

Scheda tecnica

Dai reattori di nuova generazione all'energia delle stelle: prospettive e scenari della ricerca sul nucleare

Che cosa è la fissione nucleare?

La fissione nucleare è un processo basato sulla disintegrazione dell'atomo generata dall'urto fra un neutrone e nuclei di atomi molto pesanti (fissili, quali l'uranio o il plutonio) che si rompono in frammenti più piccoli e producono neutroni che possono a loro volta provocare altre fissioni, innescando reazioni a catena. I frammenti di fissione generano energia cinetica che si trasforma in calore, cioè in energia termica, utile per produrre vapore con cui alimentare una turbina e ricavare energia elettrica. La fissione di 1 grammo di uranio produce un quantitativo di energia pari a quella ottenibile dalla combustione di circa 2.800 kg di carbone. Il problema è che il processo di fissione comporta anche la produzione di rifiuti radioattivi che necessitano di centinaia di migliaia di anni per diventare innocui.

Che cosa è il nucleare di IV generazione?

I reattori nucleari a fissione sono generalmente classificati per "generazione", ovvero Generazione I, II, III, III+ e IV sulla base delle caratteristiche chiave che hanno determinato lo sviluppo e il loro impiego a livello industriale. Le prime tre generazioni derivano da progetti inizialmente proposti per la propulsione navale, quasi esclusivamente militare, alla fine degli anni 40.

La **Generazione I** si riferisce ai primi prototipi che hanno lanciato il nucleare civile di potenza. Questi tipi di reattore in genere funzionavano a livelli di potenza ridotti. Ad oggi non vi sono impianti di Generazione I in esercizio.

Alla **Generazione II** appartengono tutti quei reattori commerciali raffreddati soprattutto ad acqua, che hanno portato a maturità le tecnologie dei reattori della prima generazione, aumentandone il potenziale di affidabilità. I sistemi di II generazione hanno iniziato a funzionare alla fine degli anni '60 e comprendono la maggior parte degli oltre 450 reattori commerciali del mondo (oltre il 90%). Sono reattori che utilizzano sistemi di sicurezza attiva (che richiedono operazioni elettriche o meccaniche avviate da un operatore), anche se questi sistemi sono talvolta integrati in maniera complementare da sistemi passivi (che non richiedono attuazione o operazione da parte dell'uomo). Producono quantità significative di combustibile esausto che necessitano lo smaltimento finale in depositi geologici o ritrattamento. Gli impianti di Three Mile Island, Chernobyl e Fukushima Daiichi sono tutti reattori di Generazione II.

I **reattori di Generazione III** sono essenzialmente evoluzioni dei reattori di Generazione II. I miglioramenti nella tecnologia hanno puntato innanzitutto a estenderne la vita operativa, da 40 fino a 60 anni, aumentare l'efficienza e ad accrescerne ulteriormente il livello di sicurezza. In particolar modo nei reattori di Generazione III+ si fa ampio uso di sistemi passivi o attivi di nuova concezione. Oggi sono in esercizio o in fase di costruzione circa una ventina di sistemi di Generazione III+. Resta il fatto che anche questi reattori, basati sulla tecnologia dei reattori ad acqua, permane il problema di un ciclo del combustibile non chiuso, che richiede lo stoccaggio del combustibile esausto in un deposito geologico.

I **Reattori di IV Generazione, tra cui i Reattori veloci refrigerati a piombo (Generation IV – Lead-cooled Fast Reactor - LFR)** sono il **vero punto di svolta** e attraggono un sempre maggiore interesse. Questa tipologia di reattori rappresenta **la quasi esclusività delle attività di ricerca e sviluppo nel settore in Italia. La fondamentale differenza dei reattori LFR di IV generazione rispetto a quelli attuali è un sistema refrigerante che utilizza piombo invece di acqua;** in questo modo, grazie alle caratteristiche fisiche del piombo, è possibile garantire la presenza del refrigerante in qualsiasi condizione incidentale e garantire un nucleare civile sostenibile, sicuro, affidabile, resistente alla proliferazione.

