



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»**

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ  
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ**



**Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»**

**Μελέτη υποκρίσιμου πυρηνικού αντιδραστήρα  
ισχύος υποβοηθούμενου από γραμμικό επιταχυντή  
με έμφαση στην ασφαλή  
λειτουργία**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
του Άγγελου Ζουρίδη**

**Επιβλέπων: Αν. Καθηγητής Ε.Π. Χίνης**

**Αθήνα, Φεβρουάριος 2019**



## Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ), με τίτλο: «Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές» της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η ανάθεση έγινε από τον Αν. Καθηγητή Ευάγγελο Π. Χίνη της Σχολής των Μηχανολόγων Μηχανικών. Μετά τον αιφνίδιο θάνατο του στις 7 Φεβρουάριου 2017, την επίβλεψη της εργασίας ανέλαβε ο Αν. Καθηγητής Μάριος Ι. Αναγνωστάκης. Στο πλαίσιο του Δ.Π.Μ.Σ είχα τη χαρά να παρακολουθήσω τις διαλέξεις του Καθηγητή Ευάγγελου Π. Χίνη, οι οποίες αποτέλεσαν σημείο αναφοράς στην επαφή μου με τον κλάδο της πυρηνικής τεχνολογίας. Θα ήθελα να εκφράσω τα ειλικρινή μου συλλυπητήρια στην οικογένεια του εκλιπόντος, στους οικείους και συνάδελφους του. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αν. καθηγητή Μ.Ι. Αναγνωστάκη που ανέλαβε, στη συνέχεια την επίβλεψη της εργασίας μου καθώς και τα λοιπά μέλη της εξεταστικής επιτροπής τον Επ. Καθηγητή Ν.Π. Πετρόπουλο και το μέλος Ε.ΔΙ.Π. του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας Δρ. Α.Α. Νικόγλου, για τη συνεργασία μας κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Θα ήθελα να επίσης να ευχαριστήσω τον κύριο Κ. Παρασκευαΐδη Αν. Καθηγητή Ε.Μ.Π. και τα μέλη της επιτροπής που με έκαναν δεκτό στο Δ.Π.Μ.Σ καθώς και το σύνολο των καθηγητών μου αλλά και των συμφοιτητών μου κατά την διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

## Περίληψη

Στόχος αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας (ΜΕ) είναι η παρουσίαση και μελέτη των βασικών χαρακτηριστικών των ADSRs (Accelerator Driven Subcritical Reactors) δηλαδή των υποκρίσιμων πυρηνικών αντιδραστήρων σχάσης υποβοηθουμένων με επιταχυντές. Περιγράφονται στο πλαίσιο της εργασίας, οι βασικές πυρηνικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε τέτοια συστήματα, γίνεται μια γενική περιγραφή των βασικών σχεδίων των επιταχυντών (Linac, Cyclotron, Synchrotron) που χρησιμοποιούνται, και παρουσιάζεται η δυνατότητα μεταστοιχείωσης των ραδιενεργών κατάλοιπων καθώς και οι δυνατότητες που ανοίγονται με τη χρήση Θορίου ως πυρηνικού καυσίμου. Καθώς ζούμε σε έναν κόσμο μετά το πυρηνικό ατύχημα της Φουκουσίμα, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα στον τομέα της ασφαλούς λειτουργίας αυτών των συστημάτων καθώς και οι τεχνολογικές προκλήσεις που υπάρχουν.

# Abstract

The aim of this Postgraduate Thesis is the presentation and study of the basic characteristics of Accelerator Driven Subcritical Reactors. Described in the context of the thesis, the basic nuclear reactions that take place in such systems, a general description of the basic plans of the accelerators (Linac, Cyclotron, Synchrotron) used, the nuclear fuel based on Actinides that could be used, and the possibilities opened by using Thorium as nuclear fuel. As we live in a world counting the Fukushima nuclear accident, presented in this diploma thesis are the advantages and challenges in the safe operation of these systems as well as the technological challenges that exist.

# Περιεχόμενα

Πρόλογος .....	9
1 Το παρόν και το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας και ο ρόλος των αντιδραστήρων τύπου ADS (Accelerated Driven Systems) .....	10
1.1 Εισαγωγή .....	10
1.2 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας .....	10
1.3 Το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής .....	11
1.4 Προοπτικές και προκλήσεις στη χρήση της πυρηνικής ενέργειας.....	14
1.5 Κύκλοι πυρηνικού καυσίμου και μελλοντικά σενάρια .....	15
1.5.1 Στρατηγικές διαχωρισμού και μεταστοιχείωσης (P&T strategies) .....	18
1.6 Ο ρόλος των ADS Αντιδραστήρων στην παραγωγή ενέργειας .....	21
1.7 Ιστορική αναδρομή .....	24
1.8 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου .....	26
2 Αντίδραση κατακερματισμού (spallation process).....	27
2.1 Βασικά χαρακτηριστικά της αντίδρασης κατακερματισμού.....	27
2.2 Χωρική κατανομή των νετρονίων .....	31
2.2.1 Χαρακτηριστική χωρική κατανομή των νετρονίων για εγγενώς υποκρίσιμα συστήματα.	
2.2.2 Πολλαπλασιασμός νετρονίων στους ADS Αντιδραστήρες.....	35
2.3 Αποδοτικότητα πηγής νετρονίων, $\Phi^*$ .....	36
2.4 Ενεργειακοί υπολογισμοί.....	36
2.5 Ρεύμα του επιταχυντή.....	37
2.6 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου .....	38
3 Επιταχυντές.....	39
3.1 Γραμμικοί επιταχυντές (Linacs) .....	39
3.2 Κύκλοτρο (Cyclotron).....	41
3.3 Σύγχροτρον (Synchrotron).....	43
3.4 Αξιοπιστία του επιταχυντή.....	45
3.5 Επανασχεδιασμός των γραμμικών επιταχυντών για τους ADS αντιδραστήρες .....	49
3.6 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου .....	51
4 Δομικά χαρακτηριστικά και επιλογές για τους ADS αντιδραστήρες.....	52
4.1 Επιλογές ψυκτικού .....	52
4.2 Υγρά μέταλλα .....	52
4.2.1 Μόλυβδος και εύτηκτο κράμα Μόλυβδου – Βισμούθιου, LBE (Lead Bismuth Eutectic)	
52	

4.2.2	Νάτριο .....	54
4.2.3	Σύγκριση των θερμικών, φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των υγρών μετάλλων .....	54
4.3	Αέρια.....	55
4.4	Στόχος Κατακερματισμού .....	56
4.4.1	Υλικό στόχου Κατακερματισμού .....	57
4.4.2	Φυσική κατάσταση και γεωμετρία του στόχου κατακερματισμού.....	58
4.5	Η επιλογή ύπαρξης παραθύρου δέσμης (beam window or windowless) .....	62
4.6	Δομικά υλικά για ADS αντιδραστήρες .....	65
4.7	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου.....	67
5	Επιλογές καυσίμου για ADS αντιδραστήρες.....	68
5.1	Τύποι καυσίμου βασισμένου σε Ακτινίδες .....	68
5.1.1	Βασικά χαρακτηριστικά των καυσίμων σε μορφή οξειδίων .....	70
5.1.2	Βασικά χαρακτηριστικά των καυσίμων σε μορφή μεταλλικών κραμάτων .....	71
5.1.3	Βασικά χαρακτηριστικά των καυσίμων σε μορφή Νιτριδίων και Καρβιδίων .....	72
5.2	Η εναλλακτική της χρήσης του Θορίου ως πυρηνικού καυσίμου .....	73
5.2.1	Ιστορική αναδρομή.....	73
5.2.2	Πλεονεκτήματα και προκλήσεις στη χρήση του Θορίου .....	77
5.2.3	ADS αντιδραστήρες και το Θόριο ως Καύσιμο .....	78
5.3	Διάταξη πυρήνα και ράβδων καυσίμου για τους ADS αντιδραστήρες.....	81
5.4	Μεταστοιχείωση Μακρόβιων προϊόντων σχάσης (LLFP's).....	84
5.4.1	Ιδιότητες και χαρακτηριστικά των κυρίων LLFP's.....	84
5.4.2	ADS αντιδραστήρες και μεταστοιχείωση των LLFP's.....	85
5.5	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου .....	87
6	Ασφάλεια και δυναμική των ADS αντιδραστήρων.....	88
6.1	Βασικές έννοιες .....	88
6.2	Μείζονα ζητήματα στη δυναμική των ADS αντιδραστήρων.....	91
6.3	Αντίδραση του συστήματος σε περίπτωση μεταβολής της έντασης δέσμης.....	91
6.4	Σύγκριση της συμπεριφοράς του ADS αντιδραστήρα και ενός κρίσιμου αντιδραστήρα... 92	
6.4.1	Σύγκριση της συμπεριφοράς του ADS αντιδραστήρα και ενός κρίσιμου αντιδραστήρα κάτω από την αύξηση της αντιδραστικότητας.....	92
6.4.2	Σύγκριση της συμπεριφοράς του ADS αντιδραστήρα και ενός κρίσιμου αντιδραστήρα κατά τη σβέση.....	94
6.4.3	Σύγκριση της συμπεριφοράς του ADS αντιδραστήρα και ενός κρίσιμου αντιδραστήρα κάτω από μεταβατικές μεταβολές (unprotected).....	95
6.5	Συνοπτική σύγκριση ADS αντιδραστήρων με τους κρίσιμους αντιδραστήρες.....	97
6.6	Αντισεισμική προστασία αντιδραστήρα ADS.....	97

6.7	Απομάκρυνση της εναπομένουσας παραγόμενης θερμότητας (residual heat) με κυκλοφορία αέρα .....	99
6.8	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου .....	102
7	Συμπεράσματα.....	103



## Πρόλογος

Η παρούσα εργασία χαρακτηρίζεται ως βιβλιογραφική και αυτό συνεπάγεται ότι αποτελεί συλλογή στοιχείων από τη βιβλιογραφία. Η συλλογή στοιχείων έγινε με γνώμονα τις προσωπικές αντιλήψεις του συγγραφέα της παρούσας εργασίας με στόχο να γίνουν κατανοητά τα θέματα που τίθενται στην εργασία αυτή αλλά και ταυτόχρονα την καταγραφή των επιτυχιών και προκλήσεων που αντιμετωπίζει η επιστημονική κοινότητα όσον αφορά τη λειτουργία των ADS αντιδραστήρων. Κύριο μέλημα κατά την εκπόνηση της εργασίας ήταν να αναδείξει τον αμέριστο σεβασμό του συγγραφέα προς στους επιστήμονες και τεχνικούς που έχουν αναλάβει ένα τόσο πολύπλοκο εγχείρημα. Στο τέλος κάθε Κεφαλαίου παρατίθενται οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για την συγγραφή του.

Η εργασία ακολουθεί την εξής δομή :

Το πρώτο Κεφάλαιο ασχολείται με τα προβλήματα που αντιμετωπίζει η διεθνής κοινότητα στο θέμα της παραγωγής ενέργειας και αναδεικνύει τις προκλήσεις και τις δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει η πυρηνική ενέργεια, κυρίως μέσω των ADS αντιδραστήρων, στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο.

Το δεύτερο Κεφάλαιο ασχολείται με την φυσική βάση των ADS αντιδραστήρων, την αντίδραση κατακερματισμού και την νετρονική συμπεριφορά αυτής, καθώς και τις προκλήσεις και τις διαφορές από του παραδοσιακούς κρίσιμους πυρηνικούς αντιδραστήρες σχάσης.

Το τρίτο Κεφάλαιο ασχολείται με τους επιταχυντές, παρουσιάζοντας συνοπτικά τον τρόπο λειτουργίας των τριών κυρίων τύπων επιταχυντή, τις προκλήσεις και την προσπάθεια αντιμετώπισης τους μέσω των λεγομένων επιταχυντών πρωτονίων υψηλής ισχύος.

Το τέταρτο Κεφάλαιο ασχολείται με τα χαρακτηριστικά των υλικών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως ψυκτικά, στόχοι κατακερματισμού και ως δομικά υλικά. Παρουσιάζονται οι επικρατέστερες σχεδιαστικές επιλογές που υπάρχουν σε σχέση με το είδος του στόχου κατακερματισμού καθώς και με την ύπαρξη ή μη του παραθύρου δέσμης.

Το πέμπτο Κεφάλαιο ασχολείται με την ενδεχομένη χρήση των ADS αντιδραστήρων. Η πρώτη δυνατότητα είναι η ένταξη τους στις στρατηγικές μεταστοιχείωσης των ραδιενεργών καταλοίπων. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται ο κύκλος του Θορίου και οι προοπτικές που υπάρχουν στην χρησιμοποίησή του, ως κυρίου πυρηνικού καυσίμου για τους ADS αντιδραστήρες.

Το έκτο και τελευταίο Κεφάλαιο ασχολείται με την σύγκριση των ADS αντιδραστήρων με τους υπάρχοντες κρίσιμους αντιδραστήρες όσον αφορά στη συμπεριφορά τους κάτω από συνθήκες μεταβολής της αντιδραστικότητας (reactivity) και σε περιπτώσεις που απαιτείται η σβέση του αντιδραστήρα. Παρουσιάζεται επίσης η αντισεισμική θωράκιση του μελλοντικού εργοστασίου πυρηνικής ενέργειας για τους ADS αντιδραστήρες καθώς και ο σχεδιασμός του δοχείου του αντιδραστήρα, με στόχο την απομάκρυνση της παραγόμενης θερμότητας μετά το σβήσιμο του αντιδραστήρα χωρίς μηχανική υποστήριξη.

# Κεφάλαιο 1

## 1 Το παρόν και το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας και ο ρόλος των αντιδραστήρων τύπου ADS (Accelerated Driven Systems)

### 1.1 Εισαγωγή

Στο σημερινό τοπίο της παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας εμφανίζονται δυο κύριοι λόγοι που προβληματίζουν τη διεθνή κοινότητα. Ο πρώτος είναι οι διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες εξασφάλισης πηγών ενέργειας, σε ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο κόσμο, όπου οι αναπτυσσόμενες χώρες προσπαθούν να γίνουν ανταγωνιστικές και να προσεγγίσουν τις ανεπτυγμένες χώρες, σε ένα πλαίσιο όμως που - όπως αποδεικνύεται από μελέτες - οι πόροι αυτοί είναι περιορισμένοι, και ο δεύτερος, το παρατηρούμενο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής που μας αναγκάζει να επανεξετάσουμε τις επιλογές για το τρόπο παραγωγής ενέργειας. Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τα βασικά χαρακτηριστικά των προκλήσεων αυτών αλλά και την χρήση της πυρηνικής ενέργειας ως τρόπου αντιμετώπισης τους, προσφέροντας μια εναλλακτική, οικονομικά βιώσιμη και περιβαλλοντικά υπεύθυνη προοπτική.

### 1.2 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας

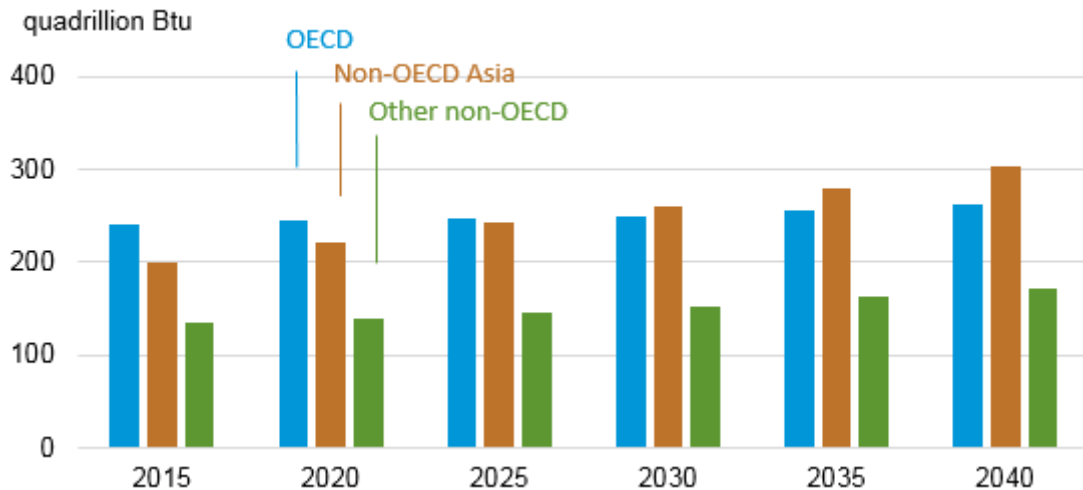
Η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας αναφέρεται στην ενέργεια που καταναλώνει το σύνολο του ανθρωπίνου πληθυσμού. Η μέτρηση της γίνεται σε ετήσια βάση και μετρά το σύνολο της ενέργειας που καταναλώνεται από όλες τις πηγές, με εξαίρεση τα ελλειπή στοιχεία που υπάρχουν για τη βιομάζα. Λόγω της σημαντικότητας του θέματος, παγκόσμιοι αλλά και κρατικοί οργανισμοί παρακολουθούν συστηματικά την ετήσια κατανάλωση ενέργειας σε παγκόσμιο και εθνικό επίπεδο αντίστοιχα. Πέραν της παρακολούθησης και καταγραφής, αναλύουν τα δεδομένα προκειμένου να εκτιμήσουν τις ενεργειακές απαιτήσεις στο εγγύς, το προσεχές και το απώτερο μέλλον. Από τους γνωστότερους οργανισμούς αυτού του είδους είναι ο International Energy Agency (IEA<sup>1</sup>) και η Energy Information Administration (EIA<sup>2</sup>) των Η.Π.Α. Στο Σχήμα 1-1 παρατίθενται στοιχεία για την κατανάλωση ενέργειας σε κράτη μέλη του ΟΟΣΑ και σε κράτη της Ασίας και του υπόλοιπου κόσμου εκτός ΟΟΣΑ, καθώς και προβλέψεις ενεργειακών απαιτήσεων από το 2020 έως το 2040. Τα στοιχεία αυτά αφορούν συνολικά την ενεργειακή κατανάλωση σε παγκόσμια κλίμακα, χωρίς να γίνεται διαχωρισμός σε επιμέρους ενεργειακές απαιτήσεις (π.χ. οικιακή κατανάλωση ή ενέργεια για παράγωγα πετρελαίου κ.α.

Γενικότερα όπως γίνεται εμφανές και από το Σχήμα 1-1, παρατηρείται μια σχετική στασιμότητα στις ανεπτυγμένες χώρες, μέλη του ΟΟΣΑ, ενώ το αντίθετο συμβαίνει με τις αναπτυσσόμενες χώρες. Αυτές οι τάσεις συμβαδίζουν μαζί με τη μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση του Α.Ε.Π στις χώρες μη-μέλη του ΟΟΣΑ καθώς και στην αύξηση αλλά και το νεότερο του πληθυσμού σε σχέση με τις χώρες μέλη.

---

<sup>1</sup> <https://www.iea.org/>

<sup>2</sup> <https://www.eia.gov/>



Σχήμα 1-1 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά περιοχή. Οι μονάδες είναι σε  $10^{15}$  BTU<sup>3</sup>

Οι τάσεις αυτές μόνο ανησυχία μπορεί να προκαλούν, ανεξάρτητα από το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, καθώς οι ανταγωνισμοί που θα προκύψουν μεταξύ των κρατών για την εξεύρεση και την εξασφάλιση ενεργειακών πόρων είναι πιθανόν να οδηγήσουν σε όξυνση τις σχέσεις μεταξύ τους, με πιθανό το σενάριο ακόμη και της ύπαρξης γενικευμένων πολεμικών συρράξεων.

Η Ευρωπαϊκή ένωση στο πλαίσιο αυτό αλλά και κάτω από την επίδραση της κλιματικής αλλαγής, αναζητά λύσεις και στο πλαίσιο της πυρηνικής τεχνολογίας. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τους ADS αντιδραστήρες, η Ε.Ε. χρηματοδότησε με 6 Μ€ το πρόγραμμα με τίτλο PDS-XADS (Preliminary Daring Study of an eXperimental Accelerator Driven System).

Οι Η.Π.Α, στο πλαίσιο αυτό έχει το δικό της πρόγραμμα για τη μελέτη των ADS που πραγματοποιείται κυρίως στο Argonne National Laboratory.

Χώρες όπως η Ινδία και η Κίνα αναζητούν να εξασφαλίσουν εναλλακτικές πηγές ενέργειας και ιδιαίτερα η Ινδία έχει παρουσιάσει μεγάλο ενδιαφέρον στην έρευνα και μελέτη των πυρηνικών αντιδραστήρων με επιταχυντές, καθώς και της ενδεχομένης χρήσης Θωρίου, λόγω των υψηλών αποθεμάτων που διαθέτει [1].

### 1.3 Το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής

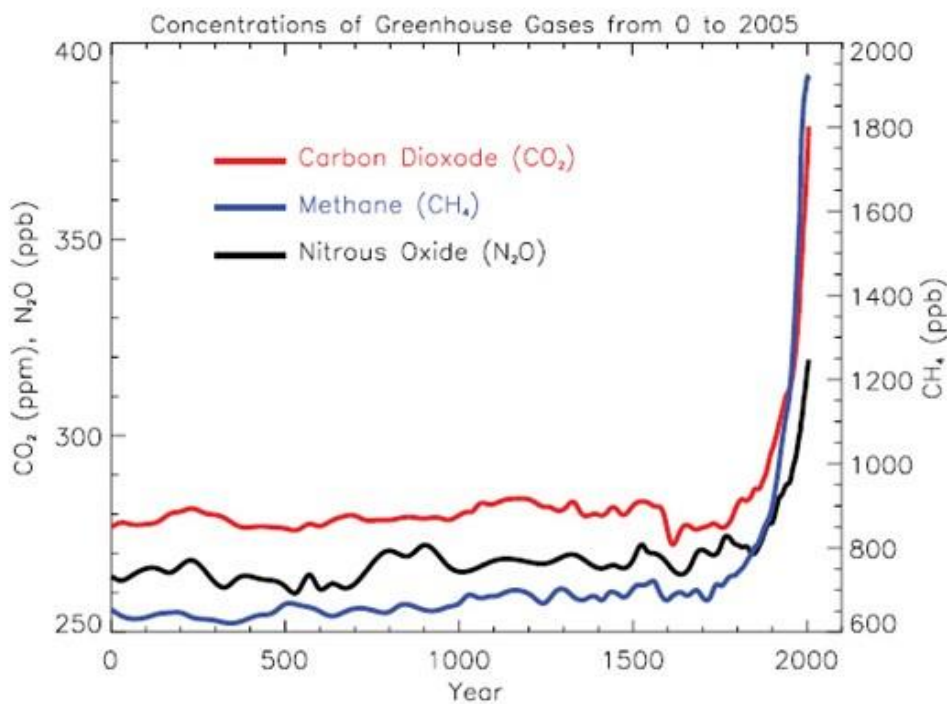
Η κλιματική αλλαγή είναι η μεταβολή στη στατιστική κατανομή των καιρικών φαινομένων σε βάθος χρόνου, από δεκαετίες έως χιλιετίες. Τα αίτια της κλιματικής αλλαγής είναι αρκετά και ποικίλα, από τη μεταβολή της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο μέχρι τα γεωλογικά φαινόμενα που συμβαίνουν στην επιφάνειά της, αλλά όπως αναδείχθηκε τις τελευταίες δεκαετίες σε μεγάλο βαθμό οφείλεται και στην ανθρώπινη δράση. Όπως παρατηρείται, με την δράση του ανθρώπου από την βιομηχανική επανάσταση και ύστερα, υπάρχει αύξηση στο μέσο όρο της θερμοκρασίας του πλανήτη.

Κύριος μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για αυτή την διαδικασία είναι το λεγόμενο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Διάφορα αέρια ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα και τα οποία παράγονται σε σημαντικό βαθμό από ανθρωπογενείς δραστηριότητες συγκρατούν την θερμότητα

<sup>3</sup> www.eia.gov

που προέρχεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα την σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη.

Παρατίθενται τρία ενδεικτικά Σχήματα, στα οποία υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις συσχέτισης μεταξύ της ανθρώπινης δραστηριότητας και της μέσης αύξησης της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πλανήτη. Στο Σχήμα 1-2 παρουσιάζονται οι εκπομπές  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  και  $\text{CH}_4$  για τις δύο χιλιετίες μ.Χ. Στο Σχήμα 1-3 παρουσιάζεται η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση ανά ενεργειακή πηγή και για το χρονικό διάστημα από το 1820 έως το 2010. Τέλος, στο Σχήμα 1-4 απεικονίζεται η μέση ετήσια θερμοκρασία επιφανείας και ο αντίστοιχος αριθμητικός μέσος πενταετίας για την χρονική περίοδο από το 1880 έως το 2010. Στο Σχήμα 1-2 παρατηρούμε ότι περί το 1900 εμφανίζεται ραγδαία αύξηση των αερίων θερμοκηπίου η οποία συνεχίζεται μέχρι το τέλος των παρατηρήσεων το έτος 2005. Η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται για το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) η οποία ξεπερνά το 200%. Σημαντικές είναι και οι αυξήσεις στις συγκεντρώσεις των διοξειδίων του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ) οι οποίες εκτιμώνται περίπου 35% και 20% αντίστοιχα. Στο Σχήμα 1-3 παρατηρούμε ότι από τα μέσα του 1800 παρουσιάζεται μία σταδιακή αύξηση στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας, η οποία καλύπτεται σχεδόν αποκλειστικά από τη καύση άνθρακα. Περί τα μέσα του 1900 ο ρυθμός αύξησης της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας υπερδιπλασιάζεται, ενώ εμφανίζονται και άλλοι ενεργειακοί πόροι όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο η πυρηνική ενέργεια κ.α.

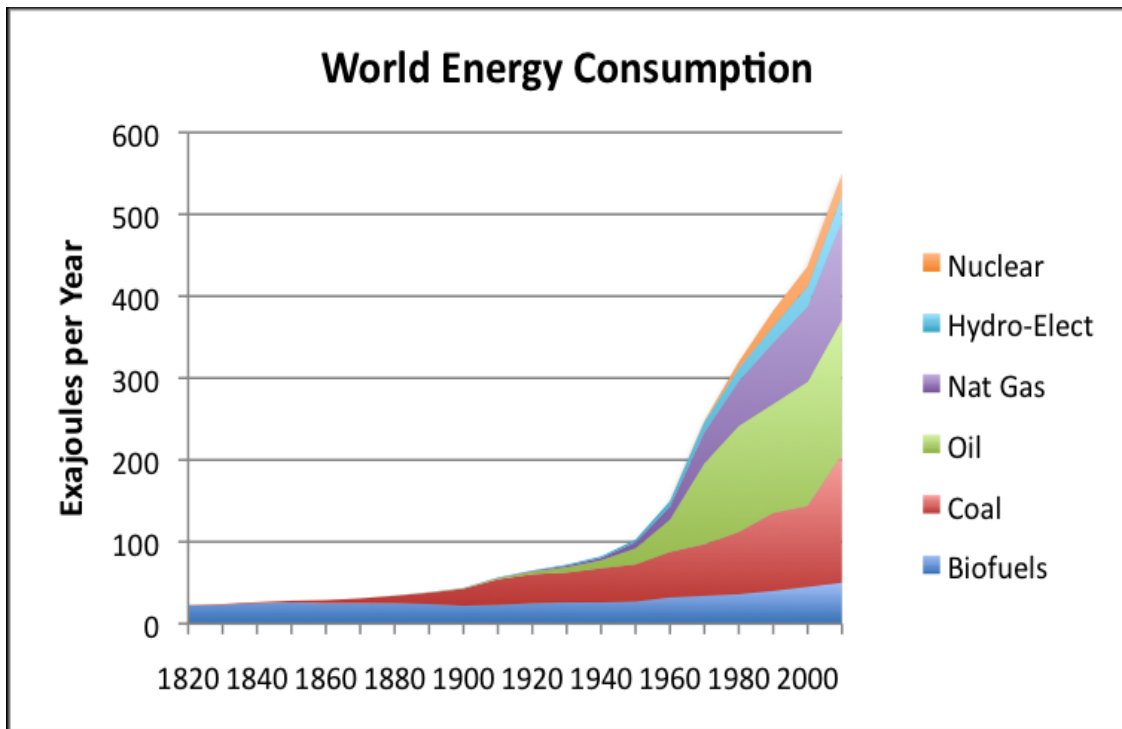


Σχήμα 1-2 Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου σε συνάρτηση με τον χρόνο<sup>4</sup>

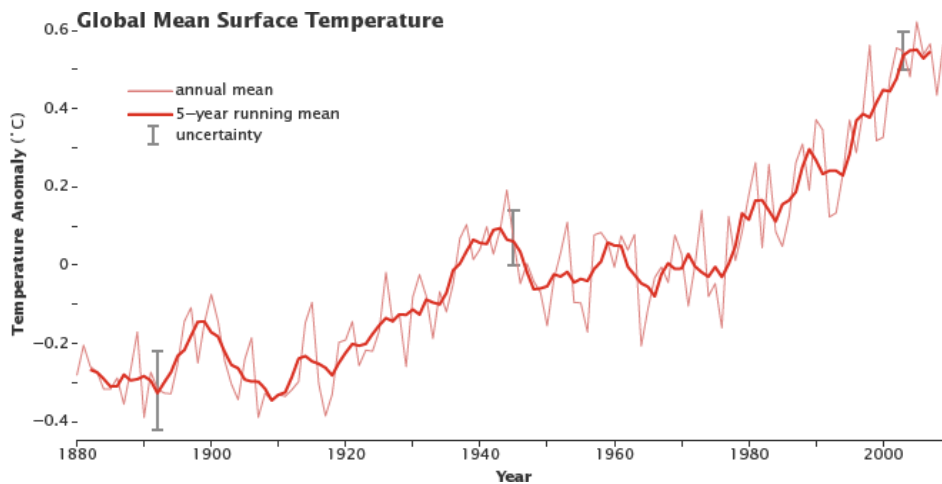
Συνδυάζοντας τα δύο αυτά διαγράμματα, αντιλαμβανόμαστε ότι η αύξηση της χρήσης ορυκτών καυσίμων κυρίως από τη 2<sup>η</sup> βιομηχανική επανάσταση και μετά είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων  $\text{CO}_2$  και  $\text{NO}_2$ , ενώ η αύξηση του μεθανίου θα μπορούσε εν μέρη να αποδοθεί και στην σημαντική ανάπτυξη της κτηνοτροφίας η οποία εκσυγχρονίζεται και αυξάνει παγκοσμίως τον όγκο της.

<sup>4</sup> www.ipcc.ch

Τέλος, στο Σχήμα 1-4 παρατηρούμε ότι η μέση ετήσια θερμοκρασία εδάφους παγκοσμίως αυξάνει συστηματικά με το χρόνο, γεγονός το οποίο συνδέεται άμεσα με τη χρήση ορυκτών καυσίμων και τα αέρια θερμοκηπίου.



Σχήμα 1-3 Ενεργειακή κατανάλωση για κάθε πηγή ενέργειας από το 1820 έως το 2010



Σχήμα 1-4 Μέση ετήσια θερμοκρασία επιφανείας και αριθμητικός μέσος πενταετίας<sup>5</sup>.

Η παγκόσμια επιστημονική κοινότητα προειδοποιεί ότι η συστηματική αύξηση της θερμοκρασίας και η κλιματική αλλαγή που θα επιφέρει θα έχει καταστροφικές επιπτώσεις για την ισορροπία του οικοσυστήματος του πλανήτη. Οι τελευταίες δεκαετίες του 20<sup>ου</sup> αιώνα χαρακτηρίστηκαν από μία παγκόσμια εγρήγορση σχετικά με τη διαχείριση όλων των διαθέσιμων πόρων του πλανήτη με στόχο

<sup>5</sup> www.agci.org

τη βιώσιμη ανάπτυξη. Εν συντομία, οι σημαντικότεροι σταθμοί σε αυτή την προσπάθεια είναι οι εξής:

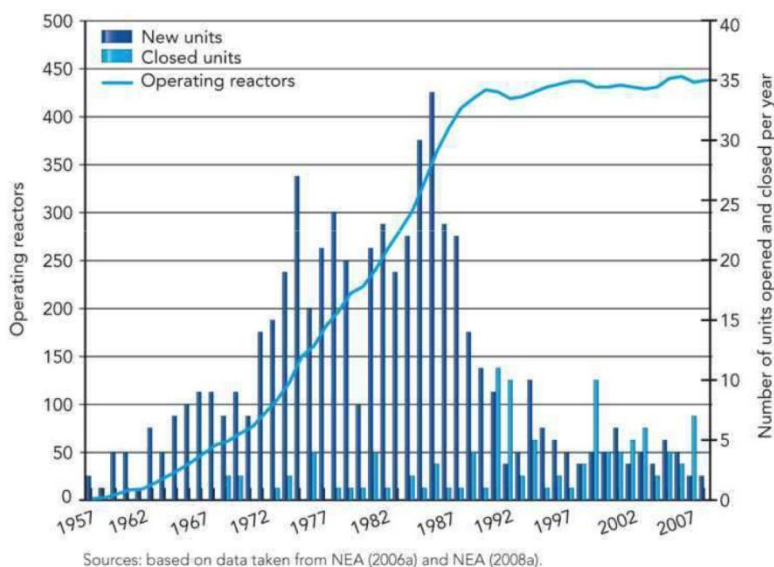
- Το 1992 στη Σύνοδο Κορυφής για τη Γη στο Rio de Janeiro (UNCED, United Nations Conference on Environment and Development) αναπτύσσεται για πρώτη φορά ένα παγκόσμιο πλάνο βιώσιμης ανάπτυξης, καταδεικνύοντας πως οι διάφοροι πόροι μπορούν και πρέπει να διαχειριστούν έτσι ώστε να διασφαλιστεί η ποιότητα διαβίωσης για τις επόμενες γενεές. Μεταξύ άλλων τα βιομηχανικά κράτη συμφώνησαν να σταθεροποιήσουν τις εκπομπές CO<sub>2</sub> από ορυκτά καύσιμα στα επίπεδα του 1990, στόχος ο οποίος δεν επετεύχθη.
- Το 1994 ενεργοποιείται το United Nations Convention on Climate Change, όπου συμμετέχουν 196 χώρες δίνοντας χαρακτήρα παγκοσμιοποίησης.
- Τη σύνοδο του Ρίο ακολούθησε το πρωτόκολλο του Κιότο, το 1997 το οποίο στόχευε μέχρι το 2012 σε εκπομπές CO<sub>2</sub> 5% κάτω από τα επίπεδα του 1990. Η συμφωνία αυτή είχε επιτυχίες και αποτυχίες. Συνολικά όμως οι εκπομπές από τις χώρες που συμμετείχαν στη συμφωνία μειώθηκαν σημαντικά.
- Το 2005 δημιουργείται το European Union Emissions Trading Scheme, το οποίο αποτελεί έναν μηχανισμό για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου στη Ευρωπαϊκή Ένωση. Είναι η πρώτη και μεγαλύτερη αγορά εκπομπών CO<sub>2</sub>.
- Το 2005 η Ρωσία υπογράφει το πρωτόκολλο του Κιότο
- Το 2009 υπογράφεται η Συμφωνία της Κοπεγχάγης σύμφωνα με την οποία οι ανεπτυγμένες χώρες δεσμεύονται να επιδοτήσουν, αρχικά με 30 δις δολάρια την περίοδο 2010-2012 και μακροπρόθεσμα 100 δις δολάρια μέχρι το 2020, ενέργειες οι οποίες στοχεύουν στη μείωση των αερίων θερμοκηπίου.
- Το 2015 υπογράφεται η συνθήκη του Παρισιού, όπου 195 χώρες συμφώνησαν σε κοινό αγώνα κατά της κλιματικής αλλαγής με δράσεις και επενδύσεις για μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> και ανάπτυξη ενός βιώσιμου ενεργειακού μέλλοντος.

Μια παρατήρηση που μπορεί να γίνει εδώ είναι το γεγονός ότι η παραγωγή ενέργειας μέσω πυρηνικών αντιδραστήρων σχάσης δεν αποτελεί πηγή εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου, γεγονός που την καθιστά ελκυστική εναλλακτική λύση για να επιτευχθούν οι στόχοι της μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου. Μελέτες [3] αναδεικνύουν ότι για τις χώρες του ΟΟΣΑ που η πυρηνική τεχνολογία είναι ενταγμένη στην παραγωγή ενέργειας, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη μείωση των εκπεμπόμενων αερίων του θερμοκηπίου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι χωρίς την πυρηνική ενέργεια, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> θα ήταν κατά ένα τρίτο μεγαλύτερες από ότι είναι σήμερα. Αυτό αντιστοιχεί σε μια εξοικονόμηση 1200 εκατομμυρίων τόνων CO<sub>2</sub> ή 10% των εκπομπών από τις χώρες του ΟΟΣΑ. Αποτελεί όμως ακόμη σημείο αντιπαράθεσης στη διεθνή κοινότητα εάν η πυρηνική ενέργεια αποτελεί μέρος της λεγομένης βιώσιμης ανάπτυξης, για λόγους ασφαλούς λειτουργίας, διαχείρισης των πυρηνικών κατάλοιπων, διάδοσης των πυρηνικών οπλών αλλά ακόμη και ανταγωνισμού μεταξύ των εταιριών που δραστηριοποιούνται στο τομέα της παραγωγής ενέργειας. Χαρακτηριστική περίπτωση είναι το πρωτόκολλο του Κιότο [2] που η χρήση της πυρηνικής ενέργειας δεν εντάχθηκε στα μέτρα που αποσκοπούσαν στην μείωση εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου.

#### 1.4 Προοπτικές και προκλήσεις στη χρήση της πυρηνικής ενέργειας

Μέσα λοιπόν στο συγκεκριμένο πλαίσιο που αναζητείται λύση για τα παραπάνω προβλήματα η πυρηνική ενέργεια μπορεί να προσφέρει εναλλακτικές λύσεις. Σύμφωνα με στοιχεία του ΟΟΣΑ, το 2010 παγκοσμίως λειτουργούσαν 441 μονάδες πυρηνικών αντιδραστήρων σχάσεως, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 375 GWe, καλύπτοντας το 14% της παγκόσμιας ηλεκτροπαραγωγής. Από

αυτούς, το 90% αποτελείται από αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος, ενώ το 50% εξ αυτών έχουν ηλικία μικρότερη των 25 ετών. Στο Σχήμα 1-5 παρουσιάζονται ιστορικά δεδομένα για το «άνοιγμα» και «κλείσιμο» πυρηνικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής για την περίοδο 1957 έως 2007.



Σχήμα 1-5 Ιστορικά δεδομένα ανάπτυξης πυρηνικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής από το 1957 έως το 2007

Πέραν της υψηλής διαθεσιμότητας και ανταγωνιστικότητας, για να μπορέσει η πυρηνική ενέργεια να παίξει καθοριστικό ρόλο στο παγκόσμιο καταμερισμό της ενεργειακής παραγωγής, θα πρέπει να αντιμετωπιστούν οι - δικαιολογημένοι ως ένα βαθμό - φόβοι της διεθνούς κοινής γνώμης στα ζητήματα της ασφάλειας, της επάρκειας των φυσικών πόρων που απαιτούνται, της αντιμετώπισης του προβλήματος των πυρηνικών καταλοίπων και της διάδοσης των πυρηνικών όπλων.

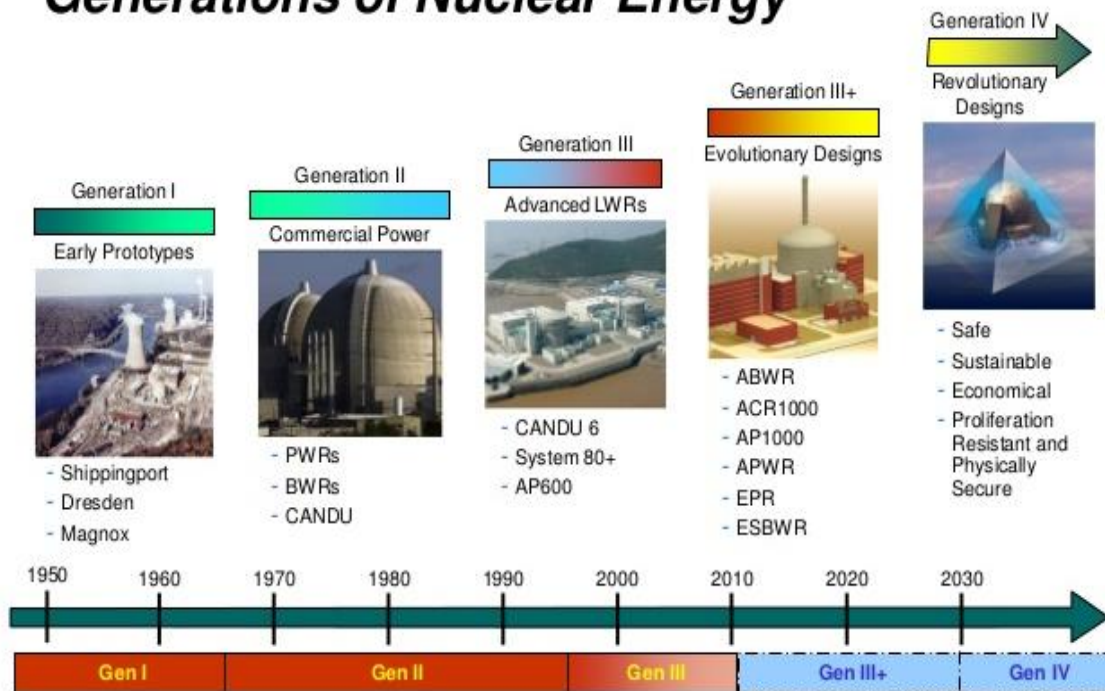
### 1.5 Κύκλοι πυρηνικού καυσίμου και μελλοντικά σενάρια

Σύμφωνα με τη κατηγοριοποίηση των πυρηνικών αντιδραστήρων σχάσης, αυτή τη στιγμή οι αντιδραστήρες που βρίσκονται σε λειτουργία, στην πλειοψηφία τους ανήκουν στη δεύτερη γενιά αντιδραστήρων. Η γενιά αυτή ουσιαστικά περιλαμβάνει τους πρώτους εμπορικούς σταθμούς πυρηνικής ηλεκτροπαραγωγής οι οποίοι κατασκευάστηκαν το χρονικό διάστημα από τα μέσα της δεκαετίας του '60 μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '90 (Σχήμα 1-6), περίοδος όπου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-5, παρατηρείται ο υψηλότερος ρυθμός κατασκευής και λειτουργίας πυρηνικών σταθμών παγκοσμίως. Σε αυτή τη γενιά συγκαταλέγονται οι BWR (Boiling Water Reactor), οι PWR (Pressurized Water Reactor) και οι CANDU (Canada Deuterium Uranium). Βασικό καύσιμο των Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος σήμερα είναι το Ουράνιο και σε ορισμένες περιπτώσεις το Πλουτώνιο. Το πυρηνικό καύσιμο είναι σε μορφή οξειδίου και η σύσταση του ως προς τα ισότοπα το Ουράνιο και του Πλουτωνίου εξαρτώνται από τον τύπο του αντιδραστήρα.

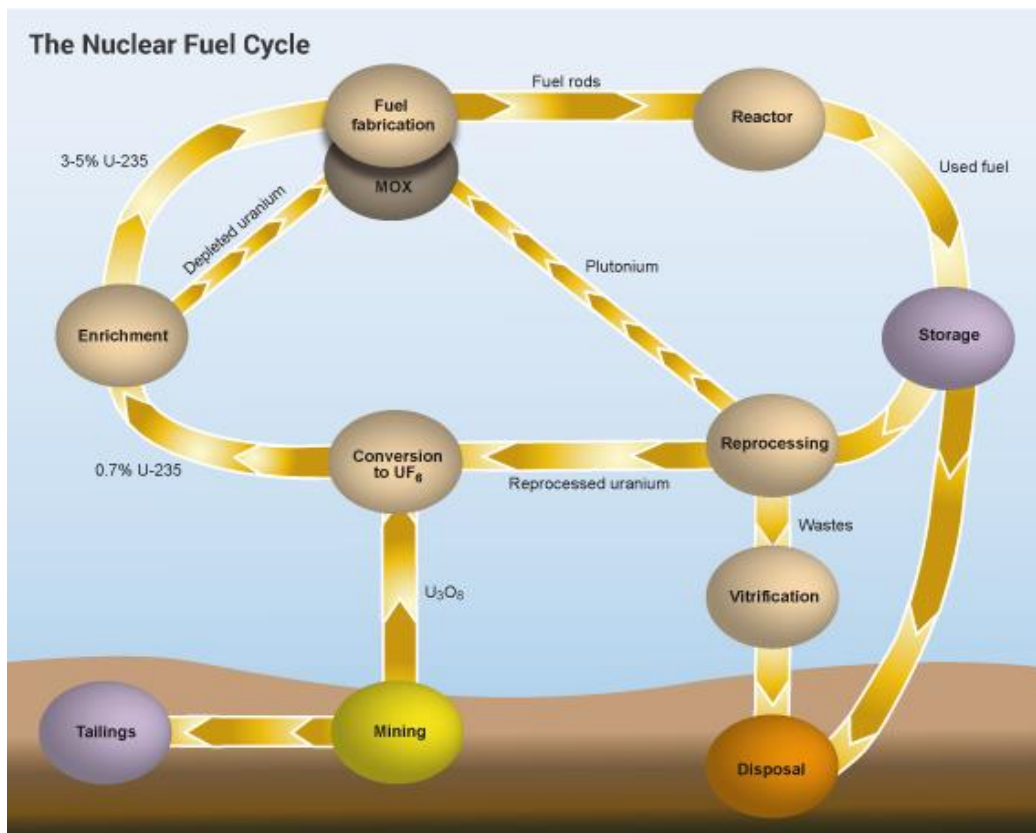
Για παράδειγμα, το  $UO_2$  με το ουράνιο στη φυσική του κατάσταση χρησιμοποιείται στους CANDU, το οξείδιο του Ουρανίου εμπλουτισμένο σε  $^{235}U$  σε ποσοστό 1,5% - 4% σε αντιδραστήρες BWR, PWR αλλά και CANDU. Υπάρχει επίσης το λεγόμενο MOX (MIX Oxide) που είναι μείγμα οξειδίου Ουρανίου Πλουτωνίου  $U(P)O_2$  το οποίο επίσης χρησιμοποιείται από τους BWR, PWR αλλά και από τον αντιδραστήρα ταχέων νετρονίων FBR (Fast Breeder Reactor).

Κύκλος πυρηνικού καυσίμου (Σχήμα 1-7) ονομάζεται το σύνολο το διαδικασιών, πυρηνικών και χημικών, από την εξόρυξη μέχρι την διάθεση του πυρηνικού καυσίμου και τη διαχείριση των ραδιενεργών καταλοίπων.

# Generations of Nuclear Energy



Σχήμα 1-6 Εξέλιξη των Πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος<sup>6</sup>



Σχήμα 1-7 Κύκλος πυρηνικού καυσίμου<sup>7</sup>

<sup>6</sup> www.gen-4.org



Η πυρηνική βιομηχανία παραγωγής ενέργειας έχει καταλήξει, όσον αφορά τον κύκλο, σε δυο επιλογές μέχρι σήμερα. Ο πρώτος είναι ο λεγόμενος "ανοιχτός" κύκλος καυσίμου (Open fuel Cycle). Με αυτή την επιλογή το χρησιμοποιημένο καύσιμο όταν απομακρύνεται από τον αντιδραστήρα τοποθετείται σε αποθήκες ειδικά διαμορφωμένες και έπειτα, χωρίς καμία περαιτέρω επεξεργασία προχωρά η διαδικασία εναπόθεσης στο έδαφος. Χώρες όπως οι Η.Π.Α, Φινλανδία, Σουηδία εφαρμόζουν αυτή τη πρακτική. Ο κύκλος αυτός έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα μειονεκτήματα, όπως θα δούμε παρακάτω, έχουν να κάνουν με τον χρόνο ζωής των ραδιενεργών καταλοίπων. Τα πλεονεκτήματα αυτής της διαδικασίας είναι οικονομικά (Πίνακας 1-1), ενώ συγχρόνως περιορίζουν τη διάδοση πυρηνικού υλικού με σκοπό την κατασκευή πυρηνικών όπλων.

Η δεύτερη επιλογή είναι η περαιτέρω επεξεργασία του χρησιμοποιημένου καυσίμου. Κατά την διάρκεια λειτουργίας του αντιδραστήρα μέσω αντιδράσεων σχάσης και απορρόφησης (πρόσληψης) νετρονίων, δημιουργούνται υπερουράνια στοιχεία TRU, (Transuranic elements), όπως τα Αμερίκιο, Νεπτούνιο, Κιούριο τα οποία δρουν ανταγωνιστικά στη σχάση του  $^{235}\text{U}$ , καθώς και Ακτινίδες. Υπερουράνια στοιχεία ονομάζονται τα στοιχεία με ατομικό αριθμό (Z) μεγαλύτερο του Ουρανίου (92) και έως 118. Οι Ακτινίδες είναι μία σειρά 15 ραδιενεργών χημικών στοιχείων μεταξύ του Ακτινίου (89) και του Λωρένσιου (103). Οι Ακτινίδες με ατομικό αριθμό από 93 έως 103 ανήκουν στα υπερουράνια στοιχεία ενώ τα στοιχεία με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο του 103 καλούνται και Υπερακτινίδες ή υπέρβαρα στοιχεία. Οι Ακτινίδες, με εξαίρεση το Ακτίλιο (Ac), το Θόριο (Th), το Πρωτακτίλιο (Pa) και το Ουράνιο (U), δεν υπάρχουν φυσικά στη Γη αλλά δημιουργούνται από τεχνικές όπως ο βομβαρδισμός νετρονίων. Το Ουράνιο και το Πλουτώνιο αποσπώνται από το χρησιμοποιημένο καύσιμο και χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθεί καύσιμο τύπου MOX. Οι Ακτινίδες και τα υπόλοιπα ραδιενεργά κατάλοιπα αφού πρώτα υποστούν κατάλληλη επεξεργασία τοποθετούνται στο έδαφος. Αυτό το κύκλο τον έχουν υιοθετήσει χώρες όπως η Ρωσία, η Ιαπωνία κ.α. Αυτή η μέθοδος, παρόλο που αξιοποιεί καλύτερα το πυρηνικό καύσιμο και μειώνει το θερμικό φορτίο που φέρουν τα ραδιενεργά κατάλοιπα δεν αντιμετωπίζει ριζικά το πρόβλημα που οφείλεται στις Ακτινίδες και άλλα σχάσιμα προϊόντα με μεγάλο χρόνο ζωής, τα λεγόμενα LLFPs (Long-lived fission products) όπως το  $^{129}\text{I}$ . Επίσης, πρόκειται για μια διαδικασία με αρκετά υψηλότερο κόστος σε σχέση με τον ανοιχτό κύκλο που αναφέρθηκε παραπάνω ακόμη και στη χρήση MOX καυσίμου, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται και από τα στοιχεία του πίνακα που ακολουθεί. (Πίνακας 1-1)

Πίνακας 1-1 Κόστος παραγωγής ενέργειας με αντιδραστήρα (\$/kg καυσίμου)

	PWR-U	PWR-MOX	FBR-MOX	FBR - P & T
<b>Κατασκευή καυσίμου</b>	170	440	600	1000
<b>Επανεπεξεργασία</b>	-	320	500	-
<b>Μεταφορά καυσίμου</b>	20	20	40	60
<b>Διαχωρισμός HLW</b>	-	-	-	400
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ</b>	190	780	1140	1460

Στον παραπάνω πίνακα, η τελευταία στήλη αφορά τις λεγόμενες στρατηγικές διαχωρισμού και μεταστοιχείωσης, (P&T, Partitioning and Transmutation), των Ακτινιδών και των προϊόντων σχάσης με μεγάλο χρόνο ζωής. Αυτές οι στρατηγικές που αναπτύσσονται θα επιτρέψουν στο μέλλον τη μείωση της ραδιενέργειας που προέρχεται κυρίως από κατάλοιπα υψηλής

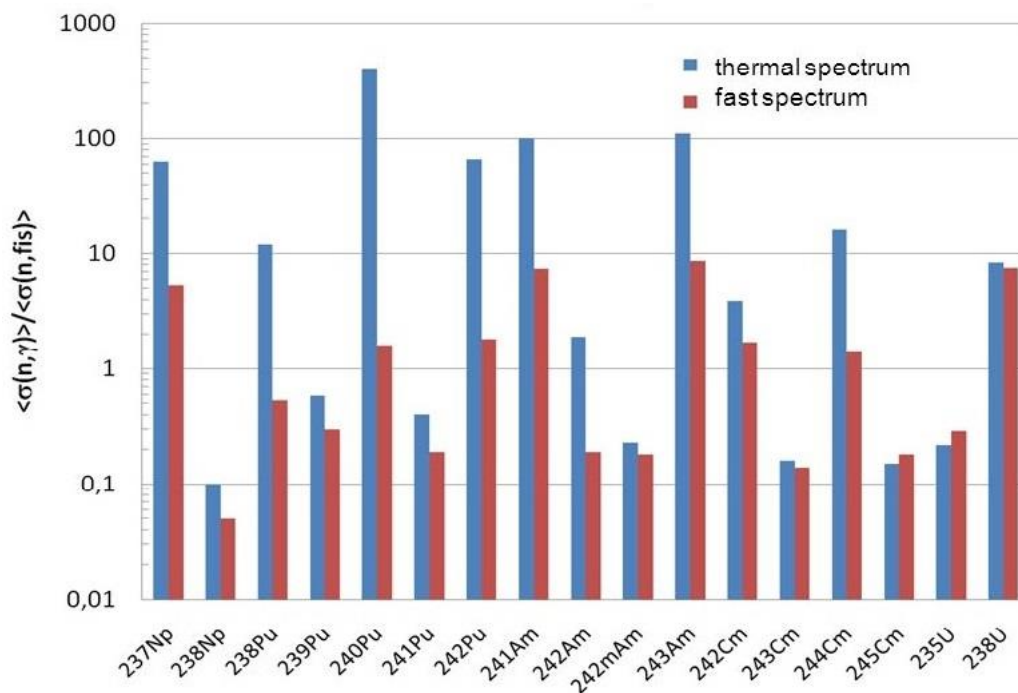
<sup>7</sup> www.world-nuclear.org

ραδιενέργειας. Κυρίαρχο ρόλο σε αυτές τις στρατηγικές φαίνεται να παίζουν οι ADS αντιδραστήρες όπως θα αναπτύξουμε διεξοδικά στη συνέχεια της παρούσας ΜΕ.

