

Ricerca e Presentazione su SMR e l'Energia Nucleare Oggi

Riepilogo Esecutivo

Il presente rapporto fornisce una panoramica approfondita dei Reattori Modulari di Piccola Taglia (SMR), esplorandone le caratteristiche distintive, i vantaggi e le sfide che ne ostacolano l'adozione su larga scala. Verrà inoltre analizzato lo stato attuale dell'energia nucleare a livello globale, evidenziandone il ruolo nella decarbonizzazione e nella sicurezza energetica, pur riconoscendone le intrinseche complessità.

L'importanza strategica dell'energia nucleare, in particolare con l'avvento degli SMR, nel soddisfare la crescente domanda energetica mondiale e gli obiettivi climatici sarà un tema centrale.

1. Reattori Modulari di Piccola Taglia (SMR): Definire la Prossima Generazione di Energia Nucleare

Questa sezione approfondisce gli aspetti tecnici e operativi degli SMR, differenziandoli dagli impianti nucleari convenzionali ed esplorando le innovazioni che li posizionano come una tecnologia potenzialmente trasformativa nel panorama energetico globale.

1.1. Cosa sono gli SMR? Definizione, Caratteristiche Fondamentali e Innovazioni Tecnologiche

I Reattori Modulari di Piccola Taglia (SMR) sono definiti come reattori nucleari avanzati con una potenza massima di 300 Megawatt elettrici (MWe) per unità, capaci di produrre circa 7,2 milioni di kWh al giorno.¹ Questa capacità è notevolmente inferiore rispetto alle centrali nucleari di grandi dimensioni, che tipicamente superano i 1.000 MWe e possono produrre circa 24 milioni di kWh al giorno.¹ L'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA) definisce specificamente gli SMR come aventi una capacità di potenza fino a 300 MW(e) per unità, pari a circa un terzo della capacità di generazione dei reattori nucleari tradizionali.⁴

Una caratteristica distintiva degli SMR è la loro modularità, che consente ai loro sistemi e componenti di essere assemblati in fabbrica.¹ Queste unità prefabbricate possono poi essere trasportate come moduli o persino come unità complete in una località specifica per l'installazione, riducendo significativamente i costi di costruzione e installazione in loco e potenzialmente accorciando i tempi complessivi del progetto.¹ Questo approccio si contrappone nettamente ai grandi reattori di potenza, che sono spesso progettati su misura per una particolare località.⁴ La fabbricazione in fabbrica offre anche il potenziale per economie di scala e un migliore controllo di qualità grazie agli ambienti di produzione standardizzati.⁵ Questo passaggio dalla costruzione su

misura e su larga scala di impianti nucleari tradizionali a un modello basato sulla fabbricazione in serie e sull'assemblaggio modulare rappresenta un cambiamento fondamentale nell'intero processo di realizzazione dei progetti nucleari. Si tratta di una vera e propria industrializzazione dell'energia nucleare, trasformandola da un'infrastruttura unica e ingegnerizzata su misura in un prodotto più ripetibile e fabbricato. Questo potrebbe avere un impatto profondo sulle catene di approvvigionamento, sui requisiti di manodopera e sui modelli di finanziamento, rendendo potenzialmente l'energia nucleare un'opzione più accessibile e praticabile per una gamma più ampia di paesi e regioni, in particolare quelli con infrastrutture di rete più piccole o capacità di costruzione meno sviluppate, dove i grandi impianti convenzionali sarebbero economicamente o logisticamente impraticabili.

Gli SMR comprendono una vasta gamma di progetti di reattori, inclusi quelli basati su concetti tradizionali di reattori ad acqua leggera (ad esempio, reattori ad acqua pressurizzata integrali, PWR compatti, reattori ad acqua bollente) e concetti più avanzati di Generazione IV.⁴ La scelta del refrigerante varia, includendo acqua leggera, metallo liquido (come sodio o piombo), sale fuso o elio, a seconda della tecnologia specifica.¹ Gli SMR basati su tecnologie non ad acqua leggera sono spesso chiamati Reattori Modulari Avanzati (AMR).¹ I progetti SMR di Generazione IV sono particolarmente degni di nota in quanto possono operare a temperature più elevate senza la necessità di vasi di contenimento significativamente pressurizzati, il che migliora intrinsecamente la loro sicurezza e il loro profilo economico.⁴

I progetti SMR proposti presentano generalmente configurazioni più semplici rispetto ai grandi reattori esistenti.⁴ Un concetto di sicurezza fondamentale negli SMR si basa fortemente su sistemi di sicurezza passivi (inerenti), che utilizzano forze naturali come la gravità e la circolazione naturale per il raffreddamento del nucleo del reattore, anche in situazioni di incidente o emergenza.¹ Questa filosofia di progettazione aumenta significativamente il tempo a disposizione degli operatori per reagire e richiede azioni molto limitate, o addirittura nulle, da parte degli operatori per portare il reattore in uno stato sicuro.¹ Questi sistemi di sicurezza passivi consentono anche l'eliminazione di una serie di componenti (ad esempio, pompe di sicurezza, valvole, tubazioni e cavi), limitando di fatto il rischio di guasto.¹ Gli SMR beneficiano inoltre dell'esperienza operativa acquisita dai grandi reattori tradizionali e dai reattori di piccola scala utilizzati nei sottomarini nucleari e in altre navi a propulsione nucleare.¹ La ricerca sui combustibili tolleranti agli incidenti (ATF), come i composti di carburo di silicio e le leghe di zirconio rivestite, è fondamentale per migliorare la sicurezza degli SMR mantenendo l'integrità del combustibile in condizioni di incidente e minimizzando il rilascio di materiali radioattivi.⁵ Questo approccio rappresenta un'evoluzione

significativa nella filosofia della sicurezza nucleare, passando da sistemi attivi complessi che richiedono un intervento umano significativo a progetti intrinsecamente "a prova di errore". Semplificando i sistemi di sicurezza e riducendo i potenziali punti di guasto, gli SMR mirano a limitare intrinsecamente la scala e le conseguenze di potenziali incidenti. Se dimostrata e comunicata con successo, questa sicurezza intrinseca migliorata potrebbe cambiare radicalmente la percezione pubblica e snellire i processi normativi, che storicamente sono stati ostacoli importanti alla diffusione dell'energia nucleare.