Le proprietà intrinseche del refrigerante adottato e l'utilizzo di sistemi passivi rende l'impianto estremamente affidabile, semplificando la gestione di eventuali incidenti. In 20 anni di studi sui sistemi LFR, non si sono evidenziati scenari incidentali che abbiano determinato la "fusione del nocciolo". Questi sistemi sono inoltre ideati e progettati per essere semplici e compatti al fine di ridurre la complessità e le dimensioni dell'impianto, oltre ai costi di approvvigionamento, di installazione e manutenzione. Inoltre, operando a temperature più elevate, garantiscono un rendimento maggiore nella produzione di energia elettrica, possono utilizzare combustibile riprocessato in grandi quantità rendendo il riprocessamento del combustibile economicamente conveniente (ciclo del combustibile chiuso) e gli elementi in esso contenuti sono tecnicamente inaccessibili (primo fra tutti il plutonio) garantendo così un'elevata sicurezza in caso di eventi incidentali, di attacchi terroristici o di azioni di sabotaggio, poiché il reattore tende spontaneamente a una condizione stabile e sicura. Per concepire e promuovere lo sviluppo di sistemi nucleari di IV generazione e renderli disponibili industrialmente negli anni '30, nel 2001 è stato istituito il GENERATION IV International Forum (GIF) al quale l'Italia partecipa tramite la rappresentanza dell'Europa. Questi **obiettivi sono raggiungibili, nell'arco di 20-25 anni**, massimizzando la ricerca nella termofluidodinamica dei metalli liquidi e nella progettazione di nocciolo (la parte che contiene il combustibile).

Che cosa sono gli Small Modular Reactors (SMR) e Advanced Modular Reactors (AMR)?

A metà strada fra la terza e la quarta generazione di reattori si pongono due filiere particolarmente interessanti che possono essere determinanti nel processo di decarbonizzazione già dai prossimi anni: gli **Small Modular Reactors (SMR)** e gli **Advanced Modular Reactors (AMR)**. Si tratta del cosiddetto **'nucleare sostenibile' o nucleare di nuova generazione**.

- **Gli Small Modular Reactors (SMR)** sfruttano la tecnologia dell'attuale flotta 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); gli SMR possono essere la risposta immediata alle difficoltà tecniche e realizzative delle centrali di terza generazione: le dimensioni ridotte (che riducono i costi dei sistemi di sicurezza pur mantenendone immutate le garanzie), la modularità (che permette di realizzare la maggior parte dei componenti in un unico sito industriale per spedirli successivamente alla zona di installazione), l'armonizzazione, almeno a livello europeo, delle procedure di licensing dell'impianto, sono tutti fattori che permettono di rendere il costo del kWh da nucleare concorrenziale con quello da rinnovabili, nonostante la perdita dell'effetto scala. Resta irrisolta la questione relativa alla produzione di rifiuti radioattivi a lunga vita: gli SMR, infatti, sono raffreddati ad acque e devono utilizzare come combustibile uranio arricchito che a fine utilizzo deve essere gestito come rifiuto.
- **Gli Advanced Modular Reactor (AMR)**, derivati dalle tecnologie di quarta generazione, utilizzano nuovi sistemi di raffreddamento (es. piombo liquido) o combustibili innovativi per offrire prestazioni migliori, nuove funzionalità (cogenerazione, produzione di idrogeno, soluzioni di gestione dei rifiuti nucleari) e un cambiamento di passo per una più elevata competitività economica, sostenibilità, sicurezza passiva e affidabilità, nonché resistenza alla proliferazione atomica e protezione fisica.

