

3 marzo 2008

# ITER: la sfida dell'umanità alla fusione termonucleare

MARCO BOZZA

*marco.bozza@marcobozza.eu*

## 1. INTRODUZIONE

Due sono i problemi che attualmente caratterizzano il panorama energetico/ambientale del pianeta:

- 1) la progressiva riduzione della disponibilità delle fonti energetiche di origine fossile (petrolio, carbone, gas naturale);
- 2) la progressiva alterazione del clima globale (aumento della temperatura e dell'inquinamento) a causa di attività antropiche.

La necessità di trovare valide soluzioni al problema dell'esaurimento delle fonti fossili (petrolio in particolare), e degli aspetti ambientali connessi ai processi di produzione di energia, ha spinto la comunità scientifica internazionale ad impegnarsi attivamente in programmi di ricerca per lo sviluppo di tecnologie innovative nel settore dell'energia. Relativamente al breve, medio e lungo termine sull'approvvigionamento energetico sono necessarie misure per far fronte alle questioni relative alla sicurezza dell'approvvigionamento stesso, ai cambiamenti climatici e allo sviluppo sostenibile, garantendo al contempo che non sia pregiudicata la crescita economica futura. Una delle opzioni più promettenti a lungo termine per l'approvvigionamento energetico, soprattutto per quello centralizzato di elettricità di base, è l'utilizzo della tecnologia che sfrutta la fusione termonucleare controllata, CTF (*Controlled Thermonuclear Fusion*). Oltre agli sforzi che la comunità internazionale sta compiendo nel campo della ricerca sulle energie rinnovabili, l'energia da fusione ha le potenzialità per contribuire in modo significativo alla riduzione sia della dipendenza energetica dei Paesi industrializzati dalle fonti fossili, sia dell'immissione in atmosfera di gas ad effetto serra.

La ricerca sull'energia da fusione, ha l'obiettivo di sviluppare una tecnologia che consenta di ottenere una sorgente:

- in grado di soddisfare efficacemente il crescente fabbisogno mondiale di energia dell'umanità;
- che non contribuisca all'aumento dei cambiamenti climatici del pianeta;
- sicura sotto il profilo della produzione;
- economicamente conveniente.

Inoltre, i combustibili necessari per la fusione, deuterio e trizio, sono potenzialmente disponibili in quantità praticamente illimitata in qualsiasi parte del mondo.

I progressi della ricerca giustificano una continuazione delle ricerche che perseguono l'obiettivo di una centrale con reattore a fusione. A livello europeo, l'obiettivo a lungo termine è la realizzazione in circa 30 anni, di reattori prototipo per centrali elettriche che soddisfino queste esigenze. Riuscire a sviluppare la tecnologia necessaria consentirebbe quindi di produrre energia praticamente in quantità illimitata, sostanzialmente pulita, tecnologicamente sicura ed economicamente competitiva.

Le sfide da affrontare sono però davvero notevoli. Obiettivo primario è conseguire anzitutto progressi verso la dimostrazione della fattibilità scientifica e tecnologica dell'energia da fusione nucleare. Il programma di fisica della Fusione è condotto in Europa in modo coordinato dall'insieme degli Istituti nazionali associati con l'EURATOM, attraverso lo sfruttamento delle varie macchine sperimentali e del tokamak europeo JET (*Joint European Torus*), operante a Culham (Inghilterra), che ha appurato la fattibilità scientifica e tecnica dell'energia di fusione.

In Europa e nel mondo sono in funzione molte macchine sperimentali più piccole del JET e specializzate in vari aspetti dello studio della Fusione. Tramite l'EFDA (*European Fusion Development Agreement*), sono coordinate le attività di ricerca e sviluppo tecnologico, il funzionamento del tokamak europeo JET e il contributo alle collaborazioni internazionali.

Dopo i lavori teorici e gli studi sperimentali condotti su queste macchine, la collaborazione su scala mondiale nella ricerca ha concentrato gli sforzi nello sviluppo di una nuova macchina: ITER, *International Thermonuclear Experimental Reactor*.

ITER è un progetto internazionale di ricerca e sviluppo di un reattore sperimentale da 500 MW il cui obiettivo è dimostrare la fattibilità tecnologica della fusione termonucleare. Questa macchina produrrà 10 volte più energia di quella necessaria per creare le condizioni di elevatissime temperature (150 milioni di gradi centigradi) richieste per mantenere il plasma nella condizione (quasi-stazionaria) di fusione. Dal 2007 il reattore è in costruzione a Cadarache nel sud della Francia, non lontano da Marsiglia.

