απεικόνιση της παραγόμενης και απαγόμενης θερμικής ισχύος από ράβδο πυρηνικού καυσίμου [9].

Η αύξηση της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας του ψυκτικού είναι αμελητέα, συνεπώς όλη η θερμότητα που μεταφέρεται από το πυρηνικό καύσιμο στο ψυκτικό χρησιμοποιείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του τελευταίου. Η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να εκφραστεί μέσω της αύξησης της ενθαλπίας του ψυκτικού:

$$P = \dot{m} \cdot \Delta h$$

όπου P είναι ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας (σε Watt), \dot{m} η παροχή μάζας του ψυκτικού (σε Kg/s) και Δh η αύξηση της ενθαλπίας του ψυκτικού (σε J/Kg) κατά τη δίοδο αυτού μέσα από τον πυρήνα.

Θεωρώντας την ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση, C_p , του ψυκτικού πρακτικά σταθερή στο εύρος θερμοκρασιών που μας ενδιαφέρει και ακόμη αν θεωρήσουμε ότι δεν συμβαίνει βρασμός του ψυκτικού η μεταβολή της ενθαλπίας γράφεται: $\Delta h = C_p \cdot \Delta T$ όπου ΔT είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του ψυκτικού.

Τελικά η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$P = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

4.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΨΥΚΤΙΚΟΥ

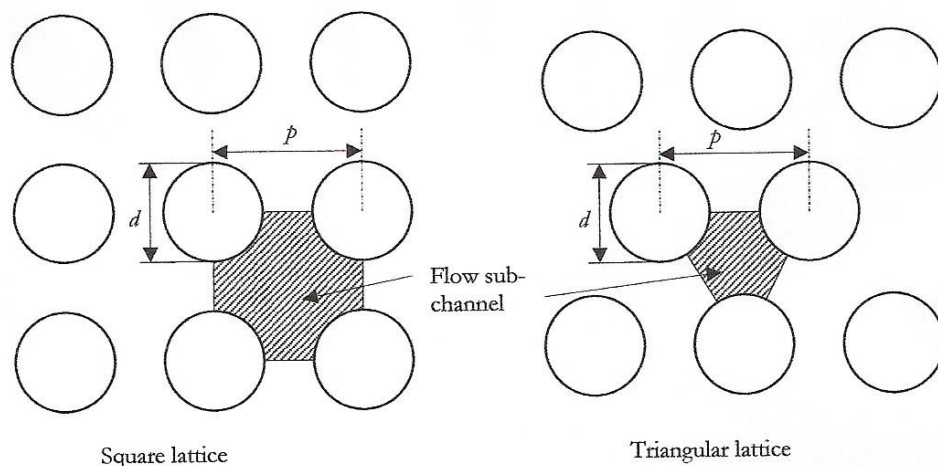
Οι δέσμες των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου στους πυρηνικούς αντιδραστήρες έχουν συνήθως ιδιαίτερα πολύπλοκη δομή. Συνεπώς, μία πλήρης θερμο-υδραυλική ανάλυση απαιτεί πολύ περίτεχνες υπολογιστικές τεχνικές. Γενικά, υπάρχουν πολλά επίπεδα προσεγγίσεων που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη της ανάλυσης:

- Απλή μονοδιάστατη ανάλυση ενός απλού υπο-καναλιού (subchannel).
- Ανάλυση ολόκληρης της δέσμης των ράβδων του καυσίμου χρησιμοποιώντας την ανάλυση των υπο-καναλιών.
- Τρισδιάστατη ανάλυση με χρήση της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (computational fluid dynamics, CFD).

Στην απλούστερη προσέγγιση το υπο-κάνάλι ροής του ψυκτικού αντιμετωπίζεται σαν ένας μονοδιάστατος αγωγός με διάμετρο ίση με την υδραυλική διάμετρο του υπο-καναλιού. Η υδραυλική διάμετρος ενός καναλιού οποιουδήποτε σχήματος ορίζεται ως:

$$D = \frac{4A}{P_w}$$

όπου A είναι το εμβαδόν της διατομής και P_w είναι η ισοδύναμη περίμετρος του καναλιού.



Σχήμα 4.2 Τυπικά υπο-κάνάλια ροής ψυκτικού σε δέσμες ράβδων πυρηνικού καυσίμου [5].

Για το τετραγωνικό και το τριγωνικό πλέγμα η υδραυλική διάμετρος υπολογίζεται με χρήση της παραπάνω σχέσης και του σχήματος 4.2. Το εμβαδόν για κάθε περίπτωση είναι:

$$A = p^2 - \frac{\pi d^2}{4} \quad \text{για τετραγωνικό πλέγμα}$$

$$A = \frac{\sqrt{3}}{4} p^2 - \frac{\pi d^2}{8} \quad \text{για τριγωνικό πλέγμα}$$

όπου οι παράμετροι p , d του πλέγματος ορίζονται μέσω του σχήματος 4.2.

Επίσης για κάθε περίπτωση η ισοδύναμη περιμέτρος είναι:

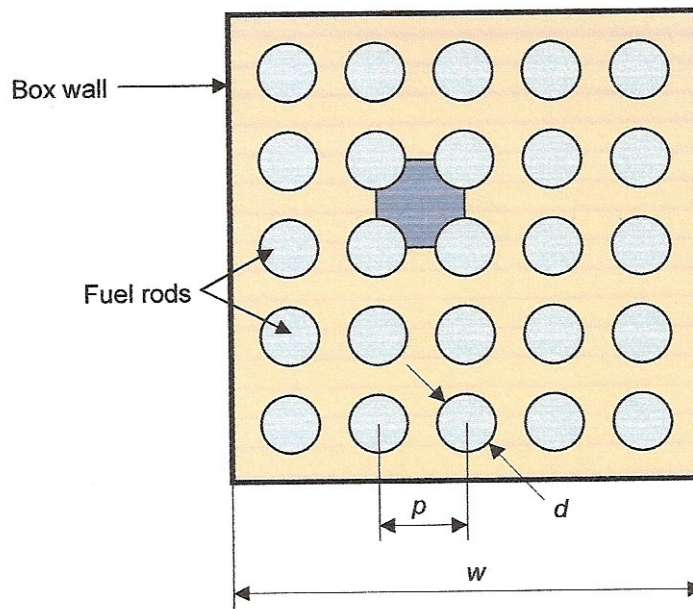
$$P_w = \pi d \quad \text{για τετραγωνικό πλέγμα}$$

$$P_w = \frac{1}{2} \pi d \quad \text{για τριγωνικό πλέγμα}$$

Τελικά η υδραυλική διάμετρος για τα δύο αυτά βασικά πλέγματα είναι:

$$D = d \left[\frac{4}{\pi} \left(\frac{p}{d} \right)^2 - 1 \right] \quad \text{για τετραγωνικό πλέγμα}$$

$$D = d \left[\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left(\frac{p}{d} \right)^2 - 1 \right] \quad \text{για τριγωνικό πλέγμα}$$



Σχήμα 4.3 Διατομή της δέσμης των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου σε έναν BWR [5].

Στην περίπτωση του πλέγματος των ράβδων καυσίμου ενός BWR (σχήμα 4.3) η υδραυλική διάμετρος δίνεται από τη σχέση:

$$D = \frac{4A}{P_w} = \frac{4w^2 - N\pi d^2}{4w + N\pi d}$$

όπου N είναι το πλήθος των ράβδων στο πλέγμα.

4.4 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h που καθορίζει την απαγωγή της θερμότητας που παράγεται στη ράβδο του πυρηνικού καυσίμου από το ψυκτικό εξαρτάται ισχυρά από τις συνθήκες ροής του ψυκτικού.

Μονοφασική ροή

Ο συντελεστής h (σε $W/m^2 \cdot K$) υπολογίζεται από τον αδιάστατο αριθμό Nusselt μέσω της σχέσης:

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{D}$$

όπου Nu είναι ο αριθμός Nusselt, λ είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ψυκτικού (σε $W/m \cdot K$) και D είναι η υδραυλική διάμετρος.

Για στρωτή ροή είναι: $Nu=4,364$ [5]. Για τυρβώδη ροή ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται από τη σχέση Dittus-Boelter [5]:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

όπου Pr είναι ο αριθμός Prandtl και Re είναι ο αριθμός Reynolds. Η παραπάνω σχέση ισχύει για $Re > 10^4$ και $0,7 < Pr < 2500$. Οι αδιάστατοι αριθμοί Prandtl και Reynolds ορίζονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

και

$$Re = \frac{\rho \cdot \nu \cdot L}{\mu}$$

όπου $\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ είναι ο συντελεστής θερμικής διάχυσης και ακόμη:

ρ: πυκνότητα (σε Kg/m^3)

c_p : ειδική θερμότητα (σε $J/Kg \cdot K$)

$\nu = \mu/\rho$: κινηματικό ιξώδες (σε m^2/s)

μ : δυναμικό ιξώδες (σε $Pa \cdot s$)

ν : ταχύτητα ρευστού (σε m/s)

L : η χαρακτηριστική γραμμική διάσταση

Διφασική ροή

Διφασική ροή έχουμε όταν το ψυκτικό μέσο αλλάζει φάση με παίρνοντας θερμότητα από την καρδιά του αντιδραστήρα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος όπου ένα μέρος του ψυκτικού νερού βράζει οπότε έχουμε κυκλοφορία μίγματος νερού-ατμού.

Μία εκτίμηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας h στην περίπτωση της διφασικής ροής μπορεί να γίνει μέσω της σχέσης που προτάθηκε από τον Rasohin [5]:

$$h = \begin{cases} 5,5 \cdot p^{0,25} (\dot{q})^{2/3} & \text{για } 0,1 < p \leq 8 \\ 0,577 \cdot p^{1,33} (\dot{q})^{2/3} & \text{για } 8 < p < 20 \end{cases}$$

όπου p είναι η πίεση (σε MPa) και \dot{q} είναι η ροή θερμότητας (σε W/m^2).

Ροή Υγρού Μετάλλου

Εξαιτίας της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας των υγρών μετάλλων σε σχέση με το νερό και τα αέρια ο υπολογισμός των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας διαφέρει πολύ. Η ακόλουθη σχέση έχει προταθεί από τον Dwyer [5]:

$$Nu = 6,66 + 3,126 \cdot \frac{p}{d} + 1,184 \left(\frac{p}{d} \right)^2 + 0,0155 (\Psi \cdot Pe)^{0,86}$$

$$\text{όπου } \Psi = 1 - \frac{0,942 \left(\frac{p}{d} \right)^{1,4}}{\text{Pr} \cdot \left(\frac{\text{Re}}{10^3} \right)^{1,281}}$$

και Pe είναι ο αδιάστατος αριθμός Peclet που ορίζεται από τη σχέση:

$$Pe = \text{Re} \cdot \text{Pr} = \frac{D\nu\rho c_p}{\lambda}$$

Η εξίσωση του Dwyer για τον αριθμό Nusselt είναι έγκυρη για $\frac{p}{d} > 1,35$.

Για τετραγωνικά πλέγματα πυκνής διάταξης χρησιμοποιείται και η εξής απλούστερη σχέση για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt:

$$Nu = 0,48 + 0,0133 \cdot Pe^{0,70}$$

4.5 ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΣΗΣ

Ο υπολογισμός της πτώσης πίεσης στον πυρήνα του πυρηνικού αντιδραστήρα είναι πολύ σημαντικός γιατί επηρεάζει καθοριστικά την κατανομή της ροής στα υποκανάλια και επιπλέον η ολική πτώση πίεσης στο κύκλωμα του ψυκτικού είναι απαραίτητο να είναι γνωστή ώστε να υπολογιστεί η απαιτούμενη αντλητική ισχύς.

Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί οι οποίοι προκαλούν πτώση της πίεσης κατά τη ροή του ψυκτικού μέσα στον αντιδραστήρα. Οι σημαντικότεροι είναι:

- Ιξώδης τριβή.
- Τοπικές απώλειες στην είσοδο και στην έξοδο του πυρήνα.
- Απώλειες λόγω υψομετρικών διαφορών.

Σε ένα κανάλι σταθερού εμβαδού διατομής η ολική πτώση πίεσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta p_{ολ} = \Delta p_{i\xi} + \Delta p_{\tau} + \Delta p_{\upsilon\psi}$$

Η απώλεια πίεσης λόγω του ιξώδους καθορίζεται, όπως είναι γνωστό, σε μεγάλο βαθμό από το συντελεστή τριβής, C_f . Η σχέση που τη δίνει είναι η εξής:

$$\Delta p_{i\xi} = 4C_f \frac{L}{D} \cdot \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right)$$

όπου

L: μήκος καναλιού

D: υδραυλική διάμετρος

ρ : πυκνότητα ψυκτικού

u: ταχύτητα ψυκτικού

Για στρωτή ροή ο συντελεστής τριβής υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$C_f = a \cdot \text{Re}^{-b}$$

όπου a , b είναι σταθερές οι οποίες για στρωτή ροή σε σωλήνα είναι ίσες με 16 και 1 αντίστοιχα. Για τυρβώδη ροή οι σταθερές a, b εξάγονται πειραματικά.

Αντίστοιχα, οι τοπικές απώλειες καθορίζονται από τους συντελεστές τοπικών απωλειών, ξ , μέσω της σχέσης:

$$\Delta p_{\tau} = \xi \cdot \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right)$$

Οι συντελεστές τοπικών απωλειών εξαρτώνται ισχυρά από τη γεωμετρία και συνήθως υπολογίζονται πειραματικά. Τυπική εξάρτηση των συντελεστών τοπικών απωλειών από τον αριθμό Reynolds δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\xi = a + b \cdot \text{Re}^{-c}$$

όπου a , b , c είναι σταθερές.

4.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΙ ΚΩΔΙΚΕΣ ΣΤΗ ΘΕΡΜΟΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ

Από τα πρώτα χρόνια της ανάπτυξης της πυρηνικής τεχνολογίας χρησιμοποιήθηκαν υπολογιστικοί κώδικες για την υποστήριξη της μελέτης του σχεδιασμού και της ασφάλειας των πυρηνικών εγκαταστάσεων. Οι αιτίες γι' αυτό είναι βασικά δύο. Από την μια μεριά η πυρηνική τεχνολογία είναι ένα διεπιστημονικό πεδίο όπου υπάρχει ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ πολλών διαφορετικών επιστημονικών αντικειμένων (π.χ. φυσική νετρονίων, μεταφορά θερμότητας, διαστικές ροές, χημεία κ.α.). Από την άλλη μεριά η πυρηνική βιομηχανία έχει, όπως είναι φυσικό, θέσει πολύ υψηλούς στόχους όσον αφορά τη λειτουργική ασφάλεια των πυρηνικών σταθμών κάτι που σημαίνει ότι απαιτείται πολύ μεγάλη ακρίβεια στην εκτίμηση και τον υπολογισμό των συνθηκών λειτουργίας.

Οι υπολογιστικοί κώδικες που χρησιμοποιούνται σήμερα ταξινομούνται στις παρακάτω ομάδες:

- *Κώδικες προσομοίωσης αντιδραστήρων.* Χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μελέτη της συμπεριφοράς των νετρονίων του αντιδραστήρα (διάχυση νετρονίων, υπολογισμοί ενεργών διατομών κ.α.) και περιέχουν και κάποια στοιχεία θερμοϋδραυλικής ανάλυσης. Παραδείγματα τέτοιων υπολογιστικών πακέτων είναι τα: POLCA, SIMULATE, PHOENIX και CASMO.
- *Κώδικες κινητικής αντιδραστήρων.* Παράδειγμα κώδικα αυτής της κατηγορίας είναι ο PARCS ο οποίος επιλύει την εξίσωση διάχυσης των νετρονίων σε τρισδιάστατη καρτεσιανή γεωμετρία και υπολογίζει την χρονοεξαρτώμενη ροή νετρονίων. Χρησιμοποιείται ακόμη στην ανάλυση ατυχημάτων σε LWR.
- *Θερμοϋδραυλικοί κώδικες.* Χρησιμοποιούνται για την ανάλυση του ατυχήματος απώλειας ψυκτικού. Υπάρχει μία μεγάλη ποικιλία τέτοιων υπολογιστικών πακέτων εν χρήσει στην πυρηνική τεχνολογία. Τα πιο γνωστά είναι το RELAP5 και το TRAC.
- *Θερμοϋδραυλικοί κώδικες ανάλυσης καυσίμου.* Χρησιμοποιούν μέσες τιμές των μεγεθών της ροής θερμότητας για να υπολογίσουν πτώσεις πίεσης και μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη μεταφορά μάζας, ορμής και ενέργειας. Παραδείγματα τέτοιων κωδίκων είναι οι COBRA, VIPRE, THYC, BUNDLE και MONA-3.

- *Κώδικες ατυχημάτων.* Χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της εξέλιξης διαφόρων πυρηνικών ατυχημάτων. Παραδείγματα τέτοιων κωδίκων είναι ο MELCOR και ο SCDAP/RELAP5.

4.7 ΤΟ ΑΤΥΧΗΜΑ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΨΥΚΤΙΚΟΥ

Κάθε αστοχία η οποία μπορεί να μειώσει τη ροή ψυκτικού σε έναν αντιδραστήρα μπορεί να έχει πολύ σοβαρές συνέπειες σε όλο τον πυρηνικό σταθμό. Το χειρότερο ατύχημα που θα μπορούσε να συμβεί είναι η ολική αποκοπή του μεγαλύτερου σωλήνα ψυκτικού ο οποίος είναι απευθείας συνδεδεμένος με το δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα. Στην περίπτωση αυτή έχουμε το λεγόμενο ατύχημα απώλειας ψυκτικού (loss of coolant accident, LOCA) που αν δεν αντιμετωπιστεί έγκαιρα μπορεί να οδηγήσει σε τήξη τμήματος του πυρήνα ή και όλου του αντιδραστήρα. Το ατύχημα απώλειας ψυκτικού είναι το σοβαρότερο ατύχημα, η δε ελαχιστοποίηση της πιθανότητας να συμβεί και ο περιορισμός των συνεπειών του αποτελεί τη βάση του σχεδιασμού οποιουδήποτε αντιδραστήρα.

Αξίζει να αναφερθεί ότι το LOCA είναι γνωστό και με το όνομα «σύνδρομο της Κίνας» από την ομώνυμη κινηματογραφική ταινία του 1979, η οποία είχε σαν θέμα την εμφάνιση LOCA σε έναν αντιδραστήρα στις Η.Π.Α. και την ανάπτυξη τεράστιων θερμοκρασιών που έχουν σαν αποτέλεσμα την τήξη του εδάφους και του εσωτερικού της Γης. Τελικά, το ατύχημα αυτό φτάνει να επηρεάσει ακόμη και την Κίνα που για τους Αμερικανούς είναι «η άλλη πλευρά του κόσμου». Φυσικά, το σενάριο αυτό είναι τελείως εξωπραγματικό.

Μόλις διαγνωσθεί LOCA δίνεται εντολή στο σύστημα ελέγχου του αντιδραστήρα να βυθιστούν οι ράβδοι ελέγχου στον πυρήνα ώστε το σύστημα να καταστεί υποκρίσιμο και να περιοριστεί η παραγωγή θερμότητας από τις σχάσεις του πυρηνικού καυσίμου. Όμως ένα υπολογίσιμο ποσό θερμότητας, που ονομάζεται αποθηκευμένη θερμότητα (store heat) παραμένει στον πυρήνα αφού δεν είναι δυνατόν να απαχθεί από αυτόν. Επίσης συνεχίζει να παράγεται θερμότητα λόγω των σχάσεων και των άλλων ραδιενεργών διασπάσεων που συνεχίζουν να συμβαίνουν στον πυρήνα. Η θερμότητα αυτή ονομάζεται παραμένουσα θερμότητα (decay heat).

Η παραγόμενη ισχύς στον πυρήνα του πυρηνικού αντιδραστήρα μετά τη βύθιση όλων των ράβδων ελέγχου είναι φυσικά φθίνουσα συνάρτηση του χρόνου και εξαρτάται αφενός από το χρόνο συνεχούς λειτουργίας πριν συμβεί το ατύχημα και αφετέρου από τη μέγιστη πυκνότητα της παραγόμενης ισχύος κατά την κανονική λειτουργία του.

Αμέσως μετά από τη διακοπή της λειτουργίας του αντιδραστήρα ο οποίος έχει λειτουργήσει για αρκετό χρονικό διάστημα πριν τη διακοπή, η παραγόμενη θερμική ισχύς είναι πάνω από το 7% της αντίστοιχης παραγόμενης θερμικής ισχύος κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του. Το ποσοστό παραγόμενης ισχύος μειώνεται μετά από 15 λεπτά στο 2%, μετά από μία ημέρα στο 0,4% ενώ μετά από μία εβδομάδα πέφτει στο 0,2%. Η σχέση που δίνει προσεγγιστικά την πυκνότητα της παραγόμενης θερμικής ισχύος συναρτήσει του χρόνου μετά τη βύθιση των ράβδων ελέγχου είναι:

$$\frac{p(t)}{p_N} = 0,15 \cdot e^{-0,1t}$$

όπου:

$p(t)$ η πυκνότητα παραγόμενης θερμικής ισχύος τη χρονική στιγμή t μετά τη βύθιση των ράβδων ελέγχου,

p_N η πυκνότητα παραγόμενης θερμικής ισχύος κατά την κανονική λειτουργία και

t ο χρόνος που έχει μεσολαβήσει από τη βύθιση των ράβδων ελέγχου.

Η κυριότερη παράμετρος που πρέπει να ελεγχθεί όταν συμβεί LOCA είναι η θερμοκρασία των στοιχείων και του περιβλήματος του πυρηνικού καυσίμου. Κατά την κανονική λειτουργία η θερμοκρασία του περιβλήματος του πυρηνικού καυσίμου σε έναν LWR κυμαίνεται από 300° C έως 350°C. Όμως όταν συμβεί LOCA η αύξηση της θερμοκρασίας των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου είναι απότομη λόγω παραμένουσας και αποθηκευμένης θερμότητας και γίνεται με ρυθμό της τάξης των $10 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{s}$ με $30 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{s}$. Το οξειδίο του ουρανίου τήκεται στους 2840°C, ενώ ο ανοξειδωτος χάλυβας και το κράμα zircaloy, που αποτελούν υλικά του περιβλήματος στους 1400°C και 1800°C αντίστοιχα. Όμως ακόμη και σε θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες από αυτές, τα στοιχεία του πυρηνικού καυσίμου έχουν ήδη χάσει τη μηχανική τους αντοχή και είναι πολύ πιθανό να έχει ήδη συμβεί διαρροή ραδιενέργειας. Για αυτό σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς η μέγιστη θερμοκρασία του περιβλήματος του πυρηνικού καυσίμου δεν επιτρέπεται να ξεπεράσει τους 1204°C (2200°F).

Οι αερίψυκτοι αντιδραστήρες μπορούν να σχεδιαστούν με πραγματικά ασήμαντη πιθανότητα εμφάνισης ατυχήματος LOCA. Αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα των αερίψυκτων αντιδραστήρων σε σχέση με τους LWR.

Για την αντιμετώπιση του LOCA οι σύγχρονοι αντιδραστήρες είναι εφοδιασμένοι με εφεδρικά συστήματα ψύξης (emergency Core Cooling System, ECCS). Στόχος του συστήματος αυτού είναι η επανάψυξη (rewetting) των στοιχείων του πυρηνικού καυσίμου που

υπερθερμάνθηκαν ώστε να αποφευχθεί πιθανή τήξη του πυρήνα του αντιδραστήρα. Τα εφεδρικά συστήματα ψύξης εξετάζονται εκτενώς στο κεφάλαιο 5.

5. ΕΦΕΔΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Γενικά οι πυρηνικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι εφοδιασμένοι με περισσότερα τους ενός εφεδρικά συστήματα ψύξης. Τα εφεδρικά συστήματα ψύξης έχουν σκοπό την επανάψυξη των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου δηλαδή την αποκατάσταση πάνω στις ράβδους υγρού στρώματος ψυκτικού και την προώθηση αυτού του στρώματος σε όλο το μήκος των ράβδων. Τα εφεδρικά συστήματα ψύξης έχουν ως αποστολή τη συνεχή και αξιόπιστη ψύξη του πυρήνα οποτεδήποτε συμβεί κάποια δυσλειτουργία του κύριου συστήματος ψύξης.

Άλλα εφεδρικά συστήματα είναι σχεδιασμένα για την αντιμετώπιση μικρών διαρροών ψυκτικού και άλλα για την αντιμετώπιση LOCA. Υπάρχουν και συστήματα που δρουν ως συμπληρωματικά άλλων ενώ σε πολύ σοβαρά ατυχήματα είναι δυνατό να λειτουργούν ταυτόχρονα περισσότερα του ενός συστήματα. Τα εφεδρικά συστήματα ψύξης χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα ενεργητικά και τα παθητικά συστήματα.

Τα ενεργητικά συστήματα απαιτούν εξωτερική ισχύ για να λειτουργήσουν. Με την ανίχνευση και της παραμικρής διαρροής ενεργοποιούνται ακαριαία και τροφοδοτούν με νερό τον πυρήνα όταν η πίεση στο κύκλωμα είναι ακόμα υψηλή και υπάρχει επαρκής κυκλοφορία ψυκτικού.

Τα παθητικά συστήματα λειτουργούν αυτόματα χωρίς να απαιτούν εξωτερική ισχύ. Έτσι, μπορούν να δράσουν ακόμα και αν υπάρξει ολική απώλεια ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας κατά κύριο λόγο τη δύναμη της βαρύτητας (φυσική κυκλοφορία).

Τέλος, τα εφεδρικά συστήματα ψύξης ταξινομούνται βάσει του τρόπου επανάψυξης του πυρήνα σε συστήματα ψεκασμού από πάνω (top spraying) και συστήματα πλημμυρισμού από κάτω (bottom flooding).

5.2 ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Η λειτουργία των εφεδρικών συστημάτων ψύξης διέπεται από διεθνείς κανονισμούς. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι, σύμφωνα με την United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC) οι εξής:

- Η μέγιστη θερμοκρασία του περιβλήματος των στοιχείων καυσίμου δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 1204 °C.
- Η συνολική οξείδωση του περιβλήματος δεν πρέπει σε κανένα σημείο να ξεπερνά το 17% του αρχικού πάχους του περιβλήματος, πριν αυτό υποστεί οξείδωση.
- Το συνολικό ποσό του υδρογόνου που παράγεται από την αντίδραση του μετάλλου του περιβλήματος με το νερό (ή/και τον ατμό, σε περίπτωση διφασικής ροής) δεν πρέπει να ξεπερνά το 1% της θεωρητικά παραγόμενης ποσότητας υδρογόνου αν όλο το μέταλλο του περιβλήματος του πυρηνικού καυσίμου συμμετείχε στην αντίδραση.
- Οι αλλαγές που συμβαίνουν στη γεωμετρία του πυρήνα κατά τη φάση της επανάψυξης δεν πρέπει να λειτουργούν ανασταλτικά στην επαρκή ψύξη του πυρήνα.
- Μετά από κάθε επιτυχημένη λειτουργία του εφεδρικού συστήματος επανάψυξης, η θερμοκρασία του πυρήνα πρέπει να παραμένει σε επαρκώς χαμηλά επίπεδα, καθώς και να είναι δυνατή η απαγωγή της παραμένουσας θερμότητας για όλο το χρονικό διάστημα που καθορίζεται από το χρόνο παρουσίας ραδιενεργών αντιδράσεων στον πυρήνα.

5.3 ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΕΦΕΔΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το εφεδρικό σύστημα ψύξης αποτελείται από τρία ανεξάρτητα υποσυστήματα τα οποία λειτουργούν σε διαφορετικές πιέσεις. Τα υποσυστήματα αυτά είναι:

1. Οι συσσωρευτές νερού (accumulator injection system)

Το υποσύστημα αυτό αποτελείται από δύο ή περισσότερες ανεξάρτητες δεξαμενές που περιέχουν κρύο, εμπλουτισμένο με βόριο νερό σε πίεση 14 με 45 bar. Τα δοχεία αυτά είναι συνδεδεμένα μέσω βαλβίδων ελέγχου και σωλήνων είτε με το πρωτεύον σύστημα ψύξης και μέσω αυτού με το δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα είτε απευθείας με το δοχείο πίεσης. Αν η πίεση του κύριου συστήματος ψύξης μειωθεί κάτω από την πίεση των συσσωρευτών νερού, οι βαλβίδες ελέγχου ανοίγουν και μεγάλες ποσότητες νερού εμπλουτισμένου με βόριο οδηγούνται στον πυρήνα. Το βόριο είναι απορροφητής νετρονίων και εξασφαλίζει ότι ο αντιδραστήρας θα καταστεί υποκρίσιμος, δηλαδή θα «σβήσει».

