

Indagine conoscitiva in materia di energia prodotta mediante fusione nucleare
VIII Commissione (Ambiente, transizione ecologica, energia, lavori pubblici, comunicazioni,
innovazione tecnologica)

Senato della Repubblica

Audizione Parlamentare

6 marzo 2024

Gentile Presidente, gentili Onorevoli,

in qualità di Presidente di AIN – Associazione Italiana Nucleare - ringrazio la Commissione Ambiente per l'opportunità offerta da questa audizione che ci consente di fornire il nostro contributo, nell'ambito dell'indagine conoscitiva in materia di energia prodotta mediante fusione nucleare.

L'energia da fusione nucleare

La fusione di due isotopi dell'idrogeno, il deuterio (D) e il trizio (T), reazione D-T dà luogo alla produzione di un nucleo di elio (He) e di un neutrone (n) con il rilascio di 17,6 MeV di energia sotto forma di energia cinetica dei prodotti:



L'energia sviluppata per ogni grammo di materia reagente è pari a circa 340 GJ, equivalenti a 6,5 tonnellate di metano, ovvero circa 9700 scm (metri cubi standard).

Il funzionamento di un impianto di produzione dell'energia che utilizza la reazione DT si basa sulle seguenti caratteristiche:

- i nuclei di elio (particelle alfa) prodotti dalla reazione di fusione restano confinati nel volume del plasma, sostenendone la temperatura e compensando le perdite di calore;
- i neutroni prodotti sfuggono verso l'esterno del recipiente in cui avviene la reazione (camera a vuoto o vacuum vessel) e depositano la loro energia in un mantello collocato intorno ad essa (blanket), il quale ospita il sistema di raffreddamento e contiene un materiale a base di

litio. Mentre vengono rallentati, i neutroni reagiscono con il litio (Li, costituito per il 7.6% da ${}^6\text{Li}$ e per il 92.5% da ${}^7\text{Li}$) producendo trizio attraverso reazioni nucleari.

Le materie prime per il combustibile della fusione con ciclo DT sono dunque il deuterio e il litio, mentre il prodotto finale è solo elio, un gas nobile e innocuo.

Il blanket, quindi, deve: assicurare una produzione di trizio tale da garantire l'autosufficienza dell'impianto; assicurare l'asportazione efficiente del calore depositato dai neutroni (pari all'80% dell'energia liberata dalla fusione) e destinato a generare energia elettrica; schermare dai neutroni i componenti più esterni e permanenti dell'impianto.

Si indica con il fattore di guadagno Q il rapporto tra la potenza di fusione prodotta e quella immessa nel plasma ($Q = 1$ è chiamata condizione di breakeven). Un reattore commerciale a fusione dovrà realizzare almeno $Q = 30$ in modo tale da produrre energia elettrica da immettere in rete, tenendo conto dell'efficienza netta di conversione e della potenza necessaria per operare l'impianto. Infatti, negli schemi attuali, si prevede comunque di fornire una quantità di potenza al plasma sotto forma di onde a radiofrequenza, in modo da controllarne il buon confinamento.

Nel caso della fusione a confinamento magnetico (una delle alternative possibili per realizzare la fusione), il confinamento del plasma si realizza mediante campi magnetici all'interno di una camera toroidale metallica, cioè a forma di ciambella, (che in un reattore avrà un volume di circa 1000 m^3), entro cui si produce il vuoto spinto. Il combustibile (D e T) viene continuamente iniettato e poi estratto per evitare l'accumulo di residui e impurità.

Nel plasma si possono sviluppare vari tipi di instabilità, che vanno evitate o eliminate, sia perché portano a contatti del plasma ad altissima temperatura con la parete metallica della camera toroidale con il rischio di danneggiarla, sia perché aumentano molto le perdite termiche.

L'intensità dei campi magnetici richiesti, insieme alle dimensioni stesse delle bobine, richiedono l'uso di magneti superconduttori (ovvero con l'utilizzo di conduttori a resistenza elettrica nulla nelle condizioni di esercizio) per limitare al minimo la potenza elettrica necessaria per alimentarli.

Per il riscaldamento del plasma alle temperature richieste si usano sistemi di riscaldamento a onde elettromagnetiche (a frequenze appropriate per un'efficace interazione con il plasma), e a iniezione di fasci di atomi neutri ad alta energia.

Le particelle alfa e quelle di plasma che sfuggono al confinamento vengono deviate da una opportuna configurazione delle linee di campo magnetico verso un componente, chiamato divertore, dal quale vengono estratte. Il divertore è costituito da tubi in cui scorre il fluido di raffreddamento, rivestiti con bersagli di materiale opportuno.

Le ricerche sviluppate dall'Unione Europea seguono principalmente la tecnica a confinamento magnetico.

Nella fusione a confinamento inerziale (altra tecnica per realizzare la fusione) una capsula sferica di qualche millimetro di diametro (detta pellet), contenente una miscela di combustibile di DT, viene compressa fino a raggiungere un'altissima densità. La compressione scalda efficacemente la regione centrale della capsula, fino a che non si raggiunge la temperatura necessaria per innescare i processi di fusione, pari a circa cento milioni di gradi centigradi.

Per ottenere la compressione della capsula a densità così alte si impiegano tipicamente fasci laser o raggi X ad alta intensità. I fasci laser o di raggi X devono incidere uniformemente tutta la superficie della capsula, trasformandola in un plasma che si espande verso l'esterno.

Al fine di avere il massimo di energia prodotta da fusione si vorrebbe che tutto il combustibile della capsula venisse "bruciato" durante il processo di fusione, ma i limiti tecnologici attuali non lo consentono. Inoltre, l'energia consumata per operare i laser è circa un centinaio di volte maggiore dell'energia prodotta dagli stessi laser, rendendo attualmente il bilancio energetico complessivo della fusione inerziale più sfavorevole rispetto a quella a confinamento magnetico.

