

EVOLUZIONE, PROSPETTIVE E CRITICITA' DEI REATTORI NUCLEARI

P.PIZZI

Club Dirigenti Tecnici

28 Novembre 2025

Considerazioni Generali

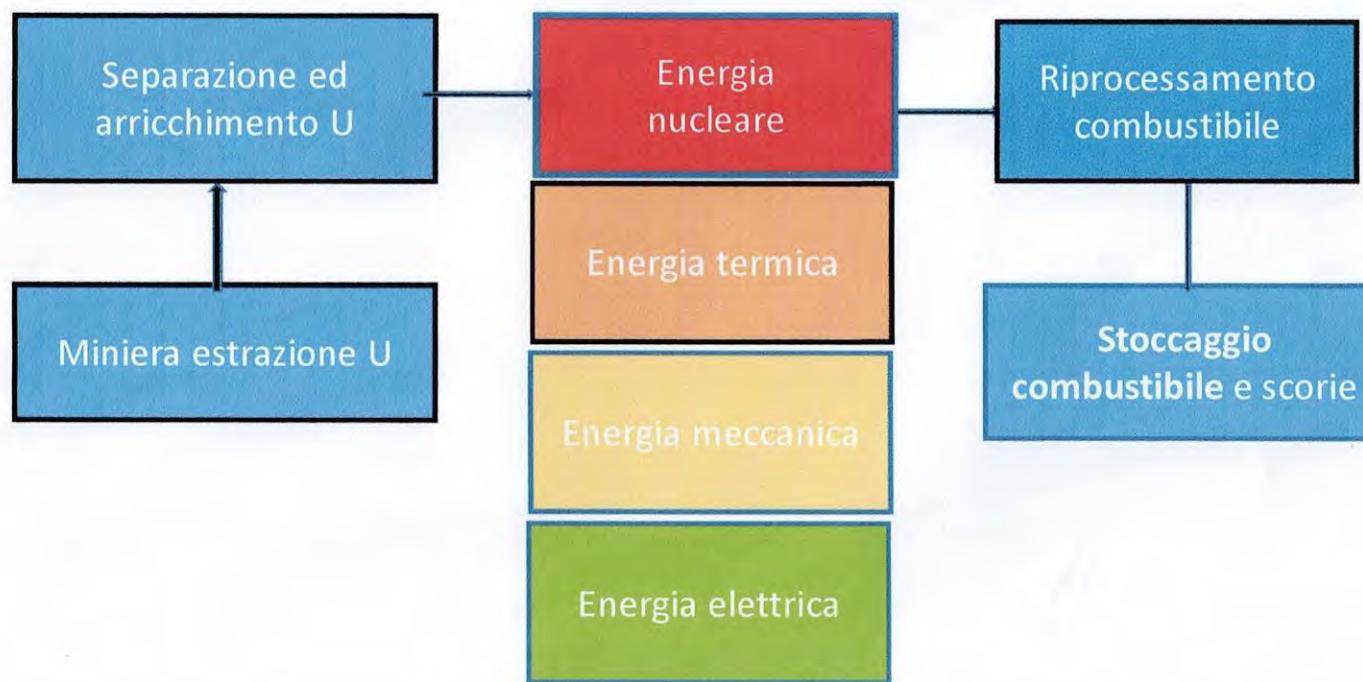
- **Energia liberata da 1kg. di materiale fissionabile**
22500 Mwh

- **Energia liberata da 1kg. di carbone**
0,008 Mwh

Combustibile	Moderatore	Neutroni	Refrigerante	Dimensioni (m)
Uranio naturale	Grafite	Lenti	Aria	7-8
Uranio naturale	Acqua pesante	Lenti	Acqua pesante	3
U legg, arricchito	Grafite	Lenti	Sodio	2,5
U legg. arricchito	Acqua	Lenti	Acqua	1,5
U alt. arricchito	Acqua	Lenti	Acqua	0,5
U alt. arricchito	Nessuno	Veloci	Sodio	0,3

