

**RELAZIONE  
DELL'INGEGNER GIOVANNI NASCHI**

PAGINA BIANCA

ENEA-DISP

Doc.DISP (86) 6 - Rev. 1

RAPPORTO SUGLI ASPETTI DI SICUREZZA E PROTEZIONE  
SANITARIA DEI REATTORI A FUSIONE

ROMA, DICEMBRE 1986

**INDICE**

1. Quadro della situazione
2. Richiami sul processo di fusione
3. Il progetto STARFIRE
4. Potenze ed energie
5. Materiali radioattivi e tossici
6. Produzione di rifiuti e impatto ambientale in condizioni di normale esercizio. Esposizione a campi elettromagnetici
7. Analisi degli incidenti
8. Considerazioni finali
9. Riferimenti

## 1. QUADRO DELLA SITUAZIONE

I programmi di ricerca sulla fusione nucleare controllata, attualmente in corso a livello mondiale, sono finalizzati a dimostrare la fattibilità scientifica della sua utilizzazione per la generazione di energia elettrica.

Ci si attende che nel 1992 il JET (Joint European Torus), che rappresenta il più avanzato esperimento di fusione attualmente esistente, possa produrre per la prima volta un plasma D-T, che, almeno in corrispondenza del centro di esso, presenti condizioni sufficienti a determinare un significativo contributo del riscaldamento nucleare.

Per una dimostrazione della fattibilità scientifica e tecnologica di base di un reattore a fusione, occorre però produrre un plasma in cui la reazione di fusione si autosostenga per tempi sufficientemente lunghi (i.e. centinaia di secondi).

Per raggiungere questo obiettivo, sarà necessario adottare le tecnologie di base di un reattore, previa dimostrazione della fattibilità di tali tecnologie (magneti superconduttori, schermi, pareti resistenti ad elevati flussi di calore, di atomi, ioni, elettroni e neutroni, iniezione e scarico del combustibile, recupero del trizio, problemi di sicurezza, etc.).

Infatti il JET, pur rappresentando il culmine di molti anni di ricerche, è ancora limitato agli studi di fisica del plasma.

Prima che la fusione nucleare possa essere utilizzata per la generazione di energia elettrica, sarà poi necessario sviluppare la tecnologia a livello industriale e dimostrarne la competitività economica.

Nell'ambito del Programma Europeo per la Fusione, basato prevalentemente su macchine a confinamento magnetico tipo JET, la dimostrazione completa, fisica e tecnologica di base della fusione, verrà affrontata con il Progetto NET, attualmente in fase di progettazione preliminare a Garching (Monaco). Il funzionamento è previsto per il 2000.

Successivamente, con il Progetto DEMO (Reattore Dimostrativo), si dovrà pervenire alla dimostrazione ingegneristica e fornire tutti gli elementi necessari per una valutazione economica del processo.

Per quanto riguarda i futuri reattori commerciali di potenza a fusione

del tipo Tokamak, diversi studi sono stati condotti o sono in corso; è quindi possibile e significativo svolgere un'analisi preliminare di sicurezza su un impianto di questo tipo.

I progetti dettagliati attualmente in corso per la prossima macchina (tipo NET) hanno, inoltre, molte caratteristiche in comune con questi studi concettuali di reattori, accrescendone la credibilità.

Per quanto riguarda invece altri approcci (confinamento inerziale oppure altre configurazioni di confinamento magnetico), gli studi a livello reattore sono ancora ad uno stato embrionale, per cui non è ancora possibile una valutazione, seppure preliminare, degli aspetti di sicurezza.

Tuttavia, a parità di potenza prodotta, è lecito supporre che, con le attuali tecnologie, gli inventari di radioattività (trizio, materiali attivati, etc.) siano dello stesso ordine di grandezza.

Tra gli studi concettuali di reattore a fusione del tipo Tokamak attualmente disponibili, il più completo è quello STARFIRE sviluppato negli USA (rif. 1).

Le considerazioni riportate nella presente relazione faranno pertanto riferimento ad un'analisi svolta su tale impianto e si ritiene che essa sia significativa per una preliminare valutazione dei problemi di sicurezza.

