

The logo for AWE (Atomic Weapons Establishment) is displayed. It features the word "AWE" in a bold, white, sans-serif font. The letter "A" is stylized with a horizontal bar that is orange on the left and red on the right. The letter "E" has a small red horizontal bar at its top right.

AWE

Luglio 2024

Le nuove prospettive dell'industria nucleare



AUTORI

Lisa Castiglioni

Federico Ciolfi

CURATORI

Riccardo Antonucci

Nathan Senise Volpe

SI RINGRAZIA

Alessia Sementilli





CHI SIAMO

AWARE è un Think Tank nato nell'**ottobre del 2019** che si pone l'obiettivo ultimo di contribuire alla definizione del futuro che verrà stimolando la **riflessione** e il **dibattito** sulle nuove sfide del mondo contemporaneo.

Per farlo sono stati individuati due macro argomenti che meglio rappresentano le chiavi per leggere e guidare il futuro del nostro pianeta:

- **l'evoluzione delle tecnologie e del settore digitale nelle sue declinazioni;**
- **lo sviluppo sostenibile,** basato su tre pilastri (sociale, economico ed ambientale).

INDICE

> Abstract	p. 1
> Introduzione	p. 2
Il nucleare nel Green Deal: opportunità per gli SMR	p. 2
Il nucleare e l'Italia: una nuova sensibilità	p. 4
> Fondamenti degli SMR	p. 5
Caratteristiche degli SMR	p. 5
Tipi di SMR	p. 5
Vantaggi degli SMR	p. 10
> Ostacoli e sfide	p. 12
Analisi sui costi di costruzione degli SMR	p. 12
Accettazione pubblica del nucleare in Italia	p. 19
> Transizione energetica	p. 19
Decarbonizzazione del sistema elettrico e ruolo del nucleare	p. 22
Ruolo degli SMR nella riduzione delle emissioni di carbonio	p. 26
> Case study	p. 29
Reattori LFR in Italia	p. 29
Lo sviluppo del reattore HTGR	p. 31
La lezione di NuScale	p. 33
> Conclusioni	p. 36
> Proposte di Policy	p. 39
Bibliografia e Sitografia	p. 41
Contatti	p. 59

ABSTRACT

Il presente studio esamina le potenzialità offerte dagli Small Modular Reactors (SMR) in un contesto di nuovo interesse da parte delle istituzioni comunitarie e dell'opinione pubblica italiana sul nucleare come fonte di energia elettrica a basse emissioni.

A seguito di un'analisi sulla tecnologia degli SMR, vengono riportate le caratteristiche operative principali e i relativi vantaggi offerti, anche attraverso una disamina di casi studio selezionati.

Infine, lo studio contiene delle proposte di policy per favorire un approccio proattivo del Paese alle potenzialità offerte dalla tecnologia nucleare e dagli SMR in particolare.



INTRODUZIONE

Il nucleare nel Green Deal: opportunità per gli SMR

I cambiamenti climatici e l'accelerato degrado ambientale rappresentano una minaccia senza precedenti per l'Europa e per il mondo intero. Per affrontare efficacemente queste sfide, l'Unione Europea ha delineato nel Green Deal del 2019 una roadmap per l'eliminazione delle emissioni nette di gas serra entro il 2050, stabilendo anche un obiettivo intermedio di riduzione delle emissioni nette di gas serra di almeno il 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990¹. In questo contesto, l'interesse per il nucleare e soprattutto verso nuove tecnologie come gli SMR (Small Modular Reactor) è cresciuto esponenzialmente negli ultimi anni². Fra le iniziative di rilievo vi è il Regolamento Delegato 2022/1214 della Commissione Europea, emanato nel 2022, che inserisce l'energia nucleare e il gas naturale all'interno della cosiddetta tassonomia volta a identificare gli investimenti sostenibili³. Inoltre, il 9 febbraio 2023 la Commissaria europea all'Energia Kadri Simson ha ufficialmente lanciato l'Alleanza Industriale UE sugli SMR con l'obiettivo di unire il settore tecnologico e le aziende energetiche per facilitare il percorso verso la decarbonizzazione.

Attualmente, in Europa ci sono circa 100 reattori nucleari attivi, con la Francia in testa con 56 reattori in funzione, seguita dalla Spagna (7), Repubblica Ceca e Svezia (6)⁴.

Partendo da questi numeri, l'Europa sta considerando la possibilità di costruire nuovi reattori utilizzando la tecnologia di IV generazione, la quale mostra notevoli miglioramenti rispetto al passato. Partendo da questi numeri, l'Europa sta considerando la possibilità di costruire nuovi reattori utilizzando la tecnologia di IV generazione, la quale mostra notevoli miglioramenti rispetto al passato in termini di efficienza e sicurezza. Tuttavia, il suo status di standard tecnologico emergente comporta ancora delle sfide relativamente ai materiali necessari, ai costi legati allo sviluppo delle infrastrutture e all'adozione di questo nuovo standard su vasta scala. I design di IV generazione possono essere usati per gli SMR: le loro applicazioni e caratteristiche saranno esaminate in seguito.

[1] Commissione Europea. (2024). Raccomandazione della Commissione su un obiettivo di riduzione delle emissioni per il 2040 per tracciare il percorso verso la neutralità climatica entro il 2050.

[2] Gli SMR sono i reattori modulari piccoli che sfruttano la tecnologia della IV generazione nucleare su scala ridotta, con molti vantaggi rispetto ai reattori tradizionali, tra cui una maggiore efficienza nell'utilizzo del combustibile, minor produzione di rifiuti tossici ed una maggiore competitività economica.

[3] Wired. (2022). "Alla fine la Commissione europea ha inserito gas e nucleare nell'elenco degli investimenti sostenibili".

[4] World Nuclear Association. (2024). Nuclear Power in the European Union

Il nucleare e l'Italia: una nuova sensibilità

L'Italia ha aggiornato il proprio Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima nel 2023, portando l'obiettivo di riduzione delle emissioni dei gas serra entro il 2030 dal -47% del PNIEC 2019 al -55%⁵. In Italia i combustibili fossili giocano un ruolo cruciale sia nella produzione di energia che nelle importazioni energetiche, ma questa dipendenza presenta almeno due questioni di rilevanza: in primo luogo, la notevole dipendenza da queste fonti energetiche rende estremamente difficile il conseguimento delle necessarie riduzioni delle emissioni di gas serra per affrontare il cambiamento climatico. In secondo luogo, vi sono preoccupazioni legate all'elevata quota di importazioni, comprese le sfide associate alla dipendenza da paesi politicamente instabili e l'impatto negativo sul saldo commerciale. Di conseguenza, vi è un crescente interesse a ridurre il consumo di combustibili fossili e a favorire fonti di energia a basse o nulle emissioni di gas serra, insieme a strategie di diversificazione o riduzione delle importazioni energetiche. Queste criticità possono essere superate aumentando la quota di energie rinnovabili e, possibilmente, valutando l'opzione dell'energia nucleare nella produzione di energia elettrica.

Attualmente, l'energia nucleare non fa parte del mix energetico italiano, a seguito dei referendum tenuti nel 1987 e nel 2011 che hanno sancito in maniera evidente il no della popolazione a questa fonte. Tuttavia, il Governo Meloni ha espresso in più sedi l'intento di reintrodurre in Italia l'utilizzo del nucleare soprattutto per soddisfare gli obiettivi di decarbonizzazione nello scenario al 2050⁶.

La nuova sensibilità nazionale per il nucleare fa emergere la questione dello smaltimento dei rifiuti radioattivi, dato che l'Italia non dispone ancora di una struttura di stoccaggio nazionale. Per l'Italia è fondamentale stabilire come i rifiuti saranno gestiti nel caso in cui si decida di costruire nuove centrali nucleari. Il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza energetica ha pubblicato, a inizio 2024, 51 aree idonee per ospitare il deposito nazionale dei rifiuti radioattivi⁷. L'individuazione di alcune aree, come le 21 ubicate nella Tuscia (Lazio), ha portato a manifestazioni di dissenso per scongiurare la costruzione nella zona di un deposito.

In sintesi, la questione dell'energia nucleare è estremamente complessa, con vantaggi e svantaggi da considerare, e rappresenterà sicuramente un argomento articolato di discussione per gli italiani nei prossimi mesi, mentre l'Europa osserva da vicino.

[5] Camera dei Deputati. (2023). Allegato al DEF 2023 - Relazione sullo stato di attuazione degli impegni per la riduzione delle emissioni di gas serra

<https://documenti.camera.it/Leg19/Dossier/Pdf/Am0022.Pdf>

[6] Enea Magazine, "Il nucleare italiano nel panorama internazionale ed europeo". Link: [Ibidem.](#)

[7] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. (2023). Nucleare, pubblicato l'elenco delle 51 aree idonee alla localizzazione del Deposito nazionale [Ibidem.](#)

FONDAMENTI DEGLI SMR

Caratteristiche degli SMR

Gli SMR costituiscono una categoria di reattori a fissione nucleare impiegati nella generazione di energia elettrica, ma differiscono dalle centrali nucleari convenzionali in quanto sono di dimensioni più contenute.

L'intero spettro delle innovazioni nucleari di nuova generazione sono anche chiamate "tecnologie nucleari avanzate", considerando gli SMR come una componente di queste tecnologie. Le Tecnologie Nucleari Avanzate possono essere generalmente suddivise in due categorie principali⁸:



Reattori modulari compatti di terza generazione

che utilizzano il raffreddamento ad acqua e sono simili alle centrali esistenti ma in scala ridotta;



Reattori modulari avanzati di quarta generazione e oltre

che sfruttano innovativi sistemi di raffreddamento o carburanti per introdurre nuove funzionalità e realizzare significative riduzioni dei costi operativi.

Per quanto riguarda il funzionamento degli SMR, essi sfruttano il principio della fissione nucleare per la produzione di energia. In questi reattori, la fissione nucleare comporta la divisione del nucleo atomico in nuclei più piccoli, con conseguente rilascio di calore e radiazioni. Questo calore viene quindi impiegato per generare elettricità attraverso la produzione di vapore, che alimenta una turbina.

Tipi di SMR

Gli SMR integrano le tecnologie del nucleare di IV generazione e possono essere suddivisi in sei tipologie in base al design scelto⁹. Di seguito forniamo una disamina di ciascuna di esse.

[8] ENEA. Il nucleare di nuova generazione

[9] World Nuclear Association. (2023). Are there different types of nuclear reactor?

Micoreactors (MRs)

I micoreattori, ossia reattori con una potenza media di 10 MW(e), adottano diverse opzioni di refrigerante, come acqua cosiddetta “leggera” (naturale), elio, sale fuso e metallo liquido. In alternativa, è possibile utilizzare come sistema di raffreddamento i tubi di calore per migrare il calore generato dal reattore all'esterno.¹⁰ I micoreattori non solo possono soddisfare esigenze specifiche di produzione di energia elettrica, ma hanno anche il potenziale per applicazioni come l'alimentazione di microreti e la fornitura di energia per aree remote non collegate alla rete, la pronta ripristinazione dell'energia in zone colpite da catastrofi naturali e la desalinizzazione dell'acqua di mare. La versatilità e le potenzialità di queste soluzioni contribuiscono alla diversificazione e alla sostenibilità dell'approvvigionamento energetico in contesti specifici.

[10] Utilizzati per migrare il calore generato dal reattore all'esterno

Land-based Water-cooled (PWRs)

Questi design sfruttano tecnologie mature già impiegate nella maggior parte dei reattori attualmente operativi. Attualmente, la maggioranza dei reattori in funzione è costituita dai reattori ad acqua pressurizzata (PWR), rappresentando circa il 61% del totale. Questi reattori possono essere classificati in due categorie principali: integrali, noti anche come "auto-pressurizzati", con generatori di vapore interni al recipiente, e modulari compatti.

I PWR integrali si distinguono dai PWR convenzionali poiché non sono dotati di pressurizzatori e generatori di vapore esterni. Al contrario, dispongono di uno spazio per il vapore sotto la cupola nella parte superiore del recipiente, che funge da pressurizzatore, mentre i generatori di vapore sono posizionati internamente allo stesso recipiente. Alcuni di questi progetti utilizzano la circolazione naturale del refrigerante primario in condizioni normali di funzionamento e non richiedono pompe primarie di ricircolo.

I PWR modulari compatti sono derivati dai progetti russi di reattori per propulsione navale e presentano maggiore somiglianza ai PWR convenzionali. Tuttavia, i moduli che ospitano il nocciolo, le parti interne, i generatori di vapore, il pressurizzatore e le pompe del refrigerante sono organizzati in modo compatto e collegati tra loro con tubi corti, dotati di dispositivi per la prevenzione delle perdite. Le tubazioni sono disposte in modo tale che il sistema di refrigerazione primario è praticamente esente dalla possibilità di perdite.

Sono attualmente in sviluppo 25 progetti di SMR raffreddati ad acqua, che comprendono diverse configurazioni delle tecnologie LWR (reattori ad acqua "leggera") e PHWR (reattori ad acqua "pesante" pressurizzata). Fra questi, la Central Argentina de Elementos Modulares (CAREM), un PWR integrale con circolazione naturale del refrigerante, è in costruzione in Argentina con l'obiettivo di raggiungere la piena operatività nel 2026. Un altro progetto di reattore a terra con tecnologia PWR integrale è l'ACP100, in costruzione in Cina e punta ad essere operativo commercialmente nel 2026.

