

**RELAZIONE
DEL PROFESSOR PAOLO FASELLA**

PAGINA BIANCA

Il Programma Fusione Europeo

Relazione del Prof. Paolo FASELLA,
Direttore Generale della Ricerca, CCE,
alla
Commissione Industria della Camera
10.12.1986

I. Introduzione

Tenendo conto del fatto che degli aspetti scientifici e tecnici della Fusione hanno già parlato i Professori RUBBIA e TOSCHI, che della Fusione nel quadro generale dell'energia in Italia parlerà il Prof. COLOMBO, che sarà seguito dal Prof. COPPI per i Tokamak ad alto campo tipo IGNITOR, dall'Ing. NASCHI per la sicurezza ed infine dall'Ing. BERTOLINI per il JET, vorrei concentrarmi sul Programma Fusione Comunitario e la sua strategia.

Come figura nella proposta di programma quadro per la ricerca scientifica e tecnologica Comunitaria 1987-91, la Commissione oggi considera la fusione termonucleare come una delle importanti sorgenti potenziali di energia per il futuro, ma non l'unica, cosciente tra l'altro del fatto che a breve termine non si può certo rinunciare ai reattori a fissione.

E' noto che, il Programma Fusione Comunitario concentra la quasi totalità dei suoi sforzi sul confinamento magnetico, e che nel campo della fusione inerziale svolge soltanto un'attività ridotta per mantenersi al corrente. Nel 1972 l'Europa ha preso la decisione di concentrare gli sforzi sul confinamento magnetico sul Tokamak, che cominciava a fornire i risultati più spettacolari, e su un piccolo numero di linee alternative che presentano certi vantaggi concettuali per il reattore, abbandonando completamente le macchine a specchi e altri approcci. Questa decisione fondamentale è stata a poco a poco seguita dagli altri programmi Fusione nel mondo.

II. Il Programma Fusione Comunitario

1. La fusione quale programma Comunitario

Le decisioni del Consiglio dei Ministri Europei, affermano a più riprese che il Programma Fusione Comunitario è una collaborazione a lungo termine che riguarda tutte le attività svolte negli Stati Membri nel settore della Fusione termonucleare controllata e che persegue l'obiettivo di costruire in comune, a tempo debito, eventuali prototipi di reattori da industrializzare e commercializzare.

Al Programma Fusione Comunitario aderiscono due paesi non membri della Comunità, la Svezia e la Svizzera, che per quanto riguarda la fusione hanno gli stessi diritti e doveri degli Stati Membri.

Il potenziale a lungo termine della fusione giustifica un suo energetico sviluppo. La fusione potrebbe contribuire in modo determinante a ridurre la vulnerabilità economica, ecologica e politica dell'Europa nel prossimo secolo.

Le principali ragioni in favore di una base comunitaria per la ricerca e lo sviluppo nel campo della fusione sono ben note:

- l'ampiezza delle risorse umane e finanziarie necessarie;
- lo sforzo a lungo termine necessario;
- l'esistenza di un bisogno collettivo, comune a tutti gli Stati Membri;
- la creazione di un mercato Europeo in domini della tecnologia di punta per le industrie Europee;
- in caso di successo, l'apertura di un vasto mercato Comunitario per il reattore Europeo;
- la possibilità di competere con i tre altri grandi programmi fusione del mondo, l'americano, il giapponese e il sovietico.

La fusione possiede un notevole contenuto tecnologico di punta. La macchina JET, quelle nei laboratori associati e gli sviluppi per il NET costituiscono già una dimostrazione di alta tecnologia con

effetti benefici per altre branche della scienza e dell'industria europea ; l'importanza del ruolo dell'industria aumenterà sostanzialmente quando NET entrerà nella fase di progettazione ingegneristica.

2. Strategia

Schematicamente, le tappe per giungere a reattori a fusione atti a produrre energia sono la dimostrazione della fattibilità scientifica, la dimostrazione della fattibilità tecnologica e finalmente la dimostrazione della fattibilità economica della fusione (Fig.1). Attualmente con il JET, i Tokamak Europei di medie dimensioni ed i loro equivalenti stranieri, siamo ancora nella fase scientifica. Il NET (Next European Torus) di cui si sta preparando il progetto di massima, è concepito come una macchina che dovrebbe, inizialmente, confermare la piena fattibilità scientifica della fusione e, successivamente, affrontare il problema della fattibilità tecnologica. Infine la strada verso la commercializzazione dei reattori a fusione sarà aperta dal reattore di dimostrazione DEMO.

Il calendario previsto per le macchine nelle varie tappe è il seguente:

- . JET: resterà in funzione probabilmente fino alla fine del 1992;
- . Macchine di medie dimensioni: sono in funzione o entreranno in funzione attorno al 1988.
- . NET : si prevede che possa entrare in funzione entro la fine del secolo.
- . DEMO: dovrebbe poter entrare in funzione circa 15 anni dopo NET.

Per il periodo 1987-1991 i principali obiettivi del Programma Fusione sono i seguenti:

- creare la base fisica e tecnologica necessaria per il progetto particolareggiato del NET;
- avviare il progetto particolareggiato del NET nel 1989-1990 semprechè a quel momento esistano già le basi di dati necessarie;

- studiare le possibilità offerte da configurazioni alternative (Stellarator e Strizione a Campo Inverso) in vista del reattore.
- continuare una certa attività nel campo della fusione inerziale.

Per ulteriori informazioni sulla strategia e gli obiettivi del Programma Fusione si vedano le Figg. 2 e 3.

3. Contenuto Tecnico

- JET é a livello mondiale il più avanzato esperimento sulla fusione (Fig.4); il pieno sfruttamento delle sue capacità ha richiesto alcune apparecchiature supplementari per le quali sarà necessario protrarre la durata del JET fino alla fine del 1992. Il contributo italiano a JET, in personale e supporto dell'Associazione EURATOM-ENEA, e in contratti industriali, è notevole. Ne mostrero' le cifre fra poco. A questo punto vorrei invece sottolineare la notevole importanza per la strategia del Programma Fusione del più recente risultato del JET: quello presentato all'ultima conferenza dell'AIEA sulla Fusione a Kyoto in novembre. Per la prima volta, modificando opportunamente la configurazione magnetica (punti X, Fig.5), è stato possibile ottenere su un grande Tokamak il famoso regime H - scoperto qualche anno fa sul Tokamak a divertore ASDEX nell'associazione EURATOM-Istituto Max-Planck a Monaco di Baviera - grazie al quale la temperatura del plasma e le altre grandezze di interesse termonucleare crescono applicando potenti metodi di riscaldamento. Non bisogna infatti dimenticare che per qualche anno la comunità Fusione mondiale si è trovata di fronte ad un grande ostacolo: per quanto elevata fosse la potenza del riscaldamento, la temperatura del plasma e le altre grandezze termonucleari non aumentavano. E' in tali momenti di scoraggiamento e di impazienza che si è tentato, nella lunga marcia verso la fusione, di abbandonare la strada maestra per cercare delle scorciatoie. Ora, grazie al JET, abbiamo il conforto di argomenti scientifici che la strada su cui ci siamo inoltrati in Europa: JET - NET - DEMO resta la strada maestra verso il reattore a Fusione.

- Si potrebbero citare altri esempi, oltre che ASDEX, di Tokamak di medie dimensioni nei nostri laboratori Associati che continuano a contribuire in modo sostanziale al successo del JET e della fusione tramite esperimenti e sviluppi specifici (Fig.6). Uno dei nuovi Tokamak, FTU (costo approssimativo : 45 MioECU) è in costruzione a Frascati nell'Associazione EURATOM-ENEA.

- NET è nella fase di definizione e di programmazione di massima. Il contributo degli scienziati italiani al NET è determinante.

- Il programma tecnologico è soprattutto in appoggio al NET, ma non mancano altre attività anche a più lunga scadenza quali quelle riguardando i materiali, la sicurezza e l'impatto sull'ambiente (Fig.7). In quest'ambito va sottolineata l'attività Fusione di Ispra. Essa è essenzialmente la seguente:
 - . Supporto al progetto di massima di NET.

 - . Studi sperimentali di componenti per NET.

 - . Esperimenti e studi di valutazione sulla sicurezza e l'impatto sull'ambiente.

 - . Installazione del laboratorio per la manipolazione del trizio (facente seguito alla decisione del Consiglio dei Ministri Europei); il contratto industriale per la sua costruzione è stato aggiudicato (Fig.8).

- Inoltre il sito di Ispra, secondo uno studio presentato nel 1983 al Consiglio dei Ministri e al Parlamento Europei, si presenta come adatto a una eventuale realizzazione del progetto IGNITOR (vedi pag. 12 e Fig.25).

- In Europa due macchine relative alle linee alternative al Tokamak sono in costruzione, una delle quali, RFX (costo approssimativo: 50 MioECU), a Padova nell'Associazione EURATOM-ENEA.

- Una certa attività è mantenuta nel campo della fusione a laser. Per queste ricerche l'Italia ha un piccolo gruppo a Frascati.

4. Struttura politico-amministrativa e sistema di gestione del programma

Il programma fusione Europeo è gestito congiuntamente dalla Commissione e dalle Istituzioni Nazionali Associate. Le decisioni essenzialmente appartengono alle istituzioni della Comunità per l'adozione dei programmi quinquennali (Commissione, Parlamento, Consiglio). Come è noto il programma comprende JET, NET, le Associazioni e alcuni servizi del CCR (Fig.9).

Per il JET è stata creata una Impresa Comune. Tale impresa è formata dalla Commissione, da tutte le istituzioni associate e dagli altri paesi membri che non hanno attività nel campo della fusione.

La Commissione paga l'80% delle spese totali di JET (Fig.10); il 10% è pagato dalla Gran Bretagna in quanto paese ospite e il rimanente 10% da tutte le associazioni al prorata dei loro bilanci annuali. Il costo complessivo della macchina (investimenti) si aggira sui 600 MioECU.

Un accordo multilaterale esiste anche per NET. La Commissione paga il 100% delle spese del gruppo. Il costo previsto della macchina è di almeno 2 BioECU.

Ciascuna Associazione è gestita da un Comitato composto da membri dell'Istituzione nazionale in questione e dalla Direzione del Programma Fusione Europeo. La Commissione paga il 25% delle spese correnti e il 45% degli investimenti (Fig.10).

Il ruolo delle associazioni, attualmente orientate soprattutto alla fisica (ed i cui programmi di ricerca forniscono il necessario respiro allo sforzo Europeo), sarà destinato ad essere rilevato progressivamente da organismi nazionali orientati alla tecnologia, e più tardi dall'industria.

La tecnologia della Fusione viene sviluppata in seno alle Associazioni, nonchè dal Centro Comune di Ricerca.

Per la gestione complessiva del programma la Commissione è assistita dal Comitato Consultivo Programma Fusione (CCFP) composto da 3 rappresentanti per ogni paese membro o associato (Svezia e Svizzera). In particolare il CCFP raccomanda alla Commissione, su proposta dei laboratori, gli investimenti eligibili per il finanziamento al 45%.

Il CCFP ha due sottocomitati uno per la fisica (PC) ed uno per la tecnologia (FTSC); quest'ultimo esercita la supervisione di NET e delle attività di tecnologia, CCR incluso.

Il numero totale di ricercatori impegnati nel Programma Fusione Comunitario è di circa 1.200, di cui oltre 200 impiegati dalla Commissione ed in massima parte utilizzati a JET o nei laboratori Associati (Fig.11).

Il presente bilancio annuale del Programma Fusione ammonta a circa 370 MioECU (prezzi 1986) dei quali circa il 50% è finanziato dalla Comunità (Figg.12 e 13). Per un confronto con i Programmi Fusione Americano e Giapponese si vedano le Figg.14 e 15.

In cifre, lo sforzo italiano, tanto nel numero dei ricercatori che nel finanziamento, rappresenta circa il 10% del totale.

Il costo della gestione (Direzione Fusione a Bruxelles e finanziamento del CCFP e sottocomitati) ammonta a circa 0,6% del costo totale del programma.

Tra le numerose disposizioni prese per garantire al Programma Fusione un carattere effettivamente comunitario merita di essere sottolineata quella riguardante la mobilità del personale: ogni anno più di 200 ricercatori del programma sono inviati in altri laboratori, mediante "contratti di mobilità", per periodi variabili da un mese ad un anno. Un caso a parte è il JET, dove il programma è eseguito da personale con "biglietto di ritorno", cioè da personale che gli organismi nazionali si sono impegnati a reintegrare

una volta terminato il loro distaccamento al JET; dall'inizio del progetto, una metà circa del personale è ritornata alle Associazioni di origine a lavoro completato ed è stata sostituita da altro personale più qualificato per i nuovi compiti da svolgere.

