

Φυσική των Επιταχυντών και Αντιδραστήρων

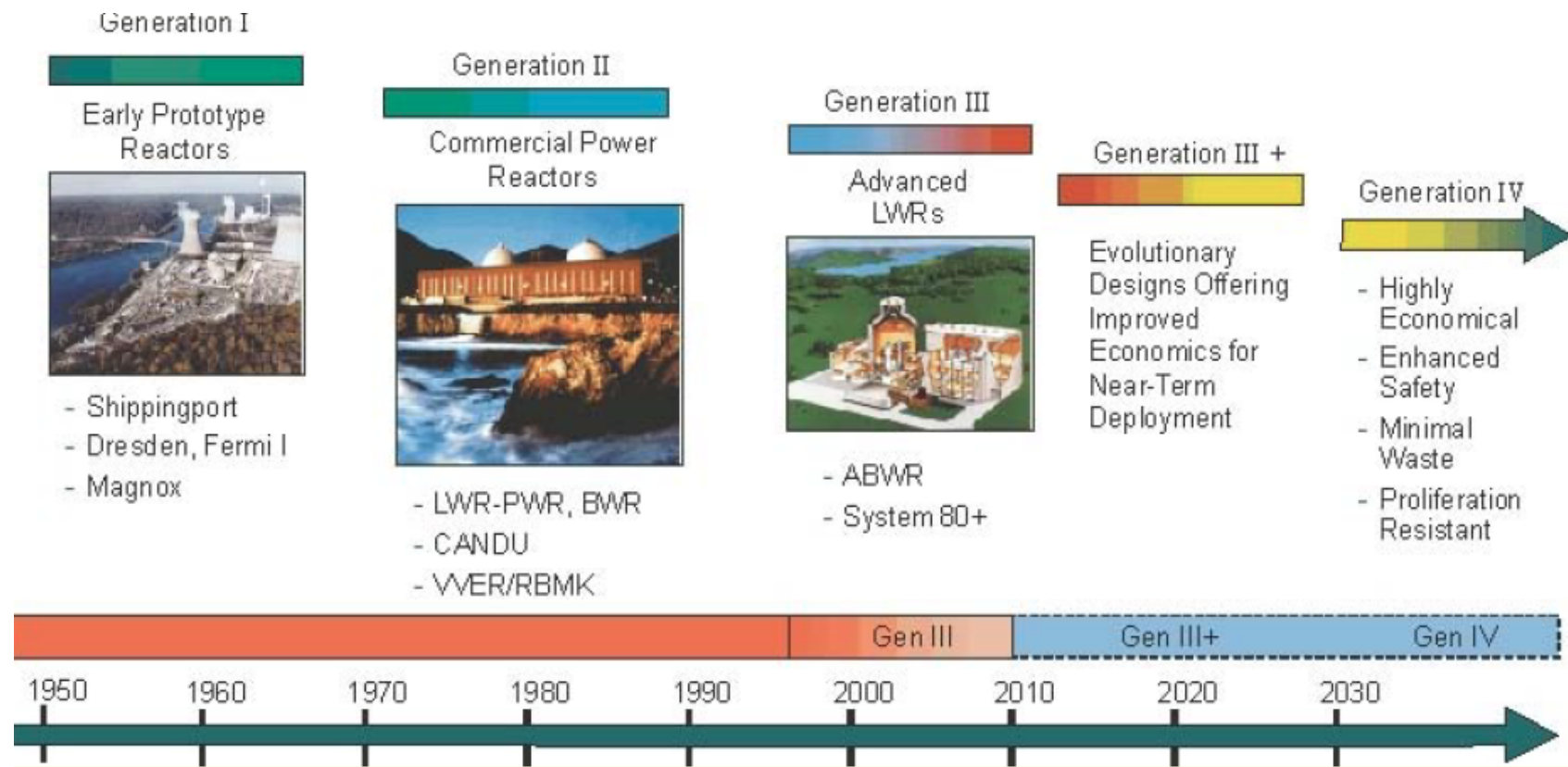
Δ. Σαμψωνίδης

Διαλεξη 4η

Αντιδραστήρες

- Η περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από πυρηνική, παράγεται με δύο μόνο είδη αντιδραστήρων που αναπτύχθηκαν στη δεκαετία του 1950 και έκτοτε έχουν βελτιωθεί.
- Νέοι σχεδιασμοί εμφανίζονται και μάλιστα μερικοί είναι σε λειτουργία, καθώς οι αντιδραστήρες πρώτης γενεάς πλησιάζουν στο τέλος της ζωής τους.
- Περίπου το 13% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από την πυρηνική ενέργεια, περισσότερο από ό,τι από όλες τις πηγές σε όλο τον κόσμο το 1960.

Γενεές Αντιδραστήρων

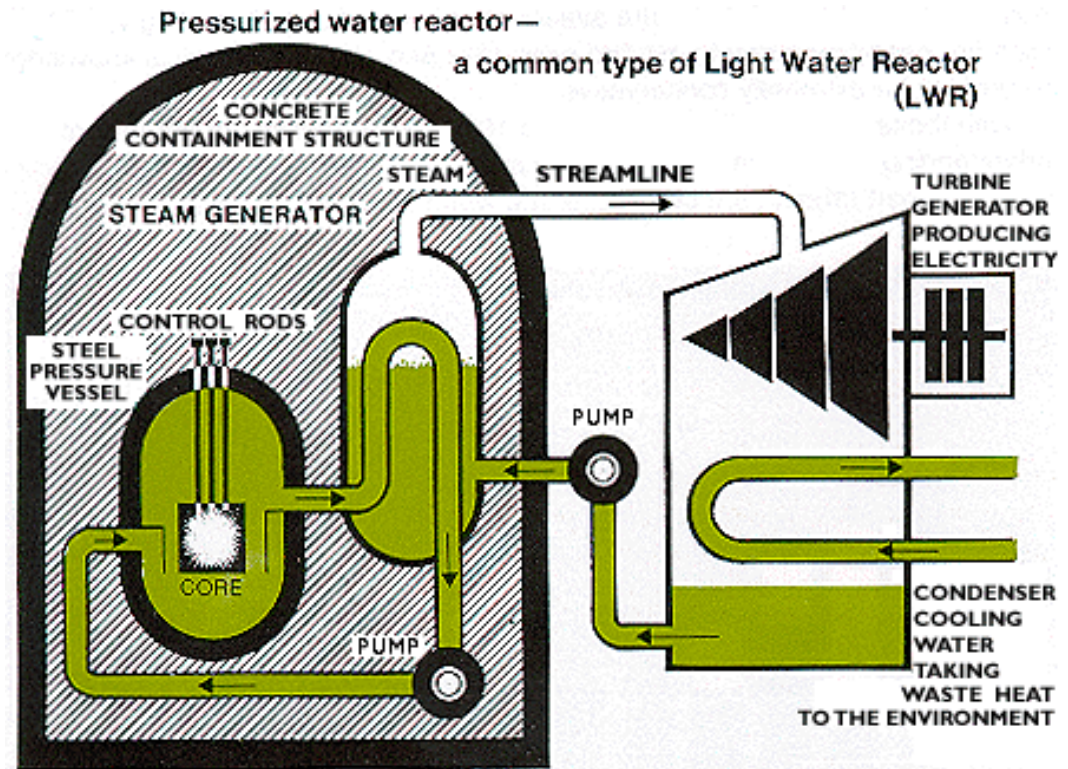


Αντιδραστήρες

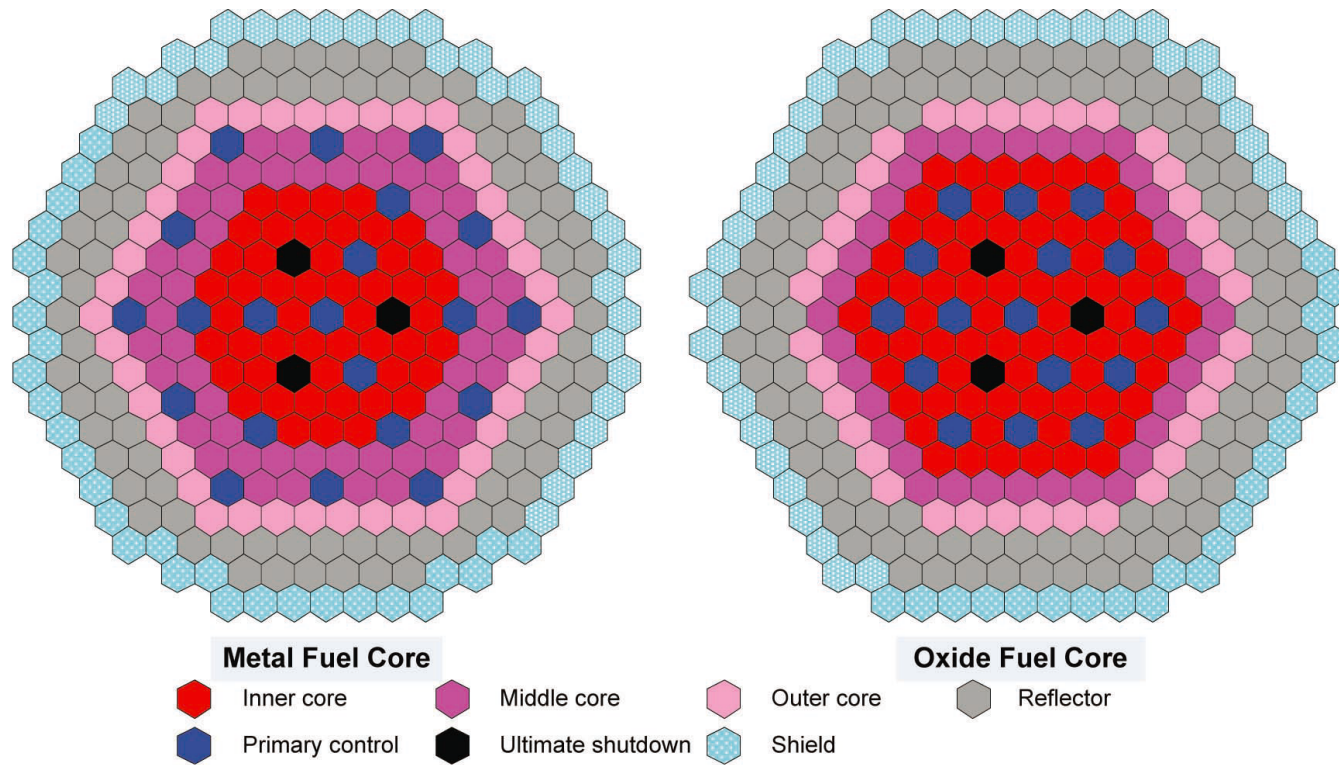
- Σήμερα, οι αντιδραστήρες που προέρχονται από σχέδια που αναπτύχθηκαν αρχικά για την πρόωση υποβρυχίων και μεγάλων πολεμικών πλοίων παράγουν περίπου το **85%** της ηλεκτρικής πυρηνικής ενέργειας στον κόσμο.
- Ο κύριος τύπος είναι ο αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος (**PWR**) ο οποίος έχει το νερό σε πάνω από 300 ° C υπό πίεση σ' ένα πρωτεύον κύκλωμα ψύξης/μεταφοράς θερμότητας, και παράγει ατμό σε ένα δευτερεύον κύκλωμα.
- Οι λιγότεροι αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος (**BWR**) παράγουν ατμό στο πρωτεύον κύκλωμα πάνω από τον πυρήνα του αντιδραστήρα, σε παρόμοιες θερμοκρασίες και πίεση.
- Και οι δύο τύποι χρησιμοποιούν **νερό** ως ψυκτικό μέσο και ως επιβραδυντή, για να επιβραδύνει τα νετρόνια. Δεδομένου ότι το νερό βράζει στους 100 ° C, έχουν ισχυρά δοχεία πίεσης χάλυβα ή σωλήνες για να καταφέρει υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας.

Συστατικά ενός πυρηνικού αντιδραστήρα

- Πυρήνας (καρδιά)
 - Καύσιμο
 - Επιβραδυντής
 - Ψυκτικό
 - Ανακλαστήρας
- Ράβδοι ελέγχου
- Δοχείο πίεσεως (ή ράβδοι πίεσεως)
- Γεννήτρια ατμού
- Εξωτερική δομή (Θωράκιση)



Πυρήνας του αντιδραστήρα



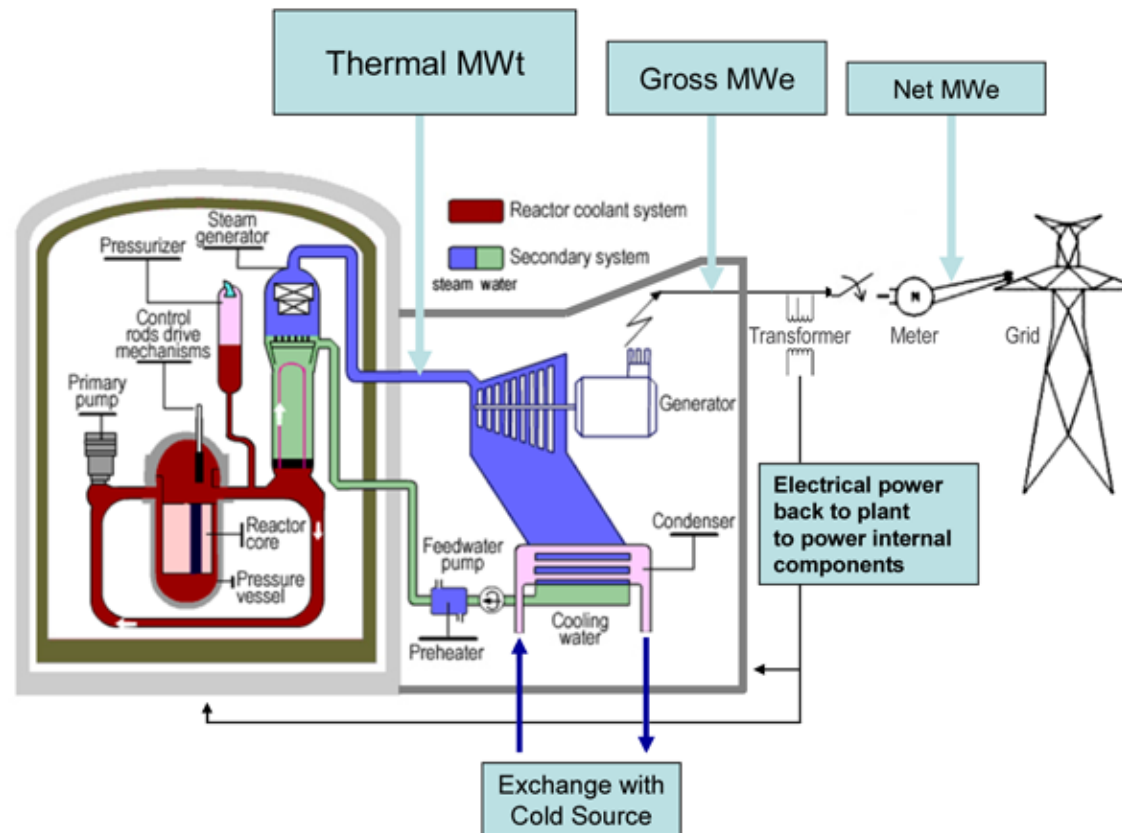
Τύποι αντιδραστήρων

ΘΕΡΜΙΚΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ										ΤΑΧΕΙΣ	
ΥΔΩΡ		ΒΑΡΥ ΥΔΩΡ				ΓΡΑΦΙΤΗΣ				-	Επιβραδυντή
H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	D ₂ O	HYDRO-CARBON	CO ₂	Molten Salt	CO ₂	H ₂ O	Helium	Na/NaK	Ψυκτικό
		BLW	PHWR	OCR			Magnox				Φυσικό U
PWR	BWR	SGHW	Atucha				AGR	RBMK	HTGR		Εμπλουτισμένο U
LWBR						MSBR			THTR		Thorium - U
		Fugen								LMFBR	Plutonium - U

Η ονομαστική ισχύς πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος

- Η ισχύς ενός πυρηνικού σταθμού αναφέρεται με τρεις τρόπους:
- **Θερμική MWt**, η οποία εξαρτάται από το σχεδιασμό (τον τύπο) του πυρηνικού αντιδραστήρα, και σχετίζεται με την ποσότητα και την ποιότητα του ατμού που παράγει.
- **Μεικτή ηλεκτρική MWe** δείχνει την ισχύ που παράγεται από τον αμοστρόβιλο και τη γεννήτρια, και λαμβάνει επίσης υπόψη τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος για το κύκλωμα συμπυκνωτή.
- **Καθαρή ηλεκτρική MWe**, η οποία είναι η διαθέσιμη ισχύς που θα σταλεί έξω από το εργοστάσιο στο δίκτυο, μετά την αφαίρεση της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για να λειτουργήσει ο αντιδραστήρας (ψύξη και αντλίες νερού, κλπ.) και η υπόλοιπη εγκατάσταση

Η ονομαστική ισχύς πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος



- Η σχέση μεταξύ αυτών εκφράζεται με δύο τρόπους:
- Θερμική απόδοση %: ο λόγος μεικτού MWe προς θερμική MW. Είναι συχνά 33-37%.
- Καθαρή απόδοση % ο λόγος της καθαρής MWe που έχει επιτευχθεί προς τη θερμική MW. Αυτό είναι λίγο χαμηλότερο.

