Zeitschrift: Archi : rivista svizzera di architettura, ingegneria e urbanistica = Swiss review of architecture, engineering and urban planning

Herausgeber: Società Svizzera Ingegneri e Architetti

Band: - (2008)

Heft: 2

Artikel: Ricadute e benefici delle ricerche sulla fusione

Autor: Batistoni, Paola

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-133983

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Ricadute e benefici delle ricerche sulla fusione

Paola Batistoni*

La ricerca sulla fusione nucleare ha l'obiettivo di rendere disponibile una fonte di energia inesauribile, pulita, sicura ed economicamente competitiva, che potrà contribuire in futuro a ridurre l'impiego di combustibile fossile, con grande beneficio per l'ambiente e per la sicurezza dell'approvvigionamento energetico. Avviata ormai da alcuni decenni in molti paesi, essa rappresenta un'impresa scientifica internazionale di lungo termine e di grandi dimensioni in termini di risorse impiegate. Gli enormi progressi compiuti nel cammino verso l'obiettivo dichiarato, la realizzazione del reattore a fusione, hanno richiesto la produzione di una grande quantità di nuove conoscenze e di nuove tecnologie in molti campi quali la fisica del plasma, l'alto vuoto e la meccanica di precisione, i materiali avanzati, la criogenia, la costruzione di magneti superconduttori, l'elettronica di potenza impulsata, la radiofrequenza, la robotica e telemanipolazione, l'acquisizione dati e il controllo, i sistemi diagnostici. L'insieme di tutti questi aspetti scientifici e tecnologici rappresentano i settori su cui, nel tempo, il programma fusione ha maggiormente investito risorse per la realizzazione di impianti sperimentali sempre più complessi e la formazione di personale altamente qualificato, con un crescente coinvolgimento dell'industria. I progressi compiuti nell'attività di ricerca e sviluppo per la fusione, che hanno portato alla costruzione del reattore sperimentale ITER, hanno dato luogo a numerose ricadute scientifiche e tecnologiche con un considerevole impatto in altri campi della scienza e ricadute sul sistema produttivo.

Introduzione

Le sfide economiche della globalizzazione impongono di concentrare le risorse disponibili sull'obiettivo vitale del mantenimento del livello di competitività del sistema economico, in altre parole sul mantenimento del livello di benessere acquisito dalla nostra società. La ricerca scientifica e tecnologica non solo non è esente da questa richiesta, al contrario essa è protagonista e motore dello sviluppo ed è per questo che l'opinione pubblica, il cittadino contribuente, chiede che le risorse disponibili siano concentrate su imprese scientifiche che abbiano un impatto misurabile in termini di benefici economici, ambientali e sulla qualità della vita.

La ricerca sulla fusione, avviata fin dal principio degli anni '50 per gli scopi civili, costituisce un esempio di impresa scientifica internazionale forse unico in termini di orizzonte temporale, di impegno di risorse e di continuità. Essa ha l'obiettivo di rendere disponibile una fonte di energia inesauribile, pulita, sicura ed economicamente competitiva, cioè di fornire una risorsa necessaria al sistema economico e sociale. La fusione contribuirà in futuro a ridurre sostanzialmente l'impiego di combustibile fossile e quindi l'emissione di gas ad effetto serra, con grande beneficio per l'ambiente e per la sicurezza dell'approvvigionamento energetico. Tuttavia, al di là dell'importanza dell'obiettivo, essa ha già richiesto l'impiego di grandi risorse a livello mondiale negli ultimi decenni, ed altre risorse dovranno essere investite per alcuni decenni ancora prima che l'energia da fusione possa essere utilizzata su larga scala. Nel frattempo è lecito chiedersi, come per altre grandi imprese scientifiche, se e in che misura essa fornisca un significativo contributo al progresso scientifico e tecnologico, e in che misura esso si traduca in progresso economico e sociale.

Il quadro storico

La possibilità di utilizzare l'energia generata nelle reazioni di fusione nucleare fu discussa per la prima volta nel Laboratorio Cavendish di Cambridge nel 1932, quando Lord Rutherford e i suoi collaboratori osservarono tali reazioni bombardando bersagli con fasci di ioni con energie di alcune centinaia di kilovolts, utilizzando elementi leggeri. Già nel 1928 Atkinson and Houtermans avevano ipotizzato che la fusione termonucleare costituisse la fonte dell'energia irraggiata dalle

stelle, e H. Bethe avrebbe descritto in dettaglio il ciclo di reazioni di fusione nel sole nel 1939, ma nessuna idea su come utilizzare tale fonte di energia sulla terra fu considerata fino al 1946, quando in Inghilterra si iniziarono a studiare gas ionizzati (plasmi), confinati in tubi di forma prima lineare poi toroidale tramite il campo magnetico generato da una corrente che fluiva all'interno del gas stesso (*pinch*). Circa negli stessi anni, a Los Alamos, Fermi, Teller, R.R. Wilson ed altri discutevano con toni piuttosto pessimistici sulla possibilità di ottenere energia dalla fusione termonucleare fino a che non si comprese che l'impresa poteva essere possible utilizzando i due isotopi pesanti dell'idrogeno, il deuterio (^{2}H o D) e il trizio (^{3}H o T). Le ricerche si indirizzarono immediatamente alla realizzazione di esplosivi termonucleari, ma attorno al 1950 presero avvio anche ricerche sulla fusione termonucleare controllata a scopi civili negli Stati Uniti, in Unione Sovietica e in Inghilterra. Dapprima tali ricerche erano classificate, poiché si riteneva che si potesse in questo modo ottenere intense sorgenti di neutroni veloci, utili per produrre plutonio.

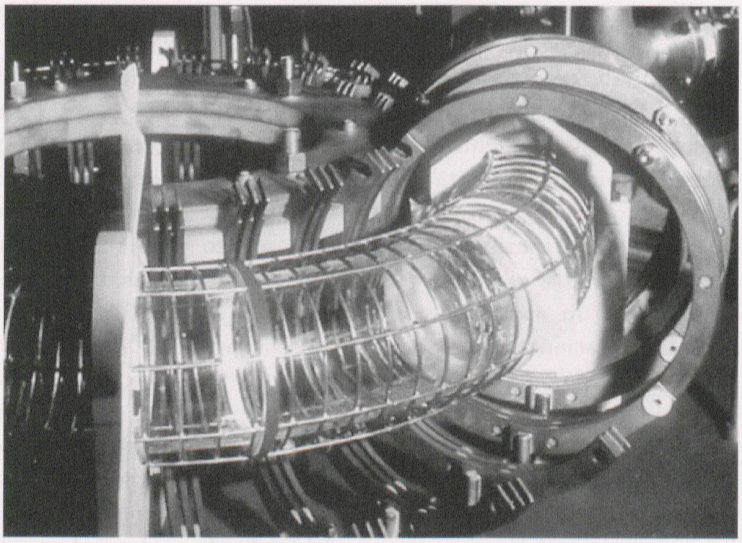
Fu chiaro fin dall'inizio che per raggiungere le temperature di plasma necessarie per innescare le reazioni di fusione (dell'ordine di cento milioni di gradi, circa 10 keV) occorreva trovare il modo di tenere il plasma lontano dalle pareti del recipiente. Ben presto, però, altre difficoltà si manifestarono, sotto forma di instabilità e di perdite di energia del plasma, per cui occorreva ricorrere a trappole magnetiche con campi magnetici sempre più intensi, dell'ordine di alcuni Tesla per raggiungere le estreme condizioni di densità, temperatura e purezza del gas richieste. A partir dagli anni '50 furono realizzati molti esperimenti su trappole magnetiche con configurazioni sia lineari aperte (e.g. *mirror*) sia toroidali chiuse (*stellarator, reversed field pinch* e più tardi *tokamak*). Considerata la difficoltà dell'impresa, e dal momento che sorgenti di neutroni erano ormai disponibili dai reattori nucleari, ben presto si decise di aprire le ricerche sulla fusione a confinamento magnetico alla collaborazione internazionale.