5. Relazioni Internazionali

La Fusione magnetica si presta come pochi altri settori della ricerca alla collaborazione su scala mondiale. I motivi sono quegli stessi che sono all'origine del Programma Fusione Europeo.

Se quest'ultimo è forse il più avanzato dei quattro grandi programmi nel mondo, è grazie al fatto che in Europa tutti gli sforzi nazionali nel campo della fusione magnetica sono completamente integrati nel programma Comunitario. Gli altri tre sono, nell'ordine d'importanza, quello degli Stati Uniti, quello del Giappone, e finalmente quello dell'Unione Sovietica. Altre attività limitate esistono in particolare in Canada e in Australia. Macchine comparabili al JET sono in servizio negli Stati Uniti (TFTR) e in Giappone (JT-60).

Che attualmente l'Europa occupi, grazie soprattutto ai contributi fondamentali forniti recentemente dal JET, una posizione di primo piano è stato pienamente confermato alla recente conferenza mondiale sulla fusione a Kyoto.

Il programma fusione europeo intrattiene da molti anni relazioni più o meno formali con gli altri programmi nel mondo. Attualmente si esplorano forme di collaborazione più ampie e più stabili (Fig.16). In questo contesto è opportuno ricordare una decisione del Consiglio dei Ministri Europei secondo la quale "nelle relazioni con gli altri programmi fusione nel mondo il Programma Fusione Comunitario si presenta come un tutto unico".

Un accordo-quadro bilaterale sulla Fusione esiste tra l'Euratom e il Canada, uno sta per essere firmato con gli Stati Uniti⁽¹⁾, e un terzo è in preparazione avanzata con il Giappone.

(1) L'accordo è stato firmato il 15 dicembre 1986.

Nel quadro dell'Agencia Internazionale dell'Energia (OCSE-Parigi), in cui partecipano rappresentanti del programma fusione europeo, nordamericano e giapponese, sono stati conclusi diversi accordi su settori precisi:

- costruzione di un grande dispositivo toroidale di bobine superconduttrici;
- collaborazione sugli Stellarator;
- collaborazione su alcuni specifici problemi dei tokamak;
- studio in comune di materiali per futuri reattori a fusione;
- collaborazione tra i 3 grandi tokamak TFTR, JET e JT-60.

Un nuovo accordo di collaborazione sulle Strizioni a Campo Inverso sarà concluso prossimamente.

Da diversi anni, nell'ambito dell'Agencia Internazionale dell'Energia Atomica (AIEA-ONU a Vienna) l'Euratom partecipa assieme agli altri tre grandi programmi fusione ai Gruppi di Lavoro INTOR (studi concettuali di reattore a fusione).

La coordinazione dei programmi fusione dell'Europa, degli USA, del Giappone e del Canada è pure discussa nel quadro del vertice economico (Gruppo di lavoro sulla fusione iniziato dopo il Vertice di Versailles), soprattutto in relazione al "Next Step".

Più recentemente l'importanza della fusione per il futuro dell'umanità e l'interesse di una collaborazione internazionale per il suo sviluppo sono stati evocati negli incontri Est-Ovest al più alto livello (Reagan-Gorbachov). Attualmente sono allo studio le possibilità tecniche di fare il primo progetto di una macchina del tipo NET nel quadro di un'ampia collaborazione internazionale tra i quattro grandi programmi fusione mondiali. Si puo' già affermare che:

- (a) il calendario di realizzazione di una macchina internazionale non dovrebbe differire da quello del NET (giacchè il Next Step deve comunque essere basato sui risultati del JET e dei progetti equivalenti);
- (b) Una tale collaborazione si tradurrebbe per i partecipanti in risparmi considerevoli nella fase di costruzione e in quella di esercizio, mentre non dovrebbe essere apprezzabile l'eco-

nomia nel periodo 1987-1991, cioè nella fase di progettazione preliminare e, eventualmente, di inizio dei progetti particolareggiati;

- (c) le prospettive di collaborazione internazionale non devono rallentare il programma Europeo sulla fusione; in particolare il progetto NET deve continuare secondo il calendario stabilito fino a che si troverà una soluzione internazionale che offra garanzie convincenti per il "Next Step".

Nel campo della fusione inerziale la situazione è completamente diversa per ragioni politiche:

- i paesi d'Europa agiscono in ordine sparso : alcuni posseggono dei laboratori importanti spesso sotto segreto militare, altri mantengono un'attività limitata in laboratori non militari;
- la supremazia degli Stati Uniti è assoluta (programma in gran parte sotto segreto militare);
- la posizione del Giappone (programma non militare) è invidiabile;
- quanto all'Unione Sovietica, come nel campo della fusione magnetica, i ricercatori sono eccellenti ma le realizzazioni tecniche sono in posizione di retroguardia.

La collaborazione internazionale è pressochè inesistente nella fusione inerziale.

6. Partecipazione Italiana al Programma Fusione

Come è noto il ruolo dell'Italia nella gestione del Programma Fusione è sempre stato di primo piano. La posizione centrale nella creazione, lo sviluppo e il consolidamento di tale programma è universalmente riconosciuta al Prof. Donato PALUMBO che ne ha assicurato la direzione dall'inizio, nel 1958, fino all'agosto scorso. Il Prof. Romano TOSCHI che dirige il gruppo NET dalla sua costituzione nel 1983, era stato prima il Presidente del JET Supervisory Board (1973-76) e poi il Presidente del Comitato Esecutivo del JET (1978-83). L'Ing. Roberto ANDREANI è da quest'anno Presidente del Comitato dei Programmi del CCFP. L'Ing. Enzo BERTOLINI è Vice-Direttore di Dipartimento al JET. Alla Direzione del Programma Fusione a Bruxelles un ruolo importante continua ad essere giocato dai Dottori Umberto FINZI ed Ernesto CANOBBIO.

Un contributo importante nel campo della tecnologia della Fusione è dato dal gruppo di Ispra guidato dal Dott. Giampaolo CASINI.

L'Italia è stata il secondo paese europeo a stabilire con l'Euratom relazioni ufficiali per la Fusione e il suo contributo è stato sempre sostanziale.

Per ogni paese membro, la partecipazione ad un programma comunitario completamente integrato qual'è la Fusione, offre vantaggi generali e specifici. Tra i primi figura il beneficio di tutta l'esperienza Europea in un campo dove nessun paese membro può pretendere di possedere da solo un numero sufficiente di specialisti per coprire tutti gli aspetti del programma. Tra i secondi figurano i benefici per l'industria. Questi ultimi hanno i due aspetti dei contratti (Fig.17) e dell'interazione dei ricercatori della fusione con gli ingegneri dell'industria (Figg.18 e 19). L'industria Italiana partecipa attivamente alle gare di appalto, obbligatoriamente Europee, per tutti i dispositivi costruiti nel programma. L'insieme dei contratti industriali Europei ammonta a circa 120 MioEcu per anno. L'industria Italiana ha ottenuto circa il 25% (in volume finanziario) dei contratti stipulati dalle Associazioni negli ultimi 5 anni (Figg.20 e 21). Si può notare che attualmente la stragrande maggioranza delle bobine magnetiche delle macchine nelle associazioni sono costruite in Italia (Ansaldo, Fig.19). La partecipazione dell'ENEA e del CNR al JET in personale stabile, in personale distaccato temporaneamente e in contratti di supporto, si cifra in ciascuno dei casi, a circa il 10% (Fig.22). Al NET l'ENEA partecipa per circa il 30% degli effettivi e il 20% del valore dei contratti (Fig.22). E' nel dominio della tecnologia che la parte italiana è stata finora abnormalmente piccola: dell'ordine del 4%.

7. Prospettive

Per quanto riguarda la fusione D-T, i valori di ignizione per la temperatura e per il prodotto termonucleare nT , grazie soprattutto ai più recenti risultati di JET e del TFTR americano, sembrano raggiungibili all'inizio degli anni novanta (Fig.23).

Come è stato detto, nella linea d'approccio alla fusione per confinamento magnetico è il Tokamak la macchina che ha fornito i risultati più spettacolari e che è quindi la più sviluppata.

Attualmente il Tokamak è una macchina pulsata, il che per un reattore sarebbe un inconveniente (fatica dei materiali); ma già oggi è stata dimostrata sperimentalmente la possibilità di renderlo continuo, usando microonde per mantenere la corrente nel plasma. JET è un Tokamak, NET sarà un Tokamak (Fig.24). Non è ancora sicuro che DEMO sarà pure un Tokamak, ma in ogni modo la linea diretta verso il reattore, come è concepita attualmente, implica macchine di notevoli dimensioni fisiche e campi magnetici di 5-6 Tesla, che sono nei limiti di fattibilità previsti per le bobine superconduttrici, e funzionanti a impulsi molto lunghi ed eventualmente in continuo. Un Tokamak compatto e ad alto campo, come IGNITOR o il progetto americano CIT, è universalmente considerato un interessante esperimento di fisica capace di realizzare, a un prezzo contenuto, le condizioni di ignizione (Fig.25). Tuttavia esso non è direttamente estrapolabile ad un reattore economico.

Nelle linee alternative, gli Stellarator e le Strizioni a Campo Inverso (RFP) sono delle varianti dei Tokamak che, benchè meno avanzate, presentano certi vantaggi concettuali, che bisogna valutare nella prospettiva del reattore. E' per questo che in Europa noi costruiamo uno Stellarator e una Strizione a Campo Inverso (quest'ultima a Padova) di notevoli dimensioni. Sono le leggi fisiche del confinamento magnetico in generale che impongono l'uso di dispositivi di grandi dimensioni anche per lo studio dei problemi fisici.

Del confinamento inerziale ha parlato il Prof. Rubbia. Si tratta di un approccio molto diverso dal precedente. Indubbiamente, un reattore a fusione inerziale presenterebbe dal punto di vista concettuale dei vantaggi apprezzabili rispetto al reattore a fusione magnetica: le "variabili" tecniche sono separate: da una parte la sorgente di energia, in un'altra il bersaglio, e in un'altra ancora il mantello generatore di Trizio. Lo schema di un reattore a fasci di ioni pesanti è mostrato sulla Fig.26. Ma è giocoforza riconoscere che dal punto di vista sperimentale la

fusione inerziale é meno avanzata che la fusione magnetica. Attualmente la maggior parte degli sforzi è consacrata allo sviluppo delle sorgenti di energia, laser o fasci di particelle. Tali sorgenti di energia devono avere caratteristiche estreme - potenze gigantesche, impulsi cortissimi, elevatissime capacità di focalizzazione per indurre al centro di un piccolo bersaglio di Deuterio-Trizio le condizioni di temperatura e densità richieste per la fusione inerziale. Queste sorgenti di energia hanno evidenti applicazioni in altri campi, in particolare militari, che godono di importanti stanziamenti. Quindi la maggior parte dei laboratori sulla fusione inerziale sono almeno in parte sotto segreto militare e gli sviluppi dipendono solo parzialmente dalle esigenze della fusione. Appare opportuno che, in sede Europea, si proceda a un approfondimento delle prospettive di questo approccio alla fusione termonucleare controllata.

Consideriamo brevemente il problema della radioattività posto da un reattore a fusione. I combustibili Deuterio e Litio come pure l'Elio, prodotto finale delle reazioni D-T non sono radioattivi. Soltanto un elemento intermedio, il Trizio, lo è, ma in linea di principio esso non dovrebbe uscire dal reattore che, sotto questo aspetto, è un sistema isolato (Fig.27). Il problema dei residui radioattivi nel caso del reattore a fusione D-T è essenzialmente legato ai materiali della struttura meccanica che sono attivati dai neutroni prodotti dalle reazioni termonucleari. Questo problema potrà essere alleviato sia a lungo termine usando combustibili avanzati, sia in tempi più ravvicinati sviluppando dei materiali strutturali molto meno attivabili che l'acciaio, quali leghe di vanadio ecc. Il problema dello studio dei materiali sotto radiazioni e dello sviluppo di nuove leghe diventerà a lungo termine uno dei problemi essenziali della fusione (vedere le conclusioni del Panel Amelinckx (AIE)).

E' ben noto pero' che, dal punto vista dell'impatto sull'ambiente, il beneficio della fusione sarebbe totale se si potessero usare i combustibili cosiddetti avanzati (Boro e Idrogeno) invece del Deuterio e del Trizio perchè i problemi di radioattività potrebbero sparire del tutto. Purtroppo questo richiederebbe il raggiungimento

di condizioni fisiche estreme per il plasma. E' perciò universalmente accettato che il primo reattore a fusione utilizzi il combustibile D-T.

