



Πυρηνική σχάση και παραγωγή ενέργειας

Λάμπας Αθανάσιος

09107019

Πυρηνική φυσική & Εφαρμογές

Ρόζα Ζάννη Βλαστού

16/2/2020 - 19/2/2020

Εισαγωγή

Με την τεχνολογική εξέλιξη των τελευταίων αιώνων, απ την εφεύρεση του πρώτου λαμπτήρα ως τα σύγχρονα εργοστάσια παραγωγής άρχισε σταδιακά, με εκθετική αύξηση, η ανάγκη για κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος για την θεραπεία μιας πληθώρας εφαρμογών του σύγχρονου τρόπου ζωής. Απο το φώς μας τις νύχτες μέχρι το επόμενο email που έχουμε διορία λίγες ώρες να στείλουμε, για την θέρμανση, την τροφή, την υγεία, την διασκέδαση την οργάνωση σε ατομικό, κοινοτικό, τοπικό και εθνικό επίπεδο, για κάθε κοινωνικό τομέα και ουσιαστικά για σχεδόν κάθε παράμετρο της σύγχρονης ζωής μας, είναι απαραίτητη φθηνή, αξιόπιστη και πραγματικά πολύ ηλεκτρική ενέργεια. Απ την έναρξη των τεχνολογικών εφαρμογών της αυτές τις απαιτήσεις έδειχνε οτι θα ικανοποιούσε η πυρηνική ενέργεια, με την μορφή της πυρηνικής σχάσης και, παράλληλα και σε συνέχεια, της πυρηνικής σύντηξης. Εμείς σε αυτήν την εργασία θα ασχοληθούμε με την πρώτη μορφή της πυρηνικής ενέργειας, και την πιο ανεπτυγμένη και εφαρμοσμένη μέχρι σήμερα (αρχές 2020) αυτή της πυρηνικής σχάσης.

Λίγα Ιστορικά

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

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

Στη διάρκεια της δεκαετίας του 1940 πολλές χώρες ανέπτυξαν πυρηνικά προγράμματα προσανατολισμένα στην κατασκευή πυρηνικών όπλων. Μόλις το 1951 χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά πυρηνικός αντιδραστήρας για μη στρατιωτικούς σκοπούς και συγκεκριμένα για τη δοκιμαστική παραγωγή μικρής ποσότητας ηλεκτρικού ρεύματος (ΗΠΑ, Αϊντάχο). Στις 27 Ιουνίου 1954 πρώτη φορά πυρηνικός αντιδραστήρας συνδέθηκε με εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (ΕΣΣΔ, Ομπνίσκ) παρέχοντάς του σε μόνιμη βάση ηλεκτρικό ρεύμα.

Στη διάρκεια της δεκαετίας του 1950 ήταν διάχυτη η αισιοδοξία ότι η πυρηνική αποτελούσε τη νέα «μαγική» ενέργεια που θα κάλυπτε τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες με πολύ χαμηλό κόστος. Μάλιστα ο πρόεδρος της Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας των ΗΠΑ Λιούις Στράους έμεινε στην ιστορία για τη λανθασμένη του πρόβλεψη «στο μέλλον η πυρηνική ενέργεια θα είναι τόσο φθηνή, που δεν θα κάνουμε τον κόπο να την κοστολογούμε». Ο Λιούις είχε επίσης προβλέψει ότι το 2000 στις ΗΠΑ θα λειτουργούσαν 1.000 πυρηνικοί σταθμοί. Έπεσε και σε αυτό έξω (λειτουργούν 104), καθώς η κατασκευή νέων πυρηνικών σταθμών ουσιαστικά αναστάλη λόγω του ατυχήματος στο Three Mile Island το 1979, αλλά και επειδή η παραγωγή ηλεκτρισμού με φυσικό αέριο ήταν φθηνότερη. Άλλο ζήτημα που καθιστά την πυρηνική ενέργεια λιγότερο δημοφιλή από όσο τη φαντάζονταν επιστήμονες και πολιτικοί πενήντα χρόνια πριν, είναι το κόστος της επεξεργασίας και αποθήκευσης των πυρηνικών αποβλήτων.

Σήμερα 31 χώρες διαθέτουν συνολικά 439 πυρηνικούς αντιδραστήρες σε λειτουργία παράγοντας το 14% του ηλεκτρισμού του κόσμου. Η Γαλλία, χάρη στους 58 αντιδραστήρες της αναδεικνύεται πρωταθλήτρια στον τομέα (ποσοστό ενεργειακής κάλυψης 78%). Για να τους «κινήσει» καταναλώνει 10.000 τόνους ουρανίου καυσίμου το χρόνο. Σήμερα σε όλο τον κόσμο κατασκευάζονται γύρω στους 64 αντιδραστήρες, οι 26 εκ των οποίων στην Κίνα, με δεύτερη τη Ρωσία με 10, και τρίτη την Ινδία με 6. Αρκετές ακόμα χώρες διαθέτουν πυρηνικούς αντιδραστήρες μικρής ισχύος για ερευνητικούς σκοπούς. Ανάμεσά τους η Ελλάδα με τον αντιδραστήρα ισχύος 5MW στο Κέντρο Έρευνας «Δημόκριτος».