ITER costituisce il passaggio fondamentale verso la realizzazione di reattori prototipo per centrali elettriche con l'obiettivo di preludere alla realizzazione a scala industriale di impianti di potenza a fusione.

La strategia per raggiungere tale obiettivo di lungo termine comprende, come prima priorità, la costruzione di ITER, seguita dalla costruzione di DEMO, una centrale elettrica a fusione di "dimostrazione". La strategia prevede anche un programma dinamico di sostegno alle attività di ricerca e sviluppo per ITER e alle attività di sviluppo nel campo dei materiali, delle tecnologie e della fisica della fusione necessarie per DEMO. Ciò richiede il coinvolgimento di partner internazionali, mediante la cooperazione di enti di ricerca, imprese e associazioni dei paesi interessati alla fusione, in particolare delle parti firmatarie dell'accordo ITER.

## 2. ITER: UNA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE

ITER è il frutto di una cooperazione tra sette partner riuniti in una joint venture internazionale: Unione Europea, Giappone, Russia, Stati Uniti d'America, Cina, India e Corea del Sud, Paesi che da soli rappresentano insieme più della metà della popolazione mondiale. La cerimonia che nel 2006 ha siglato l'accordo è stata ospitata dal presidente francese Jacques Chirac presso il Palazzo dell'Eliseo a Parigi, e ad essa hanno partecipato il presidente della Commissione europea J. Manuel Barroso e il commissario europeo per la Scienza e la Ricerca Janez Potočnik, oltre ai ministri degli altri Paesi firmatari di ITER. L'accordo ha stabilito le disposizioni necessarie per rendere operativa l'Organizzazione ITER, tra cui gli obiettivi e le funzioni della medesima, i membri, la forma giuridica, il consiglio, il direttore generale e il personale.

Il valore complessivo del programma è di circa 10 miliardi di euro in trent'anni, mentre i soli costi di costruzione di ITER sono stimati in 5 miliardi di euro in 10 anni, la gran parte dei quali verrà assegnata sotto forma di contratto (in kind) ad aziende industriali e organizzazioni di ricerca sulla fusione nucleare. L'Europa coprirà il 50% dei costi di investimento, mentre gli altri sei partner contribuiranno ognuno con il 10% (si tiene conto di un 10% di imprevisti).

ITER è, per impegno finanziario e tecnologico, uno dei più costosi e ambiziosi progetti scientifici del mondo mai realizzati dall'uomo. "Si tratta – ha spiegato Kaname Ikeda, direttore generale di ITER – di una cooperazione internazionale senza precedenti che potrà contribuire a creare una nuova fonte energetica per l'umanità."

Il recente rientro (2003) degli Stati Uniti nelle negoziazioni relative a ITER e la storica decisione della Cina e della Corea del Sud di partecipare alla sua realizzazione hanno contribuito ad incentivare i relativi programmi di ricerca, al punto da rendere le risorse ad essi destinate dalle amministrazioni di gran lunga preminenti rispetto ad ogni altra relativa al settore elettronucleare. Significativa appare a tal proposito la scelta effettuata dall'Unione Europea nell'ambito del VI Programma Quadro in materia di finanziamento alla ricerca nel campo delle tecnologie nucleari.

I partner internazionali, integrando le rispettive esperienze maturate sulla fusione, e sui tokamak in particolare, partendo dalle conoscenze fisiche costituite e dalla tecnologia collaudata, hanno fatto di ITER il primo progetto completo di un impianto a fusione delle dimensioni di una centrale elettrica convenzionale.

