

7. Η ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Αμέσως μετά την ανακάλυψη της τεχνητής πυρηνικής σχάσεως του ουρανίου με νετρόνια από τους O. Hahn και F.Strassmann (1938) έγινε αντιληπτό ότι το καινούργιο αυτό φαινόμενο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Ο πρώτος πυρηνικός αντιδραστήρας (Chicago Pile-1), που κατασκεύασε μία ομάδα επιστημόνων με επικεφαλής τον E.Fermi κάτω από μία πτέρυγα εγκαταλελειμένων κερκίδων του σταδίου Alonso Stagg Field του Πανεπιστημίου του Σικάγο, λειτούργησε ήδη στις 2 Δεκεμβρίου του 1942¹.

Από τότε εκατοντάδες πυρηνικοί αντιδραστήρες κατασκευάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν σ' όλον τον κόσμο για την παραγωγή ενέργειας, για την παραγωγή ραδιονουκλιδίων και για ερευνητικούς σκοπούς. Το 2008 η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τους 436 πυρηνικούς αντιδραστήρες, που λειτουργούν σε 30 χώρες έφθασε τα 370 GWe, δηλαδή το 15% της παγκόσμιας παραγωγής ή τα 30 % στις χώρες του Ο.Ο.Σ.Α. (Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Αναπτύξεως)².

7.1 Αλυσσωτές αντιδράσεις και νετρονικό ισοζύγιο στους πυρηνικούς αντιδραστήρες.

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 5, κατά τη διάρκεια της σχάσεως του ²³⁵U, που είναι και το πιο συνηθισμένο σχάσιμο υλικό, σχηματίζονται δύο συνήθως προϊόντα της σχάσεως (πυρήνες με A = 80-150) και εκπέμπονται 2 ως 3 νετρόνια (μέσος όρος 2.4229) και ακτινοβολία-γ. Η συνολική ενέργεια, που απελευθερώνεται κατά τη σχάση μπορεί να υπολογισθεί λαμβάνοντας υπόψη τη μέση ενέργεια συνδέσεως των βαρέων (7.6 MeV) και των μέσου

¹ *The First Reactor*, 40th anniversary commemorative edition, U.S.D.O.E., Washington D.C., 1982 (<http://www.osti.gov/accomplishments/documents/fullText/ACC0044.pdf>)

² Πηγή: World Nuclear Association

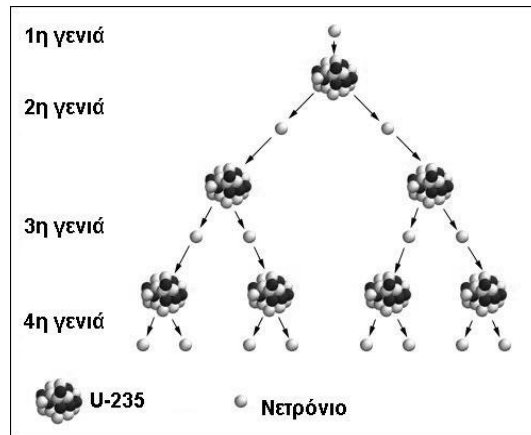
μεγέθους πυρήνων (8.5 MeV) και ανέρχεται σε περίπου 210 MeV. Τα 210 MeV κατανέμονται ως εξής

- κινητική ενέργεια των προϊόντων της σχάσεως	175 MeV
- κινητική ενέργεια των αμέσων νετρονίων	5
- ενέργεια της άμεσης ακτινοβολίας-γ	7
- ενέργεια της β ⁻ -διάσπασης των προϊόντων της σχάσεως	7
- ενέργεια της γ-διάσπασης των προϊόντων της σχάσεως	6
- ενέργεια των νετρονίων	10

Από αυτά τα 210 MeV μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας περίπου τα 190 MeV. Δε μπορεί να γίνει εκμετάλλευση της ενέργειας των νετρονίων λόγω της μικρής αλληλεπίδρασής τους με την ύλη καθώς επίσης της ακτινοβολίας-γ, που κι αυτή απορροφάται σε μικρό ποσοστό στον όγκο του πυρηνικού αντιδραστήρα. Έτσι, επειδή 1 eV/άτομο αντιστοιχεί σε 96.3 kJ/γραμμομόριο (23 kcal/ γραμμομόριο), από την ποσοτική σχάση 1 g ²³⁵U παράγεται ενέργεια με περίπου 2.15 10⁴ kWh (περ. 1 MWd). Αυτό σημαίνει ότι ένας πυρηνικός αντιδραστήρας ηλεκτρικής ισχύος 1000 MW_e (θερμικής περ. 3000 MW_{th}) καταναλώνει το χρόνο περίπου έναν τόνο ²³⁵U. Για την παραγωγή ισχύος 1W απαιτούνται 3.1 x 10¹⁰ σχάσεις/δευτερόλεπτο. Για σύγκριση μπορεί να αναφερθεί ότι η καύση 1 g άνθρακα αποδίδει μόνο 33.9 kJ (8.1 kcal), που αντιστοιχεί σε 9.4 Wh.

Τα 2.43 νετρόνια, που παράγονται κατά μέσον όρο κατά τη σχάση του ²³⁵U με νετρόνια, μπορούν να προκαλέσουν τη σχάση άλλων πυρήνων ²³⁵U οδηγώντας στη εξάπλωση μιάς αλυσωτής αντιδράσεως. Έτσι αν κατά τη σχάση ενός πυρήνα ²³⁵U προκύψουν 2 νετρόνια και τα νετρόνια αυτά προκαλέσουν τη σχάση περαιτέρω πυρήνων, τότε στη δεύτερη γενιά θα υπάρχουν 4 νετρόνια, στην τρίτη 8, στην τέταρτη 16 κλπ. Αυτό φυσικά το πρότυπο (Σχήμα 7-1) ουδέποτε συναντάται απόλυτα στην πράξη γιατί υπάρχουν και απώλειες νετρονίων.

Πρέπει, φυσικά, να λεχθεί, ότι τα νετρόνια, που απελευθερώνονται στη σχάση του ²³⁵U, έχουν μέση ενέργεια 1.5 ως 2 MeV. Αυτή η ενέργεια είναι αρκετή ώστε να προκαλέσουν τη σχάση και πυρήνων του ²³⁸U που βρίσκεται σε περίσσεια στο πυρηνικό καύσιμο. Έτσι ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων για περαιτέρω σχάσεις νετρονίων (ν ε) αυξάνει κατά τον παράγοντα ταχείας σχάσεως ε, που δίνει το λόγο του συνολικού αριθμού των



Σχήμα 7-1: Αλυσσωτή αντίδραση σχάσεως του ^{235}U με νετρόνια

ταχέων νετρονίων ως προς τον αριθμό των ταχέων νετρονίων από σχάσεις με θερμικά νετρόνια. Το ϵ έχει τιμή μεγαλύτερη της μονάδος. Ο πολλαπλασιασμός του αριθμού των νετρονίων από σχάσεις με ταχεία νετρόνια είναι δυνατός μόνο μέσα στο πυρηνικό καύσιμο. Όταν τα ταχεία νετρόνια βγουν από το καύσιμο η ενέργειά τους υποβιβάζεται κάτω της ενέργειας του κατωφλίου σχάσεως του ^{238}U (περ. 1 MeV) με κρούσεις με τα άτομα του επιβραδυντή (moderator) του αντιδραστήρα.

Στην επιθερμική περιοχή ενεργειών ($1 < E_n < 100$ eV) λαμβάνει χώρα έντονη απορρόφηση των νετρονίων, που δικαιολογείται από την ύπαρξη κορυφών συντονισμού στη συνάρτηση διεγέρσεως της απορρόφησης νετρονίων από το σχάσιμο υλικό. Η πιθανότητα διαφυγής από το συντονισμό p δίνει το ποσοστό των $\nu \epsilon$ μη-θερμικών νετρονίων, που αποφεύγει την απορρόφηση κατά τη διάρκεια της μείωσης της ενέργειάς τους και είναι διαθέσιμο για περαιτέρω χρήση.

Ένα μέρος από τα $\nu \epsilon p$ θερμικά νετρόνια χάνεται απορροφούμενο από το πυρηνικό καύσιμο, τον επιβραδυντή, το ψηκτικό υλικό ή τα δομικά στοιχεία του αντιδραστήρα. Ο παράγοντας θερμικής χρήσεως f δίνει το ποσοστό αυτών των νετρονίων που απορροφούνται από το πυρηνικό καύσιμο ως προς τη συνολική απορρόφηση των νετρονίων. Μόνο τα νετρόνια που απορροφούνται από το πυρηνικό καύσιμο μπορούν να συνεισφέρουν στον περαιτέρω πολλαπλασιασμό των νετρονίων και τη διατήρηση της αλυσσωτής αντίδρασης. Ο παράγοντας θερμικής χρήσεως f

είναι μικρότερος ως ίσος με τη μονάδα. Έτσι από τα ν αρχικά νετρόνια τελικά μόνο ν_{ef} παραμένουν διαθέσιμα για αντίδραση με το πυρηνικό καύσιμο.

- Το πυρηνικό καύσιμο αντιδρά κατά δύο τρόπους με τα θερμικά νετρόνια
- με πραγματοποίηση πυρηνικών αντιδράσεων του τύπου (n,γ)
 - με πυρηνική σχάση

Με τον όρο *αποτελεσματικός αριθμός νετρονίων* (η) χαρακτηρίζεται ο αριθμός των νετρονίων, που οδηγεί σε πυρηνική σχάση

$$\eta = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_{(n,\gamma)}}$$

όπου σ_f είναι η ενεργός διατομή για σχάση με θερμικά νετρόνια και $\sigma_{(n,\gamma)}$ η αντίστοιχη για αντιδράσεις του τύπου (n,γ) .

Οι τιμές του αποτελεσματικού αριθμού νετρονίων η για τα πιο συνηθισμένα σχάσιμα υλικά δίνεται στον Πίνακα 7-1.

Πίνακας 7-1: Ενεργός διατομή σχάσεως με θερμικά νετρόνια και αντιδράσεως (n,γ) , μέσος αριθμός εκπεμπόμενων νετρονίων ν και αποτελεσματικός αριθμός νετρονίων η για διάφορα σχάσιμα νουκλίδια.

Σχάσιμο νουκλίδιο	σ_f (b)	$\sigma_{(n,\gamma)}$ (b)	ν (νετρ./σχάση)	η (νετρ./σχάση)
^{233}U	530.6	47.0	2.4866	2.2844
^{235}U	580.2	98.3	2.4229	2.0719
^{239}Pu	741.6	271.3	2.8799	2.1085
^{241}Pu	1007.3	368.1	2.934	2.149

Στην περίπτωση πυρηνικών καυσίμων που, όπως το ουράνιο, διαθέτουν περισσότερα του ενός ισότοπα, πρέπει στον υπολογισμό του

αποτελεσματικού αριθμού νετρονίων να ληφθεί υπόψη και η απορρόφηση νετρονίων κι από αυτά.

Έτσι από τα ν αρχικά νετρόνια προκύπτουν

$$\eta \epsilon p f = k_{\infty}$$

για τη σχέση και τον πολλαπλασιασμό των νετρονίων στον αντιδραστήρα. Η σχέση αυτή ονομάζεται *σχέση των τεσσάρων συντελεστών* και ισχύει για ένα σύστημα απείρων διαστάσεων (μηδενική περαιτέρω απώλεια νετρονίων). Αυτή η συνθήκη όμως δεν υφίσταται στην πράξη γιατί υπάρχουν πάντοτε απώλειες νετρονίων από διάχυση προς το εξωτερικό του αντιδραστήρα, που όσο κι αν μειώνονται με τη χρήση ενός ανακλαστήρα, επηρεάζουν το νετρονικό περιεχόμενό του. Έτσι για πραγματικές συνθήκες χρησιμοποιείται αντί του *λόγου πολλαπλασιασμού απείρων διαστάσεων* (k_{∞}) ο *αποτελεσματικός λόγος πολλαπλασιασμού* (k_{eff}). Ο k_{eff} λαμβάνει υπόψη του με έναν παράγοντα γεωμετρίας (P) τις πραγματικές διαστάσεις του αντιδραστήρα

$$k_{eff} = P k_{\infty}$$

Το P και το k_{∞} είναι πάντοτε μικρότερα της μονάδος.

