

TECNOLOGIE DELLA FUSIONE NUCLEARE: RICERCA E INNOVAZIONE IN ITALIA

R. Zanino¹, G. Vecchi², M. Ferraris³, M. Zucchetti¹, G. Vella⁴, E. Oliveri⁴,
V. Coccoresse⁵, A. Pizzuto⁶, F. Gnesotto⁷, G. Bonizzoni⁸

¹ Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino, ² Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Torino, ³ Dipartimento di Scienza dei Materiali e Ingegneria Chimica, Politecnico di Torino, ⁴ Dipartimento di Ingegneria Nucleare, Università di Palermo, ⁵ Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Università di Napoli Federico II, Associazione Euratom-ENEA (Consorzio CREATE), ⁶ ENEA, Centro Ricerche Energia, Frascati, ⁷ Consorzio RFX, Padova, ⁸ CNR, Istituto di Fisica del Plasma, Milano

SOMMARIO

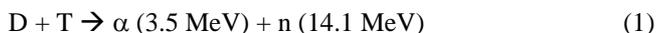
In questa nota si dà un breve riassunto dello stato dell'arte e delle prospettive delle ricerche sulle tecnologie della fusione nucleare in Italia e delle principali innovazioni "di prodotto" (hardware e/o software) da esse derivanti. Queste ricerche coprono uno spettro assai ampio e per sua natura interdisciplinare di attività, che include le tecnologie dei materiali innovativi (superconduttori, ceramici, compositi, triziogeni, strutturali, a bassa attivazione, etc.), le tecnologie del vuoto, dei componenti ad alto flusso termico, della manutenzione remotizzata, la criogenia, l'analisi di sicurezza, il trattamento della potenza elettrica, le tecnologie per il riscaldamento, il controllo e la diagnostica del plasma, ma anche lo sviluppo, la convalida sperimentale e l'applicazione di strumenti di calcolo sofisticati per la modellazione elettromagnetica/termofluidodinamica/meccanica dei componenti dell'impianto.

In particolare, viene qui documentata la posizione rilevante a livello internazionale che l'Italia occupa nel campo delle tecnologie della fusione nucleare: l'ENEA, il CNR e diverse sedi universitarie collaborano infatti da molti anni, all'interno dell'Associazione EURATOM-ENEA per la Fusione, alla ricerca e sviluppo di tecnologie innovative per i principali esperimenti esistenti sia nel nostro Paese (FTU a ENEA/Frascati e RFX a CNR/Padova) sia all'estero (ad es. il grande esperimento europeo JET a Culham (GB)). Questo nell'ottica di progetti internazionali (ITER in primis), che dovrebbero portare alla realizzazione di un reattore dimostrativo entro alcune decine di anni.

INTRODUZIONE

La fusione nucleare è una fonte energetica basata sulla formazione di nuclei ottenuti facendo reagire tra loro nuclei più leggeri all'interno di un gas ionizzato (*plasma*) ad alta temperatura ($k_B T \sim 10\text{-}20 \text{ keV} \rightarrow T \sim 10^8 \text{ K}$). Nell'approccio detto "a confinamento magnetico", che è il più promettente al momento, il plasma viene confinato nella camera a vuoto dove avviene la reazione usando magneti di varia configurazione.

La reazione comparativamente più facile da far avvenire è



dove i nuclei di due isotopi dell'idrogeno (deuterio D e trizio T) fondono insieme per formare una particella α (nucleo di ^4He) e un neutrone.

La particella α in (1), avendo un'energia molto maggiore di quella media delle particelle nel plasma, può contribuire, collidendo con queste ultime, al mantenimento ad alta temperatura dei reagenti, fino a permettere in linea di principio la produzione di energia senza bisogno di fornire energia al plasma dall'esterno (*ignizione*). Viceversa il neutrone in (1), rallentando in un mantello (*blanket*) posto immediatamente all'esterno della camera di reazione, serve anzitutto alla produzione di elettricità (conversione di energia cinetica in energia termica e, successivamente, in energia elettrica, v. Fig.1) seguendo un principio sostanzialmente identico a quello dei reattori nucleari a fissione. Il parametro chiave dal punto di vista energetico è il fattore di amplificazione Q definito come il rapporto fra potenza prodotta e potenza immessa nel plasma. Q tende all'infinito in condizioni di ignizione, mentre $Q = 1$ indica invece condizioni cosiddette di *breakeven* o pareggio.

A differenza della fissione, la fusione garantisce intrinsecamente la non divergenza della potenza prodotta nel plasma in condizioni incidentali e l'assenza di prodotti di reazione radioattivi a lungo tempo di decadimento. Inoltre, parte del combustibile (D) è disponibile in quantità praticamente illimitata nell'acqua, mentre il resto (T), pur non esistendo in natura, è in linea di principio producibile interamente in situ, come risultato di reazioni nucleari fra il neutrone prodotto nella (1), eventualmente moltiplicato nel blanket, e Li presente nel blanket, in una delle varie forme (solido, liquido) possibili. Occorre anche sottolineare che la fusione condivide con la fissione il merito di essere una fonte *CO₂-free*, cioè priva di emissioni di anidride carbonica – un importante punto a favore rispetto alle fonti fossili, al momento dell'entrata in vigore del Protocollo di Kyoto.

