

L'ENERGIA DEL MONDO

Criticità e prospettive della questione energetica

h 18.00

martedì
23
marzo

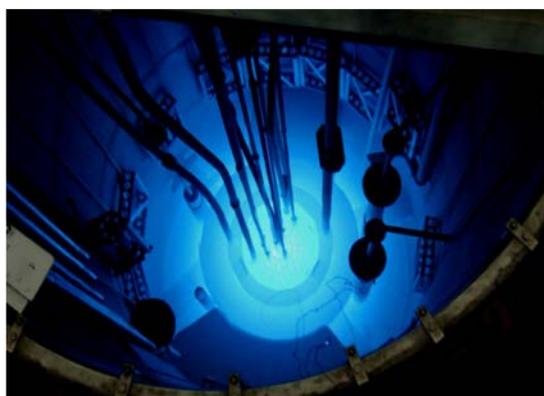
DUEMILA 21

**Nucleare:
energia di ieri o di domani?**

Saverio ALTIERI

Università di Pavia

DIPARTIMENTO DI FISICA

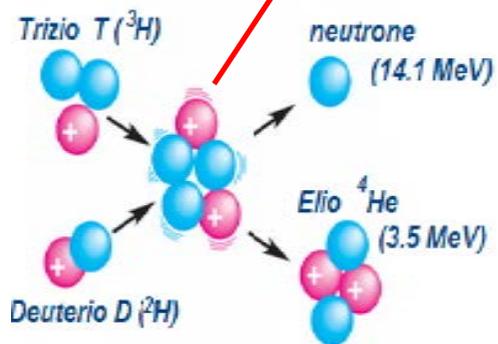
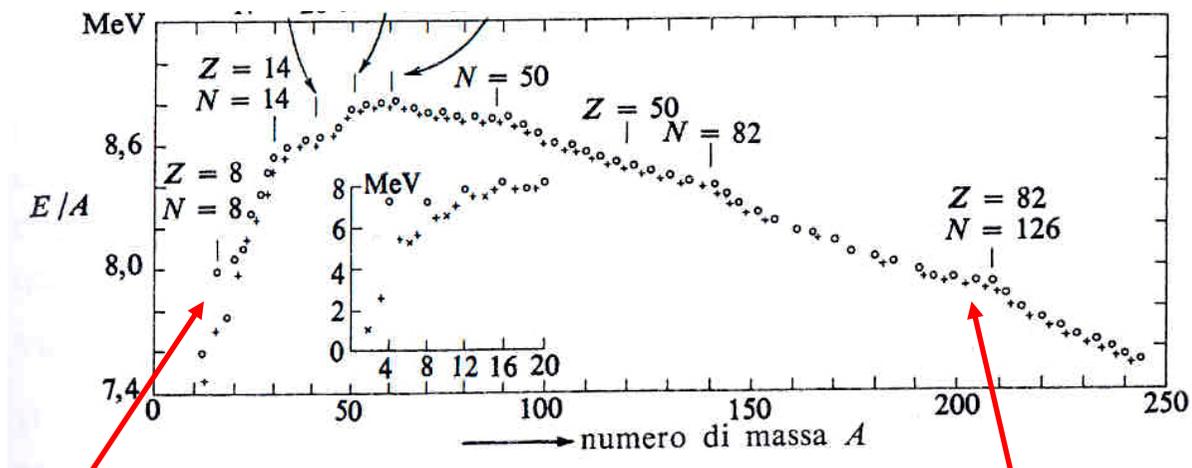
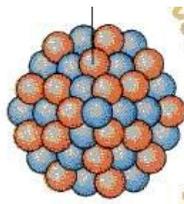


TRIGA-LENA-UNIPV



ENERGIA dal nucleo

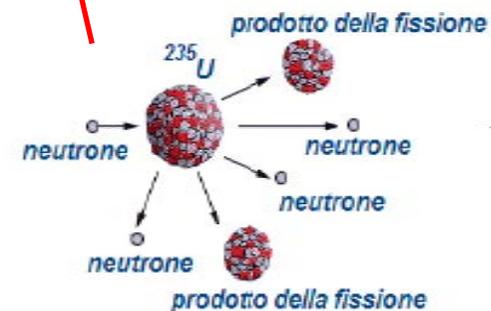
$$A = Z + N$$



FUSIONE

$$E = mc^2$$

Equazione di Einstein

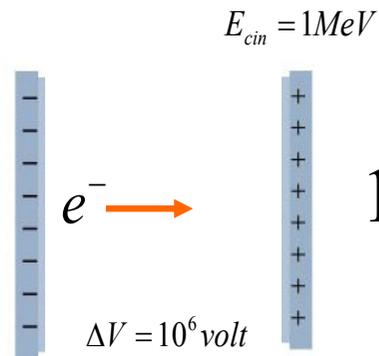


FISSIONE

ENERGIA dal nucleo - fusione e fissione

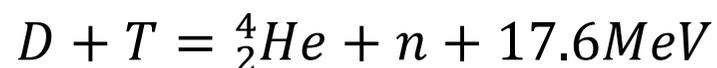
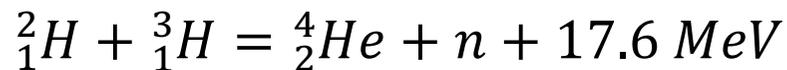
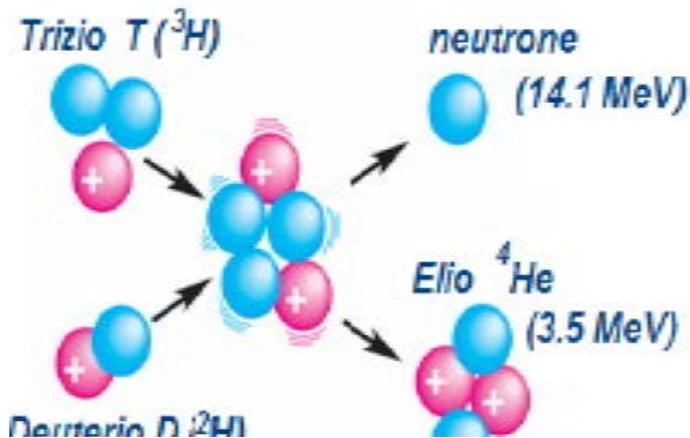
$$E = mc^2$$

Equazione di Einstein

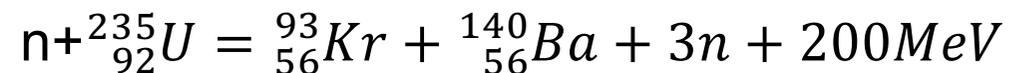
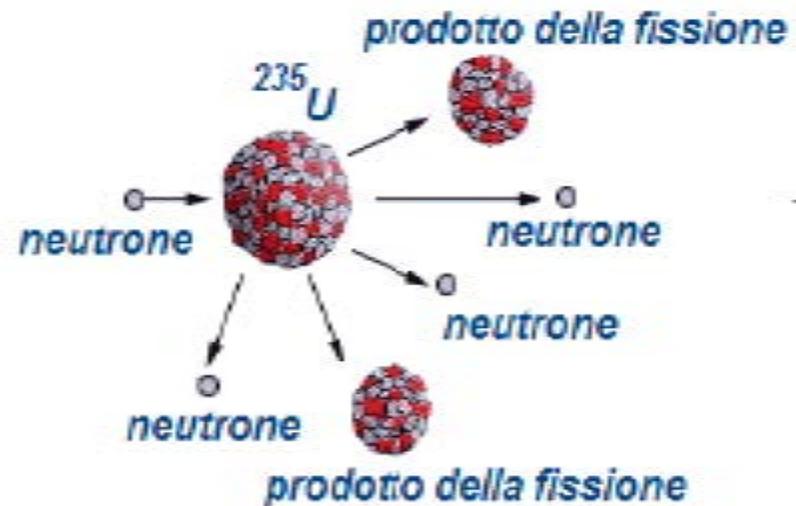


$$1\text{MeV} = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

FUSIONE



FISSIONE



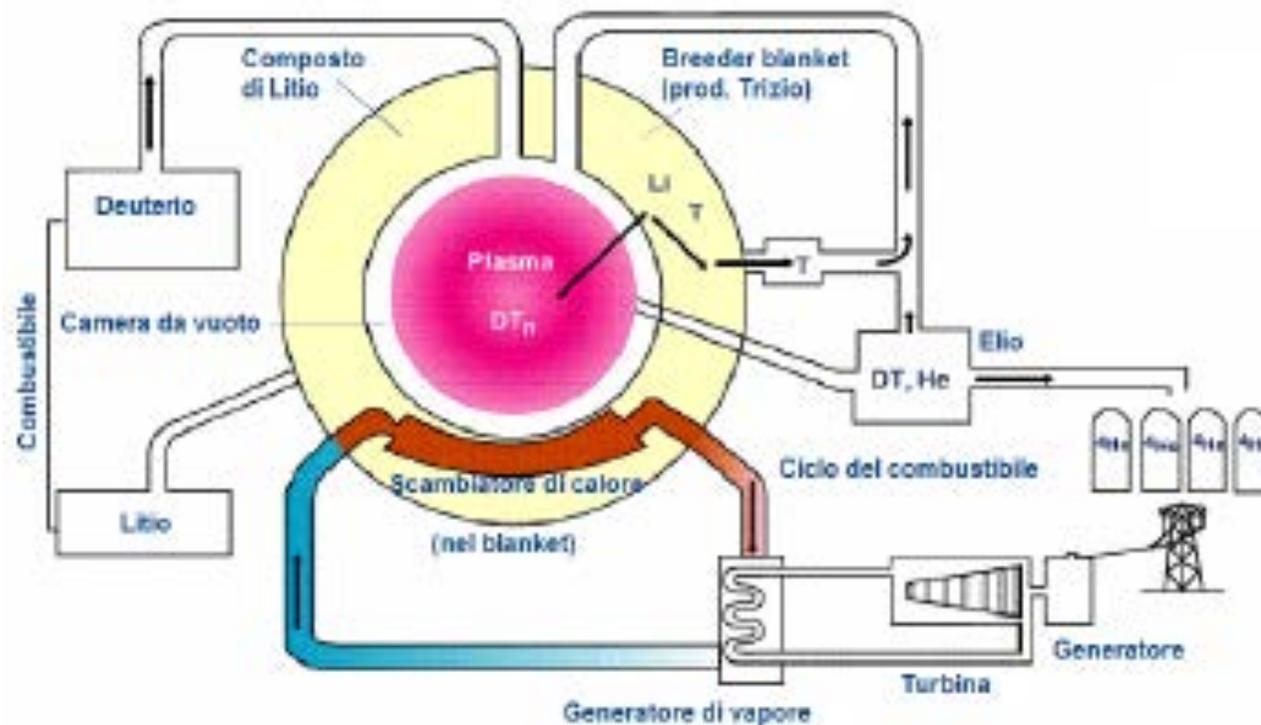
ENERGIA dal nucleo - fusione

Deuterio : 1 g in
39 litri di acqua

Litio : molto abbondante nelle
rocce, oceani, acque minerali



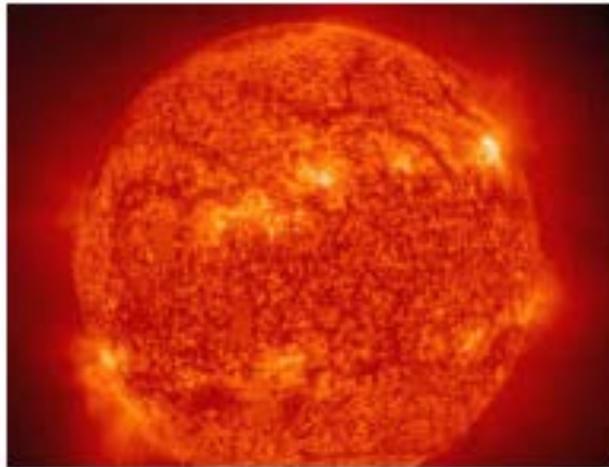
Trizio: prodotto in ciclo
chiuso nel reattore



ENERGIA dal nucleo - fusione

Per ottenere la fusione occorre

- riscaldare il gas di deuterio-trizio a 150-200 milioni di ° C
- mantenerlo in un'opportuna configurazione di equilibrio
- evitarne il contatto con le pareti della camera di reazione



già a 100 mila gradi, atomi e molecole si dissociano in nuclei positivi ed elettroni dando luogo a un nuovo stato della materia chiamato plasma.