Για τον αποτελεσματικό λόγο πολλαπλασιασμού υπάρχουν τρεις οριακές περιπτώσεις:

- $k_{eff} < 1$: Στην περίπτωση αυτή ο αριθμός των νετρονίων μειώνεται από γενιά σε γενιά με αποτέλεσμα τον τερματισμό της αλυσωτής αντίδρασης και το σβήσιμο του πυρηνικού αντιδραστήρα. Το σύστημα αυτό ονομάζεται *υποκρίσιμο*.
- $k_{eff} = 1$: Στην περίπτωση αυτή υπάρχει μία στατική ισορροπία μεταξύ της παραγωγής και απορρόφησης των νετρονίων. Τέτοιες συνθήκες υπάρχουν κατά την ομαλή λειτουργία ενός πυρηνικού αντιδραστήρα. Το σύστημα αυτό χαρακτηρίζεται ως *κρίσιμο*.
- $k_{eff} > 1$: Στην περίπτωση αυτή ο αριθμός των νετρονίων αυξάνει από γενιά σε γενιά και μπορεί τελικά να καταστεί και ανεξέλεγκτος. Τέτοιες συνθήκες υφίστανται κατά την έναρξη της λειτουργίας ενός πυρηνικού αντιδραστήρα, κατά τις εκρήξεις πυρηνικών βομβών και σε περιπτώσεις πυρηνικών ατυχημάτων. Το σύστημα αυτό χαρακτηρίζεται ως *κρίσιμο*.

Για να διατηρηθεί ένας αντιδραστήρας σε λειτουργία το k_{eff} πρέπει να είναι λίγο μεγαλύτερο της μονάδας. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του αντιδραστήρα παράγονται προϊόντα της σχάσεως που απορροφούν νετρόνια και διαταράσσουν το νετρονικό περιεχόμενο του αντιδραστήρα. Γι' αυτό είναι απαραίτητο να υπάρχει μία περίσσεια αντιδραστικότητας ($k_{excess} = k_{eff} - 1$) στον αντιδραστήρα που να αντισταθμίζει αυτές τις απώλειες νετρονίων. Με τον όρο *αντιδραστικότητα* χαρακτηρίζεται η απόκλιση του λόγου πολλαπλασιασμού από την τιμή $k = 1$. Η περίσσεια αντιδραστικότητας ελέγχεται με τις *ράβδους ελέγχου* του αντιδραστήρα.

Στον πολλαπλασιασμό των νετρονίων του αντιδραστήρα συνεισφέρει μόνο ο k_{excess} . Ιδιαίτερη σημασία στον πολλαπλασιασμό των νετρονίων έχει ο χρόνος l , που μεσολαβεί μεταξύ δύο γενιών νετρονίων. Ο χρόνος αυτός δίνει τη μέση διάρκεια ζωής των νετρονίων στο σύστημα

$$\frac{dn}{dt} = \nu \frac{k_{eff} - 1}{l}$$

Από την ολοκλήρωση της σχέσεως αυτής με οριακές συνθήκες $n = n_0$ για $t = t_0$ προκύπτει

$$n = n_0 e^{\frac{k_{eff} - 1}{l} t} = n_0 e^{\frac{t}{T}}$$

Το $T = l / (k_{eff} - 1)$ ονομάζεται *περίοδος του αντιδραστήρα* και δίνει τη μεταβολή του νετρονικού περιεχομένου του κατά e . Έτσι για τη ροή νετρονίων (Φ) του αντιδραστήρα³ ισχύει η σχέση

$$\Phi(t) = \Phi_0 e^{\frac{t}{T}}$$

Για παράδειγμα, για έναν αντιδραστήρα με $k_{eff} = 1.01$ και $l = 10^{-3}$ δευτερόλεπτα προκύπτει για $t = 1$ δευτερόλεπτο μία μεταβολή $\Phi/\Phi_0 = 20000$, που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα ελέγχου. Σημαντικό ρόλο σ'

³ Με τον όρο *ροή νετρονίων* χαρακτηρίζεται ο αριθμός των νετρονίων σε ένα cm^3 , πολλαπλασιασμένος με τη διαδρομή που διανύουν ανά δευτερόλεπτο. Η μονάδα της ροής νετρονίων είναι $\mathbf{n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}}$.

αυτό το σημείο παίζουν και τα καθυστερημένα νετρόνια που εκπέμπονται από ορισμένα προϊόντα της σχάσεως.

Κατά τη β-διάσπαση παρατηρούνται σε ορισμένες περιπτώσεις μεταπτώσεις σε διεγερμένες καταστάσεις του θυγατρικού πυρήνα που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από την ενέργεια συνδέσεως ενός νετρονίου. Στις περιπτώσεις αυτές η β-διάσπαση ακολουθείται από εκπομπή νετρονίου (π.χ. $^{137}\text{I} \rightarrow ^{137}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Xe} + n$ ή $^{87}\text{Br} \rightarrow ^{87}\text{Kr} \rightarrow ^{86}\text{Kr} + n$). Τα νετρόνια αυτά εκπέμπονται με το χρόνο υποδιπλασιασμού του πρόδρομου νουκλιδίου (*precursor*) γιατί η διάρκεια ζωής της διεγερμένης καταστάσεως είναι πολύ μικρή. Τα καθυστερημένα νετρόνια μεταβάλλουν το νετρονικό ισοζύγιο του αντιδραστήρα οδηγώντας σε μεγαλύτερες τιμές περιόδου του και συνεπώς σε βραδύτερη και ομαλότερη μεταβολή της ροής του.

Στη σχάση με θερμικά νετρόνια του ^{235}U προκύπτουν έξι ομάδες προϊόντων σχάσεως που εκπέμπουν καθυστερημένα νετρόνια (Πίνακας 7-2).

Πίνακας 7-2: Καθυστερημένα νετρόνια από τη σχάση του ^{235}U .

Ομάδα	t_j (s)	β_j	Απόδοση (νετρ./σχάση)	Πρόδρομα νουκλίδια
1	55.72	0.034	0.00052	^{87}Br
2	22.72	0.223	0.00546	^{137}I , ^{88}Br , ^{136}Te , ^{141}Cs
3	6.22	0.201	0.00310	^{89}Br , ^{138}I , ^{93}Rb , ^{137}Te , ^{87}Se
4	2.30	0.372	0.00624	^{94}Rb , ^{90}Br , ^{139}I , ^{85}As , ^{135}Sb ,
5	0.614	0.128	0.00182	^{99}Y , ^{140}I , ^{91}Br , ^{89}Se , ^{86}As
6	0.230	0.042	0.00066	(Br, Rb, As..)

Έτσι η μέση διάρκεια ζωής των νετρονίων στον αντιδραστήρα μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση

$$\bar{l} = (1 - \beta)l_{prompt} + \sum_{j=1}^6 (\beta_j t_j)$$

όπου l_{prompt} η μέση διάρκεια ζωής των αμέσων νετρονίων στον αντιδραστήρα, β το ποσοστό των καθυστερημένων νετρονίων ανά σχάση, β_j η σχετική αφθονία εκπομπής των επιμέρους ομάδων των καθυστερημένων νετρονίων και t_j ο μέσος χρόνος υποδιπλασιασμού τους. Οι τιμές του β για μερικά σχάσιμα με θερμικά νετρονία νουκλίδια δίνονται στον Πίνακα 7-3. Το β για τη σχάση ^{238}U με ταχεία νετρόνια είναι 0.0148.

Πίνακας 7-3: Ποσοστό καθυστερημένων νετρονίων ανά σχάση για νουκλίδια που σχάζονται με θερμικά νετρόνια.

Νουκλίδιο	^{233}U	^{235}U	^{239}Pu	^{241}Am	^{243}Am
β	0.0026	0.00641	0.002	0.0013	0.0024

Λαμβάνοντας υπόψη στο προηγούμενο παράδειγμα και την εκπομπή των καθυστερημένων νετρονίων προκύπτει

$$l = (1 - 0.00641) 10^{-3} + 0.085 = 0.086 \text{ s}$$

γεγονός που συνεπάγεται $\Phi/\Phi_0 = 1.12$ αντί για 20000. Η μεταβολή αυτή της ροής μπορεί να ελεγχθεί με τις ράβδους ελέγχου του αντιδραστήρα.

7.2 Τα συστατικά και η δομή ενός πυρηνικού αντιδραστήρα

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες μπορούν να διακριθούν σε *ερευνητικούς* και *ισχύος*. Οι ερευνητικοί αντιδραστήρες έχουν συνήθως μικρή ισχύ και χρησιμοποιούνται για ερευνητικούς σκοπούς και την παραγωγή ραδιοϊσοτόπων. Οι αντιδραστήρες ισχύος χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην πραγματικότητα δε διαφέρει ένας πυρηνικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ένα θερμικό παρά μόνο στον τρόπο παραγωγής της θερμότητας. Στους πυρηνικούς σταθμούς

παράγεται από τη σχάση του σχάσιμου υλικού (τις περισσότερες φορές ^{235}U) ενώ στους θερμικούς από την καύση άνθρακα ή πετρελαίου. Και στις δύο περιπτώσεις η θερμότητα μεταφέρεται στο αμοπααραγωγό σύστημα, παράγεται ατμός και στη συνέχεια με τη βοήθεια μίας γεννήτριας ηλεκτρισμός.

Τα κύρια συστατικά ενός αντιδραστήρα είναι το πυρηνικό καύσιμο, ο επιβραδυντής, το ψηκτικό μέσο και τα συστήματα ελέγχου.

Με τον όρο πυρηνικό καύσιμο χαρακτηρίζεται κάθε υλικό που καταναλώνεται για την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας. Ως πυρηνικά καύσιμα χρησιμοποιούνται κυρίως οξειδία σχάσιμων υλικών (π.χ. του ουρανίου (με εμπλουτισμό 1-5% σε ^{235}U), του πλουτωνίου (^{239}Pu) ή ακόμη και μεικτά οξειδία του ουρανίου και πλουτωνίου (MOX fuels). Τα οξειδία του ουρανίου και του πλουτωνίου δεν παρουσιάζουν μέχρι το σημείο τήξεώς τους καμία αλλαγή φάσεως, δεν είναι πυροφόρα και αλληλεπιδρούν με το περίβλημα των ράβδων των καυσίμων στον αντιδραστήρα. Τα καρβίδια και τα νιτρίδια του ουρανίου και πλουτωνίου έχουν επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζοντας καλύτερες θερμικές ιδιότητες και μεγαλύτερη πυκνότητα.

Οι ραβδοί των πυρηνικών καυσίμων (fuel rods), που περιέχουν το πυρηνικό καύσιμο σε μορφή κυλίνδρων μικρής διαμέτρου (Σχήμα 7-2), είναι τοποθετημένες σε κατάλληλα πλαίσια των οποίων η μορφή εξαρτάται από τον τύπο του αντιδραστήρα (Σχήμα 7-3).



Σχήμα 7-2: Κύλινδροι πυρηνικού καυσίμου πυρηνικού αντιδραστήρα.

Οι συστοιχίες αυτές (assemblies) περιλαμβάνουν και ράβδους ελέγχου του αντιδραστήρα που αποτελούν μέρος των συστημάτων ασφαλείας του.

Ο κύριος ρόλος των συστοιχειών των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου είναι να συγκρατούν το σχάσιμο υλικό σε καθορισμένες θέσεις μέσα στον πυρήνα του αντιδραστήρα εξασφαλίζοντας τη διατήρηση της νετρονικής ισορροπίας και την κανονική του ψύξη. Ένας πυρηνικός αντιδραστήρας ελαφρού ύδατος υπό πίεση ισχύος 1000 MW_e διαθέτει 120 – 190 συστοιχίες καυσίμου με 180 – 260 ράβδους μήκους ~ 4.5 m. ανά συστοιχία. Αντίστοιχα, ένας αντιδραστήρας ελαφρού ύδατος υπό βρασμό διαθέτει 370 – 800 συστοιχίες καυσίμων με 90 περίπου ράβδους η κάθε μία από αυτές.