La situazione a livello internazionale e le relative iniziative di ricerca e sviluppo

Tutti i Paesi avanzati hanno programmi di ricerca e sviluppo dell'energia da fusione per i vantaggi che essa presenta:

- la reazione su cui si basa non produce gas climalteranti;
- utilizza combustibili che sono virtualmente illimitati e geograficamente diffusi. Si stima che una centrale a fusione da 1 GW_e consumerà 250 kg di combustibile/anno, mentre una centrale a metano di pari potenza ne consuma circa 1,5 milioni di tonnellate/anno.
- è intrinsecamente sicura. Le piccole quantità di combustibile presenti nella zona di reazione assicurano che interrompendo il flusso di combustibile il reattore si autospegne.
- non utilizza uranio o plutonio e quindi non ricade, come la fissione, nel regime del trattato di non proliferazione. Peraltro, il Trizio è un materiale strategico utilizzato nella produzione di ordigni termonucleari, quindi il suo utilizzo dev'essere soggetto a opportuna sorveglianza.
- presenta un basso impatto ambientale. La reazione di fusione non produce nuclei radioattivi, ma solo elio. Nel corso del funzionamento del reattore a fusione vengono attivati per irraggiamento neutronico e quindi diventano radioattivi, solo i componenti interni al reattore, ovvero le strutture metalliche costituite prevalentemente da acciai, rame, tungsteno, etc. Occorre perciò sviluppare acciai a basso contenuto di determinate impurità nonché procedure di trattamento per il riciclo ed il riutilizzo dei materiali funzionali.
- ha come obiettivo la produzione di energia in modo continuativo. Da questo punto di vista è molto simile all'energia da fissione, ed è quindi adatta ad essere impiegata come una

sorgente di energia di base. Anche dal punto degli investimenti è caratterizzata da un grosso impegno economico per la realizzazione degli impianti e da un basso costo dei combustibili, mentre sono da definire i costi di esercizio.

I progressi ottenuti negli ultimi decenni nella comprensione teorica dei processi fisici che avvengono nei plasmi termonucleari, nello sviluppo delle tecnologie necessarie e degli strumenti numerici analitico-predittivi, e il grande impegno posto negli esperimenti, hanno portato la fusione ad un grado di maturità tecnologica vicino alla validazione in ambito sperimentale. Nella fusione a confinamento magnetico sono stati condotti esperimenti in cui il processo di fusione è stato ottenuto e controllato in condizioni vicino al breakeven (produzione netta di energia nella reazione di fusione) per tempi relativamente lunghi, e nella fusione inerziale il breakeven¹ è stato raggiunto.

La ricerca si concentra adesso sull'ottenimento di regimi di fusione a valori elevati di guadagno di potenza, e nel completamento dello sviluppo delle tecnologie necessarie per operare un impianto di potenza in modo continuo. Per entrambe le linee magnetica e inerziale è necessario proseguire lo sviluppo dei materiali per i componenti interni al reattore (blanket, divertore) in grado di sopravvivere all'intenso flusso neutronico per tutta la vita dell'impianto senza subire un degrado delle proprietà fisiche e termomeccaniche.

Infine, le soluzioni tecnologiche dovranno dar luogo a un elevato fattore di carico dell'impianto, e a costi competitivi per l'energia da fusione rispetto ai costi di produzione da altre fonti di energia sostenibili.

Il progetto attualmente più avanzato nell'ambito del confinamento magnetico è ITER, il reattore di tipo tokamak realizzato nell'ambito di una collaborazione internazionale tra Europa, Stati Uniti, Russia, Giappone, Cina, Corea del Sud e India.

ITER è stato progettato per produrre 500 MW di potenza termica da fusione con un fattore di guadagno $Q=10$ in condizioni pulsate con durata dell'impulso di centinaia di secondi, e $Q=5$ in condizioni semi stazionarie o continue. Lo scopo di ITER è dimostrare la fattibilità scientifica e tecnologica della fusione per la produzione di energia elettrica in una macchina basata sul confinamento magnetico di tipo tokamak. In particolare i principali obiettivi sono i seguenti: 1) la piena comprensione della fisica del plasma ad elevati livelli di produzione di potenza di fusione, 2) il controllo della stabilità del plasma in tutti i suoi aspetti (macro e micro instabilità, interazione del plasma con la parete della camera a vuoto, effetti delle particelle alfa prodotte nella fusione, effetti delle impurità), 3) il conseguimento della reazione di fusione D-T fino alla produzione di

¹ Le condizioni pratiche per il breakeven sono però molto diverse tra fusione a confinamento magnetico e fusione inerziale. Infatti, l'energia consumata per operare i laser dell'inerziale è circa 100 volte maggiore di quella immessa nel sistema, mentre l'energia consumata per operare i sistemi di riscaldamento nel confinamento magnetico è solo alcune volte più grande di quella immessa.

potenze rilevanti; 4) la sperimentazione di sistemi di riscaldamento del plasma di grande potenza; 5) il funzionamento dei magneti superconduttori in condizioni operative prossime a quelle prevedibili per un reattore commerciale; 6) la realizzazione e sperimentazione di apparecchiature robotizzate in grado di effettuare interventi di manutenzione sulle parti interne della macchina rese radioattive dai neutroni; 7) la sperimentazione di diversi moduli di blanket (Test Blanket Modules, TBM) atti ad assicurare una adeguata produzione di trizio e lo scambio termico dell'energia prodotta nella fusione dal mantello (blanket) al fluido refrigerante in condizioni di temperatura e pressione simili a quelle previste per la centrale con reattore a fusione².