High Temperature Gas-cooled (HTGRs)

Gli SMR appartenenti a questa categoria possono fornire calore a temperature molto elevate, superando i 750°C. Tale caratteristica rende possibile per questi reattori la generazione di energia elettrica in modo altamente efficiente. Questi SMR possono essere impiegati anche in numerose applicazioni industriali e nella cogenerazione. Una pubblicazione dell'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA) ha descritto 14 SMR che utilizzano la tecnologia HTGR (Reattore a Gas ad Alta Temperatura), tra cui il progetto HTR-PM in Cina, che è stato collegato alla rete nel dicembre 2021. In questa categoria rientrano anche tre reattori di prova, due dei quali sono in fase di test da oltre vent'anni in Giappone e in Cina, rispettivamente.

La diversificazione delle applicazioni, estendendosi anche al settore industriale e alla cogenerazione, evidenzia il potenziale di queste tecnologie nel contribuire a una fornitura energetica sostenibile e versatile. Inoltre, la presenza di reattori di prova in funzione a lungo termine in Giappone e in Cina sottolinea l'interesse continuo e la fiducia nella stabilità e nell'affidabilità di questa categoria di reattori nucleari.

Marine-Based Water-cooled (PWRs)

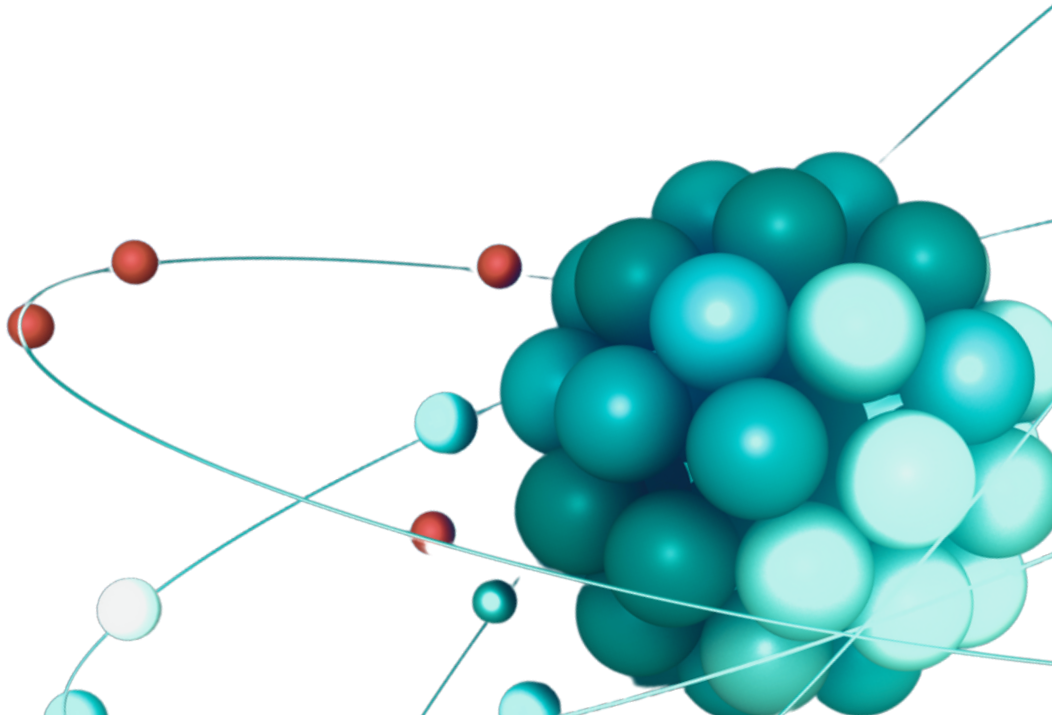
In questa categoria sono inclusi progetti di reattori nucleari modulari di piccola scala destinati all'impiego in ambienti marini. Ciò può essere realizzato attraverso l'installazione di unità galleggianti su chiatte o navi. Questa categoria offre molteplici opzioni flessibili per il dispiegamento di SMR in ambienti marini, in quanto l'utilizzo di unità galleggianti su barche o navi consente la mobilità e l'accesso a diverse aree, inclusi luoghi remoti o difficilmente raggiungibili. In particolare, l'impiego di SMR raffreddati ad acqua su navi rompighiaccio rappresenta un'applicazione specializzata di questa tecnologia, indicando la flessibilità e l'adattabilità dei progetti di SMR alle esigenze specifiche di contesti marini.

Molten Salt-cooled (MSRs)

Gli SMR inclusi in questa categoria, basati sulla tecnologia dei reattori a sale fuso, sfruttano le proprietà uniche di questo tipo di refrigerante per ridurre la pressione del refrigerante e consentire un ciclo di combustibile più flessibile.

Liquid metal-cooled fast neutron spectrum (LMFRs)

La scelta di adottare la tecnologia dei neutroni veloci e refrigeranti a metallo liquido rappresenta una direzione innovativa nel campo della generazione nucleare, in quanto l'utilizzo di refrigeranti come il sodio, il piombo puro e l'eutettico piombo-bismuto introduce vantaggi significativi in termini di efficienza e sicurezza dei reattori.



Vantaggi degli SMR

Gli SMR vengono prefabbricati lontano dal sito di installazione e poi trasportati per l'assemblaggio finale, una pratica che comporta una serie di vantaggi tra cui:

- 1 Riduzione dei costi di costruzione:** gli SMR vengono prefabbricati e trasportati sul sito di installazione per l'assemblaggio finale. L'approccio consente di standardizzare i componenti, semplificando il processo di assemblaggio e riducendo al minimo i tempi di costruzione se comparati ai reattori nucleari di maggiori dimensioni, spesso soggetti a complesse progettazioni personalizzate per specifiche località, con la conseguenza di ritardi significativi nella realizzazione stessa.
- 2 Collocazione agevole:** grazie alle loro dimensioni contenute, gli SMR hanno la capacità di essere collocati in siti che in circostanze normali non potrebbero accogliere centrali nucleari più imponenti.
- 3 Maggiore sicurezza:** controllo qualità più rigoroso all'interno delle strutture di fabbricazione che riduce il rischio di errori umani e il rischio di incidenti durante la costruzione sul sito.
- 4 Aumento dell'efficienza del sistema di contenimento,** grazie alla compattezza e alla modularità degli SMR rispetto ai reattori tradizionali.

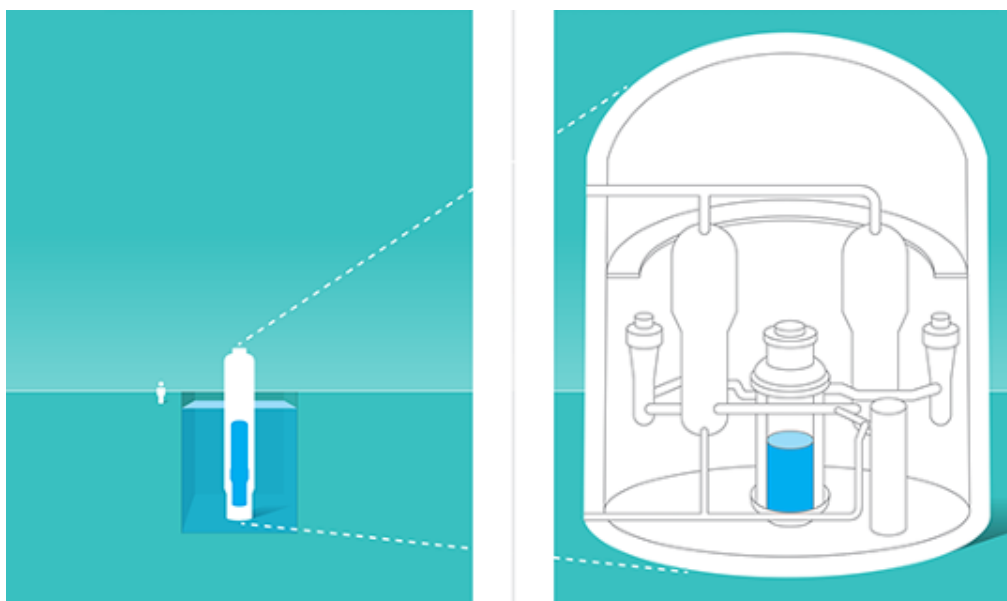


Figura 1: Dimensioni dell'edificio di contenimento degli SMR vs edificio di contenimento di una centrale nucleare tradizionale; Fonte: ansto.gov.au

Per questi motivi gli SMR sono considerati una soluzione preferibile per superare le **barriere economiche** che talvolta ostacolano la realizzazione delle centrali nucleari tradizionali e rappresentano un'alternativa pulita e a zero emissioni di carbonio rispetto ai combustibili fossili.

Un esempio di ostacolo è la scarsa capacità della rete di distribuzione, riscontrabile in alcuni contesti e che può essere superato dagli SMR integrandoli nelle reti preesistenti o operare autonomamente, funzionando in modalità "fuori rete", grazie alla loro ridotta produzione di energia elettrica rispetto ad una centrale nucleare tradizionale. A questo scopo si prestano particolarmente i **microreattori**, i quali si rivelano particolarmente idonei per aree in cui è difficile accedere a fonti di energia pulita, affidabile ed economica. Inoltre, i microreattori possono agire come fornitori di energia di backup in situazioni d'emergenza o rimpiazzare generatori di energia spesso alimentati a diesel in comunità rurali o imprese remote.

Le proposte riguardanti gli SMR sono, in generale, caratterizzate da progetti semplificati rispetto ai reattori già esistenti, con un orientamento verso sistemi passivi ossia **meccanismi che in automatico,**

senza intervento umano o utilizzo di energia, permettono il funzionamento del reattore.

In questo modo, qualora si verifichi un'emergenza non vi è alcun bisogno di intervento umano o azioni esterne per disattivare i sistemi e i rischi di rilasci pericolosi di radioattività nell'ambiente sono pressoché nulli.

Inoltre, gli SMR richiedono quantità di combustibile notevolmente inferiori. Le centrali elettriche basate su SMR sono in grado di operare per periodi prolungati senza necessità di rifornimenti, con intervalli che variano da 3 a 7 anni, a differenza delle centrali convenzionali che richiedono rifornimenti annuali o biennali. Alcuni SMR sono addirittura progettati per funzionare **fino a 30 anni senza alcuna necessità di rifornimenti**¹¹.

Sotto il profilo economico, attualmente gli SMR presentano costi inferiori rispetto ai reattori tradizionali, e questa dinamica è destinata a evolvere con l'espansione del mercato degli SMR e la standardizzazione dell'industria attraverso la produzione di scala. Invece di realizzare singoli reattori di grandi dimensioni, la produzione di SMR dovrebbe avvenire in lotti **riducendo i costi di produzione.**

[11] International Atomic Energy Agency (IAEA). (2023). What are Small Modular Reactors (SMRs)?

OSTACOLI E SFIDE

Analisi sui costi di costruzione degli SMR

L'analisi economica presentata offre un quadro dettagliato dei principali SMR attualmente in fase di sviluppo a livello mondiale. Attraverso la valutazione dei costi di costruzione e dei rendimenti previsti, l'obiettivo è fornire una panoramica esaustiva delle implicazioni economiche associate a queste tecnologie nucleari di prossima generazione.

La valutazione si basa su dati pubblicati dall'ARIS¹² nel 2020, che comprende informazioni dettagliate sui costi di costruzione degli SMR e sulla generazione elettrica prevista. Mediante un'analisi quantitativa è stato possibile identificare i trend e le sfide principali che caratterizzano l'attuale panorama degli SMR. Inoltre, l'analisi considera sia progetti completati (come il KLT-40S russo e l'HTR-PM) che in fase di sviluppo in modo da fornire una visione complessiva ed accurata.

I dati raccolti includono informazioni sui costi di costruzione degli SMR, espressi in dollari per megawatt (USD/MW), ed i costi totali del progetto sono stati stimati moltiplicando i costi di costruzione per la potenza elettrica prevista (MWe).

Project	Country	Design	# Fuel assembly	Thermal Output MW (t)	Electrical Output MW(e)	Reactor's height	Reactor's diameter	Construction Cost (USD/MW)	Total Cost (Estimated)
CAREM	Argentina	Land-based Water-cooled	61	100	30	11	3,2	\$ 23.187.000	\$ 695.610.000
ACP100	China	Land-based Water-cooled	57	385	125	10	3,35	\$ 5.000.000	\$ 625.000.000
SMART	Republic of Korea	Land-based Water-cooled	57	365	107	18,5	6,5	\$ 10.187.000	\$ 1.090.009.000
UK-SMR	United Kingdom	Land-based Water-cooled	121	1276	443	11,3	4,5	\$ 5.216.000	\$ 2.310.688.000
BWRX-300	USA and Japan	Land-based Water-cooled	240	870	280	26	4	\$ 2.250.000	\$ 630.000.000
KLT40S	Russian Federation	Marine-Based Water-cooled	121	150	35	4,8	2	\$ 13.531.000	\$ 473.585.000
ACPR50S	China	Marine-Based Water-cooled	37	200	50	7,2	2,2	\$ 8.532.000	\$ 426.600.000
RITM-200M	Russian Federation	Marine-Based Water-cooled	241	175	50	8,6	3,45	\$ 4.212.000	\$ 210.600.000
HTR-PM	China	High Temperature Gas-cooled		500	210	25	5,7	\$ 5.400.000	\$ 1.134.000.000
PBMR-400	South Africa	High Temperature Gas-cooled		400	165	30	6,2	\$ 1.550.000	\$ 255.750.000
Xe-100	United States of America	High Temperature Gas-cooled		200	82,5	16,4	4,88		\$ 2.400.000.000
BREST-OD-300	Russian Federation	Liquid metal-cooled fast neutron spectrum	169	700	300	17,5	26	\$ 4.160.000	\$ 1.248.000.000
4S	Japan	Liquid metal-cooled fast neutron spectrum	18	30	10	24	3,5	\$ 2.500.000	\$ 25.000.000
ARC-100	United States	Liquid metal-cooled fast neutron spectrum	99	286	100	15,6	7,6	\$ 5.050.000	\$ 505.000.000
Integral MSR	Canada	Molten Salt-cooled		440	195	10	3,67	\$ 4.054.000	\$ 790.530.000
ThorCon	Indonesia	Molten Salt-cooled		557	250	10,3	7,8	\$ 900.000	\$ 225.000.000
FUJI	Japan	Molten Salt-cooled		450	200	5,4	5,34	\$ 1.900.000	\$ 380.000.000
e-Vinci	United States	Microreactor	9	N/A	5			\$ 5.771.000	\$ 28.855.000
U-Battery	United Kingdom	Microreactor	10	N/A	N/A			\$ -	\$ 90.500.000
Aurora	United States	Microreactor	4	680	685			\$ 14.599	\$ 10.000.000

Figura 2: Dati sugli SMR attualmente in fase di sviluppo e completati secondo i dati ARIS; Fonte: Tabella originale AWARE, fonte dati ARIS

[12] IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). (2020). Advances in Small Modular Reactor Technology Developments

Il MWe è uguale alla potenza termica generata moltiplicata per l'efficienza del reattore, che varia a seconda della tipologia. Di seguito, una panoramica calcolata sui reattori attualmente a disposizione:

- Marine-based Water-cooled: efficienza media del 25,6%, varia tra il 23,3% e 28%.
- Land-based Water-cooled: efficienza media del 31,7%, varia tra il 29,3% e 34,71%.
- Liquid metal-cooled fast neutron spectrum: efficienza media del 37%, varia tra il 42,85% e 33,33%.
- Microreactor: Dati non disponibili per tutti i reattori. Alcune ricerche suggeriscono un'efficienza termica vicina al 40%.¹³
- High Temperature Gas-cooled: efficienza media del 41,5%, stabile per tutti i reattori.
- Molten Salt-cooled: efficienza media del 44,5%, stabile per tutti i reattori.

