Sviluppi tecnologici attesi per: 2030, (2040,) 2050

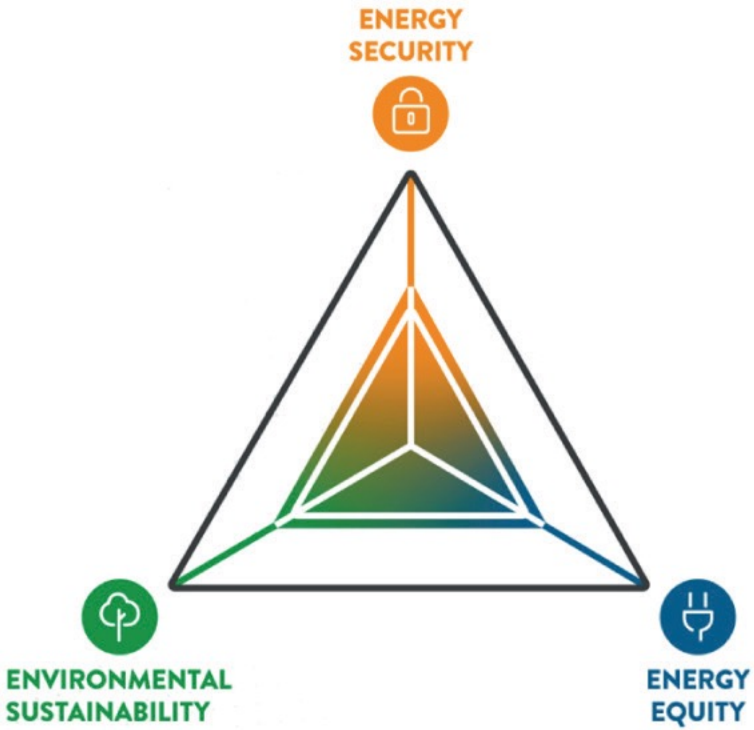
Fissione

INFN Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Laboratori Nazionali del Sud
Catania
2024 Febbraio 21

prof. Marco Ricotti
Politecnico di Milano, Dept. of Energy
CeSNEF-Nuclear Engineering division

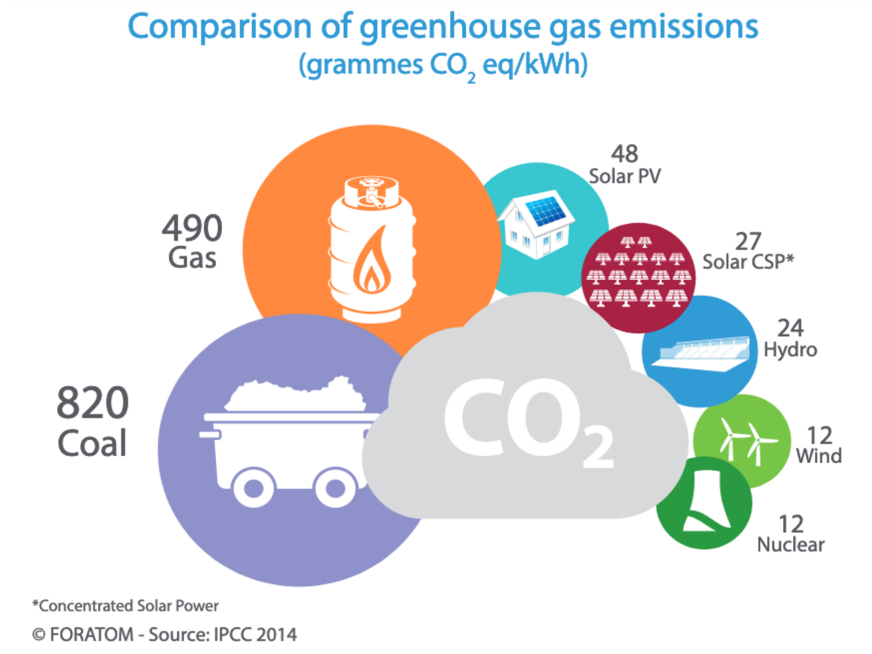
Il «Trilemma Energetico» e il nucleare

(I) Global warming **(II) Dipendenza strategica** **(III) Ricadute economiche**



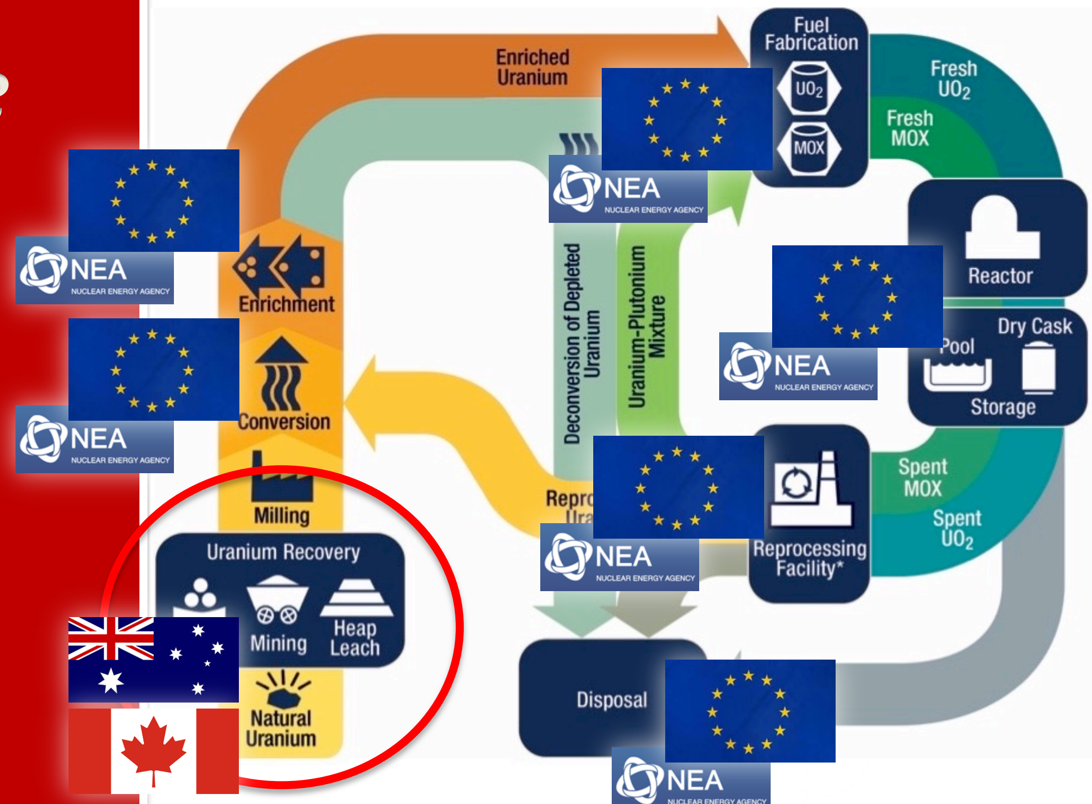
Il «Trilemma Energetico» e il nucleare
I. Global warming

"ma il Nucleare inquina…"



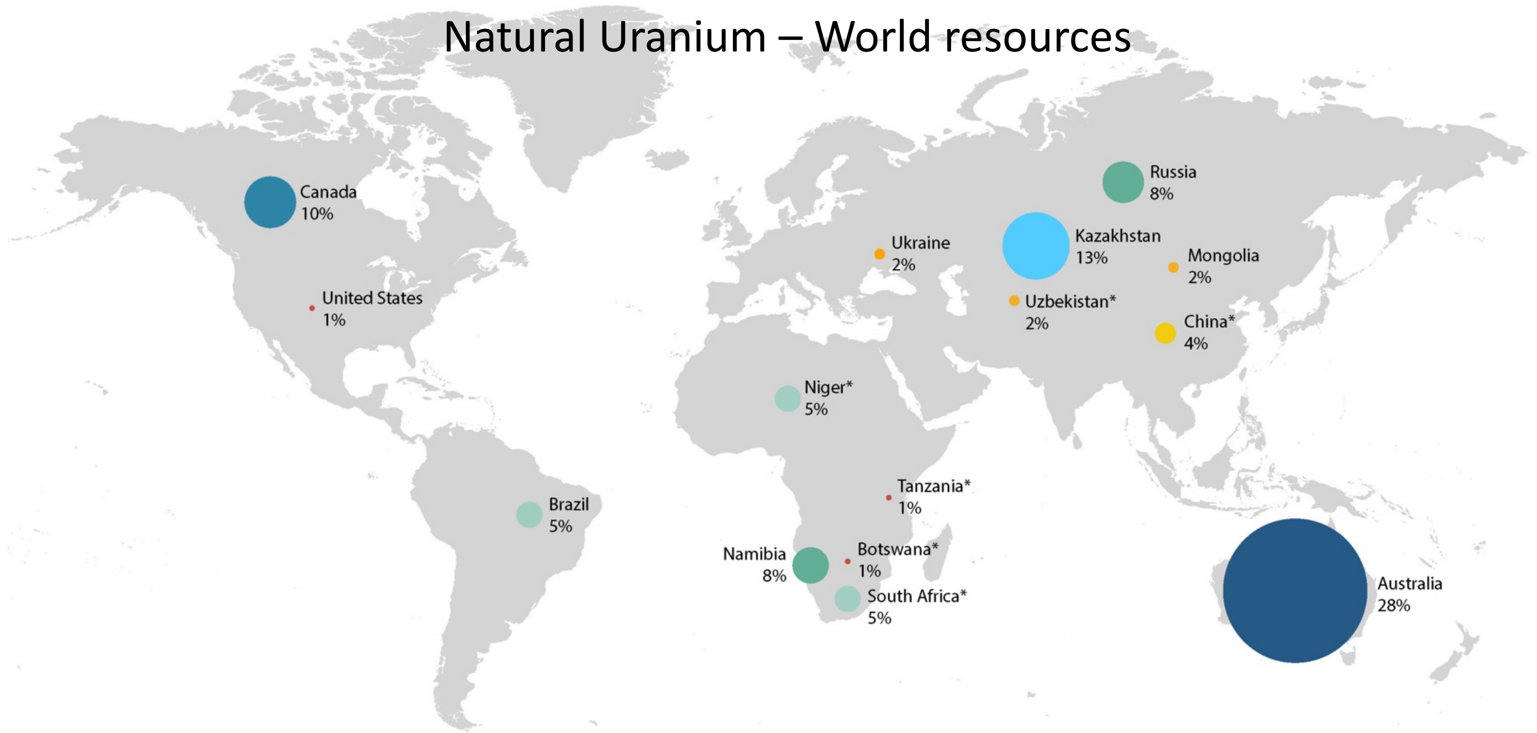
Il «Trilemma Energetico» e il nucleare
II. Dipendenza strategica

"ma il Nucleare è rischioso…"



Il «Trilemma Energetico» e il nucleare
II. Dipendenza strategica

Natural Uranium – World resources



IAEA / NEA, Uranium 2022: Resources, Production and Demand (Red Book), 2022

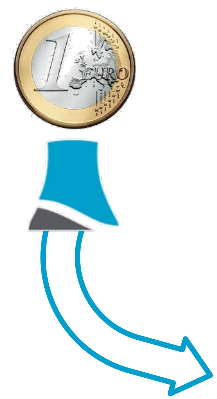
Il «Trilemma Energetico» e il nucleare
III. Ricadute economiche

“ma il Nucleare non è economico…”

