



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Πτυχιακή Εργασία:
Παραγωγή Ηλεκτρικής
Ενέργειας Από Πυρηνικούς
Σταθμούς

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΧΟΙΝΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΓΑΛΙΩΤΟΣ ΚΩΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Α.Μ. 7492, ΔΑΣΟΥΚΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Α.Μ. 7518

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πυρηνική ενέργεια που παράγεται σήμερα απελευθερώνεται μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται πυρηνική σχάση, κατά την οποία οι πυρήνες ουρανίου διαχωρίζονται και εκλύουν ενέργεια. Αποτελεί μια εναλλακτική λύση χαμηλών εκπομπών άνθρακα αντί για τα ορυκτά καύσιμα και αναλογεί στο 26% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην ΕΕ. Στην παρούσα πτυχιακή αναλύεται η διαδικασία μετατροπής της πυρηνικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Αρχικά έγινε μια σύντομη εισαγωγή στην πυρηνική ενέργεια και σε μερικά ιστορικά γεγονότα. Έπειτα στο κεφάλαιο 2 αναλύεται η δομή το άτομο, η ραδιενέργεια και διαφορά άλλα υποατομικά σωματίδια . Στο κεφάλαιο 3 αναφέρθηκαν διάφορες χημικές ορολογίες και μερικά χημικά στοιχεία που έχουν σχέση με την πυρηνική ενέργεια . Στο επόμενο κεφάλαιο περιεγραφήκαν οι πυρηνικές αντιδράσεις και τα είδη στα οποία διακρίνονται με έμφαση στην πυρηνική σχάση. Στην συνέχεια έγινε λεπτομερής ανάλυση στα είδη των πυρηνικών αντιδραστών. Στο κεφάλαιο 6 αναφέρθηκαν τα μετρά ασφάλειας και οι κατηγορίες των ραδιενεργών καταλοίπων .Τέλος περιεγραφήκαν διάφορες πληροφορίες σχετικά με την πυρηνική ενέργεια στο κεφάλαιο 7.

Summary

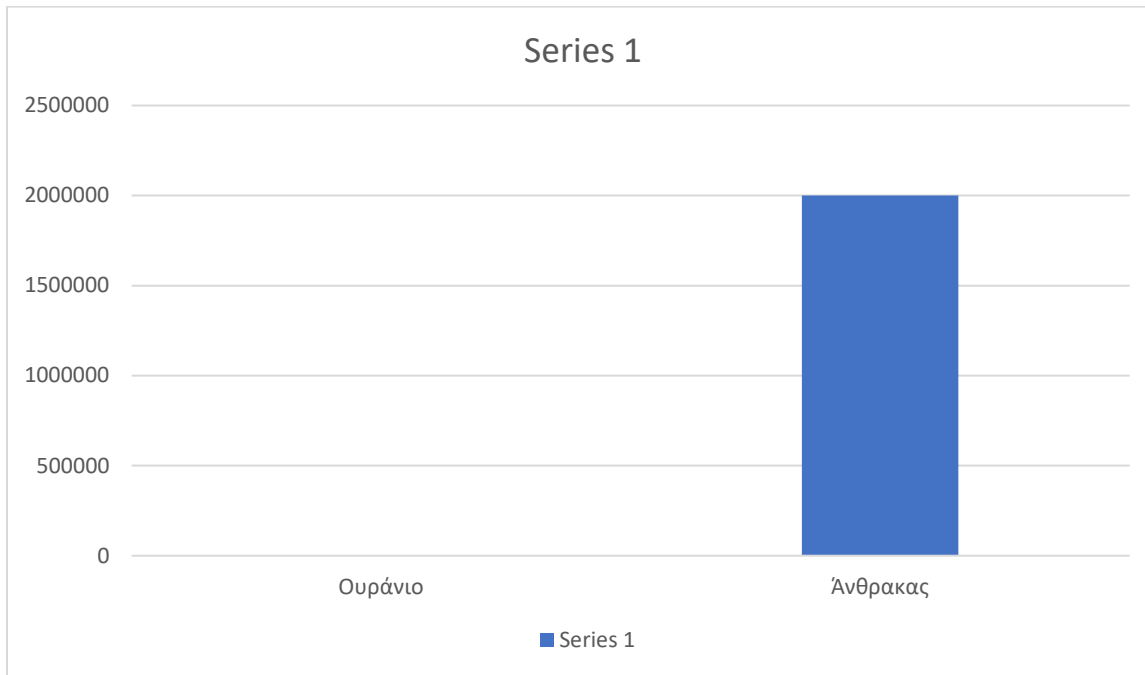
The nuclear energy produced today is released through a process called nuclear fission, in which uranium nuclei separate and emit energy. It is a low-carbon alternative to fossil fuels and accounts for 26% of the electricity produced in the EU. This thesis analyzes the process of converting nuclear energy into electricity. Initially, there was a brief introduction to nuclear power and some historical events. Then in chapter 2 we analyze the atom, radioactivity, and different other subatomic particles. In Chapter 3, various chemical terminologies and some chemical elements related to nuclear energy have been mentioned. The next chapter described nuclear reactions and the types in which they are distinguished with emphasis on nuclear fission. Then there was a detailed analysis of the types of nuclear reactors. Chapter 6 mentions safety measures and categories of radioactive waste. Finally, various information on nuclear energy were described in Chapter 7.

Πίνακας Περιεχομένων

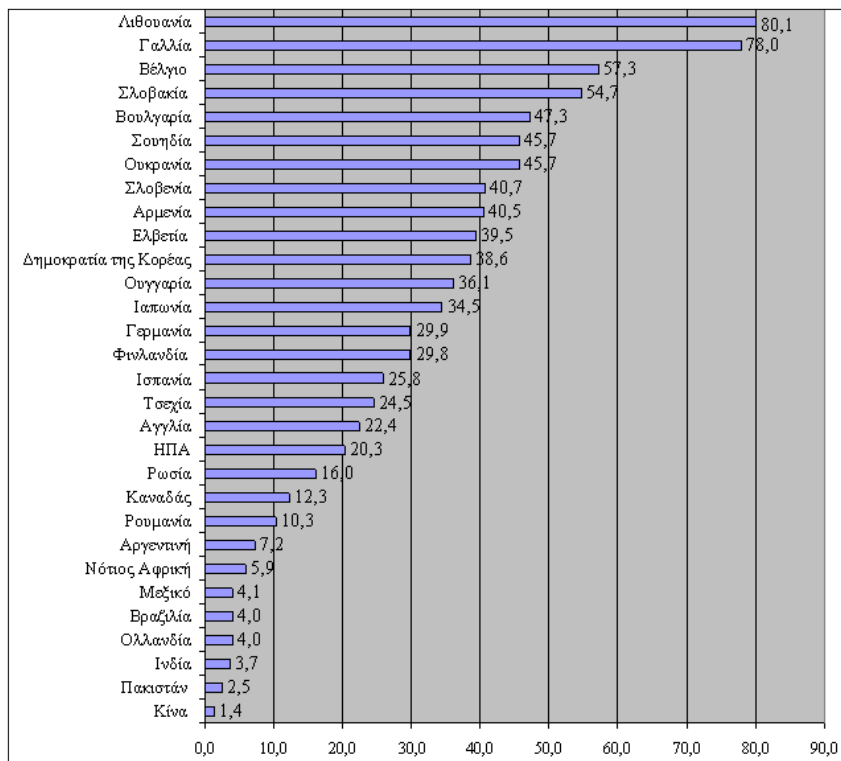
| | |
|-----------------------------------|--------|
| 0.1 Πίνακας Γραφημάτων | σελ.04 |
| 1. Εισαγωγή | |
| 1.1. Πυρηνική Ενέργεια | σελ.05 |
| 1.2. Ιστορική αναδρομή | σελ.06 |
| 2. Το Άτομο | |
| 2.1. Η δομή του ατόμου | σελ.11 |
| 2.2. Ηλεκτρόνια | σελ.12 |
| 2.3. Διέγερση Ηλεκτρονίων | σελ.12 |
| 2.4. Πυρηνικές Δυνάμεις | σελ.13 |
| 2.5. Στοιχειώδη σωματίδια | σελ.14 |
| 2.5.1. Quarks | σελ.14 |
| 2.5.2. Αντικουράκ | σελ.15 |
| 2.5.3. Βαρυόνιο | σελ.15 |
| 2.5.4. Μεσόνιο | σελ.15 |
| 2.5.5. Μπозζονιο | σελ.15 |
| 2.5.6. Γκουονιο | σελ.16 |
| 2.6. Ραδιενέργεια | σελ.16 |
| 3. Χημικά στοιχεία | |
| 3.1. Ορολογίες | σελ.17 |
| 3.1.1. Χημικά στοιχεία | σελ.17 |
| 3.1.2. Πλάσμα | σελ.17 |
| 3.1.3. Ατομικός αριθμός | σελ.19 |
| 3.1.4. Μαζικός αριθμός | σελ.19 |
| 3.1.5. Ισοτοπική μάζα | σελ.19 |
| 3.1.6. Ατομικό βάρος | σελ.20 |
| 3.1.7. Τεχνικά στοιχεία | σελ.20 |
| 3.1.8. Ισότοπα | σελ.20 |
| 3.2. Φυσικά στοιχεία | σελ.21 |
| 3.2.1. Ουράνιο | σελ.21 |
| 3.2.2. Ζικτρόνιο | σελ.24 |
| 3.2.3. Εμπλουτισμένο βόριο | σελ.26 |
| 3.2.4. Απεμπλουτισμένο βόριο | σελ.27 |
| 3.2.5. Άζωτο 16 | σελ.28 |
| 3.3. Υποπροϊόντα πυρηνικής σχάσης | σελ.28 |
| 3.3.1. Καίσιο | σελ.28 |
| 3.3.2. Στρόντιο - 90 | σελ.29 |
| 4. Πυρηνικές Αντιδράσεις | |
| 4.1. Πυρηνική Ενέργεια | σελ.31 |
| 4.2. Πυρηνική Αντίδραση | σελ.31 |
| 4.2.1. Πυρηνική αντίδραση | σελ.31 |
| 4.2.2. Μεταστοιχείωση | σελ.32 |
| 4.2.3. Πυρηνική σύντηξη | σελ.32 |
| 4.2.4. Ραδιενεργή διάσπαση | σελ.34 |
| 4.2.5. Πυρηνική σχάση | σελ.34 |

| | | |
|-----------|--|--------|
| 4.2.5.1. | Αλυσιδωτή αντίδραση | σελ.35 |
| 4.2.5.2. | Κρίσιμη μάζα | σελ.36 |
| 4.2.5.3. | Επιβραδυντές | σελ.37 |
| 5. | Είδη πυρηνικών Αντιδραστήρων | |
| 5.1. | PWR | σελ.38 |
| 5.2. | BWR | σελ.41 |
| 5.3. | CANDU | σελ.45 |
| 5.4. | VVER | σελ.48 |
| 5.4.1. | VVER-440 | σελ.51 |
| 5.4.2. | VVER-1000 | σελ.51 |
| 5.4.3. | VVER-1200 | σελ.52 |
| 5.5. | RBMK | σελ.53 |
| 5.5.1. | RBMK-1500 | σελ.54 |
| 5.5.2. | RBMK-2000 & RBMK-3600 | σελ.55 |
| 5.5.3. | RBMK-2400 | σελ.56 |
| 5.6. | TRIGA | σελ.56 |
| 5.7. | GCR | σελ.58 |
| 6. | Μετρά Ασφαλείας | |
| 6.1. | Μετρά ασφαλείας εργαζομένων σε πυρηνικά εργοστάσια | σελ.60 |
| 6.2. | Πυρηνική ενέργεια και το περιβάλλον | σελ.62 |
| 6.3. | ραδιενεργά κατάλοιπα | σελ.63 |
| 6.3.1. | κατάλοιπα χαμηλού επιπέδου | σελ.64 |
| 6.3.2. | κατάλοιπα μέτριου επιπέδου | σελ.64 |
| 6.3.3. | κατάλοιπα υψηλού επιπέδου | σελ.65 |
| 6.4. | είδη διαρροών που μπορεί να έχει ένας πυρηνικός αντιδραστήρας | σελ.66 |
| 7. | Ενέργεια | |
| 7.1. | Απελευθέρωση ενέργειας κατά τη σχάση | σελ.67 |
| 7.2. | Αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας | σελ.68 |
| 7.3. | Η ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από πυρηνικούς αντιδραστήρες | σελ.69 |
| 7.4. | Είναι οι αντιδράσεις σύντηξης ανανεώσιμη πηγή ενέργειας? | σελ.71 |
| 7.5. | Προβλήματα σχετικά με την ενέργεια | σελ.72 |
| 8. | Βιβλιογραφία | |
| 8.1. | Βιβλιογραφία | σελ.73 |
| 8.2. | Ισότοποι | σελ.75 |

0.1 Πίνακας Γραφημάτων



Γράφημα 1 του κεφαλαίου 7



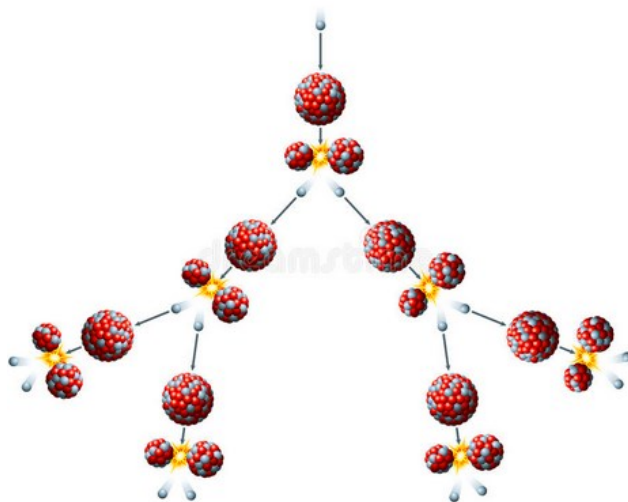
Γράφημα 2 του κεφαλαίου 7

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγή

1.1 Πυρηνική ενέργεια

Πυρηνική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που απελευθερώνεται όταν μετασχηματίζονται και διασπώνται οι ατομικοί πυρήνες. Είναι δηλαδή η δυναμική ενέργεια που είναι εγκλωβισμένη στους πυρήνες των ατόμων λόγω της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων που τα συνιστούν. Η πυρηνική ενέργεια απελευθερώνεται κατά τη σχάση ή σύντηξη των πυρήνων και εφόσον οι πυρηνικές αντιδράσεις είναι ελεγχόμενες (όπως συμβαίνει στην καρδιά ενός πυρηνικού αντιδραστήρα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει ενεργειακές ανάγκες.



Εικόνα 1.1: Πυρηνική διάσπαση

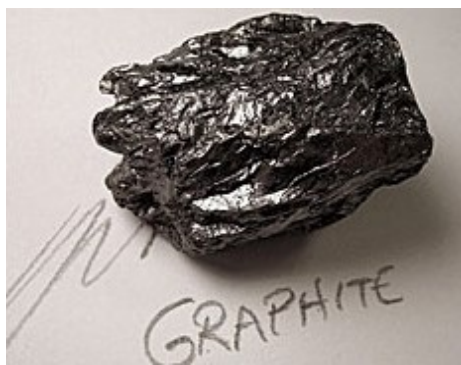
Κατά τη διάρκεια μιας αντίδρασης διάσπασης πυρήνων (πυρηνική σχάση), πυρήνες με μεγάλο ατομικό αριθμό (Ατομικός αριθμός, είναι ο αριθμός που φανερώνει πόσα πρωτόνια βρίσκονται στον πυρήνα ενός ατόμου.) δηλαδή πυρήνες που αποτελούνται από πολλά πρωτόνια και νετρόνια (που όλα μαζί λέγονται και νουκλεόνια), σπάνε σε μικρότερους πυρήνες και αποβάλλουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε διάφορα μήκη κύματος (ορατή και μη ορατή) και μερικά κινούμενα νετρόνια. Η ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μετατρέπεται τελικά σε θερμική ενέργεια. Στους νέους πυρήνες που σχηματίζονται τα πρωτόνια και τα νετρόνια συγκρατούνται με ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις και έχουν (πάλι) αποθηκευμένη στο πυρήνα τους πυρηνική ενέργεια. (Είναι προφανές ότι η ενέργεια του αρχικού πυρήνα, ήταν μεγαλύτερη από την ενέργεια των νέων πυρήνων που σχηματίστηκαν).

Κατά τη διάρκεια της σύντηξης πυρήνων πυρήνες με πολύ μικρό ατομικό αριθμό δηλαδή πυρήνες με ελάχιστα πρωτόνια και νετρόνια, ενώνονται σχηματίζοντας μεγαλύτερους πυρήνες και αποβάλλουν

ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε διάφορα μήκη κύματος (ορατή και μη ορατή) και μερικά κινούμενα νετρόνια. Η ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μετατρέπεται τελικά σε θερμική ενέργεια. Στους νέους πυρήνες που σχηματίζονται τα πρωτόνια και τα νετρόνια συγκρατούνται με ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις και έχουν (πάλι) αποθηκευμένη στο πυρήνα τους πυρηνική ενέργεια. (Είναι προφανές ότι η ενέργεια των 2 αρχικών πυρήνων, ήταν μεγαλύτερη από την ενέργεια των νέων πυρήνων που σχηματίστηκαν).

1.2 Ιστορική αναδρομή

1) Δεκέμβριο του 1942, ο Dr. Enrico Fermi πραγματοποίησε την πρώτη ελεγχόμενη πυρηνική αντίδραση, με χρήση φυσικού ουράνιου και γραφίτη.

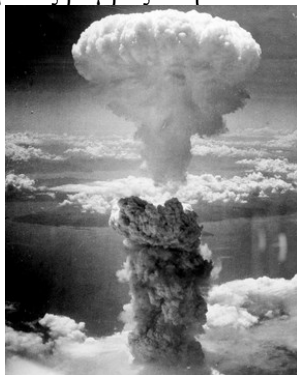


Εικόνα 1.2: Γραφίτης



Εικόνα 1.3: Ουράνιο

2) Αύγουστο του 1945, οι ΗΠΑ, υπό την εντολή του προέδρου Harry S. Truman, έριξαν τις πρώτες ατομικές βόμβες στην Ιαπωνία, μια στην Χιροσίμα και μια στο Ναγκασάκι.



Εικόνα 1.4: Πυρηνική έκρηξη Χιροσίμα 1945



Εικόνα 1.5: Πυρηνική έκρηξη Ναγκασάκι 1945

3) Αύγουστο του 1946, ο πρόεδρος Harry S. Truman υπέγραψε την συνθήκη ατομικής ενέργειας του 1946 (The Atomic Energy Act of 1946) και ιδρύθηκε η επιτροπή του Κογκρέσου της ατομικής ενέργειας (The Joint Congressional Committee on Atomic Energy)

4) Δεκέμβριο του 1953, το πρόγραμμα 'The Atoms For Peace' αποκαλύπτεται από τον πρόεδρο Dwight Eisenhower, ο οποίος είχε προτείνει την δημιουργία μιας διεθνούς οργάνωσης, που θα αφοσιωνόταν στην δημιουργία ειρηνικών πυρηνικών τεχνολογιών.

5) Ιανουάριος του 1955, η επιτροπή ατομικής ενέργειας ανακοινώνει ένα συνεργατικό πρόγραμμα μεταξύ της κυβέρνησης και της βιομηχανίας πυρηνικής ενέργειας , με στόχο την ανάπτυξη πυρηνικών εργοστασίων.



Εικόνα 1.6: Πυρηνικό εργοστάσιο τύπου GCR

6) Ιούλιο του 1955, η πόλη Arco στην πολιτεία Άινταχο των ΗΠΑ, με πληθυσμό 1000 ανθρώπων, γίνεται η πρώτη Αμερικάνικη πόλη που τροφοδοτείται από πυρηνική ενέργεια. Η ενέργεια της πόλης προμηθευόταν από έναν πειραματικό αντιδραστήρα , λεγόμενο Borax III.



Εικόνα 1.7: Πειραματικό αντιδραστήρας Borax III

7) Σεπτέμβριος του 1957, ο πρόεδρος Eisenhower υπογράφει την ‘Price-Anderson Act’ , η οποία προστάτευε τους πολίτες, δημόσιες υπηρεσίες και εργολάβους από υποκείμενες οικονομικές δυσκολίες , στην περίπτωση ατυχήματος σε πυρηνικό εργοστάσιο.

8) Οκτώβριος του 1957, ο αντιδραστήρας παραγωγής πλουτωνίου στην Windscale, πιάνει φωτιά, εξαπλώνοντας περίπου 20.000 κιουρί(curies) ραδιενεργού ιωδίου στην Μεγάλη Βρετανία και την βόρεια Ευρώπη.

9) Νοέμβριος του 1965, μια μεγάλη διακοπή ηλεκτρικής ενέργειας στην βορειοανατολική ΗΠΑ, πρότρεψε υποστηρικτές πυρηνικής ενέργειας να την προωθήσουν ως μια απαραίτητη πηγή εναλλακτικής ενέργειας.



Εικόνα 1.8: Πυρηνικό εργοστάσιο τύπου GCR

10) Οκτώβριος του 1974, ο πρόεδρος Gerald Ford κατάργησε την επιτροπή ατομικής ενέργειας και την αντικατέστησε με δύο νέες υπηρεσίες:

- i) the Energy Research and Development Administration.
- ii) the Nuclear Regulatory Commission.

Αυτές οι υπηρεσίες ήταν πλέον υπεύθυνες για τον έλεγχο της πυρηνικής βιομηχανίας.

11) Απρίλιος του 1977, ο πρόεδρος Jimmy Carter ανακοινώνει ένα συμβόλαιο που απαγόρευε την επανεπεξεργασία χρησιμοποιημένων πυρηνικών καυσίμων.



Εικόνα 1.9: Ραδιενεργά κατάλοιπα

12) Μάρτιος του 1979, πολλαπλή κατάρρευση εξοπλισμού και ανθρώπινα λάθη οδήγησαν στο ατύχημα πυρηνικού αντιδραστήρα στο Three Mile Island, Harrisburg, Pennsylvania, το οποίο ως σήμερα θεωρείτε το μεγαλύτερο πυρηνικό ατύχημα των ΗΠΑ. Τον Οκτώβριο της ίδιας χρονιάς, η βιομηχανία πυρηνικής ενέργειας δημιουργεί το ινστιτούτο πυρηνικής ενέργειας με σκοπό τον αντιμετώπισμο προβλημάτων ασφάλειας.



Εικόνα 1.10: Three Mile Island

13) Οκτώβριος του 1981, ο πρόεδρος Ronald Reagan αντιστρέφει την απόφαση του πρώην προέδρου Jimmy Carter, ακυρώνοντας την απαγόρευση επανεπεξεργασία χρησιμοποιημένων πυρηνικών καυσίμων, παρουσιάζοντας μια νέα πολιτική, η οποία επέβαλλε την χρήση αποθηκευτικών χώρων για μεγάλου επιπέδου ραδιενεργών αποβλήτων.

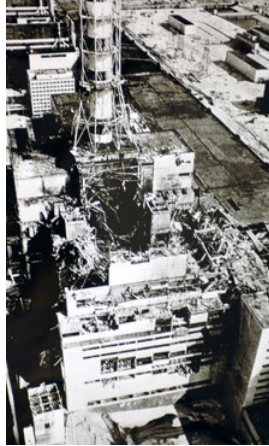
14) Ιανουάριος του 1983, η πολιτική ραδιενεργών αποβλήτων 'The Nuclear Waste Policy Act' υπογράφεται από τον πρόεδρο Ronald Reagan, η οποία διατυπώνει ένα χρονολόγιο για τον διορισμό μόνιμων υπογείων εγκαταστάσεων, για την αποθήκευση τους.

15) Απρίλιος του 1983, το Atomic Industrial Forum, μια ομάδα υποστηρικτών πυρηνικής ενέργειας δημοσιεύει μια δήλωση, όπου ισχυρίζεται πως το ατύχημα του Three Mile Island το 1979 δεν άλλαξε το θεμελιωδώς αψεγάδιαστο ιστορικό ασφάλειας της βιομηχανίας. Συγκεκριμένα διατύπωνε πως κανένα μέλος του δημόσιου κοινού δεν έχει τραυματιστεί ή σκοτωθεί από ατύχημα πυρηνικού αντιδραστήρα εμπορικού πυρηνικού εργοστασίου, κανένας εργαζόμενος δεν έχει ποτέ παρουσιάσει σοβαρό τραυματισμό από ραδιενέργεια και πως το πιο σοβαρό ατύχημα σε εμπορικό πυρηνικό εργοστάσιο της χώρας δεν άλλαξε το ασυναγώνιστο ιστορικό ασφάλειας.



Εικόνα 1.11: Πυρηνικό εργοστάσιο τύπου GCR

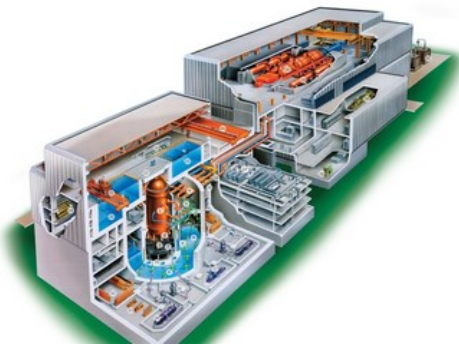
16) Απρίλιος του 1986, ανεξέλεγκτες αντιδράσεις κατά την διάρκεια δοκιμών και ελέγχων στον πυρηνικό αντιδραστήρα του Chernobyl κοντά στο Κίεβο, βρισκόμενο στη τότε Σοβιετική Ένωση, προκάλεσαν μια ακολουθία εκρήξεων οι οποίες εκτοξεύσανε το κάλυμμα του πυρήνα του αντιδραστήρα απελευθερώνοντας τεράστιες ποσότητες ραδιενέργειας στο ολόκληρο βόρειο ημισφαίριο. Το περιστατικό του Chernobyl ήταν και είναι ως σήμερα η χειρότερη πυρηνική καταστροφή, με αποτέλεσμα πάνω από 75 εκατομμύρια άνθρωποι να έχουν εκτεθεί σε επικίνδυνα υψηλά ποσοστά ραδιενέργειας.



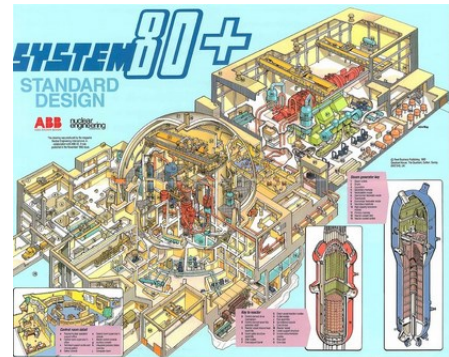
Εικόνα 1.12: Κατεστραμμένος αντιδραστήρας στο Chernobyl

17) Οκτώβριος του 1992, ο πρόεδρος George Bush υπογράφει την ‘Energy Policy Act’, η οποία αναμόρφωσε την διαδικασία αδειοδότησης για αναπτυγμένα πυρηνικά εργοστάσια. Η αναβαθμισμένη διαδικασία ήταν σχεδιασμένη έτσι ώστε να επέτρεπε στο δημόσιο κοινό να συμμετέχει στις αποφάσεις ως αναφορά την κατασκευή πυρηνικών εργοστασίων. Επίσης παρείχε ένα πιο οικονομικά σταθερό περιβάλλον για τους χρηματοδότες.

18) Ιούλιος του 1994, η επιτροπή ‘Nuclear Regulatory Commission’ διέμεινε τα σχέδια των δύο πρώτων ανεπτυγμένων πυρηνικών εργοστασίων της General Electric's Advanced Boiling Water Reactor και της ABB Combustion Engineering's System 80+. Τα δύο αυτά εργοστάσια ήταν τα πρώτα που ακολουθούσαν τους κανονισμούς για αδειοδότηση υπό την επιτροπή NRC.



Εικόνα 1.12: General Electric's Advanced Boiling Water Reactor



Εικόνα 1.13: ABB Combustion Engineering's System 80+

19) Ιούνιος του 1996, περιφερειακός δικαστής Sylvania Rambo απορρίπτει νομικές αγωγές ενάντια της Metropolitan Edison Company, εκ μέρους ανθρώπων και επιχειρήσεων, που είπαν πως είχαν εκτεθεί σε και τραυματιστεί από ραδιενέργεια γάμμα (gamma radiation), κατά την διάρκεια του ατυχήματος στο Three Mile Island το 1979, με αιτιολογία ‘έλλειψης στοιχείων’.

20) Ιανουάριος του 1998, η Κίνα δηλώνει την υποστήριξη της προς τις διεθνές προσπάθειες ταχείας αναπαραγωγής πυρηνικής ενέργειας. Η ανακοίνωση αυτή οδήγησε στις συναλλαγές πυρηνικής τεχνολογίας μεταξύ Κίνας και ΗΠΑ, οι οποίες διαμαρτυρήθηκαν από το κογκρέσο των Ηνωμένων Πολιτειών.

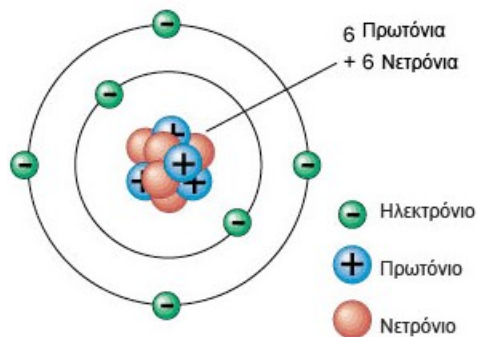
Κεφάλαιο 2

2.1 Η δομή του ατόμου

Στην φύση, το άτομο είναι το μικρότερο σωματίδιο ενός χημικού στοιχείου το οποίο διατηρεί τις χημικές ιδιότητες του *στοιχείου* με την έννοια ότι παραμένει αμετάβλητο κατά την εξέλιξη ενός χημικού φαινομένου (χημική αντίδραση). Κάθε άτομο αποτελείται από έναν πυρήνα, που περιέχει τα θετικά φορτισμένα πρωτόνια και τα ουδέτερα νετρόνια που μαζί ονομάζονται νουκλεόνια. Ο πυρήνας στον οποίο συγκεντρώνεται πρακτικά όλη η μάζα του ατόμου, έχει αποκτήσει ένα θετικά φορτισμένο φορτίο λόγω των νουκλεονίων. Γύρω από τον πυρήνα και σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις κινούνται τα ηλεκτρόνια που έχουν αρνητικό φορτίο και μάζα 1836 φορές μικρότερη από τα πρωτόνια . Το 1913 ο Bohr διατύπωσε τις περιβόητες συνθήκες Bohr, δεχόμενος ότι τα ηλεκτρόνια κινούνται σε *καθορισμένες (επιτρεπτές)* κυκλικές τροχιές γύρω από τον πυρήνα. Όπως αναφέρθηκε τα ηλεκτρόνια φέρουν αρνητικό φορτίο και καθώς βρίσκονται μέσα στο ηλεκτρονικό πεδίο του θετικά φορτισμένου πυρήνα έλκονται απ' αυτόν με δυνάμεις

$$\text{Coulomb: } F = \frac{m \cdot v^2}{r} = \frac{Ze^2}{r^2}$$

όπου m η μάζα του ηλεκτρονίου, v η ταχύτητα του, r η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς του, e το φορτίο του και Z ο αριθμός των θετικών φορτίων του πυρήνα. Τα ηλεκτρόνια δεν πέφτουν πάνω στον πυρήνα ακριβώς λόγω της μεγάλης ταχύτητας με την οποία κινούνται. Οι ταχύτητες των ηλεκτρονίων στο άτομο είναι αρκετά μεγάλες ώστε, υπό κανονικές συνθήκες, δεν τα αφήνουν να πέσουν πάνω στον πυρήνα, αλλά από την άλλη όχι τόσο μεγάλες ώστε, να βγουν έξω από το ηλεκτρικό πεδίο του πυρήνα που τα έλκει και να φύγουν από το άτομο. Η συνολική ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου είναι το άθροισμα της ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας (λόγω της θέσης του στο ηλεκτρικό πεδίο του ατόμου) και της κινητικής ενέργειας λόγω της ταχύτητας με την οποία περιφέρεται γύρω από τον πυρήνα. Η συνολική ενέργεια εξαρτάται από την ακτίνα της τροχιάς που διαγράφει το ηλεκτρόνιο, δηλαδή από την απόσταση του ηλεκτρονίου από τον πυρήνα.