Υπολογισμός ισχύος

Με μέση ενέργεια/σχάση $\sim 200\text{MeV}$, ο αριθμός των σχάσεων για 1 W :

$$\begin{aligned} 1 \text{ fission} &= 200 \text{ MeV} \\ 1 \text{ MeV} &= 1.602 \times 10^{-6} \text{ ergs} \\ 1 \text{ erg} &= 1 \times 10^{-7} \text{ watt-sec} \end{aligned}$$

$$1 \text{ watt} \left(\frac{1 \text{ erg}}{1 \times 10^{-7} \text{ watt-sec}} \right) \left(\frac{1 \text{ MeV}}{1.602 \times 10^{-6} \text{ erg}} \right) \left(\frac{1 \text{ fission}}{200 \text{ MeV}} \right) = 3.12 \times 10^{10} \frac{\text{fissions}}{\text{second}}$$

Ισχύς = Ρυθμός αντιδράσεων $R = \phi \Sigma$ x ογκος του αντιδραστήρα

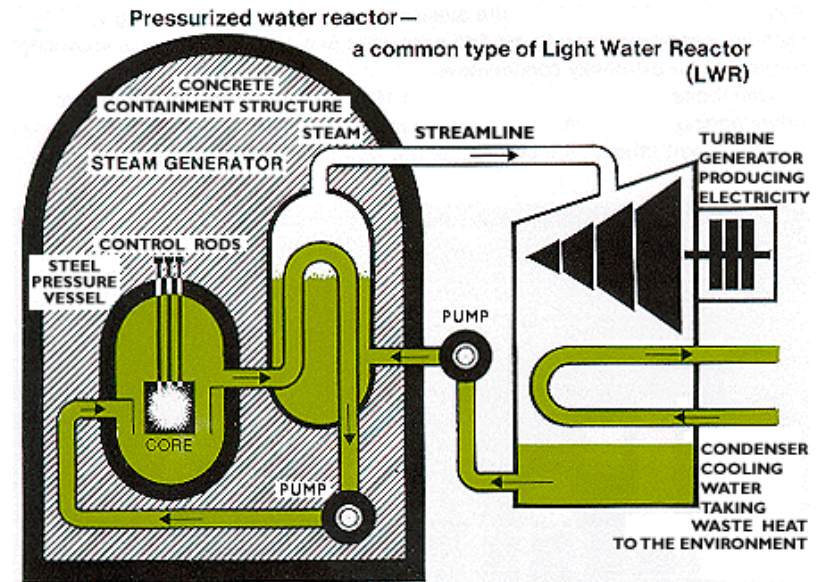
$$P = \frac{\phi_{\text{th}} \Sigma_f V}{3.12 \times 10^{10} \frac{\text{fissions}}{\text{watt-sec}}}$$

$$R = \phi \Sigma$$

- R = reaction rate (reactions/sec)
- ϕ = neutron flux (neutrons/cm²-sec)
- Σ = macroscopic cross section (cm⁻¹)

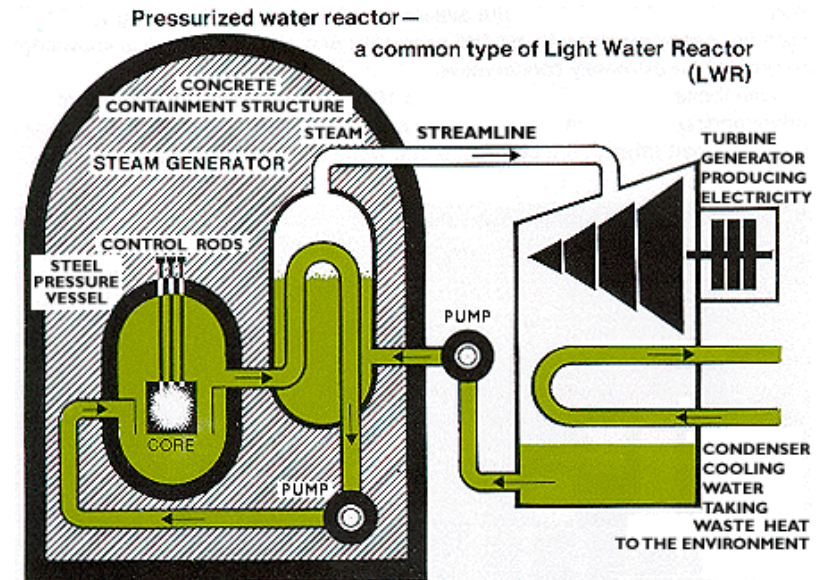
Pressurized Water Reactor (PWR)

- Ο πιο κοινός τύπος, με πάνω από 230 να χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και πολλές εκατοντάδες για ναυτική πρόωση.
- Ο σχεδιασμός των PWRs ξεκίνησε ως μια μονάδα παραγωγής ενέργειας για υποβρύχια.
- Οι PWR χρησιμοποιούν συνηθισμένο νερό τόσο ως ψυκτικό μέσο και ως επιβραδυντή.
- Ο σχεδιασμός : ένα πρωτεύον κύκλωμα ψύξης το οποίο ρέει διαμέσου του πυρήνα του αντιδραστήρα κάτω από πολύ υψηλή πίεση, και ένα δευτερεύον κύκλωμα στο οποίο παράγεται ατμός για την οδήγηση του στροβίλου.

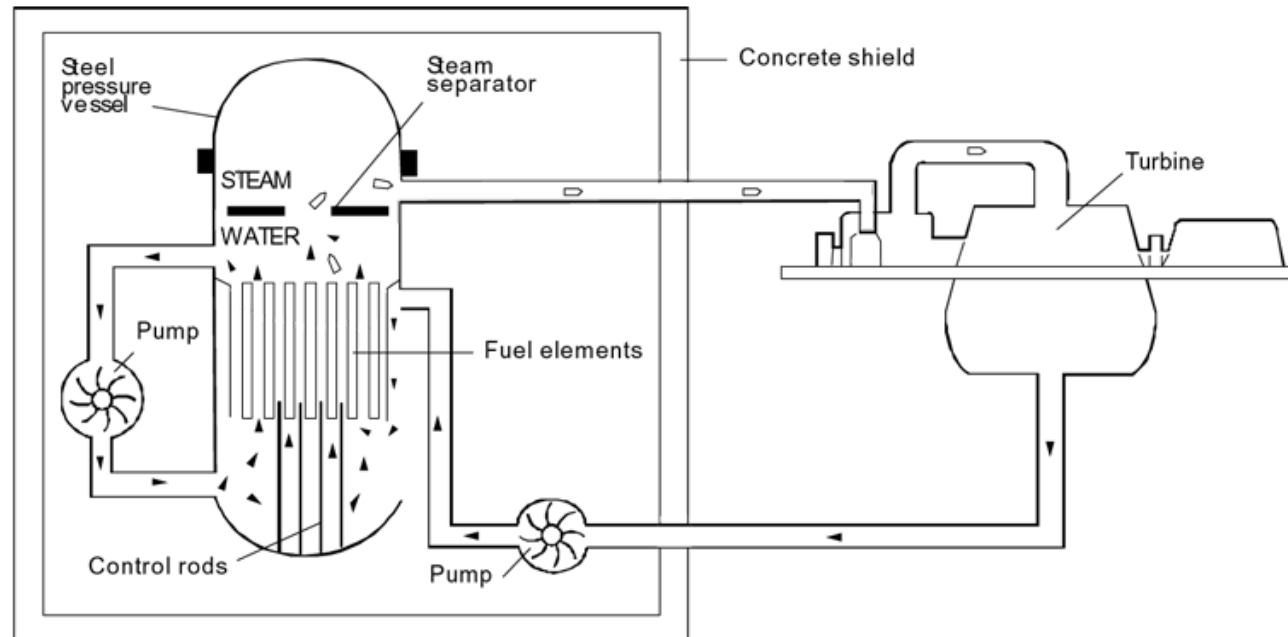


Pressurized Water Reactor (PWR)

- Ένας PWR έχει συμπλέγματα καυσίμων 200-300 ράβδων το καθένα, τοποθετημένα κάθετα στον πυρήνα. Σε ένα μεγάλο αντιδραστήρα έχει περίπου 150-250 συμπλέγματα καυσίμου με συνολικά 80-100 τόνους ουρανίου.
- Η θερμοκρασία του νερού στην καρδιά του αντιδραστήρα φθάνει περίπου τους 325°C , γι' αυτό πρέπει να διατηρείται σε πίεση περίπου 150 ατμόσφαιρες για να παραμένει σε υγρή φάση.
- Στο πρωτεύον κύκλωμα ψύξης το νερό είναι, επίσης και ο επιβραδυντής και αν κάποιο μέρος από αυτό μετατραπεί σε ατμό η αντίδραση σχάσης θα επιβραδυνθεί.
- Αυτό το αρνητικό αποτέλεσμα είναι ένα από τα θετικά χαρακτηριστικά ασφαλείας αυτού του τύπου. Το δευτερεύον σύστημα τερματισμού περιλαμβάνει την προσθήκη βορίου στο πρωτεύον κύκλωμα.



Boiling Water Reactor (BWR)

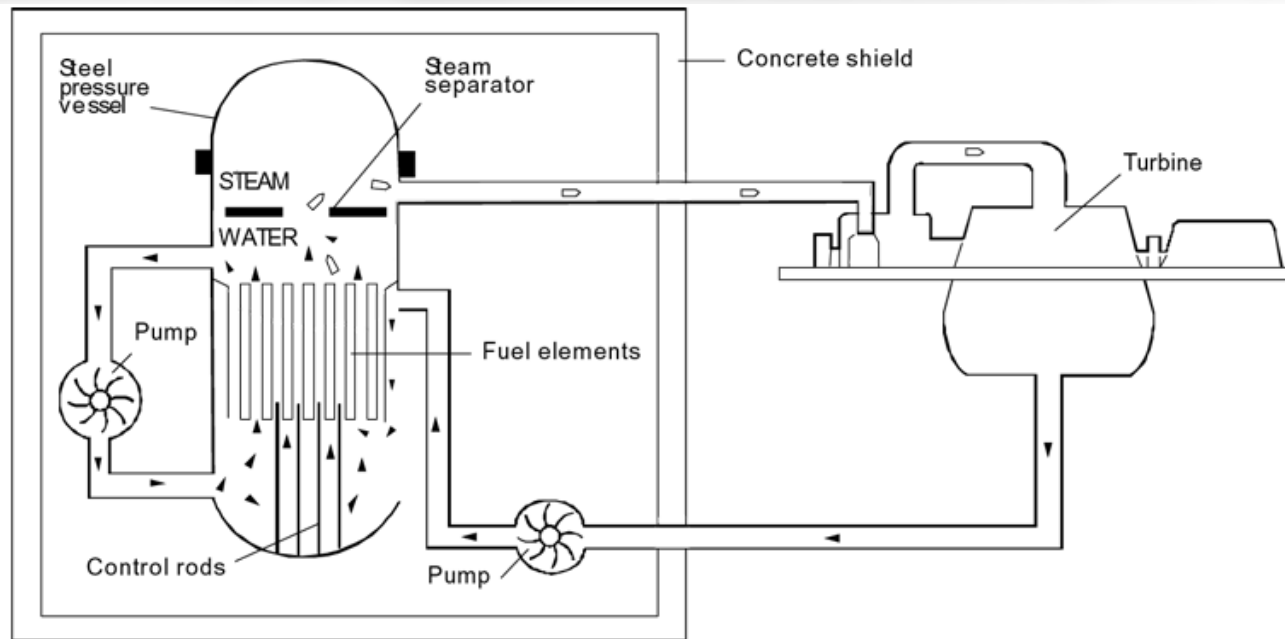


Αυτός ο τύπος έχει πολλές ομοιότητες με το PWR, εκτός του ότι υπάρχει ένα μόνο κύκλωμα στο οποίο το νερό είναι σε χαμηλότερη πίεση (περίπου 75 ατμόσφαιρες), έτσι ώστε στους περίπου 285 ° C να βράζει, στον πυρήνα του αντιδραστήρα.

Ο αντιδραστήρας είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί με 12-15% του νερού πάνω από τον πυρήνα, με μορφή ατμού, και συνεπώς με λιγότερη επιβραδυντική ισχύ.

Ο ατμός διέρχεται διαμέσου ξηραντήρα (πλάκες, διαχωριστές ατμού) πάνω από τον πυρήνα και στη συνέχεια απευθείας σε ανεμογεννήτριες, οι οποίες είναι έτσι μέρος του κυκλώματος του αντιδραστήρα.

Boiling Water Reactor (BWR)



Δεδομένου ότι το νερό γύρω από τον πυρήνα του αντιδραστήρα είναι πάντα μολυσμένο με ίχνη ραδιοϊσοτόπων, αυτό σημαίνει ότι η τουρμπίνα θα πρέπει να είναι θωρακισμένο για προστασία κατά τη διάρκεια της συντήρησης. Το κόστος αυτό τείνει να εξισορροπήσει τις εξοικονομήσεις λόγω του απλούστερου σχεδιασμού. Το μεγαλύτερο μέρος της ραδιενέργειας στο νερό είναι πολύ βραχύβια.

