

COMMISSIONI RIUNITE
AMBIENTE, TERRITORIO E LAVORI PUBBLICI (VIII)
ATTIVITÀ PRODUTTIVE, COMMERCIO E TURISMO (X)

RESOCONTO STENOGRAFICO

INDAGINE CONOSCITIVA

1.

SEDUTA DI MARTEDÌ 19 MARZO 2024

PRESIDENZA DEL PRESIDENTE DELLA VIII COMMISSIONE **MAURO ROTELLI**

INDICE

	PAG.		PAG.
Sulla pubblicità dei lavori:		Cappelletti Enrico (M5S)	5
Rotelli Mauro, <i>presidente</i>	2	L'Abbate Patty (M5S)	4
INDAGINE CONOSCITIVA SUL RUOLO DELL'ENERGIA NUCLEARE NELLA TRANSIZIONE ENERGETICA E NEL PROCESSO DI DECARBONIZZAZIONE		Pavanelli Emma (M5S)	4
		Squeri Luca (FI-PPE)	5
Audizione, in videoconferenza, di Enrico Zio, professore ordinario di impianti nucleari al Politecnico di Milano:		Zio Enrico, <i>professore ordinario di impianti nucleari al Politecnico di Milano</i>	2, 4, 5
Rotelli Mauro, <i>presidente</i>	2, 4, 5, 6	ALLEGATO: Documentazione depositata dal professor Enrico Zio	7

N. B. Sigle dei gruppi parlamentari: Fratelli d'Italia: FdI; Partito Democratico - Italia Democratica e Progressista: PD-IDP; Lega - Salvini Premier: Lega; MoVimento 5 Stelle: M5S; Forza Italia - Berlusconi Presidente - PPE: FI-PPE; Azione - Popolari europei riformatori - Renew Europe: AZ-PER-RE; Alleanza Verdi e Sinistra: AVS; Noi Moderati (Noi con L'Italia, Coraggio Italia, UDC e Italia al Centro) - MAIE: NM(N-C-U-I)-M; Italia Viva - il Centro - Renew Europe: IV-C-RE; Misto: Misto; Misto-Minoranze Linguistiche: Misto-Min.Ling.; Misto+Europa: Misto+E.

PRESIDENZA DEL PRESIDENTE
DELLA VIII COMMISSIONE MAURO
ROTELLI

La seduta comincia alle 11.45.

Sulla pubblicità dei lavori.

PRESIDENTE. Avverto che la pubblicità dei lavori della seduta odierna sarà assicurata anche mediante la resocontazione stenografica e la trasmissione attraverso la *web-tv* della Camera dei deputati.

Audizione, in videoconferenza, di Enrico Zio, professore ordinario di impianti nucleari al Politecnico di Milano.

PRESIDENTE. L'ordine del giorno reca, ai sensi dell'articolo 144, comma 1, del Regolamento, l'audizione, in videoconferenza, di Enrico Zio, professore ordinario di impianti nucleari al Politecnico di Milano, nell'ambito dell'indagine conoscitiva sul ruolo dell'energia nucleare nella transizione energetica e nel processo di decarbonizzazione.

Ringrazio il professor Enrico Zio per la partecipazione ai nostri lavori e gli cedo la parola pregandolo di voler sintetizzare e non dare lettura del documento eventualmente trasmesso alle Commissioni, che sarà comunque allegato al resoconto stenografico della seduta odierna.

ENRICO ZIO, *professore ordinario di impianti nucleari al Politecnico di Milano (intervento in videoconferenza)*. Signor presidente, vorrei condividere con voi una presentazione che ho fatto, che ho intitolato « Ripartenza nucleare » (*vedi allegato*). Grazie molte per l'opportunità.

Io sono professore di impianti nucleari e mi occupo soprattutto degli aspetti di sicurezza, affidabilità e rischio. Per anni ho tenuto una cattedra di *Électricité de France* a Parigi proprio su questi temi e sulla resilienza del sistema energetico con il nucleare. Adesso sono anche alla *École des mines* di Parigi.

Cosa sta succedendo nel mondo lo sappiamo. Ci sono dei *driver*, in particolare il cambiamento climatico, che è il tema principale di quest'oggi, ma anche la disuguaglianza economica e le tensioni geopolitiche, che colpiscono anche l'approvvigionamento energetico, che fanno sì che vi sia una convergenza sull'importanza dell'accesso a fonti di energia che siano abbondanti, a basse emissioni, competitive dal punto di vista economico e affidabili.

C'è, quindi, un rinnovato interesse sull'ingegneria nucleare, per diversi eventi o con diverse testimonianze, che vanno dalla situazione dell'Ucraina e l'importanza accresciuta della sicurezza energetica, all'inclusione del nucleare in politiche ambientali, dalla COP alla tassonomia europea, a impegni importanti nel mondo internazionale, l'impegno cinese di 150 gigawatt in quindici anni, Corea del Sud e Svezia che cancellano politiche di *phase-out*, in Europa - Francia, Finlandia e altri Paesi che sono particolarmente intenzionati - e stanno avviando programmi di costruzione di nuovi impianti nucleari.

È interessante il *budget* per l'anno fiscale 2025 che il Presidente Biden ha annunciato la settimana scorsa, in cui sono previsti 1,6 miliardi di dollari per il nucleare. È interessante anche il primo progetto negli Stati Uniti di un impianto di un'azienda chimica che ha chiesto l'autorizzazione per l'installazione di un impianto nucleare in prossimità per sfruttare il ca-

lore di processo generato dall'impianto nucleare a favore dei processi chimici promossi dall'azienda.

È interessante anche la prospettiva sui reattori modulari piccoli (*small modular reactors*) di cui si sta parlando molto. Si prevedono circa 22 gigawatt, per un investimento di 176 miliardi nei prossimi anni. Gli Stati Uniti annunciano circa 4 gigawatt di SMR, con 3 gigawatt ulteriori. Anche Polonia e Canada investono. Insomma, c'è grande attenzione anche sui reattori modulari piccoli, tenendo conto che la maggior parte non è ancora in fase di costruzione, ma è in fase di autorizzazione. Però, c'è la notizia positiva che il primo reattore commerciale di questo tipo recentemente è stato allacciato alla rete in Cina.