Εικόνα 2.1: Άτομο άνθρακα

2.2 Ηλεκτρόνια

Σύμφωνα λοιπόν με τον Bohr , το άτομο είναι ένα κβαντομηχανικό σύστημα , πράγμα που συνεπάγεται , μεταξύ άλλων, ότι τα ηλεκτρόνια του ατόμου δεν μπορούν να έχουν οποιαδήποτε ενέργεια, αλλά μόνο διακριτές επιτρεπόμενες στάθμες ενέργειας, διαφορετικές και χαρακτηριστικές για κάθε στοιχείο. Για παράδειγμα άλλες είναι επιτρεπόμενες ενεργειακές στάθμες του ηλεκτρονίου του ατόμου του H_2 και άλλες οι επιτρεπόμενες ενεργειακές στάθμες του ηλεκτρονίου του ατόμου του O_2 .

2.3 Διέγερση ηλεκτρονίων

Τα ηλεκτρόνια ενός οποιουδήποτε ατόμου, όπως επιβάλλεται από την απαγορευτική αρχή του **Pauli**, κινούνται κατανεμημένα σε τροχιές διαφόρων ακτινών. Ηλεκτρόνια που κινούνται σε τροχιές της ίδιας ακτίνας λέμε ότι ανήκουν στον ίδιο φλοιό ή στην ίδια στοιβάδα. Τα ηλεκτρόνια ενός ατόμου τείνουν πάντα να έχουν όσο το δυνατό μικρότερη ενέργεια, που σημαίνει δηλαδή ότι τείνουν να καταλάβουν τις τροχιές με μικρότερη ακτίνα. Κατανέμονται επομένως κατά τέτοιο τρόπο ώστε να συμπληρώνεται πρώτα ο πρώτος εσωτερικός φλοιός , στη συνέχεια ο δεύτερος , ο τρίτος κ.τ.λ. όσο υπάρχουν ηλεκτρόνια. Η κατάσταση του ατόμου με την μικρότερη από τις επιτρεπόμενες ενέργειες των ηλεκτρονίων είναι η μόνη ευσταθής και ονομάζεται **θεμελιώδης κατάσταση**. Υπό συνήθεις συνθήκες το άτομο βρίσκεται στην θεμελιώδη κατάσταση. Οι άλλες επιτρεπόμενες καταστάσεις είναι μη ευσταθείς και ονομάζονται καταστάσεις διέγερσης και οι αντίστοιχες ενεργειακές στάθμες ονομάζονται στάθμες διέγερσης. Είναι δυνατόν να προσδοθεί σε κάποιο ηλεκτρόνιο του ατόμου εξωτερική ως προς το άτομο, για παράδειγμα με σύγκρουση με άλλο άτομο , και το ηλεκτρόνιο να βρεθεί σε κάποια ενεργειακή στάθμη διέγερσης. Στην κατάσταση αυτή δεν θα παραμείνει για πάντα, κάποια στιγμή το άτομο θα αποβάλει την περίσσεια ενέργεια εκπέμποντας ένα ή περισσότερα φωτόνια που θα φέρουν αυτή την περίσσεια ενέργεια και θα επιστρέψει στην ευσταθή θεμελιώδη κατάσταση. Έστω ότι κάποιος φορέας ενέργειας επιχειρήσει να προσδώσει ενέργεια σε ηλεκτρόνιο ενός ατόμου τότε εάν η προσφερόμενη ενέργεια είναι μικρότερη από αυτήν που απαιτείται για να ανέλθει το ηλεκτρόνιο στην πρώτη στάθμη διέγερσης , το άτομο θα αγνοήσει τον εξωτερικό φορέα ενέργειας και θα παραμείνει στην θεμελιώδη του κατάσταση. Εάν όμως η προσφερόμενη ενέργεια είναι επαρκώς μεγάλη , το ηλεκτρόνιο θα ανέλθει σε στάθμη διέγερσης. Από την στάθμη αυτή θα επανέλθει στην θεμελιώδη κατάσταση αποβάλλοντας την περίσσεια ενέργεια , συνήθως με εκπομπή φωτονίων. Σημειώνεται ότι ενέργεια στάθμης είναι η διαφορά της ενέργειας της στάθμης από την ενέργεια της θεμελιώδης στάθμης. Έστω το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου προσέλαβε ενέργεια και ανήλθε στη δεύτερη στάθμη , όπου έχει ενέργεια $E_2=12.1\text{eV}$. Από αυτό το σημείο θα αποδιεγερθεί και θα επιστρέψει στην θεμελιώδη κατάσταση με τους εξής δύο τρόπους:

I. Πέφτοντας αρχικά στην πρώτη στάθμη ενέργειας $E_1=10.2\text{eV}$, με εκπομπή ενός φωτονίου $E_2-E_1=1.9\text{eV}$ που είναι ορατό φάσμα χρώματος κόκκινο. Στη συνέχεια, πέφτει από την πρώτη στάθμη στην θεμελιώδη

εκπέμποντας ένα φωτόνιο ενέργειας 10.2eV , που βρίσκεται στο υπεριώδες του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας .

II. Πέφτοντας κατευθείαν από την δεύτερη στάθμη στην θεμελιώδη κατάσταση με εκπομπή ενός φωτονίου' ενέργειας 12.1eV , που βρίσκεται στο υπεριώδες του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

2.4 Πυρηνικές Δυνάμεις

Οι δυνάμεις που εξασκούνται μέσα στον πυρήνα μεταξύ των σωματιδίων όταν βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους $<10^{-15}\text{m}$ είναι οι **πυρηνικές δυνάμεις** και είναι υπεύθυνες για την συγκρότηση του. Η πυρηνική δύναμη μεταξύ δύο πρωτονίων ή δύο νετρονίων ή μεταξύ πρωτονίου-νετρονίου είναι ίδια. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά και ιδιότητες των πυρηνικών δυνάμεων είναι τα εξής:

I. **Είναι ισχυρές:** Είναι υπεύθυνες για τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις, για την εκπομπή των ακτινών άλφα από τον πυρήνα. Είναι οι πλέον ισχυρές από όλα τα είδη δυνάμεων που υπάρχουν στη φύση. Είναι ισχυρότερες από τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις Coulomb, γι' αυτό τα πρωτόνια βρίσκονται πολύ κοντά το ένα με το άλλο μέσα στον πυρήνα. Αν κοιτάξουμε τον πυρήνα σε σχέση με τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις, βλέπουμε ότι οι απωστικές δυνάμεις ανάμεσα στα θετικά φορτισμένα πρωτόνια, που τείνουν να αποσυνθέσουν τον πυρήνα στα συστατικά του, είναι κολοσσιαίες. Δύο εφαπτόμενα πρωτόνια απωθούνται με δύναμη περίπου $6 \cdot 10^7 \text{N} = 6 \cdot 10^3$ τόνων. Η δύναμη αυτή εάν εφαρμοστεί στη μάζα του πρωτονίου προκαλεί επιτάχυνση 10^{34}m/s^2 . Πρέπει συνεπώς οι πυρηνικές δυνάμεις να είναι τόσο ισχυρές, ώστε να υπερνικούν τις ηλεκτροστατικές και να συγκρατούν τα νουκλεόνια στο μικρό χώρο του πυρήνα. Τέλος καλούνται ισχυρές λόγω του πολύ μικρού χρόνου δράσης τους, που είναι της τάξης του 10^{-23}s .

II. **Είναι κορέσιμες:** Οι κλασσικές δυνάμεις, βαρύτητας και Coulomb, είναι ακόρεστες δυνάμεις. Κάθε σωματίο του πυρήνα, πρωτόνιο ή νετρόνιο, δρα με περιορισμένο αριθμό γειτονικών του σωματιδίων, καθόσον πρόσθεση σωματιδίων στον πυρήνα αυξάνει την ενέργεια σύνδεσης $[\Delta E]$ του πυρήνα σαν, αλλά η μέση ενέργεια σύνδεσης ανά σωματίο του πυρήνα $[\Delta E/A]$, παραμένει σταθερή, περίπου $[8\text{MeV}]$, για τους περισσότερους πυρήνες από $A=50$ μέχρι $A=130$. Η σταθερή πυρηνική πυκνότητα και η εξάρτηση της πυρηνικής ακτίνας από την κυβική ρίζα του μαζικού αριθμού A $[R=R_0 A^{1/3}]$ αποτελούν μια ακόμη απόδειξη ότι οι πυρηνικές δυνάμεις είναι κορέσιμες.

III. **Είναι μικρής εμβέλειας:** Για τις πυρηνικές δυνάμεις πρέπει να υπάρχει απωστική συνιστώσα , καθόσον διαφορετικά όλοι οι πυρήνες θα πρέπει να έχουν το ίδιο περίπου μέγεθος , σε αντίθεση προς τα πειραματικά δεδομένα, τα οποία δίνουν πυρηνική ακτίνα ανάλογη των πυρηνικών δυνάμεων. Η απωστική συνιστώσα αρχίζει να δρα από το κέντρο του σωματιδίου, πρωτονίου ή νετρονίου, μέχρι περίπου $0.5\text{m}(0.5 \cdot 10^{-13}\text{cm})$ και θα πρέπει να είναι κατά πολύ ισχυρότερη, στην απόσταση αυτή 0.5fm , από την ελκτική συνιστώσα των πυρηνικών δυνάμεων. Η εμβέλεια των πυρηνικών δυνάμεων φθάνει μέχρι λίγα fm και η πυρηνική ακτίνα είναι της τάξης των 10fm . Έτσι, ένα νετρόνιο που ταξιδεύει μέσα σε ένα υλικό δεν αισθάνεται την

παρουσία του πυρήνα παρά μόνο όταν βρεθεί πολύ κοντά του, θα συνεχίσει να ταξιδεύει ευθεία γραμμή μέχρις ότου πέσει πάνω στον πυρήνα. Αντίθετα, ένα πρωτόνιο απωθείται από το θετικό φορτίο του πυρήνα αμέσως μόλις διαπεράσει το σύννεφο των ηλεκτρονίων του ατόμου. Σε αποστάσεις σημαντικά μεγαλύτερες από την ακτίνα του πυρήνα, η μόνη δύναμη που ασκείται στο πρωτόνιο είναι η ηλεκτροστατική.

IV. Είναι ανεξάρτητες του φορτίου: Τα σωματίδια του πυρήνα, πρωτόνια και νετρόνια κινούνται μέσα στον πυρηνικό όγκο, χωρίς να επηρεάζει το ένα το άλλο, ανεξάρτητα από το αν φέρουν φορτίο ή όχι. Η ενέργεια που απαιτείται για εξαχθεί ένα πρωτόνιο από τον πυρήνα είναι περίπου η ίδια που απαιτείται για να εξαχθεί το νετρόνιο. Γι' αυτό έχουν και κοινή ονομασία, νουκλεόνια, γεγονός που τα κάνει να μην ξεχωρίζουν, όσον αναφορά την ιδιότητα αυτή.

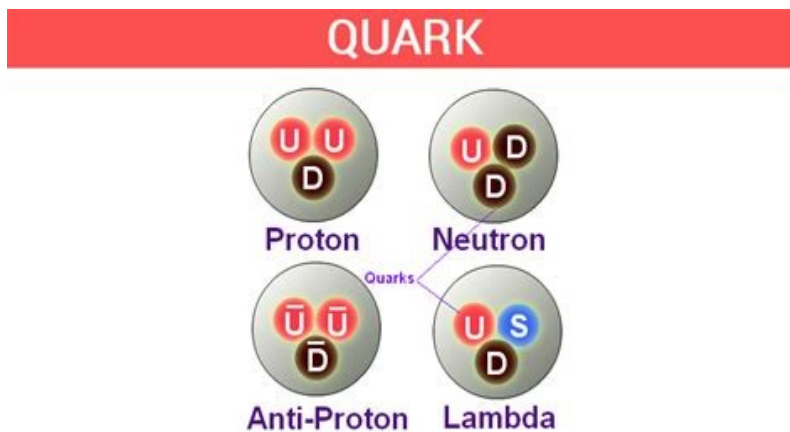
Για να καταλάβουμε το πόσο ισχυρές είναι οι πυρηνικές δυνάμεις, πρέπει να συγκρίνουμε με τις άλλες δυνάμεις που βρίσκονται στη φύση. Συγκεκριμένα οι τέσσερις γνωστές δυνάμεις είναι:

- **Ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις:** Είναι 137 φορές πιο ασθενείς από τις πυρηνικές. Δρουν μεταξύ φορτισμένων σωματίων ή σωματίων που έχουν ηλεκτρική ή μαγνητική ροπή. Είναι δυνάμεις άπειρης εμβέλειας, υπεύθυνες για την ενέργεια σύνδεσης των ηλεκτρονίων στα άτομα και τον σχηματισμό των μορίων, με χρόνο δράσης 10^{-21} s.
- **Δυνάμεις ασθενούς αλληλεπίδρασης:** είναι 10^{14} φορές ασθενέστερες από τις πυρηνικές δυνάμεις. Υπεύθυνες για την εκπομπή των ακτινών βήτα από τον πυρήνα
- **Δυνάμεις βαρύτητας:** Είναι 10^{39} φορές ασθενέστερες από τις πυρηνικές δυνάμεις, είναι δυνάμεις ελκτικές, άπειρης εμβέλειας και ακολουθούν τον νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου

2.5 Στοιχειώδη σωματίδια

2.5.1 Quarks

Πειράματα έδειξαν πως τα πρωτόνια και τα νετρόνια αποτελούνται από άλλα μικρότερα σωματίδια που ονομάζονται **quarks** (κουάρκς). Τα κουάρκ (quarks) θεωρούνται σήμερα βασικοί τύποι των στοιχειωδών σωματιδίων της ύλης από τα οποία αποτελούνται τα βαρυόνια (baryons) και τα μεσόνια (mesons). Μαζί με τα γκλουόνια, θεωρούνται τα μόνα στοιχειώδη σωματίδια που μπορούν και αλληλοεπιδρούν μέσω της ισχυρής πυρηνικής δύναμης. Υπάρχουν 6 ειδών quarks και είναι τα **U-Up, D-Down, C-Charm, S-Strange, T-Top, B-Bottom**. Ένα πρωτόνιο αποτελείται από 1 down quark και 2 up quarks ενώ το νετρόνιο αποτελείται από 2 down quarks και 1 up quark.



Εικόνα 2.2: Quarks διάφορων σωματιδίων

2.5.2 Αντικουάρκ

Το αντικουάρκ είναι στοιχειώδες σωματίο της αντιύλης. Είναι το αντισωματίο του κουάρκ. Κουάρκ και αντικουάρκ έχουν ίδια μάζα και χρόνο ζωής, αλλά αντίθετο φορτίο, χρώμα και βαρυονικό αριθμό

2.5.3 Βαρυόνιο

Τα βαρυόνια είναι υποατομικά σωματίδια τα οποία δημιουργούνται με συνδυασμούς τριών κουάρκ. Μαζί με τα μεσόνια απαρτίζουν την οικογένεια των **αδρονίων**, δηλαδή σωματίδια που κατασκευάζονται από κουάρκ. Τα βαρυόνια είναι φερμιόνια, σε αντίθεση με τα μεσόνια που είναι μποζόνια. Υπακούουν δηλαδή στη στατιστική Φέρμι-Ντιράκ, ενώ μπορούν να συμμετέχουν και σε ισχυρές αλληλεπιδράσεις. Τα βαρυόνια διαθέτουν έναν κβαντικό αριθμό, τον βαρυονικό, ο οποίος διατηρείται σε κάθε είδους αλληλεπιδράσεις.

2.5.4 Μεσόνιο

Τα μεσόνια είναι μποζονια που ανήκουν στα αδρόνια και αποτελούνται από ένα κουάρκ και ένα αντικουάρκ.

2.5.5 Μποζόνιο

Στην κβαντική μηχανική, το μποζόνιο είναι ένα στοιχειώδες σωματίδιο το οποίο ακολουθεί τη στατιστική Μπόους-Αϊνστάιν (*Bose-Einstein statistics*). Τα μποζόνια από το θεώρημα σπιν-στατιστικής είναι σωματίδια που έχουν ακέραιο σπιν. Στη φύση υπάρχουν στοιχειώδη σωματίδια που είναι μποζόνια, αλλά και σύνθετα των οποίων το ολικό σπιν είναι ακέραιο. Λόγω του ότι το σπιν των σωματιδίων αυτών είναι ακέραιο (και όχι ημιακέραιο όπως στα φερμιόνια, δεν περιορίζονται από την απαγορευτική αρχή του Πάουλι και μπορούν να βρίσκονται στην ίδια κατάσταση στην ίδια περιοχή του χώρου. Αυτό σε θεωρητικό επίπεδο σημαίνει ότι η κυματοσυνάρτησή δύο ή παραπάνω σωματιδίων είναι συμμετρική σε εναλλαγές των σωματιδίων σε αντιδιαστολή με αυτήν των φερμιονίων που είναι αντισυμμετρική.

2.5.6 Γκλουόνιο

Τα **γκλουόνια** ή **γλοιόνια** είναι στοιχειώδη σωματίδια (μποζόνια) με σπιν 1, μηδενική μάζα ηρεμίας και μηδενικό ηλεκτρικό φορτίο. Είναι σωματίδια τα οποία μεταφέρουν την ισχυρή αλληλεπίδραση, με την οποία αλληλοεπιδρούν τα κουάρκς, θεμελιώδη σωματίδια από τα οποία απαρτίζεται η ύλη. Η αλληλεπίδραση αυτή περιγράφεται από την κβαντική χρωμοδυναμική. Τα γκλουόνια είναι ταυτόχρονα φορείς του ισχυρού πυρηνικού φορτίου ("φορτίο χρώματος") και μεσάζοντες της ισχυρής πυρηνικής δύναμης. Υπάρχουν σε οκτώ ποικιλίες, που αποτελούν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς "χρώματος" και αντι-"χρώματος" για τα τρία "χρώματα": κόκκινο, πράσινο και μπλε, και τα αντι-χρώματά τους (τρία είδη θετικού/αρνητικού φορτίου χρώματος). Ο ένατος δυνατός συνδυασμός είναι "άχρωμος" (ακριβέστερα είναι "color-singlet") και για τον λόγο αυτό δεν μπορεί να μεταβιβάσει την ισχυρή αλληλεπίδραση και αγνοείται. Τα "χρώματα" αυτά δεν έχουν καμία σχέση με τα χρώματα της οπτικής. Είναι απλά ένας τρόπος να ονοματίζουμε τα τρία είδη "φορτίου" της ισχυρής δύναμης.

2.6 Ραδιενέργεια

Ο όρος ραδιενέργεια (radioactivity) αποδόθηκε το 1898 από την Curie για να περιγράψει τη ραδιενεργό συμπεριφορά του ουρανίου και του θορίου που η ίδια είχε παρατηρήσει. Η Curie εμπνεύστηκε το πρώτο συνθετικό της λέξης (radio) από το λατινικό (radium) που σημαίνει ακτίνα και το δεύτερο (activity=δραστηριότητα) αποδόθηκε στα ελληνικά ως ενέργεια.

Ραδιενέργεια ονομάζεται η ιδιότητα της αυθόρμητης και τυχαίας διάσπασης, δηλαδή της διάσπασης χωρίς εξωτερική διέγερση, των ραδιενεργών πυρήνων με ταυτόχρονη εκπομπή σωματιδίων ή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τους πυρήνες ορισμένων χημικών στοιχείων, γι' αυτό το λόγο ονομάζονται ραδιενεργά. Από τα περίπου 2500 νουκλίδια που είναι γνωστά στην επιστήμη, λιγότερα από 300 είναι ραδιενεργά. Τα άτομα των ραδιενεργών στοιχείων φέρουν ασταθείς πυρήνες, οι οποίοι έχουν ατομικό αριθμό 82 και άνω, όπως λ.χ. το πολώνιο (Po), στοιχεία δηλαδή που είναι βαρύτερα από το μόλυβδο (Pb). Αυτό σημαίνει πως αυτοί μπορούν να διασπαστούν αυθόρμητα διότι οι πυρηνικές ελκτικές δυνάμεις που τους ασκούνται είναι ασθενέστερες λόγω της μεγάλης απόστασης. Κατά τον αυθόρμητο μετασχηματισμό ενός πυρήνα απελευθερώνεται πυρηνική ακτινοβολία. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ραδιενεργή διάσπαση. Η ακτινοβολία συνίσταται σε σωματίδια άλφα (ή ακτίνες α), σωματίδια βήτα (ή ακτίνες β) και ακτινοβολία γάμμα (ή ακτίνες γ). Η ακτινοβολία γάμμα φέρει συνήθως την περισσότερη ενέργεια από τα προϊόντα των ραδιενεργών διασπάσεων. Γενικά όλα τα προϊόντα της διάσπασης μπορεί να αποδειχτούν επικίνδυνα για την ισορροπία της λειτουργίας των ζωντανών οργανισμών, προκαλώντας συχνά μεταλλάξεις και ανωμαλίες. Η ραδιενέργεια ενός υλικού δεν επηρεάζεται από φυσικές και χημικές μεταβολές, αλλά οφείλεται στην αυθόρμητη διάσπαση των πύρινων των ατόμων.

Κεφάλαιο 3 Χημικά στοιχεία

3.1 Ορολογία

3.1.1 Χημικά στοιχεία

Χημικό στοιχείο, συχνά αποκαλούμενο ως στοιχείο, είναι οποιαδήποτε ουσία αποτελείται αποκλειστικά από άτομα με τον ίδιο αριθμό πρωτονίων στους πυρήνες τους (ατομικό αριθμό). Τα χημικά στοιχεία διακρίνονται σε μέταλλα, μεταλλοειδή, αμέταλλα και στην κατάσταση την οποία βρίσκονται όπου διακρίνονται σε στερεά, υγρά, αέρια και στο πλάσμα. Όλα τα στοιχεία είναι τοποθετημένα σε έναν πίνακα ο οποίος λέγεται περιοδικός πίνακας.

Periodic Table of the elements

| 1 | 2 | | | | | | | | | | | 18 | 19 | 20 | | | | | | | | | | | 36 | 37 | 38 | | | | | | | | | | | 54 | 55 | 56 | | | | | | | | | | | 86 | 87 | 88 | | | | | | | | | | | 118 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 1 | 2 | | | | | | | | | | | 10 | 11 | 12 | | | | | | | | | | | 18 | 19 | 20 | | | | | | | | | | | 36 | 37 | 38 | | | | | | | | | | | 54 | 55 | 56 | | | | | | | | | | | 86 | 87 | 88 | | | | | | | | | | | 118 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| H | He | | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne | Na | Mg | | | | | | | | | | | Ar | K | Ca | | | | | | | | | | | Xe | Rb | Sr | | | | | | | | | | | Rn | Cs | Ba | | | | | | | | | | | Fr | Ra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | | | | | | | | | | | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 1 | 2 | | | | | | | | | | | 18 | 19 | 20 | | | | | | | | | | | 36 | 37 | 38 | | | | | | | | | | | 54 | 55 | 56 | | | | | | | | | | | 86 | 87 | 88 | | | | | | | | | | | 118 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | | | | | | | | | | | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 1 | 2 | | | | | | | | | | | 18 | 19 | 20 | | | | | | | | | | | 36 | 37 | 38 | | | | | | | | | | | 54 | 55 | 56 | | | | | | | | | | | 86 | 87 | 88 | | | | | | | | | | | 118 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | | | | | | | | | | | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 1 | 2 | | | | | | | | | | | 36 | 37 | 38 | | | | | | | | | | | 54 | 55 | 56 | | | | | | | | | | | 86 | 87 | 88 | | | | | | | | | | | 118 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | | | | | | | | | | | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 1 | 2 | | | | | | | | | | | 36 | 37 | 38 | | | | | | | | | | | 54 | 55 | 56 | | | | | | | | | | | 86 | 87 | 88 | | | | | | | | | | | 118 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | | | | | | | | | | | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 1 | 2 | | | | | | | | | | | 36 | 37 | 38 | | | | | | | | | | | 54 | 55 | 56 | | | | | | | | | | | 86 | 87 | 88 | | | | | | | | | | | 118 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | | | | | | | | | | | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 1 | 2 | | | | | | | | | | | 36 | 37 | 38 | | | | | | | | | | | 54 | 55 | 56 | | | | | | | | | | | 86 | 87 | 88 | | | | | | | | | | | 118 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | | | | | | | | | | | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | | | | | | | | | | | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 1 | 2 | | | | | | | | | | | 36 | 37 | 38 | | | | | | | | | | | 54 | 55 | 56 | | | | | | | | | | | 86 | 87 | 88 | | | | | | | | | | | 118 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | | | | | | | | | | | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 | 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 | 134 | 135 | 136 | 137 | 138 | 139 | 140 | 141 | 142 | 143 | 144 | 145 | 146 | 147 | 148 | 149 | 150 | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 | 160 | 161 | 162 | 163 | 164 | 165 | 166 | 167 | 168 | 169 | 170 | 171 | 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 | 181 | 182 | 183 | 184 | 185 | 186 | 187 | 188 | 189 | 190 | 191 | 192 | 193 | 194 | 195 | 196 | 197 | 198 | 199 | 200 | 201 | 202 | 203 | 204 | 205 | 206 | 207 | 208 | 209 | 210 | 211 | 212 | 213 | 214 | 215 | 216 | 217 | 218 | 219 | 220 | 221 | 222 | 223 | 224 | 225 | 226 | 227 | 228 | 229 | 230 | 231 | 232 | 233 | 234 | 235 | 236 | 237 | 238 | 239 | 240 | 241 | 242 | 243 | 244 | 245 | 246 | 247 | 248 | 249 | 250 | 251 | 252 | 253 | 254 | 255 | 256 | 257 | 258 | 259 | 260 | 261 | 262 | 263 | 264 | 265 | 266 | 267 | 268 | 269 | 270 | 271 | 272 | 273 | 274 | 275 | 276 | 277 | 278 | 279 | 280 | 281 | 282 | 283 | 284 | 285 | 286 | 287 | 288 | 289 | 290 | 291 | 292 | 293 | 294 | 295 | 296 | 297 | 298 | 299 | 300 | 301 | 302 | 303 | 304 | 305 | 306 | 307 | 308 | 309 | 310 | 311 | 312 | 313 | 314 | 315 | 316 | 317 | 318 | 319 | 320 | 321 | 322 | 323 | 324 | 325 | 326 | 327 | 328 | 329 | 330 | 331 | 332 | 333 | 334 | 335 | 336 | 337 | 338 | 339 | 340 | 341 | 342 | 343 | 344 | 345 | 346 | 347 | 348 | 349 | 350 | 351 | 352 | 353 | 354 | 355 | 356 | 357 | 358 | 359 | 360 | 361 | 362 | 363 | 364 | 365 | 366 | 367 | 368 | 369 | 370 | 371 | 372 | 373 | 374 | 375 | 376 | 377 | 378 | 379 | 380 | 381 | 382 | 383 | 384 | 385 | 386 | 387 | 388 | 389 | 390 | 391 | 392 | 393 | 394 | 395 | 396 | 397 | 398 | 399 | 400 | 401 | 402 | 403 | 404 | 405 | 406 | 407 | 408 | 409 | 410 | 411 | 412 | 413 | 414 | 415 | 416 | 417 | 418 | 419 | 420 | 421 | 422 | 423 | 424 | 425 | 426 | 427 | 428 | 429 | 430 | 431 | 432 | 433 | 434 | 435 | 436 | 437 | 438 | 439 | 440 | 441 | 442 | 443 | 444 | 445 | 446 | 447 | 448 | 449 | 450 | 451 | 452 | 453 | 454 | 455 | 456 | 457 | 458 | 459 | 460 | 461 | 462 | 463 | 464 | 465 | 466 | 467 | 468 | 469 | 470 | 471 | 472 | 473 | 474 | 475 | 476 | 477 | 478 | 479 | 480 | 481 | 482 | 483 | 484 | 485 | 486 | 487 | 488 | 489 | 490 | 491 | 492 | 493 | 494 | 495 | 496 | 497 | 498 | 499 | 500 | 501 | 502 | 503 | 504 | 505 | 506 | 507 | 508 | 509 | 510 | 511 | 512 | 513 | 514 | 515 | 516 | 517 | 518 | 519 | 520 | 521 | 522 | 523 | 524 | 525 | 526 | 527 | 528 | 529 | 530 | 531 | 532 | 533 | 534 | 535 | 536 | 537 | 538 | 539 | 540 | 541 | 542 | 543 | 544 | 545 | 546 | 547 | 548 | 549 | 550 | 551 | 552 | 553 | 554 | 555 | 556 | 557 | 558 | 559 | 560 | 561 | 562 | 563 | 564 | 565 | 566 | 567 | 568 | 569 | 570 | 571 | 572 | 573 | 574 | 575 | 576 | 577 | 578 | 579 | 580 | 581 | 582 | 583 | 584 | 585 | 586 | 587 | 588 | 589 | 590 | 591 | 592 | 593 | 594 | 595 | 596 | 597 | 598 | 599 | 600 | 601 | 602 | 603 | 604 | 605 | 606 | 607 | 608 | 609 | 610 | 611 | 612 | 613 | 614 | 615 | 616 | 617 | 618 | 619 | 620 | 621 | 622 | 623 | 624 | 625 | 626 | 627 | 628 | 629 | 630 | 631 | 632 | 633 | 634 | 635 | 636 | 637 | 638 | 639 | 640 | 641 | 642 | 643 | 644 | 645 | 646 | 647 | 648 | 649 | 650 | 651 | 652 | 653 | 654 | 655 | 656 | 657 | 658 | 659 | 660 | 661 | 662 | 663 | 664 | 665 | 666 | 667 | 668 | 669 | 670 | 671 | 672 | 673 | 674 | 675 | 676 | 677 | 678 | 679 | 680 | 681 | 682 | 683 | 684 | 685 | 686 | 687 | 688 | 689 | 690 | 691 | 692 | 693 | 694 | 695 | 696 | 697 | 698 | 699 | 700 | 701 | 702 | 703 | 704 | 705 | 706 | 707 | 708 | 709 | 710 | 711 | 712 | 713 | 714 | 715 | 716 | 717 | 718 | 719 | 720 | 721 | 722 | 723 | 724 | 725 | 726 | 727 | 728 | 729 | 730 | 731 | 732 | 733 | 734 | 735 | 736 | 737 | 738 | 739 | 740 | 741 | 742 | 743 | 744 | 745 | 746 | 747 | 748 | 749 | 750 | 751 | 752 | 753 | 754 | 755 | 756 | 757 | 758 | 759 | 760 | 761 | 762 | 763 | 764 | 765 | 766 | 767 | 768 | 769 | 770 | 771 | 772 | 773 | 774 | 775 | 776 | 777 | 778 | 779 | 780 | 781 | 782 | 783 | 784 | 785 | 786 | 787 | 788 | 789 | 790 | 791 | 792 | 793 | 794 | 795 | 796 | 797 | 798 | 799 | 800 | 801 | 802 | 803 | 804 | 805 | 806 | 807 | 808 | 809 | 810 | 811 | 812 | 813 | 814 | 815 | 816 | 817 | 818 | 819 | 820 | 821 | 822 | 823 | 824 | 825 | 826 | 827 | 828 | 829 | 830 | 831 | 832 | 833 | 834 | 835 | 836 | 837 | 838 | 839 | 840 | 841 | 842 | 843 | 844 | 845 | 846 | 847 | 848 | 849 | 850 | 851 | 852 | 853 | 854 | 855 | 856 | 857 | 858 | 859 | 860 | 861 | 862 | 863 | 864 | 865 | 866 | 867 | 868 | 869 | 870 | 871 | 872 | 873 | 874 | 875 | 876 | 877 | 878 | 879 | 880 | 881 | 882 | 883 | 884 | 885 | 886 | 887 | 888 | 889 | 890 | 891 | 892 | 893 | 894 | 895 | 896 | 897 | 898 | 899 | 900 | 901 | 902 | 903 | 904 | 905 | 906 | 907 | 908 | 909 | 910 | 911 | 912 | 913 | 914 | 915 | 916 | 917 | 918 | 919 | 920 | 921 | 922 | 923 | 924 | 925 | 926 | 927 | 928 | 929 | 930 | 931 | 932 | 933 | 934 | 935 | 936 | 937 | 938 | 939 | 940 | 941 | 942 | 943 | 944 | 945 | 946 | 947 | 948 | 949 | 950 | 951 | 952 | 953 | 954 | 955 | 956 | 957 | 958 | 959 | 960 | 961 | 962 | 963 | 964 | 965 | 966 | 967 | 968 | 969 | 970 | 971 | 972 | 973 | 974 | 975 | 976 | 977 | 978 | 979 | 980 | 981 | 982 | 983 | 984 | 985 | 986 | 987 | 988 | 989 | 990 | 991 | 992 | 993 | 994 | 995 | 996 | 997 | 998 | 999 | 1000 |

Εικόνα 3.1: Περιοδικός πίνακας

3.1.2 Πλάσμα

Το πλάσμα είναι η 4η θεμελιώδη κατάσταση της ύλης, που χαρακτηρίζονται από την παρουσία σημαντικού τμήματος φορτισμένων σωματιδίων σε οποιονδήποτε συνδυασμό ιόντων ή ηλεκτρονίων. Στην κατάσταση αυτή, τα άτομα και τα μόρια αποσυνδέονται από τα ιόντα τους. Το πλάσμα δηλαδή αποτελείται από ένα μείγμα ελεύθερων ηλεκτρονίων και ιονισμένων ατόμων (δηλαδή άτομα ή μόρια που έχουν χάσει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια). Είναι η πιο άφθονη μορφή συνηθισμένης ύλης στο σύμπαν, που συνδέεται κυρίως με κεραυνούς, αστέρια, μεσοαστρικό διάστημα στην ιονόσφαιρα, συμπεριλαμβανομένου του Ήλιου και τον πύρινα της γης.