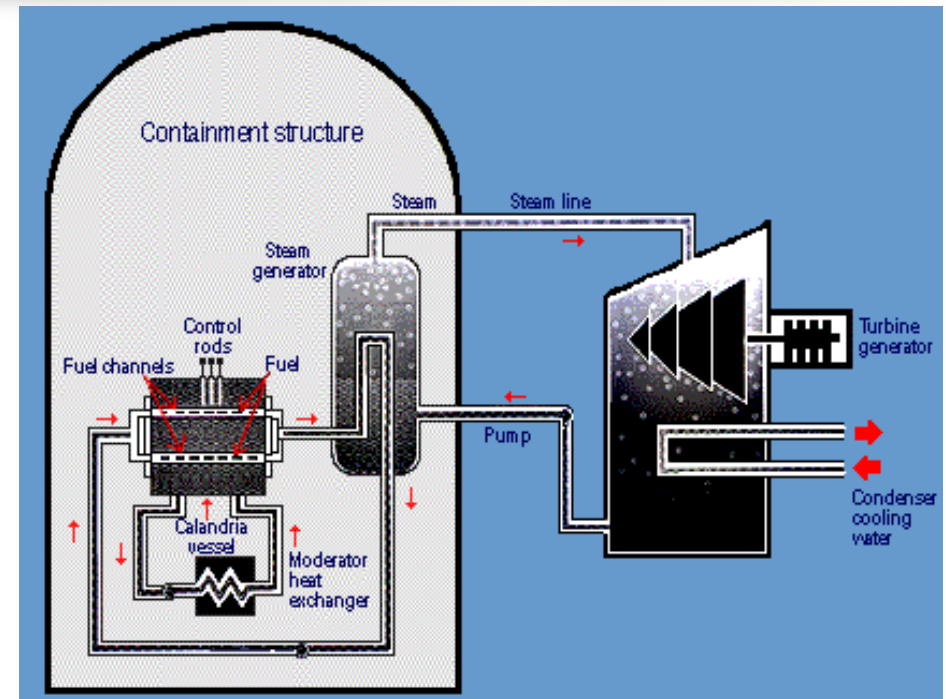
Ένα σύμπλεγμα καυσίμων ΒΑΚ περιλαμβάνει 90-100 ράβδους καυσίμου, και υπάρχουν μέχρι και 750 συμπλέγματα σε ένα πυρήνα του αντιδραστήρα, που περιέχουν μέχρι και 140 τόνους ουρανίου.

Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR or CANDU)

Ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα PHWR έχει αναπτυχθεί από το 1950 στον Καναδά ως CANDU, και πιο πρόσφατα στην Ινδία.

PHWRs χρησιμοποιούν φυσικό ουράνιο (0,7% U-235) (οξειδίο) ως καύσιμο, ως εκ τούτου, χρειάζεται ένα αποτελεσματικό επιβραδυντή, βαρύ ύδωρ (D_2O).

Ο PHWR παράγει περισσότερη ενέργεια ανά kg φυσικού ουρανίου από τους άλλους τύπους.



- Ο επιβραδυντής είναι σε μια μεγάλη δεξαμενή που ονομάζεται Calandria, διαπερνάται από εκατοντάδες οριζόντιους σωλήνες πίεσης που σχηματίζουν διαύλους για το καύσιμο, ψύχεται με ροή βαρέος ύδατος υπό υψηλή πίεση στο πρωτεύον κύκλωμα ψύξης, φθάνοντας $290^{\circ} C$.
- Όπως και στον PWR, το πρωτεύον ψυκτικό μέσο παράγει ατμό σε ένα δευτερεύον κύκλωμα οδήγησης των στροβίλων.
- Ο σχεδιασμός του σωλήνα πίεσης σημαίνει ότι ο αντιδραστήρας μπορεί να ανεφοδιαστεί προοδευτικά χωρίς κλείσιμο, με απομόνωση επιμέρους σωλήνων πίεσης από το κύκλωμα ψύξης.

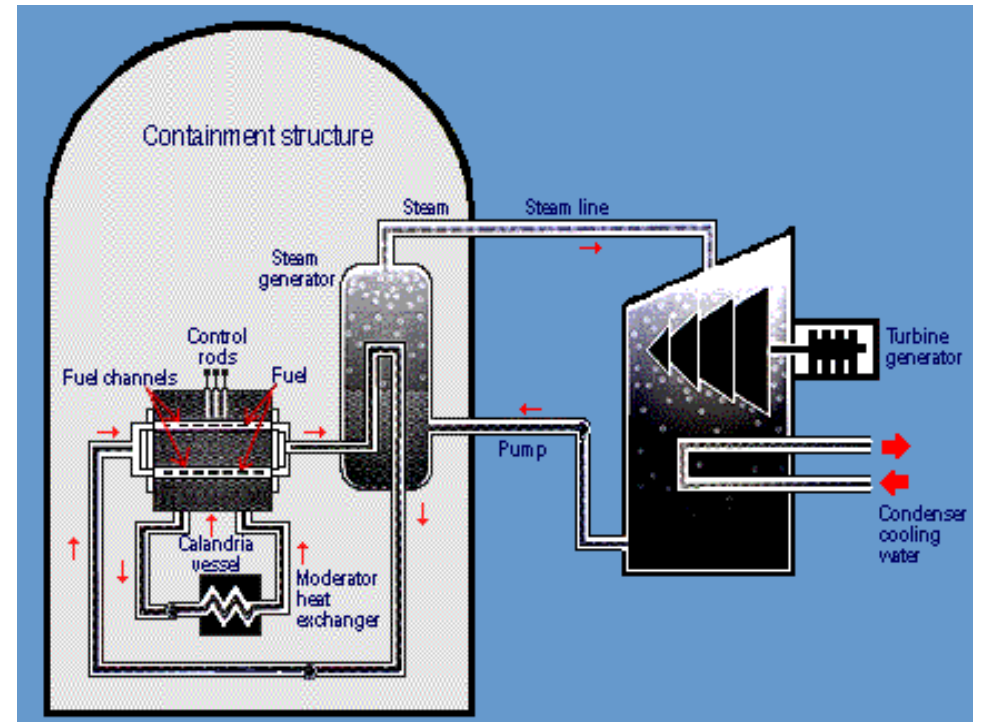
Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR or CANDU)

Ένα συγκρότημα καυσίμων CANDU αποτελείται από μια δέσμη των 37 μέτρων μήκους ράβδους καυσίμου (κεραμικά σφαιρίδια καυσίμου σε σωλήνες zircaloy) συν μια δομή στήριξης, με 12 δέσμες που βρίσκονται άκρο σε άκρο σε ένα κανάλι καυσίμου. Ράβδους ελέγχου διαπερνούν τα Calandria κατακόρυφα, και ένα δευτερεύον σύστημα τερματισμού περιλαμβάνει την προσθήκη γαδολίνιο στο μεσολαβητή. Το βαρύ ύδωρ επιβραδυντής κυκλοφορεί μέσα από το σώμα του δοχείου Calandria δίδει επίσης κάποια θερμότητα.

Νεότερα σχέδια PHWR όπως το Advanced Candu Αντιδραστήρα (ACR) έχουν ελαφρά ψύξη του νερού και ελαφρώς εμπλουτισμένο καύσιμο.

Αντιδραστήρες CANDU μπορεί να τρέξει εύκολα σε ανακυκλωμένο ουράνιο από επανεπεξεργασία αντιδραστήρων ελαφρού ύδατος χρησιμοποιούμενο καύσιμο, ή ένα μείγμα αυτό και το απεμπλουτισμένο ουράνιο που έχει απομείνει από εγκαταστάσεις εμπλουτισμού.

Περίπου 4000 MWe του PWR μπορεί στη συνέχεια καυσίμων 1000 MWe του CANDU ικανότητα, με την προσθήκη του απεμπλουτισμένου ουρανίου. Θόριο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε καύσιμα.



CANDU

NPD, Ontario (1962)

Pickering, Ontario (1971-73, 1983-86)

Wolsong, South Korea (1982, 1997-99)

Qinshan, China (2002-03)

Rajasthan, India (1973, 1982)

Kanupp, Pakistan (1972)

Cernavoda, Romania (1996, 2007, ... ?)

Embalse, Argentina (1984)

Darlington, Ontario (1990-93)

Bruce, Ontario (1977-79, 1985-87)

Gentilly 1 and 2, Quebec (1971, 1983)

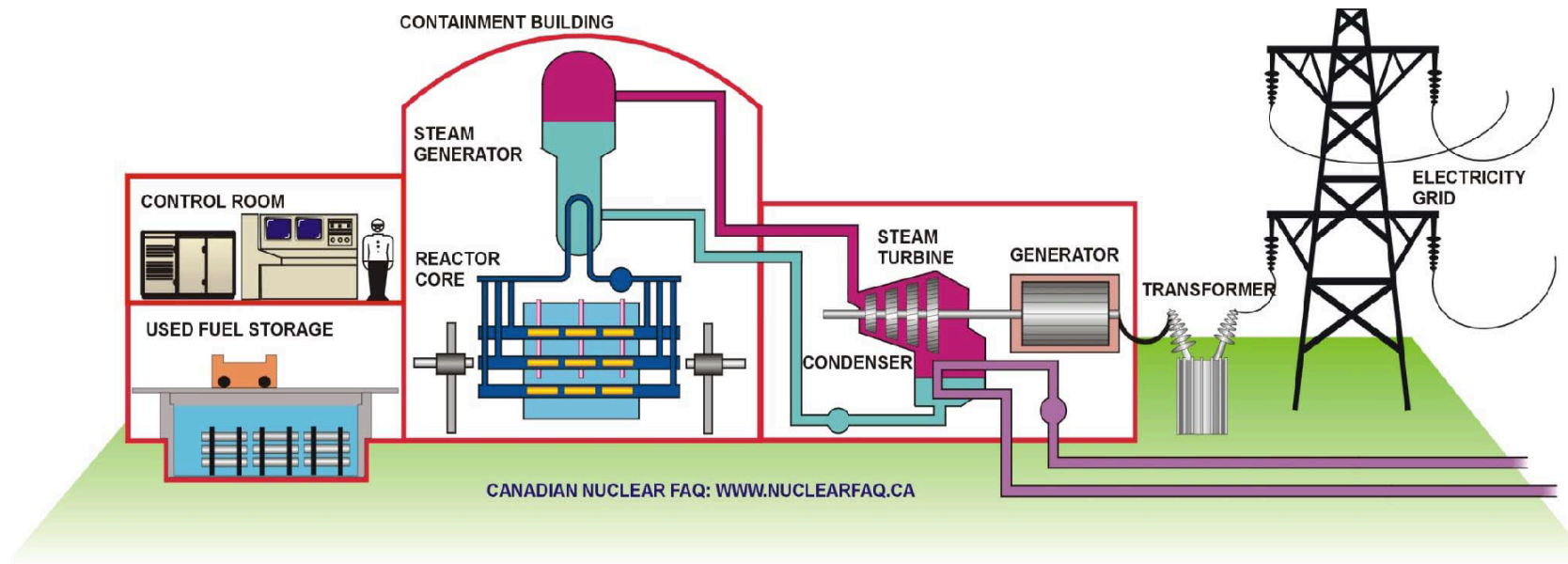
Pt. Lepreau, New Brunswick (1983)

Douglas Point, Ontario (1966)

20 in Canada

12 offshore

CANDU

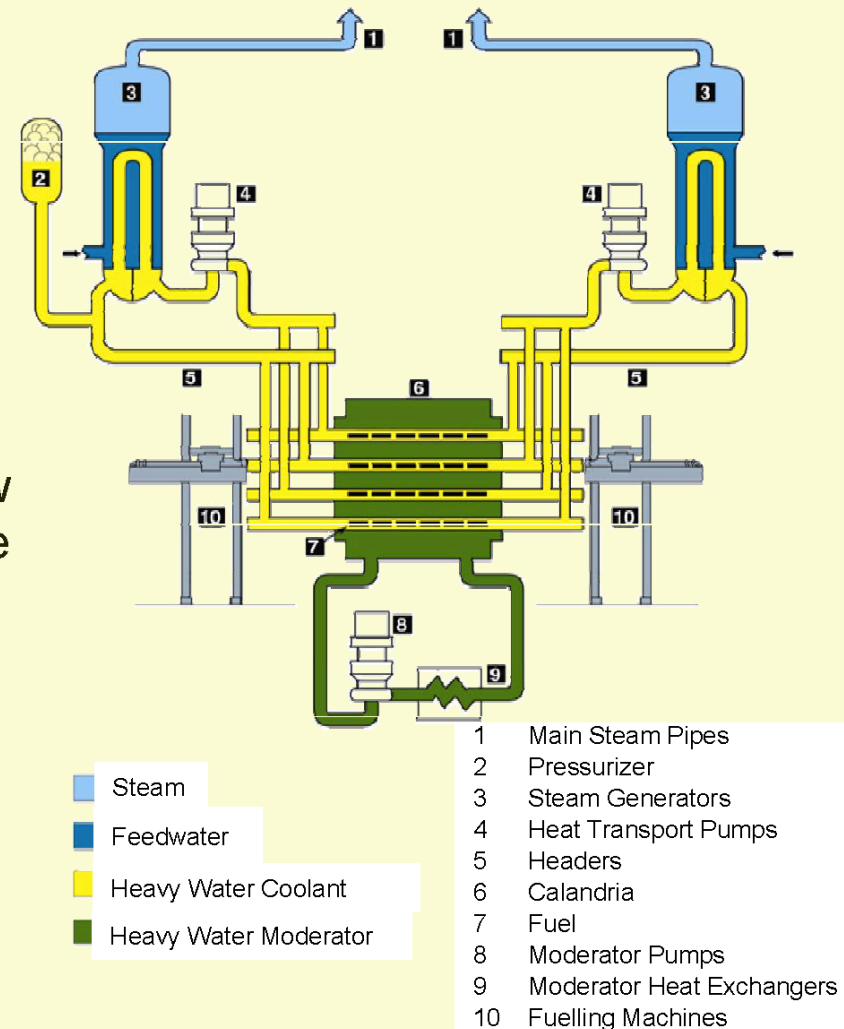


Power cycle similar to PWR and BWR

CANDU

CANDU PRIMARY SYSTEM

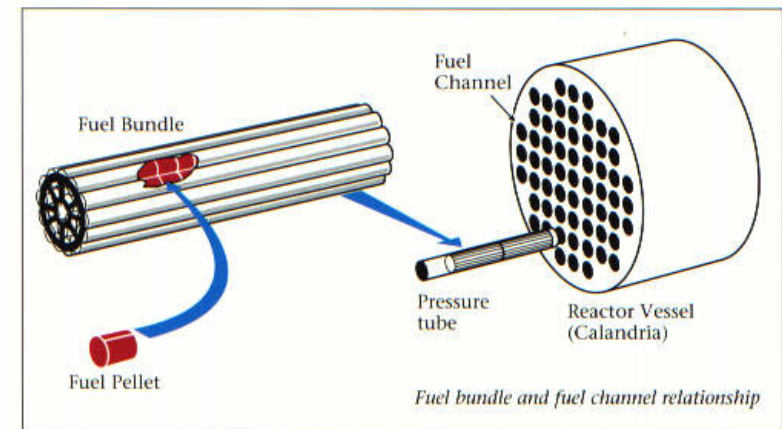
- Natural uranium fuel and D₂O moderator
- Fuel contained in individual fuel channels (pressure tubes) filled with high pressure (>10 MPa) and high temperature (~300°C) D₂O coolant
- Pressure tubes contained in a large cylindrical tank (calandria) filled with low pressure (<1 MPa) and low temperature (<80°C) D₂O moderator
- Fuel clad and pressure tubes are made of Zr alloys
- Fuelling machines connect to individual pressure tubes for refuelling
- Conventional turbine/generator and auxiliary systems