Su richiesta della Commissione Energia del Parlamento Europeo il Programma Fusione Comunitario sta preparando un rapporto sugli aspetti ecologici ed economici della fusione da sottoporre al Consiglio insieme alla proposta del programma fusione 1987-91. A causa del lungo periodo di tempo necessario allo sviluppo dell'energia di fusione, i risultati sono necessariamente molto preliminari:

- Ambiente.

- . In normali condizioni di funzionamento, la radioattività ambientale dovuta al Trizio resterà molto al disotto del livello della radioattività naturale. Nelle stesse condizioni, le piccole quantità di materiali strutturali attivati che potrebbero passare nel circuito di raffreddamento per effetto della corrosione saranno contenibili in modo molto efficace.
- . Il peggior incidente immaginabile non comprometterebbe le condizioni di vita all'esterno del sito del reattore.
- . A differenza delle centrali che utilizzano combustibili fossili, nel caso della fusione non ci sarà ovviamente emissione di anidride carbonica, il cui impatto sull'ambiente, potrebbe diventare critico in un'economia basata sull'uso del carbone.

Per altri dati sugli aspetti ecologici della Fusione vedi Fig.28.

- Economia.

Le incertezze inerenti alle stime a lungo termine rendono ogni conclusione poco attendibile: il costo dell'energia da fusione potrebbe essere da 1 a 2 volte il costo dell'energia basata sui sistemi attuali (Fig.29). Il grado d'interesse pratico della fusione dipenderà allora dal peso relativo dei fattori ambientali ed economici. Questi dovranno quindi essere periodicamente rivalutati per precisare il ruolo probabile che la fusione terrà sulla scena energetica nel prossimo secolo.

Un altro aspetto interessante è il legame tra la Tecnologia del nucleare tradizionale e quella della fusione.

Finora, per le sue esigenze di sviluppi tecnologici, il Programma Fusione ha usufruito sostanzialmente delle conoscenze accumulate dal programma Fissione nei centri nucleari convenzionali, in particolare per quanto riguarda i materiali irraggiati, il mantello fertilizzante, la neutronica, il trizio, la robotica e la radio-protezione. La Fusione utilizza ugualmente le installazioni della Fissione (p.e. reattori ad alto flusso) per lo studio di materiali necessari per le tappe successive.

In questo contesto va sottolineato il ruolo giocato dal CCR e da Ispra in particolare.

Non bisogna però dimenticare che la Fusione ha bisogno anche di tecniche e apparecchiature specifiche di grande mole p.e. nel settore delle grandi bobine superconduttrici e delle sorgenti di neutroni a 14 MeV ad alto flusso.

In fine ci si può chiedere se le risorse finanziarie fin qui destinate alla Fusione siano adeguate e se non sia possibile accelerare i programmi di ricerca almeno in certi settori.

Bisogna, credo, distinguere tra uno sviluppo normale e uno sviluppo forzato (crash programme). È evidente che se si facesse sentire un bisogno imperativo di disporre a breve scadenza di una nuova sorgente di energia, si potrebbe lanciare un programma fusione accelerato, a condizione però di prendere notevoli rischi. Per esempio, se oggi noi dovessimo lanciare il progetto particolareggiato e la costruzione di NET senza aspettare i 4 anni che pensiamo necessari per disporre di una buona base di dati, saremmo obbligati di prendere notevoli margini di sicurezza. Una tale macchina avrebbe necessariamente dimensioni maggiori e quindi costerebbe nettamente di più di quanto oggi si prevede per un programma normale. Attualmente le circostanze esterne non sembrano imporre un programma accelerato, e i governi sembrano in favore del più rapido progresso compatibile con l'accettazione di rischi moderati.

La comunità Fusione Europea considera che il programma può funzionare in quest'ottica con un bilancio globale di circa 2,2 BioECU per il periodo 1987-91, il 50% circa di tale somma provenendo dalla

Comunità. E' questa la somma iscritta nella proposta di programma quadro per la ricerca Comunitaria (1987-1991).

Non bisogna poi dimenticare che, affianco alle limitazioni finanziarie, ci sono quelle imposte dal numero limitato di specialisti disponibili a corto termine, e che i progressi della fisica seguono un loro ritmo proprio, che puo' essere facilmente rallentato diminuendo le risorse finanziarie ma che non puo' essere arbitrariamente accelerato aumentandole.

Tutto questo riguarda la fisica del confinamento magnetico. Invece nel settore della tecnologia il ritmo dei progressi è molto più strettamente legato al ritmo delle spese. E' certo che stanziamenti supplementari permetterebbero di affrontare fin d'ora dei problemi, quali lo sviluppo di nuovi materiali poco attivabili, che, se trascurati oggi, ci potrebbero metter in futuro in una situazione imbarazzante.

STRATEGIA DEL PROGRAMMA EUROPEO DI FUSIONE

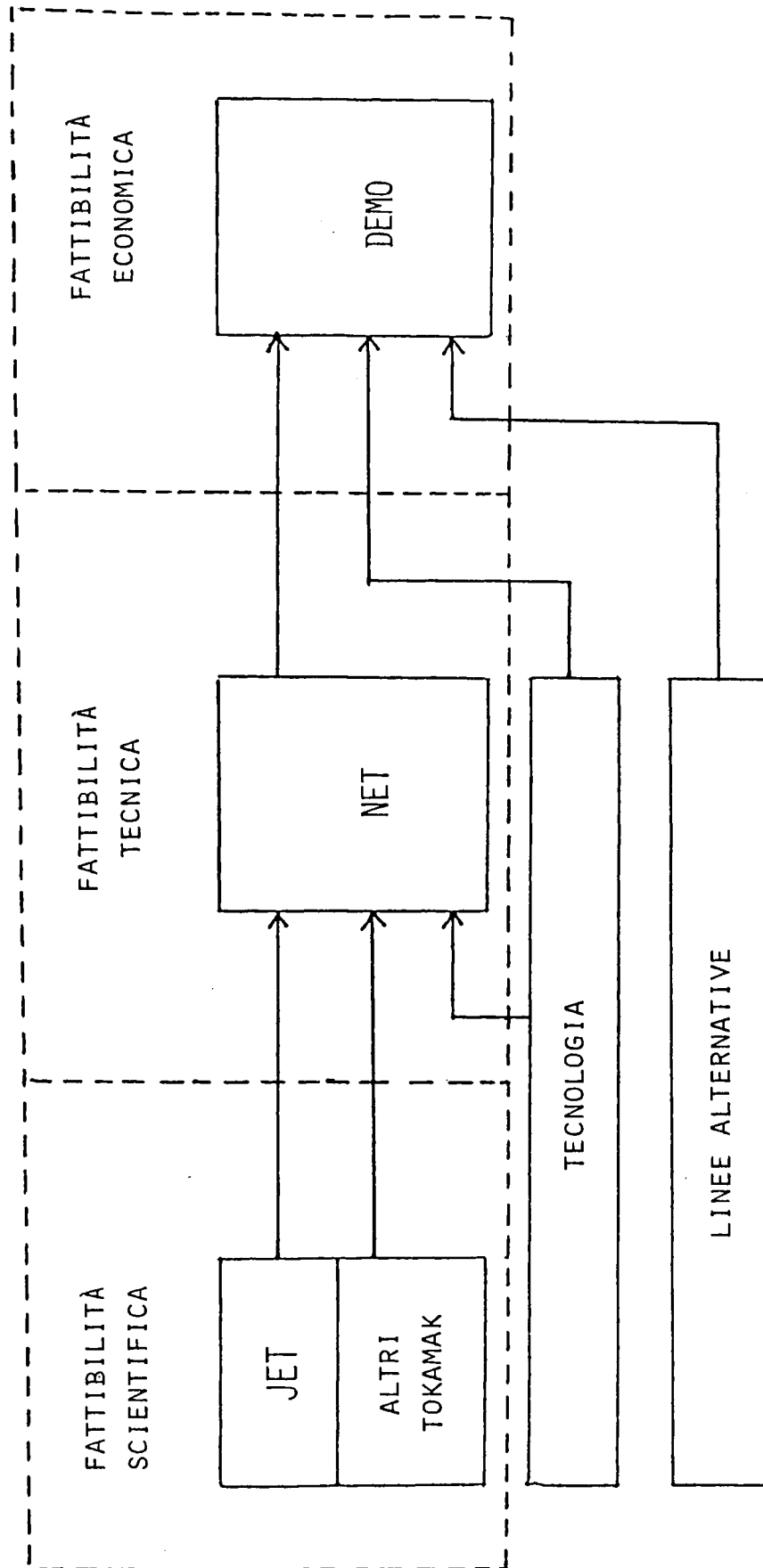
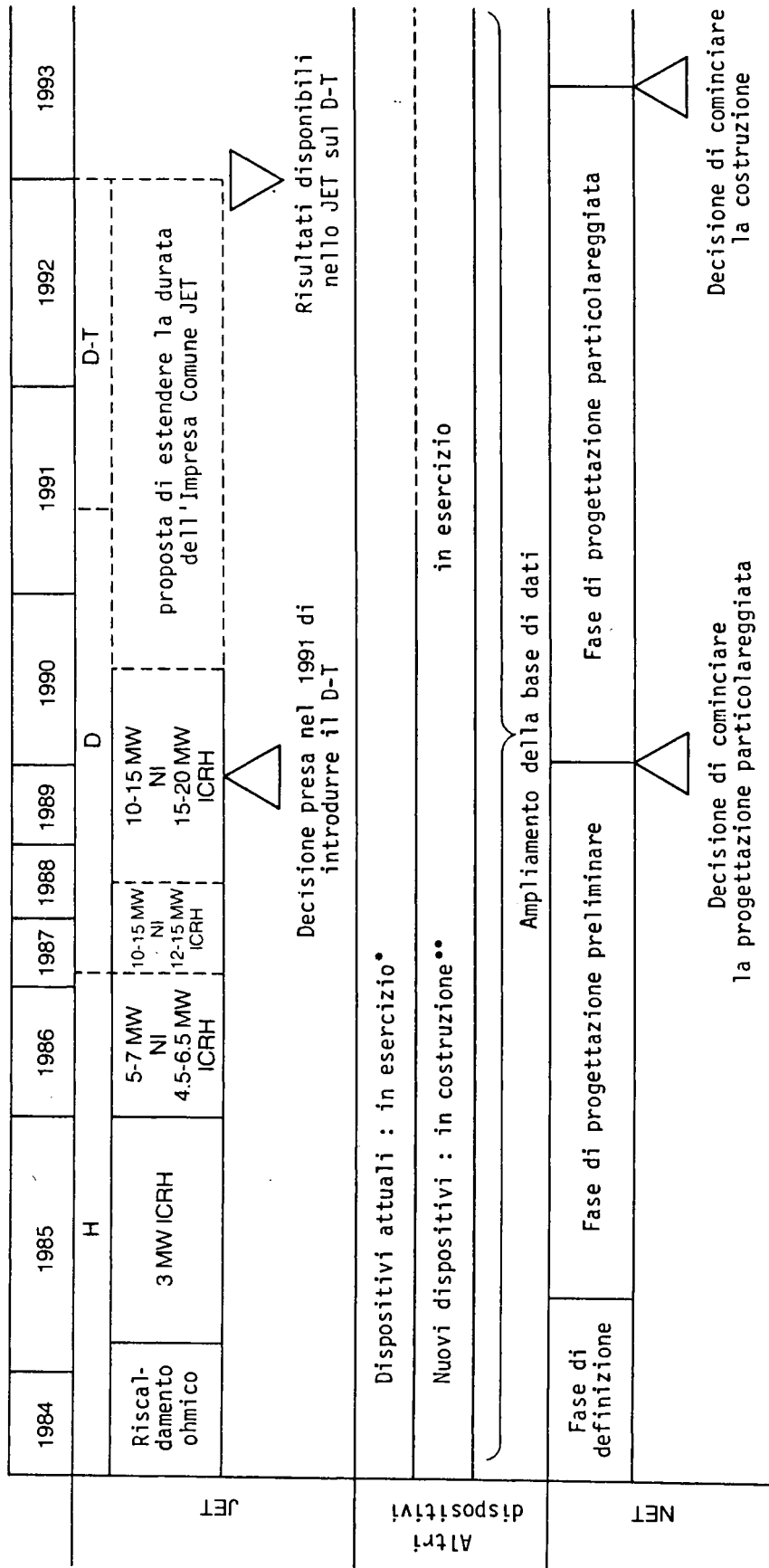