Εικόνα 3.2: Γυάλινη λάμπα πλάσματος

Η παρουσία φορτισμένων σωματιδίων καθιστά το πλάσμα ηλεκτρικά αγώγιμο, με τη δυναμική των μεμονωμένων σωματιδίων και της μακροσκοπικής κίνησης πλάσματος να διέπονται από συλλογικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία και να είναι πολύ ευαίσθητα σε εξωτερικά εφαρμοσμένα πεδία. Η απόκριση του πλάσματος στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία χρησιμοποιείται σε πολλές σύγχρονες συσκευές και τεχνολογίες, όπως τηλεοράσεις πλάσματος ή χάραξη πλάσματος.

Ανάλογα με τη θερμοκρασία και την πυκνότητα, αν η ποσότητα είναι μεγαλύτερη από το λεγόμενο μέγεθος του Debye, μπορεί επίσης να υπάρχει ένας ορισμένος αριθμός ουδέτερων σωματιδίων κάνοντας το να παρουσιάζει ηλεκτρικά ουδέτερη συμπεριφορά, οπότε το πλάσμα ονομάζεται μερικώς ιονισμένο. Τα σημάδια νέον και οι αστραπές είναι παραδείγματα μερικώς ιονισμένου πλάσματος.



Εικόνα 3.3: Αντίδραση πλάσματος σε διαφορετικά στοιχεία

Σε πολύ θερμό πλάσμα τα σωματίδια έχουν αρκετή ενέργεια ώστε να ξεκινήσουν αντιδράσεις πυρηνικής σύντηξης με παραδείγματα τέτοιων αντιδράσεων να είναι η αιτία της θερμότητας στον πυρήνα του ήλιου.

Στη γη, τέτοιο είδος πλάσματος δημιουργείται μόνο σε συνθήκες εργαστηρίου και παρασκευάζεται για χρήση σε πυρηνικούς αντιδραστήρες σύντηξης.

Σε αντίθεση με τις μεταβάσεις φάσης μεταξύ των άλλων τριών καταστάσεων της ύλης, η μετάβαση στο πλάσμα δεν είναι σχετικά καλά καθορισμένη και είναι θέμα ερμηνείας και πλαισίου. Το αν ένας δεδομένος βαθμός ιονισμού αρκεί για να ονομάσει μια ουσία «πλάσμα» εξαρτάται από το συγκεκριμένο φαινόμενο που εξετάζεται.

3.1.3 Ατομικός αριθμός

Ο ατομικός αριθμός ενός χημικού στοιχείου είναι ίσος με τον αριθμό των πρωτονίων κάθε ατόμου του χημικού στοιχείου, και καθορίζει το χημικό στοιχείο

Ο αριθμός των πρωτονίων στον ατομικό πυρήνα καθορίζει επίσης και το ηλεκτρικό φορτίο του, που με τη σειρά του καθορίζει και τον αριθμό των ηλεκτρονίων του ατόμου, εφόσον δεν βρίσκεται στην κατάσταση ιόντος. Τα ηλεκτρόνια τοποθετούνται σε ατομικά τροχιακά, που καθορίζουν τις διάφορες χημικές ιδιότητες του χημικού στοιχείου. Ο αριθμός των νετρονίων του πυρήνα συνήθως έχει πολύ λίγη επίδραση στις χημικές ιδιότητες του χημικού στοιχείου, εκτός από την περίπτωση του δευτερίου, που είναι ισότοπο του υδρογόνου.

3.1.4 Μαζικός αριθμός

Ο μαζικός αριθμός ενός νουκλιδίου, που συμβολίζεται με το γράμμα A, είναι ένας απλός φυσικός αριθμός που συμβολίζει τον (συνολικός) αριθμός των νουκλεονίων (δηλαδή των πρωτονίων και των νετρονίων) στον ατομικό του πυρήνα. Τα διαφορετικά ισότοπα ενός δεδομένου χημικού στοιχείου έχουν διαφορετικούς μαζικούς αριθμούς, που συμβατικά γράφονται ως εκθέτες πάνω αριστερά από το χημικό σύμβολο του στοιχείου, για παράδειγμα ^{238}U .

3.1.5 Ισοτοπική μάζα

η ισοτοπική μάζα ενός μοναδικού ατόμου είναι ένας πραγματικός αριθμός για τη μάζα ενός συγκεκριμένου ισότοπου του χημικού στοιχείου, χρησιμοποιώντας ως μονάδα μέτρησης την ατομική μονάδα μάζας (atomic mass unit - amu). Γενικά, όταν εκφράζεται σε ατομικές μονάδα μάζας, η ισοτοπική μάζα διαφέρει αριθμητικά ελάχιστα από το μαζικό αριθμό ενός δεδομένου νουκλιδίου ή ισότοπου, εφόσον η μάζα ενός πρωτονίου ή ενός νετρονίου δεν είναι ακριβώς 1 amu και αφού τα ηλεκτρόνια συνεισφέρουν κι αυτά (έστω) ένα ελάχιστο μερίδιο στην ατομική μάζα

3.1.6 Ατομικό βάρος

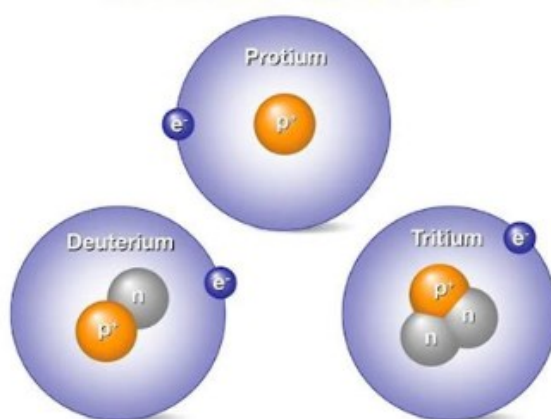
Το ατομικό βάρος (ΑΒ) ή (σχετική ή μέση) ατομική μάζα (A_r) είναι ένας αριθμός που αναφέρεται σε ένα στοιχείο ή σε ένα ισότοπο ενός στοιχείου. Εκφράζει τη μάζα του ατόμου κάποιου στοιχείου, μετρημένη σε μονάδες ατομικής μάζας (u) και ισούται με τη μάζα σε γραμμάρια που περιέχει ένα mol ατόμων του ισότοπου ή του στοιχείου.

3.1.7 Τεχνητά στοιχεία

Τεχνητά στοιχεία είναι στοιχεία τα οποία δεν βρίσκονται στην φύση αλλά έχουν δημιουργηθεί από τον άνθρωπο με ραδιενεργές μεθόδους είτε σε πυρηνικούς αντιδραστήρες είτε σε εργαστήρια, δηλαδή είναι προϊόντα μεταστοιχείωσης. Τα Τεχνητά στοιχεία είναι όλα στερεά. Τα περισσότερα από αυτά βρίσκονται σε θέσεις μετά από αυτή του Ουρανίου (U) στον περιοδικό πίνακα, τα οποία αποκαλούνται υπερουράνια στοιχεία. Όλα αυτά τα στοιχεία είναι ραδιενεργά.

3.1.8 Ισότοπα.

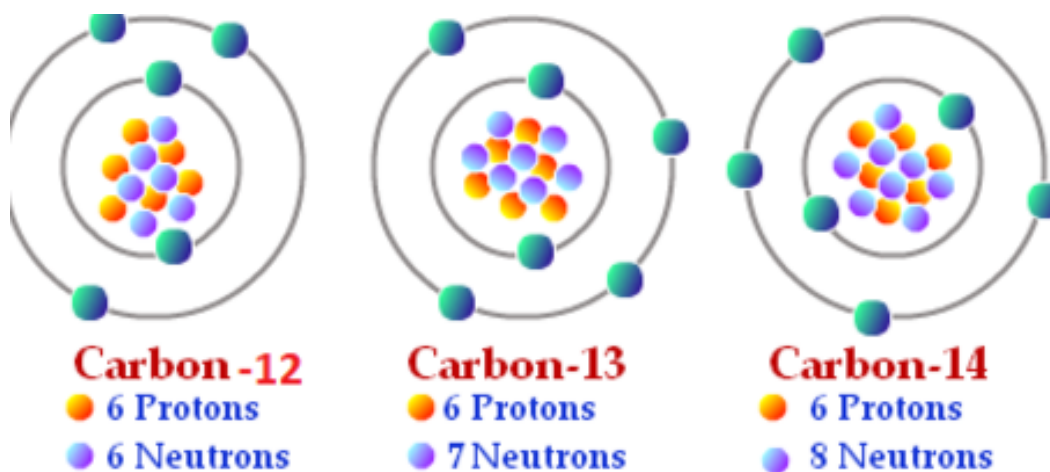
Τα ισότοπα θα μπορούσαν να χαρακτηρισθούν ως διαφορετικές εκδοχές, ή παραλλαγές του ίδιου του στοιχείου. Όλα τα ισότοπα ενός στοιχείου έχουν ίδιο ατομικό αριθμό και επομένως τις ίδιες χημικές ιδιότητες, παρουσιάζοντας διαφορά μόνο στον μαζικό αριθμό. Ωστόσο τα ισότοπα μπορεί να παρουσιάζουν διαφορετικές φυσικές ιδιότητες όπως για παράδειγμα στην πυκνότητα.



Εικόνα 3.4: Ισότοπα υδρογόνου

Ένα ισότοπο καθορίζεται από τον μαζικό αριθμό του που ονομάζεται και αριθμός νουκλεονίων. Πρόκειται για το συνολικό αριθμό των πρωτονίων και των νετρονίων του ατομικού του πυρήνα. Σημειώνεται ότι οι χημικές ιδιότητες των στοιχείων εξαρτώνται από την ηλεκτρονική δομή τους που συνδέεται άμεσα με τον αριθμό πρωτονίων των πυρήνων τους. Αντίθετα τα νετρόνια δεν επηρεάζουν αυτές, πλην όμως συντελούν στη διαμόρφωση της τιμής της ατομικής μάζας των ατόμων των στοιχείων. Αυτό έχει ως συνέπεια τα

ισότοπα να διακρίνονται μεταξύ τους από τις ατομικές μάζες τους. Σημαντική διαφορά μεταξύ των ισωτόπων του ίδιου ατομικού αριθμού είναι ότι τα περισσότερα ισότοπα είναι ασταθή, ενώ μερικά μόνο είναι σταθερά. Συνήθως τα ασταθή ισότοπα είναι ραδιενεργά, καλούμενα εξ αυτού "ραδιοϊσότοπα" υπάρχουν ακόμα άλλες δυο κατηγορίες ισωτόπων, τα αρχέγονα ισότοπα και τα σταθερά ισότοπα. Κάθε ισότοπο προσδιορίζεται από το όνομα του συγκεκριμένου στοιχείου ακολουθούμενο από μία παύλα και τον μαζικό αριθμό του (π.χ. ήλιο-3 , το ήλιο-4 , άνθρακας-12 , άνθρακας-14 , ουράνιο-235, ουράνιο-239 κ.λπ.. Ως χημικό σύμβολο του ισωτόπου χρησιμοποιείται ομοίως το χημικό σύμβολο του στοιχείου, π.χ., «C» για τον άνθρακα, με δύο αριστερούς εκθέτες, έναν πάνω αριστερά και ένα κάτω επίσης αριστερά. Ο άνω εκθέτης αποδίδει τον μαζικό αριθμό του ισωτόπου και ο κάτω τον ατομικό αριθμό του στοιχείου όπως π.χ. ${}^3_2\text{He}$, ${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{14}_6\text{C}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$, και ${}^{239}_{92}\text{U}$. Μιας και ο κάτω αριστερά αριθμός του κάθε ισωτόπου παραμένει σταθερός μιας και ο ατομικός αριθμός του στοιχείου δεν αλλάζει.



Εικόνα 3.5: Ισότοπα άνθρακα

3.2 Φυσικά στοιχεία

3.2.1 Ουράνιο

Το ουράνιο είναι χημικό στοιχείο στη σειρά των ακτινιδών, με ατομικό αριθμό 92 και ατομικό βάρος 238,02891 g/mol. Έχει θερμοκρασία τήξης 1405.3 K (1132,2 C°). Το ουράνιο είναι βαρύ, αργυρόλευκο, τοξικό, με μεταλλική λάμψη, μεγάλη πυκνότητα και μεγάλη σκληρότητα. Είναι ραδιενεργό στοιχείο, χημικά τοξικό, ασταθές και αναφλέγεται εύκολα σε λεπτό διαμερισμό. Το φυσικό ουράνιο αποτελείται από τα τρία ισότοπα ουράνιο 234 (U-234) σε ποσοστό 0,0058%, ουράνιο 235 (U-235) σε ποσοστό 0,71% και ουράνιο 238 (U-238) σε ποσοστό 99,28%. Τα ισότοπα αυτά έχουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων (92) και διαφορετικό αριθμό νετρονίων - 142, 143 και 146 νετρόνια- αντίστοιχα. Όλα τα ισότοπα του ουρανίου

είναι ραδιενεργά και, επειδή είναι ασταθή μέσα από συνεχείς μεταστοιχειώσεις, τείνουν να γίνουν πιο σταθερά εκπέμποντας ιονίζουσα ακτινοβολία, δηλαδή σωματίδια άλφα, βήτα και ακτινοβολία γάμμα. Το U-238 και το U-235, μέσα από μια σειρά μεταστοιχειώσεων, καταλήγουν στα σταθερά και μη ραδιενεργά ισότοπα μόλυβδου, Pb-206 και Pb-207 αντίστοιχα.



Εικόνα 3.6: Μη επεξεργασμένο ουράνιο

Από τα παραπάνω ισότοπα του ουρανίου, ως πυρηνικό καύσιμο χρησιμοποιείται μόνο το U-235 και επειδή η συγκέντρωσή του στο φυσικό ουράνιο είναι πολύ μικρή (0,71%), ο εμπλουτισμός του είναι απαραίτητη διαδικασία, δαπανηρή και αρκετά δύσκολη. Λέγοντας **εμπλουτισμό** εννοούμε τη διαδικασία αύξησης της συγκέντρωσης του U-235 και απόρριψης του U-238. Ο διαχωρισμός των δύο ισωτόπων του ουρανίου δεν γίνεται με βάση τις χημικές τους ιδιότητες (γιατί και τα δύο ισότοπα έχουν την ίδια χημική συμπεριφορά) αλλά βάσει των φυσικών τους ιδιοτήτων.

Η πρώτη μέθοδος διαχωρισμού των δύο ισωτόπων ήταν μια διεργασία διαχωρισμού διάχυσης μέσω μεμβρανών σε αέρια φάση και υψηλή θερμοκρασία. Το εξαφθοριούχο ουράνιο (UF_6), που σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 57 °C μετατρέπεται σε αέριο, περνά μέσα από διαχωριστικές μικροπορώδεις μεμβράνες. Τα μόρια του U-235 που έχουν μικρότερη μάζα περνούν από τις μεμβράνες πιο εύκολα και πιο γρήγορα από ό,τι τα μόρια του U-238. Αποτέλεσμα της διεργασίας εμπλουτισμού είναι η συσσώρευση -εκατέρωθεν της διαχωριστικής επιφάνειας της μεμβράνης- μείγματος πλούσιου σε U-235 και φτωχού σε U-238 - **πρόκειται για το εμπλουτισμένο ουράνιο**- και από την άλλη, αερίου φτωχού σε U-235 και πλούσιου σε U-238 δηλαδή το **εξαντλημένο ουράνιο**.

Αργότερα αναπτύχθηκαν και άλλες μέθοδοι εμπλουτισμού, όπως η μέθοδος pozzle, με μικρότερες ενεργειακές απαιτήσεις, ή μέθοδος εμπλουτισμού με **υπερφυγοκέντρωση**, που είναι σήμερα η επικρατούσα.



Εικόνα 3.7: Εμπλουτισμένο ουράνιο 235

Η παραπάνω διαδικασία -που έχει μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις- επαναλαμβανόμενη μπορεί να δώσει υψηλής περιεκτικότητας εμπλουτισμένο ουράνιο (HEU), δηλαδή με περιεκτικότητα σε U-235 πάνω από 90%, που χρησιμοποιείται για την κατασκευή πυρηνικών βομβών. Το χαμηλής περιεκτικότητας εμπλουτισμένο ουράνιο (LEU) περιέχει περίπου 3% U-235 και χρησιμοποιείται ως καύσιμο στους πυρηνικούς αντιδραστήρες. **Κατά τη διαδικασία εμπλουτισμού, αυτό που απομένει ως απόβλητο είναι το εξαντλημένο ουράνιο** που περιέχει 0,2% U-235 και 99,8% U-238. Το ισότοπο U-234 γενικά αγνοείται (συνήθως δεν αναφέρεται καθόλου) γιατί περιέχεται σε πάρα πολύ μικρές ποσότητες (0,0008% U-234).

Κατά την παραγωγή 1.000 τόνων εμπλουτισμένου ουρανίου προκύπτουν πάνω από 9.000 τόνοι εξαντλημένου ουρανίου. Πρόκειται δηλαδή για ένα πυρηνικό απόβλητο που δημιουργεί μεγάλα προβλήματα αποθήκευσης και διάθεσης. Η Γαλλία έχει γύρω στους 210.000 τόνους εξαντλημένου ουρανίου και οι ΗΠΑ τη διπλάσια ποσότητα (περίπου 500.000 τόνους) που πρέπει να αποθηκευτεί, γεγονός που απαιτεί τεράστιο κόστος. Η κατασκευή συμβατικών όπλων από το απόβλητο αυτό είναι ένας φτηνός τρόπος «αξιοποίησής» του. Υπάρχουν μέταλλα μεγάλης σκληρότητας, όπως το βολφράμιο και το τιτάνιο, για την κατασκευή όπλων και πυρομαχικών μεγάλης διατηρητικής ικανότητας, που είναι όμως πολύ ακριβά. **Το εξαντλημένο ουράνιο, αντίθετα, δεν κοστίζει τίποτα και η χρησιμοποίησή του για κατασκευή όπλων «αδειάζει» τις αποθήκες των αποβλήτων.**



Εικόνα 3.8: Προσωρινή αποθήκευση πυρηνικών καταλοίπων

Ακόμα δεν έχουν μελετηθεί με ακρίβεια οι επιπτώσεις του εξαντλημένου ουρανίου στην ανθρώπινη υγεία, όχι μόνο όσων συμμετείχαν σε πολεμικές επιχειρήσεις αλλά και των ανθρώπων που κατοικούσαν στις εμπόλεμες ζώνες, λόγω απουσίας επιδημιολογικών μελετών. Αντιλαμβάνεστε, επίσης, το μέγεθος του κινδύνου που απειλεί τους εργαζόμενους σε μεταλλεία ουρανίου και μονάδες επεξεργασίας και διαχείρισής του. Η ραδιενεργή σκόνη ευθύνεται για την εμφάνιση διαφόρων μορφών καρκίνου και άλλων προβλημάτων υγείας καθώς και για τη ρύπανση των οικοσυστημάτων, που θα παραμείνει για αιώνες. Αυτό μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό, αφού **ο χρόνος ημιζωής του εξαντλημένου ουρανίου** (χρόνος που χρειάζεται για να μειωθεί η ραδιενέργεια στη μισή ποσότητα της αρχικής) **είναι 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια.**

3.2.2 Ζιρκόνιο

Το ζιρκόνιο είναι ένα χημικό στοιχείο με το σύμβολο Zr και ατομικό αριθμό 40. Το όνομα ζιρκόνιο προέρχεται από το όνομα του ορυκτού ζιρκονίου, της σημαντικότερης πηγής ζιρκονίου. Είναι ένα λαμπερό, γκριζόλευκο, ισχυρό μεταβατικό μέταλλο που μοιάζει πολύ με το άφνιο και, σε μικρότερο βαθμό, με το τιτάνιο. Το ζιρκόνιο χρησιμοποιείται κυρίως ως πυρίμαχο και αδιαφανές, αν και μικρές ποσότητες χρησιμοποιούνται ως παράγοντας κράματος για την ισχυρή αντοχή του στη διάβρωση. Το ζιρκόνιο

σχηματίζει μια ποικιλία ανόργανων και οργανομεταλλικών ενώσεων όπως το διοξείδιο του ζirkονίου και το διχλωριούχο ζirkονόκαινο, αντίστοιχα. Πέντε ισότοπα εμφανίζονται φυσικά, τέσσερα από τα οποία είναι σταθερά. Οι ενώσεις ζirkονίου δεν έχουν γνωστό βιολογικό ρόλο.



Εικόνα 3.9: Ζirkόνιο

Μια ιδιότητα του ζirkονίου είναι ότι μπορεί να αντισταθεί και στην υψηλή θερμοότητα και στην διάβρωση αφήνοντας όμως να περνάνε ελεύθερα τα νετρόνια που βοηθάει στην πυρηνική σχάση. Η επένδυση για καύσιμα πυρηνικών αντιδραστήρων καταναλώνει περίπου το 1% της παροχής ζirkονίου, κυρίως με τη μορφή ζirkαλόι (zircalloys). Οι επιθυμητές ιδιότητες αυτών των κραμάτων είναι μια διατομή χαμηλής δέσμευσης νετρονίων και αντοχή στη διάβρωση υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Αναπτύχθηκαν αποτελεσματικές μέθοδοι για την απομάκρυνση των προσμείξεων αφνίου για την εξυπηρέτηση αυτού του σκοπού.

Ένα μειονέκτημα των κραμάτων ζirkονίου είναι η αντιδραστικότητα με το νερό, παράγοντας υδρογόνο, οδηγώντας σε υποβάθμιση της επένδυσης ράβδων καυσίμου ($Zr + 2 H_2 O \rightarrow ZrO_2 + 2 H_2$)

Η υδρόλυση είναι πολύ αργή κάτω από τους 100 °C, αλλά ταχεία σε θερμοκρασία άνω των 900 °C. Τα περισσότερα μέταλλα υφίστανται παρόμοιες αντιδράσεις. Η οξειδοαναγωγική αντίδραση σχετίζεται με την αστάθεια των συγκροτημάτων καυσίμου σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτή η αντίδραση συνέβη στους αντιδραστήρες 1, 2 και 3 του πυρηνικού σταθμού Φουκουσίμα Ι (Ιαπωνία) μετά τη διακοπή της ψύξης του αντιδραστήρα από τον σεισμό και την καταστροφή του τσουνάμι της 11ης Μαρτίου 2011, οδηγώντας στα πυρηνικά ατυχήματα της Φουκουσίμα Ι. Μετά τον εξαερισμό του υδρογόνου στην αίθουσα συντήρησης αυτών των τριών αντιδραστήρων, το μείγμα υδρογόνου με ατμοσφαιρικό οξυγόνο εξερράγη, προκαλώντας σοβαρές ζημιές στις εγκαταστάσεις και σε τουλάχιστον ένα από τα κτίρια συγκράτησης.

Το ζirkόνιο είναι συστατικό του πυρηνικού καυσίμου υδρίδιο του ουρανίου ζirkονίου (UZrH) που χρησιμοποιείται στους αντιδραστήρες TRIGA.

3.2.3 Εμπλουτισμένο βόριο

Το ισότοπο βόριο-10 ή αλλιώς εμπλουτισμένο βόριο έχει την ιδιότητα να απορροφά θερμικά νετρόνια σύμφωνα με την πυρηνική αντίδραση, $^{10}\text{B} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^9_3\text{Li} + ^4_2\text{He} + \gamma$

Τα προϊόντα των αντιδράσεων αυτών είναι λίθιο-9, -γ (φωτόνια) και -α σωματίδια σημαντικής ενέργειας.

Το βόριο-10 εξαιτίας αυτής του της ιδιότητας χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της καλής λειτουργίας των πυρηνικών αντιδραστήρων που λειτουργούν με θερμικά νετρόνια, στα συστήματα επείγουσας σβέσης αυτών των πυρηνικών αντιδραστήρων αλλά και ως θωράκιση για προστασία από πεδία θερμικών νετρονίων, αλλά και για ιατρικούς θεραπευτικούς σκοπούς. Το βόριο-10 χρησιμοποιείται στους αντιδραστήρες ως στερεό με τη μορφή βοριοπυριτικών ράβδων ελέγχου ή ως διάλυμα βορικού οξέος. Στους αντιδραστήρες τύπου πεπιεσμένου ύδατος, εισάγεται με τη μορφή βορικού οξέος στο ψυκτικό του αντιδραστήρα όταν ο αντιδραστήρας είναι κλειστός για ανεφοδιασμό. Μετά την έναρξη της λειτουργίας φιλτράρεται σταδιακά προς τα έξω, καθώς το σχάσιμο υλικό που χρησιμοποιείται σταδιακά γίνεται ολοένα και λιγότερο με αποτέλεσμα να χρειάζονται περισσότερα θερμικά νετρόνια για τη σχάση του. Εκτός από τους πυρηνικούς αντιδραστήρες και την τεχνολογία θωράκισης έναντι νετρονίων το εμπλουτισμένο βόριο χρησιμοποιείται και για ραδιοθεραπεία με νετρόνια. Σύμφωνα μ' αυτήν την μέθοδο ραδιοθεραπείας μια ένωση που περιέχει βόριο-10 εισάγεται με κατάλληλο τρόπο σε καρκινικούς όγκους οι οποίοι δεν επιδέχονται άλλη προσφορότερη θεραπεία (π.χ. σε εγκεφαλικούς όγκους). Στη συνέχεια ο ασθενής εκτίθεται σε μία δέσμη θερμικών νετρονίων κατάλληλης χαμηλής έντασης η οποία προσβάλλει την περιοχή των όγκων. Η πυρηνική αντίδραση αυτών των νετρονίων με τους πυρήνες του βορίου-10 που παρατέθηκε πιο πάνω παράγει ακτινοβολία α (μικρής εμβέλειας και μεγάλης ενέργειας) που βομβαρδίζει και καταστρέφει τον όγκο.



Εικόνα 3.10: Μη επεξεργασμένο βόριο

Λόγω της ιδιαίτερης χρήσης του βορίου-10 σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, σε ρόλο απορροφητή θερμικών νετρονίων, έχουν αναπτυχθεί αρκετά βιομηχανοποιημένες διεργασίες παραγωγής του. Πρόκειται για διεργασίες που διαχωρίζουν κατά το δυνατόν το φυσικό βόριο σε βόριο-10 και βόριο-11. Παρόλο που υπάρχουν και πολλές άλλες μέθοδοι για το ίδιο αποτέλεσμα, οι διεργασίες που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι κυρίως δύο: η κλασματική απόσταξη του παραγωγού του βορίου DME-BF₃ (διμεθυλαιθεροτριφθοροβόριο) και η χρωματογραφία στήλης βοριούχων ενώσεων και ονομάζονται διεργασίες «ισοτοπικού εμπλουτισμού βορίου». Το προϊόν των διεργασιών που περιέχει σχεδόν καθαρό βόριο-10 ονομάζεται «εμπλουτισμένο» βόριο, ενώ το υπόλειμμα περιέχει σχεδόν καθαρό βόριο-11 και ονομάζεται «απεμπλουτισμένο» βόριο.

3.2.4 Το απεμπλουτισμένο βόριο

Αντίθετα από το βόριο-10, το βόριο-11 δεν απορροφά νετρόνια και γι' αυτό χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία ημιαγωγών σε συστήματα που πρέπει να αντέχουν σε προσβολή από ακτινοβολία νετρονίων. Επιπλέον το βόριο-11 έχει προταθεί ως πυρηνικό καύσιμο διότι όταν προσβάλλεται από πρωτόνιο κινητικής ενέργειας περίπου 500 keV παράγει 3 σωματίδια α και 8,7 MeV ενέργειας. Οι περισσότερες άλλες αντίστοιχες πυρηνικές αντιδράσεις παράγουν και ταχέα νετρόνια που είναι καταστρεπτικά, τόσο για τον ίδιο τον αντιδραστήρα, αλλά και βλαβερά για το προσωπικό που τυχόν εκτίθεται σε αυτά. Με τη χρήση του βορίου-11 η κινητική ενέργεια των σωματιδίων α μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ τυχόν άλλες ραδιενεργές ακτινοβολίες παύουν σύντομα όταν κλείσει ο σχετικός αντιδραστήρας.

3.2.5 Άζωτο 16

Το ραδιοϊσότοπο ^{16}N είναι το κυρίαρχο ραδιονουκλίδιο ψυκτικό των πυρηνικών αντιδραστήρων συμπιεσμένου ύδατος. Παράγεται από το ^{16}O του νερού κατά την αντίδραση (n,p). Έχει μικρή ημιζωή 7,1 sec, αλλά η μετατροπή του ξανά σε ^{16}O παράγει υψηλής ενέργειας ακτίνες γ (5-7 MeV).

3.3 Υποπροϊόντα πυρηνικών αντιδράσεων

3.3.1 Καίσιο 137

Το Καίσιο 137 (Cesium-137) ή Cs-137 , είναι από τα προβληματικότερα προϊόντα σχάσης βραχείας-μέσης ημιζωής, επειδή μεταφέρεται εύκολα στην φύση λόγω της μεγάλης διαλυτότητας των αλάτων του στο νερό, που αποτελούν και την συνηθέστερή του χημική ένωση.

