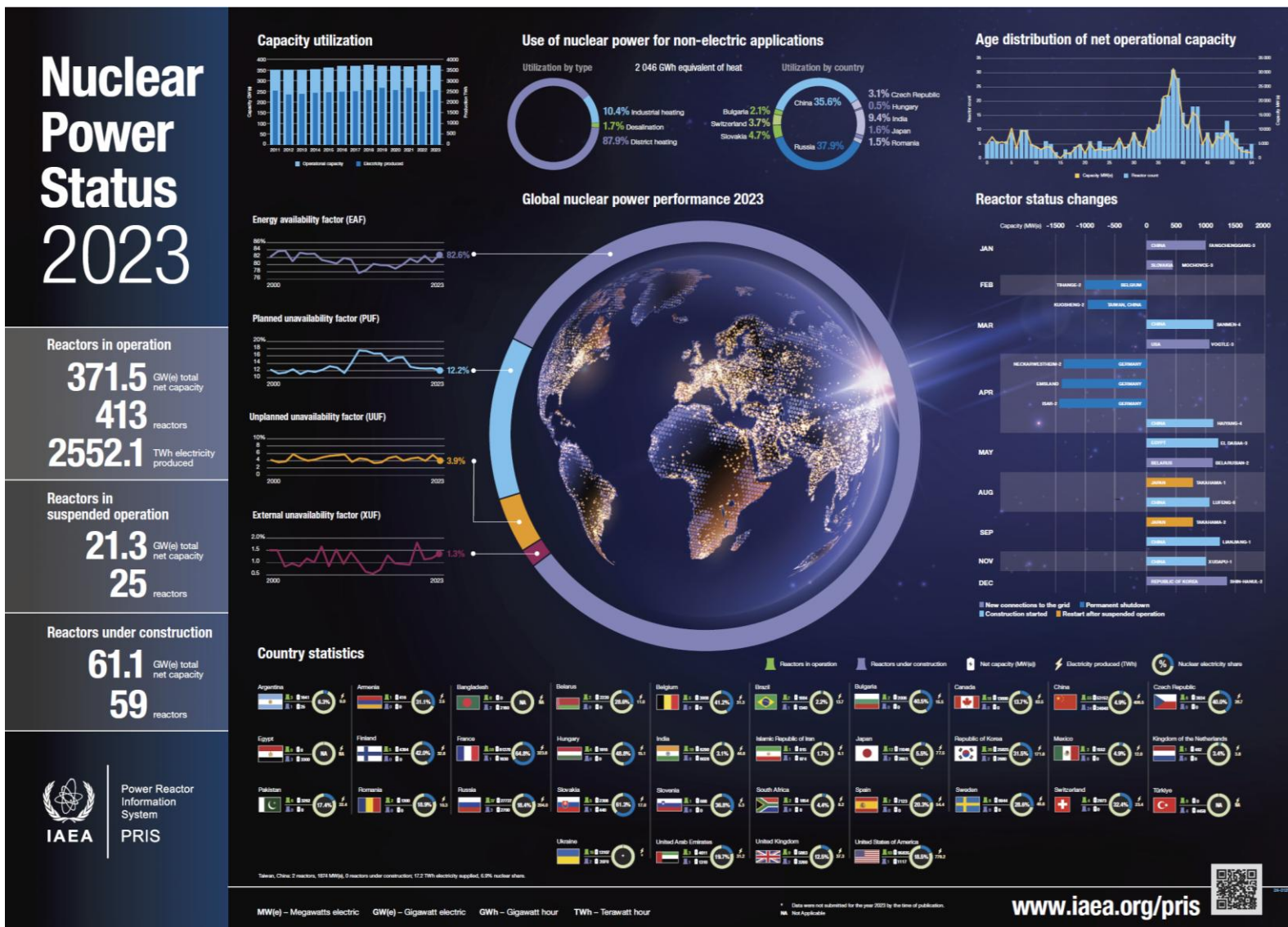
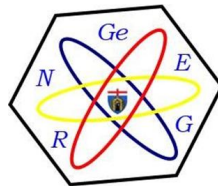


Transizione Energetica: SMR e Sostenibilità

Prof. Ing. Guglielmo Lomonaco

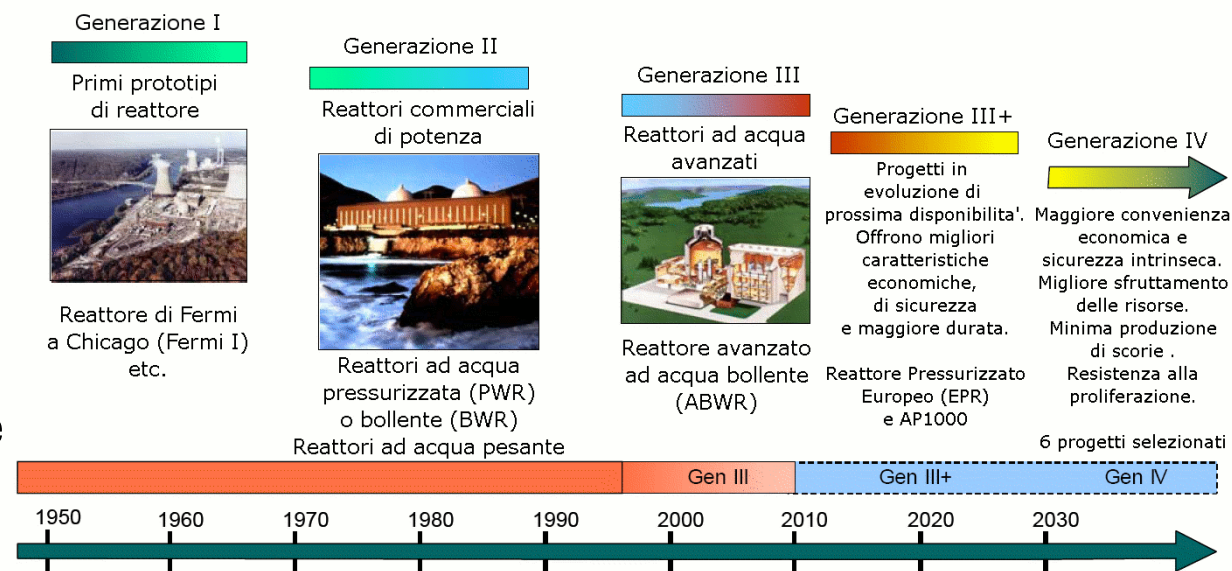
*Professore Associato di Impianti Nucleari
Università di Genova*



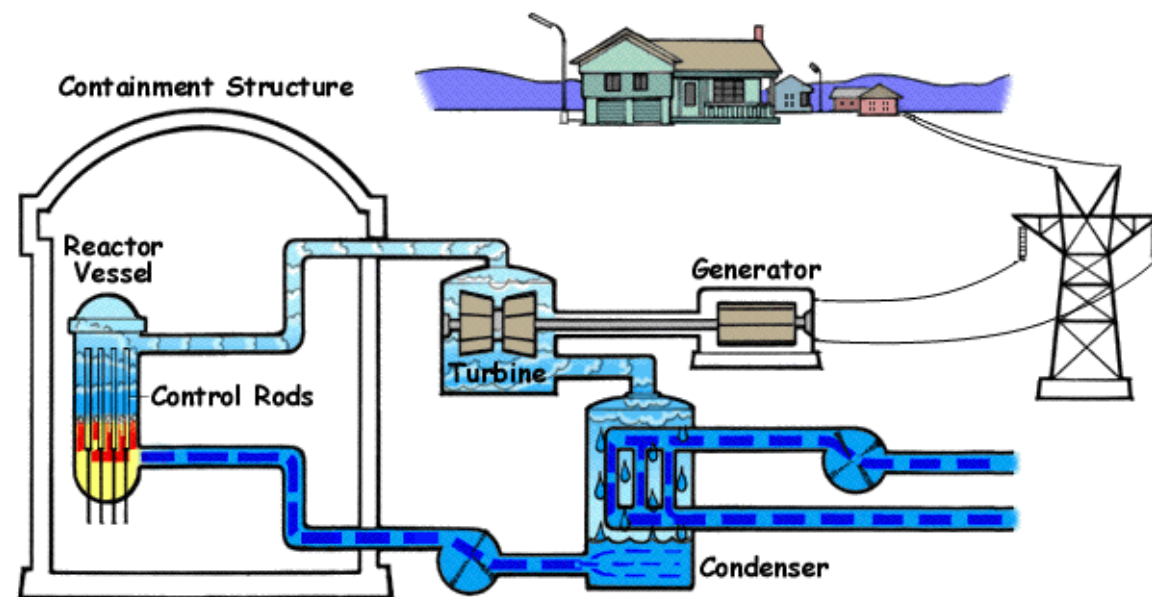
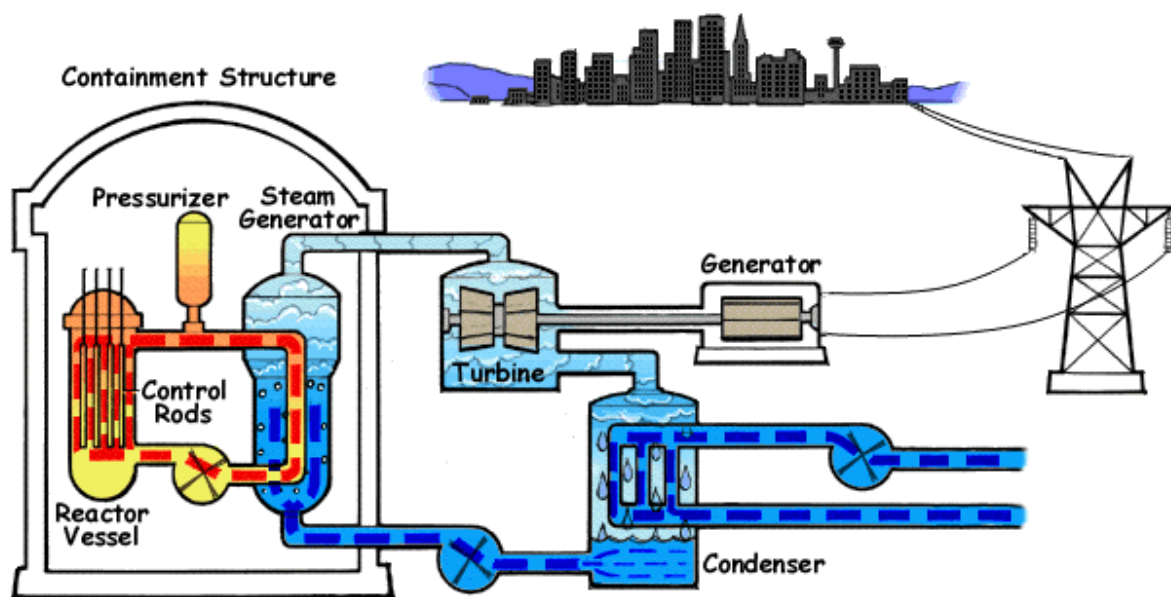


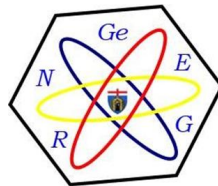
LE GENERAZIONI DEI REATTORI PASSATE, PRESENTI E...FUTURE

- Gli impianti nucleari per la produzione di elettricità sono stati sviluppati a partire dai primi anni '50
- Tale sviluppo è generalmente distinto in fasi o «generazioni»
- La prima generazione si riferisce a sistemi poco più che prototipici
- La seconda riguarda i reattori attualmente in funzione
- La terza riguarda i reattori avanzati o evolutivi
- La quarta i sistemi futuri



Le principali filiere di reattori





Evoluzione delle Tecnologie Nucleari



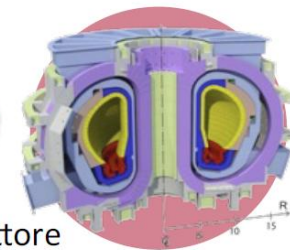
Standard

Quasi tutti i reattori oggi in funzione. Estensione della vita operativa (da 40 a 60-80 anni)



Small Modular Reactors

Piccola taglia (< 300 MWe), progettazione e costruzione modulari.



Fusione

Primo reattore (commerciale) a fusione

DEMO & FOAK

2050 2060

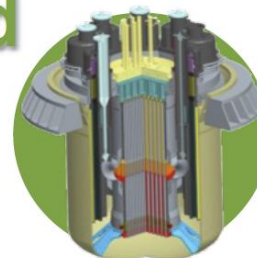


Evolutivi

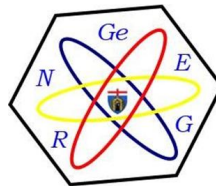
Alcuni già operativi (Cina, UAE, Corea Sud, Russia, India).
La maggioranza dei 59 reattori in costruzione nel Mondo



Advanced Modular Reactors

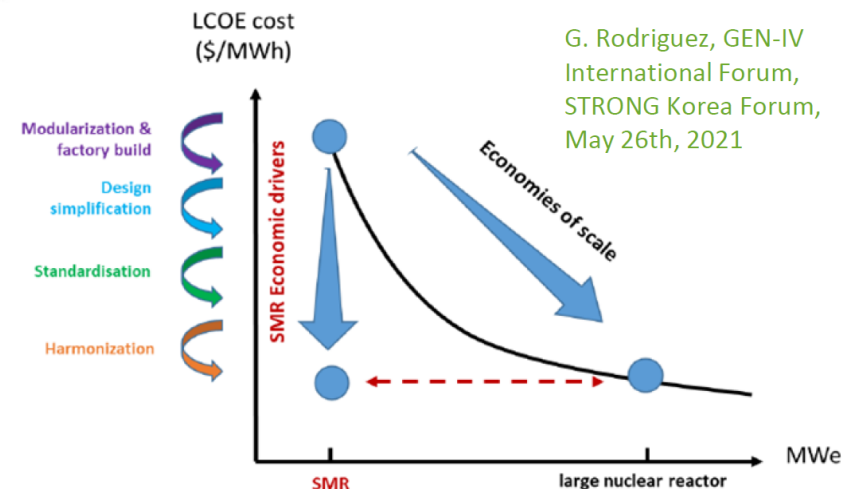


Raffreddamento a metallo liquido o a Sali fusi.
Possibilità di riciclare i rifiuti a vita lunga e ad alta radioattività.