Pertanto, la tipologia di reattore con la conversione di potenza più efficiente è il reattore a sale fuso.

La maggiore efficienza è direttamente proporzionale al costo di costruzione, in quanto ci sono diversi fattori da tenere in considerazione: il seguente grafico raffigura il rapporto tra costo totale di costruzione e la potenza del reattore, clusterizzando i diversi progetti all'interno dei loro rispettivi design.

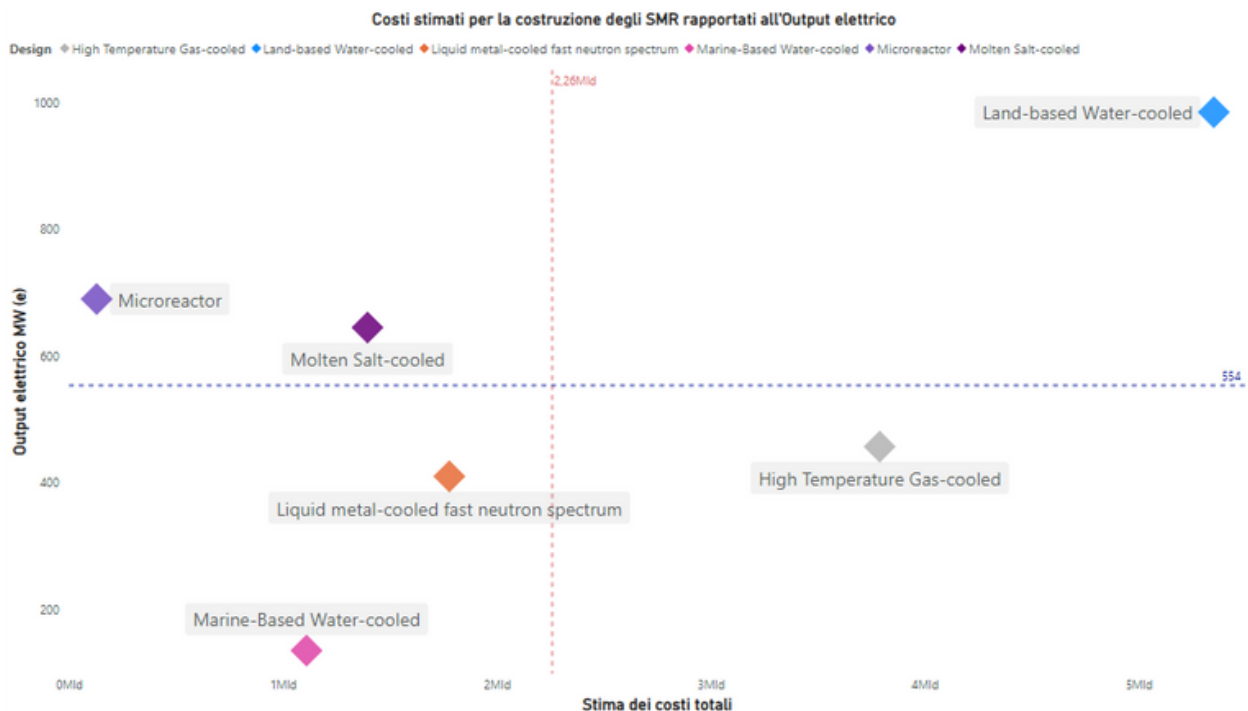


Figura 3: Costi stimati per la costruzione degli SMR rapportati all'Output elettrico; Fonte: Grafico originale AWARE, fonte dati ARIS

[13] T. Feia, K. Moa, Y. Miaoa, C. Forsythb, R. Hua, S. Bhattachayaa, T. Kim, "Conceptual Core Design of The Molten Metal Fueled Microreactor with Self-Regulating Capability". Argonne National Laboratory, University of California at Berkeley.

Nel quadrante in alto a sinistra si trovano i design che hanno la miglior combinazione di costo (minore della media della popolazione: \$2,26 Mld) e di Output (superiore alla media della popolazione: 554 MW(e)), in particolare i microreactors ed i Molten-Salt cooled SMR.

I progetti di Land-based water cooled si differenziano rispetto al resto della popolazione per Output prodotto e costi sostenuti.

La rappresentazione varia poco se si considera l'Output termico degli SMR, il quale informazioni chiave sulla capacità del reattore di produrre energia termica, che può poi essere convertita in energia elettrica o utilizzata per altri scopi, come il riscaldamento o la desalinizzazione dell'acqua.

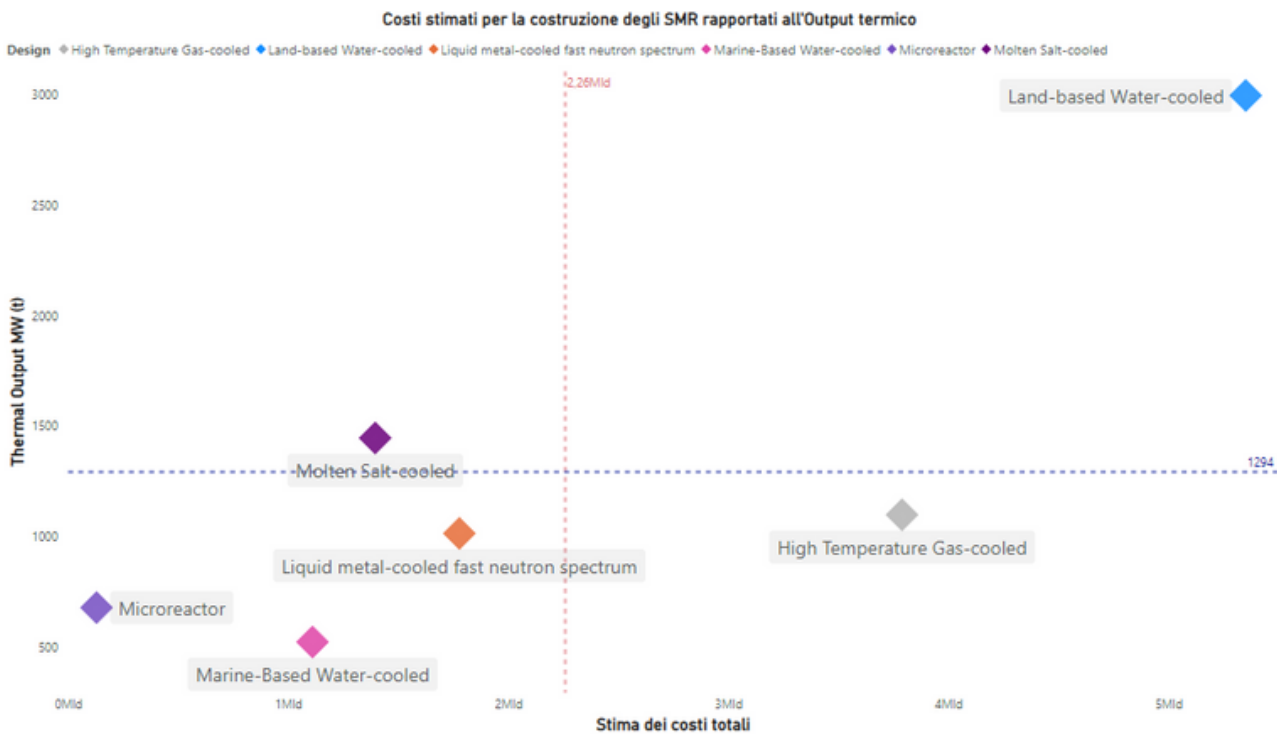


Figura 4: Costi stimati per la costruzione degli SMR rapportati all'Output termico; Fonte: Grafico originale AWARE, fonte dati ARIS

In questo scenario, i microreactors scendono al quadrante inferiore in quanto la dimensione di questi reattori non garantisce un alto output termico.

Per valutare le dimensioni dei reattori, disponendo delle misurazioni di altezza e diametro per ciascun progetto, è stato utilizzato un metodo di approssimazione considerando il reattore come un cilindro ($V = \pi \cdot r^2 \cdot h$). Questo approccio ha permesso di calcolare il volume del reattore e rapportarlo ai costi appena rappresentati.

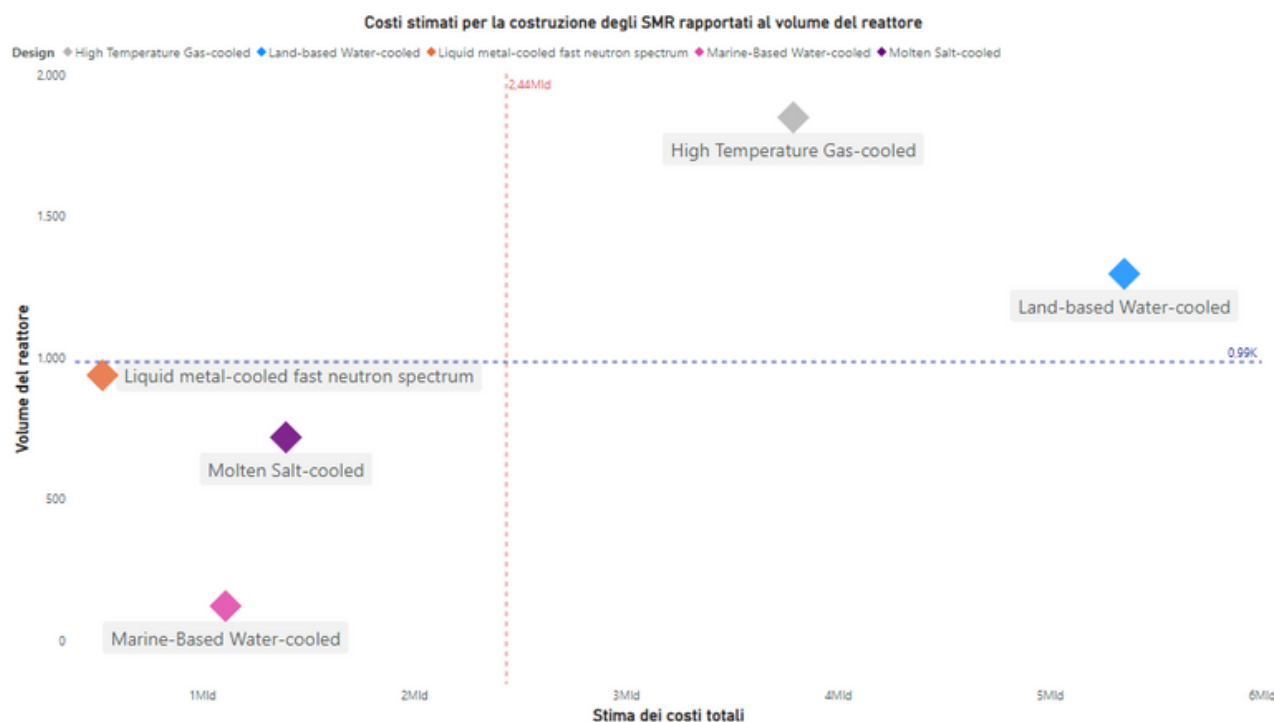


Figura 5: Costi stimati per la costruzione degli SMR rapportati al volume del reattore; Fonte: Grafico originale AWARE, fonte dati ARIS

Da quest'analisi si evince che, prendendo come riferimento l'Output elettrico dei progetti, **il costo e l'efficienza degli SMR non sono direttamente correlati alle dimensioni del reattore.**

In particolare, il design High temperature gas-cooled, con una media di 1893 m³, è il più grande rispetto alla popolazione analizzata ma si posiziona come quarto design per Output di elettricità.

I reattori Land-based water cooled sono i più costosi ed i più efficienti per Output elettrico e termico prodotto. Conseguentemente, sono tra gli SMR più grandi con un volume medio di 1296 m³.

L'efficienza di questi reattori dipende anche da come viene assemblato il combustibile (vedi colonna "fuel assembly").