La prospettiva di sviluppo di nuove costruzioni nucleari vede diversi Paesi coinvolti in tutto il mondo. In particolare, nei prossimi dieci anni ci potremo aspettare che Cina e India siano i principali sviluppatori o costruttori di impianti nucleari, in particolare con tecnologie ad acqua. Questo «PWR» che vedete nel documento è l'acqua pressurizzata, «HWR» è l'acqua pesante. Ma sono ancora i grandi reattori di grande taglia in termini di megawatt elettrici e saranno sicuramente loro che hanno il programma principale di sviluppo di reattori nucleari.

Ci sono, comunque, tanti altri Paesi nel mondo (circa cinquanta) che stanno seriamente considerando di avviare un programma nucleare.

È interessante il caso del Nord America, perché ci sono forti investimenti privati su diverse tipologie di reattori, con diversi livelli di sostegno finanziario, che ammontano a circa 4 miliardi di dollari di investimenti.

Nel tema della decarbonizzazione chiaramente il nucleare sembra molto attraente, perché è tra le sorgenti più a bassa emissione di CO₂. Qui vedete un grafico di grammi di CO₂ equivalente per chilowattora e vedete che il nucleare si posiziona nei livelli bassi di emissione, assieme all'eolico. Quindi, è certamente molto interessante per la decarbonizzazione. Questo su

tutto il ciclo di vita degli impianti (nucleare, eolico eccetera).

Qui vedete due aspetti interessanti del nucleare. Uno è che il nucleare — lo vedete in questo primo grafico (*vedi allegato, slide 9*) — fa un utilizzo di suolo molto basso, molto piccolo. Quindi, in tutti quei Paesi densi e affollati, in cui c'è poco spazio dove mettere impianti, il nucleare diventa molto interessante.

Dal punto di vista della *performance* in termini di fattore di carico, vale a dire l'energia effettivamente generata rispetto all'energia teorica, il nucleare è molto efficiente, perché siamo intorno al 92 per cento.

Il problema è che l'attuale *business model* per i grandi impianti è piuttosto complicato. Ci sono lunghi processi di autorizzazione, costruzione difficile, impianti molto grandi e si produce solamente elettricità per metterla in rete. Da un punto di vista economico questo aspetto è risultato problematico, soprattutto nel mondo occidentale, non così, invece, in Asia.

Nelle *slides* vedete il cosiddetto «*overnight cost*», ossia se non ci fossero interessi quanto costerebbe il nucleare in dollari per chilowatt elettrico, e vedete che i costi nei Paesi occidentali, con qualche variabilità, sono molto più alti che non i costi in Asia. Adesso non sto a leggervi tutto, ma questo accade perché l'Asia ha modi per affrontare questi grandi impianti che sono decisamente diversi da quelli adottati in Europa e negli Stati Uniti, dove c'è una costruzione che comincia con la progettazione ancora non completata, poi il processo normativo non accetta facilmente modifiche di progetto durante la costruzione, vi è un forte indebitamento iniziale, la catena di approvvigionamento non è così banale, eccetera, eccetera.

Ci sono, però, innovazioni tecniche che consentono di migliorare la situazione. Senza entrare adesso nei dettagli, mi limito a dire che queste innovazioni tecniche porterebbero a spostare il lavoro dal cantiere alle fabbriche, con riduzione dei costi di costruzione e dei costi indiretti, standardizzazione del *design*, quindi apprendimento e miglioramento delle procedure di costru-

zione molto più rapido, riduzione dei costi di autorizzazione e riduzione dei tempi di costruzione. Tipicamente in altre aziende questo porta a una riduzione dei costi capitali intorno al 10-50 per cento, quindi parliamo di una riduzione importante.

PRESIDENTE. Professore, mi scusi, riesce a terminare in un minuto, in maniera da poter lasciare spazio ai colleghi per i loro interventi?

ENRICO ZIO, *professore ordinario di impianti nucleari al Politecnico di Milano (intervento in videoconferenza)*. Certamente. Faccio notare che un aspetto importante di questa formula è l'effetto della dimensione di energia prodotta, quindi l'effetto scala, che per i reattori grandi è importante, per i reattori piccoli è più basso.

Arrivo molto rapidamente alle conclusioni. Parliamo di partenza nucleare, ma siamo comunque sempre esposti a una possibile frenata nucleare, che avverrebbe se anche per i reattori avanzati e i reattori piccoli modulari si superassero i costi e i ritardi previsti nei programmi, come è avvenuto per i grandi impianti negli ultimi quindici anni, se questi reattori fossero soltanto limitati a produrre energia elettrica per la rete e non ad accedere ad altri mercati, per i quali potrebbero essere molto interessanti data la flessibilità, e se per caso dovesse esserci un altro grave incidente.

In conclusione, è vero che c'è un grande interesse per il nucleare ai fini della decarbonizzazione, ma c'è comunque un importante aspetto da valutare sui costi del rischio finanziario. Inoltre, i reattori nucleari piccoli possono essere importanti, ma potrebbero avere un costo maggiore per unità di energia generata, ragion per cui devono affacciarsi ad altri mercati. Infine, se andiamo su tecnologie diverse dall'acqua, c'è poca esperienza, quindi i rischi aumentano.

Alla fine è molto importante che, in un processo di inserimento del nucleare nell'ambito del *mix* energetico di un Paese, si riescano a programmare in maniera armonica tutte le attività che sono necessarie — si dice che è sviluppo fino alla verifica e

all'autorizzazione — ed è inevitabile che questo sia legato a politiche di governo globale sull'energia. Per questo motivo, dimostro il mio apprezzamento per quello che state facendo in questo ambito.

Vi ringrazio.

PRESIDENTE. Grazie a lei, professor Zio.

Do la parola ai colleghi che intendono intervenire per porre quesiti o formulare osservazioni.

PATTY L'ABBATE. Grazie, professore, per la sua illustrazione. Voglio farle una sola domanda. Lei ci ha fatto vedere la *slide* sulla CO₂, ci ha detto che si ottiene valutandola come CO₂ equivalente su tutto il ciclo di vita e ha fatto la comparazione fra le diverse tipologie di fonti che possono dare energia. Ebbene, le chiedo se rispetto al lavoro scientifico fatto sul *life cycle assessment* (LCA) possiamo avere la comparazione delle varie fonti energetiche valutando anche la domanda di energia, valutando la tossicità sull'uomo, valutando la tossicità anche sull'ecosistema. Inoltre, le chiedo se è stato fatto un lavoro di LCA utilizzando il ReCiPe, un metodo che contempla al suo interno diciassette impatti ambientali, al fine di verificare anche sulle altre caratteristiche in che modo possiamo comparare le varie fonti di energia, anche quelle *green*, che sono proprio quelle che stiamo qui analizzando.

