

Gruppo di Lavoro 3
Tecnologie di fusione nucleare

RAPPORTO FINALE

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

INDICE

CAP. 1 - GENERALITÀ	5
C1-1 OBIETTIVI E FINALITÀ DEL GDL 3: TECNOLOGIE DI FUSIONE	5
C1-2 COMPONENTI DEL GDL 3	6
1-2.1 MEMBRI	6
1-2.2 ESPERTI INTERNI ALLA PIATTAFORMA AUDITI	6
1-2.3 ESPERTI ESTERNI AUDITI	6
CAP. 2 - SOMMARIO	7
CAP. 3 - RICOGNIZIONE DELLA SITUAZIONE NAZIONALE E DEL CONTESTO INTERNAZIONALE	11
C3-1 INTRODUZIONE	11
3-1.1 LA FUSIONE COME FONTE DI ENERGIA	11
3-1.2 LA FUSIONE A CONFINAMENTO MAGNETICO	14
3-1.3 FUSIONE A CONFINAMENTO INERZIALE	16
3-1.4 VANTAGGI DELLA FUSIONE	17
3-1.5 GRADO DI MATURITÀ TECNOLOGICA	18
3-1.6 INTEGRAZIONE DI UNA CENTRALE A FUSIONE NELLA RETE ELETTRICA	19
C3-2 IL PANORAMA INTERNAZIONALE	20
3-2.1 IL PROGETTO INTERNAZIONALE ITER	20
3-2.2 L'ACCORDO BROADER APPROACH	23
3-2.3 IL PROGRAMMA EUROPEO	23
3-2.4 I PROGRAMMI SULLA FUSIONE MAGNETICA AL DI FUORI DELL'UNIONE EUROPEA	26
3-2.5 RECENTI SVILUPPI NELLA FUSIONE INERZIALE – IL PANORAMA INTERNAZIONALE	29
3-2.6 IL CRESCENTE IMPEGNO DEI PRIVATI	30
3-2.7 INIZIATIVE PER LO SVILUPPO DEL QUADRO NORMATIVO PER L'ENERGIA DA FUSIONE	33
C3-3 IL PANORAMA ITALIANO	36
3-3.1 IL QUADRO DI RIFERIMENTO NAZIONALE	36
3-3.2 IL PROGRAMMA QUADRO NAZIONALE 2006 – 2023	40
3-3.3 L'ATTUALE PROGRAMMA ITALIANO NEL QUADRO EUROPEO E INTERNAZIONALE	45
3-3.4 IL PROGETTO NAZIONALE <i>DIVERTOR TOKAMAK TEST FACILITY</i> (DTT)	54
3-3.5 L'INDUSTRIA ITALIANA NELLA FILIERA DELLA FUSIONE	56
3-3.6 FORMAZIONE	59
C3-4 ANALISI DELLE CRITICITÀ	60
3-4.1 GAP TECNOLOGICI	60

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

3-4.2	ECONOMICITÀ - STUDI DI REATTORE E ANALISI DI SCENARI.....	64
3-4.3	PUNTI DI FORZA E CRITICITÀ DEL SISTEMA NAZIONALE.....	66
CAP. 4 -	ELABORAZIONE DI PROPOSTE	68
C4-1	INTRODUZIONE	68
C4-2	OBIETTIVI DEL PROGRAMMA.....	70
CAP. 5 -	ROAD MAP.....	74
C5-1	PROGRAMMA DI ATTIVITÀ VERSO LA FUSIONE COMMERCIALE	74
CAP. 6 -	LINEE GUIDA.....	79
C6-1	AZIONI.....	79
C6-2	RISORSE, INVESTIMENTI E TEMPI.....	82
ALLEGATI	85
A.1	PRINCIPALI INFRASTRUTTURE DI RICERCA PER LA FUSIONE PRESENTI O IN COSTRUZIONE IN ITALIA.....	85
A.2	COMPETENZE DELLA FILIERA INDUSTRIALE ITALIANA SULLA FUSIONE.....	87
A.3	FORMAZIONE (CONTRIBUTO A GDL6).....	91
A.4	SICUREZZA E PREVENZIONE, QUADRO NORMATIVO, CERTIFICAZIONE (CONTRIBUTO A GDL4)	97

INDICE DELLE FIGURE

- Figura 1. Schema di reattore a fusione a confinamento magnetico di tipo tokamak. “ R_0 ” è il raggio maggiore della camera a vuoto, “ a ” il raggio minore.
- Figura 2. L’interno del criostato che ospiterà il reattore ITER, in cui è inserito un settore del tokamak (sulla sinistra)
- Figura 3. Il sito di ITER a Cadarache (Francia) nel settembre 2023.
- Figura 4. Crescita del numero delle industrie private sulla fusione e dei relativi finanziamenti nel corso degli anni.
- Figura 5. A sinistra: la sorgente di SPIDER. A destra: MITICA
- Figura 6. Prototipo in scala 1:1 dell’Inner Vertical Target del divertore di ITER realizzato da Ansaldo Nucleare e ENEA, e testato con successo alle condizioni di lavoro.
- Figura 7. A sinistra: Sezione del conduttore per il magnete toroidale di ITER costituito da fili superconduttori in Nb₃Sn e raffreddato con elio liquido, sviluppato con il contributo fondamentale di ENEA. A destra: Una fase del processo di produzione del cavo (cablatura) presso Tratos Cavi (Pieve Santo Stefano, Arezzo).
- Figura 8. Avvolgimento di una delle 10 bobine che costituiscono il magnete toroidale di ITER realizzate a Genova da ASG Superconductors SpA.
- Figura 9. Inserimento delle 10 bobine del magnete toroidale di ITER nelle strutture metalliche di contenimento presso SIMIC (Marghera, Venezia).
- Figura 10. Impianto tokamak DTT in costruzione presso il Centro ENEA di Frascati.
- Figura 11. Sistema di alimentazione della sorgente di SPIDER realizzato da OCEM, Bologna.
- Figura 12. Vista dall’alto del settore #5 del vacuum vessel di ITER, in costruzione insieme ad altri 4 settori da parte del Consorzio italiano AMW (Ansaldo, Mangiarotti, Walter Tosto).
- Figura 13. Roadmap per realizzazione primo impianto per energia da fusione

INDICE DELLE TABELLE

- Tabella 1. Partner italiani affiliati a ENEA nel Consorzio Eurofusion
- Tabella 2. Costi attività di ricerca nel decennio 2014-2023 (escluso DTT)
- Tabella 3. Mappa delle competenze italiane per fusione magnetica e inerziale
- Tabella 4. Obiettivi del programma
- Tabella 5. Risorse per O1 – Competenze di fisica e ingegneria, di operazione, gestione e controllo di impianti a fusione a confinamento magnetico
- Tabella 6. Risorse per O2 – Tecnologie abilitanti della fusione e infrastrutture necessarie a confinamento magnetico
- Tabella 7. Risorse per O3 – Progettazione e integrazione di sistema
- Tabella 8. Risorse per O4 – Sviluppo e implementazione della supply chain nazionale e ottimizzazione processi produttivi
- Tabella 9. Risorse per O5 – Fusione a confinamento inerziale
- Tabella 10. Risorse per O6 – Attività di ricerca, formazione e innovazione tecnologica
- Tabella 11. Risorse per O7 – Sviluppo quadro normativo e autorizzativo (M€)
- Tabella 12. Riassunto risorse (M€)
- Tabella A1. Principali infrastrutture di ricerca per la fusione presenti o in costruzione in Italia
- Tabella A3. Mappa degli attuali insegnamenti universitari sulla fusione

CAP. 1 - GENERALITÀ

C1-1 Obiettivi e finalità del GdL 3: *Tecnologie di fusione.*

Il Gruppo di Lavoro 3 (GdL 3) ha identificato una serie di obiettivi nel contesto della ricognizione e delle proposte di sviluppo di applicazioni della fusione nucleare in Italia.

Nella prima fase delle attività, il GdL3 ha condotto una ricognizione relativamente al panorama italiano e al contesto internazionale nel settore della fusione nucleare, per poter identificare obiettivi chiave e finalità strategiche. Il GdL3 ha quindi svolto un'analisi approfondita che copre tutti i principali aspetti strategici e in particolare:

- **Tecnologie:** valutare lo stato attuale delle tecnologie nucleari da fusione sia a livello nazionale sia internazionale, identificando le principali innovazioni e le iniziative pubbliche e private in atto.
- **Livello di maturità tecnologica e principali criticità:** analizzare il livello di sviluppo e maturità delle odierne tecnologie nucleari da fusione, individuando le principali sfide tecnologiche da affrontare e le criticità che possono influenzarne l'impiego e lo sviluppo a livello italiano.
- **Competenze italiane in ambito di ricerca e sviluppo (R&S):** mappare le competenze tecnologiche presenti e identificare le esigenze di R&S necessarie per supportare l'evoluzione del settore della fusione in Italia, focalizzandosi su aspetti e tematiche prioritari e strategici.
- **Competenze italiane in ambito industriale:** mappare le competenze della filiera industriale italiana sulla fusione, enormemente cresciuta con la costruzione di ITER, e identificare le strategie per supportarne e far crescere la competitività nel crescente mercato mondiale.
- **Stima dei costi:** effettuare una valutazione dei costi associati agli investimenti in nuove tecnologie di fusione nucleari, nonché ai costi operativi, di manutenzione e decommissioning dei futuri impianti.
- **Vita tecnica attesa e prestazioni:** analizzare la vita tecnica prevista degli impianti nucleari da fusione, valutandone le prestazioni in termini di affidabilità, producibilità e sostenibilità nel lungo periodo, nei limiti dei dati finora noti.
- **Aspetti di sicurezza:** valutare quali potrebbero essere le misure volte a garantire gli standard di sicurezza per reattori nucleari a fusione, prevenendo e mitigando potenziali rischi per la salute pubblica e l'ambiente durante tutte le fasi del loro ciclo di vita.

Sulla base delle analisi e valutazioni effettuate durante la fase di ricognizione, il GdL3 ha poi perseguito l'obiettivo di elaborare proposte di azione e di definire le tappe chiave per il possibile sviluppo sostenibile del settore della fusione nucleare in Italia, al fine di garantire un approccio coerente e strategico nell'ambito delle politiche energetiche nazionali volte alla decarbonizzazione del sistema energetico, garantendo il coordinamento dei programmi e progetti nel settore.

C1-2 Componenti del GdL 3

1-2.1 Membri

ENEA (Co-coordinatore)
RSE (Co-coordinatore)
ASG
CNR
Consorzio RFX
CREATE
DTT Project
ENI
Fincantieri SI
INFN
Politecnico di Torino
SIMIC
Università di Ferrara
Università Milano-Bicocca
Università di Palermo
Università di Perugia
Università degli Studi della Tuscia

1-2.2 Esperti interni alla Piattaforma Auditi

Ansaldo Nucleare SpA
ATB Riva Calzoni SpA
Belleli Energy CPE Srl
Demont
ENEL SpA
Mangiarotti/ Westinghouse Electric Company
Newcleo
Università La Sapienza
Walter Tosto SpA
X-Nano

1-2.3 Esperti esterni Auditi

-

CAP. 2 - SOMMARIO

I progressi ottenuti nella comprensione teorica dei processi fisici che avvengono nei plasmi termonucleari, nello sviluppo delle tecnologie e degli strumenti numerici analitico-predittivi e il grande impegno posto negli esperimenti, hanno fatto molto progredire il livello di maturità del processo di fusione controllata. Nella fusione magnetica il processo di fusione è stato ottenuto e controllato in condizioni vicine al *pareggio tra energia generata nella fusione e quella fornita al sistema*, per tempi relativamente lunghi, e nella fusione inerziale il pareggio è stato raggiunto e superato.

Parallelamente, la costruzione di ITER, il primo impianto che mira a dimostrare la fattibilità scientifica e tecnologica della fusione in una macchina di tipo tokamak, è completata per circa l'80% ed ha reso possibile lo sviluppo di tecnologie di rilevanza reattoristica, quali quelle dei magneti superconduttori e dei componenti interni al reattore deputati all'estrazione della potenza di fusione.

Grazie ai successi ottenuti e al continuo avanzamento tecnologico, il contesto dell'energia da fusione sta vedendo un sostanziale cambiamento con considerevoli investimenti da parte di un numero crescente di società nel settore privato impegnate in tutto il mondo nella fusione sia magnetica sia inerziale, o con approcci misti. L'obiettivo che si pongono queste società, che hanno ad oggi attirato un totale di oltre 7100 M\$ (dato 2024) di investimenti da parte di soggetti sia privati sia pubblici, è di realizzare impianti in grado di immettere energia elettrica in rete a partire dagli anni 2030-2040, quindi in anticipo rispetto alla metà del secolo prevista nell'ambito degli attuali programmi di ricerca pubblici. In molti Paesi stanno sorgendo partenariati pubblico-privati (PPP) per accelerare lo sviluppo tecnologico e promuovere l'innovazione combinando le conoscenze della ricerca con il *know how* industriale, ed anche l'Europa si sta muovendo in questa direzione. Diversi Paesi stanno adeguando il proprio quadro normativo per la futura realizzazione ed esercizio di reattori a fusione, abilitante e fondamentale per la relativa commercializzazione.

Vi sono ancora sfide da affrontare per la diffusione commerciale della fusione. Infatti, occorre:

- validare gli elementi fisici e tecnologici meno maturi,
- ottimizzare i processi di industrializzazione dei singoli componenti, riducendo il ricorso a processi onerosi e ad alto rischio adottati nelle fasi di sviluppo pre-industriale;
- integrare tali elementi in una centrale elettrica affidabile, disponibile e di lunga vita, con le caratteristiche di sicurezza intrinseca della fusione;
- migliorare la competitività economica degli impianti a fusione da dispiegare sul mercato.

L'Italia ha una lunga tradizione di ricerca per lo sviluppo dell'energia da fusione ed ha sviluppato competenze su tutti gli aspetti scientifici, tecnologici e industriali, e ha una riconosciuta esperienza nella progettazione, realizzazione e utilizzo di sistemi e impianti sperimentali per fusione. La "scuola" italiana per la fusione, in fisica ed ingegneria, è considerata una delle migliori al mondo, a tal punto che ricercatori e ingegneri formati in questa scuola occupano ruoli chiave in un gran numero di laboratori e organismi europei ed internazionali. Il contributo dell'Italia al programma europeo sulla fusione è tra i più rilevanti, secondo solo a quello tedesco. Il costo totale delle attività di ricerca sulla fusione in Italia negli ultimi dieci anni (escluso DTT) è di 817 M€, di cui 425 M€ coperti con fondi europei e internazionali. Nello stesso periodo le risorse umane complessive impiegate annualmente nel programma italiano sono state mediamente pari a circa 650 persone.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

L'industria nazionale è stata fin dall'inizio fortemente coinvolta dalla comunità italiana della fusione nel programma di ricerca, con il duplice scopo di ottenerne il supporto ingegneristico e produttivo richiesto dal programma, e di far crescere le competenze industriali necessarie per avviare la filiera dei futuri reattori a fusione. Questa strategia si è dimostrata vincente, come testimoniato dal ruolo quasi dominante dell'industria italiana nelle commesse per la costruzione di ITER (a parte quelle per la costruzione delle infrastrutture civili che spettano prevalentemente alla Francia come Paese ospite). Allo stato attuale, su più di 7000 M€ investiti dall'Europa nella costruzione di ITER, la quota assegnata alla filiera italiana è superiore a 2000 M€ per la realizzazione di componenti ad alto contenuto tecnologico quali, ad esempio, i cavi superconduttori, i magneti e la camera a vuoto. L'industria italiana ha acquisito un'esperienza eccezionale e delle referenze uniche dal progetto ITER. Ciò le permette di essere oggi accreditata tra i maggiori *players* al mondo nella produzione di componenti complessi e critici per la fusione, anche nel crescente mercato del settore privato. Inoltre, l'Italia ospita la *facility* NBTf per lo sviluppo degli iniettori di particelle per il riscaldamento del plasma di ITER.

Grazie alla costruzione della *facility* DTT l'Italia conferma la propria centralità anche come sede di una delle maggiori installazioni di ricerca di caratura internazionale e di importanza fondamentale per ITER e i futuri impianti a fusione. DTT è un'iniziativa italiana, parte integrante della *roadmap* europea per la fusione, che vede coinvolti tutti gli enti di ricerca, la gran parte delle università attive nella fusione ed ENI, la maggiore industria energetica nazionale. DTT è un impianto molto complesso, che richiede l'integrazione di diverse tecnologie innovative, e mette a frutto tutte le competenze maturate in Italia, incluse quelle industriali, consentendo al sistema Paese di trovarsi in una posizione privilegiata per la costruzione di un impianto a fusione di potenza.

Tuttavia ciò richiede l'attuazione di un importante programma sperimentale, di sviluppo, e validazione tecnologica sostenuto da adeguati finanziamenti, e di un quadro normativo specifico per l'energia da fusione, che ne abiliti l'industrializzazione. L'innovazione promossa dalle iniziative private e dai partenariati pubblico-privati, insieme al crescente numero di impianti progettati, sarà decisiva per accelerare la maturazione della tecnologia. La sperimentazione in ITER rimane centrale per l'esperienza che potrà fornire in termini di *commissioning*, scenari di plasma, gestione del trizio, aspetti nucleari, sicurezza, disponibilità dell'impianto, e produzione di rifiuti radioattivi.

Le competenze presenti nei laboratori e nelle università sulla gamma completa delle conoscenze scientifiche e tecnologiche, la disponibilità di un ampio parco di infrastrutture di ricerca, le numerose collaborazioni internazionali, le capacità ingegneristiche e costruttive, e infine la presenza di un'industria con ampia esperienza e competenza nel settore della fusione, rappresentano i punti di forza dell'Italia nell'ambito dell'impegno internazionale per lo sviluppo della fusione.

Alla luce del rapido cambiamento in atto nel panorama europeo e internazionale della fusione, è oltremodo necessario che le risorse e le competenze acquisite nel nostro Paese, sia di ricerca sia industriali, possano crescere con un adeguato programma di attività per poter cogliere in pieno anche nel nostro Paese le opportunità che si stanno presentando per lo sviluppo della fusione, la quale potrebbe cominciare a giocare un ruolo nel mix energetico nazionale anche prima della metà del secolo.

L'attuale accelerazione nel contesto globale dell'energia da fusione vede l'avvio di progetti che si propongono la realizzazione di impianti in grado di produrre energia

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

elettrica ben entro il 2050, rendendo potenzialmente disponibile la tecnologia in anticipo rispetto alla metà del secolo prevista nell'ambito degli attuali programmi di ricerca pubblici. Inoltre, la sperimentazione in ITER fornirà nei prossimi anni ulteriori dati ed esperienza su un numero di aspetti molto rilevanti per la gestione di un impianto per la produzione di energia elettrica da fusione.

Sulla base degli esiti della RICOGNIZIONE, la presente PROPOSTA mira consolidare ulteriormente il ruolo già molto rilevante del nostro Paese in questo settore strategico in modo che possa cogliere appieno le opportunità che si stanno presentando per lo sviluppo dell'energia da fusione a livello internazionale, assicurare la disponibilità delle tecnologie necessarie e preparare il Paese alla costruzione, operazione e manutenzione di centrali elettriche a fusione.

- La strategia adottata punta principalmente sulla tecnologia ad oggi più avanzata, cioè quella del confinamento magnetico basata sulla configurazione tokamak, per la quale il nostro Paese vanta capacità industriali di eccellenza, con l'obiettivo finale di costruire i(l) primo(i) reattore(i) a fusione in Italia attorno al 2050. Gli obiettivi specifici delineati in questa proposta a breve termine mirano alla maturazione delle conoscenze scientifiche, delle tecnologie e del quadro normativo, dei *concept* progettuali di reattori e delle capacità industriali della *supply chain* in modo da permettere l'inizio della progettazione di impianti a fusione commerciali e, nel medio-lungo termine, alla piena acquisizione di tutti fattori abilitanti per consentire l'avvio della produzione di energia elettrica da fusione. Il conseguente programma di attività qualificanti per il raggiungimento degli obiettivi fissati è delineato per l'intero sistema Paese, dalle università ai centri di ricerca, dalle imprese agli enti/istituti competenti. Esso include la realizzazione delle infrastrutture necessarie per poter operare le scelte tecnologiche necessarie in tempi sufficientemente brevi da consentire lo sviluppo del progetto e la costruzione del reattore nei tempi indicati. Il programma include inoltre le attività di formazione, ricerca e sviluppo tecnologico, nonché di crescita industriale e della *supply chain* necessarie per preparare il Paese alla costruzione, operazione e manutenzione di centrali elettriche a fusione.
- Parallelamente, si ritiene strategico che la ricerca e lo sviluppo tecnologico continuino anche su linee diverse da quella magnetica basata sui tokamak con l'obiettivo di mantenere e far crescere nel Paese le competenze per poter accogliere tutti gli sviluppi che si avranno su queste linee nel caso possano diventare competitive, con particolare riferimento alla fusione a confinamento inerziale e/o considerando anche cicli diversi da quello deuterio-trizio. Il programma delineato prevede quindi il mantenimento di linee di ricerca e di infrastrutture su un più ampio spettro di possibilità per massimizzare la competitività del nostro Paese.

Elementi essenziali della proposta si concretizzano in un consistente programma di ricerca e sviluppo nazionale, con la partecipazione a progetti europei e internazionali, la promozione di una politica industriale mirata a sostenere lo sviluppo e la competitività della *supply chain* nazionale sulle tecnologie più rilevanti a fronte di una forte concorrenza internazionale. Elementi fondamentali sono la formazione universitaria e professionale, lo sviluppo e la successiva implementazione di un quadro normativo chiaro e specifico per la fusione, la definizione dei diritti di proprietà intellettuale connessi con la messa a punto di processi/prodotti per impianti a fusione per permettere un efficace trasferimento tecnologico e la crescita globale del mercato della fusione.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

L'attuazione del programma richiede in primo luogo il supporto alle attività di ricerca e la realizzazione di adeguate infrastrutture di ricerca nazionali di test e qualifica. In aggiunta alla significativa partecipazione italiana ai programmi europei (EUROfusion, IFMIF/DONES e ITER attraverso F4E) e le collaborazioni con maggiori progetti internazionali, sono necessari strumenti di finanziamento nazionali aggiuntivi e relative risorse per programmi di ricerca e sviluppo, realizzazione di infrastrutture tecnologiche e produzioni di prototipi non coperti con fondi comunitari, necessari per risolvere i gap tecnologici. E' altresì necessario il potenziamento della formazione universitaria di settore.

Le PPP costituiscono un utile strumento per promuovere l'innovazione e fornire alle aziende l'accesso al supporto tecnico e finanziario necessario per far progredire tecnologie innovative e far crescere un'industria nazionale competitiva. Le norme e gli accordi riguardanti la proprietà intellettuale sono fondamentali per incoraggiare lo sviluppo di nuove opportunità imprenditoriali e definire la profittabilità della PPP.

D'altra parte, la crescita della *supply chain* in un contesto ancora in forte sviluppo e quindi ancora incerto richiede l'adozione di misure di supporto che vanno dall'istituzione di programmi per la formazione e la creazione di competenze professionali necessarie per il settore della fusione, garantendo la disponibilità di manodopera qualificata, ai contributi statali a fondo perduto o prestiti agevolati alle imprese che investono nel settore della fusione per la costruzione di prototipi e impianti e infine, a garanzie pubbliche sui finanziamenti privati concessi alle imprese del settore della fusione, riducendo il rischio per gli investitori e facilitando l'accesso al credito.

Rimane fondamentale favorire la partecipazione di imprese italiane alla costruzione e alla gestione degli impianti realizzati nell'ambito di progetti europei o internazionali. A questo fine, è necessaria la promozione di accordi bilaterali per la condivisione di know-how, dati sperimentali, tecnologie e infrastrutture.

Nel quadro attuale riveste quindi grande importanza la dichiarazione adottata nel comunicato finale dei Leader del G7 a conclusione del meeting tenutosi in Puglia nei giorni 13-15 giugno 2024, che riconosce alla tecnologia dell'energia di fusione il potenziale per fornire una soluzione duratura alle sfide globali del cambiamento climatico e della sicurezza energetica. I Leader del G7 hanno istituito un gruppo di lavoro internazionale sull'energia da fusione, il cui meeting inaugurale si è tenuto a Roma il giorno 6 novembre 2024, impegnandosi a promuovere collaborazioni internazionali per accelerare lo sviluppo e dimostrazione di impianti di fusione, per favorire gli investimenti privati e pubblici fidanzamento, e promuovere approcci coerenti alle normative sulla fusione.

Infine, data la forte interconnessione tra tutti gli elementi di programma si propone la creazione di una cabina di regia, nell'ambito del più ampio coordinamento del programma nucleare nazionale, per l'elaborazione di un piano operativo nazionale sulla fusione che identifichi i centri di competenza e le tecnologie abilitanti per valorizzazione e ulteriore sviluppo della *supply chain* a livello nazione e UE, e definisca le principali *milestone* e relative tempistiche di tutte le attività previste, sotto la direzione dei Ministeri competenti. La cabina di regia potrebbe fornire il coordinamento, il monitoraggio e la revisione periodica delle attività previste nel piano, e promuovere una adeguata campagna di comunicazione destinata a favorire l'accettabilità degli impianti a fusione presso l'opinione pubblica, nell'ambito del più ampio programma di comunicazione sull'energia.

CAP. 3 - RICOGNIZIONE DELLA SITUAZIONE NAZIONALE E DEL CONTESTO INTERNAZIONALE

C3-1 Introduzione

3-1.1 La fusione come fonte di energia

La fusione è una reazione nucleare in cui due nuclei di elementi leggeri, come l'idrogeno, in condizioni particolari si fondono formando nuclei di elementi più pesanti con emissione di grandi quantità di energia (alcuni milioni di volte maggiori, per unità di massa, a quelle liberate dalle comuni reazioni di combustione). La fusione è il processo che alimenta il Sole e le altre stelle, ed è inverso rispetto a quello della fissione in cui nuclei pesanti, quali quello di uranio si rompono in nuclei più piccoli.

La reazione di fusione prevalente nel Sole è quella che, con alcuni passaggi, trasforma quattro nuclei di idrogeno in un nucleo di elio (catena protone-protone). Tale processo, tuttavia, è estremamente lento, con probabilità delle reazioni di avvenire estremamente basse. La densità di potenza prodotta dal Sole è al massimo di circa 300 W/m³ al centro, e il Sole produce una grande quantità di energia grazie alle sue dimensioni. Per utilizzare la fusione in impianti per la produzione di energia sulla Terra, occorre raggiungere densità di potenza molto più elevate, dell'ordine del MW/m³, utilizzando reazioni più veloci. La reazione più facile da conseguire a tale scopo, perché raggiunge la massima probabilità di verificarsi ad energie più basse (oggi raggiungibili in laboratorio), è quella che utilizza due isotopi dell'idrogeno, il deuterio (D) e il trizio (T), reazione D-T, che produce un nucleo di elio (He) e un neutrone (n) con il rilascio di 17,6 MeV di energia sotto forma di energia cinetica dei prodotti:



L'energia sviluppata per ogni grammo di materia reagente è pari a circa 340 GJ, equivalenti all'energia prodotta nella combustione di 12 tonnellate di carbone o 6,5 tonnellate di metano (ovvero 9700 metri cubi standard).

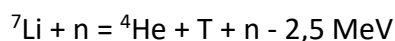
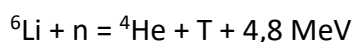
Affinché i due nuclei possano fondersi, essi devono venire a trovarsi a distanze dell'ordine di 10⁻¹⁵ m, una dimensione centomila volte inferiore al diametro di un atomo, ma poiché sono dotati di carica elettrica positiva, e quindi si respingono, per avvicinarli occorre vincere la forte repulsione elettrica e quindi spendere molta energia. La soluzione più efficace è riscaldare una miscela dei due gas fino a temperatura molto elevata (dell'ordine dei 100-200 milioni di gradi, dieci volte più alta che nel centro del Sole). Per riuscirci, occorre evitare, per quanto possibile, il contatto con le pareti del recipiente in cui il gas è contenuto e ridurre al minimo le perdite di calore. Si noti che già a circa 100 mila gradi, atomi e molecole si dissociano in nuclei positivi ed elettroni dando luogo ad un nuovo stato della materia chiamato plasma.

Mentre il deuterio è stabile e facilmente reperibile in natura (ad esempio estraendolo dall'acqua di mare), il trizio è un isotopo radioattivo dell'idrogeno caratterizzato da un tempo di dimezzamento abbastanza breve (~12 anni) e non si trova in natura se non in

quantità minime. Si rende quindi necessaria la sua produzione, contestualmente al suo sfruttamento, negli stessi impianti a fusione.

Pertanto, il funzionamento di un impianto di produzione dell'energia che utilizza la reazione D-T si basa sulle seguenti caratteristiche:

- i nuclei di elio (particelle α) prodotti dalla reazione di fusione sono elettricamente carichi e restano confinati (per un certo intervallo di tempo) nel volume del plasma. Essendo generati con un'energia molto maggiore di quella dei nuclei di deuterio e trizio, cedono questa energia al plasma stesso compensando le perdite di calore e sostenendone la temperatura;
- i neutroni prodotti, essendo elettricamente neutri, non restano confinati dal campo magnetico ma sfuggono verso l'esterno del recipiente in cui avviene la reazione (**camera a vuoto** o **vacuum vessel**) depositando la loro energia in un **mantello** collocato intorno ad essa (**blanket**) dotato di una **prima parete** esposta al plasma, il quale ospita il sistema di raffreddamento e contiene un materiale a base di litio. Mentre vengono rallentati, i neutroni reagiscono con il litio (Li, costituito nel caso di litio naturale per il 7.6 % da ${}^6\text{Li}$ e per il 92.5 % da ${}^7\text{Li}$) producendo trizio attraverso le seguenti reazioni:



Il trizio prodotto viene estratto ed è riciclato come combustibile nella camera di reazione rendendo così il sistema autosufficiente nell'uso del trizio. Il contributo dato dalla reazione con ${}^6\text{Li}$ è di gran lunga prevalente, e per questo motivo nel mantello occorre utilizzare litio arricchito in ${}^6\text{Li}$ rispetto alla composizione isotopica naturale.

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

Tuttavia, non tutti i neutroni raggiungono il blanket a causa del possibile assorbimento da parte dei componenti strutturali o perché vengono persi attraverso gli accessi dedicati ai sistemi diagnostici o di riscaldamento. E' necessario quindi inserire nel blanket materiali in grado di moltiplicare i neutroni incidenti attraverso opportune reazioni nucleari. I materiali utilizzabili a questo scopo, indicati come "**moltiplicatori di neutroni**", sono il berillio o il piombo.

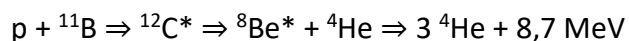
Il **blanket** rappresenta uno dei componenti chiave per il funzionamento di un impianto a fusione. Oltre ad assicurare una produzione di trizio tale da garantire l'autosufficienza dell'impianto, deve anche assicurare l'asportazione efficiente dell'energia depositata dai neutroni (pari all'80% dell'energia liberata dalla fusione) e dalla radiazione e particelle provenienti dal plasma tramite un fluido termoconvettore (acqua in pressione, elio o metalli liquidi) destinato alla produzione di vapore di un fluido secondario per la generazione di energia elettrica per mezzo di un ciclo termodinamico convenzionale. Essendo il componente più prossimo alla zona del plasma, il blanket ha anche il compito di schermare dai neutroni e dalla radiazione i componenti più esterni dell'impianto.

Per ottenere un bilancio energetico positivo è necessario che il plasma di D-T sia confinato in un volume sufficientemente lontano dalle pareti metalliche della camera di reazione (**confinamento**), e mantenuto alla temperatura richiesta per un tempo sufficiente a che l'energia liberata nella reazione di fusione possa compensare sia le perdite sia l'energia

usata per produrlo (**autosostentamento**). Tali condizioni si conseguono quando la temperatura (T) da un lato ed il prodotto densità del plasma (n) per tempo di confinamento dell'energia (τ) dall'altro (o del prodotto triplo $n\tau T$) superano determinati valori di soglia (condizioni di fusione). Il risultato si può ottenere sia con plasmi ad alta densità confinati per tempi brevi (**fusione a confinamento inerziale**), sia con plasmi a bassa densità e tempi di confinamento elevati (**fusione a confinamento magnetico**).

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

Anche se la reazione di fusione D-T è la più probabile, promettente e studiata, non è l'unica possibile, ne esistono infatti altre, quali ad esempio D-D, p-¹¹B e D-³He, che però richiedono temperature molto più elevate e presentano probabilità di avvenire più basse rispetto alla D-T. Per completezza, menzioniamo anche esperimenti che impiegano nuclei di combustibile polarizzati che dovrebbero aumentare la probabilità di reazione. Nel seguito si riporta la reazione che può avvenire tra un protone p ed un nucleo di ¹¹B, attraverso la creazione di un nucleo eccitato di ¹²C; tale nucleo decade rapidamente in un nucleo di ⁸Be emettendo una particella α ; il nucleo di berillio, a sua volta, si divide in due nuove particelle α . Il risultato finale è dunque la produzione di tre particelle α e di energia per 8,9 MeV:



Il principale vantaggio della reazione scelta è quello di coniugare l'assenza di neutroni (con notevolissimi vantaggi dal punto di vista della radioprotezione e del danneggiamento dei materiali strutturali) con l'abbondanza dei combustibili in natura (il boro è estremamente abbondante in natura, e il ¹¹B rappresenta circa il 20 % del boro naturale). Tuttavia, in questo schema, non è possibile ottenere guadagno di energia in condizioni di equilibrio termodinamico ed occorre ricorrere a schemi più complessi.

Un'ulteriore reazione di fusione allo studio è quella deuterio - ³He:



Anche in questo caso, come nella reazione, precedente si ha una minore produzione di neutroni ad alta energia, circa 1/100 rispetto alla D-T, ma le temperature richieste per ottenere un guadagno di energia sono molto più elevate. Un ulteriore svantaggio è dato dal fatto che ³He è un isotopo molto raro sulla Terra (mentre si ritiene sia più diffuso sulla Luna, nello strato superiore delle rocce regolitiche).

^a Si noti che il concetto di ignizione, ovvero il caso in cui la potenza immessa dall'esterno è nulla e quindi Q tende a un valore infinito, non è in pratica utilizzato negli schemi di funzionamento attualmente previsti per un reattore a fusione

3-1.2 La fusione a confinamento magnetico

Nel caso della fusione magnetica il confinamento del plasma si realizza mediante campi magnetici capaci di guidare il moto delle particelle cariche, entro la camera a vuoto, secondo traiettorie che non ne intersechino le pareti. L'impianto è costituito da una camera toroidale metallica, cioè a forma di ciambella, entro cui si produce il vuoto spinto e si inietta il "combustibile" a bassa densità (circa 10^{20} particelle per metro cubo, pari ad una densità 100.000 volte più bassa di quella dell'aria). Il combustibile viene continuamente iniettato e poi estratto per evitare l'accumulo di "ceneri di elio" o di impurità provenienti dalle pareti, oltre che per recuperare il combustibile non bruciato. In ogni momento all'interno della camera si trova solo qualche grammo di combustibile.

Nel plasma si possono sviluppare vari tipi di instabilità, sia macroscopiche (che coinvolgono l'intera ciambella di plasma) sia localizzate. Queste instabilità vanno evitate o eliminate, sia perché portano a contatti del plasma ad altissima temperatura con la prima parete dei componenti ad esso esposti con il rischio di danneggiarli, sia perché aumentano molto le perdite termiche.

Un insieme di bobine magnetiche costituite da conduttori percorsi da corrente elettrica, disposte simmetricamente attorno alla camera, genera la configurazione di campi magnetici esterni e/o prodotti da correnti circolanti nel plasma che ne limitano il contatto con le pareti. Di fatto, il campo magnetico è il contenitore del plasma in grado di trattenere al suo interno le particelle elettricamente cariche, e di opporsi alla tendenza del plasma ad espandersi verso le pareti. L'intensità dei campi magnetici richiesti, il cui valore massimo è previsto essere dell'ordine di almeno della decina di T, insieme alle dimensioni stesse delle bobine (15 – 20 m di altezza/diametro nel caso dell'esperimento ITER, inferiori nelle macchine più compatte) richiedono l'uso di **magneti superconduttori** (ovvero realizzati con l'utilizzo di conduttori a resistenza elettrica nulla nelle condizioni di esercizio), gli unici in grado di generare le intensità di campo magnetico necessarie evitando la dissipazione di potenza per effetto Joule nei conduttori stessi.

Per il riscaldamento del plasma alle temperature richieste si usano **sistemi di riscaldamento a onde elettromagnetiche** (a frequenze appropriate per un'efficace interazione con il plasma), e a iniezione di fasci di atomi neutri ad alta energia (**Neutral Beam Injection, NBI**) i quali penetrano entro il plasma e, cedendo la loro energia per urti, lo riscaldano.

Le particelle che, a causa di vari meccanismi, escono dalla zona ben confinata del plasma e diffondono verso le pareti, vengono deviate da una opportuna configurazione delle linee di campo magnetico verso un componente, chiamato **divertore**, dal quale vengono estratte dalla camera a vuoto. In questo modo si protegge la prima parete esposta al plasma e si rende più efficiente l'estrazione delle ceneri di elio. Il flusso di particelle sul divertore atteso in un reattore a fusione è tale da determinare, nel caso dell'esperimento ITER, un flusso termico di 10-20 MW/m², con possibili punte fino a 50-60 MW/m² in eventi transitori veloci, che deve essere efficientemente estratto in modo da evitare il danneggiamento del componente stesso. A tal fine, il divertore è costituito da tegole di materiale opportuno attraversate da tubi in cui scorre il fluido di raffreddamento. Il divertore è solitamente situato nella parte bassa della camera a vuoto e lontano dalla zona di buon confinamento del plasma.

