



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Διπλωματική Εργασία

Χρυσούλης Βασίλειος

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Φεβρουάριος 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

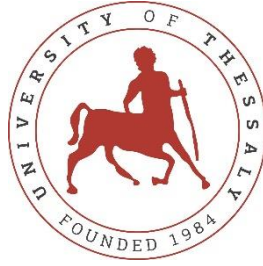
ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Διπλωματική Εργασία

Χρυσούλης Βασίλειος

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Φεβρουάριος 2023



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

NUCLEAR ENERGY AND APPLICATIONS

Diploma Thesis

Chrysoulis Vasileios

Supervisor: Bargiotas Dimitrios

February 2023

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

Μπαργιώτας Δημήτριος

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Λουτρίδης Σπυρίδων

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Περατζάκης Γεώργιος

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

**ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ
ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ**

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο Δηλών

Χρυσούλης Βασίλειος

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this diploma thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Chrysoulis Vasileios

Ευχαριστίες

Η διπλωματική εργασία που ακολουθεί, με τίτλο «Πυρηνική ενέργεια και εφαρμογές» αποτελεί τον επίλογο των σπουδών μου στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, το οποίο μου προσέφερε γνώσεις τόσο στον τομέα της ενέργειας όσο και στον τομέα των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή, Δημήτριο Μπαργιώτα ο οποίος με εμπιστεύθηκε να αναλάβω ένα τέτοιο θέμα για τη διπλωματική μου εργασία και να πορευθούμε μαζί μέχρι και την ολοκλήρωσή της.

Και θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, Ευάγγελο, Βασιλική και Ολυμπία οι οποίοι μου στάθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου πορείας και πάντα με στήριζαν μέχρι να καταφέρω να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Χρυσούλης Βασίλειος

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάζεται η πυρηνική ενέργεια και οι εφαρμογές της. Απώτερος στόχος της εργασίας είναι η αντικειμενική εκτίμηση των προοπτικών που υπάρχουν από τη χρήση της πυρηνικής ως προς το μέλλον της ανθρωπότητας αλλά και του πλανήτη μας.

Στην αρχή γίνεται μία εισαγωγή στο τί είναι η πυρηνική ενέργεια. Πως ανακαλύφθηκε, από ποιους και πότε έγινε η πρώτη πρακτική εφαρμογή της. Στη συνέχεια περιγράφεται το σημερινό ενεργειακό τοπίο σχετικά με το ποιες μορφές είναι οι πιο συνηθισμένες σήμερα και τι αντίκτυπο έχει αυτό. Στο δεύτερο κομμάτι αναλύουμε την πρώτη κύρια εφαρμογή της πυρηνικής ενέργειας, τους πυρηνικούς αντιδραστήρες, τους διάφορους τύπους αντιδραστήρων που υπάρχουν σήμερα και αναλύουμε την υπάρχουσα ασφάλεια και τους μηχανισμούς σχετικά με τα ραδιενεργά κατάλοιπα. Στο τρίτο κομμάτι αναλύουμε τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ραδιοϊσοτόπων, που αποτελούν την κύρια εφαρμογή της πυρηνικής ενέργειας για την εξερεύνηση του διαστήματος, αναφέρουμε ακόμα μία εφαρμογή που είναι σε εξέλιξη τους πυρηνικούς θερμικούς πυραύλους και κάνουμε μία ιστορική αναδρομή στις πιο σπουδαίες αποστολές που χρησιμοποίησαν πυρηνική ενέργεια και τι κατάφεραν. Στο τέταρτο κομμάτι αναλύουμε τις κύριες εφαρμογές και μεθόδους της πυρηνικής ιατρικής, τις διαγνωστικές τομογραφίες, τις μεθόδους ακτινοθεραπείας και γενικά τα ραδιενεργά ισότοπα που χρησιμοποιούνται στον κλάδο. Τέλος έχουμε ένα συμπερασματικό κεφάλαιο όπου τονίζονται τα κύρια στοιχεία του κάθε κεφαλαίου και της κάθε εφαρμογής.

Λέξεις-κλειδιά: Πυρηνική ενέργεια, εφαρμογές, περιβάλλον, πυρηνικοί αντιδραστήρες, ραδιενεργά κατάλοιπα, θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ραδιοϊσοτόπων, πυρηνική ιατρική, διαγνωστικές τομογραφίες, ραδιενεργά ισότοπα.

NUCLEAR POWER AND APPLICATIONS

Chrysoulis Vasileios

Abstract

In the context of this thesis, nuclear energy and its applications are examined. The ultimate goal of this paper is the objective assessment of the perspectives that exist from the use of nuclear power for the future of humanity and our planet.

At the beginning there is an introduction to what nuclear energy is. How it was discovered, by whom and when was its first practical application. The current energy landscape is then described in terms of which forms are most common today and what impact this has. In the second part we analyze the first major application of nuclear power, nuclear reactors, the various types of reactors that exist today and analyze the existing safety and mechanisms regarding radioactive waste. In the third part we analyze the thermoelectric generators of radioisotopes, which are the main application of nuclear energy for space exploration, we mention another application that is in progress, nuclear thermal rockets and we do a historical review of the most important missions that used nuclear energy and what did they achieve. In the fourth part we analyze the main applications and methods of nuclear medicine, diagnostic tomography, radiation therapy methods and in general the radioactive isotopes used in the industry.

Finally, we have a concluding chapter where the main elements of each chapter and each application are highlighted.

Keywords: Nuclear energy, applications, environment, nuclear reactors, radioactive waste, thermoelectric radioisotope generators, RTG, nuclear medicine, diagnostic tomography, radioactive isotopes.

Πίνακας περιεχομένων

<i>Ευχαριστίες</i>	<i>xiii</i>
<i>Περίληψη</i>	<i>xv</i>
<i>Abstract</i>	<i>xvii</i>
<i>Πίνακας περιεχομένων</i>	<i>xix</i>
<i>Κατάλογος εικόνων</i>	<i>xxi</i>
<i>Κατάλογος σχημάτων</i>	<i>xxiii</i>
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής.....	1
1.2 Οργάνωση του τόμου.....	2
Κεφάλαιο 2 Πυρηνική ενέργεια	3
2.1 Εισαγωγή	3
2.2 Ιστορική αναδρομή	3
2.3 Γενικό ενεργειακό τοπίο	5
2.4 Ενέργεια και Περιβάλλον.....	5
Κεφάλαιο 3 Πυρηνικοί αντιδραστήρες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	7
3.1 Ορισμός.....	7
3.2 Εξέλιξη πυρηνικών αντιδραστήρων	10
3.3 Τύποι πυρηνικών αντιδραστήρων	13
3.3.1 Αντιδραστήρες ελαφρύ ύδατος.....	13
3.3.2 Αντιδραστήρες βαρέως ύδατος.....	15
3.3.3 Αντιδραστήρες γραφίτη-ύδατος.....	17
3.3.4 Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων.....	17
3.3.5 Προηγμένοι αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος	18
3.3.6 Επόμενης γενιάς CANDU.....	19
3.3.7 Πυρηνικός αντιδραστήρας σύντηξης.....	20

3.4 Ασφάλεια	21
3.5 Ραδιενεργά κατάλοιπα	24
3.6 Πλεονεκτήματα πυρηνικής ενέργειας.....	26
Κεφάλαιο 4 Εφαρμογές πυρηνικής ενέργειας για την εξερεύνηση του διαστήματος	28
4.1 Θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ραδιοϊσοτόπων (RTG).....	28
4.2 Πυρηνικοί θερμικοί πύραυλοι	32
4.3 Παραδείγματα χρήσης πυρηνικής ενέργειας στο διάστημα	33
4.3.1 Πρόγραμμα RORSAT	33
4.3.2 Πρόγραμμα SNAP	34
4.3.3 Αποστολές που χρησιμοποίησαν RTG	35
4.4 Συμπεράσματα.....	42
Κεφάλαιο 5 Πυρηνική ενέργεια και Ιατρική	44
5.1 Ιστορία των SPECT και PET	44
5.2 Αρχές λειτουργίας των SPECT και PET	45
5.3 Μέθοδοι ακτινοθεραπείας	49
5.4 Ραδιενεργά ισότοπα για θεραπεία	53
5.5 Συμπεράσματα για την πυρηνική ιατρική.....	55
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα	56
Βιβλιογραφία.....	58

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.1: Σχάση του πυρήνα του ουρανίου	4
Εικόνα 3.1: Σχηματικό διάγραμμα απαγωγής θερμότητας από την καρδιά αντιδραστήρα	8
Εικόνα 3.2: Έμμεσος θερμοδυναμικός κύκλος αντιδραστήρα	9
Εικόνα 3.3: Άμεσος θερμοδυναμικός κύκλος αντιδραστήρα	10
Εικόνα 3.4: Αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος (PWR)	14
Εικόνα 3.5: Αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος (BWR)	15
Εικόνα 3.6: Αντιδραστήρας CANDU	16
Εικόνα 3.7: Αντιδραστήρας γραφίτη ύδατος	17
Εικόνα 3.8: Αναπαραγωγικός αντιδραστήρας ταχέων νετρονίων	18
Εικόνα 3.9: Αντιδραστήρας επόμενης γενιάς CANDU	20
Εικόνα 3.10: Η κάψουλα καυσίμου και οι ακτίνες λέιζερ που χρησιμοποιήθηκαν για την επιτυχή πυρηνική σύντηξη	21
Εικόνα 3.11: Αποθήκη προσωρινής αποθήκευσης ραδιενεργών κατάλοιπων	26
Εικόνα 3.12: Συντελεστής δυναμικότητας ανά μορφή ενέργειας 2020	27
Εικόνα 4.1: Τομή σε μία θερμοηλεκτρική γεννήτρια ραδιοϊσοτόπων και διάγραμμα λειτουργίας	29
Εικόνα 4.2: Γενική εικόνα θερμοηλεκτρικού στοιχείου όπου το p-element είναι το θετικό άκρο και το n-element το αρνητικό	30
Εικόνα 4.3: Απεικόνιση μοντέλου θερμοηλεκτρικής γεννήτριας ραδιοϊσοτόπων πολλαπλών αποστολών.	31
Εικόνα 4.4: Μοντέλο πυρηνικού πυραύλου μονού σταδίου σε χαμηλή τροχιά γης	32
Εικόνα 4.5: Μοντέλο δορυφόρου του προγράμματος RORSAT	34
Εικόνα 4.6: Διάγραμμα του SNAP 10A	35
Εικόνα 4.7: Φωτογραφία του πλανήτη Δία από το Pioneer 10	37
Εικόνα 4.8: Φωτογραφία του πλανήτη Κρόνου από το Pioneer 11	38
Εικόνα 4.9: Φωτογραφία του Viking 1 μετά τη προσγείωση του στον Άρη	39
Εικόνα 4.10: Φωτογραφίες του Κρόνου από το Voyager 1 και 2 σε σύγκριση με του Pioneer 11	40

Εικόνα 4.11: Σχηματική αναπαράσταση του διαστημοπλοίου Cassidy	41
Εικόνα 4.12: Φωτογραφία του curiosity rover και με κύκλο η γεννήτρια ραδιοϊσοτόπων MMRTG	42
Εικόνα 5.1: Σάρωση ολόκληρου σώματος (SPECT) με τη χρήση τεχνητίου-99m (99m Tc) που δείχνει την ύπαρξη της ασθένειας του Paget.	46
Εικόνα 5.2: Ολική σάρωση σώματος PET με τη χρήση φθόριο-18 (18 F) για τον εντοπισμό όγκων	48
Εικόνα 5.3: Στο (d) βλέπουμε την ένωση των εικόνων από ένα PET scan και από ένα CT για την διάγνωση δεξιού ρινοφαρυγγικού καρκινώματος.....	49
Εικόνα 5.4: Εικόνα συστήματος ρυθμιζόμενης εντάσεως ακτινοβολίας (IMRT).....	51
Εικόνα 5.5: Εικόνα συστήματος ογκομετρικής διαμορφωμένης θεραπείας τόξου (VMAT)	52
Εικόνα 5.6: Εικόνα συστήματος στερεοτατικής ακτινοθεραπείας (SBRT)	53

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 2.1: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που αποφεύχθηκαν από τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας.....	6
Σχήμα 2.2: Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας με μεθόδους χαμηλής παραγωγής άνθρακα, 1971-2018.....	7

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι πολύ σημαντική στο σύγχρονο τρόπο ζωής. Η καθημερινή ζωή των ανθρώπων απαιτεί ολοένα και περισσότερη κατανάλωση ενέργειας με αποτέλεσμα οι συμβατικοί τρόποι παραγωγής μέσω πετρελαίου, φυσικού αερίου ή και άλλων υδρογονανθράκων να μην είναι αρκετοί ορισμένες φορές και επιπρόσθετα να έχουν και άλλες αρνητικές συνέπειες. Όπως για παράδειγμα η μόλυνση του περιβάλλοντος και η γενική μείωση του ορυκτού πλούτου του πλανήτη. Έτσι, ο άνθρωπος καλείτε να εξερευνήσει εναλλακτικούς τρόπους για να καλύψει τις ενεργειακές του ανάγκες. Την πιο διαδεδομένη λύση εξ αυτών αποτελούν οι λεγόμενες εναλλακτικές μορφές ενέργειας οι οποίες δεν έρχονται με τα συνήθη αρνητικά των υπολοίπων. Η ενέργεια που παράγεται είναι “καθαρή” χωρίς σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και επίσης δεν είναι περιορισμένη καθώς ο ήλιος, ο αέρας και το νερό για παράδειγμα είναι ανεξάντλητα. Το κύριο όμως μειονέκτημα των εναλλακτικών μορφών για τα σύγχρονα δεδομένα της ενεργειακής αγοράς είναι ότι δεν είναι τόσο ανταγωνιστικά σε σχέση με τα υπάρχοντα και δεν αρκούν από μόνα τους για να καλύψουν τις σύγχρονες ενεργειακές απαιτήσεις.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Σε αυτό το δίλλημα λοιπόν μεταξύ ενεργειακής επάρκειας και περιβαλλοντικής μόλυνσης τη λύση έρχεται να δώσει μια άλλη μορφή ενέργειας, η πυρηνική. Η οποία όπως θα δούμε και παρακάτω έχει φαινομενικά τα θετικά και των δύο προηγούμενων μορφών που αναφέρθηκαν. Αντικείμενο λοιπόν της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατανόηση της χρησιμότητας της πυρηνικής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η περιγραφή των σύγχρονων θετικών εφαρμογών της.

Σε αυτή τη διπλωματική έχουν γίνει οι παρακάτω ενέργειες για να επιτευχθεί ο στόχος της:

1. Μελετήθηκαν συστήματα και εφαρμογές της πυρηνικής ενέργειας.
2. Έγινε έρευνα πάνω στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε συστήματος.
3. Αξιολογήθηκε η επίδοση και η χρησιμότητα των συστημάτων.
4. Έγινε έρευνα πάνω στις συγκαταβατικές εφαρμογές άλλων μορφών ενέργειας.

5. Έγινε σύγκριση μεταξύ των πυρηνικών εφαρμογών και των υπολοίπων.

1.2 Οργάνωση του τόμου

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μία εισαγωγή στο τι είναι η πυρηνική ενέργεια, πως ανακαλύφθηκε, ποιες χώρες την χρησιμοποιούν και πως και τέλος τι ισχύει για τα ελληνικά δεδομένα.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η κύρια εφαρμογή της πυρηνικής ενέργειας η οποία είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω αντιδραστήρων. Και δίνεται μια εικόνα για την παγκόσμια κατάσταση αυτής της εφαρμογής.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η χρήση της πυρηνικής ενέργειας για την λειτουργία διαστημικών πυραύλων και πως αυτό έχει αλλάξει τα δεδομένα στον συγκεκριμένο κλάδο.

Στο Κεφάλαιο 5 έχουμε τις εφαρμογές της πυρηνικής ενέργειας στον κλάδο της ιατρικής.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα κύρια σημεία του κάθε κεφαλαίου, έχουμε μία κατηγοριοποίηση των θετικών και των αρνητικών της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας και πιθανές προτάσεις για την καλύτερη χρήση της στο μέλλον.

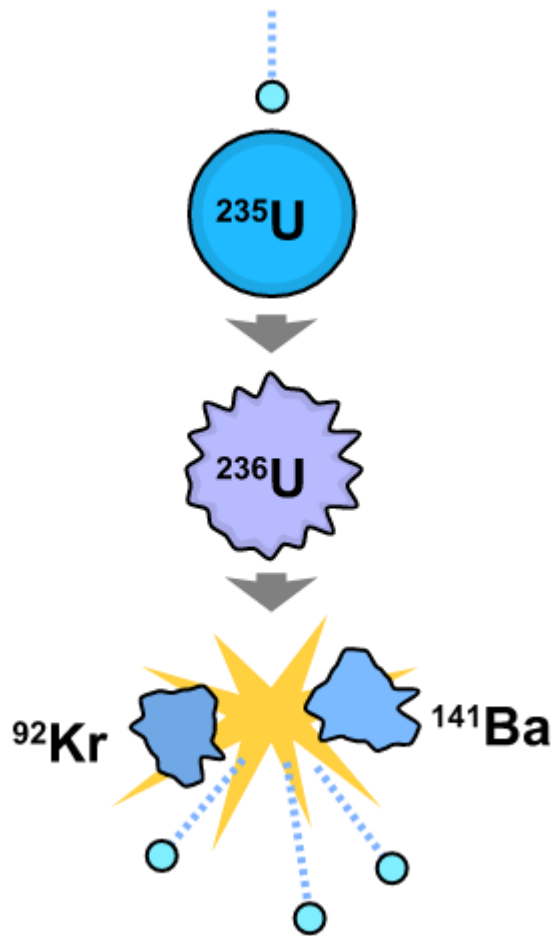
Κεφάλαιο 2 Πυρηνική ενέργεια

2.1 Εισαγωγή

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 τη σύντηξη των πυρήνων και εφόσον οι πυρηνικές αντιδράσεις είναι ελεγχόμενες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει ενεργειακές ανάγκες.

2.2 Ιστορική αναδρομή

Η πρώτη εργαστηριακή σχάση πραγματοποιήθηκε το 1938 στο Βερολίνο από τους φυσικούς Ότο Χαν και Λίζε Μάιτνερ. Οι δυο αυτοί φυσικοί βομβάρδισαν το ουράνιο με νετρόνια έχοντας ως στόχο να το μετατρέψουν στο άγνωστο μέχρι τότε στοιχείο με ατομικό αριθμό 93. Τα αποτελέσματα της έρευνάς τους, όμως, οδήγησαν στη παραγωγή ενός στοιχείου με διαφορετικές ιδιότητες από αυτές που περίμεναν για ένα βαρύ στοιχείο. Σύντομα οι Χαν και Μάιτνερ μαζί με τον Γερμανό φυσικό Φριτς Στράσμμαν κατέληξαν σε ένα συμπέρασμα. Το στοιχείο που παραγόταν ήταν βάριο, με ατομικό αριθμό 56, πράγμα που σήμαινε ότι η προσθήκη νετρονίου στον πυρήνα του ουρανίου προκαλούσε τη σχάση του, όπως ονόμασε τη διαδικασία η Μάιτνερ, σε δύο στοιχεία. Το ένα ήταν το ήδη γνωστό βάριο, ενώ το άλλο ήταν ένα στοιχείο με ατομικό αριθμό 43, το οποίο ονομάστηκε Τεχνητίο. Εντύπωση όμως προκάλεσε το γεγονός ότι πέρα από τα μεγάλα ποσά ενέργειας που απελευθερώθηκαν κατά τη διαδικασία της σχάσης απελευθερώθηκαν επίσης δύο νετρόνια, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα για αλυσιδωτή αντίδραση. Τα δύο νετρόνια που απελευθερώνονται κατά τη σχάση του πυρήνα Ουρανίου, προκαλούν τη σχάση δυο πρόσθετων πυρήνων Ουρανίου, απελευθερώνοντας 4 νετρόνια, που με τη σειρά τους προκαλούν τη σχάση τεσσάρων πυρήνων και τα λοιπά (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Σχάση του πυρήνα του ουρανίου

Όπως καταλαβαίνουμε σε μία μικρή φαινομενικά ποσότητα Ουρανίου όπου υπάρχουν δισεκατομμύρια πυρήνες με αυτή την αλυσιδωτή αντίδραση μπορούμε να παράγουμε γιγάντια ποσά ενέργειας.

Ο πρώτος πυρηνικός αντιδραστήρας που χρησιμοποιήθηκε για ειρηνικούς σκοπούς βρίσκεται στο Αϊντάχο των ΗΠΑ. Συγκεκριμένα το 1951 χρησιμοποιήθηκε ο συγκεκριμένος αντιδραστήρας για την παραγωγή μια μικρής ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρώτη φορά που πυρηνικός αντιδραστήρας συνδέθηκε με εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας χρονολογείται στο 1954, στο Ομπνίσκ της ΕΣΣΔ. [1]

2.3 Γενικό ενεργειακό τοπίο

Καθώς η νούμερο ένα εφαρμογή της πυρηνικής ενέργειας σήμερα είναι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω πυρηνικών αντιδραστήρων, ας κοιτάξουμε πόσοι υπάρχουν στον κόσμο και πόσο αποδοτικοί είναι.

Σήμερα, ο χάρτης της πυρηνικής ενέργειας περιλαμβάνει 437 πυρηνικούς αντιδραστήρες, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την παραγωγή του 11% της ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως (2653 TWh). Η πρωτιά ανήκει στην Αμερική, η οποία διαθέτει 92 πυρηνικούς αντιδραστήρες που αντιστοιχούν στο 30% της παγκόσμιας πυρηνικής παραγωγής (771,6 TWh). Στη δεύτερη θέση βρίσκεται η Κίνα με 54 ενεργούς πυρηνικούς αντιδραστήρες και μέση παραγωγή 383,2 TWh η οποία αναγκάστηκε να στραφεί στην πυρηνική ενέργεια λόγω της όλο και αυξανόμενης περιβαλλοντικής μόλυνσης του αέρα κυρίως λόγω των εργοστασίων της που βασίζονται στη καύση άνθρακα. Και στην τρίτη θέση αξίζει να αναφέρουμε τη Γαλλία με 56 πυρηνικούς αντιδραστήρες και παραγωγή 363.4 TWh που αντιστοιχεί στην κάλυψη του 70% των αναγκών της κάνοντας την μία από τις πιο ανεξάρτητες ενεργειακά χώρες στον κόσμο.