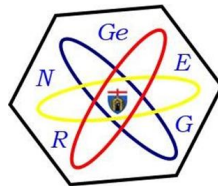
Definitions: SMR / AMR / MMR

- **Small Modular Reactor (SMR):**
<500 MWe max, usually between 50 and 200 MWe, generally based on GEN-III technology (PWR, BWR, sometimes HTR)
- **Advanced Modular Reactor (AMR):**
SMR type but of GEN-IV type system (Molten salt, Na, Pb, Gas, SuperCritical Water)
- **Micro Modular Reactor (MMR) or Very Small Modular Reactor (vSMR) :** Electro- and/or calogen nuclear reactor of a range power from 1 to 20 MWe



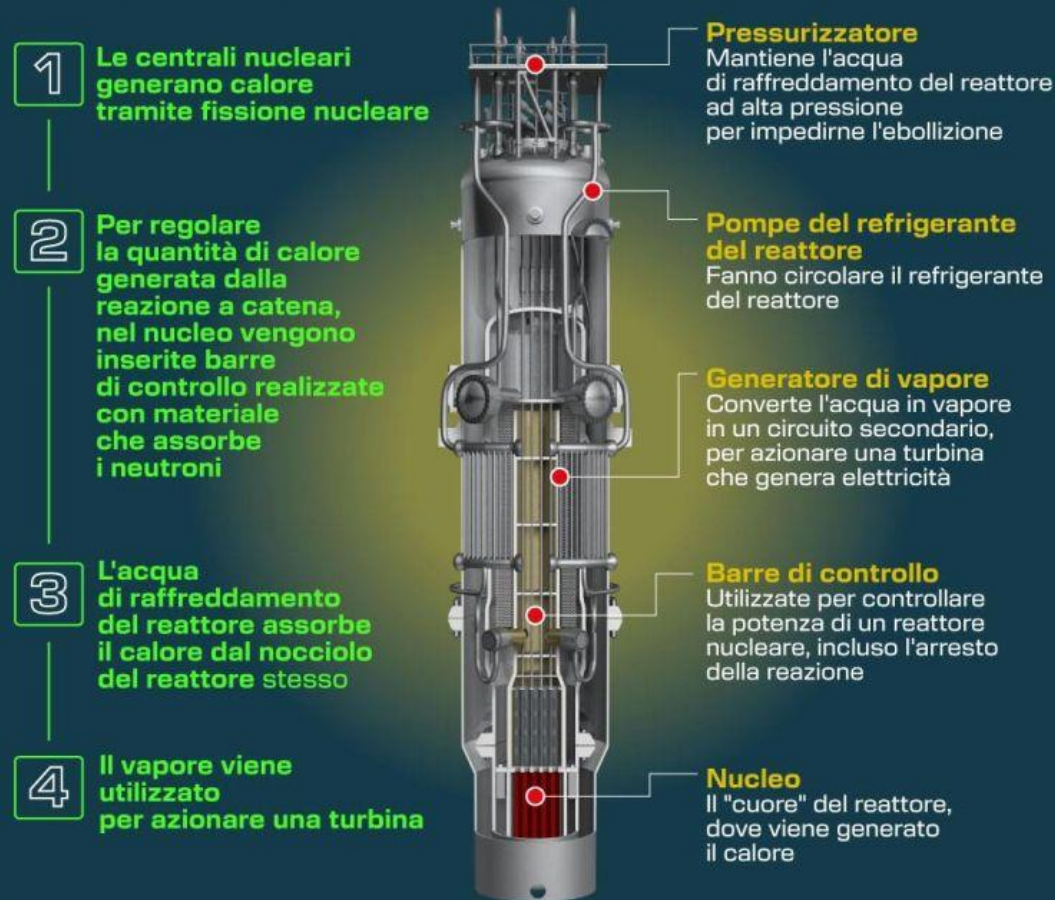
G. Rodriguez, GEN-IV
International Forum,
STRONG Korea Forum,
May 26th, 2021

- Scale effect => modularization plus off-site fabrication
- Design simplifications allowed by a reduced power => limitation of the Emergency Planning Zones
- Series effect => Reduction of construction time & costs
- Opening towards new specific markets => remote areas, non-electrical applications, electricity/heat cogeneration ...



Small Modular Reactors (SMR)

Gli SMR sono reattori pensati per essere modulari (ovvero prodotti industrialmente in serie) e di piccola taglia, quindi fino a 300 mega watt di potenza elettrica (MWe)



SMR



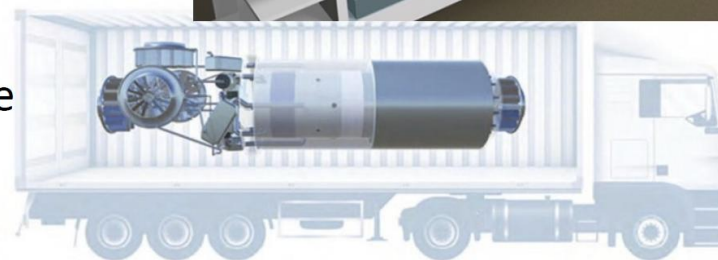
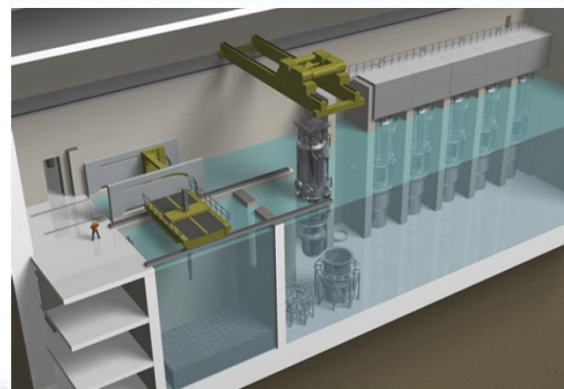
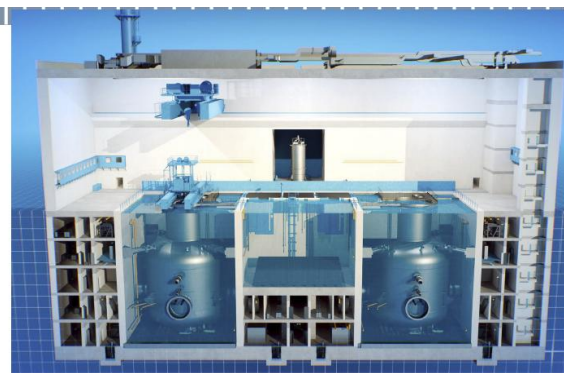
Reattori nucleari di taglia limitata (< 300 MWe)

Vantaggi:

- Design **semplificato**
- Strategia di sicurezza a «**sistemi passivi**» (circolazione naturale: no Fukushima)
- Progettazione e costruzione **modulare**, in officina
- **Cogenerazione** (idrogeno, accumulo termico, teleriscaldamento, desalazione, biofuel)

Sfide:

- Mercato internazionale, costruzione in serie
- Dimostratori: tempi e costi



SMR già operativi (esempi)



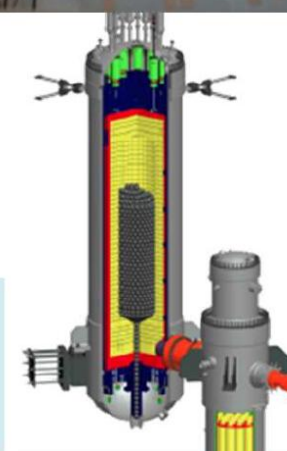
RUSSIA
Barge mounted
PWR reactor



KLT40s

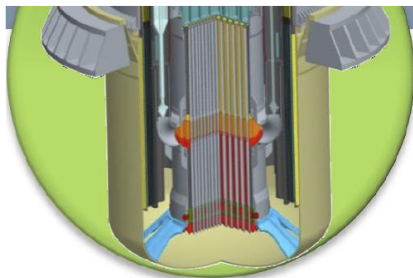


CHINA
High Temperature
Gas Reactor



HTR-PM

AMR



Reattori raffreddati a:
piombo liquido, sodio liquido,
sali fusi

«fisica differente»: eccesso di neutroni

Vantaggi:

- Gli stessi degli SMR (molti GenIV sono SMR)
- Miglior **rendimento**
- Possibilità di **separare e «bruciare» i rifiuti** ad alta radiotossicità

Sfide:

- Economicità
- Integrazione con impianti del ciclo del combustibile (proliferazione)

LA DIMENSIONE DEL PROBLEMA

Rifiuti prodotti per persona, per anno*

1.36 ton rifiuti totali annui



270 kg

rifiuti solidi urbani



54 kg

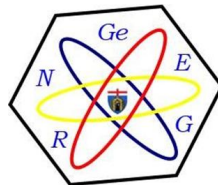
rifiuti tossico-nocivi



54 g

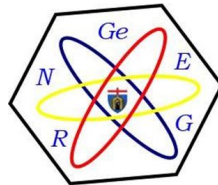
rifiuti radioattivi





Esempi di SMR/AMR/MMR (2023)

Name	Design organisation	Headquarter (city/region)	Country	Thermal power (MWth)	Outlet temperature (°C)	Spectrum (thermal/fast)	Fuel type
ARC-100	ARC Clean Technology	Saint John, New Brunswick	Canada	286	510	Fast	Metallic U-Zr alloy
CAREM	CNEA ¹	Buenos Aires	Argentina	100	326	Thermal	UO ₂ pellets
ACPR50S	CGN ²	Shenzhen	China	200	321.8	Thermal	UO ₂ pellets
ACP100	CNNC ³ and NPIC ⁴	Hainan Province	China	385	319.5	Thermal	UO ₂ pellets
Nuward	EDF ⁵	Paris	France	540	307	Thermal	UO ₂ pellets
BWRX-300	GE-Hitachi/Hitachi-GE	Wilmington, North Carolina	United States	870	287	Thermal	UO ₂ pellets
Hermes	Kairos Power	Alameda, California	United States	35	585	Thermal	TRISO pebble
SEALER-55	Leadcold Reactors	Stockholm	Sweden	140	432	Fast	Uranium nitride
Stable Salt Reactor - Wasteburner	Moltex Energy	Saint John, New Brunswick	Canada	750	590	Fast	Molten salt fuel
VOYGR	NuScale Power	Portland, Oregon	United States	250	321	Thermal	UO ₂ pellets
Aurora	OKLO	Sunnyvale, California	United States	4	500	Fast	Metallic U-Zr alloy
Rolls-Royce SMR	Rolls-Royce SMR Ltd	Manchester	United Kingdom	1 358	325	Thermal	UO ₂ pellets
KLT-40S	Rosatom	Moscow	Russia	150	316	Thermal	UO ₂ pellets
RITM-200N	Rosatom	Moscow	Russia	190	321	Thermal	UO ₂ pellets
RITM-200S	Rosatom	Moscow	Russia	198	318	Thermal	UO ₂ pellets
Sodium	TerraPower	Bellevue, Washington	United States	840	500	Fast	Metallic U-Zr alloy
HTR-PM	INET ⁶	Beijing	China	500	750	Thermal	TRISO pebble
MMR	Ultra Safe Nuclear	Seattle, Washington	United States	15	630	Thermal	TRISO prismatic
U-Battery	Urenco	Stoke Poges	United Kingdom	10	710	Thermal	TRISO prismatic
eVinci	Westinghouse Electric Company	Cranberry Township, Pennsylvania	United States	13	750	Thermal	TRISO
XE-100	X-energy	Rockville, Maryland	United States	200	750	Thermal	TRISO-X pebble