Nel 1956, durante la visita dell'accademico sovietico I. Kurchatov al British Energy Research Laboratory di Harwell in Inghilterra, furono scambiati risultati sugli esperimenti *pinch* in corso nei rispettivi paesi, scambio che aprì la strada alla completa declassificazione delle ricerche sulla fusione a confinamento magnetico in occasione della Seconda Conferenza Mondiale sugli Impieghi Pacifici dell'Energia Atomica, tenutasi a Ginevra nel 1958.

Nel frattempo, nel 1957, J. D. Lawson di Harwell aveva pubblicato una famosa nota sui criteri per il funzionamento di un reattore a fusione, in cui si quantificavano per la prima volta le condizioni per la temperatura del plasma (T), la densità di particelle (n) e il tempo di confinamento dell'energia (τ), che debbono essere soddisfatte contemporaneamente affinché il plasma possa produrre più energia da fusione di quanta non ne serva per riscaldarlo dall'esterno: in altre parole $n\tau T > 10^{21}$ s m^{-3} keV con T = 10 - 20 keV, $n \approx 10^{20}$ m^{-3} e τ dell'ordine di alcuni secondi.

Nello stesso anno, iniziavano in Italia le attività sperimentali sui gas ionizzati presso l'allora Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare (CNEN), e veniva istituita la Comunità Europea dell'Energia Atomica (EURATOM) che poneva le basi per la collaborazione tra i Paesi europei nel campo dell'energia nucleare, inclusa la fusione. Ancora oggi il programma fusione è condotto in quasi tutti i Paesi europei con il coordinamento e il parziale finanziamento (circa il 30%) dell'Euratom nell'ambito dei Programmi Quadro europei per la ricerca, tramite contratti di associazione (per Italia l'ENEA è responsabile del Contratto di Associazione con l'Euratom sulla Fusione).

Da allora è stata percorsa molta strada, grazie all'ampia collaborazione internazionale, talvolta con improvvise accelerazioni dovute a risultati particolarmente importanti o sull'onda di vicende politico-economiche internazionali. Uno degli eventi più importanti si verificò negli anni 1965-68, quando nel *tokamak* sovietico T3 furono raggiunte per



Esperimento FTT (Frascati Turbulent Torus) realizzato a Frascati nel 1972. Dopo una serie di esperimenti dedicati allo studio di plasmi densi e di breve durata, FTT fu il primo tokamak realizzato in Italia e il secondo in Europa occidentale (il diametro del toro era di 30 cm, il diametro della sezione di 10 cm). L'esperimento si proponeva lo studio del riscaldamento turbolento del plasma in una configurazione toroidale.

la prima volta temperature del plasma dell'ordine di 1 keV (circa 10 milioni di gradi) per alcuni millisecondi e a densità superiori a 10^{19} m^{-3}. L'evento, insieme alla crisi energetica del 1972-73, fece crescere enormemente l'interesse e le speranze nella fusione, tanto che in quelli anni fu decisa la costruzione di un gran numero di *tokamak* nel mondo di dimensioni medio-grandi, tra cui il *Frascati Tokamak* (FT) presso i laboratori ENEA di Frascati, seguito poi dal *Frascati Tokamak Upgrade* (FTU) ancora in operazione, e il *Joint European Torus* (JET) a Culham (Inghilterra), la macchina per la fusione più grande al mondo (con raggio maggiore di 3 m, raggio minore di 1.2 m). I progressi compiuti sono stati enormi, con estrema semplificazione essi possono essere descritti tramite il miglioramento del parametro di Lawson che è passato da $n\tau T \approx 10^{17}$ s m^{-3} keV in T3 a $n\tau T > 10^{21}$ s m^{-3} keV nel 1997 quando il JET raggiunse le migliori prestazioni producendo 16 MW di potenza di fusione (65% della potenza assorbita), 21 MJ di energia, operando con un plasma DT.

Il prossimo passo è ora costituito da ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), un reattore sperimentale realizzato dall'Unione Europea, il Giappone, gli Stati Uniti, la Russia, la Cina, la Corea del Sud e l'India attualmente in fase di costruzione. ITER, la cui missione sarà dimostrare la fattibilità scientifica e tecnologica della fusione come fonte di energia, avrà dimensioni lineari doppie rispetto al JET (raggio maggiore 6.2 m, raggio minore 2 m), lavorerà con un campo magnetico di 5.3 T e una corrente di plasma di 15 MA, e produrrà 500 MW di potenza di fusione per tempi lunghi (decine di minuti), utilizzando in maniera integrata e testando la maggior parte dei componenti chiave per il funzionamento del reattore a fusione. Gli elementi di base della fisica di ITER sono stati provati con successo negli esperimenti fin qui effettuati su un ampio intervallo dei parametri del plasma, i regimi di plasma di ITER richiedono una ragionevole estrapolazione di tali parametri. La realizzazione della macchina ITER , e in particolare di alcuni componenti chiave, ha richiesto la messa a punto di tecnologie innovative la cui fattibilità è stata analizzata anche con la costruzione di prototipi nel corso della attività di ricerca e sviluppo condotte negli ultimi anni. La costruzione di ITER dovrebbe concludersi entro il 2018.

Sebbene il salto tecnologico tra ITER e la realizzazione del reattore a fusione sia ancora impegnativo, il passo che manca è ormai piccolo rispetto al percorso fatto, percorso che ha richiesto un enorme sforzo scientifico e tecnologico in un campo in cui, all'inizio, quasi tutto era da inventare.