Le prestazioni attese del plasma di ITER rappresentano una ragionevole estrapolazione dei risultati validati negli esperimenti tokamak sin qui effettuati, in primis quelli ottenuti al JET (Gran Bretagna), e basati su strumenti molto avanzati di simulazione numerica.

La progettazione e costruzione di ITER hanno determinato lo sviluppo di nuove tecnologie di rilevanza reattoristica quali, tra le tante, quelle dei magneti superconduttori di campo magnetico e dimensioni ragguardevoli, e quella del divertore.

La costruzione di ITER è molto avanzata, con circa l'80% dell'impianto completato. La fase attuale vede l'inizio dell'assemblaggio del reattore, che è però ritardata a causa di non conformità dei primi settori di camera a vuoto e altri difetti su altri componenti forniti dalla Corea del Sud. Inoltre, l'Autorità per la Sicurezza Nucleare francese (ITER è realizzato in Francia) ha imposto un momentaneo stop all'assemblaggio chiedendo chiarimenti sulla piattaforma di cemento che sosterrà il reattore, sulla mappatura delle radiazioni di neutroni e sulle non conformità dei settori di camera a vuoto sopra menzionate. Oltre a ciò, il nuovo direttore di ITER nominato nel 2022 ha proposto modifiche al progetto della macchina per inglobare soluzioni innovative e di maggiore rilevanza reattoristica. Tutto ciò determina un ritardo significativo dell'inizio delle sperimentazioni, dell'ordine di alcuni anni, rispetto alla data prevista del 2025. La nuova data sarà comunicata ufficialmente dall'ITER Council a giugno 2024.

I costi complessivi di costruzione di ITER sono difficilmente stimabili per via del contributo in kind da parte dei partner. Il costo a fine costruzione per l'Europa è stimato intorno agli 11 miliardi di euro.

Vi è inoltre un accordo di cooperazione bilaterale tra Unione Europea (Euratom) e Giappone, denominato Broader Approach, avente lo scopo di integrare il progetto ITER ed accelerare i tempi per la realizzazione dell'energia da fusione, attraverso attività di R&S relative a tecnologie avanzate per i futuri reattori dimostrativi.

² ITER non è progettato per essere autosufficiente per il trizio. L'interno della camera a vuoto conterrà moduli di blanket con la sola funzione schermante, e non di produzione di trizio. Il programma TBM mira alla installazione nella macchina di alcuni moduli di prova forniti da alcuni partner, per la conduzione di test sull'efficienza di produzione di trizio e sulla performance nucleare, termomeccanica ed elettromagnetica.

Il Broader Approach Agreement prevede in particolare:

- l'attività ingegneristica di progettazione e sviluppo della sorgente di neutroni intensa IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility) per riprodurre il flusso di neutroni atteso sulla prima parete della camera di un impianto a fusione di potenza, concentrandolo in un volume nel quale possono essere inseriti, irradiati e poi rimossi e analizzati dei campioni di diversi materiali. Per ridurre i rischi, è stato realizzato a Rokkasho (Giappone) un prototipo di acceleratore in scala 1:1 e uno del circuito e del bersaglio di litio circolante che sono attualmente in fase di test.
- l'upgrade del tokamak giapponese JT-60U con l'adozione di magneti superconduttori. La macchina JT-60SA (Super Advanced) ha prodotto il primo plasma a fine 2023. JT-60SA, il tokamak più grande al mondo oggi esistente dopo la recente chiusura di JET, sarà utilizzato congiuntamente da Europa e Giappone con l'obiettivo di affiancare ITER in modo da prepararne la sperimentazione, favorirne il raggiungimento degli obiettivi tecnologici e fornire conoscenze per la transizione da ITER verso i futuri reattori a fusione.
- la realizzazione in Giappone di un centro internazionale di ricerca sulla energia di fusione (IFERC), dotato in particolare di un centro di calcolo ad alta velocità.

L'Europa conduce un programma di sviluppo della fusione coordinato a livello comunitario fin dalla firma del trattato Euratom del 1958.

JET, il tokamak più grande al mondo fino alla partenza di JT-60SA, è la macchina comunitaria situata a Culham (Oxfordshire, UK) e chiusa nel dicembre 2023 col completamento dei test previsti. JET ha raggiunto vari record: $Q=0.65$ in regime transiente (1997), potenza di fusione pari a 12 MW per 5 secondi e 59 MJoule di energia totale prodotta (2022). In questi esperimenti JET ha dimostrato che si è oggi in grado di ottenere le condizioni per la fusione ad elevati livelli di potenza, e di sostenerle e controllarle per tempi lunghi rispetto al tempo di confinamento dell'energia.

Nel 2014, 29 istituti di ricerca di 26 Paesi membri dell'Unione Europea più la Svizzera hanno dato vita a EUROfusion, il Consorzio europeo per lo sviluppo dell'energia da fusione secondo la Roadmap europea.

Le otto missioni per l'attuazione della Roadmap mirano a:

- 1) il successo degli esperimenti su ITER e la preparazione delle operazioni in un reattore dimostrativo (DEMO) con la sperimentazione sulle macchine europee, gli studi teorici e di sviluppo di simulazioni numeriche,
- 2) lo sviluppo e dimostrazione di componenti interni (divertore) in grado di smaltire gli elevatissimi carichi termici previsti,

- 3) lo sviluppo e la qualifica di materiali resistenti al flusso di neutroni ad alta energia,
- 4) lo sviluppo di blanket in grado di garantire l'autosufficienza per l'approvvigionamento del trizio,
- 5) la dimostrazione di sicurezza dell'impianto,
- 6) l'integrazione di tutte le parti che costituiscono un impianto a fusione nel progetto DEMO,
- 7) lo sviluppo di nuove tecnologie per ridurre il costo e dimostrare la fattibilità economica della fusione,
- 8) in parallelo, lo studio delle configurazioni alternative ai tokamak (stellarator) per portarle ad un livello di maturità che ne permetta una valutazione come soluzione a lungo termine per il reattore.

