

Il nucleare di nuova generazione

Sempre più spesso si sente parlare del nucleare di nuova generazione e, in particolare, degli Small Modular Reactor (SMR) e degli Advanced Modular Reactor (AMR). Di che cosa si tratta? E perchè da più parti si considerano questi impianti più sicuri e sostenibili? L'articolo che segue vuole rispondere a queste domande a livello scientifico e tecnologico evidenziando che le nuove tecnologie nucleari avanzate dovrebbero essere dispite nel prossimo decennio per poter dare un vero contributo alla transizione energetica.

DOI 10.12910/EAI2023-071

di **Alessandro Dodaro e Mariano Tarantino**, Dipartimento Nucleare - ENEA

Insieme a un'ampia quota di risorse energetiche rinnovabili, le tecnologie nucleari di nuova generazione hanno un ruolo importante da svolgere nella transizione energetica verso un'economia a basse emissioni di gas serra.

A questo scopo l'UE ha incluso l'energia nucleare nella tassonomia per le tecnologie energetiche a supporto del Green Deal, e il nucleare sta guadagnando consensi per far parte della spina dorsale di un mix energetico a emissioni zero. **Affinché le nuove tecnologie nucleari avanzate possano dare un vero contributo a questi obiettivi, il loro dispiegamento dovrebbe aver luogo nel prossimo decennio.**

La capacità del nuovo nucleare di sostituire le centrali nucleari ormai a fine vita, di provvedere alla cogenerazione industriale (calore industriale), al teleriscaldamento e alla produzione di idrogeno possono rappresentare ulteriori fattori di successo per la loro penetrazione nei sistemi energetici ibridi futuri e più sostenibili.

Tutti i concetti oggi sviluppati hanno in comune la taglia, più piccola se confrontata con le centrali nucleari convenzionali (da pochi a poche

centinaia di MWe), e una progettazione che si pone come obiettivo la realizzazione di gran parte dell'impianto in fabbrica per il successivo trasporto in sito (modularità).

Le tecnologie nucleari avanzate possono essere classificate in 2 gruppi:

- **Small Modular Reactors (SMR)**, che sfruttano l'attuale tecnologia dei LWR (Generazione III o III+) su scala ridotta, in una configurazione di tipo a circuito (loop) o in una configurazione integrale (componenti del circuito primario tutti installati nel reactor vessel);
- **Advanced Modular Reactor (AMR)**, derivati dalle tecnologie di quarta generazione, che utilizzano nuovi sistemi di raffreddamento (es. piombo liquido) o combustibili innovativi per offrire prestazioni migliori, nuove funzionalità (cogenerazione, produzione di idrogeno, soluzioni per la chiusura del ciclo del combustibile e quindi della gestione dei rifiuti nucleari) e un cambiamento di passo per una più elevata competitività economica, sostenibilità, sicurezza passiva e affidabilità, nonché resistenza alla proliferazione e protezione fisica.

Diverse agenzie internazionali (tra cui IAEA, IEA, OECD-NEA) pre-

vedono grandi quote di mercato dell'energia per il nuovo nucleare: nello scenario "high-case" (SMR realizzabili in 3-4 anni, produzione in fabbrica e assemblaggio in sito) entro il 2035 potrebbero essere aggiunti fino a 21 GWe di SMR (circa il 3% di capacità nucleare totale installata), mentre nello scenario "low-case" la capacità installata si ridurrebbe a meno di 1 GWe principalmente in Nord America e Asia.

Aspetti innovativi e livello di maturità tecnologica

La principale forza trainante nelle centrali termiche e nucleari è stata l'efficienza termica. Molti concetti di SMR basati sulla tecnologia LWR possono raggiungere efficienze termiche lorde nel range del 26-31%, mentre gli AMR potrebbero raggiungere il 40-42% grazie alle più elevate temperature in gioco.

Sebbene siano generalmente considerati meno maturi, gli AMR hanno un potenziale maggiore in termini di competitività, che in alcuni casi potrebbe essere ancora maggiore spostandosi verso cicli termici altamente efficienti (ad esempio, basati su CO₂ supercritica). Inoltre, l'AMR basato su uno **spettro di neutroni veloce** ha

un uso migliore delle risorse naturali e riduce al minimo i rifiuti nucleari a lunga vita, presentandosi così come un sistema energetico ad **elevata sostenibilità, sicurezza, economicità, resistenza alla proliferazione e protezione fisica** (GENERATION IV).

