



POLITECNICO
MILANO 1863

Ripartenza Nucleare

Enrico Zio

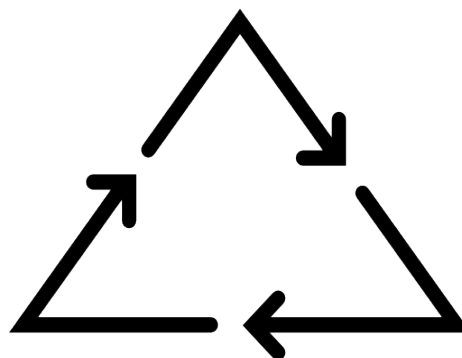
POLITECNICO DI MILANO - DIPARTIMENTO DI ENERGIA
Laboratorio di Analisi di Segnale e Analisi di Rischio (LASAR)

Cosa succede?

Cambiamento climatico



Disuguaglianza economica



Tensioni geopolitiche

Tutte le soluzioni convergono alla capacità di fornire l'accesso a fonti di energia abbondanti, a basse emissioni, competitive e affidabili.

- Invasione dell'**Ucraina** → riscoperta dell'importanza della **sicurezza energetica**
- **COP-26, -27, -28, EU tassonomia** → inclusione del **nucleare nelle politiche ambientali**
- **Impegno cinese** rispetto ad una massiva espansione nucleare (**150 GW in 15 anni**)
- Elezioni in **Corea del sud e Svezia** → cancellazione delle politiche di *phaseout*
- **Governo giapponese** intenzionato a riaccendere gli impianti nucleari sospesi
- **Francia, Finlandia, Svezia, Olanda, Regno Unito, Polonia, Repubblica Ceca, Ungheria e Romania** intenzionate a costruire nuovi impianti nucleari
- **Governo statunitense** impegnato a stanziare ingenti risorse economiche per gli impianti esistenti e appena costruiti (**\$1.6 miliardi FY 2025**)
- Nuovi progetti di **impianti nucleari negli Stati Uniti e in Canada**
- Progetto della **Dow Chemical's negli USA** per riutilizzare il calore di processo nucleare in impianti chimici
- Segnali di rinnovato interesse nella cultura di massa, per esempio il **film di Oliver Stone "Nuclear Now"**

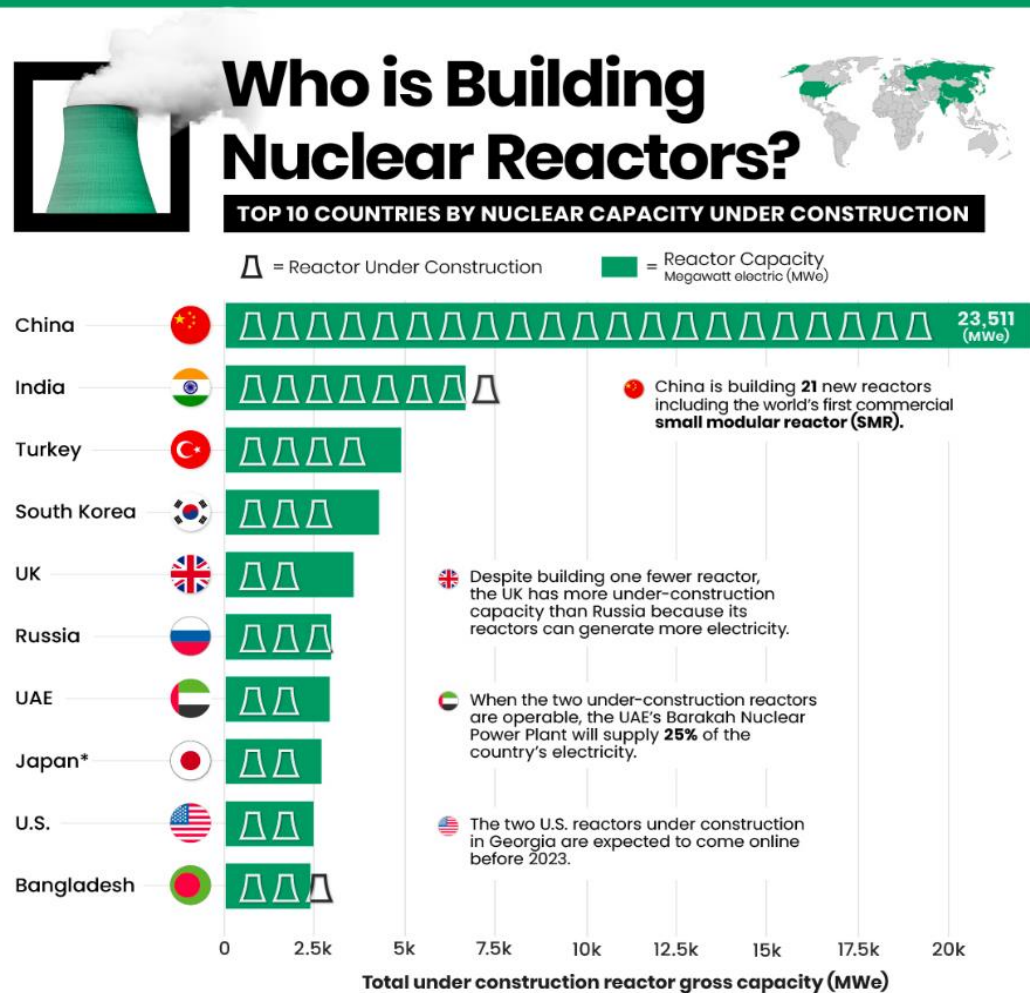
- Circa **22 GW** di progetti relativi a "**reattori modulari piccoli**" (*small modular reactor*, SMR) per un valore di **\$176 miliardi** in investimenti potenziali in tutto il mondo, con un incremento del 65% a partire dal 2021.
- Gli **Stati Uniti** hanno annunciato circa **4 GW** in progetti di **SMR** in aggiunta a quasi **3 GW** in fase di sviluppo iniziale o pre-sviluppo iniziale.
- La **Polonia** e il **Canada** arrivano in seconda e terza posizione, con circa **2 GW** a testa in termini di capacità programmata.
- La grande maggioranza dei progetti **SMR** a livello globale **non sono ancora in fase di costruzione**, ma l'industria ha raggiunto un importante traguardo lo scorso anno con **l'attivazione del primo SMR commerciale**, un reattore ad alta temperatura **raffreddato a gas** della taglia di **200 MW** nella provincia di **Shandong, Cina**. Il primo reattore raffreddato ad acqua dovrebbe entrare in operazione nella provincia di Hainan, Cina, nel 2026.