La ricerca sulla fusione, nel senso della ricerca applicata, quindi con dispositivi sperimentali orientati alla dimostrazione della fattibilità scientifica, è iniziata negli anni '60 e negli anni '90 sono state raggiunte le condizioni di breakeven, con ~ 16 MW di potenza neutronica prodotta. I programmi di ricerca degli ultimi dieci anni, incentrati principalmente sul progetto ITER (v. oltre), sono invece per lo più orientati a dimostrarne la fattibilità tecnologica. A causa dei limiti di spazio imposti alla presente pubblicazione, non verrà fatto nel seguito che qualche superficiale riferimento alle questioni di *fisica* della fusione nucleare, e in particolare di fisica dei plasmi, per le quali si rimanda a testi (ad es., [1]) e riviste specializzate.

COMPONENTI PRINCIPALI DI UN REATTORE A FUSIONE E RELATIVE TECNOLOGIE

La configurazione magnetica di reattore a fusione su cui si

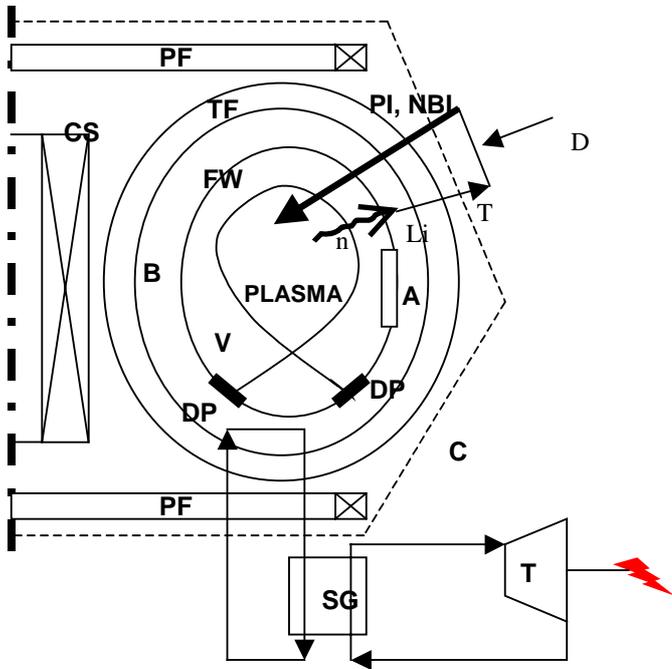


Figura 1. Schizzo di un reattore a fusione di tipo tokamak (sezione verticale passante per l'asse di simmetria della macchina - linea tratto e punto spessa). C = criostato (linea tratteggiata), CS = solenoide centrale, TF = magneti del campo toroidale, PF = magneti del campo poloidale, PI = pellet injector, NBI = neutral beam injector, B = blanket, FW = prima parete, DP = piastra del divertore, A = antenna per il riscaldamento ausiliario (a radiofrequenza) del plasma, V = camera a vuoto (include anche il blanket), SG = generatore di vapore, T = turbina.

stanno concentrando gli sforzi della comunità internazionale e' di tipo *tokamak* [1]. In questa configurazione, v. Fig.1, il plasma e' confinato in una camera a forma di toro (ciambella) dalla sovrapposizione di campi magnetici di origini diverse. Il funzionamento e', nell'idea originale, intrinsecamente pulsato (principio del trasformatore, v. oltre) ed è questo uno dei problemi da risolvere per rendere vantaggiosamente disponibile la fusione come fonte energetica. Stanno perciò venendo sviluppati metodi di generazione della corrente di plasma di tipo non induttivo (*current drive*) che potranno permettere un funzionamento quasi stazionario.

Passiamo ora alla breve descrizione dei principali componenti del reattore, in ordine centrifugo a partire dal plasma (v. Fig.1).

Diagnostiche

Nella macchine per la fusione e' presente una grande quantità di diagnostiche, direttamente affacciate al plasma o addirittura penetranti in esso (ad es. le sonde di Langmuir). Nelle prime macchine sperimentali il sistema delle diagnostiche aveva principalmente il ruolo di misurare le più importanti grandezze fisiche, al fine di poter orientare lo sviluppo delle campagne sperimentali e la comprensione delle leggi di scala per il confinamento. Questo ruolo, già a partire dalle grosse macchine attuali come il JET e ancor più nei futuri reattori, si va però affievolendo a favore di un ruolo più tecnologico, incentrato sul controllo in feedback dei parametri del plasma. Infatti, l'ottenimento di lunghe scariche, fino al limite della quasi stazionarietà, è legato a un complesso sistema di misura, basato su tecniche elettromagnetiche in bassa e alta frequenza, ottiche, bolometriche, ecc., che governa

i vari attuatori e che deve operare in difficili condizioni di alto flusso neutronico.