### 1.5.1 Στρατηγικές διαχωρισμού και μεταστοιχείωσης (P&T strategies)

Κύριος σκοπός της λειτουργίας των ADS αντιδραστήρων είναι η μεταστοιχείωση των LLFP'S (Long Lived Fission Products) και των λεγομένων MA (Minor Actinides). Ως στοιχεία (MA) αναφέρονται οι Ακτινίδες, πλην του Ουρανίου και του Πλουτωνίου και πιο συγκριμένα τα στοιχεία: Νεπτούνιο (Np), Αμερίκιο (Am), Μπερκέλιο (Bk), Καλιφόρνιο (Cf), Αϊνσταϊνίο (Es) και Φέρμιο (Fm). Το Ουράνιο και το Πλουτώνιο ονομάζονται Major Actinides.

Οι Ακτινίδες Νεπτούνιο και Αμερίκιο συμμετέχουν σε αντιδράσεις απορρόφησης νετρονίων, μέσω της αντίδρασης  $(n,\gamma)$  με αποτέλεσμα τη δημιουργία ισοτόπων των παραπάνω στοιχείων. Επιθυμητή αντίδραση για αυτά τα στοιχεία είναι η σχάση. Εάν θεωρήσουμε την ενεργό διατομή της απορρόφησης νετρονίων ως  $\sigma(n,\gamma)$  και της σχάσης  $\sigma(n,fis)$ , τότε πρέπει ο λόγος των ενεργών διατομών  $\sigma(n,\gamma)/\sigma(n,fis)$  να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος, καθώς απαιτείται η μεταστοιχείωση αυτών των στοιχείων και όχι η δημιουργία νέων ισοτόπων. Στο Σχήμα 1-8 παρουσιάζεται ο λόγος των ενεργών διατομών απορρόφησης και σχάσης  $\sigma(n,\gamma)/\sigma(n,fis)$  διαφόρων υπερουράνιων στοιχείων για τις περιπτώσεις θερμικών και ταχέων νετρονίων. Με κόκκινο χρώμα φαίνεται ο λόγος των δυο ενεργών διατομών για την περίπτωση των ταχέων νετρονίων και με μπλε για νετρόνια με χαμηλή ενέργεια.



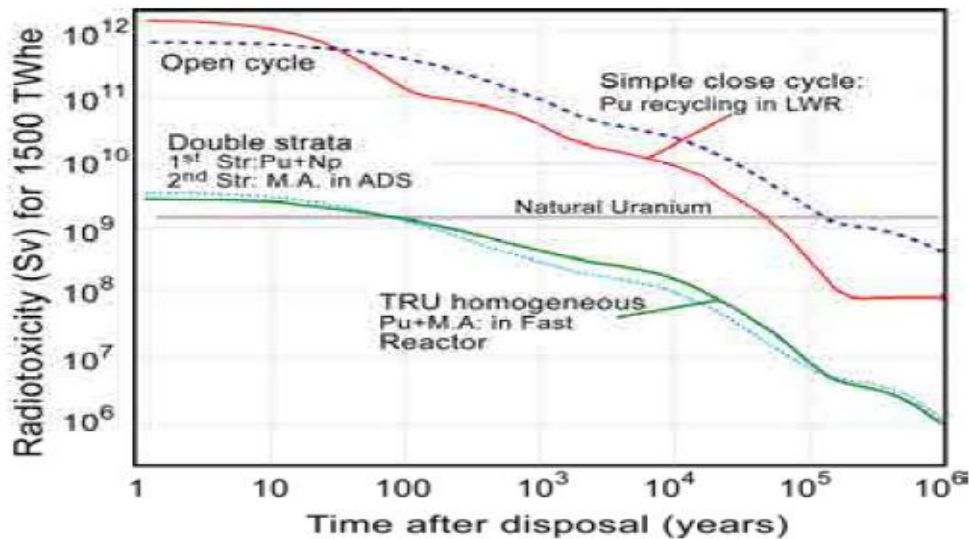
Σχήμα 1-8 Ο λόγος ενεργών διατομών,  $\sigma(n,\gamma)/\sigma(n,fis)$  για διάφορα ισότοπα που ανήκουν στις Ακτινίδες

Αυτό που παρατηρείται είναι ότι ο λόγος μεταξύ των δυο ενεργών διατομών είναι μικρότερος για ταχέα νετρόνια σε σχέση με τα θερμικά, σχεδόν για το σύνολο των εικονιζόμενων ισοτόπων. Εξαιρέση αποτελούν τα ισότοπα  $^{235}\text{U}$  και  $^{245}\text{Cm}$ . Η περίπτωση του ισοτόπου του Ουρανίου αναδεικνύει το γεγονός ανάπτυξης της πυρηνικής τεχνολογίας, στα πρώτα στάδια της, σε αντιδραστήρες που χρησιμοποιούν τα θερμικά νετρόνια αλλά και την ανάγκη εμπλουτισμού του πυρηνικού καυσίμου με  $^{235}\text{U}$  όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι διαχωρισμού και μεταστοιχείωσης, όπως η χρήση LWR αντιδραστήρων με πολλαπλές ανακυκλώσεις.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν συνοπτικά του τρεις τομείς όπου αναμένονται πλεονεκτήματα μέσω των P&T στρατηγικών. Αυτοί είναι:

- Η μείωση του χρόνου ζωής των ραδιενεργών καταλοίπων και μετέπειτα η εναπόθεση τους στο έδαφος, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχήμα 1-9.

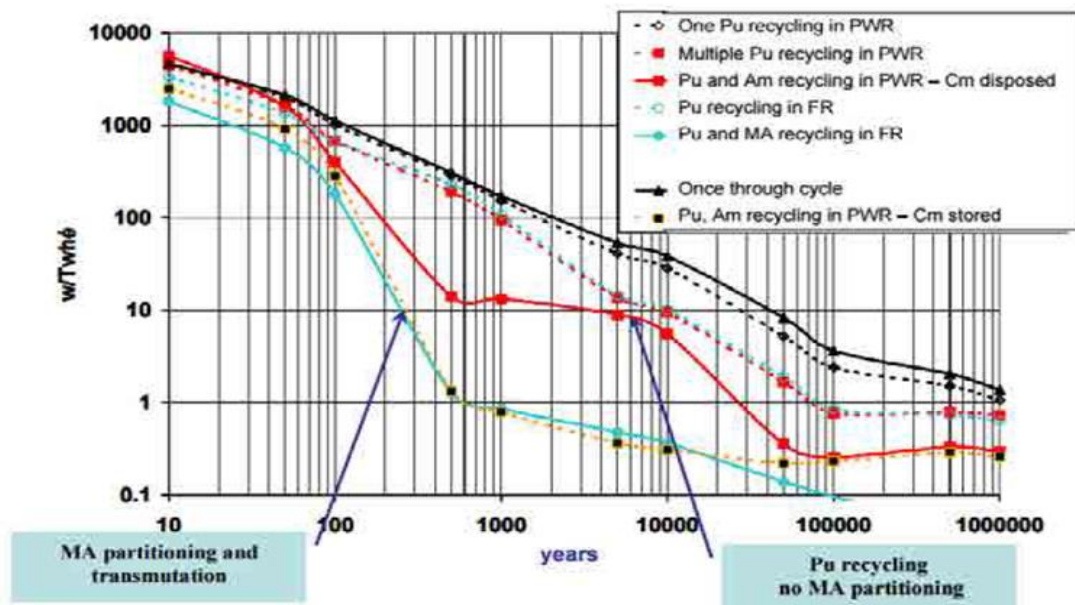


Σχήμα 1-9 Μείωση εκπομπής ραδιενέργειας των καταλοίπων για διάφορες στρατηγικές [5]

Στο παραπάνω Σχήμα φαίνεται καθαρά η πρόβλεψη για μείωση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας με το πέρασμα του χρόνου και κυρίως όσον αφορά τη χρήση των ADS αντιδραστήρων (γαλάζια καμπύλη) σε σχέση με τους υπάρχοντες κύκλους καυσίμου. Αυτό που είναι ενδεικτικό είναι ότι με τη χρήση των FBR's και των ADS αντιδραστήρων, μετά το πέρασμα 100 χρόνων, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία από τα ραδιενεργά κατάλοιπα προβλέπεται να είναι σε συγκρίσιμα επίπεδα με εκείνη του Ουρανίου που υπάρχει στο έδαφος.

- Η μείωση του θερμικού φορτίου των ραδιενεργών καταλοίπων που εναποτίθεται στο έδαφος με αποτέλεσμα την δυνατότητα για εναπόθεση μεγαλύτερου όγκου καταλοίπων (Σχήμα 1-10).

Τα ραδιενεργά κατάλοιπα χωρίζονται σε 4 βασικές κατηγορίες. Τα VLLW (Very Low-Level Waste) τα οποία δεν θεωρούνται επικίνδυνα για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Τα LLW (Low-Level Waste) είναι τα κατάλοιπα εκείνα η εκπεμπόμενη ραδιενέργεια δεν ξεπερνά τα 4 GBq ανά τόνο για τα α-ραδιενεργά ισότοπα και 12 GBq ανά τόνο για τα β- και γ-ραδιενεργά. Τα LLW δεν αφορούν μόνο την πυρηνική βιομηχανία καθώς παράγονται και από άλλες πηγές όπως π.χ. νοσοκομεία. Συνήθως ο καλύτερος τρόπος για την διατήρηση αυτών των καταλοίπων είναι η γεωλογική ταφή τους. Αποτελούν το 90% των ραδιενεργών καταλοίπων αλλά η εκπεμπόμενη ραδιενέργεια που οφείλεται σε αυτά είναι της τάξης του 1%.



Σχήμα 1-10 Μείωση της παραγόμενης θερμότητας (Decay Heat) των καταλοίπων για διάφορες στρατηγικές [5]

Υπάρχουν τα κατάλοιπα, ILW (Intermediate-Level Waste), που είναι περισσότερο ραδιενεργά από τα LLW, με αποτέλεσμα να χρειάζεται προστασία στη διαχείρισή τους αλλά δεν παράγουν αρκετή θερμότητα ( $<2 \text{ kW/m}^3$ ). Είναι αποκλειστικά αποτέλεσμα της λειτουργίας των πυρηνικών αντιδραστήρων και αποτελούν το 7% των ραδιενεργών καταλοίπων και η ραδιενέργεια που εκλύεται εξαιτίας τους είναι της τάξης του 4% από τη συνολική ραδιενέργεια των ραδιενεργών καταλοίπων [3].

Το πρόβλημα με τα ραδιενεργά κατάλοιπα, αφορά κυρίως τα λεγόμενα ραδιενεργά κατάλοιπα HLW (High-Live Waste) που παράγουν θερμότητα μεγαλύτερης των  $2 \text{ kW/m}^3$ . Αυτά αποτελούν το 3% του συνολικού όγκου των ραδιενεργών καταλοίπων αλλά είναι υπεύθυνα για το 95% της ραδιενέργειας. Επιπρόσθετα, όπως προαναφέρθηκε, παράγουν αρκετή θερμότητα με αποτέλεσμα να ανεβάζουν τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος στο οποίο θα ταφούν και ο τρόπος αντιμετώπισης είναι η συνεχιζόμενη ψύξη τους. Ενδεικτικά [4] στο YMP (Yucca Mountain Project) που είναι ο χώρος αποθήκευσης των ραδιενεργών καταλοίπων στις Η.Π.Α υπολογίζεται ότι η θερμότητα που θα εκλύεται 300 χρόνια μετά την πλήρωση του αποθετηρίου θα είναι  $6 \text{ GWyr}$ , με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του βράχου σε σχέση με το περιβάλλον.

- Μείωση της πιθανότητας διάδοσης πυρηνικών υλικών με σκοπό την παρασκευή πυρηνικών όπλων.

Μέσω των P&T στρατηγικών επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αντίσταση στην διάδοση υλικού με σκοπό την παρασκευή πυρηνικών όπλων, πέραν των όποιων περιορισμών και δεσμεύσεων μέσω διεθνών συνθηκών, καθώς περιορίζεται η διαθεσιμότητα του πλουτωνίου. Χαρακτηριστικό ιστορικό παράδειγμα είναι η Ινδία η οποία ξεκίνησε το πυρηνικό της πρόγραμμα το 1967 και ενώ το 1968 υπέγραψε η συνθήκη NPT (Non-Proliferation Treaty), προχώρησε σε πυρηνική δοκιμή 7 χρόνια αργότερα. Περισσότερα για το θέμα του περιορισμού της διάδοσης των πυρηνικών για δημιουργία όπλων θα αναφερθούν στο πέμπτο Κεφάλαιο, όπου αναλύεται ο ρόλος του Πλουτωνίου στη χρήση των ADS αντιδραστήρων, με σκοπό την καύση των ραδιενεργών καταλοίπων, είτε την παραγωγή ενέργειας με τη χρήση Θορίου. Το Πλουτώνιο και συγκεκριμένα το ισότοπο  $^{239}\text{Pu}$  είναι το κύριο συστατικό στην κατασκευή πυρηνικών όπλων και παράγεται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες

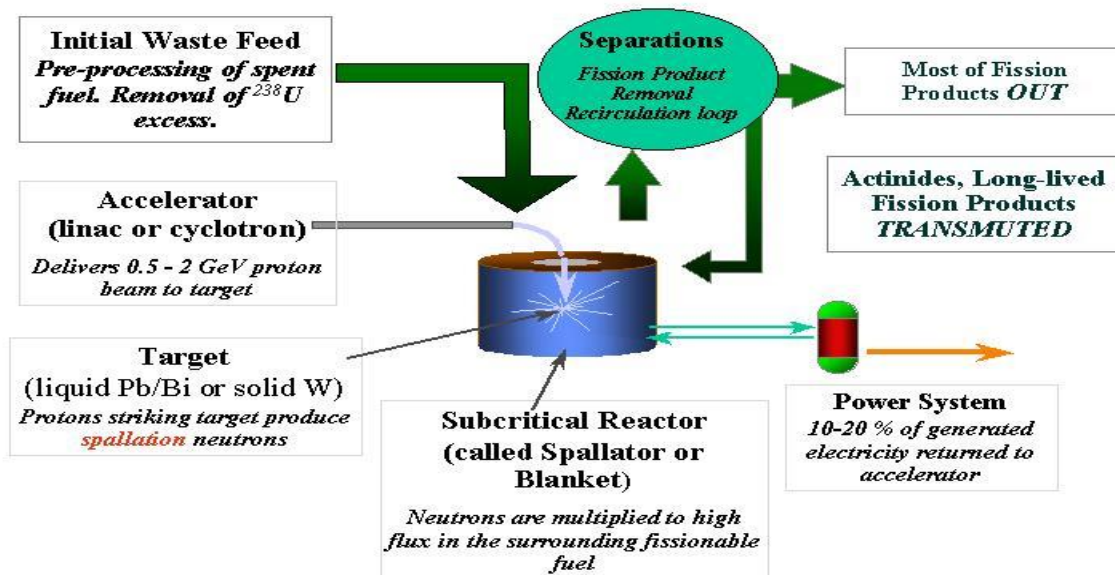
σχάσης και μπορεί να αποσπαστεί μέσω της μεθόδου PUREX από το χρησιμοποιημένο καύσιμο με σκοπό την παραγωγή πυρηνικών όπλων.

## 1.6 Ο ρόλος των ADS Αντιδραστήρων στην παραγωγή ενέργειας

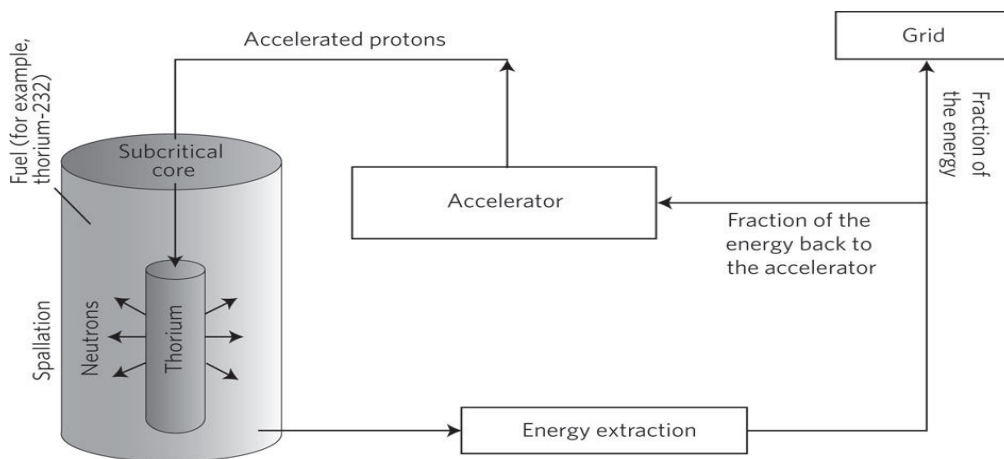
Οι ADS αντιδραστήρες, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω στην ιστορική αναδρομή, δεν είναι καινούργια ιδέα αλλά φαίνεται να έχει έλθει ο καιρός όπου τα τεχνολογικά επιτεύγματα σε διάφορους τομείς μπορεί να την καταστήσουν εφικτή. Τρία είναι τα βασικά μέρη ενός τέτοιου αντιδραστήρα. Πρώτον η ύπαρξη επιταχυντή σωματιδίων κατά βάση πρωτονίων, δεύτερον ενός στόχου κατακερματισμού (Spallation Target) ο οποίος όταν βομβαρδίζεται με πρωτόνια παράγει νετρόνια και τρίτον ενός υποκρίσιμου πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος. (Σχήμα 1-11, Σχήμα 1-12). Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο όρος “spallation” στην παρούσα εργασία αποδίδεται με τον ελληνικό όρο «κατακερματισμός» και δεν θα πρέπει να συγχέεται με τον αγγλικό όρο “multifragmentation”. Συχνά στη βιβλιογραφία ο όρος “spallation” αποδίδεται και ως «θρυμματισμός».

Η έννοια υποκρίσιμος πυρηνικός αντιδραστήρας αναφέρεται στη σταθερά πολλαπλασιασμού  $k_{eff}$  που είναι ο λόγος του ρυθμού παραγωγής νετρονίων προς το ρυθμό απώλειας των νετρονίων. Οι υπάρχοντες πυρηνικοί αντιδραστήρες όπου  $k_{eff}=1$  ονομάζονται "κρίσιμοι". Εάν σε ένα σύστημα  $k_{eff}>1$ , τότε το σύστημα ονομάζεται υπερκρίσιμο, κάτι που συμβαίνει στα πυρηνικά όπλα. Εάν  $k_{eff}<1$  τότε το σύστημα ή ο αντιδραστήρας χαρακτηρίζονται υποκρίσιμοι.

Στόχος των ADS αντιδραστήρων είναι πρωτίστως, όπως προαναφέρθηκε, η συμμετοχή τους σε P&T στρατηγικές με σκοπό την μεταστοιχείωση συγκεκριμένων ισότοπων που βρίσκονται στα ραδιενεργά κατάλοιπα, και δευτερεύοντος η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, π.χ. με τη χρήση του κύκλου του Θορίου.



Σχήμα 1-11 Σχηματική απεικόνιση ADS με σκοπό την συμμετοχή του σε P&T στρατηγικές [5]



Σχήμα 1-12 Σχηματική απεικόνιση του ADS με σκοπό την παραγωγή ενέργειας (χρήση Θορίου) <sup>8</sup>

Σημαντικό πλεονέκτημα που παρουσιάζουν αυτά τα συστήματα είναι ο υποκρίσιμος αντιδραστήρας, που ενώ θα αποτελούσε πρόβλημα σε συμβατικού τύπου αντιδραστήρες, εδώ οδηγεί σε προοπτικές ενισχυμένης ασφαλούς λειτουργίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για τη συντήρηση της αλυσιδωτής αντίδρασης απαιτείται μια εξωτερική πηγή νετρονίων, στην περίπτωση αυτή ο επιταχυντής, ο οποίος μπορεί να απενεργοποιηθεί σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, με αποτέλεσμα ο αντιδραστήρας να καταστεί άμεσα υποκρίσιμος. Τα ζητήματα ασφάλειας των ADS αντιδραστήρων θα αναλυθούν ενδελεχώς σε επόμενο Κεφάλαιο.

Το άλλο εξίσου σημαντικό πλεονέκτημα των αντιδραστήρων αυτών είναι η δυνατότητα χρήσης μη σχάσιμων υλικών όπως το Θόριο. Μελέτες σχετικά με τη δυνατότητα χρήσης του Θορίου ως εναλλακτικού πυρηνικού καυσίμου έχουν εκπονηθεί ήδη από τη δεκαετία του 1960, όπως θα δούμε σε επόμενο Κεφάλαιο.

Βέβαια υπάρχουν και αρκετές προκλήσεις στην κατασκευή αυτών των αντιδραστήρων. Αυτή τη στιγμή βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο, με σκοπό την εύρεση λύσεων σε διάφορα τεχνικά θέματα, προκειμένου να υπάρξει βιομηχανική εφαρμογή στο μέλλον. Η πρώτη πρόκληση αφορά τις κατασκευαστικές προϋποθέσεις του αντιδραστήρα – κυρίως του στόχου κατακερματισμού – και του λεπτού παραθύρου (beam window) μέσω του οποίου καθοδηγείται η δέσμη στον στόχο. Ο σκοπός αυτού του λεπτού παραθύρου είναι η προστασία των τμημάτων του αντιδραστήρα από την ακτινοβολία που προέρχεται από τον πυρήνα του αντιδραστήρα. Περισσότερα στοιχεία σχετικά με την ύπαρξη ή μη παραθύρου δέσμης καθώς και του ρόλου αυτού δίνονται στο εδάφιο 4.5. Η αντίδραση κατακερματισμού (spallation process) και τα συνακόλουθα φαινόμενα και αντιδράσεις φέρνουν στο προσκήνιο την ανάγκη περαιτέρω μελέτης στον τομέα των υλικών, λόγω του υψηλού θερμικού φορτίου και της ακτινοβολίας στα οποία πρόκειται να εκτίθενται τα δομικά στοιχεία των αντιδραστήρων αυτών και στα οποία θα πρέπει να ανταπεξέλθουν.

Ζητήματα υπάρχουν επίσης όσον αφορά τον επιταχυντή και τις τεχνολογικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Για παράδειγμα, η δέσμη πρωτονίων που συγκρούεται με το στόχο κατακερματισμού πρέπει να έχει ενέργεια 1 GeV. Τέτοιες ενέργειες, με τη σημερινή τεχνολογία είναι εφικτό να επιτευχθούν αλλά υπάρχουν προβλήματα σχετικά με την αξιόπιστη λειτουργία τους, γεγονός ιδιαίτερος σημαντικό, εάν πρόκειται να προχωρήσουν αυτοί οι αντιδραστήρες σε παραγωγή ενέργειας σε βιομηχανικό επίπεδο.

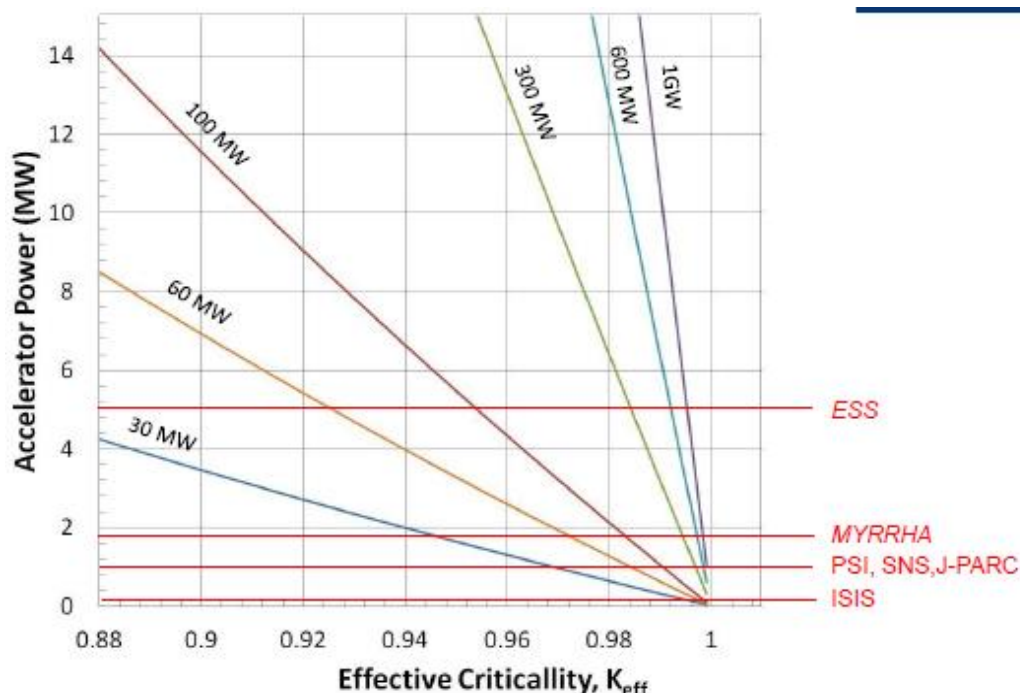
<sup>8</sup> www.wgsi.org

Γενικά, πρέπει να επισημανθεί ότι η μεγαλύτερη πρόκληση και για τους παραπάνω λόγους αλλά και γενικότερα είναι ότι από τη φύση τους οι ADS αντιδραστήρες, καθώς συνδυάζουν έναν επιταχυντή με ένα πυρηνικό αντιδραστήρα, αυξάνουν την κατασκευαστική τους πολυπλοκότητα. Η πολυπλοκότητα της τεχνολογίας αυτής θα γίνει αντικείμενο συζήτησης σε επόμενα Κεφάλαια και αφορά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κυρίως την ανάπτυξη τεχνολογιών που ήδη εφαρμόζονται για τους επιταχυντές. Υπάρχουν επίσης και τα ζητήματα που πρέπει να διερευνηθούν όσον αφορά το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για το στόχο κατακερματισμού, τα κατασκευαστικά υλικά του αντιδραστήρα, ακόμη και ποιο θα είναι το ψυκτικό που θα χρησιμοποιηθεί.

Επιπλέον, καθώς η τροφοδοσία του επιταχυντή γίνεται μέσω της παραγόμενης ισχύος του αντιδραστήρα, κρίσιμο μέγεθος για την επιτυχή λειτουργία του συστήματος είναι το ενεργειακό κέρδος  $G$ , που είναι ο λόγος μεταξύ της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την προσφερόμενη στον επιταχυντή ισχύ. Το ενεργειακό κέρδος, το οποίο αναλύεται διεξοδικότερα στο εδάφιο 2.4, δίνεται από τη Σχέση 1.1 [2]:

$$G = \frac{P_{el}}{P_{acc}} = 0.96 \frac{K_{eff}}{1-K_{eff}} \quad (\Sigma\chi. 1.1)$$

Η παραπάνω σχέση μας δείχνει την ιδιαιτερότητα του συστήματος, καθώς και τον ρόλο που παίζει η αξιοπιστία του επιταχυντή. Στο Σχήμα 1-13, παρουσιάζονται οι απαιτούμενες τιμές ισχύος του επιταχυντή για διάφορες τιμές της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος και της  $K_{eff}$  καθώς και την ισχύ του επιταχυντή που έχει επιτευχθεί ή αναμένεται να επιτευχθεί σε μία σειρά από πειραματικές εγκαταστάσεις.



Σχήμα 1-13 Σχέση μεταξύ της ισχύος αντιδραστήρα και της σταθεράς πολλαπλασιασμού για στόχο κατακερματισμού από μόλυβδο [2]

Αυτό που μπορεί να διαπιστωθεί (Σχήμα 1-13) είναι το γεγονός ότι ακόμη απαιτείται έρευνα και ανάπτυξη της τεχνολογίας επιταχυντών, με σκοπό τη σύζευξη τους με υποκρίσιμο πυρηνικό αντιδραστήρα. Η ισχύς των επιταχυντών που χρησιμοποιούνται στο PSI (Paul Scherrer Institute), στο SNS (Spallation Neutron Source) και το J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) δεν είναι αρκετή όπως φαίνεται παραπάνω με σκοπό την παραγωγή ισχύος από τον αντιδραστήρα στις

επιθυμητές τιμές της σταθεράς πολλαπλασιασμού. Κύρια πειραματική ενασχόληση των παραπάνω κέντρων έρευνας είναι η μελέτη της αντίδρασης κατακερματισμού και των παραγόμενων από τη διαδικασία νετρονίων.

Ο επιταχυντής του MYRRHA (Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications) θα είναι από τους πρώτους που η ισχύς του επιτρέπει την τιμή της  $k_{eff}$  να προσεγγίσει την αποδεκτή τιμή, ( $k_{eff} \sim 0,98$ ), που προβλέπεται να έχουν τέτοιου είδους αντιδραστήρες όταν θα γενικευθεί η βιομηχανική εφαρμογή τους, και ταυτόχρονα να είναι ικανός για παραγωγή ισχύος της τάξης των 100 MW.

Τέλος, ο επιταχυντής στο ESS (European Spallation Source) υπερδιπλασιάζοντας την ισχύ του επιταχυντή θα είναι το επόμενο βήμα στην εξερεύνηση αυτών των τεχνολογιών και θα τεθεί σε λειτουργία το 2023.

## 1.7 Ιστορική αναδρομή

Η δυνατότητα χρήσης των επιταχυντών με σκοπό την παραγωγή ενέργειας έγινε κατανοητή αμέσως μετά την εφεύρεση του κύκλωτρου από τον E.O. Lawrence και την ανακάλυψη της αντίδρασης κατακερματισμού τη δεκαετία του 1930, όταν παρατηρήθηκε στην επιφάνεια της γης ροή θερμικών νετρονίων της τάξης των  $\sim 10^{-4} - 10^{-3}$  νετρόνια/(cm<sup>2</sup>·s) τα οποία προέρχονται από την αλληλεπίδραση των πρωτονίων της κοσμικής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα. Το 1947 με τη χρήση επιταχυντών παρατηρήθηκε το φαινόμενο αυτό από τον B. B. Cunningham στο Berkeley. Αμέσως έγινε σαφές ότι υπήρχε η δυνατότητα χρήσης επιταχυντών ως πηγής νετρονίων από τους Lawrence στις Η.Π.Α και W.N. Semenov στη Σοβιετική Ένωση. Η πρώτη προσπάθεια εφαρμογής με σκοπό τη δημιουργία σχάσιμου υλικού ήταν το ερευνητικό πρόγραμμα MTA (Material Testing Accelerator) στο Lawrence Livermore Radiation Laboratory, αλλά η προσπάθεια αυτή εγκαταλείφθηκε το 1952 όταν βρέθηκαν κοιτάσματα Ουρανίου στις Η.Π.Α. Βέβαια, η ερευνά καθώς και διάφορες προτάσεις για τη χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας δεν σταμάτησε. Μια Καναδική ομάδα στα εργαστήρια Chalk River Laboratories υποστήριζε τη χρήση σχάσιμου υλικού μέσω της χρήσης επιταχυντών για τους αντιδραστήρες CANDU. Στη Σοβιετική Ένωση, υπό την καθοδήγηση των V.I. Goldanski και R.G. Vassiliou πραγματοποιήθηκαν πειράματα για τον πληθυσμό νετρονίων που πρόκυπτε μετά τη χρήση του επιταχυντή πρωτονίων σε στόχο από εμπλουτισμένο ουράνιο. Οι Η.Π.Α, ενώ αρχικά εγκατέλειψαν αυτή την προοπτική, για λόγους μη διάδοσης των πυρηνικών όπλων, ξαναστράφηκαν στη τεχνολογία των FBRs και το εργαστήριο BNL (Brookhaven National Laboratory) πρότεινε διάφορους αντιδραστήρες που θα χρησιμοποιούσαν σχάσιμο υλικό που θα είχε παραχθεί με τη βοήθεια επιταχυντών.

Η αρχική ιδέα της εκμετάλλευσης της αντίδρασης κατακερματισμού απ' ευθείας για μεταστοιχείωση Ακτινίδων και προϊόντων σχάσης εγκαταλείφθηκε σύντομα, λόγω της υψηλής τιμής ρεύματος πρωτονίων που απαιτούνταν από τον επιταχυντή. Οι συντηρητικότεροι υπολογισμοί εκτιμούσαν την ένταση του ρεύματος πρωτονίων πολύ μεγαλύτερη από τα 300 mA, όπου ήταν τεχνολογικά εφικτό. Επιπλέον, ο ετήσιος ρυθμός απ' ευθείας μεταστοιχείωσης με τη χρήση επιταχυντών έντασης ρεύματος περί τα 300mA είναι πολύ μικρότερος από τον ετήσιο ρυθμό παραγωγής ραδιενεργών προϊόντων σχάσης ενός πυρηνικού αντιδραστήρα ελαφρού ύδατος ισχύος 1 GWe.

Τα τελευταία 25 χρόνια έχει ξαναζωντανέψει το ενδιαφέρον για τη χρήση των ADS αντιδραστήρων, καθώς το 1993 ο Carlo Rubbia και η ομάδα του στο CERN πρότειναν έναν αντιδραστήρα, τον ονομαζόμενο Energy Amplifier, ο οποίος θα χρησιμοποιούσε κύκλωτρο και Θόριο ως καύσιμο. Τα πρώτα πειράματα έχουν ήδη πραγματοποιηθεί και στο CERN συνεχίζονται τα πειράματα σχετικά με



την δυνατότητα χρήσης του Θορίου και του κύκλου του ως πυρηνικού καυσίμου, σε συνδυασμό με τους ADS αντιδραστήρες.

## 1.8 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] S. Kapoor, «Accelerator-driven sub-critical reactor system (ADS),» *Pramana journal of physics*, τόμ. 59, αρ. 6, pp. 941-950, 2002.
- [2] R. Cywinski, *Particle accelerators and thorium energy*, 2012.
- [3] A. Krasa, «Spallation Reaction Physics,» 2010.
- [4] B. Brath, T. Friesen, Y. Guerard, C. Jacques-Brissette, C. Lindman, K. Lockridge , S. Mulgund και B.-J. Walke , «Climate Change and Resource Sustainability An Overview for Actuaries,» *Canadian Institute of Actuaries*, Αύγουστος 2015.
- [5] «Nuclear Energy and the Kyoto Protocol,» OECD, 2002.
- [6] «Physics and Safety of Transmutation Systems,» OECD, 2006.
- [7] Status of Accelerator Driven Systems Research and Technology Development, IAEA, 2015.
- [8] F. Carminati, R. Klapisch, J. Revol, C. Roche, J. Rubio και C. Rubbia, «An Energy Amplifier for Cleaner and Inexhaustible Nuclear Energy Production Driven by a Particle Beam Accelerator,» *CERN Publishing*, 1993.
- [9] C. Rubbia, J.-A. Rubio, S. Buono, F. Carminati, N. Fietier, J. Galvez, C. Geles, Y. Kadi, R. Klapisch, P. Mandrillon, J. Revol και C. Roche, «Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier,» *CERN Publishing*, 1995.

# Κεφάλαιο 2

## 2 Αντίδραση κατακερματισμού (spallation process)

Η βασική διαδικασία που θα συντελείται στο εσωτερικό ενός υποκρίσιμου πυρηνικού αντιδραστήρα ADS είναι η αντίδραση κατακερματισμού που ανήκει στις λεγόμενες άμεσες πυρηνικές αντιδράσεις (direct nuclear reactions). Στο κεφάλαιο αυτό, ακολουθεί μια βασική παρουσίαση της διαδικασίας αυτής καθώς, και ορισμένοι ενεργειακοί υπολογισμοί για τη λειτουργία του αντιδραστήρα.

### 2.1 Βασικά χαρακτηριστικά της αντίδρασης κατακερματισμού

Υπάρχουν διάφορες πυρηνικές αντιδράσεις οι οποίες χαρακτηρίζονται από την παραγωγή νετρονίων, όπως όμως ήδη αναδείχθηκε, για τους υποκρίσιμους πυρηνικούς αντιδραστήρες η αντίδραση που προτείνεται είναι αυτή του κατακερματισμού. Ο λόγος είναι φυσικά το ενεργειακό κόστος για την παραγωγή νετρονίων. Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας 2-1 με τις βασικές πυρηνικές αντιδράσεις παραγωγής νετρονίων.

Πίνακας 2-1 Πυρηνικές αντιδράσεις που χαρακτηρίζονται από παραγωγή νετρονίων [1]

Πυρηνικές αντιδράσεις	Σωματίδιο και τυπική ενέργεια	Ρεύμα δέσμης (σωμ./s)	Πληθυσμός Παραγόμενων Νετρονίων (n/προσπίπτων σωμ.)	Ενέργεια Νετρονίων (MeV)	Εκπεμπόμενα Νετρόνια ανά δευτερόλεπτο (n/s)
$^2\text{H}+^3\text{H}\rightarrow^4\text{He}+n$	$^3\text{H}$ (0.3MeV)	6XE19	1XE-4 ~ 1XE-5	1XE4	2XE15
(e,n) & ( $\gamma$ ,n)	e (60 MeV)	5XE15	0.04	1500	1XE14
Σχάση	-	-	~1	200	2XE18
Κατακερματισμός (μη σχάσιμος στόχος)	p (800 MeV)	1xE15	14	30	2XE16
Κατακερματισμός (σχάσιμος στόχος)	p (800 MeV)	1xE15	30	55	4XE16

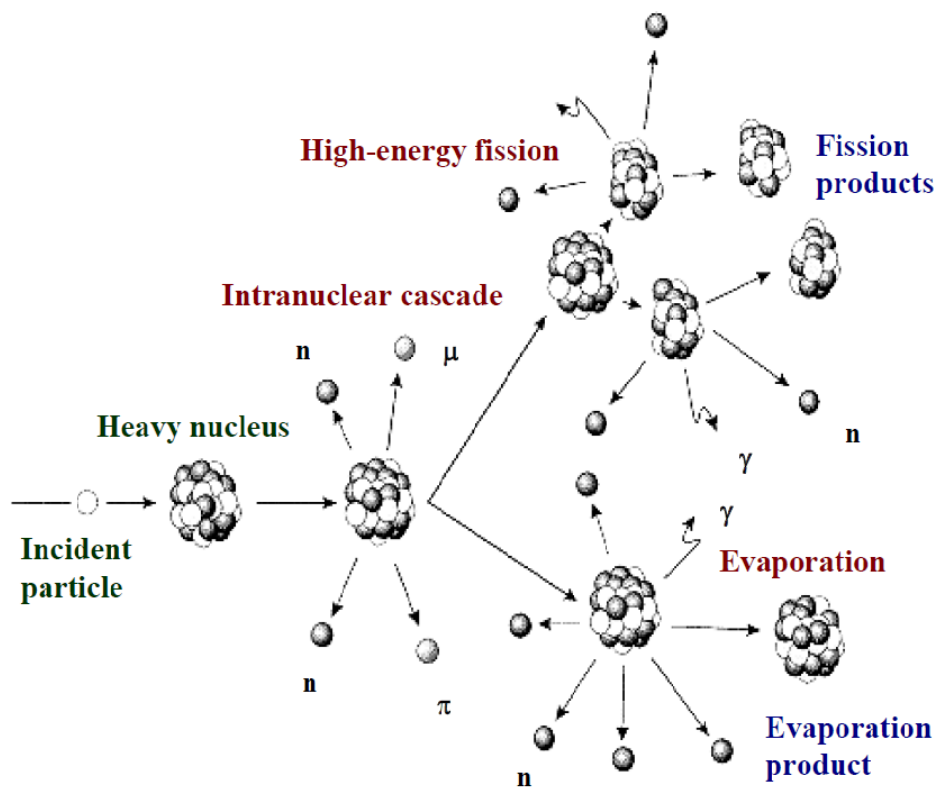
Η αντίδραση κατακερματισμού στην πυρηνική φυσική είναι η αλληλεπίδραση υψηλής ενέργειας σωματιδίων, όπως πρωτόνια, νετρόνια ή ελαφρείς πυρήνες (π.χ. Δευτέριο), με βαρύτερους πυρήνες, με αποτέλεσμα την εκπομπή νετρονίων από τους τελευταίους.

Αυτή η διαδικασία έχει δύο βασικά στάδια. Αρχικά, το σωματίδιο-βλήμα με ενέργεια μεταξύ εκατοντάδων MeV μέχρι μερικών GeV, συγκρούεται με τον βαρύτερο πυρήνα-στόχο και εν συνεχεία ακολουθούν μια σειρά από άμεσες αντιδράσεις, που περιγράφονται ως INC (IntraNuclear Cascade). Αυτή η φάση στην αντίδραση κατακερματισμού διαρκεί ελάχιστο χρονικό διάστημα περίπου  $10^{-22}$  s. Τα πρωτόνια με ενέργειες 1 GeV έχουν μικρό μήκος κύματος de Broglie, περίπου

0.1 fm με αποτέλεσμα να συγκρούονται με τα μεμονωμένα νουκλεόνια του πυρήνα στόχου και να μη σχηματίζεται σύνθετος πυρήνας. Η κινητική ενέργεια του πρωτονίου μεταβιβάζεται στα νουκλεόνια του πυρήνα μέσω ελαστικών συγκρούσεων με αποτέλεσμα την εξαγωγή τους από τον πυρήνα, εάν αποκτήσουν την κατάλληλη ενέργεια. Το υπόλοιπο της αρχικής κινητικής ενέργειας παραμένει στον πυρήνα ο οποίος παραμένει σε διεγερμένη κατάσταση.

Ενδιαφέρον από φυσικής άποψης παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για διαφορετικές ενέργειες των πρωτονίων. Για πρωτόνια ενέργειας μέχρι 100 MeV έχουμε συγκρούσεις στο εσωτερικό του πυρήνα. Για μερικές εκατοντάδες MeV έχουμε δημιουργία πιονίων και για ενέργειες άνω των 2 GeV δημιουργούνται βαρύτερα αδρόνια (hadrons) τα οποία με τη σειρά τους συμμετέχουν στο INC (Σχήμα 2-1).

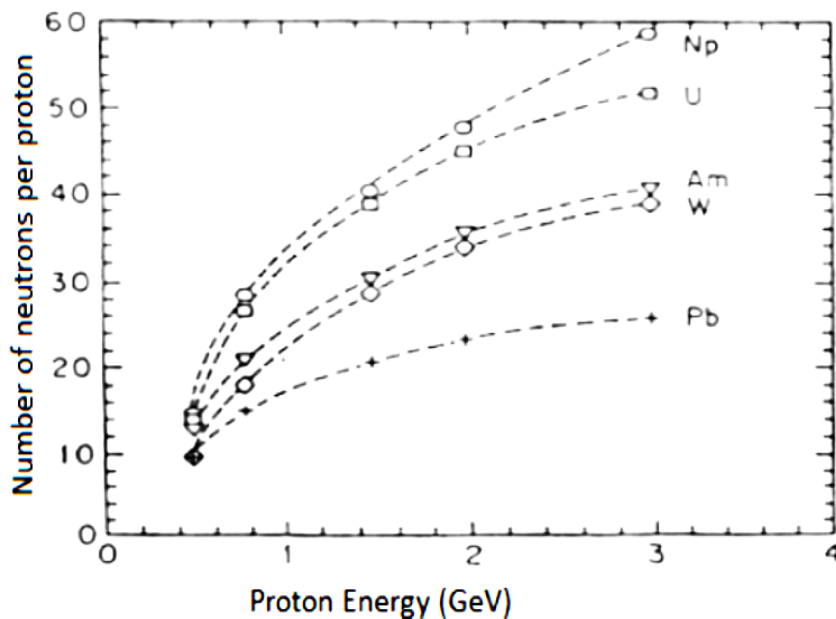
Στη συνέχεια ακολουθεί το επόμενο στάδιο της αντίδρασης κατακερματισμού, μετά από  $10^{-16}$ s, όπου ο πυρήνας στόχος βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση, με αποτέλεσμα στο τέλος της διαδικασίας ο πυρήνας στόχος να υποστεί εκπομπή (evaporation) νετρονίων, ή άλλων σωματιδίων (π.χ. α), λόγω αποδιέγερσης, χωρίς να αποκλείεται η εναλλακτική διαδικασία της σχάσης για τον διεγερμένο πυρήνα. Τα προϊόντα της σχάσης, με τη σειρά τους θα αποδιεγερθούν, καθώς και αυτά θα είναι σε διεγερμένη κατάσταση. Το Σχήμα 2-1 παρουσιάζεται σχηματικά η αντίδραση κατακερματισμού.



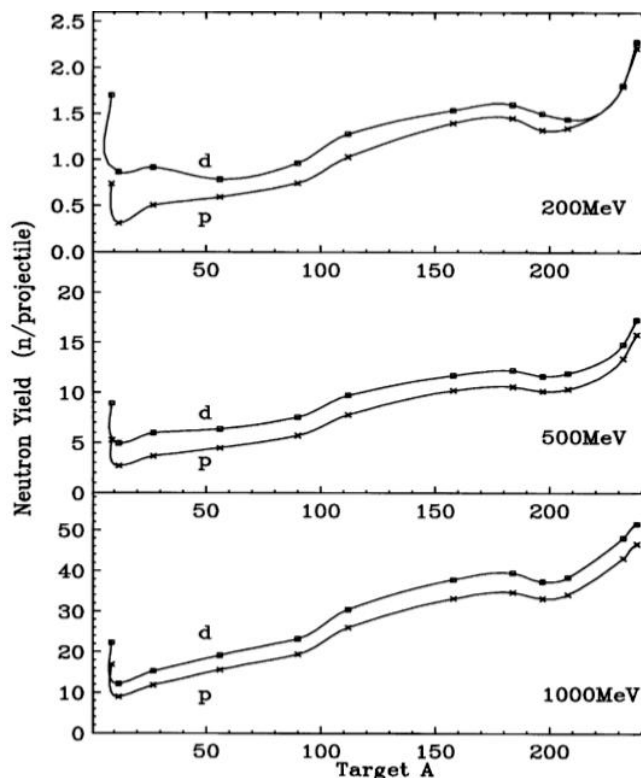
Σχήμα 2-1 Διαδικασία αντίδρασης κατακερματισμού[3]

Όπως έχει προκύψει πειραματικά, το πλήθος των παραγόμενων νετρονίων διαφέρει, ανάλογα με τον πυρήνα στόχο, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2-1, όπου για πρωτόνια ενέργειας 800 MeV έχουμε σχεδόν διπλάσιο αριθμό παραγόμενων νετρονίων για την περίπτωση σχάσιμου στόχου, σε σχέση με την περίπτωση μη σχάσιμου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για την περίπτωση στόχου από Μόλυβδο πρέπει η δέσμη πρωτονίων να είναι περίπου 1 με 2 GeV, ο λόγος είναι ότι υπάρχει εξάρτηση μεταξύ της ενέργειας δέσμης και του πλήθους των εξερχόμενων νετρονίων (Σχήμα 2-2).

Αντίστοιχα, το φαινόμενο του κορεσμού για ενέργεια δέσμης μεγαλύτερης των 2 GeV ισχύει για το Βολφράμιο (W), Αμερίκιο (Am) αλλά και στη περίπτωση του Ουρανίου (U) στα 3 GeV.



Σχήμα 2-2 Αριθμός νετρονίων ανά πρωτόνιο σε συνάρτηση με την ενέργεια της δέσμης [1]

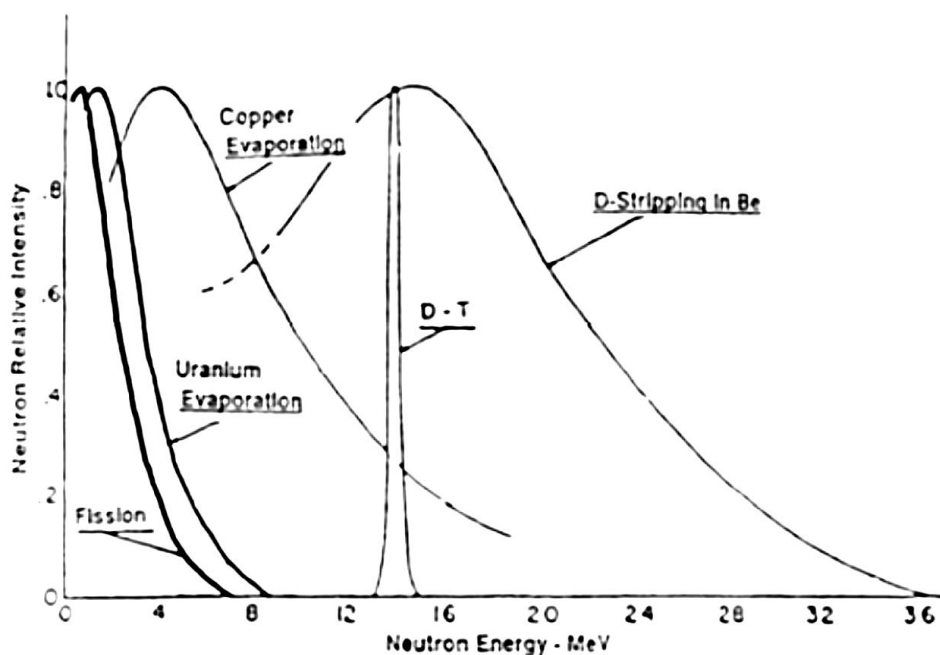


Σχήμα 2-3 Πολλαπλασιασμός νετρονίων ως συνάρτηση του Μαζικού αριθμού του στόχου κατακερματισμού για δέσμη σωματιδίων Δευτέριου και πρωτονίων με ενέργειες 200MeV, 500MeV, 1GeV για κυλινδρικό στόχο[2]

Επίδραση στον παραγόμενο αριθμό νετρονίων έχει και το είδος του σωματιδίου βλήματος που θα χρησιμοποιηθεί. Στο Σχήμα 2-3 φαίνεται η σύγκριση μεταξύ δέσμης αποτελούμενης από Δευτέριο και από πρωτόνια. Φαίνεται ότι για τη δέσμη σωματιδίων Δευτέριου, η παραγωγή νετρονίων μέσω

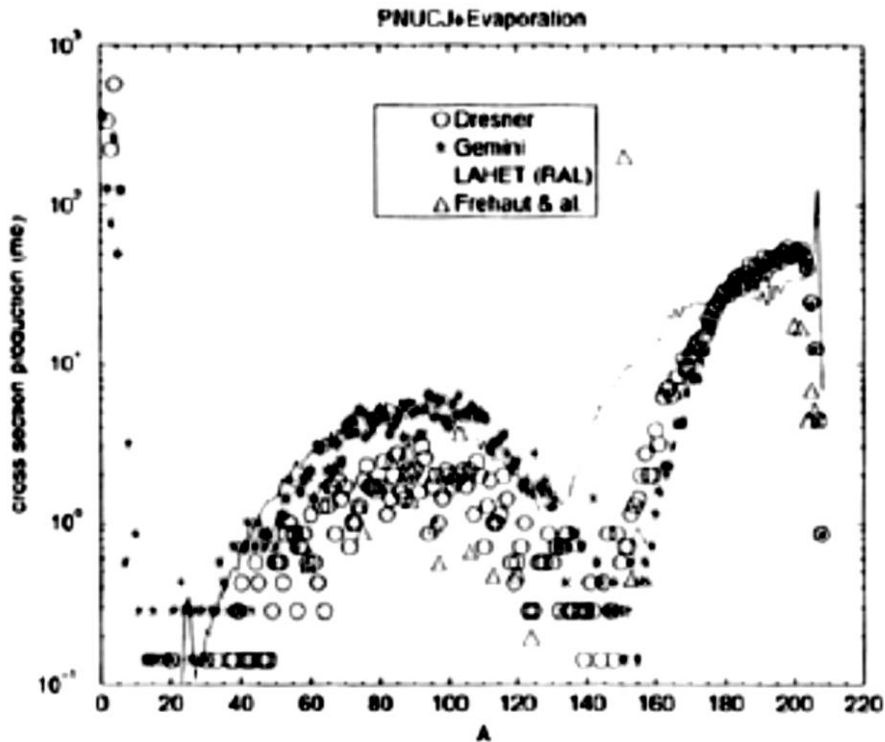
της αντίδρασης κατακερματισμού είναι μεγαλύτερη κατά έναν παράγοντα που κυμαίνεται από 1.3 έως 2.5 φορές σε σχέση με τη δέσμη πρωτονίων. Αυτό που παρατηρείται όμως είναι ότι όταν αυξάνεται η ενέργεια της δέσμης και ο μαζικός αριθμός του στόχου, η διαφορά αυτή μειώνεται στο 10% ανάλογα με την περίπτωση.

Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη η ενεργειακή κατανομή των νετρονίων από τη διαδικασία της εκπομπής (evaporation) από το διεγερμένο πυρήνα. Σε αυτή την περίπτωση η ενεργειακή κατανομή μοιάζει με την ενεργειακή κατανομή των νετρονίων της σχάσης, όπως χαρακτηριστικά απεικονίζεται στο αριστερό τμήμα στο Σχήμα 2-4. Αυτή η παρόμοια συμπεριφορά των εκπεμπόμενων νετρονίων από τη σχάση αλλά και από διεγερμένους πυρήνες οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ενεργοποίηση και η επίδραση (radiation damage) στα δομικά υλικά κατασκευής ενός ADS αντιδραστήρα πρέπει να αναμένεται να είναι αντίστοιχη με αυτήν στους αντιδραστήρες σχάσης.



Σχήμα 2-4 Ενεργειακή κατανομή νετρονίων για διάφορες αντιδράσεις [1]

Κατά την διαδικασία θρυμματισμού, όπως προαναφέρθηκε, μπορεί να προκύψουν ραδιενεργά ισότοπα. Μερικά από αυτά τα ραδιενεργά ισότοπα είναι το Πολώνιο  $^{210}\text{Po}$  (χρόνος ημιζωής: 130 μέρες), ο Υδράργυρος  $^{194}\text{Hg}$  (χρόνος ημιζωής: 520 χρόνια) και το Γαδολίνιο  $^{148}\text{Gd}$  (χρόνος ημιζωής: 76.4 χρόνια). Η κατανομή αυτών το προϊόντων εξαρτάται από την ενέργεια των πρωτονίων καθώς και από το στόχο. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 2-5, παρατίθεται η κατανομή προϊόντων για συγκρούσεις πρωτονίων ενέργειας 800MeV με στόχο Μόλυβδο. Επισημαίνεται ότι ο επικρατέστερος στόχος μέχρι στιγμής είναι ένα εύτηκτο κράμα Μόλυβδου Βισμούθιου (LBE). Ένα από ακόμα σημαντικό θέμα που χρήζει περαιτέρω μελέτης είναι η ενδεχόμενη διάβρωση του στόχου ως αποτέλεσμα των προϊόντων που παράγονται κατά την αντίδραση κατακερματισμού.



Σχήμα 2-5 Ενεργός διατομή προϊόντων θρυμματισμού συναρτήσει του μαζικού αριθμού τους για δέσμη πρωτονίων 800 MeV σε στόχο Pb [1]

## 2.2 Χωρική κατανομή των νετρονίων

Μία παράμετρος που έχει πολύ μεγάλη σημασία για την αξιολόγηση μίας πηγής κατακερματισμού και εν συνεχεία για το σχεδιασμό ενός αντιδραστήρα ADS είναι η χωρική κατανομή και το ενεργειακό φάσματα των εκπεμπομένων νετρονίων. Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστεί η χωρική κατανομή των νετρονίων και ο πολλαπλασιασμός των νετρονίων στους ADS αντιδραστήρες.