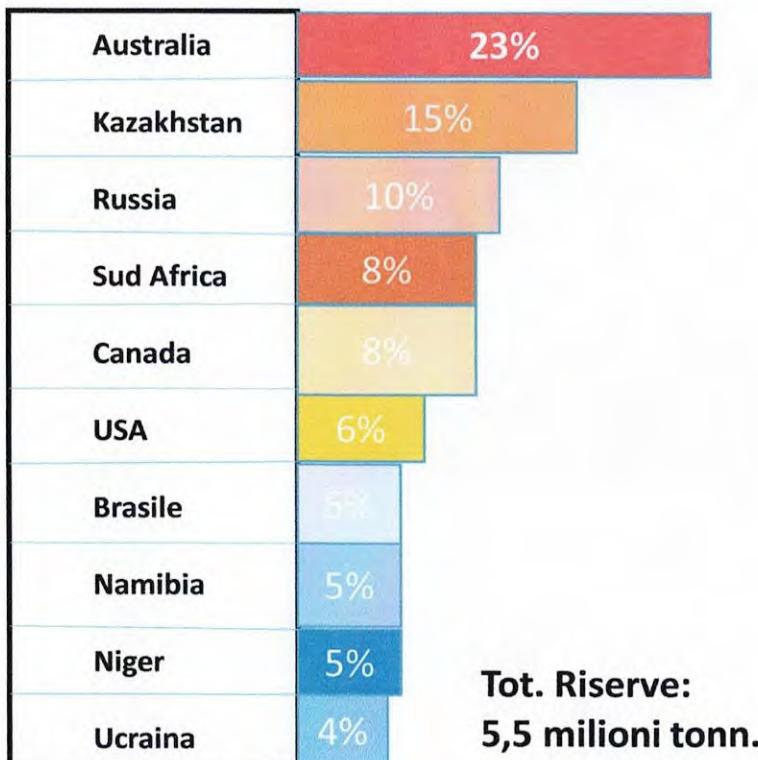
3
2

SCHEMA STRUTTURA IMPIANTO NUCLEARE

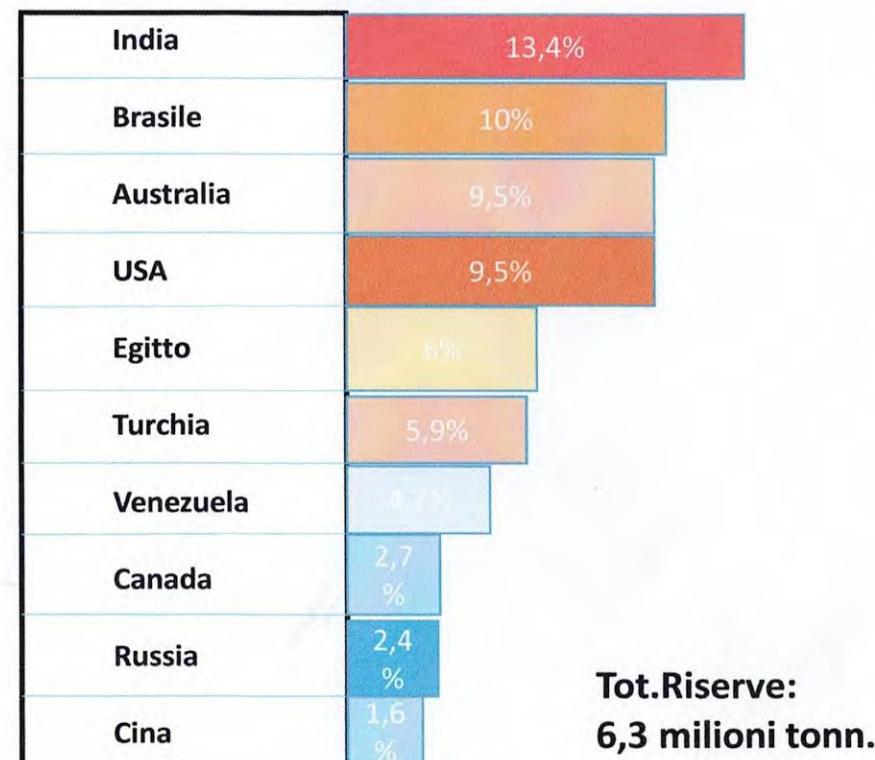


Distribuzione riserve Uranio e Torio

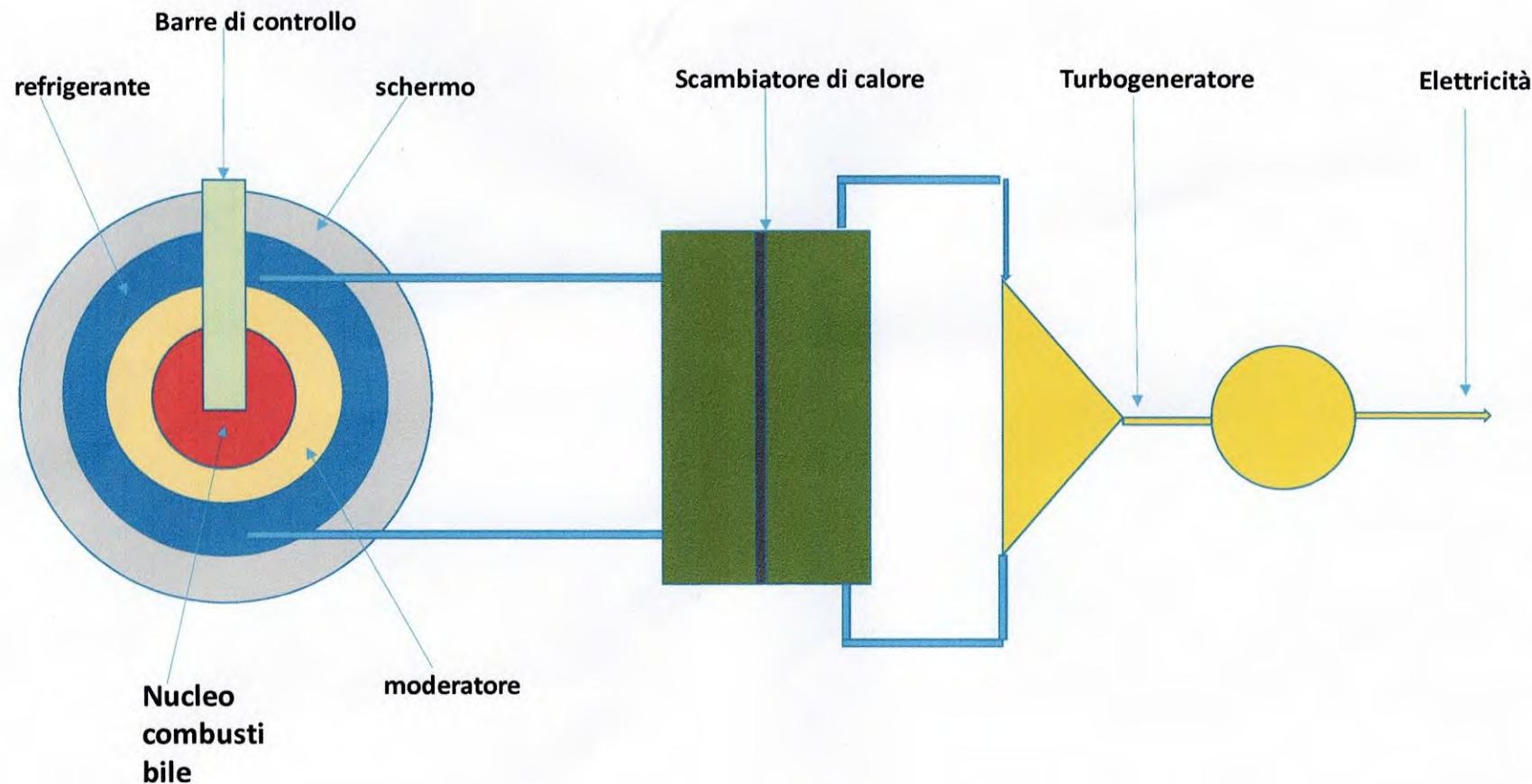
Uranio



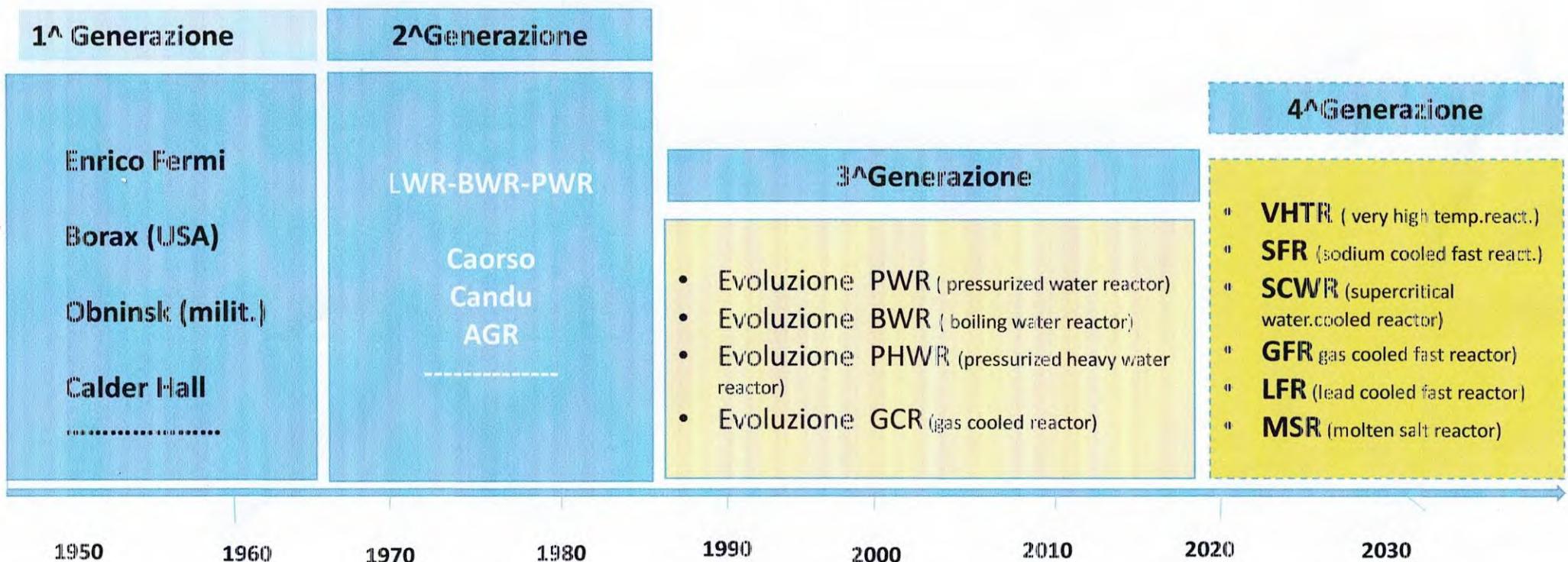
Torio



Schema di un reattore nucleare



EVOLUZIONE REATTORI NUCLEARI



Reattori di 1^ - 2^ - 3^ generazione

-1^ Generazione

- 1942 -Chicago pile 1
- 1954- Obninsk (URSS)
- 1954 – Borax (USA)
- 1956- Primo reattore commerciale di grande potenza (50 Mw) a Calder Hall (G.B.)
- 1962- Latina (reattore gas-grafite Magnox da 150 Mwe)