La **competitività economica** è presentata come uno dei punti di forza degli SMR/AMR, ed in genere è rivendicata da sviluppatori/progettisti, sebbene sia difficile da dimostrare in anticipo. I fattori dirimenti per compensare l'assenza di economia di scala rispetto agli impianti nucleari di grandi dimensioni sarebbero:

- **la riduzione dei tempi e dei costi di realizzazione**, che a sua volta ridurrebbe anche gli interessi durante la costruzione, uno dei costi più rilevanti per gli impianti recenti di grandi dimensioni;
- **standardizzazione e realizzazione in fabbrica** che, unitamente alla dimensione ridotta dell'investimento per ogni unità modulare, consentirebbe di raggiungere il pieno beneficio della curva di apprendimento più rapidamente e con una spesa complessiva inferiore: questo effetto si rifletterebbe non solo in una riduzione di costi di capitale diretti, ma verosimilmente anche in una ridotta percezione del rischio finanziario, quindi in tassi di interesse più bassi.

Per gli SMR, il livello di maturità tecnologica si colloca intorno a 6-8; per gli AMR, intorno a 5-6¹.

Principali attività svolte in ENEA

ENEA, Ansaldo Nucleare, newcleo, SIET e molte altre industrie e università italiane contribuiscono continuamente allo sviluppo di molteplici concetti SMR/AMR, tra i quali:

Il Parlamento Europeo chiede una strategia UE sui piccoli reattori modulari

L'11 dicembre scorso, il Parlamento europeo riunito in plenaria a Strasburgo ha adottato con 409 voti a favore, 173 contrari e 31 astenuti (su 613 votanti) la relazione sui piccoli reattori nucleari, a prima firma dell'eurodeputato sloveno del Ppe, Franc Bogovič, che chiede una specifica strategia industriale globale per lo sviluppo dei piccoli reattori nucleari nell'Unione Europea. I piccoli reattori modulari (small modular reactors) sono reattori nucleari più piccoli sia in termini di potenza sia di dimensioni fisiche, rispetto alle centrali tradizionali su scala gigawatt, con una potenza compresa tra 10 e 300 MegaWatt. Si basano su tecnologie esistenti e sono progettati per essere costruiti in fabbrica in forma modulare standard e il loro vantaggio principale è che possono essere assemblati in fabbrica e poi spediti e installati sul posto, quindi anche in aree remote con capacità di rete limitata o in aree in cui l'uso di grandi centrali nucleari tradizionali non è possibile. Questa tipologia di reattori utilizza reazioni di fissione nucleare per creare calore che può essere utilizzato direttamente o per generare elettricità e sono di recente tornati al centro del dibattito politico in UE nel pieno della crisi energetica con la Russia e nel tentativo di diversificare le fonti di approvvigionamento.

- **NUWARD**, concetto francese di SMR modulare, riferimento europeo, guidato da EDF. In Italia, tramite un accordo tra EDISON, ANSALDO ENERGIA e ANSALDO NUCLEARE, e con ENEA che svolge il ruolo di advisor, si stanno valutando prospettive di sviluppo della filiera e possibili impatti sul mix energetico italiano di questa tecnologia. EDF è già in contatto con SIET ed ENEA per la futura sperimentazione a Piacenza;
- **ALFRED**, prototipo UE per un AMR basato su GEN-IV Lead-cooled Fast Reactor (LFR), supportato dal consorzio internazionale FALCON (guidato da Ansaldo Nucleare, e basato sulla tecnologia ENEA); in Romania l'industria italiana sta portando avanti la realizzazione della più grande infrastruttura sperimentale mai realizzata su questa tecnologia;
- **Westinghouse LFR**, per la quale Ansaldo Nucleare ed ENEA sup-

portano la realizzazione di diversi impianti sperimentali nell'ambito del programma AMR UK;

- **LFR-AS-30**, AMR sviluppato dalla start-up **newcleo**, basato sulla tecnologia ENEA, e che vede investimenti privati per oltre 50 M€ presso le infrastrutture ENEA. ENEA è il referente per la progettazione nucleare e gli aspetti tecnologici del reattore: sono attualmente in fase di formalizzazione i primi accordi esecutivi previsti dall'Accordo Quadro che ENEA ha sottoscritto con la società.