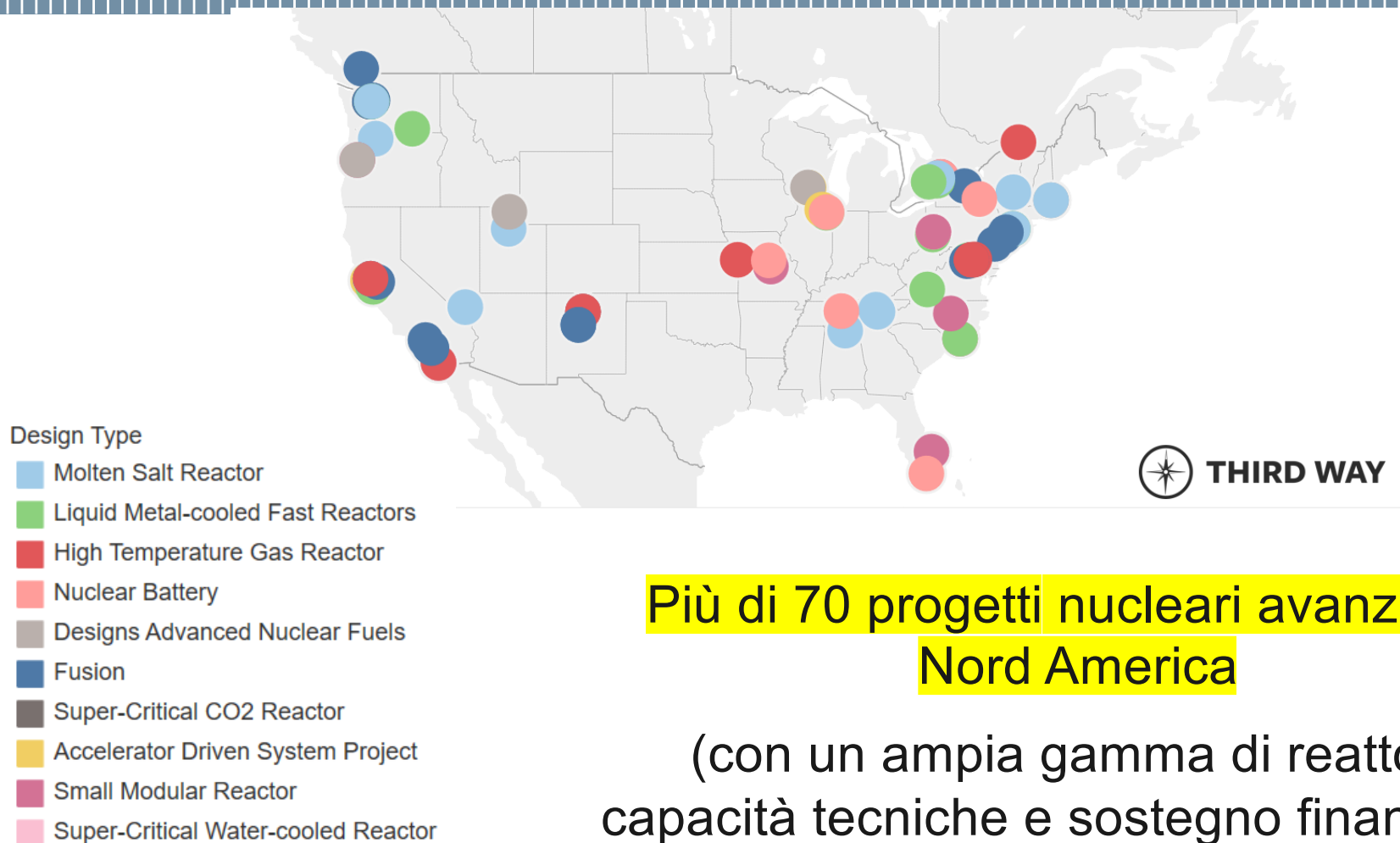
Rinnovato interesse nell'energia nucleare

Cina e India contribuiranno alla maggior parte dei progetti di costruzione di nuove centrali nella prossima decade:

- Cina → Large PWR
- India → Large HWR

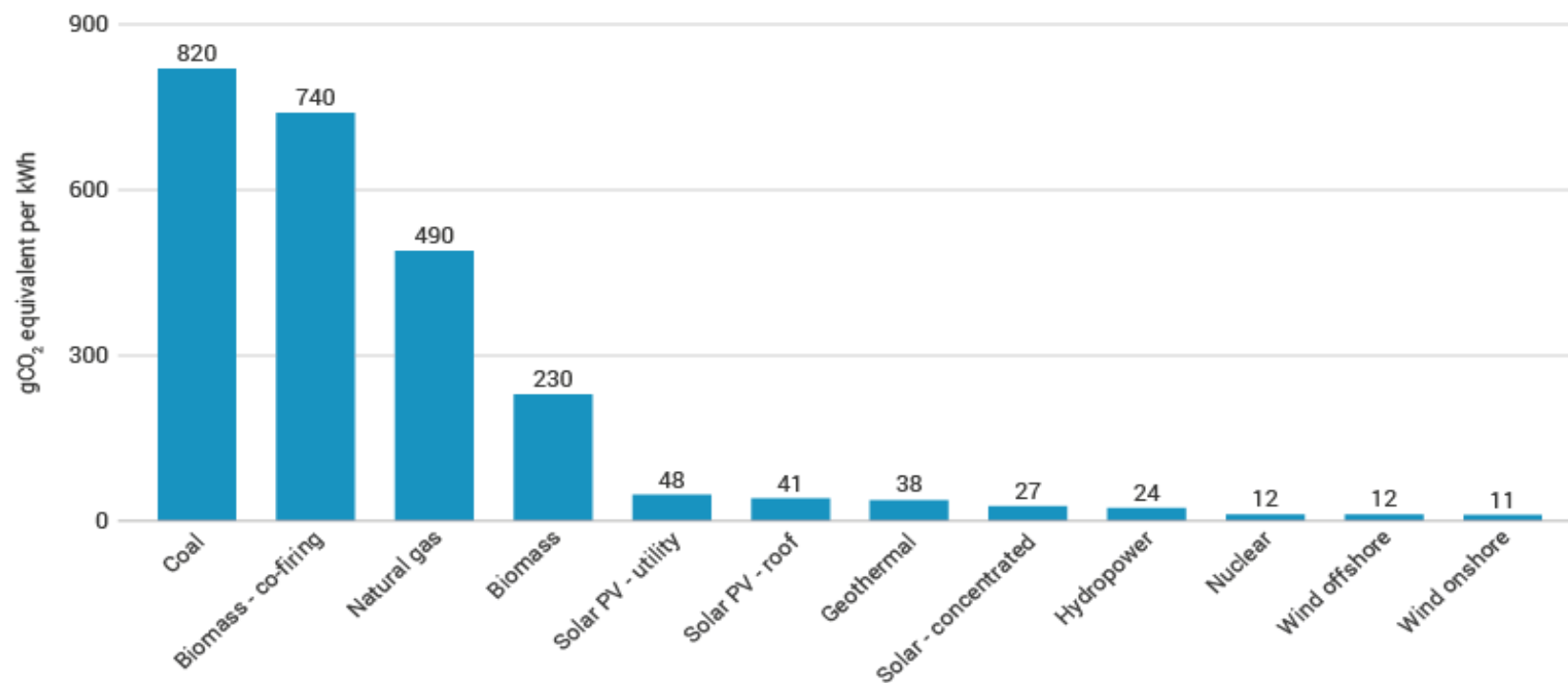
Circa 30 altri Paesi stanno considerando o pianificando un programma di sviluppo nucleare, e altri 20 hanno espresso interesse.