Questi assemblaggi sono costituiti da una serie di elementi combustibili, che possono essere sotto forma di barre o pastiglie, contenenti il materiale nucleare, solitamente uranio arricchito o plutonio, che sostiene la reazione a catena nucleare all'interno del reattore.

Gli assemblaggi del combustibile vengono disposti in maniera ordinata e precisa all'interno del nucleo del reattore, dove vengono sottoposti all'irraggiamento neutronico. Durante il processo di fissione nucleare, gli atomi di combustibile all'interno degli assemblaggi rilasciano energia sotto forma di calore, che viene utilizzato per generare vapore e alimentare una turbina collegata a un generatore per produrre elettricità.

La loro disposizione e il loro design devono essere attentamente progettati per garantire una distribuzione uniforme del calore e dei neutroni all'interno del nucleo del reattore, al fine di evitare surriscaldamenti o instabilità nel processo di fissione nucleare.

Inoltre, gli assemblaggi del combustibile devono essere progettati per resistere alle alte temperature e alle radiazioni presenti all'interno del nucleo del reattore durante il funzionamento. **La durata e l'efficienza del combustibile sono fattori critici per la sicurezza e l'economia del reattore, e gli assemblaggi del combustibile vengono periodicamente sostituiti durante la manutenzione e il ricaricamento del reattore.**

Da notare che il numero di fuel assembly in un SMR (Small Modular Reactor) non è direttamente correlato alla qualità o all'efficacia del reattore stesso, ma un numero eccessivo di fuel assembly può aumentare la complessità della progettazione ed i costi di manutenzione del reattore, senza necessariamente portare a vantaggi significativi in termini di prestazioni.

Il seguente grafico conferma che alcuni progetti presentano numerosi fuel assembly, senza però avere una spinta di output in più: il reattore russo RITM-200M ha 241 fuel assembly, più del doppio di un altro reattore Marine-Based Water-cooled come il KLT40S e più di sei volte del ACPR50S, senza avere significativi vantaggi a livello prestazionale (50 MW(e)).

Anche il reattore BWRX-300 presenta quasi lo stesso numero di fuel assembly del RITM-200M, senza incorrere in costi eccessivi rispetto alla popolazione analizzata. Tuttavia, anche questo reattore risulta fuori scala rispetto agli altri reattori della categoria (come UK-SMR, SMART e CAREM). Il reattore UK-SMR infatti risulta superiore in termini di output, seppur costando più del triplo del BWRX-300.

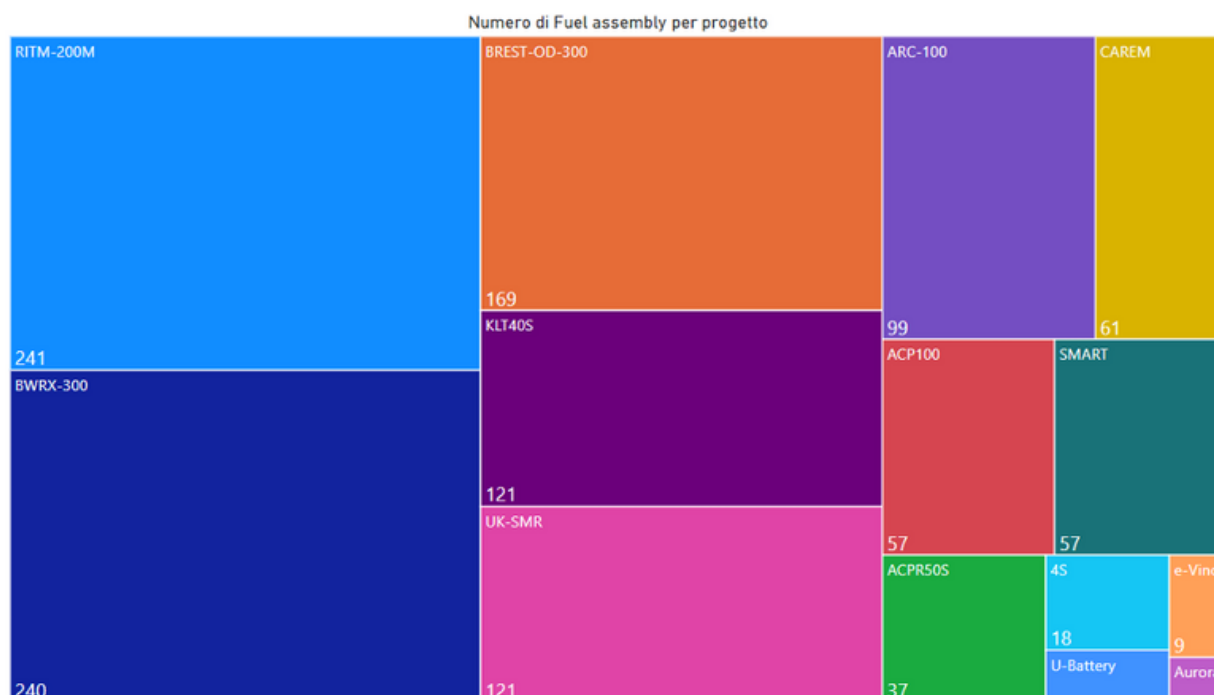


Figura 6: Numero di fuel assembly (assiemi, fasci o barre di combustibile) utilizzate per progetto; Fonte: Grafico originale AWARE, fonte dati ARIS

Di seguito, la tabella con alcuni reattori di generazione III+ e IV costruiti recentemente ad eccezione del reattore francese Superphénix che è stato decommissionato nel 1998 e rimane ad oggi il più grande reattore autofertilizzante mai costruito.¹⁴

Project	Design	Reactor type	Investment cost (USD/MWe)	Capacity (MWe)	Total Cost (Estimated)
Vogtle-3	Land based	PWR	\$ 8.600.000	1117	\$ 9.606.200.000
Superphénix	Sodium fast reactor	SFR	\$ 27.747.200	1250	\$ 34.684.000.000
Clinton-1	Boiling Water Reactor	BWR	\$ 9.722.604	935	\$ 9.090.634.740
Fort St. Vrain	High temperature gas reactor	HTGR	\$ 7.197.750	200	\$ 1.439.550.000

Figura 7: Caratteristiche di recenti reattori di Gen III e IV; Fonte: Tabella originale AWARE, dati di Björn Steigerwald, Jens Weibezahn, Martin Slowik, Christian von Hirschhausen. (2023). *Uncertainties in Estimating Production Costs of Future Nuclear Technologies*

Comparando questi reattori con gli SMR analizzati prima, a parità di design e tipologia di reattore, emergono i seguenti risultati:

- Il reattore georgiano Vogtle-3 può essere comparato con l'SMR russo KLT40S. Un fattore da tenere in considerazione è che dal 2009 le stime dei costi di costruzione del Vogtle-3 sono aumentate di \$14 Mld[i]. Con i dati attuali, il costo per MWe generato si assesterebbe sui \$21 Mln, contro i \$13,5 Mln del KLT40S.
- Il reattore americano Clinton-1 e l'SMR BWRX-300 sono entrambi dei Boiling Water Reactor. Il costo per MWe generato anche qui risulta essere più basso per gli SMR, con una differenza di circa \$7,5 Mln per MWe prodotto.
- Riguardo il Fort St. Vrain, la tipologia di reattore è assimilabile allo SMR cinese HTR-PM. Il costo per MWe non differisce di molto (solo \$1,7k circa) e in quanto a costi totali di costruzione l'HTR-PM risulta più economico per più di \$300 Mln, nonostante abbia una capacità superiore di 10 MWe rispetto al Fort St. Vrain.

[14] Björn Steigerwald, Jens Weibezahn, Martin Slowik, Christian von Hirschhausen. (2023). *Uncertainties in Estimating Production Costs of Future Nuclear Technologies*

Per ultimo abbiamo il reattore francese Superphénix che veniva alimentato a Sodio, come lo SMR americano ARC-100 che diventerà operativo nel 2029. Considerando i costi di costruzione, il reattore francese è un outsider rispetto alla popolazione analizzata ed è uno dei reattori più costosi mai costruiti, arrivando a costare circa \$22Mln in più per MWe prodotto rispetto al progetto ARC-100.

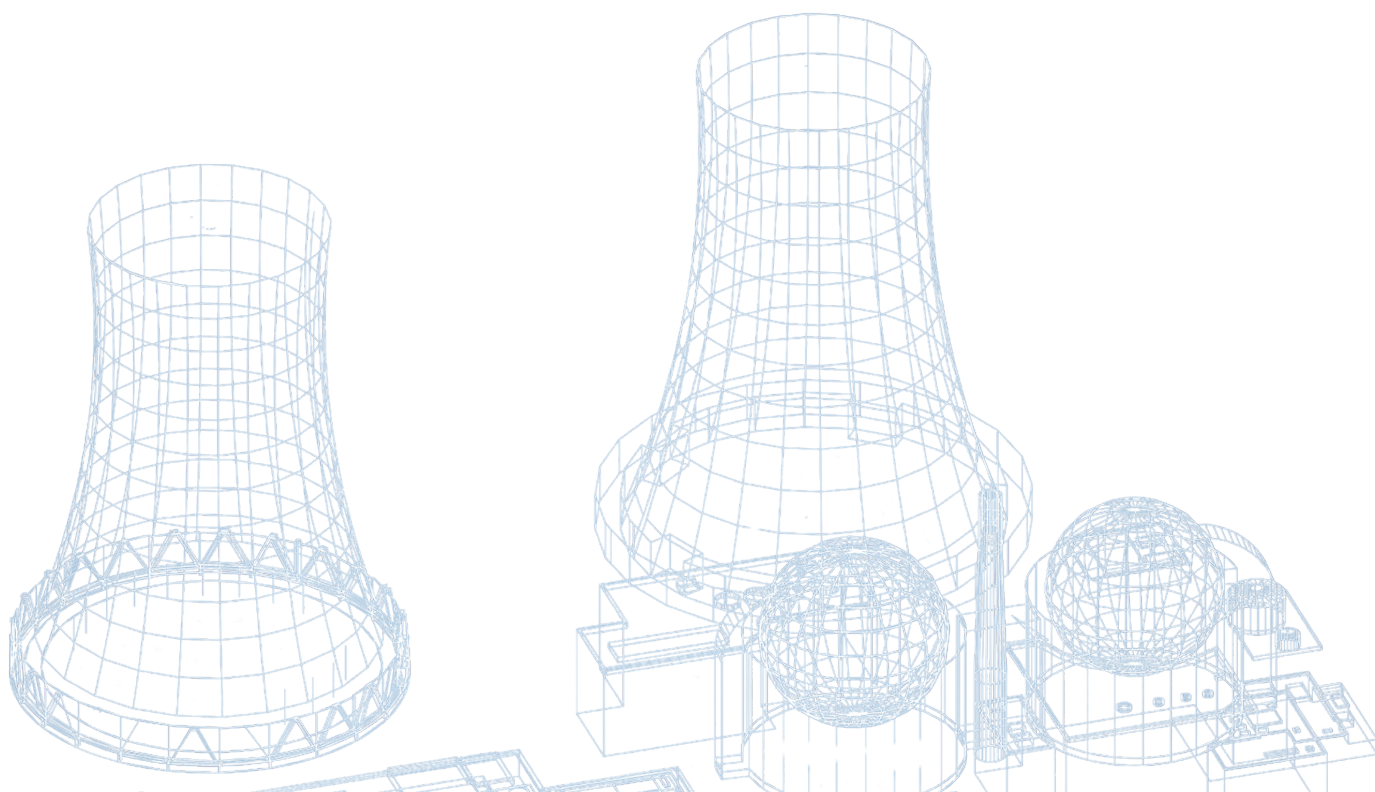
In conclusione, l'analisi comparativa dei costi di costruzione e dei costi per MWe generato evidenzia diverse considerazioni interessanti sui reattori nucleari esaminati, suggerendo che **gli SMR offrono un'eccellente opportunità per ridurre i costi di costruzione e di gestione degli impianti nucleari, mantenendo allo stesso tempo elevati standard di sicurezza e prestazioni.** Infatti, il costo di costruzione di un SMR rispetto ad un reattore di generazione III+ o IV in media è inferiore del 54,9%.

Conclusioni

La competitività economica degli SMR rispetto ad altre forme di generazione di energia e calore a basse emissioni sarà cruciale per la diffusione su larga scala della tecnologia. Tuttavia, l'evoluzione dei costi è incerta e gli SMR attuali presentano una vasta gamma di stime di costo.

Storicamente, l'economia di scala ha portato a un aumento delle dimensioni dei reattori, ma per gli SMR si prevede un approccio di costruzione in serie per ridurre i costi.

I risultati dell'analisi sono incoraggianti e rilevano un vantaggio economico rispetto ai reattori tradizionali. Questa nuova tipologia di reattori potrebbe segnare una nuova era per lo sviluppo e adozione del nucleare a livello globale.



Accettazione pubblica del nucleare in Italia

Le opinioni pubbliche sull'energia nucleare sono spesso soggette a significative fluttuazioni, influenzate da eventi rilevanti e da variabili socioeconomiche. Questo fenomeno si è manifestato in modo evidente dopo eventi come l'incidente di Chernobyl e il disastro di Fukushima Daiichi, che hanno portato a una diminuzione del sostegno all'energia nucleare in molti paesi.

Tuttavia, il quadro non è uniforme in tutto il mondo: mentre alcuni paesi hanno visto un indebolimento della fiducia nell'energia nucleare, altri hanno assistito a un rafforzamento del sostegno.