2. Το σύστημα ψεκασμού υψηλής πίεσης (High pressure injection system, HPIS)

Το υποσύστημα αυτό επιτρέπει την άντληση νερού και την εισαγωγή του στο πρωτεύον κύκλωμα ψύξης σε πιέσεις περίπου 100 bar με σχετικά αργό ρυθμό. Η ύπαρξη μικρής διαρροής στο πρωτεύον

κύκλωμα ψύξης θα οδηγήσει σε μεσαίας κλίμακας πτώση πίεσης και θα ενεργοποιήσει τις αντλίες του HPIS για την αποκατάσταση της ροής του ψυκτικού.

3. Το σύστημα ψεκασμού χαμηλής πίεσης (Low pressure injection system, LPIS)

Αν η πίεση του συστήματος μειωθεί περαιτέρω εξαιτίας ενός LOCA, τίθεται σε λειτουργία το LPIS και εφοδιάζει τον αντιδραστήρα με βοριούχο νερό για μεγάλο διάστημα μετά και το άδειασμα των συσσωρευτών νερού. Κατά τη λειτουργία του LPIS το ψυκτικό νερό διέρχεται από εναλλάκτη προκειμένου να αποβάλει το ποσό θερμότητας που έχει απορροφήσει κατά τη διέλευσή του μέσα από τον πυρήνα. Έτσι ο αντιδραστήρας είναι εφοδιασμένος με ένα σύστημα που θα μπορεί να παραλαμβάνει την παραμένουσα θερμότητα ακόμα και σε μεγάλο χρονικό διάστημα μετά από LOCA. Πρέπει να σημειωθεί ότι το LPIS μπορεί να ψεκάσει νερό εξωτερικά του δοχείου πίεσης του αντιδραστήρα ώστε να συμπυκνώσει τον ατμό που έχει δημιουργηθεί εκεί από τη διαρροή ψυκτικού και την απότομη πτώση της πίεσης.

Ο συνδυασμός των τριών εφεδρικών συστημάτων ψεκασμού νερού μπορεί να ανταποκριθεί αποτελεσματικά σε πολλές διαφορετικές περιπτώσεις απώλειας ψυκτικού και αποσυμπίεσης του αντιδραστήρα.

5.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΕΦΕΔΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

5.4.1 Γενικά

Καταρχήν πρέπει να σημειωθεί ότι διακρίνουμε δύο κατηγορίες LOCA. Πρόκειται για το μεγάλης έκτασης (large break, LB) LOCA και το μικρής έκτασης (small break, SB) LOCA.

Κατά τη διάρκεια ενός LB LOCA ένας από τους σωλήνες προσαγωγής ψυκτικού στο δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα έχει τελείως διαρρηχθεί και έχουμε απώλεια ψυκτικού και από το σπασμένο σωλήνα. Αυτή η αστοχία αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως «double-ended guillotine break» ή ως αστοχία «200%». Επειδή αυτή η δυσλειτουργία πιστεύεται ότι αποτελεί το χειρότερο ατύχημα που θα μπορούσε να συμβεί σε έναν αντιδραστήρα έχει επιλεγεί σαν το ατύχημα με βάση το οποίο σχεδιάζονται τα εφεδρικά συστήματα ψύξης.

Αρχικά, όσον αφορά τις μελέτες ασφάλειας των πυρηνικών αντιδραστήρων η προσοχή όλων ήταν στραμμένη στη μελέτη του LB LOCA. Μετά όμως το ατύχημα Three Mile Island διαπιστώθηκε ότι μία μικρή βλάβη στο πρωτεύον κύκλωμα ψύξης είναι πολύ πιο πιθανή από μία μεγάλη βλάβη. Με τον όρο μικρή βλάβη εννοούμε τρύπα σε σωλήνα του κυκλώματος ψύξης αρκετά μικρού μεγέθους (διαμέτρου έως περίπου

12 εκατοστών) ώστε να μην υπάρξει αποσυμπίεση του συστήματος. Η κύρια διαφορά ενός SB LOCA από ένα LB LOCA είναι ότι στο πρώτο η πίεση μειώνεται σχετικά αργά.

5.4.2 Μεγάλης Έκτασης LOCA

Η ακολουθία των γεγονότων που συμβαίνουν σε ένα LB LOCA έχει ως εξής:

Φάση 1 (blowdown phase)

Όταν συμβεί αστοχία σε έναν από τους κύριους σωλήνες προσαγωγής ψυκτικού στο δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα, το ψυκτικό μέσο διαρρέει από το δοχείο πίεσης και το πρωτεύον κύκλωμα ψύξης, στο εξωτερικό του δοχείου πίεσης. Μετά από την άμεση αρχική αποσυμπίεση του δοχείου πίεσης του αντιδραστήρα ο ρυθμός πτώσης της πίεσης μειώνεται εξαιτίας της παρουσίας διφασικού μείγματος στο δοχείο πίεσης και στο πρωτεύον κύκλωμα ψύξης. Η απώλεια μάζας του ψυκτικού λόγω της διαρροής είναι σημαντικά μικρότερη λόγω ακριβώς της δημιουργίας διφασικού μείγματος. Μετά από περίπου 10 δευτερόλεπτα η πίεση έχει μειωθεί τόσο ώστε να αρχίσουν να λειτουργούν τα συστήματα HPIS και accumulator τα οποία παρέχουν νερό στο κύκλωμα του εφεδρικού συστήματος ψύξης.

Φάση 2 (bypass phase)

Με την εκκίνηση του HPIS και του accumulator υπάρχει μία σημαντική ανοδική ροή ατμού προς το κανάλι εισόδου το οποίο κατά την κανονική λειτουργία του αντιδραστήρα οδηγεί το νερό ψύξης στον πυθμένα του δοχείου πίεσης. Η φάση αυτή ξεκινά 20 περίπου δευτερόλεπτα μετά τη στιγμή που συμβαίνει η αρχική δυσλειτουργία και διαρκεί περίπου 10 δευτερόλεπτα. Η ροή αυτή εμποδίζει το ψυκτικό νερό που στέλνει το accumulator να φτάσει κάτω από τον πυρήνα και έτσι το νερό παρακάμπτει το κανάλι εισόδου και ρέει στους κλάδους του πρωτεύοντος συστήματος ψύξης έως ότου φτάσει στο σημείο που ο σωλήνας έχει διαρραγεί από όπου και εξέρχεται.

Φάση 3 (refill phase)

Η πλήρωση του κατώτερου τμήματος του δοχείου πίεσης του αντιδραστήρα ξεκινά μετά την περαιτέρω αποσυμπίεσή του, όταν η ροή του ατμού στο κανάλι εισόδου μειωθεί αρκετά ώστε να μην μπορεί πλέον να εμποδίσει την είσοδο του νερού στον πυρήνα του αντιδραστήρα. Η πλήρωση του πυρήνα με νερό ξεκινά 23 περίπου δευτερόλεπτα μετά τη στιγμή του ατυχήματος και διαρκεί περίπου 17 δευτερόλεπτα.

Φάση 4 (reflood phase)

Από τα πρώτα στάδια της πρώτης φάσης ο πυρήνας έχει στεγνώσει και η θερμοκρασία των στοιχείων του καυσίμου αυξάνεται πολύ γρήγορα

φτάνοντας τους 1000°C περίπου. Αυτό οδηγεί στην αλλοίωση των ιδιοτήτων των ράβδων και συνεπώς στην απελευθέρωση αερίων προϊόντων σχάσης τα οποία εξέρχονται από το σημείο διάρρηξης. Περίπου 40 δευτερόλεπτα μετά την εκδήλωση του ατυχήματος και αφού το κατώτερο τμήμα του αντιδραστήρα έχει πληρωθεί με νερό αρχίζει η τέταρτη φάση η οποία έχει σαν στόχο την επανάψυξη των ράβδων. Στη φάση αυτή η παροχή μάζας του νερού που εισέρχεται στο δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα είναι σταθερή ενώ μέρος του νερού ψύξης υπερχειλίζει και εγκαταλείπει το δοχείο πίεσης από το σημείο της διάρρηξης.

Φάση 5 (long-term cooling)

Μετά από χρόνο μεγαλύτερο των 250 δευτερολέπτων ενεργοποιείται το LPIS, το οποίο διοχετεύει νερό στον πυρήνα. Κατά τη φάση αυτή, ατμός ίσως συνεχίζει να δημιουργείται στον πυρήνα και να εξέρχεται από το σημείο διάρρηξης. Ο ατμός αυτός συμπυκνώνεται με τη βοήθεια σωλήνων ψεκασμού νερού οι οποίοι ψεκάζουν νερό στο χώρο που βρίσκεται ο αντιδραστήρας και οι οποίοι τροφοδοτούνται από τις αντλίες του LPIS.

5.4.3 Μικρής Έκτασης LOCA

Στην περίπτωση του SB LOCA λόγω του ότι ο πυρήνας παραμένει σε υψηλή πίεση, το accumulator και το LPIS είναι δυνατό να τεθούν σε λειτουργία μόνο μετά την παρέλευση αρκετού χρόνου. Μόλις συμβεί η βλάβη έχουμε σχετικά μικρή πτώση της πίεσης και ο αντιδραστήρας σταματά τη λειτουργία του. Όταν η πίεση μειωθεί στα 100 bar το HPIS τίθεται σε λειτουργία και όταν η πίεση φτάσει τα 70 bar το νερό του πρωτεύοντος κυκλώματος αρχίζει να ατμοποιείται. Μόλις τα θερμότερα μέρη του πρωτεύοντος κυκλώματος φτάσουν στη θερμοκρασία κορεσμού του νερού, δημιουργούνται φυσαλίδες ατμού οι οποίες οδηγούνται στα ανώτερα τμήματα του αντιδραστήρα. Αυτά συμβαίνουν τα πρώτα 10 δευτερόλεπτα μετά τη διάρρηξη του σωλήνα.

Γενικά υπάρχουν διαφωνίες για το αν πρέπει οι αντλίες ανακυκλοφορίας να λειτουργούν κατά τη διάρκεια ενός ατυχήματος LOCA ή όχι. Αφενός, αν λειτουργούν ίσως βοηθήσουν στην κυκλοφορία του νερού και άρα στην καλύτερη ψύξη του πυρήνα, αφετέρου όμως ωθούν νερό στο σημείο της βλάβης αυξάνοντας έτσι την απώλεια ψυκτικού. Οι διεθνείς κανονισμοί που ισχύουν σήμερα αναφέρουν ότι οι αντλίες ανακυκλοφορίας πρέπει να τίθενται εκτός λειτουργίας κατά τη διάρκεια ενός LOCA.

Σαν αποτέλεσμα της αποσυμπίεσης (λόγω της απώλειας ψυκτικού) δημιουργείται ατμός ο οποίος συγκεντρώνεται στο άνω τμήμα του αντιδραστήρα. Από εκεί δεν μπορεί να δραπετεύσει προς το σημείο όπου

υπάρχει η οπή γιατί οι σωληνώσεις προσαγωγής και εξαγωγής του ψυκτικού βρίσκονται χαμηλότερα. Όμως η απώλεια νερού είναι αρκετά γρήγορη και συνεπώς η στάθμη του νερού στο δοχείο πίεσης πέφτει στο επίπεδο των σωλήνων προσαγωγής και απαγωγής ψυκτικού από τον πυρήνα σε περίπου 250 δευτερόλεπτα. Στο διάστημα αυτό η πίεση διατηρείται σε υψηλά επίπεδα και είναι ανέφικτη η λειτουργία των εφεδρικών συστημάτων χαμηλής πίεσης.

Κατά το χρονικό διάστημα των 250 δευτερολέπτων μετά το αρχικό συμβάν, η πλευρά του πρωτεύοντος κυκλώματος των ατμοπαραγωγών αδειάζει σταδιακά λόγω της απώλειας ψυκτικού και έτσι ατμός από τον πυρήνα οδηγείται εκεί όπου συμπυκνώνεται και επιστρέφει ξανά πίσω στον πυρήνα. Οι ατμοπαραγωγοί δηλαδή δρουν σαν σύστημα απαγωγής θερμότητας από τον πυρήνα.

Όμως η διαδικασία αυτή θα συμβεί μόνο αν η πίεση και κατά συνέπεια η θερμοκρασία κορεσμού στο δευτερεύον κύκλωμα είναι επαρκώς χαμηλή ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά θερμότητας από το πρωτεύον στο δευτερεύον κύκλωμα. Λόγω της συνεχόμενης απώλειας νερού από το σύστημα ο πυρήνας αρχίζει να στεγνώνει από πάνω προς τα κάτω. Το σύστημα βρίσκεται ακόμη υπό υψηλή πίεση λόγω της παρουσίας ατμού, ο οποίος δεν μπορεί να διαφύγει από τους σωλήνες προσαγωγής εμποδιζόμενος από νερό που υπάρχει στο δοχείο πίεσης. Επιπλέον, κάποιοι κλάδοι του κυκλώματος ψύξης οι οποίοι βρίσκονται χαμηλότερα από το σημείο προσαγωγής του νερού στο δοχείο πίεσης παραμένουν γεμάτοι με νερό εμποδίζοντας τη ροή του ατμού από τον ατμοπαραγωγό προς το σημείο αστοχίας.

Μόλις όμως η στάθμη του νερού στα σημεία αυτά υποχωρήσει αρκετά, μπορεί ο ατμός να φτάσει στο σημείο διάρρηξης και να εξέλθει από το δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα οδηγώντας άμεσα σε αποσυμπίεση. Η εναπομένονσα ποσότητα νερού στον πυρήνα τμηματικά ατμοποιείται και μείγμα νερού και φυσαλίδων ατμού επαναψύχει το επάνω τμήμα του πυρήνα. Όσο η αποσυμπίεση προχωρά, ο πυρήνας αρχίζει να στεγνώνει ξανά. Όμως η πτώση της πίεσης επιτρέπει τη λειτουργία των accumulator και του LPIS, τα οποία πλημμυρίζουν με νερό τον πυρήνα και τον επαναψύχουν.

5.5 ΕΠΑΝΑΨΥΞΗ ΡΑΒΔΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Στο σχήμα 5.1 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας ενός σημείου του περιβλήματος ράβδου πυρηνικού καυσίμου από τη στιγμή που χάνει την επαφή με το ψυκτικό μέσο μέχρι τη στιγμή που επαναψύχεται. Θεωρούμε ότι τη χρονική στιγμή t_0 συμβαίνει LOCA.

Μέχρι τη χρονική στιγμή αυτή η θερμοκρασία του περιβλήματος της ράβδου ήταν σταθερά ίση με τη θερμοκρασία κανονικής λειτουργίας, T_0 .

Μόλις συμβεί LOCA οι ράβδοι ελέγχου βυθίζονται ώστε να μειωθεί ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας. Παρόλα αυτά συνεχίζει να παράγεται θερμότητα (λόγω decay heating) και έτσι η θερμοκρασία αυξάνεται με ρυθμό από 10°C έως 30°C το δευτερόλεπτο. Τη στιγμή t_1 ενεργοποιείται το εφεδρικό σύστημα ψύξης. Το χρονικό διάστημα από την εκκίνηση του εφεδρικού συστήματος έως ότου το υγρό φιλμ αποκατασταθεί στην άκρη της ράβδου ονομάζεται χρόνος καθυστέρησης. Αρχικά η επίδραση του ECCS στην ψύξη είναι αμελητέα και συνεπώς η θερμοκρασία συνεχίζει να αυξάνεται με μικρότερο όμως ρυθμό. Τη χρονική στιγμή t_2 η θερμοκρασία φτάνει στη μέγιστη τιμή της που ονομάζεται θερμοκρασία καμπής (turn around temperature) και αμέσως μετά αρχίζει να μειώνεται. Η μείωση της θερμοκρασίας γίνεται αργά στην αρχή και στη συνέχεια με όλο και ταχύτερο ρυθμό. Τη χρονική στιγμή t_3 η οποία ονομάζεται χρόνος επανάψυξης το λεπτό φιλμ του υγρού έχει φτάσει ακριβώς στο σημείο της ράβδου που παρακολουθούμε. Σε αυτή τη φάση μπορούμε να διακρίνουμε κατά μήκος της ράβδου τρεις περιοχές

1. Υγρή περιοχή (wet region)

Στην περιοχή αυτή η επιφάνεια της ράβδου καλύπτεται από υγρό συνεχές φιλμ ψυκτικού. Είναι δυνατό να έχουμε είτε συνθήκες μονοφασικής ροής είτε κορεσμένης διφασικής ροής. Η θερμοκρασία του υγρού φιλμ είναι είτε η θερμοκρασία κορεσμού του νερού στη συγκεκριμένη πίεση. Ο συντελεστής συναγωγής για ροή νερού είναι της τάξης των $10^4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

2. Περιοχή υγρού μετώπου (wet front region)

Στην περιοχή αυτή μήκους 1 έως 30 mm συμβαίνουν τα σημαντικότερα φαινόμενα της διαδικασίας επανάψυξης, ενώ μπορεί να επιτευχθεί πτώση της θερμοκρασίας κατά εκατοντάδες βαθμούς Κελσίου. Κατά μήκος του υγρού μετώπου το κυρίαρχο φαινόμενο είναι αυτό του έντονου εκτεταμένου εστιακού βρασμού με έντονη τάση μετάπτωσης σε μεμβρανοειδή βρασμό. Συνέπεια αυτού είναι στο άκρο του υγρού μετώπου προς την ξηρή περιοχή να είναι έντονο το φαινόμενο του διασκορπισμού των σταγονιδίων του ρευστού τα οποία πέφτουν στη θερμή επιφάνεια και διασκορπίζονται στο νέφος του ατμού. Για το λόγο αυτό η περιοχή αυτή λέγεται και περιοχή βίαιης σταγονοποίησης (sputtering region). Ο υπολογισμός των συντελεστών μετάδοσης θερμότητας στην περιοχή αυτή υπήρξε θέμα έντονου προβληματισμού μεταξύ των ερευνητών. Αυτό οφείλεται στο ότι είναι δύσκολο να διεξαχθούν απευθείας μετρήσεις γιατί το φαινόμενο αυτό είναι μεταβατικό, η περιοχή του υγρού μετώπου πολύ μικρή και η

θερμοκρασιακή μεταβολή στο τοίχωμα πολύ μεγάλη. Σύμφωνα πάντως με εκτιμήσεις, που προκύπτουν από προσαρμογή πειραματικά δεδομένων σε υπολογιστικά μοντέλα, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για νερό είναι της τάξης των $10^5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

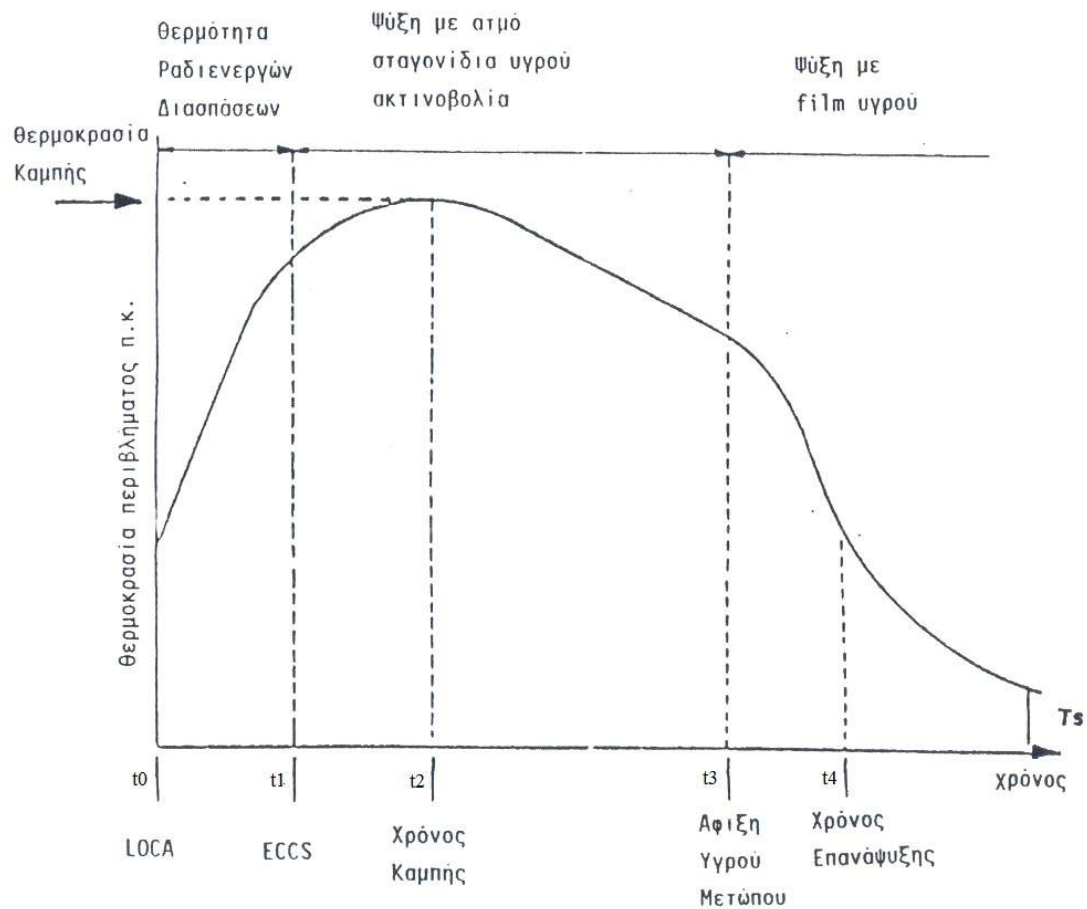
3. Ξηρή περιοχή (dry region)

Η ξηρή περιοχή περιλαμβάνει το τμήμα της ράβδου το οποίο δεν έχει επαναψυχθεί ακόμη και καλύπτεται από νέφος ατμού, το οποίο προέρχεται από την ατμοποίηση του νερού. Στο νέφος ατμού ενδεχομένως να υπάρχουν σταγονίδια νερού και έτσι η ροή χαρακτηρίζεται ως σταγονοειδής. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην περιοχή αυτή είναι πολύ μικρός, της τάξης των $10-100 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, λόγω των ασθενών μηχανισμών μετάδοσης θερμότητας (αγωγή και ακτινοβολία) προς τον ατμό ενώ πολλοί ερευνητές δέχονται ότι η ροή στην περιοχή αυτή είναι αδιαβατική. Η θερμοκρασία της ράβδου θεωρείται είτε σταθερή είτε ότι μειώνεται με μικρό και σχεδόν σταθερό ρυθμό.

Κατά την επανάψυξη, θερμότητα από την ξηρή περιοχή της ράβδου, όπου ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας προς το μίγμα-ατμού σταγονιδίων είναι πολύ χαμηλός μεταφέρεται κυρίως προς την περιοχή του υγρού μετώπου και λιγότερο προς την υγρή περιοχή. Αυτό συμβαίνει γιατί και στις δύο αυτές περιοχές οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας είναι πολύ υψηλοί. Στη συνέχεια η θερμότητα αυτή απάγεται από το υγρό φιλμ. Η έντονη θερμική αποφόρτιση που συμβαίνει στο υγρό μέτωπο προκαλεί πτώση της θερμοκρασίας ακριβώς μπροστά από αυτό (στην ξηρή περιοχή) και έτσι καθίσταται δυνατή η προώθησή του. Κατά κύριο λόγο η μεταφορά θερμότητας προς το ψυκτικό συμβαίνει στην περιοχή του υγρού μετώπου όπου επικρατούν συνθήκες βρασμού.

Μετά την επίτευξη της θερμοκρασίας καμπής αρχίζει η ψύξη στο εν λόγω σημείο της ράβδου. Η θερμοκρασία του αρχίζει να ελαττώνεται λόγω πρόδρομης ψύξης η οποία προκαλείται από το sputtering που συμβαίνει στην άκρη του υγρού μετώπου. Μόλις το υγρό μέτωπο φτάσει στο εν λόγω σημείο ο μηχανισμός της βίαιης σταγονοποίησης έχει σαν αποτέλεσμα την ταχύτατη αύξηση του ρυθμού ψύξης. Το υγρό μέτωπο συνεχίζει να κινείται έως ότου το υγρό φιλμ να αποκατασταθεί στο θεωρούμενο σημείο. Ο χρόνος που μεσολαβεί από τη στιγμή που συνέβη το ατύχημα έως την αποκατάσταση του υγρού φιλμ στο θεωρούμενο σημείο ονομάζεται χρόνος επανάψυξης του σημείου αυτού. Εάν το σημείο που μελετάμε βρίσκεται στην άλλη άκρη της ράβδου από εκείνη η οποία τροφοδοτείται πρώτα με νερό, ο χρόνος αυτός ονομάζεται χρόνος επανάψυξης της ράβδου.

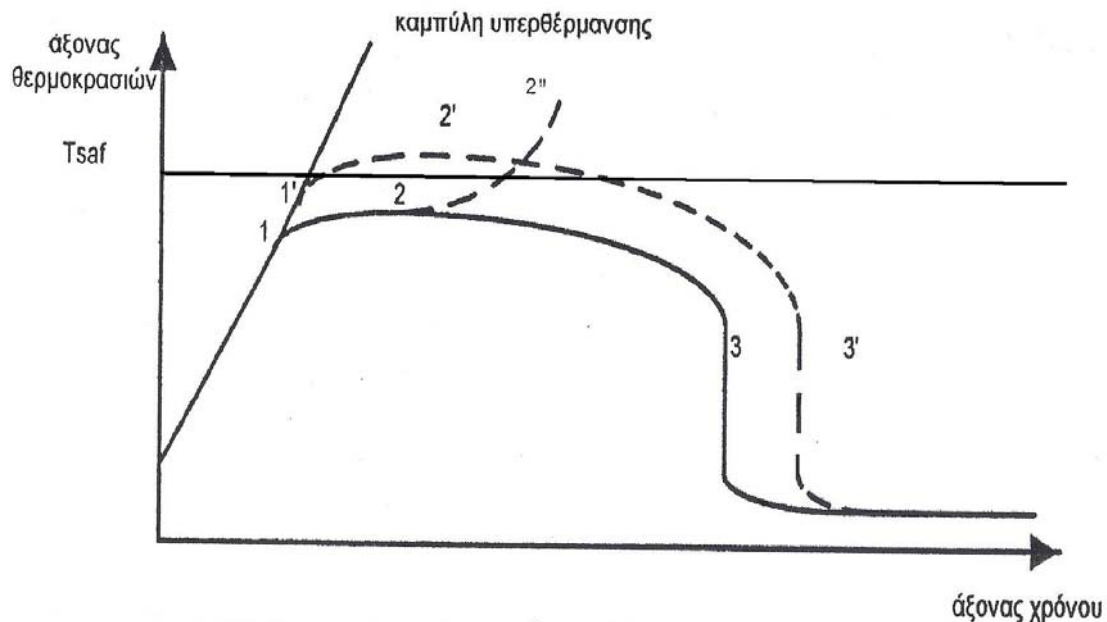
Ο ρυθμός προώθησης του υγρού μετώπου πάνω στη ράβδο ονομάζεται ταχύτητα επανάψυξης της ράβδου. Αν και παλαιότερα οι ερευνητές πίστευαν ότι η ταχύτητα επανάψυξης είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της επανάψυξης τελικά αποδείχθηκε πειραματικά και θεωρητικά ότι η κίνηση του υγρού μετώπου πάνω στη ράβδο είναι επιταχυνόμενη λόγω της πρόδρομης ψύξης η οποία μειώνει όλο και περισσότερο τα θερμικά φορτία που πρέπει να αποφορτιστούν. Όλα αυτά βέβαια με την προϋπόθεση ότι η παραγωγή θερμικής ισχύος δεν αυξάνεται για κάποιο λόγο κατά τη διάρκεια της επανάψυξης.



