

Guglielmo Lomonaco

Professore Associato di Impianti Nucleari,
Dipartimento di Ingegneria Meccanica,
Energetica, Gestionale e dei Trasporti (DIME),
Università degli Studi di Genova.



La Nuova Era dell'Energia Nucleare: SMR, AMR e Sostenibilità nella Transizione Energetica*

Analisi tecnico-divulgativa sulle tecnologie modulari, il PNIEC 2024 e la filiera industriale italiana

La transizione energetica verso il Net Zero richiede fonti programmabili e sostenibili. Questo articolo analizza il ruolo del nuovo nucleare, con focus su reattori modulari (SMR/AMR), sicurezza passiva, minimizzazione delle materie prime critiche e gestione delle scorie. Vengono inoltre delineati gli scenari PNIEC 2024 per l'Italia e il potenziale contributo della filiera industriale nazionale.

Introduzione e sfide della transizione energetica

Il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050 (Net Zero) impone una profonda revisione della strategia energetica globale. Sebbene l'espansione delle fonti rinnovabili intermittenti (come solare ed eolico) sia un pilastro fondamentale, un mix basato esclusivamente su di esse presenta una serie di criticità tecnico-economiche. La "decarbonizzazione dell'ultimo miglio" (i.e. dal 90% al 100%) comporterebbe infatti una lievitazione esponenziale dei costi di sistema, legata alle esigenze di stoccaggio energetico e agli ingenti investimenti per il potenziamento e il bilanciamento delle reti elettriche.

Un ulteriore elemento critico è la stabilità e l'inerzia della rete. A differenza dei generatori rinnovabili collegati tramite inverter, le centrali termoelettriche e nucleari tradizionali dispongono di grandi masse ro-

tanti sincrone (turbina-generatore). L'energia cinetica immagazzinata in queste turbine fornisce una risposta passiva e immediata alle oscillazioni di frequenza, contenendo le variazioni nei primi istanti successivi a un guasto, prima dell'intervento delle riserve di potenza regolabili.

Sotto il profilo della sostenibilità e dell'approvvigionamento, va considerato l'impiego di Materie Prime Critiche (CRM), come illustrato in tab. 1: l'integrazione del nuovo nucleare consentirebbe dunque di alleggerire la pressione sulle catene di fornitura mineraria.

* L'autore ha partecipato al Panel dedicato alla Transizione Energetica in occasione della 1ª Tappa 2026 di Aias on the Road «Leadership industriale in sicurezza sul lavoro e transizione energetica» tenutasi a Genova il 6 marzo 2026.

Tabella 1 Fabbisogno di Materie Prime Critiche (CRM) per fonte energetica (kg/GWh)

Fonte Energetica	CRM Totali (kg/GWh)	Principali Materiali Critici Impiegati
Solare Fotovoltaico	207.8	Silicio, Rame, Manganese, Terre Rare
Eolico	162.9	Rame, Terre Rare (Neodimio), Nichel, Manganese
Carbone	14.1	Rame, Cromo
Nuovo Nucleare	9.3	Rame, Nichel, Cromo, Molibdeno
Gas Naturale	3.9	Nichel, Cromo

L'evoluzione tecnologica: SMR, AMR e MMR

La recente innovazione tecnologica in ambito nucleare si sta esprimendo principalmente attraverso le soluzioni modulari di piccola e media taglia, progettate per superare i limiti finanziari e costruttivi dei grandi reattori di III Generazione Avanzata (Gen-III⁺), come illustrato in tab. 2; più nello specifico si hanno:

— *Small Modular Reactors (SMR)*: reattori ad acqua leggera di potenza inferiore a 300 MWe (tipicamente tra 50 e 200 MWe), derivati dalla tecnologia Gen-III⁺. Sfruttano la fabbricazione modulare in officina e l'assemblaggio in cantiere, riducendo tempi e costi finanziari grazie all'effetto serie.