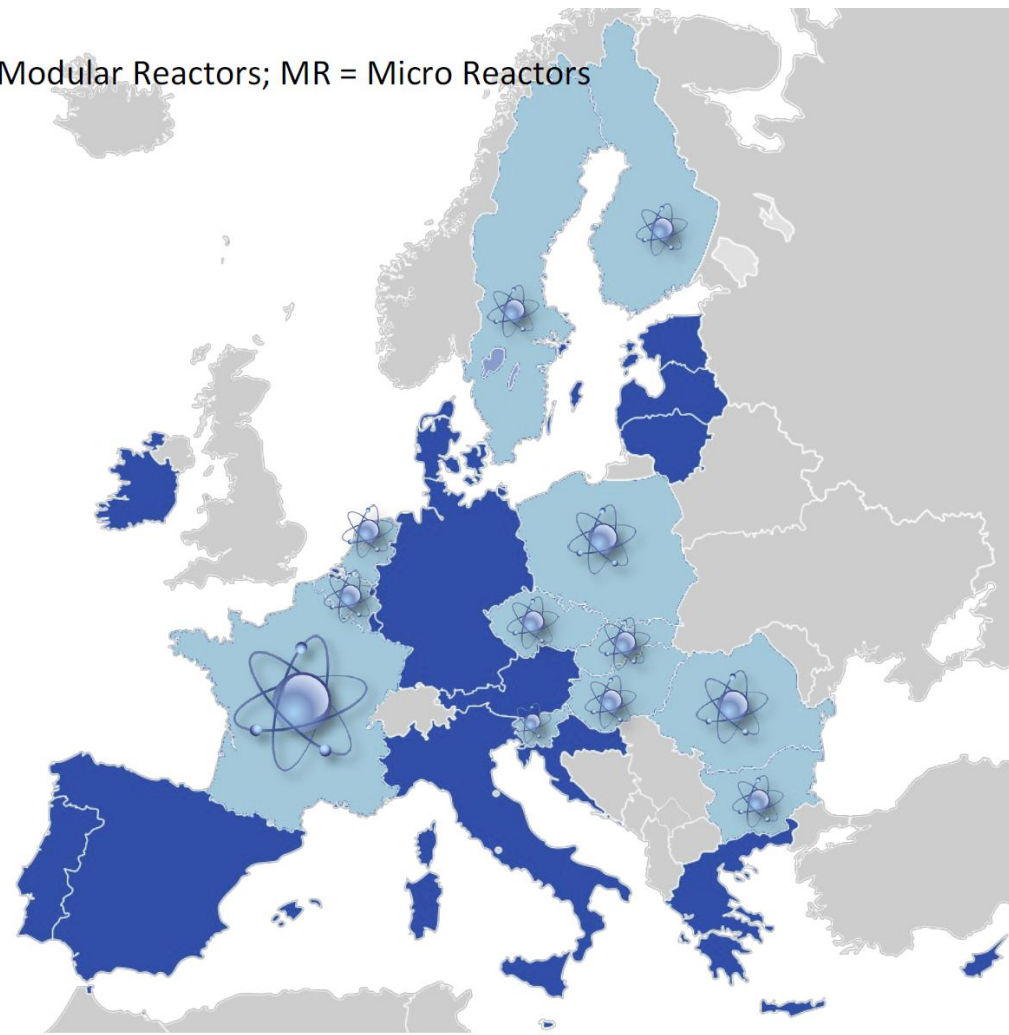
Interesse verso nuovi reattori in UE

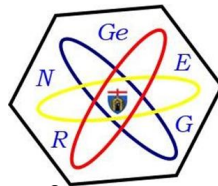
LR = Large Reactors; SMR = Small Modular Reactors; AMR = Advanced Modular Reactors; MR = Micro Reactors

Francia	(LR, SMR, AMR)
Svezia	(LR, SMR)
Belgio	(LR, SMR)
Finlandia	(LR, SMR)
Ungheria	(LR)
Bulgaria	(LR)
Rep. Ceca	(LR)
Romania	(LR, SMR)
Slovacchia	(LR, SMR)
Slovenia	(LR)
Olanda	(LR, SMR)
Polonia	(LR, SMR, MR)

Potenziale mercato SMR in EU:

- 10 unità al 2035
- 10+ unità/anno al 2050



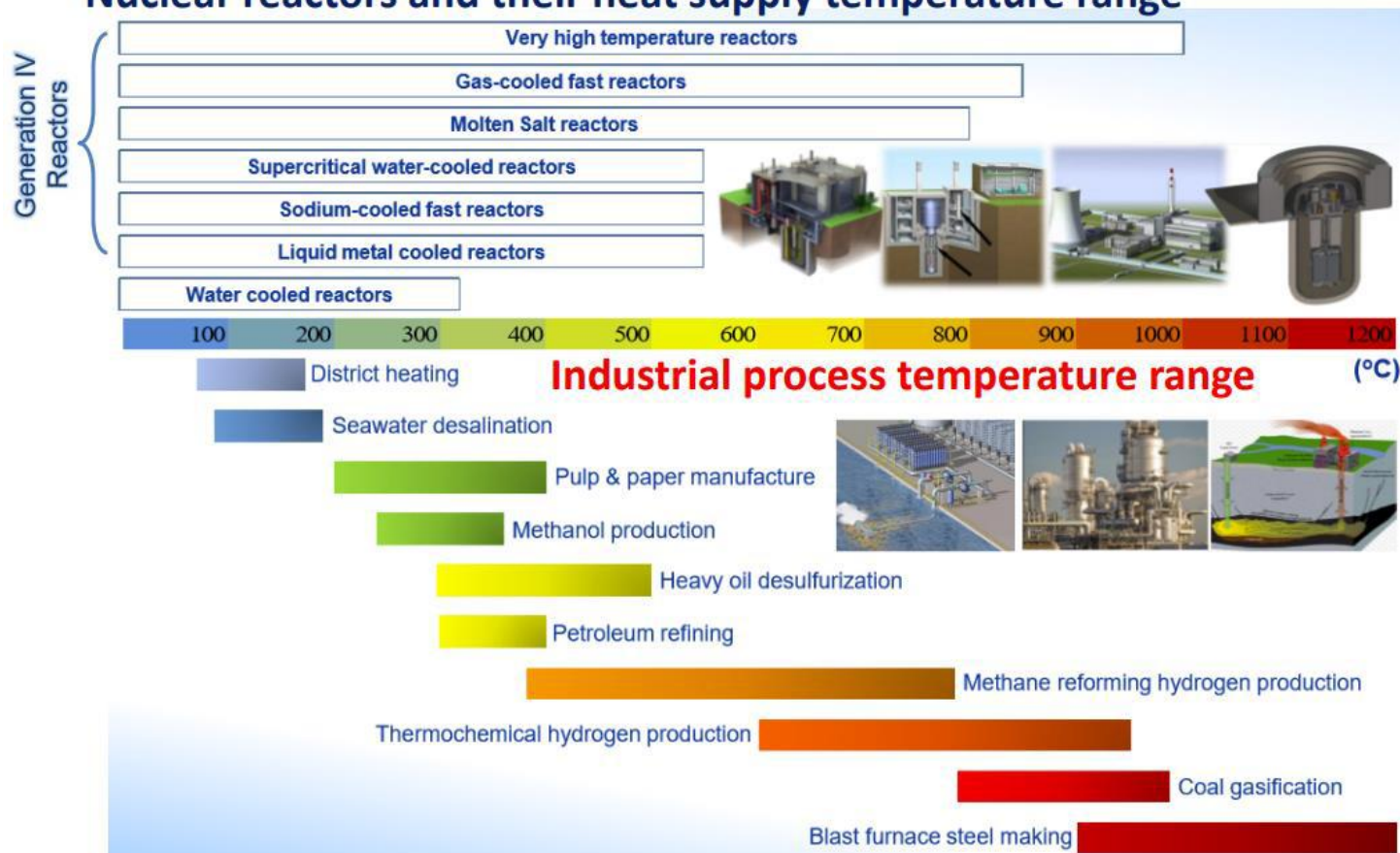


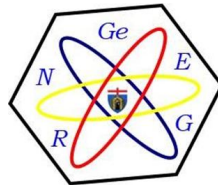
Applicazioni non elettriche

Opportunities for nuclear non-electric applications



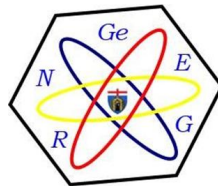
Nuclear reactors and their heat supply temperature range



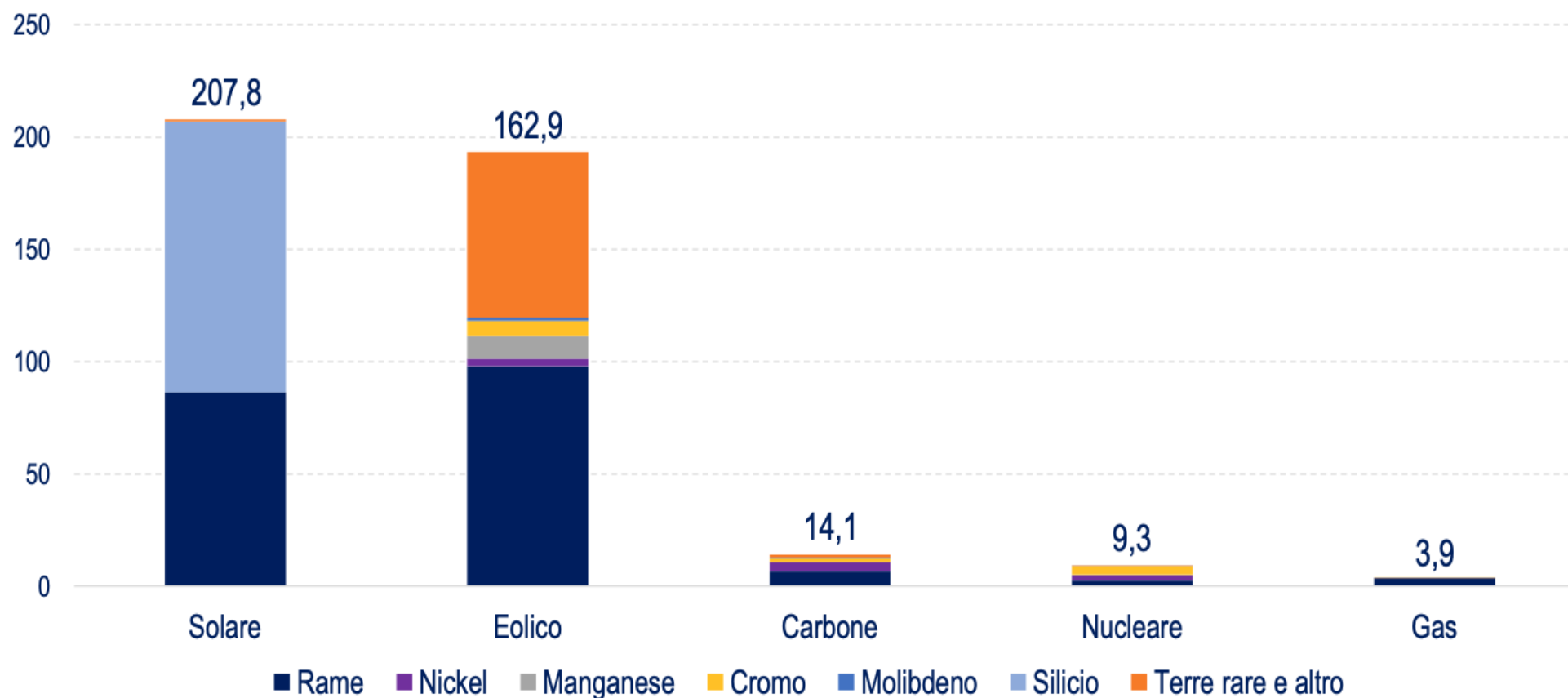


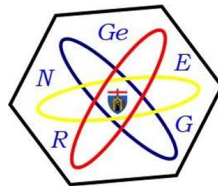
Le problematiche di un mix di generazione sbilanciato sulle fonti rinnovabili

- Non programmabilità della produzione elettrica (in assenza di stoccaggio)
- Lievitazione dei costi per lo stoccaggio ed il trasporto dell'energia
- Scarsa sicurezza/stabilità di rete
- Limitata disponibilità di materie prime critiche necessarie per la costruzione di tali tecnologie