Σχήμα 5.1 Χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας του περιβλήματος μιας ράβδου πυρηνικού καυσίμου [9].

Απαραίτητη προϋπόθεση για να έχουμε επιτυχή επανάψυξη των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου είναι να διατηρηθεί η θερμοκρασία όλων των σημείων τους κάτω από τα θερμοκρασιακά όρια ασφαλείας που καθορίζονται στους διεθνείς κανονισμούς (2200°F ;ή 1204°C). Στο σχήμα 5.2 παρατηρούμε ότι αρκεί η θερμοκρασία καμψής T_2 να διατηρηθεί κάτω από τη θερμοκρασία, $T_{\text{safe}}=1204^{\circ}\text{C}$ για να θεωρηθεί επιτυχής η επανάψυξη. Όπως είναι φανερό όσο περισσότερο

καθυστερήσει η εκκίνηση του εφεδρικού συστήματος τόσο αυξάνεται η πιθανότητα αποτυχίας της επανάψυξης.



Σχήμα 5.2 Χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας ενός τυχαίου σημείου της εξωτερικής επιφάνειας του περιβλήματος του πυρηνικού καυσίμου. Παρουσιάζονται οι τρεις δυνατές εκβάσεις της προσπάθειας επανάψυξης [9].

Η προσπάθεια επανάψυξης έχει τρεις δυνατές εκβάσεις. Αυτές είναι:

1. Η επανάψυξη να ξεκινήσει και να ολοκληρωθεί επιτυχώς, χωρίς δηλαδή η θερμοκρασία οποιουδήποτε σημείου της εξωτερικής επιφάνειας του περιβλήματος του πυρηνικού καυσίμου να υπερβεί το όριο ασφάλειας.

2. Η επανάψυξη να ξεκινήσει καθυστερημένα, να ολοκληρωθεί κανονικά αλλά κατά τη διάρκειά της η θερμοκρασία σε κάποιο σημείο της εξωτερικής επιφάνειας του περιβλήματος του πυρηνικού καυσίμου να υπερβεί το όριο ασφάλειας με πιθανότητα διαρροής.

3. Η επανάψυξη να ξεκινήσει με μεγάλη καθυστέρηση με αποτέλεσμα να μην καταστεί δυνατή η προώθηση του υγρού μετώπου πάνω στη ράβδο του πυρηνικού καυσίμου και συνεπώς η τελευταία να λιώσει.

Τυπικές τιμές της ταχύτητας επανάψυξης για επιτυχή επανάψυξη με νερό για τυπικές ράβδους πυρηνικού καυσίμου είναι μεταξύ 10 και 50mm/s.

5.6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΠΑΝΑΨΥΞΗ

Οι κυριότερες παράμετροι που επηρεάζουν το φαινόμενο της επανάψυξης είναι:

- Η αρχική θερμοκρασία στην επιφάνεια της ράβδου
- Η πίεση του συστήματος
- Η παροχή του υγρού στην είσοδο του καναλιού
- Η υπόψυξη του υγρού στην είσοδο του καναλιού
- Η παροχή του ατμού στην είσοδο του καναλιού
- Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του περιβλήματος
- Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του ψυκτικού
- Η ποιότητα της επιφάνειας της ράβδου

Τα παραπάνω μεγέθη εμπλέκονται στην ταχύτητα επανάψυξης χωρίς όμως για ορισμένα από αυτά να έχει για την ώρα ξεκαθαριστεί ο λεπτομερής μηχανισμός με τον οποίο την επηρεάζουν. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της δυσκολίας που υπάρχει στη μέτρηση κάποιων μεγεθών όπως η παροχή ατμού και ο βαθμός οξειδωσης της ράβδου.

Για τη θεωρητική μελέτη του φαινομένου της επανάψυξης οι ερευνητές στηρίζονται στην εξίσωση της αγωγής της θερμότητας πάνω στο περίβλημα της ράβδου του πυρηνικού καυσίμου, η οποία γράφεται ως εξής:

$$\frac{dT}{dt} = a \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{d^2 T}{dz^2} \right] + \frac{q_f}{\rho c}$$

όπου:

z: η συντεταγμένη κατά τον άξονα της ράβδου

r: η συντεταγμένη κατά την ακτίνα της ράβδου

T: η απόλυτη θερμοκρασία του περιβλήματος της ράβδου

t: ο χρόνος που μεσολαβεί από την έναρξη της επανάψυξης έως τη στιγμή που μας ενδιαφέρει

q_f: η πυκνότητα θερμικής ισχύος της ράβδου

a: ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της ράβδου

c: η ειδική θερμότητα του περιβλήματος της ράβδου

ρ: η πυκνότητα του περιβλήματος της ράβδου

Υπολογιστικές προσομοιώσεις του φαινομένου της επανάψυξης δείχνουν ότι η ταχύτητα επανάψυξης είναι αντιστρόφως ανάλογη της αρχικής θερμοκρασίας της ράβδου και ότι εξαρτάται επίσης από τα χαρακτηριστικά της ράβδου και τις συνθήκες ροής του ψυκτικού. Ακόμη, φαίνεται ότι η ταχύτητα επανάψυξης δεν εξαρτάται άμεσα από την παροχή του ψυκτικού του εφεδρικού συστήματος ψύξης. Ένα πρακτικό

πρόβλημα που εμποδίζει την εκτεταμένη χρήση των υπολογιστικών μοντέλων για εξαγωγή συμπερασμάτων και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος είναι η έλλειψη δεδομένων για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στην περιοχή του υγρού μετώπου.

6. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

6.1 ΔΟΣΕΙΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Όταν κάποια ποσότητα ιοντίζουσας ακτινοβολίας προσπέσει σε κάποιο υλικό, ένα μέρος της θα διέλθει δια του υλικού χωρίς να αλληλεπιδράσει με αυτό και ένα άλλο μέρος της θα αλληλεπιδράσει με το υλικό εναποθέτοντας σε αυτό ενέργεια. Η ενέργεια που απορροφάται ανά μονάδα μάζας του υλικού ονομάζεται απορροφούμενη δόση.

Η απορροφούμενη δόση σε βιολογικό ιστό είναι το βασικό μέγεθος για την εκτίμηση αφενός μεν της διακινδύνευσης επαγωγής βιολογικών επιπτώσεων, αφετέρου δε του μεγέθους των επιπτώσεων: μεγαλύτερη απορροφούμενη δόση συνεπάγεται μεγαλύτερη διακινδύνευση και ενδεχομένως μεγαλύτερο μέγεθος επίπτωσης.

Η σύγχρονη μονάδα απορροφούμενης δόσης ονομάζεται Gray, συμβολίζεται με Gy και ορίζεται ως η απορροφούμενη δόση 1 Joule ανά Kg υλικού. Δεδομένου ότι η απορροφούμενη δόση ενός Gy είναι μεγάλη ως προς τις βιολογικές επιπτώσεις, χρησιμοποιούνται στην πράξη τα υποπολλαπλάσια του.

Η βιολογική επίπτωση εξαρτάται όχι μόνο από την απορροφούμενη δόση αλλά και από τον ρυθμό της δόσης, δηλαδή από την απορροφούμενη δόση ανά μονάδα χρόνου. Επίσης, η βιολογική επίπτωση εξαρτάται όχι μόνο από την ενέργεια που εναπόθεσε η ραδιενεργός ακτινοβολία, αλλά και από το είδος της ακτινοβολίας. Έτσι η ίδια δόση σε Gy προκαλεί πολύ μεγαλύτερη βιολογική επίπτωση αν προέρχεται από σωματίδια α , απ' ό,τι αν προέρχεται από ακτινοβολία γ .

Για να επέλθει η ίδια βιολογική επίπτωση απαιτείται, κατά προσέγγιση, εικοσαπλάσια απορροφούμενη δόση από ακτινοβολία γ ή X. σε σχέση με την απορροφούμενη δόση λόγω σωματιδίων α . Για την ίδια απορροφούμενη δόση, η ακτινοβολία α είναι είκοσι φορές περίπου πιο αποτελεσματική βιολογικά, είκοσι περίπου φορές «πιο επικίνδυνη», απ' ό,τι η ακτινοβολία γ ή X. Εισήχθη λοιπόν ο συντελεστής στάθμισης W_R της ακτινοβολίας. Ο καθαρός αριθμός W_R δίνει κατά προσέγγιση τη σχετική βιολογική αποτελεσματικότητα κάθε συγκεκριμένου είδους ακτινοβολίας, σε σχέση με την βιολογική αποτελεσματικότητα των ακτινών γ ή X. Δηλαδή ο συντελεστής στάθμισης συγκεκριμένης ακτινοβολίας δηλώνει πόσες φορές μεγαλύτερη πρέπει να είναι η

απορροφούμενη δόση από ακτινοβολία γ ή X, από την απορροφούμενη δόση από τη συγκεκριμένη ακτινοβολία, για να επιφέρει το ίδιο βιολογικό αποτέλεσμα. Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι ο συντελεστής στάθμισης της ακτινοβολίας a είναι $W_R = 20$.

Στον πίνακα 6.1 δίνονται τιμές του W_R για τα διάφορα είδη ακτινοβολιών σύμφωνα με τον κανονισμό ακτινοπροστασίας της χώρας μας και τη σχετική οδηγία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Η τιμή του W_R για τα νετρόνια εξαρτάται από την ενέργειά τους.

Πίνακας 6.1 Τιμές του W_R για τις διάφορες ιοντίζουσες ακτινοβολίες

Ακτινοβολία	W_R
Φωτόνια	1
Ηλεκτρόνια	1
Νετρόνια	5-20
Πρωτόνια	5
Σωματία α , θραύσματα σχάσης, βαρείς πυρήνες	20

Η ισοδύναμη δόση ορίζεται ως το γινόμενο της απορροφούμενης δόσης σε Gy επί τον συντελεστή στάθμισης W_R . Η ισοδύναμη δόση μετράται σε Sievert (σύμβολο Sv), τα οποία προκύπτουν ως το γινόμενο της απορροφούμενης δόσης σε Gy επί τον συντελεστή στάθμισης W_R . Τα μεν Gy της απορροφούμενης δόσης δίνουν την ενέργεια που εναποθέτει η ακτινοβολία ανά χιλιόγραμμο ιστού, τα δε Sv της ισοδύναμης δόσης είναι μέτρο της διακινδύνευσης από την εναπόθεση αυτής της ενέργειας, από συγκεκριμένη ακτινοβολία.

Δεδομένου ότι για τα φωτόνια (ακτινοβολίες γ ή X) είναι $W_R = 1$, το μέγεθος της απορροφούμενης δόσης (σε Gy) είναι ίσο με το μέγεθος της ισοδύναμης δόσης (σε Sv) για τα φωτόνια. Επειδή ότι δόση 1 Sv είναι μεγάλη, χρησιμοποιούνται στην πράξη τα εξής υποπολλαπλάσιά του: 1mSv, 1 μ Sv, 1nSv.

Η διακινδύνευση αυξάνεται με την αύξηση της ισοδύναμης δόσης. Προκειμένου να δοθεί αίσθηση των “φυσιολογικών δόσεων” παρατίθενται τιμές δόσεων από φυσική ραδιενέργεια, δηλαδή από τη ραδιενεργό ακτινοβολία που εκπέμπεται από το φυσικό περιβάλλον, μέσα στο οποίο αναπτύχθηκε και έζησε επί χιλιετίες ο άνθρωπος. Από το έδαφος και τα οικοδομικά υλικά ο άνθρωπος δέχεται συνεχώς ακτινοβολία γ , εκτίθεται δηλαδή συνεχώς σε ακτινοβολία γ από το φυσικό περιβάλλον. Δεδομένου ότι η έκθεση αυτή προέρχεται από το εξωτερικό του σώματος του ανθρώπου, ονομάζεται εξωτερική έκθεση. Δεδομένου δε ότι η ακτινοβολία αυτή προσπίπτει ομοιογενώς σε

ολόκληρο το σώμα του ανθρώπου, η αντίστοιχη δόση ονομάζεται ολόσωμη δόση.

Έτσι ο ρυθμός της ολόσωμης ισοδύναμης δόσης στη Θεσσαλονίκη, από αυτήν την εξωτερική έκθεση φυσικής ραδιενέργειας, είναι 40 nSv ανά ώρα. Η δόση των 40 nSv ανά ώρα συνεπάγεται ετήσια δόση από φυσική ραδιενέργεια 0,35 mSv. Στην Αθήνα, οι δόσεις από εξωτερική έκθεση από φυσική ραδιενέργεια είναι μισές περίπου από τις αντίστοιχες της Θεσσαλονίκης, ενώ αυτές στην Καβάλα και τις Σέρρες είναι διπλάσιες περίπου από αυτές της Θεσσαλονίκης. Η φυσική ραδιενέργεια παρουσιάζει, και παρουσίαζε από γενέσεως κόσμου, μεγάλες γεωγραφικές διακυμάνσεις χωρίς αυτό να συνιστά πρόβλημα για τον άνθρωπο.

Παλαιότερα χρησιμοποιείτο ως μονάδα της απορροφούμενης δόσης το rad (από τα αρχικά του Radiation Absorbed Dose) και της ισοδύναμης δόσης το REM (από τα αρχικά του Radiation Equivalent Man). Είναι:

$$1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy} = 10 \text{ mGy}$$

$$1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv} = 10 \text{ mSv}$$

Οι εκθέσεις σε ακτινοβολία και οι αντίστοιχες δόσεις διακρίνονται σε ολόσωμες και σε δόσεις μεμονωμένων ιστών, ή οργάνων. Η ίδια ποσότητα ισοδύναμης δόσης δεν επιφέρει τις ίδιες βιολογικές συνέπειες και δεν συνεπάγεται την ίδια διακινδύνευση για τα διάφορα όργανα και τους ιστούς. Ως εκ τούτου ορίστηκε ως μέτρο της διακινδύνευσης για τα διάφορα όργανα και ιστούς η ενεργός δόση, μετρούμενη και αυτή σε Sievert, ως εξής:

$$\text{Ενεργός δόση} = (\text{Ισοδύναμη δόση}) \cdot W_T$$

όπου ο καθαρός αριθμός W_T είναι συντελεστής στάθμισης για κάθε ιστό, ή όργανο. Οι συντελεστές στάθμισης W_T που ισχύουν στους Ελληνικούς κανονισμούς ακτινοπροστασίας βασίζονται σε σχετική οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Για ολόσωμη δόση, δηλαδή για ολόκληρο το σώμα, ο συντελεστής W_T είναι 1. Έτσι αν π.χ. οι γεννητικοί αδένες λάβουν ισοδύναμη δόση 100 mSv, η ενεργός δόση είναι $100 \text{ mSv} \times 0,2 = 20 \text{ mSv}$, ενώ αν το δέρμα λάβει ισοδύναμη δόση 100 mSv η ενεργός δόση είναι $100 \text{ mSv} \times 0,01 = 1 \text{ mSv}$. Τέλος αν η ισοδύναμη δόση για όλο το σώμα είναι 100 mSv, τότε η αντίστοιχη ενεργός δόση είναι 100 mSv.

Συνεπώς το μέτρο της διακινδύνευσης είναι η ενεργός δόση, η οποία στην περίπτωση ολόσωμης έκθεσης σε ακτινοβολία ισούται με την ισοδύναμη δόση.

Τέλος, μιλάμε για έκθεση ενός ανθρώπου, ζώου, ή αντικειμένου σε συγκεκριμένη ακτινοβολία και εννοούμε ότι αυτά δέχθηκαν την συγκεκριμένη ακτινοβολία. Η λέξη έκθεση έχει όμως διπλή χρήση.

Αποτέλεσε το πρώτο, ιστορικά, μέγεθος δοσιμετρίας και συνεχίζει από αδράνεια να χρησιμοποιείται και σήμερα. Είναι μέτρο της ποσότητας ιοντισμού του αέρα από ακτινοβολίες γ ή X (φωτόνια) και μόνον από αυτές. Μονάδα αυτής της έκθεσης είναι το Roentgen (R) που ορίζεται ως εκείνη η ποσότητα ακτινοβολίας γ ή X που παράγει στον αέρα ιόντα με συνολικό ηλεκτρικό φορτίο $2,58 \cdot 10^{-4}$ Coulomb ανά Kg αέρα.

Επειδή το 1 Roentgen είναι πολύ μεγάλη ποσότητα, χρησιμοποιούνται τα υποπολλαπλάσιά του. Μπορεί να δειχθεί εύκολα ότι ακτινοβολία γ ή X ενός R εναποθέτει στον αέρα 8,69 mGy. Η ενέργεια που εναποτίθεται, άρα και η απορροφούμενη δόση, εξαρτάται βέβαια από το υλικό. Έτσι, 1R εναποθέτει 9,6 mGy σε βιολογικό ιστό, κατά συνέπεια η αντίστοιχη ισοδύναμη δόση είναι και αυτή 9,6 mSv. Οπότε μπορούμε, κατά προσέγγιση, να πούμε ότι:

$$\text{ισοδύναμη δόση σε mSv} = 10 \text{ (έκθεση σε R)}$$

Και επειδή υπό κανονικές συνθήκες οι ρυθμοί δόσης είναι της τάξης των nSv ανά ώρα, χρήσιμη είναι και η σχέση :

$$\text{(δόση σε nSv)} = 10 \text{ (έκθεση σε } \mu\text{R)}$$

6.2 ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Κατά την αλληλοεπίδραση ραδιενεργών ακτινοβολιών και ύλης, η ακτινοβολία εναποθέτει ενέργεια στο υλικό, με αποτέλεσμα τον ιοντισμό του υλικού. Η διαδικασία η οποία οδηγεί στην εμφάνιση των αλλοιώσεων στα κύτταρα αρχίζει με την πρακτικά ακαριαία παραγωγή των ιόντων στα κύτταρα. Τα ιόντα, σε χρόνο της τάξης του εκατομμυριοστού του δευτερολέπτου, αντιδρούν με μόρια του κυττάρου με αποτέλεσμα την παραγωγή δραστικών χημικών προϊόντων. Αυτά τα χημικά προϊόντα, σε χρόνο μερικών δευτερολέπτων, αντιδρούν με τα μόρια του κυττάρου. Ακολουθεί τέλος το βιολογικό στάδιο των αλλοιώσεων που μπορεί να διαρκέσει από μερικά λεπτά της ώρας μέχρι δεκάδες χρόνια, ανάλογα με την επίπτωση της βλάβης.

Το είδος, το μέγεθος και η πιθανότητα εμφάνισης της βιολογικής βλάβης, που μπορεί να προκαλέσει στον άνθρωπο η έκθεση σε ιοντίζουσα ακτινοβολία εξαρτάται από το μέγεθος και τον ρυθμό της δόσης και από το μέρος του σώματος που εκτίθεται στην ακτινοβολία.

Άμεσες σωματικές επιπτώσεις ονομάζονται οι επιπτώσεις που εμφανίζονται μέσα σε λίγες ώρες ή/και μέχρι 60 περίπου μέρες από την έκθεση στην ακτινοβολία. Οφείλονται σε εκτεταμένα φαινόμενα αλλοιώσεων κυττάρων και κυτταρικών θανάτων. Προκύπτουν μόνο από εξαιρετικά έντονη έκθεση σε ακτινοβολία ολόκληρου ή μεγάλου μέρους του σώματος, σε δόσεις συνήθως μεγαλύτερες από 500 mSv που

ελήφθησαν σε διάστημα χρόνου μικρότερο από μια ημέρα. Στατιστικά δεδομένα τέτοιων εκθέσεων έχουμε κυρίως από τα θύματα των ατομικών βομβών στην Ιαπωνία (1945) και σε μικρότερο βαθμό από λίγα εργαστηριακά ατυχήματα και από ασθενείς που εκτέθηκαν σε έντονη ακτινοβολία για θεραπευτικούς σκοπούς. Συμπεράσματα από τέτοιες στατιστικές μελέτες συνοψίζονται παρακάτω.

- Δόση 0-0,5 Sv: Δεν υπάρχουν παρατηρήσιμα συμπτώματα.
- Δόση 0,5-1 Sv: Ελαφρές αλλαγές στο αίμα. Κανένα άλλο παρατηρήσιμο σύμπτωμα
- Δόση 1-2 Sv: Εμετός μέσα σε λίγες ώρες, σε 5% ως 50% των περιπτώσεων, με κόπωση και απώλεια ορέξεως. Μέτριες μεταβολές στο αίμα. Σε κάθε περίπτωση επέρχεται ανάρρωση από τα συμπτώματα αυτά μέσα σε λίγες εβδομάδες.
- Δόση 2-6 Sv: Δόση μεγαλύτερη από 3 Sv προκαλεί, σε κάθε περίπτωση, εμετό σε χρόνο λιγότερο από 2 ώρες. Σοβαρές μεταβολές στο αίμα, που συνοδεύονται από αιμορραγία και αυξανόμενη επιδεκτικότητα σε μόλυνση καθώς αυξάνεται η δόση. Απώλεια των μαλλιών μετά 2 εβδομάδες, για δόσεις μεγαλύτερες από 3 Sv. Ανάρρωση από τα συμπτώματα αυτά μέσα σε ένα μήνα ως ένα χρόνο, στις περισσότερες περιπτώσεις δόσεων κοντά στο όριο των 2 Sv. Στις περιπτώσεις δόσεων κοντά στο άνω όριο των 6 Sv, επιβιώνει μόνο το 20% περίπου.
- Δόση 6-10 Sv: Εμετός μέσα σε μια ώρα, σοβαρές μεταβολές του αίματος, αιμορραγία, μολύνσεις, απώλεια μαλλιών. Σε 80% ως 100% επέρχεται θάνατος μέσα σε 2 μήνες. Μακρότατος χρόνος ανάρρωσης από τα συμπτώματα αυτά όσων επέζησαν.

Τα παραπάνω συμπτώματα εμφανίζονται μόνο στις περιπτώσεις ακτινοβόλησης ολοκλήρου, ή μεγάλου μέρους του σώματος. Είναι γνωστό, π.χ. από ιατρικές-θεραπευτικές εφαρμογές, ότι η απορρόφηση σε μικρή περιοχή του σώματος δόσεων αντίστοιχων με αυτές του πίνακα 6.1 επιφέρει πολύ μικρότερες βλάβες. Όπως είναι φανερό το μέγεθος της βλάβης είναι άξουσα συνάρτηση της δόσης. Μπορούμε ακόμα να πούμε ότι για τις άμεσες σωματικές επιπτώσεις υπάρχει κατώφλι δόσης, της τάξης των 500 mSv, κάτω από το οποίο δεν υπάρχουν παρατηρήσιμα άμεσα συμπτώματα.

Καθυστερημένες σωματικές επιπτώσεις ονομάζονται οι επιπτώσεις που εμφανίζονται με καθυστέρηση που μπορεί να κυμαίνεται από ένα μέχρι περίπου τριάντα χρόνια μετά την έκθεση σε έντονη ακτινοβολία. Οι επιπτώσεις αυτές οφείλονται συνήθως σε αλλοιώσεις που προκαλούνται στο DNA, δηλαδή σε μεταλλάξεις. Υπάρχει πλήθος δεδομένων (π.χ. από αυτούς που επέζησαν μετά τις ατομικές εκρήξεις το 1945 στην Ιαπωνία, από τους ακτινολόγους των πρώτων δεκαετιών του 20^{ου} αιώνα, από ασθενείς που εκτέθηκαν σε έντονη ακτινοβολία για θεραπευτικούς

σκοπούς), που δείχνουν ότι η έκθεση σε έντονη ακτινοβολία επιφέρει καθυστερημένες σωματικές επιπτώσεις όπως λευχαιμίες, καρκίνους (π.χ. του θυρεοειδούς αδένος, που παρατηρείται ιδιαίτερα σε νεαρά άτομα, ή του καρκίνου των πνευμόνων που έχει παρατηρηθεί σε εργάτες υπόγειων ορυχείων ουρανίου), προσωρινή ή και μόνιμη στειρώση, δυσλειτουργία διάφορων οργάνων του σώματος, καταρράκτη των οφθαλμών. Ο καταρράκτης των οφθαλμών είναι μια από τις λίγες καθυστερημένες σωματικές επιπτώσεις για την οποία φαίνεται να υπάρχει κατώφλι δόσης. Ο καταρράκτης δεν εμφανίζεται στις περιπτώσεις έντονων δόσεων μικρότερων από περίπου 2 Sv.

Από την συμπτωματολογία της ίδιας της ασθένειας είναι αδύνατο να αποδειχθεί αν αυτή προκλήθηκε από την έκθεση σε ακτινοβολία, ή από άλλη συνήθη αιτία. Για παράδειγμα η λευχαιμία παρουσιάζεται ακριβώς με τα ίδια συμπτώματα ανεξάρτητα από την αιτία που την προκάλεσε (έντονη ακτινοβολία σε κάποιο μακρινό παρελθόν ή άλλη διαφορετική αιτία). Ο προσδιορισμός της ακτινοβολίας ως γενεσιουργού αιτίας της ασθένειας μπορεί να γίνει μόνο στατιστικά. Απαιτείται δηλαδή μελέτη της συχνότητας εμφάνισης της ασθένειας σε μεγάλο πληθυσμό ακτινοβολημένων ατόμων, σε σύγκριση με την αντίστοιχη συχνότητα σε πληθυσμό με μόνη ακτινοβολία αυτή του φυσικού υπόβαθρου. Δεδομένα για τέτοιες μελέτες υπάρχουν στους επιζήσαντες των βομβαρδισμών με πυρηνικά όπλα στις πόλεις Ναγκασάκι και Χιροσίμα. Υπάρχουν ακόμα πειραματικά δεδομένα εργαστηριακής ακτινοβολίας εκατοντάδων χιλιάδων (για κάθε δόση) ποντικών, που είναι ζώα θηλαστικά όπως και ο άνθρωπος. Μελετήθηκαν οι επιπτώσεις της συσσωρευμένης δόσης, δηλαδή το άθροισμα όλων των δόσεων, επιπλέον της φυσικής ραδιενέργειας, που έχει δεχτεί ένας οργανισμός συνολικά σε όλη τη ζωή του. Τα κύρια αποτελέσματα από την ανάλυση των δεδομένων αυτών είναι:

- Η συχνότητα εμφάνισης της ασθένειας, δηλαδή το ποσοστό του πληθυσμού το οποίο ασθενεί, είναι αύξουσα συνάρτηση της συσσωρευμένης δόσης με πιθανή εξαίρεση τις εξαιρετικά μεγάλες δόσεις.
- Για μικρές συσσωρευμένες δόσεις, π.χ. δόσεις μικρότερες από 200 mSv, δεν έχουν εντοπιστεί ούτε άμεσα, ούτε καθυστερημένα κλινικά συμπτώματα.

Η έλλειψη εντοπισμού επιπτώσεων από έκθεση σε χαμηλές δόσεις ραδιενέργειας δεν σημαίνει αναγκαστικά ότι δεν υπάρχουν καθυστερημένες επιπτώσεις για μικρές δόσεις. Σημαίνει ότι αν υπάρχουν, ενδέχεται να εμφανισθούν σε ένα μικρό ποσοστό των ατόμων που ακτινοβολήθηκαν. Αυτό δε το ποσοστό αναμένεται να είναι τόσο μικρό, ώστε για την ενοχοποίηση της ακτινοβολίας για την ασθένεια απαιτείται επιδημιολογική μελέτη σε μεγάλο πληθυσμό, για τον οποίο είναι γνωστή

με ικανοποιητική ακρίβεια η συνήθης, δηλαδή από άλλες αιτίες, συχνότητα εμφάνισης της ασθένειας.

Από την άλλη μεριά το κύριο ενδιαφέρον, για την καθιέρωση κανόνων ακτινοπροστασίας, βρίσκεται στις εξαιρετικά μικρές αλλά χρόνιες δόσεις. Ο μόνος λοιπόν τρόπος εκτίμησης των καθυστερημένων βιολογικών επιπτώσεων, που μπορεί να έχουν οι μικρές χρόνιες δόσεις είναι η επέκταση των δεδομένων των μεγάλων δόσεων στις μικρές. Οι εκτιμήσεις αυτές οφείλουν να είναι συντηρητικές, να είναι δηλαδή βέβαιο ότι υπερεκτιμούν τον πραγματικό κίνδυνο. Βασίζονται σε τρεις υποθέσεις:

1. Ότι δεν υπάρχει κατώφλι δόσης κάτω από το οποίο η διακινδύνευση (η συχνότητα) εμφάνισης της βιολογικής επίπτωσης να είναι μηδενική. Γίνεται δηλαδή η υπόθεση ότι για οσοδήποτε μικρή δόση υπάρχει πεπερασμένη πιθανότητα βιολογικής επίπτωσης.