Ξεκινώντας με την εξίσωση συνέχειας έχουμε :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = S - \Sigma_{\alpha} \Phi - \vec{\nabla} \cdot \vec{J} \quad (\text{Σχ.2.1})$$

Η εξίσωση αυτή δηλώνει πως η μεταβολή της πυκνότητας των νετρονίων είναι ίση με την πηγή των νετρονίων  $S$ , όταν αφαιρεθεί ο ρυθμός απορρόφησης νετρονίων, και η διαρροή νετρονίων. Όπου το  $\Sigma_{\alpha}$  είναι μακροσκοπική ενεργός διατομή απορρόφησης,  $\Phi$  η ροή των νετρονίων,  $D$  η σταθερά διάχυσης και  $J$  η πυκνότητα του “ρεύματος” των νετρονίων. Συνεχίζοντας με το νόμο του Fick έχουμε:

$$\vec{J} = -D \vec{\nabla} \Phi \quad (\text{Σχ.2.2})$$

Η εξίσωση αυτή δηλώνει ότι τα νετρόνια κινούνται από περιοχές με μεγάλη συγκέντρωση σε περιοχές με μικρότερη.

Αντικαθιστώντας το νόμο του Fick στην εξίσωση συνέχειας έχουμε :

$$\frac{1}{V} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = S - \Sigma_{\alpha} \Phi + D \nabla^2 \Phi \quad (\text{Σχ.2.3})$$

Αυτή είναι η εξίσωση διάχυσης των νετρονίων. Για τους ADS αντιδραστήρες η χωρική κατανομή των νετρονίων μπορεί να περιγραφεί από αυτή τη βασική εξίσωση σε ισορροπία οπότε:

$$D\nabla^2\Phi - \Sigma_a\Phi + S = 0 \quad (\text{Σχ. 2.4})$$

Εισάγοντας τη παράμετρο  $k_\infty$ , που είναι ο αριθμός των νετρονίων που παράγονται για κάθε είδους απορρόφηση νετρονίων στο καύσιμο για ένα άπειρο ομογενές σύστημα, μπορούμε να εκφράσουμε την πηγή των νετρονίων η οποία αποτελείται από τα νετρόνια που παράγονται κατά τη σχάση αλλά και τα νετρόνια από τη διαδικασία θρυμματισμού άρα :

$$S = k_\infty\Sigma_a\Phi + C \quad (\text{Σχ. 2.5})$$

Συνεπώς :

$$\nabla^2\Phi - \frac{\Sigma_a}{D}(1 - k_\infty)\Phi + \frac{C}{D} = 0 \quad (\text{Σχ. 2.6})$$

Εισάγοντας τη φυσική παράμετρο κρισιμότητας (material buckling)  $B_M$  και το λεγόμενο μήκος διάχυσης,  $L_c$  έχουμε:

$$L_c = \sqrt{\frac{D}{\Sigma_a}} \quad (\text{Σχ. 2.7})$$

$$B_M^2 = \frac{k_\infty - 1}{L_c^2} \quad \text{για} \quad k = 1 \quad (\text{Σχ. 2.8})$$

Οπού  $k$ , η σταθερά πολλαπλασιασμού (criticality).

Όταν το  $k \neq 1$  οδηγούμαστε στη λεγόμενη γεωμετρική παράμετρο κρισιμότητας (geometric buckling)  $B_g$  όπου ισχύει:

$$B_g^2 = \frac{k_\infty - 1}{L_c^2} \quad (\text{Σχ. 2.9})$$

Αυτό που ισχύει για αυτούς του δυο συντελεστές είναι ότι όταν είναι ίσοι μεταξύ τους, το σύστημα είναι κρίσιμο. Η παράμετρος  $B_M$  εκφράζει την παραγωγή νετρονίων μείον την απορρόφηση τους και εξαρτάται μόνο από του χαρακτηριστικά εκάστοτε υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το πυρηνικό καύσιμο, ενώ η παράμετρος  $B_g$  εκφράζει τη διαρροή τους και εξαρτάται από την γεωμετρία του αντιδραστήρα . Δηλαδή έχουμε:

$B_M^2 < B_g^2$  , το σύστημα είναι υποκρίσιμο

$B_M^2 = B_g^2$  , το σύστημα είναι κρίσιμο

$B_M^2 > B_g^2$  , το σύστημα είναι υπερκρίσιμο

Η εύρεση του  $B_g$  είναι ένα πρόβλημα ιδιοτιμών και εξαρτάται από τη γεωμετρία του προβλήματος. Τελικά, καταλήγουμε σε μια εξίσωση ης μορφής :

$$\nabla^2\Psi + B_g^2\Psi = 0 \quad (\text{Σχ. 2.10})$$

Η οποία είναι η χαρακτηριστική κυματική εξίσωση.

Αντικαθιστώντας τη νετρονιακή ροή με τη βοήθεια των ιδιοσυναρτήσεων έχουμε :

$$\Phi(\vec{x}) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n \Psi_n(\vec{x}) \quad (\text{Σχ. 2.11})$$

Αντίστοιχα μπορεί να εκφραστεί με τον ίδιο τρόπο και η πηγή των νετρονίων :

$$C(\vec{x}) = D \sum_{n=1}^{\infty} C_n \Psi_n(\vec{x}) \quad (\text{Σχ. 2.12})$$

Για τους συντελεστές έχουμε :



$$\Phi_n = \int_V \Psi_n(\vec{x}) \Phi(\vec{x}) dV \quad (\text{Σχ. 2.13})$$

και

$$C_n = \int_V \Psi_n(\vec{x}) C(\vec{x}) dV \quad (\text{Σχ. 2.14})$$

Μέσω αυτών των εξισώσεων είναι δυνατό να καθορίσουμε τους συντελεστές  $\Phi_n$ :

$$\Phi_n = \frac{C_n}{B_n^2 - B_M^2} \quad (\text{Σχ. 2.15})$$

Ένα παράδειγμα είναι το παραλληλεπίπεδο σύστημα με συνοριακές συνθήκες:  $\Psi(\vec{x}) = 0$  για  $x=0$ ,  $x=a$ ,  $y=0$ ,  $y=b$ ,  $z=0$  και  $z=c$ . Τότε τα ιδιοδιανύσματα έχουν τιμές :

$$\Psi_{l,m,n}(\vec{x}) = \sqrt{\frac{8}{abc}} \sin\left(l \frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(m \frac{\pi y}{b}\right) \sin\left(n \frac{\pi z}{c}\right) \quad (\text{Σχ.2.16})$$

Με ιδιοτιμές :

$$B_{n,l,m}^2 = \pi^2 \left( \frac{l^2}{a^2} + \frac{m^2}{b^2} + \frac{n^2}{c^2} \right) \quad (\text{Σχ. 2.17})$$

Αυτό το παράδειγμα είναι ενδεικτικό καθώς οι ιδιοτιμές αυξάνουν, λύνοντας την (Σχ. 2.9) ως προς  $k_i$  έχουμε :

$$k_i = \frac{k_\infty}{1 + L_c^2 B_i^2} \quad (\text{Σχ. 2.18})$$

Όπως γίνεται αντιληπτό, εάν για  $i=1$ ,  $k_1 < 1$  τότε και οι υπόλοιπες τιμές του  $k$  θα είναι ακόμη μικρότερες . Εάν το  $k_\infty > 1$ , τότε η υποκρίσιμη κατάσταση εξαρτάται από την διαρροή νετρονίων. Εάν  $k_\infty < 1$  τότε το σύστημα είναι εγγενώς υποκρίσιμο.

Συνεχίζοντας, οι συντελεστές  $\Phi_{l,m,n}$  μπορούν να γραφτούν στη παρακάτω μορφή:

$$\Phi_{l,m,n} = \frac{c_{l,m,n}}{B_{l,m,n}^2 - B_M^2} = \frac{c_{l,m,n}}{B_{l,m,n}^2 - \frac{k_\infty - 1}{L_c^2}} = \frac{L_c^2 c_{l,m,n}}{1 + B_{l,m,n}^2 L_c^2} \frac{1}{1 - k_{l,m,n}} \quad (\text{Σχ. 2.19})$$

Και έτσι η γενική λύση είναι :

$$\Phi(\vec{x}) = L_c^2 \sum_{l,m,n} \frac{L_c^2 c_{l,m,n}}{1 + B_{l,m,n}^2 L_c^2} \frac{\Psi(\vec{x})_{l,m,n}}{1 - k_{l,m,n}} \quad (\text{Σχ. 2.20})$$

Από εδώ φαίνεται πως όταν το  $k_1$  προσεγγίζει τη μονάδα η σειρά αποκλίνει. Το  $k_1$  τότε είναι ισοδύναμο με το  $k_{eff}$ .

### 2.2.1 Χαρακτηριστική χωρική κατανομή των νετρονίων για εγγενώς υποκρίσιμα συστήματα.

Είχε οριστεί στην παραπάνω ενότητα ότι για το εγγενώς υποκρίσιμο σύστημα ισχύει ότι  $k_\infty < 1$ . Παρακάτω ακολουθεί μια παρουσίαση, για ένα απλό σύστημα, πηγή νετρονίων στο κέντρο ενός μέσου διάχυσης απείρων διαστάσεων. Εκφράζοντας τον διαφορικό τελεστή Laplace σε σφαιρικές συντεταγμένες η εξίσωση διάχυσης παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{d^2 \Phi(r)}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\Phi(r)}{dr} - \frac{1 - k_\infty}{L_c^2} \Phi(r) = 0 \quad (\text{Σχ. 2.21})$$

Η λύση αυτής τη διαφορικής εξίσωσης δευτέρου βαθμού έχει την εξής μορφή :

$$\Phi(r) = A \frac{e^{-kr}}{r} + C \frac{e^{kr}}{r} \quad (\text{Σχ. 2.22})$$

Με  $k = \sqrt{\frac{1-k_\infty}{L_c^2}}$  και  $1 - k_\infty > 0$  (Σχ. 2.23)

Προφανώς  $C = 0$  λόγω απαίτησης να μην απειρίζεται η  $\Phi(r)$  όταν  $r \rightarrow \infty$

Χρησιμοποιώντας ξανά τον νόμο του Fick μπορούμε να γράψουμε :

$$J = -D \frac{d\Phi(r)}{dr} = DAe^{-kr} \frac{1+kr}{r^2} \quad (\text{Σχ. 2.24})$$

Ορίζοντας τη δύναμη της πηγής  $Q$  ,με μονάδα μέτρησης  $n/s$  εξ ορισμού έχουμε:

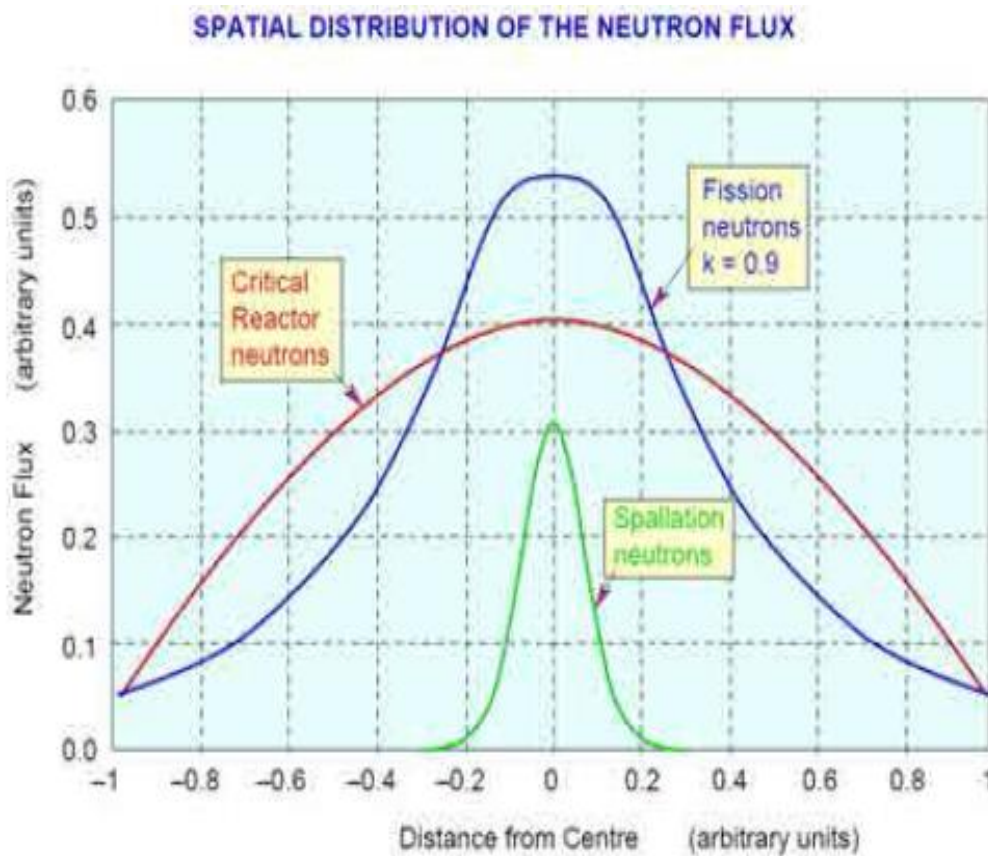
$$Q = \lim_{r \rightarrow 0} 4\pi r^2 J = \lim_{r \rightarrow 0} 4\pi r^2 DAe^{-kr} \frac{1+kr}{r^2} \quad (\text{Σχ. 2.25})$$

Άρα :

$$A = \frac{Q}{4\pi D} \quad (\text{Σχ. 2.26})$$

Οπότε η τελική λύση είναι:

$$\Phi(r) = \frac{Q}{4\pi D} \frac{e^{-kr}}{r} \quad (\text{Σχ. 2.27})$$



Σχήμα 2-6 Τυπική κατανομή ροής νετρονίων για κρίσιμους αντιδραστήρες και ADS [1]

Η λύση όπως φαίνεται και από τη γραφική της παράσταση (Σχήμα 2-6) αναδεικνύει τη διαφορά μεταξύ των κρίσιμων αντιδραστήρων και των αντίστοιχων ADS αντιδραστήρων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στους κρίσιμους αντιδραστήρες η νετρονική ροή σχετίζεται με τις συνοριακές συνθήκες ενώ στους ADS με το INC. Παρατηρείται ότι λόγω του εκθετικού όρου η νετρονική ροή για τα εγγενώς υποκρίσιμα συστήματα θα φθίνει ταχύτερα με την απομάκρυνση από την πηγή νετρονίων. Η συμπεριφορά αυτή θα ισχύει ακόμη και για μη σημειακές πηγές αλλά σε μεγάλες αποστάσεις από αυτές. Για περισσότερες πληροφορίες και εμβάθυνση επί του θέματος της ροής νετρονίων, προτείνεται στον αναγνώστη η ακόλουθη βιβλιογραφία [6, 7, 8]

### 2.2.2 Πολλαπλασιασμός νετρονίων στους ADS Αντιδραστήρες

Ξεκινώντας, πρέπει να ορίσουμε τον όρο *πολλαπλασιασμός (multiplicity) M* ως τον αριθμό των παραγόμενων νετρονίων ανά σωματίδιο δέσμης. Ο παράγοντας *M* εξαρτάται από το μαζικό αριθμό του πυρήνα στόχου αλλά και από την ενέργεια των σωματιδίων της δέσμης. Ένας ημιεμπειρικός τύπος που έχει διατυπωθεί [2] για λεπτούς στόχους είναι:

$$M = (0.0803 + 0.0336 \ln E_p)A \quad (\text{Σχ. 2.28})$$

Οπού *A* ο μαζικός αριθμός του πυρήνα στόχου και  $E_p$  η ενέργεια δέσμης των πρωτονίων.

Αυτή η εξίσωση δίνει με ακρίβεια καλύτερη από 10% τον πολλαπλασιασμό των νετρονίων για  $A > 40$ .

Γενικά, έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση του πληθυσμού των νετρονίων οφείλεται περισσότερο στη διαδικασία εξάτμισης (evaporation) [2] σε σχέση με το INC για ενέργειες δέσμης μεγαλύτερες από 1 GeV. Για μικρότερες ενέργειες παρατηρείται ότι οι δύο αυτοί μηχανισμοί παραγωγής νετρονίων είναι περίπου ισοδύναμοι.

Για ενέργειες δέσμης της τάξης του 1 GeV η διαδικασία παράγωγης νετρονίων μέσω του μηχανισμού INC εξαρτάται γραμμικά από το μαζικό αριθμό του πυρήνα και όχι από την ενέργεια των σωματιδίων, καθώς η ενεργός διατομή αλληλεπίδρασης νουκλεονίου-νουκλεονίου δεν μεταβάλλεται για αυτές τις ενέργειες δέσμης. Η εκπομπή νετρονίων μέσω της διαδικασίας εκπομπής από διεγερμένο πυρήνα εξαρτάται και από τον μαζικό αριθμό καθώς και από το υπόλειμμα ενέργειας που παραμένει στον πυρήνα στόχο, και συνεπώς εξαρτάται από την ενέργεια της αρχικής δέσμης (Σχήμα 2-2).

Συνεχίζοντας τη μελέτη για τον παράγοντα *M*, αυτός μπορεί να εξαχθεί θεωρητικά για αντιδράσεις σχάσης και του τύπου  $(n, xn)$  μέσω της σχέσης [1]:

$$M = \sum_{n=0}^{\infty} k^n = \frac{1}{1-k} \quad \text{για } k < 1 \quad (\text{Σχ. 2.29})$$

Υποθέτοντας ότι η διαδικασία είναι ίδια για όλες τις γενιές νετρονίων μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέση τιμή του *k* :

$$k_{scr} = k = \frac{M-1}{M} = 1 - \frac{1}{M} < 1 \quad (\text{Σχ. 2.30})$$

Πρέπει να τονιστεί ότι ο συντελεστής πολλαπλασιασμού  $k_{scr}$  αφορά την πηγή των νετρονίων και ότι  $k_{scr} \neq k_{eff}$ , αφού υπάρχει εξωτερική πηγή νετρονίων στους ADS αντιδραστήρες σε σχέση με τους κρίσιμους αντιδραστήρες.

Αν λοιπόν υποθέσουμε ότι ο αρχικός αριθμός νετρονίων ήταν  $N_0$  τότε τα συνολικά νετρόνια μετά την διαδικασία πολλαπλασιασμού θα είναι :

$$N = N_0 \frac{1}{1-k_{src}} = N_0 M \quad (\text{Σχ. 2.31})$$

### 2.3 Αποδοτικότητα πηγής νετρονίων, $\Phi^*$

Σε αυτή την ενότητα θα αναλυθεί ο όρος της αποδοτικότητας πηγής νετρονίων ο οποίος είναι ο λόγος της μέσης τιμής της αποδοτικότητας των νετρονίων που προέρχονται από την εξωτερική πηγή ( $\rho_{src}$ ) με τη μέση τιμή της αποδοτικότητας των νετρονίων ανά σχάση ( $\rho_{eff}$ ).

Εξ ορισμού, για συνεχή παραγωγή ισχύος θα πρέπει να προσφέρεται ένας αριθμός νετρονίων ανά σχάση ο οποίος θα δίνεται από την σχέση:

$$\rho_{eff} = u \left( \frac{1}{k_{eff}} - 1 \right) \quad (\text{Σχ. 2.32})$$

και στην περίπτωση ανεξάρτητης εξωτερικής πηγής:

$$\rho_{src} = u \left( \frac{1}{k_{src}} - 1 \right) \quad (\text{Σχ. 2.33})$$

Οπού  $u$  ο μέσος αριθμός νετρονίων ανά σχάση.

Σύμφωνα με τον ορισμό που δόθηκε παραπάνω η αποδοτικότητα της πηγής νετρονίων προκύπτει:

$$\Phi^* = \frac{\rho_{src}}{\rho_{eff}} = \frac{u \left( \frac{1}{k_{src}} - 1 \right)}{u \left( \frac{1}{k_{eff}} - 1 \right)} = \frac{k_{src} M_{src}}{k_{eff} M_{eff}} \quad (\text{Σχ. 2.34})$$

όπου έγινε χρήση της Σχ. 2.29.

Γενικά, η  $\Phi^*$  αυξάνει με την αύξηση του  $k_{src}$ . Υπάρχουν γενικά και άλλες παράμετροι που προκαλούν την αύξηση, όπως το “μήκος διάχυσης”  $L_c$  με τις διαστάσεις του πυρήνα του αντιδραστήρα.

Η  $\Phi^*$  μπορεί να πάρει διάφορες τιμές. Όταν  $\Phi^* < 1$  τότε τα νετρόνια που προέρχονται από την εξωτερική πηγή πολλαπλασιάζονται σε μικρότερο βαθμό από τα νετρόνια της σχάσης. Εάν  $\Phi^* = 1$  τότε έχουμε ισότητα μεταξύ των δυο πηγών νετρονίων. Και τέλος, αν  $\Phi^* > 1$ , περίπτωση που μελετάται από τους ερευνητές, τα νετρόνια από την εξωτερική πηγή πολλαπλασιάζονται ταχύτερα από τα νετρόνια που προέρχονται από τη σχάση. Μπορεί να δειχθεί ότι, καθώς αυξάνεται η  $\Phi^*$ , αυξάνει και η παραγόμενη ενέργεια από τη σχάση όπως θα δούμε παρακάτω, στη σχέση της με την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ.

### 2.4 Ενεργειακοί υπολογισμοί

Έχει ήδη αναφερθεί στο πρώτο Κεφαλαίο η σχέση μεταξύ της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος και της καταναλισκόμενης από τον επιταχυντή ισχύος που προέρχεται από τον ίδιο τον αντιδραστήρα. Υπάρχει λοιπόν εξάρτηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος από το ρεύμα του επιταχυντή  $i_p$ .

Η συνολική ισχύς του αντιδραστήρα έχει δειχτεί ότι εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$P_{tot} = \frac{k_{eff}}{1-k_{eff}} \frac{i_p E_f}{v} u_{sp} \Phi^* \quad (\text{Σχ. 2.35})$$

$E_f$ , η ενέργεια που απελευθερώνεται ανά σχάση, περίπου 200 MeV,  $v$  είναι ο μέσος αριθμός των παραγόμενων νετρονίων ανά σχάση,  $k_{eff}$ , η σταθερά πολλαπλασιασμού με  $k_{eff} < 1$ ,  $u_{sp}$  ο αριθμός των νετρονίων από το θρυμματισμό ανά πρωτόνιο.

Συνεχίζοντας, γνωρίζουμε ότι για την ισχύ του επιταχυντή ισχύει:

$$P_{acc} = E_p i_p \quad (\text{Σχ. 2.36})$$

Έστω ότι το σύνολο της παραγόμενης ισχύος μετατρέπεται σε ηλεκτρική, δηλαδή:

$$P_{el} = P_{tot} \quad (\text{Σχ. 2.37})$$

Διαιρώντας κατά μέρη τις δυο σχέσεις για την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ και την ισχύ του επιταχυντή παίρνουμε το ενεργειακό κέρδος  $G$  του ADS:

$$G = \frac{P_{el}}{P_{acc}} = \frac{P_{tot}}{E_p i_p} = \frac{u_{sp} \Phi^* E_f k_{eff}}{E_p (1 - k_{eff}) v}$$

$$\text{ή} \quad G = \frac{E_f u_{sp}}{E_p \rho_{src}} \quad (\text{Σχ. 2.38})$$

Σχετικά με το ενεργειακό κέρδος  $G$  είναι σκόπιμο να σχολιάσουμε τα εξής:

- Αν  $G > 1$ , είναι η επιθυμητή κατάσταση λειτουργίας του ADS αντιδραστήρα.
- Αν  $G = 1$ , δεν υπάρχει ενεργειακό κέρδος. Όλη η ισχύς του αντιδραστήρα χρησιμοποιείται για τη λειτουργία επιταχυντή.
- Αν  $G < 1$ , Η λειτουργία του επιταχυντή απαιτεί μεγαλύτερα ποσά ισχύος από αυτά που προσφέρει ο αντιδραστήρας.

## 2.5 Ρεύμα του επιταχυντή

Αναφερθήκαμε εκτεταμένα και στο πρώτο Κεφάλαιο στον επιταχυντή και τις προϋποθέσεις που πρέπει να τηρεί, και όπως φάνηκε από την παραπάνω ενότητα, κρίσιμη ποσότητα θα είναι όχι μόνο η ενέργεια της δέσμης αλλά και το ρεύμα του επιταχυντή. Λύνοντας την 2.31 ως προς  $i_p$  έχουμε:

$$i_p = \frac{P_{acc}}{E_p} = \frac{1 - k_{eff}}{k_{eff}} \frac{v}{E_f} \frac{P_{tot}}{u_{sp} \Phi^*} \quad (\text{Σχ. 2.39})$$

Βλέπουμε ότι το ρεύμα είναι αντιστρόφως ανάλογο από τη  $k_{eff}$ , όσο μεγαλύτερη τιμή διαθέτει τόσο μικρότερο το ρεύμα που πρέπει να έχει ο επιταχυντής. Επίσης, πρέπει να τονιστεί ότι το ρεύμα είναι ανάλογο με τη συνολική παραγόμενη θερμική ισχύ του αντιδραστήρα.

Στον Πίνακα 2-2 παρουσιάζονται εκτιμήσεις για το ρεύμα και την ισχύ του επιταχυντή για ισχύ δέσμης πρωτονίων 600 MeV και 1 GeV και συνολική ισχύ του αντιδραστήρα  $P_{tot}=1000$  Wth [9].

Πίνακας 2-2 Το απαιτούμενο ρεύμα πρωτονίων και κέρδους για διάφορες τιμές του  $k_{eff}$ [9]

	$E_p = 600 \text{ MeV}$			$E_p = 1 \text{ GeV}$		
$k_{eff}$	$i_p$ (mA)	$P_{acc}$ (MW)	G	$i_p$ (mA)	$P_{acc}$ (MW)	G
<b>0.90</b>	100	60	17	47	47	21
<b>0.95</b>	47	28	35	22	22	45
<b>0.98</b>	18	11	91	9	9	116

Στο Κεφάλαιο που ακολουθεί θα παρουσιαστούν τα διάφορα σχέδια επιταχυντών με τα προτερήματα και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν.

## 2.6 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] Status of Accelerator Driven Systems Research and Technology Development, IAEA, 2015.
- [2] J.Cugnon, C. Volant, S. Vuillier, «Nucleon and deuteron induced spallation reactions,» *Nuclear Physics* τομ. 625, αρ. 4, pp 729-757, 1997.
- [3] A. Krasa, «Spallation Reaction Physics,» 2010.
- [4] George B. Arfken, Hans J. Weber and Frank E. Harris, «Mathematical Methods for Physicists, Seventh Edition: A Comprehensive Guide 7th Edition,» *Academic Press*, Ιούνιος 2012
- [5] Gary J. Russell, «Spallation Physics - An Overview,» *International Collaboration on Advanced Neutron Sources*, Οκτώβριος 1990.
- [6] Μ.Γ. Αγγελόπουλος, «Πυρηνική Τεχνολογία», ΕΜΠ, 1983
- [7] J.R. Lamarsh, «Introduction to Nuclear Reactor Theory» 3<sup>rd</sup> edition, *Addison-Wesley, Reading*, 1983.
- [8] Weston M. Stacey, «Nuclear Reactor Physics», 2<sup>nd</sup> edition, *Wiley-Vch Verlag GmbH & Co.*
- [9] Per Seltborg, «Source efficiency and high-energy neutronics in accelerator-driven systems,» *Department of Nuclear and Reactor Physics, Royal Institute of Technology*, 2005

# Κεφάλαιο 3

## 3 Επιταχυντές

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι τρεις βασικές κατηγορίες των επιταχυντών που χρησιμοποιούνται σε πειραματικές εγκαταστάσεις για τη διερεύνηση της αντίδρασης κατακερματισμού αλλά και γενικά σε πειράματα που αφορούν την εξερεύνηση της φύσης σε υποατομικό επίπεδο. Οι κατηγορίες αυτές αποτελούν και τις πιθανές λύσεις για τον επιταχυντή στους ADS αντιδραστήρες. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα αλλά και οι προκλήσεις που έχει κάθε κατηγορία για τη χρήση αυτή.

Για την ανάπτυξη της επιστημονικής έρευνας που αφορά στη δομή του πυρήνα, είναι ιδιαίτερα σημαντική η μελέτη πυρηνικών αντιδράσεων και άλλων πυρηνικών διαδικασιών. Η ραδιενεργός διάσπαση είναι η κυρίαρχη πυρηνική διαδικασία που αυθόρμητα συμβαίνει στην επιφάνεια της γης. Από την άλλη πλευρά, τα πρωτόνια και οι βαρύτεροι πυρήνες, προκειμένου να υπερβούν το δυναμικό Coulomb και να αλληλεπιδράσουν με έναν πυρήνα στόχο – πέραν της σκέδασης Rutherford – πρέπει να έχουν πολύ υψηλή ενέργεια. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η σύγκρουση νετρονίων με τον πυρήνα, αλλά δεδομένου ότι το νετρόνιο είναι ένα ασταθές σωματίδιο (χρόνος ζωής: 881.5 s) και όταν βρίσκεται ελεύθερο μετατρέπεται μέσω της διάσπασης β<sup>-</sup> σε πρωτόνιο και ηλεκτρόνιο εκπέμποντας ταυτόχρονα ένα αντινεutrino, τέτοιες αντιδράσεις σύγκρουσης με τον πυρήνα είναι σπάνιες. Από τα παραπάνω φαίνεται πως για την ανάπτυξη της επιστημονικής ερευνάς στη δομή του πυρήνα και της μελέτης του, έπρεπε να αναπτυχθούν τεχνολογίες που θα επιτρέπουν την συλλογή πειραματικών δεδομένων, ως αποτέλεσμα πυρηνικών αντιδράσεων. Αρχικά, η έρευνα πραγματοποιείτο μέσω της μελέτης της κοσμικής ακτινοβολίας και της αλληλεπίδρασης της με την ατμόσφαιρα της Γης. Αυτή η έρευνα οδήγησε στην ανακάλυψη του Μιονίου το 1936 και του Πιονίου το 1947. Στη συνέχεια, το τεχνολογικό επίτευγμα που άνοιξε δρόμους στη συνεπή πειραματική μελέτη του πυρήνα και των υποατομικών σωματιδίων αλλά και σε άλλους κλάδους της επιστημονικής ερευνάς είναι οι επιταχυντές σωματιδίων.

### 3.1 Γραμμικοί επιταχυντές (Linacs)

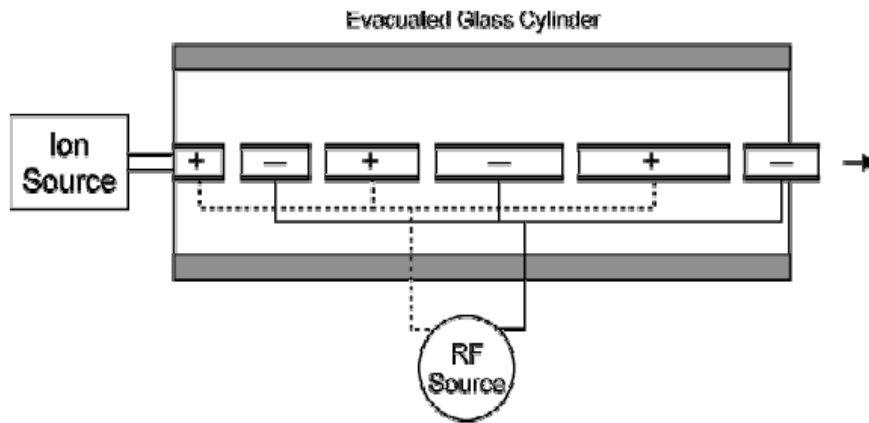
Όπως έχει ήδη αναφερθεί στα βασικά χαρακτηριστικά των ADS αντιδραστήρων, αλλά και στην περιγραφή της αντίδρασης κατακερματισμού, η δέσμη των σωματιδίων του επιταχυντή πρέπει να έχει ενέργεια τάξης μεγέθους 1 GeV. Ένα από τα βασικά σχέδια που έχουν προταθεί είναι ο γραμμικός επιταχυντής. Ακολουθεί μια περιγραφή της λειτουργίας του, των πλεονεκτημάτων αλλά και μειονεκτημάτων που παρουσιάζει ο συγκεκριμένος επιταχυντής. Οι βασικές αρχές λειτουργίας των γραμμικών επιταχυντών τέθηκαν περί το 1930.

Στους γραμμικούς επιταχυντές η δέσμη φορτισμένων σωματιδίων υποβάλλεται σε μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία τα οποία εφαρμόζονται κατά μήκος της δέσμης (Σχήμα 3-1). Για παράδειγμα μια δέσμη πρωτονίων θα απωθείται από την άνοδο και θα έλκεται από την κάθοδο και θα κερδίζει ενέργεια καθώς περνά από κάθε διαδοχικό κενό μεταξύ των ηλεκτροδίων. Ο συγχρονισμός της άφιξης των πρωτονίων με το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να επιτευχθεί αν το κάθε ηλεκτρόδιο μεταβάλλει την πολικότητα του ώστε αρχικά να έλκει και αργότερα να απωθεί το κάθε σωματίδιο μόλις περάσει το συγκεκριμένο ηλεκτρόδιο.

Αυτή η μεταβολή της πολικότητας της διαφοράς δυναμικού θα είναι μια ημιτονοειδής συνάρτηση της μορφής:

$$V = V_0 \sin \omega t \text{ και } \omega = 2\pi f \quad (\text{Σχ.3.4})$$

όπου  $V_0$  η υψηλότερη τιμή της τάσης,  $f$  η συχνότητα και  $\omega$  η γωνιακή συχνότητα. Βασικό συστατικό λειτουργίας ενός τέτοιου σχεδίου είναι τα ηλεκτρόδια να είναι κοίλοι κυλινδρικοί σωλήνες, τα λεγόμενα (drift tubes) και η δέσμη να περνά από το εσωτερικό τους. Όπως προαναφέρθηκε, η δέσμη θα επιταχύνεται μεταξύ των ηλεκτροδίων, αλλά στο εσωτερικό των ηλεκτροδίων όπου το δυναμικό είναι μηδέν θα συνεχίζει να κινείται χωρίς απώλεια ενέργειας, για αυτό και το όνομα Drift tubes.



Σχήμα 3-1 Σχηματική απεικόνιση του γραμμικού επιταχυντή[2]

Η πηγή ενέργειας που αλλάζει την πολικότητα των ηλεκτροδίων θα την μεταβάλει ενώ η δέσμη βρίσκεται στο εσωτερικό των drift tubes.

Ο χρόνος τον οποίον βρίσκεται η δέσμη στο εσωτερικό των ηλεκτροδίων πρέπει να είναι σταθερός. Τα σωματίδια πρέπει να φτάνουν στο επόμενο κενό σε χρόνο:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (\text{Σχ.3.5})$$

Συνεπώς, θα πρέπει το μέγεθος του κάθε ηλεκτροδίου να αυξάνει σε συνάρτηση με την ταχύτητα των σωματιδίων μέσω της σχέσης:

$$L = v_i \frac{T}{2} \quad (\text{Σχ.3.6})$$

όπου  $v_i$  η ταχύτητα στο  $i$ -στο ηλεκτρόδιο.

Σημαντική είναι η διαφορά φάσης με τη οποία τα σωματίδια καταφθάνουν σε κάθε κενό μεταξύ των ηλεκτροδίων σε σχέση με την συχνότητα  $\omega$ . Από τη μια πλευρά, εάν το κέντρο του παλμού της δέσμης φτάνει στο κενό μεταξύ των ηλεκτροδίων καθώς το ηλεκτρικό πεδίο αυξάνει, τα ταχύτερα σωματίδια θα αποκτήσουν μικρότερη επιτάχυνση ενώ το αντίθετο θα συμβεί με τα πιο αργά και το αποτέλεσμα είναι να έχουμε μια ελαχιστοποίηση στην διασπορά της ταχύτητας των επιμέρους σωματιδίων. Από την άλλη όμως, ρυθμίζοντας το κέντρο του παλμού της δέσμης να φτάνει όταν αυξάνει το ηλεκτρικό πεδίο, έχει το χαρακτηριστικό ότι το πεδίο το οποίο αισθάνεται ένα σωματίδιο της δέσμης είναι ασύμμετρο, με αποτέλεσμα η τροχιά των σωματιδίων να παρεκκλίνει από τον άξονα του επιταχυντή. Ανεξάρτητα από αυτό το πρόβλημα, το γεγονός ότι έχουμε ελάχιστη διασπορά στην ταχύτητα είναι σημαντικότερο από το πρόβλημα εστίασης και άρα η επιλογή γίνεται με γνώμονα την ελαχιστοποίηση της κύμανσης στην ταχύτητα των σωματιδίων. Εξάλλου, με τη χρήση των καταλλήλων διατάξεων, όπως οι ηλεκτρομαγνητικοί φακοί μπορεί να επιτευχθεί η εστίαση της δέσμης.

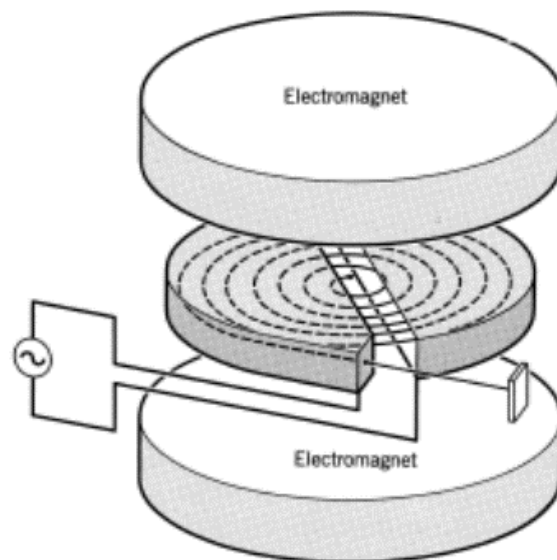


Το πλήθος των ηλεκτροδίων στο εσωτερικό ενός LINAC είναι αρκετά μεγάλο γιατί η επιτάχυνση στο κενό μεταξύ δυο διαδοχικών ηλεκτροδίων δεν είναι αρκετά μεγάλη. Μια τυπική τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που επιταχύνει τα σωματίδια σε μια υπεραγωγίμη κοιλότητα είναι περίπου  $1-2 \frac{MV}{m}$  ανά σωματίδιο. Ένα παράδειγμα που αφορά επιτάχυνση ηλεκτρονίων είναι ο επιταχυντής στο SLAC (Stanford Linear Accelerator) που έχει μήκος 2 μιλίων. Κάτι τέτοιο, όπως γίνεται προφανές, μεγαλώνει το κόστος των ADS αντιδραστήρων με τη χρήση γραμμικού επιταχυντή, καθώς το ηλεκτρικό φορτίο του πρωτονίου που θα χρησιμοποιηθεί στην αντίδραση κατακερματισμού είναι ίσο με το φορτίο του ηλεκτρονίου, ενώ η μάζα του πρωτονίου είναι περίπου 2000 φορές μεγαλύτερη, κάτι που σημαίνει πολύ μεγαλύτερη δυσκολία για την επιτάχυνση των πρωτονίων και κατά συνέπεια πολύ μεγαλύτερος επιταχυντής. Όμως, όπως θα δούμε παρακάτω ένας γραμμικός επιταχυντής είναι αρκετά ισχυρότερος όσον αφορά την ενέργεια που αποκτούν τα σωματίδια της δέσμης, σε σχέση με το κύκλοτρον. Από την άλλη, το κύκλοτρο υπερτερεί του γραμμικού επιταχυντή στην παραγωγή συνεχούς ρεύματος πρωτονίων, χωρίς διακοπές δέσμης (beam trips), όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.

### 3.2 Κύκλοτρο (Cyclotron)

Είναι γνωστό πως ένα φορτισμένο σωματίδιο που κινείται μέσα σε ένα ομοιογενές και ισχυρό μαγνητικό πεδίο δέχεται μια δύναμη κάθετη στην κίνηση του και έτσι μπορεί να κινηθεί σε κυκλική τροχιά. Ο πρώτος επιταχυντής, ο οποίος βασίστηκε σε μαγνητικά πεδία, εφευρέθηκε το 1929 από τον E.O. Lawrence. Το αρχικό κύκλοτρο είχε ένα κενό θάλαμο ο οποίος τοποθετήθηκε ανάμεσα στον βόρειο και νότιο πόλο ενός ηλεκτρομαγνήτη.

Το κύκλοτρο είναι ένας κυκλικός επιταχυντής που αποτελείται από δυο ηλεκτρομαγνήτες και δυο δύο ημικυκλικούς μεταλλικούς θαλάμους του ονομαζόμενους λόγω του σχήματος και Dee's (Σχήμα 3-2).



Σχήμα 3-2 Σχηματική απεικόνιση ενός κύκλοτρον [1].

Αυτοί ημικυκλικοί μεταλλικοί θάλαμοι είναι συνδεδεμένοι με εναλλασσόμενη διαφορά δυναμικού, όπως και στη περίπτωση του LINAC, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου, μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η επιτάχυνση των σωματιδίων. Στο εσωτερικό των

μεταλλικών θαλάμων, το ηλεκτρικό πεδίο είναι μηδενικό με αποτέλεσμα τα σωματίδια να ακολουθούν κυκλική τροχιά, λόγω της ύπαρξης του μαγνητικού πεδίου. Η επιτάχυνση των σωματιδίων επιτυγχάνεται στο διάκενο μεταξύ των δυο αυτών θαλάμων, με αποτέλεσμα τα σωματίδια να ακολουθούν σπειροειδή τροχιά και μόλις αποκτήσουν την απαιτούμενη ενέργεια να φεύγουν από τον επιταχυντή

Η ακτίνα κίνησης  $r$  μπορεί σε κάθε στιγμή να βρεθεί από τις παρακάτω σχέσεις :

$$F_L = \vec{B} \times q\vec{v} \quad (\Sigma\chi. 3.7)$$

όπου  $F_L$ , η δύναμη Lorentz,  $B$  το μαγνητικό πεδίο,  $q$  η τιμή του φορτίου του σωματιδίου,  $v$ , η ταχύτητα του σωματιδίου.

Η δύναμη αυτή εξαναγκάζει τα σωματίδια σε κυκλική κίνηση, λειτουργώντας ως κεντρομόλος και κατά συνέπεια θα ισχύει:

$$F_L = Bqv = m \frac{v^2}{r} \quad (\Sigma\chi. 3.8)$$

κατά συνέπεια :

$$r = \frac{mv}{Bq} \quad (\Sigma\chi. 3.9)$$

Η διάρκεια περιστροφής του σωματιδίου είναι :

$$t_c = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{Bq} \quad (\Sigma\chi. 3.10)$$

Παρατηρούμε ότι η διάρκεια περιστροφής δεν εξαρτάται από την ταχύτητα, αλλά είναι σταθερή. Η μοναδική περίπτωση που δεν ισχύει αυτό είναι όταν έχουμε να κάνουμε με σχετικιστικά σωματίδια. Όπως είναι γνωστό από την ειδική θεωρία της σχετικότητας, η μάζα του σωματιδίου αλλάζει μετρούμενη σε διαφορετικό από το αδρανειακό σύστημα του σωματιδίου, π.χ. του εργαστηρίου και δίνεται μέσω της σχέσης:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (\Sigma\chi. 3.11)$$

όπου  $m$  η μάζα σε διαφορετικό σύστημα αναφοράς,  $m_0$  η μάζα ηρεμίας,  $v$ , η ταχύτητα του σωματιδίου  $c$  η ταχύτητα του φωτός στο κενό.

Αξίζει να αναφερθεί ότι χάρη σε αυτή την ιδιότητα λειτουργούν οι φασματογράφοι μάζας, ICR (ion-cyclotron-resonance).

Στο κύκλοτρο, η ακτίνα κάθε κυκλικής τροχιάς αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας και έτσι το σωματίδιο ακολουθεί σπειροειδή τροχιά. Η μέγιστη ταχύτητα επιτυγχάνεται όταν το σωματίδιο αποκτήσει ακτίνα τροχιάς ίση με τη φυσική ακτίνα  $\rho_{max}$  του κενού θαλάμου αλλά και των Dee's αντίστοιχα. Από τη σχέση της κινητικής ενέργειας, για τη μέγιστη ταχύτητα έχουμε

$$E_{k_{max}} = \frac{1}{2} m v_{max}^2 = \frac{(Bq\rho_{max})^2}{2m} = \frac{(B\rho_{max})^2}{2} \frac{q^2}{m} \quad (\Sigma\chi. 3.12)$$

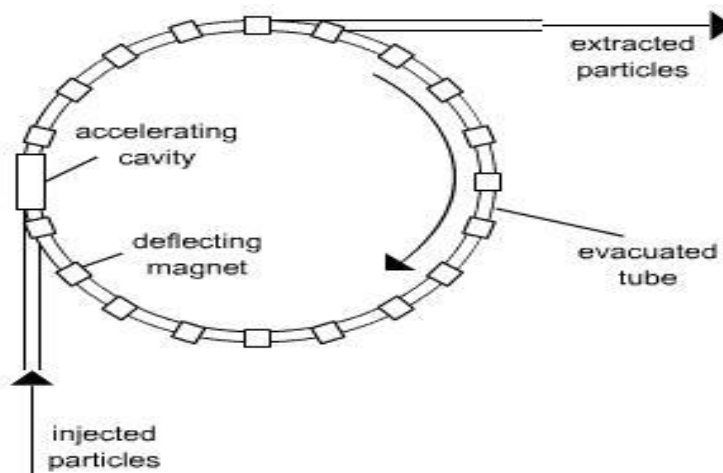
Παρατηρούμε ότι η μέγιστη κινητική ενέργεια εξαρτάται από 2 παραμέτρους της συσκευής,  $B$  και  $\rho_{max}$ . Ο πρώτος όρος της εξίσωσης (3.12) ονομάζεται τιμή  $K$  του κύκλοτρου και έχει μονάδες της τάξης των MeV, δηλαδή:

$$K = \frac{(B\rho_{max})^2}{2} \quad (\Sigma\chi. 3.13)$$

Η μεγαλύτερη τιμή για το  $K$  που έχει επιτευχθεί μέχρι σήμερα είναι  $K=1200\text{MeV}$  και προσφέρει ενέργεια σε βαριά ιόντα της τάξης  $200\text{MeV}$  ανά ιόν. Αυτή η σχετικά μικρή ενέργεια ανά σωματίδιο οφείλεται στην σχετικιστική αύξηση της μάζας αλλά και στη κάθετη εστίαση, ώστε να παραμείνει η δέσμη σε μέσο όρο, στο ίδιο επίπεδο καθώς και εδώ εμφανίζονται τα ίδια προβλήματα εκτροπής που εμφανίζονται στο LINAC. Υπάρχουν τεχνικές που προσπαθούν να αντιμετωπίσουν αυτά τα ζητήματα, αλλά ακόμη δεν έχουν επιτευχθεί λύσεις που θα καθιστούσαν ελκυστική τη χρήση του κύκlotρου στους ADS αντιδραστήρες, παρόλο που γνωρίζουμε αρκετά για αυτά και είναι πιο οικονομικά από τα LINACs. Στα πλεονεκτήματα τους όμως, όπως και στα LINACs είναι ότι η δέσμη είναι πρακτικά συνεχής. Η προσπάθεια για ισχυρότερες δέσμες μέσω του κύκlotρου οδήγησε στο συγχροκύκlotρο το 1946 στο Berkeley και στη δημιουργία του σύγχροτρου, το οποίο θα παρουσιάσουμε στη συνέχεια.

### 3.3 Σύγχροτρον (Synchrotron)

Το σύγχροτρον, εν αντιθέσει με το κύκlotρο χρησιμοποιεί σταθερή κυκλική τροχιά, την οποία ακολουθούν τα επιταχυνόμενα σωματίδια (Σχήμα 3-3). Επιπλέον εφαρμόζει χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, με αποτέλεσμα η επιτάχυνση των σωματιδίων να μην είναι συνεχής αλλά περιοδική, σύμφωνα με το χρονισμό του πεδίου.



Σχήμα 3-3 Σχηματική απεικόνιση σύγχροτρου [1]

Έτσι το σύγχροτρον είναι μία παλμική μηχανή που λειτουργεί με κύκλους. Εισάγεται αρχικά μια δέσμη σωματιδίων η οποία δεν έχει μεγάλη ενέργεια, η δέσμη επιταχύνεται και εξάγεται και το σύστημα επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση. Το ενεργειακό κέρδος της δέσμης είναι μικρό σε κάθε κύκλο, περίπου  $100\text{keV}$  ανά κύκλο και κατά την κάθε περιστροφή της δέσμης το μαγνητικό πεδίο αυξάνει προς τη μέγιστη τιμή του. Αυτό που παρατηρείται στην περίπτωση των μη σχετικιστικών σωματιδίων είναι πως καθώς αυξάνει η ταχύτητα, αυξάνει και η συχνότητα περιστροφής των σωματιδίων καθώς η ακτίνα της κυκλικής διαδρομής παραμένει σταθερή. Αυτό οδηγεί στο γεγονός ότι ο επιταχυντής και το μαγνητικό πεδίο πρέπει να συγχρονιστούν με την ενέργεια των σωματιδίων. Υπάρχουν δυο εφαρμογές για το σύγχροτρον, αλλά και οι δυο χρησιμοποιούν αρχικά μικρότερα σύγχροτρα ή ακόμη και γραμμικούς επιταχυντές για την αρχική επιτάχυνση της δέσμης.

Η πρώτη εφαρμογή αφορά στην σύγκρουση υποατομικών σωματιδίων λόγω της μεγάλης ενέργειας που προσδίδεται στη δέσμη. Το σύγχροτρον έχει αποδειχθεί ότι είναι ένα πολύτιμο εργαλείο στα χέρια των πειραματικών φυσικών για τη μελέτη των στοιχειωδών σωματιδίων καθώς η ενέργεια της δέσμης μπορεί να φτάσει τα  $7\text{TeV}$ , όπως για παράδειγμα στον LHC (Large Hadron Collider).

Η δεύτερη εφαρμογή έχει ως κύριο σκοπό την μελέτη αλλά και χρησιμοποίηση της λεγομένης Ακτινοβολίας Σύγχροτρον (Synchrotron radiation ή magnetobremstrahlung radiation) που παράγεται λόγω της μεταβολής της κινητικής κατάστασης φορτισμένων σωματιδίων. Αυτό το φαινόμενο είναι απόρροια του πεπερασμένου της ταχύτητας του φωτός. Ένα φορτισμένο σωματίδιο είναι πηγή ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών που εκτείνονται, σφαιρικά ως το άπειρο. Οι δυναμικές γραμμές ενός φορτισμένου σωματιδίου σε ηρεμία, κινούνται και αυτές μαζί με το φορτισμένο σωματίδιο ομοιόμορφα. Μια ενδεχομένη μεταβολή στην κινητική κατάσταση του φορτισμένου σωματιδίου οδηγεί επίσης στην μεταβολή της κινητικής κατάστασης των δυναμικών γραμμών. Εάν, για παράδειγμα ένα φορτισμένο σωματίδιο επιταχυνθεί συνεπάγεται ότι και οι δυναμικές γραμμές θα υποστούν την ίδια επιτάχυνση. Όμως το αξίωμα της ειδικής θεωρίας της Σχετικότητας σχετικά με τη ταχύτητα του φωτός και της πεπερασμένης τιμή της, ανεξάρτητα της κίνησης του παρατηρητή, οδηγεί στο γεγονός ότι η πληροφορία της επιτάχυνσης του σωματιδίου δεν έχει διαδοθεί στο σύνολο των δυναμικών γραμμών αλλά σε ένα τμήμα τους. Αυτό ονομάζεται Ορίζοντας Γεγονότων (Event Horizon), οι δυναμικές γραμμές που δεν βρίσκονται στον Ορίζοντα Γεγονότων και αρά δεν έχουν επιταχυνθεί ακόμη, δείχνουν ότι προκύπτουν από την προηγούμενη κινητική κατάσταση του σωματιδίου σε αντίθεση με αυτές που βρίσκονται μέσα στον Ορίζοντα Γεγονότων. Αυτή η παραμόρφωση των δυναμικών γραμμών, ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός και είναι αυτό που ονομάζουμε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Το μέγεθος της είναι ανάλογο της επιτάχυνσης του φορτισμένου σωματιδίου. Σύγχροτρον μεγαλύτερης ενέργειας – το λεγόμενο Storage Ring – επιτρέπει στα εισαγόμενα σωματίδια να είναι σχετικιστικά, από προηγούμενη επιτάχυνση σε άλλο σύγχροτρον, και έτσι η συχνότητα περιστροφής παραμένει σταθερή. Η μεταβολή της κινητικής κατάστασης των φορτισμένων σωματιδίων, δεν προκύπτει από την μεταβολή του μέτρου της ταχύτητας αλλά από τη μεταβολή της κατεύθυνσής της, προκειμένου να πραγματοποιήσει κυκλική κίνηση, μέσω της χρήσης μαγνητών. Το αποτέλεσμα είναι η εκπομπή της λεγομένης ακτινοβολίας Σύγχροτρον, η οποία εκτείνεται από τις υψηλής ενέργειας ακτίνες Χ (Hard X-rays) έως τα μικροκύματα. Η μελέτη της ακτινοβολίας αυτής έχει επιστημονικό και ερευνητικό ενδιαφέρον καθώς εφαρμόζεται σε πολλούς επιστημονικούς τομείς, από την επιστήμη των υλικών έως τη μοριακή βιολογία.

Τα μεγαλύτερα και πιο γνωστά παραδείγματα στην χρησιμοποίηση τέτοιου είδους επιταχυντών είναι ο RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) στο Brookhaven National Lab (BNL) των ΗΠΑ, ο TEVATRON στο Fermi lab και ο LHC στο CERN. Η δέσμη στον TEVATRON - ανενεργός πλέον από το 2011 - μπορούσε να φτάσει μέχρι και τα 0.95 TeV. Αντίστοιχα, ο RHIC μπορεί να επιτύχει ενέργειες 100 GeV ανά ιόν. Γενικά, η μέγιστη ενέργεια της δέσμης είναι ανάλογη με το γινόμενο μαγνητικού πεδίου και της ακτίνας όπως και στα κύκλωτρα. Τα μαγνητικά πεδία που μπορούν να παραχθούν, αγγίζουν τα μερικά Tesla, άρα κυρίαρχο ρόλο παίζει το μέγεθος της ακτίνας, που μπορεί να περιοριστεί μόνο από τη χρηματοδότηση του πειράματος ή/και κατασκευαστικούς περιορισμούς. Ενδεικτικά, το σύγχροτρον στο RHIC που είναι υπεύθυνο για την αρχική ώθηση της δέσμης έχει 20m ακτίνα ενώ το κύριο σύστημα έχει ακτίνα 610 m περίπου, δηλαδή 3,834 Km περιφέρεια και περιλαμβάνει 1740 υπεραγωγίμους ηλεκτρομαγνήτες. Αντίστοιχο σχέδιο χρησιμοποιείται και στο CERN, όπου μια σειρά από αρχικούς επιταχυντές δίνουν ώθηση στη δέσμη ώστε να εισαχθεί στον LHC όπου και επιταχύνεται μέχρι τα 7 TeV.