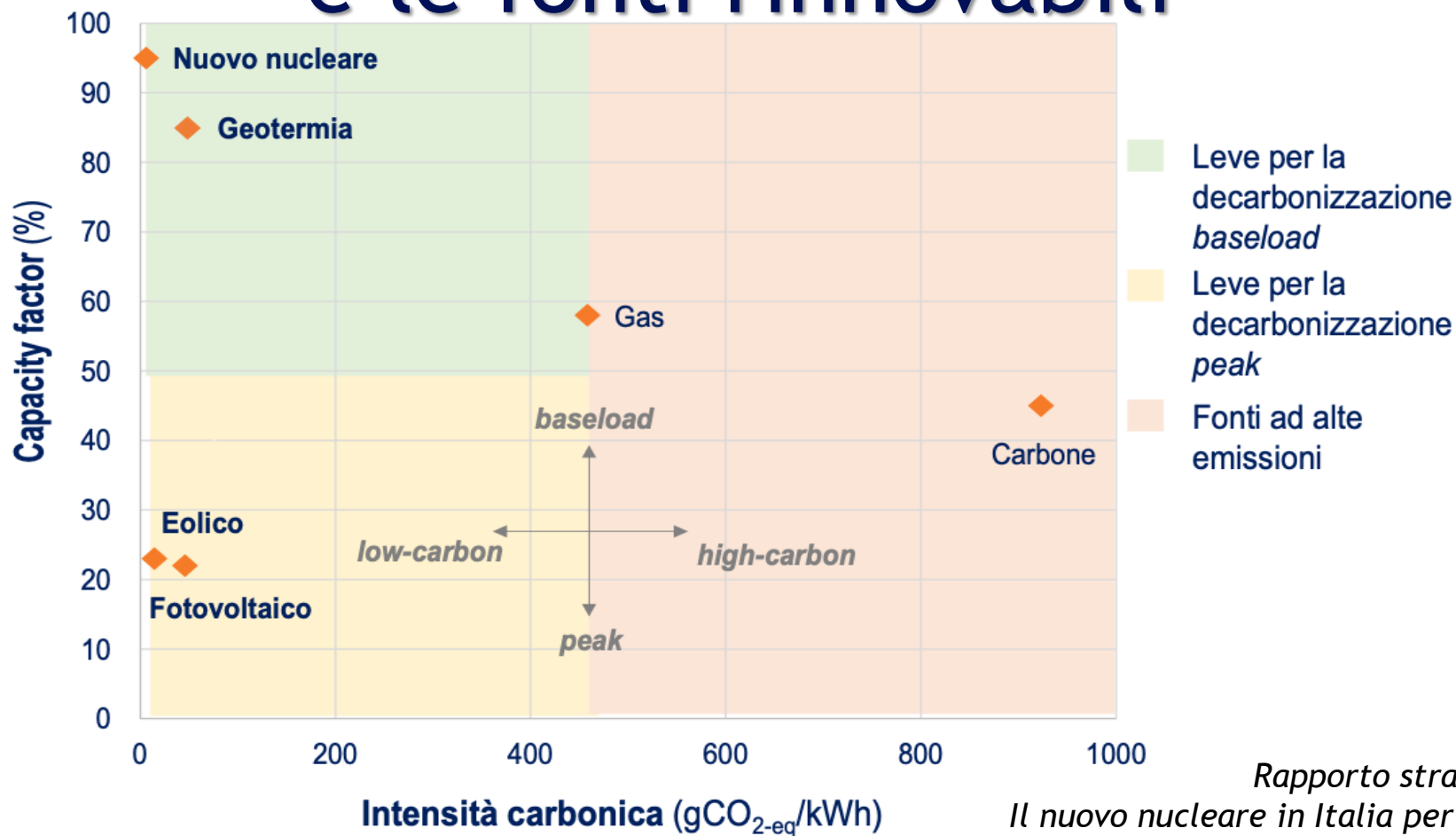


Quantità [kg] di materie prime critiche necessarie per produrre 1 GWh di energia

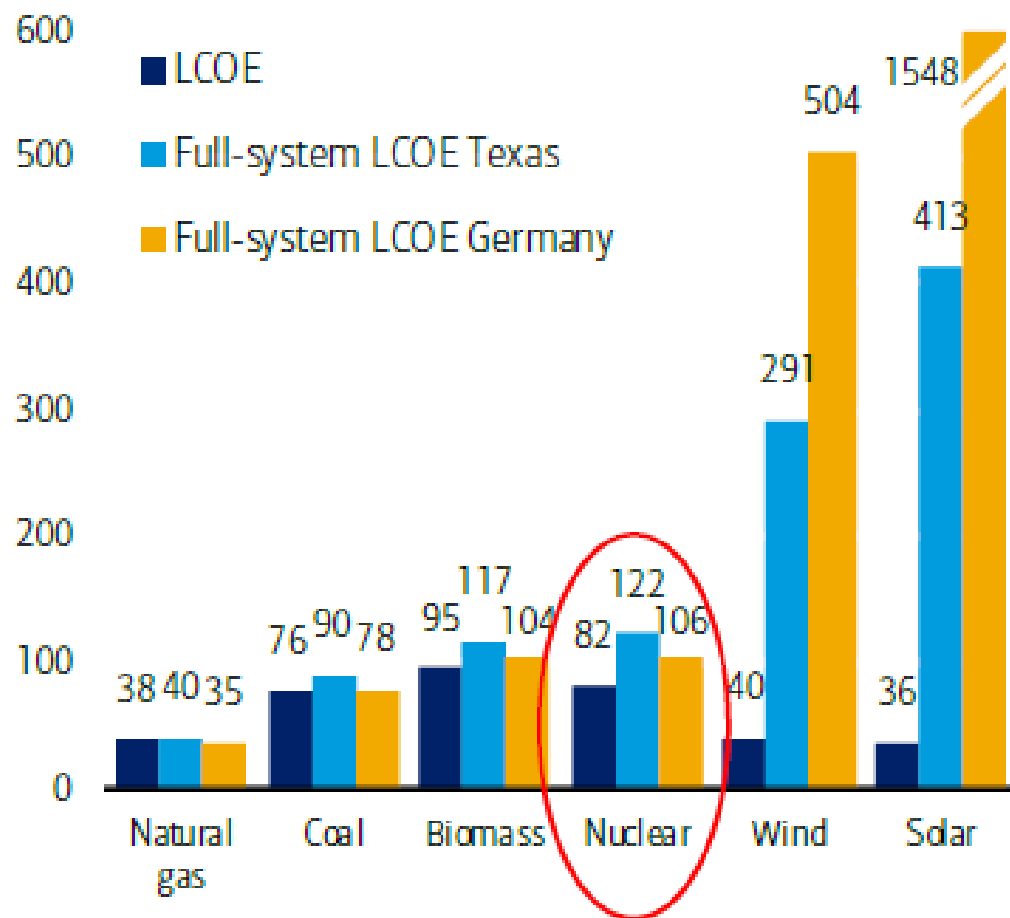




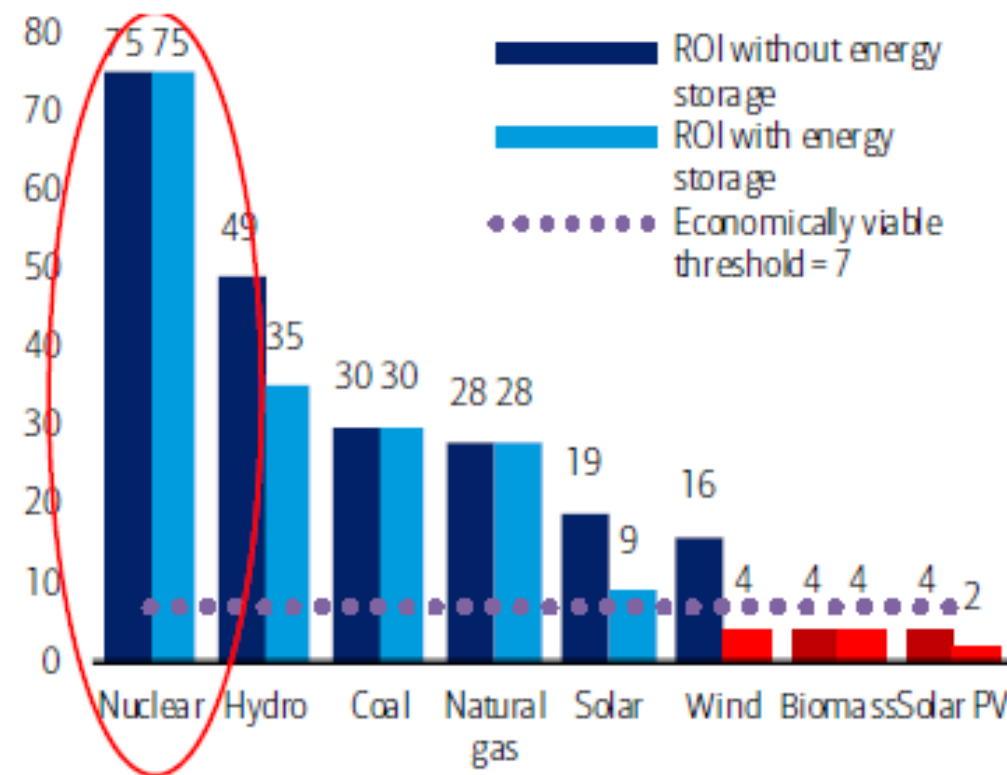
Un confronto fra il nuovo nucleare e le fonti rinnovabili



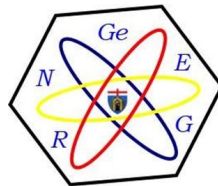
L(FS)COE & EROEI



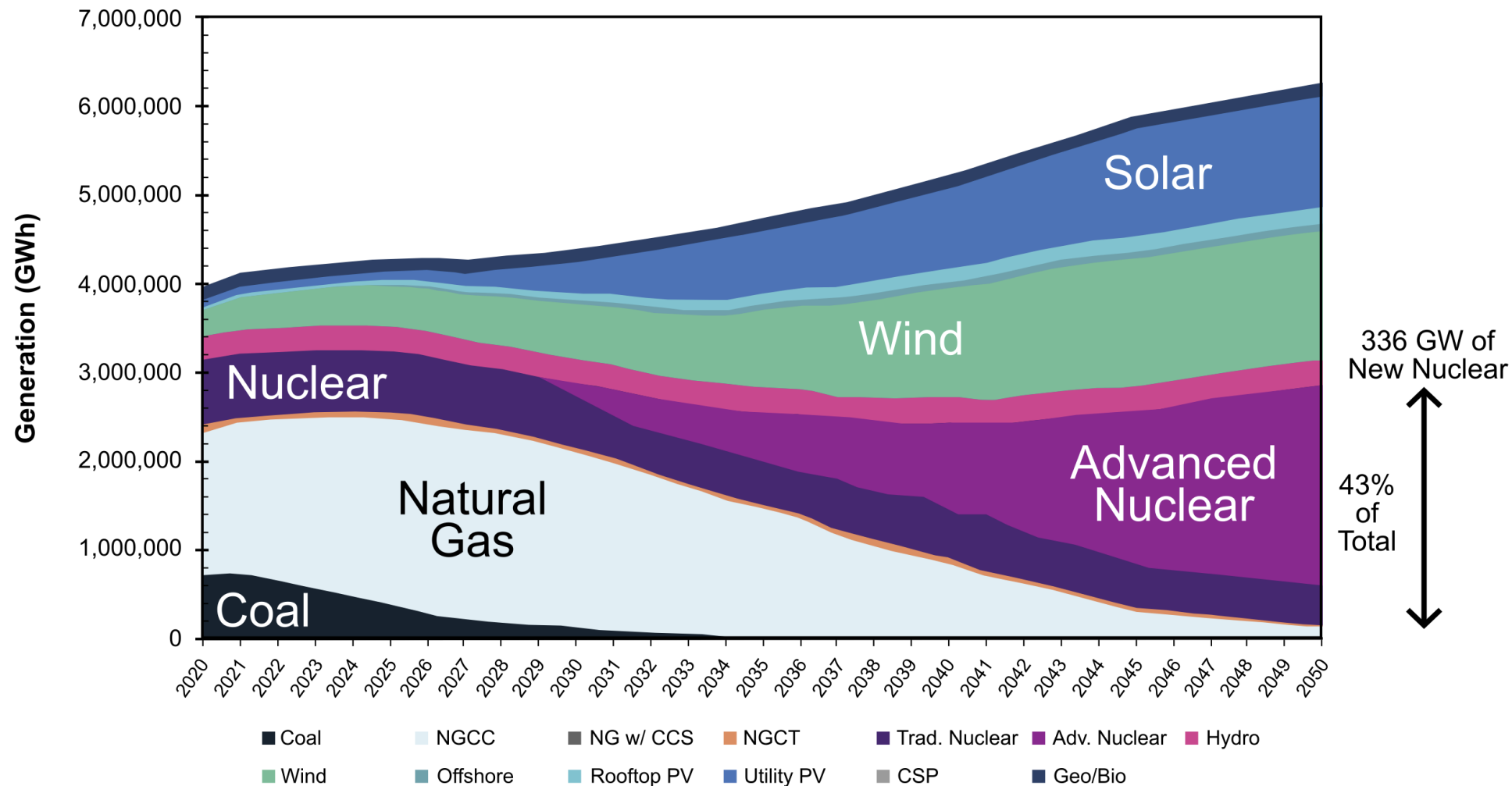
Source: BofA Research Investment Committee, Idel 2022

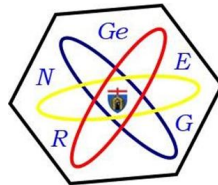


Source: BofA Research Investment Committee, D. Weißbach, G. Ruprecht, A. Huke, K. Czerski, S. Gottlie, A. Hussein; Red signals EROI below economically viable threshold



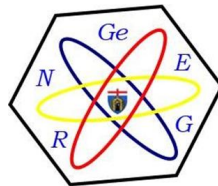
Possibile scenario zero emission (USA)