I concetti di macchine a confinamento magnetico attualmente più studiati riguardano i sistemi chiamati rispettivamente **tokamak**, **stellarator** e **Reversed Field Pinch (RFP)**, tutti basati su configurazioni toroidali (nella sezione dedicata al panorama internazionale sono riportati anche progetti sperimentali che utilizzano configurazioni diverse). Di questi, la configurazione tokamak è quella che ha consentito i maggiori progressi dal punto di vista del riscaldamento e del contenimento e isolamento termico del plasma. Il sistema dei magneti impiegato nei tokamak consiste nei seguenti principali tipi di bobine:

- le **bobine del campo magnetico toroidale**, applicate ad opportuni intervalli lungo tutto l'anello della camera toroidale, avvolte su di essa e alimentate in corrente continua. Esse inducono un campo magnetico all'interno della camera da vuoto avente le linee di forza parallele all'asse circolare che segue lo sviluppo della camera toroidale;
- le **bobine del campo magnetico poloidale**, disposte su piani paralleli al piano equatoriale della camera toroidale e quindi ortogonali alle bobine toroidali. Tra esse si distinguono le bobine disposte esternamente alla camera, che servono a generare un campo magnetico verticale per il controllo dell'equilibrio, della forma e della posizione del plasma, e il solenoide centrale descritto nel seguito;
- il **solenoide centrale**, costituito da una colonna di bobine, posta al centro della camera. L'insieme del solenoide centrale e del plasma costituisce un trasformatore, di cui il primario è il solenoide e il secondario è il plasma stesso. Inviando una corrente variabile nelle bobine del solenoide centrale, si crea un campo magnetico variabile che induce nel plasma una corrente elettrica la quale, a sua volta, genera un campo magnetico poloidale che si aggiunge al campo magnetico toroidale dando alle linee di forza risultanti un andamento elicoidale, che si presta meglio a confinare il plasma.

Le ricerche sviluppate dall'Unione Europea seguono principalmente la linea a confinamento magnetico, basate primariamente su tokamak e anche su stellarator.

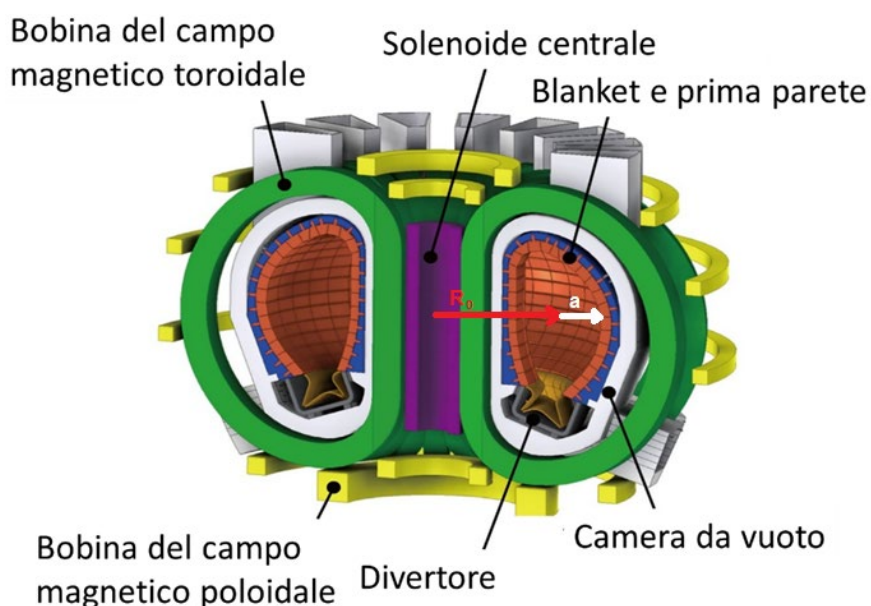


Figura 1. Schema di reattore a fusione a confinamento magnetico di tipo tokamak. " R_0 " è il raggio maggiore della camera a vuoto, " a " il raggio minore.

3-1.3 Fusione a confinamento inerziale

Nella fusione a confinamento inerziale una **capsula sferica** di qualche millimetro di diametro (detta pellet), contenente una miscela di combustibile di D-T, viene compressa fino a ridurre il suo raggio di oltre un fattore 30, in modo da raggiungere un'altissima densità, pari a migliaia di volte la densità del combustibile solido. La compressione scalda efficacemente la regione centrale della capsula, fino a che non si raggiunge la temperatura necessaria per innescare i processi di fusione, pari a circa cento milioni di gradi centigradi. L'unico meccanismo fisico che in questa tecnica confina la materia all'interno della capsula è la sua propria inerzia, da cui il nome "confinamento inerziale".

Per ottenere la compressione della capsula a densità così alte è necessario impiegare **fasci laser o raggi X ad alta intensità**, oppure **fasci di ioni pesanti ad alta energia**. L'ultimo caso è quello al momento meno studiato a causa delle maggiori limitazioni tecnologiche. I fasci laser o di raggi X devono incidere uniformemente su tutta la superficie della capsula, trasformandola in un plasma che si espande verso l'esterno, nel processo detto di ablazione, il quale produce di conseguenza la compressione e quindi l'implosione della parte rimanente della capsula verso il suo centro.

Al fine di avere il massimo di energia prodotta da fusione si vorrebbe che tutto il combustibile della capsula venisse "bruciato" durante il processo di fusione. Il prodotto ρR , anche chiamato *areal density* ed espresso in g/cm^2 , dato dalla densità ρ del combustibile compresso per il raggio R della superficie sferica che lo contiene, fornisce un'indicazione della percentuale di combustibile bruciato: il valore di riferimento di circa $3,0 \text{ g/cm}^2$, corrisponde teoricamente a circa il 30% di combustibile bruciato e ad un guadagno G , inteso come il rapporto tra l'energia liberata dalle reazioni di fusione nucleare e l'energia della sorgente esterna impiegata per l'irraggiamento della capsula, di qualche decina. Per un futuro reattore è necessario che questo guadagno G sia almeno dell'ordine di qualche centinaio^b.

Per innescare le reazioni di fusione, l'uniformità di irraggiamento della capsula deve essere molto elevata, altrimenti sul plasma in espansione si innescano fenomeni di instabilità idrodinamiche che distruggono la simmetria di compressione e rendono impossibile l'innescio. A tal fine si è impiegato lo schema di irraggiamento indiretto, in cui il pellet è contenuto e sostenuto dentro un contenitore cilindrico d'oro, detto **Hohlraum**. Un elevato numero di fasci laser colpisce diversi punti della parete interna del contenitore e produce raggi X, i quali irraggiano la superficie del pellet con elevata uniformità. Ciò però a scapito del rendimento, perché solo una piccola frazione dell'energia laser è effettivamente depositata nella capsula.

Per un futuro reattore a fusione inerziale è necessario sfruttare al meglio l'energia dei laser, e per tale motivo sono preferibili metodi di **irraggiamento diretto**, in cui i laser colpiscono direttamente la superficie del pellet. Per risolvere il problema dell'uniformità di irraggiamento, due approcci avanzati di irraggiamento diretto sono stati messi a punto, chiamati **shock ignition** e **fast ignition**, in cui si separa la fase di compressione da quella di ignizione. In entrambi i casi si ha una fase preliminare di compressione del pellet, mediante un primo irraggiamento laser che produce parametri più moderati di densità e

^b Si noti che la definizione di Guadagno (G) differisce da quella utilizzata per la fusione a confinamento magnetico (Q)

temperatura rispetto al caso di irraggiamento classico, rilassando di molto il requisito di uniformità. Nel caso di *shock ignition*, a questa fase preliminare viene fatto seguire un secondo irraggiamento laser ad intensità molto più alta, che determina una seconda compressione del pellet, che porta all'ignizione. Nel caso di *fast ignition*, invece, dopo la fase preliminare si prevede di fornire, in maniera molto rapida, una elevata quantità di energia proprio al centro della capsula. Questo può essere fatto in diversi modi, e al momento si studia la possibilità di impiegare fasci di particelle ad alta energia, generati da interazione laser con un bersaglio ausiliario.

3-1.4 Vantaggi della fusione

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

- la reazione su cui si basa non produce gas climalteranti;
- utilizza combustibili che sono virtualmente illimitati e geograficamente diffusi. Il deuterio si estrae dall'acqua di mare dove si trova in una concentrazione tale, circa 33 g/m³, da rendere possibile la fusione per decine di milioni di anni. Il litio^c proveniente da risorse terrestri comprovate e facilmente estraibili fornirebbe combustibile sufficiente per far funzionare impianti a fusione per più di 1000 anni. Considerando il litio che può essere estratto dall'acqua dell'oceano, le riserve sono praticamente illimitate (sufficienti a soddisfare il fabbisogno energetico mondiale per alcuni milioni di anni). Si stima che una centrale a fusione da 1 GW_e consumerà 250 kg di combustibile/anno, mentre una centrale a metano di pari potenza ne consuma circa 1,3 milioni di tonnellate/anno.
- è intrinsecamente sicura. All'interno del reattore saranno presenti pochi grammi di combustibile, il quale va continuamente introdotto sotto forma di immissione di gas nella fusione magnetica o di pellet in quella inerziale, immissione che può essere interrotta in qualsiasi momento determinando così la cessazione immediata delle reazioni e della liberazione di energia. Le caratteristiche intrinseche delle reazioni di fusione sono tali che in presenza di malfunzionamento di uno dei sistemi vitali dell'impianto il reattore si spegne automaticamente.
- a differenza della fissione nucleare non utilizza uranio o plutonio e quindi non ricade nelle problematiche associate al trattato di non proliferazione. In generale il rischio di proliferazione nucleare a fini bellici in impianti a fusione, se tecnicamente non escludibile in assoluto, rappresenta uno scenario poco plausibile e sostanzialmente irrilevante.
- presenta un basso impatto ambientale. La reazione di fusione non produce scorie radioattive, ma solo elio. Nel corso del funzionamento del reattore a fusione diventano radioattivi i componenti interni del reattore, ovvero le strutture metalliche costituite

^c Nel 2020 il litio è stato inserito dalla Commissione Europea nella lista dei materiali considerati critici. Tuttavia, se l'industria della fusione corrispondesse all'attuale industria della fissione, con una capacità di circa 500 GW, la sua domanda di litio sarebbe dell'ordine di poche decine di migliaia di tonnellate all'anno – ovvero una parte minore del mercato globale che ammontava a 130.000 tonnellate nel 2022, e che si stima salirà a 700.000 tonnellate nel 2050.

prevalentemente da acciai, rame, tungsteno, etc. La ricerca è quindi focalizzata sullo sviluppo di opportuni materiali per le strutture della camera di reazione, come gli acciai RAFM (*Reduced Activation Ferritic Martensitic*) che oltre ad offrire caratteristiche funzionali di resistenza ai carichi di radiazione rispettino anche stringenti limiti per alcune impurità (es. Nb, Mo, Ni). Alcuni radionuclidi a lunga emivita (es. ^{94}Nb , ^{14}C) potrebbero infatti contribuire a innalzare la classificazione da *Low Level Waste (LLW)* a *Intermediate Level Waste (ILW)*¹ di grandi quantità di materiali² secondo i criteri di riferimento esistenti per i depositi di smaltimento dei rifiuti radioattivi provenienti dalla produzione di energia da fissione nucleare. La fusione ha quindi la potenzialità di non produrre rifiuti radioattivi a lungo-termine (>100 di anni) per le future generazioni e gli attuali studi indicano che essa non richiederà il loro stoccaggio in depositi geologici profondi. In ogni caso la ricerca in corso sui materiali a bassa attivazione (per eliminare le impurità non funzionali) e lo sviluppo di procedure di trattamento per il riciclo ed il riutilizzo dei materiali funzionali restano fondamentali in prospettiva dello sviluppo di reattori a fusione.

- può produrre energia a flusso costante. Da questo punto di vista è molto simile all'energia da fissione, ed è quindi adatta a essere una sorgente di energia di base.

3-1.5 **Grado di maturità tecnologica**

Le ricerche sperimentali sulla fusione sono iniziate nel corso degli anni 1950, ma hanno avuto un significativo impulso solo dopo i risultati molto incoraggianti ottenuti nel tokamak T3 in Unione Sovietica nel 1968, e soprattutto dopo la crisi petrolifera del 1973 che determinò il fiorire di molti esperimenti a livello internazionale, e anche in Italia.

I progressi ottenuti nei decenni seguenti nella comprensione teorica dei processi fisici che avvengono nei plasmi termonucleari, nello sviluppo delle tecnologie necessarie e degli strumenti numerici analitico-predittivi, e il grande impegno posto negli esperimenti, hanno portato la fusione alla prima validazione in ambito sperimentale^d. Nella fusione magnetica sono stati condotti esperimenti in cui il processo di fusione è stato ottenuto e controllato in condizioni vicino al breakeven per tempi relativamente lunghi, e nella fusione inerziale il breakeven è stato superato.

Come illustrato nei capitoli seguenti, la ricerca si concentra adesso sull'ottenimento di regimi di fusione a valori elevati di guadagno di potenza, e nel completamento dello sviluppo delle tecnologie necessarie per operare un impianto di potenza in modo continuo con adeguata affidabilità. Queste riguardano in primo luogo le tecnologie del blanket per tutti gli approcci. Inoltre, nel caso della fusione magnetica deve essere portata a maturazione la tecnologia del divertore, mentre nella fusione inerziale i gap tecnologici riguardano lo sviluppo dei bersagli e dei laser di adeguata frequenza.

Per ogni approccio è necessario proseguire lo sviluppo dei materiali per i componenti interni al reattore (blanket, divertore) in grado di sopravvivere all'intenso flusso neutronico per tutta la vita operativa dell'impianto senza subire degradazione delle proprietà fisiche e termomeccaniche. I neutroni di fusione, infatti, sono prodotti ad

^d Lo Science and Technology Committee dell'Euratom ha recentemente sottolineato che servirebbe una analisi dettagliata dei TRL delle tecnologie chiave per favorire il coinvolgimento dell'industria e quindi accelerare lo sviluppo dell'energia da fusione.

energie circa dieci volte superiori rispetto ai neutroni di fissione, e provocano nei materiali un più intenso danneggiamento reticolare e una maggiore produzione di gas (elio, idrogeno) aumentandone la tendenza all'infragilimento e riducendone la saldabilità.

Infine, le soluzioni tecnologiche individuate dovranno dar luogo ad una realizzabilità non troppo complessa per ridurre i rischi industriali ed economici, nonché ad una elevata *availability* dell'impianto, così da raggiungere costi competitivi per l'energia da fusione rispetto ai costi di produzione da altre fonti di energia sostenibili.

A tutto questo deve poi accompagnarsi lo sviluppo degli standard e dei percorsi autorizzativi che portino all'esercizio della centrale. Le normative di riferimento sono profondamente diverse da quelle di un impianto da fissione e anche di un impianto convenzionale a combustibili fossili e devono coprire tutte le fasi della realizzazione della centrale dal progetto fino al completo smantellamento. Tutto questo sviluppo normativo ha da pochissimo iniziato a prendere corpo in ambito IAEA, inoltre alcuni stati come Gran Bretagna e Stati Uniti d'America hanno intrapreso un percorso normativo e regolatorio specifico per la tecnologia di fusione.

3-1.6 **Integrazione di una centrale a fusione nella rete elettrica**

Il sistema elettrico di alimentazione di un reattore a fusione di grossa taglia (alcune centinaia di MW_e) e di trasporto dell'energia elettrica prodotta può raggiungere potenze di centinaia di MVA e quindi rappresenta una parte onerosa in termini di costi e di spazi occupati.

Il sistema d'alimentazione dell'impianto di fusione è generalmente costituito da due sottosistemi principali, corrispondenti a due diversi livelli di tensione: la sottostazione di trasformazione (ad esempio a 400 kV), che è connessa alla rete nazionale di trasmissione e provvede alla trasformazione dall'alta alla media tensione (MT) e la vasta impiantistica della sezione MT, cui compete l'effettiva alimentazione delle utenze, adattando e distribuendo la potenza ai vari sistemi di avvolgimenti toroidali e poloidali della macchina.

Nella progettazione del sistema d'alimentazione elettrica si deve tenere conto dei seguenti requisiti. Poter alimentare senza disservizi la macchina durante il ciclo più gravoso di funzionamento previsto in specifica e in particolare fornire la potenza richiesta, cui si aggiungono centinaia di MVAR di potenza reattiva generati localmente dai dispositivi di compensazione statici (SVC). Unitamente alle caratteristiche del nodo di connessione alla rete, l'impianto non deve creare elevate cadute di tensione superiori al 3% sulla rete di trasmissione e variazioni di frequenza superiori al 0,1% per non superare i livelli ammessi dalla normativa vigente in materia di qualità del servizio della rete stessa. Si deve quindi optare per uno schema di alimentazione che rappresenti un buon compromesso tra le seguenti esigenze: costo delle apparecchiature, flessibilità operativa e d'impianto, riduzione al minimo dei valori della potenza reattiva che deve fluire in entrata e uscita dalla rete di alimentazione e della fluttuazione della potenza attiva in uscita.

Alcuni schemi di impianti a fusione prevedono il funzionamento pulsato o, nel caso del confinamento magnetico, periodi di funzionamento lunghi (alcune ore) intervallati da periodi molto più brevi durante i quali si dovrà provvedere alla energizzazione del

solenoide centrale. In questi casi sarà necessario dotare gli impianti di opportune soluzioni in grado di garantire un'erogazione continua dell'energia elettrica.

C3-2 Il panorama internazionale

Negli ultimi anni si sta registrando un' enorme crescita di interesse per l'energia da fusione, con finanziamenti significativi da parte di soggetti sia privati sia pubblici, grazie ai recenti successi ottenuti negli esperimenti del *Joint European Torus (JET)* e della *National Ignition Facility (NIF)*, di cui si parlerà nel seguito, e alla costruzione del reattore sperimentale ITER, che ha fatto avanzare significativamente la scienza e le tecnologie necessarie per la realizzazione di un impianto a fusione e accresciuto le capacità industriali del settore unitamente a recenti innovazioni dal settore privato³.

3-2.1 Il progetto internazionale ITER

Il progetto attualmente più avanzato nell'ambito del confinamento magnetico è ITER⁴, il reattore di tipo tokamak realizzato nell'ambito di una collaborazione internazionale tra Europa (che contribuisce con il 45,4%, di cui il 20% coperto dalla Francia), Stati Uniti, Russia, Giappone, Cina, Corea del Sud e India (con un contributo pari al 9,1% ciascuno). Le basi di ITER risalgono al 1985 a seguito di un accordo tra il Presidente americano, R. Reagan, e il Capo del governo dell'Unione Sovietica, M. Gorbachev, sulla scia di un precedente ambizioso progetto, INTOR (*International tokamak Reactor*), promosso dall'IAEA nel 1978. Le circostanze politiche particolari e il valore altamente simbolico di quell'accordo al massimo livello mondiale determinarono un clima di grande apertura e collaborazione. La lunga trattativa per la definizione dell'accordo ITER si concluse felicemente nel 2007, anno in cui l'accordo è stato firmato ed è stata avviata la costruzione dell'impianto nel sito francese di Cadarache (a fianco del *Centro del Commissariat pour l'Energie Atomique, CEA*).

ITER ($R_0=6,2$ m, $a=2$ m, Fig.1) è stato progettato per produrre 500 MW di potenza da fusione con un fattore di guadagno $Q=10$ in condizioni pulsate con durata dell'impulso di centinaia di secondi, e $Q=5$ in condizioni semi stazionarie o continue. **Lo scopo di ITER è dimostrare la fattibilità scientifica e tecnologica della fusione per la produzione di energia in una macchina di tipo tokamak.** In particolare, i principali obiettivi sono i seguenti:

- 1) la piena comprensione della fisica del plasma ad elevati livelli di produzione di potenza di fusione;
- 2) il controllo della stabilità del plasma (macro e micro instabilità), interazione del plasma con la parete della camera, effetti delle particelle α prodotte nella fusione;
- 3) il conseguimento della reazione di fusione D-T fino alla produzione di potenze rilevanti;
- 4) la sperimentazione di sistemi di riscaldamento del plasma di grande potenza;
- 5) la fattibilità e il funzionamento dei magneti superconduttori in condizioni operative prossime a quelle prevedibili per un reattore commerciale;

6) la sperimentazione di apparecchiature robotizzate in grado di effettuare interventi di manutenzione sulle parti interne della macchina rese radioattive dai neutroni;

7) la sperimentazione di diversi moduli di blanket (**Test Blanket Modules, TBM**) atti ad assicurare una adeguata produzione di trizio e lo scambio termico dell'energia prodotta nella fusione dal mantello (blanket) al fluido refrigerante in condizioni di temperatura e pressione simili a quelle previste per le centrali con reattore a fusione^e.

Alla costruzione della macchina i partner contribuiscono *in kind* per il 90 % del costo totale, cioè fornendo direttamente i componenti attraverso apposite Agenzie Nazionali e secondo uno schema concordato. Per la partecipazione ad ITER in Europa è stato sottoscritto nel 2007 uno specifico accordo bilaterale, l'*European Joint Undertaking for ITER and the Development of Fusion Energy* (in breve **Fusion for Energy, F4E**) con l'obiettivo di fornire il contributo europeo ad ITER, implementare l'accordo *Broader Approach* (§2-3.2) e preparare la costruzione di un reattore dimostrativo. Tale accordo ha portato alla costituzione di una apposita Agenzia, denominata appunto F4E, con sede a Barcellona. Ad essa partecipano la Commissione Europea e i Paesi facenti parte dell'Euratom.

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

La costruzione di ITER ha prodotto lo sviluppo di nuove tecnologie di rilevanza reattoristica quali, tra le tante, quelle dei magneti superconduttori toroidali in niobio-stagno (Nb₃Sn) e poloidali in niobio-titanio (NbTi) con campo magnetico e dimensioni ragguardevoli (rispettivamente di 12 T e altezza 13 m, e di 6 T e diametro massimo 24 m), e quella del divertore con bersagli in monoblocchi di tungsteno su tubi di rame-cromo-zirconio (CuCrZr) che ha richiesto lo sviluppo e la dimostrazione di tecnologie di giunzione speciali per resistere a carichi termici stazionari dell'ordine di 10 MW/m² e transitori dell'ordine di 20 MW/m².

La costruzione di ITER è in via di conclusione con circa l'80% dell'impianto completato. La fase attuale vede l'inizio dell'assemblaggio del reattore, che è però ritardata a causa di non conformità dei primi settori di camera a vuoto e difetti su schermi termici forniti dalla Corea del Sud. Inoltre, l'Autorità per la Sicurezza Nucleare francese ha imposto un momentaneo stop all'assemblaggio chiedendo chiarimenti sulla piattaforma di cemento che sosterrà il reattore, sulla mappatura delle radiazioni di neutroni e sulle non conformità dei settori di camera a vuoto sopra menzionate. Tutto ciò determina un ritardo significativo dell'inizio delle operazioni, dell'ordine di diversi anni, rispetto alla data prevista di fine 2025. D'altra parte, il nuovo direttore generale di ITER nominato nel 2022 ha proposto modifiche al programma scientifico e al progetto della macchina per mitigare l'effetto dei ritardi e per inglobare soluzioni innovative e di maggiore rilevanza reattoristica. Il nuovo programma (ITER *Baseline*) è stato proposto all'ITER Council a giugno 2024. Una conseguenza dei ritardi nel programma ITER è il ritardo delle operazioni con i Test Blanket Module (TBM), i prototipi di blanket che devono essere inseriti nella

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

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

macchina per essere testati durante la fase nucleare di ITER (ovvero durante operazioni in DT a piena potenza) e che costituiscono un elemento di enorme rilevanza per la realizzazione di un reattore commerciale che richieda l'auto-fertilizzazione della produzione del trizio.

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

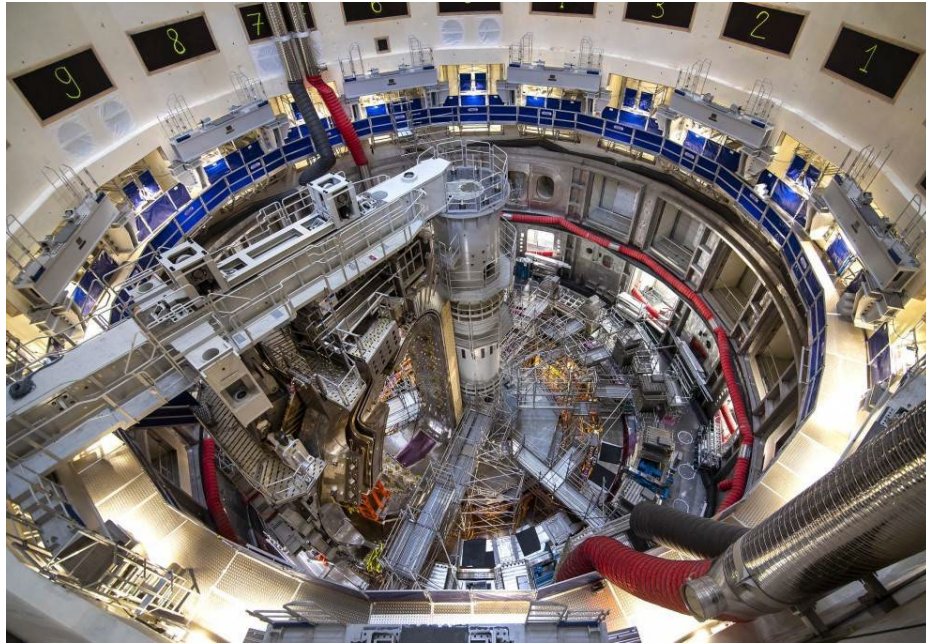


Figura 2. L'interno del criostato che ospiterà il reattore ITER, in cui è inserito un settore del tokamak (sulla sinistra)



Figura 3. Il sito di ITER a Cadarache (Francia) nel settembre 2023. L'edificio più alto ospita il reattore.

3-2.2 L'accordo Broader Approach

La trattativa per la definizione dell'accordo ITER fu resa difficile perché sia l'Unione Europea sia il Giappone aspiravano ad ospitare l'impianto in un proprio sito. Per offrire al Giappone una contropartita alla sua approvazione del sito di Cadarache (Francia), si rese necessario un accordo di cooperazione bilaterale tra Unione Europea (Euratom) e Giappone, denominato **Broader Approach**, avente lo scopo di integrare il progetto ITER ed accelerare i tempi per la realizzazione dell'energia da fusione, attraverso attività di R&S relative a tecnologie avanzate per i futuri reattori dimostrativi. L'entità dei finanziamenti stanziati ammontava a 680 M€ (50% a carico dell'Europa e 50% a carico del Giappone), con una parte importante del contributo europeo *in-kind*. I contributi da parte dei Paesi europei più importanti sono quelli di Francia (180 M€), Italia (90 M€), Spagna, Svizzera e Germania.

Il *Broader Approach Agreement* prevedeva in particolare:

- l'attività ingegneristica di progettazione e sviluppo della sorgente di neutroni intensa **IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility)**⁵ per la qualifica dei materiali. IFMIF si propone di riprodurre il flusso di neutroni atteso sulla prima parete della camera di un impianto di potenza a fusione in un volume nel quale possono essere inseriti, irradiati con altissime dosi (come nel reattore) e poi rimossi e analizzati fuori linea, campioni di diversi materiali. Per ottenere questa radiazione in un volume localizzato ma sufficientemente ampio, si utilizza un acceleratore di deutoni ad altissima intensità (10 MW a 40 MeV) il cui fascio incide su un bersaglio di litio liquido circolante per produrre un intenso fascio di neutroni con spettro di energia simile a quello dei neutroni prodotti nella reazione D-T. La precisione di tutti i parametri sia del fascio sia del bersaglio, unitamente alle intensità record necessarie per comprimere i tempi di irraggiamento a valori accettabili, rendono IFMIF una sfida tecnologica. Per ridurre i rischi, è stato realizzato a Rokkasho (Giappone) un prototipo di acceleratore in scala 1:1 e uno del circuito e del bersaglio di litio circolante che sono attualmente in fase di test;
- l'up-grade del tokamak giapponese JT-60U con l'adozione di magneti superconduttori. La costruzione della macchina **JT-60SA (Super Advanced)**⁶ è iniziata nel 2013 ed il primo plasma è stato ottenuto nell'ottobre 2023. JT-60SA, attualmente il tokamak più grande al mondo, sarà utilizzato congiuntamente da Europa e Giappone con l'obiettivo di affiancare ITER in modo da prepararne la sperimentazione, favorirne il raggiungimento degli obiettivi tecnologici e fornire conoscenze per la transizione da ITER verso i futuri reattori a fusione;
- la realizzazione in Giappone di un centro internazionale di ricerca sulla energia da fusione (IFERC), dotato in particolare di un centro di calcolo ad elevate prestazioni.

3-2.3 Il programma europeo

L'Europa conduce un programma di sviluppo della fusione coordinato a livello comunitario fin dalla firma del trattato Euratom del 1958. Da allora il coordinamento è avvenuto attraverso Contratti di Associazione con gli Stati Membri con Euratom fino al 2013. Nel 1999 fu istituito l'European Fusion Development Agreement (EFDA) volto a

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

rafforzare il coordinamento tra i Paesi membri in iniziative comuni, quale in particolare l'esperimento comunitario **Joint European Torus (JET)**⁷ presso il quale i laboratori europei collaboravano molto attivamente già dalla seconda metà degli anni 1970.

JET, il tokamak più grande al mondo fino alla partenza di JT-60SA, è la macchina comunitaria situata a Culham (Oxfordshire, GB). Entrata in operazione nel giugno 1983, è stata chiusa nel dicembre 2023 dopo aver prodotto, con il contributo di tutta la comunità scientifica europea, i risultati più rilevanti a livello mondiale nella fusione a confinamento magnetico, risultati che hanno fornito la base scientifica per la progettazione di ITER. JET ha effettuato tre campagne sperimentali in D-T^f, una nel 1997 e le altre nel 2022 e 2023 in cui ha raggiunto diversi record: un fattore di guadagno pari a $Q=0,65$ in regime transiente (1997), una potenza di fusione pari a 12 MW per 5 secondi e 69 MJ di energia totale prodotta (2023). **In questi esperimenti JET ha dimostrato che si è oggi in grado di ottenere le condizioni per la fusione ad elevati livelli di potenza, e di sostenerle e controllarle per tempi lunghi** rispetto al tempo di confinamento dell'energia (che per JET è di circa 0,5 secondi).

Un ulteriore salto di qualità nell'organizzazione e nel coordinamento del programma europeo di sviluppo della fusione è stato fatto nel 2014, quando 29 istituti di ricerca di 26 Paesi membri dell'Unione Europea più la Svizzera hanno dato vita a EUROfusion, il Consorzio europeo per lo sviluppo dell'energia da fusione. Nel 2013 era stata elaborata la *Roadmap* europea per l'energia da fusione (***Fusion Electricity – A roadmap to the realisation of fusion energy***⁸), poi aggiornata nel 2018⁹, che stabilisce gli obiettivi principali del programma.

Nella sua seconda versione pubblicata nel 2018, prevedeva le seguenti fasi sequenziali:

1. Dimostrazione tecnica dell'energia da fusione su larga scala – questo è il primo obiettivo di ITER (500 MW per 400 secondi) (intorno al 2035);
2. Immissione di elettricità in rete tramite una centrale elettrica a fusione dimostrativa (**DEMO**) in grado di (a) generare centinaia di MW di elettricità per almeno diverse ore, (b) operare con un ciclo di D-T chiuso, ovvero producendo in modo autosufficiente il trizio necessario, e (3) avere elevate caratteristiche di sicurezza (intorno al 2050);
3. Parallelamente, avanzamento della tecnologia e innovazione per consentire la transizione dalla dimostrazione dall'impianto di fusione a reattori convenienti e adatti alla produzione su larga scala e relativa distribuzione commerciale;
4. Produzione industriale su larga scala di impianti di fusione (nella seconda metà del secolo).

La configurazione di riferimento per DEMO è il tokamak. Tuttavia, sebbene gli *stellarator* siano meno maturi dei tokamak, poiché presentano vantaggi concettuali come una migliore stabilità del plasma e una capacità intrinseca di stato stazionario, il programma ne prevede l'ulteriore sviluppo in modo da poterne valutare a pieno le potenzialità.

Nel programma quadro europeo Horizon 2020, EUROfusion ha ottenuto un *grant* da Euratom per lo svolgimento del programma di attività previsto dalla *Roadmap*, con un supporto finanziario di 685,3 M€ per le attività comuni (a cui si aggiungevano 60 milioni

^f Normalmente nelle campagne sperimentali si usano plasmi di solo deuterio per evitare l'uso del trizio e la grande produzione di neutroni energetici che deriva dall'uso di miscele DT.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

di euro all'anno per l'operazione del JET). A questi si devono aggiungere i contributi degli Stati membri (almeno dello stesso ordine di grandezza, in quanto le attività di EUROfusion sono realizzate in co-finanziamento). In Horizon Europe negli anni 2021 – 2025 (seguendo la cadenza quinquennale dei programmi Euratom), EUROfusion ha ottenuto un secondo *grant* di 555 M€, cui si aggiungono circa 450 M€ di finanziamenti nazionali dai Paesi Membri. La distribuzione dei fondi all'interno del Consorzio è decisa dai membri stessi in base alle priorità generali dettate dalla *Roadmap*.

In funzione degli obiettivi principali, si articolano le otto missioni per l'attuazione della *Roadmap* che, in sintesi, mirano ad assicurare:

- 1) il successo degli esperimenti su ITER e la preparazione delle operazioni in un **reattore dimostrativo (DEMO)** con la sperimentazione sulle macchine europee, gli studi teorici e di sviluppo di simulazioni numeriche,
- 2) lo sviluppo e dimostrazione di componenti interni (quali il divertore) in grado di smaltire gli elevatissimi carichi termici previsti,
- 3) lo sviluppo e la qualifica di materiali strutturali e funzionali resistenti al flusso di neutroni,
- 4) lo sviluppo di blanket in grado di garantire l'autosufficienza per l'approvvigionamento del trizio,
- 5) la sicurezza dell'impianto,
- 6) l'integrazione del progetto di DEMO,
- 7) lo sviluppo di nuove tecnologie per ridurre il costo e dimostrare la fattibilità economica della fusione,
- 8) in parallelo, lo studio delle configurazioni alternative ai tokamak (in particolare gli stellarator) per portarle ad un livello di maturità che ne permetta una valutazione come soluzione a lungo termine per il reattore.

Il Consorzio comprende attualmente 28 organizzazioni di ricerca e università di 26 Paesi europei, con la partecipazione esterna del Regno Unito, Norvegia e Svizzera, e 162 entità affiliate (incluse molte industrie) e, di fatto, rappresenta un paradigma unico di integrazione europea.

I principali impianti di ricerca sulla fusione magnetica attualmente in operazione o in costruzione presso i membri del Consorzio, oltre a ITER, sono i seguenti:

- **Tokamak**: JET (fino al 2023), ASDEX Upgrade (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Germania), TCV (Swiss Plasma Center, Lausanne, Svizzera), WEST (CEA, Cadarache, Francia) a cui si aggiungono le macchine in costruzione COMPASS-U (Institute of Plasma Physics, Praga, Repubblica Ceca) e DTT (Consorzio DTT, Frascati, Italia);
- **Stellarator**: Wendelstein 7-X (Greifswald, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Germania), TJ-II (CIEMAT, Spagna);
- **Reversed Field Pinch**: RFX (Consorzio RFX, Padova, Italia), EXTRAP T2R (Stoccolma, Svezia).

A queste si aggiungono numerosi impianti tecnologici per lo studio del ciclo del combustibile, della termo-meccanica e termo-fluidodinamica del blanket, per test di materiali e cavi superconduttori. Per gli studi di neutronica con neutroni di fusione è disponibile ad oggi un'unica sorgente di media intensità (Frascati Neutron Generator, FNG, ENEA, Frascati).

E' inoltre in fase di avvio in Spagna la costruzione di una sorgente intensa **IFMIF-DONES (Demo Oriented Neutron Source¹⁰)** per la qualifica dei materiali per i componenti interni del reattore alle dosi di irraggiamento neutronico attese a fine vita del reattore. Per la costruzione si è formato il consorzio pubblico spagnolo IFMIF-DONES, che si avvale del supporto di EUROfusion, Fusion for Energy e della Croazia, ma sono in corso interlocuzioni con tutti i partner europei potenziali partecipanti all'impresa.

Nella *Roadmap* del 2018 si puntava ad ottenere i primi progetti concettuali di DEMO intorno al 2027 e alla decisione di costruire DEMO qualche anno dopo l'operazione in D-T ad alte prestazioni di ITER, assumendo che fossero a quel punto disponibili anche i risultati sui test, sempre in ITER, dei moduli di blanket (TBM) da utilizzare in DEMO.

Alla luce degli ormai certi ritardi di ITER, soprattutto in relazione ai test sui TBM, si rende necessaria una revisione della strategia europea rafforzando il coinvolgimento delle industrie in partenariati pubblico-privati (PPP) per accelerare lo sviluppo di soluzioni tecnologiche e ingegneristiche innovative, per esempio per il blanket, i materiali, e i superconduttori ad alta temperatura critica. In questa ottica, l'Euratom Research and Training Programme – Euratom Work Programme 2023-2025 for nuclear research and training nel 2024 ha lanciato una Coordination and Support Action (CSA) per la preparazione di una European Fusion Industry Platform come strumento per l'attuazione di Public-Private Partnership sulla fusione¹¹.

Viene anche sottolineata l'importanza di elaborare un quadro normativo comune europeo per l'autorizzazione delle centrali a fusione, e di iniziare prima possibile con la selezione del sito per DEMO, che consentirebbe di sviluppare l'interazione con il legislatore e procedere in parallelo con la concessione delle licenze in parallelo, evitando così ulteriori ritardi.

Alle iniziative europee, si aggiunge l'iniziativa nazionale della Germania che, nel maggio 2023, con l'aiuto di un team di esperti, ha prodotto un Memorandum che descrive il potenziale tedesco in ambito scientifico ed industriale per la fusione e definisce le attività di ricerca necessarie verso un futuro reattore. A partire da ciò, è stato pubblicato un *position paper* sulla fusione in Germania, come base per un nuovo programma di finanziamenti nei prossimi 5 anni¹².

3-2.4 I programmi sulla fusione magnetica al di fuori dell'Unione Europea

Programmi nazionali rilevanti sulla fusione sono condotti da alcuni decenni in tutti i Paesi partner di ITER. Qui di seguito riportiamo un estratto degli sviluppi più importanti che si sono avuti recentemente in alcuni di questi Paesi nei quali è in atto un'accelerazione rispetto ai programmi precedenti.

