Università di Pisa

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione

CIRTEN

Consorzio Interuniversitario per la Ricerca tecnologica Nucleare

Energia nucleare da fissione

G. FORASASSI *W. AMBROSINI*

SOMMARIO

- Energia dai nuclei
- I reattori nucleari
- Principali tipi di reattori
- Filosofia di sicurezza
- Reattori innovativi
- L’energia da fissione oggi

ENERGIA DAI NUCLEI
Alcune tappe storiche importanti

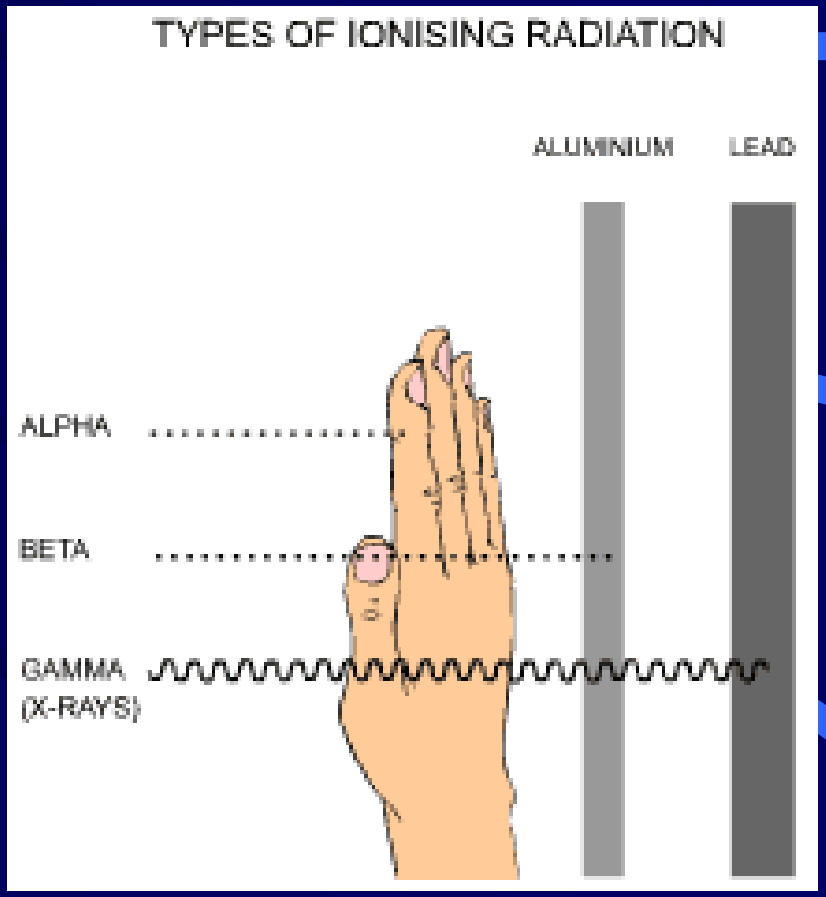
1896: scoperta della radioattività (Becquerel)
1898: Pierre e Marie Curie isolano il Radio
1905: teoria speciale della relatività di Einstein
1911: modello atomico di Rutherford
1913: modello atomico di Bohr
1926: sviluppo della meccanica quantistica (Schrödinger)
1932: scoperta del neutrone (Chadwick)
1934: scoperta della radioattività artificiale (Joliot-Curie)
1938: scoperta della fissione (Hahn e Strassmann)

ENERGIA DAI NUCLEI
La radioattività

- I nuclei degli atomi possono essere “radioattivi”, cioè emettere “radiazioni” che sono di tre tipi:
  - particelle alfa (nuclei di He)
  - particelle beta (elettroni)
  - raggi gamma (radiazioni elettromagnetiche ad alta energia)

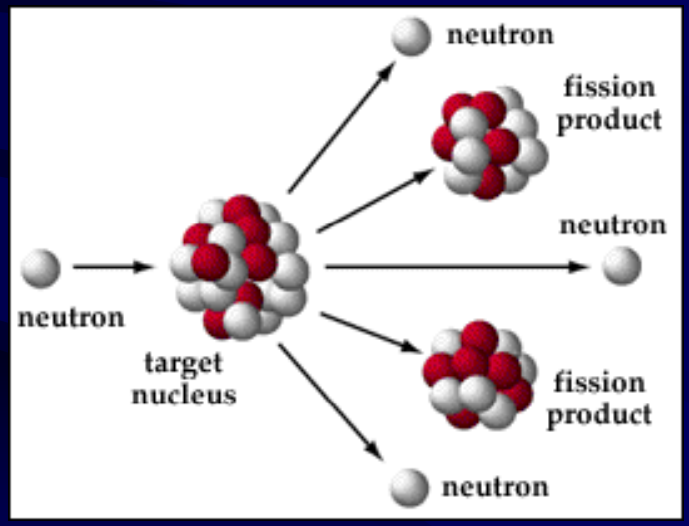
- Il “potere penetrante” di queste radiazioni è diverso e dipende dal meccanismo di interazione con la materia (Linear Energy Transfer)

- La radioattività, che esiste in natura o può essere generata artificialmente, mostrò che i nuclei possono liberare energia



ENERGIA DAI NUCLEI
La fissione e la reazione a catena

- La fissione è una reazione nucleare, cioè che coinvolge i nuclei degli atomi
- Nella fissione, un nucleo pesante (ad es., uranio) si scinde in due nuclei più leggeri, emettendo 2 o tre neutroni



$$E = \Delta m c^2$$

- Poiché la massa dei prodotti di reazione è inferiore a quella del nucleo iniziale e del neutrone incidente, si ha produzione di energia (circa 200 MeV)

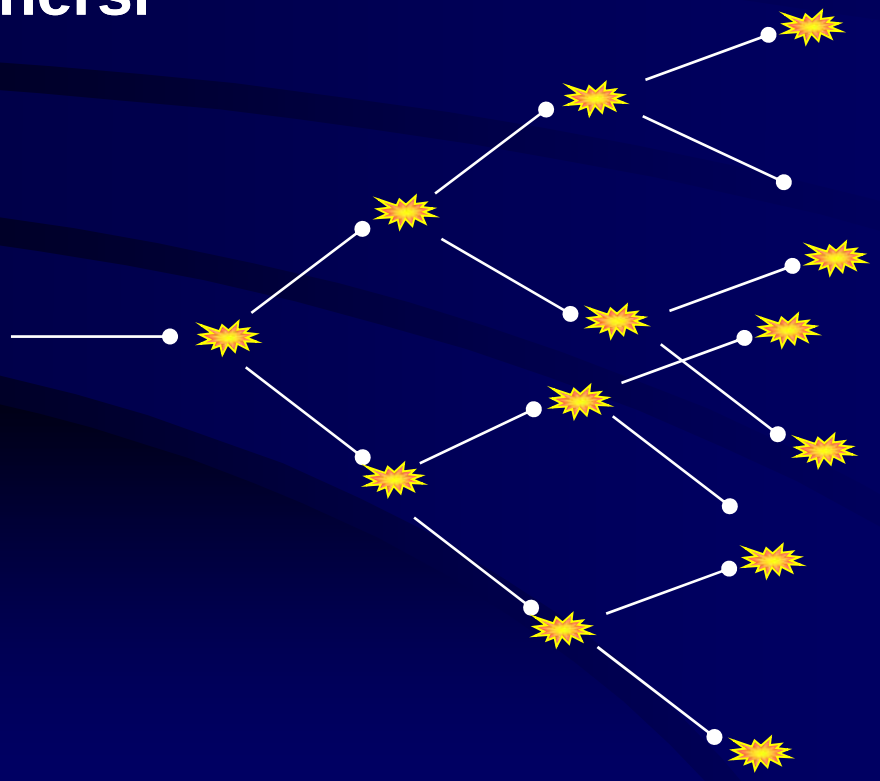
ENERGIA DAI NUCLEI
La fissione e la reazione a catena

- La fissione produce nuclei più leggeri diversi che vengono detti “prodotti di fissione”
- Essi posseggono l’80% dell’energia prodotta dalla fissione sotto forma di energia cinetica
- Tale energia cinetica viene trasformata in calore quando i prodotti di fissione interagiscono con il materiale circostante
- I prodotti di fissione sono radioattivi; emettono quindi radiazioni che a loro volta lasciano parte della loro energia nel materiale sotto forma di calore

LA FISSIONE PUÒ ESSERE QUINDI USATA PER PRODURRE CALORE

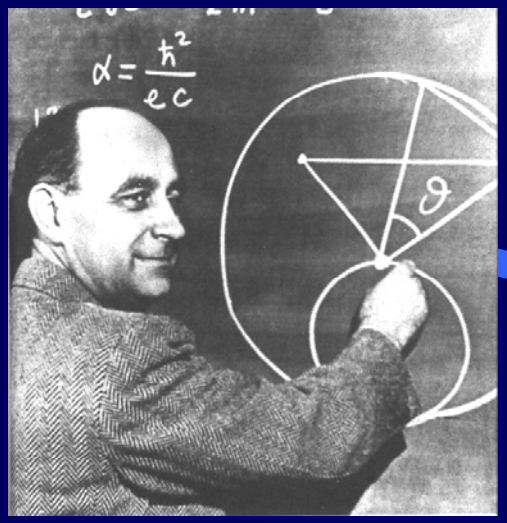
ENERGIA DAI NUCLEI
La fissione e la reazione a catena

- **Poiché la fissione produce anche neutroni, questi possono a loro volta "fissionare" altri nuclei di uranio e così via, producendo una "reazione a catena" che può autosostenersi**



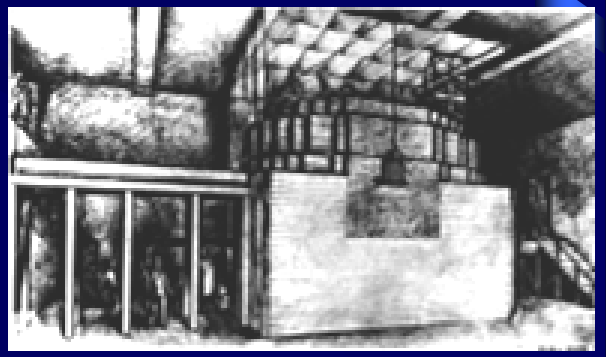
I REATTORI NUCLEARI
La “pila” di Fermi

- Il 2 Dicembre 1942, in un campo di “squash” di Chicago, il primo reattore nucleare del mondo raggiunse la criticità (v. in seguito)



- Il premio Nobel Enrico Fermi, fuggito negli Stati Uniti dall’Italia fascista, era il leader del progetto

- In quel memorabile pomeriggio la “pila” di Fermi, denominata CP-1, funzionò per circa 4.5 minuti alla potenza di 1.5 Watt



I REATTORI NUCLEARI

La “pila” di Fermi

- Quel giorno il gruppo di Fermi riuscì ad ottenere per la prima volta **una reazione di fissione a catena con elementi di uranio sparsi in una matrice di grafite**