— *Advanced Modular Reactors (AMR)*: reattori modulari di IV Generazione (Gen-IV) che impiegano refrigeranti innovativi quali metalli liquidi (piombo, sodio), sali fusi o gas ad alta temperatura. Operano a temperature superiori e consentono di riciclare e “bruciare” gli attinidi minori nei combustibili esausti.

— *Micro Modular Reactors (MMR o vSMR)*: unità compatte di potenza compresa tipicamente tra 1 e 20 MWe, destinate ad applicazioni *ad hoc*, siti remoti o distretti industriali.

Dal punto di vista della sicurezza, gli SMR integrano strategie a “sistemi passivi” basati sulla circolazione naturale e sulla dissipazione spontanea del calore di decadimento, privi di necessità di alimentazione elettrica di emergenza (eliminando la problematica principale in incidenti come quello di Fukushima). Ciò consente di ridurre notevolmente le zone di pianificazione dell'emergenza (EPZ). Inoltre, le elevate temperature operative degli AMR aprono la strada alle applicazioni non elettriche quali produzione di idrogeno pulito, teleriscaldamento urbano, desalinizzazione e calore di processo per l'industria chimica e siderurgica.

Tabella 2 Classificazione delle tecnologie modulari (SMR, AMR, MMR)

Categoria	Potenza Elettrica	Tecnologia / Generazione	Caratteristiche e Applicazioni
Small Modular Reactor (SMR)	< 300 MWe	Gen-III ⁺ (PWR, BWR, HTR)	Fabbricazione in serie, sicurezza passiva, cogenerazione elettricità/calore
Advanced Modular Reactor (AMR)	< 300 MWe	Gen-IV (Metalli liquidi, Sali fusi, VHTR)	Alte temperature (>500 °C), riciclo scorie, idrogeno termochimico
Micro Modular Reactor (MMR)	1 - 50 MWe	Gen-III ⁺ / Gen-IV	Compattezza, installazione rapida, siti remoti e distretti industriali

Lo scenario italiano: PNIEC 2024 e filiera industriale

Il Piano Nazionale Integrato per l’Energia e il Clima (PNIEC 2024) ha reinserito l’energia nucleare nella pianificazione energetica italiana a lungo termine, definendo due scenari al 2050:

- *Scenario Nucleare Moderato*: prevede l’installazione di circa 8 GW di capacità al 2050 (di cui circa 7.6 GW da fissione modulare e 0.4 GW da fusione), coprendo oltre il 10% della domanda elettrica nazionale.
- *Scenario Nucleare Senza Limitazioni*: ipotizza il massimo dispiegamento tecnologico con il raggiungimento di 16 GW installati al 2050.

Per attuare lo scenario moderato, si prospetta la progressiva installazione di una flotta diversificata di reattori modulari (un possibile esempio è mostrato in tab. 3), integrata da un’eccellenza industriale nazionale già consolidata. L’Italia vanta infatti una filiera manifatturiera di primo piano (comprendente realtà come Ansaldo Energia, CAEN Sys, Demont, Fincantieri SI, Mangiarotti, SIET, Walter Tosto e molte altre) accreditata sui mercati internazionali e dotata di una capacità produttiva stimata fino a 8 SMR/anno.

Tabella 3 Proiezione flotta reattori in Italia al 2050 (Scenario PNIEC 2024 Moderato)

Tipologia di Reattore	2035	2040	2045	2050
NUWARD™ (SMR ad acqua pressurizzata)	2 unità	7 unità	12 unità	17 unità
LFR (Lead-cooled Fast Reactor - Gen IV)	0 unità	0 unità	2 unità	6 unità
HTR-PM (High Temp. Gas Reactor)	0 unità	0 unità	2 unità	4 unità
Fusione Nucleare (DEMO / Commerciale)	0 unità	0 unità	0 unità	1 unità
Capacità Installata Totale (GW)	0.68 GW	2.38 GW	4.90 GW	8.22 GW

