

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 1586

**Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας μέσω Πυρηνικού
Αντιδραστήρα**

Electricity Production by Nuclear Reactor

ΒΑΣΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ (6894)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΙΜΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2016

Πρόλογος:

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω πυρηνικού αντιδραστήρα. Ποιο συγκεκριμένα:

Στο 1^ο κεφάλαιο δίδονται οι βασικοί ορισμοί και αναλύεται το φαινόμενο της πυρηνικής σχάσης μέσω του οποίου εκλύεται ενέργεια για την μετατροπή της σε ηλεκτρική.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική αναδρομή των πυρηνικών εργοστασίων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ποιο συγκεκριμένα στη λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων.

Στο 3^ο κεφάλαιο αναλύονται τα βασικά μέρη ενός πυρηνικού εργοστασίου. Στην συνέχεια αναφέρεται η διαδικασία κατασκευής ενός πυρηνικού εργοστασίου με έμφαση στην κατασκευή του πυρηνικού αντιδραστήρα.

Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφεται διεξοδικά η διαδικασία μετατροπής της πυρηνικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια και οι βασικές δικλείδες για τη μεταφορά της θερμότητας και τους βασικούς παραμέτρους μεταφοράς.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται σε γενική μορφή η κατασκευή και λειτουργία των σύγχρονων γεννητριών και ο τρόπος λειτουργίας τους.

Τέλος στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η περίληψη και τα συμπεράσματα της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Περιεχόμενα:

Πρόλογος	iii
Περιεχόμενα	iv
Κεφάλαιο 1 ^ο	1
1. Εισαγωγή στην ατομική και πυρηνική Φυσική	1
1.1. Μελέτη της δομής του πυρήνα του ατόμου. Βασικές σχέσεις	1
1.2. Ισότοπα	5
1.3. Απώλεια μάζας	11
1.4. Ενέργεια συνδέσεως	11
1.5. Χρόνος υποδιπλασιασμού. Ελάττωση του αριθμού των ραδιενεργών πυρήνων συναρτήσει του χρόνου.	12
1.6. Θάλαμος Wilson	12
Κεφάλαιο 2 ^ο	14
2. Ιστορική αναδρομή	14
2.1. Μια γρήγορη ανασκόπηση	14
2.2. Πυρηνικοί αντιδραστήρες	15
2.2.1. Λειτουργία	15
2.2.2. Βασικές διαδικασίες	16
2.2.3. Ιστορία	16
2.2.4. Είδη πυρηνικών αντιδραστήρων	17
Κεφάλαιο 3 ^ο	19
3. Κατασκευή πυρηνικού αντιδραστήρα	19
Κεφάλαιο 4 ^ο	33
4. Μελέτη μεταφοράς της θερμότητας	33
4.1. Παραγωγή ενέργειας και παράμετροι μεταφοράς	33
4.2. Εξισώσεις για τη μεταφορά της θερμότητας	38

4.3. Θερμική αγωγιμότητα	40
4.4. Μηχανική προσέγγιση στην ανάλυση της μεταφοράς της θερμότητας	41
Κεφάλαιο 5^ο	42
5. Σύγχρονες Γεννήτριες	42
5.1. Γενικά	42
5.2. Κατασκευή εναλλακτών	44
5.2.1. Στάτης	44
5.2.2. Ρότορας	44
5.3. Τύλιγμα οπλισμού των εναλλακτών	47
5.4. Διέγερση μαγνητικού πεδίου και διεγέρτριες	48
5.5. Σύστημα αερισμού ή ψύξης ενός εναλλάκτη	49
5.6. Αρχή λειτουργίας	49
5.6.1. Κατανόηση της λειτουργίας	50
Κεφάλαιο 6^ο	51
6. Περίληψη-Συμπεράσματα	51
Βιβλιογραφία	52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1. Εισαγωγή στην ατομική και πυρηνική Φυσική.

1.1. Μελέτη της δομής του πυρήνα του ατόμου. Βασικές σχέσεις.

Τα άτομα των διαφόρων στοιχείων αποτελούνται από τον πυρήνα και από τα ηλεκτρόνια, που περιστρέφονται γύρω από αυτόν σε καθορισμένες τροχιές. Οι πυρήνες των στοιχείων από τα πρωτόνια και τα νετρόνια. Επειδή τα νετρόνια δεν έχουν φορτίο, το φορτίο του πυρήνα είναι ίσο με τον αριθμό των πρωτονίων. Ο αριθμός των πρωτονίων σε ένα πυρήνα ονομάζεται ατομικός αριθμός.

Η μάζα ενός ατόμου ισούται, με μεγάλη προσέγγιση, με το άθροισμα των μαζών των πρωτονίων και των νετρονίων του. Επειδή η μάζα του πρωτονίου και του νετρονίου (εκφρασμένα σε μονάδες ατομικής μάζας) είναι πολύ κοντά στη μονάδα, η μάζα ολόκληρου του πυρήνα, θα πρέπει να έχει τιμή που συμπίπτει με μεγάλη προσέγγιση με ακέραιο αριθμό της κλίμακας ατομικής μάζας. Ένα άτομο αποτελείται από τον πυρήνα και τα ηλεκτρόνια των οποίων ο αριθμός είναι ίσος με τον ατομικό αριθμό του στοιχείου αυτού. Επειδή η συμβολή των ηλεκτρονίων στην συνολική μάζα του ατόμου, όσα ηλεκτρόνια και αν έχει το άτομο, είναι πολύ μικρό ποσοστό της μονάδας ατομικής μάζας και έτσι η συνολική μάζα του ατόμου δίνεται από ένα αριθμό με τιμή σχεδόν ακέραια. Ο ακέραιος αριθμός, ο οποίος με μεγάλη προσέγγιση εκφράζει τη μάζα του ατόμου, ονομάζεται μαζικός αριθμός ατόμου.

Ο μαζικός αριθμός εκφράζει το άθροισμα των πρωτονίων και των νετρονίων του πυρήνα.

Σε ένα στοιχείο ο μαζικός αριθμός συμβολίζεται στο πάνω μέρος του στοιχείου ενώ ακριβώς από κάτω υπάρχει ο ατομικός αριθμός.

Για παράδειγμα παίρνουμε τον άνθρακα: ${}_{6}^{12}\text{C}$.

Ο μαζικός αριθμός σε αυτή τη περίπτωση είναι ο 12 και ο ατομικός το 6. Επειδή ο ατομικός αριθμός, όπως προαναφέρθηκε, εκφράζει τον αριθμό των πρωτονίων, υπάρχουν 6 πρωτόνια και συνεπώς 6 ηλεκτρόνια και κατά συνέπεια $12-6=6$ νετρόνια.

Παρόμοια και για το ουράνιο ${}_{92}^{235}\text{U}$.

Ο αριθμός των πρωτονίων είναι ίσος με τον αριθμό των ηλεκτρονίων και ίσος με 92 (ατομικός αριθμός 92) ενώ ο αριθμός των νετρονίων είναι $235-92=143$ (μαζικός αριθμός 235).

Στον παρακάτω πίνακα έχουμε μερικά στοιχειώδη σωματίδια:

Σωματίδιο	Σύμβολο	Μάζα (u)	Φορτίο
Πρωτόνιο	$p, \begin{smallmatrix} 1 \\ 1 \end{smallmatrix}H$	1,00782	+e
Νετρόνιο	$n, \begin{smallmatrix} 1 \\ 0 \end{smallmatrix}n$	1,00867	0
Ηλεκτρόνιο	$\begin{smallmatrix} 0 \\ -1 \end{smallmatrix}e, \begin{smallmatrix} 0 \\ -1 \end{smallmatrix}\beta$	0,0005488	-e
Ποζιτρόνιο	$\begin{smallmatrix} 0 \\ +1 \end{smallmatrix}e, \begin{smallmatrix} 0 \\ +1 \end{smallmatrix}\beta$	0,0005488	+e

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα, θα πρέπει να σταθούμε σε δύο σημεία.

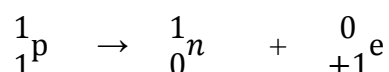
Το πρώτο σημείο είναι η πολύ μικρή μάζα του ηλεκτρονίου σε σχέση με τη μάζα του πρωτονίου και του νετρονίου. Γι' αυτό το λόγο θεωρούμε, κατά προσέγγιση, ότι η μάζα του ατόμου είναι συγκεντρωμένη στον πυρήνα.

Πρέπει να αναφερθεί στο σημείο αυτό ότι η πραγματική μάζα (όταν εκφράζεται σε Kgr) των ατόμων ή των μορίων, είναι πάρα πολύ μικρή σε σύγκριση με τις μάζες που συνήθως χρησιμοποιούμε, επόμενος είναι καλύτερα να την εκφράσουμε με τη βοήθεια μιας άλλης σχετικής κλίμακας, της οποίας η μονάδα ονομάζεται μονάδα ατομικής μάζας με σύμβολο u. Η μονάδα αυτή καθορίζεται έτσι ώστε η μάζα του ατόμου του ισότοπου $^{12}_6C$ να είναι ακριβώς 12 u.

Το δεύτερο σημείο στο οποίο θα πρέπει να σταθούμε είναι το ποζιτρόνιο. Το ποζιτρόνιο είναι ένα σωματίδιο το οποίο βγαίνει μέσα από τον πυρήνα σε ορισμένες πυρηνικές αντιδράσεις. Όπως παρατηρούμε και στο πίνακα η μάζα του είναι ίση με τη μάζα του ηλεκτρονίου και θετικό στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο. Συνεπώς, το ποζιτρόνιο είναι ένα αντιηλεκτρόνιο και είναι ένα μεγάλο μέρος από τη θεωρία της «ύλης και αντιύλης». Το ποζιτρόνιο δεν υπάρχει μέσα στο πυρήνα αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις δημιουργείται μέσα στον πυρήνα και αμέσως εκπέμπεται έξω από αυτόν. Επίσης το ποζιτρόνιο, πέρα από τις πυρηνικές αντιδράσεις όπου εμφανίζεται, εμφανίζεται και στην κοσμική ακτινοβολία.

Η πυρηνική αντίδραση του ποζιτρονίου εκφράζεται:

Πρωτόνιο \rightarrow Νετρόνιο + Ποζιτρόνιο

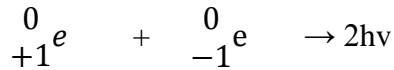


Όταν το ποζιτρόνιο αποβληθεί από τον πυρήνα αμέσως θα βρεθεί στο πλήθος των ηλεκτρονίων. Το ποζιτρόνιο μαζί με το πρώτο ηλεκτρόνιο που θα βρεθεί μπροστά του θα ενωθεί, εφόσον έχουν αντίθετα φορτία το αποτέλεσμα είναι να έλκονται. Τότε, ολόκληρη η

μάζα των δύο ετερόνυμων ηλεκτρονίων μετατρέπεται σε ισοδύναμη ενέργεια δύο φωτονίων γ που έχουν την ίδια συχνότητα ν . το κάθε φωτόνιο έχει ενέργεια $h\nu$ ισοδύναμη με τη μάζα ηρεμίας με του ηλεκτρονίου.

Η αντίστοιχη πυρηνική αντίδραση είναι η εξής:

Ποζιτρόνιο + Ηλεκτρόνιο \rightarrow 2 φωτόνια γ



όπου h σταθερά Plank. Είναι ίση με $6,262 \cdot 10^{-34}$ (Joule*sec)

δηλαδή κατά την εξαφάνιση του ζεύγους ποζιτρονίου-ηλεκτρονίου, εξαφανίζεται μάζα ίση με $2m_e$ και εμφανίζεται ενέργεια ίση με $2 h\nu$. Αυτή η μετατροπή της μάζας σε ενέργεια δίνεται από την εξίσωση του Albert Einstein ($E=m \cdot c^2$).

1.2. Ισότοπα

Υπάρχουν άτομα που έχουν τον ίδιο ατομικό αριθμό αλλά διαφορετικούς μαζικούς αριθμούς. Αυτά τα άτομα ονομάζονται ισότοπα. Οι ισότοποι πυρήνες έχουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων αλλά διαφορετικό αριθμό νετρονίων. Για παράδειγμα το κοινό οξυγόνο είναι μίγμα τριών ισότοπων που έχουν μαζικούς αριθμούς 16, 17, 18. Κάθε ένα από αυτά τα ισότοπα έχει τον ίδιο ατομικό αριθμό 8, και συμβολίζονται ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{17}_8\text{O}$, ${}^{18}_8\text{O}$. Στον πυρήνα του κάθε ισότοπου υπάρχουν 8 πρωτόνια, αλλά ο αριθμός των νετρονίων είναι 8, 9, 10 αντίστοιχα.

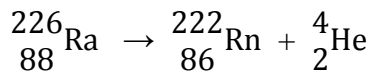
Πυρηνικές Αντιδράσεις

Οι κανόνες που ισχύουν στις πυρηνικές αντιδράσεις είναι διαφορετικοί από τους κανόνες που ισχύουν στις συνηθισμένες χημικές αντιδράσεις. Οι βασικοί κανόνες που ισχύουν είναι οι εξής:

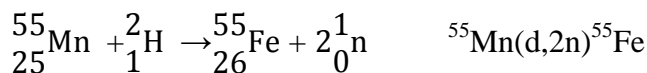
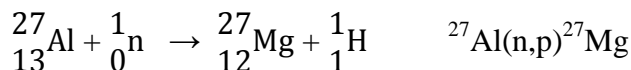
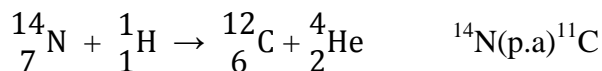
- i. Κάθε στοιχείο πρέπει να συνοδεύεται από έναν αριθμό που εκφράζει το μαζικό αριθμό (πάνω δείκτης) και από έναν άλλο που εκφράζει τον ατομικό αριθμό ή το πυρηνικό φορτίο του στοιχείου (κάτω δείκτης).
- ii. Το ελεύθερο πρωτόνιο είναι ο πυρήνας του ατόμου του υδρογόνου και παριστάνεται με ${}^1_1\text{H}$.
- iii. Το ελεύθερο νετρόνιο έχει μηδενικό ατομικό αριθμό γιατί δεν έχει φορτίο, ο μαζικός του αριθμός είναι το 1. Ο συμβολισμός για το νετρόνιο είναι 1_0n .
- iv. Το ηλεκτρόνιο (σωμάτιο β) έχει μηδέν μαζικό αριθμό και ατομικό αριθμό -1. Συμβολίζεται ${}^0_{-1}e$.
- v. Το ποζιτρόνιο έχει μηδέν μαζικό αριθμό και ατομικό αριθμό +1. Συμβολίζεται ${}^0_{+1}e$.
- vi. Ένα σωμάτιο α είναι ένας πυρήνας ηλίου και γι' αυτό συμβολίζεται ${}^4_2\text{He}$ ή ${}^4_2\alpha$.

- vii. Η ακτινοβολία γ είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με πολύ μικρό μήκος κύματος και εκπέμπεται με μορφή φωτονίων με ενέργεια $h\nu$, μηδενικό μαζικό αριθμό και μηδενικό φορτίο.
- viii. Σε μια πυρηνική αντίδραση το άθροισμα των κάτω δεικτών (ατομικοί αριθμοί) των στοιχείων που αντιδρούν πρέπει να είναι ίσο με το άθροισμα των κάτω δεικτών των προϊόντων της αντίδρασης.
- ix. Το άθροισμα των πάνω δεικτών (μαζικοί αριθμοί) πρέπει επίσης να είναι το ίδιο και στα δύο μέλη της αντίδρασης.

Έτσι η εξίσωση διασπάσεως του ραδίου είναι:



Πολλές πυρηνικές αντιδράσεις μπορούμε να τις συμβολίσουμε με σύντομο τρόπο. Έστω ότι βομβαρδίζουμε με ένα ελαφρό σωματίδιο και ότι ένα άλλο ελαφρό σωματίδιο είναι το προϊόν της αντίδρασης. Τα δύο σωματίδια περικλείονται σε παρένθεση, που βρίσκεται ανάμεσα στο σύμβολο του πυρήνα που ήταν ο αρχικός στόχος και του πυρήνα που είναι το τελικό προϊόν. Τα σύμβολα n, p, d, α , e, γ παριστάνουν αντίστοιχα ακτινοβολία νετρονίων, πρωτονίων, δευτερονίων (${}_1^2\text{H}$), άλφα, ηλεκτρονίων και ακτινών γ . Παρακάτω δίνονται παραδείγματα συμβολισμού πυρηνικών αντιδράσεων με τον αναλυτικό και το σύντομο τρόπο έκφρασης:

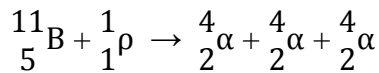


Τα νετρόνια έχουν μεγάλη ικανότητα στο να προκαλούν μεταστοιχείωση επειδή δεν έχουν θετικό φορτίο και έτσι μπορούν να πλησιάζουν τον πυρήνα χωρίς να απωθούνται από αυτόν. Ένα φορτισμένο σωματίδιο, όπως ένα πρωτόνιο, πρέπει να έχει πολύ υψηλή ενέργεια για να μπορέσει να προκαλέσει μεταστοιχείωση. Τα ηλεκτρόνια επειδή έχουν μικρή μάζα, δεν μπορούν συνήθως να προκαλέσουν μεταστοιχειώσεις, έστω και αν έχουν πολύ υψηλή ενέργεια.

Παρακάτω περιγράφονται διάφοροι τύποι πυρηνικών αντιδράσεων. Τα χρησιμοποιούμενα βλήματα και πρωτόνια, δευτερόνια, σωματίδια α και νετρόνια. Εκτός των υλικών αυτών σωματιδίων αποδείχθηκε πειραματικώς ότι και τα φωτόνια των ακτινών γ είναι δυνατόν να προκαλέσουν διασπάσεις, αρκεί η ενέργεια αυτών να είναι πολύ μεγάλη.

1) Διασπάσεις με πρωτόνια:

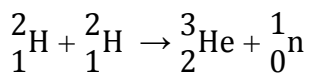
Ως τυπικό παράδειγμα παίρνουμε τη διάσπαση του βορίου με το βομβαρδισμένο με πρωτόνια.



Κατά την αντίδραση, όπως βλέπουμε και από την εξίσωση, παίρνουμε ως προϊόντα ταυτόχρονα τρία σωμάτια α. η διάσπαση του πυρήνα του βορίου είναι δυνατό να επιτευχθεί και με πρωτόνια μικρής κινητικής ενέργειας δηλαδή πρωτονίων τα οποία έχουν επιταχυνθεί με σχετικά χαμηλή τάση (100 kV). Για πυρήνες, όμως, στοιχείων με μεγαλύτερο ατομικό αριθμό, οι απωστικές δυνάμεις Coulomb είναι τόσο μεγάλες ώστε τα πρωτόνια δεν κατορθώνουν να εισχωρήσουν στο εσωτερικό του πυρήνα, παρά μόνο αν έχουν μεγάλη κινητική ενέργεια.

2) Διασπάσεις με δευτέριο:

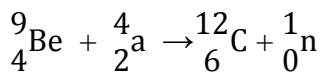
Μια πυρηνική αντίδραση με πολύ μεγάλη σημασία είναι η διάσπαση του δευτέρου με βομβαρδισμένο δευτερίου. Το δευτέριο είναι ισότοπο του υδρογόνου και συμβολίζεται ${}_{1}^{2}\text{H}$. Κατά την πυρηνική αυτή αντίδραση παράγεται ένα ισότοπο του ηλίου, το ${}_{2}^{3}\text{He}$ και ένα νετρόνιο. Δηλαδή:



Για τη διάσπαση αυτή πρέπει τα δευτέρια να έχουν επιταχυνθεί με τάση 10 kV ενώ η απόδοση (ποσοστό κρούσης) αυξάνεται με την τάση. Είναι προφανές ότι με υψηλές τάσεις επιτυγχάνονται η παραγωγή μεγάλου αριθμού νετρονίων. Επομένως η αντίδραση αυτή χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου επιζητείται μια ισχυρή πηγή νετρονίων.

3) Διασπάσεις με σωμάτια α:

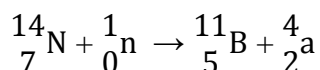
Πολύ ενδιαφέρουσα περίπτωση είναι η διάσπαση του βηρυλλίου με σωμάτια α. αυτή παρουσιάζει το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ότι το προϊόν της αντίδρασης είναι ένα νετρόνιο. Δηλαδή:



Η μεγάλη χρήση της παραπάνω πυρηνικής αντίδρασης οφείλεται στο γεγονός ότι μας παρέχει την δυνατότητα να κατασκευάσουμε μικρές φορητές πηγές νετρονίων. Για να γίνει αυτό δυνατό μέσα στο εσωτερικό ενός μικρού σωλήνα αναμιγνύεται ποσότητα ραδίου με ρινίσματα βηρυλλίου, οπότε κατά τη διάσπαση του ραδίου τα εκπεμπόμενα σωμάτια α βομβαρδίζουν το ${}_{4}^{9}\text{Be}$ και παράγουν νετρόνια.

4) Διασπάσεις με νετρόνια:

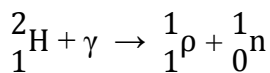
Σαν παράδειγμα διάσπασης με νετρόνια αναφέρουμε την διάσπαση του πυρήνα του αζώτου, η οποία περιγράφεται ως εξής:



Η έλλειψη ηλεκτρικού φορτίου επιτρέπει στα νετρόνια να εισέρχονται μέσα στους πυρήνες χωρίς να υφίστανται απωστικές δυνάμεις. Δηλαδή μπορούμε να επιτύχουμε πυρηνικές αντιδράσεις με νετρόνια χωρίς να είναι απαραίτητα μεγάλη η ταχύτητά τους. Αντίθετα, αποδείχθηκε ότι η διάσπαση είναι τόσο πιθανότερη όσο μικρότερη είναι η ταχύτητα του νετρονίου. Σε αυτή τη περίπτωση ονομάζονται 'βραδέα νετρόνια'. Αυτό οφείλεται στο ότι η πτώση του νετρονίου μέσα στο 'φρέαρ δυναμικού' είναι τόσο πιθανότερη, όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος κατά τον οποίον το νετρόνιο βρίσκεται κοντά στο πυρήνα. Μέχρι σήμερα έχουν επιτευχθεί διασπάσεις με νετρόνια για όλα σχεδόν τα στοιχεία.