I plasmi e le ricadute scientifiche del programma fusione

Applicazioni industriali dei plasmi

I plasmi a bassa temperatura erano studiati fin dall'inizio del '900 in fisica solare e in fisica della ionosfera, ed erano utilizzati fin dalla seconda metà dell'800 nell'industria elettrica e in quella della illuminazione. Tuttavia i plasmi rimasero un po' confinati in questi settori di nicchia fino a che le ricerche sulla fusione nucleare non fecero crescere enormemente l'interesse intorno ai gas ionizzati, contribuendo a mettere a punto le tecnologie necessarie per produrli e controllarli, in primo luogo le tecnologie elettrotecniche e elettroniche (generatori, condensatori, interruttori per impulsi di potenza) e dell'alto vuoto (pompe, materiali compatibili e a tenuta di vuoto). Si può affermare che le ricerche sulla fusione hanno contribuito, in modo più o meno diretto, a sviluppare la grande quantità di applicazioni tecnologiche e industriali del plasma che conosciamo. Si tratta in generale di plasmi a bassa temperatura ($T \leq 10$ eV), sia termici sia in non equilibrio termico (in cui la componente ionica è molto più fredda di quella elettronica). I primi sono utilizzati come sorgente termica per fondere e proiettare su superfici reagenti gassosi o particolati solidi, iniettati nel plasma in forma di minuscole particelle (*plasma spraying*, deposizione al plasma, etc.) o esposti al plasma nella forma di materiali solidi (applicazioni di fusione e di raffinazione in metallurgia). Plasmi in non equilibrio termico, invece, sono utilizzati per generare e controllare flussi di ioni incidenti su superfici per modificarne le caratteristiche sia depositandovi materiali (deposizione), sia rimuovendone i primi strati molecolari (*etching e sputtering*), sia depositando in profondità nuovi componenti (impiantazione ionica), sia generando, su composti organici, la disponibilità superficiale di legami chimici liberi per la cattura di radicali diversi da quelli rimossi (modificazione superficiale delle fibre sintetiche e delle materie plastiche). Le applicazioni attuali di tecnologie assistite dal plasma comprendono: la fabbricazione di circuiti integrati a semiconduttore e altri strumenti elettronici, la produzione di supporti magnetici per registrazione, lo stampaggio di film polimerici, la realizzazione di lampade per illuminazione, *display* ottici e schermi, l'indurimento di utensili, la saldatura di materiali, stampi e metalli industriali, le lavorazioni meccaniche di precisione, l'accrescimento di film superconduttori o di diamanti, i depositi anticorrosione, di

barriera termica e di isolamento elettrico, la lavorazione di materiali esotici sia di tipo ceramico che metallico, la fabbricazione di manufatti a sagoma speciale in metalli refrattari, la produzione di materiali biocompatibili e di imballaggi per prodotti farmaceutici. Tra le applicazioni in via di sviluppo vi è l'utilizzo di plasmi per la propulsione in motori da applicarsi a vettori spaziali per missioni di lunga durata, e la distruzione di rifiuti tossico-nocivi mediante torce al plasma.

Sviluppo della fisica del plasma, contributi ad altri campi della scienza

Al di là delle applicazioni industriali dei plasmi a bassa temperatura, la generazione e il controllo di plasmi ad alta temperatura per la fusione ha richiesto la comprensione di un gran numero di fenomeni fisici complessi, e ha contribuito sostanzialmente allo sviluppo di una nuova disciplina scientifica, la fisica del plasma, che a sua volta ha dato contributi in molti altri campi della scienza. Essa trova applicazione nello studio del magnetosfera terrestre, della corona solare e in molti fenomeni astrofisici, nella comprensione delle instabilità dei fasci intensi di particelle cariche negli acceleratori. Ma non solo. Considerati una volta come oggetti inestricabili, trattabili al massimo con ricette semiempiriche, estrapolabili al più con rozze leggi di scala, i plasmi termonucleari sono adesso sistemi fisici più comprensibili e forgiabili dall'esterno. La fusione magnetica ha prodotto diversi MW di potenza di fusione, pareggiando quasi la potenza fornita dall'esterno. Ciò è stato possibile grazie alla comprensione teorica dei meccanismi di trasporto (diffusione delle particelle, conduzione del calore), di insorgenza e sviluppo di instabilità macroscopiche e microscopiche, di propagazione di onde elettromagnetiche, di processi non lineari. Il plasma ha costituito l'arena ideale per lo studio della turbolenza dei fluidi, del caos e della complessità, consentendo scoperte di carattere fondamentale quali, ad esempio, la presenza di regimi quiescenti in sistemi lontani dall'equilibrio termodinamico, quali i plasmi confinati, caratterizzati dalla presenza di sorgenti di energia libera. In questi regimi, il campo di velocità varia tanto rapidamente nello spazio da spezzare i vortici di turbolenza riducendo la diffusione. Questa circostanza è alla base dei regimi a confinamento migliorato, ottenuti ed esplorati negli ultimi anni in molti *tokamak*, in cui la formazione di regioni interne al plasma a ridotta turbolenza da luogo a barriere al trasporto di energia.

Nell'ambito della fisica atomica, la ricerca sulla fusione ha stimolato lo studio e la valutazione delle sezioni d'urto necessarie per l'analisi delle impurezze nei plasmi, in particolare le sezioni d'urto di collisione, ionizzazione, eccitazione e cattura degli elettroni su ioni con $Z>>1$. La disponibilità dei gas di laboratorio ha reso possibile la spettroscopia di specie atomiche molte volte ionizzate e molto eccitate che trova applicazioni in astrofisica. Per lo studio dell'interazione plasma-parete nei *tokamak* sono stati sviluppati codici di simulazione delle cascate di collisioni originate dagli ioni non confinati che penetrano nelle pareti della camera da vuoto, in grado di descrivere ogni fenomeno di riflessione o di erosione della superficie; tali codici sono adesso utilizzati per molte altre applicazioni scientifiche e industriali che utilizzano l'impiantazione ionica, per esempio per il drogaggio dei semiconduttori.

Nell'ambito della fisica nucleare, poiché le reazioni di fusione DT danno luogo a neutroni con energia di 14.1 MeV, il programma fusione ha promosso la misura o la valutazione di sezioni d'urto neutroniche per energie dei neutroni almeno fino a 20 MeV, cioè su di un intervallo più esteso rispetto a quello già esplorato per la fissione. La necessità di schermare i componenti critici del reattore da tali neutroni, e di limitare il danneggiamento e l'attivazione che essi provocano nei materiali più esposti, hanno richiesto la preparazione di librerie di sezioni d'urto e di dati nucleari, lo sviluppo di codici per il calcolo del trasporto della radiazione nella materia in geometrie complesse, per il calcolo degli effetti dell'irraggiamento e dell'attivazione indotta dai neutroni. Le librerie di dati nucleari sviluppate nel programma fusione sono ampiamente utilizzate come base di partenza per progetti di ricerca che richiedono ulteriori estensioni a più alte energie (astrofisica nucleare, sorgenti di spallazione) e in numerose applicazioni pratiche quali la dosimetria per applicazioni in radioprotezione, l'analisi della composizione chimica e della presenza di elementi in traccia nei materiali per attivazione neutronica.

Il programma fusione ha anche stimolato la realizzazione di sorgenti di neutroni utilizzate a scopi non militari per la validazione dei dati nucleari appena descritti. In questo settore, l'ENEA ha realizzato a Frascati un Generatore di Neutroni da 14 MeV di media intensità, il *Frascati Neutron Generator* (FNG), unico nel suo genere in Italia e per molti anni in Europa, che produce 10^{11} n/s in modo continuo tramite la reazione di fusione tra deuterio e trizio. Dal 1992, anno in cui ha co-

minciato ad operare, non solo FNG è stata la *facility* europea di riferimento per la validazione sperimentale dei dati nucleari per la fusione, ma ha anche costituito una delle poche sorgenti di neutroni disponibili in Italia e, insieme ai laboratori ad essa annessi, ha contribuito al mantenimento delle competenze nucleari sperimentali in Italia. L'uso di FNG è molto richiesto da gruppi di ricerca italiani al di fuori della fusione, per lo studio del danneggiamento di rivelatori e/o di componenti elettronici esposti al flusso di neutroni, per lo sviluppo, caratterizzazione e calibrazione di nuovi rivelatori per applicazioni in astrofisica e in fisica delle alte energie, e infine in dosimetria neutronica.