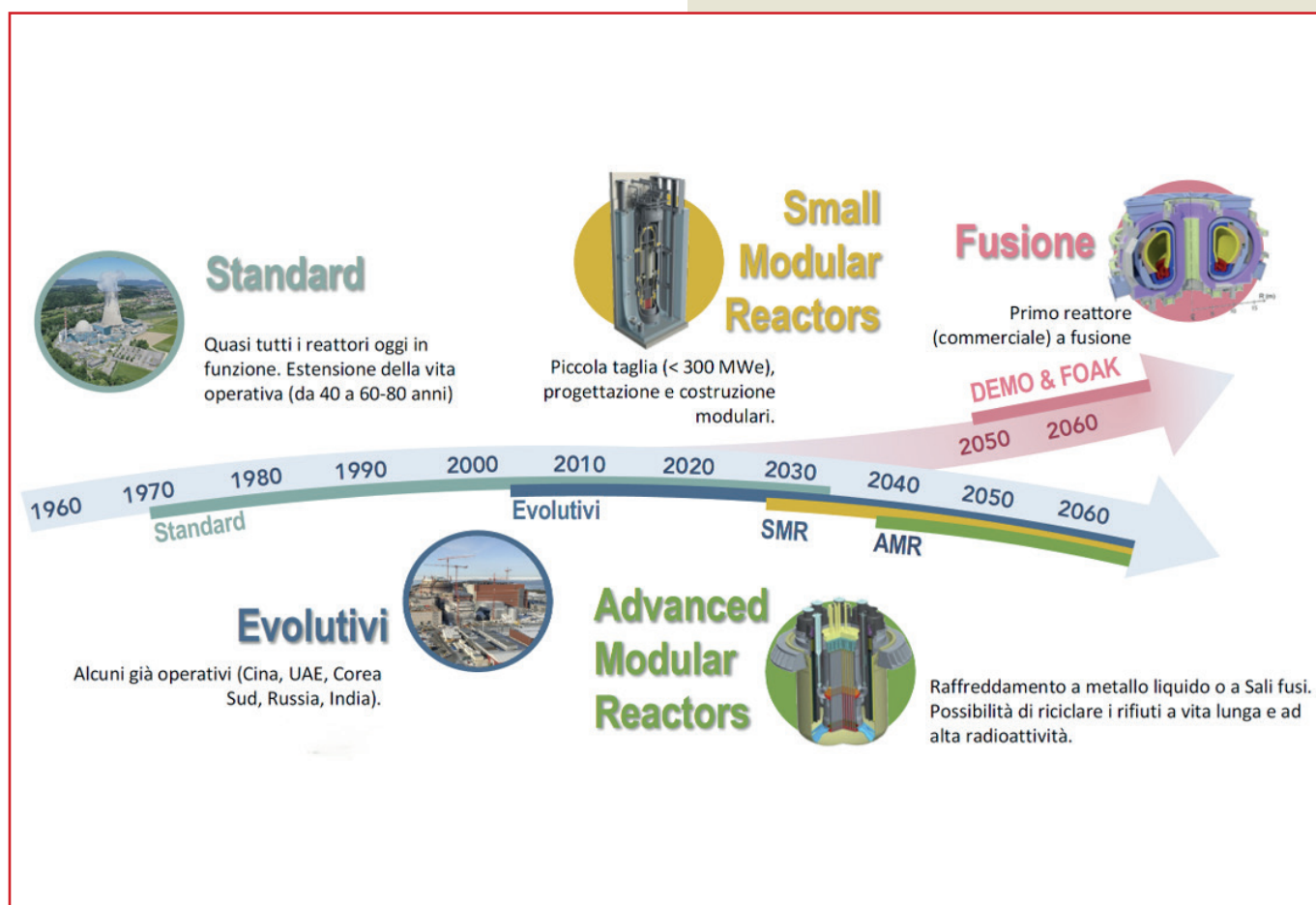
Sicurezza, impatto ambientale e gestione dei rifiuti radioattivi

Uno degli aspetti centrali nella valutazione EHS/ESG riguarda l’impatto ambientale lungo l’intero ciclo di vita (LCA). I dati ufficiali UNECE e BofA confermano che l’intensità carbonica del nucleare è pari a circa 5-12 g CO₂^{eq}/kWh, un valore inferiore o equivalente all’eolico (11-12 g) e nettamente inferiore al fotovoltaico (27-41 g).