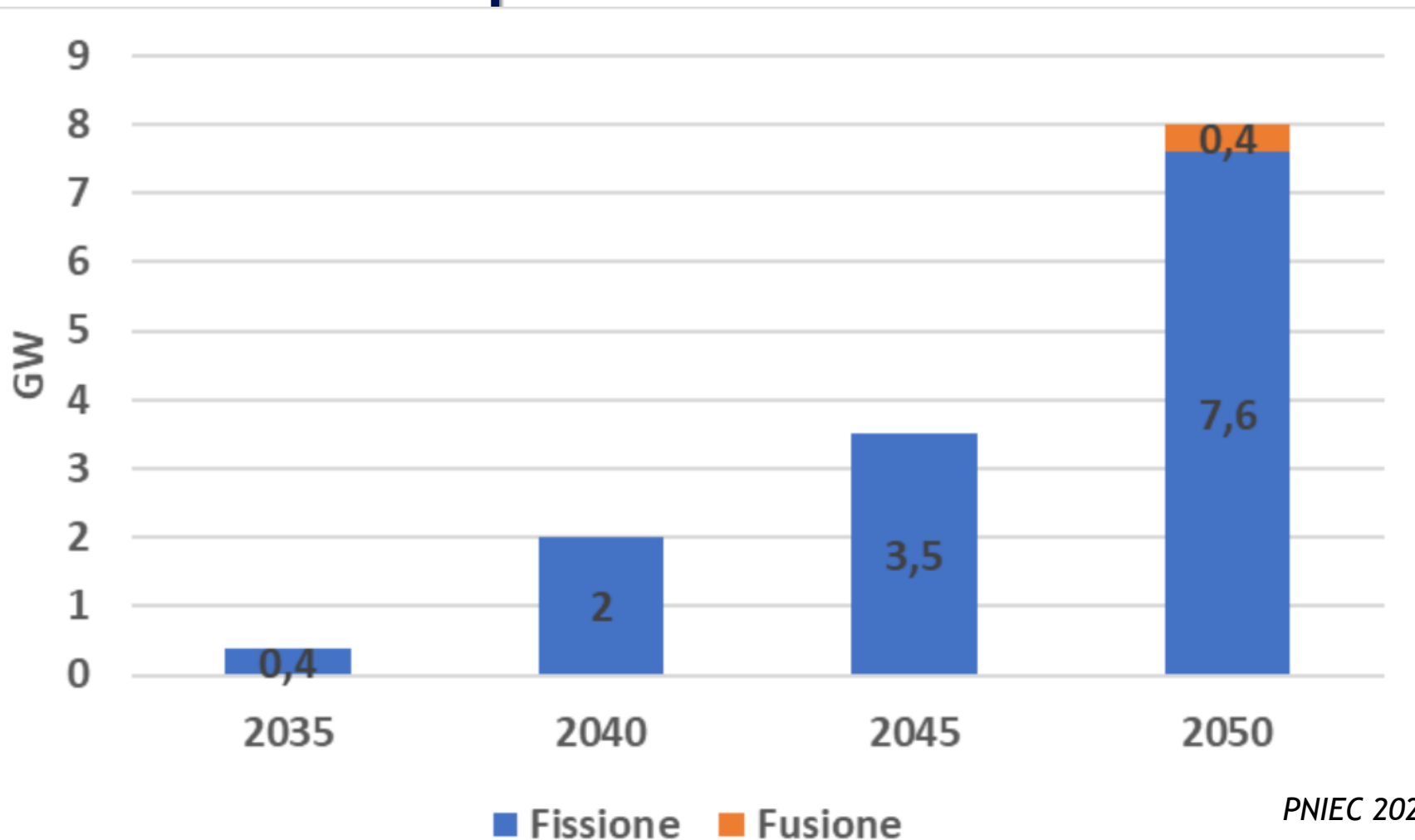


Gli scenari futuri delineati all'interno del PNIEC 2024

- **Nucleare moderato:** Attualmente risulta lo scenario più attendibile e prevede una reintroduzione dell'energia nucleare che arrivi al 2050 con una capacità installata di 8 GW
- **Nucleare senza limitazione:** Rappresenta uno scenario ancora utopistico dove vengono utilizzare tutte le risorse disponibili, permettendo di arrivare al 2050 con una capacità installata di 16 GW

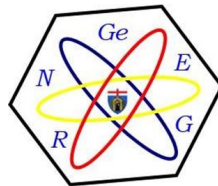


Evoluzione della potenza nucleare installata



Possibile sviluppo della flotta di reattori italiani

Tipologia di reattore	Numero di unità operative al 2035	Numero di unità operative al 2040	Numero di unità operative al 2045	Numero di unità operative al 2050
NUWARD tm	2	7	12	17
LFR	0	0	2	6
HTR-PM	0	0	2	4
Fusione nucleare	0	0	0	1
Capacità installata [GW]	0.68	2.38	4.9	8.22



Nuclear Supply Chain in Italia

ansaldo | energia

ASRA AIR COM
COINOX
baglioni

ATB RIVA
CALZONI

B&R BREMBANA & ROLLE

Ti
TECTUBI RACCORDI S.p.A.

CAEN Sys
Systems & Spectroscopy Division

CECOM
HIGH PRECISION SOLUTIONS

CESTARO ROSSI
CONSTRUCTION AND FABRICATION OF INDUSTRIAL PLANTS SINCE 1971 - ITALY

FOMAS GROUP

De Pretto industrie

DEMONT

FRANCHINI ACCIAI

FINCANTIERI **si**
evolving integration

OCEM
POWER ELECTRONICS

FORGIATURA MORANDINI



GEATOP
Metrology & Survey

GIVA GROUP

forge monchieri

SOFTEC



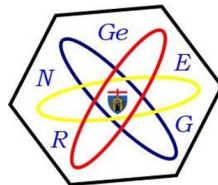
RIFA

SIET
sperimentiamo le tue idee

SHARC
A PASSION FOR CHALLENGES

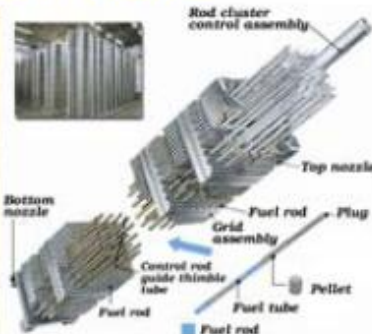
walter tosto





Origine dei rifiuti radioattivi

Ciclo del combustibile nucleare



Ricerca e Medicina

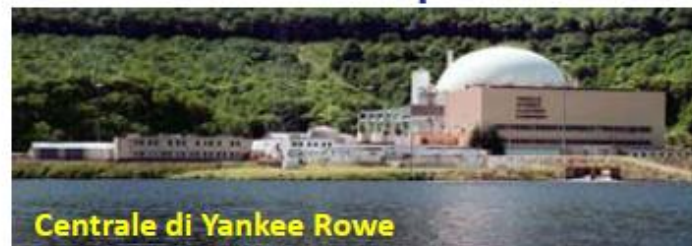
- Ospedali
- Laboratori analisi
- Industria farmaceutica
- Reattori di ricerca



Industria

- Petrolifera
- Fosfati
- Fonderie
- Saldature
-

Smantellamento impianti



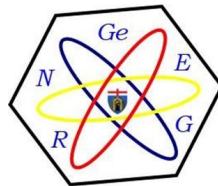
Centrale di Yankee Rowe



Altri

- Rivelatori di fumo
- Parafulmini
- Radio-luminescenti
- Ceneri
- Derivati del Torio (lenti, refrattari)
-



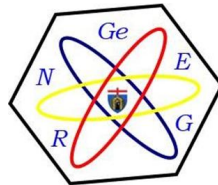


Classificazione dei rifiuti radioattivi

A breve vita

A lunga vita

Bassissima attività	Non sono veri “rifiuti radioattivi” Principalmente provenienti da varie attività che utilizzano materiali radioattivi	
Bassa attività	Non richiedono schermatura. Rifiuti di esercizio di impianti nucleari, ma anche da altre attività.	Rifiuti industriali e nucleari
Media attività	Richiedono schermatura. Per lo più da impianti nucleari, ma anche altre attività.	Per lo più da impianti nucleari
Alta attività e combustibile nucleare	Richiedono schermatura e dissipazione del calore prodotto, ancora di più se combustibile MoX.	



I depositi a livello internazionale

- Molti Paesi hanno modalità di smaltimento definitivo dei rifiuti a bassa attività e breve vita
- Questi costituiscono il 90% del volume totale dei «veri» rifiuti radioattivi
- Non ci sono difficoltà tecniche, ma solo soluzioni tecniche diverse
- L'operatività dei rifiuti a lunga vita è ancora parziale
- Le eccezioni più importanti sono i già funzionanti **depositi geologici WIPP (USA) e Olkiluoto (Finlandia)**
- Altri Paesi europei sono vicini a realizzare depositi geologici: preparazione anche in laboratori sotterranei [Aspö (Svezia), Bure (Francia), Hades (Belgio), Grimsel (Svizzera), etc.] che accompagneranno gli sviluppi futuri
- In particolare Svezia e Francia dopo molti anni di studi tecnici:
 - Siti già selezionati
 - Metodi già avanzati



Forsmark (Svezia)



Oskarshamn (Svezia)



Gorleben (Germania)



Konrad (Germania)



Morsleben (Germania)



Yucca Mountain (USA)



WIPP (USA)



La Manche (Francia)



L'Aube (Francia)

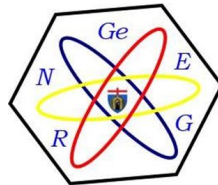


El Cabril (Spagna)



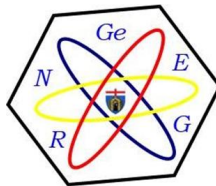
Drigg (Regno Unito)

Depositi definitivi per materiali a **bassa e media attività**
(il 95% dei materiali radioattivi prodotti negli impianti nucleari) sono in esercizio in quasi tutti i Paesi industriali



Depositi temporanei di rifiuti a media attività





Depositi geologici pianificati

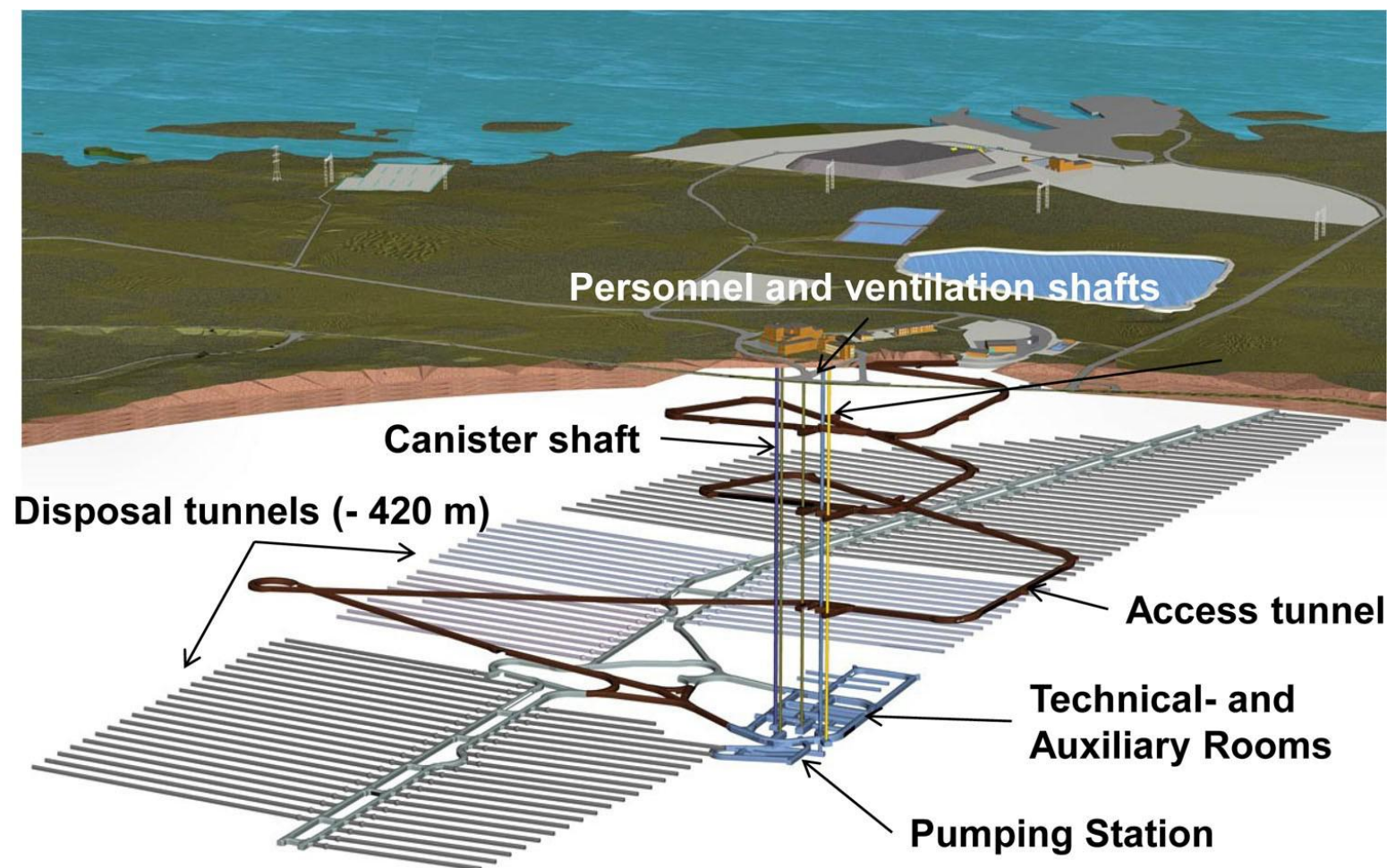
Planned projects with selected site

Location	Commissioning date	Organisation Responsible	Stage of process
France, Cigéo	2035	ANDRA	In July 2022 the French official journal published the decree recognising the public utility of Cigéo. Construction licence submitted in January 2023.
Russia, Krasnoyarsk	tbc	NORWM	Underground Research Laboratory under construction. Construction of DGR will begin after research period.
Sweden, Forsmark	2030-2032	SKB	Licence application for construction approved in September 2022.
Switzerland, Nördlich Lägern	2060	Swiss Nuclear	General licence applications to be submitted to the federal government in 2024. Approval, expected around 2030, subject to an optional referendum.