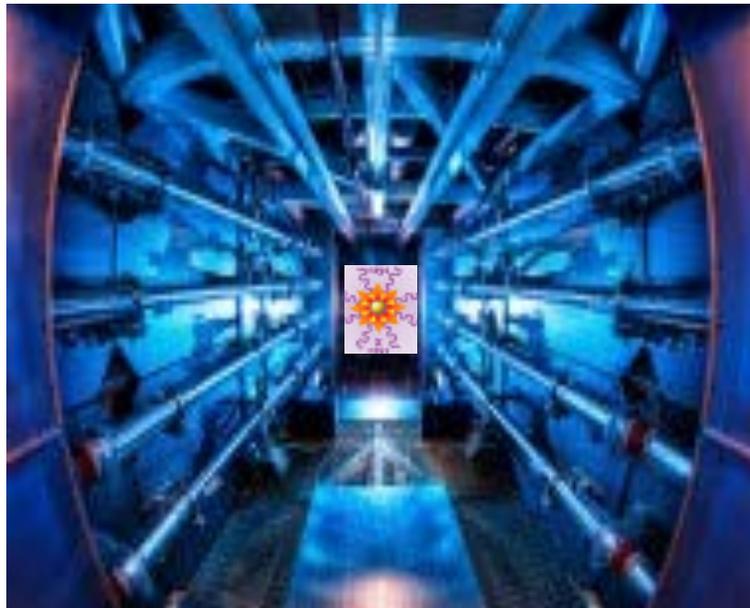
Fusione: confinamento

non ci sono materiali che possano reggere temperature di milioni di gradi

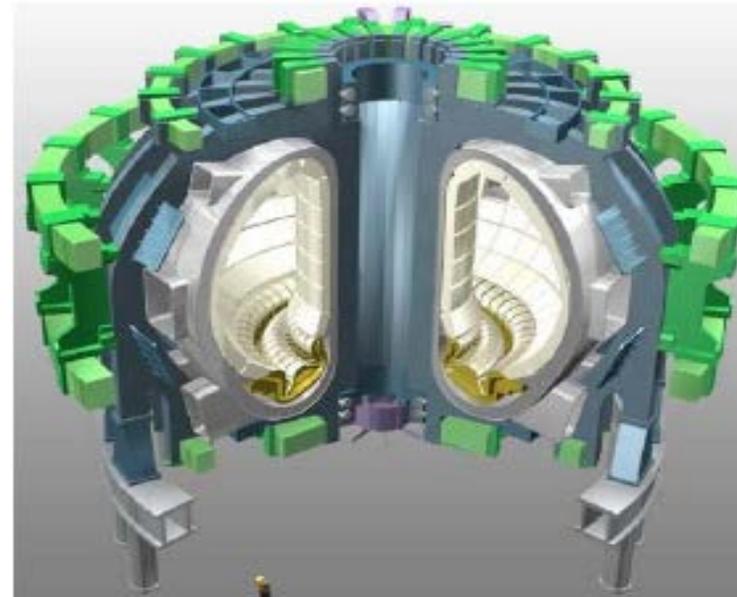
confinamento del plasma



inerziale



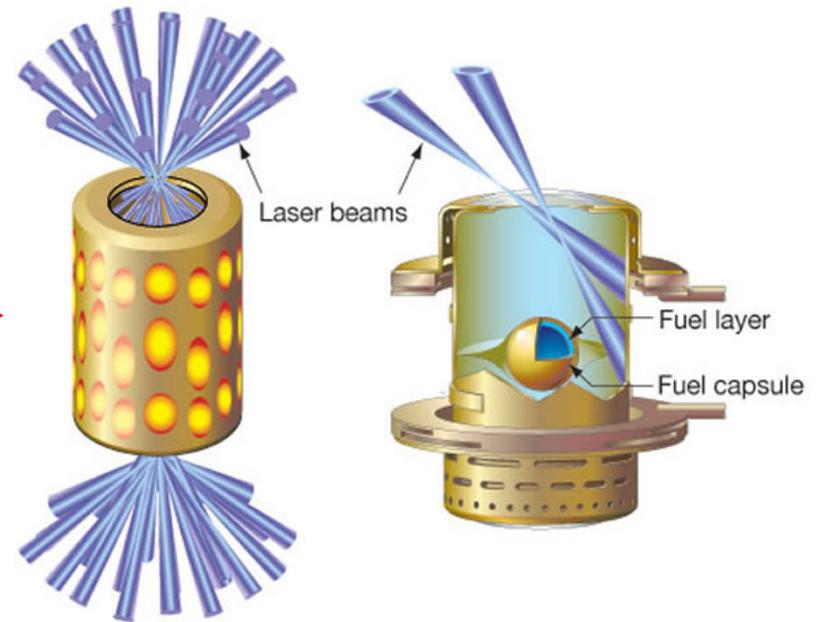
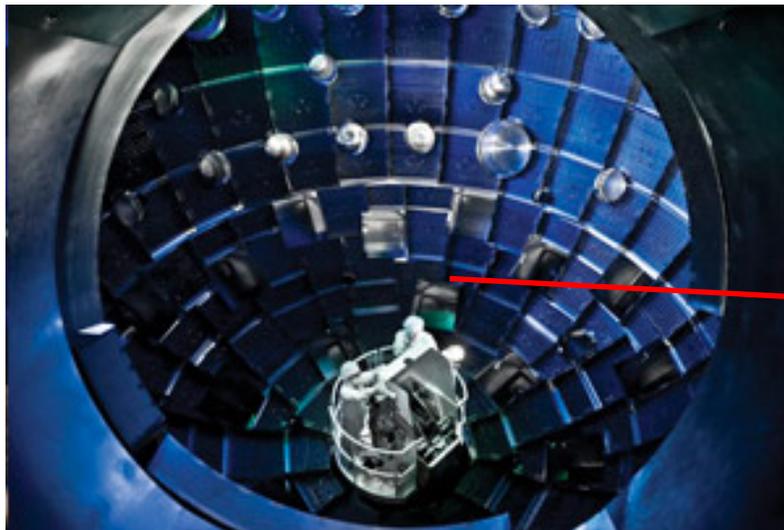
magnetico



Il plasma è confinato in una camera a forma di ciambella mediante intensi campi magnetici prodotti da bobine magnetiche avvolte intorno alla camera stessa

Confinamento inerziale

The National Ignition Facility (NIF) at Lawrence Livermore National Laboratory in California



192 fasci laser

29 settembre 2014

1800 kJ: energia cinetica di un camion di 2 tonnellate a 160 km/h



14 kJ: energia cinetica di una palla da tennis a 80 km/h

Guadagno di potenza = $14/1800 = 0.008$

Confinamento magnetico

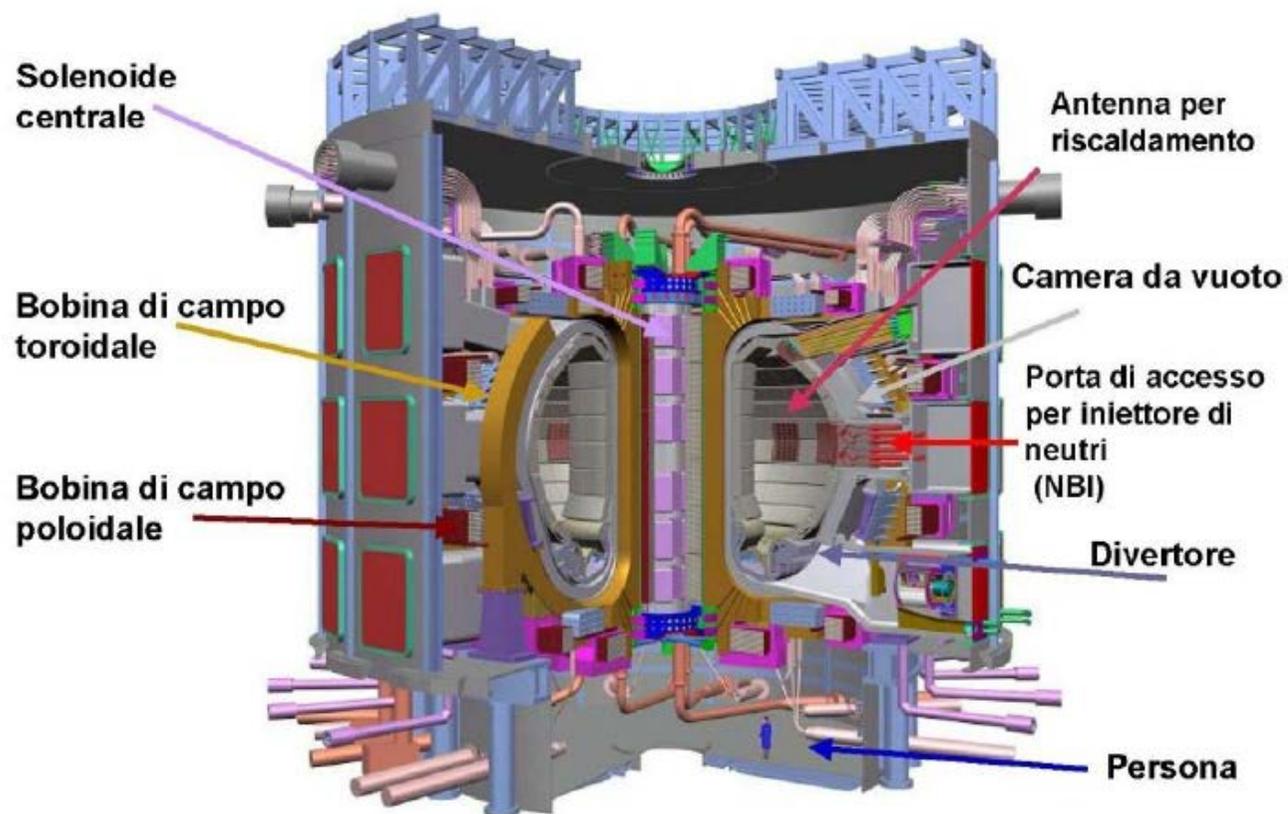
JET (*Joint European Torus*)

International Thermonuclear Experimental Reactor

Progetto ITER

JET	0.65 (1997)
ITER	5 - 10
Reattore	40 - 60

UE, Cina, Giappone, Corea, Russia, USA



Fusione: prospettive

Il reattore sperimentale ITER dovrà dimostrare entro i prossimi 15 anni la possibilità di ottenere un plasma che brucia producendo un buon guadagno di energia (10)

Si aprirà così la strada verso la costruzione di DEMO, il primo reattore dimostrativo, in 30-40 anni

Il coinvolgimento dell'Industria, così come la formazione e il training delle giovani generazioni saranno condizione necessaria per il raggiungimento dell'obiettivo finale: l'energia da fusione.

<https://www.youtube.com/watch?v=XNcGpQCX8a0>

<https://youtu.be/vPS-epGPJmg>

ENERGIA dal nucleare — confronto con fonti fossili

COMBUSTIBILE	H _i [MJ/kg]
Petrolio greggio	41,9
Benzina auto	44,0
GPL	45,7
Gasolio	42,9
Gas naturale	35,9
Metano	37,8
Coke	30,2
Litantrace	31,5

Fusione

250 g di D + 750 g di ⁶Li
216 milioni di MJ

Fissione

1000 g di ²³⁵U
82 milioni di MJ

Consumo giornaliero di una centrale da 3000 MW

in 1 giorno = 24 h produce energia termica pari a

$3000 \text{ MW} \times 24 \text{ h} = 72 \text{ GWh}$

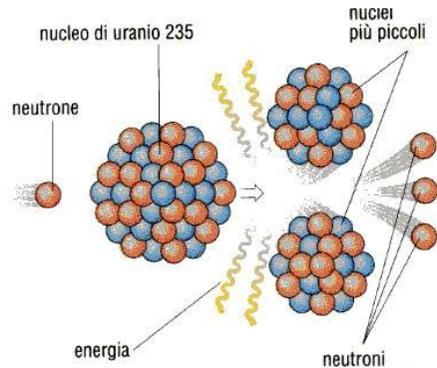
si consumano

3 kg ²³⁵U

5880 ton di petrolio

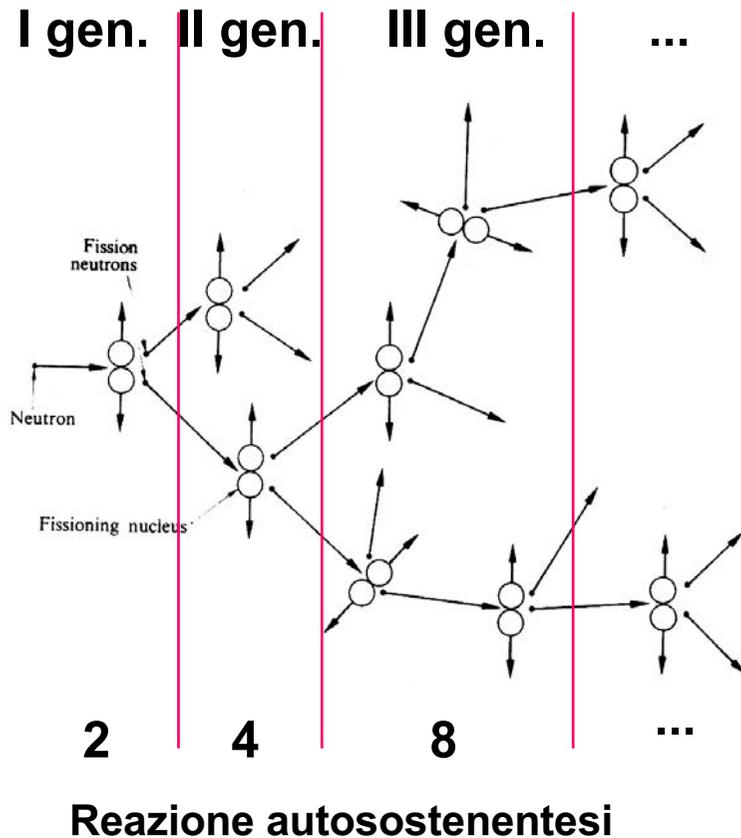
7800 ton di carbone

Fissione – la reazione a catena



FATTORE DI MOLTIPLICAZIONE

$$K = \frac{n. \text{ in data gen.}}{n. \text{ in gen. prec.}}$$



$$K \begin{cases} < 1 \rightarrow \text{pop. decresc.} \rightarrow r. \text{ sottocrit.} \\ = 1 \rightarrow \text{pop. costante} \rightarrow \text{REATTORE CRITICO} \\ > 1 \rightarrow \text{pop. crescente} \rightarrow r. \text{ sopracrit.} \end{cases}$$

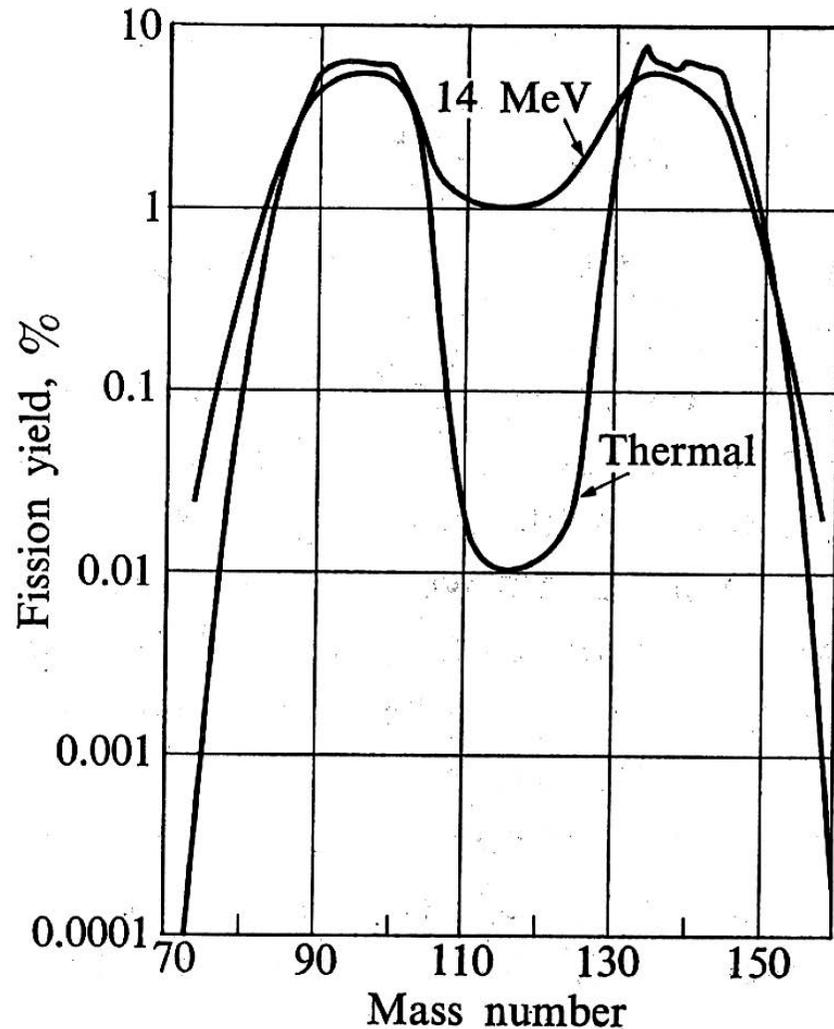
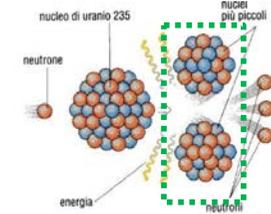
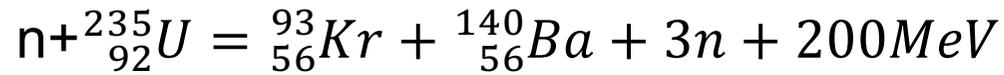
In un reattore nucleare
la reazione procede in maniera
controllata

Due problem da risolvere

Fuga dei neutroni
dal sistema

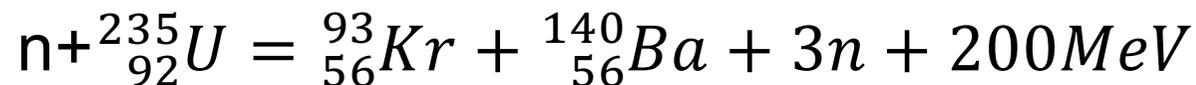
Catture parassite
dei neutroni

I prodotti di fissione – chi sono?