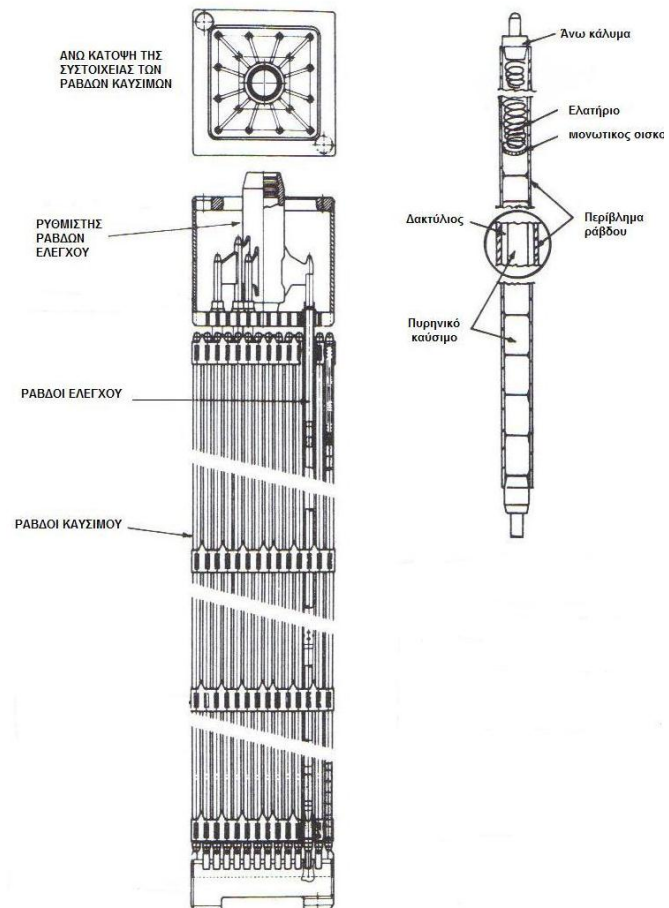
Στο παρελθόν οι ράβδοι των καυσίμων ήταν κατασκευασμένες από ανοξείδωτο χάλυβα που αντικαταστάθηκε, στους πιο σύγχρονους αντιδραστήρες από κράμματα του ζirkονίου. Τα πιο γνωστά από αυτά είναι το Zircaloy-2 (Zr με 1.20 - 1.70% Sn, 0.05 - 0.15% Cr, 0.07 – 0.20% Fe, 0.03 – 0.08% Ni και 0.01% Hf) και το Zircaloy-4 (Zr με 1.2 – 1.7% Sn, 0.7 – 0.13% Cr, 0.18 – 0.24% Fe, 0.01% Hf και ελάχιστο Ni). Τα κράμματα του ζirkονίου παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση αλλά, από την άλλη πλευρά, πρέπει να είναι και απαλλαγμένα από το Hf που έχει 600 φορές μεγαλύτερη ενεργό διατομή σύλληψης νετρονίων από το Zr. Η κανονική περιεκτικότητα του Zr σε Hf είναι 1 – 5%.

Ο ρόλος των συστημάτων ελέγχου του αντιδραστήρα είναι η εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του. Τα συστήματα ελέγχου αποτελούνται από συστοιχίες ράβδων οι οποίες περιέχουν μικρούς κυλίνδρους κραμμάτων ή ενώσεων στοιχείων με μεγάλη ενεργό διατομή απορρόφησης νετρονίων. Οι ράβδοι αυτοί είτε κινούνται ανάμεσα στις ράβδους καυσίμου του αντιδραστήρα απορροφώντας την περίσσεια των νετρονίων κι ελέγχοντας την περίσσεια αντιδραστικότητάς του είτε πέφτουν ανάμεσα στις συστοιχίες καυσίμων προκαλώντας, σε περίπτωση ανάγκης, το σταμάτημα της αλυσσώτης αντίδρασης δηλαδή το σβήσιμο του αντιδραστήρα.

Παρ' όλον ότι υπάρχουν πολλά στοιχεία με ικανότητα απορρόφησης νετρονίων (π.χ. σπάνιες γαίες), τα πλέον συνηθισμένα υλικά για ράβδους ελέγχου αντιδραστήρων είναι το κράμμα Ag (80%) - In (15%) - Cd (5%), το καρβίδιο του βορίου (B₄C εμπλουτισμένο σε ¹⁰B που έχει υψηλές ενεργές διατομές για σύλληψη νετρονίων) και τα κράμματα του Hf (Hafalloys, κυρίως για αντιδραστήρες πλοίων λόγω του υψηλού κόστους). Το τιτανικό

δυσπρόσιο (Dy_2TiO_5) και το διβοριούχο χάλφνιο (HfB_2) είναι επίσης δύο νέα υλικά με προοπτικές χρήσεως σε ράβδους ελέγχου.

Ο ρόλος του ψηκτικού μέσου στους αντιδραστήρες είναι η απαγωγή και μεταφορά της θερμότητας που παράγεται κατά την πυρηνική σχάση κάνοντας δυνατή την εκμετάλλευσή της για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας



Σχήμα 7-3: Ράβδος και συστοιχεία πυρηνικών καυσίμων

Τα περισσότερα είδη αντιδραστήρων ισχύος ψύχονται σήμερα με νερό (ελαφρύ ύδωρ) που παίζει συγχρόνως το ρόλο του επιβραδυντή των νετρονίων.

Η σχετικά υψηλή ενεργός διατομή σύλληψης νετρονίων του υδρογόνου ($\sigma_{(n,\gamma)} = 0.33 \text{ b}$) επιβάλλει τη χρησιμοποίηση ελαφρά εμπλουτισμένου σε ^{235}U καυσίμου. Από την άλλη μεριά, η χρησιμοποίηση βαρέως ύδατος (π.χ. σε αντιδραστήρες CANDU) επιτρέπει τη χρήση καυσίμων με φυσική περιεκτικότητα σε ^{235}U αλλά μειώνει την ισχύ του αντιδραστήρα και αυξάνει το κόστος του. Η ενεργός διατομή του δευτερίου για νετρόνια είναι κάπου εξακόσιες εξήντα φορές μικρότερη. Τέλος, ορισμένα ήδη πυρηνικών αντιδραστήρων χρησιμοποιούν ως ψηκτικό μέσο CO_2 ή He. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται γραφίτης ως επιβραδυντής των νετρονίων.

Τα πυρηνικά καύσιμα και οι ράβδοι ελέγχου του αντιδραστήρα βρίσκονται στο δοχείο πίεσεως του αντιδραστήρα, που είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα (πάχος: $\sim 10 \text{ cm}$). Το δοχείο πίεσεως του αντιδραστήρα μαζί με τα ψηκτικά συστήματα και τα συστήματα ασφαλείας του είναι τοποθετημένα σε ένα δοχείο εγκλωβισμού (containment) μεγάλης αντοχής από χάλυβα που είναι προσαρμοσμένο στο κτήριο του αντιδραστήρα. Το δοχείο εγκλωβισμού του αντιδραστήρα έχει ως σκοπό και τον περιορισμό της διαφυγής ραδιενεργών ουσιών στο περιβάλλον και τη μείωση των επιπτώσεων τυχόν ατυχημάτων (βλ. επίσης Σχήμα 7-4).

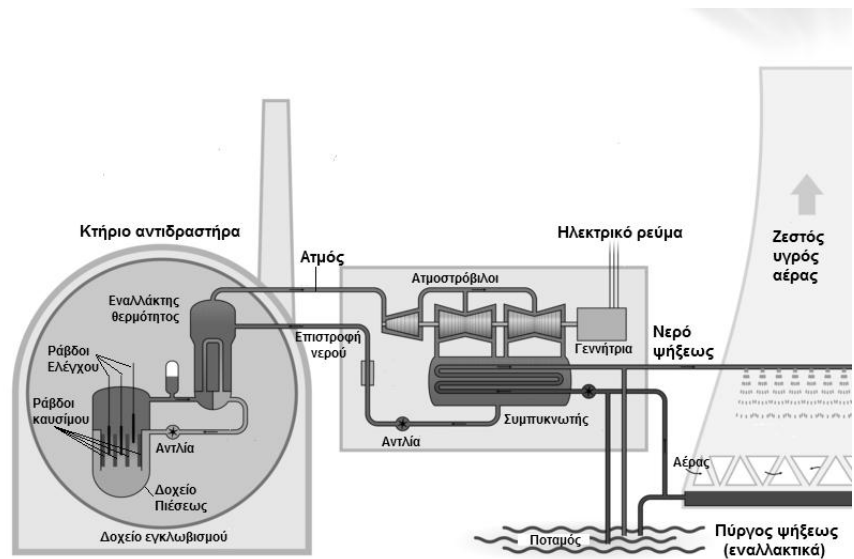
7.3 Είδη πυρηνικών αντιδραστήρων

Το μεγαλύτερο ποσοστό των αντιδραστήρων ισχύος ανήκουν στην κατηγορία των *αντιδραστήρων ελαφρού ύδατος* (LWR, Light Water Reactors). Μόνο σε λίγες χώρες (ιδιαίτερα στη Μ. Βρετανία) χρησιμοποιούνται αντιδραστήρες με αέριο ψήξη.

Οι αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος διακρίνονται σε *αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος υπό πίεση* (PWR, Pressurized Water Reactors) και σε *αντιδραστήρες εάφρου ύδατος υπό βρασμό* (BWR, Boiling Water Reactors).

Και οι δύο αυτοί τύποι αντιδραστήρων παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

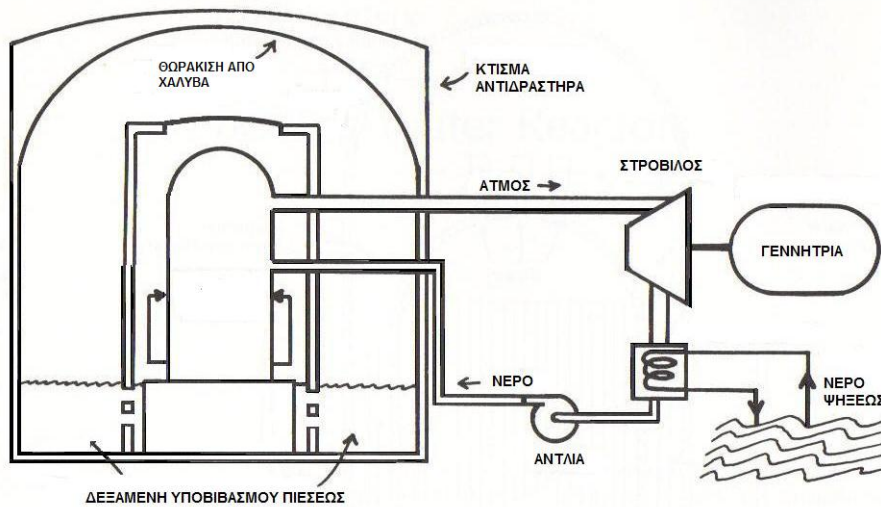
Στον αντιδραστήρα ελαφρού ύδατος υπό πίεση (Σχήμα 7-4) η κατανάλωση του καυσίμου είναι σταθερή σ' όλο το μήκος των ράβδων των καυσίμων. Οι αντιδραστήρες αυτοί διαθέτουν δύο ψηκτικούς κύκλους



Σχήμα 7-4: Γραφική παράσταση πυρηνικού σταθμού παραγωγής ισχύος με αντιδραστήρα ελαφρού ύδατος υπό πίεση (PWR).

γεγονός που επιτρέπει την τοποθέτηση του ατμοστρόβιλου σε άλλο κτήριο. Το νερό εισέρχεται στο κάτω μέρος του πυρήνα του αντιδραστήρα με μια θερμοκρασία περ. 275 °C και εξέρχεται από το επάνω με περ. 315 °C. Το νερό διατηρείται σε υγρή κατάσταση σ' αυτές τις θερμοκρασίες λόγω της αυξημένης πίεσης που ανέρχεται σε περ. 150 atm. Το μειονέκτημα αυτών των αντιδραστήρων είναι αστάθειά τους σε περίπτωση βρασμού του ψηκτικού μέσου (νερού) που απαιτεί άμεση ρύθμιση με τις ράβδους ελέγχου ή σε σοβαρότερη περίπτωση σβύσιμο του αντιδραστήρα με τις ράβδους ασφαλείας. Το κρίσιμο σημείο του νερού είναι γύρω στους 370 °C και 218 atm.

