

Il nucleare italiano nel panorama internazionale ed europeo

Gilberto Pichetto Fratin p. 8

Perchè si riparla di nucleare in Italia?

Roberto Adinolfi p. 14

L'INFN e l'energia nucleare

Antonio Zoccoli p. 49

Energia Ambiente e Innovazione

ENEA magazine
3/2023
eai.enea.it

ISSN: 1124 - 0016

NUOVO NUCLEARE: ricerca, tecnologie, scenari e prospettive

LE INTERVISTE:

Stefano Buono, Pietro Barabaschi, Massimo Garribba,
Davide Malacalza, Nicola Monti

Nucleare sostenibile: scenari e prospettive



di **Gilberto Dialuce**, Presidente ENEA

Il riscaldamento globale di origine antropica che caratterizza gli ultimi decenni (l'ultima decade è stata la più calda sinora registrata e il 2023 è stato l'anno più caldo dal 1850) è secondo la comunità scientifica la principale causa dei cambiamenti climatici che si manifestano sul pianeta con emergenze ambientali che avvengono con sempre maggiore frequenza. Solo riducendo rapidamente al minimo le emissioni di gas serra si potrà cercare di rallentare e stabilizzare un processo per troppo tempo trascurato e questo spiega perché la spinta verso la decarbonizzazione è sempre più forte e nell'interesse globale.

È necessario perciò in questo cammino ricorrere a tutti i mezzi che la ricerca e lo sviluppo tecnologico mettono a disposizione per arrivare a una transizione energetica che sia il più possibile rapida, sicura, equa e sostenibile per l'ambiente e il territorio e per le comunità e le imprese: l'efficientamento dei consumi e della trasmissione dell'energia, accanto alla diffusione capillare della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili e lo sviluppo dello stoccaggio dell'energia, sono interventi ormai imprescindibili, ma non consentono da soli di ridurre l'uso dei combustibili fossili a livelli che consentano di centrare gli obiettivi di neutralità climatica che i Paesi industrializzati si sono dati a partire dal primo accordo universale per la lotta contro i cambiamenti climatici del 2015, in occasione della 21^a Conferenza delle Parti (COP21) della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici a Parigi, accolti in ambito G7 e recentemente ribaditi dalla COP28. L'instabilità dello scenario geopolitico, emersa drammaticamente nell'ultimo biennio, ed i suoi ulteriori sviluppi, che coinvolgono la sicurezza delle rotte di transito dell'energia, e i nuovi scenari sulla necessità di crescenti approvvigionamenti di materie prime critiche necessarie alla crescita degli impianti rinnovabili, hanno evidenziato in modo drammatico la necessità della sicurezza degli approvvigionamenti energetici: in un Paese come il nostro, dove tre quarti dell'energia elettrica dipende dall'estero (importazione diretta o delle materie prime che utilizziamo per produrla), diventa indispensabile cercare una soluzione che permetta a un sistema elettrico basato fondamentalmente sulle rinnovabili di avere la necessaria stabilità di funzionamento in presenza della loro connessa variabilità, garantendo al contempo al mercato elettrico una certa stabilità dei prezzi e della disponibilità a lungo termine.

In questo contesto si inserisce la mozione approvata dalla Camera, che ha impegnato il Governo ad "incentivare lo sviluppo delle nuove tecnologie nucleari destinate alla produzione di energia per scopi civili". Diretta conseguenza della mozione è stata l'istituzione della "Piattaforma Nazionale per un Nucleare Sostenibile", coordinata dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica con il supporto di ENEA e RSE, che ha l'obiettivo "di definire in tempi certi un percorso finalizzato alla possibile ripresa dell'utilizzo dell'energia nucleare in Italia e alle opportunità di crescita della filiera industriale nazionale già operante nel settore".

Senza nulla togliere all'impegno su efficienza energetica, idrogeno (che può rappresentare un promettente carrier energetico del futuro) e sviluppo delle fonti rinnovabili, l'intrinseca discontinuità di queste ultime rende inevitabile che un mix energetico credibile e decarbonizzato debba essere costituito, almeno per una quota parte, da una fonte programmabile e da una serie di soluzioni tecnologiche adatte a settori specifici (quali biogas, biocarburanti avanzati per il trasporto marittimo e aereo), con un ruolo nel transitorio ancora affidato al gas naturale, tenuto anche conto dell'impegno al phase out dal carbone entro il 2025, e della

possibilità di ridurne le emissioni tramite la CCS, fonte che tuttavia presenta ancora incertezza in termini di approvvigionamento a causa delle tensioni internazionali a cui sono sottoposte le aree geografiche di produzione e transito.

Nel lungo periodo, una soluzione potrà essere il ricorso alla fusione nucleare: quando saranno risolte le criticità in termini di gestione del plasma ed efficienza di produzione ed estrazione dell'energia prodotta mediante la reazione che tiene in vita le stelle, i reattori a fusione potranno contribuire in modo decisivo al fabbisogno energetico mondiale, dato che si basano per il loro funzionamento sugli isotopi di idrogeno, non legati a scenari geopolitici, e non producono scorie a lunga durata.

La comunità scientifica internazionale, con l'Italia in prima fila, sta facendo sforzi enormi per rendere fruibile questa fonte; i principali progetti in corso sono:

- ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), in costruzione nel sud della Francia, che dovrà essere il primo reattore a produrre un surplus di energia tale da rendere economicamente conveniente sfruttare il processo per produrre energia elettrica;
- JT60-SA (Japan Torus 60 – Super Advanced), realizzato anche con finanziamenti italiani, di recente inaugurato presso il sito di Naka, che dovrà sperimentare le configurazioni di plasma da utilizzare presso ITER;
- DTT (Divertor Tokamak Test), in realizzazione presso il Centro Ricerche ENEA di Frascati, che studierà le configurazioni del divertore, cioè il componente del reattore a fusione su cui si scarica l'enorme calore prodotto e il plasma esausto, che possano essere utilizzate con successo in un reattore a fusione industriale.

Si tratta di un processo lungo e ancora con molte incognite: le stime più credibili degli addetti ai lavori portano al 2050 la realizzazione del primo dimostratore di reattore europeo e alla fine del secolo la diffusione su larga scala dei reattori a fusione.

Nel breve e medio periodo, quindi, una possibilità per introdurre nel mix energetico una quota significativa di energia decarbonizzata e programmabile, che diventi poi alternativa al gas naturale è costituita dal nuovo nucleare avanzato da fissione, e in questo settore il sistema della ricerca scientifica e il tessuto industriale italiano si pongono in posizione di rilievo in tutti i progetti internazionali in questo ambito.

La maggior parte delle centrali nucleari oggi operative sono infatti di seconda generazione, con decenni di operazione alle spalle e dovranno essere sostituite nell'arco dei prossimi 20-30 anni: attualmente sono state agganciate alla rete o sono in fase di realizzazione le prime centrali nucleari di terza generazione, raffreddate ad acqua come la maggior parte dei reattori di seconda generazione, che però incrementano gli standard di sicurezza grazie all'inserimento delle sicurezze passive (che non hanno la necessità di attuatore elettrico e quindi entrano in gioco anche in assenza di alimentazione elettrica) e sono caratterizzate da potenze installate molto elevate. Gli ingenti investimenti necessari e i lunghi tempi di costruzione ne hanno tuttavia limitato l'installazione ai Paesi in cui il ricorso all'energia nucleare era già diffuso e la filiera industriale molto sviluppata. Per facilitare la sostituzione delle centrali nucleari e per nuove applicazioni tecnologiche integrate sono perciò allo studio, anche se con diversi gradi di maturità tecnologica, due filiere molto interessanti: gli Small Modular Reactor (SMR) e gli Advanced Modular Reactor (AMR).

I primi derivano dai grandi reattori di terza generazione, mantenendone immutata la sicurezza ma riducendone drasticamente dimensioni e potenza, con conseguente riduzione dei costi e dei tempi di realizzazione: sono prossimi al dispiegamento, essendo vari progetti in corso di licensing e di sviluppo prototipale, potenzialmente disponibili su larga scala e quindi suscettibili di giocare un ruolo fondamentale già nella prossima decade. Anche la Commissione Europea, che ha riconosciuto la sostenibilità del nucleare innovativo, intende lanciare una iniziativa comune in questo ambito.

I secondi, ancora in fase di sviluppo, sono la versione ridotta dei reattori di quarta generazione: le caratteristiche principali sono la sicurezza intrinseca (sono raffreddati a metallo liquido e sono progettati in modo che in caso di non alimentazione elettrica il reattore si spenga automaticamente, senza l'intervento umano o elettromeccanico) e con un uso più sostenibile del combustibile, di cui è previsto il riciclo in modo da minimizzare la

quantità di rifiuti radioattivi a lunga vita prodotti. Si prevede che i primi prototipi industriali saranno realizzati nei prossimi dieci anni per arrivare, ove tale tecnologia sia confermata in termini di fattibilità e costi, a una produzione alla fine degli anni '30.

L'ENEA contribuisce in modo significativo allo sviluppo di molteplici concetti di reattori SMR/AMR, tra i quali NuScale (SMR ad acqua pressurizzato, licenziato dal DoE americano), NUWARD (concetto francese di SMR modulare, riferimento europeo, guidato da EDF), Rolls Royce (SMR progettato nel Regno Unito), ALFRED (prototipo UE per un AMR basato su GEN-IV Lead-cooled Fast Reactor, LFR), LFR-AS-30 (AMR sviluppato dalla start-up newcleo, basato sulla tecnologia ENEA). In ambito fusione, inoltre, su mandato del MASE, ENEA svolge il ruolo di Programme Manager nazionale nel programma europeo per la fusione, coordinando la compagine italiana, costituita dai principali enti di ricerca, player industriali, università e consorzi universitari impegnati nel settore e funge da Industrial Liason Officer per l'Agenzia europea Fusion for Energy, che gestisce le risorse economiche stanziare dalla Commissione Europea per la realizzazione di ITER.

Questo patrimonio di conoscenze e applicazioni di alto livello scientifico e tecnologico e i possibili connessi sviluppi industriali, potranno essere anche occasione di crescita della filiera italiana, che già opera in tali ambiti con successo all'estero, e del mondo della formazione scientifica e professionale. Sarà comunque necessario informare in modo corretto i cittadini sulle opportunità e potenzialità di queste tecnologie: eliminare i pregiudizi e permettere una valutazione basata sulla conoscenza e non sulle emozioni mediatiche è possibile solo ricorrendo a una campagna di informazione e ad azioni di divulgazione semplici, tecnicamente corrette ed efficaci.

In quest'ottica, l'ENEA, che dispone di un Dipartimento con oltre 430 addetti sul nucleare, attraverso i suoi esperti del settore, potrà amplificare il suo ruolo di intermediazione qualificata tra il mondo della ricerca, i cittadini, e le Istituzioni, ruolo che già svolge da anni nel pubblico interesse.



Torniamo a parlare di nucleare



di Cristina Corazza, Direttore

Questo numero della rivista è dedicato al ‘nuovo’ nucleare e, in particolare, alle nuove tecnologie per realizzare le centrali, a fronte dei profondi cambiamenti sullo scenario geopolitico e dei sempre più stringenti obiettivi di decarbonizzazione. L’atomo è tornato al centro del dibattito a livello nazionale e internazionale; tuttavia la prospettiva con la quale questo argomento viene affrontato contiene molti elementi di novità rispetto al passato, in uno scenario che, solo per fare un esempio, vede Paesi come la Germania abbandonare definitivamente l’energia da nucleare e altri, come la Finlandia, inaugurare un nuovo grande impianto o programmare nuovi reattori, come invece prevede di fare la Francia. Sulla stessa linea, l’alleanza di 22 Paesi, tra cui Usa, Gran Bretagna e Francia, che alla recente Cop28 hanno firmato una dichiarazione per triplicare l’energia nucleare entro il 2050, rispetto al 2020.

Di ‘nuovo’ nucleare parliamo coinvolgendo esperti e protagonisti del settore, per fare il punto sullo stato dell’arte e sulle prospettive di questa fonte energetica. Parliamo, quindi, di reattori a fissione, soprattutto di quelli di nuova generazione, dei sistemi di sicurezza, delle tecnologie disponibili e di quelle su cui si sta lavorando. Ma parliamo anche dell’energia delle stelle, la fusione, che vede il nostro Paese in posizione di leadership a livello scientifico e tecnologico potendo anche contare su un sistema di imprese molto avanzato e sulla realizzazione del progetto DTT, il Divertor Tokamak Test, nel Centro di Ricerche ENEA di Frascati. L’intervento di apertura è firmato dal Ministro dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica, Gilberto Pichetto Fratin, con una panoramica sul nucleare a livello italiano e internazionale evidenziando l’utilità “ambientale” di questa tecnologia.

Nella sezione Scenari troviamo, fra gli altri, gli interventi di protagonisti del settore quali il professor Marco Ricotti, Roberto Adinolfi presidente di Ansaldo Nucleare, Ambrogio Fasoli direttore del Centro Svizzero del Plasma e presidente del Consorzio EUROfusion, Francesca Ferrazza Head of Magnetic Fusion Initiatives di ENI, Luca Mastrantonio responsabile Unità Innovazione Nucleare Enel, i presidenti dell’INFN Antonio Zoccoli, del Consorzio RFX Piergiorgio Sonato e della società DTT Scarl Francesco Romanelli.

Le interviste sono dedicate a personaggi-chiave del nucleare a livello nazionale e internazionale: Pietro Barabaschi che da oltre un anno dirige ITER, il grande progetto internazionale che si propone di realizzare un reattore a fusione nucleare di tipo sperimentale, Massimo Garribba vice direttore generale responsabile del coordinamento delle politiche Euratom presso la direzione generale dell’Energia della Commissione UE, Stefano Buono scienziato e imprenditore, fondatore e AD di *newcleo*, società che progetta SMRs ovvero gli small modular reactors, Davide Malacalza presidente di ASG Superconductors azienda leader nel settore della fusione e Nicola Monti, AD di Edison che ha annunciato di voler riportare il nucleare in Italia e costruire due Small Modular Reactors entro il 2040.

Oltre che della forte ripresa del dibattito sul nucleare in chiave di sicurezza degli approvvigionamenti e di contrasto al cambiamento climatico, la cornice in cui si inserisce questo numero è la necessità per i sistemi energetici di avere una solida base in grado di assicurare la stabilità di un contesto dove cresce la presenza di fonti rinnovabili. L’atomo, quindi viene visto come una soluzione, secondo alcuni irrinunciabile, che può contribuire positivamente al mix energetico nazionale.

Un segnale in questa direzione è venuto nel luglio scorso quando 12 Paesi europei hanno firmato una dichiarazione comune indirizzata alla Commissione Europea nota come Alleanza per il nucleare. Animata

dalla Francia, ne fanno parte: Bulgaria, Croazia, Repubblica Ceca, Finlandia, Ungheria, Paesi Bassi, Polonia, Romania, Slovenia, Slovacchia e Svezia mentre Belgio e Italia hanno partecipato in qualità di osservatori e non hanno preso parte al dibattito né all'elaborazione delle conclusioni. Nel documento, intitolato "Una nuova strategia sull'uso dell'energia nucleare per l'Unione Europea", i dodici chiedono il riconoscimento del "ruolo vitale dell'energia nucleare", "sottolineano il principio della neutralità tecnologica e il diritto sovrano degli Stati membri di determinare il proprio mix energetico, che devono essere debitamente presi in considerazione nelle politiche europee".

Nel nostro Paese lo scorso maggio il Parlamento ha approvato due mozioni sul nucleare e a settembre il Ministro dell'Ambiente Gilberto Pichetto Fratin ha dato il via alla Piattaforma nazionale per un nucleare sostenibile, con l'obiettivo di elaborare entro 7 mesi una roadmap, ed entro 9 mesi anche le linee guida in termini di azioni, risorse/investimenti e tempi, con un ampio coinvolgimento degli stakeholder del settore.

Ma è in Europa e soprattutto a livello mondiale che la soluzione nucleare sta tornando di attualità: la Cina ha un massiccio programma di investimenti e a costruire nuove centrali come soluzione per soddisfare una crescente domanda di energia stanno pensando gli Stati Uniti, l'India, gli Emirati Arabi Uniti ma anche l'Arabia Saudita, l'Egitto e il Bangladesh.

Nella terza parte della rivista, il Focus ENEA, intervengono i ricercatori dell'Agenzia con approfondimenti sul nucleare da fusione e da fissione ma anche sull'utilizzo di tecnologie di derivazione nucleare in settori quali, ad esempio, la salute, lo studio dell'ambiente e la tutela del patrimonio culturale.

Maria Cristina Corasse

N. 3 Ottobre - Dicembre 2023

Direttore Responsabile

Cristina Corazza

Comitato di direzione

Ilaria Bertini, Alessandro Coppola, Alessandro Dodaro, Giulia Monteleone, Roberto Morabito

Redazione

Laura Di Pietro, Roberto De Ritis, Paola Giaquinto, Laura Moretti, Fabiola Falconieri (per i testi in inglese)

Progetto grafico ed elaborazione tecnica

Flavio Miglietta

Elaborazione grafica copertina

Maurizio Giuliani

Edizione web

Antonella Andreini, Serena Lucibello

Promozione e comunicazione

Paola Giaquinto

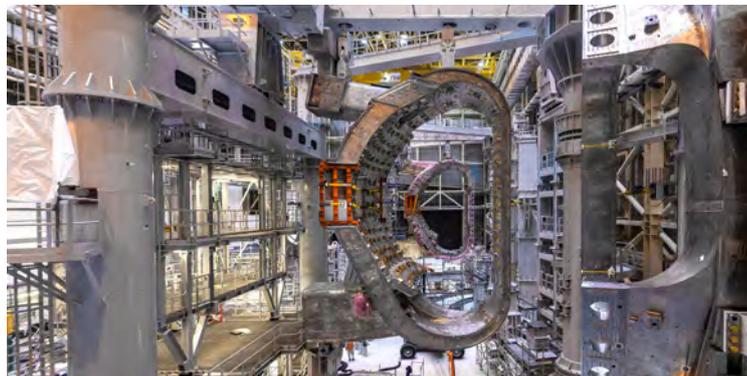
Stampa

Laboratorio Tecnografico
Centro Ricerche ENEA Frascati
Numero chiuso nel mese di gennaio 2024

Registrazione

Tribunale Civile di Roma
Numero 42/2019 del 28 marzo 2019
(versione stampata)
Numero 43/2019 del 28 marzo 2019
(versione telematica)

Foto in copertina: credits AdobeStock



24

Possiamo cambiare marcia per l'energia da fusione in Europa?
di Ambrogio Fasoli

- 1 Nucleare sostenibile: scenari e prospettive *di Gilberto Dialuce*
- 4 Torniamo a parlare di nucleare *di Cristina Corazza*

GLI INTERVENTI

- 8 Il nucleare italiano nel panorama internazionale ed europeo
di Gilberto Pichetto Fratin
- 11 Sul nucleare l'Italia non ricomincia da zero *di Alessandro Dodaro*

GLI SCENARI

- 14 Perché si riparla di nucleare in Italia? *di Roberto Adinolfi*
- 18 La Rete automatica della radioattività ambientale REMRAD
di Massimo Altavilla, Sonia Fontani, Andrea Pepperosa
- 20 La fusione a Frascati: una storia di successi proiettata nel futuro
di Paola Batistoni, Marco Ciotti, Luigi De Dominicis, Antonio Della Corte
- 24 Possiamo cambiare marcia per l'energia da fusione in Europa?
di Ambrogio Fasoli
- 27 Il ruolo di Eni nello sviluppo dell'energia da fusione
di Francesca Ferrazza
- 29 SIET, una realtà nazionale nella qualifica dei componenti nucleari
di Alfredo Luce
- 32 Il nuovo nucleare - Come si prepara una utility *di Luca Mastrantonio*
- 35 Lo scenario internazionale *di Marco Enrico Ricotti*
- 38 Il progetto DTT - Divertor Tokamak Test *di Francesco Romanelli*
- 41 Il contributo del Consorzio RFX alla ricerca sulla fusione
di Piergiorgio Sonato
- 44 Il Brasimone, centro di eccellenza internazionale per la ricerca nucleare
di Mariano Tarantino
- 49 L'INFN e l'energia nucleare *di Antonio Zoccoli*

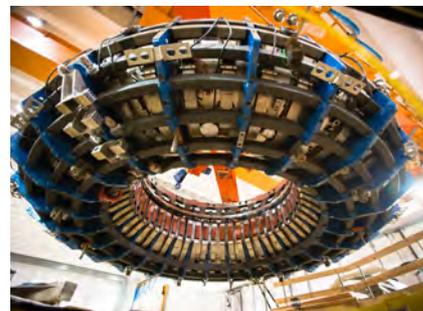
Sommario



27 Il ruolo di Eni nello sviluppo dell'energia da fusione
di Francesca Ferrazza



32 Il nuovo nucleare - Come si prepara una utility
di Luca Mastrantonio



41 Il contributo del Consorzio RFX alla ricerca sulla fusione
di Piergiorgio Sonato

LE INTERVISTE

- 52** *Stefano Buono*: Già nel prossimo decennio i nostri reattori di nuova generazione
- 55** *Pietro Barabaschi*: La sfida di ITER per l'energia sostenibile
- 58** *Massimo Garribba*: Il nucleare può giocare un ruolo fondamentale per la decarbonizzazione
- 62** *Davide Malacalza*: La fusione arriverà prima di quanto si pensi
- 64** *Nicola Monti*: Il nuovo nucleare è necessario per la transizione ecologica

FOCUS ENEA

- 67** L'impianto Top-Implart
di Concetta Ronsivalle, Alessandro Ampollini, Maria Denise Astorino, Giulia Bazzano, Fabio Fortini, Paolo Renzi, Vincenzo Surrenti, Emiliano Trinca
- 70** Sviluppo tecnologico ed attività di supporto in risposta ad eventi CBRNE
di Luigi De Dominicis, Nadia Cherubini, Mariano Tarantino, Antonietta Rizzo, Federico Rocchi, Francesco Colao, Giuseppe Marzo
- 73** Le tecnologie nucleari per la diagnostica e la conservazione dei beni culturali
di Francesca Bonfigli, Sabina Botti, Luisa Caneve, Michele Arturo Caponero, Alessia Cemmi, Rosaria D'Amato, Ilaria Di Sarcina, Luca Falconi, Massimo Francucci, Massimiliano Guarneri, Stefano Loreti, Valentina Nigro, Concetta Ronsivalle, Valeria Spizzichino, Maria Aurora Vincenti

- 77** Le applicazioni nucleari nel campo dei radiofarmaci
di Antonino Pietropaolo e Nadia Cherubini
- 80** Il nucleare per lo spazio
di Marco Ciotti, Carlo Carrelli, Francesco Lodi
- 83** Il nucleare di nuova generazione
di Alessandro Dodaro e Mariano Tarantino
- 89** Un nuovo modo di comunicare il nucleare
di Alice Avila

Gli interventi

Il nucleare italiano nel panorama internazionale ed europeo

La prospettiva al 2050 deve essere quella della neutralità carbonica e sostituire il gas con una produzione di energia nucleare aiuterebbe il nostro Paese sul fronte della indipendenza energetica e sul consumo del territorio e tutela del paesaggio, essendo l'ingombro degli Small Modular Reactor (SMR) del prossimo futuro minimo rispetto agli spazi necessari sia per il solare che per l'eolico. Questa consapevolezza dell'utilità "ambientale" del nucleare sta passando in Italia ed è un dato acquisito nel panorama internazionale.



di **Gilberto Pichetto Fratin**, *Ministro dell'Ambiente e della Sicurezza energetica*

Dopo decenni di una narrazione dell'energia atomica che era improntata alla paura, finalmente anche in Italia si sta cominciando a discutere di nucleare in maniera che definirei "laica", cioè senza preconcetti, senza dogmi, senza adesioni fideistiche a questa o a quella posizione. Forse perché l'opinione pubblica sta comprendendo che il no al nucleare, sancito dai due referendum, all'indomani dei due incidenti di Chernobyl e Fukushima, non ci ha portato vantaggi né sicurezze ma ritardi e rischi ambientali con cui oggi facciamo i conti.

L'impegno per le rinnovabili alla COP e in Italia

Appare evidente oggi che il percorso delle rinnovabili, che questo Governo ha rimesso in moto, è un percorso complesso e non esente da prezzi per il territorio. Ma il nostro impegno in questa direzione è preciso. **Abbiamo aderito alla dichiarazione proposta dalla Presidenza COP28 con l'impegno a triplicare entro il 2030 la produzione di energia da rinnovabili.**

Un impegno che è già contenuto nel nostro PNIEC dove si prevede che il solare crescerà da 21.650 MW (2020) a 79.921 MW nel 2030, prevedendo un incremento del 369,15% mentre l'eolico crescerà da 10.907 MW (2020) a 28.140 MW nel 2030, prevedendo un incremento del 258%. Con un incremento complessivo (da 32,5 a 108

GW) di oltre il 300%.

Noi stiamo puntando al massimo sulle rinnovabili, anche con gli stanziamenti del PNRR, ma certamente una quota di nucleare nel nostro mix energetico aiuterebbe molto a raggiungere l'obiettivo di neutralità carbonica nel 2050. La COP 28 che si è appena chiusa ha indicato il nucleare come una delle tecnologie utili nel percorso di decarbonizzazione al 2050.

Dunque di nucleare si ricomincia a parlare, con una crescente consapevolezza del ruolo che questa tecnologia e lo sviluppo della stessa potrà giocare nella transizione sia in termini di stabilità del sistema che in termini di decarbonizzazione. Certamente l'utilizzo dell'energia nucleare ci farebbe risparmiare molte emissioni di gas serra che altrimenti nei prossimi 26 anni continuerebbero poiché saremmo costretti a usare fonti fossili per colmare la quota di domanda di energia che le rinnovabili non programmabili rischiano di non coprire.

Il percorso che abbiamo delineato è chiaro. Oggi abbiamo un mix con 2/3 di fossile e 1/3 di rinnovabili col carbone in calo, il petrolio stabile, gas e rinnovabili in crescita.

Al 2030 intendiamo invertire questo rapporto e arrivare, dopo aver abbandonato il carbone nel 2025, a lasciarci alle spalle anche il petrolio ed arrivare ad un rapporto 2/3 e 1/3 a favore delle rinnovabili.

La prospettiva al 2050 deve essere quella della neutra-



lità carbonica e sostituire il gas con una produzione di energia nucleare aiuterebbe il nostro Paese sia sul fronte della indipendenza energetica che su quella del consumo del territorio e tutela del paesaggio, essendo l'ingombro degli Small Modular Reactor (SMR) del prossimo futuro minimo rispetto agli spazi necessari sia per il solare che per l'eolico. Questa consapevolezza dell'utilità "ambientale" del nucleare sta passando in Italia ed è un dato acquisito nel panorama internazionale.

Il nucleare fra i protagonisti della COP 28

Sono reduce dal negoziato della COP 28 a Dubai. Avrete letto quanto il nucleare sia diventato, per la prima volta, un tema chiave nel dibattito e nella trattativa sui cambiamenti climatici.

Il fatto che una ventina di Paesi, tra cui Stati Uniti e Francia, abbiano chiesto in sede di COP di triplicare le capacità energetiche degli impianti nucleari nel mondo entro il 2050 è un evento storico, perché il nucleare viene visto ufficialmente in sede internazionale come una fonte di energia determinante per ottenere la neutralità carbonica entro il 2050 e per fronteggiare l'effetto serra, risorsa in alternativa al carbone e al gas, e quindi come uno strumento per fronteggiare l'effetto serra.

C'è stato chi ha criticato l'assenza dell'Italia fra i sottoscrittori della proposta. Critica paradossale. Noi siamo pienamente convinti della validità di questa proposta politica, ma non avendo nessun impianto nucleare attivo, né in costruzione, non possiamo ad oggi impegnarci per triplicare ciò che non abbiamo.

E sempre in sede di COP, a riprova che il tema è centrale nella trattativa sul clima, il premier belga ha annunciato che il Belgio organizzerà a marzo 2024, insieme all'Agenzia internazionale per l'energia atomica (AIEA), il primo vertice mondiale sul nucleare (Nuclear Energy Summit), a livello di Capi di Stato e Leader di Governo.

Abbiamo aderito, dopo anni in cui il tema era stato bandito dal tavolo della politica nazionale, alla Alleanza per l'Energia per il Nucleare in Europa in veste di osservatori. Allo stesso modo potremmo partecipare al vertice anche con l'obiettivo di seguire da vicino il confronto istituzionale sulle evoluzioni di questa tecnologia che è stata riconosciuta "green" dalla tassonomia europea. Questi due impegni manifestati alla COP danno la misura del ruolo che l'energia nucleare si appresta a svolgere nella questione ambientale come risorsa determinante per l'uscita dai combustibili fossili.

Guardando avanti verso la fusione

E dobbiamo tener conto che stiamo discutendo di un uso del nucleare a breve-medio termine. Stiamo ragionando su piccoli reattori modulari, impianti che producono energia nella massima sicurezza, sempre con la tecnologia della fissione. Ma non dobbiamo solo guardare il prossimo futuro, dobbiamo guardare avanti e l'orizzonte del nucleare è la fusione, l'energia pulita e sicura del futuro.

E per guardare avanti, nell'ambito del decreto "Mission Innovation" abbiamo stanziato 135 milioni di euro dedicati al settore nucleare, prevedendo la realizzazione di attività di ricerca e sperimentazione sui piccoli reattori modulari nel breve-medio periodo e sulle tecnologie di fusione per il lungo periodo. In questo ambito una quota delle risorse sarà utilizzata specificatamente per attività di formazione, con l'obiettivo di rafforzare le competenze professionali, tecniche e specialistiche in questo settore.

Anche il Presidente Giorgia Meloni a Dubai ha sottolineato come "la grande sfida italiana sia il tema della fusione nucleare, che potrebbe essere la soluzione di tutti i problemi energetici". "L'Italia su questo sta pensando in grande" ha detto il premier e lo ha detto a ragion veduta perché proprio mentre si apriva la COP contemporaneamente in Giappone il cammino verso la fusione faceva un altro passo con la partecipazione strategica dell'Italia. Infatti il 1° dicembre è stato inaugurato il "JT-60SA", la più grande macchina da fusione a confinamento magnetico mai realizzata fino ad oggi nel mondo. L'Italia ha fornito a questo progetto supporto scientifico e componenti importanti, realizzati da aziende del nostro Paese anche grazie ai fondi, circa 70 milioni di euro, messi a disposizione dal Governo italiano. L'impianto "JT-60SA" rappresenta una pietra miliare nello sviluppo dell'energia da fusione e noi Italiani siamo pronti a contribuire alla messa in servizio della macchina e al suo sfruttamento scientifico.

È altresì importante implementare la collaborazione di questo progetto con il nuovo esperimento di fusione italiano che l'ENEA sta realizzando nel nostro Paese, il tokamak DTT (Divertor Tokamak Test). Entrambi questi progetti sono complementari e di supporto al progetto sperimentale ITER, in corso di costruzione a Cadarache, nel Sud della Francia, al quale l'Italia e l'UE contribuiscono in maniera determinante insieme ad altri partecipanti mondiali.

Così come è importante ricordare l'accordo di coopera-

zione che ENI ha sottoscritto negli Stati Uniti con CFS (Commonwealth Fusion Systems), di cui detiene un'importante quota di capitale (rispetto a un investimento iniziale di 50 milioni di dollari, attualmente l'impegno di Eni è di diverse centinaia di milioni di dollari) con l'obiettivo di accelerare l'industrializzazione dell'energia da fusione a confinamento magnetico.

L'Italia in prima linea nella collaborazione internazionale

Ma l'impianto giapponese "JT-60SA", frutto di una collaborazione tra il Giappone e l'UE, non è l'unico che vede le aziende italiane in prima linea in questo settore. Non posso non ricordare l'iniziativa che vede fra i protagonisti l'AIN con Ansaldo nucleare in un accordo di collaborazione con EDF e con un consorzio di industrie francesi finalizzato a rafforzare la cooperazione tra i due Paesi per collaborare nello sviluppo di soluzioni innovative in grado di garantire una produzione di energia nucleare pulita ed efficiente. E la cooperazione che si sta mettendo in campo riguarda anche la Romania, con l'accordo fra AIN e il "Romanian Atomic Forum", al fine di consolidare i rapporti italo-rumeni in ambito nucleare, caratterizzati dalle interazioni tra aziende italiane, con a capo Ansaldo Nucleare, e aziende rumene.

La "Piattaforma nazionale per un nucleare sostenibile" e il percorso italiano

In questo scenario acquisisce un maggiore rilievo l'iniziativa che abbiamo avviato al Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica con la creazione della "Piattaforma Nazionale per un Nucleare Sostenibile".

Il nostro obiettivo di mettere a sistema Istituzioni, enti universitari e di ricerca, aziende private attorno alla ipotesi di un ritorno al nucleare, così come richiesto dal Parlamento che ha approvato una mozione in questo senso, sta diventando un obiettivo strategico del Paese. A tal proposito ribadisco due elementi chiave del nostro percorso:

- non è prevista né ipotizzata la realizzazione di grandi centrali nucleari nel nostro Paese, anche perché gli esperti ci dicono che in termini di tempo complessivo per la disponibilità dell'impianto dovrebbero arrivare prima i piccoli reattori modulari che si stima saranno sul mercato tra una decina di anni;
- è molto probabile che il ruolo dello Stato sia di compartecipazione con i privati da un punto di vista finanziario, oltre che di regolazione e autorizzazione.

Saranno i privati, i poli industriali, le comunità locali a investire e decidere sulla base di una valutazione di sostenibilità economica dell'investimento.

Va chiarito che il contributo che il nucleare potrebbe dare al nostro mix energetico avrebbe una finalità ambientale e di indipendenza energetica, consentendo al nostro Paese una piena autonomia e mettendo l'Italia al riparo dalle turbolenze della geopolitica che negli ultimi anni abbiamo vissuto e stiamo ancora vivendo.

Io vorrei però che di questa "opportunità nucleare" se ne discutesse con pacatezza e tenendo presente i dati scientifici e tecnici del nucleare di oggi e di quello che l'Italia potrebbe utilizzare domani.

Penso che parallelamente a tutti gli approfondimenti e le verifiche tecniche, a tutto l'impegno del sistema industriale per essere competitivo e pronto in questo campo, sia necessaria una "political suasion" nei confronti dell'opinione pubblica.

Dobbiamo riuscire a comunicare la qualità e i vantaggi ambientali delle nuove tecnologie del nucleare. Dobbiamo essere in grado di sovvertire la cultura della paura alimentata da un ideologismo che ha fatto del contrasto al nucleare una battaglia identitaria.

Ho letto che fra i giovani oggi l'avversione al nucleare è meno marcata, e voglio ricordare qui come la stessa Greta Thunberg ha criticato la chiusura delle centrali in Germania visto che l'alternativa era il ritorno al carbone, che inquina ed emette gas serra, al contrario dei reattori nucleari.

Ci sono insomma ragioni ambientali in primo luogo – le centrali nucleari non producono CO₂ – ma anche economiche e sociali per sostenere l'opportunità di valutare in Italia un ritorno al nucleare civile.

Una recente ricerca ha stimato in 45 miliardi di euro l'impatto economico della realizzazione degli impianti di produzione di energia elettrica da fonte nucleare di ultima generazione (Small e Advanced modular reactor) in Italia. Si ipotizza inoltre la creazione di 52 mila posti di lavoro stabili a tempo pieno.

Al di là delle stime in ogni caso è evidente la spinta anche economica e occupazionale che un ritorno al nucleare implicherebbe per il nostro Paese.

Credo quindi che dobbiamo proseguire nel nostro impegno, per attrezzarci tecnologicamente e attrezzare il sistema produttivo italiano nel breve periodo, e guardare in prospettiva al nucleare come una possibile importante fonte di energia green per l'Italia.



Sul nucleare l'Italia non ricomincia da zero

L'energia nucleare può svolgere un ruolo complementare a quello delle fonti rinnovabili, garantendo stabilità e costituendo un mezzo importante per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione europei in vista del raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050. In Italia si è riaperto il dibattito sul possibile ritorno al nucleare e, nel mutato contesto, il riconosciuto bagaglio di competenze tecnico-scientifiche e le capacità industriali del settore possono rivelarsi un grande vantaggio consentendoci di non ricominciare da zero.



di **Alessandro Dodaro**, Direttore Dipartimento Nucleare - ENEA

©Xenia Rilande

L'Italia non ha competenze sul nucleare!" Quante volte abbiamo sentito questa frase? E invece esistono molte realtà, tra aziende private, Università ed Enti di Ricerca, che portano avanti lo sviluppo della fissione e della fusione nucleare a livelli altissimi, con competenze che tutto il mondo ci invidia.

Siamo in un Paese che ha abbandonato la produzione di energia elettrica da fonte nucleare quasi quarant'anni fa, a seguito di un referendum tenutosi sull'onda emotiva dell'incidente di Chernobyl, nel quale il dibattito sull'energia nucleare è stato riaperto per un breve periodo attorno al 2010 per poi chiuderlo definitivamente dopo un altro referendum a valle dell'incidente di Fukushima.

Si potrebbe pensare, quindi, che la ricerca scientifica e il tessuto industriale non avrebbero avuto alcuna motivazione o interessi sufficienti per continuare a lavorare e investire nel settore nucleare. Invece, basta analizzare il caso italiano per rendersi conto che nel nostro Paese, paradossalmente, gli enti di ricerca depositari delle competenze tecniche nel settore e le principali industrie che negli anni '80 avevano nel nucleare il proprio core business, hanno mantenuto, anche se non con lo stesso impegno precedente, il loro posizionamento in campo internazionale, partecipando alle più importanti iniziative nel settore della ricerca e sviluppo dell'energia nucleare.

L'Italia fra i Paesi leader nel programma europeo della fusione

È indubbio che un ruolo molto importante lo abbia svolto il programma di ricerca e sviluppo sulla fusione nucleare: la possibilità di riconvertire il grande patrimonio di competenze e le capacità produttive presenti in Italia in ambito fissione allo studio e sperimentazione di quella che, a detta di tutti gli esperti, sarà una fonte energetica pulita, sostenibile e utilizzabile ovunque nel mondo, si è trasformata in un volano per la nostra comunità scientifica e per le aziende del settore nucleare. L'Italia è infatti uno dei Paesi leader nel programma europeo della fusione, secondo solo alla Germania nella quota di attività che, tramite il consorzio EUROfusion, EURATOM finanzia per lo sviluppo di tale tecnologia: la compagine italiana, coordinata da ENEA, è costituita da oltre 20 soggetti, sia pubblici che privati, che rappresentano una realtà molto attiva che spazia dai principali enti di ricerca, consorzi e istituti universitari italiani alle aziende del settore, che portano nelle più sfidanti iniziative internazionali in ambito fusione nucleare il Made in Italy. Tanto per citare un numero, nella realizzazione di ITER (il reattore a fusione che dovrà dimostrare sperimentalmente la possibilità di produrre notevoli quantità di energia in eccesso rispetto al consumo) le aziende italiane hanno



vinto gare d'appalto internazionali per oltre 2 miliardi di euro, superate solo dalle cugine francesi che, però, hanno l'esclusiva sulle infrastrutture edili.

In Italia, presso il Centro Ricerche ENEA di Frascati, si sta anche realizzando uno degli impianti cardine per la roadmap europea per la fusione: la Divertor Tokamak Test Facility (DTT).

Ideata e progettata da ENEA, che ha anche reperito tutte le risorse economiche necessarie, dovrà risolvere la criticità del componente su cui smaltire il plasma esausto e il calore in eccesso che produrrà un futuro reattore a fusione commerciale. Il divertore di un reattore commerciale, infatti, dovrà sopportare una potenza superficiale di circa 20 MW/mq, uguale a quella che c'è sulla superficie del sole, ed oggi non ci sono configurazioni geometriche e di materiali in grado di resistere a tali carichi. Le campagne sperimentali che impegneranno il DTT nei suoi previsti 25 anni di operazione, assieme a quelle che si terranno

presso ITER, forniranno gli input necessari alla comunità fusionistica per realizzare, verso la fine del secolo, il primo reattore a fusione commerciale.

Appare evidente che la fusione potrà essere la risposta alla decarbonizzazione solo nel lungo periodo, cioè quando sarà tecnologicamente matura e i reattori a fusione diventeranno impianti che possano essere gestiti con affidabilità e continuità.

Per affrontare oggi la transizione energetica è estremamente importante puntare a un mix energetico che sia privo di preconcetti e guardi solo alla capacità di produrre energia rispettando l'ambiente: accanto alla sempre maggiore spinta per lo sviluppo delle energie rinnovabili tradizionali, ai processi di efficientamento che riducano gli sprechi e allo sviluppo di sistemi di accumulo necessari per aumentare le capacità e l'efficienza di stoccaggio/recupero dell'energia, è imprescindibile il ricorso a fonti stabili per completare il quadro.



Il ruolo della fissione nucleare

Un approvvigionamento energetico stabile comprende tutti i tipi di produzione energetica sostenibile, e dovrebbe essere caratterizzato da basse emissioni di gas serra, mentre attualmente il nostro Paese si garantisce la quota di energia non rinnovabile importando materie prime fossili (gas naturale e carbone) o energia elettrica diretta. **L'unica reale alternativa ai combustibili fossili e fonte di energia sostenibile è la fissione nucleare:** nel 2022 è stata la seconda fonte di produzione di energia elettrica carbon free nel mondo, superata solo dall'idroelettrico, e le proiezioni delle agenzie internazionali descrivono una inversione di tendenza rispetto alla riduzione della produzione energetica da fissione che ha caratterizzato gli ultimi 20 anni.