Grazie.

EMMA PAVANELLI. Grazie, professore. La sua illustrazione è stata molto interessante ed esaustiva dal punto di vista tecnico.

È ovvio che oggi, quando si parla di nucleare, dobbiamo anche pensare a chi sono coloro che producono questi tipi di impianti, da dove viene l'uranio e come smaltire le scorie. Ad oggi, se andiamo a vedere la situazione geopolitica, a cui ha fatto anche riferimento, se andiamo a vedere soprattutto le sanzioni europee e statunitensi alla Russia, possiamo notare che il settore nucleare non ha avuto alcuna sanzione. Questo perché oggi la Russia è il

Paese che ha il *know-how* per la costruzione di impianti, soprattutto quelli piccoli, che vengono costruiti soltanto in Russia, perché l'uranio proviene prevalentemente dalla Russia e perché la Russia è *leader* mondiale nella lavorazione delle scorie. In molti Paesi dove si sta progettando il nucleare spesso i progetti sono fermi perché, quando si parla di un impianto nucleare, serve anche un controllo tecnico sul posto, il che oggi si traduce in una incertezza sulla sicurezza nazionale di questi Paesi.

Alla luce di queste considerazioni ritengo che, per quanto tecnicamente il nucleare possa avere una sua valenza, anche se sappiamo bene che in Italia la popolazione è sempre stata molto contraria, sia necessario capire se dal punto di vista della sicurezza nazionale possa esserci un problema, considerato chi oggi realizza questi impianti. Lei stesso ci ha mostrato in una *slide* che Cina e India, che sono più vicine alla Russia, sono i Paesi dove si stanno realizzando impianti di varie dimensioni.

Grazie.

LUCA SQUERI. Grazie, professor Zio, e complimenti per l'esauriva relazione che ha fatto sul nucleare.

Vorrei porle una domanda piuttosto specifica. In America c'è un investimento da parte del Governo pari a più di un miliardo di dollari, di contro c'è tutta una serie di iniziative di aziende legate alle nuove tecnologie di piccoli e microreattori che avrebbe raccolto 4 miliardi di dollari di investimento. Ebbene, è immaginabile ripartire in Italia con un sistema di *know-how* e finanziario che non preveda un apporto più o meno consistente dello Stato? I piccoli reattori, che sono dedicati a esigenze anche specifiche, potrebbero far sì che anche gli investimenti privati, o solo gli investimenti privati, possano essere sufficienti?

ENRICO CAPPELLETTI. Grazie, professore.

Coglierei l'occasione per fare una domanda secca. Le cito un dato del *report* 2023 dell'Agenzia internazionale dell'energia: da qui ai prossimi decenni — quindi non solo oggi, ma anche per i prossimi

decenni — il costo dell'energia nucleare sarà molto superiore rispetto al costo di altre fonti energetiche, a partire da tecnologie legate a fonti sostenibili. Stante questa premessa, per quale motivo come Paese dovremmo investire decine di miliardi di euro per avere da qui a venti o forse trent'anni energia nucleare a costi molto superiori rispetto a quelli che potremmo ottenere facendo investimenti inferiori su altre tipologie e su altre tecnologie, in tempi molto più limitati?

In questo momento, specialmente come Commissione Attività produttive, dobbiamo pensare di mettere nelle condizioni il tessuto produttivo del nostro Paese di avere energia a basso costo, non ad alto costo. Non si dica che è per una questione di autonomia energetica italiana, perché in Italia non abbiamo uranio arricchito, lo dovremmo far arrivare. Noi non siamo indipendenti, come non lo è l'Europa. Quindi, il rischio è di fare un passo ulteriore, come diceva poc'anzi la collega, verso la dipendenza, in particolar modo dalla Russia, che è uno dei motivi per cui ci troviamo qui a discutere di energie alternative.

PRESIDENTE. Do la parola al professor Zio per la replica.

ENRICO ZIO, *professore ordinario di impianti nucleari al Politecnico di Milano (intervento in videoconferenza)*. Ringrazio gli onorevoli per i loro interventi, perché effettivamente sono riusciti a dire tutta una serie di cose che per motivi di tempo non ho potuto dire, cose che reputo giustissime e apprezzabili, perché effettivamente la visione da considerare è molto più ampia dell'aspetto puramente tecnico verticale del nucleare, penso alla necessità di fare una valutazione complessiva degli impatti ambientali, per esempio, dovuti anche a incidenti. Potrei farvi vedere, visto peraltro che è molto in voga, una *slide* sui morti che si possono addurre a incidenti nucleari. Poi, c'è tutto l'impatto ambientale, c'è la *relocation*, c'è la *remediation* del sito. Quindi, il discorso non può essere limitato in maniera verticale chiusa su questi aspetti.

Tutti gli aspetti economici complessivi, di dipendenza strategica e di geopolitica sono importanti, tant'è che vari Paesi — prendo gli Stati Uniti in particolare, dato che sono molto attivi — si stanno attrezzando per riaprire il loro *business* di miniere di uranio, di trattamento del combustibile e via dicendo. Stanno cercando di portare sulla loro costa tutta la filiera, al fine di essere il più possibile indipendenti. Dunque l'approvvigionamento di tecnologie, lavorazioni e materie, che effettivamente in buona parte sono in Russia, ma anche in altri Paesi, che però non sono particolarmente stabili.

Gli impianti piccoli, i microreattori e gli *small modular reactor*, possono far pensare anche a un intervento privato diretto. Tuttavia, lo Stato, qualora dovesse decidere di andare in questa direzione, dovrebbe mettersi come capofila anche negli investimenti, oltre che nel controllo. Questo mi sembra abbastanza scontato.

Per quanto riguarda l'aspetto economico del costo, i calcoli vanno fatti valutando tutti gli aspetti. Qui non ho avuto tempo di far vedere le opportunità che in particolare i piccoli e piccolissimi reattori (batterie nucleari) portano in termini di flessibilità di approvvigionamento. Ad esempio, negli Stati Uniti addirittura ci sono *campus* universitari che hanno fatto richiesta per avere la loro batteria nucleare, dal momento che per venticinque anni hanno garantito, senza *blackout*, l'energia, peraltro sul posto. Quindi, rispetto alle altre fonti energetiche bisogna mettere in conto tutte le infrastrutture necessarie a portare dal luogo di produzione i vettori energetici laddove servono. Non a caso Dow, una delle più grandi aziende chimiche del mondo, ha chiesto la licenza per installare una piccola

centrale nucleare presso i propri impianti, in maniera da poter garantire sempre l'apporto di energia, non essere attaccato a una rete e non dover subire i *blackout* dovuti alle infrastrutture, che sono molto vecchie sia in Italia, sia in Europa, sia negli Stati Uniti, proprio perché il processo chimico non si può permettere alcuna interruzione.