Τα υπέρ και τα κατά της πυρηνικής ενέργειας

Η πυρηνική ενέργεια έχει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Από άποψη αποτελεσματικότητας, είναι αξεπέραστη: η ενέργεια που εκλύεται κατά την πυρηνική σχάση 1 g ουρανίου 235 (για την πυρηνική σχάση βλ. παρακάτω) υπολογίζεται σε $9,6 \times 10^7$ kJ. Η ενέργεια που εκλύεται κατά τη χημική αντίδραση καύσης 1 g άνθρακα σε μορφή ανθρακίτη είναι 34,3 kJ, δηλαδή σχεδόν 3 εκατομμύρια φορές μικρότερη. Δεν πρέπει όμως να ξεχνάμε ότι στη Χιροσίμα, στις 6 Αυγούστου 1945, η ανθρωπότητα ανακάλυψε με τρόπο τη φοβερή δύναμη του ατόμου. Σήμερα η πυρηνική ενέργεια χρησιμοποιείται κυρίως για ειρηνικούς σκοπούς, με κυριότερο την παραγωγή φθηνής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ασφαλής όμως λειτουργία ενός εργοστασίου πυρηνικής ενέργειας αποτελεί μια τεράστια πρόκληση. Το 1986 συνέβη μια φοβερή έκρηξη σε εργοστάσιο πυρηνικής ενέργειας στο Τσερνόμπιλ της Ουκρανίας, με βαρύτατες βραχυχρόνιες και μακροχρόνιες συνέπειες, όχι μόνο για την υγεία των ζωντανών οργανισμών (ανθρώπων, ζώων και φυτών) κοντά στο εργοστάσιο, αλλά και σε όλη την Ευρώπη και πέρα από αυτήν. Πρόσφατα (Μάρτιος 2011) συνέβη νέο σοβαρότατο ατύχημα στην βορειοανατολική Ιαπωνία, που προκλήθηκε από το τσουνάμι που ακολούθησε τη φοβερή σεισμική δόνηση έντασης 8,9 στην κλίμακα Richter. Στο τελευταίο αυτό πυρηνικό ατύχημα θα επιστρέψουμε παρακάτω.

Η ασφαλής λειτουργία ενός εργοστασίου πυρηνικής ενέργειας μπορεί καταρχήν να επιτευχθεί με την αύξηση των φραγμάτων ανάμεσα στον πυρηνικό αντιδραστήρα και το περιβάλλον, ενώ η τραυματική εμπειρία από παλαιότερα και πρόσφατα πυρηνικά ατυχήματα έχει δείξει ότι 100% ασφαλής λειτουργία των πυρηνικών εργοστασίων δεν είναι δυνατή.

Πυρηνικά ατυχήματα

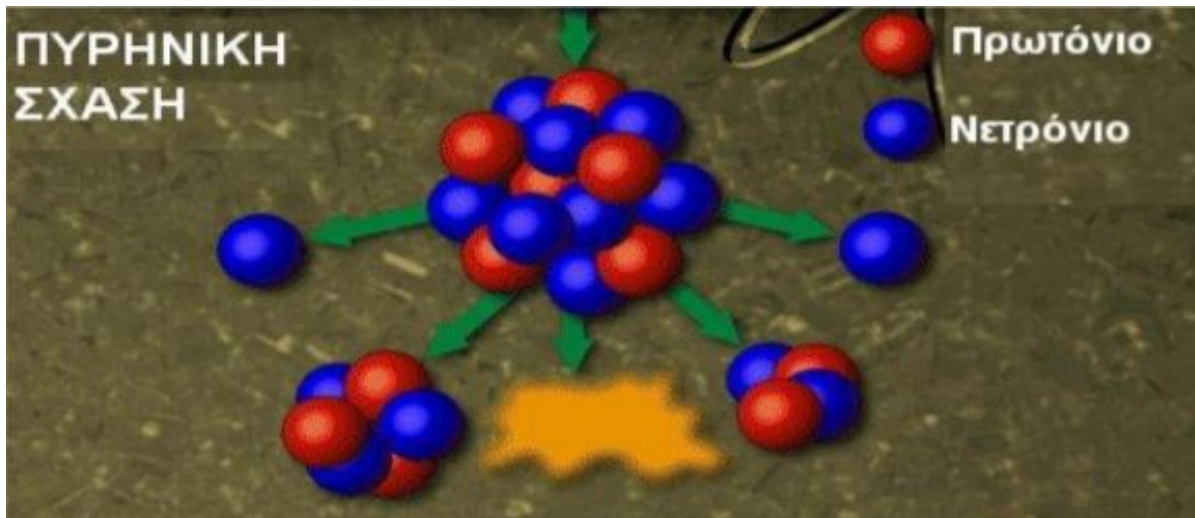
Ο μεγαλύτερος εφιάλτης της πυρηνικής ενέργειας, κι αυτός που έπαιξε τον μείζονα ρόλο στην, σχετικά, περιορισμένη χρήση της διεθνώς σήμερα είναι τα πυρηνικά ατυχήματα κάθε είδους. Το πρώτο πυρηνικό ατύχημα με διαρροή ραδιενέργειας συνέβη στον Καναδά, το 1952. Ήταν ωστόσο μικρής κλίμακας και δεν προκάλεσε θύματα ή αξιόλογη ρύπανση. Από τότε έχουν καταγραφεί τουλάχιστον 25 μικρής ή μεσαίας σημασίας ατυχήματα και ένα σοβαρό, αυτό στο Τσερνόμπιλ στις 26 Απριλίου 1986 (ΕΣΣΔ, τώρα Ουκρανία). Το 1964 ένας αμερικανικός δορυφόρος εφοδιασμένος με Πλουτώνιο-238 για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν κατόρθωσε να μπει στην προγραμματισμένη τροχιά και κατά την επάνοδό του στη Γη καταστράφηκε, απελευθερώνοντας στην ατμόσφαιρα αρκετή ραδιενέργεια ώστε να μετρηθεί με τα μέσα της εποχής. Τον Φεβρουάριο του 2011 μετά από τον σεισμό στα ανοιχτά της Ιαπωνίας, που προκάλεσε το τσουνάμι που έπληξε σφοδρά την περιοχή της Φουκουσίμα, έγινε ατύχημα στους τρεις πυρηνικούς αντιδραστήρες του εργοστασίου παραγωγής ενέργειας της Φουκουσίμα. Τεράστιες ποσότητες ραδιενέργειας εκλύθηκαν στην περιοχή, αλλά και στη θάλασσα και στον αέρα. Οι επιπτώσεις πήραν παγκόσμιες διαστάσεις και το ατύχημα χαρακτηρίστηκε εξίσου σοβαρό, αν όχι σοβαρότερο, με το Τσερνόμπιλ.