Έχει χρόνο ημιζωής περίπου 30,17 έτη, και διασπάται με βήτα διάσπαση στο μετασταθές Βάριο-137 (^{137m}Ba , Ba-137m). (περίπου 95% της διάσπασης οδηγεί σε αυτό το ισομερές. Το υπόλοιπο 5.0% μεταπίπτει απευθείας στην βασική στάθμη, η οποία είναι σταθερή.) Το Ba-137m έχει χρόνο ημιζωής περίπου 153 δευτερόλεπτα, και ευθύνεται για όλες τις εκπομπές ακτίνων γάμμα. Ένα γραμμάριο Cs-137 έχει ενεργότητα 3,215 TBq .

Η ενέργεια των φωτονίων του Ba-137m είναι 661,7 keV. Αυτά τα φωτόνια είναι χρήσιμα στην ακτινοβόληση τροφίμων και στην ραδιοθεραπεία του καρκίνου. Το Cs-137 δεν είναι ευρέως διαδεδομένο στην βιομηχανική ραδιογραφία, επειδή είναι αρκετά δραστικό χημικό στοιχείο, και συνεπώς, δύσκολο στον χειρισμό του. Επίσης τα άλατά του είναι ευδιάλυτα στο νερό, και αυτό περιπλέκει περαιτέρω τη χρήση του. Το Co-60 προτιμάται στην ραδιογραφία, λόγω του ότι είναι σχετικά μη δραστικό μέταλλο και προσφέρει ακτίνες- γ υψηλών ενεργειών.

Το Cs-137 έχει μικρό πλήθος πρακτικών εφαρμογών. Σε μικρές ποσότητες, χρησιμοποιείται για την βαθμονόμηση ανιχνευτών ραδιενέργειας. Χρησιμοποιείται σαν εκπομπός ακτίνων- γ για μετρήσεις πυκνότητας σε πετρελαιοπηγές. Μερικές φορές χρησιμοποιείται και σε θεραπείες καρκίνου, καθώς και σε βιομηχανικούς μετρητές ροής υγρών και πάχους υλικών.



Εικόνα 3.11: Καίσιο 137

3.3.2 Στρόντιο-90

Το Στρόντιο-90 (^{90}Sr) είναι ένα ραδιενεργό ισότοπο στροντίου που παράγεται από πυρηνική σχάση, με χρόνο ημιζωής 28,8 χρόνια. Υφίσταται β^- διάσπαση σε ύτριο-90, με ενέργεια διάσπασης 0,546 MeV. Το στρόντιο-90 έχει εφαρμογές στην ιατρική και τη βιομηχανία και είναι ένα ισότοπο ανησυχίας στις επιπτώσεις από πυρηνικά όπλα, δοκιμές πυρηνικών όπλων και πυρηνικά ατυχήματα. Το φυσικό στρόντιο είναι μη ραδιενεργό και μη τοξικό σε επίπεδα που απαντώνται συνήθως στο περιβάλλον, αλλά το ^{90}Sr αποτελεί κίνδυνο ακτινοβολίας.

Όπως αναφέρθηκε το ^{90}Sr είναι προϊόν πυρηνικής σχάσης. Υπάρχει σε σημαντική ποσότητα σε αναλωμένα πυρηνικά καύσιμα, σε ραδιενεργά απόβλητα από πυρηνικούς αντιδραστήρες και σε πυρηνικά κατάλοιπα πυρηνικών δοκιμών. Για τη θερμική σχάση νετρονίων όπως και στους σημερινούς πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, η απόδοση του προϊόντος σχάσης από το ουράνιο-235 είναι 5,7%, από το ουράνιο-233 6,6%, αλλά από το πλουτόνιο-239 μόνο 2,0%.



Εικόνα 3.12: Στρόντιο 90

Το στρόντιο-90 ταξινομείται ως απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας. Ο χρόνος ημιζωής του 29 ετών σημαίνει ότι μπορεί να χρειαστούν εκατοντάδες χρόνια για να αποσυντεθεί σε αμελητέα επίπεδα. Η έκθεση από μολυσμένο νερό και τρόφιμα μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο λευχαιμίας και καρκίνου των οστών.



Εικόνα 3.13: Μη επεξεργασμένο στρόντιο

Κεφάλαιο 4

Πυρηνικές αντιδράσεις

4.1 Πυρηνική ενέργεια

Όπως αναφέρθηκε και στην υποενότητα 3.1 προηγούμενος, ο πυρήνας του ατόμου αποτελείται από μικρά σωματίδια: τα θετικά φορτισμένα πρωτόνια και τα μη φορτισμένα (ουδέτερα) νετρόνια. Στον πυρήνα βρίσκεται συγκεντρωμένο το μεγαλύτερο μέρος από την μάζα του ατόμου. Τα σωματίδια αυτά, δηλαδή τα πρωτόνια και τα νετρόνια, συγκρατούνται μέσα στον πυρήνα από πολύ ισχυρές δυνάμεις που ονομάζονται πυρηνικές δυνάμεις. Η ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στον πυρήνα (και που οφείλεται σε αυτές τις δυνάμεις), ονομάζεται πυρηνική ενέργεια.



Εικόνα 4.1: Πυρηνικό εργοστάσιο τύπου GCR

4.2.1 Πυρηνική αντίδραση

Πυρηνική αντίδραση ονομάζεται η διαδικασία οποιασδήποτε μετατροπής των πυρήνων των ατόμων ενός στοιχείου, που συμβαίνει κυρίως μέσα σε ειδικό χώρο αντιδραστήρα ή που μπορεί να συμβεί και εκτός (πυρηνικά όπλα). Η αντίδραση αυτή συμβαίνει μεταξύ του πυρήνα (ενός ατόμου) και ενός σωματιδίου -

βλήματος που εισέρχεται σ' αυτό από την οποία και προκύπτει μετάπτωση του στοιχείου με διαφορετικό ατομικό πυρήνα (μεταστοιχείωση). Οι πυρηνικές αντιδράσεις διακρίνονται σε τρία είδη: στην πυρηνική σχάση, την πυρηνική σύντηξη και την ραδιενεργός διάσπαση

Στις πυρηνικές αντιδράσεις οι πυρήνες των ατόμων είτε διασπώνται, οπότε γίνεται λόγος για πυρηνική σχάση, είτε συνενώνονται, οπότε γίνεται λόγος για πυρηνική σύντηξη, είτε μεταμορφώνονται, συνήθως λόγω βομβαρδισμού από άλλους πυρήνες ή σωματίδια τα νετρόνια. Επειδή τα σωματίδια του πυρήνα συγκρατούνται με ισχυρές ελκτικές δυνάμεις, σε μια πυρηνική αντίδραση εμφανίζεται η απελευθέρωση τεράστιων ποσών ενέργειας.

4.2.2 Μεταστοιχείωση

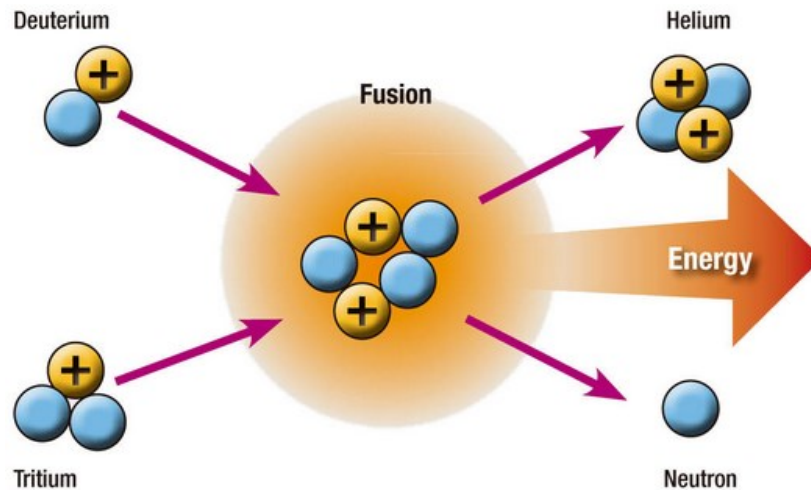
Με τον όρο μεταστοιχείωση στην πυρηνική φυσική χαρακτηρίζεται η μετατροπή ενός χημικού στοιχείου σε κάποιο άλλο στοιχείο. Μια τέτοια μετατροπή στοιχείου μπορεί να γίνει μόνο όταν αλλάξει ο αριθμός πρωτονίων του πυρήνα του ατόμου του, οπότε και διαφοροποιείται ο ατομικός αριθμός του στοιχείου. Οι πυρηνικές αντιδράσεις προκαλούν αυτήν ακριβώς την αλλαγή του αριθμού των πρωτονίων που περιέχει ο πυρήνας ενός στοιχείου. Έτσι προκύπτει ένα διαφορετικό στοιχείο με δικό του πλέον ατομικό αριθμό. Κατά τη μεταστοιχείωση ενδέχεται να δημιουργηθούν και τεχνητά στοιχεία δηλαδή χημικά στοιχεία που όμως δεν υπάρχουν "θεωρητικά" στη φύση. Χαρακτηριστικό τέτοιο παράδειγμα μεταστοιχείωσης αποτελεί η παραγωγή πλουτωνίου με βομβαρδισμό ουρανίου από νετρόνια μέσα στον πυρηνικό αναπαραγωγικό αντιδραστήρα. Κατά κύριο λόγο η μεταστοιχείωση αποτελεί πηγή αξιοποίησης πυρηνικής ενέργειας και είναι κοινό χαρακτηριστικό και των τριών τύπων πυρηνικών αντιδράσεων που συμβαίνει ανεξάρτητα της συνέχειας της αντίδρασης.

4.2.3 Πυρηνική σύντηξη

Πυρηνική σύντηξη είναι η αντίθετη αντίδρασης της πυρηνικής σχάσης στην οποία οι ελαφριοί πυρήνες συνενώνονται σε βαρύτερους μέσω θέρμανσης σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (όπου δημιουργείται πλάσμα) με ταυτόχρονη απελευθέρωση ενέργειας, δηλαδή πρόκειται για εξώθερμη αντίδραση. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως σε πολύ θερμό πλάσμα τα σωματίδια έχουν αρκετή ενέργεια ώστε να ξεκινήσουν αντιδράσεις πυρηνικής σύντηξης. Για παράδειγμα, στον ήλιο εκτελούνται συνεχώς διαδικασίες πυρηνικής σύντηξης όπου άτομα με χαμηλότερη μάζα ενώνονται για να σχηματίσουν βαρύτερα. Οι δύο ελαφρύτεροι πυρήνες πρέπει να φορτιστούν θετικά και να κινηθούν πιο κοντά ο ένας στον άλλο, ξεπερνώντας τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις απώθησης που υπάρχουν. Αυτό απαιτεί μεγάλη ποσότητα θερμοκρασίας και πίεσης. Στον πλανήτη μας, αφού δεν υπάρχει πίεση στον Ήλιο, η απαραίτητη ενέργεια

που απαιτείται για να αντιδράσουν οι πυρήνες και να ξεπεραστούν αυτές οι απωθητικές δυνάμεις επιτυγχάνονται μέσω ενός επιταχυντή σωματιδίων.

Πυρηνική σύντηξη μπορούν να κάνουν μόνον ελαφρά στοιχεία, όπως τα ισότοπα του υδρογόνου και για να θεωρηθεί εξώθερμη αναφερόμαστε σε σύντηξη ελαφρών πυρήνων μέχρι το σίδηρο-56 ή νικέλιο-62. Κατά τη σύντηξη βαρύτερων πυρήνων από αυτούς υπάρχει ενεργειακό έλλειμμα και η αντίδραση γίνεται ενδόθερμη και απορροφά ενέργεια από το περιβάλλον με την μορφή θερμότητας.



Εικόνα 4.2: Απεικόνιση πυρηνικής σύντηξης

Η ενέργεια που απελευθερώνεται, οφείλεται στο γεγονός ότι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο στα αντιδρώντα της σύντηξης (ή καλύτερα το άθροισμα των ενεργειών αυτών), είναι μικρότερη από την ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο που χαρακτηρίζει τον πυρήνα που δημιουργείται. Λόγου χάρη, στην σύντηξη δευτερίου μαζί με τρίτιο έχουμε: ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} = (\nu + 14,1\text{MeV}) + ({}^4\text{He} + 3.5\text{MeV})$ και παράγεται ένας πυρήνας λόγω σύντηξης που είναι το ${}^4\text{He}$. Το οποίο έχει μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο από το άθροισμα των αντίστοιχων ενεργειών σύνδεσης του ${}^2\text{H}$ (δευτερίου) και ${}^3\text{H}$ (τρίτιου). Οπότε με τη δημιουργία των προϊόντων στη διαδικασία της σύντηξης, υπάρχει ένα "περίσσευμα" ενέργειας, που οφείλεται στη διαφορά των ενεργειών σύνδεσης και αυτή απελευθερώνεται στο περιβάλλον με μορφή κινητικής ενέργειας στα παραπροϊόντα (π.χ. σωματίδια β ή νετρίνα ηλεκτρονίου) και με τη μορφή ακτινοβολίας γάμμα.

4.2.4 Ραδιενεργός διάσπαση

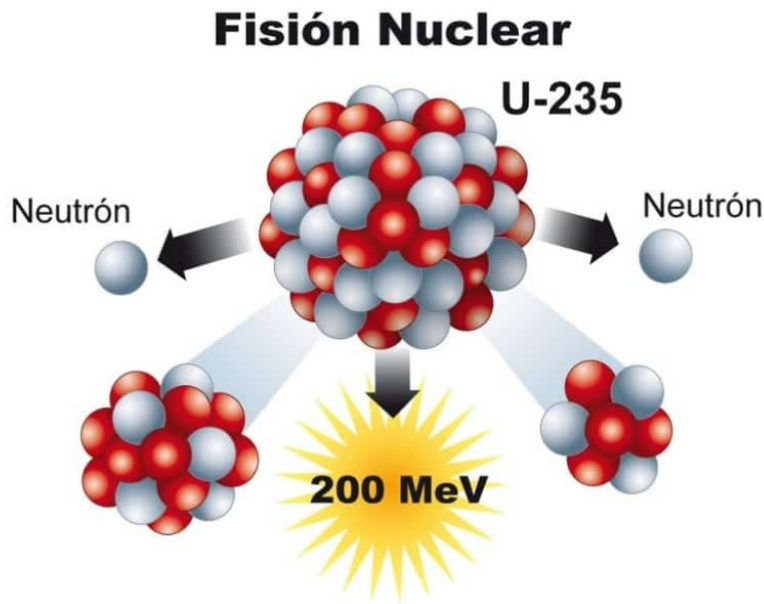
Όπως αναφέρθηκε και στην υποενότητα 3,11, ο πυρήνας του ατόμου είναι ένα κβαντομηχανικό σύστημα νουκλεονίων , που σημαίνει ότι η εσωτερική ενέργεια του πυρήνα δεν μπορεί να έχει οποιαδήποτε τιμή , αντίθετα για κάθε είδος πυρήνα υπάρχουν διακριτές επιτρεπόμενες στάθμες ενέργειας, χαρακτηριστικές του είδους του πυρήνα. Η κατάσταση με τη μικρότερη από επιτρεπόμενες ενέργειες είναι η πιο ευσταθής και για αυτό ονομάζεται **θεμελιώδης κατάσταση**. Οι υπόλοιπες καταστάσεις ονομάζονται και είναι καταστάσεις διέγερσης, εφόσον αργά ή γρήγορα, με κάποιο τρόπο, ο πυρήνας θα μεταβεί στη θεμελιώδη του κατάσταση ελευθερώνοντας την περίσσεια ενέργεια. Σχετικά μακρόβιες καταστάσεις διέγερσης ονομάζονται ισομερείς καταστάσεις.

Πολλοί από τους φυσικούς πυρήνες είναι ασταθής, δηλαδή χωρίς καμία εξωτερική διέγερση , είτε μετατρέπονται σε κάποιο άλλο πυρήνα εκπέμποντας σωματίδια , η κάποια νουκλεόνια τους μεταβαίνουν από κάποια στάθμη διέγερσης σε κάποια άλλη χαμηλότερη εκπέμποντας φωτόνια. Το φαινόμενο αυτό το ονομάζουμε ραδιενεργό διάσπαση του ασθενούς πυρήνα, όπου ο αρχικός διασπώμενος πυρήνας ονομάζεται μητρικός ενώ ο τελικός πυρήνας που προκύπτει από την διάσπαση λέγεται θυγατρικός.

Δηλαδή, η ραδιενεργός διάσπαση είναι η διαδικασία στην οποία παράγεται ένας νέος πυρήνας που μπορεί να είναι σταθερός ή επίσης ραδιενεργός. Αν είναι ραδιενεργός, τότε αναφέρεται σε αλυσίδα ραδιενεργών διασπάσεων η οποία τερματίζεται αργά ή γρήγορα σε σταθερό πυρήνα. Η ταχύτητα (ρυθμός) μιας ραδιενεργού διασπάσεως εξαρτάται από την δομή του κάθε πυρήνα.

4.2.5.1 Πυρηνική σχάση

Πυρηνική σχάση ή αλλιώς πυρηνική διάσπαση, ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία ένας αντιδραστήρας εκτοξεύει ένα νετρόνιο σε έναν ασταθή ατομικό πυρήνα με αποτέλεσμα να διασπάται σε δύο ή περισσότερους (μικρότερους) πυρήνες και σε μερικά παραπροϊόντα σωματίδια (όπως νετρόνια). Τέτοιου είδους σχάση αποτελεί μια περίπτωση μεταστοιχείωσης κατά την οποία παράγονται δύο πυρήνες με συγκρίσιμες μάζες. Στα βαρύτερα στοιχεία η σχάση είναι εξώθερμη αντίδραση αποδίδοντας στο περιβάλλον ενέργεια ως ακτινοβολία γ και ως κινητική ενέργεια των θραυσμάτων. Το μόνο βαρύ στοιχείο που μπορεί να υποστεί πυρηνική σχάση και βρίσκεται στη φύση είναι το ισότοπο του ουρανίου, το **ουράνιο-235**.

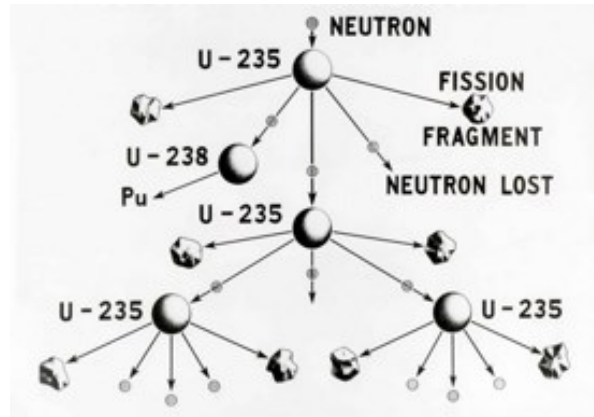


Εικόνα 4.3: Απεικόνιση πυρηνικής σχάσης

Κατά τη διάρκεια τέτοιου είδους διάσπασης, πυρήνες με μεγάλο ατομικό αριθμό, δηλαδή αυτοί που αποτελούνται από πολλά πρωτόνια και νετρόνια (νουκλεόνια), σπάνε σε μικρότερους πυρήνες και αποβάλλουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε διάφορα μήκη κύματος (ορατή και μη ορατή). Η ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μετατρέπεται τελικά σε θερμική ενέργεια. Στην συνέχεια οι νέοι πυρήνες που σχηματίζονται έχουν και αυτοί πυρηνική ενέργεια αποθηκευμένη στο πυρήνα τους και εάν συγκρουστούν με αλλά ελεύθερα νετρόνια, θα μπαίνουν με την σειρά τους σε μια νέα διαδικασία πυρηνικής σχάσης. Σε κάθε νέο κύκλο πυρηνικής σχάσης, η ενέργεια που έχει ο αρχικός πυρήνας θα είναι πάντα μεγαλύτερη από την ενέργεια των νέων πυρήνων που θα σχηματιστούν με την ολοκλήρωση της διαδικασίας.

4.2.5.2 Αλυσιδωτή αντίδραση

Η αντίδραση αυτή είναι η αρχή λειτουργίας της πυρηνικής σχάσης. Κάθε πυρήνας που διασπάται ελευθερώνει τρία νέα νετρόνια, μερικά από τα κινούμενα νετρόνια με την σειρά τους θα συγκρουστούν με άλλα μόρια ουρανίου και θα προκαλέσουν νέες διασπάσεις και τη δημιουργία άλλων ελεύθερων νετρονίων.



Εικόνα 4.4: Απεικόνιση αλυσιδωτής πυρηνικής σχάσης

Αν αυτή η διαδικασία γινόταν χωρίς καμία παρέμβαση (μη ελεγχόμενη πυρηνική σχάση), τα παραγόμενα νετρόνια που κινούνται με πολύ μεγάλη ταχύτητα θα οδηγούσαν σε ανεξέλεγκτη αλυσιδωτή αντίδραση με αποτέλεσμα να αρχίσει μια αυτοσυντηρούμενη αλυσιδωτή αντίδραση. Αν δεν ελεγχθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα ο αριθμός των ελεύθερων νετρονίων, η θερμοκρασία στον αντιδραστήρα θα αυξηθεί τόσο πολύ που θα καταλήξει να προκαλέσει το λιώσιμο του ή ακόμα και σε έκρηξη. Για την αποφυγή τέτοιου είδους ατυχήματος χρησιμοποιούνται οι λεγόμενοι επιβραδυντές προκειμένου να ελεγχθεί ή και να σταματήσει εντελώς η αλυσιδωτή αντίδραση.

Σε κάθε αντίδραση πυρηνικής σχάσης υπάρχει η πιθανότητα ανά δευτερόλεπτο ότι ένα άτομο μπορεί να σχιστεί αυθόρμητα, δηλαδή, χωρίς να παρέμβει κανένας. Αυτό ονομάζεται **αυθόρμητη πυρηνική σχάση**, όταν συμβεί αυτό, δεν είναι απαραίτητο να απορριφθεί ένα νετρόνιο από το εξωτερικό, αλλά σε ορισμένα ισότοπα ουρανίου και πλουτωνίου, που έχουν μια πιο ασταθή ατομική δομή, είναι ικανά αυθόρμητης σχάσης. Για παράδειγμα, **Το πλουτόνιο 239 είναι πιο πιθανό να σχιστεί αυθόρμητα από το ουράνιο 235.**

4.2.5.2 Κρίσιμη μάζα

Σε κάθε πυρηνική σχάση υπάρχει μια κρίσιμη μάζα, η οποία είναι **η ελάχιστη ποσότητα σχάσιμου υλικού** που είναι απαραίτητο για να διατηρηθεί μια αλυσιδωτή αντίδραση και να παραχθεί ενέργεια με συνεχή τρόπο.

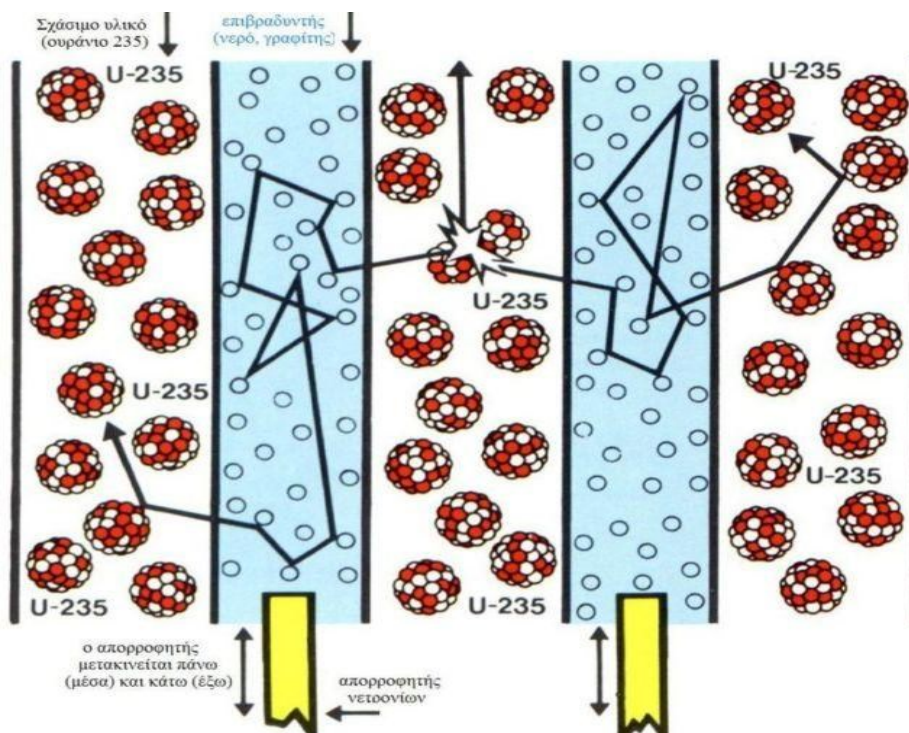
Αν και σε κάθε πυρηνική σχάση παράγονται μεταξύ δύο και τριών νετρονίων, δεν είναι όλα τα νετρόνια που απελευθερώνονται ικανά να συνεχίσουν με μια άλλη αντίδραση σχάσης, αλλά μερικά από αυτά χάνονται. Εάν αυτά τα νετρόνια που απελευθερώνονται από κάθε αντίδραση χάνονται με ρυθμό μεγαλύτερο από αυτό **μπορούν να σχηματιστούν με σχάση**, η αλυσιδωτή αντίδραση δεν θα είναι βιώσιμη **και θα σταματήσει.**

Επομένως, αυτή η κρίσιμη μάζα θα εξαρτηθεί από διάφορους παράγοντες όπως οι φυσικές και πυρηνικές ιδιότητες, η γεωμετρία και η καθαρότητα κάθε ατόμου.

Για να έχει έναν αντιδραστήρα στον οποίο διαφεύγουν τα λιγότερα νετρόνια, απαιτείται μια γεωμετρία σφαίρας, καθώς έχει την ελάχιστη δυνατή επιφάνεια έτσι ώστε **μειώνεται η διαρροή νετρονίων**. Εάν το υλικό που χρησιμοποιούμε για σχάση το συνορεύουμε με έναν ανακλαστήρα νετρονίων, χάνονται πολλά περισσότερα νετρόνια και μειώνεται η κρίσιμη μάζα που απαιτείται. Αυτό εξοικονομεί πρώτες ύλες.

4.2.5.3 Επιβραδυντές

Επιβραδυντές είναι απορροφητικά υλικά που μπορεί να είναι το νερό, ο γραφίτης, το κάδμιο (Cd) ή το βόριο (B). Ο σκοπός τους είναι η "εξουδετέρωση" των νετρονίων που κυκλοφορούν μέσα στον αντιδραστήρα, προκειμένου είτε να πραγματοποιείται σχάση στον επιθυμητό ρυθμό, είτε να σταματήσει εντελώς η σχάση και η παραγωγή νέων νετρονίων. Η ποσότητα του απορροφητικού υλικού καθορίζει την ταχύτητα με την οποία δουλεύει ο αντιδραστήρας. Δηλαδή πχ περισσότερο Κάδμιο σημαίνει λιγότερα ελεύθερα νετρόνια άρα λιγότερες διασπάσεις και τελικά λιγότερο παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα ενώ αντίστροφα λιγότερο Κάδμιο σημαίνει περισσότερα ελεύθερα νετρόνια που οδηγούν σε περισσότερες διασπάσεις και τελικά σε μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.



Εικόνα 4.6: Αλεκόνιση εσωτερικού πυρηνικού αντιδραστήρα

Με αυτό τον τρόπο πετυχαίνουν οι επιστήμονες μία ελεγχόμενη αλυσιδωτή αντίδραση. Αντίθετα, στα πυρηνικά όπλα δεν υπάρχει τέτοιος περιορισμός, οπότε ολόκληρο το πυρηνικό υλικό που περιέχεται αντιδρά ταχύτατα απελευθερώνοντας ενέργεια και ακτινοβολία.

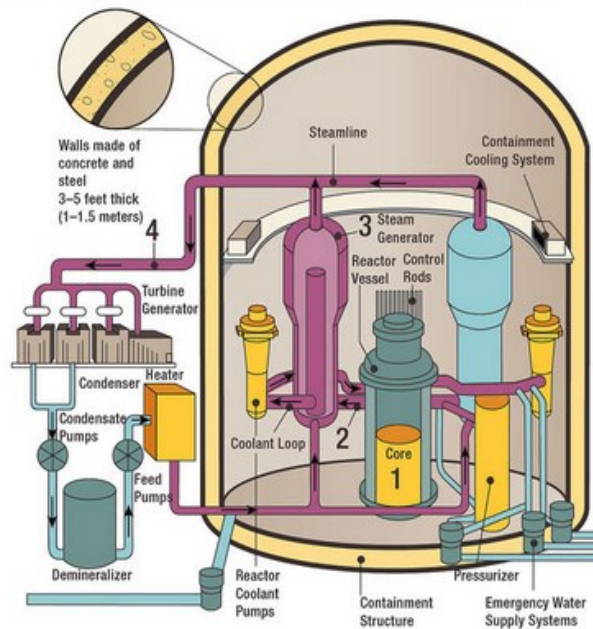
Κεφάλαιο 5

Είδη πυρηνικών αντιδραστήρων

5.1 PWR

Περιγραφή

Ένας αντιδραστήρας υπό πίεση νερού (PWR) είναι ένας τύπος πυρηνικού αντιδραστήρα ελαφρού νερού. Οι PWR αποτελούν τη μεγάλη πλειονότητα των παγκόσμιων πυρηνικών σταθμών (με αξιοσημείωτες εξαιρέσεις το Ηνωμένο Βασίλειο, την Ιαπωνία και τον Καναδά). Σε ένα PWR, το πρωτεύον ψυκτικό υγρό (νερό) αντλείται υπό υψηλή πίεση στον πυρήνα του αντιδραστήρα όπου θερμαίνεται από την ενέργεια που απελευθερώνεται από τη σχάση των ατόμων. Το θερμαινόμενο, υψηλής πίεσης νερό στη συνέχεια ρέει σε μια γεννήτρια ατμού, όπου μεταφέρει τη θερμική του ενέργεια σε νερό χαμηλότερης πίεσης ενός δευτερεύοντος συστήματος όπου παράγεται ατμός. Στη συνέχεια, ο ατμός οδηγεί στροβίλους, οι οποίοι περιστρέφουν μια ηλεκτρική γεννήτρια. Σε αντίθεση με έναν αντιδραστήρα βρασμού νερού (BWR), η πίεση στον βρόχο του πρωτεύοντος ψυκτικού υγρού εμποδίζει το βρασμό του νερού μέσα στον αντιδραστήρα. Όλοι οι αντιδραστήρες ελαφρού νερού χρησιμοποιούν συνηθισμένο νερό τόσο ως ψυκτικό όσο και ως συντονιστή νετρονίων. Οι περισσότεροι χρησιμοποιούν οπουδήποτε από δύο έως τέσσερις κάθετα τοποθετημένες γεννήτριες ατμού. Οι αντιδραστήρες VVER χρησιμοποιούν οριζόντιες γεννήτριες ατμού.