-2^ Generazione

Tipologie principali

- GCR- reattore nucleare a gas
- LWR- reattore ad acqua leggera
- RBMK- reattore ad acqua-grafite
- BWR- reattore ad acqua bollente
- PWR- reattore ad acqua pressurizzata
- HWR- reattore ad acqua pesante
- HBWR-reattore ad acqua pesante bollente
- HPWR-reattore ad acqua pesante pressurizzata (CANDU)

- 3^ Generazione

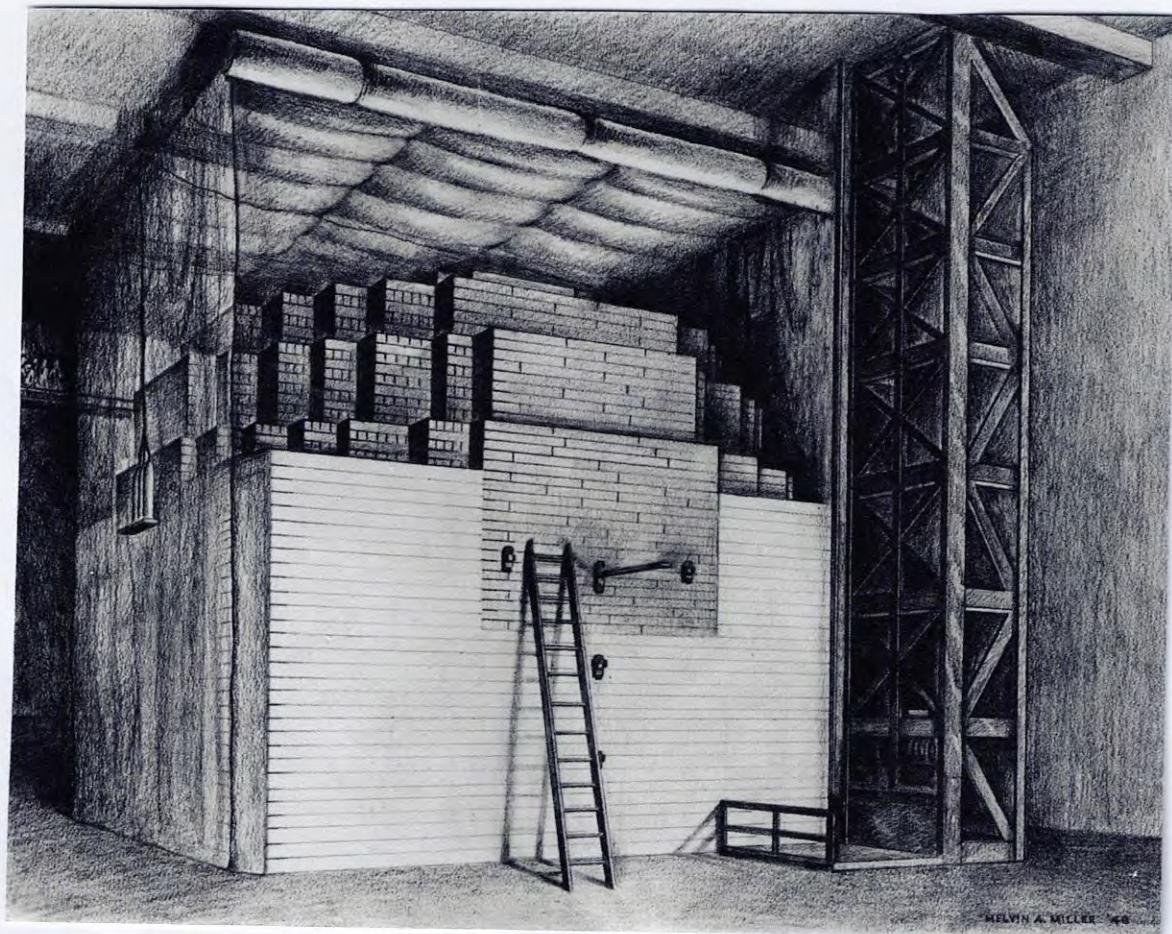
- Miglioramenti in sede di progettazione contro gli incidenti con l'obiettivo di evitare contaminazioni esterne. Core damage frequency : un evento ogni 100.000 anni. Doppio contenimento
- Progetti standardizzati per ridurre i costi
- Efficienza termica superiore

Primo reattore di 3^ gen. In funzione in Giappone nel 1996 tipo ABWR della General Electric.

8

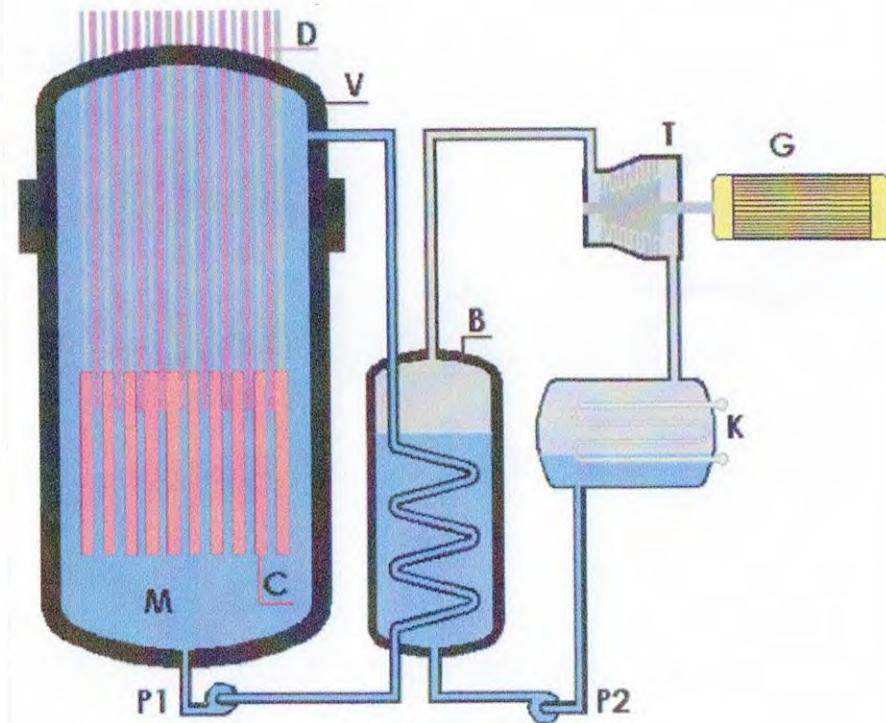
Chicago Pile-1 E.Fermi

- E.Fermi , Leo Szilard, M.Whittaker, W.Zinn realizzarono la prima reazione a catena autoalimentata il 2 dicembre 1942 nel campus dell'Università di Chicago.
- Il reattore era realizzato con pastiglie di uranio e blocchi di grafite senza sistemi di raffreddamento e senza schermatura.
- Sbarre rivestite di cadmio venivano inserite ed estratte manualmente.
- Il controllo della reazione avveniva mediante rivelatori del tipo BF-3.