Gli SMR offrono una significativa flessibilità di dispiegamento, potendo essere impiegati come unità singole o come impianti multi-modulo per soddisfare le diverse esigenze energetiche.² I loro progetti si adattano a varie configurazioni di reattori sia per applicazioni terrestri che marine, incluse configurazioni mobili e multi-modulo.⁴

1.2. Vantaggi degli SMR

I Reattori Modulari di Piccola Taglia (SMR) presentano una serie di benefici che potenzialmente superano le limitazioni degli impianti nucleari tradizionali, estendendosi a dimensioni economiche, di sicurezza, operative e ambientali.

In termini di **efficienze economiche e di costruzione**, il design modulare e l'approccio di fabbricazione in fabbrica degli SMR possono portare a costi iniziali di capitale inferiori rispetto ai massicci investimenti richiesti per i progetti nucleari su larga scala.⁴ Ciò è dovuto alle efficienze derivanti dalla produzione standardizzata e dalla ridotta complessità della costruzione in loco. La capacità di fabbricare componenti in fabbrica e assemblarli in loco riduce significativamente i tempi di costruzione. Questo approccio modulare può portare a tempi di progetto sostanzialmente più brevi, abbassando così i costi complessivi del progetto riducendo gli oneri finanziari e accelerando la generazione di entrate.⁵ Alcuni progetti SMR hanno già dimostrato il potenziale per tempi di costruzione relativamente brevi.⁴ La produzione in serie di SMR in un ambiente di fabbrica consente significative efficienze di costo attraverso economie di scala, un vantaggio non facilmente ottenibile con i grandi reattori costruiti su misura.¹ Poiché i componenti o persino intere unità possono essere trasportati al sito, la necessità di estese infrastrutture di costruzione in loco e di manodopera è ridotta, portando a minori costi di installazione.¹

Le **caratteristiche di sicurezza e protezione migliorate** sono un altro pilastro degli SMR. Essi incorporano spesso caratteristiche di sicurezza passive che si basano su forze naturali come la gravità e la convezione per spegnere in sicurezza il reattore in situazioni di emergenza, minimizzando la necessità di intervento attivo o di alimentazione esterna.¹ I progetti intrinsecamente più semplici degli SMR, rispetto ai

reattori su larga scala, riducono la complessità sia della costruzione che dell'operazione, contribuendo alla sicurezza complessiva.⁴ Le dimensioni ridotte del nucleo degli SMR limitano intrinsecamente le potenziali conseguenze di un incidente nucleare, poiché è coinvolta una minore quantità di materiale radioattivo.³ Alcuni progetti SMR sono specificamente destinati all'installazione sotterranea, il che fornisce una protezione fisica aggiuntiva contro eventi esterni come terremoti, tsunami o potenziali attacchi terroristici.⁵ La fabbricazione dei reattori in un ambiente di fabbrica controllato consente di mantenere costantemente standard di sicurezza e controllo qualità più elevati durante l'intero processo di produzione.³

La **flessibilità operativa e la versatilità** sono vantaggi chiave. Grazie al loro ingombro ridotto, alla minore potenza e ai minori requisiti di acqua di raffreddamento, gli SMR offrono una maggiore flessibilità nella scelta del sito rispetto ai grandi impianti nucleari. Possono essere posizionati in luoghi non adatti a centrali nucleari più grandi, comprese aree remote o poco servite dove le infrastrutture energetiche tradizionali potrebbero essere carenti.¹ Gli SMR possono essere impiegati in modo modulare, consentendo alle utility di aggiungere capacità di generazione in modo incrementale secondo necessità, abbinando la crescente domanda di energia in modo più preciso e riducendo i rischi di investimento iniziali.⁴ Gli SMR possono fornire energia di base affidabile e dispacciabile, il che significa che possono regolare la loro produzione per soddisfare la domanda di elettricità.⁷ Questa capacità è cruciale per garantire la stabilità e la resilienza delle reti elettriche che incorporano una quota sempre maggiore di fonti di energia rinnovabile intermittenti come l'eolico e il solare.¹ I reattori modulari di piccola taglia non sono quindi semplicemente un'alternativa alle fonti rinnovabili, ma una tecnologia complementare cruciale che può consentire una maggiore penetrazione delle fonti energetiche variabili. La loro capacità di essere dispacciabili e le loro caratteristiche di stabilizzazione della rete affrontano direttamente il problema dell'intermittenza delle rinnovabili, spostando la narrazione da una competizione tra "nucleare contro rinnovabili" a una sinergia di "nucleare con rinnovabili", promuovendo un sistema energetico a basse emissioni di carbonio più integrato e resiliente.

Oltre alla generazione di elettricità, gli SMR sono unicamente adattati per fornire calore per varie applicazioni, inclusi processi industriali (come la desalinizzazione e la produzione di idrogeno), il teleriscaldamento per edifici residenziali e commerciali e la fornitura di elettricità a comunità remote o siti industriali non collegati alla rete principale.¹ Questa capacità estende significativamente il loro potenziale di mercato. Il caso economico per gli SMR è potenzialmente più robusto e diversificato rispetto a quello degli impianti nucleari convenzionali. Servendo più vettori energetici (elettricità,

calore, idrogeno), gli SMR possono accedere a una gamma più ampia di mercati e generare molteplici flussi di entrate. Questa diversificazione può migliorare la loro redditività economica complessiva, ridurre i rischi degli investimenti e renderli più attraenti per un più ampio spettro di clienti industriali e municipali che hanno specifiche esigenze di calore o idrogeno oltre all'elettricità. Questa capacità multiuso posiziona gli SMR come "hub energetici" ¹, accelerando potenzialmente gli sforzi di decarbonizzazione in settori difficili da abbattere come l'industria pesante, che sono difficili da elettrificare direttamente.