Το κύριο μειονέκτημα του συγκεκριμένου τύπου επιταχυντή είναι ότι η δέσμη δεν είναι συνεχής και αυτό συνεπάγεται χαμηλής έντασης ρεύμα, άρα έχουμε μικρότερη προσφορά νετρονίων στον υποκρίσιμο αντιδραστήρα, επιπρόσθετα, μια παλμική δέσμη πρωτονίων οδηγεί σε παλμικές αλληλεπιδράσεις της δέσμης με το στόχο, λόγω στιγμιαίας εναπόθεσης ενέργειας στη κορυφή κάθε παλμού. Αυτό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα με τη μηχανική ακεραιότητα του στόχου και του δοχείου. Τα παραπάνω προβλήματα καθιστούν δύσκολη την επιλογή του σύγχροτρον ως επιλογή

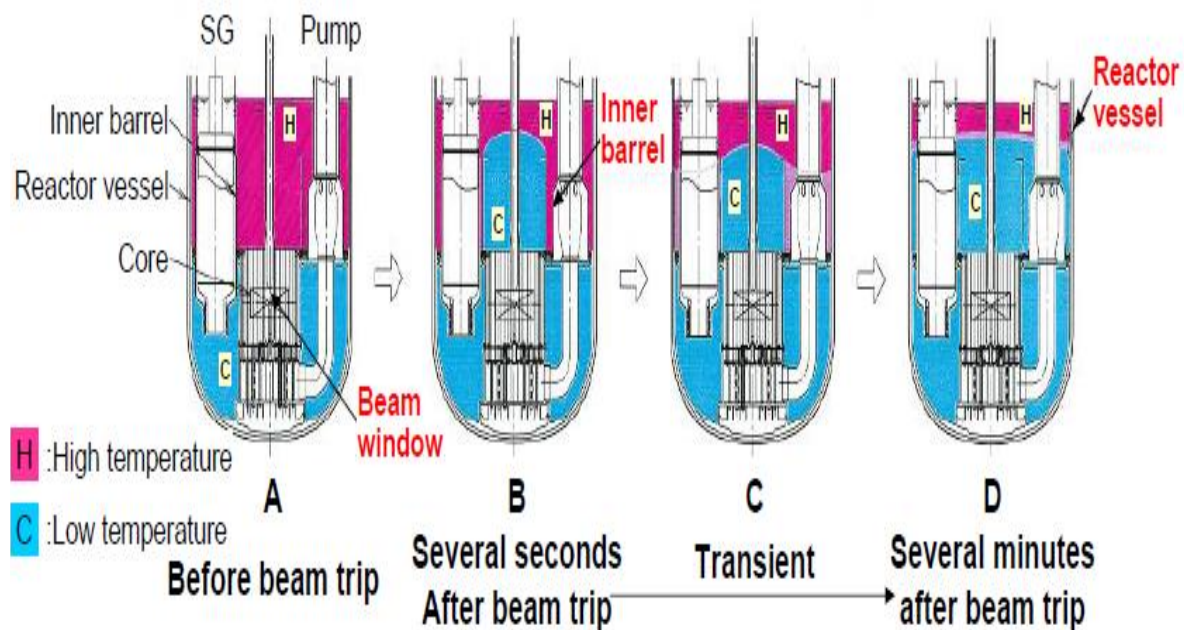
του επιταχυντή για τον ADS αντιδραστήρα. Η έρευνα πάντως πάνω στο συγκεκριμένο τύπο επιταχυντή συνεχίζεται, με κύριο πείραμα το RCS (Rapid Cycling Synchrotron) στις Η.Π.Α αξιοποιώντας τις πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία μαγνητών.

### 3.4 Αξιοπιστία του επιταχυντή

Υπάρχουν αρκετοί λόγοι που οι τεχνολογικές εξελίξεις δεν επιτρέπουν με σχετική ευκολία την ένταξη των ADS αντιδραστήρων στο ενεργειακό ισοζύγιο. Ο κυριότερος όμως είναι η αξιοπιστία του επιταχυντή. Είναι δεδομένο ότι για την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας σε βιομηχανικό επίπεδο πρέπει να ωθηθεί στα άκρα η έρευνα πάνω στους επιταχυντές. Κύριο ζήτημα των επικριτών των ADS αντιδραστήρων είναι οι διακοπές της δέσμης (beam trip). Βέβαια, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες, όπως η απώλεια ισχύος της δέσμης και το μέγεθος της.

Όπως φάνηκε και από την παρουσίαση των επιταχυντών, ο επικρατέστερος τύπος επιταχυντή αυτή τη στιγμή είναι ο γραμμικός επιταχυντής, λόγω μεγάλων ρευμάτων και ενέργειας της δέσμης, η δέσμη μπορεί να θεωρηθεί γενικά συνεχής αν και στη πραγματικότητα δεν είναι. Αυτές οι διακοπές στη δέσμη των πρωτονίων προκαλούν πολλά θερμικά προβλήματα στα κατασκευαστικά μέρη του αντιδραστήρα, ανεξαρτήτως μεγέθους, όπως το παράθυρο δέσμης (beam window), το εσωτερικό δοχείο (inner barrel), το δοχείο πίεσεως κ.α.

Το παράθυρο δέσμης αποτελεί μια μικρών διαστάσεων αλλά ιδιαίτερης σημαντικότητας κατασκευή, η οποία απομονώνει το στόχο κατακερματισμού από το δίαυλο εισόδου της δέσμης στον αντιδραστήρα, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχήμα 3-4. Περισσότερα για το beam window και το ρόλο του θα αναφέρουμε στο Κεφάλαιο 4.

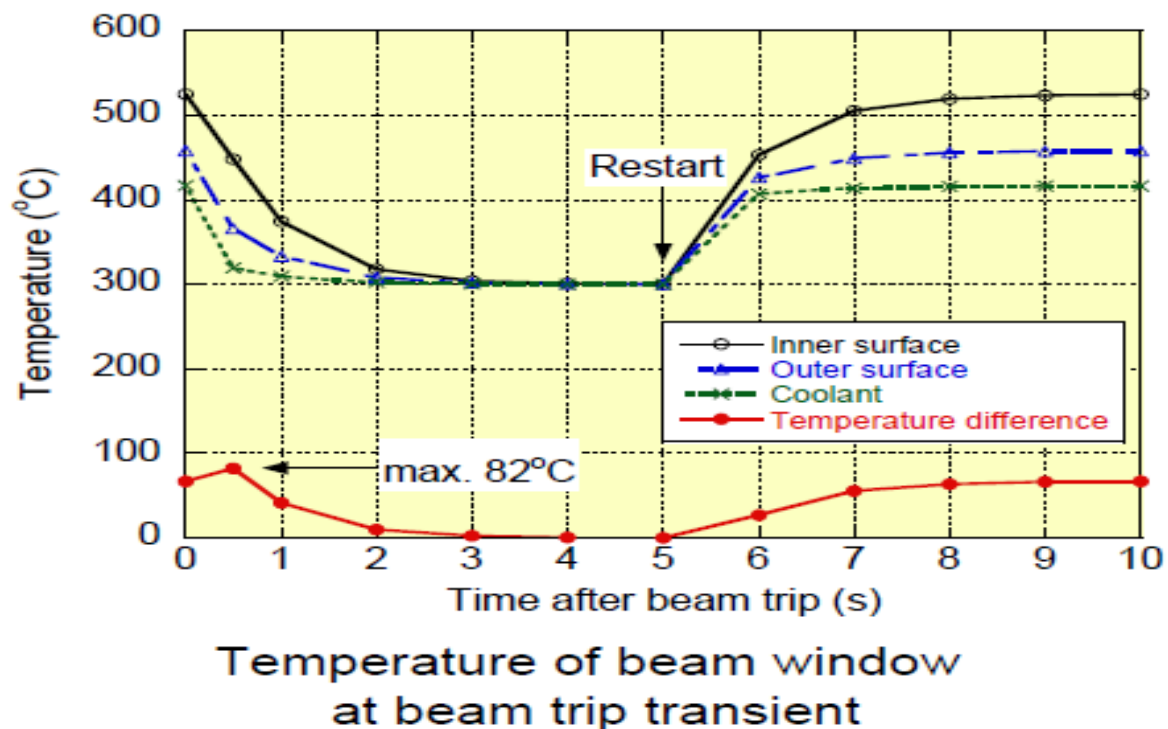


Σχήμα 3-4 Εξέλιξη της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του ADS μετά την διακοπή της δέσμης [4]

Το εσωτερικό δοχείο (Inner Barrel) του ADS είναι μια κυλινδρική κατασκευή υπερκείμενη του υποκρίσιμου πυρήνα του αντιδραστήρα, με αντικειμενικό σκοπό τη μείωση της τυρβώδους ροής του ψυκτικού κατά την έξοδο από τα κανάλια ροής του πυρήνα και τη βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών της ροής πριν την είσοδο του ψυκτικού στον ατμοπαραγωγό. Το δοχείο αυτό είναι κατασκευασμένο από χάλυβα υψηλών προδιαγραφών με πάχος 3 mm και ύψος περίπου 3 m.

Οι θερμικές καταπονήσεις (Thermal Stress) μέσα στο σύστημα ADS οφείλονται στις μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού τμήματος των διαφόρων συνιστωσών του αντιδραστήρα, οι οποίες μάλιστα δεν είναι σταθερές αλλά μεταβάλλονται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται ισχυρές τάσεις λόγω  $\Delta T$ , αλλά και κόπωση λόγω μεταβολής του  $\Delta T$ , επιφέροντας πρόωρη γήρανση των υλικών και κατ' επέκταση σημαντική μείωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων, οδηγώντας εν τέλει σε κλείσιμο του αντιδραστήρα. Αυτό βέβαια αντιμετωπίζεται ήδη και στους κρίσιμους πυρηνικούς αντιδραστήρες, αλλά η συχνότητα που θα διακόπτεται η λειτουργία σε έναν ADS αντιδραστήρα είναι αρκετά μεγαλύτερη από ότι σε έναν συμβατικό κρίσιμο αντιδραστήρα. Το εσωτερικό δοχείο (inner barrel) και το δοχείο του αντιδραστήρα πρέπει να αντέξουν για σαράντα χρόνια, ενώ προβλέπεται η αντικατάσταση του παραθύρου δέσμης κάθε δυο χρόνια. Αυτή είναι η θεωρητική χρονική διάρκεια των βασικών δομικών τμημάτων ενός υποκρίσιμου αντιδραστήρα.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά το παράθυρο της δέσμης [4] η θερμοκρασία στο εσωτερικό είναι  $525^{\circ}\text{C}$  και στο εξωτερικό  $458^{\circ}\text{C}$  πριν τη διακοπή της δέσμης. Η εξέλιξη της θερμοκρασίας για το εσωτερικό και το εξωτερικό του παραθύρου δέσμης κατά το μεταβατικό φαινόμενο της διακοπής της δέσμης (beam trip) φαίνεται στο Σχήμα 3-5.



Σχήμα 3-5 Εξέλιξη της θερμοκρασίας του εσωτερικού και του εξωτερικού του παραθύρου της δέσμης μετά τη διακοπή της δέσμης [4]

Για μία ισχύ του επιταχυντή 30 MW υπολογίζεται ότι για την μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας οι πιέσεις λόγω των αναπτυσσόμενων θερμικών τάσεων φθάνουν τα 179 MPa, 0.5 sec μετά τη διακοπή της δέσμης. Αυτές οι πιέσεις είναι μικρότερες από το κριτήριο που έχει τεθεί για το παράθυρο δέσμης  $\sim 10^5$  MPa. Συνεπώς, θα μπορούσαν να είναι αποδεκτές αρκετές διακοπές δέσμης. Αντίστοιχα, για το εσωτερικό δοχείο οι πιέσεις θα είναι της τάξης των 130 MPa, 24 sec μετά τη διακοπή της δέσμης. Το αντίστοιχο κριτήριο για το εσωτερικό είναι της τάξης των  $10^4$  MPa. Τέλος, για το δοχείο του αντιδραστήρα οι πιέσεις λόγω της θερμικών καταπονήσεων θα φθάσουν τα 113 MPa, 400 sec μετά τη διακοπή της δέσμης. Το υλικό θα είναι πιθανότατα το ίδιο που θα

χρησιμοποιηθεί για το εσωτερικό δοχείο και συνεπώς το κριτήριο θα είναι το ίδιο, περίπου  $10^4$  MPa [4].

Αυτό που έχει αναδειχθεί από τη μέχρι σήμερα έρευνα είναι ότι οι διακοπές δέσμης χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, σε αυτές που διαρκούν μέχρι ένα δευτερόλεπτο και αυτές μεγαλύτερες από ένα δευτερόλεπτο. Όπως φαίνεται από τα πειράματα, οι πρώτες δεν επιδρούν σε τόσο μεγάλο βαθμό στα εσωτερικά μέρη του αντιδραστήρα όσο οι δεύτερες, με την θερμική καταπόνηση που αναλύθηκε παραπάνω. Ενδεικτικά παρατίθεται ο πίνακας με τις αποδεκτές τιμές διακοπών δέσμης που μπορεί να υφίστανται η δέσμη του επιταχυντή, ανάλογα με την μελλοντική χρήση του ADS (Πίνακας 3-1).

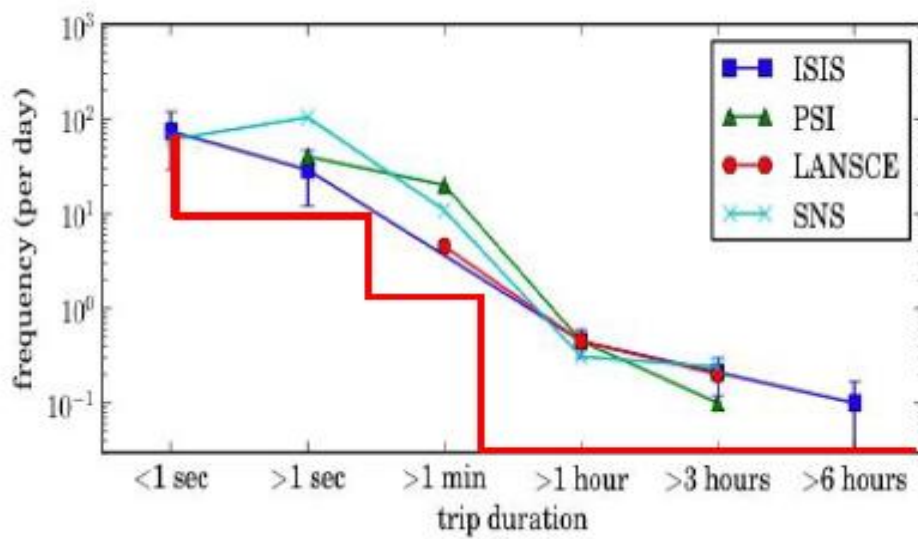
Πίνακας 3-1 Εύρος των διάφορων παραμέτρων για επιταχυντές ανάλογα με την χρήση των ADS

	<b>Επίδειξη μεταστοιχείωσης</b>	<b>Βιομηχανική εφαρμογή μεταστοιχείωσης</b>	<b>Βιομηχανική εφαρμογή με σκοπό παραγωγή ενέργειας</b>
<b>Ενέργεια δέσμης (GeV)</b>	0.5 GeV	1-2 GeV	1-2 GeV
<b>Ισχύς δέσμης (MW)</b>	1-2 MW	10-75 MW	10-75 MW
<b>Είδος δέσμης</b>	Συνεχής/παλμική	Συνεχής	Συνεχής
<b>Διακοπή δέσμης <math>t &lt; 1s</math></b>	-	< 25000 ανά χρόνο	< 25000 ανά χρόνο
<b>Διακοπή δέσμης <math>1 &lt; t &lt; 10s</math></b>	< 2500 ανά χρόνο	<2500 ανά χρόνο	< 2500 ανά χρόνο
<b>Διακοπή δέσμης <math>10s &lt; t &lt; 5 min</math></b>	< 2500 ανά χρόνο	< 2500 ανά χρόνο	< 250 ανά χρόνο
<b>Διακοπή δέσμης <math>t &gt; 5 min</math></b>	< 3 ανά χρόνο	< 3 ανά χρόνο	< 3 ανά χρόνο

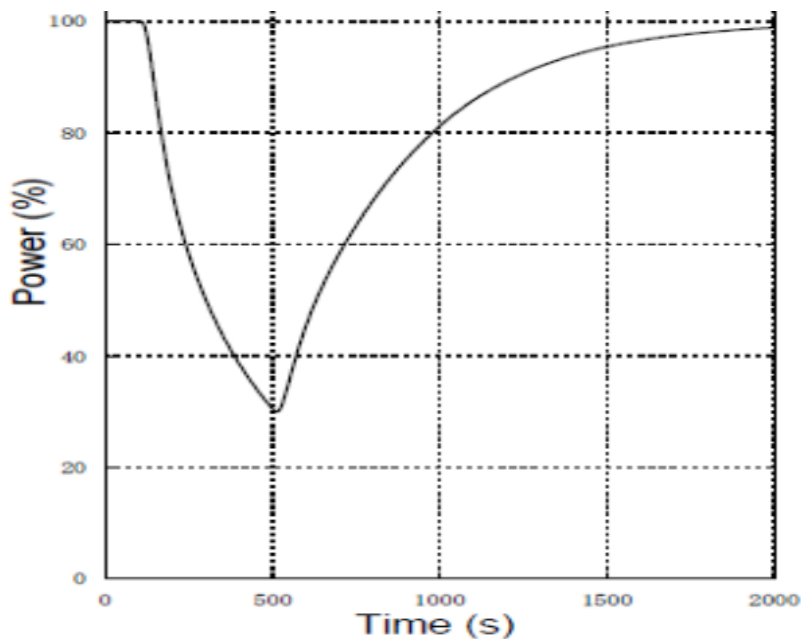
Οι τιμές αυτές για τη διακοπή της δέσμης, δεν λαμβάνουν υπόψη την ενδεχομένη θερμική καταπόνηση που μπορεί να προέρχεται λόγω της μεταστοιχείωσης των πυρήνων του στόχου κατακερματισμού

Στο Σχήμα 3-6 παρουσιάζεται η συχνότητα των διακοπών της δέσμης, σε συνάρτηση με τη χρονική τους διάρκεια, για ορισμένους εν ενεργεία επιταχυντές αλλά και οι απαιτήσεις όσον αφορά την αξιοπιστία ενός επιταχυντή σωματιδίων ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί στους ADS αντιδραστήρες για τη βιομηχανική χρήση τους.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος για διακοπές της δέσμης άνω των 400 s (Σχήμα 3-7). Παρατηρείται ότι για μια διακοπή δέσμης διάρκειας 500 s, η παραγόμενη ισχύς μειώνεται κατά 60% και απαιτείται τριπλάσιος χρόνος για να επανέλθει το σύστημα στο 100%.



Σχήμα 3-6 Η συχνότητα των διάφορων διακοπών της δέσμης για διάφορους επιταχυντές με έντονο κόκκινο είναι η απαίτηση για τον επιταχυντή ενός ADS



Σχήμα 3-7 Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μετρά από τη διακοπή δέσμης[4]

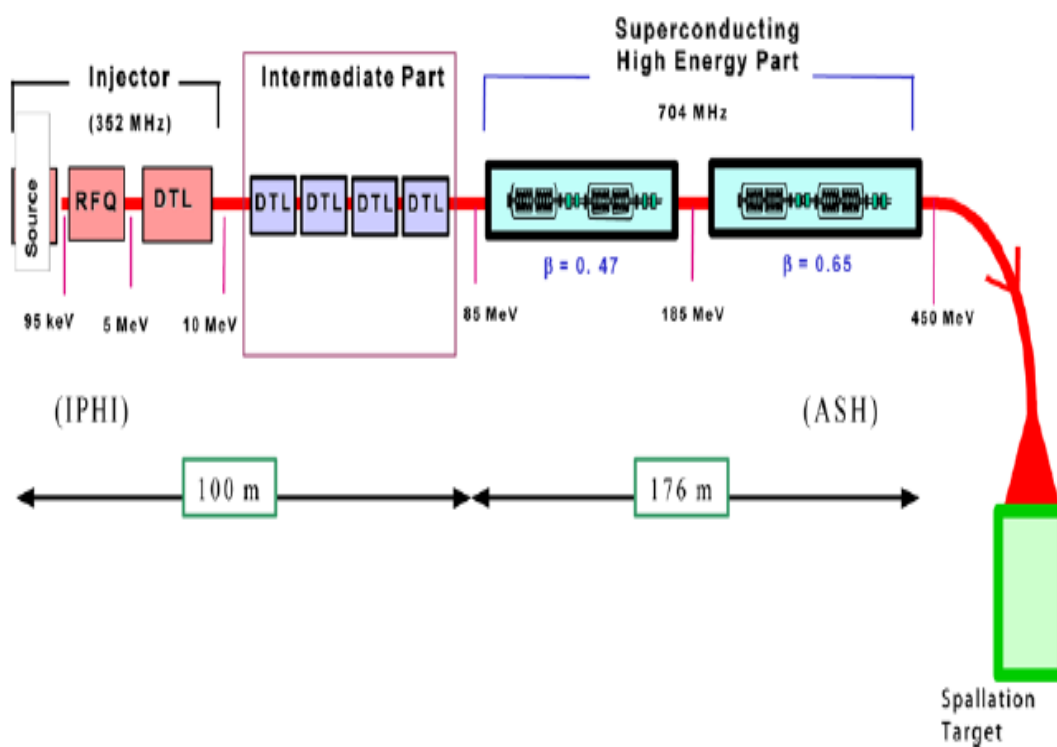
Πέραν του προβλήματος της διακοπής της δέσμης, η κατασκευή των επιταχυντών θα πρέπει να αντιμετωπίσει και άλλες προκλήσεις, όπως η απώλεια ισχύος δέσμης, η οποία δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 1 W/m, το μέγεθος της δέσμης και άλλα, τα οποία όμως ξεφεύγουν από τα όρια της παρούσας εργασίας. Όλοι αυτοί οι παράγοντες, συνυπολογιζόμενοι και του κόστους κατασκευής ενός γραμμικού επιταχυντή, συντέλεσαν στην δημιουργία διάφορων ερευνητικών προγραμμάτων για την ανάπτυξη επιταχυντών που θα μπορούν να εναρμονιστούν στα παραπάνω κριτήρια, τους λεγόμενους επιταχυντές πρωτονίων υψηλής ισχύος HPPA (High Power Proton Accelerators).



### 3.5 Επανασχεδιασμός των γραμμικών επιταχυντών για τους ADS αντιδραστήρες

Όπως φαίνεται και από την παρουσίαση των επιταχυντών, η επιλογή του γραμμικού επιταχυντή φαίνεται προτιμότερη λόγω των χαρακτηριστικών που διαθέτει. Μεγάλο μειονέκτημα είναι η εξάρτηση της ταχύτητας του πρωτονίου από το μήκος των ηλεκτροδίων, όπως φαίνεται και από τη Σχέση 3.6, που οδηγεί σε υπερμεγέθεις κατασκευές, προκειμένου να παραχθούν ενέργειες σωματιδίων δέσμης της τάξης των 1 GeV και κατ' επέκταση το υψηλό κόστος τέτοιων κατασκευών. Οι τεχνολογικές εξελίξεις όμως στο τομέα των υπεραγωγικών κοιλοτήτων προβλέπεται να βελτιώσουν σημαντικά το βαθμό απόδοσης των γραμμικών επιταχυντών, επιτρέποντας την κατασκευή εγκαταστάσεων μικρότερου μεγέθους χωρίς συμβιβασμούς στην ενέργεια των σωματιδίων της δέσμης.

Ξεκινώντας την περιγραφή, ο επιταχυντής μπορεί να χωριστεί σε τρία τμήματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-8 (όπου  $\beta = v/c$ ).

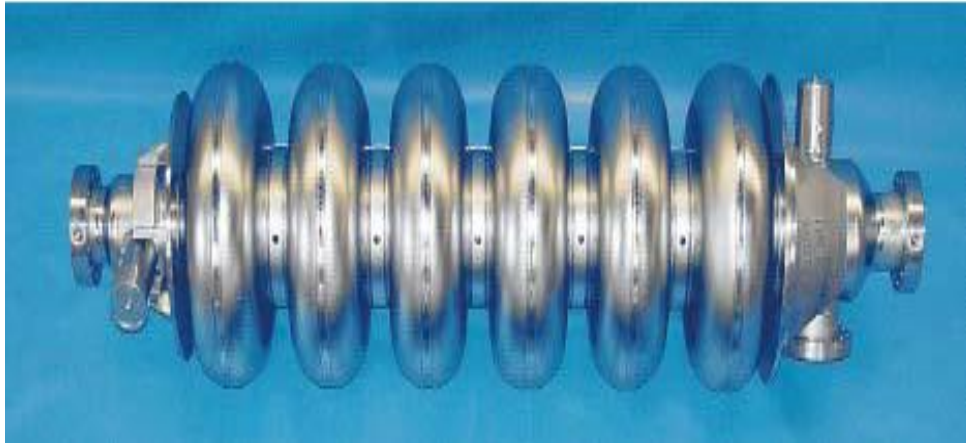


Σχήμα 3-8 Σχηματική απεικόνιση των σχεδίων ενός υπεραγωγικού HPPA για ADS[2]

Στο πρώτο τμήμα, υπάρχει η πηγή ιόντων η οποία παράγει δέσμες πρωτονίων μεγάλης έντασης. Έχουν επιλεγεί για αυτό το λόγο οι πηγές ECR (Electron Cyclotron Resonance), οι οποίες πληρούν το κριτήριο της αξιοπιστίας. Ακολουθεί το τμήμα όπου υπάρχει το λεγόμενο RFQ (Radio Frequency Quadrupole), προσδίδοντας στη δέσμη ενέργειες της τάξης των 5 MeV, ενώ ταυτόχρονα εστιάζει τη δέσμη. Το πρώτο τμήμα τελειώνει με τη διάταξη DTL (Drift Tube LINAC), όπως σε ένα γραμμικό επιταχυντή, με αποτέλεσμα η ενέργεια της δέσμης να φτάνει τα 10 MeV. Συνεχίζοντας με το μεσαίο τμήμα, το οποίο δε διαφέρει από έναν κανονικό γραμμικό επιταχυντή με την ίδια λειτουργία που παρουσιάστηκε στην 3.1. Η δέσμη εξέρχεται από το μεσαίο τμήμα με ενέργεια της τάξης των 85 MeV. Το τελευταίο τμήμα είναι και αυτό που διαφέρει σε σχέση με τους παραδοσιακούς γραμμικούς επιταχυντές. Εν αντιθέσει με τα παραδοσιακά ηλεκτρόδια που κατασκευάζονται από χαλκό, αυτό το τμήμα αποτελείται από υπεραγωγικές κοιλοότητες, με αποτέλεσμα η δέσμη να

αποκτήσει την επιθυμητή τιμή του 1 GeV. Το κέρδος από αυτή τη διαδικασία είναι το μέγεθος του επιταχυντή το οποίο δεν φαίνεται να ξεπερνά τα 500 m για την προαναφερθείσα επιθυμητή ενέργεια. Σε αυτό το τμήμα υπάρχουν και πηγές ραδιοσυχνοτήτων που εστιάζουν τη δέσμη.

Οι υπεραγωγίμες κοιλοότητες που έχουν κατασκευαστεί μέχρι τώρα μπορούν να ανταπεξέλθουν για όλες τις δυνατές τιμές του  $\beta$  όποτε υπάρχει το περιθώριο επιλογής. Για τις τιμές της αναμενόμενης ταχύτητας που θα πρέπει να έχουν τα σωματίδια,  $\beta > 0.4$ , το σχήμα των υπεραγωγίμων κοιλοτήτων έχει προταθεί να είναι ελλειπτικό όπως το SNS (Σχήμα 3-9)



Σχήμα 3-9 Υπεραγωγίμη κοιλοότητα για  $\beta=0.81$  για το πρόγραμμα SNS[7]

Το πλεονέκτημα στη χρησιμοποίηση υπεραγωγίμων κοιλοτήτων σε αντίθεση με τα παραδοσιακά χρησιμοποιούμενα Drift Tubes είναι η απώλεια στη μετάδοση ενέργειας που υπάρχει στη δεύτερη κατηγορία. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη επιτάχυνση των σωματιδίων, με αποτέλεσμα το μικρότερο μήκος του επιταχυντή και κατά συνέπεια μείωση στο κόστος.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα προβλήματα της αξιοπιστίας της δέσμης, όπως περιεγράφηκαν στη προηγούμενη ενότητα, δεν έχουν επιλυθεί για μία σειρά από λόγους, αν και έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι αντιμετώπισης, όπως φανερώνουν και τα μέχρι στιγμής πειράματα.

### 3.6 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

[1] Walter D. Loveland, David J. Morrissey ,Glenn T. Seaborg, «Modern Nuclear Chemistry,» , John Wiley & Sons, 2006

[2] Per Seltborg, «Source efficiency and high-energy neutronics in accelerator-driven systems,» *Department of Nuclear and Reactor Physics, Royal Institute of Technology*, 2005

[3] H. Aït Abderrahimh, J. Galambosd, Y. Gohara, S. Hendersonc, G. Lawrencee, T. McLaney, A. C. Moeller, S. Negates, J. Nolan, E. Pitchers, R. Rammers, R. Sheffielde, M. Todosow, «Accelerator and Target Technology for Accelerator Driven Transmutation and Energy Production,» Σεπτέμβριος, 2010

[4] Hayanori Takei, Kazufumi Tsujimoto, Nobuo Ouchi, Hiroyuki Oigawa, Motoharu Mizumoto, Kazuro Furukawa, Yujiro Ogawa, Yoshiharu Yano, «Comparison of beam trip frequencies between estimation from current experimental data of accelerators and requirement from ADS transient analyses,» *JAEA*, Μάιος, 2007

[5] Hayanori Takei, Kenji Nishihara, Kazufumi Tsujimoto, Hiroyuki Oigawa, «Estimation of acceptable beam-trip frequencies of accelerators for accelerator-driven systems and comparison with existing performance data,» *Journal of Nuclear Science and Technology*, τομ.49, αρ.4, pp.384-397, Μάρτιος,2007

[6] Robert Cywinski, «Particle accelerators and thorium energy,» ,*ThEC12*, 2012

[7] M. Pekeler, S. Bauer, J. Schwellenbach, M. Tradt, H. Vogel, P. vom Stein, «Fabrication Of Superconducting Cavities For SNS,» 2004

# Κεφάλαιο 4

## 4 Δομικά χαρακτηριστικά και επιλογές για τους ADS αντιδραστήρες

Στο Κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι επιλογές που υπάρχουν σε σχέση με τα δομικά χαρακτηριστικά των ADS αντιδραστήρων, την επιλογή του ψυκτικού, του στόχου κατακερματισμού, την επιλογή που αφορά την ύπαρξη ή μη του παραθύρου για τη δέσμη, καθώς και τη συμπεριφορά των δομικών υλικών και χαρακτηριστικών του αντιδραστήρα.

### 4.1 Επιλογές ψυκτικού

Όπως αναδείχθηκε και στην ενότητα 1.5.1, το ενδεχόμενο της χρήσης των ADS αντιδραστήρων με σκοπό την μεταστοιχείωση απαιτεί μεγάλες ενέργειες νετρονίων και έτσι η επιλογή του κυρίου ψυκτικού περιορίζεται κυρίως σε υγρά μέταλλα, όπως Pb, LBE (Lead-Bismuth Eutectic) και Na, ή σε αέρια όπως το CO<sub>2</sub> ή το He. Ακόμα, υπάρχει και η επιλογή των τετηγμένων αλάτων. Οι αντιδραστήρες που χρησιμοποιούν το συγκεκριμένο ψυκτικό αποτελούν, όπως και η περίπτωση των ADS, παράδειγμα αντιδραστήρων 4<sup>ης</sup> Γενιάς. Η χρήση του νερού ως ψυκτικού δεν προκρίνεται κυρίως λόγω της ιδιότητας του να επιβραδύνει τα νετρόνια, γεγονός που αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα όσον αφορά την μεταστοιχείωση των MA (Σχήμα 1-8). Πάντως, απαιτείται αρκετή έρευνα στη χρήση των παραπάνω ψυκτικών μέσων, και στην πρώτη φάση όπου υπάρχει η ανάγκη για την παρουσίαση των δυνατοτήτων των ADS, δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ακόμα ως επιλέξιμα για τον σκοπό αυτό.

Γενικά, τα χαρακτηριστικά ενός ψυκτικού για έναν αντιδραστήρα 4<sup>ης</sup> Γενιάς και κατ' επέκταση τους ADS αντιδραστήρες πρέπει να συμμορφώνονται με την εθνική και διεθνή νομοθεσία και να πληρούν τα κριτήρια τα οποία έχουν θεσπιστεί. Όσον αφορά τις φυσικές ιδιότητες του ψυκτικού θα πρέπει να έχει εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα, υψηλό σημείο ζέσης και χαμηλό σημείο τήξης. Όσον αφορά στην συμπεριφορά του σε σχέση με τον νετρονικό πληθυσμό θα πρέπει να έχει χαμηλή απορρόφηση νετρονίων, ελάχιστη επαγόμενη ραδιενέργεια αλλά και οι επιβραδυντικές του ικανότητες να είναι οι κατάλληλες, ανάλογα με το τύπο του αντιδραστήρα. Συνεχίζοντας, θα πρέπει να είναι συμβατό με τα υπόλοιπα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία του αντιδραστήρα, καθώς και να διατηρεί την ίδια φάση καθ' όλη την διάρκεια της λειτουργίας του αντιδραστήρα, αλλά και στο ενδεχόμενο ατυχήματος. Επίσης, το κόστος του να είναι χαμηλό και η διαθεσιμότητα του να είναι επαρκής. Τέλος, θα πρέπει να μην είναι τοξικό και να έχει χαμηλή αντιδραστικότητα.

### 4.2 Υγρά μέταλλα

Τα υγρά μέταλλα όπως η περίπτωση του Νατρίου, έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν ως ψυκτικά για αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων. Τα υγρά μέταλλα παρουσιάζουν χημικές, φυσικές και πυρηνικές ιδιότητες, οι οποίες τα καθιστούν ως ιδανικότερη επιλογή ψυκτικού ενός αντιδραστήρα, που θα έχει ως στόχο τη μεταστοιχείωση των ραδιενεργών κατάλοιπων από υπάρχοντες πυρηνικούς αντιδραστήρες σχάσης ή ακόμη και τη χρησιμοποίηση εναλλακτικού πυρηνικού καυσίμου και συγκεκριμένα του Θορίου.

#### 4.2.1 Μόλυβδος και εύτηκτο κράμα Μόλυβδου – Βισμούθιου, LBE (Lead Bismuth Eutectic)

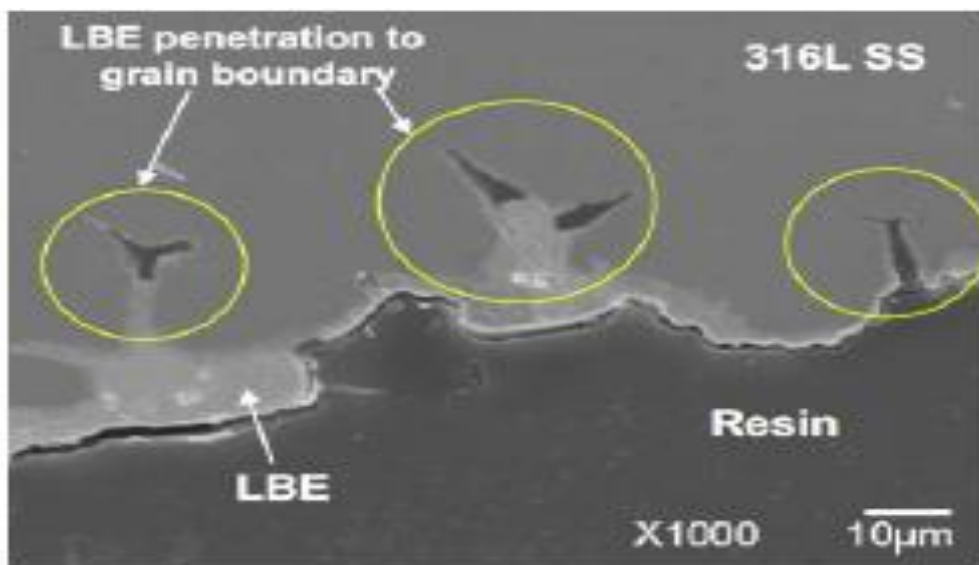
Η επιλογή αυτή έχει το μεγάλο πλεονέκτημα ότι ο στόχος κατακερματισμού μπορεί να επιλεγεί να είναι κατασκευασμένος από Μόλυβδο ή και Βισμούθιο, καθώς ο αριθμός των παραγόμενων από την αντίδραση κατακερματισμού νετρονίων εκτιμάται από τα μέχρι τώρα πειράματα

ικανοποιητικός. Αυτό δίνει το πλεονέκτημα να μην υπάρχει διαχωρισμός του στόχου κατακερματισμού και του υποκρίσιμου αντιδραστήρα.

Συνεχίζοντας με τα πλεονεκτήματα, σημαντικό κρίνεται και το γεγονός της μικρής ενεργού διατομής για σύλληψη νετρονίων για το Μόλυβδο και το Βισμούθιο. Σε αυτό στηρίζεται εξάλλου και η λειτουργία ενός υποκρίσιμου αντιδραστήρα. Επίσης, πρέπει να τονιστεί ότι ο Μόλυβδος δεν αντιδρά χημικά με το νερό ή τον αέρα. Στα μειονεκτήματα της επιλογής του Μόλυβδου ως ψυκτικού συγκαταλέγεται το γεγονός ότι προκαλεί διαβρώσεις στα δομικά υλικά του αντιδραστήρα (Σχήμα.4.1) και ότι έχει υψηλό σημείο τήξης, 327 °C. Αυτό οδηγεί σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, περίπου 400 °C με 600 °C. Αυτές οι υψηλές θερμοκρασίες επιδεινώνουν περαιτέρω τα προβλήματα διάβρωσης των δομικών υλικών. Επίσης, καθίσταται δύσκολη η διαδικασία σβέσης και ανεφοδιασμού του αντιδραστήρα χωρίς το συγκεκριμένο ψυκτικό να στερεοποιηθεί.

Λύση στα προβλήματα, που προκύπτουν από το υψηλό σημείο τήξης του Μόλυβδου φαίνεται να δίνει το LBE καθώς το σημείο τήξης του είναι στους 125 °C, σημαντικά χαμηλότερο από αυτό του Μολύβδου. Το βασικό πρόβλημα αυτής της επιλογής όμως είναι αυτό που αναφέρθηκε στο δεύτερο Κεφάλαιο, δηλαδή η παραγωγή του ραδιενεργού  $^{210}\text{Po}$  από το Βισμούθιο με αποτέλεσμα την ανάγκη για περαιτέρω προστασία του συστήματος. Μειονέκτημα αποτελεί επίσης και η σχετική σπανιότητα του Βισμούθιου. Υπάρχει ήδη τεχνολογία στη χρήση του LBE ως ψυκτικού, καθώς η Σοβιετική Ένωση το χρησιμοποιούσε στα υποβρύχιά της, εντούτοις απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη χρήση του στους ADS αντιδραστήρες.

Κρίσιμη κρίνεται η συγκέντρωση του Οξυγόνου όταν χρησιμοποιούνται κράματα Μόλυβδου. Από τη μια πλευρά πρέπει η συγκέντρωση Οξυγόνου να είναι αρκετά υψηλή ώστε να δημιουργηθεί ένα στρώμα (film) οξειδίων ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) στην επιφάνια των δομικών υλικών π.χ. Χάλυβας, προκειμένου να αποφευχθεί η διάβρωση τους από το ψυκτικό. Η περίπτωση διάβρωσης του Ανοξειδωτού Χάλυβα 316L (Stainless Steel) και εισχώρηση του στο όριο των κόκκων χωρίς την ύπαρξη του στρώματος οξειδίου παρατηρείται στο Σχήμα 4-1 για ευθύγραμμο αγωγό με την χρήση ΗΜΣ (Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης). Στο Σχήμα αυτό, ως Όριο των κόκκων, (Grain Boundary) ορίζεται ο διεπιφανειακός διαχωρισμός δύο εφαιπτόμενων κόκκων που έχουν διαφορετικό κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό σ' ένα πολυκρυσταλλικό υλικό.



Σχήμα 4-1 ΗΜΣ εικόνα της διείσδυσης του LBE σε ευθύγραμμο αγωγό κατασκευασμένο από 316L SS [3]

Η συγκέντρωση Οξυγόνου όμως, δεν πρέπει να ξεπερνά ένα συγκεκριμένο όριο, καθώς δημιουργούνται μεγάλες συγκεντρώσεις οξειδίων των υγρών μετάλλων τα οποία λειτουργούν ως στερεές ακαθαρσίες μέσα στο ψυκτικό. Πειράματα που γίνονται στο KIT (Karlsruhe Institute of Technology) στη Γερμανία, και στο ENEA (Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development) στην Ιταλία, αποσκοπούν στην κατασκευή αισθητήρων που θα παρακολουθούν τις συγκεντρώσεις του Οξυγόνου ή/και των οξειδίων.

#### 4.2.2 Νάτριο

Το Νάτριο (Na) αποτελεί μια δοκιμασμένη επιλογή καθώς έχει χρησιμοποιηθεί και στο παρελθόν σε αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων. Τα πλεονεκτήματά του είναι η αφθονία του, καθώς υπάρχει στο 2,8% των πετρωμάτων αλλά και σε μεγάλες ποσότητες στο θαλασσινό νερό ως χλωριούχο νάτριο, από το οποίο μπορεί εύκολα να αφαιρεθεί, με τη μέθοδο της ηλεκτρόλυσης. Το συγκεκριμένο ψυκτικό αποτελεί βιώσιμη λύση για αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων 4<sup>ης</sup> Γενιάς, τους λεγομένους Sodium-Cooled Fast Reactors (SFR).

Πέρα από την αφθονία του, το Νάτριο παρουσιάζει εξαιρετικές φυσικές ιδιότητες. Έχει ικανοποιητική θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα που το καθιστούν αρκετά ικανό για την ψύξη του αντιδραστήρα, τόσο υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, όσοι και στις περιπτώσεις διαχείρισης της εναπομένουσας θερμότητας (residual heat) σε μεταβατικές καταστάσεις. Μεγάλο μειονέκτημα αποτελεί η χημική αντιδραστικότητα του με το νερό και τον αέρα. Μάλιστα, υπάρχει το ιστορικό προηγούμενο ατυχήματος σε αντιδραστήρα ταχέων νετρονίων στην Ιαπωνία, στον πυρηνικό αντιδραστήρα Μορηju, όπου διαρροή Νατρίου το έφερε σε επαφή με τον αέρα με αποτέλεσμα να παραχθούν καυστικές αναθυμιάσεις και μεγάλες θερμοκρασίες και να τεθεί ο αντιδραστήρας εκτός λειτουργίας. Μειονέκτημα επίσης αποτελεί και το γεγονός ότι μπορεί μέσω απορρόφησης νετρονίου να δημιουργηθεί <sup>24</sup>Na το οποίο είναι ραδιενεργό με χρόνο ημιζωής τις 14.96 ώρες.

#### 4.2.3 Σύγκριση των θερμικών, φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των υγρών μετάλλων

Δεδομένου ότι προβάδισμα στην επιλογή του ψυκτικού των ADS αντιδραστήρων φαίνεται να έχουν τα υγρά μέταλλα, ο Πίνακας 4-1 συνοψίζει τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των επιλογών αυτών. Ιδανικό ψυκτικό δεν υπάρχει και η τελική επιλογή προκύπτει μέσα από συμβιβασμούς προκειμένου να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, το Νάτριο διαθέτει υψηλότερη θερμοχωρητικότητα και χαμηλότερη πυκνότητα σε σχέση με το Μόλυβδο και το κράμα LBE, αλλά έχει χαμηλότερη θερμοκρασία βρασμού από τα άλλα δύο ψυκτικά.

Η σύγκριση ψυκτικών επιτυγχάνεται μέσω του ημιεμπειρικού παράγοντα  $F$  (figure of merit) ο οποίος προκύπτει από τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά και την ευκολία άντλησης του κάθε υγρού. Συγκεκριμένα αυτός ο παράγοντας δίνεται μέσω της σχέσης :

$$F = \frac{C_p^{2.8} \rho^2}{\mu^2} \quad (\text{Σχ. 4.1})$$

όπου  $C_p$  η ειδική θερμοχωρητικότητα του εκάστοτε ψυκτικού (J/kg) ,  $\rho$  η πυκνότητα (kg/m<sup>3</sup>) και  $\mu$  (Pa s) το ιξώδες του ψυκτικού.

Πίνακας 4-1 Φυσικές, θερμικές και χημικές ιδιότητες των Na, Pb και LBE[1]

Ιδιότητες	Νάτριο	Μόλυβδος	Εύτηκτο κράμα Μολύβδου Βισμούθιου (LBE)
Θερμοκρασία τήξης (°C)	98	327.4	125
Θερμοκρασία βρασμού (°C)	883	1745	1670
Θερμότητα τήξης (kJ/kg)	114.8	24.7	38.8
Θερμότητα εξάτμισης (kJ/kg)	3871	856.8	852
Πυκνότητα στους 20 °C (Kg/m <sup>3</sup> )	966	11340	10474
Πυκνότητα στους 450 °C (kg/m <sup>3</sup> )	845	10520	10150
Θερμοχωρητικότητα στους 20 °C (kJ/Kg K)	1.23	0.127	0.128
Θερμοχωρητικότητα στους 450 °C (kJ/kg K)	1.269	147.3	146
Κινηματικό ιξώδες στους 450 °C (m <sup>2</sup> /s)	3·10 <sup>-7</sup>	1.9·10 <sup>-7</sup>	1.4·10 <sup>-7</sup>
Αριθμός Pr στους 450 °C	0.0048	0.0174	0.0147
Επιφανειακή τάση στους 450 °C (mN/m)	163	480	392
αλλαγή όγκου με τήξη,%	+2.65	+3.6	+0.5
Χημική αντιδραστικότητα	Υψηλή	Χαμηλή	Χαμηλή

Ενδεικτικά, συγκρίνοντας τη τιμή του  $F$  για το Na στους 300 °C το Μόλυβδο στους 500 °C<sup>9</sup>, και κάνοντας αναγωγή στην τιμή του  $F$  για το Νάτριο, έχουμε  $F_{Na}/F_{Na} = 1$  και  $F_{Pb}/F_{Na} = 0.27$ . Η υψηλότερη τιμή του  $F$  συνεπάγεται προτιμητέες ιδιότητες για την επιλογή του ψυκτικού. Όμως η τιμή του  $F$  δεν είναι ο μόνος παράγοντας επιλογής για το ψυκτικό. Για παράδειγμα, η τιμή του  $F$  για το νερό στους 300 °C είναι ίση<sup>10</sup> με  $F_{H_2O} = 60$ , πολύ υψηλότερη από την αντίστοιχη τιμή του  $F$  του Νατρίου. Όμως, όπως αναφέρθηκε και στην 4.2, το νερό λόγω των πυρηνικών του ιδιοτήτων αλλά και το χαμηλό σημείου βρασμού του, καθίσταται μη επιλέξιμο για τους ADS αντιδραστήρες.

### 4.3 Αέρια

Αέρια, πιο συγκεκριμένα το Διοξειδίου του Άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και το Ήλιο (He), έχουν χαρακτηριστικά που ευνοούν τη χρήση τους ως ψυκτικά αντιδραστήρων 4<sup>ης</sup> Γενιάς γενικά, αλλά και ειδικότερα στους ADS αντιδραστήρες.

<sup>9</sup> www.thermopedia.com

<sup>10</sup> www.thermopedia.com

Στα πλεονεκτήματα τους είναι το γεγονός ότι τα αέρια δεν επιδρούν αρνητικά στην κινητική ενέργεια των νετρονίων, άρα είναι συμβατή η επιλογή τους για τη μεταστοιχείωση Ακτινίδων με τους ADS αντιδραστήρες. Ειδικότερα το Ήλιο έχει το πλεονέκτημα ως αδρανές αέριο να μην αντιδρά χημικά με τα δομικά υλικά του αντιδραστήρα.

Στα μειονεκτήματα αυτής της επιλογής είναι ότι η χρησιμοποίηση αέριων οδηγεί σε μεγάλες πιέσεις και θερμοκρασίες, της τάξης των 4 - 8 MPa και 850°C με 950°C αντίστοιχα, οδηγώντας έτσι σε μεγάλη καταπόνηση στα δομικά υλικά του αντιδραστήρα. Αν και αυτές οι πιέσεις συναντώνται και στους PWR's, επιπρόσθετο πρόβλημα είναι η διαφορά θερμοκρασίας λειτουργίας μεταξύ τους. Αυτό το γεγονός αυξάνει τις πιθανότητες διαρροής του ψυκτικού (Loss of Coolant Accident, LOCA), λόγω δημιουργίας ρωγμών στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Επίσης, στην περίπτωση τέτοιου ατυχήματος παρατηρείται ότι είναι πιο δύσκολο, σε σχέση με τα υγρά μέταλλα, να ψυχθεί ο αντιδραστήρας από την παραμένουσα θερμότητα (Residual Heat).

Μειονέκτημα σε σύγκριση με τα υγρά μέταλλα και συγκεκριμένα με την επιλογή του Μολύβδου ή του LBE αποτελεί και το γεγονός του διαχωρισμού του στόχου κατακερματισμού που προσφέρει η επιλογή αυτή.

Η επιλογή αερίου ως ψυκτικό φαίνεται να μην προκρίνεται για τους ADS αντιδραστήρες, καθώς η έρευνα που μέχρι στιγμής πραγματοποιείται σε διάφορες χώρες αφορά κυρίως τα υγρά μέταλλα. Πέραν των αντιδραστήρων ADS, ενδιαφέρον για αέριο ψυκτικό μέσο και συγκεκριμένα για το αέριο Ήλιο υπάρχει τόσο για τους αντιδραστήρες 4<sup>ης</sup> γενιάς τύπου VHTRs (Very High Temperature Reactors), καθώς επίσης και για τους πυρηνικούς αντιδραστήρες σύντηξης.

#### 4.4 Στόχος Κατακερματισμού

Το κύριο ενδιαφέρον όσον αφορά το στόχο κατακερματισμού είναι το πόσο ικανός θα είναι στην παραγωγή νετρονίων. Όπως αναδείχθηκε και στο δεύτερο Κεφάλαιο, υπάρχει εξάρτηση από τον μαζικό αριθμό του πυρήνα στόχου. Οπότε, για αυτό το λόγο έχουν προταθεί στοιχεία όπως Ταντάλιο, Βολφράμιο, Υδράργυρος, Μόλυβδος, το Ουράνιο αλλά και το εύτηκτο κράμα LBE. Το ενδιαφέρον βέβαια της έρευνας δεν στηρίζεται μόνο στον παραγόμενο αριθμό νετρονίων αλλά και στις φυσικές, χημικές και θερμικές ιδιότητες του στόχου, καθώς θα υποστεί ακτινοβόληση και θερμικές καταπονήσεις, ως συνέπεια του «βομβαρδισμού» του από τη δέσμη πρωτονίων. Ο στόχος κατακερματισμού αποτελεί τη φυσική διεπαφή μεταξύ του επιταχυντή πρωτονίων και του υποκρίσιμου πυρηνικού αντιδραστήρα και είναι ένα από τα πιο καινοτόμα στοιχεία που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία των ADS αντιδραστήρων. Από πλευράς πειραματικής έρευνας, στο συγκεκριμένο πεδίο ξεχωρίζουν δύο εγκαταστάσεις. Στην Ευρώπη, και πιο συγκεκριμένα στο Paul Scherrer Institute της Ελβετίας το STIP (SINQ Target Irradiation Program), και στο Oak Ridge National Laboratory των Η.Π.Α το SNS. Και τα δυο χρησιμοποιούν ως στόχο υγρά μέταλλα, το πρώτο LBE και το δεύτερο Pb.

Πέραν της πειραματικής έρευνας, για την μελέτη του στόχου κατακερματισμού χρησιμοποιούνται και προγράμματα προσομοίωσης όπως το MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport Code) που αναπτύχθηκε στο Los Alamos National Laboratory. Το πρόγραμμα αυτό εφαρμόζει τη μέθοδο Monte Carlo και μπορεί να προσομοιώνει της αλληλεπιδράσεις νετρονίων, πρωτονίων, φωτονίων και ηλεκτρονίων. Έχει διάφορες εφαρμογές σε διαφορετικούς τομείς έρευνας, από την Ιατρική Φυσική και την ακτινοπροστασία (Radiation Shielding), έως τη μελέτη της διαδικασίας της σχάσης και τη μελέτη της κρισιμότητας των πυρηνικών συστημάτων. Επιπλέον, χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της αντίδρασης κατακερματισμού, με σκοπό την εξεύρεση του κατάλληλου στόχου. Το πρόγραμμα MCNPX (Monte Carlo N-Particle eXtended) το οποίο αποτελεί επέκταση του MCNP και το οποίο επίσης αναπτύχθηκε στο Los Alamos National Laboratory, έχει την ικανότητα να



προσομοιώνει τις αλληλεπιδράσεις διάφορων σωματιδίων, νουκλεονίων αλλά και ιόντων σε μεγάλο εύρος ενεργειών. Ένα άλλο πρόγραμμα είναι το GEANT4 (GEometry AND Tracking) που αποτελεί εξέλιξη του προγράμματος GEANT, το οποίο αναπτύχθηκε στο CERN. Σκοπός του συγκεκριμένου προγράμματος προσομοίωσης είναι η μελέτη της κίνησης σωματιδίων μέσα σε διάφορες γεωμετρίες και την ύλη. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιείται σε διάφορους τομείς, από την μελέτη των στοιχειωδών σωματιδίων και την πυρηνική φυσική μέχρι την ιατρική φυσική και τη φυσική του διαστήματος. Το πρόγραμμα FLUKA (FLUktuierende KAskade) είναι πρόγραμμα προσομοίωσης που και αυτό εφαρμόζει την μέθοδο Monte Carlo. Αναπτύχθηκε από το CERN και το INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) και σκοπός του είναι η μελέτη της αλληλεπίδρασης σωματιδιακής ακτινοβολίας και ύλης. Όπως και για τα προηγούμενα προγράμματα προσομοίωσης, το συγκεκριμένο πρόγραμμα βρίσκει εφαρμογή από την πυρηνική φυσική μέχρι και τη μελέτη της κοσμικής ακτινοβολίας.