Il refrigerante a metallo liquido, che permette di utilizzare in larga parte combustibile riprocessato, è l'innovazione principale dei più promettenti modelli in studio della quarta generazione, è una caratteristica propria anche degli AMR: oltre a minimizzare il quantitativo di rifiuti a lunga vita prodotti, l'uso di metallo liquido consente anche altri vantaggi, primo fra tutti la possibilità di utilizzare il calore che viene smaltito (quindi sprecato) nel processo di trasformazione del calore in lavoro tipico di qualsiasi ciclo termico.

Infatti, la temperatura alla quale si smaltisce il calore nei reattori raffreddati ad acqua è di poco superiore alla temperatura ambiente, quindi inutilizzabile; negli AMR raffreddati al piombo liquido, invece, la temperatura di smaltimento del calore è molto alta e quindi si può utilizzare questo calore residuo per generare idrogeno (uno dei più promettenti vettori energetici del futuro) o per il teleriscaldamento, rendendo in tal modo più efficiente lo sfruttamento del calore prodotto dalla fissione nucleare.

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 benefici 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;
- la **standardizzazione e realizzazione in fabbrica** che, insieme 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.

Finora, per sfruttare l'effetto scala, sono state progettate centrali nucleari di grandi dimensioni, come ad esempio l'EPR realizzato di recente in Finlandia, ma le richieste di verifica e le modifiche imposte dalle Autorità di Controllo nazionali a valle dell'incidente di Fukushima, hanno portato a forti aumenti dei costi e dei tempi di realizzazione.

Che cosa sono i reattori ADS?

Una ulteriore evoluzione, portata avanti in parallelo alla IV generazione da alcuni partenariati internazionali composti principalmente da soggetti privati, mira a realizzare entro il 2030 i reattori cosiddetti ADS (Accelerator Driven System, letteralmente "sistemi guidati da un acceleratore"): in questo caso, per funzionare, il reattore ha bisogno di neutroni prodotti dall'esterno grazie a un acceleratore di protoni. Il livello di sicurezza è molto maggiore poiché in caso di black-out elettrico (evento più rischioso in assoluto per una centrale nucleare) l'acceleratore smette di funzionare e il reattore non ricevendo i neutroni necessari, si spegne.

In conclusione, si può senz'altro affermare che a livello mondiale la fissione nucleare potrà dare un contributo alla decarbonizzazione della produzione energetica, fornendo, tra l'altro un notevole impulso al settore produttivo: basti pensare che si stima, entro il 2035, l'installazione di oltre 20 GWe di SMR a livello globale (3% della capacità nucleare totale oggi installata), accompagnata da investimenti in ricerca e sviluppo per 1 miliardo di euro per la realizzazione di reattori "First of a Kind" nel prossimo decennio.

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

La ricerca ENEA nel campo del nucleare tradizionale

Le attività di ricerca sulla fusione e la fissione fanno capo al Dipartimento Nucleare dove lavorano quasi 500 fra ricercatori e tecnologi nei Centri di Ricerca di Brasimone, Bologna, Frascati e Casaccia. Nel **Centro ENEA di Frascati** sono stati realizzati impianti di rilievo internazionale come il Frascati Tokamak, il Frascati Tokamak Upgrade, il Frascati Neutron Generator e si stanno sviluppando attività nel settore dei materiali superconduttivi, anche per utilizzo industriale nel campo spaziale, della produzione di idrogeno, oltre a macchine per la cura avanzata di patologie tumorali (protonterapia). Nel **Centro di Ricerche ENEA del Brasimone** la ricerca sulla fusione si concentra in particolare sulle tecnologie per la produzione di trizio e ha recentemente dato vita anche a due nuovi filoni di attività: la produzione di radiofarmaci, con la prospettiva di realizzare un Polo Nazionale per la medicina nucleare e lo sviluppo di tecnologie avanzate per il monitoraggio e la sicurezza/difesa del territorio.