Secondo Win-Gallup International, a livello mondiale si è osservato un incremento sostanziale del 11% nel numero di individui che si oppongono all'energia nucleare, passando dal 32% precedente alla catastrofe al 43% attuale.¹⁵

In Europa, le differenze di opinione possono essere attribuite a fattori culturali e alle priorità relative alla sicurezza energetica e al cambiamento climatico. In Finlandia, dove è stato costruito un sito di stoccaggio per i rifiuti nucleari ad alto livello, il 60% delle persone intervistate sosteneva l'energia nucleare in un sondaggio del 2022, mentre il 11% si opponeva¹⁶. Anche in Francia, dove la maggior parte dell'energia è di origine nucleare, c'è un forte sostegno pubblico a questa forma di energia. Il caso della Germania è diverso: nel 2011, dopo l'incidente di Fukushima, il governo ha deciso di chiudere alcune centrali nucleari, e la maggior parte della popolazione ha appoggiato questa decisione.

[15] World Nuclear News. (2011). Coordinated US industry response to Fukushima

[16] World Nuclear Association. (2024). Nuclear Power in Finland



La situazione in Italia è stata censita nel 2011 con un sondaggio che ha coinvolto 1.000 persone. Rispetto ai sondaggi effettuati precedentemente all'evento di Fukushima, la percentuale di individui contrari all'energia nucleare è aumentata al 75% (+4%), mentre coloro favorevoli sono scesi al 24% (-4%), con un residuo 1% di indecisi. Inoltre, secondo Win-Gallup, oltre alle opinioni sulla produzione nucleare interna, gli italiani esprimono preoccupazione per il "rischio prossimità": il 60% degli intervistati si definisce molto preoccupato riguardo l'eventualità di un incidente nucleare causato da un paese confinante all'Italia. Questo timore è alimentato dalla percezione della sicurezza delle centrali nucleari situate nei paesi confinanti. Infatti, quando interrogati sull'effettiva sicurezza delle centrali vicine all'Italia, il 51% degli intervistati si dichiara in disaccordo rispetto alla loro sicurezza, mentre solo il 23% crede che tali impianti siano adeguatamente protetti dal rischio di incidenti.

Analizzando altre nazioni si rileva che in un contesto dove la popolazione è più informata sui benefici ed i rischi del nucleare si manifesti un'accettazione diffusa e meno dissenso verso iniziative volte alla costruzione di nuove centrali nucleari. Ad esempio, in Gran Bretagna è stato effettuato un sondaggio nel 2013 per misurare l'accettazione pubblica del nucleare e, sebbene un terzo dei partecipanti abbia dichiarato che i rischi associati a questo argomento scientifico superano i suoi benefici, il 40% degli intervistati ha valutato gli aspetti positivi dell'uso dell'energia nucleare più elevati rispetto agli aspetti negativi. Questi risultati trovano una particolare correlazione con la preoccupazione legata ai cambiamenti climatici, che come mostrato nella seguente figura mostrano un incremento progressivo dal 2005 al 2013 degli scettici nei confronti del riscaldamento globale.

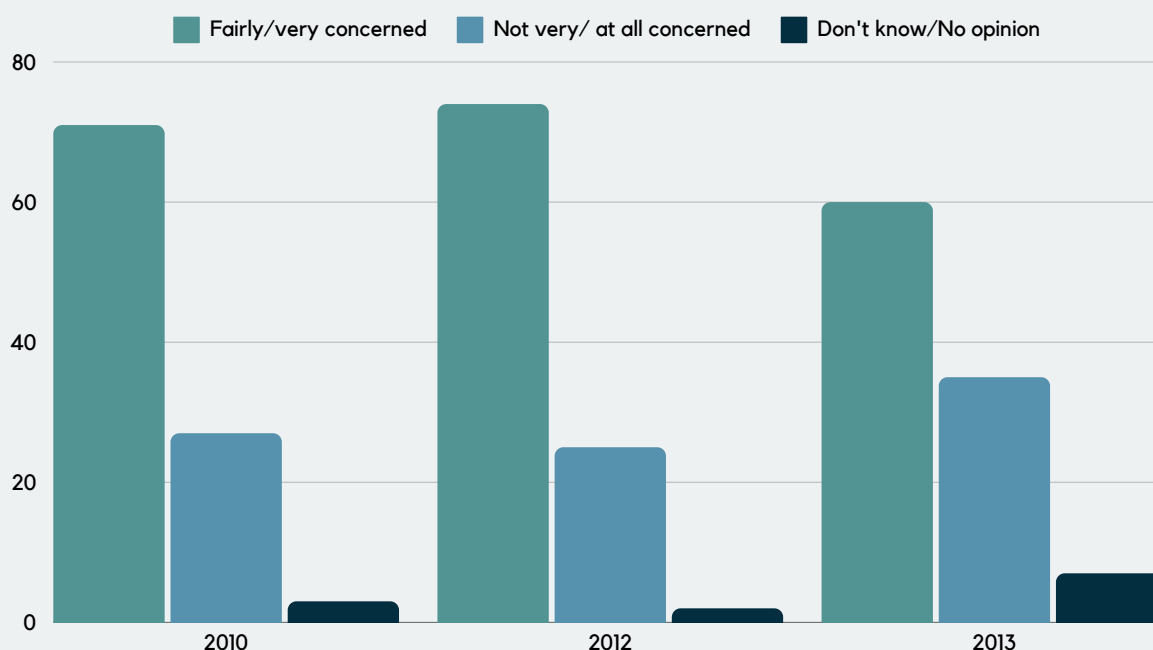


Figura 8: *Sensibilità ai cambiamenti climatici in Gran Bretagna*

Un recente sondaggio svolto da SWG nel 2023 su un campione di 800 intervistati ha registrato un'inversione del trend, con il "54% della popolazione aperta a valutare possibilità di utilizzo delle nuove tecnologie"¹⁸. Determinante il peso dei giovani (18-34 anni) nel risultato finale del sondaggio, con un 64% di loro che si è mostrato favorevole alla reintroduzione del nucleare nel mix energetico italiano. L'indagine rivela una popolazione più concreta e focalizzata a considerare il rapporto tra costi e benefici che queste innovazioni potrebbero offrire a famiglie e imprese.

Altre nazioni che hanno un'intensa diffusione di informazioni e un ampio dibattito sull'argomento, come ad esempio Svezia, Finlandia, Francia e Belgio, riscontrano un supporto maggiore all'utilizzo dell'energia nucleare.

Al contrario, nei Paesi dove il nucleare è poco discusso o addirittura trascurato, come Grecia, Portogallo e Cipro, si verifica la situazione opposta. In Svezia, dove il consenso raggiunge il 62%, circa il 30% della popolazione ha visitato una centrale nucleare. Inoltre, negli Stati Uniti, l'80% degli abitanti nelle vicinanze delle centrali nucleari si esprime a favore dell'energia nucleare. Questi dati rendono evidente come una maggiore conoscenza sull'argomento contribuisca a generare fiducia nell'uso dell'energia nucleare.

Per migliorare l'accettazione pubblica dell'energia nucleare in Italia, è fondamentale dunque coinvolgere attivamente i ricercatori, considerati la chiave di volta per lo sviluppo del settore: gli esperti infatti possono fornire alla popolazione informazioni trasparenti e accurate riguardo i benefici e i rischi associati al nuovo nucleare, contribuendo così a consolidare il consenso pubblico.

[18] Energia, iWeek "COMUNICATO STAMPA: SWG, oltre metà degli italiani favorevoli al nucleare 54% della popolazione aperta a valutare possibilità di utilizzo delle nuove tecnologie Forte il ruolo giocato dai ristori e dai possibili sconti in bolletta Netto il favore dei giovani (63%) rispetto agli over 55 (47%)"

TRANSIZIONE ENERGETICA

Decarbonizzazione del sistema elettrico e ruolo del nucleare

Il numero di paesi con l'obiettivo di raggiungere la neutralità climatica è aumentato rapidamente negli ultimi anni. Oltre 70 paesi, che coprono il 76% delle emissioni globali di CO₂ legate all'energia, hanno ora adottato tale impegno, che riguarda sia le emissioni di CO₂ che quelle di gas serra in generale. Inoltre, oltre 60 altri paesi si sono impegnati a raggiungere emissioni nette zero o neutralità carbonica, ma senza specificare una tempistica¹⁹. Questi impegni non sono ancora sostenuti da tutte le politiche e misure specifiche che saranno necessarie per la loro realizzazione, ma stanno inducendo riflessioni sulla combinazione di tecnologie a basse emissioni che possono portare i paesi verso questi obiettivi.

Le energie rinnovabili, in particolare l'energia eolica e solare fotovoltaica, sono generalmente previste come le fonti principali di elettricità mentre i paesi si dirigono verso un futuro a zero emissioni nette. Tuttavia, un numero crescente di paesi ha anche annunciato piani per sostenere nuovi investimenti in energia nucleare.

Ad esempio, il presidente Macron della Francia ha annunciato nel febbraio 2022 piani per costruire sei nuovi grandi reattori a partire dal 2028, al costo di circa 50 miliardi di euro, con l'opzione di costruirne altri otto entro il 2050²⁰. Il governo francese in precedenza aveva promesso 1 miliardo di euro per sviluppare reattori innovativi, compreso un reattore modulare piccolo entro il 2030. La Cina ha pianificato di continuare il suo attuale ritmo di costruzione di reattori nucleari per aiutare a raggiungere il suo obiettivo di neutralità carbonica entro il 2060.

Negli ultimi anni, i costi di costruzione e i tempi di realizzazione hanno afflitto l'industria nucleare in molti paesi, rendendo essenziale sciogliere questi nodi. Le dimensioni e la complessità della costruzione delle opere civili associate a un impianto nucleare sono tipicamente responsabili di gran parte dei ritardi: l'"isola" nucleare, che è il cuore dell'impianto nucleare e contiene l'edificio di contenimento, l'edificio ausiliario e l'area di gestione del combustibile, di solito rappresenta meno del 20% dei costi totali.

[19] International Energy Agency. (2021). Emissioni Nette pari a Zero entro il 2050: Una Tabella di Marcia per il Settore Energetico Globale

[20] Il Post. (2022). La Francia costruirà sei nuovi reattori nucleari

Tecniche per rendere più facile la costruzione delle opere civili, come la modularità e la standardizzazione, potrebbero ridurre i costi e la complessità della costruzione sul sito dell'impianto. L'esperienza ha dimostrato che il periodo di costruzione, specialmente per le unità "di prima generazione", tende a richiedere significativamente più tempo rispetto alle unità successive. Al contrario, una volta preso l'impegno di costruire diverse unità dello stesso progetto, il periodo di costruzione per le unità successive può diminuire considerevolmente. Nel caso della Francia, la costruzione della prima unità della serie N4 ha richiesto quasi 12 anni, la quarta unità poco più di 8 anni, con una conseguente riduzione del 30%²¹.

Construction times for new nuclear power plants by country, 1967-2021

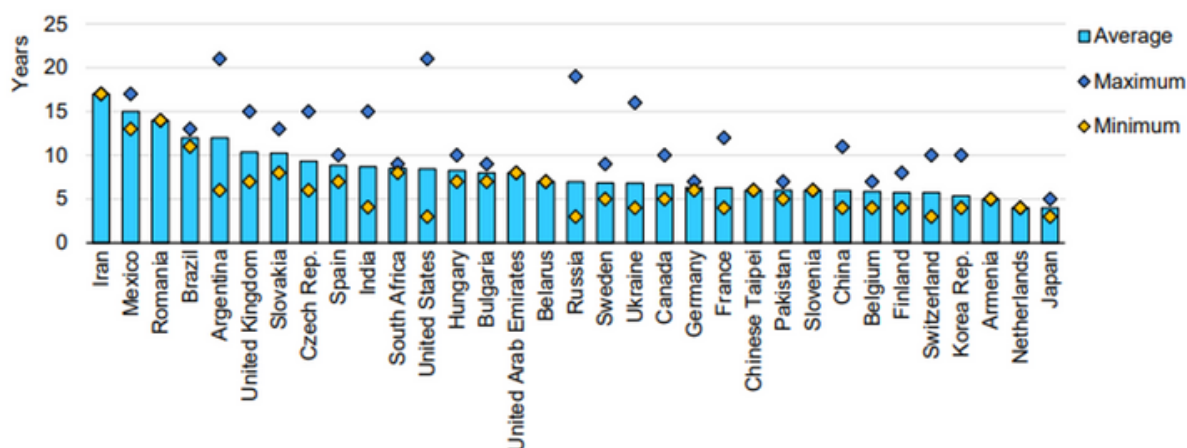


Figura 9: Analisi IEA basata sul IAEA Power Reactor Information System (PRIS).

Le posizioni espresse da paesi come Francia e Cina confermano che, al netto delle difficoltà di sviluppare nuova capacità nucleare, questa tecnologia è vista in molti casi come utile per accelerare la riduzione delle emissioni legate alla generazione di energia elettrica. Ridurre l'utilizzo di combustibili fossili, anche attraverso il nucleare, è divenuto ancor più necessario durante e a seguito della crisi energetica del 2022, la quale ha portato soprattutto i paesi UE a sperimentare come la transizione energetica sia non solo un tema legato alla sfida climatica, ma anche alla sicurezza energetica nazionale, in quanto permette di ridurre la dipendenza da attori esterni spesso problematici come la Russia.

L'energia nucleare ha rappresentato circa il 10% della produzione globale di energia elettrica nel 2020²².