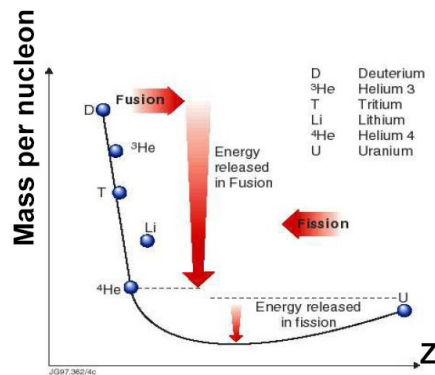
La collaborazione internazionale necessaria per produrre le specifiche progettuali di ITER ha coordinato questo progetto di grande impegno tecnico riunendo formazioni multiculturali e geograficamente disperse. Questo risultato scientifico ragguardevole è stato reso possibile dall'intervento dei maggiori scienziati e tecnici appartenenti a centri di ricerca, a università e a imprese industriali di tutto il mondo, che hanno costituito una compagine forte di centinaia di addetti, nell'ambito di una collaborazione strettamente subordinata alla logica del progetto. Per costruire e far funzionare ITER è infatti necessaria una collaborazione di livello autenticamente mondiale. I negoziati ITER riguardano la costruzione, il funzionamento e la dismissione di ITER, e comprendono voci come la divisione dei costi, la struttura direttiva, i diritti di proprietà intellettuale e il sito.

Come detto, scopo del progetto è ottenere i dati necessari per progettare e poi rendere operativo il primo impianto in grado di produrre energia elettrica sfruttando il principio della fusione termonucleare. Negli ultimi dieci anni, ITER è diventato un piano ingegneristico dettagliato, pronto ad essere costruito: i modelli o prototipi dei principali componenti tecnologici sono stati costruiti dall'industria e sono stati collaudati sotto tutti gli aspetti. In base a questa esperienza, l'industria ha valutato i costi di costruzione in maniera approfondita. Ovviamente è solo il primo passo: l'impianto consentirà di svolgere esperimenti per la produzione di plasmi con deuterio e trizio e, al contempo, di sviluppare le nuove tecnologie necessarie per la centrale a fusione del futuro (DEMO).

Ma i tempi di realizzazione saranno molto lunghi: considerando che la costruzione di ITER richiederà circa 10 anni, il primo plasma sarà realizzato nel 2016, mentre il primo GW elettrico prodotto in continuo vedrà la luce non prima del 2050.

### 3. LA FUSIONE TERMONUCLEARE

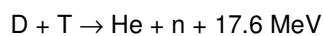
La fusione termonucleare è la reazione che avviene nel sole e nelle altre stelle, con produzione di una enorme quantità di energia. Come ben noto la materia ordinaria è formata da atomi, i quali sono costituiti da un nucleo positivo e dagli elettroni periferici negativi che ne bilanciano esattamente la carica, rendendoli neutri. Il nucleo a sua volta è formato da neutroni e protoni, i nucleoni, tenuti insieme dalla forza nucleare forte, la quale ha un raggio di azione molto piccolo. La massa di un nucleo atomico è minore della somma delle masse dei singoli nucleoni (protoni e neutroni) che lo costituiscono: la differenza (difetto di massa  $\Delta m$ ), è pari all'energia di legame  $\Delta E$  che tiene uniti i nucleoni nel nucleo, secondo il noto principio di equivalenza massa-energia della Teoria della Relatività di Einstein,  $\Delta E = \Delta m c^2$ , (c velocità della luce nel vuoto pari a  $\approx 3 \cdot 10^8$  m/s). L'energia che è possibile ottenere sfruttando il difetto di massa viene ricavata dalle reazioni nucleari: in particolare i nuclei che hanno piccola massa atomica danno energia per fusione, mentre quelli ad elevata massa atomica la danno per fissione:



nella *reazione di fusione* di due nuclei leggeri, in cui si origina un nucleo più pesante, si ha liberazione di energia perché la massa del nucleo risultante è minore delle masse dei due nuclei reagenti;

nella *reazione di fissione*, in cui un nucleo molto pesante si spezza in due nuclei più leggeri, si ha liberazione di energia perché la massa complessiva dei frammenti è minore della massa del nucleo di partenza.

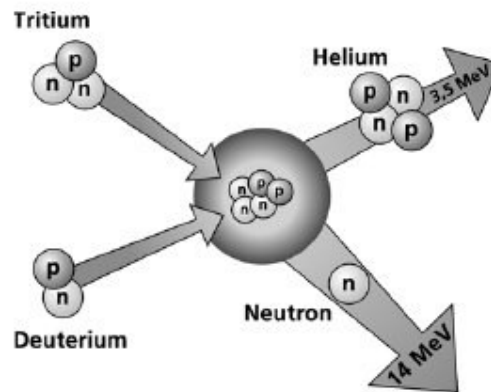
Nella reazione di fusione nuclei di elementi leggeri, quali gli isotopi dell'idrogeno (H), a temperature e pressioni elevatissime, fondono formando nuclei di elementi più pesanti come l'elio (He). Sono noti due isotopi dell'idrogeno: il deuterio (D) e il trizio (T). Il nucleo dell'idrogeno contiene un protone, il nucleo di deuterio contiene un protone e un neutrone mentre quello del trizio un protone e due neutroni. La reazione più probabile è quella che avviene tra un nucleo di deuterio e un nucleo di trizio, reazione in cui si genera un nucleo di elio (due protoni e due neutroni), detto anche particella alfa, e un neutrone;