Il Regno Unito è il primo Paese ad aver pubblicato, nel 2021, una strategia nazionale sull'energia da fusione con gli obiettivi dichiarati di dimostrare la fattibilità industriale della fusione costruendo un prototipo di centrale elettrica a fusione che fornisca energia netta entro il 2040, e di costruire un'industria della fusione leader a livello mondiale che copra le diverse tecnologie e sia in grado di esportarle nei decenni successivi. La strategia britannica prevede anche lo sviluppo del contesto normativo e l'approvazione di una legislazione, diversa da quella per il nucleare da fissione, che garantisca la sicurezza della

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

popolazione, incoraggiando e consentendo al tempo stesso l'innovazione e gli investimenti. L'elemento di punta del programma è il reattore **STEP (Spherical Tokamak for Energy Production)**¹³, al momento in fase di progettazione, per la cui realizzazione è stata fondata la società *UK Industrial Fusion Solutions (UKIFS)*¹⁴ che sosterrà il rischio complessivo dell'impresa. Nell'approccio prescelto, UKIFS stipulerà contratti con due partner industriali (uno per l'ingegneria di progetto e l'altro per la costruzione), oltre che con UKAEA (*United Kingdom Atomic Energy Authority*) come partner scientifico, stabilendo rapporti di collaborazione a lungo termine in modo che i partner siano allineati dal punto di vista strategico, oltre a fornire capacità progettuali e tecnologiche. Il sito di STEP è già stato prescelto a West Burton nel Nottinghamshire, presso il sito dismesso di una centrale a carbone. Per l'attuazione della propria strategia il governo inglese prevede stanziamenti previsti ammontano a 650 M£ fino al 2027, in aggiunta ai 700 M£ già stanziati per gli anni 2022 – 2025¹⁵. Per sostenere lo sviluppo dell'industria britannica sulla fusione, la UKAEA, oltre a continuare la sperimentazione sul tokamak MAST Upgrade, presso il suo Centro di Culham si è dotata di laboratori tecnologici all'avanguardia tra cui quelli per lo studio del danneggiamento dei materiali sottoposti a irraggiamento neutronico (*Material Research Facility*), lo sviluppo del ciclo del combustibile DT (H3AT), lo sviluppo di moduli di blanket (CHIMERA) e la robotica per ambienti ostili (RACE).

Nel marzo 2022 negli Stati Uniti la Casa Bianca, nel corso di un vertice sull'energia da fusione, ha annunciato il lancio di una "audace visione decennale" per la commercializzazione dell'energia da fusione, attraverso un programma dedicato alla formazione di partenariati pubblico-privato per lo sviluppo di un'industria competitiva dell'energia da fusione, finanziato per il 2022 con 50 M\$¹⁶. I finanziamenti forniti dal Congresso nel 2023 per la fusione magnetica attraverso il programma Science del DoE si sono assestati a 763 M\$, inferiori alle richieste dell'Amministrazione, ma circa il 3,7% in più rispetto all'anno precedente. Le richieste per il 2024 ammontano invece a 1010,5 M\$¹⁷. Attualmente, negli Stati Uniti i due maggiori esperimenti di fusione magnetica in operazione sono il tokamak *DIII-D presso la General Atomics* a San Diego, California, e il tokamak sferico *NSTX-U presso il Princeton Plasma Physics Laboratory (PPPL, Princeton, New Jersey)*. Per quanto riguarda la fusione inerziale, il finanziamento avviene attraverso il programma *National Nuclear Security Administration (NNSA)* ed è principalmente rivolto alle attività scientifiche in supporto al programma nucleare militare, ma include anche studi ed esperimenti per la produzione di energia tramite confinamento inerziale. Nel 2023 il finanziamento per NNSA ammontava a 630 M\$, le richieste per il 2024 sono pari a 601 M\$, oltre la metà dei quali per le operazioni della NIF (377 M\$)¹⁸.

Nell'ambito della cooperazione internazionale, sempre più i Governi stanno cercando una collaborazione sia dal punto di vista delle strategie nazionali, sia su azioni complementari volte allo sviluppo dell'energia da fusione, e infine anche sugli aspetti di regolamentazione. Ne sono un esempio: l'intervento a dicembre 2023 dell'inviato speciale presidenziale per il Clima degli Stati Uniti, John Kerry, che ha lanciato un piano di ingaggio internazionale per avanzare nell'ambito della fusione; la dichiarazione congiunta nel novembre 2023 del Dipartimento per la Sicurezza Energetica e il Net Zero del Regno Unito e il Dipartimento dell'Energia degli USA riguardante una partnership strategica per accelerare la dimostrazione e la commercializzazione dell'energia da fusione¹⁹; e, infine,

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

le raccomandazioni sulla regolamentazione del network intergovernativo “*Agile Nations*”²⁰, che ha visto la Gran Bretagna, il Canada e il Giappone prendere una posizione comune su come sviluppare un quadro normativo per gli impianti di energia da fusione.

Nell’Aprile 2023, il Giappone ha annunciato²¹ una strategia nazionale per l’industrializzazione dell’energia da fusione, evidenziando la necessità di una maggiore integrazione tra impegno pubblico-privato verso la commercializzazione della tecnologia. La strategia sottolinea inoltre l’importanza dell’energia da fusione come mezzo per aumentare la sicurezza energetica, affrontare la crisi climatica e fornire ai suoi primi sviluppatori e utilizzatori un vantaggio competitivo globale. A seguito della strategia, nell’ottobre 2023 il governo giapponese ha elargito i primi fondi per compagnie operanti nel settore della fusione.

La Cina ha iniziato la ricerca sulla fusione negli anni 1970 ed ha poi progredito rapidamente negli anni successivi con la realizzazione di alcuni impianti sperimentali e soprattutto dopo l’entrata nell’accordo ITER. La roadmap cinese per la fusione a confinamento magnetico ha i seguenti obiettivi a breve termine: 1) stabilire piattaforme avanzate per la ricerca sulla fisica del plasma nel *Experimental Advanced Superconducting Tokamak* (EAST), su cui si possono ottenere impulsi lunghi in operazioni ad alto confinamento, e nel tokamak HL-3 per studiare la fisica del plasma ad alte prestazioni e elevata potenza di riscaldamento esterno; 2) sviluppare tecnologie chiave per la costruzione del reattore sperimentale ITER e per la progettazione del **China Fusion Engineering Testing Reactor (CFETR)**²², un impianto in grado di produrre energia elettrica producendo in modo autosufficiente il trizio necessario; 3) progettare CFETR e completarne la costruzione negli anni 2030. La *roadmap* cinese prevede anche la costruzione di un esperimento intermedio in preparazione di CFETR, chiamato *Burning-plasma Experimental Superconducting Tokamak* (BEST), la cui costruzione dovrebbe essere completata entro il 2030.

Per la realizzazione di CFETR la Cina ha avviato un vasto programma di ricerca e sviluppo nel nuovo Centro per l’Innovazione *Comprehensive Research Facility for Fusion Technology* (CRAFT)²³, situato in Hefei. Il Centro ospita numerosi impianti per lo sviluppo di tecnologie avanzate, dai magneti superconduttori innovativi ad alte prestazioni, alle sorgenti di onde a radiofrequenza ad alta potenza, ai sistemi stazionari di iniezione di fasci di neutroni, alla manipolazione/movimentazione da remoto, al divertore, ai materiali avanzati per la fusione e ai mantelli triziogeni, oltre che a EAST. Tutte queste attività vengono finanziate con fondi governativi. Il programma prevede inoltre la realizzazione di infrastrutture di prova di componenti di CFETR in ambiente non nucleare, quali l’impianto di collaudo dei magneti superconduttori, la camera a vuoto per le simulazioni di installazione e rimozione remota di componenti, l’impianto per il ciclo del trizio e una sorgente di neutroni a 14 MeV per i test sul mantello triziogeno.

Infine, a dicembre 2023, la Cina ha annunciato la creazione di nuova entità (**China Fusion Energy Inc**)²⁴ per mettere a fattor comune le risorse provenienti da tutto il paese per sviluppare l’energia da fusione. Insieme all’azienda, è stato istituito un consorzio di innovazione collaborativa composto da 25 entità e guidato dalla *China National Nuclear Corp* (CNNC) per lavorare insieme per superare alcune sfide chiave nel campo della fusione; infine è stato istituito un fondo per l’innovazione per garantire i finanziamenti necessari.

Nei programmi sopra citati, ma non ancora in Europa, si sta considerando da alcuni anni la tecnologia HTS (High Temperature Superconductors) per la realizzazione di tokamak più compatti e di dimensioni ridotte, caratterizzati da campi magnetici elevatissimi. Tecnologia che potrebbe rivelarsi molto vantaggiosa per l'economicità dell'energia da fusione e che può rappresentare un importante vantaggio competitivo nella realizzazione di centrali per la produzione di energia.

3-2.5 Recenti sviluppi nella fusione inerziale – Il panorama internazionale

A dicembre 2022 per la prima volta è stato ottenuto in laboratorio un guadagno superiore a uno in una macchina a fusione a confinamento inerziale mediante approccio indiretto presso la **National Ignition Facility (NIF, Livermore, CA, Stati Uniti)**²⁵. **Il risultato è stato successivamente confermato e superato con l'ottenimento di un guadagno pari a circa 1,5, ovvero è stata prodotta energia da fusione in quantità del 50% superiore rispetto all'energia del laser iniettata nel Hohlraum**⁸.

La NIF, costituita da 192 laser con impulsi della durata del nanosecondo per un totale di 2 MJ di energia laser su bersaglio e da un laser ad impulso di picosecondi per scopi diagnostici, è il più potente impianto inerziale operativo al mondo e impiega uno schema di irraggiamento indiretto. Dopo i risultati ottenuti a partire dal 2021, si prevede di incrementare del 50% l'energia attualmente disponibile dei laser della NIF in modo tale da ottenere, secondo le previsioni, un guadagno G pari a 10.

La tecnologia laser della NIF, in cui ciascuno dei 192 fasci laser ha circa 20 kJ di energia alla lunghezza d'onda fondamentale nell'infrarosso, è datata di oltre 10 anni e richiede diverse ore tra un impulso laser e il successivo, mentre per un futuro reattore a fusione inerziale i laser dovranno avere frequenza di ripetizione di 10 impulsi al secondo²⁶. Su questo aspetto si è avuto un notevole progresso negli ultimi anni con lo sviluppo di laser con energie di 1,5 kJ alla fondamentale nell'infrarosso e frequenza di ripetizione di un impulso al minuto²⁷, e laser con 100 J e frequenza di ripetizione di 10 impulsi al secondo²⁸.

Sempre negli Stati Uniti è operativo l'impianto **OMEGA**²⁹, costituito da 60 fasci laser al nanosecondo e due al picosecondo, per un totale di circa 40 kJ di energia, che è al momento l'impianto a maggiore energia per studi di irraggiamento diretto, anche del tipo *shock ignition*.

In Francia è già operativo il **Laser MégaJoule (LMJ)**, che una volta completato avrà 176 fasci laser (al momento ne sono disponibili 80) con impulsi al nanosecondo, per un totale di 1,3 MJ di energia su bersaglio. Anch'esso, come la NIF, è progettato per lavorare in approccio indiretto, ed è il secondo impianto inerziale al mondo come prestazioni. Nel 2023 è stato definito il consorzio **Tarantis** costituito da CNRS, CEA e Thales con finanziamenti pubblici e privati per uno studio preparatorio per definire un nuovo impianto laser di dimensioni simili all'americano OMEGA e operante anch'esso in irraggiamento diretto. A questi dovrebbero seguire finanziamenti significativi, di cui una quota importante da parte di aziende private.

⁸ E' opportuno ricordare che questo guadagno si riferisce solo al bilancio tra l'energia di fusione e l'energia del laser e non tiene conto dell'energia impiegata per il funzionamento dell'intero impianto, incluso il laser.

In Inghilterra è operativo l'impianto ORION, costituito da 12 fasci laser di cui 10 al nanosecondo e 2 al picosecondo, per un totale di 6 kJ di energia su bersaglio. L'impianto Vulcan, al momento in fase di upgrade con il progetto Vulcan 20-20 finanziato con 85 milioni di sterline, avrà un totale di circa 10 kJ di energia laser. È stato inoltre creato il *UK Inertial Fusion Consortium*, che comprende 90 membri dei principali centri britannici attivi nel campo, che ha prodotto una roadmap per la fusione inerziale³⁰. È stato inoltre definito il programma *Laser Inertial Fusion Technology for Energy* che riguarda attività di fabbricazione dei target e iniezione, laser, fisica e sviluppo codici, ed infine la progettazione di un impianto per alti guadagni, in vista di prossimi finanziamenti nazionali.

Il progetto **ELI (Extreme Light Infrastructure)**, incluso nella roadmap ESFRI dal 2006, prevede la realizzazione di un'infrastruttura distribuita basata su tre siti situati nell'Europa orientale. La fase preparatoria ELI è stata finanziata dall'Unione Europea con il supporto di 40 istituti di ricerca provenienti da 13 paesi, tra cui l'Italia. In Repubblica Ceca, Ungheria e Romania sono state costruite le tre sedi dell'infrastruttura laser di ricerca europea ELI-ERIC: ELI-BEAMLINES (Repubblica Ceca), ELI-ALPS (Ungheria) e ELI-NP (Romania), che comprendono i laser più potenti al mondo, tra cui il primo laser al kJ con frequenza di ripetizione di 1 impulso al minuto.

In Europa la fusione inerziale ha avuto negli ultimi anni solo un limitato sostegno economico da fondi comunitari, sostanzialmente da progetti *Enabling Research* di EUROfusion, con una media di circa 500 k€ annui in totale.

I ricercatori dei maggiori istituti europei partecipano all'iniziativa **HiPER+**³¹ per l'analisi delle prospettive dalla fusione inerziale, che recentemente ha pubblicato una *roadmap* per l'inerziale in Europa³². HiPER+ trae origine dal precedente progetto Europeo ESFRI denominato HiPER (2007-2013), e prevede varie fasi di sviluppo fino alla realizzazione di un impianto dimostrativo per la produzione di energia, sostenuto dallo sviluppo delle necessarie tecnologie laser, tecnologie nucleari e competenze in ambito modellistico.

In Russia è in fase di costruzione il laser UFL-2M con caratteristiche della taglia della NIF e del LMJ, che dovrebbe fornire circa 3 MJ di energia su bersaglio con impulsi al nanosecondo, maggiore quindi dei due impianti citati, almeno prima dell'upgrade previsto per la NIF; il completamento della costruzione è previsto nei prossimi anni. Si segnalano infine l'impianto laser GEKKO XII in Giappone (energia totale 10 kJ) per irraggiamento di tipo diretto anche mediante schemi di *fast ignition*, e in Cina i laser ShenGuang-III (180 kJ complessivi) impiegato per irraggiamento indiretto e ShenGuang-II -UP (40 kJ) impiegato per irraggiamento diretto *Shock Ignition* e *Fast Ignition*.

3-2.6 Il crescente impegno dei privati

Il contesto dell'energia da fusione ha visto negli ultimi anni un sostanziale cambiamento con considerevoli investimenti in un numero crescente di società nel settore privato impegnate in tutto il mondo nella fusione sia magnetica sia inerziale, o con approcci misti, spesso con tempistiche ambiziose e un'ampia gamma di approcci. L'industria della fusione ha ad oggi attirato un totale di oltre 6200 M\$ di investimenti, di cui circa 3000 M\$ solo negli ultimi tre anni. Lo scorso anno sono state fondate 13 nuove società portando il numero delle imprese private operanti nel settore a 43 (il numero è in

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

continua crescita). Ne è nata anche un'associazione mondiale delle imprese private chiamata **FIA-Fusion Industry Association**³³ che annualmente redige un rapporto sugli sviluppi delle imprese private del settore, l'ultimo è uscito nell'estate 2023³⁴.

Oltre agli investimenti privati, è anche degno di nota l'aumento dei partenariati pubblico-privati, con 18 aziende coinvolte per un valore di diverse decine di M\$.

Gli Stati Uniti continuano a guidare la corsa con 25 società attive nel campo della fusione (tra cui molte delle più grandi), ma il settore sta diventando geograficamente sempre più diversificato, con 12 Paesi che ora mettono in campo almeno una società impegnata nel settore. Alcune di queste società sostengono che forniranno energia da fusione alla rete elettrica entro il 2035 o addirittura entro il 2030, pur ammettendo che esistono ancora sfide scientifiche e ingegneristiche importanti. Quasi tutte ritengono che anche i finanziamenti siano una sfida, poiché saranno ancora necessarie molte più risorse di quelle già ottenute per gli sviluppi tecnologici ulteriori.

Nel seguito sono descritte brevemente, tra le tante, le *start-up* che al momento hanno ottenuto finanziamenti privati superiori a 200 M\$.

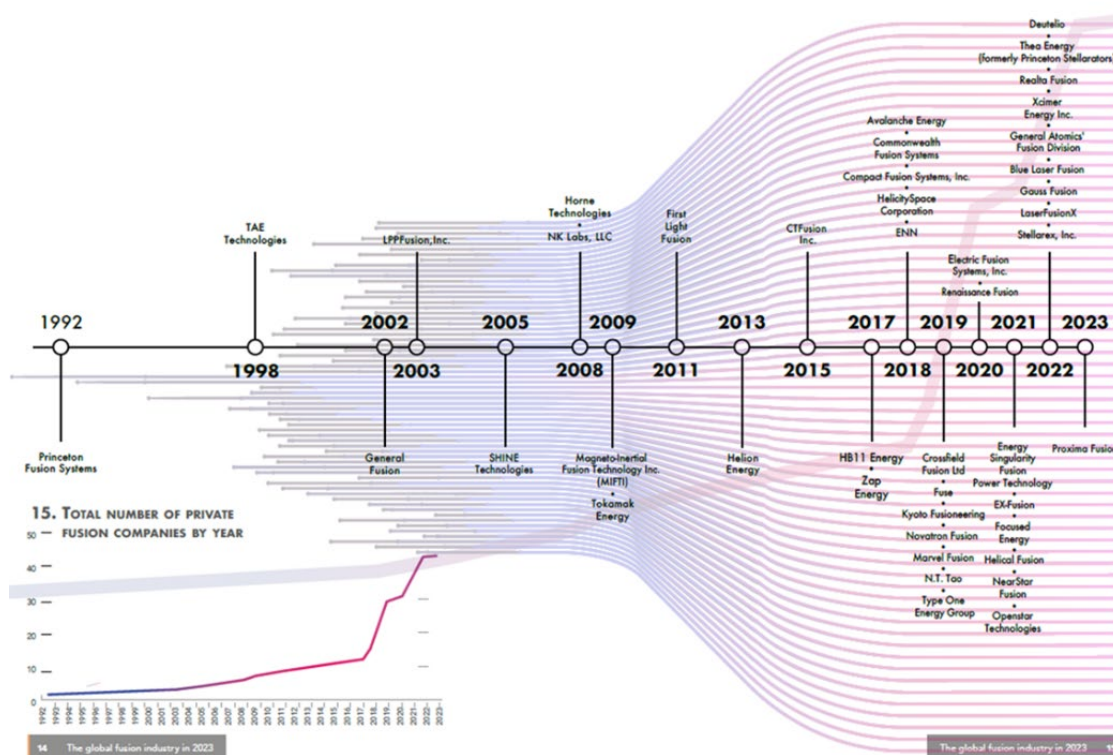


Figura 4. Crescita del numero delle industrie private sulla fusione e dei relativi finanziamenti nel corso degli anni.

La *start-up* privata con maggiori investimenti ricevuti (oltre 2000 M\$) è **Commonwealth Fusion Systems (CFS)**, uno *spin-out* del **Massachusetts Institute of Technology (MIT)**, fondata nel 2018, di cui ENI è tra gli investitori strategici. L'azienda sta attualmente costruendo un impianto dimostratore denominato SPARC, che potrebbe diventare il primo sistema di confinamento magnetico al mondo a dimostrare il guadagno energetico nella fusione a confinamento magnetico. **Nei piani di CFS, SPARC aprirà la strada ad ARC,**

che la società prevede come la prima centrale elettrica a fusione commerciale in grado di immettere elettricità nella rete elettrica. Si prevede che ARC diventi operativo all'inizio degli anni '30, cioè su una scala temporale tale da avere un impatto sul cambiamento climatico in atto. Un primo grande avanzamento tecnologico è già stato raggiunto dalla *start-up* nel settembre del 2021, con la realizzazione e validazione di magneti superconduttori innovativi, con tecnologia con HTS (*High Temperature Superconductors*), utilizzati per il confinamento del plasma da fusione e che potrebbe contribuire significativamente alla realizzazione di impianti più compatti ed efficienti. Tale vantaggio tecnologico, se non tempestivamente colmato, mette a rischio la competitività europea in questo settore.

Una concorrente è la *TAE Technologies*, fondata già nel 1998 e con base in California, che impiega oltre 600 dipendenti e negli anni recenti ha raccolto oltre 1200 M\$³⁴ di capitali privati. Nel febbraio 2023 TAE ha annunciato assieme con l'istituto giapponese *National Institute for Fusion Science* (NIFS) le prime misure della reazione di fusione p-¹¹B in un plasma confinato magneticamente³⁵, sfruttando la configurazione di campo del tipo *Field Reversed Configuration* (FRC). In questa configurazione la forma del plasma è quella di un cilindro aperto alle due estremità e permette, in linea di principio, la fuoriuscita dalla zona di reazione delle particelle cariche altamente energetiche prodotte nella reazione di fusione. L'energia cinetica di queste particelle rappresenta la parte più consistente dell'energia che viene ottenuta dalla reazione di fusione. Il fatto di poterle estrarre dalla zona di reazione genera la possibilità di convertire direttamente la loro energia in energia elettrica. Per realizzare questa configurazione sono state provate negli anni diverse strategie sperimentali. Secondo l'approccio adottato da TAE, due plasmi, già in configurazione FRC, vengono creati in due camere poste simmetricamente rispetto alla camera centrale e, in tempi di decine di microsecondi, vengono traslati, agendo opportunamente su campi magnetici esterni, verso la camera centrale. Qui i due plasmi si incontrano ad elevata velocità, centinaia di km/s, e si fondono in un unico plasma FRC effettuando il così detto "*merging*".

Un'altra concorrente è *Helion Energy*, una società con lo slogan "*First to Fusion*", fondata nel 2013 con base nello Stato di Washington che ha raccolto 577 M\$³⁴ di capitali privati. *Helion Energy* utilizza lo stesso schema FRC sopra descritto, ma con la reazione D-³He. Nel maggio di quest'anno, la società con sede in California ha firmato un accordo con Microsoft per vendere al colosso del software l'elettricità generata dalla fusione nucleare entro cinque anni, ovvero entro il 2028.

Sempre negli Stati Uniti, è stata fondata nel 2005 la società *SHINE*, con sede in Wisconsin, la quale ha già raccolto 700 M\$³⁴ di capitali privati. *SHINE* sta commercializzando e industrializzando applicazioni a breve termine nell'ambito della fusione, come l'ispezione di componenti industriali attraverso l'imaging di neutroni e la produzione di isotopi medici.

In Canada dal 2002 è presente a Vancouver la società *General Fusion* che ha attratto finanziamenti di capitali privati pari a 300 M\$³⁴ e che sta perseguendo un percorso rapido per commercializzare l'energia da fusione entro il 2030 utilizzando la sua tecnologia proprietaria *Magnetized Target Fusion* (MTF).

In Europa sono presenti attualmente una decina di start-up: Gauss Fusion, Marvel Fusion, Focused Energy e Proxima Fusion in Germania, Renaissance Fusion in Francia, Deuterio in Italia, oltre a Tokamak Energy, First Light Fusion e Oxford Sigma in Gran Bretagna³⁶. Gauss Fusion, fondata nel 2022 da aziende industriali private di Francia, Germania, Italia e Spagna, riunisce una compagine con grandi competenze scientifiche all'avanguardia e di esperienza industriale nell'energia di fusione unica in Europa. Il consorzio si prefigge di realizzare l'energia da fusione sostenibile e indipendente in Europa, con prezzi stabili ed elevata disponibilità. Gauss Fusion combina le proprie competenze imprenditoriali con l'eccellenza dei principali istituti di ricerca, quali il CERN, il Max Planck Institute for Plasma Physics (IPP) e il Karlsruhe Institute of Technology (KIT), l'ENEA in Italia e l'Università di Tecnologia di Eindhoven.

Tra altre iniziative a livello mondiale, si segnalano anche start-up nate nell'ambito della catena del valore della fornitura di futuri impianti a fusione. Ad esempio, in Giappone è stato fondato nel 2019 *Kyoto Fusioneering Ltd*, uno *spin-off* dell'Università di Kyoto con sede anche in Gran Bretagna, che ha l'obiettivo di sviluppare sistemi avanzati per il riscaldamento del plasma con onde a radiofrequenza (girotroni), per il ciclo del combustibile e per quello termico. Inoltre, l'azienda possiede capacità impiantistiche per l'integrazione complessiva di queste tecnologie in una centrale elettrica funzionante.

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

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

3-2.7 Iniziative per lo sviluppo del quadro normativo per l'energia da fusione

I recenti sviluppi nella tecnologia in ambito pubblico e privato hanno evidenziato la necessità di un processo autorizzativo e di un quadro normativo adeguati alla protezione dei lavoratori, della popolazione e dell'ambiente, ed armonizzati a livello internazionale per una diffusione rapida e sostenibile dei futuri impianti a fusione per l'intero ciclo di vita, dal licensing alla gestione dei materiali radioattivi prodotti. L'attuale quadro normativo internazionale è caratterizzato da eterogeneità e peculiarità specifiche per ogni singolo Paese. Le norme dedicate alla regolamentazione di impianti soggetti a rischio radiologico sono state concepite senza considerare lo sfruttamento sostanziale di installazioni di potenza che potessero utilizzare la fusione come risorsa primaria per produrre energia. In forza di tale contesto, il processo autorizzativo degli attuali impianti di ricerca a fusione è stato finora caratterizzato da due principali aspetti. In primo luogo, la valutazione dell'impatto in termini di sicurezza della popolazione e dell'ambiente è stata improntata a linee guida, quadro normativo e approccio metodologico definito per i reattori nucleari a fissione. In secondo luogo, l'inquadramento normativo è dipeso di

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

volta in volta dallo specifico sito di installazione dell'impianto e dai livelli di rischio identificati per l'impianto sperimentale oggetto di autorizzazione.

A titolo esemplificativo, ITER ha ottenuto una licenza per la costruzione secondo l'ordinamento francese come *Installation Nucléaire de Base* in conseguenza dell'inventario di radionuclidi (ad es. un inventario di trizio superiore a 27 g). In linea con questo inquadramento, il dominio di operazione autorizzato è stato definito sulla base del controllo dei rischi associati all'impianto, principalmente correlati agli inventari radioattivi presenti nell'impianto stesso ed alle possibili modalità di loro mobilitazione e rilascio in ambiente. L'autorizzazione dell'impianto ha quindi richiesto la redazione di un corpo di analisi di sicurezza volte a dimostrare deterministicamente che la massima dose derivante delle più severe combinazioni di eventi incidentali concepibili, comprese quelle aventi probabilità di verificarsi tale da richiederne la valutazione, risulti comunque al di sotto del valore raccomandato per l'evacuazione della popolazione (dose all'individuo rappresentativo entro una settimana dall'evento <50 mSv³⁷).

Un altro importante aspetto considerato in fase autorizzativa è relativo all'impatto ambientale di lungo termine causato dagli eventuali materiali radioattivi prodotti durante il ciclo di vita dell'impianto. Come già osservato, mentre la reazione di fusione D-T non dà luogo a produzione di elementi radioattivi, i neutroni ad alta energia in essa prodotti causano l'attivazione dei materiali strutturali per i quali la produzione di alcuni radionuclidi a lunga emivita dovuti a impurità potrebbero contribuire a innalzare la classificazione da *Low Level Waste* (LLW) a *Intermediate Level Waste* (ILW)^{h 38}. Mentre rimane fondamentale lo sviluppo di materiali a bassa attivazione e delle procedure di trattamento per il riciclo ed il riutilizzo dei materiali irraggiati, è stata identificata come necessaria l'armonizzazione dei criteri di classificazione per i depositi nazionali e l'integrazione dei criteri di allontanamento dal regime autorizzativo (*clearance*) per specifici radionuclidi³⁹.

Partendo dalle specificità della tecnologia degli impianti a fusione (l'assenza di reazioni nucleari con possibile evoluzione incontrollata, l'assenza di materiali soggetti a trattato di non proliferazione, l'assenza di radionuclidi a lunga emivita prodotti dalla reazione di fusione, l'utilizzo di tecnologie specifiche quali criogenia, vuoto, magneti superconduttivi), si evidenzia da più parti come necessario un inquadramento normativo commisurato agli specifici livelli di rischio. L'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA), il cui obiettivo è quello di lavorare con gli Stati Membri per promuovere l'uso pacifico, sicuro e sostenibile dell'energia nucleare, ha avviato uno studio interdisciplinare all'interno del progetto *International Project on Innovative Nuclear Reactors* (INPRO) riguardo agli aspetti legali ed istituzionali per l'impiego di impianti a fusione [INPRO]⁴⁰. L'obiettivo è quello di supportare la comunità della fusione nell'accelerare lo sviluppo e l'implementazione di impianti a fusione e di sistemi ibridi fissione-fusione nei prossimi decenni. In ambito IAEA è stata recentemente promossa una prima riunione internazionale dal titolo "*IAEA Technical meeting on fusion design safety and regulation*" (ottobre 2023) in cui, sull'argomento, si sono confrontati 100 partecipanti da 23 diversi Paesi. IAEA ha pianificato di redigere due primi documenti tecnici sulla

^h Questa classificazione è definita dalla IAEA senza specificazione dei relativi limiti, ed è declinata a livello nazionale ai fini della gestione dei rifiuti in funzione del criterio di smaltimento.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

“*Safety and Regulation*” e nel corso del decennio prevede lo sviluppo di specifici documenti sugli standard di sicurezza da applicare ad impianti di fusione.⁴¹

Nel panorama internazionale diversi Paesi si stanno muovendo per adeguare il proprio quadro normativo alla futura realizzazione e esercizio di reattori a fusione. Il governo del Regno Unito ha provveduto a condurre un’attenta valutazione di sicurezza per stabilire se gli impianti a fusione debbano essere regolamentati come una sorgente di radiazione da parte dello *Health and Safety Executive* (HSE), oppure come un’installazione nucleare dall’*Office of Nuclear Regulation* (ONR), regolamentazione dei reattori a fusione. Le conclusioni dell’analisi hanno indotto il governo britannico a dichiarare come più appropriato regolamentare i futuri impianti a fusione come sorgenti di radiazione⁴².

Nel gennaio 2023 la *Nuclear Regulatory Commission* (NRC) statunitense ha fornito tre opzioni per la regolamentazione dei reattori a fusione⁴³:

- Opzione 1: “*Regulate fusion energy systems under a utilization facility framework*”. Questa opzione avrebbe come conseguenza una regolamentazione dei reattori a fusione con il medesimo quadro normativo dei reattori a fissione.
- Opzione 2: “*Regulate fusion energy systems under a byproduct material framework*”, che regolamenterebbe i sistemi a fusione sulla base dell’inventario radioattivo usato o generato, allineando questa tipologia di impianti agli acceleratori di particelle a livello normativo.
- Opzione 3: “*Regulate fusion energy systems under a hybrid framework using either a byproduct material or utilization facility approach based on potential hazards*”, che applicherebbe un quadro normativo ibrido che distingue quale approccio usare sulla base di criteri basati sui rischi potenziali di impianto.

Il 14 aprile 2023, l’NRC ha stabilito che gli impianti a fusione saranno regolamentati all’interno di un quadro normativo basato sui “*byproduct materials*”, e pertanto come sorgente di radiazioni e non come un impianto nucleare⁴⁴.

L’Unione Europea ha finanziato uno studio sull’applicabilità del quadro normativo esistente sulle installazioni nucleari agli impianti a fusione⁴⁵. Lo studio, evidenziando come al 2022 non esistesse un quadro dedicato per regolamentare una possibile installazione a fusione a confinamento magnetico con combustibile di DT, ha considerato necessario lo sviluppo di un quadro legale e normativo specifico per la fusione, dal momento che il rischio radiologico potenziale dei futuri impianti a fusione commerciali sarà più elevato rispetto agli attuali impianti di ricerca in costruzione, ma comunque inferiore rispetto agli impianti nucleari a fissione.

Nell’ambito del programma EURATOM è stato avviato il progetto HARMONISE [HARMONISE1⁴⁶, HARMONISE2⁴⁷] che ha tra i suoi obiettivi quelli di analizzare gli studi di sicurezza eseguiti per i sistemi innovativi a fissione e a fusione identificando i bisogni nel processo autorizzativo per le installazioni nucleari innovative e proporre un approccio basato sull’armonizzazione e standardizzazione di metodologie, codici e standard, verifica e validazione, *licensing* di installazioni a fissione e fusione.

C3-3 Il panorama italiano

3-3.1 Il quadro di riferimento nazionale

L'Italia ha una lunga tradizione di ricerca per lo sviluppo dell'energia da fusione. E' stato il primo Paese, insieme alla Francia, ad aderire al programma europeo sulla fusione ed ha sviluppato nel tempo competenze su tutti gli aspetti scientifici, tecnologici e industriali e guadagnato una riconosciuta esperienza nella progettazione, realizzazione e utilizzo di sistemi e impianti per fusione. Il contributo dell'Italia al programma di ricerca europeo sulla fusione è tra i più rilevanti, secondo solo a quello tedesco. Il numero totale delle persone impiegate mediamente è di circa 650 per anno, in maggioranza fisici o ingegneri. Inoltre, un numero considerevole di fisici e ingegneri italiani, quantificabile nell'ordine di molte decine, sono occupati presso le organizzazioni internazionali (ITER, F4E, EUROfusion).

Le attività in Italia sono iniziate nel 1958 presso le Università di Roma e a Frascati (con il sostegno del CNEN), e a Milano e Padova (in ambito universitario coinvolgendo il CNR). Nel 1960, il CNEN stipulò un Contratto di Associazione con l'Euratom, seguito nel 1970 dal CNR, ed avviò la costruzione del laboratorio di Frascati, divenuto sede di numerosi e importanti esperimenti. In Italia le attività sulla fusione, così come negli altri Paesi europei, sono state inquadrare nel Contratto di Associazione con Euratom fino al 2013 incluso. L'Italia era rappresentata dall'ENEA in qualità di coordinatore nazionale (ruolo formalmente conferitole con delibera CIPE del 26 luglio 1990).

Fino al 2013, l'Associazione italiana per la fusione era composta da tre unità di ricerca: l'ENEA (beneficiario principale), il Consorzio RFX di Padova e l'Istituto di fisica del plasma (IFP) del CNR di Milano. A queste erano associati il Consorzio CREATE, Politecnici di Torino e Milano, Università di Catania, Roma Tor Vergata, Roma Tre, Firenze e Milano Bicocca.

I principali Centri di ricerca italiani sulla fusione sono:

– il **Centro di ricerca ENEA di Frascati**, fondato nel 1958. I primi anni furono dedicati alla sperimentazione su aspetti fondamentali di fisica del plasma di interesse sia per la fusione magnetica sia per la fusione inerziale, sviluppando anche le tecniche diagnostiche necessarie per la conduzione degli esperimenti e la comprensione teorica. Tra il 1971 e il 1978 fu realizzata la costruzione di un primo tokamak ad alto campo magnetico, il **Frascati Tokamak (FT)**, seguito nel 1989 da un secondo tokamak, sempre ad alto campo magnetico, il **Frascati Tokamak Upgrade (FTU)**, con la collaborazione del gruppo CNR di Milano. FTU è stato chiuso nel 2020 per consentire l'assemblaggio del nuovo esperimento **Divertor Tokamak Test (DTT)** di cui si parlerà nel seguito. Di particolare rilievo le attività di fisica teorica e di simulazione numerica relative alla propagazione e l'assorbimento di onde a radio-frequenza e all'interazione di particelle energetiche con plasmi in condizioni *reactor relevant*. Sempre a Frascati, negli stessi anni 1980 venivano realizzati il **Laser ABC**, il più grande impianto laser italiano, dedicato a studi di fusione inerziale e interazione-laser materia, e il **Frascati Neutron Generator (FNG)**, una sorgente di neutroni con energia pari a quella dei neutroni prodotti nella fusione, ancora oggi l'unica in Europa e tra le poche al mondo disponibili per lo studio dell'interazione dei neutroni con i materiali dei componenti interni al reattore. Nel tempo sono cresciute numerose competenze in

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

ambito tecnologico, come la superconduttività, la neutronica e sicurezza, le tecnologie dei materiali per componenti esposti ad alto flusso termico (divertore, prima parete), le diagnostiche e la criogenia che, insieme alla capacità di progettazione e integrazione di sistema, costituiscono oggi vere eccellenze a livello internazionale.

– il **Centro di ricerca ENEA del Brasimone** accoglie le attività ENEA nei campi a) della progettazione, sviluppo e qualifica delle tecnologie per il mantello triziogeno dei reattori a fusione, in particolare del *concept* basato sull'uso di metallo liquido (lega eutettica litio-piombo), con elio o acqua come fluidi refrigeranti, e b) dello sviluppo di materiali innovativi funzionali e strutturali migliorati rispetto agli standard di riferimento per la resistenza all'irraggiamento, e per la conservazione delle proprietà meccaniche ad alta temperatura e per la compatibilità coi fluidi refrigeranti. Il Centro è dotato di un ricco parco di impianti sperimentali, sezioni di prova, prototipi e apparecchi per misure e sperimentazioni su impianti termo fluidodinamici, ad acqua, ad elio e a metalli liquidi, per lo studio delle caratteristiche funzionali e di sicurezza e la qualifica di mantelli in condizioni operative. Tra i tanti, sono da menzionare gli impianti **HE-FUS3** per la qualifica termomeccanica e termo-fluidodinamica di sistemi e componenti del reattore refrigerati a elio, **LIFUS5** per lo studio dei fenomeni connessi all'interazione metallo liquido/acqua, e **TRIEX** che consente di svolgere ricerche sull'efficienza di diversi sistemi di estrazione di idrogeno e/o deuterio dalla lega litio-piombo in un ampio intervallo di condizioni operative.