Evidentemente è un problema estremamente ampio, che va affrontato con tutte le attenzioni e senza dogmi. Spero di non aver dato l'impressione di voler « vendere » il nucleare. Sono un professore nucleare, sono specializzato negli ambiti delle analisi di rischio, quindi sono estremamente attento e sensibile a questi aspetti. Non intendo vendere il nucleare, dico soltanto che il nucleare probabilmente andrebbe considerato, ovviamente valutando tutti gli aspetti in maniera, da un lato, seria e, dall'altro, serena. Dopodiché, quello che sarà il meglio per l'Italia sarete voi a capirlo e a deciderlo.

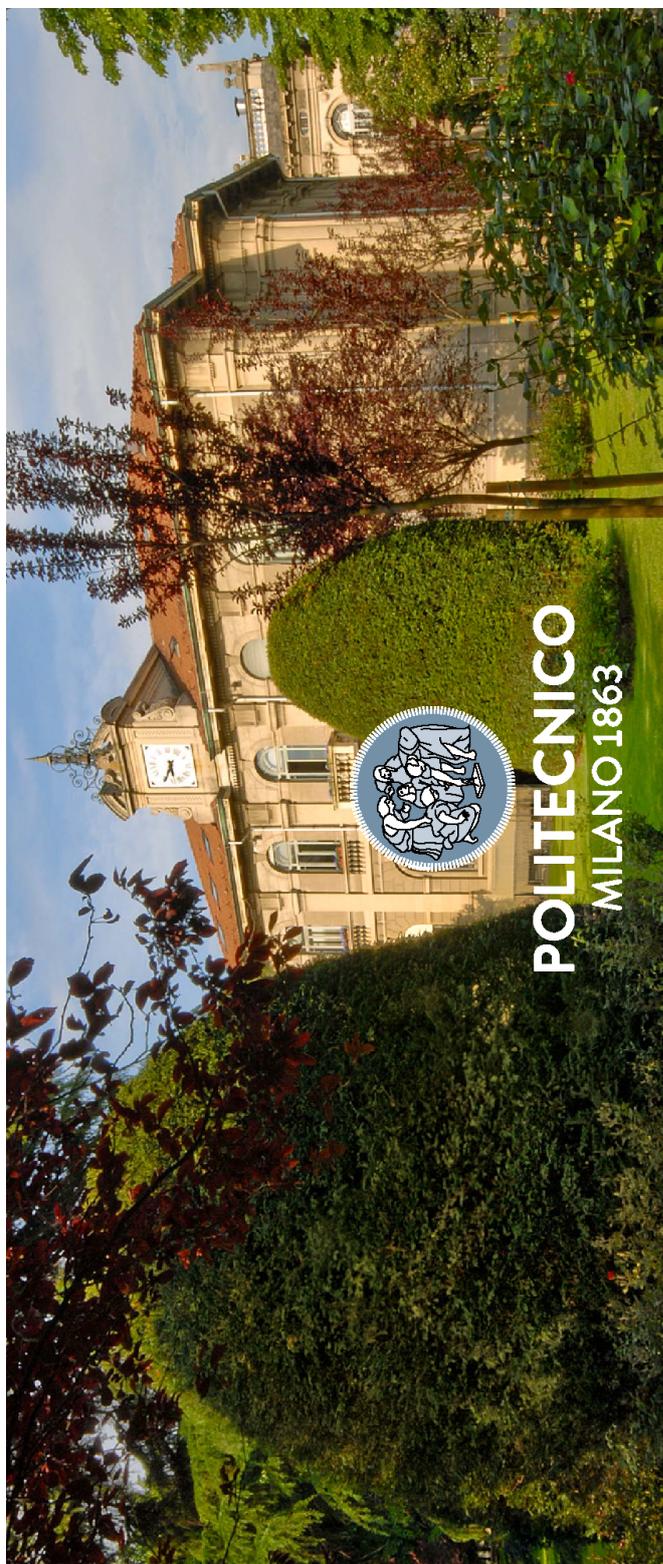
PRESIDENTE. Grazie, professor Zio. Penso che abbia esaurito in maniera brillante tutte le domande e i chiarimenti richiesti dai colleghi.

Non essendovi altre richieste di intervento, ringrazio il nostro ospite per il suo intervento e per la documentazione depositata, di cui autorizzo la pubblicazione in allegato al resoconto stenografico della seduta odierna (*vedi allegato*) e dichiaro conclusa l'audizione.

La seduta termina alle 12.10.

Licenziato per la stampa
il 22 aprile 2024

ALLEGATO



Ripartenza Nucleare

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

lasar
Laboratory of Signal and Risk Analysis

Cosa succede?

Enrico Zio

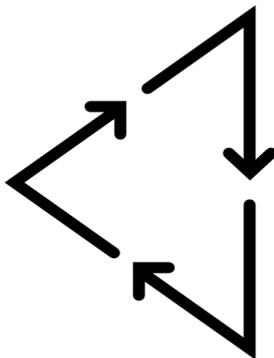
POLITECNICO MILANO 1863

La tripla sfida

lasar

Laboratory of Signal and Risk Analysis

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.

Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

Rinnovato interesse nell'energia nucleare

lasar

Laboratory of Signal and Risk Analysis

- 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"**

Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

Rinnovato interesse nell'energia nucleare

lasar

Laboratory of Signal and Risk Analysis

- 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.