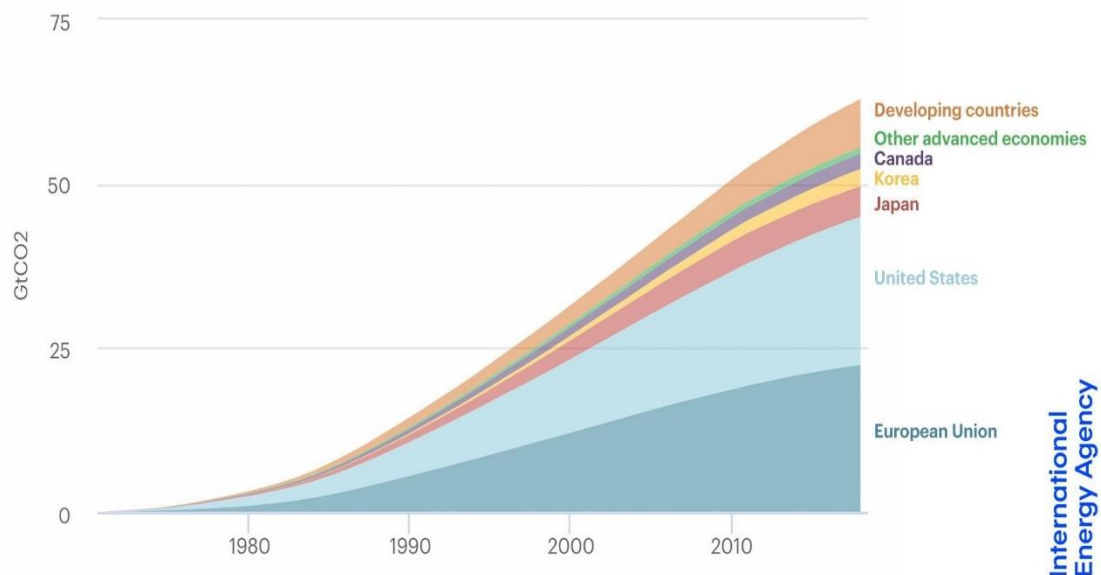
Στον υπόλοιπο κόσμο, κατασκευάζονται γύρω στους 59 αντιδραστήρες το 2022, οι 22 εκ των οποίων στην Κίνα, με δεύτερη την Ινδία με 8 και τρίτη την Τουρκία με 4. Υπάρχουν πυρηνικοί αντιδραστήρες και σε πολλές ακόμα χώρες, η χρήση των οποίων, όμως, περιορίζεται σε ερευνητικούς σκοπούς. Ανάμεσα σε αυτές τις χώρες περιλαμβάνεται και η Ελλάδα, με τον αντιδραστήρα ισχύος 5MW στο Κέντρο Έρευνας «Δημόκριτος». [2]

2.4 Ενέργεια και Περιβάλλον

Στη σημερινή κοινωνία το 80% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται προέρχεται από ορυκτά καύσιμα. Αυτό έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα καθώς υπολογίζεται ότι στη χρονική περίοδο 1959-2010 έχουν απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα 350 γιγατόνοι άνθρακα (Gt C). Από τα οποία το 45% παρέμεινε στην ατμόσφαιρα και το υπόλοιπο 55% αφομοιώθηκε από τη θάλασσα και το έδαφος. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την επιτάχυνση

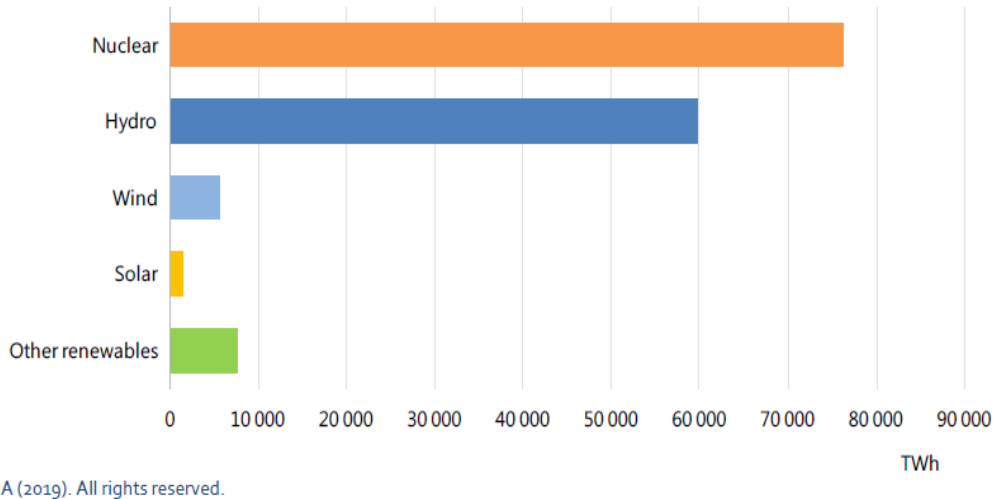
του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής. Από τα παραπάνω νούμερα που αναφέρθηκαν καταλαβαίνουμε ότι η πυρηνική ενέργεια χρησιμοποιείται αλλά παρέχοντας μόνο το 10% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας κάποιος θα μπορούσε να υποθέσει ότι δεν υπάρχουν τεράστια οφέλη.

Στο ίδιο όμως διάστημα (1971-2018) όπου η πυρηνική ενέργεια χρησιμοποιούνταν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποφεύχθηκε η απελευθέρωση 63 γιγατόνων άνθρακα στο περιβάλλον. 20% λιγότερη μόλυνση της ατμόσφαιρας καθώς η πυρηνική ενέργεια όπως και οι υπόλοιπες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό, είναι πολύ χαμηλές στην παραγωγή διοξειδίου άνθρακα (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που αποφεύχθηκαν από τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας

Και το ποσό ενέργειας που παράχθηκαν στο ίδιο διάστημα από τις υπόλοιπες μορφές παραγωγής ενέργειας που έχουν χαμηλές εκπομπές σε διοξείδιο του άνθρακα απεικονίζονται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας με μεθόδους χαμηλής παραγωγής άνθρακα, 1971-2018

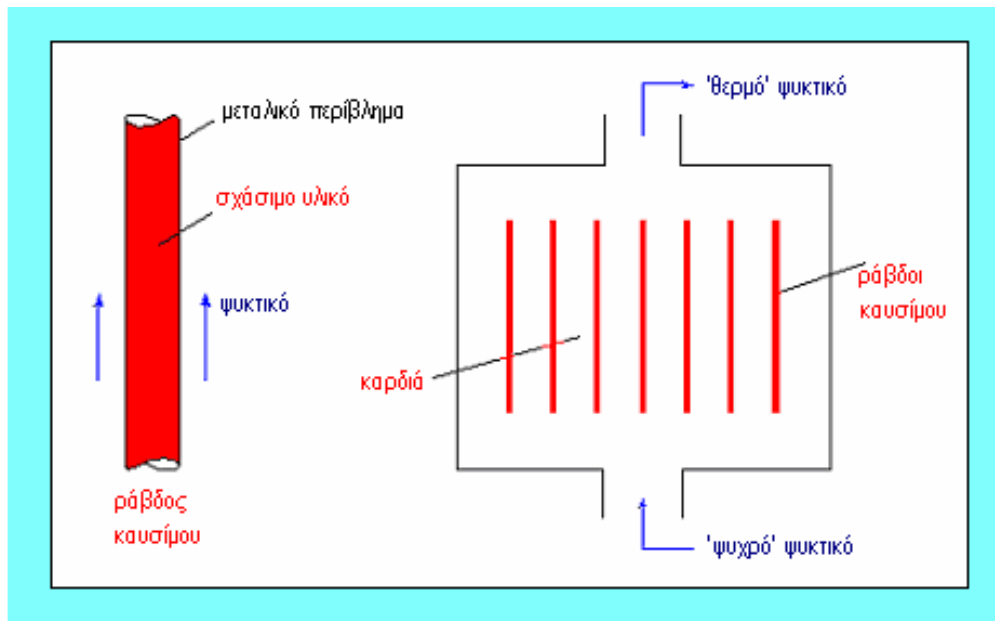
Όπου καταλαβαίνουμε ότι η πυρηνική ενέργεια είναι η πιο δυνατή μορφή παραγωγής ενέργειας ανάμεσα στις υπόλοιπες μορφές που είναι φιλικές προς το περιβάλλον. Με παραγωγή 76000 TWh σε 47 χρόνια και με μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Παραγωγή δεκαπλάσια της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας αθροιστικά. [3][4]

Κεφάλαιο 3 Πυρηνικοί αντιδραστήρες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

3.1 Ορισμός

Πυρηνικός αντιδραστήρας είναι μια διάταξη κατάλληλα σχεδιασμένη έστω να πραγματοποιεί ελεγχόμενη αυτοσυντήρητη αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης. Ο πυρηνικός αντιδραστήρας αποτελείται από την καρδιά ή αλλιώς πυρήνα όπου πραγματοποιούνται

οι σχάσεις, τον επιβραδυντή, τις ράβδους καυσίμου και τις ράβδους ελέγχου. Στους αντιδραστήρες ταχείων νετρονίων δεν υπάρχει επιβραδυντής (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1: Σχηματικό διάγραμμα απαγωγής θερμότητας από την καρδιά αντιδραστήρα

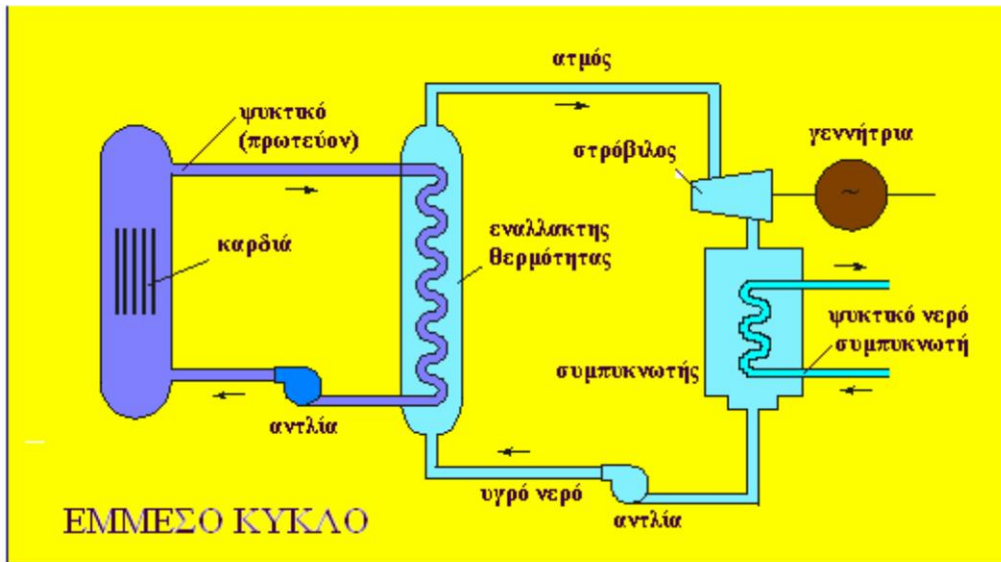
Οι ράβδοι του καυσίμου είναι τοποθετημένες ή μια δίπλα στην άλλη.

Το ψυκτικό εισέρχεται σχετικά "ψυχρό" στην καρδιά του αντιδραστήρα και, απάγοντας τη θερμότητα που παράγεται από τις σχάσεις στις ράβδους του καυσίμου, εξέρχεται από την καρδιά σχετικά "θερμό". Αυτή είναι η γενική λειτουργία ενός πυρηνικού αντιδραστήρα.

Τώρα ανάλογα με το πως χρησιμοποιούμε το ψυκτικό υγρό αφού βγει από τη καρδιά του αντιδραστήρα έχουμε και την πρώτη κατηγοριοποίηση των ηλεκτροπαραγωγών πυρηνικών αντιδραστήρων.

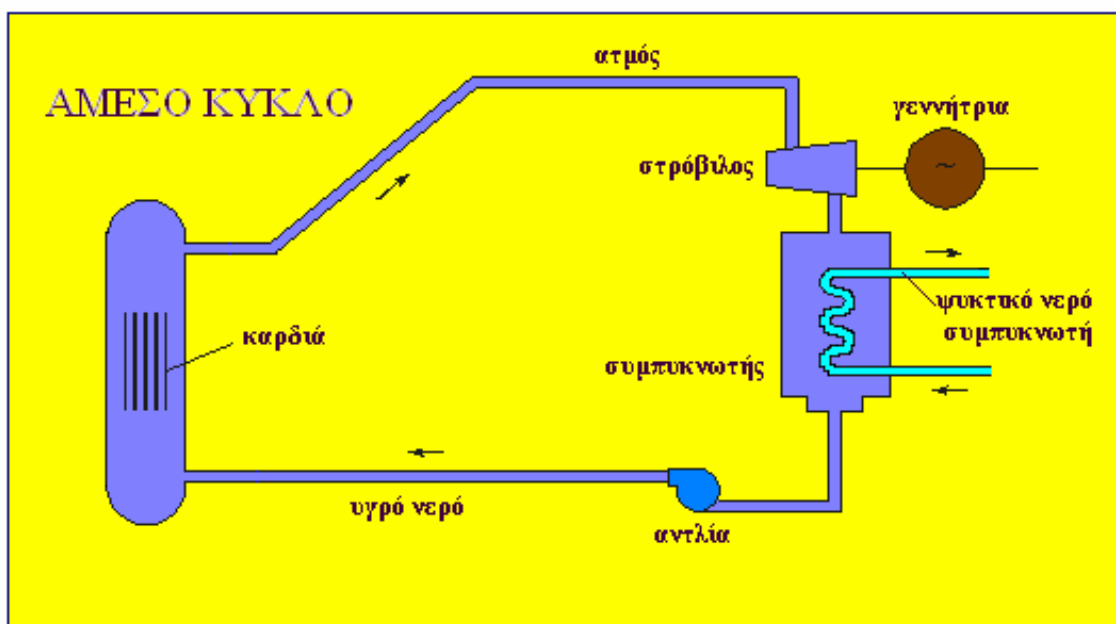
Η πρώτη κατηγορία βασίζεται στην εκμετάλλευση αυτού του θερμού ψυκτικού έμμεσα, δηλαδή να μη χρησιμοποιηθεί απευθείας. Το θερμό ψυκτικό οδηγείται σε σύστημα που ονομάζεται εναλλάκτης θερμότητας. Εκεί μεταφέρει τη θερμότητα σε κύκλωμα νερού, στο "δευτερεύον κύκλωμα ψυκτικού", όπως ονομάζεται. Έτσι το νερό του δευτερεύοντος βράζει και παράγεται ατμός. Το ψυκτικό της καρδιάς, έχοντας δώσει τη θερμική του ενέργεια στο δευτερεύον, βγαίνει από τον εναλλάκτη σχετικά "ψυχρό" και επιστρέφει

στην είσοδο της καρδιάς για τη συνέχιση της ψύξης της καρδιάς. Ο ατμός που βγαίνει από το δευτερεύον οδηγείται και κινεί το στρόβιλο, στη συνέχεια υγροποιείται στον συμπυκνωτή και στη συνέχεια οδηγείται στην είσοδο του δευτερεύοντος κυκλώματος (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: Έμμεσος θερμοδυναμικός κύκλος αντιδραστήρα

Και η δεύτερη κατηγορία αφορά την άμεση εκμετάλλευση του θερμού ψυκτικού, δηλαδή δεν μεσολαβεί εναλλάκτης θερμότητας μεταξύ της καρδιάς του αντιδραστήρα και του ατμοστροβίλου. Το ψυκτικό σε αυτούς τους αντιδραστήρες είναι νερό και η παραγωγή ατμού γίνεται με βρασμό του ίδιου του ψυκτικού στην καρδιά του αντιδραστήρα. Ο ατμός οδηγείται από την έξοδο της καρδιάς κατ' ευθείαν στην είσοδο του ατμοστροβίλου (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3: Άμεσος θερμοδυναμικός κύκλος αντιδραστήρα

3.2 Εξέλιξη πυρηνικών αντιδραστήρων

Συνήθως γίνεται κατηγοριοποίηση των αντιδραστήρων σε γενιές (γενιά I, II, III, III+ και IV). Οι γενιές αυτές έχουν να κάνουν με τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούν.

Γενιά I

Αποτελείται από τους πρώτους πυρηνικούς αντιδραστήρες που αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του '50 και του '60. Ως επί το πλείστον αναφέρονται σε αερόψυκτους αντιδραστήρες. Οι πρώτοι αντιδραστήρες που σχεδιάστηκαν κι υλοποιήθηκαν, όπως ο Shippingport (1975-1982) στην Πενσυλβανία, ο Dresden-I (1960- 1978) στο Illinois και ο Calder Hall (1956-2003) στο Ηνωμένο Βασίλειο ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία. Η τελευταία εγκατάσταση που καταγράφηκε για τέτοιου τύπου αντιδραστήρες τέθηκε εκτός λειτουργίας το Δεκέμβριο του 2012 στην Ουαλία ο πυρηνικός σταθμός Wylfa.

Γενιά II

Η εμπορική χρήση των πυρηνικών αντιδραστήρων καθώς και η ανάγκη για αξιοπιστία και οικονομική λειτουργία οδήγησε στην επόμενη γενιά. Αναπτύχθηκαν στο τέλος της δεκαετίας του '60 οι αντιδραστήρες δεύτερης γενιάς με προσδόκιμο χρόνο λειτουργίας τα 40 έτη. Αυτοί περιλάμβαναν τους αντιδραστήρες βαρέως ύδατος (Heavy Water Reactors), ελαφρού ύδατος (Light Water Reactors – PWR, LWR, BWR), και τους αντιδραστήρες AGR (Advanced Cooled Reactors). Στην κατηγορία αυτή ανήκει η πλειονότητα των εν ενεργεία σταθμών πυρηνικής ενέργειας ως και σήμερα.

Οι αντιδραστήρες της γενιάς αυτής χρησιμοποιούν κυρίως παραδοσιακά συστήματα ασφαλείας τα οποία περιλαμβάνουν ηλεκτρικές και μηχανικές λειτουργίες που εκκινούν αυτόματα αλλά μπορούν να τεθούν σε λειτουργία κι από τους χειριστές των πυρηνικών αντιδραστήρων. Κάποια από τα μηχανικά συστήματα ενεργούν παθητικά και λειτουργούν χωρίς την ανάγκη χειρισμού ή απώλειας ισχύος.

Γενιά III

Οι αντιδραστήρες της τρίτης γενιάς είναι παρόμοιοι με εκείνους της δεύτερης, αλλά και πάλι λόγω αυξημένων απαιτήσεων και οικονομίας δέχτηκαν βελτιώσεις. Συγκεκριμένα οι αλλαγές εμφανίζονται στην τεχνολογία καυσίμου, τη θερμική απόδοση, στη διαμόρφωση των κατασκευών, τα συστήματα ασφαλείας καθώς επίσης και στην τυποποίηση του σχεδιασμού. Ως επί το πλείστον τα συστήματα αυτά ενώ ο σχεδιασμός τους στηρίζεται στο σχεδιασμό απλών διατάξεων για τη διατήρηση χαμηλού κόστους κατασκευής χρησιμοποιούν προηγμένα συστήματα ασφάλειας.

Ο χρόνος λειτουργίας των αντιδραστήρων τρίτης γενιάς αποτιμάτε στα 60 χρόνια, με τη δυνατότητα επέκτασης του. Ωστόσο η παράταση της λειτουργίας σε διάστημα μεγαλύτερο των 60 χρόνων χρήζει μια σειρά από έρευνες που να εξασφαλίζουν την αξιοπιστία της διάταξης.

Σε αυτήν την γενιά ανήκουν οι προηγμένοι PWR (AP-600) και οι προηγμένοι αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος (Advanced Boiling Water Reactors – ABWR). Οι πρώτοι αντιδραστήρες που τέθηκαν σε λειτουργία είναι στην Ιαπωνία το 1996. Τέλος, σε αυτή τη

κατηγορία συγκαταλέγονται και οι αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος του τύπου System 80+, οι αντιδραστήρες Enhanced CANDU 6 κλπ. Ο αριθμός των αντιδραστήρων που είναι σε λειτουργία είναι 4 και είναι όλοι ABWR.

Γενιά III+

Η επόμενη γενιά που δημιουργήθηκε είναι η γενιά III+, η οποία χαρακτηρίζεται από σημαντικές βελτιώσεις στο επίπεδο ασφαλείας σε σχέση με την τρίτη. Συγκεκριμένα αυτή η γενιά αποτελείται από AP1000, European Pressurized Reactor(EPR), Economic Simplified Boiling Water Reactor (ESBWR), APR-1400, APWR (Advanced PWR), VVER-1200/329M Reactor, Advanced CANDU Reactor (ACR-1000), EU-ABWR. Η ανάπτυξη αυτών άρχισε στις αρχές της δεκαετίας του '90. Σε σχέση με τους προηγούμενους, τα συστήματα επιτυγχάνουν μεγαλύτερη εξάντληση καυσίμου αυτό έχει σαν αποτέλεσμα λιγότερα απόβλητα. Εν τέλει όμως η σημαντικότερη βελτίωση των αντιδραστήρων αυτών είναι η ενσωμάτωση παθητικών συστημάτων που δεν απαιτούν παρέμβαση από χειριστή ή ενεργό έλεγχο, αλλά στηρίζονται αυτού καθαυτού στη βαρύτητα ή τη φυσική διάδοση θερμότητας για την εξάλειψη βλάβης ή ατυχήματος.

Γενιά IV

Οι αντιδραστήρες του μέλλοντος αν και η ανάπτυξη τους εκτιμάται πως απαιτεί μερικές δεκαετίες ακόμα, κάποια μοντέλα πιθανώς να είναι έτοιμα πριν το 2020. Οι αντιδραστήρες της τέταρτης γενιάς συγκεντρώνουν όλα τα χαρακτηριστικά της III+ γενιάς κι είναι σχεδιασμένα για την καλύτερη δυνατή διαχείριση καυσίμου με υψηλότερο βαθμό εξάντλησης και αναπαραγωγή του εξαντλημένου ουρανίου. Ακόμα να αναφερθεί πως μπορούν να λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες από το σύνολο των σύγχρονων συστημάτων καθώς επίσης χρησιμοποιούν και συστήματα πλήρους ανακύκλωσης των ακτινίων τα οποία είναι και τα πιο επικίνδυνα ραδιενεργά απόβλητα. Εν κατακλείδι, η τέταρτη γενιά πυρηνικών αντιδραστήρων υπόσχεται αυξημένη λειτουργική ασφάλεια, τη αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των πυρηνικών αποβλήτων για ηλεκτροπαραγωγή, την παραγωγή πολλαπλάσιας ποσότητας ενέργειας μέχρι 300 φορές περισσότερη ενέργεια από την ίδια ποσότητα καυσίμου καθώς επίσης και τη μείωση του διαστήματος κατά το

οποίο τα πυρηνικά απόβλητα παραμένουν ενεργά σε μερικούς μόνο αιώνες. Συγκεκριμένα στη τέταρτη γενιά περιλαμβάνονται αντιδραστήρες υψηλής και υπερύψηλης θερμοκρασίας, αντιδραστήρες με ψύξη υγρού μετάλλου, αντιδραστήρες τετηγμένου άλατος, αντιδραστήρες που λειτουργούν με χρήση υπερκρίσιμου νερού, αεριοψυκτοι αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων. Τέλος να αναφερθεί πως περιλαμβάνονται και οι καινοτόμοι σχεδιασμοί όπως αντιδραστήρες μετάδοσης κύματος, οι οποίοι μέσω της πυρηνικής μεταστοιχείωσης μετατρέπουν το γόνιμο σε σχάσιμο υλικό.