E' opportuno notare che sono in corso studi, sia sperimentali che teorici, rivolti a migliorare gli aspetti di sicurezza, quali ad esempio:

- riduzione dell'attivazione neutronica nei materiali;
- uso di fluidi refrigeranti con ridotta interazione chimica nei confronti dei composti di litio costituenti il mantello.

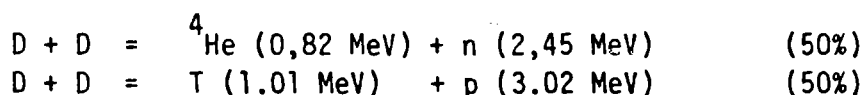
L'analisi svolta può, pertanto, essere considerata più conservativa rispetto a quella di un reattore dei prossimi decenni.

## 2. RICHIAMI SUL PROCESSO DI FUSIONE

La reazione attualmente più promettente è la fusione di un nucleo di deuterio (D) con uno di trizio (T), entrambi, come noto, isotopi dell'idrogeno, per formare un nucleo di elio (He) ed un neutrone:



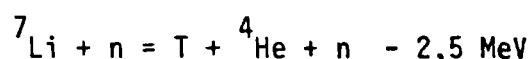
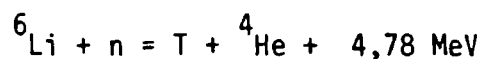
La presenza di deuterio fa sì che avvengano anche reazioni del tipo:



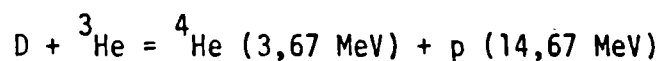
Per ottenere la fusione di due nuclei, occorre fornire ad essi un'energia tale da vincere le forze di repulsione tra nuclei; a tale energia corrispondono temperature dell'ordine di 100 milioni di gradi, alle quali i gas si trovano allo stato completamente ionizzato.

Le reazioni sopra citate, per essere sfruttate in un reattore, richiedono il rallentamento dei neutroni mediante l'impiego di un mezzo moderante.

Usando come moderatore il litio o composti di esso, si può risolvere contemporaneamente il problema della generazione del trizio, in quanto il litio agisce anche da fertilizzante secondo le reazioni:



Una reazione di interesse per la fusione è infine la seguente:



Rispetto alla reazione D-T, essa presenta il vantaggio di una minore attivazione delle strutture (di un fattore 50) e di un minore inventario di Trizio (di un fattore 100). Gli svantaggi sono di contro una maggiore sollecitazione dei materiali di prima parete (assorbimento di protoni al 100%) necessità di approvvigionare He<sup>3</sup> (dal decadimento del Trizio) e condizioni di ignizione 10-20 volte più gravose.

### 3. IL PROGETTO STARFIRE

E' un progetto di impianto a fusione elaborato dall'Argonne National Laboratory e rappresenta lo studio più completo oggi esistente sulla possibile utilizzazione del processo di fusione.

L'impianto è progettato per una potenza termica di 4000 MW (elettrica netta 1200). Il reattore (fig. 1) comprende una camera da vuoto

toroidale a confinamento magnetico (Tokamak), contenente il plasma, nel quale avviene la reazione deuterio-trizio.

La camera da vuoto è racchiusa da un complesso prima parete-mantello, che ha le seguenti funzioni:

- fornire una prima barriera fisica al plasma nel caso di anomalie al sistema di confinamento magnetico,
- convertire l'energia di fusione in calore sensibile conseguente alla cattura ed al rallentamento dei neutroni prodotti e delle particelle alfa,
- consentire l'asportazione del calore depositato mediante il sistema di refrigerazione ad acqua,
- generare il trizio necessario per l'alimentazione della reazione,
- moltiplicare i neutroni prodotti mediante ulteriore generazione che ne compensi le perdite,
- evitare la contaminazione del plasma con impurezze ad alto numero atomico,
- assicurare una prima schermatura dei magneti.