Decarbonizzazione

Il nucleare e' tra le sorgenti a piu' bassa emissione di CO₂

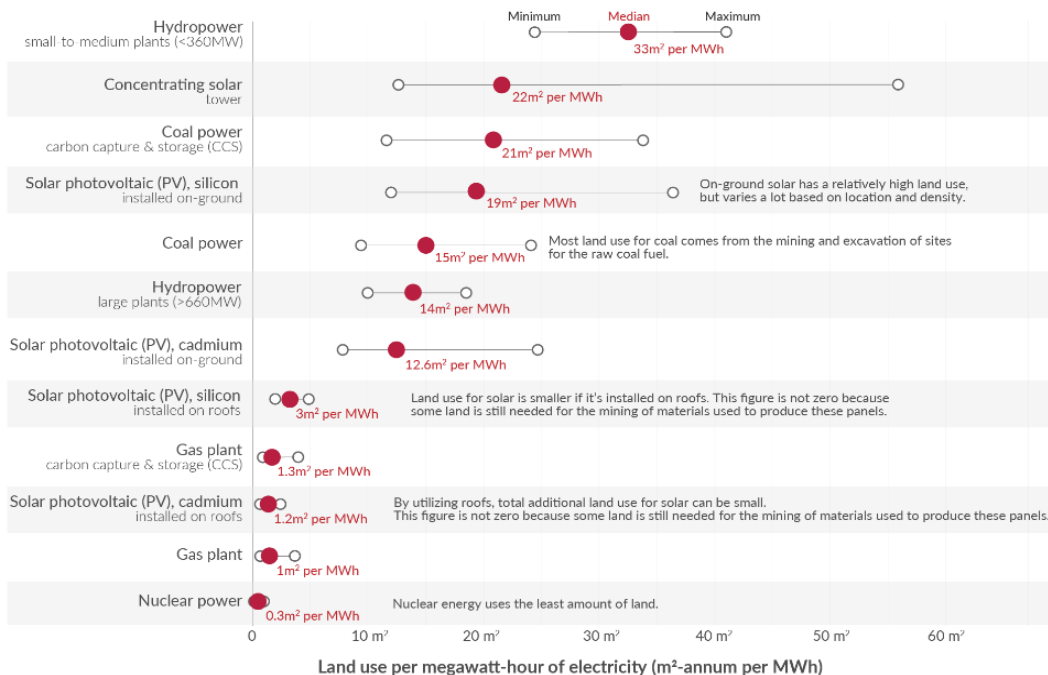


Utilizzo del suolo e Fattore di Carico

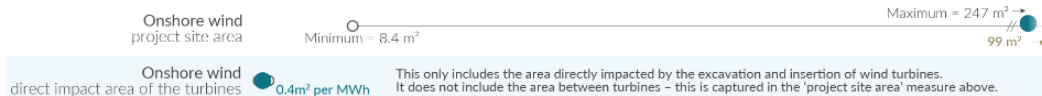
Land use of energy sources per unit of electricity

Land use is based on life-cycle assessment; this means it does not only account for the land of the energy plant itself but also land used for the mining of materials used for its construction, fuel inputs, decommissioning, and the handling of waste.

Our World in Data

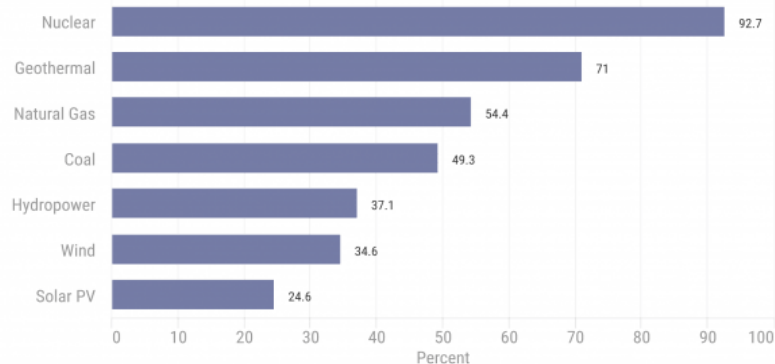


The land use of onshore wind can be measured in several ways, and is distinctly different from land use of other energy technologies. Land between wind turbines can be used for other purposes (such as farming), which is not the case for other energy sources. The spacing of turbines, and the context of the site means land use is highly variable.



*** Capacity factors are taken into account for each technology which adjusts for intermittency. Land use of energy storage is not included since the quantity of storage depends on the composition of the electricity mix. Source: UNECE (2021). Lifecycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe for all data except wind. Wind land use calculated by the author. See [OurWorldinData.org/land-use-per-energy-source](https://ourworldindata.org/land-use-per-energy-source) for more research on this topic. Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie.

U.S. Capacity Factor by Energy Source - 2021



Source: U.S. Energy Information Administration

Le attuali centrali nucleari hanno il piu' basso utilizzo di suolo e il piu' alto fattore di carico.

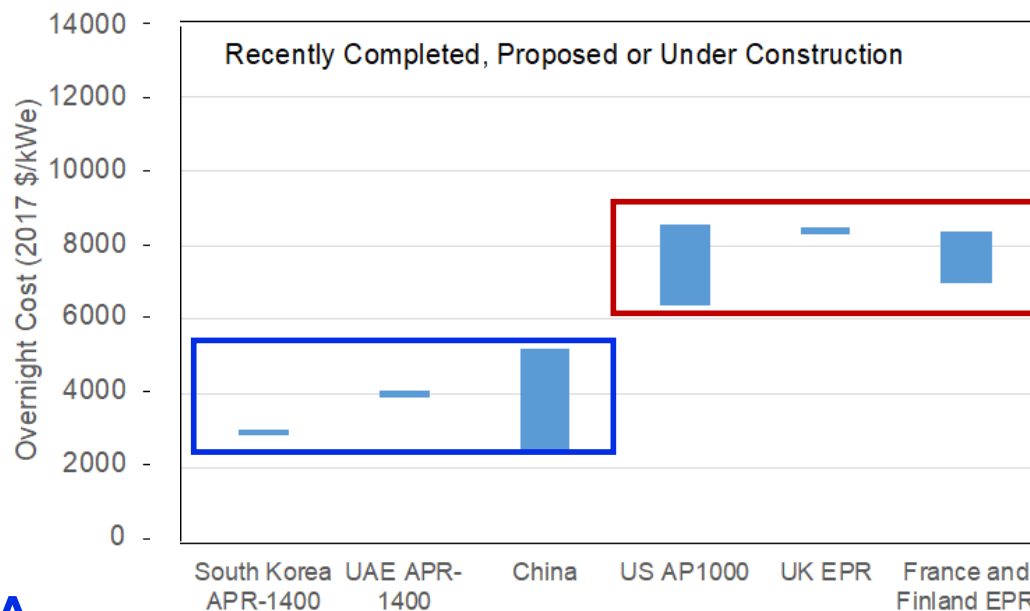
Il problema

- lunghi processi di test/autorizzazione
- costruzione
- impianti molto grandi
- vendita di un solo prodotto primario (elettricità nella rete)



**SVILUPPO ECONOMICAMENTE PROBLEMATICO NEGLI
USA E IN EUROPA (NON IN ASIA)**

Il problema: perche'?