- Questo permette di rilasciare quantità di energia molto grandi. Può essere interessante il confronto seguente:
  - **combustibili fossili: ~ 5×10^{7} J/kg**
  - **combustione dell’idrogeno: 1.4×10^{8} J/kg**
  - **fissione dell’U^{235}: 8×10^{13} J/kg**

- La possibilità di controllare la reazione a catena è legata al fatto che i neutroni vengono prodotti come;
  - **“neutroni pronti”** : (quasi immediatamente) la maggior parte
  - **“neutroni ritardati”:**(in tempi più lunghi) **pochi ma con un ruolo molto importante per il controllo del reattore**

I REATTORI NUCLEARI
Come funziona un reattore a fissione

In un reattore nucleare a fissione sono presenti materiali che permettono lo stabilirsi della reazione a catena:

- materiali “fissili”, cioè che fissionano con i neutroni:

U^{235}, Pu^{239}, U^{233}

- materiali di controllo, che assorbono neutroni:

B, Ag-In-Cd

- moderatori, che rallentano i neutroni perché possano più facilmente reagire con il materiale fissile:

H_2O, D_2O, Grafite

- materiali “fertili”, che catturando neutroni si trasformano in fissili

$U^{238} \rightarrow Pu^{239}$, $Th^{232} \rightarrow U^{233}$

- materiali strutturali, necessari a mantenere in posizione le varie parti

I REATTORI NUCLEARI
Come funziona un reattore a fissione

- Nel reattore si deve realizzare l'equilibrio tra:
  - neutroni prodotti dalle fissioni
  - neutroni perduti attraverso la superficie esterna del reattore
  - neutroni catturati dai materiali presenti (fissili e non)

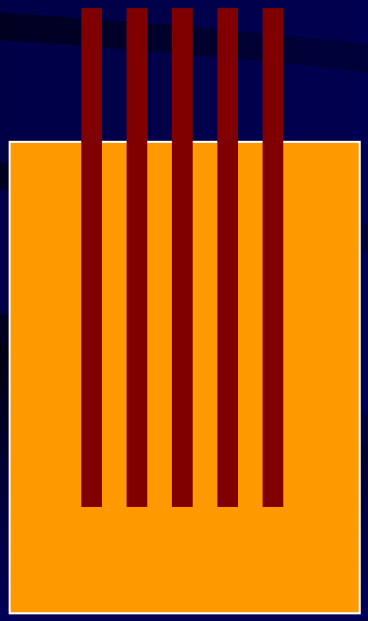
- Il fattore di moltiplicazione effettivo, K_{eff}, è il rapporto tra i neutroni di una "generazione" e quelli della generazione precedente

- Nei reattori nucleari, in condizioni stazionarie, si deve avere $K_{eff} = 1$, come Fermi riuscì ad ottenere nella "pila" CP-1 nel 1942

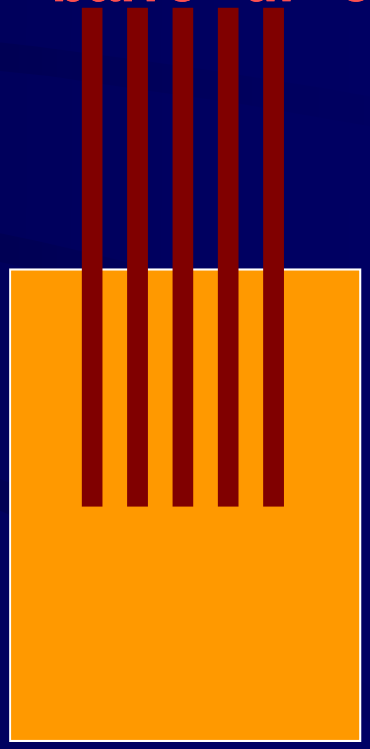
I REATTORI NUCLEARI

Come funziona un reattore a fissione

- Per realizzare questo equilibrio, generalmente, si varia la quantità di materiale assorbitore di neutroni presente nel reattore, ad esempio muovendo le barre di controllo che contengono tale materiale assorbente



più assorbimento



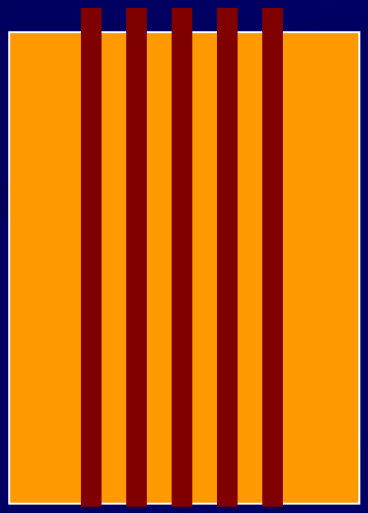
meno assorbimento

I REATTORI NUCLEARI
Come funziona un reattore a fissione

- Il numero di neutroni e, quindi, di fissioni prodotte in un secondo determina la potenza prodotta dal reattore

- Anche dopo lo spegnimento della reazione a catena (SCRAM del reattore con inserimento delle barre di controllo), viene prodotto il calore di decadimento dei prodotti di fissione che deve essere asportato per evitare surriscaldamenti

  - Questo comporta la necessità di avere sistemi di refrigerazione a lungo termine (RHR o Residual Heat Removal)



PRINCIPALI TIPI DI REATTORI

Elettricità dalla fissione

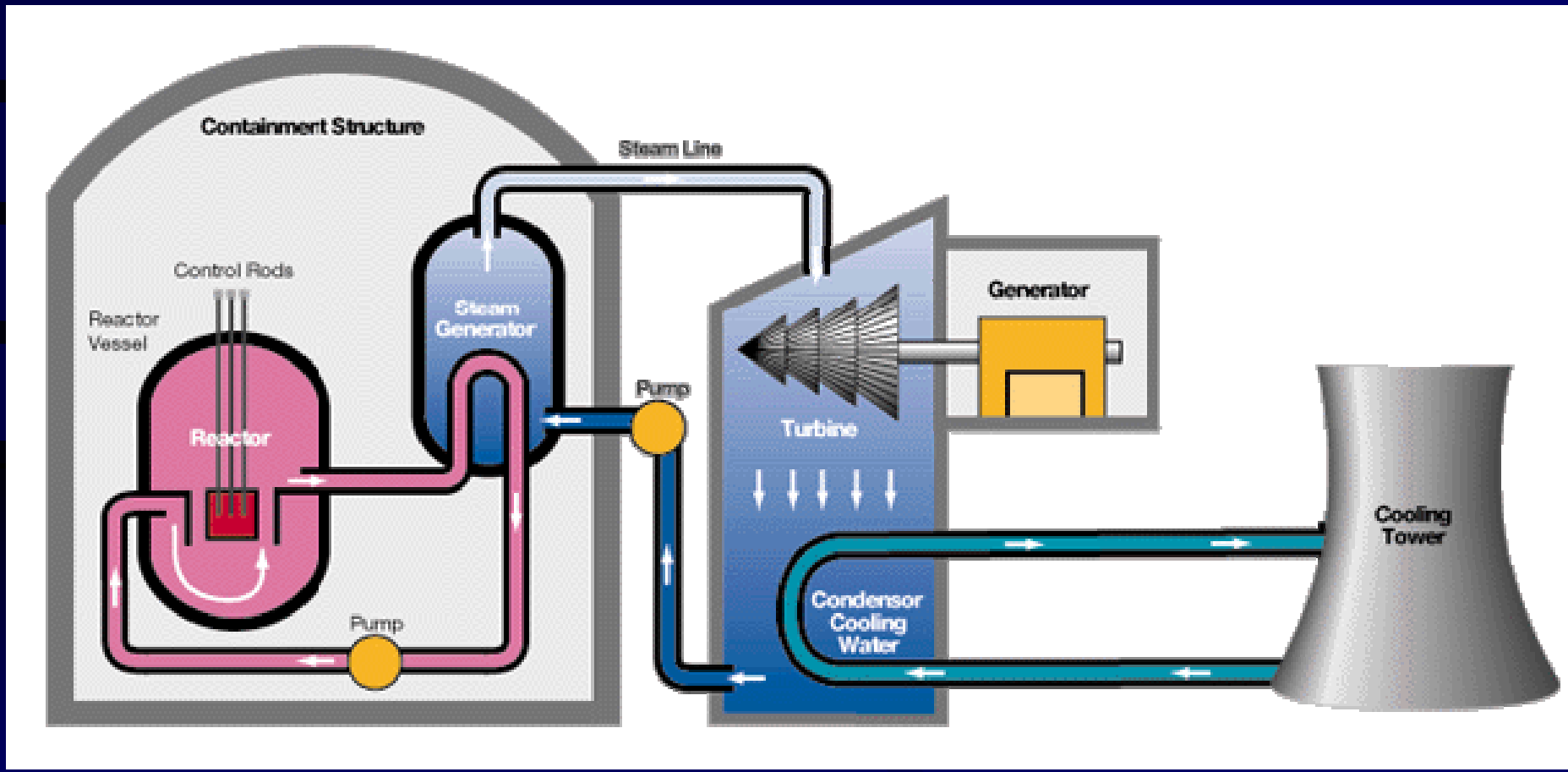
- Visto che la fissione produce calore, le centrali nucleari non differiscono molto da quelle convenzionali:
  - Al posto della caldaia c'è il un Recipiente in pressione (Vessel) al cui interno c'è il "nocciolo" che, a sua volta, contiene elementi di combustibile, barre di controllo, refrigerante, ecc.
  - All'esterno del Vessel è necessario avere un circuito utilizzatore contenente una turbina ed un alternatore per la produzione di energia elettrica

- Poiché contenevano ed utilizzavano materiale radioattivo, le centrali nucleari furono sin dall'inizio progettate con criteri diversi rispetto a quelle termiche