2. Ότι η πιθανότητα (συχνότητα) εμφάνισης της βιολογικής επίπτωσης είναι ανάλογη της συσσωρευμένης δόσης.

3. Ότι η πιθανότητα να εμφανισθεί η βιολογική επίπτωση είναι ανεξάρτητη από τον ρυθμό της δόσης, ότι εξαρτάται μόνον από τη συνολική συσσωρευμένη δόση. Η υπόθεση αυτή προϋποθέτει ανικανότητα του οργανισμού να επιδιορθώσει βλάβες όπως για παράδειγμα να αντικαταστήσει αλλοιωμένα κύτταρα, έστω κι αν οι βλάβες είναι μικρές και επέρχονται σε αραιά διαστήματα από αντίστοιχα μικρούς ρυθμούς δόσης. Γίνεται δηλαδή η υπόθεση ότι οι βλάβες συσσωρεύονται καθώς προστίθενται μικρές δόσεις.

Σχετικά τώρα με την αλήθεια των τριών αυτών υποθέσεων: πειράματα σε μεγάλους πληθυσμούς ποντικών δείχνουν ότι για την ίδια συσσωρευμένη δόση, η πιθανότητα εμφάνισης λευχαιμίας είναι μεγαλύτερη για μεγαλύτερους ρυθμούς δόσης, δηλαδή η πιθανότητα αυξάνεται όταν η ίδια συσσωρευμένη δόση δίνεται σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Αυτή η παρατήρηση δείχνει ότι η υπόθεση 3 υπερεκτιμά την πιθανότητα εμφάνισης βιολογικής επίπτωσης. Τόσο τα πειράματα αυτά, όσο και άλλες παρατηρήσεις, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι υπολογισμοί με βάση τις τρεις αυτές υποθέσεις οδηγούν σε υπερεκτίμηση της υπολογιζόμενης διακινδύνευσης από έκθεση σε ραδιενέργεια. Δηλαδή ο υπολογιζόμενος κίνδυνος είναι μεγαλύτερος του πραγματικού.

Γενετικές επιπτώσεις ονομάζονται εκείνες που μπορούν να εμφανισθούν στους απογόνους ατόμων που εκτέθηκαν σε ραδιενέργεια. Οφείλονται σε μεταλλάξεις που είχαν δημιουργηθεί στο DNA κυττάρων των ωοθηκών ή των όρχεων των γονέων τους και οι οποίες μέσω των ωαρίων, ή των σπερματοζωαρίων αντιστοίχως μεταβιβάστηκαν στους απογόνους. Η εκτίμηση της διακινδύνευσης όσον αφορά στις γενετικές επιπτώσεις γίνεται με βάση τις τρεις υποθέσεις που αναφέρθηκαν για τις καθυστερημένες σωματικές επιπτώσεις. Ο λόγος είναι ότι και στις δυο

περιπτώσεις το κύριο γενεσιουργό αίτιο είναι το ίδιο: οι επαγόμενες μεταλλάξεις στο DNA.

Πειραματικές έρευνες όμως που έγιναν για τη διερεύνηση των γενετικών επιπτώσεων σε ποντίκια δείχνουν ότι:

- Παρατηρήσιμες γενετικές επιπτώσεις υπήρξαν μόνο για μεγάλες συσσωρευμένες δόσεις και ρυθμούς δόσεων μεγαλύτερους από 0.01 mSv ανά λεπτό. Αυτός ο ρυθμός δόσης αντιστοιχεί σε 5 Sv ανά έτος, ενώ η μέση δόση από τη φυσική ραδιενέργεια είναι της τάξης των 2 mSv ανά έτος.
- Η συχνότητα εμφάνισης γενετικών επιπτώσεων παρουσιάζει σημαντική εξάρτηση από το ρυθμό της δόσης. Μόνο για πολύ μεγάλους ρυθμούς δόσης η συχνότητα εξαρτάται από τη συσσωρευμένη δόση και μόνο και είναι ανεξάρτητη του ρυθμού της δόσης.

Οι παρατηρήσεις αυτές δείχνουν ότι και στην περίπτωση των γενετικών επιπτώσεων, όπως και στην περίπτωση των καθυστερημένων σωματικών επιπτώσεων οι υπολογισμοί που γίνονται με βάση τις τρεις υποθέσεις οδηγούν σε υπερεκτίμηση του βιολογικού κινδύνου. Εντούτοις και οι τρεις αυτές υποθέσεις αποτελούν τη βάση επί της οποίας γίνονται οι εκτιμήσεις των πιθανοτήτων των βιολογικών επιπτώσεων από έκθεση σε μικρές δόσεις ακτινοβολίας και προσδιορίζονται τα όρια δόσεων για την προστασία των ανθρώπων. Η περιγραφή των θεσμοθετημένων διεθνώς ορίων δόσεων γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο.

6.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η μεταφορά ραδιενεργών υλικών από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης είναι γνωστή ως ραδιενεργός επίπτωση. Ο τόπος και ο χρόνος κατά τον οποίο τα ραδιενεργά προϊόντα μιας πυρηνικής έκρηξης θα φτάσουν στο έδαφος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και ένας από αυτούς είναι το ύψος στο οποίο γίνεται η έκρηξη. Όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος αυτό, τόσο μεγαλύτερο μέρος από τα παραγόμενα ραδιενεργά υλικά -τα οποία βρίσκονται αρχικά σε αέρια κατάσταση- ανυψώνεται στα ανώτερα και ανώτατα στρώματα της ατμόσφαιρας. Με την πάροδο του χρόνου, καθώς η θερμοκρασία της πυρακτωμένης σφαίρας ελαττώνεται, αρχίζει η συνένωση των ραδιενεργών υλικών σε μικροσκοπικά σωματίδια. Λόγω του μικρού τους μεγέθους, η πτώση τους στην επιφάνεια της γης γίνεται πολύ αργά και ένα σημαντικό μέρος μπορεί να παραμένει στην ατμόσφαιρα για αρκετούς μήνες ή χρόνια. Κατά την περίοδο αυτή τα ραδιενεργά σωματίδια μετακινούνται από τα ατμοσφαιρικά ρεύματα και ειδικά αυτά που έφτασαν σε στρατοσφαιρικά ύψη διαχέονται σε όλο το ημισφαίριο όπου έγινε η έκρηξη.

Η ραδιενεργός ρύπανση που προκαλούν οι πυρηνικοί σταθμοί κάτω από ομαλές συνθήκες λειτουργίας είναι ελάχιστη και εκτιμάται ότι επιφέρει μία πρόσθετη ετήσια δόση της τάξης των 10μSv στο μέσο κάτοικο του πλανήτη. Είναι γνωστές όμως περιπτώσεις ατυχημάτων, των οποίων οι συνέπειες ξεπέρασαν τα όρια των εγκαταστάσεων των πυρηνικών ηλεκτροπαραγωγών σταθμών (Π.Η.Σ.).

Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι το πρώτο συστατικό του οικοσυστήματος που ρυπαίνεται μετά από ατύχημα πυρηνικής εγκατάστασης που συνεπάγεται διαρροή ραδιενεργού υλικού στην ατμόσφαιρα. Το είδος και η έκταση της ραδιενεργού ρύπανσης του αέρα εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τα χαρακτηριστικά της πηγής που την προκάλεσε.

Το μεγαλύτερο μέρος των ραδιενεργών υλικών μιας ραδιενεργού επίπτωσης σε χερσαίο οικοσύστημα καταλήγει, αργά ή γρήγορα, με τον ένα ή τον άλλο τρόπο, στο έδαφος. Από τη θέση αυτή τα ραδιενεργά άτομα των ραδιενεργών υλικών προσβάλλουν με την ακτινοβολία τους τα φυτά, τα ζώα και τον άνθρωπο. Η παραμονή των ραδιενεργών ατόμων στην επιφάνεια του εδάφους εξαρτάται από το χρόνο υποδιπλασιασμού τους και από την αλληλεπίδρασή τους με το έδαφος και τα άλλα συστατικά του οικοσυστήματος.

Τα νερά σε ανοικτούς χώρους μπορούν να μολυνθούν με ραδιενεργά άτομα, μετά από ραδιενεργό βροχόπτωση και χιονόπτωση, μετά από ραδιενεργό επίπτωση και μετά από μετακίνηση ραδιενεργών ατόμων που βρίσκονται στο έδαφος (με τη βοήθεια π.χ. τρεχούμενων νερών). Όταν τα ραδιορρυπασμένα νερά χρησιμοποιούνται για άρδευση καλλιεργειών, τα υπάρχοντα ραδιενεργά άτομα εισέρχονται στο σύστημα εδάφους - φυτού και μπορούν κατά ένα ποσοστό να εισχωρήσουν στο φυτό.

Στην περίπτωση που άνθρωποι ή ζώα πίνουν τέτοια νερά, ρυπαίνουν το εσωτερικό του σώματός τους με ραδιενεργά άτομα, τα οποία ακολουθούν τους ίδιους δρόμους και δημιουργούν τα ίδια προβλήματα με τα ραδιενεργά άτομα της τροφής. Μετά από πυρηνική έκρηξη ή ατύχημα και εν αναμονή της επερχόμενης ραδιενεργού επίπτωσης, οι άνθρωποι του αγρού και τα ζώα τους πρέπει να μεταφερθούν σε προστατευμένους χώρους. Όσον αφορά την ανεύρεση καθαρού νερού σε ποσότητες αρκετές για να καλυφθούν οι ανάγκες για όσο χρονικό διάστημα απαιτηθεί, αυτό μπορεί να προέρχεται από προστατευμένο δίκτυο, προστατευμένη δεξαμενή, πηγάδι ή γεώτρηση. Όσον αφορά τη διατροφή του πληθυσμού και μέχρις ότου αποκατασταθεί κάποια ομαλότητα στη διακίνηση των τροφίμων οι κονσερβοποιημένες τροφές θα παίζουν σημαντικό ρόλο. Για τη διατροφή των ζώων είναι ανάγκη να υπάρξουν αποθηκευμένες τροφές σε ποσότητες επαρκείς για

να καλύψουν τις ανάγκες τουλάχιστον για ένα τρίμηνο. Τα παραπάνω αποτελούν τα άμεσα μέτρα αντιμετώπισης πυρηνικού ατυχήματος.

Στα βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα μέτρα, ο κανόνας που ακολουθείται είναι ότι συγκομίζονται μόνο οι καλλιέργειες που παρουσιάζουν χαμηλή ραδιορρύπανση ή οι καλλιέργειες που μπορούν να απορρυπανθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να μην είναι επικίνδυνες όταν φτάσουν στην κατανάλωση. Καλλιέργειες που παρουσιάζουν μεγάλη ραδιορρύπανση, της οποίας η απομάκρυνση δεν είναι εφικτή, δε συγκομίζονται.

Πρέπει να σημειωθεί ότι όσο πλησιάζουμε γεωγραφικά κοντά στο χώρο του ατυχήματος ή της έκρηξης και όσο είμαστε χρονικά κοντά στην περίοδο που έχει γίνει η ραδιενεργός εναπόθεση, τόσο περισσότερες καλλιέργειες δε συγκομίζονται.

Όταν η ρύπανση των εδαφών είναι πολύ μεγάλη, τα φυτά που θα αναπτυχθούν σ' αυτά θα περιέχουν μεγάλες ποσότητες ραδιενεργών ατόμων και συνεπώς θα είναι ακατάλληλα για τροφή. Στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να ληφθούν μέτρα ώστε να απαλλαγεί το έδαφος, όσο γίνεται, από την παρουσία της ραδιορρύπανσης. Αντίθετα, όταν η ραδιορρύπανση είναι μικρή, η λήψη απλών βελτιωτικών μέτρων είναι επαρκής για τη μείωση των δυσμενών επιπτώσεων που προκαλούνται από την παρουσία της στο εδαφικό σύστημα. Τα μέτρα αυτά ονομάζονται μακροπρόθεσμα και αναφέρονται επιγραμματικά παρακάτω:

- Απορρύπανση εδάφους: Συνίσταται κυρίως στην απομάκρυνση απ' αυτό του Στροντίου-90 και του Καισίου-137. Οι κυριότεροι τρόποι με τους οποίους πραγματοποιείται η απορρύπανση είναι οι παρακάτω:

1. Απομάκρυνση φυτικού τυλίγματος
2. Απομάκρυνση επιφανειακού εδάφους
3. Έκπλυση Στροντίου-90 και Καισίου-137 κάτω από τη ζώνη των ριζών
4. Συνεχής καλλιέργεια.
5. Βελτιωτικά μέτρα: Λαμβάνονται μόνο σε περιοχές όπου η ραδιενεργός ρύπανση δεν είναι πολύ σοβαρή. Τέτοια μέτρα είναι:

- Προσθήκη χημικών ουσιών και λιπασμάτων όπως ασβέστιο, κάλλιο κ.ά.
- Βαθιά άροση
- Αλλαγή στον τύπο της γεωργικής παραγωγής.

Η κατάσταση που δημιουργείται στην άμεση περιοχή τέτοιου ατυχήματος απαιτεί τη λήψη σοβαρότατων μέτρων και αποφάσεων, την κινητοποίηση τεράστιου ανθρώπινου δυναμικού και την ύπαρξη κατάλληλης επιστημονικής και τεχνικής υποδομής για την αντιμετώπισή της. Εξετάζοντας τη χρονική εξέλιξη των επιπτώσεων σε μια συγκεκριμένη περιοχή, μπορούμε να διακρίνουμε:

- Τη φάση μεταξύ της έκλυσης της ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα και της άφιξης ραδιενεργών ρύπων στην περιοχή. Ανάλογα με την περίπτωση η φάση αυτή θα διαρκέσει από ορισμένα λεπτά έως και αρκετές ημέρες.
- Τη φάση αυξημένων συγκεντρώσεων ραδιενεργών ισοτόπων στον αέρα, δηλαδή την παρουσία του ραδιενεργού νέφους. Κατά την περίοδο αυτή πραγματοποιείται η εναπόθεση ραδιενέργειας στο έδαφος και η πρωτογενής ρύπανση των φυτών και των επιφανειακών υδάτων. Ο άνθρωπος εκτίθεται σε πρόσθετη εξωτερική ακτινοβολία από τα ραδιενεργά υλικά στον αέρα και στο έδαφος και σε πρόσθετη εσωτερική από τα εισπνεόμενα ισότοπα και από τα πρώτα επιβαρυμένα τρόφιμα (εκτεθειμένα λαχανικά και φρούτα, νερό, γάλα).
- Τη φάση της αυξημένης πρωτογενούς ρύπανσης. Αρχίζει ταυτόχρονα με την προηγούμενη, αλλά διαρκεί αρκετό χρόνο μετά την πάροδο του “ραδιενεργού νέφους”. Κατά τη φάση αυτή, η οποία ονομάζεται και ενδιάμεση, η συνολική ενεργότητα των ρύπων μειώνεται συνεχώς και αρχίζει μία πολύπλοκη και πολύμορφη διακίνηση των ραδιενεργών ισοτόπων. Κατά την περίοδο αυτή ο πληθυσμός εκτίθεται σε πρόσθετη εξωτερική ακτινοβολία από το έδαφος και στην εσωτερική ακτινοβολία λόγω πρόσληψης ραδιενέργειας με την τροφή.
- Τη φάση της ύφεσης, η οποία χαρακτηρίζεται από την απουσία μηχανισμών περαιτέρω συσσώρευσης ραδιενέργειας στο περιβάλλον και στους οργανισμούς.

Τα μέτρα που ακολουθούνται για τη ραδιολογική προστασία του πληθυσμού παρουσιάζονται παρακάτω:

Κατά την πρώτη φάση έχει σημασία η όσο το δυνατό ταχύτερη ενεργοποίηση των υπηρεσιών βάσει συγκεκριμένου σχεδίου έκτακτης ανάγκης και η συλλογή όλων των απαραίτητων πληροφοριών για την εκτίμηση του ενδεχόμενου εφαρμογής ειδικών μέτρων ραδιολογικής προστασίας. Τέτοια μέτρα μπορεί να είναι η εκκένωση, ο περιορισμός σε κλειστούς χώρους, η χορήγηση σταθερού ιωδίου, ο αποκλεισμός της περιοχής του ατυχήματος, ο εσταβλισμός των ζώων, ο περιορισμός ή η απαγόρευση κατανάλωσης ορισμένων τροφίμων. Για ορισμένα από αυτά τα μέτρα έχουν καθοριστεί και συνιστάμενα όρια δόσεων

6.4 ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΤΟΥ ΟΥΡΑΝΙΟΥ

Η παραδοσιακή εξόρυξη ουρανίου είναι παρόμοια τεχνικά με οποιαδήποτε άλλη εξόρυξη, επιφανειακή ή υπόγεια. Μια διαφορετική τεχνολογία είναι η “επί τόπου εκχύλιση”, κατά την οποία η εκχυλιστική

ουσία (συνήθως θειικό οξύ) εισάγεται από γεωτρήσεις στο έδαφος/κοίτασμα, ενώ από άλλες γεωτρήσεις αντλείται διάλυμα που περιέχει ουράνιο και άλλα μέταλλα. Η ρύπανση των υπόγειων υδάτων είναι σχεδόν αναπόφευκτη.

Με τις παραδοσιακές μεθόδους εξόρυξης κι εμπλουτισμού, το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι η απόθεση των τελμάτων εμπλουτισμού, που λόγω των χαμηλών συγκεντρώσεων των κοιτασμάτων σε ουράνιο (συντά 0,1-0,2%), είναι περίπου ίσης ποσότητας με το αρχικό μέταλλευμα. Οι κίνδυνοι από την απόθεση αυτών είναι πολύ σημαντικοί.

Συγκεκριμένα, εμφανίζονται οι παρακάτω κίνδυνοι κατά την εξόρυξη του ουρανίου:

- Λόγω τεχνολογικών περιορισμών, κάποια ποσότητα ουρανίου δεν μπορεί να ληφθεί και παραμένει στα τέλματα, μαζί με τα λοιπά βαρέα ραδιενεργά στοιχεία, ράδιο και θόριο. Το 85% της αρχικής ραδιενέργειας παραμένει στα τέλματα.
- Οι σωροί των τελμάτων εκπέμπουν ραδιενεργό αέριο ραδόνιο-222, που παράγεται διαρκώς από την διάσπαση του ραδίου-226, το οποίο με τη σειρά του παράγεται διαρκώς από το θόριο-230. Μετά από περίπου ένα εκατομμύριο χρόνια η ακτινοβολία του σωρού των τελμάτων μειώνεται σε επίπεδα 33 φορές υψηλότερα από τα μη ραδιενεργά εδάφη, και εκεί σταθεροποιείται. Το ραδόνιο είναι ένας μεγάλος και μακροχρόνιος κίνδυνος γιατί συνεχίζει να εκπέμπεται και αφού κλείσουν τα μεταλλεία, και τα προϊόντα της διάσπασής του προκαλούν καρκίνο του πνεύμονα.
- Τα τέλματα περιέχουν όλα τα υπόλοιπα τοξικά βαρέα μέταλλα που δεν είναι εκμεταλλεύσιμα, όπως μολυβδαίνιο, σελήνιο, βανάδιο, μόλυβδος, ψευδάργυρος, κάδμιο, αρσενικό (ανάλογα με το κοίτασμα), σε μορφή που είναι πολύ εύκολη η διασπορά τους στο περιβάλλον. Η σκόνη που παρασύρει ο αέρας από το σωρό των τελμάτων περιέχει ράδιο, αρσενικό κ.τ.λ. Τα στραγγίσματα από το σωρό προς το έδαφος και τον υδροφόρο ορίζοντα επίσης περιέχουν ράδιο, αρσενικό και πάει λέγοντας. Αν το αρχικό μέταλλευμα είναι θειούχο, υπάρχει και όξινη απορροή που επιδεινώνει την κατάσταση.
- Φυσικά υπάρχουν όλοι οι κίνδυνοι από μια καταστροφική αστοχία του φράγματος που συγκρατεί τα τέλματα, λόγω διάβρωσης, πλημμύρας, σεισμού ή καταρρακτώδους βροχής. Η ασφάλεια των φραγμάτων μεταλλευτικών αποβλήτων πρέπει να εξασφαλίζεται σε κάθε περίπτωση.
- Μετά την παύση της εξόρυξης πρέπει να ληφθούν όλα τα απαραίτητα μέτρα ώστε ο σωρός των ραδιενεργών αποβλήτων να καλυφθεί, να σταθεροποιηθεί και να παραμείνει έτσι για τα επόμενα 1 εκατομμύριο χρόνια.

6.5 ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΑ ΚΑΤΑΛΟΙΠΑ

6.5.1 Κατηγορίες Ραδιενεργών Καταλοίπων

Ραδιενεργά κατάλοιπα θεωρούνται τα υλικά που περιέχουν αξιόλογη ποσότητα ραδιενεργών ισοτόπων, έχουν προκύψει από χρήση ραδιενεργών υλικών και δεν θεωρούνται πλέον χρήσιμα. Διακρίνονται σε χαμηλού επιπέδου, ενδιάμεσου επιπέδου και υψηλού επιπέδου κατάλοιπα, με κριτήρια την ποσότητα και το είδος της ραδιενέργειας, καθώς και τους αναμενόμενους χρόνους επιβίωσης των ραδιενεργών ισοτόπων που περιέχουν.

Χαμηλού επιπέδου κατάλοιπα παράγονται από τις εφαρμογές της πυρηνικής τεχνολογίας στην υγεία, στα ερευνητικά και άλλα εργαστήρια και τη βιομηχανία, καθώς και από την πυρηνική βιομηχανία. Συνίστανται από χαρτιά, εργαλεία, μπουκάλια, ρουχισμό, φίλτρα και άλλα, τα οποία περιέχουν μικρές ποσότητες κυρίως βραχύβιων ραδιοϊσοτόπων. Η διαχείρισή τους δεν είναι επικίνδυνη, αλλά η απόρριψή τους στο περιβάλλον πρέπει να γίνεται με περισσότερη προσοχή, σε σχέση με τα κοινά απορρίμματα. Προκειμένου να μειωθεί ο όγκος τους, συχνά τα μεν στερεά συμπιέζονται, τα δε υγρά αποξηραίνονται σε κατάλληλες εγκαταστάσεις. Στη συνέχεια, τοποθετούνται σε δοχεία τα οποία είτε (α) φυλάσσονται σε κατάλληλους επιβλεπόμενους χώρους μέχρις ότου το επί-πεδο ραδιενέργειας πέσει κάτω από ορισμένα θεσμοθετημένα από εθνικές νομοθεσίες ασφαλή όρια, οπότε αντιμετωπίζονται ως κοινά σκουπίδια και απορρίπτονται ως τέτοια, είτε (β) θάβονται σε μικρό βάθος στη γη σε επιβλεπόμενες περιοχές. Εκτιμάται ότι παγκοσμίως αποτελούν το 90% του συνολικού όγκου όλων των ραδιενεργών καταλοίπων, αλλά ότι περιέχουν μόνον το 1% της ραδιενέργειας του συνόλου των καταλοίπων.

Ενδιάμεσου επιπέδου κατάλοιπα είναι αυτά που περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες ραδιενέργειας και που, ενδεχομένως, χρειάζονται θωράκιση. Περιλαμβάνουν ραδιενεργά υλικά, π.χ. ρητίνες, χημικά υγρά, εξαντλημένες ραδιενεργές πηγές από ιατρικές και βιομηχανικές χρήσεις, αντικείμενα από αντιδραστήρες και άλλα. Τέτοια κατάλοιπα ενδέχεται να κλεισθούν σε θωράκιση τσιμέντου ή, αν πρόκειται για υγρά, να εμποτιστούν σε τσιμέντο πριν από τη φύλαξη, ή την εναπόθεση σε επιβλεπόμενους χώρους. Εκτιμάται ότι παγκοσμίως αποτελούν το 7% του

συνολικού όγκου όλων των ραδιενεργών καταλοίπων και ότι περιέχουν μόνο 4% της ραδιενέργειας του συνόλου των καταλοίπων.

Υψηλού επιπέδου κατάλοιπα θεωρούνται τα μεγάλης ραδιενέργειας προϊόντα της σχάσης και κάποια βαρέα μακρόβια ραδιενεργά ισότοπα παραγόμενα στους αντιδραστήρες. Παράγουν σημαντικές ποσότητες θερμότητας, από τη διάσπαση των ραδιονουκλιδίων, οπότε απαιτείται ψύξη και ειδική θωράκιση κατά τον χειρισμό και τη μεταφορά τους. Το υπόλοιπο του κεφαλαίου αφιερώνεται σ' αυτά τα κατάλοιπα διότι το ζήτημα της ασφαλούς μακροχρόνιας διαχείρισής τους είναι αμφιλεγόμενο, προβάλλεται έντονα από τους αντιτιθέμενους στην βιομηχανική χρήση της πυρηνικής ενέργειας και συνιστά το σημαντικότερο ίσως πρόβλημα της πυρηνικής ηλεκτροπαραγωγής.

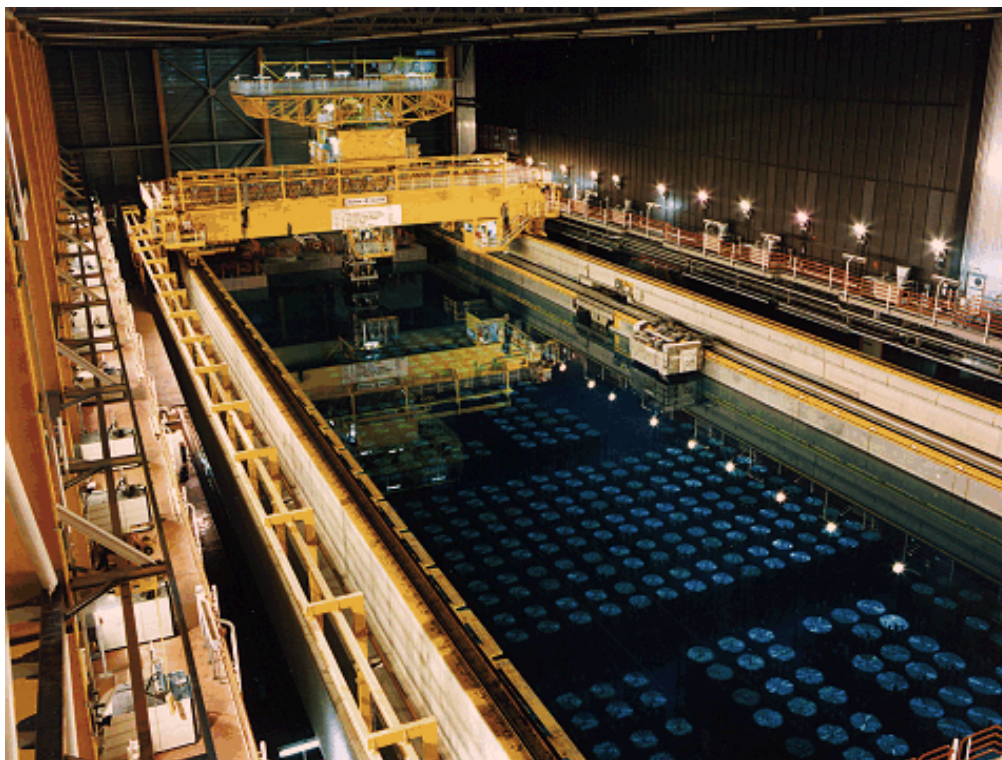
6.5.2 Βραχυπρόθεσμη Διαχείριση των Πυρηνικών Καταλοίπων

Όπως είδαμε, πολλά από τα προϊόντα της σχάσης είναι ραδιενεργά. Επί πλέον, στον αντιδραστήρα παράγονται, με απορρόφηση νετρονίων από τα ισότοπα του ουρανίου, τα ονομαζόμενα υπερουράνια ισότοπα, τα οποία είναι και αυτά ραδιενεργά. Τα κύρια υπερουράνια στοιχεία που παράγονται στο πυρηνικό καύσιμο είναι ισότοπα του πλουτωνίου, του νεπτουνίου και του αμερικού, που είναι άκρως μακρόβια με μεγάλους χρόνους ημιζωής. Η ραδιενέργειά τους εξασθενεί σε χρονική κλίμακα παρόμοια με αυτήν των ισοτόπων του ουρανίου. Έτσι, ενώ για την εξασθένιση της ραδιενέργειας των προϊόντων της σχάσης σε ανεκτά επίπεδα επαρκούν ενδεχομένως μερικές χιλιάδες έτη, η παρουσία των υπερουρανίων καθιστά απαραίτητη την ασφαλή διαχείριση των ραδιενεργών καταλοίπων από το πυρηνικό καύσιμο επί πολύ μεγαλύτερα διαστήματα.