In questa reazione i due nuclei si fondono per dare origine ad un nucleo più pesante, liberando un'energia di 17,6 MeV (17,6 milioni di elettronvolt).

Come detto la somma delle masse dei nuclei dei prodotti di reazione (He + n) non è pari alla somma delle masse dei nuclei delle particelle interagenti (D + T), ma è minore, poiché il difetto di massa si è convertito in energia, in perfetto accordo con la relazione di Einstein.

L'energia liberata si distribuisce, sotto forma di energia cinetica, tra la particella alfa e il neutrone in rapporto inverso alle rispettive masse: il nucleo di elio (quattro nucleoni) acquista 1/5 (3,5 MeV) dell'energia totale prodotta nella reazione mentre il neutrone (un nucleone) ne acquista i 4/5 (14,1 MeV).



È importante sottolineare che l'energia liberata in questo tipo di reazioni è l'energia di legame tra i nucleoni (difetto di massa) e non quella che scaturisce dalla conversione diretta dei nucleoni in energia (numero e tipo di nucleoni infatti si conservano).

Per far sì che la reazione di fusione possa avvenire occorrono, come detto, condizioni estreme di temperatura e pressione. Nel sole, che ha una temperatura interna di circa 15 milioni di gradi, la reazione di fusione di nuclei di idrogeno (reazione protone-protone) è responsabile di gran parte dell'energia che giunge fino a noi sotto forma di calore e di luce (e di neutrini solari).

Affinché possa formarsi il nucleo di elio è necessario che i nuclei dei deuterio e del trizio siano in grado di "interagire" su distanze molto molto ridotte, dell'ordine alle dimensioni del nucleo atomico ( $10^{-15}$  m). Il problema è che la forza nucleare forte che tiene uniti i nucleoni agisce entro un raggio di un millimiliardesimo di millimetro: solo avvicinandoli reciprocamente a distanze di quest'ordine di grandezza questa forza predomina su quella coulombiana di repulsione elettrostatica.

Poiché infatti i nuclei che si vogliono far fondere sono entrambi carichi positivamente, quando si tenta di avvicinarli tra loro, essi tendono a respingersi e non a fondersi a causa della forza repulsiva elettrostatica, che cresce di intensità in proporzione inversa al quadrato della distanza. Affinché possa verificarsi la fusione è necessario infrangere la barriera elettrostatica, fornendo ai nuclei un'energia cinetica elevatissima, equivalente ad una temperatura dell'ordine dei 150 milioni di gradi (10 volte la temperatura interna del Sole!). A queste temperature estreme gli atomi vengono privati della propria corteccia elettronica, e la fusione tra nuclei leggeri avviene spontaneamente.

In queste condizioni lo stato della materia, costituita da un insieme di cariche libere positive (ioni) e negative (elettroni), prende il nome di plasma. Più precisamente il plasma è un gas ionizzato, una miscela di ioni, di deuterio e trizio, ed elettroni, altamente energetici, non legati tra loro, localmente neutro cioè neutro anche su volumi macroscopicamente piccoli e con comportamento collettivo per cui il comportamento

macroscopico in un dato punto è condizionato dalla presenza di forze esterne (campi elettrici e/o magnetici dovuti alla variazione della densità e/o al moto di elettroni e ioni in volumi del plasma anche molto distanti).

La quasi totalità (circa il 99%) della materia conosciuta del nostro Universo, si trova nello stato di plasma, che per questo è detto anche "quarto stato della materia". Alla temperatura di fusione il problema che si pone è come confinare il plasma in un recipiente. In linea di principio gli ioni del plasma possono essere "confinati" mediante un campo magnetico: in assenza di questo campo le particelle si muoverebbero a caso in tutte le direzioni, urterebbero le pareti del recipiente e il plasma si raffredderebbe inibendo la reazione di fusione. In presenza di un campo magnetico invece gli ioni sono costrette a seguire traiettorie a spirale intorno alle linee di forza del campo mantenendosi lontano dalle pareti del recipiente.