Prima parete / vuoto / componenti ad alto flusso termico / limiter / divertore

La prima parete (o *first wall*) e' al tempo stesso la parete della camera di reazione e la scatola che contiene il blanket. Nella camera di reazione viene raggiunta una pressione residuale dell'ordine di $10^{-8} - 10^{-9}$ mbar per mezzo sistemi di pompaggio da ultravacuo composti generalmente da pompe turbomolecolari (opportunamente schermate contro la presenza di elevati campi magnetici) associate a pompe criogeniche (10 K). Raggiunto tale limite di pressione, il sistema di iniezione gas della miscela D-T porta la pressione nella camera di reazione a valori dell'ordine di $10^{-3} - 10^{-4}$ mbar.

Le *interazioni plasma-parete*, legate al non perfetto confinamento del plasma, influenzano in modo profondo il comportamento del plasma nella regione centrale, dove avvengono le reazioni di fusione [2]. Il *carico termico* (che può raggiungere qualche decina di MW/m^2 di picco anche in condizioni di funzionamento nominali) e il carico di particelle depositati dal plasma causano l'erosione dei componenti affacciati al plasma (PFC), limitandone la durata, ma anche l'immissione di *impurezze* (con fenomeni quali lo sputtering), che possono portare allo spegnimento della reazione (1). E' necessario allora prevedere dei sistemi per evacuare le impurezze e comunque evitare che possano penetrare verso il centro della colonna di plasma. I carichi che provengono dal plasma sono quindi di norma convogliati su regioni predefinite in modo da smaltirli su componenti (cosiddetti ad alto flusso) dedicati specificamente al controllo delle interazioni plasma-parete. Questi si distinguono in *limiter* e *divertore* (mostrato, quest'ultimo, in Fig.1).

I PFC richiedono quindi delle tecnologie e dei materiali innovativi, che sono stati sviluppati in modo molto intenso e con successo nell'ultimo decennio. In particolare, i laboratori di ricerca (ENEA) e l'industria italiana (Ansaldo) hanno ottenuto risultati di assoluto rilievo che li ha portati a competere con le industrie europee più qualificate nella fabbricazione di componenti capaci di smaltire flussi termici superiori ai $20 MW/m^2$ in continua, mentre al Politecnico di Torino sono state sviluppate giunzioni speciali fra le mattonelle previste per il divertore di ITER (tungsteno e composito in fibra di carbonio/matrice di carbonio) e la lega a base di rame che funge da dissipatore di calore [3].

Sempre al bordo del plasma, nella regione detta *scrape-off layer*, avviene il pompaggio del combustibile inutilizzato e delle cosiddette ceneri dell'He (cioè le particelle α della (1), una volta termalizzate e neutralizzate). Il plasma viene rifornito di combustibile con continuità, usando *pellet injector* e/o *neutral beam injector* (NBI) questi ultimi usati anche per il riscaldamento ausiliario del plasma, v. oltre.

Riscaldamento

Il plasma in un tokamak e' riscaldato per effetto Joule dalla corrente di plasma (fino a una decina di MA nelle macchine attuali). Tale meccanismo e' però tipicamente insufficiente a portare il plasma vicino all'ignizione, per cui e' necessario un riscaldamento ausiliario. Oltre ai già ricordati NBI, si può anche trasferire energia al plasma per mezzo di onde elettromagnetiche - dette "radio-frequenza" (RF) -- sfruttando le frequenze di risonanza del plasma. La più usata è quella di

ciclotrone ionica (ICRH), con frequenze tipiche di 30-100 MHz, per la migliore disponibilità di generatori di elevata potenza (centinaia di kW) e per l'efficienza dei meccanismi fisici di trasferimento di energia al plasma; la frequenza di risonanza ibrida inferiore (*lower hybrid*, qualche GHz) è invece utilizzata per il *current drive*. La potenza RF viene trasferita al plasma da antenne affacciate al plasma, v. Fig.1.

Mantello (*blanket*)