100
€ Billion/year

1
Million Jobs

Supply Chain



Source: 2023 NuclearEurope

Tecnologie nucleari: presente e futuro

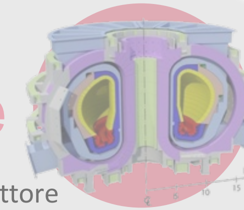
Standard

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

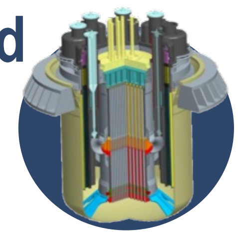


Primo reattore (commerciale) a fusione

Evolutivi

Alcuni già operativi (Cina, UAE, Corea Sud, Russia, India).
La maggioranza dei 58 reattori in costruzione nel Mondo

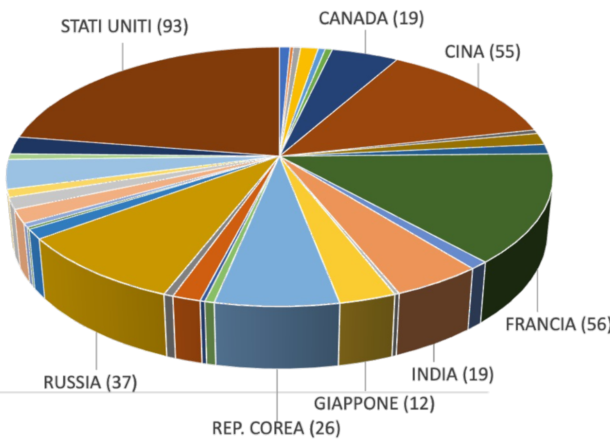
Advanced Modular Reactors

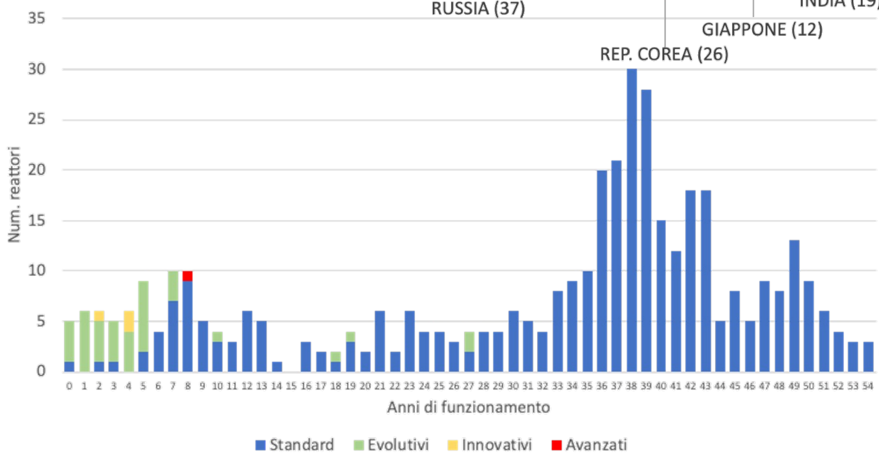


Raffreddamento a metallo liquido o a Sali fusi. Possibilità di riciclare i rifiuti a vita lunga e ad alta radioattività.

1. Standard: Estensione di Vita

N. Reattori in funzione nel mondo (Gen. 2024, Tot. 413)





40 anni

Reattori:

413 

100 

Anni di esperienza:

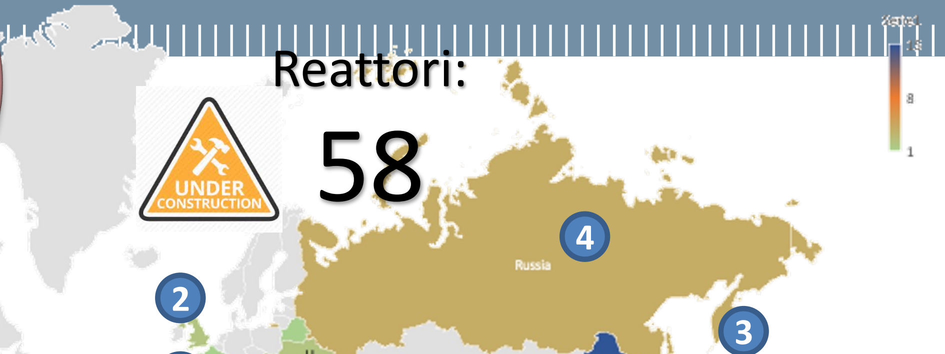
19 200

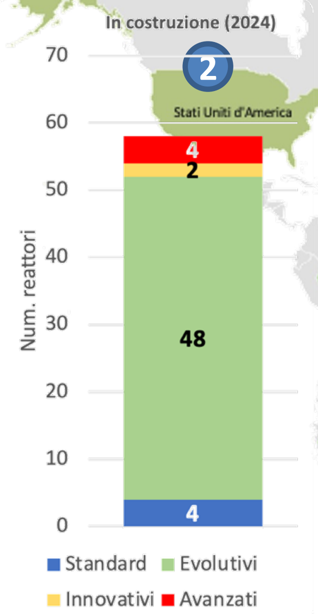
Funzionamento:

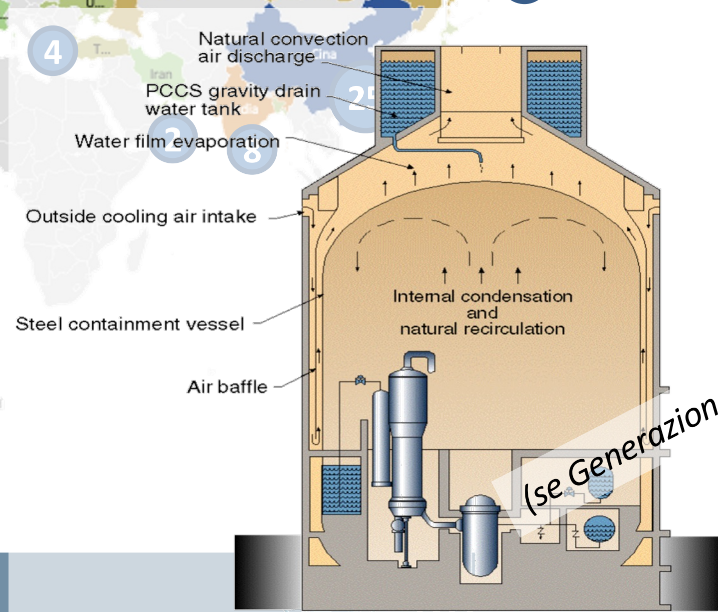
60 anni

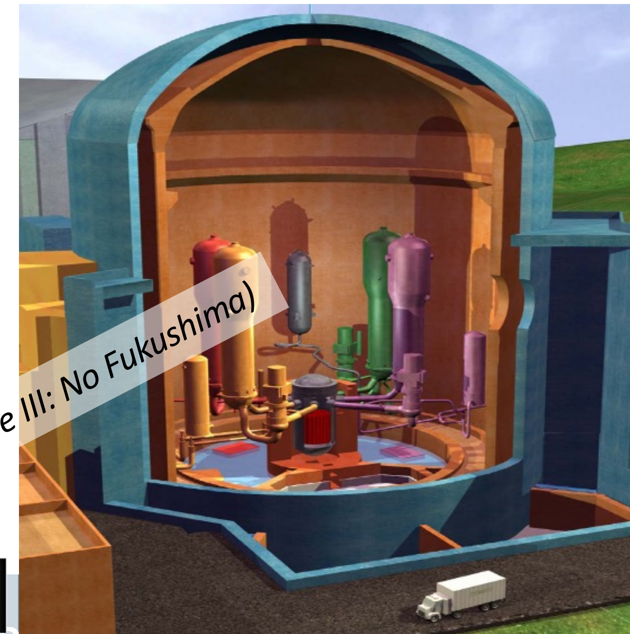
2. Evolutivi: In costruzione & Operativi

Reattori:
58



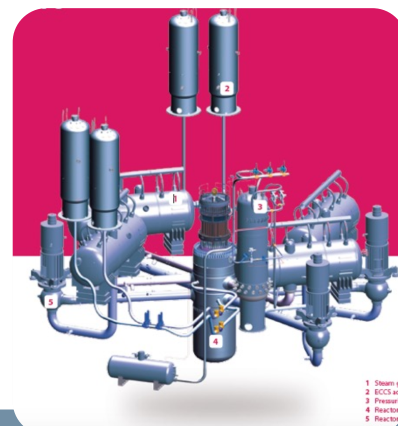


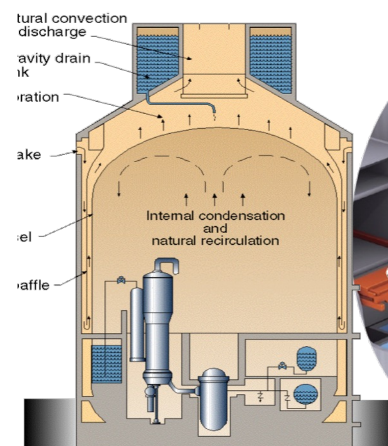


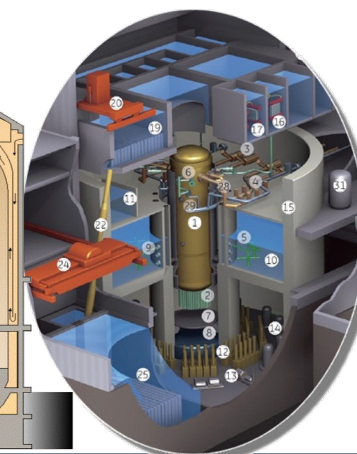


(se Generazione III: No Fukushima)

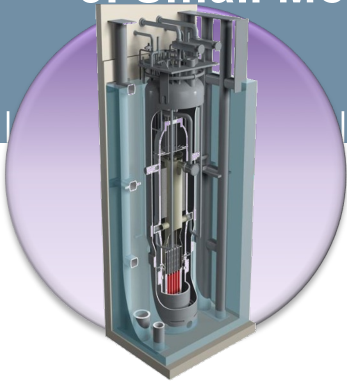
Sicurezza Attiva	**Mix** (Attiva+Passiva)	**Sicurezza Passiva**
EPR Strategy: • Economia di scala • Sicurezza attiva & ridondanza (4×100%) • Incidente severo gestito "ex-vessel" (core catcher)	AES Strategy: • Sistemi di sicurezza attivi & passivi • Incidente severo gestito "ex-vessel" (core catcher)	AP1000 Strategy: • semplificazione, modularizzazione • Sistemi di sicurezza passivi • Incidente severo gestito "in-vessel" (in-core retention)
EPR (FRA), **ABWR** (USA)	**AES-2006 (VVER 1200)** (Russia)	**AP1000, ESBWR** (USA)



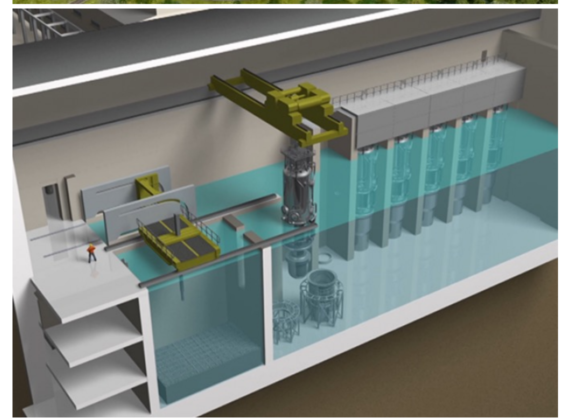


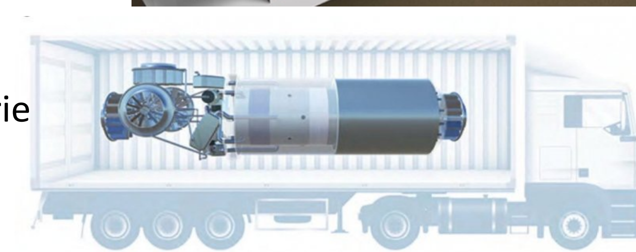


3. Small Modular Reactors: cambio di paradigma



Reattori nucleari di taglia limitata (< 300 MWe)