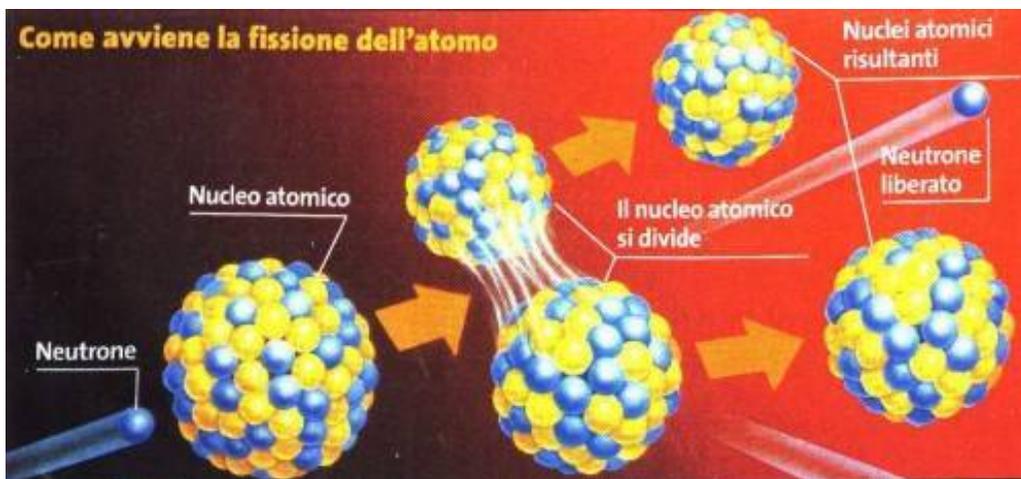


Nuclide	Half-life	Activity (PBq)
${}^{133}\text{Xe}$	5.3 d	6 500
${}^{131}\text{I}$	8.0 d	3 200
${}^{134}\text{Cs}$	2.0 y	180
${}^{137}\text{Cs}$	30.0 y	280
${}^{132}\text{Te}$	78.0 h	2 700
${}^{89}\text{Sr}$	52.0 d	2 300
${}^{90}\text{Sr}$	28.0 y	200
${}^{140}\text{Ba}$	12.8 d	4 800
${}^{95}\text{Zr}$	1.4 h	5 600
${}^{99}\text{Mo}$	67.0 h	4 800
${}^{103}\text{Ru}$	39.6 d	4 800
${}^{106}\text{Ru}$	1.0 y	2 100
${}^{141}\text{Ce}$	33.0 d	5 600
${}^{144}\text{Ce}$	285.0 d	3 300

I prodotti di fissione – sono radioattivi



L'energia prodotta dalla fissione
la troviamo come energia
cinetica
dei prodotti di fissione



Sono radioattivi

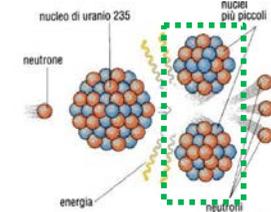


RIFIUTI RADIOATTIVI



emettono:
raggi beta (elettroni)
raggi gamma
neutrini

I prodotti di fissione – producono calore

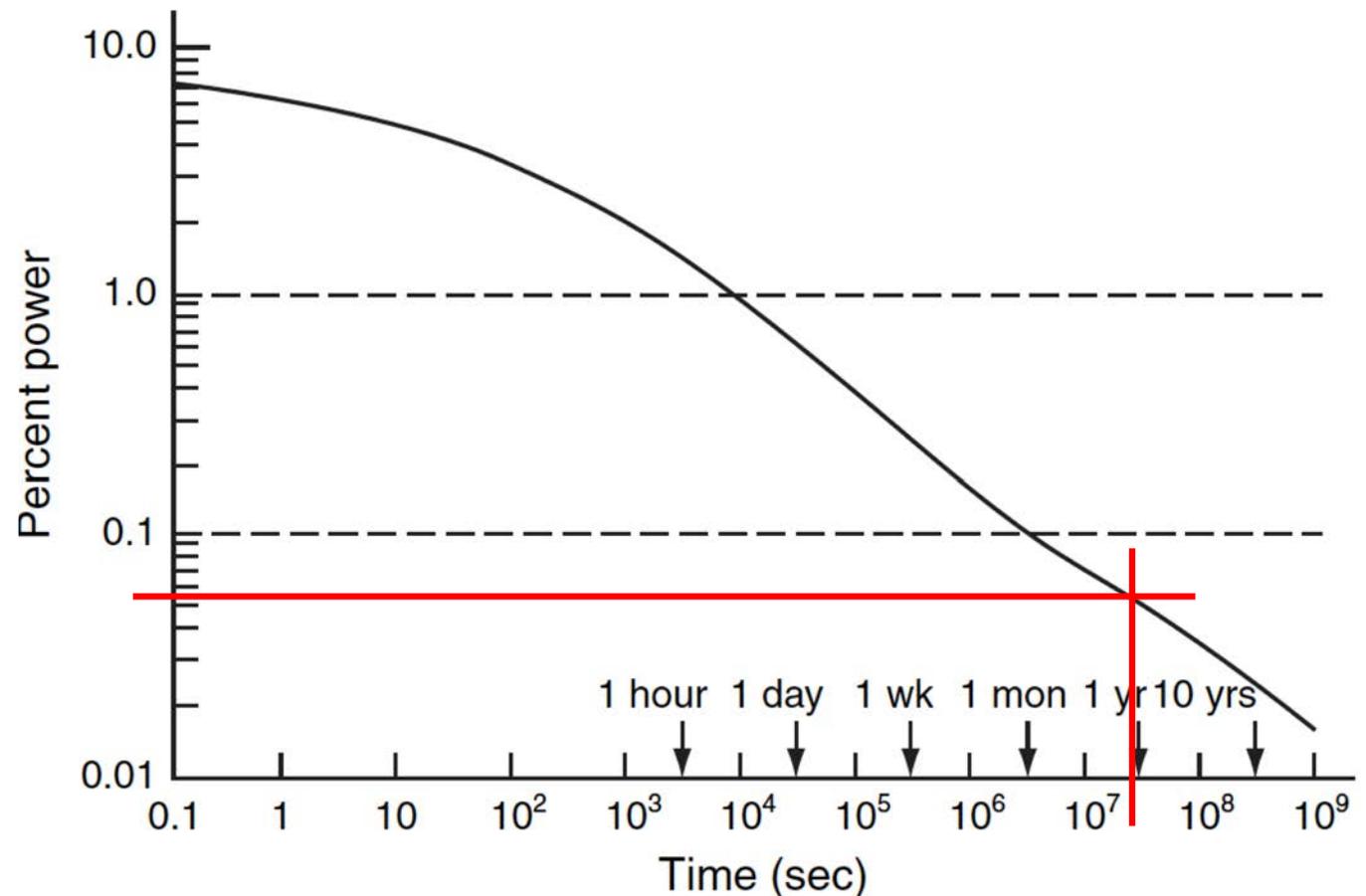


Sono radioattivi

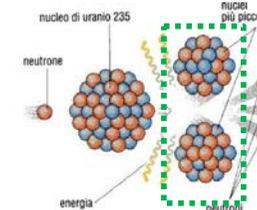


Producono calore
anche a reattore spento

**Fusione del nocciolo
se non interviene il
Sistema di
Raffreddamento di
Emergenza**



I prodotti di fissione - Fukushima



Sono radioattivi



Producono calore
anche a reattore spento

**Fusione del nocciolo
se non interviene il
Sistema di
Raffreddamento di
Emergenza**

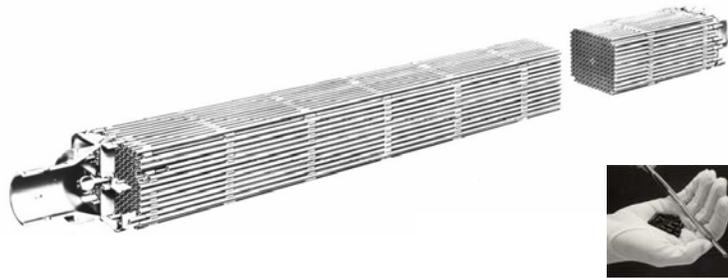
Incidente di Fukushima

11 marzo 2011



I componenti essenziali del nocciolo del reattore

In un reattore nucleare
la reazione procede in maniera
controllata



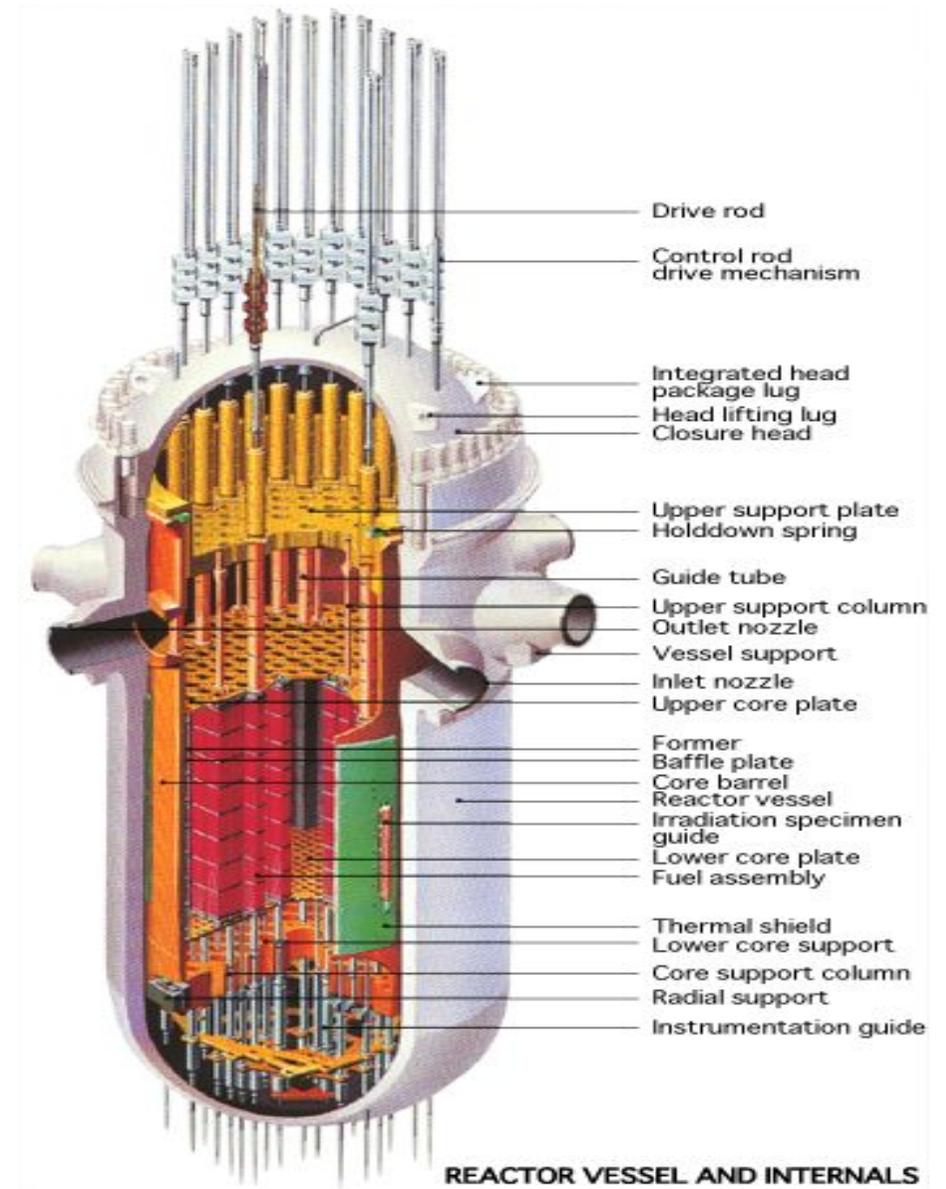
IL COMBUSTIBILE (^{235}U - ^{238}U)

IL MODERATORE (H_2O , D_2O , Be, Grafite ...)

IL RIFLETTORE (H_2O , D_2O , Be, Grafite ...)

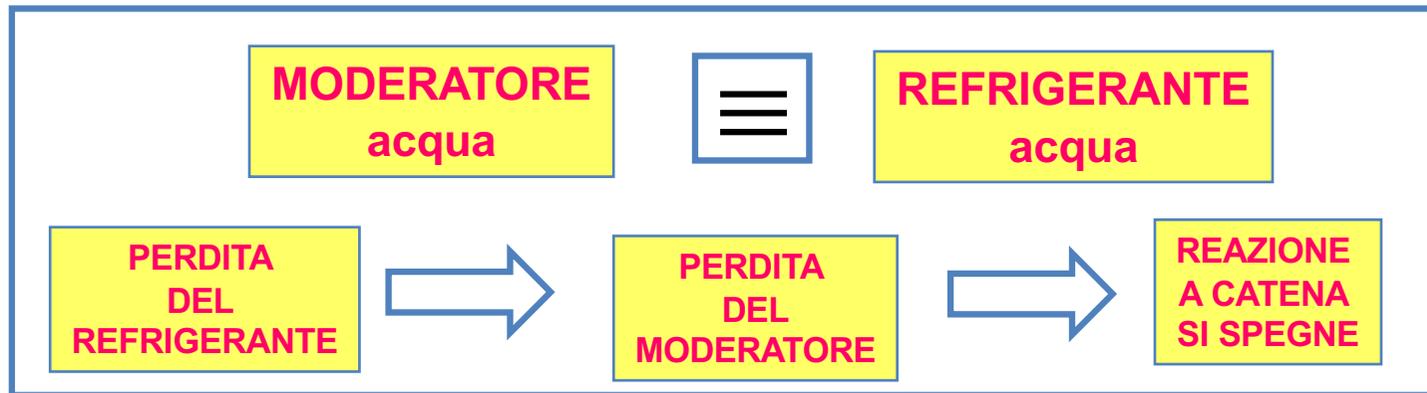
IL REFRIGERANTE (H_2O , D_2O , CO_2 ...)