Εικόνα 5.1: Αντιδραστήρας PWR

Σχεδιασμός

Το πυρηνικό καύσιμο στο δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα εμπλέκεται σε μια ελεγχόμενη αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης, η οποία παράγει θερμότητα, θερμαίνοντας το νερό στον βρόχο του πρωτεύοντος ψυκτικού μέσω θερμικής αγωγιμότητας μέσω της επένδυσης καυσίμου. Το ζεστό πρωτεύον ψυκτικό υγρό αντλείται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας που ονομάζεται γεννήτρια ατμού, όπου ρέει μέσα από αρκετές χιλιάδες μικρούς σωλήνες. Η θερμότητα μεταφέρεται μέσω των τοιχωμάτων αυτών των σωλήνων στο δευτερεύον ψυκτικό χαμηλότερης πίεσης που βρίσκεται στην πλευρά του κελύφους του εναλλάκτη όπου το δευτερεύον ψυκτικό εξατμίζεται σε ατμό υπό πίεση. Αυτή η μεταφορά θερμότητας επιτυγχάνεται χωρίς ανάμιξη των δύο ρευστών για να αποτραπεί το δευτερεύον ψυκτικό από το να γίνει ραδιενεργό. Ορισμένες κοινές διατάξεις γεννήτριας ατμού είναι οι σωλήνες u ή οι εναλλάκτες θερμότητας μονής διέλευσης.

Σε έναν πυρηνικό σταθμό, ο ατμός υπό πίεση τροφοδοτείται μέσω ενός ατμοστρόβιλου που οδηγεί μια ηλεκτρική γεννήτρια συνδεδεμένη στο ηλεκτρικό δίκτυο για μετάδοση. Αφού περάσει από τον στρόβιλο, το δευτερεύον ψυκτικό υγρό (μείγμα νερού-ατμού) ψύχεται και συμπυκνώνεται σε συμπυκνωτή. Ο συμπυκνωτής μετατρέπει τον ατμό σε υγρό έτσι ώστε να μπορεί να αντληθεί πίσω στη γεννήτρια ατμού και διατηρεί ένα κενό στην έξοδο του στρόβιλου έτσι ώστε η πτώση πίεσης στον στρόβιλο, και ως εκ τούτου η ενέργεια που εξάγεται από τον ατμό, να μεγιστοποιείται. Πριν τροφοδοτηθεί στη γεννήτρια ατμού, ο συμπυκνωμένος ατμός (αναφέρεται ως νερό τροφοδοσίας) μερικές φορές προθερμαίνεται για να ελαχιστοποιηθεί το θερμικό σοκ.

Ο ατμός που παράγεται έχει και άλλες χρήσεις εκτός από την παραγωγή ενέργειας. Στα πυρηνικά πλοία και τα υποβρύχια, ο ατμός τροφοδοτείται μέσω ενός ατμοστρόβιλου συνδεδεμένου με ένα σύνολο γραναζιών μείωσης ταχύτητας σε έναν άξονα που χρησιμοποιείται για πρόωση. Η άμεση μηχανική δράση με διαστολή του ατμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για καταπέλτες αεροσκάφους που κινούνται με ατμό ή παρόμοιες εφαρμογές. Η τηλεθέρμανση με ατμό χρησιμοποιείται σε ορισμένες χώρες και η άμεση θέρμανση εφαρμόζεται σε εσωτερικές εφαρμογές εγκαταστάσεων.

Δύο πράγματα είναι χαρακτηριστικά για τον αντιδραστήρα υπό πίεση νερού (PWR) σε σύγκριση με άλλους τύπους αντιδραστήρων, ο διαχωρισμός βρόχου ψυκτικού από το σύστημα ατμού και η πίεση μέσα στον βρόχο του πρωτεύοντος ψυκτικού. Σε ένα PWR, υπάρχουν δύο ξεχωριστοί βρόχοι ψυκτικού (πρωτεύοντος και δευτερεύοντος), οι οποίοι είναι και οι δύο γεμάτοι με απιονισμένο νερό. Ένας αντιδραστήρας βραστού νερού, αντίθετα, έχει μόνο έναν βρόχο ψυκτικού, ενώ τα πιο εξωτικά σχέδια, όπως οι αντιδραστήρες αναπαραγωγής, χρησιμοποιούν ουσίες άλλες από το νερό για ψυκτικό και συντονιστή, η οποία είναι σημαντικά υψηλότερη από ό,τι σε άλλους πυρηνικούς αντιδραστήρες και σχεδόν διπλάσια από αυτή ενός

αντιδραστήρα βρασμού νερού (BWR). Ως αποτέλεσμα αυτού, εμφανίζεται μόνο τοπικός βρασμός και ο ατμός θα επανασυμπυκνωθεί αμέσως στο χύμα υγρό. Αντίθετα, σε έναν αντιδραστήρα βραστό νερό το κύριο ψυκτικό υγρό είναι σχεδιασμένο να βράζει.

Ψυκτικό

Το νερό χρησιμοποιείται ως κύριο ψυκτικό σε ένα PWR. Το νερό εισέρχεται από τον πυθμένα του πυρήνα του αντιδραστήρα στους περίπου 548 K (275 °C) και θερμαίνεται καθώς ρέει προς τα πάνω μέσω του πυρήνα του αντιδραστήρα σε θερμοκρασία περίπου 588 K (315 °C). Το νερό παραμένει υγρό παρά την υψηλή θερμοκρασία λόγω της υψηλής πίεσης στον βρόχο του πρωτεύοντος ψυκτικού, συνήθως γύρω στα 15,0 MPa. Το νερό σε ένα PWR δεν μπορεί να υπερβεί τη θερμοκρασία των 647 K (374 °C) ή την πίεση των 22.064 MPa, επειδή αυτά είναι το κρίσιμο σημείο του νερού. Οι αντιδραστήρες υπερκρίσιμου νερού είναι (από το 2022) μόνο μια προτεινόμενη ιδέα στην οποία το ψυκτικό δεν θα έφευγε ποτέ από την υπερκρίσιμη κατάσταση. Ωστόσο, καθώς αυτό απαιτεί ακόμη υψηλότερες πιέσεις από ένα PWR και μπορεί να προκαλέσει προβλήματα διάβρωσης, μέχρι στιγμής δεν έχει κατασκευαστεί τέτοιος αντιδραστήρας.

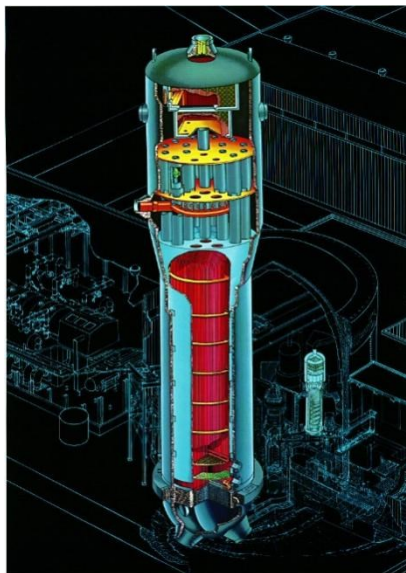
Πιεστικό

Η πίεση στο πρωτεύον κύκλωμα διατηρείται από έναν συμπιεστή, ένα ξεχωριστό δοχείο που συνδέεται με το πρωτεύον κύκλωμα και είναι μερικώς γεμάτο με νερό το οποίο θερμαίνεται στη θερμοκρασία κορεσμού (σημείο βρασμού) για την επιθυμητή πίεση από βυθισμένους ηλεκτρικούς θερμαντήρες. Για να επιτευχθεί πίεση 15,5 MPa, η θερμοκρασία του συμπιεστή διατηρείται στους 345 °C, το οποίο δίνει ένα περιθώριο υπόψυξης (η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του συμπιεστή και της υψηλότερης θερμοκρασίας στον πυρήνα του αντιδραστήρα) 30 °C. Καθώς οι 345 °C είναι το σημείο βρασμού του νερού στα 155 bar, το υγρό νερό βρίσκεται στο όριο μιας αλλαγής φάσης. Οι θερμικές μεταβατικές μεταβολές στο σύστημα ψυκτικού του αντιδραστήρα έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλες διακυμάνσεις στον όγκο υγρού/ατμού του συμπιεστή και ο συνολικός όγκος του συμπιεστή σχεδιάζεται γύρω από την απορρόφηση αυτών των μεταβατικών ουσιών χωρίς να αποκαλυφθούν οι θερμαντήρες ή να αδειάσει η συσκευή πίεσης. Οι μεταβατικές συνθήκες πίεσης στο σύστημα πρωτεύοντος ψυκτικού υγρού εκδηλώνονται ως μεταβατικές θερμοκρασίες στον συμπιεστή και ελέγχονται με τη χρήση αυτόματων θερμαντικών σωμάτων και ψεκασμού νερού, που αυξάνουν και μειώνουν τη θερμοκρασία του συμπιεστή, αντίστοιχα.

Αντλίες

Το ψυκτικό υγρό αντλείται γύρω από το πρωτεύον κύκλωμα με ισχυρές αντλίες. Αυτές οι αντλίες έχουν ρυθμό ~ 100.000 γαλόνια ψυκτικού ανά λεπτό. Αφού συλλέξει θερμότητα καθώς διέρχεται από τον πυρήνα του αντιδραστήρα, το πρωτεύον ψυκτικό μεταφέρει θερμότητα σε μια γεννήτρια ατμού στο νερό σε δευτερεύον κύκλωμα χαμηλότερης πίεσης, εξατμίζοντας το δευτερεύον ψυκτικό σε κορεσμένο ατμό στα

περισσότερα σχέδια 6,2 MPa , 275 °C για χρήση στον ατμοστρόβιλο. Το ψυχθέν πρωτεύον ψυκτικό στη συνέχεια επιστρέφεται στο δοχείο του αντιδραστήρα για να θερμανθεί ξανά.



Εικόνα 5.2: Αντλία αντιδραστήρα PWR

5.2 BWR

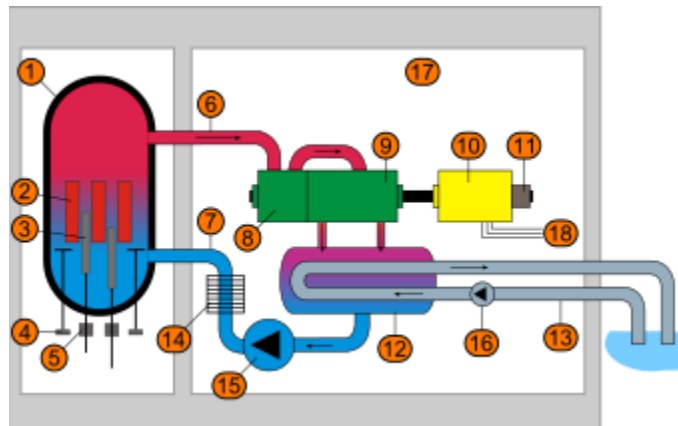
Περιγραφή

Ένας αντιδραστήρας βρασμού νερού (BWR) είναι ένας τύπος πυρηνικού αντιδραστήρα ελαφρού νερού (LWR) που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι ο δεύτερος πιο κοινός τύπος πυρηνικού αντιδραστήρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μετά τον αντιδραστήρα υπό πίεση νερού (PWR), ο οποίος είναι επίσης ένας τύπος πυρηνικού αντιδραστήρα ελαφρού νερού. Η κύρια διαφορά μεταξύ ενός BWR και ενός PWR είναι ότι σε ένα BWR, ο πυρήνας του αντιδραστήρα θερμαίνει το νερό, το οποίο μετατρέπεται σε ατμό και στη συνέχεια κινεί έναν ατμοστρόβιλο. Σε ένα PWR, ο πυρήνας του αντιδραστήρα θερμαίνει νερό, το οποίο δεν βράζει. Αυτό το ζεστό νερό στη συνέχεια ανταλλάσσει θερμότητα με ένα σύστημα χαμηλότερης πίεσης, το οποίο μετατρέπει το νερό σε ατμό που οδηγεί τον στρόβιλο. Το BWR αναπτύχθηκε από το Argonne National Laboratory and General Electric (GE) στα μέσα της δεκαετίας του 1950. Ο κύριος παρών κατασκευαστής είναι η GE Hitachi Nuclear Energy, η οποία ειδικεύεται στο σχεδιασμό και την κατασκευή αυτού του τύπου αντιδραστήρα.

Κατασκευή

Ο αντιδραστήρας BWR αποτελείται από διάφορα μέρη, όπως το δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα (1) το οποίο αποθηκεύει το παραγόμενο ατμό σε μεγάλη πίεση. Μέσα σε αυτό το δοχείο βρίσκονται τα στοιχεία πυρηνικού καυσίμου(2) και οι ράβδοι ελέγχου (3). Κάτω από το δοχείο υπάρχουν οι αντλίες

ανακυκλοφορίας(4) και ο μηχανισμός κίνησης των ράβδων(5). Στο δοχείο επίσης συνδέονται δύο σωλήνες, από τον έναν μπαίνει νερό(7) και από τον άλλον βγαίνει ατμός (6). Ο ατμός διέρχεται σε έναν στρόβιλο, υψηλής (8) και χαμηλής (9) πίεσης , ο οποίος ενώνεται με την γεννήτρια (10). Δίπλα στην γεννήτρια υπάρχει ένα στροφόμετρο (11) ώστε να παραμένει σταθερή η παραγόμενη τάση, η οποία συνδέεται στο ηλεκτρικό δίκτυο (18). Το νερό που χρησιμοποιείται για την ψύξη του αντιδραστήρα αρχικά διέρχεται μέσα από τον ψυκτικό σωλήνα (13) ,τον συμπυκνωτή (12) και τέλος πριν μπει στο δοχείο του αντιδραστήρα περνάει από τον προθερμαντήρα (14). Το νερό ελέγχεται από δύο αντλίες, την αντλία κρύου νερού (16) και την αντλία τροφοδοσίας νερού (15). Τέλος το περίβλημα του αντιδραστήρα είναι φτιαγμένο από σκυρόδεμα (17).



Εικόνα 5.3: Αντιδραστήρας BWR

Πλεονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα ενός BWR αντιδραστήρα σε σχέση με άλλα είδη αντιδραστήρων είναι διάφορα, μερικά παραδείγματα είναι τα εξής:

- Το δοχείο του αντιδραστήρα και τα σχετικά εξαρτήματα λειτουργούν σε ουσιαστικά χαμηλότερη πίεση περίπου 70-75 bars σε σύγκριση με περίπου 155 bars σε ένα PWR.
- Το δοχείο πίεσης υπόκειται σε σημαντικά μικρότερη ακτινοβολία σε σύγκριση με ένα PWR, και έτσι δεν γίνεται τόσο εύθραυστο με την πάροδο του χρόνου.
- Λειτουργεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία πυρηνικού καυσίμου, σε μεγάλο βαθμό λόγω της μεταφοράς θερμότητας από τη λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης, σε αντίθεση με την αισθητή θερμότητα στα PWR.
- Λιγότερα μεγάλα μεταλλικά εξαρτήματα λόγω έλλειψης γεννητριών ατμού και δοχείου πίεσης, καθώς και των σχετικών αντλιών πρωτεύοντος κυκλώματος. Τα παλαιότερα BWR έχουν εξωτερικούς βρόχους ανακυκλοφορίας, αλλά ακόμη και αυτή η σωλήνωση εξαλείφεται στα σύγχρονα BWR, όπως το ABWR. Αυτό κάνει επίσης τα BWR πιο απλά στη λειτουργία.

- Μικρότερος κίνδυνος ρήξης, που προκαλεί απώλεια ψυκτικού υγρού, σε σύγκριση με ένα PWR και χαμηλότερος κίνδυνος βλάβης του πυρήνα σε περίπτωση που συμβεί μια τέτοια ρήξη. Αυτό οφείλεται σε λιγότερους σωλήνες, λιγότερους σωλήνες μεγάλης διαμέτρου, λιγότερες συγκολλήσεις και χωρίς σωλήνες γεννήτριας ατμού.
- Οι αξιολογήσεις του NRC για τα περιοριστικά δυναμικά σφάλματος υποδεικνύουν ότι εάν παρουσιαζόταν ένα τέτοιο σφάλμα, ο μέσος όρος των BWR θα ήταν λιγότερο πιθανό να υποστεί ζημιά στον πυρήνα από τον μέσο όρο των PWR λόγω της στιβαρότητας και του πλεονασμού του συστήματος ψύξης πυρήνα έκτακτης ανάγκης (ECCS).
- Η μέτρηση της στάθμης του νερού στο δοχείο πίεσης είναι η ίδια τόσο για κανονικές όσο και για επείγουσες λειτουργίες, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την εύκολη και διαισθητική αξιολόγηση των συνθηκών έκτακτης ανάγκης.
- Οι BWR δεν χρησιμοποιούν βορικό οξύ για τον έλεγχο της καύσης της σχάσης για να αποφευχθεί η παραγωγή τριτίου (μόλυνση των στροβίλων), οδηγώντας σε μικρότερη πιθανότητα διάβρωσης εντός του δοχείου του αντιδραστήρα και των σωληνώσεων. Η διάβρωση από το βορικό οξύ πρέπει να παρακολουθείται προσεκτικά σε PWR. Έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να προκληθεί διάβρωση της κεφαλής του δοχείου του αντιδραστήρα εάν δεν συντηρείται σωστά. Δεδομένου ότι τα BWR δεν χρησιμοποιούν βορικό οξύ, αυτά τα απρόβλεπτα εξαλείφονται.

Μειονεκτήματα

- Τα BWR απαιτούν πιο σύνθετους υπολογισμούς για τη διαχείριση της κατανάλωσης πυρηνικού καυσίμου κατά τη λειτουργία λόγω της «διφασικής ροής ρευστού (νερού και ατμού)» στο πάνω μέρος του πυρήνα. Αυτό απαιτεί επίσης περισσότερα όργανα στον πυρήνα του αντιδραστήρα.
- Μεγαλύτερο δοχείο πίεσης αντιδραστήρα από ό,τι για PWR παρόμοιας ισχύος, με αντίστοιχα υψηλότερο κόστος, ιδίως για παλαιότερα μοντέλα που εξακολουθούν να χρησιμοποιούν κύρια γεννήτρια ατμού και σχετικές σωληνώσεις.
- Μόλυνση του στροβίλου από προϊόντα ενεργοποίησης βραχείας διάρκειας. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται θωράκιση και έλεγχος πρόσβασης γύρω από τον αμοστρόβιλο κατά τη διάρκεια κανονικών λειτουργιών λόγω των επιπέδων ακτινοβολίας που προέρχονται από τον ατμό που εισέρχεται απευθείας από τον πυρήνα του αντιδραστήρα. Αυτή είναι μια μετρίως μικρή ανησυχία, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της ροής ακτινοβολίας οφείλεται στο Άζωτο-16 (ενεργοποίηση του οξυγόνου στο νερό), το οποίο έχει χρόνο ημιζωής 7,1 δευτερολέπτων, επιτρέποντας την είσοδο στον θάλαμο του στροβίλου μέσα σε λίγα λεπτά μετά το κλείσιμο. Η εκτεταμένη εμπειρία δείχνει ότι η συντήρηση τερματισμού λειτουργίας του στροβίλου, του συμπυκνώματος και των

εξαρτημάτων του νερού τροφοδοσίας ενός BWR μπορεί να πραγματοποιηθεί ουσιαστικά ως μονάδα ορυκτών καυσίμων.

- Αν και ο σημερινός στόλος των BWR λέγεται ότι είναι λιγότερο πιθανό να υποστεί βασική ζημιά σε σχέση με τον σημερινό στόλο PWR (λόγω της αυξημένης ευρωστίας και πλεονασμού του ECCS), έχουν εκφραστεί ανησυχίες σχετικά με ικανότητα συγκράτησης της πίεσης του ενσωματωμένου, μη τροποποιημένου Mark I – ότι μπορεί να είναι ανεπαρκής για να συγκρατήσει τις πιέσεις που δημιουργούνται από ένα περιοριστικό σφάλμα σε συνδυασμό με πλήρη αστοχία ECCS που οδηγεί σε εξαιρετικά σοβαρή βλάβη στον πυρήνα. Σε αυτό το σενάριο διπλής αποτυχίας, που θεωρείται εξαιρετικά απίθανο πριν από τα πυρηνικά ατυχήματα της Fukushima I, ένας μη τροποποιημένος περιορισμός του Mark I μπορεί να επιτρέψει την εμφάνιση κάποιου βαθμού απελευθέρωσης ραδιενέργειας. Αυτό υποτίθεται ότι θα μετριαστεί με την τροποποίηση του περιβλήματος Mark I. Συγκεκριμένα, η προσθήκη ενός συστήματος στοιβας εξόδου αερίου που, εάν η πίεση περιορισμού υπερβαίνει τα κρίσιμα σημεία ρύθμισης, υποτίθεται ότι επιτρέπει την ομαλή εκκένωση των αερίων υπό πίεση αφού τα αέρια περάσουν μέσα από φίλτρα ενεργού άνθρακα σχεδιασμένα να παγιδεύουν ραδιονουκλεΐδια.

Ζητήματα ράβδων ελέγχου

Οι ράβδοι ελέγχου εισάγονται στο κάτω μέρος του δοχείου στους σύγχρονους BWR. Υπάρχουν δύο διαθέσιμες πηγές υδραυλικής ενέργειας που μπορούν να οδηγήσουν τις ράβδους ελέγχου στον πυρήνα για ένα BWR υπό συνθήκες έκτακτης ανάγκης. Υπάρχει ένας ειδικός υδραυλικός συσσωρευτής υψηλής πίεσης και επίσης η πίεση στο εσωτερικό του δοχείου του αντιδραστήρα που είναι διαθέσιμη σε κάθε ράβδο ελέγχου. Είτε ο αποκλειστικός συσσωρευτής (ένας ανά ράβδο) είτε η πίεση του αντιδραστήρα είναι ικανοί να εισάγουν πλήρως κάθε ράβδο. Οι περισσότεροι άλλοι τύποι αντιδραστήρων χρησιμοποιούν ράβδους ελέγχου άνω εισόδου που συγκρατούνται στη θέση απόσυρσης από ηλεκτρομαγνήτες, με αποτέλεσμα να πέσουν μέσα στον αντιδραστήρα λόγω της βαρύτητας εάν χαθεί η ισχύς. Αυτό το πλεονέκτημα αντισταθμίζεται εν μέρει από το γεγονός ότι οι υδραυλικές δυνάμεις παρέχουν πολύ μεγαλύτερες δυνάμεις εισαγωγής της ράβδου από τη βαρύτητα, και κατά συνέπεια, οι ράβδοι ελέγχου BWR είναι πολύ λιγότερο πιθανό να μπλοκάρουν σε μια μερικώς τοποθετημένη θέση λόγω βλάβης στα κανάλια της ράβδου ελέγχου στον πυρήνα σε περίπτωση ζημιάς. Οι ράβδοι ελέγχου κάτω εισόδου επιτρέπουν επίσης τον ανεφοδιασμό χωρίς αφαίρεση των ράβδων ελέγχου και των ηλεκτροκινητήρων, καθώς και τη δοκιμή των συστημάτων ράβδων ελέγχου με ανοιχτό δοχείο πίεσης κατά τον ανεφοδιασμό.

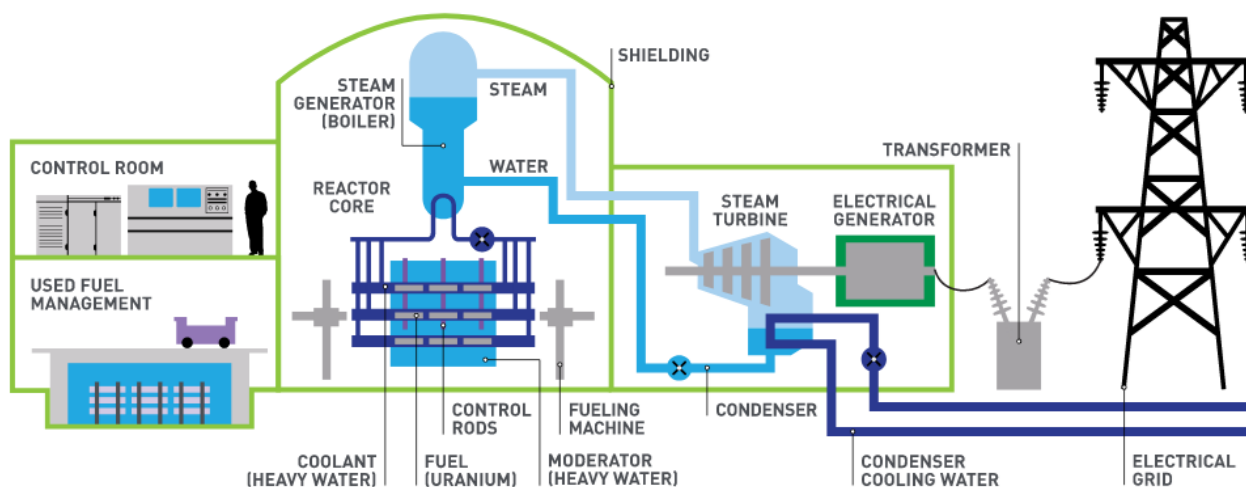
5.3 CANDU

Περιγραφή

Το CANDU (Canada Deuterium Uranium) είναι ένα καναδικό σχέδιο αντιδραστήρα βαρέος νερού υπό πίεση που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το ακρωνύμιο αναφέρεται στον συντονιστή του οξειδίου του δευτερίου (βαρύ νερό) και στη χρήση του φυσικού καυσίμου ουρανίου. Οι αντιδραστήρες CANDU αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά στα τέλη της δεκαετίας του 1950 και του 1960 από μια συνεργασία μεταξύ της Atomic Energy of Canada Limited (AECL), της Επιτροπής Υδροηλεκτρικής Ενέργειας του Οντάριο, της Canadian General Electric και άλλων εταιρειών.

Υπήρξαν δύο κύριοι τύποι αντιδραστήρων CANDU, ο αρχικός σχεδιασμός περίπου 500 MWe που προοριζόταν να χρησιμοποιηθεί σε εγκαταστάσεις πολλαπλών αντιδραστήρων και ο εξορθολογισμένος CANDU 6 στην κατηγορία 600 MWe που έχει σχεδιαστεί για χρήση σε αυτόνομες μονάδες ή σε μικρές εγκαταστάσεις πολλαπλών μονάδων. Οι μονάδες CANDU 6 κατασκευάστηκαν στο Κεμπέκ και το Νιού Μπράνσγουικ, καθώς και στο Πακιστάν, την Αργεντινή, τη Νότια Κορέα, τη Ρουμανία και την Κίνα. Ένα μόνο παράδειγμα σχεδίασης που δεν ήταν CANDU 6 πωλήθηκε στην Ινδία. Ο σχεδιασμός πολλών μονάδων χρησιμοποιήθηκε μόνο στο Οντάριο του Καναδά και αυξήθηκε σε μέγεθος και ισχύ καθώς εγκαταστάθηκαν περισσότερες μονάδες στην επαρχία, φτάνοντας τα 880 MWe στις μονάδες που εγκαταστάθηκαν στον Πυρηνικό Σταθμό Παραγωγής Ντάρλινγκτον. Μια προσπάθεια εξορθολογισμού των μεγαλύτερων μονάδων με τρόπο παρόμοιο με το CANDU 6 οδήγησε στο CANDU 9.

CANDU REACTOR SCHEMATIC



Εικόνα 5.4: Αντιδραστήρας CANDU

Σχεδιασμός και λειτουργία

Η βασική λειτουργία του σχεδιασμού CANDU είναι παρόμοια με άλλους πυρηνικούς αντιδραστήρες. Αντιδράσεις σχάσης στον πυρήνα του αντιδραστήρα θερμαίνουν νερό υπό πίεση σε έναν πρωτεύοντα βρόχο ψύξης. Ένας εναλλάκτης θερμότητας, γνωστός και ως γεννήτρια ατμού, μεταφέρει τη θερμότητα σε έναν δευτερεύοντα βρόχο ψύξης, ο οποίος τροφοδοτεί έναν ατμοστρόβιλο με μια ηλεκτρική γεννήτρια συνδεδεμένη σε αυτόν (για έναν τυπικό θερμοδυναμικό κύκλο Rankine). Ο ατμός εξαγωγής από τους στρόβιλους στη συνέχεια ψύχεται, συμπυκνώνεται και επιστρέφει ως νερό τροφοδοσίας στη γεννήτρια ατμού. Η τελική ψύξη χρησιμοποιεί συχνά νερό ψύξης από μια κοντινή πηγή, όπως μια λίμνη, ένα ποτάμι ή έναν ωκεανό. Τα νεότερα εργοστάσια CANDU, όπως ο Πυρηνικός Σταθμός Παραγωγής Darlington κοντά στο Τορόντο του Οντάριο, χρησιμοποιούν έναν διαχύτη για να διαχέουν το ζεστό νερό εξόδου σε μεγαλύτερο όγκο και να περιορίσουν τις επιπτώσεις στο περιβάλλον. Αν και όλα τα εργοστάσια CANDU μέχρι σήμερα χρησιμοποιούν ψύξη ανοιχτού κύκλου, τα σύγχρονα σχέδια CANDU μπορούν να χρησιμοποιούν πύργους ψύξης.

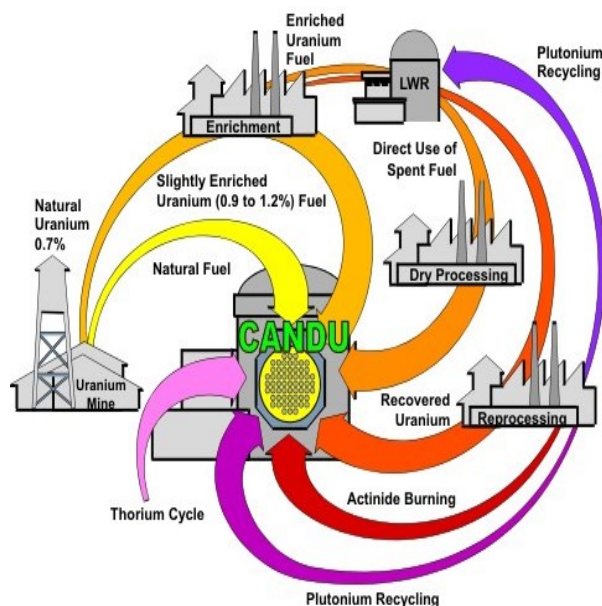
Εκεί που το σχέδιο CANDU διαφέρει από τα περισσότερα άλλα σχέδια είναι στις λεπτομέρειες του σχάσιμου πυρήνα και του πρωτεύοντος βρόχου ψύξης. Το φυσικό ουράνιο αποτελείται από ένα μείγμα κυρίως ουρανίου-238 με μικρές ποσότητες ουρανίου-235 και ίχνη άλλων ισοτόπων. Η σχάση σε αυτά τα στοιχεία απελευθερώνει νετρόνια υψηλής ενέργειας, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν σχάση και σε άλλα άτομα ουρανίου-235 στο καύσιμο. Αυτή η διαδικασία είναι πολύ πιο αποτελεσματική όταν οι ενέργειες νετρονίων είναι πολύ χαμηλότερες από αυτές που απελευθερώνουν φυσικά οι αντιδράσεις. Οι περισσότεροι αντιδραστήρες χρησιμοποιούν κάποια μορφή συντονιστή νετρονίων για να μειώσουν την ενέργεια των νετρονίων, γεγονός που καθιστά την αντίδραση πιο αποτελεσματική. Η ενέργεια που χάνεται από τα νετρόνια κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας μετριασμού θερμαίνει τον συντονιστή και αυτή η θερμότητα εξάγεται για ισχύ.

Τα περισσότερα εμπορικά σχέδια αντιδραστήρων χρησιμοποιούν κανονικό νερό ως συντονιστή. Το νερό απορροφά μερικά από τα νετρόνια, αρκετά ώστε να μην είναι δυνατή η διατήρηση της αντίδρασης σε φυσικό ουράνιο. Το CANDU αντικαθιστά αυτό το «ελαφρύ» νερό με βαρύ. Το επιπλέον νετρόνιο του βαριού νερού μειώνει την ικανότητά του να απορροφά περίσσεια νετρόνια, με αποτέλεσμα καλύτερη οικονομία νετρονίων. Αυτό επιτρέπει στο CANDU να λειτουργεί με μη εμπλουτισμένο φυσικό ουράνιο ή ουράνιο αναμεμειγμένο με μια μεγάλη ποικιλία άλλων υλικών όπως το πλουτόνιο και το θόριο. Αυτός ήταν ο κύριος στόχος του σχεδιασμού CANDU με τη λειτουργία φυσικού ουρανίου το κόστος του εμπλουτισμού μειώνεται. Αυτό παρουσιάζει επίσης ένα πλεονέκτημα όσον αφορά τη διάδοση των πυρηνικών όπλων, καθώς δεν υπάρχει ανάγκη για εγκαταστάσεις εμπλουτισμού, οι οποίες θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν για όπλα.