Il Consorzio comprende attualmente 28 organizzazioni di ricerca e università di 26 Paesi europei, con la partecipazione esterna del Regno Unito, Norvegia e Svizzera, e oltre 100 entità affiliate (incluse svariate industrie). I membri del Consorzio già esercitano numerose macchine sperimentali e numerosi impianti tecnologici per lo studio del ciclo del combustibile, della termo-meccanica e termo-fluidodinamica del blanket, per test di materiali e cavi superconduttori.

È inoltre in fase di avvio in Spagna la costruzione di una sorgente intensa di neutroni IFMIF-DONES (Demo Oriented Neutron Source) per la qualifica dei materiali. Per la costruzione si è formato il consorzio pubblico spagnolo IFMIF-DONES, che si avvale del supporto di EUROfusion, dell'Agenzia Europea Fusion for Energy e della Croazia, ma sono in corso interlocuzioni con tutti i partner europei potenziali partecipanti all'impresa.

Storicamente, la fusione è stata sviluppata dai governi, anche nel caso di ITER, con il risultato che la maggior parte delle conoscenze e della proprietà intellettuale risiedono nel settore pubblico. Tuttavia, riconoscendo che nella realizzazione di grandi infrastrutture, come le centrali a fusione, il settore privato svolge un ruolo fondamentale, l'Europa, come altri Paesi, sta progettando di supportare partenariati pubblico-privato (PPP) per agevolare la crescita di un'industria della fusione.

Il Regno Unito è il primo Paese ad aver pubblicato, nel 2021, una strategia nazionale sull'energia da fusione con gli obiettivi dichiarati di dimostrare la fattibilità commerciale della fusione costruendo un prototipo di centrale elettrica a fusione che fornisca energia netta entro il 2040, e di costruire un'industria della fusione leader a livello mondiale che copra le diverse tecnologie e sia in grado di esportarle nei decenni successivi. La strategia britannica prevede anche lo sviluppo del contesto normativo e l'approvazione di una legislazione, diversa da quella per il nucleare da fissione, che garantisca la sicurezza della popolazione, incoraggiando e consentendo al tempo stesso l'innovazione e gli investimenti. L'elemento di punta del programma è il reattore STEP (Spherical Tokamak for Energy Production), al momento in fase di progettazione, per la cui realizzazione è stata fondata la società UK Industrial Fusion Solutions (UKIFS) che sosterrà il

rischio complessivo dell'impresa. Per sostenere lo sviluppo dell'industria britannica sulla fusione, la UKAEA, oltre a continuare la sperimentazione sul tokamak MAST Upgrade, presso il suo Centro di Culham si è dotata di laboratori tecnologici all'avanguardia per lo studio del danneggiamento dei materiali sottoposti a irraggiamento neutronico, lo sviluppo del ciclo del combustibile, del blanket e la robotica per ambienti ostili.

Nel marzo 2022, negli Stati Uniti la Casa Bianca ha tenuto un vertice sull'energia da fusione, chiedendo una "audace visione decennale" per la commercializzazione dell'energia da fusione, e annunciando un programma dedicato alla formazione di partenariati pubblico-privato per lo sviluppo di un'industria competitiva dell'energia da fusione. Attualmente, negli Stati Uniti i due maggiori esperimenti di fusione magnetica in esercizio sono il tokamak DIII-D (General Atomics) e il tokamak sferico NSTX-U (Princeton Plasma Physics Laboratory).

Per quanto riguarda la Cina che sta operando a tutto campo per lo sviluppo delle varie tecnologie nucleari, la sua roadmap per la fusione a confinamento magnetico ha i seguenti obiettivi a breve termine:

1. stabilire piattaforme avanzate per la ricerca sulla fisica del plasma nel Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST), in cui si possono ottenere impulsi lunghi in operazioni ad alto confinamento, e nel tokamak HL-3 per studiare la fisica del plasma ad alte prestazioni ed elevata potenza di riscaldamento esterno;
2. sviluppare tecnologie chiave per la costruzione del reattore sperimentale ITER e per la progettazione del China Fusion Engineering Testing Reactor (CFETR), un impianto concepito per colmare il divario tra ITER e il reattore di potenza DEMO, in grado di produrre energia elettrica producendo in modo autosufficiente il trizio necessario;
3. progettare CFETR e completarne la costruzione negli anni 2030. La roadmap cinese prevede anche la costruzione di un esperimento intermedio in preparazione di CFETR, chiamato Burning-plasma Experimental Superconducting Tokamak (BEST).

Per la realizzazione di CFETR la Cina ha avviato un vasto programma di ricerca e sviluppo nel nuovo Comprehensive Research Facility for Fusion Technology (CRAFT).

Nel 2021 per la prima volta è stata ottenuta in laboratorio il breakeven in una macchina a fusione a confinamento inerziale presso la National Ignition Facility degli Stati Uniti, arrivando a produrre una quantità di energia da fusione circa il doppio dell'energia iniettata nella capsula. La NIF è il più potente impianto inerziale operativo al mondo. Il DoE ha stabilito di prevedere tempo macchina dedicato (fino al 50% del totale annuo) alla ricerca sulla fusione inerziale presso i maggiori impianti esistenti in USA, come XFEL e l'acceleratore di particelle SLAC di Stanford. È inoltre previsto di incrementare del 50% l'energia attualmente disponibile presso la NIF.