Κατά τη λειτουργία του αντιδραστήρα, το ποσοστό του σχάσιμου U-235 στο πυρηνικό καύσιμο μειώνεται καθώς το U-235 καταστρέφεται με τις σχάσεις. Ταυτόχρονα αυξάνεται η ποσότητα των προϊόντων της σχάσης και των υπερουρανίων στοιχείων. Όσο περισσότερο παραμένει το καύσιμο στον εν λειτουργία αντιδραστήρα, όσο δηλαδή περισσότερη ενέργεια παράγει, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση του ποσοστού του επιβιώσαντος U-235 και τόσο περισσότερη η ποσότητα των προϊόντων της σχάσης και των υπερουρανίων.

Όστε, με την λειτουργία του αντιδραστήρα όχι μόνον μειώνεται το ποσοστό του σχάσιμου υλικού, αλλά και προστίθενται απορροφητές νετρονίων, κυρίως τα προϊόντα της σχάσης. Όταν το ποσοστό του σχάσιμου υλικού μειωθεί κάτω από κάποια τιμή, το πυρηνικό καύσιμο δεν επαρκεί για να διατηρήσει κρίσιμο τον αντιδραστήρα στην επιθυμητή ισχύ και πρέπει να εξαχθεί από την καρδιά και να αντικατασταθεί από

νέο καύσιμο. Στην κατάσταση αυτή ονομάζεται εξαντλημένο ή χρησιμοποιημένο καύσιμο.



Εικόνα 6.1 Δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης συστάδων χρησιμοποιημένου καυσίμου [1].

Οι συστάδες του εξαντλημένου καυσίμου, αφού εξαχθούν από την καρδιά, αποθηκεύονται προσωρινά σε δεξαμενή ύδατος στο πυρηνικό εργοστάσιο (εικόνα 6.1). Το νερό στη δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης λειτουργεί, αφ' ενός, ως ψυκτικό του χρησιμοποιημένου καυσίμου και, αφ' ετέρου, ως θωράκιση των ραδιενεργών συστάδων για την προστασία των εργαζομένων.

Στο χρησιμοποιημένο καύσιμο παράγεται θερμότητα από τη διάσπαση των ραδιενεργών προϊόντων. Έτσι, αν η συστάδα, μετά την έξοδο από την καρδιά, παραμείνει χωρίς ψύξη, υπάρχει κίνδυνος τήξης του περιβλήματος ράβδων καυσίμου και διαρροής των ραδιενεργών προϊόντων. Παραδείγματος χάριν, αμέσως μόλις εξαχθεί εξαντλημένη συστάδα σύγχρονου αντιδραστήρα ελαφρού ύδατος, ηλεκτρικής ισχύος 1000 MW, είναι τόσο ραδιενεργός, ώστε εκλύει θερμότητα μερικών εκατοντάδων KW.

Δεδομένου ότι η ραδιενέργεια μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, η παραγόμενη από τη συστάδα θερμότητα, μετά από ένα έτος, μειώνεται σε πέντε περίπου KW και μετά από πέντε έτη σε ένα KW. Σαράντα έτη μετά την έξοδο από την καρδιά, η ραδιενέργεια της

συστάδας πέφτει στο ένα χιλιοστό αυτής που υπήρχε κατά την έξοδο από την καρδιά.

6.5.3 Μεσοπρόθεσμη Διαχείριση των Πυρηνικών Καταλοίπων

Έχουν επικρατήσει οι εξής δύο πολιτικές διαχείρισης:

(α) ανακύκλωση του χρησιμοποιημένου καυσίμου για τον διαχωρισμό του ουρανίου και του πλουτωνίου από τα «λοιπά ραδιενεργά υλικά». Στην περίπτωση αυτή, αντιμετωπίζονται ως κατάλοιπα αυτά τα «λοιπά ραδιενεργά υλικά», τα οποία περιέχουν τα προϊόντα της σχάσης και τα υπερουράνια στοιχεία. Στόχοι της ανακύκλωσης είναι η απόκτηση των χρήσιμων ουρανίου και πλουτωνίου και ο περιορισμός του όγκου των καταλοίπων. Η πολιτική αυτή ακολουθείται από τις ευρωπαϊκές χώρες, πλην της Σουηδίας, και από την Ιαπωνία.

(β) αντιμετώπιση του συνόλου της χρησιμοποιημένης συστάδας καυσίμου ως κατάλοιπο. Η πολιτική αυτή ακολουθείται από τη Σουηδία, υιοθετήθηκε από τις ΗΠΑ επί προεδρίας Κάρτερ και πρόσφατα από τον Καναδά. Στις χώρες αυτές αξιολογείται ως οικονομικά μη ενδιαφέρον το «άρμεγμα» ουρανίου και πλουτωνίου από το χρησιμοποιημένο καύσιμο, οπότε το σύνολο της συστάδας του χρησιμοποιημένου καυσίμου, ως έχει, χωρίς οποιαδήποτε επεξεργασία, θεωρείται, και υφίσταται διαχείριση, ως κατάλοιπο. Βεβαίως, στην περίπτωση αυτή ο όγκος των καταλοίπων είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν των καταλοίπων της ανακύκλωσης. Η κατάσταση του χρησιμοποιημένου καυσίμου, στη μορφή του κεραμικού διοξειδίου του ουρανίου, θεωρείται ευσταθής.

Οι συστάδες του χρησιμοποιημένου καυσίμου παραμένουν στην δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης για μερικά έτη, συνήθως πέντε, μέχρις ότου η παραγόμενη θερμότητα και η παραμένουσα ραδιενέργεια μειωθούν σε επίπεδα που επιτρέπουν τον ασφαλή χειρισμό των συστάδων.

Μετά από αυτό, στην περίπτωση πολιτικής ανακύκλωσης, οι συστάδες καυσίμου μεταφέρονται με κατάλληλα θωρακισμένα δοχεία σε εργοστάσιο ανακύκλωσης του χρησιμοποιημένου καυσίμου. Εκεί, αφού πρώτα τεμαχισθεί και διαλυθεί το χρησιμοποιημένο καύσιμο σε νιτρικό οξύ, διαχωρίζεται με χημικές μεθόδους το ουράνιο⁶ και το πλουτώνιο από τα λοιπά ραδιενεργά προϊόντα. Το πλουτώνιο μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί, και χρησιμοποιείται, ως σχάσιμο υλικό στους αντιδραστήρες. Τα εναπομένοντα ραδιενεργά προϊόντα, κυρίως τα προϊόντα της σχάσης και τα υπερουράνια, θεωρούνται και είναι κατάλοιπα προς ασφαλή μακροχρόνια διαχείριση. Εκπέμπουν ακτινοβολίες άλφα, βήτα και γάμμα σε πολύ υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας. Αποθηκεύονται προσωρινά σε υγρή μορφή σε κατάλληλες

δεξαμενές πολλαπλών τοιχωμάτων από ανοξείδωτο χάλυβα, περιβαλλόμενες από προεντεταμένο σκυρόδεμα, όπου ψύχονται συνεχώς δεδομένου ότι συνεχίζουν να παράγουν σημαντικές ποσότητες θερμότητας. Μολονότι οι κανονισμοί ασφαλείας των εργοστασίων ανακύκλωσης και των εγκαταστάσεων προσωρινής αποθήκευσης είναι πολύ αυστηροί, έχουν συμβεί διαρροές καταλοίπων στο περιβάλλον, από τα εργοστάσια αυτά.

Στις χώρες που επέλεξαν τη πολιτική αντιμετώπισης του συνόλου του χρησιμοποιημένου καυσίμου ως καταλοίπου, οι συστάδες του χρησιμοποιημένου καυσίμου φυλάσσονται, αρχικά, στους πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Βρίσκονται είτε στις δεξαμενές νερού του πυρηνικού σταθμού είτε σε ξηρά αποθήκευση. Με την ξηρά αποθήκευση, αφού η συστάδα καυσίμου μείνει επί μερικά έτη στη δεξαμενή νερού του πυρηνικού σταθμού, ώστε η παραγόμενη θερμότητα και η εκπεμπόμενη ραδιενέργεια να πέσουν σε ανεκτά επίπεδα, η συστάδα μεταφέρεται εκτός δεξαμενής και τοποθετείται σε δοχείο από μπετόν κατάλληλου πάχους, το οποίο λειτουργεί ως θωράκιση της ραδιενέργειας. Η ψύξη της συστάδας πραγματοποιείται με φυσική κυκλοφορία αέρα.

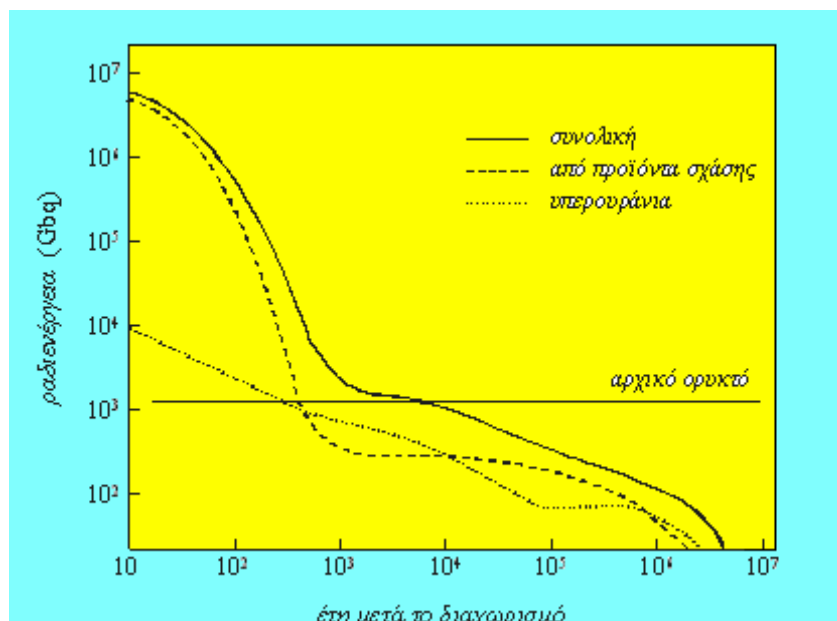


Εικόνα 6.2.: Δοχεία ξηράς αποθήκευσης συστάδων καυσίμου.

Εξάιρεση αποτελεί η Σουηδία η οποία διαθέτει από το 1988 κεντρική εγκατάσταση αποθήκευσης καταλοίπων. Μετά από παραμονή των συστάδων στην δεξαμενή νερού του πυρηνικού σταθμού επί ένα περίπου έτος, οι συστάδες αποστέλλονται στη κεντρική εγκατάσταση όπου αποθηκεύονται σε δεξαμενή νερού, στην οποία προβλέπεται να παραμείνουν επί 40 έτη.

6.5.4 Μακροπρόθεσμη Διαχείριση των Πυρηνικών Καταλοίπων

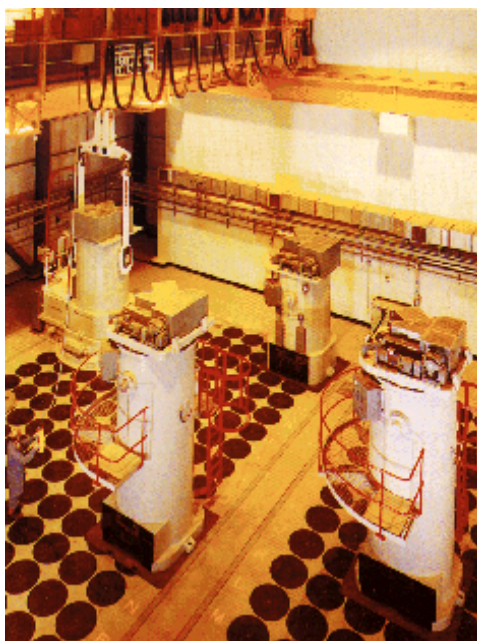
Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η κλίμακα της χρονικής διάρκειας που απαιτείται για την ασφαλή διαχείριση ή την ασφαλή εναπόθεση (π.χ. με ενταφιασμό) των καταλοίπων, παρατίθεται το διάγραμμα του Σχήματος 6.1, το οποίο παρουσιάζει την χρονική μεταβολή της συνολικής ραδιενέργειας των καταλοίπων (στην προκειμένη περίπτωση κυρίως προϊόντων της σχάσης και των υπερουρανίων), που προκύπτουν από έναν τόνο καυσίμου αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος (PWR).



Σχήμα 6.1.: Ραδιενέργεια καταλοίπων από ένα τόνο εξαντλημένου καυσίμου αντιδραστήρα PWR. Η οριζόντια συνεχής γραμμή δίνει τη συνολική ραδιενέργεια του κοιτάσματος ουρανίου από το οποίο παρήχθη το καύσιμο.

Στο διάγραμμα φαίνεται η χρονική εξέλιξη της ραδιενέργειας των προϊόντων της σχάσης, των υπερουρανίων και της συνολικής ραδιενέργειας των καταλοίπων, δηλαδή του αθροίσματος των δύο προηγούμενων. Η οριζόντια συνεχής γραμμή δίνει, ως μέτρο σύγκρισης, τη συνολική φυσική ραδιενέργεια της ποσότητας κοιτάσματος ουρανίου που είναι απαραίτητη για την κατασκευή ενός τόνου καυσίμου. Ο κατακόρυφος άξονας δίνει το μέγεθος της ραδιενέργειας και ο οριζόντιος τον χρόνο σε έτη. Πρακτικά, και για την ποιοτική εξέταση που ακολουθεί, αυτός ο χρόνος μπορεί να αναγνωσθεί ως χρόνος μετά την έξοδο του καυσίμου από τον αντιδραστήρα. Για ότι ακολουθεί δεν

ενδιαφέρουν οι απόλυτες τιμές της ραδιενέργειας, αλλά η χρονική μεταβολή της. Βλέπουμε ότι από τα 10 έως τα 1000 έτη η συνολική ραδιενέργεια των καταλοίπων μειώνεται κατά χίλιες περίπου φορές. Επίσης, σε λιγότερο από 1000 έτη η ραδιενέργεια των προϊόντων της σχάσης πέφτει κάτω από αυτήν του ορυκτού. Η συνολική ραδιενέργεια όμως προσεγγίζει αυτήν του ορυκτού σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και μέχρι τα δέκα χιλιάδες περίπου έτη παραμένει ίση περίπου με αυτήν του ορυκτού. Μολονότι η σύγκριση με το φυσικό ορυκτό δίνει το μέτρο της χρονικής κλίμακας της διακινδύνευσης, η επάνοδος στα επίπεδα ραδιενέργειας του φυσικού ορυκτού δεν είναι επαρκές κριτήριο ακτινοπροστασίας. Το ζητούμενο είναι η διασφάλιση ότι, ακόμη και μετά την πτώση της συνολικής ραδιενέργειας κάτω από τα επίπεδα του φυσικού ορυκτού, τα μακρόβια ραδιενεργά προϊόντα της σχάσης και τα υπερουράνια ισότοπα θα παραμείνουν απομονωμένα και δεν θα εισέλθουν στη βιόσφαιρα και δι' αυτής στην τροφική αλυσίδα και στο εσωτερικό του σώματος του ανθρώπου. Πρέπει λοιπόν να υπάρξει ασφαλής διαχείριση των ραδιενεργών καταλοίπων επί πολλές χιλιετίες.



Εικόνα 6.3: Σιλό αποθήκευσης δοχείων υαλοποιημένων καταλοίπων στην Αγγλία. Κάθε μεταλλικός δίσκος στο πάτωμα καλύπτει ένα σιλό που περιέχει 10 δοχεία τοποθετημένα κατακόρυφα το ένα πάνω στο άλλο. Οι λευκοί κύλινδροι είναι θωρακισμένες μηχανές φόρτωσης των δοχείων στα σιλό.

Οι περισσότερες χώρες που διαθέτουν πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος έχουν αποφασίσει την τελική εναπόθεση των καταλοίπων σε μεγάλο βάθος (500 έως 1000 μέτρα) στη γη, σε κατάλληλους

γεωλογικούς σχηματισμούς, και την παρεμβολή πολλαπλών φραγμάτων μεταξύ των καταλοίπων και της βιόσφαιρας. Τέτοια φράγματα θεωρούνται:

- ο μετασχηματισμός των καταλοίπων σε αδιάλυτη ευσταθή μορφή,
- ο εγκλωβισμός σε στεγανά δοχεία ανθεκτικά στη διάβρωση,
- η τοποθέτηση των δοχείων σε μεγάλο βάθος στο έδαφος σε ευσταθείς γεωλογικούς σχηματισμούς, δια των οποίων δεν διέρχονται υπόγεια ύδατα.

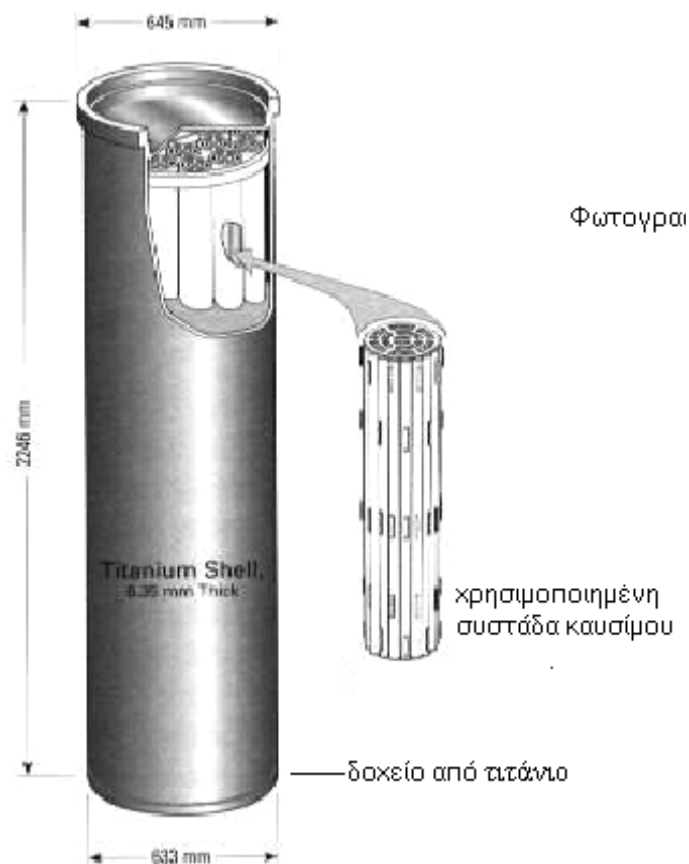
Στις χώρες που επέλεξαν πολιτική ανακύκλωσης, τα υγρά κατάλοιπα, προκειμένου να εναποτεθούν οριστικά, πρέπει να μετασχηματισθούν σε φυσικά ευσταθή και χημικά αδρανή μορφή. Η μέθοδος που εφαρμόζεται σήμερα σε βιομηχανική κλίμακα είναι η υαλοποίηση των καταλοίπων. Αυτό γίνεται με αποξήρανση των καταλοίπων και συμπύκνωσή τους σε στεγνή πούδρα, η οποία αναμειγνύεται σε υγρό γυαλί παρόμοιου τύπου με το πυρέξ. Το υγρό γυαλί χύνεται σε μεγάλα δοχεία από ανοξείδωτο χάλυβα και εκεί συμπυκνώνεται σε «στερεό» γυαλί. Κάθε δοχείο περιέχει περίπου 400 χιλιόγραμμα τέτοιου γυαλιού. Τα δοχεία αυτά αποθηκεύονται προς το παρόν μεσοπρόθεσμα, δηλαδή για μερικές δεκαετίες, σε κατάλληλους επιβλεπόμενους χώρους.

Εργοστάσια υαλοποίησης λειτουργούν στη Γαλλία (από το 1978), στην Αγγλία, στο Βέλγιο, στη Ρωσία, στην Ινδία και ένα μικρό στην Ιαπωνία, η οποία μέχρι τώρα ανακυκλώνει το μεγαλύτερο μέρος των καταλοίπων της στην Ευρώπη, ενώ κατασκευάζει ένα μεγάλο εργοστάσιο υαλοποίησης. Στις ΗΠΑ έχουν κατασκευασθεί τρία εργοστάσια υαλοποίησης, εκ των οποίων το ένα σταμάτησε τη λειτουργία του, διότι οι αυξημένες απαιτήσεις ασφάλειας που επιβλήθηκαν το κατέστησαν μη οικονομικό, το δεύτερο απέτυχε να λειτουργήσει επιτυχώς και το τρίτο δεν ολοκληρώθηκε, διότι οι ΗΠΑ επί προεδρίας Κάρτερ εγκατέλειψαν την πολιτική ανακύκλωσης.

Η υαλοποίηση των καταλοίπων επελέγη διότι το γυαλί θεωρείται ευσταθές μη διαλυτό υλικό. Δεν έχει όμως αποδειχθεί πειραματικά ότι το γυαλί αυτό θα παραμείνει ευσταθές για τις χιλιάδες έτη που απαιτούνται. Είναι δύσκολο να αποδειχθεί για τέτοια χρονική κλίμακα. Η σχετική έρευνα συνεχίζεται.

Ανεξάρτητα αν τα κατάλοιπα είναι από ανακύκλωση και υαλοποιημένα ή ολόκληρες συστάδες καυσίμου, η οριστική τους εναπόθεση προβλέπεται να γίνει βαθιά στο έδαφος. Πριν από αυτό θα παραμείνουν επί 40 έως 50 περίπου έτη στην προσωρινή αποθήκευση, όπως αυτή περιγράφηκε προηγουμένως, για τη μείωση της παραγόμενης θερμότητας και της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, ώστε ο χειρισμός τους να καταστεί ευκολότερος. Μετά προβλέπεται να τοποθετηθούν σε υδατοστεγή δοχεία από ανθεκτικό στη διάβρωση υλικό, π.χ. από

ανοξειδωτο χάλυβα. Μετά, προβλέπεται να εναποτεθούν σε βάθος 500 έως 1000 μέτρων σε γεωλογικό σχηματισμό, δια του οποίου δεν διέρχονται και δεν προβλέπεται να διέλθουν για πολλές χιλιετίες υπόγεια ύδατα.



Εικόνα 6.4: Στεγανό δοχείο αποθήκευσης καναδικού χρησιμοποιημένου καυσίμου.

Τα δοχεία προβλέπεται επίσης να καλυφθούν με ικανού πάχους υλικό, που δυσχεραίνει τη διέλευση υδάτων, όπως η μπετονιτική άργιλος. Οι τύποι γεωλογικών σχηματισμών που είναι προς το παρόν υπό αξιολόγηση είναι σκληροί κρυσταλλικοί βράχοι και βράχοι άλατος.

Εάν, παρά τις προβλέψεις, διέλθουν υπόγεια ύδατα ικανά να μεταφέρουν «ουσίες» στην επιφάνεια της Γης και στο βιοσύστημα, θα πρέπει να μην διαβρώσουν τα δοχεία και να μην έλθουν σε επαφή με τα κατάλοιπα. Εάν, παρά ταύτα, διαβρώσουν τα σχεδιασμένα ως μη διαβρώσιμα στεγανά δοχεία, δεν θα πρέπει να διαλύσουν τα προβλεπόμενα ως αδιάλυτα κατάλοιπα (γυαλί, κεραμικό διοξείδιο του άνθρακα).

Είναι φανερό ότι εφαρμόζεται και εδώ η φιλοσοφία της άμυνας σε βάθος, με την έννοια ότι σχεδιάζονται διαδοχικά φράγματα αποτροπής

της ρύπανσης της βιόσφαιρας, καθένα από τα οποία έχει μικρή πιθανότητα να διαρραγεί.

Υπάρχουν όμως κρίσιμα και ενδεχομένως αμφιλεγόμενα ζητήματα τα οποία συνεπάγονται προβληματισμούς ηθικής τάξεως. Δεδομένου του τόσο μεγάλου χρονικού διαστήματος, που απαιτείται για την ασφαλή διαχείριση των καταλοίπων, η οποία συνεπάγεται την εμπλοκή πολλών επερχόμενων γενεών, ποιο βαθμό τεχνικής βεβαιότητας πρέπει να απαιτήσουμε ώστε:

- οι γεωλογικοί σχηματισμοί να παραμείνουν ευσταθείς και να μην διέλθουν δι' αυτών υπόγεια ύδατα,
- και αν διέλθουν, να μην διαβρωθούν τα δοχεία,
- και αν διαβρωθούν τα δοχεία τα κατάλοιπα να παραμένουν ευσταθή, μη διαλυτά.

Τα ερωτήματα αυτά είναι όχι μόνο θεμιτά, αλλά επιβάλλεται να τίθενται από ενημερωμένες κοινωνίες και να δίνονται σε αυτά πειστικές απαντήσεις από τους επιστήμονες, ώστε οι πολίτες δια των εκπροσώπων τους να είναι σε θέση να λάβουν νηφάλια απόφαση για το τόσο σοβαρό ζήτημα που αφορά στο ενεργειακό πρόβλημα, άρα στην ποιότητα ζωής και στην υγεία. Μέχρι σήμερα λειτουργεί μία μόνο εγκατάσταση εναπόθεσης ραδιενεργών καταλοίπων βαθιά στη Γη στις ΗΠΑ, για ραδιενεργά κατάλοιπα των ενόπλων δυνάμεων. Αναφέρεται ότι η Σουηδία προγραμματίζει εγκατάσταση οριστικής εναπόθεσης στο έδαφος μεταξύ των ετών 2015 και 2020.

Είναι πολύ σημαντικό να επισημάνουμε ότι περιβαλλοντική ρύπανση από ραδιενεργά κατάλοιπα έχει συμβεί (διαρροές από δοχεία αποθήκευσης, ρύπανση γης) από τα πυρηνικά πολεμικά προγράμματα σε χώρες όπως οι ΗΠΑ και η πρώην Σοβιετική Ένωση.

7. ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ

7.1 ΓΕΝΙΚΑ

Από τη δεκαετία του 1950 μέχρι σήμερα έχει λειτουργήσει και λειτουργεί σε όλο τον κόσμο μεγάλος αριθμός πυρηνικών αντιδραστήρων. Σε αυτό το διάστημα έχουν συμβεί αρκετά ατυχήματα μερικά από τα οποία ήταν πολύ σοβαρά. Σε όλα αυτά τα ατυχήματα εκτός των ατυχημάτων στους Browns Ferry και Vandell-1 συνέβη βλάβη ή καταστροφή της καρδιάς. Στον Browns Ferry καταστράφηκαν από πυρκαγιά κάποιες καλωδιώσεις του συστήματος ελέγχου με αποτέλεσμα το κλείσιμο της μονάδας για 18 μήνες για την εκτέλεση των αναγκαίων επισκευών. Στον Vandell-1 πάλι από πυρκαγιά προκλήθηκε βλάβη στον στρόβιλο. Η επισκευή κρίθηκε αντιοικονομική και έτσι η μονάδα αυτή σταμάτησε να λειτουργεί μετά από 17 χρόνια λειτουργίας.

Τα σημαντικότερα ατυχήματα είναι αυτά που συνέβησαν στο Three Mile Island, στο Chernobyl και πρόσφατα στη Φουκουσίμα. Το ατύχημα στο Three Mile Island σε αντίθεση με αυτό του Chernobyl δεν προκάλεσε μεγάλη εκροή ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον ούτε επιπτώσεις στην υγεία ατόμων. Ήταν όμως ατύχημα απώλειας ψυκτικού (LOCA) και προκάλεσε την καταστροφή της καρδιάς του αντιδραστήρα.