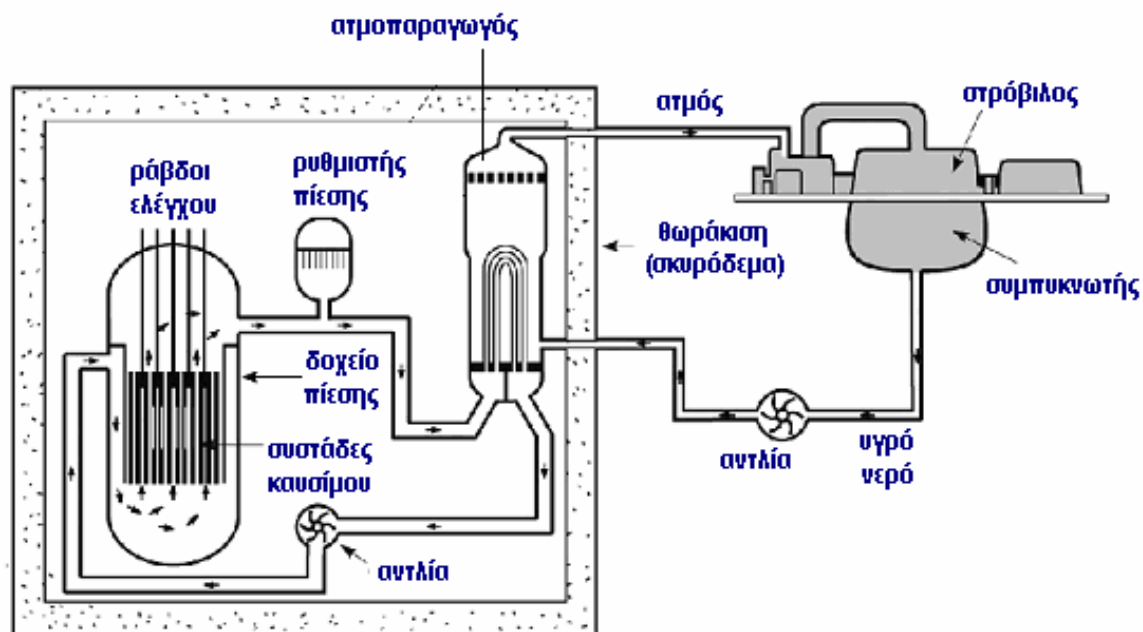
3.3 Τύποι πυρηνικών αντιδραστήρων

Ας περάσουμε τώρα στους τύπους πυρηνικών αντιδραστήρων που υπάρχουν σήμερα στον κόσμο.

3.3.1 Αντιδραστήρες ελαφρύ ύδατος

Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών των αντιδραστήρων είναι ότι χρησιμοποιούν σαν καύσιμο εμπλουτισμένο ουράνιο, η καρδιά του αντιδραστήρα είναι σχετικά μικρή σε όγκο καθώς το νερό είναι ισχυρός επιβραδυντής και επιτρέπει στα ταχεία νετρόνια να γίνουν θερμικά σε σχετικά μικρή διαδρομή αλλά η σχετική ευκολία μετάβασης του νερού από την υγρή στην αέρια φάση δημιουργεί σημαντικές απαιτήσεις, όσο αφορά στα συστήματα ασφάλειας και το σχεδιασμό του αντιδραστήρα.

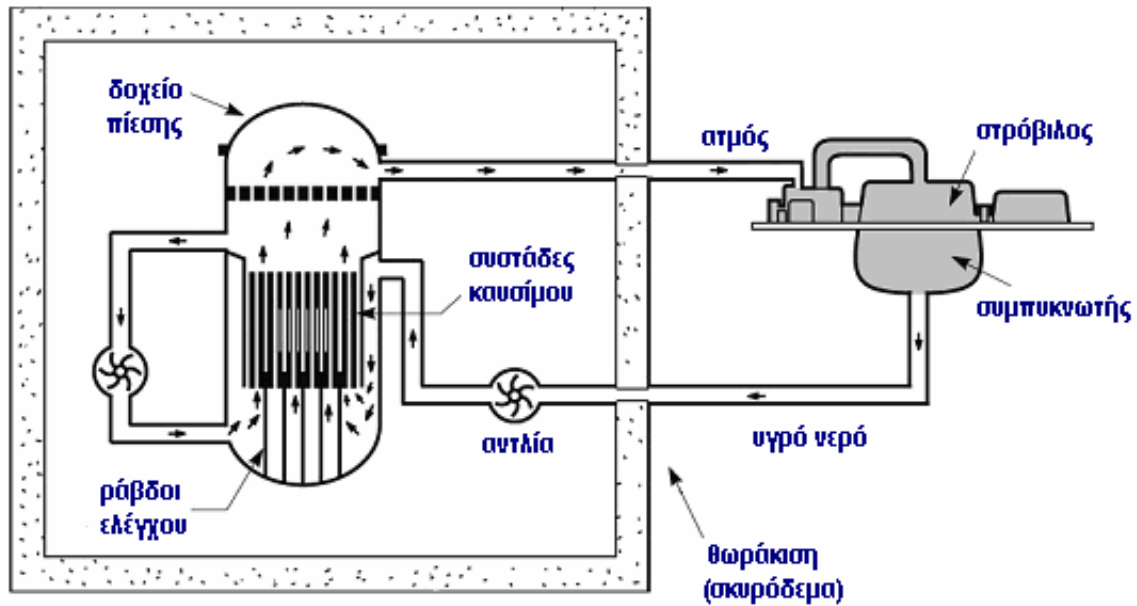
Το πρώτο μοντέλο αντιδραστήρα σε αυτή την κατηγορία ονομάζεται αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος (PWR, Pressurised Water Reactor). Το κύκλο του αντιδραστήρα είναι έμμεσο, όπως αναφέραμε προηγουμένους η θερμότητα μεταφέρεται σε δευτερεύον κύκλωμα. Το ψυκτικό της καρδιάς είναι κοινό ύδωρ (H₂O), που λειτουργεί ταυτόχρονα και ως επιβραδυντής, ευρίσκεται υπό ικανή πίεση (150 atm), ώστε να αποφεύγεται ο βρασμός στην καρδιά του αντιδραστήρα (Εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4: Αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος (PWR)

Η καρδιά βρίσκεται σε δοχείο πίεσης κατασκευασμένη από χάλυβα πάχους 20 με 23 εκατοστών. Ολόκληρο το πρωτεύον κύκλωμα, συμπεριλαμβανομένων και των ατμοπαραγωγών μονάδων, περιβάλλεται από βιολογική θωράκιση, κατασκευασμένη με σκυρόδεμα. Οι συγκεκριμένοι αντιδραστήρες αναπτύχθηκαν στην ΗΠΑ και την Σοβιετική Ένωση για την πρόωση υποβρυχίων και είναι σήμερα ο πιο διαδεδομένος τύπος αντιδραστήρα με ποσοστό 60% στη σημερινή αγορά.

Το δεύτερο μοντέλο της κατηγορίας μας ονομάζεται αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος (BWR, Boiling Water Reactor) με την άμεση διαφορά ότι το ψυκτικό ύδωρ βράζει και ο ατμός παράγεται στην καρδιά του αντιδραστήρα και χωρίς τη βοήθεια κάποιου δευτερεύοντος κυκλώματος επωφελούμαστε από τη θερμική ενέργεια που παράγεται κατατάσσοντας τον αντιδραστήρα ως άμεσου κύκλου. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι το ίδιο με τον αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος δηλαδή εμπλουτισμένο ουράνιο αλλά το δοχείο πίεσης είναι σχεδόν το μισό (70 atm) έτσι ώστε το νερό να φτάνει στο σημείο βρασμού στους 285 βαθμούς Κελσίου (Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5: Αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος (BWR)

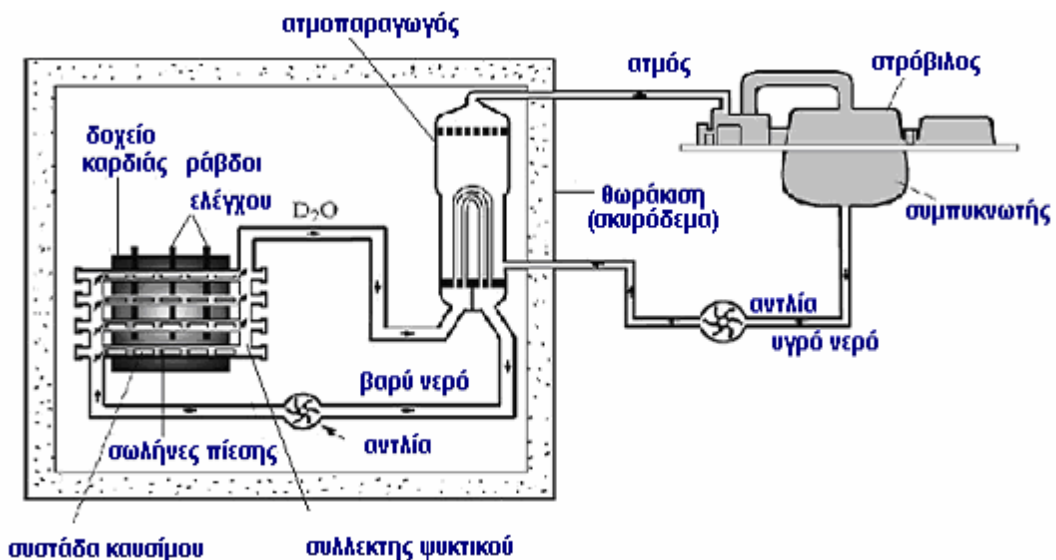
Το κίνητρο για τη χρησιμοποίηση άμεσου κύκλου είναι η αποφυγή των ατμοπαραγωγών μονάδων, με σκοπό τη μείωση του κόστους του αντιδραστήρα. Όμως στους BWR, όπως και σε κάθε πυρηνικό αντιδραστήρα άμεσου κύκλου, ο στρόβιλος και ο συμπυκνωτής αποτελούν τμήμα του κυκλώματος του ψυκτικού. Επομένως ο ατμός που παράγεται στην καρδιά, είναι ραδιενεργός με άμεση συνέπεια την εκπομπή σημαντικής ακτινοβολίας γ από τον στρόβιλο, οπότε είναι απαραίτητη η βιολογική θωράκιση και της στροβιλογεννήτριας.

3.3.2 Αντιδραστήρες βαρέως ύδατος

Η επόμενη κατηγορία αντιδραστήρων χρησιμοποιεί βαρύ ύδωρ ως επιβραδυντή (D2O). Το βαρύ ύδωρ έχει μικρή διατομή απορρόφησης νετρονίων σε σύγκριση με το απλό νερό, παρέχοντας τη δυνατότητα χρήσης φυσικού ουρανίου αλλά και άλλων υλικών όπως σωλήνες πίεσης στην καρδιά του αντιδραστήρα. Επίσης επειδή το βαρύ ύδωρ έχει πολύ μικρότερη ικανότητα επιβράδυνσης σε σχέση με το νερό αυτό απαιτεί μεγαλύτερο όγκο επιβραδυντή. Τέλος ακόμα μία σημαντική συνέπεια είναι η δυνατότητα αντικατάστασης συστάδων εξαντλημένου καυσίμου, κατά τη διάρκεια λειτουργίας του αντιδραστήρα, σε αντίθεση με τους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος στους οποίους, για την αλλαγή του

καυσίμου, απαιτείται η διακοπή της λειτουργίας του αντιδραστήρα, με προφανείς οικονομικές συνέπειες.

Ένα τέτοιο παράδειγμα αντιδραστήρα είναι οι αντιδραστήρες CANDU. Πρόκειται για αντιδραστήρα έμμεσου κύκλου όπου το ψυκτικό είναι D_2O όπως αναφέραμε και βρίσκεται υπό ικανή πίεση, ώστε να αποφεύγεται ο βρασμός του. Το δοχείο της καρδιάς περιέχει τον επιβραδυντή (D_2O) και το διαπερνούν οριζόντια εκατοντάδες σωλήνες πίεσης, το ψυκτικό (D_2O) είναι ανεξάρτητο από τον επιβραδυντή και ρέει μέσα στο σωλήνα πίεσης όπου τοποθετούνται συστάδες καυσίμου (Εικόνα 3.6).

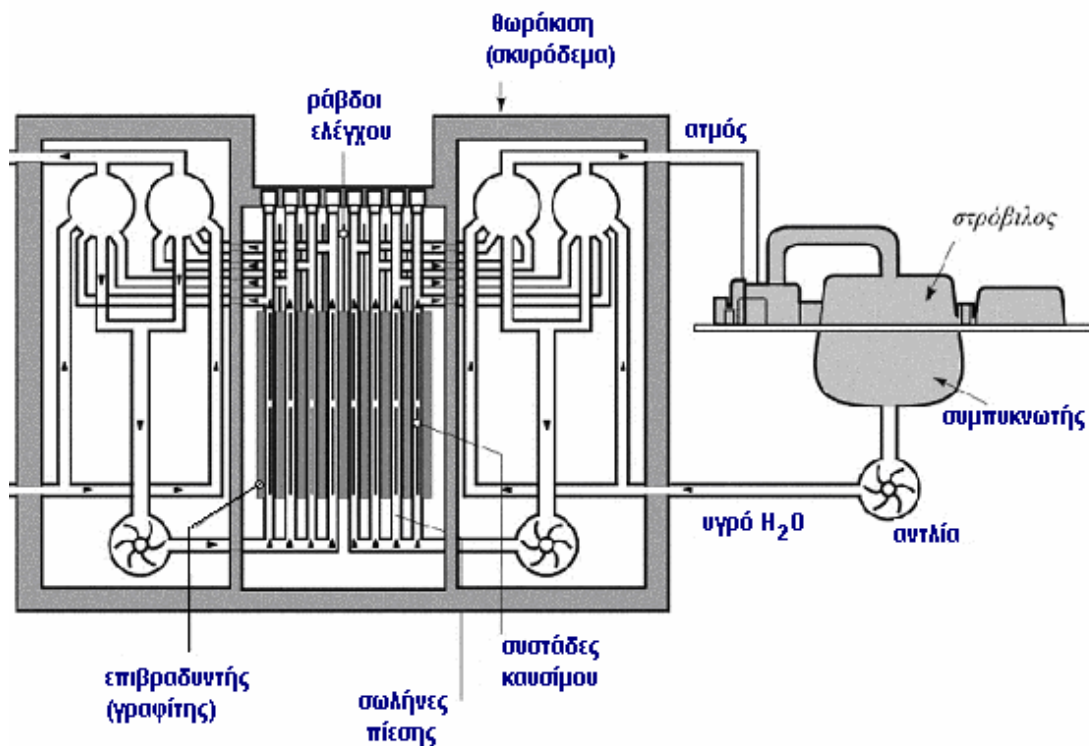


Εικόνα 3.6: Αντιδραστήρας CANDU

Το δοχείο της καρδιάς είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα πάχους 2,5 εκατοστών περίπου και διατηρείται σε ατμοσφαιρική πίεση καθώς το ψυκτικό είναι ανεξάρτητο από τον επιβραδυντή. Τέλος το ψυκτικό από την έξοδο των σωλήνων πίεσης οδηγείται στις ατμοπαραγωγικές μονάδες οι οποίες αποτελούνται από απλό νερό. Η θερμότητα από το βαρύ ύδωρ προκαλεί το νερό να εξατμίζεται και ο ατμός υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης οδηγείται στον ατμοστρόβιλο.

3.3.3 Αντιδραστήρες γραφίτη-ύδατος

Ένα ακόμη βήμα για τη διατήρηση των πλεονεκτημάτων του συστήματος πολλαπλών σωλήνων πίεσης, με ταυτόχρονη αποφυγή του κόστους του D_2O , αποτελεί ο αντιδραστήρας γραφίτη-ύδατος (RMBK), ο οποίος αναπτύχθηκε στην πρώην Σοβιετική Ένωση. Ο επιβραδυντής του RMBK είναι γραφίτης. Το ψυκτικό που ρέει στους σωλήνες πίεσης, όπου ευρίσκονται οι ράβδοι καυσίμου, είναι νερό και το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι εμπλουτισμένο ουράνιο (1.8%) (Εικόνα 3.7).

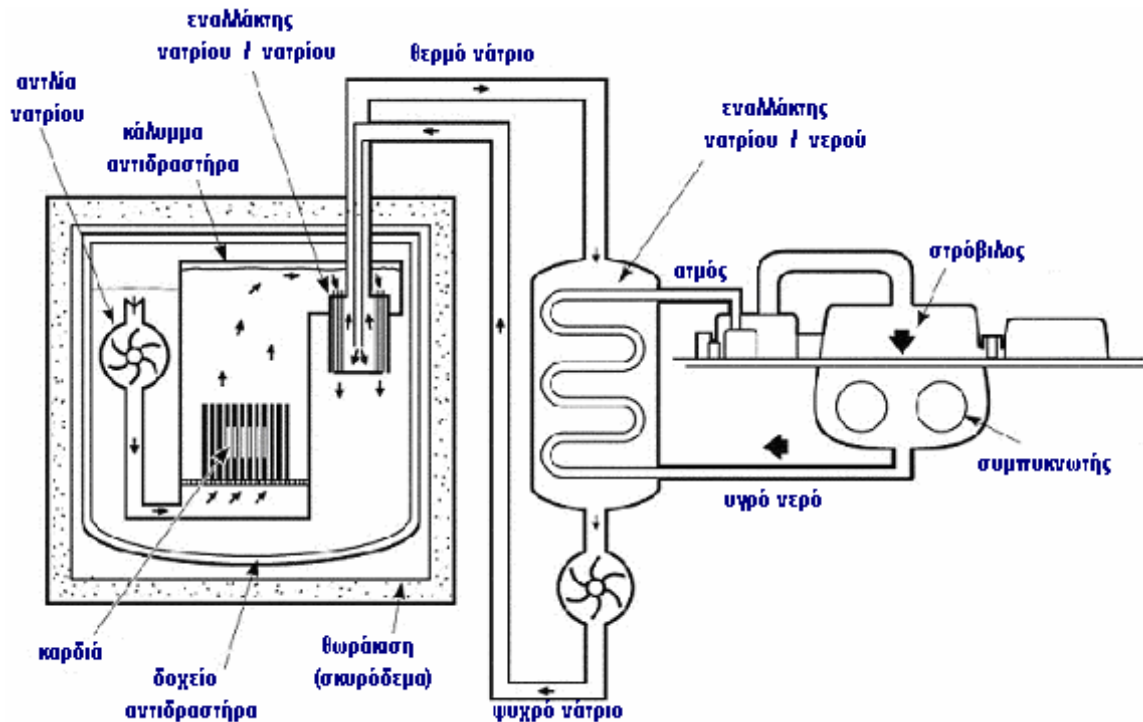


Εικόνα 3.7: Αντιδραστήρας γραφίτη ύδατος

3.3.4 Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ταχείων νετρονίων

Για αυτούς τους αντιδραστήρες σκοπός είναι η παραγωγή περισσότερου σχάσιμου υλικού από όσο καταναλώνει, οπότε και μεγάλος αριθμός των νετρονίων που προκύπτουν ανά σχάση. Για αυτό επελέγη ως σχάσιμο υλικό το πλουτώνιο ($Pu-239$) διότι έχει μεγαλύτερο ν από τα άλλα σχάσιμα υλικά. Στους συγκεκριμένους αντιδραστήρες δε χρησιμοποιείται επιβραδυντής αφού επιδιώκεται η αποφυγή της επιβράδυνσης των νετρονίων, έτσι όμως

έχουμε μικρό όγκο καρδιάς για τον αντιδραστήρα ο οποίος συνεπάγεται με μεγάλες διαρροές νετρονίων. Ως λύση λοιπόν η καρδιά περιβάλλεται με επίστρωση ουρανίου το οποίο απορροφά τα επιπλέον νετρόνια που ξεφεύγουν και μετασχηματίζονται σε Pu-239. Ακόμα μία συνέπεια όμως του μικρού όγκου της καρδιάς είναι η μεγάλη πυκνότητα ισχύος, έτσι επιλέχθηκε το υγρό νάτριο ως ψυκτικό για την απαγωγή της θερμότητας (Εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8: Αναπαραγωγικός αντιδραστήρας ταχέων νετρονίων

3.3.5 Προηγμένοι αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος

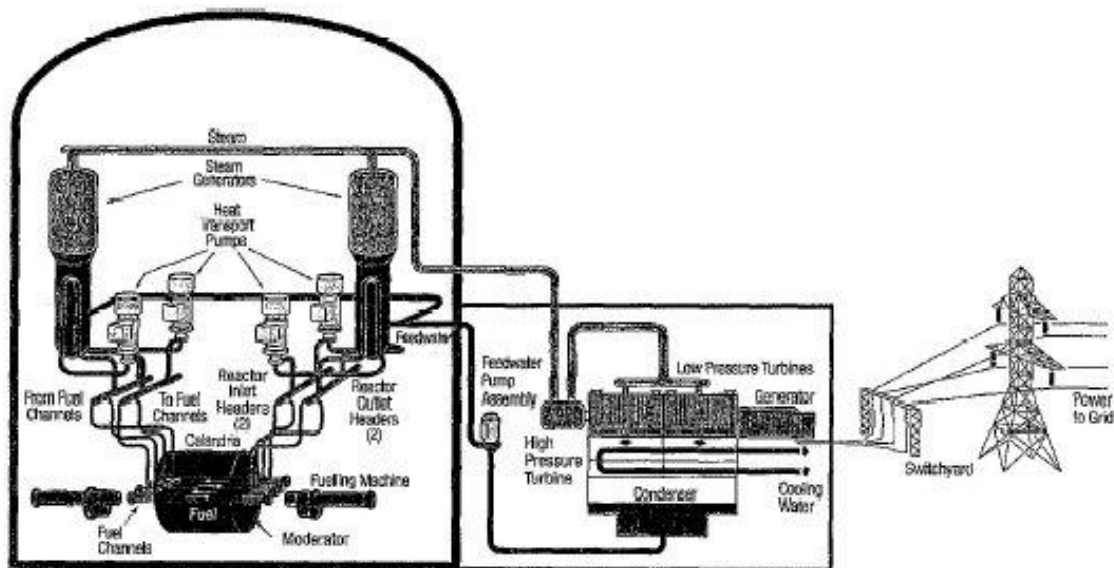
Ένα ακόμη παράδειγμα αντιδραστήρων είναι οι προηγμένοι αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος όπου αναπτύχθηκαν με σκοπό να είναι οικονομικά πιο ανταγωνιστική η χρήση της πυρηνικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή με καινούργια και πιο απλά συστήματα. Παραδείγματα αυτών των αντιδραστήρων είναι οι AP600 (600 MWe) και οι AP1000 (1000 MWe).