ASIA

- >90% della progettazione completata prima dell'avvio della costruzione
- Comprovata catena di approvvigionamento del NSSS e forza lavoro qualificata
- Costruttori inclusi nel team di progettazione
- Un unico responsabile principale del contratto
- Ente regolatore flessibile in grado di accogliere modifiche alla progettazione e alla costruzione in modo tempestivo
- Finanziamenti governativi

US/ EU

- La costruzione inizia con <50% della progettazione completata
- Catena di approvvigionamento atrofizzata, forza lavoro inesperta
- Tensioni tra i team di costruzione
- Processo normativo contrario a modifiche del progetto durante la costruzione
- Spesso capitale privato e indebitamento

Innovazioni tecniche

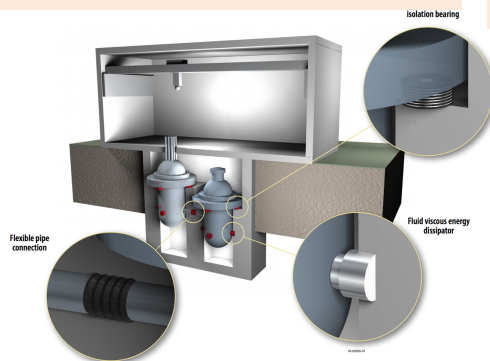
- Spostamento del lavoro dal cantiere alle fabbriche \Rightarrow riduzione dei costi di costruzione e dei costi indiretti
- Standardizzazione del design \Rightarrow riduzione dei costi di autorizzazione e di ingegneria + massimizzazione dell'apprendimento
- Riduzione dei tempi di costruzione \Rightarrow meno interessi durante la costruzione

In altre industrie (e.g., impianti chimici, sottomarini nucleari...) la riduzione dei costi di capitale derivante da tale approccio è stata nell'ordine del 10-50%

*Costruzione Modulare
e Costruzione in
Fabbrica*



Isolamento Sismico



Standardizzazione su Siti Multi-Unità



Soluzioni Avanzate in Calcestruzzo

Tipologie di reattore nucleare

Tipologie di reattore nucleare: diverse dimensioni

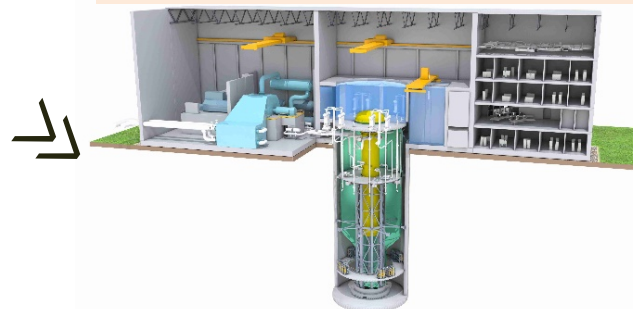
Large Light Water Reactors (LWRs)



~1000-1600 MW_e
~2-10 Mrd \$ 5-10 anni

I fornitori coreani, russi e cinesi (KHNP, Rosatom, CNNC, CGN) sono leader nel settore rispetto a quelli occidentali (EDF, Westinghouse, GEH)

Small Modular Reactors (SMRs)



~70-300 MW_e
~1-3 Mrd \$ 3-5 anni

I fornitori occidentali sono leader nel settore dei LWRs (GEH, Nuscale, Westinghouse, Rolls Royce, EDF, Holtec), e sono ben affermati rispetto ai non-LWRs (X-energy, Kairos, Terrapower).

Potenza elettrica
Costi di costruzione
Tempi di realizzazione

Microreactors (Nuclear Batteries)



~1-10 MW_e
<0.1Mrd \$ <1 anni

I fornitori statunitensi sono i leader nel settore (BWXT, X-energy, Westinghouse)

Tipologie di reattore nucleare: economia di scala (LCOE = Costo Livellato dell'Energia)

$$\text{LCOE} \left[\frac{\$}{\text{MWh}} \right] = \frac{\text{ICC} \cdot (\text{A/P}, i, N) + \text{DC} \cdot (\text{A/F}, i, N)}{W_e \cdot \text{CF} \cdot 8760} + \frac{\text{Fixed O\&M}}{W_e \cdot \text{CF} \cdot 8760} + \frac{\text{Variable O\&M}}{W_e \cdot \text{CF} \cdot 8760} + \frac{\text{FC} \cdot (\text{A/P}, i, N_{\text{Fuel}})}{24 \cdot \text{BU}}$$

Esperienza di prim'ordine con i moderni LWRs

- $W_e = 1000-1400$ MW, costruiti in 48 mesi (Corea del Sud, Cina)
- ICC = 2.5-4.0 Mrd \$ (Corea del sud, Cina)
- ICC / $W_e = 2500-3500$ \$/kW (Corea del sud, Cina)
- CF = 90-93% (Stati Uniti)
- N = 60-80 anni (Stati Uniti)
- O&M / W_e fisso = 0.5-0.6 FTE/MW (Stati Uniti)
- FC = 3800 \$/kg_U (combustibile UO₂ arricchito al 5%)
- BU = 50 MW/gg/ kg_U (Stati Uniti)