Στο εργοστάσιο κατασκευής πυρηνικού καυσίμου για πειραματικούς αντιδραστήρες Tokaimura (Ιαπωνία) συνέβη το 1999 ατύχημα κρισιμότητας, δηλαδή περιορισμένη μη-ελεγχόμενη αυτοσυντηρούμενη αντίδραση αλυσιδωτών σχάσεων. Το ατύχημα προκάλεσε το θάνατο δύο εργαζομένων. Πολλά παρόμοια ατυχήματα κρισιμότητας έχουν συμβεί σε στρατιωτικές εγκαταστάσεις και εργαστήρια κυρίως των Η.Π.Α. και της πρώην Σοβιετικής Ένωσης. Τα περισσότερα από αυτά συνέβησαν πριν από τις αρχές της δεκαετίας του 1980. Ένα από αυτά, παρόμοιο με αυτό της Ιαπωνίας που αναφέρθηκε παραπάνω, συνέβη σε εμπορικό εργοστάσιο πυρηνικού καυσίμου το 1964 και προκάλεσε ένα θάνατο. Τριάντα επτά συνέβησαν σε στρατιωτικές εγκαταστάσεις πειραματικών αντιδραστήρων και εργαστηρίων και προκάλεσαν 10 θανάτους. Άλλα είκοσι δύο συνέβησαν σε εγκαταστάσεις του κύκλου καυσίμου, είκοσι ένα σε στρατιωτικές εγκαταστάσεις και ένα σε εμπορική, και προκάλεσαν επτά θανάτους. Σε κανένα από αυτά τα ατυχήματα δε συνέβη αξιόλογη εκροή ραδιενεργών υλικών έξω από το κτίριο της εγκατάστασης.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές της δεκαετίας του 1980 συνέβησαν δύο μεγάλα ατυχήματα, τον Μάρτιο του 1979 στη μονάδα 2 του πυρηνικού σταθμού στο Three Mile Island (TMI) στην Πενσυλβάνια των Η.Π.Α. και τον Απρίλιο του 1986 στη μονάδα 4 του πυρηνικού σταθμού στο Chernobyl της Ουκρανίας. Το ατύχημα στο TMI αν και κατέστρεψε και έθεσε εκτός λειτουργίας τον πυρηνικό αντιδραστήρα δεν επέφερε σοβαρές επιβαρύνσεις στο περιβάλλον και στην υγεία του πληθυσμού. Αντίθετα, το ατύχημα στο Chernobyl είχε σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην υγεία των κατοίκων της περιοχής.

7.2 ΤΟ ΑΤΥΧΗΜΑ ΣΤΟ TMI

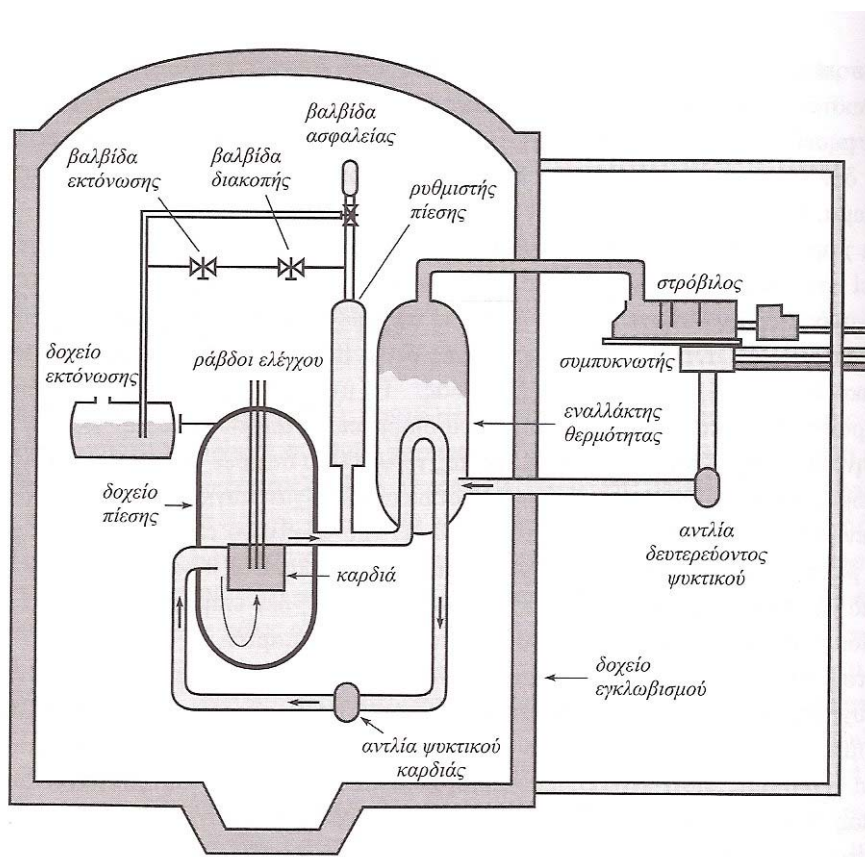
Στο νησί Three Mile Island κοντά στην πρωτεύουσα Χάρισμπουργκ της Πενσυλβάνια υπήρχε πυρηνικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με δύο αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος (PWR). Ο αντιδραστήρας της μονάδας 1 είχε ισχύ 800MW και είχε τεθεί σε πρώτη λειτουργία το 1974. Ο αντιδραστήρας της μονάδας 2 είχε ισχύ 900MW και ήταν σχεδόν ολοκαίνουργιος. Τη νύχτα της 28^{ης} Μαρτίου 1979 όταν συνέβη το ατύχημα στη μονάδα 2, ο αντιδραστήρας της μονάδας 1 ήταν εκτός λειτουργίας καθώς είχε μόλις ολοκληρωθεί η ετήσια ανανέωση του καυσίμου του.



Εικόνα 7.1 Ο πυρηνικός σταθμός στο Three Mile Island [7].

Τα κύρια γεγονότα του ατυχήματος έχουν ως εξής: Το πρωί της 28^{ης} Μαρτίου 1979, ενώ ο αντιδραστήρας λειτουργούσε στο 97% της ονομαστικής του ισχύος, συνέβη μία μικρής σημασίας βλάβη: σταμάτησαν να λειτουργούν οι αντλίες του δευτερεύοντος κυκλώματος ψυκτικού με αποτέλεσμα την αδυναμία απαγωγής θερμότητας από το

πρωτεύον κύκλωμα (το ψυκτικό που ψύχει την καρδιά) στους εναλλάκτες θερμότητας (ατμοπαραγωγές μονάδες). Η αιτία πρέπει να ήταν κάποια μηχανική ή ηλεκτρική βλάβη. Το αυτόματο σύστημα ελέγχου σταμάτησε τη λειτουργία του στροβίλου και στη συνέχεια έκλεισε τον αντιδραστήρα, δηλαδή μηδένισε τη ροή των νετρονίων σε χρόνο περίπου ενός δευτερολέπτου. Παρέμεινε όμως μεγάλη παραγωγή θερμικής ισχύος από τη διάσπαση των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης με αποτέλεσμα να αρχίσει να ανεβαίνει η πίεση στο πρωτεύον κύκλωμα του ψυκτικού.



Σχήμα 7.1 Διάγραμμα του αντιδραστήρα 2 του ΤΜΙ [1].

Το αυτόματο σύστημα ελέγχου προκειμένου να συγκρατηθεί η αύξηση της πίεσης, λίγα δευτερόλεπτα μετά το κλείσιμο του αντιδραστήρα, άνοιξε τη βαλβίδα εκτόνωσης του ρυθμιστή πίεσης και άρχισε να εκτονώνει μέρος του ψυκτικού του πρωτεύοντος κυκλώματος στο δοχείο εκτόνωσης. Σύμφωνα με τα προβλεπόμενα, όταν η πίεση μειώθηκε κάτω από μία ορισμένη τιμή, η βαλβίδα έπρεπε να κλείσει. Όμως λόγω μηχανικής αστοχίας δεν έκλεισε με αποτέλεσμα τη διαρροή ζωτικής ποσότητας ψυκτικού έξω από το πρωτεύον κύκλωμα.

Σοβαρό λάθος σχεδιασμού ήταν το γεγονός ότι δεν υπήρχε όργανο ένδειξης της πραγματικής θέσης της βαλβίδας με συνέπεια να μην αντιληφθούν οι χειριστές ότι η βαλβίδα παρέμενε ανοικτή και το ψυκτικό

διέρρηξε έξω από αυτήν. Λόγω της διαρροής του ψυκτικού η ψύξη της καρδιάς του αντιδραστήρα ήταν ελλιπής και συνεπώς υπερθερμάνθηκε. Ένα άλλο σχεδιαστικό λάθος ήταν ότι δεν υπήρχε όργανο μέτρησης της στάθμης του ψυκτικού στην καρδιά. Τα σήματα από τα διάφορα όργανα που ήταν διαθέσιμα στους χειριστές παρείχαν συγκεχυμένες πληροφορίες με αποτέλεσμα αυτοί να μην αντιληφθούν την αιτία του προβλήματος. Έτσι, καθώς οι συναγερμοί σήμαιναν οι χειριστές δεν κατάλαβαν ότι πρόκειται για ατύχημα απώλειας ψυκτικού και προέβησαν σε μία σειρά ενεργειών που έκαναν την κατάσταση ακόμη χειρότερη μειώνοντας περισσότερο τη ροή του ψυκτικού στην καρδιά.

Το αυτόματο σύστημα ελέγχου, ανταποκρινόμενο στην απώλεια ψυκτικού, ενεργοποίησε τις αντλίες παροχής συμπληρωματικού ψυχρού νερού υψηλής πίεσης. Έτσι, το υγρό νερό έμπαινε στο ρυθμιστή πίεσης υψώνοντας τη στάθμη του υγρού νερού σε αυτόν ενώ μείγμα υγρού νερού και ατμού διέφευγε μέσω της βαλβίδας. Αφού ανέβαινε η στάθμη του υγρού νερού στο ρυθμιστή πίεσης οι χειριστές νόμισαν ότι το πρωτεύον έχει πολύ περισσότερο υγρό νερό από όσο έπρεπε. Για να αποτρέψουν την πλήρωση του ρυθμιστή πίεσης με υγρό νερό, γεγονός που οδηγεί σε ανεξέλεγκτη αύξηση της πίεσης στο πρωτεύον και πιθανή θραύση του πρωτεύοντος κυκλώματος, οι χειριστές μείωσαν τη ροή του συμπληρωματικού υγρού νερού. Το γεγονός αυτό δείχνει ελλιπή εκπαίδευση του προσωπικού.

Σχηματίστηκε τότε ατμός στην καρδιά και στο πρωτεύον κύκλωμα. Το μείγμα υγρού νερού και ατμού προκάλεσε έντονες ταλαντώσεις στις αντλίες του ψυκτικού της καρδιάς. Επειδή οι ταλαντώσεις αυτές θα μπορούσαν να καταστρέψουν τις αντλίες, οι χειριστές σταμάτησαν τη λειτουργία τους με συνέπεια να σταματήσει η βεβιασμένη κυκλοφορία ψυκτικού στην καρδιά. Καθώς το ψυκτικό της καρδιάς γινόταν ατμός, ράβδοι του καυσίμου γυμνώθηκαν και η θερμοκρασία τους αυξήθηκε.

Η ελλιπής ψύξη της καρδιάς προκάλεσε υπερθέρμανση του καυσίμου με αποτέλεσμα την τήξη και τελικά τη θραύση του περιβλήματος (κράμα ζirkονίου) του καυσίμου. Στα αρχικά στάδια του ατυχήματος συνέβη τήξη περίπου της μισής καρδιάς. Συνέβη δηλαδή το σοβαρότατο ατύχημα τήξης ενός μεγάλου μέρους της καρδιάς. Παρόλα αυτά δεν προκλήθηκε ρήξη του δοχείου πίεσης.

Η φύση του ατυχήματος έγινε αντιληπτή το απόγευμα της 28^{ης} Μαρτίου. Τότε οι τεχνικοί έκλεισαν τη βαλβίδα διακοπής μεταξύ της βαλβίδας εκτόνωσης και του ρυθμιστή πίεσης οπότε σταμάτησε η απώλεια ψυκτικού από την καρδιά του αντιδραστήρα. Στη συνέχεια επανέφεραν βεβιασμένη κυκλοφορία του ψυκτικού αφού κατάφεραν να θέσουν σε λειτουργία μία αντλία του πρωτεύοντος. Έτσι η ψύξη της καρδιάς ήταν επαρκής και η κατάσταση σταθεροποιήθηκε. Φυσικά ο αντιδραστήρας είχε πια καταστραφεί ολοκληρωτικά.

Πριν την επίτευξη της επαρκούς ψύξης, λόγω υπερθέρμανσης της καρδιάς πραγματοποιήθηκε χημική αντίδραση μεταξύ του ζirkονίου του περιβλήματος των ράβδων καυσίμου και ατμού με αποτέλεσμα την παραγωγή υδρογόνου. Αυτό προκάλεσε μεγάλη ανησυχία για ενδεχόμενη καύση ή ακόμα και έκρηξη του υδρογόνου με πιθανή συνέπεια τη ρήξη του δοχείου πίεσης, την πτώση της καρδιάς στο δοχείο εγκλωβισμού και τη ρήξη του δοχείου εγκλωβισμού.



Εικόνα 7.2 Ειδικευμένο συνεργείο εργάζεται για την απομάκρυνση της ραδιενέργειας στο ΤΜΙ [1].

Η κρίση τελείωσε την 1^η Απριλίου όταν διεγνώσθη ότι κάτι τέτοιο δεν μπορούσε να συμβεί γιατί δεν υπήρχε αρκετό οξυγόνο στο δοχείο πίεσης. Οι χειριστές απομάκρυναν το υδρογόνο από το δοχείο πίεσης ανοίγοντας περιοδικά την βαλβίδα ασφαλείας. Στις 27 Απριλίου οι χειριστές επέβαλαν φυσική κυκλοφορία του ψυκτικού με αποτέλεσμα την ψύξη της καρδιάς χωρίς λειτουργία των αντλιών.

Κατά τη διάρκεια του ατυχήματος πραγματοποιήθηκαν ελεγχόμενες και μη-ελεγχόμενες εκροές ραδιενεργών αερίων στο περιβάλλον. Στις 30 Μαρτίου πραγματοποιήθηκε σημαντική ελεγχόμενη εκροή ραδιενέργειας προκειμένου να μειωθεί η πίεση στο πρωτεύον κύκλωμα και να διευκολυνθεί η ροή του ψυκτικού στην καρδιά. Αυτό προκάλεσε αβεβαιότητα και σύγχυση και ο κυβερνήτης της Πενσυλβάνια συνέστησε την απομάκρυνση των εγκύων γυναικών και των μικρών παιδιών από μία ακτίνα πέντε μιλίων γύρω από το σταθμό.

Για την εξακρίβωση των επιπτώσεων του ατυχήματος πραγματοποιήθηκαν πάρα πολλές ανεξάρτητες μελέτες που έδειξαν ότι οι επιπτώσεις από τις διαρροές ραδιενεργών υλικών ήταν αμελητέες. Η μέση δόση στον πληθυσμό που βρισκόταν σε ακτίνα 10 μιλίων από το σταθμό ήταν 0,08mSv με μέγιστη δόση το 1mSv. Διατηρήθηκε αρχείο παρακολούθησης της υγείας 30000 ατόμων που ζούσαν σε ακτίνα 5 μιλίων από το σταθμό. Η ενημέρωση του αρχείου διακόπηκε το 1997 χωρίς καμία ανησυχητική ένδειξη.

Ο καθαρισμός του κατεστραμμένου αντιδραστήρα άρχισε το 1979, κράτησε 12 χρόνια και κόστισε 973 εκατομμύρια δολάρια. Η μονάδα 1 τέθηκε ξανά σε λειτουργία το 1985 και λειτουργεί μέχρι και σήμερα σε υψηλά επίπεδα ασφαλείας και αξιοπιστίας ως αποτέλεσμα εφαρμογής και των συμπερασμάτων από το ατύχημα στη μονάδα 2.

Αιτία του ατυχήματος υπήρξε ένας συνδυασμός αστοχίας μηχανών, ανεπαρκούς σχεδιασμού και λαθών του προσωπικού λόγω ανεπαρκούς εκπαίδευσης. Η ανάλυση των γεγονότων του ατυχήματος οδήγησε σε δραστικές μόνιμες αλλαγές και βελτιώσεις στο σχεδιασμό των πυρηνικών αντιδραστήρων, στην εκπαίδευση του προσωπικού, στη διαδικασία αδειοδότησης αντιδραστήρων, στο σχεδιασμό της αντιμετώπισης εκτάκτων αναγκών και στην οργάνωση της Nuclear Regulatory Commission μιας υπηρεσίας που διαχειρίζεται τα θέματα ασφάλειας των πυρηνικών εγκαταστάσεων των Η.Π.Α.

7.3 ΤΟ ΑΤΥΧΗΜΑ ΣΤΟ CHERNOBYL

Στις 26 Απριλίου 1986 στον αντιδραστήρα 4 του πυρηνικού σταθμού του Chernobyl στην Ουκρανία συνέβη το μεγαλύτερο ατύχημα που έχει συμβεί ποτέ στην πυρηνική βιομηχανία. Υπήρξαν χρονικά εκτεταμένες διαρροές μεγάλων ποσοτήτων ραδιενεργών ρύπων στην ατμόσφαιρα. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ατυχήματος και οι τότε επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες επέφεραν τη διασπορά πολλαπλών ραδιενεργών νεφών σε μεγάλη έκταση στο Βόρειο Ημισφαίριο. Ραδιενεργοί ρύποι από το ατύχημα μετρήθηκαν όχι μόνο

στην Ευρώπη αλλά και στον Καναδά, την Ιαπωνία και τις Η.Π.Α. Το Νότιο Ημισφαίριο δεν ρυπάνθηκε.

Ο πυρηνικός σταθμός του Chernobyl βρίσκεται πολύ κοντά στα σύνορα Ουκρανίας, Λευκορωσίας και Ρωσίας, περίπου 130 χιλιόμετρα βόρεια από την πρωτεύουσα της Ουκρανίας, Κίεβο. Σε ακτίνα 30 χιλιομέτρων από το σταθμό κατοικούσαν 115 έως 135 χιλιάδες άνθρωποι.

Από τους 4 αντιδραστήρες που λειτουργούσαν στον πυρηνικό σταθμό του Chernobyl, όλοι τύπου RBMK (με επιβραδυντή γραφίτη και ψυκτικό νερό), η μονάδα 4 καταστράφηκε από το ατύχημα του 1986, η μονάδα 2 έκλεισε το 1991 μετά από πυρκαγιά στον αμοστρόβιλο, η μονάδα 1 έκλεισε το 1997 και η μονάδα 3 το 2000 μετά από διεθνή πίεση.

Το ατύχημα του 1986 ήταν συνέπεια της προσπάθειας και της επίμονης υλοποίησης ενός πειράματος. Είχε προγραμματισθεί κλείσιμο ρουτίνας της μονάδας 4 στις 25 Απριλίου 1986 για λόγους συντήρησης. Επίσης για την ίδια ημέρα είχε προγραμματισθεί, μετά τη μείωση της ισχύος του αντιδραστήρα, η διεξαγωγή του εξής πειράματος: διακοπή της παροχής ατμού στον αμοστρόβιλο και μέτρηση της χρονικής διάρκειας που ο άξονας του στροβίλου εξακολουθεί να περιστρέφεται λόγω αδράνειας και άρα συνεχίζει να παράγεται ηλεκτρική ισχύς. Παρόμοια πειράματα είχαν μέχρι τότε διεξαχθεί στο Chernobyl και σε άλλους σταθμούς, παρά το γεγονός ότι ήταν γνωστή η αστάθεια των αντιδραστήρων αυτών σε χαμηλές τιμές ισχύος.

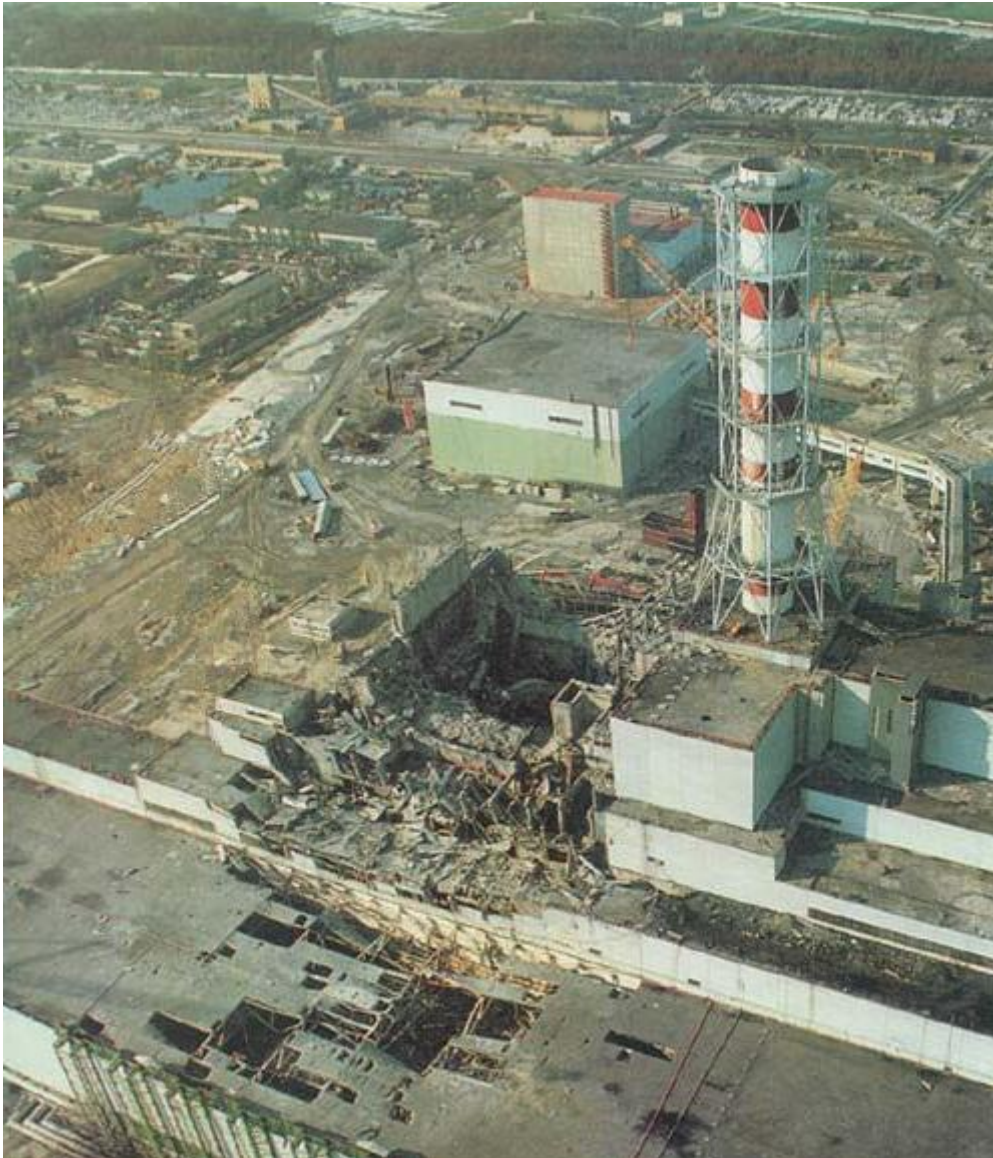


Εικόνα 7.3 Ο πυρηνικός σταθμός του Chernobyl πριν το ατύχημα [7].

Οι αιτίες του ατυχήματος ήταν:

1. Σοβαρό λάθος σχεδιασμού του αντιδραστήρα. Ένα επικίνδυνο χαρακτηριστικό αυτού του αντιδραστήρα είναι ότι σε χαμηλές τιμές

ισχύος (π.χ. λιγότερο από 700 MW θερμικής ισχύος) είναι ευάλωτος να τεθεί εκτός ελέγχου σε περίπτωση λανθασμένων χειρισμών. Οι επιστήμονες της Σοβιετικής Ένωσης ενώ γνώριζαν το πρόβλημα δεν είχαν κάνει τίποτα για να το αντιμετωπίσουν και άρα έχουν ένα μεγάλο μερίδιο της ευθύνης. Μετά το ατύχημα εφαρμόστηκε, με τεχνική και οικονομική βοήθεια της Δύσης, μια σειρά από τεχνικές επεμβάσεις στους εν λειτουργία αντιδραστήρες αυτού του τύπου στην πρώην Σοβιετική Ένωση, με αποτέλεσμα τη σημαντική βελτίωση της ασφάλειας.



Εικόνα 7.4 Ο πυρηνικός αντιδραστήρας νούμερο 4 του σταθμού του Chernobyl μετά την έκρηξη [7].

2. Ελλιπής εκπαίδευση του προσωπικού. Το προσωπικό δεν είχε επαρκή γνώση της σοβαρότητας αυτού του λάθους σχεδιασμού και δεν γνώριζε ότι το πείραμα θα μπορούσε να οδηγήσει τον αντιδραστήρα σε τέτοια

εκρηκτική κατάσταση. Δεν αντελήφθησαν επανειλημμένα σήματα του συστήματος που έδειχναν πορεία προς αστάθεια.

3. Έλλειψη παιδείας ασφάλειας. Οι χειριστές παραβίασαν πολλές φορές τις προκαθορισμένες διαδικασίες ασφάλειας προκειμένου να πραγματοποιηθεί το πείραμα. Έθεσαν εκτός λειτουργίας τα αυτόματα συστήματα ασφαλείας τα οποία οδηγούσαν στο κλείσιμο του αντιδραστήρα με συνέπεια την ματαίωση του πειράματος. Αν το σύστημα ασφαλείας ήταν ενεργό το ατύχημα θα είχε αποφευχθεί ή τουλάχιστον δεν θα είχε πάρει αυτήν την τραγική έκταση. Παρά τους ρητούς κανονισμούς, απέσυραν το σύνολο σχεδόν των ράβδων ελέγχου από την καρδιά, προκειμένου να διατηρήσουν την ισχύ για την πραγματοποίηση του πειράματος με αποτέλεσμα όταν τελικά κατάλαβαν ότι ο αντιδραστήρας ήταν σε προχωρημένο στάδιο ατυχήματος και επιβαλλόταν το άμεσο κλείσιμο, ο απαιτούμενος χρόνος καθόδου στην καρδιά των ράβδων ελέγχου ήταν πολύ μεγάλος για να προλάβει την ταχύτατα επερχόμενη καταστροφή.

Στο τελικό στάδιο του ατυχήματος η θερμική ισχύς του αντιδραστήρα αυξήθηκε ταχύτατα και ανεξέλεγκτα σε 100 περίπου φορές πάνω από τη μέγιστη ισχύ σχεδιασμού. Αυτή η ταχεία αύξηση της ισχύος προκάλεσε την ταχύτατη αύξηση της θερμοκρασίας του καυσίμου με αποτέλεσμα το θρυμματισμό μέρους του καυσίμου, την επαφή του θρυμματισμένου καυσίμου με το υγρό ψυκτικό νερό. Συνέπεια αυτού ήταν η ταχεία μεταφορά θερμότητας στο υγρό ψυκτικό με αποτέλεσμα την παραγωγή ατμού με πολύ υψηλό ρυθμό, δηλαδή εκρήξεις ατμού, που με τη σειρά τους προκάλεσαν τη διάρρηξη των σωλήνων πίεσης. Η μεγάλη αύξηση της ισχύος οδήγησε επίσης στην εξάτμιση του καυσίμου στο κέντρο μερικών συστάδων καυσίμου, η οποία τερματίστηκε με μεγάλη έκρηξη από την ταχεία εκτόνωση των ατμών του καυσίμου. Αυτή η έκρηξη διέλυσε την καρδιά και κατέστρεψε το μεγαλύτερο μέρος του κτιρίου.