Infine, gli SMR contribuiscono in modo significativo alla **decarbonizzazione e alla stabilità della rete**. Come tutta l'energia nucleare, producono pochissime emissioni di gas serra durante il funzionamento, rendendoli una fonte di energia a basse emissioni di carbonio se valutati sull'intero ciclo di vita.¹ Fornendo energia di base affidabile e dispacciabile, gli SMR migliorano la stabilità e la resilienza della rete, specialmente in sistemi con un'alta penetrazione di fonti di energia rinnovabile variabili.⁵ Sono anche ben adatti a sostituire gli impianti alimentati a combustibili fossili, consentendo il mantenimento di opportunità di lavoro altamente qualificate in aree che altrimenti sarebbero colpite dalla chiusura di tali impianti.¹

1.3. Sfide e Svantaggi del Dispiegamento degli SMR

Nonostante i loro promettenti vantaggi, gli SMR devono affrontare diverse sfide e svantaggi significativi che devono essere superati per un dispiegamento diffuso.

Le **incognite economiche e i costi** rappresentano un ostacolo primario. Le stime attuali indicano che il costo di costruzione di un SMR varia da 1 a 3 miliardi di dollari USA per unità, includendo spese relative a costruzione, licenze e messa in servizio.⁹ Queste sono investimenti iniziali sostanziali. I costi previsti dell'elettricità dagli SMR sono stimati tra NT\$3 e NT\$5 per kWh, che è attualmente superiore al costo dell'elettricità prodotta dalle centrali nucleari tradizionali.⁹ È importante riconoscere che queste proiezioni di costo si basano su stime iniziali e potrebbero evolvere man mano che la tecnologia SMR matura e più progetti vengono completati, portando potenzialmente a riduzioni dei costi attraverso economie di scala.⁹ Sebbene gli SMR promettano costi di capitale iniziali inferiori per unità, la loro competitività economica complessiva rispetto ad altre fonti energetiche o persino all'energia nucleare su larga scala è "ancora da dimostrare".⁶ Questa incertezza è una sfida chiave per attrarre investimenti privati. Inoltre, come tutti i reattori nucleari, gli SMR richiederanno alla fine la disattivazione, un processo complesso e costoso che comporta lo smantellamento del reattore e la gestione sicura dei materiali radioattivi, il che si aggiunge ai costi operativi e di disattivazione a lungo termine.⁹ Questa situazione crea

un paradosso: mentre gli SMR sono commercializzati con la promessa di costi iniziali di capitale inferiori per unità e i benefici economici della fabbricazione in fabbrica e delle economie di scala, le proiezioni iniziali suggeriscono che il costo dell'elettricità potrebbe essere più alto rispetto agli impianti tradizionali, e la loro competitività economica complessiva è ancora incerta. La realizzazione di vere economie di scala potrebbe richiedere un investimento iniziale significativo nelle infrastrutture di fabbrica e il successo del dispiegamento di molteplici unità, il che necessita di una pipeline sostanziale di progetti.

La **gestione dei rifiuti radioattivi** rimane una sfida persistente. La generazione di scorie radioattive è una sfida intrinseca per tutti i reattori nucleari, inclusi gli SMR, che richiede stoccaggio e gestione sicuri a lungo termine.⁴ Questa questione è considerata una delle "sfide più intrattabili" che l'industria nucleare deve affrontare.¹¹ Le dimensioni più piccole degli SMR possono comportare una maggiore fuga di neutroni rispetto ai reattori più grandi, portando potenzialmente a una maggiore attivazione dei materiali strutturali (come acciaio e cemento) e di conseguenza generando un volume maggiore di rifiuti radioattivi.⁹ Inoltre, il combustibile nucleare esaurito degli SMR può presentare una radiotossicità più elevata rispetto al combustibile esaurito dei reattori convenzionali, sollevando preoccupazioni sulla gestione dei rifiuti a lungo termine e sul potenziale impatto ambientale.⁹ Trovare soluzioni di smaltimento sicure e permanenti per i rifiuti che rimangono pericolosamente radioattivi per migliaia di anni è una questione complessa e politicamente delicata.¹¹ Attualmente, gran parte dei rifiuti nucleari mondiali è stoccata in strutture temporanee, come piscine di stoccaggio in loco e stoccaggio in contenitori a secco, in attesa di un sito di smaltimento finale.¹¹ Cicli del combustibile avanzati, che prevedono il riprocessamento e il riciclo del combustibile nucleare, sono in fase di esplorazione come potenziali soluzioni per ridurre il volume e la radioattività dei rifiuti nucleari.⁵

Gli **ostacoli normativi e di licenza** sono significativi. Il processo per ottenere licenze e navigare nei quadri normativi per i nuovi progetti di reattori, inclusi gli SMR, può essere lungo e costoso.⁹ I quadri normativi esistenti sono spesso progettati per reattori più grandi e su misura, rendendo il processo di approvazione per i nuovi progetti SMR più complesso e potenzialmente ritardandone il dispiegamento.⁴ Sono necessari processi normativi snelli ed efficienti per consentire un dispiegamento tempestivo.¹⁰ L'IAEA ha identificato quadri normativi robusti come una sfida chiave nel dispiegamento degli SMR.⁴ Il ritmo e la scala del dispiegamento degli SMR non dipendono solo dalla prontezza tecnologica o dal finanziamento, ma sono criticamente dipendenti dalla capacità degli organismi normativi nazionali e

internazionali di adattarsi e creare percorsi di approvazione efficienti, seppur rigorosi, per questi nuovi progetti. Questo presenta un dilemma: i regolatori hanno bisogno di esperienza con gli SMR per snellire i processi, ma gli SMR hanno bisogno di processi snelli per acquisire esperienza di dispiegamento su larga scala.