Il blanket è un componente cruciale del reattore poiché permette di chiudere il ciclo del combustibile. A differenza di quanto accade per gli altri componenti discussi in questa Sezione, però, le macchine per la fusione attuali non possiedono un blanket e anche nei progetti di reattore più vicini alla realizzazione quali ITER questo componente è previsto solo in forma parziale. Lo sviluppo e il test del blanket rappresenta quindi un obiettivo molto importante e ambizioso dello sviluppo tecnologico orientato al reattore. Sono necessari, infatti, nuovi materiali, capaci di resistere a fluenze neutroniche molto elevate e di operare ad alta temperatura, nonché soluzioni progettuali che ne ottimizzino le prestazioni e ne garantiscano l'affidabilità. Uno degli scopi della sperimentazione di ITER è, appunto, il test di qualifica dei concetti che si stanno sviluppando. I concetti fin qui selezionati in Europa si basano su due diversi tipi di materiale fertile: solido e liquido. Il fertile solido è un composto ceramico di Li e utilizza Be come moltiplicatore; il fertile liquido è un metallo liquido, lega eutettica Pb-Li, col Pb che agisce come moltiplicatore. In particolare, per quanto attiene ai moduli di prova dei mantelli trizio-genici di un futuro reattore dimostrativo destinati ad essere irradiati nel reattore ITER, due tipologie di blanket sono state selezionate come riferimento nell'ambito EFDA, ossia il mantello a letti di sfere (Helium-Cooled Pebble Bed -- HCPB) e quello a metallo liquido (Helium-Cooled Lithium Lead -- HCLL), entrambi refrigerati a elio. Il materiale strutturale, almeno per la prima generazione di reattori, è un acciaio ferritico opportunamente modificato per resistere ad alte fluenze neutroniche e avere a fine vita una attivazione sufficientemente bassa da poter essere smaltito e/o riciclato senza particolari problemi. Materiali strutturali ceramici (SiC_f/SiC) sono considerati come molto promettenti per una seconda generazione di reattori perché consentirebbero di operare a temperature superiori ai 1000 °C. In Italia, l'ENEA è molto attivo nello sviluppo dei materiali ceramici strutturali e, insieme al Politecnico di Torino e all'Università di Palermo, nella caratterizzazione delle prestazioni termomeccaniche dei blanket.

Magneti superconduttori e criogenia

Il sistema magneti di un tokamak è costituito da 3 sottosistemi principali, v. Fig.1: il solenoide centrale (CS), che funziona in modo pulsato e genera induttivamente (parte del)la corrente di plasma (primario del trasformatore) e il relativo campo magnetico; i magneti del campo toroidale (TF), disposti simmetricamente su piani verticali passanti per l'asse di simmetria della macchina, che funzionano in continua e contribuiscono alla stabilità del plasma; i magneti del campo poloidale (PF), disposti su piani orizzontali, che funzionano in regime variabile e contribuiscono all'equilibrio del plasma e al suo controllo. Fra questi ultimi si trovano sia magneti che possono portare forti correnti con dinamica lenta (per l'equilibrio del plasma) sia magneti con correnti alquanto più

piccole, ma con dinamica molto più spinta (per la compensazione dei modi instabili del plasma, ad es. lo spostamento verticale).

Nel reattore i magneti saranno superconduttori, poiché altrimenti la potenza in essi dissipata (perdite Joule legate alle correnti di diverse decine di kA) verrebbe a essere confrontabile con la potenza prodotta dall'impianto [4]. Questo rende i magneti (e in particolare i TF) il sottosistema più costoso di tutto il reattore (~ 30 % del costo totale in ITER). Visti i campi elevatissimi generati da questi magneti (≥ 10 T) non è possibile, al momento, ipotizzare l'utilizzo di superconduttori ad alta temperatura critica. In ITER, CS e TF saranno basati su Nb₃Sn, mentre i PF, che operano a campi un poco più bassi, su NbTi. Per tutti risulta necessaria una refrigerazione con He a 4-5 K. In pochi metri, all'interno del reattore, si passa quindi dai ~ 10⁸ K del plasma a qualche K dell'elio, un fatto che ben evidenzia le enormi difficoltà ingegneristiche legate al progetto di un reattore a fusione. In Italia queste tecnologie sono sviluppate e commercializzate sia a livello di laboratorio (ENEA a Frascati), che a livello industriale (Ansaldo Superconduttori a Genova, Outokumpu – ex Europa Metalli – in provincia di Lucca, etc.).

Alimentazione elettrica (*power supply*)

I sistemi di alimentazione elettrica dei magneti sono basati sui moderni componenti e schemi dell'elettronica industriale, nelle versioni con le caratteristiche più spinte, sia in termini di capacità di corrente, sia in termini di rapidità di commutazione. I magneti sono alimentati da un sistema di convertitori allo stato solido in grado di trattare potenze dell'ordine delle decine di MW richieste per formare il plasma e per controllarne le instabilità durante la fase di combustione. Speciali alimentatori, con tensioni dell'ordine di 1 MV, sono inoltre necessari per gli NBI. Questo aspetto è tra quelli maggiormente dipendenti dalla localizzazione della macchina, in quanto l'entità della potenza attiva e reattiva (e la loro derivata temporale) prelevabile dalla rete pubblica varia da sito a sito. Sono previsti in ogni caso sistemi di accumulo energetico locale (ad es. alternatori con grossa inerzia) per smussare gli spunti di potenza, particolarmente forti soprattutto in fase di avvio della scarica. In tutte queste tecnologie l'Italia occupa una posizione di assoluta leadership, a livello sia di laboratori di ricerca che di aziende industriali.

Sicurezza e impatto ambientale

La principale caratteristica dell'energia da fusione dal punto di vista dell'accettabilità sociale è quella di non richiedere, anche a seguito del massimo incidente credibile, l'evacuazione della popolazione circostante. Inoltre, lo smaltimento dei rifiuti attivati non richiede il ricorso a depositi geologici.

