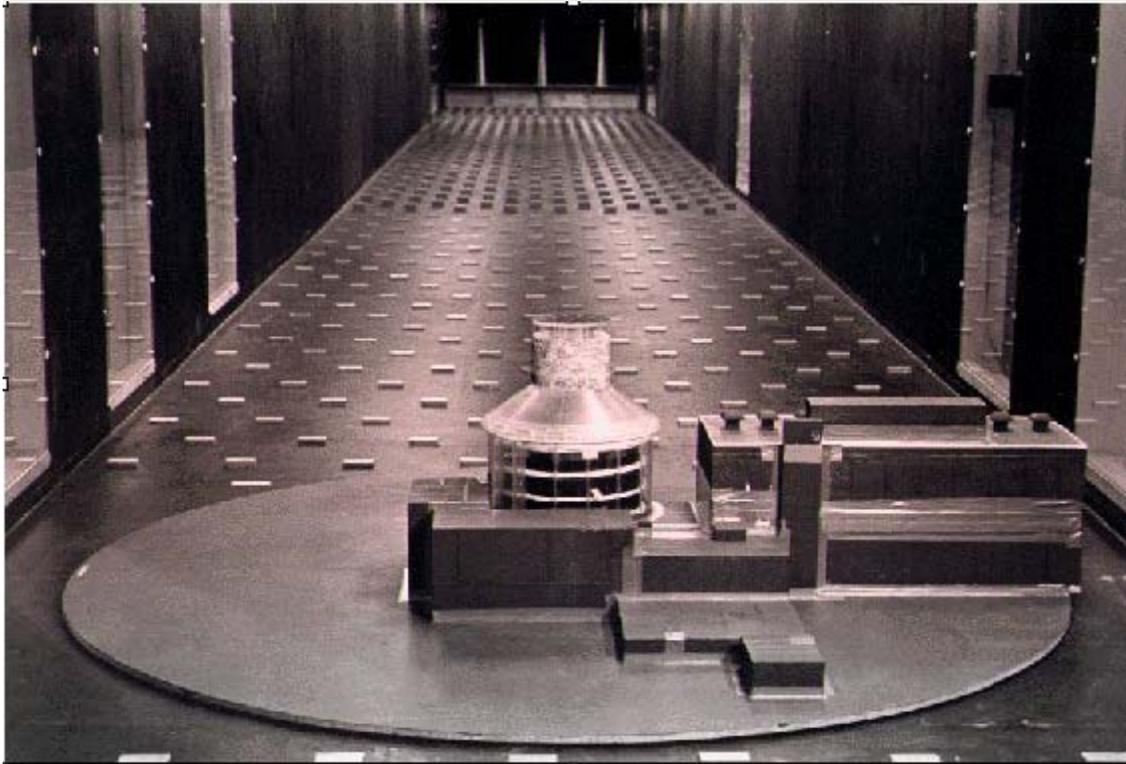
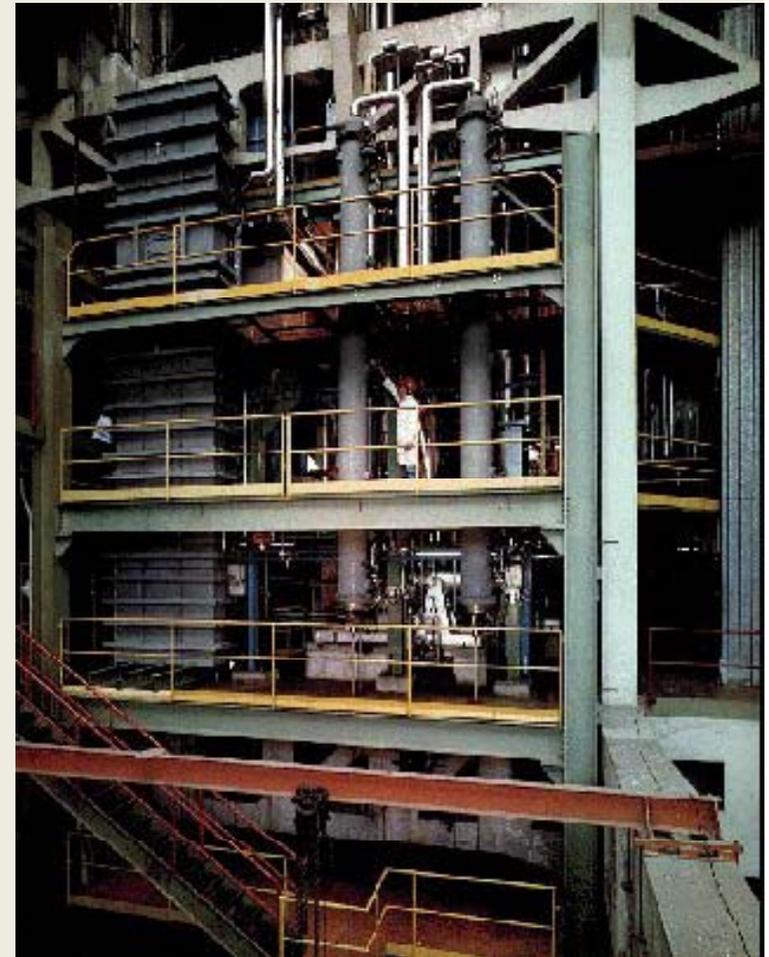


AP 1000

NRC Licensing – Campagne sperimentali



USA (containment)



ITA (primary circuit and safety systems)

Generazione III+ → disponibili verso il 2015

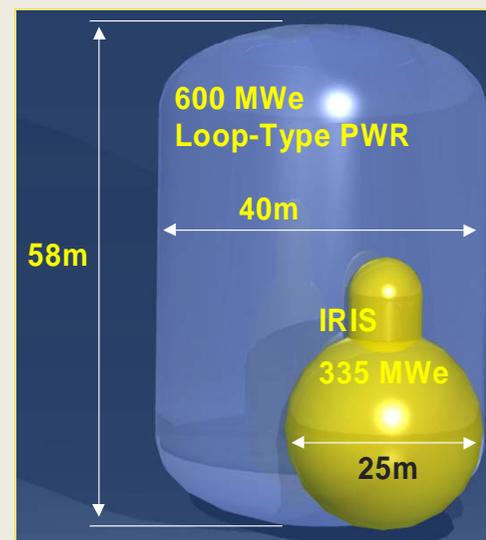
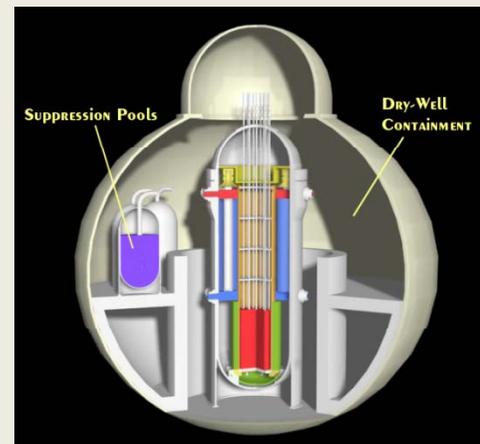
- Classe di reattori evolutivi tra l'attuale generazione III e la generazione IV, noti come reattori di Generazione III+ o *International Near Term Deployment Reactors* - che si prevede possano essere disponibili fra il 2010 e il 2015. Fra essi:
 - *Advanced CANDU Reactor (ACR)*, in corso di certificazione in Canada, Cina, USA e Regno Unito;
 - i reattori refrigerati a gas ad alta temperatura come il *Pebble Bed Modular Reactor (PBMR)*, sviluppato in Sud Africa col supporto di esperti tedeschi e con la collaborazione di BNFL ed il GT-MHR di General Atomic (USA)
 - Una menzione particolare merita lo *International Reactor Innovative & Secure (IRIS)*, sviluppato da un ampio consorzio internazionale guidato da Westinghouse e di cui fanno parte anche università (CIRTEN), organizzazioni di ricerca (ENEA) ed imprese italiane (Ansaldo Nucleare, Mangiarotti Nuclear, SIET).

IRIS

Reattore modulare ad acqua pressurizzata da 335 MWe, con circuito primario e generatori di vapore disposti all'interno del contenitore a pressione