#### 4.4.1 Υλικό στόχου Κατακερματισμού

Μέσω του προγράμματος MCNPX μπορούν να δοκιμαστούν διάφορα ισότοπα που θα μπορούσαν να επιτελέσουν το ρόλο αυτό. Το Βολφράμιο έχει ως πλεονέκτημα το γεγονός ότι είναι χημικά αδρανές και αναμένεται να υπόκειται σε μικρή διάβρωση στην περίπτωση που το ψυκτικό είναι αέριο. Επίσης, εκτιμάται ότι έχει μεγάλη αντοχή σε βλάβες που προκαλούνται λόγω ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα ο εκτιμώμενος χρόνος ζωής του στόχου να είναι περίπου ένα έτος. Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί και το χαμηλό κόστος του. Όλα τα παραπάνω δεδομένα καθιστούν το Βολφράμιο μία ελκυστική επιλογή, παρά το γεγονός ότι έχει την ιδιότητα να απορροφά νετρόνια, καθώς εκτιμάται ότι ο πληθυσμός των νετρονίων που παράγεται είναι ικανοποιητικός για να αντισταθμίσει το γεγονός αυτό.

Μία άλλη επιλογή είναι ο στόχος να είναι κατασκευασμένος από Ταντάλιο, στοιχείο το οποίο προσφέρει ευκολία στην μηχανική κατεργασία του και έχει μηχανικές ιδιότητες καλύτερες σε σχέση με το Βολφράμιο, για το οποίο η κατασκευή του στόχου εμπεριέχει πλήθος μηχανολογικών προκλήσεων. Και τα δυο παρουσιάζουν ίδια συμπεριφορά όσον αφορά τον νετρονικό πληθυσμό, αλλά το Ταντάλιο είναι αρκετά ακριβότερο.

Η επικρατέστερη επιλογή φαίνεται αυτή τη στιγμή να είναι Μόλυβδος, ή το εύτηκτο κράμα Μόλυβδου Βισμούθιου. Αν και τα προβλήματα ήδη έχουν αναφερθεί στην προηγούμενη ενότητα, (τοξικότητα, διάβρωση, δημιουργία ραδιενεργού  $^{210}\text{Po}$  κ.α.) έχει το πλεονέκτημα ότι λόγω των φυσικών και θερμικών ιδιοτήτων του μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως ψυκτικό. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η προοπτική να χρησιμοποιηθεί ένα εύτηκτο κράμα Μόλυβδου Χρυσού, κάτι το οποίο μελετάται στο πλαίσιο του προγράμματος ESS Preparatory Phase Project, στο πανεπιστήμιο της Λετονίας.

Ακόμη και ο ρευστοποιημένος Υδράργυρος μπορεί να αποτελέσει το στόχο κατακερματισμού, καθώς παρουσιάζει μεγαλύτερη παραγωγή νετρονίων, σε σχέση με το Μόλυβδο και το LBE, δεν παρουσιάζει παράγωγη ραδιενεργών ισωτόπων με εξαίρεση το  $^{194}\text{Hg}$ , το οποίο όμως είναι σπάνιο προϊόν που προκύπτει από την αντίδραση κατακερματισμού, ενώ έχει φυσικές, θερμικές και πυρηνικές ιδιότητες που το καθιστούσαν κατάλληλη επιλογή ως ψυκτικό. Για αυτούς τους λόγους, ο Υδράργυρος χρησιμοποιήθηκε στο ερευνητικό πρόγραμμα JSNS (Japan Spallation Neutron Source) στο J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) στην Ιαπωνία αλλά και στο SNS. Αυτό που έχει παρατηρηθεί πειραματικά [4] είναι πως η αλληλεπίδραση του Υδράργυρου με τη δέση πρωτονίων οδηγεί σε υψηλούς ρυθμούς θέρμανσης του στόχου, ο οποίος υπενθυμίζεται ότι έχει χαμηλό σημείο βρασμού  $357.53\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Κατά τη διάρκεια ενός σύντομου παλμού της τάξης των  $0.7\text{ }\mu\text{s}$  η αύξηση της θερμοκρασίας του στόχου θρυμματισμού είναι της τάξης των  $10^7\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ,

επαναλαμβανόμενη με συχνότητα 60 Hz. Αυτή η θερμική καταπόνηση οδηγεί σε δημιουργία κυμάτων πίεσης, τα οποία αλληλεπιδρούν με το δοχείο που βρίσκεται ο στόχος κατακερματισμού, μειώνοντας έτσι το προσδόκιμο ζωής του. Το άλλο μειονέκτημα του Υδράργυρου έχει να κάνει με την τοξικότητά του στον ανθρώπινο οργανισμό και κατά συνέπεια, η χρησιμοποίηση του απαιτεί ιδιαίτερους χειρισμούς προκειμένου να αποφευχθούν κίνδυνοι για τη δημόσια υγεία.

Μία άλλη δυνατότητα είναι η χρήση σχάσιμων πυρήνων όπως το Ουράνιο, καθώς όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-2 η χρησιμοποίηση Ακτινίδων θα προσέφερε μεγαλύτερο αριθμό παραγόμενων νετρονίων από ότι τα βαρέα μέταλλα. Τα κύρια μειονεκτήματα αυτής της επιλογής έχουν να κάνουν με τις ιδιότητες τους στόχου, καθώς έχει διαπιστωθεί διόγκωση του στόχου και καθυστέρηση στην παραγωγή νετρονίων. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να παραχθούν ραδιενεργά προϊόντα από την διαδικασία της σχάσης. Στόχος Ουράνιου ελέγχθηκε στον επιταχυντή ISIS στο Rutherford Appleton Laboratory [5] και ο χρόνος ζωής του στόχου ήταν περίπου ένας μήνας, πολύ κατώτερο χρονικό όριο από αυτό που αναμενόταν. Γενικά, υπάρχει σύγκλιση απόψεων στη διεθνή επιστημονική κοινότητα, στη μη χρησιμοποίηση Ακτινίδων ως πυρήνα στόχο.

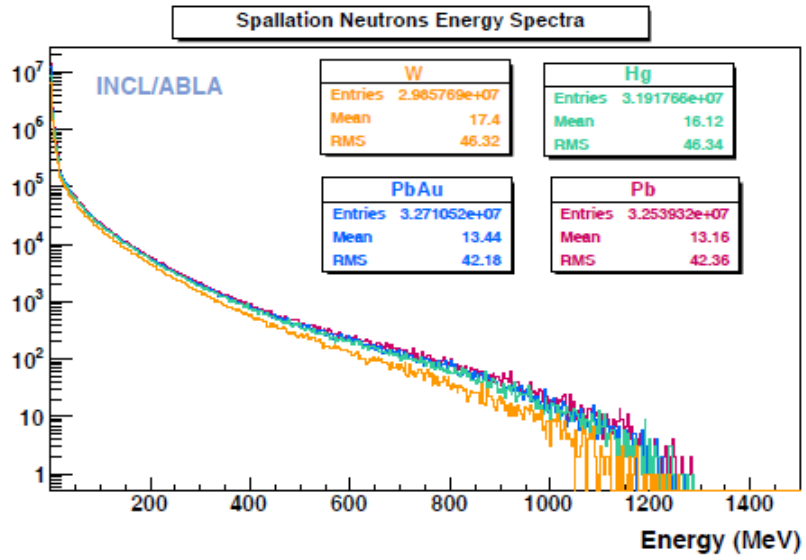
Τέλος υπάρχει και το ενδεχόμενο χρήσης ελαφρύτερων πυρήνων, όπως ο Κασσίτερος ή και ο Χαλκός. Τα ισότοπα αυτά κατά την διαδικασία ακτινοβόλησης θα παράγουν ραδιενεργούς πυρήνες που υπόκεινται διάσπαση-β με αποτέλεσμα να έχουν μικρότερο χρόνο ζωής και έχουν το επιπρόσθετο πλεονέκτημα της μη τοξικότητας. Το μεγάλο μειονέκτημα βέβαια έγκειται στο μικρό μαζικό αριθμό τους και τον αριθμό των παραγόμενων νετρονίων.

#### 4.4.2 Φυσική κατάσταση και γεωμετρία του στόχου κατακερματισμού

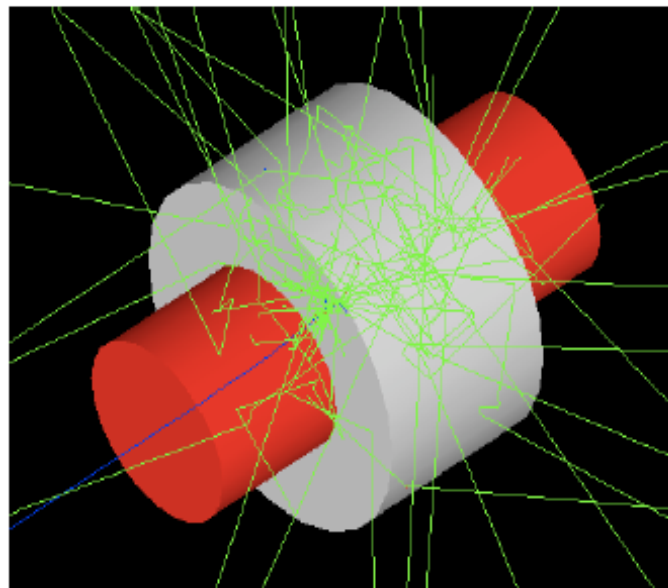
Δύο είναι επιλογές όσον αφορά το είδος του στόχου. Υπάρχει η δυνατότητα να είναι σε στερεά μορφή ή ρευστή. Στο παρελθόν, τα πειράματα που έγιναν για την αντίδραση κατακερματισμού είχαν στόχους σε στερεά μορφή, καθώς χρησιμοποιήθηκαν στόχοι όπως το Ουράνιο. Σε αυτή τη κατηγορία ανήκουν και στόχοι κατασκευασμένοι από Βολφράμιο και Ταντάλιο. Παρά την εμπειρία που υπάρχει σε στόχους τέτοιου είδους, όπως προαναφέρθηκε, η επιλογή για τον σκοπό παραγωγής ενέργειας μάλλον δείχνει να είναι της μορφής των υγρών μετάλλων των λεγομένων HLM (Heavy Liquid Metal) λόγω φυσικών και θερμικών ιδιοτήτων.

Η ενεργειακή συμπεριφορά των νετρονίων που προκύπτουν από την αντίδραση κατακερματισμού είναι παρόμοια, σύμφωνα με τις προσομοιώσεις, μεταξύ των LBE, στερεού Βολφραμίου (W), εύτηκτου κράματος Χρυσού – Μολύβδου (Pb-Au), και Υδραργύρου (Hg) (Σχήμα 4-2).

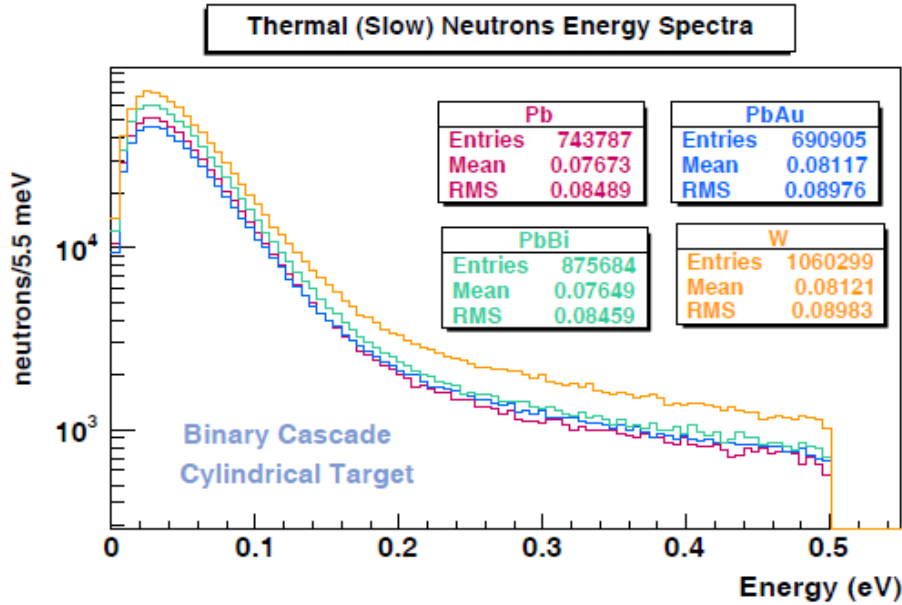
Στην περίπτωση όμως που χρησιμοποιηθεί νερό ως επιβραδυντής με σκοπό την παραγωγή θερμικών νετρονίων, κάτι που αφορά κατά βάση την μεταστοιχείωση των LLFP's, από την αντίδραση κατακερματισμού (Σχήμα 4-4) το στερεό Βολφράμιο υπερτερεί σημαντικά σε σχέση με τα υγρά κράματα μετάλλων LBE και Pb-Au και τον Υδράργυρο, που επίσης βρίσκεται σε υγρή κατάσταση. Αυτή η συμπεριφορά πιθανόν οφείλεται στη διαφορά φάσης μεταξύ των τριών που είναι σε υγρή μορφή και του στερεού W, αλλά και λόγω των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του στόχου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση [7].



Σχήμα 4-2 Ενεργειακή κατανομή των νετρονίων για ενέργεια δέσμης πρωτονίων 1.3GeV και χωρίς τη χρήση επιβραδυντή [7]



Σχήμα 4-3 Προσομοίωση (GEANT4) σύζευξης στόχου Κατακερματισμού (κόκκινος κύλινδρος) με επιβραδυντή [7]



Σχήμα 4-4 Ενεργειακή κατανομή των νετρονίων για ενέργεια δέσμης πρωτονίων 1.3GeV με τη χρήση επιβραδυντή [7]

Το ενδιαφέρον στοιχείο είναι η παρόμοια συμπεριφορά του κράματος Pb-Au με τα υπόλοιπα υλικά, χωρίς το μειονέκτημα που υπάρχει με το LBE λόγω της παραγωγής  $^{210}\text{Po}$  αν και η έρευνα πάνω στις θερμικές και φυσικές ιδιότητες του κράματος αυτού πρέπει να συνεχίσει.

Συνεχίζοντας με το μέγεθος του στόχου, κατά βάση οι προσομοιώσεις αλλά και τα διάφορα πειράματα χρησιμοποιούν κυλινδρική γεωμετρία (Σχήμα 4-3), κυρίως για την ευκολία της προσομοίωσης αλλά και για τη μελέτη της εξάρτησης του πλήθους των παραγόμενων νετρονίων από τη γεωμετρία του στόχου.

Η μαθηματική εξάρτηση του πολλαπλασιασμού (multiplicity) των νετρονίων με το μήκος του στόχου δίνεται μέσω της σχέσης:

$$M_n(x_{max}) = \int_0^{x_{max}} M_n(E_p(x)) N_p(x) n_j dx \quad (\text{Σχ. 4.2})$$

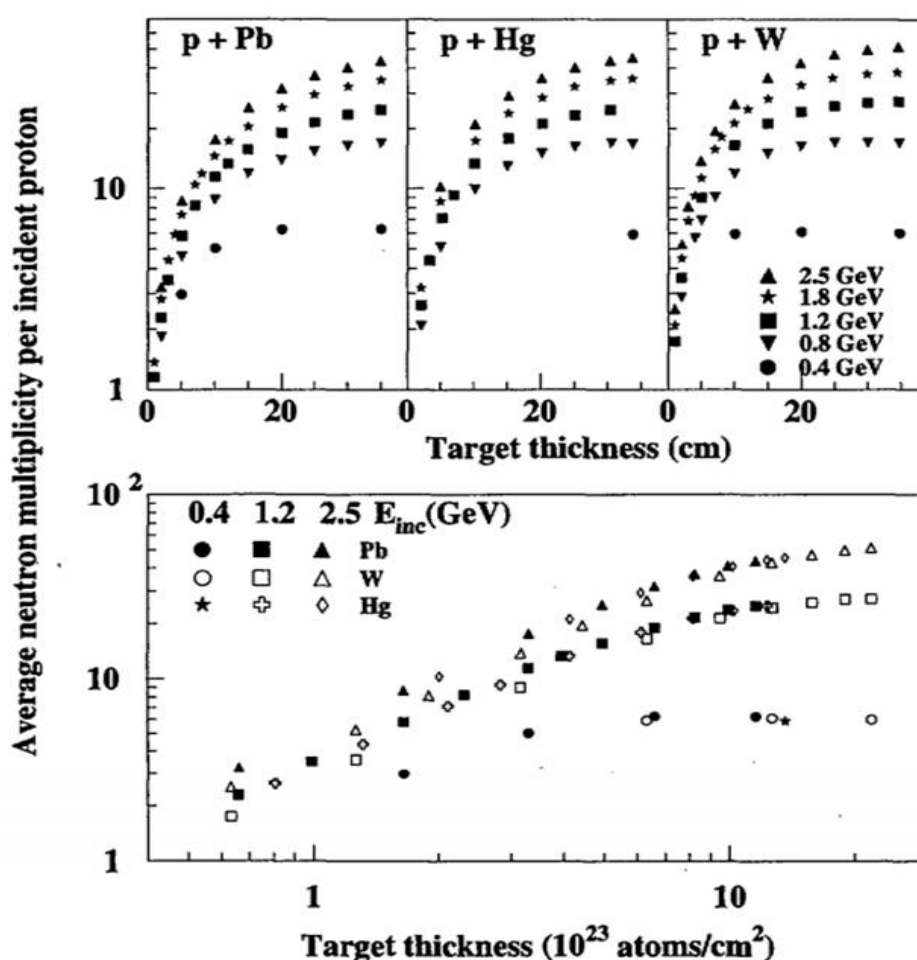
όπου:  $M_n(E_p(x))$  ο πολλαπλασιασμός νετρονίων για λεπτό στόχο όπως υπολογίζεται από την Σχ.2.28,  $N_p(x) = N_o \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right)$  η ένταση της δέσμης στον στόχο,  $\lambda = \frac{1}{n_j \sigma}$  η μέση ελεύθερη διαδρομή των πρωτονίων ή άλλων σωματιδίων,  $n_j$  ο αριθμός των πυρήνων ανά μονάδα όγκου και  $\sigma$  η ενεργός διατομή της αντίδρασης.

Η εξάρτηση των παραγόμενων νετρονίων από το στόχο θρυμματισμού, πέρα από το μαζικό αριθμό του στοιχείου που θα χρησιμοποιηθεί, έχει αποδειχθεί από πειράματα [4] και προσομοιώσεις [5], ότι εμφανίζει κορεσμό στην εκπομπή νετρονίων συναρτήσει των γεωμετρικών διαστάσεων (πάχος, μήκος, διάμετρος) του στόχου κατακερματισμού.

Για μικρές τιμές του πάχους υπάρχει σχεδόν γραμμική εξάρτηση του συντελεστή πολλαπλασιασμού νετρονίων με το πάχος (Σχήμα 4-5). Αυτό δηλώνει τη μεγαλύτερη πιθανότητα αντίδρασης των πρωτονίων της δέσμης με του πυρήνες του στόχου θρυμματισμού, ενώ γίνεται αντιληπτή και η εξάρτηση από την ενέργεια δέσμης. Για χαμηλές ενέργειες δέσμης (0.4 GeV), σημαντικό ρόλο στον παρατηρούμενο κορεσμό των εκπεμπόμενων νετρονίων παίζει η ηλεκτρική άπωση, με αποτέλεσμα τη μείωση της διεισδυτικότητας των πρωτονίων αλλά και της κινητικής ενέργειας τους.

Επιπρόσθετα, τα προϊόντα από την αντίδραση κατακερματισμού έχουν μικρότερη ενέργεια λόγω της προαναφερθείσας μείωσης στην κινητική ενέργεια των πρωτονίων.

Κορεσμός όμως παρατηρείται και για μεγαλύτερες ενέργειες δέσμης, της τάξης των 2 GeV για το μήκος του κυλίνδρου περίπου στα 60 cm. Ο λόγος που παρατηρείται το φαινόμενο αυτό είναι ότι τα περισσότερα πρωτόνια θα εμπλακούν στην αντίδραση κατακερματισμού π.χ. με τους πυρήνες Μόλυβδου, και παίρνοντας υπόψη ότι η ενεργός διατομή είναι σταθερή  $\approx 1.8$  barn, μόνο το 0.3 % της αρχικής έντασης της δέσμης φτάνει ενδεικτικά στα 100 cm. Αυτή η συμπεριφορά ισχύει ακόμη και για τα σχάσιμα ισότοπα όπως το  $^{238}\text{U}$ , όπου ο κορεσμός παρατηρείται για ακόμη μικρότερα μήκη από τα 60 cm, λόγω της μεγαλύτερης ενεργού διατομής απορρόφησης νετρονίων.

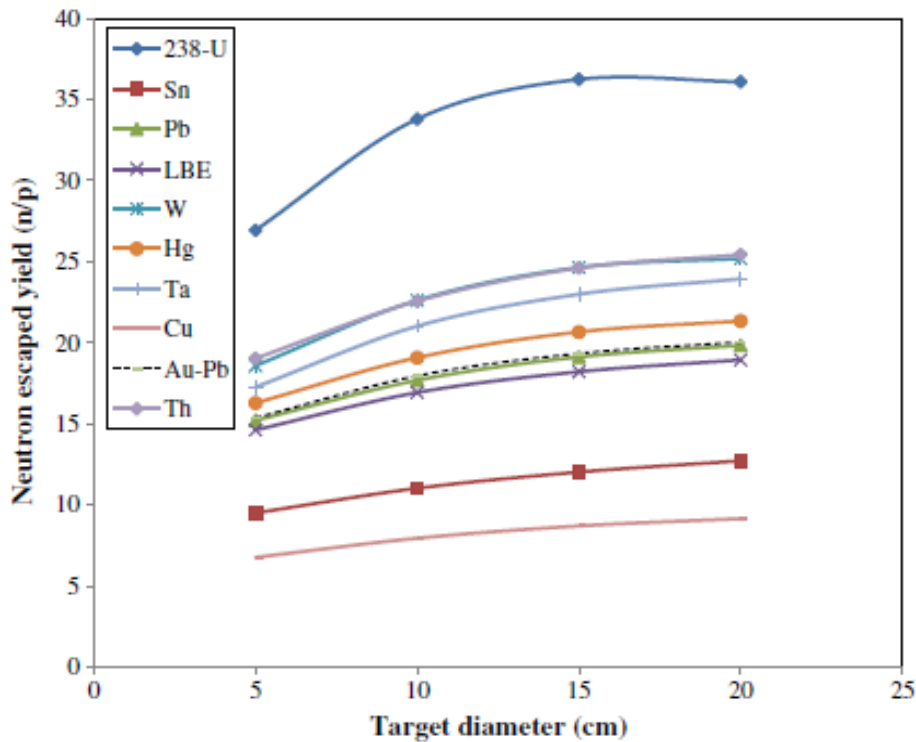


Σχήμα 4-5 Επάνω: πολλαπλασιασμός νετρονίων σε συνάρτηση με το πάχος του στόχου (μονάδα μέτρησης (cm) και την ενέργεια δέσμης για Μόλυβδο, Υδράργυρο και Βολφράμιο. Η διάμετρος του στόχου είναι 15 cm

Κάτω: Τα ίδια αποτελέσματα σε διαφορετική μονάδα μέτρησης (atoms/cm<sup>2</sup>) για το πάχος του στόχου. Η διάμετρος του στόχου είναι 15 cm [4]

Σημαντική είναι και η διάμετρος του κυλινδρικού στόχου στην διαφυγή των νετρονίων. Τα πειράματα δείχνουν ότι η μέγιστη εκπομπή νετρονίων παρατηρείται για διάμετρο 20 cm, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-6. Κορεσμός επέρχεται για διάμετρο 20 cm. Για μεγαλύτερη διάμετρο

παρατηρείται μείωση στα διαφυγόντα από το στόχο νετρόνια, λόγω αύξησης της απορρόφησης τους μέσα στον στόχο θρυμματισμού.



Σχήμα 4-6 Σύγκριση της διαφυγής των νετρονίων για διάφορα στοιχεία με πάχος στόχου 30 cm και ενέργεια δέσμης 1 GeV [5]

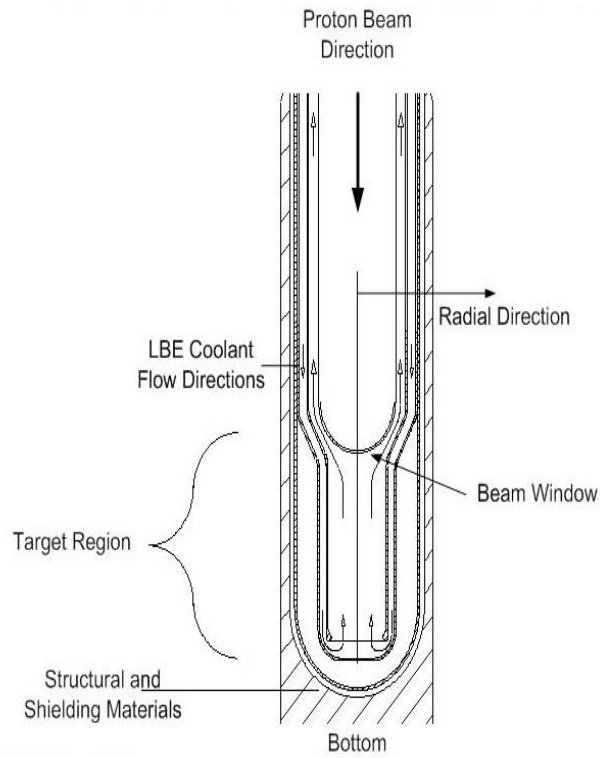
Εν κατακλείδι, η προτιμότερη λύση μέχρι στιγμής φαίνεται να είναι η χρήση υγρών μετάλλων και συγκεκριμένα τα κράματα Μόλυβδου, παρόλα τα προβλήματα διάβρωσης, παραγωγής  $^{210}\text{Po}$  και γενικότερα άλλων προϊόντων από την αντίδραση κατακερματισμού που κυκλοφορούν στο σύστημα. Όσον αφορά τους στερεούς στόχους αν και υπάρχει εμπειρία στη χρήση τους για την μελέτη της αντίδρασης κατακερματισμού, οι φυσικές και θερμικές ιδιότητες τους αποτελούν μειονέκτημα σε σχέση με τα υγρά μέταλλα.

#### 4.5 Η επιλογή ύπαρξης παραθύρου δέσμης (beam window or windowless)

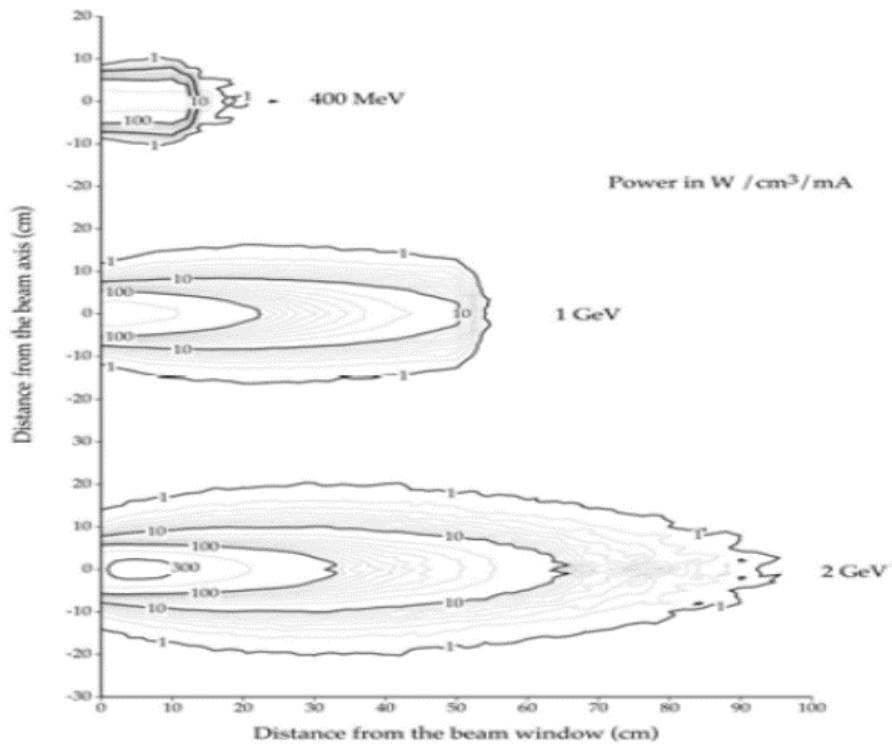
Υπάρχει άλλη μια επιλογή που πρέπει να γίνει και διακρίνει μεταξύ τους τα διάφορα σχέδια των ADS αντιδραστήρων. Το λεγόμενο παράθυρο δέσμης, που δεν είναι τίποτε άλλο από μια κατασκευή η οποία λειτουργεί ως όριο μεταξύ της δέσμης πρωτονίων και του στόχου κατακερματισμού (Σχήμα 4-10). Αφορά κατά βάση την περίπτωση που χρησιμοποιούνται υγρά μέταλλα ως στόχος κατακερματισμού.

Ο λόγος ύπαρξης του παραθύρου είναι να διαχωρίσει τον κενό θάλαμο όπου οδεύει η δέσμη πρωτονίων από τον στόχο κατακερματισμού και επιπλέον να προστατεύσει τον κενό θάλαμο από τη ραδιενέργεια που εκλύεται από τον πυρήνα του πυρηνικού αντιδραστήρα (Σχήμα 4-7) [8].

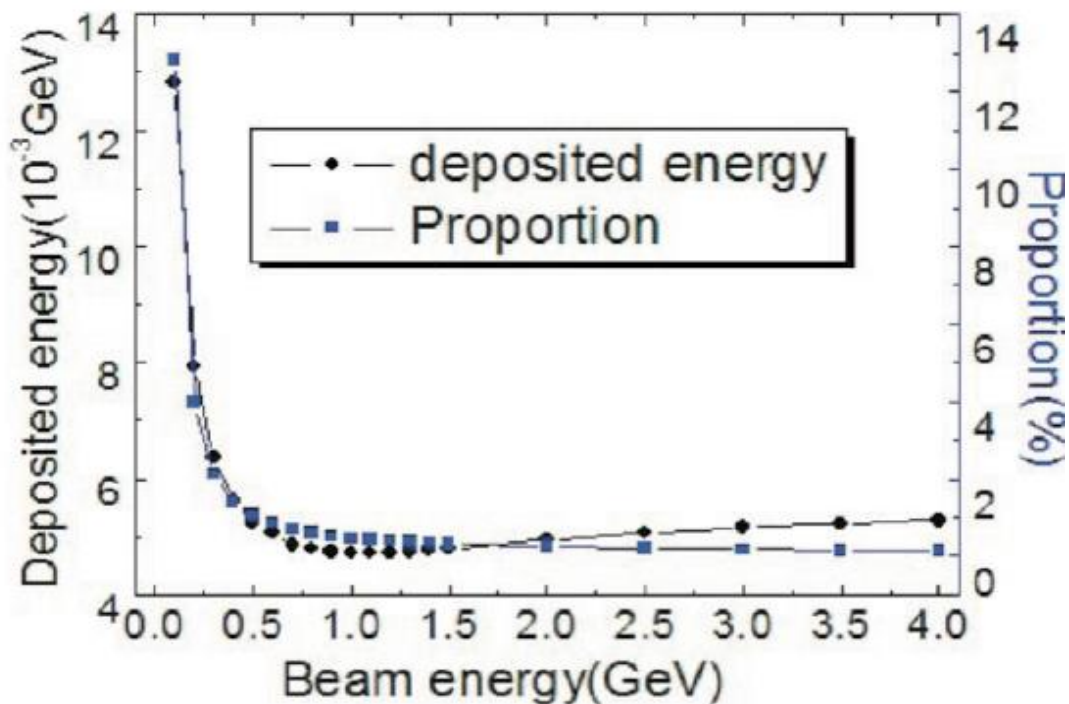
Η κατανομή της ισχύος που αποτίθεται στο παράθυρο εξαρτάται τόσο από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά παραθύρου και κενού θαλάμου, όσο και από την ενέργεια της δέσμης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-8.



Σχήμα 4-7 Δομή του παραθύρου δέσμης



Σχήμα 4-8 Θερμική ισχύς που αναποτίθεται στο παράθυρο (beam window) για διάφορες ενέργειες της δέσμης και στόχο από μόλυβδο, σε συνάρτηση της απόστασης από τον άξονα της δέσμης και της απόστασης από το παράθυρο της δέσμης [11].



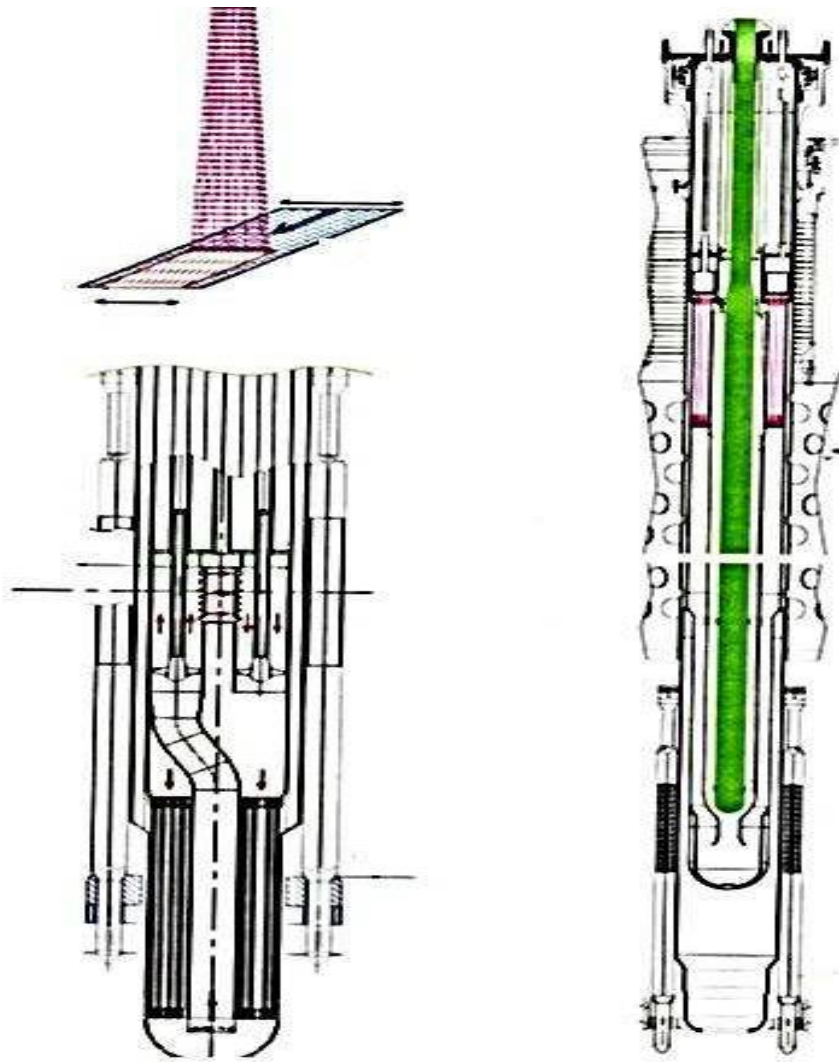
Σχήμα 4-9 Συσχέτιση μεταξύ της εναπόθεση ενέργειας ανά πρωτόνιο και της ενέργειας της δέσμης πρωτονίων (μαύρη καμπύλη) και απόθεση ενέργειας που εμφανίζεται ως κλάσμα της ενέργειας δέσμης πρωτονίων (μπλε καμπύλη) [8].

Η θερμική ισχύς, που εναποτίθεται στο παράθυρο είναι της τάξης των  $10^3$  W. Τα μοντέλα προσομοίωσης έδειξαν ότι όσο μικρότερη είναι η ενέργεια της δέσμης των προσπιπτόντων σωματιδίων τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια που εναποτίθεται στο παράθυρο (Σχήμα 4-9).

Αυτή η συμπεριφορά, αν και εκ πρώτης ανάγνωσης φαίνεται ως παράδοξη, αποδίδεται στο γεγονός ότι ένα σημαντικό ποσοστό πρωτονίων από τη δέσμη χαμηλής ενέργειας δεν θα διαπεράσουν το παράθυρο, με αποτέλεσμα να εναποθέσουν σε αυτό την κινητική τους ενέργεια. Αυξάνοντας την ενέργεια της δέσμης, περίπου στο 1GeV, το ποσοστό των πρωτονίων τα οποία δεν διαπερνούν το παράθυρο είναι σημαντικά μικρότερο, με αποτέλεσμα η ενέργεια που αποτίθεται σε αυτό να μειώνεται. Επιπλέον, έχει διαπιστωθεί θετική συσχέτιση μεταξύ της αποτιθέμενης θερμικής ισχύος και της πυκνότητας του υλικού του παραθύρου. Καθώς το συγκεκριμένο σημείο του αντιδραστήρα θα υποστεί μεγάλες θερμικές καταπονήσεις, έχει προταθεί ο Φερριτικός Μαρτενσιτικός (Φ/Μ) Χάλυβας T91 που χρησιμοποιείται στο SINQ Target Irradiation Program.

Η άλλη προοπτική, δηλαδή να μην υπάρχει παράθυρο (windowless), ενώ δεν έχει τα προβλήματα που αντιμετωπίζονται στην περίπτωση επιλογής ύπαρξης του παραθύρου δέσμης σε σχέση με τις θερμικές καταπονήσεις, χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι τα προϊόντα από την αντίδραση κατακερματισμού ενέχεται να περάσουν στον κενό θάλαμο από όπου εισάγεται η δέσμη των σωματιδίων στο σύστημα. Σε αυτά τα σχέδια για τον ADS αντιδραστήρα, ο στόχος κατακερματισμού καθώς και το ψυκτικό είναι το LBE. Η φυσική κυκλοφορία του ψυκτικού εμποδίζεται εγγενώς από το γεγονός ότι αυξάνεται η θερμοκρασία του LBE στο ανώτερο μέρος του αντιδραστήρα, όπου δέχεται την ακτινοβολία πρωτονίων, σε σχέση με το κατώτερο μέρος, όπου διατηρεί χαμηλότερη θερμοκρασία.





Σχήμα 4-10 Σχηματική απεικόνιση των εναλλακτικών σχεδίων των δυο επιλογών (windowless αριστερά, window δεξιά) για τους ADS αντιδραστήρες.[11]

Το τμήμα του LBE όπου η θερμοκρασία αυξάνεται βρίσκεται στο άνω μέρος, σε σχέση με το υπόλοιπο ψυκτικό, οπότε ο μόνος τρόπος για να επιτευχθεί η κυκλοφορία του είναι μέσω της χρήσης μηχανικών αντλιών. Οι μηχανικές αντλίες ωθούν το ψυκτικό στην περιοχή όπου λαμβάνει χώρα η αντίδραση κατακερματισμού και εν συνεχεία προς τα κάτω, στους εναλλάκτες θερμότητας.

Επιπλέον, η ύπαρξη των μηχανικών αντλιών εξασφαλίζει υψηλές ταχύτητες ροής του ψυκτικού ανάμεσα στα δυο σημεία όπου υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας, με σκοπό τη μείωση της θερμοβαθμίδας, καθώς και την εξασφάλιση ότι τα προϊόντα από την αντίδραση κατακερματισμού δεν θα περάσουν στον κενό θάλαμο. Ένα από τα πιο σημαντικά πειράματα τα οποία θα αναλύσουν αυτή τη λειτουργία είναι ο MYRRHA.

Η παρουσία των μηχανικών αντλιών δεν κρίνεται απαραίτητη στην περίπτωση ύπαρξης του παραθύρου της δέσμης για την ροή του ψυκτικού, καθώς σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται φυσική ροή του ψυκτικού υποβοηθούμενου από έγχυση Αργόν (Ar).

#### 4.6 Δομικά υλικά για ADS αντιδραστήρες

Τα δομικά υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για τους ADS αντιδραστήρες αλλά και γενικότερα για τους μελλοντικούς αντιδραστήρες 4<sup>ης</sup> γενιάς (GEN IV) θα πρέπει να έχουν ορισμένα χαρακτηριστικά

όπως, η αντοχή σε μεγάλες θερμοκρασίες, μεγαλύτερο πλήθος αλλά και ενέργεια των νετρονίων, καθώς, όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, θα πρέπει να ανταπεξέλθουν στις διαβρώσεις που προκαλούνται από το ψυκτικό. Τα σημερινά δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στους αντιδραστήρες δεύτερης γενιάς, οι οποίοι λειτουργούν περίπου στους 350 °C, δεν πληρούν τις προϋποθέσεις για την 4<sup>η</sup> γενιά αντιδραστήρων σχάσης, εξαιτίας των μεγαλύτερων θερμοκρασιών λειτουργίας. Φερριτικός Μαρτενιτικός (Φ/Μ) χάλυβας, Ωστενιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες καθώς και κράματα με βάση το Νικέλιο έχουν προταθεί για τους αντιδραστήρες αυτούς.

Οι Φ/Μ χάλυβες (9-12% Cr) αποτελούν την κυρίαρχη επιλογή, μερικά παραδείγματα είναι οι HT-9, T-91, NF12, γιατί έχουν μεγαλύτερη αντίσταση σε φαινόμενα οξείδωσης και διάβρωσης σε σχέση με τους χάλυβες που έχουν μικρή συγκέντρωση Cr. Οι συγκεκριμένοι χάλυβες έχουν προταθεί επίσης και για τους αντιδραστήρες σύντηξης, λόγω της “μειωμένης ενεργοποίησης” (Reduced-Activation, RA). Το σημαντικό πλεονέκτημα αυτών των χάλυβων είναι ότι σε περίπτωση αλλαγής ή αντικατάστασης τμημάτων του αντιδραστήρα, τα υλικά που απομακρύνονται αντιμετωπίζονται ως κατάλοιπα χαμηλής ενεργότητας, (Low Level Waste - LLW) ή και πολύ χαμηλής ενεργότητας (Very Low Level Waste – VLLW) και είναι πολύ πιο εύκολα διαχειρίσιμα. Βέβαια, δεν έχουν μόνο αυτό το πλεονέκτημα, καθώς επιδεικνύουν καλές μηχανικές ιδιότητες, όπως αντοχή στο φαινόμενο διόγκωσης και σχετικά καλή αντοχή στον ερπυσμό σε χαμηλές θερμοκρασίες. Εντούτοις, ανησυχίες εκφράζονται σχετικά με τον μακροχρόνιο ερπυσμό σε υψηλές θερμοκρασίες, ο οποίος επηρεάζει το όριο θραύσης, καθώς και η ψαθυροποίηση του υλικού λόγω ακτινοβόλησης σε θερμοκρασίες περί τους 400 °C.

Η άλλη λύση είναι οι Ωστενιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες οι οποίοι έχουν καλή αντοχή ερπυσμού σε υψηλές θερμοκρασίες καθώς και σχετικά καλή αντοχή στα φαινόμενα διάβρωσης και οξείδωσης. Δυστυχώς όμως παρουσιάζουν έντονα φαινόμενα διόγκωσης ακόμη και για αλληλεπίδραση με μικρότερο αριθμό νετρονίων καθώς και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, πράγμα το οποίο σημαίνει χαμηλότερη αποδοτικότητα.

Επίσης λύση αποτελούν και τα κράματα Νικελίου, καθώς υπάρχει τεχνογνωσία γύρω από τη χρήση τους, κυρίως σε μηχανές αεριοθούμενων αεροσκαφών, όπου αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες και παρουσιάζουν καλή αντοχή ερπυσμού. Αυτά όμως παρουσιάζουν αστάθεια φάσης κάτω από συνθήκες ακτινοβόλησης με νετρόνια, καθώς και διόγκωση και ευθραυστότητα.

## 4.7 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] Pascal Yvon, «Structural Materials for Generation IV Nuclear Reactors 1st Edition,» *Woodhead Publishing*, 2016
- [2] Per Seltborg, «Source efficiency and high-energy neutronics in accelerator-driven systems,» *Department of Nuclear and Reactor Physics, Royal Institute of Technology*, 2005
- [3] Tao Wan Shigeru Saito, «Flow-Accelerated Corrosion of Type 316L Stainless Steel Caused by Turbulent Lead–Bismuth Eutectic Flow,» *Metals - Open Access Metallurgy Journal*, Αύγουστος, 2018
- [4] L.K. Mansur, T.A Gabriel, J.R. Haines, D.C. Lousteau, «R&D for the spallation neutron source mercury target,» *Journal of Nuclear Materials*, τομ.296, αρ.1-3, 2001
- [5] S. A. H. Fegghi, Z. Gholamzadeh, C. Tenreiro, «Investigation of the optimal material type and dimension for spallation targets using simulation methods,» *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 2014
- [6] A. Krasa, «Spallation Reaction Physics,» 2010.
- [7] Adriana Bungau, Robert Cywinski, Cristian Bungau, «Target Optimization Studies for The European Spallation Source,» *IPAC 10 OC/ACFA*, 2010
- [8] Jiajia Tian, Hongli Wu, Hao, Gongfa Liu, Huanli Luo, Xiangqi Wang, «Temperature and Optimize Design of Beam Window In The Accelerator Driven Sub-Critical System,» *PAC'11 OC/IEEE*, 2011
- [9] K. Linga Murty, Indrajit Charit, «Structural materials for Gen-IV nuclear reactors: Challenges and opportunities,» *Journal of Nuclear Materials*, τομ.383, αρ.1-3, pp.189-195, 2008
- [10] Fosco Bianchi ,Roberta Ferri «Accident analysis of the Windowless Target System,» 2006
- [11] Status of Accelerator Driven Systems Research and Technology Development, IAEA, 2015.
- [12] Σ.Ε. Σιμόπουλος, «Απαγωγή Θερμότητας Από Τον Πυρήνα Πυρηνικών Αντιδραστήρων,» *ΕΜΠ*, 1983
- [13] G.F. Hewitt, C.L. Tien, « Introduction to Nuclear Power, 2<sup>nd</sup> edition, ,» *Taylor & Francis*, 2000

# Κεφάλαιο 5

## 5 Επιλογές καυσίμου για ADS αντιδραστήρες

Υπάρχουν δυο κυρίαρχες επιλογές για τη χρήση των ADS αντιδραστήρων. Η πρώτη επιλογή δεν είναι καθαρά για λόγους παραγωγής ενέργειας αλλά για την μεταστοιχείωση των πυρηνικών κατάλοιπων που προκύπτουν από την λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος. Επιπρόσθετα, μαζί με την καύση των ραδιενεργών κατάλοιπων, ο ADS αντιδραστήρας θα μπορούσε να ενταχθεί στις στρατηγικές μη-διάδοσης των πυρηνικών όπλων, χρησιμοποιώντας ως καύσιμο, Πλουτώνιο. Η δεύτερη προοπτική, είναι η χρησιμοποίηση του Θορίου ως καυσίμου.

### 5.1 Τύποι καυσίμου βασισμένου σε Ακτινίδες

Το καύσιμο που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα υποκρίσιμο αντιδραστήρα αποτελεί πεδίο έρευνας σε σχέση με έναν κρίσιμο αντιδραστήρα, καθώς η χρησιμοποίηση Ουράνιου το οποίο θα βελτιώνει την διαδικασία της μεταστοιχείωσης δεν υπάρχει σε αρκετά σχέδια. Το καύσιμο βασισμένο σε Ακτινίδες πρέπει να έχει υψηλές συγκεντρώσεις σε Αμερίκιο και Κιούριο, από 45% έως 70% [3]. Επίσης θα περιέχει Πλουτώνιο από 30% μέχρι 55% το οποίο θα αποτελείται από 80%- 90% από τα άρτια ισότοπα  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  και  $^{242}\text{Pu}$  και 10%-20% από τα περιττά  $^{239}\text{Pu}$  και  $^{241}\text{Pu}$ . Ο λόγος που γίνεται διαχωρισμός σε περιττά και άρτια ισότοπα είναι το λεγόμενο Nuclear Shell Model, που είναι το μοντέλο το οποίο χρησιμοποιείται για την περιγραφή της δομής του πυρήνα, εστιάζοντας την περιγραφή σε κάθε νουκλεόνιο ξεχωριστά. Το άλλο μοντέλο μελέτης του πυρήνα το οποίο χρησιμοποιείται για την μελέτη του πυρήνα είναι το λεγόμενο Liquid-Drop Model όπου αναλύεται ο πυρήνας ως σύνολο. Με βάση το Nuclear Shell Model, οι πυρήνες που έχουν άρτιο (even-even) αριθμό νετρονίων και πρωτονίων είναι πιο σταθεροί από τους πυρήνες που έχουν περιττό αριθμό (odd-even) νετρονίων είτε πρωτονίων ή ακόμη όταν είναι ο αριθμός και των δύο νουκλεονίων είναι περιττός (odd-odd) [13]. Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο είναι αποτέλεσμα άθροισης διάφορων όρων, όπως για παράδειγμα ο μαζικός αριθμός (Z), αλλά στην αύξηση της ενέργειας σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και το πλήθος των νετρονίων και πρωτονίων και αν αυτό είναι περιττό ή άρτιο. Αυτός ο ορός της ενέργειας σύνδεσης, συμβολίζεται με  $\delta$  και η τιμή του διαφέρει ανάλογα τον πυρήνα:

$$\delta = +\alpha_p A^{-3/4}, \text{ για (άρτιο - άρτιο)} \quad (\Sigma\chi. 5.1)$$

$$\delta = 0, \text{ (περιττό αριθμό A)} \quad (\Sigma\chi. 5.2)$$

$$\delta = -\alpha_p A^{-3/4}, \text{ για (περιττό-περιττό)} \quad (\Sigma\chi. 5.3)$$

όπου  $\alpha_p \approx 34 \text{ MeV}$ .

Αυτός είναι ο λόγος που στη φύση συναντώνται μόνο τέσσερις περιττοί-περιττοί σταθεροί πυρήνες ( $^2\text{H}$   $^6\text{Li}$   $^{10}\text{B}$   $^{14}\text{N}$ ) και 167 άρτιοι-άρτιοι σταθεροί πυρήνες. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο γίνεται εμπλουτισμός του φυσικού ουρανίου του πυρηνικού καυσίμου (99.3%  $^{238}\text{U}$ ) με το ασταθές ισότοπο του Ουράνιου  $^{235}\text{U}$ , από το 0.71% στο 3.2% για τις περιπτώσεις αντιδραστήρων ελαφρού ύδατος.

Αυτό το ασυνήθιστο μίγμα καυσίμου που βασίζεται σε Ακτινίδες, παρουσιάζει εκπομπές ακτινοβολίας  $\gamma$  καθώς και νετρονίων κατά τη διάρκεια της παρασκευής του και μειωμένη αποδοτικότητα. Αυτό οφείλεται κυρίως στις χειρότερες θερμοδυναμικές ιδιότητες του, σε σχέση με

το Ουράνιο, στην αστάθεια του Αμερίκιου καθώς και στην παραγωγή Ηλίου κάτω από συνθήκες ακτινοβολήσης. Υπάρχουν αυτή τη στιγμή δυο εγκαταστάσεις στην Ευρώπη που έχουν προγράμματα σχετικά με την εξεύρεση λύσεων στο τομέα αυτό, τα ATALANTE (L'Atelier Alpha et Laboratoires pour ANalyses, Transuraniens et Études de retraitement) στο Marcoule, της Γαλλίας, στις εγκαταστάσεις της CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), και στο ITU-JRC (the Institute for Transuranium Elements) στην Καρλσρούη της Γερμανίας.

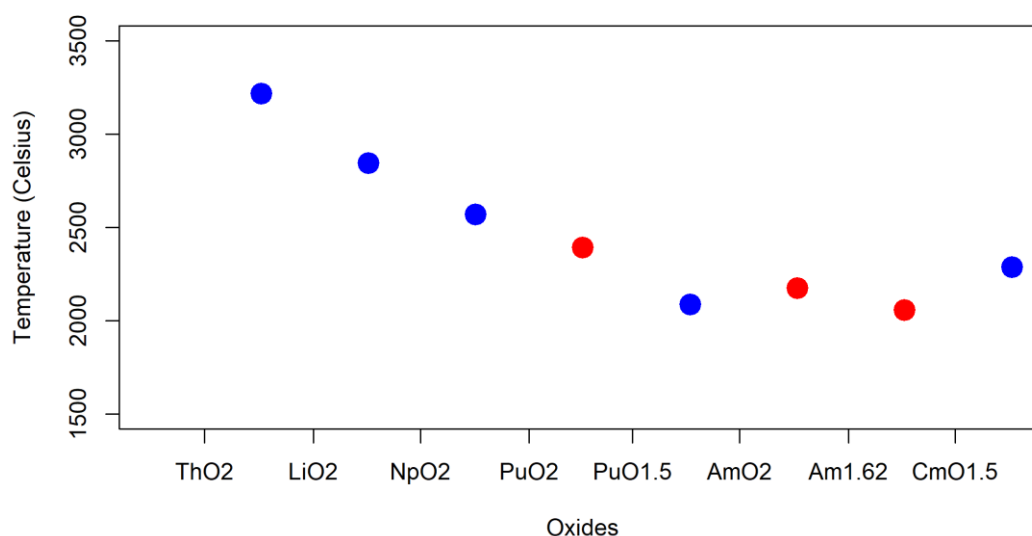
Η επιθυμητή σύνθεση του καυσίμου σε MA (βλ. § 1.5.1) για τα καύσιμα των ADS αντιδραστήρων θα πρέπει να είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ των θερμικών, των μηχανικών καθώς και των χημικών ιδιοτήτων. Οι θερμικές αφορούν τα περιθώρια σε σχέση με την τήξη ή αποσύνθεση/εξάτμιση. Για τις μηχανικές ιδιότητες, το κύριο μέλημα αφορά την αλληλεπίδραση καυσίμου-περιβλήματος (cladding) και την αστοχία αυτού, καθώς και τις εσωτερικές πιέσεις. Οι χημικές ιδιότητες αφορούν κυρίως στη διάβρωση του περιβλήματος. Αυτά αφορούν τις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε περίβλημα και καύσιμο. Οι ιδιότητες των ενώσεων των διάφορων στοιχείων φαίνονται στον παρακάτω Πίνακας 5-1.