Infine, la **accettazione pubblica e le preoccupazioni geopolitiche/di sicurezza** costituiscono barriere importanti. Superare le preoccupazioni e lo scetticismo di lunga data del pubblico sull'energia nucleare rimane un ostacolo significativo al dispiegamento diffuso.⁴ Lo "spettro di eventi come Chernobyl e Fukushima incombe sulla coscienza pubblica" ¹¹, nonostante i progressi nella sicurezza. L'identificazione di siti idonei per gli SMR, in particolare in regioni densamente popolate, può rivelarsi difficile a causa della potenziale resistenza delle comunità locali preoccupate per la sicurezza e gli impatti ambientali.⁹ Garantire misure di sicurezza robuste per proteggere le strutture SMR da potenziali minacce, come terrorismo, sabotaggio o guerra, è cruciale.⁹ L'implementazione e il mantenimento di queste rigorose misure di sicurezza si aggiungono ai costi operativi degli SMR.⁹ Una preoccupazione fondamentale è garantire che la tecnologia SMR non venga utilizzata per la proliferazione di armi. Ciò richiede salvaguardie rigorose e supervisione internazionale per prevenire la deviazione di materiali nucleari, con una preferenza per i progetti resistenti alla proliferazione.¹⁰

1.4. Stato Globale e Prospettive Future per gli SMR

L'interesse globale per gli SMR è in rapida crescita, con oltre 80 progetti SMR in diverse fasi di sviluppo in 18 paesi.¹ Il database ARIS (Advanced Reactors Information System) dell'IAEA elenca circa 70 progetti SMR attivi in varie fasi di sviluppo e dispiegamento in tutto il mondo ⁶, con l'edizione 2024 che registra i progressi di 56 dei 98 progetti identificati a novembre 2023.⁴ L'Unione Europea sta attivamente sostenendo le attività di ricerca e sviluppo sugli SMR nell'ambito del suo Programma di Ricerca e Formazione Euratom (2021-2025), con una forte enfasi sulla sicurezza nucleare, la protezione, le salvaguardie, la protezione dalle radiazioni e la gestione dei rifiuti radioattivi, nonché sullo sviluppo delle competenze nucleari.¹

Unità SMR sono già dispiestate e operative in Cina e nella Federazione Russa.⁶ A livello globale, quattro SMR sono attualmente in fasi avanzate di costruzione in Argentina, Cina e Russia.² Progetti specifici degni di nota includono: il reattore PWR integrale CAREM, in costruzione in Argentina, con l'obiettivo di raggiungere la prima criticità entro il 2028 ⁶; l'SMR ACP100 della Cina, la cui costruzione è iniziata nel 2021, con l'operazione commerciale prevista entro il 2026 ⁶; due unità del tipo KLT-40S, PWR, che sono operative dal 2020 sulla centrale nucleare galleggiante Akademik

Lomonosov a Pevek, Federazione Russa, dimostrando il dispiegamento in ambiente marino ⁶; il modulo a letto di ciottoli (HTR-PM) a temperatura elevata della Cina è stato collegato alla rete nel dicembre 2021 e opera a piena potenza dal 2022.⁶

L'interesse globale per i reattori di piccole e medie dimensioni o modulari è in aumento grazie alla loro capacità di soddisfare la necessità di generazione di energia flessibile per una gamma più ampia di utenti e applicazioni, inclusa la sostituzione di centrali elettriche a combustibili fossili invecchiate.² Le ultime proiezioni dell'IAEA indicano un ruolo futuro significativo per l'energia nucleare, con la capacità nucleare mondiale che potrebbe aumentare di due volte e mezzo rispetto al livello attuale entro il 2050. Un quarto sostanziale di questa nuova capacità è previsto provenire dagli SMR.⁶ Questa prospettiva positiva è rafforzata dalla prima storica Global Stocktake nell'ambito dell'Accordo di Parigi approvata alla COP28 nel 2023, dove 198 paesi firmatari della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici hanno incluso il nucleare tra le tecnologie il cui dispiegamento doveva essere accelerato per raggiungere emissioni nette zero di carbonio.⁶ Inoltre, più di 20 paesi si sono impegnati a triplicare la capacità nucleare globale alla COP28.⁶

Gli SMR stanno emergendo come una soluzione convincente per le nuove e crescenti esigenze energetiche. Le aziende tecnologiche stanno già stringendo accordi con i produttori di SMR per alimentare in modo pulito i loro data center ad alta intensità energetica, una domanda trainata in gran parte dall'aumento dell'intelligenza artificiale, delle criptovalute e dei veicoli elettrici.³ I paesi in via di sviluppo stanno sempre più considerando gli SMR come un'opzione più economica e flessibile per reti più piccole, migliorando la loro indipendenza energetica.⁶ L'avvento degli SMR sta consentendo all'energia nucleare di penetrare mercati e applicazioni precedentemente inesplorati. Ciò include nazioni che non potevano ospitare o permettersi grandi reattori convenzionali, così come settori industriali specifici con requisiti di potenza immensi, affidabili e a basse emissioni di carbonio. Questa diversificazione dei fattori di domanda potrebbe accelerare il dispiegamento e l'innovazione degli SMR, portando potenzialmente a una più ampia "rinascita nucleare" guidata non solo da mandati nazionali di sicurezza energetica e decarbonizzazione, ma anche da specifiche esigenze energetiche industriali e regionali.

Gli SMR sono ampiamente riconosciuti come una delle tecnologie più promettenti per il futuro della produzione energetica.³ La loro potenziale integrazione negli ambienti urbani potrebbe ridefinire il modo in cui l'infrastruttura energetica è concepita, offrendo soluzioni compatte e flessibili che possono adattarsi al tessuto urbano.³ Il percorso dal concetto al dispiegamento diffuso per gli SMR è un processo complesso

e multifaccettato che richiede uno sforzo sostenuto e coordinato tra maturità tecnologica, quadri politici di supporto, investimenti significativi in ricerca e sviluppo e strategie di commercializzazione di successo. Sebbene vi sia una forte volontà politica e un sostegno alla ricerca e sviluppo, la transizione verso l'operazione commerciale su larga scala è ancora agli inizi e deve affrontare ostacoli come l'adattamento normativo e la dimostrazione della competitività economica a lungo termine.