[21] IAEA "Nuclear Power and Secure Energy Transition"

[22] Associazione Italiana Nucleare. (2021). L'energia nucleare a supporto della decarbonizzazione

Questa quota è diminuita del 18% alla fine degli anni '90, ma l'energia nucleare rimane ancora la seconda fonte più grande di elettricità a basse emissioni (cioè non basata sui combustibili fossili) dopo l'energia idroelettrica e la principale fonte nelle economie avanzate. Nel 2020, l'elettricità nucleare ha ancora superato il contributo totale combinato della generazione eolica e solare fotovoltaica a livello mondiale, nonostante la massiccia crescita di tali fonti rinnovabili. A luglio 2022 sono stati censiti 440 reattori nucleari in funzione in 33 paesi del mondo²³, con una capacità combinata di 413 GW. Circa 270 GW di quella capacità erano stati realizzati nelle economie avanzate.

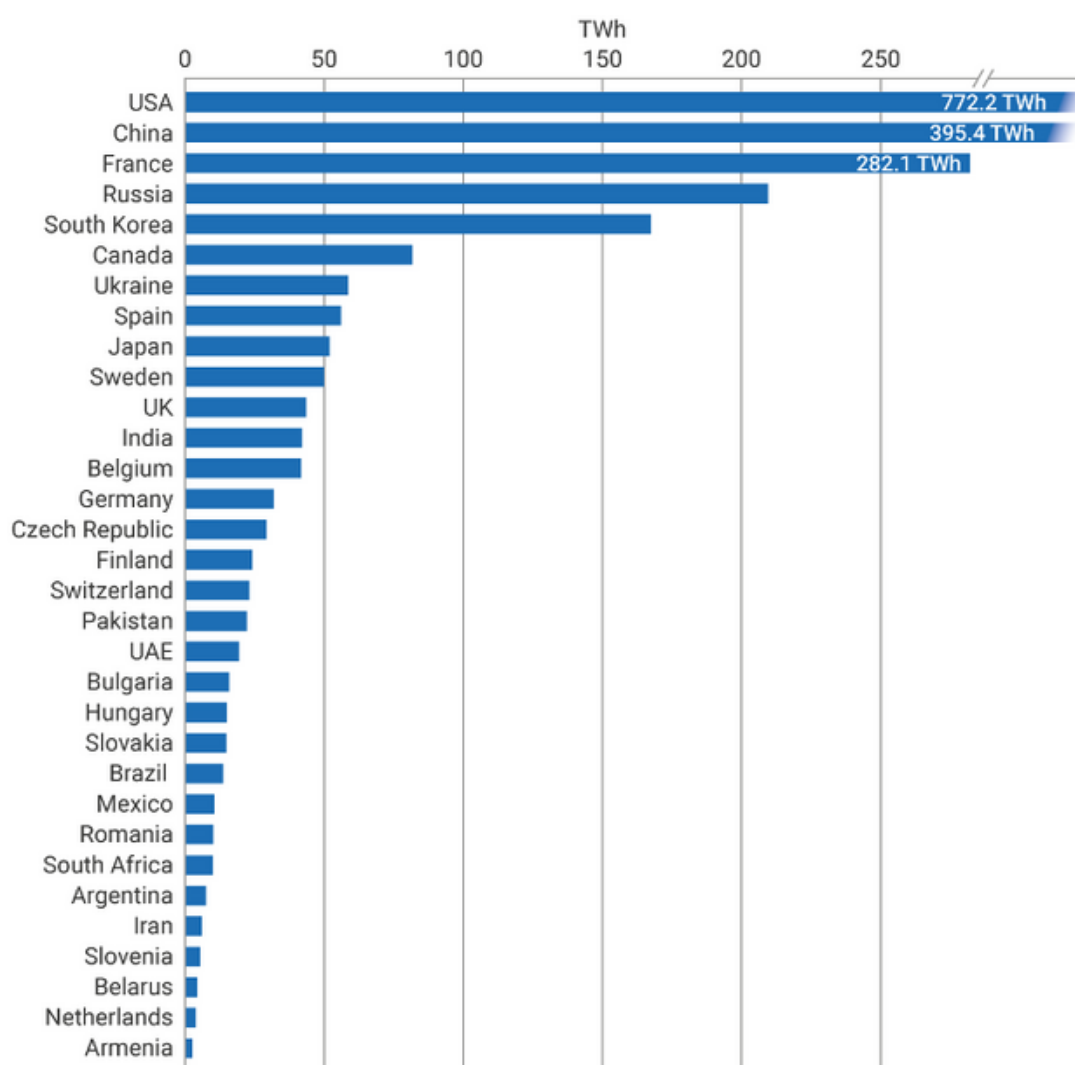


Figura 10: *Generazione di energia elettrica dal nucleare per Paese (2021) World Nuclear Association*
 Fonte: World Nuclear Association.

[23] International Energy Agency (IEA). (2022). Nuclear Power and Secure Energy Transitions

L'energia nucleare, con i suoi 413 gigawatt (GW) di capacità operativa in 32 paesi, contribuisce tanto alla sicurezza energetica quanto alla decarbonizzazione evitando 1,5 gigatonnellate (Gt) di emissioni globali e 180 miliardi di metri cubi (bcm) di domanda globale di gas all'anno. Essendo **la seconda fonte più grande di energia a basse emissioni dopo l'energia idroelettrica** e con la sua programmabilità e potenziale di crescita, l'energia nucleare - nei paesi in cui è accettata - può contribuire alla decarbonizzazione del sistema elettrico soprattutto in quelle ore in cui le fonti rinnovabili non programmabili non sono in grado di generare energia elettrica, tipicamente nelle ore notturne.

Le prospettive future offerte dal nucleare si scontrano però con il fatto che le economie sviluppate hanno perso il primato nel mercato: nonostante possiedano quasi il 70% della capacità nucleare globale, **gli investimenti si sono fermati e gli ultimi progetti hanno superato di gran lunga i budget**, con notevoli ritardi sulla tabella di marcia. Di conseguenza, il panorama dei progetti e dei design preferiti si è spostato, con la maggior parte dei reattori in costruzione dal 2017 di origine russa o cinese²⁴.

A rendere tutto ancor più complesso vi è la presenza di restrizioni sull'energia nucleare in alcuni paesi, guidate da preoccupazioni sulla sicurezza e sui rifiuti. **L'incidente del 2011 alla centrale nucleare di Fukushima-Daiichi in Giappone ha minato la fiducia del pubblico nell'energia nucleare**, sottolineando la necessità di una sorveglianza regolamentare robusta e indipendente. Anche per questo motivo i rischi di incidenti sono uno dei principali fattori dietro i divieti sull'energia nucleare o le politiche per eliminarla progressivamente.

[24] Wired. (2023), La nuova alba dell'energia nucleare.

Ruolo degli SMR nella riduzione delle emissioni di carbonio

In questo contesto globale, gli SMR possono rappresentare un buon compromesso fra sfruttare i vantaggi offerti dall'energia nucleare e limitare i rischi percepiti dalla popolazione, permettendo di integrare le fonti rinnovabili non programmabili e avvicinarci ulteriormente al traguardo stabilito dagli obiettivi di sviluppo sostenibile (SDGs), in particolare l'SDG 7 ossia "Assicurare a tutti l'accesso a energia economia, affidabile, sostenibile e moderna".

L'IAEA svolge un ruolo chiave nel coordinare gli sforzi globali per lo sviluppo di SMR e MR, unendo esperti, governi e organi di regolamentazione per promuovere l'implementazione sicura di questa nuova tecnologia. La NHSI (Iniziativa di Armonizzazione e Standardizzazione Nucleare) è stata lanciata dall'IAEA nel giugno 2022, mentre la SMR Platform (Piattaforma sui Reattori Modulari Piccoli e le loro Applicazioni) è stata avviata nel 2021. La NHSI mira a promuovere l'armonizzazione e la standardizzazione del design, della costruzione, della regolamentazione e degli approcci industriali degli SMR, mentre la SMR Platform supporta tutti gli aspetti dello sviluppo, dell'implementazione, dell'autorizzazione e della supervisione degli SMR.

Un dubbio della comunità scientifica è come e dove questi reattori potranno essere utilizzati: mentre i microreattori mostrano potenzialità per essere impiegati in zone remote, gli SMR potrebbero svolgere un ruolo significativo anche in settori come la produzione di plastica e altre forme di lavorazione industriale che richiedono calore. Gli attuali reattori nucleari generano considerevoli quantità di calore, ma circa il 60-70% di questa energia termica viene disperso nell'ambiente a causa dell'efficienza di conversione da vapore a elettricità.

Una modalità più efficiente di utilizzo dell'energia nucleare, volta a ridurre le emissioni di carbonio, consiste nell'impiegare il calore generato dai reattori nucleari nei processi industriali o chimici. Il programma di dimostrazione dei reattori avanzati del Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti sta promuovendo lo sviluppo di un SMR raffreddato a gas ad alta temperatura per l'implementazione in un complesso manifatturiero di prodotti per i consumatori.

Il principale ostacolo nell'attuazione di questa transizione energetica risiede nella fase di sviluppo incompleta degli SMR, dal momento che questi non sono ancora operativi per la generazione di energia. Questa limitazione può derivare da sfide tecniche, normative o finanziarie che rallentano il progresso verso la piena implementazione di questa tecnologia.

Le incertezze su quando la tecnologia SMR sarà pronta per la distribuzione su scala commerciale rendono difficile proiettare il loro futuro ruolo nella decarbonizzazione del sistema energetico. Tuttavia, gli SMR rappresenteranno una parte sempre maggiore delle nuove aggiunte di capacità nucleare dopo il 2030, sulla base dell'ipotesi che si continui a fare progressi nello sviluppo e nella dimostrazione della tecnologia e nella riduzione dei costi. Un ruolo fondamentale lo avranno gli investimenti pubblici in ricerca e sviluppo, i quali già oggi costituiscono un importante promotore di investimenti privati nel settore degli SMR e sono spesso visti anche come un'opportunità per affermare la leadership tecnologica del paese.

Oltre agli USA, di seguito la situazione negli altri principali paesi coinvolti nello sviluppo degli SMR:

Russia

Prima centrale nucleare galleggiante, Akademik Lomonosov, operativa dal 2020 a Pevek. Si stanno sviluppando nuovi progetti di SMR in corso, incluso un impianto onshore con reattore RITM-200.



Corea del Sud

Cambiamento di politica per rivitalizzare l'industria nucleare. Accordo per costruire SMR in Arabia Saudita con tecnologia SMART SMR.



Cina

Leader nello sviluppo tecnologico nucleare. La prima connessione alla rete energetica è stata effettuata nel 2021 con il primo impianto dimostrativo HTR-PM a Shidao Bay, con reattori ad alta temperatura e gas refrattario. Sono stati annunciati altri progetti come ACP100 su Hainan.



Giappone

Priorità al riavvio delle centrali esistenti, ma strategia di crescita verde includendo lo sviluppo degli SMR. Al via a collaborazioni internazionali per tecnologie come gli SMR ad alta temperatura.



Francia

Piano di re-industrializzazione con fondi per lo sviluppo di SMR, inclusi progetti come NUWARD SMR.



Regno Unito

Investimenti significativi per sviluppare Rolls-Royce SMR, supportati da finanziamenti pubblici e privati. Nuova legislazione per attrarre investimenti nel settore nucleare.



Europa Settentrionale, Centrale e Orientale

Crescente interesse per gli SMR per affrontare la necessità di sostituire le centrali a combustibili fossili e aumentare la capacità di generazione, con particolare attenzione a soddisfare le esigenze di riscaldamento industriale e urbano.



CASE STUDY

Reattori LFR in Italia

La società di tecnologia nucleare, *newcleo*, lavora per progettare, installare ed operare reattori nucleari a fissione di quarta generazione raffreddati al piombo (SM-LFR) che utilizzino come combustibile ciò che oggi è considerato un rifiuto. Fondata nel 2021 con capitale iniziale di EUR100 milioni, ad oggi ha raccolto quasi 0,5 miliardi di euro di finanziamenti privati e ha recentemente avviato una raccolta di capitali fino a 1 miliardo di euro che la porterebbe ad essere la start-up nucleare più finanziata nel mondo.

L'approccio di *newcleo* si basa sulla combinazione di tecnologie provate e nuove soluzioni ingegneristiche e sulle migliori in termini di sicurezza e sostenibilità. Il piano commerciale prevede il First-Of-A-Kind da 200 MWe nel 2033, il primo di una serie di reattori, e la produzione di combustibile MOX dal 2030. I reattori veloci di *newcleo* utilizzano come combustibile gli scarti dell'attuale industria nucleare, eliminando la necessità di estrarre uranio per centinaia di anni e riducendo significativamente il volume dei rifiuti nucleari ad alta attività, altrimenti destinate ad un deposito geologico. I piccoli reattori modulari consentono altresì la produzione in serie, riducendo i costi e i rischi di progetto.