Su quest'ultimo progetto ENEA è particolarmente impegnata con la realizzazione di un dimostratore non nucleare, denominato PRECURSOR, in scala quasi 1 a 1 presso il Centro Ricerche del Brasimone nell'Appennino tosco-emiliano: l'impianto, che vedrà come generatore di calore una resistenza elettrica al posto del nucleo del reattore, permetterà di testare la termofluidodinamica di

¹ Su una scala di valori da 1 a 9, dove 1 è il più basso (definizione dei principi base di una nuova tecnologia) e 9 il più alto (sistema già utilizzato in ambiente operativo).

un reattore al piombo di piccola taglia per arrivare alla progettazione e realizzazione in Francia o in UK del reattore vero e proprio.

Il ruolo nel settore nucleare della partecipata SIET

La SIET S.p.A., con sede a Piacenza, è stata fondata da ENEA e CISE nel 1983 con lo scopo primario di effettuare test per la sicurezza di componenti e sistemi destinati ad impianti nucleari per la produzione di energia elettrica; attualmente appartiene per il 44% a ENEA, per il 42% all'ENEL NewHydro e, per quote minori, al Politecnico di Mi-

lano, a Forty Seven, a Tectubi Racordi, ad Ansaldo Finmeccanica e ad Ansaldo Energia. I settori operativi di SIET possono essere riassunti in:

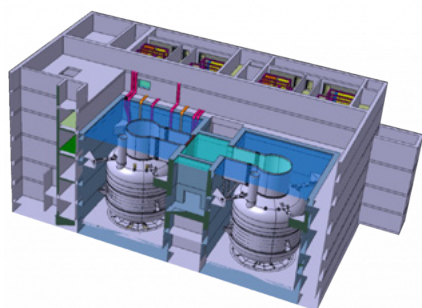
- ricerca e sviluppo per l'energia nucleare;
- sviluppo, prova e certificazione sperimentale di componenti termomeccanici per impianti di produzione e di processo (valvole, scambiatori di calore, piping, sistemi di tenuta...);
- ingegneria e formazione;
- taratura della strumentazione di misura.

SIET possiede impianti sperimentali di grande taglia, unici al mon-

do per dimensioni e specificità, in grado di simulare il comportamento termofluidodinamico di componenti e sistemi LWR appartenenti alla tecnologia dei reattori di generazione III e III+. Questi impianti costituiscono uno strumento di grande efficacia a supporto delle utilities, delle autorità istituzionali di sicurezza e delle industrie nazionali ed estere impegnate nello sviluppo e qualificazione di componenti e sistemi per la produzione di energia nucleare.

per info: alessandro.dodaro@enea.it

SMR - NuwardTM (EDF, France) Potenziale ruolo dell'Italia



NUWARDTM - PWR integrale, con due unità indipendenti per avere massima flessibilità di esercizio, potenza elettrica 340 MWe.

- 1) Forniture Componenti e Sistemi
- 2) Supporto al licensing mediante analisi, caratterizzazioni sperimentali
- 3) Coinvolgimento ENEA & SIET



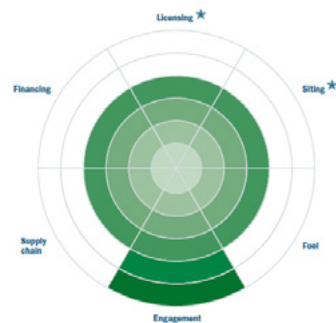
Design Organization	Thermal Power (MWth)	Outlet Temperature (°C)	Spectrum (thermal/fast)	Fuel type	Fuel (LEU/HALEU/HEU)
NuScale Power	250	321	Thermal	UO ₂ pellets	LEU