LA SICUREZZA È STATA SEMPRE
IL FATTORE PIÙ IMPORTANTE

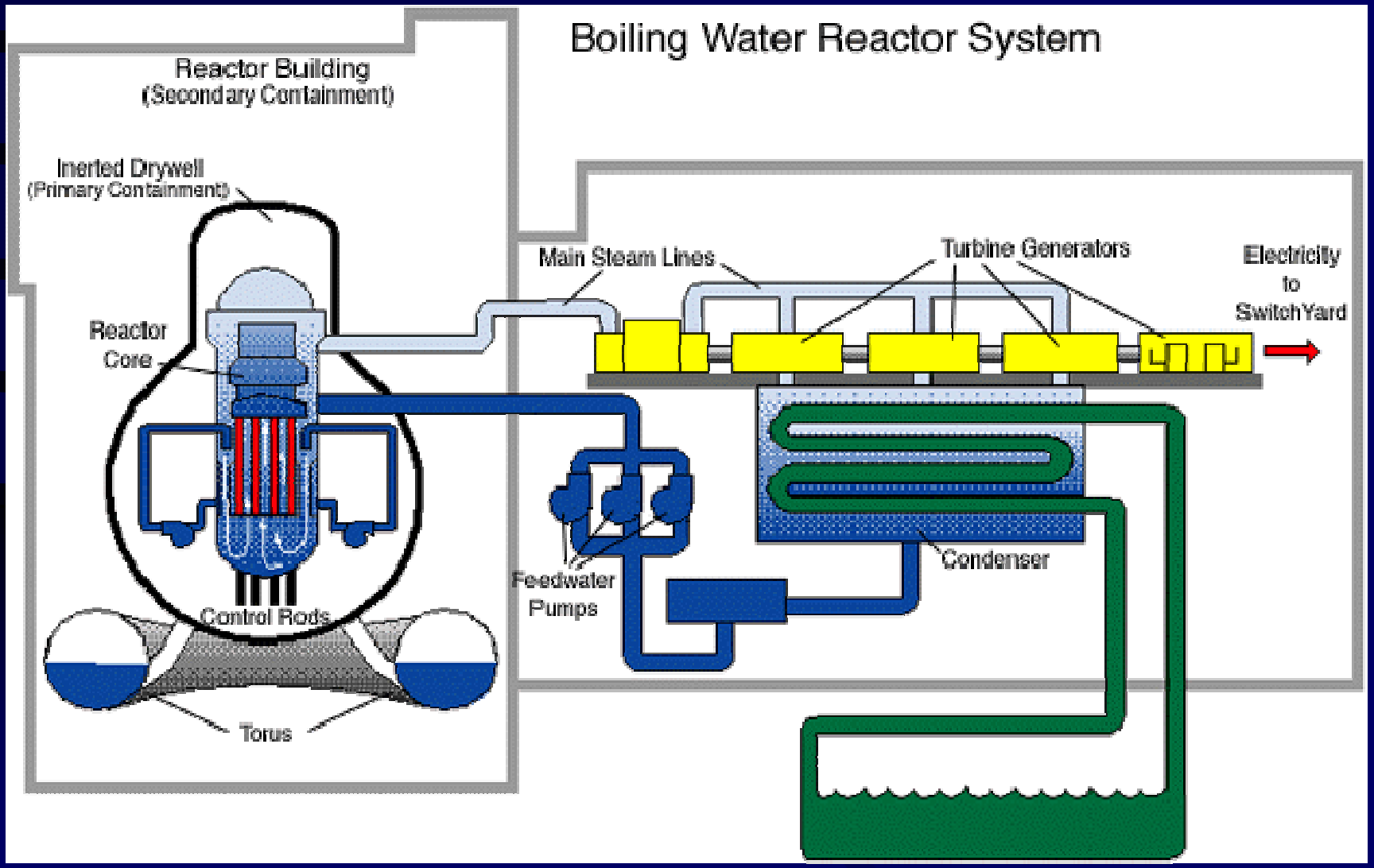
PRINCIPALI TIPI DI REATTORI

Reattori ad acqua leggera in pressione (PWR)



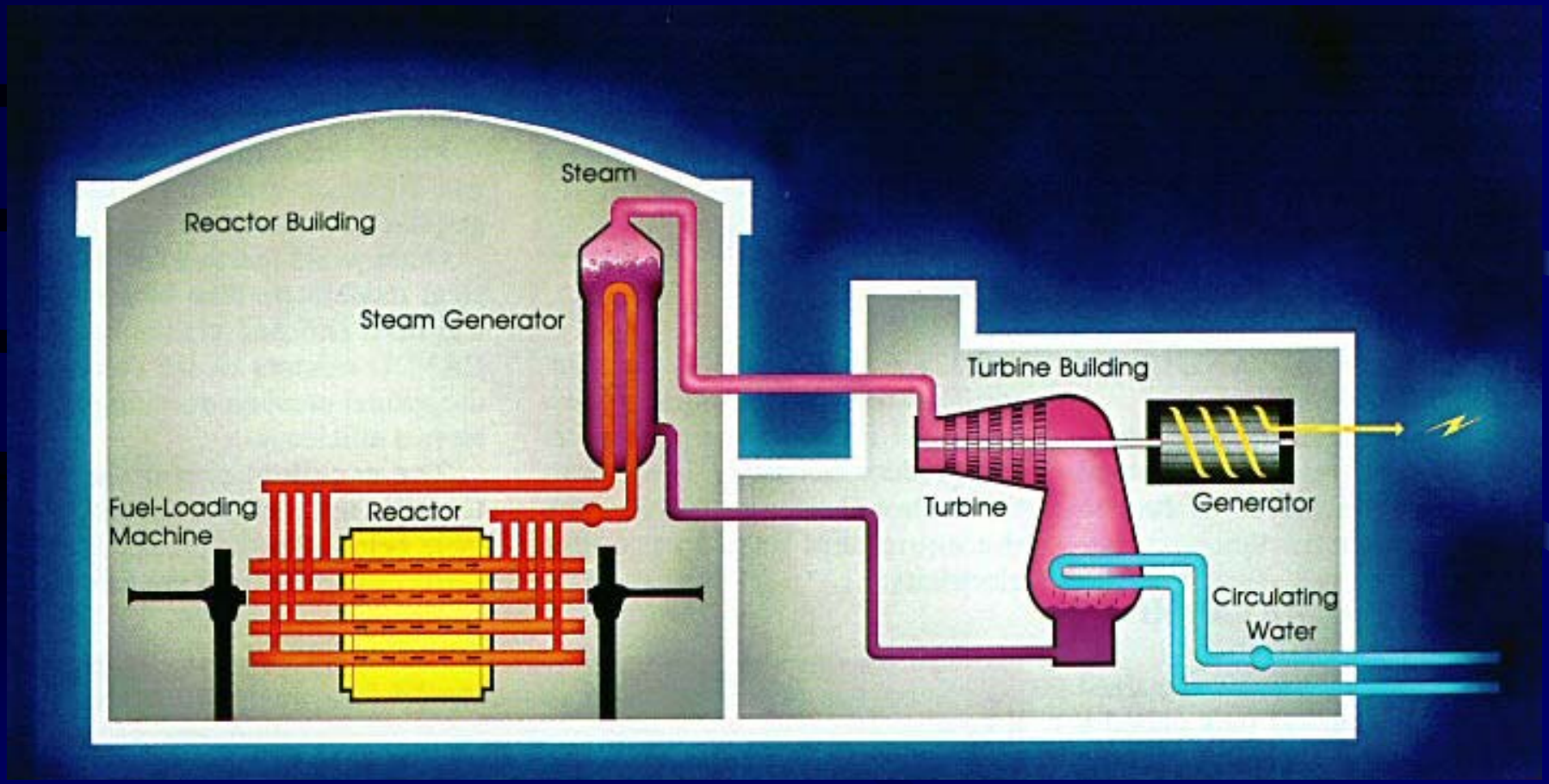
PRINCIPALI TIPI DI REATTORI

Reattori ad acqua leggera bollente (BWR)



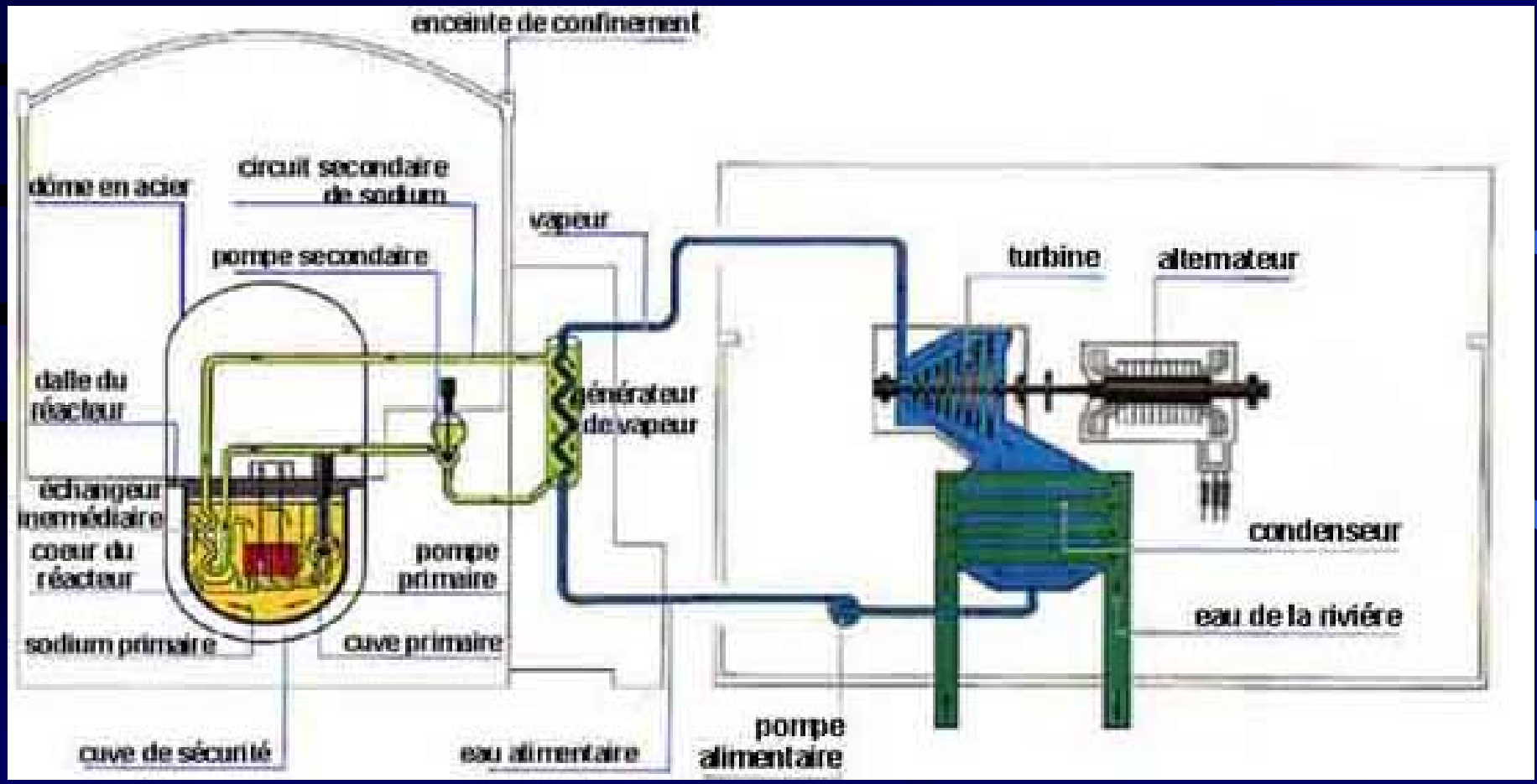
PRINCIPALI TIPI DI REATTORI

Reattori ad acqua pesante canadesi (CANDU)