CANDU

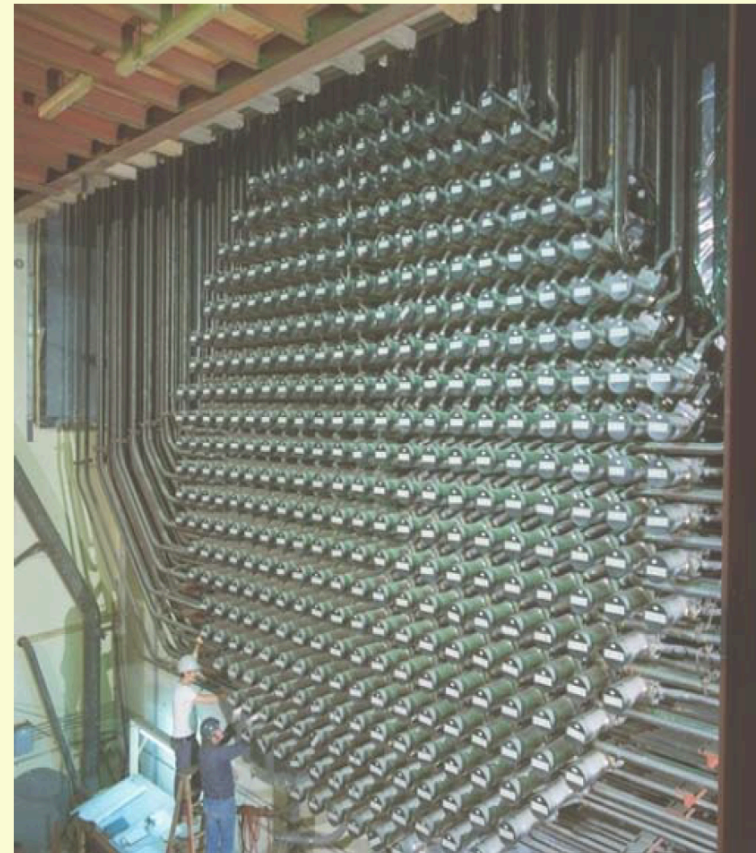
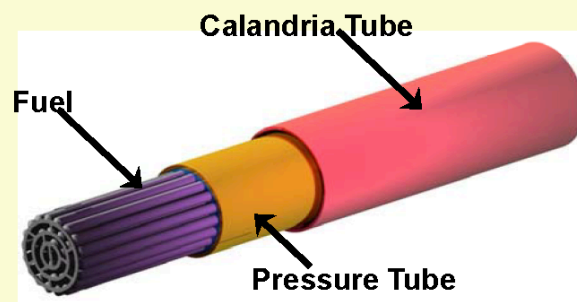
CANDU FUEL BUNDLES

- UO_2 pellets in Zircaloy cladding (0.38 mm thick)
- 28 or 37 pins form a fuel bundle (pins have a 13.08 mm outside diameter)
- Pins held together by end plates.
- Pins separated by spacers. Outer pins have bearing pads.
- Bundles: 495.3 mm long and 102.5 mm in diameter
- Average burnup: 7500-8500 MWd/ton)



PRESSURE TUBES (OR FUEL CHANNELS)

- Each fuel channel consists of a pressure tube and two end-fittings (primary pressure boundary), plus a calandria tube
- Pressure tube - calandria tube separated by a gas filled annulus; gap maintained by “garter” springs
- Low neutron cross section
- Total channel length: 11.56 m (~6 m fuelled)



Σύστημα CALANDRIA

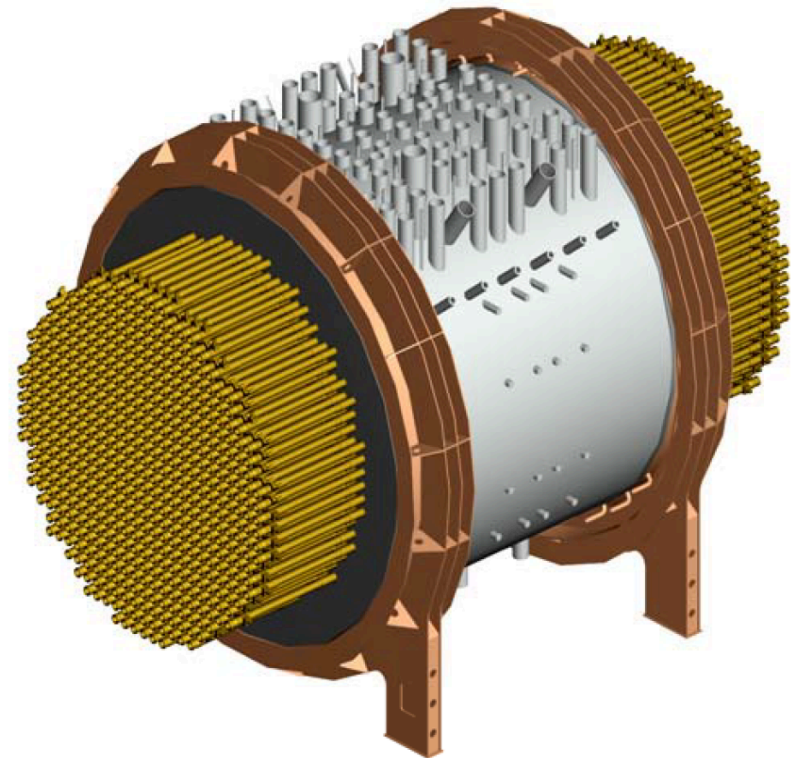
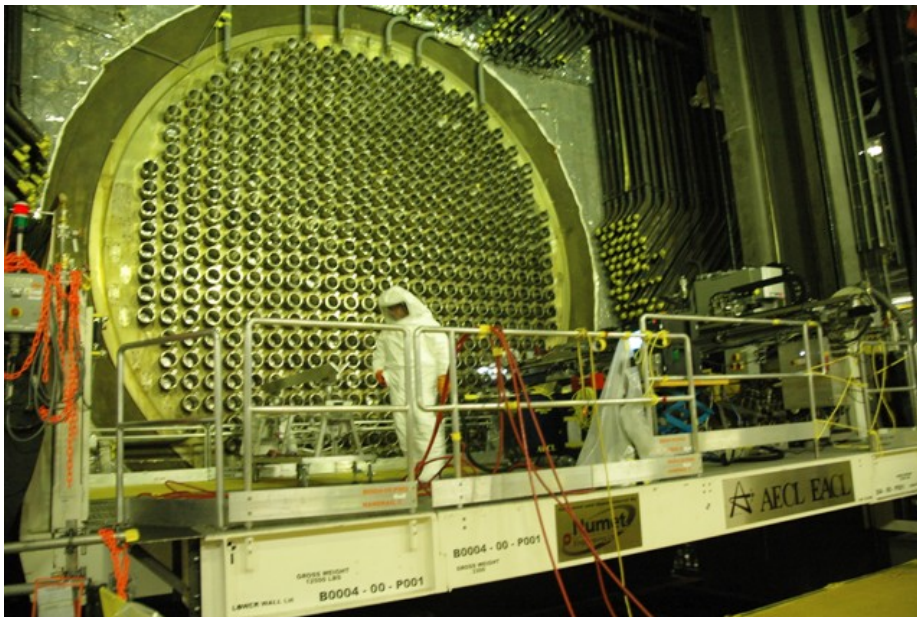
Περιέχει το βαρύ ύδωρ

Οριζόντιοι σωλήνες πίεσης και κατακόρυφοι σωλήνες ελέγχου

380-480 οριζόντιοι σωλήνες

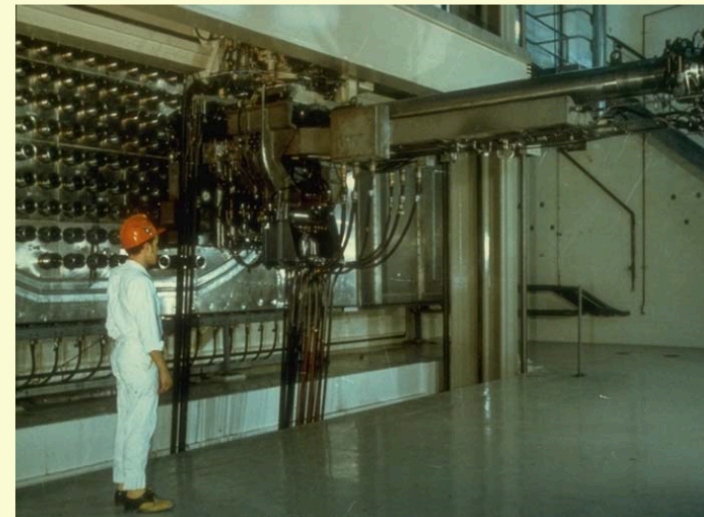
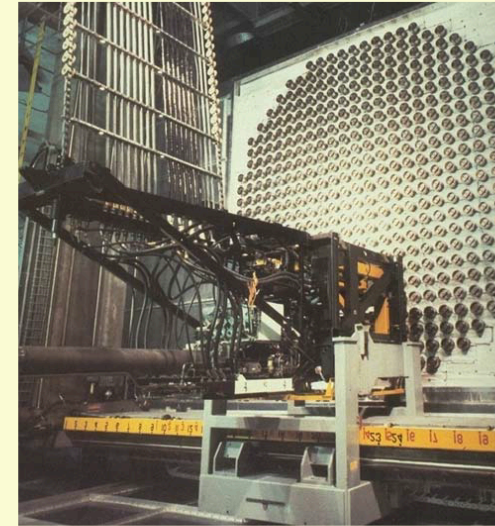
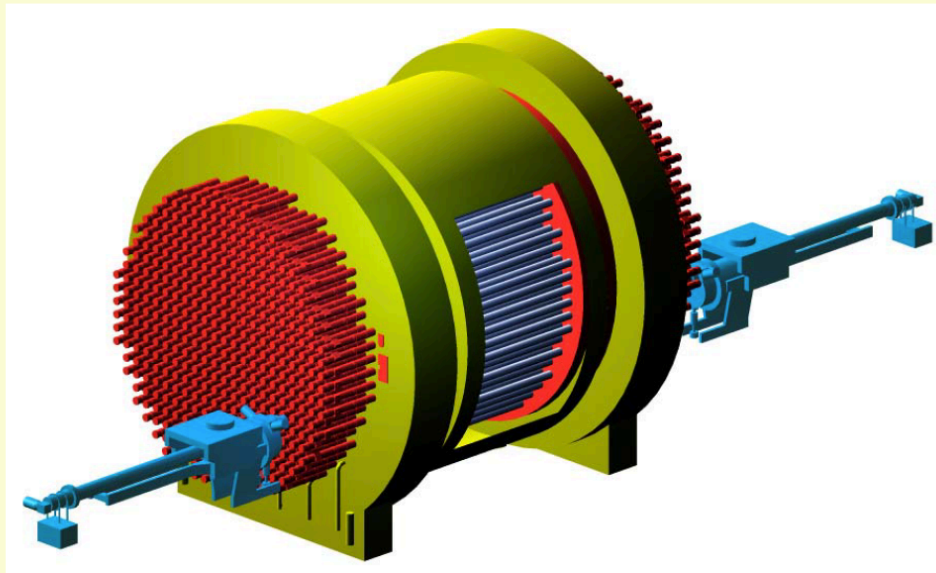
12-13 καυσίμου ανά σωλήνα πίεσης

ΔΕΝ υπάρχει δοχείο πίεσης

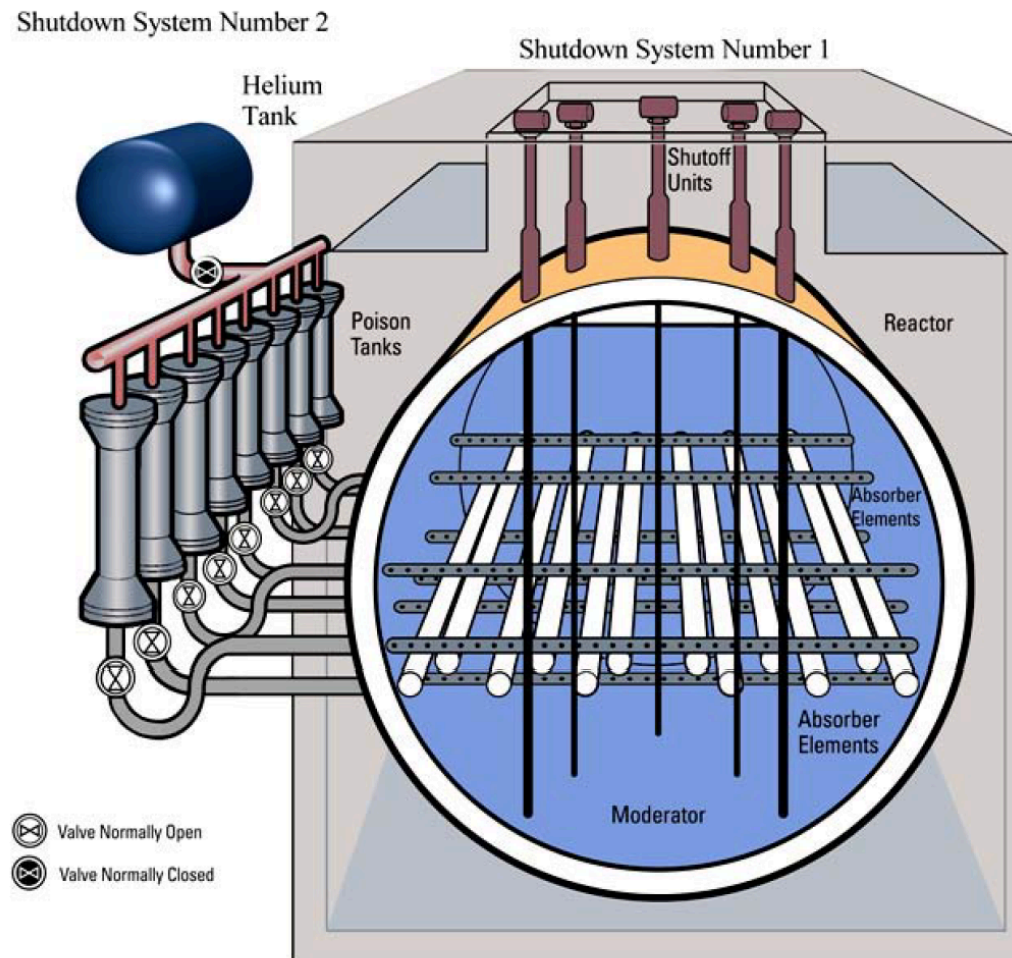


FUELLING MACHINES

- Two fuelling machines operate simultaneously accepting or loading fuel
- Remotely operated from control room



Σύστημα Shutdown



High Temperature Gas Reactors (HTGR)

- Small modular units: 125-300 MWe
- Helium cooled, 850-900°C outlet T, <9 MPa pressure
- Thermal efficiency >40%
- Graphite moderated
- Microsphere UO₂ or UCO fuel
- Electricity and process heat
- Passive decay heat removal
- Two “flavors”: **block core** or **pebble bed**

15

Ταχείς Αντιδραστήρες Υγρού Μετάλλου

Οι αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων είναι ένα σύστημα στο οποίο τα νετρόνια **δεν επιβραδύνονται**

Ο αριθμός των νετρονίων που εκπέμπονται ανά απορροφούμενο νετρόνιο είναι μεγαλύτερος και έτσι τα επιπλέον νετρόνια μπορούν να απορροφηθούν σε μια «κουβέρτα» U-238 για την παραγωγή Pu-239, με αποτέλεσμα την "αναπαραγωγή" νέου καυσίμου.

Αν σχεδιαστεί σωστά ο αντιδραστήρας μπορεί να αναπαράγει στην πραγματικότητα περισσότερο καύσιμο από ό, τι καταναλώνει (είναι δυνατές πολλαπλές ανακυκλώσεις καυσίμων).

Χρειάζεται ένα ψυκτικό υγρό που δεν επιβραδύνει νετρόνια, συνήθως ένα υγρό μέταλλο όπως νάτριο

Είναι ενδιαφέρον, ο πρώτος πυρηνικός αντιδραστήρας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ήταν αντιδραστήρα ταχέων νετρονίων στο Idaho.



Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR)

Χαρακτηριστικά

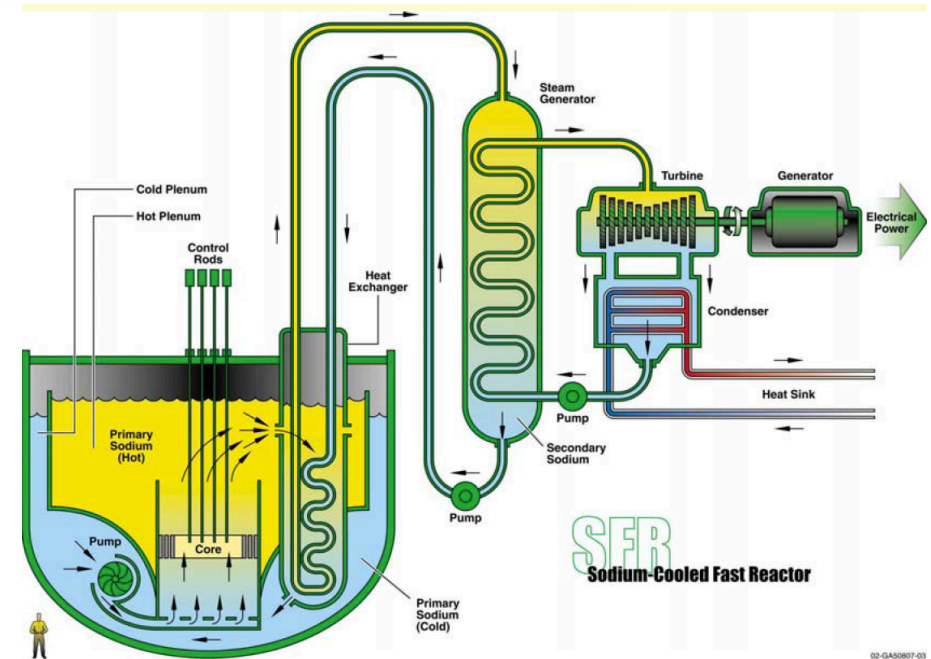
- Ψυκτικό νάτριο
- $> 500^{\circ}\text{C}$ Θερμοκρασία εξόδου
- 150 έως 1300 Mwe
- Μέταλλο ή οξείδιο του

Οφέλη

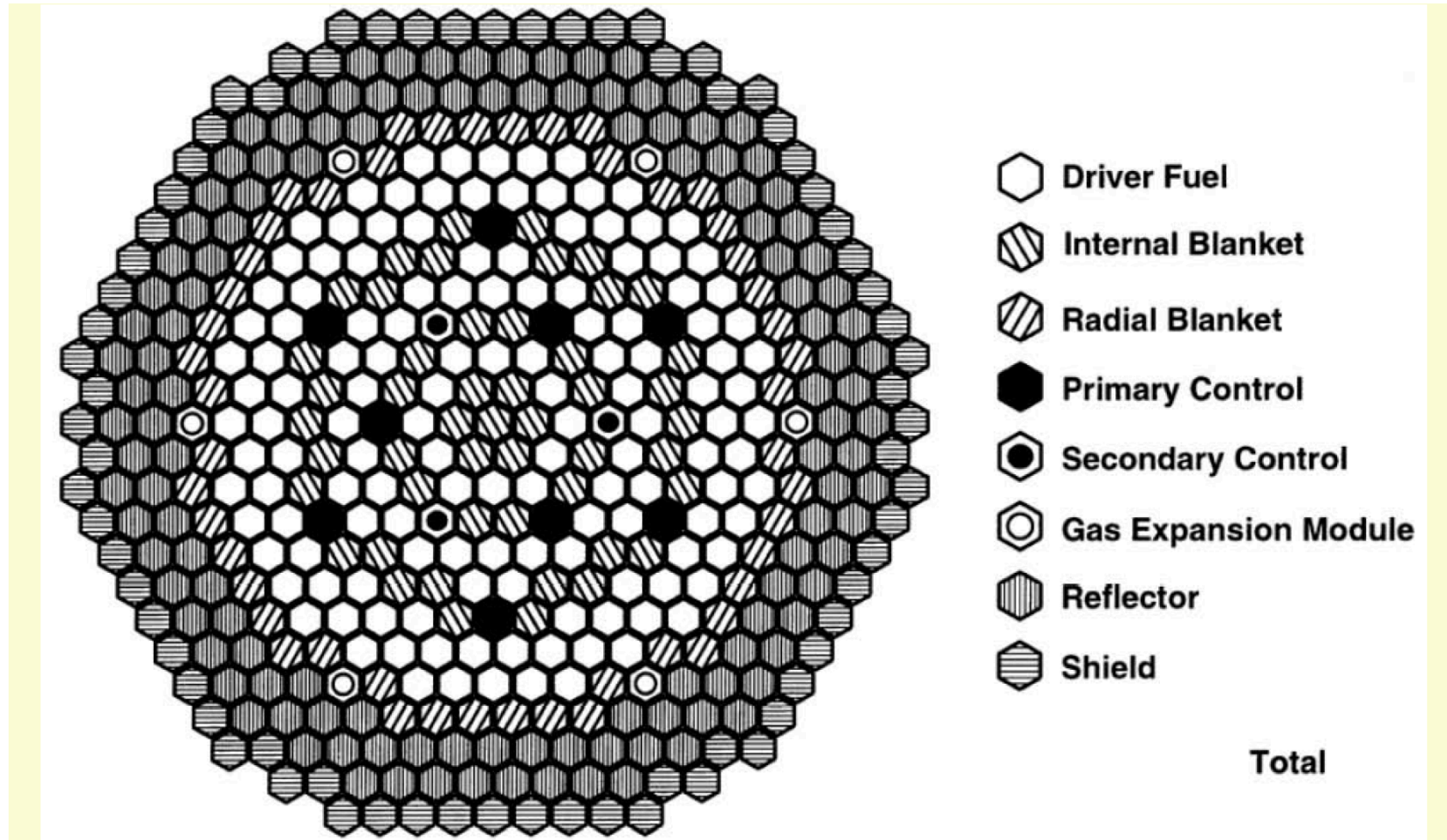
- Αποδοτική παραγωγή σχάσιμου υλικού (αναπαραγωγή)
- Νάτριο είναι εξαιρετικό για τη μεταφορά θερμότητας και έχει υψηλό σημείο βρασμού (880°C)
- Σχετικά υψηλή θερμοκρασία (καλό για απόδοση $\sim 40\%$), αλλά χαμηλή πίεση (καλό για την ασφάλεια)

Μειονεκτήματα

- Το νάτριο αντιδρά με αέρα και ατμό, ως εκ τούτου, απαιτείται ενδιάμεσος βρόχος και ειδικά μέτρα πυροπροστασίας, τα οποία προσθέτουν στο κόστος και την πολυπλοκότητα
- Απαιτεί υψηλότερο αρχικό εμπλουτισμό για να ξεκινήσετε.
- Δημιουργεί Pu (διάδοση των πυρηνικών όπλων)

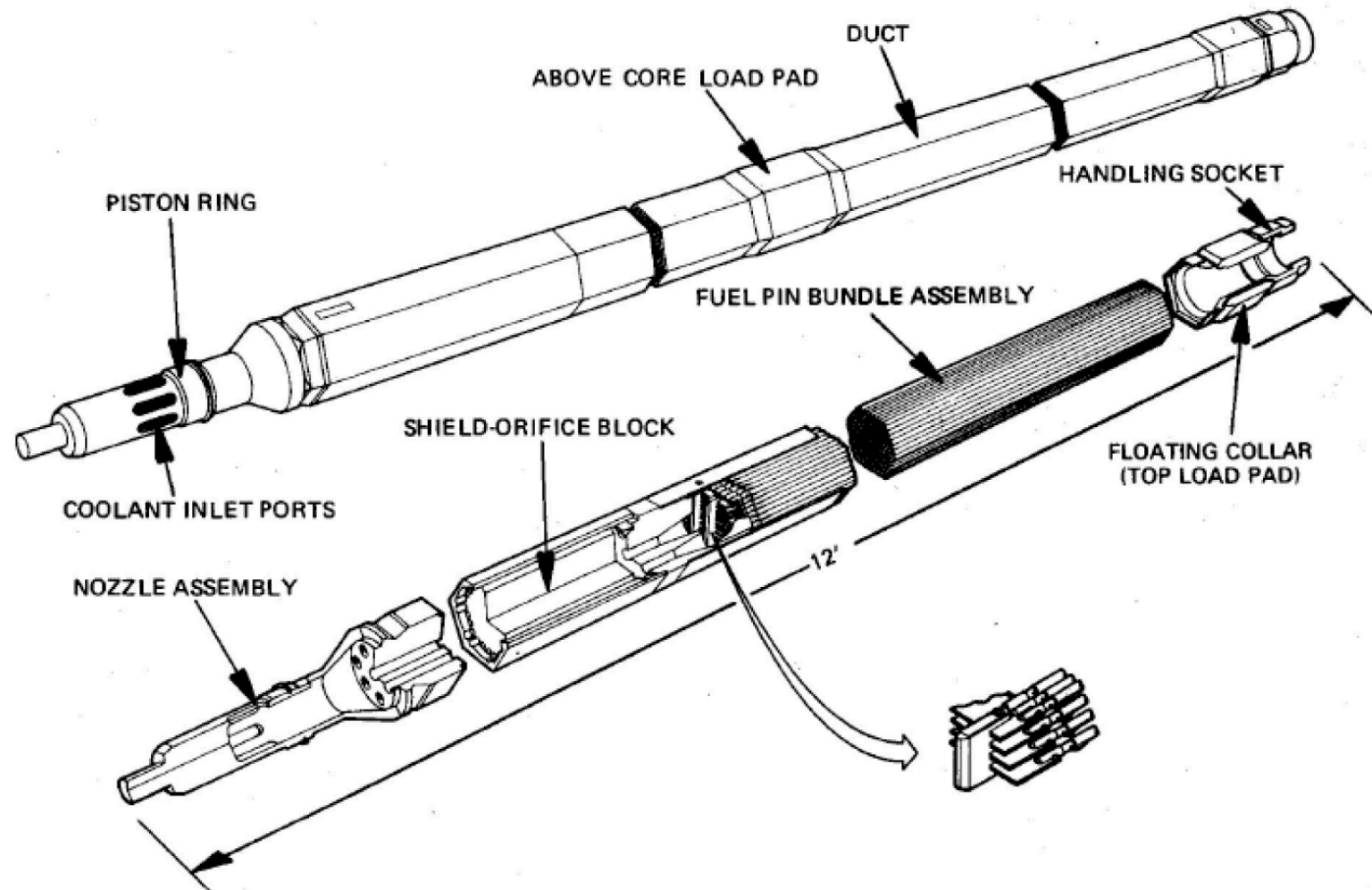


SFR - καρδιά

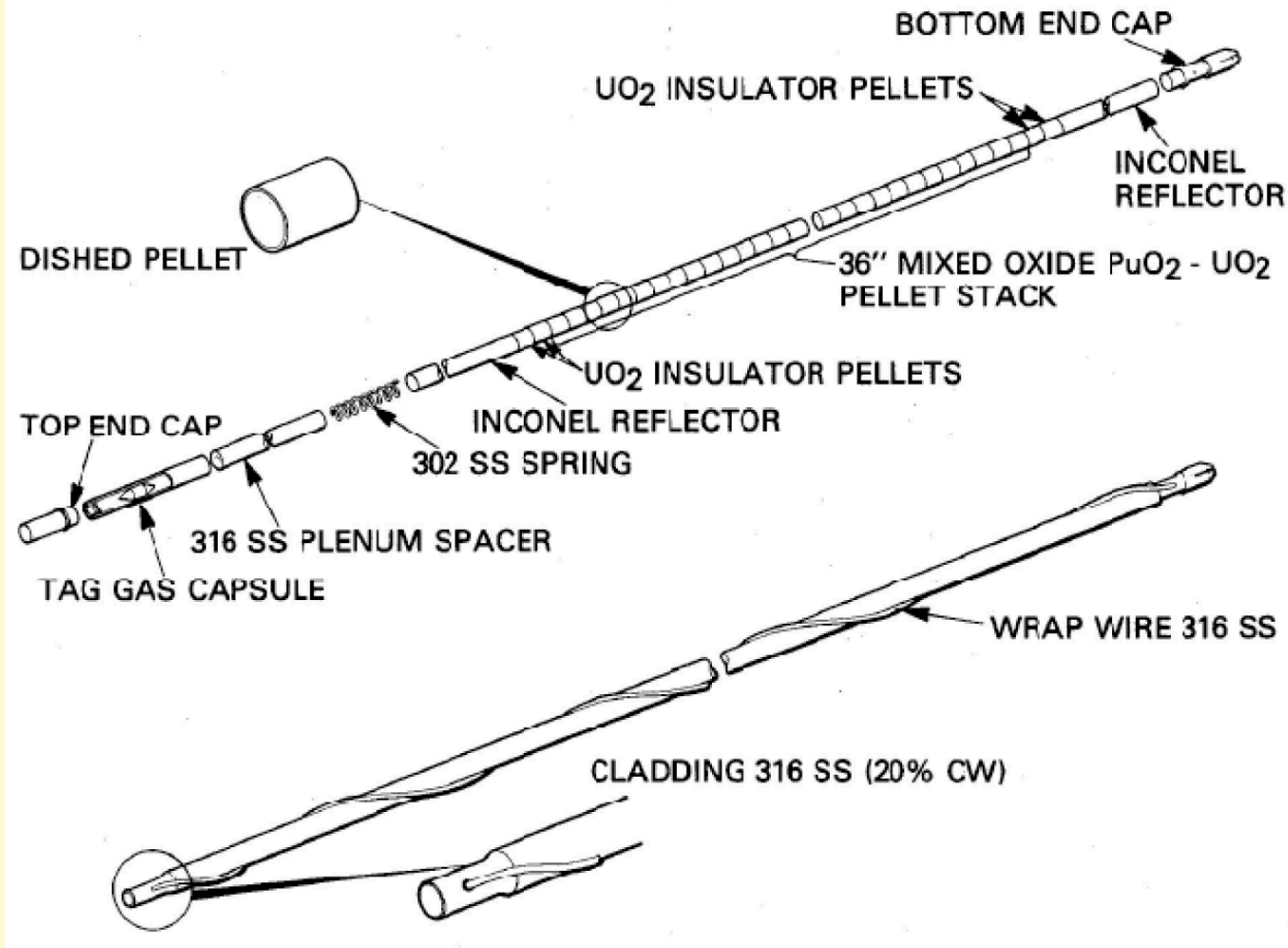


- Uses U-238 blankets to absorb neutrons that escape from the driver fuel core region

SFR – διάταξη καυσίμου



SFR – κύλινδροι καυσίμου



Very tight lattice requires use of wire wrap to keep fuel rods separated

Advanced Gas-cooled Reactor (AGR)

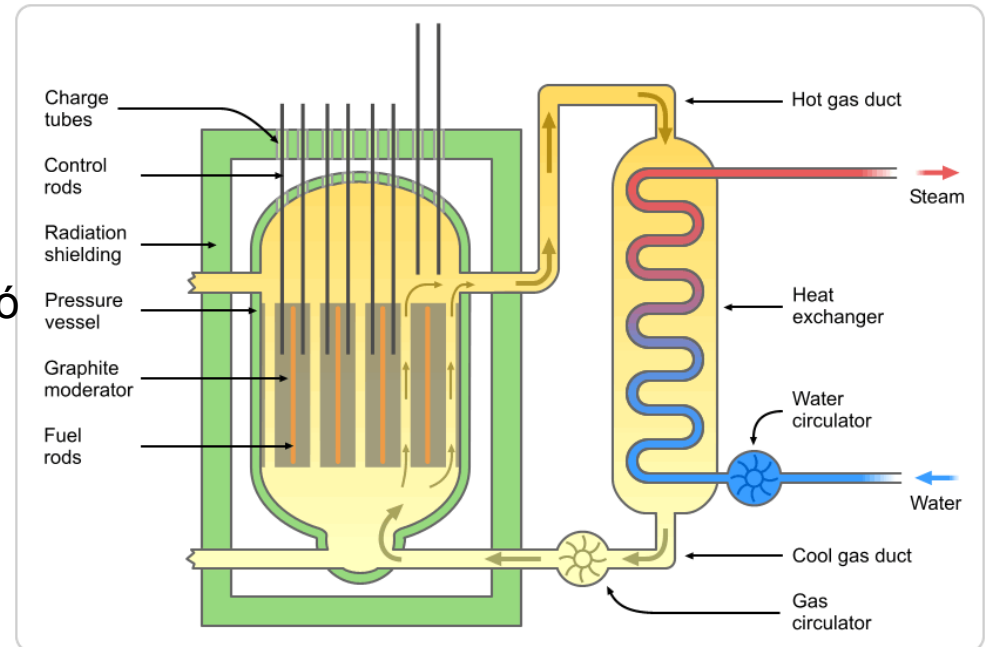
Αυτή είναι η δεύτερη γενιά των Βρετανικών αερόψυκτων αντιδραστήρων, χρησιμοποιώντας επιβραδυντή γραφίτη και το διοξείδιο του άνθρακα ως ψυκτικό υγρό.