L'energia nucleare può svolgere un ruolo complementare a quello delle fonti rinnovabili, garantendo stabilità e costituendo un mezzo importante per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione europei in vista del raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050. Persino in Italia si è riaperto il dibattito sul possibile ritorno al nucleare e, nel mutato contesto, il riconosciuto bagaglio di competenze tecnico-scientifiche e le capacità industriali del settore possono rivelarsi un grande vantaggio consentendoci di non ricominciare da zero.

Tutti i nuovi concetti di reattore a fissione in fase di sviluppo hanno in comune una taglia più piccola rispetto alle centrali nucleari convenzionali (la potenza varia da poche decine a qualche centinaio di MWe), e una particolare attenzione alla progettazione che permetta di realizzare gran parte dei componenti in una fabbrica e poi trasportarli nel sito di costruzione della centrale (modularità):

- Small Modular Reactors (SMR), che sfruttano la tecnologia dell'attuale flotta LWR (Generazione III o III+) su scala ridotta;
- 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 e nuove funzionalità (cogenerazione, produzione di idrogeno, gestione più semplice dei rifiuti nucleari).

Se gli SMR sono ormai una tecnologia matura e pronta per il deployment, gli AMR necessitano ancora di ricerche e prototipazioni che li renderanno commercialmente disponibili nel prossimo decennio.

ENEA, Ansaldo Nucleare, *newcleo*, SIET, per citare solo i principali attori del panorama nazionale (perché assieme a loro ci sono molte altre industrie e università italiane coinvolte) lavorano attivamente nello studio e sviluppo di tecnologie correlate ai SMR e AMR, impegnandosi principalmente nel supporto di progetti internazionali, per collaborare allo sviluppo del nuovo nucleare in Europa e favorirne la diffusione, in prospettiva anche in Italia, con la possibilità di avere i primi reattori tra una decina di anni.

Valorizzare le competenze della filiera industriale italiana

L'obiettivo è valorizzare le "competenze" della filiera industriale italiana nel settore, avviando allo stesso tempo una riflessione sul possibile ruolo del nuovo nucleare nella transizione energetica in Italia.

Qualora si decida di tornare all'uso dell'energia nucleare per produrre energia elettrica (e magari anche per altri scopi civili) l'esperienza maturata in questi progetti potrà essere valorizzata anche sul nostro territorio.

E la sfida per il futuro dell'Italia sarà quella di connettere le migliori energie, le migliori competenze e le forze vive del Paese per capire se c'è la reale prospettiva di una reindustrializzazione del nucleare in Italia. Sia con la tecnologia della fissione sia, in prospettiva, con le dinamiche che potrà mettere in campo l'avveniristica corsa alla fusione.

Perché si riparla di nucleare in Italia?

La lunga e travagliata storia dell'energia nucleare in Italia ha conosciuto negli ultimi due anni una significativa accelerazione, in larga misura inattesa. Dopo un lungo periodo di rigetto aprioristico delle evidenti ragioni che fanno del nucleare una fonte carbon-free, finalmente si è creata una pre-condizione, necessaria seppur non sufficiente, per un nuovo interesse degli operatori del settore. Questo nuovo capitolo della storia del nucleare nel Paese nasce dalla base, prima ancora che dai decisori politici.

DOI 10.12910/EAI2023-054



di Roberto Adinolfi, Presidente di Ansaldo Nucleare

La lunga e travagliata storia dell'energia nucleare in Italia ha conosciuto negli ultimi due anni una significativa accelerazione, in larga misura inattesa.

Ad essa hanno contribuito alcuni fattori esterni, primo fra tutti l'inclusione degli investimenti sull'energia nucleare (per quanto a determinate condizioni) nei criteri della Tassonomia europea. **Dopo anni di rigetto aprioristico delle evidenti ragioni che fanno del nucleare una fonte carbon-free, finalmente si è creata una pre-condizione, necessaria seppur non sufficiente, per un nuovo interesse degli operatori europei del settore.** Ed ancor più, questo passo ha verosimilmente sgombrato il campo anche nel nostro Paese da tanta disinformazione circa l'impatto ambientale dell'energia nucleare. Ma in Italia, Paese da decenni disinteressato a progetti nucleari, stanno

giocando un ruolo significativo anche fattori più interni al nostro sistema:

- in primis, **la preoccupazione diffusa per la sicurezza degli approvvigionamenti**, messa in crisi dallo scoppiare del conflitto tra Russia e Ucraina: un tema scomparso per anni dal dibattito pubblico italiano, ma tornato di interesse anche del più vasto pubblico;
- di conseguenza, **l'allarme delle industrie energivore italiane sia sul livello attuale dei prezzi**, sia sulla loro eccessiva instabilità: fattore questo che rischia di penalizzare i nostri produttori rispetto a quelli di Paesi che, come la Francia, possano contare su un mix produttivo meno esposto alle fluttuazioni di mercato;
- da ultimo, in uno scenario dove gran parte della produzione sarà assicurata dalle fonti rinnovabili non programmabili, **la necessi-**

tà di mantenere la rete sempre bilanciata: la geografia del Paese, con i consumi concentrati al Nord e la produzione da RES in sviluppo principalmente al Sud, comporta non solo il bilanciamento orario e stagionale delle RES, ma anche **un bilanciamento geografico, che non può non preoccupare le società elettriche, in particolare quelle a forte connotazione regionale.**

L'insieme di questi fattori esterni ed interni ha creato una concomitanza di interesse per il nucleare tra vari soggetti, dai grandi consumatori alle società elettriche, dai cittadini preoccupati per la sicurezza del futuro ai giovani sensibili alle tematiche ambientali (e non ancorati a schemi ideologici...). **Possiamo ben dire, anche alla luce dei più recenti sondaggi, che questo nuovo capitolo della storia del nucleare nel Paese nasce dalla base, prima ancora che**

dai decisori politici.

Peraltro, anche a questo livello si registrano ormai passi significativi: il più rilevante è la Piattaforma di coordinamento sui temi nucleari

lanciata dal Ministro dell'Ambiente, che intende raggruppare intorno ad un tavolo comune tutti gli attori interessati a vagliare i pro e i contro di una ripresa di iniziativa e ad individuare una possibile road map per consentire decisioni di investimento in nucleare anche nel nostro Paese.

Non solo: l'Italia ha anche aderito, seppure in qualità di osservatore, ad alcune significative iniziative lanciate in Europa per stimolare il dibattito, quali la Nuclear Alliance promossa dalla Francia e dagli altri Paesi che ospitano impianti nucleari o che intendono dotarsene nel prossimo futuro (es. la Polonia).

Altra iniziativa rilevante è quella promossa dalla Commissione Europea sugli Small Modular Reactors:

nell'ambito delle attività esplorative condotte nella fase di Pre-partnership, l'ISIN ha partecipato al gruppo di lavoro costituito dall'European Nuclear Safety Regulatory Group (ENSREG) per valutare le migliori modalità per armonizzare le valutazioni di sicurezza e i percorsi autorizzativi tra i vari Paesi europei. L'obiettivo dell'iniziativa è facilitare la realizzazione di reattori standardizzati, condizione essenziale per una produzione in serie e quindi per il raggiungimento della competitività degli SMR sul mercato. È di novembre l'annuncio da parte della Commissaria UE all'Energia del lancio di una SMR Industrial Alliance, alla quale vari attori industriali italiani guardano già con interesse.

Come ci presentiamo a questo appuntamento?

Questo fiorire di interesse, nell'opinione pubblica come tra i decisori politici, deve comunque misurarsi,

in primo luogo, con lo stato dell'arte del Sistema Italia in materia di energia nucleare. Cercherò nel seguito di dare un contributo almeno per quanto concerne lo stato della nostra struttura tecnico-industriale.

Le uniche attività realizzative in campo nucleare in Italia ormai da venti anni sono solo quelle correlate alla sistemazione dei rifiuti radioattivi e allo smantellamento delle centrali all'arresto. Ma **l'industria italiana ha continuato a ricercare lavoro all'estero, posizionandosi su molti dei (pochi) progetti in corso in Europa, sia nel campo dei Nuovi Impianti che nel campo delle migliori agli impianti in esercizio.** Cito i più significativi:

- La realizzazione delle due unità CANDU in Romania (Cernavoda 1 & 2), un progetto completato da tempo (2007) ma che fino all'inizio di quest'anno è rimasto l'unico nuovo impianto entrato in esercizio in Europa dopo Chernobyl. Importante notare come l'unità 2 di Cernavoda sia stata completata (dal consorzio AECL-Ansaldo, col coinvolgimento di numerosi fornitori italiani) con soli due mesi di ritardo e con un extra-costi del 7% rispetto alla stima iniziale. **Oggi l'industria italiana, forte di questo risultato, è ben posizionata per la realizzazione di due ulteriori unità, nonché per il revamping della prima unità, prossima ad esaurire la vita iniziale di progetto.**
- La realizzazione delle due unità VVER in Slovacchia (Mohovce 3&4) che ha visto impegnata ENEL sia come owner che come integratore, e che quest'anno ha conseguito il traguardo della messa in servizio dell'Unità 3.
- L'upgrade di sicurezza dell'impianto PWR in Slovenia (Krsko), per tener conto delle lessons learned dall'incidente di Fukushima: Ansaldo ha progettato e realizza-

to due nuovi sistemi di sicurezza "ultima" (ovvero di back up ai sistemi già esistenti, anche in condizioni estreme, quale terremoto limite), rendendo così possibile l'estensione della vita dell'impianto per altri venti anni.

- La risoluzione della problematica di stress corrosion cracking emersa sugli impianti francesi: le nuove tubazioni che sono state montate sugli impianti sono state approvvigionate da due aziende italiane (Tectubi e IBF), a testimonianza dell'alto livello di qualità della nostra manifattura.
- Peraltro, **anche in termini di tecnologia le nostre strutture sono state, e sono, all'avanguardia:**

- **Abbiamo sviluppato in Italia i più innovativi componenti richiesti dal ricorso ai cd. sistemi di sicurezza passiva, adottati per i reattori di terza generazione avanzata,** quali gli scambiatori immersi in piscina utilizzati nell'AP1000 e nello SBWR o il Contenitore metallico per lo smaltimento finale del calore dell'AP1000. Componenti non solo progettati e realizzati come prototipi nelle nostre fabbriche, ma anche testati nelle facilities sperimentali di ENEA e SIET.
- Per primi abbiamo esplorato progetti di piccoli reattori (gli antesignani degli SMR), uno per tutti il reattore IRIS (proposto dal Politecnico di Milano ad inizio anni 2000)
- **Abbiamo condotto la ricerca europea sulla quarta generazione,** sviluppando in particolare la filiera dei reattori veloci raffreddati a piombo, oggetto ai giorni nostri di due progetti proposti da compagnie italiane (ENEA, Ansaldo Nucleare e Newcleo), sui quali si stanno aggregando crescenti interessi europei.
- Last but not the least, siamo presenti da protagonisti sul fronte

più avanzato delle tecnologie nucleari, quello della fusione. Le **imprese italiane rappresentano oggi il secondo fornitore di ITER, con commesse relative a componenti di primaria rilevanza, quali il Vacuum Vessel, i magneti toroidali, ecc. E non va dimenticato l'impegno per la realizzazione del Divertor Tokamak Test facility di ENEA, nonché la partecipazione attiva di ENI all'innovativo progetto CFS negli Stati Uniti.**

Quali prospettive per la nostra industria?

Questo per il passato e per il presente: ma cosa possiamo pensare di fare per il futuro, come industria italiana, per esser parte attiva nell'evoluzione dei mercati nucleari in Europa, e anche essere pronti a sostenere un nuovo scenario nel nostro Paese,

qualora se ne aprisse l'opportunità? Senz'altro possiamo continuare, ed anzi incrementare, la nostra partecipazione ai progetti oggi allo studio in vari Paesi europei: solo così potremo mantenere aggiornate le nostre conoscenze, progredire nell'innovazione di processo e di prodotto, e soprattutto creare reali opportunità di crescita professionale ai tanti giovani che anche nel nostro Paese tornano a guardare al settore nucleare con interesse.

Per la nostra industria, le opportunità più interessanti potrebbero essere offerte dal nascente mercato degli SMR, dove almeno in linea di principio ci possono essere maggiori spazi liberi per inserirsi nelle catene di fornitura che si stanno formando a livello europeo. Inoltre, proprio sugli SMR sembra che più facilmente si potranno creare opportunità nel mercato domestico. Infatti

gli SMR meglio si attagliano ad attori che si affacciano per la prima volta alla generazione elettronucleare, come molte nostre utilities nonché i grandi consumatori; meglio si combinano con una forte presenza di RES nella rete; meglio rispondono alla difficoltà di trovare siti, che da sempre costituiscono in Italia una barriera per la localizzazione dei grandi impianti.

Perché gli SMR possano affermarsi sul mercato e trovare un adeguato spazio affianco ai grandi impianti che altrove in Europa continuano ad essere il riferimento anche per il futuro, è necessario soddisfare alcuni criteri insiti nel modello di business associato a questi impianti che non usufruiscono del beneficio della grande taglia. Non basta infatti disegnare un reattore di piccola taglia da commercializzare in moduli successivi per assicurarne la competitività



(il recente caso di cancellazione del progetto pilota Nuscale nello Utah ne è un esempio).

Bisogna innanzitutto individuare la taglia ottimale per contenere comunque i costi fissi di impianto, assicurando allo stesso tempo la possibilità di assemblare il reattore in officina, evitando così i costi (e gli extracosti!) della costruzione in sito, ove ogni ritardo genera sia maggiori oneri diretti sia maggiori oneri finanziari.

Bisogna assicurarsi poi i vantaggi associati alla realizzazione in serie, quindi standardizzare non solo il progetto e renderlo fruibile in svariati Paesi, ma anche adottare soluzioni tecniche e processi di costruzione che sfruttano pienamente la learning curve.

E ancora, **bisogna semplificare quanto più possibile il progetto**, ricorrendo laddove possibile a componenti standard industriali di alta qualità, ma non disegnati e costruiti specificamente.

Tutto ciò aiuta a comprendere come nel caso degli SMR bisognerà rivedere dalle fondamenta l'organizzazione della Supply Chain, passando da un approccio "project oriented" nell'impostazione e nell'organizzazione del lavoro ad un approccio "factory oriented".

Ne consegue che, almeno in linea teorica, **per la penetrazione degli SMR si creerà un campo di gioco più livellato, dove anche i fornitori "storici" dovranno rimettersi in discussione e fornire nuove soluzioni fit for purpose, rinunciando in buona misura alle rendite di posizione acquisite negli anni. Una buona opportunità per le industrie italia-**

ne che da venti anni conquistano spazi puntando proprio sulla propria capacità di adattamento alle specifiche esigenze dei clienti.

Come ripartire?

Nel ricostruire le condizioni per una ripartenza del nucleare in Italia, sembra sensato

- partire dai punti di forza ancora esistenti, e
- fare leva su quanto accade intorno a noi in Europa.

Da qui, alcune proposte:

a) Partecipare sin da subito alle iniziative internazionali in corso per accrescere le competenze: poter contare su una struttura industriale, e di ricerca, di elevata qualità non solo contribuirà alla credibilità di un programma nucleare presso i cittadini, ma consentirà anche di far ricadere nel Paese buona parte degli investimenti ad esso associati. Senza altro questo compito ricade in primo luogo sugli operatori economici interessati: ma non si può ignorare la rilevanza di accordi di collaborazione a livello politico nel favorire il dialogo a livello operativo.

b) Avviare una campagna di informazione corretta e neutrale sui temi dell'energia, evidenziando benefici e problemi associati alle varie fonti, prendendo spunto dall'esperienza in corso in altri Paesi (ad esempio riguardo alla sistemazione dei rifiuti radioattivi): anche se le scelte ottimali in una materia così complessa vanno assunte nelle sedi preposte, la sensibilità oggi esistente per le problematiche ambientali richiede che queste scelte siano comprensibili per i cittadini.

c) Avviare percorsi di formazione per le molteplici professionalità ri-

chieste a supporto di un programma nucleare: professionalità tecniche, sia a livello ingegneristico che di manodopera specializzata, ma anche professionalità per la messa a punto della legislazione e la sua applicazione, ovvero per la gestione di grandi progetti e per il loro finanziamento, ed ancora per la gestione degli impianti e la loro sorveglianza. Anche in questo caso, la collaborazione internazionale può tornare utile: la carenza di risorse non è un problema solo italiano!

Le precedenti proposte, si noti bene, possono essere messe in atto, ed anzi è bene che lo siano, prima ed indipendentemente da decisioni circa il varo di nuovi impianti in Italia: se opportunamente strutturate, esse potranno anche trovare copertura dei costi associati tramite il ritorno in termini di crescita dell'export e di formazione, e quindi di occupazione, in un settore ad alto valore aggiunto e tecnologicamente avanzato.

Molti altri passi saranno necessari se si vorrà giungere al varo di un programma di costruzione di impianti nucleari: ma anche qui l'esperienza internazionale potrà essere un valido riferimento per approntare una precisa e completa road map: si pensi all'avvio di analoghi programmi in Paesi che partivano da un livello di conoscenze decisamente inferiore, quali la Polonia o gli Emirati Arabi.

E questo è il compito al quale è chiamata la Piattaforma lanciata dal Ministro dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, piattaforma alla quale le industrie italiane del settore sono pronte a fornire il proprio contributo di idee ed esperienze.

La Rete automatica della radioattività ambientale REMRAD

Il controllo sulla radioattività ambientale è regolato dalla normativa nazionale che recepisce direttive e trattati internazionali (Euratom) ¹ in cui è stabilito che gli Stati membri provvedano “agli impianti necessari per effettuare il controllo permanente del grado di radioattività dell’atmosfera, delle acque e del suolo”. In tale contesto normativo si inserisce la rete automatica della radioattività ambientale, REMRAD, gestita dall’Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione (ISIN) e costituita da stazioni di monitoraggio radiologico ad altissima sensibilità.

DOI 10.12910/EAI2023-055



di **Massimo Altavilla**, Responsabile dell’Area Rischio radiologico, **Sonia Fontani**, Responsabile Sezione controllo della radioattività ambientale, **Andrea Peperosa**, Sezione impiego sorgenti di radiazioni ionizzanti

Il controllo sulla radioattività ambientale è regolato dalla normativa nazionale che recepisce direttive e trattati internazionali (Euratom) ¹ in cui è stabilito che gli Stati membri provvedano “agli impianti necessari per effettuare il controllo permanente del grado di radioattività dell’atmosfera, delle acque e del suolo”.

In tale contesto normativo si inserisce la rete automatica della radioattività ambientale, REMRAD, gestita dall’Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione (ISIN) e costituita da stazioni di monitoraggio radiologico ad altissima sensibilità tramite sistemi automatici di campionamento e analisi spettrometrica del particolato atmosferico depositato su di un

filtro di grandi dimensioni, le quali sono in grado di rilevare in tempo “quasi reale” le minime anomalie radiometriche presenti in aria.

Le stazioni REMRAD sono localizzate in aree del territorio italiano, individuate tenendo conto anche dei venti prevalenti nel nostro Paese, per coprire le più probabili vie d’ingresso della contaminazione radioattiva in aria eventualmente rilasciata a seguito di un evento incidentale in un’installazione nucleare transfrontaliera o, più in generale, di eventi di contaminazione radioattiva in aria.

Il Piano nazionale per la gestione delle emergenze radiologiche e nucleari

La REMRAD è inclusa nell’ambito dei sistemi di allertamento nazionali

previsti dal “Piano nazionale per la gestione delle emergenze radiologiche e nucleari” ². **In caso di emergenza nucleare o radiologica i dati della rete, trasmessi in tempo reale ad un centro di controllo, devono confluire al Centro Emergenze Nucleari dell’ISIN, nonché essere resi disponibili a livello europeo ai fini di un rapido scambio di informazioni in ambito comunitario** ³.

L’altissima sensibilità di rivelazione delle stazioni REMRAD è garantita sia dall’elevata portata di campionamento, fino a 500 m³/h, sia dalla configurazione di misura adottata.

L’aria viene aspirata attraverso una testa di campionamento e confluisce, tramite un condotto di dimensioni tali da ridurre al minimo le perdite di carico, sopra un filtro in fibra di

¹ l’art. 152 del Decreto Legislativo n.101 del 31 luglio 2020 e sue successive modifiche, che recepisce l’art. 72 della Direttiva 59/2013/EURATOM, nonché gli artt. 35 e 36 del Trattato Euratom (1957)

² adottato con DPCM 14 marzo 2022, di cui al comma 2 dell’articolo 182 del D. Lgs. 101/2020 e successive modifiche ed integrazioni.

³ in ottemperanza alla Decisione del Consiglio dell’Unione Europea del 14 dicembre 1987 n.87/600/Euratom

vetro, di sezione rettangolare, su cui il particolato atmosferico si deposita. Il supporto portafiltra è progettato in modo da indurre il flusso di aria ad attraversare il filtro in quindici sezioni circolari identiche (diametro 77 mm) determinando altrettante aree circolari di deposizione.

Tale processo di deposizione è stato realizzato per ottimizzare e rendere riproducibile la geometria di misura. L'aria, dopo aver attraversato il filtro, confluisce in un canale di scarico ed è espulsa in ambiente. Un sistema di insonorizzazione, installato nella parte finale del canale di scarico, garantisce il mantenimento della pressione acustica entro limiti ampiamente accettabili. Per ogni filtro, in condizioni di funzionamento normali, la fase di campionamento dura 24h così da raggiungere un volume di aria aspirata di circa 12000 m³.

La misura del filtro è effettuata in due fasi differenti.

La prima fase è effettuata tramite un rivelatore spettrometrico LaBr₃ di dimensioni 1.5" x 1.5" posto in posizione ortogonale rispetto al filtro, al di sotto di esso. La testa del rivelatore è centrata rispetto ad una delle sezioni circolari laterali di deposizione del particolato. Tale misura consiste in dodici acquisizioni consecutive da 2h ciascuna e, poiché eseguita contestualmente alla fase di campionamento, viene definita on-line.

La seconda fase è effettuata tramite un rivelatore al germanio iperpuro tipo BeGe "Broad Energy Germanium", raffreddato elettricamente, installato all'interno di una schermatura cilindrica di piombo di spessore 10 cm e rivestita internamente da 1

mm di rame e 2 mm di stagno. La parte superiore della schermatura è costituita da un sistema scorrevole a due ante. Tale misura consiste in un'unica misura di 24 h con salvataggi delle acquisizioni cumulative ogni 2 h.

L'ottimizzazione dei sistemi di misura

Tra la prima e la seconda fase, il filtro viene diviso, in maniera automatica, in quindici sezioni di area uguale corrispondenti alle quindici aree di deposizione del particolato.

Queste sono impilate all'interno di un beaker che rappresenta la geometria di misura della seconda fase e lasciato in uno stato "di riposo" per 24 h, al fine di abbattere il contributo dei radionuclidi di origine naturale a breve vita presenti nel fondo e ridurre, conseguentemente, la Minima Concentrazione Rivelabile (MCR) della stazione di misura. Per questo la seconda fase di misura è definita off-line.

In caso di emergenza, la procedura ciclica di misura on line-riposo-off line, di durata totale pari a 72 ore, può essere modificata dall'operatore in modo tale da ridurre i tempi di analisi e di risposta.

L'ottimizzazione dei sistemi di misura sia in termini strutturali che analitici ha permesso di raggiungere valori di MCR dell'ordine dei mBq/m³ per il sistema on-line e dell'ordine dei μBq/m³ per il sistema off-line, rispetto il radionuclide di riferimento Cs-137.

Caratteristica particolare delle stazioni automatiche di monitoraggio REMRAD è che il sistema di misu-

ra on-line è stato progettato sulla base di un brevetto⁴ per invenzione industriale dell'ISIN, il cui inventore è il Dott. Massimo Altavilla, Responsabile dell'Area rischio radiologico con coordinamento tecnico delle attività di competenza del Servizio Radioprotezione, sorgenti radioattive, controllo radioattività ambientale, laboratori radiometrici.

Il brevetto è basato proprio sul metodo per generare la curva di efficienza assoluta, di un rivelatore di radiazioni a scintillazione LaBr₃, rispetto ad un filtro di grandi dimensioni, in fibra di vetro, suddiviso in 15 aree circolari, contenuto all'interno di una struttura composta da più sezioni. La curva di efficienza assoluta è calcolata per mezzo del codice di calcolo Monte Carlo, utilizzato per la modellizzazione del rivelatore di radiazione a scintillazione LaBr₃ e della struttura contenente il filtro assoluto.

La stessa curva di efficienza assoluta è funzionale rispetto al rivelatore di radiazione poiché permette la "quantificazione" dei radionuclidi, in termini di attività radiologica [Bq] depositata nelle 15 aree circolari del filtro, e la successiva determinazione della concentrazione radioattiva in aria [Bq/m³], ed è calcolata rispetto al particolato depositato nelle 15 aree circolari del sistema filtro. Ciascuna delle 15 aree circolari del filtro contribuisce, con propria specifica probabilità di deposizione del particolato, alla computazione della curva di efficienza assoluta.

⁴ *brevetto concesso per l'invenzione oggetto della domanda N. 102021000022559 del Ministero delle Imprese e del Made in Italy, "Direzione Generale Per La Tutela Della Proprietà Industriale - Uibm" - Metodo Per Il Calcolo Della Efficienza Assoluta Di Rivelazione Di Un Rivelatore A Scintillazione Labr3(Ce) Rispetto Ad Un Filtro Di Grandi Dimensioni, In Fibra Di Vetro, Installato In Un Sistema Di Campionamento Del Particolato In Aria Ad Alto Volume"*

La fusione a Frascati: una storia di successi proiettata nel futuro

I laboratori ENEA di Frascati continuano a giocare un ruolo di rilievo nel panorama internazionale e il grande patrimonio impiantistico, strumentale e di competenze presente nel centro trova importanti applicazioni in svariati campi. La scuola di fisica che ha dato vita ai primi studi degli anni 50, è tutt'oggi saldamente presente e attiva in particolare nello sviluppo di modelli avanzati per la descrizione del comportamento dei plasmi e l'analisi delle osservazioni ottenute negli esperimenti. Inoltre, particolarmente significativo è l'impegno nella realizzazione della nuova macchina DTT: dalla progettazione concettuale, alla definizione dei programmi di attività, alla realizzazione di numerose diagnostiche sia tradizionali sia innovative, per l'osservazione del comportamento del plasma e la validazione dei modelli teorici.

DOI 10.12910/EAI2023-056



di Paola Batistoni, Marco Ciotti, Luigi De Dominicis, Antonio Della Corte, Dipartimento Nucleare ENEA

Alla fine degli anni '50, un piccolo gruppo di ricercatori del Consiglio Nazionale di Ricerche Nucleari (CNRN, poi CNEN e oggi ENEA) iniziò un'attività di ricerca su gas ionizzati e fusione nucleare presso l'Università di Roma. Nel 1960 l'attività fu trasferita presso il Centro di Ricerche di Frascati dove era stato costruito un primo edificio per ospitare il nuovo Laboratorio Gas Ionizzati. Nello stesso anno veniva firmato il contratto di associazione tra il CNRN e Euratom che definiva i termini con cui il CNRN avrebbe fornito il proprio contributo "per mezzo dello studio della fisica del plasma e della fusione nucleare controllata nel suo Laboratorio Gas Ionizzati". Nasceva così a Frascati il Programma Fusione Italiano. **Nei primi anni la ricerca fu orienta-**

ta allo studio della fisica dei plasmi di interesse non solo per la fusione ma anche per l'astrofisica. Furono varati due programmi sulla fusione, uno orientato al confinamento magnetico, l'altro al confinamento inerziale con lo studio di plasmi densi e caldi ottenuti con tecniche di compressione magnetica, e dell'interazione di fasci laser di potenza con la materia. In parallelo, venivano sviluppate le diagnostiche necessarie e studi teorici per l'analisi degli esperimenti.

I primi grandi impianti di ricerca e la crescita dei laboratori tecnologici

In seguito ai risultati ottenuti nel 1968 dal Tokamak russo T3, in cui per la prima volta un plasma raggiungeva temperature di 10 milioni di gradi, anche a Frascati si decise di

concentrare le attività sulla linea a confinamento magnetico, e in particolare sulla configurazione tokamak, così come avveniva in altri laboratori europei e americani. Ci si orientò verso una macchina compatta con alto campo magnetico per esplorare regimi ad alta densità e alta corrente di plasma, quindi con più efficace riscaldamento ohmico del plasma. **Il primo tokamak costruito a Frascati, il Frascati Tokamak (FT), aveva un campo magnetico toroidale di 10 T e corrente di plasma di 600 kA. Per il riscaldamento del plasma si utilizzavano onde elettromagnetiche a radiofrequenza (2.45 GHz). Il progetto fu avviato nel 1971, il primo plasma fu ottenuto nell'aprile 1978.** Qualche anno dopo si decise di realizzare un esperimento più ambizioso per estendere i buoni risultati ottenuti con l'utilizzo di maggiori

potenze di riscaldamento a radiofrequenza. La costruzione della nuova macchina, il **Frascati Tokamak Upgrade (FTU)**, richiese circa sette anni a partire dal 1982. Anche FTU era una macchina compatta ad alto campo (corrente di plasma 1.6 MA, campo magnetico 8 T), ma con una superficie di accesso al plasma molto maggiore di FT per permettere un sostanziale riscaldamento del plasma con una potenza totale dei sistemi a radiofrequenza di 9.2MW. Così come FT, l'intera macchina era racchiusa in un criostato e raffreddata con azoto liquido. In FTU sono stati ottenuti plasmi ad alta densità (fino a 8×10^{20} particelle/cm³), temperature ioniche ed elettroniche pari a 15 milioni di gradi, con parametri di plasma molto migliorati rispetto a

quanto previsto dalle leggi di scala semi empiriche. **FTU è stato chiuso nel 2020 per permettere la costruzione del nuovo esperimento Divertor Tokamak Test facility (DTT).** Negli stessi anni venne riavviata la **ricerca sulla fusione a confinamento inerziale al fine di mantenere in Italia l'esperienza acquisita in questo campo.** L'**Impianto ABC**, nato nel 1988 e ancora in funzione, è un impianto laser ad alta energia in grado di produrre due potenti fasci di luce infrarossa alla lunghezza d'onda di 1054 nanometri. L'energia viene liberata in tre miliardesimi di secondo su un'area di diametro di 50 micron. Quando l'impulso laser colpisce il bersaglio, nella zona di interazione si forma il plasma. La qualità dell'implosione del bersaglio

è studiata misurando varie caratteristiche del plasma, tra cui la densità, la luce visibile ed i raggi X emessi, le particelle cariche accelerate e le microonde generate dal loro movimento.

Alla fine degli anni '80, crescendo l'interesse verso gli aspetti tecnologici della fusione, fu anche avviata la costruzione di un generatore di neutroni da 14 MeV per studiare l'interazione dei neutroni da fusione con i vari materiali di interesse per il reattore. Il 14-MeV **Frascati Neutron Generator (FNG)**, interamente progettato e realizzato in ENEA, inaugurato nel 1992 ed ancora in operazione, genera fino a 10^{11} neutroni/s tramite la reazione di fusione $D+T \rightarrow n + \alpha$ accelerando un fascio di deutoni su bersagli triziati.



La realizzazione di FNG fu una felice intuizione: è tuttora uno dei pochissimi generatori di neutroni di intensità medio-alta al mondo per la ricerca sulla fusione, ed è la facility di riferimento in Europa. Oggi la neutronica per la fusione è notevolmente cresciuta rispetto al 1992: in questo progresso FNG ha dato, e continuerà a dare, un contributo fondamentale.

Fin dall'inizio i Laboratori erano dotati al proprio interno di una serie di Servizi Tecnici, necessari per la realizzazione dei vari esperimenti e della relativa strumentazione, perché mancava nell'area circostante un tessuto industriale capace di far fronte alle varie esigenze. L'alto contenuto innovativo e le prestazioni eccezionali richieste fecero rapidamente crescere le competenze dei Servizi Tecnici a livelli di eccellenza, trasformandoli in molti casi in veri e propri laboratori tecnologici. **Quel patrimonio di esperienza è all'origine delle attività tecnologiche per la fusione in cui oggi ENEA è protagonista nel panorama mondiale con importanti contributi alla realizzazione di JT60-SA, ITER, DEMO e DTT, e grazie alle quali può affiancare l'industria con il necessario supporto di conoscenze e know how. Da queste sono fiorite anche molte applicazioni nel campo della sicurezza, della protezione dell'ambiente e del benessere dei cittadini.**

La fusione a Frascati oggi

Oggi i laboratori di Frascati continuano a giocare un ruolo di rilievo nel panorama internazionale. La prestigiosa scuola di fisica che ha dato vita ai primi studi degli anni 50, è tutt'oggi saldamente presente e attiva in particolare nello sviluppo di modelli avanzati per la descrizione del comportamento dei plasmi e

l'analisi delle osservazioni ottenute negli esperimenti. Particolarmente significativo è l'impegno nella realizzazione della nuova macchina DTT: dalla progettazione concettuale della macchina, alla definizione dei suoi programmi di attività, alla realizzazione di numerose diagnostiche sia tradizionali sia innovative, per l'osservazione del comportamento del plasma e la validazione dei modelli teorici.

Nell'ambito del confinamento magnetico si conducono anche esperimenti basati su idee innovative, come il caso della **macchina Proto-Sphera**, dove si ricreano configurazioni magnetiche alternative al tokamak, e anche di interesse astrofisico. L'attività comprende anche lo studio della fusione a confinamento inerziale mediante l'impianto laser ABC che, grazie alla presenza di un completo e raffinatissimo sistema di diagnostiche, unito all'agilità di funzionamento, rende possibile effettuare una larga serie di esperimenti di preselezione delle attività da svolgere su impianti di maggiore potenza.

Il panorama delle attività in corso è completato dalla partecipazione a quasi tutti gli esperimenti nel mondo nel campo della fusione magnetica e inerziale, sia con ricercatori "sul campo" sia con ruoli di rilievo e incarichi di supervisione/coordinatione.

I laboratori di Frascati contribuiscono in modo significativo alla progettazione di ITER e DEMO.

A Frascati è stata messa a punto la tecnologia di giunzione tra materiali diversi (Hot Radial Pressing) necessaria per la fabbricazione del divertore di ITER, il componente affacciato al plasma sul quale sono smaltiti gli alti flussi di potenza prodotta nelle reazioni di fusione. L'integrità di tale componente deve

essere garantita rivestendo gli scambiatori (in rame e raffreddati ad acqua) con tegole di materiali idonei, quali il tungsteno, caratterizzati da alta diffusività termica e resistenza a erosione. ENEA ha realizzato per Ansaldo Nucleare il prototipo in scala 1:1 del divertore di ITER che è stato testato con successo alle condizioni di lavoro attese. Poiché la tecnologia sviluppata per ITER potrebbe non essere estrapolabile a DEMO, si stanno adesso sviluppando soluzioni avanzate per DEMO da realizzare e testare in DTT.

Un punto di forza è costituito dalle competenze nucleari presenti a Frascati, in particolare relative a analisi neutroniche e sviluppo di modelli e codici tra i più avanzati. Inoltre, FNG permette lo studio di effetti della radiazione su materiali e componenti e lo sviluppo di nuovi rivelatori e tecniche di misura. Gli esperimenti condotti a FNG forniscono la validazione sperimentale dei calcoli nucleari di progetto, determinando così i margini di sicurezza. L'attività presso FNG ha contribuito a far crescere in maniera sostanziale l'esperienza "hands-on" nella neutronica per la fusione in Europa.

ENEA è capofila di un consorzio europeo per la progettazione di uno dei maggiori sistemi diagnostici di ITER, la Radial Neutron Camera, che dovrà misurare la potenza di fusione prodotta con requisiti molto spinti di risoluzione spaziale e temporale. Molta esperienza è stata acquisita nelle tecnologie per il ciclo del combustibile, e nei sistemi di iniezione di gas per mezzo di pellet criogenici ad alta velocità.

Di particolare rilevanza è il sistema messo a punto da ENEA denominato IVVS (In Vessel Viewing System) per ITER, che consente di produrre immagini 3D della superficie interna del vessel in condizio-

ni di vuoto, con temperature fino a 120°C, alto campo magnetico, ed elevate dosi di radiazioni ionizzanti. È stato inoltre sviluppato un sistema LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) capace di analizzare gli elementi presenti sulla superficie interna del vessel in modo da monitorarne il possibile danneggiamento e la ritenzione di idrogeno (trizio) nelle pareti. Infine, Frascati detiene la maggiore esperienza in Europa sugli studi di sicurezza degli impianti a fusione e sta partecipando attivamente allo sviluppo della normativa per l'autorizzazione a livello europeo e internazionale.

Grazie all'esperienza decennale nello sviluppo di materiali superconduttori per realizzare cavi per elettromagneti, ENEA ha avuto un ruolo preminente a livello internazionale nello sviluppo dei cavi in Nb3Sn per le bobine dei magneti di ITER, i più grandi (ogni bobina è alta 16 m e larga 10 m) e più potenti (campo magnetico prodotto di 13 T) mai realizzati al mondo. Recentemente è stato progettato l'intero sistema magnetico superconduttivo di DTT ed è iniziata la produzione dei conduttori in Nb3Sn e NbTi per le relative bobine. Parallelamente prosegue lo sviluppo di conduttori che utilizzano nastri superconduttori ad alta temperatura critica (HTS) di ultima generazione in grado di operare in campi magnetici molto elevati. **Quello di Frascati è riconosciuto in tutto il mondo come uno dei gruppi di punta del settore per i suoi contributi di altissimo livello.**

Questo ha consentito la **creazione di un consorzio** con realtà industriali italiane coinvolto nel procurement di tutti i maggiori progetti scientifici che utilizzano superconduttori, non solo nel campo della fusione (ITER, JT-60SA, DTT), ma anche nella fisica delle alte energie (LHC e successivi up-grade), nella piena applicazione della missione dell'ENEA di promozione del trasferimento tecnologico all'industria italiana.

Tecnologie per la sicurezza, la salute e i beni culturali

Infine, il grande patrimonio impiantistico, strumentale e di competenze presente nel centro di Frascati trova importanti applicazioni in svariati campi. Presso il Centro di Frascati è operativo l'impianto **TOP IMPLART** costituito da un innovativo acceleratore lineare di protoni con energia massima di 71MeV per la protonterapia, cioè trattamenti oncologici con utilizzo di fasci di protoni. Il programma, finanziato dalla Regione Lazio e coordinato da ENEA in collaborazione con l'Istituto Superiore di Sanità e l'Istituto Regina Elena di Roma, ha dato vita ad importanti risultati di trasferimento tecnologico verso partner industriali. L'impianto trova anche applicazioni di rilievo nel settore aerospaziale e dei Beni Culturali.

Il Centro Ricerche ENEA di Frascati si caratterizza anche come uno dei più importanti hub di ricerca nazionali nel settore CBRN, cioè, dedicato alle minacce chimiche, biologi-

che, radioattive e nucleari, grazie al coordinamento e partecipazione a numerosi progetti europei e NATO.

Le diverse tecnologie sviluppate sono state con successo trasferite agli operatori istituzionali chiamati a rispondere e gestire tali tipi di emergenze. Di rilievo anche le attività di ricerca legate alla **preservazione e fruizione dei Beni Culturali** grazie allo sviluppo di sensoristica avanzata che è stata con successo dispiiegata in numerosi siti di interesse mondiale quali la Cappella Sistina ed il Colosseo. I dati generati dai sensori ENEA hanno permesso agli esperti di programmare interventi di conservazione e identificare caratteristiche fino a quel momento sconosciute. Importanti sviluppi sono stati ottenuti anche nel dominio della fotonica ed in particolare dei materiali nanocompositi e dei sensori in fibra ottica trovando applicazione in settori quali la diagnostica strutturale di impianti complessi ed infrastrutture.

Le competenze scientifiche e tecnologiche presenti nel Centro di Frascati forniscono un costante e sostanziale supporto al programma di sviluppo della fusione e alla crescita dell'industria italiana promuovendone la partecipazione ai grandi progetti scientifici internazionali. La realizzazione di DTT ne permetterà un ulteriore sviluppo, nella piena applicazione della missione dell'ENEA di promozione del trasferimento tecnologico per lo sviluppo sostenibile del nostro Paese.

Possiamo cambiare marcia per l'energia da fusione in Europa?

Per mantenere la leadership e la competitività tecnologica, e garantire che l'energia da fusione diventi una realtà il prima possibile, l'Europa deve intensificare i suoi sforzi. L'attuale Roadmap per l'energia elettrica da fusione contiene gli elementi principali di un programma orientato ai reattori, e la logica che li collega, ma si basa in gran parte su un approccio sequenziale, da JET a ITER e DEMO, e su presupposti che non sono più validi. Riconoscendo la necessità di procedere il più rapidamente possibile alla dimostrazione della fattibilità commerciale dell'energia da fusione, la comunità europea della fusione e in particolare il Consorzio EUROfusion propongono un approccio leggermente modificato, fissando l'orizzonte temporale per l'entrata in funzione di un impianto di fusione dimostrativo al più tardi alla metà del secolo. Ciò implica una revisione degli obiettivi e dei requisiti specifici e dell'approccio sinergico agli elementi cruciali dell'attuale Roadmap, in primis ITER e DEMO.