Ουσιαστικά είναι μια απλούστερη έκδοση των γνωστών αντιδραστήρων πεπιεσμένου ύδατος με λιγότερη σωλήνωση, λιγότερες βαλβίδες και μειωμένους σεισμικούς όγκους κτηρίων. Επίσης διαθέτουν συστήματα παθητικής ψύξης σε περίπτωση ατυχήματος τα οποία στηρίζονται σε απλούς φυσικούς νόμους όπως η βαρύτητα, η φυσική κυκλοφορία και το συμπιεσμένο αέριο για να ψύξουν γρήγορα τον πυρήνα του αντιδραστήρα. Το αποτέλεσμα αυτών των καινούργιων σχεδιασμών είναι οι συγκεκριμένοι αντιδραστήρες να έχουν εκατό φορές λιγότερη συχνότητα βλάβης σε σχέση με τα προηγούμενα σχέδια εγκαταστάσεων. Επίσης αξιοσημείωτη είναι και η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής τους που ανέρχεται στα 60 χρόνια.

3.3.6 Επόμενης γενιάς CANDU

Αποτελούν ένα καλύτερο σχεδιασμό των ήδη υπάρχων αντιδραστήρων CANDU που αναφέραμε και πριν με καινούργια χαρακτηριστικά. Τα βασικότερα εξ αυτών είναι το σύστημα ψύξης που χρησιμοποιεί ελαφρύ νερό αντί για βαρύ, η χρήση εμπλουτισμένο ουράνιο αντί για απλού, το μέγεθος του πυρήνα του αντιδραστήρα όπου είναι σχεδόν το μισό σε σχέση με τους CANDU και η εκτεταμένη διάρκεια ζωής του καυσίμου με μειωμένο όγκο ακτινοβολίας καυσίμου. Επίσης παρέχουν βελτιωμένη θερμική απόδοση καθώς χρησιμοποιούν ατμοστρόβιλους υψηλότερης πίεσης ατμού.

Για την ασφάλεια τους αυτός ο νέος σχεδιασμός διαθέτει δύο ανεξάρτητα συστήματα διακοπής λειτουργίας και τη δυνατότητα παθητικής ψύξης καυσίμου σε περίπτωση ανάγκης όπως στους προηγμένους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (Εικόνα 3.9). [5][6]

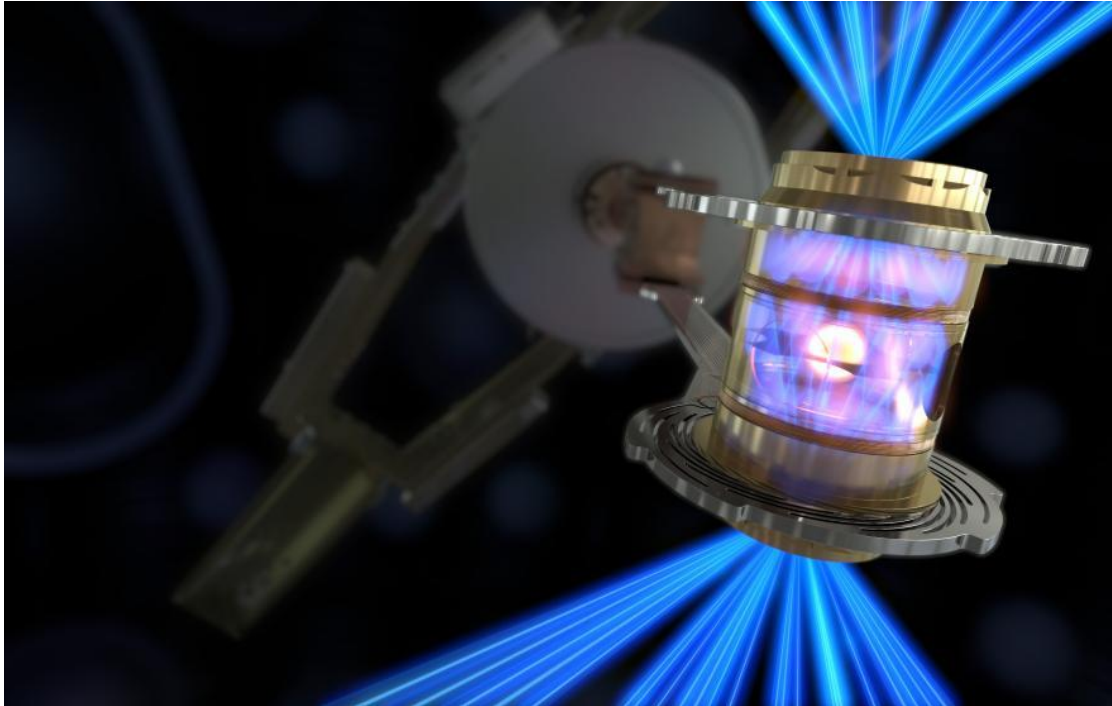


Εικόνα 3.9: Αντιδραστήρας επόμενης γενιάς CANDU

3.3.7 Πυρηνικός αντιδραστήρας σύντηξης

Σύγχρονη ιστορία γράφτηκε στις 13 Δεκεμβρίου 2022 όπου το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ και η Εθνική Διοίκηση Πυρηνικής Ασφάλειας ανακοίνωσαν την επίτευξη πυρηνικής σύντηξης, μιας μεθόδου παραγωγής ενέργειας από την πυρηνική που γνωρίζαμε μόνο σε θεωρητικό επίπεδο εδώ και 60 χρόνια.

Σύντηξη ονομάζεται η διαδικασία όπου δύο ελαφροί πυρήνες συνδυάζονται για να σχηματίσουν έναν ενιαίο βαρύτερο πυρήνα απελευθερώνοντας μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Οι πρώτοι επιστήμονες το 1960 υπέθεσαν ότι κάτι τέτοιο θα ήταν πιθανό με τη χρήση ενός λέιζερ και 62 χρόνια μετά οι επιστήμονες του σήμερα κατασκευάζοντας τα πιο ισχυρά συστήματα λέιζερ, ικανά να δημιουργήσουν θερμοκρασίες και πιέσεις όπως αυτές στους πυρήνες των αστεριών, και χρησιμοποιώντας τις γνώσεις των παλιών κατάφεραν να παράξουν 2.05 μεγατζάουλ (MJ) περισσότερη ενέργεια από αυτή που χρειάστηκε σαν είσοδο το πείραμα. Για να δημιουργηθεί η ανάφλεξη σύντηξης η ενέργεια λέιζερ μετατρέπεται σε ακτίνες X οι οποίες στη συνέχεια συμπιέζουν μια κάψουλα καυσίμου μέχρι να εκραγεί, δημιουργώντας ένα πλάσμα υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής πίεσης (Εικόνα 3.10).



Εικόνα 3.10: Η κάψουλα καυσίμου και οι ακτίνες λέιζερ που χρησιμοποιήθηκαν για την επιτυχή πυρηνική σύντηξη

Σαφώς αυτό αποτελεί μόνο την αρχή από ένα μεγάλο επιστημονικό κεφάλαιο που σίγουρα στο μέλλον θα προχωρήσει πολύ περισσότερο. Κάποιοι επιστήμονες πιστεύουν ότι στο μέλλον δε θα βασιζόμαστε στα ορυκτά για παραγωγή ενέργειας και ότι μοντέλα όπως ο πυρηνικός αντιδραστήρας σύντηξης θα παρέχουν καθαρή και αξιόπιστη ενέργεια σε όλο τον κόσμο. Σίγουρα το μέλλον φαίνεται λαμπρό και με την παραπάνω ιστορική ανακάλυψη η ανθρωπότητα έκανε ένα βήμα πιο κοντά προς αυτό. [7]

3.4 Ασφάλεια

Σαφώς και ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα αποτελεί η ασφάλεια των μονάδων που φτιάχνουμε. Λόγω των πιθανών συνεπειών των πυρηνικών ατυχημάτων ο κατασκευαστής και ο υπεύθυνος λειτουργίας της εγκατάστασης έχουν διεθνώς την κύρια ευθύνη για την ασφάλεια της εγκατάστασης και σε δεύτερη φάση οι σχετικοί οργανισμοί που αναπτύσσουν τα πρότυπα ασφαλείας.

Ο βασικός στόχος των συστημάτων ασφαλείας είναι η εξασφάλιση πολλαπλών διαδοχικών φραγμάτων εγκλωβισμού, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα διαρροής των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης στο περιβάλλον. Το πως πετυχαίνετε αυτό σε κάθε αντιδραστήρα είναι διαφορετικό, λόγω των διαφορών των αντιδραστήρων μεταξύ τους, αλλά υπάρχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά.

Το πρώτο φράγμα είναι το ίδιο το καύσιμο. Στους περισσότερους αντιδραστήρες το καύσιμο είναι στερεό, συνήθως κεραμικό με σημείο τήξης 2860 βαθμούς Κελσίου, στη μορφή των μικρών κυλινδρικών δισκίων. Τα στερεά προϊόντα της σχάσης εγκλωβίζονται μέσα στο ίδιο το δισκίο. Τα αέρια όμως προϊόντα της σχάσης, όπως είναι τα ραδιοϊσότοπα του κρυπτού, του ξένου και του ιωδίου, διαφεύγουν από τα δισκία με αργό ρυθμό.

Το δεύτερο φράγμα είναι το κλειστό περίβλημα της ράβδου καυσίμου, το οποίο εγκλωβίζει τα αέρια προϊόντα της σχάσης. Ανάμεσα στα δισκία και το περίβλημα υπάρχει αδρανές αέριο ήλιο. Καθώς η ράβδος παραμένει 3 ή 4 έτη στην καρδιά, δηλαδή σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας και έντονου βομβαρδισμού με νετρόνια, το υλικό του περιβλήματος καταπονείται, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μικρών ρωγμών και οπών από τις οποίες διαφεύγουν ραδιενεργά αέρια στο ψυκτικό. Το ποσοστό των ράβδων από τις οποίες διαφεύγουν αέρια είναι της τάξης του 0,2%, κοντά στο τέλος της παραμονής των στην καρδιά του αντιδραστήρα.

Το τρίτο φράγμα εγκλωβισμού των προϊόντων της σχάσης είναι το δοχείο πίεσης και το κύκλωμα του ψυκτικού. Και για επιπλέον προστασία από διαρροές ραδιενεργών προϊόντων από το πρωτεύον κύκλωμα του ψυκτικού εγκαθίστανται και συστήματα ανίχνευσης ραδιενέργειας για την έγκαιρη διάγνωση διαρροών σε όλη την έκταση του πρωτεύοντος κυκλώματος. Εγκαθίστανται επίσης αισθητήρες διαρροής ψυκτικού για τη έγκαιρη διάγνωση μικρών διαρροών, ώστε να διορθωθούν εγκαίρως.

Και τέλος το τελευταίο φράγμα είναι το δοχείο εγκλωβισμού που κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους τουλάχιστον ενός μέτρου για να αντέχει τις μεγάλες πιέσεις και να κρατάει μέσα του τα ραδιενεργά προϊόντα.

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες κατά την κατασκευή τους ακολουθούν την αρχή άμυνα σε βάθος. Δηλαδή πρέπει να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα εκκίνησης οποιουδήποτε πιθανού ατυχήματος, επιβάλλεται το σύστημα να έχει σχεδιαστεί και να λειτουργεί έτσι, ώστε αν το ατύχημα εκκινήσει, να αποτρέψει την ανάπτυξη του ατυχήματος και να επαναφέρει τον αντιδραστήρα σε ασφαλή κατάσταση. Και τέλος ελαχιστοποίηση της πιθανότητας να συμβεί μεγάλο ατύχημα, αν παρόλα αυτά το ατύχημα συμβεί να ελαχιστοποιηθούν οι συνέπειες στο περιβάλλον και στην υγεία του πληθυσμού.

Αξίζει να σημειωθεί ότι περίπου το 25% του συνολικού κόστους ενός πυρηνικού εργοστασίου είναι μόνο για την ασφάλεια των αντιδραστήρων. Τα σημερινά πυρηνικά εργοστάσια είναι τόσο εξελιγμένα σε θέματα ασφαλείας όπου η πιθανότητα ατυχήματος απώλειας ψυκτικού (LOCA) που είναι το πιο σοβαρό ατύχημα που μπορεί να συμβεί σε ένα πυρηνικό αντιδραστήρα είναι λιγότερο από 1 στα 1.000.000 έτη λειτουργίας αντιδραστήρων. Στο μέλλον στόχος είναι το 1 στα 10.000.000 έτη.

Τέλος κατά την κατασκευή ενός πυρηνικού εργοστασίου λαμβάνονται υπόψη και άλλα εξωτερικά γεγονότα που μπορούν να συμβούν όπως σεισμοί, πλημμύρες. Κατά την κατασκευή λαμβάνεται υπόψη η σεισμικότητα της εκάστοτε περιοχής για τον προσδιορισμό της θέσης εγκατάστασης. Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες στη Γαλλία είναι κατασκευασμένοι ώστε να αντέχουν σεισμό διπλάσιας ισχύος αυτού του μεγαλύτερου σεισμού που ενδέχεται να συμβεί στα επόμενα χρόνια. Και ας μην ξεχνάμε ότι υπάρχουν και συστήματα ασφαλείας που είναι έτοιμα να σταματήσουν τη λειτουργία του αντιδραστήρα όταν υπάρχει κίνδυνος για κάποιο εξωτερικό φαινόμενο για να ελαχιστοποιηθεί η οποιαδήποτε ζημιά που πρόκειται να συμβεί. Με την συνεχή βελτίωση στην ασφάλεια των πυρηνικών εργοστασίων και την πιθανότητα σοβαρών ατυχημάτων να μειώνεται συνέχεια και να είναι ήδη απειροελάχιστη, από στατιστικής άποψης η πυρηνική ενέργεια είναι η ασφαλέστερη πηγή ηλεκτροπαραγωγής από πλευράς ατυχημάτων.

3.5 Ραδιενεργά κατάλοιπα

Σαφώς και η πυρηνική ενέργεια δεν έρχεται μόνο με θετικά. Από τη χρήση τέτοιων καυσίμων (π.χ. ουράνιο) και μεθόδων (σχάση) προκύπτουν ραδιενεργά κατάλοιπα.

Ραδιενεργά κατάλοιπα ονομάζονται εκείνα τα υλικά που περιέχουν αξιόλογη ποσότητα ραδιενεργών ισοτόπων δε θεωρούνται πλέον χρήσιμα και έχουν προκύψει όπως αναφέραμε από τη χρήση ραδιενεργών υλικών. Τα διακρίνουμε σε χαμηλού επιπέδου, ενδιάμεσου επιπέδου και υψηλού επιπέδου με κριτήρια την ποσότητα και το είδος της ραδιενέργειας καθώς και τους αναμενόμενους χρόνους επιβίωσης των ραδιενεργών ισοτόπων που περιέχουν.

Στην πρώτη κατηγορία των χαμηλού επιπέδου ραδιενεργών καταλοίπων ανήκουν ότι προκύπτει από τις εφαρμογές της πυρηνικής τεχνολογίας στην υγεία, σε εργαστήρια, στη βιομηχανία και στην πυρηνική βιομηχανία. Τα συγκεκριμένα κατάλοιπα έχουν τη μορφή κυρίως συνηθισμένων αντικειμένων όπως χαρτιά, εργαλεία, φίλτρα, γάντια τα οποία όμως περιέχουν μικρές ποσότητες βραχύβιων ραδιοϊσοτόπων. Δηλαδή μικρής διάρκειας ζωής. Προκειμένου να μειωθεί ο όγκος τους συχνά συμπιέζονται και αν είναι υγρά αποξηραίνονται και μετά αποθηκεύονται σε ειδικά δοχεία. Στη συνέχεια φυλάσσονται σε ειδικούς χώρους μέχρι να πέσουν τα επίπεδα ραδιενέργειας και μετά αντιμετωπίζονται σε κοινά απορρίμματα, θάβονται σε μικρό βάθος σε συγκεκριμένες επιβλεπόμενες περιοχές. Αξίζει να σημειωθεί ότι αποτελούν το 90% του συνολικού όγκου όλων των ραδιενεργών καταλοίπων αλλά ταυτόχρονα περιέχουν μόνο το 1% της συνολικής ραδιενέργειας των πυρηνικών αποβλήτων.

Στη δεύτερη κατηγορία ενδιάμεσου επιπέδου είναι τα κατάλοιπα που περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες ραδιενέργειας και που συνήθως χρειάζονται θωράκιση με τσιμέντο ή εμπλουτισμό με τσιμέντο αν είναι υγρά. Περιλαμβάνουν ραδιενεργά υλικά όπως χημικά υγρά, εξαντλημένες ραδιενεργές πηγές από ιατρικές και βιομηχανικές χρήσεις, αντικείμενα από αντιδραστήρες και άλλα. Εκτιμάται ότι παγκοσμίως αποτελούν το 7% του συνολικού όγκου όλων των ραδιενεργών καταλοίπων και ότι περιέχουν μόνο 4% της ραδιενέργειας του συνόλου των καταλοίπων.

Και στην τρίτη κατηγορία υψηλού επιπέδου έχουμε τα προϊόντα της σχάσης με μεγάλη ραδιενέργεια και κάποια βαρέα μακρόβια ραδιενεργά ισότοπα παραγόμενα στους αντιδραστήρες. Στα συγκεκριμένα απαιτείται ψύξη και ειδική θωράκιση κατά τον χειρισμό και τη μεταφορά τους καθώς παράγουν ακόμα σημαντικές ποσότητες θερμότητας.

Τώρα όσον αφορά τα κατάλοιπα μέσου και υψηλού επιπέδου έχουμε δύο πρωτόκολλα διαχείρισης.

Έχουμε την ανακύκλωση δηλαδή τον διαχωρισμό των σχάσιμων από τα λοιπά ραδιενεργά υλικά. Στόχοι της ανακύκλωσης είναι ο περιορισμός των καταλοίπων και χρησιμοποίηση των χρήσιμων ουρανίου ξανά. Η τακτική αυτή ακολουθείται κυρίως από τις ευρωπαϊκές χώρες. Συγκεκριμένα οι συστάδες καυσίμου μεταφέρονται για ανακύκλωση όπου γίνεται ο διαχωρισμός του ουρανίου και του πλουτωνίου από τα λοιπά ραδιενεργά προϊόντα τα οποία στην συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σχάσιμο υλικό στους αντιδραστήρες. Τα υπόλοιπα ραδιενεργά κατάλοιπα οδηγούνται προς ασφαλή μακροχρόνια διαχείριση και αποθηκεύονται σε υγρή μορφή σε κατάλληλες δεξαμενές από ανοξείδωτο χάλυβα περιβαλλόμενες από σκυρόδεμα. Η διαδικασία ψύξης δεν σταματάει καθώς συνεχίζουν να παράγουν σημαντικές ποσότητες θερμότητας.

Η δεύτερη μορφή διαχείρισης είναι η αντιμετώπιση της συστάδας εξαντλημένου καυσίμου ως κατάλοιπο. Η πολιτική αυτή ακολουθείται από τις ΗΠΑ, τη Σουηδία, και τον Καναδά καθώς δε το θεωρούν οικονομικά ωφέλιμο. Οι συστάδες του κατάλοιπου λοιπόν φυλάσσονται στους πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής για 5 έτη. Το διάστημα αυτό είναι είτε στις δεξαμενές νερού είτε σε ξηρά αποθήκευση. Όταν η παραγόμενη θερμότητα και η εκπεμπόμενη ραδιενέργεια πέσουν σε επιθυμητά επίπεδα, τότε αυτά τα κατάλοιπα μεταφέρονται και τοποθετούνται σε δοχεία από μπετόν συγκεκριμένου πάχους, το οποίο λειτουργεί ως αποτελεί ασπίδα από την ραδιενέργεια. Εξαιρέση και πάλι η Σουηδία, η οποία διαθέτει αποθήκευσης καταλοίπων από το 1988 όπου αποθηκεύονται σε δεξαμενή νερού για 40 έτη (Εικόνα 3.11).