Ο αντιδραστήρας είχε καταστεί πλέον κρατήρας που μεταξύ άλλων περιείχε τηγμένο πυρηνικό καύσιμο. Επέφερε επίσης τεράστια διαρροή ραδιενεργών υλικών γύρω από το κτίριο του αντιδραστήρα. Το οξυγόνο του αέρα αντέδρασε με τον γραφίτη που αποκαλύφθηκε και σχηματίστηκε μονοξείδιο του άνθρακα το οποίο ανεφλέγη και προκάλεσε πυρκαγιά του γραφίτη στην καρδιά του αντιδραστήρα. Οι εκρήξεις εκτόξευσαν πίδακα από θερμά και εξαιρετικά ραδιενεργά σωματίδια στην ατμόσφαιρα. Η στήλη του καπνού και των ραδιενεργών σωματιδίων υψώθηκε έως περίπου ένα χιλιόμετρο στην ατμόσφαιρα. Τα πιο βαριά σωματίδια εναποτέθηκαν στο έδαφος σε ακτίνα 100 περίπου χιλιομέτρων από το σταθμό. Τα ελαφρύτερα σωματίδια παρασύρθηκαν από τους ανέμους σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Στις περιοχές που βρισκόταν το ραδιενεργό νέφος και συνέβαιναν βροχοπτώσεις οι ραδιενεργοί ρύποι

εναποτίθεντο στο έδαφος. Οι εκροές ραδιενεργών ρύπων συνεχίστηκαν για 20 περίπου ημέρες μετά το ατύχημα. Η έντονη πυρκαγιά του γραφίτη ανύψωνε τους ραδιενεργούς ρύπους σε μεγάλα ύψη στην ατμόσφαιρα διευρύνοντας τη γεωγραφική τους διασπορά.

Η μεγάλη χρονική διάρκεια των εκροών, τα μεγάλα ύψη στην ατμόσφαιρα στα οποία ανυψώθηκαν οι ρύποι λόγω της πυρκαγιάς και οι συχνές αλλαγές στην κατεύθυνση των ανέμων είχαν ως αποτέλεσμα τη διασπορά του ραδιενεργού νέφους και την εναπόθεση ραδιενεργών ρύπων σε σχεδόν ολόκληρο το Βόρειο Ημισφαίριο. Αξιόλογη όμως ρύπανση εκτός της Σοβιετικής Ένωσης συνέβη μόνο σε τμήματα της Ευρώπης. Το μέγεθος της ρύπανσης των εδαφών είχε μεγάλες διαφορές από θέση σε θέση λόγω διαφορετικών βροχοπτώσεων κατά τη δίοδο του νέφους και διαφορετικών διαμορφώσεων των επιφανειακών εδαφών. Αυτή η γεωγραφική ανομοιογένεια των εναποθέσεων υπήρξε ιδιαίτερα μεγάλη σε μεγάλες αποστάσεις από το Chernobyl, όπως π.χ. στην Ελλάδα.

Μετά το ατύχημα ο κατεστραμμένος αντιδραστήρας εγκλωβίστηκε σε μία δομή από περίπου 300.000 τόνους σκυροδέματος και σιδήρου, η οποία ονομάστηκε «περίβλημα» ή «σαρκοφάγος». Η δομή αυτή στηρίχθηκε σε ότι είχε απομείνει από τους τοίχους του κτιρίου του αντιδραστήρα και έκλεισε με στέγη από σιδηρά κατασκευή. Τοποθετήθηκε πλήθος αισθητήρων για την παρακολούθηση διαφόρων παραμέτρων (π.χ. ραδιενεργών ακτινοβολιών, θερμοκρασιών κ.τ.λ.) στο εσωτερικό της «σαρκοφάγου».

Την εποχή εκείνη στόχος ήταν η κατασκευή, τα συντομότερο δυνατόν, δομής ικανής να συγκρατήσει τα ραδιενεργά υλικά εντός του κτιρίου του αντιδραστήρα. Έτσι, η σαρκοφάγος αποτελεί προσωρινό φραγμό των ραδιενεργών εκροών και όχι μια κατασκευή μακροχρόνιας ασφαλούς διαχείρισης. Για την οριστική επίλυση του προβλήματος (ίσως διάλυση του κατεστραμμένου αντιδραστήρα και μακροχρόνια διαχείριση των καταλοίπων) απαιτείται διεθνής επιστημονική, οικονομική και πολιτική συνεργασία. Έχουν γίνει στο παρελθόν πολλές σχετικές μελέτες από διεθνείς ομάδες εμπειρογνομόνων.

Το ατύχημα είχε σοβαρές ραδιολογικές επιπτώσεις στην υγεία του πληθυσμού καθώς και κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις στην Ουκρανία, τη Λευκορωσία και τη Ρωσία. Αν και οι ραδιολογικές επιπτώσεις σε άλλες χώρες ήταν μικρές, το ατύχημα προκάλεσε έντονους φόβους στο κοινό σε όλο τον κόσμο ως προς τους κινδύνους από τους πυρηνικούς αντιδραστήρες. Επιπλέον, επηρέασε σημαντικά την πολιτική των κυβερνήσεων σχετικά με τους πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος.

7.4 ΤΟ ΑΤΥΧΗΜΑ ΣΤΗ ΦΟΥΚΟΥΣΙΜΑ

Το ατύχημα στον πυρηνικό σταθμό της Φουκουσίμα στην Ιαπωνία αποκάλυψε τα ελλείμματα ασφάλειας των αντιδραστήρων ζέοντος ύδατος, που είναι εγκατεστημένοι εκεί.

Όταν έγινε ο σεισμός στις 11 Μαρτίου του 2011 οι αντιδραστήρες 4, 5 και 6 ήταν εκτός λειτουργίας. Οι αντιδραστήρες 1, 2 και 3 έκλεισαν, όπως προβλεπόταν, με ασφάλεια. Η ψύξη των αντιδραστήρων έπρεπε να συνεχιστεί, με χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας που θα παρείχαν οι προς τούτο προβλεπόμενες νηζελογεννήτριες και μπαταρίες. Σύμφωνα με πληροφορίες, το σύστημα έκτακτης ψύξης λειτούργησε κανονικά επί μισή ώρα. Μέχρι εκείνη τη στιγμή οι αντιδραστήρες οδηγούνταν ομαλά προς ευσταθές κλείσιμο, ακολουθώντας την προβλεπόμενη ομαλή διαδικασία ασφάλειας. Το μεγάλο τσουνάμι που ακολούθησε κατέστρεψε τις νηζελογεννήτριες και το τμήμα του συστήματος ψύξης που βρισκόταν στην παραλία, σε υψόμετρο μόλις έξι μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας. Τα συστήματα ασφάλειας έμειναν χωρίς ρεύμα και οι αντιδραστήρες χωρίς ψύξη, οπότε άρχισε το ατύχημα και στους τρεις αντιδραστήρες.

Είναι ακατανόητο γιατί, σε μια χώρα με τέτοια συχνότητα σεισμών με τσουνάμι, δε είχε γίνει σχετική πρόβλεψη. Αν τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη και τα συστήματα έκτακτης ψύξης ήταν σε αρκετό ύψος π.χ. τριάντα μέτρων, η έκταση που θα είχε πάρει το ατύχημα θα ήταν πολύ περιορισμένη.

Σε άλλες χώρες, όπως π.χ. στη Γαλλία και στη Γερμανία, υπάρχει ξεχωριστό υδατοστεγές, σε περίπτωση πλημμύρας, π.χ. από ποτάμι, όπου υπάρχουν πολλές νηζελογεννήτριες, αρκετές για να τροφοδοτήσουν τους αντιδραστήρες, ακόμα και σε περίπτωση απώλειας μερικών από αυτές. Σε σταθμούς με πολλές μονάδες, συχνά προβλέπεται και επιπλέον ανεξάρτητο σύστημα βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής. Υπάρχει επίσης πλήρες δευτερεύον θωρακισμένο σύστημα ελέγχου του αντιδραστήρα το οποίο, σε περίπτωση ανάγκης, παρακάμπτει το σύνηθες σύστημα ελέγχου και αναλαμβάνει την ασφαλή οδήγηση του αντιδραστήρα σε ευσταθή κατάσταση.

Στη Φουκουσίμα, με έξι αντιδραστήρες, αυτά τα, όντως δαπανηρά, συστήματα δεν υπάρχουν. Οι λόγοι είναι προφανείς: οικονομία χάριν του κέρδους. Δεδομένου ότι όλα αυτά ήταν γνωστά, η ρυθμιστική αρχή της Ιαπωνίας ελέγχεται ως τουλάχιστον ανεπαρκής.

Οι ράβδοι καυσίμου, στους τρεις αντιδραστήρες, γυμνώθηκαν και υπερθερμάνθηκαν. Το υπέρθερμο ζιρκόνιο των ράβδων καυσίμου οξειδώνονταν (καιγόταν) από το οξυγόνο του νερού και απελευθερώνονταν υδρογόνο. Ελεύθερο υδρογόνο κατέληξε στο υπερκείμενο κτίριο, με αποτέλεσμα εκρήξεις στα υπερκείμενα κτίρια των

αντιδραστήρων 1, 3 και 2. Οι εκρήξεις διέλυσαν τους τοίχους από μεταλλικά φύλα και αποκάλυψαν και τραυμάτισαν τις δεξαμενές αναλωμένου καυσίμου. Επίσης, από το σεισμό, το τσουνάμι ή τις εκρήξεις, καταστράφηκε, όπως φαίνεται σήμερα, μέρος του συστήματος ψύξης των αντιδραστήρων 1,2 και 3. Οι δεξαμενές του αναλωμένου καυσίμου έχασαν έτσι την ψύξη τους, μέρος των ράβδων γυμνώθηκαν, υπερθερμάνθηκαν, καίγονταν και άρχισε σημαντική διαρροή ραδιενέργειας και από αυτές. Είδαμε τις προσπάθειες να γεμίσουν αυτές τις δεξαμενές με νερό, χρησιμοποιώντας πυροσβεστικές αντλίες. Δυστυχώς, οι ανησυχίες για αυτόν τον τρόπο αποθήκευσης αναλωμένου καυσίμου στο υπερκείμενο κτίριο επιβεβαιώθηκαν στη Φουκουσίμα.

Οι πιθανές αιτίες της διαρροής υδρογόνου στα υπερκείμενα κτίρια έχουν ως εξής. Όταν η πίεση στο δοχείο πίεσης της καρδιάς και στο περίβλημα ασφάλειας άρχισε να αυξάνεται επικίνδυνα, λόγω των ατμών και του υδρογόνου, το προσωπικό διοχέτευσε αέρια από το περίβλημα ασφάλειας στο περιβάλλον. Μέρος αυτών φαίνεται πως διέρρευσε και συσσωρεύθηκε στο υπερκείμενο κτίριο. Καθώς η πίεση στο περίβλημα ασφάλειας αυξανόταν, το προσωπικό πραγματοποίησε, σωστά και όπως προβλέπεται, μία ή περισσότερες ελεγχόμενες εκτονώσεις αερίων στην ατμόσφαιρα, συμπεριλαμβανομένου υδρογόνου και ραδιενεργών αερίων, προκειμένου να μειωθεί η πίεση. Οι χειριστές στην Φουκουσίμα, προκειμένου να μειώσουν την εκροή ραδιενεργών αερίων στην ατμόσφαιρα, επέτρεψαν την αύξηση της πίεσης του συστήματος εγκλωβισμού αρκετά πάνω από την πίεση λειτουργίας, οπότε προέκυψε διαρροή αερίων υψηλής πίεσης από το σύστημα εγκλωβισμού στο υπερκείμενο κτίριο.

Οι συνέπειες των εκρήξεων είναι πλέον σαφείς: διαρροή ραδιενέργειας στο περιβάλλον από τις δεξαμενές αναλωμένου καυσίμου, βλάβες στον εξοπλισμό ψύξης και ηλεκτροδότησης στις αίθουσες των στρόβιλογεννητριών, άρα δυσκολία αποκατάστασης επαρκούς ψύξης της καρδιάς, με συνέπεια την επί εβδομάδες αδυναμία αποκατάστασης ευσταθούς ασφάλειας. Η συγκεκριμένη τοποθέτηση των δεξαμενών αναλωμένου καυσίμου, αποδείχθηκε ότι είναι συμβιβασμός εις βάρος της ασφάλειας, χάριν της οικονομίας.

Το 2002 αποκαλύφθηκε το σκάνδαλο παραποίησης εκθέσεων ασφάλειας, προς την ρυθμιστική αρχή, και απόκρυψης σοβαρών συμβάντων ασφάλειας επί πολλά έτη, από τον ενεργειακό κολοσσό TEPCO, ιδιοκτήτη του σταθμού της Φουκουσίμα και άλλων πυρηνικών σταθμών. Οι παραποιήσεις αφορούσαν, μεταξύ άλλων, και τις ρωγμές στις συγκολλήσεις του περιβλήματος της καρδιάς των αντιδραστήρων, γεγονός εξαιρετικά σοβαρό για την ασφάλεια. Μετά την αποκάλυψη του σκανδάλου επιβλήθηκε δωδεκάμηνη διακοπή της λειτουργίας του αντιδραστήρα I.

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι:

- οι αντιδραστήρες άντεξαν το μεγάλο σεισμό, έκλεισαν όπως προβλεπόταν και όδευαν ομαλά προς ευσταθές κλείσιμο
- το ατύχημα προέκυψε από το εξαιρετικά μεγάλο τσουνάμι, για το μέγεθος του οποίου δεν είχαν λάβει μέτρα ασφάλειας, ως όφειλαν
- στο συγκεκριμένο σταθμό υπήρχαν απαράδεκτες ελλείψεις, όντως δαπανηρών, εγκαταστάσεων ασφάλειας
- προτεραιότητα της TEPCO υπήρξε το κέρδος εις βάρος της ασφάλειας
- η ρυθμιστική αρχή αποδείχθηκε, τουλάχιστον, ανεπαρκής
- ενώ οι αντιδραστήρες είναι τεχνολογίας και προδιαγραφών που ίσχυαν προ πενήντα ετών, στη Φουκουσίμα δεν προέβησαν, ως όφειλαν, στις εξαιρετικά σημαντικές βελτιώσεις της ασφάλειας αντίστοιχων αντιδραστήρων, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε άλλες χώρες, όπως π.χ. στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ.

8. ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

8.1 ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

Συνήθως οι πυρηνικοί σταθμοί περικλείουν περιοχές από 500 με 1000 στρέμματα, συμπεριλαμβανομένης της ζώνης αποκλεισμού γύρω από το εργοστάσιο. Για ένα σταθμό 1000MW η έκταση που απαιτείται υπολογίζεται γύρω στα 1000 έως 4000 στρέμματα. Τα κτίρια που απαρτίζουν τον σταθμό είναι:

- Το κτίριο συγκράτησης: Πρόκειται για ένα κτίριο συνήθως με ημισφαιρικό θόλο σχεδιασμένο για τη διατήρηση της πίεσης του, στους 50 περίπου βαθμούς ανά τετραγωνική ίντσα. Κανονικά, στεγάζει τον αντιδραστήρα και το σύστημα ψύξης το οποίο περιέχει άκρως ραδιενεργά υγρά. Το κτίριο είναι κατασκευασμένο από χάλυβα. Μερικές φορές, το κτίριο περιβάλλεται από μια συγκεκριμένη δομή που έχει σχεδιαστεί για πολύ χαμηλότερες πιέσεις (3 βαθμούς ανά τετραγωνική ίντσα). Η περιοχή μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος στο κτίριο ονομάζεται σπείρα. Τα σχέδια ποικίλλουν. Σε μια εγκατάσταση υπάρχουν τοίχοι πάχους 4,5 ποδιών (περίπου 1,5 μέτρο) με σκυρόδεμα οπλισμένο με χάλυβα. Ο τρούλος είναι 2,5 πόδια πάχος και η βάση 12 πόδια πάχος. Το κτίριο συγκράτησης είναι το 3^ο φράγμα στα προϊόντα σχάσης.
- Κτίριο βοηθητικό ή κτίριο αντιδραστήρα: Πρόκειται για ένα κτίριο ξεχωριστά από τη συγκράτηση που στεγάζει ένα μεγάλο μέρος του εξοπλισμού υποστήριξης που μπορεί να περιέχει ραδιενεργά υγρά και αέρια. Ο εξοπλισμός έκτακτης ανάγκης συνήθως βρίσκεται σ' αυτό το κτίριο.
- Κτίριο στροβίλου: Πρόκειται για ένα κτίριο που στεγάζει το στρόβιλο, τη γεννήτρια, το συμπυκνωτή και τα συστήματα τροφοδοσία ύδατος.
- Κτίριο εισροής: Πρόκειται για ένα κτίριο που στεγάζει τις αντλίες όπου κυκλοφορεί το νερό που αντλείται από το ποτάμι, τη λίμνη, και τη θάλασσα για την ψύξη του συμπυκνωτή. Πραγματοποιείται καθαρισμός του νερού, έτσι ώστε να μπορεί να περάσει μέσα από τους σωλήνες συμπυκνωτή.

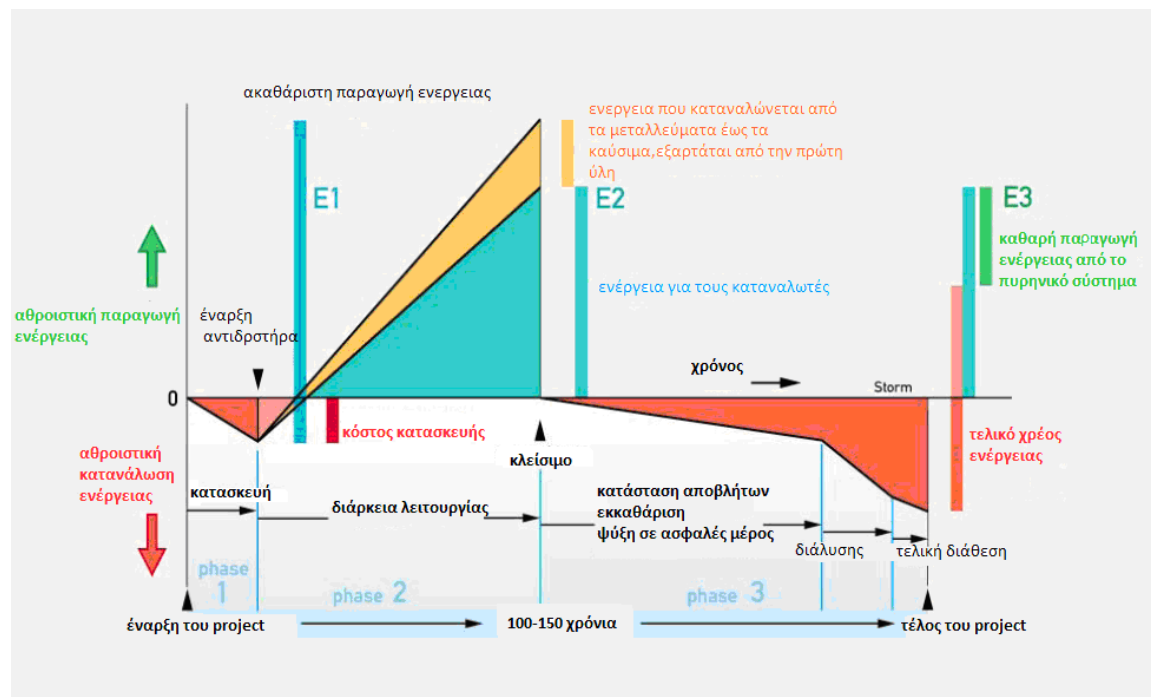
- Κτίριο καυσίμου: Πρόκειται για ένα ξεχωριστό κτίριο από το κτίριο συγκράτησης που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση αναλωμένων καυσίμων στα ράφια του χάλυβα σε μια μεγάλη βαθιά πισίνα αποθήκευσης 40 ποδιών. Βαρέλια για την αποστολή ή την επί τόπου ξηρή αποθήκευση των αναλωμένων καυσίμων θα φορτωθούν για αποστολή. Ένας νέος χώρος αποθήκευσης καυσίμων προβλέπεται για την παραλαβή της νέας πρώτης ύλης και αποθήκευσης πριν από τη μετάβαση στο κτίριο συγκράτησης και στη συνέχεια στον αντιδραστήρα κατά τη διάρκεια του ανεφοδιασμού.
- Κτίριο γεννήτριας Diesel: Πρόκειται για ένα κτίριο που χρησιμοποιείται για να στεγάσει τις γεννήτριες Diesel και για την υποστήριξη διαφόρων συστημάτων (αέρας, νερό, ανεμιστήρες ψυγείο, μαζούτ, λιπαντικά έλαια, κλιματισμός και εξαερισμός). Σε ορισμένες περιπτώσεις, σχετίζεται με τους ηλεκτρικούς διακόπτες για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από την γεννήτρια Diesel. Οι γεννήτριες Diesel παρέχουν εφεδρική ηλεκτρική ενέργεια για την ασφάλεια και μη ασφάλεια των συστημάτων.
Σε ορισμένες εγκαταστάσεις, διαφορετικά κτίρια, εκτός από αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω, στεγάζουν τα εξής:
 - Συστήματα επεξεργασίας νερού που χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό του νερού, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μονάδα παραγωγής ενέργειας.
 - Ραδιενεργά συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό και την αποθήκευση ραδιενεργών υγρών και αερίων.
 - Αντλίες στον πύργο ψύξης που χρησιμοποιούνται για την άντληση νερού. Οι πύργοι ψύξης χρησιμοποιούνται συχνά για μονάδες ηλεκτροπαραγωγής που βρίσκονται στα ποτάμια και τις μικρές λίμνες ώστε ο αντίκτυπος της θερμοκρασίας του νερού που απορρίπτεται στα ψάρια να είναι ο ελάχιστος δυνατός.
 - Το κτίριο ελέγχου, που αφορά την ηλεκτρική καλωδίωση, και τα συστήματα αερισμού
 - Το κτίριο διοίκησης
 - Ασφάλεια

8.2 ΧΡΟΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

Το πυρηνικό ενεργειακό σύστημα ξεχωρίζει από όλα τα άλλα ενεργειακά συστήματα με εξαιρετικά μακροπρόθεσμες δεσμεύσεις (100-

150 χρόνια). Η χρονική ακολουθία του πυρηνικού προγράμματος έχει τρία κύρια μέρη:

1. Κατασκευή του πυρηνικού σταθμού
2. Λειτουργία
3. Ενέργειες μετά το κλείσιμο



Σχήμα 8.1 Χρονοδιάγραμμα πυρηνικού σταθμού.

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε τις φάσεις από τις οποίες περνάει ένας πυρηνικός σταθμός. Συγκεκριμένα:

- 1^η Φάση: Κατασκευή του πυρηνικού σταθμού.
- 2^η Φάση: Παραγωγική διάρκεια ζωής, από την έναρξη λειτουργίας μέχρι το κλείσιμο του αντιδραστήρα.
- 3^η Φάση: Διαδικασία αδρανοποίησης του αντιδραστήρα.

8.2.1. Κατασκευή του Πυρηνικού Σταθμού

Ιστορικά δεδομένα δείχνουν ότι ένας μέσος χρόνος κατασκευής είναι περίπου 10-15 χρόνια, ακόμη και στην περίπτωση των πυρηνικών αντιδραστήρων με ώριμη και αποδεδειγμένη σχεδίαση. Ο λόγος που πολλοί σταθμοί παίρνουν πολύ καιρό να κατασκευαστούν, οφείλεται στις αδυναμίες στη διαδικασία αδειοδότησης που επιτρέπει διακοπές και καθυστερήσεις σε πολλές συγκυρίες. Αυτές οι καθυστερήσεις αυξάνουν τη διάρκεια κατασκευής και το κόστος σημαντικά. Νέες κανονιστικές διαδικασίες είναι σε θέση να μειώσουν ενδεχομένως αυτό το διάστημα.

Η διαδικασία χορήγησης αδειών (στις ΗΠΑ) είναι μια διαδικασία δύο σταδίων. Πρώτον, ο υποψήφιος παραγωγός κάνει αίτηση για την οικοδόμηση του εργοστασίου, η οποία συχνά περνάει και από κανόνες δικαστηρίου. Μετά από μία παρατεταμένη περίοδο με αγωγές και δημόσιο σχολιασμό η άδεια κατασκευής έχει χορηγηθεί και ο υποψήφιος παραγωγός μπορεί να χτίσει το εργοστάσιο. Αφού το εργοστάσιο κατασκευαστεί, στο πρόγραμμα του παραγωγού είναι να υποβάλει αίτηση για άδεια εκμετάλλευσης και η όλη διαδικασία (αγωγές, σχολιασμοί ύπαρξης της μονάδας και όλα τα υπόλοιπα) ξεκινά ξανά από την αρχή. Αυτός είναι ο τρόπος που χρησιμοποιείται για να χορηγηθεί η άδεια στις ΗΠΑ. Έχουν συσταθεί νέες διαδικασίες για την χορήγηση αδειών νέων αντιδραστήρων.

Συμπεριλαμβανομένων όλων των γενικών και ειδικών αδειών και όσων ειπώθηκαν παραπάνω, η όλη διαδικασία χρειάζεται τουλάχιστον 10 χρόνια από την αρχή μέχρι το τέλος.

8.2.2. Λειτουργία του Πυρηνικού Σταθμού

Η μακρύτερη διάρκεια λειτουργίας των πυρηνικών αντιδραστήρων είναι περίπου 40 έτη. Ορισμένες πηγές μιλούν για το μέλλον για διάρκεια ζωής 60 χρόνια. Δεν είναι βέβαιο αν ακόμη και 40 έτη πρέπει να λαμβάνονται ως μέσος όρος ζωής όλων των αντιδραστήρων ισχύος. Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες δεν μπορούν να λειτουργούν κατά τη διάρκεια ενός αόριστου αριθμού ετών, λόγω της αλλοίωσης των υλικών, της συσσώρευσης ραδιενεργών ουσιών στο σύστημα και της διάβρωσης των προϊόντων και των προϊόντων σχάσης από τη διαρροή καυσίμων.

Επιπλέον, τα υλικά κατασκευής του πυρηνικού σταθμού γίνονται πιο ραδιενεργά και λιγότερο αξιόπιστα, όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια λειτουργίας του αντιδραστήρα. Η παράταση της διάρκειας ζωής γενικά επιτυγχάνεται με εκτεταμένες ανακαινίσεις. Το κόστος αυτών των επεκτάσεων της ζωής μπορεί να απευθύνεται στο αρχικό κόστος κατασκευής.

Η περίοδος αποπληρωμής ενέργειας (ονομάζεται και περίοδος επιστροφής ενέργειας) του πυρηνικού συστήματος διαρκεί 5 έως 11 έτη πλήρους λειτουργίας με χρήση των μεταλλευμάτων ουρανίου που εξορύσσονται, ή περίπου 6 έως 14 ημερολογιακά έτη.

Μετά το κλείσιμο, στο τέλος της διάρκειας ζωής ενός πυρηνικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, ο κύκλος δεν έχει ολοκληρωθεί. Για να αποφύγουμε να γίνουν τεράστιες περιοχές μη κατοικήσιμες για πολλούς αιώνες από ακούσια διασπορά ραδιενεργών υλικών, πρέπει να γίνουν αρκετά μεγάλης κλίμακας δύσκολες ενέργειες.

Μεταξύ αυτών των ενεργειών, είναι η αποθήκευση και η συσκευασία του αναλωμένου καυσίμου, ο καθαρισμός του αντιδραστήρα, η προστασία του αντιδραστήρα κατά τη διάρκεια που θα κρυώνει, η αποσυναρμολόγηση, η συσκευασία των αποβλήτων για τελική διάθεση, η κατασκευή ενός ασφαλούς και βαθέως γεωλογικού σχηματισμού και η τελική διάθεση όλων των ραδιενεργών αποβλήτων στο τελικό αποθετήριο. Η εκκαθάριση ενός πυρηνικού έργου μετά το κλείσιμο του αντιδραστήρα μπορεί να κρατήσει 30 έως 100 χρόνια. Η έλλειψη εμπειρίας όσον αφορά τις τελικές αυτές εργασίες, εισάγει μεγάλες αβεβαιότητες στον απόηχο μιας εγκατάστασης πυρηνικής ενέργειας .

8.2.3 Αδρανοποίηση του Αντιδραστήρα

Για να τεθεί εκτός λειτουργίας ένας πυρηνικός αντιδραστήρας είναι απαραίτητο να γίνει μία σειρά από ενέργειες κυρίως για λόγους ασφαλείας. Για να αποφύγουμε να γίνουν τεράστιες περιοχές μη κατοικήσιμες για πολλούς αιώνες από ακούσια διασπορά ραδιενεργών υλικών, πρέπει να γίνουν κάποιες χρονοβόρες, μεγάλης κλίμακας και σε πολλές περιπτώσεις δύσκολες εργασίες.