– il **CNR, principalmente con la sede di Milano dell'Istituto di Scienza e Tecnologia dei Plasmi (ISTP)**, ha una lunga tradizione iniziata negli anni '60 sulla fusione a confinamento magnetico e competenze su numerosi aspetti teorici, sperimentali e tecnologici. ISTP (prima IFP) ha lavorato alla progettazione del sistema di riscaldamento tramite iniezione di potenza a 140 GHz alla frequenza di ciclotrone elettronica (ECRH) in FTU in collaborazione con ENEA e ha partecipato alla sperimentazione fino al 2020, cogestendo l'impianto ECRH. Le competenze scientifiche e tecnologiche maturate sono state trasferite nel progetto per l'EC Upper Launcher di ITER, quindi a DEMO e ora a DTT. ISTP è attivo nel campo delle diagnostiche a radiofrequenza, nucleari e gamma che ha progettato e operato a JET e in diversi tokamak. A Milano opera la macchina lineare **GyM** per studi di interazione plasma-materiali. Diversi altri istituti CNR contribuiscono con competenze nel campo delle diagnostiche, dei materiali, dei sensori, della superconduttività. Presso l'Istituto Nazionale di Ottica del CNR (INO-Pisa), è attivo dal 1985 un gruppo di ricerca sulla fusione inerziale per lo studio dell'interazione laser-plasma e dei laser per la fusione. Il programma sperimentale attuale si sviluppa presso le *facility* europee e internazionali e presso il Laboratorio di Irraggiamento con Laser Intensi (ILIL). Il gruppo è tra i promotori di HiPER+, che mira a coordinare le attività europee per lo sviluppo dell'energia da fusione inerziale e la realizzazione di un'infrastruttura di grande scala a scopo dimostrativo.

– il **Consorzio RFX di Padova**, con sede presso l'Area di ricerca del CNR di Padova, è stato costituito nel 1996 da CNR, ENEA, Università di Padova e Acciaierie Venete S.p.A, a cui si è aggiunto INFN nel primo decennio degli anni 2000. Esso eredita le attività di ricerca sui plasmi e la fusione iniziati nel 1959 e ha visto realizzare i primi due esperimenti toroidali **Eta Beta 1** (1974-78) ed **Eta Beta 2** (1979-1989) di confinamento del plasma nella

configurazione *Reversed Field Pinch* (RFP), alternativa al tokamak. Nei primi anni '80, il CNR, l'Università di Padova e ENEA proposero al Governo italiano il finanziamento, con il contributo prioritario da parte dell'Unione Europea, della macchina toroidale **RFX (*Reversed Field eXperiment*)**, la più grande al mondo nel suo genere. La costruzione di RFX fu avviata nel 1984 e la prima fase operativa è iniziata nel 1991. Attualmente RFX è nella fase di upgrade alla terza versione di macchina denominata **RFX-mod2ⁱ**.

Il Consorzio RFX, con specifico accordo con la **ITER Organization** e il supporto governativo, è impegnato nello sviluppo degli Iniettori di Neutri per il riscaldamento del Plasma di ITER nella **NBTF-Neutral Beam Test Facility** realizzata nell'Area di Ricerca del CNR che ospita due esperimenti **SPIDER** e **MITICA**.

– il **Consorzio CREATE – (Consorzio di Ricerca per l'Energia, l'Automazione e le Tecnologie dell'Elettromagnetismo)** è stato costituito nel 1992 dall'Università di Reggio Calabria e dalla società ABB Ricerca S.p.A. L'attuale composizione societaria è costituita da sei Università pubbliche (Università della Basilicata, della Campania Luigi Vanvitelli, di Cassino e del Lazio Meridionale, di Napoli Federico II, di Napoli Parthenope e di Trieste) e dal socio industriale Ansaldo Nucleare. Il CREATE ha ereditato ed allargato il contributo dell'Università di Napoli fornito alla ricerca sulla fusione fin dagli anni 70, collaborando sia agli studi concettuali sui reattori a fusione sia alla fase di progettuale del JET, per proseguire negli anni 80 nelle attività progettuali post-JET (Next European Torus e INTOR), sfociate poi negli anni 90 in ITER. Il CREATE ha partecipato e partecipa alle principali iniziative progettuali per dispositivi di interesse fusionistico (ad es. ITER e DTT), oltre a fornire supporto all'operazione di macchine sperimentali. Le principali competenze scientifiche riguardano la modellistica elettromagnetica del plasma in presenza di strutture metalliche in geometria 3D, il controllo della posizione e dell'equilibrio del plasma nella camera da vuoto, la progettazione meccanica dei principali componenti del tokamak (camera da vuoto, divertore e blanket) e la manutenzione remota, anche con l'ausilio della realtà virtuale.

– **La Società DTT S.c.a.r.l** è stata costituita nel 2019 da ENEA e Consorzio CREATE, cui si sono successivamente aggiunti l'ENI e gli altri principali enti di ricerca italiani operanti nella fusione. La DTT srl ha come obiettivo la realizzazione del nuovo progetto nazionale Divertor Tokamak Test facility, descritto più avanti nel Cap. 1.3.4).

Inoltre:

– un ruolo molto importante per la crescita scientifica della rete italiana sulla fusione è quello svolto dalle numerose **Università pubbliche** (oltre a quelle che contribuiscono come soci dei Consorzi RFX e CREATE) che gradualmente hanno cominciato a collaborare anche attraverso l'ENEA. I campi di ricerca spaziano dalla fisica teorica e modellistica alle diagnostiche e il controllo dei plasmi, dallo sviluppo di tecnologie innovative quali la superconduttività, i materiali innovativi e metamateriali, i sistemi di alimentazione elettrica, la sicurezza e la manutenzione remotizzata, allo studio multifisico del comportamento nucleare, termomeccanico e termo-fluidodinamico dei mantelli

ⁱ RFX-mod2 ha ricevuto finanziamenti regionali del piano POR-FESR 2014-20 per lo sviluppo del Distretto produttivo della Meccanica dell'Alto Vicentino e del piano PNRR per le grandi Infrastrutture di Ricerca, di cui RFX-mod2 è classificato ad alta priorità nel PNIR 2012-27, attraverso un progetto NEFERTARI finanziato dal MUR assegnato al CNR e alle Università di Napoli "Federico II" e di Padova.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

triziogeni e dei componenti ad alto flusso termico nonché alla progettazione integrata di componenti e di impianti prototipali. Queste competenze da un lato sono estremamente importanti per la formazione di alto livello (laurea, laurea magistrale, dottorato) nel campo della fusione in generale e per la diffusione e promozione delle ricerche sulla fusione verso gli studenti e la formazione di giovani ricercatori da inserire nei vari gruppi di ricerca attivi nei centri di ricerca e università. Dall'altra, nei loro aspetti più specificatamente tecnologici, queste competenze costituiscono un ponte verso l'industria manifatturiera coinvolta nella realizzazione di componenti e impianti per grandi esperimenti prototipali avanzati.

– **ENI** ha recentemente avviato un programma di sviluppo dell'energia da fusione che si articola su più fronti. Per quanto riguarda il panorama italiano, ENI è partner del progetto DTT con il possesso di una quota societaria pari al 25%; il know-how industriale e le competenze di gestione e sviluppo di grandi progetti, combinate con l'eccellenza della ricerca scientifica di ENEA e degli altri partner, saranno la chiave di questa infrastruttura, basata primariamente su competenze e tecnologie italiane. ENI, inoltre, collabora da tempo con numerose università e centri di eccellenza sul territorio nazionale su diverse linee di ricerca e fornendo supporto a diversi dottorati su tematiche di interesse per la fusione, attivati tra l'altro dal Politecnico di Milano e di Torino, le Università di Padova, di Milano - Bicocca, di Napoli, di Bologna, di Roma "La Sapienza", di Catania, della Toscana; infine, con il CNR, ENI ha attivato un centro di ricerca congiunto che ha come obiettivo principale quello di sviluppare competenze locali nel campo della fusione. Dal 2018 ENI è azionista strategico della società Commonwealth Fusion Systems (CFS), con cui collabora attivamente e strategicamente per accelerare l'industrializzazione della fusione. L'impegno di ENI nell'energia da fusione prevede inoltre una collaborazione con il Plasma Science and Fusion Center del MIT e una collaborazione strategica con UKAEA su diversi temi, tra cui i materiali, il ciclo del combustibile, la diagnostica, la fisica e controllo del plasma e le tecnologie superconduttive.

- **Ricerca sul Sistema Energetico - RSE S.p.A.** è impegnata in attività di ricerca e sviluppo nell'ambito di numerosi progetti nazionali ed internazionali per l'innovazione e il miglioramento delle prestazioni del sistema elettrico, focalizzandosi su soluzioni applicabili al fine di migliorarne la resilienza, l'affidabilità, la sicurezza e la sostenibilità ambientale. Nel campo della fusione, RSE può offrire competenze teoriche e pratiche sui componenti elettrici necessari per l'alimentazione e la distribuzione dell'energia di futuri reattori. RSE dispone di diversi laboratori attrezzati per testare materiali e componenti a vari livelli di temperatura e tensione e di competenze specifiche nella caratterizzazione elettrica, termica e meccanica di materiali superconduttori ad alta temperatura critica (HTS), ritenuti particolarmente idonei per reattori a fusione compatti. RSE conduce regolarmente caratterizzazione di conduttori HTS a varie temperature criogeniche, a partire da 4,2 K, e ha la capacità di progettare e realizzare avvolgimenti HTS da sottoporre a prove sperimentali in tensione e corrente (fino a valori dell'ordine dei kV e kA). Prototipi di componenti HTS, con prestazioni superiori ai loro omologhi tradizionali, sono stati progettati e realizzati da RSE anche nell'ambito di forniture per il CERN di Ginevra e/o installazioni nelle reti di media tensione. Recentemente, RSE ha integrato nel suo Consiglio Scientifico diversi esperti di tematiche nucleari, sia sulla fissione sia sulla fusione, che attualmente ricoprono ruoli di rilievo in importanti istituzioni europee ed

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

internazionali, quali ad esempio CEA e ORNL. Tali esperti hanno confermato la loro disponibilità a supportare RSE in tutte le fasi dei lavori del GdL3 e anche successivamente.

Dal 2014 l'Italia è partner del consorzio europeo EUROfusion che propone e attua la *Roadmap* europea per l'energia da fusione con cofinanziamento da parte di Euratom. ENEA, in qualità di Program Manager per l'Italia, coordina le attività italiane comprese quelle delle 21 (ad oggi) entità affiliate al programma tra cui enti di ricerca, università e imprese italiane, elencati in Tabella 1.

Tabella 1. Partner italiani affiliati a ENEA nel Consorzio Eurofusion

ENEA (Programme Manager)	
Ansaldo Nucleare	Politecnico di Milano
Consorzio CINECA	Politecnico di Torino
CNR	Università di Cagliari
Consorzio CREATE	Università di Catania
Consorzio RFX	Università di Milano - Bicocca
DTT scarl	Università di Palermo
ENI	Università di Pisa
INFN	Università di Roma La Sapienza
LT-Calcoli	Università di Roma Tor Vergata
Rina Consulting	Università di Roma Tre
	Università della Tuscia

3-3.2 Il programma quadro nazionale 2006 – 2023

Nel 2006 i presidenti di ENEA, CNR e INFN presentarono congiuntamente all'allora Ministro della Ricerca un documento programmatico relativo alle attività del decennio 2006-2015⁴⁸, che aveva i seguenti obiettivi strategici

- la partecipazione al programma internazionale ITER
- lo svolgimento delle attività attribuite all'Italia nell'ambito del *Broader Approach*
- un programma sperimentale di ricerche di fisica del plasma riferito ad ITER
- il progetto e la costruzione a cura dell'ENEA nel Centro di Frascati di un nuovo tokamak concepito esplicitamente come "satellite" di ITER
- un programma di ricerche tecnologiche a supporto di ITER e DEMO
- la formazione e il training del nuovo personale
- un'attività di *Watching Brief* destinata al mantenimento di competenze di elevato livello nel settore degli studi sulla fusione inerziale.

Tale programma fu poi aggiornato nel 2014 da un gruppo di lavoro formato, da ENEA, CNR, INFN, Consorzio RFX e Consorzio CREATE in vista dell'avvio del progetto comunitario Eurofusion.

Il programma decennale elaborato nel 2006 e aggiornato nel 2014 ha rappresentato un impegno notevole per il sistema Paese ed è stato pienamente attuato sia per la partecipazione a ITER, sia per quanto riguarda l'Accordo *Broader Approach*.

I risultati più rilevanti sono descritti qui di seguito.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

- Per quanto riguarda il programma ITER:
 - Presso il Consorzio RFX a Padova è stata realizzata la **Neutral Beam Test Facility (NBTF)**, una infrastruttura di ricerca per lo sviluppo degli iniettori di particelle neutre accelerate a 1 MV per il riscaldamento del plasma di ITER, in grado di depositare 17 MW di potenza nel plasma per 1 ora, prestazioni che non sono mai state realizzate e che richiedono significativi progressi sia scientifici che tecnologici. Il Consorzio RFX ha assunto il ruolo di principale partner di ITER e F4E per lo sviluppo degli iniettori di particelle attraverso una collaborazione internazionale che vede coinvolte istituzioni di molti paesi europei, del Giappone e dell'India, oltre a EUROfusion. Nella NBTF sono ospitati due grandi apparati sperimentali:
 - **SPIDER, entrato in funzione nel 2018**, dedicato a sviluppare la sorgente di ioni negativi di H/D che, una volta estratti, possono essere accelerati fino al valore di energia richiesto. La sorgente opera in vuoto ed è dotata di una griglia di grandi dimensioni (900 mm x 1800 mm) dotata di 1280 fori da cui devono essere estratti gli ioni negativi prodotti nella camera di plasma retrostante per un totale di circa 60 A, con una disuniformità massima del 10% nella densità di corrente estratta.
 - **MITICA**, il prototipo degli iniettori che verranno installati in ITER. In MITICA una sorgente di ioni negativi simile a quella di SPIDER sarà accoppiata ad un sistema di accelerazione elettrostatica a 5 stadi fino all'energia di 1 MeV per un totale di 40 MW di potenza, che dovrà funzionare a regime per 1 ora. Il sistema di alimentazione multistadio a 1 MV in DC, unico al mondo, è stato realizzato in Giappone. MITICA è in fase avanzata di realizzazione e di collaudo: nel 2025 verranno installati i componenti interni dell'iniettore per iniziare le campagne sperimentali dell'intero iniettore.

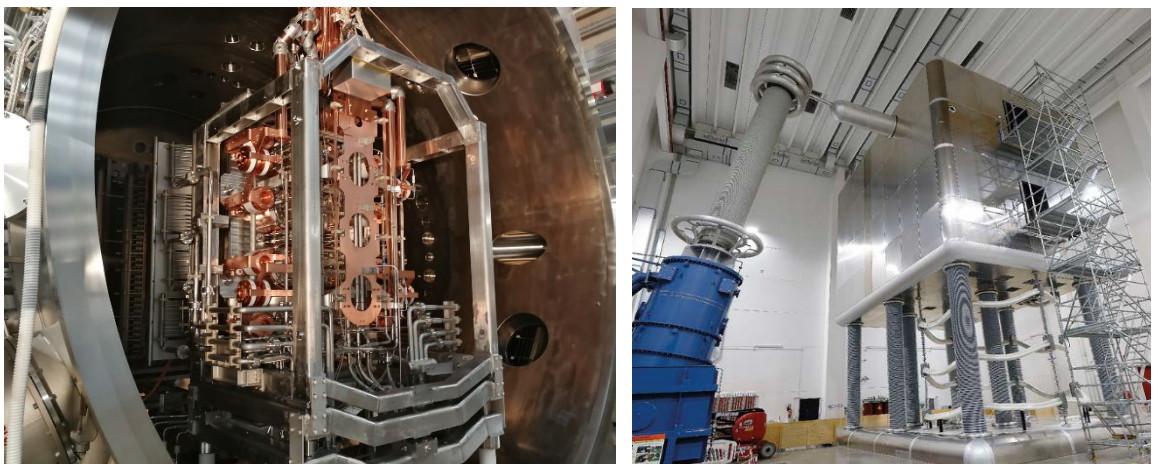


Figura 5. A sinistra: la sorgente di SPIDER. A destra: MITICA

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

- ENEA, come leader di un progetto europeo formato da CNR-ISTP di Milano, Università di Milano - Bicocca, CNR-ISTP di Milano e diversi laboratori europei, e con la partecipazione di CREATE, NIER e Università di Trieste, ha portato a termine il progetto della **Radial Neutron Camera (RNC) e Radial Gamma Ray Spectroscopy (RGRS)**, il sistema diagnostico a multicollimatore per la misura del profilo spaziale della potenza di fusione prodotta. ENEA ha avuto un ruolo preminente nello sviluppo di tecnologie innovative necessarie per il progetto. Un esempio è dato dallo sviluppo dei cavi in Nb₃Sn per le bobine dei magneti di ITER, costituito da migliaia di filamenti di rame e di Nb₃Sn tra cui scorre elio liquido alla temperatura di 4.2 K, che conducono una corrente fino a 68 kA. Un altro importante esempio è fornito dallo sviluppo del divertore di ITER, i cui scambiatori in lega di CuCrZr e raffreddati ad acqua sono rivestiti con tegole di tungsteno, caratterizzato da alta diffusività termica e resistenza all'erosione. L'ENEA ha messo a punto le tecnologie di giunzione tra materiali diversi necessarie alla fabbricazione di tali componenti con soluzioni originali (*Hot Radial Pressing*). Sulla base di questi risultati ENEA e Ansaldo Nucleare hanno realizzato il prototipo in scala 1:1 del divertore di ITER che è stato testato con successo alle condizioni di lavoro (per 5000 cicli a 10 MW/m² e per 1000 cicli e 20 MW/m²). Molto importante è stato anche il supporto alla progettazione del reattore. Da menzionare, in particolare, le analisi neutroniche e i calcoli dei flussi di neutroni nelle varie parti dell'impianto, dell'attivazione dei materiali e delle dosi risultanti, calcoli in gran parte validati presso il Generatore di neutroni FNG dell'ENEA di Frascati con esperimenti su prototipi di componenti di ITER.

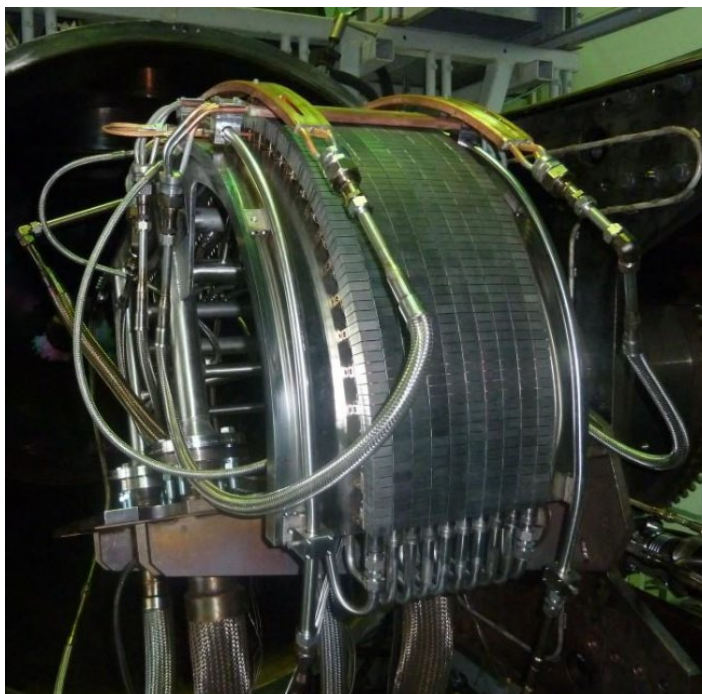


Figura 6. Prototipo in scala 1:1 dell'Inner Vertical Target del divertore di ITER realizzato da Ansaldo Nucleare e ENEA, e testato con successo alle condizioni di lavoro.

- CNR-ISTP di Milano ha fornito importanti contributi a ITER nel campo del riscaldamento del plasma tramite iniezione di potenza rf alla frequenza di ciclotrone elettronica (ECRH), partecipando a diversi grant di F4E e contratti con ITER per il

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

design dell'EC Upper Launcher e per lo sviluppo del gyrotron europeo a 170 GHz. ISTP ha svolto studi circa le prestazioni del lanciatore, con simulazioni di assorbimento e induzione di corrente e stime di stabilizzazione di modi MHD tramite iniezione localizzata di potenza ECRH. Ha inoltre fornito supporto alla definizione dell'ITER Research Plan e contribuito alla caratterizzazione del sistema degli specchi del lanciatore con calcoli di ottica millimetrica.

- Le università hanno contribuito supportando la progettazione con attività teorico-modellistiche riguardanti lo sviluppo di modelli e relativi codici di calcolo *state-of-the-art* per il riscaldamento a radiofrequenza del plasma, lo studio delle interazioni plasma-parete, il controllo a catena chiusa della posizione del plasma nella camera da vuoto nella fase sia di *startup* sia di *flat top*, l'analisi delle conseguenze delle "disruzioni" di plasma (perdite improvvise di confinamento) sulle strutture metalliche", la progettazione dei componenti critici della macchina, la termoidraulica stazionaria e transitoria nei componenti affacciati al plasma soggetti ad alti flussi termici e in particolare nel divertore, la termofluidodinamica del refrigerante del blanket, il trasporto del trizio nel blanket, l'analisi di transitori termo-fluidodinamici nei magneti superconduttori, la sicurezza e l'analisi di rischio.
- La ricerca ha fornito un sostanziale supporto tecnico all'industria italiana fornendo, in molti casi, le competenze richieste per partecipare con successo alle gare per forniture di componenti e servizi di elevato contenuto tecnico-scientifico. ENEA ha svolto anche il ruolo di *Industry Liaison Officer* per ITER in Italia. Grazie alla stretta collaborazione tra ricerca e industria, le imprese italiane si sono aggiudicate commesse per ITER per un totale di oltre 2000 M€, con un ritorno non solo economico ma anche in termini di crescita tecnologica.
- Per quanto riguarda il *Broader Approach*, i componenti previsti a carico del nostro Paese sono stati forniti con successo al tokamak JT-60SA che è stato completato e in cui il primo plasma è stato acceso nell'ottobre 2023. In particolare:
 - con il coordinamento e su progettazione dell'ENEA, l'industria italiana ha fornito cavi superconduttori per i magneti (Tratos Cavi, Criotec), le bobine toroidali e poloidali superconduttrici (ASG Superconductors), le casse di contenimento delle bobine (Walter Tosto), le alimentazioni per il sistema magnetico (Poseico Power Electronics e OCEM Tecnologie Energetiche);
 - il Consorzio RFX, agendo su mandato del CNR, ha sviluppato i progetti innovativi dei sistemi di protezione per tutte le bobine realizzate con materiali superconduttori, forniti dall'industria italiana Ansaldo Sistemi Industriali, attualmente Nidec ASI, e del sistema di alimentazione per il controllo delle instabilità di plasma, fornito dall'industria italiana Equipaggiamenti Elettronici Industriali (EEI). Successivamente, il Consorzio RFX ha realizzato due diagnostiche, finanziate da EUROfusion, che saranno installate a breve: il sistema laser Thomson Scattering per la misura del profilo di temperatura al divertore e lo spettrografo VUV per lo studio delle impurezze del plasma.
 - INFN ha progettato e realizzato il componente RFQ (*Radio Frequency Quadrupole*) di LIPAc (*Linear IFMIF Prototype Accelerator*), il prototipo dell'acceleratore di IFMIF. Il

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

RFQ è un sistema molto avanzato in grado di accelerare un fascio continuo e molto intenso di nuclei di deuterio fino a 5 MeV. Dopo la progettazione e la realizzazione dei prototipi e delle parti più complesse presso INFN, la costruzione è stata affidata, sotto la supervisione dell'INFN, ad aziende specializzate con gare a partecipazione internazionale, in cui le aziende italiane hanno avuto risultati particolarmente brillanti. LIPAc è in fase avanzata di costruzione a Rokkasho (Giappone). L'operazione di LIPAc si protrarrà almeno fino al 2025 per mettere a punto anche i difficili parametri di operazione.

- ENEA ha progettato un componente importante di IFMIF, il sistema di chiusura posteriore del bersaglio di IFMIF (*backplate*) e del relativo sistema di manutenzione e manipolazione remota. Sono inoltre stati condotti presso il Centro ENEA di Brasimone i test di corrosione dell'acciaio da parte del litio fluente ad alta temperatura, ovvero nelle condizioni operative.
- Un intenso programma sperimentale di ricerca di fisica del plasma è stato condotto con FTU e RFX. In particolare:
 - FTU ha svolto un intenso programma sperimentale per lo studio di plasmi ad alta densità ed elevati campi magnetici rilevanti per ITER. Tra i sistemi di riscaldamento addizionale operativi in FTU, un ruolo importante è stato assunto dal sistema di iniezione di potenza a microonde ECRH a 140 GHz per il riscaldamento del plasma, il controllo delle instabilità MHD, e gli studi di pre-ionizzazione e formazione del plasma. Vi si sono effettuati studi sulla formazione e la stabilizzazione di fasci di elettroni energetici che si generano nel plasma (così detti *runaway*) con uso di sistemi di misura innovativi, e sulla interazione del plasma con la prima parete con diversi tipi di materiale (molibdeno, Inconel). Inoltre, è stata esplorata la possibilità di utilizzare metallo liquido come materiale di prima parete utilizzando litio e stagno liquidi, materiale di interesse per un futuro reattore. E' stata testata la tecnica diagnostica basata su *Laser Induced Breakdown Spectroscopy* per la misura della ritenzione di isotopi dell'idrogeno nei componenti di prima parete, tecnica molto importante per la determinazione della ritenzione di trizio in ITER e DEMO. Le attività di fisica teorica sono ulteriormente cresciute, in particolare relativamente alla propagazione e all'assorbimento di onde a radio-frequenza e all'interazione di particelle energetiche con plasmi in condizioni reattoristiche.
 - RFX, nella seconda fase dal 2004 al 2015, con la realizzazione della versione RFX-mod, ha ottenuto risultati significativi, raggiungendo i parametri nominali di 2 MA di corrente toroidale di plasma e 15 milioni di gradi di temperatura di plasma. Questo grazie a sostanziali modifiche ai sistemi di controllo locale dei campi magnetici sulla superficie del plasma e migliorando le strutture conduttrici passive che circondano il plasma. La capacità di ricondurre, attraverso il controllo attivo dei modi, una struttura magnetica caotica ad una ordinata, quindi meglio confinante, ha fatto meritare a RFX-mod la copertina del numero di agosto 2009 della rivista *Nature Physics*. Su RFX-mod sono stati realizzati esperimenti pionieristici di controllo in tempo reale di instabilità di plasma i cui risultati e le cui strategie di controllo sono state esportate e ripetute in altri esperimenti tokamak.
 - Infine, l'Italia ha assicurato una forte e qualificata partecipazione alla sperimentazione del JET con la cosiddetta *ITER-like Wall* (che riproduce la stessa

combinazione di materiali di prima parete inizialmente prevista per ITER), e con la preparazione e partecipazione alle nuove campagne sperimentali con miscele di D-T (DTE2 e DTE3).

- Il programma 2006-2023 prevedeva la costruzione di un nuovo tokamak in Italia con l'obiettivo di preparare gli scenari operativi di ITER simulando l'effetto delle particelle α mediante ioni accelerati dai sistemi di riscaldamento esterno senza ricorrere all'uso del trizio, e con uso di soluzioni tecnologiche innovative rilevanti per ITER e DEMO. Il nuovo tokamak (allora denominato FAST) aveva anche lo scopo di colmare la carenza di macchine sperimentali in Europa dopo la prevista chiusura di JET, considerata anche l'età degli altri impianti, tutti attivi dalla fine del secolo scorso. Quando, nel 2012, fu pubblicata la prima *Roadmap* europea per la fusione, fu presa la decisione di allineare il nuovo progetto italiano agli obiettivi prioritari lì stabiliti, e in particolare allo sviluppo e dimostrazione di un divertore in grado di smaltire gli elevatissimi carichi termici previsti nel reattore. La costruzione del nuovo tokamak, ora denominato *Divertor Tokamak Test facility* (DTT), è stata avviata nel 2019.
- In parallelo, è stato svolto un intenso programma tecnologico, prima in ambito EFDA e poi Eurofusion) a supporto di ITER e DEMO nei settori del blanket, dei magneti superconduttori, dei materiali e delle tecnologie per la prima parete, della neutronica e della sicurezza. Per il programma blanket l'Italia è tradizionalmente impegnata nello sviluppo del *concept* che prevede l'impiego della lega eutettica PbLi come materiale breeder e moltiplicatore di neutroni, e l'acqua come fluido refrigerante, denominato **Water Cooled Lithium Lead (WCLL)** blanket.
- Il programma sulla fusione inerziale è stato condotto con continuità in ambito teorico e sperimentale, presso l'impianto laser ABC dell'ENEA di Frascati e presso impianti laser stranieri ad alta energia e potenza. Tutto ciò ha consentito all'Italia di mantenere un elevato livello di competenza nel settore. Questo ha permesso al gruppo italiano di svolgere, negli anni successivi, il ruolo di coordinatore in gruppi di lavoro internazionali, all'interno di progetti finanziati e più in generale di iniziative a livello europeo. La fusione nucleare a confinamento inerziale è stata supportata economicamente anche attraverso il progetto HiPER con il coinvolgimento di ENEA, CNR, Università di Roma La Sapienza, Università di Milano, Università di Pisa e INFN^j.

3-3.3 L'attuale programma italiano nel quadro europeo e internazionale

La ricerca condotta in Italia sulla fusione copre tutto lo spettro delle discipline coinvolte, dalla fisica del plasma alle tecnologie per il reattore, dall'ingegneria agli studi di sicurezza. La scuola italiana in fisica ed ingegneria della fusione, è considerata una delle migliori al mondo, a tal punto che ricercatori e ingegneri formati a questa scuola occupano ruoli chiave in un gran numero di laboratori e di organismi europei ed internazionali. Con la costruzione della nuova macchina DTT, la comunità dei fisici e

^j Le attività di cooperazione tra diverse istituzioni europee operanti nella fusione inerziale sono state inoltre finanziate anche attraverso due azioni COST (European Cooperation in Science and Technology): "Developing the physics & the scientific community for inertial confinement fusion at the time of NIF ignition" e "Proton Boron Nuclear fusion: from energy production to medical applications"

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

ingegneri italiani potrà confermare la centralità dell'Italia anche come sede di una delle maggiori installazioni di caratura internazionale e di importanza fondamentale per ITER, DEMO e per la ricerca e sviluppo nella fusione in generale.

Gran parte del programma italiano sulla fusione si svolge nell'ambito delle attività del Consorzio EUROfusion, con contributi a tutte le otto missioni (si veda §2-3-3) per l'attuazione della *Roadmap* europea.

L'Italia rappresenta il secondo maggiore contributore, dopo la Germania, al programma di EUROfusion, ed è presente su tutte le linee di attività. Nel primo *grant* ottenuto da EUROfusion in *Horizon 2020* per il periodo 2014-2020, su un totale di 685,3 M€ di contributo Euratom (pari al 55% del valore totale delle attività del Consorzio), a fronte delle attività svolte l'Italia ha ricevuto un contributo di 114,3 M€, ovvero il 16,7% del totale del contributo Euratom. Per il nuovo *grant* in *Horizon Europe*, al momento finanziato solo per il quinquennio 2021-2025, dei 555 M€ di contributo Euratom sono previsti per l'Italia circa 100 M€, pari al 18% del totale.

Oltre alla partecipazione al programma EUROfusion, l'Italia partecipa al programma di *Fusion for Energy* (F4E) sia attraverso attività di ricerca e sviluppo cofinanziate al 50% (*grant*) o di contratti di servizio e fornitura finanziati al 100%, e direttamente a ITER con contratti di servizio e fornitura finanziati al 100% (in questi ultimi casi, spesso tramite proficue collaborazioni tra centri di ricerca, università e industrie).

Oltre alla partecipazione ai programmi europei e a ITER, si conducono attività nazionali su progetti strategici e volte all'ulteriore sviluppo delle competenze e infrastrutture presenti nel nostro Paese (**programma complementare**). Oltre a questi, vanno menzionate le partecipazioni ad altri progetti Euratom, IAEA e IEA, oltre alle numerose collaborazioni internazionali normalmente non finanziate.

Tenuto conto di tutti i finanziamenti esterni (EUROfusion, F4E, ITER) per la fusione a confinamento magnetico e di quelli nazionali (programma complementare e cofinanziamento dei *grant* europei), il costo totale delle attività di ricerca sulla fusione in Italia negli ultimi dieci anni (escluso DTT) si è assestato a 817 M€, di cui 425 M€ coperti con fondi europei (Tabella 2). Nello stesso periodo le risorse umane complessive impiegate annualmente nel programma italiano sono state mediamente pari a circa 650 persone. La mappa delle competenze sulla fusione presenti nel nostro Paese è riportata nella Tabella 3. In Appendice A1 sono descritte le principali infrastrutture di ricerca per la fusione presenti e in costruzione in Italia.

Tabella 2. Costi attività di ricerca nel decennio 2014-2023 (escluso DTT)

<i>Attività</i>	<i>Costi attività 2014-2023 (escluso DTT) (M€)</i>	<i>Contributo da finanziamenti europei e internazionali (M€)</i>
Eurofusion	258	150*
F4E/ITER	301	275**
Programma nazionale	258***	-
TOTALE	817	425

* Di cui 54 M€ a ENEA

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

**Includono i contributi ricevuti da ENEA, Consorzio RFX, CNR e CREATE da F4E e ITER. Di questi, 265 M€ rappresentano gli investimenti di F4E/ITER per la NBTF presso RFX a Padova

*** Di questi, 223 M€ sono a fronte delle attività di ENEA

Tabella 3. Mappa delle competenze italiane per fusione magnetica e inerziale

	Confinamento magnetico						Confin. inerziale			Tematiche comuni							
	Fisica dei plasmi	Operazione dell'impianto	Diagnostiche e Controlli	Sistemi di riscaldamento	Progettazione integrata dell'impianto	Divertore	Magneti superconduttori	Fisica interazione laser-materia	Tecnologie laser	Operazioni alta ripetizione	Blanket	Balance of Plant	Materiali	Nucleare e sicurezza	Normativa	Studi socio-economici	Integrazione nel sistema elettrico
ENEA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
RSE	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
CNR	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
INFN	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Consorzio RFX	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Consorzio CREATE	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
ENI	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Uni. Ferrara	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Univ. Milano	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Univ. Mi-Bicocca	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Univ. Pisa	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Un. Roma Sapienza	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Politec. Torino	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Univ. Palermo	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Univ. Tuscia	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Uni. TorVergata	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Competenza rilevante
 Competenza parziale
 Nessuna competenza

Infine, l'attività italiana nella ricerca sulla fusione si avvantaggia di una larghissima rete di collaborazioni internazionali, che sarebbe difficile descrivere qui per intero, che si estende in tutti i settori e verso tutti i maggiori centri di ricerca al mondo.

Il programma italiano copre tutte gli aspetti scientifici e tecnologici come descritto nel seguito avendo come guida le missioni per l'attuazione della *Roadmap*.

- ***Studi teorici, simulazioni numeriche e sperimentazione sui plasmi***

ENEA, CNR, Consorzio RFX e Università della Tuscia svolgono una notevole attività teorica-modellistica, simulativa per scenari di plasma e di interpretazione degli esperimenti nell'ambito principalmente di EUROfusion. Esiste un'esperienza di diversi decenni nella simulazione dei fenomeni al bordo del plasma presso il Politecnico di Torino. Le attività sulla fisica dei plasmi per la fusione sono molteplici e di assoluto livello internazionale. I principali temi riguardano le condizioni di plasma ignito e lo studio delle particelle energetiche, lo sviluppo di scenari di plasma, le instabilità magneto-idrodinamiche e il loro controllo, studi del plasma di bordo e dell'interazione plasma-parete. Molto significativa la partecipazione a campagne sperimentali presso gli esperimenti europei, in particolare JET fino al 2023, e alla preparazione della sperimentazione di JT-60SA. I gruppi di ricerca italiani hanno consolidata esperienza su tutti i sistemi diagnostici e di controllo e stanno sviluppando soluzioni innovative per impianti con rilevante produzione di neutroni quali ITER e DEMO.

La sperimentazione in SPIDER ha richiesto lo sviluppo di analisi e di codici di plasma per interpretare i risultati e per orientare le scelte sia di modifica della sorgente che di operatività della stessa. In MITICA il raggiungimento della tensione nominale di 1 MV in DC ha anche evidenziato la necessità di migliorare la diagnostica e i sistemi di protezione dei componenti e delle macchine più rilevanti dell'impianto.

- ***Sviluppo e dimostrazione di componenti interni (prima parete e divertore)***

Esiste una notevole esperienza, particolarmente in ENEA, in Ansaldo, presso il Politecnico di Torino e Università della Tuscia, sulle tecnologie di giunzione per componenti per la fusione, in particolare per giunzioni fra materiali dissimili impiegati nei componenti affacciati al plasma in grado di sopportare elevati carichi termici, quali il divertore. ENEA ha partecipato a tutte le fasi di qualifica del processo di fabbricazione di questi componenti al fine di qualificare ditte europee alla fabbricazione del segmento interno del divertore di ITER. Inoltre, ENEA partecipa in collaborazione con CREATE e Università di Palermo al design e alle attività di ricerca e sviluppo per le tecnologie del divertore di DEMO. Ansaldo Nucleare, con Ansaldo Energia e ENEA, ha realizzato un prototipo dell'Inner Vertical Target di ITER e si è qualificata per la produzione di serie. ENEA fornisce un numero consistente di campioni e prototipi utilizzati per i test di resistenza dei materiali ai carichi termici e neutronici condotti in tutta Europa, e effettua analisi sulla quasi totalità dei campioni realizzati da altri gruppi europei con il metodo ad ultrasuoni. Il design del primo divertore di DTT è stato sviluppato in interazione continua con il gruppo del CNR di Padova e coadiuvato per l'ingegnerizzazione e la verifica termo-strutturale dal gruppo di lavoro del CREATE e da ricercatori sloveni. I test per la qualifica del design del divertore di DTT sono stati svolti e superati con successo.