2. L'Energia Nucleare Oggi: Panorama Globale e Imperativi Strategici

Questa sezione fornisce una panoramica completa dello stato attuale dell'energia nucleare a livello globale, valutando il suo contributo al mix energetico mondiale, i suoi benefici strategici nel contesto del cambiamento climatico e della sicurezza energetica, e le sfide durature che deve affrontare.

2.1. Stato Globale Attuale dell'Energia Nucleare: Reattori Operativi, Capacità e Quota di Elettricità

Le centrali nucleari sono attualmente operative in 31 paesi in tutto il mondo.⁷ Questi impianti generano collettivamente circa un decimo (circa il 10%) della produzione totale di elettricità mondiale.⁷ A partire da ottobre 2023 / maggio 2025 (a seconda della fonte specifica e della frequenza di aggiornamento ⁷), ci sono tra 416 e 419 reattori operativi a livello globale, con una capacità elettrica netta combinata che varia da 376.283 MWe a 378,1 GW.⁷ La generazione totale di elettricità nucleare a livello globale registrata è di 2.552.067 GWh, contribuendo per il 9,15% all'elettricità totale mondiale.¹⁴ La maggior parte di questi reattori operativi è concentrata in Europa, Nord America e Asia orientale.¹⁴

Per quanto riguarda le **nuove costruzioni e le proiezioni future**, a maggio 2025, c'erano 66 reattori con una capacità netta di 61.637 MWe in costruzione a livello globale.¹⁴ La Cina è in testa a questa nuova costruzione, con 30 reattori (34.365 MWe) attualmente in costruzione, rappresentando quasi la metà delle nuove costruzioni globali.¹⁴ La Russia segue con 7 reattori (5.290 MWe) in costruzione.¹⁴ Altri paesi che stanno attivamente costruendo nuovi reattori includono Bangladesh, Egitto, India, Iran, Pakistan, Turchia, Ucraina e Regno Unito.¹⁴ Le ultime proiezioni dell'IAEA sono molto ottimistiche, prevedendo che la capacità nucleare mondiale potrebbe aumentare di due volte e mezzo rispetto al livello attuale entro il 2050.⁶ Una parte significativa di questa capacità nuova prevista, in particolare un quarto, è prevista provenire dai Reattori Modulari di Piccola Taglia (SMR).⁶ Questa prospettiva positiva è rafforzata dalla storica prima Global Stocktake nell'ambito dell'Accordo di Parigi alla COP28 nel

2023, dove 198 paesi firmatari della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici hanno incluso il nucleare tra le tecnologie il cui dispiegamento doveva essere accelerato per raggiungere emissioni nette zero di carbonio.⁶ Inoltre, più di 20 paesi si sono impegnati a triplicare la capacità nucleare globale alla COP28.⁶

Per decenni, l'energia nucleare ha subito una stagnazione o persino un'eliminazione graduale in molte parti del mondo, in particolare dopo incidenti come Chernobyl e Fukushima. Tuttavia, la recente inclusione del nucleare tra le tecnologie da accelerare per le emissioni nette zero di carbonio nella Global Stocktake della COP28 e la proiezione dell'IAEA di un aumento di 2,5 volte della capacità nucleare entro il 2050 segnalano un profondo cambiamento. Ciò è ulteriormente rafforzato dall'impegno di oltre 20 paesi alla COP28 di triplicare la capacità nucleare globale. C'è un chiaro e rinnovato riconoscimento globale del ruolo critico e indispensabile dell'energia nucleare nel raggiungimento di ambiziosi obiettivi di cambiamento climatico. Questo segna un significativo cambiamento nella politica internazionale e nel sentimento degli investimenti, superando il rallentamento post-Fukushima. Lo slancio politico, come evidenziato dai risultati della COP28, indica una più ampia accettazione che la decarbonizzazione alla scala e al ritmo richiesti necessita di tutte le fonti di energia a basse emissioni di carbonio disponibili, incluso il nucleare.

Di seguito, una tabella che riassume le statistiche chiave sulla potenza nucleare globale:

Statistiche Globali sull'Energia Nucleare (a partire da Ottobre 2023 / Maggio 2025)

Paese	Reattori in Uso	Reattori in Costruzione	Capacità (MW)	Generazione (GWh)	% del Totale	Fattore di Capacità (%)*
Mondo (Totale)	416-419	66	376,283 - 397,600	2,552,067	9.15% - 10%	83.9%
Stati Uniti	94	0	96,952	779,186	18.6%	94.1%
Cina	58	30	56,888	406,484	4.9%	89.8%
Francia	57	0	63,000	323,773	64.8%	67.3%

Russia	36	7	27,727	203,957	18.4%	83.1%
Corea del Sud	26	2	25,825	171,640	31.5%	80.2%
Canada	17	0	12,669	83,465	13.7%	69.7%
Ucraina	15	2	13,107	81,126	55.0%	71%
Giappone	14	2	31,679	77,539	5.6%	29.5%
Spagna	7	0	7,123	54,371	20.3%	89.8%
India	21	6	8,055	44,646	3.1%	84.6%
Svezia	6	0	6,944	46,648	28.6%	79.8%
Regno Unito	9	2	5,883	37,278	12.5%	73%
Finlandia	5	0	4,369	32,759	42.0%	93.9%
Belgio	4	0	3,463	31,289	41.2%	90.1%
Emirati Arabi Uniti	4	0	5,348	31,206	19.7%	91.2%
Repubblica Ceca	6	0	3,934	28,728	40.0%	83.9%
Svizzera	4	0	2,973	23,404	32.4%	91.1%
Pakistan	6	1	3,262	22,383	17.4%	84.5%
Slovacchia	5	1	2,308	17,005	61.3%	94%
Bulgaria	2	0	2,006	15,488	40.4%	87.7%
Ungheria	4	0	1,916	15,092	48.8%	90%