Περί Σχάσης

Ξέρουμε ότι το άτομο ενός χημικού στοιχείου αποτελείται από έναν πυρήνα που περιβάλλεται από ένα ηλεκτρονιακό νέφος. Ο πυρήνας αυτός αποτελείται από νετρόνια και πρωτόνια, ο αριθμός των οποίων ποικίλει. Αυτά τα σωματίδια συγκρατούνται μεταξύ τους με μια πολύ ισχυρή πυρηνική δύναμη. Στη φύση, οι ατομικοί πυρήνες των περισσότερων στοιχείων είναι σταθεροί. Ένας συγκεκριμένος πυρήνας, αυτός του ισότοπου του στοιχείου ουράνιο (ισότοπα ονομάζονται άτομα του ίδιου χημικού στοιχείου -οι πυρήνες τους έχουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων - ίδιο ατομικό αριθμό- που διαφέρουν στον αριθμό των νετρονίων, δηλαδή στον μαζικό αριθμό.), U, με μαζικό αριθμό 235 (235U ή U-235)(Το ραδιενεργό ορυκτό ουράνιο (U) που βρίσκεται στον στερεό φλοιό της γης, με τη μορφή του ορυκτού ουρανίτης, περιέχει μέχρι 20% καθαρό U. Το φυσικό U αποτελείται κυρίως από δύο ισότοπα, το U-235 (235U) και το U-238 (238U), κατά κανόνα σε αναλογία 0,7% και 99,3% αντιστοίχως. Μόνο το U235 χρησιμοποιείται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες, διότι έχει μεγάλη πιθανότητα να παθαίνει σχάση, σε αντίθεση με το U-238), συγκρουόμενος με ένα νετρόνιο, μπορεί να διασπαστεί, απελευθερώνοντας μια σημαντική ποσότητα ενέργειας. Η διάσπαση αυτή ονομάζεται πυρηνική σχάση. Υπάρχουν και άλλα τεχνητά στοιχεία (που τα έφτιαξαν οι επιστήμονες στα εργαστήρια), όπως το πλουτώνιο, Pu, που μπορεί επίσης να διασπαστούν με αυτόν τον τρόπο.

Η σχάση του U-235 δεν είναι αυθόρμητη διαδικασία, αλλά συμβαίνει όταν ένας πυρήνας U235 συγκρουστεί με ένα νετρόνιο. Κατά τη σχάση ενός πυρήνα U-235 παράγονται ένας αριθμός νετρονίων (συνήθως 2 ή 3) και δύο ελαφρύτεροι πυρήνες με παραπλήσιες μάζες, όπως π.χ. αυτοί του μετάλλου βάριο (Ba) (που ανήκει στη 2η ομάδα του περιοδικού πίνακα, τις αλκαλικές γαίες) και του ευγενούς αερίου κρυπτόν (Kr). Η αντίδραση αυτή παριστάνεται με την ακόλουθη πυρηνική εξίσωση (το n παριστάνει ένα νετρόνιο):





Τα παραγόμενα με τη σχάση νετρόνια μπορούν να συγκρουστούν με άλλους πυρήνες U-235, προκαλώντας πάλι σχάση, απελευθερώνοντας και άλλα νετρόνια και ενέργεια, κ.ο.κ. Αυτή είναι η πολυσυζητημένη αλυσιδωτή αντίδραση, που αν γίνεται με σταθερό ρυθμό (αν δηλαδή ο αριθμός των σχάσεων ανά δευτερόλεπτο είναι σταθερός), αποτελεί τον μηχανισμό παραγωγής της ενέργειας στους πυρηνικούς αντιδραστήρες. Αν όμως ο ρυθμός της αλυσιδωτής αντίδρασης αυξάνει συνεχώς, σε κλάσμα του δευτερολέπτου εκλύονται τεράστιες ποσότητες ενέργειας και προκαλείται ισχυρότατη έκρηξη, όπως συμβαίνει στην ατομική βόμβα (σωστότερα: πυρηνική βόμβα). Στο φυσικό ορυκτό ουράνιο δεν συμβαίνει αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης, ακόμα και παρουσία νερού, ή όταν διαλυθεί σε νερό, λόγω της χαμηλής περιεκτικότητάς του σε U-235.

Όπως είπαμε, για την επίτευξη της αλυσιδωτής αντίδρασης σχάσης, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες χρησιμοποιούν ως καύσιμο το λεγόμενο εμπλουτισμένο ουράνιο. Η τεράστια ποσότητα ενέργειας που απελευθερώνεται με την αντίδραση σχάσης οφείλεται στο ότι η μάζα του ουρανίου που σχάστηκε είναι μεγαλύτερη από τη μάζα των θραυσμάτων της σχάσης κατά Δm . Η εκλυόμενη ενέργεια ΔE σχετίζεται με τη διαφορά μάζας Δm μέσω της εξίσωσης του Einstein:

$$\Delta E = \Delta m c^2, \text{ όπου } c \text{ είναι η ταχύτητα του φωτός (σχεδόν } 3 \times 10^8 \text{ m/s).}$$

(μή σχετικιστική μορφή της εξίσωσης Einstein περι αντιστοιχίας ύλης-ενέργειας).

Λόγω του ότι το ισότοπο U235 έχει μεγάλη πιθανότητα να παθαίνει σχάση, ενώ το U-238 μικρή, απαιτείται το φυσικό ουράνιο να εμπλουτίζεται με ειδική διαδικασία, που αφαιρεί μεγάλο μέρος του U-238, μέχρι η περιεκτικότητα σε U-235 να ανέβει στο 3-5%. Το απομακρυνόμενο μέρος του ορυκτού είναι σχεδόν καθαρό ουράνιο U-238 και ονομάζεται απεμπλουτισμένο ουράνιο.

Το ουράνιο εξορύσσεται ως μέταλλευμα σε μεγάλες ποσότητες κυρίως από τον Καναδά, την Αυστραλία και το Καζακστάν. Οι τρεις αυτές χώρες είναι υπεύθυνες για περισσότερες από τις μισές πηγές του μεταλλεύματος στον κόσμο.