- ***Sviluppo di blanket in grado di garantire l'autosufficienza per il trizio***

L'Italia ha investito principalmente sulle attività di progettazione e ricerca e sviluppo afferenti al *concept* di mantello *Water-Cooled Lead-Lithium (WCLL)*^k, ovvero refrigerato ad acqua e con lega eutettica piombo-litio come moltiplicatore neutronico e generatore di trizio. Per questo tipo di mantello ENEA detiene la *leadership* in ambito europeo sulla parte di progettazione del sistema e dei relativi componenti, attraverso attività ingegneristiche che includono sviluppo e l'impiego di modelli CAD, neutronici, termoidraulici, magnetoidrodinamici, termomeccanici, e di trasporto trizio (Università di Palermo, di Roma La Sapienza, di Pisa e Politecnico di Torino). Contribuisce in modo determinante a tutta la fase di progettazione concettuale del WCLL TBM di ITER, e supporta F4E in attività di ricerca e sviluppo relative alle tecnologie di questo sistema. Negli ultimi decenni, ENEA ha investito nella costruzione di infrastrutture sperimentali e laboratori fondamentali per le tecnologie del *concept* di blanket WCLL presso il proprio Centro del Brasimone.

L'Italia partecipa inoltre alla progettazione dei processi che compongono il ciclo del combustibile. Tra i processi studiati e sviluppati si ha il sistema di processamento dei gas esausti con l'utilizzo di tecnologie a membrana prodotte in ENEA. Ci sono poi i processi di recupero di trizio dall'acqua e per la separazione degli isotopi dell'idrogeno, per i quali vengono sviluppati codici dedicati necessari alla progettazione, all'identificazione delle specifiche dei materiali ed alla stima dell'efficienza e del consumo energetico. Si svolgono inoltre attività di ricerca relative alla purificazione del trizio dal sistema di raffreddamento del reattore e lo sviluppo di codici per la stima degli inventari e della permeazione di trizio nei componenti principali dell'impianto. Altre attività riguardano lo studio di sistemi a membrana per l'estrazione di idrogeno ed isotopi dal PbLi ed altri metalli liquidi.

- ***Sviluppo e qualifica di materiali strutturali e funzionali***

Le attività in questo campo si concentrano sullo sviluppo dei materiali strutturali per il blanket, in particolare dell'acciaio EUROFER97 "standard" (acciaio RAFM sviluppato in Europa per la fusione) e su nuove varianti con composizioni alternative, studiate e sviluppate per migliorarne in particolare la resistenza all'irraggiamento neutronico. Nei laboratori ENEA si caratterizzano le proprietà chimico-fisiche di materiali strutturali e funzionali e si conducono prove di corrosione di materiali strutturali a contatto con la lega liquida eutettica piombo-litio fino a 550 °C. Caratterizzazione di EUROFER97 viene svolta anche presso laboratori CNR con test termomeccanici (fatica e creep) per la definizione delle regole ingegneristiche da applicare a tale acciaio. Presso l'Università di Perugia (Dipartimento di Ingegneria - sede di Terni) si sta mettendo a punto un trattamento termo-meccanico innovativo per EUROFER97 finalizzato al miglioramento della tenacità del materiale. L'Italia è anche coinvolta nelle attività di ricerca e sviluppo di soluzioni di avanguardia per la realizzazione e la caratterizzazione di materiali innovativi per il divertore, con particolari caratteristiche di resistenza all'irraggiamento neutronico e al carico termico, come leghe di tungsteno o materiali compositi a base di tungsteno, o

^k L'Europa sviluppa anche un altro tipo di mantello denominato *Helium Cooled Pebble Bed (HCPB)* che usa il berillio come materiale moltiplicatore di neutroni, materiali ceramici a base di litio come trizio generatore e l'elio come refrigerante.

all'erosione superficiale indotta dal plasma con soluzioni basate sull'utilizzo di litio o stagno liquidi. Inoltre, studi per la qualifica dei materiali per i componenti della prima parete (tungsteno e EUROFER97), dei processi di base di erosione e ri-deposizione di tali materiali sono svolti nella macchina linear GyM del CNR-ISTP.

- **Materiali e magneti superconduttori**

L'Italia possiede grandi competenze nello sviluppo dei materiali superconduttori e di tecnologie per la realizzazione di conduttori utilizzati nella generazione di alti campi magnetici. I materiali studiati sono superconduttori a bassa temperatura critica (LTS), basati sulla tecnologia del niobio, i superconduttori ad alta temperatura critica (HTS) della famiglia degli Ossidi di Terra Rara-Bario-Rame (ReBCO), MgB_2 e materiali superconduttivi innovativi a base di ferro. L'attività è basata su un forte know-how e competenze sui processi di sintesi e caratterizzazioni dei materiali. Relativamente alle applicazioni su larga scala, ENEA e Università della Tuscia hanno anche una lunga tradizione nella progettazione di sistemi magnetici per i reattori a fusione e nella realizzazione di cavi superconduttori costituenti di tali magneti. Nell'ambito del progetto DEMO, ENEA contribuisce alla progettazione del sistema magnetico e alla realizzazione di conduttori costituiti da superconduttori LTS o HTS che vengono caratterizzati in condizioni operative (temperatura di circa $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ (4,2 K) e campi magnetici fino a 12 T). Inoltre, studia le problematiche legate all'isolamento elettrico dei magneti e alla generazione di alte tensioni che potrebbero compromettere l'integrità della bobina. Particolare attenzione è posta alla rilevazione della transizione tra lo stato superconduttivo e quello normale (quench), e allo studio della sua propagazione nel magnete. Il sistema magnetico di DTT, e cioè le 18 bobine toroidali, i 6 magneti poloidali e il solenoide centrale nonché collegamenti, anch'essi superconduttivi fra gli alimentatori e i magneti, completamente superconduttivo basato sui ben consolidati superconduttori LTS, è stato interamente progettati in ENEA. ENEA sta costruendo una nuova infrastruttura nel Centro di Frascati (FCCTF) per effettuare i test criogenici dei magneti stessi. Ricerche sui magneti superconduttori vengono condotte da INFN presso il Laboratorio Acceleratori e Superconduttività applicata (LASA) di Milano e il Laboratorio di superconduttività di potenza di Salerno. Il LASA sviluppa tecnologie avanzate per la superconduttività, la criogenia e la produzione di campi elettromagnetici statici e a radiofrequenza ad alta intensità.

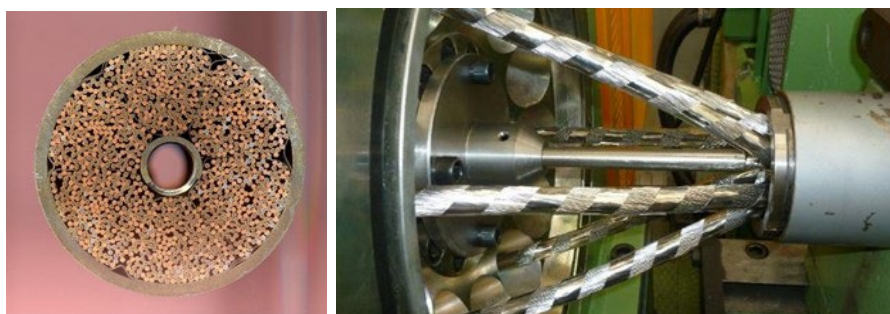


Figura 7. A sinistra: Sezione del conduttore per il magnete toroidale di ITER costituito da fili superconduttori in Nb3Sn e raffreddato con elio liquido, sviluppato con il contributo fondamentale di ENEA. A destra: Una fase del processo di produzione del cavo (cablatura) presso Tratos Cavi (Pieve Santo Stefano, Arezzo).

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE



Figura 8. Avvolgimento di una delle 10 bobine che costituiscono il magnete toroidale di ITER realizzate a Genova da ASG Superconductors SpA.



Figura 9. Inserimento delle 10 bobine del magnete toroidale di ITER nelle strutture metalliche di contenimento presso SIMIC (Marghera, Venezia).

- **Sviluppo del Balance of Plant**

L'Italia ha un ruolo di primo piano nella progettazione e nello sviluppo del *Balance of Plant* e dei sistemi ausiliari del reattore DEMO. Queste attività consentiranno di acquisire una proficua esperienza in vista della progettazione futura di impianti a fusione di tipo commerciale, destinati al dispacciamento di energia elettrica su scala industriale in

maniera “continua” a partire da un plasma operante in modalità pulsata¹. In particolare, l’ENEA, in collaborazione con le Università di Palermo, “La Sapienza” di Roma, il Politecnico di Milano e valendosi del prezioso contributo di Ansaldo Nucleare, sta sviluppando, in ambito EUROfusion, il design concettuale del *Balance of Plant* previsto per DEMO, che integri le potenze termiche derivanti dal circuito di refrigerazione primario del blanket con quelle dei circuiti degli altri componenti interni alla camera da vuoto, prevedendo soluzioni avanzate per generatori di vapore, scambiatori di calore intermedi a sali fusi ed eventuali sistemi di accumulo termico, e di tutti i sistemi ausiliari. Tali attività saranno validamente supportate dalle campagne di test sperimentali previste sull’impianto STEAM, in costruzione presso il centro di ricerche ENEA del Brasimone, e finalizzata allo studio sperimentale delle prestazioni termoidrauliche del generatore di vapore asservito al circuito di refrigerazione primario del blanket WCLL di DEMO.

- ***Sicurezza dell’impianto***

L’Italia vanta una delle maggiori competenze in Europa sulla sicurezza degli impianti a fusione, potendo coprire l’intero processo di valutazione degli aspetti finalizzati alla redazione della documentazione richiesta dal processo autorizzativo. Questa include a) l’identificazione dei pericoli dell’impianto (inventari radiologici, energie, etc.) e quantificazione dei relativi rischi in base a simulazioni per la quantificazione dei termini di sorgente (es. prodotti di corrosione attivati, inventari di polveri, etc.), b) i calcoli di attivazione neutronica e quantificazione dei campi di radiazione, e c) l’identificazione dei carichi di fuoco. Un importante supporto alla progettazione è dato dalle attività di definizione dei requisiti di sicurezza derivanti dalla classificazione dei sistemi (sistemi con funzioni di sicurezza, apparecchiature a pressione, resistenti al fuoco, resistenti ad eventi sismici, etc.). Per i sistemi più maturi in termini di dettaglio progettuale, si simulano gli eventi incidentali rappresentativi mediante codici numerici validati in grado di modellarne la fenomenologia chimico-fisica/nucleare al fine di quantificarne le conseguenze, ad esempio in termini di rottura dei sistemi di confinamento e rilasci di radionuclidi in ambiente. Anche gli aspetti di sicurezza occupazionale sono oggetto di analisi e minimizzazione permanente dei rischi di esposizione a radiazioni ionizzanti (*As Low As Reasonably Achievable* (ALARA)).

Avendo come oggetto di studio sistemi innovativi (sistemi del ciclo del combustibile, diagnostiche, magneti superconduttivi, sistemi criogenici, etc.) che utilizzano materiali specifici con limitata esperienza operativa, l’analisi di sicurezza è supportata ed integrata da un programma di ricerca metodologica e sperimentale che spazia dalle diagnostiche per il controllo degli inventari alla caratterizzazione ed il trattamento dei rifiuti nucleari da fusione, alla validazione sperimentale dei codici e una più accurata modellizzazione della fenomenologia incidentale attraverso la migliore definizione della reattività chimico-fisica di alcuni materiali. Infine, ENEA ha sviluppato nel tempo un database sui ratei di fallimento o manutenzioni dei sistemi o componenti nelle macchine sperimentali esistenti (es. FTU, JET etc.) in contesti di collaborazione internazionale quali ad esempio il programma *Environmental, Safety and Economic Aspects of Fusion Power* della IEA.

¹ Ad esempio, il DEMO europeo è previsto lavorare con impulsi di durata di almeno due ore e intervallo tra due impulsi per il tempo necessario a “ricaricare” il solenoide centrale, dell’ordine circa 10 minuti.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

- **Quadro normativo e licensing**

L'ENEA sta ricoprendo un ruolo molto attivo nella definizione di quelle che presumibilmente saranno linee guida internazionali per il quadro normativo, autorizzativo e di regolamentazione necessari alla costruzione e l'operazione dei futuri reattori a fusione. In particolare, partecipa attivamente allo studio denominato "*Legal and Institutional Issues of Prospective Deployment of Fusion Facilities*", attraverso la delegazione italiana presso il progetto INPRO (*International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycle*) della IAEA. Lo scopo è fornire supporto agli Stati Membri per accelerare lo sviluppo e l'implementazione di reattori a fusione nei prossimi decenni, con particolare riguardo agli aspetti legali ed autorizzativi attraverso la pubblicazione di un documento dedicato appartenente alle *Nuclear Energy Series* della IAEA.

ENEA è capofila di alcune attività del progetto HARMONISE iniziato nel 2022 e finanziato dall'Euratom, che si propone di analizzare le attuali guide di sicurezza nucleare internazionali, gli standard nucleari e il quadro normativo corrente, col fine di proporre un approccio completo per l'armonizzazione e la normalizzazione delle metodologie di analisi di sicurezza, della qualificazione, della validazione, dei codici standard, delle norme e del processo di concessione delle licenze dei reattori avanzati a fissione e a fusione nucleare. All'interno del consorzio EUROfusion, il dipartimento NUC di ENEA partecipa direttamente al gruppo di lavoro per la definizione del quadro legale per i futuri reattori di potenza a fusione nucleare.

- **Studi socio-economici**

Un ulteriore ambito di studio riguarda gli aspetti socioeconomici e di sostenibilità ambientale di lungo termine dello sfruttamento dell'energia da fusione. Il Consorzio RFX ed ENEA svolgono in ambito europeo attività inerenti alla modellazione economica dei sistemi energetici la elaborazione di scenari energetici futuri mediante il modello EUROfusion TIMES Model (ETM) che integra la fusione fra le tecnologie generatrici di energia elettrica. In relazione al possibile impatto ambientale della fusione nucleare come produttore nel mercato energetico, si operano inoltre stime di utilizzo e disponibilità di materiali per la fusione che ricadano fra i materiali rari o che possano presentare criticità in termini di esaurimento o alto utilizzo da parte di tecnologie concorrenti, quali Li, Pb, Nb, Be, Ta, W in rapporto alle quantità necessarie per sviluppare una filiera di reattori a fusione, tenendo conto del possibile riutilizzo dei materiali in-situ. In particolare, sono state sviluppate delle proiezioni di domanda aggregata sia per utilizzo nella filiera della fusione nucleare che per altre tecnologie.

Infine, sono state condotte attività volte a comprendere l'attitudine del pubblico verso la fusione attraverso sondaggi o eventi pubblici.

- **Fusione inerziale**

La fusione inerziale è finanziata da EUROfusion, all'interno di vari progetti di *Enabling Research*, di entità molto ridotta per attività di coordinamento e collaborazione ('*keep-in-touch*') tra i vari gruppi europei. Tali finanziamenti hanno comunque consentito a ENEA e CNR-INO di portare avanti ricerche su aspetti di primario interesse in ambito teorico/numerico, sperimentale - presso il laser ABC dell'ENEA, presso ILIL a CNR-INO e presso impianti laser stranieri ad alta energia e potenza - e di sviluppo e test di

diagnostiche avanzate, soprattutto per schemi avanzati di irraggiamento diretto quali *Shock Ignition* e *Fast Ignition*. In questo contesto sono condotte attività su a) l'interazione laser con materiali avanzati di tipo microstrutturato (*foam*), argomento di primario interesse per l'impiego nelle capsule contenenti il combustibile, b) gli impulsi elettromagnetici a radiofrequenza-microonde generati negli esperimenti (di grande importanza per un futuro reattore a fusione inerziale, e per lo schema di irraggiamento diretto *Magnetized Inertial Fusion*, e la grande potenzialità di impiego in applicazioni interdisciplinari.

ENEA e CNR partecipano inoltre allo sviluppo della proposta del progetto HiPER+ con le sue competenze chiave in settori come la fisica dei plasmi, con particolare riferimento all'interazione laser-plasma, le tecnologie nucleari, le tecnologie laser di alta potenza e la fisica e le tecnologie dei materiali. Il progetto è incentrato sullo schema di *shock ignition*, basato sull'approccio *direct-drive*. Questa partecipazione è rafforzata ulteriormente grazie agli investimenti nello sviluppo di infrastrutture ESFRI e PNRR attualmente in corso.

Recentemente, presso i Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN a Catania, è stata lanciato il progetto I-LUCE (INFN *Laser induced radiations facility*) che rappresenta una delle frontiere della accelerazione di particelle dell'INFN e sarà la prima *facility* italiana in grado di offrire un ampio spettro di radiazione prodotta dalla interazione di laser di potenza con la materia^m. I-LUCE si basa sull'uso di sistemi laser di potenza (fino a 1 PW), impulsi ultracorti (23 fs - 20 ps) e frequenza degli impulsi compresi tra 1 Hz e 10 Hz. Inoltre, il progetto FUSION dell'INFN, in collaborazione con ENEA, Università di Catania, Università del Salento e altri istituti europei, si occupa di studiare i processi fisici coinvolti nella reazione fusione $p-^{11}B$. Vengono anche condotti studi sulla fusione polarizzata (INFN, Università di Ferrara), ovvero con nuclei con lo spin nucleare orientato che può far guadagnare fattori importanti nella probabilità di fusione dei nuclei. La fusione polarizzata è di interesse anche per la fusione a confinamento magneticoⁿ.

3-3.4 Il progetto nazionale *Divertor Tokamak Test facility* (DTT)

Un ruolo preminente nel programma italiano sulla fusione è svolto dalla *facility* DTT, un'iniziativa italiana parte della *roadmap* europea, che vede coinvolti tutti gli enti di ricerca e la gran parte delle università attive nella fusione, e ENI, la maggiore industria energetica nazionale. DTT è un impianto molto complesso, che richiede l'integrazione di diverse tecnologie innovative, le stesse necessarie per la costruzione di un impianto a fusione di potenza, con l'eccezione di quelle nucleari che sono state evitate per massimizzare la flessibilità dell'impianto. DTT mette frutto tutte le competenze maturate in Italia e consente al sistema Paese di trovarsi in una posizione privilegiata per la costruzione di un impianto a fusione di potenza.

DTT si inserisce nella *Roadmap* europea finalizzata alla realizzazione di DEMO. Questo ambizioso obiettivo richiede una forte accelerazione degli sforzi destinati alla soluzione di problemi, alcuni dei quali non sono adeguatamente affrontati negli esperimenti attuali.

^mIl finanziamento di I-LUCE proviene da tre diversi progetti PNRR: EuAPS (Eupraxia Advanced Photon Sources), SAMOTHRACE Sicilian Micro and Nano Technology Research and Innovation Center) e ANTHEM (AdvaNced Technologies for Human CentrEd Medicine)

ⁿ Tale tecnologia è sotto verifica sperimentale presso il tokamak DIII-D della General Atomics a San Diego.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

In particolare, una delle principali sfide è rappresentata dai carichi termici che vengono convogliati sul divertore che in DEMO e in un impianto di potenza potrebbero essere superiori a quelli previsti in ITER. Pertanto, la *Roadmap* europea prevede la realizzazione di una *facility* per studiare soluzioni alternative a quella adottata in ITER, che permettano di ridurre il flusso termico sul divertore da molte decine ad alcuni MW/m². DTT è stata identificata dalla comunità scientifica europea come la *facility* di riferimento per fornire soluzioni che integrino tutti gli aspetti fisici e tecnologici necessari per lo sviluppo di soluzioni valide per il reattore a fusione.

DTT è attualmente in costruzione a cura della società consortile DTT s.c.ar.l. i cui attuali soci sono ENEA, ENI, Consorzio CREATE, CNR, Consorzio RFX, INFN, Università di Milano Bicocca, Tor Vergata, Tuscia, Politecnico di Torino e Consorzio CETMA.

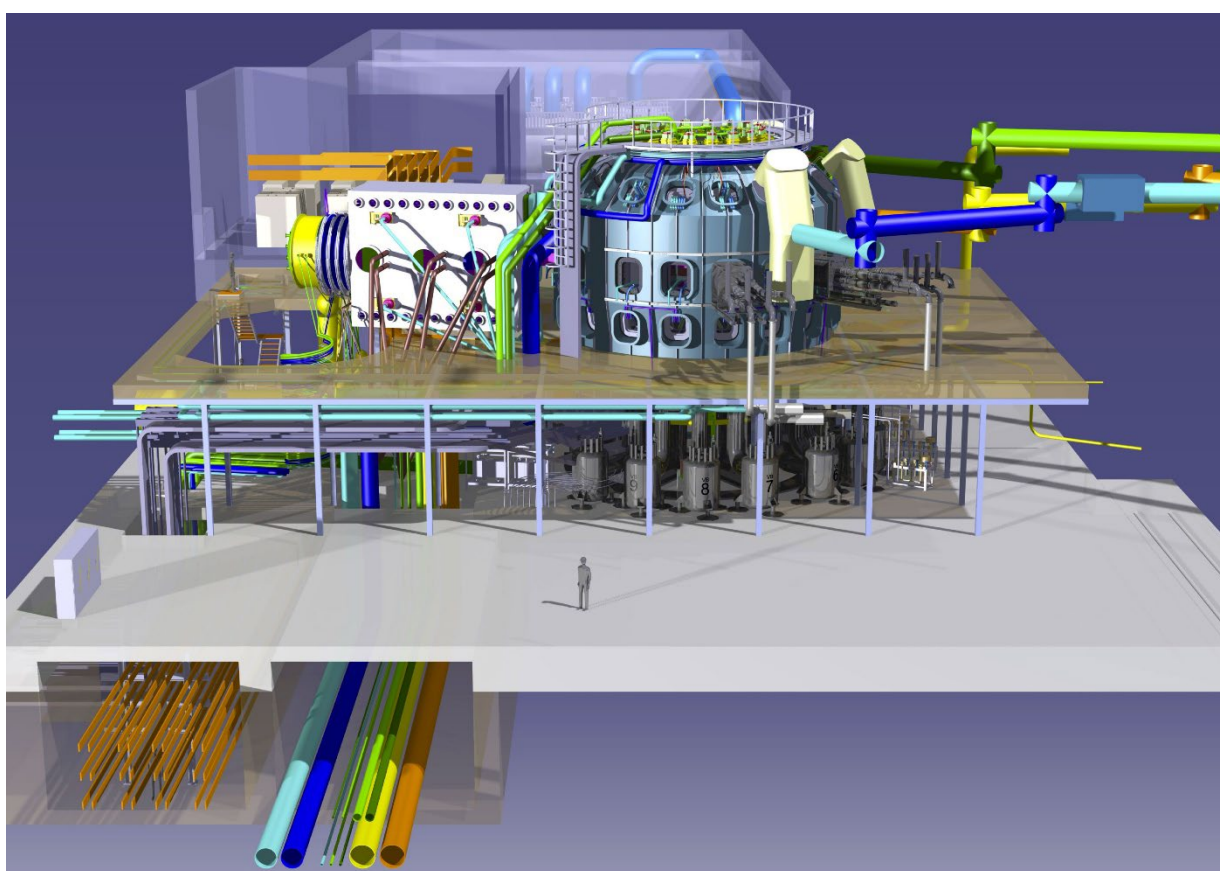


Figura 10. Impianto tokamak DTT in costruzione presso il Centro ENEA di Frascati.

E' una macchina di taglia e rilevanza superiore alle altre esistenti in Europa, a parte ITER, con magneti superconduttori simili a quelli di ITER e che prevede l'uso del tungsteno come materiale di rivestimento dei componenti affacciati al plasma come previsto per il reattore. La potenza addizionale installata, che prevede 45 MW rilasciati al plasma, è costituita per 32 MW da radiofrequenza a 170 GHz, 10 MW da fasci di neutri a 510 keV e 8 MW di radiofrequenza a 90 MHz. Con questi parametri, DTT avrà, nella zona del divertore, la stessa potenza termica per unità di lunghezza di ITER e DEMO, cioè 15 MW/m. Questo consentirà di fare esperimenti integrati di assoluta rilevanza reattoristica. La macchina potrà provare differenti topologie di divertore per il quale saranno testate

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

diverse configurazioni e vari materiali (tungsteno, metalli liquidi) da sottoporre a flussi termici superiori a 20 MW/m². Le attività di ricerca correlate costituiranno una notevole spinta per lo sviluppo di tecnologie innovative in vari settori, con rilevanti ricadute per le industrie italiane ed europee, oltre a costituire una valida piattaforma per la formazione di nuove generazioni di fisici, ingegneri e tecnologi e per opportunità di spin-off.

Il costo di investimento inizialmente previsto per la sua realizzazione è stato valutato, nel 2015, in 500 M€ che attualizzati diventano circa 615 M€. Ai costi di investimento contribuisce anche EUROfusion che ha stanziato 60 M€ destinati alla realizzazione del divertore.

DTT sarà operativo entro il 2030. Le operazioni ed il programma sperimentale copriranno un periodo di oltre venti anni, impegnando 150 persone (50% ricercatori e personale qualificato, 50% personale di supporto), e accompagnando la sperimentazione di ITER e la progettazione e costruzione di DEMO. Nei prossimi anni DTT sarà, quindi, la macchina da fusione di riferimento europea.

Grazie all'alto livello tecnologico la macchina rappresenta anche una importante opportunità per l'industria nazionale di continuare a sviluppare il know-how specifico sugli impianti a fusione. Inoltre, DTT già costituisce un polo di attrazione internazionale che richiama l'interesse di una larga parte della comunità scientifica europea ed extraeuropea, come dimostrato dalla numerosa e qualificata partecipazione di scienziati europei alla definizione del programma scientifico (*Research Plan*).

3-3.5 L'industria italiana nella filiera della fusione

La comunità italiana della fusione è stata fin dall'inizio fortemente orientata al coinvolgimento dell'industria nazionale nel programma di ricerca e sviluppo e al trasferimento tecnologico. Fin dagli anni 1980 ha posto attenzione allo sviluppo delle tecnologie specifiche della fusione promuovendo costantemente il coinvolgimento dell'industria al duplice scopo di ottenerne il supporto tecnico-ingegneristico e produttivo richiesto dal programma e, al tempo stesso, di far crescere le competenze industriali necessarie per avviare la filiera dei reattori a fusione.

Lo stretto rapporto con l'industria è cresciuto:

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

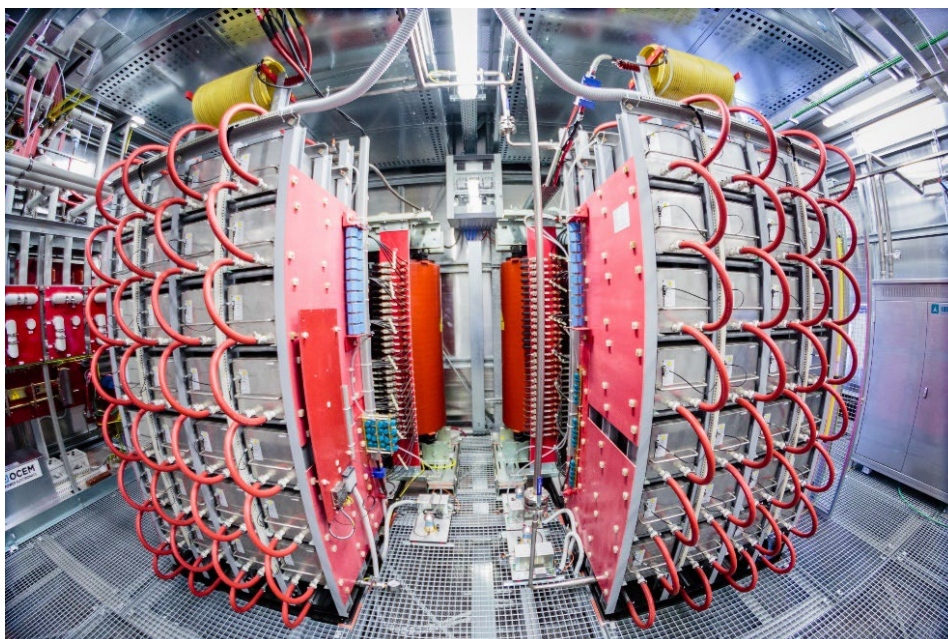


Figura 11. Sistema di alimentazione della sorgente di SPIDER realizzato da OCEM, Bologna

Nell'ultimo decennio, questa strategia per l'acquisizione e la valorizzazione delle competenze industriali per la fusione si sono dimostrate vincenti, come testimoniato dal ruolo quasi dominante a livello europeo giocato dall'industria italiana nelle commesse per la costruzione di ITER (a parte quelle per la costruzione degli edifici che spettano prevalentemente alla Francia come Paese ospite). Allo stato attuale, su più di 7000 M€ investiti nella costruzione del reattore, degli impianti e degli edifici, la quota assegnata alla filiera italiana è superiore a 2000 M€ per la realizzazione di componenti chiave del reattore quali, ad esempio, i cavi superconduttori, i magneti e la camera a vuoto. L'industria italiana ha acquisito un'esperienza eccezionale e delle referenze uniche dal progetto ITER. Ciò permette all'industria italiana di essere oggi accreditata tra maggiori *players* nel settore della produzione di componenti complessi e critici, aprendo la strada per un percorso simile anche nel crescente settore privato della fusione, che ha già assegnato commesse rilevanti a fornitori italiani.

Il progetto ITER ha contribuito in modo decisivo all'ampliamento del coinvolgimento delle imprese nella fusione agendo da catalizzatore di investimenti e la filiera industriale italiana, già ben posizionata, si sta arricchendo di nuove imprese, che seppur non specializzate nel nucleare o nella fusione, si stanno avvicinando a questo ambito e stanno imparando a conoscerne le specificità e coglierne le opportunità. Un recente studio sulla filiera della fusione italiana⁴⁹ ha mostrato che l'interesse verso la fusione della maggior parte delle imprese coinvolte nella fusione è piuttosto recente: se da un lato buona parte delle imprese partecipa o ha partecipato in passato a più di un progetto di fusione, la maggioranza di esse, infatti, ha iniziato ad operare in tale filiera dal 2010 partecipando alla costruzione di ITER. E' importante sottolineare che sono coinvolte non solo grandi imprese, ma soprattutto piccole e medie imprese (SME) per le quali la partecipazione a progetti complessi, internazionali e fortemente competitivi rappresenta un'occasione di

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

crescita in termini di acquisizione di competenze tecniche e di adeguati sistemi di management, di controllo e qualità.

Un caso a parte è rappresentato dal gruppo Ansaldo, impegnato nel campo della fusione sin dagli anni '80 con Ansaldo Ricerche e poi con Ansaldo Nucleare, che ha perseguito negli anni una presenza diffusa sia sulla progettazione di sistemi e componenti (per ITER e per DTT), sia sulla costruzione di componenti critici (direttamente o in collaborazione con partners manifatturieri), sia infine sulle attività di montaggio più peculiari di un impianto a fusione. Ciò allo scopo di maturare competenze di integrazione di impianto in vista di future realizzazioni.

Esempi di aziende impegnate nello sviluppo dell'energia da fusione e nel supporto a progetti internazionali sono descritti nell'Appendice A2.

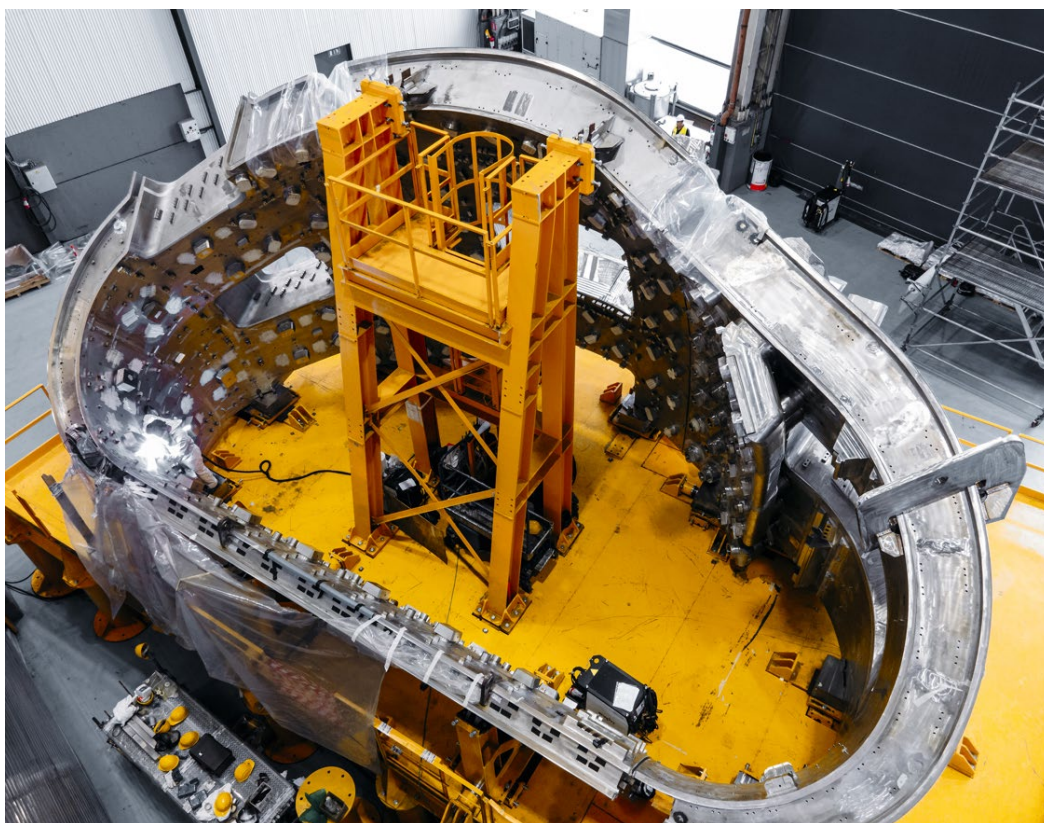


Figura 12. Vista dall'alto del settore #5 del vacuum vessel di ITER, in costruzione insieme ad altri 4 settori da parte del Consorzio italiano AMW (Ansaldo, Mangiarotti, Walter Tosto).

L'attuale evoluzione del panorama internazionale sullo sviluppo dell'energia da fusione vede alcune industrie assumere il ruolo non solo di fornitori di componenti e servizi, ma anche di sviluppatori.

ENI, ad esempio ha avviato un programma di sviluppo dell'energia da fusione che si articola su più fronti. Nel panorama italiano, ENI è partner del progetto DTT con il 25%; il know-how industriale e le competenze di gestione e sviluppo di grandi progetti che, combinate con l'eccellenza della ricerca scientifica di ENEA e degli altri partner, saranno la chiave di questa infrastruttura, basata primariamente su competenze e tecnologie

italiane. ENI, inoltre, collabora da tempo con numerose università e con CNR su diverse linee di ricerca sulla fusione. A livello internazionale, dal 2018 è azionista strategico di CFS che si propone di realizzare il primo impianto in grado di immettere energia in rete entro i primi anni del 2030, mentre il primo impianto sperimentale a confinamento magnetico con produzione netta di energia è attualmente in costruzione presso il centro di Devens, Boston (USA). L'impegno di ENI prevede inoltre una collaborazione con il Plasma Science and Fusion Center del MIT nel programma LIFT (*Laboratory for Innovation in Fusion Technologies*) e una collaborazione strategica con UKAEA su diversi temi, tra cui i materiali, il ciclo del combustibile, la diagnostica, la fisica e controllo del plasma e le tecnologie superconduttive.

3-3.6 **Formazione**

Il panorama della formazione superiore (laurea, laurea magistrale e dottorato) nell'ambito della fisica e dell'ingegneria dei reattori a fusione e della scienza e tecnologia dei plasmi in Italia vede il contributo di diversi attori accademici distribuiti su tutto il territorio nazionale. In Appendice A3 sono riportati i principali atenei coinvolti e gli insegnamenti proposti ai diversi livelli.

Le università tradizionalmente impegnate nelle attività di ricerca e didattica nell'ingegneria nucleare agiscono da lungo tempo in sinergia, riunite nel Consorzio Interuniversitario per la Ricerca e le Tecnologie Nucleari (CIRTEN). I docenti nucleari sono incardinati nei Settori Scientifico Disciplinari "Fisica dei Reattori Nucleari" (ING-IND/18), "Impianti Nucleari" (ING-IND/19) e "Misure e Strumentazione Nucleari" (ING-IND/20). In alcune sedi universitarie si segnala il contributo del settore "Elettrotecnica" (ING-IND/31). Attività di formazione rilevante per la fusione nucleare viene svolta nei corsi di laurea in Fisica da diversi anni, con insegnamenti sulla fisica dei plasmi (FIS-03), la fisica nucleare e neutronica (FIS-04), le diagnostiche nucleari e di plasma e la superconduttività (FIS-01). Entrambi questi percorsi hanno contribuito a formare generazioni di fisici e ingegneri attivi con successo nel campo della fusione in Italia e all'estero.

Nell'ambito delle lauree di ingegneria industriale, tipicamente ingegneria energetica e/o dell'energia, sono impartiti al primo livello alcuni insegnamenti fondanti dell'ingegneria nucleare (es. principi di ingegneria nucleare, applicazioni dell'ingegneria nucleare, elementi di ingegneria nucleare, termo-fluidodinamica, termomeccanica, sicurezza e analisi di rischio, radioattività e radioprotezione). Nei corsi di laurea magistrale in ingegneria nucleare e/o ingegneria energetica e nucleare le competenze nucleari vengono ampliate ed approfondite, corroborate con insegnamenti specificatamente inerenti alla fisica e all'ingegneria dei reattori a fusione. Corsi avanzati sono proposti nell'ambito del Dottorato, focalizzati su quelle tematiche che ogni sede sente come più prossime alla propria attività di ricerca. Gli insegnamenti attivi ai tre diversi livelli nell'ambito dei corsi in Fisica contribuiscono a formare ricercatori con specifiche competenze sui plasmi per la fusione (teoriche, simulative e sperimentali) cui si aggiungono competenze su temi quali la fisica nucleare, la superconduttività, i controlli, il calcolo avanzato e l'analisi dati. Vi è inoltre un crescente coinvolgimento attivo delle aziende nelle attività di formazione accademica, soprattutto a livello di lauree magistrali (tirocini formativi e tesi in azienda) e dottorati industriali.

Nella prospettiva di un ritorno al nucleare in Italia, la formazione dovrà giocare un ruolo crescente. Occorre in primo luogo maggiore formazione sugli aspetti nucleari, di sicurezza e normativi per la fusione. Inoltre, per coprire tutte le competenze, professionali e tecniche, dalle fasi progettuali incluse le analisi di sicurezza, alla costruzione e montaggio, il *commissioning* e la gestione operativa dell'impianto, sarà importante sviluppare accordi di collaborazione con realtà che possano formare tali competenze attraverso *stage* e permanenze "operative" presso sedi produttive della *supply chain*, impianti e centri di ricerca industriale. Le università avranno un ruolo importante nel coordinamento di queste attività formative "sul campo". Le aziende necessiteranno di nuovi investimenti/competenze per affrontare questa sfida.