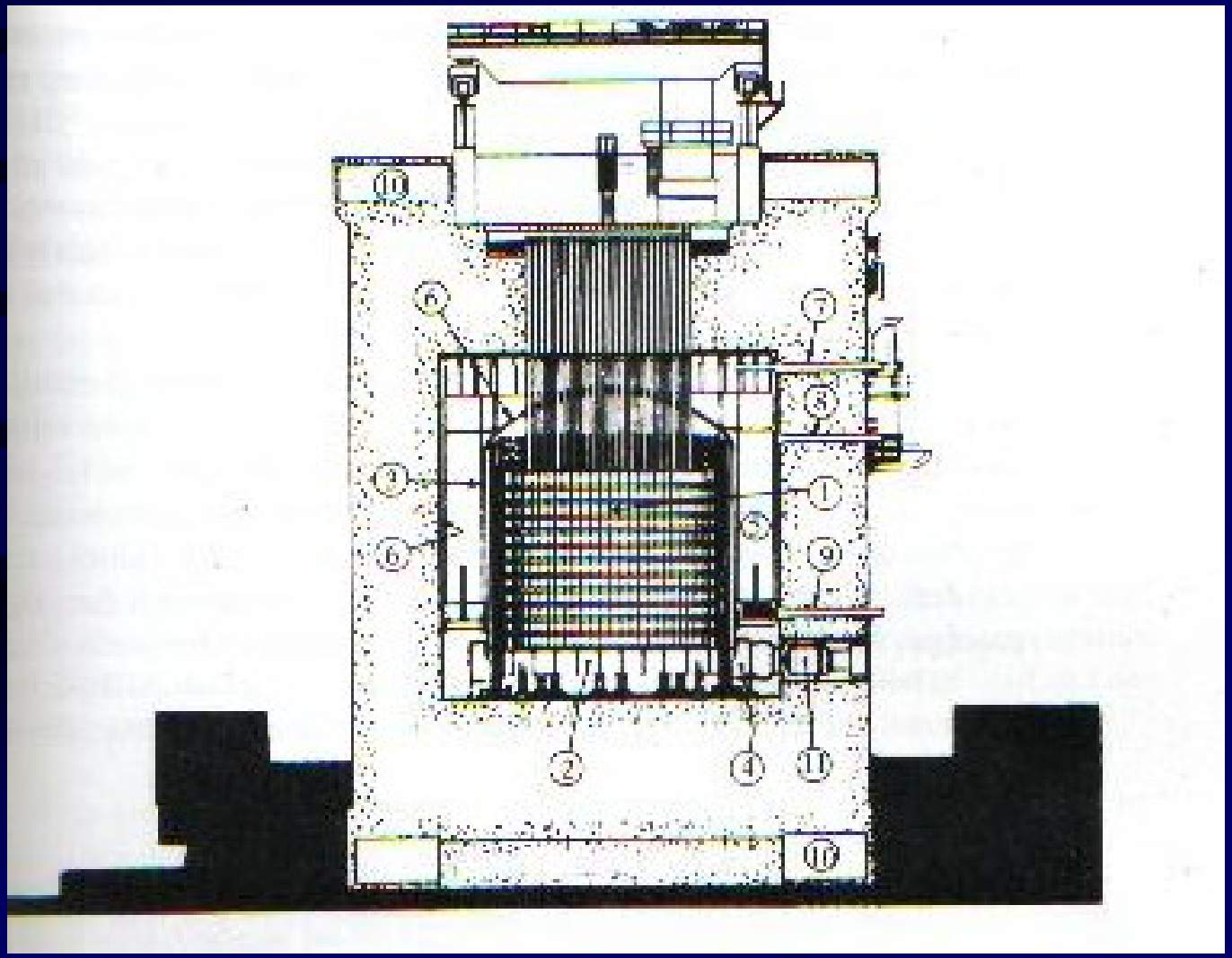
PRINCIPALI TIPI DI REATTORI

Reattori autofertilizzanti refrigerati a metallo liquido (LMFBR)



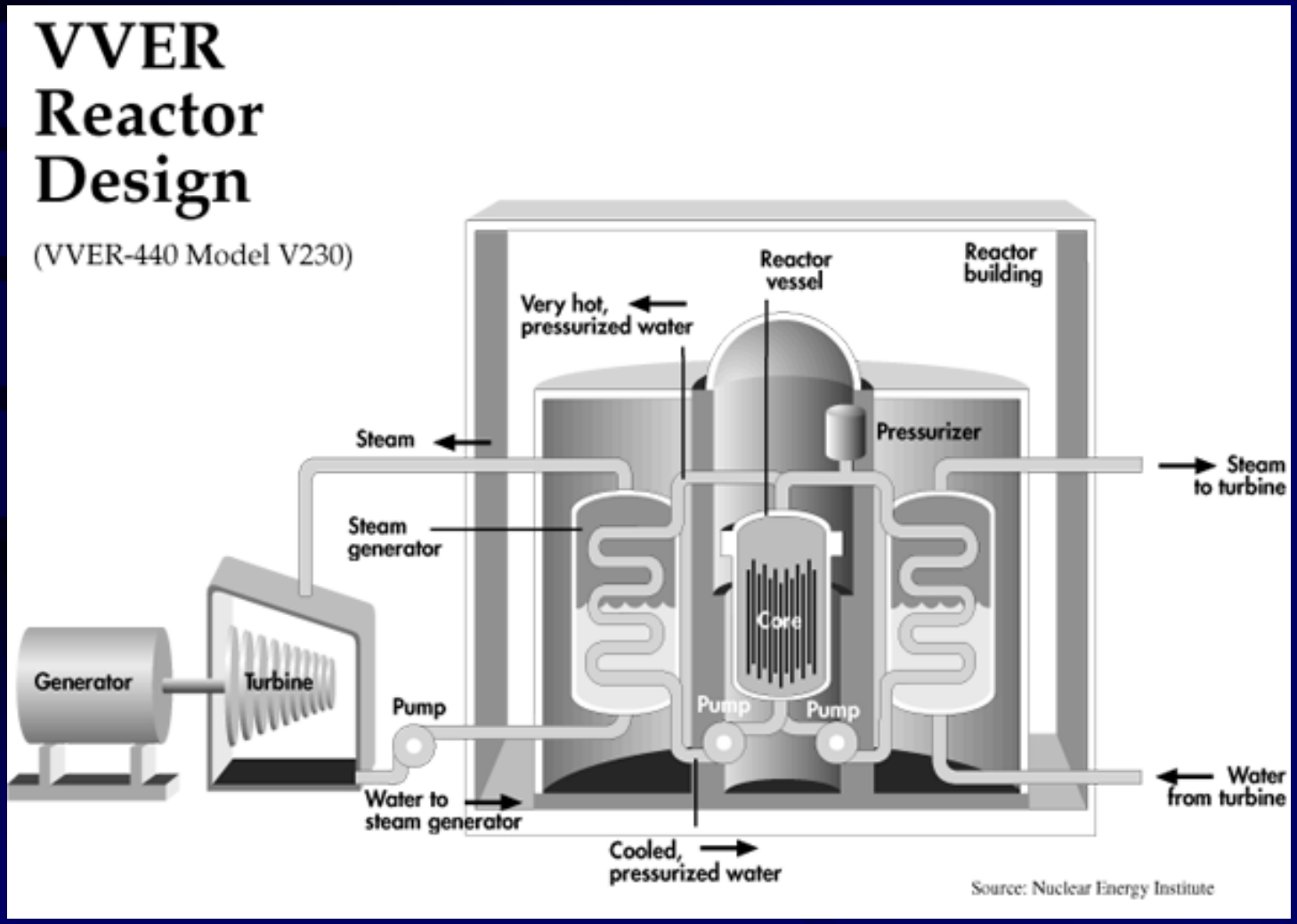
PRINCIPALI TIPI DI REATTORI

Reattori refrigerati a gas e moderati con grafite (AGR)



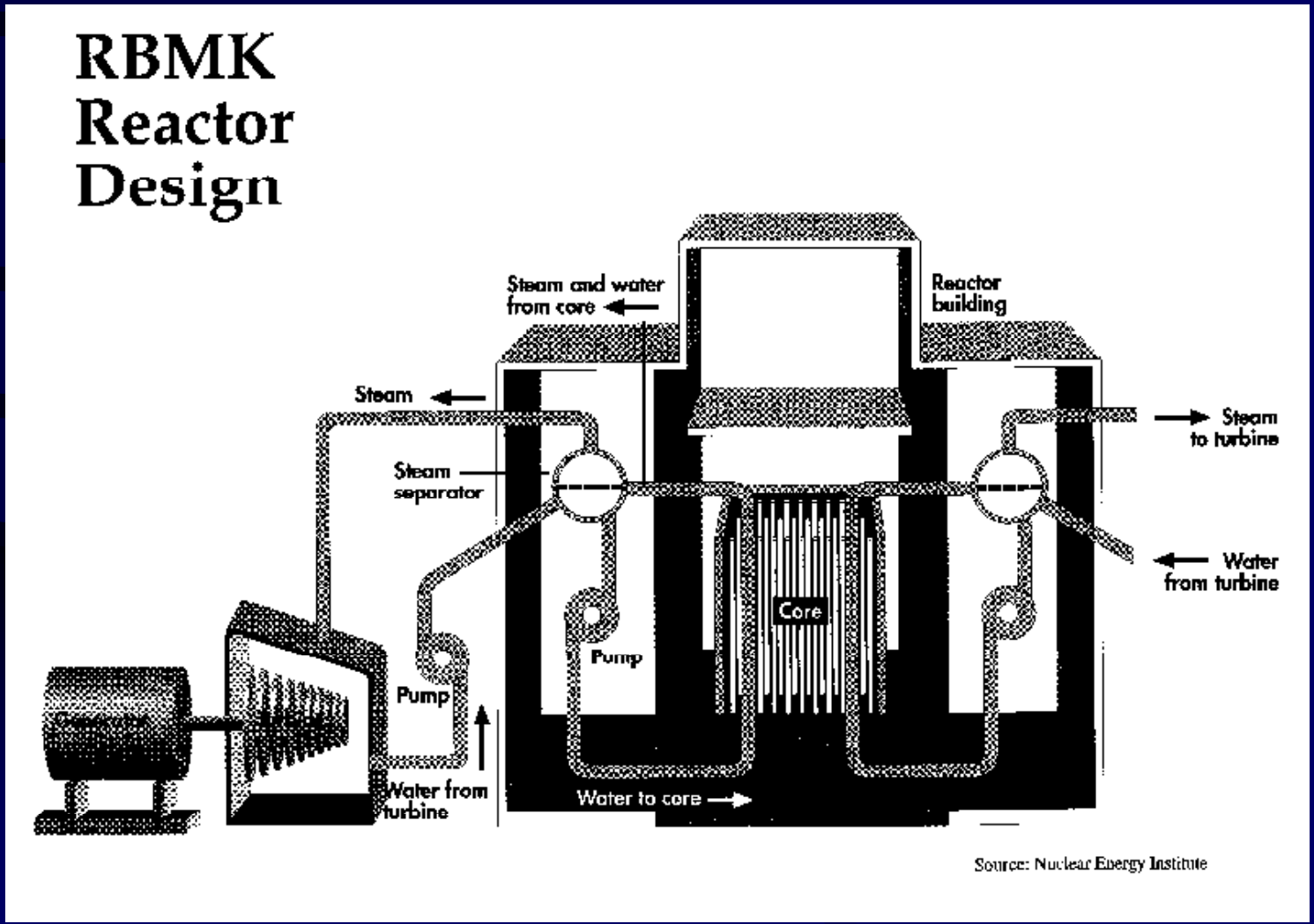
PRINCIPALI TIPI DI REATTORI

Reattori ad acqua leggera in pressione di progetto sovietico (VVER)