La scienza computazionale ha tratto notevole impulso dalla comunità della fusione, nell'ambito della quale si sono andati sviluppando codici sempre più complessi, per la simulazione fluidodinamica, magneto-fluidodinamica e cinetica del plasma, utilizzati in altre discipline quali la fisica dell'atmosfera, fisica solare, astrofisica, fisica dei fasci di particelle non neutre. I metodi numerici per il calcolo dei campi magnetici in geometrie complesse e l'analisi degli stress ad elementi finiti sono stati sviluppati per la progettazione delle macchine per la fusione. La fusione ha contribuito allo sviluppo dei sistemi di supercalcolo: il *Magnetic Fusion Energy Computing Center* (MFECC) realizzato nel 1974 negli Stati Uniti presso i laboratori nazionali di Livermore, appositamente per servire il programma fusione americano, con la sua rete di accesso remoto ai laboratori affiliati al *Department of Energy* (DOE) e alle università americane costituì il primo esempio di centro di supercalcolo non classificato, servito da modello per gli altri che seguirono.

Sviluppo di nuove tecniche di misura

Oltre alla comprensione teorica, lo studio dei plasmi ha richiesto lo sviluppo di una molteplicità di tecniche di misura, di analisi dei dati e tecniche di ricostruzione dell'immagine estremamente avanzati che sono state in seguito applicate ad altri campi della scienza e della tecnologia. Presso il Laboratorio Gas ionizzati del Centro ENEA di Frascati fu effettuata nel 1959 la prima misura della densità elettronica di un plasma mediante un interferometro ottico. Successivamente, nel 1962 fu introdotto l'uso del laser, da poco scoperto, nelle tecniche interferometriche di misura della densità di plasma, e immediatamente dopo vennero eseguiti i primi esperimenti di *scattering* di luce laser per la misura della temperatura del plasma. Negli anni successivi tutte queste tecniche sono diventate di uso generale nella fisica del plasma. Le sonde di Langmuir applicate e perfezionate per la misura del flusso di ioni da plasmi di fusione sono normalmente applicate nell'industria dei semiconduttori. Sistemi laser utilizzati per la misura del campo di velocità nei plasmi per lo studio della turbolenza sono utilizzati in molte applicazioni per misurare la concentrazione, dimensione e velocità di polveri, la temperatura, velocità e turbolenza di fluidi, vibrazioni e deformazioni, la qualità di fibre sintetiche in tempo reale durante la produzione.

Non solo energia

Per concludere, vale la pena di menzionare che la fusione è studiata anche per applicazioni diverse dalla produzione di energia. In particolare, le macchine a fusione, anche funzionando al di sotto del pareggio energetico, costituiscono sorgenti di neutroni «volumetriche», cioè con grandi volumi disponibili per l'esposizione all'irraggiamento neutronico. Per questo, in particolari condizioni e regimi operativi, potrebbero essere utilizzate per il bruciamento degli attinidi, e la produzione di radioisotopi. Per i vettori spaziali per missioni di lunga distanza, sono allo studio vari tipi di motori a fusione che, essendo caratterizzati da valori di impulso specifico centinaia di volte più grandi di quelli attualmente ottenibili, consentirebbero di ridurre la durata delle missioni a tempi più accettabili.

Le ricadute industriali

Lo stretto rapporto tra le ricerche sulla fusione e l'industria si esplica, tradizionalmente, tramite quattro meccanismi principali: la formazione professionale, le commesse per forniture per la realizzazione degli apparati sperimentali, lo sviluppo e/o il trasferimento delle tecnologie innovative, la produzione di spin off.

La formazione professionale

Il trasferimento di innovazione e di *know-how* dall'ambito più ristretto dell'impresa scientifica al mondo produttivo, può avvenire in primo luogo attraverso la formazione di personale tecnico-scientifico altamente qualificato tramite la permanenza di studenti e di giovani ricercatori presso i grandi laboratori di ricerca dove sono operativi gli impianti sperimentali di ricerca. Nel caso della fusione, la quantità e la dimensione di tali impianti sperimentali, la complessità e la multidisciplinarietà che li caratterizza, l'ampia collaborazione internazionale che li collega, fa della

formazione professionale un meccanismo di grande valore sociale, anche se difficilmente quantificabile. Nel quinquennio 1995-99 erano operative in Europa una decina macchine sperimentali presso cui lavoravano, oltre a circa 1750 ricercatori, 250 studenti di PhD, 45 ricercatori all'anno con borse di studio e un numero non precisato di studenti in fase di preparazione della tesi di laurea, la gran parte dei quali è stata successivamente impiegata nell'industria e nel sistema educativo oltre che nella ricerca.

Le tecnologie della fusione

Mentre i primi esperimenti sulla fusione erano completamente realizzati all'interno dei laboratori, in una fase successiva si iniziò a ricorrere all'industria per la fornitura di apparecchi o strumenti con particolari prestazioni, o di interi componenti per le macchine sperimentali, progettati all'interno dei laboratori. Nel tempo, man mano che gli impianti sperimentali sono cresciuti in complessità, si è reso necessario un maggiore coinvolgimento dell' industria non solo per la fornitura di oggetti ma anche per attività di progettazione e di sviluppo di specifiche soluzioni in settori ad alta tecnologia quali l'alto vuoto e la meccanica di precisione, i materiali avanzati, la criogenia, la costruzione di magneti e bobine, l'elettronica di potenza impulsata, la radiofrequenza, la robotica e telemanipolazione, l'acquisizione dati e il controllo, i sistemi diagnostici, la tecnologia del trizio. L'insieme di tutti questi aspetti scientifici e tecnologici rappresentano i settori su cui, nel tempo, il programma fusione ha maggiormente investito risorse con un crescente coinvolgimento dell'industria. In tutti questi settori, le imprese che hanno partecipato alla realizzazione di componenti e impianti per la fusione, incluse le piccole e medie industrie, hanno generalmente tratto beneficio acquisendo nuove tecnologie, *know-how* e qualificazione, e trasferendoli dall'ambito scientifico in nuovi settori di mercato.

Gli spin-offs

Le tecnologie dell'alto vuoto (~10^{-8} bar) sono utilizzate nella realizzazione di camere da vuoto di grandi dimensioni (il volume della camera interna del JET è di circa 150 m^3, saranno 837 m^3 in ITER), e in grado di sostenere elevati carichi termici, continui o accidentali, e intense forze elettromagnetiche che possono verificarsi per l'interazione di correnti immagine con il campo magnetico. Nel caso di scariche lunghe o stazionarie, la camera da vuoto deve essere attivamente raffreddata, mentre la necessità di contenerne il degassamento può richiedere il riscaldamento preventivo della camera da vuoto fino a 500 °C, talvolta dovendo mantenere l'isolamento termico con i magneti superconduttori. L'uso del trizio richiede inoltre che tutti i componenti siano operabili in maniera remotizzata. L'insieme di questi requisiti richiede lavorazioni di alta precisione, tecniche avanzate di saldatura, di controllo e per la tenuta di vuoto. Le tecnologie dell'alto vuoto e della meccanica di precisione hanno avuto un notevole impulso dal programma fusione, si pensi in particolare allo sviluppo di guarnizioni metalliche di ogni tipo, alle tecniche di saldatura e del relativo controllo.