C3-4 Analisi delle criticità

3-4.1 Gap tecnologici

Le sfide ancora da affrontare per la piena diffusione commerciale della fusione consistono nel:

- validare gli elementi fisici e tecnologici meno maturi;
- ottimizzare i processi di industrializzazione dei singoli componenti, eliminando o riducendo il ricorso a processi onerosi perché troppo costosi o lunghi e ad alto rischio, che comprensibilmente sono stati adottati nelle fasi di sviluppo preindustriale per consentire di raggiungere la fattibilità del processo di base;
- integrare tali elementi in una centrale elettrica affidabile, disponibile e di lunga vita. Questa fase dimostrativa, affidata in generale nei vari programmi alla costruzione di un reattore DEMO^o, deve sfruttare le caratteristiche di sicurezza intrinseca della fusione e convalidare le basi scientifiche, tecnologiche, innovative e industriali di un primo impianto commerciale;
- ottimizzare/migliorare la competitività economica degli impianti a fusione da dispiegare sul mercato.

La sperimentazione in ITER rimane centrale per l'esperienza che potrà fornire in termini di scenari di plasma, gestione del trizio e aspetti nucleari, sicurezza e disponibilità dell'impianto, e produzione di rifiuti radioattivi.

In aggiunta e in parallelo alla sperimentazione in ITER, i gap tecnologici da colmare sono descritti qui di seguito in ordine di priorità e urgenza:

- Tecnologie del trizio e del blanket

L'attuale livello di maturità delle soluzioni individuate per il blanket e per tutte le tecnologie ausiliarie, compreso il ciclo completo del combustibile, è ancora troppo basso per garantire l'autosufficienza del trizio e la sostenibilità economica. L'esperienza disponibile è limitata a piccole quantità e la scalabilità verso impianti, inventari e consumi di trizio su scala industriale non è stata ancora affrontata, in particolare relativamente alla eliminazione della permeazione del trizio attraverso i materiali strutturali, alla riduzione

^o Occorre precisare che nei programmi di alcune delle iniziative private, quali CFS e Gauss Fusion, non si prevede la costruzione di un DEMO ma si pensa di procedere direttamente alla costruzione di un impianto commerciale.

della ritenzione di trizio nelle strutture, e all'efficienza di recupero del trizio dal materiale autofertilizzante e riciclo. Inoltre, mancano ancora dati affidabili sulle prestazioni funzionali del blanket in condizioni di carico rappresentative, che vanno dalla gestione dei carichi termomeccanici ed elettromeccanici, alla compatibilità dei materiali, agli effetti e frequenza dei guasti, in presenza di elevati flussi di neutroni.

Il programma Test Blanket Module (TBM) di ITER, che avrebbe dovuto fornire la qualificazione di alcuni dei tipi di blanket fin qui sviluppati dai partner in condizioni operative rilevanti, inclusi i flussi neutronici, è previsto solo per la seconda fase di funzionamento di ITER e non è chiaro quando i risultati potranno essere disponibili. La sorgente di neutroni IFMIF-DONES, l'unica struttura in grado di fornire neutroni con spettro e fluensa, adeguati per qualificare i materiali, sarà operativa intorno al 2035 e potrà irraggiare solo campioni di blanket di piccolo volume. In mancanza di test di qualifica rilevanti, gli effetti combinati dell'impatto dei neutroni e di altri modi di degrado durante il funzionamento, quali ad esempio la corrosione, la fatica da cicli termici e la permeazione del trizio, verrebbero rilevati solo nei test integrali su DEMO.

La strategia sin qui seguita nei programmi "istituzionali" si è fondata sull'assunzione di un basso rischio tecnico rimandando la costruzione di DEMO solo dopo un adeguato (e lungo) programma di qualifica. L'attuale approccio di molte nuove iniziative (CFS, UK-STEP ed altri) ammette un rischio maggiore accettando che la piena qualifica del blanket sia ottenuta al momento del suo utilizzo integrato nel reattore stesso, accorciando così i tempi verso la dimostrazione della fattibilità della fusione. In UK l'autorità atomica (UKAEA) ha recentemente annunciato un programma chiamato "Fusion Futures", che ha l'obiettivo di affrontare alcune di queste sfide.

- *Prestazioni del divertore, scarico ed estrazione della potenza*

La soluzione tecnologica per il divertore adottata in ITER, con materiale di armatura in tungsteno, materiale strutturale in lega di rame e raffreddato ad acqua, potrebbe non essere adeguata per DEMO o per una centrale commerciale a confinamento magnetico, dove i carichi di potenza attesi potrebbero essere notevolmente superiori determinando la necessità di frequenti sostituzioni. Per spingere verso un'attrattiva economica è necessario sviluppare soluzioni notevolmente migliorate e/o trovare configurazioni di plasma in cui una frazione molto ampia di potenza venga irradiata prima di raggiungere il divertore. L'esplorazione di soluzioni che riducono il carico termico sul divertore, affrontate principalmente da studi sul plasma, è l'obiettivo primario di DTT, che si pone quindi al centro di una linea di sviluppo fondamentale per la fusione a confinamento magnetico. Parallelamente è necessario valutare configurazioni e materiali avanzati per il divertore per garantire prestazioni ottimali di raffreddamento, integrità termico-meccanica e, allo stesso tempo, per fornire una protezione sufficiente alla camera da vuoto. Va notato che la configurazione del divertore ha un grande impatto sulla progettazione della macchina e dei sistemi di movimentazione remota.

- *Regimi di plasma ad alta potenza/alto guadagno*

La messa a punto dei regimi di plasma che soddisfano i requisiti di un impianto ad alta potenza/alto guadagno richiede un vigoroso programma di ricerca e sviluppo che combini aspetti fisici e tecnologici che devono essere considerati insieme per trovare soluzioni

progettuali coerenti. Ad esempio, scenari di plasma idonei devono essere combinati con soluzioni di smaltimento del calore, che evitano carichi termici transitori o stazionari elevati sul divertore, garantendone così la durata richiesta. Le condizioni del plasma di DEMO non possono essere tutte riprodotte contemporaneamente negli esperimenti attuali, e anche se in vari esperimenti sono state trovate soluzioni interessanti per i singoli aspetti, la loro integrazione rimane una sfida. Inoltre, le “*disruzioni*” (perdite improvvise di confinamento del plasma) rappresentano una grave minaccia per l’attrattiva di un tokamak e influiscono sulla sua disponibilità complessiva, rafforzando la necessità di sviluppare uno scenario operativo che sia resistente alle perturbazioni, compresi i guasti dei sottosistemi tecnici. Occorre rafforzare la comprensione di come le condizioni al contorno stabilite dal materiale della parete influenzano le prestazioni del plasma in uno sforzo sperimentale e teorico combinato. Poiché DEMO prevede di utilizzare una parete tutta in tungsteno (e anche ITER prevede di convertirsi a questo materiale), la sperimentazione su DTT che avrà la prima parete in tungsteno sarà di estremo interesse per il programma.

- Materiali

I neutroni, interagendo con i materiali dei componenti interni al reattore, ne provocano trasmutazioni (cambiamento della composizione chimica), degradazione delle caratteristiche termo-meccaniche e li rendono radioattivi. I neutroni da fusione hanno un’energia circa dieci volte superiore a quella dei neutroni da fissione, causando effetti diversi nei materiali con cui interagiscono. In particolare, a parità di esposizione, nei materiali esposti a neutroni da fusione si produce una maggiore quantità di gas (idrogeno, elio), responsabile di una maggiore tendenza alle variazioni dimensionali (*swelling*) e infragilimento (*embrittlement*). In Europa e altrove sono stati sviluppati materiali strutturali per la fusione caratterizzati da bassa attivazione neutronica, come gli acciai RAFM, in particolare EUROFER, o acciai *Oxide Dispersion Strengthened* (ODS)⁵⁰. Sulla base dei dati sperimentali, la finestra della temperatura operativa per i RAFM si estende da ~300 °C fino a ~550 °C, con il limite inferiore determinato dall’indurimento e dall’infragilimento indotti dalle radiazioni, e il limite superiore dovuto allo sforzo a scorrimento in temperatura (*thermal creep strength*). L’attuale stato di sviluppo degli acciai RAFM ne consentirebbe l’impiego nel blanket di un reattore DEMO fino ad una esposizione neutronica totale di 20 dpa^p, ovvero per circa 2 anni a piena potenza. Per aumentare la vita del blanket è necessario un vigoroso programma di irraggiamenti per qualificare i materiali nell’intervallo oltre 20 dpa allo scopo di limitare la necessità di sostituire il blanket e quindi i costi associati a tale operazione e ridurre allo stesso tempo la quantità di rifiuti radioattivi. Tale programma dovrebbe affrontare le proprietà meccaniche e termiche, la risposta all’esposizione al plasma e all’irradiazione con neutroni da 14 MeV a un livello superiore a 20 dpa, la compatibilità chimica e le questioni di sicurezza. L’impianto IFMIF-DONES è stato progettato per fornire in pochi anni la qualificazione dei materiali soggetti a irradiazione con adeguato flusso e spettro neutronico, necessari per la progettazione, la concessione di licenze, la costruzione e il

^p Il dpa (displacement per atom) è l’unità di misura utilizzata per l’esposizione neutronica. Considerando i neutroni da fusione, 20 dpa in ferro corrispondono all’esposizione in una prima parete di DEMO per circa 2 anni. In un impianto di potenza i materiali strutturali dovrebbero sostenere almeno 50 dpa per avere una vita del blanket di almeno 5 anni prima della sostituzione.

funzionamento sicuro di un impianto di fusione di potenza. Oltre ai materiali strutturali per il blanket, questo programma deve includere anche i materiali per il divertore, ovvero il tungsteno per la protezione termica (*Armour*) e la lega CuCrZr per i tubi refrigeranti (*Heat Sink*). Parallelamente, deve crescere la maturità e la robustezza dei processi di fabbricazione industriale, lavorazione meccanica, giunzione e produzione. In un'ottica a lungo termine è ugualmente importante continuare lo sviluppo delle leghe ODS, le uniche oggi potenzialmente capaci di raggiungere le performances richieste in un impianto di potenza, e ugualmente materiali avanzati per il divertore come materiali compositi o rinforzati per dispersione di particelle, capaci di sopportare flussi termici più elevati.

- Confinamento inerziale

Un futuro reattore a fusione inerziale dovrà funzionare in maniera impulsata ad una frequenza di ripetizione che si stima essere di circa 10 volte al secondo (10 Hz). Questo pone requisiti stringenti per tutti gli impianti e i dispositivi che saranno operativi durante il funzionamento del reattore, e che dovranno lavorare con tale periodicità. Ciò riguarda:

- sistemi di inserimento, ad alta velocità e riproducibilità, delle capsule di combustibile nella posizione dedicata;
- sistemi di verifica e controllo, prima di ciascun irraggiamento laser, della posizione della capsula e delle sue caratteristiche fisiche;
- sistemi di protezione di materiali e di dispositivi rispetto ai detriti ad alta velocità prodotti dall'irraggiamento laser con la capsula;
- sistemi di acquisizione, gestione, salvataggio e copia dei dati.

Come per gli altri sistemi, anche i laser dovranno operare alla frequenza di 10 Hz, con energie per singolo irraggiamento dell'ordine di qualche MJ e ad efficienze più elevate (>10%) rispetto a quelle dei laser attualmente impiegati negli esperimenti di fusione inerziale. Le metodologie in fase di sviluppo prevedono il miglioramento dell'efficienza degli amplificatori laser mediante la tecnologia di pompaggio a diodi. In tal modo si sono ottenuti al momento laser con energia per impulso di 1500 J con ripetizione di un impulso al minuto, e di 100 J con 10 Hz. Versioni migliorate di questi moduli potranno servire come base per impianti modulari laser futuri che funzionino a 10 Hz e con energia complessiva di qualche MJ.

Nell'irraggiamento indiretto, sin qui usato negli esperimenti record di NIF, l'energia che raggiunge la capsula in forma di raggi X è circa un decimo di quella iniziale dei laser iniettata nell' Hohlraum. Il prezzo da pagare per avere irraggiamento uniforme è quindi quello di una notevole perdita di energia utile. Rimane quindi da sviluppare l'approccio diretto, in cui i laser colpiscono la superficie della capsula, e che consente di trasferire energia al combustibile in maniera molto più efficiente. Ciò comporta maggiori guadagni a parità di energia, o lo stesso guadagno con energie laser molto ridotte. Nell'approccio diretto, inoltre, non è previsto l'uso di Hohlraum e si rende possibile l'uso di capsule più semplici, con enorme riduzione dei costi del combustibile rispetto all'approccio indiretto.

- Sicurezza e produzione e gestione dei rifiuti

Il potenziale di pericolo degli impianti a fusione è molto inferiore a quello degli impianti a fissione, ma non può essere considerato insignificante, ed è principalmente associato al

rilascio di trizio e di materiali attivati. Rimangono aperti alcuni elementi di ricerca e sviluppo in vista dello sviluppo dell'approccio di sicurezza DEMO, necessario per accompagnare la progettazione fin dalla sua fase iniziale e stabilire obiettivi di sicurezza. Innanzitutto, è importante ridurre le incertezze nella quantificazione dei termini chiave delle sorgenti radiologiche. In secondo luogo, è necessario valutare la quantità di rifiuti derivanti dalle operazioni, rifiuti che si prevedono più grandi rispetto a quelli generati in impianti a fissione, e dopo quanto tempo essi possono soddisfare i criteri di rifiuti a bassa attività. In terzo luogo, è necessario capire se eventuali rifiuti di livello intermedio possono essere gestiti in impianti di smaltimento in prossimità della superficie.

L'approccio auspicato in Europa per la gestione dei rifiuti degli impianti a fusione si basa fortemente sul *recycling* e sull'allontanamento dal regime autorizzatorio (*clearance*) per ridurre i costi di *decommissioning* e come alternativa allo smaltimento in depositi per rifiuti radioattivi a bassa attività in prossimità della superficie. Non si prevede che la fusione genererà alcun rifiuto radioattivo ad alta attività. A parte alcuni studi effettuati su tecniche di rimozione del trizio e del ^{14}C , e l'esperienza di *recycling* proveniente dall'industria della fissione riguardante gli acciai attivati con metodi industriali, la fattibilità e potenzialità del *recycling* per i materiali utilizzati negli impianti a fusione deve essere ancora in larga misura investigata e validata. A questo scopo, sarà di grande rilievo il *decommissioning* di JET che inizierà tra qualche mese, oltre alla fondamentale sperimentazione in ITER.

- Manutenzione remota

Non è stata ancora identificata una soluzione definitiva per la manutenzione e la riparazione dei componenti interni del reattore. Dato il numero di componenti presenti all'interno della camera da vuoto (moduli blanket, divertore), la loro rimozione e riparazione in caso di guasti ha un grande impatto nel determinare la disponibilità dell'impianto. E' quindi necessario sviluppare un sistema di manutenzione remota e la relativa strategia in grado di garantire la rimozione dei componenti anche in caso di danni e ridurre al minimo la durata della manutenzione garantendo al contempo il rispetto dei requisiti di sicurezza (ad esempio il contenimento del trizio).

3-4.2 Economicità - Studi di reattore e analisi di scenari

Il costo del kWh dell'energia da fusione dipende principalmente da tre fattori: a) il costo di investimento, b) l'efficienza netta (MWh elettrici in rete/MWh termici) e c) la disponibilità dell'impianto (ore di funzionamento all'anno).

I parametri del reattore DEMO sviluppato nell'ambito della *Roadmap* europea sono definiti sulla base di un approccio conservativo basato sulla tecnologia di ITER, già disponibile, per i magneti e il divertore. Sulla base di queste assunzioni, nella versione Baseline 2017^{51,52}, DEMO ha raggio maggiore $R_0 = 9$ m, raggio minore $a = 2,9$ m, campo magnetico sull'asse della camera a vuoto, $B_0 = 5.7$ T, potenza di fusione $P_{fus} = 2000$ MW, potenza elettrica netta $P_e = 500$ MW, e disponibilità complessiva dell'impianto pari a 70%. Inoltre, si assume di utilizzare in una prima fase un blanket "starter" con EUROFER come materiale strutturale fino ad un limite di 20 dpa, già disponibile, per poi passare a un secondo blanket con materiali strutturali migliorati utilizzabili fino a 50 dpa.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Date le dimensioni, l'efficienza globale e la disponibilità di DEMO, il costo dell'energia elettrica prodotta non sarebbe competitivo rispetto ad altre fonti energetiche. D'altra parte, DEMO è concepito in modo conservativo come un "dimostratore" delle tecnologie nucleari al fine di ridurre i rischi nella costruzione di un First-of-a-kind (FOAK) a cui rimandare significative ottimizzazioni successive. Inoltre, i programmi "istituzionali" perseguono la dimostrazione e la piena qualifica per le varie tecnologie prima di intraprendere la costruzione di DEMO per ridurre le incertezze costruttive ed operative. Questo approccio riduce il rischio di investimento del dimostratore e migliora la durata e la disponibilità del funzionamento dell'impianto ma, al tempo stesso, comporta un'adozione più lenta dell'energia da fusione sul mercato. Inoltre, richiede un notevole capitale iniziale per costruire costose strutture di test e validazione.

L'approccio di alcune iniziative private consiste, invece, nel mirare direttamente al FOAK con l'adozione di soluzioni innovative che risultano determinanti per l'economicità dell'elettricità prodotta. L'intenzione è quella di dimostrare la fattibilità tecnica della fusione a livello di prototipo, con lo scopo di dare slancio iniziale al settore e promuovere l'innovazione attraverso una certa pressione competitiva. Infatti, soluzioni innovative già in fase di sviluppo, renderanno la fusione più competitiva:

- i materiali superconduttori ad alta temperatura critica (HTS), offrono vantaggi tecnologici rilevanti in quanto possono operare con un margine di temperatura più elevata consentendo configurazioni di avvolgimenti e magneti semplificate, raffreddate indirettamente per conduzione, separando le funzioni di raffreddamento ed elettriche del conduttore. Ciò può tradursi in una riduzione del rischio di guasti ad alta tensione e del rischio di perdite di elio. Inoltre, tali materiali, insieme a materiali strutturali avanzati, applicati a configurazioni di magneti innovativi consentirebbero anche una riduzione della dimensione dell'impianto.
- alternative ai refrigeranti ad acqua, compatibili con una finestra di temperatura operativa più ampia, presentano il vantaggio di far ottenere efficienze termodinamiche e durate di vita potenzialmente più elevate di quelle previste oggi per la soluzione acqua/EUROFER e inoltre di alleviare i potenziali problemi legati all'impatto dei neutroni da 14 MeV sulla chimica dell'acqua.

Tali approcci, in caso di esito positivo, dovranno comunque essere seguiti da ulteriori sviluppi per dimostrare non solo che sia possibile costruire un impianto a fusione, ma che sia possibile farlo con dimensioni, disponibilità e costi commisurati alle esigenze del mercato energetico.

Nonostante le ampie incertezze e le assunzioni sulle tecnologie disponibili, sono stati effettuati numerosi studi di scenario, sia in Europa (EUROfusion⁵³) sia negli Stati Uniti⁵⁴, per investigare le condizioni e i livelli di penetrazione dell'energia da fusione nel mix energetico mondiale. Questi studi mostrano che tale penetrazione non dipende solo dai progressi nella tecnologia stessa, ma dipende in modo critico anche dalla crescita economica e quindi dalla domanda di energia (in particolare energia elettrica) e dalle politiche pubbliche sugli obiettivi della transizione energetica. Un altro fattore importante è l'accettazione pubblica, che risulta in generale molto positiva e sarà determinante nella diffusione degli impianti a fusione. In presenza di limiti molto stringenti sulle emissioni di carbonio, lo sfruttamento dell'energia da fusione potrà iniziare non appena la tecnologia

si renderà disponibile in maniera competitiva con altre tecnologie a basse emissioni di gas climalteranti e crescerà rapidamente in presenza di una adeguata *supply chain*.

Il progetto ITER ha contribuito in modo decisivo alla crescita delle capacità industriali in ambito fusione in tutto il mondo e particolarmente in Italia. Inoltre, l'attuale evoluzione del panorama internazionale sullo sviluppo dell'energia da fusione vede alcune industrie assumere il ruolo non solo di fornitori di componenti e servizi, ma anche di sviluppatori. In ogni modo, passare dagli attuali progetti, seppur in numero crescente, ad un mercato su larga scala della fusione richiede un significativo ampliamento della *supply chain* e della relativa capacità, in particolare per le forniture di tipo più specifico riguardanti il ciclo del combustibile (trizio), i girotroni per il riscaldamento del plasma, l'arricchimento del litio in ^6Li , la produzione di magneti superconduttori etc. La sfida è raccogliere il capitale iniziale necessario e di assicurare continuità di investimenti. La soluzione a questa sfida si trova nella costituzione di partenariati pubblico-privati, con il chiaro obiettivo dello sviluppo e qualifica delle tecnologie più critiche, e basati su meccanismi di condivisione del rischio.

3-4.3 **Punti di forza e criticità del sistema nazionale**

I capitoli precedenti hanno evidenziato i punti di forza dell'Italia nell'ambito dell'impegno internazionale per lo sviluppo della fusione: le competenze presenti nei laboratori e nelle università sulla gamma completa delle conoscenze scientifiche e tecnologiche necessarie, la disponibilità di un ampio parco di infrastrutture di ricerca, il posizionamento nel programma europeo e le numerose collaborazioni internazionali, le capacità ingegneristiche e costruttive relative a complessi sistemi a fusione, la presenza di un'industria con ampia esperienza e competenza in ambito fusionistico. Alla luce del rapido cambiamento in atto, è oltremodo necessario che le risorse e le competenze acquisite possano crescere per poter accogliere in pieno le opportunità che si stanno presentando.

La popolazione dei ricercatori, tecnologi e ingegneri attivi sulla fusione in Italia è cresciuta in modo notevole nel corso degli anni '80 del secolo scorso, e ha visto oscillazioni significative nelle nuove assunzioni negli ultimi decenni. Come risultato, una parte importante di tale popolazione, la più esperta, è prossima a fine carriera determinando perdite di conoscenze e *know how*. La costruzione di DTT sta ponendo rimedio, almeno in parte, a questo formando una nuova generazione di ingegneri e ricercatori con la realizzazione di un progetto innovativo di grande complessità. Tuttavia, in molti settori né il ricambio, né tantomeno il trasferimento di conoscenze, è garantito.

La necessità di portare a maturità le tecnologie più critiche, quali quelle dell'estrazione di potenza, dei blanket e dei materiali, con particolare attenzione agli aspetti radiologici, richiede il potenziamento delle infrastrutture di ricerca con caratteristiche rilevanti allo scopo. Anche in questo caso, la costruzione di DTT garantirà la presenza in Italia di una macchina di taglia, contenuto innovativo e rilevanza per il programma ben superiori a quelli delle altre macchine presenti in Europa. La presenza di MITICA e SPIDER della NBTf stanno ugualmente garantendo una competenza di eccellenza nel campo del riscaldamento dei plasmi con iniezioni di neutri e dell'elettronica di potenza. La presenza di FNG costituisce un altro importante *asset* per le competenze neutroniche *hands-on*.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Tuttavia, i flussi neutronici ottenibili a FNG sono estremamente bassi e, sebbene largamente non sufficienti ai fini dello studio del danneggiamento dei materiali indotto da neutroni, un upgrade di FNG di pochi ordini di grandezza nel flusso neutronico, potrebbe garantire lo svolgimento di studi rilevanti sulle performance dei blanket. Inoltre, non sono presenti in Italia laboratori attrezzati per la manipolazione di trizio o celle calde per test su materiali irraggiati, infrastrutture necessarie per le tecnologie del blanket e dei materiali, nonché di interesse trasversale per tutti i settori del nucleare.

Una questione chiave è come sostenere e sviluppare le capacità industriali acquisite, tutte di grande valore anche per applicazioni in molti altri campi, che richiedono continuità in termini di realizzazioni di infrastrutture. Le aree industriali che non sono state stimulate dagli appalti ITER dovranno inoltre essere avviate. Alcuni settori si presentano particolarmente critici per il nostro Paese, quali quelli relativi all'arricchimento del ^6Li , all'impiego su larga scala del riscaldamento a microonde, alla fabbricazione di blanket, al recycling su scala industriale dei rifiuti radioattivi, per citarne solo alcuni.

Infine, in relazione agli aspetti normativi, è importante notare che il nostro Paese (l'unico in anni recenti in Europa, a parte la Francia per ITER) ha molto recentemente portato a termine la procedura autorizzativa per l'impianto DTT i cui aspetti nucleari, pur se ridotti di vari ordini di grandezza rispetto ad un impianto di potenza, non sono trascurabili. ENEA ha curato la procedura e ha ottenuto il nulla osta di categoria A per le pratiche con sorgenti di radiazioni ionizzanti relativo all'impianto DTT ai sensi dell'art. 51 del D. Lgs. 31 luglio 2020 n.101. Per l'attuale sistema autorizzativo, insieme a quello relativo alla gestione dei rifiuti radioattivi (Decreto 7 agosto 2015 - Classificazione dei rifiuti radioattivi, ai sensi dell'articolo 5 del D. Lgs. 4 marzo 2014, n. 45), dovrà essere valutata l'eventuale necessità di adattamento del testo per un impianto di potenza a fusione con un approccio graduale (*graded approach*) che tenga in considerazione l'inventario radioattivo e gli scenari di sicurezza, massimo incidente credibile, sitologia, anche sulla base di altre esperienze in corso (in UK, in USA) con cui siamo già abbastanza allineati.

CAP. 4 - ELABORAZIONE DI PROPOSTE

C4-1 Introduzione

Il lavoro di ricognizione ha mostrato che il contesto globale dell'energia da fusione sta vedendo una sostanziale accelerazione con un numero crescente di società nel settore privato impegnate nello sviluppo della fusione sia magnetica sia inerziale, o con approcci misti, che stanno raccogliendo investimenti sostanziosi da parte di soggetti principalmente privati, ma anche governativi. Alcune di queste società hanno in programma la realizzazione di impianti in grado di produrre energia elettrica nella decade tra il 2030 e il 2040, quindi in anticipo rispetto alla metà del secolo prevista nell'ambito degli attuali programmi di ricerca pubblici. La sperimentazione in ITER nei prossimi anni fornirà informazioni ed esperienze fondamentali in termini di *commissioning*, scenari di plasma, gestione del trizio e aspetti nucleari, sicurezza e disponibilità dell'impianto, *remote handling*, *power exhaust* nonché l'effettivo scenario di inventario di rifiuti radioattivi, oltre ad aver già fornito rilevanti informazioni su molte delle tecnologie costruttive dei componenti e dei sottosistemi di un impianto per produzione di energia elettrica da fusione.

A tal proposito occorre inoltre evidenziare che ITER ha recentemente annunciato per la prima volta l'intenzione di impegnarsi più ampiamente ad un approccio di *partnership* pubblico-private (PPP), attraverso il coinvolgimento del settore privato alle iniziative di fusione, con la partecipazione di società attive nello sviluppo di impianti, degli *end-user*, della *supply chain*, delle università e dei centri di ricerca. L'obiettivo è sviluppare mezzi di accesso efficienti affinché le aziende del settore privato possano imparare dal corpus pratico di conoscenze e dalle lezioni apprese finora nello sviluppo del progetto ITER. La realizzazione di ITER, e anche lo sviluppo delle nuove macchine, stanno insegnando la necessità del coinvolgimento della *supply chain* fin dall'inizio del processo di progettazione per ottimizzare le esperienze e le competenze.

In Italia è presente una combinazione quasi unica nel panorama internazionale di competenze scientifiche, tecnologiche, ingegneristiche e industriali grazie alle quali il nostro sistema Paese è protagonista nello sviluppo e nella costruzione di ITER, secondo solo alla Germania nel contributo alla *Roadmap* europea sulla fusione, e attualmente impegnato nella costruzione della *facility* DTT.

Analogamente, il previsto upgrade del sistema laser della NIF e le campagne sperimentali previste sulla *facility* ad irraggiamento diretto (*direct drive*) OMEGA promettono sostanziali sviluppi nel campo della fusione a confinamento inerziale, in particolare rispetto al guadagno nel primo caso ed all'ottimizzazione del processo di implosione e di design del target di combustibile nel secondo.

Grazie al fertile contesto nazionale, vi sono le condizioni perché il Paese possa cogliere appieno le opportunità che si stanno presentando per lo sviluppo dell'energia da fusione la quale, con le condizioni nel seguito delineate, potrebbe cominciare a giocare un ruolo nel mix energetico nazionale già alla metà del secolo. Ciò richiede un intenso programma di attività di formazione, ricerca e sviluppo tecnologico, nonché di crescita industriale e

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

della *supply chain* in modo da consolidare ulteriormente il ruolo del Paese in questo settore strategico, contribuire allo sviluppo su scala industriale degli impianti a fusione e preparare il Paese alla costruzione, operazione e manutenzione di centrali elettriche a fusione non appena la tecnologia si renda disponibile.

La tecnologia più avanzata, ad oggi, è quella del confinamento magnetico basata sulla configurazione tokamak la quale, inoltre, trova piena corrispondenza nelle capacità industriali di eccellenza del nostro Paese che vanno dalla meccanica alla realizzazione di cavi e magneti superconduttori a bassa e alta temperatura critica, dalla robotica all'elettronica di potenza, solo per fare alcuni esempi. Lo scenario globale prevede al momento la possibilità che i primi reattori basati sul confinamento magnetico in grado di immettere potenza elettrica in rete possano essere costruiti in altri Paesi (per es. Stati Uniti, Gran Bretagna, Germania, Cina) ben entro il 2050, rendendo potenzialmente la tecnologia disponibile per la costruzione di alcuni impianti anche in Italia. L'approccio qui proposto prevede quindi sia un adeguato programma nazionale sia una stretta collaborazione con i progetti esteri più promettenti e più ambiziosi in termini temporali, così da essere pronti ad applicarne i risultati in Italia già al 2040, senza eccessivi oneri (temporali prima ancora che di costo).

Un fattore abilitante a questo approccio è rappresentato dallo sviluppo e dalla successiva implementazione di un quadro normativo chiaro e specifico per la fusione sfruttando il coordinamento iniziato da IAEA e il lavoro portato avanti da altre nazioni a livello internazionale come Stati Uniti e Gran Bretagna; si rende pertanto indispensabile individuare e strutturare l'ente di stato previsto per il *licensing* degli impianti di fusione e avviarne le attività nel minor tempo possibile.

Al tempo stesso, si ritiene strategico che la ricerca continui anche su linee diverse quali la fusione a confinamento inerziale e/o con cicli diversi da quello deuterio-trizio, con l'obiettivo di mantenere e far crescere nel Paese le competenze per poter accogliere tutti gli sviluppi che si avranno su queste linee nel caso possano competere con il confinamento magnetico basato sul ciclo D-T.

In questa fase in cui la fusione sta muovendo dall'ambito scientifico-tecnologico a quello industriale, visto l'entità dello sforzo ancora necessario per colmare i gap tecnologici, è essenziale che si continui a sostenere il positivo clima di collaborazione e condivisione delle infrastrutture che ha sin qui contraddistinto lo sforzo globale per lo sviluppo di questa tecnologia. Al tempo stesso, è necessario che venga definito un quadro chiaro dei diritti di proprietà intellettuale connessi con la messa a punto di processi/prodotti per impianti a fusione per permettere un efficace trasferimento tecnologico e la crescita globale del mercato della fusione.

Ciò premesso, le condizioni per l'avvio della produzione di energia elettrica da fusione in Italia intorno al 2050 sono legate all'attuazione di un vigoroso programma e al raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- a breve termine (2030) la maturazione delle conoscenze scientifiche, delle tecnologie e del quadro normativo, dei *concept* progettuali di reattori e delle capacità industriali della *supply chain* in modo da permettere l'inizio della progettazione di impianti a fusione commerciali

- a medio termine (2035-38) la piena acquisizione dei fattori abilitanti per consentire entro il 2050 l'avvio della produzione di energia elettrica da fusione e la successiva commercializzazione della tecnologia.

C4-2 Obiettivi del programma

La fase di ricognizione ha mostrato che le sfide ancora da affrontare per la piena diffusione commerciale della fusione consistono nel:

- validare gli elementi fisici e tecnologici meno maturi (si veda §C2-5)
 - tecnologie del trizio e del blanket
 - prestazioni del divertore, smaltimento della potenza
 - regimi di operazioni di plasma ad alta potenza/alto guadagno
 - materiali per i componenti in-vessel
 - sicurezza e gestione dei rifiuti
 - manutenzione remotizzata/robotizzata
 - sistemi di riscaldamento addizionale e di generazione di corrente, e sistemi diagnostici e di controllo adeguati al funzionamento e gestione del reattore,
 - magneti superconduttori, sistemi di gestione dei flussi di potenza con la rete
- ottimizzare i processi di industrializzazione dei singoli componenti, eliminando o minimizzando il ricorso a processi onerosi perché troppo costosi o lunghi e ad alto rischio;
- integrare tali elementi in una centrale elettrica affidabile, disponibile e di lunga vita operativa. Questa fase, associata in generale nei vari programmi alla costruzione di un reattore dimostrativo, deve sfruttare le caratteristiche di sicurezza intrinseca della fusione e convalidare le basi scientifiche, tecnologiche, innovative e industriali di un primo impianto commerciale;
- ottimizzare/migliorare la competitività economica degli impianti a fusione da dispiegare sul mercato.
- definire il complesso di standard, normative e processi sia progettuali/realizzativi sia autorizzativi/normativi per la progettazione, la realizzazione, l'esercizio, la manutenzione e lo smantellamento di una centrale a fusione.

Gli avanzamenti sopra indicati sono in buona parte comuni agli impianti a confinamento magnetico e a quelli a confinamento inerziale. In quest'ultima linea, i gap fisici e tecnologici specifici da colmare sono essenzialmente quelli relativi alla dimostrazione della fattibilità di un reattore basato su irraggiamento diretto del combustibile, alla tecnologia dei laser ad alta efficienza, e di tutti i sistemi richiesti per il funzionamento del reattore ad alta frequenza.

L'avanzamento sulle linee sopra indicate dovrà avvalersi di soluzioni innovative che risulteranno determinanti per la fattibilità ed economicità dell'elettricità da fusione, quali ad esempio i materiali e nastri/cavi superconduttori ad alta temperatura critica (HTS, intesi nella loro integrazione di avvolgimenti, alimentazioni e controllo) e i refrigeranti alternativi all'acqua, compatibili con una finestra di temperatura operativa più ampia.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Pertanto, l'obiettivo di abilitare l'avvio dell'energia da fusione intorno alla metà del secolo richiede l'attuazione di un programma di attività mirato al raggiungimento degli obiettivi riportati in Tabella nel breve (2030-35) e nel medio-lungo termine (2050):

Tabella 4 – Obiettivi del programma

Breve termine (2030)	Medio termine (2035-38)	Lungo termine (2050)
O1 – Competenze di fisica e ingegneria, di operazione, gestione e controllo di impianti a fusione a confinamento magnetico		
Rafforzamento delle competenze di fisica dei plasmi in regimi di rilevanza reattoristica, di ingegneria, di operazione, gestione e controllo di impianti a fusione tramite la partecipazione di un adeguato team di ricercatori e ingegneri alla sperimentazione e operazione di DTT, NBTF, RFX-mod e altri impianti a fusione europei, e tramite il contributo alla preparazione delle operazioni in ITER.	<p>Continuo rafforzamento delle competenze di fisica, ingegneria, operazione, gestione e controllo di impianti a fusione.</p> <p>Finalizzazione dei parametri del reattore, sulla base di progetti già realizzati o in via di realizzazione in Italia o altrove.</p> <p>Sviluppo di modelli e codici per operazione e controllo di impianti a fusione.</p>	<p>Disponibilità delle competenze necessarie per operazione, gestione e controllo di impianti a fusione, e del loro ulteriore sviluppo.</p> <p>Partecipazione alla sperimentazione di ITER.</p>
O2 – Tecnologie abilitanti della fusione e infrastrutture necessarie per impianti a fusione a confinamento magnetico		
Realizzazione di adeguate infrastrutture per sperimentazione e test per lo sviluppo delle tecnologie della fusione non ancora mature con particolare riguardo a quelle nucleari (tecnologie dei materiali strutturali e funzionali per componenti affacciati al plasma e mantelli, tecnologie per la produzione e gestione del trizio per l'intero ciclo del combustibile, tecnologie per l'arricchimento del Li in ⁶ Li) e dell'estrazione della potenza.	<p>Dimostrazione delle tecnologie della fusione, incluse quelle nucleari, tramite la realizzazione di prototipi, test e qualifica di materiali e componenti (divertore, blanket, magneti, sistemi di riscaldamento e diagnostici).</p> <p>Formazioni di partnership-pubblico private per programma di prototipazione e qualifica.</p> <p>Sviluppo tecnologie digitali e strategie per operazione e manutenzione di impianti a fusione.</p> <p>Definizione di <i>Utility Requirements</i> europei tra utilities/end users interessati ad uno sfruttamento commerciale della tecnologia, per individuare gli obiettivi di progetto</p>	<p>Realizzazione primo/i reattore/i commerciali.</p> <p>Disponibilità di tecnologie innovative (materiali avanzati, magneti superconduttori, componenti, sistemi di riscaldamento, diagnostici e di controllo avanzati) che consentano di accrescere la sostenibilità economica di ulteriori impianti a fusione.</p>

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

	premianti e le modalità operative accettabili.	
O3 – Capacità di progettazione e integrazione di sistema		
Ottimizzazione del progetto del reattore inclusi i sistemi ausiliari (sistemi di riscaldamento addizionali, impianti di potenza, criogenici e di raffreddamento, sistemi diagnostici, sistemi robotici e di controllo intelligente, balance of plant).	Consolidamento di System Integrator, che aggrega competenze di design ed esercizio, e di un end-user, in grado di coordinare il programma di sviluppo di un primo impianto anche in Italia e per la successiva serie, anche coordinandosi con i programmi internazionali.	Consolidamento dei sistemi di gestione dei flussi di potenza per alimentare senza disservizi reattori a fusione e per l'immissione di energia da fusione in rete.
O4 – Supply chain nazionale e processi produttivi		
Consolidamento delle capacità industriali esistenti e valorizzazione del know-how acquisito. Sviluppo delle capacità industriali della <i>supply chain</i> italiana sulle tecnologie meno mature anche tramite la partecipazione a programmi internazionali e con il supporto di laboratori di ricerca e delle università Sviluppo di azioni volte ad aumentare la competitività del settore privato della fusione italiano ed internazionale alla luce della concorrenza globale.	Consolidamento della capacità industriale e <i>supply chain</i> , da raggiungere attraverso investimenti per colmare vari tipi di gap esistenti (formazione, processi produttivi, innovazione di prodotto), e forme di sostegno pubblico, in considerazione di analoghi programmi di sviluppo portati avanti da altri Paesi europei. Formazione di partnership pubblico-private per accelerare l'ottimizzazione dei processi produttivi. Consolidamento, anche con agenzie e organizzazioni internazionali, di standard e certificazioni di componenti e prodotti.	Disponibilità di processi produttivi ottimizzati che accrescano l'economicità degli impianti a fusione.
O5 – Fusione a confinamento inerziale		
Sviluppo di tecnologie e sistemi laser adeguati per confinamento inerziale ad irraggiamento diretto del tipo <i>shock ignition</i> e <i>fast ignition</i> . Creazione di un centro nazionale di analisi computazionale open access per attività avanzate di modellistica e simulazione. Crescita delle competenze teoriche e sperimentali presso le facility nazionali e tramite la partecipazione ai	Consolidamento delle competenze teoriche e sperimentali nella fisica e nelle tecnologie per la fusione inerziale. Partecipazione al programma HiPER+ per la realizzazione di un'infrastruttura di grande scala a scopo dimostrativo.	Sviluppo di approcci alternativi, con particolare riferimento alla fattibilità della fusione a confinamento inerziale con reazione aneutronica p-11B, nello schema <i>proton fast ignition</i> .