LE BARRE DI CONTROLLO (B, Cd)



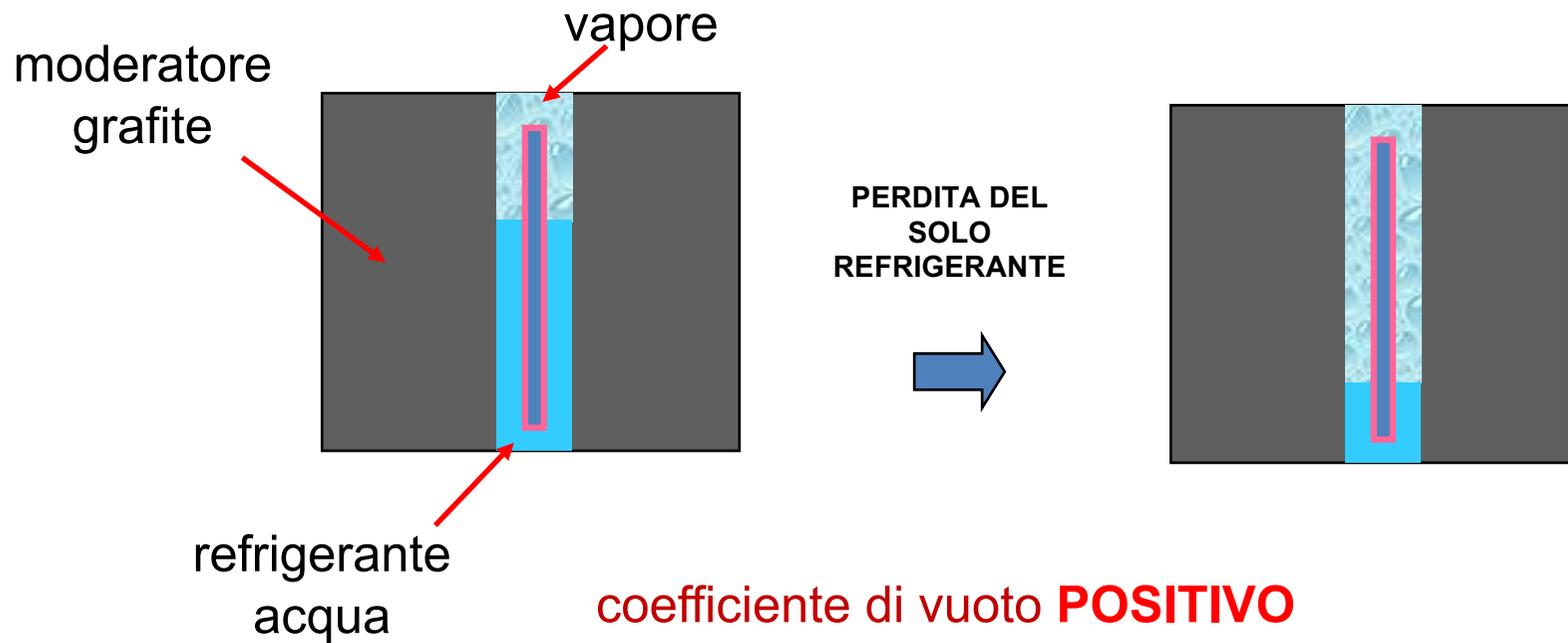
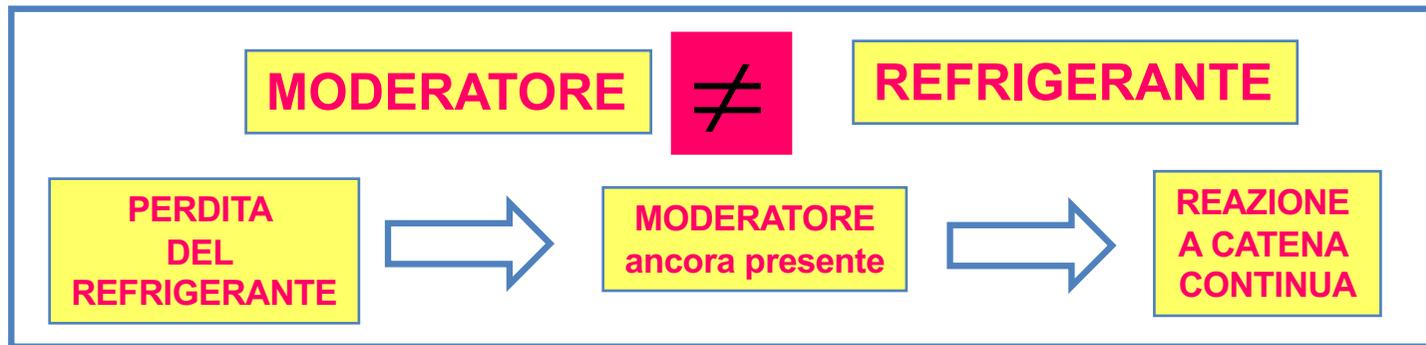
La sicurezza intrinseca coefficiente di vuoto negativo

Senza il rallentamento dei neutroni
la reazione a catena si spegne



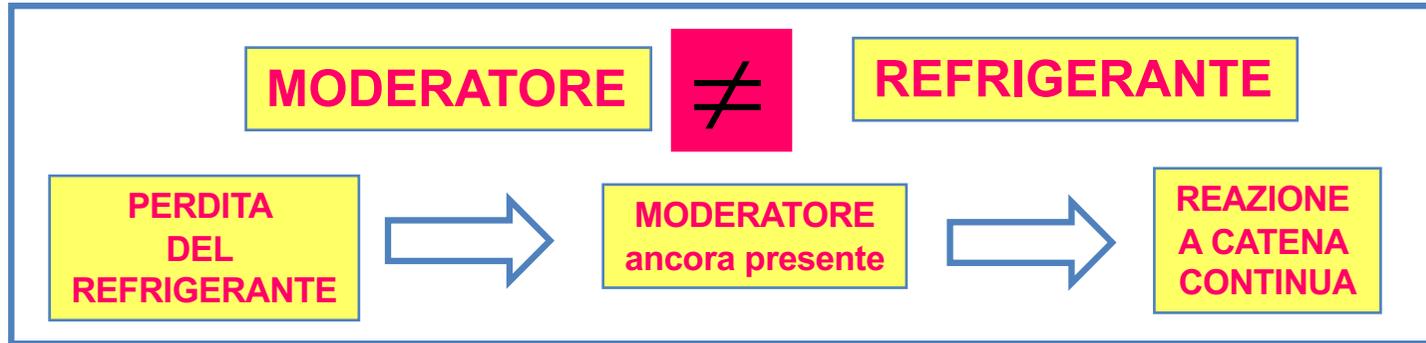
coefficiente di vuoto **NEGATIVO**
OK per la sicurezza

La sicurezza intrinseca coefficiente di vuoto positivo



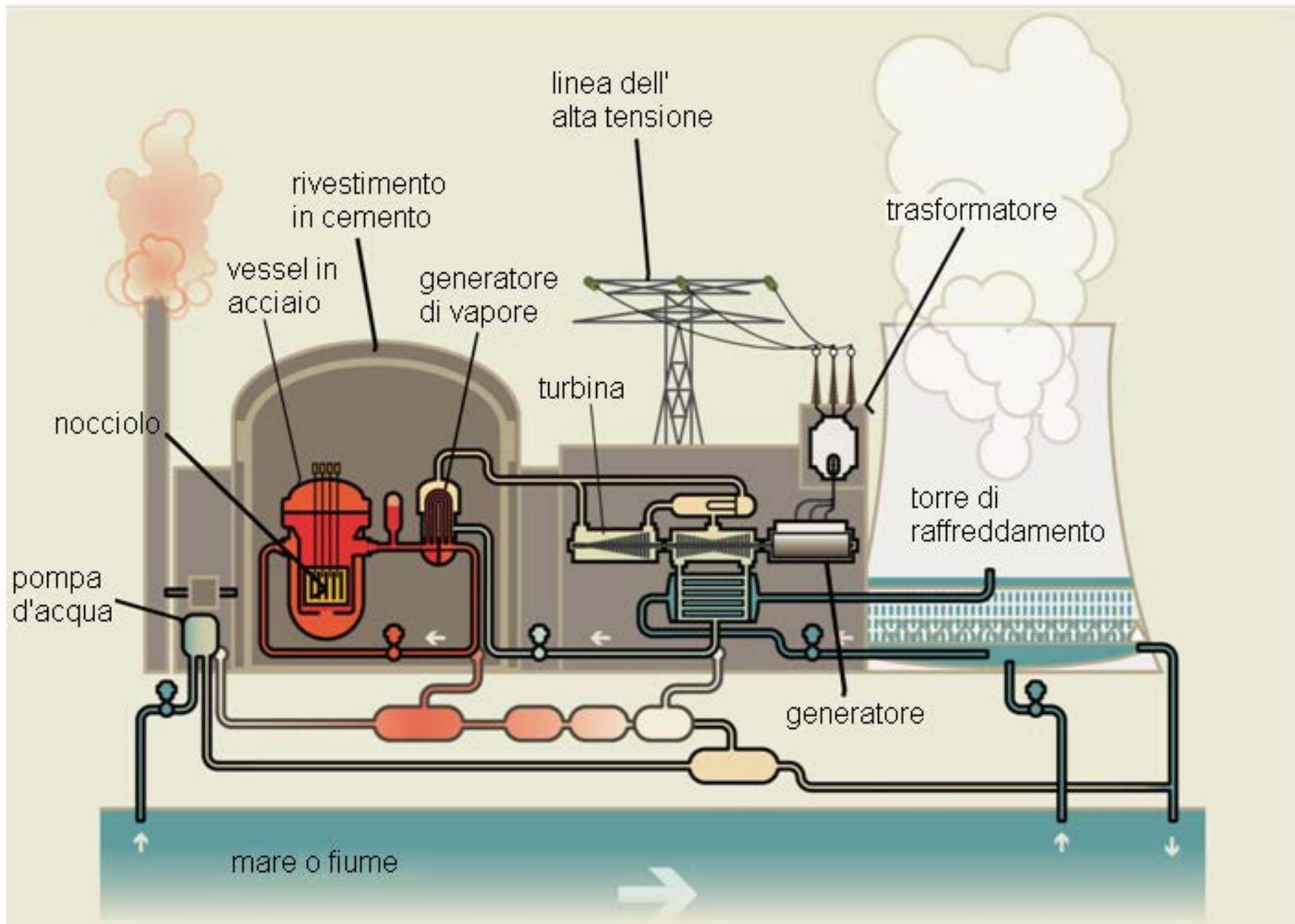
coefficiente di vuoto **POSITIVO**
molto pericoloso

Coefficiente di vuoto positivo - Chernobyl



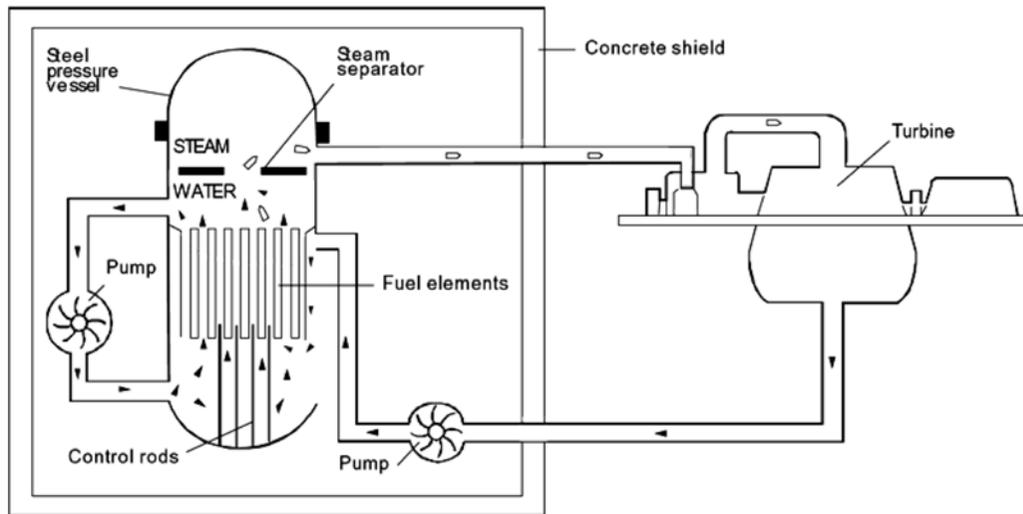
coefficiente di vuoto
POSITIVO
molto pericoloso
Chernobyl

Schema di un impianto nucleare – energia elettrica



Tipi di reattore BWR

Boiling Water Reactor



BWR

A CICLO DIRETTO

progettato per
funzionare in
modo
da avere circa il
15% di acqua
sotto forma
di vapore
immesso
direttamente in
turbina

Moderatore: acqua leggera

Refrigerante: acqua leggera

Combustibile: uranio arricchito al 3-5%

90 – 100 barrette

in 750 el. di comb. circa 140 tonn. di uranio

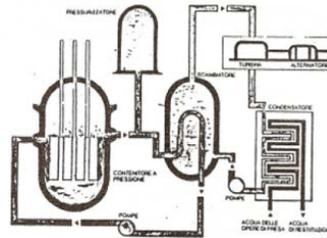
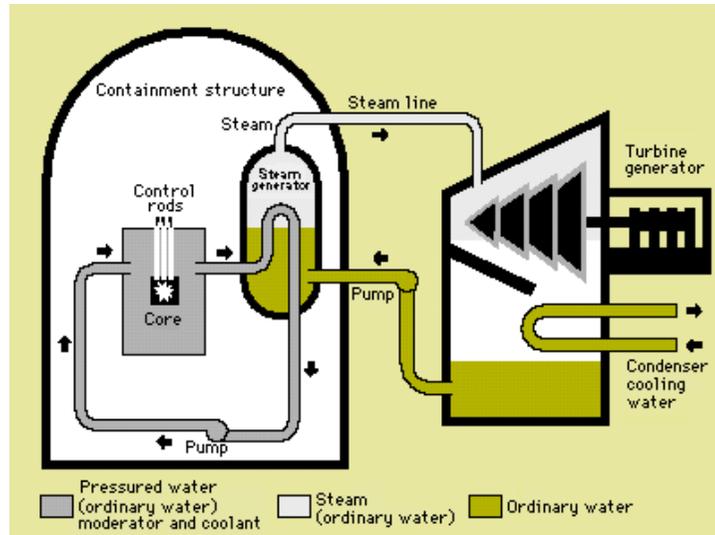
Circuito di raffreddamento primario a 75 atm