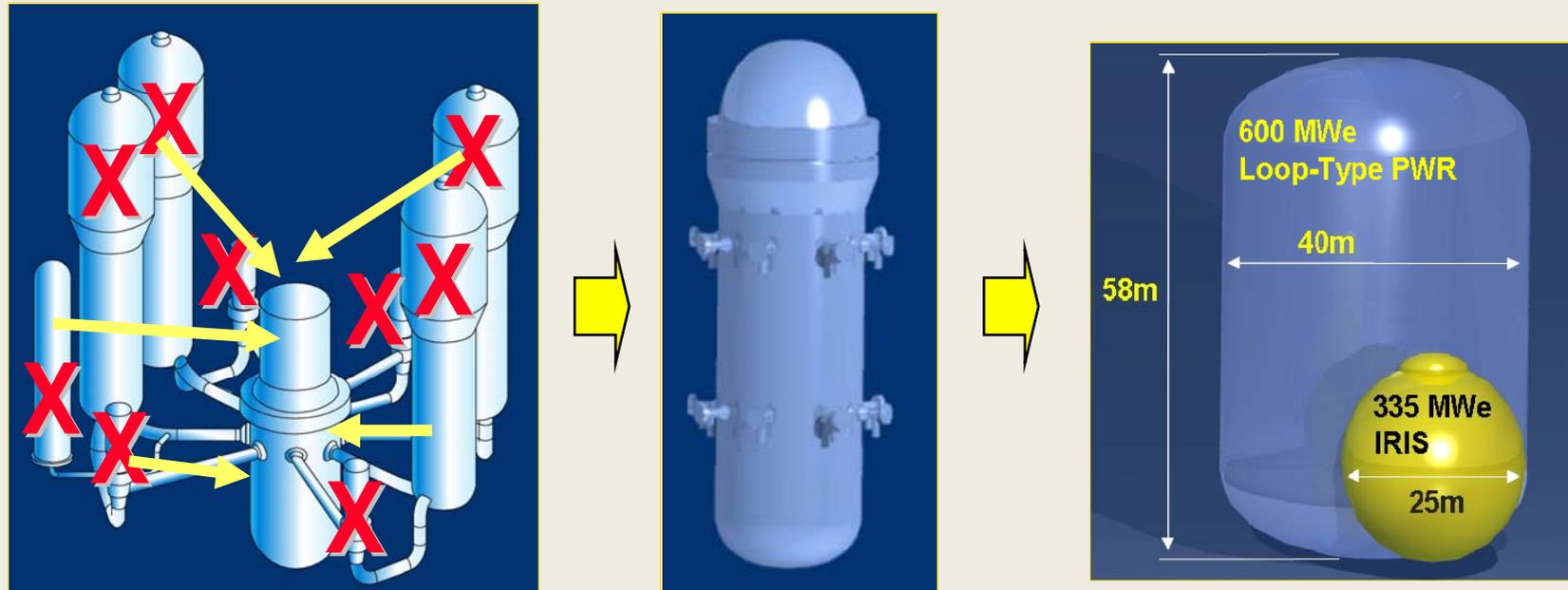
Tale peculiarità consente notevoli riduzioni delle dimensioni del sistema di contenimento e, di conseguenza, la possibilità di collocare tali reattori in caverna o nel sottosuolo, un'idea del passato che potrebbe ridiventare attuale in tempi di crescente preoccupazione per gli attacchi terroristici.

La taglia di riferimento di 335 MWe è stata scelta nella prospettiva di localizzazione sia di moduli singoli (specialmente nei Paesi in via di sviluppo, con reti elettriche di piccole dimensioni e allo scopo di produzione combinata di elettricità, calore e/o acqua potabile), nonché di centrali pluri-modulo gestite attraverso un'unica sala controllo



Reattore IRIS e suo contenitore di sicurezza; confronto con un reattore PWR standard

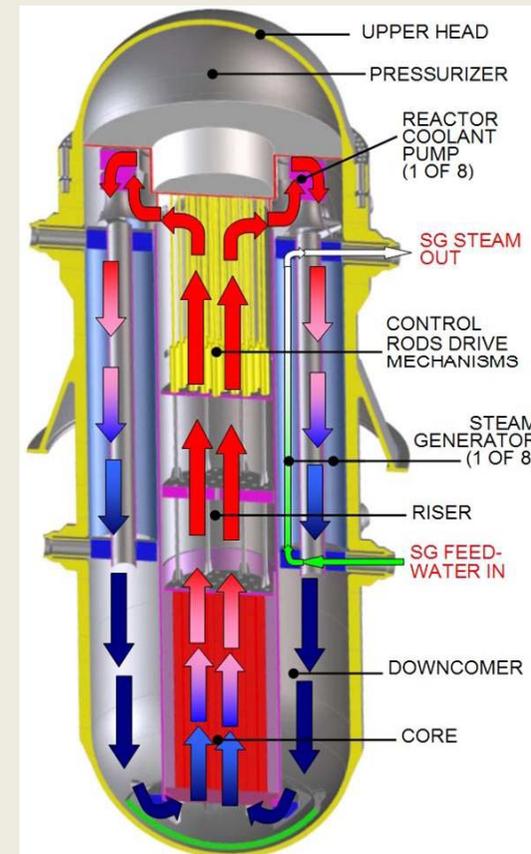
IRIS: Reattore raffreddato ad acqua con sistema primario integrato



- Simplifies design by eliminating loop piping and external components
- Enables compact containment and economic small plant size
- Enhances safety by eliminating major classes of accidents

IRIS Design Features

- 335 MWe PWR
- Long life core ~4 years
- 8 helical-coil steam generators
- 8 axial flow fully immersed primary coolant pumps
- Internal control rod drive mechanisms
- Integral pressurizer with large volume-to-power ratio
- Uses Safety-by-Design™ approach



Safety-by-Design™ - The Bottom Line

Criterion	Typical Advanced LWRs	IRIS
Defense-in-Depth (DID)	Redundant and/or diverse active systems or Passive systems	No active systems; Safety-by-Design™ with fewer passive safety systems
Class IV Design Basis Events	8 typically considered	Only 1 remains Class IV (fuel handling accident)
Core Damage Frequency (CDF)	~10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁷ events per year	~10 ⁻⁸ events per year
Large Early Release Frequency (LERF)	~10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁸ events per year	~10 ⁻⁹ events per year

Provides basis for enhanced licensing, such as reducing (or eliminating) the emergency response requirements

The IRIS Team



10 countries

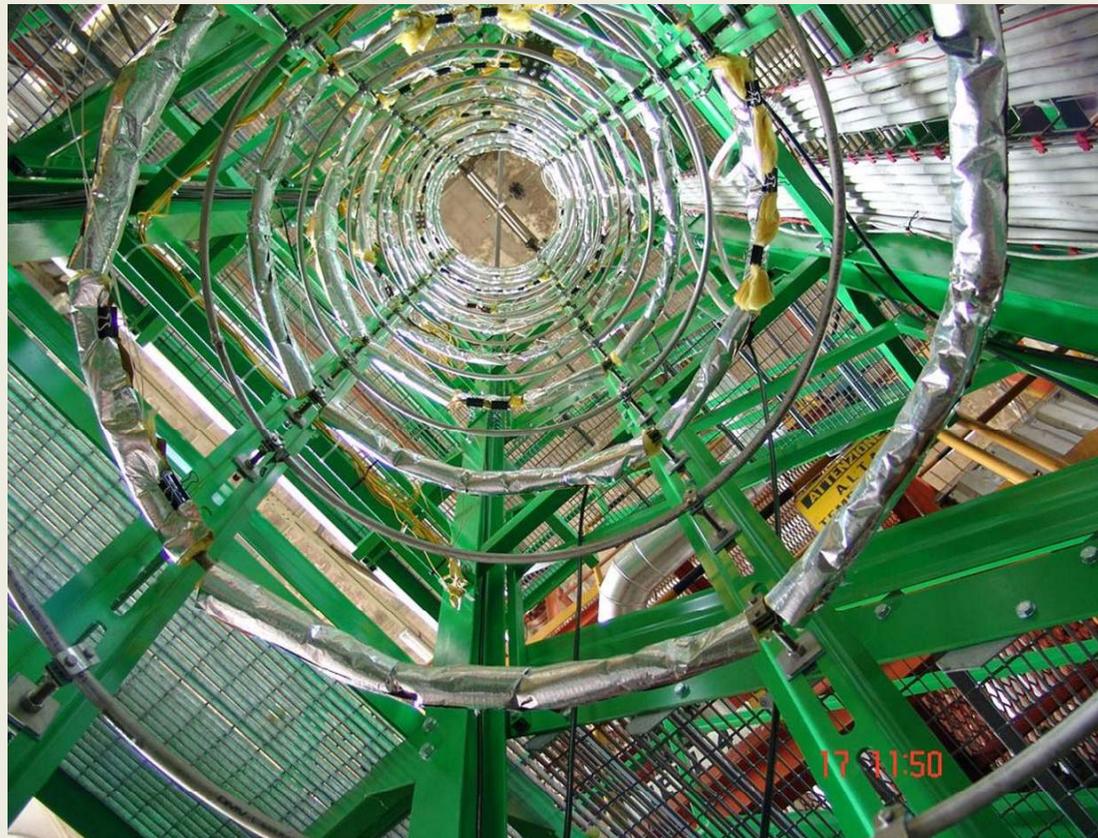
- Brazil
- Croatia
- Italy
- Lithuania
- Japan
- Mexico
- Spain
- Russia
- United Kingdom
- United States

20 organizations

- Industry
- Power producers
- Laboratories
- Universities

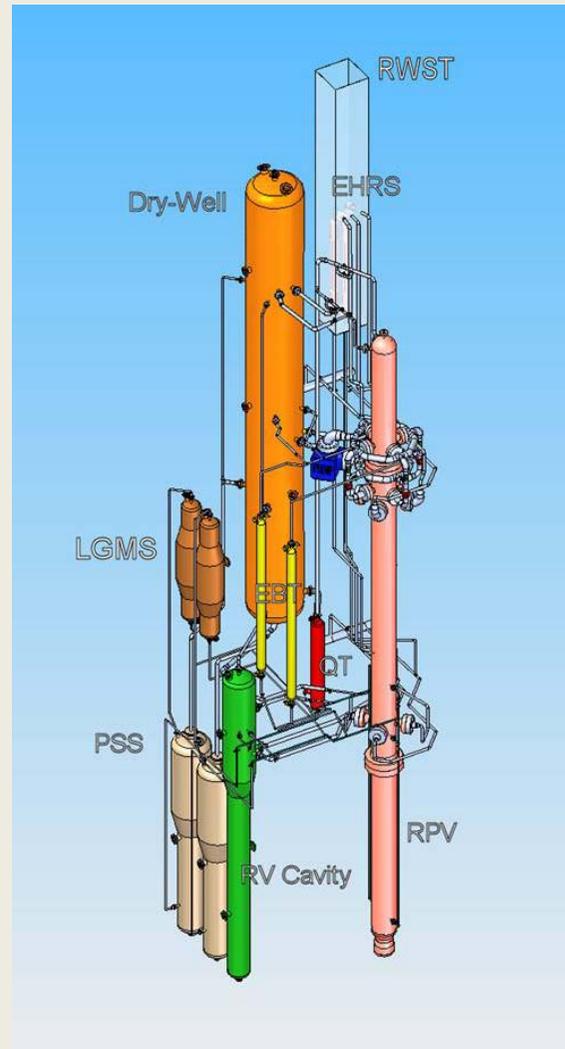
IRIS Thermal-Hydraulic Test Facilities (SIET, Italy)