5) Διασπάσεις με φωτόνια:

Κατά τη διάσπαση ενός πυρήνα δευτερονίου ${}^2_1\text{H}$ από φωτόνια παράγονται πρωτόνια:



Ανάλογες αντιδράσεις, οι οποίες προκαλούνται με φωτόνια, έχουν παρατηρηθεί και σε πολλούς άλλους πυρήνες, αλλά για να γίνουν αυτές οι διασπάσεις η απαιτούμενη ενέργεια του φωτονίου να είναι μεγαλύτερη της τάξεως των 2,5 MeV.

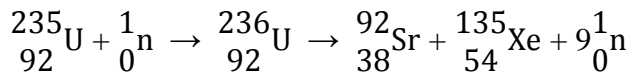
Αυτοί είναι οι κυριότεροι τρόποι, με τους οποίους μπορούμε να διασπάσουμε τους πυρήνες των ατόμων. Βέβαια, κατά τα τελευταία χρόνια, έχει ευρεθεί ότι και άλλα σωματίδια, όπως ηλεκτρόνια, είναι δυνατόν να προκαλέσουν διασπάσεις πυρήνων, αρκεί η ενέργεια αυτών να είναι πολύ μεγάλη. Κατ' αρχήν άλλωστε κάθε πυρηνική αντίδραση πραγματοποιείται εφόσον, από ενεργειακής άποψης, είναι δυνατή. Όσες από αυτές δεν έχουν παρατηρηθεί μέχρι στιγμής πειραματικώς μπορούν να πραγματοποιηθούν, αλλά με πολύ μικρή πιθανότητα.

Οι πυρηνικές αντιδράσεις, εκτός από τις περιπτώσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως, χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Αυτές είναι οι αλυσιδωτές, οι θερμοπυρηνικές και οι πυρηνικές αντιδράσεις υψηλής ενέργειας.

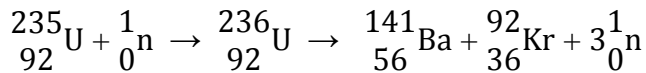
Μια διεργασία που έχει άμεση σχέση με τις πυρηνικές αντιδράσεις είναι η σχάση των πυρήνων.

Στα πρώτα χρόνια των πυρηνικών αντιδράσεων το προϊόν της αντίδρασης ήταν ένα στοιχειώδες σωματίδιο και το υπόλοιπο κάποιος πυρήνας. Το 1939 ο Hall (γερμανός φυσικός) και ο Strassmann (αμερικάνος φυσικός), ανακάλυψαν ένα νέο τύπο διασπάσεως, κατά τον οποίο ο πυρήνας μετά την ενσωμάτωση σε αυτόν του βλήματος, διασπάται σε δύο θραύσματα που έχουν μάζα περίπου ίση προς το ήμισυ της μάζας του αρχικού πυρήνα. Αυτή η διάσπαση του πυρήνα σε δύο μεγάλα και περίπου ίσα μέρη ονομάζεται σχάση. Μέχρι σήμερα οι πυρήνες που μπορούν να υποστούν σχάση είναι λίγοι, ενώ βρίσκονται όλοι κοντά στο τέλος του περιοδικού συστήματος. Κατά τον βομβαρδισμό αυτόν με νετρόνια παράγεται ένας ασταθής πυρήνας, ο οποίος διασπάται σε δύο μεγάλα και ίσα μέρη, ενώ ταυτόχρονα παράγονται και μερικά δευτερογενή νετρόνια.

Έτσι κατά τη σχάση του ${}_{92}^{235}\text{U}$ με νετρόνια υπάρχουν διάφορες περιπτώσεις για τα προϊόντα, δύο από τις οποίες είναι οι εξής:



ή



Η κατά τη σχάση εκλυόμενη ενέργεια είναι μεγάλη και αποδίδεται υπό μορφή κινητικής ενέργειας των θραυσμάτων. Η παραπάνω πυρηνική αντίδραση έχει πάρα πολύ μεγάλη σημασία. Κατά μέσο όρο σε κάθε σχάση εκλύεται ενέργεια γύρω στα 200 MeV δηλαδή πολύ μεγαλύτερη από την ενέργεια που εκλύεται σε άλλους τύπους πυρηνικών αντιδράσεων. Η ενέργεια αυτή κατανέμεται σε όλα τα προϊόντα της διάσπασης, ενώ τα παραγόμενα νετρόνια έχουν κινητική ενέργεια μέχρι τα 17 MeV.

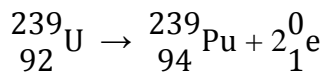
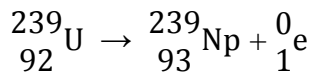
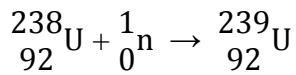
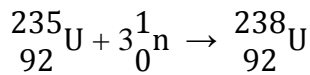
6) Αλυσιδωτές Αντιδράσεις:

Όπως είδαμε και παραπάνω αν βομβαρδίσουμε ένα πυρήνα ${}_{92}^{235}\text{U}$ με ένα νετρόνιο θα γίνει σχάση, υπό ταυτόχρονη εκπομπή δευτερογενών νετρονίων τα οποία διαφεύγουν στο περιβάλλον. Αν όμως ο πυρήνας αυτός περιβάλλεται από άλλους όμοιους πυρήνες υπάρχει μεγάλη πιθανότητα τα δευτερογενή νετρόνια να ενσωματωθούν σε άλλους πυρήνες και να τους διασπάσουν. Αν λοιπόν η ποσότητα του υλικού είναι τόση ώστε ένα τουλάχιστον από τα νετρόνια, που παράγονται σε κάθε σχάση, ενσωματωθεί σε άλλο πυρήνα και προκαλείται νέα σχάση, η αντίδραση θα συνεχίζεται χωρίς να απαιτείται συνεχής βομβαρδισμός νετρονίων από το προσωπικό και κυρίως δεν θα χρειάζεται να επιταχύνουμε τα νετρόνια κάθε φορά για να πετυχαίνουμε τη σχάση. Αυτές οι αντιδράσεις ονομάζονται αλυσιδωτές αντιδράσεις, ενώ η ελάχιστη αναγκαία ποσότητα του υλικού που χρειάζεται για να γίνει η αντίδραση ονομάζεται κρίσιμη ποσότητα.

Η κρίσιμη ποσότητα εξαρτάται από την καθαρότητα του χρησιμοποιημένου υλικού, είναι τόσο μικρότερη όσο καθαρότερη είναι η ποσότητα του υλικού. Αυτό γίνεται γιατί το ποσοστό των νετρονίων, τα οποία ενσωματώνονται στους ξένους πυρήνες (και κατά συνέπεια αχρηστεύονται στην αντίδραση) είναι πολύ μικρό. Όταν η διαθέσιμη ποσότητα είναι μεγαλύτερη της κρίσιμης και αρχίζει η αντίδραση αυτή, θα εξακολουθήσει με γεωμετρικώς αυξανόμενη ταχύτητα για να καταλήξει τελικά στην έκρηξη του συνόλου.

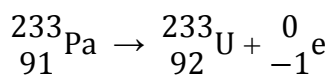
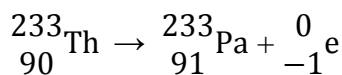
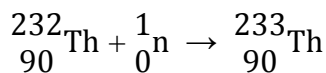
Μια εκρηκτική αλυσιδωτή αντίδραση, είναι δυνατόν, με κατάλληλη ρύθμιση της ταχύτητας διάσπασης να μετατραπεί σε ελεγχόμενη, αρκεί γι' αυτό, ένα ποσοστό των παραγόμενων νετρονίων από κάθε σχάση να απορροφάται έτσι ώστε ο αριθμός των σχάσεων ανά μονάδα χρόνου να διατηρείται σταθερός. Αυτό επιτυγχάνεται αν τοποθετήσουμε ανάμεσα στην μάζα του υλικού άλλα υλικά όπως κάδμιο ή βόριο, τα οποία να απορροφούν τα πλεονάζοντα νετρόνια.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε μια ενδιαφέρουσα σειρά πυρηνικών αντιδράσεων που γίνονται σε ένα πυρηνικό αντιδραστήρα. Είναι οι αντιδράσεις παρασκευής πλουτωνίου και οι αντιδράσεις αναπαραγωγής:



Τα θερμαντικά νετρόνια που παράγονται από τη σχάση του ${}_{92}^{235}\text{U}$ απορροφούνται από το ${}_{92}^{238}\text{U}$, το οποίο το μετατρέπουν σε ${}_{92}^{239}\text{U}$, που αυτόματα μετασχηματίζεται σε ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ με την αποβολή από τον πυρήνα δύο ταχύτατων ηλεκτρονίων (ακτινοβολία β).

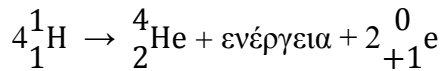
Επειδή το ουράνιο δεν βρίσκεται σε πολύ μεγάλες ποσότητες στην φύση, γίνεται μετατροπή του θόριο Th σε ουράνιο U κατά τις ακόλουθες πυρηνικές αντιδράσεις:



Το θόριο ${}_{90}^{232}\text{Th}$ βομβαρδισμένο με ένα νετρόνιο ${}_0^1\text{n}$ μετατρέπεται σε ${}_{90}^{233}\text{Th}$ το οποίο είναι ασταθές και μεταστοιχειώνεται σε πρωτακτίριο ${}_{91}^{233}\text{Pa}$ υπό την ταυτόχρονη αποβολή ακτινοβολίας β και αυτό μεταστοιχειώνεται σε ${}_{92}^{233}\text{U}$ που είναι ισότοπο του ${}_{92}^{235}\text{U}$.

7) Θερμοπυρηνικές Αντιδράσεις:

Όπως είδαμε προηγουμένως, πυρήνες μεγάλου ατομικού βάρους που ανήκουν στο τέλος του περιοδικού συστήματος παθαίνουν σχάση και καταλήγουν σε πυρήνες μέσου ατομικού βάρους, οι οποίοι αποτελούν πολύ ευσταθή μορφή της ύλης αφού έχουν σχετικά μέγιστο έλλειμμα μάζας. Επειδή κατά τη σχάση παράγονται πυρήνες οι οποίοι έχουν μεγάλο έλλειμμα μάζας, θα έχουμε μετατροπή μάζας σε ενέργεια. Ανάλογη μετάβαση από λιγότερο σταθεράς μορφής πυρήνες σε σταθερότερη μορφή μπορούμε να έχουμε και με πυρήνες που βρίσκονται στην αρχή του περιοδικού συστήματος και συγκεκριμένα του υδρογόνου. Κατ' αρχήν τέσσερα άτομα υδρογόνου με βάση το φαινόμενο της σύντηξης θα μας δώσουν ένα άτομο ηλίου:



Επειδή το έλλειμμα μάζας του $\text{}^1_1\text{H}$ είναι πολύ μικρότερο από αυτό του $\text{}^4_2\text{He}$ θα έχουμε μετατροπή μάζας σε ενέργεια.

Επομένως μπορούμε να πούμε ότι η σύντηξη είναι η ένωση δύο πολύ ελαφρών πυρήνων για το σχηματισμό ενός βαρύτερου πυρήνα, ενώ συγχρόνως ελευθερώνεται ενέργεια με τη μορφή ακτινοβολίας και κινητικής ενέργειας.

Για να γίνει σύντηξη πρέπει ο ένας πυρήνας να εισχωρήσει μέσα στον άλλο, για να συμβεί όμως αυτό πρέπει οι ταχύτητες να είναι πολύ μεγάλες. Αυτές οι συγκρούσεις γίνονται όταν οι πυρήνες βρίσκονται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και οι πυρηνικές αντιδράσεις που γίνονται ονομάζονται θερμοπυρηνικές αντιδράσεις.

Οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις γίνονται στον ήλιο, στους θερμούς αστέρες, κ.τ.λ, στους οποίους λόγω υψηλής θερμοκρασίας γίνεται η σύντηξη του υδρογόνου προς το στοιχείο ήλιο.

Επίσης θερμοπυρηνική αντίδραση γίνεται και κατά την κατασκευή της βόμβας του υδρογόνου όπου η απαιτούμενη υψηλή θερμοκρασία προκαλείται συνήθως από έκρηξη ατομικής βόμβας.

Κατά τα τελευταία χρόνια γίνονται πειράματα για επίτευξη θερμοπυρηνικής αντίδρασης στο εργαστήριο, μέσα σε σωλήνες, στους οποίους δημιουργούνται ισχυρότατες ηλεκτρικές εκκενώσεις. Κατά την εκκένωση όλα τα άτομα ιονίζονται και δημιουργείται έτσι το πλάσμα. Συμπιέζοντας το πλάσμα αποκτά υψηλή θερμοκρασία. Έτσι οι υψηλές θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται είναι αρκετών εκατομμυρίων βαθμών χωρίς ο σωλήνας να καταστρέφεται. Υπολογίζεται από τους επιστήμονες ότι αν βελτιωθούν ορισμένες συνθήκες θα είναι δυνατή η παραγωγή ενέργειας με αυτή τη μέθοδο.

8) Πυρηνικές Αντιδράσεις Υψηλής Ενέργειας:

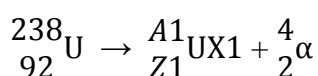
Οι πυρηνικές αντιδράσεις υψηλής ενέργειας είναι οι αντιδράσεις οι οποίες για να γίνουν πρέπει σωμάτια με μεγάλη ενέργεια, της τάξεως των GeV, να προσπέσουν πάνω σε πυρήνες. Οι πυρηνικές αντιδράσεις υψηλής ενέργειας επιτυγχάνονται με τα σημερινά ισχυρά βλήματα. Τέτοιες αντιδράσεις προκαλούνται επίσης και με νετρόνια πολύ υψηλής ενέργειας που προκύπτουν από άλλες πυρηνικές αντιδράσεις. Στις πυρηνικές αντιδράσεις υψηλής ενέργειας συνήθως ο πυρήνας που βομβαρδίζεται διαχωρίζεται σε πλήθος θραυσμάτων μεταξύ των οποίων όπως βρίσκεται πειραματικά είναι ένας πυρήνας ελαφρύτερος από αυτόν που βομβαρδίστηκε και ο άλλος μπορεί να είναι πρωτόνια, δευτερόνια, ή άλλα σωμάτια. Αυτή η πυρηνική αντίδραση λέγεται τεμαχισμός.

Παράδειγμα πυρηνικής αντίδρασης:

Εξ' αιτίας της ραδιενεργού διάσπασης ${}_{92}^{233}\text{U}$ εκπέμπει ένα σωματίο α. ο βαρύς πυρήνας που απομένει ονομάζεται UX1. Το UX1 στη συνέχεια εκπέμπει ένα σωματίο β. Ο βαρύς πυρήνας που απομένει από αυτήν την εξέλιξη ονομάζεται UX2. Να προσδιοριστεί ο ατομικός αριθμός καθώς και ο μαζικός των UX1 και UX2.

Λύση:

Ας υποθέσουμε ότι ο μαζικός αριθμός του UX1 είναι ο A1 και ο ατομικός Z1. Έτσι ο συμβολισμός του UX1 θα είναι ${}_{Z1}^{A1}\text{UX1}$. Ομοίως θα έχουμε και για το UX2, δηλαδή ο συμβολισμός του θα είναι ${}_{Z2}^{A2}\text{UX2}$. Έτσι από τις πυρηνικές αντιδράσεις θα έχουμε:



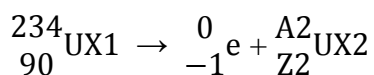
Επειδή σε κάθε πυρηνική αντίδραση το άθροισμα των μαζικών αριθμών των προϊόντων είναι ίσο με το άθροισμα των μαζικών αριθμών των αντιδράσεων θα είναι:

$$238 = A1 + 4 \leftrightarrow A1 = 234$$

Αυτό ισχύει και για τους ατομικούς αριθμούς:

$$92 = Z1 + 2 \leftrightarrow Z1 = 90$$

Άρα ο μαζικός αριθμός του UX1 είναι ο 234 και ο ατομικός 90. Η πυρηνική αντίδραση που περιγράφει το σχηματισμό του UX2 είναι:



Επομένως:

$$234 = 0 + A2 \leftrightarrow A2 = 234$$

$$90 = -1 + Z2 \leftrightarrow Z2 = 91$$

Οπότε ο συμβολισμός του θα είναι: ${}_{91}^{234}\text{UX2}$

Αν κοιτάξουμε τους σχετικούς πίνακες με το περιοδικό σύστημα τότε θα δούμε πως τα στοιχεία ${}_{90}^{234}\text{UX1}$ και ${}_{91}^{234}\text{UX2}$ ανήκουν στα φυσικά ραδιενεργά στοιχεία και πιο συγκεκριμένα στην οικογένεια ουρανίου-ραδίου.

1.3. Απώλεια Μάζας

Ένα συμπέρασμα που θα μπορούσαμε να βγάλουμε για τη μάζα ενός πυρήνα είναι ότι αυτό θα είναι ακριβώς ίσο με το άθροισμα της μάζας των πρωτονίων και των νετρονίων, από τα οποία αυτός αποτελείται. Αυτό όμως στη πραγματικότητα δεν συμβαίνει. Αν συγκρίνουμε τη τιμή του ατομικού βάρους ενός πυρήνα, η οποία βρίσκεται πειραματικά, και την τιμή του ατομικού βάρους, η οποία βρίσκεται υπολογιστικά με το άθροισμα της μάζας των πρωτονίων και των νετρονίων, θα δούμε πως η πειραματική τιμή, η οποία είναι και πραγματική, θα είναι μικρότερη από την υπολογιζόμενη. Τη διαφορά Δm ονομάζουμε απώλεια μάζας. Η απώλεια μάζας μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πρωτόνια και νετρόνια, όταν ενώνονται για το σχηματισμό των πυρήνων, χάνουν ένα μέρος της μάζας τους.

Έτσι σύμφωνα με τα παραπάνω αν ονομάσουμε A_p τη μάζα των πρωτονίων, A_n τη μάζα των νετρονίων, Z τον αριθμό των πρωτονίων και N τον αριθμό των νετρονίων τότε η μάζα του πυρήνα $A_{\text{πυρ.}}$ θα πρέπει να είναι:

Χωρίς απώλεια μάζας:

$$A_{\text{πυρ.}} = Z * A_p + N * A_n$$

Με απώλεια μάζας:

$$A_{\text{πυρ.}} = Z * A_p + N * A_n - \Delta m$$

1.4. Ενέργεια Συνδέσεως

Για να συγκρατούνται μόνιμα εντός του πυρήνα τα πρωτόνια και τα νετρόνια πρέπει να εξασκούνται μεταξύ τους ελκτικές δυνάμεις. Οι ελκτικές δυνάμεις αυτές δεν μπορούν να εξηγηθούν από τη κλασική φυσική αφού μεταξύ των πρωτονίων ασκούνται μόνο απωστικές δυνάμεις, ενώ μεταξύ πρωτονίων-νετρονίων ή νετρονίων-νετρονίων δεν υπάρχουν δυνάμεις. Βέβαια υπάρχουν δυνάμεις λόγω μιας παγκόσμιας έλξης, αλλά είναι τόσο μικρές, ώστε δεν μπορούν να εξηγήσουν την ευστάθεια του πυρήνα. Οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των συστατικών του πυρήνα ανήκουν σε μια ιδιαίτερη περίπτωση. Όταν δύο σώματα, είτε πρωτόνια είτε νετρόνια, βρεθούν σε πολύ μικρή απόσταση ασκούνται δυνάμεις που ονομάζονται πυρηνικές δυνάμεις.

Για να συγκρατείται μόνιμα εντός του πυρήνα το συσσωμάτωμα των πρωτονίων και των νετρονίων πρέπει να βρίσκεται σε ευσταθή κατάσταση. Για να συμβαίνει αυτό η δυναμική ενέργεια του συσσωματώματος πρέπει να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ενέργεια την οποία έχουν τα πρωτόνια και τα νετρόνια πριν πλησιάσουν και σχηματίσουν το πυρήνα. Κατά το σχηματισμό ενός πυρήνα πρέπει να ελευθερωθεί ποσό ενέργειας. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται ενέργεια συνδέσεως W και ελευθερώνεται υπό τη μορφή ακτινοβολίας κατά τη δημιουργία του πυρήνα. Αυτή η δημιουργία πυρήνων δεν γίνεται σήμερα στη Γη αλλά στο εσωτερικό διάφορων αστεριών. Η υψηλή θερμοκρασία των οποίων οφείλεται στη ενέργεια συνδέσεων που απελευθερώνεται κατά τη σύντηξη στοιχειωδών σωματιδίων προς σχηματισμό των διαφόρων πυρήνων. Από τη θεωρία της σχετικότητας κάθε ενέργεια E πρέπει να αντιστοιχεί σε μάζα m και αντίστοιχα κάθε μάζα να είναι ισοδύναμη προς ένα ποσό

ενέργειας, άρα θα είναι ταυτόσημες. Έτσι σύμφωνα με τον Albert Einstein, η ενέργεια συνδέσεως θα είναι ίση με $E = \Delta mc^2$ όπου C ταχύτητα φωτός και Δm η απώλεια μάζας.

1.5. Χρόνος υποδιπλασιασμού. Ελάττωση του αριθμού των ραδιενεργών πυρήνων συναρτήσει του χρόνου.