Acqua a 285°C

Coefficienti di temperatura e di vuoto: negativi

Tipi di reattore PWR

Pressurised Water Reactor



A CICLO
INDIRETTO

Il fluido termovettore
asporta il calore dal
nocciolo e lo cede,
attraverso uno
scambiatore/generatore
di vapore,

ad un secondo
fluido termovettore
che viene immesso
in turbina

Il più diffuso
(circa 230 + alcune
centinaia usati nella
propulsione marina)

Moderatore: acqua leggera

Refrigerante: acqua leggera

Combustibile: uranio arricchito al 3-5%

in 150-200 el. di comb. (200-300 barrette)

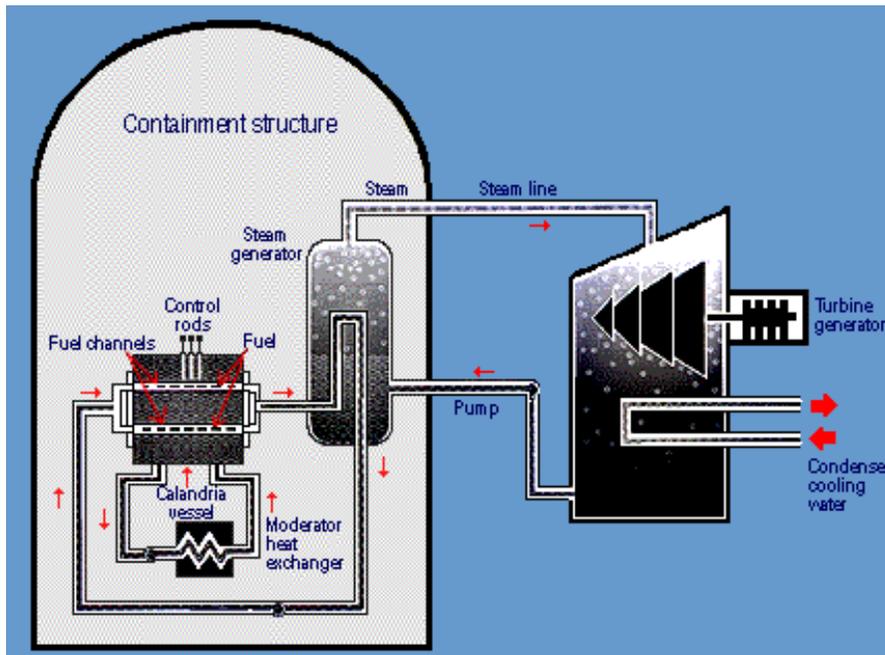
circa 80-100 tonn. di uranio

Circuito di raffreddamento primario chiuso pressurizzato a **150 atm**

Acqua a 325°C

Coefficienti di temperatura e di vuoto: negativi

Tipi di reattore PHWR



A CICLO INDIRETTO CANDU Canadian Deuterium Uranium

Progettato negli anni
'50 in Canada

Reattore ad uranio
naturale con
moderatore ad acqua
pesante

Moderatore: acqua pesante

Refrigerante: acqua pesante

Combustibile: uranio naturale allo 0.7%

37 barrette da 50 cm per ogni elemento di
comb.

Circuito di raffreddamento primario pressurizzato con
acqua a 290°C

Coefficienti di temperatura e di vuoto: negativi

Diffusione limitata
non sviluppati in USA e
URSS perché possono
essere usati per
produrre plutonio

Tipi di reattore – reattori a grafite

I reattori a grafite discendono direttamente dalla “pila di Fermi”

MAGNOX

AGR

HTGR

RBMK

I primi sfruttati per la produzione di energia elettrica perché potevano utilizzare uranio naturale (no arricchimento)

Favoriti anche da interesse bellico per la produzione di Pu

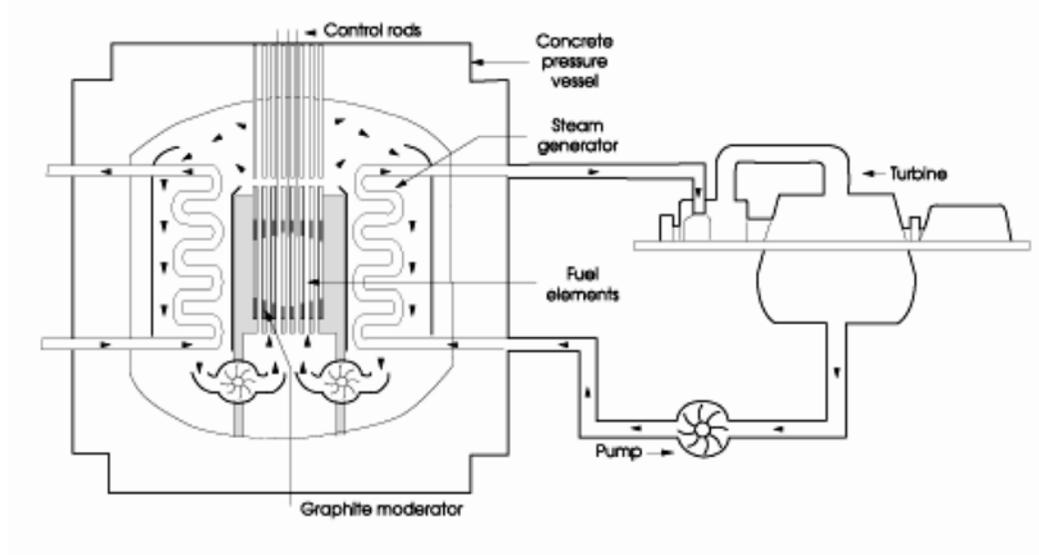
Sviluppati negli anni '60 nel Regno Unito, in Germania e negli USA

Non hanno avuto grande diffusione

Rinato interesse per gli HTGR (High Temperature **Gas** Reactor) in GEN IV potrebbero essere usati per la produzione di idrogeno

Tipi di reattore AGR

Advanced Gas-cooled Reactor



Moderatore: grafite

Refrigerante: **CO₂ gassosa: non assorbe neutroni**

Combustibile: uranio arricchito al 2.5-3.5%
in tubi di acciaio

Circuito di raffreddamento primario chiuso e CO₂ a 650°C

Coefficienti di temperatura e di vuoto: negativi

AGR

Un buon esempio

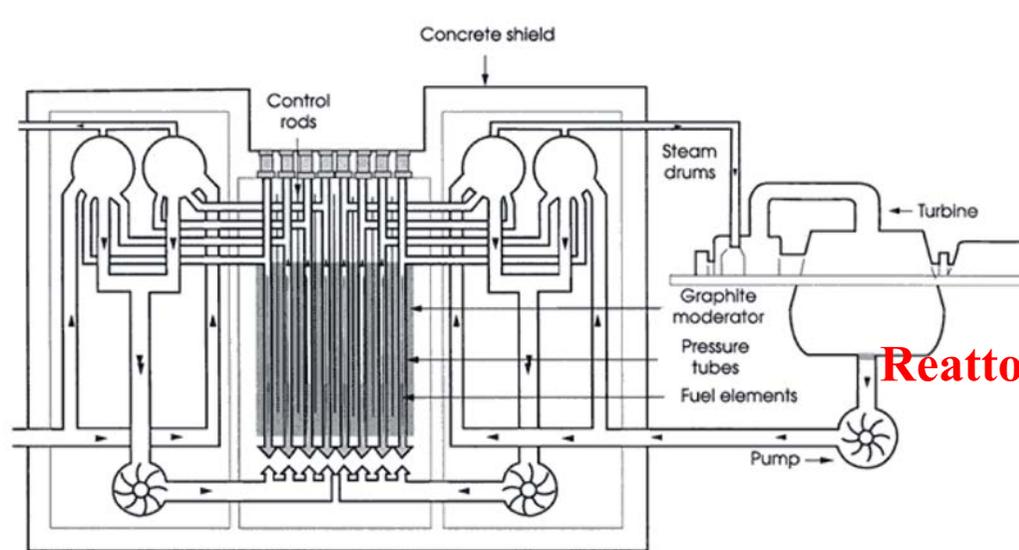
A CICLO
INDIRETTO

Seconda
generazione
dei reattori a
gas

Progettati in
Inghilterra
come
evoluzione dei
magnox

Tipi di reattore RBMK

Reactor **B**olshoi **M**oschnosti **K**analynyi



RBMK

Un cattivo esempio

**Reattore ad acqua bollente
di Chernobyl**

Ignalina

Kursk

Leningrad

Smolensk

Moderatore: grafite

Refrigerante: **acqua leggera bollente (assorbe neutroni)**

Combustibile: uranio arricchito al 2%, 18 barrette per elemento

in tubi in lega di zirconio lunghi 7 m; 192

tonn. di uranio

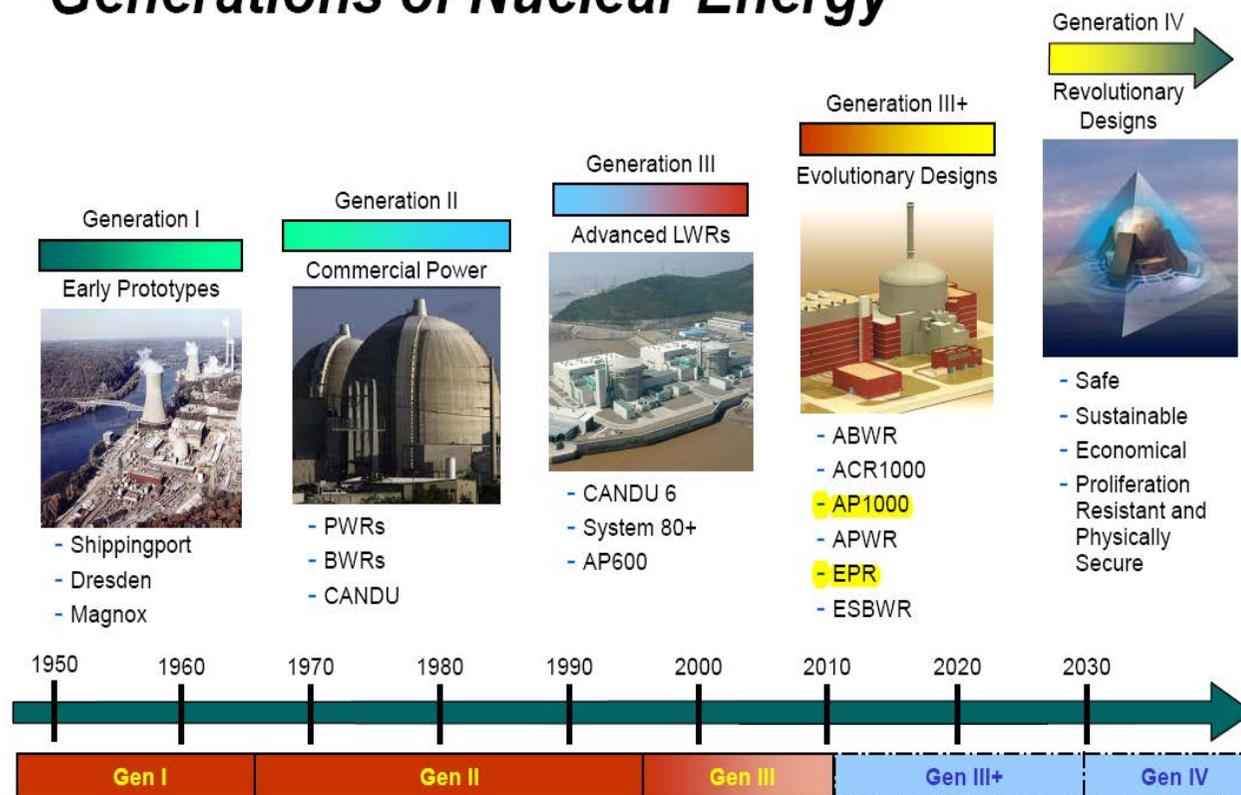
in 1680 canali in pressione

Coefficienti di temperatura: negativo

Coefficienti di vuoto: positivo

Tipi di reattore – le generazioni

Generations of Nuclear Energy



LA GENERAZIONE I NEGLI ANNI '50-'60 CON I PRIMI PROTOTIPI

LA GENERAZIONE II NEGLI ANNI '60 CON I PRIMI REATTORI COMMERCIALI IN FUNZIONE OGGI

LA GENERAZIONE III SVILUPPATA A PARTIRE DAGLI ANNI '90 reattori di tipo evolutivo disponibili oggi