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

<p>progetti internazionali per lo studio dell'interazione laser-plasma, per lo sviluppo delle tecnologie di produzione dei target e dei necessari metodi diagnostici.</p>		
<p>O6 – Ricerca, formazione e innovazione tecnologica</p>		
<p>Mantenimento di un adeguato livello di ricerca di base nella fisica dei plasmi, nello sviluppo di materiali e tecnologie della fusione, nei processi e sistemi avanzati, e negli approcci alternativi quali la fusione a confinamento inerziale. Formazione tramite accesso e utilizzo di infrastrutture sperimentali. Rafforzamento dell'offerta formativa universitaria e di alta formazione riguardo l'energia da fusione, per garantire adeguata presenza di ricercatori, ingegneri e operatori in questo ambito</p>	<p>Rafforzamento di un adeguato livello di ricerca nella fisica dei plasmi, nelle tecnologie della fusione, nello sviluppo di materiali, processi e sistemi avanzati, e nella ricerca relativa a approcci alternativi. Consolidamento di adeguata offerta formativa universitaria e di alta formazione riguardo l'energia da fusione, per garantire di ricercatori, ingegneri, operatori e tecnici in questo ambito.</p>	<p>Crescita di adeguata offerta formativa universitaria e di alta formazione riguardo l'energia da fusione, per garantire di ricercatori, ingegneri, operatori e tecnici per lo sviluppo della filiera di reattori a fusione.</p>
<p>O7 – Quadro normativo e autorizzativo</p>		
<p>Sviluppo di un quadro autorizzativo e normativo specifico per l'energia da fusione che ne abiliti l'industrializzazione tenendo conto delle differenze tra fusione e fissione, dalla realizzazione, operazione e manutenzione allo smantellamento e la gestione dei rifiuti.</p>	<p>Presenza di un quadro normativo chiaro per l'autorizzazione, commissioning, operazione, smantellamento e gestione dei rifiuti di impianti a fusione. Selezione e preparazione del sito e delle relative infrastrutture.</p>	<p>Presenza di autorità di autorizzazione e controllo.</p>

CAP. 5 - ROAD MAP

C5-1 Programma di attività verso la fusione commerciale

Gli elementi del programma sono riportati nel seguito, presentati in funzione degli obiettivi illustrati nel capitolo precedente.

O1 – Competenze di fisica e ingegneria, di operazione, gestione e controllo di impianti a fusione a confinamento magnetico

Le seguenti attività sono fondamentali per la crescita e mantenimento delle competenze di *system integrator* e di gestione e operazione di impianti a fusione:

- Completamento della costruzione e *commissioning* dell'impianto DTT. Sperimentazione su DTT per la validazione della soluzione per il divertore.
- Partecipazione al *commissioning* e alla sperimentazione in ITER. Sperimentazione nella NBTF. Sperimentazione su RFX-mod2 e partecipazione a esperimenti europei MFE (ASDEX, WEST, COMPASS) e internazionali esistenti (JT-60SA, KSTAR, EAST, D-IIID, HL-3 etc.) e futuri (SPARC, ARC, BEST, STEP, CFETR), assicurando l'accesso per condivisione ai dati sperimentali storici dei principali impianti nel rispetto delle proprietà intellettuali.
- Sviluppo di operazioni di plasma in regimi reattoristici, codici e modelli, e loro validazione sperimentale. Studio e valutazione tecnico-scientifica di regimi di *burning plasma*.

O2 – Tecnologie abilitanti della fusione e infrastrutture necessarie per impianti a fusione a confinamento magnetico

Le attività hanno il fine di ridurre drasticamente i rischi associati alla realizzazione del primo impianto attraverso l'attuazione di un programma di sviluppo tecnologico comprensivo di realizzazione prototipi e loro qualifica, che abilitino l'inizio della progettazione esecutiva del reattore. Il programma è svolto attraverso la formazione di partnership pubblico-private (PPP):

- Sviluppo, test e qualifica materiali strutturali e funzionali. Partecipazione alla costruzione e alle campagne di irraggiamento presso IFMIF/DONES.
- Realizzazione di infrastrutture tecnologiche per:
 - sorgente di neutroni con intensità sufficiente per sviluppo del ciclo del combustibile
 - prove con celle calde per qualifica materiali radioattivi
 - prove e qualifica componenti per ciclo del combustibile
 - prove componenti e relative tecnologie per blanket, sistemi raffreddamento, *additive manufacturing*
 - prove qualifiche di alimentazioni elettriche, cavi e magneti superconduttori in regimi AC e DC per caratterizzazioni e test – Upgrade della Frascati Cold Coil Test Facility ed eventuale integrazione altri laboratori in un'infrastruttura distribuita
 - prove di *remote handling* e sviluppo di sistemi di manipolazione remota adatti all'uso in ambiente reattoristico.
 - sviluppo divertori innovativi e relativa industrializzazione.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

- Realizzazione, test e qualifica di prototipi in partnership ricerca-industria per:
 - componenti critici quali divertori, blanket, magneti, etc.
 - sistemi diagnostici e algoritmi di trattamento dati e analisi intelligenti associati a codici di controllo in tempo reale del plasma
 - sistemi di riscaldamento del plasma (e.g. ICRH e ECRH)
 - sistemi di potenza per la gestione dei flussi di scambio di potenza con la rete, dei sistemi di alimentazione per gli attuatori dei sistemi di controllo dinamico e per i sistemi di riscaldamento addizionale
 - tecnologie da vuoto alternative ai sistemi criogenici e dei sistemi di condizionamento della parete compatibili con il reattore.
- Identificazione dei requisiti di progetto, inclusi gli aspetti di sicurezza e gestione dei rifiuti - Input per elaborazione quadro normativo.

O3 – Progettazione e integrazione di sistema

Le attività previste mirano a:

- Definizione delle modalità di funzionamento attese per la generazione di energia elettrica, sulla base dei requisiti degli *end user* per input al progetto concettuale.
- Creazione di PPP per il progetto concettuale di impianti a fusione, prioritizzazione e ottimizzazione dei processi produttivi. A seguire, creazione PPP per il progetto esecutivo e costruttivo di impianti a fusione sul territorio italiano.
- Sviluppo tool per studi di rete per l'interfacciamento di un reattore a fusione con il sistema elettrico nazionale e gestione dei flussi energetici (centro controllo reti).

O4 – Sviluppo e implementazione della *supply chain* nazionale e ottimizzazione processi produttivi

Poiché il contesto internazionale della fusione è ancora in sviluppo e quindi incerto, la crescita della *supply chain* richiede in primo luogo la maturazione delle tecnologie e la scelta delle soluzioni progettuali da adottare. Richiede inoltre l'adozione di misure di supporto pubblico per la formazione e la creazione di competenze professionali e di manodopera qualificata, e relativo supporto economico. I principali elementi sono i seguenti:

- Definizione del set di componenti/sistemi per i quali la ricerca italiana ha messo a punto soluzioni di avanguardia, e quindi:
 - Prioritizzazione del relativo sviluppo industriale.
 - Identificazione e mappatura delle *value chain* e tecnologie abilitanti per valorizzazione/sviluppo della *supply chain* a livello nazionale ed europeo.
 - Definizione di un quadro per i diritti di proprietà intellettuale connessi con la messa a punto di processi/prodotti per la fusione, essenziale per stimolare investimenti privati in tecnologie innovative.
- Supporto per i costi necessari allo sviluppo di processi applicabili al settore della fusione e all'ottenimento e al mantenimento delle certificazioni e conformità nucleari della fusione:
 - Sviluppo dei sistemi di saldatura, lavorazioni meccaniche, trattamenti termici e coating, applicabili al settore della produzione dei componenti specifici per la fusione.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

- Istituzione di meccanismi di incentivazione all'innovazione industriale, analoghi a quelli esistenti per altri settori strategici (ad es. IPCEI idrogeno).
- Sviluppo/potenziamento di scuole di alta formazione e certificazione di personale qualificato per gestione di impianto.
- Contributi statali a fondo perduto o prestiti agevolati alle imprese che investono nel settore della fusione per la costruzione di prototipi e impianti, garanzie sui finanziamenti privati concessi alle imprese del settore della fusione, riducendo il rischio per gli investitori e facilitando l'accesso al credito.
- Creazione/partecipazione a gruppi di lavoro per lo sviluppo di standard di riferimento tecnici.
- Supporto allo sviluppo di stabilimenti industriali attrezzati/idonei per la produzione di componenti specifici per la fusione.
- Supporto alla partecipazione della *supply chain* italiana a eventi del settore al fine di promuovere l'export della filiera industriale nazionale.

O5 – Fusione a confinamento inerziale

Parallelamente alla realizzazione dei primi impianti a confinamento magnetico, il programma prevede la crescita e il consolidamento delle competenze teoriche e sperimentali nella fisica e nelle tecnologie per la fusione inerziale attraverso la partecipazione ai maggiori esperimenti internazionali, la partecipazione al programma HiPER+ e il potenziamento delle infrastrutture nazionali:

- Partecipazione alla sperimentazione in impianti IFE esistenti (ABC-ENEA, LULI2000, PALS, NIF, OMEGA, LMJ, ELI-Beamlines, ORION, GEKKO XII, ShenGuang-III) e futuri (HiPER Plus, Focused Energy, Marvel Fusion, Blue Laser Fusion, HB11). Partecipazione alla realizzazione e esercizio di una facility europea per implosione ad irraggiamento diretto, in linea con la roadmap di HiPER+.
- Creazione di un centro nazionale di analisi computazionale open access per attività avanzate di modellistica e simulazione.
- Progettazione e realizzazione di una infrastruttura/laboratorio laser per sviluppo schemi IFE a irraggiamento diretto - Upgrade e integrazione nuove iniziative nel settore in un'infrastruttura distribuita. Studio di approcci alternativi della fusione a confinamento inerziale.
- Sviluppo tecnologie:
 - per laser ad alta frequenza, alta efficienza
 - di materiali micro- e nano-strutturati per target e relative tecnologie di fabbricazione su larga scala
 - di diagnostiche avanzate per il controllo dell'ignizione.

O6 – Attività di ricerca, formazione e innovazione tecnologica

Lo sviluppo della filiera della fusione richiederà, come avvenuto per altre tecnologie, un processo di continua ottimizzazione rispetto alle soluzioni adottate per i primi impianti, che ne accrescano l'efficienza, la durata di vita, la disponibilità e, in ultima analisi, la competitività economica. Tale processo di ottimizzazione sarà certamente necessario per i materiali strutturali e funzionali dei componenti più interni, dei materiali per il mantello e refrigeranti, e si avvarrà di progressi nella comprensione teorica e nel controllo dei

plasmi in regime reattoriale. Queste attività sono quindi previste per tutto il periodo di sviluppo, oltre l'inizio della costruzione dei primi impianti. Ugualmente, nell'arco di tutto il periodo di riferimento, e fin da subito, si dovrà assicurare adeguata offerta formativa universitaria e di alta formazione nell'ambito dell'energia da fusione, per garantire la disponibilità di ricercatori, ingegneri, operatori e tecnici per lo sviluppo della filiera di reattori a fusione. I principali elementi sono i seguenti:

- Sviluppo, caratterizzazioni, test sperimentali e qualifiche per accrescere la competitività economica degli impianti a fusione (MFE e IFE):
 - materiali strutturali e funzionali avanzati e relative tecnologie innovative (es. manifattura additiva).
 - superconduttori avanzati ad alta temperatura per magneti ad alto campo
 - materiali *breeder* e refrigeranti avanzati.
- Studi di fisica dei plasmi relativi ad approcci alternativi e/o con cicli diversi dal ciclo DT.
- Potenziamento dell'offerta formativa universitaria e di alta formazione riguardo l'energia da fusione:
 - Rafforzamento e attivazione di corsi universitari, dottorati, borse di studio e tirocini presso laboratori di ricerca e imprese.
 - Programma di formazione per l'upskilling degli iscritti agli ordini professionali.

O7 – Sviluppo quadro normativo e autorizzativo

Il programma proposto richiede la definizione di un quadro autorizzativo e normativo specifico per l'energia da fusione che ne abiliti l'industrializzazione tenendo conto delle differenze tra fusione e fissione, che definisca i termini per l'autorizzazione, *commissioning*, operazione, smantellamento e gestione dei rifiuti di impianti a fusione entro il 2035. Parallelamente, è necessario procedere alla selezione e preparazione del sito e delle relative infrastrutture. A tale scopo, i principali elementi sono i seguenti:

- Studi di reattori, analisi incidentali, valutazioni di dosi occupazionali e di produzione di rifiuti radioattivi
- Partecipazione a tavoli e gruppi di lavoro nazionali e internazionali con gli organismi preposti alla standardizzazione, alla certificazione e all'autorizzazione a realizzare ed esercitare reattori a fusione.
- Sviluppo di quadro normativo per l'allaccio di una centrale a fusione alla rete nazionale.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Azione volte al raggiungimento di una maturità tecnologica nell'energia da fusione e allo sviluppo di una catena del valore nazionale nell'ambito del suo utilizzo (GdL 3)																										
O1 - Competenze di fisica e ingegneria, di operazione, gestione e controllo di impianti a fusione a confinamento magnetico																										
Completamento della costruzione di DTT, sperimentazione e sviluppo tecnologico.	2025	2050																								
Partecipazione al completamento e alla sperimentazione di ITER, inclusa NBTF - Partecipazione a RFX-mod2, e agli esperimenti IMFE europei/internazionali.	2025	2050																								
Sviluppo di regimi di operazioni di plasma, codici e modelli, e loro validazione	2025	2050																								
O2 - Tecnologie abilitanti della fusione e infrastrutture necessarie per impianti a fusione a confinamento magnetico																										
Sviluppo, test e qualifica materiali strutturali e funzionali, anche attraverso la partecipazione a IFMIF/DONES.	2025	2041																								
Realizzazione di facility tecnologiche per sviluppo tecnologie e qualifica componenti.	2025	2030																								
Realizzazione, test e qualifica di prototipi di componenti del reattore e sistemi di riscaldamento e controllo.	2025	2041																								
Identificazione dei requisiti di progetto, inclusi gli aspetti di sicurezza e gestione.	2025	2036																								
O3 - Progettazione e integrazione di sistema																										
Definizione delle modalità di funzionamento attese per la generazione di energia elettrica, sulla base dei requisiti degli <i>end user</i> , per input al progetto concettuale.	2025	2036																								
Creazione di partnership pubblico-private per i progetti concettuale e esecutivo di reattori a confinamento magnetico.	2036	2050																								
O4 - Sviluppo della supply chain nazionale e ottimizzazione processi produttivi per reattore a confinamento magnetico																										
Definizione di tecnologie per le quali il sistema italiano ha messo a punto soluzioni di avanguardia e prioritizzazione del relativo sviluppo industriale. Identificazione e mappatura della value chain nazionale.	2025	2036																								
Supporto per i costi necessari per lo sviluppo di processi applicabili al settore della fusione e all'ottenimento e al mantenimento delle certificazioni e conformità nucleari della fusione.	2025	2042																								
O5 - Fusione a confinamento inerziale																										
Partecipazione alla sperimentazione in impianti IFE esistenti e futuri - Partecipazione alla realizzazione e esercizio di una facility europea a irraggiamento diretto (Roadmap di HIPER4).	2025	2050																								
Realizzazione di una infrastruttura/laboratorio laser per sviluppo schemi IFE a irraggiamento diretto e studi di approcci alternativi per fusione a confinamento inerziale.																										
Sviluppo tecnologie laser ad alta frequenza, alta efficienza e diagnostiche avanzate per il controllo dell'ignizione. Sviluppo di materiali micro- e nano-strutturati per target.	2025	2045																								
O6 - Attività di ricerca, formazione e innovazione tecnologica																										
Studi di fisica dei plasmi relativi a approcci alternativi e/o con cicli diversi dal ciclo DT.	2025	2040																								
Sviluppo, test sperimentali e qualifica di materiali strutturali/funzionali avanzati e materiali superconduttori ad alta temperatura critica, di materiali breeder e refrigeranti avanzati.	2025	2050																								
Creazione di un centro nazionale di analisi computazionale open access per attività avanzate di modellistica e simulazione.	2025	2045																								
O7 - Sviluppo quadro normativo e autorizzativo																										
Studi di reattori, analisi incidentali, valutazioni di dosi occupazionali e di produzione di rifiuti radioattivi																										
Partecipazione a tavoli e gruppi di lavoro nazionali e/o internazionali con gli organismi preposti alla standardizzazione, alla certificazione e all'autorizzazione a realizzare ed esercitare reattori a fusione.																										
Sviluppo di quadro normativo per l'allaccio di una centrale a fusione alla rete nazionale																										

Figura 13. Roadmap per realizzazione primo impianto per energia da fusione

CAP. 6 - LINEE GUIDA

C6-1 Azioni

Gli elementi di programma descritti nel paragrafo C4-1 rappresentano le azioni da attuare per l'obiettivo di abilitare l'avvio dell'energia da fusione intorno alla metà del secolo. Le risorse valutate per l'attuazione del programma, separate per obiettivi, sono riportate nelle tabelle nel § C5-2.

L'attuazione del programma richiede in primo luogo il supporto alle attività e alle infrastrutture di ricerca nazionali e il loro rafforzamento e adeguamento, l'avvio di un vigoroso programma di sviluppo tecnologico e dimostrazione in collaborazione tra ricerca e industria, il rafforzamento della *supply chain* con adeguate misure di supporto, nonché un adeguato programma di formazione di tecnici, laureati e dottori di ricerca. L'entità e la dimensione dell'impegno economico rendono necessaria la collaborazione e la promozione di sinergie con altri programmi europei e internazionali per la condivisione di dati sperimentali, tecnologie e infrastrutture. La scala temporale del programma richiede la definizione di *milestones* con relative tempistiche, e il coordinamento e un attento monitoraggio dell'avanzamento delle attività.

Ricerca, sviluppo e formazione - E' necessario proseguire nelle attività fondamentali per la crescita e mantenimento delle competenze di *system integrator* e di gestione e operazione di impianti a fusione, ovvero DTT, NBTF, RFX-mod2, di sviluppo di operazioni di plasma in regimi reattoristici, di teorie, codici e modelli e loro validazione sperimentale. E' necessaria inoltre una forte partecipazione italiana ai programmi europei e la partecipazione/collaborazione ai maggiori progetti internazionali. Di particolare rilevanza è la continuazione della partecipazione al programma di ricerca e sviluppo europeo condotto da EUROfusion al quale, come si è visto nella fase "Ricognizione", l'Italia già partecipa in modo significativo e da cui ottiene notevoli risorse con ottimo ritorno delle risorse comuni europee.

E' inoltre di fondamentale importanza la partecipazione dei ricercatori e ingegneri italiani alla preparazione delle operazioni, al *commissioning* e poi alla sperimentazione su ITER (direttamente e attraverso F4E) che rimane centrale per l'esperienza che potrà fornire in termini di *commissioning*, scenari di plasma, gestione del trizio, aspetti nucleari, sicurezza, disponibilità dell'impianto, e produzione di rifiuti radioattivi. La partecipazione alla sorgente di neutroni IFMIF/DONES consentirà l'accesso al programma di qualifica dei materiali sottoposti a irraggiamento neutronico.

Nell'ambito dello sviluppo per IFE, è opportuno l'upgrade delle infrastrutture nazionali per IFE per preparare la piena partecipazione dell'Italia alla costruzione di una *facility* europea nell'ambito della *roadmap* HIPER+, e al suo sfruttamento scientifico.

E' altresì necessario il potenziamento della formazione universitaria di settore nelle diverse competenze scientifiche e tecnologiche e nei diversi livelli di professionalità, sfruttando le diverse opportunità del sistema scolastico e accademico e coinvolgendo tutti gli attori della *supply chain*.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Sviluppo tecnologico e crescita della supply chain – E' necessario accelerare il programma di sviluppo e dimostrazione tecnologica al fine di ridurre drasticamente i rischi associati alla realizzazione del primo impianto. A tal fine, si propone la realizzazione di nuove infrastrutture di prova e qualifica per lo sviluppo delle tecnologie non ancora mature, e quindi la realizzazione di prototipi e loro qualifica, che abilitino l'inizio della progettazione esecutiva del reattore.

L'accelerazione tecnologica richiede la creazione di *partnership* pubblico-private (PPP) che riuniscano il settore della ricerca e della formazione, le imprese e il governo per promuovere l'innovazione e fornire alle aziende l'accesso al supporto tecnico e finanziario necessario. Le norme e gli accordi riguardanti la proprietà intellettuale sono fondamentali per incoraggiare lo sviluppo di nuove opportunità e definire il rapporto rischio-rendimento della PPP.

Si sottolinea che lo strumento PPP è ampiamente usato nell'ambito dei programmi europei (*Idrogeno, High Performance Computing, Batt4EU, Clean Steel – Low Carbon Steelmaking, Automated Mobility etc.*) per promuovere la competitività del sistema produttivo europeo, spesso mirando a diversi livelli di TRL che vanno da bassa (TRL 3) ad alta maturità (TRL 7-8). Alcuni Paesi già utilizzano lo strumento PPP per le tecnologie di fusione (*US INFUSE - Innovation Network for Fusion Energy, UKAEA STEP programme - Spherical Tokamak for Energy Production*) e anche la Commissione Europea si sta aprendo sempre di più a questo modello per lo sviluppo dell'energia da fusione. Ne è un esempio la call per "*European Fusion Industry Platform and Preparation for a Public-Private Partnership on Fusion Energy*" recentemente lanciata dalla Commissione.

Supporto all'industria - Passare dagli attuali progetti ad un mercato su larga scala della fusione richiede un significativo ampliamento della *supply chain* e della relativa capacità e competenza. Per favorire il mantenimento e la crescita di un'industria competitiva occorre disporre di capitale iniziale, assicurare continuità di investimenti e cercare di tutelare gli interessi degli investitori industriali contro il rischio di slittamento temporale dei ritorni attesi a causa di possibili criticità tecnologiche su attività nelle quali non sono direttamente coinvolti. Oltre alla costituzione dei già citati partenariati pubblico-privati, basati su meccanismi di condivisione del rischio, altri strumenti potrebbero essere utilizzati, quali ad esempio:

- Programmi di formazione per la creazione di competenze professionali necessarie per il settore della fusione, garantendo la disponibilità di manodopera qualificata.
- Contributi statali a fondo perduto o prestiti agevolati alle imprese che investono nel settore della fusione, per costruzione di prototipi e impianti.
- Garanzie pubbliche sui finanziamenti privati concessi alle imprese del settore della fusione, riducendo il rischio per gli investitori e facilitando l'accesso al credito.
- Supporto alla creazione di una filiera della fusione nazionale, favorendo la partecipazione di imprese italiane alla costruzione e alla gestione degli impianti.
- In prospettiva, la attivazione di incentivi fiscali o altri benefici economici per le imprese che producono energia da fusione, rendendo il settore più competitivo, come peraltro già regolamentato per il settore FER.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

- Programmi di formazione per la creazione di competenze professionali necessarie per il settore della fusione, garantendo la disponibilità di manodopera qualificata.

Accordi internazionali e cooperazione - La realizzazione della fusione nucleare è una sfida scientifica e tecnologica che richiede investimenti considerevoli, molto probabilmente oltre le capacità finanziarie di un singolo paese come l'Italia. Si rende quindi necessaria la promozione di accordi bilaterali/multilaterali per la partecipazione a esperimenti di fusione europei e internazionali per la condivisione di dati sperimentali, tecnologie e infrastrutture.

Oltre alle partnership già esistenti in ambito europeo e internazionale, l'Italia dovrebbe attivamente perseguire l'instaurazione di ulteriori alleanze internazionali, seguendo l'esempio di altre nazioni europee. Queste collaborazioni, sia di natura pubblica che privata, devono essere strutturate secondo specifiche modalità e obiettivi.

Le collaborazioni con il settore privato, incluse le *start-up*, dovrebbero concentrarsi sullo sviluppo di tecnologie innovative capaci di accelerare significativamente il progresso nella ricerca e sviluppo sulla fusione. Queste partnership possono stimolare l'innovazione e agevolare il trasferimento delle conoscenze scientifiche nella pratica industriale definendo gli aspetti di proprietà intellettuale residenti nelle istituzioni di ricerca pubbliche.

È necessaria, inoltre, la promozione di accordi che abilitino la cooperazione su pratiche normative innovative e specifiche per la fusione in ottica di armonizzazione delle stesse; una volta normati, si ritiene fondamentale stabilire cooperazioni sul licensing dei futuri impianti a fusione, così da efficientare e accelerarne il percorso di commercializzazione

Coordinamento e *monitoring* - La forte interconnessione tra tutti gli elementi di programma richiede sia per MFE sia per IFE la creazione di una "cabina di regia", nell'ambito del più ampio coordinamento del programma nucleare nazionale, per

- l'elaborazione di un piano operativo nazionale sulla fusione che definisca le principali *milestones* e relative tempistiche delle attività di ricerca, formazione e sviluppo tecnologico ed industriale, con il coinvolgimento dei Ministeri competenti;
- identificazione e mappatura delle tecnologie abilitanti, dei centri di competenza, e delle *value chain*, azioni di networking per valorizzazione/sviluppo della *supply chain* a livello nazione/UE;
- il coordinamento delle attività previste nel piano e il monitoraggio dei progressi raggiunti nella sua implementazione;
- la revisione e l'aggiornamento del piano operativo con cadenza triennale;
- il supporto di una adeguata campagna di comunicazione destinata a favorire l'accettabilità degli impianti a fusione presso l'opinione pubblica, da inquadrarsi nell'ambito del più ampio programma di comunicazione sull'energia nucleare.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

C6-2 Risorse, Investimenti e tempi

Tabella 5 Risorse per O1 – Competenze di fisica e ingegneria, di operazione, gestione e controllo di impianti a fusione a confinamento magnetico (M€)

Voce	2025-2027	2028-2030	2031-2035	2036-2050	Totale
Personale (includere missioni e costi indiretti)	105	107	242	571	1025
Investimenti & costi di gestione	810	78	281	845	2014
Totale	915²	185³	523⁴	1416⁵	3039¹

¹ Di cui, in totale, 1700 M€ coperti da altre fonti come segue:

² già coperti per **376,7 M€** da altre fonti di finanziamento: 320 M€ per la costruzione di DTT (BEI, MUR, MISE, EUROfusion, Regione Lazio, PNRR, Mission Innovation), 34,7 M€ per NBTF (ITER), 9 M€ per RFX-mod2 (Mission Innovation), 13 M€ per attività EUROfusion.

³ coperti per **49,1 M€** da altre fonti di finanziamento: 34,7 M€ per NBTF (ITER), 14,4 M€ per attività EUROfusion.

⁴ coperti per **324 M€** da altre fonti di finanziamento: 58 M€ per NBTF (ITER), 266 M€ per attività EUROfusion inclusa sperimentazione DTT.

⁵ coperti per **951 M€** da altre fonti di finanziamento: 216 M€ per NBTF da fondi ITER nel caso venga esteso l'attuale accordo ITER con Consorzio RFX, 735M€ per attività EUROfusion inclusa sperimentazione DTT.

Tabella 6 Risorse per O2 – Tecnologie abilitanti della fusione e infrastrutture necessarie a confinamento magnetico (M€)

Voce	2025-2027	2028-2030	2031-2035	2036-2050	Totale
Personale (includere missioni e costi indiretti)	50	73	85	236	444
Investimenti & costi di gestione	213	424	420	295	1352
Totale	263⁶	497⁷	505⁸	531⁸	1796^{6,7,8}

⁶ Coperti per 40 M€ da EUROfusion

⁷ E' ipotizzabile la continuazione di un contributo di **15 M€/anno** da EUROfusion fino al 2030.

⁸ Oltre il 2030 è ragionevolmente ipotizzabile un contributo comunitario anche superiore a **15 M€/anno** attraverso la piattaforma tecnologica europea per la fusione, già annunciata dalla Commissione Europea. La disponibilità di infrastrutture tecnologiche a partire dal 2030 potrà fornire risorse aggiuntive attraverso la fornitura di servizi a terzi (ad es. start up), come avviene ad esempio già per FNG.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Tabella 7 Risorse per O3 – Progettazione e integrazione di sistema (M€)

Voce	2025-2027	2028-2030	2031-2035	2036-2050	Totale
Personale (incluse missioni e costi indiretti)	15	28	84	109	226
Investimenti & costi di gestione	2	2	10	20	34
Totale	17	30	94	129	270

Tabella 8 Risorse per O4 – Sviluppo e implementazione della supply chain nazionale e ottimizzazione processi produttivi (M€)

Voce	2025-2027	2028-2030	2031-2035	2036-2050	Totale
Personale (incluse missioni e costi indiretti)	9	19	28	41	97
Investimenti & costi di gestione	1	56	82	94	233
Totale	10	75	110	135	330

Tabella 9 Risorse per O5 – Fusione a confinamento inerziale (M€)

Voce	2025-2027	2028-2030	2031-2035	2036-2050	Totale
Personale (incluse missioni e costi indiretti)	19	21	40	105	185
Investimenti & costi di gestione	255	316	300	440	1311⁹
Totale	274	337	340	545	1496

⁹Includono inoltre le risorse per la partecipazione dell'Italia alla costruzione di una facility europea nell'ambito della roadmap HIPER+ a partire dal 2028. La eventuale collocazione di tale facility in Italia, qualora se ne verificassero le condizioni, richiederebbe risorse ulteriori qui non conteggiate.

Tabella 10 Risorse per O6 – Attività di ricerca, formazione e innovazione tecnologica (M€)

Voce	2025-2027	2028-2030	2031-2035	2036-2050	Totale
Personale (incluse missioni e costi indiretti)	11	14	20	60	105
Investimenti & costi di gestione	14	32	56	86	188
Totale	25	46	76	146	293

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Tabella 11 Risorse per O7 – Sviluppo quadro normativo e autorizzativo (M€)

Voce	2025-2027	2028-2030	2031-2035	2036-2050	Totale
Personale (incluse missioni e costi indiretti)	11	15	35	75	136
Investimenti & costi di gestione	3	3	5	15	26
Totale	14	18	40	90	162

Tabella 12 Riassunto risorse (M€)

Obiettivo	2025-2027	2028-2030	2031-2035	2036-2050	Totale
O1 – Competenze di fisica e ingegneria, di operazione, gestione e controllo di impianti a fusione a confinamento magnetico	915 ²	185 ³	523 ⁴	1416 ⁵	3039 ¹
O2 – Tecnologie abilitanti della fusione e infrastrutture a confinamento magnetico	263 ⁶	497 ⁷	505 ⁸	531 ⁸	1796 ^{6,7,8}
O3 – Progettazione e integrazione di sistema	17	30	94	129	270
O4 – Sviluppo e implementazione della supply chain nazionale e ottimizzazione processi produttivi	10	75	110	135	330
O5 – Fusione a confinamento inerziale	274	337	340	545	1496
O6 – Attività di ricerca, formazione e innovazione tecnologica	25	46	76	146	293
O7 – Sviluppo quadro normativo e autorizzativo	14	18	40	90	162
Totale	1518⁹	1188	1688	2992	7386¹⁰

⁹ Di cui **373 M€** già coperti da altre fonti di finanziamento

¹⁰ Di cui almeno circa 2400 M€ coperti da altre fonti di finanziamento

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

ALLEGATI

A.1 Principali infrastrutture di ricerca per la fusione presenti o in costruzione in Italia

Nome	Proprietario	Tipo	Scopo	Note
DTT	ENEA Frascati	Tokamak	Elemento della roadmap europea per lo sviluppo di soluzioni per l'estrazione della potenza di fusione	In costruzione
NBTF-SPIDER	ITER Organization Consorzio RFX Padova	Neutral Beam Test Facility	Sviluppo della sorgente a ioni negativi di H/D estratti da un plasma RF per gli iniettori del sistema di riscaldamento del plasma di ITER	In operazione
NBTF-MITICA	ITER Organization Consorzio RFX Padova	Neutral Beam Test Facility	Sviluppo del prototipo di iniettore di particelle neutre di H/D per gli iniettori del sistema di riscaldamento del plasma di ITER	In fase di commissioning e sviluppo In operazione dal 2025
RFX	RFX Padova	Reversed Field Pinch	Studio di configurazione alternativa al tokamak con autogenerazione del campo magnetico attraverso le correnti elettriche indotte nel plasma stesso	In fase di Upgrade
ABC	ENEA Frascati	Laser	Studio dell'iterazione laser-materia per fusione inerziale	
FNG	ENEA Frascati	Sorgente di neutroni	Validazione dati nucleari e codici di trasporto neutronici per la fusione	
FCCTF	ENEA Frascati	Test facility	Test dei magneti superconduttivi di DTT alla temperatura e corrente di esercizio	In costruzione
HRP	ENEA Frascati	Produzione di target di divertori e strumentazione a ultrasuoni	Sviluppo di unità affacciate al plasma del divertore, test e qualifica con ultrasuoni	
HE-FUS3	ENEA Brasimone	Test facility	Termoidraulica e qualifica di componenti dei circuiti del blanket e TBM ad elio	
IELLLO	ENEA Brasimone	Test facility	Test di componenti (es. pompe magnetiche) e strumentazioni (es. thermal-flowmeter) prototipiche per il circuito di PbLi del blanket	
LIFUS5/Mod3	ENEA Brasimone	Test facility	Test per lo studio dei LOCA (<i>Loss of Coolant Accident</i>) e dell'interazione tra acqua e PbLi	
TRIEX	ENEA Brasimone	Circuito in PbLi	Caratterizzazione di metodi di estrazione del trizio dal PbLi	
HYPERQUARCH	ENEA Brasimone	Test facility	Misure della costante di solubilità del trizio in metallo liquido	
PERI-II	ENEA Brasimone	Test facility	Misure di permeazione del trizio attraverso i materiali	
W-HYDRA	ENEA Brasimone	Circuito ad acqua in pressione, ed Eletron Beam Gun per la generazione del flusso termico	Simulazioni del sistema di refrigerazione primario ad acqua in pressione del blanket e TBM a PbLi.	In costruzione

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

			Simulazioni del funzionamento pulsato del generatore di vapore del circuito primario del blanket. Test integrali dei LOCA	
GyM	CNR ISTP Milano	Linear Plasma Device	Interazione plasma - materiali	
Negative Ion Optimization, NIO1	Consorzio RFX/INFN	Sorgente di ioni negativi	Sviluppo di sorgenti di ioni negative, finalizzate alla produzione di potenti fasci di ioni da impiegare per il riscaldamento del plasma.	
Divertor Test Facility	ENEA/Univ. di Napoli Federico II/CREATE	Test facility	Mock up Divertore per DTT	In costruzione
ILIL	CNR INO Pisa	Laboratorio Laser Intensi	Studio dell'iterazione laser-materia per fusione inerziale	
PROTO-SPHERA	ENEA Frascati	Tokamak sferico	Studio di configurazioni alternative di sistemi a confinamento magnetico	
TRUST	Università della Toscana	Tokamak	Didattico-dimostrativo. Test di materiali esposti ad alti flussi termici e di magneti superconduttori HTS	In costruzione