Brasile	2	1	1,884	13,695	2.2%	82.7%
Messico	2	0	1,552	12,044	4.9%	90.2%
Bielorussia	2	0	2,220	10,997	28.6%	81%
Romania	2	0	1,300	10,312	18.9%	92.5%
Argentina	3	1	1,641	8,963	6.3%	63.1%
Sudafrica	2	0	1,854	8,154	4.4%	62%
Iran	1	1	915	6,071	1.7%	75.3%
Slovenia	1	0	688	5,332	36.8%	87.8%
Paesi Bassi	1	0	482	3,771	3.4%	90.1%
Armenia	1	0	416	2,512	31.1%	70.2%
Bangladesh	0	2	2,160	—	—	—
Egitto	0	4	4,400	—	—	—
Turchia	0	4	4,456	—	—	—
Germania	3	0	4,055	6,723	1.4%	—

Nota: I dati sul fattore di capacità non sono consistentemente disponibili per tutti i paesi in costruzione o con dati aggregati. I dati sono basati su ¹⁴ e riflettono lo stato al 2023/2025 a seconda della fonte.

Le statistiche mostrano chiaramente una vasta disparità nel ruolo dell'energia nucleare tra i paesi. Mentre alcune nazioni come Francia, Slovacchia e Ucraina dipendono dal nucleare per la maggior parte della loro elettricità ¹⁴, altre, come Cina e Stati Uniti, sono produttori massicci in termini assoluti ma hanno una quota

percentuale minore del loro mix energetico totale.¹⁴ Inoltre, esiste una netta divisione tra i paesi che stanno costruendo aggressivamente nuovi reattori (ad esempio, Cina, Russia, Egitto, Turchia) e quelli con flotte stabili o persino che perseguono politiche di eliminazione graduale (ad esempio, Germania, Belgio, riavvii post-Fukushima del Giappone).¹⁴ Questa diversità significa che un approccio "taglia unica" alla politica energetica nucleare o al dispiegamento degli SMR sarà inefficace. Strategie di successo devono essere meticolosamente adattate ai contesti nazionali specifici, agli ambienti normativi e alle sfide energetiche uniche.

2.2. Benefici dell'Energia Nucleare nel Contesto Moderno

L'energia nucleare è una fonte energetica a basse emissioni di carbonio, rendendola uno strumento cruciale per la **decarbonizzazione e la mitigazione del cambiamento climatico**.⁵ L'impatto dell'energia nucleare sulla riduzione delle emissioni di carbonio è sostanziale. Solo negli Stati Uniti, l'elettricità generata dal nucleare evita all'atmosfera oltre 470 milioni di tonnellate metriche di emissioni di anidride carbonica che altrimenti proverrebbero dai combustibili fossili.¹⁶ A livello globale, l'energia nucleare ha prevenuto circa 70 gigatonnellate (Gt) di emissioni di CO₂ negli ultimi cinque decenni e continua a evitare più di 1 Gt di CO₂ annualmente.⁷ L'energia nucleare è esplicitamente riconosciuta come un attore chiave nella lotta globale contro il cambiamento climatico ed è cruciale per accelerare i progressi verso gli obiettivi di emissioni nette zero di carbonio, come sottolineato dall'Accordo di Parigi e dalla COP28.⁶ L'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA) riconosce una nuova era per l'energia nucleare, poiché la domanda di elettricità pulita e sicura cresce in tutto il mondo, posizionandola come un attore chiave nella transizione verso fonti energetiche sostenibili.⁷ Paesi come la Francia lo dimostrano, con oltre il 90% della sua elettricità proveniente da fonti a basse emissioni di carbonio, di cui il 70% è nucleare, con conseguenti emissioni di CO₂ estremamente basse dalla generazione di elettricità.⁷

Un vantaggio critico dell'energia nucleare è la sua **dispacciabilità**, fondamentale per la **sicurezza energetica e l'affidabilità della rete**. A differenza delle fonti intermittenti come l'eolico e il solare, le centrali nucleari possono operare costantemente 24 ore su 24, 7 giorni su 7, e sono in grado di regolare la loro produzione per soddisfare la domanda di elettricità, fornendo una fornitura di energia affidabile e controllabile.⁷ Le strutture nucleari forniscono energia di base stabile, essenziale per mantenere la stabilità e la resilienza della rete, specialmente quando le reti integrano quantità crescenti di energia rinnovabile variabile.⁵ Fornendo una fonte interna di elettricità, l'energia nucleare, inclusi gli SMR, può ridurre significativamente la dipendenza di una nazione dai combustibili fossili importati. Ciò migliora

l'indipendenza e la sicurezza energetica, il che è particolarmente importante per i paesi con risorse energetiche interne limitate.¹⁰ Al di là dei suoi benefici ambientali, l'energia nucleare offre un percorso significativo verso una maggiore sicurezza e indipendenza energetica nazionale. Fornendo una fonte di elettricità stabile, prevedibile e controllata a livello nazionale, essa isola i paesi dalla volatilità dei mercati internazionali dei combustibili fossili e dalle interruzioni geopolitiche dell'approvvigionamento. Questo rende l'energia nucleare un asset strategico cruciale per la resilienza e l'autosufficienza nazionale in un ambiente globale incerto.

L'energia nucleare fornisce una base stabile e a basse emissioni di carbonio che supporta l'ampia diffusione delle energie rinnovabili intermittenti come il solare e l'eolico, garantendo l'affidabilità complessiva della rete e accelerando la transizione verso l'energia pulita.⁷ Man mano che le reti elettriche integrano quote sempre maggiori di energia rinnovabile variabile, il valore intrinseco delle fonti di energia dispacciabili e a basse emissioni di carbonio come il nucleare aumenta drasticamente. L'energia nucleare fornisce i servizi essenziali di stabilità, affidabilità e bilanciamento della rete necessari per garantire una fornitura continua di energia anche quando le fonti rinnovabili variabili non generano (ad esempio, di notte, durante periodi di calma). Questo rende il nucleare non solo una fonte di energia "pulita", ma una fondamentale tecnologia "abilitante per la rete" per il futuro sistema energetico, consentendo una maggiore penetrazione delle energie rinnovabili senza compromettere la stabilità della rete.