Nella fusione a confinamento magnetico il plasma caldo è racchiuso in una camera a vuoto, e una opportuna configurazione di campi magnetici esterni e/o prodotti da correnti circolanti nel plasma impedisce il contatto con le pareti del recipiente. Sono state studiate, a questo proposito, diverse configurazioni magnetiche: configurazioni a specchio in cui le linee di forza del campo magnetico sono aperte alle estremità del plasma e configurazioni a simmetria toroidale (es. Stellarator, Tokamak). Quella che ha ottenuto finora i migliori risultati nella fusione a confinamento magnetico, è quella del Tokamak, ed è anche quella adottata in ITER.

#### 4. SVILUPPO DI ITER

##### *Realizzazione di ITER*

Tale attività comprende quanto necessario per la costruzione congiunta dell'ITER (come infrastruttura di ricerca internazionale), in particolare la preparazione del sito, la costituzione dell'organizzazione ITER e dell'impresa comune europea ITER, la gestione e la dotazione di risorse umane, sostegno tecnico e amministrativo generale, la costruzione delle attrezzature e degli impianti ed il sostegno al progetto durante la fase di costruzione.

##### *Attività di ricerca e sviluppo in preparazione del funzionamento di ITER*

R&S nella fisica di fusione e nell'ingegneria del plasma, in particolare: preparazione del funzionamento di ITER nonché studio e valutazione di formule di confinamento magnetico. Inoltre un programma mirato nei settori della fisica e della tecnologia garantirà l'esercizio dei pertinenti impianti e la gestione delle risorse del programma sulla fusione, vale a dire JET e altri dispositivi di confinamento magnetico, esistenti, futuri o in fase di costruzione (Tokamaks, Stellarators, RFP). Valuterà le tecnologie specifiche fondamentali per ITER, consoliderà le scelte del progetto ITER e preparerà la messa in esercizio di ITER mediante attività sperimentali e teoriche.

##### *Attività tecnologiche preparatorie per DEMO*

Tali attività comprendono un forte impulso allo sviluppo dei materiali e delle tecnologie chiave della fusione, compresi i mantelli, e la costituzione di una équipe specializzata incaricata di preparare la costruzione dell'IFMIF International Fusion Materials Irradiation Facility) per sottoporre a prove di idoneità i materiali da utilizzare per DEMO. Esse comprenderanno prove di irraggiamento e la modellazione dei materiali, studi per la progettazione di DEMO, studi sulla sicurezza e sugli aspetti ambientali e socioeconomici dell'energia da fusione.

*Attività di ricerca e sviluppo a più lungo termine*

Queste attività comprenderanno l'approfondimento di concetti perfezionati per sistemi di confinamento magnetico che offriranno vantaggi potenziali per le centrali elettriche a fusione, studi teorici e attività di modellazione volti a comprendere il comportamento del plasma di fusione sotto tutti gli aspetti e il coordinamento, nell'ambito di una attività di "veglia" tecnologica, delle attività di ricerca civile degli Stati membri sul confinamento inerziale.

*Risorse umane, istruzione e formazione*

In considerazione delle necessità immediate e a medio termine del progetto ITER e in prospettiva della prosecuzione delle attività nel settore della fusione, saranno intraprese iniziative volte ad assicurare la disponibilità di risorse umane adeguate, in termini quantitativi, della gamma di competenze e dell'elevato livello di formazione e di esperienze, in particolare in relazione alla fisica e all'ingegneria della fusione.

*Infrastrutture*

La costruzione dell'impianto internazionale di ricerca sull'energia da fusione ITER sarà uno degli elementi delle nuove infrastrutture di ricerca con una forte dimensione europea.

*Processi di trasferimento tecnologico*

Il progetto ITER richiederà strutture organizzative nuove e più flessibili di modo che i processi innovativi e di progresso tecnologico che ne conseguiranno siano trasferiti rapidamente all'industria e si possano raccogliere le sfide che consentiranno all'industria europea di diventare più competitiva.