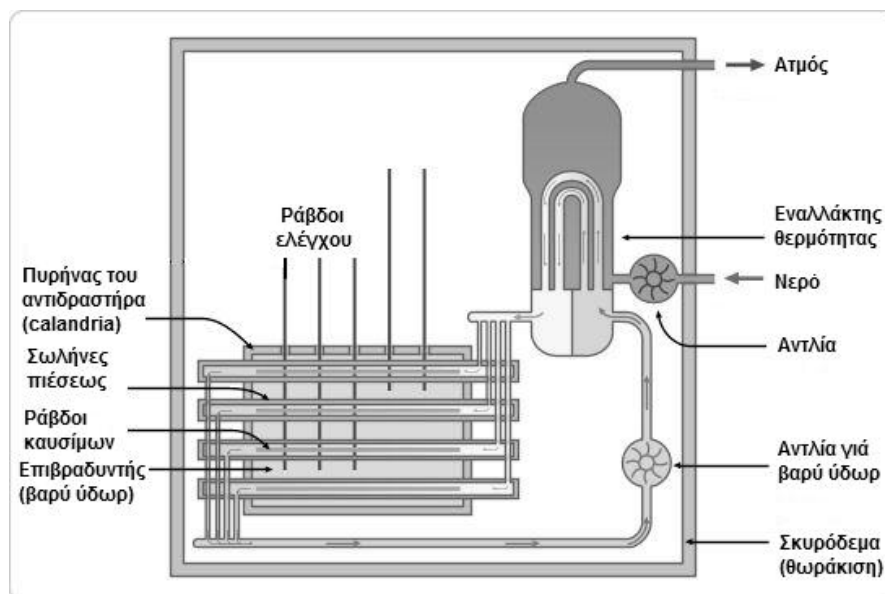
Το πλεονέκτημα των αντιδραστήρων ελαφρού ύδατος υπό βρασμό (Σχήμα 7-5) είναι ο ένας ψηκτικός κύκλος που οδηγεί τον ατμό (285 °C, 70 atm) στον ατμοστρόβιλο χωρίς τη μεσολάβηση ενός εναλλάκτη θερμότητας. Το μειονέκτημά του, από την άλλη πλευρά είναι η ανομοιορμωφή κατανάλωση του καυσίμου υλικού, γεγονός που απαιτεί συνεχή ρύθμιση της ομαλής λειτουργίας του αντιδραστήρα με τις ράβδους ελέγχου.



Σχήμα 7-5: Απλοποιημένη γραφική παράσταση πυρηνικού σταθμού παραγωγής ισχύος με αντιδραστήρα ελαφρού ύδατος υπό βρασμό (BWR).

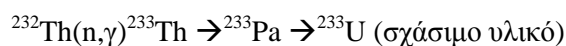
Από τους πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος που βρίσκονται σε λειτουργία το 65% είναι του τύπου ελαφρού ύδατος υπό πίεση (PWR) και 22% ελαφρού ύδατος υπό βρασμό (BWR). Από υπόλοιπους τύπους αντιδραστήρων οι πλέον διαδεδομένοι είναι οι καναδικοί βαρέως ύδατος CANDU (PHWR, Pressurized Heavy Water Reactors), οι βρετανικοί αερίοψηκτοι (AGR, Advanced Gas-cooled Reactors) και οι ρωσικοί υψηλής ισχύος με κανάλια (RBMK, *reaktor bolshoy moshchnosti kanalniy*).

Οι CANDU (ακρώνυμο του Canadian Deuterium Uranium reactors) είναι αντιδραστήρες με βαρύ ύδωρ ως επιβραδυντή νετρονίων και καύσιμα φυσικού ουρανίου Σχήμα 7-6. Οι αντιδραστήρες αυτοί μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν ως καύσιμα μεικτά οξειδία (καύσιμα MOX) και απεμπλουτισμένο ουράνιο από επεξεργασμένα χρησιμοποιημένα καύσιμα αντιδραστήρων ελαφρού ύδατος. Οι αντιδραστήρες αυτοί μπορούν ακόμη να



Σχήμα 7-6: Σχηματική παράσταση αντιδραστήρα CANDU.

εκκολάψουν πυρηνικό καύσιμο χρησιμοποιώντας το μη σχάσιμο με θερμικά νετρόνια θόριο-232



Το ^{233}U , που σχάζεται με θερμικά νετρόνια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στους ίδιους ή άλλους πυρηνικούς αντιδραστήρες.

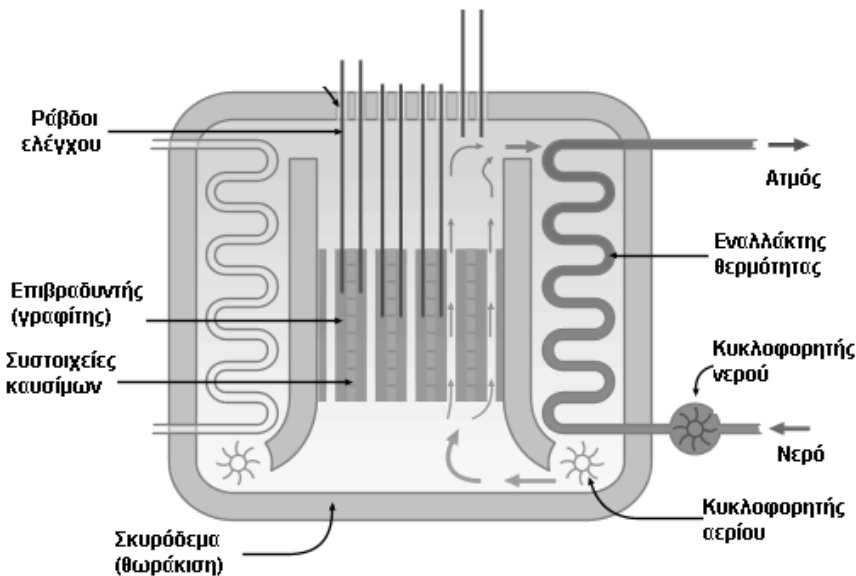
Το ψηκτικό μέσο στους αντιδραστήρες CANDU διατηρείται υπό πίεση για να αποφευχθεί η πρόκληση του βρασμού του στον πυρήνα του.

Οι αντιδραστήρες αυτοί παρέχουν μια σειρά πλεονεκτημάτων που προέρχονται από την αποφυγή του εμπλουτισμού του πυρηνικού του καυσίμου. Το κύριο μειονέκτημα είναι το υψηλό αρχικό κόστος κατασκευής λόγω της αναγκαιότητας μεγάλου όγκου βαρέως ύδατος ως επιβραδυντή. Σήμερα βρίσκονται σε λειτουργία περίπου 44 τέτοιου είδους αντιδραστήρες.

Οι AGR, η δεύτερη γενιά βρετανικών αντιδραστήρων, χρησιμοποιεί γραφίτη ως επιβραδυντή νετρονίων, διοξείδιο του άνθρακα ως ψηκτικό μέσο

και εμπλουτισμένο ουράνιο (2.5-3.5%) σε ράβδους από ανοξείδωτο χάλυβα για το καύσιμο (Σχήμα 7-7). Όλοι οι πυρηνικοί σταθμοί με AGR διαθέτουν συνήθως δύο αντιδραστήρες με θερμική ισχύ $\sim 1500 \text{ MW}_{\text{th}}$ ($\sim 600 \text{ MW}_{\text{e}}$) ο καθένας, τοποθετημένους στο ίδιο κτήριο.

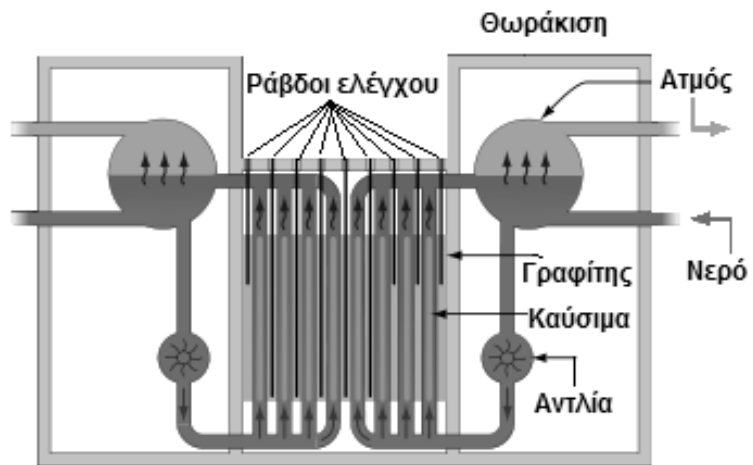
Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας εξόδου του ψηκτικού μέσου από τον αντιδραστήρα ($640 \text{ }^{\circ}\text{C}$), οι AGR έχουν υψηλότερη θερμική απόδοση από τους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος υπό πίεση (~ 41 έναντι 34%) στους οποίους το ψηκτικό μέσο (νερό) εξέρχεται με θερμοκρασία $\sim 325 \text{ }^{\circ}\text{C}$.



Σχήμα 7-7: Σχηματική παράσταση ενός αντιδραστήρα AGR

Οι RBMK, που έχουν ως ψηκτικό μέσο ελαφρύ ύδωρ και γραφίτη ως επιβραδυντή, χρησιμοποιούν ελαφρά εμπλουτισμένο ουράνιο ($2.0 - 2.4\% \text{ }^{235}\text{U}$) ως καύσιμο (Σχήμα 7-8). Στον τύπο αυτό των αντιδραστήρων ανήκει και αυτός του Chernobyl. Σήμερα λειτουργούν ακόμη 12 τουλάχιστον αντιδραστήρες τέτοιου τύπου στη Ρωσία και Λιθουανία.

Σε λειτουργία βρίσκεται επίσης και ένας αριθμός άλλων τύπων αντιδραστήρων μερικοί των οποίων παρέχουν, λόγω του ενεργειακού φάσματος των νετρονίων τους, τη δυνατότητα να δημιουργούν σχάσιμα με



Σχήμα 7-8: Σχηματική παράσταση ενός RBMK

θερμικά νετρόνια υλικά (π.χ. ^{233}U , ^{239}Pu) από μη σχάσιμα (π.χ. ^{238}U , ^{232}Th). Οι αντιδραστήρες αυτοί χαρακτηρίζονται ως μετατροπείς (*converters*) ή ως εκκολαπτικοί αντιδραστήρες (*fast breeder reactors*) ανάλογα με το αν ποσότητα του σχάσιμου υλικού που παράγουν είναι μικρότερη από αυτή που καταναλώνουν ή μεγαλύτερη.

Ανάμεσα στα άλλα είδη αντιδραστήρων πρέπει οπωσδήποτε να αναφερθούν αυτοί που χρησιμοποιούνται για την προώθηση πλοίων και υποβρυχίων και οι πειραματικοί αντιδραστήρες.

Οι αντιδραστήρες που χρησιμοποιούνται για την προώθηση πλοίων (π.χ. παγοθραυστικών, μεταγωγικών) και υποβρυχίων είναι του τύπου ελαφρού ύδατος υπό πίεση με ισχύ μέχρι 55 MW. Η κατασκευή τους είναι συμπαγής (περιλαμβάνει και θωράκιση για την ακτινοβολία) και χρησιμοποιούν υψηλά εμπλουτισμένο ουράνιο ως σχάσιμο υλικό (από >20% για πλοία επιφανείας ως και >96% για υποβρύχια). Με τον υψηλό εμπλουτισμό των καυσίμων αποφεύγεται η ανάγκη ανανεώσεώς τους για πολλά χρόνια. Το καύσιμο έχει συνήθως τη μορφή ενός μεταλλικού κράμματος με ζιρκόνιο.

Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης οι πειραματικοί αντιδραστήρες πολλοί των οποίων είναι του τύπου ανοικτής δεξαμενής. Οι αντιδραστήρες

αυτοί αποτελούνται από δεξαμενή με νερό (συνήθως ελαφρύ ύδωρ) στην οποία βρίσκονται οι ράβδοι των καυσίμων και ελέγχου του αντιδραστήρα.

Οι ράβδοι των καυσίμων αποτελούνται από ένα κράμμα του ουρανίου (εμπλουτισμός σήμερα συνήθως <20%) με αλουμίνιο ή ζιρκόνιο. Υψηλότερος εμπλουτισμός θα παράτεινε το χρόνο χρήσεως των καυσίμων αλλά απαγορεύθηκε για λόγους που σχετίζονται με τον περιορισμό παραγωγής σχασίμων υλικών για πυρηνικά όπλα. Βηρύλιο και γραφίτης είναι τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση και ανάκλαση των νετρονίων.

Οι πειραματικοί αντιδραστήρες χρησιμοποιούνται ευρύτατα για την εκπαίδευση, παραγωγή ραδιοϊσοτόπων για ιατρικούς και άλλους σκοπούς, για αναλύσεις με νετρονική ενεργοποίηση, για μελέτες κρυσταλλικής δομής με περίθλαση νετρονίων, κλπ.

7.4 Ο κύκλος των πυρηνικών καυσίμων

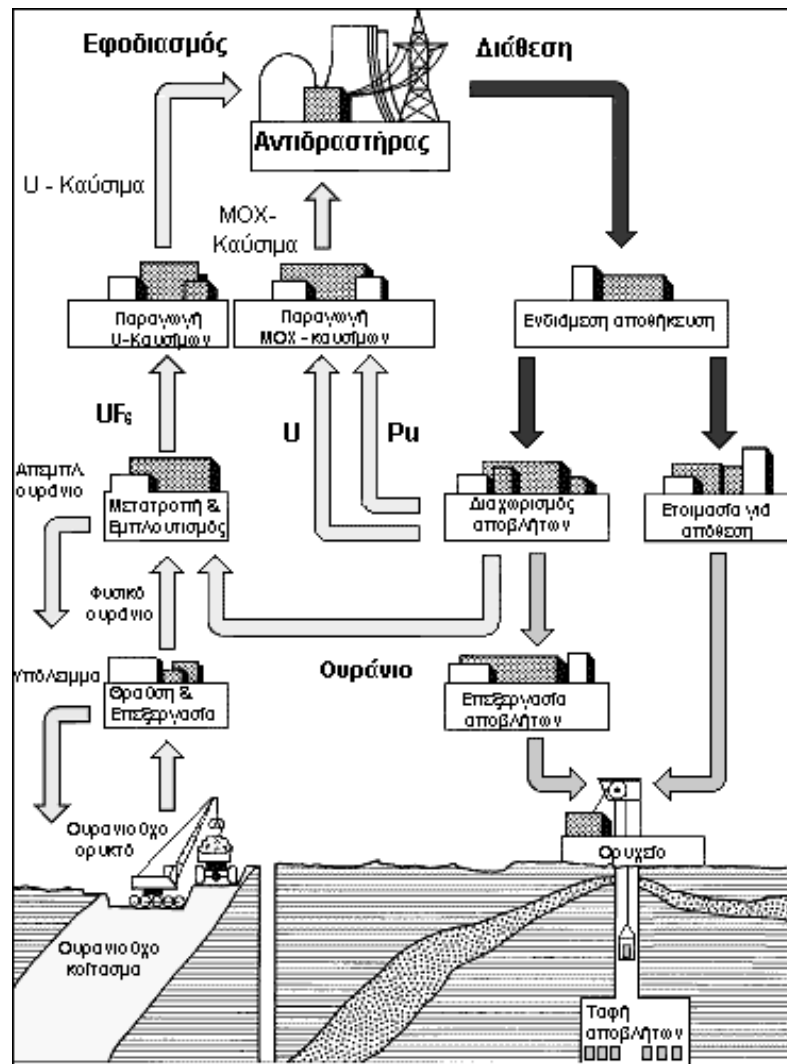
Ο κύκλος των πυρηνικών καυσίμων (nuclear fuel cycle) περιγράφει τον εφοδιασμό των πυρηνικών αντιδραστήρων με καύσιμο υλικό και περιλαμβάνει την έρευνα και την εξόρυξη του σχασίμου υλικού, το διαχωρισμό και τον εμπλουτισμό του, την παραγωγή και τη χρησιμοποίηση των πυρηνικών καυσίμων, την αποθήκευση και την ανακύκλωση των μη καταναλωθέντων σχασίμων υλικών και, τέλος, τη διάθεση των πυρηνικών αποβλήτων. Ο κύκλος των πυρηνικών καυσίμων με ουράνιο ως σχάσιμο υλικό, που είναι και το πιο συνηθισμένο πυρηνικό καύσιμο για αντιδραστήρες ισχύος, δίνεται στο Σχήμα 7-9.

7.4.1 Η εξόρυξη και παραλαβή του ουρανίου.

Το ουράνιο ευρίσκεται στο φλοιό της γής σε αφθονία 2.8 μg/g (ppm). Παρουσιάζει μεγαλύτερη αφθονία από το χρυσό, άργυρο και υδράργυρο και ελαφρώς μικρότερη από το κοβάλτιο, το μόλυβδο και το μολυβδαίνιο.

Τα κυριότερα πρωτογενή ορυκτά του ουρανίου είναι ο ουρανινίτης και ο πισουρανίτης. Και τα δύο περιέχουν οξείδια του ουρανίου (συνδυασμός UO_2 και UO_3 με περιεκτικότητά σε ουράνιο 50-85% εκφρασμένη σε U_3O_8).

Ο ουρανινίτης (Σχήμα 7-10) έχει κυβική ή οκταεδρική κρυσταλλική μορφή, πυκνότητα 8 - 10.5, χρώμα γκριζόμαυρο και σκληρότητα όση



Σχήμα 7-9: Ο κύκλος των πυρηνικών καυσίμων.



Σχήμα 7-10: Ουρανινίτης (αριστερά) και πισσουρανίτης (δεξιά)

περίπου ο χάλυβας (5 – 6 στην κλίμακα του Moh). Είναι ένα από τα κύρια συστατικά όλων των κοιτασμάτων του ουρανίου.

Ο πισσουρανίτης, που παρουσιάζει συγγένεια ως προς τη σύσταση και τις ιδιότητες με τον ουρανινίτη αλλά δε διαθέτει χαρακτηριστική κρυσταλλική μορφή, είναι το κύριο συστατικό των υψηλής περιεκτικότητας πετρωμάτων του ουρανίου και συνοδεύεται συνήθως από πρωτογενή ορυκτά του σιδήρου, χαλκού, κοβαλτίου, μολύβδου, αργύρου και βισμούθιου. Επίσης συνοδεύεται πολλές φορές, όπως και ο ουρανινίτης, από έγχρωμα δευτερογενή ορυκτά του ουρανίου, που προέρχονται από αλλοιώσεις του.

Τα χαμηλής περιεκτικότητας πετρώματα έχουν τυπική περιεκτικότητα 0.01 ως 0.25 % σε οξείδια του ουρανίου ενώ τα υψηλής μέχρι και πάνω του 23% (Καναδάς).

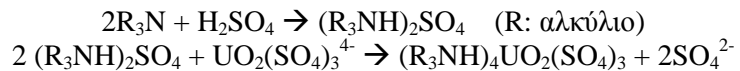
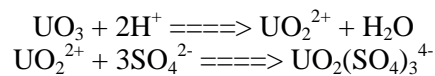
Η εξόρυξη του ουρανίου πραγματοποιείται επιφανειακά ή υπογείως (στοές). Η παραλαβή του σε ορισμένα κοιτάσματα πραγματοποιείται με επιτόπια έκπλυσή του διοχετεύοντας αραιό διάλυμα οξέως σε στοές ορυχείων και αναρρόφησή του.

Γενικά, μπορεί να αναφερθεί ότι, ενώ υπάρχουν πολλά ορυχεία ουρανίου σε πάνω από 20 χώρες, τα 2/3 της παγκόσμιας παραγωγής προέρχονται από περίπου μόνο 10 ορυχεία.

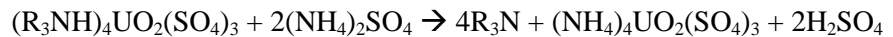
Τα μεγαλύτερα ανακτήσιμα αποθέματα ουρανίου βρίσκονται στην Αυστραλία (1 243 000 t ή το 23% των παγκοσμίων αποθεμάτων) , στο Καζακστάν (817 000 t), στη Ρωσία (546 000 t), στη Ν. Αφρική (435 000 t), στον Καναδά (423 000 t), στις Η.Π.Α. (περ. 342 000 t) καθώς επίσης στη

Βραζιλία, Ναμίμπια και Νιγηρία (από περ. 278 000 t). Τα συνολικά εκτιμώμενα παγκοσμίως ανακτήσιμα αποθέματα ουρανίου ανέρχονται σε περ. 5 469 000 t (2007) και οι σημερινές απαιτήσεις ανέρχονται σε ~ 65 000 tU/χρόνο. Δηλαδή τα σημερινά γνωστά αποθέματα προβλέπεται να επαρκέσουν για πάνω από 80 χρόνια χρησιμοποιώντας συμβατικούς τύπους πυρηνικών αντιδραστήρων. Το χρονικό αυτό διάστημα μπορεί να παραταθεί ακόμη πιο πολύ χρησιμοποιώντας και ορυκτά μικρότερης περιεκτικότητας σε ουράνιο.

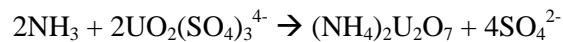
Μετά τη θραύση και την άλεση το ουράνιο παραλαμβάνεται από το πέτρωμα με έκπλυση με θειικό οξύ. Κατά τη διεργασία αυτή σχηματίζεται ένα ευδιάλυτο θειικό σύμπλοκο $[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3]^{4-}$ που μπορεί να συγκρατηθεί από ανιονικούς ιοντανταλλάκτες ή να επεξεργασθεί περαιτέρω με τεταρτοταγείς αμίνες διαλελυμένες σε κηροζίνη για την παραλαβή του ουρανίου με εκχύλιση



Το εκχύλισμα, μετά από καθαρισμό υφίσταται επεξεργασία, σε στήλες αντιστρόφου ροής, με διάλυμα θειικού αμμωνίου για την παραλαβή του ουρανίου με τη μορφή εναμμωνίου θειικού ουρανού



Η προσθήκη αέριας αμμωνίας για την εξουδετέρωση του διαλύματος οδηγεί τελικά στην καταβύθιση του ουρανίου ως διουρανικού αμμωνίου



Το διουρανικό αμμώνιο μετατρέπεται θερμικά σε U_3O_8 που είναι και το προϊόν που διοχετεύεται στο εμπόριο με το όνομα *yellow cake*. Το *yellow cake* έχει περιεκτικότητα σε ουράνιο, υπό τη μορφή οξειδίων του ($\text{U}_3\text{O}_8 + \text{UO}_2 + \text{UO}_3$), 70 ως 90%. Για την παραγωγή πυρηνικών καυσίμων για έναν

πυρηνικό αντιδραστήρα ισχύος 1000 MW_e απαιτούνται περίπου 200 t yellow cake το χρόνο.

Σε ορισμένες περιπτώσεις ή παραλαβή του ουρανίου από τα πετρώματά του γίνεται με έκπλυση με διάλυμα ανθρακικών, οπότε σχηματίζεται το αντίστοιχο ευδιάλυτο ανθρακικό σύμπλοκο [UO₂(CO₃)₃]⁴⁻. Το ουράνιο σ' αυτή την περίπτωση μπορεί να παραληφθεί με καταβύθιση με αλκάλια ως διουρανικό νάτριο ή με μαγνήσιο.

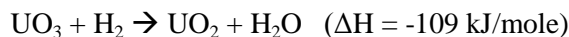
7.4.2 Η μετατροπή σε UF₆ και ο εμπλουτισμός του ουρανίου.