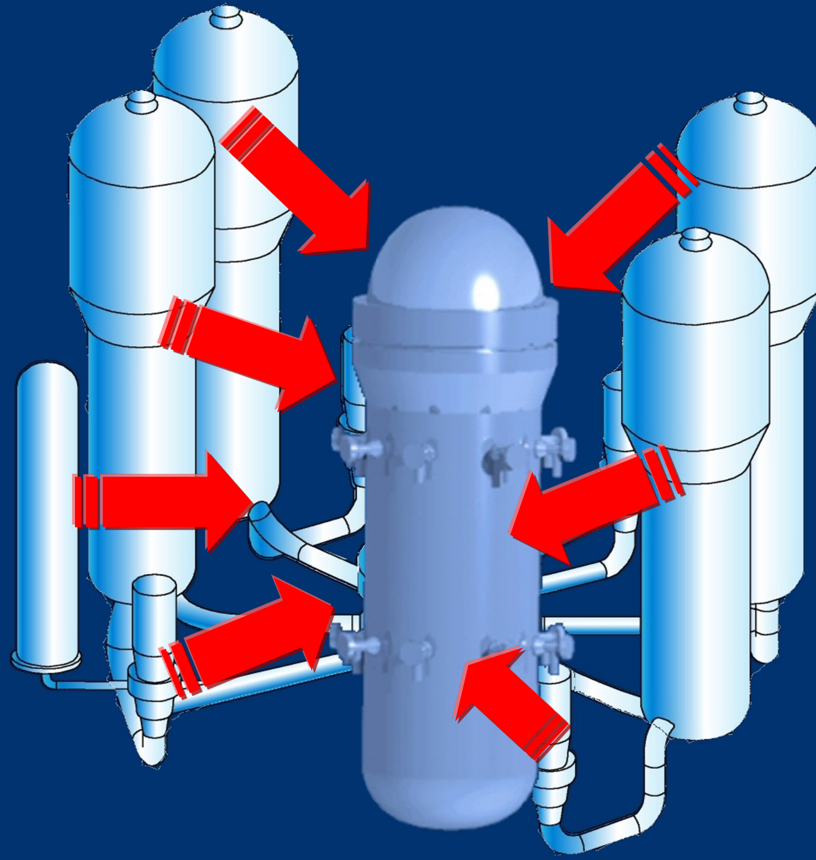
Vantaggi:

- 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

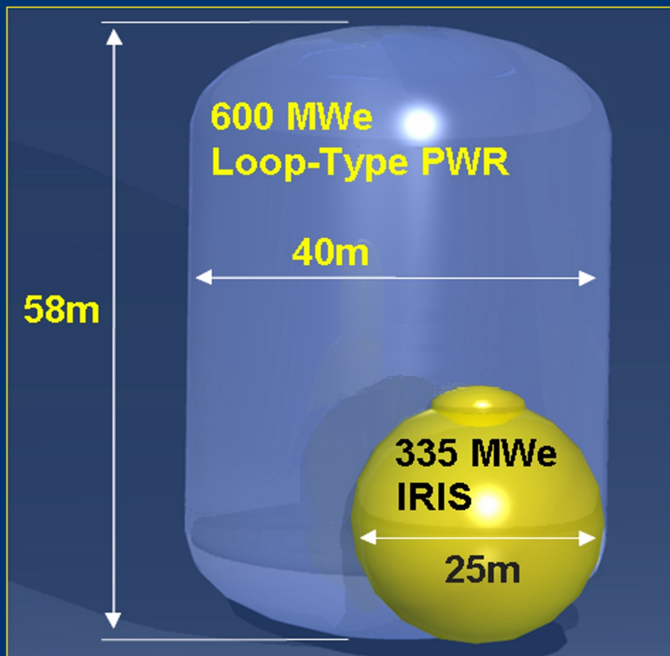
3. Small Modular Reactors: integral PWR



La soluzione «Integrale»:

- elimina le penetrazioni dei tubi e i componenti primari esterni

3. Small Modular Reactors: integral PWR



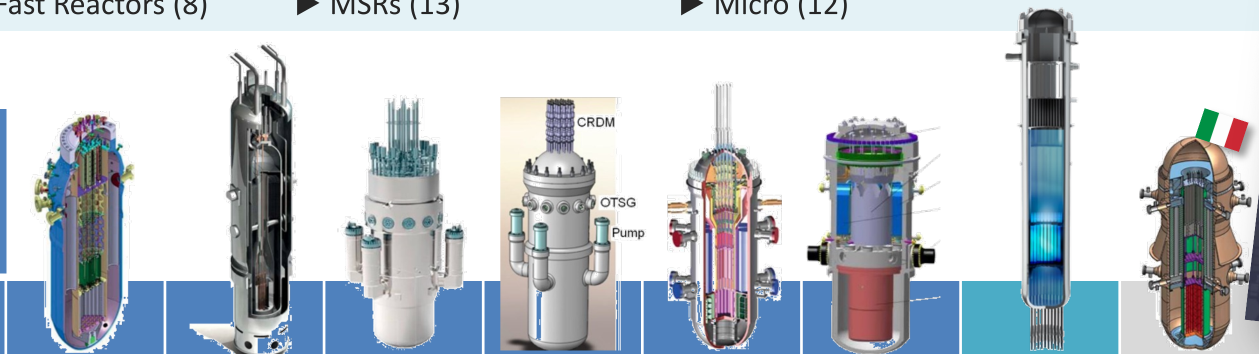
La soluzione «Integrale»:

- permette l'utilizzo di contenitori compatti
- riduce le dimensioni dell'edificio primario

3. Small Modular Reactors: cambio di paradigma

83 progetti SMR/AMR in fase di sviluppo nel Mondo, taglia: da 1-5 MWe (micro) a 300 MWe

- ▶ **Land Based WCRs (25)**
- ▶ Marine Based WCRs (8)
- ▶ HTGRs (17)
- ▶ LM Fast Reactors (8)
- ▶ MSRs (13)
- ▶ Micro (12)

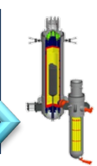


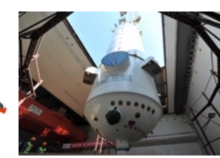
IN FASE DI SVILUPPO

REATTORI di tipo INTEGRATO	CAREM	NuScale	RITM-200	ACP100	SMART	NUWARD	BWRX-300	IRIS
taglia MWth MWe	100 27	160 (?) 50 (77)	165 52	310 100	330 100	540 170	900 300	1000 335
In funzione nell'anno:	? (constr.)	2029-2030	2030	2026	>2030	>2030	~2035	suspended

GIA' IN FUNZIONE

RUSSIA
KLT-40s: Barge mounted PWR reactor
CINA
HTR-PM: High Temperature Gas Reactor





IAEA International Atomic Energy Agency

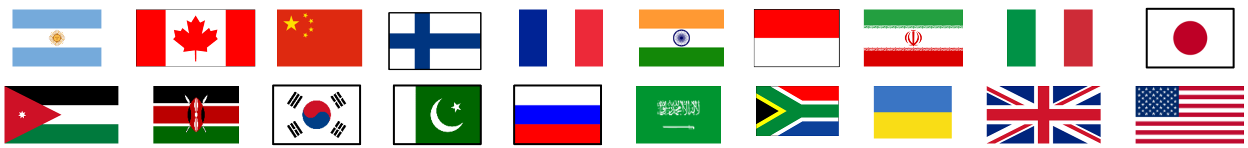
1st Int.l Conf. on SMRs and their Applications

21 – 25 October 2024

International Technical Working Group on SMR
(I Cycle 2018 – 2021, II Cycle 2022 – 2025)

IAEA

- **Chairperson: Mr. Marco RICOTTI, Politecnico di Milano, Italy**
- To advice and support IAEA programmatic planning and implementation in areas related to technology development, design, deployment and economics of SMRs
- Now 20 Member States and three International Organizations: European Commission, ISO, WNA as invited observers



European Commission

ISO

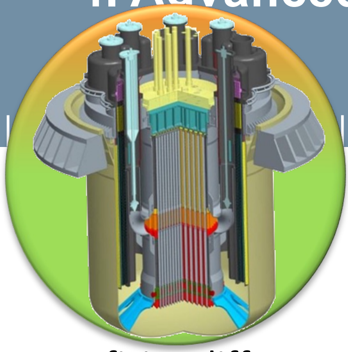
World Nuclear Association

- Three technical subgroups established:
  - **SG-1:** Development of Generic Users Requirements and Criteria (GURC)
  - **SG-2:** Research, Technology Development and Innovation; Codes and Standards
  - **SG-3:** Industrialization, design engineering, testing, manufacturing, supply chain, and construction technology

- Five General Meetings conducted : 2018, 2019, 2020 (virtual), 2021, the last TWG-SMR Meeting was in September 2023
- Information at:

https://nucleus.iaea.org/sites/htgr-kb/twg-smr/SitePages/Home.aspx

4. Advanced Modular Reactors: opzione riduzione rifiuti



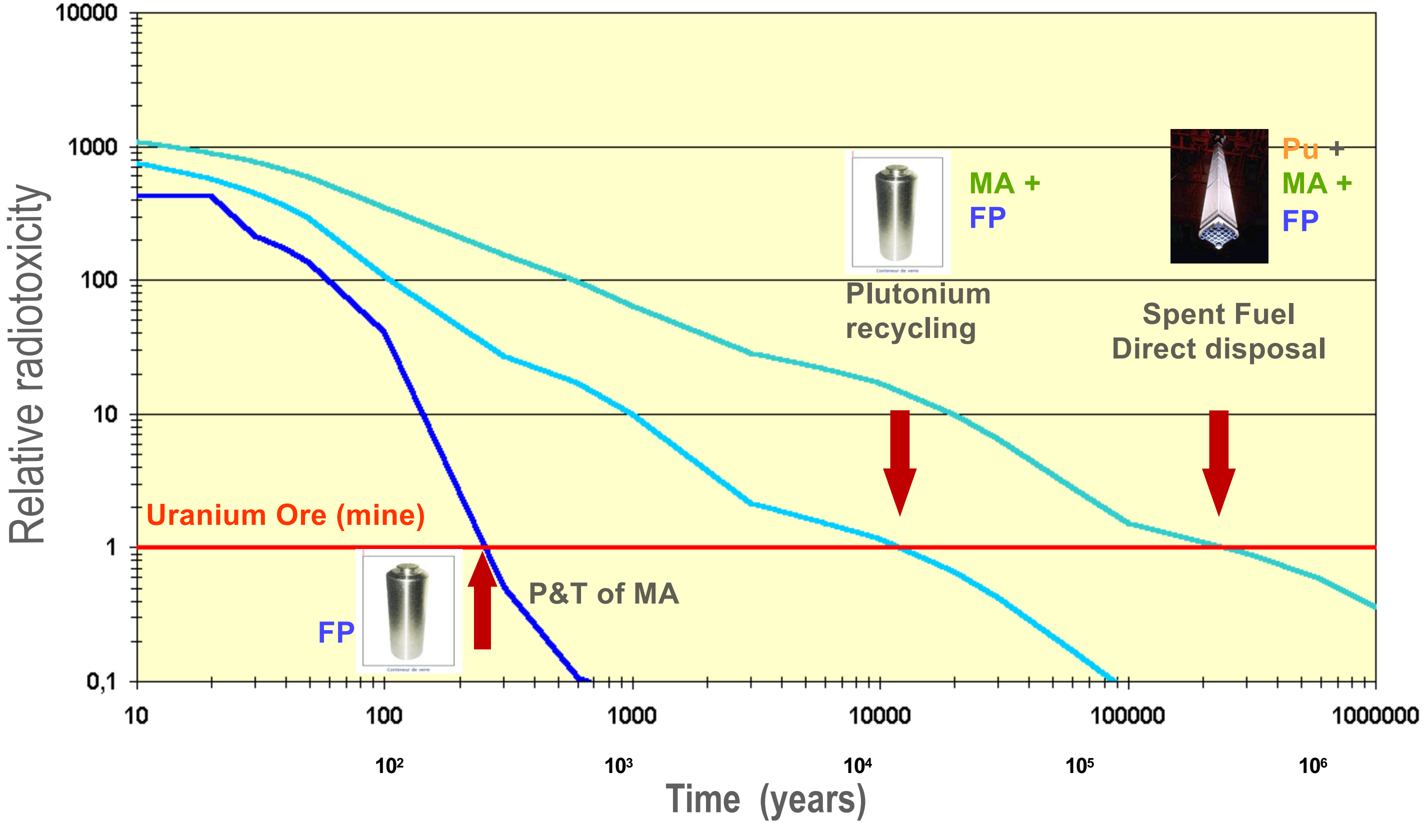
Reattori raffreddati a: piombo liquido, sodio liquido, sali fusi

«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)

4. Advanced Modular Reactors: opzione riduzione rifiuti

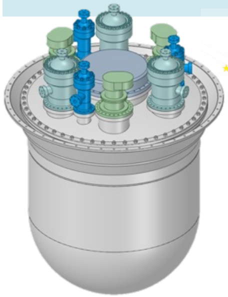


4. Advanced Modular Reactors: opzione riduzione rifiuti

ALFRED

(Falcon Consortium, ITA-ROM)

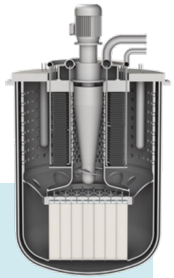
- Lead-cooled Fast Reactor (125 MWe)
- Exp. facilities in Italia (ENEA Brasimone), nuove grandi exp. facilities in Romania



NEWCLEO

(ITA)

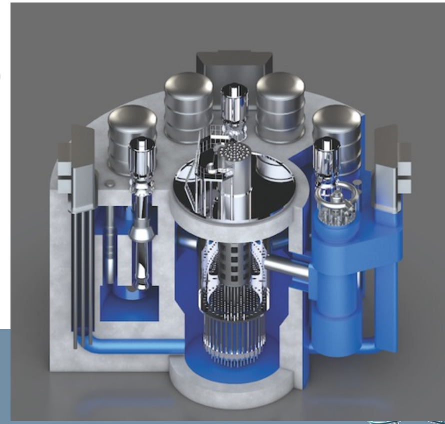
Start-up



PRORYV

(ROSATOM, Russia)

- Lead-cooled Fast Reactor (300 MWe)
- Accoppiato con impianto riprocessamento + impianto rifabbricazione combustibile
- Riciclo di rifiuti ad alta radioattività (burner)



MMR

(USNC – Francesco Venneri)

Start-up

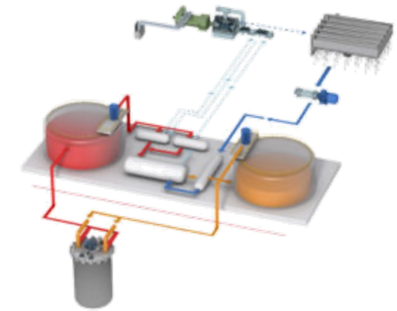
- High Temperature Gas Reactor (5-10 MWe)
- Combustibile ceramic Micro-incapsulato (TRISO)
- No acqua per raffreddamento, no rete elettrica (strategia “batteria”)

NATRIUM

(TerraPower – Bill Gates)

Start-up

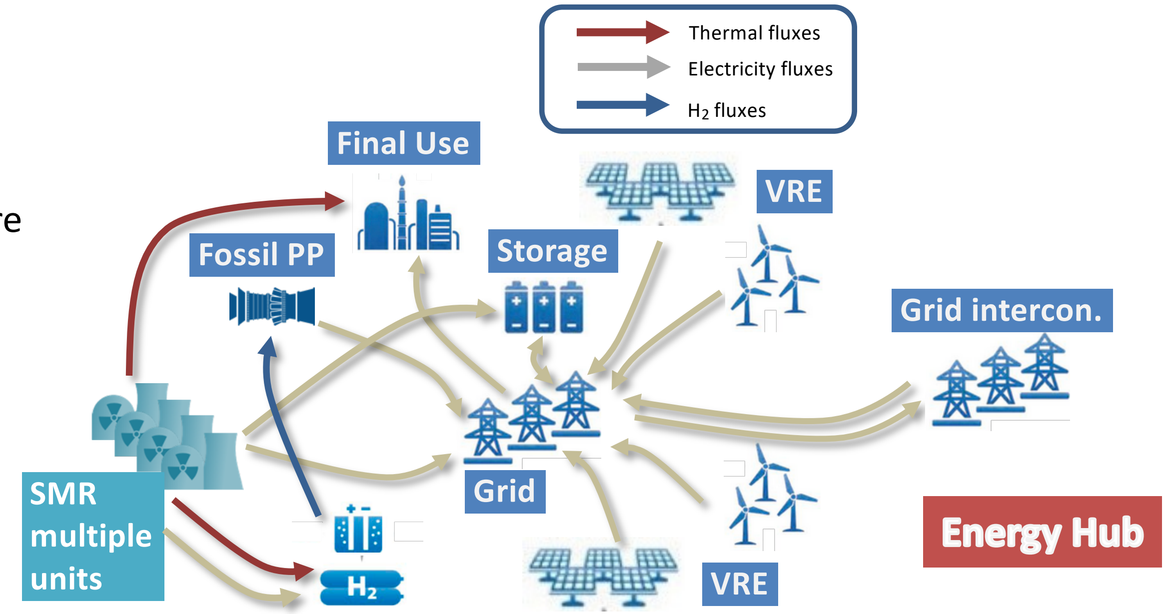
- Sodium Fast Reactor (345 MWe)
- Energia termica reattore completamente stoccata in serbatoi Sali Fusi
- Cogenerazione disaccoppiata dall’impianto nucleare
- Picco 500 MWe >5h



Decarbonizzazione completa?
Sistemi energetici ibridi

Opportunità:

- **Integrazione** tra rinnovabili & nucleare (riduzione costi per energy storage e servizi di rete)
- **Cogenerazione** (elettricità + calore per: teleriscaldamento, desalazione, energy storage, idrogeno, biofuel)
- **Servizi energetici** per industrie energivore / distretti industriali
- **Accelerazione** dello sviluppo/«ri-allenamento» della supply chain nucleare (per il Mondo Occidentale)



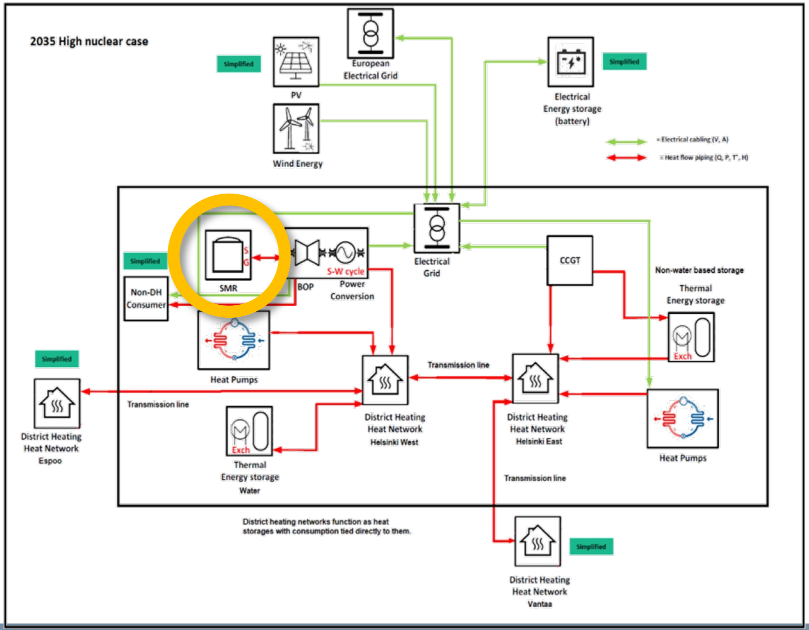
TANDEM

TANDEM project

Valutazione tecnico-economica scenari SMR cogenerativi

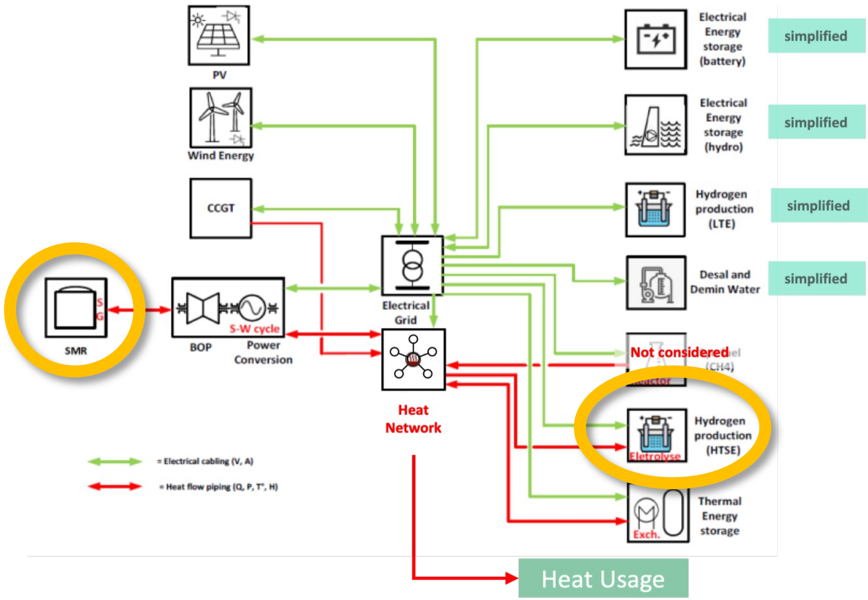
Teleriscaldamento Urbano 2035

caso 1 - Finlandia: Helsinki, o Espoo, o Vantaa
caso 2 - Repubblica Ceca



Hub Energetico 2035

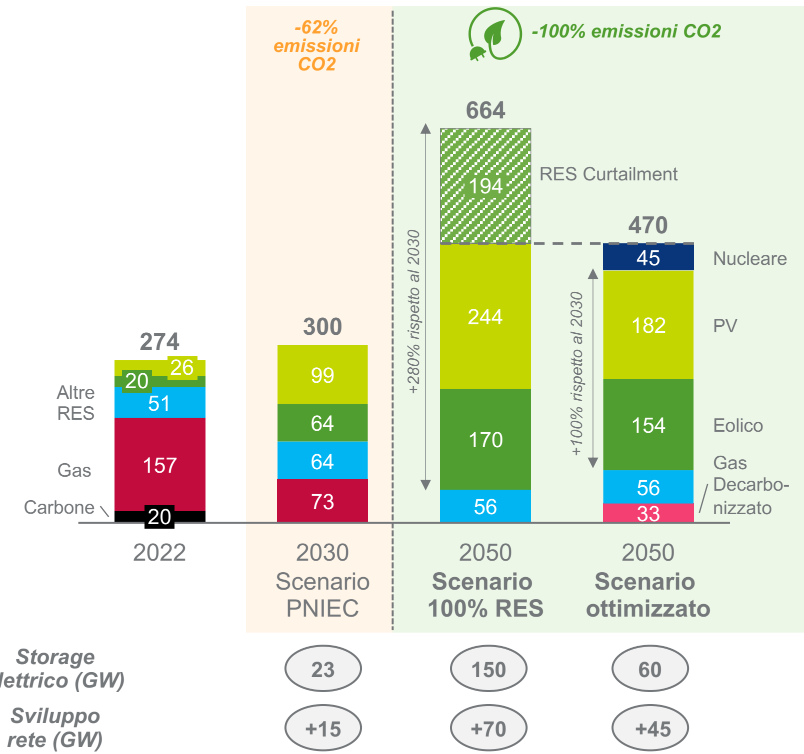
caso 3 – Porti – Francia: Dunkerque, Fos-sur-Mer; Spagna: Algeciras