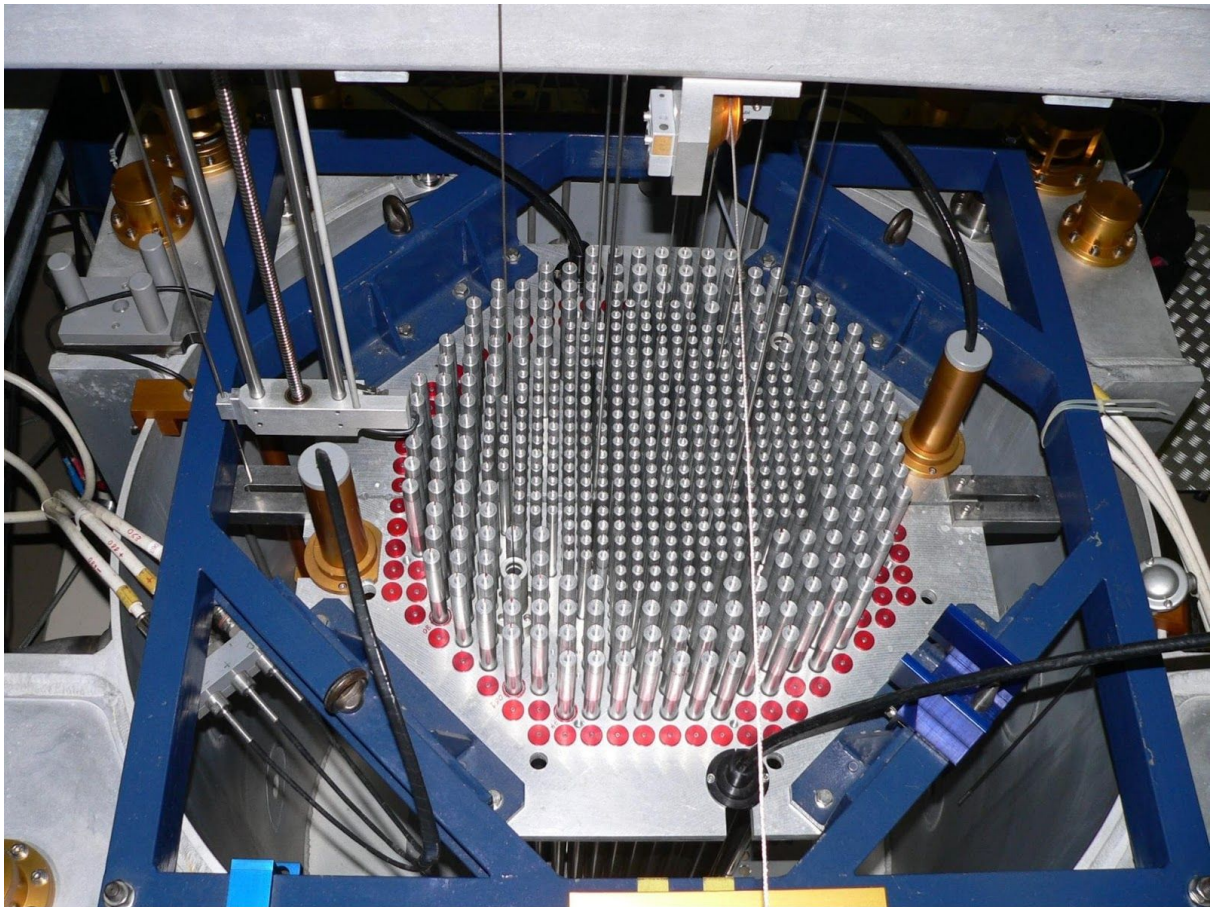
(Μετάλλευμα ουρανίου).

Πυρηνικός αντιδραστήρας

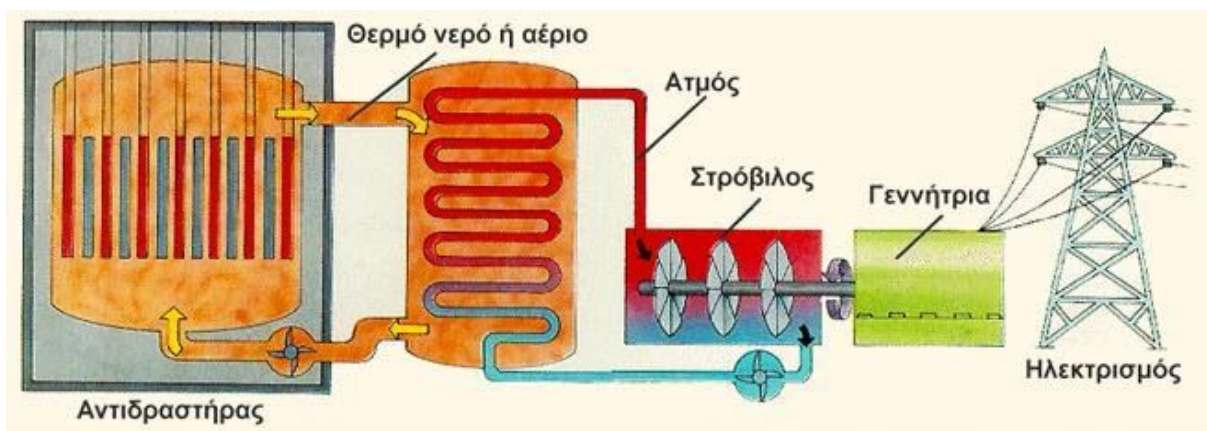


Υπάρχουν πολλά είδη πυρηνικών αντιδραστήρων. Ο πιο κοινός είναι ο αντιδραστήρας πεπιεσμένου νερού, τον οποίο και θα περιγράψουμε. Όπως είδαμε, η σχάση των πυρήνων του U-235 παράγει νετρόνια. Η αντίδραση συντηρείται μόνον όταν ο αριθμός των νετρονίων που προκαλούν σχάση παραμένει σταθερός με τον χρόνο, και συγκεκριμένα όταν, από τα