Reattore nucleare ad acqua pressurizzata (PWR)

- Acqua di raffreddamento come moderatore a pressioni di circa 15 Mpa e temperature di circa 320 °C. Il secondario a circa 8 Mpa.
- Il combustibile viene rivestito con leghe di zirconio sotto forma di piastre o barrette contenenti pastiglie di UO₂. Con arricchimento del 3% la densità di potenza è circa 35kW/kg.
- Le barre di controllo sono costituite da carburo di boro rivestito di inox. Barre destinate allo spegnimento e barre per il controllo.
- Il vessel è realizzato in acciaio ferritico rivestito internamente in acciaio inox o inconel.



Schema di un reattore PWR

Dati su Centrale elettronucleare Phènix

- Anno di costruzione ; 1968-1972
- Località ; Centro CEA di Marcoule
- Reattore nucleare sperimentale del tipo veloce autofertilizzante FBR
- Potenza ; 563 Mwt (250 Mwe)
- Produzione energia elettrica per 35 anni
- Nome legato al mitico uccello Fenice che rinasce dopo la morte

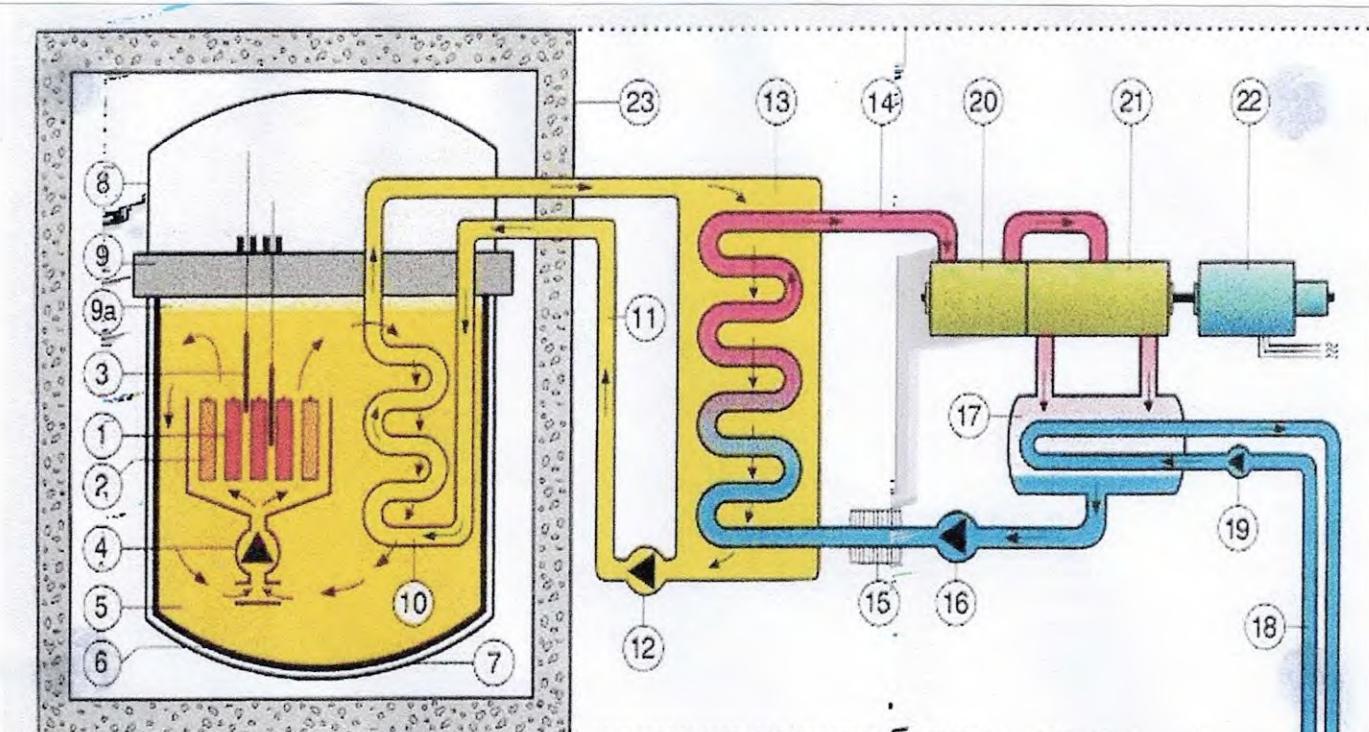
Dati su centrale Super-phènix

- Potenza: 3000 Mwt (1200 Mwe)
- Anno di costruzione: 1976-1985
- Anno di produzione : 1986
- Anno di chiusura : 1998 per problemi di sicurezza

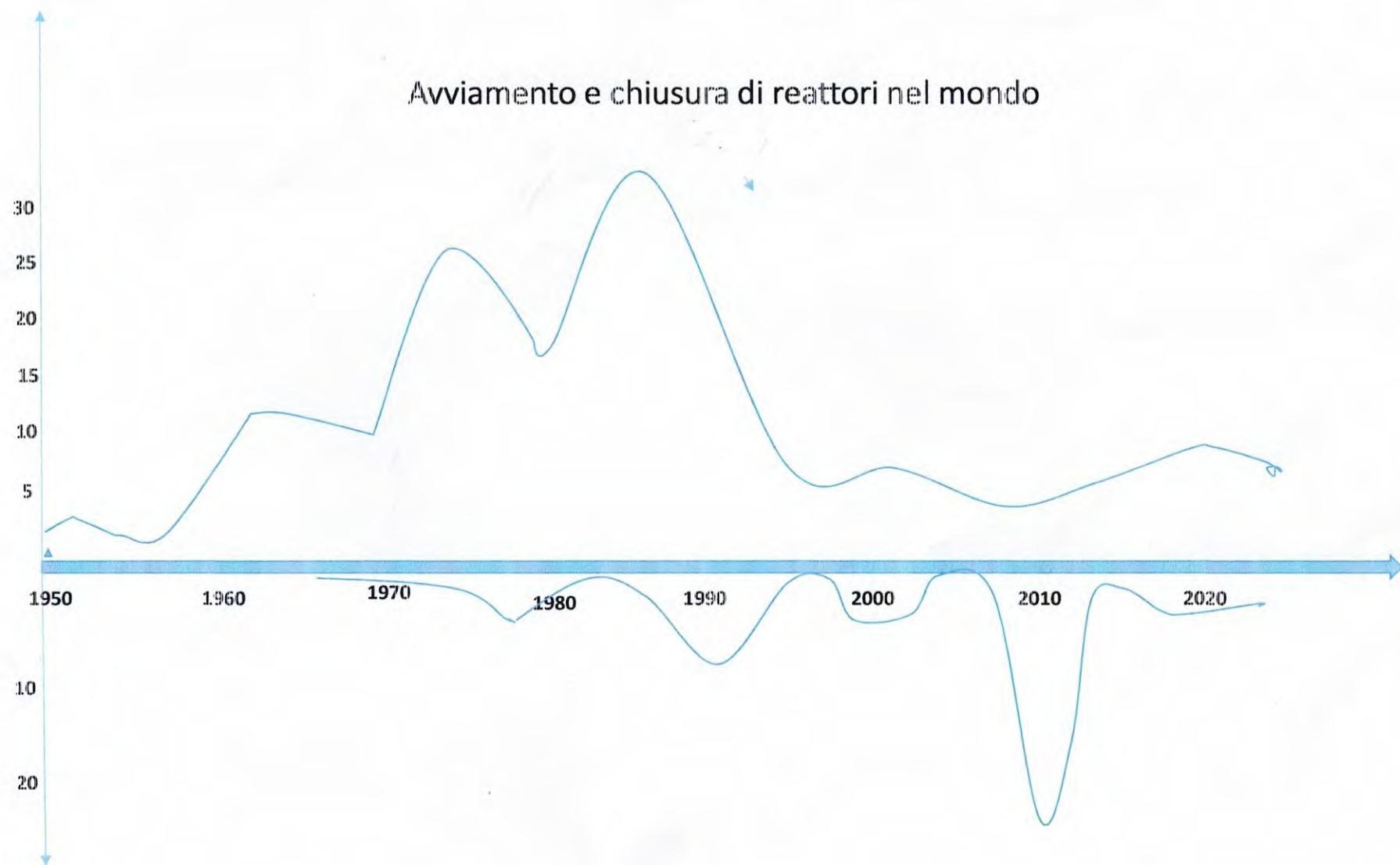
Nota : Per un funzionamento a piena potenza 3000 Mw per 300 giorni l'anno il consumo di combustibile sarebbe stato di 960 Kg di plutonio. A confronto un reattore ad acqua pressurizzata consumerebbe 27 tonn. di uranio arricchito.