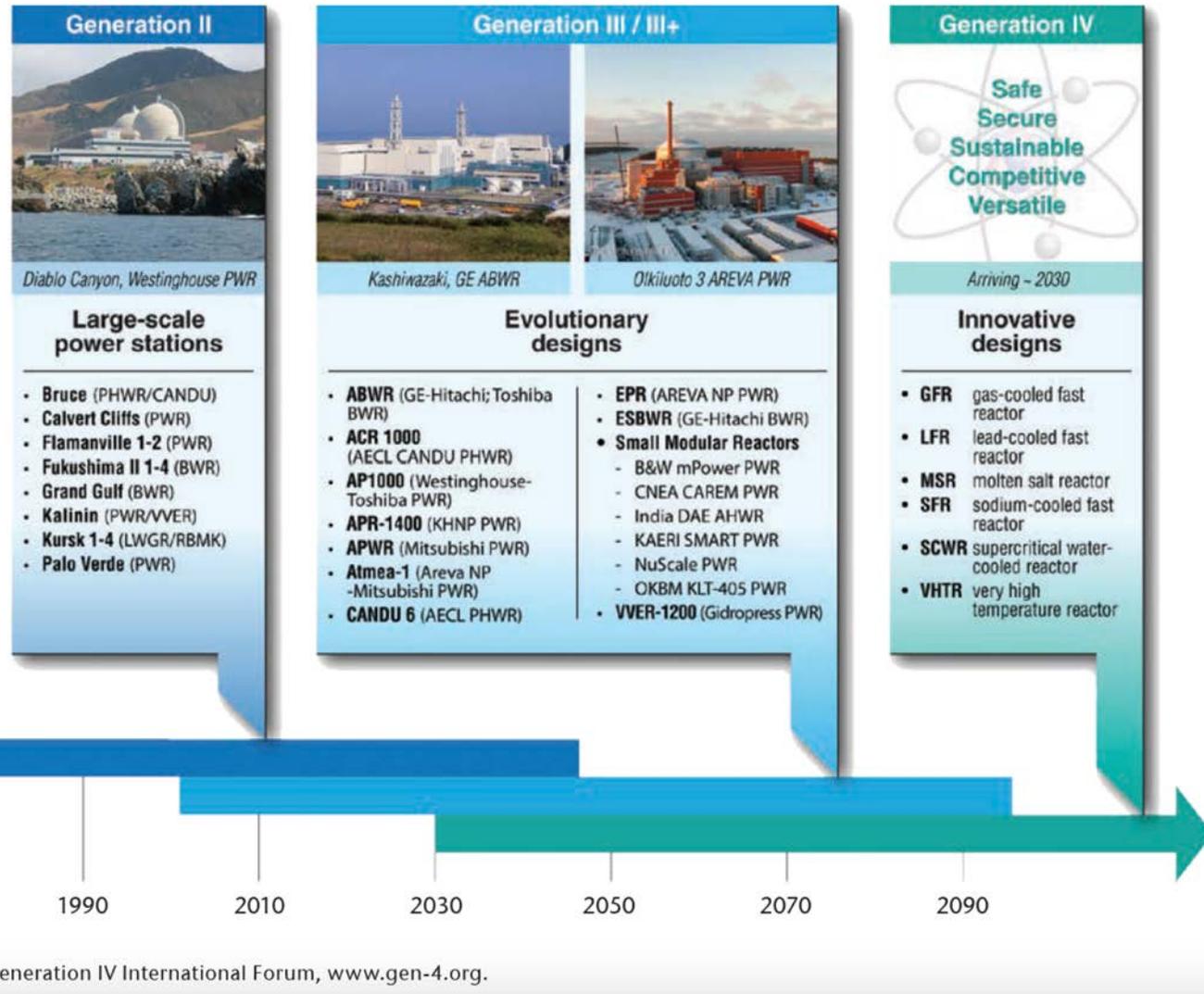
LA GENERAZIONE IV IN VIA DI SVILUPPO disponibili fra 20-30 anni

Tipi di reattore – le generazioni

Figure 7: Evolution of fission reactor technology

Technology Roadmap
Nuclear Energy

2015 edition



Source: Generation IV International Forum, www.gen-4.org.

Il database della IAEA

PRIS



The Database on Nuclear Power Reactors

The Power Reactor Information System (PRIS), developed and maintained by the IAEA for over five decades, is a comprehensive database focusing on nuclear power plants worldwide. PRIS contains information on power reactors in operation, under construction, or those being... [READ MORE »](#)

Registered User ENTRY

How to Register

CURRENT STATUS

443 NUCLEAR POWER REACTORS
IN OPERATION

393 084 MW_e TOTAL NET INSTALLED
CAPACITY

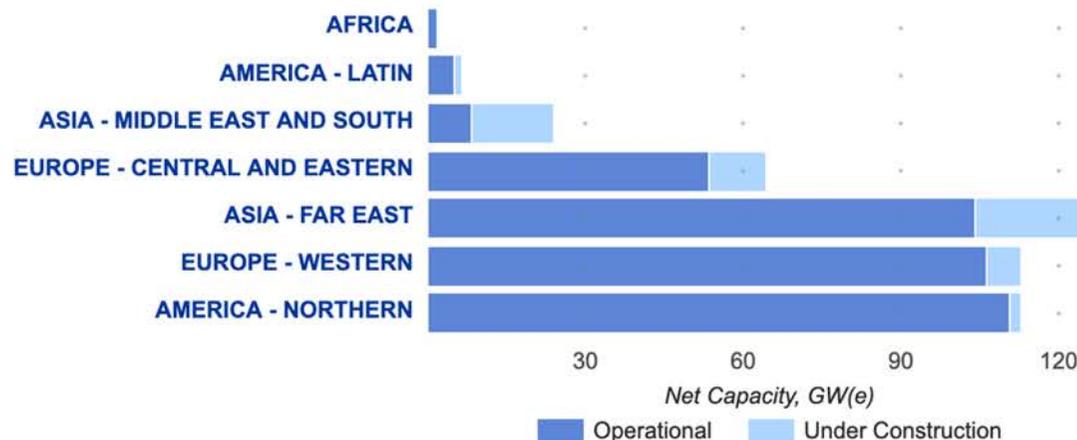
50 NUCLEAR POWER REACTORS
UNDER CONSTRUCTION