Το ουράνιο εμφανίζεται στη φύση με τη μορφή τριών ισοτόπων, το ²³⁴U (αφθονία: 0.0054 %, T_{1/2}: 2.48 10⁵ χρόνια), το ²³⁵U (αφθονία: 0.71 %, T_{1/2}: 7.13 10⁸ χρόνια) και το ²³⁸U (αφθονία: 99.28 %, T_{1/2}: 4.51 10⁹ χρόνια).

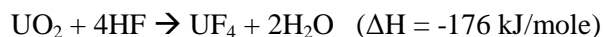
Στους περισσότερους πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος απαιτείται πυρηνικό καύσιμο εμπλουτισμένο σε ²³⁵U που σχάζεται με θερμικά νετρόνια. Το ²³⁸U σχάζεται μόνο με ταχεία νετρόνια.

Για τον εμπλουτισμό του ουρανίου σε ²³⁵U πρέπει να μετατραπεί σε μία αέριο ένωση του, το UF₆. Το παγκόσμιο ετήσιο δυναμικό μετατροπής του ουρανίου σε UF₆ ανέρχεται σε 76 000 t.

Για τη μετατροπή σε UF₆ το U₃O₈ διαλύεται σε νιτρικό οξύ και μετατρέπεται σε UO₂(NO₃)₂·6H₂O που παραλαμβάνεται με εκχύλιση σε στήλες χρησιμοποιώντας κηροζίνη ή δωδεκάνιο. Το ουράνιο, που παραλήφθηκε από το οργανικό εχυλιστικό μέσο, πλένεται με αραιό νιτρικό οξύ, συγκεντρώνεται με εξάτμιση και μετατρέπεται θερμικά σε καθαρό τριοξείδιο του ουρανίου (UO₃). Το UO₃ τελικά ανάγεται με υδρογόνο σε κλίβανο σε διοξείδιο του ουρανίου (UO₂).

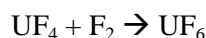


Το διοξείδιο του ουρανίου, που προέκυψε κατ' αυτόν τον τρόπο, αντιδρά σε άλλο κλίβανο με αέριο HF και σχηματίζει τετραφθοριούχο ουράνιο, UF₄



Η μετατροπή αυτή πολλές φορές πραγματοποιείται σε υγρή φάση.

Το UF₄ αντιδρά περαιτέρω με αέριο φθόριο σε αντιδραστήρα ρευσταιωρούμενης κλίνης και παράγει εξαφθοριούχο ουράνιο (UF₆) το οποίο συμπυκνώνεται και αποθηκεύεται σε μεταλλικά δοχεία



Οι περισσότεροι αντιδραστήρες ισχύος απαιτούν καύσιμο εμπλουτισμένο 3 ως 5% σε ²³⁵U. Περισσότερο εμπλουτισμένο καύσιμο απαιτείται σε αντιδραστήρες πλοίων (>20%) και υποβρυχίων (>90%, συνήθως 96%).

Το εμπλουτισμένο ουράνιο διακρίνεται σε

- Ουράνιο με ελαφρό εμπλουτισμό (SEU, slightly-enriched uranium): 0.9 – 2% ²³⁵U. Το ουράνιο αυτό αντικαθιστά το φυσικό σε αντιδραστήρες βαρέως ύδατος (π.χ. CANDU).

- Ουράνιο χαμηλού εμπλουτισμού (LEU, low-enriched uranium): < 20%. Το ουράνιο αυτό είναι κατάλληλο για αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (LWR) και ερευνητικούς αντιδραστήρες.

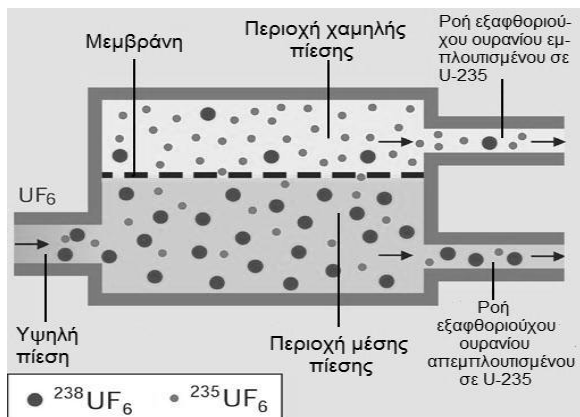
- Ουράνιο υψηλού εμπλουτισμού (HEU, highly-enriched uranium): >20%. Το ουράνιο αυτό είναι κατάλληλο για αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων, ναυτικούς αντιδραστήρες και για οπλικά συστήματα.

Στον εμπλουτισμό με διάχυση αερίων το UF₆ υποχρεώνεται να διαπεράσει υπό πίεση μία σειρά πορωδών μεμβρανών ή διαφραγμάτων (Σχήμα 7-11).

Τα μόρια του ²³⁵UF₆ περνούν ελαφρώς ταχύτερα από αυτά του ²³⁸UF₆ κι έτσι το αέριο που διαχέεται μέσα από τους πόρους της μεμβράνης είναι ελαφρώς εμπλουτισμένο σε ουράνιο-235, ενώ το υπόλοιπο απεμπλουτισμένο (²³⁵U <0.71%). Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται πολλές φορές μέχρι να ληφθεί ουράνιο του επιθυμητού εμπλουτισμού. Για να ληφθεί ουράνιο εμπλουτισμένο σε 3 ως 4% σε U-235 απαιτούνται περίπου 1400 βαθμίδες εμπλουτισμού με διάχυση αερίου.

Σήμερα το 40% της παγκόσμιας παραγωγής πυρηνικής ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από ουράνιο που εμπλουτίστηκε με αέριο διάχυση. Παρά, όμως, την αξιοπιστία και την αντοχή των σχετικών εγκαταστάσεων οι περισσότερες από αυτές αντικαθίστανται βαθμιαία με αντίστοιχες με φυγοκέντρους.

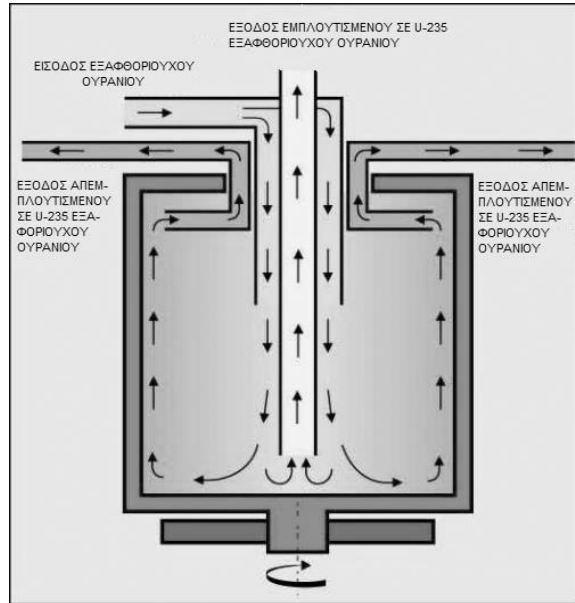
Στη φυγοκεντρική μέθοδο εμπλουτισμού του ουρανίου χρησιμοποιείται, όπως και σ' αυτή με διάχυση αερίων, UF₆ σε αέριο κατάσταση. Και σ' αυτή



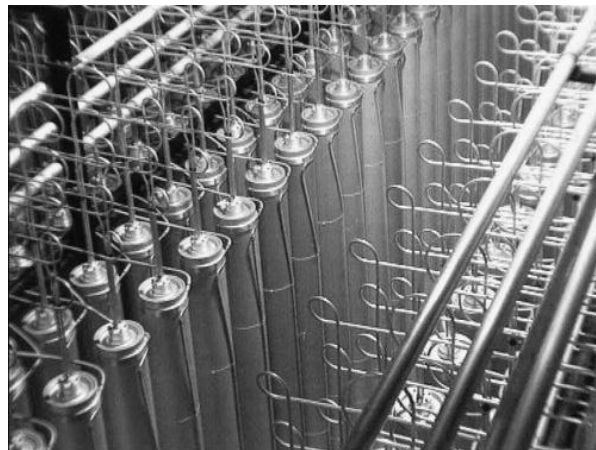
Σχήμα 7-11: Σχηματική παράσταση βαθμίδας διαχωρισμού με διάχυση αερίων.

την περίπτωση γίνεται εκμετάλλευση της διαφοράς μάζας μεταξύ του ^{235}U και ^{238}U το αέριο εισέρχεται σε μια σειρά από σωλήνες μήκους 1-2 μέτρων και διαμέτρου 15-20 cm που βρίσκονται υπό κενό. Όταν οι σωλήνες αυτοί αρχίσουν να περιστρέφονται με ταχύτητα 50 000 ως 70 000 rpm (στροφές ανά λεπτό) τα βαρύτερα μόρια του $^{238}\text{UF}_6$ συγκεντρώνονται προς τα τοιχώματα του περιστρεφόμενου θαλάμου ενώ τα ελαφρύτερα του $^{235}\text{UF}_6$ κοντά στον κεντρικό άξονα επιτυγχάνοντας έναν εμπλουτισμό σε ^{235}U (βλ. Σχήμα 7-12). Το εμπλουτισμένο εξαφθοριούχο ουράνιο τροφοδοτεί τις επόμενες βαθμίδες του εμπλουτισμού, ενώ το απεμπλουτισμένο επιστρέφει στην προηγούμενη. Όταν επιτευχθεί ο απαιτούμενος βαθμός εμπλουτισμού το αέριο απομακρύνεται από το σύστημα (Σχήμα 7-13).

Η ικανότητα εμπλουτισμού κάθε βαθμίδας φυγοκέντρων είναι, παρά τη μικρότερη χωρητικότητά τους, πολύ μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες βαθμίδες των εγκαταστάσεων διαχύσεως αερίων. Έτσι στις εγκαταστάσεις εμπλουτισμού με φυγοκέντρους ο αριθμός των βαθμίδων είναι 10 ως 20 σε σύγκριση με τις πάνω από 1000 των αντίστοιχων εγκαταστάσεων διαχύσεως.



Σχήμα 7-12: Σχηματική παράσταση βαθμίδας διαχωρισμού με φυγόκεντρο.



Σχήμα 7-13: Εγκατάσταση εμπλουτισμού με φυγόκεντρος

Έχει αναπτυχθεί επίσης και μία σειρά από άλλες τεχνικές εμπλουτισμού του ουρανίου (αεροδυναμικές τεχνικές, τεχνικές με χρήση laser, μαγνητικές τεχνικές και οι χημικές τεχνικές.) χωρίς καμία από αυτές να βρίσκει μέχρι στιγμής ιδιαίτερη πρακτική εφαρμογή.