DOI 10.12910/EAI2023-057



di **Ambrogio Fasoli**, Direttore dello Swiss Plasma Center presso l'Istituto Federale Svizzero di tecnologia di Losanna (EPFL), Presidente di EUROfusion

La fusione avviene quando nuclei leggeri si combinano per formare nuclei più pesanti. L'energia rilasciata in questo processo alimenta le stelle e può fornire all'umanità elettricità sicura, sostenibile, pulita e priva di emissioni di gas serra. I plasmi di fusione sono caratterizzati da fenomeni multi-scala, determinati dalle dinamiche non lineari derivanti dall'interazione delle particelle cariche con i campi elettrici e magnetici che le particelle stesse contribuiscono a produrre. La comprensione e il controllo di questi fenomeni richiedono un approccio multidisciplinare, comprendente esperimenti sofisticati in dispositivi su larga scala, simulazioni numeriche, scienza dei dati e intelligenza artificiale per il

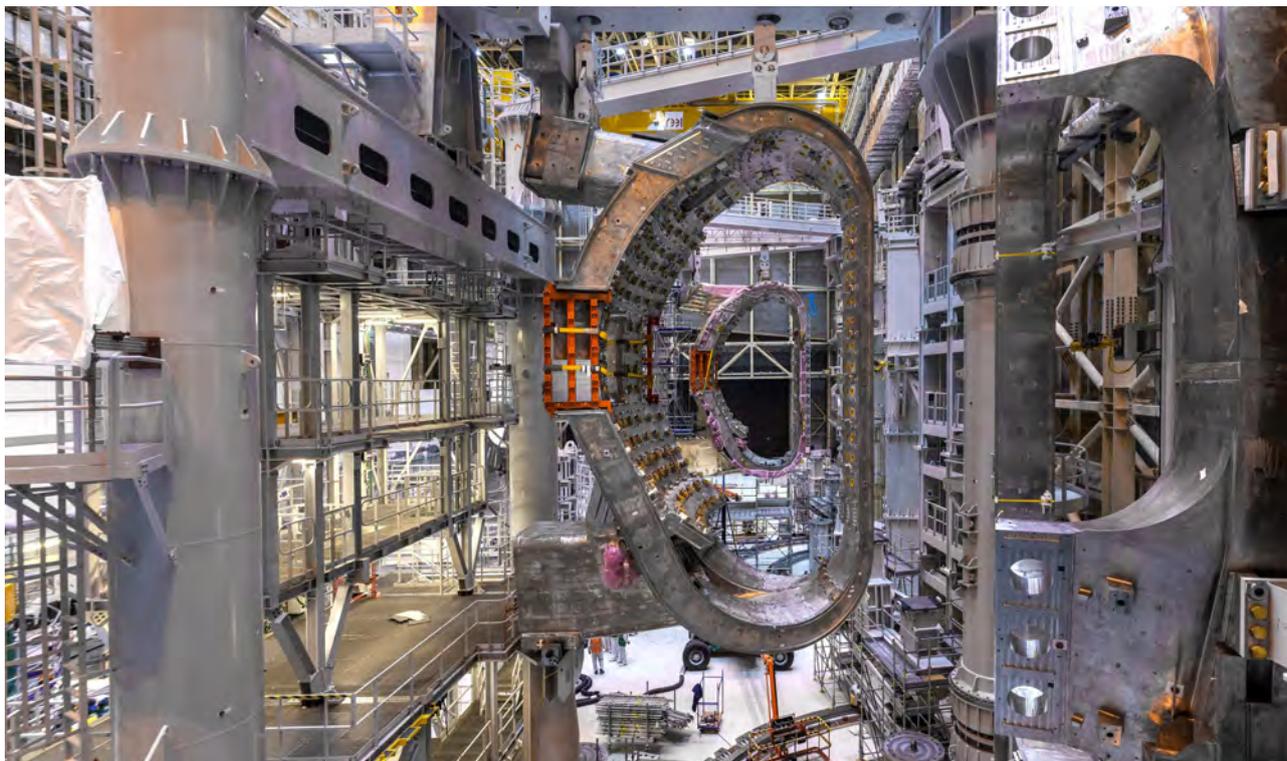
controllo del plasma in tempo reale, e diagnostiche avanzate per tracciare il comportamento del plasma.

Recentemente, è stato ottenuto il record di energia da fusione utilizzando il confinamento magnetico nel tokamak europeo JET, ed è stato raggiunto un bilancio energetico positivo in una capsula di plasma nella fusione inerziale. Nel tokamak cinese EAST è stato mantenuto un plasma stabile fino a 1000 secondi, e nello stellarator W7X è stato raggiunto un turnover di energia di plasma superiore a 1GJ. L'assemblaggio del tokamak ITER sta per essere completato. Grazie a questi risultati, l'interesse per la fusione è cresciuto enormemente, compreso per industrie ed investitori privati.

Combattere il cambiamento climatico e accrescere l'indipendenza energetica

Allo stesso tempo, è cresciuta la percezione dell'urgente bisogno di energia elettrica pulita, **per combattere il cambiamento climatico** e far fronte a condizioni sociali ed economiche in rapida evoluzione. **La guerra in Ucraina ha reso la società desiderosa di sviluppare soluzioni energetiche scevre da una dipendenza eccessiva da singoli Paesi.**

Nonostante i grandi investimenti nelle energie rinnovabili, i combustibili fossili coprono ancora circa l'80% del consumo energetico mondiale. È diventato evidente che le fonti rinnovabili hanno un'ampia impronta geografica e che il loro carattere intermittente richiede uno stoccaggio



su larga scala, ancora costoso e non privo di impatto ambientale. **Le centrali elettriche di base continueranno a essere importanti.**

Per mantenere la sua posizione di leadership e la sua competitività tecnologica, e per garantire che l'energia da fusione diventi una realtà il prima possibile, l'Europa deve intensificare i suoi sforzi. L'attuale Roadmap europea per l'energia elettrica da fusione contiene gli elementi principali di un programma orientato ai reattori, e la logica che li collega, ma si basa in gran parte su un approccio sequenziale, da JET a ITER e DEMO, e su presupposti che non sono più validi. In particolare, tale approccio sequenziale verrebbe fortemente rimandato a causa dei ritardi previsti nell'avvio delle operazioni di ITER.

Riconoscendo la necessità di procedere il più rapidamente possibile

alla dimostrazione della fattibilità commerciale dell'energia da fusione, la comunità europea della fusione e in particolare il Consorzio EURO-fusion propongono un approccio leggermente modificato, fissando l'orizzonte temporale per l'entrata in funzione di un impianto di fusione dimostrativo al più tardi alla metà del secolo. Ciò implica una revisione degli obiettivi e dei requisiti specifici e dell'approccio sinergico agli elementi cruciali dell'attuale Roadmap, in primis ITER e DEMO.

Da ITER lezioni cruciali e uniche

Il progetto ITER è la pietra miliare nella ricerca della fusione, in quanto fornirà una dimostrazione della fattibilità scientifica e tecnologica del raggiungimento di un bilancio energetico positivo nel plasma a una scala compatibile con la produzione netta di energia dalla fusione, e della

sua sicurezza. **Da ITER si traggono lezioni cruciali e uniche in tutte le sue fasi, dalla progettazione all'assemblaggio, alle prime operazioni e infine alle campagne a piena potenza con combustibile Deuterio e Trizio.** D'altro canto, DEMO, l'ultima fase di ricerca e sviluppo prima di una piena diffusione commerciale della fusione, dimostrerà che è possibile integrare tutti gli elementi di fisica e tecnologia che consentono la fusione in una centrale elettrica affidabile, disponibile, di lunga durata ed economicamente competitiva.

Per dimostrare la fattibilità commerciale dell'energia da fusione intorno alla metà del secolo è necessario avere come obiettivo l'avvio delle operazioni di DEMO in un arco di tempo di 20 anni dall'inizio del progetto. In Europa, è opinione diffusa che gli obiettivi minimi di DEMO debbano comprendere:

- la dimostrazione delle prestazioni delle tecnologie chiave, ad adeguati livelli di disponibilità ed accessibilità dell'impianto, e la loro integrazione;
- una produzione netta di energia elettrica alla rete dell'ordine di 300-500MWs;
- un ciclo di combustibile autosufficiente;
- un robusto scenario di funzionamento del plasma e un sistema di estrazione dell'energia dalla camera da vuoto (plasma exhaust);
- una dimostrazione della sicurezza intrinseca e di impatto tollerabile degli elementi attivati;

Con questi elementi, sarà possibile valutare le prospettive economiche di una centrale a fusione, consentendo tuttavia ulteriori sviluppi basati sull'ottimizzazione del progetto e sulle innovazioni tecnologiche.

Lacune nelle conoscenze

Sebbene molti dei fondamentali siano oggi ben noti, rimangono ancora alcune lacune nelle nostre conoscenze. Secondo il parere soggettivo dell'autore, le aree più importanti per lo sviluppo della fisica del plasma per una centrale a fusione sono gli scenari del plasma, i transitori, il plasma exhaust, e il regime del burning plasma.

La tecnologia per la fusione magnetica deve essere all'avanguardia in una serie impressionante di campi, dalla manipolazione a distanza alla criogenia, all'equilibrio dell'impianto e alle sorgenti di microonde ad alta potenza, per citarne alcuni.

Sebbene tutti questi aspetti presentino problemi significativi, gli sforzi più urgenti di ricerca e sviluppo sono probabilmente necessari per il blanket, ovvero il sistema che circonda il plasma come un mantello e che garantisce la riproduzione del combustibile, per il quale non esiste ad oggi un concetto definitivo, e per

i materiali. Particolare attenzione deve essere prestata anche ai magneti superconduttori, che hanno un impatto cruciale sul progetto globale e sui costi, e, cosa ancora più importante, alle procedure di licensing che, se non affrontate tempestivamente, possono diventare un ostacolo quasi insormontabile.

Oltre a rinforzare e focalizzare l'intero programma, sarà fondamentale per il nuovo approccio europeo poter trovare un equilibrio tra conoscenze consolidate e innovazioni, ed esplorare soluzioni a più alto rischio e potenziale rispetto a quelle intraprese finora. Un nuovo importante aspetto è il coinvolgimento delle industrie in partenariati pubblico-privati, che consentirà di rendere più efficaci le fasi di progettazione e costruzione di DEMO, che devono essere guidate dall'industria. DEMO dovrà essere costruito con pratiche industriali.

Uno sforzo multidisciplinare a lungo termine

Prospettiamo, inoltre, una **parallelizzazione di alcune attività tra ITER e DEMO**, ad esempio quelle relative allo sviluppo del blanket, per ridurre il rischio intrinseco a un funzionamento precoce di DEMO e consentire un'introduzione anticipata delle centrali a fusione. È inoltre importante iniziare al più presto la selezione del sito per DEMO, il che consentirebbe di sviluppare l'interazione con il legislatore per procedere in parallelo con la concessione delle licenze. Infine, proponiamo di intensificare gli sforzi per sviluppare soluzioni che possano rendere più attraenti le centrali a fusione, come il concetto di stellarator, i magneti superconduttori ad alta temperatura, i metodi di raffreddamento innovativi e i materiali strutturali avanzati. Per sostenere questo approccio accelerato è necessaria una diffusione su

larga scala delle simulazioni numeriche, che combinino la descrizione in principi primi della regione di plasma del nucleo caldo con quella del bordo più freddo che interagisce con le superfici dei materiali, una descrizione ab-initio delle proprietà dei materiali e codici di sistema sempre più realistici e completi, che beneficino anche dell'**uso dell'intelligenza artificiale** a diversi livelli, compreso per il controllo del plasma. Questo sforzo guiderà non solo la definizione degli esperimenti, l'interpretazione e l'estrapolazione dei dati nei dispositivi al plasma attuali e futuri, ma anche la stessa progettazione di DEMO.

La ricerca sulla fusione è uno sforzo multidisciplinare a lungo termine che richiede esperti in campi quali la fisica del plasma e atomica, la robotica, l'intelligenza artificiale, la scienza dei materiali, l'ingegneria meccanica ed il controllo. **Il carattere transdisciplinare della ricerca sulla fusione alimenta competenze trasversali in numerose altre aree scientifiche e industriali. I plasmi sono utilizzati al di là della fusione in diversi campi, tra cui la propulsione spaziale, le tecnologie a microonde, la riduzione dell'inquinamento per le navi da carico, la sterilizzazione, la dermatologia, l'oncologia e l'odontoiatria, e per metodi innovativi di accelerazione delle particelle per la fisica delle alte energie.**

Questi sviluppi entusiasmanti ed i temi all'avanguardia che il programma di fusione affronta, integrando la fisica del plasma con le tecnologie energetiche, costituiscono un'attrattiva unica e forniscono un ambiente ottimale per la formazione di nuove generazioni di scienziati ed ingegneri - una risorsa cruciale per il successo dell'impresa globale e transgenerazionale che la ricerca dell'energia di fusione rappresenta.

Il ruolo di Eni nello sviluppo dell'energia da fusione

La sfida di Eni è accelerare il progresso dell'energia da fusione, che una volta portata a livello industriale, potrà garantire una fornitura estesa di energia pulita con un processo sicuro e virtualmente inesauribile. L'impegno di Eni è quello di continuare a lavorare sinergicamente con le più importanti realtà scientifiche impegnate nello sviluppo dell'energia da fusione.

DOI 10.12910/EAI2023-058



di **Francesca Ferrazza**, Head of Magnetic Fusion Initiatives di Eni

Eni ha assunto un impegno chiaro per raggiungere la neutralità carbonica delle proprie attività, ponendo l'innovazione tecnologica al centro della propria strategia di decarbonizzazione e sostenendo lo sviluppo di tecnologie proprietarie e breakthrough.

Questa visione si incarna in sfide importanti come lo sviluppo dell'energia da fusione. Eni è stata la prima grande azienda energetica a investire in questa tecnologia, che potrebbe portare a una vera rivoluzione nel campo dell'energia, poiché - una volta portata a livello industriale - consentirebbe di generare grandi quantità di energia a emissioni zero con un processo sicuro e virtualmente illimitato.

Nel campo dell'innovazione tecnologica, Eni continua a rafforzare la propria rete di collaborazioni con le più importanti realtà scientifiche nazionali e internazionali. Vanno in

questa direzione gli accordi di ricerca instaurati con l'Università degli Studi di Milano-Bicocca, Milano, Padova, Genova, Bologna e Trieste, Politecnico di Milano, Politecnico di Torino, il CNR ed ENEA, oltre a molte altre realtà nell'ambito dell'energia da fusione.

In particolare, in Italia con ENEA, Eni partecipa attivamente al progetto DTT (Divertor Tokamak Test facility) condotto presso il Centro Ricerca ENEA di Frascati, per l'ingegnerizzazione e la costruzione di una macchina Tokamak di notevole rilevanza dedicata alla sperimentazione di componenti che dovranno gestire le grandi quantità di calore che si sviluppano all'interno della camera di fusione. La competenza industriale di Eni, le capacità di gestione e sviluppo in progetti di grandi dimensioni, unite all'eccellenza della ricerca scientifica di ENEA, saranno la chiave del successo per la realizzazione di questa iniziativa e

struttura di rilievo, basata principalmente su competenze e tecnologie italiane.

Esempi di partnership pubblico-privato

DTT, in particolare, sarà tra i più grandi esperimenti scientifici mai realizzati in Italia e rappresenta un esempio virtuoso di partnership pubblico-privata nel mondo della fusione, in cui centri di eccellenza, università e industrie uniscono le forze mettendo a fattor comune i loro tratti distintivi per raggiungere un obiettivo ambizioso.

Eni partecipa al progetto con il 25%, ENEA con il 70% e la restante parte è divisa tra università e centri di eccellenza, tra cui il consorzio CREATE (Ricerca per l'Energia, l'Automazione e le Tecnologie dell'Elettromagnetismo), l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Il Consorzio RFX, il Politecnico di Torino, l'Università degli Studi della Tuscia, Universi-

tà degli Studi di Milano-Bicocca, l'Università degli Studi di Roma Tor Vergata, il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) e il Centro di Ricerche europeo di Tecnologie Design e Materiali (CETMA). Il progetto pone ancora una volta l'Italia all'avanguardia internazionale nel campo della ricerca per ottenere energia più pulita, virtualmente inesauribile e sicura.

Inoltre, sempre in Italia Eni, nell'ambito di una ampia collaborazione con il CNR, ha creato il centro di ricerca congiunto Eni-CNR "Ettore Majorana" sulla fusione a confinamento magnetico che attraverso lo sviluppo di competenze e know-how tecnologico dà vita ad un punto di incontro per la ricerca sulle tecnologie per i sottosistemi del Tokamak. Attiva dal 2019, questa collaborazione ha l'obiettivo di sviluppare competenze locali nel campo della fusione attraverso la promozione di Dottorati di ricerca e attivazione di Grant per la modellazione dei fenomeni fisici e degli elementi di progettazione ingegneristica. In particolare, le attività si articolano in sei linee di ricerca specialistiche su materiali adatti all'ambiente fusionistico, sistemi di diagnostica e di elettronica di potenza, meccanismi di controllo e riscaldamento addizionali, superconduttori di nuova generazione e modellistica computazionale, con l'ulteriore possibilità di aver accesso ai supercomputer del green data center di Eni.

Collaborazioni a livello internazionale

A livello internazionale, l'impegno di Eni nell'energia da fusione prevede inoltre una **collaborazione con il Plasma Science and Fusion Center del Massachusetts Institute of Technology (MIT)** nel programma LIFT (Laboratory for Innovation in Fusion Technologies). La partnership con il MIT, iniziata nel 2008, si concentra dal 2018 sull'avanzamento tecnologico dell'energia da fusione a confinamento magnetico, ponendolo come obiettivo principale per contribuire alla decarbonizzazione dei sistemi energetici globali. Eni è inoltre azionista strategico dal 2018 di CFS, Commonwealth Fusion Systems, la società spin-out del MIT di Boston che si è data l'obiettivo di realizzare una prima macchina, denominata SPARC, in grado di dimostrare la possibilità di produrre più energia di quella necessaria per avviare e sostenere il processo di fusione. SPARC, che è attualmente in corso di assemblaggio nel sito di CFS di Devens, vicino a Boston, rappresenta una tappa tecnologica fondamentale per aprire la strada alla realizzazione di ARC, la prima centrale progettata per fornire energia da fusione alla rete. I primi risultati sono stati già ottenuti nel 2021 con il test del primo magnete superconduttore ad alto campo realizzato con superconduttori HTS (High Temperature Superconductors) su scala rilevante per

un uso industriale: in particolare questa innovazione permetterà di ridurre le dimensioni dell'impianto che risulterà pertanto più compatta ed efficiente.

La sfida di Eni è far sì che l'energia da fusione possa riuscire nel traguardo di rivoluzionare il panorama della filiera della generazione energetica, fungendo da punto di svolta cruciale coniugando efficienza, sostenibilità e integrazione con il mix energetico. Allo stesso tempo, l'impegno di Eni è di lavorare affinché, a valle dei primi impianti dimostrativi, si stabilisca una supply chain sempre più robusta, che veda riconosciute l'eccellenza tecnologica e la capacità di ricerca del nostro Paese, in dialogo costante con l'Europa e con le altre realtà internazionali.

In questo l'Italia ha già sviluppato importanti competenze: basti pensare che già oggi, il tessuto industriale italiano è uno dei maggiori contributori al progetto intergovernativo sulla fusione ITER, con commesse che hanno raggiunto un valore di **quasi 2 miliardi** di euro. Un impegno importante che dà materialità a questo campo di innovazione e che fa capire le potenzialità di un mercato in continuo sviluppo, che ha l'occasione unica di creare grande valore per la propria industria e di raccogliere i frutti dei talenti che sa esprimere.

SIET, una realtà nazionale nella qualifica dei componenti nucleari

Caratteristica principale della SIET è di detenere impianti sperimentali quasi unici al mondo per dimensioni, potenza e flessibilità, indirizzati alla Ricerca e Sviluppo nel campo della Termoidraulica e Termomeccanica di componenti e sistemi di centrali per la produzione di energia (generatori di vapore, valvole, condensatori, eiettori a vapore, macchine a fluido, separatori di vapore, ecc.). La società è partecipata da ENEA (44,15 %), ENEL Innovation Hubs (41,55 %), Tectubi Raccordi (6,41%), Politecnico di Milano (3,57%), Ansaldo Energia (2,16%), Mare Engineering Group (2,16%).

DOI 10.12910/EAI2023-059



di Alfredo Luce, Amministratore delegato SIET

SIET S.p.A. fu fondata nel 1983 dall'ENEA (allora Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente) e dal CISE (Centro Informazioni Studi Esperienze) con lo scopo di effettuare prove per la sicurezza di componenti e sistemi destinati ad impianti nucleari per la produzione di energia elettrica. Le attività della SIET si svolgono all'interno delle aree della dismessa Centrale Emilia (di proprietà A2A), eccellente esempio di architettura industriale degli anni '20 e pertanto sottoposta a tutte le tutele previste dal DLgs 42/2004. Dopo l'incidente di Chernobyl la SIET ha avuto alterne vicissitudini con grandi successi laddove arrivavano grandi commesse nucleari nazionali ma soprattutto estere e periodi di grave crisi quando il settore nucleare presentava un andamento sfavorevole.

È stato nei periodi di crisi che il

management della SIET ha avviato un processo di diversificazione sviluppando nuovi settori, quali Certificazione di Prodotto (valvole termostatiche e disconnettori idraulici), Certificazione di Sistema (ISO 9001, ISO/IEC 27001, ecc.), Metrologia (taratura strumenti), In-

gegneria (progettazione e realizzazione impianti sperimentali, calcoli termo-fluido-dinamici, formazione, ecc.), facendo tesoro delle competenze sviluppate come indotto delle attività nucleari.

La società ad oggi è partecipata da ENEA (Agenzia nazionale per le



Centrale Emilia

nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile) per il 44,15 %, ENEL Innovation Hubs S.r.l. per il 41,55 %, Tectubi Raccordi S.p.A. per il 6,41%, Politecnico di Milano per il 3,57%, Ansaldo Energia S.p.A. per il 2,16%, Mare Engineering Group S.p.A. per il 2,16%.

Grandi Impianti Sperimentali

Caratteristica principale della SIET è di detenere impianti sperimentali quasi unici al mondo per dimensioni, potenza e flessibilità, indirizzati alla Ricerca e Sviluppo nel campo della Termoidraulica e Termomeccanica di componenti e sistemi di centrali per la produzione di energia (generatori di vapore, valvole, condensatori, eiettori a vapore, macchine a fluido, separatori di vapore, ecc.).

L'impianto **GEST (G**enerator **S**eparator **T**est) permette di verificare il funzionamento dei generatori di vapore e dei separatori acqua-vapore, componenti installati sia nei reattori nucleari ad acqua di tipo pressurizzato (PWR) sia in quelli ad acqua bollente (BWR).

L'impianto GEST è uno dei "pezzi



Impianto GEST

pregiati" della SIET ed è stato usato negli anni per numerose campagne sperimentali, ultime quelle su un mock-up del generatore a tubi elicoidali di NuScale Power. È stato anche utilizzato per la qualifica sperimentale a piena scala degli scambiatori di calore PCC (Passive Containment Condenser) e IC (Isolation Condenser) del reattore SBWR (Simplified Boiling Water Reactor) di General Electric.

L'Impianto **SPES (S**imulatore **P**resurizzato per **E**sperienze di **S**icurezza) è una struttura sperimentale simulante il circuito termoidraulico primario di una centrale nucleare di tipo pressurizzato; si tratta di un impianto di grandi dimensioni in grado di simulare il comportamento di un impianto reale in condizioni normali e incidentali.

Tale struttura è stata utilizzata, negli anni '90, per un programma sperimentale, commissionato da Westinghouse, per la certificazione di un impianto nucleare denominato AP600 (poi evolutosi in AP1000), mediante la configurazione impiantistica denominata SPES-2.

Nella stessa area una nuova facility, denominata SPES-3, è stata progettata e parzialmente realizzata come simulatore fisico del reattore SMR-IRIS a piena scala in elevazione ed in scala 1:100 in volume. Su SPES-3 erano previsti transitori simulanti situazioni incidentali del reattore, allo scopo di verificare la capacità del sistema di sostenere situazioni di emergenza e per la messa a punto dei codici di calcolo numerici per le verifiche di sicurezza del reattore. Il programma, finanziato da ENEA nell'ambito di un Accordo di Programma con il Ministero dello Sviluppo Economico, è stato interrotto a metà dopo l'Incidente di Fukushima.

L'impianto **IETI (I**mpianto per



Passive Isolation Condenser

Esperienze Termo-Idrauliche) è uno storico impianto degli anni '70, in cui è possibile eseguire esperienze di scambio termico con acqua e vapore ad elevate temperatura e pressione. L'impianto IETI è stato utilizzato per prove di crisi termica su simulatori di elementi di combustibile nucleare, ma anche per prove ad elevatissimi flussi termici per applicazioni nel campo della fusione nucleare. Negli ultimi anni è stato utilizzato per prove di termo-fluidodinamica su tubazioni elicoidali, tipiche del generatore di vapore del SMR IRIS e di quello di NuScale.

Il "Rinascimento Nucleare" e l'incidente di Fukushima

Nel 2009, a seguito di un rinnovato interesse per l'energia nucleare da fissione, la SIET cominciò a implementare un nuovo Piano Industriale il cui obiettivo era il rilancio della propria presenza nel settore nucleare, per cogliere le opportunità che si fossero presentate, sia a livello nazionale che internazionale. Le risorse messe a disposizione con un Accordo di Programma fra ENEA e MiSE consentirono di attuare un

cospicio piano di investimenti, permettendo di far fronte alle maggiori criticità create dall'invecchiamento di attrezzature ed impiantistica. In parallelo fu attuato un piano di assunzione di personale che ha permesso alla SIET di avere uno staff tecnico più adeguato alle potenzialità di offerta. Fu in quegli anni che nell'area SPES venne parzialmente realizzato SPES-3.

Le opportunità si sono però concretizzate solo in parte. Se da una parte sono state acquisite importanti commesse "nucleari" dall'estero (NuScale), dall'altra le prospettive italiane si sono azzerate a seguito dell'Incidente di Fukushima. Una volta cancellato il programma nucleare italiano, la SIET si è trovata a far fronte a un repentino azzeramento delle commesse nazionali, non sempre compensato dalla cresciuta capacità di acquisire commesse nel mercato internazionale e certamente non compensabile dai pur lusinghieri miglioramenti negli altri settori produttivi. **Le attività per conto terzi sviluppate come diversificazione, seppure al di fuori dell'interesse dei principali azionisti, hanno avuto nel tempo un incremento che, unitamente alla collaborazione con NuScale, ha consentito alla SIET di sopravvivere fino ad oggi.**

Le nuove prospettive nel panorama internazionale e nazionale

Gli investimenti e le nuove assunzioni fatte negli anni del breve "rinnovamento nucleare" hanno reso la SIET in grado di competere a livello internazionale. È stato allora che è iniziata la collaborazione con NuScale (USA), che aveva cominciato le attività per lo sviluppo di un nuovo reattore nucleare di tipo SMR di generazione III+. Inoltre,

con il miglioramento dei servizi trasversali (Qualità, Sicurezza, Progettazione, Gestione Strumentazione, ecc.) si sono create e/o rafforzate sinergie con gli altri settori produttivi che hanno migliorato il funzionamento dell'azienda.

Le prospettive della SIET SpA sono oggi decisamente positive. La collaborazione con NuScale per il reattore SMR, iniziata nel 2011 con prove su generatore di vapore a tubi elicoidali, è ancora pienamente operativa, non solo per le classiche prove di tipo termo-fluidodinamico, ma anche per i fenomeni associati, quali lo studio delle vibrazioni indotte dal flusso di acqua. Questa collaborazione è ben nota nell'ambiente in quanto è riscontrabile anche nei Rapporti di NRC in occasione di diversi audit superati con successo dalla SIET.

I programmi di ricerca EURATOM in ambito H2020, a cui la SIET ha partecipato (Progetti ELSMOR e PIACE), hanno dato ancora più visibilità alla SIET e ai suoi impianti sperimentali, utilizzati per prove di sistemi di sicurezza passiva di fondamentale importanza per i nuovi impianti.

La visibilità della SIET, unitamente all'odierno rinnovato interesse per il nucleare da fissione, specialmente per lo sviluppo di reattori SMR di generazione III+ o IV, ha fatto sì che negli ultimi anni altre importanti aziende (Westinghouse, Rolls Royce, CNEA, General Electric Hitachi, EDF, NewCLEO, ecc.) abbiano contattato la SIET.

Allo stato attuale, oltre allo storico cliente NuScale, si è aggiunto un altro importante cliente, che non possiamo ancora citare per motivi di riservatezza, che ha intenzione di realizzare nell'area SPES una nuova facility integrale per la simulazione delle principali condizioni inciden-

tali di un nuovo reattore SMR. Altri potenziali clienti stanno studiando con SIET la fattibilità di prova di diverse tipologie di generatori di vapore e di sistemi di sicurezza passiva.

Dal MASE uno stanziamento di 135 milioni

In un contesto internazionale così movimentato non sempre le notizie sono buone e incoraggianti. È infatti notizia delle ultime settimane la cancellazione del progetto CFPP (Carbon Free Power Project) tra NuScale e Utah Associated Municipal Power Systems, sembra per gli eccessivi costi di realizzazione. L'evento ha dato un duro colpo alla quotazione in borsa di NuScale, facendo addirittura temere un imminente fallimento, nonostante l'azienda abbia diversi altri progetti in corso negli USA e nel mondo e sia l'unica azienda al mondo ad avere un progetto di SMR già licenziato. È evidente che un'eventuale fallimento di NuScale si ripercuoterebbe immediatamente sui conti della SIET, anche se NuScale si sta premurando di tranquillizzare azionisti e fornitori ed ha anche contattato direttamente SIET per assicurare che non ci sarà nessuna variazione nei contratti in corso.

È anche notizia degli ultimi giorni che il MASE ha stanziato 135 milioni per il rilancio del settore nucleare in Italia, con particolare riferimento ad attività di ricerca e sperimentazione sui piccoli reattori modulari di terza e quarta generazione nel breve-medio periodo e sulle tecnologie di fusione per il lungo periodo. In tale contesto, SIET si mette a disposizione per dare il proprio contributo per rilanciare la filiera industriale nucleare in Italia, guardando al nucleare innovativo e sostenibile.

Il nuovo nucleare - Come si prepara una utility

A livello internazionale il Gruppo Enel guarda con attenzione alle nuove tecnologie nucleari in fase di studio, di sperimentazione e di certificazione, come gli Small & Advanced Modular Reactors e la tecnologia di fusione nucleare. In questa direzione vanno anche la creazione dell'unità organizzativa Nuclear Innovation - la cui missione è di costruire un competence centre qualificato che presidi tecnologie, analisi scenari e supporti le attività istituzionali legate a questo settore - e il recente accordo con la società *newcleo*.

DOI 10.12910/EAI2023-060



di **Luca Mastrantonio**, Responsabile Unità Innovazione Nucleare Enel

E nel ha giocato un ruolo importante nella storia del nucleare: il suo percorso per sviluppare le migliori competenze in questo settore è cominciato negli anni '60 in Italia e, dopo il referendum del 1987, è proseguito con la partecipazione in gruppi di ricerca internazionali. Nel 2008 l'azienda è stata chiamata a guidare il potenziale reinserimento di questa tecnologia in Italia, esperienza poi conclusa con il referendum del 2011. Il Gruppo ha inoltre maturato esperienza nella gestione di impianti in Spagna e nella costruzione in Slovacchia, rafforzando le proprie conoscenze e capacità di sviluppo.

Gli impianti nucleari di Endesa e il progetto Mochovce

In Spagna Endesa, la controllata di Enel, possiede sei impianti nucleari sui sette totali in funzione nel Paese.

Questi impianti hanno una capacità installata di oltre 6,3GW - di cui 3,3GW di capacità consolidata - e si riferiscono alla consolidata tecnologia PWR di II generazione cui sono state applicate operazioni di Life Extension a 10 anni e di Power Upgrades per un totale di 810 MW (+11%).

In Slovacchia, attraverso la partecipazione nella utility Slovenske Elektrarne, Enel ha contribuito alla realizzazione di un reattore nucleare (Mochovce 3) da 440 MW, recentemente connesso alla rete, ed è attualmente impegnata nella realizzazione di una seconda unità (COD 2024).

Si tratta di **una delle tre centrali in costruzione in Europa negli ultimi 30 anni**, e una delle sole due entrate in funzione finora nello stesso arco di tempo. **Con Mochovce 3&4 (unità 3 entrata al 100% in produzione a settembre 2023), Enel ha consolidato la sua leadership tecnologica coordinando, in qualità di Owner**

& Architect Engineer tutte le fasi esecutive del progetto: dal design alla scelta dei fornitori, passando per la realizzazione e la messa in produzione dell'impianto.

La centrale nucleare slovacca è un modello di evolutionary design poiché è stata realizzata aggiornando il design originale russo con standard di sicurezza occidentali elevati ed è stata infine sottoposta agli stress test post-Fukushima, permettendo all'impianto di raggiungere gli stessi livelli di sicurezza delle attuali centrali di III generazione.

Questo "sforzo industriale", estremamente rilevante per una utility, ha consentito ad Enel di maturare una esperienza tecnica notevole in ambito nucleare.

Inoltre, Enel detiene una partecipazione del 42% nella società SIET, uno dei maggiori players di sperimentazione e testing su componenti di sicurezza per impianti nucleari, che



attualmente ha attività in corso con i maggiori progettisti dei nuovi Small Modular Reactor.

La strategia di Enel e l'esplorazione di nuove tecnologie

Gli impianti nucleari basati sulle tecnologie attualmente disponibili hanno evidenziato, soprattutto nei Paesi OCSE, tempi di costruzione estremamente lunghi e costi elevati rispetto ai piani di deployment originali.

Queste criticità sono determinate da una serie di fattori tra cui: la complessità tecnologica dei progetti, con il lancio di modelli "first of a kind" che hanno introdotto un ulteriore livello di difficoltà; la tortuosità degli iter autorizzativi e di licensing connessi alla sicurezza; il progressivo disimpegno dei Paesi occiden-

tali a costruire un ecosistema e una supply chain in grado di sostenere in modo efficace la costruzione di nuovi impianti nucleari. A ciò si aggiunge anche un ulteriore problema come la diminuzione di personale qualificato ed esperto di settore.

In questo scenario **Enel non ha ad oggi nessun investimento previsto nel proprio piano strategico 2024-2026 non prevedendo lo sviluppo di nuova capacità nucleare con le attuali tecnologie; rispetto alle nuove, il Gruppo si posiziona come player tecnologicamente neutro, ritenendo opportuno esplorare tutte le aree del settore energetico** che siano focalizzate a sviluppare tecnologie in grado di garantire un'energia pulita, affidabile, conveniente, garantendo così la sicurezza degli approvvigionamenti e la sostenibilità

ambientale in linea con gli obiettivi europei di decarbonizzazione.

Coerentemente con questa strategia, **a livello internazionale il Gruppo sta guardando con attenzione anche alle nuove tecnologie nucleari attualmente in fase di studio, di sperimentazione e di certificazione, come gli Small & Advance Modular Reactors e la tecnologia di fusione nucleare.**

In questa direzione vanno anche la creazione dell'unità organizzativa Nuclear Innovation - la cui missione è quella di costruire un **competence centre qualificato** che presidi tecnologie, analizzi scenari e supporti le attività istituzionali legate a questo settore - e il recente accordo con la società *newcleo*.

Le nuove tecnologie in esplorazione

Gli SMR (Small Modular Reactor) di terza generazione avanzata rappresentano, prima che una soluzione tecnologica, un nuovo business model costruito intorno a concetti di modularità, prefabbricazione e standardizzazione che dovrebbe consentire riduzione di tempi e costi unitamente ad una maggiore facilità di inserimento nei siti dedicati (anche brown field) con un minor impegno economico iniziale (capex) e modelli finanziari più flessibili. Inoltre, gli standard di sicurezza saranno ulteriormente incrementati grazie a all'introduzione di **sistemi a sicurezza passiva** (no Fukushima). Tuttavia, **non è stata ancora provata l'efficacia economica dell'approccio modulare**, considerato che oggi esistono solo applicazioni di nicchia e che **l'implementazione dei primi impianti basati su questo concetto in Europa è attesa dopo il 2030.**

I reattori di **IV Generazione AMR** rappresentano una tecnologia sostanzialmente differente dalla maggior parte dei reattori attualmente in funzione, sono per lo più raffreddati a metalli liquidi, sali fusi o gas e consentono l'ottimizzazione dell'uso del combustibile nucleare, la riduzione del waste nucleare per unità di energia prodotta e la **chiusura del ciclo del combustibile** con possibilità di bruciare il combustibile depleto proveniente dagli altri impianti, con tempo di decadimento delle scorie a più alta attività ridotta di tre ordini di grandezza. I reattori di IV Gene-

razione **non hanno tuttavia ancora raggiunto la maturità tecnologica;** infatti, nessuno dei modelli potenzialmente implementabili in Europa ha ottenuto la licenza a costruire (sono ancora in fase di sviluppo del design) e la loro piena **disponibilità commerciale è attesa non prima del periodo 2035-2040.**

Reattori più piccoli e modulari

I reattori piccoli e modulari, siano essi di generazione III+ o di IV, consentono maggiori opzionalità in termini di collocazione geografica rispetto alle centrali di grandi dimensioni (sia per le ridotte quantità di combustibile sia per i sistemi di sicurezza passivi) consentendo la possibilità di produrre una serie di **buy-products addizionali all'energia elettrica**, a seconda della tecnologia selezionata, utili per l'industria di processo energivora e alle comunità residenziali: calore residenziale e industriale, produzione di idrogeno, desalinizzazione sono alcuni degli *use case* che saranno declinati grazie alle nuove tecnologie da fissione. Questi scenari implementativi abiliteranno le utility a **una offerta più completa** sui servizi per l'industria e residenziali e quindi una maggiore penetrazione; dall'altro lato faciliteranno una più ampia integrazione di fonti rinnovabili intermittenti potendo bilanciare il mix con una **fonte dispacciabile zero carbon** utile a stabilizzare la rete (oltre che fornire in alcune configurazioni servizi di flessibilità D&R). La combinazione di queste leve consen-

tirà alle utility di consolidare i piani di decarbonizzazione, elettrificazione e sostenibilità.

Tempi e modelli di deployment

L'orizzonte temporale di questi scenari evidentemente dovrà tenere in considerazione il livello di maturità industriale del nuovo nucleare nelle sue diverse declinazioni e quindi gli obiettivi dovranno considerare tempi medio lunghi per la readiness tecnologica. La modalità con cui si potrà arrivare a detti obiettivi non potrà non prevedere un **approccio sistemico** (un esempio viene dal modello della **Francia anni '70**) e la tendenza a creare consorzi (i.e. tra utility e industria energivora) per dividere i rischi e aumentare la **sostenibilità finanziaria complessiva.** Un altro esempio di compartecipazione viene dal programma nucleare USA degli anni '60 dove si passò da un forte sostegno finanziario alla ricerca e sviluppo nucleare in seno all'industria privata, dove fu permesso a società private di costruire ed esercire centrali nucleari, sovente quando si trattava delle prime installazioni, con sovvenzioni di denaro pubblico; solo quando l'industria apparve abbastanza salda da poter marciare in autonomia la partecipazione statale fu dichiarata decaduta. **Detto approccio sistemico, inoltre, è presumibile che questa volta non si limiterà ad essere nazionale ma nel caso dell'Europa, potrebbe essere di natura comunitaria.**

Lo scenario internazionale

La principale novità riguardante l'atomo, sia sullo scenario internazionale sia su quello domestico, è il ritorno dell'interesse per l'energia nucleare da fissione. L'attenzione all'energia atomica oggi è spinta principalmente dalla necessità di trovare adeguate risposte al "trilemma" energetico: soluzioni in grado di offrire energia a basso impatto ambientale, a ridotta dipendenza strategica, a costi accessibili per imprese e cittadini.

DOI 10.12910/EAI2023-061



di **Marco Enrico Ricotti**, Professore ordinario di impianti nucleari al Politecnico di Milano

La principale novità riguardante l'atomo, sia sullo scenario internazionale sia su quello domestico, è il ritorno dell'interesse per l'energia nucleare da fissione. In premessa, qualche numero per inquadrare l'attualità e le prospettive.