53 163 MW_e TOTAL NET INSTALLED
CAPACITY

18 850 REACTOR-YEARS OF
OPERATION

20-03-2021

REGIONAL DISTRIBUTION OF NUCLEAR POWER CAPACITY



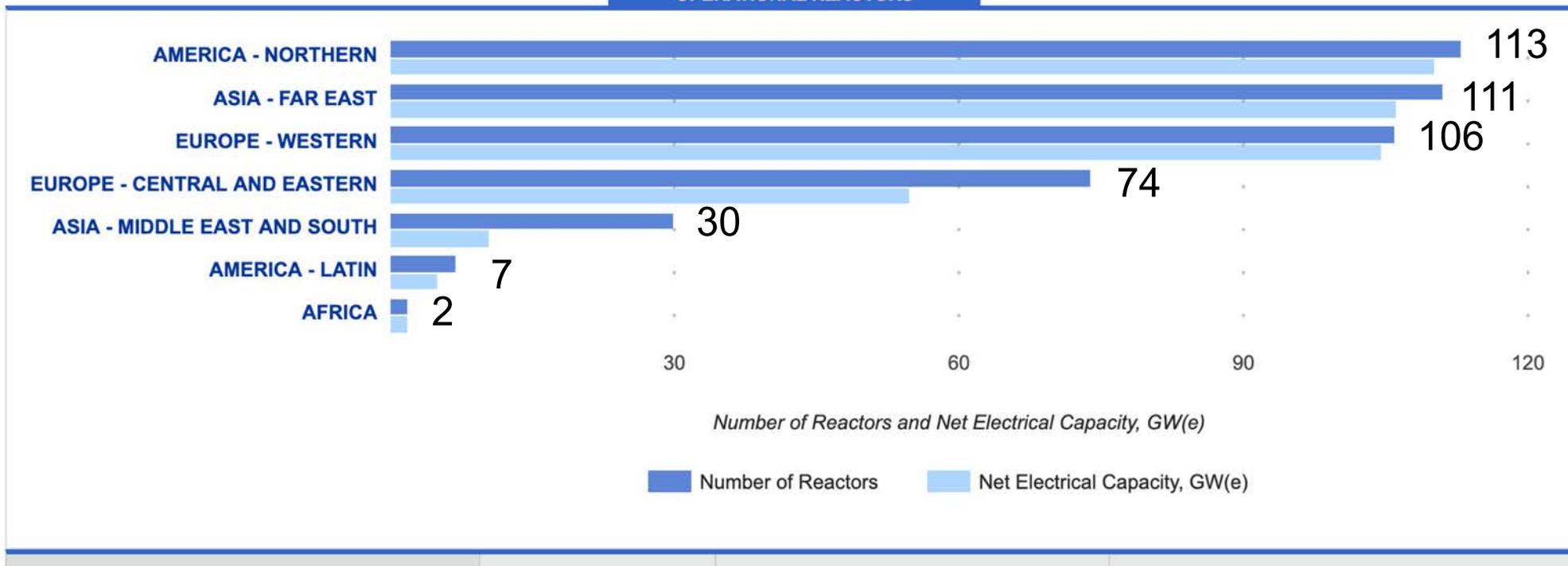
<https://www.iaea.org/PRIS/home.aspx>

Reattori in operazione per tipo

Operational & Long-Term Shutdown Reactors

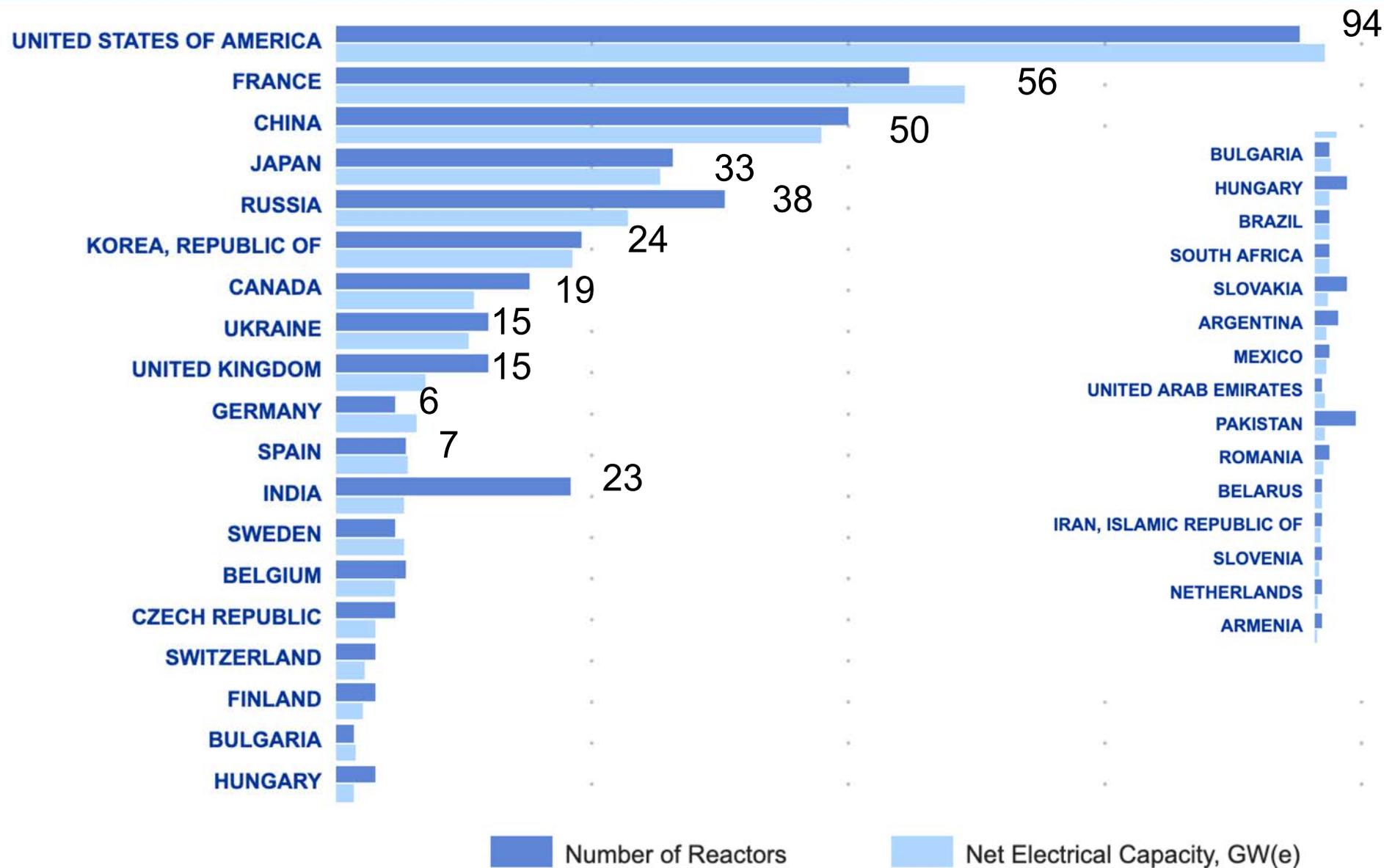
By Country By Type By Region

OPERATIONAL REACTORS



Reattori in operazione per tipo

OPERATIONAL REACTORS



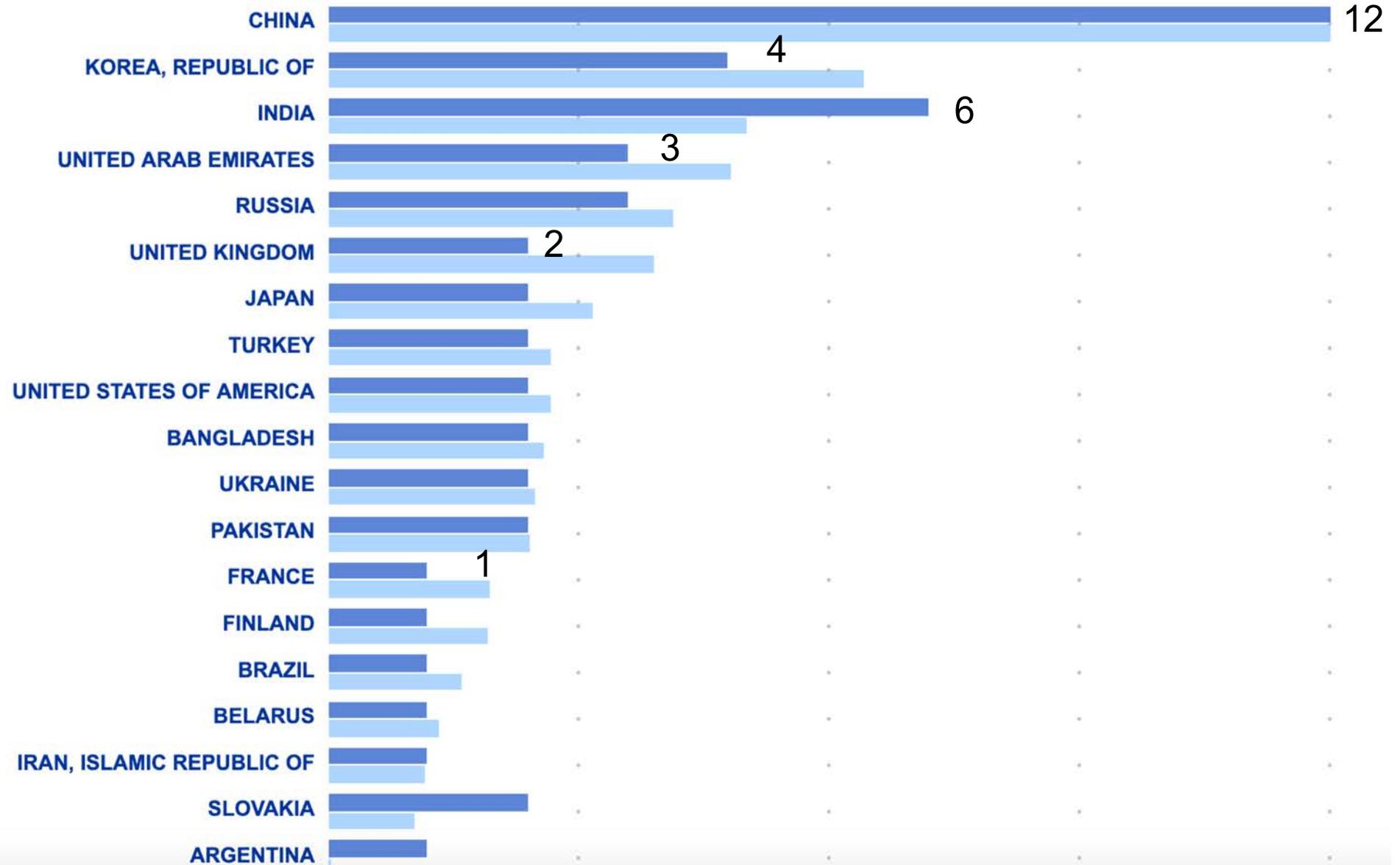
Under Construction Reactors

By Country

By Type

By Region

UNDER CONSTRUCTION REACTORS



Reattori in costruzione nel mondo

Number of reactors under construction by region

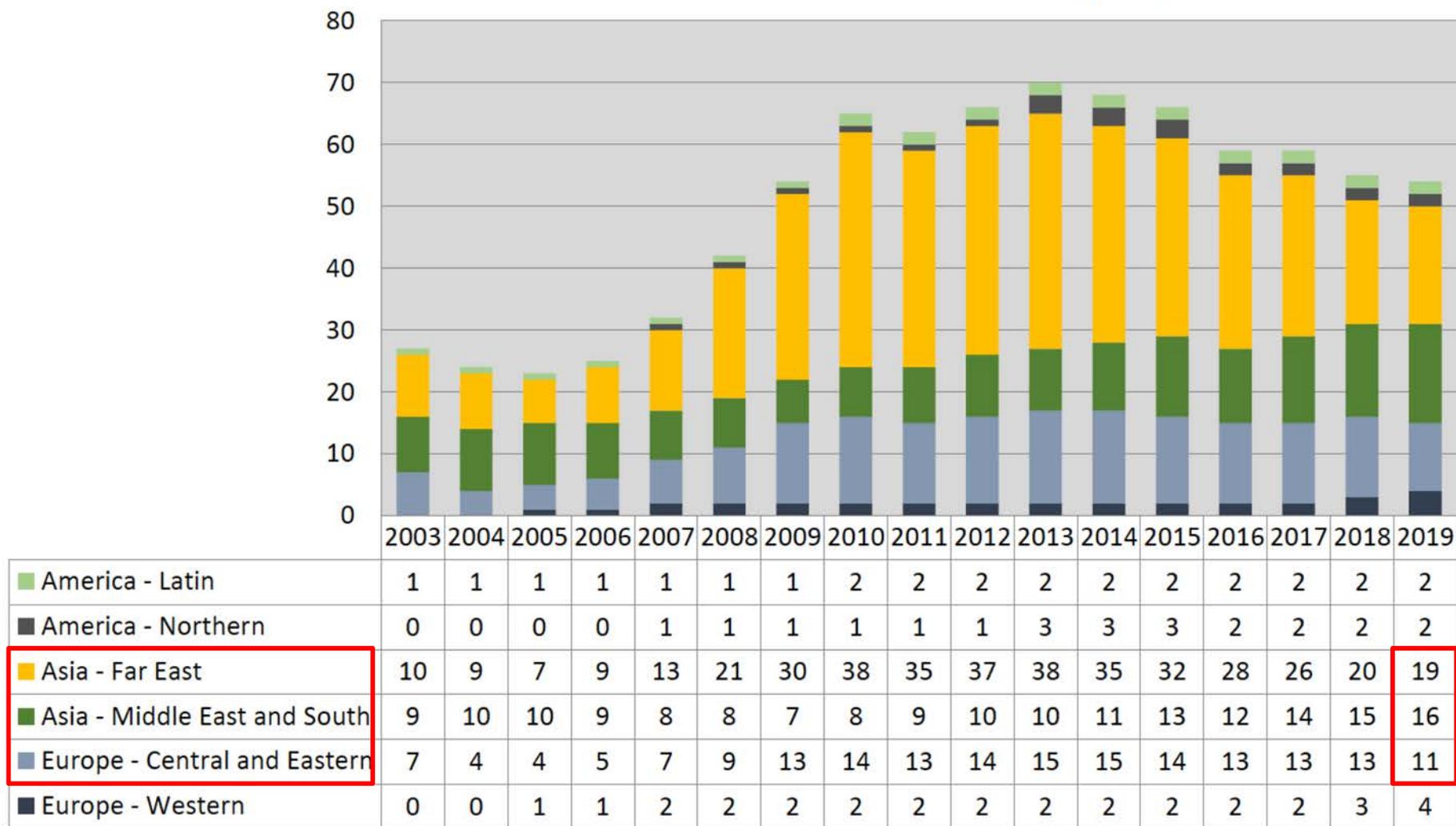
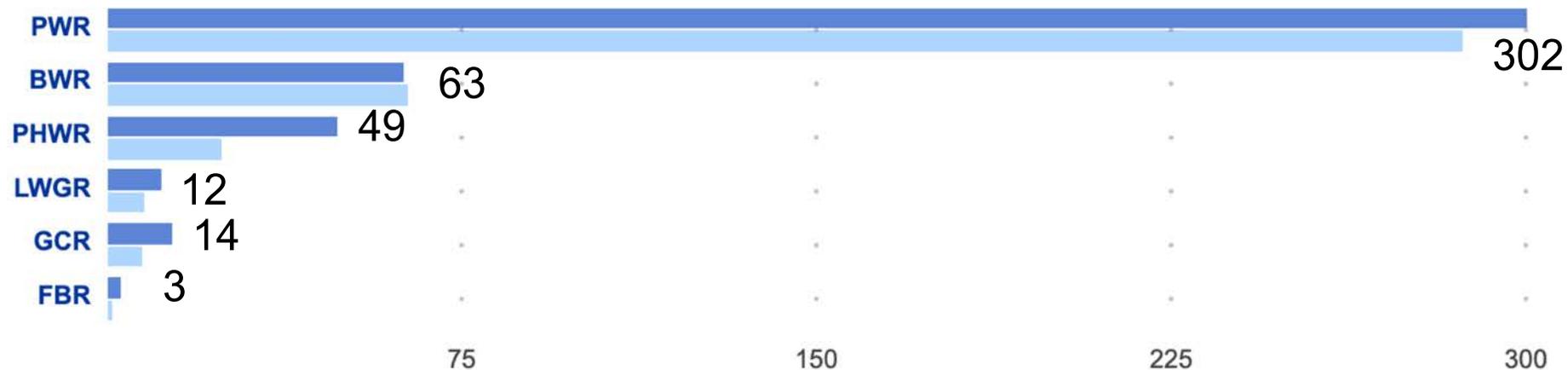


FIG. A-3. Number of reactors under construction by region.

(Source: IAEA Power Reactor Information System www.iaea.org/pris)

Reattori in operazione per tipo

OPERATIONAL REACTORS



Number of Reactors and Net Electrical Capacity, GW(e)

■ Number of Reactors ■ Net Electrical Capacity, GW(e)

Reattori generazione III caratteristiche

MAGGIORI REQUISITI DI SICUREZZA

- Gli eventi con **danneggiamento e fusione del combustibile** devono essere presi in considerazione **nel progetto** in modo integrato;
- Anche nelle **sequenze incidentali “severe”**, sebbene con probabilità estremamente basse, **non ci deve essere necessità di evacuazione della popolazione circostante** l’impianto; e l’eventuale contaminazione deve essere estremamente limitata nello spazio e nel tempo;
- **L’operatore deve essere essenzialmente un supervisore** e l’impianto deve rimanere in sicurezza anche in assenza di un suo intervento per un notevole lasso di tempo;
- **Le dosi ai lavoratori** dell’impianto devono essere **più basse** di quelle dei migliori impianti attuali;
- **I sistemi di sicurezza** devono essere **ridondanti, diversificati, separati** nello spazio ed indipendenti

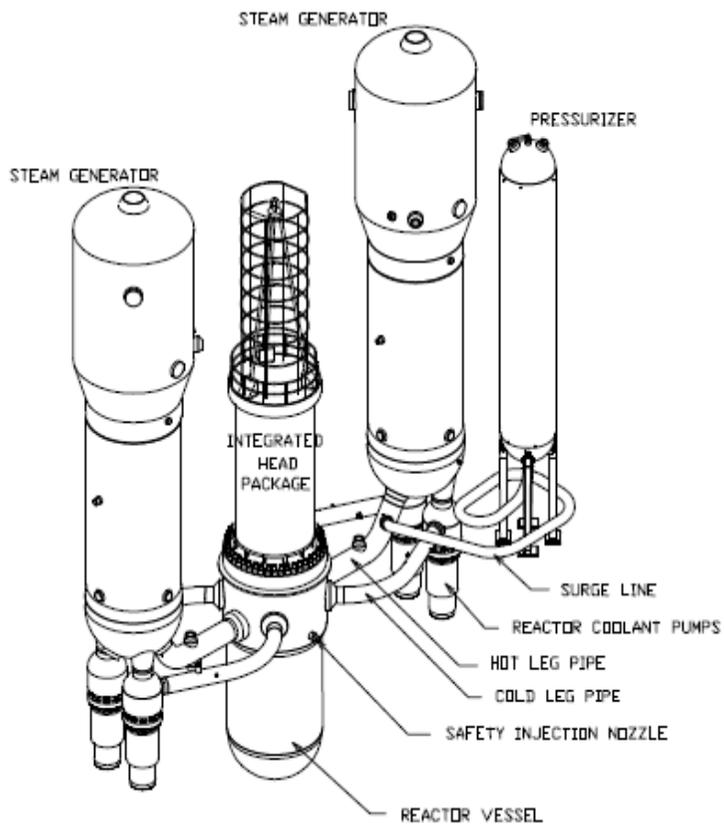
Reattori generazione III caratteristiche

MIGLIORI PRESTAZIONI

- Standardizzazione del progetto per accelerare tempi di licensing e realizzazione:
 - **tempi di costruzione** compresi tra **36 e 60 mesi** (tra primo getto ed esercizio commerciale);
 - tutti i **componenti** (eccetto vessel) **devono essere facilmente sostituibili**;
 - **vita operativa più lunga** (60 anni di vita di progetto);
- Burn-up del combustibile maggiore (**60 GWd/t**). Ciclo di refueling esteso. Fermate per ricarica brevi (meno di 14 giorni);
- Reattore in grado di operare in un sistema elettrico ad alta percentuale del nucleare (reattore con **caratteristiche di flessibilità per gestire il carico**);
 - **Fattore di disponibilità medio su 20 anni superiore al 90%**;
- Il nocciolo deve poter accettare almeno il 50% di MOX (**combustibile ad ossidi misti U/Pu**)

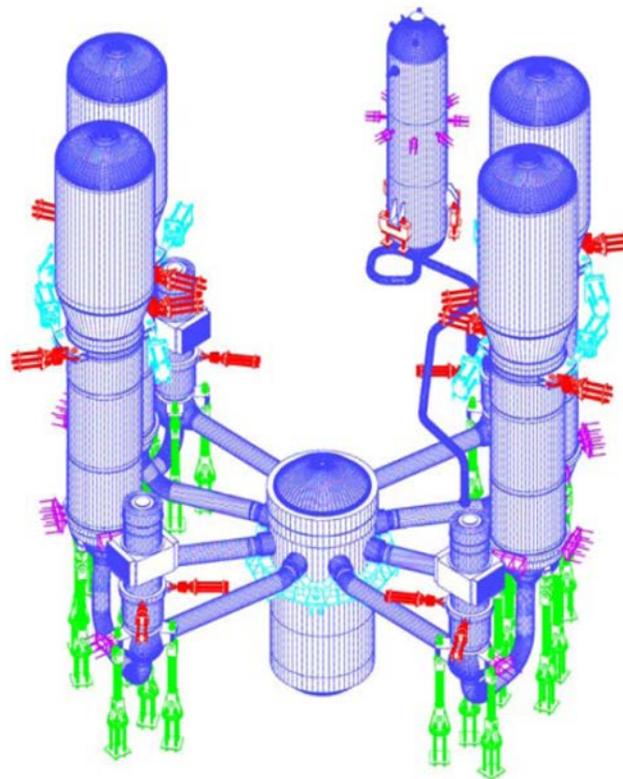
Reattori generazione III ridondanza per perdita di refrigerante