I reattori veloci autofertilizzanti tipo Super-phènix sono stati adottati dal GIF (Generation IV international Forum) tra le sei tipologie di reattori di IV generazione.

Schema del reattore veloce Phènix



- | | |
|--|-----------------------------|
| 1- Elemento di combustibile fissile | 13- Generatore di vapore |
| 2- Elemento di combustibile fertile | 14- Vapore |
| 3- Barra di controllo | 15 Pre-riscaldatore |
| 4- Pompa di circolazione del sodio | 17- Condensatore |
| 5- Sodio | 19- Pompa acqua fredda |
| 6- Contenitore in acciaio | 20- Turbina alta pressione |
| 7- Contenitore di sicurezza | 21- Turbina bassa pressione |
| 8- Chiusura | 22 - Generatore |
| 9- Coperchio | 23- Edificio reattore |
| 10- Scambiatore di calore | |
| 11- Circuito di sodio secondario | |
| 12- Pompa di circolazione sodio secondario | |



Incidenti nucleari

1. Incidente di Three Mile Island (Pennsylvania)

- 28 marzo 1979
- Reattore ad acqua pressurizzata PWR prodotto da Babcock & Wilcox
- Cause: guasto al circuito di raffreddamento secondario con conseguente aumento della pressione del circuito primario di raffreddamento del nocciolo con l'apertura di una valvola di rilascio e conseguente SCRAM. La valvola di rilascio rimase aperta con parziale svuotamento del circuito primario e parziale fusione del nocciolo.
- Nessun morto o ferito

2. Incidente di Chernobyl (URSS)

- 26 aprile 1986
- Reattore RBMK da 1000 Mwe moderato a grafite e raffreddato ad acqua per la produzione di energia elettrica e plutonio per uso militare..
- Esplosione con liberazione di vapore ad altissima pressione che ha espulso il coperchio di acciaio e cemento da 1000 tonn.
Le esplosioni furono termochimiche dovute al riscaldamento del nocciolo.
All'origine del disastro sono state l'incompetenza del personale addetto ai test ed un errore di progettazione del sistema di controllo delle barre.
- Morti accertati 65, presunti 4000. Sfollati 116.000

3. Incidente di Fukushima Giappone)

- 11 marzo 2011
- Centrale composta da 6 reattori BWR (pressione 80 atm e temp. 280 forniti dalla G.E. con una potenza complessiva di 4700 Mw.
- Incidente innescato da un terremoto e maremoto di magnitudo 9,0
- Parallelamente alla scossa sismica si attivò lo SCRAM con l'arresto dei reattori ed entrarono in funzione i generatori di emergenza a gasolio. Tuttavia dopo 40 min. l'onda di maremoto allagò i generatori diesel causando un blackout con la conseguente perdita di raffreddamento e

14
quindi la parziale fusione del nocciolo e la produzione di idrogeno che causò le esplosioni delle unità 1,3,4.

- Determinò un rilascio importante di radionuclidi nell'oceano Pacifico .Si rilevò un morto a seguito delle radiazioni e furono evacuate 184000 persone.
- Criticità reattori BWR : il vapore generato nell'acqua di raffreddamento va direttamente nelle turbine pur non essendo mai a contatto con materiali fissili. Interazione forte tra le turbine e la stabilità della temperatura del nocciolo.

REATTORI DI 4^A GENERAZIONE

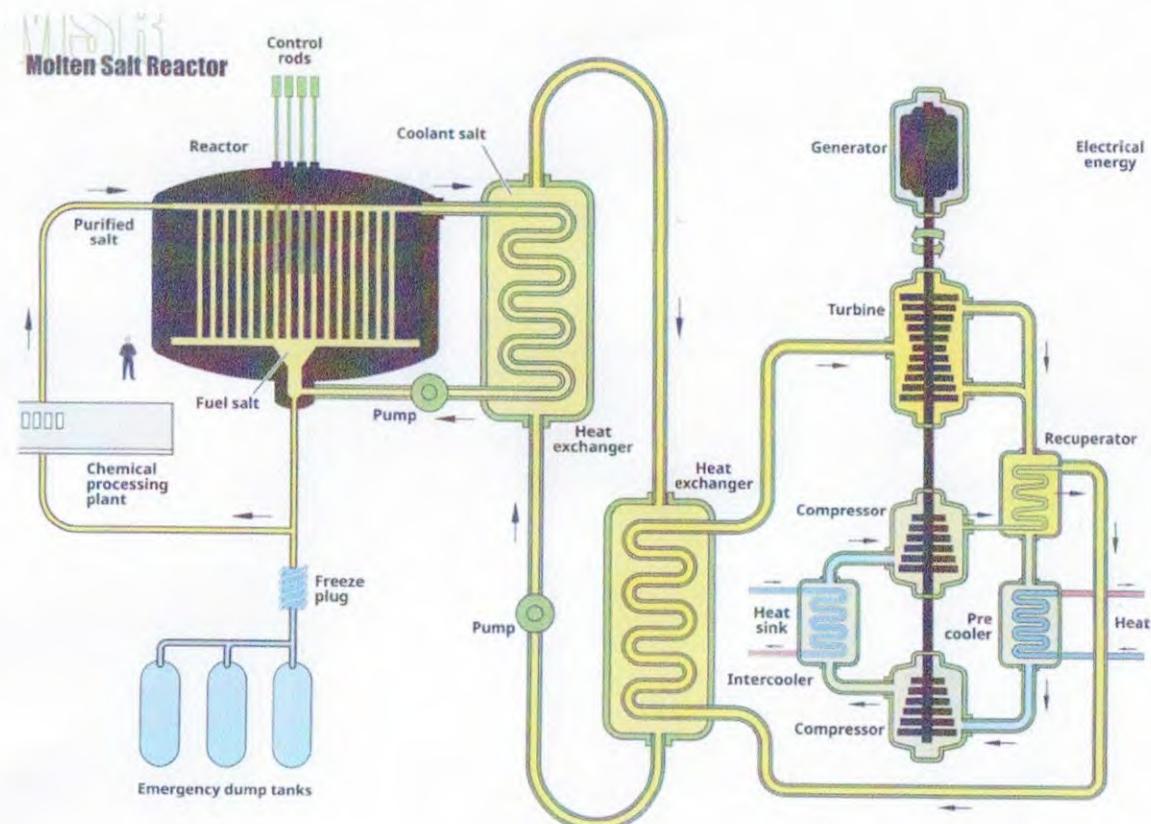
Obiettivi:

- Aumentare l'efficienza del combustibile
- Minimizzare la produzione di scorie
- Abbassare i costi
- Aumentare il livello di sicurezza

Sistema	Spettro neutronico	Refrigerante	Temperatura di uscita (C ^A)	Ciclo combustibile	Potenza (Mwe)
VHTR (very high temp. reactor)	Termico	Elio	900-1000	Aperto	250-300
SFR (sodium cooled fast reactor)	Veloce	Sodio	500-550	Chiuso	50-150 300-1500 600-1500
SCWR supercritical water cooled reactor)	Termico/veloce	Acqua	510-625	Aperto/Chiuso	300-700 1000-1500
GFR (gas cooled fast reactor)	Veloce	Elio	850	Chiuso	1200
LFR (lead-cooled fast reactor)	Veloce	Piombo	480-570	Chiuso	20-180 300-1200 600-1000
MSR (molten salt reactor)	Termico/veloce	Sali di fluoruro	700-800	Chiuso	1000

Reattore nucleare a Sali fusi al torio TMSR

- Sviluppato dallo Shanghai Institute of Applied Physics
- Località : Wuwei (Cina)
- Potenza : 2-10 Mw
- Sali fusi : LFTR (Fluoruro di torio liquido)
- Vantaggi :
 - Sicurezza intrinseca
 - Facilità di estrazione dei prodotti di fissione
 - Utilizzabile a bassa potenza anche per sottomarini o vettori spaziali
 - Può operare a temperature molto alte
- Svantaggi :
 - Problemi di corrosione ad alta temperatura



X Wikipedia Commons

Reattori di nuova generazione

- Nuword – PWR con potenza elettrica di 340 Mw (collaborazione ENEA-EDF-SIET)
- Nuscale power module- PWR raffreddato ad acqua- sono previsti vari moduli gestiti da una sola sala di controllo. (*in sospeso*).
- BWRX 300 (GE-Hitachi Nuclear Energy) BWR da 300 Mwe con sistemi di sicurezza passivi. Rappresenta la decima generazione dei BWR.
- AMR- LFR (Newcleo- ENEA- Francia) – reattore veloce refrigerato a piombo liquido
- ALFRED (ANSALDO NUCLEARE, ENEA, RATEN-ICN Romania) reattore veloce refrigerato a piombo liquido
- MMR-USNC micro reattore modulare da 15 Mw termici con combustibile TRISO (*in sospeso*)

Reattore micro-modulare USNC

- MMR è un piccolo reattore da 15 Mw termici e 4 Mwe costruito in fabbrica e trasportato in loco.
- Utilizza il combustibile TRISO costituito da particelle di Uranio rivestite da un primo strato di pirocarbone, un secondo di ceramica SiC che trattiene i prodotti di fissione e costituisce una barriera chimico-termica ed un terzo di pirocarbone per la resistenza meccanica.
- Incorpora sistemi di sicurezza passivi a gravità anche senza intervento umano od alimentazione esterna. Il raffreddamento è tramite elio.
- Genera meno rifiuti radioattivi
- Il 24 dicembre 2024 USNC ha dichiarato fallimento e la NANO Nuclear Energy ha acquisito il sistema MMR brevettato da USNC.



* USNC - De Salvo

- ACP 100-SMR Longlong One (China National Nuclear Corporation). Reattore PWR di potenza termica da 385 Mw e 125 Mwe.
 - La costruzione è stata avviata nel 2021 sull'isola di Hainan.
 - Vita prevista 60 anni. Utilizzabile anche per teleriscaldamento, desalinizzazione produzione di vapore.
 - Potrà produrre energia elettrica per soddisfare circa 500.000 abitazioni.
 - E' il primo reattore di nuova generazione al mondo che supera la revisione di sicurezza dell' IAEA.
 - La modularità e le dimensioni ridotte lo rendono adatto anche per luoghi remoti.
- Centrale Nucleare Akademik Lomonosov (Russia) galleggiante situata a Pevek con due reattori tipo PWR da 35 Mwe con U- a basso arricchimento.
 - Funzionante dal 2019 ma i dati operativi sono piuttosto scarsi con fattori di carico di circa 26-30%

IL NUCLEARE IN ITALIA

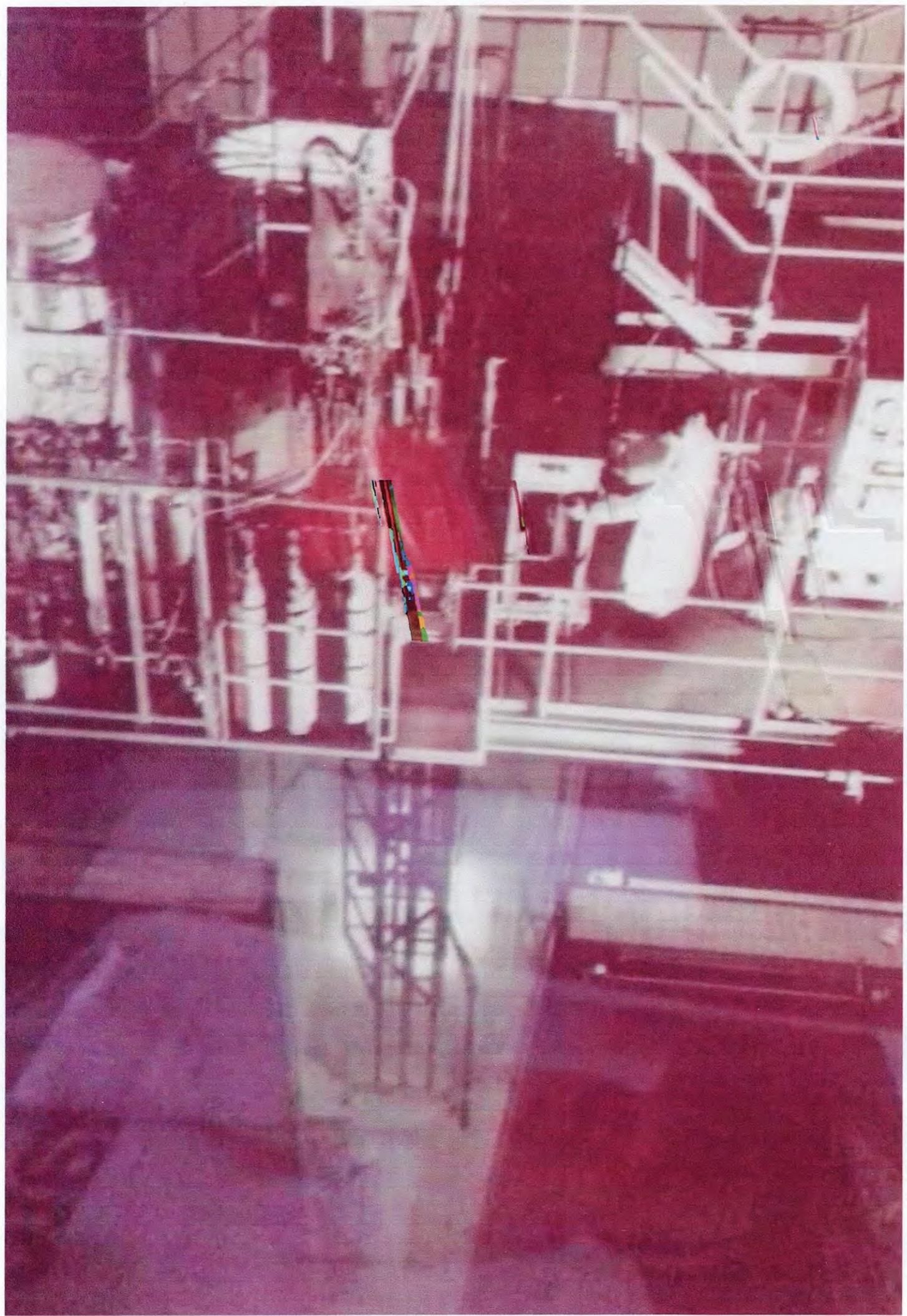
La storia del nucleare in Italia si può dividere in due macrofasi: dal 1946 al 1964 e la seconda dopo lo shock petrolifero con l'avvio di centrali elettronucleari.