PRINCIPALI TIPI DI REATTORI

Reattori refrigerati ad acqua leggera e moderati con grafite di progetto sovietico (RBMK tipo Chernobyl)



Valori Annuali

Source	Amount
Inside the Body (air—radon)	200 millirem
Inside the Body (food and water)	40 millirem
Earth’s Crust (Colorado plateau)	90 millirem
Earth's Crust (Atlantic or Gulf Coast)	23 millirem
Earth's Crust (elsewhere in the U.S.)	46 millirem
Outer Space [Cosmic Rays] (5,000-6,000 feet)	55 millirem
Outer Space [Cosmic Rays] (sea level)	26 millirem
Medical X-Ray (chest)	20 millirem
Living in Stone, Brick, or Concrete Building	7 millirem
Airline Flights (round-trip cross-country)	5 millirem
Airline Flights (per 1,000 miles flown)	1 millirem
Watching Television	1–2 millirem
Computer Terminal	0.1 millirem
Luminous Wrist Watch	0.06 millirem
Coal-Fired Power Plant (living within 50 miles)	0.03 millirem
Nuclear Power Plant (living within 50 miles)	0.009 millirem
Smoke Detector	0.008 millirem

FILOSOFIA DI SICUREZZA
La radioprotezione

- **Organizzazioni nazionali ed internazionali (ad es., la ICRP) deliberano gli "standards" per la protezione contro le radiazioni ionizzanti**

- **In generale, i principi adottati per la protezione dalle radiazioni sono tre:**
  - ***nessuna esposizione deliberata a radiazioni è giustificata senza che ne provenga un beneficio***

    GIUSTIFICAZIONE

  - ***tutte le esposizioni devono essere ridotte al minimo ragionevole ("as low as reasonably achievable")***

    OTTIMIZZAZIONE (ALARA)

  - ***in ogni caso le dosi non devono superare alcuni limiti stabiliti per i vari gruppi di popolazione***

    SI DEVONO RISPETTARE LE DOSI MASSIME AMMISSIBILI STABILITE ESTRAPOLANDO CONSERVATIVAMENTE GLI EFFETTI NOTI AD ALTE DOSI

FILOSOFIA DI SICUREZZA
Progettare in Sicurezza

Difesa in Profondità

1. *Progettare per il massimo di sicurezza in condizioni normali con elevati margini di tolleranza per i possibili malfunzionamenti*

   QUALITÀ, RIDONDANZA, ISPEZIONABILITÀ, TESTABILITÀ, SICUREZZA INTRINSECA, DIVERSIFICAZIONE

2. *Assumere che gli incidenti possano accadere nonostante la cura adottata nel progetto, nella costruzione e nell'esercizio*

   INTRODURRE SALVAGUARDIE PER FRONTEGGIARE GUASTI (ECCS, POTENZA "OFF" e "ON-SITE", SCRAM RIDONDANTE)

3. *Introdurre sistemi di sicurezza aggiuntivi basati sulla valutazione di incidenti ipotetici, nei quali avvenga il guasto simultaneo dei sistemi di protezione*

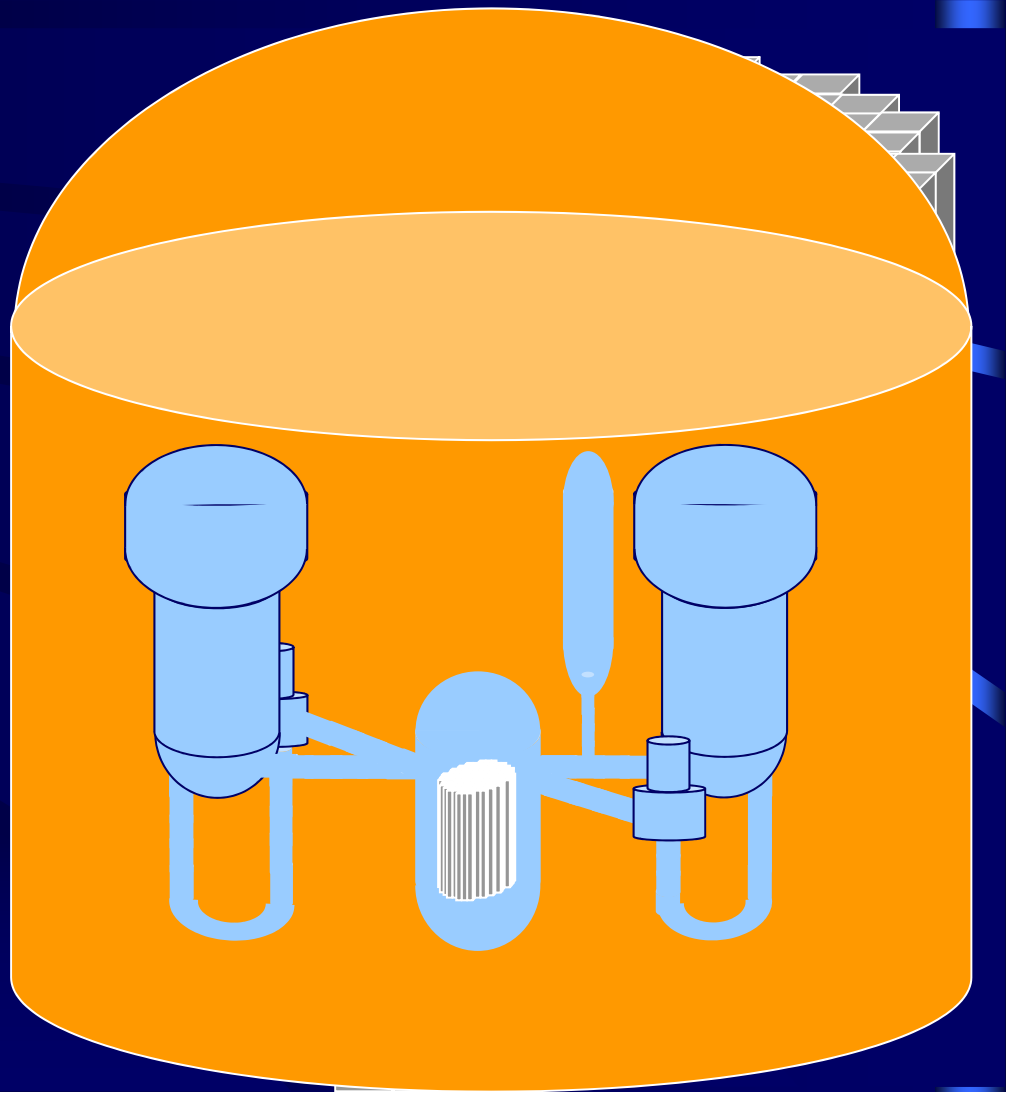
   SALVAGUARDIE AGGIUNTIVE PER FRONTEGGIARE GLI INCIDENTI DI BASE DI PROGETTO

FILOSOFIA DI SICUREZZA
Progettare in Sicurezza

Barriere Multiple

La fuoriuscita di materiale radioattivo viene prevenuta da barriere fisiche:

- **il combustibile**
- **l'incamiciatura**
- **il circuito in pressione del reattore**
- **il sistema di contenimento**



FILOSOFIA DI SICUREZZA
La Localizzazione degli Impianti Nucleari

- La scelta del sito su cui costruire un reattore può avere importanti conseguenze nel caso di possibili incidenti ed è anche rilevante per la distribuzione dell'energia elettrica

- Si devono considerare i seguenti aspetti:
  - la **densità di popolazione**:
    - area di esclusione
    - zona a bassa densità di popolazione
  - la **meteorologia del sito**:
    - la distribuzione dei venti ha influenza sulle conseguenze di un incidente
    - la possibilità che si verifichino piene o trombe d'aria deve essere considerata
  - le **caratteristiche sismiche della regione** (definizione dei TRA e TRB)
  - la **rete stradale**
  - la **disponibilità di un pozzo di calore** (fiume o mare)

FILOSOFIA DI SICUREZZA
Incidenti Considerati nel Progetto

- Il principio di “difesa in profondità” richiede che vengano definiti **incidenti possibili ma, generalmente, altamente improbabili da prendere a riferimento nel progetto del reattore**

- Viene definito un vasto spettro di incidenti; grossolanamente, si considerano due categorie:

  - **Incidenti di Perdita di Refrigerante (LOCAs)**
    - anche quando la reazione a catena è spenta il calore di decadimento deve essere asportato, altrimenti il combustibile si riscalda e fonde
    - si considerano diversi tipi di rottura dalle piccole perdite alla rottura a ghigliottina della tubazione di più grosso, diametro
    - per fronteggiare questi eventi vengono introdotti nell’impianto **sistemi di refrigerazione di emergenza (ECCS)**
  - **Incidenti di Criticità**
    - essi vengono evitati progettando **noccioli intrinsecamente stabili**
    - si utilizzano anche **sistemi multipli di spegnimento della razione a catena (barre, boro liquido)**

I REATTORI INNOVATIVI
Generazioni di Reattori

- La maggior parte dei reattori attualmente in funzione appartiene alla cosiddetta II^{A} Generazione
  - essi fanno uso di sistemi "attivi" di elevata qualità per fronteggiare gli incidenti presi a riferimento nel progetto
  - sulla base del concetto di "difesa in profondità" essi fanno uso anche di sistemi "passivi" (ad es., inserimento delle barre di controllo per gravità)
- I reattori della III^{A} Generazione attualmente proposti sono basati su di una tecnologia simile, ma fanno un uso più esteso di sistemi "passivi" per fronteggiare i possibili incidenti
  - ad es., la circolazione naturale, la convezione e l'irraggiamento per la rimozione del calore residuo, sistemi "fail-safe", ecc.
  - reattori passivi, intrinsecamente sicuri, innovativi sono stati progettati e "licenziati" (AP600, AP1000)
- Una IV^{A} Generazione è allo studio e dovrebbe garantire, se possibile, un più elevato livello di sicurezza a partire dal 2020-2030