Nelle macchine a confinamento magnetico il campo magnetico principale è generato dalle bobine che formano il magnete toroidale, mentre la forma e il centramento del plasma sono ottimizzati utilizzando le bobine del circuito magnetico poloidale. La gran parte delle macchine fin qui realizzate fa uso di elettromagneti costituiti da avvolgimenti di rame.

Tuttavia, poiché il reattore a fusione potrà essere economicamente competitivo solo utilizzando magneti superconduttori, il programma fusione ha dedicato uno sforzo considerevole allo sviluppo dei materiali e dei magneti superconduttori fin dagli anni '70. Rispetto ai magneti impiegati negli acceleratori di particelle, i magneti nelle macchine a fusione operano a valori del campo magnetico più intensi e devono sostenere severi carichi, talvolta impulsati. Un programma internazionale di collaborazione tra Stati Uniti, Europa e Giappone fu iniziato nel 1977, sotto l'egida della *International Energy Agency* (IEA) per lo sviluppo e dimostrazione di magneti superconduttori per la fusione. Lo scopo di questo grande progetto, denominato *Large Coil Task* (LCT), era quello di dimostrare le tecniche di costruzione, l'operazione e il funzionamento di grandi magneti superconduttori, in grado di produrre campi magnetici di almeno 8 Tesla. Per questo progetto furono utilizzate leghe di NbTi e Nb_3Sn in varie forme e raffreddate in vario modo, sebbene in quel momento non vi fosse ancora una chiara esperienza applicativa in nessuno di questi casi. Il progetto, che vedeva la partecipazione di numerosi laboratori di ricerca con un vasto coinvolgimento dell'industria (General Dynamics, General Electric, Westinghouse, Airco, Intermagnetics General Corporation, Siemens, Vacuumschmelze, Krupp, Brown Boveri, Hitachi, Toshiba, Kawasaki, Mitsubishi), si concluse a metà degli anni '80 con la realizzazione di 6 bobine di dimensioni 2.5 m x 3.5 m, con correnti nei conduttori di 10 - 18 kA.

Successivamente sono state realizzate diverse macchine a fusione con magneti superconduttori: i *tokamak* TRIAM-1M (Kasuga, Giappone, 1986), TORE SUPRA (Cadarache, Francia, 1988), HT-7U (Hefei, Cina, recentemente completato) e lo stellarator lhd (Nagoya, Giappone, 1998). Dal 1985 le attività si sono concentrate sullo sviluppo di magneti superconduttori in Nb^3Sn per ITER che raggiungono dimensioni e prestazioni mai raggiunte fino ad oggi. Nell'ambito delle attività di R&S, sono stati costruiti due prototipi delle bobine superconduttrici rispettivamente del magnete toroidale (campo magnetico massimo pari a 11.8 T, realizzato in Europa con il coordinamento dell'ENEA) e del solenoide centrale (campo magnetico massimo pari a 13.5 T, realizzato in collaborazione tra Giappone e Stati Uniti). Lo sforzo finanziato dalla fusione ha contribuito sostanzialmente allo sviluppo dei magneti superconduttori, oggi ampiamente usati in varie applicazioni che richiedono alti campi magnetici non tecnicamente ottenibili altrimenti, o per le quali le elevate correnti utilizzate rendono l'uso di tali magneti economicamente competitivo. Attualmente, il mercato più importante è rappresentato dagli apparecchi per la diagnostica medica per immagini basata sulla risonanza magnetica nucleare (*Magnetic Resonance Imaging*, MRI), che impiega intensi campi magnetici caratterizzati da elevato grado di omogeneità e stabilità. Tuttavia, stanno riscuotendo crescente interesse i sistemi per l'immagazzinamento magnetico dell'energia elettrica (*Superconducting Magnetic Energy Starage systems, SMESs*) per la stabilizzazione delle reti elettriche, ed altri componenti di uso nell'industria elettrica (generatori, limitatori di corrente etc.).

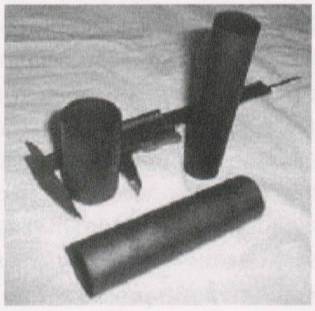
I sistemi di riscaldamento del plasma con microonde utilizzano un grande intervallo di frequenze, da alcuni MHz ad oltre 100 GHz. Le sorgenti di alta potenza (~ 0.5 - 1 MW) utilizzate variano dai tetrodi (~ 1 - 300 MHz), ai klystron (~ 0.3 - 10 GHz) e ai gyrotron (~ 10 - 200 GHz). I klystron utilizzati per gli esperimenti di fusione furono inizialmente adattati da quelli usati per i radar o per altre applicazioni industriali, estendendone nel tempo la durata dell'impulso e la potenza (~ 1 MW). I gyrotron, studiati inizialmente per scopi militari, sono stati ulteriormente sviluppati a partire dalla fine degli anni '70 appositamente per generare microonde ad alta potenza ed alta frequenza per riscaldare i plasmi della fusione utilizzando la risonanza alla frequenza di ciclotrone degli elettroni. Attualmente i gyrotron sono utilizzati per la produzione microonde focalizzate e capaci di fare una scansione su aree relativamente grandi per la lavorazione di materiali a bassa conducibilità termica quali polveri, polimeri, vetro e ceramici in genere: l'utilizzo di più alte frequenze, corrispondenti a lunghezze d'onda più piccole, presenta vantaggi rispetto alle frequenze tradizionalmente usate per queste applicazioni (fino a 2.45 GHz) in termini di maggiore concentrazione di potenza e di focalizzazione su materiali a contatto con materiali che non devono essere trattati, per processi di sinterizzazione, giunzione di materiali con diverse temperature di fusione (metalli su ceramici) per riscaldamento selettivo, rivestimenti ceramici. Inoltre, rispetto alle sorgenti di microonde tradizionali, l'impiego di gyrotron consente di ridurre i tempi di lavorazione e i consumi energetici. Sulla base dei progressi ottenuti per la fusione, si stanno sviluppando amplificatori basati su gyrotron per radar ad onde millimetriche ad alta potenza che presentano migliori prestazioni in quanto, lavorando a frequenze più alte, subiscono minore attenuazione da parte dell'atmosfera e forniscono una migliore risoluzione delle immagini.