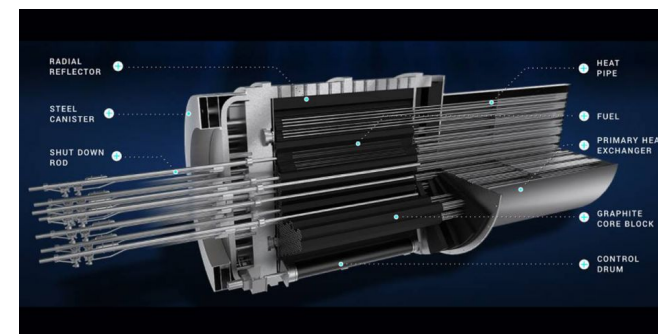
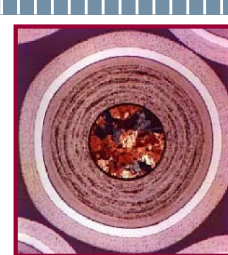
Reattori piccoli (qualitativo)

- W_e : 1-300 MW
- ICC: impianto più piccolo, design semplificato, tempi ridotti
- ICC / $W_e = ??$
- CF: nessuna esperienza operativa
- N = 20 anni (micro) fino a 60-80 anni (tutti gli altri)
- O&M: maggiore automazione
- FC: uguale (UO₂ arricchito al 5%) o superiore (HALEU + TRISO)
- BU: molto variable

L'effetto di W_e (da 3 a 1400 volte inferiore rispetto ai grandi reattori LWR) al denominatore dell'equazione del LCOE è molto difficile da superare *anche con* una semplificazione del design aggressiva, costruzione in fabbrica, apprendimento rapido e automazione.

Caratteristiche intrinseche

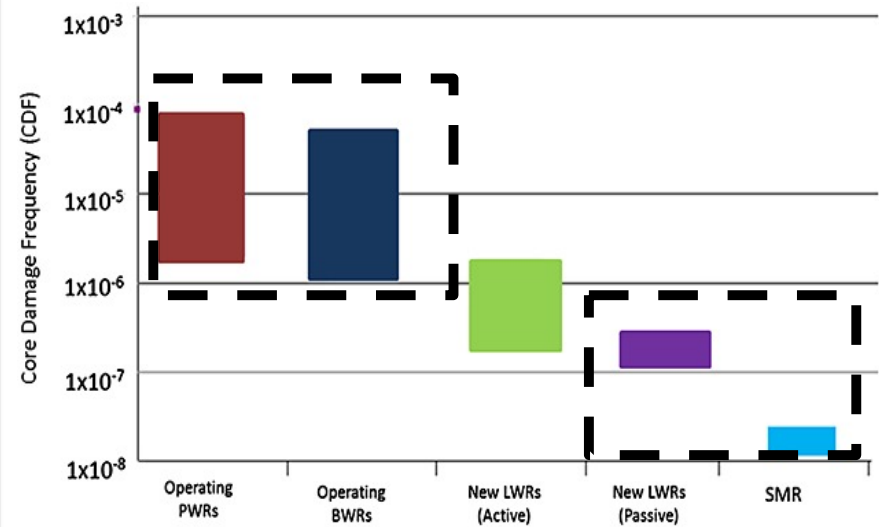
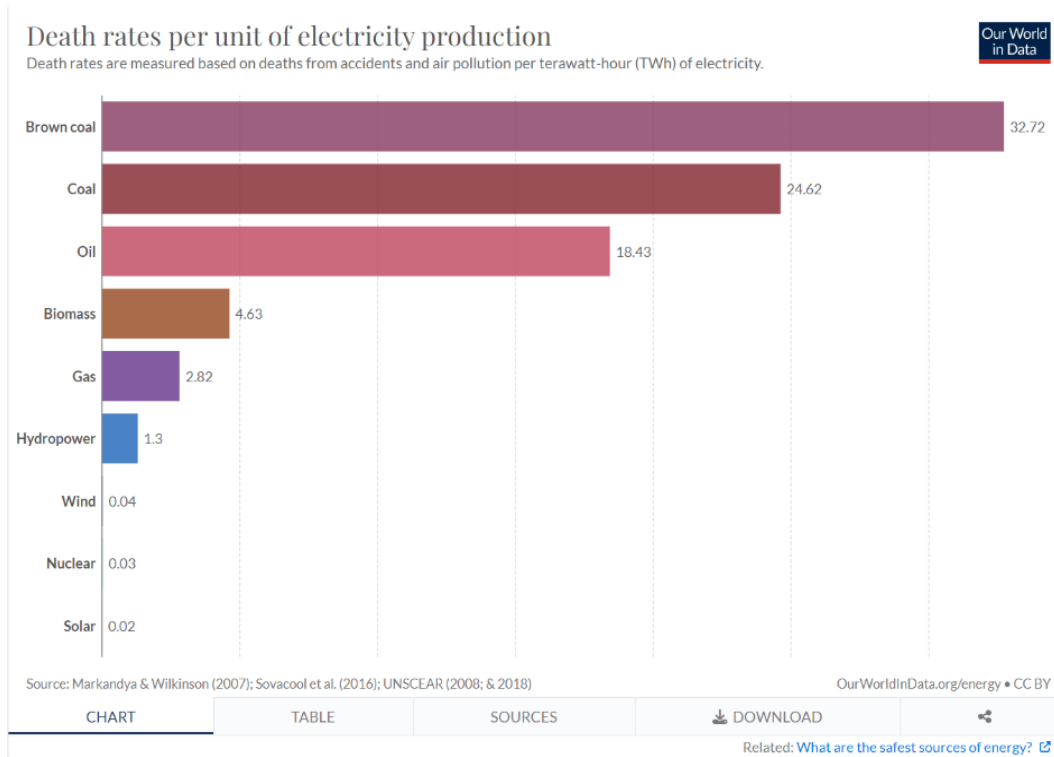
- Il refrigerante non vaporizza;
- Il combustibile ceramico trattiene completamente la radioattività fino a temperature molto alte;
- L'alta capacità termica impedisce bruschi aumenti di temperatura;
- Il raffreddamento passivo non richiede interventi esterni per gestire incidenti.