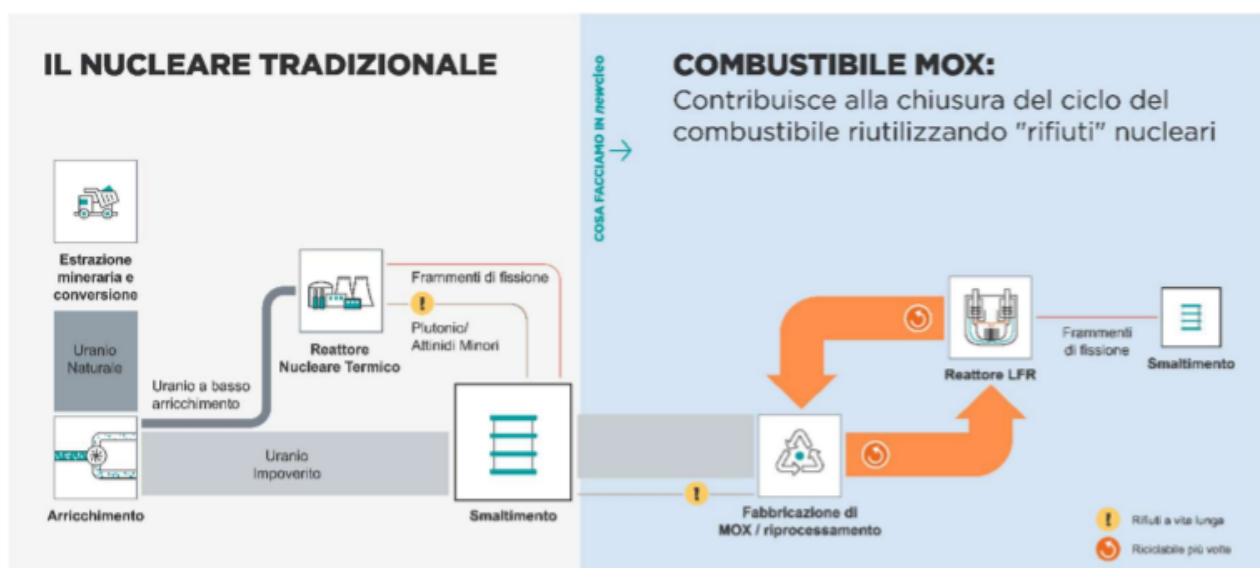


Figura 11: La produzione di MOX (Mixed OXide)

newcleo ha anche l'intenzione di installare un reattore di irraggiamento, una versione da 30 MWe del suo modulo commerciale, che servirà sia i progetti di sviluppo di *newcleo* oltre ad offrire servizi di irraggiamento unici in Europa basati su uno spettro neutronico veloce ed intenso. Il prototipo LFR-AS-30 è vincitore del bando "Reattori nucleari innovativi" per progetti finanziati dal piano di investimenti France 2030.

newcleo ha stabilito un ampio programma di ricerca e sviluppo, che si basa anche sul forte know-how presente in Italia. La tecnologia LFR è infatti stata sviluppata a lungo in Italia, in termini teorici, ingegneristici e con competenze manifatturiere.

ENEA, partner di *newcleo*, è leader a livello mondiale sui sistemi di raffreddamento al piombo, e presso il centro di Brasimone opera diverse importanti facilities non-nucleari. Il gruppo SRS-Fucina, acquisito nel 2023 da *newcleo*, ha grandi competenze ingegneristiche e manifatturiere su apparecchiature sperimentali non-nucleari al piombo. Questo ha portato *newcleo* a costruire, installare ed operare due nuove facilities (CAPSULE, e CORE) nel dicembre 2023 ed aprile 2024, dopo solo pochi mesi dalla loro concezione, presso il centro di Brasimone. *newcleo* utilizza anche le facilities pre-esistenti di ENEA-Brasimone, installando diverse test-sections presso CIRCE e NACIE, e prevede di installare nuove facilities nel 2024, 2025 e culminare con un prototipo non-nucleare in scala del proprio reattore nel 2026.

Il gruppo *newcleo*, con oltre 70 partnership e collaborazioni, è presente in quattro Paesi europei e conta su più di 750 dipendenti, di cui più di 200 in Italia. La Commissione UE ha incluso le **tecnologie nucleari innovative**, come quella di *newcleo*, nel perimetro della tassonomia UE delle attività economiche sostenibili dal punto di vista ambientale.

Lo sviluppo del reattore HTGR

La Dow Inc., azienda statunitense leader nella produzione di prodotti chimici con sede a Seadrift, Texas, ha scelto di puntare sull'innovazione energetica attraverso un progetto ambizioso: l'implementazione di un reattore HTGR presso il suo impianto UCC1 Seadrift Operations. Questa iniziativa, risultato di una partnership strategica con X-Energy Reactor Company, LLC, rappresenta un passo significativo verso l'adozione di fonti energetiche sostenibili e a basso impatto ambientale.

Il progetto nasce dall'esigenza di garantire una fornitura energetica sicura, affidabile e sostenibile per il sito di produzione di Seadrift, considerando l'avvicinarsi della fine del ciclo vitale degli impianti esistenti. L'accordo di sviluppo congiunto (JDA) tra Dow e X-Energy, supportato dal Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti (DOE), prevede un investimento massiccio in ingegneria e infrastrutture, con un totale di fino a \$50 milioni destinati a finanziare il progetto.

Il reattore in questione è lo Xe-100, il cui nucleo è realizzato principalmente in grafite e contiene piccoli pezzi di combustibile arricchito al 15,5%. Ogni pezzo, delle dimensioni approssimative di una pallina da biliardo, ospita migliaia di particelle di combustibile di uranio opportunamente rivestite con Tristructural Isotropic (TRISO),

che le rende praticamente indistruttibili.

Il rivestimento TRISO crea una barriera ermetica intorno al nucleo di uranio, garantendo la trattenuta dei prodotti di fissione e dei gas generati durante il funzionamento. Questo consente la costruzione dell'impianto entro un raggio di 500 metri da zone industriali o urbane, senza compromettere la sicurezza.

Il carico di pezzi di combustibile freschi avviene nel reattore in modo simile al funzionamento di una macchina per le palline da gomma. Attraverso il letto di pezzi di combustibile viene pompato elio, il quale, riscaldandosi, genera vapore che alimenta un generatore elettrico.

Il reattore si rifornisce costantemente mediante l'aggiunta giornaliera di pezzi di combustibile freschi nella parte superiore, mentre quelli esauriti vengono rimossi dal fondo del nucleo. Ogni pezzo di combustibile rimane all'interno del nucleo per poco più di tre anni e viene fatto passare attraverso il nucleo fino a sei volte per raggiungere una completa combustione. Una volta esauriti, i materiali esausti vengono direttamente depositati in contenitori asciutti e conservati in loco, senza la necessità di un raffreddamento temporaneo o attivo.

Uno degli aspetti più significativi di questa iniziativa è il suo impatto ambientale positivo: si prevede infatti una riduzione delle emissioni di CO₂ del sito di Seadrift di circa 440.000 tonnellate all'anno una volta che il nuovo reattore SMR sarà operativo.

Attualmente, Dow e X-Energy stanno collaborando attivamente per completare e presentare la domanda di Permesso di Costruzione alla Commissione di Regolamentazione Nucleare degli Stati Uniti (NRC), un passo cruciale per avviare la fase di realizzazione del progetto. Si prevede che la costruzione dei quattro reattori SMR inizierà nel 2026 e sarà completata entro la fine del decennio, fornendo così a Seadrift un'infrastruttura energetica all'avanguardia per supportare le attività industriali di Dow.

Il sito di produzione di Seadrift di Dow, che si estende su una superficie di 4.700 acri, svolge un ruolo fondamentale nella fornitura di materiali

chimici utilizzati in una vasta gamma di settori, tra cui imballaggi alimentari, calzature, isolamento elettrico e componenti per energie rinnovabili.

La collaborazione con X-Energy rappresenta un'opportunità unica per Dow di consolidare la propria posizione di leadership nel settore chimico e di contribuire attivamente alla trasformazione del panorama energetico globale.

In conclusione, il progetto nucleare SMR presso il sito di Seadrift di Dow rappresenta un esempio tangibile di innovazione e sostenibilità nel settore industriale. Attraverso questa iniziativa, Dow dimostra il suo impegno verso un futuro energetico più pulito e responsabile, puntando sull'integrazione di tecnologie avanzate per garantire un approvvigionamento energetico sicuro e sostenibile per le generazioni future²⁵.

[25] Dow Inc. (2023). Dow and X-energy advance efforts to deploy first advanced small modular nuclear reactor at industrial site under DOE's Advanced Reactor Demonstration Program

La lezione di NuScale

Negli USA, la NuScale Power Corporation si è aggiudicata il primo posto per lo sviluppo dei reattori modulari piccoli nel continente americano, ricevendo l'approvazione del progetto dalla Nuclear Regulatory Commission (NRC). NuScale prevede una nuova centrale nucleare con reattore modulare ad acqua progettata per fornire energia per la produzione di energia, il teleriscaldamento, la desalinizzazione e altre applicazioni di produzione di calore. Il 9 ottobre 2023 l'azienda Standard Power ha annunciato un accordo per l'acquisto di 24 SMR (Small Modular Reactors) di NuScale, consolidando ulteriormente la sua presenza nel settore. Standard Power, nota per la sua attività nella realizzazione di centri di calcolo per servizi di blockchain e data mining, ha progettato di impiegare questi reattori in due importanti data center situati in Ohio e in Pennsylvania. Questa mossa strategica segue la quotazione di NuScale in borsa al NYSE nel 2022, sottolineando l'interesse crescente per la tecnologia SMR e il suo ruolo chiave nel settore energetico e infrastrutturale. Questa veloce crescita ha portato NuScale a siglare il primo progetto importante in accordo con il consorzio Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS). Il progetto prevedeva la costruzione della prima centrale elettrica costituita da SMR, dando vita al Carbon-Free Power Project (CFPP),

per cui il Department of Energy ha stanziato un grant da circa 1,4 miliardi di dollari in dieci anni.

La UAMPS voleva avvalersi della tecnologia SMR di NuScale per sostituire la generazione di energia a carbone in pensione, segnando un passo cruciale verso la decarbonizzazione dei suoi portafogli energetici. Inoltre, con la realizzazione del progetto si proponeva di assicurare un'offerta costante e resiliente di elettricità ai clienti.

La tecnologia nucleare non avrebbe operato in solitario ma si sarebbe integrata in modo sinergico con grandi quantità di energia rinnovabile, compresa quella eolica e solare.

Il cuore della centrale elettrica di NuScale è rappresentato dal rivoluzionario reattore modulare di piccole dimensioni (SMR), noto come NuScale Power Module™ (NPM). Questo modulo, completamente prefabbricato in fabbrica, genera una potenza lorda di 77 megawatt di elettricità (MWe) attraverso l'impiego di una versione più sicura, compatta e scalabile della tecnologia del reattore ad acqua pressurizzata.

Il Nuclear Energy Institute (NEI) sostiene che per un impianto di energia nucleare, con una capacità installata di 1.000 megawatt, è richiesto un terreno

relativamente limitato, pari a circa 1,3 miglia quadrate o 830 acri.

Questa valutazione si basa sulla dimensione media dei 59 siti delle centrali nucleari presenti negli Stati Uniti. Il reattore modulare di piccole dimensioni (SMR) di NuScale adotta i principi della circolazione naturale guidata dalla galleggiabilità, eliminando la necessità di pompe per la circolazione dell'acqua attraverso il reattore. I moduli, completamente prefabbricati in fabbrica senza necessità di costruzione, montaggio o lavori di fabbricazione in loco, vengono successivamente trasportati sul sito della centrale, eliminando le attività legate alla sicurezza in loco.

NuScale presenta un breve periodo di costruzione nucleare, inferiore ai 36 mesi dal primo calcestruzzo di sicurezza alla completa meccanizzazione.

NuScale ha inoltre effettuato approfonditi studi sui costi associati al suo impianto comprendente 12 moduli e una capacità di 924 MWe. I risultati di tali analisi dimostrano che il costo livellato dell'elettricità (LCOE) di un impianto NuScale ammonta a \$64 per megawatt-ora (MWh), garantendo economie competitive e una significativa riduzione della volatilità dei costi di produzione. Inoltre, i costi operativi e di manutenzione di un impianto NuScale risultano inferiori a quelli registrati dal 25% delle più grandi centrali nucleari statunitensi.

La produzione lorda di 924 MWe è

sufficiente per alimentare circa 700.000 abitazioni negli Stati Uniti. Un singolo modulo di potenza può fornire energia pulita a 60.000 abitazioni. Sostituire una centrale elettrica a carbone con un impianto da 924 MWe consentirebbe di evitare oltre otto milioni di tonnellate di emissioni di CO₂ all'anno, equivalente a togliere 1,7 milioni di auto dalla circolazione.

Il concetto di SMR di NuScale ha però attraversato diverse fasi di sviluppo in termini di dimensioni del reattore. Inizialmente progettato per produrre 44 MWe, nel corso degli anni il progetto ha subito varie modifiche, aumentando dapprima a 50, successivamente a 55 e poi a 60 MWe. Infine, dopo l'ottenimento della licenza, è stato annunciato un ulteriore aumento di potenza a 77 MWe. Questo cambiamento ha richiesto un passaggio aggiuntivo di approvazione da parte della NRC.

Il costo di costruzione, escludendo gli oneri finanziari, ha registrato un aumento significativo. Da una stima iniziale di circa 7.000 \$/kWe, ha raggiunto gli 11.000 \$/kWe nel 2020 e attualmente si attesta a 20.000 \$/kWe. Questo ha comportato un incremento dell'investimento totale per il progetto CFPP da 5,3 a 9,3 miliardi di dollari. Di conseguenza, il costo di produzione dell'elettricità è salito da 58 a 89 \$/MWh. Questi i principali motivi per cui l'8 novembre NuScale e UAMPS hanno annunciato la decisione di non procedere con la realizzazione del progetto CFPP.

La motivazione dietro questa scelta è stata il fatto che la fase di sottoscrizione del progetto ha raggiunto solo l'80% del budget complessivo. Il fattore economico ha portato il progetto ad un chiaro fallimento. Inoltre, secondo i dati NuScale, per ogni 924 MWe di capacità generata la centrale SMR richiederebbe quasi il 100% in più di personale per garantirne il funzionamento. Nonostante un LCOE vantaggioso rispetto ai tradizionali impianti a carbone e gas che, come riporta NuScale, si assesta sui \$64/MWh, la scalabilità del SMR progettato è venuta meno con il conseguente incremento di dimensioni nel tempo: è essenziale evitare che le dimensioni di tali reattori siano eccessivamente ridotte. Un indicatore iniziale di fragilità del progetto in questo contesto emerge dalla continua modifica delle dimensioni del reattore nel corso degli anni, passando da 44 a 77 MWe. Sebbene questa revisione sembri essere finalizzata a ridurre il costo specifico, ha purtroppo comportato la necessità di ripercorrere l'intero processo di licenza.