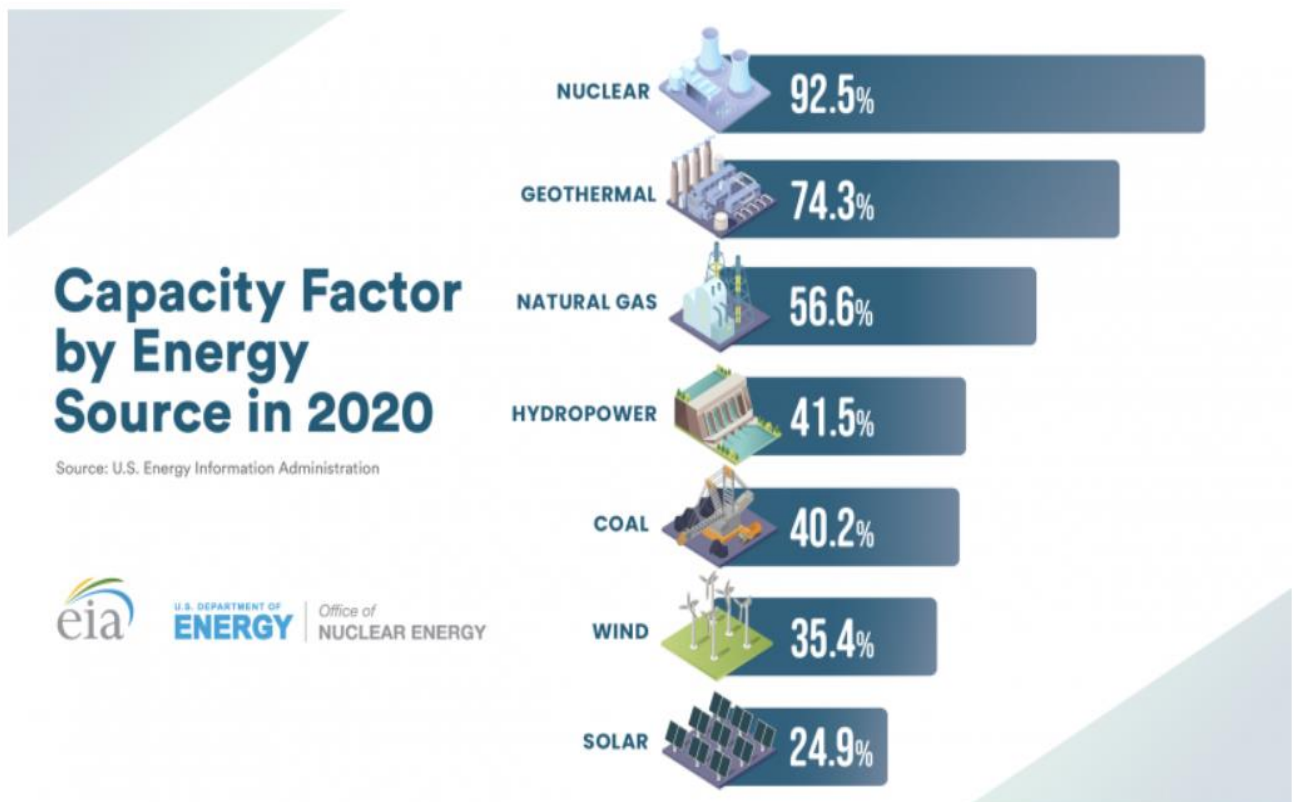
Εικόνα 3.11: Αποθήκη προσωρινής αποθήκευσης ραδιενεργών κατάλοιπων

Τέλος όποιο πρωτόκολλο και αν ακολουθηθεί τα κατάλοιπα αφού παραμείνουν επί 40 έως 50 περίπου έτη στην προσωρινή αποθήκευση προβλέπεται να αποθηκευτούν βαθιά στο έδαφος. Η εναπόθεση γίνεται σε βάθος 500 έως 1000 μέτρων σε γεωλογικό σχηματισμό του οποίου δεν διέρχονται ύδατα. [6]

3.6 Πλεονεκτήματα πυρηνικής ενέργειας

Συνοψίζοντας η πυρηνική ενέργεια προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπόλοιπες μορφές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με το βασικότερο να είναι ο υψηλός συντελεστής δυναμικότητας. Σα συντελεστή δυναμικότητας ορίζουμε τη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε σχέση με το μέγεθος της εγκατάστασης.

Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 12 τα εργοστάσια πυρηνικής ενέργειας είχαν συντελεστή δυναμικότητας 92.5% με αμέσως επόμενη την γεωθερμική ενέργεια σε ποσοστό 74.3% ενώ οι πιο συγκαταβατικές μορφές όπως το φυσικό αέριο και τα εργοστάσια άνθρακα να έχουν 56.6% και 40.2% αντίστοιχα (Εικόνα 3.12).



Εικόνα 3.12: Συντελεστής δυναμικότητας ανά μορφή ενέργειας 2020

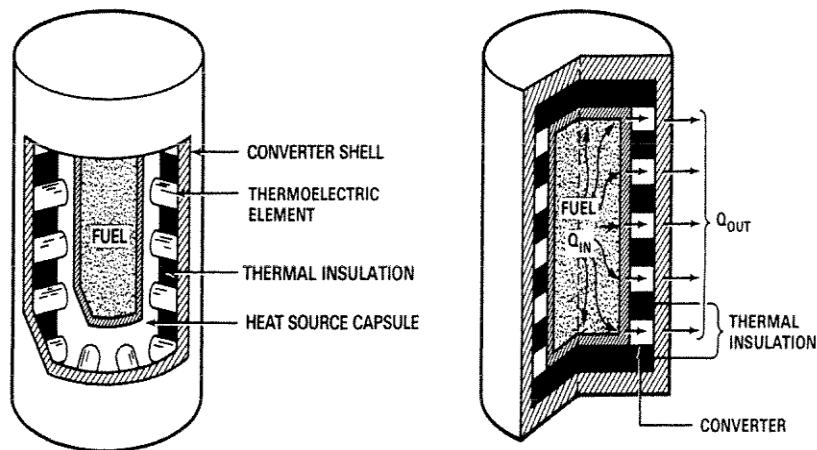
Επιπλέον οι πυρηνικοί σταθμοί λειτουργούν συνεχώς για μεγάλες χρονικές περιόδους, παρέχοντας μια σταθερή και αξιόπιστη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό σε συνδυασμό με τις χαμηλές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και την υψηλή αποδοτικότητα των πυρηνικών σταθμών στη μετατροπή της ενέργειας των καυσίμων τους σε ηλεκτρική ενέργεια (περίπου 33%) και το χαμηλό λειτουργικό κόστος σε σύγκριση με άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας η πυρηνική ενέργεια έχει τη δυνατότητα να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών του κόσμου, συμβάλλοντας παράλληλα στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής. [8]

Κεφάλαιο 4 Εφαρμογές πυρηνικής ενέργειας για την εξερεύνηση του διαστήματος

Στην εξερεύνηση του διαστήματος, η πυρηνική ενέργεια έχει χρησιμοποιηθεί για πολλούς διαφορετικούς σκοπούς, συμπεριλαμβανομένης της τροφοδοσίας διαστημικών σκαφών και της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας για επιστημονικά όργανα και άλλο εξοπλισμό ακόμα και δορυφόρων τηλεπικοινωνίας, αλλά και σε μερικές περιπτώσεις για παραγωγή θερμικής ενέργειας. Ένα από τα πιο γνωστά παραδείγματα χρήσης της πυρηνικής ενέργειας στην εξερεύνηση του διαστήματος είναι η χρήση θερμοηλεκτρικών γεννητριών ραδιοϊσοτόπων (RTG) για την τροφοδοσία διαστημικών σκαφών. Η ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας είναι πολύ σημαντική σε καταστάσεις όπου δεν είναι πρακτική η χρήση ηλιακών συλλεκτών (πάνελ) ή συμβατικών μπαταριών. Αλλά και για τη χρήση συστημάτων πυρηνικής πρόωσης τα οποία χρησιμοποιούν την ενέργεια που απελευθερώνεται από τις πυρηνικές αντιδράσεις για να παρέχουν ώθηση σε ένα διαστημόπλοιο.

4.1 Θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ραδιοϊσοτόπων (RTG)

Ως θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ραδιοϊσοτόπων ορίζουμε τις συσκευές που χρησιμοποιούν τη θερμότητα που παράγεται από τη ραδιενεργή διάσπαση μιας μικρής ποσότητας ραδιενεργού ισότοπου, όπως το πλουτώνιο-238, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ραδιοϊσοτόπων αποτελούνται από δύο κύρια μέρη, ένα σύστημα που παράγει τη θερμότητα και ένα σύστημα που τη μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια (Εικόνα 4.1).

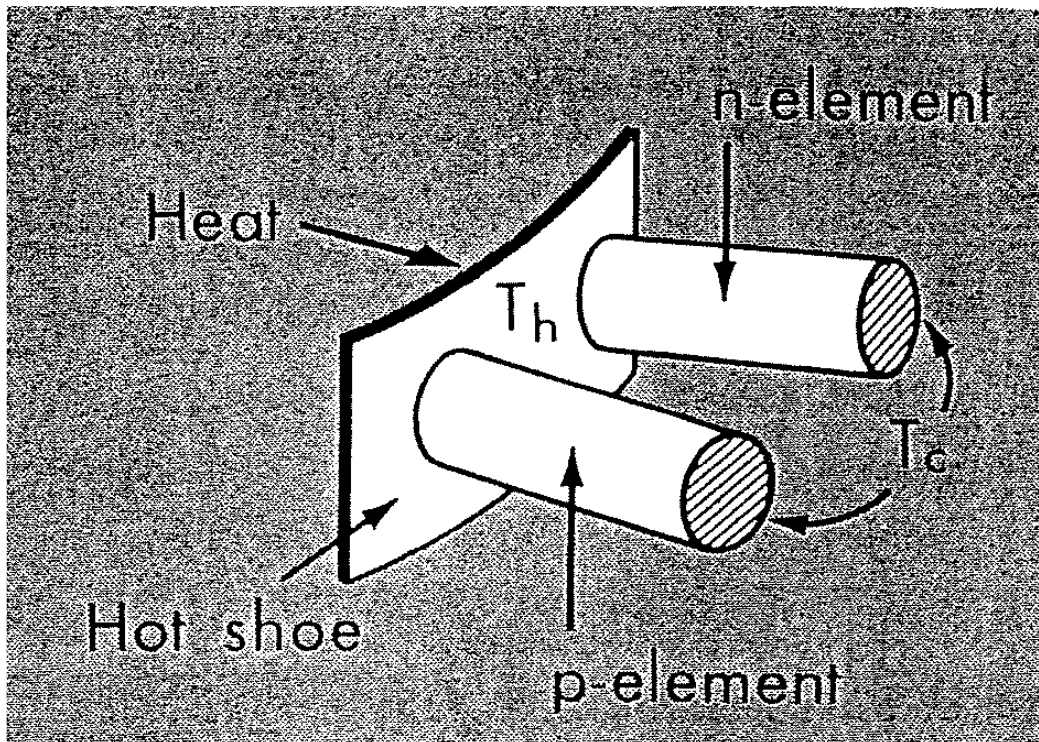


Εικόνα 4.1: Τομή σε μία θερμοηλεκτρική γεννήτρια ραδιοϊσοτόπων και διάγραμμα λειτουργίας

Το σύστημα θερμότητας ή αλλιώς πηγή θερμότητας αποτελείται από ένα σφραγισμένο δοχείο ραδιοϊσοτόπων (πλουτώνιο-238) που το καύσιμο διασπάται και απελευθερώνει θερμότητα. Και στη συνέχεια, η θερμότητα μεταφέρεται μέσω ενός θερμοστοιχείου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Πιο αναλυτικά οι πρώτες θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ραδιοϊσοτόπων χρησιμοποίησαν πλουτώνιο-238 σε μεταλλική φόρμα. Μετά το πλουτώνιο χρησιμοποιήθηκε σε μορφή μικρών σφαιρών φτιαγμένες από οξείδιο από πλουτώνιο. Και τέλος για λόγους μεγαλύτερης ασφάλειας η μορφή του καυσίμου άλλαξε σε κεραμοειδή (κεραμικό-μεταλλικό στερεό) συγκεκριμένα μια μίξη από οξείδιο πλουτωνίου και μολυβδαίνιο.

Ένα θερμοηλεκτρικό στοιχείο αποτελείται από δύο άκρα. Ένα θετικό και ένα αρνητικό. Το θετικό άκρο αποτελείται από υλικά που έχουν έλλειψη ηλεκτρονίων και για αυτό συμπεριφέρεται σε θετικά φορτισμένο. Το αρνητικό άκρο αποτελείται από υλικά που το κάνουν να έχει υπερβολικά πολλά ηλεκτρόνια δίνοντας του αρνητικό φορτίο. Όταν αυτό θερμαίνεται τα ηλεκτρόνια από το αρνητικό άκρο απωθούνται από το θερμό άκρο και αντίστροφα τα ηλεκτρόνια στο θετικό άκρο έλκονται από τη θερμότητα. Έτσι σαν αποτέλεσμα έχουμε τη παραγωγή ρεύματος από τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία καθώς ο ορισμός του ρεύματος είναι η κίνηση των ηλεκτρονίων (Εικόνα 4.2).



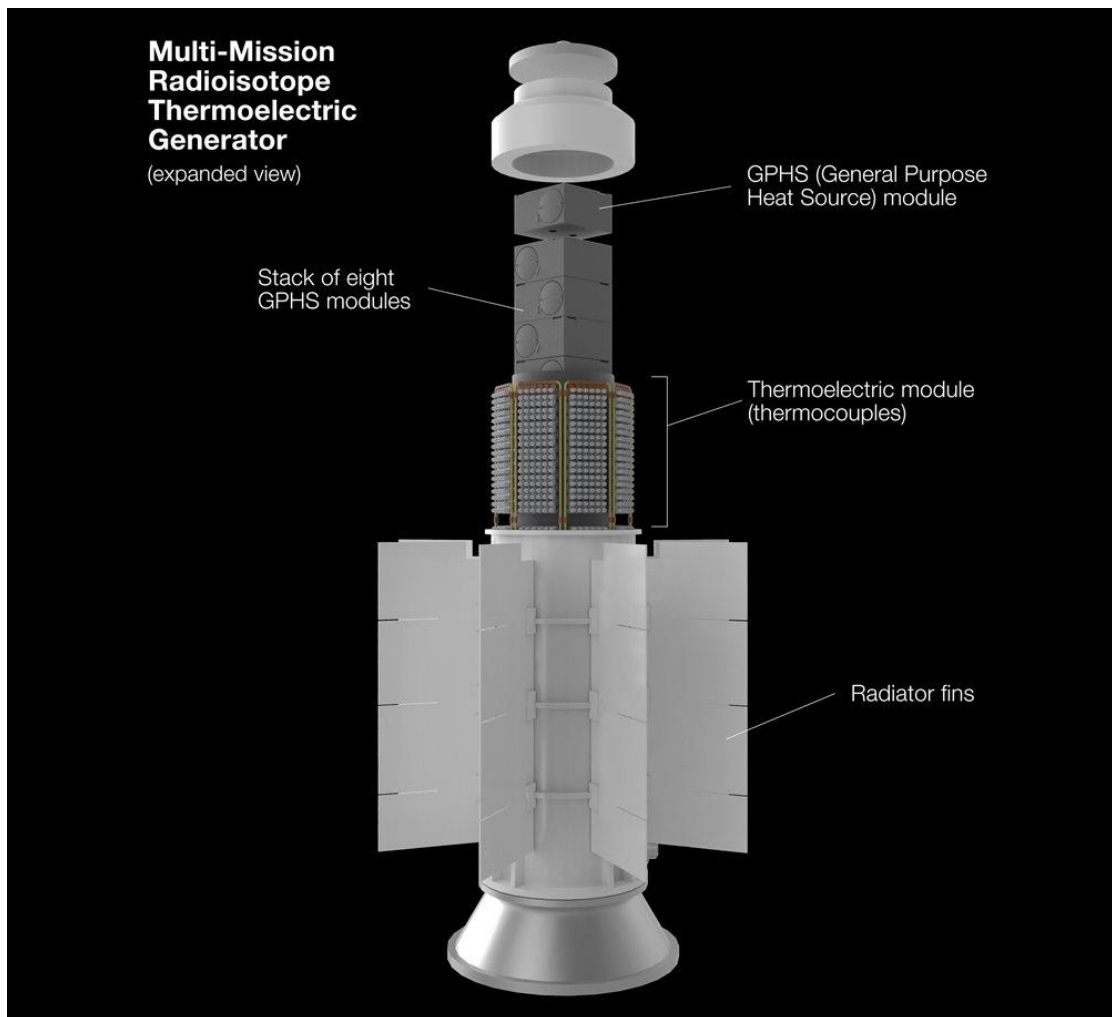
Εικόνα 4.2: Γενική εικόνα θερμοηλεκτρικού στοιχείου όπου το p-element είναι το θετικό άκρο και το n-element το αρνητικό

Ένα καλό θερμοηλεκτρικό υλικό πρέπει να έχει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση. Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα βοηθάει στο να μη ταξιδεύει υπερβολική θερμότητα από το θερμό μέρος στο κρύο χωρίς να παράγεται ηλεκτρική ενέργεια, με άλλα λόγια να διατηρείται η διαφορά θερμοκρασίας όπου βασίζεται το στοιχείο μας, και η χαμηλή αντίσταση μειώνει τις θερμικές απώλειες. Τέλος το υλικό μας πρέπει να μπορεί να παράγει υψηλή τάση για να υπάρχει αρκετή διαφορά θερμοκρασίας του κρύου και του θερμού άκρου.

Ιστορικά οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής από το 1961 έχουν χρησιμοποιήσει 40 θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ραδιοϊσοτόπων για να παρέχουν ενέργεια σε 23 διαστημικά συστήματα. [9]

Ωστόσο τα τελευταία μοντέλα θερμοηλεκτρικών γεννητριών ραδιοϊσοτόπων που λειτουργούν με πλουτώνιο ονομάζονται πηγές θερμότητας γενικής χρήσης (GPHS RTG) συνολικής ισχύος 249 watt. Κάθε τέτοιο σύστημα αποτελείται από τέσσερα σφαιρίδια

καυσίμου φτιαγμένα από κεραμικά πλουτωνίου και η ενέργεια παρέχεται στο σύστημα μέσω 18 μονάδων πηγής θερμότητας. Ακόμα ένα σημαντικό μοντέλο είναι οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ραδιοϊσοτόπων πολλαπλών αποστολών (MMRTG) οι οποίες βασίζονται στην ίδια αρχή με τις προηγούμενες με τη μόνη διαφορά ότι χρησιμοποιούν 8 μονάδες πηγής θερμότητας γενικής χρήσης με περίπου 4.8 κιλά οξειδίου του πλουτωνίου με θερμική ισχύ 2 kW δηλαδή 110 watt παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας με 2.7 κιλοβατώρες ανά ημέρα (Εικόνα 4.3). [10]

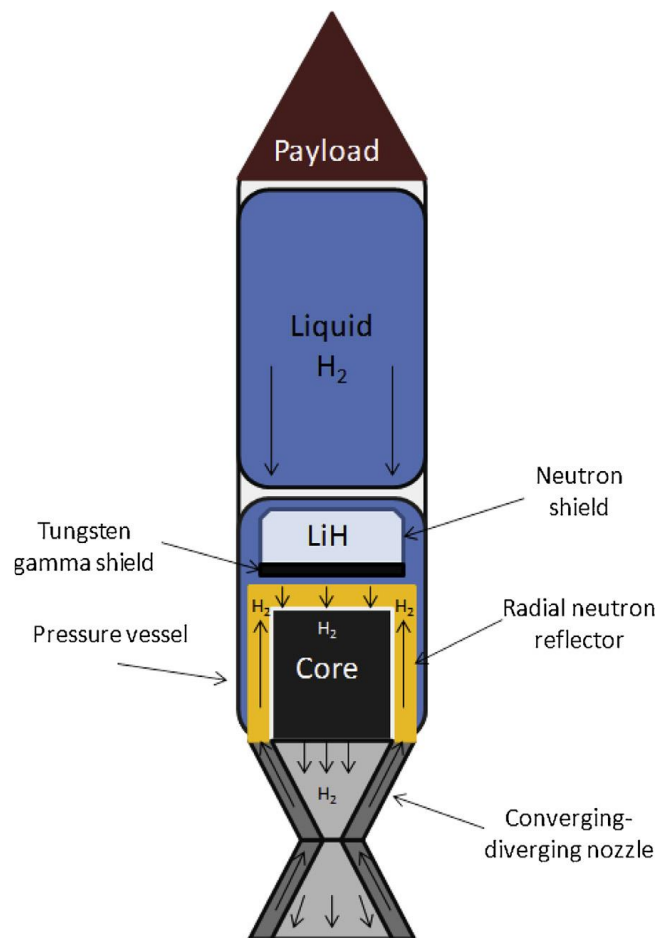


Εικόνα 4.3: Απεικόνιση μοντέλου θερμοηλεκτρικής γεννήτριας ραδιοϊσοτόπων πολλαπλών αποστολών.

4.2 Πυρηνικοί θερμικοί πύραυλοι

Οι πυρηνικοί θερμικοί πύραυλοι (NTRs) είναι ένας τύπος συστήματος πρόωσης που χρησιμοποιεί έναν πυρηνικό αντιδραστήρα για να θερμάνει ένα προωθητικό σε υψηλές θερμοκρασίες και στη συνέχεια να το αποβάλλει μέσω ενός ακροφυσίου για να παράγει ώθηση.

Ωστόσο, αυτά τα συστήματα πυραύλων είναι πολύ πιο περίπλοκα και δαπανηρά στην ανάπτυξη και στη λειτουργία τους σε σχέση με τους χημικούς πυραύλους και εγείρουν σημαντικές ανησυχίες για την ασφαλή χρήση τους. Παρά τις προκλήσεις έχουν μελετηθεί από διάφορους διαστημικούς οργανισμούς και ιδιωτικές εταιρείες ως δυνητικά μέσα για την πραγματοποίηση επανδρωμένων αποστολών μεγάλης εμβέλειας και άλλων προηγμένων διαστημικών εφαρμογών με δυνατότητες που ξεπερνούν τα σημερινά συστήματα χημικών πυραύλων (Εικόνα 4.4). [11]



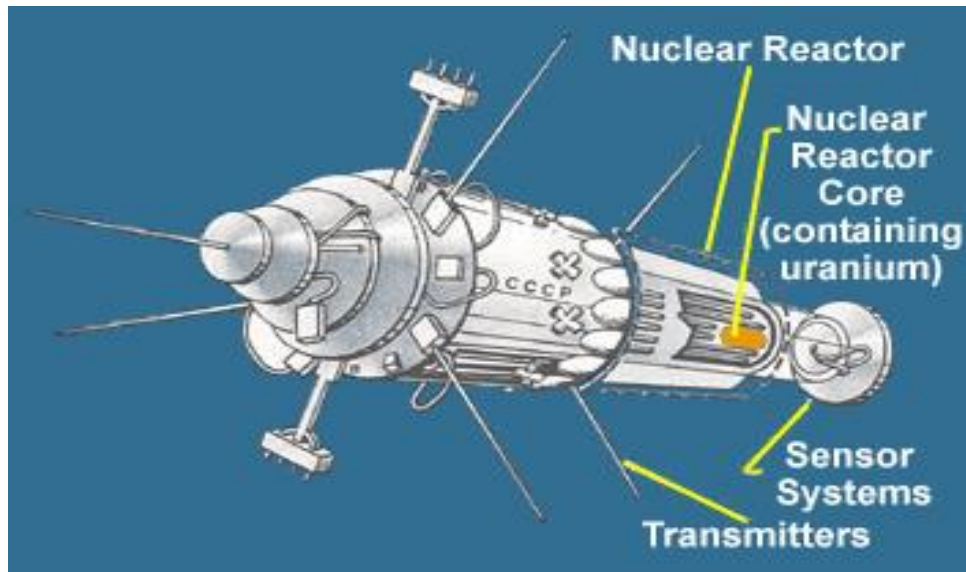
Εικόνα 4.4: Μοντέλο πυρηνικού πυραύλου μονού σταδίου σε χαμηλή τροχιά γης

4.3 Παραδείγματα χρήσης πυρηνικής ενέργειας στο διάστημα

Υπάρχουν πολλά επιτυχημένα παραδείγματα που η πυρηνική ενέργεια έχει χρησιμοποιηθεί στο διάστημα. Τα δύο βασικότερα είναι για τη παραγωγή ενέργειας για δορυφόρους και εξοπλισμό που βρίσκονται σε τροχιά της γης και έχουν επικοινωνιακούς στόχους και για τη παραγωγή ενέργειας για τα διαστημόπλοια που στέλνονται στο διάστημα για λόγους εξερεύνησης. Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα δούμε τα προγράμματα που αποτέλεσαν σταθμό στην ιστορία της ανάπτυξης της σημερινής πυρηνικής τεχνολογίας.