FIG. 1

FIG. 2

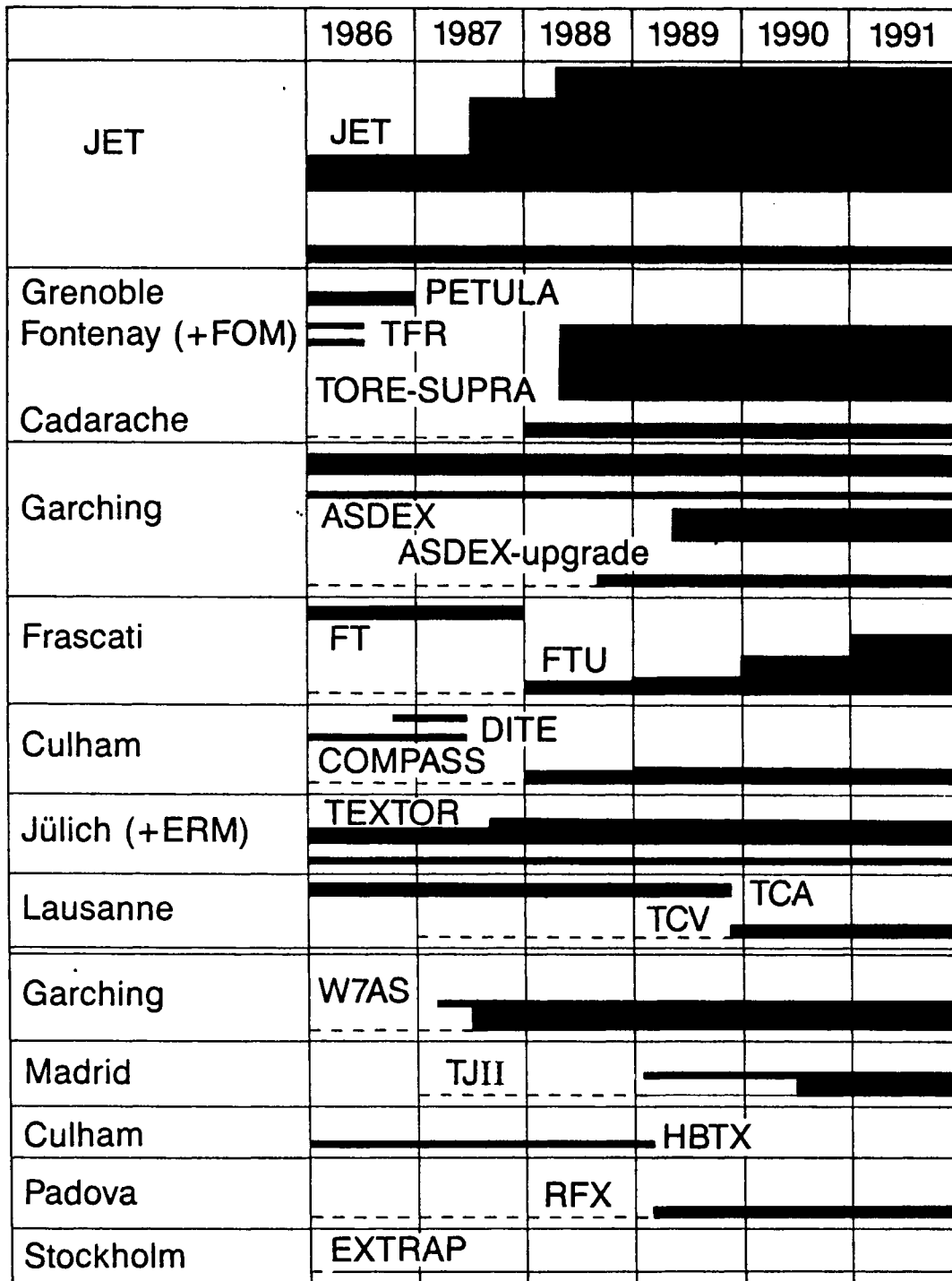
TAPPE FONDAMENTALI DELLA RICERCA FUSIONE IN EUROPA



MW = megawatt accoppiati al plasma
 NI = Iniezione di Neutri
 ICRH = Riscaldamento alla Risonanza Ciclotronica Ionica
 H,D,T = idrogeno, deuterio, tritio

- FT • ASDEX • ETA BETA II • HBTX-IB • TCA • CLEO • DITE • TEXTOR • EXTRAP •
- TORE SUPRA • FTU • ASDEX-Upgrade • WENDELSTEIN VII-AS • COMPASS • RFX •

Aggiornato (Settembre 1986)



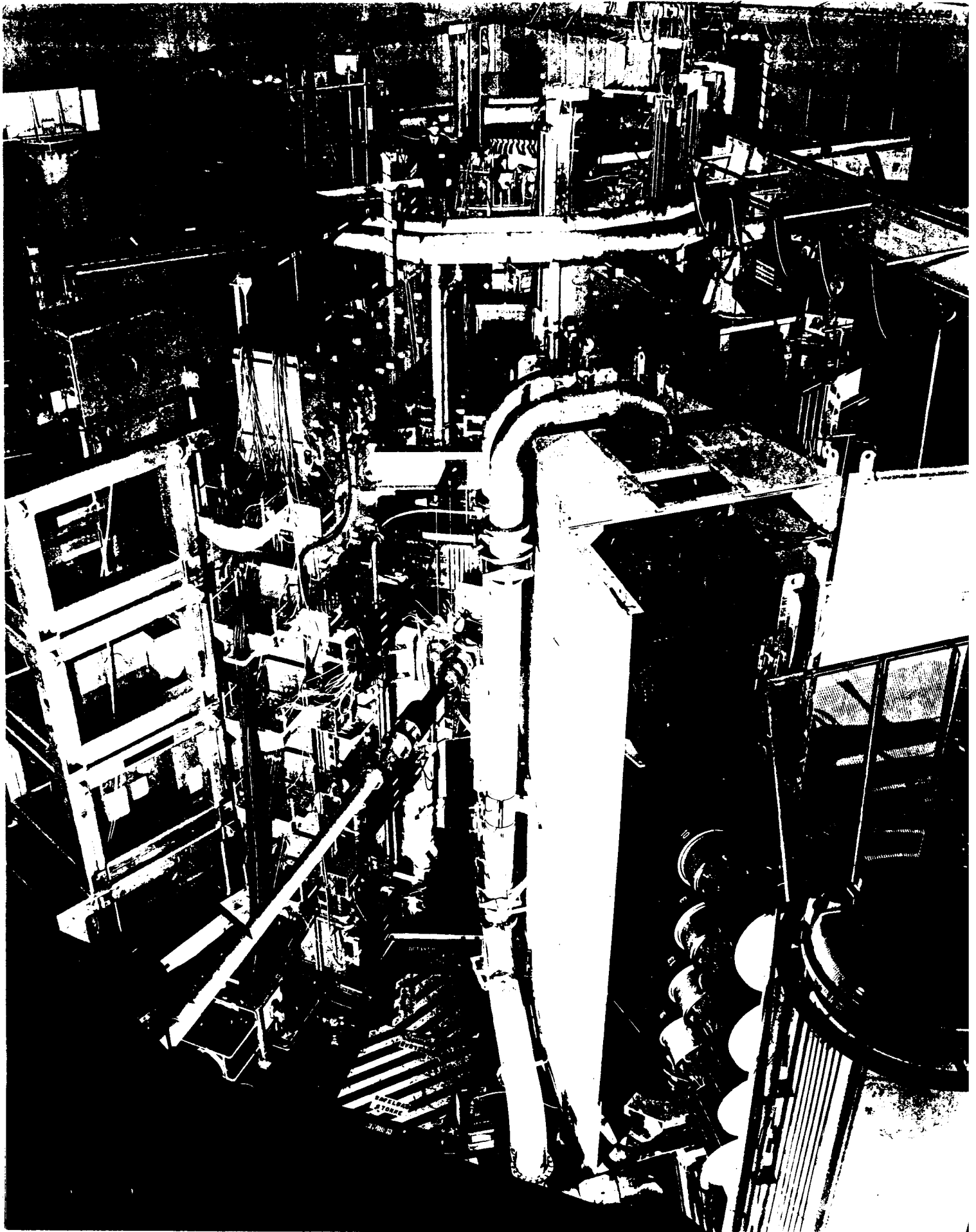
I diversi metodi di riscaldamento sono rappresentati da diversi colori :

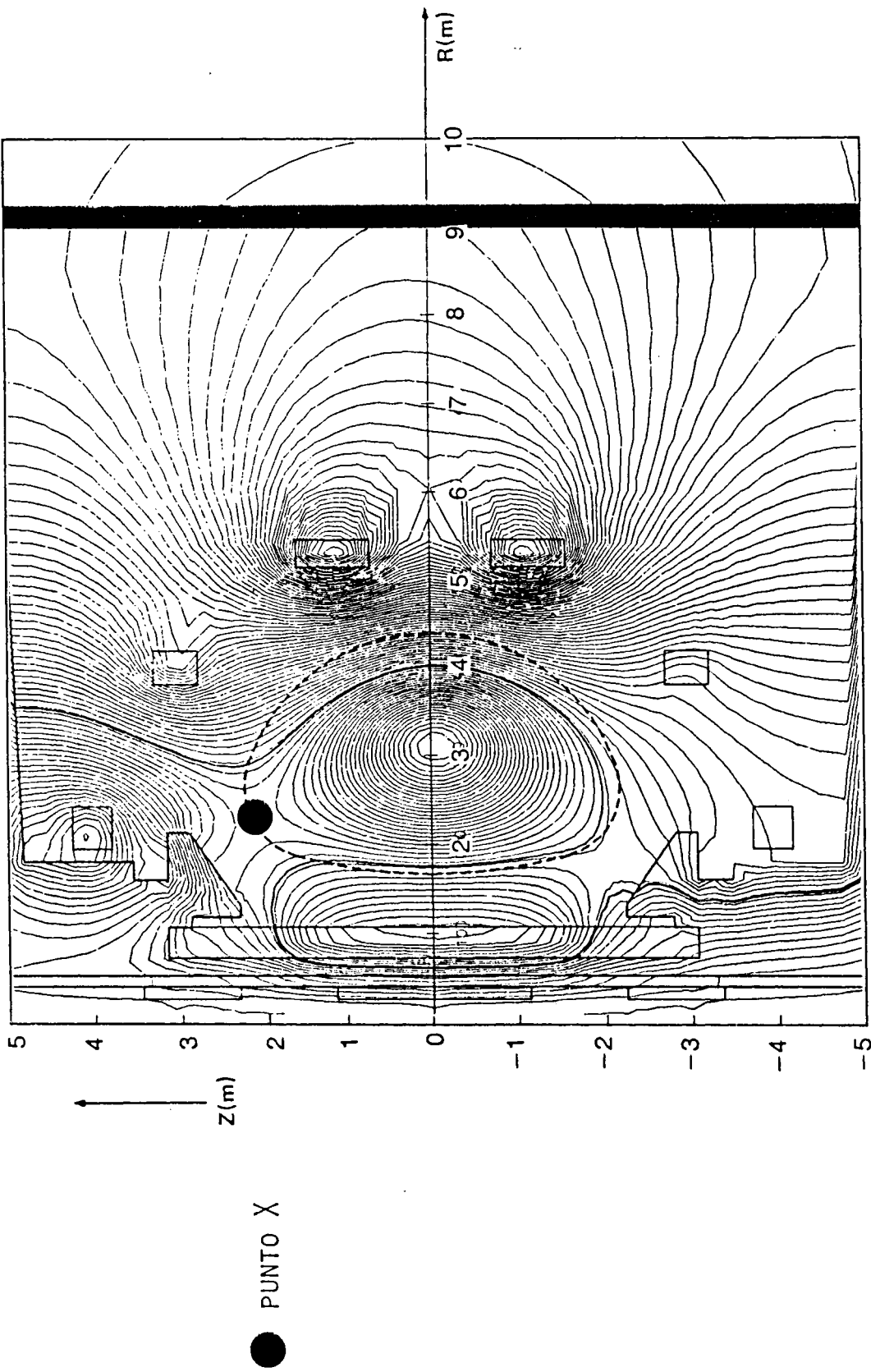
- Nero : Riscaldamento ohmico
- Giallo : Iniezione di fasci di atomi neutri
- Rosso : Riscaldamento alla risonanza ciclotrone ionica
- Verde : Riscaldamento o generazione di corrente alla risonanza ibrida inferiore
- Blu : Riscaldamento alla risonanza ciclotrone elettronica
- Porpora: Riscaldamento con onde di Alfvén.