HCSG FACILITY (Test Section)



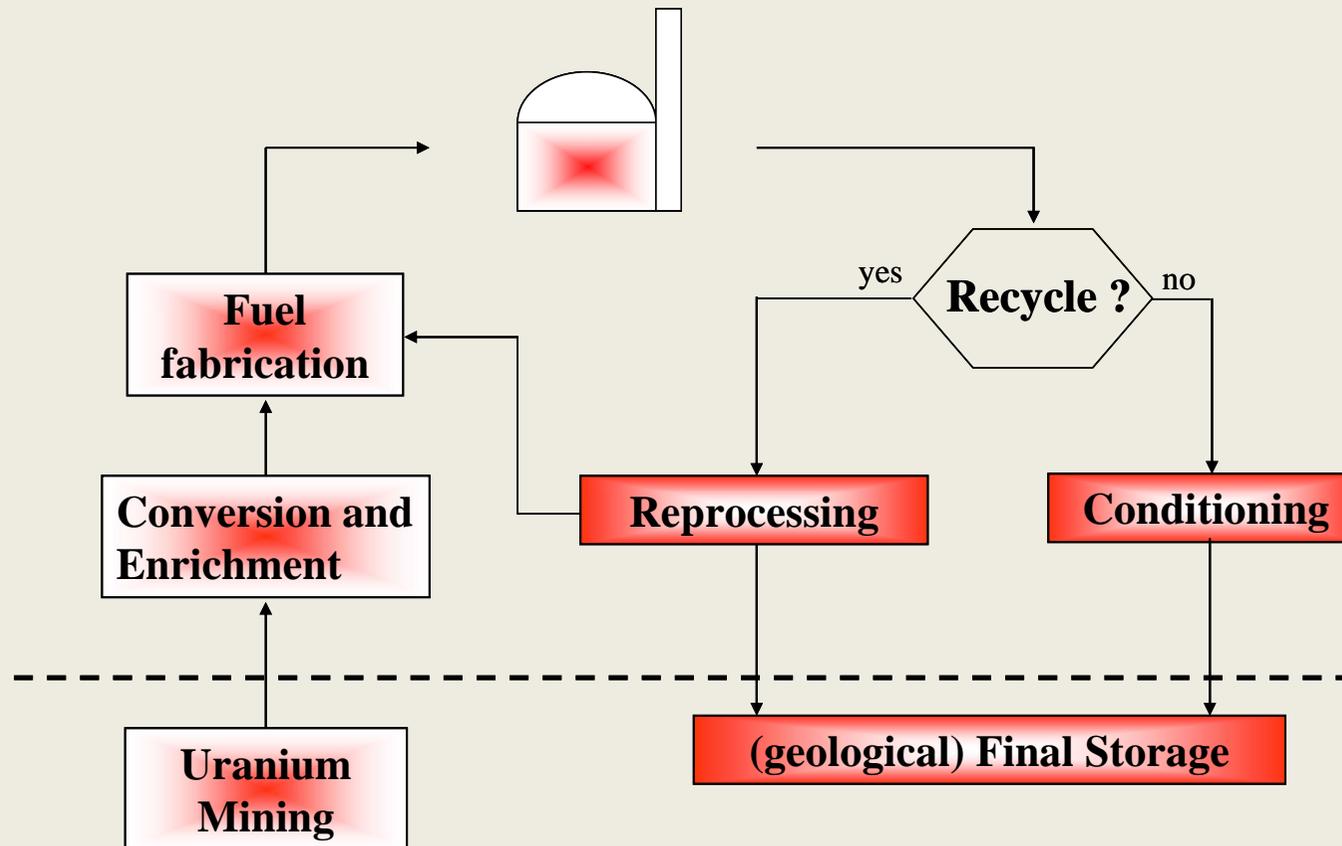
Thermal-Fluid-Dynamics experiments on a full-scale helical-coil tube of the IRIS Reactor Steam Generator

IRIS SPES3 Facility (SIET, Italy)



I reattori.... ma quale ciclo del combustibile?

- stoccaggio diretto del combustibile usato (direct disposal)
- ciclo »chiuso« (ritrattamento e riciclo del combustibile) (closed cycle)





Fuel Cycle Options for Countries with Large-scale Nuclear Power Program (>20 GWe)

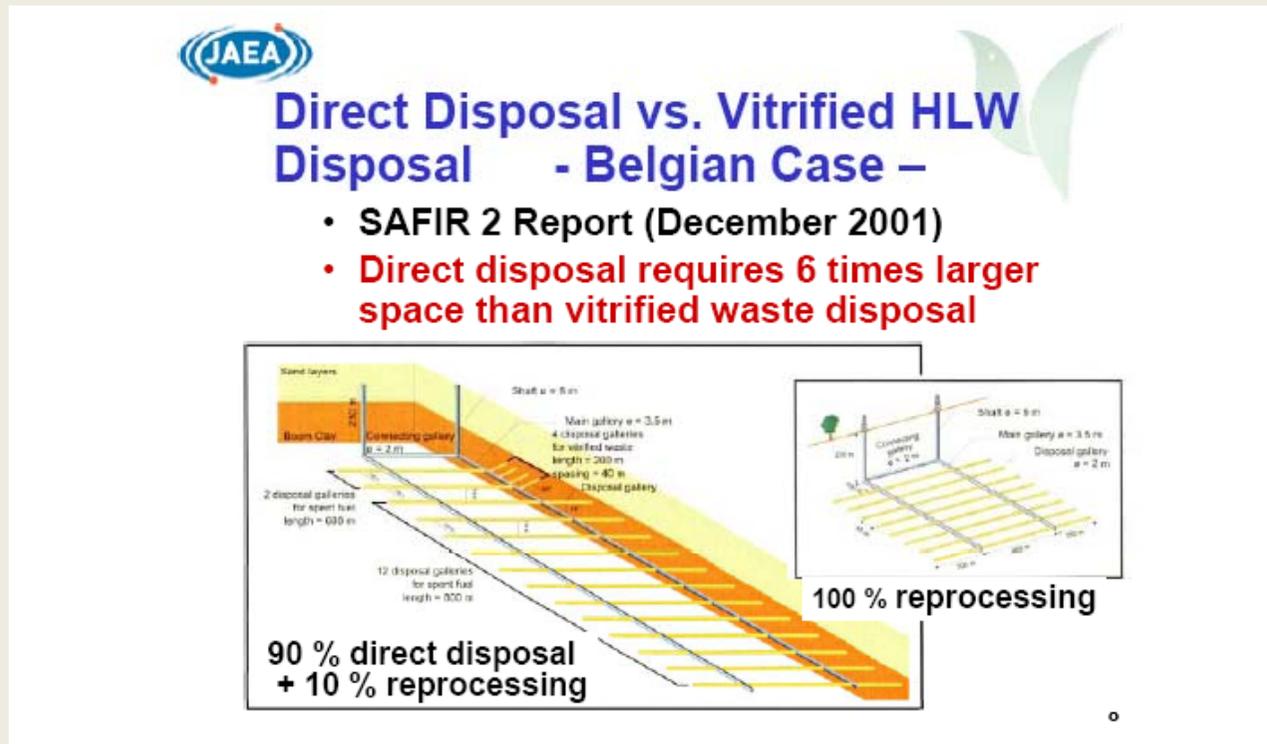
Country	Number of NPPs*	Installed Capacity (GWe) *	Current Policy	Future Options
USA	103	97.5	Direct Disposal	Proliferation-resistant closed cycle (R&D under AFCI)
France	59	63.5	Closed Cycle	Closed cycle with FBR
Japan	52	46.3	Closed Cycle	Closed cycle with FBR
Germany	19	22.4	Nuclear phase-out	-
Russia	30	21.7	Closed Cycle	Closed cycle with FBR
South Korea	19	16.8 (26.1 by 2015)	Direct Disposal	DUPIC cycle (Study on FR is also in progress)
China	9	6.6 (32- 36 by 2020)	Closed Cycle	Closed cycle with FBR
India	14	2.5 (20.9 by 2020)	Closed Cycle	Closed U/Pu cycle with FBR or thorium cycle with AHWR

* As of end of 2004 12

Nel ciclo aperto il combustibile scaricato dalle centrali nucleari viene inviato direttamente al deposito

Se si ritratta (ciclo chiuso), i rifiuti radioattivi ad alta attività finali (prodotti di fissione e attinidi minori: Np, Am, Cm) vengono « vetrificati »

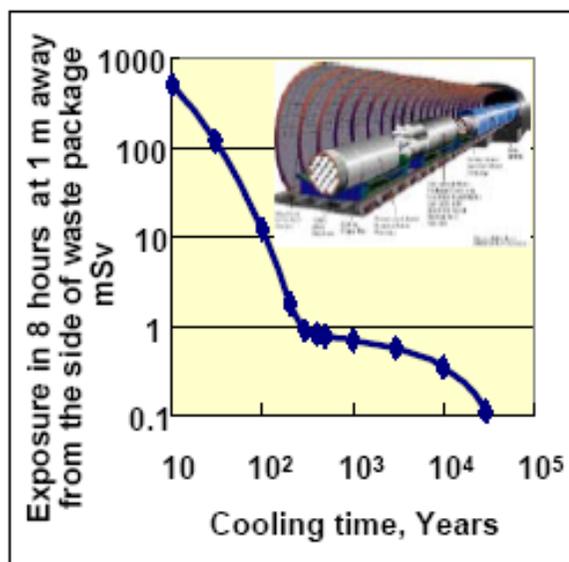
Questa operazione riduce significativamente lo spazio di stoccaggio