Πίνακας 5-1 Κατάλογος των ενώσεων Ακτινίδων και των ιδιοτήτων τους [3]

Ενώσεις Ακτινίδων	Θερμοκρασία τήξης ή αποσύνθεσης (°C)	Πυκνότητα (g·cm <sup>-3</sup> )	Θερμική αγωγιμότητα στους 1273K (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$\Delta G_f^0$ στους 298K (kJ·mol <sup>-1</sup> )
<b>Pu-Am-Cm-40Zr</b>	1327	9.61	22	-
<b>NpO<sub>2</sub></b>	2550	11.14	-	-720
<b>PuO<sub>2</sub>, Pu<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2390, 2360	11.46	3	-730
<b>AmO<sub>2</sub>, Am<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2175, 2205	11.71	-	-620
<b>Cm<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	377	-	-	-
<b>NpN</b>	2830 ( 12atm N <sub>2</sub> )	-	17	-
<b>PuN</b>	2675 (1atm N <sub>2</sub> )	14.24	13	-150
<b>AmN</b>	2570(1atm N <sub>2</sub> )	13	-	-
<b>NpC<sub>1-x</sub></b>	>1400	-	-	-90
<b>PuC<sub>1-x</sub>, Pu<sub>2</sub>C<sub>3</sub></b>	1654, 2050	13.6	11	-70, -100
<b>Am<sub>2</sub>C<sub>3</sub></b>	-	-	-	-70
<b>NpS</b>	-	-	-	-342
<b>PuS</b>	2347	-	-	-360

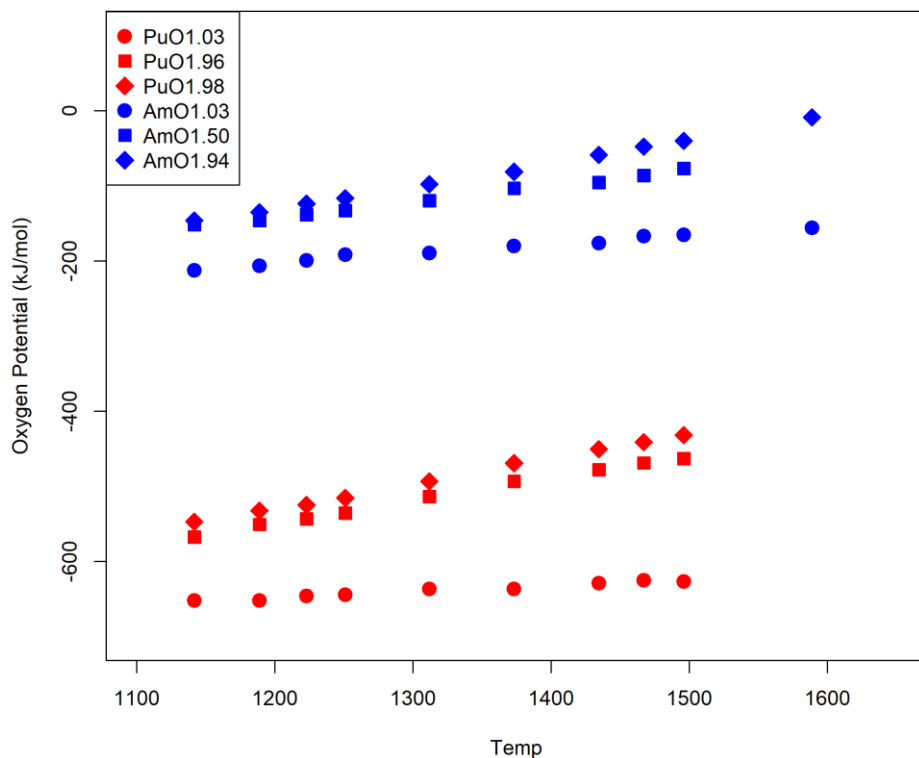
### 5.1.1 Βασικά χαρακτηριστικά των καυσίμων σε μορφή οξειδίων

Το βασικό πλεονέκτημα που έχουν οι ενώσεις των Ακτινίδων με το οξυγόνο δεν έχει να κάνει με τις ιδιότητες τους αλλά κυρίως με την εμπειρία που έχει η πυρηνική βιομηχανία σε σχέση με τη χρήση των MOX και UOX καυσίμων (βλ. § 1.5). Γενικότερα, τα οξείδια των Ακτινίδων έχουν χειρότερες θερμικές ιδιότητες από τα MOX και UOX με σημείο τήξης που μειώνεται από τη θερμοκρασία των 2900 °C περίπου για το UO<sub>2</sub> στη θερμοκρασία των 2300 °C για το στο Cm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-1.



Σχήμα 5-1 Θερμοκρασία τήξης για διάφορα οξείδια [3]

Επίσης σημαντικό είναι το χημικό δυναμικό του Οξυγόνου του καυσίμου, το οποίο αναφέρεται και ως Oxygen Potential και εκφράζει τη μεταβολή της ενέργειας Gibbs δηλαδή την ενέργεια σχηματισμού κάτω από σταθερές συνθήκες (standard-state free energies of formation). Το Oxygen Potential είναι μία σημαντική ιδιότητα για το πυρηνικό καύσιμο που είναι σε μορφή οξειδίου και καθορίζει την θερμοδυναμική συμπεριφορά του καυσίμου κατά την δημιουργία του καθώς και κάτω από ακτινοβόληση. Η μονάδα μέτρησης είναι kJ/mol και είναι επιθυμητό να είναι όσο δυνατόν χαμηλότερη η τιμή του. Το πυρηνικό καύσιμο βασισμένο σε MA παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τα οξείδια π.χ. του Πλουτωνίου (Σχήμα 5-2) γεγονός που οδηγεί σε σοβαρά φαινόμενα διάβρωσης του περιβλήματος, κυρίως για μεγάλα ποσοστά καύσης (Burnup) του πυρηνικού καυσίμου, αλλά και αστάθεια κυρίως για το ισότοπο του Αμερίκιου, <sup>241</sup>Am, το οποίο μεταστοιχειώνεται σε <sup>242</sup>Cm, το οποίο κατά διάσπασή του οδηγεί στην παραγωγή Ηλίου, με άμεσο αποτέλεσμα τη διόγκωση του καυσίμου [3].



Σχήμα 5-2 Σχέση μεταξύ του Oxygen Potential με τη θερμοκρασία. Με μπλε είναι τα οξείδια του Αμερίκιου και κόκκινο τα οξείδια του Πλουτωνίου [3]

Πάντως, είναι δυνατό να περιοριστούν τα συγκεκριμένα προβλήματα αν έχει προηγηθεί η ανάμιξη με ένα αδρανές μέταλλο (inert matrix). Επίσης, πλεονέκτημα σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες καυσίμων που θα παρουσιαστούν παρακάτω είναι η σχετική ευκολία κατασκευής τους καθώς και ο χειρισμός τους λόγω της υψηλής χημικής τους σταθερότητας [3].

### 5.1.2 Βασικά χαρακτηριστικά των καυσίμων σε μορφή μεταλλικών κραμάτων

Ιστορικά, η μορφή πυρηνικού καυσίμου που χρησιμοποιείται από το 1946 κυρίως στους FBRs (βλ. § 1.5) είναι τα κράματα Ουράνιου-Ζιρκονίου, Ουράνιου-Αλουμίνιου, Ουράνιου-Πυριτίου καθώς και Ουράνιου-Μολυβδαίνιου. Πέραν των παραδοσιακών κραμάτων υπάρχουν σκέψεις για κατασκευή μεταλλικού καυσίμου με χρήση MA. Γενικά, η κατασκευή τέτοιων καυσίμων αποτελεί ένα σύνθετο μεταλλουργικό εγχείρημα με πολλές μεταβολές φάσης. Τα κύρια πλεονεκτήματά τους, σε σχέση με οξείδια που αναφέρθηκαν στην § 5.1.1, είναι η εξαιρετική θερμική τους αγωγιμότητα καθώς και οι μηχανικές τους ιδιότητες, αν και πρέπει να σημειωθεί ότι οι τελευταίες ιδιότητες είναι σαφώς μειωμένες σε σχέση με τα κράματα με βάση το Ουράνιο. Η πυκνότητά τους είναι υψηλή αλλά το σημείο τήξης είναι αρκετά χαμηλό με αποτέλεσμα να έχουμε χημικές αντιδράσεις με το περιβάλλον του καυσίμου που οδηγούν σε διαβρώσεις του. Για να επιλυθεί μερικώς αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιείται το Ζιρκόνιο σε ποσοστό 30% με 40% με σκοπό να ανέβει το σημείο τήξης.

Είναι γεγονός ότι τα μεταλλικά καύσιμα εμφανίζουν φαινόμενα σημαντικής διόγκωσης [5]. Η διόγκωση, η οποία οφείλεται στα αέρια που δημιουργούνται λόγω σχάσης τα οποία είναι κυρίως τα αδρανή αέρια όπως το Ξένο (Xe) και το Κρυπτό (Kr), αντισταθμίζεται από το σχεδιασμό του καυσίμου, το οποίο επιτρέπει ένα συγκεκριμένο ποσοστό ελεύθερης διόγκωσης με τη χρήση Νατρίου στο διάκενο μεταξύ καυσίμου και περιβλήματος. Το κενό αυτό είναι κατασκευασμένο

ώστε να επιτρέπει 30% αύξηση του όγκου του καυσίμου το οποίο καλύπτεται μόλις για 2% καύσης του μεταλλικού καυσίμου. Πάνω από αυτό το όριο, το μεταλλικό καύσιμο αποκτά πορώδη επιφάνεια με τους πόρους να είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Το πορώδες επιτρέπει τη διαφυγή των αερίων σχάσης με αποτέλεσμα να μην ασκεί πιέσεις στο περίβλημα στο εσωτερικό της ράβδου καυσίμου. Τα μεταλλικά καύσιμα είναι εγγενώς σχεδιασμένα να λειτουργούν με αυτό τον τρόπο και αυτό αποτελεί πλεονέκτημα στην περίπτωση αντιμετώπισης του παραγόμενου Ηλίου. Για την αποφυγή της υπερπίεσης εντός του περιβλήματος του πυρηνικού καυσίμου λόγω της παραγωγής Ηλίου, ο σχεδιασμός προβλέπει εσωτερικό κενό θάλαμο (plenum) επαρκούς όγκου.

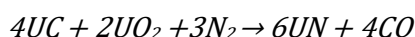
### 5.1.3 Βασικά χαρακτηριστικά των καυσίμων σε μορφή Νιτριδίων και Καρβιδίων

Το κύριο πλεονέκτημα των ενώσεων αυτών είναι ότι η θερμική τους αγωγιμότητα είναι 4-5 φορές μεγαλύτερη από τα αντίστοιχα οξείδια, ενώ το σημείο τήξης είναι παραπλήσιο. Αυτό επιτρέπει τη λειτουργία των αντιδραστήρων σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Επίσης, κυρίως για τις αζωτούχες ενώσεις παρατηρείται καλή αναμειξιμότητα, γεγονός που επιτρέπει την ύπαρξη περισσότερων ενώσεων διάφορων Ακτινιδίων. Πλεονέκτημα επίσης είναι και το γεγονός ότι δεν παρατηρούνται φαινόμενα διάβρωσης του περιβλήματος του καυσίμου, όπως στην περίπτωση των οξειδίων. Μεγάλο πλεονέκτημα επίσης αποτελεί και η χημική συμβατότητα τους με τα υγρά μέταλλα που χρησιμοποιούνται ως ψυκτικά (Pb, LBE, NA).

Τα πυρηνικά καύσιμα σε μορφή Νιτριδίων, κυρίως το Νιτρικό Ουράνιο (UN), έχουν προταθεί να αποτελέσουν το μελλοντικό καύσιμο των πυρηνικών αντιδραστήρων σχάσης. Συγκεκριμένα για το Ουράνιο η κυρίαρχη μέθοδος για την κατασκευή του UN είναι μέσω της μεθόδου της Ανθρακοθερμικής Αναγωγής (Carbothermic Reduction) που συντελείται με βάση τις παρακάτω αντιδράσεις :



Η οποία πραγματοποιείται σε περιβάλλον Αργόν και θερμοκρασία > 1450 °C για 10 με 20 ώρες. Στη συνέχεια ακολουθεί η αντίδραση:



Για τις Ακτινίδες η μέθοδος παρασκευής του συγκεκριμένου πυρηνικού καυσίμου έχει βάση την διαδικασία που προτάθηκε την δεκαετία του 1970 και είναι βασισμένη στην αντίδραση Ιωδιούχου Πλουτωνίου (PuI<sub>3</sub>) και του Ιωδιούχου Ουράνιου (UI<sub>4</sub>) με μεταλλικό Νάτριο σε διάλυμα Αμμωνίας.

Πρέπει να αναφερθεί ότι τα Νιτρίδια παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι είναι συμβατά με την μέθοδο PUREX (Plutonium Uranium Redox Extraction), της μεθόδου που χρησιμοποιείται ευρέως στην πυρηνική βιομηχανία για την εξαγωγή του Ουρανίου και του Πλουτωνίου από το χρησιμοποιημένο καύσιμο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι τα συγκεκριμένα Νιτρίδια παρουσιάζουν υψηλή διαλυτότητα σε Νιτρικό οξύ το οποίο χρησιμοποιείται στο πρώτο βήμα αυτής της μεθόδου. Πρέπει να τονιστεί ότι, επειδή η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για την εξαγωγή ισότοπου του Πλουτωνίου <sup>239</sup>Pu, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή πυρηνικών όπλων, παρακολουθείται στενά από διεθνείς οργανισμούς. Ένα μειονέκτημα στη χρήση των Νιτριδίων είναι η ανάγκη εμπλουτισμού με το ισότοπο <sup>15</sup>N, έτσι ώστε να περιοριστεί η παραγωγή του επικίνδυνου ισότοπου <sup>14</sup>C μέσω της αντίδρασης <sup>14</sup>N(n,p)<sup>14</sup>C.

Ένα ακόμα πρόβλημα αποτελεί η αντιδραστικότητα των Νιτριδίων καυσίμων γενικά με το νερό και το Οξυγόνο, ακόμη και σε θερμοκρασία δωματίου [3]. Η συμπεριφορά αυτή εντείνεται με τον ατομικό αριθμό του ισότοπου. Λύση που μπορεί να περιορίσει αυτά τα προβλήματα είναι η ανάμειξη με έναν παράγοντα αδράνειας, όπως το Αζωτούχο Ζιρκόνιο (ZrN) το οποίο παρουσιάζει



εξαιρετικές φυσικές και θερμικές ιδιότητες, σχηματίζει στερεά διαλύματα για το σύνολο των Ακτινίδων και έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αντιδραστικότητας των Νιτριδίων.

Ακόμη, η θερμική αγωγιμότητα των Νιτριδίων εξαρτάται, όπως και στην περίπτωση της αντιδραστικότητας, από τον ατομικό αριθμό των Ακτινίδων, [3], [5], και παρουσιάζει σημαντική μείωση καθώς αυτός αυξάνεται.

Τα πυρηνικά καύσιμα σε μορφή Καρβιδίων ( $UC$ ,  $UC_2$ ,  $U_2C_3$ ) για το Ουράνιο και ( $PuC$  και  $Pu_2C_3$ ) για το Πλουτώνιο έχουν επίσης προταθεί και για τις Ακτινίδες. Ο παραπάνω τύπος καυσίμου έχει προταθεί κυρίως για ένα συγκεκριμένο τύπο αντιδραστήρα σχάσης 4<sup>ης</sup> Γενιάς, το λεγόμενο PBR (Pebble-Bed Reactor). Στα μειονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου καυσίμου είναι το γεγονός ότι παρατηρείται μεγαλύτερη διόγκωση σε σχέση με τα οξειδία, η οποία οδηγεί με τη σειρά της σε αλληλεπίδραση του καυσίμου με το περίβλημα σε συντομότερο χρονικό διάστημα, σε σύγκριση με πυρηνικό καύσιμο βασισμένο σε τύπο οξειδίου. Αυτό οδηγεί σχεδιαστικά σε ράβδο πυρηνικού καυσίμου η οποία παρουσιάζει μεγαλύτερο κενό μεταξύ του καυσίμου του περιβλήματος, σε σχέση με τα καύσιμα που βασίζονται σε οξειδία. Συγχρόνως, η πυκνότητα του καυσίμου θα πρέπει να είναι μικρότερη.

Μεταξύ των Νιτριδίων των Καρβιδίων, τα Νιτρίδια είναι τα επικρατέστερα καύσιμα, παρόλο που παρουσιάζουν παρόμοιες ιδιότητες, καθώς η κατασκευή τους είναι αρκετά ευκολότερη σε σύγκριση με τις άλλες ενώσεις.

## 5.2 Η εναλλακτική της χρήσης του Θορίου ως πυρηνικού καυσίμου

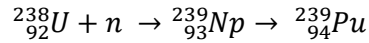
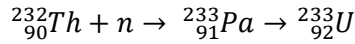
Από τα πρώτα βήματα της πυρηνικής ενέργειας, ο κύκλος του Θορίου παρουσίαζε μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς η ποσότητα Θορίου στο φλοιό της Γης είναι περίπου τέσσερις φορές μεγαλύτερη, σε σύγκριση με το Ουράνιο και κατά συνέπεια υπάρχει δυνατότητα άντλησης μεγαλύτερων ποσών ενέργειας σε σχέση με το Ουράνιο (Πίνακας 5-2) και βέβαια πολύ μεγαλύτερα από τα ορυκτά καύσιμα. Οι ADS αντιδραστήρες μπορούν να δείξουν το μέλλον καθώς υπάρχει η δυνατότητα χρήσης του κύκλου Θορίου, με σκοπό την παραγωγή ενέργειας όπως αναδείχθηκε από την εργασία του C.Rubbia [1],[2] και της ομάδας του στο CERN.

Πίνακας 5-2 Παγκόσμια αποθέματα ενέργειας σε ZJ ( $=10^{21}$ ), όπου ΘΝ τα αποθέματα σε θαλασσινό νερό [4].

Καύσιμο	Ετήσια κατανάλωση (1999) (ZJ)	Εκτιμώμενα αποθέματα(ZJ)	Καταναλωμένα μέχρι το 1999 (ZJ)
Πετρέλαιο	0.14	32.42	5.14
Φυσικό αέριο	0.08	49.79	2.38
Άνθρακας	0.09	199.67	5.99
Ουράνιο	0.04	5.41(2000 ΘΝ)	
Θόριο	-	1300000	-

### 5.2.1 Ιστορική αναδρομή

Το  $^{232}\text{Th}$  όπως και το  $^{238}\text{U}$  έχουν άρτιο αριθμό νετρονίων και πρωτονίων, γεγονός που τους καθιστά σταθερούς πυρήνες και άρα οι συγκεκριμένοι πυρήνες δεν μπορούν να υποστηρίξουν αλυσιδωτές αντιδράσεις. Τα συγκεκριμένα ισότοπα θεωρούνται μη σχάσιμα (non fissile) αλλά σε αντιδράσεις απορρόφησης νετρονίων παράγονται  $^{233}\text{U}$  και  $^{239}\text{Pu}$  αντίστοιχα:



οι πυρήνες  ${}^{233}\text{U}$  και  ${}^{239}\text{Pu}$  είναι σχάσιμοι με :



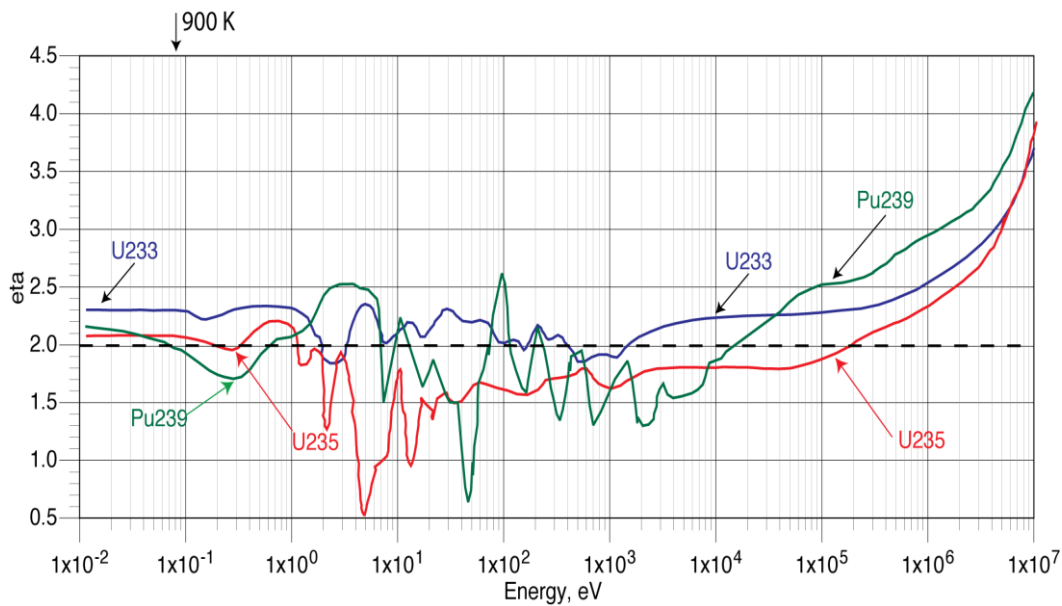
Γεγονός που καθιστά τους παραπάνω πυρήνες γόνιμους (fertile) με σκοπό την παραγωγή σχάσιμων πυρήνων.

Αυτοί είναι οι λεγόμενοι κύκλοι Θορίου και Ουρανίου. Οι δυο αυτοί κύκλοι αποτέλεσαν αντικείμενο έρευνας κατά την διάρκεια τις δεκαετίες του 60 και 70 στις Η.Π.Α και αλλού. Αυτοί οι δυο κύκλοι μοιάζουν να προσφέρουν απεριόριστα ποσά ενέργειας χωρίς την ανάγκη εμπλουτισμού του καυσίμου και επιπλέον μπορούν να διατηρήσουν την αλυσιδωτή αντίδραση, καθώς κατά τη διάρκεια της σχάσης παράγονται περισσότερα από 2 νετρόνια. Αυτό που έγινε αμέσως σαφές ήταν πως πρέπει να δημιουργηθούν νέοι τύποι αντιδραστήρα ώστε να μπορούν να χρησιμοποιήσουν τους παραπάνω κύκλους, αν και στην περίπτωση του Θορίου μπορούσαν και οι Αντιδραστήρες Θερμικών Νετρονίων (Thermal Reactors) να ανταπεξέλθουν στη χρήση του συγκεκριμένου κύκλου έστω και θεωρητικά [4] (Σχήμα 5-3). Η παράμετρος ( $\eta$ )<sup>11</sup> αφορά τα παραγόμενα νετρόνια ανά σχάση. Στα θερμικά νετρόνια αυτό που παρατηρείται είναι ότι κατά τη σχάση του  ${}^{233}\text{U}$ , παράγονται 2.3 περίπου νετρόνια, αριθμός συγκρίσιμος με αυτών των παραγόμενων από το  ${}^{235}\text{U}$ , αλλά και με το ισότοπο του Πλουτωνίου ( ${}^{239}\text{Pu}$ ).

Από το Σχήμα 5-3 διακρίνεται και αυτό που ειπώθηκε στην ενότητα 1.5, δηλαδή η επιλογή καυσίμου τύπου MOX καθώς ο αριθμός παραγόμενων νετρονίων από το  ${}^{239}\text{Pu}$  είναι μεγαλύτερος από το  ${}^{235}\text{U}$  για θερμικά νετρόνια, καθώς και για ενδιάμεσες ενέργειες (περιοχή Resonance). Αυτή η συμπεριφορά του συγκεκριμένου ισότοπου οδηγεί στη χρήση του ακόμη και σε αντιδραστήρες που χρησιμοποιούν το Θόριο ως καύσιμο, οι οποίοι, ανεξάρτητα από το είδος τους (κρίσιμοι, υποκρίσιμοι) αναμένεται και αυτοί να χρησιμοποιήσουν καύσιμο τύπου MOX. Στην περίπτωση του Θορίου δεν υπάρχει το αντίστοιχο ισότοπο, όπως το  ${}^{235}\text{U}$  στην περίπτωση της χρήση του Ουρανίου, οπότε κρίνεται απαραίτητη η χρησιμοποίηση του καυσίμου τύπου MOX, όπου θα χρησιμοποιηθεί οξείδιο του Πλουτωνίου, καθώς το Θόριο μεταστοιχειώνεται μέσω απορρόφησης νετρονίου σε ισότοπο του Πρωτακτινίου ( ${}^{233}\text{Pa}$ ) το οποίο έχει χρόνο ημιζωής 26,7 μέρες, με αποτέλεσμα την πτώση στη τιμή της σταθεράς πολλαπλασιασμού  $k$ . Στην ενότητα 5.2.2 θα αναφέρουμε περισσότερα πάνω στην επίδραση που έχει ένα καύσιμο το οποίο αποτελείται από οξείδια Θορίου και Πλουτωνίου στην σταθερά πολλαπλασιασμού  $k$ , για αρκετούς κύκλους καυσίμου.

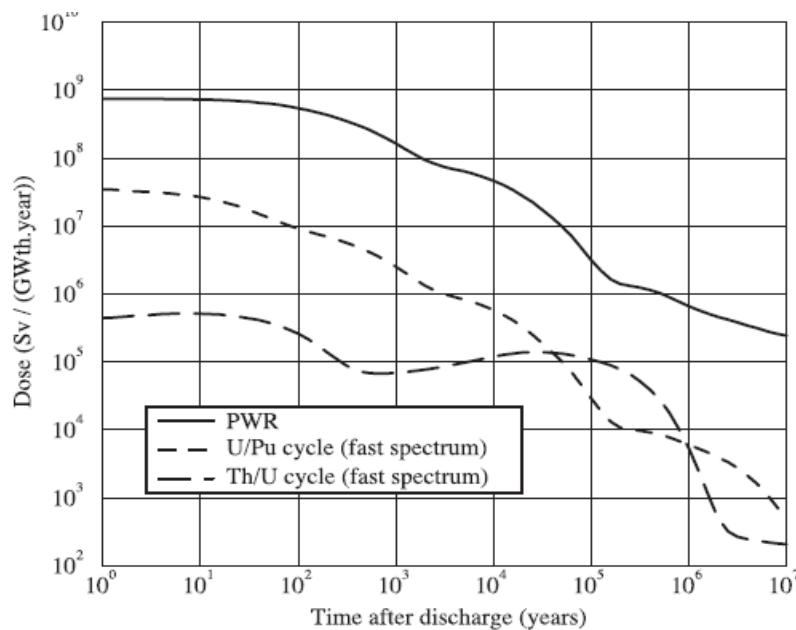
Επιπλέον, το Σχήμα 5-3 αναδεικνύει τη μετέπειτα φάση ανάπτυξης της πυρηνικής βιομηχανίας και το ενδιαφέρον για τους FBRs, καθώς, όπως παρατηρείται, ο αριθμός των παραγόμενων νετρονίων για αντιδραστήρες που κάνουν χρήση ταχέων νετρονίων είναι μεγαλύτερος.

<sup>11</sup> Στο σχήμα 5-3 παρουσιάζεται ως “eta”



Σχήμα 5-3 Παραγωγή νετρονίων ανά νετρόνιο ( $\eta$ ) κατά την διάρκεια της σχάσης για διάφορες ενέργειες των νετρονίων [5]

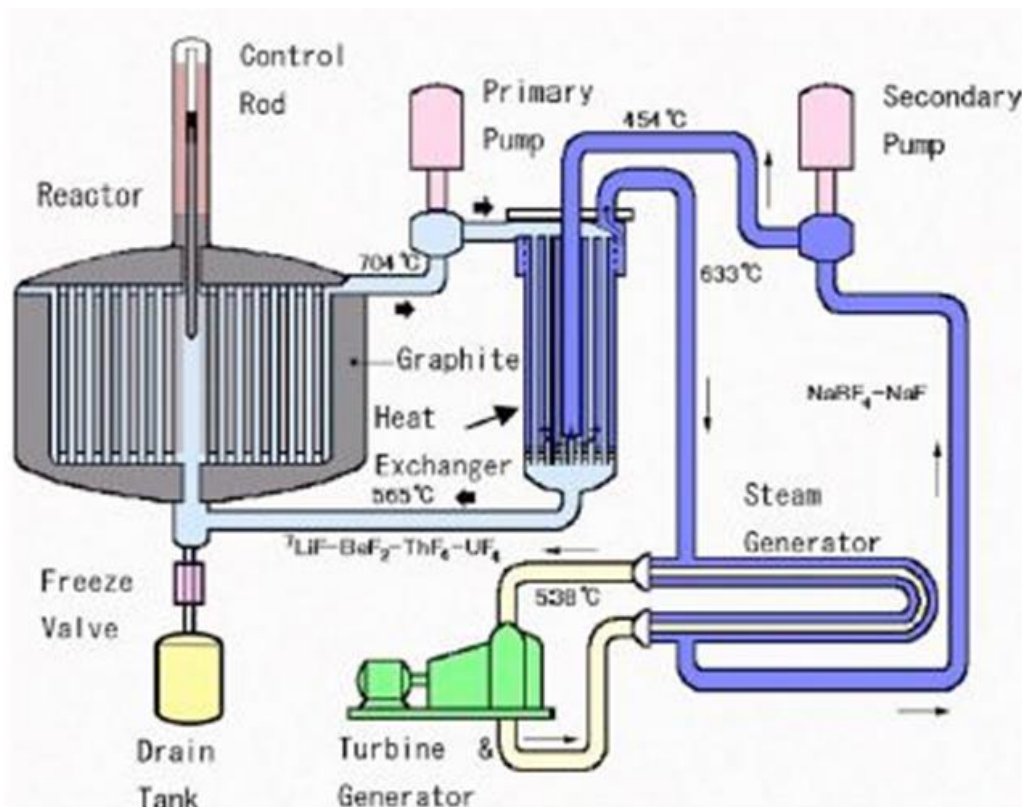
Η αλήθεια είναι ότι ιστορικά η μερίδα του λέοντος σε ότι αφορά την χρηματοδότηση, έχει κατευθυνθεί στην ανάπτυξη των FBRs, σε σχέση με τα σχέδια που είχαν προταθεί για την χρήση του Θορίου ως καύσιμο. Ο λόγος πιθανότατα ήταν το ψυχροπολεμικό κλίμα της εποχής που οδήγησε με φρενήρη ρυθμό την κούρσα εξοπλισμού όσον αφορά τα πυρηνικά όπλα κάτι που προσφερόταν από τον κύκλο του Ουράνιου σε σχέση με τον κύκλο του Θορίου, λόγω της παραγωγής  $^{239}\text{Pu}$ . Το  $^{233}\text{U}$  είχε επίσης προταθεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή πυρηνικών όπλων, και η πρώτη δοκιμή του έγινε στις 15 Απριλίου το 1955, όπου χρησιμοποιήθηκε μαζί με Πλουτώνιο στη λεγομένη σειρά δοκιμών “Teapot”. Αυτό όμως που έγινε σαφές είναι ότι το  $^{233}\text{U}$  δεν είναι κατάλληλο υλικό, λόγω της πολύ υψηλής  $\gamma$ -ακτινοβολίας που εκπέμπει, γεγονός που καθιστά πολύ δύσκολη τη διαχείρισή του για την κατασκευή όπλων, ιδιαίτερα αν συγκριθεί με το Πλουτώνιο το οποίο δεν εκπέμπει καθόλου  $\gamma$ -ακτινοβολία. Πάντως, και οι δυο κύκλοι, όπως έχει αναφερθεί ήδη για τους FBRs, αντιμετωπίζουν το ζήτημα των ραδιενεργών καταλοίπων (Σχήμα 5-4).



Σχήμα 5-4 Η εκλυόμενη ραδιενέργεια των καταλοίπων (Ακτινίδων) για κύκλους καυσίμου σε PWR, U/Pu, Th/U

Το Σχήμα 5-4 επιβεβαιώνει αυτό που αναδείχθηκε στο πρώτο Κεφάλαιο, δηλαδή την αποτελεσματικότερη καύση των ΜΑ με τη χρήση ταχέων νετρονίων. Κρίσιμο για τη διαχείριση των ραδιενεργών κατάλοιπων κρίνεται το χρονικό διάστημα μεταξύ των πρώτων 500 και 10000 χρόνων [6], καθώς εκεί βρίσκεται η μεγαλύτερη πιθανότητα αστοχίας των αποθηκευτικών χώρων όπου φυλάσσονται τα ραδιενεργά κατάλοιπα. Η ραδιενέργεια για αυτό το χρονικό διάστημα οφείλεται κατά κύριο λόγο στις ΜΑ, αλλά και στο παραγόμενο Πλουτώνιο. Ο κύκλος του Θορίου προσφέρει το πλεονέκτημα της μικρότερης παραγωγής ΜΑ, καθώς και Πλουτωνίου. Ειδικά στην περίπτωση της μειωμένης παραγωγής Πλουτωνίου, αυτό φέρει και το επιπρόσθετο πλεονέκτημα της μη διάδοσης των πυρηνικών οπλών.

Υπάρχει περιορισμένη εμπειρία σε αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων με χρήση Θορίου από την δεκαετία του 60. Ενδεικτικά, δύο από αυτά τα σχέδια ήταν ο Radkowsky Reactor αλλά και ο CANDU με παραπλήσιο σχέδιο [4]. Σε αυτά υπήρχε μικρή ποσότητα Ουράνιου με επίπεδο εμπλουτισμού περί το 20% σε  $^{235}\text{U}$ , ενώ το Θόριο χρησιμοποιείτο ως blanket, διαχωρισμένο από το  $^{235}\text{U}$ . Το  $^{235}\text{U}$  ουσιαστικά πρόσφερε τα αρχικά νετρόνια ώστε να ξεκινήσει ο Κύκλος Th/U. Κατά τη συνέχεια των αντιδράσεων και την «καύση» του καυσίμου, το ποσοστό ενέργειας το οποίο αποδίδεται στο Θόριο αντιστοιχεί περίπου στο 30% με 50%.

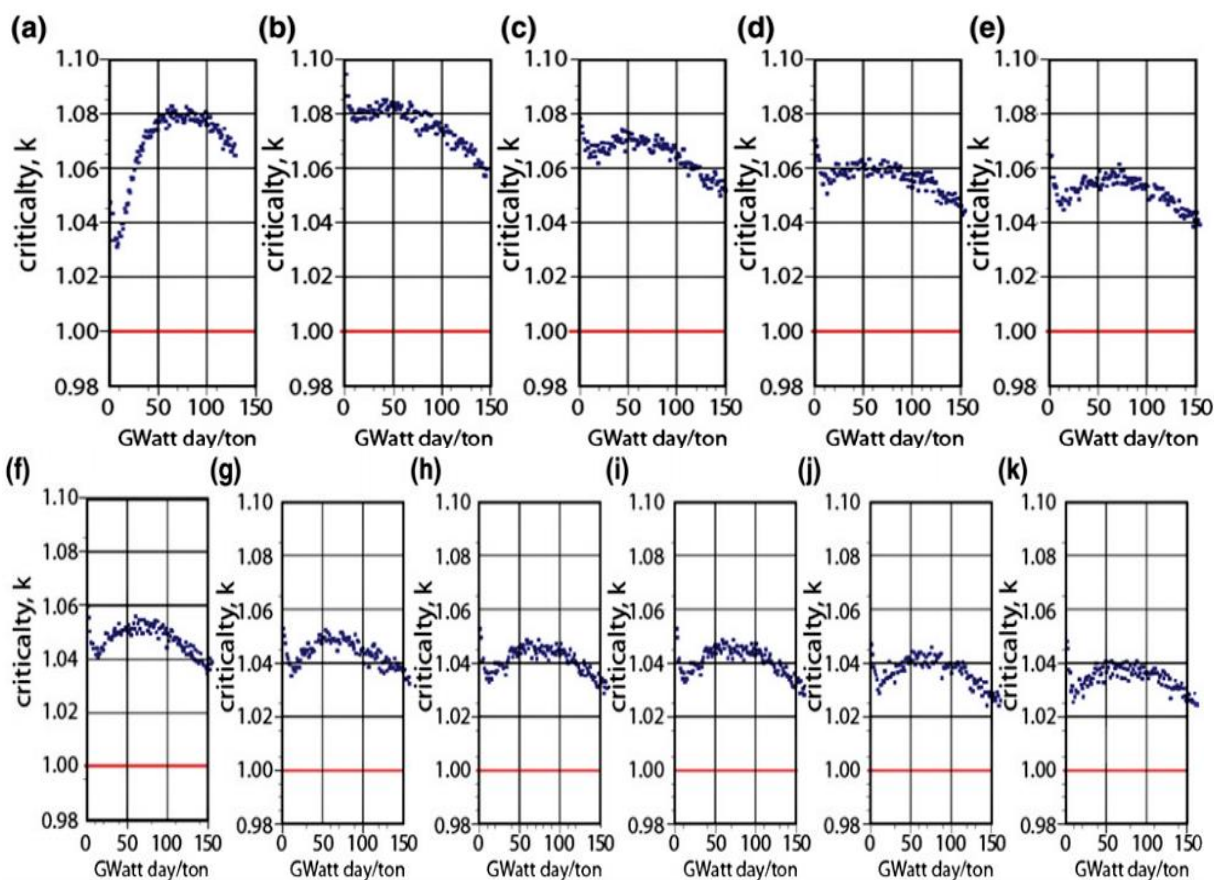


Σχήμα 5-5 Σχηματική απεικόνιση αντιδραστήρα τετηγμένων αλάτων[5]

Η πρόταση όμως που χρησιμοποιούσε αποκλειστικά Θόριο ως γόνιμο υλικό (fertile) ήταν από μια πολύ σημαντική προσωπικότητα στο χώρο της πυρηνικής βιομηχανίας, τον A. Weinberg. Αυτοί οι αντιδραστήρες ήταν οι αντιδραστήρες τετηγμένων αλάτων (Molten Salt Reactors) και το σχέδιο τους ακόμη αποτελεί μια ενδιαφέρουσα προοπτική για το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας (Σχήμα 5-5).

### 5.2.2 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις στη χρήση του Θορίου

Στα πλεονεκτήματα της χρήσης του Θορίου, πέρα από την διαθεσιμότητα του σε σχέση με το Ουράνιο, είναι και το γεγονός ότι ο κύκλος του Θορίου παράγει λιγότερο ενεργά ραδιενεργά κατάλοιπα, σε σχέση και με τον κύκλο του Ουρανίου που χρησιμοποιείται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες  $2^{n5}$  Γενιάς. Η χρησιμοποίηση πυρηνικού καυσίμου βασισμένου στο κύκλου του Θορίου συνεπάγεται και τη χρήση Πλουτωνίου στα αρχικά στάδια του κύκλου του καυσίμου. Ο κάθε κύκλος είναι διάρκειας 10-15 χρόνων. Αυτό είναι σημαντικό για τον περιορισμό της ύπαρξης των πυρηνικών όπλων καθώς το WPU (Weapons Grade Plutonium) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτό το σκοπό. Στο Σχήμα 5-6 παρουσιάζεται η σχέση του πολλαπλασιαστή νετρονίων  $k$  με την παραγόμενη ενέργεια, δηλαδή φανερώνει την εξάρτηση με το χρόνο, αν και πρέπει να τονιστεί ότι το παράδειγμα αφορά κρίσιμο αντιδραστήρα. Παρατηρείται ομαλή μετάβαση της τιμής του  $k$  που στην αρχή (Σχήμα 5-6 (a)) ο αντιδραστήρας χρησιμοποιεί σαν αρχικό καύσιμο το οξείδιο του Πλουτωνίου με σταδιακό πέρασμα στο καύσιμο του οξείδιο του Θορίου. Η τιμή του  $k$  παραμένει σταθερά πάνω από την απαιτούμενη, ( $k=1$ ).



Σχήμα 5-6 Σχέση  $k$  με την καύση του καυσίμου τύπου MOX (84.5%  $ThO_2$  και 15.5%  $PuO_2$ ) σε συνάρτηση με την παραγωγή ενέργειας [5]

Συνεχίζοντας με τα πλεονεκτήματα, η ενεργός διατομή απορρόφησης νετρονίων για το  $^{232}Th$  είναι τριπλάσια από το  $^{238}U$  για τα θερμικά νετρόνια, και έτσι έχουμε μεγαλύτερη παραγωγή  $^{233}U$  από ότι  $^{239}Pu$  για τους thermal reactors. Το  $ThO_2$  έχει μεγαλύτερη χημική σταθερότητα από το  $UO_2$  καθώς και καλύτερες φυσικές και θερμικές ιδιότητες. Το  $ThO_2$  είναι σχετικά αδρανές σε σχέση με το  $UO_2$  το οποίο οξειδώνεται σε  $U_3O_8$  και  $UO_3$ . Αυτό σημαίνει ότι η προσωρινή αποθήκευση καθώς και η μόνιμη ταφή του χρησιμοποιημένου καυσίμου  $ThO_2$  είναι πιο εύκολη.

Στα μειονεκτήματα από τη χρήση Θορίου, πρέπει να αναφερθεί ότι παρόλο που δεν υπάρχει παραγωγή Ακτινίδων, παράγονται τα ισότοπα  $^{229}Th$ ,  $^{230}U$  τα οποία έχουν επιπτώσεις λόγω

ραδιενέργειας. Παράγεται ακόμα, από την απορρόφηση του νετρονίου από το  $^{232}\text{Th}$  μέσω διάσπασης  $\beta$ , το  $^{233}\text{Pa}$ . Αυτή η ενδιάμεση κατάσταση συναντάται και στην περίπτωση του κύκλου του Ουρανίου με παραγωγή  $^{239}\text{Np}$ . Η διαφορά είναι στο χρόνο ημιζωής, όπου στη περίπτωση του  $^{233}\text{Pa}$  είναι 27 μέρες, ενώ για το ισότοπο του  $^{239}\text{Np}$  είναι 2.3 μέρες και συνεπώς χρειάζεται περισσότερος χρόνος για την παραγωγή του σχάσιμου  $^{233}\text{U}$ . Τέλος, είναι αναγκαίος ο διαχωρισμός του  $^{233}\text{Pa}$  από το χρησιμοποιημένο καύσιμο, κάτι που επιτυγχάνεται μέσω της μεθόδου THOREX.

Στους αντιδραστήρες Θορίου υπάρχει ακόμα παραγωγή του  $^{232}\text{U}$  και των θυγατρικών του πυρήνων  $^{212}\text{Bi}$  και  $^{208}\text{Tl}$  που είναι μεν βραχύβια αλλά συγχρόνως και ισχυρές πηγές γ-ακτινοβολίας. Πρέπει να επισημανθεί ότι το πλεονέκτημα του  $\text{ThO}_2$  ότι είναι σχετικά αδρανές, καθίσταται σε μειονέκτημα στην περίπτωση της διάλυσης του σε Νιτρικό οξύ. Για το λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία η χρήση του Υδροφθορίου (HF), κάτι που δημιουργεί προβλήματα διάβρωσης στις εγκαταστάσεις επανεπεξεργασίας. Αυτό το πρόβλημα περιορίζεται με τη χρήση  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  για τον περιορισμό των ιόντων Φθορίου (F). Το σημείο τήξης του  $\text{ThO}_2$  είναι  $3350\text{ }^\circ\text{C}$  ενώ του  $\text{UO}_2$  είναι  $2800\text{ }^\circ\text{C}$ , αυτό το γεγονός οδηγεί σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες για τη δημιουργία του καυσίμου σε αντίστοιχες πυκνότητες. Πάντως, συνολικά η μεγαλύτερη πρόκληση είναι η έλλειψη εμπειρίας συγκρινόμενης με τα  $\text{UO}_2$  και  $\text{PuO}_2$ .

### 5.2.3 ADS αντιδραστήρες και το Θόριο ως Καύσιμο

Υπολογισμοί [5] για την παράμετρο  $k_\infty$  δείχνουν ότι προσεγγίζει τη τιμή της μονάδας για ένα καύσιμο αποκλειστικά αποτελούμενο από Θόριο. Η παράμετρος  $k_\infty$  είναι η θεωρητική τιμή του πολλαπλασιαστή νετρονίων για άπειρο σύστημα, δηλαδή σύστημα που δεν έχουμε διαρροές νετρονίων και άρα η  $k_{eff}$  θα είναι μικρότερη της μονάδας. Οι κύριοι λόγοι είναι δύο, η ύπαρξη  $^{233}\text{Pa}$  αλλά και των Xe και Sm που συμμετέχουν στην απορρόφηση νετρονίων. Βέβαια υπάρχει και τρίτος λόγος, η παραγωγή των ανωτέρων του  $^{233}\text{U}$  ισότοπων του Ουρανίου που και αυτά λειτουργούν ανταγωνιστικά με απορροφήσεις νετρονίων. Το πρόβλημα βέβαια λύνεται με μια εξωτερική πηγή νετρονίων. Η ισορροπία επιτυγχάνεται όταν το  $^{233}\text{U}$  που υφίσταται σχάση αντισταθμίζεται από το ποσό του  $^{233}\text{U}$  που παράγεται. Η συγκέντρωση ισορροπίας εξαρτάται επίσης από το ενεργειακό φάσμα των απορροφηθέντων νετρονίων.

Η ισορροπία,  $\xi$ , δεν είναι πάρα η επιθυμητή τιμή του λόγου μεταξύ του πληθυσμού των πυρήνων του  $^{233}\text{U}$  προς το τον πληθυσμό των πυρήνων του  $^{232}\text{Th}$ .

$$\rho = \frac{N(\text{U}233)}{N(\text{Th}232)} = \xi \quad (\text{Σχ.5.1})$$

Ο λόγος αυτός έχει αποδειχτεί [5] ότι είναι ίσος με το λόγο μεταξύ της ενεργού διατομής απορρόφησης για το  $^{232}\text{Th}$ , με το άθροισμα των ενεργών διατομών απορρόφησης και σχάσης για το  $^{233}\text{U}$ . Οπότε για την ισορροπία  $\xi$ :

$$\xi = \frac{\langle \sigma_c^{232Th} \rangle}{\langle \sigma_c^{233U} + \sigma_f^{233U} \rangle} \quad (\text{Σχ.5.2})$$

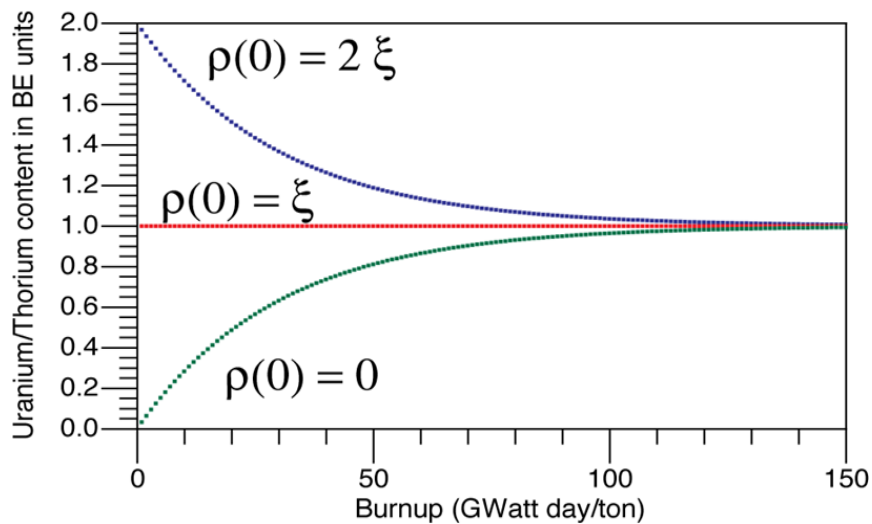
όπου:

$\langle \sigma_c^{232Th} \rangle$  η μέση τιμή της ενεργού διατομής απορρόφησης του  $^{232}\text{Th}$  για όλο το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων, και

$\langle \sigma_c^{233U} + \sigma_f^{233U} \rangle$  το άθροισμα της μέσης τιμής των ενεργών διατομών απορρόφησης και σχάσης, για το  $^{233}\text{U}$  για όλο το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων αντίστοιχα.

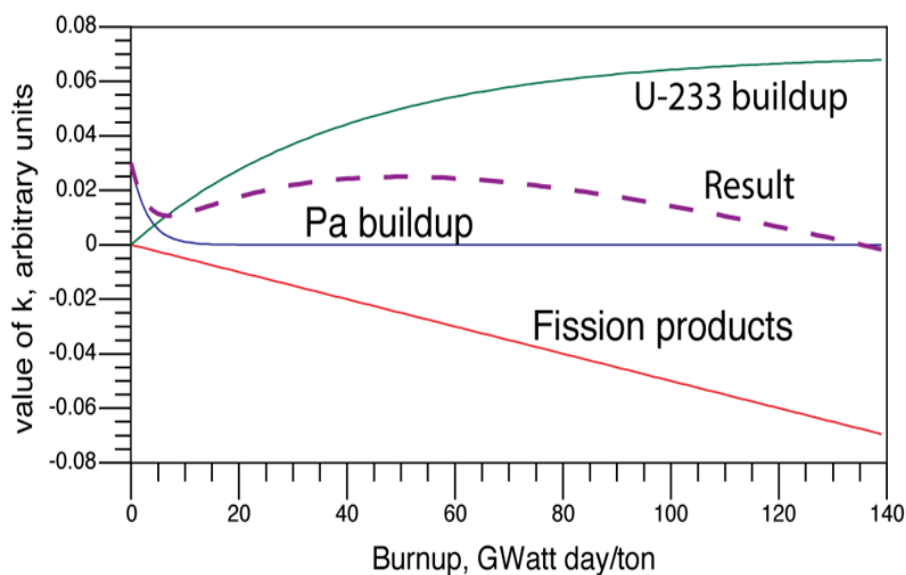
Από την εξ 5.2 μπορεί να υπολογιστεί ότι  $\xi=0.0135$  για θερμικά νετρόνια και ότι  $\xi=0.125$  για ταχεία νετρόνια.

Όπως παρατηρείται, για την περίπτωση π.χ. όπου αρχικά,  $\rho(0)$ , υπάρχει περίσσειμα  $^{233}\text{U}$ ,  $\rho(0) = 2\xi$ . Ακόμα όμως και στην περίπτωση που υπάρχει μόνο καθαρό  $^{232}\text{Th}$ ,  $\rho(0) = 0$ , πάλι η κατάληξη είναι η ισορροπία (Σχήμα 5-7).



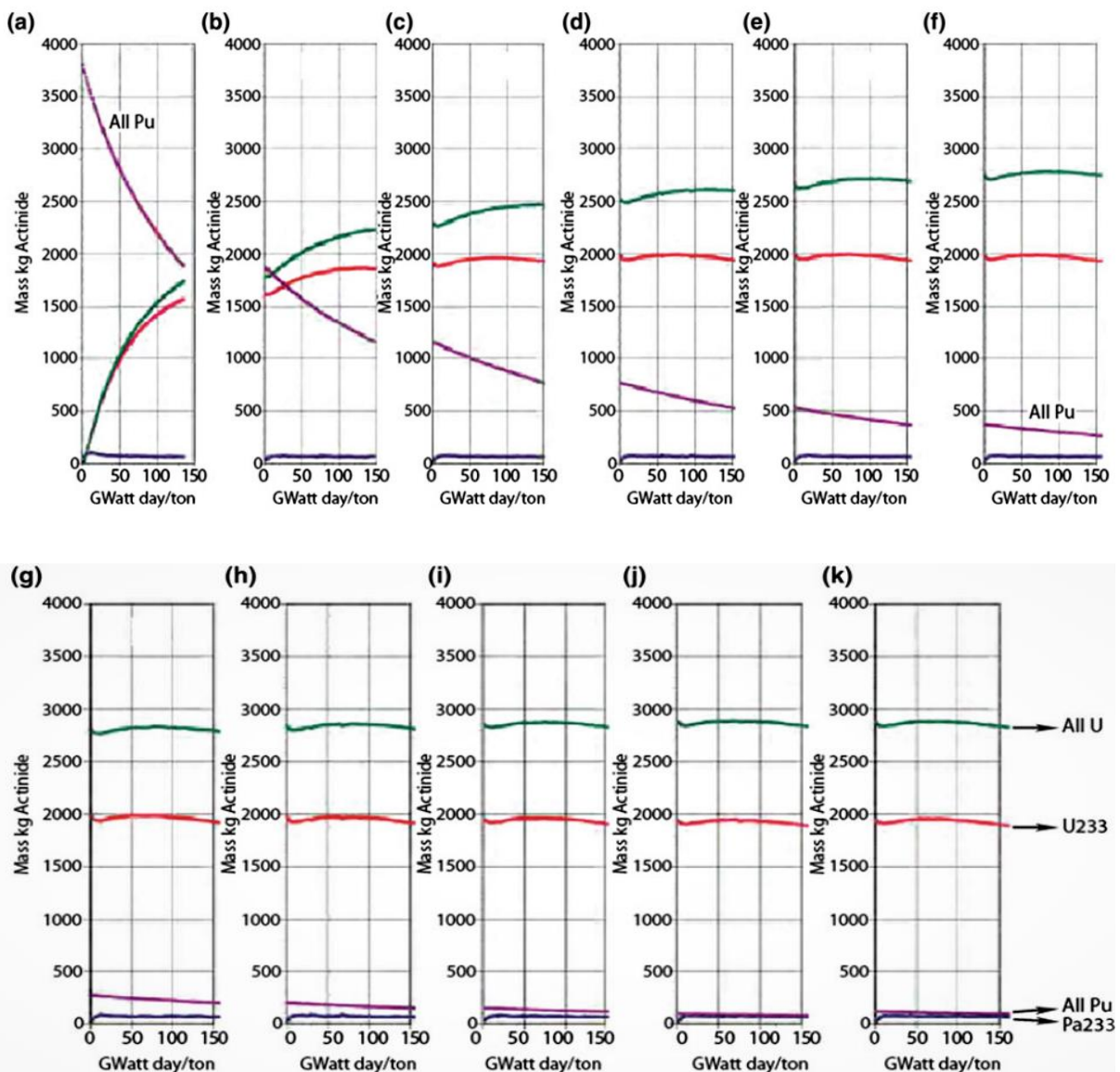
Σχήμα 5-7 Εξέλιξη της αναλογίας  $\rho=N(\text{U}233)/N(\text{Th}232)$  [5]

Εάν υποθέσουμε ότι τώρα ξεκινά ένας καινούργιος κύκλος, όπου η ισορροπία έχει επιτευχθεί εισάγοντας ποσότητα Θορίου το  $k$  θα μειωθεί. Το Θόριο σταδιακά μεταστοιχειώνεται σε  $^{233}\text{U}$  με αποτέλεσμα την αύξηση του  $k$ . Όμως ανταγωνιστικά σε αυτή την αντίδραση δρουν η παραγωγή  $^{233}\text{Pa}$  και άλλων προϊόντων σχάσης που μειώνουν την τιμή του  $k$ . Το αποτέλεσμα αυτών των διαδικασιών είναι το  $k$  να φτάνει στη λεγομένη [5] μαγική ισορροπία (magic equilibrium), Σχήμα 5-8, όπου η τιμή του  $k$  να είναι περίπου σταθερή με μεταβολή της τάξης 1%.