Ad oggi il Centro di Ricerca del Brasimone dispone di un parco impianti fra i più ampi e attrezzati d'Europa. In parallelo, presso il Centro di ricerca ENEA di Bologna sono state affinate nuove tecniche di progettazione per i sistemi nucleari LFR (nucleare di IV generazione), e nuove metodologie nonché strumenti di calcolo e analisi, con particolare riferimento alla sicurezza, che fanno di ENEA uno fra gli enti di ricerca più avanzati a livello internazionale su questa tecnologia. Nel **Centro della Casaccia** la ricerca riguarda la fissione nucleare.

La ricerca ENEA sui reattori di nuova generazione

ENEA, in collaborazione con il sistema universitario italiano (CIRTEN) e l'industria nazionale, (in particolare con Ansaldo Nucleare), da oltre 20 anni svolge attività di ricerca e sviluppo tecnologico sui sistemi nucleari a fissione di IV Generazione refrigerati a piombo. Risale infatti al 1999 la progettazione e successiva installazione, presso il Centro di Ricerca Brasimone, dei primi impianti sperimentali per lo sviluppo tecnologico di sistemi refrigerati a metallo liquido pesante (piombo o leghe di piombo).

Le attività di Ricerca&Sviluppo hanno riguardato in special modo lo sviluppo di materiali innovativi, gli studi di termoidraulica dei metalli liquidi, la progettazione e qualifica di componenti avanzati e, infine, le prove su sistemi integrali anche di larga scala.

Nel settore degli AMR e della IV generazione, ENEA e con i suoi partner industriali partecipa a due rilevanti progetti internazionali:

- la progettazione di due AMR, in Francia e Regno Unito, assieme alla start-up *newcleo* che si propone di realizzare reattori che invece di produrre rifiuti a lunga vita, possano bruciare quelli prodotti nel passato. L'accordo guarda alla realizzazione di Advanced Modular Reactors. *newcleo* si propone di sviluppare i primi prototipi entro sette anni e, successivamente, di commercializzarli a livello internazionale.
- la realizzazione del primo dimostratore di reattore di IV generazione raffreddato al piombo denominato Alfred (Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator), che sarà realizzato in Romania; il progetto è portato avanti dal consorzio internazionale FALCON (Fostering Alfred Construction), di cui fanno parte Ansaldo Nucleare, ENEA e Istituto di Ricerca Nucleare della Romania. Diversi componenti ad alta tecnologia saranno qualificati dai laboratori ENEA del CR Brasimone.

Che cosa è la fusione nucleare?

La **fusione nucleare è un processo completamente diverso dalla fissione** e ha come obiettivo di produrre energia elettrica rinnovabile, inesauribile, in modo intrinsecamente sicuro, utilizzando lo stesso meccanismo che 'accende' gli astri. Per questo viene chiamata 'energia delle stelle'.

Nella fusione, l'energia scaturisce dall'unione di due nuclei di elementi molto leggeri quali, ad esempio, l'idrogeno; dalla reazione scaturiscono un neutrone e l'elio, un gas nobile ampiamente utilizzato nella

vita quotidiana. Non vengono prodotte emissioni di gas serra, né rifiuti radioattivi che restano tali per millenni, escludendo così la possibilità di incidenti che coinvolgano la popolazione ed eventuali criticità future da materiali residui: infatti, gli unici materiali radioattivi (la parte di combustibile costituita da trizio e i prodotti di attivazione generati durante il funzionamento) sono all'interno della camera di reazione che non ha contatti con l'esterno. Altri vantaggi sono: il rispetto dell'ambiente e zero impatto da estrazione dei combustibili, la sicurezza intrinseca e lo sviluppo di tecnologie innovative applicabili in numerosi campi.

Esistono **due modi per indurre la fusione**: i sistemi che utilizzano il confinamento inerziale, in cui potenti fasci laser incidono su piccole sfere congelate di deuterio e trizio comprimendole e scaldandole fino a raggiungere, al centro delle sferette compresse, le condizioni in cui si verificano le reazioni di fusione, e i sistemi che utilizzano il confinamento magnetico, in cui grandi magneti formati da materiali superconduttori imbrigliano il gas idrogeno confinandolo all'interno di un volume ben definito a forma di ciambella, all'interno della quale viene scaldato fino a raggiungere le condizioni per la fusione. In entrambi gli approcci, l'idrogeno deve raggiungere temperature di oltre 100 milioni di gradi, in uno stato particolare chiamato "plasma".