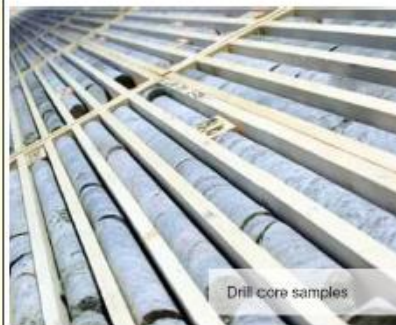
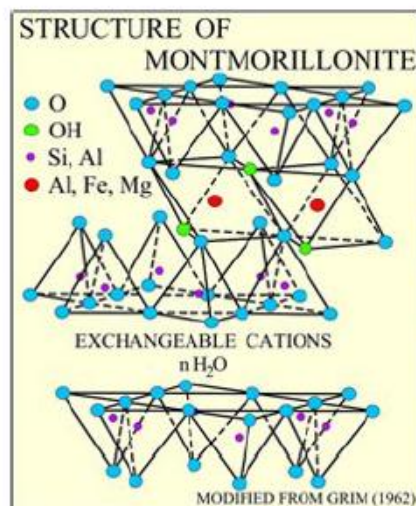
Proposed projects

Location	Commissioning date	Organisation Responsible	Stage of process
Canada	2040+	NWMO	Site selection by late 2024, two sites under consideration. Construction License by 2032.
China	2050+	CNNC	Construction process of URL to test the suitability of Besuha region. If successful, an underground repository will be built near the laboratory by 2050).
Czech Republic	2065	SÚRAO	Site selection by 2030.
Germany	2050	BGR	Site selection by 2031.
Hungary	2030	PURAM	Site selection process is expected to be completed by 2032.
India	tbc	AEC	Plans are focused on the northwest Rajasthan region
Japan	2035	NUMO	Site selection in process in Hokkaido prefecture (Suttu town or Kamoenai village). Expected to be complete by 2025.
Slovakia	tbc	JAVYS	Two sites are undergoing detailed site investigations - expected to be complete in 2023.
United Kingdom	2040	NDA	Site selection in England or Wales launched in 2018.
USA	Suspended	USA DOE	A solution to the permanent disposal of spent nuclear fuel (SNF) in the United States is currently stalled.

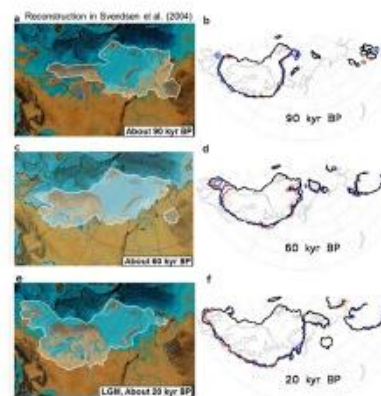
Olkiluoto spent nuclear fuel repository

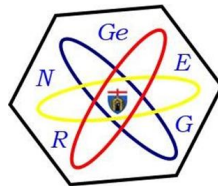


A multi-disciplinary effort



The first deep research hole was drilled in Oikiluoto as early as 1989.



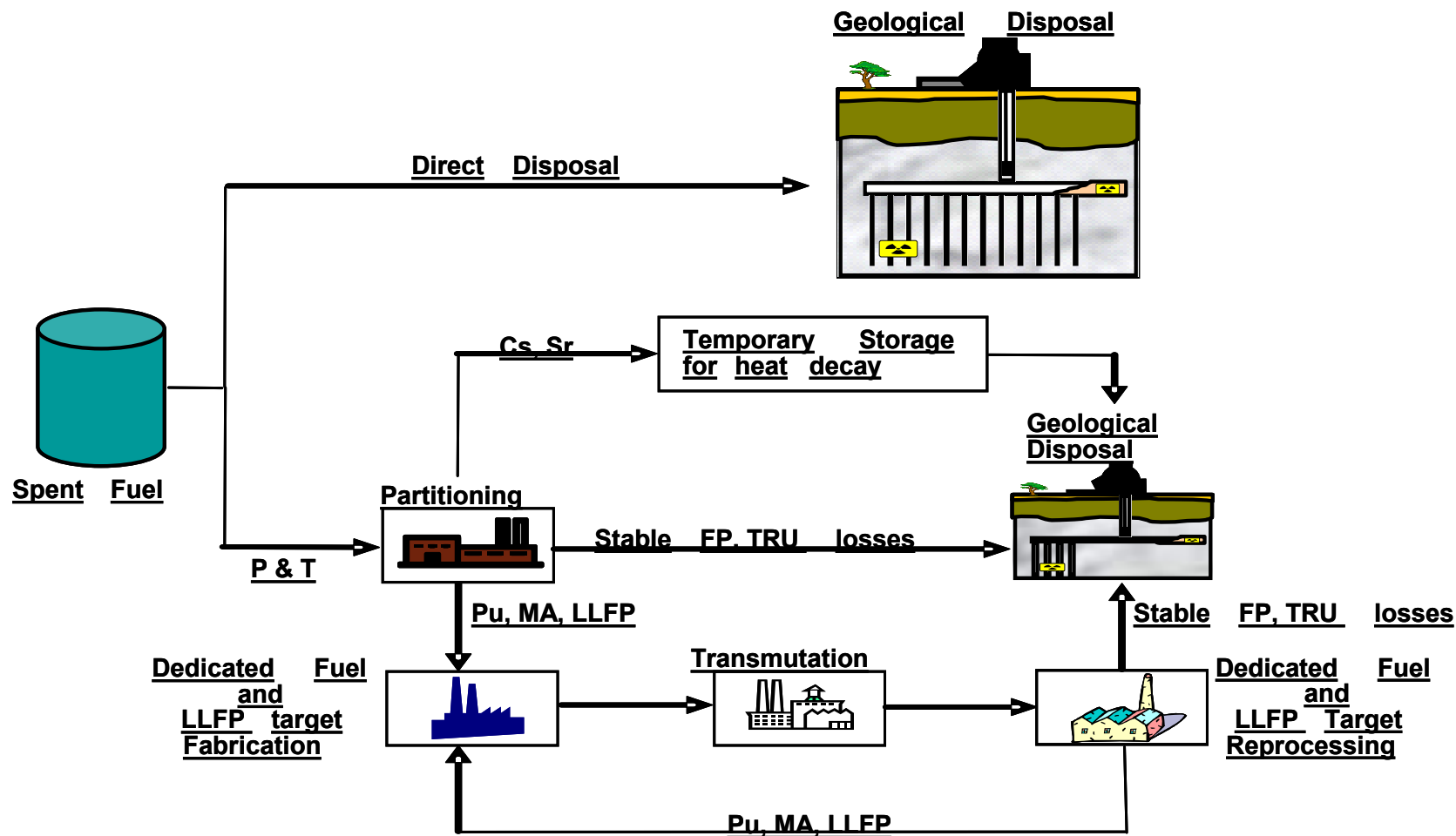
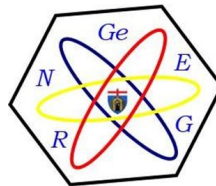


Rifiuti nucleari pericolosi: la reale dimensione del problema

Un francese in un anno produce:

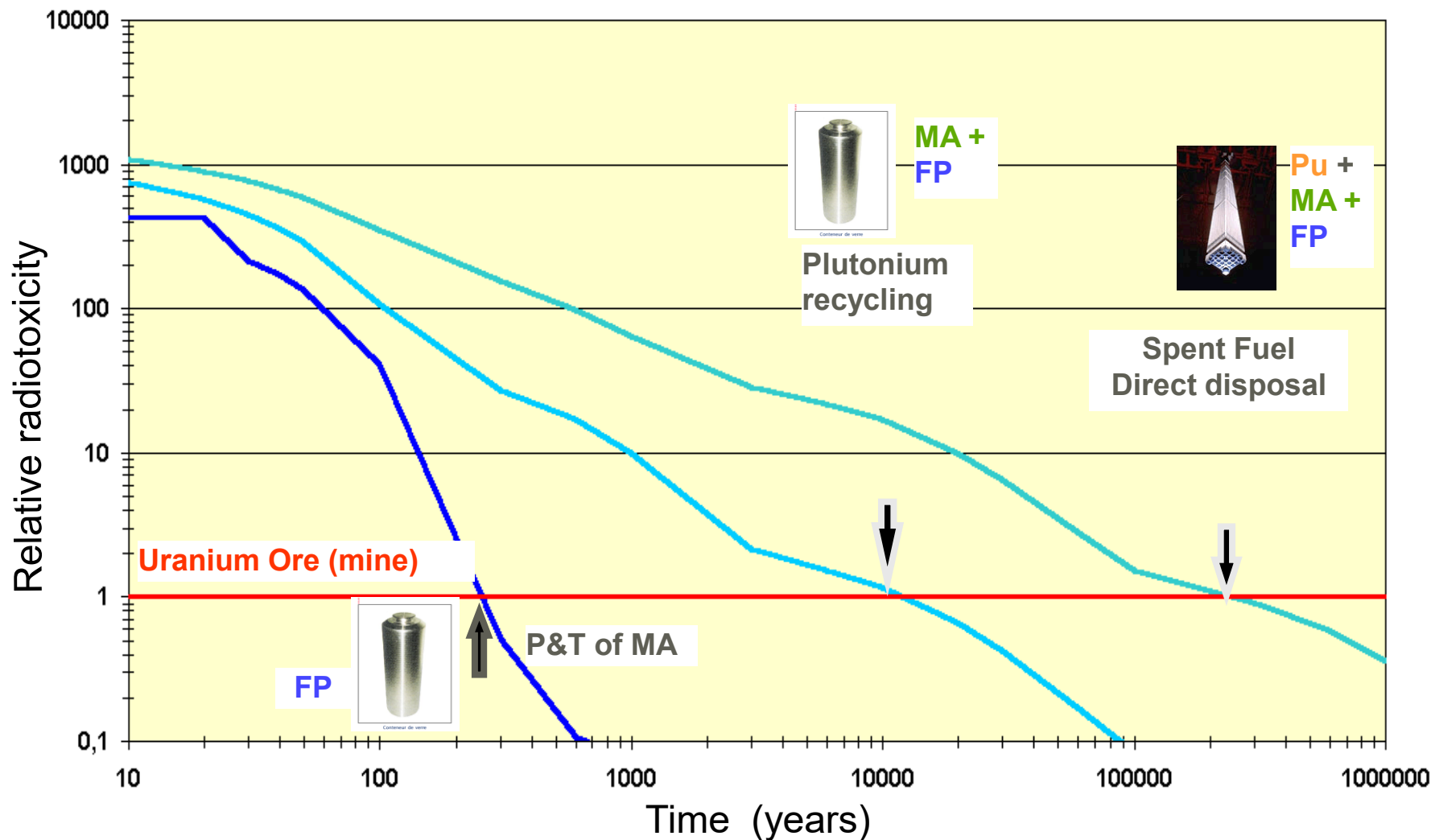
- **3000 kg** di rifiuti di ogni tipo, che comprendono:
 - **100 kg** di rifiuti tossico-nocivi (chimici, metalli pesanti-mercurio piombo cadmio non degradabili,...), che comprendono:
 - **1 kg** di rifiuti nucleari, che comprende:
 - **0.05 kg** di rifiuti radioattivi pericolosi a lunga vita (>30 anni)
- Quindi, in una intera vita (70 anni), un francese che consumi solo energia elettrica nucleare, produce un volume di rifiuti radioattivi pericolosi pari a...

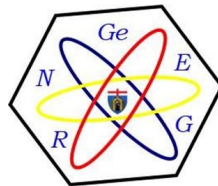




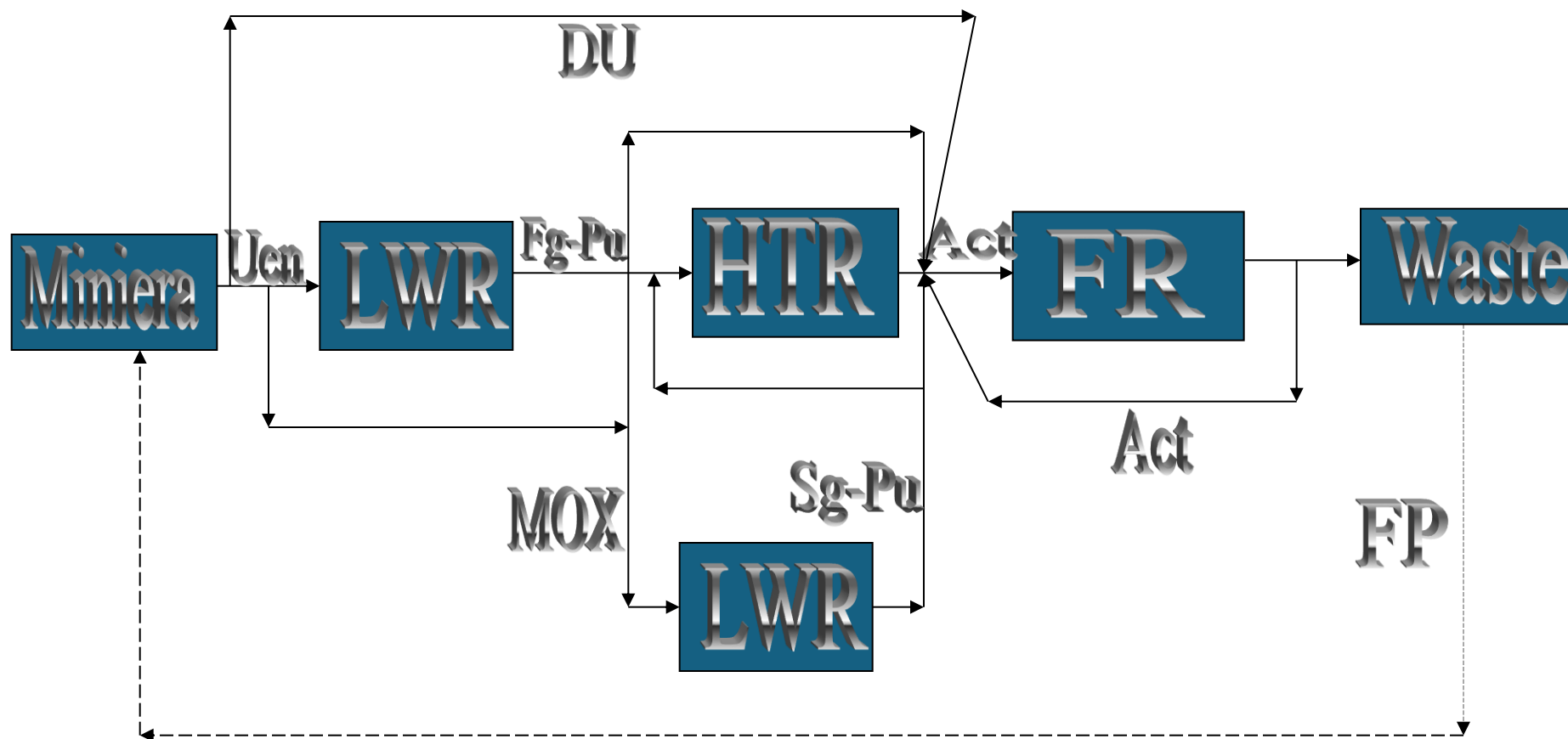
LLFP: Long lived fission products (Tc -99, I -129, Se -79, ...); MA: Minor Actinides (Am, Np, Cm)