Un altro modo per riscaldare il plasma, e generare corrente in maniera non induttiva (requisito necessario per passare dall'operazione impulsata a quella continua), consiste nell'iniettare fasci di particelle neutre ad alta energia (140 keV nel caso del JET), ottenuti neutralizzando fasci di ioni positivi. Per energie più elevate (1 MeV nel caso di ITER), conviene produrre tali fasci a partire da ioni negativi i quali presentano una maggiore efficienza di conversione ad alte energie. Recentemente sono state sviluppate sorgenti e sistemi di focalizzazione di fasci di ioni negativi con i requisiti di convergenza e durata del fascio necessari per ITER. Una delle caratteristiche di tali fasci è la purezza della composizione grazie all'assenza di specie atomiche o molecolari diverse. Per questa caratteristica, la tecnologia sviluppata per la fusione viene applicata alla produzione di film ultrasottili di silicio monocristallino (10 mm) con il metodo della delaminazione, in cui un fascio di ioni negativi viene inviato, senza dover ricorrere a sistemi di analisi e di separazione di massa, su uno strato di silicio monocristallino. Lo strato di idrogeno depositato ad una determinata profondità nel cristallo, a seguito di riscaldamento causa la separazione dello strato superficiale. In questo modo si possono produrre film di silicio monocristallino, da utilizzare su substrati di basso costo nelle celle fotovoltaiche, con lo spessore minimo per avere sufficiente efficienza di conversione e costi ridotti.

La disponibilità di opportuni materiali rappresenta un aspetto cruciale per lo sviluppo dell'

energia da fusione, siano essi materiali strutturali, materiali esposti alla prima parete, materiali per la produzione e recupero del trizio nel ciclo del combustibile, o per applicazioni specifiche (isolanti, finestre, guarnizioni, fibre ottiche). La selezione dei materiali di ITER ha richiesto un approccio totalmente ingegneristico per tener conto in maniera integrata delle proprietà meccaniche e degli effetti dell'irraggiamento neutronico, delle tecniche di lavorazione e giunzione, dell'affidabilità e manutenzione. Il materiale strutturale primario di ITER sarà ancora un acciaio convenzionale (316 L(N)); diversi materiali saranno utilizzati nei componenti affacciati al plasma sui quali viene depositato il 20% della potenza di fusione totale, con picchi in eccesso ai 10 MW/m^2 nella parte in cui viene convogliata, attraverso una particolare configurazione del campo magnetico, gran parte di tale potenza (divertore). La comprensione dei meccanismi di interazione e degli effetti di erosione e rideposizione ha portato alla scelta del berillio per la prima parete, e di compositi in fibre di carbonio (CFC) e di tungsteno per il divertore. L'attività di progettazione di ITER ha prodotto una notevole estensione della conoscenza delle proprietà fisiche e termo-meccaniche di tutti i materiali utilizzati e ha richiesto lo sviluppo di nuove leghe e di tecniche di giunzione tra metalli diversi per la rimozione dei flussi di calore. Inoltre, la necessità di impedire rilasci di trizio attraverso le pareti dei vari componenti ha determinato lo sviluppo di barriere di permeazione agli isotopi dell'idrogeno nei metalli, utilizzando tecniche di *coating* o impiantazione ionica. Al tempo stesso, per il recupero del trizio, sono state sviluppate membrane metalliche sottili in lega di palladio, completamente selettive all'idrogeno, per la realizzazione di tubi permeatori in grado di separare gli isotopi dell'idrogeno da miscele gassose. Entrambe queste tecnologie possono trovare impiego, ad esempio, nei processi di produzione e separazione dell'idrogeno per alimentare celle a combustibile.

Più a lungo termine, i requisiti di sicurezza, di riduzione delle scorie radioattive e di competitività economica per il reattore a fusione richiedono lo sviluppo di materiali avanzati, caratterizzati da bassa attivazione e resistenza al danneggiamento da irraggiamento neutronico, con possibilità di operare ad alta temperatura. La specificità della fusione rispetto alla fissione consiste principalmente nel maggiore tasso di trasmutazioni con produzioni di gas (H, He) per reazioni indotte dai neutroni (circa 100 volte più grande negli acciai) a parità di fluenza neutronica. Per ridurre questi effetti negativi sono stati sviluppati acciai ferritici/martensitici a ridotta attivazione (F82-H in Giappone, 9Cr-2WTaV negli Stati Uniti, EUROFER in Europa) che presentano proprietà superiori rispetto agli acciai convenzionali in termini resistenza all'impatto e resistenza a frattura, e al tempo stesso minor sensibilità all'infragilimento sotto irraggiamento neutronico, il cui impiego è tuttavia limitato a temperature di lavoro non superiori a circa 600°C (circa 650 °C per leghe indurite con ossidi dispersi). Come materiali strutturali per concetti di reattore operanti a più alte temperature, sono sviluppati composti in fibre di carburo di silicio (SiC/SiC) (e in misura minore leghe di vanadio V-4Cr-4Ti) che presentano le migliori caratteristiche in termini di attivazione indotta da neutroni. Il carburo di silicio monolitico e i materiali compositi C-SiC e SiC-SiC sono utilizzati nell'industria aerospaziale, in parti di motori e bruciatori, negli scambiatori di calore ad alta temperatura per realizzare componenti destinati ad operare ad elevate temperature ed in condizioni aggressive per le loro caratteristiche di stabililità chimica e resistenza meccanica ad alta temperatura, di resistenza all'abrasione, all'ossidazione e in generale all'aggressione chimica e allo sputtering chimico. Il carburo di silicio monolitico viene generalmente fabbricato con la tecnologia delle polveri, ha buona conducibilità termica ma è fragile. Al contrario, i compositi sono più resistenti ma presentano valori più bassi della conducibilità termica. Il miglioramento di questa caratteristica dei compositi, insieme alla riduzione delle impurezze e alla comprensione degli effetti della produzione di gas (He) sotto irraggiamento sono oggetto della attività di sviluppo condotta nell'ambito del programma fusione.

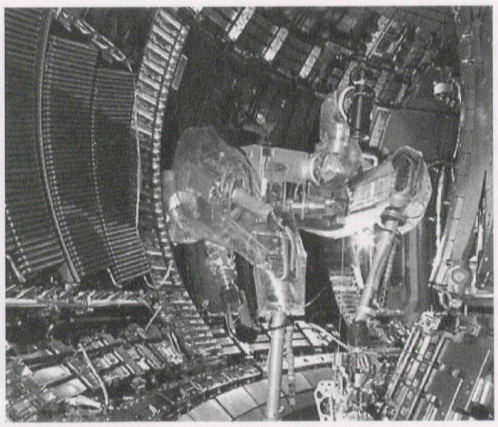


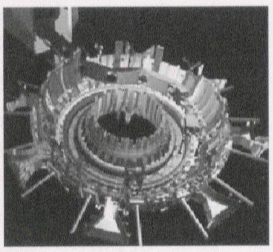
L'ENEA è attiva nello sviluppo di compositi SiC/SiC per la fusione. In collaborazione con la Fabbricazioni Nucleari (FN., e la Tecnotessile S.r.l., ha realizzato pannelli di composito SiC-SiC aventi elevata purezza (SiC stechiometrico policristallino), elevata densità (fino a 2.60 g/cm3) e alta conducibilità termica (oltre 30 W/(mK).
I materiali prodotti sono prototipici di livello pre-industriale, ma la tecnologia è scalabile anche a prodotti semilavorati di dimensione rilevante per applicazioni industriali. Ha inoltre messo a punto una tecnica di fabbricazione di materiali a gradiente di funzione, costituiti da una struttura mista di carburo di silicio multistrato e di un composito ceramico a fibra continua, adatti alla fabbricazione di pannelli in geometria piana, curva e tubolare.