FIG. 3

Lo spessore di ogni striscia di colore è proporzionale alla potenza di riscaldamento (1 mm per 1 MW) iniettata nella camera a vuoto (coll'eccezione del JET dove esso indica la potenza accoppiata al plasma secondo una stima iniziale). La fase di costruzione è indicata da una tratteggiata.

Fig. 4





IL TIPO DI CONFIGURAZIONE MAGNETICA CHE HA PERMESSO IL RECENTE SUCCESSO DEL JET

FIG. 5

FIG. 6

CONTRIBUTI DELLE ASSOCIAZIONI A JET E NET

SCIENTIFICI/TECNOLOGICI (lista non esaustiva):

- . Carbonizzazione Limiter raffreddati (TEXTOR a Jülich)
- . Scoperta del modo H (ASDEX a Garching)
- . Sviluppo di antenne RF (TFR a Fontenay)
- . Sviluppo di fasci di atomi neutri (Fontenay, Culham)
- . Produzione di corrente tramite onde (Petula a Grenoble)
- . Iniezione di ghiaccioli (Risø)
- . Riscaldamento LH (FTU a Frascati, PETULA a Grenoble)
- . Diagnostica (molti laboratori, in particolare Frascati che ha sviluppato un analizzatore di particelle neutre e uno spettrometro a raggi X).

CONTRIBUTI DI PERSONALE

- . La maggior parte del personale del JET proviene dalle Associazioni e dispone di un "biglietto di ritorno": una metà circa del personale è già ritornata alle Associazioni di origine ed è stata sostituita da altro personale più qualificato per i nuovi compiti da svolgere.
- . Le Associazioni contribuiscono anche alla costituzione del team NET.

FIG. 7

LEGAMI TRA IL CCR E NET E ASSOCIAZIONI NELLA TECNOLOGIA DELLA FUSIONE

NET E ASSOCIAZIONI	CCR: PROGRAMMA FUSIONE					
	Studi reattore	Studi mantello fertilizzante	Studi materiali strutturali	Valutazione rischi	Costruzione laboratorio Trizio	
NET	X					
Ingegneria del mantello e prima parete	X	X		X		
Tecnologia del Trizio		X			X	
Materiali strutturali			X	X		
Materiali fertilizzanti		X				
Magneti						
Manutenzione	X					
Sicurezza e ambiente				X	X	

Fig. 8

CALENDARIO DI REALIZZAZIONE PER ETHEL (Giugno 1986)

ETHEL : Eur. Tritium Handling Experim. Lab. Ispra

AZIONE	1986	1987	1988	1989	1990
A. PROCEDURA PER LICENZA DI COSTRUZIONE					
A.1. Ricerca dei criteri di sicurezza	---				
A.2. Rapporto preliminare di sicurezza		---			
A.3. Accordo dell'ENEA-DISP.			---		
B. REALIZZAZIONE					
B.1. Progetto di massima	---				
B.2. Scelta delle ditte	---				
B.3. Progetto ingegneristico		---			
B.4. Costruzione del laboratorio				---	
C. PROGRAMMA SPERIMENTALE					
C.1. Definizione dell'esperienza	---				
C.2. Prove preliminari		---			
C.3. Fornitura delle attrezzature				---	
D. CONSEGNA					---

Fig. 9
Laboratori associati al programma europeo di fusione controllata

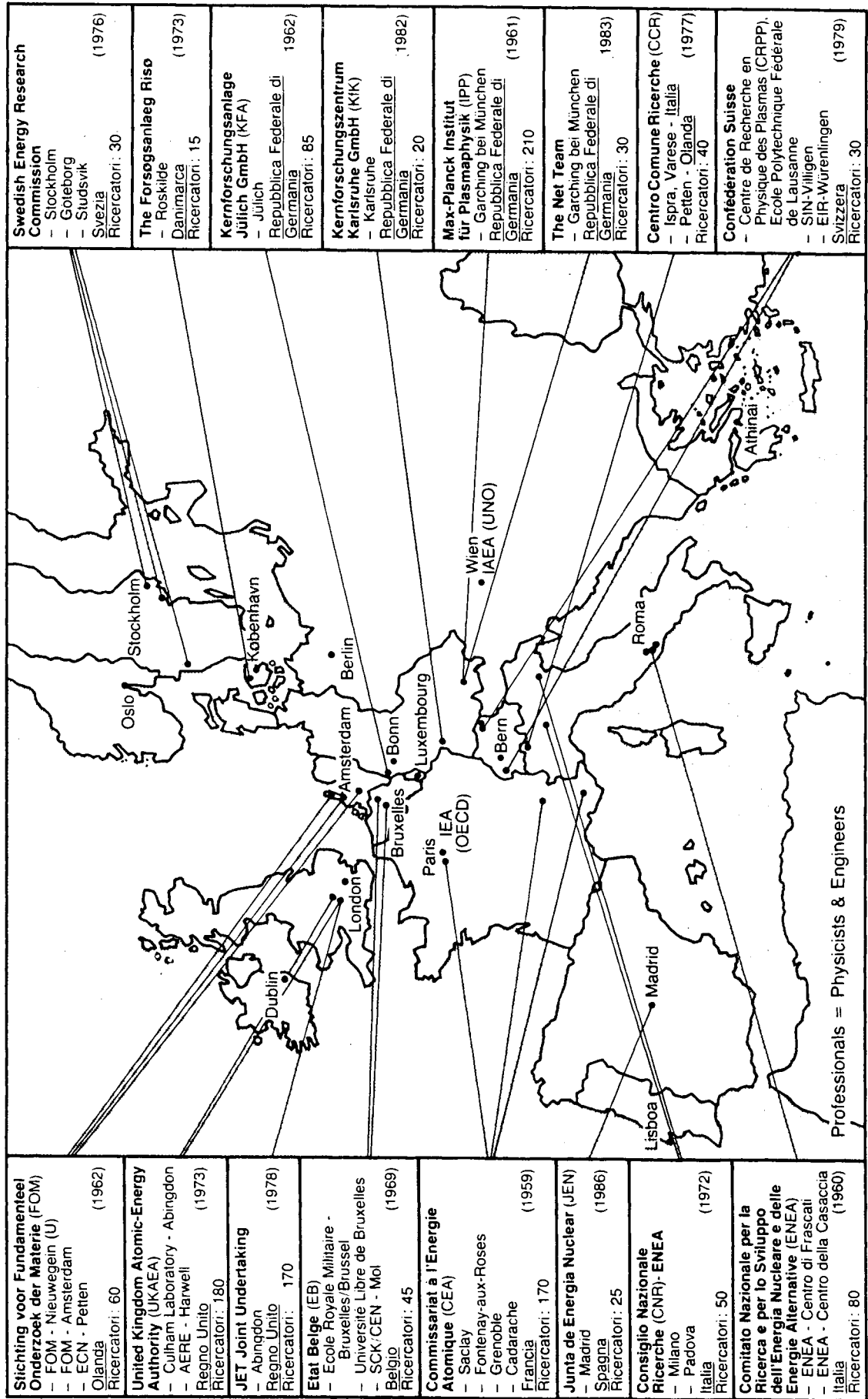


FIG. 10

PARTECIPAZIONE DELLA COMUNITA

ASSOCIAZIONI:	
- Costi di funzionamento	25%
- Azioni prioritarie e attività per JET e NET:	45%
- Supporto del NET da parte del laboratorio ospite:	75%
<hr/>	
JET	80%
<hr/>	
CCR	100%
<hr/>	
INDUSTRIA	100%
<hr/>	

Fig. 11

PERSONALE FUSIONE IN EUROPA

3600, DEI QUALI CIRCA 1200 SONO RICERCATORI.

DEI 1200 RICERCATORI:

- A) CIRCA 1000 LAVORANO NELLE ASSOCIAZIONI DEI QUALI 130 LAVORANO ALL'ENEA E CNR (13 %)
- B) CIRCA 200 LAVORANO AL JET.

IL TEAM JET È COSTITUITO DA 385 PERSONE:

- A) 220 SONO IMPIEGATI DALL'UKAEA
- B) 165 SONO IMPIEGATI DALL'EURATOM, DEI QUALI 21 SONO ITALIANI (12,7 %).

DEI 165 DIPENDENTI DELLA DG XII (INCLUSI QUELLI DISTACCATI NELLE ASSOCIAZIONI, JET, E NET) 28 SONO ITALIANI (26,5 %).

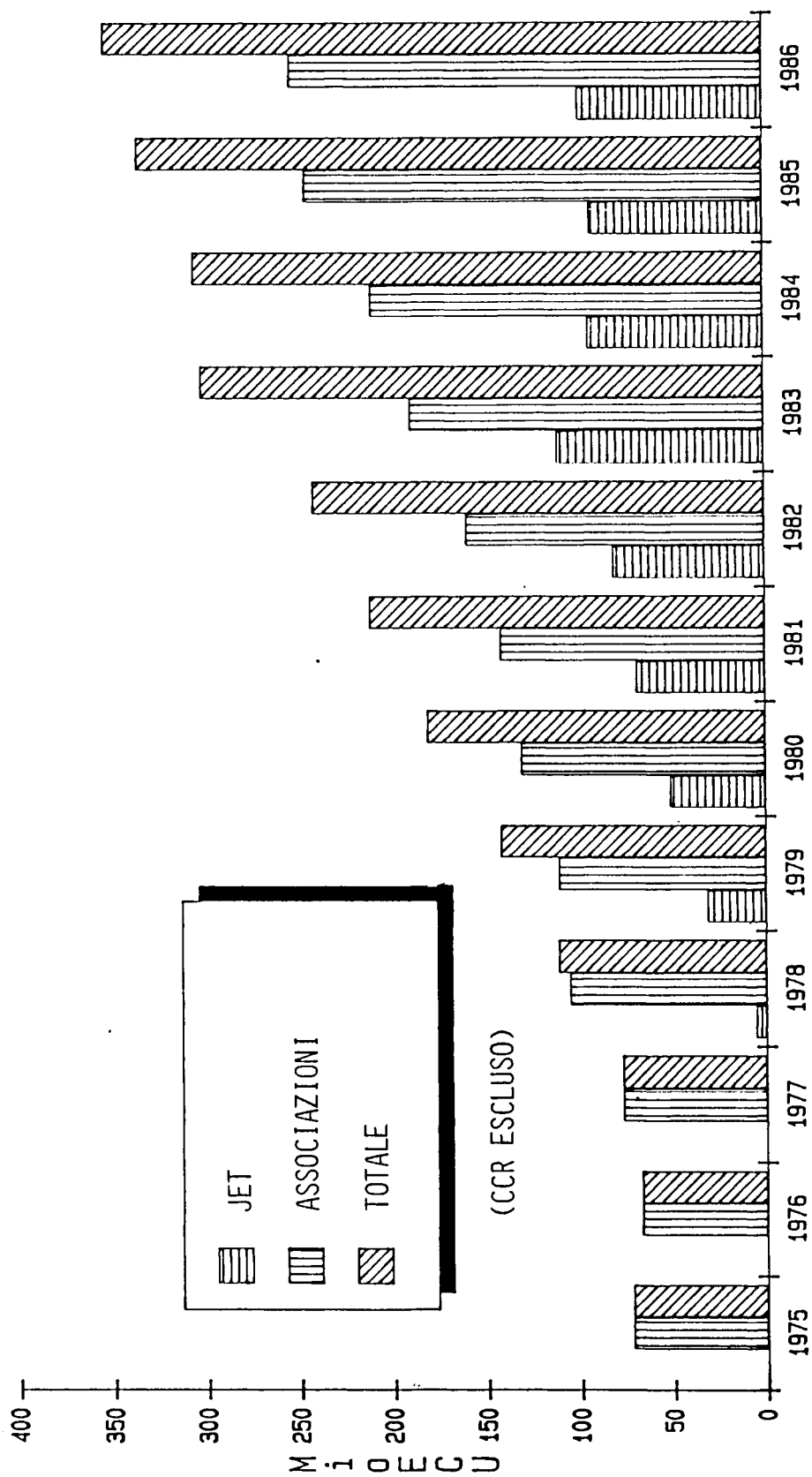


FIG. 12

Fig. 13

SPESE PER LA FUSIONE NEL 1985 IN EUROPA E IN ITALIA
(cifre in miliardi di ECU)

A) BUDGET JET (PAGAMENTI):	94.0
B) - SPESE DELLE ASSOCIAZIONI:	245.2
- SPESE ENEA + CNR:	30.3 (12.4%)

PER CONFRONTO:

PRODOTTO NAZIONALE LORDO: (cifre del 1983)	
- STATI MEMBRI + CH E S:	3.005.000
- ITALIA:	397.000 (13.2%)

FIG. 14

SPESE GLOBALI RELATIVE
AI PRINCIPALI PROGRAMMI FUSIONE NEL MONDO
1976 - 1985

Le spese globali del programma Fusione europeo (CCR escluso) sono ammontate a 1,95 miliardi di ECU (attuali) dei quali 540 milioni di ECU per il JET.