IL NUCLEARE NELLO SCENARIO ITALIANO

COME ARRIVARE ALLA NEUTRALITÀ CARBONICA AL 2050

Evoluzione Italiana del mix di produzione[1] (TWh)



- Le **rinnovabili sono fonti di energia verde non programmabile**
  - **Produzione concentrata** in particolari momenti della giornata, non coincidenti con la richiesta di carico elettrico (24h)
  - **Localizzazione nelle zone con maggiore disponibilità di risorse naturali** (es. Sud) e lontane dai principali centri di consumo (es. Nord)
- Un **sistema 100% rinnovabili richiede importanti investimenti**
  - sovradimensionamento dell'energia prodotta da RES di oltre il 40%
  - 150 GW di accumulo e 70 GW di rete addizionali
- **SMR/AMR possono contribuire alla decarbonizzazione, affiancando la produzione rinnovabile**
  - installando 1 impianto all'anno dal 2030-2035, si arriverebbe a 15-20 impianti al 2050, **contribuendo al 10% della produzione nazionale**
- Lo **Scenario Ottimizzato**, con 80% rinnovabili, 10% nucleare e 10% produzione a gas decarbonizzata, consente il raggiungimento dei target di decarbonizzazione al 2050 con una **riduzione degli investimenti pari a circa 400 Miliardi€**

ansaldo nucleare · edison · ENEA · Politecnico Milano 1863 · nE

1) Scenario PNIEC giugno 2023 in 2030, Scenario simulato Edison in 2050 2) CCS = Cattura e stoccaggio della CO2

Nucleare: Europa, Italia

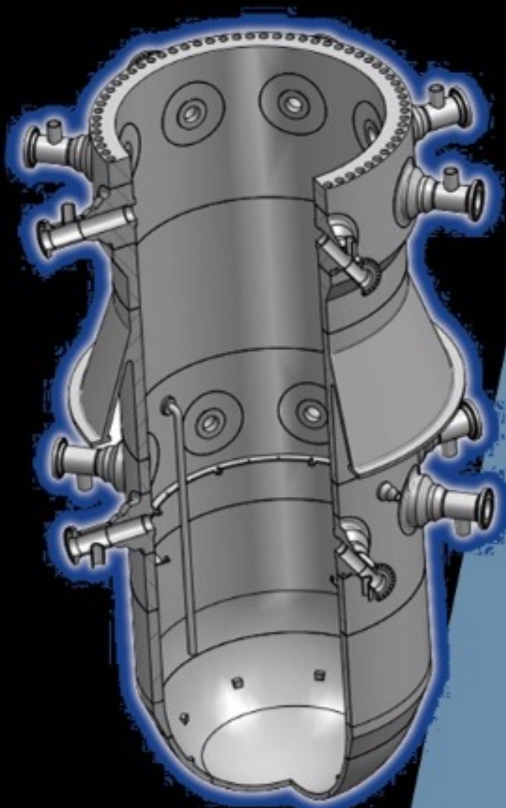
Il **dibattito sul nucleare è ripreso tra il 2021 e il 2023**, in un contesto di accelerata crisi climatica e volatilità dei prezzi del gas

- **giugno '21** – Lancio di **un pre-partenariato dell'UE per gli SMR** per riunire industrie, centri di ricerca e sviluppo, servizi pubblici e decisori politici interessati a collaborare per lo sviluppo dei SMR
- **febbraio '22** – La Commissione ha classificato il nucleare come tecnologia elegibile nella **Tassonomia UE**
- **marzo '23** – L' Energia nucleare avanzata è stata menzionata nell'**EU Net Zero Industry Act**
- **L'Idrogeno** prodotto con energia nucleare è considerato a basse emissioni di CO2 dalla **legislazione UE**
- **maggio '23** – L'**Alleanza Nucleare Europea** (16 paesi), alla quale l'Italia partecipa come osservatore, ha annunciato l'obiettivo di raggiungere 150 GW di capacità nucleare nell'UE entro il 2050
- **maggio '23** – Il **Parlamento italiano ha approvato un mandato sul nucleare** che impegna il Governo a sostenere l'energia nucleare nel quadro europeo, dal punto di vista tecnologico e politico
- **settembre '23** – **Le autorità di sicurezza francesi, finlandesi e ceche** danno un primo parere sulla sicurezza di Nuward SMR (**Nuward SMR Joint Early Review**[1])
- Diverse **aziende italiane hanno annunciato iniziative sul nuovo nucleare** nel corso del 2023
- **settembre '23** – MASE lancia la **Piattaforma per il Nucleare Sostenibile**
- **novembre '23** – La **Commissaria Simson annuncia una Industrial Alliance** per lo sviluppo di un Programma europeo su SMR

1) Nuward SMR Joint Early Review, partnership che non presuppone la scelta di Nuward come tecnologia per lo sviluppo di un programma futuro

Confidenziale – Per discussione

- **COP 28: Global Stocktake, per la prima volta menzionato il nucleare**
- **6 Feb 2024: EC lancia la «EU SMR Industrial Alliance)**



How many

Reactor Pressure Vessel for SMRs, the Italian nuclear supply chain is ready to produce <u>every year</u> ?

Flip the card and find the answer…

download the brochure HERE

ITALIAN NUCLEAR SUPPLY CHAIN FOR SMALL MODULAR REACTORS

Preliminary investigation and Case Study on Large Components manufacturing

(Case #1: Reactor Pressure Vessel)

25 aziende pronte ad avviare la Supply Chain Nucleare Italiana degli Small Modular Reactors

2024.02.21

ansaldo energia

AFTRA AIR COM COINOX Baglioni

ATB RIVA CALZONI

B&R BREMBANA&ROLLE

TECTUBI RACCORDI S.p.A.

CAEN SyS Systems & Spectroscopy Division

CECOM HIGH PRECISION SOLUTIONS

CESTARORossi

FOMAS GROUP

De Pretto industrie

DEMONT

FRANCHINIACCIAI®

FINCANTIERI Si evolving integration

OCEM POWER ELECTRONICS

GEATOP Metrology & Survey

GIVA GROUP

forge monchieri

SOFTEC®

Officine LUIGI RESTA SpA

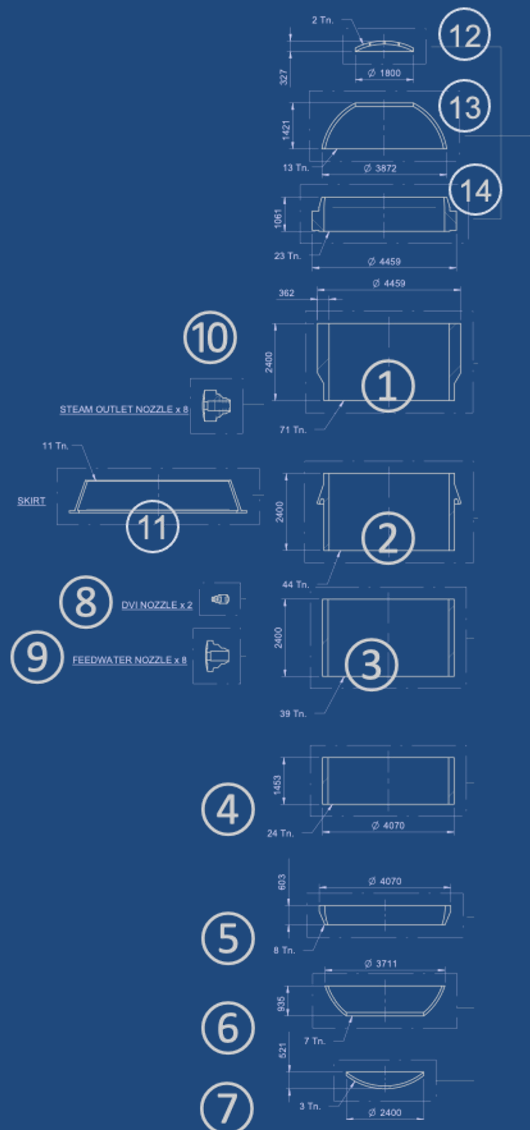
RINA

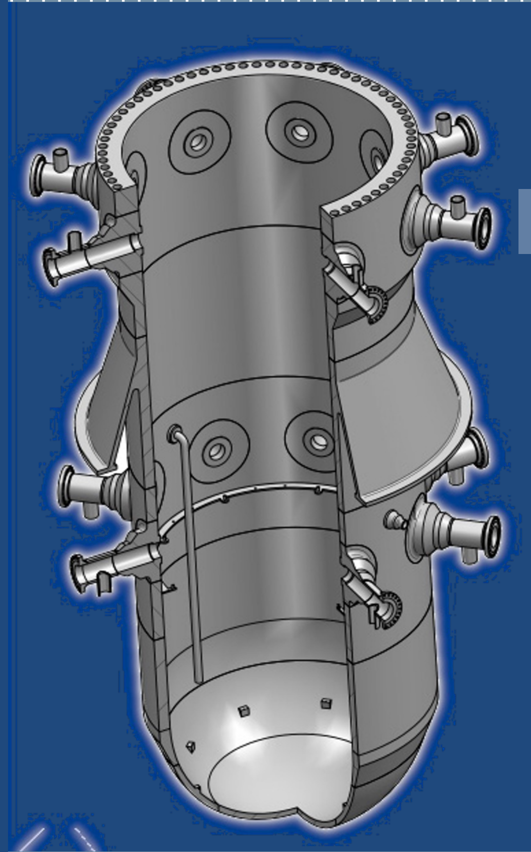
SIET sperimentiamo le tue idee

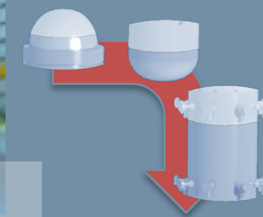
SIMIC since 1975 A PASSION FOR CHALLENGES