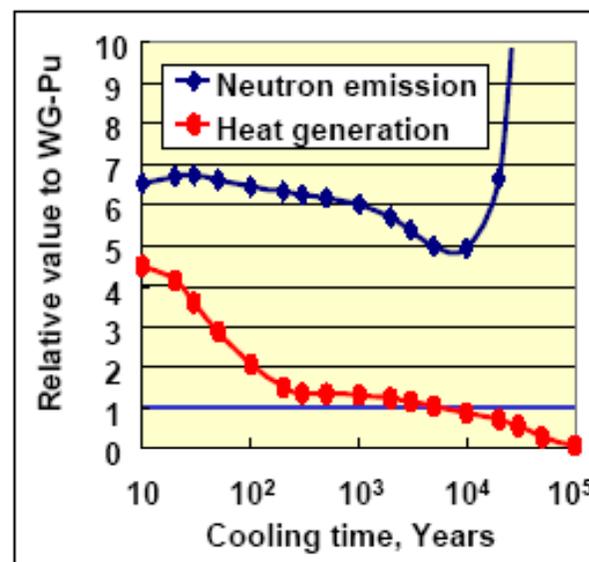
Per quanto riguarda i rischi di proliferazione, lasciare il Plutonio nel combustibile usato (cioè fare dello stoccaggio diretto) presenta ovvi inconvenienti:



100 years later, access becomes easier and plutonium becomes more attractive in direct disposal



Radiation exposure



Plutonium properties

9

In sostanza, 3 inconvenienti maggiori legati allo stoccaggio diretto:

- Utilizzo estremamente inefficiente dell'Uranio (<1%)**
- Grandi volumi di stoccaggio**
- Formazione di « miniere » di Plutonio**

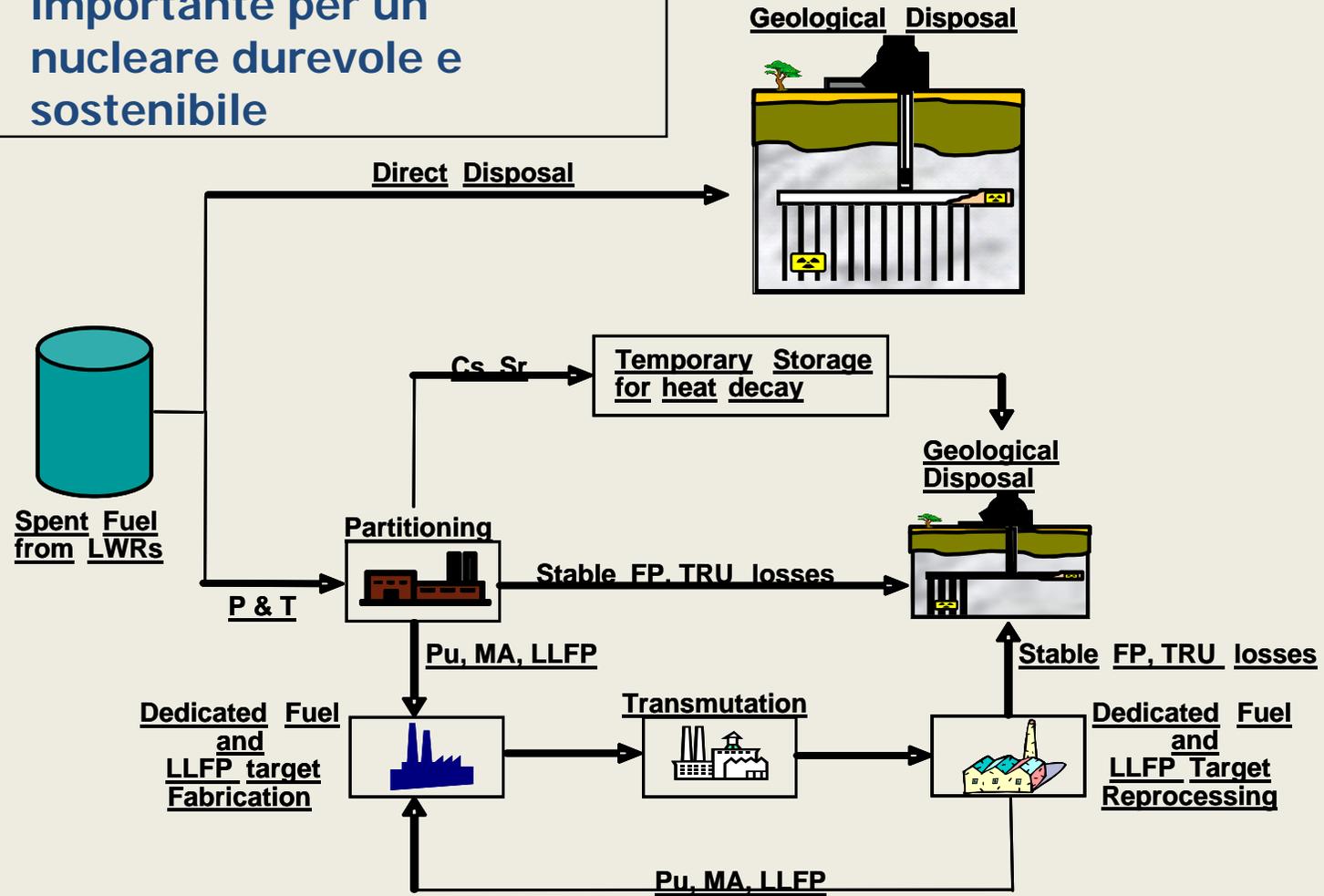


Three fundamental problems in direct disposal option

- Extremely low uranium utilization efficiency (<1%)**
- Need for larger HLW repository space due to larger volume and larger heat load of waste packages**
- Formation of plutonium mines**
 - More than 8,000 tons of Pu will be buried by 2100
 - 100 years later, access becomes easier, and plutonium properties become more attractive for weapon use

7

Chiudere il ciclo è quindi importante per un nucleare durevole e sostenibile



LLFP: Long lived fission products (Tc-99, I-129, Se -79, ...); **MA:** Minor Actinides (Am, Np, Cm)