Κύκλος καυσίμου

Ένας σχεδιασμός βαρέος νερού μπορεί να διατηρήσει μια αλυσιδωτή αντίδραση με χαμηλότερη συγκέντρωση σχάσιμων ατόμων από τους αντιδραστήρες ελαφρού νερού, επιτρέποντάς του να χρησιμοποιεί ορισμένα εναλλακτικά καύσιμα. για παράδειγμα, "ανακτημένο ουράνιο" (RU) από χρησιμοποιημένο καύσιμο LWR. Το CANDU σχεδιάστηκε για φυσικό ουράνιο με μόνο 0,7% ^{235}U , επομένως το επανεπεξεργασμένο ουράνιο με 0,9% ^{235}U είναι ένα συγκριτικά πλούσιο καύσιμο. Αυτό εξάγει επιπλέον 30-40% ενέργεια από το ουράνιο. Ο αντιδραστήρας Qinshan CANDU στην Κίνα χρησιμοποίησε ανακτημένο ουράνιο. Η υπό ανάπτυξη διαδικασία DUPIC (Άμεση χρήση αναλωμένου καυσίμου PWR στο CANDU) μπορεί να το ανακυκλώσει ακόμη και χωρίς επανεπεξεργασία. Το καύσιμο οξειδώνεται στον αέρα, στη συνέχεια σε υδρογόνο ανάγεται για να το σπάσει σε σκόνη, η οποία στη συνέχεια σχηματίζεται σε σφαιρίδια καυσίμου CANDU.

Το CANDU μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα μείγμα οξειδίων ουρανίου και πλουτωνίου (καύσιμο MOX), είτε από αποσυναρμολογημένα πυρηνικά όπλα είτε από επανεπεξεργασμένο καύσιμο αντιδραστήρα. Το μείγμα ισοτόπων σε επανεπεξεργασμένο πλουτώνιο δεν είναι ελκυστικό για όπλα, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο (αντί να είναι απλά πυρηνικά απόβλητα), ενώ η κατανάλωση πλουτωνίου εξαλείφει τον κίνδυνο διάδοσης. Εάν ο στόχος είναι ρητά η χρήση πλουτωνίου ή άλλων ακτινιδών από αναλωθέν καύσιμο, τότε προτείνονται ειδικά καύσιμα αδρανούς μήτρας για να γίνει αυτό πιο αποτελεσματικά από το MOX. Δεδομένου ότι δεν περιέχουν ουράνιο, αυτά τα καύσιμα δεν παράγουν επιπλέον πλουτώνιο.



Εικόνα 5.5: Κύκλος καυσίμου αντιδραστήρα CANDU

Σκοπός χρήσης βαρέος νερού

Το κύριο πλεονέκτημα του μετριαστή βαρέος νερού έναντι του ελαφρού νερού είναι η μειωμένη απορρόφηση των νετρονίων που συντηρούν την αλυσιδωτή αντίδραση, επιτρέποντας χαμηλότερη συγκέντρωση ενεργών ατόμων (μέχρι το σημείο χρήσης μη εμπλουτισμένου φυσικού καυσίμου ουρανίου). Το δευτέριο (βαρύ υδρογόνο) έχει ήδη το επιπλέον νετρόνιο που θα απορροφούσε το ελαφρύ υδρογόνο, μειώνοντας την τάση σύλληψης νετρονίων. Το δευτέριο έχει διπλάσια μάζα από ένα νετρόνιο (έναντι ελαφρού υδρογόνου, που έχει περίπου την ίδια μάζα). Η αναντιστοιχία σημαίνει ότι χρειάζονται περισσότερες συγκρούσεις για τον μετριασμό των νετρονίων, απαιτώντας μεγαλύτερο πάχος συντονιστή μεταξύ των ράβδων καυσίμου. Αυτό αυξάνει το μέγεθος του πυρήνα του αντιδραστήρα και τη διαρροή νετρονίων. Η χαμηλή πυκνότητα ^{235}U στο φυσικό ουράνιο υποδηλώνει επίσης ότι λιγότερο καύσιμο θα καταναλωθεί προτού ο ρυθμός σχάσης πέσει πολύ χαμηλά για να διατηρήσει την κρισιμότητα, επειδή η αναλογία ^{235}U προς προϊόντα σχάσης ^{238}U είναι χαμηλότερη. Στο CANDU το μεγαλύτερο μέρος του συντονιστή βρίσκεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από ό,τι σε άλλα σχέδια, μειώνοντας την εξάπλωση των ταχυτήτων και τη συνολική ταχύτητα των σωματιδίων του συντονιστή. Αυτό σημαίνει ότι τα περισσότερα από τα νετρόνια θα καταλήξουν σε χαμηλότερη ενέργεια και είναι πιο πιθανό να προκαλέσουν σχάση, οπότε το CANDU όχι μόνο «καίει» φυσικό ουράνιο, αλλά το κάνει και πιο αποτελεσματικά. Συνολικά, οι αντιδραστήρες CANDU χρησιμοποιούν 30-40% λιγότερο εξορυσσόμενο ουράνιο από τους αντιδραστήρες ελαφρού νερού ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα του σχεδιασμού βαρέων υδάτων. όχι μόνο απαιτεί λιγότερα καύσιμα, αλλά καθώς το καύσιμο δεν χρειάζεται να εμπλουτιστεί, είναι επίσης πολύ λιγότερο ακριβό.

5.4 VVER

Περιγραφή

Η ρωσική συντομογραφία VVER σημαίνει 'water - water energy reactor' δηλαδή υδρόψυκτος ενεργειακός αντιδραστήρας. Ο σχεδιασμός είναι ένας τύπος αντιδραστήρα υπό πίεση νερού (PWR). Τα κύρια διακριτικά χαρακτηριστικά του VVER σε σύγκριση με άλλα PWR είναι οι οριζόντιες γεννήτριες ατμού, εξαγωγικά συγκροτήματα καυσίμου, καμία διείσδυση πυθμένα στο δοχείο πίεσης και οι πιεστές υψηλής χωρητικότητας που παρέχουν μεγάλο απόθεμα ψυκτικού αντιδραστήρα.

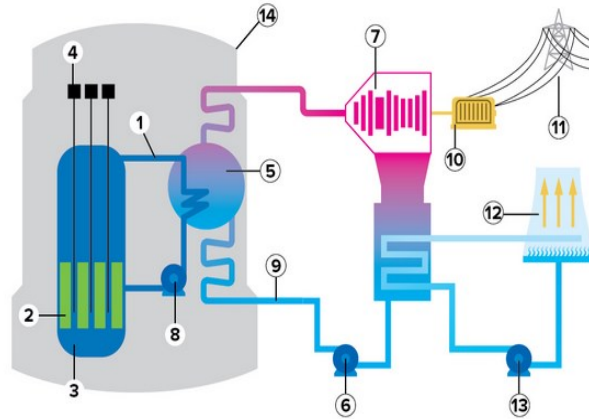
Οι ράβδοι καυσίμου του αντιδραστήρα βυθίζονται πλήρως σε νερό που διατηρείται σε πίεση περίπου 15,7 MPa, έτσι ώστε να μην βράζει στις κανονικές θερμοκρασίες λειτουργίας (220 έως πάνω από 320 °C). Το νερό στον αντιδραστήρα χρησιμεύει τόσο ως ψυκτικό όσο και ως επιβραδυντικός παράγοντας που είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό ασφαλείας. Εάν η κυκλοφορία του ψυκτικού υγρού αποτύχει, η επίδραση μετριασμού νετρονίων του νερού μειώνεται λόγω της αυξημένης θερμότητας που δημιουργεί φυσαλίδες ατμού που δεν μετριάζουν τα νετρόνια, μειώνοντας έτσι την ένταση της αντίδρασης και αντισταθμίζοντας

την απώλεια ψύξης, μια κατάσταση γνωστή ως αρνητικός συντελεστής κενού. Οι μεταγενέστερες εκδόσεις των αντιδραστήρων είναι εγκλωβισμένοι σε τεράστια χαλύβδινα δοχεία πίεσης αντιδραστήρων. Το καύσιμο είναι χαμηλού εμπλουτισμού διοξείδιο ουρανίου (UO₂) ή ισοδύναμο που συμπιέζεται σε πέλλετ και συναρμολογείται σε ράβδους καυσίμου.

Η αντιδραστικότητα ελέγχεται από ράβδους ελέγχου που μπορούν να εισαχθούν στον πάνω μέρος του αντιδραστήρα. Αυτές οι ράβδοι είναι κατασκευασμένες από υλικό απορρόφησης νετρονίων και, ανάλογα με το βάθος εισαγωγής, εμποδίζουν την αλυσιδωτή αντίδραση. Εάν υπάρχει έκτακτη ανάγκη, μπορεί να πραγματοποιηθεί διακοπή της λειτουργίας του αντιδραστήρα με πλήρη εισαγωγή των ράβδων ελέγχου στον πυρήνα.

Σχεδιασμός και λειτουργία

Ένας πυρηνικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής με αντιδραστήρα VVER έχει δύο ξεχωριστά συνυπάρχοντα κυκλώματα νερού. Το πρωτεύον κύκλωμα (1) περιέχει νερό που θερμαίνεται από ράβδους πυρηνικού καυσίμου (2) έως και 239,7 °C στο δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα (3). Η σταθερότητα της αλυσιδωτής αντίδρασης εξασφαλίζεται από το σύστημα ελέγχου και προστασίας του αντιδραστήρα (4). Όλος ο κύριος εξοπλισμός κυκλώματος τοποθετείται μέσα στο κτίριο περιορισμού (14). Το νερό παραμένει στην υγρή του κατάσταση στο πρωτεύον κύκλωμα λόγω υψηλής πίεσης (17,6 MPa). Μόλις θερμανθεί στον αντιδραστήρα, το νερό περνά στη γεννήτρια ατμού (5) – τεράστιοι κύλινδροι με σωλήνες που βρίσκονται μέσα τους. Οι γεννήτριες ατμού (SGs) τύπου VVER τοποθετούνται οριζόντια, τέσσερις ανά νησίδα αντιδραστήρα, εξασφαλίζοντας ακόμη υψηλότερο βαθμό ασφάλειας. Το νερό του πρωτεύοντος κυκλώματος μεταφέρεται σε σωλήνες υψηλής πίεσης, ενώ το νερό του δευτερεύοντος κυκλώματος (9) αντλείται από την αντλία νερού τροφοδοσίας (6) στη γεννήτρια ατμού. Η πίεση του δευτερεύοντος κυκλώματος είναι δύο φορές χαμηλότερη από την πίεση του πρωτεύοντος κυκλώματος – γι' αυτό το νερό του δευτερογενούς κυκλώματος εξατμίζεται, απορροφώντας θερμότητα από τους σωλήνες των πρωτευόντων δοχείων μέσα στα SG. Ο παραγόμενος ατμός μεταφέρεται στον στρόβιλο (7) που περιστρέφεται. Το νερό του πρωτεύοντος κυκλώματος φεύγει από τους σωλήνες SG και στη συνέχεια αντλείται στον αντιδραστήρα μέσω μιας αντλίας ψυκτικού του πρωτεύοντος αντιδραστήρα (8). Ο αμοστρόβιλος περιστρέφει τη γεννήτρια. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται στο σταθμό μεταγωγής (11). Ο ατμός ψύχεται καθώς περνά μέσα από την τουρμπίνα, μετατρέποντας σε καυτό υγρό. Πρέπει να κρυώσει περαιτέρω πριν κατευθυνθεί πίσω στη γεννήτρια ατμού. Αυτό γίνεται είτε σε πύργο ψύξης (12) είτε σε λιμνούλα ψύξης. Μετά από αυτό, η αντλία νερού κυκλοφορίας (13) αντλεί το νερό πίσω στο δευτερεύον κύκλωμα.



Εικόνα 5.6: Αντιδραστήρας VVER

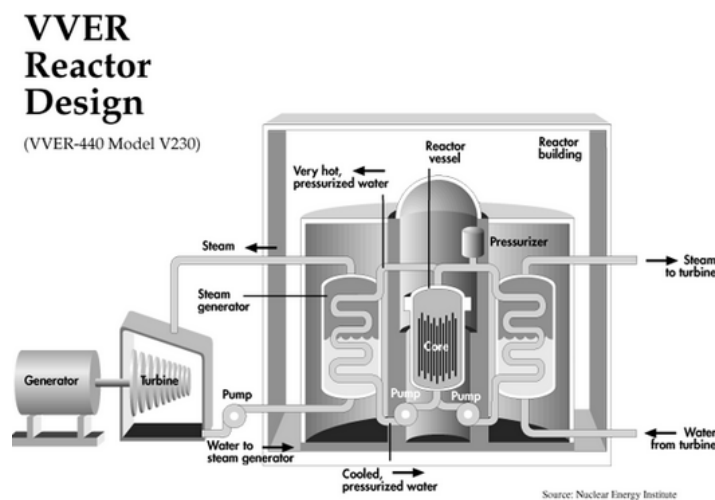
Ένα τυπικό χαρακτηριστικό σχεδιασμού των πυρηνικών αντιδραστήρων είναι τα πολυεπίπεδα φράγματα ασφαλείας που εμποδίζουν τη διαφυγή ραδιενεργού υλικού. Οι αντιδραστήρες VVER έχουν τρία στρώματα:

- Ράβδοι καυσίμου: η επένδυση από ερμητικό κράμα ζirkονίου (Zircaloy) γύρω από τα πυροσυσσωματωμένα κεραμικά σφαιρίδια καυσίμου με οξείδιο του ουρανίου παρέχει ένα φράγμα ανθεκτικό στη θερμότητα και την υψηλή πίεση.
- Τοίχωμα δοχείου πίεσης αντιδραστήρα: ένα τεράστιο χαλύβδινο κέλυφος περικλείει ερμητικά ολόκληρο το συγκρότημα καυσίμου και το πρωτεύον ψυκτικό.
- Κτήριο αντιδραστήρα: ένα κτήριο συγκράτησης από σκυρόδεμα που περικλείει ολόκληρο το πρώτο κύκλωμα είναι αρκετά ισχυρό ώστε να αντιστέκεται στο κύμα πίεσης που θα προκαλούσε μια παραβίαση στο πρώτο κύκλωμα.

Σε σύγκριση με τους αντιδραστήρες RBMK – τον τύπο που εμπλέκεται στην καταστροφή του Τσερνομπίλ – ο VVER χρησιμοποιεί εγγενώς ασφαλέστερο σχεδιασμό, επειδή το ψυκτικό υγρό είναι επίσης ο συντονιστής και από τη φύση του σχεδιασμού του έχει αρνητικό συντελεστή κενού όπως όλα τα PWR. Δεν έχει τον κίνδυνο αυξημένης αντιδραστικότητας και μεγάλης μεταβατικής ισχύος του RBMK με μέτριο γραφίτη σε περίπτωση απώλειας ατυχήματος ψυκτικού υγρού. Οι αντιδραστήρες RBMK κατασκευάστηκαν επίσης χωρίς δομές συγκράτησης για λόγους κόστους λόγω του μεγέθους τους, ο πυρήνας VVER είναι σημαντικά μικρότερος.

5.4.1 VVER-440

Μία από τις παλαιότερες εκδόσεις του τύπου VVER, που παρουσίαζε ορισμένα προβλήματα με τον σχεδιασμό του κτιρίου περιορισμού. Όπως ήταν στην αρχή με τα μοντέλα V-230 και παλαιότερα που δεν είχαν κατασκευαστεί για να αντιστέκονται στη σχεδιαστική βάση του μεγάλου σπασίματος σωλήνων, ο κατασκευαστής πρόσθεσε με το νεότερο μοντέλο V-213 έναν λεγόμενο πύργο συμπυκνωτή Bubble, που – με τον πρόσθετο όγκο του και αριθμός στρωμάτων νερού – έχει ως στόχο να καταστείλει τις δυνάμεις του ατμού που διαφεύγει γρήγορα χωρίς την εμφάνιση διαρροής περιορισμού. Κατά συνέπεια, όλες οι χώρες μέλη με εργοστάσια σχεδιασμού VVER-440 V-230 και παλαιότερες αναγκάστηκαν από τους πολιτικούς της Ευρωπαϊκής Ένωσης να τις κλείσουν οριστικά. Ο πυρηνικός σταθμός Bohunice και ο πυρηνικός σταθμός Kozloduy έπρεπε να κλείσουν με αυτές τις δύο, αντίστοιχα, τέσσερις από τις μονάδες τους. Ενώ στην περίπτωση του πυρηνικού σταθμού Greifswald, η γερμανική ρυθμιστική αρχή είχε ήδη λάβει την ίδια απόφαση μετά την πτώση του τείχους του Βερολίνου.

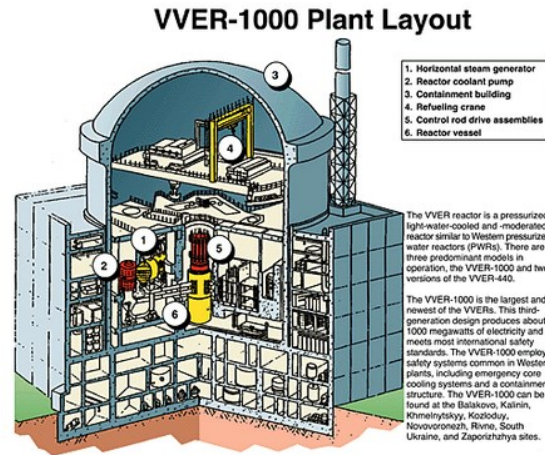


Εικόνα 5.7: Αντιδραστήρας VVER-400

5.4.2 VVER-1000

Όταν κατασκευάστηκε για πρώτη φορά, το σχέδιο VVER προοριζόταν να λειτουργήσει για 35 χρόνια. Μετά από αυτό, θεωρήθηκε απαραίτητη μια σημαντική αναθεώρηση στη μέση διάρκεια ζωής, συμπεριλαμβανομένης της πλήρους αντικατάστασης κρίσιμων εξαρτημάτων, όπως τα κανάλια καυσίμου και ράβδων ελέγχου. Εφόσον οι αντιδραστήρες RBMK καθόρισαν ένα σημαντικό πρόγραμμα αντικατάστασης στα 35 χρόνια, οι σχεδιαστές αποφάσισαν αρχικά ότι αυτό έπρεπε να συμβεί και στον τύπο VVER, αν και είναι πιο στιβαρού σχεδιασμού από τον τύπο RBMK. Τα περισσότερα από τα εργοστάσια VVER της Ρωσίας φθάνουν τώρα και περνούν τα 35 χρόνια. Πιο πρόσφατες μελέτες σχεδιασμού

επέτρεψαν την παράταση της διάρκειας ζωής έως και 50 χρόνια με την αντικατάσταση του εξοπλισμού. Τα νέα VVER θα φέρουν το όνομα με εκτεταμένη διάρκεια ζωής.

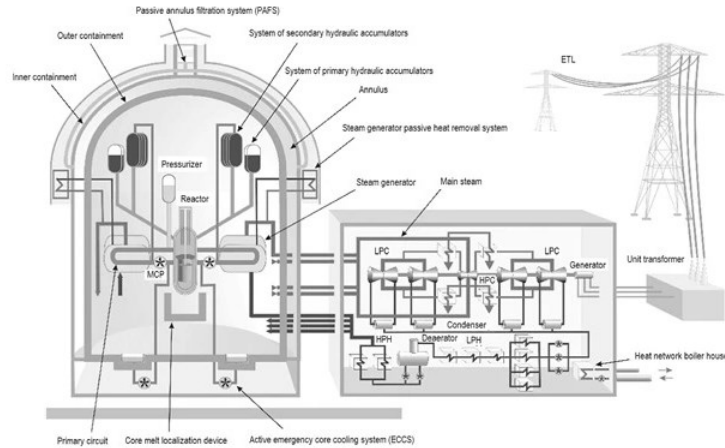


Εικόνα 5.8: Αντιδραστήρας VVER-1000

5.4.3 VVER-1200

Το VVER-1200 (ή NPP-2006 ή AES-2006) είναι μια εξέλιξη του VVER-1000 που προσφέρεται για οικιακή και εξαγωγική χρήση. Ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα έχει βελτιστοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης καυσίμου. Οι προδιαγραφές περιλαμβάνουν κόστος κατασκευής 1.200 \$ ανά kW για μια νύχτα, προγραμματισμένο χρόνο κατασκευής 54 μηνών, διάρκεια ζωής 60 ετών με συντελεστή χωρητικότητας 90% και απαίτηση περίπου 35% λιγότερου επιχειρησιακού προσωπικού από το VVER-1000. Το VVER-1200 έχει μεικτή και καθαρή θερμική απόδοση 37,5% και 34,8%, παράγοντας 1.198 MWe ισχύος.

Οι δύο πρώτες μονάδες έχουν κατασκευαστεί στον πυρηνικό σταθμό του Λένινγκραντ και στον πυρηνικό σταθμό του Νοβοβορόνεζ. Περισσότεροι αντιδραστήρες με VVER-1200/491, όπως ο σχεδιασμός Leningrad σχεδιάζονται και βρίσκονται υπό κατασκευή. Ο τύπος VVER-1200/392 όπως είναι εγκατεστημένος στο Νοβοβορόνεζ έχει επίσης επιλεγεί για τον πυρηνικό σταθμό Seversk, Zentral και South-Urals. Μια τυπική έκδοση αναπτύχθηκε ως VVER-1200/513 και βασίστηκε στο σχέδιο VVER-TOI (VVER-1300/510).



Εικόνα 5.9: Αντιδραστήρας VVER-1200

5.5 RBMK

Ο RBMK είναι μια κατηγορία πυρηνικών αντιδραστήρων ενέργειας με επιβραδυντές από γραφίτη που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από τη Σοβιετική Ένωση. Το όνομα αναφέρεται στο σχεδιασμό του όπου, αντί για ένα μεγάλο δοχείο πίεσης από χάλυβα που περιβάλλει ολόκληρο τον πυρήνα, ο πυρήνας περιβάλλεται από μια κυλινδρική δακτυλιοειδή χαλύβδινη δεξαμενή μέσα σε ένα θησαυροφυλάκιο από σκυρόδεμα και κάθε συγκρότημα καυσίμου περικλείεται σε μια μεμονωμένη διάμετρο 8 cm (εσωτερική) σωλήνα (που ονομάζεται "τεχνολογικό κανάλι"). Τα κανάλια περιέχουν επίσης το ψυκτικό υγρό και περιβάλλονται από γραφίτη.

Ο RBMK είναι ένας αντιδραστήρας πρώιμης γενιάς και ο παλαιότερος εμπορικός σχεδιασμός αντιδραστήρα που βρίσκεται ακόμα σε ευρεία λειτουργία. Ορισμένες πτυχές του αρχικού σχεδιασμού του αντιδραστήρα RBMK, όπως ο μεγάλος θετικός συντελεστής κενού, το «θετικό φαινόμενο scram» των ράβδων ελέγχου και η αστάθεια σε χαμηλά επίπεδα ισχύος, συνέβαλαν στην καταστροφή του Τσερνομπίλ το 1986, στην οποία ένα RBMK αντιμετώπισε ανεξέλεγκτη πυρηνική αλυσιδωτή αντίδραση, που οδηγεί σε έκρηξη ατμού και υδρογόνου, μεγάλη πυρκαγιά και επακόλουθη τήξη του πυρήνα. Η ραδιενέργεια απελευθερώθηκε σε μεγάλο μέρος της Ευρώπης. Η καταστροφή προκάλεσε παγκόσμια έκκληση για τον πλήρη παροπλισμό των αντιδραστήρων. Ωστόσο, εξακολουθεί να υπάρχει σημαντική εξάρτηση από τις εγκαταστάσεις RBMK για ισχύ στη Ρωσία. Τα περισσότερα από τα ελαττώματα στο σχεδιασμό των αντιδραστήρων RBMK-1000 διορθώθηκαν μετά το ατύχημα του Τσερνομπίλ και από τότε δώδεκα αντιδραστήρες λειτουργούν χωρίς σοβαρά περιστατικά για περισσότερο από τριάντα χρόνια. Ενώ εννέα μπλοκ RBMK υπό κατασκευή ακυρώθηκαν μετά την καταστροφή του Τσερνομπίλ, και το τελευταίο από τα τρία εναπομείναντα μπλοκ RBMK στον πυρηνικό σταθμό του Τσερνομπίλ έκλεισε το 2000, από τον Δεκέμβριο του 2021 υπήρχαν ακόμη 8 αντιδραστήρες RBMK και τρεις μικροί γραφίτες EGP-6

μετριασμένοι αντιδραστήρες ελαφρού νερού που λειτουργούν στη Ρωσία, αν και όλοι έχουν εξοπλιστεί εκ των υστέρων με ορισμένες ενημερώσεις ασφαλείας.



Εικόνα 5.10: Κάλυμμα προστασίας κατεστραμμένου αντιδραστήρα στο Τσερνομπίλ

Σχεδιαστικά ελαττώματα και θέματα ασφάλειας

Ως αντιδραστήρας πρώιμης γενιάς βασισμένος στη σοβιετική τεχνολογία της δεκαετίας του 1950, ο σχεδιασμός του RBMK βελτιστοποιήθηκε για ταχύτητα παραγωγής έναντι πλεονασμού. Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε με πολλά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά που αποδείχθηκαν επικίνδυνα ασταθή όταν λειτουργούσαν εκτός των σχεδιαστικών τους προδιαγραφών. Η απόφαση να χρησιμοποιηθεί ένας πυρήνας γραφίτη με φυσικό καύσιμο ουρανίου επέτρεψε τη μαζική παραγωγή ενέργειας με μόνο το ένα τέταρτο της δαπάνης των αντιδραστήρων βαρέος νερού, οι οποίοι ήταν πιο εντατικοί σε συντήρηση και απαιτούσαν μεγάλους όγκους ακριβού βαρέος νερού για την εκκίνηση. Ωστόσο, είχε επίσης απροσδόκητες αρνητικές συνέπειες που δεν θα αποκαλυφθούν πλήρως μέχρι την καταστροφή του Τσερνομπίλ το 1986.

5.5.1 RBMK-1500

Η κύρια διαφορά μεταξύ των αντιδραστήρων RBMK-1000 και RBMK-1500 είναι ότι ο RBMK-1500 ψύχεται με λιγότερο νερό, το οποίο υιοθετεί μια ελικοειδή στρωτή ροή αντί για μια καθαρά στρωτή ροή μέσω των καναλιών. Το RBMK-1500 χρησιμοποιεί επίσης λιγότερο ουράνιο. Η ελικοειδής ροή δημιουργείται από στροβιλιστές στο συγκρότημα καυσίμου και αυξάνει την απομάκρυνση θερμότητας. Λόγω του θετικού συντελεστή κενού του RBMK, ο μειωμένος όγκος νερού ψύξης προκαλεί υψηλότερη

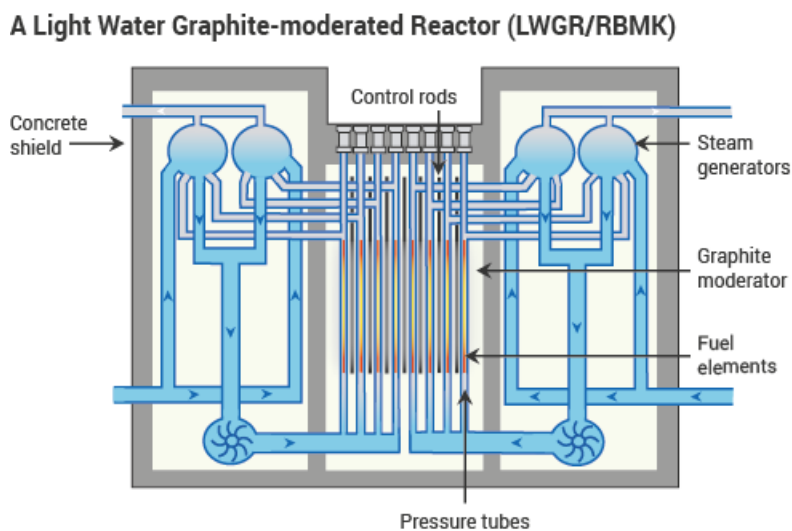
απόδοση ισχύος. Όπως υποδηλώνει το όνομα, σχεδιάστηκε για ηλεκτρική ισχύ 1500 MW. Οι μόνοι αντιδραστήρες αυτού του τύπου και ισχύος εξόδου είναι αυτοί του πυρηνικού σταθμού Ignalina.



Εικόνα 5.11: Κάλυμμα πυρήνα αντιδραστήρα RBMK-1500

5.5.2 RBMK-2000 & RBMK-3600

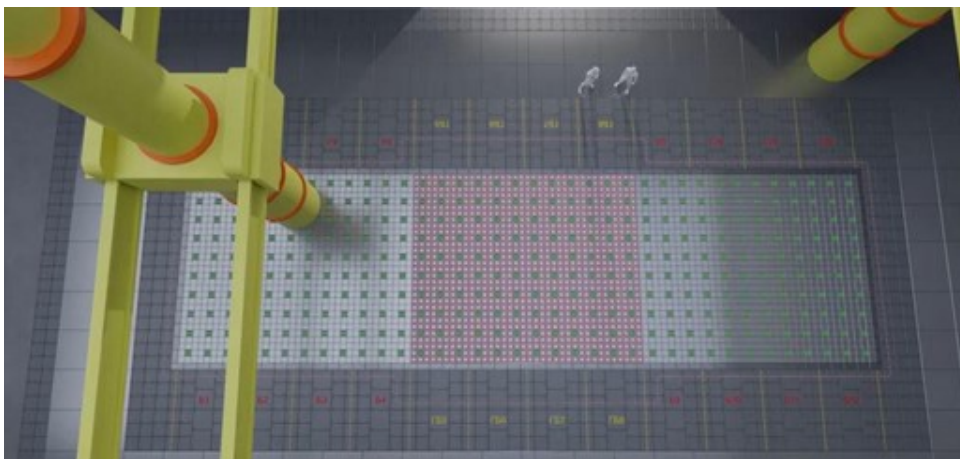
Τα RBMK-2000 και RBMK-3600 σχεδιάστηκαν για να παράγουν 2000 και 3600 MW ηλεκτρικής ισχύος αντίστοιχα. Το RBMK-2000 θα είχε αυξημένη διάμετρο καναλιού και αριθμό ράβδων καυσίμου ανά συγκρότημα καυσίμου, ενώ θα διατηρούσε τις ίδιες διαστάσεις του πυρήνα του αντιδραστήρα με τα RBMK-1000 και RBMK-1500. Το RBMK-3600 πιθανώς παρόμοια με το RBMK-1500 θα είχε προσθέσει στροβιλιστές στο σχέδιο RBMK-2000 για να αυξήσει την απομάκρυνση της θερμότητας.