walter tosto

Reactor Pressure Vessel per SMR fabbricabili in Italia, all’anno







FORGING COMPANIES

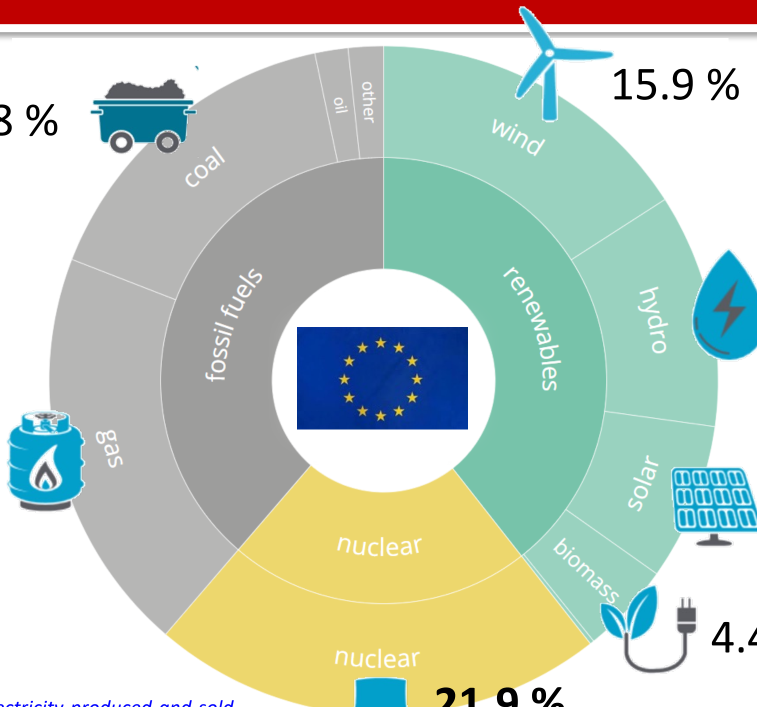
MANUFACTURING COMPANIES

+ **8** SMR/anno

I tre «paradossi italici»

BACKUP

“ma il Nucleare non è importante…”

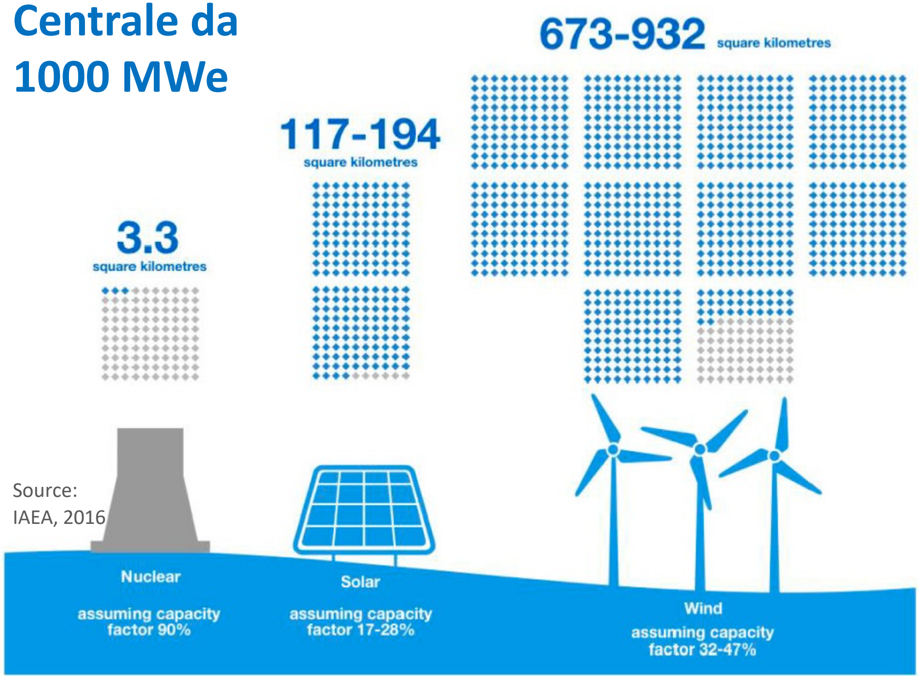


2023 Eurostat database
https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/how-is-eu-electricity-produced-and-sold

Il «Trilemma Energetico» e il nucleare
Uso del suolo

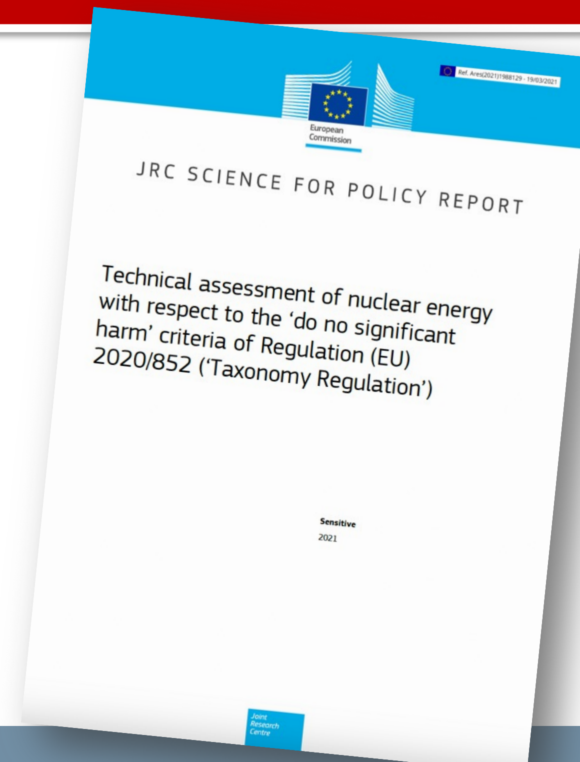
“ma il Nucleare danneggia l’ambiente…”

Centrale da 1000 MWe



Source: IAEA, 2016

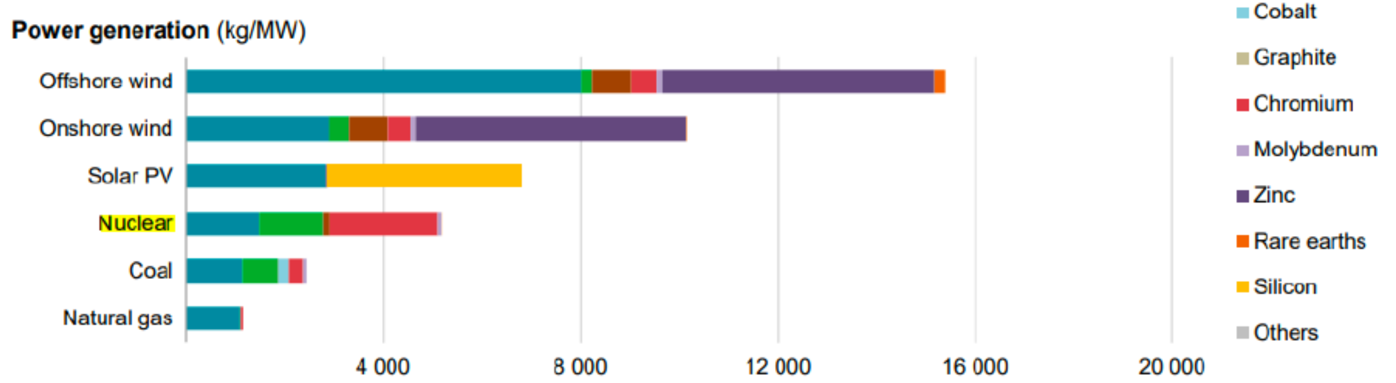
***Nota**:*
Superficie necessaria per ottenere la STESSA POTENZA INSTALLATA (potenza di picco per le Rinnovabili). Ma produzione di ENERGIA è diversa nella giornata e nelle stagioni.
Per ottenere la STESSA ENERGIA PRODOTTA ALL’ANNO, le Rinnovabili richiedono PIU’ POTENZA INSTALLATA + ACCUMULO DI ENERGIA.



Il «Trilemma Energetico» e il nucleare
Uso di materiali critici

“ma il nucleare danneggia l’ambiente/è rischioso…”

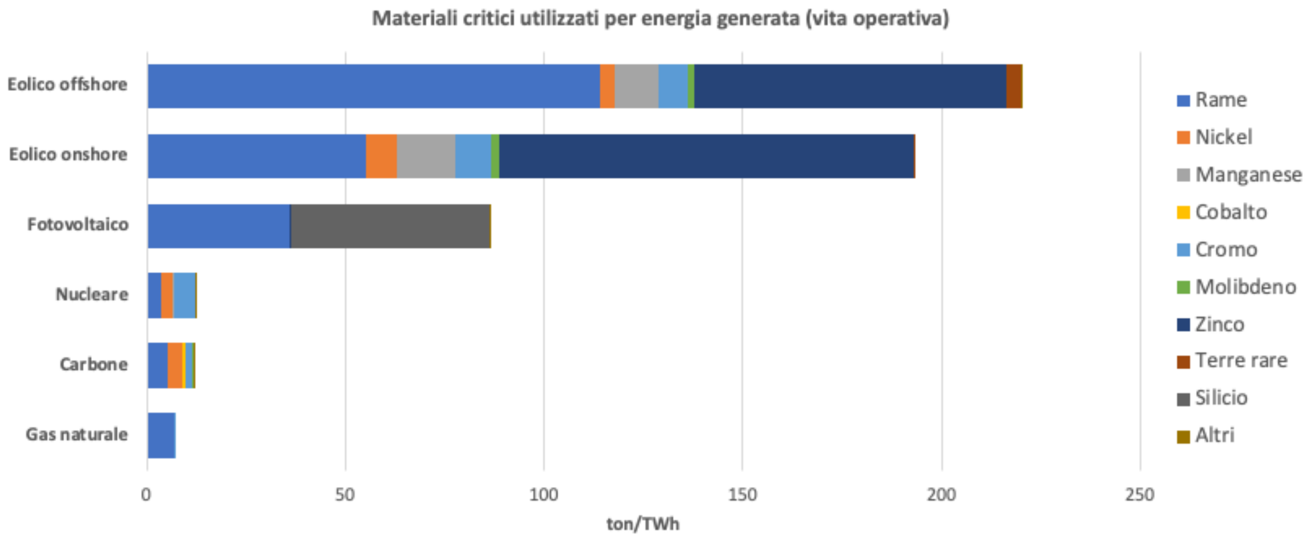
Offshore wind plant requires thirteen times more mineral resources than a similarly sized gas-fired power plant and three times more than Nuclear



Source: IEA, 2021, The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, World Energy Outlook Special Report

Il «Trilemma Energetico» e il nucleare
Uso di materiali critici

“ma il nucleare danneggia l’ambiente/è rischioso…”