In sintesi:

- **1946-1964** Forte sviluppo delle competenze a livello europeo
- **1964-1990** Sviluppo e realizzazione di quattro centrali
- **1987** Referendum abrogativo a seguito dell'incidente di Chernobyl
- **2008** Il governo presenta la «Strategia energetica nazionale» per il ritorno al nucleare
- **2011** Referendum abrogativo per cui non si ritorna al nucleare
- **2023** Viene presentato un «Piano di sviluppo e ricerca delle tecnologie sul nucleare pulito avanzato e sicuro»

Nel primo periodo le attività principali furono sviluppate da CNRN- CISE- Agip Nucleare- SORIN.

In quest'ultimo periodo Società come Ansaldo nucleare- ENEA- ENI- Newcleo ecc. hanno attivato progetti in collaborazione con società estere e sotto l'egida dell' U.E. (es. il reattore veloce Alfred in Romania ...)



21

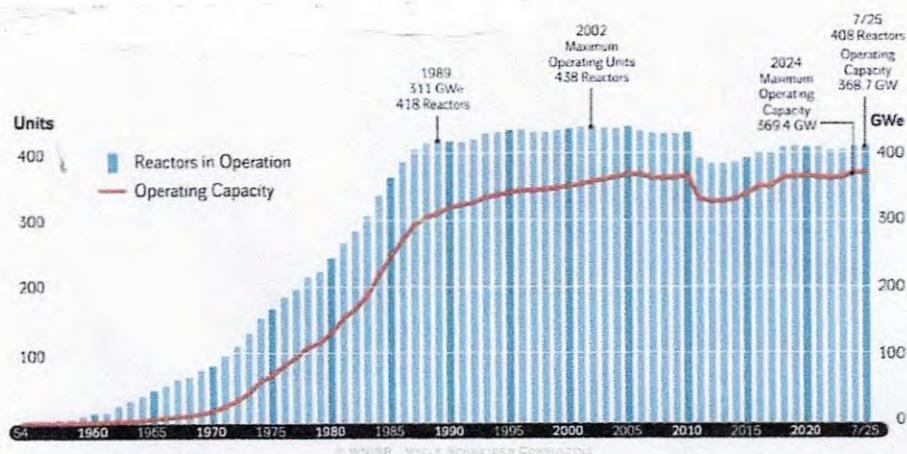
17

Centrali nucleari in Italia

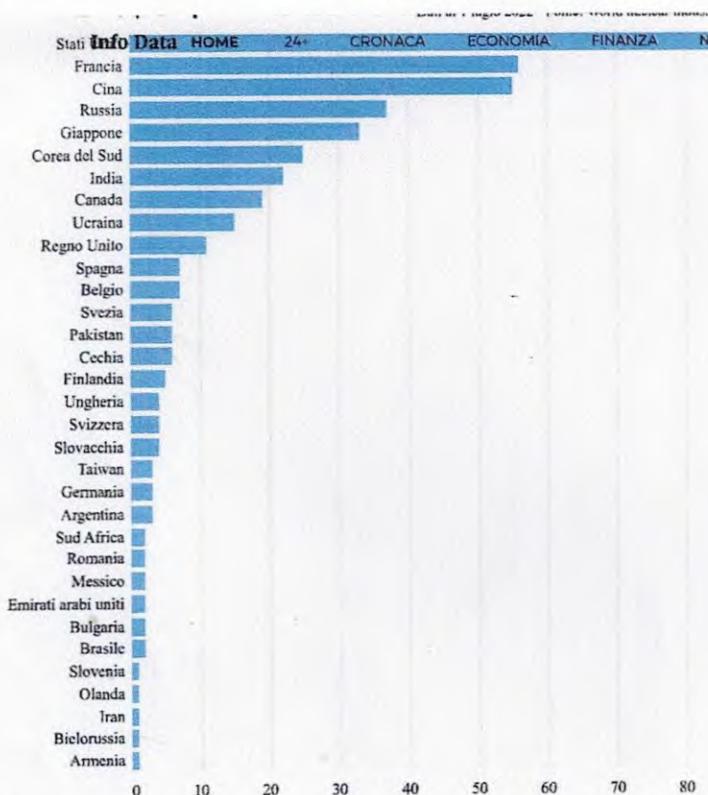
Centrale	Tipo	Potenza(Mw)	Inizio costruzione	Erogazione	Dismissione
Latina	Magnox	200	1-11-1958	12-05-1963	1-12-1987
Garigliano	BWR	150	1-11-1959	1-01-1964	1-03-1982
Enrico Fermi	PWR	260	1-07-1961	22-10-1964	1-07-1990
Caorso	BWR	860	1-01-1960	23-05-1978	1-07-1990