- Incidenti come TMI, Chernobyl e Fukushima sono eliminati da progetto;
- La zona d'emergenza è limitata al confine del sito (non è necessaria l'evacuazione);
- L'ottenimento delle autorizzazioni tramite test su scala per i microreattori diventa possibile (esempio del KRUSTY di NASA-LANL)

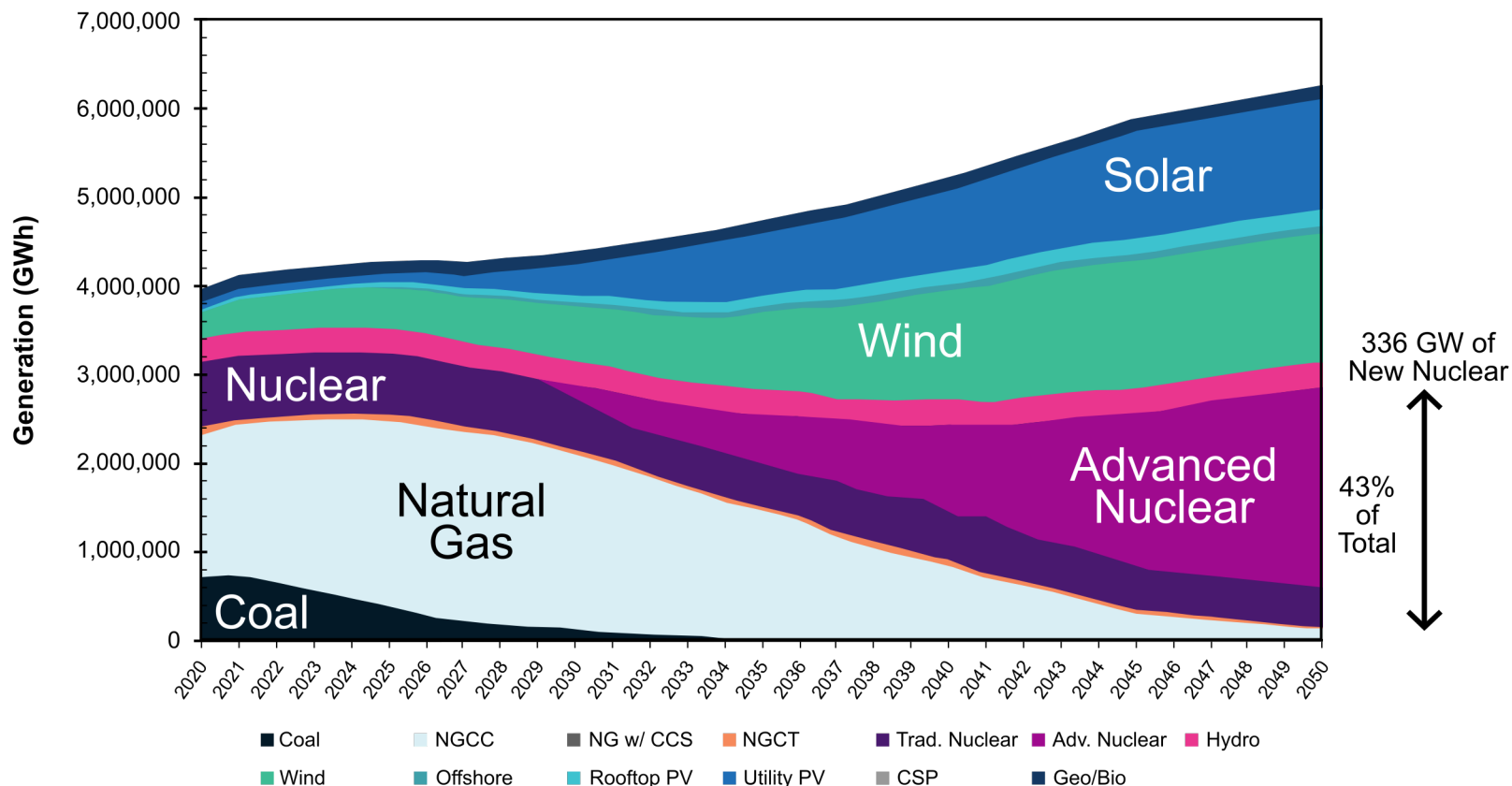
Tipologie di reattore nucleare: sicurezza avanzata

Nucleare ancor piu' sicuro



Mercato nucleare

Mercato nucleare: produzione di potenza



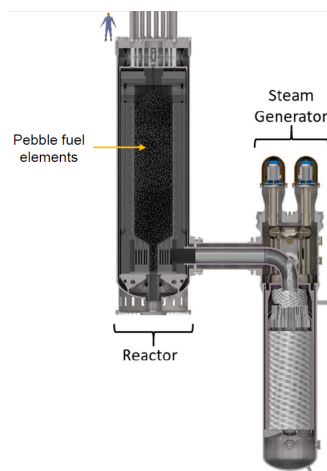
Gli SMR rappresenteranno il 30% del nucleare globale in uno scenario di zero emissioni globali