Nonostante i risultati ottenuti, lo sforzo di ottimizzazione delle tre categorie di materiali sopra menzionati per gli aspetti specifici della fusione, per il momento non rende i prodotti sviluppati competitivi per applicazioni diverse. Tuttavia, tale lavoro di sviluppo è raccolto da progetti che presentano problematiche simili, come quelli per la realizzazione di sorgenti neutroniche di spallazione, di sistemi ADS (*Accelerator Driven System*) o dei reattori nucleari di IV generazione, per i quali si pensa di impiegare i materiali strutturali sviluppati per il reattore a fusione.

Nel reattore a fusione così come nelle macchine sperimentali che operano in DT, a causa dell'uso del trizio e dell'attivazione dei materiali indotta dai neutroni, la manipolazione dei componenti deve avvenire in modo remotizzato, richiedendo l'uso di servomanipolatori, trasportatori, sistemi di visione e *ranging*. Nel caso della fusione tali sistemi debbono essere in grado di operare con elevata precisione su grandi distanze, in presenza di alte dosi di radiazione gamma. Fin dall'inizio degli anni '60 l'ENEA ha sviluppato un telemanipolatore MASCOT di tipo *master slave* con retroazione di forza, in grado di effettuare azioni trasmettendo informazioni sensoriali all'operatore. Il MASCOT è stato utilizzato e via via migliorato al JET, dove è tuttora in uso un modello di quarta generazione in grado di compiere tutte le operazioni richieste durante le fasi di *shutdown* utilizzando un sistema di realtà virtuale che accede direttamente ai disegni CATIA (*Computer Aided Three-dimensional Interactive Application*). Le caratteristiche peculiari del sistema sono dovute alla complessità dell'ambiente di lavoro e alla flessibilità necessaria per acquisire con estremo dettaglio tutte le modifiche apportate all'ambiente in continua evoluzione, e per mettere a punto nuove procedure operative.

I sistemi di acquisizione e controllo debbono garantire il monitoraggio e il controllo di tutte le azioni relative all'operazione delle macchine sperimentali, inclusi tutti gli impianti ausiliari, e la misura dei parametri di plasma, al fine di mantenere le caratteristiche delle scariche entro i limiti desiderati ed evitare danni gravi agli impianti stessi. Tali sistemi sono caratterizzati da un elevato tasso di acquisizione di informazioni, tipicamente dell'ordine del gigabyte per ogni singola scarica del JET. Le informazioni sono memorizzate, elaborate e fornite in rete in forma comprensibile e in tempo reale agli operatori con un elevato grado di affidabilità. Inoltre, sono cresciuti enormemente nel tempo i sistemi di feedback per controllare dapprima singoli parametri (la posizione del plasma, la densità etc.), fino alla completa identificazione del regime di plasma secondo categorie prestabilite e la sua correzione in accordo con quanto programmato, utilizzando tecniche di Intelligenza Artificiale. Sebbene in generale si utilizzino tecnologie hardware/software sviluppate nell'ambito degli esperimenti di fisica delle alte energie, la specificità della fusione sta nell'elevato grado di integrazione delle informazione raccolte, che si riflette sull'architettura del sistema di controllo e feedback che è costituito, più propriamente, da un complesso di sistemi integrati, programmati a rispondere a variazioni dello stato degli impianti, a guasti degli attuatori, a comportamenti indesiderati del plasma. Con l'avvento di ITER, cresceranno enormemente le esigenze di controllo e di ottimizzazione delle operazioni, nonché le possibilità di controllare strumenti a distanza in tempo reale.





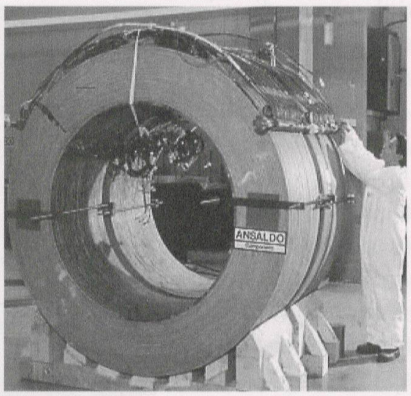
A sinistra: immagine dell'interno della camera da vuoto del JET, con il manipolatore MASCOT nella parte terminale di un braccio articolato lungo 10 m, che sta sostituendo le tegole di rivestimento della parte inferiore della camera (divertore).
A destra: simulazione di una operazione all'interno della camera da vuoto del JET.

Trasferimento tecnologico e sinergie

L'industria ha spesso interesse a partecipare ai progetti della fusione perché vede sinergie con il proprio core business. Nella realizzazione del JET e del *Test Fusion Tokamak Reactor* (TFTR), la macchina realizzata a Princeton (USA) all'inizio degli anni '80, il contributo di industrie ad alta tecnologia è stato fondamentale. Ad esempio, l'industria aerospaziale McDonnell Douglas Corporation applicò il sistema Unigraphics di Computer Aided Design (CAD), più veloce e più preciso rispetto ai sistemi disponibili negli anni '80, per la produzione delle tegole di carbonio per il rivestimento della prima parete interna di TFTR. Questa fu, se non la prima, una delle prime e dimostrative applicazioni del sistema, estremamente vantaggiosa sia per il progetto TFTR sia per la McDonnell Douglas. L'impresa austriaca Plansee AG

è un impresa che opera in diverse aree tecnologiche tra cui la metallurgia delle polveri, le tecniche di produzione e di giunzione di metalli, di materiali ceramici e di compositi refrattari. La Plansee AG partecipa attivamente sia al programma europeo a lungo termine per lo sviluppo di materiali per la fusione, sia alla realizzazione di particolari soluzioni per gli esperimenti attuali, in particolare per componenti affacciati al plasma che debbono quindi sopportare un alto flusso termico. Negli anni '80, componenti che utilizzavano giunzioni di tungsteno e leghe CuCrZr erano utilizzate negli interruttori dei circuiti ad alto carico nell'industria energetica. Le giunzioni erano e sono tuttora realizzate fondendo rame puro su tungsteno e saldando con *electron beam* il composto su di una struttura di supporto in CuCrZr. Alla metà degli anni '80 l'idea di sostituire il tungsteno con compositi di carbonio, con la fusione diretta del rame sul composito, portò alla messa a punto del processo chiamato *Active Metal Casting*. A quel tempo la modesta qualità meccanica dei compositi C/C non ne permise l'applicazione ai ruttori per circuiti ad alta tensione, tuttavia la tecnologia è stata applicata alla fusione e ottimizzata nel corso degli anni '90 con la costruzione di componenti ad alto flusso termico affacciati al plasma e raffreddati attivamente. Le stringenti richieste di affidabilità di tali componenti hanno richiesto anche la messa a punto di tecniche di ispezione non distruttive basate su metodi termografici, radiografici e ultrasonici. La Plansee applica adesso questa tecnologia allo sviluppo di camere di combustione avanzate per motori aerei e spaziali e, di nuovo, alla produzione di ruttori per i circuiti ad alta tensione.