VOYGR™ (NuScale Power Corporation, USA) **Potenziale ruolo dell'Italia**



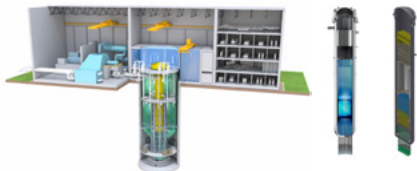
NuScale Power Module™ (NPM) è un piccolo reattore ad acqua pressurizzata (PWR) raffreddato ad acqua leggera. Gli impianti NuScale VOYGR™ SMR sono scalabili e possono essere costruiti per ospitare un numero variabile di unità e soddisfare le esigenze energetiche del cliente. Gli impianti standard NuScale includono il VOYGR-4 a 308 MW(e), il VOYGR-6 a 462 MW(e), e il VOYGR-12 a 924 MW(e). Ogni NPM è un modulo autonomo che opera indipendentemente dagli altri moduli in una configurazione multimodulo. Tutti i moduli sono gestiti da un'unica sala di controllo.

1) Al momento attuale nessuna interazione



Design Organization	Thermal Power (MWth)	Outlet Temperature (°C)	Spectrum (thermal/fast)	Fuel type	Fuel (LEU/HALEU/HEU)
NuScale Power	250	321	Thermal	UO ₂ pellets	LEU

BWRX-300 (GE-Hitachi Nuclear Energy, USA & Japan) **Potenziale ruolo dell'Italia**



Il BWRX-300 di GE-Hitachi Nuclear Energy (GEH) è un impianto ad acqua bollente da 300 MWe che utilizza sistemi di sicurezza passivi. Costituisce la decima generazione del Boiling Water Reactor (BWR) e rappresenta il progetto BWR più semplice dall'inizio di GE.

- 1) Forniture Componenti e Sistemi
- 2) Supporto al licensing mediante analisi, caratterizzazioni sperimentali



Design Organization	Thermal Power (MWth)	Outlet Temperature (°C)	Spectrum (thermal/fast)	Fuel type	Fuel (LEU/HALEU/HEU)
Ge-Hitachi/ Hitachi-GE	870	287	Thermal	UO ₂ pellets	LEU

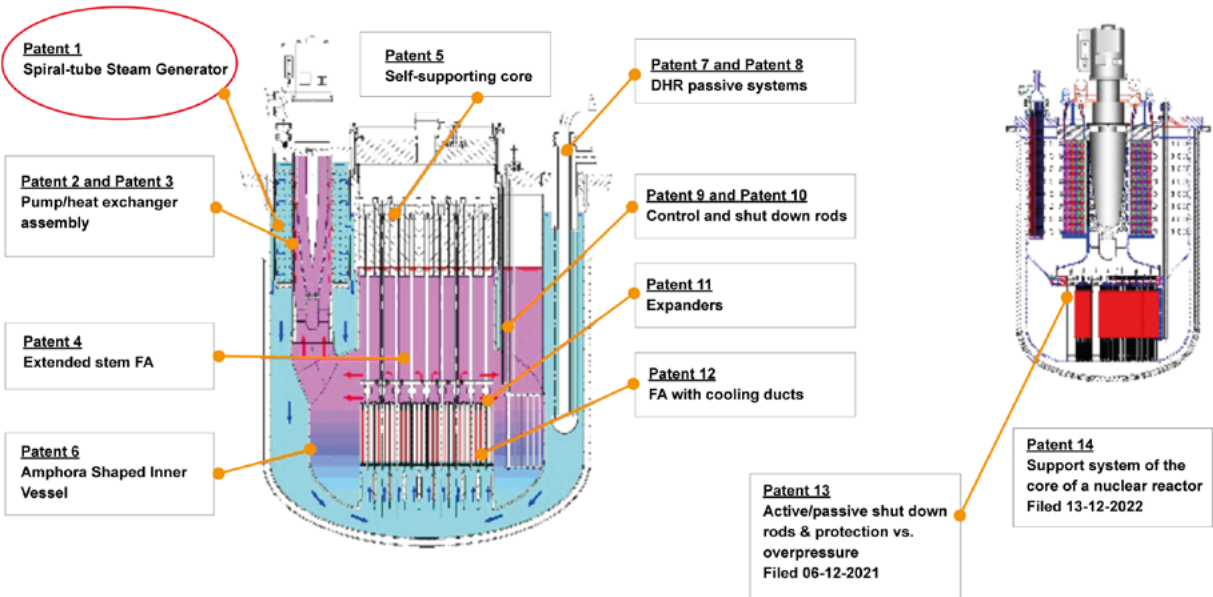
LFR-AS-200 (newcleo, Italy)		Potenziale ruolo dell'Italia
-----------------------------	--	------------------------------