Per il programma americano la spesa è stata di 5,4 miliardi di dollari, dei quali 3,8 per il confinamento magnetico.

Per il programma giapponese la spesa è stata di 337 miliardi di yen (spese per il personale escluse).

Tassi di cambio al dicembre 86: 1 ECU = 1.05\$ = 170 Y

FIG. 15

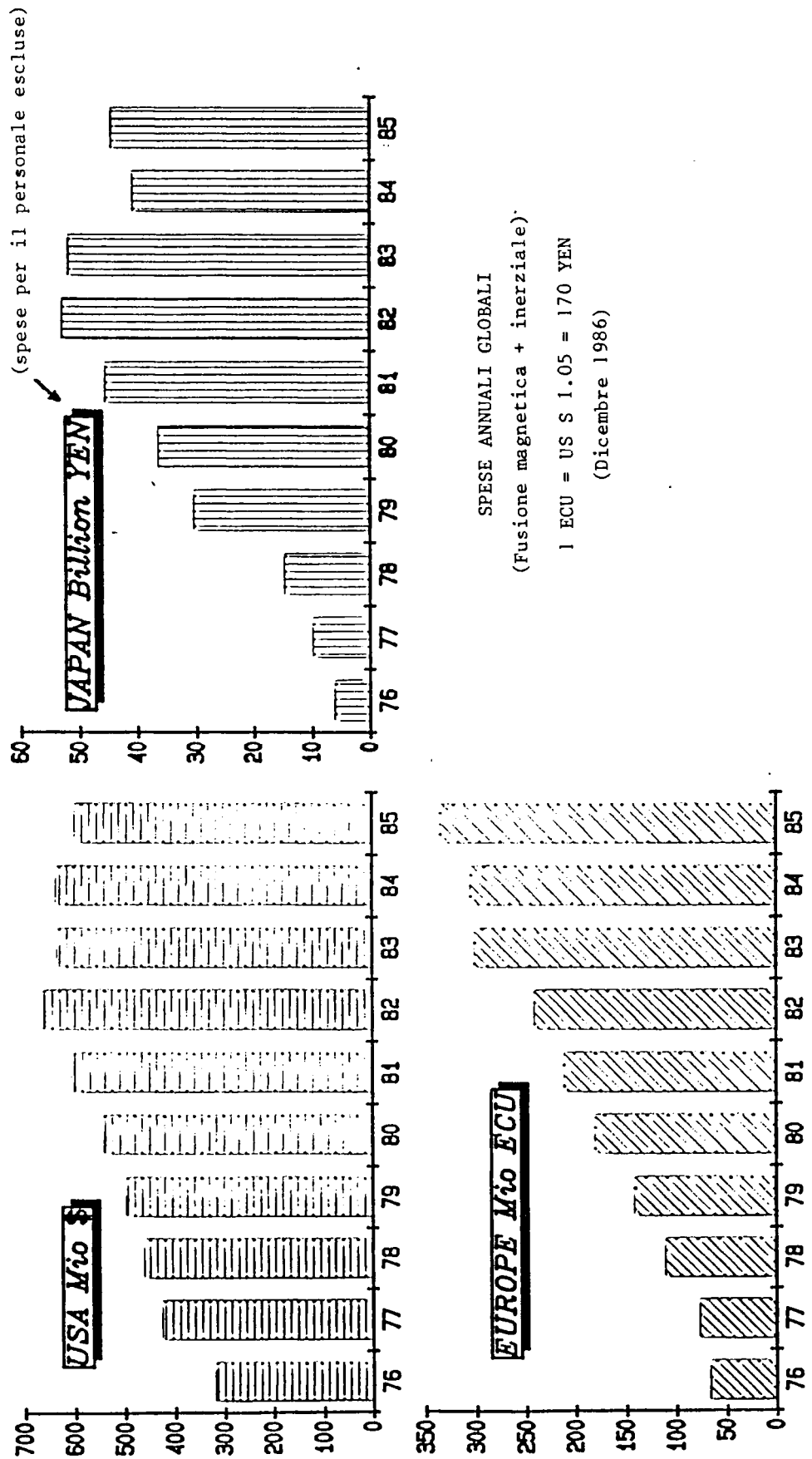


Fig. 16

COOPERAZIONE INTERNAZIONALE NEL CAMPO DELLA FUSIONE

DECISIONE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI DEL 16 DICEMBRE 1980 :
"NELLE RELAZIONI CON GLI ALTRI PROGRAMMI FUSIONE NEL MONDO
IL PROGRAMMA FUSIONE COMUNITARIO SI PRESENTA COME UN TUTTO
UNICO".

- ACCORDI-QUADRO BILATERALI
CANADA : (1986)
USA : (1986)
GIAPPONE : IN PREPARAZIONE AVANZATA.

- ACCORDI DI ESECUZIONE NEL QUADRO DELLA IEA (OCSE)
TOKAMAK : TEXTOR (1977)
ASDEX E ASDEX-UPGRADE (1985)
I TRE GRANDI TOKAMAK (JET, JT-60 E TFTR)
(1986)
LINEE ALTERNATIVE : STELLARATOR (1985)
REVERSED FIELD PINCH, IN
PREPARAZIONE
TECNOLOGIA DELLA FUSIONE : LARGE COIL TASK (1977)
MATERIALI FUSIONE (1981)

- COOPERAZIONE NELL'AMBITO DELLA IAEA
PARTECIPAZIONE DELL'EURATOM, ASSIEME AL GIAPPONE, USA,
E USSR, NEI GRUPPI DI LAVORO INTOR DAL 1978.

- GRUPPO DI LAVORO SULLA FUSIONE (INIZIATO DOPO IL
VERTICE DI VERSAILLES)

COORDINAZIONE DEI PROGRAMMI FUSIONE NEL QUADRO DEL
VERTICE ECONOMICO, SOPRATTUTTO IN RELAZIONE AL NEXT
STEP.

- AMPIA COLLABORAZIONE INTERNAZIONALE (REAGAN-GORBACHOV)

LE POSSIBILITÀ TECNICHE DI FARE IL PRIMO PROGETTO DI
UNA MACCHINA DEL TIPO NET IN COLLABORAZIONE TRA I 4
GRANDI PROGRAMMI FUSIONE MONDIALI SONO ATTUALMENTE ALLO
STUDIO.

FIG. 17

LA FUSIONE E L'INDUSTRIA

Dal 1978 al 1985, JET ha commissionato 400 miliardi di ECU in contratti, dei quali circa 240 miliardi di ECU per dotarsi di tecnologia di punta.

Dal 1976 al 1985, le associazioni hanno commissionato circa 300 miliardi di ECU in dotazioni e costruzioni di apparecchiature (valore di base).

La spesa totale per dotazioni di tecnologia di punta (grandi calcolatori esclusi) si aggira su 500 miliardi di ECU per gli ultimi dieci anni.

L'industria europea ha ricevuto circa il 96% di tale somma.

Attualmente la Fusione sta concludendo contratti per dotazioni relative all'attività scientifica per un ammontare annuo vicino ai 120 miliardi di ECU.

FIG. 18

IMPATTO DELLA FUSIONE SULL'INDUSTRIA EUROPEA

- . STIMOLI ALL'INDUSTRIA DELL'ALTA TECNOLOGIA EUROPEA PROVENGONO DAGLI STANDARD RICHIESTI DALLA FUSIONE, SPESSO AL LIMITE DELLA TECNOLOGIA ESISTENTE.

- . GRAZIE ALLA FORTE INTERAZIONE SVILUPPATASI CON LA FUSIONE, L'INDUSTRIA È IN MISURA DI AFFRONTARE PROGETTI SEMPRE PIÙ AMBIZIOSI SULLA STRADA DELLA COSTRUZIONE DI UN POSSIBILE REATTORE A FUSIONE.

DA UN INDAGINE PRELIMINARE SU 72 INDUSTRIE RAPPRESENTATIVE, RISULTA CHE L'80% DI ESSE DICHIARANO DI AVER GIÀ AVUTO BENEFICI TECNOLOGICI E INDUSTRIALI DALLA FUSIONE IN CERTI SETTORI.

FIG. 19

UN ESEMPIO DI IMPATTO SULL'INDUSTRIA :
UNA DICHIARAZIONE DELL'ANSALDO

IL LAVORO ESEGUITO PER CONTRATTI FUSIONE (40 MILIARDI DI LIT) HA CONTRIBUITO IN MODO DETERMINANTE A :

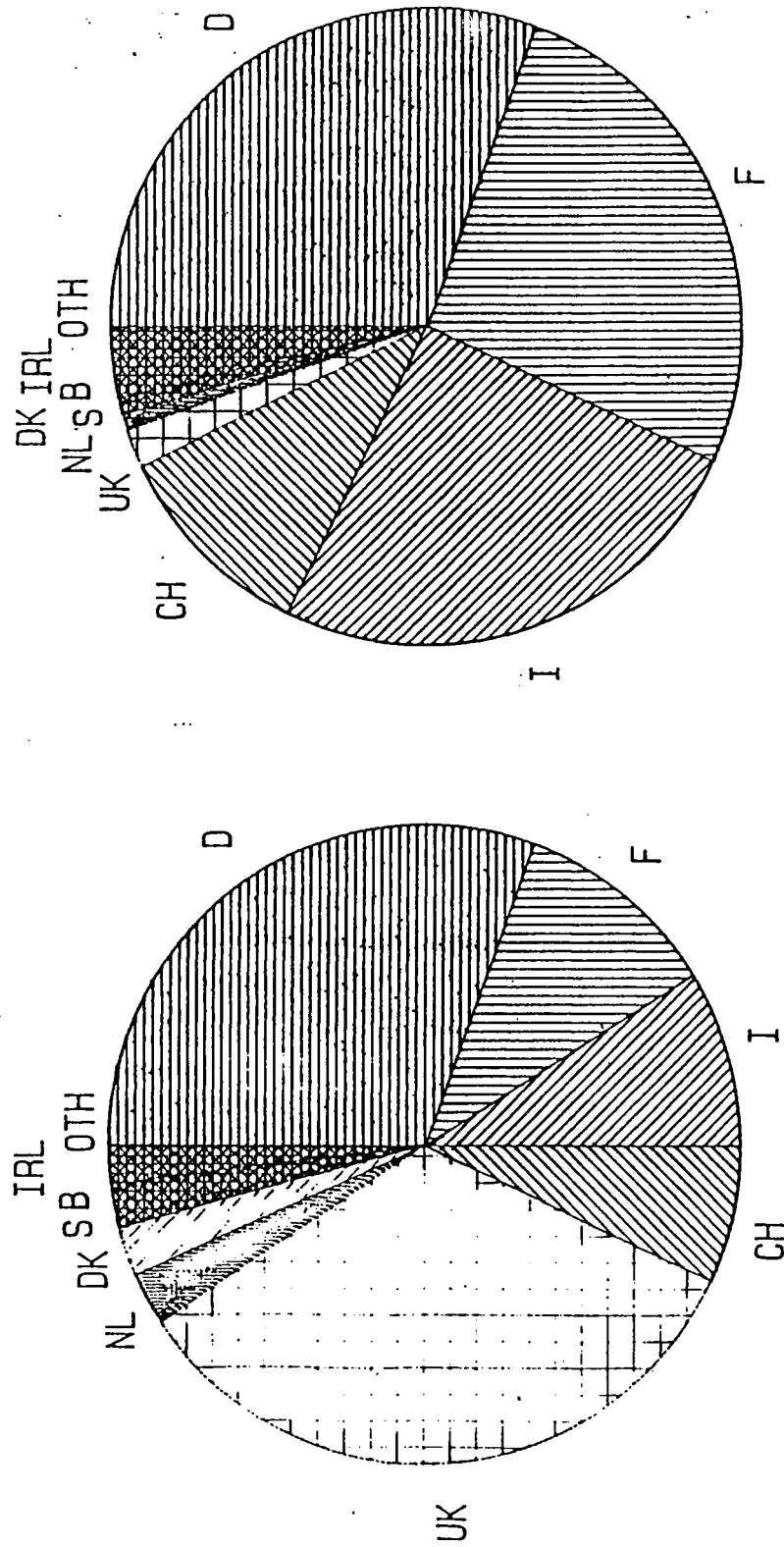
- AUMENTARE LA CAPACITÀ DI PROGETTAZIONE DELLA DITTA
- ACQUISIRE UN ATTEGGIAMENTO NUOVO IN FUNZIONE DEL TIPO DI CLIENTE (LABORATORIO DI RICERCA) E DEL TIPO DI PRODOTTO DOMANDATO
- ADATTARE LA PROPRIA STRUTTURA A UN NUOVO TIPO DI ATTIVITÀ (CREAZIONE DI UNA NUOVA DIVISIONE)
- ATTREZZARE DIVERSI "AMBIENTI PULITI"
- SVILUPPARE TECNICHE DI AUTOMAZIONE PER RIDURRE COSTI E MIGLIORARE L'AFFIDABILITÀ DEL PRODOTTO
- PROCURARSI O SVILUPPARE NUOVI UTENSILI AVANZATI
- MIGLIORARE IL KNOW-HOW IN TECNICHE SPECIALIZZATE.