Enrico Zio

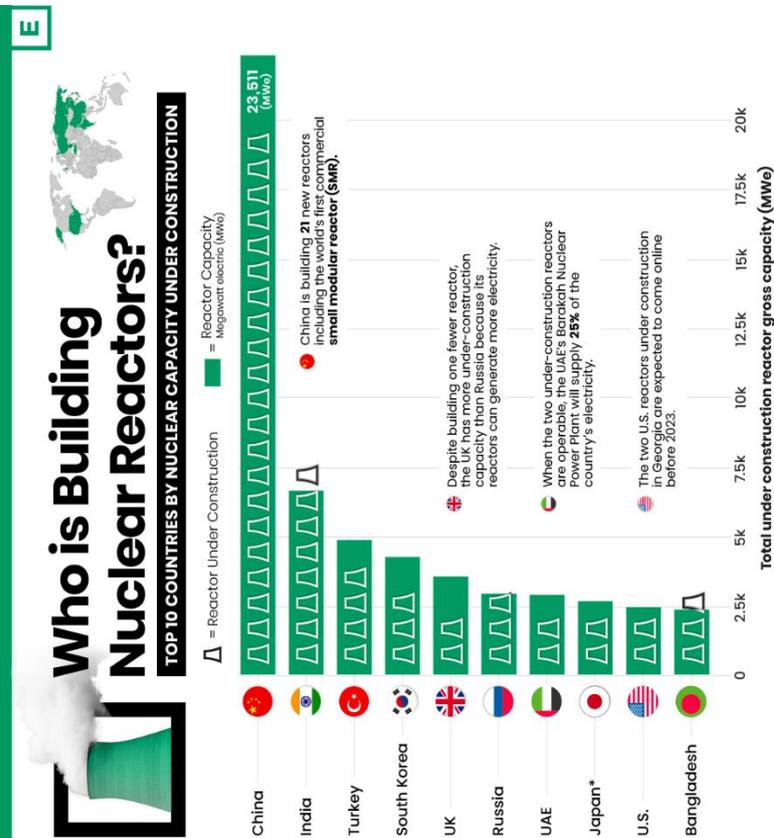
POLITECNICO MILANO 1863

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

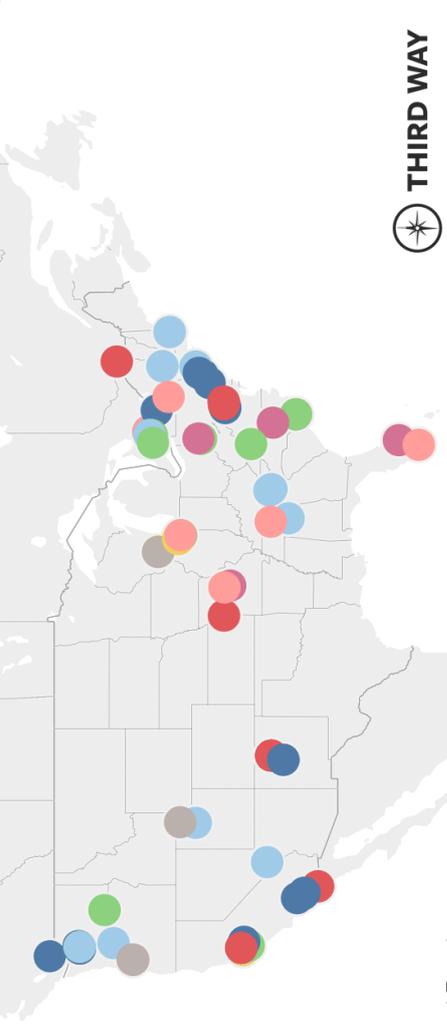
Circa 30 altri Paesi stanno considerando o pianificando un programma di sviluppo nucleare, e altri 20 hanno espresso interesse.



Enrico Zio

Investimenti privati per nuove tecnologie nucleari ~\$4B

lasar
Laboratory of Signal and Risk Analysis



- Design Type
- Molten Salt Reactor
 - Liquid Metal-cooled Fast Reactors
 - High Temperature Gas Reactor
 - Nuclear Battery
 - Designs Advanced Nuclear Fuels
 - Fusion
 - Super-Critical CO2 Reactor
 - Accelerator Driven System Project
 - Small Modular Reactor
 - Super-Critical Water-cooled Reactor

Più di 70 progetti nucleari avanzati in Nord America

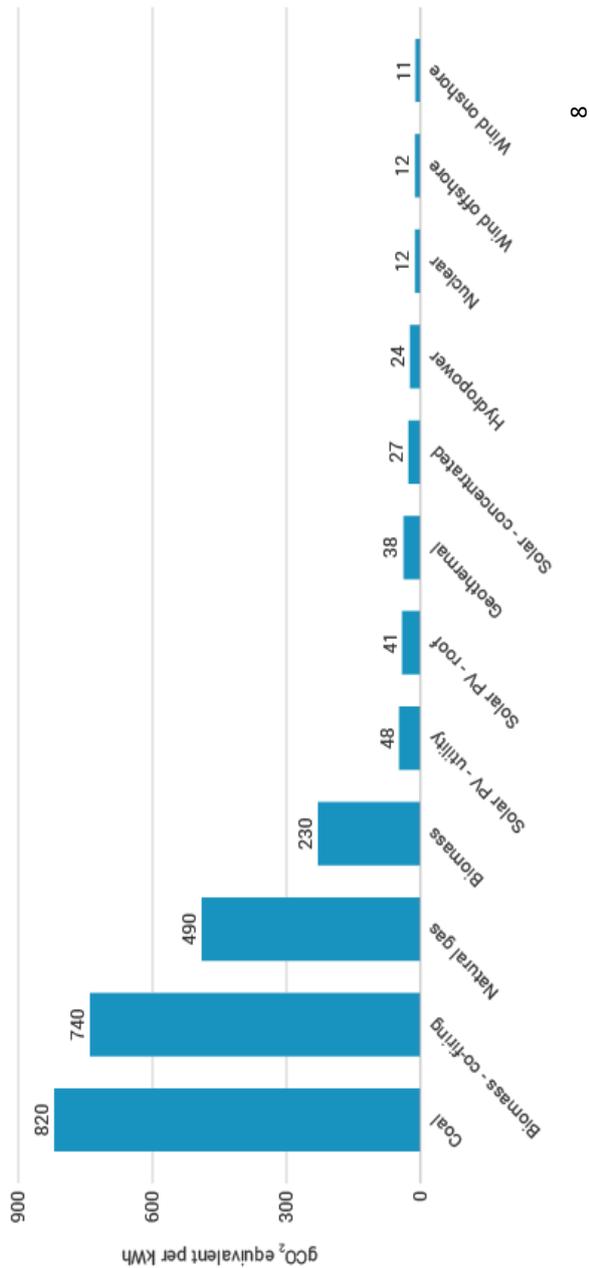
(con un'ampia gamma di reattori, capacità tecniche e sostegno finanziario)

Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

Decarbonizzazione

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



8

POLITECNICO MILANO 1863

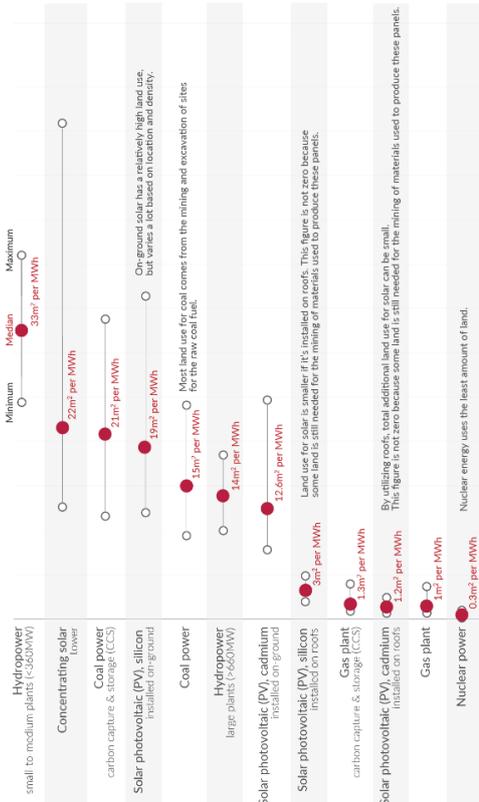
Enrico Zio

Utilizzo del suolo e Fattore di Carico

Land use of energy sources per unit of electricity

Our World in Data

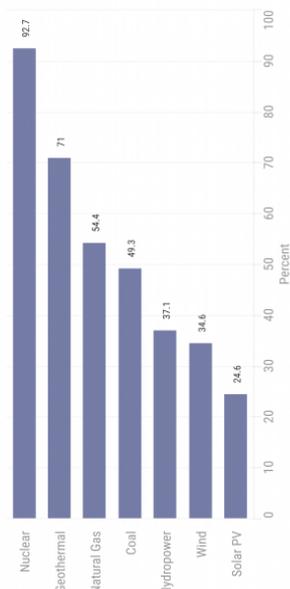
Land use is based on life-cycle assessments; this means it does not only account for the land of the energy plant itself but also land used for the mining of materials used for its construction, fuel inputs, decommissioning, and the handling of waste.



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. Source: UNECE (2021). Lifecycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe. All data except wind. Wind land use calculated by the author. See OurWorldInData.org/land-use-per-energy-source for more details on this topic.

*** Capacity factors are taken into account for each technology which allows for intermittency. Land use of energy storage is not included since the quantity of storage depends on the composition of the electricity mix. Source: OurWorldInData.org/land-use-per-energy-source for more details on this topic.

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.

lasar
Laboratory of Signal and Risk Analysis

Il problema

Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

Il problema: l'attuale business model

lasar

Laboratory of Signal and Risk Analysis



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

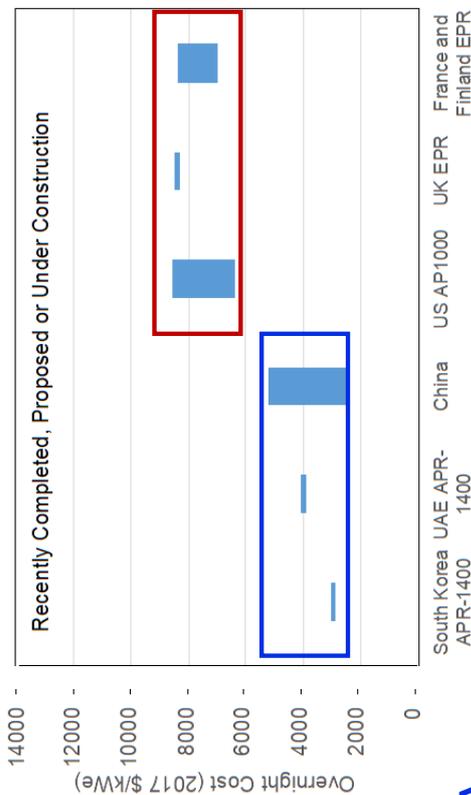


**SVILUPPO ECONOMICAMENTE PROBLEMATICO NEGLI
USA E IN EUROPA (NON IN ASIA)**

Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

Il problema: perché?



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

Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

lasar
Laboratory of Signal and Risk Analysis

Innovazioni tecniche

Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

Innovazioni tecniche

lasar

Laboratory of Signal and Risk Analysis

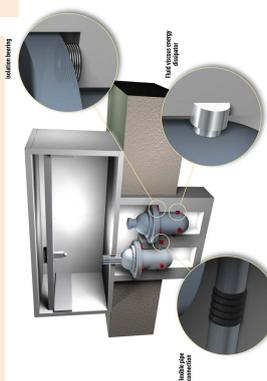
- Spostamento del lavoro dal cantiere alle fabbriche ⇒ riduzione dei costi di costruzione e dei costi indiretti
- Standardizzazione del design ⇒ riduzione dei costi di autorizzazione e di ingegneria + massimizzazione dell'apprendimento
- Riduzione dei tempi di costruzione ⇒ meno interessi durante la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

Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

lasar
Laboratory of Signal and Risk Analysis

Tipologie di reattore nucleare

Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

Tipologie di reattore nucleare: diverse dimensioni

lasar

Laboratory of Signal and Risk Analysis

Large Light Water Reactors (LWRs)

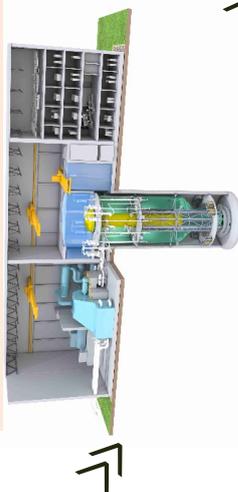


~1000-1600 MW_e

~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).

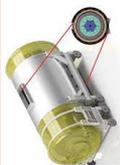
Potenza elettrica

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)

Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

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

lasar

Laboratory of Signal and Risk Analysis

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

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.

Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

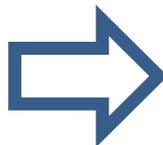
Tipologie di reattore nucleare: sicurezza

lasar
Laboratory of Signal and Risk Analysis



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.