Είναι προφανές ότι με τη πάροδο του χρόνου ο αριθμός των πυρήνων λόγω των συνεχών διασπάσεων θα ελαττώνονται διαρκώς. Αν ονομάσουμε n_0 τον αρχικό αριθμό των πυρήνων (για τη χρονική στιγμή $t=0$) και n τον αριθμό των πυρήνων, οι οποίοι υπάρχουν από τη χρονική στιγμή t , είναι προφανές πως ο αριθμός n θα είναι μικρότερος του αριθμού n_0 . Η σχέση μεταξύ αυτών των δύο αριθμών δίνεται από το τύπο $n = n_0 * e^{-\lambda t}$, οποίος ονομάζεται νόμος των ραδιενεργών μετατροπών, όπου λ είναι μια σταθερά, η οποία ονομάζεται σταθερά διάσπασης.

Παρατηρούμε ότι ο αριθμός των υπαρχόντων πυρήνων ελαττώνεται εκθετικά με το χρόνο. Στον παραπάνω τύπο το e είναι η βάση των φυσικών λογαρίθμων ($e \approx 2,7$). Αν στην παραπάνω εξίσωση θέσουμε $t = \frac{1}{\lambda}$ τότε θα ισχύει:

$$n = n_0 * e^{-\lambda * 1/\lambda} = n_0 * e^{-1} \leftrightarrow n = n_0 / e$$

Αυτό σημαίνει ότι για χρόνο $t = \frac{1}{\lambda}$ ο αριθμός των πυρήνων ελαττώνεται από τη τιμή n_0 στην τιμή n_0 / e , δηλαδή περίπου το ένα τρίτο. Ο χρόνος αυτός ονομάζεται μέσος χρόνος ζωής του πυρήνα.

Ως πιο συνηθισμένο μέτρο της σταθερότητας του πυρήνα αποτελεί ο χρόνος υποδιπλασιασμού του ραδιενεργού υλικού. Χρόνος υποδιπλασιασμού ή ημιπερίοδος ζωής ονομάζεται ο χρόνος που χρειάζεται, ώστε από μια ορισμένη ποσότητα ραδιενεργών πυρήνων του ίδιου τύπου, να διασπαστούν οι μισοί. Ο αριθμός αυτός είναι χαρακτηριστικός για κάθε πυρήνα και συμβολίζεται με T . έτσι ένα σύνολο από ραδιενεργούς πυρήνες του ίδιου τύπου θα ελαττωθεί στο $\frac{1}{4}$ του αρχικού χρόνου μετά από χρόνο $2T$, στο $\frac{1}{8}$ μετά από χρόνο $3T$, κ.τ.λ.

1.6. Θάλαμος Wilson

Ας θεωρήσουμε ένα χώρο, ο οποίος περιέχει μίγμα αέρος και κορεσμένων υδρατμών. Αν μέσω απότομης εκτόνωσης ψύξουμε το μίγμα θα παραχθούν υπέρκοροι ατμοί, οπότε μέρος των υδρατμών θα υγροποιηθούν και θα σχηματιστούν σταγονίδια.

Με το θάλαμο Wilson μπορούμε να παρατηρήσουμε την τροχιά οποιουδήποτε φορτισμένου σωματιδίου. Το σωματίδιο κινείται μέσα στο θάλαμο, συγκρούεται με τα μόρια του αέρα και τα ionίζει. Τα ιόντα που σχηματίζονται κατά μήκος της τροχιάς του χρησιμεύουν ως πυρήνες υγροποίησης, ενώ τα παραγόμενα σταγονίδια καθίστανται απ' ευθείας ορατά ως μια γραμμή. Έτσι ο θάλαμος Wilson αποτελείται από ένα κλειστό δοχείο, το οποίο περιέχει αέρα και του οποίου το ένα άκρο είναι κινητό.

Μερικές σταγόνες νερού είναι αρκετές για να σχηματιστούν κορεσμένοι υδρατμοί. Αν αφήσουμε να περάσει μέσα από το θάλαμο ένα φορτισμένο σωματίδιο, π.χ. σωματίδιο α , και

σύγχρονος με απότομη εκτόνωση προκαλέσουμε ψύξη των υδρατμών, θα δημιουργηθεί σειρά σταγονιδίων υπό μορφή γραμμής, η οποία μας δείχνει ακριβώς τη τροχιά του σωματιδίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο



2. Ιστορική αναδρομή

2.1. Μια γρήγορη ανασκόπηση

Στις 16 Σεπτεμβρίου του 1954 ο Lewis Strauss, ο πρόεδρος της Αμερικάνικης επιτροπής Ατομικής ενέργειας, στάθηκε μπροστά σε ακροατήριο επιστημόνων στη Νέα Υόρκη και με σιγουριά τους διαβεβαίωσε ότι τα παιδιά τους θα απολάμβαναν την ηλεκτρική ενέργεια, υπερβολικά φτηνή, με μηδαμινό κόστος. Η πρώτη εργαστηριακή πυρηνική σχάση επιτεύχθηκε από τους φυσικούς Ότο Χαν και Λίζε Μάιτνερ, το 1938 στο Βερολίνο. Οι δυο τους «βομβάρδισαν» ουράνιο με νετρόνια σε μια προσπάθεια να το μετατρέψουν στο άγνωστο τότε στοιχείο με ατομικό αριθμό 93 (το ουράνιο έχει Α.Α. 92 και η προσθήκη στον πυρήνα του ενός νετρονίου θα έπρεπε, όπως είχε ήδη διαπιστωθεί ότι συνέβαινε με ελαφρύτερα στοιχεία, να το μετασχηματίσει σε ένα νέο στοιχείο με ένα πρωτόνιο παραπάνω). Το παραγόμενο όμως στοιχείο είχε ιδιότητες πολύ διαφορετικές από τις αναμενόμενες (για ένα βαρύ στοιχείο με Α.Α. 93), γεγονός ανεξήγητο για τους δύο επιστήμονες.

Εκείνη την περίοδο η Μάιτνερ λόγω της εβραϊκής καταγωγής της υποχρεώθηκε να εγκαταλείψει το Βερολίνο και ο Χαν συνέχισε τα πειράματά του με τον επίσης γερμανό φυσικό Φριτς Στράσμαν. Σύντομα οι τρεις (η Μάιτνερ εξόριστη στη Σκανδιναβία) κατέληξαν σε ένα πολύ τολμηρό συμπέρασμα: Το παραγόμενο στοιχείο με τις αναπάντεχες ιδιότητες ήταν βάριο, που έχει Α.Α. μόλις 56. Αυτό σήμαινε ότι με κάποιο τρόπο η προσθήκη νετρονίου στον πυρήνα του ουρανίου προκαλούσε τη «σχάση» του, όπως ονόμασε τη διαδικασία η Μάιτνερ, σε δύο στοιχεία: Το Βάριο που ήδη ήταν γνωστό και ένα ακόμα στοιχείο (το οποίο αργότερα ονομάστηκε Τεχνητό) με Α.Α. 43, απελευθερώνοντας μάλιστα τεράστια ποσά ενέργειας. Εκείνο όμως που έκανε ακόμα πιο ενδιαφέρουσα την ανακάλυψη, ήταν η απελευθέρωση (με τη σχάση) δύο νετρονίων, παρέχοντας τη δυνατότητα για μια αλυσιδωτή αντίδραση. Έτσι, τα δύο νετρόνια που απελευθερώνονται κατά τη σχάση του πυρήνα Ουρανίου προκαλούν τη σχάση δύο πρόσθετων πυρήνων Ουρανίου, απελευθερώνοντας 4 νετρόνια που με τη σειρά τους προκαλούν τη σχάση τεσσάρων πυρήνων κ.ο.κ. Με τον τρόπο αυτό μια ελάχιστη ποσότητα Ουρανίου μπορεί να απελευθερώσει με την αλυσιδωτή σχάση της ένα γιγαντιαίο ποσό ενέργειας, που -όπως έγινε σύντομα κατανοητό- είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί είτε για ειρηνικούς σκοπούς (την κάλυψη ενεργειακών αναγκών) είτε για την κατασκευή πυρηνικών βομβών.

2.2. Πυρηνικοί αντιδραστήρες

Πυρηνικός αντιδραστήρας ονομάζεται η διάταξη εκείνη εντός της οποίας παράγεται ενέργεια με ελεγχόμενη αντίδραση σχάσης. Ο πυρηνικός αντιδραστήρας θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σαν μια μεγάλη δεξαμενή όπου το πυρηνικό καύσιμο υφίσταται πυρηνική σχάση απελευθερώνοντας έτσι θερμότητα. Τα άτομα του εν λόγω καυσίμου, υπό ορισμένες συνθήκες, διασπώνται αυθόρμητα εκπέμποντας νετρόνια, τα οποία στη συνέχεια προκαλούν τη διάσπαση άλλων ατόμων, με τελικό αποτέλεσμα μια γεωμετρικά αυξανόμενη αλυσιδωτή αντίδραση.

Στην "καρδιά του αντιδραστήρα" φέρονται επιβραδυντικό υλικό και ρυθμιστικές ράβδοι (ή "ράβδοι ελέγχου" ή "ράβδοι ρύθμισης") που συγκρατούν την αλυσιδωτή αντίδραση σε σταθερό ρυθμό έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ομαλή ροή της θερμότητας. Ένα "ψυκτικό μέσο" (που μπορεί να είναι αέριο ή υγρό όπως το νερό) κυκλοφορεί μέσα στον αντιδραστήρα και θερμαίνεται. Στη συνέχεια αυτό οδηγείται σε ένα "εναλλάκτη θερμότητας" όπου προκαλεί βρασμό σε νερό που υπάρχει εκεί. Ο παραγόμενος ατμός στη συνέχεια θέτει σε κίνηση στρόβιλους που παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα αλλά και κινητική ενέργεια (π.χ. πυρηνοκίνητα πλοία).

Ο πυρηνικός αντιδραστήρας εκπέμπει έντονη ακτινοβολία που αξιοποιείται στη παραγωγή ραδιοϊσοτόπων. Η διαρροή της ακτινοβολίας αυτής εμποδίζεται από τα προστατευτικά στρώματα της "θωράκισης" (κελύφους) του αντιδραστήρα. Όλοι όσοι εργάζονται σε τέτοιους χώρους υποχρεούνται να είναι εφοδιασμένοι με ειδικούς φορητούς ανιχνευτές ραδιενέργειας.

2.2.1. Λειτουργία

Συνοπτικά, σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα σχάσης η ενέργεια που απελευθερώνεται από τη σχάση του πυρηνικού καυσίμου χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού, με τον οποίο τίθεται σε λειτουργία ένας στρόβιλος που με τη σειρά του περιστρέφει μια ηλεκτρογεννήτρια.

Στην πλειοψηφία τους, οι σύγχρονοι πυρηνικοί αντιδραστήρες χρησιμοποιούν ως καύσιμο εμπλουτισμένο ουράνιο ή μεικτό οξείδιο, ενώ κάποιιοι χρησιμοποιούν φυσικό ουράνιο (U). Το εμπλουτισμένο ουράνιο, περιέχει το ισότοπο U^{235} σε μεγαλύτερο ποσοστό από ότι το φυσικό ουράνιο, ενώ το μεικτό οξείδιο εκτός από ουράνιο περιέχει και τα ισότοπα Pu^{239} και Pu^{240} του πλουτωνίου. Υπάρχουν και αντιδραστήρες σχάσης που χρησιμοποιούν ως καύσιμα είτε το πλουτώνιο είτε το ισότοπο U^{233} του ουρανίου.

Το καύσιμο βρίσκεται σε ειδικούς φορείς (containers), σε μορφή ράβδων καυσίμου (fuel pins). Αυτές οι ράβδοι τοποθετούνται με καθορισμένη διάταξη μέσα στον επιβραδυντή (moderator), ο οποίος είναι γραφίτης ή βαρύ ύδωρ και σκοπός του είναι να επιβραδύνει τα νετρόνια που παράγονται από τις σχάσεις. Οι ρυθμιστικές ράβδοι, που χρησιμεύουν στη διατήρηση ενός σταθερού ρυθμού σχάσης, εισέρχονται στον πυρήνα του επιβραδυντή και η θέση τους μεταβάλλεται έτσι ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός ρυθμός σχάσης· όταν οι ράβδοι είναι βαθύτερα μέσα στον πυρήνα, επιβραδύνουν περισσότερα νετρόνια κι έτσι μειώνεται ο ρυθμός σχάσεων. Το αντίθετο συμβαίνει όταν οι ράβδοι αποσύρονται.

Ένα ψυκτικό υλικό κυκλοφορεί υπό πίεση μέσα στα λεγόμενα "κανάλια" του επιβραδυντή. Σκοπός της κυκλοφορίας του ψυκτικού είναι η απαγωγή της θερμικής ενέργειας και η μεταφορά της σε εναλλάκτη θερμότητας. Ο επιβραδυντής βρίσκεται στο εσωτερικό χαλύβδινου προστατευτικού περιβλήματος, κατασκευασμένου έτσι ώστε να αντέχει στις υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Γύρω από το χαλύβδινο περίβλημα υπάρχει θωράκιση από σκυρόδεμα που εμποδίζει τη ραδιενέργεια να φτάσει στους χειριστές του αντιδραστήρα και το περιβάλλον, τόσο σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας όσο και σε περίπτωση ατυχήματος.

2.2.2. Βασικές διαδικασίες

Η διαδικασία που λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό ενός πυρηνικού αντιδραστήρα κατά τη διάρκεια παραγωγής σταθερού ποσού ισχύος μπορεί να συνοψιστεί στα παρακάτω στάδια:

1. Η σχάση κάθε πυρήνα U^{235} παράγει θραύσματα σχάσης μεταξύ των οποίων και νετρόνια. Τα θραύσματα της σχάσης μεταφέρουν το μεγαλύτερο ποσοστό της κινητικής ενέργειας που απελευθερώνεται από τον πυρήνα του ουρανίου. Αυτή την κινητική ενέργεια την αποδίδουν σε άλλα άτομα με τα οποία συγκρούονται και έτσι οι ράβδοι των καυσίμων θερμαίνονται.
2. Τα νετρόνια της σχάσης εξέρχονται των ράβδων καυσίμου με κινητική ενέργεια της τάξης των MeV. Εισέρχονται στον χώρο του επιβραδυντή και συγκρούονται με τα άτομά του, μεταφέροντας έτσι την κινητική τους ενέργεια σε αυτά. Έτσι τα άτομα του επιβραδυντή αποκτούν ενέργεια και τα νετρόνια επιβραδύνονται έως ότου η μέση κινητική ενέργειά τους είναι περίπου ίση με αυτήν των ατόμων του επιβραδυντή καθώς αυτά ταλαντώνονται στο κρυσταλλικό του πλέγμα. Αυτά τα νετρόνια λέγονται θερμαντικά νετρόνια επειδή δεν χάνουν (κατά μέσο όρο) άλλη ενέργεια, μοιράζοντάς την στα άτομα του επιβραδυντή.
3. Τα νετρόνια που έχουν επιβραδυνθεί πλέον εισέρχονται ξανά στις ράβδους του καυσίμου και προκαλούν νέες σχάσεις πυρήνων U^{235} και έτσι επαναλαμβάνεται η διαδικασία.

2.2.3. Ιστορία

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

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

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

2.2.4. Είδη πυρηνικών αντιδραστήρων

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος ονομάζονται πυρηνικοί αντιδραστήρες ισχύος ή πυρηνικοί σταθμοί ισχύος και διακρίνονται σε τέσσερις βασικούς τύπους στους οποίους όλοι χρησιμοποιούν νερό ως ψυκτικό μέσο και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το είδος του νερού που χρησιμοποιούν ως επιβραδυντή. Αυτοί οι τύποι είναι:

A. Αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (LWR - Light-Water Reactors). Αυτοί διακρίνονται στους δύο επιμέρους τύπους:

A.1. Αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος (PWR - Pressurized Water Reactors)

A.2. Ζέοντος ύδατος (BWR - Boiling Water Reactors).

B. Αντιδραστήρες βαρέος ύδατος (HWR - Heavy Water Reactors) που με τη σειρά τους διακρίνονται σε:

B.1. Πεπιεσμένου βαρέος ύδατος (HPWR - και Heavy Pressurized-Water Reactors)

B.2. Αντιδραστήρας ζέοντος βαρέος ύδατος (HBWR - Heavy Boiling Water Reactors).

Οι τύποι A.1. και A.2. αποτελούν το 72% των εγκατεστημένων πυρηνικών Σταθμών ισχύος. Επίσης τύπου A.1. (που είναι μικρότερου όγκου) είναι εκείνοι που φέρονται στα πυρηνοκίνητα πλοία.

Υπάρχουν επίσης οι αερίψυκτοι πυρηνικοί αντιδραστήρες που χρησιμοποιούν ως επιβραδυντή γραφίτη και ως ψυκτικό μέσο διοξείδιο του άνθρακα ή ήλιο. Η τεχνολογία με το διοξείδιο του άνθρακα έχει σταματήσει να αναπτύσσεται και η Μεγάλη Βρετανία που έχει

αρκετούς τέτοιους σκοπεύει να τους αντικαταστήσει με τον γενιάς III+ της γαλλικής Arcona τον EPR που είναι τύπος PWR, αλλά με το ήλιο υπάρχει πρόταση για ένα εντελώς κλειστό κύκλωμα όπου το αέριο σε υψηλή θερμοκρασία (περίπου 850°C) από τον αντιδραστήρα θα κινεί αεριοστρόβιλο με αναμενόμενη θερμοδυναμική αποδοτικότητα 48%. Το ήλιο έχει το πλεονέκτημα να είναι χημικά και πυρηνικά αδρανές, ενώ τα καύσιμα ενός τέτοιου αντιδραστήρα δε θα μπορούν να λειώσουν σε περίπτωση απώλειας της ψυκτικής λειτουργίας.

Ένας άλλος τύπος πυρηνικών αντιδραστήρων που έχουν κατασκευαστεί είναι οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες. Ο πιο επιτυχημένος είναι ο ρωσικός BN-600 που εκτός από τα 560MW που εξάγει, παράγει και περισσότερα καύσιμα από ότι καταναλώνει. Σε τέτοιους αντιδραστήρες χρησιμοποιείται το Th²³² για παραγωγή U²³³ και το U²³⁸ για παραγωγή Pu²³⁹ και αναπόφευκτα Pu²⁴⁰. Τυπικά το πρωτεύον τους ψυκτικό είναι υγρό νάτριο που παρουσιάζει αρκετές τεχνολογικές προκλήσεις, αλλά υπάρχει πρόταση για αερόψυκτους αναπαραγωγούς αντιδραστήρες με ήλιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3. Κατασκευή Πυρηνικού Αντιδραστήρα

Ο πυρηνικός αντιδραστήρας λειτουργεί, όπως είπαμε, με βάση την ελεγχόμενη πυρηνική αντίδραση. Ως πυρηνικό καύσιμο χρησιμοποιείται το φυσικό ισότοπο ουράνιο $^{235}_{92}\text{U}$ ή τα δύο τεχνητά ισότοπα πλουτωνίου και ουρανίου 233 . Τα τρία αυτά διασπώνται με θερμικά νετρόνια. Κατά τη σχάση τα παραγόμενα νετρόνια έχουν μεγάλη ταχύτητα και έχει παρατηρηθεί πειραματικά ότι τα ταχέα νετρόνια έχουν μεγάλη πιθανότητα να ενσωματωθούν σε πυρήνες ουρανίου $^{238}_{92}\text{U}$ και να αχρηστευθούν. Έτσι η ταχύτητα των νετρονίων πρέπει να ελαττωθεί. Με τη παρεμβολή του επιβραδυντή, όπως θα δούμε παρακάτω, τα νετρόνια αυτά υφίστανται συγκρούσεις με άτομα μικρής μάζας με αποτέλεσμα, σύμφωνα με τους νόμους των κρούσεων, να μεταβιβάζεται σε κάθε κρούση σημαντικό ποσοστό της ενέργειας των νετρονίων στα άτομα του επιβραδυντή.

Έτσι τα νετρόνια αυτά έχουν μικρές ταχύτητες και ονομάζονται θερμικά. Τα θερμικά νετρόνια είναι πολύ κατάλληλα για τη συντήρηση της αλυσιδωτής αντίδρασης γιατί έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να προκαλέσουν σχάση του $^{235}_{92}\text{U}$ και γιατί η πιθανότητα της ενσωμάτωσης στον πυρήνα του $^{233}_{92}\text{U}$ είναι μικρή.