Il potenziale competitivo della fusione come fonte sicura e a basso impatto ambientale per la produzione di energia elettrica nei paesi industrializzati necessita quindi di un progetto del reattore dove l'attenzione ai problemi di *impatto ambientale* sia in primo piano [5]. Ciò spiega i tre grandi filoni della ricerca sulla sicurezza in questo campo: 1) *analisi di incidente*, con lo scopo (v. sopra) di non avere alcun incidente credibile che comporti l'evacuazione della popolazione intorno all'impianto; 2) *gestione del ciclo del combustibile*, ottimizzando, monitorando e rendendo sicura la produzione e gestione del trizio nel reattore; 3) *gestione delle scorie radioattive*, con lo scopo di minimizzare la produzione di scorie che possano costituire un pericolo per le generazioni

future [6]. ENEA e Politecnico di Torino sono particolarmente attivi in questo settore.

Strumenti di calcolo

Un ruolo fondamentale nella tecnologia dei reattori a fusione è giocato dagli strumenti e sistemi di calcolo, che sono di grossa complessità e delicatezza, anche se, per loro natura, influiscono in modo modesto sul costo complessivo. La principale distinzione qualitativa è fra codici da utilizzare in sede di operazione della macchina (real time) e codici da utilizzare per la progettazione e l'analisi delle scariche e/o di sottosistemi del reattore.

Lo sviluppo di codici di calcolo in Italia ha portato in taluni casi a risultati di assoluta preminenza internazionale in diversi settori. Nel campo dei magneti superconduttori sono stati sviluppati e convalidati codici per la modellazione termoidraulica multiconduttore di interi magneti [7] e codici per la modellazione ibrida termoidraulica/elettromagnetica di cavi superconduttori [8]. Nel campo del riscaldamento a radiofrequenza, è stato sviluppato un codice di calcolo [9] per la simulazione delle antenne affacciate al plasma, convalidato sull'esperimento Alcator C-Mod (MIT). Nel campo del controllo del plasma sono stati sviluppati e convalidati sperimentalmente (in particolare al JET) codici di simulazione della scarica, che consentono di progettare sistemi di controllo digitale multiparametro. Infine, nel campo delle interazioni plasma-parete sono stati e stanno venendo sviluppati strumenti di calcolo avanzati per la modellazione dello scrape-off layer, ad es. [10], mirati a simulare i carichi termici sui PFC in geometrie e condizioni di operazione complesse.

PROGRAMMI DI RICERCA NAZIONALI

I programmi di ricerca nazionali sulla fusione sono orientati sia alla sperimentazione della fisica che allo sviluppo tecnologico. Essi si concentrano su esperimenti attualmente in corso presso l'ENEA di Frascati (FTU) e il Consorzio RFX a Padova (RFX), oltre che sulla collaborazione diretta all'esperimento europeo JET. Accanto a queste macchine, che sono in esercizio oramai da parecchi anni, ci sono studi e

proposte per esperimenti futuri. Tra questi, oltre alla collaborazione alle attività progettuali ITER, vi sono il progetto IGNITOR (v. oltre) e una versione potenziata di FTU denominata FT3. Le Università italiane collaborano attivamente alle attività dell'Associazione EURATOM-ENEA per la Fusione Termonucleare Controllata giocando in queste attività un ruolo molto importante sia dal punto di vista della formazione specialistica che della ricerca di base e applicata.

Esperimenti sulla fusione in Italia

FTU (Frascati Tokamak Upgrade) è l'unico tokamak attualmente operante in Italia, v. Fig.2. Si tratta di una macchina compatta ad alto campo magnetico (~ 8 T) rispetto a quelle attualmente operanti nel mondo. Le caratteristiche dettagliate e i risultati della macchina sono riportati in internet (<http://ftu.frascati.enea.it/>).

RFX (v. anche il sito <http://www.igi.pd.cnr.it/>) è una macchina toroidale, v. Fig.3, di ~ 1 m di diametro dotata di prima parete in grafite, mentre il diametro del toro è di ~ 4 m [11]. Il plasma è confinato in configurazione "Reversed Field Pinch", che differisce da quella tokamak per il livello più basso del campo magnetico necessario. Questo tipo di macchine non richiede quindi magneti superconduttori. L'esperimento è gestito dal Consorzio RFX, formato da CNR, ENEA, Università di Padova e Acciaierie Venete SpA. La macchina, recentemente rientrata in funzione, è stata modificata con l'obiettivo di offrire un contributo sostanziale allo studio del controllo attivo delle instabilità magneto-idrodinamiche, che costituisce uno dei problemi da risolvere nella realizzazione di un reattore a fusione [12]. Le particolari caratteristiche della macchina hanno richiesto lo sviluppo, in stretta collaborazione con l'industria, di specifiche tecnologie, in particolare nel campo degli amplificatori di grande potenza con tempi di risposta molto rapidi, degli interruttori per elevate correnti, dei sistemi robotizzati di ispezione e manipolazione, della strumentazione optoelettronica. In molti casi, questi sviluppi tecnologici hanno portato a interessanti "spin-off", in settori quali la trazione elettrica, le acciaierie, la propulsione spaziale, l'industria tessile.