Un aspetto importante riguarda gli studi sugli aspetti socioeconomici, sulla valutazione dei costi economici e dell'accettabilità sociale dell'energia da fusione, a complemento di altri studi sulla sicurezza e sulla dimensione ambientale; il coordinamento, nel contesto di un'attività per restare al passo con gli sviluppi, delle attività civili di ricerca degli Stati membri sul confinamento inerziale ed eventuali concetti alternativi; la diffusione dei risultati e diffusione dell'informazione al pubblico; mobilità e formazione.

**5. ACQUISIZIONE DEI COMPONENTI NEL PERIODO DI COSTRUZIONE**

L'acquisizione dei componenti costitutivi del reattore avverrà "in kind", ovvero ciascun Partner fornirà, attraverso le rispettive Agenzie nazionali, componenti pronti per l'installazione, acquisendoli a proprie spese su specifiche e disegni sviluppati in comune, sulla base di una suddivisione di costi già negoziata in linea di principio. L'Europa, che come detto sosterrà il 50% del finanziamento, contribuirà per circa il 40% dei contributi in kind, mentre il restante 10%, verrà gestito direttamente dal Team di ITER, per approvvigionare principalmente componenti e sistemi molto particolari, che richiedono know how specifico, sviluppato tipicamente nei laboratori di ricerca.

I costi di produzione industriale saranno sostenuti dai vari Partners in un modo indipendente dal loro costo reale. Questo metodo consente nella pratica una levitazione arbitraria dei costi di costruzione, ma richiederà una ferrea organizzazione preventiva ed esecutiva del progetto, dato che errori di produzione di un Partner o mancanza di coordinamento tra le produzioni di Partners differenti si rifletteranno con ritardi del progetto ed aumenti di costo. Sono quindi significativi rischi di gestione del progetto.

Per ciascuno dei Paesi membri opereranno specifiche Agenzie, che affiancheranno il Team di ITER, per curare la gestione dei contratti di costruzione secondo uno schema di suddivisione concordato tra le parti. L'Europa sta organizzando la propria Agenzia a Becellona, l'ELE (*European Legal Entity*), che ha tra gli obiettivi immediati quelli di stabilire un database di potenziali fornitori industriali e di avviare le gare per le forniture.

## 6. CONINVOLGIMENTO DELL'INDUSTRIA

Il progetto dettagliato di ITER è stato messo a punto negli ultimi anni sulla base di un'intensa attività di Ricerca e Sviluppo condotta in numerosi centri di ricerca, università e industrie di tutto il mondo a cui hanno partecipato centinaia di ricercatori e tecnici. La costruzione di ITER richiede una notevole partecipazione industriale sia in settori convenzionali (ingegneria civile, elettrica ed elettronica, nucleare) sia in settori ad alto contenuto tecnologico (materiali e componenti affacciati al plasma, magneti superconduttori, componenti da vuoto e componenti per il ciclo del trizio, equipaggiamento per manipolazione remotizzata e ispezione visiva, apparecchiature di diagnostica per lo studio e il controllo dei plasmi). Attraverso l'"Associazione EURATOM-ENEA sulla Fusione" di cui fanno parte, oltre l'ENEA, il Consorzio RFX di Padova, l'Istituto di Fisica del Plasma del CNR di Milano, il consorzio CREATE e numerosi gruppi universitari, l'Italia partecipa in maniera rilevante al Programma Europeo sulla Fusione e al progetto ITER.

La partecipazione dell'industria al progetto ITER avviene a due livelli :

1. fornitura di sistemi ed impianti di grandi dimensioni ma di livello tecnologico commerciale, mediante gare e contratti di procurement durante il periodo di costruzione della macchina (edifici, sistemi meccanici, alimentazioni elettriche, criogenia, idraulica, servizi)
2. mediante programmi di ricerca e sviluppo su sistemi e/o tecnologie nuove o non completamente sviluppate, in collaborazione con gli Enti europei (ELE, FDA, Consorzio Industriale per la Fusione) e nazionali (ENEA) che coordinano la ricerca e sviluppo, in vista di una fornitura industriale del prodotto finito (superconduttori, sistemi di riscaldamento, robotica, diagnostiche, T-handling, sicurezza nucleare)

Un aspetto importante riguarda la formazione dei ricercatori: il progetto ITER si svilupperà in un periodo di 30 anni, un tempo confrontabile o più lungo del periodo attivo di un ricercatore. Sarà necessario quindi preparare giovani ricercatori ed ingegneri che affinché sappiano utilizzare in modo efficiente le risorse disponibili. Queste persone saranno selezionate nelle Università, e successivamente addestrate nei centri di ricerca.