Καύσιμο: σφαιρίδια οξειδίου του ουρανίου, εμπλουτισμένου κατά 2,5-3,5%, σε σωλήνες από ανοξείδωτο χάλυβα.

Το διοξείδιο του άνθρακα κυκλοφορεί διαμέσου του πυρήνα, φθάνοντας 650 ° C. Περνάει έξω από σωλήνες της γεννήτριας ατμού.

Ράβδοι ελέγχου διαπερνούν τον επιβραδυντή και ένα δευτερεύον σύστημα τερματισμού με έγχυση αζώτου στο ψυκτικό.

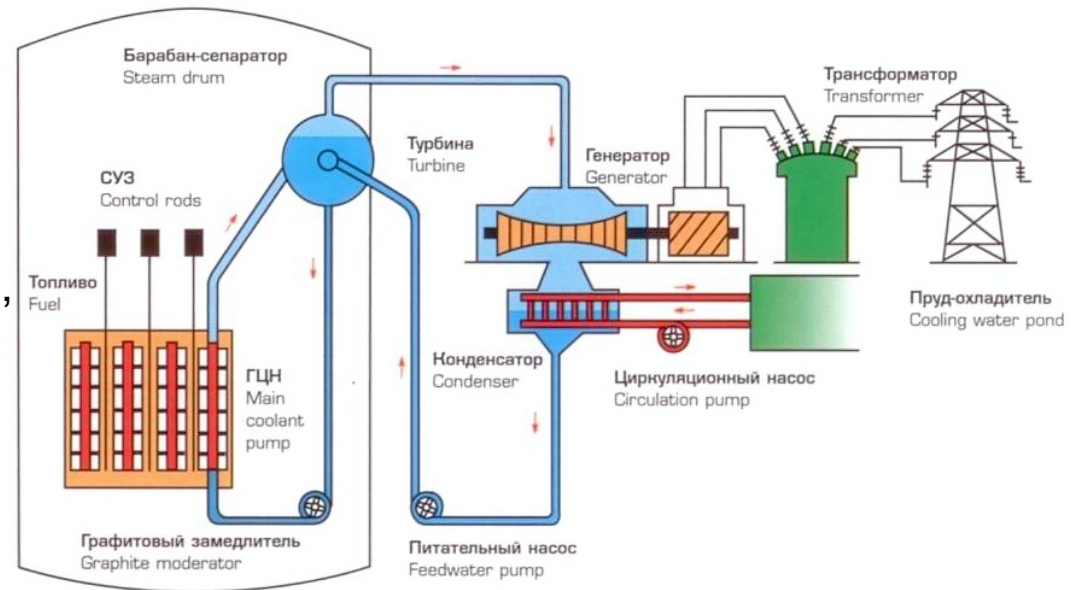
Ο AGR αναπτύχθηκε από την **Magnox**, με γραφίτη επιβραδυντή και ψυκτικό CO₂. Χρησιμοποιούν καύσιμο το **φυσικό** ουρανίου σε μεταλλική μορφή.



Light water graphite-moderated reactor (RBMK)

Σοβιετικού σχεδιασμού,
αντιδραστήρες παραγωγής πλουτωνίου.
Χρησιμοποιεί (7 m μήκος) κάθετους
σωλήνες πίεσης
επιβραδυντής γραφίτης,
ψύχεται με νερό, (στον πυρήνα σε 290° C),
όπως και σε ένα BWR.
Τα καύσιμο είναι το οξειδίο του ουρανίου
χαμηλού εμπλουτισμού.

Реактор РБМК – отпуск электроэнергии потребителю
Reactor RBMK – Electricity to the consumer



Επιβράδυνση οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο σταθερό γραφίτη,
η περίσσεια βρασμού μειώνει απλώς το σύστημα ψύξης και την απορρόφηση νετρονίων,
χωρίς να αναστέλλει την αντίδραση σχάσης.

Δεν έχουν κατασκευαστεί ποτέ έξω από την Σοβιετική Ένωση.

Κύρια ψυκτικά

Νερό ή βαρύ ύδωρ πρέπει να διατηρείται σε πολύ υψηλή πίεση (1000-2200 psi , 7-15 MPa , 150 ατμ.) για να μπορέσει να λειτουργήσει πάνω από 100° C.

Αυτό έχει μια σημαντική επίπτωση στη μηχανική του αντιδραστήρα.

Νερό περίπου στα 25 MPa μπορεί να δώσει θερμική απόδοση 45% (όπως και σε ορισμένους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα) με θερμοκρασίες εξόδου των 600° C,

Σε εξαιρετικά υπερκρίσιμα επίπεδα (30+ MPa) μπορεί να επιτευχθεί και 50 %.

Ψύξη με νερό είναι αρκετά κοινός τρόπος σε όλους τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, επειδή
λειτουργεί πολύ καλά,
είναι **σχετικά φθηνή** και υπάρχει μια **τεράστια εμπειρία**.

Το νερό είναι ένας πολύ πιο αποτελεσματικός από τον αέρα για την απομάκρυνση της θερμότητας.

Κύρια ψυκτικά

Ήλιο πρέπει να χρησιμοποιείται σε παρόμοια πίεση (1000-2000 psi, 7-14 MPa) διατηρεί επαρκή πυκνότητα για αποτελεσματική λειτουργία
Υπάρχουν μηχανικές επιπτώσεις, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον κύκλο Brayton για να οδηγεί απευθείας ένα στρόβιλο.

Διοξείδιο του άνθρακα χρησιμοποιήθηκε στους πρώτους βρετανικούς αντιδραστήρες και στους AGR, οι οποίοι λειτουργούν σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες από ό, τι αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος.

Είναι πυκνότερο από το ήλιο και επομένως πιθανό να δώσει την **καλύτερη απόδοση** θερμικής μετατροπής. Επίσης διαρρέει λιγότερο εύκολα από το ήλιο .

Νάτριο, χρησιμοποιείται συνήθως στους αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων σε περίπου **550° C**, τήκεται στους **98° C** και βράζει στους **883° C** σε ατμοσφαιρική πίεση.

Υψηλή θερμική αγωγιμότητα .

Συνήθως χρησιμοποιείται και ένα δευτερεύον κύκλωμα νερού/ατμού να οδηγεί ένα στρόβιλο (κύκλος Rankine) σε χαμηλότερη θερμική απόδοση.

Το Νάτριο δεν διαβρώνει τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στην επένδυση καυσίμου ή το πρωτεύον κύκλωμα, ούτε το ίδιο το καύσιμο αν υπάρχει βλάβη στην επένδυση, αλλά είναι γενικά **πολύ δραστικό**.

Κύρια ψυκτικά

Μόλυβδος ή μόλυβδος-βισμούθιο ευτηκτικό σε αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων σε υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας.

Διαφανή στα νετρόνια,

Δεν καίγονται, όταν εκτεθούν στον αέρα .

Αλλά είναι διαβρωτικά της επένδυσης των καυσίμων και χάλυβα, η οποία αρχικά περιοριζόταν θερμοκρασίες έως 550° C.

Με τα σημερινά υλικά μπορεί να φτάσει στους 650°C και στο μέλλον 700 ° C, χρησιμοποιώντας ενισχυμένο χάλυβα.

Ένα πρόβλημα είναι ότι το Pb - Bi παράγει προϊόντα που είναι τοξικά, πολώνιο (Po – 210).

Pb-Bi τήκεται σε σχετικά χαμηλή **125 ° C** (ως εκ τούτου ευτηκτικό) και βράζει σε **1670 ° C** , **Pb** τήκεται στους **327 ° C** και βράζει στους **1737 ° C**, αλλά είναι πολύ πιο άφθονο και φθηνότερο από την παραγωγή βισμούθιου, ως εκ τούτου, προβλέπεται για χρήση σε μεγάλη κλίμακα στο μέλλον.

Κύρια ψυκτικά

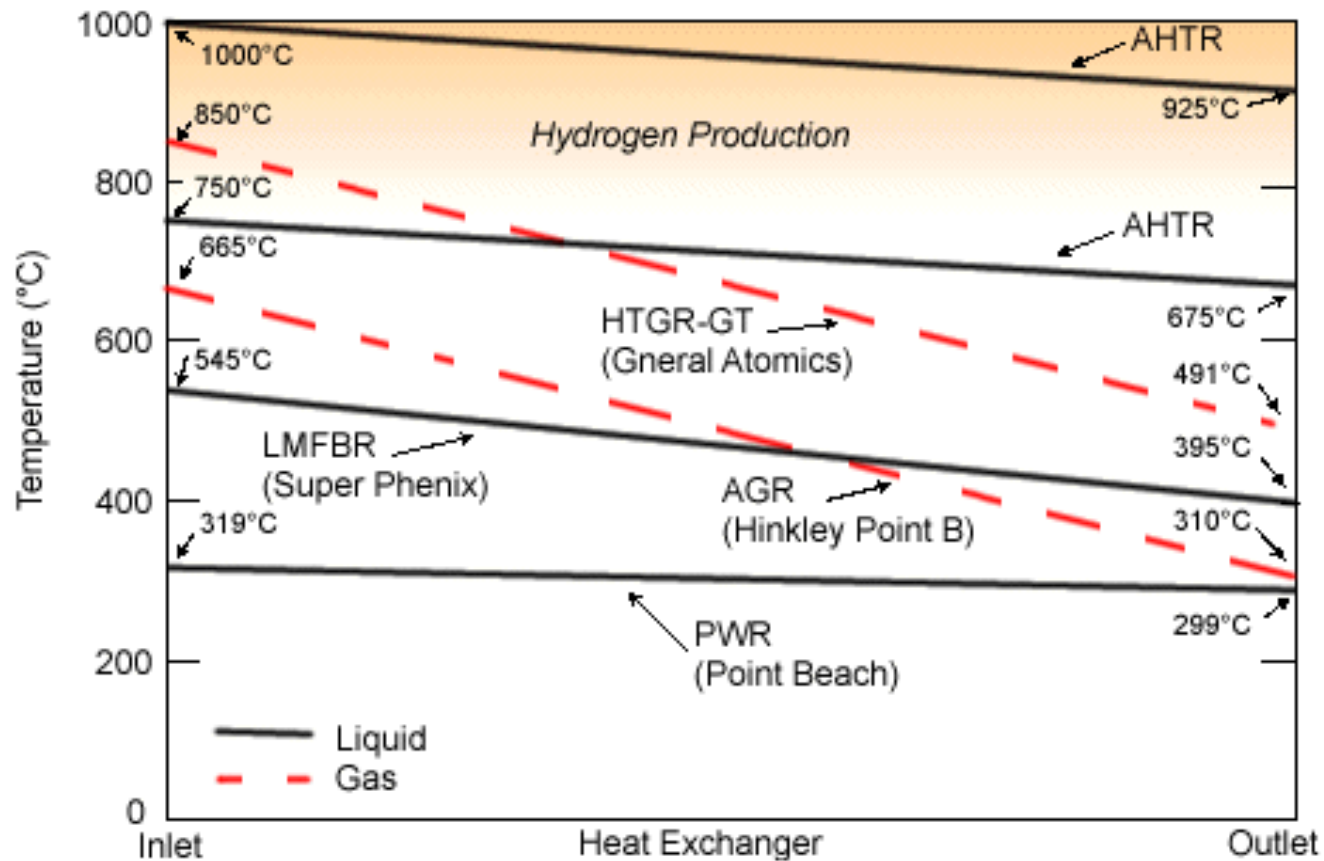
Φθοριούχα άλατα βράζουν σε $> 1400^{\circ}\text{C}$ σε ατμοσφαιρική πίεση, έτσι ώστε να επιτρέψει διάφορες επιλογές για τη χρήση της θερμότητας, συμπεριλαμβανομένης της χρήση ηλίου σε δευτερεύον κύκλωμα με θερμικές αποδόσεις από 48% στους 750°C έως 59 % στους 1000°C .

Φθοριούχα άλατα έχουν πολύ χαμηλή πίεση ατμού ακόμη και σε υψηλή θερμότητα, μεταφέρουν περισσότερη θερμότητα από τον ίδιο όγκο νερού ,
Καλές ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας ,
Χαμηλή απορρόφηση νετρονίων ,
Δεν αντιδρούν βίαια με τον αέρα ή το νερό ,
Αδρανή σε ορισμένες κοινές ενώσεις με μέταλλα.
Άλας λιθίου -βηρυλλίου Li_2BeF_4 φθορίδιο (FLiBe) έχει σημείο τήξεως 459°C και σημείο ζέσεως 1430°C .