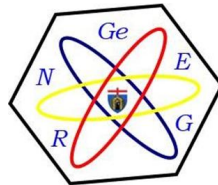
Minimizzazione della radiotossicità dei rifiuti radioattivi





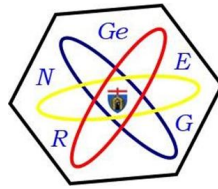
Cicli Simbiotici





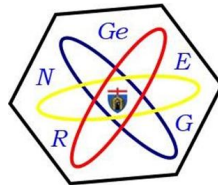
Conclusioni [1/2]

- Il raggiungimento del net zero 2050 attraverso l'utilizzo di sole fonti rinnovabili risulta una strada difficilmente percorribile per problematiche tecnico-economiche e di approvvigionamento delle materie prime critiche
- Uno mix energetico composto da fonti rinnovabili e nucleare permette il raggiungimento della neutralità climatica in tempistiche adeguate, con costi relativamente contenuti e garantendo un'adeguata sicurezza strategica



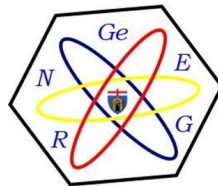
Conclusioni [2/2]

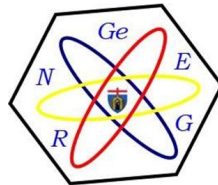
- Lo sviluppo dell'energia nucleare è stato sicuramente rallentato da quanto accaduto a Fukushima
- Ciò nonostante in molti Paesi Europei ed extra-Europei si sta continuando a sfruttare tale fonte di energia, anche con nuove realizzazioni
- L'innovazione giocherà un ruolo essenziale per rispondere ai nuovi obiettivi di sviluppo durevole e di minimizzazione dei rifiuti
- Un problema essenziale è la formazione di una nuova generazione di specialisti nei diversi settori: materiali, chimica degli attinidi, ingegneria del sistema, fisica dei reattori, meccanica, termoidraulica, etc.
- Le „sfide“ scientifiche offrono potenzialmente straordinarie aperture nell'industria, nei centri di ricerca e nell'Università
- L'energia è un tema centrale nelle nostre società: contribuire allo sviluppo di un nucleare durevole, sicuro e rispettoso dell'ambiente non è soltanto un „challenge“ scientifico, ma un vero e proprio „challenge“ di società



**Lo scienziato non è l'uomo
che fornisce le vere risposte:
è quello che pone le vere domande
(Claude Lévi Strauss)**

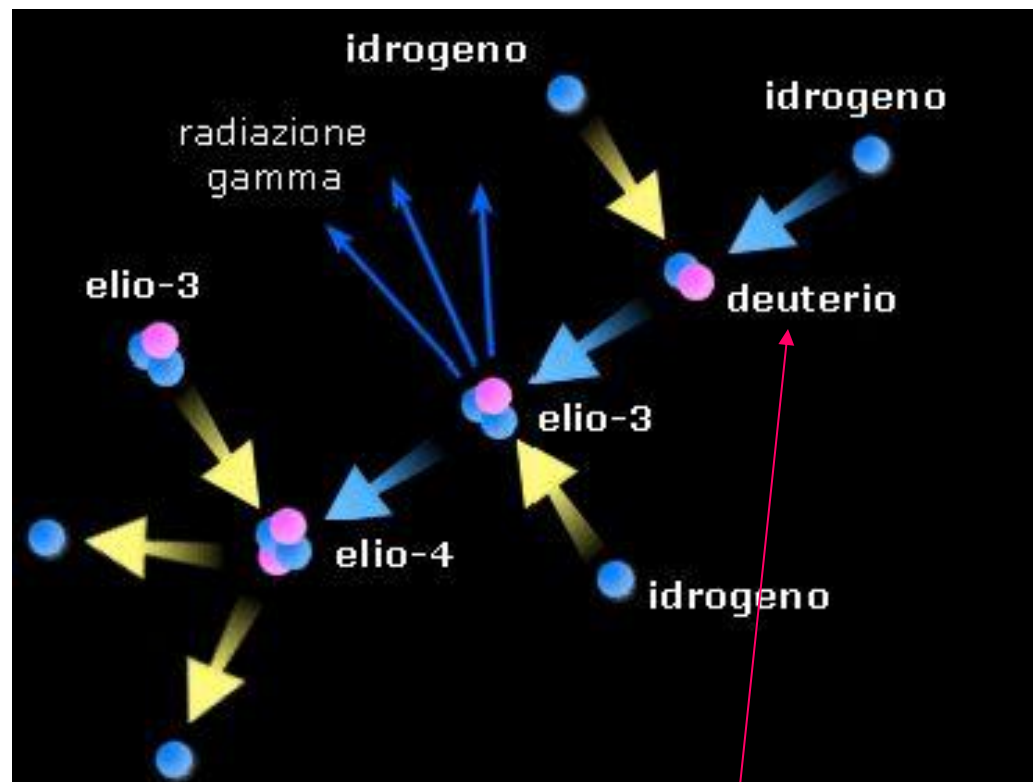
Grazie per l'attenzione!



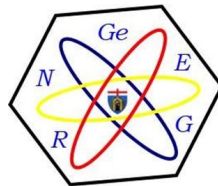


La Fusione Nucleare

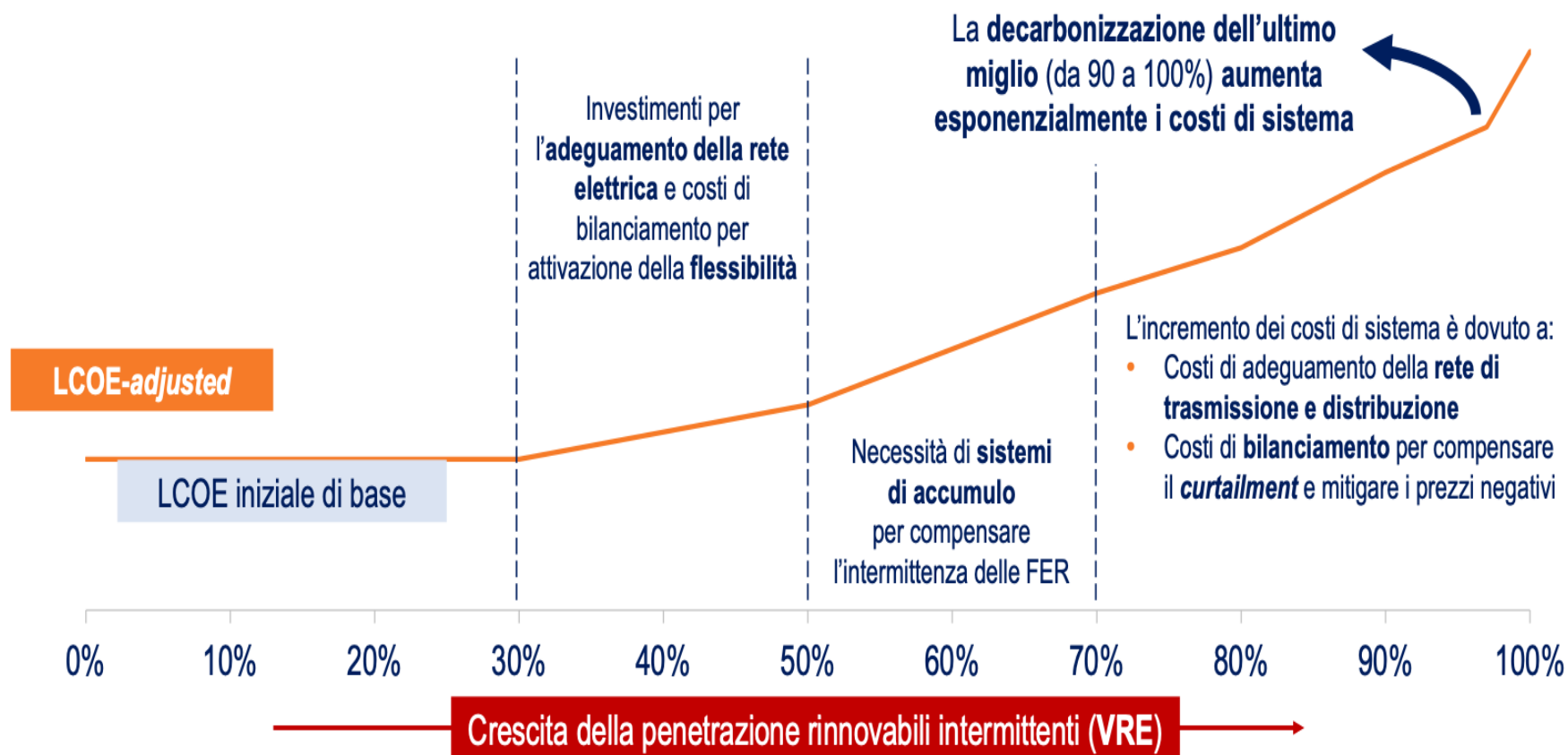
- La fusione nucleare è un processo con il quale si uniscono i nuclei di atomi leggeri (idrogeno, trizio, deuterio) in atomi di elementi più pesanti (elio)
- L'energia che si produce con la fusione è maggiore rispetto all'energia che si può ricavare con la fissione
- L'unità di misura che viene usata è il kWh, che corrisponde a 3600000 joule



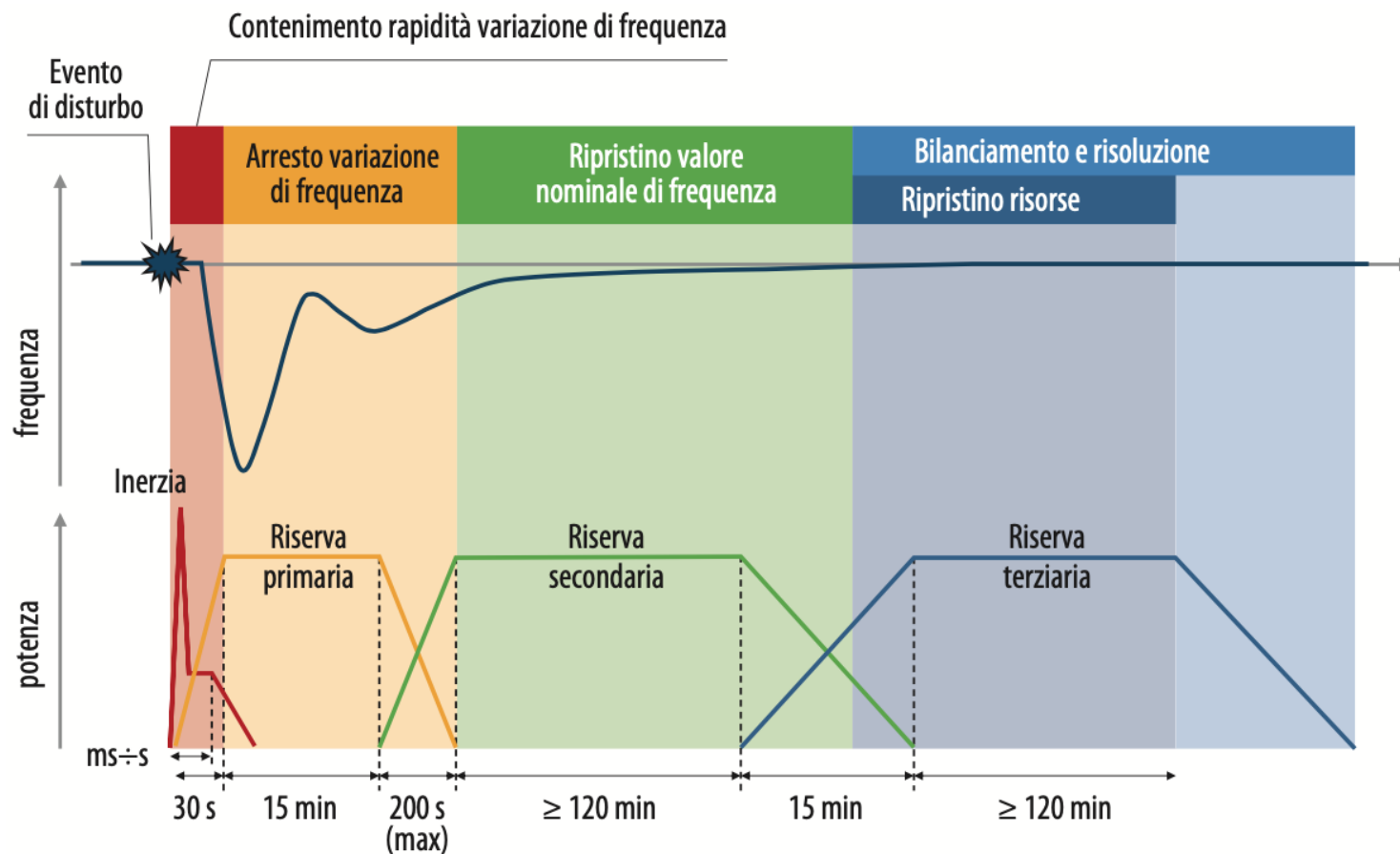
È formato da un protone e un neutrone; chimicamente si comporta come l'idrogeno, ma la sua massa è doppia