AP1000



Potenza elettrica installata (MWe)	1117
Numero di loops	2

EPR

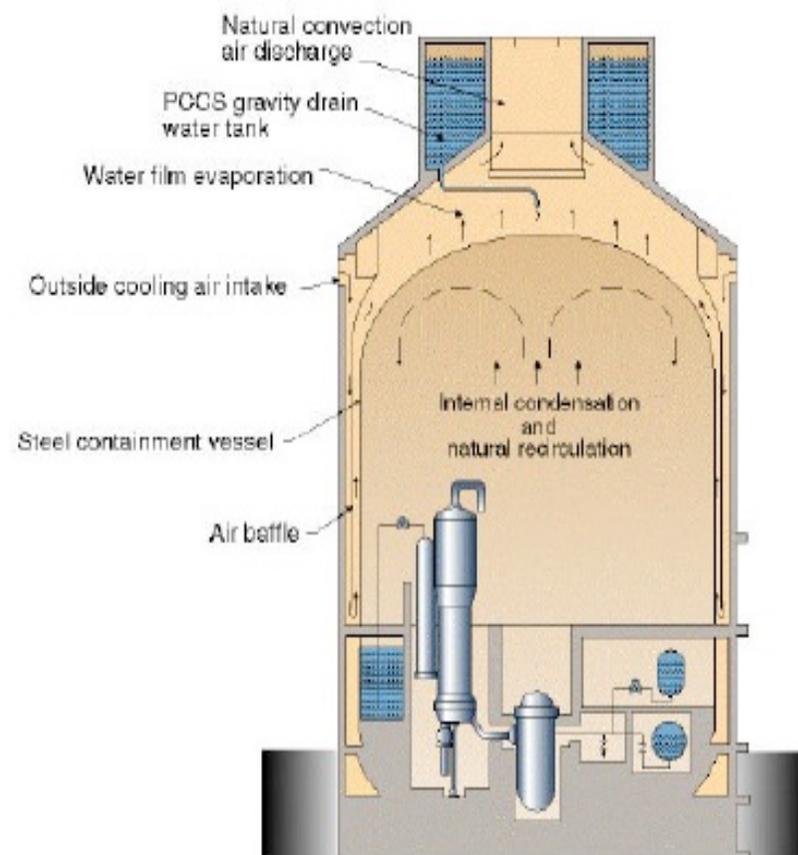
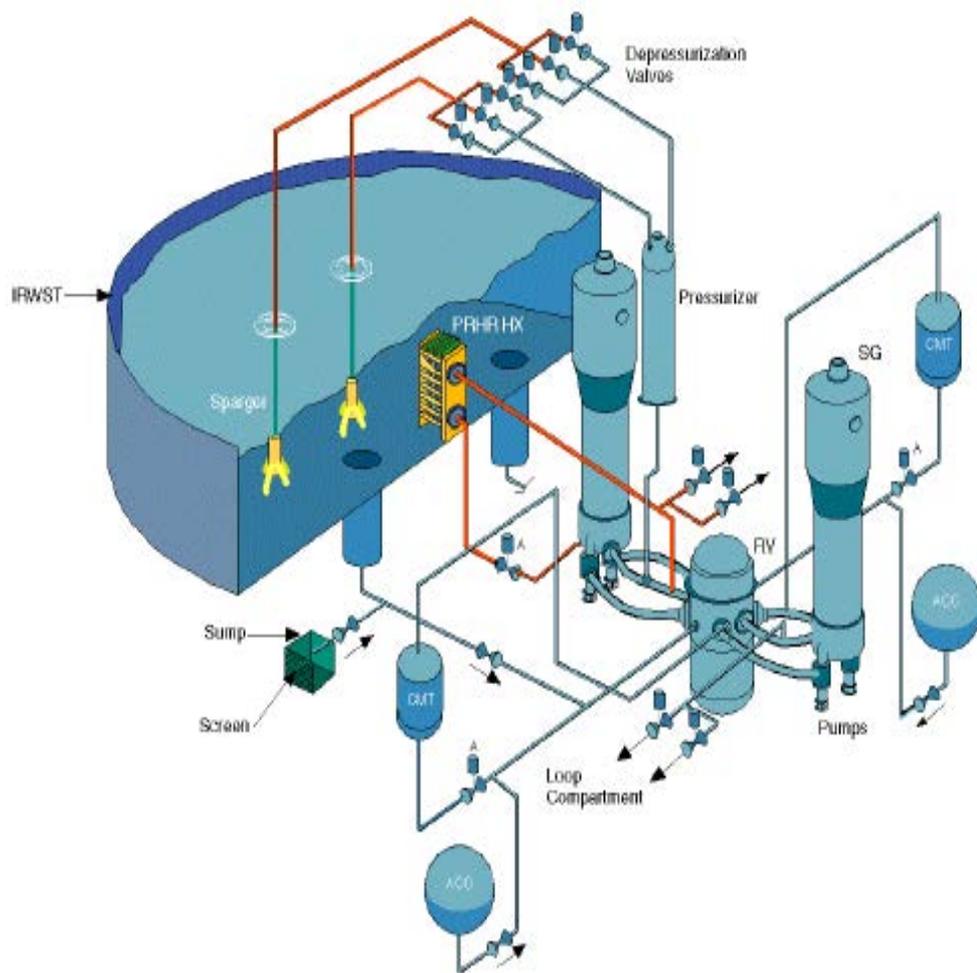


Potenza elettrica installata (MWe)	1600
Potenza termica nominale (MWth)	4300

Il reattore AP1000 americano

PVR → AP600 → AP1000

SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO PASSIVO
PER IL NOCCIOLO PER IL CONTENIMENTO



Il reattore EPR europeo – il contenitore esterno



- Doppio contenimento.
- “Liner” interno in acciaio a tenuta (6 mm).
- Cilindro interno in calcestruzzo armato precompresso
- Cilindro esterno in calcestruzzo rinforzato.

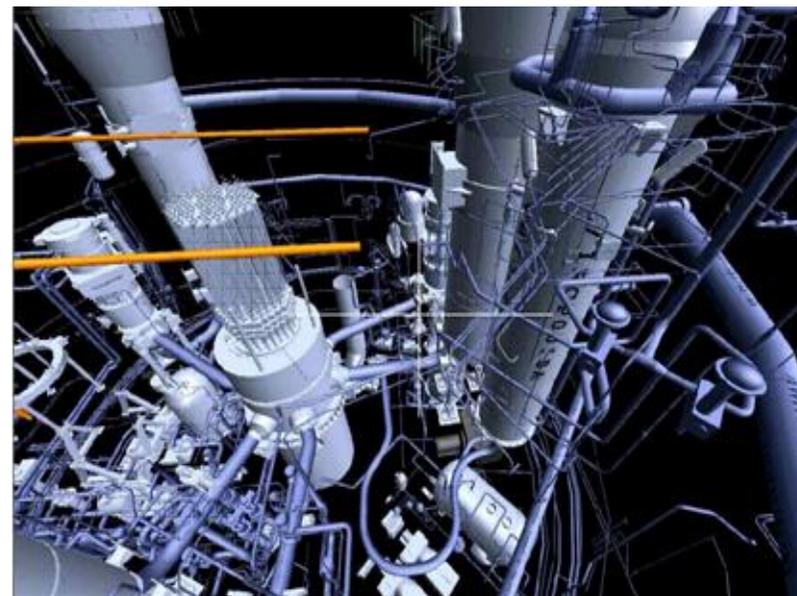
Il reattore EPR europeo raccolta e refrigerazione del nocciolo fuso



In caso di fusione del nocciolo quest'ultimo è incanalato e raccolto in una apposita zona costituita da una grande vasca con intercapedine raffreddata.

Il reattore CPR1000 cinese

Potenza elettrica installata (MWe)	1060
Numero di loops	3



Il primo reattore "100% made in China" connesso alla rete

📅 30 Novembre 2020 👤 AIN 💬 0 Commenti 📍 Cina, connessione, gen III, Hualong One, nuovo nucleare

L'unità 5 della centrale di *Fuqing* è stata connessa alla rete [lo scorso 27 novembre](#). L'evento marca una pietra miliare nel programma nucleare cinese, proiettando il Dragone nell'Olimpo delle grandi potenze del nucleare civile.

installati anche 2 EPR e 2 AP100

Mix fonti per produzione energia elettrica

TAISHAN-1

Operational

REACTOR DETAILS

Reactor Type PWR	Model EPR-1750	Owner Taishan Nuclear Power Joint Venture Company Limited	Operator Taishan Nuclear Power Joint Venture Company Limited
Reference Unit Power (Net Capacity) 1660 MW_e	Design Net Capacity 1660 MW_e	Gross Capacity 1750 MW_e	Thermal Capacity 4590 MW_t
Construction Start Date 18 Nov, 2009	First Criticality Date 06 Jun, 2018		
First Grid Connection 29 Jun, 2018	Commercial Operation Date 13 Dec, 2018		

Il reattore EPR europeo — Flamanville e Olkiluoto

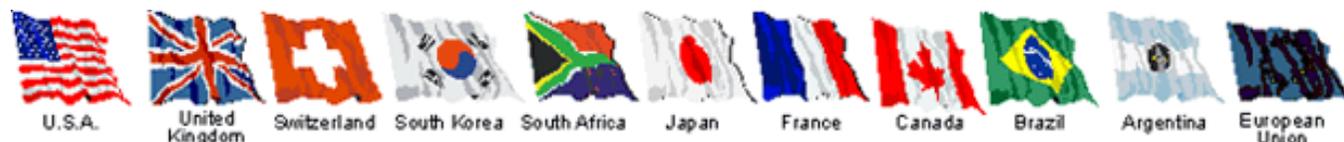


La nuova ministra dell'energia francese ha appena definito il più grande progetto nucleare del paese "un casino". Il reattore pressurizzato europeo (EPR) che è stato commissionato per la centrale nucleare di Flamanville, dove si unirà a due reattori ad acqua pressurizzata esistenti, ha avuto fin qui un percorso costellato di ritardi e problemi. L'ultima modifica al progetto ha espanso le tempistiche da 13 (già molti) a 17 anni (un'enormità).

L'EPR risale agli anni 2000, quando i primi due reattori furono commissionati per Francia e Finlandia. Malgrado i progressi compiuti nel 2007 e nel 2005, rispettivamente, nessuno dei due reattori ha rispettato i tempi previsti.
costi: da 3.9 M€ a 14.6 M€

Ora, la **Finlandia** dovrebbe arrivare prima nel **2021**, se rispetterà il giorno di apertura riprogrammato. **La Francia adesso mira al 2023**. Il governo francese uscente ha firmato l'ultima estensione a marzo.

Reattori generazione IV



- Per lo sviluppo dei reattori di **quarta generazione** opera un apposito consorzio (**GIF IV**) costituito da:
- Usa, Gran Bretagna, Svizzera, Corea del Sud, Sudafrica, Giappone, Francia, Canada, Brasile, Argentina, e dall'EURATOM in rappresentanza della Commissione Europea.
- Questi reattori dovrebbero essere **operativi tra 20 - 30 anni** e saranno probabilmente loro a subentrare a quelli di seconda generazione.
- Ulteriori miglioramenti in sicurezza, affidabilità e prestazioni rispetto alle precedenti generazioni.

Reattori generazione IV

- Gli impianti di quarta generazione attualmente in fase di studio sono sei:
 - reattori veloci raffreddati a gas (GFR)
 - reattori veloci raffreddati a piombo (LFR)
 - reattori epitermici a sali fusi (MSR)
 - reattori veloci raffreddati a sodio (SFR)
 - reattori termici raffreddati ad acqua con cicli ipercritici (SCWR)
 - reattori termici raffreddati a gas altissima temperatura (VHTR).

Gas-Cooled Fast Reactor System	GFR
Lead-Cooled Fast Reactor System	LFR
Molten Salt Reactor System	MSR
Sodium-Cooled Fast Reactor System	SFR
Supercritical-Water-Cooled Reactor System	SCWR
Very-High-Temperature Reactor System	VHTR

Reattori generazione IV

Due aspetti interessanti:

- reattori modulari con basse potenze (qualche centinaio di MW) detti Small Modular Reactor (SMR) adatti per la desalinizzazione dell'acqua di mare o per essere collocati in posti remoti; possono essere costruiti e trasportati direttamente sul posto; pensati per funzionare 15-20 anni senza necessità di cambiare il combustibile



FIG. B-6. The Akademik Lomonosov FNPP. (Photo: Rosatom)

Compact PWR-type SMR 70 MW(e) + 50 gigacalorie / h

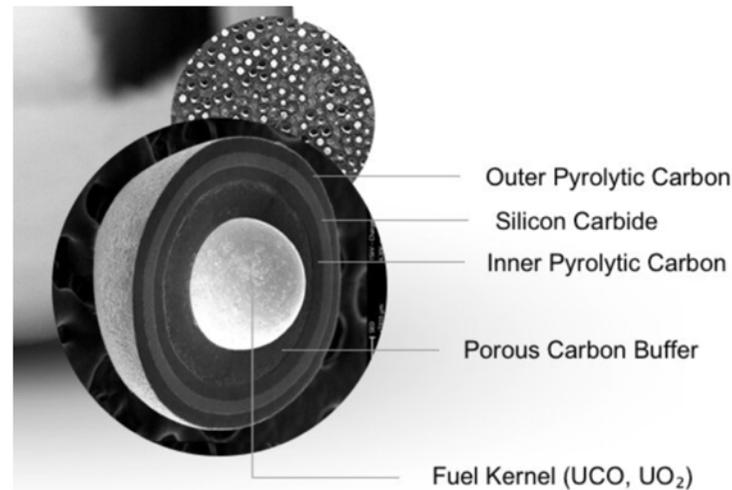
Reattori generazione IV

Possibilità di produrre idrogeno, attraverso la dissociazione termica dell'acqua, con reattori VHTR raffreddati a gas elio; funzionano a 800 °C - 1000 °C.

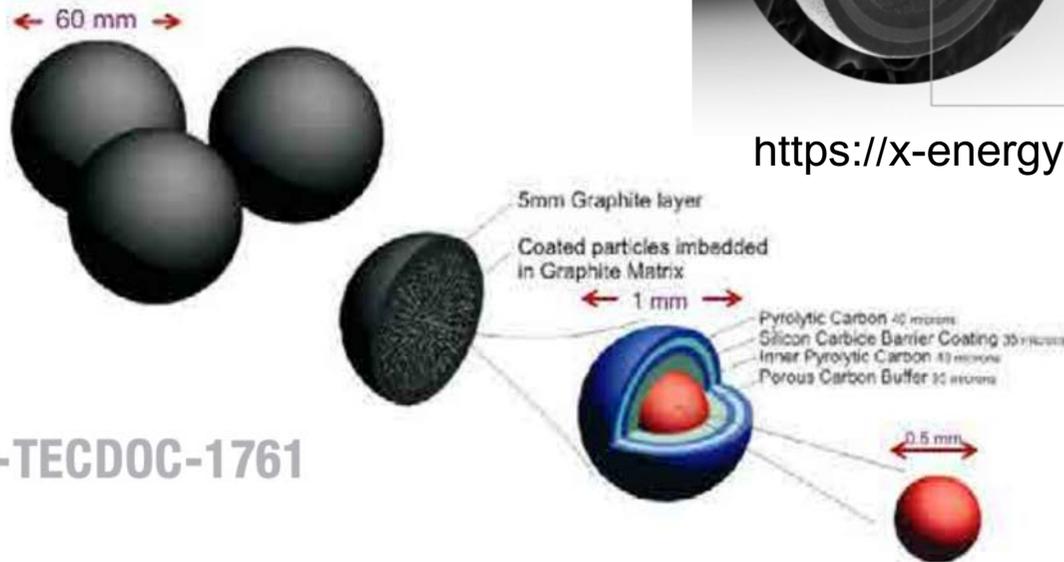
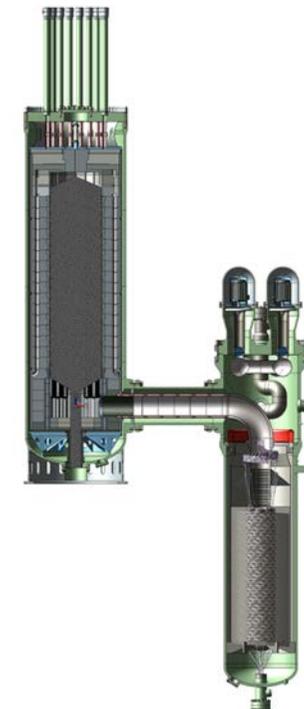
DANIEL OBERHAUS SCIENCE 06.30.2020 07:00 AM

Nuclear 'Power Balls' May Make Meltdowns a Thing of the Past

Triso particles are an alien-looking fuel with built-in safety features that will power a new generation of high-temperature reactors.



<https://x-energy.com/fuel/triso-x>



IAEA-TECDOC-1761

FIG. 2. Spherical fuel element consisting of ~50 mm diameter fuel zone and ~5 mm thick fuel free zone, the TRISO coated particle and the 0.5 mm diameter fuel kernel.