Ciclo chiuso con reattori veloci minimizzazione dei rifiuti radioattivi

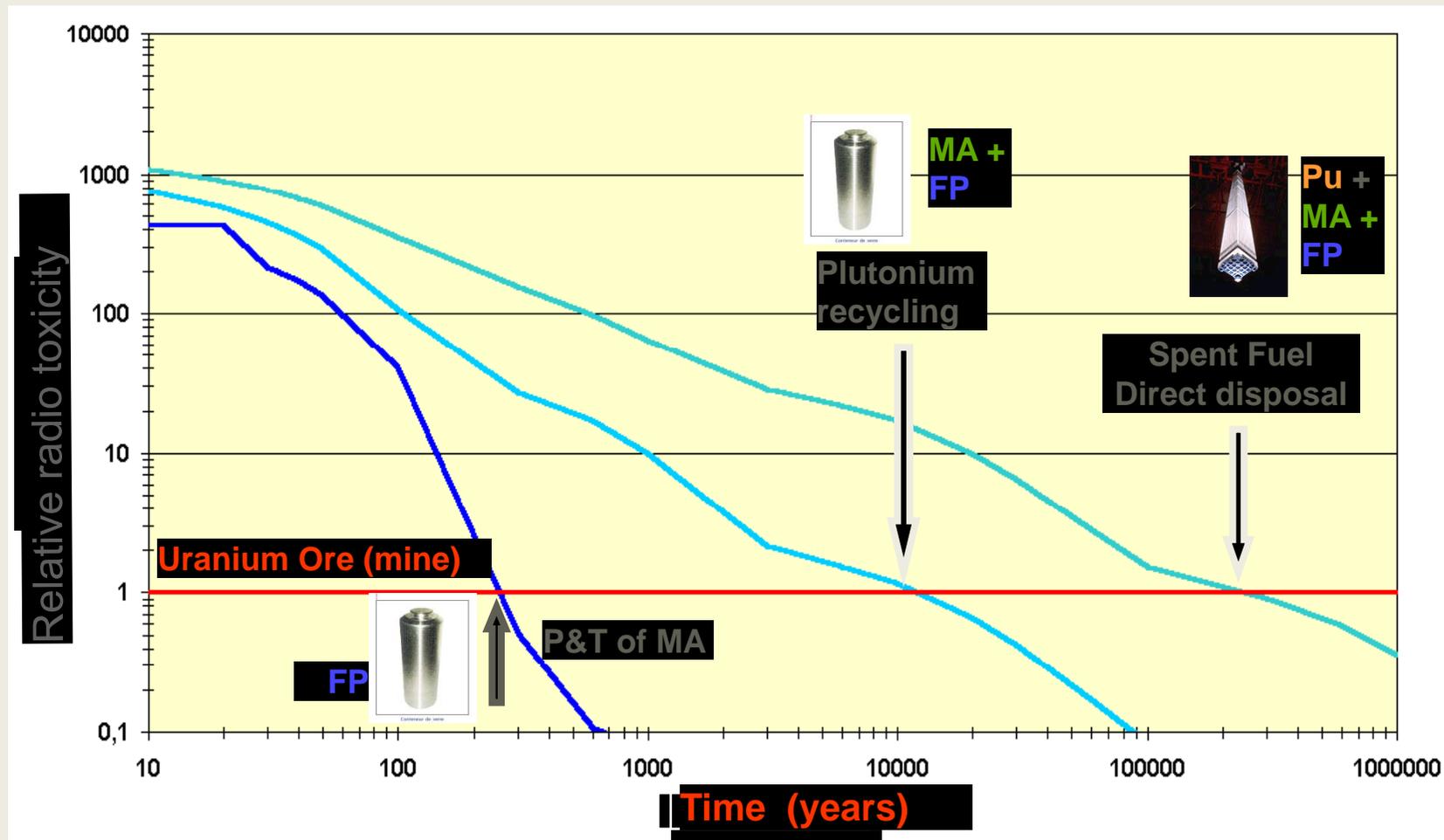
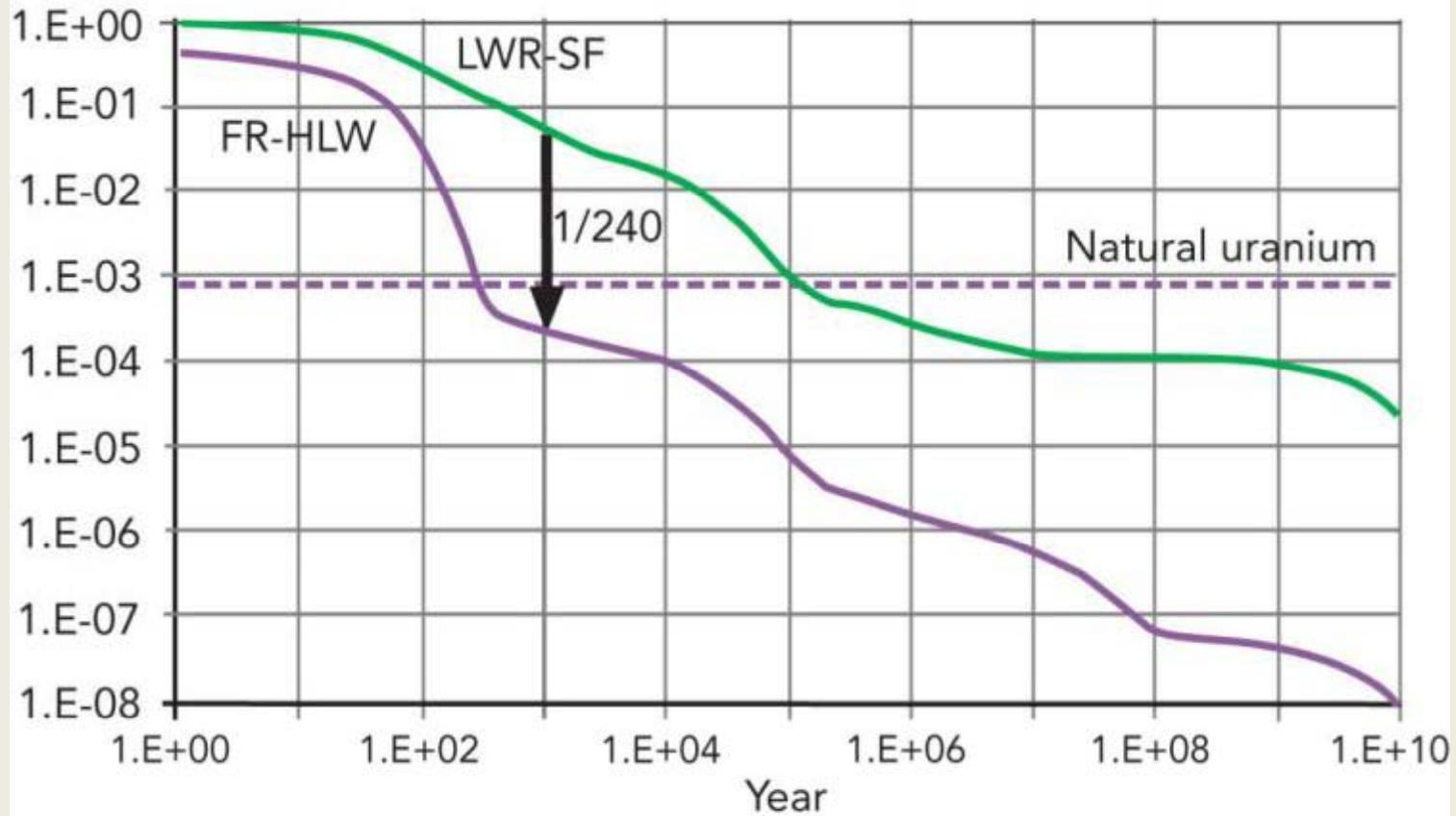


Figure 14.2: Relative radiotoxicity of high-level waste for LWR once-through and FR fuel cycle options



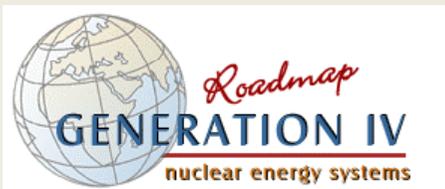
Source: Nakajima (2006).

BENEFICI POTENZIALI DELLA CHIUSURA DEL CICLO CON SEPARAZIONE/TRASMUTAZIONE

- **Drastica riduzione della sorgente di radiotossicità e dei tempi di stoccaggio in sicurezza in un deposito geologico**
- **Riduzione del calore residuo: aumento della capacità del deposito geologico**
- **Se i transuranici (Pu ed attinidi minori) non vengono separati fra di loro, diminuzione del rischio di proliferazione**

Generazione IV: i sistemi del futuro

- La domanda di energia nucleare è potenzialmente in significativo aumento.
- L'esigenza per il nucleare di essere "durevole" (cioè di permettere la conservazione delle risorse naturali) diventa un obiettivo maggiore
- La riduzione dei rifiuti e del rischio di proliferazione diventano criteri altrettanto importanti quanto la sicurezza e l'economia
- Inoltre, altre applicazioni dell'energia nucleare vengono proposte: la produzione di idrogeno, l'uso industriale del calore, la desalinizzazione dell'acqua marina
- Lo sviluppo di nuovi sistemi richiede tempo e la loro introduzione su scala industriale è prevedibile verso il 2030-2040 o oltre



Generation IV

- **Programma “Generation IV” (dal 2000) – Obiettivi**
 1. **Sustainability:** soddisfare requisiti ambientali, efficace sfruttamento combustibile, minimizzare rifiuti e ridurre tempi per rifiuti a lunga vita
 2. **Economics:** costi life-cycle e rischi finanziari competitivi con altre fonti energetiche
 3. **Safety and Reliability:** eccellere in sicurezza e affidabilità, bassissima probabilità di danneggiamento combustibile, eliminare necessità piani evacuazione
 4. **Proliferation Resistance & Physical Protection:** scarsa attrattività per diversione di materiale strategico, elevata protezione da attacchi terroristici

- Oltre 100 concetti e progetti di nuovi reattori presentati (industrie, centri di ricerca, università da tutto il mondo)
- Panel di esperti delle 10 Nazioni: comparazione e valutazione secondo metrica e criteri per ottenere grado di soddisfacimento degli obiettivi, selezione dei migliori concetti e progetti



Generation IV System	Best Case Deployment Date
SFR	2015
VHTR	2020
GFR	2025
MSR	2025
SCWR	2025
LFR	2025

International Near-Term Deployment (by 2015)

- ABWR II
- ACR-700
- AP600
- AP1000
- APR1400
- APWR+
- CAREM
- EPR
- ESBWR
- GT-MHR
- HC-BWR
- IMR
- IRIS
- PBMR
- SMART
- SWR-1000

Generation IV International Forum

Nuovi requisiti per un nucleare “sostenibile e durevole”:

• Miglioramenti graduali per:

- ✓ Competitività
- ✓ Sicurezza e affidabilità

■ Concetti decisamente innovanti per:

- ✓ Minimizzazione dei rifiuti
- ✓ Conservazione delle risorse
- ✓ Non proliferazione

➤ Maturità tecnica verso il 2030-2040

➤ Nuovi mercati

- produzione di idrogeno
- uso diretto del calore
- desalinizzazione

➤ R&D “distribuita” a livello internazionale



Dai reattori ad acqua ai reattori di IV Generazione

- **Reattori raffreddati ad acqua**
 - Una tecnologia matura con la più vasta esperienza di costruzione, manutenzione, operazione
 - Notevoli progressi nella transizione da Gen-II a Gen-III
 - Due limitazioni principali:
 - temperatura sotto i 300°C (rendimento “basso”)
 - bilancio neutronico che non lascia margini (per es. per la surgenerazione e/o la trasmutazione dei rifiuti radioattivi)