L’esperienza tedesca dimostra come la chiusura delle centrali nucleari abbia condotto a emissioni medie orarie (circa 396 g CO₂^{eq}/kWh nel 2023) circa otto volte superiori a quelle della Francia (circa 52 g CO₂^{eq}/kWh), a causa del ricorso ai combustibili fossili per il bilanciamento.

In materia di salute e sicurezza sul lavoro, il database ENSAD (Paul Scherrer Institut) evidenzia che la fonte nucleare registra il minor tasso di mortalità per unità di energia prodotta (0.006 decessi/GW contro 0.87 del carbone e 4.26 dell’idroelettrico). Studi della Columbia University e del MIT evidenziano inoltre come l’esercizio nucleare eviti migliaia di morti premature annue dovute all’inquinamento atmosferico fossile.

Relativamente alla gestione dei rifiuti radioattivi, un cittadino francese (i cui consumi elettrici sono storicamente coperti da nucleare) genera (direttamente o indirettamente) in 70 anni appena 3.5 kg di rifiuti radioattivi totali, di cui solo 50 grammi ad alta attivi-

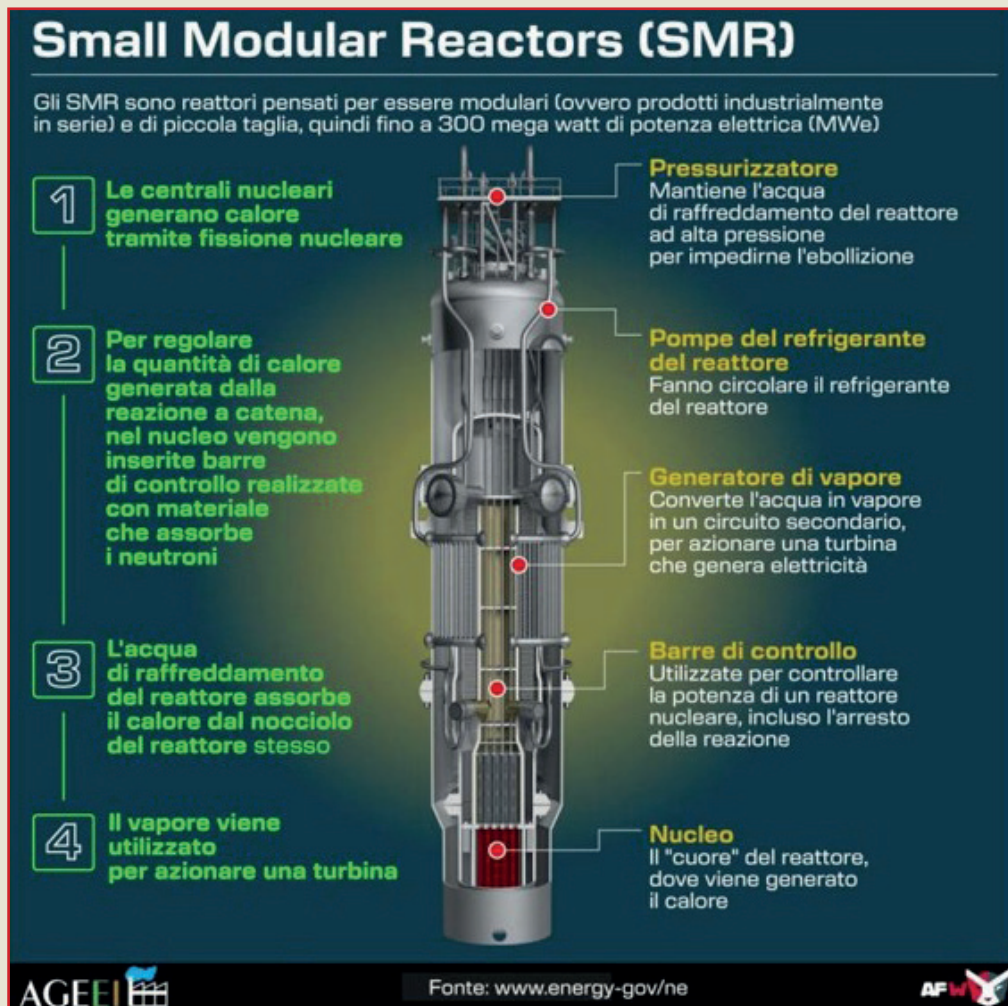


tà e lunga vita (HLW). Mentre i depositi superficiali per i rifiuti a bassa e media attività (95% del volume) sono operativi in quasi tutti i Paesi industrializzati, per i rifiuti ad alta attività si stanno consolidando i depositi geologici profondi (DGR), come WIPP negli USA, Olkiluoto in Finlandia e Cigéo in Francia.

Le tecnologie di Separazione e Trasmutazione (P&T) abbinate ai reattori veloci AMR consentiranno infine di ridurre i tempi di radiotossicità da “geologici” (oltre 100.000 anni) a “storici” (meno di 1000 anni).

Evoluzione delle filiere di reattori nucleari dalla Generazione I ai reattori modulari SMR/AMR e Gen-IV.

Fonte: Prof. G. Lomonaco / Università di Genova (rielaborazione originale della fig. 11 della presentazione “Problematiche energetiche e ruolo del nucleare futuro (...e presente)” del Prof. Marco Ricotti / Politecnico di Milano, libera da diritti per AIAS).



Schema concettuale di un reattore SMR ad acqua pressata con pressurizzatore integrato e sistemi passivi di sicurezza.