Εικόνα 5.12: Σχεδιάγραμμα αντιδραστήρα RBMK-2000

5.5.3 RBMKP-2400

Το RBMKP-2400 είναι ορθογώνιο αντί για κυλινδρικό και ήταν ένα αρθρωτό, θεωρητικά απείρως διαμήκη επεκτάσιμο σχέδιο με κατακόρυφους διαχωριστές ατμού, που προοριζόταν να κατασκευαστεί σε τμήματα σε ένα εργοστάσιο για συναρμολόγηση επί τόπου. Σχεδιάστηκε για να έχει ισχύ εξόδου 2400 MWe και υψηλότερη θερμική απόδοση λόγω υπερθέρμανσης ατμού απευθείας στον πυρήνα του αντιδραστήρα σε ειδικά κανάλια καυσίμου με ράβδους καυσίμου με επένδυση από ανοξείδωτο χάλυβα αντί της πιο κοινής επένδυσης Zircaloy, για θερμοκρασία εξόδου ατμού 450°C. Κανένας αντιδραστήρας με αυτήν την ισχύ εξόδου δεν έχει κατασκευαστεί ποτέ, με τον πιο ισχυρό να είναι από το 2018 ο 1750 MWe EPR. Η ανάπτυξη αυτού του σχεδίου ακυρώθηκε μετά την καταστροφή του Τσερνομπίλ. Ένα RBMKP-4800 θα είχε αυξημένο αριθμό καναλιών εξάτμισης και υπερθέρμανσης, αυξάνοντας έτσι την ισχύ εξόδου. Δύο RBMK-2400 είχαν προγραμματιστεί για τον πυρηνικό σταθμό Kostroma



Εικόνα 5.13: Κάλυμμα πυρήνα αντιδραστήρα RBMK-2400

5.6 TRIGA

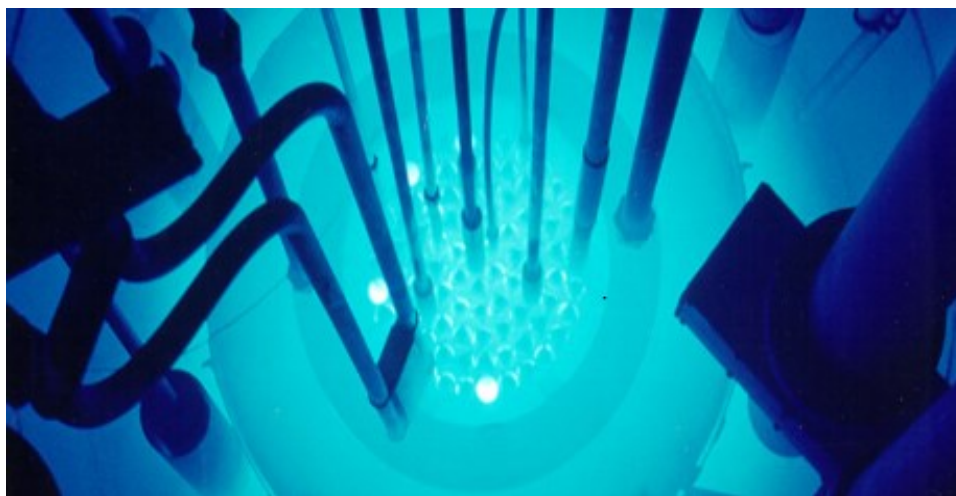
Το TRIGA (Training, Research, Isotopes, General Atomics) είναι μια κατηγορία πυρηνικών ερευνητικών αντιδραστήρων που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από την General Atomics. Η ομάδα σχεδιασμού για το TRIGA, στην οποία περιλαμβάνονταν ο Έντουαρντ Τέλερ, ήταν επικεφαλής του φυσικού Freeman Dyson.

Σχεδιασμός

Το TRIGA είναι ένας αντιδραστήρας πιάσας που μπορεί να εγκατασταθεί χωρίς κτίριο περιορισμού και έχει σχεδιαστεί για έρευνα και δοκιμαστική χρήση από επιστημονικά ιδρύματα και πανεπιστήμια για σκοπούς όπως προπτυχιακή και μεταπτυχιακή εκπαίδευση, ιδιωτική εμπορική έρευνα, μη καταστροφικές δοκιμές και παραγωγή ισοτόπων.

Ο αντιδραστήρας TRIGA χρησιμοποιεί καύσιμο υδρίδιο ζirkονίου ουρανίου (UZrH), το οποίο έχει μεγάλο, άμεσο αρνητικό συντελεστή αντιδραστικότητας θερμοκρασίας καυσίμου, που σημαίνει ότι καθώς

αυξάνεται η θερμοκρασία του πυρήνα, η αντιδραστικότητα μειώνεται γρήγορα. Λόγω αυτού του μοναδικού χαρακτηριστικού, έχει παλμοποιηθεί με ασφάλεια σε ισχύ έως και 22.000 μεγαβάτ. Το υδρογόνο στο καύσιμο δεσμεύεται στην κρυσταλλική δομή του υδριδίου του ουρανίου ζirkονίου με δονητική ενέργεια 0,14 eV. Όταν ο πυρήνας είναι ζεστός, αυτά τα επίπεδα γεμίζουν και μεταφέρουν ενέργεια σε οποιοδήποτε ψυχρότερο νετρόνιο καθιστώντας τα ζεστά και, επομένως, λιγότερο αντιδραστικά. Το TRIGA σχεδιάστηκε αρχικά για να τροφοδοτείται με ουράνιο υψηλής εμπλουτισμού, αλλά το 1978 το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ ξεκίνησε το πρόγραμμα Reduced Enrichment for Research Test Reactors, το οποίο προώθησε τη μετατροπή του αντιδραστήρα σε καύσιμο ουρανίου χαμηλού εμπλουτισμού



Εικόνα 5.14: Αντιδραστήρας TRIGA

Ιστορία

Ο TRIGA αναπτύχθηκε για να είναι ένας αντιδραστήρας που, σύμφωνα με τα λόγια του Έντουαρντ Τέλερ, «θα μπορούσε να δοθεί σε ένα σωρό παιδιά γυμνασίου για να παίξουν μαζί τους χωρίς κανένα φόβο ότι θα πληγωθούν». Ο Τέλερ ήταν επικεφαλής μιας ομάδας νεαρών πυρηνικών φυσικών. στο Σαν Ντιέγκο το καλοκαίρι του 1956 για να σχεδιάσει έναν εγγενώς ασφαλή αντιδραστήρα που δεν θα μπορούσε, λόγω του σχεδιασμού του, να υποστεί κατάρρευση. Ο σχεδιασμός ήταν σε μεγάλο βαθμό πρόταση του Freeman Dyson. Το πρωτότυπο για τον πυρηνικό αντιδραστήρα TRIGA (TRIGA Mark I) ήταν τέθηκε σε λειτουργία στις 3 Μαΐου 1958 στην πανεπιστημιούπολη General Atomics στο Σαν Ντιέγκο και λειτούργησε μέχρι το κλείσιμο το 1997. Έχει χαρακτηριστεί ως πυρηνικό ιστορικό ορόσημο από την Αμερικανική Πυρηνική Εταιρεία. Στη συνέχεια παρήχθησαν άλλες παραλλαγές του σχεδίου TRIGA και εγκαταστάθηκαν συνολικά 33 αντιδραστήρες TRIGA σε διάφορες τοποθεσίες στις Ηνωμένες Πολιτείες. Όσα παραμένουν λειτουργικά συνεχίζουν να αναβαθμίζονται. Άλλοι 33 αντιδραστήρες έχουν εγκατασταθεί σε άλλες χώρες. Πολλές από αυτές τις εγκαταστάσεις προκλήθηκαν από την πολιτική «Atoms for Peace» του Προέδρου των ΗΠΑ το

1953, η οποία επεδίωκε να επεκτείνει την πρόσβαση στην πυρηνική φυσική σε χώρες της αμερικανικής σφαίρας επιρροής. Κατά συνέπεια, οι αντιδραστήρες TRIGA μπορούν να βρεθούν σε συνολικά 24 χώρες.

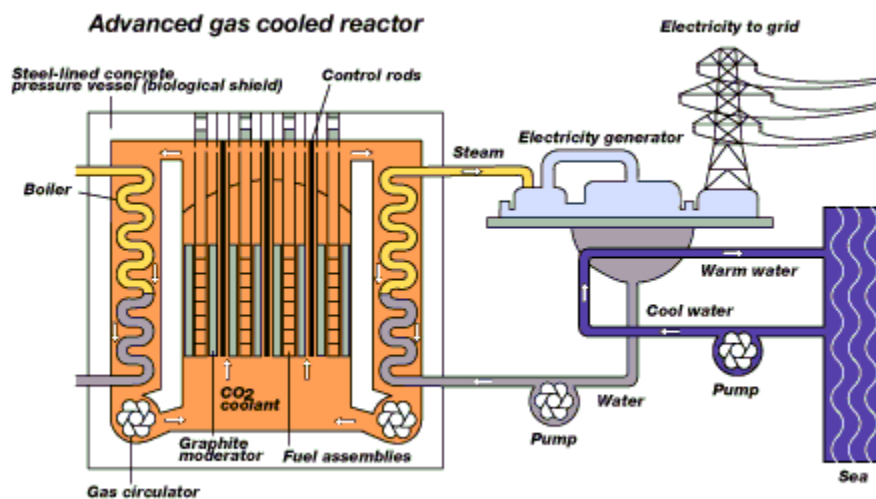
5.7 GCR

Περιγραφή

Ένας αερόψυκτος αντιδραστήρας (GCR) είναι ένας πυρηνικός αντιδραστήρας που χρησιμοποιεί γραφίτη ως μετριαστή νετρονίων και αέριο (διοξείδιο του άνθρακα ή ήλιο) ως ψυκτικό. Αν και υπάρχουν πολλοί άλλοι τύποι αντιδραστήρων που ψύχονται με αέριο, οι όροι GCR και σε μικρότερο βαθμό αερόψυκτος αντιδραστήρας χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα για να αναφερθούν σε αυτόν τον τύπο αντιδραστήρα.

Ένας GCR μπορεί να χρησιμοποιήσει φυσικό ουράνιο ως καύσιμο, επιτρέποντας στις χώρες που το ανέπτυξαν να κατασκευάσουν τα δικά τους καύσιμα χωρίς να βασίζονται σε άλλες χώρες για προμήθειες εμπλουτισμένου ουρανίου, το οποίο κατά την ανάπτυξή τους τη δεκαετία του 1950 ήταν διαθέσιμο μόνο από τις Ηνωμένες Πολιτείες ή της Σοβιετικής Ένωσης. Ο καναδικός αντιδραστήρας CANDU, που χρησιμοποιεί βαρύ νερό ως συντονιστή, σχεδιάστηκε με τον ίδιο στόχο τη χρήση φυσικού καυσίμου ουρανίου για παρόμοιους λόγους.

Ιστορικά θερμικού φάσματος γραφίτη μετριασμένου αερίου αντιδραστήρες ανταγωνίζονται ως επί το πλείστον με τους αντιδραστήρες ελαφρού νερού, που τελικά έχασαν από αυτούς αφού είχαν δει κάποια ανάπτυξη στη Βρετανία και τη Γαλλία. Οι αντιδραστήρες βαρέος νερού μοιράζονται ορισμένες σχεδιαστικές εκτιμήσεις, καθώς και οι δύο μπορούν κατ' αρχήν να χρησιμοποιούν μη εμπλουτισμένο καύσιμο, αλλά απαιτούν διαδικτυακό ανεφοδιασμό για να είναι βιώσιμοι αντιδραστήρες ισχύος.



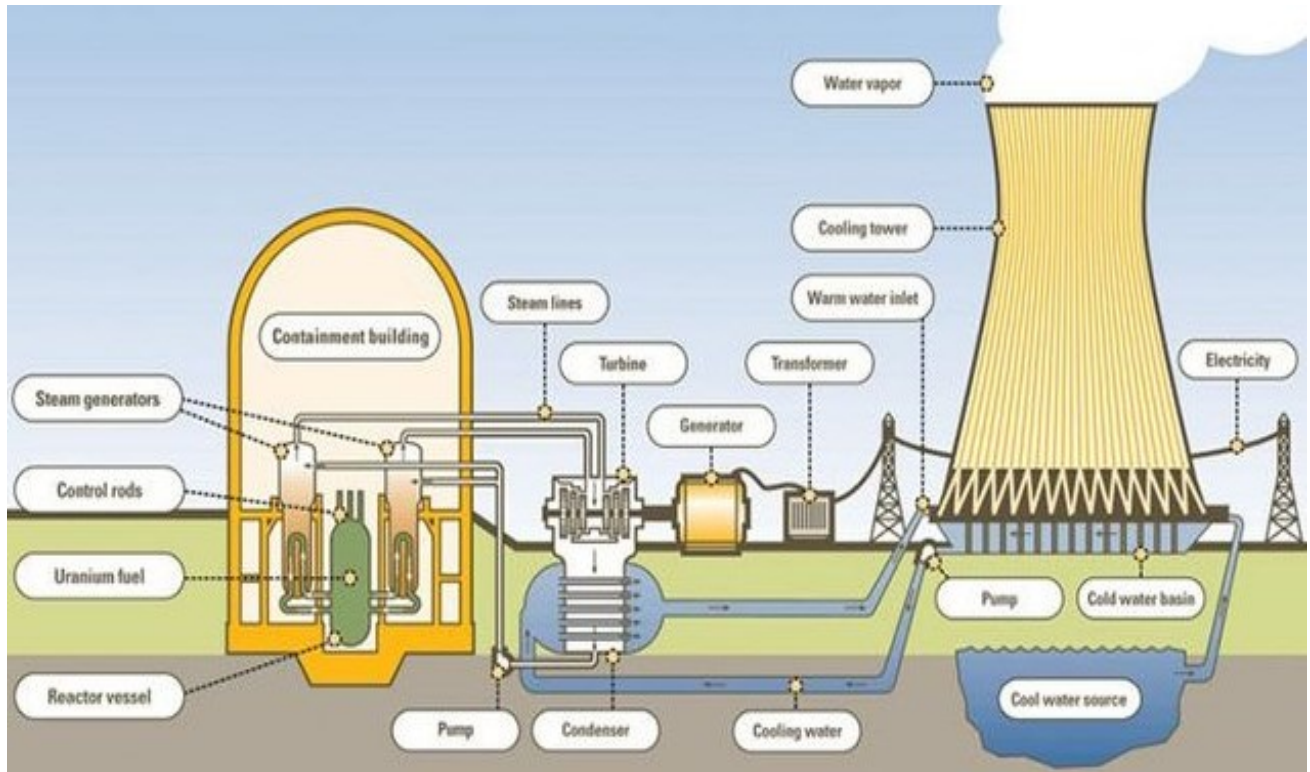
Εικόνα 5.15: Σχεδιάγραμμα αντιδραστήρα GCR

Πλεονεκτήματα

- Δεν έχει συντελεστή κενού αντιδραστικότητας καθώς το ψυκτικό υγρό είναι αέριο σε θερμοκρασία δωματίου και παραμένει αέριο στη θερμοκρασία λειτουργίας.
- Ικανός να χρησιμοποιεί φυσικό (μη εμπλουτισμένο) ουράνιο ως άνθρακα έχει χαμηλότερη διατομή απορρόφησης νετρονίων από το ελαφρύ νερό.
- Μπορεί να επιτευχθεί υψηλή θερμοκρασία εξόδου ψυκτικού υγρού, αυξάνοντας την απόδοση του Carnot.
- Χαμηλότερη πίεση από ό,τι σε αντιδραστήρα νερού υπό πίεση.
- Οι αντιδραστήρες Magnox σχεδιάστηκαν για διπλή χρήση και παράγουν πλουτώνιο ποιότητας ενέργειας και όπλων, μεταγενέστερα σχέδια αντί να εκτρέφουν πλουτώνιο βαθμού αντιδραστήρα.
- Μικρότερος κίνδυνος έκρηξης υδρογόνου καθώς δεν υπάρχει νερό.
- Η υψηλή θερμοκρασία εξόδου ψυκτικού επιτρέπει καλύτερη χρήση για τη θερμότητα διεργασίας, εάν είναι επιθυμητό.
- Προσθέτοντας κανονικό (ελαφρύ) νερό, για παράδειγμα ως ψυκτικό έκτακτης ανάγκης, καταστρέφει την αντίδραση επιτρέποντας καλύτερη ασφάλεια στην αντιμετώπιση απρόβλεπτων ατυχημάτων.

Μειονεκτήματα

- Ογκώδης λόγω της χαμηλότερης ενεργειακής πυκνότητας του φυσικού ουρανίου σε σύγκριση με το εμπλουτισμένο καύσιμο και χαμηλότερη μετριαστική επίδραση του άνθρακα σε σύγκριση με το νερό.
- Η επένδυση καυσίμου Magnox δεν μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλο χρονικό διάστημα σε μια δεξαμενή αναλωμένου καυσίμου καθιστώντας υποχρεωτική την πυρηνική επανεπεξεργασία.
- Η αντίδραση Boudouard μεταξύ του συντονιστή γραφίτη και του ψυκτικού CO₂ μπορεί να παράγει εκρηκτικό και δηλητηριώδες μονοξείδιο του άνθρακα.
- Ένα ατύχημα απώλειας ψυκτικού υγρού, σε αντίθεση με έναν αντιδραστήρα με μετριοπάθεια νερού, δεν προκαλεί από μόνο του σύγκρουση.
- Ο γραφίτης είναι εύφλεκτος και εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες κατά τη λειτουργία - μια πυρκαγιά γραφίτη είναι ένα πιθανό σενάριο ατυχήματος.
- Ο πυρηνικός γραφίτης είναι πιο ακριβός από το ελαφρύ νερό αλλά λιγότερο ακριβός από το βαρύ νερό.



Εικόνα 5.16: Σχεδιάγραμμα αντιδραστήρα GCR

Κεφάλαιο 6

Μέτρα ασφαλείας

6.1 Μέτρα ασφαλείας εργαζομένων σε πυρηνικά εργοστάσια

Η Ευρωπαϊκή Ένωση ορίζει ως «πυρηνική ασφάλεια» την επίτευξη κατάλληλων συνθηκών λειτουργίας, την πρόληψη ατυχημάτων και τον μετριασμό των συνεπειών ατυχημάτων, με αποτέλεσμα την προστασία των εργαζομένων και του πληθυσμού από κινδύνους που προκύπτουν από ιοντίζουσες ακτινοβολίες οι οποίες προέρχονται από πυρηνικές εγκαταστάσεις. Την ευθύνη για την ασφάλεια των εγκαταστάσεων φέρουν κατά κύριο λόγο οι κάτοχοι άδειας λειτουργίας πυρηνικών εγκαταστάσεων, υπό την εποπτεία των εθνικών ρυθμιστικών αρχών.

Εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η χρήση της πυρηνικής ενέργειας για ειρηνικούς σκοπούς διέπεται από τη Συνθήκη Ευρατόμ του 1957, με την οποία ιδρύθηκε η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας και η οποία παρέχει το νομικό πλαίσιο που καθορίζει τις αρμοδιότητες και τις δραστηριότητές της. Πρόσφατες οδηγίες Ευρατόμ θέτουν απαιτήσεις που αφορούν την πυρηνική ασφάλεια, τα ραδιενεργά απόβλητα και τα αναλωμένα καύσιμα, καθώς και τα βασικά πρότυπα ασφαλείας.

Στο πλαίσιο του ελέγχου μας εξετάσαμε πόσο σωστά αξιοποίησε η Επιτροπή τις αρμοδιότητές της, προκειμένου να συμβάλει στην πυρηνική ασφάλεια στην ΕΕ. Αξιολογήσαμε τον τρόπο με τον οποίο παρακολουθεί τη μεταφορά των οδηγιών Ευρατόμ στη νομοθεσία των κρατών μελών. Εξετάσαμε τις ρυθμίσεις περί έγκαιρης ειδοποίησης και ανταλλαγής πληροφοριών σε περίπτωση έκτακτου κινδύνου από ακτινοβολίες, περιστάσεις κατά τις οποίες ο ρόλος της περιορίζεται στη διαχείριση του συστήματος. Τέλος, αναλύσαμε δύο δραστηριότητες στο πλαίσιο των οποίων ο ρόλος της Επιτροπής απορρέει από τη Συνθήκη Ευρατόμ: τη γνωμοδότηση επί σχεδίων επενδύσεων στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας και το δικαίωμα να ελέγχει τη λειτουργία και την αποτελεσματικότητα των εγκαταστάσεων που διαθέτουν τα κράτη μέλη για τον διαρκή έλεγχο της περιεκτικότητας σε ραδιενέργεια της ατμοσφαιράς, των υδάτων και του εδάφους. Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι, συνολικά, η Επιτροπή έχει συμβάλει αρκετά στην πυρηνική ασφάλεια στην ΕΕ. Ωστόσο, χρειάζεται ακόμη να επικαιροποιήσει το νομικό πλαίσιο και τις εσωτερικές κατευθυντήριες οδηγίες της.

Η Επιτροπή έχει βελτιώσει τον τρόπο με τον οποίο παρακολουθεί τη μεταφορά των οδηγιών Ευρατόμ στο εθνικό δίκαιο. Ήταν καλύτερα προετοιμασμένη στην περίπτωση των δύο τελευταίων οδηγιών (της τροποποιημένης οδηγίας για την πυρηνική ασφάλεια και της οδηγίας για τα βασικά πρότυπα ασφαλείας) από ό,τι στην περίπτωση της παλαιότερης οδηγίας για τα ραδιενεργά απόβλητα και τα αναλωμένα καύσιμα. Κατά το διάστημα που καλύπτει ο έλεγχός μας, η Επιτροπή χρησιμοποίησε το αποτέλεσμα των αξιολογήσεων από ομότιμους ως πηγή πληροφοριών για την αξιολόγηση της συμμόρφωσης ενός κράτους μέλους με τις οδηγίες Ευρατόμ. Αφού ολοκληρωθούν αυτοί οι έλεγχοι μεταφοράς και συμφωνίας, η

Επιτροπή θα εξακολουθήσει να είναι υπεύθυνη για την παρακολούθηση των αποτελεσμάτων των αξιολογήσεων από ομότιμους.

Διαπιστώσαμε ότι η Επιτροπή διαχειρίζεται σωστά τις ρυθμίσεις περί ταχείας ανταλλαγής πληροφοριών σε περίπτωση έκτακτου κινδύνου από ακτινοβολίες στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα (ECURIE). Μολονότι θα μπορούσε να βελτιώσει τη συνέχεια που δίδεται στα αντλούμενα διδάγματα, η ανάπτυξη του συστήματος είναι σταθερή, γεγονός που διασφαλίζει ότι αυτό λειτουργεί σωστά και ότι είναι τεχνολογικά επίκαιρο.

Η Επιτροπή εξετάζει τα σχέδια επενδύσεων στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας, προκειμένου να αξιολογεί τη συμβατότητά τους με τη Συνθήκη Ευρατόμ, εκδίδει δε μη δεσμευτική γνώμη απευθυνόμενη στο εκάστοτε εμπλεκόμενο κράτος μέλος. Διαπιστώσαμε ότι το ισχύον πλαίσιο περί γνωμοδοτήσεων δεν ακολουθεί τις τελευταίες νομοθετικές και τεχνολογικές εξελίξεις ή τις εξελίξεις πολιτικής. Παραδείγματος χάριν, ενώ γίνονται επενδύσεις στη μακροπρόθεσμη λειτουργία πολλών αντιδραστήρων για την παράταση της λειτουργίας των πυρηνικών εγκαταστάσεων πέραν της αρχικώς προβλεπόμενης διάρκειας ζωής τους, το ισχύον πλαίσιο δεν είναι σαφές σχετικά με το κατά πόσον αυτές οι επενδύσεις πρέπει να αποτελούν αντικείμενο υποχρεωτικής γνωστοποίησης στην Επιτροπή.

Από τον έλεγχό μας προέκυψαν ορισμένοι περιορισμοί στις διαδικασίες που εφαρμόζει η Επιτροπή για τη γνωμοδότηση επί σχεδίων επενδύσεων στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας και την επιθεώρηση των εγκαταστάσεων των κρατών μελών για τον διαρκή έλεγχο των επιπέδων ραδιενέργειας. Η Επιτροπή δεν διαθέτει αξιόπιστες διαδικασίες που να εξασφαλίζουν την πληρότητα, συνέπεια και συνεκτικότητα αυτών των δραστηριοτήτων.

Οι συστάσεις που διατυπώνουμε επί τη βάση των συμπερασμάτων μας εστιάζουν στον ρόλο της Επιτροπής όσον αφορά τη μεταφορά στο εθνικό δίκαιο των οδηγιών Ευρατόμ, στο πλαίσιο εντός του οποίου γνωμοδοτεί επί των σχεδίων επενδύσεων στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας και, τέλος, στην προσέγγιση που εφαρμόζει για τις γνωμοδοτήσεις της και τις επιθεωρήσεις των εγκαταστάσεων ελέγχου της ραδιενέργειας.

6.2 Πυρηνική ενέργεια και το περιβάλλον

Η προσιτή και καθαρή ενέργεια είναι η πλέον μεγαλύτερη πρόκληση για τις σύγχρονες κοινωνίες. Αποτελεί τον 7ο και πιο κρίσιμο στόχο βιώσιμης ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών για το 2030. Καθαρή ενέργεια σημαίνει χαμηλές ή μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, κάτι που μας οδηγεί στις εξής γενικές εναλλακτικές λύσεις: αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική και πυρηνική ενέργεια.

Η πυρηνική ενέργεια θεωρείται ότι μπορεί να αποτελέσει σημαντικό μέσο για την ενεργειακή μεταστροφή του πλανήτη. Με λίγα λόγια, η θερμότητα που παράγεται από τον πυρηνικό αντιδραστήρα μετατρέπει το νερό σε ατμό, ο οποίος με τη σειρά του κινεί ένα στρόβιλο παράγοντας τελικά ηλεκτρική ενέργεια. Η όλη

διαδικασία πραγματοποιείται χωρίς εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η ενέργεια αυτή μπορεί να καλύψει τεράστιες ενεργειακές ανάγκες. Σε αντίθεση με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούν τον άνεμο, τον ήλιο ή το νερό, η πυρηνική ενέργεια έχει το μεγαλύτερο συντελεστή απόδοσης αφού εγγυάται συνεχή παραγωγή όλο το χρόνο. Σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ ένας πυρηνικός αντιδραστήρας παράγει τόση ενέργεια όση 3 εκατομμύρια φωτοβολταϊκά πάνελ των 320 Watts και όση 430 περίπου ανεμογεννήτριες των 2,3MW. Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας αναμένεται να επεκταθεί λοιπόν τα επόμενα χρόνια.

Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC) εκτιμά μελλοντικά σενάρια για τον διαμοιρασμό της πρωτογενούς ενέργειας μέχρι το 2040 προβλέποντας ακόμα και τριπλασιασμό της παραγωγής πυρηνικής ενέργειας. Τι σημαίνει όμως αυτό για τον άνθρωπο και το περιβάλλον; Οι μεγαλύτερες ανησυχίες αφορούν τη διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων και την πιθανότητα πυρηνικών ατυχημάτων. Είναι γνωστό ότι τα πυρηνικά απόβλητα είναι τοξικά και παραμένουν τοξικά για πολλά χρόνια θέτοντας το ερώτημα για τον αντίκτυπο στην ανθρώπινη και περιβαλλοντική υγεία. Αύξηση των πυρηνικών σταθμών και επέκταση της πυρηνικής ενέργειας έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση των πυρηνικών αποβλήτων και των εκτάσεων γης που αυτά διατίθενται. Ακόμα, τα ατυχήματα του παρελθόντος δεν έχουν αφήσει περιθώριο στον κοινό άνθρωπο να εμπιστευτεί την πυρηνική ενέργεια. Ο φόβος λοιπόν για τις επιπτώσεις που μπορεί να έχει κάποιο καιρικό φαινόμενο ή σεισμός στις εγκαταστάσεις των πυρηνικών αντιδραστήρων έχει εμποδίσει μέχρι τώρα την περαιτέρω ανάπτυξη της πυρηνικής τεχνολογίας. Κάποιες χώρες μάλιστα, με μεγάλη συμμετοχή στην παραγωγή πυρηνικής ενέργειας, όπως η Γαλλία και η Γερμανία έχουν αποφασίσει σταδιακή μείωση της χρήσης της, στρεφόμενες σε ανανεώσιμες μορφές ενέργειας. Βέβαια ο σχεδιασμός τέτοιων κατασκευών μεγάλης σημασίας γίνεται με υψηλούς συντελεστές ασφαλείας για μεγάλη αντοχή έναντι δυνάμεων ανέμου, σεισμού και άλλων καιρικών και μη παραγόντων. Γι' αυτό πρόκειται και για δαπανηρές κατασκευές.

Τελικά, η πυρηνική ενέργεια αδιαμφισβήτητα μπορεί να δώσει λύση στο ενεργειακό πρόβλημα μειώνοντας σημαντικά τη συγκέντρωση CO₂, αλλά με τι ρίσκο; Γιατί εάν κινδυνεύει η ανθρώπινη ζωή αλλά και το ίδιο το περιβάλλον που προσπαθεί να σώσει εξ αρχής, τότε δεν μπορεί να αποτελεί πραγματικά μέρος της βιώσιμης ανάπτυξης. Ο ορισμός αυτής άλλωστε είναι η ικανοποίηση των αναγκών του παρόντος χωρίς την διακινδύνευση του μέλλοντος των επόμενων γενεών. Γι' αυτό κρίνεται πολύ σημαντική η ενημέρωση της ευρύτερης κοινότητας για το μηχανισμό λειτουργίας, τα μέτρα ασφάλειας και γενικότερα το πλαίσιο των πυρηνικών προγραμμάτων. Μόνο γνωρίζοντας σε βάθος θα μπορούσαμε να κρίνουμε και να αποφασίσουμε για το μέλλον του πλανήτη μας αλλά και του ανθρώπου.



Εικόνα 6.1: Πυρηνικό εργοστάσιο τύπου GCR

6.3 Ραδιενεργά κατάλοιπα

Τα δευτερεύοντα προϊόντα του αντιδραστήρα (οι πυρήνες που δημιουργούνται κατά τη διάσπαση) είναι επικίνδυνα για τον άνθρωπο γιατί είναι ραδιενεργά.

Για την αφαίρεση και τη μεταφορά αυτών των παραπροϊόντων στον τόπο αποθήκευσής τους ακολουθείται μια διαδικασία που εξασφαλίζει ότι δεν θα υπάρξουν διαρροές.

Επίσης η αποθήκευσή τους γίνεται με συγκεκριμένη διαδικασία που εξασφαλίζει ότι για όλη τη διάρκεια ζωής των ραδιενεργών αυτών στοιχείων δεν θα υπάρξουν διαρροές



Εικόνα 6.2: Απεικόνιση βαθμίδων ραδιενεργών καταλοίπων

6.3.1 Κατάλοιπα χαμηλού επιπέδου

Κατάλοιπα χαμηλού επιπέδου παράγονται σε νοσοκομεία , βιομηχανίες και κατά την διάρκεια επανεπεξεργασίας πυρηνικών καυσίμων. Περιλαμβάνονται από χαρτιά, πανιά, εργαλεία, ρούχα, φίλτρα και άλλα υλικά , τα οποία περιέχουν μικρά ποσοστά ραδιενέργειας. Υλικά που προέρχονται από οποιαδήποτε ενεργή περιοχή, έχουν ανατεθεί ως LLW (Low-level waste) ως προληπτικό μέτρο ασφάλειας, ακόμη και αν υπάρχει η ελάχιστη πιθανότητα έκθεσης σε ραδιενεργά υλικά. Κατάλοιπα αυτού του επιπέδου δεν εκθέτουν αρκετή ραδιενέργεια ώστε να θεωρηθούν επικίνδυνα και περιλαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό καταλοίπων. Με λίγες εξαιρέσεις όπου απαιτούνται κάποια μέτρα ασφαλείας κατά την διάρκεια χειρισμού και μεταφοράς, τα περισσότερα κατάλοιπα LLW είναι κατάλληλα για ρηχή χερσαία ταφή. Για να μειωθεί ο όγκος τους, συχνά συμπιέζονται ή αποτεφρώνονται πριν από την απόρριψή τους.