Κύρια ψυκτικά

Heat Transfer for Different Primary Coolants

Low-pressure liquid coolants allow more heat to be delivered, at higher temperatures



Forsberg 2002

Αντιδραστήρες IV γενιάς

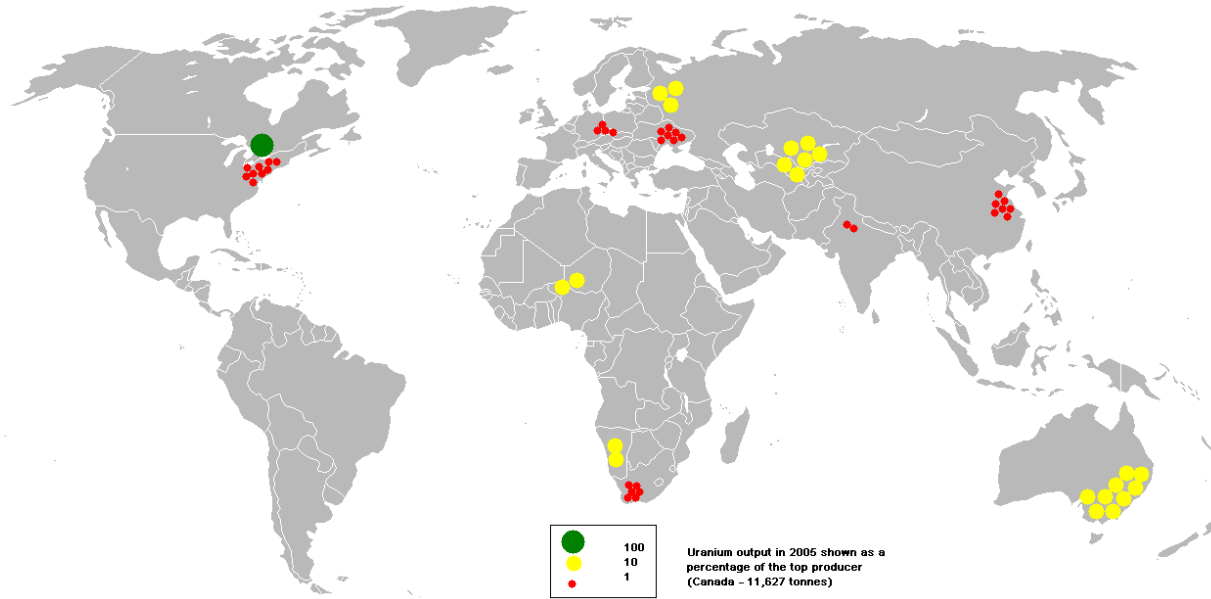
	neutron spectrum (fast/ thermal)	coolant	temperature (°C)	pressure*	fuel	fuel cycle	size(s) (MWe)	uses
Gas-cooled fast reactors	fast	helium	850	high	U-238 +	closed, on site	1200	electricity & hydrogen
Lead-cooled fast reactors	fast	lead or Pb-Bi	480-800	low	U-238 +	closed, regional	20-180** 300-1200 600-1000	electricity & hydrogen
Molten salt fast reactors	fast	fluoride salts	700-800	low	UF in salt	closed	1000	electricity & hydrogen
Molten salt reactor - Advanced High-temperature reactors	thermal	fluoride salts	750-1000		UO ₂ particles in prism	open	1000-1500	hydrogen
Sodium-cooled fast reactors	fast	sodium	550	low	U-238 & MOX	closed	30-150 300-1500 1000-2000	electricity
Supercritical water-cooled reactors	thermal or fast	water	510-625	very high	UO ₂	open (thermal) closed (fast)	300-700 1000-1500	electricity
Very high temperature gas reactors	thermal	helium	900-1000	high	UO ₂ prism or pebbles	open	250-300	hydrogen & electricity

Από που προέρχεται το U ?

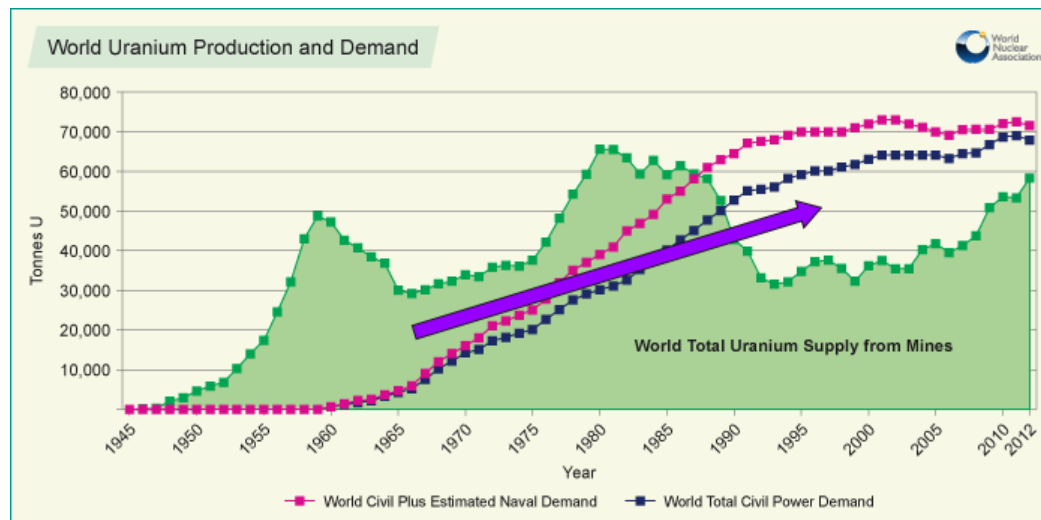
- Το ουράνιο είναι σχετικά κοινό - που βρίσκεται στο θαλασσινό νερό και σε πετρώματα.
- Ήμισυ της παγκόσμιας παραγωγής είναι στον Καναδά και την Αυστραλία σε ανοιχτά ορυχεία ή σχετικά ρηχά ορυχεία.
- Εν συνεχεία αλέθεται - το μετάλλευμα θρυμματίζεται για να σχηματίσει μία λεπτή σκόνη και εκπλένεται με θειικό οξύ για την παραγωγή συμπυκνωμένου U_3O_8 – το οποίο ονομάζεται yellowcake και γενικά έχει περισσότερο από 80% U σε σύγκριση με το αρχικό 0,1%
- Υπόγεια ορυχεία προκαλούν λιγότερη διαταραχή, αλλά χρειάζεται πολύ καλό εξαερισμό για την προστασία από την έκθεση αερομεταφερόμενα ακτινοβολία.
- Απορρίμματα κατεργασίας είναι ραδιενεργά με μακρόβια δράση σε χαμηλές συγκεντρώσεις και επίσης περιέχουν βαρέα μέταλλα. Θα πρέπει να απομονωθούν.
- Όλο και περισσότερο η εξορυκτική βιομηχανία χρησιμοποιεί in-situ έκπλυσης. Εδώ οξυγονωμένο υπόγειο ύδωρ κυκλοφορεί διαμέσου του υπόγειου U για να διαλυθεί το U και να το φέρει στην επιφάνεια.



U Production from mines (tonnes)

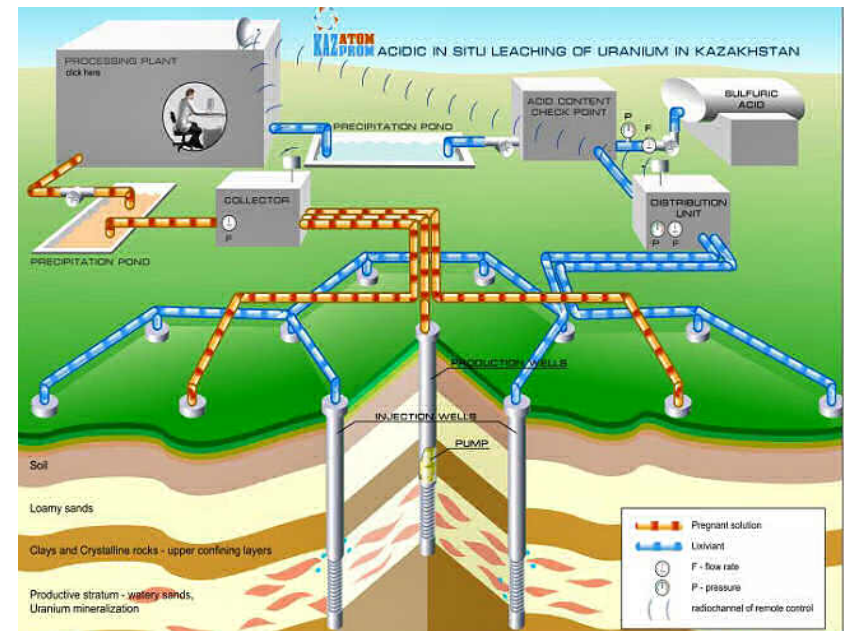
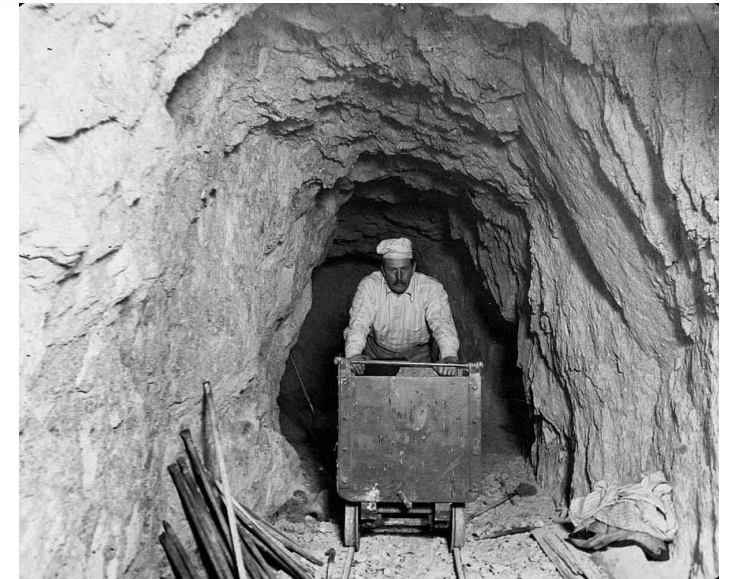


Country	2010	2011	2012
Kazakhstan	17803	19451	21317
Canada	9783	9145	8999
Australia	5900	5983	6991
Niger (est)	4198	4351	4667
Namibia	4496	3258	4495
Russia	3562	2993	2872
Uzbekistan	2400	2500	2400
USA	1660	1537	1596
China (est)	827	885	1500
Malawi	670	846	1101
Ukraine (est)	850	890	960
South Africa	583	582	465
India (est)	400	400	385
Brazil	148	265	231
Czech Republic	254	229	228
Romania (est)	77	77	90
Germany	8	51	50
Pakistan (est)	45	45	45
France	7	6	3
total world	53	53	58
tonnes U₃O₈	671	493	394
percentage of world demand*	78%	85%	86%

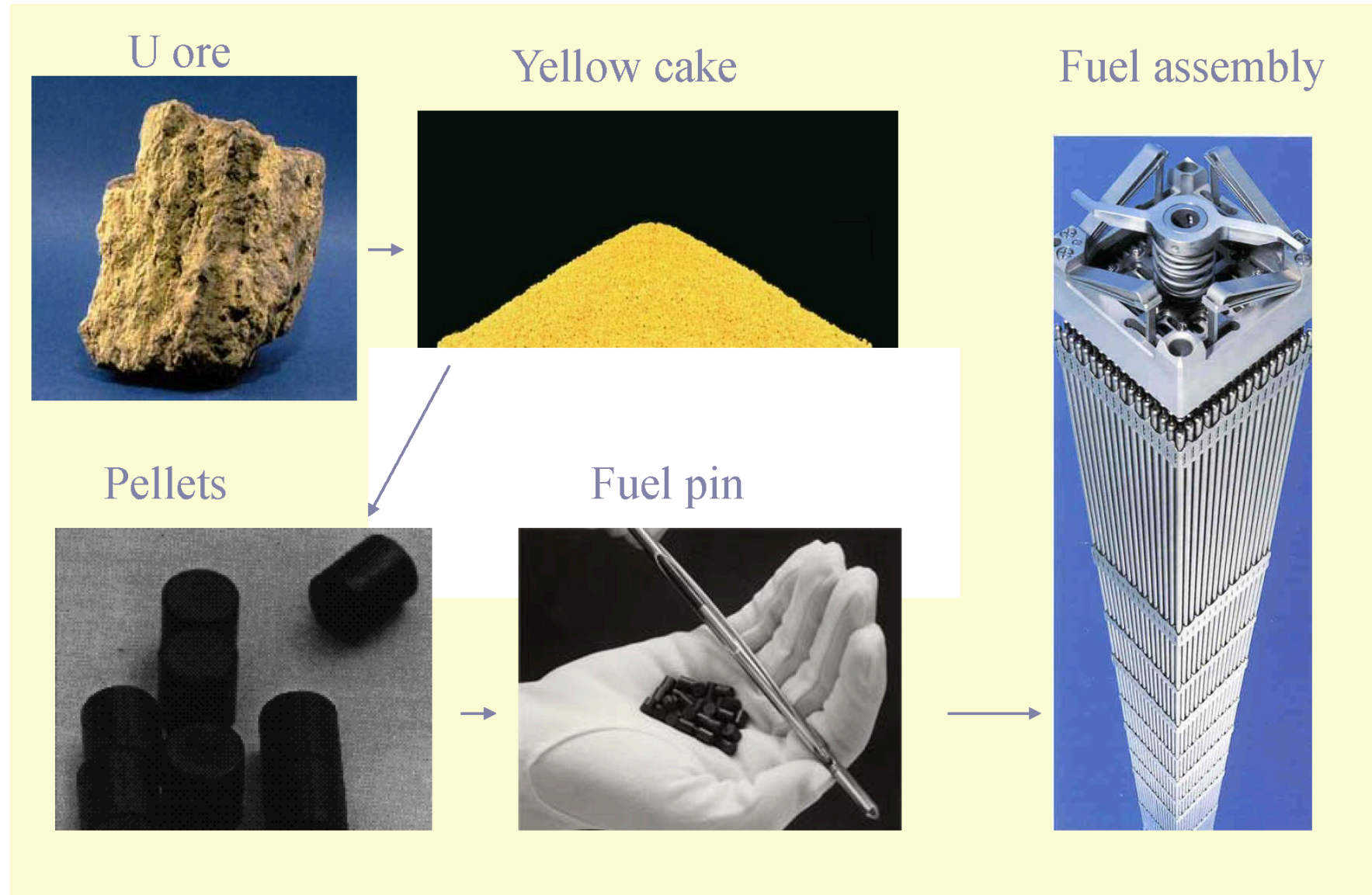


Εξόρυξη Ουρανίου

Method	tonnes U	%
Conventional underground (except Olympic Dam)*	16,324	27.9%
Conventional open pit	11,906	20.4%
In situ leach (ISL)	26,263	45.0%
By-product*	3851	6.6%

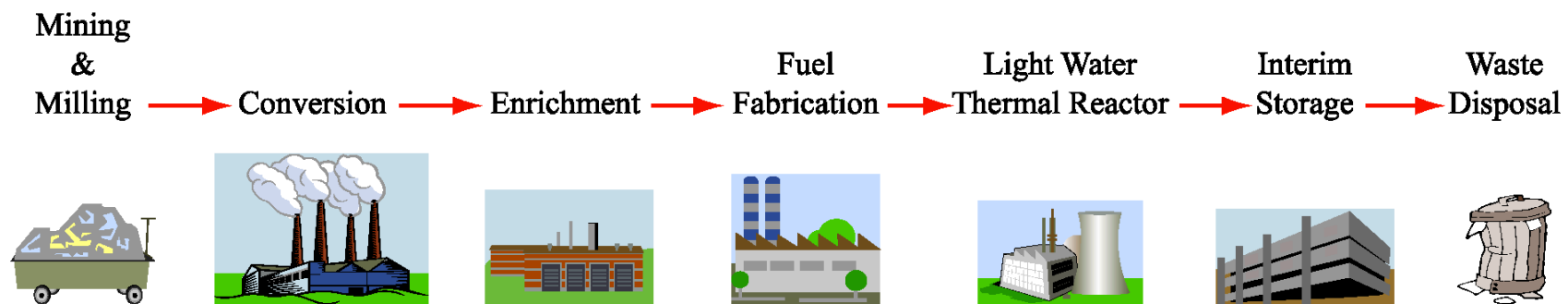


Καύσιμο Ουράνιο



Fuel Cycle Scenarios (1)

Once-through (US current)