La produzione di energia nucleare nel mondo

- 2024- Energia generata 2677 TWh
- 2024- Capacità elettrica 369 GW

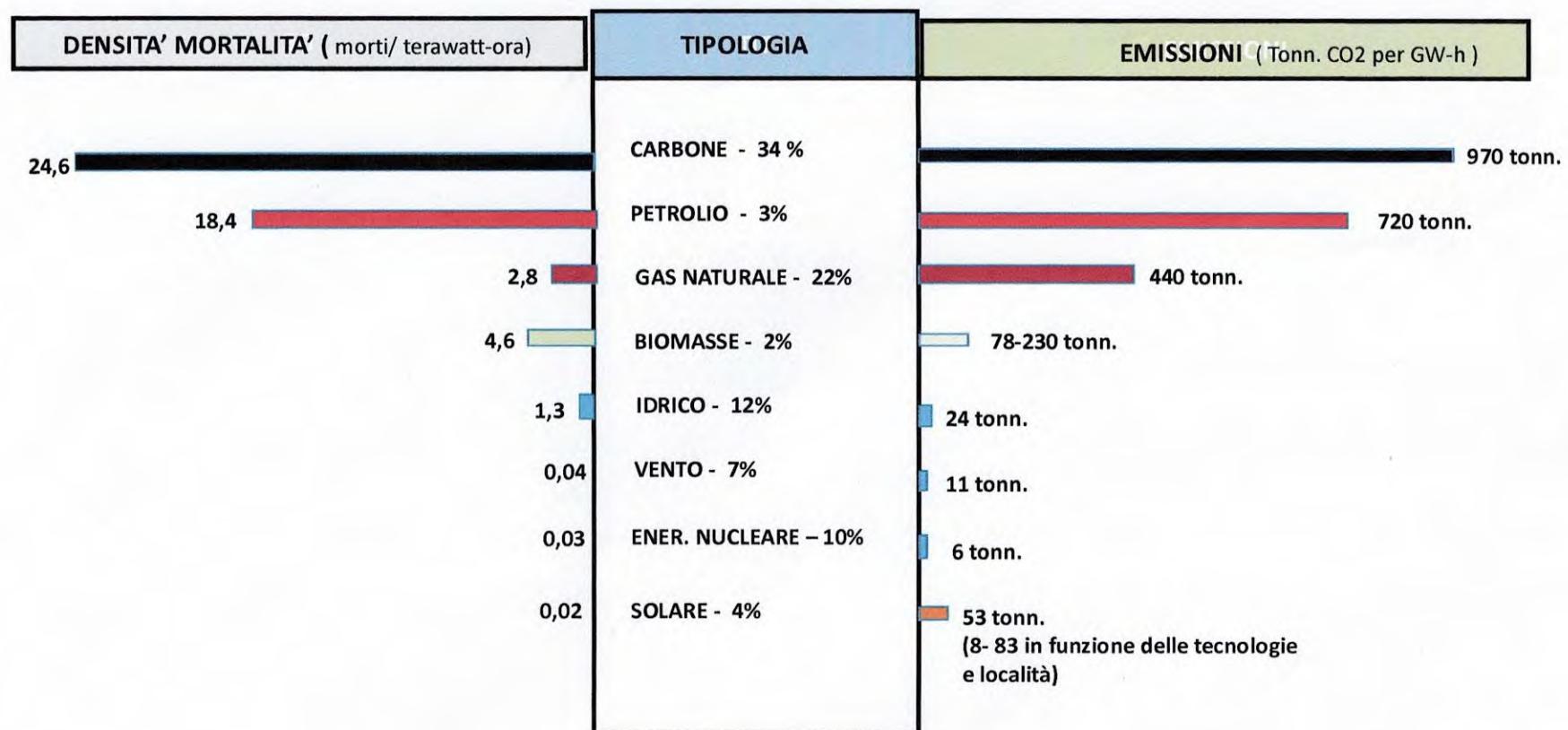


Centrali nucleari attive : 440 (U.S. 92- FR. 56- Cina 55)



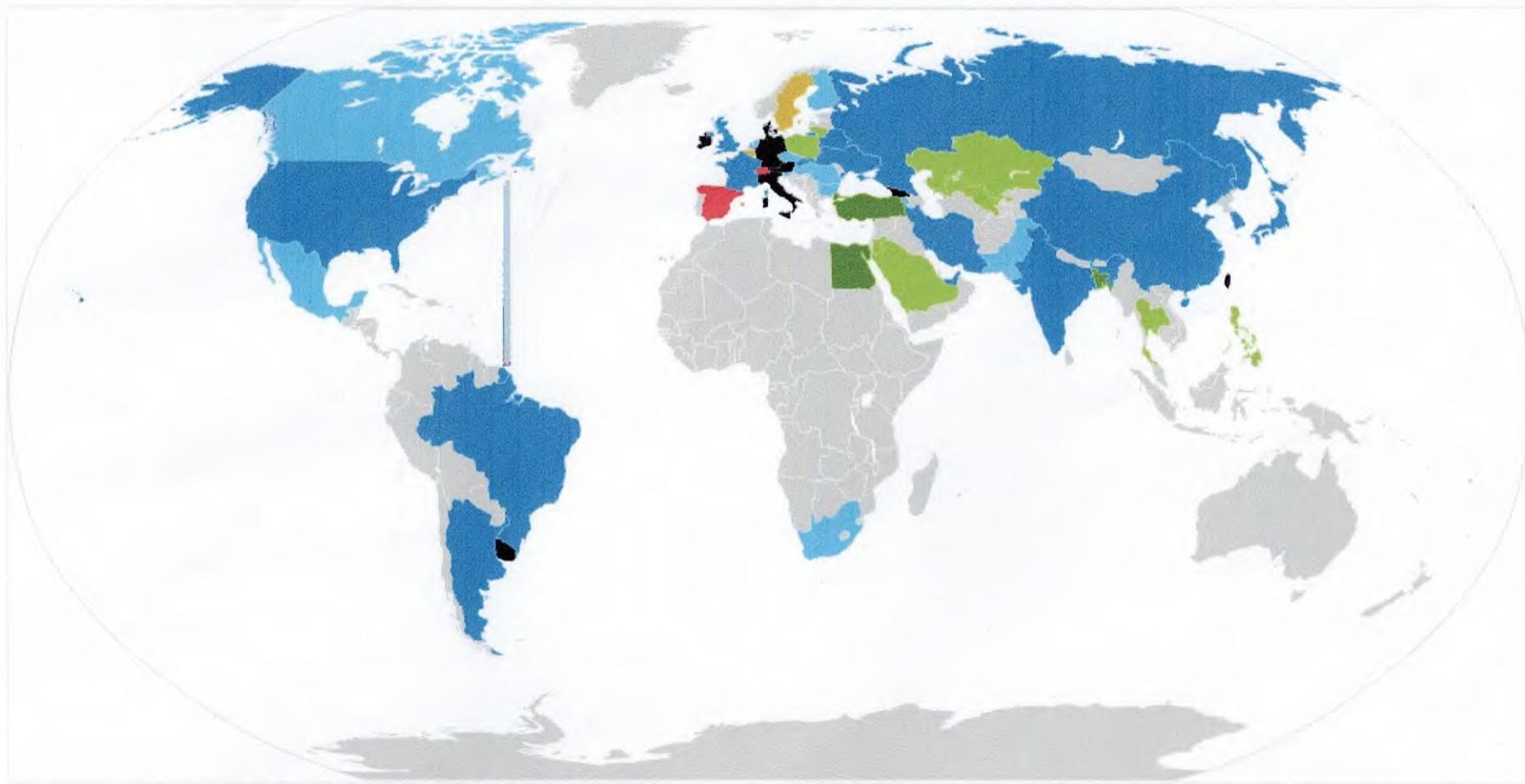
Fonte WNISR2025

Confronto tra varie sorgenti di energia



Fonte – Hannah Ritchie
Nucleare e Ragione

Quadro della situazione nelle singole nazioni



La situazione delle centrali nucleari nel mondo a oggi:

- Reattori in funzione, nuovi reattori in costruzione
- Reattori in funzione, nuovi reattori in considerazione
- Nessun reattore in funzione, nuovi reattori in costruzione
- Nessun reattore in funzione, nuovi reattori in considerazione
- Reattori in funzione, situazione stabile
- Reattori in funzione, in considerazione la loro chiusura
- L'energia nucleare non è legale