Infine, sono disponibili in Italia anche diverse piattaforme tecnologiche per lo sviluppo, realizzazione e caratterizzazione di componenti di un reattore a fusione. Le principali fra queste sono: laboratori di prove magneti superconduttori, sorgente di neutroni da 14 MeV, laboratori tecnologici per sviluppo processi e caratterizzazione materiali, impianto per la realizzazione di componenti ad alto flusso termico, circuiti a elio e metalli liquidi, piattaforme di simulazione di operazioni

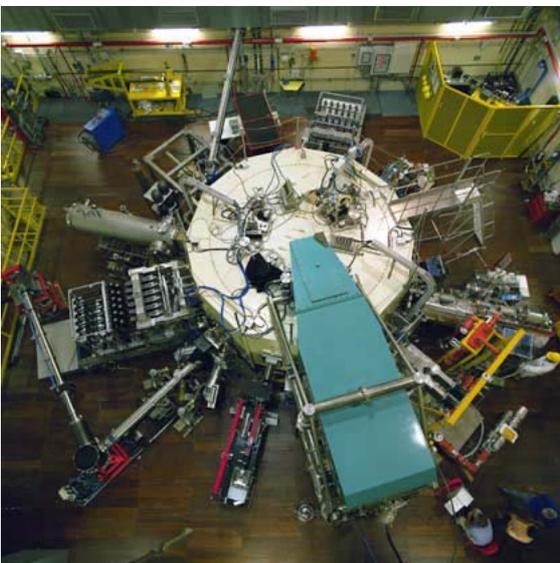


Figura 2. FTU.

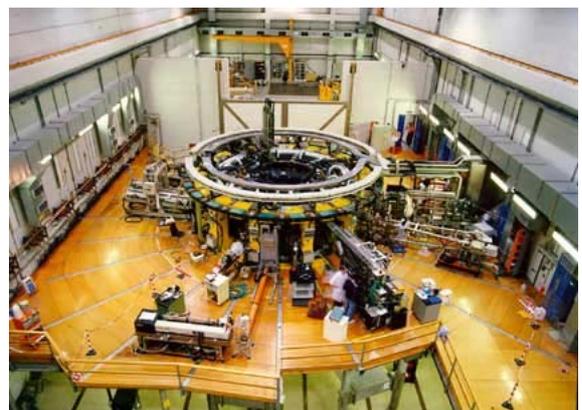


Figura 3. RFX.

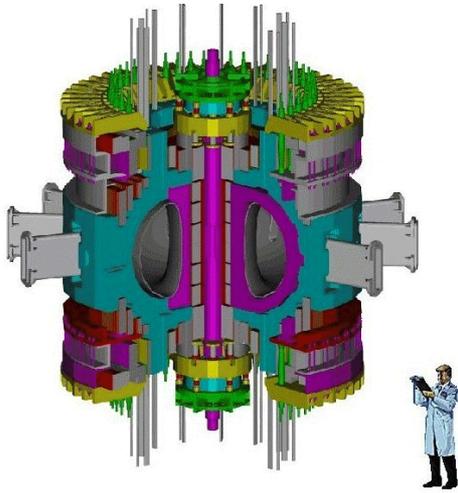


Figura 4. Schizzo di IGNITOR.

di manutenzione remota.

Il progetto IGNITOR (<http://www.frascati.enea.it/ignitor/>)

IGNITOR, v. Fig.4, e' un progetto di tokamak ideato da B. Coppi del MIT di Cambridge (MA) USA. Scopo principale del progetto e' di raggiungere le condizioni di ignizione del plasma. Il funzionamento prevede, dopo una scarica di 4 s, pause di alcune ore, a seconda della potenza di scarica. La macchina e' compatta ad alto campo (erede della linea Alcator del MIT e di FTU), conseguentemente il plasma puo' raggiungere densita' molto elevate. L'attivita' di R&D su IGNITOR e' portata avanti da un gruppo dedicato dell'ENEA, in collaborazione con MIT, CNR e Universita'. Siti considerati per la costruzione di IGNITOR includono Rondissone e Caorso.

Il Ruolo delle Universita'

Le Universita' italiane svolgono un duplice ruolo istituzionale, di didattica e di ricerca, nel contesto delle tecnologie per la fusione nucleare.

Per quanto riguarda la didattica, diversi corsi sono interamente dedicati alla tecnologia della fusione, mentre numerosi altri vi dedicano parti significative. Fra i primi ricordiamo: il corso di *Ingegneria dei reattori nucleari a fusione* nella Laurea Specialistica in Ingegneria Energetica e Nucleare presso il Politecnico di Torino e il corso di *Plasmi e fusione termonucleare controllata* nella Laurea Specialistica in Ingegneria Elettrica dell'Universita' di Padova. Presso l'Universita' di Padova viene tenuto annualmente un corso di Master post-lauream in Ingegneria e Fisica dei plasmi. Infine, l'attivita' didattica di interesse per la fusione culmina con la formazione di numerosi dottorandi.