2.3. Sfide Durature per l'Energia Nucleare

Nonostante i suoi vantaggi, l'industria dell'energia nucleare continua a fronteggiare sfide persistenti, tra cui alti costi, preoccupazioni per la sicurezza, la complessa questione dei rifiuti radioattivi e la percezione pubblica.

Uno degli ostacoli più significativi all'espansione dell'energia nucleare sono gli **alti costi iniziali di capitale e gli oneri finanziari**.¹¹ La costruzione di una centrale nucleare comporta ingegneria complessa, rigorose misure di sicurezza e un'ampia supervisione normativa, tutti fattori che contribuiscono a oneri finanziari sostanziali. Uno studio della World Nuclear Association indica che il "costo notturno" (il costo di costruzione escluse le spese di finanziamento) per le nuove centrali nucleari può variare da 2.000 a 9.000 dollari per kilowatt di capacità elettrica¹¹, evidenziando l'ingente spesa finanziaria. La portata di questi investimenti iniziali, spesso nell'ordine di miliardi di dollari, rende intrinsecamente difficile per le aziende ottenere i finanziamenti necessari e procedere con i progetti, portando a ritardi o cancellazioni.¹¹ La redditività finanziaria dell'energia nucleare, sia per le nuove costruzioni che per la

gestione continua delle infrastrutture esistenti, è una sfida complessa e duratura. L'industria deve attrarre investimenti massicci e a lungo termine per i nuovi progetti, finanziando contemporaneamente la disattivazione sicura degli impianti più vecchi e lo stoccaggio sicuro dei rifiuti. Ciò richiede meccanismi di finanziamento innovativi e spesso supportati dal governo per ridurre il rischio dei progetti, dati i loro lunghi tempi di sviluppo, le incertezze normative e la vastità del capitale richiesto.

Le **preoccupazioni per la sicurezza e la preparazione alle emergenze** rimangono una questione preminente per molti individui.⁸ Lo "spettro di eventi come Chernobyl e Fukushima incombe sulla coscienza pubblica", sollevando profonde domande sulla sicurezza e l'affidabilità della tecnologia nucleare.¹¹ Sebbene gli incidenti nucleari siano incredibilmente rari, il loro potenziale di devastazione immediata e di conseguenze ambientali e sanitarie a lungo termine è significativo.⁸ Per mitigare questi rischi, le centrali nucleari operano sotto una rigorosa supervisione normativa. Negli Stati Uniti, ad esempio, la Nuclear Regulatory Commission (NRC) applica parametri di sicurezza stringenti, utilizzando tecnologie avanzate per il monitoraggio in tempo reale e conducendo ispezioni sia annunciate che a sorpresa.⁸ Gli organismi internazionali e le agenzie normative nazionali stanno continuamente rafforzando gli standard di sicurezza.¹² Le moderne centrali nucleari sono progettate con molteplici strati di robusti sistemi di sicurezza che mirano a mitigare il rilascio di materiali nocivi nell'ambiente.⁸ I progressi nella progettazione dei reattori, come lo sviluppo di sistemi di sicurezza passivi, stanno rendendo le nuove centrali nucleari più sicure e resilienti.¹² La preparazione completa alle emergenze è fondamentale. Ogni impianto nucleare sviluppa piani di emergenza dettagliati in collaborazione con le autorità locali, statali e federali, inclusi procedure per l'evacuazione, il ricovero e la comunicazione. Vengono condotte esercitazioni regolari per garantire che sia il personale dell'impianto che le comunità locali siano preparati a rispondere efficacemente a vari scenari.⁸ È importante notare che, secondo la World Nuclear Association, l'energia nucleare ha uno dei tassi di mortalità più bassi per unità di elettricità generata rispetto ad altre fonti energetiche come petrolio, carbone e persino alcune fonti rinnovabili.⁸

Il **problema persistente dello smaltimento dei rifiuti nucleari** è forse una delle sfide più intrattabili e politicamente cariche che l'industria nucleare deve affrontare.¹¹ Le centrali nucleari generano combustibile nucleare esaurito, che rimane pericolosamente radioattivo per migliaia di anni, richiedendo metodi di smaltimento sicuri e isolati.⁵ Attualmente, gran parte dei rifiuti nucleari mondiali è stoccata in strutture temporanee, come piscine di stoccaggio in loco e stoccaggio a secco in contenitori, in attesa di un sito di smaltimento finale e permanente.¹¹ Trovare soluzioni di smaltimento a lungo termine politicamente e socialmente accettabili si è dimostrato

eccezionalmente difficile. L'esempio del deposito di rifiuti nucleari di Yucca Mountain negli Stati Uniti, che ha affrontato un'intensa opposizione ed è stato infine defanziato, evidenzia i significativi ostacoli alla creazione di depositi permanenti.¹¹ Cicli del combustibile avanzati, come quelli che prevedono il riprocessamento e il riciclo del combustibile nucleare, sono in fase di ricerca come potenziale mezzo per ridurre il volume e la radioattività dei rifiuti nucleari, migliorando così le pratiche di gestione dei rifiuti.⁵

Infine, i **rischi per la sicurezza e la percezione pubblica** sono fattori cruciali. Le strutture nucleari, per loro natura, sono potenziali obiettivi per varie minacce, inclusi terrorismo, sabotaggio o atti di guerra.⁹ Garantire misure di sicurezza robuste per proteggere queste strutture è cruciale e si aggiunge ai loro costi operativi.⁹ Le percezioni negative e le preoccupazioni sulla sicurezza, i rifiuti e la protezione spesso ostacolano lo sviluppo e il dispiegamento dei progetti nucleari.⁴ Superare queste preoccupazioni pubbliche profondamente radicate rimane una barriera significativa al dispiegamento diffuso e può portare a una forte opposizione locale alla localizzazione di nuove strutture.⁹ Nonostante i significativi progressi nei protocolli di sicurezza tecnica, una rigorosa supervisione normativa e un tasso di mortalità dimostrabilmente basso rispetto ad altre fonti energetiche, l'accettazione pubblica rimane un ostacolo importante al dispiegamento dell'energia nucleare. Questo scetticismo persistente è in gran parte radicato nello "spettro di Chernobyl e Fukushima" e nella questione irrisolta dello smaltimento a lungo termine dei rifiuti radioattivi. Ottenere una "licenza sociale per operare" per l'energia nucleare non riguarda solo il raggiungimento della sicurezza tecnica; riguarda altrettanto, se non di più, la costruzione e il mantenimento della fiducia pubblica attraverso la trasparenza, una comunicazione efficace del rischio e progressi tangibili sulle questioni più emotive come la gestione dei rifiuti.