4.3.1 Πρόγραμμα RORSAT

Συγκεκριμένα το πρόγραμμα RORSAT (Radar Ocean Reconnaissance Satellite) της Σοβιετικής Ένωσης στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν πυρηνικές αντιδράσεις για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το σύστημα ραντάρ του δορυφόρου οι οποίοι μπορούσαν να διαπεράσουν την επιφάνεια της θάλασσας και να συλλέξουν πληροφορίες για υποβρύχια και πλοία. Το πρόγραμμα λειτούργησε από το 1967 μέχρι το 1988 και εκτοξεύτηκαν 34 πυρηνικοί αντιδραστήρες χαμηλής ισχύος με μόνο ένα ατύχημα το 1978 όπου ο Cosmos-954 ξαναμπήκε στην ατμόσφαιρα και έγινε κομμάτια πάνω από τον Καναδά. Το πρόγραμμα αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς ήταν από τις πρώτες φορές που ο άνθρωπος επιχείρησε να χρησιμοποιήσει αυτή τη τεχνολογία και στα 21 χρόνια λειτουργίας και με την τότε τεχνογνωσία υπήρξε μόνο ένα παράδειγμα δυσλειτουργίας (Εικόνα 4.5).

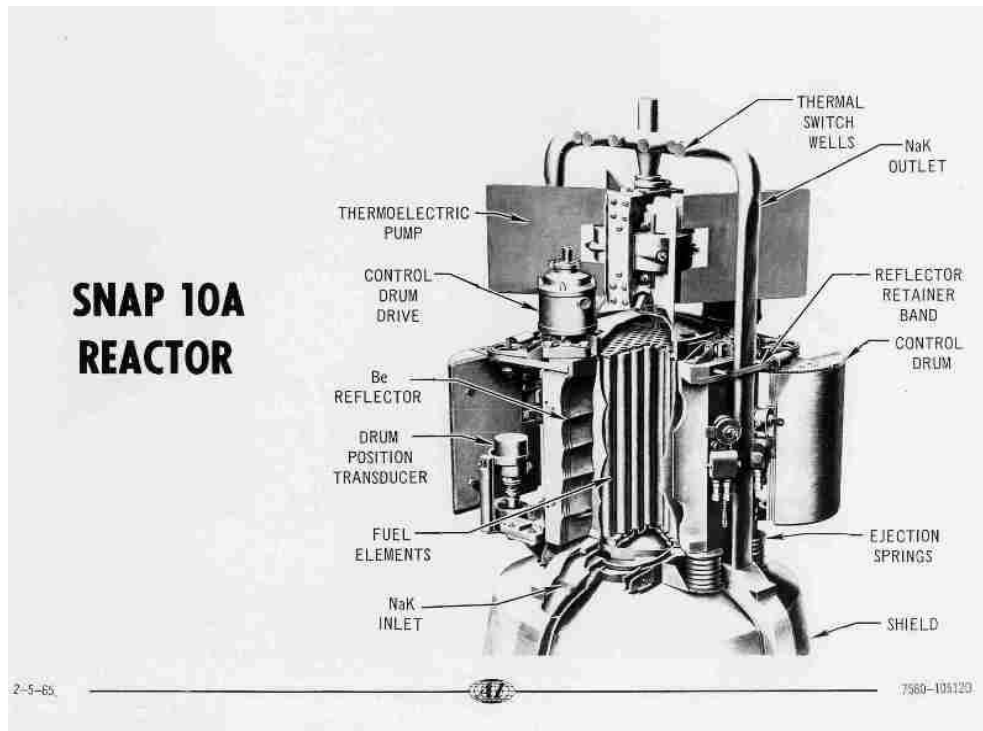


Εικόνα 4.5: Μοντέλο δορυφόρου του προγράμματος RORSAT

4.3.2 Πρόγραμμα SNAP

Τα αρχικά του οποίου σημαίνουν Systems for Nuclear Auxiliary Power που στα ελληνικά μεταφράζεται ως βοηθητικά συστήματα πυρηνικής ενέργειας. Το πρόγραμμα ξεκίνησε από τις ΗΠΑ το 1950 από την Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας και είχε ως στόχο την ανάπτυξη μιας συμπαγούς και ελαφριάς γεννήτριας πυρηνικής ενέργειας με σκοπό τη χρήση της για αποστολές στο διάστημα, για στρατιωτικές επιχειρήσεις αλλά και για την τροφοδοσία φάρων και μετεωρολογικών σταθμών που είναι απομακρυσμένοι γεωγραφικά.

Το πρόγραμμα αυτό ανέπτυξε πολλά διαφορετικά μοντέλα γεννητριών πυρηνικής ενέργειας με τα πιο επιτυχημένα από αυτά τα SNAP-3 και SNAP-9A τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σα πηγές ενέργειας το SNAP-3 σε απομακρυσμένες στρατιωτικές βάσεις και το SNAP-9A σε μετεωρολογικούς σταθμούς. Το πιο ενδιαφέρον όμως μοντέλο ήταν το SNAP-10A το οποίο ήταν το πρώτο μοντέλο πηγής πυρηνικής ενέργειας που εκτοξεύτηκε στο διάστημα και μπήκε σε τροχιά γύρω από τη Γη το 1965 με ισχύ 650 Watt. Δυστυχώς κατάφερε να λειτουργήσει μόνο για 43 ημέρες, όμως η τεχνολογία που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του προγράμματος SNAP ήταν εκείνη που έθεσε τα θεμέλια για την ανάπτυξη των σημερινών συστημάτων πυρηνικής ενέργειας RTG (Εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.6: Διάγραμμα του SNAP 10A

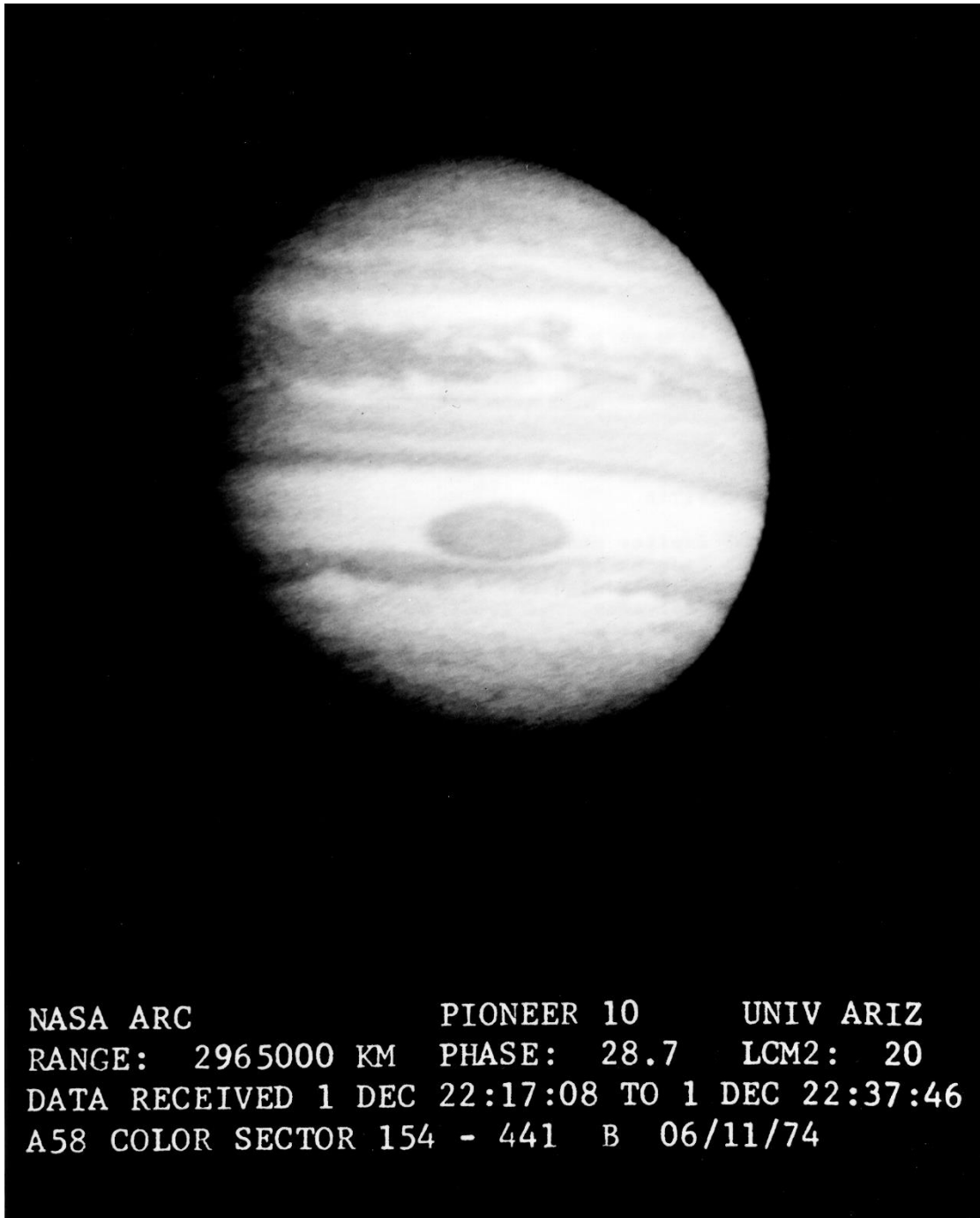
4.3.3 Αποστολές που χρησιμοποίησαν RTG

Μέχρι σήμερα έχουν γίνει 22 αποστολές στο διάστημα που χρησιμοποιήθηκε πυρηνική ενέργεια σε κάποια μορφή, συγκεκριμένα όμως οι 16 από αυτές χρησιμοποίησαν θερμοηλεκτρική γεννήτρια ραδιοϊσοτόπων για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που χρειάστηκαν.

Η πρώτη από αυτές όπως είπαμε θεωρείται το SNAP-10A με ημερομηνία 3 Απριλίου 1965. Η επόμενη αποστολή που χρησιμοποίησε RTG ήταν στις 11 Δεκεμβρίου 1972 με κωδικό όνομα ALSEP το οποίο στέκει για τα πειράματα που έγιναν στην επιφάνεια του φεγγαριού όπου και έφτασε ο πύραυλος. Σκοπός της αποστολής ήταν η τοποθέτηση επιστημονικών οργάνων μέτρησης έτσι ώστε να συνεχίσουμε να παίρνουμε δεδομένα και αφού τελειώσει η αποστολή. [12]

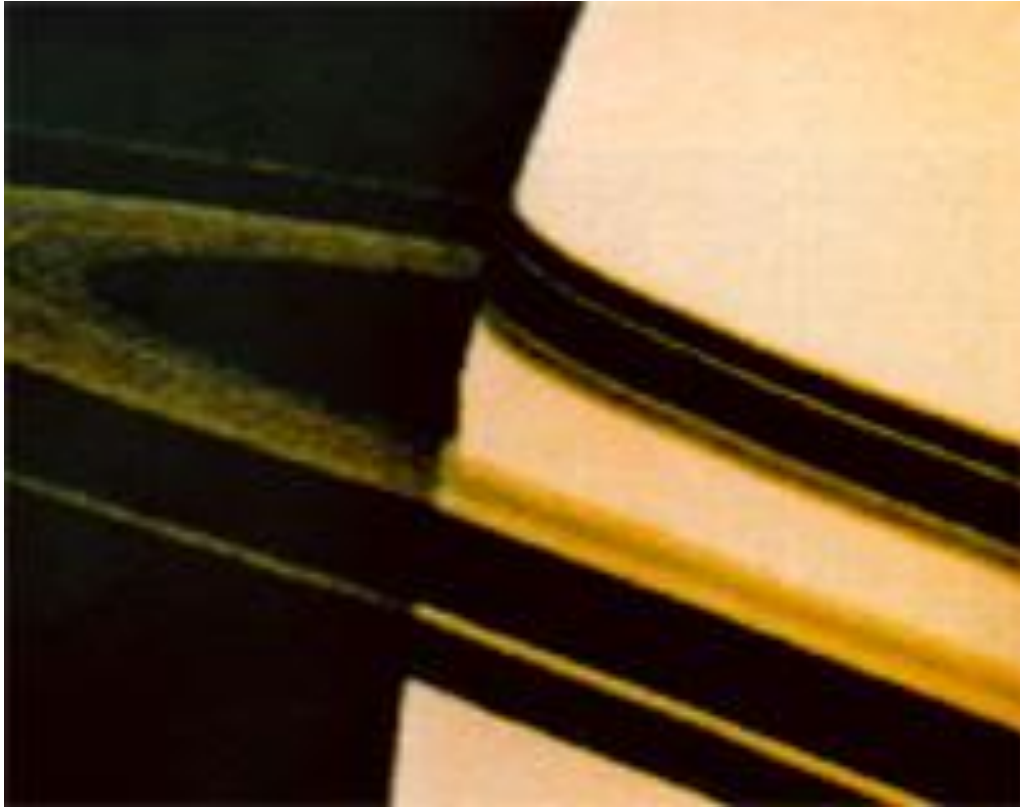
Οι επόμενες σημαντικές αποστολές ήταν οι Pioneer 10 και 11 με ημερομηνίες εκτόξευσης 2 Μαρτίου 1972 και 5 Απριλίου 1973 και όπως λέει και το όνομα τους ήταν πρωτοπόρες καθώς έθεσαν καινούργια ρεκόρ στο πόσο μακριά έχει φτάσει οτιδήποτε έχει φτιαχτεί από τον άνθρωπο και προφανώς προσέφεραν πληροφορίες και εικόνες που δεν είχε ξαναδεί

ο άνθρωπος. Λίγο πιο συγκεκριμένα το Pioneer 10 ήταν το πρώτο διαστημόπλοιο που διέσχισε τη ζώνη των αστεροειδών και πέταξε δίπλα από το Δία καταγράφοντας τις πρώτες κοντινές φωτογραφίες του πλανήτη, χαρτογράφησε τις έντονες ζώνες ακτινοβολίας του πλανήτη, εντόπισε το μαγνητικό του πεδίο και ανακάλυψε ότι ο Δίας είναι κυρίως ένας υγρός πλανήτης. Οι γεννήτριες ραδιοϊσοτόπων λειτούργησαν για 30 χρόνια μέχρι που χάθηκε η επικοινωνία. Για το Pioneer 10 χρησιμοποιήθηκαν 2 θερμοηλεκτρικές γεννήτριες SNAP-19 ικανές να παρέχουν 140 W (Εικόνα 4.7).



Εικόνα 4.7: Φωτογραφία του πλανήτη Δία από το Pioneer 10

Αντίστοιχα για το Pioneer 11 πέρασε το Δία στο ταξίδι του και πέταξε δίπλα από τον Κρόνο δίνοντας μας τις πρώτες φωτογραφίες του πλανήτη αλλά και πρωτόγνωρες μετρήσεις για την ακτινοβολία, τα μαγνητικά του πεδία αλλά και για τα φεγγάρια του. Οι γεννήτριες ραδιοϊσοτόπων του λειτούργησαν για 22 χρόνια μέχρι που χάθηκε η επικοινωνία (Εικόνα 4.8). [13]



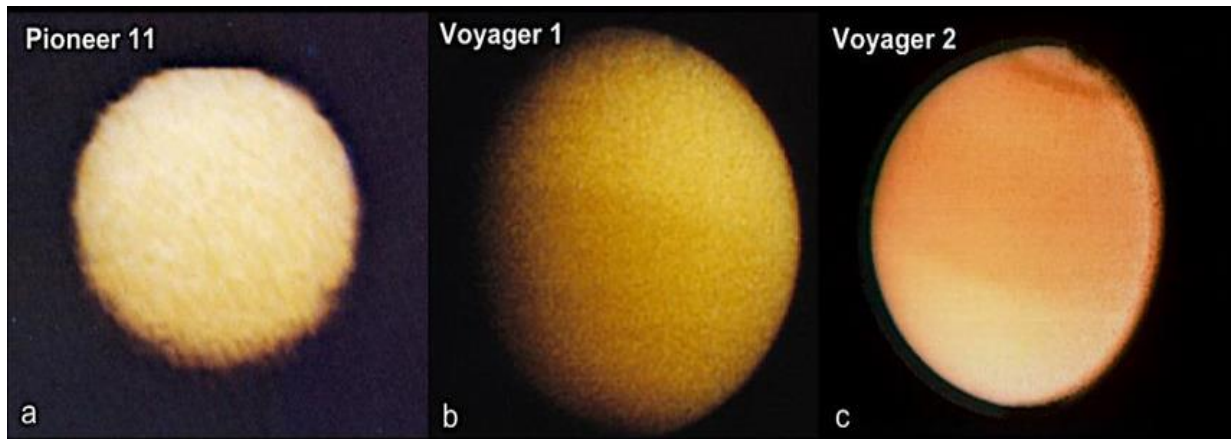
Εικόνα 4.8: Φωτογραφία του πλανήτη Κρόνου από το Pioneer 11

Οι επόμενες αποστολές ήταν οι Viking 1 και 2 το 1975 όπου και αυτές γράφτηκαν στην ιστορία καθώς με τη βοήθεια 2 θερμοηλεκτρικών γεννητριών ραδιοϊσοτόπων SNAP-19 35 watt το κάθε ένα κατάφεραν να προσγειωθούν στον Άρη και να μας δώσουν εικόνες της επιφάνειας του πλανήτη. Τα 2 διαστημόπλοια ήταν πανομοιότυπα και αποτελούνταν και τα δύο από ένα προσεδάφιο και ένα τροχιακό μέρος. Εκτός από εικόνες οι δύο προσεδαφιστές έκαναν 3 πειράματα για να αναζητήσουν πιθανά σημάδια ζωής. Σύμφωνα με τους επιστήμονες τα στοιχεία έδειξαν ότι δεν υπήρχε παρουσία ζωντανών μικροοργανισμών γεγονός που αιτιολογείται με την υπερβολική ξηρότητα του εδάφους του πλανήτη και της ηλιακής υπεριώδους ακτινοβολίας. Τα τελευταία δεδομένα που έφτασαν στη γη ήταν στις 11 Απριλίου 1980 (Εικόνα 4.9). [14]



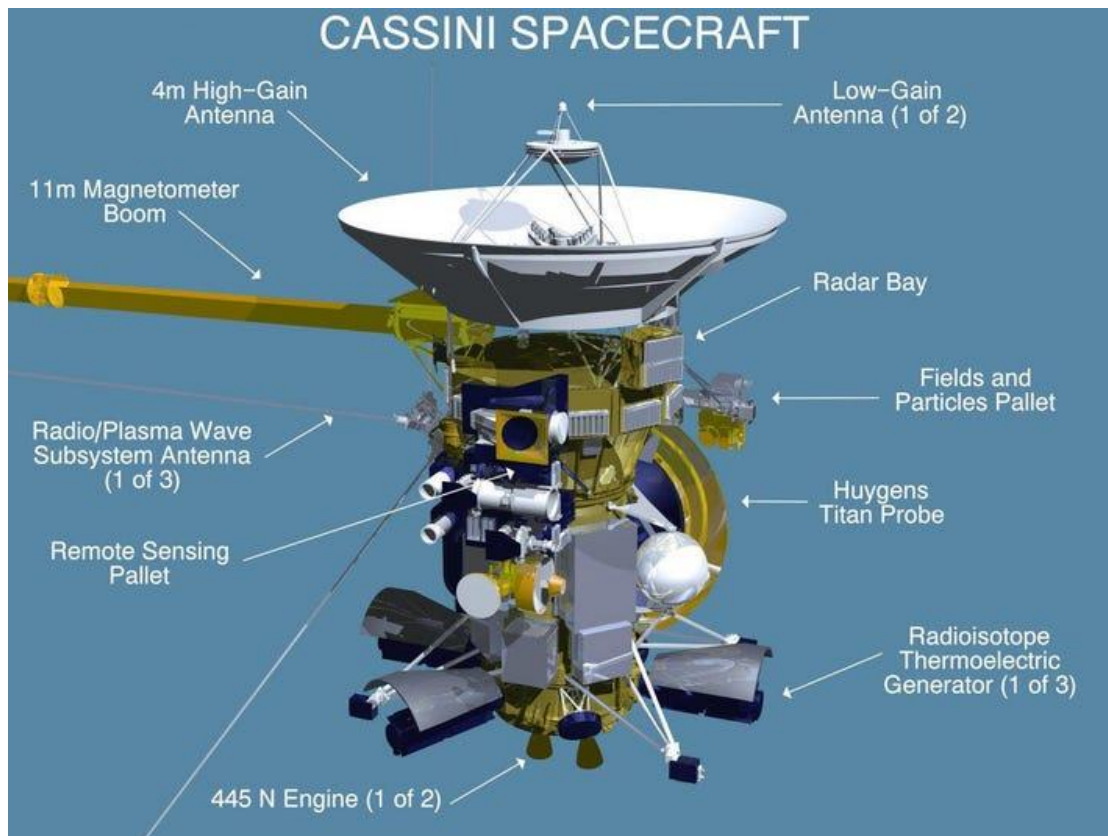
Εικόνα 4.9: Φωτογραφία του Viking 1 μετά τη προσγείωση του στον Άρη

Το Σεπτέμβριο του 1977 και τον Αύγουστο αντίστοιχα έχουμε την εκτόξευση των μη επανδρωμένων διαπλανητικών διαστημοπλοίων Voyager 1 και 2. Οι δύο αυτές αποστολές τροφοδοτούμενες από 3 θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ραδιοϊσοτόπων συνολικής ισχύς 249 watt η κάθε μία, μας έδωσαν μια άνευ προηγουμένου ματιά στο εξωτερικό διάστημα ανακαλύπτοντας τους δακτύλιους του Δία, κάποια ενεργά ηφαίστεια στην Ιώ σε ένα φεγγάρι του Δία, θερμοπίδακες σε ένα άλλο φεγγάρι του Ποσειδώνα και κοντινές εικόνες του Ουρανού και του Ποσειδώνα. Είναι ενεργεί ακόμα και σήμερα, ταξιδεύουν στο διάστημα και μας δίνουν δεδομένα και πληροφορίες σε απόσταση περίπου 24.000.000.000 χιλιομέτρων από την Γη ο Voyager 1 και 20.000.000.000 χιλιόμετρα ο Voyager 2 θέτοντας το ρεκόρ για το μεγαλύτερη απόσταση που έχει ταξιδέψει κάτι που φτιάχτηκε από τον άνθρωπο στο διάστημα και επικοινωνεί ακόμα με τη Γη (Εικόνα 4.10). [15]