Per quanto riguarda la ricerca, diverse sedi universitarie fruiscono di contratti e task EFDA per lo svolgimento di ricerche su temi di tecnologie della fusione (fra cui magneti superconduttori per ITER, interazioni plasma parete, realizzazione e caratterizzazione meccanica di giunzioni fra compositi C/C e rame, ideazione e sviluppo di giunzioni e rivestimenti a bassa attivazione neutronica per compositi SiC/SiC (DEMO) [13], controllo del plasma in JET e ITER, sviluppo e implementazione di diagnostiche, etc.), supportati dall'Unione Europea nell'ambito dell'Associazione EURATOM-ENEA. Inoltre, da diversi anni alcune sedi

italiane collaborano a progetti di ricerca cosiddetti di rilevante interesse nazionale (PRIN) cofinanziati dal MIUR (<http://prin.miur.it/>).

La necessita' di costituire stabili gruppi di lavoro incentrati in specifiche e consolidate competenze e specializzazioni, ha inoltre spinto alla costituzione di Consorzi di ricerca. Ad esempio il Consorzio CREATE (www.create.unina.it), a prevalente partecipazione universitaria, coordina tutta l'attivita' di ricerca di interesse per l'Associazione EURATOM-ENEA che si svolge in alcune universita', dipartimenti e centri di ricerca del Centro-Sud.

PARTECIPAZIONE ITALIANA AI PROGRAMMI INTERNAZIONALI

L'Italia partecipa all'operazione di JET e al progetto ITER attraverso il cosiddetto "European Fusion Development Agreement" (EFDA). L'EFDA e' nato nel 1999 per il coordinamento delle attivita' sulla ricerca in Europa nel campo della fusione nucleare e svolge il ruolo di rappresentante europeo per la costruzione di ITER coinvolgendo laboratori di ricerca universitari e industriali attraverso appositi "work program" a scadenze temporali definite.

L'esperimento JET

Il Joint European Torus (JET) e' il principale esperimento europeo nel campo della fusione (Fig.5). L'attivita' passata e presente del JET, le finalita' e i risultati sono dettagliatamente illustrati in internet (<http://www.jet.efda.org/>). Il JET ha visto una forte partecipazione italiana, a livello di progettazione, di costruzione, di programmi sperimentali, di interventi di miglioramento. Oltre che con singoli ricercatori, la partecipazione italiana avviene in modo strutturato a cura e responsabilita' dell'ENEA-Frascati, del Consorzio CREATE e del Consorzio RFX, nell'ambito dell'esecuzione di "orders" e "notifications", orientati alla partecipazione alle campagne sperimentali e allo sviluppo di "enhancements", con attivita' svolte sia presso il JET sia presso i laboratori nazionali.



Figura 5. JET.

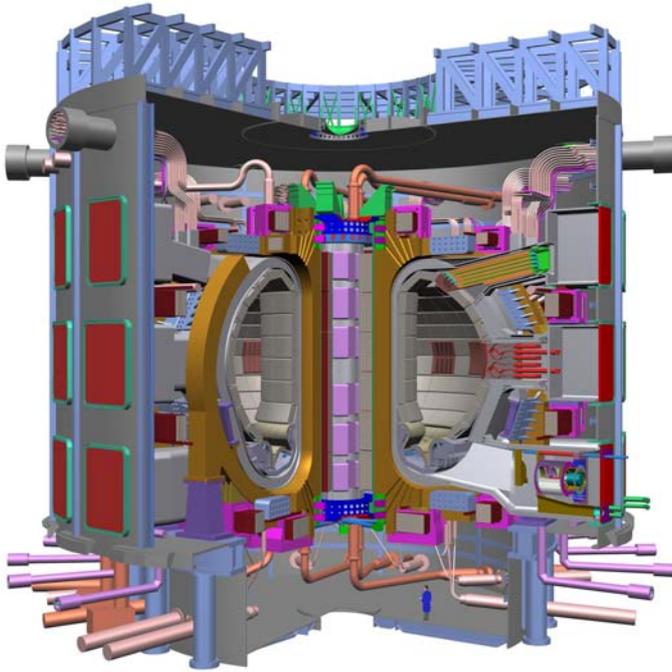


Figura 6. Schizzo di ITER.