In Italia, fin dagli anni '70 l'ENEA ha svolto attività intese a promuovere il coinvolgimento dell'industria italiana nel campo delle realizzazioni di materiali e/o apparecchiature per grossi magneti superconduttori (tecnologie di fabbricazione di cavi e nastri superconduttori, tecniche di avvolgimento di materiali intrinsecamente fragili), tramite il trasferimento delle conoscenza acquisite. La collaborazione tra ENEA e l'industria italiana ha significativamente contribuito a far nascere le competenze in questo settore e a potenziare la capacità di fabbricazione dei magneti superconduttori. Un esempio è il solenoide superconduttore in NbTi per la *test facility* europea SULTAN, installato presso l'Istituto Paul Sherrer di Villigen in Svizzera nel 1980, primo magnete di dimensioni rilevanti completamente progettato e costruito in Italia da ENEA, Europa Metalli e Ansaldo: il campo magnetico è 6 T su un diametro di 1.3 m



Primo magnete superconduttore di dimensioni rilevanti, in Nb-Ti, progettato e costruito in Italia da ENEA, Europa Metalli e Ansaldo per la Test Facility SULTAN (Villigen, Svizzera) nel 1980 e ancora in operazione. Il diametro è di 1.3 m, il campo magnetico è 6T.

(ancora in operazione). L'Europa Metalli S.p.A (oggi Luvata), un'industria leader internazionale nel campo della manifattura di semilavorati in rame e sue leghe, col supporto scientifico e di controllo di qualità dell'ENEA, ha acquisito la capacità di produrre e commercializzare, su scala globale, fili e cavi superconduttori adatti a tutte le grosse applicazioni, acquisendo importanti contratti per la realizzazione di magneti per la diagnostica basata sulla risonanza magnetica (RMN) in campo medico. Il cavo superconduttore in Nb_3Sn per il prototipo del magnete toroidale di ITER è stato interamente fabbricato dalla Europa Metalli, mentre l'inserimento nel *jacket* di acciaio è stato effettuato presso l'Ansaldo. L'Ansaldo Energia, industria leader nella costruzione di macchine elettriche, partecipando al programma fusione ha iniziato a costruire magneti superconduttori ed ha in seguito sviluppato capacità autonome di progettazione e realizzazione. L'Ansaldo Superconduttori (oggi ASG Superconductors) attualmente è coinvolta nella progettazione, costruzione, installazione e prove di magneti ed apparecchiature speciali per il Large Hadron Collider (LHC) del CERN di Ginevra, e nella realizzazione di sistemi di accumulo di elettricità per limitatori di corto circuito per reti elettriche (*Superconducting Energy Storage systems, SMEs*) per la protezione dei carichi elettrici.

Il coinvolgimento dell'industria nel programma fusione

Nello sviluppo del programma fusione, i laboratori sono stati affiancati in maniera crescente da industrie ad alta tecnologia. In questo modo, si è anche perseguito lo scopo di preparare l'industria alla realizzazione degli impianti successivi fino alla produzione di energia da fusione, attraverso lo sviluppo della capacità di produrre le

tecnologie specifiche. Durante la fase di progettazione di ITER il ruolo dell'industria è ulteriormente cresciuto. La costruzione di ITER rappresenterà un'impresa comparabile alla costruzione di un reattore di potenza, e richiederà un notevole contributo dell'industria sia in aree convenzionali, quali l'ingegneria edile, meccanica ed elettrica, sia nelle aree tecnologicamente più specialistiche, menzionate in precedenza. In Europa, ad esempio, per preparare l'industria alla costruzione di ITER fin dal 1993 si è dato vita alla formazione di un sistema di qualificazione di imprese europee nei settori tecnologici relativi alle tecnologie chiave illustrate in precedenza, con il quale sono state coinvolte numerose industrie (tra cui anche alcune PMI). L'obiettivo è di preparare un insieme di imprese, o di raggruppamenti di imprese, che potranno partecipare a bandi di gara per la fornitura di prototipi e di apparecchiature relativi a tecnologie specifiche alla fusione termonucleare ed essenziali all'eventuale costruzione di un reattore sperimentale. Strategie simili sono seguite negli Stati Uniti e i Giappone.

Strategie per il trasferimento tecnologico

Se nel passato vi è stata una chiara ed esplicita strategia nel perseguire il coinvolgimento dell'industria nell'impresa fusione, è tuttavia mancata un'altrettanto chiara strategia per promuovere in modo attivo ed efficace il trasferimento tecnologico in quanto non dichiarato esplicitamente nelle finalità del programma: la mancanza di adeguati strumenti non ha permesso per il passato il pieno sfruttamento di un enorme potenziale di innovazione. Inoltre, la carenza di strutture dedicate alla identificazione e registrazione degli eventi positivi, rende oggi difficile ricostruire quantitativamente l'impatto del programma sul sistema produttivo. Tuttavia, negli ultimi anni, nel contesto della globalizzazione dei mercati e della competizione tecnologica in tutti i settori industriali, si è fatto più vivo l'interesse per lo sfruttamento razionale delle risorse di ricerca. Attualmente, con velocità, determinazione e modalità diverse i laboratori e gli istituti coinvolti nelle ricerche sulla fusione in tutto il mondo stanno attuando politiche che facilitano o promuovono tale trasferimento. Con riferimento al quadro europeo, ad esempio, l' *Atomic Energy Agency* inglese, UKAEA, si è dotata di specifici strumenti, quali la creazione di un *Innovation Center* a Culham per la creazione di *spin-offs* dalle attività del JET. Altri istituti, quali il *Max Planck Institute of Plasma Physic* in Germania, più tradizionalmente vedono nello sviluppo di nuove conoscenze e il loro graduale trasferimento il maggior beneficio per l'industria. Infine, alcuni istituti, quali la *National Technology Agency* finlandese, TEKES in Finlandia, hanno un approccio molto diretto ed attivo nel coordinare il coinvolgimento dell'industria nei grandi progetti internazionali per la fusione, per la fisica delle alte energie e per la ricerca spaziale, al fine di promuovere la competitività dell'industria del proprio paese.

Ringraziamenti

L'autrice desidera ringraziare in modo particolare i numerosi colleghi che hanno letto il manoscritto per i loro commenti e i preziosi suggerimenti, e tutti coloro che pazientemente le hanno fornito la loro competente consulenza.

Nota: Tratto da *Energia, ambiente, innovazione*, N. 2-2004

* Responsabile dell'Unità di Agenzia del Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleari dell'ENEA. Lavora da molti anni alla fusione nucleare occupandosi, in particolare, degli aspetti nucleari della fusione. Si è occupata di diagnostiche nucleari in esperimenti per la fusione nucleare a confinamento magnetico in Italia e all'estero (FT,FTU, JET, TFTR). Dal 1994 al 2002 è stata Responsabile della Sezione Neutronica della Divisione Fusione dell'ENEA, e dell'operazione e sperimentazione del generatore di neutroni da 14 MeV dell'ENEA, FNG (*Frascati Neutron Generator*). Dal 1995 è Principal Investigator di numerosi esperimenti di neutronica condotti in collaborazione con altri laboratori europei e mondiali presso FNG, finalizzati alla validazione del progetto nucleare del reattore a fusione. Nell'ambito dell'*Implementing Agreement* della IEA (*International Energy Agency* - OCSE) sulla Tecnologia del Reattore a Fusione, è Task Coordinator per la neutronica per la fusione.
È membro del Technical Advisory Panel dell'Agenzia Europea per ITER.
È autrice o coautrice di più di 100 tra pubblicazioni, relazioni ad invito, presentazioni a congresso. È Editor della rivista scientifica internazionale *Fusion Engineering and Design*.