6.3.2 Κατάλοιπα μέτριου επιπέδου

Κατάλοιπα μεσαίου επιπέδου ή ILW (Intermediate-level waste) περιέχουν υψηλότερες ποσότητες ραδιενέργειας σε σύγκριση με κατάλοιπα χαμηλού επιπέδου και απαιτούν θωράκιση, αλλά όχι απαραίτητα ψύξη. Συνήθως περιλαμβάνονται από ρητίνες, χημική λάσπη και μεταλλική επένδυση πυρηνικών καυσίμων, καθώς και μολυσμένα υλικά από τον παροπλισμό ενός πυρηνικού αντιδραστήρα. Μπορούν να στερεοποιηθούν σε σκυρόδεμα ή πίσσα ή να αναμιχθούν με πυριτική άμμο και να υαλοποιηθούν για την ασφαλή απόρριψή τους. Κατά γενικό κανόνα, τα βραχύβια απόβλητα (κυρίως μη καύσιμα υλικά από αντιδραστήρες) θάβονται σε ρηχά αποθετήρια, ενώ τα μακρόβια απόβλητα (από την επανεπεξεργασία καυσίμων) αποθηκεύονται σε γεωλογικές αποθήκες.

6.3.3 Κατάλοιπα υψηλού επιπέδου

Κατάλοιπα υψηλού επιπέδου ή HLW (High-level waste) παράγονται από πυρηνικούς αντιδραστήρες και την επανεπεξεργασία πυρηνικού καυσίμου. Ο ακριβής ορισμός του HLW διαφέρει διεθνώς. Αφού μια ράβδος πυρηνικού καυσίμου εξυπηρετήσει έναν κύκλο καυσίμου και αφαιρεθεί από τον πυρήνα, θεωρείται HLW. Οι ράβδοι αναλωμένου καυσίμου περιέχουν κυρίως ουράνιο με προϊόντα σχάσης και διουρανικά στοιχεία που παράγονται στον πυρήνα του αντιδραστήρα. Το αναλωμένο καύσιμο είναι πολύ ραδιενεργό και συχνά ζεστό. Το HLW αντιπροσωπεύει πάνω από το 95% της συνολικής ραδιενέργειας που παράγεται κατά τη διαδικασία παραγωγής πυρηνικής ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά συμβάλλει σε λιγότερο από το 3% του όγκου όλων των ραδιενεργών αποβλήτων που παράγονται παγκόσμια. Για παράδειγμα, το πυρηνικό πρόγραμμα 60 ετών στο Ηνωμένο Βασίλειο μέχρι το 2019 παρήγαγε 2150 m³ HLW.

Τα ραδιενεργά απόβλητα από τις ράβδους αναλωμένου καυσίμου αποτελούνται κυρίως από καίσιο-137 και στρόντιο-90, αλλά μπορεί επίσης να περιλαμβάνει πλουτώνιο, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί διουρανικό απόβλητο. Οι χρόνοι ημιζωής αυτών των ραδιενεργών στοιχείων μπορεί να διαφέρουν αρκετά εξαιρετικά. Ορισμένα στοιχεία, όπως το καίσιο-137 και το στρόντιο-90, έχουν χρόνο ημιζωής περίπου 30 ετών. Εν τω μεταξύ, το πλουτώνιο έχει χρόνο ημιζωής που μπορεί να εκτείνεται έως και 24.000 χρόνια.

Η ποσότητα HLW παγκοσμίως αυξάνεται επί του παρόντος κατά περίπου 12.000 τόνους κάθε χρόνο. Ένας πυρηνικός σταθμός 1000 μεγαβάτ παράγει περίπου 27 τόνους αναλωμένου πυρηνικού καυσίμου (μη επεξεργασμένο) κάθε χρόνο. Για σύγκριση, η ποσότητα τέφρας που παράγεται μόνο από εργοστάσια παραγωγής ενέργειας άνθρακα στις Ηνωμένες Πολιτείες υπολογίζεται σε 130.000.000 τόνους ετησίως και η ιπτάμενη τέφρα υπολογίζεται να απελευθερώσει 100 φορές περισσότερη ακτινοβολία από έναν αντίστοιχο πυρηνικό σταθμό



Εικόνα 6.3: Δραματική απεικόνιση ραδιενεργών καταλοίπων

6.4 Είδη διαρροών που μπορεί να έχει ένας πυρηνικός αντιδραστήρας

Τα ραδιενεργά στοιχεία μπορούν να διαφύγουν από τα πυρηνικά εργοστάσια με δύο τρόπους.

1 - σε μορφή αερίου

Ραδιενεργά αέρια είναι δυνατόν να απελευθερωθούν από το κτήριο του αντιδραστήρα. Στο σύστημα εξαερισμού του κτιρίου υπάρχουν φίλτρα, αλλά υπάρχει η πιθανότητα να περάσουν μέσα από αυτά κάποια ραδιενεργά αέρια. Το σύστημα εξαερισμού ελέγχεται συνεχώς από πολλαπλά μηχανήματα ώστε να εντοπιστούν άμεσα τυχόν διαρροές και να ληφθούν μέτρα.

2 - σε μορφή υγρών αποβλήτων

Τα κτίρια καθαρίζονται συχνά. Τα υγρά με τα οποία καθαρίζονται μπορεί εκτός από την βρώμα να "καθαρίσουν" και ραδιενεργά στοιχεία και έτσι να γίνουν ραδιενεργά. Τα υγρά αυτά περνάνε μια διαδικασία καθαρισμού. Πρακτικά είναι αδύνατον να καθαριστούν 100%, και έτσι ένα μικρό ποσοστό ραδιενεργών στοιχείων παραμένει σε αυτά. Πριν απορριφθούν περνάνε από πολλαπλούς ελέγχους ώστε τα ραδιενεργά στοιχεία που περιέχουν να είναι πολύ κάτω από τα επιτρεπτά όρια για την ανθρώπινη υγεία. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται εξειδικευμένο προσωπικό και εξελιγμένος εξοπλισμός.

Τα επιτρεπτά μέγιστα όρια διαρροών που έχουν τεθεί για τη λειτουργία πυρηνικών αντιδραστήρων, είναι πολύ-πολύ χαμηλά δηλαδή τέτοια που δεν προκαλούν βλάβη στην ανθρώπινη υγεία. Τα όρια αυτά έχουν αποφασιστεί από τον διεθνή οργανισμό ατομικής ενέργειας, που έχει έδρα στη Βιέννη. Ο οργανισμός αυτός ελέγχει και την εφαρμογή των κανονισμών.

Στους σύγχρονους αντιδραστήρες οι διαρροές είναι πολύ πιο κάτω από τα επιτρεπτά μέγιστα αυτά όρια. Εκτός όμως από τους ελέγχους στο κτήριο του αντιδραστήρα, σε μια μεγάλη περιοχή γύρω από τους πυρηνικούς αντιδραστήρες διενεργούνται τακτικοί έλεγχοι στο έδαφος, το χορτάρι, το πόσιμο νερό, τον αέρα, το γάλα, τα ψάρια κ.α. Σε περίπτωση που οι μετρήσεις από εγκατεστημένους μετρητές ξεπεράσουν τα όρια ασφαλείας θα σημάνει συναγερμός ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα.

Κεφάλαιο 7

Ενέργεια

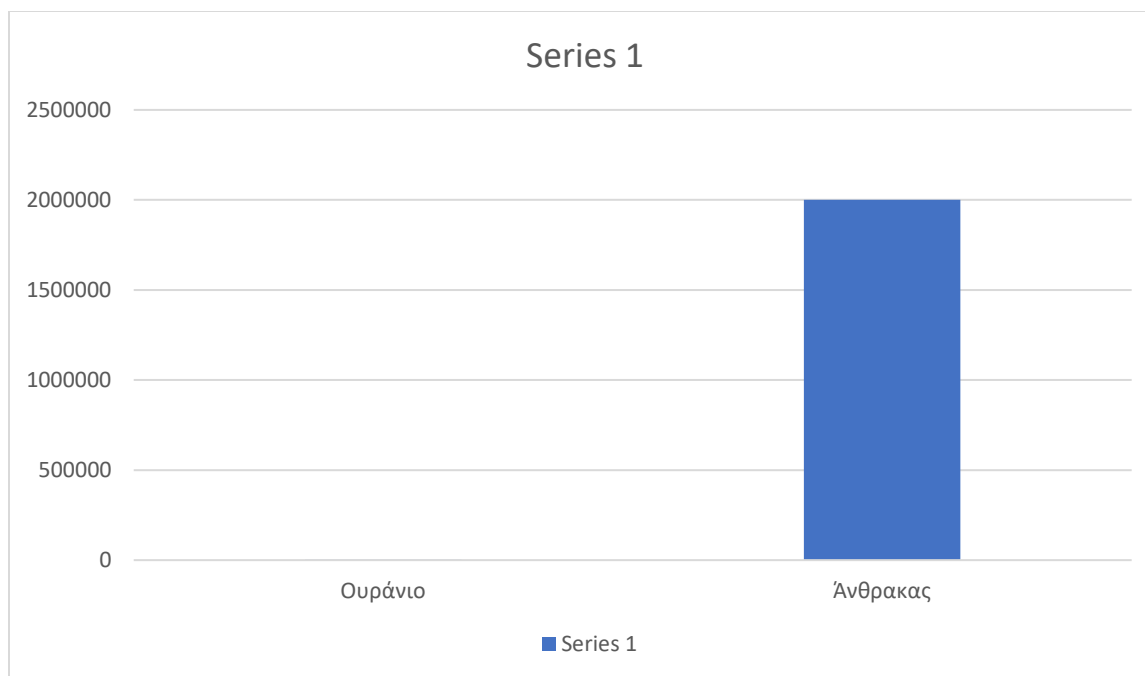
7.1 Απελευθέρωση ενέργειας κατά τη σχάση

Η συνολική απελευθέρωση ενέργειας σε ένα συμβάν σχάσης μπορεί να υπολογιστεί από τη διαφορά στις υπόλοιπες μάζες των αντιδρώντων (π.χ. $^{235}\text{U} + n$) και των τελικών σταθερών γινομένων (π.χ. $^{93}\text{Nb} + ^{141}\text{Pr} + 2n$). Το ενεργειακό ισοδύναμο αυτής της διαφοράς μάζας δίνεται από τη σχέση Αϊνστάιν, $E = mc^2$. Η συνολική απελευθέρωση ενέργειας εξαρτάται από τον διαχωρισμό της μάζας, αλλά ένα τυπικό συμβάν σχάσης θα είχε τη συνολική απελευθέρωση ενέργειας κατανομημένη περίπου ως εξής για τα κύρια συστατικά της θερμικής σχάσης του ουρανίου-235 που προκαλείται από νετρόνια

| Energy component | number per fission | total energy |
|--|--------------------|--------------|
| Kinetic energy of fission fragments | 2 | 170 MeV |
| Kinetic energy of prompt neutrons | 2.5 | 5 |
| Binding energy from capture of prompt neutrons | 2.5 | ~12 |
| Prompt gamma rays | 8 | 8 |
| Total = | | 195 MeV |

Εικόνα 7.1: Υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας από πυρηνική διάσπαση

Αυτή η ενέργεια απελευθερώνεται σε χρονική κλίμακα περίπου 10-12 δευτερολέπτων και ονομάζεται άμεση απελευθέρωση ενέργειας. Μετατρέπεται κατά μεγάλο βαθμό σε θερμότητα μέσα στο εσωτερικό ενός αντιδραστήρα που λειτουργεί και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας. Επίσης, υπάρχει μια καθυστερημένη απελευθέρωση ενέργειας από τη ραδιενεργή αποσύνθεση των προϊόντων σχάσης που ποικίλλει σε χρόνο ημιζωής από κλάσματα ενός δευτερολέπτου έως πολλά χρόνια. Τα βραχύβια είδη διασπώνται στον αντιδραστήρα και η ενέργειά τους προσθέτει στην παραγόμενη θερμότητα. Ωστόσο, τα μακροβιότερα είδη παραμένουν ραδιενεργά και δημιουργούν πρόβλημα στον χειρισμό και τη διάθεση των στοιχείων καυσίμου του αντιδραστήρα όταν πρέπει να αντικατασταθούν. Για κάθε άτομο ουρανίου που διασπάται, ένα ποσοστό περίπου όσο το 0,09% της αρχικής μάζας μετατρέπεται σε ενέργεια. Συνολικά, περίπου 200 MeV ενέργειας ανά σχάση μπορούν να ανακτηθούν για εφαρμογές ισχύος. Εδώ να αναφερθεί ότι όταν καίγεται ένα άτομο πολύ καθαρού άνθρακα απελευθερώνονται 10eV. Δηλαδή 1 άτομο ουρανίου δίνει περίπου 2.000.000 φορές παραπάνω ενέργεια από ένα άτομο άνθρακα.



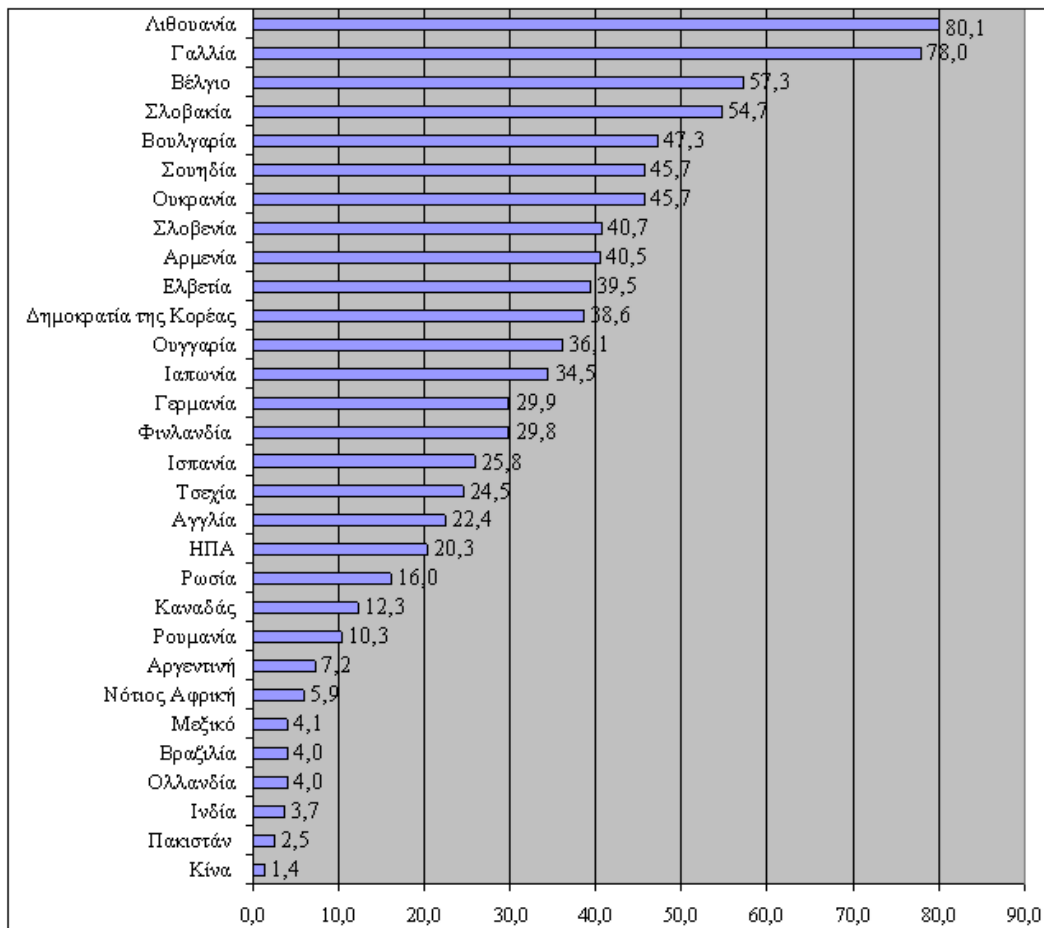
Γραφική 7.1: Γραφική απεικόνιση απελευθερωμένης ενέργειας από τη διάσπαση 1 gr (γραμμάριου) ουρανίου, που αντιστοιχεί με την ενέργεια που απελευθερώνεται από την καύση 2 τόνων λιγνίτη (2.000.000 γραμμαρίων).

7.2 Αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας

Μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας δεν μπορούν να αποθηκευτούν. Σε ένα θερμοηλεκτρικό ή πυρηνικό εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν μπορεί να τεθεί σε λειτουργία και να διακόψει τη λειτουργία του γρήγορα και εύκολα. Ο βαθμός δυσκολίας διαφέρει σημαντικά από τύπο εργοστασίου σε τύπο εργοστασίου. Ένας πυρηνικός αντιδραστήρας για παράδειγμα κλείνει μόνο για συντήρηση. Ένα υδροηλεκτρικό εργοστάσιο όμως, ελέγχεται ευκολότερα με τη σταδιακή διακοπή της ροής του νερού.

Σε μερικές περιοχές του κόσμου έχουν δημιουργηθεί ειδικά υδροηλεκτρικά εργοστάσια, τα οποία τίθενται σε λειτουργία όταν η ενεργειακή ζήτηση είναι μεγάλη και κλείνουν όταν η ενεργειακή ζήτηση μειώνεται. Τα υδροηλεκτρικά αυτά εργοστάσια σχεδιάζονται και κατασκευάζονται έτσι ώστε στην περιοχή να μπορούν να δημιουργηθούν 2 τεχνητές λίμνες, μία σε υψηλότερο επίπεδο από όπου παρέχεται το νερό στο εργοστάσιο όταν αυτό λειτουργεί και μία σε χαμηλότερο επίπεδο όπου μαζεύεται το νερό μετά τη χρήση του. Τις ώρες μειωμένης ζήτησης το επιπλέον ρεύμα που παράγεται π.χ. σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα χρησιμοποιείται για να ανεβάσει το νερό από τη λίμνη που βρίσκεται χαμηλά στη λίμνη που βρίσκεται σε ψηλότερο επίπεδο. Με αυτό τον τρόπο δεν αποθηκεύεται απευθείας η ηλεκτρική ενέργεια αλλά μετατρέπεται η ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική (δυναμική), η οποία και αποθηκεύεται. Την περίοδο αυξημένης ζήτησης το υδροηλεκτρικό εργοστάσιο μετατρέπει πάλι την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.

7.3 Η ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από πυρηνικούς αντιδραστήρες

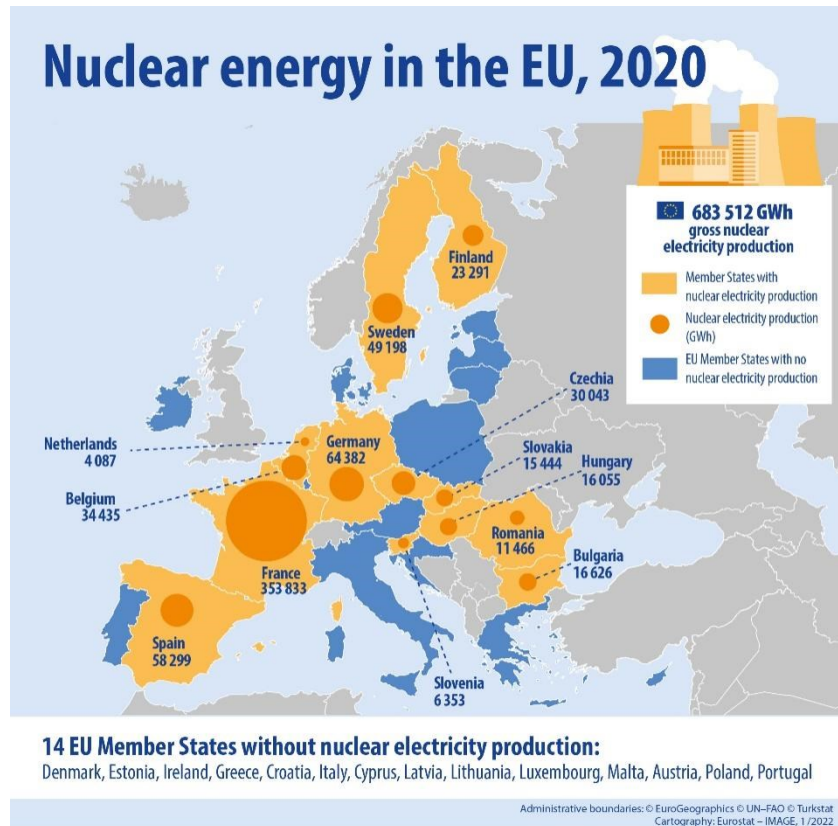


Γραφική 7.2: Ο πίνακας δείχνει το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που προερχόταν από πυρηνικούς αντιδραστήρες σε συγκεκριμένες χώρες στο τέλος του 2002. Πολλές από αυτές τις χώρες εξάγουν ρεύμα σε και σε άλλες.

Το 2020 από την πυρηνική ενέργεια παράγεται το 1/4 του ηλεκτρικού ρεύματος στην Ευρωπαϊκή Ένωση, όπως προκύπτει από τα διαθέσιμα στοιχεία της Eurostat.

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια του 2020, 13 κράτη – μέλη παρήγαγαν 683.512 GWh πυρηνικής ενέργειας, ένα μέγεθος που αντιστοιχεί με το 25% της συνολικής ηλεκτρικής παραγωγής.

Η χώρα με το μεγαλύτερο μερίδιο είναι η Γαλλία, όπου παράγεται το 1/2 (52%) της συνολικής πυρηνικής ενέργειας στην Ευρώπη. Ακολουθούν η Γερμανία (9%), Ισπανία (9%) και Σουηδία (7%).



Εικόνα 7.2: Ευρωπαϊκές χώρες με πυρηνικά εργοστάσια

Αυτά τα τέσσερα κράτη, επομένως, συνεισφέρουν περισσότερα από τα 3/4 της συνολικής ενέργειας που παράγεται στα πυρηνικά εργοστάσια της Ευρώπης.

Σε όλη τη Γηραιά Ήπειρο, στις αρχές του 2020 υπήρχαν 109 πυρηνικοί αντιδραστήρες. Κατά τη διάρκεια του έτους, έκλεισαν τρεις αντιδραστήρες, ενώ αρκετοί ακόμη ανέστειλαν τη λειτουργία τους μέσα στο 2021.

Η πιο εξαρτημένη χώρα από την πυρηνική ενέργεια είναι η Γαλλία με ποσοστό 67%, ενώ έπεται η Σλοβακία με 54%, η Ουγγαρία με 46% και η Βουλγαρία με 41%.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η χώρα μας, όπως και η Ιταλία, η Ισπανία, η Κύπρος, η Ιρλανδία και ορισμένες άλλες χώρες της Ε.Ε., δεν διαθέτουν πυρηνικά εργοστάσια.

Στο μεταξύ, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αναμένεται να συμπεριλάβει, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, την πυρηνική ενέργεια στην κατηγορία των πράσινων μορφών ενέργειας (συνεπάγεται ευνοϊκότερες μορφές χρηματοδότησης), κάτι το οποίο έχει ήδη πυροδοτήσει αντιδράσεις σε αρκετές χώρες.

Η επικείμενη απόφαση της Κομισιόν εντάσσεται στο πλαίσιο της νέας ενεργειακής στρατηγικής, σύμφωνα με την οποία η πυρηνική ενέργεια και το φυσικό αέριο θα αποτελέσουν τις μεταβατικές μορφές ενέργειας στον δρόμο προς την καθολική χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ).

7.4 Είναι οι αντιδράσεις σύντηξης ανανεώσιμη πηγή ενέργειας;

Τα κοιτάσματα ουρανίου στην επιφάνεια της γης, όπως και όλα τα άλλα ορυκτά (μέταλλα, πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.λπ.) εξαντλούνται.

Υπάρχει όμως ένας τύπος πυρηνικού αντιδραστήρα που ονομάζεται **breeder reactor**. Στον αντιδραστήρα αυτό, κάτω από κατάλληλες συνθήκες τα νετρόνια που παράγονται κατά τη διάρκεια της διάσπασης, αντιδρούν με τα ισότοπα του ουρανίου που δεν είναι σχάσιμα και «γενούν» επιπλέον καύσιμο υλικό. Συνήθως το ουράνιο 238 μετατρέπεται σε πλουτόνιο 239.

Αν το κριτήριο για τις «οικολογικές» μορφές ενέργειας είναι η (μη) έκλυση διοξειδίου του άνθρακα, τότε η πυρηνική ενέργεια είναι πράγματι φιλική προς το περιβάλλον, καθώς η παραγωγή της προκαλεί 18 γραμμάρια CO₂ ανά κιλοβατώρα, ενώ το αντίστοιχο ποσό για τον λιγνίτη είναι ...800 γραμμάρια. Όμως το περιβάλλον δεν επιβαρύνεται μόνο από το διοξείδιο του άνθρακα. Είναι προφανείς οι ανυπολόγιστες επιπτώσεις σε περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος. Επιπλέον, η πυρηνική βιομηχανία δεν έχει παρουσιάσει μέχρι σήμερα μία ολοκληρωμένη λύση για την εξουδετέρωση ή ανακύκλωση πυρηνικών αποβλήτων(π.χ. απεμπλουτισμένο ουράνιο), για την ακρίβεια αναβάλλει συνεχώς τη λύση για το απώτερο μέλλον και μέχρι τότε τα απόβλητα ενταφιάζονται σε «προσωρινούς» αποθηκευτικούς χώρους.

Από την πλευρά της η Γερμανία κλείνει τα τελευταία πυρηνικά εργοστάσια το 2022, έχει επενδύσει τεράστια ποσά σε εναλλακτικές πηγές ενέργειας και θέλει να αυξήσει το ποσοστό των ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό μείγμα στο 80% μέχρι το 2030. Επιπλέον, δεν έχει καμία διάθεση να ανοίξει πάλι ένα ζήτημα που επί δεκαετίες είχε διχάσει τη γερμανική κοινωνία. Βέβαια όλα αυτά συμβαίνουν γιατί, όπως επισημαίνει ο αναλυτής της γερμανικής τηλεόρασης (ARD) για ευρωπαϊκά θέματα Ραλφ Σίνα, «μέχρι στιγμής η κυβέρνηση δεν είχε κανέναν δισταγμό να εισάγει πυρηνική ενέργεια από τη Γαλλία. Μόνο το 2020 τα γαλλικά πυρηνικά εργοστάσια συνεισέφεραν 14 δις κιλοβατώρες στο γερμανικό ενεργειακό δίκτυο».

7.5 Άλλα προβλήματα που σχετίζονται με την ενέργεια

Η ασφάλεια για τους εργαζόμενους και το περιβάλλον δεν αποτελεί πρόβλημα μόνο των πυρηνικών εργοστασίων. Προβλήματα στη λειτουργία τους αντιμετωπίζουν και μεγάλες βιομηχανικές μονάδες. Γιατί:

α) οι νόμοι για την προστασία του περιβάλλοντος σε μερικές χώρες όπως για παράδειγμα στις Ευρωπαϊκές είναι πολύ αυστηροί

β) η ενέργεια κοστίζει ακριβά, γιατί οι κανόνες ασφαλείας είναι πολύ αυστηροί και το κόστος ασφαλέστερων εργοστασίων είναι υψηλότερο και

γ) το κόστος εργασίας (αμοιβές εργατών) είναι υψηλό.

Έτσι βιομηχανικές μονάδες μεταφέρθηκαν σε περιοχές που δεν υπάρχουν κανόνες ούτε για την ασφάλεια του περιβάλλοντος (όπως Ταϊβάν, Κίνα, Τουρκία κ.α.) αλλά ούτε και για την ασφάλεια των εργατών. Το κόστος της ενέργειας και της λειτουργίας του εργοστασίου είναι χαμηλό και το προϊόν φτάνει στον καταναλωτή σε χαμηλότερη τιμή.

9 Βιβλιογραφία

- 1) Nielsen, Ralph (2005) "Zirconium and Zirconium Compounds" in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH, Weinheim. doi:10.1002/14356007.a28_543
- 2) "Zirconium". How Products Are Made. Advameg Inc. 2007. Retrieved 2008-03-26.
- 3) Lide, David R., ed. (2007–2008). "Zirconium". CRC Handbook of Chemistry and Physics. Vol. 4. New York: CRC Press. p. 42. ISBN 978-0-8493-0488-0.
- 4) Gillon, Luc (1979). *Le nucléaire en question*, Gembloux Duculot, French edition.
- 5) Harper, Douglas. "zircon". Online Etymology Dictionary.
- 6) Scoullou, Michael J. · Vonkeman, Gerrit H. (2001). *Mercury, Cadmium, Lead: Handbook for Sustainable Heavy Metals Policy and Regulation*. Springer. ISBN 978-1-4020-0224-3.
- 7) «Strontium | Radiation Protection | US EPA». United States Environmental Protection Agency (EPA). 24 Απριλίου 2012. Ανακτήθηκε στις 18 Ιουνίου 2012.
- 8) Απόστολος Πολυζάκης “Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος”
- 9) M. G. Arora & M. Singh (1994). *Nuclear Chemistry*. Anmol Publications. p. 202. ISBN 81-261-1763-X.
- 10) J. Byrne (2011) *Neutrons, Nuclei, and Matter*, Dover Publications, Mineola, NY, p. 259, ISBN 978-0-486-48238-5.
- 11) Marion Brüninghaus. "Nuclear fission". *European Nuclear Society*. Archived from the original on 2013-01-17. Retrieved 2013-01-04.
- 12) "50 Years of Nuclear Energy" (PDF). *International Atomic Energy Agency*. Retrieved 2006-11-09.
- 13) Hill, C. N. (2013). *An atomic empire: a technical history of the rise and fall of the British atomic energy programme*. London: Imperial College Press. ISBN 9781908977434.
- 14) Palfreman, Jon (1997). "Why the French Like Nuclear Energy". *Frontline*. Public Broadcasting Service. Retrieved 25 August 2007.
- 15) Rüdiger, Wolfgang, ed. (1990). *Anti-nuclear Movements: A World Survey of Opposition to Nuclear Energy*. Detroit, MI: Longman Current Affairs. p. 1. ISBN 978-0-8103-9000-3.

Ιστοσελίδες

- Ζικτρόνιο <http://www.madehow.com/Volume-1/Zirconium.html> (τελική επίσκεψη 04/04/2023)
- Πυρηνική ενέργεια: λύση στο περιβαλλοντικό πρόβλημα ή ένα επιπρόσθετο αγκάθι; <https://thesafiablog.com/2019/02/10/analysis-papantonaki-2/> (τελική επίσκεψη 04/04/2023)
- Τι είναι η Πυρηνική σχάση (τελική επίσκεψη 04/04/2023)
https://www.renovablesverdes.com/el/%CF%80%CF%85%CF%81%CE%B7%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CE%B4%CE%B9%CE%AC%CF%83%CF%80%CE%B1%CF%83%CE%B7/#Diferencia_entre_fusion_y_fision
- Quarks <https://www.britannica.com/science/quark> (τελική επίσκεψη 04/04/2023)
- Nuclear Fuel and its Fabrication <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/fuel-fabrication.aspx> (τελική επίσκεψη 04/04/2023)
- *"The Discovery of Nuclear Fission"*. www.mpic.de. (τελική επίσκεψη 04/04/2023)
- Η δομή του ατόμου <https://www.chem-net.gr/the-atom/> (τελική επίσκεψη 04/04/2023)
- Πυρηνική σύντηξη: Τι είναι και τι κατάφεραν οι επιστήμονες - Ανάλυση Reuters <https://www.ieidiseis.gr/energeia/176561/pyriniki-syntiksi-ti-einai-kai-ti-kataferan-oi-epistimones-analysi-reuters> (τελική επίσκεψη 04/04/2023)
- <https://www.garyfallidou.org/indexgr.html> (τελική επίσκεψη 04/04/2023)