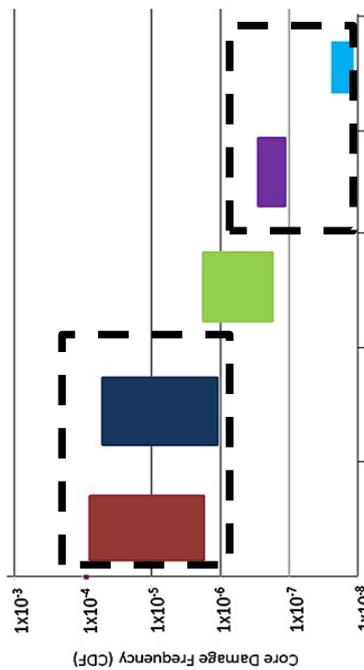
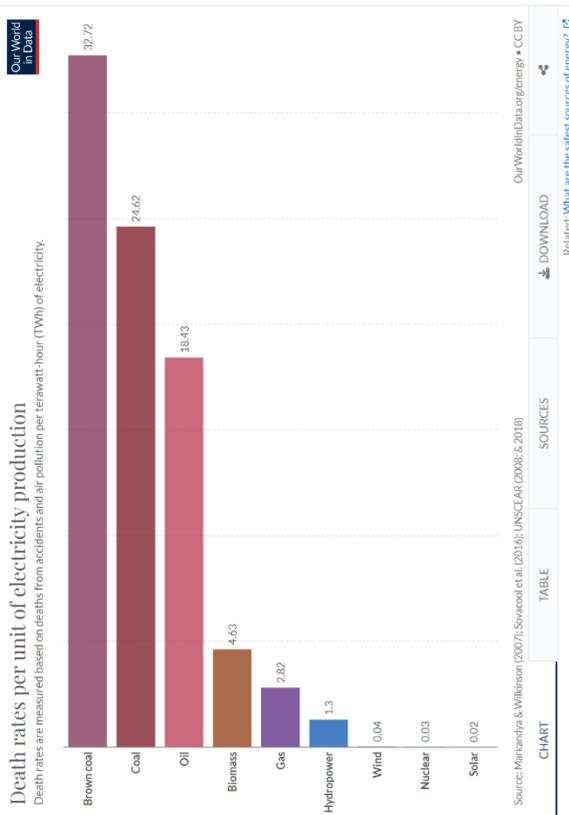
- Incidenti come TMI, Chernobyl e Fukushima sono eliminati da progetto;
- La zona d'emergenza è limitata al confine del sito (non è necessaria l'evacuazione);
- L'ottenimento delle autorizzazioni tramite test su scala per i microreattori diventa possibile (esempio del KRUSTY di NASA-LANL)

Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

Tipologie di reattore nucleare: sicurezza avanzata

Nucleare ancor piu' sicuro



lasar
Laboratory of Signal and Risk Analysis

Mercato nucleare

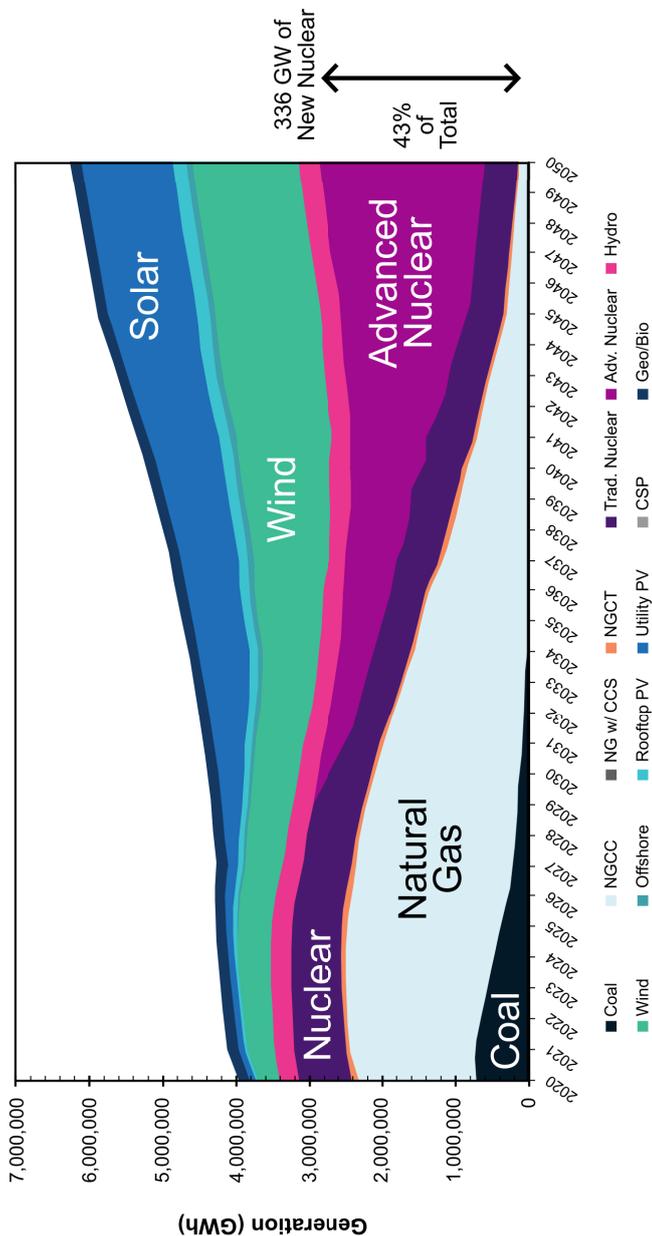
Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

Mercato nucleare: produzione di potenza



Laboratory of Signal and Risk Analysis



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

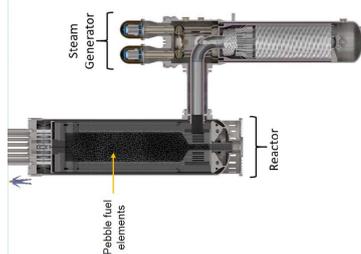
Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