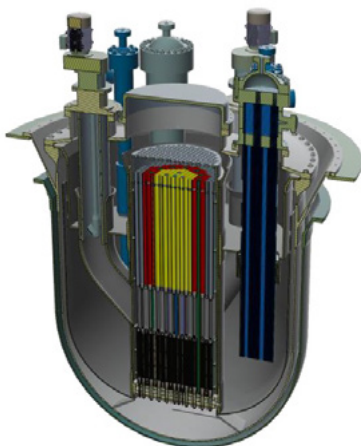
Il BWRX-300 di GE-Hitachi Nuclear Energy (GEH) è un impianto ad LFR-AS-200 è un reattore refrigerato a piombo liquido, spettro neutronico veloce, con arricchimento fino al 19-20%. Basato sulla collaborazione newcleo-ENEA, si pone di truardare la commercializzazione entro il 2030-2035. newcleo lavora al progetto anche mediante collaborazioni con la Francia (fabbrica del combustibile MOX, DEMO) e con UK (FOAK). Interamente finanziato da fondi privati. Centro di progettazione a Torino e Centro di R&S presso il Brasimone (ENEA)

- 1) Tecnologia Italiana sviluppata principalmente da ENEA e i suoi partners
- 2) Fornitura sistemi e componenti
- 3) Provider tecnologico
- 4) Supply chain

International patents for our Gen-IV SMR designs

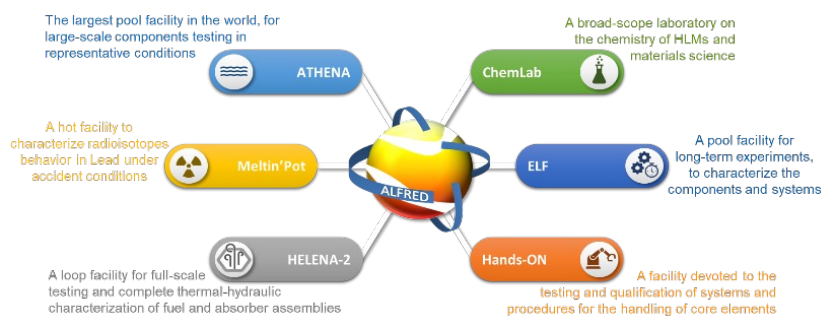


ALFRED (ANSALDO NUCLEARE, ENEA, RATEN-ICN, Romania)		Potenziale ruolo dell'Italia
--	--	-------------------------------------



ALFRED è un reattore refrigerato a piombo liquido, spettro neutronico veloce, con arricchimento fino al 19-20%. Il progetto, promosso dal consorzio FALCON (ANSALDO NUCLEARE, ENEA, RATEN-ICN), ha come obiettivo la costruzione di ALFRED (DEMO LFR) in Romania entro il 2030-2035, mediante finanziamenti Europei. Finanziamento attuale di 120 M€ per le attività di R&S in Romania.

- 1) Tecnologia Italiana sviluppata principalmente da ENEA e i suoi partners.
- 2) Fornitura sistemi e componenti.
- 3) Provider tecnologico.
- 4) Supply chain



Xe-100 (X-energy, LLC, USA)		Potenziale ruolo dell'Italia
------------------------------------	--	-------------------------------------



L'Xe-100 è un reattore raffreddato a gas ad alta temperatura con combustibile TRISO e con una potenza termica di 200 MW. È dotato di un sistema di rifornimento continuo con arricchimento di circa il 15,5%.

- 1) Nessun coinvolgimento dell'industria italiana e/o ENEA e altri players

Design Organization	Thermal Power (MWth)	Outlet Temperature (°C)	Spectrum (thermal/fast)	Fuel type	Fuel (LEU/HALEU/HEU)
X-Energy	200	750	Thermal	TRISO-X pebble	HALEU