7.4.3 Η παραγωγή των πυρηνικών καυσίμων

Με τον όρο πυρηνικό καύσιμο χαρακτηρίζεται γενικά κάθε υλικό που καταναλώνεται για την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας. Στους διάφορους τύπους αντιδραστήρων χρησιμοποιούνται πυρηνικά καύσιμα όπως

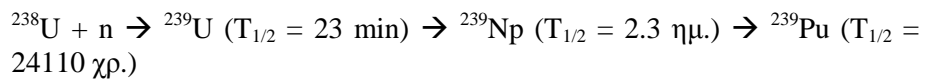
- Τα καύσιμα οξειδίου του ουρανίου (UOX, uranium oxide fuels), που παρασκευάζονται με επίδραση αμμωνίας σε νιτρικό ουρανύλιο. Το σχηματιζόμενο στερεό ουρανικό αμμώνιο πυρώνεται για να σχηματισθεί U_3O_8 , που ανάγεται σε μείγμα αργού/υδρογόνου σε $700\text{ }^\circ\text{C}$ σε UO_2 . Από αυτό το οξείδιο του ουρανίου, που αναμειγνύεται και με ένα οργανικό συνδετικό υλικό, παραγονται κονιομεταλλουργικά οι κύλινδροι των καυσίμων.
- Τα καύσιμα μεικτών οξειδίων (MOX, mixed oxide fuels) που αποτελούνται από μείγμα οξειδίων του πλουτωνίου (^{239}Pu) και φυσικού ή απεμπλουτισμένου ουρανίου. Τα καύσιμα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος.
- Τα καύσιμα φυσικού ουρανίου για αντιδραστήρες βαρέως ύδατος (π.χ. CANDU).
- Τα μεταλλικά καύσιμα, που αποτελούνται από κράμματα του σχάσιμου υλικού με ζirkόνιο ή αλουμίνιο. Τα καύσιμα αυτά που παρουσιάζουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα και χαμηλό σ.τ., χρησιμοποιούνται σε αντιδραστήρες μικρής ισχύος (π.χ. ναυτικοί και πειραματικοί αντιδραστήρες).
- Τα καύσιμα μεικτών υδριδίων του ουρανίου (π.χ. UZrH) που παρουσιάζουν αρνητικό θερμικό συντελεστή αντιδραστικότητας.
- Τα κεραμικά καύσιμα που αποτελούνται από καρβίδια ή νιτρίδια του ουρανίου (UC, UN). Στα καύσιμα αυτά μπορούν επίσης να καταταγούν και τα σφαιρικά καύσιμα που αποτελούνται από σφαιρικά σωματίδια του σχάσιμου ή και του εκκολάξιμου υλικού

(π.χ. ^{232}Th) υπό μορφή καρβιδίου σε μία μήτρα από γραφίτη. Τα καύσιμα αυτά προορίζονται για αντιδραστήρες με αέριο ψήξη.

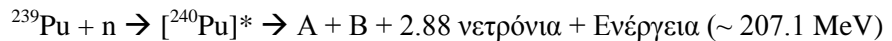
Ένα τμήμα των καυσίμων του αντιδραστήρα ανανεώνεται κάθε χρόνο για την αντιστάθμιση της καύσης του σχάσιμου υλικού και τη μείωση της απορρόφησης νετρονίων από νουκλίδια που σχηματίστηκαν κατά τη λειτουργία του αντιδραστήρα (π.χ. ακτινίδες, προϊόντα σχάσεως). Ένας αντιδραστήρας ισχύος 1000 MW_e χρειάζεται περίπου 25 t νέου πυρηνικού καυσίμου το χρόνο.

7.4.4 Η επεξεργασία των χρησιμοποιημένων πυρηνικών καυσίμων και η ανακύκλωση του απομένοντος σχάσιμου υλικού.

Κατά τη λειτουργία του πυρηνικού αντιδραστήρα σχηματίζονται, εκτός από τα προϊόντα της σχάσεως του ^{235}U , και κάποια ισότοπα υπερουρανίων στοιχείων. Τα νουκλίδια αυτά προέρχονται από τη σύλληψη νετρονίων από το ^{238}U . Ανάμεσα σ' αυτά τα νουκλίδια ιδιαίτερη θέση κατέχει το ^{239}Pu που είναι και σχάσιμο



Το ^{239}Pu , όπως και το ^{235}U , είτε συλλαμβάνει νετρόνια και μετατρέπεται σε ^{240}Pu ($^{239}\text{Pu}(n,\gamma)^{240}\text{Pu}$, $\sigma_{(n,\gamma)} = 271.3 \text{ b}$) είτε σχάζεται απελευθερώνοντας κατά μέσο όρο 2.88 νετρ./σχάση και $\sim 207.1 \text{ MeV}$ ενέργειας ($\sigma_f = 741.6 \text{ b}$).



Το ^{239}Pu συνεισφέρει τελικά μέχρι και 30% στη συνολική παραγωγή ενέργειας σ' έναν πυρηνικό αντιδραστήρα.

Τα διάφορα προϊόντα της σχάσεως (περισσότερα από 200 ισότοπα 35 στοιχείων) και οι ακτινίδες, που σχηματίζονται από συλλήψεις νετρονίων συγκρατούνται σε μεγάλο ποσοστό στο πυρηνικό καύσιμο παρά τις υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν σ' αυτό ($\sim 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ στον άξονά του και $\sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$ στην περίμετρο). Ένα τμήμα μόνο των αερίων προϊόντων σχάσεως διαφεύγει από τους κυλίνδρους των καυσίμων και συγκρατείται μέσα στις

ράβδους. Η παρουσία προϊόντων της σχάσεως και ακτινίδων στο ψηκτικό μέσο και το δοχείο εγκλωβισμού του αντιδραστήρα είναι πολύ μικρή όταν δεν υπάρχουν ελαττώματα στις ράβδους των καυσίμων που επιτρέπουν τη διαφυγή τους. Από τα αέρια και πτητικά ραδιονουκλίδια που διαφεύγουν σε μικρές ποσότητες στους αντιδραστήρες αξίζει να αναφερθούν το ^{133}Xe ($t_{1/2} = 5.243$ ημ.), το ^{85}Kr ($t_{1/2} = 10.756$ χρ.) και το ^{131}I ($t_{1/2} = 8.02$ ημ.).

Το ^{133}Xe προσροφάται αρχικά σε φίλτρα ενεργού άνθρακα, όπου μειώνεται με το χρόνο η ραδιενέργειά του με διάσπασή του σε ^{133}Cs (σταθερό) και μετά με αργό ρυθμό απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.

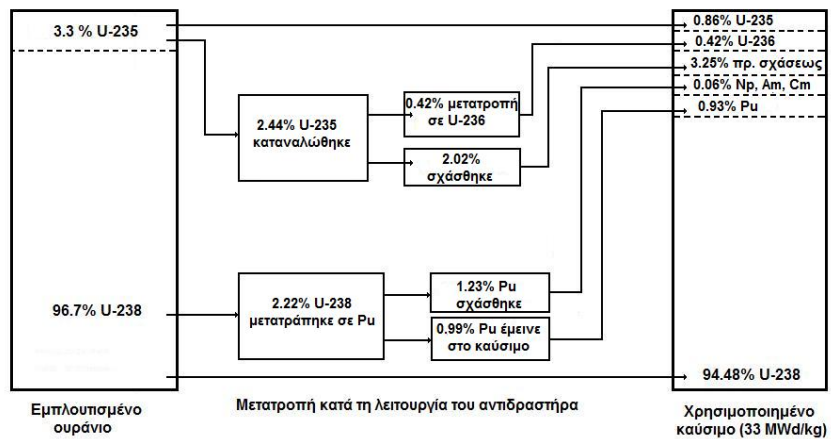
Το ^{85}Kr , παρά τον μεγάλο χρόνο υποδιπλασιασμού του, παρουσιάζει πολύ μικρή ραδιοτοξικότητα και απελευθερώνεται επίσης, υπό συνεχή έλεγχο, στην ατμόσφαιρα. Η ποσότητα του ^{85}Kr , που απελευθερώνεται κατά την επεξεργασία των χρησιμοποιημένων πυρηνικών καυσίμων, που είναι πολύ μεγαλύτερη, συγκρατείται μέχρι να διασπασθεί με ειδικές τεχνικές σε μεταλλικές φυάλες αερίων.

Το ποσοστό του ^{131}I στο δοχείο εγκλωβισμού του αντιδραστήρα είναι μικρό και συγκρατείται σε ποσοστό 99.9% σε ειδικά φίλτρα εμποτισμένα με AgNO_3 (σχηματισμός AgI).

Πέρα από τυχόν προϊόντα της σχάσεως εμφανίζονται νερό ψήξεως του αντιδραστήρα και μικρές ποσότητες τριτίου (^3H , $t_{1/2} = 12.323$ χρ.) που προέρχεται από σύλληψη νετρονίων από το υδρογόνο του νερού ή από πυρηνικές αντιδράσεις τους με το ^{10}B των ράβδων ελέγχου του αντιδραστήρα.

Όσον αφορά το πυρηνικό καύσιμο πρέπει να αναφερθεί ότι απεμπλουτίζεται βαθμιαία με την “καύση” του ^{235}U . Όταν η περιεκτικότητα του καυσίμου σε ^{235}U πέσει στο ~1%, απομακρύνεται από τον αντιδραστήρα και μεταφέρεται μέσα σε ειδικά δοχεία μεταφοράς στην εγκατάσταση ενδιάμεσης αποθήκευσης. Στο Σχήμα 7-14 δίνεται το ισοζύγιο ραδιονουκλιδίων σ’ ένα πυρηνικό καύσιμο μετά από παραγωγή ενέργειας 33 MWd/kg.

Στην εγκατάσταση ενδιάμεσης αποθήκευσης οι συστοιχίες των καυσίμων τοποθετούνται για σειρά ετών σε δεξαμενές με νερό όπου και ψύχονται καθώς απαλλάσσονται από τα βραχύβια προϊόντα της σχάσεως που διασπώνται κατά το χρόνο αυτής της παραμονής. Μετά από 6 μήνες παραμονής η θερμοκρασία των καυσίμων πέφτει στο περίπου 1% της αρχικής, ενώ η ραδιενέργειά τους, παρά τη μείωσή της, εξακολουθεί να



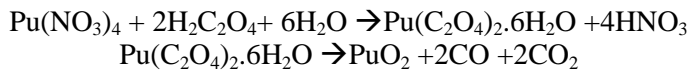
Σχήμα 7-14: Ισοζύγιο ραδιονουκλιδίων σ' ένα πυρηνικό καύσιμο μετά από παραγωγή ενέργειας 33 MWd/kg.

είναι $\sim 10^{10}$ φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του φυσικού ουρανίου (δηλ. $\sim 3.7 \cdot 10^{14}$ Bq/g). Μερικές από τις συστοιχίες των καυσίμων επαναχρησιμοποιούνται, όταν η περιεκτικότητά τους σε ^{235}U το επιτρέπει, ενώ οι υπόλοιπες μεταφέρονται για φύλαξη, για επεξεργασία ή για γεωλογική διάθεση (“once through cycle”).

Στην εγκατάσταση επεξεργασίας οι ράβδοι των πυρηνικών καυσίμων τεμαχίζονται και διαλύονται σε πυκνό νιτρικό οξύ. Από το διάλυμα που προκύπτει διαχωρίζονται σε παλόμενες στήλες αντιθέτου ροής το ουράνιο και πλουτώνιο από τα προϊόντα της σχάσεως, τις υπόλοιπες ακτινίδες και τα προϊόντα της ενεργοποίησης των συστοιχιών. Ο διαχωρισμός πραγματοποιείται με εκχύλιση χρησιμοποιώντας TBP (Tri-Butyl Phosphate, $(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_3\text{PO}$) σε κηροζίνη (αναλογία 30:70) ως εκχυλιστικό μέσο. Το ουράνιο και το πλουτώνιο παραλαμβάνονται από την οργανική φάση ενώ τα προϊόντα της σχάσεως και οι ακτινίδες παραμένουν στην υδατική.

Ο διαχωρισμός του πλουτωνίου από το ουράνιο πραγματοποιείται σε δεύτερη παλόμενη στήλη με αναγωγή του πλουτωνίου με περίσσεια U^{4+} σε Pu^{3+} που δεν εκχυλίζεται από το TBP. Έτσι, το τρισθενές πλουτώνιο μεταφέρεται στην υδατική φάση ενώ το U^{4+} και U^{6+} παραμένουν στην οργανική. Το τρισθενές πλουτώνιο επανοξειδώνεται εύκολα παρουσία νιτρικού και νιτρώδους οξέως σε τετρασθενές. Το $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$, που

σχηματίζεται, συμπυκνώνεται με εξάτμιση, καταβυθίζεται ως οξαλικό με προσθήκη οξαλικών και δίνει τελικά με πύρωση PuO_2 σε μορφή σκόνης



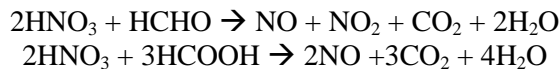
Παρομοίως, το νιτρικό ουρανύλιο συμπυκνώνεται με εξάτμιση και με πύρωση μετατρέπεται σε UO_3 . Η αναγωγή του UO_3 με υδρογόνο δίνει UO_2 .