Το πυρηνικό καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι το φυσικό ουράνιο, στο οποίο το 0,7% είναι φυσικό ουράνιο και το υπόλοιπο ουράνιο $^{238}_{92}\text{U}$. Τα νετρόνια δημιουργούνται στη μάζα του φυσικού ουρανίου και προκαλούν τις ακόλουθες δράσεις:

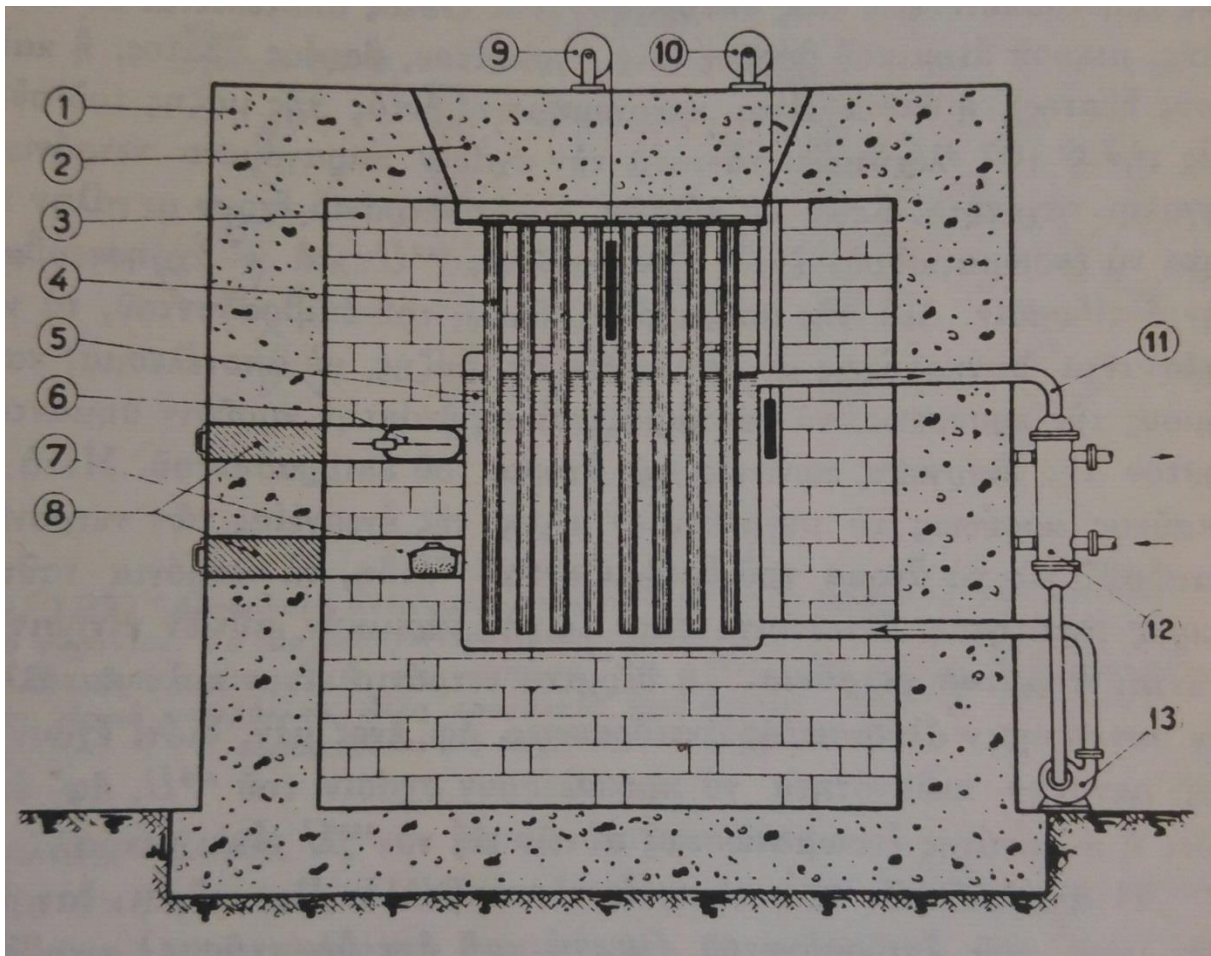
- I. Μερικά νετρόνια μεγάλης ενέργειας προκαλούν διασπάσεις πυρήνων ουρανίου 238 .
- II. Μερικά άλλα νετρόνια που έχουν μικρότερες ενέργειες συλλαμβάνονται από πυρήνες ουρανίου και τελικά γίνονται πυρήνες πλουτωνίου 239 .
- III. Αν τα νετρόνια που παράγονται επιβραδυνθούν ώστε να μεταβληθούν σε θερμικά νετρόνια προκαλούν διασπάσεις των πυρήνων ουρανίου 235 και έτσι διατηρείται η αλυσιδωτή αντίδραση.

Ένα άλλο υλικό που υπάρχει στον πυρήνα του αντιδραστήρα είναι ο επιβραδυντής. Στους αντιδραστήρες στους οποίους το καύσιμο είναι φυσικό ουράνιο ο επιβραδυντής αποτελείται αποκλειστικά από βαρύ νερό ή γραφίτη. Στους αντιδραστήρες στους οποίους το καύσιμο είναι εμπλουτισμένο ουράνιο ο επιβραδυντής αποτελείται από βαρύ ή κοινό νερό, από γραφίτη ή βηρύλλιο. Στους θερμικούς αντιδραστήρες η μάζα του επιβραδυντή είναι μεγάλη γιατί όλα τα νετρόνια που διατηρούν την αλυσιδωτή αντίδραση πρέπει να γίνουν θερμικά νετρόνια. Το πυρηνικό καύσιμο που είναι υπό μορφή ράβδων βυθίζεται μέσα στον επιβραδυντή. Ο αντιδραστήρας αυτός λέγεται ετερογενής και είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος

πυρηνικού αντιδραστήρα. Σε άλλους αντιδραστήρες που ονομάζονται ομογενείς το καύσιμο και ο επιβραδυντής αποτελούν σχεδόν ομογενές μίγμα όπως όταν έχουμε διάλυμα άλατος ουρανίου μέσα σε νερό. Οι αντιδραστήρες αυτοί έχουν μικρές διατάξεις και χρησιμοποιούνται για επιστημονικές έρευνες.

Για τον έλεγχο της λειτουργίας του αντιδραστήρα υπάρχει στο κέντρο του ένας φωρατής νετρονίων. Αυτός δέχεται κάθε στιγμή μικρό αριθμό νετρονίων που είναι ανάλογος με τον αριθμό νετρονίων, τα οποία κινούνται κάθε στιγμή μέσα στον αντιδραστήρα. Αν η ένδειξη του φωρατή νετρονίων είναι σταθερή τότε ο αριθμός των διασπάσεων ανά δευτερόλεπτο διατηρείται σταθερός. Αντίθετα αν οι ενδείξεις του φωρατή νετρονίων αυξάνουν ή ελαττώνουν ολοένα τότε ο αριθμός των διασπάσεων ανά δευτερόλεπτο αντίστοιχα αυξάνεται ή ελαττώνεται. Στην περίπτωση αυτή αυτόματα εισάγονται μέσα στον αντιδραστήρα ή ανασύρονται οι ράβδοι ελέγχου ώστε να αποκατασταθεί η κανονική λειτουργία του αντιδραστήρα.

Η απώλεια των νετρονίων στο περιβάλλον ελαττώνεται αν το ουράνιο με τον επιβραδυντή περιβληθεί με τοιχώματα από υλικό το οποίο έχει την ιδιότητα να επαναφέρει προς το εσωτερικό του αντιδραστήρα όσο το δυνατόν ποσοστό των εξερχόμενων νετρονίων. Το υλικό αυτό ονομάζεται ανακλαστήρας. Έτσι όλο το σύστημα καυσίμου και επιβραδυντή περιβάλλεται από τον ανακλαστήρα.



Σχήμα 1 Αντιδραστήρας. (1) Θώρακας, (2) Πάμα, (3) Ανακλαστήρας από γραφίτη, (4) Ράβδοι ουρανίου, (5) Επιβραδυντής εκ βαρέων ύδατος, (6) Θάλαμος Ιονισμού για την παρακολούθηση της λειτουργίας του αντιδραστήρα, (7) Παρασκευή ραδιενεργών ισοτόπων, (8) Πιάματα, (9) Πλάκα ασφαλείας από κάδμιο, (10) Πλάκα ρυθμίσεων της λειτουργίας, (11) Σαληνώσεις κυκλοφορίας βαρέων ύδατος, (12) Ψυκτήρας απαγωγός της παραγόμενης θερμότητας, (13) Αντλία για τη κυκλοφορία του βαρέου ύδατος.

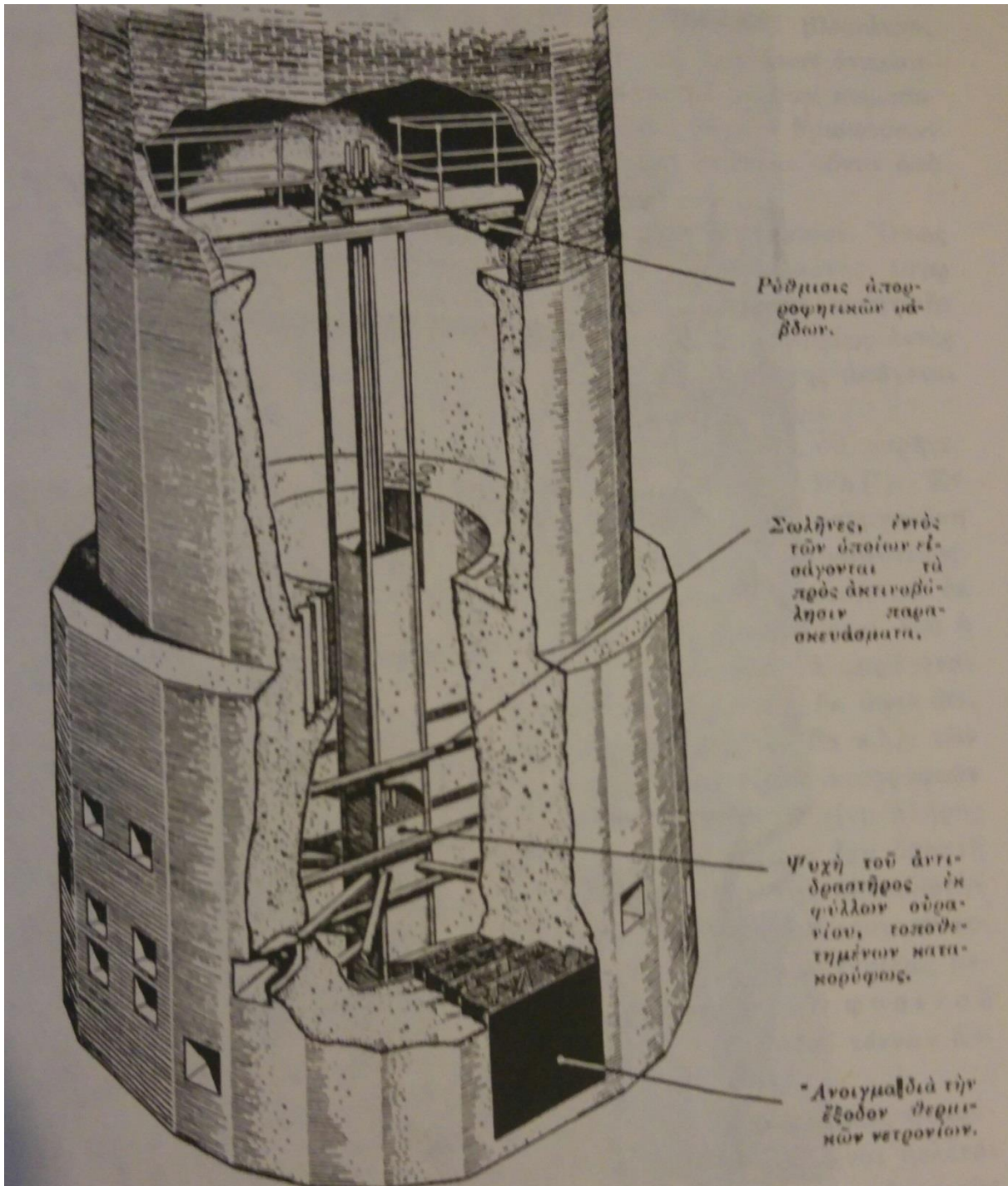
Στο σχήμα 1 παριστάνεται πυρηνικός αντιδραστήρας ο οποίος ως επιβραδυντή χρησιμοποιεί βαρύ ύδωρ (5) και ως ανακλαστήρα παχύ στρώμα γραφίτη (3). Για να προστατεύεται το προσωπικό που δουλεύει στον πυρηνικό αντιδραστήρα από την έντονη ακτινοβολία περιβάλλεται ο αντιδραστήρας από παχύ θώρακα μπετόν (1).

Η κινητική ενέργεια των θραυσμάτων της σχάσης μετατρέπεται εντός της μάζας του ουρανίου σε θερμότητα η οποία στον συγκεκριμένο αντιδραστήρα ανάγεται από βαρύ ύδωρ το οποίο τίθεται σε κυκλοφορία από την αντλία (13). Το θερμό βαρύ ύδωρ διαχέεται από τον ψυκτήρα (12) αποδίδοντας εστί σε αυτόν τη θερμότητά του.

Ο ρυθμός με τον οποίον παράγεται η θερμότητα μέσα στον πυρηνικό αντιδραστήρα εξαρτάται από τον αριθμό των νετρονίων τα οποία προκαλούν τις σχάσεις. Αυτός ρυθμίζεται από κινητές πλάκες καδμίου ή βορίου (10) οι οποίες απορροφούν ορισμένο ποσοστό των παραγόμενων νετρονίων ώστε ο ρυθμός των διασπάσεων μέσα στον αντιδραστήρα να διατηρείται σταθερός. Αυτές οι κινητές πλάκες είναι οι πλάκες ρύθμισης λειτουργίας. Σε περίπτωση κακού χειρισμού ή κάποιου άλλου ανθρώπινου λάθους θα ήταν δυνατόν να παραχθεί υπερβολική θερμότητα η οποία θα ήταν ικανή να προκαλέσει τήξη και καταστροφή

στον αντιδραστήρα, υπάρχουν οι πλάκες ασφαλείας (9). Οι πλάκες ασφαλείας βρίσκονται μέσα στο βαρύ ύδωρ και διακόπτουν αν χρειαστεί αυτόματα τη λειτουργία του αντιδραστήρα. Για τη παρακολούθηση της λειτουργίας χρησιμεύουν οι θάλαμοι ιονισμού (6).

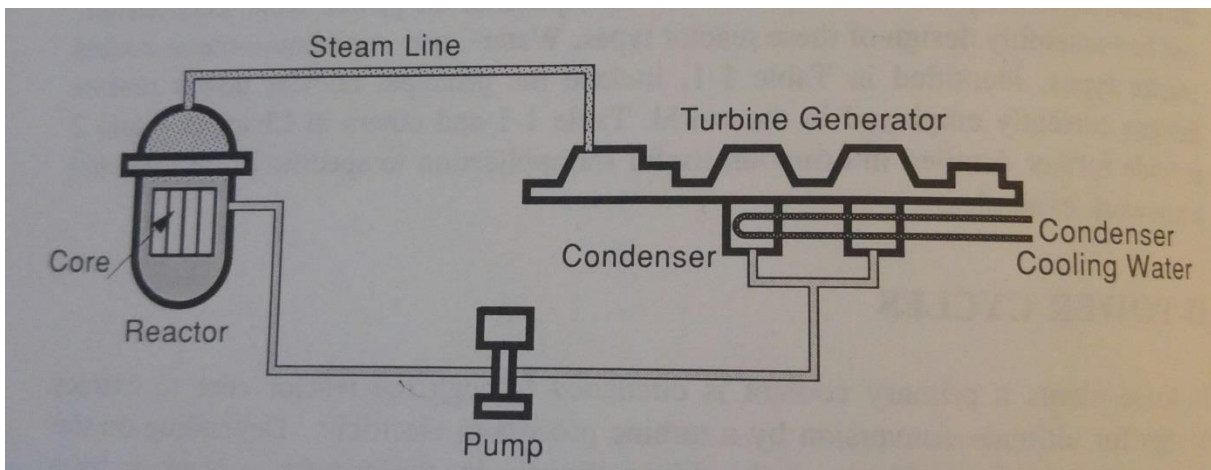
Τον μεγάλο αριθμό των παραγόμενων νετρονίων τον εκμεταλλευόμαστε για την παραγωγή ραδιενεργών ισοτόπων τα οποία παράγονται από την έκθεση κατάλληλων χημικών παρασκευασμάτων (7) με την αντίδραση νετρονίων.



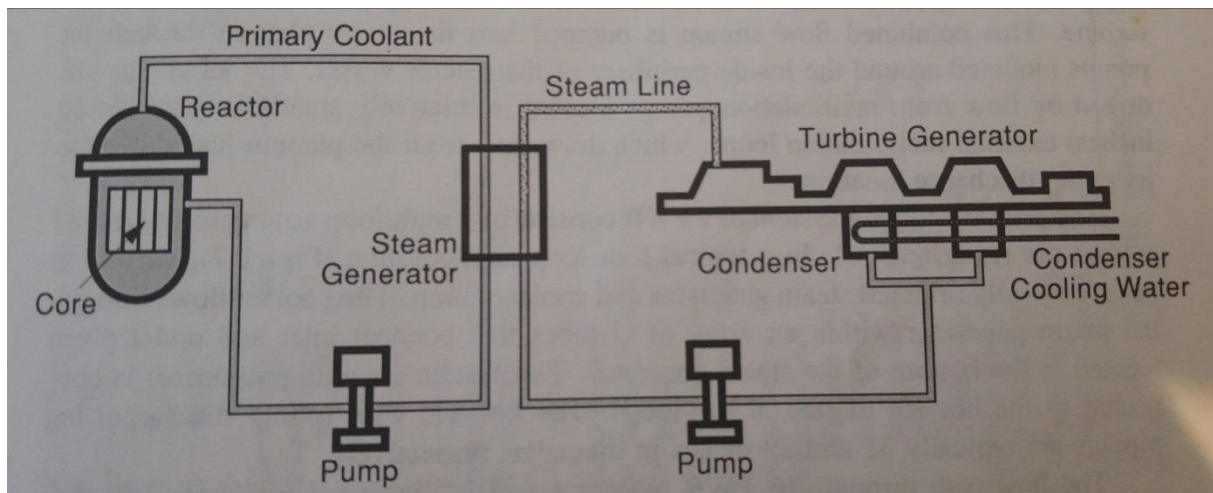
Σχήμα 2 Αντιδραστήρας Ανοικτής Δεξαμενής

Άλλο σύστημα αντιδραστήρα που χρησιμοποιείται σήμερα είναι αυτό του σχήματος 2 που παριστάνει ένα πυρηνικό αντιδραστήρα στον οποίο το φυσικό ουράνιο έχει αντικατασταθεί με εμπλουτισμένο ουράνιο δηλαδή ουράνιο το οποίο περιέχει $^{235}_{92}\text{U}$ σε ποσοστό μεγαλύτερο του ποσοστού του 0,7% που περιέχει το φυσικό ουράνιο. Επειδή στο υλικό αυτό το ποσοστό των άχρηστων για τη σχάση πυρήνων $^{238}_{92}\text{U}$ είναι ελαττωμένο οι όροι οι οποίοι τίθενται για τη χρησιμοποίηση του επιβραδυντή να είναι περιορισμένοι. Έτσι το βαρύ ύδωρ το οποίο είναι δυσεύρετο αντικαθίσταται με το συνηθισμένο ύδωρ το οποίο εκτελεί ταυτόχρονα και χρέη ανακλαστήρος. Ο τύπος του συγκεκριμένου αντιδραστήρα ονομάζεται ανοιχτή δεξαμενή.

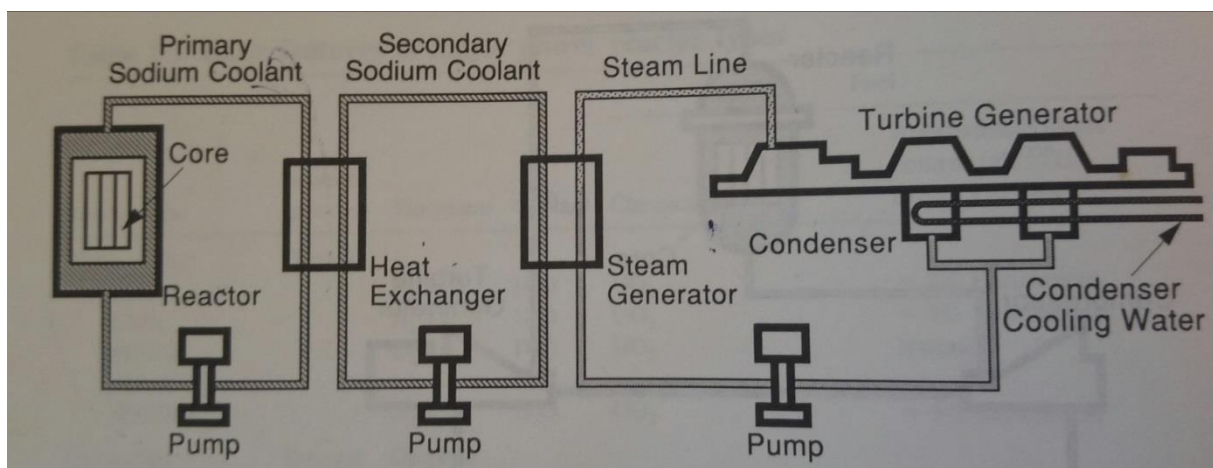
Οι διάφορες ουσίες που θέλουμε να βομβαρδιστούν φέρονται στον πυρήνα του αντιδραστήρα με κατάλληλους σωλήνες οι οποίοι φράσσονται στο εξωτερικό τους άκρο για να μην εξέρχονται τα νετρόνια. Αυτοί οι σωλήνες όταν το εξωτερικό τους άκρο είναι ανοιχτό παρέχουν δέσμη νετρονίων μεγάλης ταχύτητας η οποία προέρχεται από τον πυρήνα του αντιδραστήρα. Τα ταχεία αυτά νετρόνια μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα πειράματα. Στο παραπάνω σχήμα μπορούμε να παρατηρήσουμε το άνοιγμα από το οποίο εξέρχεται η δέσμη των νετρονίων.



Σχήμα 3 Κόριο σύστημα μεταφοράς του ψυκτικού



Σχήμα 4 Κύριο και Δευτερεύον σύστημα μεταφοράς του ψυκτικού



Σχήμα 5 Κύριο και δύο δευτερεύοντα συστήματα μεταφοράς του ψυκτικού

Σήμερα όπως είπαμε και παραπάνω υπάρχουν πολλοί τύποι πυρηνικών αντιδραστήρων.

Η γεννήτρια μπορεί να οδηγείται κατευθείαν από το κύριο σύστημα στο οποίο μεταφέρεται από το ψυκτικό η θερμότητα ή μπορεί να έχει και ένα δευτερεύον το οποίο παίρνει τη θερμότητα από το κύριο.

Επίσης εκτός από ένα μπορεί να υπάρχουν δύο και περισσότερα δευτερεύοντα. Για ένα αντιδραστήρα BWR (boiling water reactor-αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος) και για ένα HTGR (high temperature gas reactor-αντιδραστήρας αερίου υψηλής θερμοκρασίας ο οποίος χρησιμοποιεί σαν ψυκτικό το ήλιο), χρησιμοποιούν συνήθως ένα πρωτεύον σύστημα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.