Σχήμα 5-8 Επίδραση των διάφορων παραγόντων στην τιμή του  $k$ , με διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζεται η μαγική ισορροπία [5]

Για τους υποκρίσιμους αντιδραστήρες, στην περίπτωση που υπάρχει μόνο μείγμα Θορίου ως πυρηνικό καύσιμο, επειδή σε κάθε κύκλο πρέπει να ξανά εισάγεται, θα έχουμε πτώση στη τιμή του  $k$  κάτω από τα επιτρεπτά όρια ( $k \sim 0.95$ ). Έτσι, για να έχουμε ενεργειακό κέρδος ( $G > 1$ , βλ. § 2.4) στη λειτουργία του αντιδραστήρα πρέπει να υπάρχει κάποιο σχάσιμο υλικό με θερμικά νετρόνια. Έτσι προτείνεται ως αρχικό καύσιμο, ώστε να αρχίσει ο κύκλος του Θορίου, το  $^{239}\text{Pu}$  σε τύπο καυσίμου MOX. Το  $^{239}\text{Pu}$  έχει διπλάσια ενεργό διατομή σχάσης από το  $^{233}\text{U}$  και άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί λιγότερη ποσότητα, επίσης μπορεί να επιτευχθεί πλήρης καύση του. Τέλος το  $^{239}\text{Pu}$  υπάρχει σε αφθονία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είτε από τα πυρηνικά όπλα (WPU) είτε από τους υπάρχοντες πυρηνικούς αντιδραστήρες σχάσης.



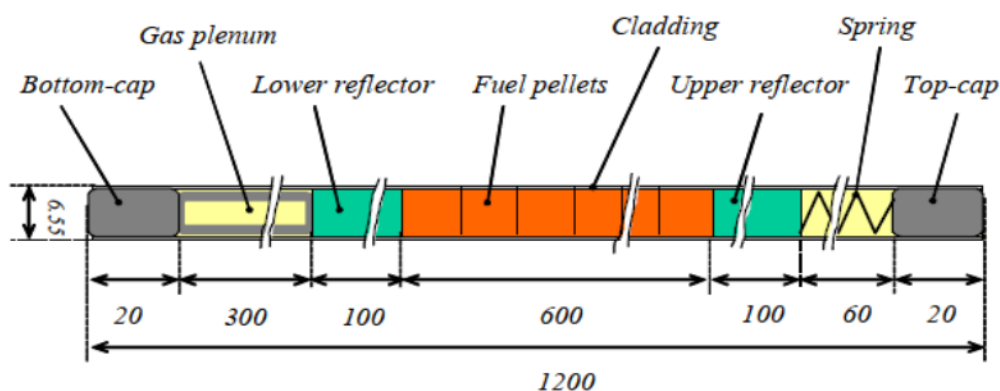
Σχήμα 5-9 Καύση Pu και συσσώρευση των ισότοπων του U για 11 κύκλους [5]

Στο Σχήμα 5-9 απεικονίζονται με την αρχική καύση του Πλουτωνίου, έντεκα κύκλοι που ο καθένας έχει διάρκεια 10-15 έτη. Το Πλουτώνιο καίγεται καθώς συσσωρεύονται ισότοπα Ουρανίου, κυρίως  $^{233}\text{U}$ , και δεν χρειάζεται να εισαχθεί ξανά. Στο τέλος κάθε κύκλου γίνεται εφοδιασμός με Θόριο και επεξεργασία και καύση των παραγόμενων Ακτινιδών.

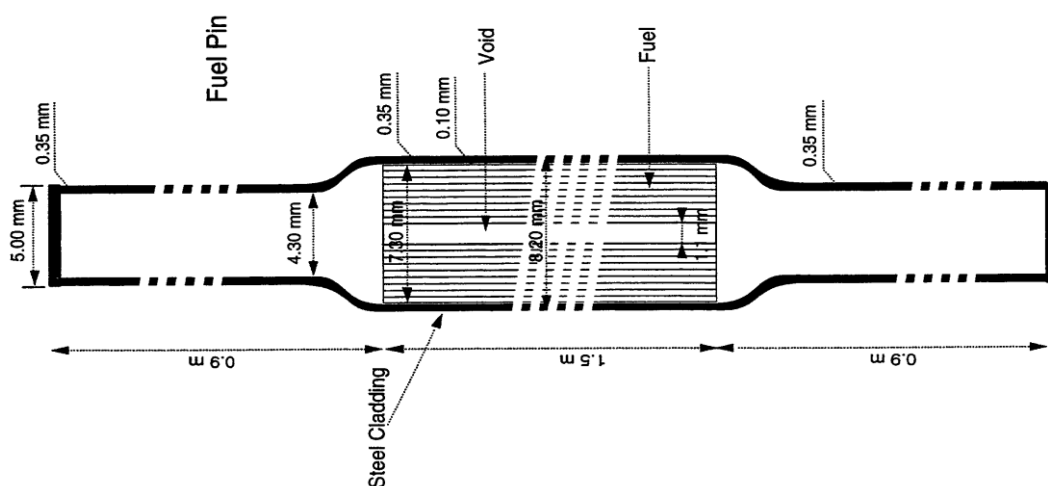


### 5.3 Διάταξη πυρήνα και ράβδων καυσίμου για τους ADS αντιδραστήρες

Το καύσιμο και στις δυο περιπτώσεις που προαναφέρθηκαν, δηλαδή χρήση MA ή Θορίου, τοποθετείται σε ράβδους και είναι στερεό σε μορφή pellet. Και για τα δυο ενδεχόμενα χρήσης του ADS αντιδραστήρα (μεταστοιχείωση, παράγωγή ενέργειας μέσω Θορίου), στο σχεδιασμό της ράβδου καυσίμου υπάρχει εσωτερικός κενός θάλαμος (plenum) με σκοπό την συσσώρευση των αερίων σχάσης. Τόσο στην περίπτωση του αντιδραστήρα MYRRHA (Σχήμα 5-10) [3], όσο και στην περίπτωση του αντιδραστήρα Energy Amplifier (EA), όπως φαίνεται στο (Σχήμα 5-11), [2] χρησιμοποιείται χάλυβας για περίβλημα (T91 για τον MYRRHA) ενώ θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και κράματα Ζιρκονίου για τους μελλοντικούς ADS αντιδραστήρες. Ο σχεδιασμός τους έχει πολλές ομοιότητες με αυτόν των FBRs αλλά θα πρέπει να μελετηθεί η συμπεριφορά τους με ταυτόχρονη χρήση LBE ως ψυκτικό, σε σχέση με την υπάρχουσα εμπειρία που υπάρχει για ψυκτικό Νάτριο. Επίσης, θα πρέπει να μελετηθεί η μείωση στην πίεση που ασκεί το ψυκτικό στον κενό θάλαμο (plenum) έξω από τη ράβδο [2]. Η χρήση του T91, ως το υλικό κατασκευής του περιβλήματος γίνεται λόγω των χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.6. Όμως, ο MYRRHA έχει προταθεί να έχει θερμοκρασίες λειτουργίας από 200 °C έως 450 °C, γεγονός που δημιουργεί ανησυχία για τα φαινόμενα ψαθυρότητας του T91. Το κατώτερο όριο θερμοκρασίας λειτουργίας προκύπτει από το σημείο τήξης του LBE που είναι 125 °C.

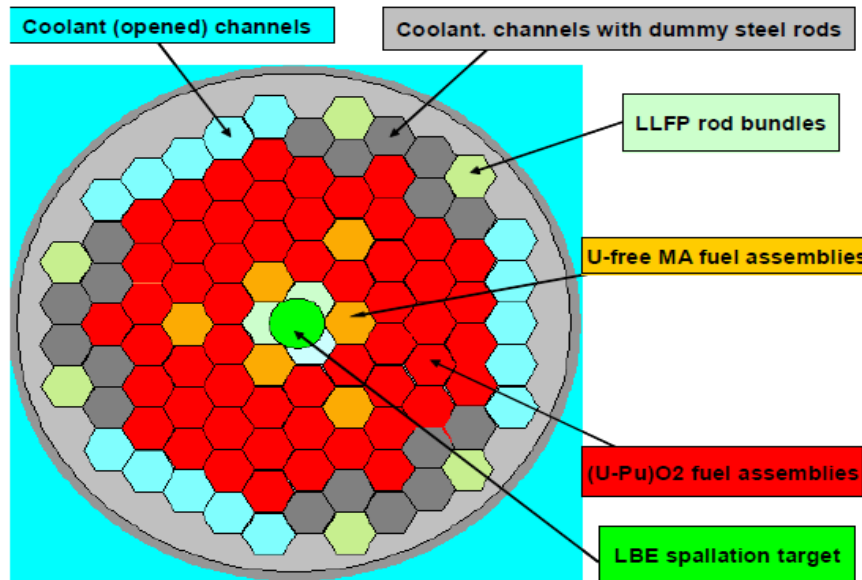


Σχήμα 5-10 Σχηματική απεικόνιση της Ράβδου καυσίμου για το MYRRHA [3]

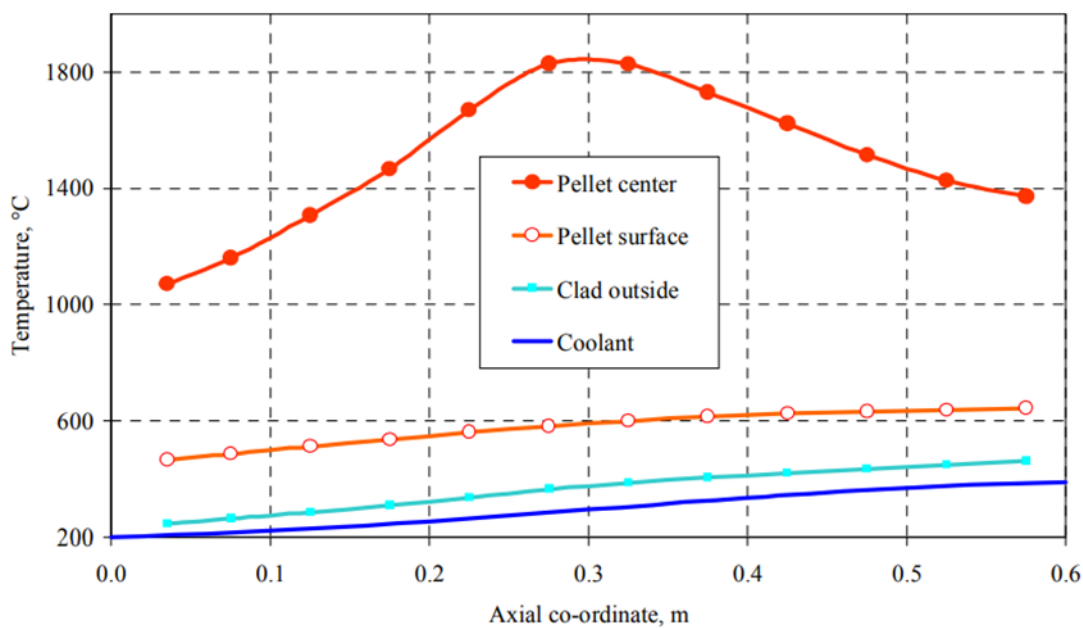


Σχήμα 5-11 Σχηματική απεικόνιση της πρότασης για τον EA [2]

Συνεχίζοντας για την διάταξη του πυρήνα, και στις δυο περιπτώσεις οι ράβδοι συγκεντρώνονται σε συστάδες και σχηματίζουν εξαγωνικές δομές. Στο κέντρο φαίνεται ο στόχος κατακερματισμού (Σχήμα 5-12). Για την περίπτωση του MYRRHA έχει επιλεγεί καύσιμο τύπου MOX λόγω της μεγάλης εμπειρίας που υπάρχει στην Ευρώπη όσον αφορά τη κατασκευή του, αλλά και της καλύτερης νετρονικής συμπεριφοράς του για ταχέα νετρόνια, σε σχέση με τα οξείδια του Ουράνιου.



Σχήμα 5-12 Διάταξη του πυρήνα του MYRRHA για την μελέτη μεταστοιχείωσης MA και LLFP[3]

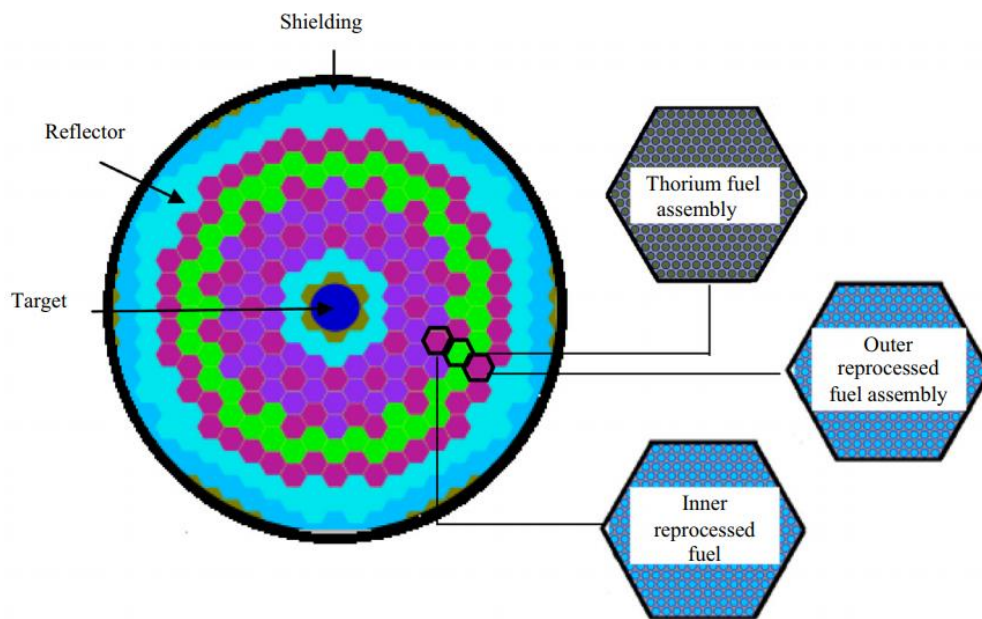


Σχήμα 5-13 Κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος του άξονα της ράβδου για το καύσιμο, το περίβλημα και το ψυκτικό [3]

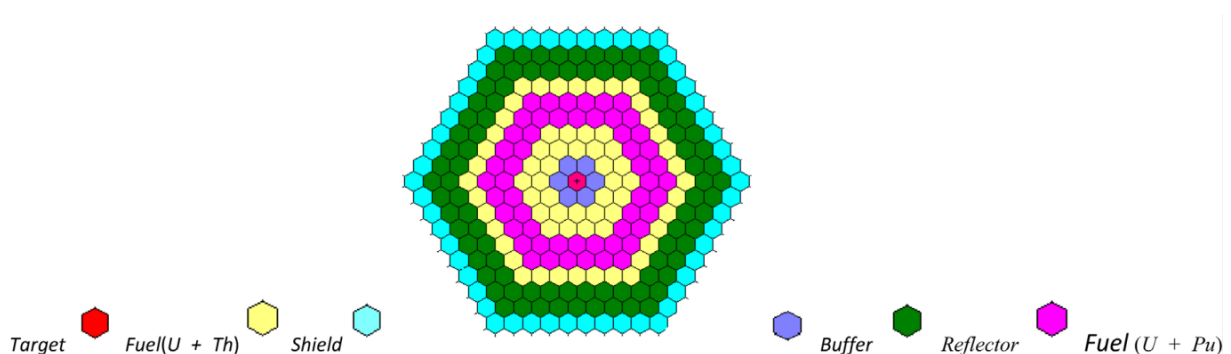
Για τον MYRRHA, το συνολικό μήκος των ράβδων θα είναι περίπου 1.2 m και το ενεργό μήκος, δηλαδή αυτό που θα περιέχει τα pellets του καυσίμου θα είναι 0.6 m. Η θερμική ισχύς για την θερμότερη ράβδο θα είναι 16.93 KW και μέγιστη θερμοκρασία καυσίμου και περιβλήματος 1830 °C και 450 °C αντίστοιχα. Στο Σχήμα 5-13 απεικονίζεται η κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος του καυσίμου. Το θερμικό περιθώριο ασφαλείας για την περίπτωση καυσίμου εμπλουτισμού 30% «φρέσκου» MOX είναι περί τους 830 °C, βάσει του σημείου τήξης του καυσίμου και της μέγιστης

εκτιμώμενης θερμοκρασίας του καυσίμου. Στο Σχήμα 5-13 απεικονίζονται επίσης, η θερμοκρασία περιβλήματος καθώς και του ψυκτικού, συναρτήσει της θέσης κατά μήκος της ράβδου. Η μέγιστη θερμοκρασία του καυσίμου παρατηρείται περί το κέντρο της ράβδου.

Για την περίπτωση της χρήσης Θωρίου ως πυρηνικού καυσίμου στους ADS αντιδραστήρες, δεν υπάρχει κάποιος πειραματικός πυρηνικός αντιδραστήρας, που να έχει σχεδιαστεί με σκοπό την διερεύνηση της προοπτικής αυτής, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της επίδειξης των δυνατοτήτων αυτής της τεχνολογίας στο MYRRHA. Τα μέχρι στιγμής δεδομένα προκύπτουν από προσομοιώσεις [9, 10, 11]. Ο υποκρίσιμος πυρήνας και στις δυο περιπτώσεις (Σχήμα 5-14, Σχήμα 5-15) είναι ετερογενής, χρησιμοποιεί πέρα από Θωρίο σε μορφή οξειδίου στην πρώτη περίπτωση (Σχήμα 5-14) επανεπεξεργασμένο καύσιμο το οποίο περιέχει και MA, ενώ στη δεύτερη περίπτωση (Σχήμα 5-15) καύσιμο τύπου MOX (U, Pu).



Σχήμα 5-14 Προσομοίωση της διάταξης του πυρήνα του ADS αντιδραστήρα με χρήση επανεπεξεργασμένου καυσίμου που περιέχει MA [9]



Σχήμα 5-15 Προσομοίωση της διάταξης του πυρήνα του ADS αντιδραστήρα με χρήση καυσίμου τύπου MOX [10]

Η παρατήρηση που έγινε στην ενότητα 5.2.3 για την αναγκαιότητα ύπαρξης και άλλου καυσίμου πέρα του Θωρίου επιβεβαιώνεται μέσω των προσομοιώσεων. Ενδεικτικά [10], το  $k_{eff}$  αρχικά μόνο με τη χρήση καυσίμου Θωρίου-Ουρανίου (85% ThO<sub>2</sub> + 15% UO<sub>2</sub>) θα μειωνόταν κάτω από την αρχική τιμή του ( $k_{eff} = 0.95$ ), ενώ αυξάνεται με την εισαγωγή καυσίμου τύπου MOX (U-Pu), ( $k_{eff} = 0.966$ ).

Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και για τη διάταξη [10] που απεικονίζεται στο Σχήμα 5-14. Αυτή η συμπεριφορά, με σκοπό το μεγαλύτερο ποσοστό καύσης των ΜΑ αντιμετωπίζεται χωρίζοντας τον πυρήνα του αντιδραστήρα σε τρεις περιοχές. Στη πρώτη περιοχή τοποθετείται το επανεπεξεργασμένο καύσιμο το οποίο συνεισφέρει στην αύξηση του  $k_{eff}$  (seed), στη δεύτερη περιοχή τοποθετείται το Θόριο, το οποίο λειτουργεί ως “κουβέρτα” (blanket), και τέλος στη τρίτη περιοχή τοποθετείται πάλι επανεπεξεργασμένο καύσιμο. Ο λόγος που το επανεπεξεργασμένο καύσιμο τοποθετείται εγγύτερα του στόχου κατακερματισμού είναι ότι εκεί η νετρονική πυκνότητα είναι μεγαλύτερη. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μεγαλύτερο ποσοστό καύσης των ΜΑ και αντιμετωπίζεται η μείωση του  $k_{eff}$  λόγω απορρόφησης νετρονίων από το Θόριο.

#### 5.4 Μεταστοιχείωση Μακρόβιων προϊόντων σχάσης (LLFP's)

Όπως φαίνεται και στην ενότητα 5.3, καθώς και όπως έχει αναφερθεί και στο πρώτο κεφάλαιο, η πρόταση για τους ADS αντιδραστήρες δεν αφορά μόνο την μεταστοιχείωση των ΜΑ αλλά και τη μεταστοιχείωση των LLFP's. Μερικά από αυτά τα ισότοπα είναι τα:  $^{129}\text{I}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{126}\text{Sn}$  και  $^{79}\text{Se}$ . Τα ισότοπα αυτά παρουσιάζουν σχετικά μεγάλη εκπομπή ακτινοβολίας και για τον σχεδιασμό του χώρου που γίνεται η αποθήκευση των προϊόντων σχάσης αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, καθώς για το αρχικό χρονικό διάστημα αποθήκευσης αυτά τα ισότοπα αποτελούν την κύρια πηγή ακτινοβολίας. Με αυτά ως δεδομένα, στόχος είναι η μεταστοιχείωση αυτών των προϊόντων σχάσης σε σταθερούς πυρήνες ή σε πυρήνες που ο χρόνος υποδιπλασιασμού τους είναι αρκετά μικρότερος.

##### 5.4.1 Ιδιότητες και χαρακτηριστικά των κυρίων LLFP's

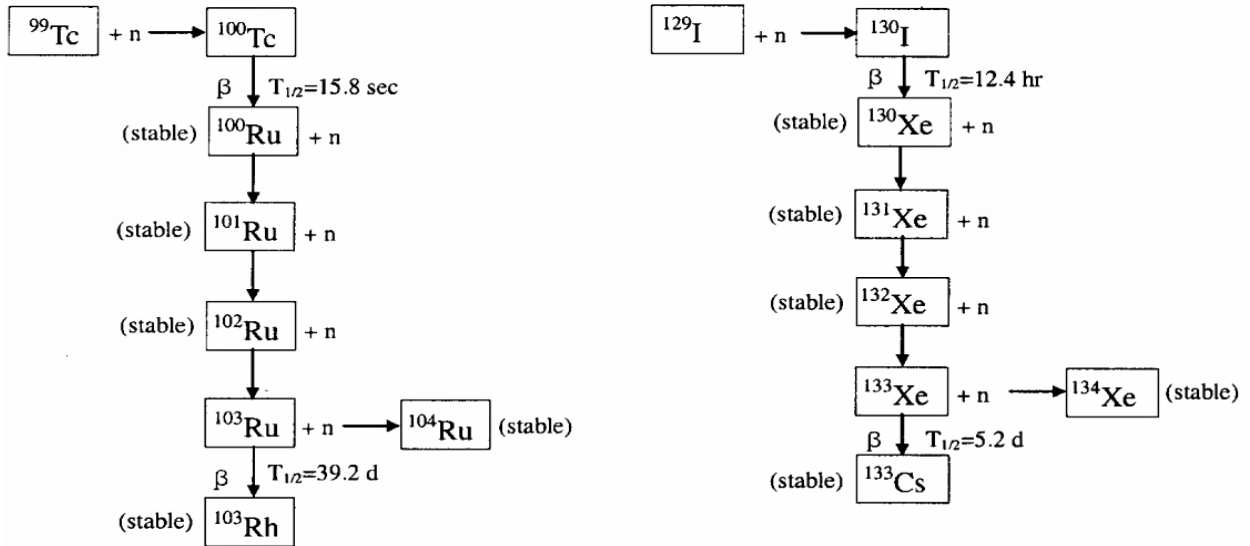
Στη προηγούμενη ενότητα, αναφέρονται τα κύρια ισότοπα που αποτελούν τα λεγόμενα LLFP's. Από αυτά, η προσπάθεια για μεταστοιχείωση αφορά κυρίως τα  $^{129}\text{I}$  (Ιώδιο) και  $^{99}\text{Tc}$  (Τεχνήτιο). Αυτό συμβαίνει γιατί, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5-3, η ενεργός διατομή απορρόφησης νετρονίων για τα υπόλοιπα ισότοπα, είτε πρόκειται για ταχέα είτε για θερμικά νετρόνια, είναι αρκετά μικρότερη.

Πίνακας 5-3 Ιδιότητες των βασικών LLFP's[11]

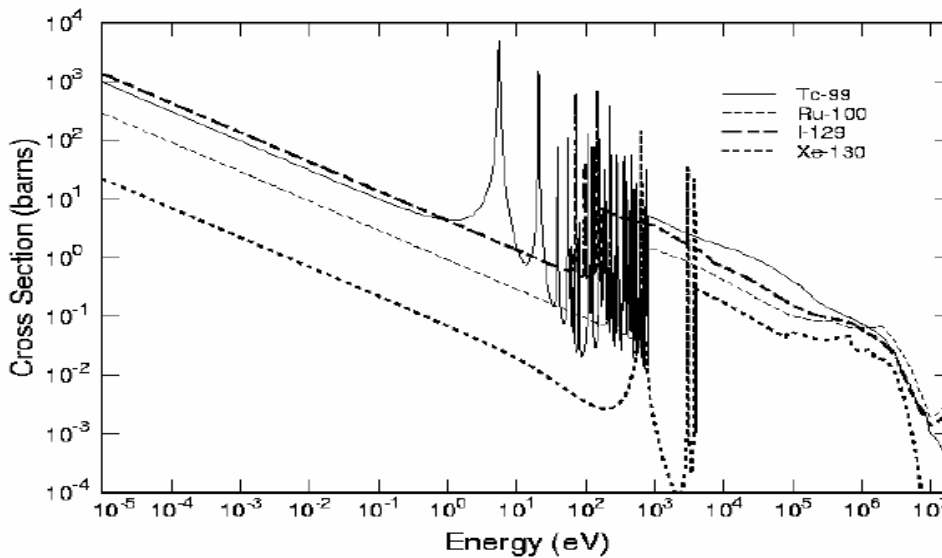
Ισότοπο	Τρόπος διάσπασης	Χρόνος υποδιπλασιασμού (yrs)	Ενεργός διατομή για ταχέα νετρόνια (b)	Ενεργός διατομή Για θερμικά νετρόνια (b)
$^{79}\text{Se}$	$\beta^-$	$6.5 \times 10^4$	0.002	0.33
$^{99}\text{Tc}$	$\beta^-$	$2.1 \times 10^5$	0.451	9.32
$^{126}\text{Sn}$	$\beta^-$	$1.0 \times 10^5$	0.007	0.03
$^{129}\text{I}$	$\beta^-$	$1.6 \times 10^7$	0.35	3.12
$^{135}\text{Cs}$	$\beta^-$	$2.3 \times 10^6$	0.071	2.48

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5-3, υπάρχει η δυνατότητα μεταστοιχείωσης του  $^{135}\text{Cs}$ , με ταχέα νετρόνια. Το Ιώδιο ως προϊόν σχάσης από τους πυρηνικούς αντιδραστήρες, συγκεκριμένα τον PWR, έχει τυπική συγκέντρωση σε ισότοπα του Ιωδίου με ποσοστό 23% για το  $^{127}\text{I}$  και 77% για το  $^{129}\text{I}$ . Ο τρόπος μεταστοιχείωσης του  $^{129}\text{I}$  φαίνεται στο Σχήμα 5-16. Σχετικά με το ισότοπο  $^{127}\text{I}$  η πιθανότητα μεταστοιχείωσής του σε  $^{129}\text{I}$ , είναι πολύ χαμηλή. Με την απορρόφηση ενός νετρονίου το  $^{127}\text{I}$  μεταστοιχείωνεται σε  $^{128}\text{I}$ , το οποίο με τη σειρά του μεταστοιχείωνεται σε  $^{128}\text{Xe}$  μετά από σύντομο χρονικό διάστημα. Ο χρόνος ημιζωής του  $^{128}\text{I}$  είναι 25 min. Αντίστοιχα το  $^{129}\text{I}$  μεταστοιχείωνεται σε  $^{130}\text{Xe}$  με απορρόφησης νετρονίου. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι η σχέση ενεργού διατομής με την ενέργεια των νετρονίων (Σχήμα 5-17) είναι αντιστρόφως ανάλογη για το  $^{129}\text{I}$ .

Το  $^{99}\text{Tc}$  μεταστοιχειώνεται σε  $^{100}\text{Tc}$  μετά από απορρόφηση νετρονίου (Σχήμα 5-16) το οποίο με τη σειρά του διασπάται σε  $^{100}\text{Ru}$  (Ρουθίνιο) σχετικά σύντομα, και το οποίο με τη σειρά του μεταστοιχειώνεται διαδοχικά σε μία σειρά από σταθερούς πυρήνες με απορρόφηση νετρονίων. Η ενεργός διατομή απορρόφησης για το  $^{99}\text{Tc}$  είναι μεγαλύτερη για ενδιάμεσες ενέργειες νετρονίων (Σχήμα 5-17). Αυτό που πρέπει να τονιστεί είναι ότι υπάρχει η πιθανότητα μεταστοιχείωσης του  $^{99}\text{Tc}$  μέσω (n,2n) αντίδρασης σε  $^{98}\text{Tc}$ , το οποίο επίσης ανήκει στην κατηγορία των LLFP's με χρόνο ημιζωής,  $4.2 \times 10^6$  yrs.



Σχήμα 5-16 Διαδικασία μεταστοιχείωσης των  $^{129}\text{I}$  και  $^{99}\text{Tc}$  [11]



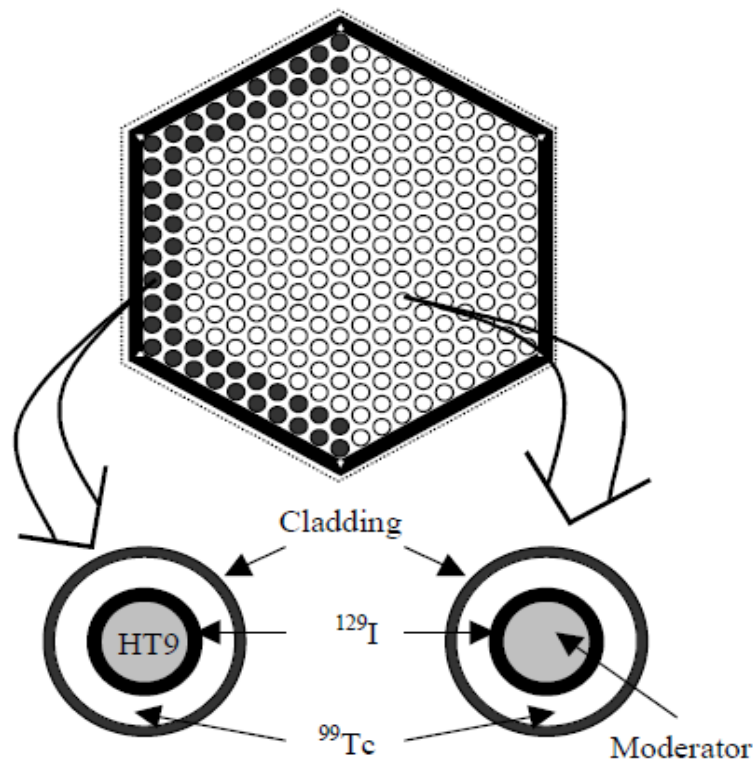
Σχήμα 5-17 Διατομή απορρόφησης νετρονίων σε συνάρτηση με την ενέργεια των νετρονίων για τα  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{100}\text{Ru}$  και  $^{130}\text{Xe}$  [11]

#### 5.4.2 ADS αντιδραστήρες και μεταστοιχείωση των LLFP's

Ένα από τα προγράμματα ανάπτυξης που αφορά τους ADS αντιδραστήρες και τη διερεύνηση των δυνατοτήτων που προσφέρουν στη μεταστοιχείωση των MA και LLFP's ξεκίνησε το 1997 στο KAERI (Korean Atomic Energy Research Institute) στη Νότια Κορέα και είναι το ονομαζόμενο HYPER (HYbrid Power Extraction Reactor). Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα [12], το οποίο έχει ως αντικείμενο τη μεταστοιχείωση των  $^{129}\text{I}$  και  $^{99}\text{Tc}$ , έχουν προταθεί για μεν το  $^{99}\text{Tc}$  ο στόχος, να είναι σε μεταλλική

μορφή, ενώ για το  $^{129}\text{I}$  ο στόχος να είναι το  $\text{CaI}_2$  (Ιωδιούχο Ασβέστιο) ή το  $\text{NaI}$  (Ιωδιούχο Νάτριο). Για την χρησιμοποίηση του  $^{99}\text{Tc}$  σε μεταλλική μορφή, δεν υπάρχουν τεχνικά προβλήματα, όμως στην περίπτωση του  $\text{NaI}$  υπάρχει πιθανό πρόβλημα, κατά την διαδικασία της μεταστοιχείωσης του Ιωδίου, το Νάτριο να υποστεί αλλαγή φάσης (τήξη) και να απελευθερωθεί από το στόχο. Οπότε, η κυρίαρχη επιλογή για τη μεταστοιχείωση του Ιωδίου φαίνεται να είναι το  $\text{CaI}_2$  το σημείο τήξης του οποίου είναι  $783^\circ\text{C}$  ( $842^\circ\text{C}$  για το  $\text{Ca}$ ). Πλεονέκτημα στη μεταστοιχείωση του Ιωδίου αποτελεί αυτό που αναφέρθηκε στη προηγούμενη παράγραφο για τη μεταστοιχείωση του  $^{127}\text{I}$ , με αποτέλεσμα να μη χρειάζεται διαχωρισμός ισοτόπων για την κατασκευή του στόχου. Τα  $^{99}\text{Tc}$  και  $\text{CaI}_2$  θα τοποθετηθούν [12] στην ίδια ράβδο χρησιμοποιώντας ως επιβραδυντή το  $\text{ZrH}_2$  (Σχήμα 5-18).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-17 και στον Πίνακα 5-3, η χρήση επιβραδυντή για τη μεταστοιχείωση των LLFP's κρίνεται επιβεβλημένη, δεδομένου ότι η ενεργός διατομή απορρόφησης αυξάνει καθώς μεταβαίνουμε στην περιοχή των θερμικών νετρονίων, ενώ μειώνεται ραγδαία στην περιοχή των ταχέων νετρονίων.



Σχήμα 5-18 Διαμόρφωση της ράβδου καυσίμου για τα LLFP's [12]

Το περίβλημα της ράβδου του καυσίμου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-18, είναι κατασκευασμένο από Μαρτενσιτικό Χάλυβα HT9. Το πλεονέκτημα της ράβδου που έχει και τα δυο ισότοπα έχει να κάνει με το γεγονός ότι το  $^{99}\text{Tc}$  παρουσιάζει φαινόμενο αυτοθωράκισης (shelf shielding effect) για τα θερμικά νετρόνια (Σχήμα 5-17). Η τοποθέτηση του  $^{99}\text{Tc}$  στο εξωτερικό (Σχήμα 5-18) της ράβδου ουσιαστικά θα "φιλτράρει" τα θερμικά νετρόνια λόγω του φαινομένου της αυτοθωράκισης και νετρόνια με μεγαλύτερη ενέργεια θα συμμετέχουν στις αντιδράσεις μεταστοιχείωσης, όπου εκεί το φαινόμενο αυτοθωράκισης είναι μικρότερο και για τα δυο ισότοπα.

## 5.5 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] F. Carminati, R. Klapisch, J. Revol, C. Roche, J. Rubio και C. Rubbia, «An Energy Amplifier for Cleaner and Inexhaustible Nuclear Energy Production Driven by a Particle Beam Accelerator,» *CERN Publishing*, 1993.
- [2] C. Rubbia, J.-A. Rubio, S. Buono, F. Carminati, N. Fietier, J. Galvez, C. Geles, Y. Kadi, R. Klapisch, P. Mandrillon, J. Revol και C. Roche, «Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier,» *CERN Publishing*, 1995.
- [3] Status of Accelerator Driven Systems Research and Technology Development, IAEA, 2015.
- [4] Ν. Λυμπερέα, «Πυρηνικοί Αντιδραστήρες Ισχυος Θορίου», Μεταπτυχιακή Εργασία ΔΠΜΣ Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας, 2011
- [5] Carlo Rubbia, «A future for Thorium Power? , » *Thorium Energy for the World*, 2013
- [6] Status of minor actinide fuel development, IAEA , 2009
- [7] Comparison of thorium and uranium fuel cycles, *National Nuclear Laboratory*, τομ. 11, αρ.5, 2012
- [8] Thorium Fuel Cycle — Potential Benefits and Challenges, IAEA, 2005
- [9] Ali Pazirandeh, Laia Shirmohammadi, «Simulation of an Accelerator Driven Subcritical Core with Mixed Uranium-Thorium Fuel,» *World Journal of Engineering and Technology*, vol.3, n. 3, pp. 328-33, 2015
- [10] Thanh Mai Vu, Takanori Kitada, «Seed and blanket thorium-reprocessed fuel ADS: Multi-cycle approach for higher thorium utilization and TRU transmutation,» *Annals of Nuclear Energy*, vol.75, pp. 438-442, 2015
- [11] Physics and Safety of Transmutation Systems A Status Report, *OECD/NEA*, 2006
- [12] Yonghee Kim, Won-Seok Park, R.N. Hill, «Core Design Characteristics of the HYPER System,» *OECD/NEA*, 2002.
- [13] Krane S. Kenneth, «Introductory Nuclear Physics, » *Wiley & Sons*, 1987

# Κεφάλαιο 6

## 6 Ασφάλεια και δυναμική των ADS αντιδραστήρων

Η κινητική συμπεριφορά των νετρονίων καθώς και η δυναμική συμπεριφορά του ADS αντιδραστήρα διαφέρουν σημαντικά από αυτές των συμβατικών κρίσιμων πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος που είναι σήμερα σε λειτουργία. Οπότε, τίθεται ως θέμα υψίστης σημασίας η κινητική και δυναμική μελέτη των ADS αντιδραστήρων και η σύγκριση τους με τους υπάρχοντες αντιδραστήρες θερμικών ή ταχέων νετρονίων.

### 6.1 Βασικές έννοιες

Προτού παρουσιαστούν τα ζητήματα που αφορούν την δυναμική των ADS αντιδραστήρων, για λόγους πληρότητας και καλύτερης κατανόησης του κειμένου, θα παρουσιαστούν βασικές έννοιες που αφορούν την δυναμική και κινητική ανάλυση των αντιδραστήρων.

Ξεκινώντας γενικά, έχουμε τους εξής ορισμούς:

Κινητική του αντιδραστήρα (Reactor kinetics): Η κινητική του αντιδραστήρα είναι η μελέτη της χρονικής εξάρτησης της ροής νετρονίων για υποτιθέμενες αλλαγές στις μακροσκοπικές ενεργές διατομές των διαφόρων αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στον αντιδραστήρα. Αναφέρεται επίσης ως reactor kinetics without feedbacks.

Δυναμική του αντιδραστήρα (Reactor Dynamics): Η δυναμική του αντιδραστήρα είναι η μελέτη της χρονικής εξάρτησης της ροής νετρονίων, όταν οι μακροσκοπικές διατομές επιτρέπεται με τη σειρά τους να εξαρτώνται από τη ροή των νετρονίων. Αναφέρεται επίσης ως reactor kinetics with feedbacks and with spatial effects.

Έχουν ήδη οριστεί οι πολλαπλασιαστές νετρονίων  $k_{eff}$  και  $k_{\infty}$  που ουσιαστικά είναι το μέτρο της αλλαγής του πληθυσμού των νετρονίων ανά γενιά. Ο πρώτος αφορά στο σύστημα που μελετάμε ενώ ο δεύτερος αφορά στο ίδιο σύστημα αλλά χωρίς να λαμβάνεται υπόψη τη διαφυγή νετρονίων.

Η απομάκρυνση ενός συστήματος από την κρισιμότητα εκφράζεται από τον αδιάστατο συντελεστή  $\rho = \frac{k_{eff}-1}{k_{eff}}$  ο οποίος ονομάζεται αντιδραστικότητα (reactivity). Ως μονάδα αντιδραστικότητας χρησιμοποιείται το pcm (per cent mille) δηλαδή χιλιοστά επί τοις εκατό,  $10^{-3} \times 10^{-2} = 10^{-5}$  της αντιδραστικότητας  $\rho$  ( $\% \Delta k/k$ ) και τα δολάρια αντιδραστικότητας (\$) όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια. Η χρήση της μονάδας pcm χρησιμοποιείται κυρίως στους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (LWRs) λόγω των χαμηλών τιμών αντιδραστικότητας<sup>12</sup>.

Με  $\beta$  ορίζεται το κλάσμα των καθυστερούμενων νετρονίων (delayed neutrons) με μεγάλες ενέργειες. Η ύπαρξη τους οφείλεται στη διάσπαση βήτα (beta decay) που συμβαίνει στα προϊόντα της σχάσης. Με  $\beta_{eff}$  ορίζεται το κλάσμα των καθυστερούμενων νετρονίων (delayed neutrons) με μικρές ενεργείες (thermal region), πρόκειται για τα νετρόνια που εκπέμπονται από τους πυρήνες - προϊόντα της σχάσης και όχι μόνο. Άμεσα νετρόνια (Prompt neutrons), είναι τα άμεσα νετρόνια που προκύπτουν κατά την διάρκεια της σχάσης και αντιστοιχούν στο ποσοστό  $(1 - \beta)$  των νετρονίων. Στην περίπτωση όπου ο συντελεστής πολλαπλασιασμού των ακαριαίων νετρονίων ισούται με τη μονάδα, δηλαδή  $(1 - \beta)k = 1$ , τότε ο αντιδραστήρας γίνεται κρίσιμος μόνο με τη ροή των ακαριαίων νετρονίων και η κατάσταση αυτή ονομάζεται ακαριαία κρισιμότητα (prompt criticality).

<sup>12</sup> www.nuclear-power.net



Εναλλακτικά της μονάδος pcm χρησιμοποιείται το δολάριο αντιδραστικότητας (\$) το οποίο καθορίζεται ως το ποσό της αντιδραστικότητας που απαιτείται προκειμένου ένας αντιδραστήρας να καταστεί ακαριαία κρίσιμος, δηλαδή  $\rho = \beta_{eff}$  και κατ' επέκταση  $(\$) = \frac{\rho}{\beta_{eff}}$ . Το δολάριο αντιδραστικότητας δεν είναι απόλυτη μονάδα μέτρησης, καθώς η τιμή του  $\beta_{eff}$  ποικίλει για διαφορετικά πυρηνικά καύσιμα.

Δεδομένου ότι η μακροσκοπικές ενεργές διατομές συσχετίζονται με τη θερμοκρασία και την πυκνότητα, γίνεται κατανοητό ότι η αντιδραστικότητα ενός συστήματος θα επηρεάζεται από τις μεταβολές πυκνότητας και θερμοκρασίας του καυσίμου, του επιβραδυντή και άλλων στοιχείων του αντιδραστήρα τα οποία αλληλεπιδρούν με τις νετρονικές ροές. Η επίδραση αυτών των παραμέτρων στην αντιδραστικότητα εκφράζεται μέσω του συντελεστή αντιδραστικότητας  $\alpha$ , ο οποίος καθορίζεται από τη μεταβολή της αντιδραστικότητας ανά μονάδα μεταβολής του εκάστοτε μετρούμενου μεγέθους. Για παράδειγμα, ο συντελεστής αντιδραστικότητας  $\alpha_m$  για τη θερμοκρασία του επιβραδυντή ( $T_m$ ) δίνεται από τη Σχ. 6.1. Το μέτρο της μεταβολής της αντιδραστικότητας  $d\rho$  ονομάζεται reactivity effect.

$$\alpha_m = - \frac{d\rho}{dT_m} \quad (\text{Σχ. 6.1})$$

Οι μεταβολές αυτές, οι οποίες προκύπτουν κατά της φάσεις μεταβατικής λειτουργίας (transient) των αντιδραστήρων, αντιμετωπίζονται κατάλληλα κυρίως μέσω των ράβδων ελέγχου, προκειμένου να επιτευχθεί μόνιμη κατάσταση (steady state) λειτουργίας όπου η αντιδραστικότητα παραμένει σταθερή. Για την περίπτωση των υποκρίσιμων αντιδραστήρων χωρίς ράβδους ελέγχου, μεταβολές της αντιδραστικότητας αντιμετωπίζονται μέσω της λειτουργίας του επιταχυντή.

Τα εγγενή χαρακτηριστικά των υποκρίσιμων συστημάτων μπορούν να εξεταστούν με μεθόδους όπως το λεγόμενο «Joint kinetic model» ή τα «thermo-hydraulic channel averaged reactivity feedback assessments». Στην πραγματικότητα απαιτούνται πιο περίπλοκες διαδικασίες υπολογισμού όταν αξιολογείται η ροή νετρονίων και οι θερμοδραυλικές συνθήκες εντός αυτού του συστήματος.

Για τη μελέτη της κινητικής των αντιδραστήρων εφαρμόζεται το αδιάστατο μοντέλο (point kinetic model) στο οποίο ενδιαφέρει μόνο η χρονική εξάρτηση της πυκνότητας της ροής των νετρονίων. Σε αυτό το μοντέλο, ο αντιδραστήρας δεν έχει διαστάσεις και δεν μας ενδιαφέρει το σχήμα και η πυκνότητα της ροής των νετρονίων. Ο πολλαπλασιαστής νετρονίων,  $k_{eff}$ , που δείχνει τη μεταβολή των νετρονίων από γενιά σε γενιά, δεν προσφέρει καμία πληροφορία όμως για την χρονική διάρκεια της εκάστοτε γενιάς νετρονίων. Η εξίσωση που περιγράφει την χρονική μεταβολή στον πληθυσμό των νετρονίων δηλώνει ότι η μεταβολή αυτή είναι ίση με την περίσσεια της παραγωγής των νετρονίων από τη σχάση (prompt neutrons) μείον την απώλεια νετρονίων λόγω σχάσης συν την ύπαρξη των νετρονίων που δεν είναι άμεσο προϊόν της σχάσης και προκύπτουν αργότερα (delayed neutrons) και την παρουσία μιας εξωτερικής πηγής και είναι:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \left( \frac{1-\beta}{1-\rho\beta} - 1 \right) \frac{N}{\Lambda} + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i + S(t) \quad (\text{Σχ.6.2})$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\beta_i}{1-\lambda\beta_i \Lambda} \frac{N}{\Lambda} - \lambda_i C_i \quad (\text{Σχ.6.3})$$

Όπου  $N$ , ο πληθυσμός των νετρονίων,  $\beta_i$  και  $\beta$  το κλάσμα των καθυστερούμενων νετρονίων με  $\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$  και  $\beta_i$  το κλάσμα των καθυστερούμενων νετρονίων για το  $i$ -th γκρουπ πυρήνων (precursor group, συνήθως έξι). Τα  $\lambda_i, C_i$  είναι η σταθερά διάσπασης και η συγκέντρωση για το  $i$  –

τη γκρουπ πυρήνων αντίστοιχα, η αντιδραστικότητα (reactivity)  $\rho$  και  $\Lambda$  ο μέσος χρόνος ζωής μίας γενιάς ακαριαίων νετρονίων (prompt neutrons).

Το  $S(t)$  είναι η συνεισφορά της εξωτερικής πηγής, στην περίπτωση των ADS έχουμε:

$$S(t) = -\frac{\rho_0 N_{sp}}{\Lambda} \quad (\Sigma\chi.6.4)$$

όπου  $\rho_0 < 0$ , η αντιδραστικότητα σε σταθερή κατάσταση,  $N_{sp}$  ο πληθυσμός νετρονίων από την αντίδραση θρυμματισμού ανά πρωτόνιο.

Στη σταθερή κατάσταση ο όρος που αφορά την εξωτερική πηγή παραμένει σταθερός και εάν οριστεί  $\kappa_0$  ο πολλαπλασιαστής νετρονίων για αυτή την σταθερή κατάσταση τότε η,  $N_{sp}$  μπορεί να γραφεί:

$$N_{sp} = \frac{1}{1-\rho_0\beta} N_0 \quad (\Sigma\chi.6.5)$$

και 
$$S(t) = (1 - \kappa_0) \frac{N_0}{\Lambda} \quad (\Sigma\chi.6.6)$$

όπου  $N_0$  η αρχική πυκνότητα νετρονίων.

Η συνολική αντιδραστικότητα για τα υποκρίσιμα συστήματα είναι άθροισμα κυρίως τεσσάρων όρων :

$$\rho(t) = \rho_0 + \rho_{ext}(t) + \rho_{Doppler}(t) + \rho_{Mod.den}(t) \quad (\Sigma\chi.6.7)$$

$$\rho_{Doppler}(t) = \frac{a}{c_p} P(t)t \quad (\Sigma\chi.6.8)$$

$$\rho_{Mod.den}(t) = \acute{\alpha}\{dens.(T_{mod}(t)) - dens.(T_{mod}(0))\} \quad (\Sigma\chi.6.9)$$

Η  $\rho_{ext}(t)$  είναι η αντιδραστικότητα που οφείλεται σε εξωτερικούς λόγους,  $\rho_{Doppler}(t)$  είναι η μείωση της αντιδραστικότητας λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του καυσίμου ( $a < 0$ , με μονάδες μέτρησης για το  $a$ :  $\$/^\circ\text{C}$ ) και  $P(t)$  η παραγόμενη ισχύς ανά γραμμάριο  $\rho_{Mod.den}(t)$  είναι η μειωμένη αντιδραστικότητα ( $\acute{\alpha} < 0$ , με μονάδες μέτρησης για το  $\acute{\alpha}$ :  $\$/gr \times cm^{-3}$ ) λόγω μεταβολής στην πυκνότητα του επιβραδυντή (Moderator).

Ολοκληρώνοντας, η ισχύς ανά γραμμάριο δίνεται :

$$P(t) = \frac{E_f \Sigma_f N(t) \nu}{fuel\ density} \quad (\Sigma\chi.6.10)$$

όπου  $E_f$  η ενέργεια ανά σχάση,  $\nu$  η ταχύτητα των νετρονίων και  $\Sigma_f$  η μακροσκοπική ενεργός διατομή.

Εάν  $P_0$  η ισχύς σε σταθερή κατάσταση τότε η εξέλιξη της ισχύος με την πυκνότητα του νετρονιακού πληθυσμού δίνεται από την σχέση:

$$P(t) = P_0 \frac{N(t)}{N_0} \quad (\Sigma\chi.6.11)$$

Θα παρουσιαστεί στη συνέχεια του Κεφαλαίου η σύγκριση ενός ADS αντιδραστήρα με έναν κρίσιμο LWR (Liquid Water Reactor). Αυτό που ενδιαφέρει είναι η μελέτη του λεγομένου ακαριαίου άλματος (Prompt Jump). Το ακαριαίο άλμα αφορά την στιγμιαία μεταβολή στην ισχύ του αντιδραστήρα που είναι αποτέλεσμα εισαγωγής αντιδραστικότητας στο σύστημα και προσεγγιστικά μπορεί να δοθεί μέσω της συνθήκης προσέγγισης ακαριαίου άλματος, PJA (Prompt Jump Approximation). Το PJA δίνεται μέσω της σχέσης για το :

$$\frac{dN}{dt} \Big|_{t=0} = 0 \quad (\text{Σχ. 6.12})$$

όπου χρησιμοποιήσαμε τη Σχ. 6.2. Ουσιαστικά, αυτό που δηλώνει η Σχ. 6.12 είναι το γεγονός ότι τα ακαριαία νετρόνια (prompt neutrons) δεν διαδραματίζουν κάποιο ρόλο στην παρατηρούμενη στιγμιαία αύξηση ισχύοντος αντιδραστήρα.

## 6.2 Μείζονα ζητήματα στη δυναμική των ADS αντιδραστήρων

Έχουν περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια οι προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν και προκύπτουν από σύζευξη ενός επιταχυντή με έναν πυρηνικό αντιδραστήρα, κυρίως όσον αφορά την ενδεχομένη αστοχία των επιμέρους συστημάτων που απαρτίζουν έναν ADS αντιδραστήρα. Έχει ήδη σχολιαστεί στο τρίτο Κεφάλαιο η συμπεριφορά του επιταχυντή (beam trips) και οι θερμικές καταπονήσεις που προκαλούνται.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναδειχθούν τρία κυρίαρχα ζητήματα όπου πρέπει να εξεταστεί η δυναμική των ADS αντιδραστήρων. Το πρώτο ζήτημα είναι οι ξαφνικές μεταβολές στην ενέργεια δέσμης του επιταχυντή ή οι απότομες αλλαγές στην αντιδραστικότητα του αντιδραστήρα. Το δεύτερο ζήτημα είναι τα χαρακτηριστικά του ADS αντιδραστήρα μετά από σβέση (shutdown) και το πέρασμα από την ενέργεια λειτουργίας του σε ψυχρή κατάσταση. Και τρίτον, η συμπεριφορά του συστήματος κάτω από μεταβατικές (transient) καταστάσεις που μπορεί να συμβούν κατά την διάρκεια της λειτουργίας του, π.χ. beam trips, απώλεια ροής ψυκτικού λόγω βλάβης της αντλίας ψυκτικού κ.α.

Υπάρχουν δυο κατηγορίες μεταβατικών καταστάσεων (transient). Οι λεγόμενες “protected” όπου ο επιταχυντής σταματά όπως έχει υπολογιστεί, το αντίστοιχο στους κρίσιμους αντιδραστήρες με την ορθή λειτουργία των ράβδων ελέγχου. Και οι λεγόμενες “unprotected” όπου παρουσιάζονται προβλήματα στις fail-safe διαδικασίες.

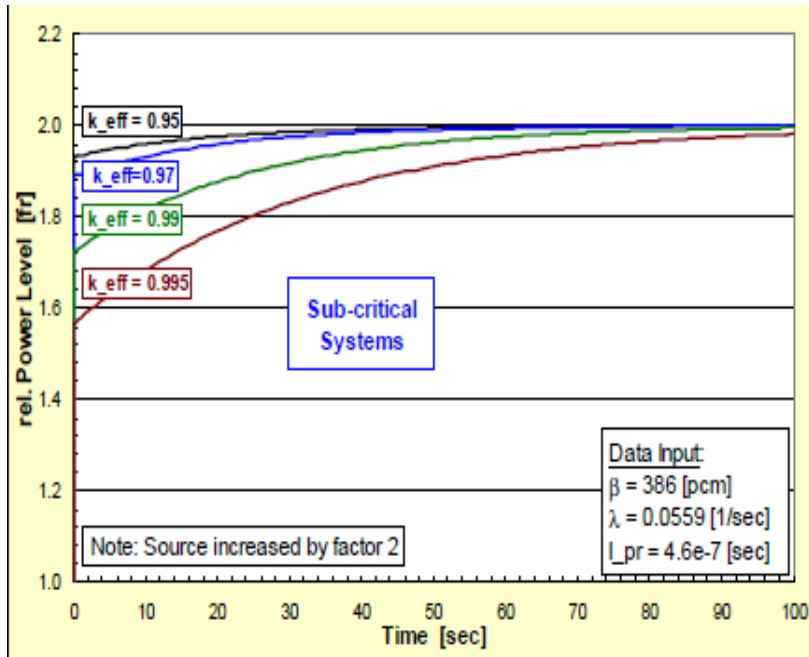
## 6.3 Αντίδραση του συστήματος σε περίπτωση μεταβολής της έντασης δέσμης

Λόγω του επιπέδου ανάπτυξης της τεχνολογίας των επιταχυντών που έχει μέχρι στιγμής επιτευχθεί για τη σύζευξη τους με ένα υποκρίσιμο αντιδραστήρα, υπάρχει το ενδεχόμενο της μεταβολής στην ένταση της δέσμης. Σε αυτό το ενδεχόμενο η συνεισφορά της εξωτερικής πηγής θα δίνεται από τον τύπο:

$$S^*(t) = S(t) \frac{I^*}{I_0} \quad (\text{Σχ.6.13})$$

όπου  $I^*$  είναι η νέα ένταση του ρεύματος του επιταχυντή που έχει προκύψει λόγω δυσλειτουργίας και  $I_0$  η ένταση του ρεύματος υπό κανονική λειτουργία.