Η όλη διαδικασία που φέρει το όνομα μέθοδος PUREX (**P**lутonium and **U**ranium **R**ecovery by **E**xtraction) περιλαμβάνει επίσης μια σειρά από άλλα ενδιάμεσα στάδια που απαλλάσσουν το πλουτόνιο και το ουράνιο από διάφορα νουκλίδια που παρεμποδίζουν το διαχωρισμό (π.χ. TcO_4^- , που αντικαθιστώντας το NO_3^- καθιστά το Pu^{4+} μη εκχυλίσιμο από το TBP).

Το οξείδιο του πλουτονίου αναμειγνύεται με απεμπλουτισμένο ουράνιο για την παραγωγή καυσίμων μεικτών οξειδίων (MOX). Επίσης για την παραγωγή καυσίμων MOX χρησιμοποιείται και το πλουτόνιο που προέρχεται από την καταστροφή των κεφαλών πυρηνικών όπλων.

Το TBP, που χρησιμοποιείται στη μέθοδο PUREX, χρειάζεται σε τακτά χρονικά διαστήματα αναγέννηση για να απαλλαγεί και από τα προϊόντα της ραδιόλυσής του.

Το ισχυρά ραδιενεργό διάλυμα με τα προϊόντα της σχάσεως και τις ακτινίδες ($\sim 10^{14}$ Bq/l) οδηγείται σε ψηχόμενες δεξαμενές από ανοξείδωτο χάλυβα. Για να κρατηθεί η συγκέντρωση του νιτρικού οξέως στα 2M προστίθεται ένα αναγωγικό (π.χ. HCHO ή HCOOH)



Οι νιτρώδεις ατμοί μετατρέπονται πάλι σε νιτρικό οξύ



Μετά από πενταετή παραμονή σ' αυτές τις δεξαμενές, για τη μείωση της ραδιενέργειάς του, το διάλυμα με τα προϊόντα της σχάσεως και οι ακτινίδες συμπυκνώνεται και, μετά από μετατροπή σε μια μη υδατοδιαλυτή μορφή, οδηγείται για υαλοποίηση (προετοιμασία για γεωλογική εναπόθεση).

Εγκαταστάσεις επεξεργασίας χρησιμοποιημένων πυρηνικών καυσίμων αντιδραστήρων παραγωγής ενέργειας στην Ευρώπη λειτουργούν στη Γαλλία

(Le Hague) και την Αγγλία (Sellafield) ενώ παρόμοιες εγκαταστάσεις λειτουργούν στις Η.Π.Α., Ρωσία, Ιαπωνία, Ινδία, Αυστραλία και Β. Κορέα.

Στις διάφορες εγκαταστάσεις εφαρμόζονται για την επεξεργασία των χρησιμοποιημένων καυσίμων και παραλλαγές της μεθόδου PUREX.

7.4.5 Η διάθεση των πυρηνικών αποβλήτων

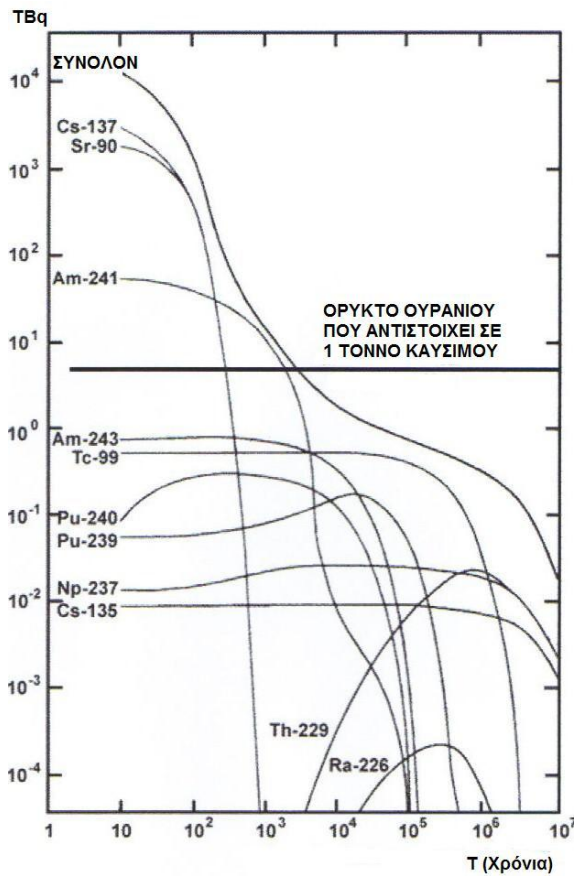
Τα ραδιενεργά απόβλητα περιλαμβάνουν όχι μόνο τα προϊόντα της σχάσεως, τις ακτινίδες και τα προϊόντα νετρονικής ενεργοποίησης των δομικών στοιχείων των καυσίμων, αλλά και μία σειρά άλλων υλικών εκ των οποίων μόνο ένα μικρό ποσοστό είναι υψηλής ακτινοβολίας (~5%). Για παράδειγμα, κατά τη λειτουργία ενός αντιδραστήρα ελαφρού ύδατος υπό βρασμό ισχύος 1300 MW_e προκύπτουν 253 m³ ραδιενεργά συμπυκνώματα, 120 m³ υλικών καθαρισμού και 8 m³ υλικών φίλτρων, που ανάλογα με τη ραδιενέργεια υφίστανται επεξεργασία ή τοποθετούνται σε μεταλλικά βαρέλια με σκυρόδεμα ή πίσσα και προωθούνται για γεωλογική διάθεση.

Γενικά, τα ραδιενεργά απόβλητα χαρακτηρίζονται ανάλογα με τη ραδιενέργειά τους ως υψηλής (HLW, **H**igh **L**evel **W**aste), μέσης (ILW, **I**ntermediate **L**evel **W**aste) και χαμηλής ακτινοβολίας (LLW, **L**ow **L**evel **W**aste). Με τον όρο επίσης απόβλητα με υπερουράνια στοιχεία (TRUW, **T**ransuranic **W**aste) χαρακτηρίζονται από τις αμερικανικές αρχές απόβλητα, ανεξάρτητα προέλευσης, που περιέχουν α-ραδιενεργά ισότοπα υπερουρανίων στοιχείων με χρόνο υποδιπλασιασμού άνω των 20 ετών και σε συγκέντρωση > 3.7 MBq/kg. Συνήθως αυτά τα απόβλητα προέρχονται από προγράμματα παραγωγής πυρηνικών όπλων.

Τα προϊόντα της σχάσεως, που αποτελούν απόβλητα υψηλής ακτινοβολίας, ενσωματώνονται σε ειδικές ύαλους (π.χ. βοριοπυριτικές) με καλές μηχανικές ιδιότητες, υψηλό βαθμό συγκράτησης των ραδιονουκλιδίων και αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες, καλή θερμική αγωγιμότητα και αντοχή στην ακτινοβολία. Τα υλικά αυτά εγγυώνται τη συγκράτηση των ραδιονουκλιδίων για πάνω από 1000 χρόνια.

Τα μεταλλικά περιβλήματα και πάματα των ράβδων των καυσίμων συμπίεζονται για μείωση του όγκου τους και τοποθετούνται σε ειδικά μεταλλικά κάνιστρα, και, όπως και τα υπόλοιπα απόβλητα, προωθούνται για γεωλογική διάθεση.

Στο *Σχήμα 7-15* η μεταβολή της ραδιενέργειας ενός τόννου χρησιμοποιημένου πυρηνικού καυσίμου με το χρόνο.



Σχήμα 7-15: Μεταβολή της ραδιενέργειας ενός τόνου χρησιμοποιημένου πυρηνικού καυσίμου με το χρόνο⁴.

Ως κατάλληλοι γεωλογικοί σχηματισμοί για τη μακρόχρονη διαφύλαξη των συσκευασμένων αποβλήτων υψηλής ακτινοβολίας θεωρούνται τα παλαιά αλατορυχεία, περιοχές με γρανιτικό περιβάλλον καθώς επίσης περιοχές με

⁴ Δεδομένα από IAEA Radioactive Waste Management (1992).

μικροπορώδη υλικά (ορυκτά της αργίλου, φυσικοί ζεόλιθοι) που διαθέτουν πολύ μεγάλη σταθερότητα και αμελητέα διαπερατότητα.

Το ορυκτό άλας έχει υψηλή πλαστικότητα και θερμική αγωγιμότητα που εγγυάται την απαγωγή της θερμότητας της διάσπασης των ραδιονουκλιδίων. Από την άλλη πλευρά, ο γρανίτης είναι ένας ιδιαίτερα αδιαπέραστος γεωλογικός σχηματισμός με εξαιρετική σταθερότητα ενώ οι άργιλοι και οι φυσικοί ζεόλιθοι (τόφοι) παρουσιάζουν υψηλές προσροφητικές ιδιότητες που αποτελούν έναν ιδιαίτερα περιοριστικό παράγοντα στην τυχόν διάχυση των εναποθεθέντων ραδιονουκλιδίων στο περιβάλλον και στη ρύπανση του υδροφόρου ορίζοντα. Σε τέτοιες εγκαταστάσεις πρόκειται να εναποθεθούν και τα απόβλητα παραγωγής πλουτωνίου για στρατιωτικούς σκοπούς που παραμένουν ακόμη σε μεγάλες ποσότητες σε δεξαμενές.

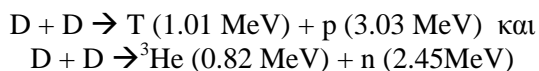
Η διάθεση των πυρηνικών αποβλήτων αποτελεί ένα από τα κρίσιμα προβλήματα του κύκλου των πυρηνικών καυσίμων που δεν έχει επιλυθεί ακόμη οριστικά. Προς το παρόν μία ποσότητα πολλών χιλιάδων τόννων χρησιμοποιημένων πυρηνικών καυσίμων περιμένει, συσκευασμένη σε ειδικά δοχεία, την οριστική επεξεργασία και διάθεση.

7.5 Η παραγωγή ενέργειας από την πυρηνική σύντηξη.

Κατά τη σύντηξη ελαφρών πυρήνων για σχηματισμό βαρύτερων απελευθερώνεται ενέργεια που προέρχεται από τη διαφορά της ενέργειας συνδέσεως. Παρ' όλον πολλές αντιδράσεις σύντηξης ελαφρών πυρήνων έχουν "εξώθερμο" χαρακτήρα και απελευθερώνουν κατά την πραγματοποίησή τους ενέργεια, μόνο η αντίδραση $^2\text{H} + ^3\text{H}$ (D - T αντίδραση) παρέχει, αρχικά, προοπτικές εκμετάλλευσης.



Η αντίδραση $^2\text{H} + ^2\text{H}$ (D - D αντίδραση) μπορεί να θεωρηθεί ως υποψήφια για το απώτερο μέλλον



Λόγω του ότι το τρίτο είναι ασταθές και παράγεται μέσω της αντίδρασης $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ (φυσική αφθονία ^6Li : 7.42%), η σύντηξη D + D θα προσφέρει και

πλήρη ανεξάρτηση της παραγωγής ενέργειας από πρώτες ύλες, που βρίσκονται σε συγκεκριμένες χώρες. Το δευτέριο διατίθεται σε απεριόριστες ποσότητες παντού στη φύση.

Η σύντηξη μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνον όταν οι συγκρουόμενοι πυρήνες βρεθούν σε υψηλές θερμοκρασίες υπό μορφή πλάσματος. Σ' αυτές τις θερμοκρασίες, λόγω των υψηλών κινητικών ενεργειών, εξουδετερώνεται η ηλεκτροστατική άπωση των συγκρουόμενων πυρήνων και παράγεται ανά μονάδα όγκου και χρόνου από τη σύντηξη περισσότερη ενέργεια από αυτή που δαπανάται. Γενικά, η παραγωγή ενέργειας στο πλάσμα εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την ενεργό διατομή της αντίδρασης και από την πυκνότητα των αντιδρώντων πυρήνων. Τεχνολογικά προβλήματα, όπως η αντοχή των υλικών που περικλείουν το πλάσμα, η παραγωγή του τριτίου και ο περιορισμός της ενεργοποίησης των υλικών, πρέπει ακόμη να επιλυθούν οριστικά πριν την βιομηχανική εφαρμογή της πυρηνικής σύντηξης στην παραγωγή ενέργειας.