A differenza dei tradizionali reattori a fissione, le centrali a fusione non producono rifiuti radioattivi ad alta attività/di lunga durata. Infatti, il prodotto della reazione di fusione è elio, ovvero un gas inerte.¹ Ci sono però due tematiche da tener presente. La prima riguarda la presenza di trizio, un isotopo dell'idrogeno che ha una radioattività molto bassa e un tempo di dimezzamento di circa 12 anni. La seconda è che i materiali che compongono la camera interna del reattore diventano radioattivi dando luogo a rifiuti ad attività bassa o media, riciclabili, ad esempio, in altri impianti di fusione. Ad oggi lo sviluppo di materiali a "bassa attivazione" rappresenta una parte importante della ricerca sulla fusione. Per quello che riguarda la sostenibilità economica, non abbiamo ancora stime attendibili del costo medio per kilowattora di elettricità da fusione. Ma certamente i costi si ridurranno per effetto dell'ulteriore sviluppo della tecnologia e delle economie di scala: più le centrali a fusione penetreranno il mercato più il costo dell'elettricità prodotta diventerà competitivo.

Ad oggi, la fusione nucleare è considerata una prospettiva di grande rilievo anche se le tempistiche sono di lungo periodo, oltre l'orizzonte del 2050.

¹ Ad oggi per riprodurre il meccanismo che accende gli astri, la ricerca scientifica utilizza una macchina denominata Tokamak, di forma toroidale, caratterizzata da un involucro cavo, con all'interno un'apposita 'camera di reazione' rivestita da un mantello costituito da contenitori di litio, un metallo presente in abbondanza sulla terra. Fra le diverse configurazioni magnetiche studiate (Stellarator, Tokamak etc) il Tokamak si è dimostrato la soluzione tecnologica più efficace per la sua stabilità e capacità di assicurare i lunghi tempi di confinamento necessari a mantenere il plasma in condizioni di temperatura e densità sufficientemente lunghe per farle collidere e fondersi.

La reazione di fusione viene riprodotta all'interno del Tokamak utilizzando il litio presente nel rivestimento, il deuterio, una forma di idrogeno di cui è ricca l'acqua di mare (30 g/m³) e il trizio, generato direttamente all'interno del Tokamak, in un ciclo chiuso. Deuterio e trizio vengono immessi nella camera di reazione e portati a temperature di 200 milioni di gradi, oltre dieci volte l'interno del sole, trasformandosi in un composto di particelle cariche separate, nuclei ed elettroni, ovvero in plasma. Per arrivare a questo risultato si impiegano sistemi altamente sofisticati, basati sull'uso di onde elettromagnetiche o di fasci di particelle neutre.

Per evitare che le particelle di plasma si muovano disordinatamente, urtando e danneggiando le pareti, perdendo energia preziosa e, di conseguenza, inibendo la reazione di fusione, intorno alla camera di reazione all'interno del Tokamak vengono collocati grandi magneti che hanno il compito di produrre campi magnetici in grado di 'confinare' il plasma. Il passaggio dalla reazione di fusione alla produzione di energia elettrica avviene attraverso i neutroni generati dall'unione fra il deuterio e il trizio: l'energia dei neutroni viene depositata all'interno del mantello della camera di reazione dove viene trasformata in vapore che alimenta una gigantesca turbina per produrre energia elettrica. L'elio che residua nei diversi passaggi del processo viene smaltito senza problemi.

La caratteristica fusione è la capacità di autosostenersi grazie all'energia prodotta nella fusione stessa; tuttavia, il processo va costantemente alimentato iniettando gas di deuterio e trizio nella camera di reazione e rimuovendo l'elio prodotto. Infatti, se l'iniezione cessa, la reazione si spegne immediatamente. Da qui l'intrinseca sicurezza del sistema.