Per lo svolgimento delle funzioni assegnate, il complesso prima parete-mantello si presenta come una struttura con differenti strati di materiali, percorsa all'interno da tubi per l'acqua di raffreddamento e da canali per l'asportazione del trizio prodotto, mediante corrente di elio (figg. 2. e 3). Il materiale di prima parete è acciaio inossidabile austenitico, mentre il fertilizzante è alluminato di litio solido<sup>(\*)</sup>. La moltiplicazione<sup>(\*\*)</sup> neutronica è assicurata da uno strato interno di zirconio-piombo, mentre la purezza del plasma viene garantita da un leggero rivestimento di Berillio sulla prima parete.

-----  
 (\*) Le prime concezioni di reattore a fusione includevano come fertilizzante e refrigerante il litio liquido. Data la sua enorme reattività con l'aria o con l'acqua, nel progetto europeo (NET) il litio è stato sostituito con suoi composti allo stato solido o con l'eutettico Litio-Piombo (allo stato liquido). Il vantaggio è di una minore reattività e di una minore cessione di energia di reazione. Contemporaneamente è stato considerato l'elio come fluido refrigerante e la grafite per il rivestimento della prima parete.

Negli USA è ancora allo studio l'utilizzazione del litio liquido, sia come generatore di trizio che come refrigerante, date le sue ottime qualità per entrambi gli aspetti. Per i sopra citati motivi di sicurezza, questa soluzione impone il non utilizzo dell'acqua all'interno dell'edificio reattore e l'inertizzazione dell'atmosfera dello stesso.

(\*\*) In altre concezioni di reattori Tokamak si impiega berillio come moltiplicatore neutronico.



Il confinamento magnetico del plasma (fig. 4) è assicurato da magneti superconduttori<sup>(\*)</sup> che producono induzioni magnetiche molto intense (circa 10 Tesla)<sup>(\*)</sup>. Un primo sistema di riscaldamento del plasma, per avvicinarlo alla temperatura di innesco della fusione, è ottenuto, per via ohmica, tramite la corrente di plasma (circa 10 MA), che costituisce l'avvolgimento secondario del trasformatore, il cui primario (superconduttore) è avvolto su un magnete posto al centro della camera toroidale. Il sistema principale di riscaldamento è quello a radiofrequenza, che serve ad innescare e a sostenere la reazione di fusione.

Attorno alla camera da vuoto è ricavato un sistema di schermi concentrici al mantello, posti ad una certa distanza da esso, in maniera da lasciare un'intercapedine. Gli schermi hanno la funzione di assorbire l'irraggiamento neutronico in uscita dal mantello, riducendo il rateo di esposizione a valori tali da consentire l'accesso del personale entro le 24 h dallo spegnimento.

Il sistema di trasporto del calore e di conversione dell'energia presenta le stesse caratteristiche di un reattore a fissione di tipo pressurizzato (fig. 5): si compone di due circuiti di refrigerazione ad acqua, complessivamente dimensionati per asportare il calore da convertire in energia elettrica.

Il sistema del ciclo del combustibile (fig. 6) riprocesa il trizio incombusto in uscita dalla camera toroidale, separandolo dalle impurezze contenute; estrae il trizio prodotto nel mantello e lo separa dal gas di trascinarsi; effettua la separazione isotopica deuterio-trizio, provvede al loro immagazzinamento separato e all'invio al reattore di entrambi i prodotti, miscelati nelle volute proporzioni.

#### 4. POTENZE ED ENERGIE

Lo studio del reattore STARFIRE prevede una potenza termica complessiva prodotta dalla fusione pari a 4000 MW, con una produzione elettrica lorda di 1440 MW, di cui 1200 MW netti, mentre 240 MW sarebbero necessari per il funzionamento dei vari sistemi dell'impianto. 2560 MW verrebbero scaricati come energia termica. Il rendimento netto che ne risulta sembrerebbe pertanto di poco inferiore a quello di altre fonti energetiche.

Ai fini della valutazione degli incidenti è inoltre importante la definizione delle quantità delle energie in gioco che sono riportate in tab. 1.

In tab. 2 è invece indicata la potenza di decadimento dei materiali attivati dall'irraggiamento neutronico nel complesso prima parete-

---

(\*) Le dimensioni della macchina impongono, data la distanza dal plasma, la generazione di 10 Tesla sul magnete per avere 5 Tesla sul plasma.

mantello.