Fonte: US DOE / Energy.gov (dominio pubblico).

Rappresentazione concettuale multilivello del deposito geologico profondo per il combustibile esausto (es. Olkiluoto).

Fonte: Posiva Oy (materiale stampa libero da diritti con citazione fonte).

Conclusioni e prospettive per la prevenzione e la sicurezza

L'integrazione tra fonti rinnovabili e reattori modulari di nuova generazione costituisce la soluzione più solida per raggiungere gli obiettivi Net Zero al 2050, coniugando decarbonizzazione, sicurezza di approvvigionamento e stabilità economica.

Per l'Italia, l'attuazione degli scenari del PNIEC 2024 rappresenta sia una sfida energetica sia una straordinaria opportunità industriale.

La riuscita di questo percorso richiederà una rigorosa governance della sicurezza, la trasparenza informativa verso la cittadinanza e la formazione di professionisti specializzati nei settori ingegneristico, chimico e radioprotezionistico.

L'uso dell'energia nucleare non costituisce, da solo, la soluzione al trilemma energetico ma non esiste soluzione realistica a tale "rebus" che possa davvero prescindere da tale fonte.

Note e Riferimenti bibliografici

1. Lomonaco, Guglielmo (2023), "Energia nucleare oggi e domani: visione globale", Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, Serie VI, Vol. VI, 2023.
2. Lomonaco, Guglielmo, "Transizione Energetica: SMR e Sostenibilità", Presentazione al Convegno AIAS on the Road, Palazzo San Giorgio, Genova, 6 Marzo 2024.
3. MASE - Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, "Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC 2024)".
4. UNECE, "Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options", Commissione Economica per l'Europa delle Nazioni Unite, 2021.
5. PSI / ENSAD, "Energy Comparative Risk Assessment", Paul Scherrer Institut, Svizzera, 2022.
6. BofA Global Research, "The RIC Report: The nuclear necessity", BofA Global Research, Global Financial Data, 9 maggio 2023.