νετρόνια που προκύπτουν από τη σχάση, μόνο ένα προκαλεί νέα σχάση, συναντώντας έναν άλλο πυρήνα U-235. Όμως πέρα από τη διατήρηση αυτού του ισοζυγίου, πρέπει τα νετρόνια να επιβραδυνθούν, καθώς η σχάση είναι πιο αποδοτική με νετρόνια χαμηλής ενέργειας. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται επιβραδυντής των νετρονίων που είναι κατά κανόνα το νερό. Αυτό το νερό ονομάζεται πρωτεύον νερό, κυκλοφορεί στην καρδιά του αντιδραστήρα και δεν ενεργεί μόνο ως επιβραδυντής των νετρονίων, αλλά και ως μέσο ελέγχου της θερμοκρασίας, αποτρέποντας την υπερθέρμανση της καρδιάς του αντιδραστήρα. Το πρωτεύον νερό επιτελεί μία επιπλέον σημαντική λειτουργία: θερμαινόμενο από το πυρηνικό καύσιμο, κυκλοφορεί μέσω σωληνώσεων και στον χώρο της γεννήτριας υδρατμών, όπου υπάρχει το δευτερεύον νερό. Το δευτερεύον νερό θερμαίνεται αρκετά και γι' αυτό τον λόγο εξατμίζεται. Οι δημιουργούμενοι υδρατμοί μεταβιβάζονται σε μια τεράστια ηλεκτρογεννήτρια που παράγει ηλεκτρισμό. Αυτή είναι και η βασική χρησιμότητα του πυρηνικού αντιδραστήρα. Ο υδρατμός δεν αποβάλλεται στο περιβάλλον, αλλά έρχεται σε επαφή με ένα κύκλωμα ψύξης και υγροποιείται. Το κύκλωμα αυτό λειτουργεί με κρύο νερό από τη θάλασσα ή από κάποιο ποτάμι. Αυτό το νερό είναι το τριτεύον νερό. Για τον λόγο αυτόν, τα πυρηνικά εργοστάσια κατασκευάζονται συχνά πολύ κοντά στη θάλασσα, όπως στην περίπτωση της Φουκουσίμα της Ιαπωνίας. Ένας σταθμός με αντλίες τροφοδοτεί το κύκλωμα ψύξης. Το νερό ανακυκλώνεται στο κάθε κύκλωμα. Το τριτεύον νερό επιστρέφει στη θάλασσα ή στο ποτάμι, το δευτερεύον νερό επιστρέφει στη γεννήτρια ατμού και το πρωτεύον στην καρδιά του αντιδραστήρα. Αυτά τα τρία κυκλώματα ανταλλάσσουν θερμότητα, αλλά ποτέ, υπό κανονικές συνθήκες, νερό. Έτσι μειώνονται οι πιθανότητες ρύπανσης του περιβάλλοντος με ραδιενέργεια, αφού μόνο το πρωτεύον νερό είναι ραδιενεργό και έρχεται σε επαφή με τα στοιχεία του πυρηνικού καυσίμου. Επομένως, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, ραδιενέργεια από την καρδιά του αντιδραστήρα και το πρωτεύον νερό δεν μεταβιβάζεται ούτε στο δευτερεύον ούτε στο τριτεύον νερό.



(Ο πυρήνας ενός πυρηνικού αντιδραστήρα).



(Από την πυρηνική σχάση στον ηλεκτρισμό).

Τον Μάρτιο του 2011, στον πυρηνικό σταθμό της πόλης Φουκουσίμα της Ιαπωνίας προκλήθηκαν καταστροφές λόγω εκρήξεων αερίου υδρογόνου, που θεωρείται ότι παράχθηκε από τη διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο, στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν (το νερό διασπάται σε θερμοκρασίες πάνω από 2000°C). Οι υψηλές θερμοκρασίες προέκυψαν από τη διακοπή της κυκλοφορίας του χρησιμοποιούμενου ως ψυκτικού θαλασσινού νερού (τριτεύον νερό), λόγω διακοπής του

ηλεκτρικού ρεύματος. Αποτέλεσμα των καταστροφών στον αντιδραστήρα ήταν να απελευθερωθεί μεγάλη ποσότητα ραδιενέργειας, τόσο στην ατμόσφαιρα όσο και στη θάλασσα, με σημαντικές συνέπειες για τη ζωή και την οικονομία τουλάχιστον σε όλη την Ιαπωνία.



(Οι κατεστραμμένοι πυρηνικοί αντιδραστήρες Νο. 3 και Νο. 4 του πυρηνικού σταθμού Φουκουσίμα της Ιαπωνίας).



(Κάτοικοι της περιοχής κοντά στο πυρηνικό εργοστάσιο Φουκουσίμα περιμένουν για ελέγχους ραδιενέργειας).

Αυτήν τη στιγμή λειτουργούν πυρηνικά εργοστάσια σε 31 χώρες στον κόσμο και αριθμούν συνολικά 451 εν ενεργεία πυρηνικούς αντιδραστήρες. Η χώρα με τους περισσότερους αντιδραστήρες είναι οι ΗΠΑ με 99, ενώ ακολουθούν η Γαλλία με 58, η Ιαπωνία με 42, η Κίνα με 39 και η Ρωσία με 35.

Ραδιενέργεια

Στα άτομα των περισσότερων στοιχείων που συναντούμε στη φύση, οι πυρήνες τους είναι σταθεροί. Άτομα, όμως, με μεγάλο συνήθως αριθμό πρωτονίων και νετρονίων έχουν συχνά ασταθείς πυρήνες και μεταπίπτουν σε άτομα άλλων στοιχείων, με εκπομπή πυρηνικής ακτινοβολίας ή ραδιενέργειας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ραδιενεργός διάσπαση. Τα αντίστοιχα στοιχεία ονομάζονται ραδιενεργά ή ραδιοϊσότοπα. Τα περισσότερα έχουν και σταθερά ραδιενεργά ισότοπα. Πολλά ραδιοϊσότοπα βρίσκονται στη φύση (φυσικά ραδιοϊσότοπα). Η ραδιενέργεια που εκπέμπουν ονομάζεται φυσική ραδιενέργεια. Ένας μεγάλος αριθμός ραδιοϊσοτόπων έχει παρασκευαστεί σε πυρηνικούς αντιδραστήρες (τεχνητά ραδιοϊσότοπα). Η ραδιενέργεια που εκπέμπουν ονομάζεται τεχνητή ραδιενέργεια.

Η ραδιενεργός ακτινοβολία αποτελείται από **τρεις** διαφορετικούς **τύπους**:

➤ **Σωματία άλφα**

Κάθε σωματίο α αποτελείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια (πυρήνας ηλίου, 4He). Τα σωματία α έχουν θετικό φορτίο και γι' αυτό εκτρέπονται από το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο.

➤ **Σωματία βήτα**

Τα σωματία β είναι ηλεκτρόνια, έχουν αρνητικό φορτίο και εκτρέπονται από το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο.

➤ **Ακτίνες γάμμα**

Οι ακτίνες γ είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα και γι' αυτό δεν εκτρέπονται από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Έχουν πάρα πολύ μεγάλη διεισδυτική ικανότητα.