Mercato nucleare: produzione di idrogeno e combustibili sintetici



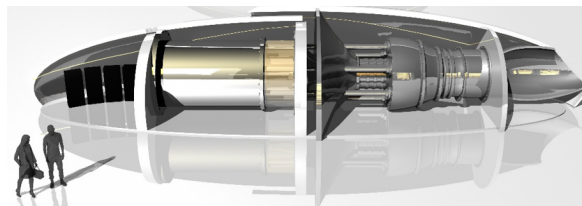
Produzione centralizzata di
idrogeno/combustibile su
larga scala

o collocata in prossimità
di utilizzatori industriali
di idrogeno



Mercato nucleare: produzione di prodotti primari non energetici

microreattori
(esempi: eVinci,
X-energy, BWXT)



calore ed elettricità a zero emissioni

Elettificazione delle
estrazioni minerarie

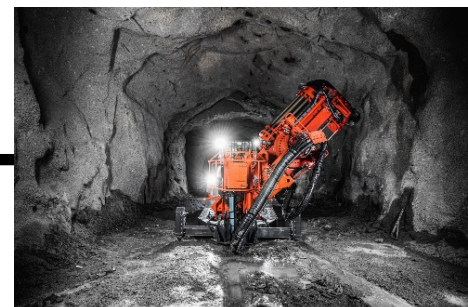
Caratteristiche:

- (1) Non necessita di tubi o cavi
- (2) Catena di produzione in loco
- (3) Approvvigionamento incrementale
- (4) Prodotti a zero emissioni

Moduli per sinterizzazione
eletto-termica, elettrolisi
di ossido fuso



minerali



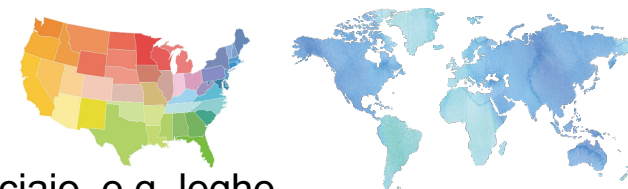
Tutto in-situ

Acciaio

Fabbricazione e
assemblaggio modulare



Export nei mercati interni ed esteri



Prodotti finiti in acciaio, e.g. leghe
per applicazioni aerospaziali

Mercato nucleare: versatilità di applicazioni

Spettro di dimensioni e opzioni



Varietà di output



Elettricità



H₂ Idrogeno



Calore

Possibili diversi utilizzi



Case



Veicoli



Businesses



Aviazione



Ferrovie



Navigazione



Cemento



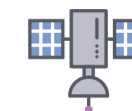
Acciaio



Industrie



Acqua



Spazio

Da cosa succede a cosa puo' succedere

Da cosa succede a cosa può succedere Da ripartenza a frenata nucleare

- Se per la prima ondata di progetti di costruzione degli SMR e AMR (Advanced Modular Reactors) si ripete (anche su scala ridotta) l'esperienza di **superamento dei costi** e **ritardi di programma** avvenuta negli Stati Uniti e in Europa negli ultimi 15 anni
- Se il nucleare rimane **confinato al mercato del prodotto primario energia elettrica**, dove la sua competitività è incerta
- Se dovesse esserci un **grave incidente** in qualsiasi parte del mondo

Da cosa succede a cosa può succedere Da ripartenza a frenata nucleare

- Se per la prima ondata di progetti di costruzione degli SMR e AMR si ripete (anche su scala ridotta) l'esperienza di **superamento dei costi** e **ritardi di programma** avvenuta negli Stati Uniti e in Europa negli ultimi 15 anni

“Le stime sul ruolo dell'energia nucleare in questo mix dipendono dalle **ipotesi**...Le ipotesi di maggior impatto sono state quelle sui **costi di policy e tecnologia**.” (US national Academy , 2023)

Storicamente, gli **elevati costi di capitale** hanno contribuito a **rallentare o bloccare lo sviluppo** del nucleare.

Attenzione: progetti innovativi di reattore nucleare (**SMR, AMR**) potrebbero comunque essere esposti a **lunghi tempi di sviluppo**, **elevati costi** -> **grandi incertezze** negli effettivi vantaggi.

Conclusioni

- Grande interesse e supporto per il nucleare, dato il suo ruolo nella decarbonizzazione del sistema energetico
- Costi e rischio finanziario sono un problema per l'Occidente
- Riduzione del rischio finanziario puo' venire da piccoli reattori nucleari, piu' semplici e prodotti in serie, con processi veloci di test e autorizzazione
- SMR probabilmente avranno un costo maggiore (per unita' di energia generata)
- Grandi potenzialita' su altri mercati ("non-energetici) potrebbero esserci per i reattori avanzati, se si supereranno le difficolta' di autorizzazione, supply chain, costi
- Costi e rischi aumentano per progetti di reattore non raffreddati ad acqua

Da cosa succede a cosa può succedere Da ripartenza a frenata nucleare

Occorrono importanti sforzi razionali per programmare in maniera armonica le attività (costose) di ricerca e sviluppo, di dimostrazione delle tecnologie, di semplificazione dell'iter di verifica e autorizzazione.

Lo sviluppo del nucleare è inevitabilmente legato a politiche di governo chiave sull'energia.