LA COMPETENZA ACQUISITA GRADUALMENTE HA FACILITATO ORDINAZIONI IN AREE CONNESSE : FISICA DELLE ALTE ENERGIE, DIAGNOSTICHE MEDICHE...

LA DITTA STA TRASFERENDO ALCUNE DELLE TECNOLOGIE AVANZATE (PER ESEMPIO L'AUTOMAZIONE) AD ALTRE AREE PIÙ CONVENZIONALI DELLE SUE ATTIVITÀ INDUSTRIALI.

Fig. 20

CONTRATTI INDUSTRIALI PIAZZATI NEI VARI PAESI



CONTRATTI JET, ESCLUSI QUELLI PER GLI EDIFICI E IL PER-SONALE

CONTRATTI PER AZIONI A SUPPORTO PREFERENZIALE NELLE ASSO-CIAZIONI (1981-1985)

Fig. 21

DOVE SONO STATI STIPULATI I CONTRATTI PER LA FUSIONE ?
(CIFRE IN MioECU)

- A) CONTRATTI JET STIPULATI (EDIFICI ESCLUSI) :
- EUR 12 + CH E S : 327,1
 - IN ITALIA : 29,2 (8,9 %)
- B) PRINCIPALI CONTRATTI STIPULATI DALLE ASSOCIAZIONI DURANTE 1982-1985 :
- EUR 12 + CH E S : 140,2
 - IN ITALIA : 36,6 (26,1 %)
- C) PRINCIPALI CONTRATTI STIPULATI DALLE ASSOCIAZIONI DURANTE IL SOLO 1985 :
- EUR 12 + CH E S : 40,9
 - IN ITALIA : 13,1 (32 %)

PER CONFRONTO

- EUR 12 + CH E S : 3.005.000
 - ITALIA : 397.000 (13,2 %)
- PRODOTTO NAZIONALE LORDO (1983) :

FIG. 22

CONTRIBUTI DELLE ASSOCIAZIONI ITALIANE FUORI D'ITALIA

1) CONTRIBUTI AL JET

- PARTECIPAZIONE AL FINANZIAMENTO DIRETTO DEL 10 % DEL BUDGET JET, IN 1985: 0.97 MILIONI DI ECU
- PERSONALE ITALIANO NEL TEAM JET: 21
- SUPPORTO AL JET (CONTRATTO ART. 14): 0.5 MILIONI DI ECU

2) CONTRIBUTI AL NET

- PERSONALE ITALIANO NEL TEAM NET: 11 (SU 44)
- ATTIVITÀ PER NET: 1.3 MILIONI DI ECU PER 1985/86

3) COLLABORAZIONE CON ALTRE ASSOCIAZIONI

- CON IPP GARCHING SULLA GENERAZIONE DI CORRENTE CON ONDE LH IN ASDEX
- COLLABORAZIONE CON LA UKAEA - CULHAM SUL PROGETTO RFX
- COLLABORAZIONE CON LA SVIZZERA E L'OLANDA SUL PROGETTO SULTAN

4) COLLABORAZIONE INTERNAZIONALE

- PARTECIPAZIONE NEL QUADRO DEGLI ACCORDI SOTTOSCRITTI DAL PROGRAMMA FUSIONE EURATOM.

PROGRESSI VERSO LA FUSIONE

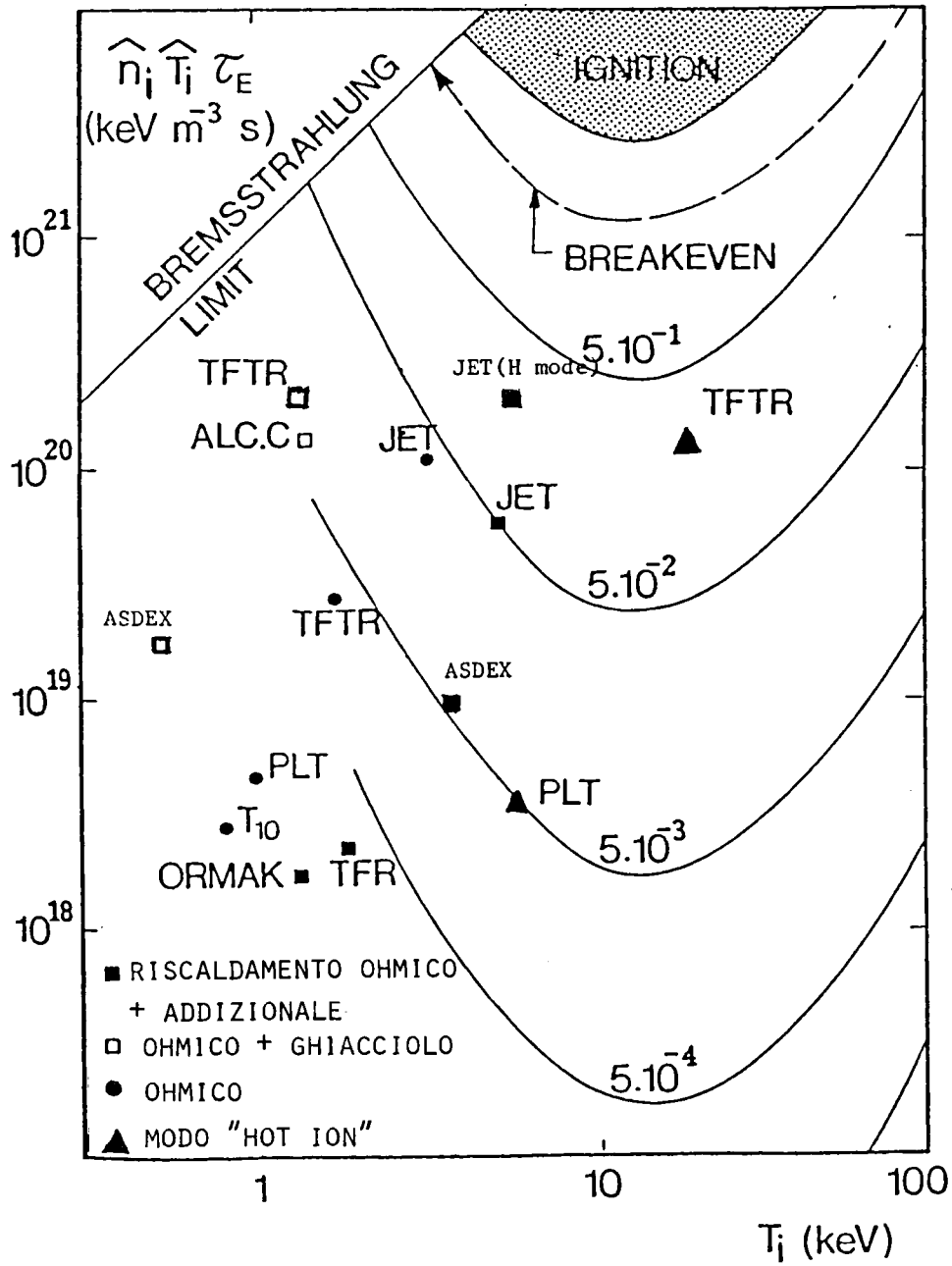


FIG. 23

Fig. 1. - Schema della macchina NET (Next European Torus) per la dimostrazione delle fattibilità scientifica e tecnologica della fusione: 1) mantello, 2) prima parete, 3) schermo, 4) criostato, 5-6 pompaggio, 7) bobine toroidali, 8) solenoide centrale, 9) piastra divertore, 10) bobine poloidali.

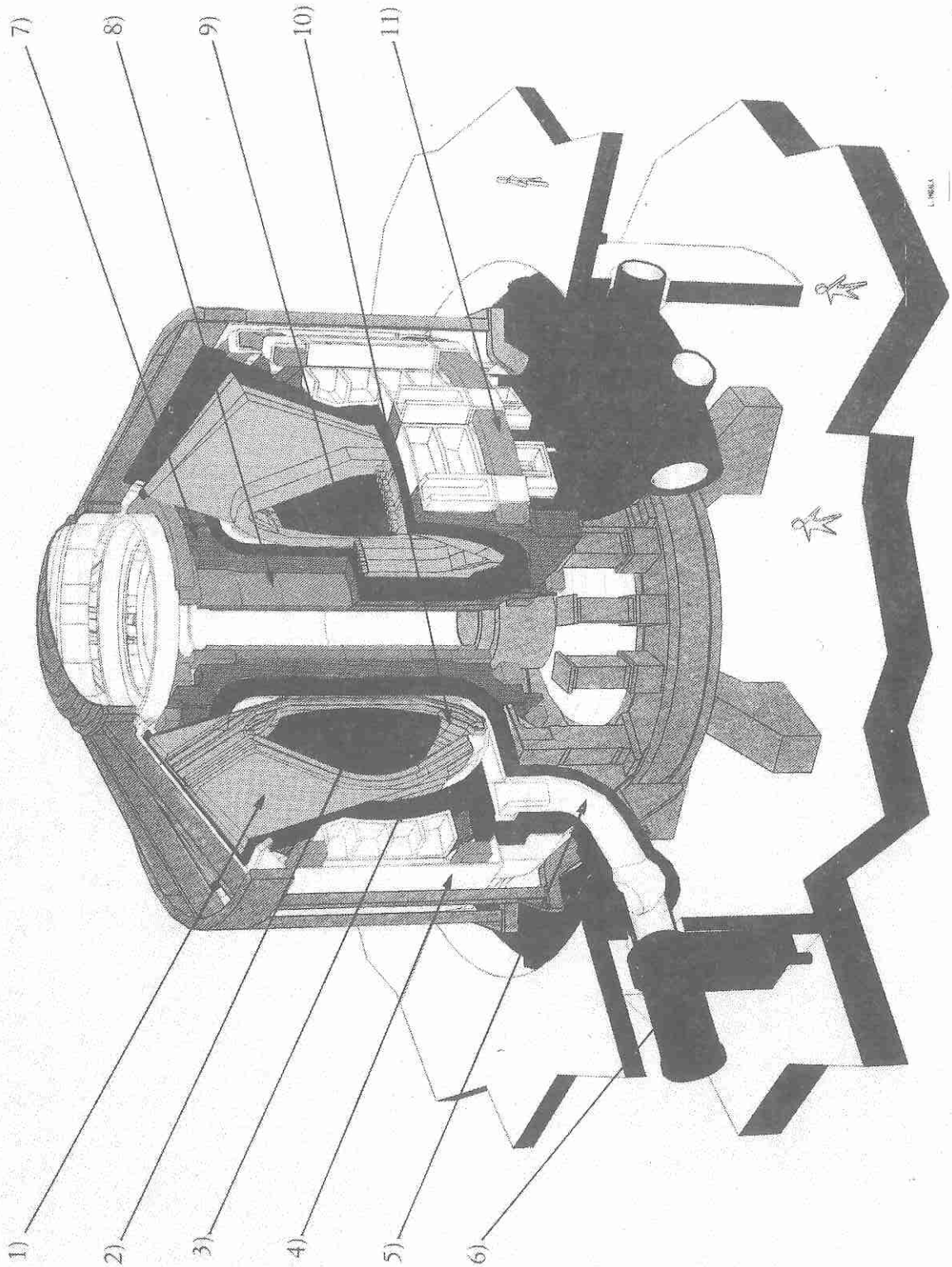


FIG. 24.