Η ραδιενεργός ακτινοβολία αποτελεί έναν αόρατο εχθρό με σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Η πυρηνική βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρισμού, τα ορυχεία εξόρυξης ουρανίου, καθώς και τα ερευνητικά κέντρα ή νοσοκομεία που χρησιμοποιούν ραδιοϊσότοπα είναι πηγές ραδιενεργών αποβλήτων. Η συσσώρευσή τους αυξάνει επικίνδυνα τα ποσοστά ακτινοβολίας που δέχονται οι ζωντανοί οργανισμοί. Επίσης οι δοκιμές πυρηνικών όπλων και τα ατυχήματα σε πυρηνικούς σταθμούς επιβαρύνουν το περιβάλλον με ακτινοβολία και ραδιενεργά υλικά. Η ραδιενέργεια δεν μπορεί να εξουδετερωθεί, παρά μόνο με την ασφαλή αποθήκευση των ραδιενεργών υλικών για χρονικό διάστημα αρκετό για να «απενεργοποιηθούν» μέσω της ραδιενεργού διάσπασης. Για μερικά βαρέα ισότοπα, αυτό πρακτικά απαιτεί αρκετούς αιώνες! Η ραδιενέργεια των αποβλήτων, στις περιοχές όπου αποθηκεύονται, απειλεί με εκτεταμένη ρύπανση τη βιόσφαιρα.

Ανίχνευση και μέτρηση της ραδιενέργειας

Η ραδιενεργός ακτινοβολία μπορεί να ανιχνευτεί από τα αποτελέσματα που επιφέρει στην ύλη, π.χ. μαυρίζει τα φωτογραφικά φιλμ. Ακόμη, όταν επιδρά σε ορισμένες χημικές ουσίες,

προκαλεί φθορισμό ή φωσφορισμό, ενώ διαπερνά υλικά ορισμένου πάχους. Με βάση αυτές τις ιδιότητες, η ραδιενέργεια ανιχνεύεται και μετριέται με ειδικές συσκευές που ονομάζονται απαριθμητές Geiger-Müller.

Ιοντίζουσες ακτινοβολίες

Ιοντίζουσες ακτινοβολίες ονομάζονται οι ακτινοβολίες που μεταφέρουν ενέργεια ικανή να προκαλέσει ιοντισμό των ατόμων της, και επομένως να διασπάσει χημικούς δεσμούς, προκαλώντας έτσι βιολογικές βλάβες στους ζωντανούς οργανισμούς. Οι γνωστότερες ιοντίζουσες ακτινοβολίες είναι οι ακτίνες Χ, που παράγονται στις καθοδικές λυχνίες των ακτινολογικών μηχανημάτων και χρησιμοποιούνται ευρέως στην ιατρική. Άλλες μορφές είναι οι ακτινοβολίες α, β, και γ που εκπέμπονται από τους ραδιενεργούς πυρήνες ατόμων. Η διεισδυτικότητα των διαφόρων ακτινοβολιών στην ύλη εξαρτάται από το είδος τους και την ενέργεια που μεταφέρουν. Τα σωμάτια α απορροφούνται από ένα φύλλο χαρτιού, τα σωμάτια β από μερικά χιλιοστά πλεξιγκλάς, ενώ η υψηλής ενέργειας ακτινοβολία γ είναι πολύ διεισδυτική και απαιτεί σχετικά μεγάλα πάχη επιλεγμένων υλικών για να απορροφηθεί πλήρως (π.χ. μολύβδου ή σκυροδέματος). Η ποσότητα ενέργειας που μεταφέρεται από την ακτινοβολία στην ύλη ανά χιλιόγραμμο μάζας ονομάζεται δόση της ακτινοβολίας. Η πιθανότητα βλάβης της υγείας σχετίζεται άμεσα με τη δόση της ακτινοβολίας και το είδος της (π.χ. τα σωμάτια α προκαλούν 10 φορές μεγαλύτερο βιολογικό αποτέλεσμα από τις ακτίνες Χ ή τις ακτίνες γ).

Η δόση ακτινοβολίας που προκαλεί το ίδιο βιολογικό αποτέλεσμα με εκείνο που συνεπάγεται η επίδραση 1 rad ακτίνων Χ ονομάζεται 1 rem. (1 rem (rad equivalent for man): ισοδύναμο σε rad για τον άνθρωπο).

Το 1 rad είναι παλαιότερη μονάδα μέτρησης της δόσης ιοντίζουσας ακτινοβολίας. (1 rad = 0.01 Gy, όπου 1 Gy (1 gray) ορίζεται ως η απορρόφηση 1 J ιοντίζουσας ακτινοβολίας από 1 kg ύλης (συνήθως ανθρώπινου ιστού).)

Η φυσική ραδιενέργεια που παίρνει κανείς ετησίως είναι 0,1-0,15 rem. Το όριο που τίθεται σήμερα για τον γενικό πληθυσμό είναι 0,2 rem. Η θανατηφόρος δόση είναι 600 rem.

Πυρηνικά απόβλητα

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η πυρηνική βιομηχανία είναι ότι με δημιουργία πυρηνικής ενέργειας παράγονται πυρηνικά απόβλητα. Τα απόβλητα αυτά μπορούν να παραμείνουν ραδιενεργά, άρα και επικίνδυνα, για εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια από τη δημιουργία τους.

Οι μεγαλύτερες ποσότητες ραδιενεργών αποβλήτων αποτελούν περιπτώσεις πυρηνικών καυσίμων, συστατικά αντιδραστήρα και ουράνιο. Υπάρχουν επίσης και τα απόβλητα υψηλού

κινδύνου, τα οποία ονομάζονται έτσι επειδή είναι πολύ θανατηφόρα, ακόμα και εάν κάποιος κάτσει κοντά τους έστω και για λίγες ημέρες. Αυτός ο τύπος αποβλήτων αντιπροσωπεύει ένα μικρό μόνο μερίδιο. Για παράδειγμα, στη Βρετανία μόλις το 0,3% του συνολικού όγκου των πυρηνικών αποβλήτων της χώρας είναι υψηλού κινδύνου.