In tab. 3 infine è riportato un confronto relativo delle energie significative tra l'impianto STARFIRE ed un impianto LWR di pari potenza.

## 5. MATERIALI RADIOATTIVI E TOSSICI

I problemi di radioprotezione che emergono durante il funzionamento di un reattore prototipo a fusione, sia in condizioni normali che incidentali, sono essenzialmente connessi alla presenza di Trizio, alla generazione di neutroni di energia 2,45 e 14,1 MeV (derivanti dalle reazioni D-D e D-T) ed alla radiazione ritardata, dovuta all'attivazione delle strutture della macchina.

Il Trizio decade con tempo di dimezzamento di 12,33 anni, emettendo radiazioni beta di energia media di 5,7 KeV e massima di 18 KeV. Le vie di esposizione ad esso sono o per inalazione ed ingestione o attraverso la pelle.

Il tempo di dimezzamento biologico del T, ingerito o inalato, è di 10 giorni. Per la facilità con cui il corpo assorbe l'acqua, esso è più pericoloso in forma di acqua triziata che come trizio elementare (fattore 25.000).

Il Trizio, da un punto di vista chimico-fisico, è un elemento molto mobile ed in particolare passa attraverso i metalli. Laddove sono configurabili accumuli di esso, si ricorre alla sua immobilizzazione mediante adsorbimento su materiali solidi opportuni. In tab. 4 sono raccolte le quantità di T che si stima possano prodursi nell'impianto STARFIRE:

La radioattività indotta dai neutroni da 14 MeV è concentrata nei materiali strutturali dei componenti del reattore più esposti al plasma (prima parete e mantello).

Ai fini dell'impatto ambientale, sono determinanti i radionuclidi a vita lunga (tempo di dimezzamento superiore all'anno). Un elenco di alcuni di essi, valido per STARFIRE, è indicato in tab 5. Questa attività è caratterizzata da una bassa mobilità. Le vie di rilascio all'ambiente sono:

- erosione o corrosione da parte del refrigerante primario,
- sostituzione di parti del reattore,
- fusione e volatilizzazione di parte del materiale in condizioni incidentali.

In tab. 6 è riportato un confronto dell'inventario di radioattività presente nei reattori a fusione ed in quelli a fissione.

Un materiale con alto potenziale di rischio di esplosione è il Berillio, che viene usato come rivestimento della prima parete. Esso

presenta un'alta velocità di reazione con aria, acqua, anidride carbonica, e libera notevoli quantità di energia. Infine è da sottolineare che questo elemento è molto tossico; se inalato, provoca malattie polmonari e, a contatto della pelle, dermatiti e congiuntiviti.

Una concentrazione di 2 microgrammi/m<sup>3</sup> è il limite ammesso per esposizione lavorativa continuata di 8 ore.

La grafite, infine, usata come riflettore dei neutroni alla periferia esterna del mantello, è suscettibile di liberare grosse quantità di energia, per combustione, se viene esposta all'aria ad alta temperatura (tab. 1).

## 6. PRODUZIONE DI RIFIUTI E IMPATTO AMBIENTALE IN CONDIZIONI DI NORMALE ESERCIZIO. ESPOSIZIONE A CAMPI ELETTROMAGNETICI

### 6.1 Attraverso gli scarichi delle ventilazioni e gli scarichi liquidi, si stima che possano essere immessi nell'ambiente fino a 10<sup>4</sup> Ci/anno di trizio, in normale esercizio (tab. 7).

L'attività dei prodotti di corrosione contenuti nei liquidi scaricati stimata dal DOE (rif. 2) è di 0,17 Ci/anno. Dal punto di vista delle conseguenze ambientali, un rilascio di 10<sup>4</sup> Ci/anno di Trizio negli effluenti gassosi può comportare una dose individuale al gruppo critico di qualche mRem/anno. Dello stesso ordine di grandezza può essere la dose associata agli scarichi liquidi.

I rifiuti solidi prodotti, secondo la quantità di attività che contengono, sono classificati in rifiuti di alta, media e bassa attività. In tab. 8 si riporta la classificazione adottata in STARFIRE e la corrispondenza con la classificazione DISP (rif. 4).