In Francia è già operativo il Laser Mégajoule (LMJ), il secondo impianto inerziale al mondo come prestazioni. Nel 2023 è stato definito il consorzio Tarantis costituito da CNRS, CEA e Thales con finanziamenti pubblici e privati: il governo francese nel 2024 finanzierà uno studio preparatorio per definire un nuovo impianto laser di dimensioni simili all'americano OMEGA. A questo dovrebbero seguire finanziamenti significativi, di cui una quota importante da parte di aziende private.

In Inghilterra sono operativi l'impianto ORION e l'impianto Vulcan, al momento in fase di upgrade con il progetto Vulcan 20-20. È stato inoltre creato il UK Inertial Fusion Consortium, comprendente 90 membri dei principali centri britannici attivi nel campo, che ha prodotto una roadmap. È stato inoltre definito il programma Laser Inertial Fusion Technology for Energy che riguarda attività di fabbricazione dei target e iniezione, laser, fisica e sviluppo codici, ed infine la progettazione di un impianto per alti guadagni, in vista di prossimi finanziamenti nazionali.

In Germania nel maggio 2023 è stato prodotto, con l'aiuto di un team di esperti un Memorandum che descrive il potenziale tedesco in ambito scientifico ed industriale per la fusione inerziale e definisce le attività di ricerca necessarie per effettuare un percorso verso un futuro reattore. A partire da ciò, è stato pubblicato un position paper sulla fusione in Germania, come base per un nuovo programma di finanziamenti nei prossimi 5 anni. Non essendoci in Germania al momento un impianto laser adeguato, lo stato tedesco supporta l'infrastruttura ELI (Extreme Light Infrastructure) – ERIC. I recenti sviluppi in ambito inerziale hanno prodotto la formazione di un programma all'interno di ELI-ERIC.

La fusione inerziale ha avuto negli ultimi anni solo un limitato sostegno economico da fondi comunitari, sostanzialmente da progetti Enabling Research di EUROfusion. I ricercatori dei maggiori istituti europei partecipano all'iniziativa HIPER+ per l'analisi delle prospettive dalla fusione inerziale, che recentemente ha pubblicato una roadmap per l'inerziale in Europa.

In Russia è in fase di costruzione il laser UFL-2M con caratteristiche della taglia della NIF e del LMJ, con completamento della costruzione è previsto per i prossimi anni. Si segnalano infine l'impianto laser GEKKO XII in Giappone, e in Cina i laser ShenGuang-III e ShenGuang- II -UP.

Nuovi approcci internazionali per accelerare lo sviluppo della fusione nucleare

Il contesto dell'energia da fusione ha visto negli ultimi anni un sostanziale cambiamento di rotta con considerevoli investimenti in un numero crescente di società nel settore privato impegnate nella fusione in tutto il mondo, spesso con tempistiche ambiziose e un'ampia gamma di approcci.

Lo scorso anno sono state fondate 13 nuove società portando il numero delle imprese private sulla fusione a 44 (il numero è in continua crescita). Oltre agli investimenti privati, è anche degno di nota l'aumento dei partenariati pubblico-privati, con 18 aziende coinvolte.

Gli Stati Uniti continuano a guidare la corsa con 25 società attive nel campo della fusione (tra cui molte delle più grandi), ma il settore sta diventando geograficamente sempre più diversificato, con 12 Paesi che ora mettono in campo almeno una società di fusione.

Alcune di queste società sostengono che forniranno energia da fusione alla rete elettrica entro il 2035 o addirittura entro il 2030, pur ammettendo che esistono ancora sfide scientifiche e ingegneristiche importanti. Quasi tutte ritengono che anche i finanziamenti siano una sfida, poiché saranno necessarie ulteriori risorse, ben più rilevanti di quelle già ottenute, per gli sviluppi scientifici e tecnologici necessari.

La maggiore delle start-up private è Commonwealth Fusion Systems (CFS), uno spin-off del Massachusetts Institute of Technology (MIT) fondata nel 2018 e a cui è associata la nostra ENI. L'azienda sta attualmente costruendo un dimostratore denominato SPARC, che potrebbe diventare il primo sistema di confinamento magnetico al mondo a dimostrare il guadagno energetico nella fusione a confinamento magnetico. Nei piani di CFS, SPARC aprirà la strada ad ARC, che la società prevede come la prima centrale elettrica a fusione commerciale in grado di immettere elettricità nella rete elettrica. Si prevede che ARC diventi operativo all'inizio degli anni '30, cioè in una scala temporale tale da avere un impatto sul cambiamento climatico in atto.

In Europa sono presenti attualmente una decina di start-up: Gauss Fusion, Marvel Fusion, Focussed Energy e Proxima Fusion in Germania, Renaissance Fusion in Francia, Deuterio in Italia, oltre a Tokamak Energy, First Light Fusion e Oxford Sigma in Gran Bretagna, ecc.

In Giappone è stato fondato nel 2019 Tokyo Fusionneering, uno spin off dell'Università di Tokyo che ha l'obiettivo di sviluppare sistemi avanzati per il riscaldamento del plasma, per il ciclo del combustibile e quello termico. Inoltre, l'azienda possiede capacità impiantistiche per l'integrazione complessiva di queste tecnologie in una centrale elettrica funzionante. Lo scopo è promuovere l'innovazione fornendo soluzioni pratiche per accelerare il percorso verso la commercializzazione della fusione.

In Cina, infine, è stata fondata nel 2022 Energy Singularity, che si concentra principalmente sulle tecnologie dei magneti superconduttori e l'uso dell'intelligenza artificiale per la realizzazione in tempi brevi di un reattore dimostrativo basato su un tokamak compatto ad alto campo magnetico.

La presenza di tante iniziative nel campo della fusione ha aumentato enormemente la richiesta di esperti in tutti i settori, dalla progettazione alla gestione degli impianti, allo sviluppo delle tecnologie. Ciò sta determinando una forte concorrenza per risorse qualificate nel mercato globale della fusione e un flusso di competenze chiave verso Paesi più attivi e innovativi quali, al momento, la Gran Bretagna e gli Stati Uniti.