Σήμερα, τα υψηλού επιπέδου απορρίμματα αντιμετωπίζονται με ψύξη σε νερό για αρκετά χρόνια και στη συνέχεια αναμιγνύονται με τετηγμένο γυαλί, και χύνονται σε χαλύβδινα δοχεία. Αυτά τα δοχεία αποθηκεύονται τελικά σε ένα δοχείο επενδυμένο με σκυρόδεμα.



Αυτό όμως το μέτρο είναι προσωρινό. Οι επιστήμονες γνωρίζουν ότι θα χρειαστεί να βρουν έναν τρόπο αποθήκευσης των πυρηνικών αποβλήτων που θα προσφέρει ασφάλεια για χιλιάδες χρόνια. Ορισμένες χώρες, όπως η Αμερική και η Φινλανδία, σκοπεύουν να αποθηκεύσουν πυρηνικά απόβλητα σε βαθιά υπόγεια-αποθήκες. Για να είναι ασφαλής η συγκεκριμένη μέθοδος, θα πρέπει οι επιστήμονες να είναι σίγουροι ότι το υλικό δεν θα μπορεί να διαρρεύσει και να μολύνει υπόγεια νερά, ή να ανέβει στην επιφάνεια.

Λόγω των πυρηνικών αποβλήτων, ασκείται μέχρι και σήμερα έντονη κριτική στην πυρηνική ενέργεια. Ορισμένες ομάδες αντιτίθενται στους πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επειδή υπάρχει ο φόβος δημιουργίας ατυχήματος με καταστρεπτικές επιπτώσεις για τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

Στα θετικά, οι πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής δεν απελευθερώνουν αέρια θερμοκηπίου, που αναγκάζουν τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα και φυσικού αερίου να συμβάλλουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη.

Υπάρχουν διάφορα είδη πυρηνικών αποβλήτων, ανάλογα με την προέλευσή τους και τη ραδιενέργειά τους. Ως επί το πλείστον έχουν ελάχιστη ή μέτρια ραδιενέργεια και σύντομο διάστημα ζωής. Μεταξύ αυτών είναι τα ρούχα ή τα γάντια, οι λαμπτήρες και οι βελόνες των νοσοκομείων. Ενώ αποτελούν το 95% του συνόλου των πυρηνικών αποβλήτων, εκπέμπουν λιγότερη ραδιενέργεια από το 1% της συνολικής ραδιενέργειας και γι' αυτό δεν αποτελούν σοβαρό πρόβλημα. Μπορούν να αποθηκευτούν σε τσιμεντένιες χωματερές. Πυρηνικά κατάλοιπα περιέχονται επίσης στα υγρά ψύξης των πυρηνικών αντιδραστήρων.

Τα πυρηνικά απόβλητα που προκαλούν τη μεγαλύτερη ανησυχία είναι αυτά με υψηλή ραδιενέργεια. Αυτά αποτελούν το 1% των συνολικών πυρηνικών αποβλήτων, αλλά εκπέμπουν το 99% της συνολικής ραδιενέργειας, ενώ η διάρκεια ζωής τους είναι δεκάδες χιλιάδες χρόνια. Αυτά τα απόβλητα προέρχονται κυρίως από τα «σβησμένα καύσιμα» των εργοστασίων πυρηνικής ενέργειας. Το κύριο πρόβλημα όμως με τα πυρηνικά απόβλητα δεν είναι η υψηλή ραδιενέργεια, αλλά η χημική τοξικότητά τους. Τέλος, ένα ακόμη πρόβλημα που προκαλούν τα πυρηνικά εργοστάσια είναι αυτό της θερμικής ρύπανσης. Σε ένα εργοστάσιο πυρηνικής ενέργειας, ένα καύσιμο σπάνια διαρκεί πάνω από 3-4 χρόνια και μετά παύει να είναι αποτελεσματικό. Το πρόβλημα είναι το πώς θα διατεθούν αυτά τα «σβησμένα καύσιμα». Τα σβησμένα καύσιμα δεν περιέχουν μόνο άχρηστες ουσίες αλλά μπορεί να ανακυκλωθούν για να παραγάγουν νέο πυρηνικό καύσιμο. Γι' αυτό ορισμένες χώρες τα ανακυκλώνουν.



(Το πυρηνικό εργοστάσιο Vermont Yankee στις ΗΠΑ εκβάλλει θερμό νερό στον ποταμό Connecticut προκαλώντας θερμική ρύπανση.)

Θερμική ρύπανση

Η ανύψωση ή ταπείνωση της θερμοκρασίας του νερού πάνω ή κάτω από τις κανονικές εποχιακές τιμές σε ρεύματα, ποτάμια, λίμνες, εκβολές ποταμών, θάλασσες και ωκεανούς ως αποτέλεσμα της αποβολής θερμού ή ψυχρού νερού από διάφορες βιομηχανικές ή βιοτεχνικές μονάδες.



Ραδιενέργεια και υγεία

Τόσο η φυσική όσο και η τεχνητή ραδιενέργεια επιδρούν στους βιολογικούς ιστούς των ζωντανών οργανισμών και επιφέρουν αλλοιώσεις στα κύτταρα και το γενετικό τους υλικό, προκαλώντας μεταλλάξεις. Αυτό μπορεί να προκαλέσει σοβαρές ασθένειες, τόσο στους ίδιους όσο και στους απογόνους τους, ανάλογα με την ποσότητα και το είδος της ραδιενεργού ακτινοβολίας στην οποία έχουν εκτεθεί. Με τις δοκιμές των πυρηνικών όπλων συσσωρεύεται μεγάλη ποσότητα ραδιενεργών ουσιών στο περιβάλλον. Ιδιαίτερα επικίνδυνο είναι το ραδιοϊσότοπο στρόντιο-90 (^{90}Sr), το οποίο εισέρχεται εύκολα στον ανθρώπινο οργανισμό με την τροφή και αποτίθεται στα οστά, όπως ακριβώς και το ασβέστιο (το Sr ανήκει στην 2η ομάδα του περιοδικού πίνακα, όπως και το Ca). Από εκεί εκπέμπει ακτινοβολία που επηρεάζει την παραγωγή των ερυθρών αιμοσφαιρίων στον μυελό των οστών και προκαλεί λευχαιμία. Είναι επίσης δυνατό, μέσω του θηλασμού, να περάσει από τη μητέρα στο βρέφος και να προκαλέσει σοβαρές βλάβες. Ένα από τα προϊόντα της ραδιενεργού διάσπασης του U-238 είναι το αέριο ραδόνιο-222 (^{222}Rn). Το Rn εισέρχεται στο ανθρώπινο σώμα μέσω του αναπνευστικού συστήματος και η ακτινοβολία α που εκπέμπει προκαλεί καρκίνο των πνευμόνων.