Conclusione e Prospettive Strategiche

I Reattori Modulari di Piccola Taglia (SMR) rappresentano una significativa evoluzione nella tecnologia nucleare, offrendo vantaggi convincenti rispetto ai grandi reattori tradizionali in termini di modularità, fabbricazione in fabbrica, caratteristiche di sicurezza passive migliorate e flessibilità operativa.¹ La loro versatilità si estende oltre la generazione di elettricità ad applicazioni non elettriche cruciali come il calore per processi industriali, il teleriscaldamento e la produzione di idrogeno, posizionandoli come un componente cruciale per un mix energetico diversificato e a basse emissioni di carbonio e consentendo la decarbonizzazione in settori difficili da abbattere.¹ La capacità degli SMR di integrarsi e completare le fonti di energia rinnovabile intermittenti fornendo energia di base dispacciabile è un fattore abilitante critico per

la stabilità della rete in un sistema energetico in rapida decarbonizzazione.¹

L'energia nucleare, in particolare con l'avvento degli SMR, è strategicamente importante per affrontare la crescente domanda energetica globale, mitigare il cambiamento climatico e rafforzare la sicurezza energetica. Il rinnovato impegno globale verso l'energia nucleare, evidenziato da iniziative come la COP28 e le proiezioni dell'IAEA, sottolinea il suo ruolo indispensabile nel raggiungimento degli obiettivi di emissioni nette zero.

Tuttavia, il percorso verso un dispiegamento diffuso non è privo di ostacoli. Le incertezze sui costi, la gestione dei rifiuti radioattivi, le complessità normative e la necessità di una maggiore accettazione pubblica rimangono sfide significative. Il successo degli SMR dipenderà dal superamento di questi ostacoli attraverso una ricerca e sviluppo sostenuta, quadri normativi adattivi, meccanismi di finanziamento innovativi e un coinvolgimento proattivo del pubblico. L'energia nucleare, con il potenziale trasformativo degli SMR, è pronta a svolgere un ruolo sempre più significativo nel plasmare un futuro energetico globale resiliente, sicuro e decarbonizzato.

Bibliografia

1. Small Modular Reactors explained - Energy - European Commission, accesso eseguito il giorno maggio 29, 2025, https://energy.ec.europa.eu/topics/nuclear-energy/small-modular-reactors/small-modular-reactors-explained_en
2. Small modular reactors (SMR) | IAEA, accesso eseguito il giorno maggio 29, 2025, <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>
3. The Future of Energy: How Small Modular Reactors Are Changing the Game - Gensler, accesso eseguito il giorno maggio 29, 2025, <https://www.gensler.com/blog/future-of-energy-small-modular-reactors>
4. Small Modular Reactors: An overview - ANSTO, accesso eseguito il giorno maggio 29, 2025, <https://www.ansto.gov.au/news/small-modular-reactors-an-overview>
5. What Are The Benefits Of SMRs? → Question - Energy → Sustainability Directory, accesso eseguito il giorno maggio 29, 2025, <https://energy.sustainability-directory.com/question/what-are-the-benefits-of-smrs/>
6. Advances in SMR Developments 2024 - Scientific, technical publications in the nuclear field | IAEA, accesso eseguito il giorno maggio 29, 2025, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/p15790-PUB9062_web.pdf
7. Nuclear Energy in the Clean Energy Transition | IAEA, accesso eseguito il giorno maggio 29, 2025, <https://www.iaea.org/newscenter/news/nuclear-energy-in-the-clean-energy-transition>

8. Nuclear Power and Safety, accesso eseguito il giorno maggio 29, 2025, <https://www.nuscalepower.com/exploring-smrs/smr-101/nuclear-power-and-safety>
9. Small Modular Reactors: Pros and cons - EUROVIEW, accesso eseguito il giorno maggio 29, 2025, <https://euroview.ecct.com.tw/category-inside.php?id=2160>
10. What Future Role for SMRs? → Question - Energy → Sustainability Directory, accesso eseguito il giorno maggio 29, 2025, <https://energy.sustainability-directory.com/question/what-future-role-for-smrs/>
11. What Are Challenges Of Nuclear Energy? → Question, accesso eseguito il giorno maggio 29, 2025, <https://energy.sustainability-directory.com/question/what-are-challenges-of-nuclear-energy/>
12. Navigating the Safety and Waste Management Challenges of Nuclear Expansion, accesso eseguito il giorno maggio 29, 2025, <https://www.reportlinker.com/article/10682>
13. www.gensler.com, accesso eseguito il giorno maggio 29, 2025, <https://www.gensler.com/blog/future-of-energy-small-modular-reactors#:~:text=SMRs%20promise%20smaller%2C%20more%20versatile,associated%20with%20larger%20nuclear%20plants.>
14. Nuclear power by country - Wikipedia, accesso eseguito il giorno maggio 29, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_power_by_country
15. Nuclear Share of Electricity Generation in 2023 - (https://pris.iaea.org). - International Atomic Energy Agency, accesso eseguito il giorno maggio 29, 2025, <https://pris.iaea.org/pris/worldstatistics/nuclearshareofelectricitygeneration.aspx>
16. www.nei.org, accesso eseguito il giorno maggio 29, 2025, <https://www.nei.org/advantages/climate#:~:text=Nuclear%20Energy%20is%20Clean%20Energy,otherwise%20come%20from%20fossil%20fuels.>