FIG. 25

PARAMETRI E COSTI DI IGNITOR E CIT

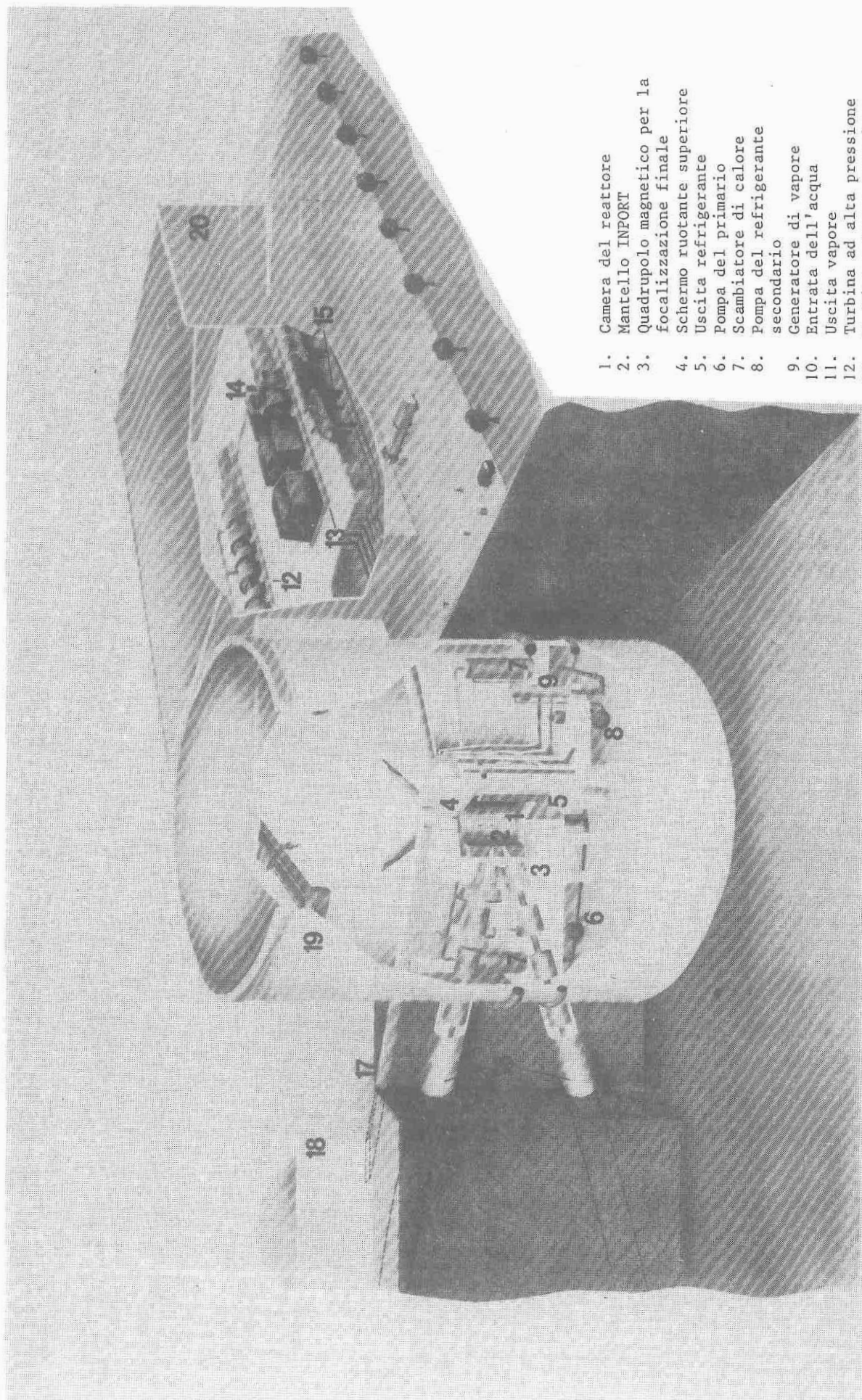
	IGNITOR ⁽¹⁾	CIT (US) ⁽²⁾
Ro (cm)	108,5	132,4
A x B (CM)	39,5 X 67	43 X 85
ELONGAZIONE	1,7	2
RAPPORTO D'ASPETTO	2,75	3,1
CAMPO MAGNETICO (T)	12,4	10,4
CORRENTE NEL PLASMA (MA)	10	10
PLATEAU (S)	4	4,2
RISCALDAMENTO (MW)	8	10-20
COSTO GLOBALE (MS)	(3)	282,5 ⁽⁴⁾
DURATA GLOBALE DELLA COSTRUZIONE, IN ANNI, DALL'INIZIO DEL PROGETTO INGEGNERISTICO	4	6,5

(1) IL PROGETTO DETTAGLIATO PER LA COSTRUZIONE DI IGNITOR È STATO RECENTEMENTE PREDISPOSTO DALL'ENEA, NELL'AMBITO DELL'ASSOCIAZIONE EURATOM.

(2) CIT PUO' FUNZIONARE CON O SENZA DIVERTORE, ANCHE SE L'IGNIZIONE È RAGGIUNGIBILE PIÙ FACILMENTE NEL PRIMO CASO. I VALORI QUI RIPPORTATI SI RIFERISCONO AL CASO SENZA DIVERTORE.

(3) UN PREVENTIVO ACCURATO DEL COSTO SARÀ DISPONIBILE AL TERMINE DELLA FASE DI PROGETTAZIONE.

(4) INCLUSA UNA RISERVA DEL 28 %.



1. Camera del reattore
2. Mantello INPORT
3. Quadrupolo magnetico per la focalizzazione finale
4. Schermo ruotante superiore
5. Uscita refrigerante
6. Pompa del primario
7. Scambiatore di calore
8. Pompa del refrigerante secondario
9. Generatore di vapore
10. Entrata dell'acqua
11. Uscita vapore
12. Turbina ad alta pressione
13. Turbina a bassa pressione
14. Generatore di elettricità
15. Condensatore e preriscaldatore dell'acqua
16. Condotti dei fasci
17. Condotto per il trasporto del bersaglio
18. Magazzino dei bersagli
19. Contenitore del reattore
20. Edificio delle macchine

REATTORE HIBALL (940 MW_{e1})

SCHEMA DI REATTORE A FASCI
DI IONI PESANTI

FIG. 26

FIG. 27

SCHEMA DI PRINCIPIO DI UN REATTORE A FUSIONE NUCLEARE

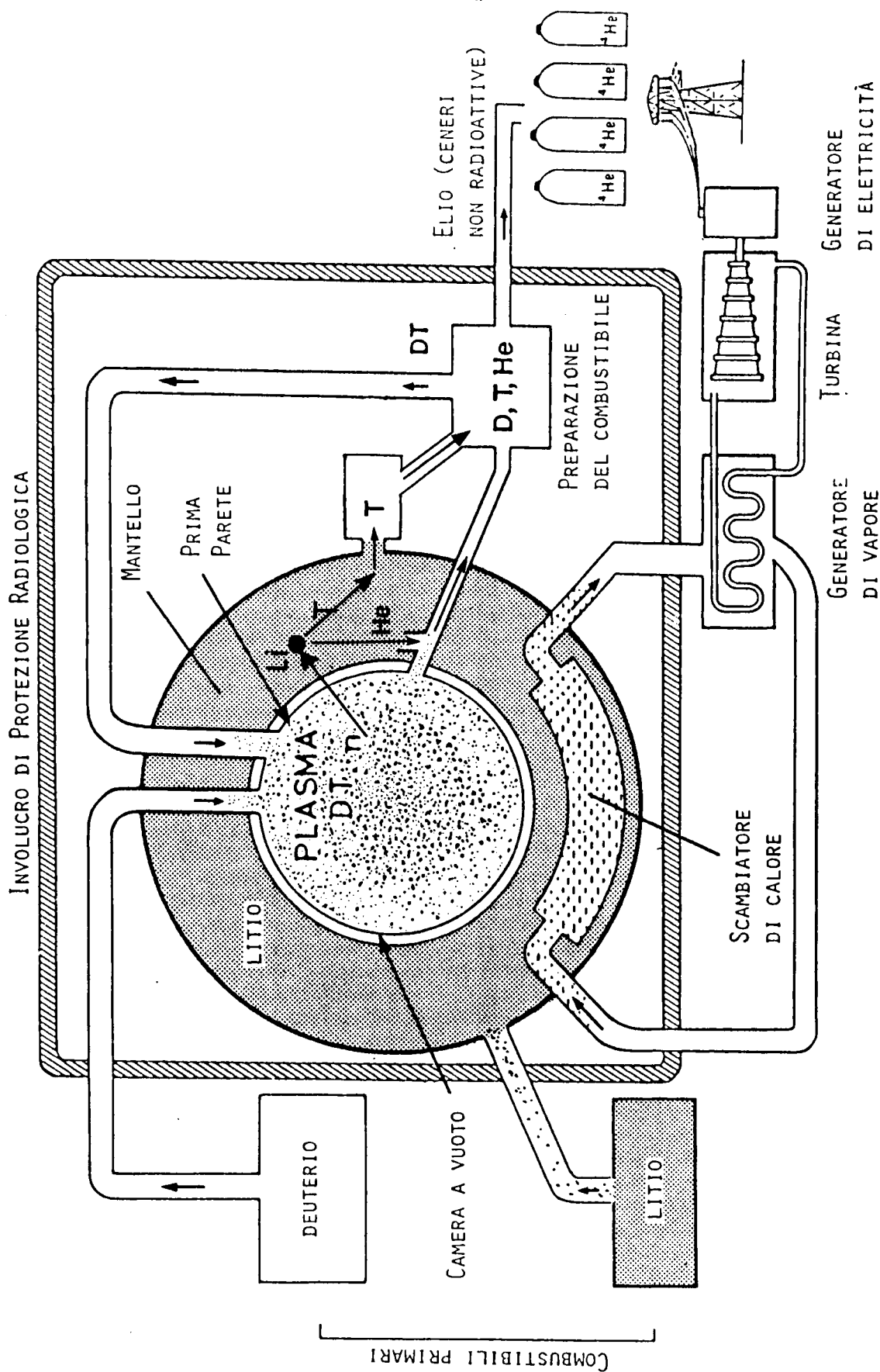


Tabella — Reazione di fusione D-T e reazioni che producono il tritio.

$$D + T \rightarrow {}^4\text{He} (3,52 \text{ MeV}) + n (14,06 \text{ MeV})$$

$${}^6\text{Li} + n \rightarrow T + {}^4\text{He} + \text{energia} (4,86 \text{ MeV})$$

$${}^7\text{Li} + n \rightarrow T + \text{He} + n - 2,5 \text{ MeV}$$

Fig. 28

IMPATTO DELLA FUSIONE SULL'AMBIENTE

- I Nessun inquinamento chimico
- II Basso rischio radioattivo
 - A) . I combustibili (Li, D) e il prodotto finale (He) non sono radioattivi.
 - . Un elemento intermedio (HE) è radioattivo, ma in linea di principio non esce dal reattore.
 - . L'attivazione da neutroni può essere molto ridotta usando appropriati materiali strutturali.
 - B) Funzionamento normale
 - . Effluenti nell'atmosfera (60% come nei HTO, 40% in gas)
 - 20,000 Ci(T) per anno
 - . Dose collettiva per il pubblico da 2000 centrali a fusione
 - 0.04% della radioattività naturale
 - . Altri effluenti: trascurabili.
 - C) Peggior incidente immaginabile
 - . 200 G T (come nei HTO) emessi dal tetto del reattore nelle peggiori condizioni di vento
 - 6-8 REM a 1 Km
 - . nessun danno immediato
 - . nessuna necessità di sgombero all'esterno del sito del reattore.
 - D) Scorie
 - . Nessun prodotto α - attivo
- III Sicurezza passiva potenziale
 - . Nessun pericolo di escursione nucleare
 - . Basso rischio biologico potenziale da radionuclidi
 - . Trattamento locale del Trizio (nessun trasporto di elementi radioattivi).

FIG. 29

PROSPETTIVE ECONOMICHE DELLA FUSIONE

- I. 1 MILIONE DI KILOWATT-ORA (ELETTRICI)
CONSUMO DI 10 GRAMMI DI DEUTERIO
E DI 400 GRAMMI DI LITIO
(CORRISPONDENTI A 60 TONNELLATE DI PETROLIO, OPPURE
A 85 TONNELLATE DI CARBONE)

L'EFFETTO DEL COSTO DEL COMBUSTIBILE NEL COSTO DELL'ELETTRICITÀ PRODOTTA È TRASCURABILE.

- II. A) IL COSTO DELLA PRODUZIONE DI ELETTRICITÀ È DOMINATO DAL CAPITALE INVESTITO.
- B) USO COMMERCIALE DELLA FUSIONE PREVISTO PER GLI ANNI 2030 - 2040.
- C) COSTO STIMATO DELL'ELETTRICITÀ PRODOTTA DA REATTORI A FUSIONE : 1 - 2 VOLTE QUELLO DELL'ELETTRICITÀ PRODOTTA DA REATTORI A FISSIONE.