I recenti sviluppi nella tecnologia in ambito pubblico e privato hanno evidenziato la necessità di un processo autorizzativo e di un quadro normativo adeguati alla protezione dei lavoratori, della popolazione e dell'ambiente, e armonizzati a livello internazionale per una diffusione rapida e sostenibile dei futuri impianti a fusione.

Partendo dalle specificità della tecnologia degli impianti a fusione, si evidenzia da più parti come necessario un inquadramento normativo commisurato agli specifici livelli di rischio. L'Agencia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA) ha avviato uno studio interdisciplinare all'interno del progetto International Project on Innovative Nuclear Reactors (INPRO) riguardo agli aspetti legali ed istituzionali per l'impiego di impianti a fusione. L'obiettivo è quello di supportare la comunità della fusione nell'accelerare lo sviluppo e l'implementazione di impianti a fusione e di sistemi ibridi fissione-fusione nei prossimi decenni. Peraltro la stessa IAEA non ha ancora avviato le azioni necessarie allo sviluppo di standard di sicurezza condivisi a livello internazionale, per mancanza di sufficiente esperienza negli Stati Membri e perché l'azione appare prematura rispetto allo stato della tecnologia.

Nel panorama internazionale alcuni Paesi si stanno muovendo per adeguare il proprio quadro normativo alla futura implementazione di reattori a fusione.

La situazione in Italia e il contributo italiano ai programmi internazionali

Nel 2006 fu presentato congiuntamente dai presidenti di ENEA, CNR e INFN all'allora Ministro della Ricerca un documento programmatico relativo alle attività del decennio 2006-2015, che aveva i seguenti obiettivi strategici:

- la partecipazione al programma internazionale ITER, tramite a) qualificata presenza di ricercatori italiani nelle organizzazioni di ITER e F4E; b) supporto al sistema industriale italiano per la realizzazione delle commesse di servizi e forniture; c) assunzione di diretta responsabilità per lo sviluppo di componenti ad elevato contenuto scientifico, in particolare diagnostiche e dispositivi di riscaldamento del plasma. Tra queste azioni di sviluppo la principale è la realizzazione da parte del Consorzio RFX del dispositivo Neutral Beam Injector di riscaldamento del plasma mediante iniezione di atomi neutri
- lo svolgimento delle attività attribuite all'Italia nell'ambito del Broader Approach
- un programma sperimentale di ricerche di fisica del plasma riferito ad ITER
- il progetto e la costruzione a cura dell'ENEA nel Centro di Frascati di un nuovo tokamak concepito esplicitamente come "satellite" di ITER
- un programma di ricerche tecnologiche a supporto di ITER e DEMO
- la formazione e il training del nuovo personale, anche in vista alla partecipazione alle attività internazionali

- un’attività di Watching Brief destinata al mantenimento di competenze di elevato livello nel settore degli studi sulla fusione inerziale.

In particolare, nell’ambito del Broader Approach, l'Italia si impegnava a svolgere le seguenti azioni:

- progettazione del primo stadio dell'acceleratore di ioni di deuterio per IFMIF e realizzazione di uno specifico prototipo
- partecipazione alla realizzazione del “bersaglio” di litio liquido in convezione forzata per IFMIF
- partecipazione, unitamente all'industria italiana, al progetto e alla realizzazione dei magneti toroidali a superconduttori per il tokamak giapponese JT60SA
- sviluppo e realizzazione di buona parte dell'alimentazione elettrica dei magneti per il tokamak JT60SA
- partecipazione all'attività per la realizzazione dell’International Fusion Energy Research Centre (IFERC) in Giappone.

Il programma decennale elaborato nel 2006, seppur con qualche estensione ad alcuni anni successivi al 2015, è stato pienamente attuato sia per la partecipazione a ITER, sia per quanto riguarda l’Accordo Broader Approach.

Il nostro Paese, il primo insieme alla Francia ad aderire al programma europeo, ha una lunga tradizione di ricerca per lo sviluppo dell’energia da fusione, ed ha ottenuto nel tempo competenze su tutti gli aspetti scientifici, tecnologici e industriali e una riconosciuta esperienza nella progettazione, realizzazione e utilizzo di sistemi e impianti per fusione. Il contributo dell'Italia al programma di ricerca europeo sulla fusione è tra i più rilevanti, secondo solo a quello tedesco. Il numero totale delle persone impiegate mediamente è di svariate centinaia all’anno, in maggioranza fisici o ingegneri. Inoltre, svariate decine di fisici e ingegneri italiani sono occupati presso le organizzazioni internazionali (ITER, F4E, EUROfusion).

La ricerca condotta in Italia sulla fusione copre in pratica tutto lo spettro delle discipline coinvolte, dalla fisica del plasma alle tecnologie per il reattore, dall’ingegneria agli studi di sicurezza. La scuola italiana in fusione, in fisica ed ingegneria, è considerata una delle migliori al mondo, a tal punto che prodotti di questa scuola occupano ruoli chiave in un gran numero di laboratori e di organismi in Europa ed internazionali. Con la costruzione della nuova macchina DTT, la comunità dei ricercatori e ingegneri italiani potrà ristabilire una centralità dell’Italia anche come sede di una delle maggiori installazioni di caratura internazionale e di importanza fondamentale per ITER, DEMO e per la ricerca e sviluppo in fusione in generale.

Oltre alla partecipazione ai programmi europei e a ITER, si conducono attività nazionali su progetti strategici e volte all’ulteriore sviluppo delle competenze e infrastrutture presenti nel

nostro Paese (programma complementare). Oltre a questi, vi sono partecipazioni ad altri progetti Euratom, IAEA, IEA di grande interesse, e le collaborazioni internazionali.