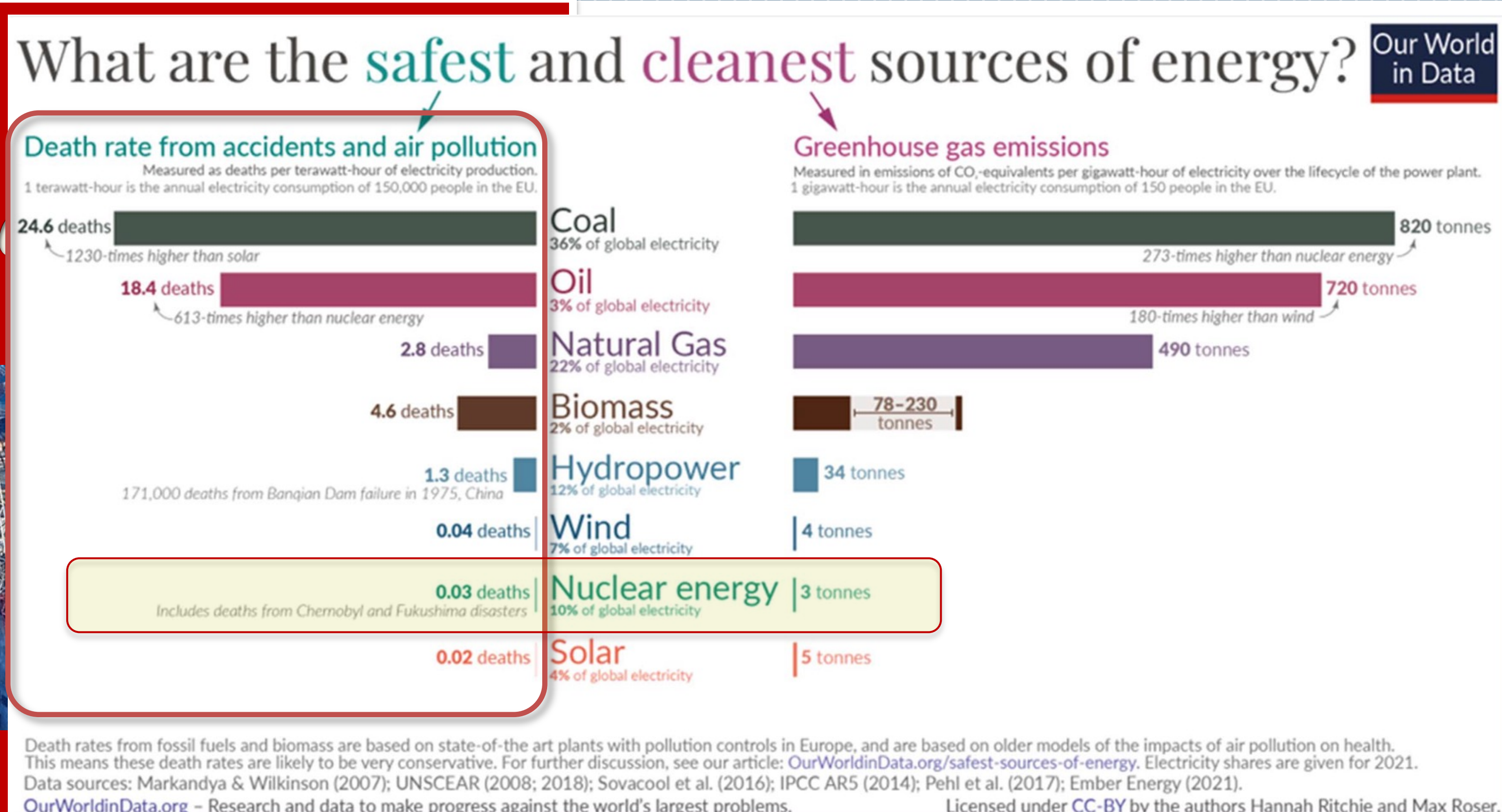


Rielaborazione POLIMI: materiali critici per elettricità prodotta (intera vita operativa)

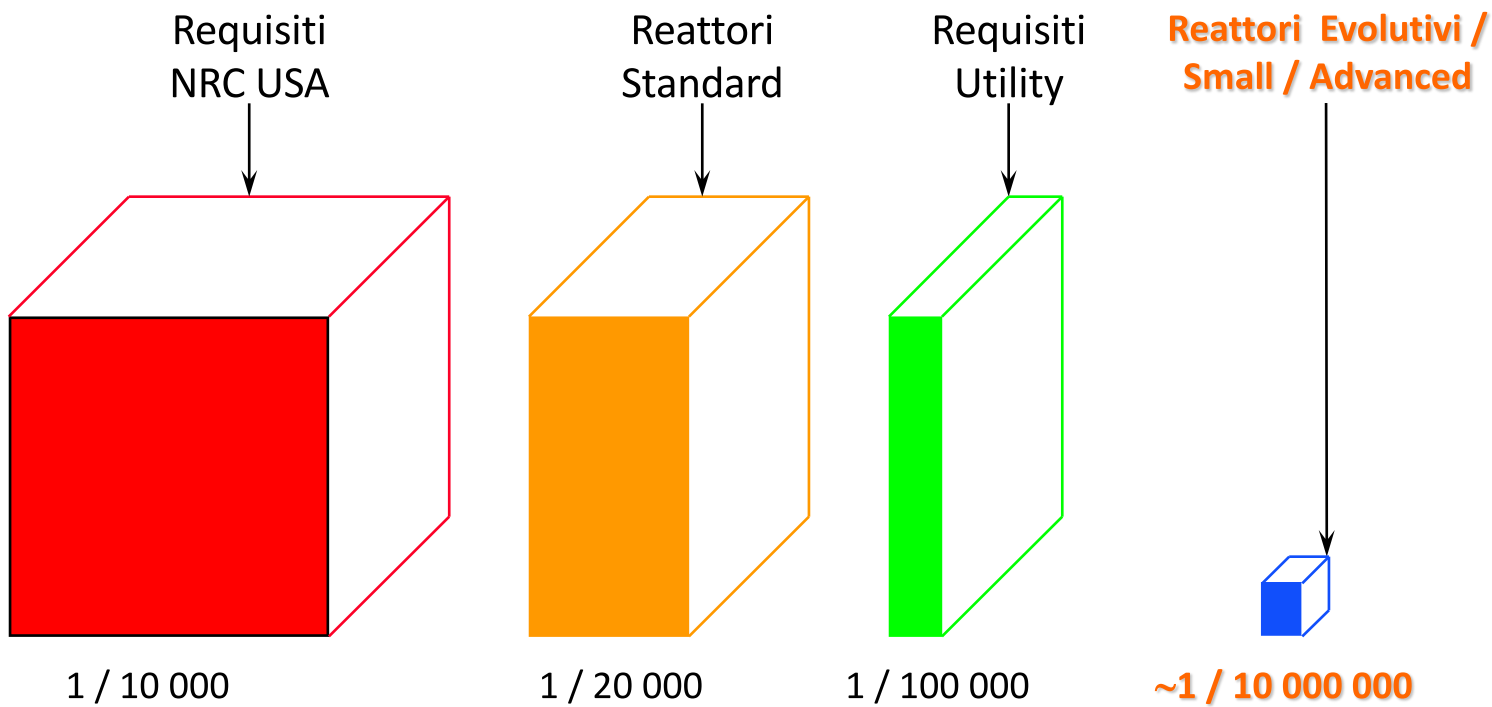
Il «Trilemma Energetico» e il nucleare
Sicurezza

“ma il

peri

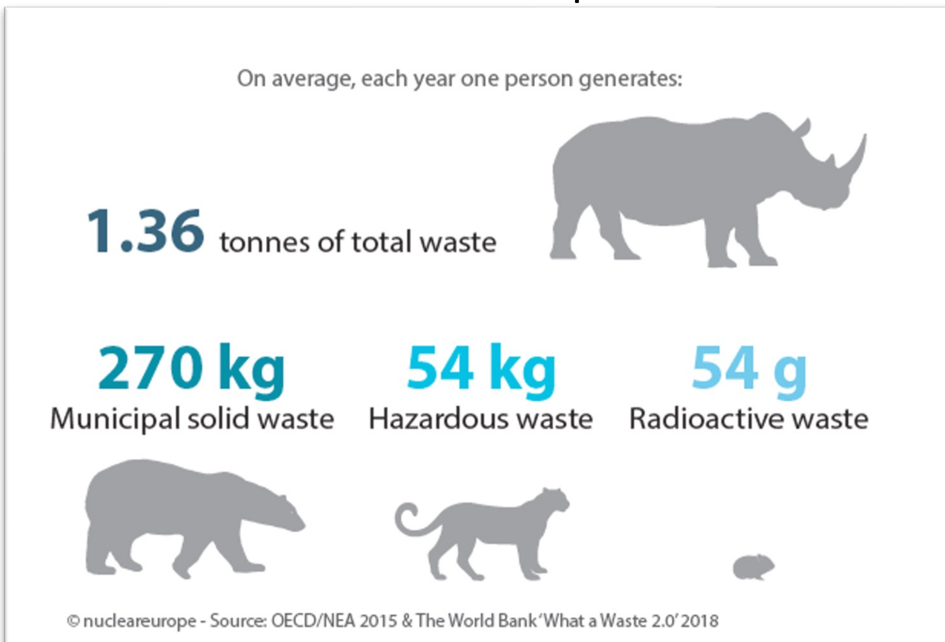


Livello di Sicurezza nei nuovi reattori

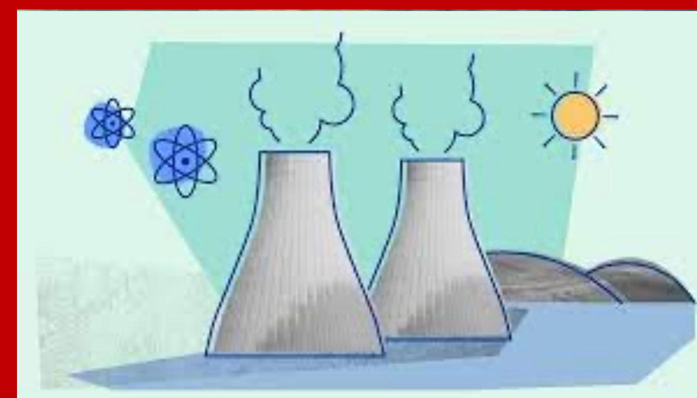


Frequenza attesa Incidente Danneggiamento Combustibile (eventi/anno)

La dimensione dei problemi

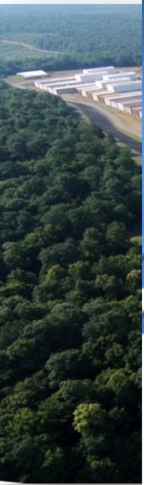


"ma il Nucleare non sa gestire i rifiuti..."