Il Progetto ITER (<http://www.iter.org/>)

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) è un progetto di reattore elaborato nell'ambito di una collaborazione internazionale che coinvolge, oltre all'Unione Europea, anche Cina, Corea del Sud, Giappone, Russia e Stati Uniti. La macchina (v. Fig.6) è di grandi dimensioni e i costi per la sua realizzazione vengono stimati oggi in circa 5 miliardi di Euro. ITER dovrebbe produrre circa 500 MW di potenza da fusione e realizzare un fattore di amplificazione della potenza Q significativo, simultaneamente dimostrando tecnologie essenziali per un reattore a fusione come sistema integrato. Il progetto si avvicina oggi a una fase decisionale chiave con due siti candidati a ospitarlo: Cadarache in Francia e Rokkasho in Giappone. Allo sviluppo di questo progetto risulta legato anche il destino di IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility) e la prospettiva di DEMO, cioè del primo impianto che, in alcune decine di anni, dovrebbe dimostrare la produzione di elettricità a partire dalla fusione nucleare.

Il progetto ITER ha, tra l'altro, avuto il merito di consentire il lancio di una attività di sviluppo tecnologico finalizzata. Il progresso ottenuto nei vari campi nell'arco di una decina di anni è impressionante. Prestazioni senza precedenti si sono ottenute sui magneti superconduttori, i flussi termici smaltibili dai PFC erano decisamente inferiori, la manutenzione remota di componenti così complessi e pesanti era tutta da dimostrare. Inoltre, ITER ha costituito l'elemento di traino anche per le tecnologie che a più lungo termine dovranno essere utilizzate nei reattori, di cui l'esempio più importante è lo sviluppo di prototipi di mantello fertile.

CONCLUSIONI E PROSPETTIVE

La fusione nucleare è una fonte energetica alternativa a quelle attuali e con molti potenziali vantaggi in termini di emissioni di CO_2 , disponibilità del combustibile, sicurezza nucleare.

Per raggiungere la maturità e poter dimostrare la sua competitività anche in termini economici essa richiede lo sviluppo di tecnologie innovative in molti settori, con un approccio multidisciplinare che ha già portato a progressi e risultati molto importanti in questo campo.

L'Europa è al momento leader mondiale nella fusione e l'Italia in particolare possiede competenze di primo piano grazie a molti anni di esperienza e al forte legame esistente fra laboratori di ricerca (ENEA e CNR) e Università.

A fianco delle numerose macchine per la fusione operanti oggi in Italia e nel mondo esistono anche progetti internazionali, primo fra tutti ITER, che offrono alle aziende italiane un'eccellente occasione per rafforzarsi in diversi settori ad altissima tecnologia.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. J. Wesson, Tokamak, Clarendon Press, Oxford, 1997.
2. P. C. Stangeby, The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices, IoP Publishing, Bristol, 2000.
3. P. Appendino, et al., Direct joining of CFC to copper, *J. Nucl. Mater.*, vol. 329-333, pp. 1563-1566, 2004.
4. N. Mitchell e E. Salpietro, ITER R&D: Magnets: Toroidal Field Model Coil, *Fus. Eng. Des.*, vol. 55, pp. 171-190, 2001.
5. W. Gulden, et al., An update of safety and environmental issues for fusion, *Fus. Eng. Des.*, vol. 51-52, pp. 419-427, 2000; M.Zucchetti, M.Ferraris, M.Salvo, Safety Aspects of Joints and Coatings for Plasma Facing Components With Composite Structures, *Fus. Eng. Des.*, vol. 58-59, pp. 939-943, 2001.
6. N. Taylor, E.T.Cheng, D.Petti, M.Zucchetti, Overview of International Waste Management Activities in Fusion, *Fus. Technol.*, vol. 39, pp. 350-???, 2001.
7. L.Savoldi e R.Zanino, M&M: Multi-Conductor Mithrandir Code for the Simulation of Thermal-Hydraulic Transients in Superconducting Magnets, *Cryogenics*, vol. 40, pp. 179-189, 2000.
8. R. Zanino, et al., Modeling AC losses in the ITER NbTi Poloidal Field Full Size Joint Sample (PF-FSJS) using the THELMA code, *Fus. Eng. Des.*, 2005 (in stampa).
9. R. Maggiore, et al., Efficient 3D/1D self-consistent integral-equation analysis of ICRH antennae, *Nucl. Fusion*, vol. 44, pp. 846-868, 2004.
10. R.Zanino, Advanced Finite Element Modeling of the Tokamak Plasma Edge, *J. Comput. Phys.*, vol. 138, pp. 881-906, 1997; F. Subba e R. Zanino, A 2-D Fluid Model of the Scrape-off Layer (SOL) Using Adaptive Unstructured Finite Volumes, *J. Nucl. Mater.*, vol. 290-293, pp. 743-747, 2001.
11. G. Rostagni et al., Topical issue on the RFX experiment (editor P. Komarek), *Fus. Eng. Des.*, vol. 25, pp 301-504, 1995.
12. P. Sonato et al., Machine modifications for active MHD control in RFX, *Fus. Eng. Des.*, vol.66-68, pp. 161-168, 2003.
13. M. Ferraris, et al., Glass-ceramic joining and coating of SiC/SiC for fusion applications, *J. Nucl. Mater.*, vol. 258-263, pp. 1546-1550, 1998

This work was carried out partly within the framework of the European Fusion Development Agreement. The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect those of the European Commission.