Ο PWR (pressurized water reactor-αντιδραστήρας πεπιεσμένου νερού) καθώς και ο PHWR (pressurized heavy water reactor- αντιδραστήρας πεπιεσμένου βαρέου ύδατος) χρησιμοποιούν συνήθως εκτός από το κύριο σύστημα και ένα δευτερεύον όπως φαίνεται στο σχήμα 4.

Ο LMFBR (liquid metal fast breeder reactor-ταχύς αναγεννητικός αντιδραστήρας υγρού μετάλλου) χρησιμοποιεί τρία συστήματα μεταφοράς του ψυκτικού. Ένα πρωτεύον σύστημα μεταφοράς όπου το ψυκτικό είναι το νάτριο, ένα δευτερεύον με ψυκτικό πάλι το νάτριο και από ένα σύστημα ατμού ‘συμπυκνωτή’ νερού όπως φαίνεται στο σχήμα 5.

Μια εξελιγμένη μορφή του LMFBR είναι ο LMR(liquid metal reactor-αντιδραστήρας υγρού μετάλλου) ο οποίος όμως δεν έχει σχεδιαστεί να είναι ταχύς.

Ένα πολύ μεγάλο πλεονέκτημα των δευτερευόντων συστημάτων είναι ότι η γεννήτρια δεν έρχεται σε επαφή με το πρωτεύον το οποίο είναι ραδιενεργό. Το κύριο σύστημα περνάει μέσα από τον πυρήνα του αντιδραστήρα με αποτέλεσμα να δέχεται τη ραδιενεργό ακτινοβολία και να καθίσταται και αυτό ραδιενεργό.

Όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 3 η γεννήτρια έρχεται σε επαφή με το κύριο σύστημα μεταφοράς του ψυκτικού. Σε αντίθετη όμως περίπτωση με τα δευτερεύοντα συστήματα μεταφοράς του ψυκτικού η γεννήτρια δεν έρχεται σε επαφή με το ραδιενεργό κύριο σύστημα. Παρατηρώντας τα σχήματα 4 και 5, η θερμότητα από το ένα κύκλωμα στο άλλο γίνεται με εναλλάκτη θερμότητας.

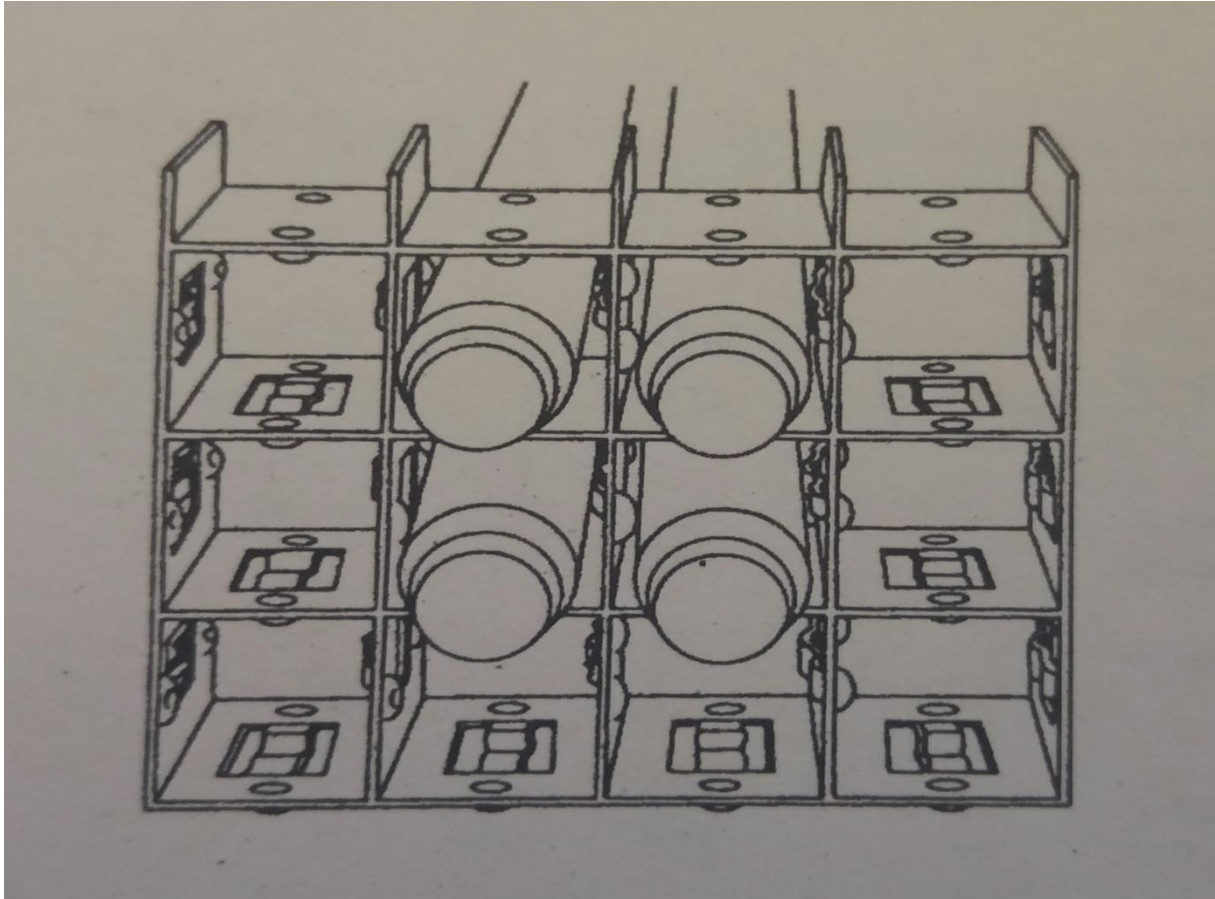
Με τον όρο ψυκτικό εννοούμε ένα μέσο το οποίο χρησιμοποιείται για την αφαίρεση της θερμότητας από ένα σύστημα για να αποσπάσει ενέργεια. Στους πυρηνικούς αντιδραστήρες το ψυκτικό χρησιμοποιείται για να μεταφέρει τη θερμότητα της αντίδρασης από το πυρήνα του αντιδραστήρα σε έναν εναλλάκτη θερμότητας. Σε αερόψυκτους αντιδραστήρες το ψυκτικό είναι συνήθως διοξείδιο του άνθρακα CO_2 . Πεπιεσμένο νερό ή βρασμένο νερό χρησιμοποιείται πολλές φορές και ως ψυκτικό αλλά και ως επιβραδυντής σε πολλούς τύπους πυρηνικών αντιδραστήρων. Στους ταχείς αντιδραστήρες ως ψυκτικό χρησιμοποιείται το υγρό νάτριο.

Τύπος αντιδραστήρα	Κατάσταση νετρονίων	Επιβραδυντής	Ψυκτικό	Καύσιμο	
				Χημικός τύπος	Approximate fissile content (all ²³⁵ U except LMFBR)
Υδροψυκτο	Θερμική				
PWR		H ₂ O	H ₂ O	UO ₂	≈ 3% Εμπλουτισμός
BWR		H ₂ O	H ₂ O	UO ₂	≈ 3% Εμπλουτισμός
PHWR (CANDU)		D ₂ O	D ₂ O	UO ₂	Φυσικό
SGHWR		D ₂ O	H ₂ O	UO ₂	≈ 3% Εμπλουτισμός
Αερόψυκτο	Θερμική	Γραφίτης			
AGR			CO ₂	UO ₂	≈ 3% Εμπλουτισμός
HTGR			Ηλιο	ThO ₂	≈ 7-20% Εμπλουτισμός ^a
Υγρού Μετάλλου	Ταχεία	None	Νάτριο		
LMR				UO ₂ /PuO ₂	≈ 15-20% Pu
LMFBR				UO ₂ /PuO ₂	≈ 15-20% Pu

^aOlder operating plants have enrichments of more than 90%.

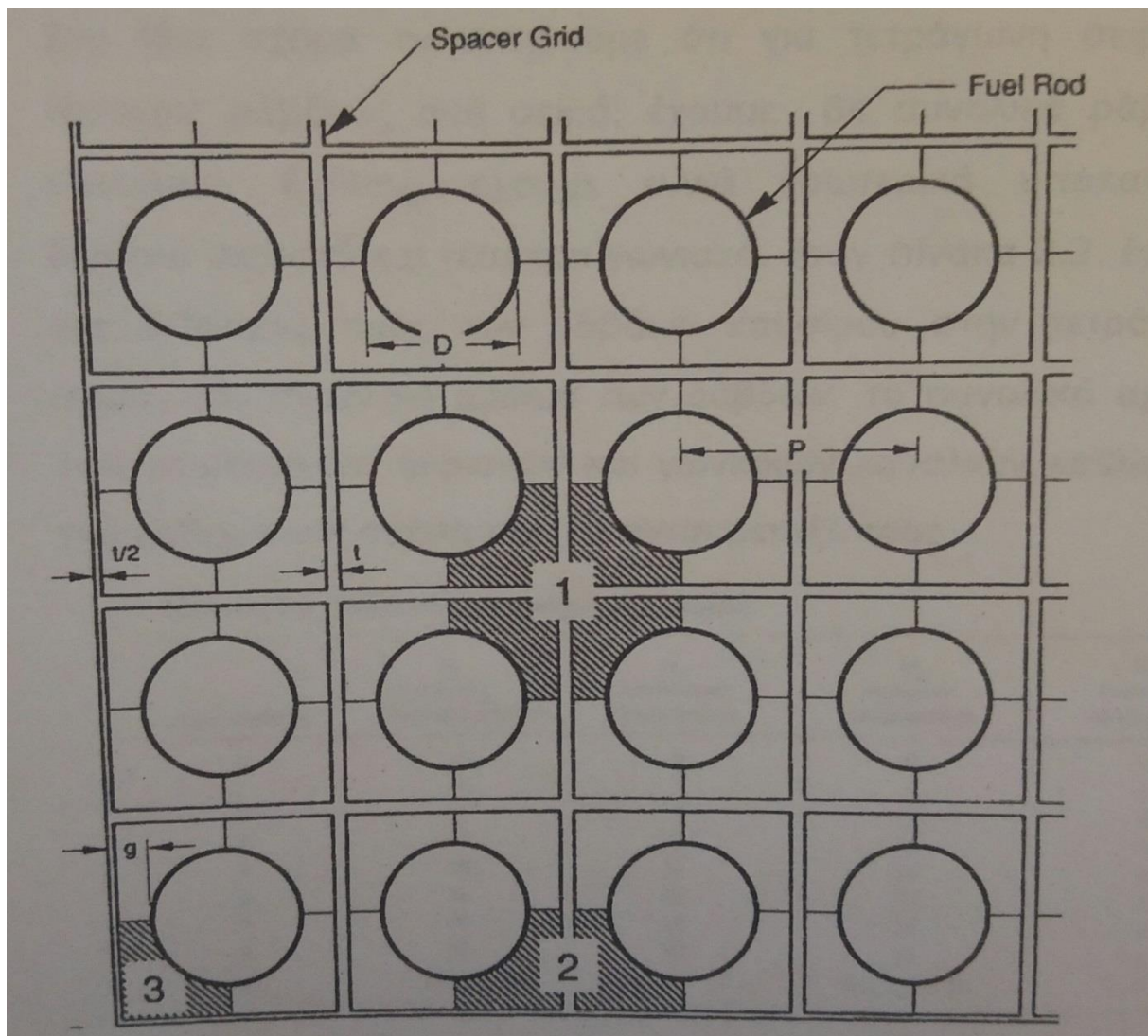
Σχήμα 6 Βασικά χαρακτηριστικά μερικών τύπων πυρηνικών αντιδραστήρων

Με τον όρο εναλλάκτης θερμότητας εννοούμε συσκευή μεταφοράς θερμότητας από ένα ρευστό σε κάποιο άλλο χωρίς να επιτρέπουμε στα δύο ρευστά να έρθουν σε επαφή μεταξύ τους. Ένας απλός εναλλάκτης θερμότητας αποτελείται από μία δέσμη παράλληλων σωλήνων μέσα από τους οποίους ρέει κάποιο ρευστό, που περιέχεται σε ένα δοχείο μέσα στο οποίο ρέει το άλλο ρευστό προς την αντίθετη κατεύθυνση.



Σχήμα 7

Ένα άλλο ενδιαφέρον στοιχείο που προκύπτει είναι ο τρόπος με τον οποίον τοποθετούνται τα καύσιμα μέσα στο πυρήνα του αντιδραστήρα. Σαν παράδειγμα μπορούμε να πάρουμε την τοποθέτηση των καυσίμων μέσα στο πυρήνα του PWR, όπου γίνεται σε τετράγωνη σειρά όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.



Σχήμα 8 Τετραγωνική σειρά. Σχεδιασμός υποκαναλιού, (1) Εσωτερικά, (2) Ακριανά, (3) Γωνιακά

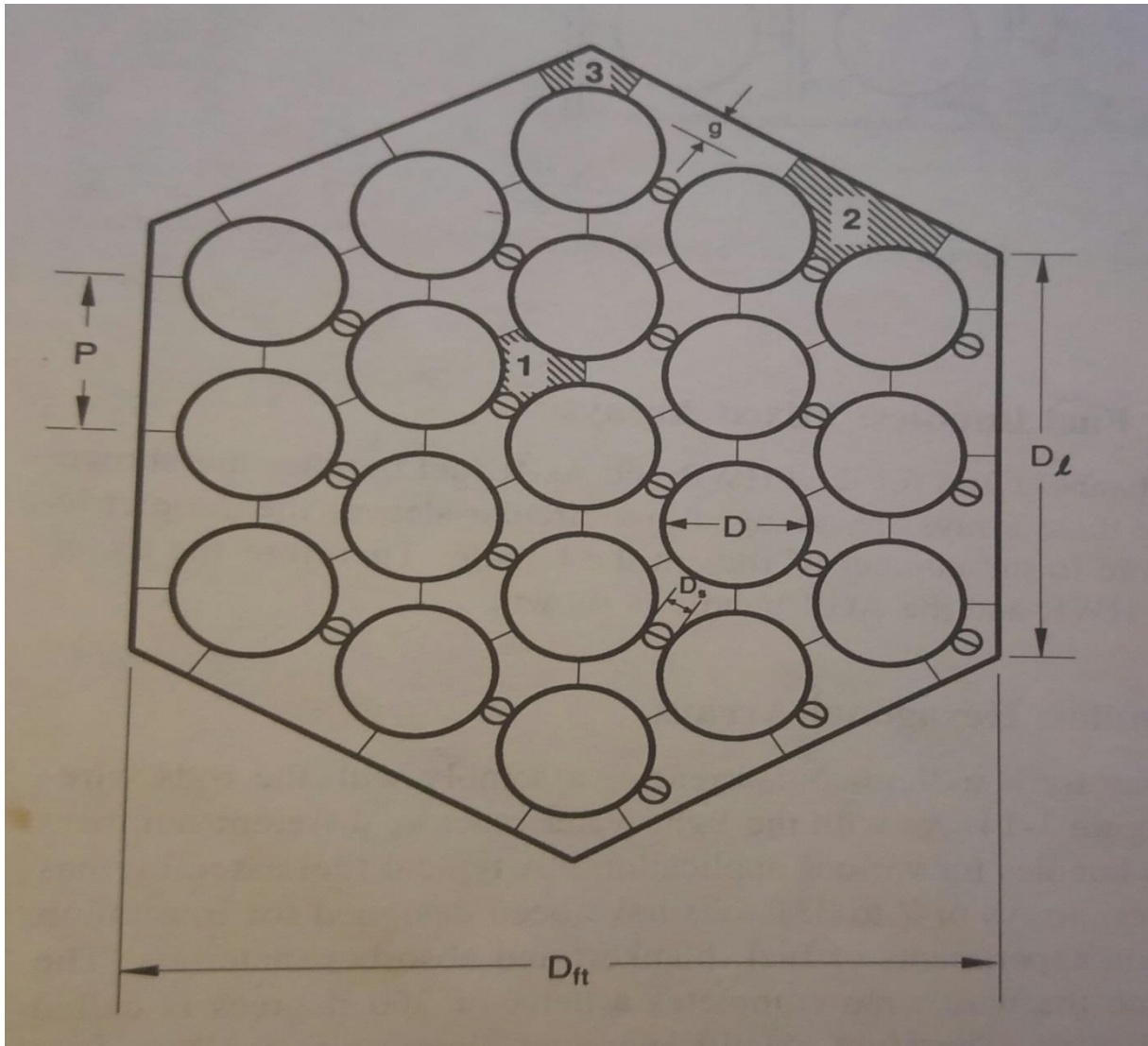
Στο σχήμα 8 διακρίνουμε το σχεδιασμό τριών υποκαναλιών. Όπως μπορούμε να συμπεράνουμε από το σχήμα, εσωτερικό κανάλι έχουμε όταν το υποκανάλι αυτό βρίσκεται ανάμεσα σε τέσσερις ράβδους καυσίμου. Ακριανό υποκανάλι έχουμε όταν το υποκανάλι περνάει από δύο ακριανούς ράβδους καυσίμου και γωνιακό όταν το υποκανάλι βρίσκεται στη γωνία του τετραγώνου.

Στο ίδιο σχήμα παρατηρούμε ότι για τετράγωνη σειρά με τέσσερις ράβδους ανά σειρά έχουμε συνολικά 64 ράβδους καυσίμου. Επίσης έχουμε εννιά εσωτερικά υποκανάλια, δώδεκα ακριανά και τέσσερα γωνιακά.

Rows of rods	N_p Total no. of rods	N_1 No. of interior subchannels	N_2 No. of edge subchannels	N_3 No. of corner subchannels
1	1	0	0	4
2	4	1	4	4
3	9	4	8	4
4	16	9	12	4
5	25	16	16	4
6	36	25	20	4
7	49	36	24	4
8	64	49	28	4
N_{rows}	N_{rows}^2	$(N_{rows} - 1)^2$	$4(N_{rows} - 1)$	4

Σχήμα 9 Υποκανάλια τετραγωνικής σειράς

Στο σχήμα 9 έχουμε για διάφορες τιμές των ράβδων καυσίμου στην τετραγωνική σειρά, τον συνολικό αριθμό των ράβδων, το συνολικό αριθμό των εσωτερικών, ακριανών και γωνιακών καναλιών και τη μαθηματική σχέση που δίνονται μεταξύ τους.



Σχήμα 10 Εξαγωνική σειρά. Σχεδίαση υποκαναλιών, (1) Εσωτερικά, (2) Ακριανά, (3) Γωνιακά.

Rings of rods	N_p Total no. of rods	N_{ps} No. of rods along a side	N_1 No. of interior subchannels	N_2 No. of edge subchannels	N_3 No. of corner subchannels
1	7	2	6	6	6
2	19	3	24	12	6
3	37	4	54	18	6
4	61	5	96	24	6
5	91	6	150	30	6
6	127	7	216	36	6
7	169	8	294	42	6
8	217	9	384	48	6
9	271	10	486	54	6
N_{rings}	$\sum_{n=1}^{N_{rings}} 6n$	$N_{rings} + 1$	$6N_{rings}^2$	$6N_{rings}$	6

Additional useful relations between N_p , N_{ps} , and N_1 are as follows.

$$N_{ps} = \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4}{3}(N_p - 1)} \right] / 2$$

$$N_p = 3N_{ps}(N_{ps} - 1) + 1$$

$$N_1 = 6(N_{ps} - 1)^2$$

$$N_2 = 6(N_{ps} - 1)$$

Σχήμα 11 Υποκανάλια για εξαγωγικές σειρές.

Ένας άλλος βέβαια τρόπος τοποθέτησης των καυσίμων είναι ο εξαγωγικός όπως φαίνεται στο σχήμα 10. Με εξαγωγικό τρόπο συνήθως τοποθετούνται τα καύσιμα στον LMFBR.

Στο σχήμα 11 βλέπουμε τον αριθμό των υποκαναλιών για διάφορους αριθμούς ράβδων καυσίμου καθώς και τη μαθηματική σχέση με την οποία δίνονται τα υποκανάλια με το συνολικό αριθμό των ράβδων.

Characteristic	BWR	PWR(W)	PHWR	HTGR	AGR	LMFBR
Reference design						
Manufacturer	General Electric	Westinghouse	Atomic Energy of Canada, Ltd.	General Atomic	National Nuclear Corp.	Novatome
System (reactor station)	BWR/6	(Sequoyah)	CANDU-600	(Fulton) ^a	HEYSHAM 2	(Superphenix)
Steam-cycle						
No. coolant systems	1	2	2	2	2	3
Primary coolant	H ₂ O	H ₂ O	D ₂ O	He	CO ₂	Liq. Na
Secondary coolant	—	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	Liq. Na/H ₂ O
Energy conversion						
Gross thermal power, MW(th)	3579	3411	2180	3000	1550	3000
Net electrical power, MW(e)	1178	1148	638	1160	618	1200
Efficiency (%)	32.9	33.5	29.3	38.7	40.0	40.0
Heat transport system						
No. primary loops and pumps	2	4	2	6	8	4
No. intermediate loops	—	—	—	—	—	8
No. steam generators	—	4	4	6	4	8
Steam generator type	—	U tube	U tube	Helical coil	Helical coil	Helical coil
Thermal hydraulics						
Primary coolant						
Pressure (MPa)	7.17	15.5	10.0	4.90	4.30	~0.1
Inlet temp. (°C)	278	286	267	318	334	395
Ave. outlet temp. (°C)	288	324	310	741	635	545
Core flow rate (Mg/s)	13.1	17.4	7.6	1.42	3.91	16.4
Volume (L) or mass (kg)	—	3.06 × 10 ⁵	1.20 × 10 ⁵	(9550 kg)	5.3 × 10 ⁶	(3.20 × 10 ⁶ kg)
Secondary coolant						
Pressure (MPa)	—	5.7	4.7	17.2	16.0	~0.1/17.7
Inlet temp. (°C)	—	224	187	188	156.0	345/235
Outlet temp. (°C)	—	273	260	513	541.0	525/487

Source: Knief [4], except AGR-HEYSHAM 2 data are from Alderson [1] and the PWR (W)-Sequoyah data from Coffey [3].
^aDesigned but not built.