Τα ραδιοϊσότοπα, παρ' όλα 'υτα, βρίσκουν εφαρμογές σε πολλούς τομείς, π.χ. στην ιατρική για διαγνωστικούς και θεραπευτικούς σκοπούς. Τα καρκινογόνα κύτταρα είναι πιο ευαίσθητα στην ραδιενεργό ακτινοβολία από τα υγιή. Με τις κατάλληλες προφυλάξεις, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σήμερα στην αντιμετώπιση του καρκίνου. Στη βιολογία και τη γεωργία είναι δυνατό, με τη χρήση ραδιοϊσοτόπων, να παρακολουθούμε την πορεία των προϊόντων μεταβολισμού σε ζώα και φυτά.

Απεμπλουτισμένο ουράνιο

Είδαμε ότι το U-238, προκύπτει από τον εμπλουτισμό του φυσικού U σε U-235 και ονομάζεται απεμπλουτισμένο ουράνιο. Παρόλο ότι και το U-238 είναι ραδιενεργό, το κύριο πρόβλημα είναι η χημική τοξικότητά του και όχι η ραδιενέργεια, γι' αυτό η αποθήκευσή του είναι το ζητούμενο. Το U-238 χρησιμοποιείται συχνά με εναλλακτικούς τρόπους. Για παράδειγμα, η ιδιαίτερα υψηλή πυκνότητά του το καθιστά «ιδανικό» για την επικάλυψη σφαιρών και βλημάτων επειδή διαθέτει μεγάλη διατρητική ικανότητα. Εκτός από τη βιομηχανία όπλων, χρησιμοποιείται επίσης και στην αεροναυπηγική. Βλήματα κατασκευασμένα από U-238 χρησιμοποιήθηκαν τη δεκαετία του 1990 στον πόλεμο του Κοσσυφοπεδίου, με τις αρνητικές συνέπειες στην υγεία του άμαχου πληθυσμού και των στρατιωτών για πολλές δεκαετίες μετά τη πολεμική σύρραξη.



(Το U-238 βρίσκεται σε μικρές ποσότητες στο έδαφος και κυρίως σε διάφορα πετρώματα).



(Έκρηξη από ρίψη βόμβας απεμπλουτισμένου ουρανίου).

Το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας

Όλα δείχνουν πως η πυρηνική ενέργεια θα είναι μαζί μας για πολύ καιρό ακόμα. Λόγω της δυνατότητάς της για συνεχή και αξιόπιστη παραγωγή σε ηλεκτρισμό, θεωρείται σε πολλά επίπεδα καλύτερη εναλλακτική από την ηλιακή ή την αιολική ενέργεια.

Επίσης, εάν λάβουμε υπόψιν πως αυτήν τη στιγμή επενδύονται δισεκατομμύρια σε αυτήν, φαίνεται πως η πυρηνική ενέργεια θα είναι ένα σημαντικό μέσο για τη βιώσιμη ανάπτυξη, σήμερα και στο μέλλον.

Βιβλιογραφία

- Armstrong, Robert C., Catherine Wolfram, Robert Gross, Nathan S. Lewis, and M.V. Ramana et al. *The Frontiers of Energy*, *Nature Energy*, Vol 1, 11 January 2016.
- Clarfield, Gerald H. and William M. Wiecek (1984). *Nuclear America: Military and Civilian Nuclear Power in the United States 1940-1980*, Harper & Row.
- Cooke, Stephanie (2009). *In Mortal Hands: A Cautionary History of the Nuclear Age*, Black Inc.
- Cravens, Gwyneth (2007). *Power to Save the World: the Truth about Nuclear Energy*. New York: Knopf. ISBN 0-307-26656-7.
- Elliott, David (2007). *Nuclear or Not? Does Nuclear Power Have a Place in a Sustainable Energy Future?*, Palgrave.
- Ferguson, Charles D., (2007). *Nuclear Energy: Balancing Benefits and Risks* Council on Foreign Relations.
- Herbst, Alan M. and George W. Hopley (2007). *Nuclear Energy Now: Why the Time has come for the World's Most Misunderstood Energy Source*, Wiley.
- Schneider, Mycle, Steve Thomas, Antony Froggatt, Doug Koplow (2016). *The World Nuclear Industry Status Report: World Nuclear Industry Status as of 1 January 2016*.
- Walker, J. Samuel (1992). *Containing the Atom: Nuclear Regulation in a Changing Environment, 1993-1971*, Berkeley: University of California Press.
- Weart, Spencer R. *The Rise of Nuclear Fear*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2012. ISBN 0-674-05233-1

Ιστότοποι:

- <https://volton.gr/puriniki-energeia/>
- <http://kodipheet.chem.uoi.gr/contents/9%20KEF%209.pdf>
- http://skiathos.physics.auth.gr/atlas/Nuclear_Physics/2014/T2/Sampsonidis/Fission_Fussion.pdf

Περιεχόμενα

| | |
|----------------------------------------------------|-----------|
| Εισαγωγή | 2 |
| Λίγα Ιστορικά | 3 |
| Τα υπέρ και τα κατά της πυρηνικής ενέργειας | 4 |
| Πυρηνικά ατυχήματα | 5 |
| Περί Σχάσης | 6 |
| Πυρηνικός αντιδραστήρας | 8 |
| Ραδιενέργεια | 12 |
| Ανίχνευση και μέτρηση της ραδιενέργειας | 12 |
| Ιοντίζουσες ακτινοβολίες | 13 |
| Πυρηνικά απόβλητα | 13 |
| Θερμική ρύπανση | 15 |
| Ραδιενέργεια και υγεία | 16 |
| Απεμπλουτισμένο ουράνιο | 17 |
| Το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας | 18 |
| Βιβλιογραφία | 19 |
| Περιεχόμενα | 20 |