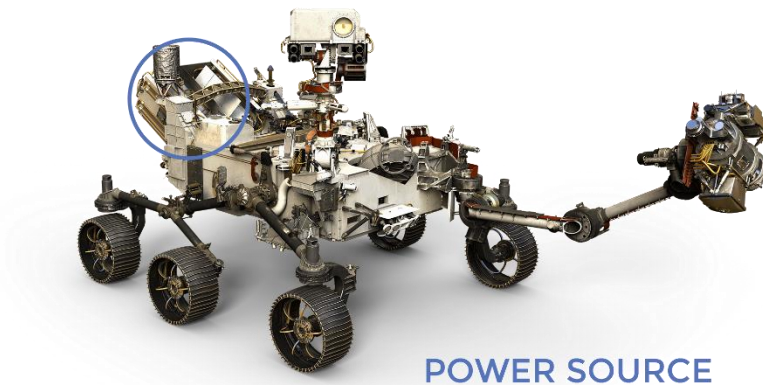
Εικόνα 4.10: Φωτογραφίες του Κρόνου από το Voyager 1 και 2 σε σύγκριση με του Pioneer 11

Η επόμενη σημαντική αποστολή έγινε τον Οκτώβριο του 1997 και είχε όνομα Cassinuy. Το διαστημόπλοιο Cassinuy μετέφερε 3 θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ραδιοϊσοτόπων συνολικής ισχύς 870 watt παραγόμενη από 33 κιλά πλουτώνιου 238 και κατάφερε να κάνει πρωτοποριακές ανακαλύψεις σχετικά με τον Κρόνο και τα φεγγάρια του. Οι σημαντικότερες εξ αυτών είναι για τον Τιτάνα όπου αποτελείται από παχιά ατμόσφαιρα και υγρούς ωκεανούς αλλά και σε ένα άλλο φεγγάρι του Κρόνου τον Εγκέλαδο βρήκε θερμοπίδακες παρέχοντας στοιχεία για τη δυνατότητα ανάπτυξης ζωής στον υπόγειο ωκεανό. Τα δεδομένα που πήραμε μόνο από αυτή την αποστολή οδήγησαν στην δημοσίευση πάνω από 3000 επιστημονικών εκθέσεων (Εικόνα 4.11). [16]



Εικόνα 4.11: Σχηματική αναπαράσταση του διαστημοπλοίου Cassidy

Τέλος η αποστολή με όνομα Mars Science laboratory με το curiosity rover που εκτοξεύτηκε το 2011 το οποίο είναι ενεργό ακόμα και σήμερα έχει κάνει σημαντικές ανακαλύψεις στον πλανήτη Άρη καθώς βρήκε στοιχεία ότι κάποτε υπήρχε μια αρχαία λίμνη γλυκού νερού στην επιφάνεια του. Το συγκεκριμένο ρόβερ καθώς και πιο σύγχρονο τροφοδοτείται από μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια ραδιοϊσοτόπων πολλαπλών αποστολών (MMRTG) και έχει διανύσει πάνω από 282 χιλιόμετρα πάνω στον κόκκινο πλανήτη, έχει ανέβει μέχρι και σε ύψος 600 μέτρων, έχει στείλει πάνω από 500.000 φωτογραφίες, πάνω από 3.000 GB δεδομένων και έχει οδηγήσει στην συγγραφή πάνω από 900 επιστημονικών άρθρων (Εικόνα 4.12). [17][18]



Εικόνα 4.12: Φωτογραφία του curiosity rover και με κύκλο η γεννήτρια ραδιοϊσοτόπων MMRTG

4.4 Συμπεράσματα

Όπως είδαμε η πυρηνική ενέργεια έχει προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στην αποστολή που ονομάζουμε εξερεύνηση του διαστήματος. Τα πιο σημαντικά από αυτά και ο λόγος που πιστεύω ότι στο μέλλον θα τη συναντάμε όλο και περισσότερο καθώς η τεχνολογία της αναπτύσσεται ραγδαία αρχικά οφείλεται στην υψηλή ενεργειακή της πυκνότητα. Αυτό σημαίνει ότι μια μικρή ποσότητα καυσίμου μπορεί να παρέχει μεγάλα ποσά ενέργειας και για μεγάλο χρονικό διάστημα με μεγάλη αξιοπιστία χωρίς να βασίζεται σε εξωτερικούς παράγοντες όπως η άλλη εναλλακτική μας για τέτοιες αποστολές η ηλιακή ενέργεια. Αυτό καθιστά την πυρηνική ενέργεια ιδανική για διαστημικές αποστολές που απαιτούν μακροπρόθεσμη ισχύ, όπως αποστολές στο βαθύ διάστημα ή αποστολές μεγάλης διάρκειας σε άλλους πλανήτες.

Επιπλέον η φύση αυτών των αποστολών ως προς τις αντιξοότητες που μπορεί να παρουσιαστούν λόγω του περιβάλλοντος απαιτούν μία δυνατή λύση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού του προβλήματος είναι η αποστολή Rosetta της Ευρωπαϊκής

Διαστημικής Υπηρεσίας. Η οποία αφού προσγείωσε επιτυχώς το 2014 τον Philae, ένα ρόβερ εξοπλισμένο με μπαταρίες και ηλιακά πάνελ μόνο, πάνω σε ένα κομήτη λόγω της επιφάνειας του κομήτη και την παρουσία πολλών βράχων τα ηλιακά πάνελ δε μπορούσαν να παράξουν ενέργεια καθώς δεν περνούσαν οι ακτίνες του ηλίου. Έτσι το ρόβερ έστειλε δεδομένα μόνο για 64 ώρες, όσο ακριβώς άντεξαν οι μπαταρίες του. [10]

Τέλος οι πυρηνικοί αντιδραστήρες μπορούν να λειτουργήσουν κάτω από σκληρές συνθήκες που παρουσιάζονται στο διάστημα. Καθώς δε σταματούν να λειτουργούν σε ακραίες θερμοκρασίες, επίπεδα ακτινοβολίας και υψηλές ατμοσφαιρικές πιέσεις. Σαφώς όμως οι λύσεις που δίνονται από την πυρηνική ενέργεια δε πρέπει να είναι απόλυτες, μια ιδανική περίπτωση θα είναι οι αποστολές μας να αποτελούνται και από ηλιακά πάνελ καθώς ο κύριος στόχος μας είναι το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα από το οποίο μπορεί να εξαρτώνται και ανθρώπινες ζωές, είτε είναι κάποια μέτρηση μεγάλης σημασίας για την ανθρωπότητα είτε είναι μια επανδρωμένη αποστολή.

Κεφάλαιο 5 Πυρηνική ενέργεια και Ιατρική

Η πυρηνική ενέργεια έχει παίξει σημαντικό ρόλο και στον κλάδο της ιατρικής. Οι εφαρμογές της χρησιμοποιούνται τόσο ως διαγνωστικά μέσα, για κάποια πάθηση, αλλά και ως θεραπευτικά ανοίγοντας καινούργιους δρόμους και δυνατότητες σε αυτό τον πολύ σημαντικό κλάδο. Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε τις πιο σημαντικές εφαρμογές της πυρηνικής ιατρικής.

Στην κατηγορία των διαγνωστικών εφαρμογών ανήκουν οι απεικονιστικές διαδικασίες όπως η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων (PET) και η τομογραφία εκπομπής μονοφωτονίου (SPECT) οι οποίες παρέχουν ακριβή εικόνα των εσωτερικών δομών του σώματος του ασθενούς αλλά και των μεταβολικών διεργασιών του. Στην κατηγορία των θεραπευτικών εφαρμογών από την άλλη έχουμε την γνωστή ακτινοθεραπεία, η οποία είναι για ανθρώπους που πάσχουν κυρίως από καρκίνο αλλά και άλλες ασθένειες οι οποίες χρειάζονται υψηλές δόσεις ακτινοβολίας, στο συγκεκριμένο σημείο που υπάρχει το πρόβλημα, για να αντιμετωπιστούν. Επιπλέον στην πυρηνική ιατρική χρησιμοποιούνται και ραδιενεργά ισότοπα τόσο για καλύτερη διάγνωση αλλά και θεραπεία ασθενειών όπως ο καρκίνος, οι καρδιακές παθήσεις και ορισμένες νευρολογικές διαταραχές. Πάμε να δούμε αναλυτικά τις παραπάνω εφαρμογές που περιγράψαμε και γιατί αποτελούν επανάσταση στον τομέα της ιατρικής.

5.1 Ιστορία των SPECT και PET

Η πρώτη σάρωση με τη χρήση τομογραφίας εκπομπής φωτονίων (SPECT) πραγματοποιήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Αποτελούσε ένα μεγάλο επίτευγμα στον επιστημονικό κλάδο όπου μέχρι τότε η μόνη γνωστή μέθοδος ήταν τα σπινθηρογραφήματα τα οποία μας έδιναν μια δισδιάστατη εικόνα των εσωτερικών δομών του ανθρώπινου σώματος. Η τομογραφία με εκπομπή φωτονίων επέτρεψε την παραγωγή τρισδιάστατων εικόνων με πιο λεπτομερείς και ακριβείς πληροφορίες κάνοντας δυνατή την διάγνωση περισσότερων ιατρικών καταστάσεων και κατά επέκταση την ανάπτυξη πιο

αποτελεσματικών θεραπειών. Οι πρώτες τομογραφίες εκπομπής φωτονίων χρησιμοποίησαν στοιχειώδης κάμερες γάμα.

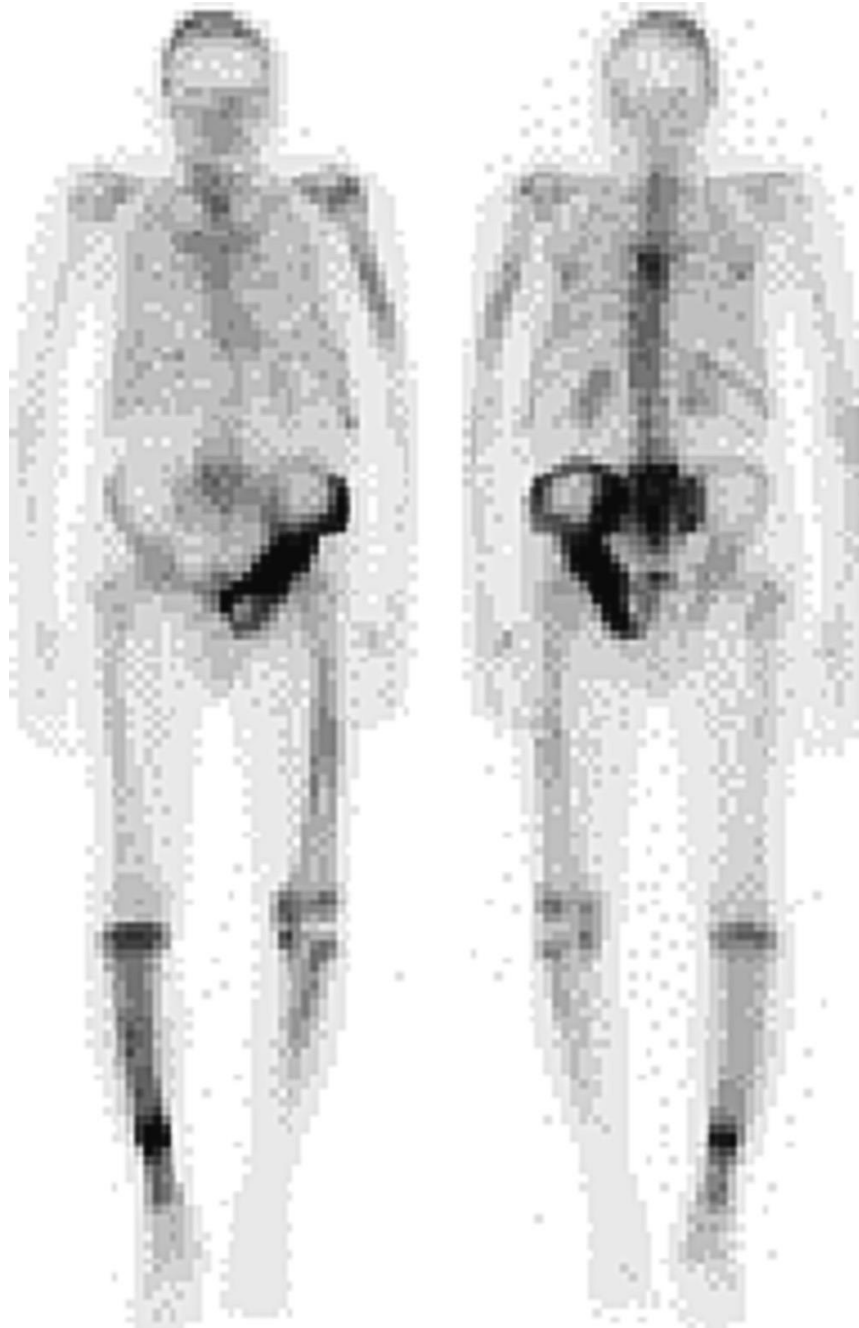
Αντίστοιχα η πρώτη τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων (PET) έγινε στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Η συγκεκριμένη εφαρμογή της πυρηνικής ιατρικής ήταν πολύ σημαντική καθώς στόχευε στην ακριβή απεικόνιση των μεταβολικών διεργασιών μέσα στο ανθρώπινο σώμα σε πραγματικό χρόνο. Σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες απεικόνισης, όπως οι ακτινογραφίες και οι αξονικές τομογραφίες που παράγουν εικόνες ανατομίας, η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων παρέχει λειτουργικές πληροφορίες σχετικά με τις εσωτερικές δομές του ανθρώπινου σώματος. Οι πρώτες λοιπόν τομογραφίες εκπομπής ποζιτρονίων χρησιμοποίησαν απλές κάμερες και βασικές ενώσεις ανίχνευσης αλλά με μεγάλη χρησιμότητα καθώς ήταν ένα σημαντικό μέσο για την έγκαιρη ανίχνευση και κατά επέκταση θεραπεία πολλών δύσκολων ιατρικών παθήσεων όπως ο καρκίνος, οι καρδιακές παθήσεις και οι νευρολογικές διαταραχές. [19]

5.2 Αρχές λειτουργίας των SPECT και PET

Οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες στο πως λειτουργούν. Και οι δύο βασίζονται σε ένα ραδιενεργό ιχνηθέτη, ο οποίος εισάγεται στο σώμα του ασθενούς και έχει μία συγκεκριμένη αντίδραση που βοηθάει στην παραγωγή εικόνων των εσωτερικών δομών που μελετάμε. Φυσικά ανάλογα με το μέρος ή το όργανο όπου θέλουμε να μελετήσουμε χρησιμοποιούμε και διαφορετικούς ιχνηθέτες.

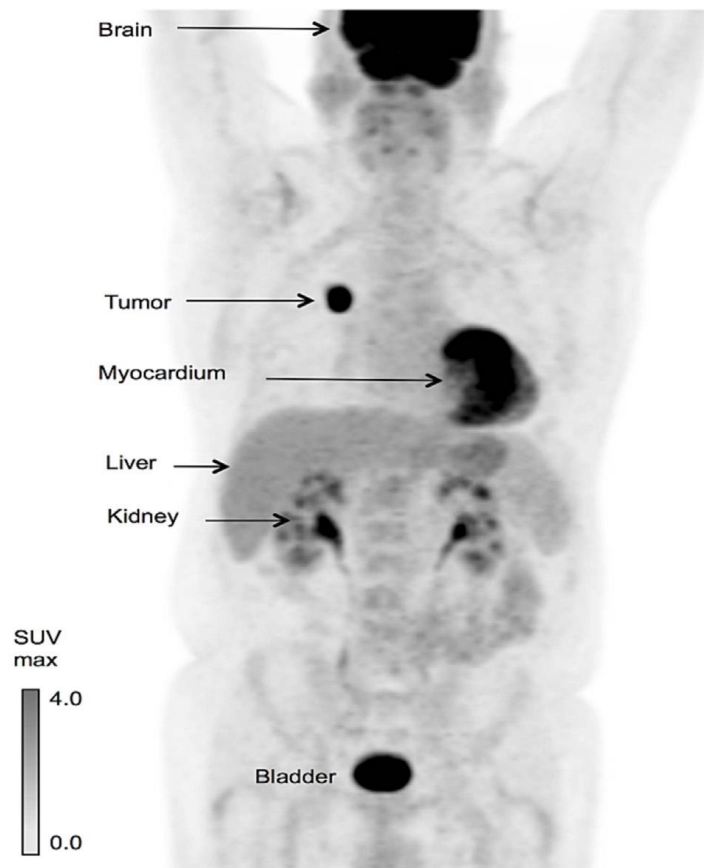
Ποιο συγκεκριμένα στην τομογραφία εκπομπής φωτονίων (SPECT) οι ιχνηθέτες που χρησιμοποιούνται είναι το τεχνητίο-99m (^{99m}Tc) για σαρώσεις καρδιάς, εγκεφάλου, πνευμόνων και οστών, το θάλλιο-201 (^{201}Tl) για συγκεκριμένες σαρώσεις που αφορούν την καρδιά και την αξιολόγηση της ροής του αίματος, το ιώδιο-123 (^{123}I) για σαρώσεις του θυροειδούς αδένα και για την ανίχνευση του καρκίνου του θυροειδούς, το γάλλιο-67 (^{67}Ga) που είναι πολύ χρήσιμο στην απεικόνιση της οστεομυελίτιδας, το ξένο-133 (^{133}Xe) σε μορφή αερίου για αναπνευστικές μελέτες και την απεικόνιση της εγκεφαλικής ροής

του αίματος και τέλος το ίνδιο-111 (^{111}In) το οποίο μέσω των αιμοπεταλίων μπορεί να εντοπίσει την ακριβή θέση ενός θρόμβου αλλά και μέσω των πεπτιδίων και των πρωτεϊνών να εντοπίσει κάποια σπάνια μορφή καρκίνου (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1: Σάρωση ολόκληρου σώματος (SPECT) με τη χρήση τεχνητίου-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) που δείχνει την ύπαρξη της ασθένειας του Paget.

Αντίστοιχα στη τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων χρησιμοποιούνται ραδιενεργά στοιχεία όπως το φθόριο-18 (^{18}F) που είναι το πιο γνωστό, το οποίο χρησιμοποιείται στην ογκολογία και επιπλέον λόγω του μικρού του μεγέθους μπορεί να διαπεράσει τον αιματοεγκεφαλικό φραγμό και να μας δώσει πληροφορίες για την εγκεφαλική λειτουργία και να βοηθήσει στον εντοπισμό του καρκίνου. Επιπλέον το ρουβίδιο-82 (^{82}Rb) και το άζωτο-13 (^{13}N), με τη μορφή μορίων αμμωνίας, είναι πολύ διαδεδομένα στην καρδιακή απεικόνιση καθώς το πρώτο απορροφάτε πολύ γρήγορα από τους ιστούς της καρδιάς και το δεύτερο λόγω της χαμηλής υπολειμματικής αξίας του ποζιτρονίου μας δίνει εικόνες με υψηλή ανάλυση της περιοχής και ο άνθρακας-11 (^{11}C) ο οποίος μπορεί να προσκολληθεί άμεσα σε μικρά όργανα αντικαθιστώντας υπάρχοντα άτομα άνθρακα και κατά συνέπεια να μας δώσει μία ακριβή εικόνα της περιοχής. Η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων είναι επίσης πολύ διαδεδομένη στις σαρώσεις για ανίχνευση του καρκίνου του πνεύμονα, τον εντοπισμό συγκεκριμένων ασθενειών των νευρώνων του εγκεφάλου όπως η ασθένεια Parkinson και το Alzheimer (Εικόνα 5.2).

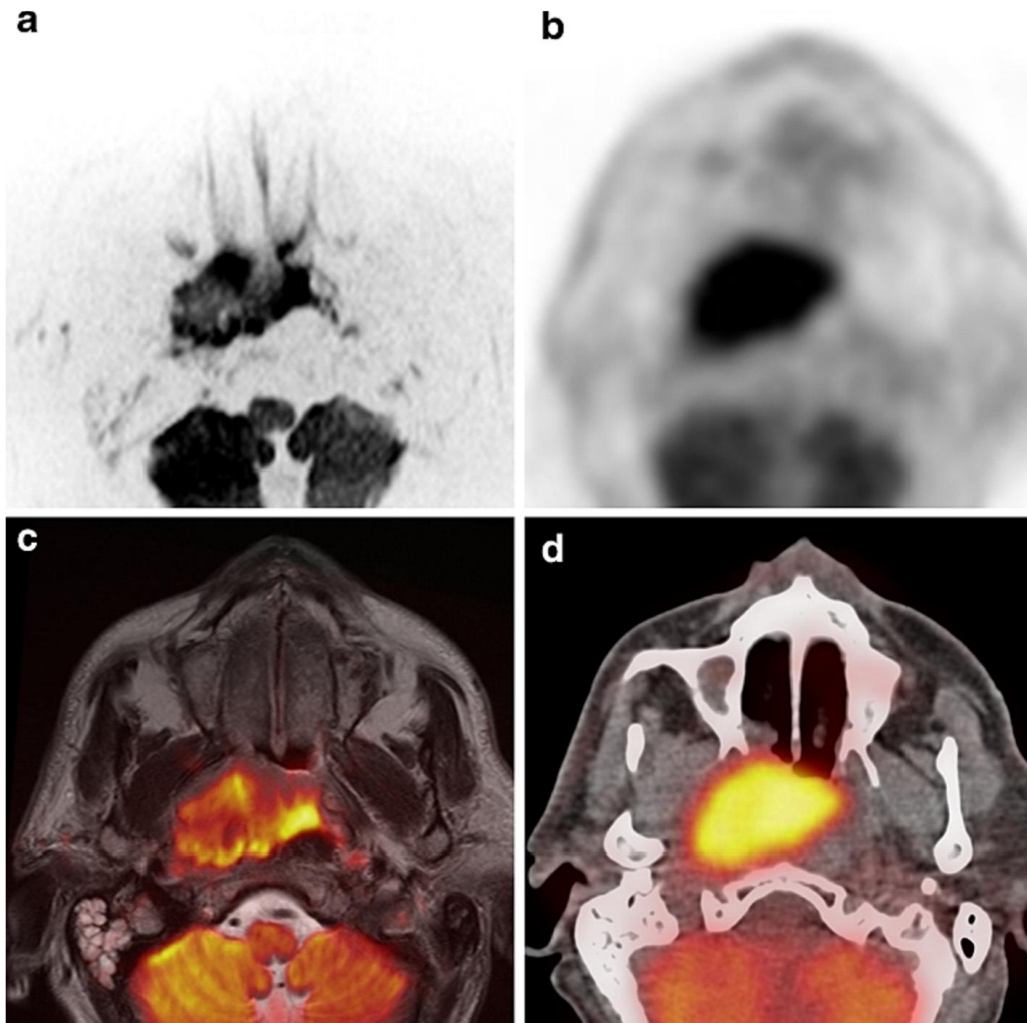


Εικόνα 5.2: Ολική σάρωση σώματος PET με τη χρήση φθόριο-18 (^{18}F) για τον εντοπισμό όγκων

Οι ιχνηθέτες στη συνέχεια αφού εισέλθουν στο σώμα του ασθενούς, στη περίπτωση της τομογραφίας εκπομπής φωτονίων, εκπέμπουν ακτίνες γάμα καθώς αποσυντίθεται οι οποίες ανιχνεύονται από τις αντίστοιχες κάμερες γάμα, που είναι τοποθετημένες γύρω από το σώμα του ασθενούς, οι εικόνες αυτές έπειτα στέλνονται σε υπολογιστή όπου ανακατασκευάζονται σε τρισδιάστατη μορφή και έτσι έχουμε τις εικόνες της τελικής σάρωσης.