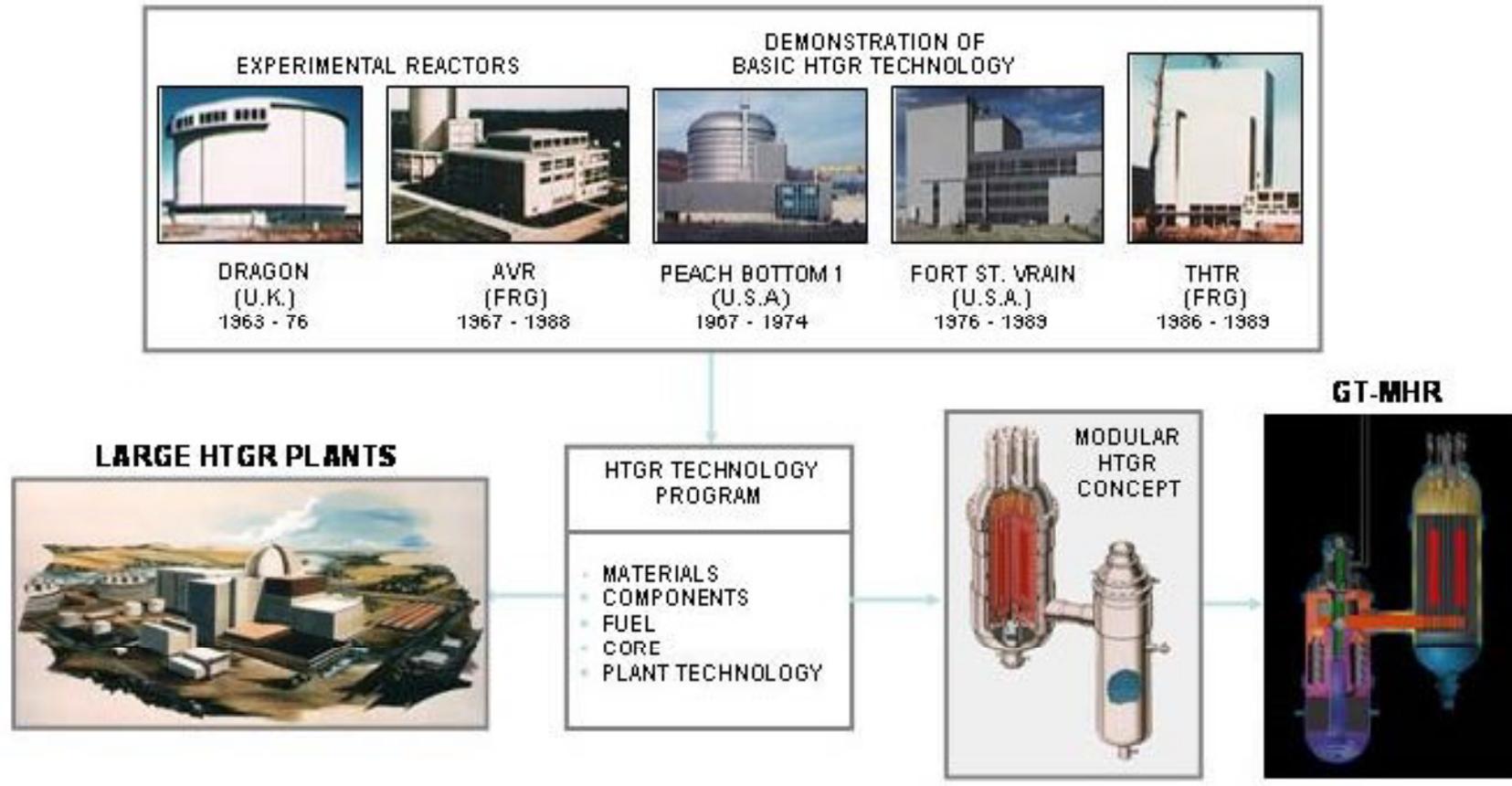
- **Fin dagli anni '50, individuate due vie per ovviare a queste limitazioni:**
 - i reattori veloci
 - i reattori ad alta temperatura

Reattori ad Alta Temperatura

- Temperature dell'ordine di 800-1000°C permettono l'uso diretto del calore per l'industria e la produzione di idrogeno tramite processi chimici
- L'unica possibilità è il raffreddamento con un gas, e l'elio è la scelta più conveniente
- Primi prototipi negli anni '70 (Fort St Vrain negli USA, THTR in Germania)
- Piccoli reattori sperimentali costruiti recentemente in Asia (HTTR in Giappone, HTR 10 in Cina)
- Nuovi progetti allo studio nel quadro di Gen III (PBMR in Sud Africa) o di Gen IV (NGNP negli USA)

Reattori ad Alta Temperatura

Broad Foundation of Helium Reactor Technology



Source: General Atomics

Reattori ad Alta Temperatura: Le Sfide

- **Il combustibile: sferette con rivestimento di grafite e SiC; sferette a loro volta inserite in blocchi di grafite secondo diverse opzioni:**
 - compacts (FSV, GT-MHR)
 - pebbles (THTR, PBMR)

- **Materiali strutturali: la grafite è dominante nel core, ma materiali adatti alle alte temperature (per es. ceramici negli scambiatori), devono essere sviluppati**

- **Il sistema di raffreddamento: circuiti a elio con conversione diretta (ciclo di Brayton) o conversione indiretta per mezzo di scambiatori**

- **Potenza del reattore: limitata dalla bassa potenza specifica e alta pressione**

Reattori a Neutroni Veloci

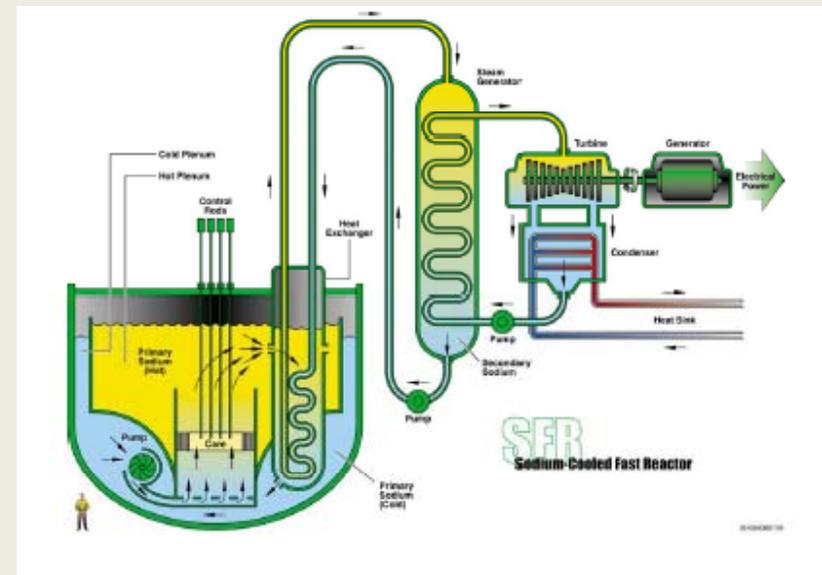
- I neutroni “veloci” danno luogo ad un rapporto fra probabilità di fissione e probabilità di assorbimento molto favorevole → bilancio neutronico ricco in neutroni disponibili
- Ne consegue la possibilità di un uso efficace dell’Uranio, con trasformazione dell’U-238 in Pu-239
- Inoltre, gli attinidi “minori” (Am, Cm, Np) vengono bruciati molto meglio che nei reattori a neutroni termici a causa delle alte probabilità di fissione dei neutroni veloci nell’interazione con questi elementi
- Il riciclaggio multiplo di tutti i transuranici è fattibile

Reattori Veloci: le tecnologie

- Per mantenere i neutroni “veloci”, si devono evitare materiali a basso n atomico per il core e soprattutto per il refrigerante.
- Le due principali classi di refrigeranti sono i metalli liquidi (Na, Pb, Pb/Bi) ed i gas (He, CO₂).
- Notevole esperienza internazionale sulla tecnologia del raffreddamento con il Na (BN600 in Russia, Superphenix e Phenix in Francia, Monju in Giappone, FFTF negli USA)
- I reattori veloci raffreddati a gas non sono mai stati realizzati → solo allo stadio concettuale
- I Russi hanno usato il Pb-Bi per i reattori dei sottomarini. Molto promettente la tecnologia del Pb puro
- L’uso della tecnologia dell’He sviluppata per gli HTR, è considerata anche per i veloci.

Reattori Veloci: la tecnologia del Na

- Il sodio è un ottimo refrigerante:
 - liquido in un ampio intervallo di temperature (90 – 890°C)
 - mono isotopico (Na23)
 - parametri termodinamici favorevoli
 - non corrosivo (se purificato)
- Notevole esperienza industriale :
 - vari usi industriali
 - 40 anni di studi tecnologici per applicazioni nucleari
 - molti prototipi
- Ben noti svantaggi :
 - reattività chimica (fuochi di sodio e reazione sodio-acqua)
 - difficoltà per la manutenzione e l'ispezione



BN 600 (Russia)

A 600 MWe plant built at Beloyarsky (Russia)
First criticality: 1980; still in operation



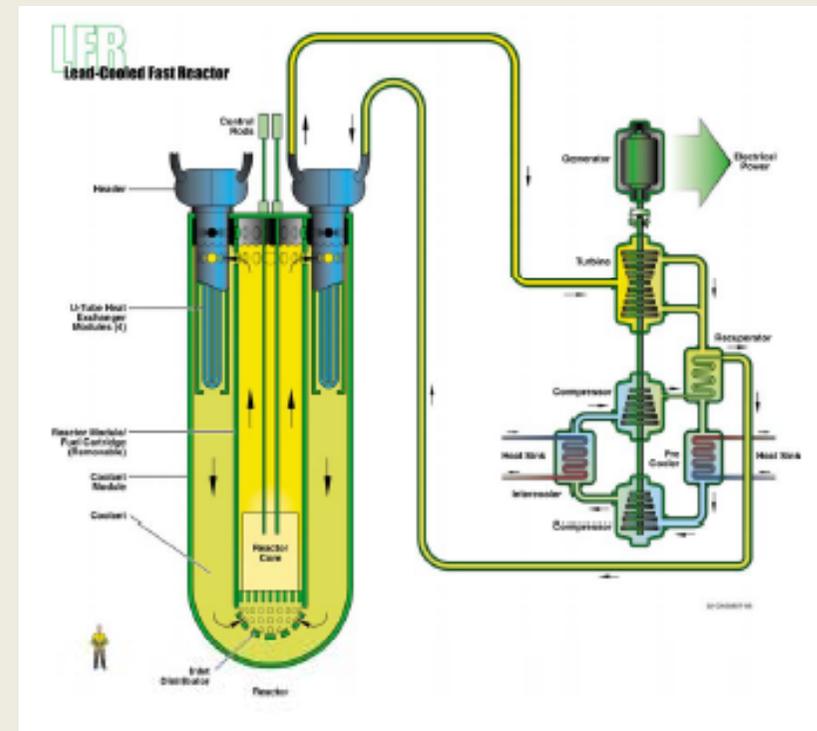
SUPERPHENIX

A 1200 MWe plant built at Creys-Malville (France)
First criticality: 1985; Shutdown: 1997