Oggi il nucleare rappresenta un contributo limitato al fabbisogno energetico complessivo mondiale, largamente dominato dai combustibili fossili, nonostante i titanici sforzi e le ingenti risorse economico-finanziarie dedicate alla decarbonizzazione, soprattutto in Europa: nel 2022, l'energia necessaria ad alimentare la vita e le attività umane sul globo è stata prodotta con olio combustibile (31%), carbone (27%), gas (23%) – quindi un preoccupante 80% e oltre di fossili – integrati dal 14% di rinnovabili, tra le quali l'idroelettrico al 7%, l'eolico al 3% e il solare al 2%,

completati infine dal 4% di nucleare. Tuttavia, limitandoci al nostro Continente, il ruolo dell'atomo risulta tutt'altro che trascurabile se valutiamo il solo settore elettrico – considerazione effettivamente più ragionevole, visto che le centrali nucleari oggi producono quasi esclusivamente elettricità e che la principale strategia di decarbonizzazione prevede di elettrificare per intero i sistemi dell'industria, dei trasporti e dell'abitare: **i cento reattori nucleari europei rappresentano la prima fonte energetica "green" dell'UE fornendo il 21,9% dell'elettricità, seguiti dall'eolico (15,9%), dall'idroelettrico (11,3%), dal fotovoltaico (7,6%) e dalle biomasse (4,4%) (fonte Eurostat 2023).**

Ma quali i motivi di questo interesse? Quali tecnologie sono oggi disponibili e quali lo saranno nei prossimi anni? E quale ruolo può giocare

l'Italia?

L'attenzione all'energia atomica oggi è spinta principalmente dalla necessità di trovare adeguate risposte al "trilemma" energetico: soluzioni in grado di offrire energia a basso impatto ambientale, a ridotta dipendenza strategica, a costi accessibili per imprese e cittadini.

In questo scenario, reso drammaticamente complesso dalle crisi geopolitiche in atto, il nucleare si iscrive a buon diritto nella lista dei partner utili.

Perché ha emissioni limitate, per unità di energia elettrica prodotta, sull'intero ciclo di vita ¹: circa 12 grammi di CO₂ equivalente per kWh, pari all'eolico e inferiore ai 24 dell'idroelettrico e ai 48 del fotovoltaico, ben sotto gli oltre 400 del gas e gli 800 del carbone. Circa gli altri aspetti positivi del nucleare, basta scorrere il report ² di oltre 350 pagine

¹ Steffen Schlömer (ed.), *Technology-specific Cost and Performance Parameters, Annex III of Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (2014)

² Abousahl, S., et al., *Technical assessment of nuclear energy with respect to the 'do no significant harm' criteria of Regulation (EU) 2020/852 ('Taxonomy Regulation')*, EUR 30777 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021, ISBN 978-92-76-40538-2, doi:10.2760/207251, JRC125953

prodotto dal Joint Research Centre e utilizzato dalla Commissione Europea per giustificare l'inclusione dell'atomo nella tassonomia green. Perché riduce la dipendenza strategica da Paesi "critici", sia per le fonti energetiche sia per i materiali critici: **il nucleare coinvolge, infatti, un ciclo industriale quasi interamente europeo**, dalla progettazione alla costruzione, gestione e smantellamento delle centrali nucleari, dall'arricchimento alla fabbricazione del combustibile. **La tecnologia, il know-how e le capacità realizzative sono interamente europee (e pure italiane)**. Circa l'approvvigionamento dell'Uranio naturale, sebbene alcuni giacimenti esistano anche in Europa, ci si può rifornire praticamente senza rischi da Australia e Canada. Inoltre, è assai minore l'utilizzo di metalli critici e di terre rare rispetto alle rinnovabili e non è necessario dotarsi di grandi capacità di accumulo dell'energia, ad esempio attraverso batterie. Perché ha un impatto positivo su industria ed economia europee: coinvolge oltre un milione di lavoratori e una filiera industriale continentale diffusa, fatta da una manifattura sia "pesante" sia "leggera", da infrastrutture civili importanti e da servizi ad alto valore aggiunto. Genera oltre 450 miliardi di PIL all'anno ed è realistico stimare che ogni euro investito nel nucleare possa ricadere almeno per l'80% in Europa. Inoltre, la programmabilità della produzione e la stabilità e prevedibilità dei costi di generazione sono fattori unici per le aziende, per il mercato elettrico e per l'economia in generale.

Trovare soluzioni al trilemma energetico

Circa le tecnologie disponibili, il contributo alla soluzione del trilemma, da oggi ai prossimi decen-

ni, può giungere da reattori appartenenti a differenti tipologie.

Innanzitutto, dall'estensione di vita per molti dei reattori della flotta attualmente in esercizio (412 nel Mondo, 100 in Europa), costruiti negli anni '70-'90: in gran parte dovrebbero essere chiusi nel prossimo decennio, dopo 30-40 anni di vita, ma per molti di essi si prospetta un'estensione di vita per altri 10-20 anni, di norma dopo l'aggiornamento dei sistemi di sicurezza e dopo la sostituzione di alcuni componenti con altri aventi prestazioni migliorate.

Un secondo contributo nei prossimi anni arriverà dai reattori di generazione "evolutiva": grandi macchine da oltre 1000 MWe di potenza, che rappresentano larga parte dei 58 impianti già oggi in costruzione sul globo. Una tecnologia migliorata, più performante e più sicura rispetto alla precedente (li avessimo avuti a Fukushima, verosimilmente non si sarebbe verificato lo scenario incidentale severo). Reattori di questo tipo operano già da tempo con successo in Russia, in Medio ed in Estremo Oriente. Sono di recente attivazione anche in Europa e in USA, sebbene con parecchie criticità, in termini di tempi e costi di costruzione.

Il terzo contributo sarà quello delle tecnologie "innovative", rappresentate dai piccoli reattori modulari (Small Modular Reactors – SMR), già disponibili in Russia e in Cina ma destinati a maturare entro il 2030 anche nel resto del mondo, Europa inclusa. Si tratta di reattori di dimensioni ridotte, solitamente comprese tra 100 e 300 MWe per modulo, basati su soluzioni di sicurezza di tipo "passivo", praticamente senza necessità di alimentazione elettrica e di intervento umano. Gli SMR sono progettati per essere costruiti principalmente in officina, cioè in

un ambiente più controllato, quindi trasportati e assemblati in loco. Ciò garantirebbe tempi e costi più certi e ridotti, quindi un minor rischio finanziario.

L'installazione di moduli in successione, favorita dalla modularità, consentirà anche un effetto di autofinanziamento: mentre un modulo produce elettricità, con i guadagni si co-finanzia la realizzazione del modulo successivo. Gli SMR apriranno anche opportunità per la cogenerazione, come il teleriscaldamento, la desalazione dell'acqua, la produzione di biocarburanti e, non ultima, la produzione di idrogeno.

Su questa tecnologia già da alcuni anni si stanno concentrando gli interessi di diverse nazioni, sia quelle degli storici "vendor" (le già citate Russia e Cina, ma anche USA, Canada, Corea del Sud, Giappone, Argentina, Regno Unito, oltre a diversi Paesi EU quali Francia, Finlandia, Repubblica Ceca, Polonia, Romania) sia alcune "newcomer" del nucleare (ad es. Giordania, Malesia, Indonesia, Filippine, Arabia Saudita, Marocco, Ghana).

Gli Advanced Modular Reactors

Il quarto contributo, disponibile intorno al 2040, sarà quello dei reattori "avanzati" (Advanced Modular Reactors – AMR), molto diversi da quelli attuali, promettono anch'essi alti standard di sicurezza e un ulteriore passo avanti in termini di sostenibilità del ciclo del combustibile, attraverso il riciclo dei rifiuti a lunga vita e ad alta radioattività, quelli più pericolosi. In questo modo, la durata della radiotossicità dei rifiuti sarà drasticamente ridotta, da oltre 100mila a meno di 300 anni; tuttavia, per questo scopo si dovranno affrontare e risolvere alcune fasi molto delicate dal punto di vista tecnologico e geopolitico-strategico, quali

il riprocessamento del combustibile e l'estrazione di plutonio. Per raggiungere questi obiettivi si stanno sviluppando reattori che non sono più raffreddati ad acqua ma con piombo o sodio liquidi oppure con sali fusi. La prima dimostrazione di questa nuova soluzione di riciclo, nell'ambito del progetto "Proryv", è già in costruzione in Russia e dovrebbe essere completata attorno al 2030. **Ad oggi, sono oltre 80 i progetti di SMR, AMR e micro-reattori (questi ultimi, spesso appartenenti alla categoria degli "avanzati" ma con potenze tra 1 e 5 MWe) allo studio nel mondo. A questo argomento IAEA ha dedicato molte iniziative negli anni recenti, sino ad istituire una specifica Piattaforma**³.

Infine, il quinto contributo: i reattori a fusione. Un passo importante nel percorso che porterà alla futura fase commerciale dell'energia da fusione sarà l'accensione del reattore ITER, il più grande progetto internazionale dedicato a questa tecnologia, in costruzione a Cadarache in Francia e al quale l'Europa sta collaborando con Cina, Corea del Sud, Giappone, India, Russia e Stati Uniti. Realisticamente, però, sembra difficile pensare di avere la prima centrale nucleare a fusione commerciale collegata alla rete prima del 2050-60. Altre iniziative, supportate da private equity, sono in fase di sviluppo nel mondo: diverse start-up promettono accele-

razioni formidabili nella fase di sviluppo e di realizzazione di macchine a fusione, tra queste Commonwealth Fusion System del MIT di Boston, finanziata anche da Eni. Ma saranno i prossimi anni a confermare o smentire questa prospettiva.

Infine, il ruolo dell'Italia. Già importante oggi, ma potenzialmente da assoluto protagonista su tutte e tre le nuove tecnologie: SMR, AMR e fusione. Qualche esempio può ben rendere l'idea in proposito.

Sugli SMR, i laboratori piacentini di SIET rappresentano una sorta di punto di accumulazione per i test dei principali reattori PWR integrati, ossia la maggior parte dei modelli di SMR raffreddati ad acqua allo studio nel mondo: NuScale, il primo progetto small statunitense; fra poco anche l'SMR dell'inglese Rolls Royce; in prospettiva anche alcuni studi per Nuward, il progetto francese; interazioni aperte anche per l'argentino CAREM e altri SMR americani. Di recente, Edison ha firmato accordi di collaborazione con Ansaldo e EdF per studi sulla realizzazione di SMR e AMR in Italia, con Ansaldo divenuta collaboratrice di EdF per lo sviluppo di EPR2 e Nuward.

In ambito AMR, ENEA da anni sviluppa laboratori sperimentali di livello internazionale presso la sede del Brasimone, per lo sviluppo della tecnologia Lead-cooled Fast Reactor-LFR. L'Italia è leader europea in

questa tecnologia, potendo vantare: la guida del progetto ALFRED, sviluppato da Ansaldo Nucleare con la stessa ENEA e i rumeni di RATEN, la recente sigla di un accordo di collaborazione Ansaldo-Westinghouse-Romania-Belgio su LFR, nonché la prima, e ad oggi unica, start-up nucleare "italiana", newcleo, anch'essa impegnata nello studio di reattori LFR.

Infine, sul tema fusione, il progetto DTT guidato da ENEA e partecipato da ENI, con la collaborazione di università e centri di ricerca italiani, a supporto dello sviluppo della soluzione ITER, alla costruzione del quale contribuiscono sin dall'inizio numerose aziende italiane.

Proprio l'argomento supply chain italiana, rappresenta il leit-motiv delle tre nuove tecnologie nucleari, confermando in questo impegnativo settore la capacità delle aziende nazionali, la cui qualità è riconosciuta a livello internazionale.

Un'ottima notizia, insieme a quelle relative all'interesse per il tema nucleare di alcune utilities e di diversi settori industriali energivori ed anche da parte delle giovani generazioni, come testimoniato dall'incremento delle iscrizioni ai corsi nucleari nelle università italiane. In sintesi, un'opportunità alla portata del Paese.

³ <https://nucleus.iaea.org/sites/smr/SitePages/Resources.aspx>

Il progetto DTT - Divertor Tokamak Test

La costruzione di DTT è una sfida e un'opportunità per il sistema Paese: vincerla richiede di riconoscere la fusione come progetto nazionale. Ad oggi DTT s.c.ar.l. è il più rilevante esempio di partnership pubblico-privato nel mondo della fusione, in grado di mettere assieme le conoscenze delle istituzioni di ricerca e delle università italiane e l'esperienza di costruzione e gestione di grandi impianti della maggiore società energetica italiana. Questa interazione di esperienze diverse è un esperimento nell'esperimento, ma è destinata ad avere effetti fecondi.

DOI 10.12910/EAI2023-062



di **Francesco Romanelli**, *Presidente DTT s.c.ar.l.*

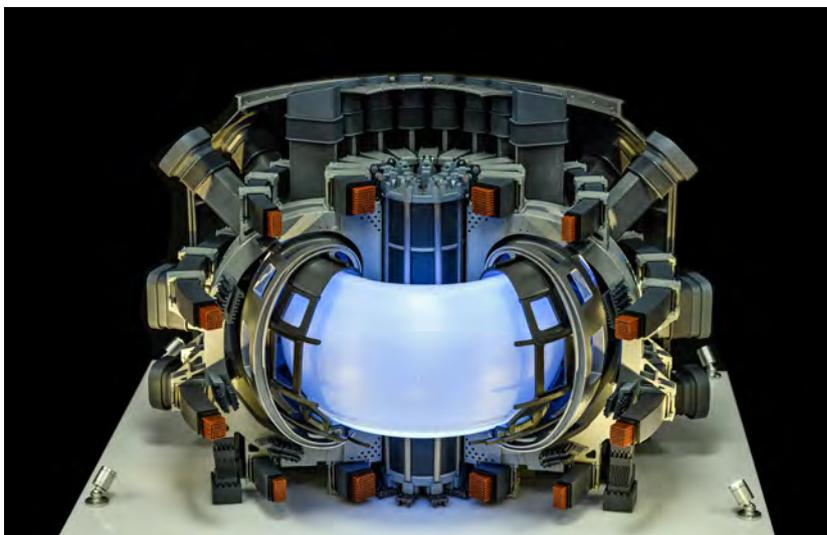
L'aumento della popolazione mondiale, il miglioramento della condizione delle popolazioni dei Paesi emergenti mediante una maggiore disponibilità di energia pro-capite e la necessità di ridurre l'impatto dei cambiamenti climatici spingono a una progressiva decarbonizzazione della produzione di energia. La soluzione non verrà da una singola tecnologia, ma da un portafoglio di tecnologie che include le rinnovabili e il nucleare da fissione. In questo contesto **la fusione è destinata a giocare un ruolo sempre più importante in quanto ha alcuni vantaggi importanti:**

- **il combustibile è praticamente illimitato e diffuso – ne abbiamo sulla Terra per decine di milioni di anni;**
- **non produce gas serra;**
- **il processo è intrinsecamente sicuro;**
- **ha un limitato impatto ambien-**

tale – i neutroni prodotti nelle reazioni di fusione possono attivare la camera di reazione ma con una opportuna scelta dei materiali la radioattività decade a valori accettabili nel giro di 100 anni.

Oggi la fusione ha raggiunto alcuni

traguardi importanti. JET, il maggiore esperimento di fusione a confinamento magnetico in operazione, ha dimostrato la produzione in maniera controllata di circa 60MJ di energia e la National Ignition Facility, il maggiore esperimento di fusione inerziale, ha ottenuto energia da



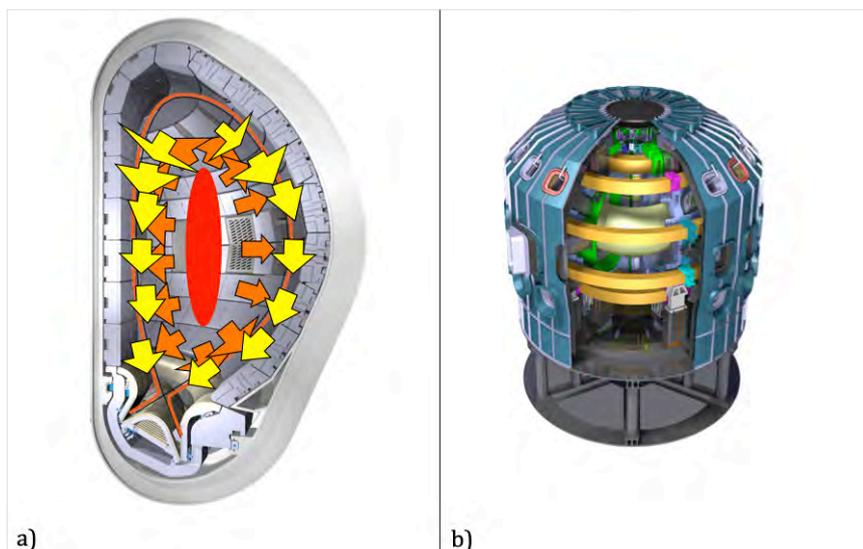


Figura 1. A sinistra lo schema di una macchina da fusione con il divertore in basso. Il calore generato dalle reazioni di fusione attraversa il bordo del plasma (linea arancione) e fluisce in uno stretto strato (frecche gialle) verso il divertore da cui viene estratto. A destra uno spaccato di DTT

fusione in eccesso rispetto a quanto iniettato nella capsula (holraum) in cui avviene la reazione.

Altre sfide da superare

Per poter procedere alla costruzione di un impianto di potenza occorre però superare altre sfide. Tra queste, come proposto nella Roadmap alla energia da fusione ¹, una delle più critiche è quella della estrazione del calore. Facendo riferimento alla Fig.1a, il calore prodotto dalle reazioni di fusione viene trasportato per conduzione e convezione verso il bordo del plasma. Una volta attraversato il bordo, il calore fluisce in uno stretto strato di plasma verso una nicchia posta in fondo alla camera di reazione dove sono disposte delle piastre (il divertore). Il calore viene depositato sul divertore e da qui viene estratto mediante un circuito di raffreddamento. Il punto è che lo strato è così stretto e la quantità di calore così alta che il carico termico sul divertore può raggiun-

gere gli stessi valori della superficie del Sole! È possibile costruire componenti che possono sopravvivere in tali condizioni?

Per affrontare questa questione la Roadmap propone la costruzione di una Divertor Tokamak Test facility (DTT – Fig.1b) lasciando alla comunità scientifica il compito di proporre opportune soluzioni. Nel dibattito che si svolse tra i laboratori Europei afferenti al Consorzio EUROfusion negli anni successivi emerse la proposta di ENEA di una macchina tokamak a campo relativamente alto (6 Tesla), corrente di 5.5 milioni di Ampère, dimensioni compatte (raggio maggiore di 2.2m) e elevata potenza di riscaldamento (45MW). Per comprendere le capacità dell'esperimento possiamo dire che DTT sarebbe in grado di raggiungere condizioni prossime al pareggio della potenza (breakeven) se operata con una miscela di deuterio trizio (DTT opererà con solo deuterio per evitare problemi di attivazione).

Per costruire DTT nel 2019 è stata fondata la società consortile DTT s.c.ar.l. che oggi vede 11 soci: ENEA, ENI (i due soci di maggioranza), CNR, INFN, Consorzio CREATE, Consorzio RFX, Politecnico di Torino, le Università di Milano Bicocca, di Roma "Tor Vergata", della Tuscia e la società CETMA. I fondi per la costruzione sono forniti interamente da ENEA e includono fondi dei ministeri, anche attraverso un grant PNRR di 55M di euro, della Regione Lazio e del Consorzio EUROfusion. I fondi per il funzionamento della società sono divisi pro-quota tra i soci. La proprietà dell'impianto rimarrà di ENEA. La società avrà inoltre la responsabilità delle operazioni dell'impianto.

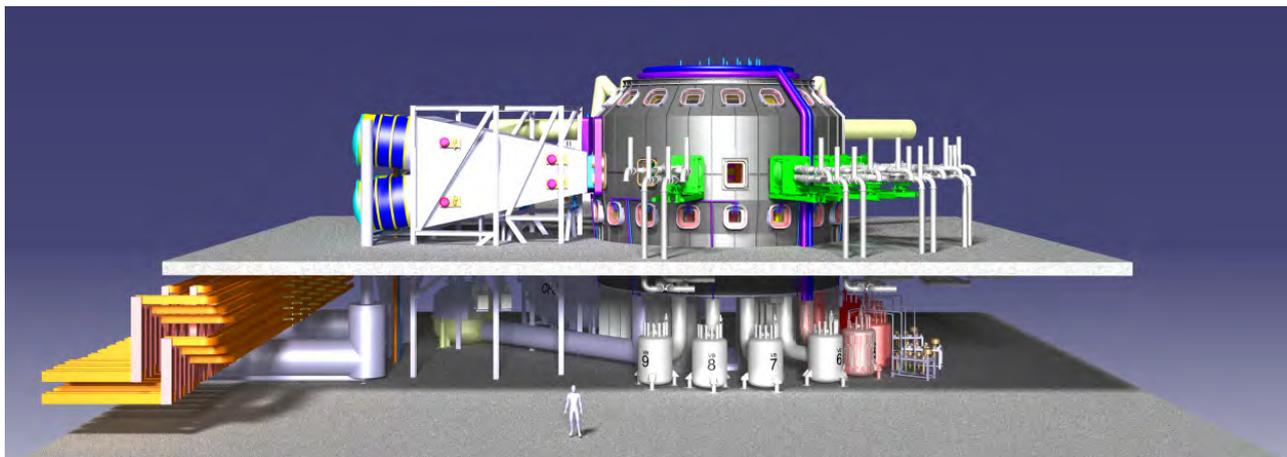
DTT è il più importante esempio di partnership pubblico-privato nel mondo della fusione

È importante notare che DTT s.c.ar.l. è al momento il più rilevante esempio di partnership pubblico-privato nel mondo della fusione. La società mette assieme le conoscenze nel campo della fusione delle istituzioni di ricerca e delle università italiane e l'esperienza di costruzione e gestione di grossi impianti della maggiore società energetica italiana. Questa interazione di esperienze diverse è un esperimento nell'esperimento, ma è destinata ad avere effetti fecondi.

La novità più importante nel mondo della fusione degli ultimi anni è la nascita di diverse start-up private che hanno raccolto finanziamenti per circa sei miliardi di dollari.

Di conseguenza il panorama della fusione vede oggi tre distinti attori: i laboratori di ricerca, le industrie della fusione e i supplier. Ciascuno di questi attori da solo non sarà

¹ F. Romanelli et. al. Fusion electricity - A Roadmap to the realization of fusion energy ISBN 978-3-00-040720-8 <https://www.euro-fusion.org/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>



in grado di portare la fusione allo stadio di sfruttamento industriale. **Solo combinando le conoscenze in questo campo presenti nel mondo della ricerca, l'approccio pragmatico delle industrie sulla fusione e l'esperienza sulla costruzione dei componenti dei supplier sarà possibile accelerare lo sviluppo della fusione.**

Il Regno Unito si sta muovendo in questa direzione con la costruzione del reattore STEP nell'ambito di un progetto nazionale sotto la direzione della UKAEA che prevede di coinvolgere importanti compagnie private.

L'Italia è in una posizione unica per giocare un ruolo di primo piano

L'Italia è in una posizione unica per giocare un ruolo di primo piano nella realizzazione dell'energia da fusione. L'industria italiana è quella che ha maggiormente partecipato alla costruzione di ITER con

commesse ad oggi pari a 1.8 miliardi di euro, DTT s.c.ar.l. è un consorzio che coinvolge i maggiori attori pubblici e privati ed infine la costruzione di DTT richiede non solo la padronanza delle singole tecnologie della fusione ma anche l'integrazione di queste tecnologie in un progetto coerente. **Occorre quindi che anche l'Italia consideri la fusione come progetto nazionale.**

DTT è in piena fase di costruzione. È stato impegnato circa un terzo del budget previsto. La fornitura dello strand superconduttore per la costruzione del magnete toroidale e di quattro delle sei bobine poloidali è stata completata. È stato prodotto circa il 20% del cavo superconduttore per il magnete toroidale e la produzione di serie degli avvolgimenti dovrebbe iniziare nel 2024.

Tra la fine del 2023 e l'inizio del 2024 arriveranno i primi alimentatori del magnete toroidale che verranno utilizzati per la test facility in cui ver-

ranno provate le bobine. La facility è in costruzione da parte di ENEA. Il prototipo della sorgente di onde millimetriche (gyrotron) per il riscaldamento del plasma di DTT è stato completato ed è attualmente sotto test presso la facility FALCON in Svizzera. A valle del test verrà iniziata la fornitura degli altri 15 gyrotrons. La progettazione degli edifici che ospiteranno l'infrastruttura e del sistema di distribuzione elettrica è in fase di completamento e si prevede di lanciare la gara per entrambi i lavori all'inizio del 2024. A inizio 2023 è stato approvato il progetto per la linea a 150kV dal nodo di Roma est al Centro Ricerche ENEA di Frascati. Il completamento è previsto entro il 2028.

La costruzione di DTT è una sfida e un'opportunità per il sistema Paese. Vincere questa sfida richiede riconoscere la fusione come progetto nazionale.

Il contributo del Consorzio RFX alla ricerca sulla fusione

Il Consorzio RFX è un esempio positivo di sinergia tra i maggiori Enti di ricerca scientifica e tecnologica, l'Università e il mondo produttivo italiano. Le ricerche del gruppo sono state caratterizzate fin dall'inizio da una forte integrazione tra fisici e ingegneri, che ha portato dapprima ad operare la più importante filiera di esperimenti RFP a livello mondiale e più recentemente a realizzare ed operare quella Neutral Beam Test Facility che costituisce l'unico grande laboratorio di ITER al di fuori di Cadarache e i cui risultati saranno essenziali per determinare il successo scientifico di ITER.

DOI 10.12910/EAI2023-063



di Piergiorgio Sonato, Presidente Consorzio RFX

La ricerca sulla Fusione a Padova è nata in ambito universitario dopo la seconda Conferenza di Ginevra del 1958 sull'uso pacifico dell'atomo, che fu preceduta nel 1957 dalla Conferenza di Venezia sui "Fenomeni di ionizzazione nei gas" in cui fisici come Rosenbluth e Shafranov portarono contributi fondamentali, sviluppati poi dalle ricerche delle istituzioni dei Paesi di entrambe le parti di quella che all'epoca era la "cortina di ferro".

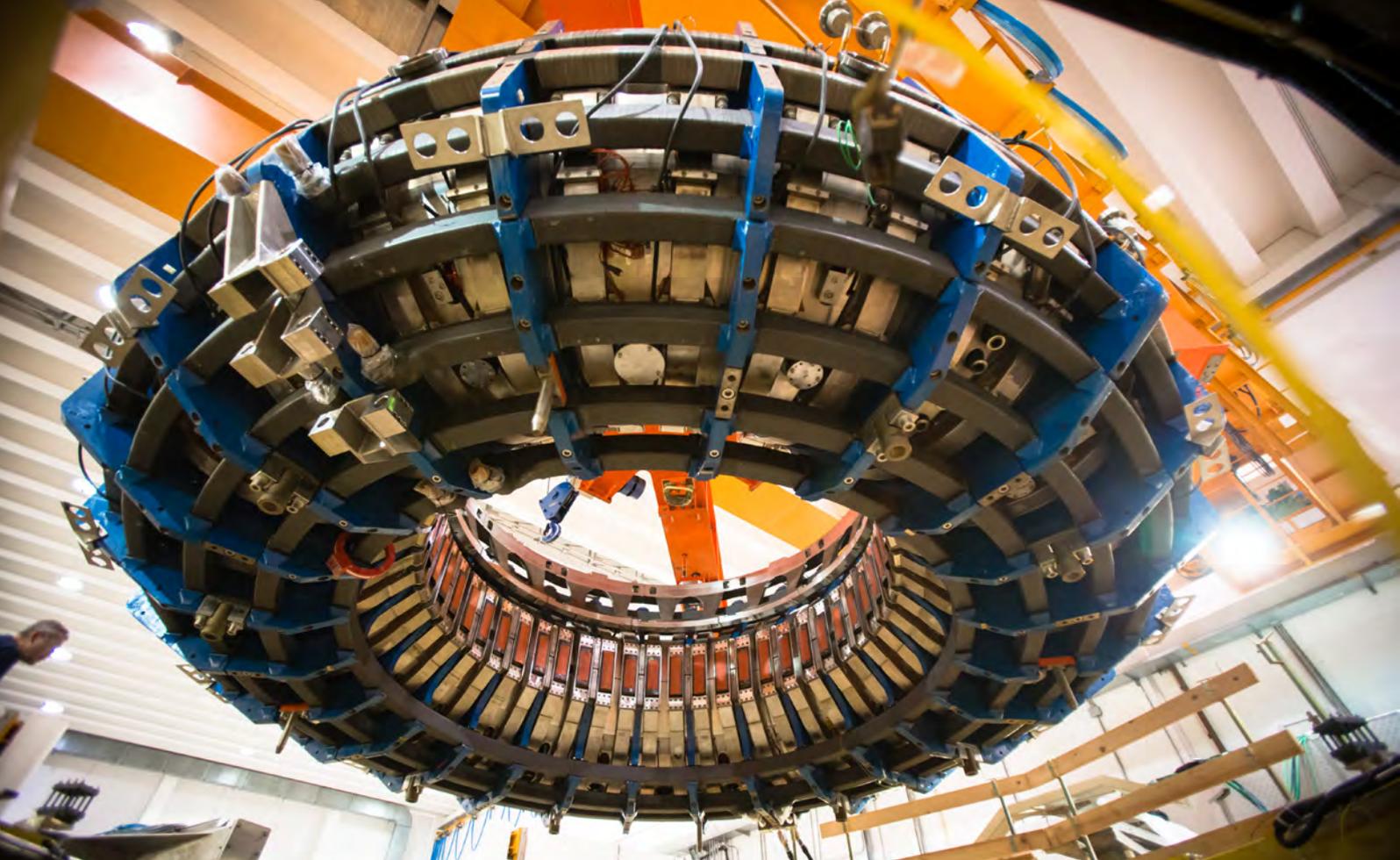
Stimolati da questi eventi, il Prof. Gaetano Malesani e il Prof. Giorgio Rostagni diedero vita alle prime ricerche su piccole macchine lineari, che poi si svilupparono con gli esperimenti toroidali Eta Beta 1 e 2 degli anni 70 e 80, ospitati nell'Istituto di Elettrotecnica ed Elettronica dell'Ateneo patavino; nello stesso periodo

venne coinvolto il CNR, per far crescere il gruppo di ricercatori e tecnici che costituirono il nucleo fondante dell'Istituto Gas Ionizzati del CNR. Negli stessi anni a Milano il CNR istituì l'Istituto di Fisica del Plasma.

Nei primi anni '80, il CNR e l'Università di Padova coinvolsero ENEA nel proporre al Governo italiano il finanziamento, con il contributo prioritario da parte dell'Unione Europea, di una macchina a confinamento magnetico toroidale, RFX, la più grande al mondo nel suo genere. La sigla è l'acronimo di Reversed Field eXperiment, che indica una configurazione di confinamento magnetico (Reversed Field Pinch-RFP) alternativa al più studiato Tokamak e che si caratterizza per il fatto che la quasi totalità del campo magnetico di confinamento è prodotto dalle correnti che circolano

nel plasma. In questa configurazione non sono necessari i grandi magneti, oggi superconduttori, che caratterizzano gli esperimenti Tokamak e Stellarator. La macchina è ospitata, per la dimensione delle sue infrastrutture, nell'Area di Ricerca del CNR di Padova.

Lo sviluppo delle attività ha poi portato nel 1996 alla creazione del Consorzio RFX, con lo scopo precipuo di coordinare la ricerca sulla fusione svolta a Padova e di costituire un modello di integrazione delle ricerche svolte dai maggiori enti di ricerca italiani, il mondo accademico e la realtà manifatturiera. **Il Consorzio RFX, inizialmente costituito da CNR, ENEA, Università di Padova e Acciaierie Venete SpA, vedrà poi l'ingresso di INFN nel primo decennio del nuovo millennio.**



L'evoluzione dell'esperimento RFX

Il Consorzio RFX, con il supporto prevalente del CNR, si è poi sviluppato arrivando oggi a vedere impegnate oltre 180 persone e una trentina di dottorandi dell'Università di Padova. L'Università di Padova costituisce il bacino di attrazione e di crescita delle giovani generazioni di ricercatori attraverso uno specifico corso di dottorato internazionale in Fusion Science and Engineering, esempio unico in Europa, che è oggi condiviso con l'Università di Napoli "Federico II".

L'esperimento RFX è poi evoluto all'inizio del millennio con la realizzazione della versione RFX-mod apportando sostanziali modifiche ai sistemi di controllo locale dei campi magnetici sulla superficie del plasma attraverso l'introduzione di 192 bobine a sella che rivestono completamente la superficie del toro. **RFX-mod ha ottenuto risultati**

significativi, raggiungendo i parametri nominali di 2 MA di corrente toroidale di plasma e 15 milioni di gradi di temperatura di plasma. La capacità di ricondurre, attraverso il controllo attivo dei modi, una struttura magnetica caotica ad una ordinata, quindi meglio confinante, ha fatto meritare a RFX-mod la copertina del numero di agosto 2009 della rivista Nature Physics.

RFX-mod dal 2016 è oggetto di un ulteriore intervento di modifica per poter accedere a nuovi spazi operativi. Un primo finanziamento nel piano POR-FESR 2014-20 della Regione Veneto è stato assegnato al Distretto della Meccanica dell'Alto Vicentino, avente il Consorzio RFX come soggetto di ricerca, per realizzare la nuova barriera di separazione atmosfera-alto vuoto e la modifica della struttura conduttrice di stabilizzazione delle fluttuazioni di campo magnetico al bordo del plasma.

Nel 2021 RFX è stato incluso nella

lista delle Infrastrutture di Ricerca ad Alta Priorità nel PNIR 2021-27.

Nel 2022 il CNR, attraverso la sua nuova struttura di ricerca sulla fusione, l'Istituto per la Scienza e la Tecnologia dei Plasmi (ISTP), che riunisce le attività dei due precedenti istituti già citati e di una parte dell'Istituto Nanotec di Bari, ha presentato il progetto NEFERTARI congiuntamente a Università di Napoli "Federico II" e Università di Padova. NEFERTARI da una parte consentirà di estendere gli obiettivi scientifici delle modifiche e dall'altra favorisce e intensifica la visione di RFX come una Infrastruttura di Ricerca che opera in rete coinvolgendo sia le tre sedi di ISTP sia che diversi dipartimenti delle Università di Padova e di Napoli.

Le attività del Consorzio RFX, sono sempre state integrate nei programmi europei, fino al 2013 nel quadro dell'European Fusion Development Agreement che in Italia ave-

vano ENEA come referente, e dal 2014 nel quadro di EUROfusion il cui coordinatore italiano continua ad essere ENEA. A livello internazionale le ricerche sulla configurazione Reversed Field Pinch sono coordinate sotto l'egida dell'IEA.

Gli esperimenti SPIDER e MITICA

A seguito della firma dell'accordo di collaborazione tra Cina, Corea del Sud, Giappone, India, Russia, Stati Uniti d'America e Unione Europea siglato a Parigi nel 2006 per la realizzazione di ITER a Cadarache (F), la ITER Organization decise di realizzare una infrastruttura di ricerca per lo sviluppo degli iniettori di particelle neutre accelerate a 1 MV in grado di depositare 17 MW di potenza nel plasma per 1 ora. Prestazioni che non sono mai state realizzate e che richiedono significativi progressi sia scientifici che tecnologici.

L'Italia propone di ospitare l'infrastruttura affidandola al Consorzio RFX ed offrendo la realizzazione degli edifici per ospitare due grandi esperimenti, SPIDER e MITICA. Il MIUR assegnò a CNR e INFN i fondi per realizzare quegli edifici, mentre tutte le apparecchiature scientifiche sono state finanziate dall'ITER Organization.

Il Consorzio RFX da allora ha assunto il ruolo di principale partner della ITER Organization e di Fusion for Energy (l'agenzia europea istituita nel 2007 per realizzare i componenti e sistemi europei per ITER) per lo sviluppo degli iniettori di particelle da installare in ITER attraverso una collaborazione internazionale che vede coinvolte istituzioni di molti Paesi europei, del Giappone e dell'India, oltre a EUROfusion.

SPIDER è un esperimento dedicato a sviluppare la sorgente di ioni negativi di Idrogeno/Deuterio che, una volta estratti, possono essere accelerati fino al valore di energia

richiesto. La sorgente opera in vuoto ed è dotata di una griglia di grandi dimensioni (900 mm x 1800 mm) dotata di 1280 fori da cui vengono estratti gli ioni negativi prodotti nella camera di plasma retrostante per un totale di circa 60 A, con una disuniformità massima del 10% nella densità di corrente. Il plasma viene generato in una camera per mezzo di otto generatori a radiofrequenza a 1 MHz della potenza complessiva di 800 kW.

SPIDER è entrato in funzione nel 2018 e, dopo tre anni mezzo di esperimenti i cui risultati sono in buon accordo con le aspettative, la sorgente è stata oggetto di una profonda revisione per permettere di raggiungere i parametri nominali richiesti.

MITICA è il prototipo dei due iniettori che verranno installati in ITER. In MITICA una sorgente di ioni negativi simile a quella di SPIDER sarà accoppiata ad un sistema di accelerazione elettrostatica a 5 stadi fino a 1 MV per un totale di 40 MW di potenza, che dovrà funzionare a regime per 1 ora. A valle del sistema di accelerazione il neutralizzatore e il Residual Ion Dump convertono gli ioni negativi in un fascio di particelle neutre di Idrogeno/Deuterio per una potenza di uscita di circa 20 MW. Completa l'iniettore un calorimetro su cui il fascio viene fermato e diagnosticato.

Il sistema di alimentazione multistadio a 1 MV in DC, unico al mondo, è stato realizzato in Giappone.

MITICA è in fase avanzata di realizzazione: nel 2025 verranno installati i componenti interni dell'iniettore per iniziare le campagne sperimentali dell'intero iniettore.

Il ruolo nell'esperimento DTT e nel Broader Approach

Il Consorzio RFX è coinvolto in DTT, essendone socio e rivestendo

ruoli significativi di progetto, realizzazione e preparazione del piano scientifico. Ha inoltre un ruolo importante nel Broader Approach, con la realizzazione di sistemi di alimentazione elettrica e di diagnostiche della macchina giapponese JT-60SA, attualmente il più grande Tokamak del mondo.

Infine, significativo è l'impegno nello sviluppo del progetto DEMO, il reattore prototipo che a seguito dei risultati ottenuti in ITER, in DTT e in altri esperimenti europei ed extra-europei, dimostrerà la produzione di energia elettrica dalle reazioni di fusione.

In conclusione, possiamo affermare che il Consorzio RFX costituisce per l'Italia un positivo esempio di sinergia tra i maggiori Enti di ricerca scientifica e tecnologica, l'Università e il mondo produttivo. Le ricerche del gruppo sono state caratterizzate fin dall'inizio da una forte integrazione tra Fisici e Ingegneri, che ha portato dapprima ad operare la più importante filiera di esperimenti RFP a livello mondiale e più recentemente a realizzare ed operare quella Neutral Beam Test Facility che costituisce l'unico grande laboratorio di ITER al di fuori di Cadarache e i cui risultati saranno essenziali per determinare se ITER potrà raggiungere le prestazioni fusionistiche attese. Il Consorzio RFX costituisce dunque una fertile istituzione di ricerca, profondamente integrata nel vivace ambito internazionale, che oggi vede la fusione al centro dell'attenzione, nella fondata speranza che l'umanità possa disporre, nel corso di questo secolo, di una fonte di energia pulita, sicura e perfettamente adeguata a complementare le altre forme di energia sostenibili dal punto di vista non solo ambientale, ma anche sociale ed economico.



Il Brasimone, centro di eccellenza internazionale per la ricerca nucleare

Oggi il Centro ENEA del Brasimone è un centro di eccellenza a livello internazionale sulle tecnologie per il nucleare del futuro, soprattutto sulle tecnologie dei metalli liquidi, e si caratterizza per la sua particolare predisposizione culturale e strumentale per le tecnologie innovative.

DOI 10.12910/EAI2023-064



di **Mariano Tarantino**, *Responsabile della Divisione Sicurezza e Sostenibilità del Nucleare ENEA*

Quando ci si avvicina al Centro ENEA del Brasimone, la prima cosa che si nota è la “cupola” del reattore, come un monolite incastonato fra i monti dell’appennino toscano-emiliano e il lago. È una vista che la-

scia affascinati, come se quell’opera concepita dall’uomo per governare le leggi della natura, non potesse che essere costruita altro che lì. Eppure, è un’opera incompiuta, testimone di quello che l’Italia era quasi riuscita a diventare, ovvero un

Paese all’avanguardia nel nucleare, una delle tecnologie più sfidanti della storia dell’uomo.

Il reattore PEC “Prova Elementi Combustibili” non è mai stato ultimato. Dopo l’incidente di Chernobyl l’Italia ha abbandonato il proprio



Contenimento del Reattore PEC in fase di installazione

programma nucleare, e con esso il PEC. Questo però non ha minato la vocazione ad innovare del Centro e dell'ENEA, e la determinazione nel guardare al futuro, di tutti i ricercatori e i tecnici che lavorano presso il Brasimone.

Abbandonata la politica di produzione di energia elettrica da fissione, **dopo il referendum del 1987 iniziò un processo di riconversione delle risorse umane e strutturali, orientando le attività del Centro prevalentemente verso la tecnologia della fusione termonucleare controllata; ciò ha permesso di realizzare ulteriori investimenti che hanno profondamente modificato il Centro e le sue capacità operative, dotandolo di ulteriori infrastrutture, impianti e laboratori per ricerche tecnologiche, talora in grado anche di applicare le competenze a settori completamente diversi.**

Quello del Brasimone è quindi diventato un Centro di Ricerca, proiettato verso il futuro, a vocazione internazionale.