Οι εργασίες αυτές είναι: καθαρισμός του αντιδραστήρα, προστασία του αντιδραστήρα κατά τη διάρκεια της περιόδου ψύξης, διάλυση του αντιδραστήρα και άλλων ραδιενεργών τμημάτων της μονάδας παραγωγής ενέργειας, συσκευασία αποβλήτων και τέλος κατασκευή ενός ασφαλούς χώρου γεωλογικής αποθήκευσης και διάθεσης των αποβλήτων σε κάποια αποθήκη.

8.3 ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ

Παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την αξιολόγηση των περιοχών για την επιλογή του τόπου εγκατάστασης ενός πυρηνικού σταθμού είναι οι εξής:

- Τα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού του αντιδραστήρα και της προτεινόμενης λειτουργίας.
- Η πυκνότητα του πληθυσμού και τα χαρακτηριστικά χρήσης της γης των περιχώρων, συμπεριλαμβανομένης της ζώνης αποκλεισμού, της ζώνης χαμηλού πληθυσμού, και της απόστασης από το αστικό κέντρο.

Η σημασία των παραπάνω εννοιών είναι:

- Ζώνη αποκλεισμού θεωρείται η περιοχή γύρω από τον αντιδραστήρα στην οποία η “άδεια” του αντιδραστήρα έχει την

κυριότητα να καθορίζει όλες τις δραστηριότητες συμπεριλαμβανόμενου του αποκλεισμού/μετακίνησης εργατικού προσωπικού και ιδιοκτησιών της περιοχής.

- Ζώνη χαμηλού πληθυσμού είναι η περιοχή που περιβάλλει την περιοχή του αποκλεισμού που περιέχει τους κατοίκους, ο συνολικός αριθμός και η πυκνότητα των οποίων είναι τέτοιες ώστε να υπάρχει εύλογη πιθανότητα ότι τα κατάλληλα προστατευτικά μέτρα μπορούν να ληφθούν για λογαριασμό τους, σε περίπτωση σοβαρού ατυχήματος.
- Απόσταση από το κέντρο πληθυσμού είναι η απόσταση από τον αντιδραστήρα στο πλησιέστερο σύνορο με μια πυκνοκατοικημένη περιοχή (25.000 κάτοικοι).
- Τα φυσικά χαρακτηριστικά για την περιοχή όπως σεισμολογία, μετεωρολογία, γεωλογία και υδρολογία. Συγκεκριμένα, τα γεωλογικά και σεισμικά στοιχεία που πρέπει να μελετηθούν είναι τα παρακάτω:
 1. Δονήσεις εδάφους
 2. Τεκτονική παραμόρφωση της επιφάνειας
 3. Μη τεκτονική παραμόρφωση
 4. Ποσοστά υποτροπής σε σεισμούς
 5. Γεωμετρία και ποσοστά ολίσθησης
 6. Υλικά θεμελίων της περιοχής
 7. Σεισμικά κύματα, πλημμύρες υδάτων.

Οι απαιτούμενες έρευνες που πρέπει να πραγματοποιηθούν για την επιλογή της κατάλληλης θέσης, όπου θα εγκατασταθεί ο πυρηνικός σταθμός είναι οι εξής:

- Απαιτούμενη έρευνα για Δονητικές Εδαφικές Κινήσεις. Οι έρευνες που απαιτούνται εδώ παρέχουν επαρκή βάση για τη επιλογή της θέσης για τη σεισμική δραστηριότητα. Μερικές από αυτές είναι η καταγραφή του σεισμικού ιστορικού και η συμπεριφορά των γεωλογικών υλικών της επιφάνειας στους σεισμούς.
- Έρευνα για προβληματικές επιφάνειες. Προσδιορισμός της λιθολογίας, στρωματογραφίας, υδρολογίας στρωμάτων, και οι διαρθρωτικές εδαφολογικές συνθήκες της περιοχής και της περιοχής του γύρω χώρου, συμπεριλαμβανομένης της γεωλογικής ιστορίας.
- Έρευνα για πλημμύρες συνακόλουθες σεισμών και κύματα νερού. Πληροφορίες σχετικά με την απόσταση από παραθαλάσσιες περιοχές και ιστορικά δεδομένα από τσουνάμι που έπληξαν ή θα μπορούσαν να πλήξουν την περιοχή. Ειδική έρευνα για περιοχές κοντά σε λίμνες ή ποτάμια.

- Έρευνα για την παροχή νερού ψύξης. Η διασφάλιση της επαρκούς ύδρευσης για ψύξη έκτακτης ανάγκης και μακροπρόθεσμης θερμικής απομάκρυνσης λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό του πυρηνικού σταθμού, σε συνδυασμό βέβαια τις πληροφορίες σχετικά με τις φυσικές ιδιότητες των υλικών του εδάφους και τα αποτελέσματα της ασφαλούς διακοπής λειτουργίας σε περίπτωση σεισμών και τη βάση του σχεδιασμού για την επιφάνεια ρωγμών.

8.4 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η πυρηνική ενέργεια είναι μια από τις πιο αξιόπιστες και πρακτικές μορφές πηγών ηλεκτρικής ενέργειας που είναι διαθέσιμες σήμερα. Κατά μέσο όρο έχει συντελεστή χρησιμοποίησης μεγαλύτερο από 90%, που σημαίνει ότι δημιουργεί στην περιοχή τη μέγιστη απόδοσή του, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες, ή την ώρα της ημέρας. Είναι η ιδανική τεχνολογία για να καλυφθεί η αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας βασικού φορτίου.

Η λειτουργία ενός πυρηνικού σταθμού δημιουργεί 400 έως 700 μόνιμες θέσεις εργασίας. Η οικοδόμηση μίας νέας πυρηνικής εγκατάστασης θα οδηγήσει στη δημιουργία 1400 έως 1800 θέσεων εργασίας.

Η κατασκευή μίας νέας πυρηνικής μονάδας παραγωγής ενέργειας θα αποτελέσει μία σημαντική ώθηση στους προμηθευτές διαφόρων αγαθών, όπως σκυροδέματος και χάλυβα και εκατοντάδων εξαρτημάτων. Για παράδειγμα, ένας νέος πυρηνικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής χρειάζεται περίπου:

- 400.000 κυβικά μέτρα σκυροδέματος
- 66.000 τόνους χάλυβα
- 44 μίλια σωληνώσεων
- 300 μίλια ηλεκτρικών καλωδίων
- 130.000 ηλεκτρικά εξαρτήματα

Στους πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η ανάγκη για εξαιρετικά προηγμένη τεχνολογία ψύξης, ασφάλειας, συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης, θωράκισης από τις ακτινοβολίες κ.τ.λ. οδηγεί σε μεγάλο κόστος κατασκευής της μονάδας. Έτσι, η συμβολή του κεφαλαίου της αρχικής επένδυσης στο κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι διπλάσια στις πυρηνικές μονάδες σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν πετρέλαιο, γαιάνθρακες ή φυσικό αέριο.

Το κόστος του καυσίμου όμως πηγαίνει αντίστροφα. Στη συμβατική μονάδα είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με την πυρηνική

μονάδα. Αυτό μπορούμε να το καταλάβουμε από τη σύγκριση της ικανότητας παραγωγής θερμότητας των διαφόρων καυσίμων. Ενώ 1Kg άνθρακα ή πετρελαίου δίνει περίπου 10KWh θερμότητας, 1 Kg U-235 δίνει περίπου $20 \cdot 10^6$ KWh θερμότητας.

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το κόστος της πυρηνικής ενέργειας είναι η αξία του ουρανίου. Στο σχήμα 8.2 βλέπουμε πως διακυμάνθηκε η αξία του ουρανίου την αμέσως προηγούμενη δεκαετία. Παρατηρούμε ότι υπάρχουν σημαντικές διακυμάνσεις. Η τιμή του ουρανίου αυξήθηκε κατακόρυφα το 2007 φτάνοντας τα 220 ευρώ/Kg και στη συνέχεια παρουσίασε σημαντική μείωση με αποτέλεσμα το 2010 να πέσει στα 70 ευρώ/Kg. Στο σχήμα 8.3 φαίνονται με περισσότερη λεπτομέρεια οι μεταβολές στην τιμή του ουρανίου την τριετία 2007-2010.



Σχήμα 8.2 Διακύμανση της τιμής του ουρανίου στο διάστημα 2000-2010.



Σχήμα 8.3 Διακύμανση της τιμής του ουρανίου στο διάστημα 2007-2010.

8.5 ΧΡΗΣΗ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σήμερα 31 χώρες διαθέτουν συνολικά 441 πυρηνικούς αντιδραστήρες σε λειτουργία καλύπτοντας το 16% των ενεργειακών τους αναγκών. Εν ενεργεία υπάρχουν σήμερα αντιδραστήρες 13 διαφορετικών τύπων. Η Γαλλία, χάρη στους 59 αντιδραστήρες της αναδεικνύεται πρωταθλήτρια στον τομέα (ποσοστό ενεργειακής κάλυψης 78%). Για να τους «κινήσει» καταναλώνει περίπου 10.000 τόνους ουρανίου καυσίμου το χρόνο. Πάντως οι μεγαλύτερες πυρηνικές δυνάμεις (ΗΠΑ, Γαλλία, Αγγλία, Γερμανία) δεν κατασκευάζουν, ούτε σχεδιάζουν νέους αντιδραστήρες. Σήμερα σε όλο τον κόσμο κατασκευάζονται γύρω στους 25 αντιδραστήρες, οι 17 εκ των οποίων στη Ρωσία, την Ινδία και την Κίνα (4, 5, 9, αντίστοιχα). Υπολογίζεται ότι τα αμέσως επόμενα χρόνια τρεις ακόμα χώρες θα αποκτήσουν σταθμούς πυρηνικής ενέργειας (Ιράν, Αίγυπτος, Βόρεια Κορέα). Αρκετές ακόμα χώρες διαθέτουν πυρηνικούς αντιδραστήρες μικρής ισχύος για ερευνητικούς σκοπούς. Ανάμεσά τους η Ελλάδα με τον 5 MW αντιδραστήρα στο Κέντρο Έρευνας «Δημόκριτος».



Σχήμα 8.4 Παγκόσμιος χάρτης των πυρηνικών εργοστασίων

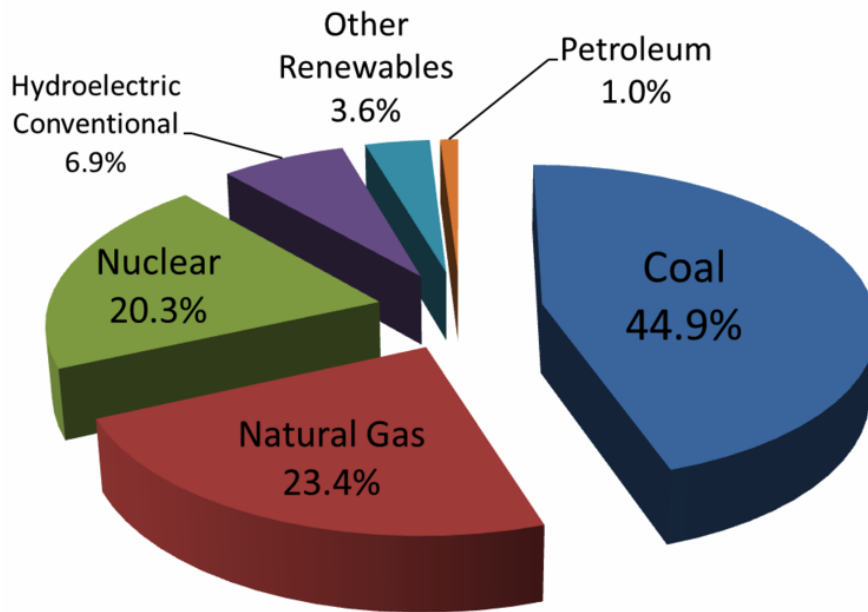


Σχήμα 8.5 Πυρηνικοί αντιδραστήρες υπό κατασκευή σε όλο τον κόσμο.

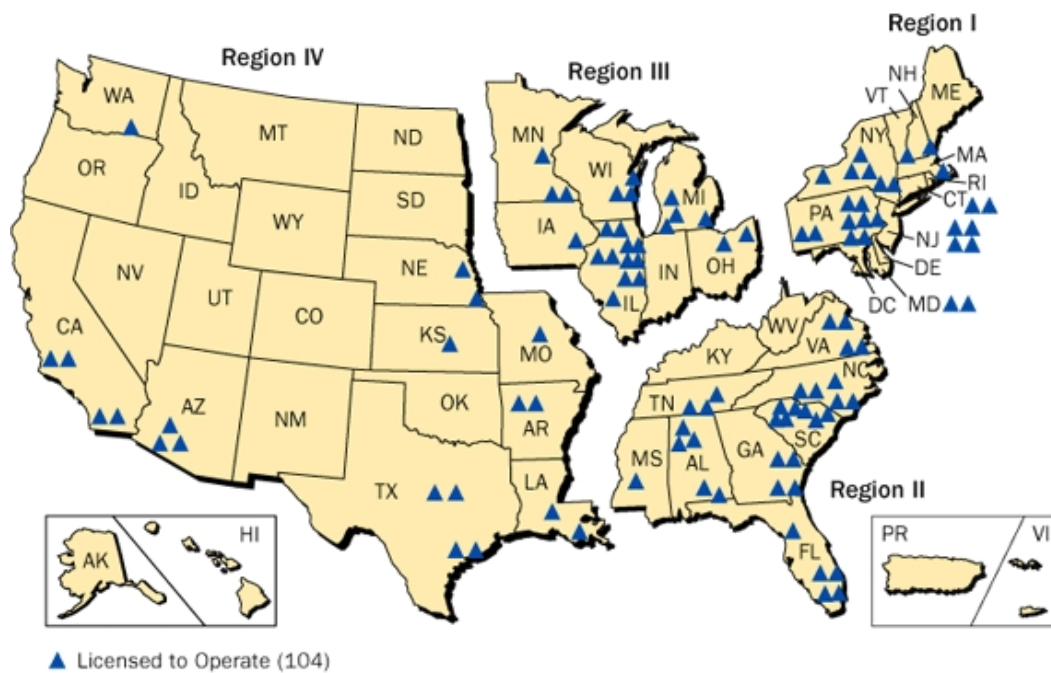
Οι Η.Π.Α. καλύπτουν το 20% περίπου των ενεργειακών τους αναγκών (σχήμα 8.6) με την ενέργεια που παράγεται στους 104 ηλεκτροπαραγωγούς πυρηνικούς αντιδραστήρες που διαθέτουν. Πρόκειται για 69 PWR και 35 BWR. Οι Η.Π.Α. είναι η πρώτη χώρα στον κόσμο στην παραγωγή εμπορικής πυρηνικής ενέργειας. Η Υπηρεσία Ατομικής Ενέργειας των Η.Π.Α. έχει χωρίσει τη χώρα σε τέσσερις

περιοχές για την καλύτερη διαχείριση των πυρηνικών αντιδραστήρων και την αυστηρότερη επίβλεψη των μέτρων ασφαλείας που λαμβάνονται. Οι περιοχές αυτές φαίνονται στο σχήμα 8.7.

2009 U.S. Electricity Generation by Source



Σχήμα 8.6 Πηγές της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στις Η.Π.Α. [7].



Σχήμα 8.7 Οι τόποι εγκατάστασης των πυρηνικών αντιδραστήρων των Η.Π.Α. [7].



Εικόνα 8.1 Ο πυρηνικός σταθμός Koeberg που βρίσκεται κοντά στο Cape Town στη Νότια Αφρική. Είναι ο μοναδικός πυρηνικός σταθμός στην αφρικανική ήπειρο.

Στην εικόνα 8.2 φαίνεται ο πυρηνικός σταθμός του Kozloduy 200 Km βορειοδυτικά της Σόφιας στη Βουλγαρία. Είναι ο μοναδικός αντιδραστήρας στη Βαλκανική χερσόνησο. Αποτελείται από 6 μονάδες εκ των οποίων οι 2 έχουν ισχύ 1000MW και οι άλλες 4 από 400 MW.



Εικόνα 8.2 Ο πυρηνικός σταθμός του Kozloduy στη Βουλγαρία [7].

8.6 ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

Η Ελλάδα, όπως κάθε άλλη χώρα, επιθυμεί να έχει επαρκή και ασφαλή κάλυψη των αναγκών της σε ηλεκτρική ενέργεια με ανταγωνιστικές τιμές και αποδεκτές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επιβάλλεται, επομένως, διερεύνηση όλων των προσφερόμενων πρωτογενών πηγών ηλεκτροπαραγωγής και συγκριτική μελέτη των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που παρουσιάζει η κάθε μία.

Τα τελευταία χρόνια, οι αυξανόμενες ανάγκες της Ελλάδος σε ηλεκτρική ενέργεια καλύπτονται μόλις οριακά. Η οριακή αυτή κάλυψη των αναγκών της Ελλάδος σε ηλεκτρική ενέργεια αναμένεται να συνεχιστεί επί αρκετό χρονικό διάστημα και μάλιστα είναι πιθανόν να παρουσιαστεί και ενεργειακό έλλειμμα κατά το 2020. Η κατάσταση αυτή δεν είναι δυνατόν να αποτραπεί ακόμη και μετά την πλήρη αξιοποίηση όλων των πηγών ηλεκτροπαραγωγής που ήδη χρησιμοποιούνται (λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας).

Ειδικά για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ανώτατα όρια χρησιμοποιήσεώς των επιβάλλονται και από την ανελαστικότητα των ωρών λειτουργίας των θερμοηλεκτρικών μονάδων. Αναγκαία είναι κατά συνέπεια η αναζήτηση εναλλακτικών πηγών, και ως τέτοιες αναγνωρίζονται:

- οι εισαγωγές μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας
- ο εισαγόμενος λιθάνθρακας
- η πυρηνική ενέργεια.

Η πρώτη επιλογή συνεπάγεται εξάρτηση και ανταγωνιστικότητα με τις γειτονικές χώρες, η δεύτερη είναι ενδεχομένως αναπόφευκτη μεσοπρόθεσμη αλλά ρυπογόνος λύση, και η τρίτη, ακόμη και αν γίνει αποδεκτή, απαιτεί 10-15 χρόνια μεταξύ λήψης απόφασης και υλοποίησής της. Σε αντίθεση με την οριακή ενεργειακή επάρκεια, επιθυμητή θα ήταν η ύπαρξη υπερεπάρκειας εγχώριας ηλεκτρικής ενέργειας για ταχύτερη τεχνολογική ανάπτυξη και εξαγωγή.

Οι παραπάνω παράμετροι καθιστούν επιβεβλημένη τη σοβαρή εξέταση της πυρηνικής επιλογής και υπεύθυνη αξιολόγηση όλων των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της.

Η έντονη σεισμικότητα της Ελλάδος πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη σε κάθε προγραμματισμό και σχεδιασμό πυρηνικών εργοστασίων, δεν αποτελεί όμως αποτρεπτικό παράγοντα. Υπάρχουν δεκάδες πυρηνικών εργοστασίων σε σαφώς σεισμικές περιοχές (π.χ. στην Καλιφόρνια) χωρίς κανένα σοβαρό πρόβλημα. Προφανώς, η σεισμική θωράκιση αυξάνει το κόστος της κατασκευής.

Το πλέον κρίσιμο πρόβλημα της αποδοχής της πυρηνικής ενέργειας είναι η ασφαλής διαχείριση των ραδιενεργών πυρηνικών καταλοίπων/αποβλήτων. Η χρήση πυρηνικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή από μία χώρα προϋποθέτει τη θέσπιση ενός εθνικού προγράμματος διαχείρισης για την προσωρινή και μόνιμη αποθήκευση ραδιενεργών καταλοίπων που θα προέλθουν από τις προτεινόμενες πυρηνικές μονάδες. Η διεθνής αποδοχή αυτού του προγράμματος κρίνεται απαραίτητη. Τονίζεται, εν προκειμένω, ότι η λύση των καταλοίπων να μην επιβάλλεται να είναι εθνική, αλλά είναι θέμα συμφωνίας με τους προμηθευτές του πυρηνικού υλικού.

Ακόμη, πρέπει να σημειωθεί ότι η κοινή γνώμη στην Ελλάδα είναι μάλλον εχθρική έναντι της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας κυρίως λόγω του φόβου για κάποιο πυρηνικό ατύχημα.

Επιβάλλεται ρεαλιστική αξιολόγηση των ενεργειακών αναγκών και στόχων της Ελλάδος και πλήρης ανάλυση των δυνατοτήτων και των προβλημάτων όλων των πηγών ενέργειας: ορυκτών καυσίμων, ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εξοικονόμησης ενέργειας, και πυρηνικής ενέργειας.

Σε ότι αφορά την πυρηνική ενέργεια, ενδείκνυται:

- Να κριθεί κατά πόσον η πυρηνική ενέργεια μπορεί να αποτελέσει μία συνιστώσα του ενεργειακού μείγματος της Ελλάδος και κατά πόσον η πυρηνική ενέργεια μπορεί να αντικαταστήσει ένα σημαντικό μέρος των ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται.
- Να αρχίσει μια οργανωμένη, εκτεταμένη, αντικειμενική και υπεύθυνη ενημέρωση των Ελλήνων πολιτών και πολιτικών επί των ενεργειακών αναγκών και προβλημάτων της χώρας, ώστε να κριθεί κατά πόσον η πυρηνική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί προς όφελος της Ελλάδος.
- Να ληφθούν άμεσα μέτρα ενημέρωσης σχετικά με την τεχνογνωσία και την αποκτηθείσα εμπειρία στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας, και, επιπροσθέτως, μέτρα δημιουργίας ενδογενούς ανθρώπινου δυναμικού με μακροπρόθεσμη εθνική επένδυση στον τομέα της εκπαίδευσης.
- Να αρχίσει η προετοιμασία των αναγκαίων μελετών, νομοθεσιών και υποδομών, ώστε η χώρα να είναι, 'εν δυνάμει', έτοιμη για την όποια επιλογή.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

9.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα σε πολλές χώρες του κόσμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για την πρόωση πλοίων και υποβρυχίων και για πειραματικούς σκοπούς. Ως πυρηνικά καύσιμα χρησιμοποιούνται κυρίως το ουράνιο και το πλουτόνιο.

Η χρήση των πυρηνικών αντιδραστήρων είναι δυνατό να έχει αμελητέες συνέπειες στο περιβάλλον υπό τον όρο ότι τηρούνται με αυστηρότητα οι κανονισμοί ασφαλείας. Οποσδήποτε, πάντα υπάρχει το ενδεχόμενο να συμβεί πυρηνικό ατύχημα είτε από αστοχία κάποιου συστήματος του αντιδραστήρα είτε από ανθρώπινο λάθος.

Το σύστημα ψύξης του πυρηνικού αντιδραστήρα έχει σκοπό την απαγωγή της παραγόμενης θερμότητας στην καρδιά του αντιδραστήρα και αποτελεί το πιο σημαντικό τμήμα αυτού. Ως ψυκτικό μέσο χρησιμοποιείται κυρίως το νερό. Το σύστημα ψύξης αφενός οδηγεί τη θερμότητα στις αμοπαγωγές μονάδες προς περαιτέρω εκμετάλλευση και αφετέρου διατηρεί σχετικά χαμηλή τη θερμοκρασία του πυρήνα. Όπως έχει αναλυθεί εκτενώς στα προηγούμενα κεφάλαια ενδεχόμενη υπερθέρμανση του πυρήνα έχει ιδιαίτερα καταστροφικές συνέπειες.

Η θερμοϋδραυλική ανάλυση των πυρηνικών αντιδραστήρων έχει σαν στόχο την θεωρητική και πειραματική μελέτη της απαγωγής της θερμότητας που παράγεται στην καρδιά του αντιδραστήρα από το ψυκτικό. Χρησιμοποιούνται τεχνικές της μηχανικής ρευστών και της μετάδοσης θερμότητας, ενώ για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων με στόχο πάντα τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας έχουν αναπτυχθεί ειδικοί υπολογιστικοί κώδικες.

Για την αντιμετώπιση έκτακτων καταστάσεων έχουν αναπτυχθεί εφεδρικά συστήματα ψύξης με αποστολή την επανάψυξη των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου σε περίπτωση αστοχίας του βασικού συστήματος ψύξης.

Η ραδιενέργεια όπως είναι ευρέως γνωστό έχει ιδιαίτερα δυσάρεστες επιπτώσεις στο περιβάλλον και στον άνθρωπο. Ένα πολύ σημαντικό ζήτημα που σχετίζεται με την ασφαλή λειτουργία των πυρηνικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων.

Τα σημαντικότερα πυρηνικά ατυχήματα είναι αυτά που συνέβησαν στο Three Mile Island (Η.Π.Α., 1979), στο Chernobyl (Ουκρανία, 1986) και στη Φουκουσίμα (Ιαπωνία, 2011).

Τα πυρηνικά εργοστάσια έχουν υψηλό κόστος κατασκευής και χαμηλό κόστος λειτουργίας σε σύγκριση με τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ορυκτά καύσιμα.

9.2 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Κύρια πλεονεκτήματα είναι: η ενεργειακή ασφάλεια και η μείωση των αερίων θερμοκηπίου.

Η πυρηνική ενέργεια μπορεί να προσφέρει στην Ελλάδα ηλεκτρική ενεργειακή επάρκεια, ενεργειακή ασφάλεια, ευελιξία στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας διαφοροποίηση καυσίμου για ηλεκτροπαραγωγή, μείωση των αερίων θερμοκηπίου (αντικαθιστώντας τα ορυκτά καύσιμα), μεγαλύτερες ποσότητες και χαμηλότερο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας.

Κύρια μειονεκτήματα είναι: Ανάγκη διαχείρισης των καταλοίπων και υψηλό αρχικό κόστος που απαιτείται για τα συστήματα ασφάλειας και αποτροπής τρομοκρατικών ενεργειών (κίνδυνοι ασφάλειας, τρομοκρατίας, διασποράς πυρηνικών υλικών, διαχείρισης ραδιενεργών καταλοίπων, και υψηλό αρχικό κόστος κατασκευής του πυρηνικού σταθμού).

Οπωσδήποτε η πυρηνική ενέργεια αποτελεί μία απόλυτα αξιόπιστη πηγή ενέργειας. Με τους πυρηνικούς αντιδραστήρες μπορούμε να εξασφαλίσουμε συνεχή, σταθερή και αδιάλειπτη ροή ενέργειας. Όπως είναι φυσικό, με βάση τα παραπάνω πλεονεκτήματα, η χρήση πυρηνικής ενέργειας πρέπει να εξετάζεται ως μία καλή λύση, υπό τον όρο ότι τηρούνται με θρησκευτική ευλάβεια κανόνες ασφάλειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΒΙΒΛΙΑ-ΑΡΘΡΑ

1. Αντωνόπουλος-Ντόμης Μ., *Εισαγωγή στην Πυρηνική Τεχνολογία*, εκδόσεις Ζήτη 2005.
2. Ασημακόπουλος Π., *Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική*, εκδόσεις Πανεπιστημίου Ιωαννίνων 2002.
3. Anglart H., *Applied Reactor Technology* 2009, διαθέσιμο στην ιστοσελίδα <http://www.reactor.sci.kth.se>.
4. Young H., *Πανεπιστημιακή Φυσική*, τόμος Β, εκδόσεις Παπαζήση 1994.
5. S. Glasstone and A. Sesonsky, *Nuclear Reactor Engineering: Reactor Systems Engineering*, Springer 1994, διαθέσιμο στην ιστοσελίδα <http://books.google.gr/books>.
6. Masaaki U., *Thermal-Hydraulics of Nuclear Reactors*, Japan Atomic Energy Research Institute 2004, διαθέσιμο στην ιστοσελίδα www.ansn-jp.org.

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

7. <http://www.wikipedia.org>
8. http://www.chem.uoa.gr/chemicals/chem_uf6.htm
9. http://nuclear.ntua.gr/ses/ses_yliko.html
10. <http://www.withfriendship.com>
11. <http://www.fusion-eur.org>