La comunità italiana della fusione è stata fin dall'inizio fortemente orientata al coinvolgimento dell'industria nazionale nel programma di ricerca e sviluppo e al trasferimento tecnologico. Fin dagli anni '80 ha posto attenzione allo sviluppo delle tecnologie specifiche della fusione promuovendo costantemente il coinvolgimento dell'industria al duplice scopo di ottenerne il supporto tecnico-ingegneristico e produttivo richiesto dal programma e, al tempo stesso, di far crescere le competenze industriali necessarie per avviare la filiera dei reattori a fusione. Lo stretto rapporto con l'industria è cresciuto:

- con la realizzazione in Italia di impianti di ricerca complessi (FTU, RFX, più recentemente MITICA e DTT) con un importante coinvolgimento dell'industria nella progettazione, nella individuazione di soluzioni tecniche e nella costruzione;
- con lo sviluppo di un ampio spettro di tecnologie per la fusione con particolare riguardo a quelle che avevano una maggiore corrispondenza nella vocazione industriale nel nostro Paese (meccanica, elettrotecnica, superconduttività, robotica, elettronica di potenza...);
- con il tempestivo coinvolgimento dell'industria nel programma tecnologico per la fusione, che ha visto in molti casi le soluzioni tecnologiche trovare un primo sviluppo e dimostrazione nei laboratori, e poi ingegnerizzazione, industrializzazione e produzione nelle industrie.

Nell'ultimo decennio, questa strategia per l'acquisizione e la valorizzazione delle competenze industriali per la fusione si sono dimostrate vincenti, come testimoniato dal ruolo quasi dominante a livello europeo giocato dall'industria italiana nelle commesse per la costruzione di ITER (a parte quelle per la costruzione degli edifici che spettano prevalentemente alla Francia come Paese ospite). Allo stato attuale, su più di 7 miliardi di euro investiti nella costruzione del reattore, degli impianti e degli edifici, la quota assegnata alla filiera italiana è superiore a 1800 M€ per la realizzazione di componenti chiave del reattore quali, ad esempio, i cavi superconduttori, i magneti e la camera a vuoto.

È importante sottolineare che sono coinvolte non solo grandi imprese, ma soprattutto piccole e medie imprese (SME). In ogni caso, la partecipazione a progetti complessi, internazionali e fortemente competitivi rappresenta per le imprese un'occasione di crescita in termini di acquisizione di competenze tecniche, e di adeguati sistemi di management, di controllo e qualità.

Il progetto ITER ha dato certamente un contributo decisivo al coinvolgimento delle imprese nella fusione agendo da catalizzatore di investimenti e la filiera industriale italiana, già ben posizionata, si sta arricchendo di nuove imprese, che seppur non specializzate nel nucleare o nella fusione, si stanno avvicinando a questo ambito e stanno imparando a conoscerne specificità e opportunità. Un recente studio sulla filiera della fusione italiana¹ ha mostrato che l'interesse verso la fusione

della maggior parte delle imprese coinvolte nella fusione è piuttosto recente: infatti, se da un lato buona parte delle imprese partecipa o ha partecipato in passato a più di un progetto di fusione, la maggioranza di esse ha iniziato ad operare nella filiera della fusione dal 2010 partecipando alla costruzione di ITER.

L'industria italiana e i centri di ricerca hanno sicuramente acquisito un'esperienza eccezionale e delle referenze uniche dal progetto ITER, realizzando con successo componenti e servizi tra i più tecnologicamente avanzati al mondo. Ciò ha permesso agli stessi di crescere e di essere oggi accreditati tra i maggiori players nel settore della produzione di componenti complessi e critici e determina la potenzialità di fare un simile percorso anche nel crescente settore privato della fusione.

Secondo uno studio commissionato dalla Commissione europea – DG Energy D.4 – e pubblicato nel 2018 da Trinomics in associazione con Cambridge Econometrics, l'impatto economico generato nell'Unione Europea dal 2008 al 2017 in termini di valore, rispetto all'ipotesi di assenza di spese, è di quasi 4.8 miliardi di euro (contro 5.1 miliardi spesi). Il report evidenzia anche un impatto knowledge-driven, legato alla possibilità di sfruttare le innovazioni tecnologiche in altri ambiti (spin-off), alla possibilità di creare opportunità di condivisione con altre imprese con effetti sinergici, alla possibilità di migliorare le competenze delle risorse umane coinvolte.

I principali problemi ancora da risolvere

Anche se la fusione non costituirà la soluzione a breve termine per fare fronte alla crisi climatica, sul lungo periodo potrebbe rivelarsi l'opzione migliore per soddisfare il fabbisogno energetico mondiale.

Per rendere questo possibile, occorre ancora trovare soluzione ad alcuni punti critici. La comunità internazionale ritiene che tali punti possano sintetizzarsi come segue:

- Confinamento stabile del plasma a temperature di circa 10 volte maggiori di quelle al centro del sole;
- Danneggiamento dei materiali strutturali soggetti a elevatissime fluenze di neutroni (n/cm^2) di energia più di 10 volte superiore a quella dei neutroni in un reattore a fissione. A tale fine occorre progettare e realizzare una *material test facility* ad alto flusso di neutroni di energia rilevante per test e qualifica di materiali ad uso fusionistico. La relativa collaborazione internazionale in corso si chiama IFMIF/DONES; la relativa facility è in fase di progettazione;
- Rimozione di densità di potenza termica elevatissime, mai raggiunte in nessuna macchina per la produzione di energia in maniera stabile e continua; in particolare l'impianto DTT

in costruzione a Frascati sperimenterà soluzioni per lo smaltimento della potenza direzionata sul divertore;