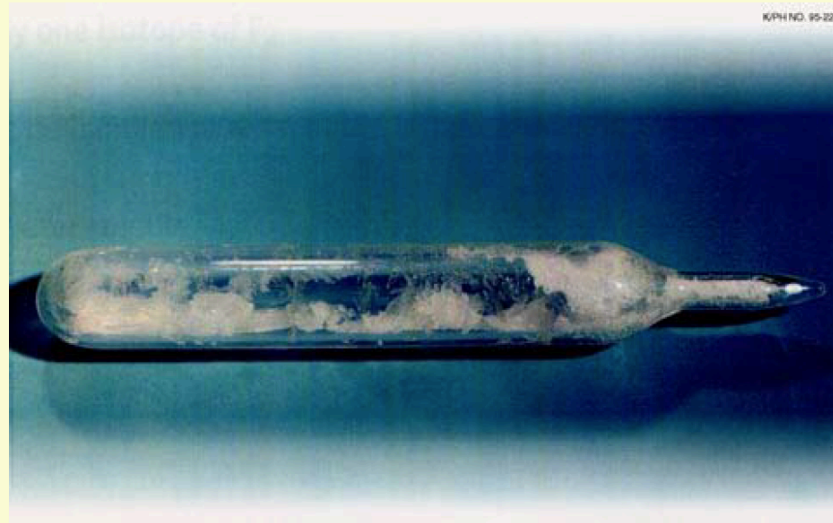


Bellezane, France Site (open pit mine)



Διαδικασία μετατροπής (Conversion Process)

- U_3O_8 converted to UF_6 for enrichment process
- UF_6 : only form of uranium that is gaseous at “industrial” temperatures
 - Gaseous at 133°F (56.1°C)
 - In solid form at room temperature

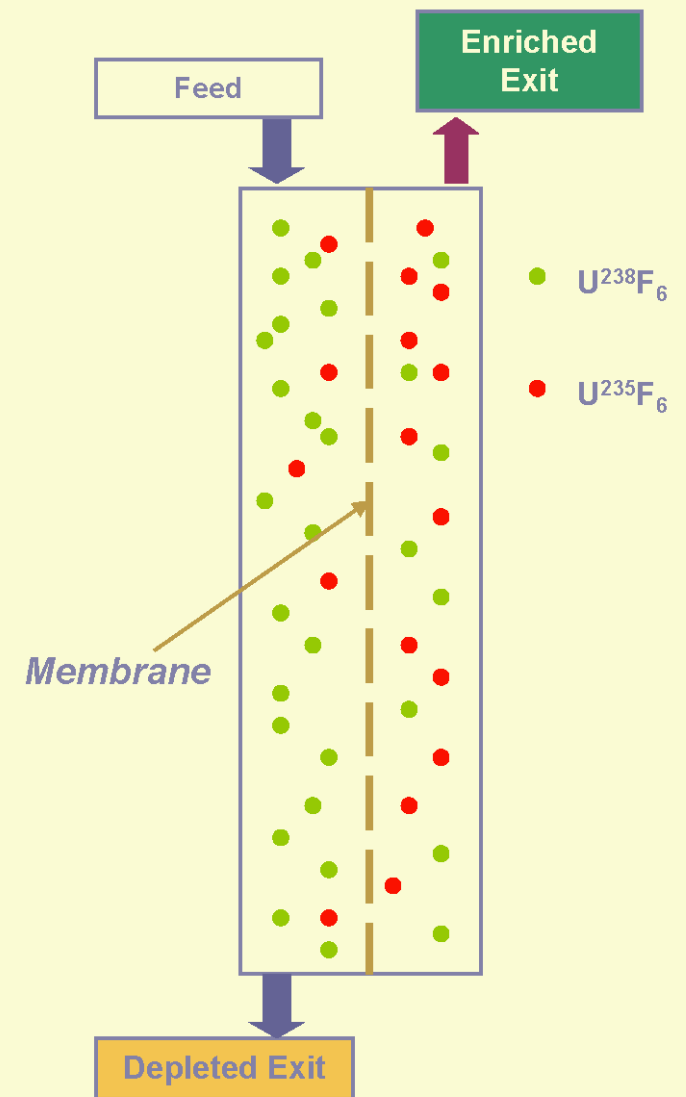


Εμπλουτισμός Ουρανίου

- Two major commercial processes:
 - Gaseous Diffusion
 - Gas Centrifuging
- Can also blend down weapons-grade HEU
 - U.S.-Russian HEU Agreement (“Megatons to Megawatts”) - ~50% of U.S. fuel supply
- Upward price pressure driven by demand
- Priced in Separative Work Units (SWU)

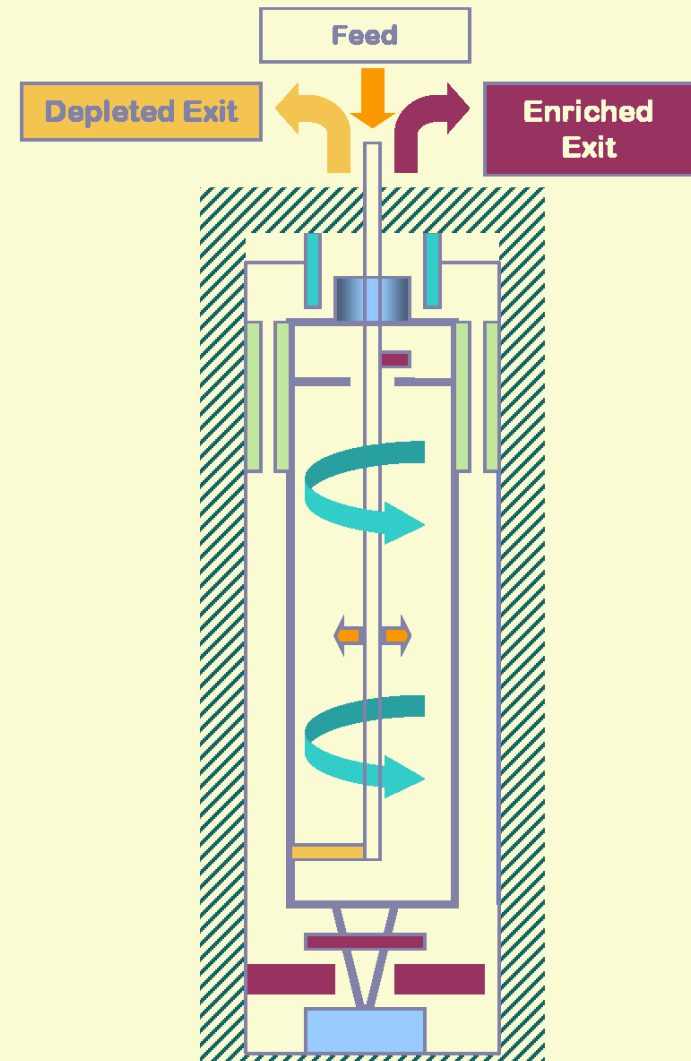
Εμπλουτισμός - Διάχυση

- The UF_6 gas diffuses across a membrane (filter):
 - U^{235}F_6 molecules are smaller, faster: they cross the membrane more often, statistically
 - ➔ This gas is enriched in U^{235}
 - U^{238}F_6 molecules are bigger, slower: they cross the membrane less often, statistically
 - ➔ This gas is depleted in U^{235}



Εμπλουτισμός - Φυγοκέντριση

- The UF_6 gas is centrifuged:
 - U^{235}F_6 molecules are lighter and move preferentially toward the center of the rotor
 - ➔ Red Bale/Gas enriched in U^{235}
 - U^{238}F_6 molecules are heavier and move preferentially toward the periphery of the rotor
 - ➔ Yellow Bale/Gas depleted in U^{235}



Gas Centrifuge Enrichment Facility

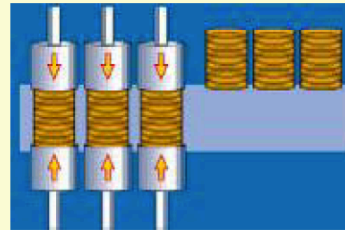


Fuel Fabrication Process

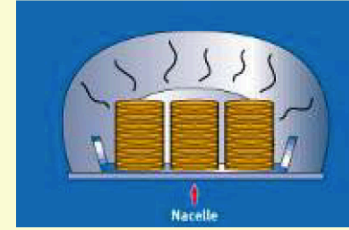
« De-Conversion »



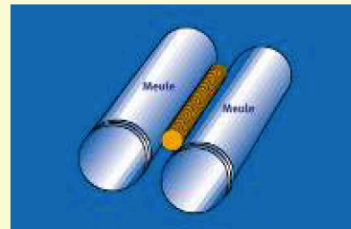
1 *Powder Production*



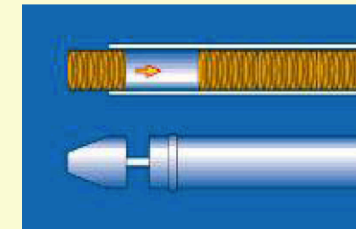
2 *Pressing or pelletizing*



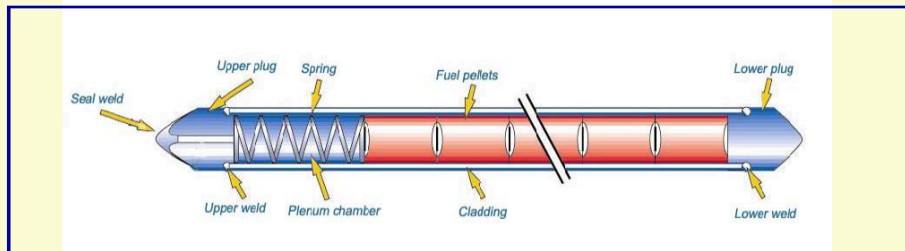
3 *Sintering*



4 *Grinding*



5 *Rod cladding*



Light water reactor fuel rod



6 *Assembly fabrication*

Χρησιμοποιημένα καύσιμα

Τα χρησιμοποιημένα καύσιμα εκπέμπουν ακτινοβολία και θερμότητα.

- A. Ξεφορτώνονται σε μια περιοχή αποθήκευσης δίπλα στον αντιδραστήρα για να διασπαστούν.
- B. Μπορεί να αποθηκευτούν εκεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Μπορεί επίσης να αποθηκευτούν σε ξηρό περιβάλλον που ψύχεται από τον αέρα.

Και τα δύο είδη των αποθήκευσης είναι προσωρινά. Θα πρέπει να υποβληθούν σε επανεπεξεργασία ή αποστέλλονται σε τελική διάθεση. Όσο περισσότερο χρόνο είναι αποθηκευμένο το πιο εύκολο είναι να χειριστούν.

- Μακροχρόνια αποθήκευση → επανεπεξεργασία για να ανακτήσει χρήσιμα καύσιμα και τελική αποθήκευση.
- Επανεπεξεργασία : χωρίζει U και Pu από τα απόβλητα με την κοπή των ράβδων και τη διάλυση αυτών σε οξύ για να διαχωριστούν τα διάφορα υλικά.
- Τυπικό χρησιμοποιημένο καύσιμο: 95% ^{238}U , 1% ^{235}U , 1% Pu και 3% προϊόντα σχάσης, συμπεριλαμβανομένων και άλλα transuranics.
- Η επανεπεξεργασία επιτρέπει την ανακύκλωση των καυσίμων και παράγει ένα σημαντικά μειωμένο όγκο αποβλήτων

Fuel Cycle Scenarios (2)

Thermal Reactor Recycle (France, Germany, Switzerland, Belgium and Japan current, soon in the US)

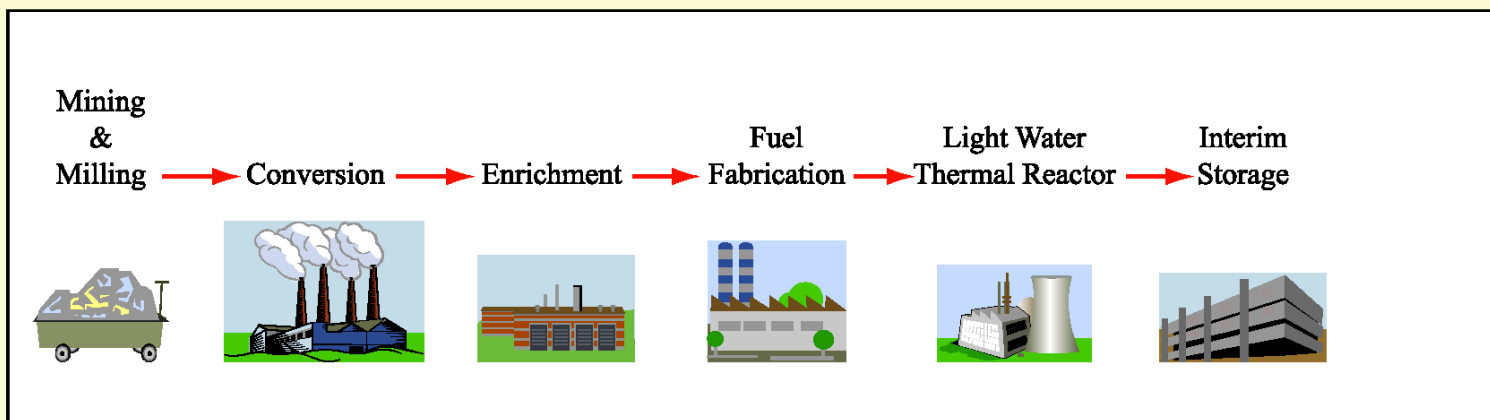
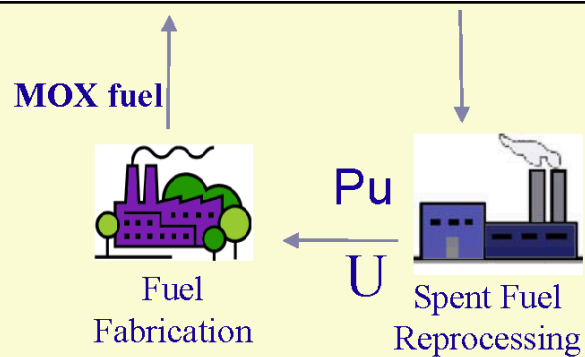


Image by MIT OpenCourseWare.



Fuel Cycle Scenarios

3. Fast Reactor Recycle (demonstration stage in Japan and Russia)

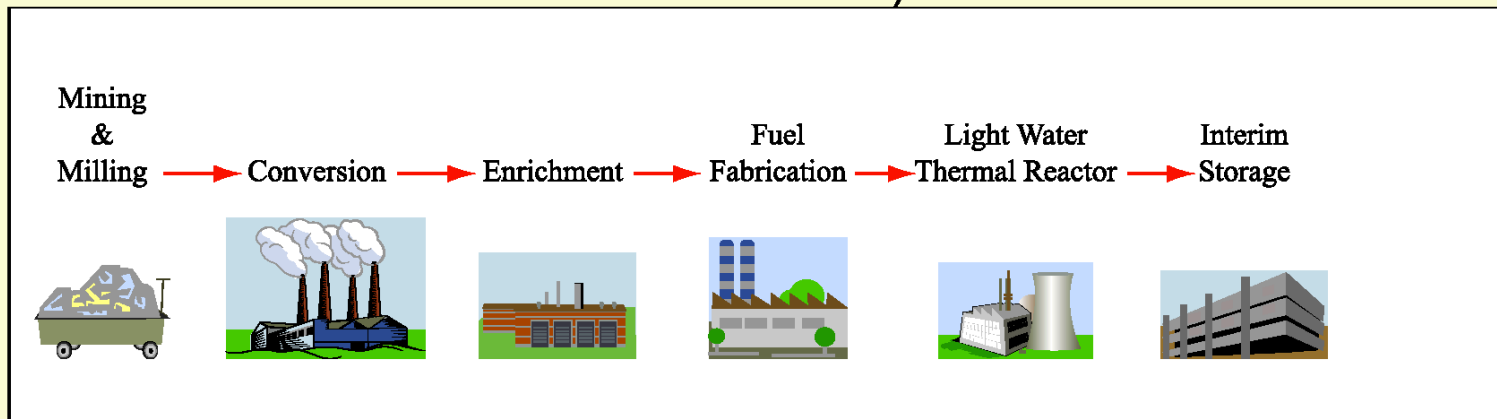


Image by MIT OpenCourseWare.