Mercato nucleare: produzione di idrogeno e combustibili sintetici



Produzione centralizzata di idrogeno/combustibile su larga scala

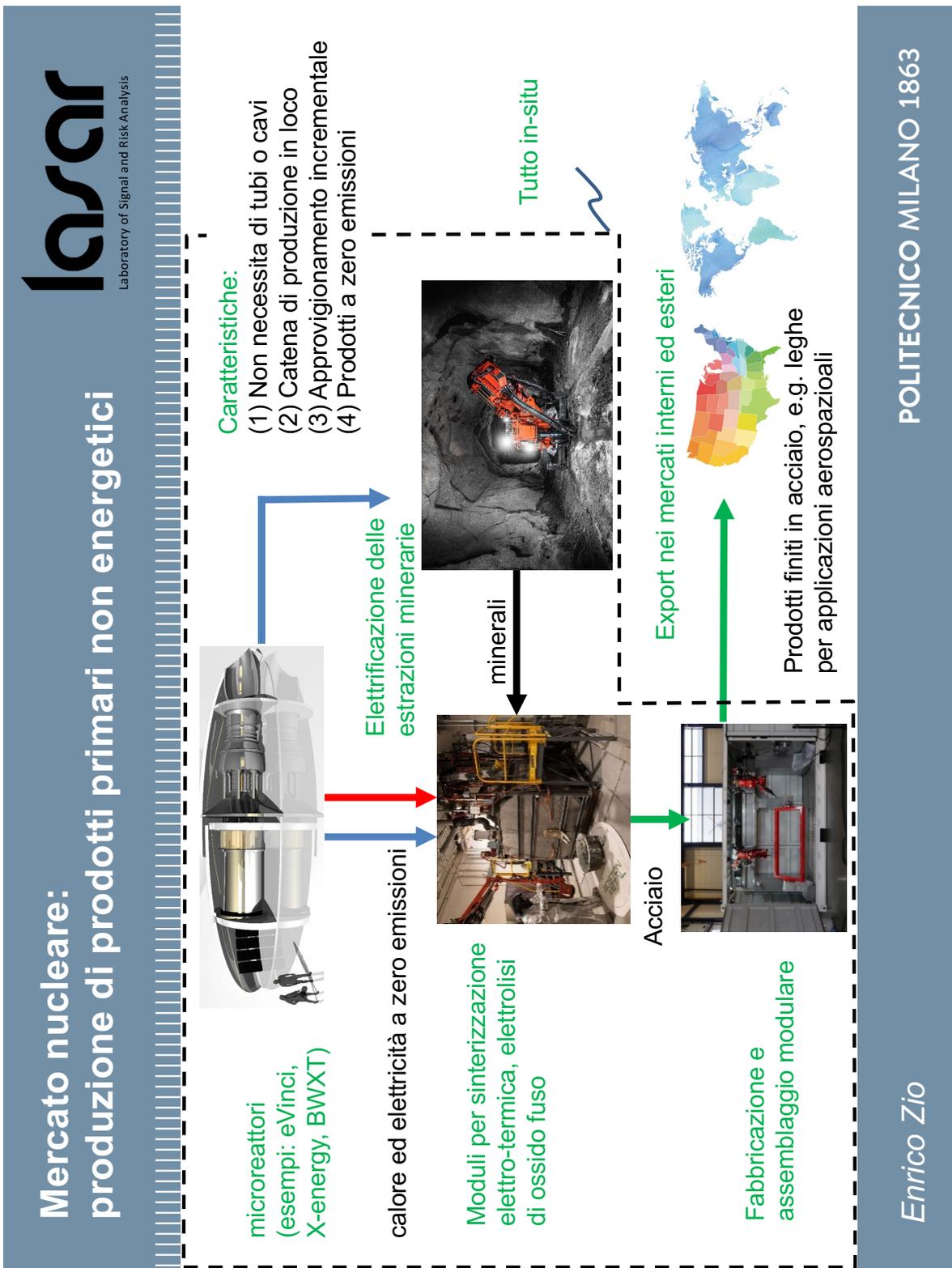


o collocata in prossimità
di utilizzatori industriali
di idrogeno



Enrico Zio

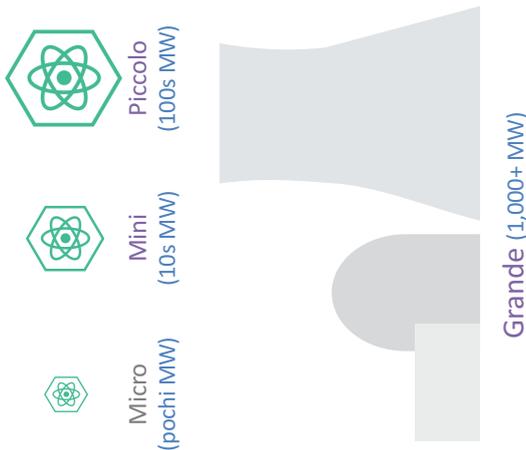
POLITECNICO MILANO 1863



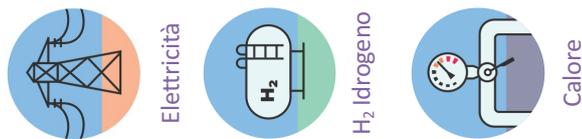
**Mercato nucleare:
versatilità di applicazioni**



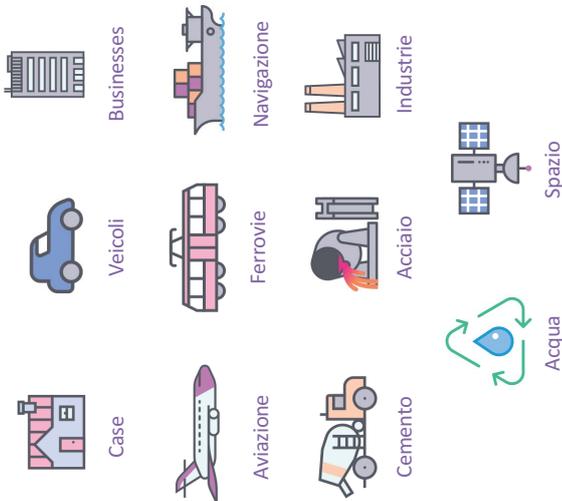
Spettro di dimensioni e opzioni



Varietà di output



Possibili diversi utilizzi



Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

lasar
Laboratory of Signal and Risk Analysis

**Da cosa succede a
cosa puo' succedere**

Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

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

lasar
Laboratory of Signal and Risk Analysis

- 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

Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

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

lasar

Laboratory of Signal and Risk Analysis

- 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.

Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

lasar
Laboratory of Signal and Risk Analysis

Conclusioni

Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

Conclusioni

lasar

Laboratory of Signal and Risk Analysis

- 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 può venire da piccoli reattori nucleari, più semplici e prodotti in serie, con processi veloci di test e autorizzazione
- SMR probabilmente avranno un costo maggiore (per unità di energia generata)
- Grandi potenzialità su altri mercati ("non-energetici) potrebbero esserci per i reattori avanzati, se si supereranno le difficoltà di autorizzazione, supply chain, costi
- Costi e rischi aumentano per progetti di reattore non raffreddati ad acqua

Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863

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

lasar
Laboratory of Signal and Risk Analysis

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.

Enrico Zio

POLITECNICO MILANO 1863



19STC0082950