Lievitazione dei costi all'aumentare della penetrazione rinnovabile



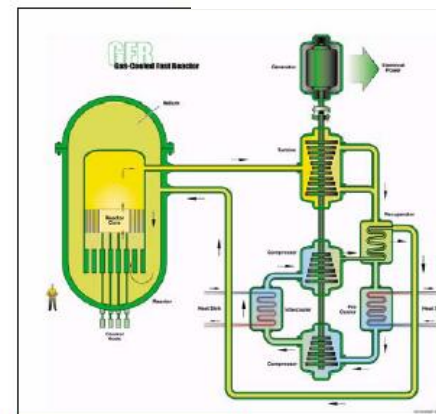
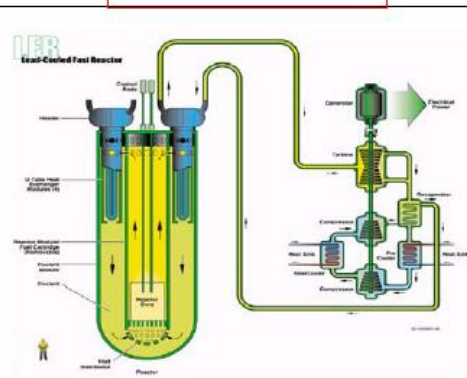
L'inerzia di rete



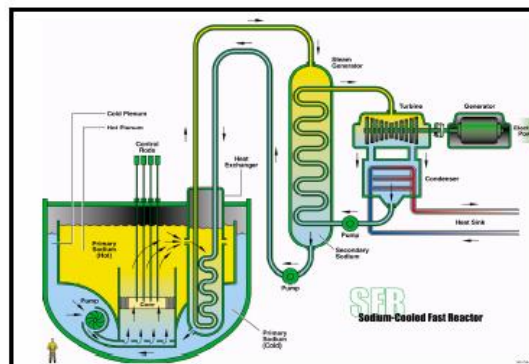
- Le riserve di potenza non sono in grado di intervenire efficacemente nei primissimi istanti successivi ad uno sbilanciamento
- In questa fase critica, un ruolo determinante è svolto dall'energia cinetica rotazionale immagazzinata nelle turbine dei reattori nucleari
- Queste turbine, essendo sincrone con la frequenza di rete, grazie alla loro massa ed inerzia, sono in grado di contribuire alla stabilizzazione immediata della frequenza, fornendo o assorbendo energia in modo passivo

I 6 sistemi della GEN-IV

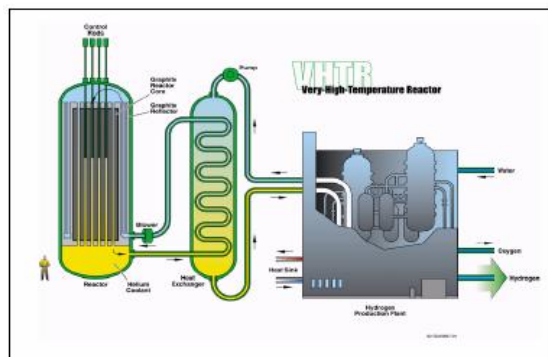
Lead Fast Reactor



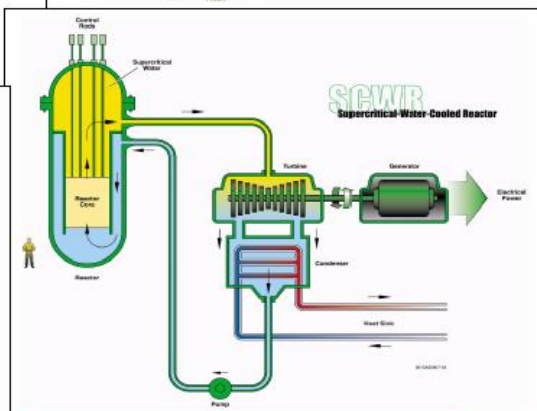
Gas Fast Reactor



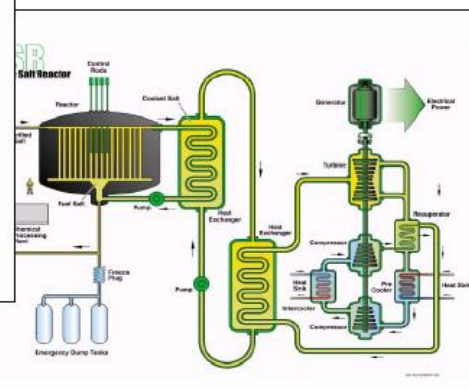
Sodium Fast Reactor



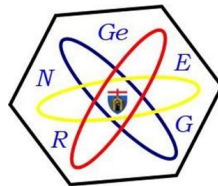
Very High Temperature Reactor



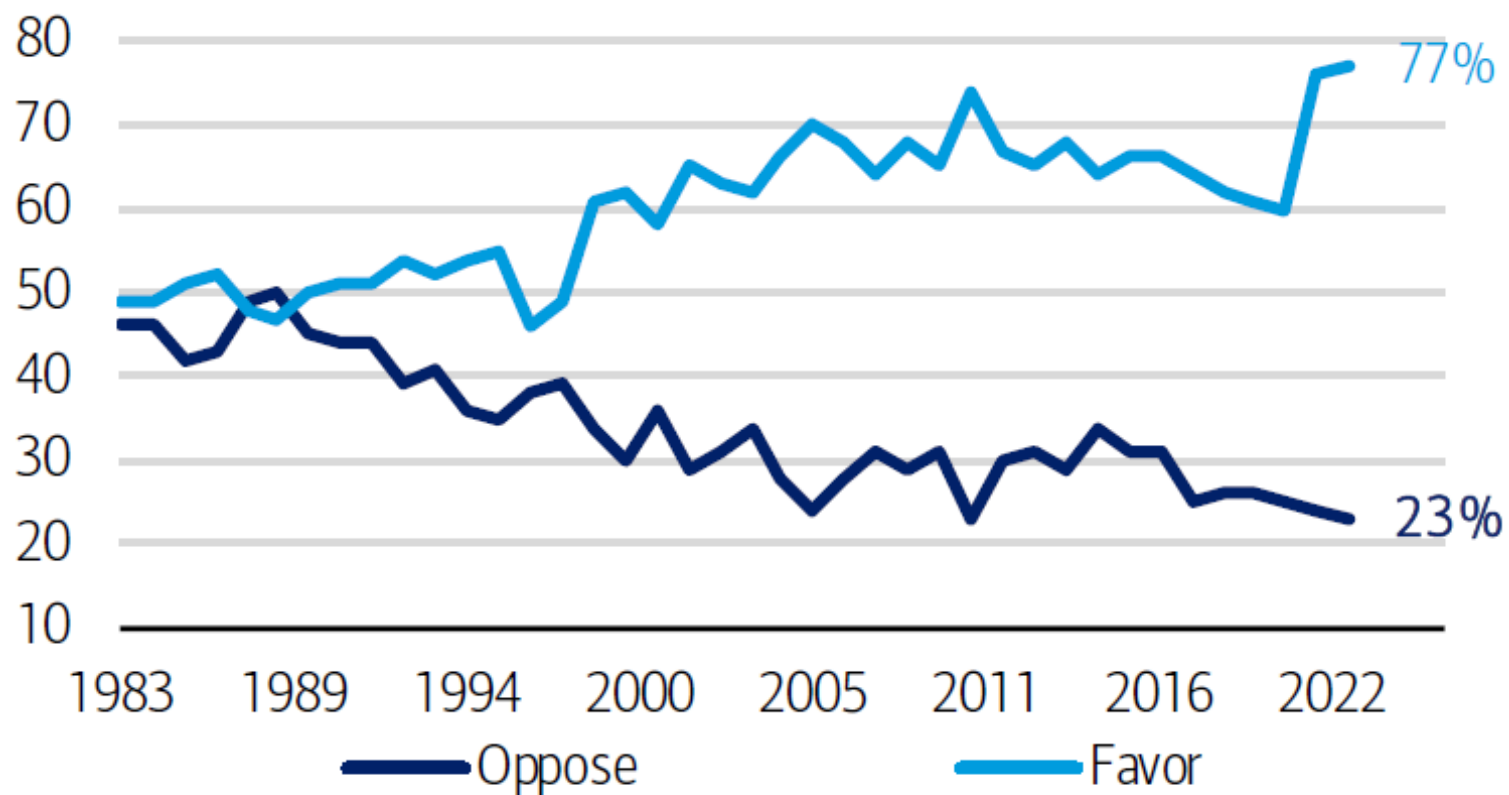
Supercritical Water-cooled Reactor



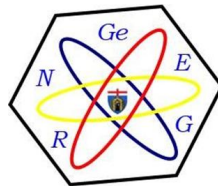
Molten Salt Reactor



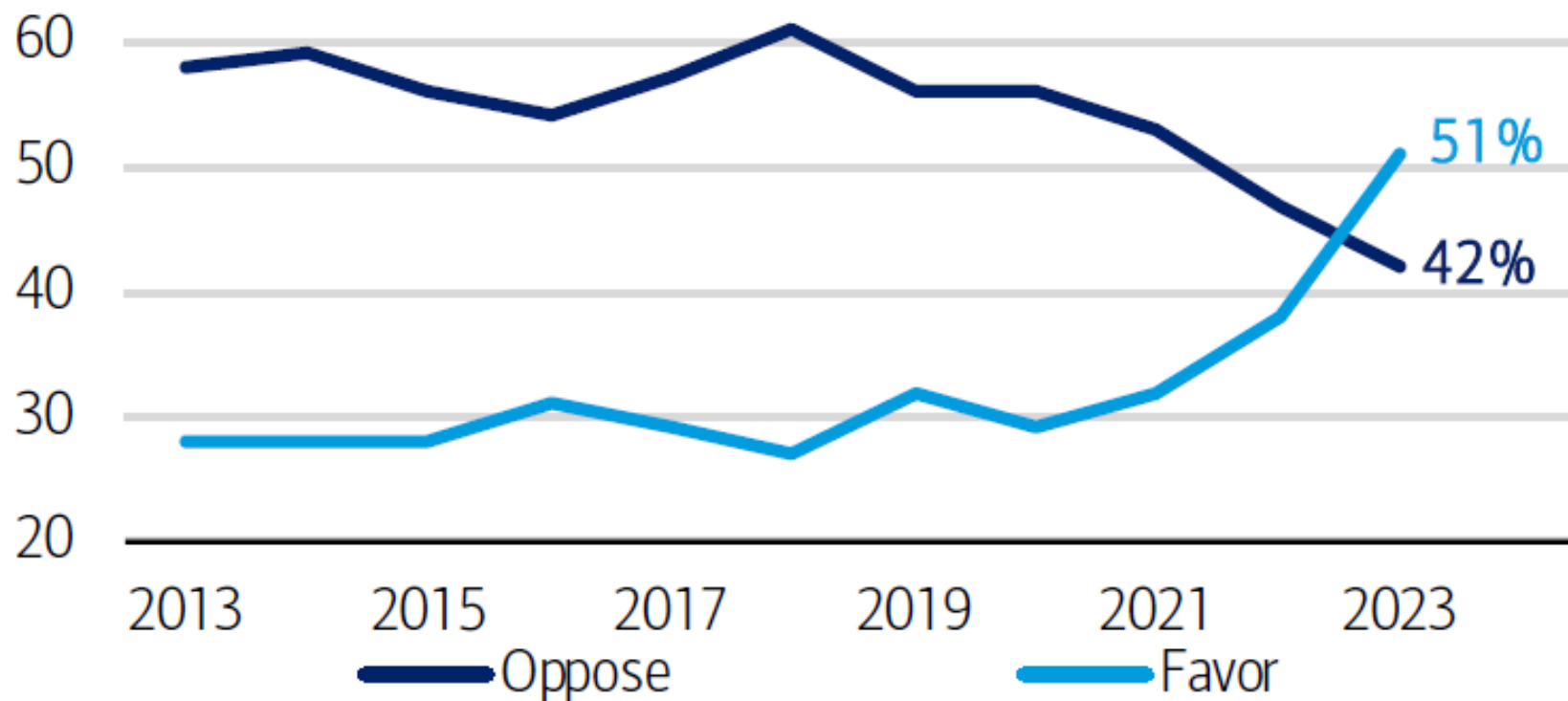
Utilizzo Energia Nucleare (USA)



Source: BofA Research Investment Committee, Bisconti Research, Inc.



Riavvio Impianti Nucleari (Giappone)



Source: BofA Research Investment Committee, World Nuclear News, Asahi Shimbun. Note: Other or no responses are omitted.