I REATTORI INNOVATIVI
Progetti in costruzione ed allo studio

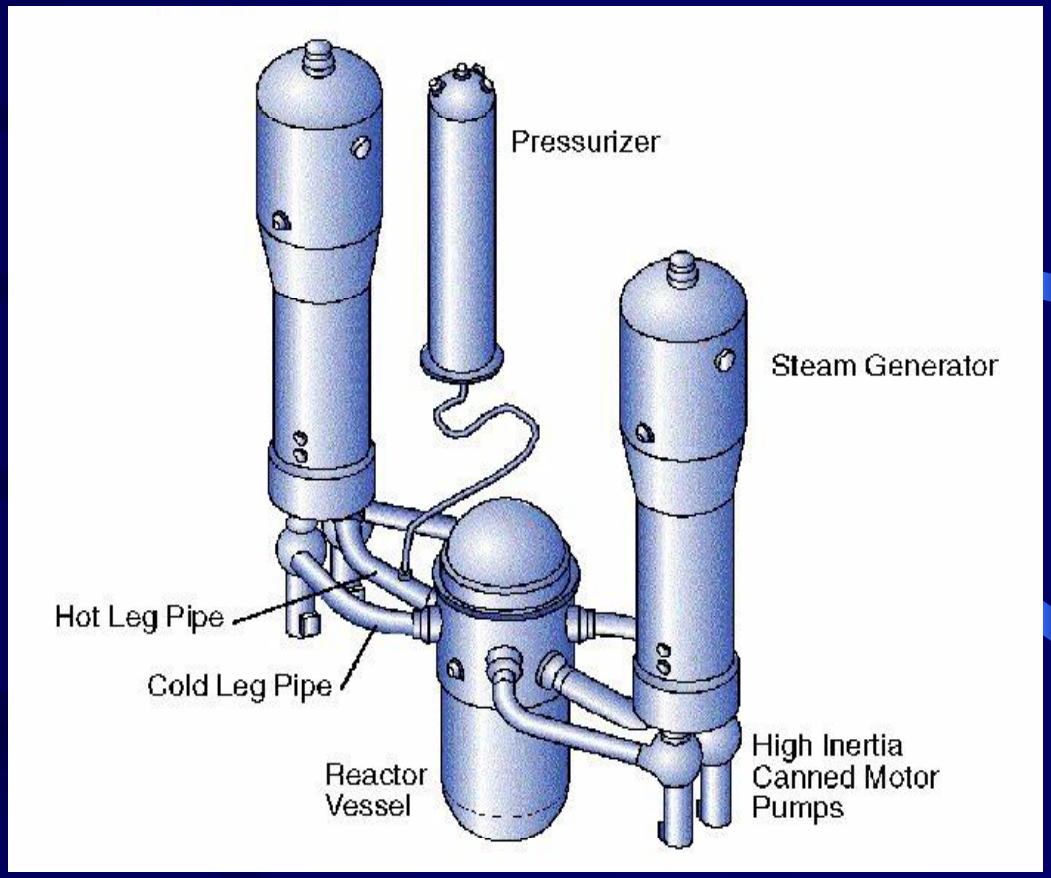
- Nel seguito verranno descritti alcuni dei reattori in costruzione e dei progetti innovativi attualmente allo studio:
  - **l'AP600-AP1000:** un reattore di III^A + Generazione fornito di caratteristiche di sicurezza passiva (in costruzione)
  - **L'EPR:** un reattore di III^A + Generazione con caratteristiche di sicurezza attiva/passiva avanzate (in costruzione)
  - **l'IRIS:** un reattore che dovrebbe essere disponibile a partire dal 2012-2015, che impiega un approccio detto di **"safety-by-design"**
  - **Accelerator Driven Systems (ADS):** reattori proposti come "inceneritori" di scorie a lungo tempo di dimezzamento
  - **Reattori refrigerati a gas ad alta temperatura:** funzionanti sia con neutroni termici che veloci per produzione di energia, H2, desalinizzazione, etc

- Molti altri tipi di reattori sono stati proposti o sono attualmente considerati per il loro possibile impiego

I REATTORI INNOVATIVI
WESTINGHOUSE AP600 - AP 1000

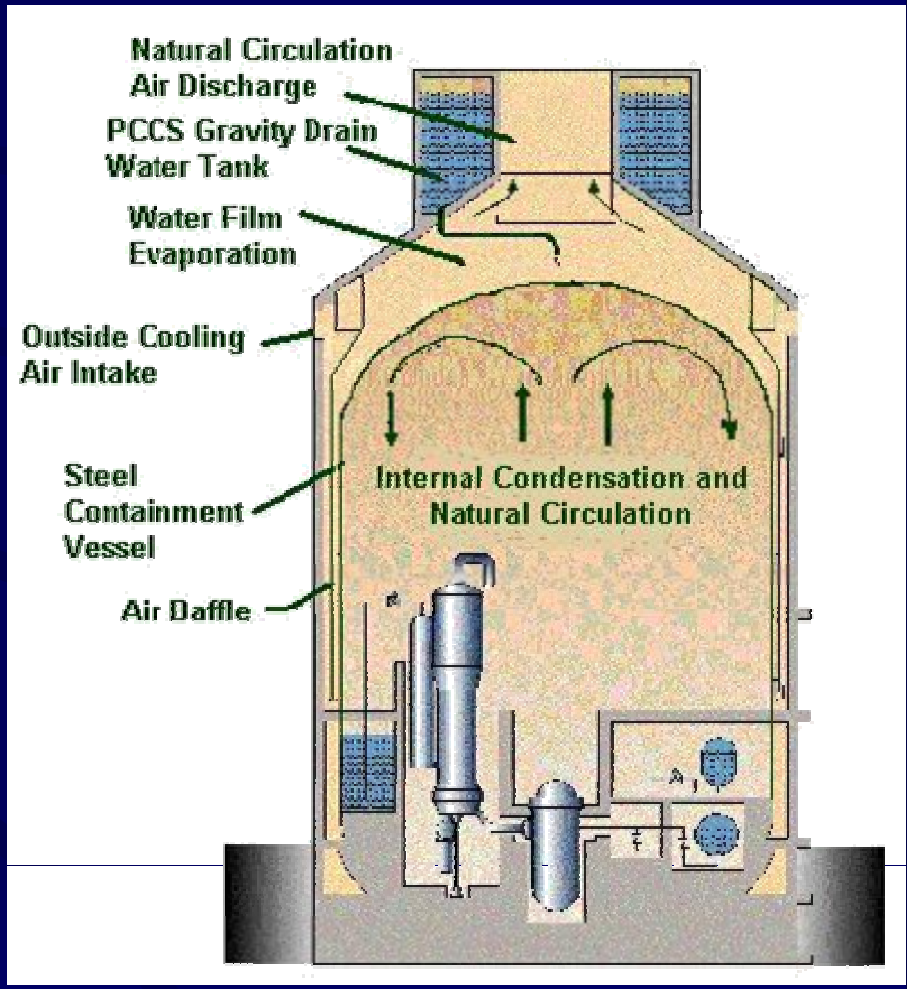
- E’ un reattore della Westinghouse con molti dispositivi di tipo passivo

- E’ basato su di una tecnologia “provata”
  - potenza di 600 MWe
  - due circuiti
  - ridotta densità di potenza del reattore
  - sistema passivo di rimozione del calore residuo



I REATTORI INNOVATIVI
WESTINGHOUSE AP600 – AP 1000

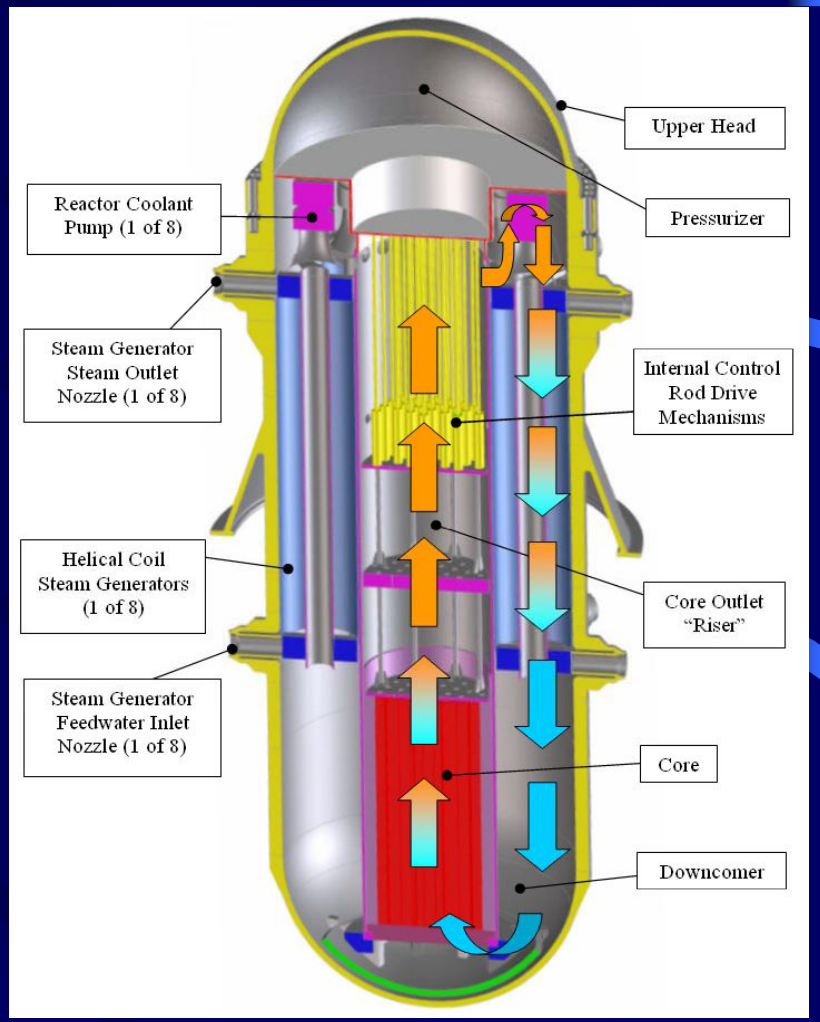
- E’ un reattore con molti dispositivi passivi e di tipo provato, della potenza di 600-1000 Mwe, .
- Il sistema di contenimento è progettato per eliminare il calore residuo per mezzo di sistemi passivi in seguito ad un LOCA e per resistere agli effetti di eventi accidentali esterni
  - La condensazione del vapore sulla superficie interna e convezione naturale ed evaporazione sulla superficie esterna del contenitore di sicurezza