## 7. OPORTUNITÀ PER L'INDUSTRIA ITALIANA

Si stima che il valore dei componenti che l'Europa dovrà fornire sia di circa 1.750 milioni di euro. Per l'industria italiana la costruzione di ITER rappresenta l'opportunità di operare in un settore ad alta tecnologia che può accrescerne la competitività. L'Italia, infatti, punta ad acquisire circa il 20% delle commesse, concentrate soprattutto nei campi dei magneti superconduttori, dei componenti per alti flussi termici, della

meccanica, della manutenzione remota, delle alimentazioni elettriche, dei controlli e degli iniettori di neutri. Inoltre vi sono anche opportunità in settori più convenzionali come edifici e impiantistica relativa. Si prevede, inoltre, che il know how acquisito per la messa a punto delle forniture necessarie, avrà ricadute sull'indotto di altri settori high-tech, in cui c'è l'esigenza di operare con elevati standard di qualità sia produttiva che organizzativa. L'Italia dovrà prepararsi per affrontare la sfida costituita dalla concorrenza dell'industria europea, anche in vista delle prime gare d'appalto in programma.

La realizzazione di ITER richiede competenze multidisciplinari molto diversificate, essendo i campi tecnologici di intervento molto vasti. E' necessario, perciò, mettere a sistema questo know how, tipicamente patrimonio del mondo della ricerca, ed in particolare dell'ENEA, che ha permesso di sviluppare ITER, instaurando un coordinamento con il sistema industriale italiano in modo da realizzare uno scambio di conoscenze fondamentale per risultare competitivi. La costituzione di apposite joint venture tra diverse imprese consentirà inoltre di aggregare le competenze necessarie per la realizzazione dei componenti. Specifiche azioni verranno messe a punto dall'ENEA, insieme ai suoi partner nelle attività sulla fusione (Consorzio RFX di Padova, l'Istituto di Fisica dei Plasmi del CNR di Milano, e più recentemente anche l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN).), per preparare l'industria italiana interessata a partecipare alla costruzione di ITER. Il nostro paese è attivo sia nella ricerca fondamentale che riguarda il comportamento dei plasmi sia in compiti più applicativi come la progettazione dei principali componenti di ITER e dell'impianto per la prova dei materiali critici del futuro reattore a fusione denominato IFMIF (*International Fusion Materials Irradiation Facility*).

Le collaborazioni con l'Industria Italiana hanno significativamente accresciuto le competenze per la produzione di fili e cavi superconduttori e potenziato le capacità di fabbricazione dei magneti superconduttori.

Dal 1985 le attività si sono quasi totalmente concentrate nella partecipazione al programma tecnologico europeo di ricerca e sviluppo per la realizzazione di ITER. Tale programma è parzialmente finanziato dall'Euratom e l'ENEA ha condotto circa il 25% delle attività europee di R&S sui magneti superconduttori per ITER. L'importanza di questi componenti risiede nel fatto che, mentre nei magneti convenzionali la resistenza del materiale fa riscaldare la bobina, disperdendo quindi molta energia sotto forma di calore, nelle bobine superconduttrici non essendoci resistenza, è possibile creare campi magnetici molto più potenti utilizzando correnti ad intensità più elevata.

All'ENEA è stata affidata la responsabilità del coordinamento europeo per la realizzazione dei conduttori compositi superconduttori in  $Nb_3Sn$  e  $NbTi$  necessari alla fabbricazione delle bobine dei magneti di ITER.

Un promettente settore di ricerca è quello sulla Superconduttività ad Alta Temperatura Critica, orientato allo sviluppo di metodi per la realizzazione di nastri superconduttori a base di  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , utilizzando tecniche di deposizione tipiche dei film sottili. Tale materiale è infatti oggetto di ricerca a livello mondiale per le sue potenzialità di produzione in larga scala a costi competitivi e per le buone proprietà di trasporto elettrico in presenza di campi magnetici già a temperature ottenibili con l'azoto liquido (65-80°K). Ciò consente di prefigurare applicazioni di potenza con costi criogenici ridotti rispetto ai materiali superconduttori ad alta temperatura critica disponibili oggi sul mercato.