Perché il Brasimone è un centro di eccellenza a livello internazionale

Oggi il Centro ENEA del Brasimone è un centro di eccellenza a livello internazionale sulle tecnologie

per il nucleare del futuro, soprattutto sulle tecnologie dei metalli liquidi, e si caratterizza per la sua particolare predisposizione culturale e strumentale per le tecnologie innovative.

Ma cerchiamo di capire come mai e perché il Brasimone è un centro di eccellenza a livello internazionale.

Come noto, oggi sul tema dell'energia si gioca una partita dirimente per il futuro dell'Italia e dell'Europa: in un contesto globale di rilancio dell'energia nucleare da fissione (in attesa della fusione nucleare), necessaria alla decarbonizzazione del mix energetico e quindi alla transizione energetica della nostra società entro il 2050, non si può prescindere da un'analisi complessiva del ciclo nucleare focalizzandosi soprattutto sul miglioramento dell'efficienza del combustibile e sulla gestione/minimizzazione delle scorie radioattive a lunga vita.

Su questo ENEA ha lavorato negli ultimi 20 anni, creando una forte sinergia fra la vocazione sperimentale del Brasimone e quella progettuale e di analisi a Bologna. L'utilizzo nel medio-lungo termine di sistemi nucleari a spettro veloce, unitamente all'adozione di cicli del combustibile chiusi, sono considerati requisiti fondamentali ed imprescindibili di sostenibilità di questa forma di energia, sia in termini di disponibilità di materie prime sia di gestione dei rifiuti radioattivi. Infatti, come dimostrato da innumerevoli studi internazionali di analisi di scenario, effettuati in ambito OECD-NEA, IAEA, Euratom, ecc., cicli del combustibile avanzati che includano sistemi nucleari a spettro veloce critici; nonché tecniche di separazione del combustibile esaurito e trasmutazione degli attinidi, permettono un utilizzo più efficiente del combustibile nucleare. Ciò consente la mi-

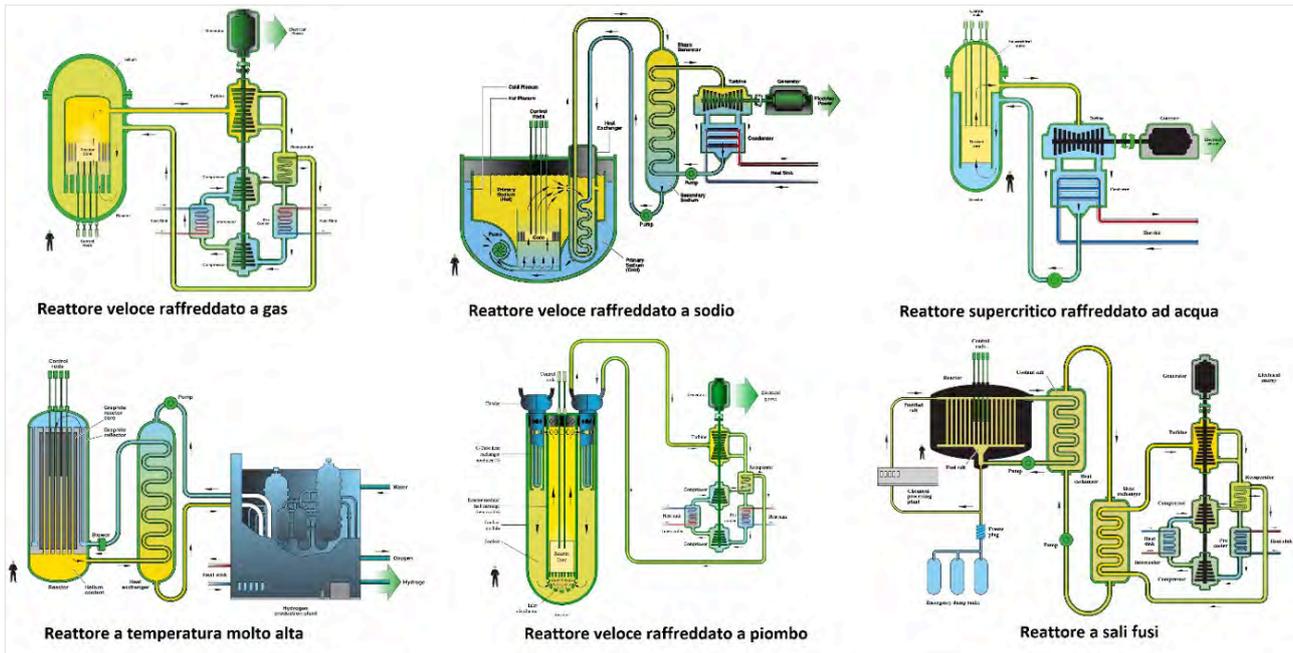
nimizzazione dei volumi e dei tempi di decadimento dei rifiuti radioattivi ad alta attività e, più in generale, la drastica riduzione dei requisiti del deposito geologico e una riduzione dei rischi di proliferazione, qualora vengano adottate opportune strategie di riciclo del combustibile che, in ogni punto del ciclo, evitino la separazione del plutonio dagli attinidi minori.

Tralasciando, in questa sede, le complesse strategie e scelte tecnologiche dell'intero ciclo del combustibile e limitandosi ai soli sistemi nucleari a spettro veloce in cui "bruciare" in maniera efficiente il combustibile, è noto che essi differiscono principalmente per il tipo di refrigerante primario. Dovendo evitare in un sistema veloce la presenza di materiali che assorbano o moderino i neutroni, le possibili scelte di fluido refrigerante primario sono tre: il gas, il sodio, i metalli liquidi pesanti (e in particolare il piombo).

Una soluzione vincente

Vale la pena ricordare che a questi tre refrigeranti primari corrispondono gli altrettanti sistemi nucleari a spettro veloce selezionati dal Generation IV International Forum e i tre concetti proposti in ESNII, la European Sustainable Nuclear Industrial Initiative della Sustainable Nuclear Energy Technology Platform europea.

I sistemi nucleari raffreddati a metallo liquido pesante (piombo) sono per ENEA la soluzione vincente. Negli ultimi 20 anni la tecnologia del piombo è stata ampiamente studiata e sviluppata in Europa e, in particolare, in Italia grazie a un considerevole numero di programmi finanziati dalla Commissione Europea e per molti anni (fino al 2018) nell'ambito dell'Accordo di Programma fra ENEA e MSE.



Le sei tecnologie candidate per la quarta generazione di reattori nucleari. Il fluido di raffreddamento utilizzato, cruciale nel processo di asportazione del calore dal nocciolo del reattore, rappresenta una delle principali differenze

Infatti, il vantaggio offerto dai metalli liquidi pesanti, quali il piombo, è di non reagire con l'acqua e con l'aria e di avere una temperatura di ebollizione di oltre 1700°C, consentendo semplificazioni impiantistiche che permettono un abbattimento dei costi a parità di prestazioni (es. potenza elettrica prodotta). Esistono problemi di compatibilità dei materiali strutturali a contatto con i metalli liquidi pesanti, ma negli ultimi anni si sono fatti enormi progressi nella direzione della mitigazione/soluzione del problema. Inoltre, grazie alle ridottissime sezioni d'urto di assorbimento neutronico e perdita di energia per scattering elastico, l'utilizzo del piombo come refrigerante primario permette di spaziare le barrette dell'elemento di combustibile molto di più che nel caso di altri refrigeranti (il rapporto passo/diametro della barretta di un elemento di combustibile di un reattore raffreddato a piombo è molto simile

a quello dei reattori ad acqua). Ciò consente, da un lato di ridurre l'altezza del vessel, pur mantenendo grande capacità di asportazione del calore residuo in circolazione naturale, e dall'altro, di aumentare la portata primaria con conseguente possibilità di ridurre il salto termico attraverso il nocciolo, ottenendo quindi, potenze elevate con bassi salti termici. In tal modo si può prevedere una temperatura di uscita nocciolo di 480 °C pur in presenza di una elevata temperatura d'ingresso (circa 400 °C), imposta dall'alta temperatura di fusione del piombo. Questo regime termico permette di limitare i problemi di corrosione/erosione dei metalli liquidi pesanti e poter prendere in considerazione, nel breve termine, materiali commercialmente disponibili, senza lunghi tempi di R&S, consentendo al contempo efficienze non inferiori al 40%.

ENEA all'avanguardia nei reattori refrigerati a piombo liquido

Una volta risolti alcuni punti salienti della tecnologia del piombo, che costituiscono l'oggetto dei programmi di R&S portati avanti in Italia da ENEA e dai suoi partner, sarà possibile, in linea di principio, realizzare un impianto dimostrativo di un sistema veloce raffreddato a piombo in tempi (2030-2035) congruenti con quelli previsti dai programmi per la transizione energetica e gli obiettivi di decarbonizzazione entro il 2050.

Su questa tecnologia nucleare, nota come reattori refrigerati a piombo liquido (Lead-cooled Fast Reactor – LFR), l'Italia, tramite ENEA, è all'avanguardia.

Questi reattori oltre che sostenibili sono estremamente sicuri. I sistemi LFR, grazie alle caratteristiche fisiche del piombo, sono capaci di garantire la presenza del refrigerante in qualsiasi condizione incidentale, conservando la capacità di



Dimostratore Europeo del Reattore Veloce Avanzato al Piombo (ALFRED): rappresentazione del sistema primario del reattore, la parte in cui avviene la produzione del calore utilizzato per generare energia elettrica

poter raffreddare il nocciolo in ogni condizione, preservando l'integrità delle barriere ingegneristiche che imprigionano gli elementi radioattivi, prevenendone qualsiasi rilascio. Tali sistemi nucleari possono essere progettati in modo da consentire sempre l'instaurarsi della circolazione naturale che, anche in caso di blackout, continuerebbe a garantire il raffreddamento del reattore. **Tutte queste caratteristiche rendono estremamente sicura la tecnologia LFR, confidando esclusivamente su meccanismi intrinseci al reattore e su sistemi passivi, entrambi estremamente affidabili.**

Inoltre, grazie al potenziale di sicurezza garantito dall'utilizzo del piombo quale refrigerante, i sistemi LFR sono ideati e progettati per essere semplici. Ciò consente di ridurre la complessità e le dimensioni dell'impianto, dunque dei costi di approvvigionamento, installazione e manutenzione.

L'ENEA da sempre collabora con l'industria italiana nel settore, in primis Ansaldo Nucleare. Con Ansaldo

è stato sviluppato il DEMO ALFRED "Advanced Lead-cooled Fast Reactor European Demonstrator", da realizzarsi in Romania in collaborazione con RATEN-ICN, centro di ricerca nucleare rumeno, che con ENEA e Ansaldo ha dato vita al Consorzio FALCON "Fostering ALFRED Construction".

FALCON, tramite i fondi infrastrutturali europei messi a disposizione dal governo rumeno, sta realizzando una *Research Infrastructure* unica al mondo a supporto dello sviluppo tecnologico di ALFRED, con investimenti già stanziati di 23 M€ e ulteriori 100 M€ per il triennio 2024-2026, e l'obiettivo di realizzare ALFRED entro il 2035.

Recentemente ha visto la luce un nuovo accordo dedicato al potenziamento di FALCON in Romania, coinvolgendo oltre ENEA, Ansaldo e RATEN-ICN, anche SCK-CEN, centro di ricerca nucleare belga e leader sulla tecnologia degli ADS, e Westinghouse, player internazionale sulla tecnologia nucleare per la produzione di energia elettrica. L'obiettivo dell'accordo è potenziare la partnership di FALCON e ridurre la roadmap su una filiera commerciale di LFRs.

L'accordo con newcleo

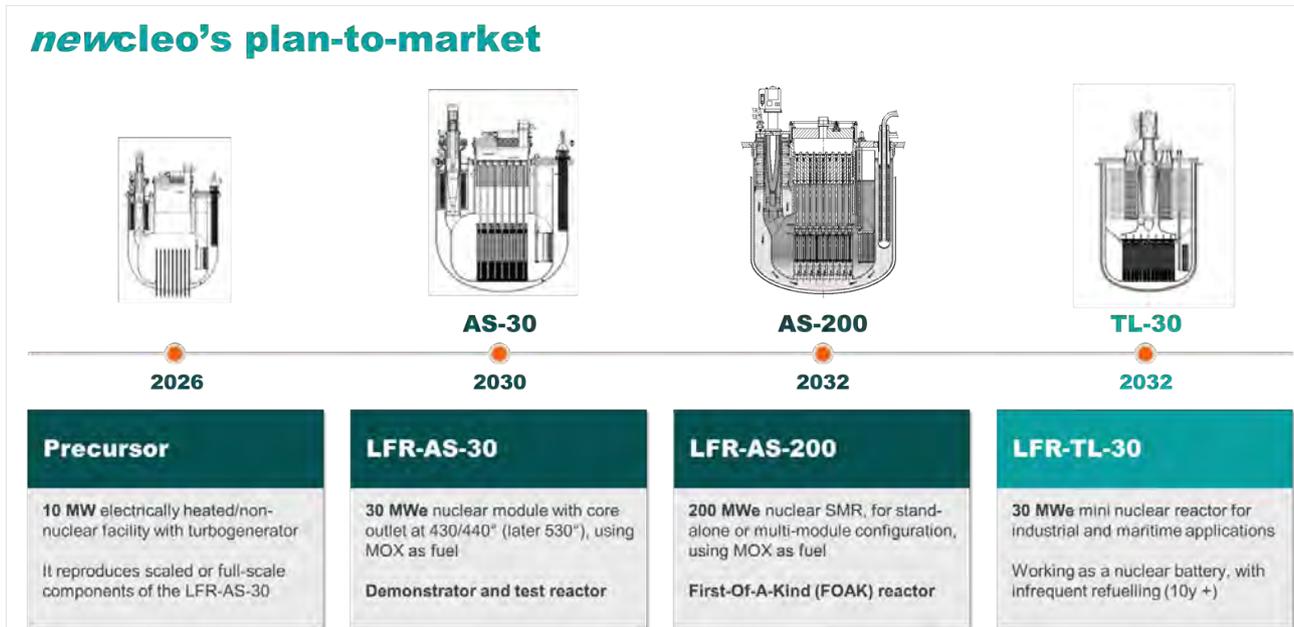
In ultimo ENEA, grazie al suo know-how e alle sue infrastrutture di ricerca situate al Brasimone, ha realizzato un accordo newcleo con la quale si sta avviando il passaggio di consegne fra mondo della ricerca e industria, con una novità mai vista in campo nucleare: finanziamenti completamente privati cosa che rende evidente la maturità tecnologica dei reattori raffreddati a piombo. newcleo si propone infatti di sviluppare i primi prototipi di reattori refrigerati a metallo liquido pesante entro il 2032-2033 e, succes-

sivamente, di commercializzarli a livello internazionale per sostituire gli attuali reattori nucleari di II e III generazione.

La collaborazione prevede, in particolare, la realizzazione di un prototipo elettrico del sistema LFR, senza l'uso di materiali radioattivi o combustibile nucleare, che permetta di studiare a fondo le prestazioni termo-fluidodinamiche, meccaniche e funzionali. ENEA metterà a disposizione infrastrutture, competenze e professionalità presenti nel suo Centro Ricerche del Brasimone per le attività di analisi della sicurezza, formazione e sperimentazione. Nell'ambito dell'accordo, inoltre, saranno implementate nuove infrastrutture di ricerca, favorendo, ove possibile, l'utilizzo e il rifacimento delle hall sperimentali e dei laboratori attualmente presenti, con investimenti da parte di newcleo che potranno superare i 50 -70 milioni di euro.

A livello operativo, è stato istituito un gruppo di lavoro con personale ENEA e newcleo che si scambierà informazioni e conoscenze e svilupperà congiuntamente apparecchiature e codici tecnologici. Oltre alla stretta cooperazione tra il personale scientifico, la collaborazione prevede l'allineamento di programmi sperimentali su sistemi nucleari innovativi, l'assistenza reciproca nella progettazione, la simulazione numerica e la costruzione di componenti chiave, sistemi e impianti.

Gli impianti nucleari veri e propri saranno poi realizzati in Francia e Regno Unito, due Paesi nucleari che hanno dimostrato ampio interesse a newcleo. Non a caso, la società ha il suo quartier generale a Londra (mentre in Italia, a Torino risiede il gruppo di progettazione) e una filiale in Francia che si sta dedicando alla realizzazione di una fabbrica per



Roadmap newcleo per la commercializzazione degli LFRs

il combustibile nucleare per reattori generazione IV che prevede di riciclare interamente l'uranio e il plutonio esistente senza alcuna attività di miniera.

In Italia si fa progettazione e ricerca e sviluppo, e si fa in ENEA al Brasimone a testimoniare il valore aggiunto che un Centro come questo può fornire ad un'industria dalle grandi ambizioni.

Non solo fissione

Il Brasimone però non è solo fissione. ENEA sta investendo, insieme alla Regione Emilia Romagna e alla Città Metropolitana di Bologna per il rilancio del C.R. ENEA del Brasimone, che nei prossimi anni potrà giocare un ruolo importante per lo sviluppo del territorio, come centro di nucleazione per nuove tecnologie, per supportare il trasferimento tecnologico e fare partnership pubblico-privato. Si lavora alla creazione di un centro di ricerca che, già

di caratura internazionale, diventi un polo di attrazione per giovani ricercatori, start-up, investitori nel settore delle nuove tecnologie.

In questo contesto ENEA sta investendo molto sulla fusione nucleare, giocando un ruolo di rilevanza internazionale sullo sviluppo delle tecnologie dei breeding blanket (mantello fertilizzante che circonda la camera a vuoto che contiene il plasma, e provvede alla generazione del combustibile e alla rimozione di parte della potenza generata per la produzione di energia elettrica).

Si sviluppano inoltre progetti finanziati dalla Regione:

- **SORGENTINA-RF** per la produzione di radio-farmaci mediante tecnologie derivate dal nucleare; il progetto è in fase di implementazione e potrebbe contribuire in maniera sensibile, una volta completato, alla fornitura di radio-farmaci per il Nord Italia;
- **LINCER**, per lo sviluppo di un

laboratorio di caratterizzazione di sorgenti neutroniche compatte per **applicazioni industriali e medicali** (esempio applicazioni di sorgenti neutroniche per terapia radiativa intraoperatoria);

- **EXADRONE** che realizza in Appennino un Centro di Eccellenza Permanente per la progettazione meccanica ed elettronica, attrezzato per la realizzazione e sperimentazione di droni industriali customizzati, perfezionati per operazioni di controllo e monitoraggio in ambienti critici, anche nucleari.

Infine, il Brasimone si propone come Centro per la progettazione e validazione di tecnologie nucleari per applicazioni spaziali per la generazione di energia elettrica nelle missioni di esplorazione lunare. Questo tramite un recente accordo siglato con ASI che ha visto l'avvio delle attività nel 2022.

L'INFN e l'energia nucleare

I grandi acceleratori e rivelatori di particelle degli esperimenti di fisica fondamentale al cuore della ricerca dell'INFN possono avere caratteristiche interessanti anche per applicazioni nel contesto dell'energia nucleare, principalmente in tre ambiti: il trattamento e la gestione dei rifiuti radioattivi generati dalle centrali a fissione; i dispositivi per la diagnostica di impianti a fissione e fusione; gli impianti ausiliari che fanno funzionare i reattori a fusione

DOI 10.12910/EAI2023-065



di **Antonio Zoccoli**, *Presidente dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare*

I grandi acceleratori e rivelatori di particelle degli esperimenti di fisica fondamentale al cuore della ricerca dell'INFN possono avere caratteristiche interessanti anche per applicazioni nel contesto dell'energia nucleare, principalmente in tre ambiti: il trattamento e la gestione dei rifiuti radioattivi generati dalle centrali a fissione; i dispositivi per la diagnostica di impianti a fissione e fusione; gli impianti ausiliari che fanno funzionare i reattori a fusione. Faremo qui alcuni esempi di sviluppi, in parte portati avanti dal progetto strategico INFN-Energia.

I rifiuti radioattivi che si producono durante il funzionamento e lo smantellamento degli impianti a fine vita vanno isolati dall'ambiente e mantenuti in sicurezza. Con il contributo dei progetti europei MICADO, PREDIS e CLEANDEM, l'INFN ha sviluppato dei dispositivi compatti, flessibili e a basso costo per la rivelazione di raggi gamma e neutroni emessi dai rifiuti, all'occorrenza equipaggiati con trasmissione dati

senza fili e anche montati su robot per ricognizioni delle zone soggette a smantellamento senza esposizione umana (Fig. 1). Questi dispositivi sono stati testati con successo su fusti campione contenenti sorgenti radioattive e verranno testati presto su manufatti cementati.

Nell'ambito dei controlli mirati a impedire che del materiale nucleare venga sottratto e utilizzato per scopi illeciti, ci viene in aiuto la "tomografia muonica", che utilizza i muoni, particelle molto penetranti create dalla radiazione cosmica. Misurando con opportuni "tracciatori" (Fig. 2) l'assorbimento dei muoni nei contenitori per il combustibile esaurito, è possibile ricavare una scansione tridimensionale del contenuto. Questo permette di stabilire se tutti gli elementi di combustibile sono presenti e non mostrano anomalie macroscopiche.

Tecnologie nucleari dalla fissione alla fusione

Un altro campo importante di applicazioni delle tecnologie INFN è

la fusione nucleare. Nella fusione nucleare "a confinamento magnetico" si utilizzano potenti campi ma-



Figura 1: Sensori di raggi gamma e neutroni assemblati (a sinistra, in alto) e montati insieme ad altri su un robot di prova nel progetto CLEANDEM (a destra)



Figura 2: (@BGZ Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH)

Un cask con a fianco i tracciatori di muoni costruiti dall'INFN (montati sui supporti blu). I muoni cosmici rivelati dai tracciatori attraversano anche il contenitore, permettendo di ispezionarne il contenuto

gnetiche per intrappolare il gas caldissimo (plasma) dentro un impianto. Il contenitore del plasma ha una forma ad anello, circondato da bobine magnetiche per l'intrappolamento del plasma. Inoltre, sono presenti una serie di impianti ausiliari per il riscaldamento del plasma, ovvero uno o più fasci di atomi neutri, che in quanto privi di carica elettrica, possono penetrare nel plasma senza risentire dei campi magnetici, e antenne che emettono onde elettromagnetiche a determinate frequenze verso il plasma. Oltre a tutto ciò, sono presenti numerosi dispositivi di diagnostica, sia per controllare la macchina facendola funzionare in sicurezza, sia per studiare il comportamento del plasma e la reazione di fusione.

La parte di plasma che sfugge all'intrappolamento va convogliata in modo da concentrare il suo enorme calore su zone fortemente raffreddate (il cosiddetto "divertore"), onde evitare di fondere la parete del con-

tenitore. Infine, per realizzare l'impianto servono materiali che possano resistere abbastanza a lungo al calore, alla radiazione del plasma e al bombardamento dei neutroni emessi dalla reazione di fusione, che possono degradare metalli e plastiche. **Vi è quindi la necessità di sviluppare materiali in grado di sostenere l'elevato flusso neutronico.** Per questo è stato proposto di realizzare IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility) e sta partendo DONES (Demo Oriented NEutron Source), laboratori dove un potente fascio di nuclei di deuterio assorbiti da un bersaglio di litio liquido produrrà un flusso molto intenso di neutroni con energie simili a quelle degli impianti a fusione, permettendo di testare i materiali. A questi progetti l'INFN dà un importante contributo tecnico-scientifico nella progettazione e realizzazione di componenti del potente acceleratore di nuclei di deuterio (Fig. 3).

Il progetto DTT, lanciato recentemente in Italia, prevede la costruzione a Frascati di un impianto a fusione dedicato allo studio del divertore sopra citato. In questo progetto, l'INFN contribuisce ai sistemi di riscaldamento del plasma, ovvero l'iniettore di atomi neutri e le radiofrequenze, e ad alcuni sistemi diagnostici.

Per realizzare un fascio di atomi neutri, si parte da una sorgente di ioni carichi, con correnti molto elevate, che vengono accelerati e infine neutralizzati. L'acceleratore consiste in un migliaio di fascetti, accelerati usando delle griglie metalliche, opportunamente raffreddate in quanto su di esse viene depositata una grande quantità di calore. Per questi componenti, così come per componenti di trasmissione delle radiofrequenze, l'INFN ha iniziato a sviluppare e ad applicare una tecnologia di punta, la "manifattura additiva" o "stampa 3D" di metalli,



Figura 3: Il primo stadio dell'impianto IFMIF-EVEDA, realizzato dall'INFN e installato a Rokkasho (Giappone)

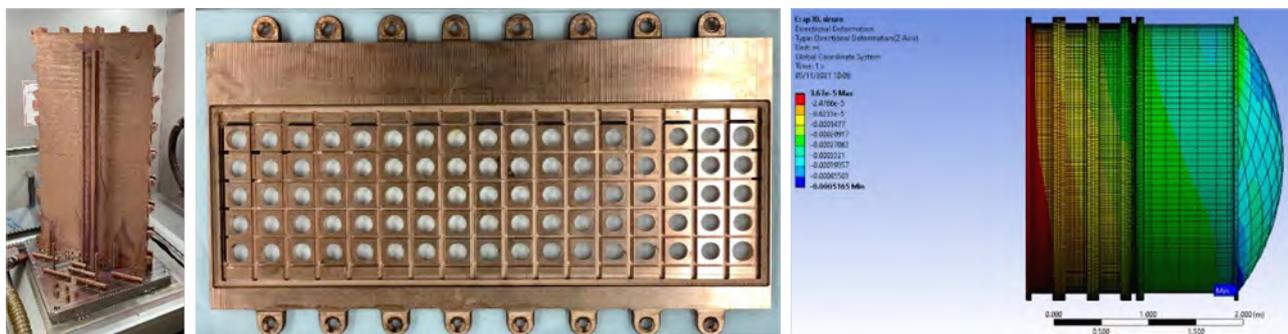


Figura 4: Una Griglia prototipo per l'iniettore di atomi neutri del progetto DTT realizzata in manifattura additiva, appena stampata (a sinistra) e dopo le post-lavorazioni (al centro). Una simulazione delle deformazioni della struttura accelerante dell'iniettore di atomi neutri, compresi gli anelli di isolamento (a destra), dove la mappa dei colori indica il grado di deformazione della struttura

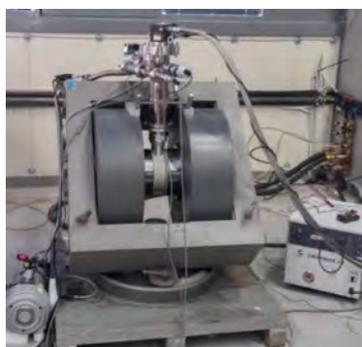


Figura 5: L'apparato di test dei cilindri di MgB_2 , utilizzati per il mantenimento della polarizzazione dei campioni

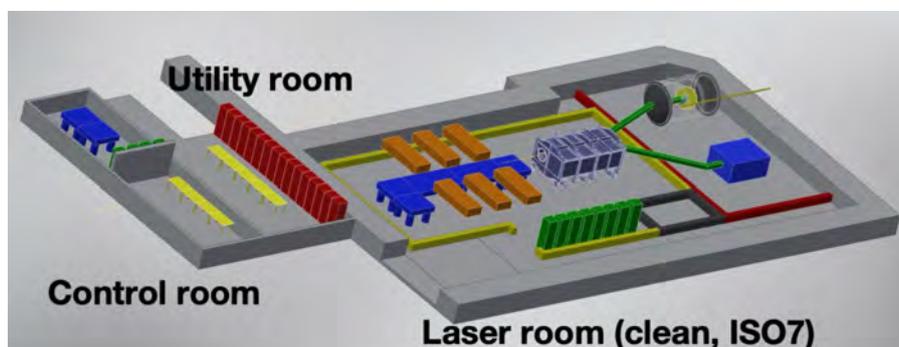


Figura 6: Schema della facility I-LUCE (INFN Laser Induced particle acceleration) ai Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN

che consente di realizzare oggetti con geometrie molto complicate, con minimo scarto di materiali (Fig. 4). Per assemblare i componenti dell'acceleratore, è pure necessario studiare delle giunzioni in materiali speciali, che consentano il necessario isolamento elettrico senza rilasciare sostanze indesiderate nel vuoto spinto dell'iniettore (Fig. 4). L'INFN collabora anche alla progettazione di determinate guide d'onda e antenne a radiofrequenza per il riscaldamento del plasma, nonché a diagnostiche del plasma basate sull'emissione di raggi X molli e sulla riflessione di radiofrequenze.

A partire dagli esperimenti di fisica nucleare con bersagli polarizzati, ovvero con lo spin nucleare orientato, è nata un'attività sulla fusione polarizzata, dove l'orientamento degli spin nucleari può far guadagnare fattori importanti nella fusione, anche nell'ambito della "fusione inerziale", in cui compressione e confinamento sono prodotti da potenti laser (Fig. 5).

In quest'ultimo ambito, l'INFN porta anche avanti il progetto FUSION, con lo scopo di realizzare una nuova classe di esperimenti basati su sistemi laser a impulsi brevissimi e alta frequenza di ripetizione.

In FUSION verranno sviluppati bersagli innovativi e nuovi sistemi diagnostici dedicati (Fig. 6). Tornando alla questione dei rifiuti radioattivi della fissione, con alcuni tipi di acceleratori come quelli sopra menzionati, si può costruire un impianto per "incenerire" i rifiuti nucleari a vita molto lunga, un impianto che si accende dando il via alla fissione solo se i neutroni vengono forniti da una sorgente esterna. L'INFN ha studiato e proposto tempo fa un'infrastruttura di ricerca su queste tematiche e collabora a studi su impianti simili dove la sorgente di neutroni è fornita invece dalla fusione nucleare.

Già nel prossimo decennio i nostri reattori di nuova generazione



Intervista con **Stefano Buono**, fondatore e CEO di newcleo

“Negli ultimi mesi abbiamo visto rifiorire un forte interesse verso l’energia nucleare tradizionale e di nuova concezione, anche a causa della situazione geopolitica. Ora sta a noi mettere a terra i progetti e rendere la nostra visione di un nucleare accessibile e sostenibile una realtà”. A esserne convinto è Stefano Buono, lo scienziato-imprenditore italiano che due anni fa ha fondato la newcleo per operare nel campo del nucleare sostenibile. La newcleo in poco tempo è riuscita a raccogliere l’interesse di diversi investitori ed enti di ricerca ed è considerata un’eccezione. Per questo gli abbiamo chiesto di raccontare i risultati ottenuti e quali sono i suoi obiettivi.

Sono molto orgoglioso dei risultati di questi due anni di vita di newcleo, che solo in Italia conta ormai 200 collaboratori – escludendo le nostre recenti acquisizioni – e credo si basi su alcuni ingredienti chiave. Il know-how sulla nostra tecnologia, ovvero sistemi nucleari raffreddati al piombo, in Italia è rilevante e fondamentale per il nostro progetto. La nostra partnership con ENEA, e le recenti acquisizioni di SRS (Servizi di Ricerche e Sviluppo) e Fucina Italia ne sono esempi lampanti.

Non solo attori di eccellenza, ma siamo riusciti ad attrarre anche grande interesse da parte dei giovani e da professionisti italiani nell’ambito nucleare che sono in alcune occasioni appositamente rientrati dall’estero.

La nostra missione, il nostro progetto industriale, ma soprattutto la nostra dedizione a veder realizzata la nostra visione sono di grande interesse per gli investitori, ma anche per grandi fornitori, come ad esempio il gruppo Tosto, con il quale abbiamo da poco avviato una stretta collaborazione.

“Sono molto orgoglioso dei risultati di questi due anni di vita di newcleo,”

Con la sua startup lei sta lavorando a mini-reattori a fissione per un nuovo nucleare pulito e sostenibile. Se ne parla da alcuni anni ma improvvisamente c’è stata un’accelerazione. Che cosa si intende per nucleare “sostenibile”?

L’energia nucleare già oggi è una fonte pulita, sicura, affidabile – un enorme aiuto alla decarbonizzazione del sistema energetico. Negli ultimi decenni l’industria si è interrogata su come migliorare ulteriormente la tecnologia nucleare, nascono così due concetti: Small Modular Reactors (reattori piccoli modulari), e Generation IV (quarta generazione).

newcleo incorpora entrambi questi concetti, e la visione è di progettare, costruire ed operare reattori a fissione che siano economici, sicuri, installabili rapidamente, e che permettano di utilizzare al meglio il combustibile nucleare. Si tratta quindi di sostenibilità in termini finanziari, ma anche in termini di utilizzo delle risorse. I reattori che progettiamo permettono infatti di utilizzare a pieno il materiale estratto, contribuendo alla chiusura del ciclo del combustibile.

Negli ultimi mesi, anche a causa della situazione geopolitica, abbiamo visto rifiorire un forte interesse verso l’energia nucleare tradizionale e di nuova concezione. Ora sta a noi mettere a terra i progetti e rendere la nostra visione di un nucleare accessibile e sostenibile una realtà.



“L’energia nucleare già oggi è una fonte pulita, sicura, affidabile – un enorme aiuto alla decarbonizzazione del sistema energetico,,

Sono in molti ad affermare che se facessimo gli investimenti necessari nelle tecnologie per le fonti rinnovabili e per sistemi di accumulo innovativi il nucleare non servirebbe. Lei cosa ne pensa? Qual è il ruolo del nucleare nel mix energetico?

Gli ambiziosi obiettivi di decarbonizzazione che ci siamo prefissati, combinati con la crescente domanda di energia, non lasciano spazio a pregiudizi di sorta: abbiamo bisogno di tutte le tecnologie a basso impatto ambientale.

Le fonti rinnovabili, così come i sistemi di accumulo, continuano ad attrarre investimenti ed incentivi governativi per superare alcune barriere tecnologiche o per l’installazione su larga scala.

A complemento di queste, l’energia nucleare può giocare un ruolo fondamentale.

È estremamente densa: a parità di energia prodotta, l’impatto in termini di area occupata, materiali utilizzati, e di rifiuti prodotti è minimo. Inoltre, è una fonte prevedibile ed affidabile, con un capacity factor molto alto, oltre il 90%. I dati accumulati in questi decenni di produzione di energia parlano chiaro: una fonte sicura e pulita che contribuisce significativamente a coprire il carico di base.

“Abbiamo bisogno di tutte le tecnologie a basso impatto ambientale,,

In una recente intervista lei ha dichiarato che oggi si possono sviluppare reattori che risolvono i problemi del vecchio nucleare, cioè la sicurezza, il costo e

i rifiuti. Ci può spiegare meglio? Che caratteristiche avranno i mini-reattori di nuova generazione e come si affronterà invece il problema delle scorie?

Come dicevamo, *newcleo* lavora su reattori piccoli modulari (SMR) veloci raffreddati al piombo (LFR). Il concetto di SMR punta a passare da un’economia di scala dei grandi reattori odierni ad un’economia di serie. Si tratta di reattori di ridotta potenza e di limitata dimensione, progettati per essere assemblati in fabbrica, trasportati facilmente, ed installati in sito, riducendo fortemente la complessità dei mega-progetti e il capitale necessario.

Inoltre, i nostri reattori veloci al piombo puntano alla semplicità e compattezza per ridurre ulteriormente i costi e i tempi di realizzazione, anche tramite sistemi passivi per assicurare la sicurezza del reattore in tutti gli scenari.

Ma non solo. I reattori veloci, insieme al riprocessamento del combustibile, permettono di riciclare ciò che oggi viene semplicemente scartato. Dal combustibile esausto dei reattori convenzionali – termici – è possibile, ad esempio, estrarre plutonio che unito all’uranio impoverito, un sottoprodotto del processo di arricchimento, può essere utilizzato come nuovo combustibile per i nostri reattori.

Si sfrutta così al meglio il contenuto energetico dell’uranio estratto in miniera, e non solo una piccola parte come oggi, riducendo allo stesso tempo i volumi di rifiuti nucleari – altrimenti destinati ad un deposito geologico.

A quando, secondo lei, la prima energia elettrica prodotta da nucleare di nuova generazione?

La quarta generazione è una realtà già oggi, con decine di progetti allo sviluppo!

newcleo è impegnata a realizzare due reattori in Europa già dal prossimo decennio. Puntiamo a realizzare un primo dimostratore da 30 MWe in Francia nei primi 2030. A seguire installeremo la nostra prima unità commerciale da 200 MWe.

Il nucleare sta crescendo molto in Europa e diversi Paesi stanno decidendo di ritornare a questa soluzione; la tecnologia moderna, secondo lei, consentirebbe di intraprendere dei percorsi di rinascita nucleare sostenibile, sicuro ed economico?

In Europa, e ancor di più in Italia, abbiamo recentemente vissuto le conseguenze di una politica energetica miope, e il tema dell'indipendenza energetica è ora sotto gli occhi di tutti.

“ Il tema dell'indipendenza energetica è sotto gli occhi di tutti, ”

Naturalmente ogni Paese per includere nel proprio mix energetico il nucleare si deve dotare di alcune infrastrutture di base, ma crediamo che le caratteristiche dei nuovi reattori, tra le quali il minor costo e i tempi di installazione più brevi, possano dare grande slancio alla rinascita nucleare.

Lo vediamo chiaramente nei Paesi in cui operiamo. Il Regno Unito ha in piano di installare fino a 24GW di nuovo nucleare entro il 2050, la Francia punta ad ampliare il suo parco e sta fortemente supportando i reattori innovativi, l'Italia ha da poco avviato la Piattaforma Nazionale per un Nucleare Sostenibile.

Lo stesso Direttore Generale IAEA ha riportato che negli ultimi mesi sta ricevendo molti Stati newcomers, ovvero che hanno intenzione di iniziare un programma nucleare.

“ Le caratteristiche dei nuovi reattori possono dare grande slancio alla rinascita nucleare, ”

Invece veniamo al nostro Paese: secondo lei il nucleare è un'opzione realisticamente percorribile oppure partiamo da zero?

È ciò che auspico: un Paese come il nostro che è stato pioniere dell'utilizzo dell'energia nucleare può sicuramente tornare a costruire ed operare centrali. Sarà necessario anche qui ricostruire tutte quelle infrastrutture di base, ma l'interesse è forte e le capacità non ci mancano.

La Piattaforma Nazionale per un Nucleare Sostenibile (PNNS), che sta iniziando i lavori in questi giorni, ha proprio l'obiettivo finale di elaborare e proporre una Strategia nazionale ed un Piano di implementazione a medio e lungo termine. Tutti gli attori industriali, accademici, le utilities e le associazioni riuniti in sette gruppi di lavoro si concentreranno sul definire quali sono i passi e le risorse necessarie per favorire e permettere il ritorno dell'energia nucleare in Italia. Si tratta di riattivare il quadro legislativo e istituzionale necessario per permettere investimenti nucleari in Italia, sia da parte di soggetti privati che, forse, pubblici.

L'Italia ha detto no al nucleare ben due volte: la prima volta con il referendum che seguiva l'incidente di Chernobyl e nel 2011 tre mesi dopo l'evento di Fukushima. Questo vostro progetto potrà, secondo lei, consentire all'opinione pubblica di riconciliarsi per così dire con il nucleare, andando a lavorare sulla sua accettabilità sociale?

Sarà necessario fornire supporto all'opinione pubblica per comprendere a pieno la portata dell'energia nucleare e della nuova tecnologia su cui stiamo lavorando. Vediamo già oggi un forte sostegno dai giovani, preoccupati per la decarbonizzazione e che hanno un atteggiamento più aperto verso l'energia nucleare. Riconoscono infatti la narrazione distorta di questi decenni e sono spesso loro a spiegare una nuova prospettiva sul nucleare e sulle nuove tecnologie con molte iniziative sul territorio ed online.

Personalmente sono molto motivato a implementare i nostri progetti anche in Italia e spero che la costruzione di nuove centrali nucleari tornerà all'attenzione dell'agenda italiana.

Il primo incontro dedicato alla PNNS il 21 settembre scorso a Roma è sicuramente un passo nella giusta direzione.

“ Per il ritorno del nucleare in Italia sarà necessario fornire supporto all'opinione pubblica, ”



La sfida di ITER per l'energia sostenibile



Intervista con **Pietro Barabaschi**, direttore generale di ITER

Pietro Barabaschi è l'ingegnere italiano che dall'ottobre 2022 dirige ITER, l'International Thermonuclear Experimental Reactor in via di realizzazione a Cadarache, nel Sud della Francia. Si tratta del più importante progetto sulla fusione nucleare a livello mondiale, nel quale sono coinvolti oltre all'Unione Europea, Stati Uniti, Russia, India, Giappone, Corea del Sud e Cina, con l'obiettivo di dimostrare la fattibilità dell'energia da fusione. A lui abbiamo chiesto di fare il punto sullo stato dell'arte di quest'opera strategica che segna una pietra miliare sul cammino verso l'energia delle stelle'. In particolare, quale è il bilancio dal suo arrivo alla guida di ITER?

Il bilancio è senz'altro positivo anche se con un po' di fatica, perché ci sono stati diversi problemi. Uno di questi – e ci stiamo mettendo mano – riguarda la preparazione dell'assemblaggio di ITER, un'operazione particolarmente complessa. Un'altra criticità riguarda l'organizzazione del progetto, su cui è stato necessario intervenire, ma adesso mi sembra che stiamo reagendo bene alle difficoltà. Quindi non mi lamento dei risultati.