- Breeding del trizio e sua gestione;
- Manipolazione a distanza e manutenzione di componenti altamente attivati;
- Sviluppo di materiali a bassa attivazione per limitare il sopra-citato problema e ridurre la quantità ed il livello di attivazione dei materiali soggetti ad attivazione neutronica;
- Definizione di un quadro legale e regolatorio (comprensivo di requisiti di sicurezza e guide tecniche) e del processo di licensing da parte di una autorità di sicurezza;
- Disponibilità di *codes&standards* per la progettazione, test, qualifica e costruzione di componenti e sistemi;
- Disponibilità di requisiti imposti dal futuro operatore di impianto (*Utility requirements*);
- Definizione delle infrastrutture di base “*technology neutral*” necessarie per qualsiasi impianto a fusione e relativo ciclo del combustibile (v. IAEA *Milestone Approach* adattato al caso fusione).

Inoltre, come già osservato nei precedenti paragrafi, non si è ancora stati in grado di progettare e realizzare un reattore a fusione con guadagno netto di energia “dalla presa alla rete”. Un impianto di questo genere coincide con il concetto di dimostratore, che logicamente dovrebbe seguire l’impianto sperimentale quale è ad esempio ITER. Come già ricordato, esistono vari concetti di dimostratore in fase di progettazione concettuale in varie parti del mondo. Fra essi si citano:

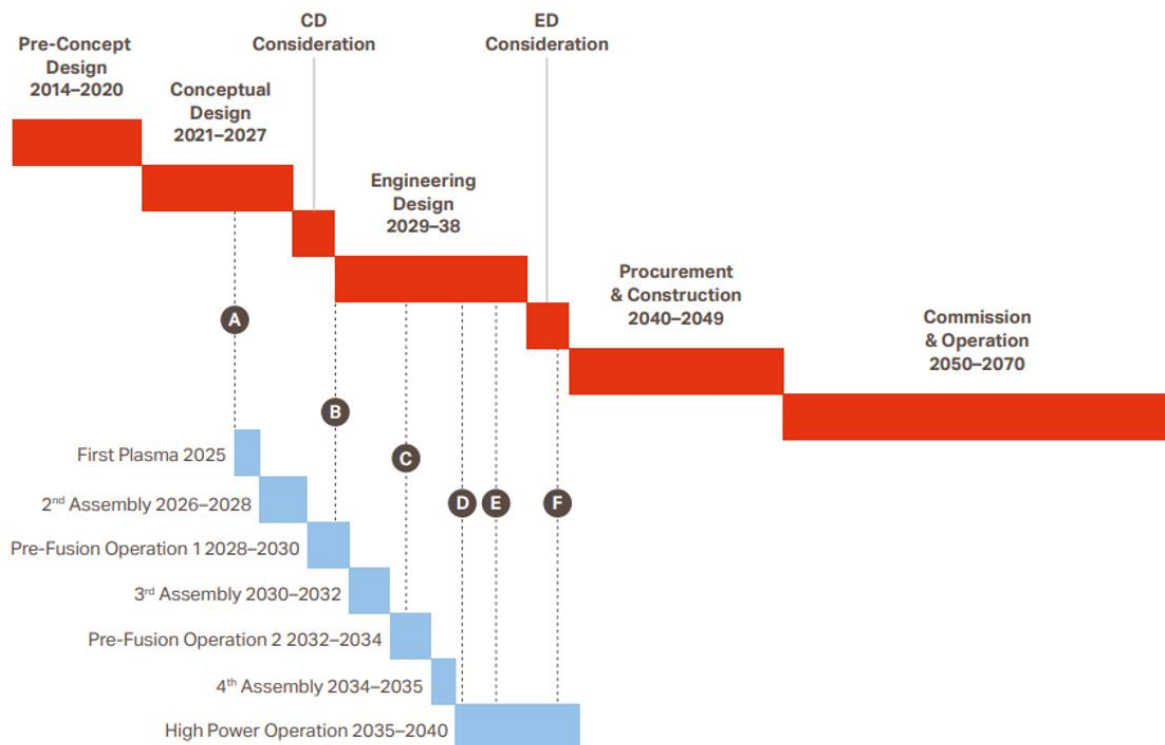
- CFETR (China)
- EU-DEMO (Europe)
- JA-DEMO (Japan)
- K-DEMO (Korea)
- DEMO-RF (Russia)
- STEP (UK)
- ARC (Commonwealth Fusion Systems, USA)

Nelle roadmap più accreditate, sulla scorta dell’esperienza di funzionamento dell’impianto dimostrativo si dovrebbe procedere con la progettazione e realizzazione del *First-of-a-Kind* che rappresenterebbe il primo reattore a fusione di tipo commerciale, al quale faranno seguito gli *Nth-of-a-kind* per un pieno utilizzo commerciale della fusione nucleare.

Nella figura sottostante si riporta l’attuale roadmap del DEMO UE che mostra che il suo *commissioning* ed esercizio è previsto fra il 2050 e il 2070. La conferma (o meno) di tale roadmap è legata ai tempi di ritorno di esperienza dal funzionamento di ITER.

Anche supponendo significative accelerazioni del processo di sviluppo e validazione dei vari concetti e la rapida risoluzione dei problemi sopra menzionati, è ragionevole ipotizzare un utilizzo

commerciale dell'energia da fusione nucleare non prima della seconda metà del secolo. Questa accelerazione e risoluzione rapida dei problemi, richiederà in ogni caso investimenti superiori a quelli già messi in campo a livello nazionale, europeo ed internazionale (svariate decine di miliardi di Euro).



Lungotevere Thaon di Revel, 76
00196 Roma

info@associazioneitaliananucleare.it
www.associazioneitaliananucleare.it