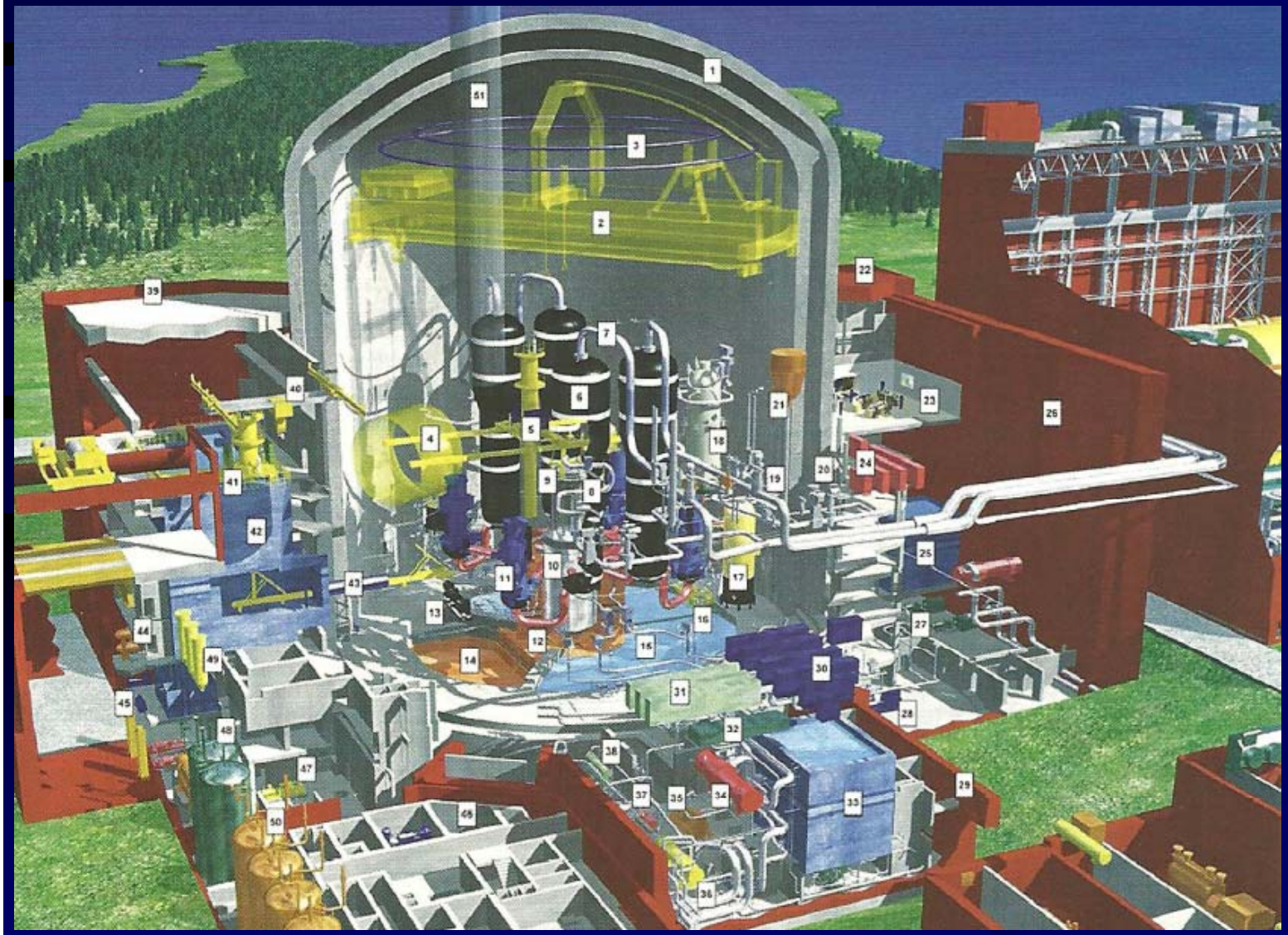
I REATTORI INNOVATIVI
WESTINGHOUSE IRIS

- Si tratta di un reattore di tipo integrale sviluppato da un consorzio internazionale, di cui fa parte il CIRTEN.

- La configurazione integrale è un aspetto essenziale dell'approccio di **"safety-by-design"**: la maggior parte delle sequenze di perdita di refrigerante è automaticamente evitata.



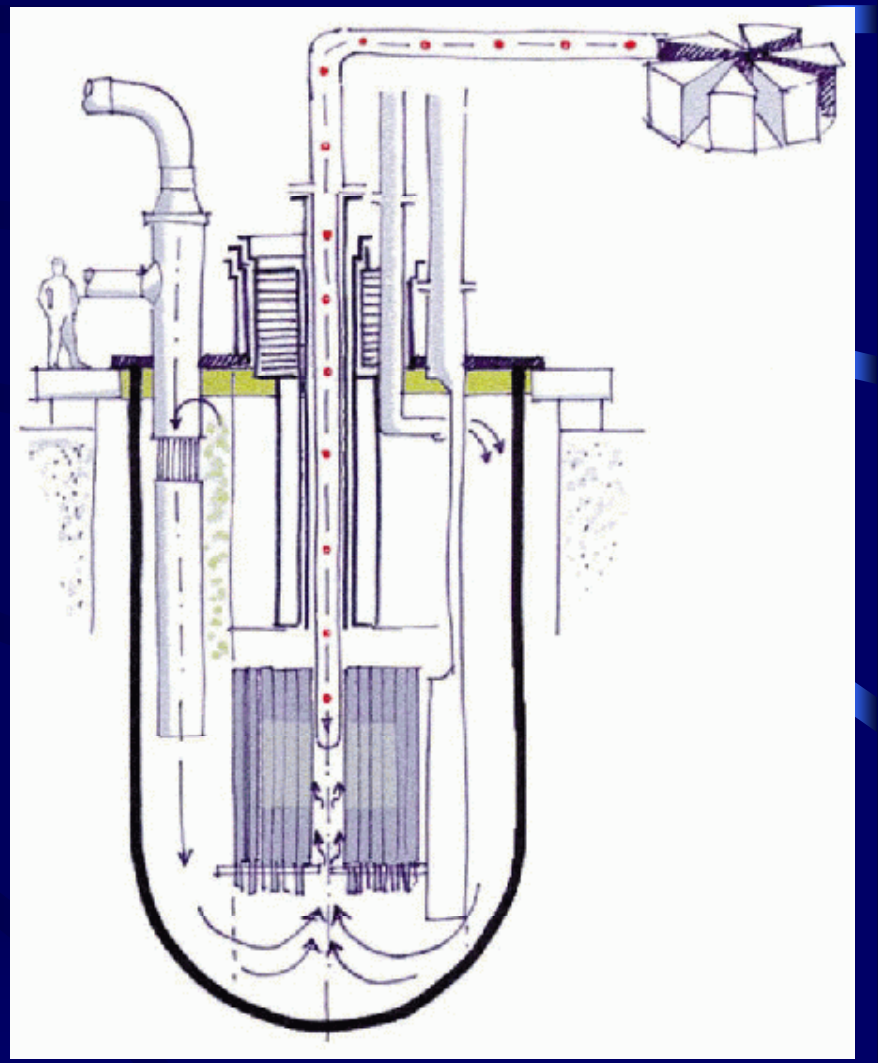
I REATTORI INNOVATIVI
AREVA EPR



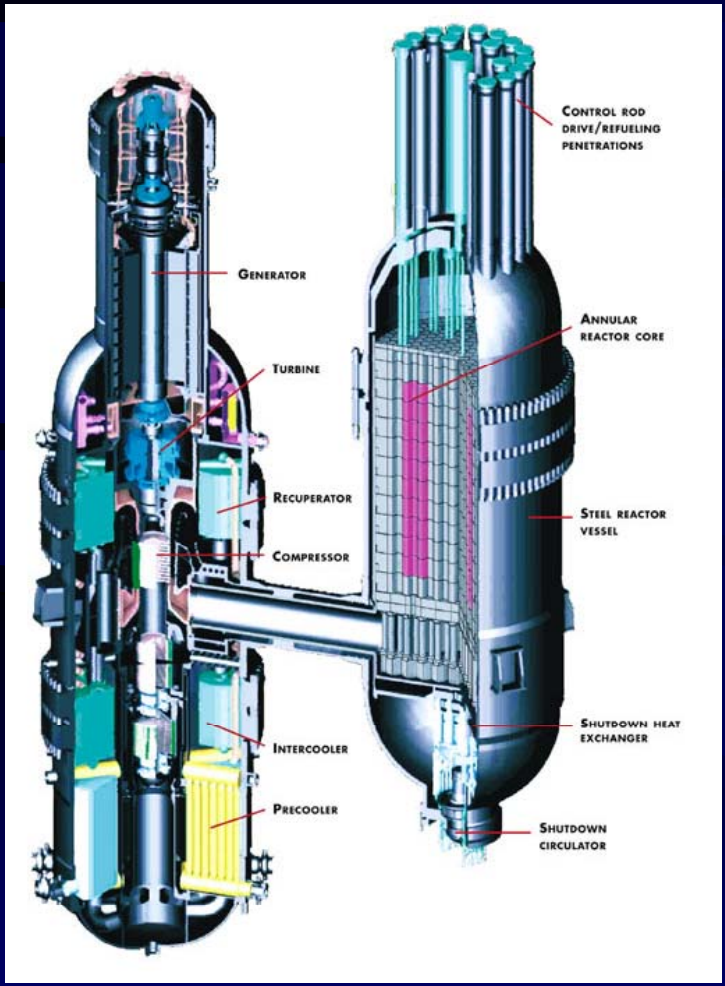
1. **Edificio reattore (contenitore interno e contenitore esterno)**
2. Gru polare
3. Spruzzatori acqua contenitore
4. Varco passaggio componenti
5. Macchina di carico e scarico del combustibile
6. Generatore di vapore
7. Linee vapore principali
8. Linee alimento principali
9. Meccanismi barre di controllo
10. Recipiente a pressione del reattore (vessel)
11. Pompa primaria
12. Tubazione primaria
13. Scambiatore CVCS
14. Vasca di raccolta e raffreddamento del corium
15. Riserva d'acqua interna
16. Scambiatore RHR
17. Accumulatore SIS
18. Pressurizzatore
19. Valvole principali vapore
20. Valvole principali alimento
21. Silenziatore valvole sfioro e sicurezza
22. **Edificio di salvaguardia, Divisione 2**
23. Sala controllo principale
24. Sala computer
25. Acqua alimento emergenza
26. **Edificio di salvaguardia, Divisione 3**
27. Pompe alimento emergenza
28. Pompa MHSI
29. **Edificio di salvaguardia, Divisione 4**
30. Quadri elettrici
31. Quadri di controllo
32. Sala batterie
33. Acqua alimento emergenza
34. Scambiatore CCWS
35. Pompa LHSIS
36. Scambiatore componenti
37. Pompa HRS contenimento
38. Scambiatore HRS contenimento