Google: «nuclear»

Aspetti ambientali del nucleare
Deposito di smaltimento dei rifiuti radioattivi



L'Aube d … el, short-
lived rac

"ma il Nucleare non sa gestire i rifiuti…"

Google: «rifiuti radioattivi»

Aspetti ambientali del nucleare
Deposito di smaltimento dei rifiuti radioattivi

Onkalo, first World Final Geological Repository for spent fuel/High Level Waste, Finland

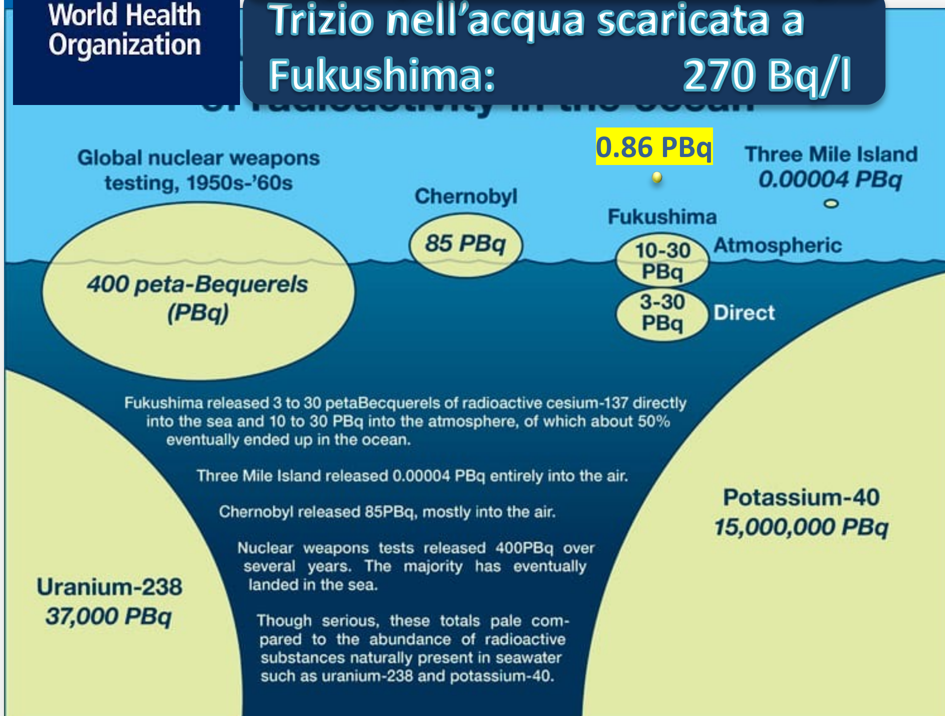
“ma il Nucleare non sa gestire i rifiuti…”

Aspetti ambientali del nucleare
Rilascio dell'acqua triziata di Fukushima

World Health Organization

OMS limite di Trizio per acqua potabile: 10 000 Bq/l

Trizio nell'acqua scaricata a Fukushima: 270 Bq/l



"ma il Nucleare inquina..."

Aspetti economico-industriali del nucleare

“ma il Nucleare costa troppo e ci vuole molto tempo…”

EPR - Olkiluoto Unit 3

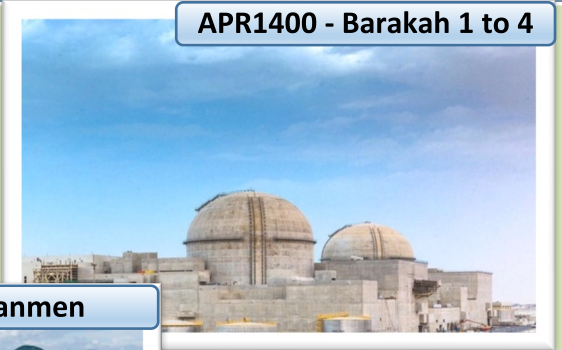
- Start 2004
- Planned COD 2009
- Full Op. Apr. 2023
- 13+ Years Delay
- Original Budget 3.2B€
- Expected 12 B€
- 8.8 B€ overrun, +270%

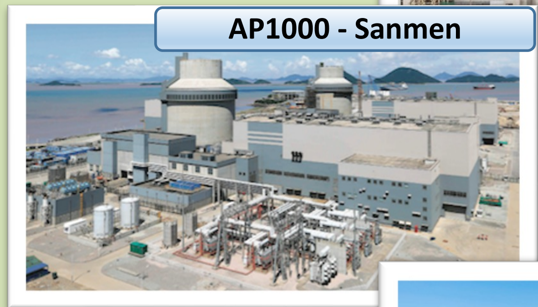
AP1000 - Vogtle Units 3 & 4

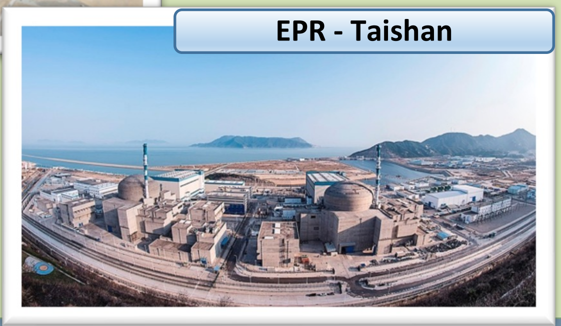
- Start 2012
- Planned COD 2016
- Full Op. Jul. 2023
- 7+ Years Delay
- Original Budget 14B$
- Expected 26 B€
- 12+ B$ overrun, +85%

VC Summer: stopped

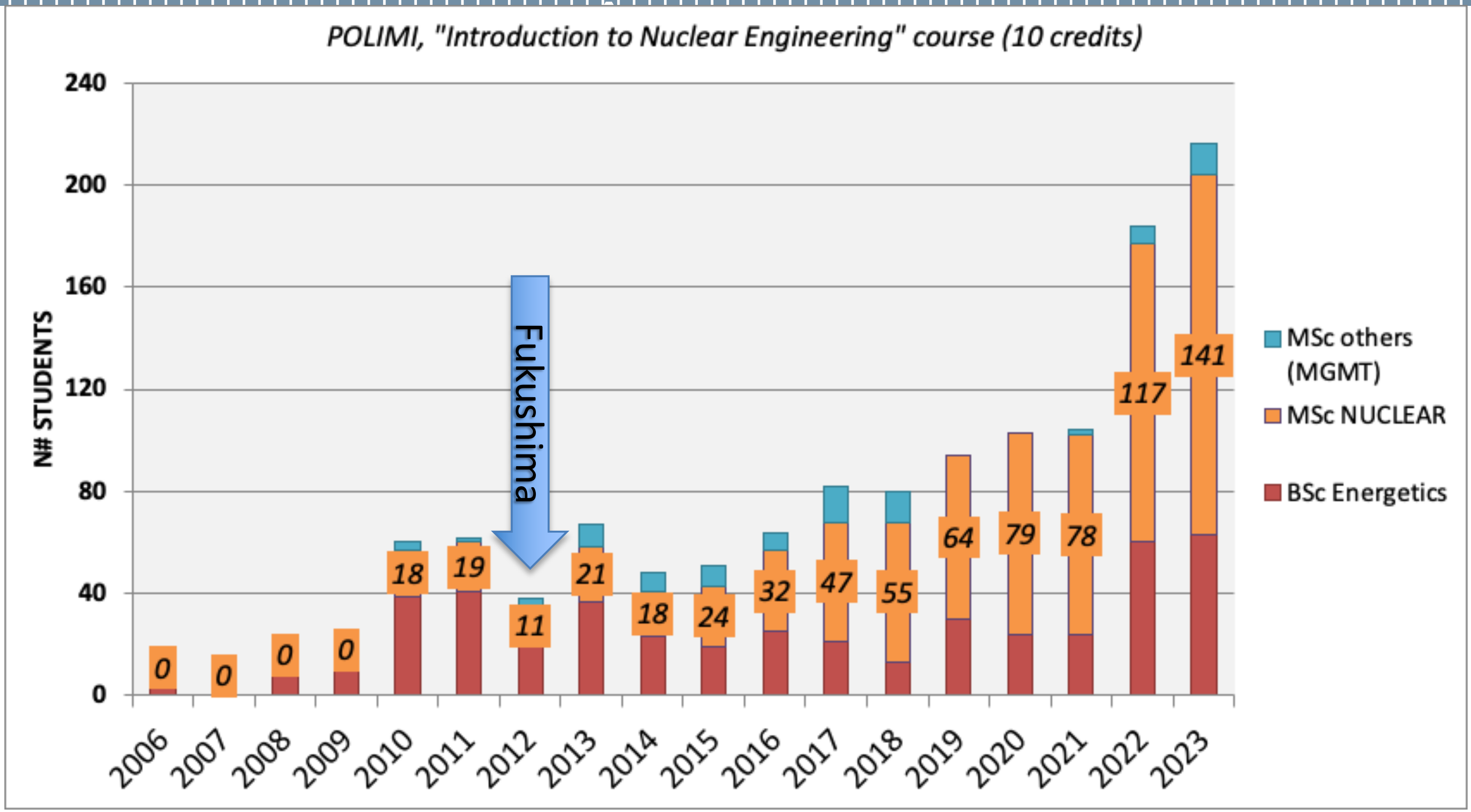
"ma il Nucleare costa troppo e ci vuole molto tempo…"


APR1400 - Barakah 1 to 4


AP1000 - Sanmen


EPR - Taishan

NUCLEAR EDUCATION IN CIRTEN UNIVERSITIES: TREND



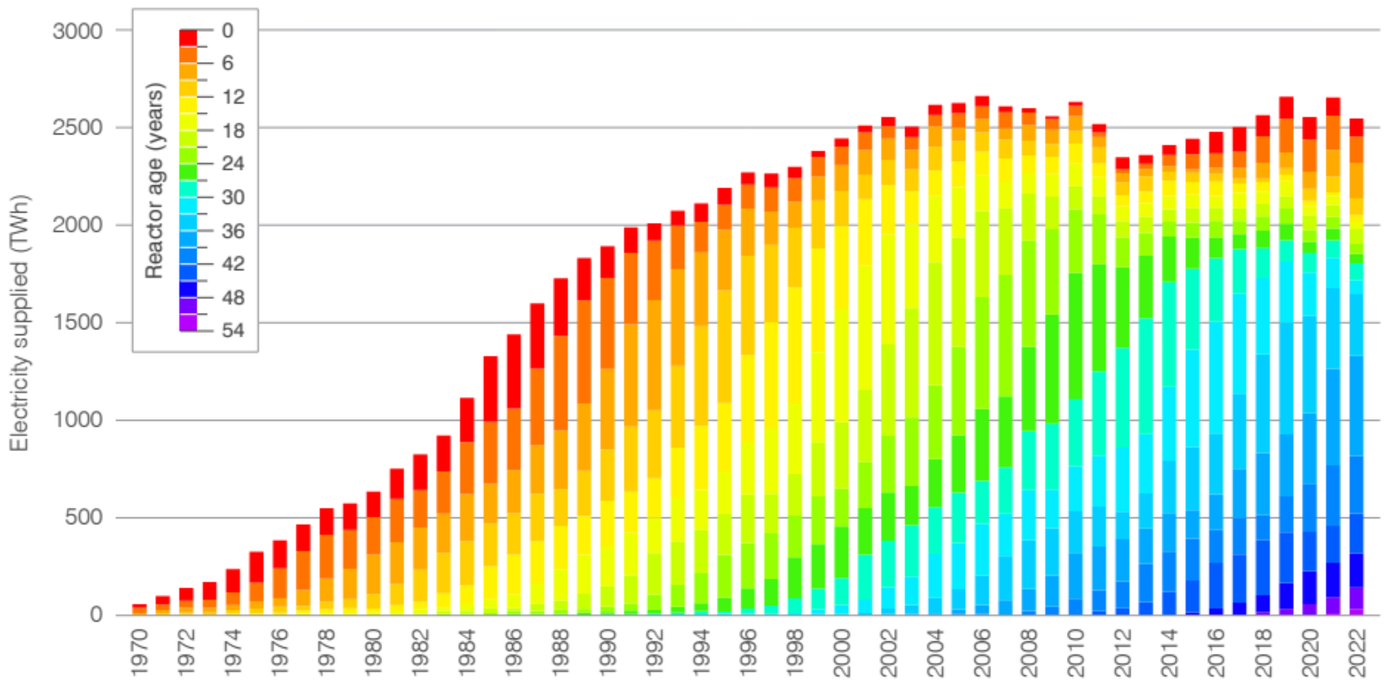
72 permanent staff professors

90+ young researchers (PhD, research assistants)

200+ new students/year (MSc + PhD programmes)

Nuclear energy: current status in THE WORLD

Figure 13. Total global nuclear electricity generation by age of reactor



Source: World Nuclear Association, IAEA PRIS

91% of current fleet is Standard + 9% is Evolutionary

SMR: Economy of Multiples vs. Economy of Scale

2024.02.21