Σχήμα 12 Χαρακτηριστικά μερικών πυρηνικών αντιδραστήρων

Characteristic	BWR	PWR(W)	PHWR	HTGR	AGR	LMFBR ^a
Reference design						
Manufacturer	General Electric	Westinghouse	Atomic Energy of Canada, Ltd.	General Atomic	National Nuclear Corp.	Novatome
System (reactor station)	BWR/6	(Sequoyah)	CANDU-600	(Fulton)	HEYSHAM 2	(Superphenix)
Moderator	H ₂ O	H ₂ O	D ₂ O	Graphite	Graphite	—
Neutron energy	Thermal	Thermal	Thermal	Thermal	Thermal	Fast
Fuel production	Converter	Converter	Converter	Converter	Converter	Breeder
Fuel ^b						
Particles						
Geometry	Cylindrical pellet	Cylindrical pellet	Cylindrical pellet	Coated microspheres	Cylindrical pellet	Annular pellet
Dimensions (mm)	10.4D × 10.4H	8.2D × 13.5H	12.2D × 16.4H	400–800 μm D	14.51D × 14.51H	7.0 D
Chemical form	UO ₂	UO ₂	UO ₂	UC/ThO ₂	UO ₂	PuO ₂ /UO ₂
Fissile (wt% 1st core ave.)	1.7 ²³⁵ U	2.6 ²³⁵ U	0.711 ²³⁵ U	93 ²³⁵ U	2.2 ²³⁵ U	15–18 ²³⁹ Pu
Fertile	²³⁸ U	²³⁸ U	²³⁸ U	Th	²³⁸ U	Depleted U
Pins						
Geometry	Pellet stack in clad tube	Pellet stack in clad tube	Pellet stack in clad tube	Cylindrical fuel stack	Pellet stack in clad tube	Pellet stack in clad tube
Dimensions (mm)	12.27D × 4.1mH	9.5D × 4 mH	13.1D × 490L	15.7D × 62L	14.89D × 987H	8.65D × 2.7 mH(C) 15.8D × 1.95 mH(BR)
Clad material	Zircaloy-2	Zircaloy-4	Zircaloy-4	Graphite	Stainless steel	Stainless steel
Clad thickness (mm)	0.813	0.57	0.42	—	0.38	0.7
Assembly						
Geometry ^c	8 × 8 square rod array	17 × 17 square rod array	Concentric circles	Hexagonal graphite block	Concentric circles	Hexagonal rod array
Rod pitch (mm)	16.2	12.6	14.6	—	25.7	9.7 (C)/17.0 (BR)
No. rod locations	64	289	37	132 (SA)/76 (CA) ^d	37	271 (C)/91 (BR)
No. fuel rods	62	264	37	132 (SA)/76 (CA) ^d	36	271 (C)/91 (BR)
Outer dimensions (mm)	139	214	102D × 495L	360F × 793H	190.4 (inner)	173F
Channel	Yes	No	No	No	Yes	Yes
Total weight (kg)	273	—	—	—	342	—

Source: Knief [4] except AGR-HEYSHAM 2 data are from Alderson [1], and LMFBR pin and pellet diameters are from Vendryes [5].
^aLMFBR-core (C), radial blanket (BR), axial blanket (BA).
^bFuel dimensions: diameter (D), height (H), length (L), (across the flats (F), (width of) square (S)).
^cLWRs have utilized a range of number of rods.
^dHTGR-standard assembly (SA), control assembly (CA).

Σχήμα 13 Χαρακτηριστικά καυσίμων για διάφορους τύπους αντιδραστήρων.

Τέλος στα σχήματα 12 και 13 μπορούμε να δούμε κάποιες χρήσιμες πληροφορίες γύρω από διάφορους πυρηνικούς αντιδραστήρες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4. Μελέτη μεταφοράς της θερμότητας

4.1. Παραγωγή ενέργειας και παράμετροι μεταφοράς

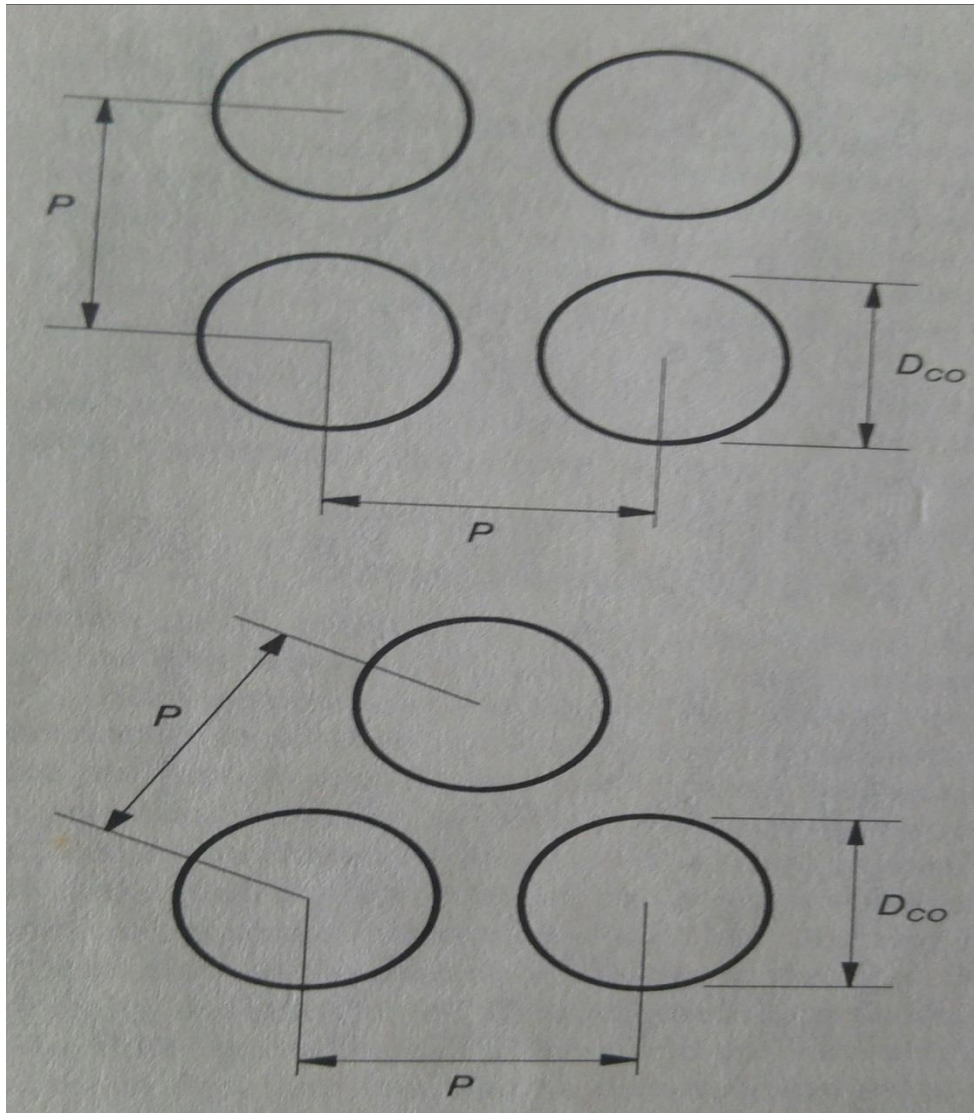
Η ενέργεια που παράγεται στον πυρήνα του πυρηνικού αντιδραστήρα μπορεί να εκφραστεί από μια μεγάλη ποικιλία όρων. Μερικοί από αυτούς είναι οι παρακάτω:

- i. Ρυθμός παραγωγής ογκομετρικής ενέργειας ή θερμότητας q'''
- ii. Επιφανειακή ροή θερμότητας \bar{q}
- iii. Γραμμικός ρυθμός παραγωγής ενέργειας q'
- iv. Ρυθμός παραγωγής ενέργειας ανά ακροδέκτη q
- v. Ισχύς του πυρήνα Q
- vi. Ειδική ισχύς πυρήνα Q/μ μάζα βαριών ατόμων
- vii. Πυκνότητα ισχύος. Η πυκνότητα ισχύος μπορεί να ποικίλει αλλάζοντας τη διάταξη ακροδεκτών των καυσίμων μέσα στο πυρήνα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 14:

Για τετραγωνική σειρά έχουμε: $Q'''_{\text{τετρ.}} = \frac{q'}{\rho^2}$

Για τριγωνική σειρά έχουμε: $Q'''_{\text{τριγ.}} = \frac{q'}{\frac{\sqrt{3}}{2} \rho^2}$

Συγκρίνοντας τις δύο αυτές εξισώσεις παρατηρούμε ότι η πυκνότητα ισχύος σε σειρά τριγώνου είναι μεγαλύτερη κατά 11,5% από ότι στην τετραγωνική.



Σχήμα 14 Τετραγωνική και τριγωνική σειρά

Γι' αυτό το λόγο πολλοί αντιδραστήρες κυρίως ο LMFBR χρησιμοποιούν την τριγωνική σειρά, η οποία μηχανικά είναι πιο απλοϊκή. Αντίθετα στους αντιδραστήρες LWR είναι πιο επιθυμητή η χρήση της σειράς τετραγώνου.

Ειδική ισχύς είναι το μέτρο της ενέργειας που παράγεται ανά μονάδα μάζας του καύσιμου υλικού. Εκφράζεται σε Watts ανά γραμμάριο του βαρέως ατόμου. Έτσι:

$$\text{Ειδική ισχύς} = \frac{Q}{\text{μάζα βαρέων ατόμων}}$$

Μια άλλη χρήσιμη παράμετρος είναι το κλάσμα της μάζας του βαρέως ατόμου στο καύσιμο υλικό και το οποίο συμβολίζεται με f. Άρα:

$$f = \frac{\text{γραμμάρια των βαρέων ατόμων του καύσιμου υλικού}}{\text{γραμμάρια του καύσιμου υλικού}}$$

Πρέπει να τονίσουμε ότι τα βαριά άτομα, συμπεριλαμβανομένου όλων των ισοτόπων του ουρανίου U, πλουτωνίου Pu και θορίου Th, αποτελούνται από σχάσιμα άτομα (M_{ff}) και από μη σχάσιμα άτομα (M_{nf}) όπου M είναι το μοριακό τους βάρος.

Έτσι για καύσιμα που περιέχουν οξειδία ισχύει:

$$f = \frac{N_{ff}M_{ff} + N_{nf}M_{nf}}{N_{ff}M_{ff} + N_{nf}M_{nf} + N_{O_2}M_{O_2}} \quad (1)$$

όπου N η ατομική πυκνότητα.

Ο εμπλουτισμός r είναι η αναλογία της μάζας των σχάσιμων υλικών προς τα συνολικά βαρέα άτομα. Άρα:

$$r = \frac{N_{ff}M_{ff}}{N_{ff}M_{ff} + N_{nf}M_{nf}}$$

Μεγάλη χρησιμότητα έχει η εξίσωση του f συναρτήσει του μοριακού βάρους και του εμπλουτισμού.

Για το N_{O_2} ισχύει η σχέση:

$$N_{O_2} = N_{ff} + N_{nf}$$

Από τη σχέση του εμπλουτισμού τροποποιώντας τη θα ισχύει:

$$r = \frac{N_{ff}M_{ff}}{N_{ff}M_{ff} + N_{nf}M_{nf}} \leftrightarrow -r = \frac{-N_{ff}M_{ff}}{N_{ff}M_{ff} + N_{nf}M_{nf}} \leftrightarrow 1-r = 1 - \frac{N_{ff}M_{ff}}{N_{ff}M_{ff} + N_{nf}M_{nf}} \leftrightarrow$$

$$1-r = \frac{N_{ff}M_{ff} + N_{nf}M_{nf} - N_{ff}M_{ff}}{N_{ff}M_{ff} + N_{nf}M_{nf}} \leftrightarrow 1-r = \frac{N_{nf}M_{nf}}{N_{ff}M_{ff} + N_{nf}M_{nf}}$$

Από την εξίσωση $r = \frac{N_{ff}M_{ff}}{N_{ff}M_{ff} + N_{nf}M_{nf}}$ λύνοντας για N_{ff} και N_{nf} θα έχουμε:

$$N_{ff} = r \frac{M_{nf}}{M_{ff}} * \frac{N_{nf}}{1-r} \quad (2)$$

$$N_{nf} = (1-r) \frac{M_{ff}}{M_{nf}} * \frac{N_{ff}}{r} \quad (3)$$

$$N_{ff} + N_{nf} = r \frac{M_{nf}}{M_{ff}} * \frac{N_{nf}}{1-r} + N_{nf} = [r \frac{M_{nf}}{M_{ff}} + (1-r)] * \frac{N_{nf}}{1-r} \quad (4)$$

Αντίστοιχα θα είναι:

$$N_{ff} + N_{nf} = N_{ff} + (1-r) * \frac{M_{ff}}{M_{nf}} * \frac{N_{ff}}{r} = [r + (1-r) \frac{M_{ff}}{M_{nf}}] * \frac{N_{ff}}{r} \quad (5)$$

Διαιρώντας με την εξίσωση (1) με το N_{O_2} θα έχουμε:

$$f = \frac{\frac{N_{ff}M_{ff}}{N_{O_2}} + \frac{N_{nf}M_{nf}}{N_{O_2}}}{\frac{N_{nf}M_{ff}}{N_{O_2}} + \frac{N_{nf}M_{nf}}{N_{O_2}} + M_{O_2}} + M_{O_2}$$

Υπολογίζοντας ξεχωριστά το κάθε μέλος της παραπάνω ισότητας θα έχουμε:

$$\begin{aligned} \frac{N_{ff}M_{ff}}{N_{O_2}} &= \frac{(2)}{(4)} * \frac{r * \frac{M_{nf}}{M_{ff}} * \frac{N_{nf}}{1-r} * M_{ff}}{[r \frac{M_{nf}}{M_{ff}} + (1-r)] * \frac{N_{nf}}{1-r}} = \frac{rM_{nf}}{r \frac{M_{nf}}{M_{ff}} + 1-r} = \frac{rM_{nf}}{\frac{rM_{nf} + (1-r)M_{ff}}{M_{ff}}} = \frac{rM_{ff}}{\frac{rM_{nf} + (1-r)M_{ff}}{M_{nf}}} = \\ &= \frac{rM_{ff}}{r + (1-r)(\frac{M_{ff}}{M_{nf}} + r)} \end{aligned}$$

Ομοίως:

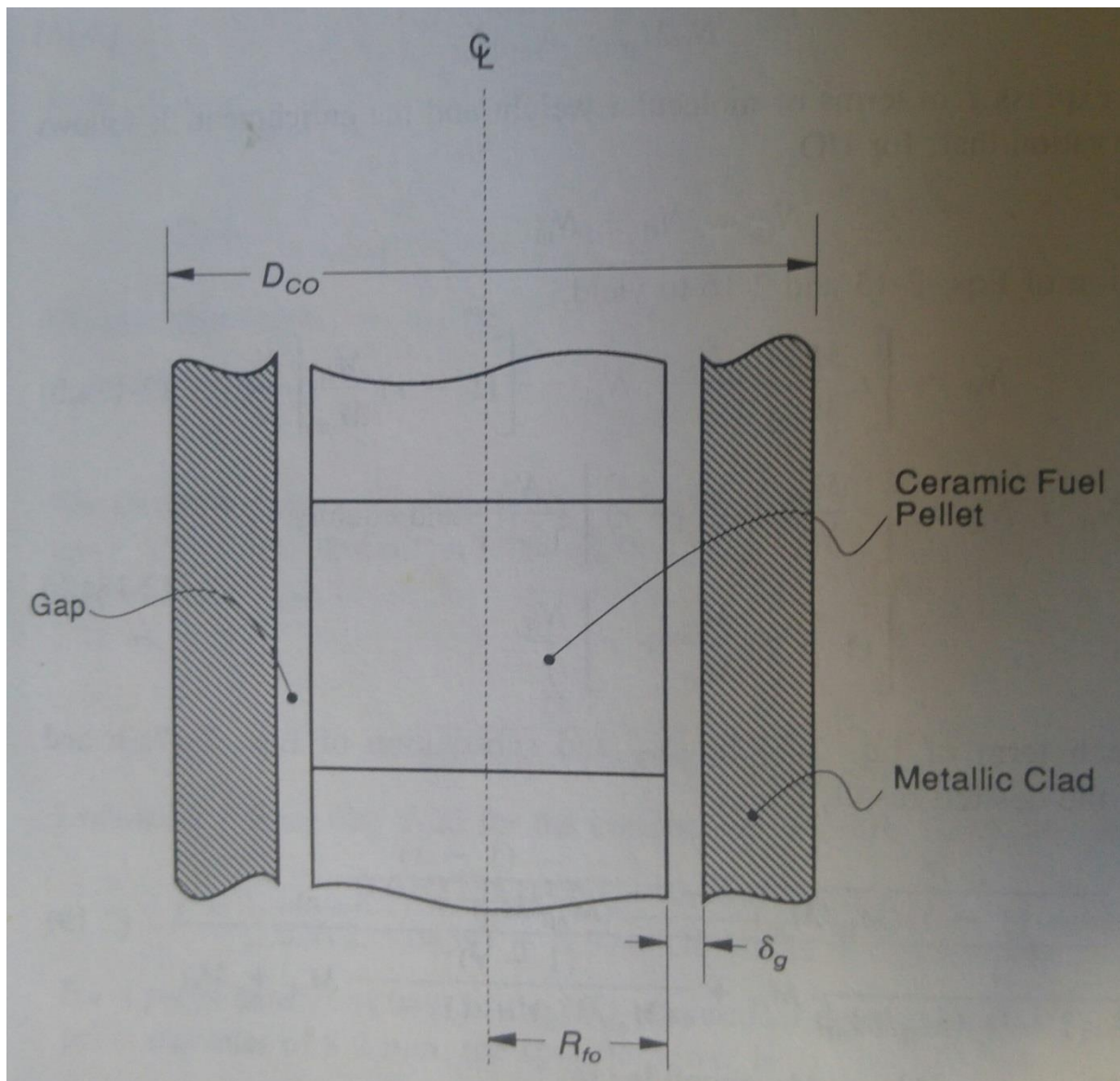
$$\begin{aligned} \frac{N_{nf}M_{nf}}{N_{O_2}} &= \frac{(3)}{(5)} * \frac{(1-r) * \frac{M_{ff}}{M_{nf}} * \frac{N_{ff}}{r} * M_{nf}}{[(1-r) * \frac{M_{ff}}{M_{nf}} + r] * \frac{N_{ff}}{r}} = \frac{(1-r)M_{ff}}{(1-r)\frac{M_{ff}}{M_{nf}} + r} = \frac{(1-r)M_{ff}}{\frac{(1-r)M_{ff} + rM_{nf}}{rM_{nf}}} = \frac{(1-r)M_{nf}}{\frac{(1-r)M_{ff} + rM_{nf}}{rM_{ff}}} = \\ &= \frac{(1-r)M_{nf}}{(1-r) + r \frac{M_{nf}}{M_{ff}}} \end{aligned}$$

Με βάση τις δύο τελευταίες εξισώσεις η f θα είναι:

$$fu_{O_2} = \frac{\frac{r}{r + (1-r) + r \frac{M_{ff}}{M_{nf}}} * M_{ff} + \frac{(1-r)}{\left(r * \frac{M_{nf}}{M_{ff}}\right) + (1-r)} * M_{nf}}{\frac{r}{r + (1-r) + r \frac{M_{ff}}{M_{nf}}} * M_{ff} + \frac{(1-r) M_{nf}}{\left(r * \frac{M_{nf}}{M_{ff}}\right) + (1-r)} * M_{O_2}}$$

Στην περίπτωση που $M_{ff} = M_{nf}$ τότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$fu_{O_2} = \frac{rM_{ff} + (1-r)M_{nf}}{rM_{ff} + (1-r)M_{nf} + M_{O_2}}$$



Σχήμα 15 Τυπική περιγραφή καυσίμου

Η πυκνότητα παραμόρφωσης περιλαμβάνει το διάκενο μεταξύ της ράβδου του καυσίμου και της εσωτερικής διαμέτρου του περιβλήματος, σχήμα 15. Η πυκνότητα παραμόρφωσης είναι η πυκνότητα της θερμότητας και εξαρτάται αν το διάκενο δ_g βρίσκεται σε ζεστή ή κρύα κατάσταση.

Characteristic	BWR	PWR(W)	PHWR	HTGR	AGR	LMFBR*
Core						
Axis	Vertical	Vertical	Horizontal	Vertical	Vertical	Vertical
No. of assemblies						
Axial	1	1	12	8	8	1
Radial	748	193	380	493	332	364 (C)
Assembly pitch (mm)	152	215	286	361	460	233 (BR)
Active fuel height (m)	3.81	3.66	5.94	6.30	8.296	1.79
Equivalent diameter (m)	4.70	3.37	6.29	8.41	9.458	1.0 (C)
Total fuel weight (ton)	156 UO ₂	101 UO ₂	98.4 UO ₂	1.72 U 37.5 Th	113.5 UO ₂	1.6 (C + BA) 3.66 32 MO ₂
Reactor vessel						
Inside dimensions (m)	6.05D × 21.6H	4.83D × 13.4H	7.6D × 4L	11.3D × 14.4H	20.25D × 21.87H	21D × 19.5H
Wall thickness (mm)	152	224	28.6	4.72 m min	5.8 m	25
Material ^b	SS-clad carbon steel	SS-clad carbon steel	Stainless steel	Prestressed concrete	Concrete helical prestressed	Stainless steel
Other features			Pressure tubes	Steel liners	Steel lined	Pool type
Power density core average (kW/L)	54.1	105	12	8.4	2.66	280
Linear heat rate						
Core average (kW/m)	19.0	17.8	25.7	7.87	17.0	29
Core maximum (kW/m)	44.0	42.7	44.1	23.0	29.8	45
Performance						
Equilibrium burnup (MWD/T)	27,500	27,500	7500	95,000	18,000	100,000
Average assembly residence (full-power days)			470	1170	1320	
Refueling						
Sequence	¼ per yr	½ per yr	Continuous on-line	¼ per yr	Continuous on-line	Variable
Outage time (days)	30	30		14-20		32

Source: Knief [3], except AGR data are from Alderson [1] and Debenham [2].
^aLMFBR: core (C), radial blanket (BR), axial blanket (BA).
^bSS = stainless steel.