I REATTORI INNOVATIVI
Sistemi Sottocritici Iniettati

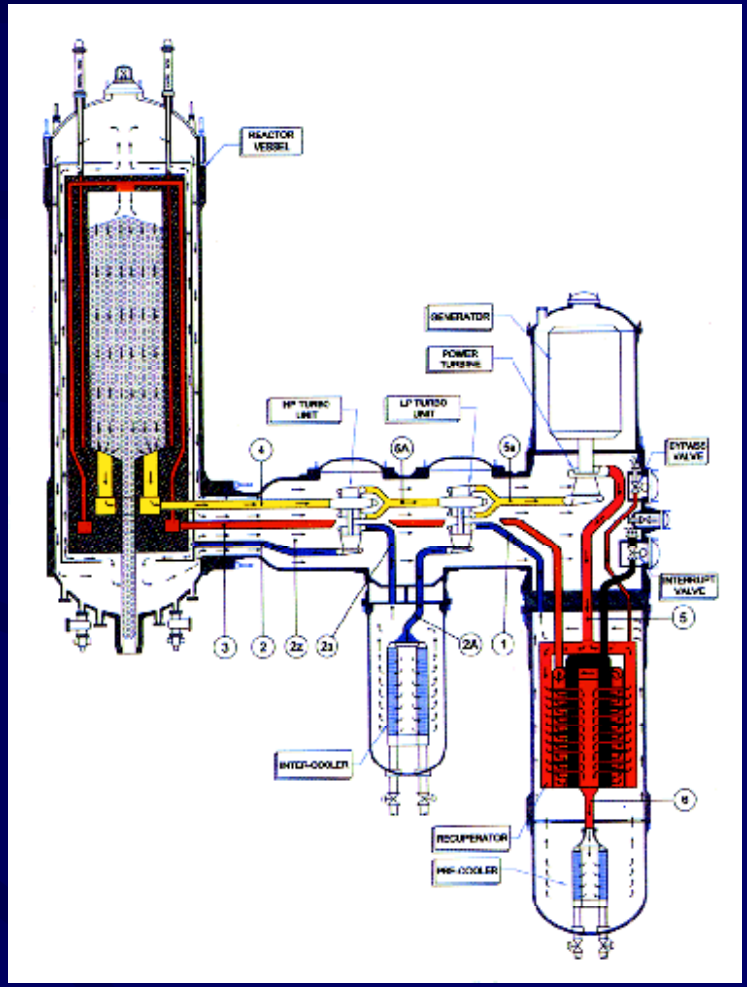
- I reattori ADS (Accelerator Driven System) sono reattori sottocritici (K<1) in cui i neutroni sono iniettati dall'esterno
- Hanno interesse perché possono trasmutare i prodotti di fissione a lunga vita riducendo i pericoli legati alle scorie nucleari
- I componenti più importanti sono:
  - un acceleratore di protoni
  - un bersaglio per la spallazione in cui il fascio di protoni produce neutroni
  - un nocciolo sottocritico in cui è prodotta la potenza termica
- Si pensa di utilizzare metalli liquidi (Pb, Pb-Bi) per refrigerare il nocciolo



I REATTORI INNOVATIVI
HTGRs Modulari



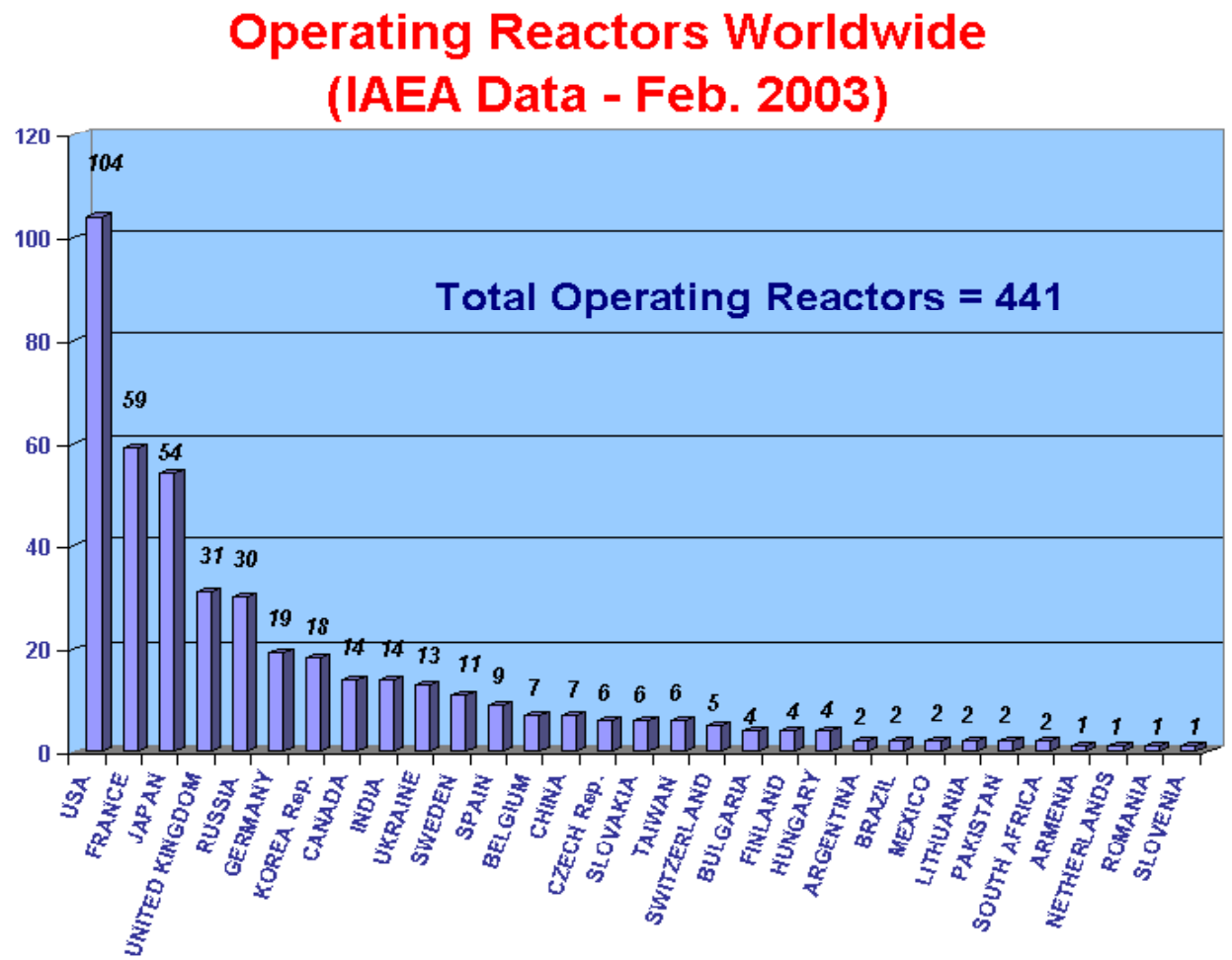
Gas Turbine – Modular Helium Reactor



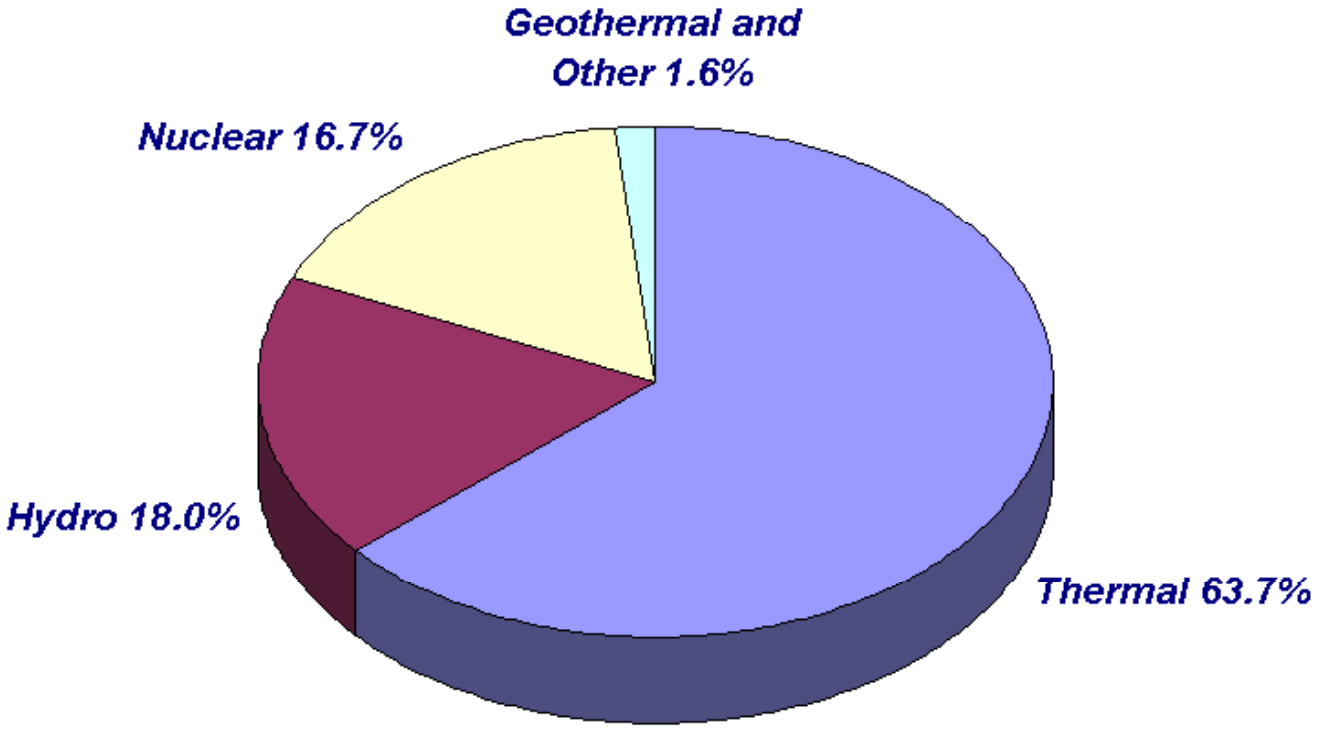
Pebble Bed Modular Reactor

L'ENERGIA DA FISSIONE OGGI

Alcuni Dati IAEA : 441 reattori in funzione + 33 in costruzione



L'ENERGIA DA FISSIONE OGGI
Alcuni Dati



L'ENERGIA DA FISSIONE OGGI
Temi frequentemente dibattuti

- Alcuni temi sono spesso discussi quando si parla di nucleare:
  - **Scorie nucleari:**
    - si tratta più di un problema politico che tecnico: le soluzioni esistono già
    - i depositi finali sono in fase di analisi/costruzione in vari Paesi
    - E' possibile la "trasmutazione" delle scorie in materiali radioattivi a "vita media" più breve mediante appositi reattori a neutroni "veloci"
  - **Incidenti realmente accaduti:**
    - **TMI-2:** danni gravi all'impianto senza conseguenza a persone e ambiente
    - **Chernobyl:** forse il massimo disastro credibile avvenuto in reattore molto particolare e considerato impossibile nei reattori di tecnologia occidentale
  - **Proliferazione nucleare:**
    - le applicazioni militari dell'energia nucleare hanno preceduto quelle pacifiche
    - costruire bombe efficienti richiede comunque tecnologie sofisticate
    - sono in corso studi per minimizzare la possibilità di utilizzare combustibili nucleari per scopi non energetici
  - **Protezione ambientale:**
    - l'energia nucleare evita l'emissione di gas serra
    - L'energia nucleare può servire per produrre idrogeno (con riduzione della necessità di combustibili fossili) ed anche per produrre acqua potabile

L'ENERGIA DA FISSIONE OGGI
Prospettive future

- Il futuro dell'energia nucleare sarà determinato da:
  - **la crescente richiesta di energia:** i Paesi in via di sviluppo chiedono di avere la loro parte del progresso e del benessere che sono stati determinati dalla tecnologia
  - **accettabilità da parte dell'opinione pubblica:** c'è la necessità di promuovere una vasta cultura scientifica che permetta una comprensione realistica dei vantaggi e dei (controllabili) rischi di ogni applicazione del progresso tecnologico
  - **considerazioni di tipo ambientale**

In conclusione appare giusto prevedere un ragiovevole ed equilibrato sviluppo di ogni fonte energetica disponibile (compresa quella nucleare), in relazione alle sue più razionali possibilità di impiego per rispondere alle necessità dell'umanità.