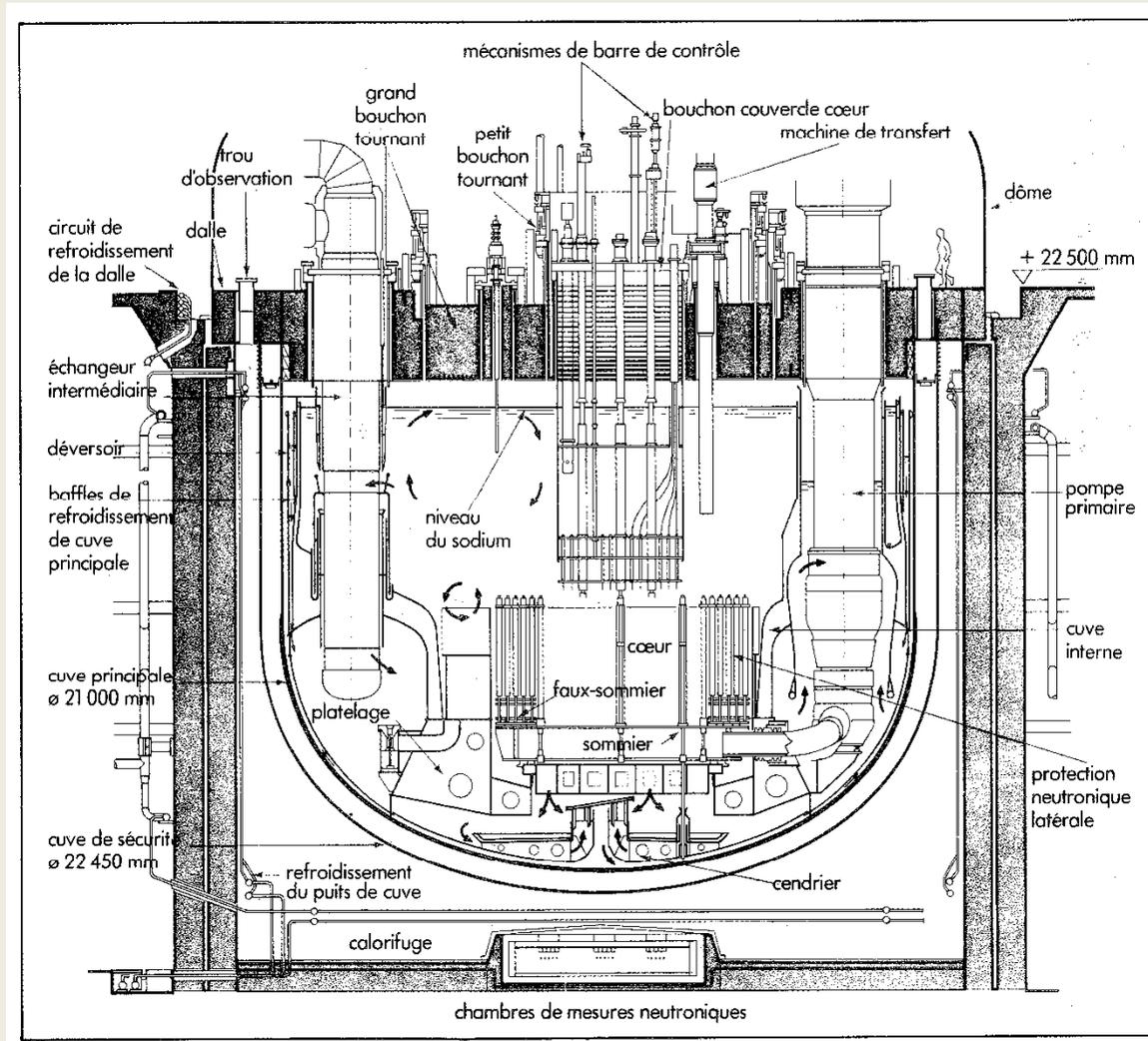


Reattori Veloci: la tecnologia del Pb

- Non reagisce con aria e acqua: possibilità di eliminare il “l’ingombrante” e costoso circuito secondario
- Refrigerante meno favorevole (parametri termodinamici e rischi di corrosione)
- L’eutettico Pb-Bi permette di alleviare i rischi di corrosione ma il Bi sotto irraggiamento n trasmuta in Po
- L’esperienza è limitata all’applicazione in Russia per la propulsione dei sottomarini militari
- Molti studi in corso in differenti paesi

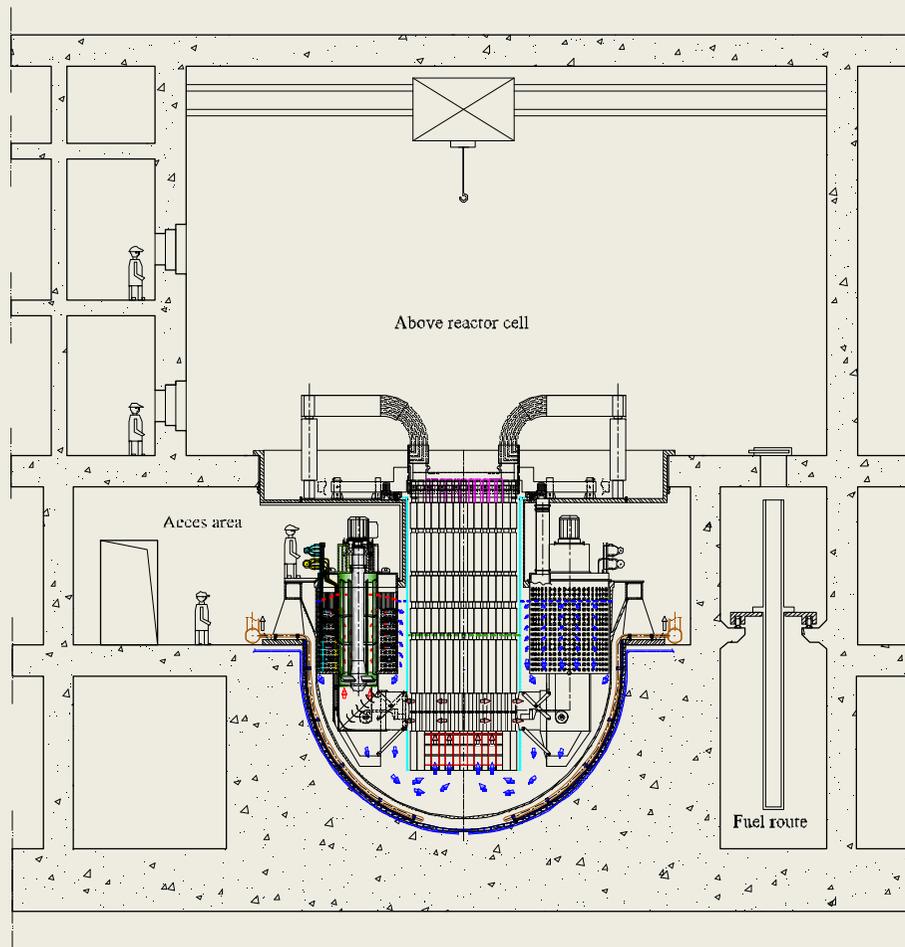
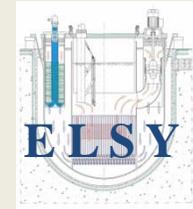


The past



SFR SUPERPHENIX Reactor Block

..... the challenge of ELSY (European Lead-cooled SYstem) is the Simplicity and Compactness of the primary system, all the in-vessel components being removable.....