Σχήμα 16 Χαρακτηριστικά 6 τύπων πυρηνικών αντιδραστήρων με θερμική απόδοση

4.2. Εξισώσεις για τη μεταφορά της θερμότητας

Το αντικείμενο την ανάλυσης της μεταφοράς της θερμότητας για τη ροή είναι:

- Προσδιορισμός του πεδίου της θερμοκρασίας σε ένα κανάλι όπου υπάρχει το ψυκτικό για να εξασφαλίσουμε ότι η θερμοκρασία της λειτουργίας είναι στα καθορισμένα όρια.
- Προσδιορισμός των παραμέτρων που διέπουν τις αναλογίες θέρμανσης μεταφοράς στα τοιχώματα των καναλιών.

Αυτές οι παράμετροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαλέξουμε υλικά και συνθήκες ροής οι οποίες μεγιστοποιούν το βαθμό της μεταφοράς της θερμότητας.

Η ροή της θερμοκρασίας ανά μονάδα επιφάνειας q'' δίνεται από την εξίσωση:

$$q''_{(r)} = -K \frac{\partial T}{\partial n} n_{(r)}$$

όπου K η θερμική αγωγιμότητα του ψυκτικού, n η κατεύθυνση της ροής του ψυκτικού στο κανάλι και $\frac{\partial T}{\partial n}$ η μεταβολή της θερμοκρασίας στην κατεύθυνση της μεταφοράς της θερμότητας.

Στη μηχανική η ροή της θερμότητας δίνεται από την εξίσωση:

$$q''_{(r)} = h(T_w - T_\beta) n_{(r)}$$

όπου T_w η θερμοκρασία των τοιχωμάτων, T_b η μέση θερμοκρασία της ροής και h ο συντελεστής της μεταφοράς της θερμότητας.

Η γενική εξίσωση της ενέργειας για τη ροή μιας φάσης δίνεται:

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \nabla q''_{(r)} + q''' + \beta T \frac{DP}{DE} + \Phi$$

όπου ρ η πυκνότητα του καύσιμου υλικού, C_p η ειδική θερμότητα, $\frac{DP}{DE}$ η παράγωγος της θερμοκρασίας ως προς το χρόνο, q'' και q''' η ροή θερμότητας και ο ρυθμός παραγωγής της θερμότητας, $\frac{DT}{Dt}$ η παράγωγος της πίεσεως ως προς το χρόνο, β ο συντελεστής διαστολής ο οποίος είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας T και Φ ο συντελεστής απωλειών.

Αν θεωρήσουμε πως $\frac{DP}{DE} = 0$ και $q''' = 0$ και ότι οι ιδιότητες των υλικών είναι ανεξάρτητες από τη θερμοκρασία, τότε η εξίσωση της ενέργειας γίνεται:

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = K \nabla^2 T + \Phi$$

όπου K η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού.

Εάν στη παραπάνω εξίσωση κάνουμε τις εξής αλλαγές:

$$\vec{U}^* = \frac{\vec{U}}{V}$$

$$X^* = \frac{x}{De}$$

$$t^* = \frac{tV}{De}$$

$$T = \frac{(T - T_0)}{(T_1 - T_0)}$$

όπου V , De και $(T - T_0)$, η ταχύτητα, το μήκος και η διαφορά της θερμοκρασίας στο σύστημα, αντίστοιχα και $T_1 - T_0$ εκφράζει τη στατική θερμοκρασία.

Επομένως η εξίσωση γίνεται:

$$\rho C_p [(T_1 - T_0) \frac{V}{De} \frac{\partial T^*}{\partial t^*} + (T_1 - T_0) \frac{V}{De} \vec{U}^* \nabla^* T^*] = K \frac{(T_1 - T_0)}{De^2} \nabla^{*2} T^* + \mu \left(\frac{V}{De}\right)^2 \rho^*$$

Άρα γίνεται:

$$\frac{\partial T^*}{\partial E^*} + \vec{U}^* \nabla^* T^* = \frac{1}{RePr} \nabla^{*2} T^* + \frac{Br}{RePr} \phi^*$$

Στην παραπάνω εξίσωση έγιναν οι αλλαγές:

$$Re = \frac{\rho V De}{\mu}, \text{ με } Re \text{ αριθμό Reynalt.}$$

Όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού, V η μέση ταχύτητα και μ το ιξώδες.

$$Br = \frac{\mu V^2}{k(T_1 - T_0)}, \text{ με } Br \text{ αριθμό BrinKmann.}$$

Ο αριθμός BrinKmann είναι η αναλογία της παραγωγής της θερμότητας προς τη μεταφορά της. Πολλές φορές χρησιμοποιούμε τον αριθμό EcKert για να εκφράσουμε την αναλογία $\frac{Br}{Pr}$ όπου:

$$Ec = \frac{Br}{Pr} = \frac{\frac{V^2}{c_p}}{T_1 - T_0}$$

όπου V η μέση ταχύτητα του ψυκτικού όπου ο αριθμός EcKert εκφράζει τη δυναμική θερμοκρασία εξαιτίας της κίνησης προς τη διαφορά της στατικής θερμοκρασίας.

4.3. Θερμική αγωγιμότητα

Η θερμική αγωγιμότητα είναι μια ιδιότητα που αναφέρεται στη ροή της θερμότητας μέσα σε ένα υλικό προς τη κλίση της θερμοκρασίας στο χώρο.

Η θερμική αγωγιμότητα των διαφόρων υλικών που χρησιμοποιούνται στη μηχανική ποικίλουν πολύ.

Υψηλή αγωγιμότητα έχουν τα μέταλλα, ενώ τα αέρια έχουν τη χαμηλότερη. Ακόμα και για τα ίδια υλικά η αγωγιμότητα είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και στην περίπτωση των αερίων επίσης της πίεσης. Μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί για τη προσέγγιση της συμπεριφοράς των πολυατομικών στοιχείων.

Για τα αέρια η σχέση που δίνει την αγωγιμότητα είναι από την εξίσωση Eucken:

$$K = \left(C_p + \frac{5R}{4M} \right) \mu$$

όπου R η παγκόσμια σταθερά των αερίων M το μοριακό βάρος του αερίου.

Για τα υγρά και στερεά η αγωγιμότητα είναι πιο δύσκολη να μελετηθεί, για μέταλλα η θερμική αγωγιμότητα K αναφέρεται στην ηλεκτρική αγωγιμότητα K_e , όπου ισχύει:

$$\frac{K}{K_e T} = L = \text{σταθερό}$$

όπου L ο αριθμός Lorentz και T η απόλυτη θερμοκρασία.

4.4. Μηχανική προσέγγιση στην ανάλυση της μεταφοράς της θερμότητας

Στην μηχανική η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων και της θερμοκρασίας ροής λαμβάνεται από το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μέσω του αριθμού Nusselt Nu, όπου:

$$Nu = \frac{hDH}{k}$$

όπου h ο συντελεστής μεταφοράς της θερμότητας και DH δίνεται από την εξίσωση:

$$DH = \frac{4 \cdot \text{εμβαδό ροής}}{\text{επιφάνεια ανά μονάδα μήκους}} = \frac{4A}{ph}$$

Παρατηρούμε πως το DH έχει διαστάσεις μήκους και είναι ένα μέγεθος το οποίο ονομάζεται πλευρική ή εγκάρσια διάσταση. Για εξωτερική ροή χρησιμοποιείται ο όρος πλευρική διάσταση ενώ για εσωτερική ροή ο όρος εγκάρσια διάσταση. Ο αριθμός Nu εξαρτάται από την αγωγή της ροής και το ψυκτικό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

5. Σύγχρονες γεννήτριες

5.1. Γενικά

Οι Σύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούνται κυρίως ως γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Είναι η βασική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι σύγχρονες γεννήτριες λειτουργούν συνήθως από κοινού (ή παράλληλα), σχηματίζοντας ένα μεγάλο σύστημα παροχής ισχύος ηλεκτρικής ενέργειας στα φορτία ή τους καταναλωτές.

Οι σύγχρονες γεννήτριες φτιάχνονται σε μεγάλες μονάδες και η ισχύς τους κυμαίνεται από δεκάδες έως εκατοντάδες μεγαβάτ.

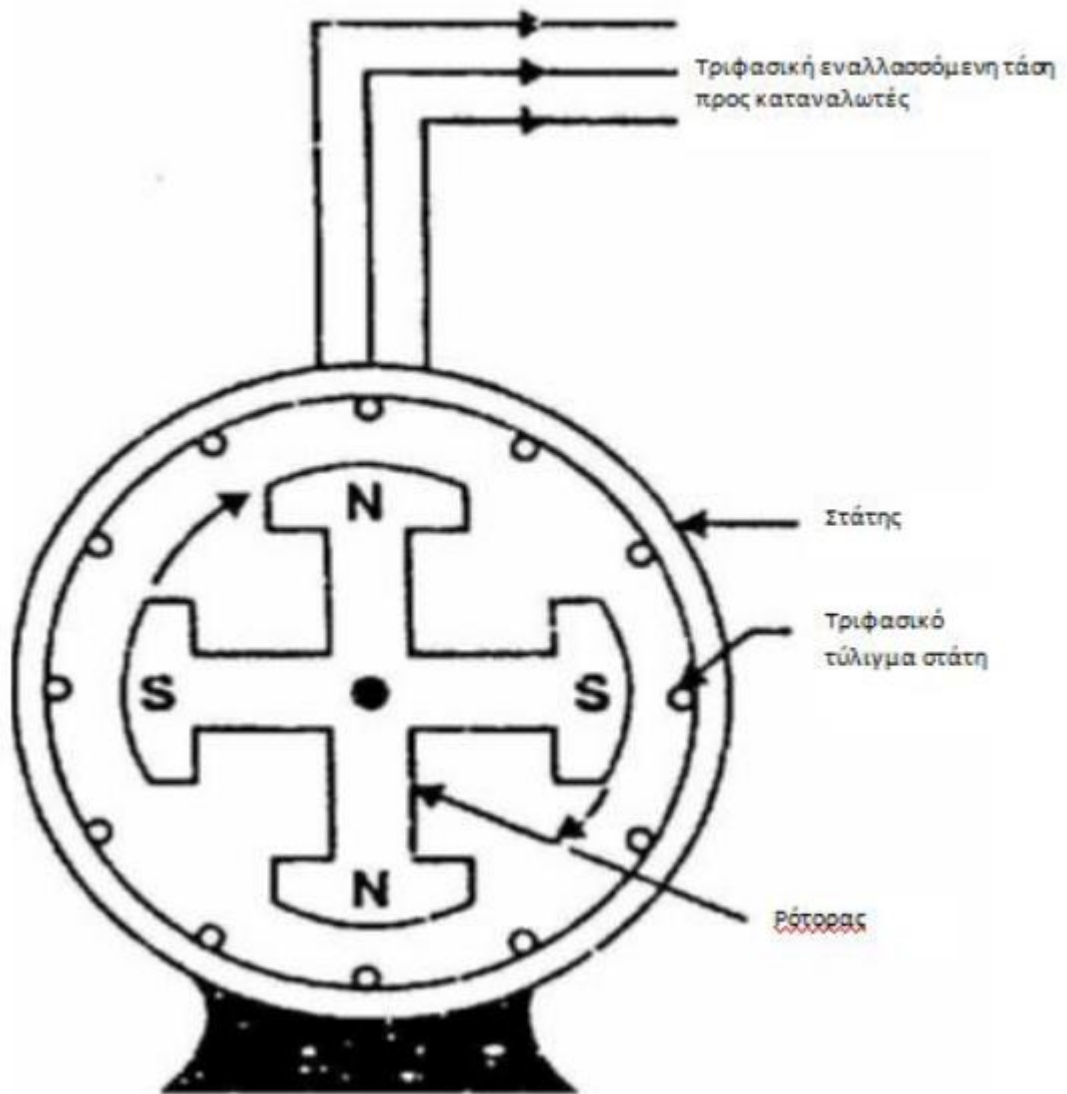
Η σύγχρονη γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική εναλλασσόμενου ρεύματος. Η πηγή της μηχανικής ενέργειας, η κινητήρια δύναμη, μπορεί να είναι μια μηχανή diesel, ένας ατμοστρόβιλος, ένας υδροστρόβιλος, ή οποιαδήποτε παρόμοια συσκευή.

Για μηχανές υψηλής ταχύτητας, η κινητήρια δύναμη είναι συνήθως τουρμπίνες ατμού που χρησιμοποιούν ορυκτά ή πυρηνικές πηγές ενέργειας.

Ένας εναλλακτήρας ακολουθεί την ίδια θεμελιώδη αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής όπως και η γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, δηλ. η μεταβολή της μαγνητικής ροής επάγει τάση (Η.Ε.Δ.) σε αγωγό. Όπως και μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, ο εναλλακτήρας έχει επίσης έναν τύλιγμα (πηνίο) οπλισμού και ένα τύλιγμα μαγνητικού πεδίου (διέγερσης). Αλλά υπάρχει μια σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο.

Σε μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, το τύλιγμα οπλισμού τοποθετείται στον ρότορα ώστε να παρέχεται η μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης που παράγεται στην περιέλιξη άμεσα, σε συνεχή τάση στους ακροδέκτες προς χρήση, μέσω του συλλέκτη. Οι μαγνητικοί πόλοι τοποθετούνται στο σταθερό μέρος της μηχανής (στάτης).

Δεδομένου ότι δεν απαιτείται συλλέκτης σε έναν εναλλακτήρα, είναι συνήθως πιο βολικό και πλεονεκτικό να τοποθετείται το τύλιγμα μαγνητικού πεδίου στο περιστρεφόμενο τμήμα και το τύλιγμα οπλισμού στο σταθερό τμήμα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Πλεονεκτήματα ακίνητου (σταθερού) οπλισμού:

Το τύλιγμα του μαγνητικού πεδίου ενός εναλλακτήρα τοποθετείται επί του ρότορα και συνδέεται σε DC πηγή μέσω δύο δακτυλίων ολίσθησης (δακτυλίδια). Το 3φασικό τύλιγμα του οπλισμού τοποθετείται στον στάτη . Αυτή η διάταξη έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- i. Είναι πιο εύκολη η μόνωση σε ακίνητη περιέλιξη για υψηλές τάσεις, για τις οποίες οι εναλλακτήρες συνήθως σχεδιάζονται. Έτσι δεν υφίστανται φυγόκεντρες δυνάμεις και επιπλέον χώρος είναι διαθέσιμος.
- ii. Το τριφασικό τύλιγμα του οπλισμού μπορεί να συνδεθεί άμεσα στους καταναλωτές, χωρίς να φορτώσει με μεγάλα ρεύματα τους δακτύλιους ολίσθησης και τις ψήκτρες.
- iii. Μόνο δύο δακτύλιοι ολίσθησης απαιτούνται για το Σ.Ρ. που απαιτείται στο τύλιγμα του μαγνητικού πεδίου του ρότορα. Αυτό το ρεύμα είναι μικρό σε σχέση με το ρεύμα εξόδου της γεννήτριας και έτσι οι δακτύλιοι ολίσθησης και οι ψήκτρες που απαιτούνται είναι ελαφριάς κατασκευής.
- iv. Λόγω της απλής και στιβαρής κατασκευής του ρότορα, υψηλότερη ταχύτητα του περιστρεφόμενου D.C. πεδίου είναι δυνατή. Αυτό αυξάνει την έξοδο που μπορεί να ληφθεί από μια μηχανή συγκεκριμένων διαστάσεων.

Σημείωση: Όλοι οι εναλλακτήρες άνω των 5 KVA χρησιμοποιούν σταθερό οπλισμό (στον στάτη) και περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο (στον ρότορα).

5.2. Κατασκευή εναλλακτών

Ένας εναλλακτήρας έχει τριφασικό τύλιγμα επάνω στο στάτη και ένα DC (συνεχούς ρεύματος) τύλιγμα, μαγνητικού πεδίου στον ρότορα.

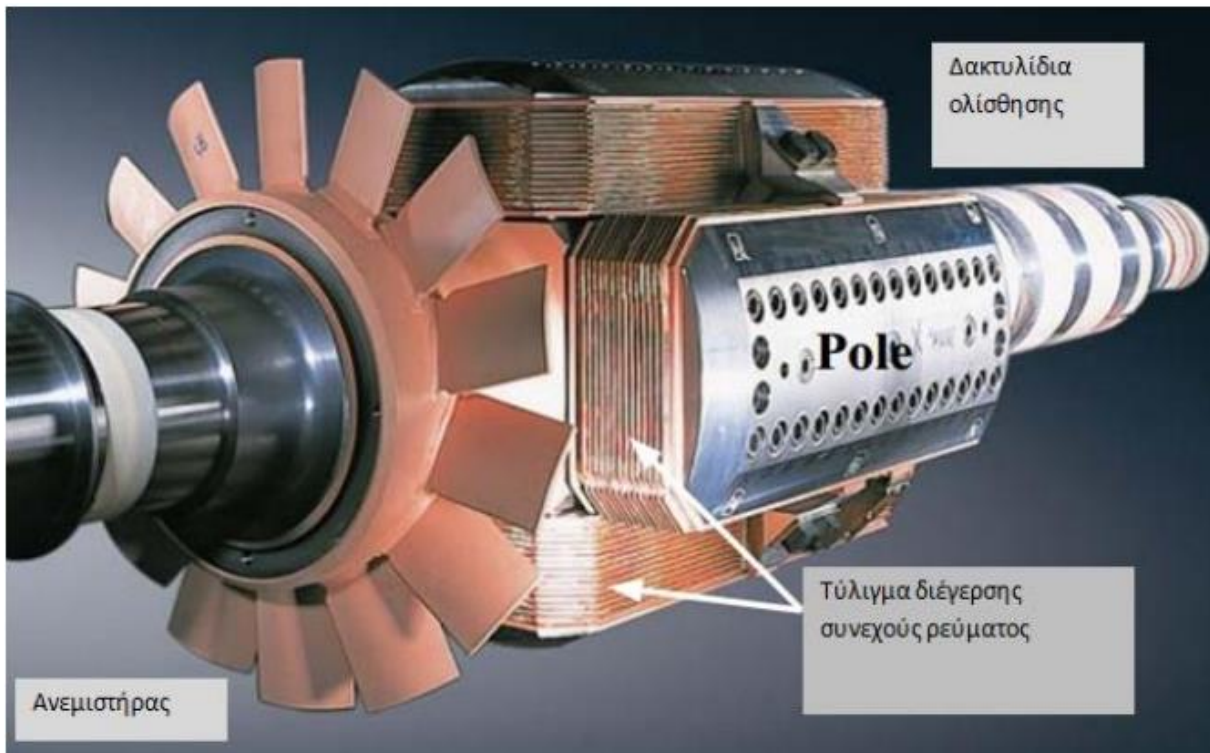
5.2.1. Στάτης

Είναι το σταθερό τμήμα της μηχανής και είναι κατασκευασμένο από φύλλα ελασμάτων χάλυβα έχοντας εγκοπές στην εσωτερική του περιφέρεια. Ένα 3- φάσεων τύλιγμα τοποθετείται σε αυτές τις υποδοχές και χρησιμεύει ως το τύλιγμα οπλισμού της γεννήτριας. Το τύλιγμα οπλισμού είναι πάντα συνδεδεμένο σε αστέρα και ο ουδέτερος συνδέεται με τη γείωση.

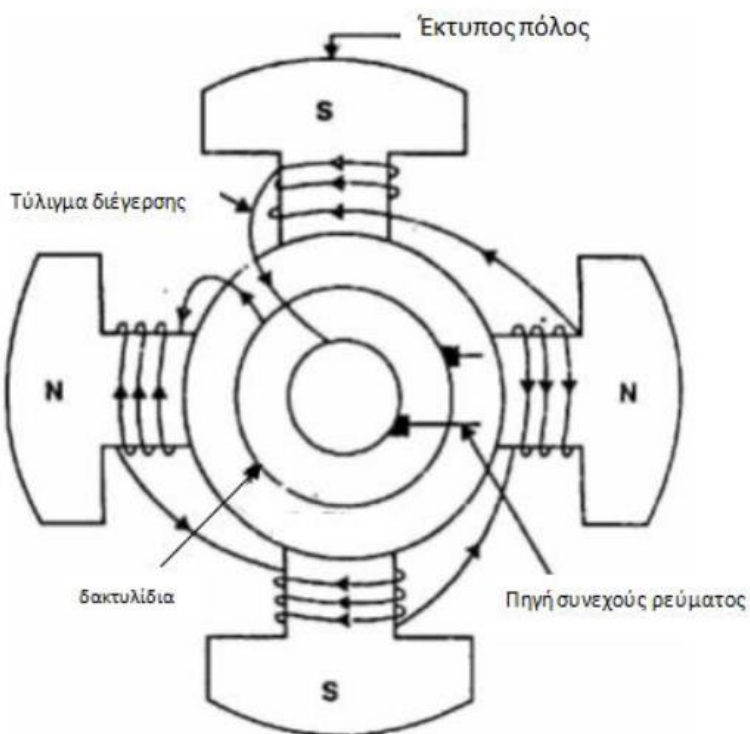
5.2.2. Ρότορας

Ο ρότορας φέρει το τύλιγμα του μαγνητικού πεδίου το οποίο τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα μέσω δύο δακτυλίων ολίσθησης (δακτυλίδια) από ξεχωριστή πηγή συνεχούς ρεύματος. Αυτή η D.C. πηγή (που ονομάζεται διεγέρτρια) είναι συνήθως μια μικρή D.C. γεννήτρια που τοποθετείται επί του άξονα του εναλλακτήρα. Η κατασκευή του ρότορα είναι δύο τύπων:

1) Με έκτυπους (εμφανείς) πόλους:



Σε αυτόν τον τύπο, οι προεξέχοντες πόλοι τοποθετούνται σε ένα μεγάλο κυκλικό χαλύβδινο πλαίσιο το οποίο είναι στερεωμένο στην άτρακτο του εναλλακτήρα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τα επιμέρους τυλίγματα των πόλων συνδέονται σε σειρά κατά τέτοιο τρόπο ώστε όταν το ολικό τύλιγμα του μαγνητικού πεδίου ενεργοποιείται από την D.C. διεγέρτρια, οι διπλανοί πόλοι να έχουν αντίθετη πολικότητα.