Quali sono le maggiori sfide in questa fase?

Stiamo attraversando una fase critica che riguarda la preparazione di un nuovo programma e una nuova scaletta dei tempi di assemblaggio. Un altro tema di rilievo riguarda la relazione con l'autorità di sicurezza: quando sono arrivato ho trovato una situazione molto critica ma adesso abbiamo impostato un nuovo rapporto, totalmente diverso, basato sulla massima trasparenza. Così possiamo muoverci con più agilità e trovare soluzioni per l'assemblaggio, risolvendo i problemi da affrontare, nello specifico il montaggio del Vacuum Ves-

sel, la camera toroidale entro la quale sarà confinato il plasma della reazione di fusione, che è la nostra sfida numero 1.

Nel "cantiere" di ITER lavorano centinaia di scienziati e ricercatori dell'Unione europea, più Svizzera, Cina, Corea del Sud, Giappone, India, Russia e USA. Le recenti tensioni geopolitiche hanno in qualche modo influenzato l'andamento dei lavori?

La scienza è più forte delle tensioni internazionali. E il caso di ITER lo dimostra, perché non si tratta solo di un progetto scientifico, ma di un esempio di collaborazione fra scienziati e ingegneri che, fortunatamente, lasciano il loro passaporto all'ingresso. Siamo una grande famiglia e non mi riferisco solo al team molto coeso che opera a Cadarache, ma in generale all'intero progetto. Certo, possono esserci frizioni fra persone ma le eventuali diversità di vedute per motivi tecnici non c'entrano niente con le tensioni geopolitiche al di fuori del progetto. ITER, quindi, è un buon esempio per tutti.

“La scienza è più forte delle tensioni internazionali,”

La fusione nucleare è considerata come un processo sostenibile anche per l'assenza di scorie. Quali sono i tempi previsti per la produzione di energia con questa tecnologia?

Su questo punto ho sentito le opinioni più disparate, ma oggi, realisticamente, penso che sia impossibile fare previsioni. Quando ho iniziato a lavorare mi è stato detto che avrei operato con DEMO. Adesso è irrealistico

pensarlo. Non penso, francamente, che si tratti di 2 o tre decenni o, come alcuni dicono, addirittura di un decennio. Faccio fatica a crederlo. È vero che, come sempre nella ricerca, possono esserci delle grandi invenzioni e auspichiamo di poter contare nei “breakthrough”, ma se guardo alla strada che abbiamo davanti, è difficile fare una previsione realistica sui tempi per arrivare a utilizzare la fusione per produrre energia in modo economico e sostenibile. Quando questo succederà non lo so. Potrei dirle trent'anni, quarant'anni, ma non penso che sia responsabile fare una previsione del genere perché, ad oggi, è impossibile fare stime attendibili.

Secondo lei la fusione può essere la risposta alle preoccupazioni per il cambiamento climatico o i tempi sono troppo lunghi?

È una soluzione, certamente non immediata ma a lungo termine. Per questo insisto sul fatto che bisogna moderare le aspettative, perché creare aspettative nell'opinione pubblica e nei nostri policy maker è sbagliato. La fusione può dare risposte nel lungo termine, ma il cambiamento climatico non è qualcosa che si manifesterà fra 50 anni. Il problema è adesso e richiede soluzioni nell'immediato con le tecnologie che abbiamo effettivamente disponibili.

“Dalla ricerca sulla fusione moltissime ricadute positive,”

Che cosa risponderebbe a quanti affermano che di fusione nucleare si parla ormai da decenni, ma l'obiettivo sembra rimanere ancora lontano?

Rispondo che hanno ragione. Ma dico anche che abbiamo fatto tanti sforzi per la fusione che vale la pena di continuare. Gli investimenti fatti sono importanti, ma ben di più lo sono, ad esempio, i costi della World Cup in Medio Oriente o la spesa per i combustibili fossili. Quindi, secondo me, vale comunque la pena di continuare nella strada di ricerca e nel programma di innovazione per cercare di trovare una soluzione alla fusione. Siamo davanti ad un'attività di ricerca all'avanguardia con tantissimo valore aggiunto che ha un'enormità di

ricadute positive sulla società che vanno al di là della ricerca stessa. Quindi, dal mio punto di vista, bisogna continuare a investire in questa direzione ed è molto bello che vi siano tante iniziative private e pubbliche che stanno nascendo nel mondo. Io sono contento che ci siano pur sapendo che alcune magari non andranno bene, ma questo succede in un innovation program. Si fanno tante prove e poi qualcosa può andare male.

“Il nucleare è necessario per eliminare la dipendenza dalle fonti fossili,”

Sono in molti a sostenere la necessità – in attesa che si arrivi alla fusione – di puntare alla fissione attraverso dei mini-reattori per un nuovo nucleare pulito e sostenibile. Lei come giudica la tecnologia della fissione?

Per forza di cose dobbiamo eliminare la nostra dipendenza dai combustibili fossili e quindi l'utilizzo dell'energia nucleare convenzionale è necessario. Ma il vero problema, secondo me, sono i tempi e i costi. In Europa siamo rimasti indietro rispetto a realtà come quella cinese dove un reattore ad acqua pressurizzata viene costruito nell'arco di 5, 6 anni mentre da noi ci vogliono 3 volte tanto, con costi che naturalmente sono molto maggiori.

Che cosa pensa degli Small Modular Reactors? Siamo alla vigilia di una svolta?

In ambito nucleare, è bello innovare, e la tecnologia dei reattori modulari può essere in certe circostanze una soluzione che ha diversi vantaggi. Quindi sì ai piccoli reattori però dobbiamo accelerare sulla costruzione di quelli tradizionali per i quali abbiamo le tecnologie necessarie e siamo già molto avanti in termini di sicurezza. Ritengo che sia più conveniente costruire più reattori nucleari con le tecnologie attuali: il problema è che ad oggi ci vogliono vent'anni per costruire un reattore nucleare e i costi triplicano: occorre accorciare i tempi facendo uno sforzo a livello europeo, comunitario e nazionale.



“Il nucleare da fissione è auspicabile anche in Italia,,

Veniamo al nostro Paese: secondo lei il nucleare è un'opzione realisticamente percorribile oppure sarebbe necessario ripartire da zero?

Purtroppo, in Italia l'industria capace di costruire reattori nucleari è stata smantellata. Ripartire, quindi, è tecnicamente complesso ma sono sicuro che sia fattibile nel nostro come in altri Paesi europei, perché non partiamo da zero. Non c'è da scoraggiarsi: certo occorre grande attenzione e non solo da parte del governo ma a tutti i livelli dell'organizzazione del sistema Italia e del sistema europeo, perché l'Italia non è isolata. Detto questo ritengo che il nucleare sia un'opzione non solo possibile ma anche auspicabile e sono molto contento che se ne parli. Sono un po' preoccupato sulle tempistiche perché non è che ci sia poi così tanto tempo. Anzi,

diciamo che siamo già parecchio in ritardo. Però, meglio tardi che mai.

Sono in molti ad affermare che, se facessimo gli investimenti necessari nelle tecnologie per le fonti rinnovabili e per sistemi di accumulo innovativi il nucleare non servirebbe. Lei cosa ne pensa?

Io rispetto le opinioni divergenti ma, secondo me, non è vero che il nucleare non servirebbe se si facessero molte più rinnovabili e sistemi di accumulo. Credo sia bene evitare di “puntare tutto su un solo cavallo”, in particolare modo quando ci sono una serie di dubbi e di punti di vista diversi. A mio parere va fatto tutto: vanno costruiti più reattori nucleari e, nel contempo, bisogna investire di più nella ricerca e nella realizzazione di più impianti di produzione da fonti rinnovabili, laddove economicamente possibile. Va fatto tutto su tutti i fronti. Tutto è necessario. Poi, se fra cinquant'anni avremo un eccesso di produzione di energia elettrica, cosa che dubito, tanto meglio. Non credo sarà stato un errore.

Il progetto ITER

L'impianto ITER acronimo di International Thermonuclear Experimental Reactor, è un reattore sperimentale in costruzione a Cadarache, nel sud della Francia. Si tratta di un progetto unico nel suo genere per le dimensioni e i soggetti coinvolti, ovvero un consorzio internazionale di sette partner: Unione Europea, Cina, India, Giappone, Russia, Corea del Sud e Stati Uniti d'America. L'investimento finanziario è di quasi 20 miliardi di euro in vent'anni.

Obiettivo primario di ITER è di costruire la macchina per la fusione più grande al mondo per dimostrare la fattibilità scientifica e tecnologica della produzione di energia da fusione nucleare per produrre energia pulita, sicura e in quantità illimitata, grazie a un “burning plasma” in grado di riprodurre le reazioni che avvengono nel sole e in ogni stella. Ma la realizzazione del progetto è anche terreno fertile per lo sviluppo di nuove tecnologie e per lo studio di materiali alternativi che trovano diretta applicazione in altri settori come l'aerospaziale (vedi la tecnologia del vuoto e del criogenico), la medicina e la biologia.

ITER vede una forte partecipazione italiana perché gran parte della tecnologia è fornita da aziende e ingegneri nucleari italiani.

I lavori di costruzione sono iniziati nel 2007 a Cadarache, nel sud della Francia, in un sito di 42 ettari che ospita oggi il tokamak, diversi edifici, infrastrutture e impianti di alimentazione. ITER è uno dei progetti ingegneristici più complessi della storia, in quanto richiederà milioni di componenti per assemblare il reattore gigante che avrà un peso di 23.000 tonnellate.

Il nucleare può giocare un ruolo fondamentale per la decarbonizzazione



Intervista con **Massimo Garribba**, vicedirettore generale della DG Energia

Da luglio del 2020 Massimo Garribba è vicedirettore generale responsabile del coordinamento delle politiche Euratom presso la direzione generale dell'Energia (Ener) della Commissione Europea. Ha un lungo curriculum nel settore nucleare che lo ha visto, fra l'altro, Direttore per l'energia nucleare, la sicurezza e ITER sempre alla DG Energia. In virtù della sua esperienza e di questi incarichi gli abbiamo chiesto di parlare di nucleare e, in particolare, di come vede il futuro di questa fonte energetica in Europa?

Mi occupo di questioni legate al nucleare da diversi decenni e ho potuto osservare importanti sviluppi tecnologici e politici, nonché diversi cambiamenti nella percezione pubblica delle tecnologie nucleari.

Da circa un anno è emerso un nuovo livello di ambizione nel settore dell'energia nucleare, anche alla luce dell'attuale contesto politico ed economico, sia nell'UE che nel resto del mondo. Ci troviamo di fronte ad una perturbazione del mercato globale dell'energia causata dall'aggressione russa contro l'Ucraina, che mette in evidenza la questione della sicurezza dell'approvvigionamento energetico e dell'accessibilità economica dell'energia. L'UE ha risposto a questa sfida molto rapidamente attraverso il piano REPowerEU, che ha tra le sue priorità la diversificazione dell'approvvigionamento energetico.

“La crisi energetica ha rafforzato la determinazione a diversificare l'approvvigionamento,,

¹ Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale europeo, al Comitato delle regioni e alla Banca europea per gli investimenti — Una strategia quadro per un'Unione dell'energia resiliente, corredata da una politica lungimirante in materia di cambiamenti climatici, COM/2015/080 final.

Allo stesso tempo, promuovendo il risparmio energetico e la produzione di energia pulita, l'UE non ha vacillato nel suo impegno a favore di obiettivi climatici ambiziosi, in linea con l'accordo di Parigi. La crisi energetica ha in effetti rafforzato la nostra determinazione a ridurre le emissioni e realizzare la transizione verso un sistema energetico pulito. Ci stiamo inoltre adoperando per rafforzare la competitività europea, anche nell'industria nucleare, occupandoci delle tecnologie più recenti, come i mini reattori modulari (Small Modular Reactors) o la fusione nucleare, e affrontando anche sfide quali la disattivazione degli impianti nucleari e la gestione dei rifiuti radioattivi.

Il nucleare che ruolo potrebbe svolgere nella transizione energetica?

Tutte le fonti a bassa emissione di carbonio, compresa l'energia nucleare, sono necessarie per conseguire l'obiettivo dell'UE di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. La Commissione si adopererà per garantire che all'interno dell'UE, e anche al di là delle nostre frontiere, la sicurezza nucleare rimanga di primaria importanza e che vengano applicati i più elevati standard di sicurezza nucleare, salvaguardie e radioprotezione.

Come valuta la tecnologia di fissione? Ed è possibile tenere un dibattito nucleare "non emotivo"?

L'UE sta definendo la propria politica energetica per rimanere tecnologicamente neutrale, in linea con gli obiettivi dell'Unione dell'energia ¹ e con il nostro forte impegno verso il conseguimento degli obiettivi di de-



carbonizzazione.

Spetta tuttavia a ciascuno Stato membro decidere se includere o meno il nucleare nel proprio mix energetico nazionale. Il dibattito sul nucleare è infatti molto vivo tra gli Stati membri dell'UE, ma anche al loro interno.

I fatti parlano da soli. Attualmente il 22 % dell'energia elettrica nell'UE proviene da centrali nucleari - basate, ovviamente, sulla fissione nucleare. Pertanto, per il prossimo futuro, questa tecnologia rimane una parte indispensabile dei progressi dell'UE verso la decarbonizzazione e la sicurezza dell'approvvigionamento energetico.

Per quanto riguarda la Commissione, tutti gli Stati membri dell'UE sono vincolati dalla legislazione di riferimento dell'UE e dell'Euratom e si impegnano a rispettare i più elevati standard di sicurezza nucleare. In base alla nostra esperienza e valutazione, l'UE dispone del quadro normativo regionale più esteso al mondo in materia di sicurezza nucleare.

“Le tecnologie nucleari avanzate offrono soluzioni interessanti,”

L'energia nucleare sta nuovamente crescendo in Europa e nel resto del mondo. Ad esempio, Francia, Polonia e Bulgaria si stanno concentrando su questa soluzione e, di recente, 12 Paesi hanno aderito all'Alleanza nucleare per sostenere questa tecnologia per decarbonizzare e ridurre la dipendenza energetica. Anche l'India, la Cina e gli Stati Uniti prevedono di investire nell'energia nucleare; siamo alla vigilia di un punto di svolta?

Da una recente analisi dell'Agenzia internazionale per l'energia (IEA) ² sulla produzione di energia a zero emissioni nette fino al 2050 è emerso che la Cina è chiaramente all'avanguardia nell'espansione dell'energia nucleare. L'analisi mostra anche la Francia e la Polonia tra i Paesi con strategie nucleari significative.

Come i lettori sapranno, la Germania ha deciso di cessare l'attività delle centrali nucleari sul suo territorio. Nel contempo, quest'anno due nuovi reattori sono stati collegati alla rete: Olkiluoto-3 in Finlandia e Mochovce-3

in Slovacchia. In altri Stati membri, come la Bulgaria, la Francia o la Svezia, la politica sembra essere orientata verso l'estensione dell'uso del nucleare. La Polonia sta avviando il proprio percorso nucleare.

Tenendo conto delle informazioni ricevute dagli Stati membri dell'UE, l'analisi della Commissione prevede che la capacità installata di energia nucleare nell'UE rimarrà più o meno stabile. La Commissione sta monitorando il mercato e sta preparando un nuovo studio sul futuro sviluppo dell'ecosistema nucleare nell'UE.

Molti sostengono la necessità di puntare su nuovi modelli a fissione come i mini-reattori e reattori raffreddati a piombo per un nucleare pulito e sostenibile. A suo parere, le moderne tecnologie consentirebbero percorsi di rinascita nucleare sostenibili, sicuri ed economici?

Le tecnologie nucleari avanzate offrono certamente soluzioni interessanti per il fabbisogno energetico dei Paesi che scelgono di utilizzarle in futuro. Circa 10 Stati membri dell'UE stanno attualmente valutando la fattibilità economica, la sicurezza e la sostenibilità delle nuove tecnologie nucleari, in particolare dei mini-reattori modulari (SMR). Tali Paesi considerano gli SMR una tecnologia che può contribuire in particolare alla decarbonizzazione di alcuni dei settori più difficili da decarbonizzare, come la produzione di acciaio. Forniamo finanziamenti a sostegno della ricerca in materia di sicurezza e dell'innovazione in questo settore.

Nel contempo, va sottolineato che questa tecnologia avanzata di reattori non è ancora stata implementata o sottoposta a controllo normativo in nessuna parte dell'UE. La maggior parte della nostra attenzione è pertanto rivolta ai reattori nucleari tradizionali e la Commissione si sta adoperando per agevolare lo sviluppo di progetti in grado di contribuire alla transizione verde già nel prossimo decennio.

Dal giugno 2021 la Commissione collabora con il cosiddetto pre-Partenariato europeo sugli SMR, insieme ai rappresentanti del settore industriale, della ricerca e delle autorità di regolamentazione in materia di sicurezza nucleare, al fine di esaminare le azioni necessarie per introdurre gli SMR nell'UE all'inizio degli anni 2030.

² <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.

“Per gli SMR serve un’Alleanza industriale europea,,

In occasione del recente Forum europeo sull'energia nucleare (the European Nuclear Energy Forum) tenuto a Bratislava, la Commissaria europea per l'Energia si è impegnata a collaborare con i suoi colleghi commissari per la creazione di un'Alleanza industriale europea sugli SMR nel più breve tempo possibile, al fine di rendere ciò possibile negli Stati membri che decidono di puntare sull'energia nucleare come parte del loro mix energetico e di sfruttare il potenziale degli SMR per i loro sforzi di decarbonizzazione.

Qual è il ruolo di Euratom in questo contesto? Più specificamente, cosa è previsto nel programma di lavoro del programma Euratom di ricerca e formazione 2023-2025 adottato dalla Commissione Europea in questo settore?

Il programma Euratom di ricerca e formazione si concentra sul miglioramento continuo della sicurezza e delle salvaguardie nucleari, della gestione dei rifiuti radioattivi e della radioprotezione. Anche la formazione e l'istruzione sono tradizionalmente parte integrante del programma.

Tra le priorità del programma di lavoro 2023-2025, la ricerca in materia di sicurezza nucleare sarà rafforzata attraverso il Partenariato europeo sui materiali nucleari, cofinanziato dall'UE. Il partenariato riunirà enti europei che hanno un mandato nazionale per la ricerca nel campo della scienza dei materiali e per la gestione dei materiali nucleari. Analogamente, la gestione dei rifiuti radioattivi e del combustibile esaurito sarà affrontata anche attraverso il cofinanziato Partenariato europeo per la gestione dei rifiuti radioattivi e le relative azioni supplementari. Inoltre, stiamo ampliando la ricerca sulle applicazioni non energetiche delle radiazioni ionizzanti e migliorando l'istruzione, la formazione e l'accesso alle infrastrutture di ricerca. Verrà inoltre prorogato un Partenariato europeo cofinanziato per la ricerca in materia di radioprotezione e il rilevamento delle radiazioni ionizzanti, istituito nel programma di lavoro per il 2021.

Il programma di lavoro Euratom pone una forte enfasi sullo sviluppo delle competenze necessarie nel settore dell'energia nucleare. L'Europa ha un ruolo di primo piano a livello mondiale per quanto riguarda determinate abilità e competenze, in particolare la sicurezza nucleare, la disattivazione degli impianti nucleari e la gestione dei rifiuti, nonché un livello avanzato di protezione dalle radiazioni. È nel nostro interesse mantenere queste competenze.

L'importanza della ricerca e della formazione è evidente anche per quanto riguarda le nostre relazioni con gli Stati membri nell'ambito dell'"Alleanza nucleare". L'Alleanza, e i singoli Stati membri dell'UE rappresentati al suo interno, sostengono correttamente che il mantenimento delle competenze e delle conoscenze dell'industria nucleare europea dovrebbe essere una delle principali priorità dell'UE.

“L'Europa ha un ruolo di primo piano per la sicurezza nucleare,,

Si sostiene che, se si effettuassero i necessari investimenti nelle tecnologie rinnovabili e nei sistemi di stoccaggio innovativi, l'energia nucleare non sarebbe necessaria. Che cosa ne pensa? Qual è il ruolo del nucleare nel mix energetico?

Nell'ambito del Green Deal europeo, le energie rinnovabili sono un pilastro della transizione verso l'energia pulita. L'UE è già leader mondiale in materia di energie rinnovabili per quanto riguarda lo sviluppo e la diffusione delle tecnologie. Stiamo tuttavia cercando di rafforzare ulteriormente la nostra competitività sui mercati mondiali delle energie rinnovabili.

Investire nelle tecnologie rinnovabili e nei sistemi di stoccaggio innovativi è una delle priorità dell'Europa per garantire il conseguimento dei nostri obiettivi di transizione energetica. Occorre tuttavia rimanere realistici, poiché l'energia resterà una risorsa scarsa e avremo bisogno di tutte le tecnologie a basse emissioni di carbonio praticabili. Questa è la base del principio di neutralità tecnologica della Commissione.

La Commissione prevede un aumento sostanziale del consumo di energia elettrica; pertanto, dobbiamo garantire che venga prodotta una quantità sufficiente di tale fonte di energia. Oggi ci affidiamo in modo signi-



ficativo all'energia nucleare, con quasi un quarto dell'energia elettrica dell'UE prodotta da centrali nucleari. Per soddisfare il nostro fabbisogno energetico a basse emissioni di carbonio, è pertanto necessario garantire la continuità degli investimenti negli impianti nucleari attuali e futuri.

“L'Italia deve accelerare il passaggio a fonti energetiche a basse emissioni di carbonio,”

E l'Italia? A suo parere, il nucleare è un'opzione realistica?

Nel 2021, il 42% dell'energia nel mix elettrico italiano proveniva da combustibili fossili. Sebbene questa cifra sia stata inferiore nel 2022 e anche quest'anno, l'Italia deve accelerare il passaggio a fonti energetiche a basse emissioni di carbonio, in linea con le priorità politiche del Green Deal europeo.

L'UE è a conoscenza delle riflessioni sull'energia nucleare in Italia. Non spetta tuttavia alla Commissione formulare osservazioni al riguardo. Organizzazioni come l'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA) saranno probabilmente coinvolte in una valutazione scientifica delle possibili tecnologie per il futuro mix energetico in Italia e i leader politici dovranno certamente discutere con tutte le parti interessate prima di prendere qualsiasi decisione.

Parliamo di fusione. A suo parere, può essere una risposta alle preoccupazioni in materia di cambiamenti climatici?

La fusione può cambiare il panorama della produzione di energia dopo il 2050 e contribuire in modo significativo all'obiettivo della neutralità climatica e alla sicurezza dell'approvvigionamento energetico. Per questo motivo, da decenni l'UE sostiene lo sviluppo della tecnologia della fusione.

Abbiamo obiettivi chiari, definiti nell'Accordo di Parigi e nell'ambito della stessa UE, come il Green Deal eu-

ropeo e il suo pacchetto di proposte legislative "Pronti per il 55 %". Poiché la reazione di fusione di per sé non emette gas a effetto serra nell'atmosfera e le emissioni di CO₂ dei reattori a fusione sono trascurabili, la fusione potrebbe fornire un contributo importante a tale politica di azzeramento delle emissioni nette nel lungo periodo.

Che cosa risponderebbe a coloro che affermano che la fusione nucleare è stata annunciata da decenni, ma rimane lontana?

Effettivamente, per arrivare alla produzione commerciale di energia elettrica basata sulla fusione sono necessari alcuni ulteriori passi in ambito: scientifico, tecnologico, normativo e industriale.

Insieme ai nostri partner internazionali stiamo costruendo in Francia il più grande e avanzato dispositivo sperimentale di fusione del mondo: ITER. Dimostrerà la fattibilità tecnologica e scientifica della fusione come fonte di energia. ITER dovrà inoltre dimostrare che la tecnologia utilizzata può essere estesa ad un reattore, aprendo così la strada a centrali dimostrative di fusione.

“La fusione può cambiare il panorama della produzione di energia dopo il 2050,”

Di recente si sono registrati sviluppi positivi e incoraggianti nel settore della fusione. Il 23 ottobre il tokamak JT-60SA, costruito in Giappone grazie a una stretta collaborazione tra l'UE e il Giappone, ha realizzato il primo plasma. Sono stati annunciati, a livello mondiale, altri progressi nella fusione, come i recenti risultati di accensione della fusione presso la National Ignition Facility (California, Stati Uniti). Anche l'Italia è molto attiva nella ricerca sulla fusione e vorrei sottolineare l'importanza del lavoro che ENEA sta compiendo per costruire e mettere in funzione l'impianto dimostrativo Divertor Tokamak, un esperimento di fusione in costruzione presso il Centro di Ricerca di Frascati.

La fusione arriverà prima di quanto si pensi



Intervista con **Davide Malacalza**, Presidente di ASG Superconductors

Dottor Malacalza con ASG siete leader nella realizzazione di componenti per il reattore ITER. Da che cosa nasce questo vostro impegno nel settore della fusione nucleare?

Le ragioni sono un mix di storia, know-how e visione imprenditoriale al servizio dell'innovazione. Quando nel 2001 abbiamo rilevato come azionisti privati l'unità magneti di Ansaldo, avevamo la visione di dover mantenere e sviluppare le competenze maturate nella tecnologia superconduttiva al servizio di ricerca e fusione. Al tempo stesso ci siamo posti l'obiettivo, molto ambizioso per l'epoca, di investire in materiali, sistemi e applicazioni per portare queste tecnologie e i loro benefici più vicini alla vita di tutti i giorni. Devo dire che, parlando di fusione, i magneti e le lavorazioni ad alto contenuto tecnologico realizzati per ITER ma anche Wendenstein W7X, Jet, JT60SA, senza trascurare che ora stiamo lavorando su DTT, rappresentano una bella storia di successo, in molti di questi casi proprio con ENEA. Non bisogna dimenticare poi le ricadute tecnologiche legate alla partecipazione a questi progetti: anche per questo siamo confidenti che il nostro superconduttore MgB2 possa portare innovazione "cost effective" in applicazioni legate alla trasmissione di energia o nel medicale.

“Creare un circuito virtuoso tra mondo della ricerca, investimenti dei privati e l'evoluzione di materiali e competenze,”

Secondo alcuni critici la fusione sarebbe una sorta di chimera, una tecnologia annunciata più volte ma dalla realizzazione ancora molto lontana. Lei che cosa ne pensa?

La fusione non solo si farà ma probabilmente, come testimoniano gli investimenti, la nascita di molte start up, prevalentemente americane (ma anche europee come nel caso di Gauss), unite al rinnovato ritorno di interesse sul tema da parte di politica e opinione pubblica, arriverà prima di quanto si pensi. Sono convinto che tutto questo accadrà se saremo capaci di creare un circuito virtuoso tra mondo della ricerca, investimenti dei privati e l'evoluzione di materiali e competenze. In ogni caso la fusione, quando arriverà, sarà anche e soprattutto grazie al lavoro e agli investimenti iniziati più di mezzo secolo fa e di coloro che ci hanno creduto e continuano a lavorarci oggi, pur sapendo che i benefici concreti arriveranno alle prossime generazioni. Fare innovazione e industria è stimolante ma impegnativo, farlo su programmi a venti o più anni richiede coraggio, visione strategica, competenza e spirito di abnegazione. Parlando di industria occorre anche ricordare che nella fusione c'è tutto ed è spinto al massimo: fisica, calcoli ingegneristici, manifattura, scienza dei materiali, tecnologia criogenica, opere civili e così via. Realizzare "una stella sulla Terra" è una sfida paragonabile ad andare nello spazio, occorre tenerne conto quando si criticano tempi e costi.

“Realizzare 'una stella sulla Terra' è una sfida paragonabile ad andare nello spazio,”



Si parla molto di 'nucleare sostenibile' riferendosi ad alcune nuove tecnologie relative alla fissione. Secondo lei è possibile utilizzare quest'espressione e a che cosa potrebbe essere riferita?

Credo che valga quando stabilito dalla "Tassonomia Europea" che attribuisce al nucleare, insieme al gas, un ruolo chiave in ottica green. Ho letto in questi giorni una dichiarazione molto interessante proprio del vostro Ing. Dodaro su Repubblica circa il mix energetico pulito del futuro che passerà da rinnovabili e nucleare. Io credo che, se vogliamo davvero innovare verso una concreta decarbonizzazione limitando davvero le fossili, la strada sia obbligatoriamente questa. Il fatto che ci siano iniziative di investimento e sviluppo di tecnologie nucleari a fissione di nuova generazione, come newcleo ad esempio, per citarne una, è un altro fatto che fa ben sperare. Vedo anche che in molte nazioni europee le cose si muovono velocemente. Il nucleare renderà sostenibile, nelle sue varie declinazioni, e mi riferisco quindi sia a fusione che fissione, il mix energetico del futuro dei Paesi più evoluti.

“Il nucleare renderà sostenibile il mix energetico del futuro,”

In Italia in questi mesi si è tornati a discutere di nucleare da fissione. Secondo lei siamo alla vigilia di una svolta?

In Italia si è vietato il nucleare a seguito di un referendum figlio di un'epoca ben precisa e che ancora adesso dispiega i suoi effetti. Occorre guardare al passato per migliorare il futuro e, quindi, una considerazione mi permetto di farla: nonostante tutto questo abbiamo in Italia e nel mondo una serie rilevante di aziende, successi, competenze, ricercatori e manager di successo che occupano posti apicali in prestigiosi Centri e Istituti di ricerca italiani e internazionali. Inoltre, le aziende italiane hanno continuato a lavorare e sviluppare know how e "saper fare" nel settore nucleare, andando a misurarsi obbligatoriamente sui mercati internazionali. Immaginiamo quanto valore scientifico ma anche industriale si potrebbe creare e liberare se ci fosse una svolta.

Come ASG avete partecipato al primo incontro della piattaforma nazionale per il nucleare sostenibile?

La strategia, le dichiarazioni e le azioni del Ministro del MASE Gilberto Pichetto Fratin mi sembrano molto positive, pragmatiche e razionali in tema energetico. E l'iniziativa di riunire le aziende italiane del settore nucleare a Roma mi pare un "calcio d'inizio" per la ripartenza nella direzione giusta.

“La strategia, le dichiarazioni e le azioni del Ministro Pichetto Fratin mi sembrano molto positive,”

Quale potrebbe essere il possibile ruolo del nucleare nel nostro mix energetico?

Sotto il profilo tecnico ci sono persone più titolate di me a parlare di concetti quali la densità energetica e il ruolo indispensabile del nucleare a supporto della stabilità della rete, con un ruolo pur sempre importante delle rinnovabili e con un progressivo abbandono delle fossili. Quello che forse mi sento di aggiungere è di tenere conto nella programmazione dell'industria italiana: farebbe bene allo sviluppo economico del Paese con il vantaggio anche di poterle sviluppare e trattenere o riportare in Italia i cervelli di giovani fisici, manager e ingegneri che lavorano all'estero. Non dimentichiamo poi che "sostenibile" dovrà essere tutta la filiera energetica: molte tecnologie e materiali innovativi, come i superconduttori ad esempio, avranno un ruolo fondamentale nel supportare questo cambio di paradigma. Penso ai ciclotroni per il nucleare, ai magneti per la fusione, ai sistemi di accumulo, o in ultima analisi anche a innovativi cavi di trasmissione dell'energia prodotta senza dispersioni e riducendo il footprint. Il nucleare è quindi un'occasione per far ripartire e rifiorire competenze scientifiche e industriali in cui l'Italia ha grande potenziale e molto da dire, grazie al lavoro di enti e Istituti come ENEA e una serie di aziende private che, non per caso, ottengono da decenni commesse nel mondo.

Il nuovo nucleare è necessario per la transizione ecologica



Intervista con **Nicola Monti**, AD di Edison

Nel marzo 2023 Edison ha annunciato l'avvio di "una riflessione strategica" insieme ad Ansaldo Energia, Ansaldo Nucleare, EDF e Nuward per sviluppare una filiera del nucleare in Italia. E, successivamente, in occasione della presentazione della strategia aziendale al 2030 e delle ambizioni al 2040, l'AD Nicola Monti ha dichiarato di voler realizzare in Italia due small modular reactor (SMR) entro il 2040. A Monti - che è in Edison dal 1999 e dal 2019 guida la società energetica (che quest'anno celebra i 140 anni dall'avvio delle sue attività a Milano e dalla prima illuminazione del Teatro alla Scala nel 1883) - abbiamo chiesto il perché questo obiettivo, se siamo ad una svolta per quanto riguarda il nostro Paese e se ci sono i presupposti di accettabilità sociale.

Le ragioni che ci portano a considerare il nuovo nucleare sono molteplici. Ci dobbiamo chiedere come vogliamo che sia il nostro sistema energetico tra 20-30 anni. Se consideriamo che maggiore indipendenza, sicurezza e adeguatezza del sistema energetico siano, insieme all'obiettivo della neutralità climatica, i cardini del piano energetico nazionale e della transizione ecologica, allora l'energia nucleare ha un ruolo determinante in questo processo. Lo sviluppo delle sole energie rinnovabili non è sufficiente per realizzare gli obiettivi della transizione ecologica e della sicurezza energetica. Edison è impegnata nella costruzione di un futuro rispettoso dell'ambiente, ma anche economicamente sostenibile per il sistema e più efficiente per tutti gli utenti.

A che punto è la ricerca?

La ricerca ha fatto notevoli passi avanti e il nuovo nucleare ha profili di sicurezza molto maggiori rispetto al passato. Gli SMR sono più piccoli, modulari, hanno

un basso impatto ambientale e ridotti costi di realizzazione perché possono essere prefabbricati. Il nuovo nucleare, inoltre, può garantire una quota di energia elettrica programmabile a costi fissi e competitivi nel lungo termine e, in questo senso, è complementare alla crescita delle tecnologie rinnovabili, in larga parte non programmabili, e assicura efficienza al sistema. Secondo un recente sondaggio di SWG, oltre la metà della popolazione italiana è a favore del nucleare, soprattutto se è effettivamente una risorsa che può portare a ridurre la spesa energetica.

“Lo sviluppo delle sole energie rinnovabili non basta per realizzare la transizione ecologica,”

Nel caso di un eventuale ritorno al nucleare per l'Italia si tratta di ripartire da zero, oppure no?

L'Italia ha cominciato a produrre energia nucleare negli anni '60, per poi abbandonarla dopo il referendum del 1987. Tuttavia, sono rimaste le competenze. E interi settori dell'economia e dell'industria hanno mantenuto un'alta specializzazione, che oggi mettono al servizio dei clienti all'estero, in Francia come in Gran Bretagna. Il ritorno al nucleare in Italia è quindi anche un'opportunità per dare una ricaduta al nostro sistema industriale in termini di investimenti, competenze e occupazione, oltre a garantire maggiore autonomia energetica. Al momento, nel panorama dei progetti in fase di sviluppo e della ricerca ci sono diversi esempi interessanti di tecnologia nucleare di generazione III+ e generazione IV, sviluppati in Europa, ai quali si ag-



giungono le cooperazioni nel campo della ricerca sulla fusione nucleare. La tecnologia degli SMR (Gen. 3+) è quella allo stadio più avanzato di sviluppo ed è attesa commercialmente a partire dal 2030.

“ Il ritorno al nucleare in Italia è un’opportunità,, ”

Quale potrebbe essere il ruolo del nucleare nel nostro mix energetico?

Secondo le nostre stime, lo scenario “ottimale” di decarbonizzazione del nostro Paese al 2050 conferma il ruolo fondamentale delle energie rinnovabili (principalmente fotovoltaico, eolico ed idroelettrico) che, adeguatamente supportate dai sistemi di accumulo di energia e dal potenziamento della rete, dovrebbero ricoprire circa l’80% del fabbisogno elettrico nazionale. Il restante 20% dovrà essere prodotto da fonti di energia programmabile di origine termoelettrica. Ipotizzando di costruire in Italia il primo impianto nucleare di piccola taglia (SMR) tra il 2030 e il 2035 e realizzando successivamente circa un impianto all’anno (15-20 cumulati al 2050), la produzione nucleare potrà ricoprire il 10% della domanda elettrica al 2050, mentre la restante quota potrà essere assicurata da centrali a gas equipaggiate con sistemi di cattura della CO₂.

Proviamo a delineare lo scenario ottimale.

A fronte dei circa 30 miliardi di euro di investimento stimati per il nucleare, lo scenario “ottimale” consente di risparmiare a livello di sistema, secondo le nostre stime, circa 400 miliardi di euro cumulati al 2050, con evidenti benefici per i consumatori, rispetto ad uno scenario di decarbonizzazione affidato al 100 per cento alle sole rinnovabili, che richiederebbe ingenti investimenti aggiuntivi in sistemi di stoccaggio, rete di trasmissione e surplus di produzione elettrica.

“ Le rinnovabili hanno un ruolo fondamentale,, ”

Si parla molto di ‘nucleare sostenibile’ riferendosi ad alcune tecnologie relative alla fissione. Qual è il suo punto di vista ed eventualmente quale potrebbe essere il ruolo della ricerca?

Il nuovo nucleare di generazione 3+, in particolare gli SMR, presenta alti profili di sostenibilità, perché produce energia senza rilasciare emissioni climalteranti, garantisce un ridotto consumo di suolo a fronte della potenza elettrica installata ed un consumo idrico equivalente a quello delle attuali centrali a gas. Sarà quindi possibile installare gli SMR in sostituzione delle attuali centrali a gas che stanno arrivando a fine vita utile, senza dover modificare la rete elettrica. Si tratta di strutture dal design compatto, per circa due terzi interrate. E le scorie che producono sono in gran parte trattabili come rifiuti speciali, mentre solo il 3% è ad alta intensità. Sono inoltre in grado di offrire una serie di servizi aggiuntivi alla produzione elettrica, come il teleriscaldamento, la produzione di vapore per l’industria e la produzione di idrogeno, ad esempio, che le rendono ideali per essere inserite in contesti quali i distretti industriali energivori del Nord Italia. La ricerca naturalmente può migliorare le prestazioni sotto molti aspetti. In particolare, ci attendiamo passi in avanti entro il 2040 per il nucleare di generazione 4, che potrebbe essere alimentato dai rifiuti nucleari delle generazioni precedenti, migliorando ulteriormente l’efficienza e la sostenibilità del sistema.

Nel marzo scorso Edison ha annunciato una lettera di intenti per lo sviluppo del nuovo nucleare, insieme a EDF, Ansaldo Energia e Ansaldo nucleare. Che cosa prevede?

Abbiamo firmato una lettera di intenti, con lo scopo di valutare potenziali cooperazioni industriali per lo sviluppo dell’energia nucleare sul mercato europeo ed italiano. In base all’intesa, Ansaldo Energia ed Ansaldo Nucleare, attraverso le proprie capacità ingegneristiche ed industriali, supporteranno lo sviluppo dei nuovi progetti nucleari del Gruppo EDF (SMR, EPR, EPR1200) e coopereranno con Edison per favorire le condizioni per lo sviluppo dell’energia nucleare in Italia.

Quali sono gli obiettivi?

Con questa intesa abbiamo avviato un gruppo di lavoro per approfondire la possibilità di riavviare la produzione nucleare in Italia, partendo dalla nuova tecnologia degli SMR. Il conflitto russo-ucraino e la crisi energetica innescatasi nel 2022 hanno reso evidente l'importanza di una strategia energetica di lungo periodo, che ponga al suo centro la sicurezza e l'indipendenza quali assi portanti. Il settore dell'energia compie necessariamente scelte di lungo termine che richiedono programmazione e che vanno predisposte per tempo. È proprio nell'emergenza del 2022 che abbiamo cominciato a maturare la nostra riflessione sul nuovo nucleare e sulla necessità di un confronto non ideologizzato su questa tecnologia, che permette di assicurare al contempo neutralità carbonica, diversificazione delle fonti di energia e competitività del tessuto industriale grazie a un costo dell'energia competitivo e pressoché fisso per la durata utile di un impianto.

“ Sul nucleare serve un confronto non ideologico, ”

Sono in molti ad affermare che, se noi facessimo gli investimenti necessari nelle tecnologie per le fonti rinnovabili e per i sistemi di accumulo innovativi, il nucleare non servirebbe. Lei che cosa ne pensa?

Le rinnovabili giocano un ruolo cardine nella decarbonizzazione del nostro Paese. Tanto che noi di Edison dedicheremo oltre la metà del nostro piano di investimenti (5 miliardi) al 2030 proprio alla crescita organica dell'installato green, per portare la capacità rinnovabile dagli attuali 2 GW a 5 GW, più un 1 GW ulteriore dedicato ai sistemi di accumulo e alla produzione di idrogeno. Tuttavia, l'intermittenza e la non programmabilità delle rinnovabili (producono quando ci sono le condi-

zioni meteo, non quando serve alla domanda elettrica) e la loro localizzazione prevalentemente al Sud, a fronte di una domanda elettrica concentrata per i due terzi al Nord, richiedono investimenti in sistemi di accumulo e rete tali da rendere economicamente più conveniente per il sistema il mantenimento di una quota di energia programmabile, in aggiunta alla produzione idroelettrica. L'energia nucleare è una fonte energetica che può sicuramente contribuire in modo efficiente e sostenibile a fornire quel contributo di energia programmabile. Siamo convinti che progettare in termini di ridondanza della rete e di diversificazione garantisca la più alta sicurezza possibile a livello di sistema e la maggiore efficienza sotto tutti i profili.