A.2 **Competenze della filiera industriale italiana sulla fusione**

- **Alca Technology**, azienda meccanica di precisione con realizzazioni in ambito italiano ed internazionale per la fusione e per gli acceleratori.
- **Angelantoni**, gruppo di aziende che opera, tra gli altri, nel settore della ricerca dalla fusione all'aerospaziale. Per la NBTF a Padova, per conto di Fusion for Energy ha realizzato il sistema da vuoto e di immissione gas di SPIDER e di MITICA.
- **ANSALDO NUCLEARE** assicura per ITER la fornitura di 5 settori del Vacuum Vessel, in associazione con Mangiarotti e Walter Tosto, nonché il montaggio del tokamak, in associazione con SIMIC. Partecipa agli studi su Remote Handling e sul sistema di refrigerazione primario. Inoltre realizza il Sistema di Alimentazione elettrica normale e di Emergenza. Grazie alla qualifica per la produzione dell'Inner Vertical Target, concorre per la realizzazione dello stesso. Ansaldo collabora anche con ENEA alla progettazione del DTT ed è impegnata su attività di progettazione per EU-DEMO in vari Work Packages (in particolare, con Ansaldo Energia sviluppa il progetto concettuale del sistema di conversione di potenza pulsata)
- **ASG Superconductors** attiva dalla fine degli anni 1980 nella realizzazione di magneti per la fusione, realizza alla fine degli anni 1990 la Toroidal Field Model Coil, il prototipo delle bobine toroidali del progetto ITER. Agli inizi degli anni 2000, contribuisce allo stellarator Wendelstein 7-X (W7X) con 30 delle 50 bobine non planari. Nel 2011 acquisisce la commessa per la produzione di 10 magneti toroidali di ITER, il primo dei quali viene consegnato nel 2017 e l'ultimo nel 2021. Nel 2013 costruisce 11 dei 18 magneti toroidali per JT60-SA, e nel 2017 acquisisce il contratto per la costruzione di 4 delle 6 bobine poloidali per ITER (che vengono costruite on site date le loro grandi dimensioni) e il test delle rimanenti due (costruite rispettivamente da Cina e Russia). Nel 2021 ha inoltre siglato il contratto per la costruzione delle 18 bobine toroidali per il DTT. ASG ha inoltre una consolidata esperienza nella costruzione OEM di magneti per ciclotroni, ciclo-sincrotroni e sincrotroni, tecnologie abilitanti per le centrali a fissione di tipo ADS (Accelerator Driven Systems) ed è attiva nel supporto alla progettazione di sistemi di confinamento magnetico da un punto di vista magnetico, meccanico e criogenico, nella installazione e *commissioning* di sistemi magnetici, di sistemi criogenici e da vuoto, oltre che di sistemi di diagnostica complessi.
- **ATB RIVA CALZONI**, storica azienda italiana con una lunga esperienza nella progettazione e fabbricazione di componenti a pressione di grandi dimensioni, da anni è impegnata nella fornitura di componenti per impieghi nucleari, in particolare cask, di ultima generazione, per il trasporto dei combustibili esausti degli impianti. Inoltre, è attiva nel settore della fusione in particolare negli Stati Uniti. Di rilievo la commessa aggiudicata nel 2023 per Commonwealth Fusion Systems (CFS), per la costruzione (in completamento) del basamento del criostato per il progetto SPARC.
- **Brembana & Rolle (ex Zanon S.p.A.)**, azienda meccanica con una lunga esperienza di forniture di componenti meccanici anche di grandi dimensioni per la fusione e per la ricerca scientifica, tra cui RFX, JET, Fusion for Energy.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

- **CECOM High Precision Solutions**, azienda specializzata in meccanica di precisione con applicazioni che vanno dagli acceleratori alla fusione con forniture per ENEA, Consorzio RFX, Fusion for Energy,
- **CINEL Scientific Instruments**, azienda specializzata in componenti meccanici di alta precisione e diagnostiche per acceleratori e nel campo della fusione. Ha realizzato componenti e sistemi oltre che i maggiori acceleratori anche nel campo della fusione tra gli altri per RFX e per IFMIF-EVEDA.
- **COELME** ha realizzato lo studio, la fornitura, l'installazione e le prove della linea di trasmissione a 100 kV dell'esperimento SPIDER.
- Il **Consorzio AMW (Ansaldo, Mangiarotti, Walter Tosto)** è stato incaricato della fornitura di cinque settori della camera da vuoto di ITER, 650 tonnellate ognuno, il cuore del reattore e prima barriera nucleare, del valore di circa 300 M€. Anche la riparazione sul sito di ITER di alcuni dei settori difettosi forniti dalla Corea è stata recentemente assegnata ad un consorzio di imprese italiane, un'importante e sfidante commessa, già avviata, che prevede innovative tecniche di saldatura e di lavorazione meccanica in sito.
- **CSC**, azienda meccanica di precisione con realizzazioni in ambito nazionale ed internazionale per diversi settori della ricerca scientifica dalla fusione all'aerospaziale.
- **Delta-Ti impianti**, azienda che realizza impianti di raffreddamento per diversi ambiti di ricerca, tra cui il CERN. Per ITER ha realizzato l'impianto di raffreddamento della NBTF a Padova ed ha contratti attivi a Cadarache nel sito di ITER.
- **De Pretto Industrie S.R.L.**, azienda meccanica che ha una lunga storia di forniture per molti componenti meccanici anche di grandi dimensioni per esperimenti di fusione e per la ricerca scientifica, per ricordarne alcuni, JET, RFX, MAST, FTU, TCV, Fusion for Energy, ITER,
- **EEL Power Electronics**, azienda che ha una lunga storia di forniture di sistemi elettronici di potenza in particolare per la generazione delle correnti dinamiche di alimentazione dei sistemi di bobine di controllo dei campi radiali al bordo plasma. Ha realizzato forniture per RFX e per JT-60SA.
- **Fantini Sud**, azienda con divisione meccanica con forniture rivolte a diverse realizzazioni scientifiche nazionali ed internazionali per ENEA, INFN, IPP, EURATOM, Consorzio RFX, ESS, Helmholtz Institute, CERN, UKAEA.
- **Fincantieri** ha avuto una prima commessa da ITER nel 2018 di un valore di circa 36 M€ in totale, seguite nel 2019 una ulteriore commessa, il TCC1 (*Tokamak Complex Contract 1*) del valore di oltre 100 M€ della durata di 5 anni, che prevede l'installazione di apparecchiature tecnologicamente avanzate di tipo *first-of-a-kind* con precisione molto spinta.
- La **società ICAS**, Innovation and Consulting on Applied Superconductivity, partecipata da ENEA, Criotec Impianti Spa di Chivasso (TO) e Tratos Cavi Spa di Pieve Santo Stefano (AR), ha avuto una commessa per la fornitura di 100 km di cavi superconduttori per le bobine dei magneti di ITER per un valore di circa 60 M€.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

- **LT Calcoli**, società da anni impegnata nella fornitura di servizi di Prototipazione virtuale tramite analisi numeriche applicate ai capi Elettro-Magnetico, Termo-Strutturale, Cinematico, Dinamico e Fluidodinamico. Ha lavorato per i progetti di diversi esperimenti di fusione europei
- **NIDEC ASI Industrial Solutions**, anche questa è una azienda di elettronica di potenza con diverse forniture nel corso dei decenni per applicazione in esperimenti di fusione, tra cui RFX e ITER. Per ITER è fornitrice del sistema di conversione statica per alimentare i trasformatori dei cinque stadi di accelerazione degli iniettori di neutri.
- **OCEM-Power Electronics**, l'azienda ha una lunga storia di forniture e sviluppi di impianti di elettronica di potenza per diversi esperimenti di fusione inclusi RFX, JT-60SA, ITER e DEMO. Per JT-60SA ha realizzato il sistema di quench delle correnti nelle bobine realizzate con materiali superconduttori, mentre per ITER, e in particolare per lo sviluppo degli iniettori di neutri fornisce tutto il sistema di alimentazione dei sistemi attivi della sorgente di ioni negativi che è ospitata nell'High Voltage deck. Questa fornitura si estende da SPIDER a MITICA e agli iniettori che saranno installati a Cadarache. Infine, tale ditta sta realizzando il prototipo in scala del sistema di gestione della potenza reattiva che si sta sviluppando per il reattore DEMO.
- **SAES Getters S.p.A.**, l'azienda specializzata in materiali speciali, in particolare per l'assorbimento passivo di gas, ha qualificato insieme a Consorzio RFX e KIT-Karlsruhe Institute of Technology (Germania) un sistema di pompaggio alternativo alle pompe criogeniche per applicazioni nella fusione. Oltre ad aver qualificato un prototipo in scala di pompa per gli iniettori per DEMO, ha realizzato il sistema di pompaggio del divertore di LHD (Giappone) e il nuovo sistema di pompaggio di SPIDER. La stessa tecnologia è proposta per l'iniettore di particelle neutre di DTT.
- **SIMIC**, fondata nel 1975, ha una solida esperienza nell'ingegneria, produzione di alta qualità di apparecchiature critiche di processo, assemblaggio e manutenzione di impianti industriali. A seguito dell'esperienza a fine anni 90 nel progetto LHC del CERN, a partire dal 2004 collabora con ITER per il quale nel 2010 ha costruito un nuovo stabilimento ad alta capacità sul fronte-mare nel Porto di Marghera (VE). SIMIC ha acquisito da F4E e da ITER la produzione di serie di 70 Radial Plates, l'inserimento delle 10 bobine del magnete toroidale nelle strutture metalliche di contenimento (350 tonnellate ciascuna). Sono attualmente in corso: (i) la realizzazione di 4 Cassette Bodies del Divertore, (ii) l'esecuzione del contratto Tokamak Assembly Machine sul sito di Cadarache, (iii) la costruzione delle 5 Large Distribution Boxes per l'impianto di distribuzione criogenica, (iv) la realizzazione di un prototipo first-of-a-kind del Cooling Blanket Manifold, (v) la commessa per la riparazione di tre settori del Vacuum Vessel forniti dalla Corea che prevede innovative tecniche di saldatura e di lavorazione meccanica in sito. SIMIC è inoltre attiva nel settore privato della Fusione negli Stati Uniti, in Europa e Inghilterra, di rilievo la commessa aggiudicata nel 2023 per CFS per la costruzione dei TF Coil Cases per SPARC. Ha inoltre avviato una collaborazione con TAE Technologies, per la costruzione della sesta generazione del dimostratore da fusione denominato Copernicus.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

- **Synecom Srl**, ha una profonda competenza nei sistemi di trasmissione dell'energia elettrica ad alta tensione in gas e per questo ha contratti attivi con il Consorzio RFX, con QST (Giappone) e Fusion for Energy per le attività relative ai sistemi alimentati a 1 MV. Competenza che sarà utilizzata anche in ITER e DTT.
- **Walter Tosto** La Walter Tosto, società a capitale privato con sede principale a Chieti, nel corso degli ultimi quindici anni ha investito in aree, tecnologie macchine e formazione per diventare un leader globale progettazione di dettaglio e la fabbricazione di tutti i principali componenti metallici presenti nel cuore di reattori per fusione nucleare con tecnologia a confinamento magnetico. Presso le proprie officine per il progetto ITER sta realizzando: settori di Vacuum Vessel che costituiscono il cuore dell'impianto, cassette del divertore e strutture dei target necessarie per la gestione del plasma, penetrazioni e componenti interni fondamentali per trasferire all'esterno della macchina il calore prodotto, schermi neutronici al boro per confinare le radiazioni di fusione e il vacuum vessel del Neutral Beam Injector, il contenitore dove viene generato il fascio di ioni che deve scaldare e plasma. La società sta inoltre producendo gli stessi componenti per CFS e la macchina denominata SPARK in istallazione negli Stati Uniti, e ha prodotto le casse per i magneti toroidali della macchina JT-60SA in Giappone, dispositivo che si è aggiudicato il titolo di tokamak più potente mai prodotta fino ad oggi dopo il raggiungimento del primo plasma.

A.3 Formazione (Contributo a GdL6)

Il panorama della formazione superiore (laurea, laurea magistrale e dottorato) nell'ambito della fisica e dell'ingegneria dei reattori a fusione e della scienza e tecnologia dei plasmi in Italia vede il contributo di diversi attori accademici distribuiti su tutto il territorio nazionale. In Tabella A3-1 sono riportati i principali atenei coinvolti e gli insegnamenti proposti ai diversi livelli.

Le università tradizionalmente impegnate nelle attività di ricerca e didattica nell'ingegneria nucleare agiscono da lungo tempo in sinergia, riunite nel Consorzio Interuniversitario per la Ricerca e le Tecnologie Nucleari (CIRTEN). I docenti nucleari sono incardinati nei Settori Scientifico Disciplinari "Fisica dei Reattori Nucleari" (ING-IND/18), "Impianti Nucleari" (ING-IND/19) e "Misure e Strumentazione Nucleari" (ING-IND/20), cui si aggiunge in particolare "Elettrotecnica" (ING-IND/31). Attività di formazione rilevante per la fusione nucleare viene svolta nei corsi di laurea in Fisica da diversi anni, con insegnamenti sulla fisica dei plasmi (FIS-03), la fisica nucleare e neutronica (FIS-04), le diagnostiche nucleari e di plasma e la superconduttività (FIS-01). Entrambi questi percorsi hanno contribuito a formare generazioni di fisici e ingegneri attivi con successo nel campo della fusione in Italia e all'estero.

Nell'ambito delle lauree nell'ambito dell'ingegneria industriale e dell'informazione, tipicamente ingegneria energetica e/o dell'energia, sono impartiti al primo livello alcuni insegnamenti fondanti dell'ingegneria nucleare e anche di interesse per la fusione (es. principi di ingegneria nucleare, applicazioni dell'ingegneria nucleare, elementi di ingegneria nucleare, termo-fluidodinamica, termomeccanica, sicurezza e analisi di rischio, radioattività e radioprotezione). Nei corsi di laurea magistrale in ingegneria nucleare e/o ingegneria energetica e nucleare le competenze nucleari vengono ampliate ed approfondite, corroborate con insegnamenti specificatamente inerenti alla fisica e all'ingegneria dei reattori a fusione. Corsi avanzati sono proposti nell'ambito del Dottorato, focalizzati su quelle tematiche che ogni sede sente come più prossime alla propria attività di ricerca. Gli insegnamenti attivi ai tre diversi livelli nell'ambito dei corsi in Fisica e Ingegneria contribuiscono a formare ricercatori con specifiche competenze sui plasmi per la fusione e sulla fisica nucleare (teoriche, simulative e sperimentali) cui si aggiungono competenze tecniche in settori fondamentali per i reattori quali, ad esempio, la superconduttività, i controlli, il calcolo avanzato, le strumentazioni di misura e l'analisi dati. Vi è inoltre un crescente coinvolgimento attivo delle aziende nelle attività di formazione accademica (stage, tirocini ed attività di perfezionamento), soprattutto a livello di lauree magistrali e dottorati industriali.

Un impianto di produzione di energia elettrica da fusione necessita di competenze ingegneristiche e di fisica molto ampie. Per questo è auspicabile un allargamento delle discipline nelle quali possa essere contemplato lo studio di problematiche specifiche dell'applicazione dell'energia di fusione. In tale direzione, si dovrebbe valutare l'introduzione di corsi di laurea specifici e integrativi rispetto alle classi attuali o l'ampliamento e introduzione di master di II livello al fine di supportare i laureati nello sviluppo di competenze specifiche per impianti a fusione.

Nella prospettiva di un ritorno al nucleare in Italia, la formazione dovrà giocare un ruolo strategico operando in sinergia con le altre realtà produttive coinvolte nel processo. Per

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

coprire tutte le competenze, dalle fasi progettuali incluse le analisi di sicurezza, alla costruzione e montaggio, il *commissioning* e la gestione operativa dell'impianto, sarà importante favorire l'attivazione di accordi di collaborazione tra le università con realtà che possano formare tali competenze attraverso *stages*, tirocini e permanenze "operative" presso sedi produttive della *supply chain*, impianti e centri di ricerca industriale. Le università avranno un ruolo importante nel coordinamento di queste attività formative "sul campo". Le aziende necessiteranno di nuovi investimenti/competenze per affrontare questa sfida.

Stima delle necessità formative

L'attuazione del programma di sviluppo delineato nella roadmap per la realizzazione dell'energia di fusione, richiede una crescita delle risorse umane complessive impiegate annualmente nel programma, attualmente pari a circa 650 FTE professional, mediamente a circa 750 nel periodo 2025-27, a oltre 900 nel periodo 2028-30, e a circa 1100 nel 2031-35. Per gli anni successivi, si ipotizza un ancora crescente numero di addetti, occupati prevalentemente nell'industria oltre che nell'ambito della ricerca.

Tenuto inoltre conto dell'età media degli attuali addetti e del turnover atteso nei prossimi anni, nonché della prevedibile richiesta di risorse umane di elevata professionalità (fisici ed ingegneri) da parte delle realtà industriali (imprese, start-up, etc) attive sulla fusione, si valuta la necessità di formare mediamente circa 100 nuovi professional all'anno così distribuiti:

- 30% fisici (fisica del plasma teorica e sperimentale, diagnostiche, materiali, superconduttività)
- 70% ingegneri prevalentemente nei seguenti corsi di studio
 - Ingegneria nucleare
 - Ingegneria energetica
 - Ingegneria meccanica
 - Ingegneria elettrica
 - Ingegneria elettronica
 - Ingegneria informatica
 - Ingegneria chimica
 - Ingegneria robotica
 - Ingegneria mecatronica
 - Ingegneria dell'automazione

Le professionalità sopra riportate si intendono **con formazione specifica sulla fusione nucleare** tramite l'attivazione di specifici insegnamenti e/o interi percorsi formativi all'interno dei corsi di studio, di master di II livello e dottorati.

Il livello di formazione richiesto nel caso dei fisici è prevalentemente quello di dottorato di ricerca. Per gli ingegneri sono richiesti la laurea magistrale, master di II livello o il dottorato. In tutti i casi è auspicabile che la formazione comprenda o sia integrata da un congruo periodo di attività (stage, tirocini, tesi, attività di perfezionamento) finanziate con borse o contratti e svolte presso laboratori di ricerca e/o realtà industriali operanti nel settore della fusione.

In parallelo alla formazione di professional che abbiano conseguito un titolo almeno del secondo livello dell'Alta Formazione sarà necessario programmare l'inserimento nel

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

sistema di ricerca e produttivo volto a realizzare impianti di produzione di energia da fusione di personale tecnico che abbia un titolo di studio del primo livello di laurea o anche inferiore. Attualmente, nei laboratori che gestiscono grandi infrastrutture di ricerca i tecnici impegnati sono in numero significativamente inferiore rispetto ai ricercatori impegnati (cioè circa il 30% del totale personale). Nella prospettiva dello sviluppo della *supply chain* italiana del settore è necessario incentivare il canale di formazione di tecnici (e.g. operatori di impianto, manutentori, tecnici del vuoto, criogenia, saldatori, etc) attraverso lo strumento di periodi di stage di formazione post diploma o post-laurea di primo livello di personale già assunto o da assumere nelle aziende dei settori rilevanti. Un ulteriore canale di formazione potrebbe essere dato dai corsi di specializzazione *ad hoc* nel format dei Master di Specializzazione di primo livello (a cui si accede con almeno la laurea di primo livello) o di percorsi ITS-Istruzione Tecnica Superiore post-diploma, percorsi già specificatamente previsti nel nostro ordinamento e che ben si prestano ad essere ritagliati sulle necessità di formazione del personale della Supply Chain della fusione.

A differenza della fissione nucleare, non vi è al momento un coordinamento nazionale delle attività di formazione nella fusione nucleare. Tale coordinamento si rende ora necessario per monitorare, programmare e attuare le iniziative necessarie per il raggiungimento degli obiettivi quantitativi e qualitativi sopra individuati. Si ritiene comunque auspicabile che il futuro coordinamento della formazione in campo nucleare tra atenei, enti di ricerca e imprese del settore abbia natura olistica/unitaria, coinvolgendo sia le tematiche della fusione sia quelle della fissione.

Tabella A3 Mappa degli attuali insegnamenti universitari sulla fusione

Università	
Campania "L. Vanvitelli"	Laurea magistrale in Ingegneria Elettronica: Corso di plasm e fusione controllata
Cassino e Lazio Meridionale	Le tematiche della Fusione Nucleare sono presentate come casi applicativi nell'ambito dei moduli "Complementi di Elettrotecnica" ed "Electrical Modelling", inquadrati nel Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica. Inoltre, tali tematiche sono inserite nel Corso di Dottorato in "Metodi, modelli e tecnologie per l'ingegneria".
Genova	Dipartimento di ingegneria meccanica, energetica, gestionale e dei trasporti Corso di "Impianti nucleari avanzati" (sistemi nucleari a fissione e a fusione di tipo avanzato e innovativo). Dipartimento di Fisica Corso di "Fisica dei neutroni" - Fisica dei reattori a fusione - Aspetti di tecnologia dei reattori a fissione e fusione - Tematiche di ricerca attuali per la produzione di energia nucleare (dal 2024-2025)
Milano	Dipartimento di Fisica Laurea magistrale in Fisica - Strutture Dati e Algoritmi per la Fisica dei Dati - Elementi di Superconduttività e Fisica dei Magneti ad Alto Campo, - Interazione e Rivelazione della Radiazione Nucleare, - Fisica dei plasm e della fusione controllata,

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

	<ul style="list-style-type: none"> - Laboratorio di fisica dei plasmi 1 - Laboratorio di Spettroscopia Nucleare, - Fondamenti di Energetica (6 CFU) <p>Il Dottorato in Fisica, in convenzione con INFN, include un percorso di studi legato alla fusione nucleare a confinamento magnetico.</p>
Milano - Bicocca	<p>Dipartimento di Fisica, con significativi contributi da parte di docenti di ISTP-CNR, Laurea in Fisica</p> <ul style="list-style-type: none"> - Elementi di Fisica dei Plasmi e Esperimentazioni di Plasmi. <p>Laurea magistrale in Fisica</p> <ul style="list-style-type: none"> - Analisi Statistica dei Dati, Applicazioni della Fisica dei Neutroni, Applicazioni di Machine Learning, Energetica, Fisica dei Plasmi I, Fisica dei Plasmi II , Laboratorio di Fisica dei Plasmi I , Laboratorio di Fisica dei Plasmi II, Rivelatori di Radiazioni, Simulazione Montecarlo di Rivelatori di Radiazione, Sostenibilità Energetica. <p>Formazione post-laurea</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dottorato in Fisica e Astronomia, in convenzione con INFN, - Dottorato industriale in <i>Strategic innovation for smart and sustainable industries, cities and communities</i>. in convenzione con ENI, che include un percorso di studi legato alla fusione nucleare a confinamento magnetico.
Napoli Federico II	<p>Dottorato di ricerca in “Fusion Science and Engineering”, erogato congiuntamente a Università di Padova.</p> <p>Corsi di laurea magistrale nell’area dell’Ingegneria Industriale e dell’Informazione:</p> <ul style="list-style-type: none"> - corso di Plasmi e Fusione Termonucleare Controllata - corso di Prototipazione Virtuale, con elementi manutenzione remotizzata di reattori nucleari; - corso di Progettazione e Sviluppo Prodotto con elementi di progettazione meccanica dei reattori per la fusione nucleare <p>Corso di laurea magistrale in Fisica:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fisica dei Plasmi - Produzione di energia nucleare - Radioprotezione in centrali nucleari
Napoli Parthenope	<p>Nell’ambito del corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale, negli insegnamenti di <i>Electrotechnics for Sustainable Energy and Mobility</i> e <i>Automatic Control Systems</i> vengono trattati temi riguardanti la Fusione Termonucleare Controllata.</p> <p>Nell’ambito del Dottorato in Energy Science and Engineering è erogato il corso in <i>Applied Superconductivity</i>.</p>
Padova	<p>Dottorato di ricerca internazionale interateneo, implementato insieme a Università di Napoli “Federico II”, in “Fusion Science and Engineering”, unico corso di dottorato in Europa dedicato specificatamente alla Fusione Nucleare attivo dal 2006</p> <p>Corso di Laurea triennale:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Fondamenti di Fisica dei Plasmi – Laurea triennale <p>Corso di Laurea Magistrale di Fisica</p> <ul style="list-style-type: none"> – Physics Laboratory (low temperature plasma experiment VESPA) – Physics of Fluids and Plasmas – Physics of Nuclear Fusion and Plasma Applications <p>Corsi di Laurea Magistrale di Ingegneria</p> <ul style="list-style-type: none"> – Nuclear Fission and Fusion Plants - Laurea Magistrale – Industrial Plasma Technologies - Laurea Magistrale
Palermo	<p>Corso di Laurea in Ingegneria dell’Energia e delle Fonti Rinnovabili:</p>

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

	<p>- Principi di Ingegneria Nucleare</p> <p>Corso di Laurea Magistrale in “Ingegneria Energetica e Nucleare”:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nuclear fusion reactors - Fission Nuclear Power Plants - Neutronics - Misure Nucleari e Dosimetria - Computational thermofluidynamics <p>Corso di dottorato in “Energy”, curriculum “Low carbon energetics and innovative nuclear systems”:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Engineering challenges of Nuclear Fusion Reactor - Thermal-hydraulic System Codes for Nuclear Power Plants - Computational Fluid-Dynamics of Conjugate Heat Transfer Problem
Perugia	<p>Corso di laurea magistrale in Ingegneria Industriale (sede di Terni):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Corso di Energetica focalizzato sullo sfruttamento dell’energia nucleare. - Corso di Metallurgia focalizzato sui materiali per applicazioni in ambito nucleare.
Pisa	<p>Nell’ambito del corso di laurea magistrale in Nuclear Engineering eroga l’insegnamento obbligatorio di “Engineering of Fusion Reactors” ed una serie di seminari sulla fusione per i corsi di Laurea in Fisa e in Ingegneria Meccanica.</p>
Politecnico Milano	<p>Corso di laurea magistrale in “Nuclear Engineering” :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Plasma physics, - Laboratory of plasma physics, - Radiation detection and measurements, - Nuclear design and technology, - Physics of nuclear materials, - Radiation protection, - Nuclear techniques for the analysis of materials, - High intensity laser for Nuclear and physical applications, - Applied Superconductivity. <p>Il Dottorato in Scienze e Tecnologia Energetiche e Nucleari (STEN) include studi legati alla fusione nucleare, sia magnetica sia inerziale, e all’interazione laser-plasma.</p>
Politecnico Torino	<p>Nell’ambito del corso di Laurea in “Ingegneria energetica”, viene offerto all’interno del corso di “Elementi di ingegneria nucleare” un modulo di introduzione alla fusione nucleare.</p> <p>Nell’ambito del corso di Laurea magistrale in “Ingegneria energetica e nucleare” (in passato corso di Laurea in “Ingegneria Nucleare”), vengono offerti da oltre trent’anni due corsi interamente dedicati alla fusione:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nuclear fusion reactor physics - Nuclear fusion reactor engineering. <p>Nell’ambito del suddetto corso di Laurea magistrale e’ attivato un orientamento “Sustainable nuclear energy”, al cui interno vengono offerti altri corsi di rilevanza per la formazione in campo fusionistico, o parzialmente dedicati alla fusione, quali ad esempio:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Advanced materials for nuclear applications; - Computational Thermomechanics; - Nuclear engineering lab and advanced heat transfer problems; - Fuel cycle, waste and decommissioning;

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

	<ul style="list-style-type: none"> - Radiation protection and safety of nuclear plants; - Monte Carlo methods, safety and risk analysis. <p>Una delle quattro sezioni del Dottorato in Energetica sviluppa attività di formazione di terzo livello e ricerca legate all'ingegneria nucleare e in particolare alla fusione.</p>
Roma La Sapienza	All'interno del corso di laurea magistrale in "Ingegneria Energetica" offre due insegnamenti opzionali sulla fisica dei plasmi e sulle tecnologie applicate nei reattori a fusione, integrabili con un laboratorio di magnetoidrodinamica dei metalli liquidi.
Roma Tor Vergata	Laurea magistrale in Ingegneria Energetica <ul style="list-style-type: none"> - "Fisica dell'energia nucleare" dedicato alla fisica e ingegneria dei reattori a fissione e fusione, - "Tecniche diagnostiche per reattori a fusione".
Trieste	<p>Nell'ambito del corso di Laurea Magistrale in ingegneria meccanica viene erogato il corso "Progettazione meccanica CAD/CAE integrata" che prevede seminari e gruppi di lavoro sulla progettazione meccanica di reattori a fusione nucleare.</p> <p>Nel corso di laurea Magistrale "Engineering For The Energy Transition" l'insegnamento "Alternative energy technologies 2" tratta le tecnologie per la fusione nucleare</p>
Tuscia	Corso di laurea magistrale in "Mechanical Engineering", curriculum "New Energy": viene erogato l'insegnamento di "Nuclear Fusion", diviso in due moduli: Plasma Physics e Technologies for Nuclear Fusion. E' attivo, inoltre, nel dottorato in inglese "Engineering for Energy and Environment), il curriculum dedicato in "Nuclear Fusion".

A.4 Sicurezza e prevenzione, quadro normativo, certificazione (contributo a GdL4)

Come ribadito nel capitolo 2-3.7, nel panorama internazionale diversi Paesi si stanno muovendo per adeguare il proprio quadro normativo alla futura implementazione di reattori a fusione. A titolo generale, possiamo riassumere le opzioni al vaglio attraverso 3 tipologie:

1. Regolamentazione dei reattori a fusione con il medesimo quadro normativo dei reattori a fissione.
2. Regolamentazione dei sistemi a fusione sulla base dell'inventario radioattivo usato o generato, allineando questa tipologia di impianti agli acceleratori di particelle a livello normativo.
3. Applicazione di un quadro normativo ibrido che distingua quale approccio usare sulla base di criteri basati sui rischi potenziali di impianto.

Il primo ritorno d'esperienza riportato in consessi internazionali (riunioni IAEA) suggerisce sia opportuno normare le specifiche problematiche tecnologiche e di sicurezza degli impianti a fusione nucleare in modo distinto dai tradizionali impianti a fissione piuttosto che semplicemente estendere la normativa per essi vigente.

L'approccio da prediligere in Italia necessiterebbe quindi di una più approfondita discussione.

A livello generale ed in continuità con la struttura normativa vigente trattata in vari riferimenti normativi (cfr. Normativa | Ispettorato nazionale per la sicurezza nucleare e la radioprotezione (isinucleare.it)) è necessaria:

- Integrazione/revisione del DLgs 101 del 2020 e ricognizione della disciplina direttamente applicabile (e.g. in materia di acceleratori di particelle) al fine di includere eventuali nuove definizioni e classificazioni degli impianti a fusione. Tale analisi dovrebbe quindi trattare i seguenti aspetti:
 - Definizioni (es. Impianto a fusione, impianto a fusione di potenza o di ricerca)
 - Autorità competenti e funzioni di vigilanza
 - Regime Autorizzativo e classificazione degli impianti a fusione
 - diverse proposte concettuali e.g. confinamento magnetico Tokamak, etc. (inventario iniziale di radionuclidi e di quelli prodotti durante l'operazione dell'impianto)
 - Misure di Sicurezza degli impianti a Fusione e gestione dei rifiuti
 - Esposizione dei lavoratori
 - valutare se necessaria integrazione per la specificità degli impianti a fusione (trizio, alto numero di aperture della camera di reazione, alta richiesta di manutenzione sostitutiva)
 - Preparazione di risposta alle emergenze
 - valutare se necessaria integrazione per la specificità degli impianti a fusione
- Rispetto del trattato di non proliferazione legato all'uso duale di alcuni elementi impiegati in alcune tecnologie a fusione, considerazioni sulle salvaguardie e l'export control.
- Aspetti di responsabilità civile.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Si ritiene inoltre opportuno che si provveda all'elaborazione da parte delle autorità ed enti competenti di una guida tecnica per la dimostrazione di sicurezza specifica per gli impianti a fusione. Nella definizione della struttura normativa italiana a supporto dell'implementazione dei futuri impianti a fusione di potenza e di ricerca, si dovrà necessariamente tener conto dei recenti sviluppi delle linee guida attualmente in fase di redazione da parte degli organismi internazionali quali IAEA, OECD/NEA, ed EURATOM, di cui l'Italia è Stato membro.

E' da considerare la recente evoluzione tecnologica ed industriale delle tecnologie a fusione, che ha dato vita a svariati design pre-concettuali molto differenti tra loro sia per le scelte tecnologiche adottate che per i principi di base di funzionamento (es. tipologia di confinamento, combustibile, blanket etc.). Tali differenze radicali possono rendere difficoltosa l'elaborazione di un quadro normativo unico ed armonizzato che li rappresenti integralmente. Questo risulta essere molto in contrasto con il quadro normativo corrente a livello nazionale ed internazionale per i reattori a fissione, fortemente influenzato dalla maggiore diffusione di reattori nucleari ad acqua leggera.

BIBLIOGRAFIA

- ¹ Safety Standards Series No. GSG-1 - Classification of Radioactive Waste, [J. Elbez-Uzan et al 2023] Nucl. Fusion in press <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ad13ad>
- ² M. R. Gilbert et al., "Waste implications from minor impurities in European DEMO materials", Nucl. Fusion 59 (2019) 076015
- ³ <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspx>
- ⁴ www.iter.org
- ⁵ <https://www.ifmif.org/>
- ⁶ <https://www.jt60sa.org/wp/>
- ⁷ <https://ccfe.ukaea.uk/programmes/joint-european-torus/>
- ⁸ Romanelli F, Barabaschi P, Borba D, Federici G, Horton L, Neu R, Stork D, Zohm H, 2012, Fusion electricity: A roadmap to the realisation of fusion electricity - <https://www.euro-fusion.org/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>
- ⁹ Donné AJH, 2019, The European roadmap towards fusion electricity. Phil. Trans. R. Soc. A 377: 20170432. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2017.0432>
- ¹⁰ <https://ifmif-dones.es/>
- ¹¹ Analysis on a strategic public-private partnership approach to foster innovation in fusion energy - Final report, European Union, 2024, ISBN 978-92-68-10292-3 doi:10.2833/323326 MJ-06-23-046-EN-N
- ¹² https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/7/775804_Positionspapier_Fusionsforschung.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- ¹³ <https://step.ukaea.uk/>
- ¹⁴ <https://ccfe.ukaea.uk/ceo-appointed-to-deliver-uk-prototype-fusion-energy-plant/>
- ¹⁵ Ian Chapman, CEO UKAEA, comunicazione privata
- ¹⁶ Fusion Industry Association (FIA) <https://www.fusionindustryassociation.org/news/fusion-in-the-news/>
- ¹⁷ Department of Energy – FY 2024 Congressional Request DOE/CF-0196 Volume 5
- ¹⁸ Department of Energy – FY 2024 Congressional Request DOE/CF-0192 Volume 1
- ¹⁹ <https://www.gov.uk/government/publications/fusion-energy-collaboration-joint-uk-us-statement/joint-statement-between-the-uk-and-the-us-on-a-strategic-partnership-to-accelerate-fusion-energy-demonstration-and-commercialisation>
- ²⁰ Agile Nations: UK, Japan and Canada joint recommendations on fusion energy - GOV.UK (www.gov.uk)
- ²¹ https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/230426_strategy.pdf, <https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/index.html>
- ²² CFETR - https://en.wikipedia.org/wiki/China_Fusion_Engineering_Test_Reactor
- ²³ https://english.cas.cn/newsroom/multimedia_news/202205/t20220524_305724.shtml
- ²⁴ <https://www.ans.org/news/article-5668/china-launches-fusion-consortium-to-build-artificial-sun/>
- ²⁵ <https://www.llnl.gov/article/50616/llnl-national-ignition-facility-delivers-record-laser-energy>
- ²⁶ S. Atzeni, J. Mayer-Ter-Vehn, "The Physics of Inertial Fusion" Oxford University Press 2004
- ²⁷ <https://www.eli-beams.eu/facility/lasers/laser-4-aton-10-pw-2-kj/>
- ²⁸ <https://www.clf.stfc.ac.uk/Pages/D100.aspx>
- ²⁹ <https://www.lle.rochester.edu/omega-laser-facility-2/>
- ³⁰ <https://www.inertial-fusion.co.uk/>
- ³¹ <https://www.laserfusion.eu/presentation-of-the-hiper-plus-project/>
- ³² <https://www.inertial-fusion.co.uk/roadmap>
- <https://www.cambridge.org/core/journals/high-power-laser-science-and-engineering/article/future-for-inertial-fusion-energy-in-europe-a-roadmap/CA1BC0917BDCF29906B9D30799D945E9>
- ³³ Fusion Industry Association (FIA): <https://www.fusionindustryassociation.org/>
- ³⁴ The global fusion industry in 2023, Fusion Companies Survey by the Fusion Industry Association, 2023., <https://neutronbytes.com/2023/09/10/uk-government-invests-650-million-in-fusion-projects/>
- ³⁵ <https://tae.com/>
- ³⁶ <https://sifted.eu/articles/mapping-europes-nuclear-fusion-industry>
- ³⁷ Generic Assessment procedure for determining protective actions during a reactor accident. IAEA TECDOC 955.
- ³⁸ IAEA 2009 Classification of radioactive waste, IAEA Safety Standards Series n. GSG-1
- ³⁹ S.M. Gonzalez de Vicente et al 2022, Nucl. Fusion 62 085001
- ⁴⁰ [INPRO] <https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/Pages/cps.aspx>

⁴¹ IAEA: <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-hosts-the-first-meeting-focusing-on-safety-and-regulation-of-fusion>

⁴² Towards Fusion Energy, The UK Government's response to the consultation on its proposals for a regulatory framework for fusion energy, Consultation conducted 1st October 2021-24th December 2021, Department for Business, Energy and Industrial Strategy, <https://www.gov.uk/government/consultations/towards-fusion-energy-proposals-for-a-regulatory-framework>.

⁴³ Nuclear Regulatory Commission, "Options for Licensing and Regulating Fusion Energy Systems", SECY-23-0001.

⁴⁴ [NRC news] <https://www.nrc.gov/cdn/doc-collection-news/2023/23-029.pdf>

⁴⁵ European Commission, Directorate-General for Energy, Study on the applicability of the regulatory framework for nuclear facilities to fusion facilities – Towards a specific regulatory framework for fusion facilities – Final report, Publications Office of the European Union, 2021, <https://data.europa.eu/doi/10.2833/787609>

⁴⁶ <https://harmonise-project.eu/vision-objectives/>

⁴⁷ A. Ikonopoulos, M. Uršič, L. Cizelj, J. C. de la Rosa Blul, S. Andronopoulos, N. Terranova et al., "Licensing fusion facilities based on the ITER and DEMO paradigms", Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe, Portorož, Slovenia, 11-14 September 2023 (to appear).

⁴⁸ Programma fusione 2006-2015, Programma decennale 2014-2023

⁴⁹ Silvia Bruzzi, La filiera nucleare italiana di fronte alle opportunità della fusione e della rivoluzione green: Una filiera strategica per la futura competitività dell'Italia, Dipartimento di Economia, Università degli Studi di Genova, 2021

⁵⁰ Arunodaya Bhattacharya *et al* 2022 *J. Phys. Energy* **4** 034003 DOI 10.1088/2515-7655/ac6f7f

⁵¹ R. Kembleton, J. Morris, M. Siccinio, F. Maviglia, EU-DEMO design space exploration and design drivers, *Fusion Engineering and Design*, Volume 178, 2022, 113080, ISSN 0920-3796, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2022.113080>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379622000801>)

⁵² L. Barucca, et al., Maturation of critical technologies for the DEMO balance of plant systems, *Fusion Engineering and Design*, Volume 179, 2022, 113096,

ISSN 0920-3796, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2022.113096>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379622000965>)

⁵³ Bustreo C. et al., Socio economic perspectives on fusion power for a sustainable future energy system, submitted to *Nuclear Fusion*, 2024

⁵⁴ <https://acee.princeton.edu/distillates/fusion-energy-via-magnetic-confinement/#introduction>