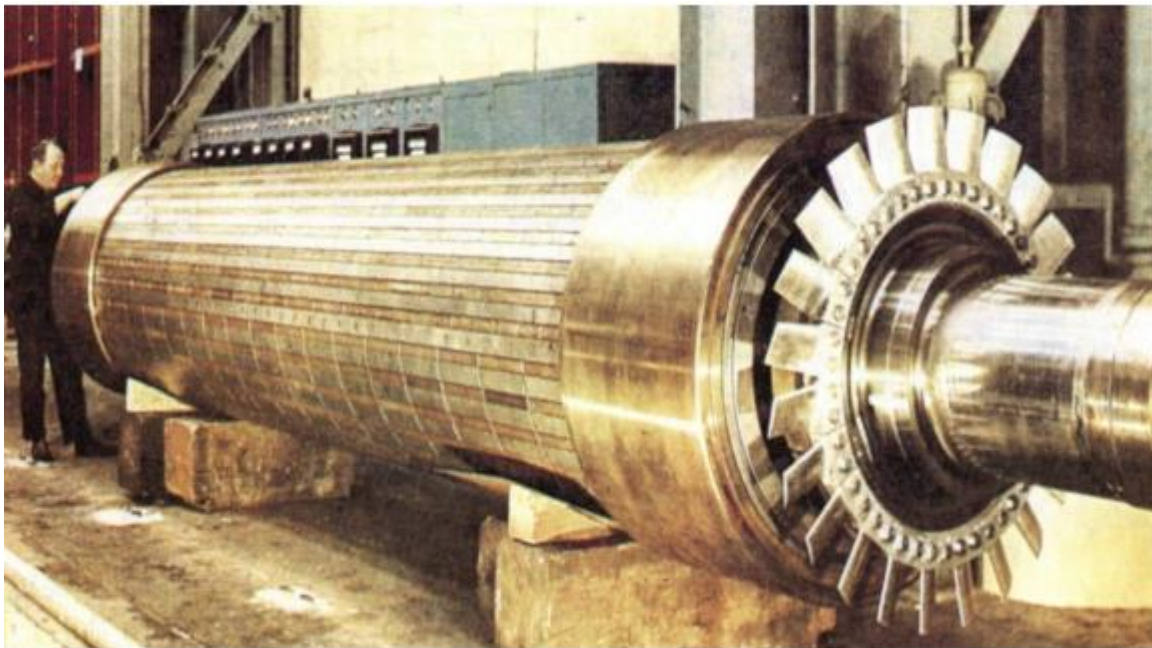


Εναλλακτικές χαμηλής και μέσης ταχύτητας (120-400 rpm), όπως αυτοί που οδηγούνται από κινητήρες ντίζελ ή υδροστροβίλους, έχουν κυρίως δρομείς έκτυπων πόλων, λόγω των παρακάτω λόγων:

- i. Οι ρότορες με προεξέχοντες πόλους θα προκαλούσαν, αν οδηγούνται σε υψηλή ταχύτητα, υπερβολική απώλεια μηχανικής ισχύος λόγω αντίστασης του αέρα και θα είχαν την τάση να παράγουν θόρυβο.
- ii. Οι ρότορες έκτυπων πόλων δεν μπορούν να καταστούν αρκετά ισχυροί για να αντέξουν τις μηχανικές καταπονήσεις στις οποίες ενδέχεται να υποβληθούν σε υψηλότερες ταχύτητες.

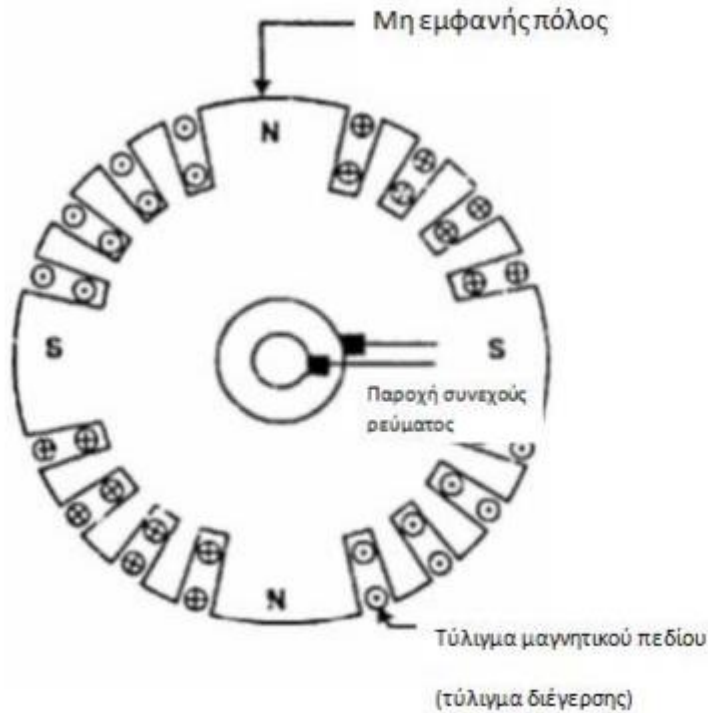
Δεδομένου ότι μία συχνότητα 50- 60 Hz απαιτείται, θα πρέπει να χρησιμοποιούν ένα μεγάλο αριθμό πόλων και να έχουν αργή ταχύτητα. Ρότορες χαμηλής ταχύτητας πάντα διαθέτει μια μεγάλη διάμετρο ώστε να παρέχουν τον αναγκαίο χώρο για την τοποθέτηση των πόλων. Κατά συνέπεια, οι δρομείς με καταναμημένους πόλους έχουν μεγάλη διάμετρο και μικρά μήκη άξονα.

2) Κυλινδρικού τύπου (μη εμφανείς πόλοι):



Σε αυτόν τον τύπο, ο ρότορας είναι κατασκευασμένος από λείο στερεό σφυρήλατο κυλινδρικό χάλυβα, που έχει μια σειρά από εγκοπές κατά μήκος της εξωτερικής περιφέρειας.

Το τύλιγμα του μαγνητικού πεδίου ενσωματώνεται σε αυτές τις αυλακώσεις και συνδέεται σε σειρά με τους δακτυλίους ολίσθησης μέσω των οποίων ενεργοποιείται από την D.C. διεγέρτρια. Οι περιοχές που αποτελούν τους πόλους αφήνονται συνήθως χωρίς αυλακώσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω. Είναι σαφές ότι οι πόλοι που σχηματίζονται είναι μη-εμφανείς δηλαδή, δεν προεξέχουν έξω από την επιφάνεια του ρότορα.



Οι Εναλλακτήρες υψηλής ταχύτητας (1500- 3000 rpm) οδηγούνται από τουρμπίνες ατμού και χρησιμοποιούν ρότορες κυλινδρικούς (μη εμφανών πόλων) και αυτό οφείλεται στους εξής λόγους:

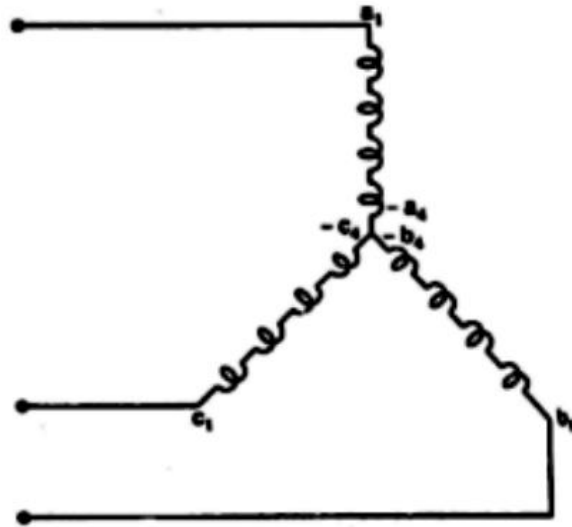
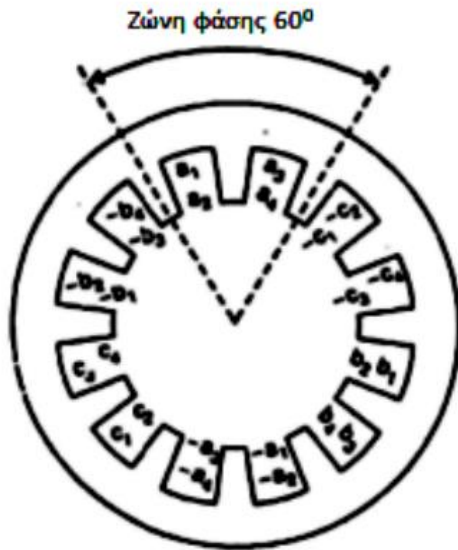
- i. Αυτός ο τύπος κατασκευής έχει μηχανική αντοχή και δίνει αθόρυβη λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες.
- ii. Η κατανομή μαγνητικής ροής γύρω από την περιφέρεια είναι σχεδόν ένα ημιτονοειδές κύμα και συνεπώς λαμβάνεται μια Η.Ε.Δ. καλύτερης κυματομορφής, απ' ό,τι στην περίπτωση του ρότορα με εμφανείς πόλους.

Δεδομένου ότι οι τουρμπίνες ατμού λειτουργούν σε υψηλή ταχύτητα και απαιτείται συχνότητα 50-60 Hz, θα χρειάζονται ένα μικρό αριθμό πόλων στον ρότορα των εναλλακτών υψηλής ταχύτητας (ονομάζονται στροβιλοεναλλακτήρες).

Κατά συνέπεια, οι στροβιλοεναλλακτήρες διαθέτουν 2 ή 4 πόλους και έχουν μικρή διάμετρο και πολύ μεγάλα μήκη άξονα.

5.3 Τύλιγμα οπλισμού των εναλλακτών

Με πολύ λίγες εξαιρέσεις, οι εναλλακτήρες είναι μηχανές 3-φάσεων λόγω των πλεονεκτημάτων του δικτύου 3-φάσεων για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή. Οι περιελίξεις για ένα εναλλακτήρα είναι πολύ απλούστερες από αυτή των μηχανών συνεχούς ρεύματος, λόγω του ότι δεν χρησιμοποιείται συλλέκτης. Το παρακάτω σχήμα δείχνει το στάτη ενός εναλλακτήρα 2 πόλων, 3-φάσεων, διπλού-στρώματος κατανεμημένα τυλίγματα.



Υπάρχουν 12 αυλακώσεις και κάθε αυλάκωση περιέχει δύο άκρα πηνίων. Τα άκρα των πηνίων που τοποθετούνται σε παρακείμενες αυλακώσεις ανήκουν στην ίδια φάση, όπως π.χ. a_1, a_3 ή a_2, a_4 συνιστούν μια ζώνη φάσης. Σημειώστε ότι σε μια μηχανή 3-φάσεων, η ζώνη φάσης είναι πάντοτε 60° ηλεκτρικές. Δεδομένου ότι το τύλιγμα έχει ρύθμιση διπλού στρώματος, μία πλευρά ενός πηνίου, όπως το a_1 , τοποθετείται στο κάτω μέρος μιας εγκοπής και από την άλλη πλευρά $-a_1$ τοποθετείται στην κορυφή της άλλης υποδοχής και απέχουν μεταξύ τους 1800 ηλεκτρικές.

Σημειώστε ότι υπάρχουν 12 συνολικά πηνία και κάθε φάση έχει τέσσερα πηνία. Τα τέσσερα πηνία κάθε φάσης συνδέονται σε σειρά, έτσι ώστε οι τάσεις τους να προστίθενται. Οι τρεις φάσεις μπορούν να συνδεθούν για να σχηματίσουν σύνδεση Y (αστέρα) ή σύνδεση D (τριγώνου).

5.4 Διέγερση μαγνητικού πεδίου και διεγέρτριες

- Η διέγερση του πεδίου με DC ρεύμα είναι ένα σημαντικό μέρος του συνολικού σχεδιασμού μιας σύγχρονης γεννήτριας.
- Το πεδίο διέγερσης πρέπει να εξασφαλίσει όχι μόνον μια σταθερή AC τάση στους ακροδέκτες, αλλά πρέπει επίσης να ανταποκρίνεται σε ξαφνικές αλλαγές φορτίου.
- Η ταχεία απόκριση διέγερσης πεδίου είναι σημαντική.

Τρεις μέθοδοι διέγερσης

1. Οι δακτύλιοι ολισθήσεως συνδέουν το τύλιγμα του πεδίου του ρότορα σε μια εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος
2. DC γεννήτρια που τροφοδοτεί το τύλιγμα διέγερσης
 - μια γεννήτρια dc είναι τοποθετημένη στον ίδιο άξονα, με τον ρότορα της AC γεννήτριας.
 - ένας συλλέκτης ανορθώνει το ρεύμα που στέλνεται στο τύλιγμα πεδίου.
- 3.

3. Χωρίς ψήκτρες διέγερση

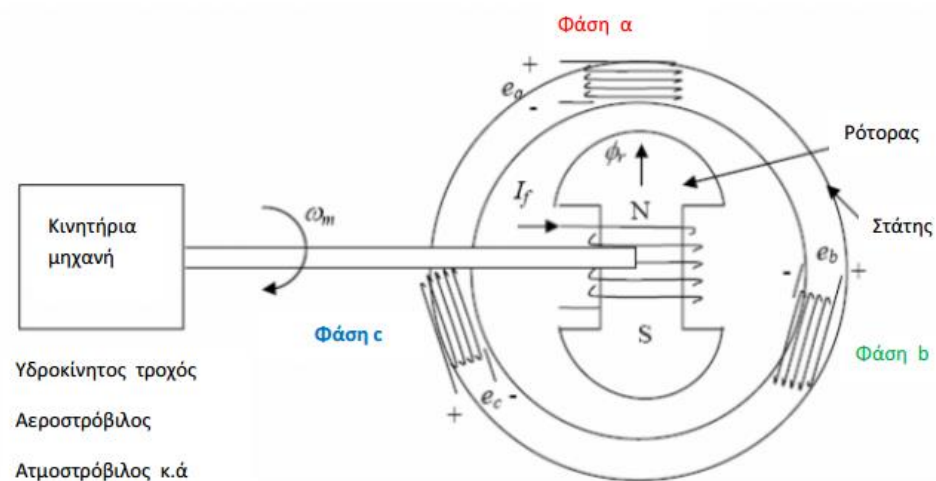
- μια γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος με σταθερό τύλιγμα πεδίου και ένα δρομέα με ένα τριφασικό κύκλωμα.
- Μέσω διόδου / SCR ανόρθωση, παρέχει DC ρεύμα στο τύλιγμα του μαγνητικού πεδίου.

5.5. Σύστημα αερισμού ή ψύξης ενός εναλλάκτη

- Οι χαμηλής ταχύτητας με προεξέχοντες πόλους εναλλακτήρες αερίζονται μέσω των προεξέχοντων πόλων που παρέχουν κυκλοφορία του αέρα. Εναλλακτήρας Τριφασικό τύλιγμα στάτη Τύλιγμα διέγερσης ρότορας Πόλος στον ρότορα Ακροδέκτες εξόδου γεννήτριας διάκενο Τριφασικός ανορθωτής Σταθερό τύλιγμα πόλου Οδήγηση διέγερσης διεγέρτριας Τριφασικός ρότορας Διεγέρτρια διεγέρτρια Γεννήτρια
- Οι κυλινδρικού ρότορα εναλλάκτες είναι σχετικά μακριές, και το πρόβλημα της ροής του αέρα απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Το ψυκτικό μέσο, αέρας ή υδρογόνο ψύχεται με το πέρασμα του πάνω από σωλήνες μέσω των οποίων το νερό ψύξης κυκλοφορεί και δημιουργείται ο εξαερισμός του εναλλάκτη.
- Το υδρογόνο συνήθως χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο σε όλες τις τουρμπίνες των εναλλακτών, επειδή το υδρογόνο παρέχει καλύτερη ψύξη από τον αέρα και αυξάνει την αποτελεσματικότητα καθώς μειώνει τις απώλειες τριβών.
- Υγρά ψύξης χρησιμοποιούνται για τους στάτες γεννητριών, κυλινδρικού δρομέα.

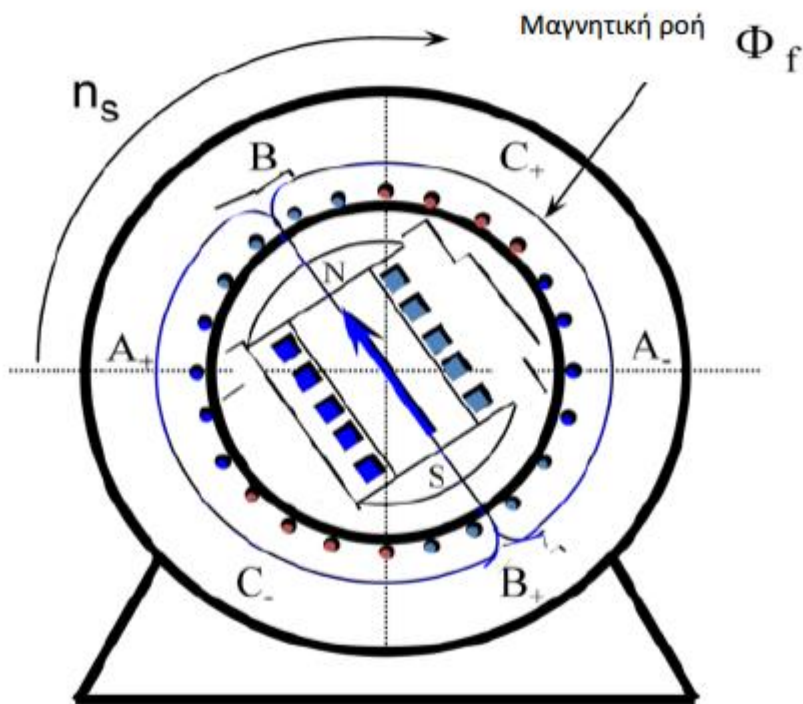
5.6. Αρχή λειτουργίας

- 1) Από μια εξωτερική πηγή τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα το τύλιγμα του πεδίου (διέγερση).
- 2) Το τύλιγμα του μαγνητικού πεδίου που βρίσκεται πάνω στον ρότορα περιστρέφεται μηχανικά με την σύγχρονη ταχύτητα.
- 3) Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει τάσεις στα τυλίγματα του επαγωγικού τυμπάνου που βρίσκονται στον στάτη.
- 4) Η συχνότητα αυτών των τάσεων είναι σε συγχρονισμό με την ταχύτητα του ρότορα.



5.6.1. Κατανόηση της λειτουργίας

- 1) Το συνεχές ρεύμα διέγερσης I_f που ρέει μέσα στο τύλιγμα διέγερσης του ρότορα, δημιουργεί μια συνεχή μαγνητική ροή Φ_f .
- 2) Ο ρότορας περιστρέφεται μέσω τουρμπίνας με σταθερή ταχύτητα n_s .
- 3) Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει μια τάση στα τυλίγματα του στάτη.
- 4) Η συχνότητα της επαγόμενης τάσης εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής.



Η σχέση συχνότητας - ταχύτητας είναι:

$$f = \frac{n_s \cdot p}{120} \leftrightarrow n_s = \frac{120 \cdot f}{p}$$

όπου p ο αριθμός των πόλων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

6. Περίληψη-Συμπεράσματα

Η παρούσα πτυχιακή εργασία, ασχολήθηκε με τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω πυρηνικής σχάσης. Πιο συγκεκριμένα, στο 1^ο κεφάλαιο, δόθηκαν οι ορισμοί και μελετήθηκε το φαινόμενο της πυρηνικής σχάσης. Στο 2^ο κεφάλαιο έγινε μια ιστορική αναδρομή της παραγωγής της πυρηνικής ενέργειας μέσω της πυρηνικής σχάσης. Στο 3^ο κεφάλαιο αναλύθηκαν τα μηχανολογικά μέρη ενός πυρηνικού εργοστασίου, με ιδιαίτερη έμφαση στον πυρηνικό αντιδραστήρα. Στο 4^ο κεφάλαιο δόθηκαν οι βασικές δικλείδες για τη μεταφορά της θερμότητας και τους βασικούς παραμέτρους μεταφοράς για τη μετατροπή της πυρηνικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Στο 5^ο κεφάλαιο περιγράφεται το ηλεκτρικό μέρος ενός πυρηνικού εργοστασίου και ποιο συγκεκριμένα επεξηγεται η σύγχρονη γεννήτρια.

Με βάση τα παραπάνω, γίνεται σαφές ότι η παρούσα πτυχιακή εργασία, μελέτησε διεξοδικά τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω πυρηνικής σχάσης και κρίνεται επιτυχής.

Βιβλιογραφία:

- 1) Ατομική και Πυρηνική Φυσική Κ. Δ. Αλεξόπουλος
- 2) Nuclear Systems I, II Neil Todreas – Mujid Kazimi
- 3) Physics Part A, Part B Halliday – Resnick
- 4) https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CF%85%CF%81%CE%B7%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82_%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%B9%CE%B4%CF%81%CE%B1%CF%83%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B1%CF%82
- 5) <https://maredu.gunet.gr/modules/document/file.php/MAK200/Synchronous%20Generators%20%CE%BD%CE%B5%CE%BF.pdf>