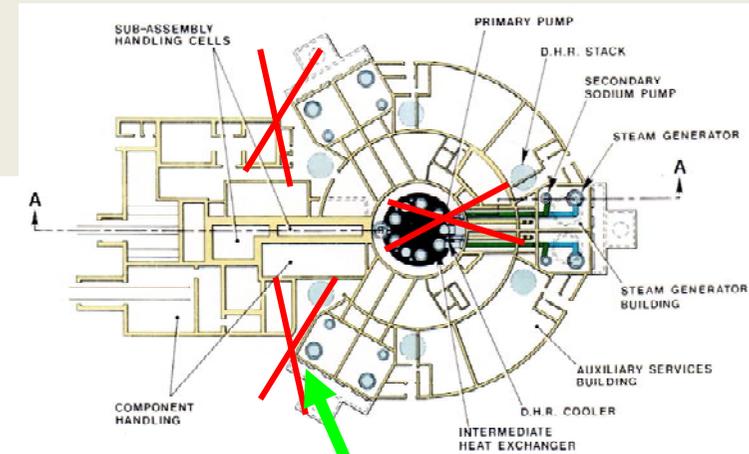
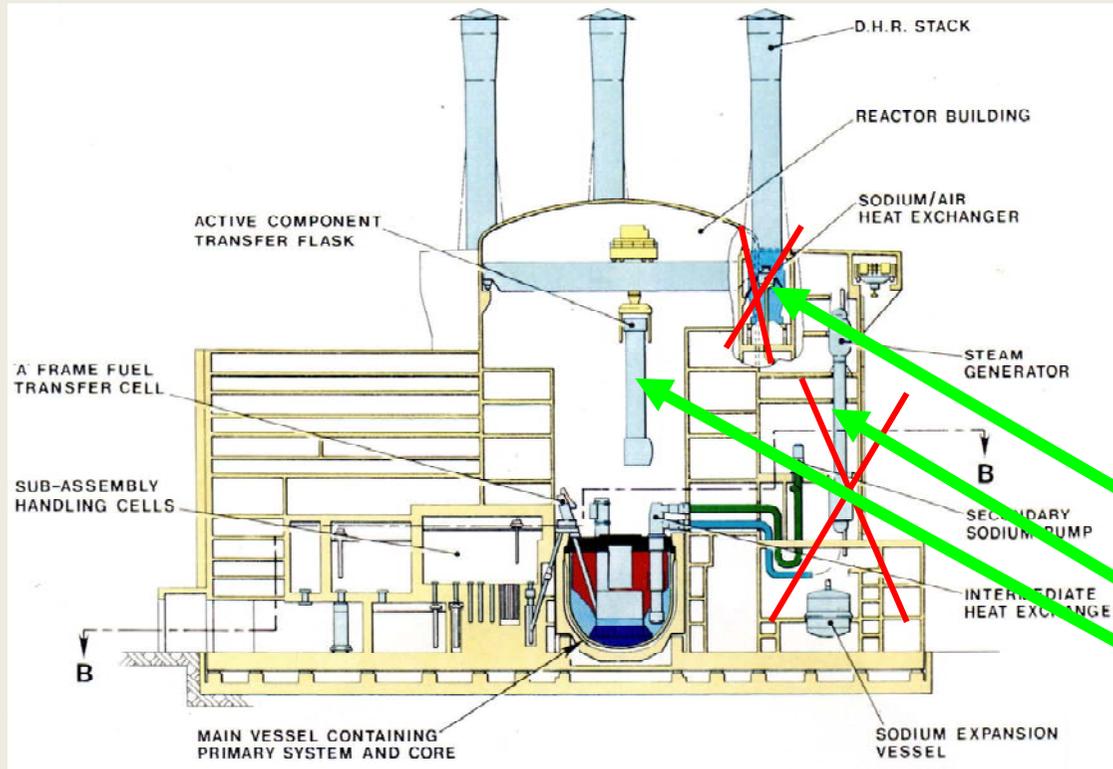


- The installation of the Primary Pumps in the Hot Collector makes possible:
- eliminating the *Sommier*;
 - eliminating the *Redan*;
 - installing the HX of the DHR in the downcomer;
 - higher free level in the downcomer.

Today

ELSY reactor building compactness

- ✓ No intermediate system is one of the keys for compactness of a LFR plant layout



No intermediate loop

Reduced reactor building foot print

No intermediate loops for DHR, heat rejected directly to air and water

S. G. inside the reactor vessel

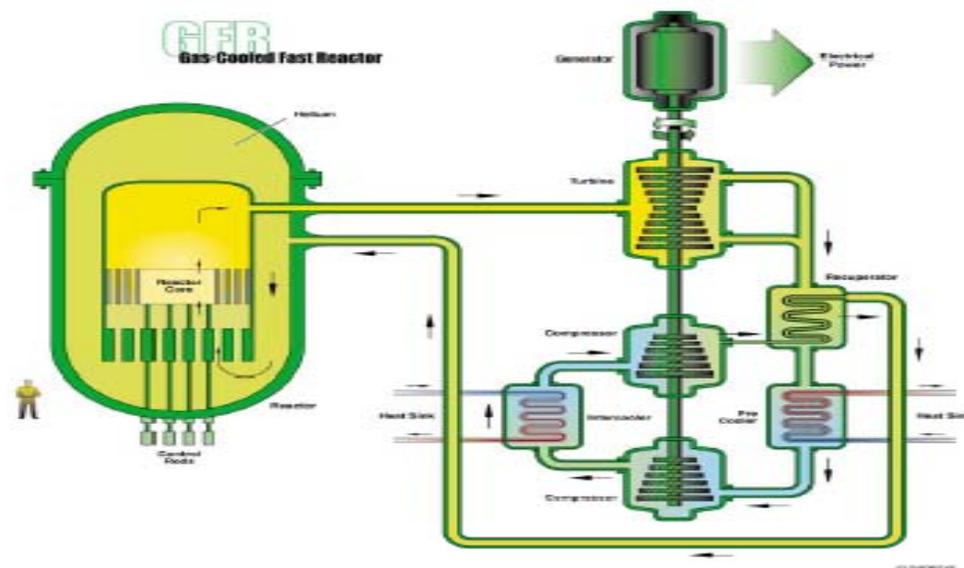
Short components to handle

Reduced reactor building elevation

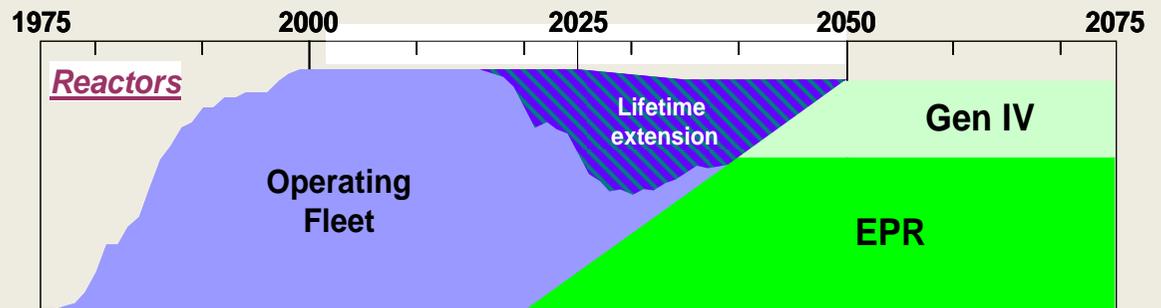
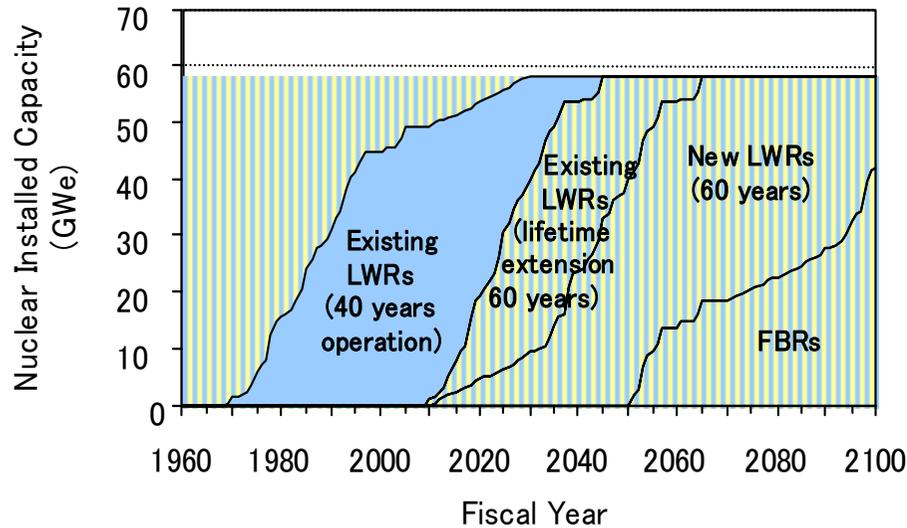
Reattori Veloci: la tecnologia dell'He

- Il raffreddamento con un gas è meno efficiente che con un metallo liquido
- Lo sviluppo di un reattore veloce a gas necessita un nuovo tipo di combustibile
- La tecnologia dell'elio è già considerata per i VHTR
- Specifici problemi di sicurezza devono essere ancora risolti

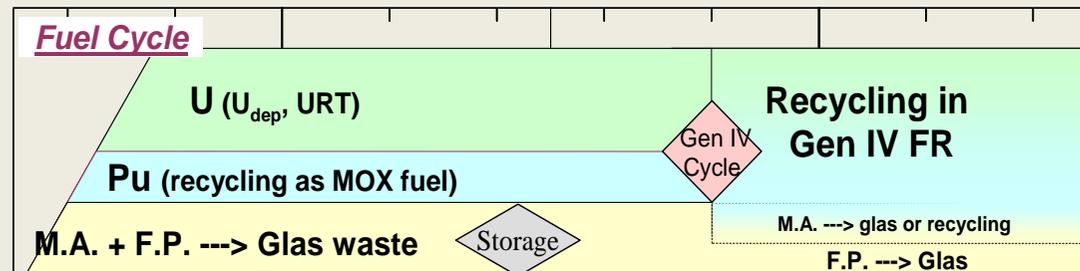
In caso di successo, il risultato permetterebbe di raggiungere entrambi gli obiettivi per uno sviluppo durevole (fisica dei neutroni veloci e tecnologia ad alte temperature)



La non facile transizione dai reattori attuali alla IV generazione



Source : EDF, ENC 2002



In Conclusione

- Dopo un periodo di stagnazione e di dubbio, ci sono chiari segnali di una nuova, significativa ripresa del nucleare nel mondo. I paesi asiatici si mostrano i più attivi, ma recenti dichiarazioni e iniziative negli USA e in Europa sono altrettanto significative.
- L'innovazione e la R&S giocheranno un ruolo essenziale per rispondere ai nuovi obiettivi di sviluppo durevole e di minimizzazione dei rifiuti.
- Un problema essenziale: la formazione di una nuova generazione di specialisti nei diversi settori: materiali, chimica degli attinidi, ingegneria del sistema, fisica dei reattori, meccanica, termoidraulica....
- Le „sfide“ scientifiche e tecnologiche offrono potenzialmente straordinarie occasioni di lavoro nell'industria, nei centri di ricerca e nell'Università.
- L'energia è un tema centrale nella nostra società. Contribuire allo sviluppo di un nucleare „durevole“, sicuro e rispettoso dell'ambiente („sostenibile“) non è soltanto un „challenge“ scientifico, ma un vero e proprio „challenge“ della società attuale.