In campo nucleare si lavora anche alla fusione, la cosiddetta 'energia delle stelle' considerata dal mondo della ricerca una soluzione che consentirà di ottenere energia sicura, illimitata e sostenibile. Per altri si tratta di una tecnologia dalla realizzazione ancora molto lontana. A suo giudizio è così?

I progetti in corso nel campo della ricerca della fusione nucleare sono certamente molto interessanti ed è necessario investire sempre e continuamente in ricerca e innovazione, come anche voi stessi di ENEA state facendo con le sperimentazioni in corso in questi ambiti. Edison è da sempre impegnata nel progresso e crede in un approccio di neutralità tecnologica, cioè di apertura a tutte le possibili tecnologie utili alla realizzazione della transizione ecologica. Nel caso specifico della fusione nucleare, siamo tuttavia consapevoli che i tempi di sviluppo e di realizzazione sono molto lunghi e riguardano il 2050 e oltre.

“ Occorre continuare a investire sulla fusione, ”

L'impianto Top-Implart

TOP-IMPLART è un acceleratore lineare di protoni sviluppato da ENEA nell'ambito di un progetto finanziato dalla Regione Lazio per la realizzazione a livello prototipale di un sistema innovativo per la terapia di neoplasie tramite protoni. Tramite un'azione di trasferimento tecnologico verso l'industria ENEA ha promosso la realizzazione di versioni ingegnerizzate adeguate all'operazione in sede ospedaliera. La macchina, oltre che in ambito bio-medicale, è impiegata anche per applicazioni nel settore dell'aerospazio per lo studio degli effetti causati dalla esposizione alle radiazioni di sistemi biologici e componenti elettronici.

DOI 10.12910/EAI2023-066

di **Concetta Ronsivalle, Alessandro Ampollini, Maria Denise Astorino, Giulia Bazzano, Fabio Fortini, Paolo Nenzi, Vincenzo Surrenti, Emiliano Trinca**, Laboratorio Acceleratori di Particelle ed Applicazioni Medicali - ENEA

L'impianto TOP-IMPLART (Terapia Oncologica con Protoni – Intensity Modulated Proton Linear Accelerator for RadioTherapy) è basato su un acceleratore lineare di protoni a RadioFrequenza (RF) sviluppato da ENEA in collaborazione con l'Istituto Superiore di Sanità (ISS) e l'Ospedale Oncologico IFO (Istituti Fisioterapici Ospedalieri) Regina Elena di Roma nell'ambito di un progetto, finanziato dalla Regione Lazio, finalizzato alla realizzazione di un prototipo di acceleratore completamente lineare per protonterapia (radioterapia con protoni).

La protonterapia, una branca della più generale adroterapia (terapia con adroni, ossia con particelle pesanti, in particolare protoni e ioni carbonio) è una tecnica particolarmente efficace basata sul bombardamento da parte di protoni accelerati del tessuto neoplastico, che offre un radiotrattamento più preciso rispetto alla terapia mediante raggi gamma, essendo in grado di conferire una dose pressoché nulla agli organi sani circostanti la regione trattata.

Questo in virtù della particolare modalità di rilascio della dose da parte dei protoni, che cedono tutta la loro energia alla fine del percorso nel tessuto (picco di Bragg).

Una macchina innovativa

L'innovatività dell'acceleratore TOP-IMPLART rispetto ad altre macchine impiegate in adroterapia quali acceleratori circolari costituiti da ciclotroni o sincrotroni, risiede nella scelta di una sequenza di acceleratori lineari, con componenti basate su un precedente brevetto ENEA. Tale soluzione offre il vantaggio di essere estremamente versatile nel piano di terapia, soprattutto in termini di controllo impulso per impulso dell'energia rilasciata e dell'intensità. **Il sistema basato su acceleratori lineari è inoltre meno costoso e meno demanding dal punto di vista della radioprotezione rispetto alle macchine basate su acceleratori circolari.**

La macchina installata in un bunker di 27 metri di lunghezza all'interno del Laboratorio APAM (Acceleratori di Particelle e Applicazioni Medicali) nel Centro Ricerche ENEA di

Frascati, è composta da un iniettore commerciale da 7 MeV operante a una radio frequenza (RF) di 425 MHz seguito da una successione di otto moduli di accelerazione di tipo SCDTL (Side Coupled Drift Tube Linac) operanti a una RF di 3 GHz, che innalzano l'energia del fascio di protoni a 71 MeV.

Gli otto moduli, interamente progettati all'interno del Laboratorio APAM, sono raggruppati in due sezioni, ciascuna di quattro moduli e ogni sezione è alimentata da un klystron da 10 MW di potenza di picco. Il fascio accelerato è emesso in impulsi di lunghezza temporale di 2.5 microsecondi che si succedono ad una frequenza tipica di ripetizione di 25 Hz. La carica tipica per impulso può essere variata fino a $5 \cdot 10^8$ protoni. I protoni si propagano in vuoto all'interno dell'acceleratore e vengono poi estratti in aria attraverso una sottile finestra di Titanio. La dimensione del fascio estratto è inferiore a 3 mm.

L'acceleratore è seguito da una linea di delivery della radiazione che include una coppia di magneti di scansione che consente di irraggiare

bersagli estesi fino ad un'area di 10 x 10 cm montati in una apposita postazione di irraggiamento. La linea è dotata delle diagnostiche di fascio quali Faraday cup, camere a ionizzazione integrali e 2D, scintillatori e monitor non distruttivi di intensità di corrente, tutte necessarie a valutare l'intensità e la posizione del fascio di particelle durante l'irraggiamento. La postazione di irraggiamento è adatta per irraggiamenti di tipo shot-through, in cui il picco di Bragg cade dietro al campione irraggiato e SOBP (Spread Out Bragg Peak), in cui il profilo di dose rilasciato nel volume di interesse viene reso uniforme sovrapponendo con intensità diverse vari picchi di Bragg ottenuti variando l'energia dei protoni.

L'attività sperimentale e i rapporti con le aziende

L'impianto TOP-IMPLART dispone anche di una seconda linea spe-

rimentale a bassa energia (3-7 MeV) in direzione verticale che impiega un magnete a 90° installato all'uscita dell'iniettore. Questa linea viene impiegata per esperimenti di radiobiologia cellulare e caratterizzazione di dosimetri a tracce fluorescenti biocompatibili sviluppati anch'essi in ENEA. Inoltre, grazie alla elevata intensità del fascio, la linea verticale verrà impiegata per studiare effetti di tipo FLASH, cioè di irraggiamenti di breve durata (dell'ordine di 100 millisecondi) ad alto rateo di dose (valori superiori a 40 Gy/sec), e per lo sviluppo di diagnostiche adeguate a questo particolare regime radioterapico, che da studi recenti a livello internazionale appare molto promettente, ma i cui meccanismi vanno ancora compresi.

La collaborazione TOP-IMPLART ha prodotto una attività di ricerca riguardante il commissioning dell'acceleratore stesso e l'impiego

della radiazione da esso prodotta in molteplici campi di ricerca.

La principale attività sperimentale ha riguardato la caratterizzazione dosimetrica dei fasci pulsati di protoni, tramite, da un lato, la valutazione delle potenzialità di sistemi commerciali già in uso nella pratica clinica, e dall'altro lo sviluppo ad hoc di dosimetri innovativi e nuovi monitor di fascio. Questa attività è stata propedeutica alla definizione di procedure che hanno permesso la realizzazione di campagne sperimentali di radiobiologia, in vitro e in vivo. **Ad oggi, l'acceleratore TOP-IMPLART è l'unico di tipo lineare per protonterapia presso cui sia stata svolta, e pubblicata, attività di ricerca in radiobiologia.**

Inoltre, lo sviluppo dell'impianto TOP-IMPLART ha dato luogo a due filoni di rapporto con le aziende. Il primo connesso alla realizzazione meccanica delle strutture

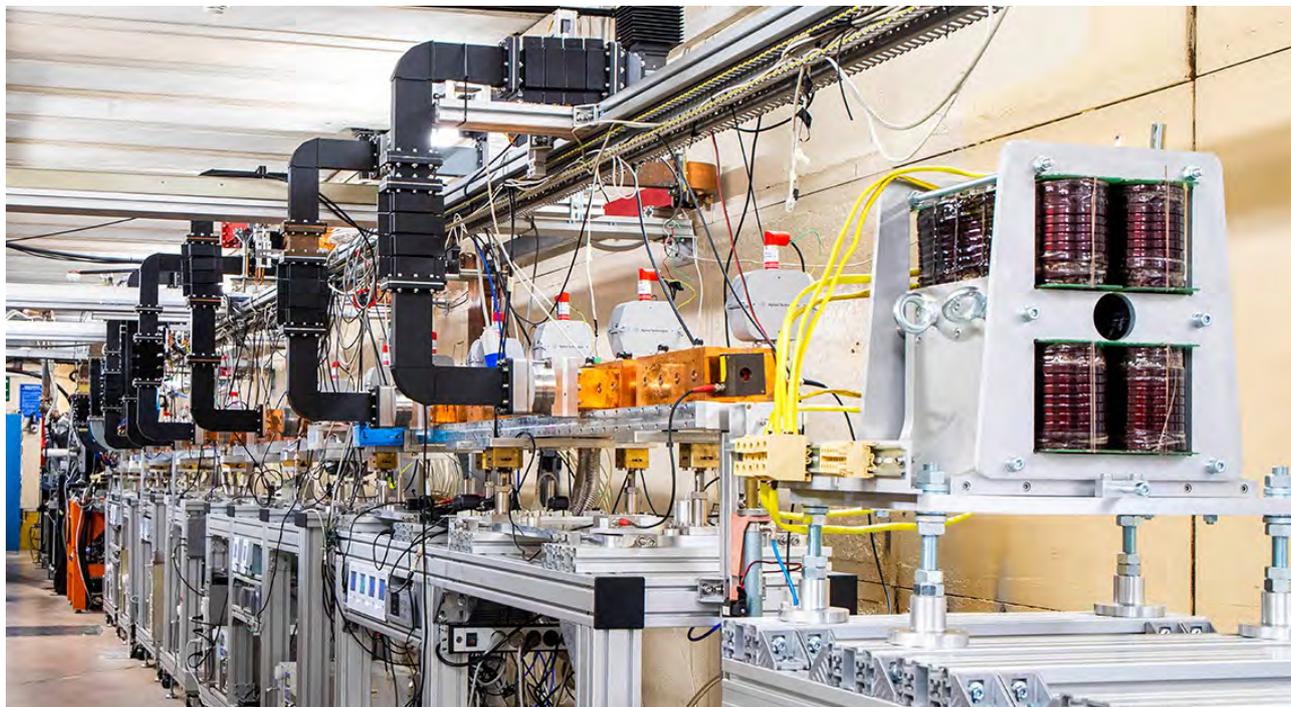
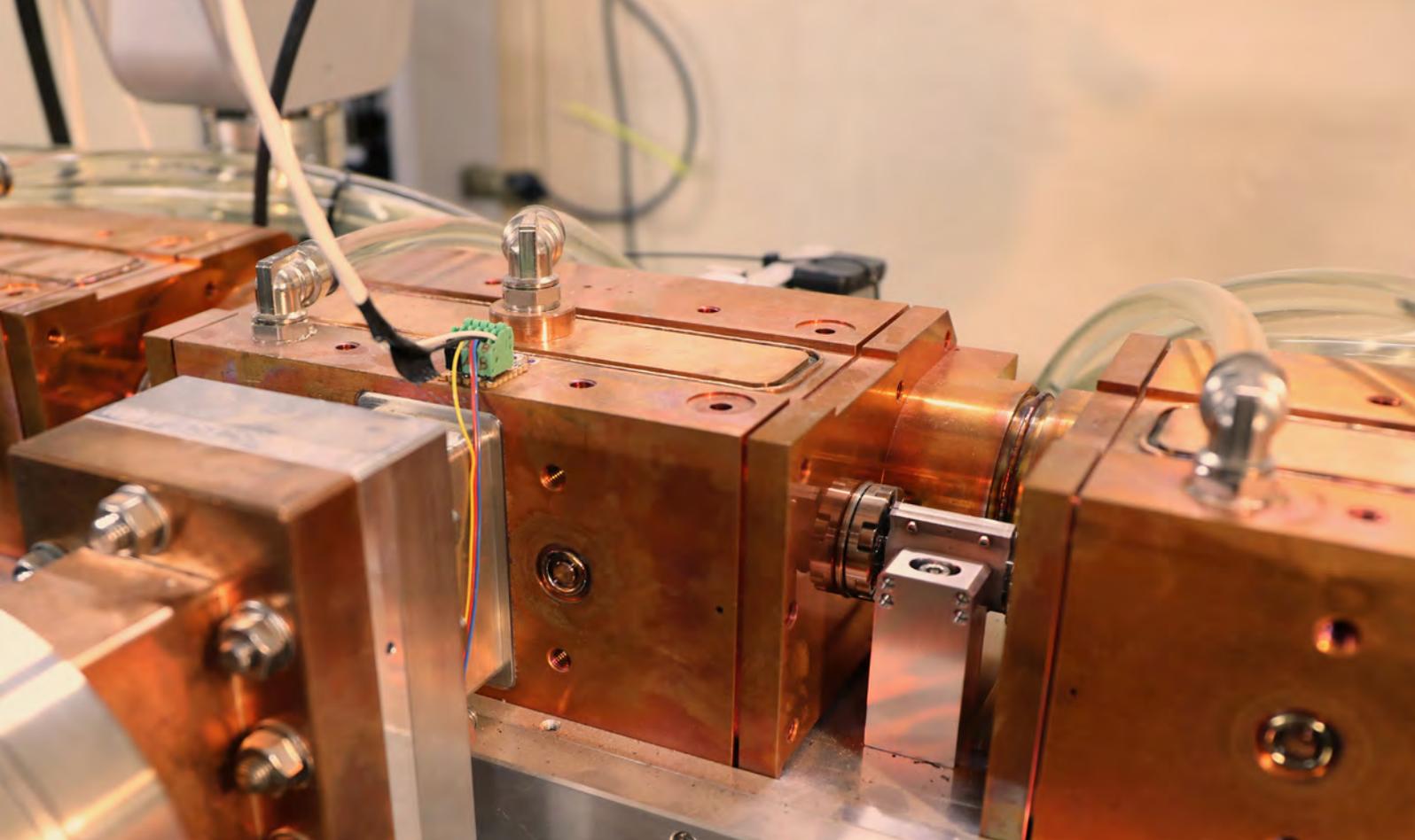


Figura 1: L'impianto TOP IMPLART presso il Centro ENEA di Frascati



acceleranti e di alcuni componenti a radiofrequenza da parte di ditte italiane (in particolare laziali) e il secondo legato all'interesse suscitato come possibile sistema ad alto impatto commerciale nel mondo della protonterapia. Questo secondo filone ha portato, tramite un'azione di trasferimento tecnologico svolta dall'ENEA, alla realizzazione di una versione ingegnerizzata della macchina a più elevata energia da parte della ditta pugliese LINEARBEAM (<https://linearbeam.com/>). Il sistema industriale è in fase di completamento anche dal punto di vista delle certificazioni per il suo impiego in una struttura clinica.

Oltre a costruire una consolidata

esperienza nell'ambito delle Scienze della Vita, l'attività sperimentale di TOP-IMPLART ha permesso di evidenziare le potenzialità di questo impianto anche in campi diversi dalla protonterapia. Grazie alle competenze sviluppate nella caratterizzazione e delivery del fascio di protoni, l'impianto può infatti essere applicato con successo nel **settore dell'aerospazio** per la caratterizzazione della resistenza a radiazioni rappresentative dell'ambiente spaziale, come i protoni, appunto, di componenti elettronici e materiali. Questi test si svolgono secondo protocolli ESA e in questi anni è stata avviata una attività di studio per verificare l'aderenza delle metodologie

sviluppate a TOP-IMPLART con i requisiti di tali protocolli. Attualmente l'acceleratore TOP-IMPLART è una delle facilities inserite nel programma ASIF2 (ASI Supported Facilities) finanziate dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI). L'operatività della macchina è garantita dallo staff tecnico e scientifico del Laboratorio APAM che verifica la qualità del fascio di particelle, si occupa della manutenzione e supporta gli utenti provenienti sia dal mondo dell'industria che da quello della ricerca anche nella realizzazione di setup di irraggiamento custom, se richiesto.

per info: concetta.ronsivalle@enea.it

Sviluppo tecnologico ed attività di supporto in risposta ad eventi CBRNE

I rischi legati alla contaminazione dell'ambiente con agenti chimici, batteriologici, radiologici e nucleari (CBRN) possono materializzarsi per cause accidentali, quali incidenti in impianti o durante la fase di trasporto, o per azioni premeditate finalizzate ad arrecare ingenti danni al tessuto economico e sociale. Qualsiasi sia la causa, un'emergenza CBRN richiede una pronta ed efficace risposta da parte delle organizzazioni preposte per mitigare gli effetti sull'uomo e sull'ambiente circostante. L'innovazione tecnologica ed il supporto di conoscenza tecnico-scientifica sono fondamentali per dotare gli operatori di strumenti qualificati per supportare la loro azione ed accrescere anche le capacità di prevenzione.

DOI 10.12910/EAI2023-067

di **Luigi De Dominicis, Nadia Cherubini, Mariano Tarantino, Antonietta Rizzo, Federico Rocchi, Francesco Colao, Giuseppe Marzo**, Dipartimento Nucleare -ENEA

L'attenzione verso il tema della prevenzione e risposta ad eventi con rilascio di agenti chimici, batteriologici, radiologici, nucleari (CBRN), anche eventualmente attivati da materiale esplosivo (E), si è innalzata in maniera rilevante sia a livello nazionale che internazionale, anche alla luce dell'evoluzione della situazione geopolitica globale. Di pari passo è andato quindi l'impegno di tutti gli attori coinvolti nello sviluppare piani di prevenzione e risposta aggiornati ed efficaci nel contrastare tali minacce. In questo contesto ENEA svolge il duplice ruolo di *technology provider* e di *scientific advisor*, ovvero di agenzia capace di sviluppare soluzioni tecnologiche innovative e fornire valutazioni di supporto tecnico ("*reachback*") agli organismi ed istituzioni chiamati a gestire la prevenzione e la risposta a questi eventi.

Progetti internazionali

Relativamente al primo ruolo, occor-

re citare la partecipazione di ENEA ad una serie di progetti internazionali. **Di particolare rilevanza è il progetto rescEU-CBRN-DSIM-IT che ENEA sta coordinando e che vede, tra gli altri, la partecipazione del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco (CNVVF) ed il supporto del Dipartimento di Protezione Civile.** Finanziato dalla Direzione generale per la protezione civile e le operazioni di aiuto umanitario della Commissione Europea (DG ECHO) nell'ambito del programma rescEU, il progetto prevede lo sviluppo di una serie di laboratori mobili completamente equipaggiati per intervento operativo in aree colpite da eventi CBRNE. La capacità prevede, oltre a moduli per il rischio chimico e biologico, anche un modulo specifico per intervento in scenari di tipo radiologico e nucleare (RN) di particolare impatto e progettato da ENEA in collaborazione con NUCLECO. Una volta completata nel settembre 2026, la capacità verrà gestita dal CNVVF e resa operativa sul

territorio nazionale in caso di evento CBRNE e su specifica richiesta in ogni Stato Membro nell'ambito dell'UCPM (*Union Civil Protection Mechanism*).

Tra le attività in carico ENEA, sono anche previsti corsi di formazione specifici a personale adibito all'operatività della capacità e funzione di assistenza reachback da remoto in caso di dispiegamento operativo della capacità stessa.

Nell'ambito del progetto ENEA metterà a disposizione anche l'esperienza maturata nella gestione dell'emergenza in caso di rinvenimento sul territorio di un materiale nucleare fuori dal regolare controllo. La procedura prevede una definizione dettagliata delle azioni da seguire per la messa in sicurezza del suddetto materiale e per garantire la protezione della popolazione e dell'ambiente dai rischi connessi all'esposizione delle radiazioni ionizzanti. **Nello specifico, ENEA ha sviluppato il Laboratorio Mobile di Radiochimica (Fig.1) che è stato**



Figura 1: Il Laboratorio Mobile di Radiochimica dell'ENEA

appositamente progettato per effettuare analisi in situ su un ampio spettro di specie radiologiche.

Minacce radioattive e nucleari

Altro dispositivo sviluppato da ENEA, e dispiegabile in tali scenari, è il **NAI (Neutron Active Interrogation)**. Si tratta di uno strumento finalizzato per scoprire minacce radioattive e nucleari sotto forma di ordigni esplosivi improvvisati (IED), le cosiddette "bombe sporche". Il suo principio di funzionamento è la tecnica di interrogazione attiva basata sulla rilevazione di neutroni secondari o raggi gamma emessi dal campione dopo la sua stimolazione da parte di una sorgente primaria di neutroni.

Sempre nell'ambito di scenari RN, ENEA sta coordinando il **progetto europeo INCLUDING** (www.including-h2020.eu) finanziato dalla Direzione Generale della Migrazione e degli Affari Interni (DG HOME) e che vede la partecipazione di altri quattordici partner da dieci Stati Membri. Il progetto ha la finalità di accrescere a livello comunitario la dotazione tecnologica e la collaborazione tra i vari stakeholder chiamati a rispondere ad una di crisi RN. In INCLUDING ENEA ha sviluppato una pluralità di tecnologie che vanno da una app denominata **BEAMS (Big Emergencies Assessment and Management System)** che permette ai primi soccorritori che interven-

gono in area di crisi di effettuare un triage digitale sulle condizioni di salute dei feriti e/o contaminati presenti a sofisticati modelli di predizione di diffusione di una nube radioattiva. Tutte le tecnologie sviluppate in INCLUDING sono state validate durante specifiche esercitazioni condotte in vari Stati Membri e di cui due organizzate da ENEA presso i Centri di Casaccia (Fig.2) e Bologna.



Figura 2: I primi soccorritori ENEA in azione durante l'esercitazione di INCLUDING tenutasi presso il Centro ENEA di Casaccia nel maggio 2023

Minacce con materiali esplosivi

Nello specifico dominio delle minacce con materiali esplosivi e collegate ad azioni di tipo terroristico, ENEA ha appena completato il progetto DEXTER (Detection of Explosives and Firearms to Counter Terrorism) finanziato dal pro-

gramma NATO Scienze for Peace and Security (SPS). In DEXTER ENEA ha coordinato un Consorzio composto da dieci tra Università e Centri di Ricerca da Paesi NATO ed Associati e con la supervisione del Department for Homeland Security (USA). DEXTER ha sviluppato una pluralità di tecnologie che cooperano per generare dati in aree ad alto transito di persone, quali stazioni metro, ferroviarie ed aeroporti. Tali dati processati in tempo reale permettono di individuare soggetti che portano con sé armi non autorizzate ed esplosivi. Nello specifico, ENEA ha sviluppato **un sensore laser capace di rivelare a distanza di decine di metri tracce di esplosivo che un individuo presenta sulla superficie dei suoi vestiti** e che è un *early warning* del fatto che ha manipolato materiale esplosivo, ed anche l'intero sistema software centralizzato per la gestione dei sensori dispiegati sul campo e per processamento dei dati. DEXTER è stato testato durante una serie di trials eseguiti presso un'area controllata della stazione di Anagnina della metropolitana di Roma operata da ATAC e con la partecipazione di agenti della Polizia di Stato (Fig.3).

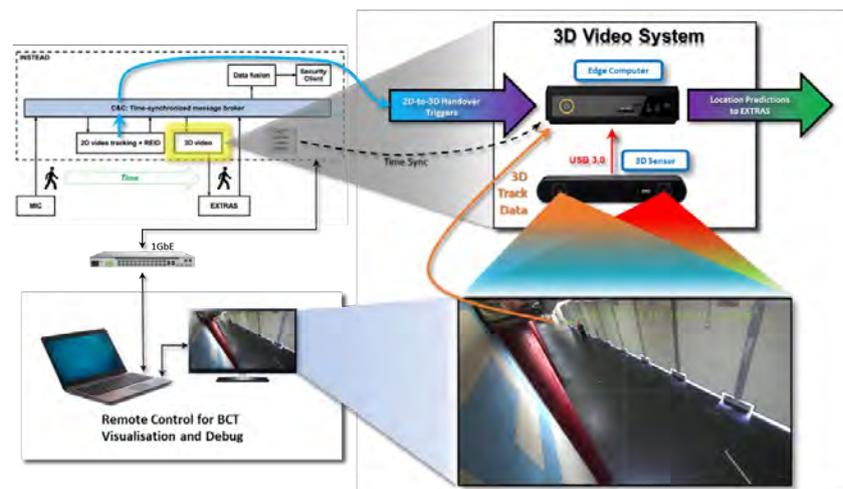


Figura 3: Lo schema funzionale del sistema DEXTER durante i trials alla stazione Anagnina di Roma



Figura 4: Laboratorio Gestione dei Rifiuti Chimici, Centro Ricerche ENEA Casaccia

Tecniche di realtà aumentata per indagini scientifiche non distruttive

In fase conclusiva è anche il progetto europeo RISEN (*Real-time on-site forensic trace qualification*), che vede la partecipazione di 20 partner con ENEA in veste di coordinatore (www.risen-h2020.eu). **RISEN prevede lo sviluppo di una rete di sensori combinati con tecniche di realtà aumentata per condurre indagini scientifiche non distruttive, rapide e accurate direttamente sulla scena del crimine.** Nel dettaglio ENEA in RISEN si occupa dello sviluppo di quattro sensori (Raman, LIBS, LIF, Crime light imaging), che servono a identificare, selezionare ed etichettare digitalmente le tracce su cui investigare. Grazie a queste tecnologie sarà possibile effettuare accertamenti sicuri, rapidi e approfonditi direttamente sul luogo dove è avvenuto il crimine, ottimizzando il rilevamento, l'identificazione e l'interpretazione delle tracce rinvenute. Le tecnologie sviluppate nell'ambito di RISEN saranno sperimentate per l'Italia dal Raggruppamento Carabinieri Investigazioni Scientifiche

(RaCIS).

Collegato al crescente interesse verso l'utilizzo di tecnologie quantistiche è il progetto NATO SPS HADES (*HAzard DEtection with quantum Sensors*) che ha l'obiettivo di sviluppare tecnologie quantistiche per il rilevamento di minacce CBRN. Coordinato da ENEA, HADES vede la partecipazione anche dell'Università di Roma Tre e l'Università di Ginevra e fornirà nuovi sensori che sfruttano le proprietà quantistiche della luce come l'entanglement. Ciò consentirà di ottenere misure di alta precisione, a volte spingendo le prestazioni oltre quelle ottenibili con strumenti classici.

In relazione al secondo ruolo di *scientific advisor*, il gruppo di ri-

cerca del Centro ENEA di Bologna fornisce supporto scientifico e tecnico per la verifica dei principali trattati internazionali sulla security nucleare e sul disarmo. In particolare, ospita e gestisce per conto del Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale il Centro Dati Nazionale per la verifica del Trattato per la Messa al Bando dei Test Nucleari (*Comprehensive Test Ban Treaty*, CTBT). Nello stesso ambito partecipa all'elaborazione dei protocolli del sistema di monitoraggio internazionale e alle verifiche ispettive previste dal Trattato. Sviluppa poi ed **applica tecniche e metodi per l'analisi forense** necessaria alla gestione delle indagini relative ad eventi CBRN e partecipa ad esercizi internazionali. Inoltre, **fornisce consulenza anche in ambito di disarmo, con particolare riferimento alle armi di distruzione di massa**, attraverso iniziative quali la *Global Partnership against the Spread of Weapons and Materials of Mass Destruction*. Infine, in ambito IAEA collabora alla redazione ed alla stesura di documenti e linee guida (*Nuclear Security Guidance Committee*), ad iniziative di formazione quali *l'International Network for Nuclear Security Training and Support Centres* e contribuisce al sistema RANET (*Response and Assistance NETWORK*) di mutua assistenza tra Stati.

[per info: luigi.dedominicis@enea.it](mailto:luigi.dedominicis@enea.it)



Figura 5: Università militare della tecnologia di Varsavia: test di tecnologie innovative sviluppate nell'ambito del progetto RISEN

Le tecnologie nucleari per la diagnostica e la conservazione dei beni culturali

Le attività per i beni culturali del Dipartimento Nucleare ENEA riguardano tematiche legate sia alla diagnostica che ai trattamenti di conservazione, attraverso lo sviluppo di tecnologie innovative e processi sostenibili. Tali attività, svolte nell'ambito di progetti regionali, nazionali ed internazionali e con la partnership di istituzioni pubbliche, private e imprese del settore, contribuiscono al processo di digitalizzazione del patrimonio culturale raccomandato dalla Commissione Europea.

DOI 10.12910/EAI2023-068

di **Francesca Bonfigli, Sabina Botti, Luisa Caneve, Michele Arturo Caponero, Alessia Cemmi, Rosaria D'Amato, Ilaria Di Sarcina, Luca Falconi, Massimo Francucci, Massimiliano Guarneri, Stefano Loreti, Valentina Nigro, Concetta Ronsivalle, Valeria Spizzichino, Maria Aurora Vincenti, Dipartimento Nucleare -ENEA**

Nel corso degli ultimi decenni, la ricerca di nuove tecnologie e processi non invasivi ha riscosso un interesse sempre crescente da parte degli specialisti che operano nel settore dei beni culturali.

I laboratori del Dipartimento Nucleare (NUC) dell'ENEA sono impegnati in attività di ricerca finalizzate alla messa a punto di strumenti, metodi di analisi e trattamenti innovativi di grande utilità per la conoscenza, conservazione, fruizione e valorizzazione del patrimonio artistico e culturale del Paese.

Particolare attenzione è rivolta alla sostenibilità economica e ambientale dei processi e delle metodologie di analisi, di fondamentale importanza per i beni culturali.

Le attività di ricerca condotte in questo ambito si concentrano su due principali settori, il primo relativo alla **diagnostica** ed il secondo più strettamente legato alla **conservazione** dei manufatti artistici. Alcune delle tecniche e dei processi impiegati nascono dalla pluriennale

esperienza dei ricercatori del Dipartimento NUC in ambito nucleare.

Tecniche diagnostiche nel campo artistico-culturale

La disponibilità di informazioni sullo stato delle opere d'arte in tempi rapidi e quanto più complete possibile può rappresentare un grande vantaggio per l'ottimizzazione delle azioni di conservazione e restauro.

A tale scopo, nei Laboratori del Dipartimento NUC sono state sviluppate analisi diagnostiche non distruttive, basate anche su tecniche spettroscopiche e di imaging già utilizzate in campi diversi.

In particolare, sono stati realizzati sensori innovativi, basati sulla tecnica spettroscopica di fluorescenza indotta da laser (*LIF-Laser Induced Fluorescence*), che risultano particolarmente vantaggiosi nel campo dei beni culturali in quanto non distruttivi, utilizzabili in situ, operanti a distanza e in grado di fornire informazioni in tempi rapidi [1]. Le immagini di fluorescenza prodotte dai sensori LIF permettono, anche grazie all'u-

tilizzo di algoritmi sviluppati ad hoc ed applicati nel processo di data post-processing, di mappare i materiali della superficie esaminata, individuando e localizzando materiali diversi utilizzati, per esempio, per operazioni di restauro o legate a processi di biodegrado.

Le rappresentazioni 2D fornite dai sistemi LIF sono inoltre sovrapponibili con i modelli 3D prodotti dai sistemi prototipali RGB-ITR (Red Green Blue Imaging Topological Radar) e IR-ITR (Infra Red Imaging Topological Radar) [2]. Tale combinazione permette di ottenere informazioni quantitative e qualitative multi-livello su struttura e difetti, colori, composizione chimica superficiale e dettagli nascosti da strati successivi. Un risultato di successo è la realizzazione della visita virtuale della Casa di Diana del Parco Archeologico di Ostia Antica, realizzata nell'ambito del Progetto VADUS finanziato da ESA, in cui i livelli multimediali creati da ENEA restituiscono informazioni di grande interesse sulle diverse fasi costruttive (murature

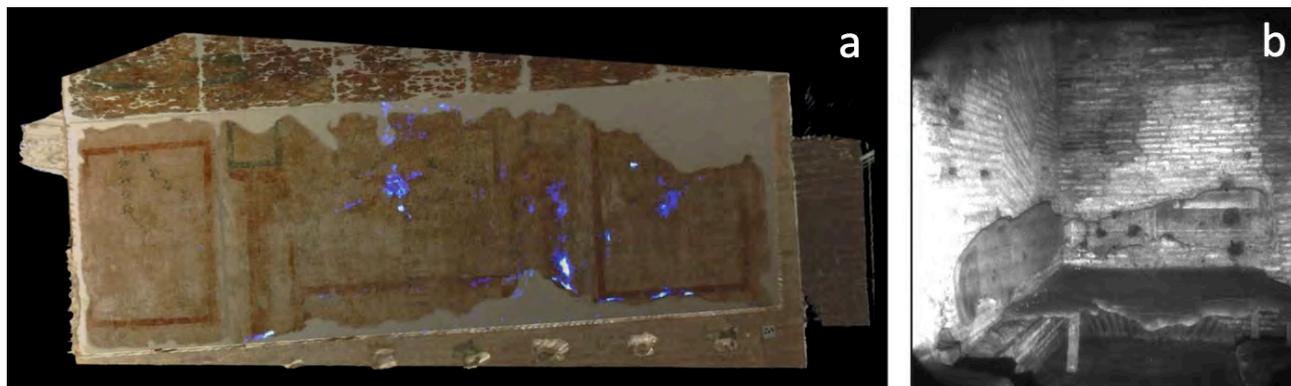


Figura 1: a) Sovrapposizione tra il modello 3D ottenuto con il sistema RGB-ITR e le immagini LIF, in blu, di una parete del Tablinum della Casa di Diana del Parco Archeologico di Ostia Antica; b) immagine LIF di parte della sala antecedente il Mitreo

relative ad interventi successivi) e di restauro (polimeri acrilici, restauro anni '80) dell'edificio (Fig.1).

Oltre ai sensori descritti, sono stati ideati e realizzati nuovi prototipi di strumenti sempre più performanti. Esempi recenti sono il laser scanner Diapason, in grado di coniugare la generazione di gemelli digitali ad alta definizione con l'analisi multi-spettrale e colorimetrica a distanza, e il LIF scanner IRIS, che integra in un unico strumento diverse funzionalità, migliorando la rapidità di misura e di analisi e favorendo l'ottimizzazione del lavoro.

Tecnologie innovative

Il Dipartimento può inoltre vantare una specifica competenza nella realizzazione di sensori in fibra ottica (FBG) [3]. Questi sensori possono essere utilizzati per il monitoraggio permanente di parametri fisici e ambientali, quali deformazione, temperatura e umidità relativa. Le caratteristiche ineguagliabili di resistenza agli agenti atmosferici e di bassa invasività rendono la tecnologia FBG estremamente utile per il monitoraggio dei beni culturali. A titolo di esempio, questi sensori sono stati installati all'interno della Cattedrale cattolica romana di Or-

vieto (XIV sec.) per il monitoraggio delle fessure presenti, nell'ambito di un lavoro multidisciplinare volto a valutarne lo stato conservativo e la vulnerabilità sismica.

I sensori FBG sono stati impiegati anche per il progetto MONALISA,

finanziato dalla Regione Lazio tramite il Centro di Eccellenza del Distretto Tecnologico Beni e Attività Culturali - DTC Lazio, come sistema di monitoraggio dinamico delle vibrazioni di origine antropica e naturale in ambito museale. I dati forniti

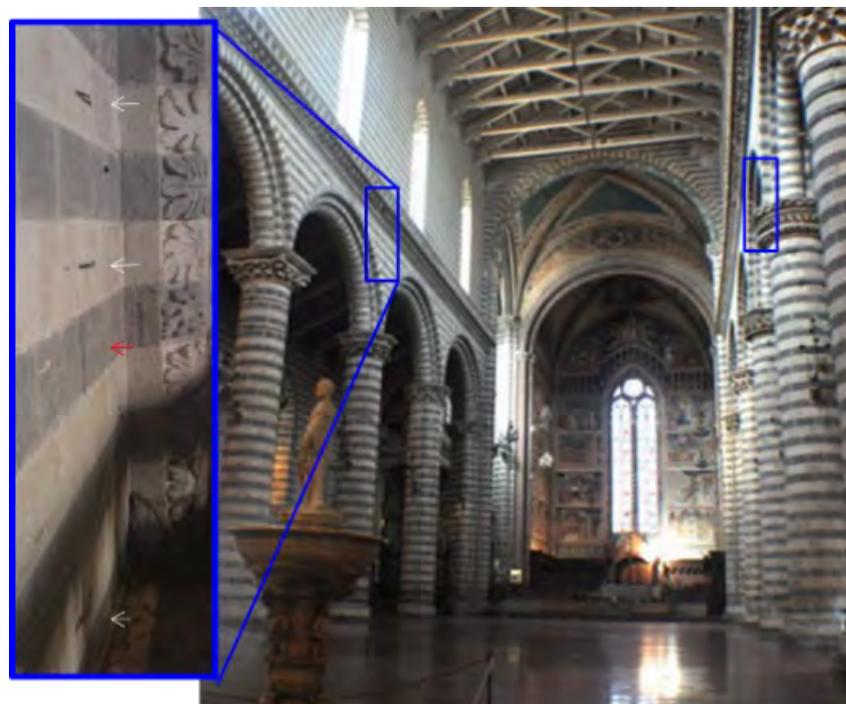


Figura 2: La navata della Cattedrale cattolica romana di Orvieto (XIV sec.): gli inserti mostrano la posizione dell'installazione dei sensori FBG. La vista ingrandita mostra i sensori FBG, scarsamente visibili nell'intervento

dai sensori sono stati integrati in un dispositivo di isolamento appositamente realizzato per la salvaguardia delle opere d'arte [4].

Le tecniche di diagnostica possono essere impiegate anche per seguire l'evoluzione dei processi responsabili dell'invecchiamento e deterioramento della carta, uno dei materiali di interesse storico e documentale tra i più diffusi e fragili. Mediante l'accoppiamento di due tecniche non distruttive e non invasive (spettrometria Raman e microscopia ottica) sono state ottenute informazioni morfologiche e composizionali, sviluppando un protocollo per la caratterizzazione dello stato di conservazione di libri di diverse epoche [5].

Le competenze in ambito nucleare presenti presso il Dipartimento NUC permettono l'impiego di sorgenti di neutroni (Reattore di ricerca TRIGA-RC1, Frascati Neutron Generator, FNG) per l'analisi di elementi in tracce in materiali di interesse per i beni culturali mediante la tecnica di analisi per

attivazione neutronica (Neutron Activation Analysis, NAA). Nello specifico, presso FNG è stato studiato un frammento di un affresco romano proveniente dalla Villa della Piscina di Centocelle (RM), determinando la presenza e la quantità di elementi come Fe, Mg, Al, Na e Cl.

Trattamenti per la conservazione dei beni culturali

Negli ultimi anni, l'utilizzo delle radiazioni ionizzanti (raggi gamma, elettroni e raggi X) per la conservazione dei beni culturali ha fornito soluzioni alternative e più sostenibili rispetto ai metodi tradizionalmente impiegati [6]. Tali radiazioni, infatti, risultano molto efficaci per l'eliminazione di insetti, batteri, funghi e muffe, responsabili del deterioramento o della perdita di beni di interesse artistico-culturale.

I manufatti costituiti da materiali di origine naturale (carta, legno, pergamena, cuoio, tessuti) possono infatti facilmente subire attacchi

biologici se conservati in condizioni ambientali non ottimali o a causa di calamità naturali, spesso indotte dal cambiamento climatico, e il loro recupero risulta spesso difficile e dispendioso.

Alcuni organismi biodeteriogeni, oltre ad essere dannosi per il manufatto, risultano anche estremamente tossici per l'uomo, rendendo impossibile il restauro o la fruizione del bene stesso. Le radiazioni ionizzanti, già ampiamente utilizzate in altri ambiti, possono essere applicate con successo per la disinfestazione e disinfezione di manufatti artistici e documentali (Fig. 3).

Analisi condotte con tecniche di caratterizzazione non distruttive e non invasive nei laboratori del Dipartimento NUC hanno dimostrato che una corretta scelta dei parametri di irraggiamento garantisce l'integrità dei manufatti trattati, permettendone il successivo restauro e la loro conservazione [7].

Il progetto PERGAMO (finanziato dalla Regione Lazio tramite il Centro



Figura 3: Esempi dell'efficacia del trattamento con radiazioni gamma presso la Facility Calliope per la rimozione di comunità microbiche presenti su un volume, datato 1890, proveniente dalla National University Library di Zagabria (Croazia)

di Eccellenza del Distretto Tecnologico Beni e Attività Culturali - DTC Lazio) prevede proprio l'utilizzo di tecniche diagnostiche e trattamenti fisici più sostenibili per il recupero e lo studio di beni culturali degradati. Nonostante le tecniche di irraggiamento vengano già ampiamente utilizzate in molti Paesi (Francia, Croazia, Romania e Brasile), per la prima volta in Italia le radiazioni disponibili presso la facility di irraggiamento Calliope (raggi gamma) e l'impianto REX (elettroni e raggi X) di ENEA vengono utilizzate per

trattamenti non invasivi a scopo di recupero da biodegrado.