Altro aspetto da considerare è la sicurezza, che è indubbiamente garantita da una grande struttura in cemento armato di qualità nucleare, che contiene la piscina di raffreddamento dei primi sei moduli SMR (con la possibilità di estendere fino a dodici).

Tuttavia, è importante sottolineare che questa struttura, seppur efficace dal

punto di vista della sicurezza, comporta un notevole costo di costruzione per l'intero impianto.

Come lezione per il futuro, sarebbe opportuno ottimizzare l'opportunità di autofinanziamento offerta dal concetto di modularità, implementando la costruzione e la messa in esercizio di un modulo SMR prima o durante la realizzazione del successivo. Questa strategia consentirebbe al flusso di cassa generato dalla vendita di elettricità e calore del modulo precedente di contribuire finanziariamente al successivo. Tuttavia, sembra che questa caratteristica non sia stata adeguatamente considerata nel progetto CFPP, poiché il primo modulo è programmato per entrare in funzione nel 2029, seguito dagli altri cinque nel 2030. Nel settore nucleare, l'avvio di un'impresa è senza dubbio affascinante ma presenta sfide più complesse rispetto ad altri settori. L'esperienza NuScale evidenzia che è essenziale trovare un equilibrio tra la freschezza, l'agilità, la visione e la capacità di attrarre investimenti tipiche delle "giovani" start-up, e l'esperienza e la solidità delle grandi aziende "storiche" del nucleare. Un partenariato collaborativo tra questi due mondi potrebbe portare a benefici reciproci, contribuendo al successo di entrambi ^{26, 27, 28}.

[26] Rivista Energia. (2023). Lezioni dal fallimento di NuScale

[27] Qualenergia. (2023). Passo falso per il nucleare SMR: cancellato il primo progetto commerciale di NuScale

[28] Reuters. (2024). Cancelled NuScale contract weighs heavy on new nuclear

CONCLUSIONI

Il presente studio ha approfondito l'universo degli Small Modular Reactors e del loro ruolo nella quarta generazione del nucleare. Dall'analisi è emerso un quadro dei diversi tipi di SMR, inclusi i loro tratti distintivi, il contributo che possono apportare alla decarbonizzazione e i limiti del loro attuale sviluppo. In primo luogo, è stato evidenziato il ruolo cruciale degli SMR nella trasformazione del settore energetico, offrendo soluzioni innovative e flessibili per affrontare le sfide della produzione energetica. Le caratteristiche degli SMR, come la modularità, la prefabbricazione e la flessibilità, offrono numerosi vantaggi rispetto ai reattori nucleari tradizionali. La modularità consente la costruzione in serie e la riduzione dei costi di investimento, mentre la prefabbricazione riduce i tempi di costruzione e i rischi associati. Inoltre, la flessibilità operativa degli SMR consente una migliore integrazione con le fonti rinnovabili e una maggiore adattabilità alla domanda energetica.

Al fine di fornire una maggiore comprensione di questa tecnologia nucleare emergente, lo studio ha messo a fuoco due aspetti cruciali: la competitività economica degli SMR rispetto ai reattori tradizionali e l'accettazione pubblica del nucleare come fonte di energia.

In primo luogo, **i risultati emersi indicano chiaramente che gli SMR offrono un'eccellente opportunità per ridurre i costi di costruzione e di gestione degli impianti nucleari**, mantenendo comunque elevati standard di sicurezza e prestazioni. In particolare, è stato osservato che il costo di costruzione medio di un SMR è inferiore del 54,9% rispetto ai reattori di generazione III+ o IV, suggerendo un chiaro vantaggio economico per questa nuova tipologia di reattori. Questo è un punto cruciale, poiché la competitività economica degli SMR rispetto ad altre fonti di energia a basse emissioni sarà fondamentale per la loro diffusione su larga scala. Tuttavia, è importante sottolineare che l'evoluzione dei costi degli SMR è ancora incerta, e attualmente esistono una vasta gamma di stime di costo. Nonostante queste sfide, i risultati dell'analisi sono incoraggianti e suggeriscono che gli SMR potrebbero rappresentare una svolta significativa nel settore nucleare, aprendo la strada a una nuova era di sviluppo e adozione del nucleare a livello globale.

In secondo luogo, è stato riconosciuto che **l'accettazione pubblica del nucleare come fonte di energia rimane un'area di preoccupazione e dibattito**.

Nonostante gli SMR offrano potenziali vantaggi in termini di sicurezza e impatto ambientale rispetto ai reattori tradizionali, la percezione pubblica del rischio nucleare e le preoccupazioni riguardanti la sicurezza continuano a influenzare l'opinione pubblica e la politica energetica.

Affrontare le preoccupazioni riguardanti la sicurezza e migliorare la comunicazione pubblica sulle caratteristiche e i benefici degli SMR sarà fondamentale per aumentare l'accettazione pubblica di questa tecnologia, migliorando la trasparenza, l'educazione e il coinvolgimento del pubblico.

Negli USA, il forte sostegno politico e istituzionale, accompagnato da massicci investimenti pubblici nella ricerca e nello sviluppo, ha catalizzato un aumento esponenziale dei progetti dimostrativi e delle iniziative commerciali legate agli SMR. Questo sostegno finanziario sta attraendo considerevoli investimenti privati, consentendo l'ingresso di nuovi attori e l'adozione di approcci innovativi nello sviluppo di progetti nell'industria nucleare.

Oltre agli Stati Uniti, diversi altri paesi stanno giocando un ruolo chiave nello sviluppo e nell'implementazione degli SMR. La Cina, leader nello sviluppo tecnologico nucleare, ha già avviato impianti dimostrativi di SMR ad alta temperatura. La Russia ha raggiunto un traguardo significativo con la prima centrale nucleare galleggiante operativa e sta attualmente sviluppando nuovi progetti di SMR sia su terra che sul mare. Il Giappone, con la sua strategia di crescita verde, sta puntando sullo sviluppo degli SMR per affrontare le sfide energetiche e ambientali del futuro. Anche la Corea del Sud, il Regno Unito, la Francia e numerosi paesi europei stanno investendo risorse considerevoli nello sviluppo degli SMR, riconoscendo il loro potenziale nel ridurre le emissioni di carbonio e garantire loro una maggiore indipendenza energetica.

Inoltre, l'uso dell'energia nucleare, specialmente attraverso gli SMR, sta emergendo come un'opportunità per consolidare la leadership tecnologica delle superpotenze mondiali, specialmente gli USA che sono rimasti "indietro" rispetto ai Paesi dell'est che non hanno mai smesso di utilizzare e sviluppare il nucleare.

Il nucleare non è attualmente parte del mix energetico italiano.

Tuttavia, a seguito del recente aggiornamento del PNIEC e nell'ottica di raggiungere la neutralità carbonica al 2050, **l'Italia può intraprendere una riflessione sul ruolo del nucleare di IV generazione nel raggiungimento degli obiettivi di policy.**

La **diffidenza** verso l'energia nucleare è stata esacerbata da eventi come gli incidenti di Chernobyl e Fukushima, i quali hanno influenzato l'opinione pubblica e hanno portato a una serie di referendum che hanno espresso contrarietà alla produzione nucleare nel paese.

I sondaggi realizzati nel 2011 mostravano un paese preoccupato per la sicurezza e il rischio di incidenti nucleari, specialmente considerando la vicinanza geografica delle centrali nucleari dei paesi confinanti, chiamato **“rischio prossimità”**.

Tuttavia, nonostante le sfide, ci sono segnali di interesse e potenziale nel settore nucleare italiano. Collaborazioni come quella tra Newcleo, Fincantieri e RINA per lo studio di fattibilità sulle applicazioni nucleari nell'industria navale indicano un rinnovato interesse per l'utilizzo delle tecnologie nucleari in settori diversi dall'energia elettrica, come l'industria manifatturiera e il trasporto marittimo. Queste iniziative potrebbero aprire nuove opportunità per l'innovazione e la diversificazione economica, mentre si esplorano soluzioni sostenibili per affrontare le sfide energetiche e ambientali del futuro.

La recente costituzione dell'**alleanza sugli SMR** rappresenta un'opportunità unica per l'Italia di collaborare con altri paesi europei e attori internazionali nel campo della ricerca, sviluppo e implementazione di tecnologie nucleari avanzate. **Aprire le porte a partnership internazionali, sia pubbliche che private, potrebbe consentire all'Italia di accedere a risorse, competenze e know-how che altrimenti sarebbero difficili da raggiungere autonomamente.** Tuttavia, è importante in questo contesto promuovere standard e regolamentazioni comuni per gli SMR, facilitando così l'armonizzazione delle politiche e la condivisione delle best practices, facendo molta attenzione alla sicurezza, alla non proliferazione nucleare e alla gestione dei rifiuti radioattivi.

PROPOSTE DI POLICY

L'adozione degli SMR rappresenta una promettente opportunità per affrontare le sfide legate alle emissioni di carbonio nel settore energetico e industriale. Le proposte di policy di seguito esposte mirano a fornire incentivi e supporto per promuovere l'implementazione responsabile degli SMR, contribuendo così alla transizione verso un'economia a basso utilizzo di combustibili fossili. In dettaglio:

1 Incentivare la ricerca e lo sviluppo

Stanzare finanziamenti e agevolazioni fiscali per la ricerca e lo sviluppo di tecnologie SMR avanzate, prioritizzando soluzioni a bassa emissione di carbonio e sicurezza nucleare.

2 Stimolare investimenti privati

Creare un ambiente favorevole agli investimenti privati nello sviluppo e nell'implementazione degli SMR attraverso incentivi fiscali, agevolazioni e collaborazioni pubblico-privato.

3 Sostenere l'integrazione industriale:

Favorire la collaborazione tra settori industriali e produttori di SMR per sviluppare applicazioni industriali innovative, come la produzione di calore per processi chimici a basse emissioni di carbonio.

4 Normative e standard

Definire normative chiare e standard di sicurezza specifici per gli SMR, garantendo un approccio rigoroso e uniforme a livello globale.

5

Implementare un **sistema di valutazione ambientale** per garantire che gli SMR aderiscano a standard ecologici e siano conformi alle leggi ambientali.

6

Formazione e istruzione

Promuovere programmi di formazione e istruzione per professionisti del settore nucleare e industriale, garantendo una forza lavoro qualificata per l'implementazione e la gestione sicura degli SMR

7

Partnership internazionali

1) Favorire la cooperazione internazionale per la condivisione di conoscenze, risorse e best practice nell'implementazione degli SMR, promuovendo la diffusione globale di questa tecnologia.

8

Monitoraggio ambientale

Implementare sistemi di monitoraggio ambientale per valutare l'impatto degli SMR sull'ambiente circostante e garantire la sostenibilità a lungo termine.

Bibliografia e Sitografia

Commissione Europea. (2024). Raccomandazione della Commissione su un obiettivo di riduzione delle emissioni per il 2040 per tracciare il percorso verso la neutralità climatica entro il 2050.

Wired. (2022). “Alla fine la Commissione europea ha inserito gas e nucleare nell'elenco degli investimenti sostenibili”.

World Nuclear Association. (2024). Nuclear Power in the European Union

Camera dei Deputati. (2023). Allegato al DEF 2023 - Relazione sullo stato di attuazione degli impegni per la riduzione delle emissioni di gas serra

Enea Magazine, “Il nucleare italiano nel panorama internazionale ed europeo”.

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. (2023). Nucleare, pubblicato l'elenco delle 51 aree idonee alla localizzazione del Deposito nazionale.

ENEA. Il nucleare di nuova generazione

World Nuclear Association. (2023). Are there different types of nuclear reactor?

International Atomic Energy Agency (IAEA). (2023). What are Small Modular Reactors (SMRs)?

IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). (2020). Advances in Small Modular Reactor Technology Developments

T. Feia, K. Moa , Y. Miaoa, C. Forsythb , R. Hua , S. Bhattachayaa , T. Kim, “Conceptual Core Design of The Molten Metal Fueled Microreactor with Self-Regulating Capability”. Argonne National Laboratory, University of California at Berkeley.

Björn Steigerwald, Jens Weibezahn, Martin Slowik, Christian von Hirschhausen. (2023). Uncertainties in Estimating Production Costs of Future Nuclear Technologies

Statista. (2023). Construction cost estimates of nuclear power reactors Vogtle 3 and 4 in the United States in selected years from 2009 to 2023

World Nuclear News. (2011). Coordinated US industry response to Fukushima

World Nuclear Association. (2024). Nuclear Power in Finland

https://www.i-week.it/wp-content/uploads/CS-iWeek-nucleare-IV-edizione_sondaggio-SWG_051023.pdf

International Energy Agency. (2021). Emissioni Nette pari a Zero entro il 2050: Una Tabella di Marcia per il Settore Energetico Globale

Il Post. (2022). La Francia costruirà sei nuovi reattori nucleari

IAEA “Nuclear Power and Secure Energy Transition”

Associazione Italiana Nucleare. (2021). L'energia nucleare a supporto della decarbonizzazione

Wired. (2023). La nuova alba dell'energia nucleare

Dow Inc. (2023). Dow and X-energy advance efforts to deploy first advanced small modular nuclear reactor at industrial site under DOE's Advanced Reactor Demonstration Program

Rivista Energia. (2023). Lezioni dal fallimento di NuScale

Qualenergia. (2023). Passo falso per il nucleare SMR: cancellato il primo progetto commerciale di NuScale

Reuters. (2024). Cancelled NuScale contract weighs heavy on new nuclear

AWARE

www.awarethinktank.it

info@awarethinktank.it