Το παράδειγμα που υπάρχει στην βιβλιογραφία αλλά και στην μελέτη των C. Rubbia et. al. [2], αναφέρεται στην περίπτωση του διπλασιασμού της δέσμης. Η απόκριση του συστήματος φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 6-1) για διάφορες τιμές  $k_{eff}$ .



Σχήμα 6-1 Απόκριση του ADS αντιδραστήρα για διπλασιασμό της έντασης της δέσμης για διάφορα  $k_{eff}$  [1]

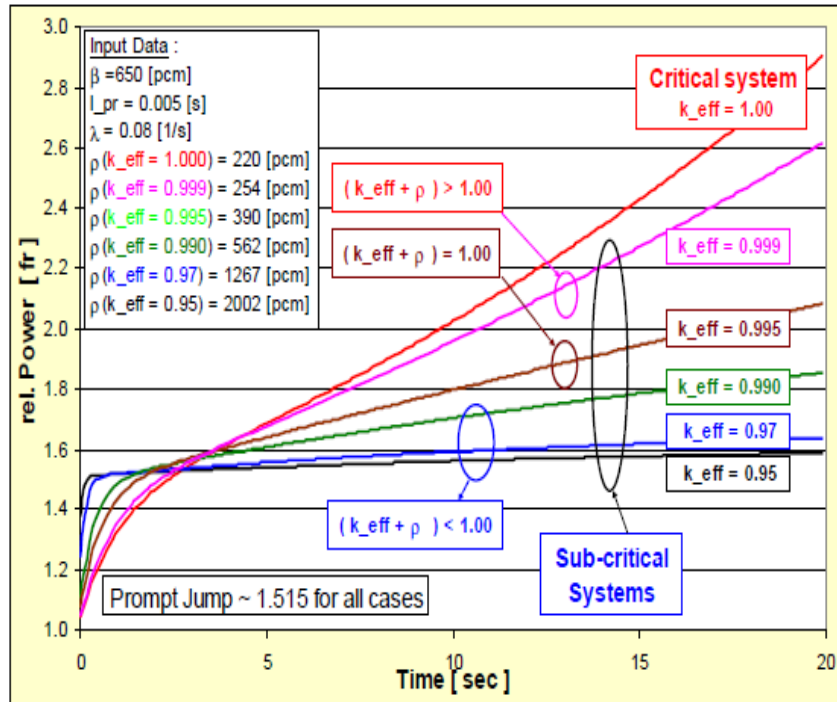
Αυτό που παρατηρείται είναι ένα ακαριαίο άλμα (prompt jump) του αντιδραστήρα. Για  $k_{eff} \sim 0.95$  το εύρος του άμεσου άλματος είναι το μεγαλύτερο, προσεγγίζοντας μετά την πάροδο 100 s την τελική τιμή. Για μεγαλύτερες τιμές  $k_{eff}$  και συγκεκριμένα για  $k_{eff} \sim 0.995$  αυτό αντιστοιχεί σε 50%-60% της τελικής τιμής. Παρατηρείται το γεγονός ότι τα delayed neutrons και η χρονική συμπεριφορά τους δεν έχουν καμία σημασία για μικρότερες τιμές του  $k_{eff}$  αλλά διαδραματίζουν ρόλο όσο μεγαλύτερη γίνεται η τιμή του πολλαπλασιαστή νετρονίων, καθώς η ισχύς προσεγγίζει την τελική τιμή της.

#### 6.4 Σύγκριση της συμπεριφοράς του ADS αντιδραστήρα και ενός κρίσιμου αντιδραστήρα

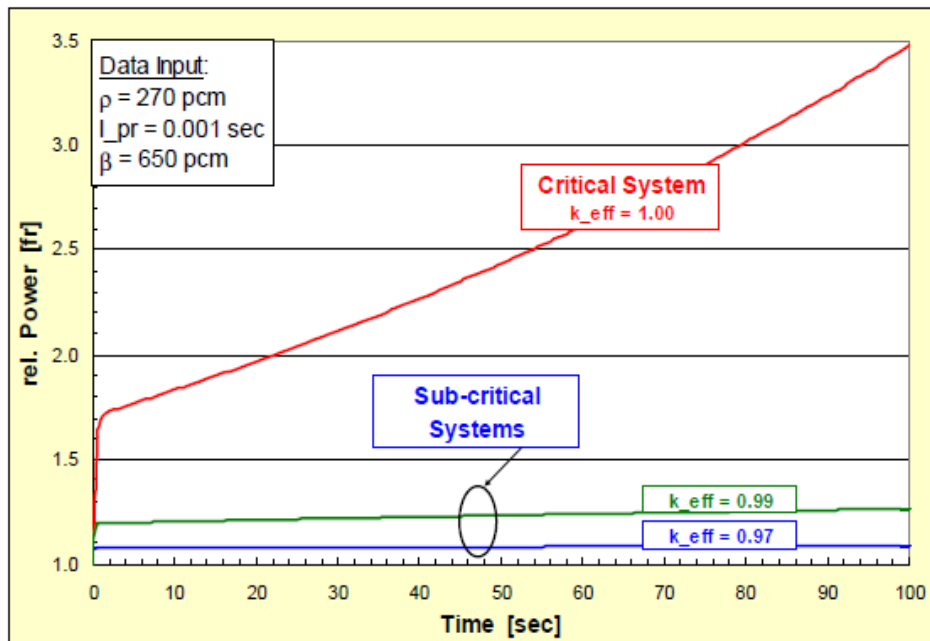
Παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον οι σύγκριση της κινητικής συμπεριφοράς (kinetics) ενός ADS αντιδραστήρα και ενός κρίσιμου αντιδραστήρα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα παρουσιαστεί η σύγκριση με έναν LWR, για διάφορα πιθανά συμβάντα.

##### 6.4.1 Σύγκριση της συμπεριφοράς του ADS αντιδραστήρα και ενός κρίσιμου αντιδραστήρα κάτω από την αύξηση της αντιδραστικότητας

Η πρώτη περίπτωση είναι η σύγκριση του ADS αντιδραστήρα για διαφορετικές τιμές του  $k_{eff}$  με τον LWR αντιδραστήρα αυξάνοντας την αντιδραστικότητα (reactivity insertion) για τον κάθε έναν αντιδραστήρα ξεχωριστά, με σκοπό να έχουν το ίδιο ακαριαίο άλμα (Σχήμα 6-2). Η δεύτερη περίπτωση αφορά τον καθορισμό της τιμής της αντιδραστικότητας ( $\rho = 270 pcm$ ), για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις (Σχήμα 6-3).



Σχήμα 6-2 Σύγκριση της απόκρισης του ADS αντιδραστήρα (διάφορα  $k_{eff}$ ) με τον LWR με κοινό ακαριαίο άλμα [1]



Σχήμα 6-3 Σύγκριση της απόκρισης του ADS αντιδραστήρα (διάφορα  $k_{eff}$ ) με τον LWR για καθορισμένη τιμή της αντιδραστικότητας ( $\rho=270$  pcm) [1]

Για την πρώτη περίπτωση, αυτό που παρατηρείται είναι ότι για τον κρίσιμο αντιδραστήρα αμέσως μετά το ακαριαίο άλμα, η αύξηση του λόγου της ισχύος είναι εκθετική. Για τους ADS αντιδραστήρες αυτό που παρατηρείται είναι ότι η συμπεριφορά τους εξαρτάται από το άθροισμα  $k_{eff} + \rho$ . Εάν  $k_{eff} + \rho \leq 1$  τότε παρατηρείται γραμμική αύξηση του λόγου της ισχύος προς την τελική τιμή. Εάν ισχύει ότι  $k_{eff} + \rho > 1$  τότε έχουμε παρόμοια συμπεριφορά με τον κρίσιμο αντιδραστήρα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-3, για την ίδια εισαγωγή αντιδραστικότητας, η συμπεριφορά των συστημάτων φαίνεται πως είναι εντελώς διαφορετική αφού ο κρίσιμος αντιδραστήρας (LWR)

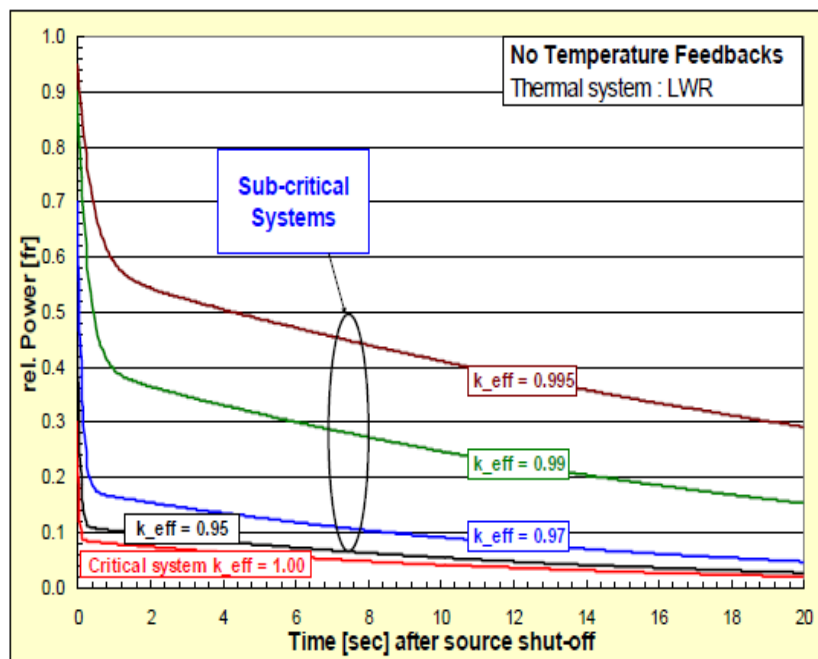
αυξάνει εκθετικά ενώ για τους ADS αντιδραστήρες, με τα συγκεκριμένα  $k_{eff}$  που απεικονίζονται, αποκτούν τη μέγιστη τιμή γραμμικά.

#### 6.4.2 Σύγκριση της συμπεριφοράς του ADS αντιδραστήρα και ενός κρίσιμου αντιδραστήρα κατά τη σβέση

Συνεχίζοντας την σύγκριση μεταξύ του ADS αντιδραστήρα και ενός κρίσιμου αντιδραστήρα, μας ενδιαφέρει η συμπεριφορά των αντιδραστήρων κατά τη διαδικασία σβέσης (shutdown). Στην περίπτωση του ADS αυτό επιτυγχάνεται με το σβήσιμο του επιταχυντή και υποθετικά χωρίς να υπάρχουν ράβδοι ελέγχου, ενώ ο LWR λειτουργεί με τον καθιερωμένο τρόπο, δηλαδή την χρήση των ράβδων ελέγχου.

Παρουσιάζονται δυο προσομοιώσεις καθώς στην περίπτωση του ADS αντιδραστήρα χωρίς ράβδους ελέγχου, σημαντικό ρόλο παίζουν οι συντελεστές αντιδραστικότητας, οι οποίοι προσφέρουν αντιδραστικότητα όταν τα βασικά υλικά του αντιδραστήρα μειώνουν την θερμοκρασία τους.

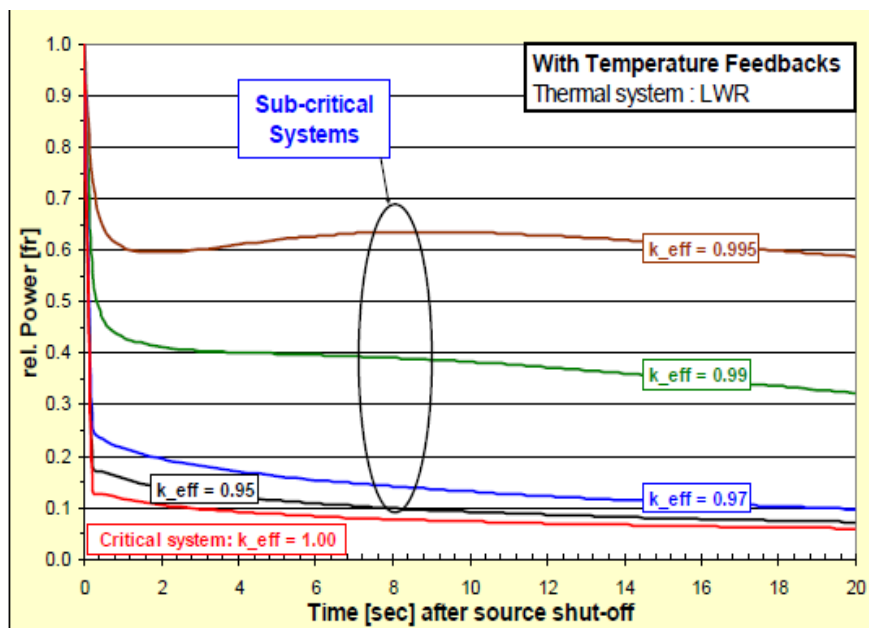
Αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 6-4 είναι τα εγγενή χαρακτηριστικά των υποκρίσιμων συστημάτων. Παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των δυο τύπων αντιδραστήρα. Αυτό οφείλεται στις ράβδους ελέγχου που έχουν κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να εισάγουν στο σύστημα τα απαιτούμενα ποσά αρνητικής αντιδραστικότητας με αποτέλεσμα να μειώνεται η παραγόμενη ισχύς στα επίπεδα κάτω από την αντίστοιχη ισχύ που παράγεται από τη decay heat. Υπολογίζεται ότι η ράβδοι ελέγχου εισάγουν στον αντιδραστήρα 10, 12(\$\beta\$) με αποτέλεσμα την άμεση μείωση της ισχύος του αντιδραστήρα περίπου στο 6% περίπου [1].



Σχήμα 6-4 Σύγκριση της απόκρισης του ADS αντιδραστήρα (διάφορα  $k_{eff}$ ) με τον LWR, μετά το σβήσιμο του επιταχυντή και εισαγωγή των ράβδων ελέγχου αντίστοιχα, χωρίς temperature feedback coefficients[1]

Στην περίπτωση του ADS αντιδραστήρα, στα σχέδια όπου δεν υπάρχουν ράβδοι ελέγχου, δεν ισχύει αυτό. Παρατηρείται ότι όσο πιο μικρή είναι η τιμή του  $k_{eff}$ , τόσο πιο κοντά είναι η συμπεριφορά των υποκρίσιμων αντιδραστήρων με τους κρίσιμους. Άρα, γεννιέται το ερώτημα που αφορά το θερμοϋδραυλικό σχεδιασμό του υποκρίσιμου συστήματος για  $k_{eff} \geq 0.98$ , ειδικά κάτω από μεταβατικές συνθήκες στις οποίες ο μηχανισμός απομάκρυνσης θερμότητας θεωρείται μειωμένος. Σε αυτό το ερώτημα απάντηση μπορεί να δώσει το LBE που θα χρησιμοποιηθεί ως ψυκτικό. Οι

θερμοφυσικές ιδιότητες του LBE και η συμπεριφορά του στη μεταφορά θερμότητας, σε συνδυασμό με τις μεγάλες ποσότητες ψυκτικού, εξασφαλίζουν ότι ακόμα και για χαμηλό ρυθμό μείωσης της παραγόμενης ισχύος η θερμοκρασία του πυρηνικού καυσίμου δεν θα αυξηθεί σε απαγορευτικά, για την ακεραιότητά του, επίπεδα.

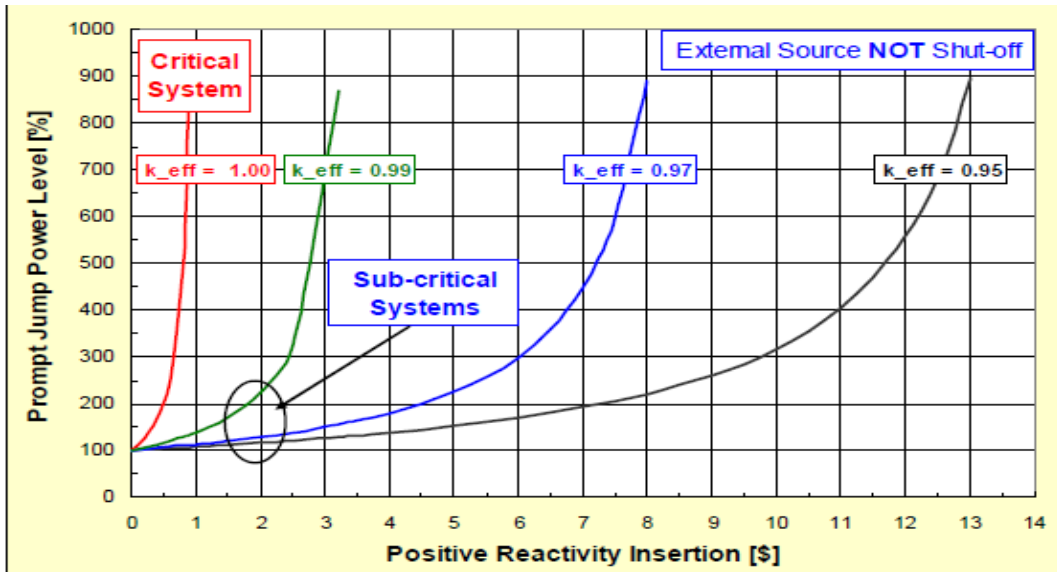


Σχήμα 6-5 Σύγκριση της απόκρισης του ADS αντιδραστήρα (διάφορα  $k_{eff}$ ) με τον LWR για το σθήςσιμο του επιταχυντή και εισαγωγή των ράβδων ελέγχου αντίστοιχα, συναρτήσει του συντελεστή αντιδραστικότητας θερμοκρασίας (temperature feedback coefficients) [1]

Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται περνώντας από θερμή κατάσταση (κανονική λειτουργία του αντιδραστήρα) στην ψυχρή (κλείσιμο του αντιδραστήρα) συνυπολογίζοντας την μεταβολή των θερμοκρασιών των υλικών του αντιδραστήρα, π.χ. του ψυκτικού του καυσίμου (Σχήμα 6-5). Εισάγεται τότε στο σύστημα, θετική αντιδραστικότητα. Αυτή εξουδετερώνει τη συνεχώς μειούμενη νετρονική ροή. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6-5 η πτώση στην παράγωγη ισχύος είναι της τάξης του 40% όταν το  $k_{eff}$  έχει επιλεχθεί να προσεγγίσει τη μονάδα. Γενικά, αυτό που θα πρέπει να ισχύει είναι ότι  $k_{eff} + \rho_{feedbacks} < 1$ . Από αυτή την σχέση προκύπτει ότι πρέπει να υπάρχει γνώση όλων των συντελεστών αντιδραστικότητας λόγω θερμοκρασίας (temperature feedback coefficients) οι οποίοι επηρεάζουν το υποκρίσιμο σύστημα. Ενδεικτικά, υπολογίζεται ότι για υποκρίσιμα συστήματα με  $k_{eff} \geq 0.98$  η αντιδραστικότητα θα πρέπει να είναι της τάξης των 2000 pcm. Στην πραγματικότητα, η αντιδραστικότητα για ψυκτικό LBE και Ήλιο δεν αναμένεται να είναι της τάξης των 1500 pcm τουλάχιστον, για τα διάφορα πειράματα των διάφορων σχεδίων που προτάθηκαν στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος της Ε.Ε. PDS\_XADS (βλ. 1.2).

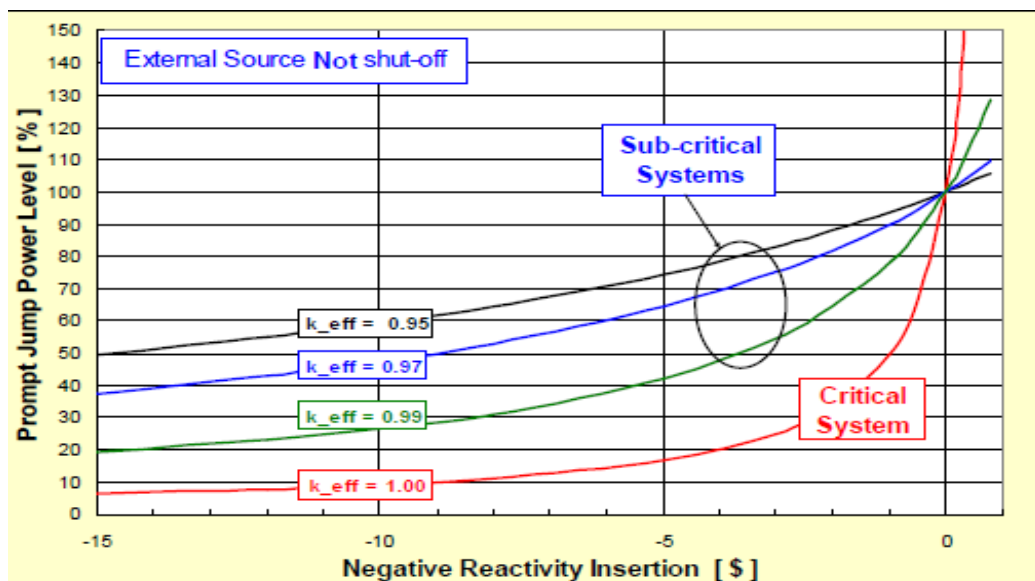
#### 6.4.3 Σύγκριση της συμπεριφοράς του ADS αντιδραστήρα και ενός κρίσιμου αντιδραστήρα κάτω από μεταβατικές μεταβολές (unprotected)

Οι προηγούμενες ενότητες περιέγραψαν τις λεγόμενες “protected” μεταβατικές μεταβολές, δηλαδή οι μεταβολές που ο επιταχυντής ανταποκρινόταν στον ενδεχόμενο τερματισμό της λειτουργίας του. Στη συνέχεια περιγράφονται οι μεταβολές που συμβαίνουν στην περίπτωση όπου ο επιταχυντής δεν τερματίζει τη λειτουργία του (“unprotected”). Η αντίστοιχη περίπτωση για τους κρίσιμους αντιδραστήρες είναι η δυσλειτουργία των ράβδων ελέγχου. Για αυτή την περίπτωση παρουσιάζονται δυο κατηγορίες μεταβατικών μεταβολών, η πρώτη αφορά την θετική αντιδραστικότητα (Σχήμα 6-6) που εισέρχεται στον αντιδραστήρα και η δεύτερη για αρνητική (Σχήμα 6-7).



Σχήμα 6-6 Σύγκριση της απόκρισης του ADS αντιδραστήρα(διάφορα  $k_{eff}$ ) με τον LWR για εισαγωγή θετικής αντιδραστικότητας χωρίς temperature feedback [1]

Στο Σχήμα 6-6 φαίνεται η συμπεριφορά του κρίσιμου και του υποκρίσιμου αντιδραστήρα για  $\rho > 0$ . Είναι γνωστό για τους κρίσιμους αντιδραστήρες που βρίσκονται σε κανονική λειτουργία (zero power state), η εισαγωγή για παράδειγμα +1(\$) αντιδραστικότητας οδηγεί σε αλματώδη αύξηση της παραγόμενης ισχύος (prompt jump). Για τους υποκρίσιμους αντιδραστήρες, για να παρατηρηθεί η ίδια αύξηση στην παραγόμενη ισχύ θα πρέπει να εισαχθούν μεγαλύτερες ποσότητες αντιδραστικότητας. Αυτή η συμπεριφορά των ADS αντιδραστήρων είναι που φανερώνει τα πλεονεκτήματα τους ακόμη και κάτω από τη δυσλειτουργία του επιταχυντή (unprotected). Επιπλέον, ο χρόνος που απαιτείται για να παρατηρηθεί αυτό το ακαριαίο άλμα είναι μεγαλύτερος στους υποκρίσιμους αντιδραστήρες σε σχέση με τους κρίσιμους, με αποτέλεσμα να δίνεται η δυνατότητα ανθρώπινης παρέμβασης με σκοπό την διόρθωση της ενδεχόμενης αυτής κατάστασης.



Σχήμα 6-7 Σύγκριση της απόκρισης του ADS αντιδραστήρα (διάφορα  $k_{eff}$ ) με τον LWR για εισαγωγή αρνητικής αντιδραστικότητας χωρίς temperature feedback[1]



Είναι γνωστό ότι σε μεταβατικές καταστάσεις δυσλειτουργίας είτε κρίσιμων είτε υποκρίσιμων αντιδραστήρων αναμένεται εισαγωγή αρνητικής αντιδραστικότητας στο σύστημα, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του πυρηνικού καυσίμου. Για παράδειγμα, ένα ατύχημα απώλειας ροής ψυκτικού (LOFA) έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του καυσίμου, λόγω ανεπαρκούς ψύξης και την πτώση της αντιδραστικότητας. Αυτό που παρατηρείται στο Σχήμα 6-7 είναι ότι το ακαριαίο άλμα, στην συγκεκριμένη περίπτωση prompt drop, για την εισαγωγή της ίδιας τιμής αρνητικής αντιδραστικότητας είναι μεγαλύτερο για τους κρίσιμους αντιδραστήρες σε σύγκριση με τους υποκρίσιμους. Αυτή είναι η πιο συνήθης περίπτωση για τα (unprotected) απροσδόκητα φαινόμενα και όπως φαίνεται, η παραγόμενη ισχύ για τους υποκρίσιμους αντιδραστήρες παραμένει σχετικά υψηλή. Αυτό αποτελεί μειονέκτημα των υποκρίσιμων αντιδραστήρων σε σχέση με τους κρίσιμους, καθώς πρέπει να εισαχθεί μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή αρνητικής αντιδραστικότητας για να επιτευχθεί η απαιτούμενη μείωση στην παραγωγής ισχύος.

### 6.5 Συνοπτική σύγκριση ADS αντιδραστήρων με τους κρίσιμους αντιδραστήρες

Αυτό που διαπιστώθηκε στην προηγούμενη ενότητα είναι η στενή σχέση μεταξύ του  $k_{eff}$  και της απόκρισης ενός υποκρίσιμου αντιδραστήρα. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης και ελέγχου της τιμής του πολλαπλασιαστή νετρονίων καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του αντιδραστήρα. Επιπλέον, η μη ύπαρξη, στα περισσότερα σχέδια, ράβδων ελέγχου, οδηγεί σε μεγαλύτερη εξάρτηση από τους temperature reactivity coefficients, οι οποίοι παίζουν τον μεγαλύτερο ρόλο για τον έλεγχο του  $k_{eff}$ . Αυτό συμβαίνει γιατί οι συντελεστές αντιδραστικότητας σε ένα σύστημα χωρίς ράβδους ελέγχου καθορίζουν τη συμπεριφορά κατά τη διάρκεια απροσδόκητων φαινομένων, αφού δεν υπάρχει άλλος τρόπος ελέγχου του συστήματος. Κατά τη διαδικασία σβέσης (shutdown) ενός υποκρίσιμου αντιδραστήρα θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση σε όλους εκείνους τους παράγοντες οι οποίοι ενδέχεται να εισάγουν θετικά ποσά αντιδραστικότητας στο σύστημα.

Γενικά, για τη λεγομένη κινητική του αντιδραστήρα (Reactor Kinetics) το καθοριστικό γεγονός για τους ADS αντιδραστήρες είναι, και αυτό ισχύει εντονότερα στην περίπτωσή μικρότερου  $k_{eff}$ , ότι η κινητική των νετρονίων είναι λιγότερο συνδεδεμένη με τη θερμοϋδραυλική του αντιδραστήρα, από ότι στους κρίσιμους αντιδραστήρες. Αυτό είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα για την ασφάλεια των ADS αντιδραστήρων, καθώς συνεπάγεται ότι για την περίπτωσή μεταβατικών μεταβολών που μπορεί να συμβούν κατά την διάρκεια λειτουργίας, αυτές μπορούν να ελεγχθούν μέσω της έντασης της δέσμης του επιταχυντή. Επιπλέον, υπό την προϋπόθεση ότι έχει διακοπεί η δέσμη σωματιδίων του επιταχυντή δεν υπάρχει κίνδυνος ατυχήματος κρισιμότητας ανεξάρτητα του τύπου καυσίμου που χρησιμοποιείται ή της κατάστασης του ψυκτικού κυκλώματος.

### 6.6 Αντισεισμική προστασία αντιδραστήρα ADS

Πέρα από το ζήτημα των πυρηνικών καταλοίπων και της διαχείρισης τους, μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις όσον αφορά την πυρηνική βιομηχανία, εάν είναι η πυρηνική ενέργεια να κερδίσει ευρεία αποδοχή, είναι η αντισεισμική θωράκιση των πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος. Το ίδιο ισχύει και για τους ADS αντιδραστήρες.

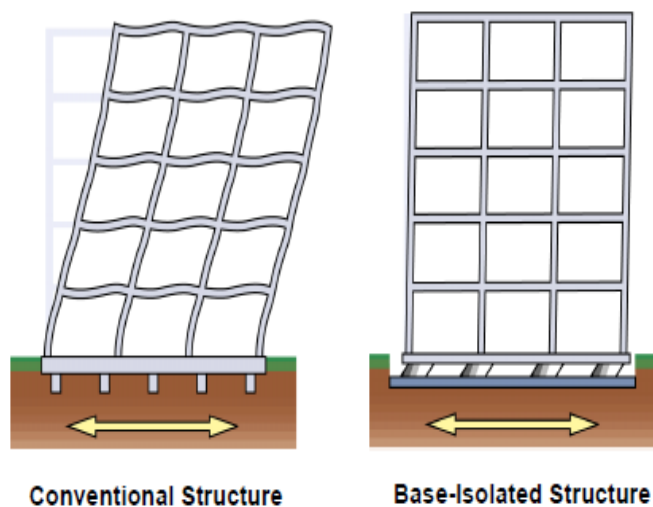
Μια προσέγγιση σε αυτό το θέμα είναι η εφαρμογή των ήδη υφιστάμενων μεθόδων για το λεγόμενο SSE (State Shutdown Earthquake) που ακολουθούνται στο 90% των πυρηνικών εργοστασίων στις Η.Π.Α. Αυτές προβλέπουν ότι η κάθετη ή/και η οριζόντια επιτάχυνση δεν πρέπει να ξεπερνά τα 0.3g. Βέβαια, εάν υιοθετηθεί αυτή η προσέγγιση, θα οδηγήσει σε υψηλά σεισμικά φορτία κυρίως στις συνιστώσες του αντιδραστήρα και δεν θα επιτρέψει την εύκολη ανέγερση των

ADS αντιδραστήρων στην περιοχή του Ειρηνικού. Πρέπει να αναμένεται στην περίπτωση των ADS αντιδραστήρων, η δυνατότητα εγκατάστασης τους κάτω από διάφορες σεισμολογικές συνθήκες και σε διάφορες περιοχές με διαφορετικά γεωλογικά χαρακτηριστικά. Γενικά, οι αντιδραστήρες που θα χρησιμοποιούν υγρά μέταλλα ως ψυκτικό διαθέτουν σχετικά λεπτό δοχείο, λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας και των χαμηλών πιέσεων κατά τη λειτουργία τους.

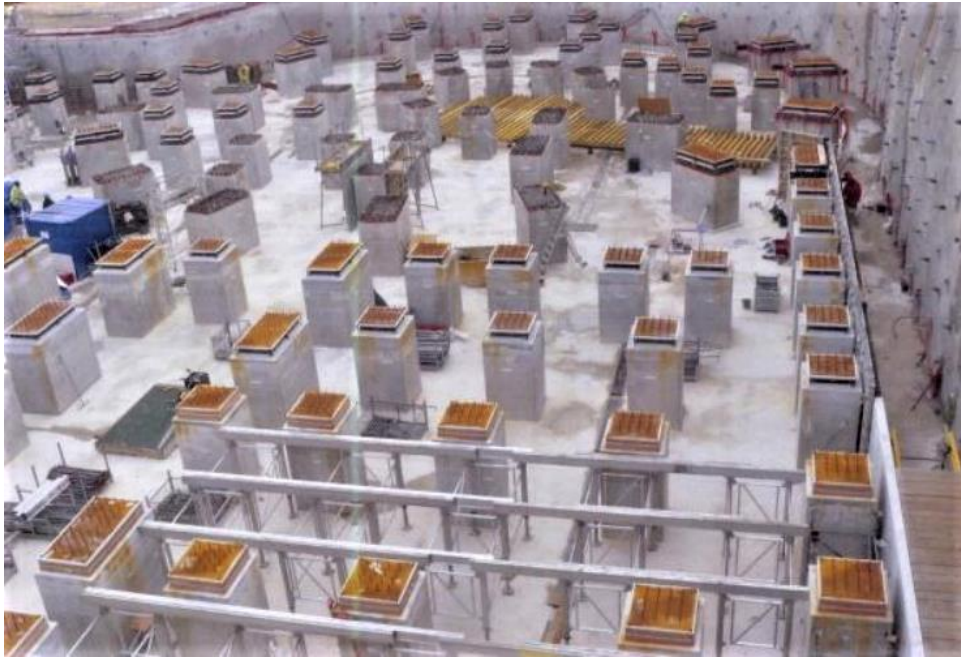
Η σχεδίαση βάσει «Base Isolation» είναι μια σημαντική εξέλιξη στον τομέα της πυρηνικής τεχνολογίας. Ο σχεδιασμός αυτός προβλέπει την ύπαρξη ενός εύκαμπτου μηχανισμού μεταξύ των θεμελίων και του εδάφους (Σχήμα 6-8, Σχήμα 6-9). Η ύπαρξη αυτού του μηχανισμού οδηγεί στην αποσυμφόρηση της εγκατάστασης από τις οριζόντιες καταπονήσεις καθώς η εγκατάσταση κινείται σαν ένα στερεό σώμα κατά την διάρκεια των σεισμικών δονήσεων.

Έρευνες που έχουν γίνει στην Ιαπωνία και αφορούν γενικότερα τους Liquid Metal Reactors έδειξαν ότι δεν θα ήταν οικονομικά συμφέρουσα η εγκατάσταση τέτοιων εργοστασίων στην Ιαπωνία χωρίς αυτά να έχουν σχεδιαστεί με βάση τη συγκεκριμένη μέθοδο. Γενικά, εάν ακολουθηθεί η συγκεκριμένη μέθοδος φαίνεται να απλοποιείται ο σχεδιασμός των εξαρτημάτων αλλά και των σωληνώσεων και επιπρόσθετα η συμπεριφορά της κατασκευαστικής δομής των εργοστασίων αυτών γίνεται προβλέψιμη, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο λόγω αβεβαιοτήτων. Ακόμα, στο ενδεχόμενο ανακάλυψης αναπάντεχων γεωτεκτονικών συνθηκών στην περιοχή που θα κατασκευαστεί το εργοστάσιο, δεν είναι αναγκαία η εγκατάλειψη της περιοχής αλλά η τροποποίηση μόνο του isolated system. Υπάρχουν ήδη δυο πυρηνικοί σταθμοί που έχουν κατασκευασθεί χρησιμοποιώντας τη μέθοδο base isolation. Ο πρώτος κατασκευάστηκε το 1976 στο Koeberg της Νοτίου Αφρικής και ο δεύτερος το 1978 στο Cruas της Γαλλίας. Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται και στον υπό κατασκευή αντιδραστήρα Jules Horowitz στη Cadarache της νότιας Γαλλίας, καθώς και στον ITER, που είναι το μεγάλο πείραμα που θα πραγματοποιηθεί με σκοπό την εξερεύνηση δυνατοτήτων για την πυρηνική σύντηξη.

Η μέθοδος Base Isolation έχει γίνει προσιτή λόγω των τεχνολογικών εξελίξεων που υπάρχουν γενικά στην κατασκευή των εύκαμπτων υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της εύκαμπτης βάσης, καθώς και σε εξελίξεις στην μηχανική κατασκευή του συνολικού μηχανισμού στήριξης. Άλλοι παράγοντες είναι το γεγονός της ύπαρξης υπολογιστικών προγραμμάτων προσομοίωσης που έχουν βοηθήσει πάρα πολύ στη βελτίωση μελέτης αυτής της μεθόδου.



Σχήμα 6-8 Σύγκριση συμβατικής κατασκευής με Base isolated κατασκευή [5]



Σχήμα 6-9 Φωτογραφία του συστήματος της base isolation από τον αντιδραστήρα Jules Horowitz [6]

## 6.7 Απομάκρυνση της εναπομένουσας παραγόμενης θερμότητας (residual heat) με κυκλοφορία αέρα

Ένα μεγάλο πρόβλημα που αντιμετωπίζει το σύνολο των πυρηνικών αντιδραστήρων είναι η εναπομένουσα παραγόμενη θερμότητα (residual heat). Η εναπομένουσα θερμότητα παίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή θερμότητας στους αντιδραστήρες μετά τη σβέση τους, οπότε οι πυρηνικές αλυσιδωτές αντιδράσεις έχουν ανασταλεί. Η διάσπαση των βραχύβιων ραδιοϊσοτόπων που παράγονται λόγω της σχάση συνεχίζεται για κάποιο ένα διάστημα μετά τη σβέση του αντιδραστήρα με αποτέλεσμα την παραγωγή μεγάλων ποσών θερμότητας.

Η πυρηνική βιομηχανία έχει αναπτύξει διάφορους τρόπους για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος με φυσικά μέσα στην περίπτωση που όλα τα μηχανικά υποβοηθούμενα συστήματα παρουσιάσουν πρόβλημα στην λειτουργία τους. Στην εργασία τους οι C. Rubbia et. al. [2] εφάρμοσαν στο σχεδιασμό του αντιδραστήρα Energy Amplifier, το λεγόμενο σύστημα RVACS (Reactor Vessel Air Cooling System) για να αντιμετωπίσουν τέτοιου είδους ζητήματα. Ακολουθεί μια παρουσίαση της διαδικασίας που λαμβάνει χώρα μετά τη σβέση του αντιδραστήρα (SCRAM) για το σχέδιο του Energy Amplifier (Σχήμα 6-10).

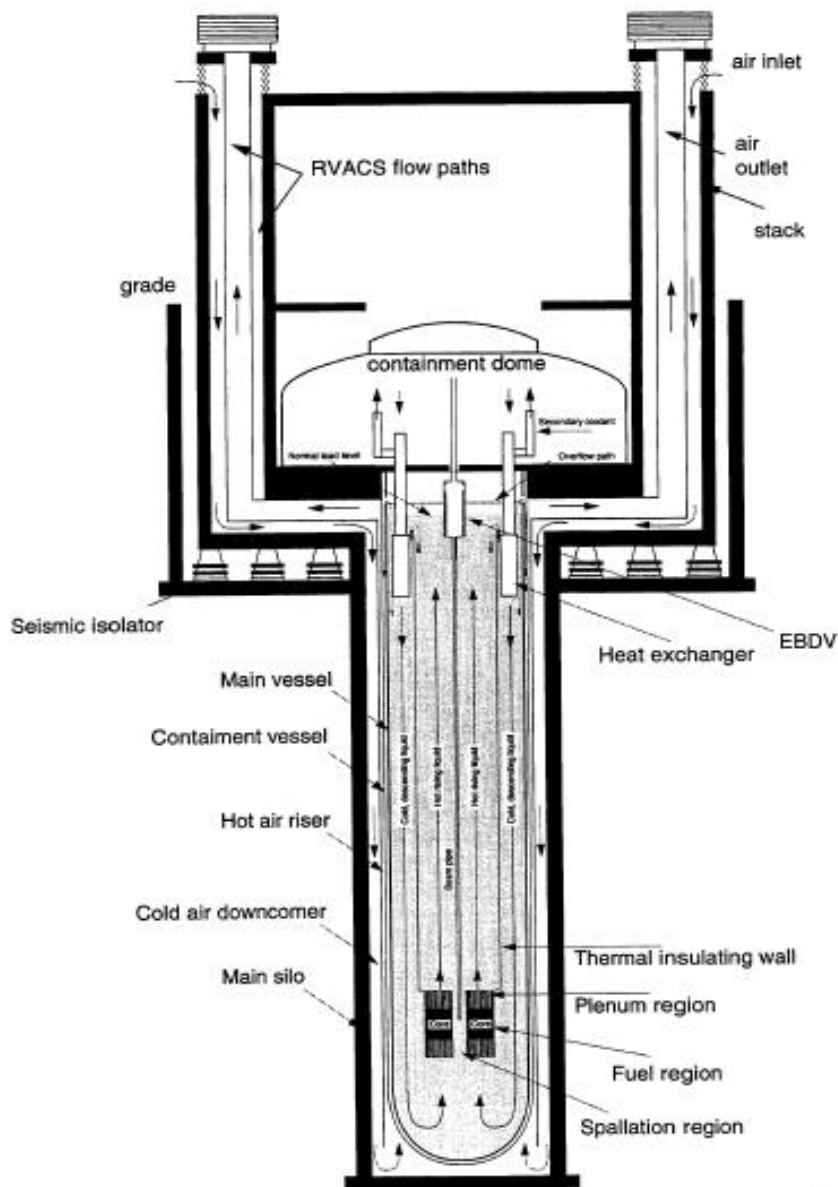
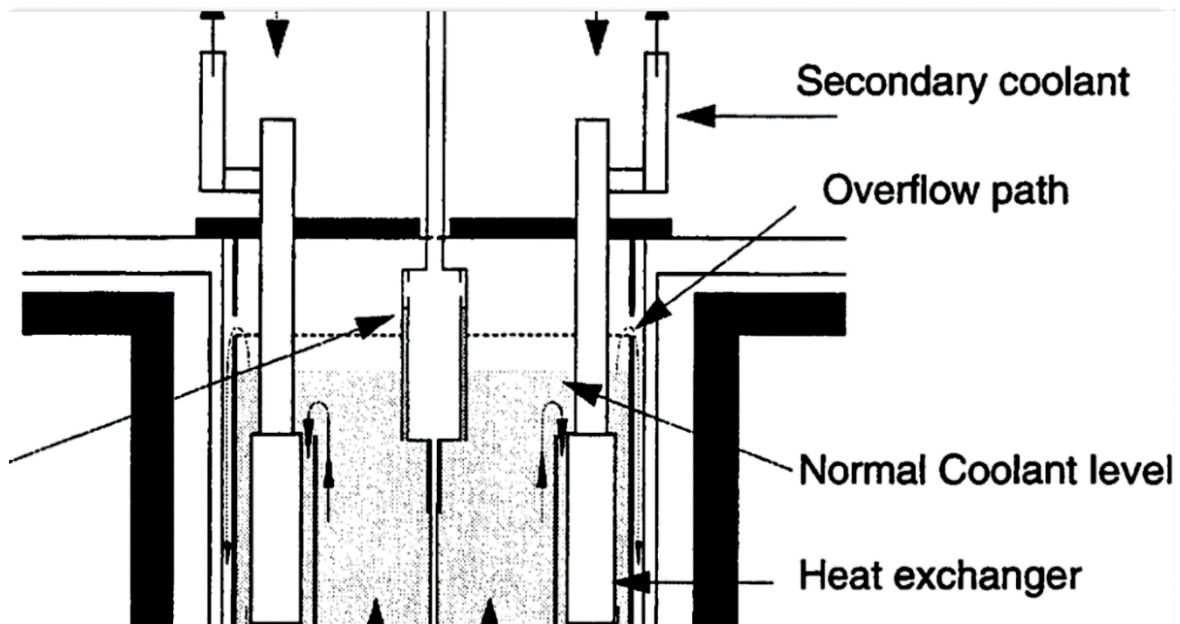


Figure 4.1a

Σχήμα 6-10 Σχηματική απεικόνιση του Energy Amplifier[2]

Η εναπομένουσα παραγόμενη θερμότητα αναμένεται να αυξήσει την μέση θερμοκρασία του ψυκτικού που έχει επιλεγεί - στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο Μόλυβδος. Ο Μόλυβδος τότε διογκώνεται και αναμένεται η υπερχειλίση του μόλις η θερμοκρασία ξεπεράσει τα επιτρεπτά όρια. Τότε Μόλυβδος θα γεμίσει το κενό που υπάρχει μεταξύ του main vessel και του containment vessel (Σχήμα 6-11). Το κενό αυτό έχει προταθεί να περιέχει Ήλιο για να κρατά τον αντιδραστήρα θερμικά μονωμένο κατά την διάρκεια λειτουργίας του. Όταν ο Μόλυβδος θα γεμίσει το κενό, τότε επιτυγχάνεται θερμική επαφή μεταξύ του main vessel και του containment vessel με αποτέλεσμα την μεταφορά θερμότητας στον αέρα στο κανάλι ανόδου. Η θερμότητα του αέρα αυξάνεται και η φυσική κυκλοφορία ξεκινά. Τα κανάλια ανόδου και καθόδου αποτελούνται από δακτυλιοειδείς διαμορφώσεις γύρω από το συνολικό δοχείο με 18 και 57 cm πάχος.



Σχήμα 6-11 Μεγέθυνση της σχηματικής απεικόνισης του ΕΑ

Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται απομάκρυνση της θερμότητας για θερμοκρασία δοχείου 500 °C. Η εξάρτηση του ρυθμού απομάκρυνσης με την θερμοκρασία του δοχείου είναι γραμμική. Συνοψίζοντας την αλληλουχία των φαινομένων έχουμε: αρχικά η παραγωγή θερμότητας λόγω της διάσπασης των προϊόντων σχάσης έχει μεγαλύτερο ρυθμό από την απομάκρυνση της και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του Μόλυβδου. Ο ρυθμός απομάκρυνσης θερμότητας αυξάνει συνεχώς όσο αυξάνει η θερμοκρασία του δοχείου. Όταν ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας γίνει ίσος με τον ρυθμό απομάκρυνσης τότε η θερμοκρασία του δοχείου είναι μέγιστη. Από εκεί και πέρα ο ρυθμός απαγωγής θερμότητας υπερβαίνει τον ρυθμό παραγωγής θερμότητας και η μέση θερμοκρασία των τοιχωμάτων του δοχείου μειώνεται προοδευτικά. Το RVACS, είναι ένα παθητικό σύστημα ασφαλείας το οποίο έχει ως βάση του τη θερμική διαστολή του Μολύβδου καθώς και τον μηχανισμό μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή. Λειτουργεί για όσο χρονικό διάστημα η θερμότητα του πυρήνα είναι ικανή να διαστείλει το Μόλυβδο, χωρίς να απαιτείται εξοπλισμός με κινούμενα μέρη, π.χ. αντλίες, κυκλοφορητές, ανεμιστήρες κ.α. ή ανθρώπινη παρέμβαση.

## 6.8 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] Physics and Safety of Transmutation Systems A Status Report, OECD/NEA, 2006
- [2] C. Rubbia, J.A. Rubio, S. Buono, F. Carminati, N. Fietier, J. Galvez, C. Geles, Y. Kadi, R. Klapisch, P. Mandrillon, J. Revol και C. Roche, «Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier,» CERN Publishing, 1995.
- [3] Accelerator Driven Systems: Energy Generation And Transmutation Of Nuclear Waste. Status Report, IAEA, 1997
- [4] J. R. Lamarsh, «Introduction to Nuclear Reactor Theory 3rd edition,» *Addison-Wesley, Reading*, 1983.
- [5] Jenna Wong, «Overview of Seismic Isolation of Nuclear Power Plants,» 2012
- [6] M. Fornix, «Seismic Isolation Of Nuclear Power Plants,», *ENEA*, 2011

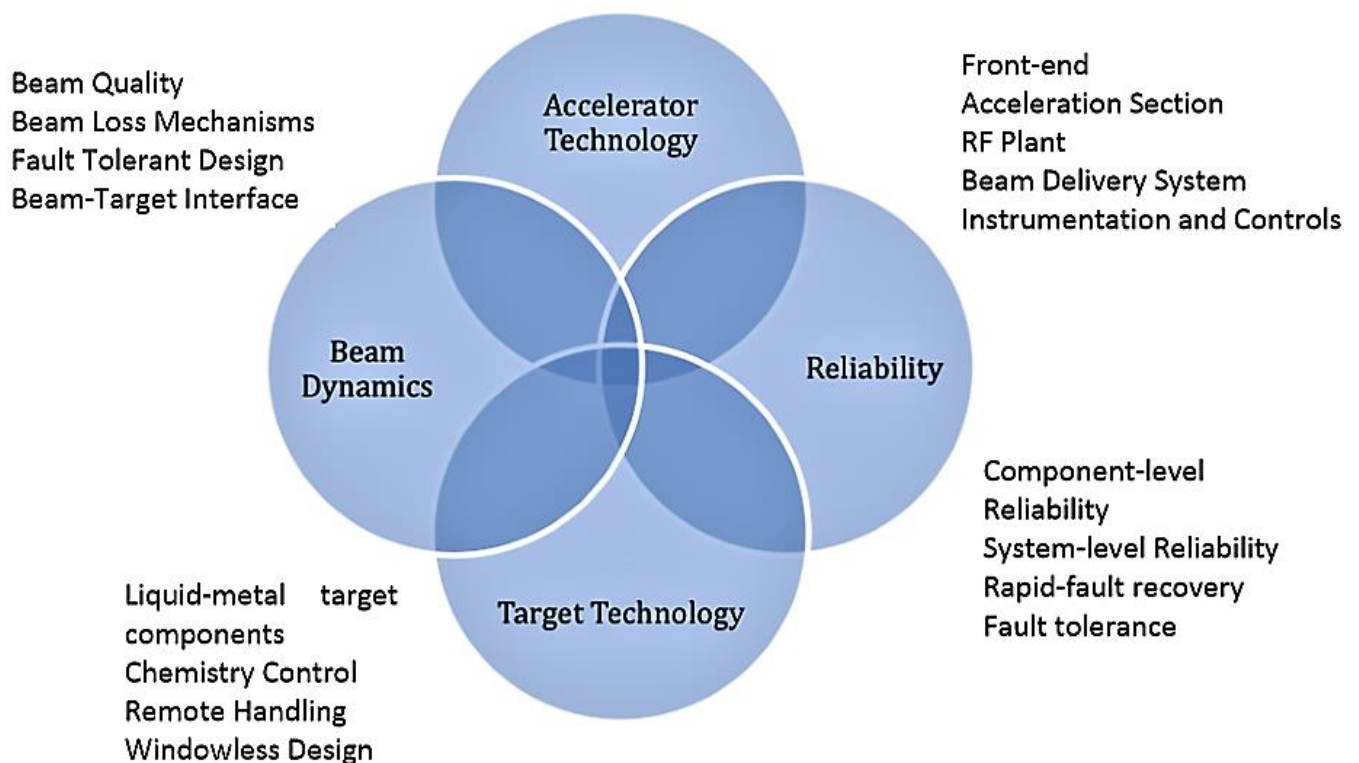
# Κεφάλαιο 7

## 7 Συμπεράσματα

Οι προκλήσεις στον τομέα της παραγωγής και κατανάλωσης της παγκόσμιας ενέργειας είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που θα έχει να αντιμετωπίσει ο πλανήτης στον 21<sup>ο</sup> αιώνα. Ο συγγραφέας της παρούσας εργασίας είναι πεπεισμένος ότι η πυρηνική ενέργεια προσφέρει προοπτικές στην αντιμετώπιση των προκλήσεων αυτών.

Οι ADS αντιδραστήρες αποτελούν ένα από τα πιθανά σχέδια που προσφέρει η πυρηνική τεχνολογία, αν και ακόμη η φάση στην οποία βρίσκονται είναι η φάση επίδειξης της δυνατότητας μεταστοιχείωσης των ραδιενεργών κατάλοιπων. Η βιομηχανική εφαρμογή θα πρέπει να αναμένεται μεταξύ του 2030 και 2040.

Αυτό που αναδεικνύεται από αυτή τη μελέτη είναι η ετοιμότητα για την επίδειξη του συστήματος για τη μεταστοιχείωση των Ακτινίδων και άλλων ραδιενεργών κατάλοιπων. Η Ευρώπη είναι από τους πρωτοπόρους στον τομέα αυτό. Οι Η.Π.Α υπολείπονται στην διερεύνηση του ζητήματος και από τις αναπτυσσόμενες χώρες η Ινδία έχει παρουσιάσει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, καθώς διαθέτει μεγάλα αποθέματα Θωρίου σε σχέση με τα αποθέματα Ουράνιου.



Σχήμα 7-1 Τεχνολογικές προκλήσεις των ADS αντιδραστήρων

Συνοψίζοντας τα βασικά χαρακτηριστικά που αναμένεται να έχει ένας ADS αντιδραστήρας για βιομηχανική παραγωγή ενέργειας και μεταστοιχείωσης έχουμε:

- Γραμμικός επιταχυντής με ενέργεια δέσμης πρωτονίων 1 GeV, επανασχεδιασμένος για τους ADS αντιδραστήρες με σκοπό την αξιοπιστία του, ρεύμα της τάξης των 10 mA και ισχύ της τάξης των 10 MW
- Στόχος κατακερματισμού σε υγρή μορφή και πιθανότατα Μόλυβδος με παραγωγή 20-25 νετρονίων περίπου ανά πρωτόνιο της δέσμης
- Χρήση LBE ως ψυκτικού
- Χρήση παραθύρου δέσμης
- $k_{eff} \sim 0.985$  με κερδος  $G \sim 60$  με 70
- Φ/Μ χάλυβας για την επιλογή των δομικών υλικών του αντιδραστήρα
- Κύριος στόχος η καύση/μεταστοιχείωση των ραδιενεργών καταλοίπων
- Αντισεισμική προστασία βασισμένη μέσω της Base isolation τεχνικής
- Ύπαρξη συστήματος RVACS με σκοπό την ενίσχυση της παθητικής ασφάλειας

Οι ADS αντιδραστήρες συνδυάζουν δυο από τα κορυφαία τεχνολογικά επιτεύγματα του 20<sup>ου</sup> αιώνα, τον επιταχυντή σωματιδίων και τον πυρηνικό αντιδραστήρα ισχύος. Οι τεχνολογίες αυτές, σε συνδυασμό με τις απαιτούμενες εξελίξεις στον τομέα των ψυκτικών, του στόχου κατακερματισμού, των δομικών υλικών του αντιδραστήρα κ.α. καθώς και η αλληλεξάρτηση τους, απεικονίζονται στο παραπάνω Σχήμα 7-1. Προσπάθεια του συγγραφέα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν να παρουσιάσει και να αναδείξει πλευρές αυτού του συνθέτου εγχειρήματος.