Rispetto alle tecniche più tradizionali, il trattamento con radiazioni ionizzanti presenta numerosi vantaggi, quali la capacità di eliminare indiscriminatamente e simultaneamente, agendo direttamente a livello del DNA, tutti gli organismi biodeteriogeni (comprese le spore fungine), l'assenza di reagenti chimici nel processo e di residui tossici o radioattivi nel manufatto. Tali caratteristiche permettono, da parte del restauratore o curatore, la fruizione immediata

dell'oggetto irraggiato.

Inoltre, nel caso particolare dei raggi gamma e, in modo più limitato, dei raggi X il loro alto potere penetrante li rende adatti al trattamento di manufatti di forma o composizione più complesse, oltre che di grandi volumi, permettendo di operare in tempi rapidi e senza aumenti di temperatura. L'utilizzo di fasci di elettroni risulta invece particolarmente utile nel caso di trattamenti di sottili stati superficiali.

per info: francesca.bonfigli@enea.it

BIBLIOGRAFIA

1. A. Palucci, M.A. Caponero, L. Caneve, S. Di Frischia, M. Francucci, M. Guarneri, V. Spizzichino, ENEA's Optical Sensors for Local and Remote Sensing of Cultural Heritage, Ebook: The Safety and Security of Cultural Heritage in Zones of War or Instability, (2021) 153, 62-79. DOI 10.3233/NHSDP210033
2. L. Caneve, F. Colao, M. Francucci, M. Guarneri, M. Mongelli, V. Spizzichino, Non-invasive diagnostic investigation at the Bishop's Palace of Frascati: an integrated approach, ACTA IMEKO (2021) 10(1), 180-186. DOI: 10.21014/acta_imeko.v10i1.827
3. M.A. Caponero, Use of FBG sensors in advanced civil engineering applications, Journal of Instrumentation (2023) 18(07), C07020. DOI: 10.1088/1748-0221/18/07/C07020
4. M.A. Vincenti, M.A. Caponero, M. Lamonaca, G. Occhipinti, O. AlShawa, L. Sorrentino, Proc. of 9th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, COMPDYN 2023, Athens, Greece, 12-14 June 2023.
5. S. Botti, F. Bonfigli, V. Nigro, A. Rufoloni, A. Vannozzi, Evaluating the Conservation State of Naturally Aged Paper with Raman and Luminescence Spectral Mapping: Toward a Non-Destructive Diagnostic Protocol. Molecules (2022) 27, 1712. DOI: 10.3390/molecules27051712.
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Uses of Ionizing Radiation for Tangible Cultural Heritage Conservation, IAEA Radiation Technology Series (2017) No. 6, IAEA, Vienna.
7. A. Cemmi, I. Di Sarcina, B. D'Orsi, Gamma radiation-induced effects on paper irradiated at absorbed doses common for cultural heritage preservation, Radiation Physics and Chemistry, (2023) 202, 110452. DOI 10.1016/j.radphyschem.2022.110452

Le applicazioni nucleari nel campo dei radiofarmaci

La fusione nucleare è un processo che permetterà, nel medio-lungo periodo, di ottenere una fonte di energia a impatto bassissimo sull'ambiente. Insieme alle attività di ricerca e sviluppo che vedono ENEA in prima fila, l'Agenzia ha individuato un'altra possibile applicazione della fusione nucleare nel campo della diagnostica medica nucleare. Il progetto SORGENTINA, per la produzione di radioisotopi utili per la medicina nucleare, ha come scopo la progettazione e la realizzazione di una sorgente di neutroni da fusione di intensità di gran lunga superiore rispetto alle sorgenti di neutroni da fusione guidate da acceleratore che operano nel mondo attualmente. Le attività di ricerca e sviluppo portate avanti dall'Agenzia nel campo dei radiofarmaci hanno l'obiettivo di produrre sul suolo italiano radioisotopi ad uso medicale non solo tramite il processo di fusione, ma anche attraverso l'utilizzo dei propri reattori a fissione nucleare utilizzati per la ricerca.

DOI 10.12910/EAI2023-069

di Antonino Pietropaolo e Nadia Cherubini, Dipartimento Nucleare - ENEA

La fusione nucleare è un processo che permetterà, nel medio-lungo periodo, di ottenere una fonte di energia a impatto bassissimo sull'ambiente. Insieme all'attività di ricerca e sviluppo che vede ENEA in prima fila in questa straordinaria avventura della conoscenza e della tecnologia, l'Agenzia ha individuato un'altra possibile applicazione della fusione nucleare nel campo della diagnostica medica nucleare. Il Tecnezio-99 metastabile (^{99m}Tc), prodotto del decadimento del Molibdeno-99 (^{99}Mo), è particolarmente utile per l'imaging diagnostico perché:

- può essere chimicamente incorporato in radiofarmaci che hanno affinità per differenti tessuti e organi;
- ha un tempo di dimezzamento sufficientemente lungo (circa 6 ore) per essere utilizzato nelle procedure di medicina nucleare;
- emette radiazione gamma di

energia circa 140 keV che può essere rivelata efficientemente dalle attuali tecnologie;

- può essere adeguatamente fornito a ospedali e cliniche utilizzando generatori di tecnezio;
- fornisce al paziente basse dosi da radiazione per via della sua vita breve, per la mancanza di radiazione alfa e la minima emissione di radiazione beta.

La maggior parte del ^{99m}Tc usato per tale scopo è ottenuto dal decadimento del Molibdeno-99 (^{99}Mo) generalmente estratto da opportuni target di uranio irraggiati in reattori nucleari. In seguito all'esposizione al flusso neutronico, i target di uranio sono processati chimicamente per separare il ^{99}Mo , che viene poi purificato per dare seguito alla costruzione di generatori di $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$, venduti e distribuiti in radiofarmacie, ospedali e cliniche di tutto il mondo.

I reattori di ricerca utilizzati per irraggiare i target che producono la maggior parte delle forniture di

^{99}Mo hanno – al momento attuale – più di 40 anni e gli shutdown, pianificati e non, di alcuni di questi reattori hanno portato alla recente interruzione di diverse forniture di $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$. Una delle chiusure più importanti è stata quella del 31 Marzo 2018 del reattore nucleare canadese NRU (National Research Universal) che copriva il 40% del fabbisogno mondiale di ^{99m}Tc e il 60% del corrispondente negli Stati Uniti.

Soluzioni alternative e principio di prossimità

Queste interruzioni (la più importante delle quali nel 2009 conosciuta come la crisi mondiale del ^{99}Mo) hanno portato le organizzazioni internazionali e le diverse agenzie governative a investire nella ricerca di soluzioni alternative ai reattori a fissione nel breve e lungo termine. Parallelamente a tale necessità esiste la volontà internazionale di ridurre l'utilizzo di uranio altamente

arricchito (HEU) per applicazioni civili. Di qui anche la necessità di approcciare ad una produzione alternativa di ^{99}Mo , attualmente prodotto quasi esclusivamente dalla fissione di target di HEU.

Nel 2020, il SARS-COV2 ha evidenziato un'altra criticità, nello specifico legata alla distribuzione e dovuta al periodo di lockdown e la diminuzione drastica di voli (passeggeri e commerciali) che hanno impedito l'approvvigionamento di ^{99}Mo , prodotto dai pochi reattori distribuiti in diversi parti del mondo, agli ospedali e dunque ai pazienti. Questo problema ha messo in evidenza come sia necessario un principio di prosimità che preveda l'utilizzo insieme ai centri di produzione globale come i reattori (nel periodo in cui saranno ancora in operazione) di centri di produzione locale che possano servire aree regionali o macroregionali all'interno dei confini nazionali, proprio per affrontare problematiche simili a quelle presentatesi con il SARS-COV2.

Esistono due diverse reazioni nucleari utilizzate al fine di produrre il ^{99}Mo con i reattori a fissione:

1. reazione di fissione del ^{235}U di target di HEU o LEU (uranio a basso arricchimento) a seguito dell'assorbimento di neutroni termico;
2. cattura radiativa di neutroni termici su bersagli di molibdeno, arricchito in ^{98}Mo .

Il ^{99}Mo può essere prodotto anche con acceleratori di particelle, specialmente elettroni e protoni:

1. fotofissione di ^{238}U attraverso la reazione $\gamma + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{99}\text{Mo} + xn + \text{altri prodotti di fissione}$;
2. fotoproduzione di ^{99}Mo attraverso la reazione $\gamma + ^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{99}\text{Mo} + n$;
3. produzione diretta di ^{99m}Tc attraverso il ciclotrone mediante la reazione: $p + ^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{99m}\text{Tc} + 2n$.



Un'altra delle soluzioni alternative per la produzione di ^{99}Mo è l'utilizzo dei neutroni da fusione a 14 MeV per irraggiare campioni di molibdeno metallico (arricchito intorno al 97% in ^{100}Mo). Nonostante la validità del principio fisico, evidenziato in molti documenti ufficiali della NEA e dell'OCSE, e anche testato a livello di processo su scala di laboratorio presso i Centri di Ricerca ENEA Frascati (Frascati Neutron Generator-FNG) e Casaccia (Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti-INMRI), il problema si presenta a livello tecnologico per la mancanza di una sorgente intensa di neutroni da fusione.

In questo contesto si inserisce il progetto SORGENTINA che ha come scopo la progettazione e la realizzazione di una sorgente di neutroni da fusione di intensità di circa 1000 volte più intensa rispetto alle sorgenti di neutroni da fusione guidate da acceleratore che operano nel mondo attualmente. Il progetto attualmente in corso, finanziato all'interno di accordo tra ENEA e Regione Emilia Romagna, ha come finalità la realizzazione di due dei componenti essenziali che costituiscono la sorgente finale. La potenza dell'impianto finale, per la

realizzazione del quale saranno necessari specifici finanziamenti, sarà di circa 250 kW e potrà produrre un quantitativo di ^{99}Mo che potrà soddisfare il fabbisogno settimanale di almeno una regione come l'Emilia Romagna.

Il Progetto Moly

La produzione di ^{99}Mo attraverso la cattura radiativa del ^{98}Mo nei reattori di ricerca appare essere una delle possibilità in termini di sicurezza e di gestione di rifiuti. L'impianto di produzione di ^{99}Mo che si intende progettare e realizzare è basato su tale tecnologia e utilizza come sorgente di neutroni il reattore TRIGA RC-1 (Training Research Isotopes General Atomics - Reattore Casaccia 1) del Centro Ricerche Casaccia di ENEA.

ENEA ha, quindi, promosso e approvato il Progetto MOLY, il cui obiettivo principale è quello di produrre sul suolo italiano il ^{99}Mo mediante irraggiamento di target di attivazione presso il reattore TRIGA RC-1.

Sulla base delle caratteristiche neutroniche del reattore, e tenendo conto anche di recenti studi relativi a impianti simili, è stata fatta una valutazione teorica dell'attivazione

neutronica ottenibile irraggiando un target di molibdeno metallico arricchito al 98.4% in ^{98}Mo nel canale centrale del nocciolo, ipotizzando alcuni scenari operativi.

Con uno scenario che prevede l'utilizzo del reattore nelle condizioni attuali con irraggiamenti discontinui durante il normale orario di lavoro (irraggiamento di 6 ore al giorno 5 giorni a settimana), e la consegna del target di Mo irraggiato la mattina successiva al termine dell'irraggiamento ad un operatore del settore, si prevede una fornitura di 220 GBq/settimana, una produzione sufficiente al fabbisogno settimanale di una regione grande come il Lazio.

ENEA, grazie alle proprie competenze tecniche e operative è potenzialmente in grado di gestire tutte le fasi del processo, dall'irraggiamento del target di molibdeno metallico alla costruzione dei generatori, costituita da un insieme di operazioni da effettuare all'interno di una Clean Room, (ambiente ad atmosfera controllata in termini di pressione e di inquinamento particellare che

rispetti gli standard europei GMP Good Manufacturing Practices richiesti a chi produce radiofarmaci).

Oltre al $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$, l'ENEA sta effettuando attività di ricerca e sviluppo con l'obiettivo di produrre sul suolo italiano altri radioisotopi ad uso medicale quali ^{177}Lu o il ^{64}Cu , mediante irraggiamento di opportuni target di attivazione e sviluppare la tecnologia per costruire generatori di radiofarmaci in strutture dedicate.

In tale contesto, si inserisce la partecipazione dell'Agenzia al Progetto Horizon EURATOM SECURE "Strengthening the European Chain of sUpplY for next generation medical RadionuclidEs", che fa riferimento alla tematica "secure and safe supply and use of radioisotopes", i cui principali obiettivi riguardano:

- sviluppo di tecnologie innovative di produzione di radionuclidi per diagnosi e/o terapia, considerando sia i reattori a fissione sia metodi alternativi basati su acceleratori;

- sviluppo di target di irraggiamento ottimizzati, interscambiabili entro il supply network europeo e basati su materiali disponibili e sostenibili per la comunità europea;
- sviluppo di raccomandazioni per realizzare test clinici con radiofarmaci in Europa, incluso lo sviluppo di protocolli dosimetrici per organi specifici e per applicazioni terapeutiche;
- un'adeguata fornitura di radioisotopi per ricerche future, test clinici e usi clinici con completa copertura di natura radioprotezionistica e con riduzione di costi su tutta la catena di distribuzione del radiofarmaco.

ENEA, dunque, è fortemente coinvolta con il suo personale e le sue infrastrutture di ricerca nel campo delle applicazioni medicali del nucleare, un campo in continuo sviluppo e con ricadute socioeconomiche rilevanti sia per i Paesi con economie consolidate che per quelli in via di sviluppo.

per info: antonino.pietropaolo@enea.it



Il nucleare per lo spazio

L'ENEA da tempo applica le proprie tecnologie e know-how connesse al nucleare a supporto dell'esplorazione spaziale. Vi sono diversi progetti e diverse macchine impiegate in questo settore come ad esempio il progetto "Sistemi Energetici Lunari con l'Energia Nucleare" (SELENE) con l'infrastruttura energetica MEnH e la macchina PROTO-SPHERA che ha fornito e fornisce ottimi risultati.

DOI 10.12910/EAI2023-070

di **Marco Ciotti, Carlo Carrelli, Francesco Lodi**, Dipartimento Nucleare - ENEA

ENEA da tempo applica le proprie tecnologie e know-how a supporto dell'esplorazione spaziale. Il progetto "Sistemi Energetici Lunari con l'Energia Nucleare" (SELENE) ha come obiettivo cardine lo studio di soluzioni tecnologiche innovative per la realizzazione e gestione di una **infrastruttura energetica denominata Moon Energy Hub (MEnH)**. Il MEnH segna un passo rivoluzionario nell'esplorazione lunare, ponendosi al centro della strategia per espandere le capacità umane sulla Luna. L'innovazione principale risiede nell'impiego di Surface Nuclear Reactors (SNR), una soluzione che promette di superare i limiti delle tecnologie energetiche tradizionali, come i sistemi radio-isotopici e i pannelli solari. Questi ultimi, sebbene utilizzati fino ad ora, hanno mostrato inefficienze, scarsa scalabilità, breve vita operativa e vulnerabilità (come da irraggiamento cosmico). Il MEnH mira a fornire una base energetica stabile per supportare un'ampia gamma di attività lunari, sia umane che robotiche. L'Hub è progettato per essere un sistema integrato e modulare, in grado di espandersi e adattarsi alle esigenze in evoluzione delle missioni lunari. Al centro di questa infrastruttura vi sono uno o più SNR. Questi moduli SNR saranno il motore principale

per la produzione di energia, affrontando sfide come l'asportazione del calore e la gestione efficiente delle risorse energetiche.

Un aspetto fondamentale del progetto è la capacità di rispondere a variazioni di carico energetico e di gestire eventuali interruzioni di potenza. Per questo, sono previsti sistemi di accumulo di energia, che garantiscono flessibilità e affidabilità operativa. Il MEnH sarà anche dotato di un sistema di trasmissione di energia orientabile, per supportare attività a distanza dal centro di generazione, e di un sistema di ricezione mobile per attività meno energivore.

Il progetto presenta numerose sfide tecnologiche e scientifiche, richiedendo innovazioni in ambiti come la sensoristica dedicata, l'alta automazione e la trasmissione di potenza wireless. Un elemento centrale del progetto è la prova sperimentale, una "proof of concept", per le soluzioni di smaltimento del calore. Questa consentirà di validare le prestazioni del sistema ed incrementarne la maturità tecnologica.

Il progetto MEnH a sostegno delle missioni lunari

In sintesi, il MEnH rappresenta un approccio integrato per il sostegno delle missioni lunari, unendo innovazione tecnologica e una visione

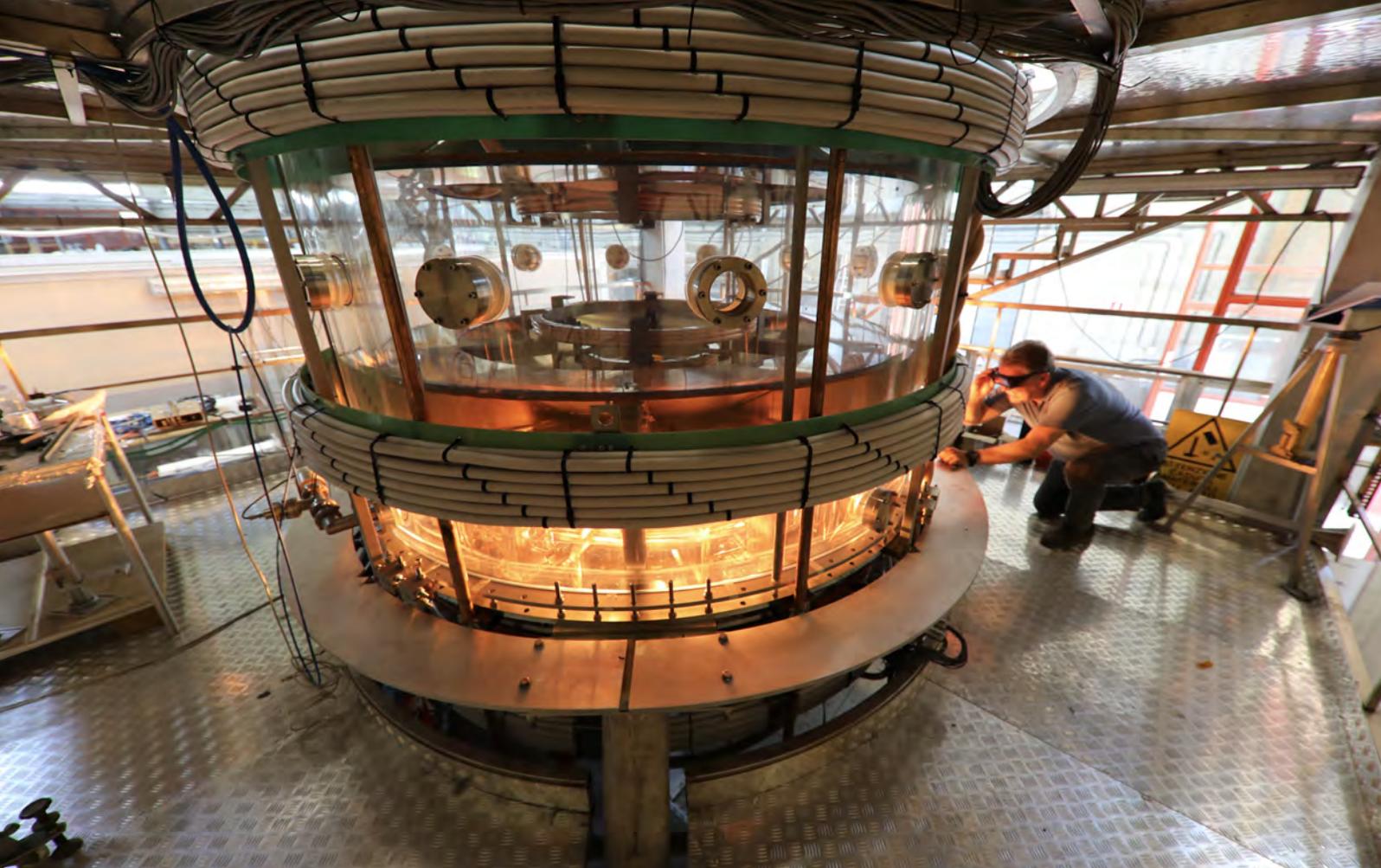
strategica per garantire operabilità, affidabilità e compattezza in un ambiente estremamente esigente come quello lunare. Con l'obiettivo di definire uno scenario operativo chiaro e di stilare una roadmap per raggiungerlo, il progetto MEnH si pone come un caposaldo per le future esplorazioni spaziali.

Per rendere realtà la visione del progetto nei 3 anni della sua durata, il consorzio SELENE prevede, oltre ENEA come capofila, anche le competenze trasversali del Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano e la visione industriale e Heritage spaziale portati Thales Alenia Space Italia.

Per quanto attiene alla propulsione per la esplorazione spaziale oggi si pensa all'applicazione di tecnologie basate sulla fusione nucleare.



Base umana sulla Luna (elaborata con tecniche di intelligenza artificiale)



La camera della macchina Proto-Sphera all'interno della quale avviene la scarica di plasma

Lo studio della fusione nucleare si svolge su due linee di attività principali, quella relativa al confinamento inerziale, con l'utilizzo di potenti laser incidenti su un piccolo bersaglio sferico, come nel caso dell'esperimento ABC di Frascati, oppure mediante confinamento magnetico, dove grandi magneti creano le condizioni per intrappolare le particelle energetiche. In tal caso la geometria più utilizzata è quella toroidale (macchine tipo Tokamak), ove una ciambella cava rappresenta il contenitore del plasma. Esistono anche studi per configurazioni alternative che possono differire marginalmente o radicalmente da quest'ultima. Il Dipartimento Nucleare è impegnato anche in uno di questi possibili approcci, mediante l'utilizzo della macchina **PROTO-SPHERA**, una idea innovativa in via di sviluppo.

La macchina PROTO-SPHERA si distingue per generare plasmi con una geometria tendenzialmente sferica, già nota per la sua ottima capacità di confinamento dovuta alla sostituzione del trasformatore centrale, tipico di un Tokamak, con una colonna di plasma, in analogia a quanto si osserva in natura all'interno di alcune nebulose.

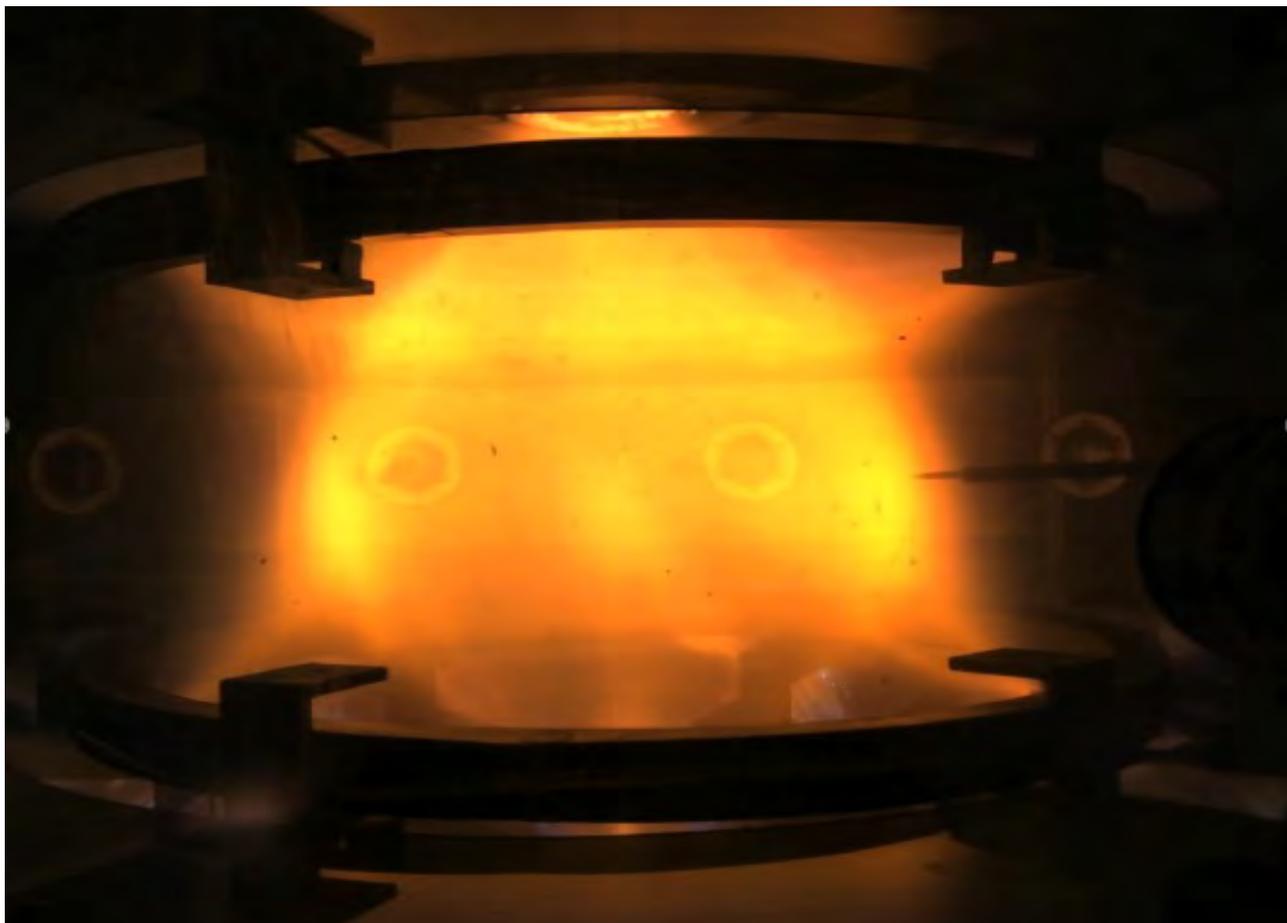
L'utilizzo della macchina PROTO-SPHERA

La macchina ha fornito e fornisce ottimi risultati in relazione alla capacità di generare configurazioni intrinsecamente stabili di plasmi che non necessitano quindi di un controllo attivo e può effettuare scariche in regime continuo, avendo rimpiazzato il trasformatore centrale in grado di fornire solo funzionamento alternato, con una scarica di plasma

tra due elettrodi che non ha, potenzialmente, limiti di regime di funzionamento.

La macchina consente di:

- essere utilizzata come banco di prova per lo sviluppo di diagnostiche di plasma che andranno realizzate su DTT;
- formare giovani studenti e ricercatori mediante un design che utilizza tutta la fisica delle macchine maggiori ma con una semplicità di utilizzo incomparabilmente superiore e con limitati problemi di sicurezza in ambito radiologico;
- effettuare studi sulle riconessioni magnetiche, fenomeno osservabile in astrofisica (nella corona solare e nelle nebulose) ma ancora non completamente compreso (collaborazione INAF); tale fenomeno, se opportunamente compreso e gestito, potrebbe rappresentare un interessante mezzo



La macchina PROTO-SPHERA durante una scarica di plasma

addizionale di riscaldamento del plasma per l'ottenimento della fusione termonucleare;

- testare configurazioni di propulsione spaziale mediante espulsione diretta di particelle veloci dalla colonna centrale di plasma attraverso un ugello magnetico (coll. UNI La Sapienza). **La geometria di PROTO-SPHERA consente di studiare agevolmente tali configurazioni. Inoltre, propulsori basati sulla fusione nucleare**

rappresentano un'alternativa interessante (e "socialmente accettabile") per la propulsione spaziale. Un reattore a fusione può essere assemblato in orbita oppure lanciato già assemblato da Terra.

Gli elementi impiegati (deuterio, litio, elio-3, boro, etc.) sono radiologicamente inerti e richiedono solo precauzioni analoghe a quelle normalmente utilizzate per i combusti-

bili chimici, comunque presenti nei vettori di lancio. Resta comunque aperto il problema di realizzare un reattore a fusione realmente funzionante, leggero, abbastanza semplice e sufficiente affidabile da poter essere utilizzato nello spazio. In questa ottica, le geometrie senza palo centrale, come PROTO-SPHERA, si prospettano estremamente promettenti. È al momento previsto un piano di potenziamento della macchina.

per info: marco.ciotti@enea.it

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 dispitegate 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-

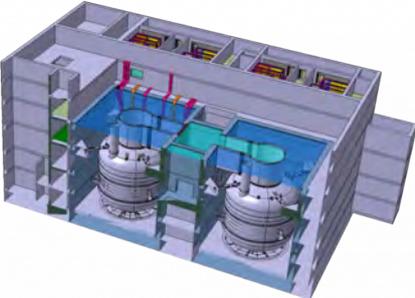
lano, a Forty Seven, a Tectubi Racordi, ad Ansaldo Finmeccanica e ad Ansaldo Energia. I settori operativi di SIET possono essere riassunti in:

- 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
	<p>NUWARDTM - PWR integrale, con due unità indipendenti per avere massima flessibilità di esercizio, potenza elettrica 340 MWe.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Forniture Componenti e Sistemi 2) Supporto al licensing mediante analisi, caratterizzazioni sperimentali 3) Coinvolgimento ENEA & SIET 

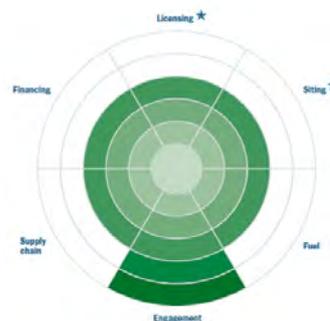
Design Organization	Thermal Power (MWth)	Outlet Temperature (°C)	Spectrum (thermal/fast)	Fuel type	Fuel (LEU/HALEU/HEU)
NuScale Power	250	321	Thermal	UO ₂ pellets	LEU

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



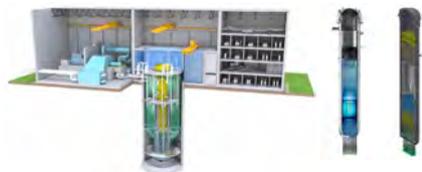
NuScale Power Module™ (NPM) è un piccolo reattore ad acqua pressurizzata (PWR) raffreddato ad acqua leggera. Gli impianti NuScale VOYGR™ SMR sono scalabili e possono essere costruiti per ospitare un numero variabile di unità e soddisfare le esigenze energetiche del cliente. Gli impianti standard NuScale 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

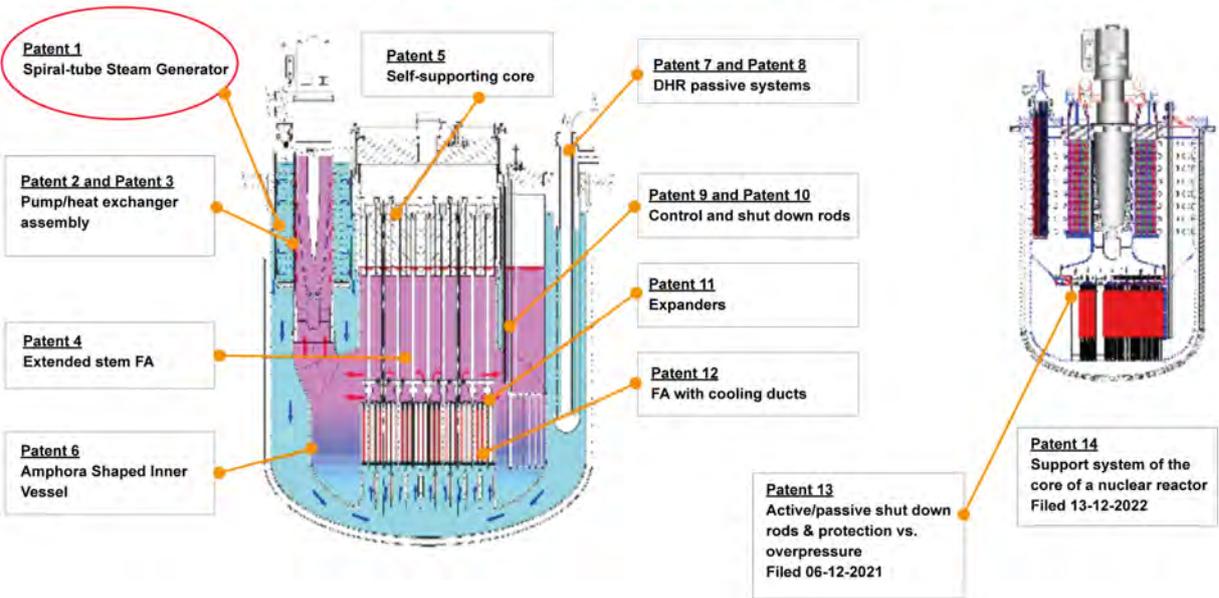
LFR-AS-200 (newcleo, Italy) **Potenziale ruolo dell'Italia**



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

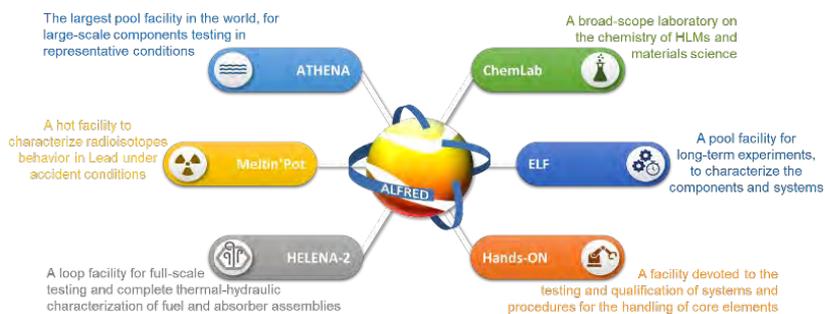


ALFRED (ANSALDO NUCLEARE, ENEA, RATEN-ICN, Romania)		Potenziale ruolo dell'Italia
--	--	-------------------------------------



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

Un nuovo modo di comunicare il nucleare

La mozione di maggioranza approvata dalla Camera nel maggio scorso per impegnare il governo ad “incentivare lo sviluppo delle nuove tecnologie nucleari destinate alla produzione di energia per scopi civili” e il varo da parte del Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica della Piattaforma nazionale per un nucleare sostenibile rendono necessario un cambio di passo nell’informazione e divulgazione sui temi legati al nuovo nucleare, anche per aprire una riflessione. Sulla scarsa conoscenza, infatti, attecchisce l’informazione distorta, sia che provenga dai giornali sia che si propaghi sui social.

DOI 10.12910/EAI2023-072

di **Alice Avila**, Unità Relazioni e Comunicazione - ENEA

Dall’ultima indagine SWG sugli Italiani e il nucleare, presentata in ottobre a Milano alla quarta edizione della “Intelligence Week”, è emerso che i favorevoli in linea di massima all’utilizzo in Italia delle nuove tecnologie nucleari oscillano tra il 49 e il 55%, con una percentuale di giovani di 16 punti superiore a quella degli over 55 (63% contro 47%). Le nuove tecnologie sono conosciute da una quota compresa tra il 19 e il 33% del campione (in tutto, 800 italiani maggiorenti): di questa fetta il 67% le ritiene sicure e il 60% green.

La ricerca ha inoltre rilevato come la popolazione sia spaccata in tre gruppi: un primo, pari al 26% degli intervistati, esprime una contrarietà a prescindere verso i nuovi impianti. A questo si oppone un gruppo un po’ meno consistente (20%) che, al contrario, li vede con assoluto favore. Nel mezzo, la maggioranza (54%), aperta a valutare la possibilità di fruire di queste tecnologie, soprattutto se le centrali nucleari saranno costruite ad una distanza significati-

va dalla propria abitazione e ancora di più se consentiranno un risparmio in bolletta.

Secondo il direttore dello studio Swg, Riccardo Grassi, “qualche anno fa il consenso sul nucleare era al 30%. Oggi due under 35 su tre sono favorevoli a nuovi impianti nucleari, mentre gli over 55 che hanno vissuto l’esperienza di Chernobyl sono i più contrari. È fondamentale lavorare su una nuova narrazione, concreta e pragmatica, che tratti gli Italiani da adulti, senza slogan”.

Vogliamo partire da questa recente fotografia per evidenziare l’opportunità di un nuovo modo di comunicare sul nucleare, senza pregiudizi di parte, basato sui dati scientifici e sul progresso della ricerca e delle tecnologie.

Un cambio di passo nell’informazione

L’attuale scenario geopolitico, dominato dalla crisi del gas russo e dalla necessità della sicurezza degli approvvigionamenti, il Green Deal europeo, che sottolinea l’urgenza di ridurre le emissioni di CO₂, le sfide

della transizione energetica in corso e l’esigenza, sottolineata dal governo italiano, di un nuovo mix energetico che preveda anche il nucleare mettono in discussione il nostro modo di produrre e consumare energia.

Di conseguenza, **la Camera ha approvato nel maggio scorso la mozione di maggioranza, che ha impegnato il governo ad “incentivare lo sviluppo delle nuove tecnologie nucleari destinate alla produzione di energia per scopi civili”**. E in linea con questo, il ministero dell’Ambiente e della Sicurezza energetica ha lanciato in settembre la **Piattaforma nazionale per un nucleare sostenibile**, coordinata con il supporto di ENEA e Rse, che ha l’obiettivo “di definire in tempi certi un percorso finalizzato alla possibile ripresa dell’utilizzo dell’energia nucleare in Italia e alle opportunità di crescita della filiera industriale nazionale già operante nel settore”.

Da tutto ciò scaturisce la necessità di un cambio di passo nell’informazione e divulgazione sui temi legati al nuovo nucleare, anche per aprire una riflessione. Come fece



Greta Thunberg nell'ottobre 2022, quando criticò il piano della Germania di dismettere gli impianti nucleari in esercizio per riaprire quelli a carbone a causa del taglio del gas dalla Russia. "Personalmente credo sia una pessima idea puntare sul carbone quando l'energia nucleare è già presente" – disse la giovane attivista, scatenando polemiche inevitabili.

La recente rivalutazione del nucleare in Europa, a seguito della guerra in Ucraina e dell'emergenza gas, sostenuta persino dai Verdi finlandesi, impone l'esigenza di informare in modo equilibrato per creare innanzitutto conoscenza. Sulla scarsa conoscenza, infatti, attecchisce l'informazione distorta, sia che provenga dai giornali sia che si propaghi sui social. E sulle paure, come quelle legate agli incidenti di Chernobyl e di Fukushima.

Un aumento netto del sostegno al nucleare

Un paper del marzo 2023 della Fondazione Robert Schuman ("A return to grace for nuclear power in European public opinion? Some elements of a rapid paradigm shift") ha messo in evidenza che, indipendentemente dalle decisioni dei Paesi sull'energia nucleare, prima della fine del 2022 si è verificato un aumento netto del sostegno al nucleare. Un aumento particolarmente forte nei Paesi in cui le posizioni contrarie sono predominanti e radicate, come l'Italia (+18 punti) o la Germania (+15), e "più moderato ma notevole" nei Paesi impegnati in un percorso di abbandono, come il Belgio (+12 punti) e la Spagna (+13). Il Regno Unito, invece, che sta rilanciando il nucleare, mostra un incremento più significativo (+14) rispet-

to alla Francia, dove il sostegno era già alto nel settembre 2021.

La percezione che i cittadini hanno è, dunque, la base per l'accettazione sociale che a sua volta è strettamente connessa, oltre che alla possibilità di partecipare al processo decisionale, al fatto di avere a disposizione informazioni affidabili, provenienti preferibilmente da esponenti scientifici. Informazioni chiare e semplici, accessibili a tutti, che facciano luce sugli aspetti legati alla sicurezza, alla gestione delle scorie, all'impatto ambientale e alla salute, anche per evitare la sindrome Nimby "Not in my back yard", ovvero "non nel mio cortile".

Per creare conoscenza e consapevolezza le azioni di comunicazione delle Istituzioni competenti dovrebbero prevedere campagne di comunicazione mirate, road show

e conferenze con esperti scientifici, materiali informativi per le nuove generazioni e per gli adulti, brevi video e podcast, tutti con un linguaggio che coniughi la correttezza scientifica e l'informalità tipica della divulgazione.

Spiegare la differenza, per esempio, tra le diverse generazioni di nucleare, tra fusione e fissione, tra small e micro modular reactor, descrivendone maturità tecnologica, tempi di realizzazione, sicurezza, sostenibilità, costi e benefici è un punto di parten-

za per informare con semplicità ed efficacia.

Illustrare, poi, a che punto sono la ricerca e lo sviluppo tecnologico, in Italia e all'estero, significa fare chiarezza con realismo sul nuovo nucleare, così da fugare i dubbi e smascherare le false chimere.

Come diceva Cartesio, "il dubbio è l'origine della saggezza". Ma il dubbio a volte può inciampare su informazioni generiche o fuorvianti o ancora sulle fake news. Un rischio a cui i cittadini sono esposti, come

ha dimostrato la pandemia. **Diventa allora fondamentale offrire risposte e spiegazioni semplici, corrette, indipendenti e autorevoli, basate su fonti certe e verificate. E qui l'apporto del giornalista e del comunicatore è determinante. Scrivere o parlare arrivando davvero alle persone, per incontrarsi e non per scontrarsi, è il *quid* che fa la differenza.**

per info: alice.avila@enea.it

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
Laboratorio Tecnografico - Centro Ricerche ENEA Frascati

www.enea.it