Στην αντίστοιχη περίπτωση της τομογραφίας εκπομπής ποζιτρονίων όπως λέει και το όνομα οι ιχνηθέτες εκπέμπουν ποζιτρόνια τα οποία καθώς αλληλοεπιδρούν με τα ηλεκτρόνια του σώματος μας και καθώς αποσυντίθεται παράγουν στο τέλος δύο φωτόνια με ακτίνες γάμα με ενέργεια 511 keV το κάθε ένα. Τα δύο αυτά φωτόνια έχουν αντίθετα φορτία οπότε απωθούνται και τα συστήματα που σκανάρουν μπορούν να εντοπίσουν την ακριβή συντεταγμένη από όπου ξεκίνησαν και να μας δώσουν μία πλήρη εσωτερική εικόνα του σημείου του ασθενούς που μας ενδιαφέρει. Επιπλέον η χρήση υπολογιστικής

τομογραφίας (CT) με τη χρήση ακτινών Χ έχει πλέον ενσωματωθεί στις τομογραφίες εκπομπής ποζιτρονίων καθώς με το συνδυασμό των δύο εικόνων που παράγονται από τις δύο μεθόδους έχουμε ένα πολύ χρήσιμο διαγνωστικό αποτέλεσμα (Εικόνα 5.3). [20]



Εικόνα 5.3: Στο (d) βλέπουμε την ένωση των εικόνων από ένα PET scan και από ένα CT για την διάγνωση δεξιού ρινοφαρυγγικού καρκινώματος.

5.3 Μέθοδοι ακτινοθεραπείας

Ας περάσουμε τώρα στην δεύτερη μεγάλη κατηγορία εφαρμογών της πυρηνικής ενέργειας στην ιατρική που είναι η ακτινοθεραπεία. Η ακτινοθεραπεία ξεκίνησε το 1896 όταν ο Γερμανός καθηγητής φυσικής Wilhelm Conrad Roentgen παρουσίασε μια διάλεξη με

όνομα «Ένα νέο είδος ακτίνας» αναφερόμενος στις σήμερα γνωστές ακτίνες Χ. Η ανακάλυψη αυτή βρήκε παγκόσμιο ενδιαφέρον και μέσα σε λίγους μήνες κατασκευάστηκαν συστήματα που χρησιμοποιούσαν ακτίνες Χ για διάγνωση ασθενειών και μετά από 3 χρόνια οι ακτίνες Χ άρχισαν να χρησιμοποιούνται για τη θεραπεία του καρκίνου. Οι πρώτες ακτινοθεραπείες χρησιμοποιούσαν ράδιο (Ra) και διαγνωστικά μηχανήματα χαμηλής τάσης. Σκοπός των παραπάνω εφαρμογών ήταν με την εφαρμογή των ακτίνων Χ να εμποδιστεί η ικανότητα των καρκινικών κυττάρων να πολλαπλασιάζονται και να πεθαίνουν. [21]

Οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν την παραπάνω τεχνική ονομάστηκαν ακτινοθεραπείες εξωτερικών ακτίνων και μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές βάση αυτής, καθεμία για συγκεκριμένο σκοπό και διαφορετικούς τύπους όγκων. Οι πιο σημαντικές εξ αυτών είναι η ρυθμιζόμενης έντασης ακτινοθεραπεία (IMRT), η ογκομετρική διαμορφωμένη θεραπεία τόξου (VMAT), η στερεοστατική ακτινοθεραπεία (SBRT).

Η ρυθμιζόμενης έντασης ακτινοθεραπεία είναι ένας τύπος ακτινοθεραπείας που χρησιμοποιεί πολλαπλές ακτίνες με διαφορετικές εντάσεις για να στοχεύσει στη συγκεκριμένη περιοχή που θέλουμε και να αποφύγουμε όσο μπορούμε τη ζημιά σε γειτονικά κύτταρα. Χρησιμοποιείται με επιτυχία σε περιπτώσεις καρκίνου όπως στο κεφάλι, στο λαιμό, στον προστάτη, στο στήθος, στον εγκέφαλο και στο γαστρεντερικό σύστημα. Η συγκεκριμένη εφαρμογή έχει βοηθήσει στην καλύτερη στόχευση των όγκων και στη μείωση της τοξικότητας σε σύγκριση με άλλες μεθόδους (Εικόνα 5.4).



Εικόνα 5.4: Εικόνα συστήματος ρυθμιζόμενης εντάσεως ακτινοβολίας (IMRT)

Έπειτα η ογκομετρική διαμορφωμένη θεραπεία τόξου είναι μια μορφή ακτινοθεραπείας που παρέχει πλήρεις κατευθύνσεις δέσμης 360 μοιρών σε μία μόνο περιστροφή. Με αποτέλεσμα να έχουμε διαφορετική κατανομή της ακτινοβολίας στο σημείο του όγκου. Μάλιστα σε ορισμένες περιπτώσεις έχουμε καλύτερα αποτελέσματα στα περιβάλλοντα κύτταρα, λιγότερη ζημιά, από την προηγούμενη μέθοδο της ρυθμιζόμενης έντασης ακτινοθεραπείας. Η μέθοδος αυτή είναι αποτελεσματική στη θεραπεία πολλών τύπου καρκίνου όπως μη μικροκυτταρικού καρκίνου του πνεύμονα, του προστάτη, του γαστρεντερικού, του γυναικολογικού, του θωρακικού κεφαλιού, του τραχήλου και του κεντρικού νευρικού συστήματος (Εικόνα 5.5).



Εικόνα 5.5: Εικόνα συστήματος ογκομετρικής διαμορφωμένης θεραπείας τόξου (VMAT)

Και τέλος έχουμε τη στερεοτατική ακτινοθεραπεία που είναι και αυτή μία νέα τεχνική εξωτερικής ακτινοβολίας με κύριο χαρακτηριστικό της την βελτιωμένη ακρίβεια που έχει, καθώς χρησιμοποιούνται πολλαπλές ακτίνες ακτινοβολίας επικεντρωμένες στο σημείο του προβλήματος από διαφορετικές κατευθύνσεις. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται κυρίως για την αφαίρεση πρωτοπαθών και ολιγομεταστατικών όγκων συνήθως μικρού μεγέθους όπου και χρειάζεται μεγάλη προσοχή και ακρίβεια. Τέτοια παραδείγματα είναι ο καρκίνος στον προστάτη, στη σπονδυλική στήλη, στα νεφρά και στο πάγκρεας (Εικόνα 5.6). [22]



Εικόνα 5.6: Εικόνα συστήματος στερεοστατικής ακτινοθεραπείας (SBRT)

5.4 Ραδιενεργά ισότοπα για θεραπεία

Όπως είδαμε πιο πριν τα ραδιενεργά ισότοπα χρησιμοποιούνται για διαγνωστικούς σκοπούς ως ιχνηθέτες, σημαντικό μέρος των μεθόδων τομογραφίας και μάλιστα αυτή ήταν και η πρώτη εφαρμογή τους όταν ανακαλύφθηκαν οι ακτίνες Χ το 1896. Έπειτα όμως από 8 χρόνια, το 1904, έγιναν τα πρώτα βήματα στην εσωτερική χρήση των ισότοπων για θεραπεία. Το 1913 χρησιμοποιήθηκαν διαλυμένα άλατα ραδίου σε πειράματα και 20 χρόνια μετά έγινε η πρώτη ενδοφλέβια χορήγηση φωσφόρου-32 (P-32) για την καταπολέμηση της λευχαιμίας το 1937. Ακόμα μία σημαντική ανακάλυψη ήταν η χορήγηση στρόντιου-89 (Sr-89) σε συγκεκριμένες περιοχές για τη θεραπεία του εξουθενωτικού πόνου από τις μεταστάσεις του καρκίνου στα οστά και μετά στα μέσα του 1940 το ραδιενεργό ιώδιο που χρησιμοποιήθηκε για τη θεραπεία του καρκίνου του θυροειδούς άρχισαν να δίνουν νέες προοπτικές στη χρήση των ραδιενεργών ισωτόπων.

Συγκεκριμένα για τη χρήση του φωσφόρου 32 μέχρι και σήμερα έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές μορφές όπως το ορθοφωσφορικό νάτριο (Na_2HPO_4), το πολυμεταφωσφορικό ($\text{Na}_6\text{O}_{18}\text{P}_6$), και το πυροφωσφορικό (P2O7). Μετά από έρευνες που έγιναν σε ανθρώπους

με λευχαιμία παρατηρήθηκε ότι οι ιστοί με λευχαιμία κρατούσαν περισσότερο ραδιενεργό φώσφορο από ότι οι κανονικοί ιστοί. Επίσης βρέθηκε ότι για να έχουμε τη μικρότερη δυνατή αποβολή του φωσφόρου από το σώμα του ασθενούς ο φώσφορος θα πρέπει να χορηγείται ενδοφλέβια και όχι από το στόμα. Ακόμα μία σημαντική ανακάλυψη ήταν η χορήγηση τεστοστερόνης στον ασθενή πριν τη θεραπεία με το φώσφορο είχε 20 φορές περισσότερες πιθανότητες να θεραπεύσει τους όγκους στα οστά. Επίσης έρευνες αργότερα έδειξαν ότι ασθενείς με οστεογενές σάρκωμα και λεμφοσάρκωμα κρατούσαν πιο εύκολα το ραδιενεργό φώσφορο στους ιστούς του σε σχέση με ασθενείς που έπασχαν από τον καρκίνο του μαστού. Όλες αυτές οι έρευνες μας δείχνουν σε ποιες περιπτώσεις είναι πιο χρήσιμο να χρησιμοποιούμε φώσφορο-32 για να έχουμε τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

Έπειτα για το στρόντιο-89 που είναι σήμερα το πιο αποτελεσματικό ραδιενεργό ισότοπο της πυρηνικής ιατρικής στη θεραπεία των μεταστάσεων του καρκίνου των οστών. Το χρησιμοποιούμε κυρίως σα χλωριούχο άλας ($^{89}\text{SrCl}_2$) και έχουμε βρει ότι περίπου το 50% μιας ενδοφλέβιας δόσης αποθηκεύετε στα οστά από τον οργανισμό και από το υπόλοιπο αποβάλλεται. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η έρευνα του Breen από την οποία αποδεικνύεται ότι ειδικότερα στα μεταστατικά σημεία η συγκέντρωση στροντίου είναι από 2 έως 25 φορές περισσότερη από ότι στα υγιή κόκαλα.

Και τέλος για το ραδιενεργό ιώδιο που έγινε γνωστό για την αποτελεσματικότητά του κατά του καρκίνου του θυροειδούς αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα και για διαγνωστικούς αλλά και για θεραπευτικούς σκοπούς και πιο συγκεκριμένα για μία ασθένεια που ονομάζεται υπερθυρεοειδισμός αλλά και για άλλα είδη καρκίνου του θυροειδούς. Έρευνες έδειξαν ότι το ραδιενεργό ιώδιο διανέμεται κατά κύριο λόγο στο συκώτι και στους πνεύμονες σε ποσοστά 70-90% και 10-20% αντίστοιχα. [19][23]

5.5 Συμπεράσματα για την πυρηνική ιατρική

Όπως είδαμε η πυρηνική ιατρική αυτός ο καινοτόμος κλάδος έχει σημειώσει μεγάλη πρόοδο τα τελευταία χρόνια και όλο και εξελίσσεται. Μία από τις πιο σημαντικές αλλαγές που επιφέρει η πυρηνική ιατρική είναι η βελτιωμένη ακρίβεια των διαγνώσεων. Με τη βοήθεια της πυρηνικής ιατρικής, οι γιατροί είναι σε θέση να προσδιορίσουν την παρουσία ορισμένων ιατρικών καταστάσεων πολύ νωρίτερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια από ό,τι με τις παραδοσιακές διαγνωστικές μεθόδους. Αυτή η έγκαιρη ανίχνευση οδηγεί σε πιο αποτελεσματικά και εξατομικευμένα σχέδια θεραπείας, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε βελτιωμένα αποτελέσματα για τους ασθενείς.

Στο παρελθόν, πολλές ιατρικές καταστάσεις αντιμετωπίζονταν με επεμβατικές διαδικασίες που ήταν συχνά επώδυνες, επικίνδυνες και απαιτούσαν μεγάλους χρόνους ανάρρωσης. Με τη βοήθεια της πυρηνικής ιατρικής, ωστόσο, πολλές από αυτές τις ίδιες καταστάσεις μπορούν πλέον να αντιμετωπιστούν με μη επεμβατικές μεθόδους, όπως είδαμε η θεραπεία με ραδιενεργά ισότοπα, η οποία μπορεί να προσφέρει στους ασθενείς ανακούφιση από τα συμπτώματά τους και οριστική θεραπεία των ασθενειών τους. Επίσης σημαντικό είναι ότι με την εξέλιξη αυτού του κλάδου οι ερευνητές μπορούν να αποκτήσουν νέες γνώσεις για τις αιτίες που προκαλούν τις διάφορες ασθένειες γεγονός που βοηθάει στη συνολική εξέλιξη της ιατρικής και τη δημιουργία νέων μορφών θεραπείας.

Τέλος, η πυρηνική ιατρική έχει σημαντικό αντίκτυπο στη φροντίδα των ασθενών. Με τη βοήθεια της πυρηνικής ιατρικής, οι ασθενείς μπορούν να λαμβάνουν πιο εξατομικευμένες και αποτελεσματικές θεραπείες, οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα ζωής τους και να οδηγήσουν σε ταχύτερους χρόνους ανάρρωσης.

Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα

Όπως είδαμε σε αυτή τη διπλωματική η πυρηνική ενέργεια έχει παίξει πολύ σημαντικό ρόλο σε πολλούς τομείς της ζωής των ανθρώπων. Είναι ένα κρίσιμο συστατικό σε πολλές τεχνολογικές εξελίξεις τις τελευταίες δεκαετίες, επιφέροντας πολυάριθμες θετικές αλλαγές σε μια ποικιλία βιομηχανιών. Από την ανακάλυψη της μέχρι της εφαρμογές της βλέπουμε ότι η πυρηνική ενέργεια έχει πάντα να δώσει το κάτι παραπάνω σε σχέση με τις μεθόδους που υπήρχαν πριν από αυτή.

Είτε μιλάμε για παραγωγή ενέργειας, όπως είδαμε, όπου οι πυρηνικοί σταθμοί παρέχουν καθαρή και αξιόπιστη ενέργεια εδώ και δεκαετίες και έχουν συμβάλει καθοριστικά στην κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών απαιτήσεων του αυξανόμενου παγκόσμιου πληθυσμού μας. Με κύριο θετικό τους τον ασυναγώνιστο συντελεστή δυναμικότητας και την ελάχιστη εκπομπή ρύπων στο περιβάλλον, αναμφισβήτητα στο μέλλον θα υπάρξουν ακόμα περισσότεροι πυρηνικοί αντιδραστήρες και με καλύτερες τεχνολογίες ώστε τα περιθώρια ατυχημάτων να είναι πραγματικά μηδαμικά.

Είτε στην εξερεύνηση του διαστήματος όπου χρήση της πυρηνικής ενέργειας επέτρεψε στις αποστολές μας να είναι μεγαλύτερες, πιο αξιόπιστες και πιο ικανές να εξερευνήσουν απομακρυσμένα και αφιλόξενα περιβάλλοντα. Μας επέτρεψε επίσης να συγκεντρώσουμε πολύτιμα δεδομένα και γνώσεις σχετικά με την προέλευση και την εξέλιξη του ηλιακού μας συστήματος, γεγονός που διεύρυνε την κατανόησή μας για το σύμπαν. Πράγμα που δε θα είχε επιτευχθεί αν βασιζόμασταν μόνο στις μεθόδους και στα μοντέλα που χρησιμοποιούν συγκαταβατικές μορφές ενέργειας.

Και φυσικά στο κλάδο της ιατρικής. Όπου η χρήση της πυρηνικής ενέργειας είναι κρίσιμη για την παραγωγή των ραδιενεργών ισοτόπων που είδαμε πριν ότι βοηθούν στη καλύτερη διάγνωση και θεραπεία ασθενειών όπου μέχρι πριν η ιατρική δυσκολευόταν να δώσει απαντήσεις. Επίσης πολύ σημαντικό είναι και η εξέλιξη του κλάδου και η επέκταση της ανθρώπινης κατανόησης για το σώμα και τις ασθένειες που μπορούν να υπάρχουν, πράγμα που χωρίς της εφαρμογές της πυρηνικής ενέργειας δε θα μπορούσαμε να έχουμε.

Συμπερασματικά, οι θετικές επιπτώσεις της πυρηνικής ενέργειας είναι εκτεταμένες και έχουν συμβάλει καθοριστικά σε πολλές τεχνολογικές εξελίξεις. Από την παροχή καθαρής και αξιόπιστης ενέργειας, έως τη διευκόλυνση της εξερεύνησης του διαστήματος και την επανάσταση στον τομέα της ιατρικής, η πυρηνική ενέργεια υπήρξε κρίσιμο στοιχείο στην πρόοδό μας και θα συνεχίσει να διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στη διαμόρφωση του μέλλοντος μας ως ανθρωπότητα. Για αυτό θα πρέπει να σταματήσουμε να τη φοβόμαστε και να προσπαθούμε συνεχώς να τη καταλάβουμε και να την εφαρμόσουμε όσο καλύτερα μπορούμε γιατί υπάρχουν πολλοί στόχοι που θα μας βοηθήσει να επιτύχουμε.

Βιβλιογραφία

- [1] https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CF%85%CF%81%CE%B7%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1 Wikipedia. Nuclear Energy. 2022.
- [2] [World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements](#) World Nuclear Association. London, 2023.
- [3] Fatih Birol. Nuclear Power in a Clean Energy System. IEA Publications, France, 2019.
- [4] Remus Pravalie, Georgeta Bandoc. Nuclear energy: Between global electricity demand, worldwide decarbonization imperativeness, and planetary environmental implications. Journal of Environmental Management 209, Elsevier, Bucharest, 2017.
- [5] Nuclear Reactor Types An Environment & Energy FactFile provided by the IEE. The Institution of Electrical Engineers, London, 2005.
- [6] ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ ΝΤΟΜΗΣ. ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ. 2^η έκδοση, εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2005.
- [7] [National Ignition Facility achieves fusion ignition](#) Breanna Bishop. 2022.
- [8] [Nuclear Power is the Most Reliable Energy Source and It's Not Even Close](#) U.S. Department of ENERGY Office of Nuclear Energy. Washington DC, 2021.
- [9] Garry L. Bennet. Space nuclear power. Encyclopedia of Physical Science and Technology, Third Edition, Volume 15, Academic Press, 2002.

- [10] [Nuclear Reactors and Radioisotopes for Space](#) World Nuclear Association. London, 2021.
- [11] Satira Labib, Jeffrey King. Design and analysis of a single stage to orbit nuclear thermal rocket reactor engine. Nuclear Engineering and Design 287 (2015) 36–47, Elsevier, USA, 2015.
- [12] [Apollo Surface Experiments](#) NASA Radioisotopes Power Systems, U.S. Department of Energy, Hamish Lindsay. 2010.
- [13] [Pioneer 10 & 11](#) NASA Radioisotopes Power Systems, U.S. Department of Energy.
- [14] [Viking 1 & 2](#) NASA, Mars Exploration Program and the Jet Propulsion Laboratory.
- [15] [Voyager](#) NASA Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology. Voyager.
- [16] [Launch of Cassini Spacecraft to Saturn](#) NASA history, Sarah Loff. Oct. 15, 1997, 2017.
- [17] [NASA's Curiosity Takes Inventory of Key Life Ingredient on Mars](#) Bill Steigerwald, NASA. Mars Exploration Program and the Jet Propulsion Laboratory, Mars Curiosity Rover, 2022.
- [18] [Perseverance Rover Electrical Power](#) NASA, NASA Science Mars 2020 Mission Perseverance Rover, 2020.
- [19] TF Budinger and T Jones. History of nuclear medicine and molecular imaging. Elsevier, 2014.
- [20] Fawaz F. Alqahtani. SPECT/CT and PET/CT, related radiopharmaceuticals, and areas of application and comparison. Saudi Pharmaceutical Journal, Saudi Arabia, Elsevier, 2022.

- [21] [History of Cancer Treatments: Radiation Therapy](#) The American Cancer Society medical and editorial content team. American Cancer Society, 2014.
- [22] Krishna Koka, Amit Verma, Bilikere S Dwarakanath & Rao VL Papineni. Technological Advancements in External Beam Radiation Therapy (EBRT): An Indispensable Tool for Cancer Treatment. Dovepress, Cancer Management and Research 2022:14 1421–1429.
- [23] Maria E. Lyra. Nuclear Medicine Therapy Radioisotopes Production and Dosimetry. A Department of Radiology, Radiation Physics Unit, Aretaieio Hospital, University of Athens, Greece, 2011.