I principali progetti nel campo della fusione

Ad oggi il maggior progetto nel campo della fusione è **ITER, l'International Thermonuclear Experimental Reactor**, al quale collaborano Unione Europea, Cina, India, Giappone, Corea del sud, Russia e Stati Uniti. Si tratta di un progetto di grande complessità tecnologica, diretto dall'italiano Pietro Barabaschi, in costruzione a Cadarache, in Francia, con un investimento di oltre 20 miliardi di euro di cui circa il 50% sostenuti dall'Unione Europea. L'obiettivo è di dimostrare la fattibilità della produzione di energia da fusione e di avere il massimo ritorno scientifico per poter progredire nei tempi più brevi possibili verso un reattore dimostrativo **DEMO**. In parallelo, l'Europa sta progettando il reattore dimostrativo DEMO con l'obiettivo di immettere in rete energia elettrica prodotta da fusione nella **seconda metà del secolo**.

Un'altra infrastruttura di rilievo nel campo della fusione è il **DTT, il Divertor Tokamak Test**, ideato principalmente da ENEA e in costruzione al Centro ENEA di Frascati, con l'obiettivo di dare risposte ad alcuni dei nodi da ancora da sciogliere sul cammino della fusione. Realizzato da un consorzio che, oltre ad ENEA, coinvolge ENI e numerose istituzioni di ricerca e Università italiane, DTT prevede investimenti per oltre 600 milioni di euro con ricadute economiche stimate in 2 miliardi di euro. Intorno al DTT è prevista la realizzazione di una cittadella internazionale della ricerca, aperta a scienziati di tutto il mondo.

Infine, vi è il progetto **DONES (Demo Oriented Neutron Source)**, in costruzione in Spagna per qualificare i materiali che meglio rispondono, in termini di resistenza meccanica (danneggiamento da radiazioni e attivazione) se immersi in campi neutronici paragonabili a quelli di un reattore industriale.

Le attività dell'ENEA nel campo della fusione nucleare

L'Italia ha una lunga tradizione di ricerca nel campo della fusione ed è il secondo partner più importante nel consorzio europeo **EUROfusion**. Il principale attore in questo campo è l'ENEA che svolge il ruolo di Program Manager Nazionale coordinando 22 partner fra enti di ricerca, università e industrie.

Le attività di ricerca e sviluppo sulla fusione svolte da ENEA e da altre istituzioni scientifiche hanno consentito alla nostra industria di partecipare con successo alla realizzazione di grandi progetti internazionali. Nella costruzione di ITER, ad esempio, circa 2 miliardi di euro sono stati assegnati, tramite gare internazionali, a soggetti italiani², posizionandoci al secondo posto dopo la Francia (che però vede negli edifici civili gran parte delle attività realizzative).

Video e materiali di approfondimento:

- [Il n. 3 del 2023 del magazine EAI Energia Ambiente e Innovazione dal titolo "Nuovo nucleare: ricerca, tecnologie, scenari e prospettive"](#)
- [Video "10 domande sul nucleare"](#)
- [Playlist ENEA Highlights sulla fusione nucleare](#)
- [Video Italia Stellare](#)
- [Video Italia Stellare \(teaser\)](#)
- [Video del modello dell'impianto sperimentale DTT, Divertor Tokamak Test \(scala 1:13\)](#)
- [DTT, il grande polo scientifico internazionale per la fusione in Italia](#)

² Fra le imprese spiccano i nomi di: ASG superconductors, CECOM, Delta TI, Ansaldo, Mangiarotti, OCEM Energy Technology, SIMIC, Walter Tosto, Tratos, Criotec, solo per citare alcune delle circa 50 aziende coinvolte. La ricerca fusionistica ha ricadute anche in altri settori quali ad esempio i trasporti: i treni a levitazione magnetica Maglev, sono possibili grazie ai progressi nel campo della superconduttività.