Lo studio STARFIRE valuta una produzione di circa 63 m<sup>3</sup>/a di rifiuti ad alta attività (III categoria della classificazione DISP) richiedenti un deposito definitivo dell'ordine del millennio e 1200 m<sup>3</sup>/a di rifiuti a bassa attività (II categoria DISP) richiedenti un deposito definitivo dell'ordine delle centinaia di anni (tab. 9).

Nello studio sopra citato è anche prevista la riciclabilità di una parte dei rifiuti ad alta attività, per il recupero delle materie prime pregiate ed in particolare del litio del fertilizzante. Questo comporta però il riprocessamento dei materiali ad alta attività, con conseguenti ulteriori esposizioni del personale.

Dal punto di vista della dose occupazionale in condizione di normale operazione, viene assunto come obiettivo di rateo di esposizione, per l'accesso del personale entro l'edificio reattore, il valore di 1 m rem/h a 24 ore dallo spegnimento. Durante il funzionamento del reattore si prevede di condurre le operazioni in maniera remotizzata.

Nel rapporto del progetto STARFIRE (rif. 1) non è contenuta una valutazione di dose occupazionale collettiva. Essa è invece stimata, seppure in modo preliminare e parziale, nella revisione del DOE di cui al rif. 2 (verifica dell'impatto ambientale di STARFIRE), nel modo che di seguito si riassume. Contribuiscono a determinare l'esposizione lavorativa prevalentemente:

- il trizio,
- il flusso neutronico,
- i prodotti di attivazione neutronica del complesso prima parete-mantello, sia mobilizzati nel refrigerante primario attraverso fenomeni di erosione e corrosione che fissati sulle strutture.

L'esposizione dei lavoratori al trizio non è valutata, per il momento, in termini di dose collettiva, in attesa dei risultati di programmi sperimentali ad hoc.

L'esposizione diretta al flusso neutronico è impedita sia dagli schermi che dalla remotizzazione delle operazioni. Presentano tuttavia qualche problema l'alta energia dei neutroni (14.6 MeV) e la necessità di disporre di numerose ed ampie penetrazioni (guide d'onda per il riscaldamento a radiofrequenza, linee di pompaggio per il vuoto, linee dell'elio, linee del refrigerante primario). Per queste cause si può prevedere una maggiore penetrazione dei neutroni attraverso le discontinuità strutturali degli schermi, con la conseguenza dell'instaurarsi di un campo di radiazioni residuo più alto del progettato (1 mrem/h a 24 ore dallo spegnimento).

L'esposizione ai prodotti di attivazione presenti nel refrigerante primario è valutata in completa analogia al caso di un PWR, in quanto il sistema di refrigerazione di STARFIRE è ad esso simile, sia per componentistica che per i livelli stimati di contaminazione del refrigerante primario. Ne deriva quindi, per la normale manutenzione, una stima di dose occupazionale di qualche centinaio di man-rem/anno.

L'esposizione durante la vita dell'impianto ai prodotti di attivazione fissati nei materiali strutturali del complesso prima parete-mantello, tipica del reattore a fusione, è confrontabile con quella derivante dalle operazioni di smantellamento dei grossi componenti dei reattori PWR a fine vita (recipienti in pressione e circuiti di raffreddamento annessi). Come già detto, è infatti prevista la sostituzione in STARFIRE di 4 settori all'anno. Procedendo con valutazioni sulle operazioni di taglio e smantellamento analoghe, il rapporto DOE stima una dose collettiva di 600 - 1100 man-rem per la sostituzione di 6 settori.

Considerando quindi lo smantellamento di 4 settori/anno si ricaverebbe una dose annua di oltre 500 man-rem. In base a quanto riportato si conclude che, per le operazioni valutabili ad oggi, è concepibile il raggiungimento di una dose dell'ordine dei 1000 man-rem/anno. E' da avvertire che la stima di cui sopra presuppone il mantenimento dell'attuale tecnologia. Nell'analisi del DOE è anche considerato il potenziale di riduzione di dose insito nella remotizzazione spinta

delle operazioni (in particolare sostituzione periodica dei settori). Essa potrebbe infatti consentire il mantenimento dei livelli di esposizione collettiva entro le centinaia di man-rem/anno. A tale obiettivo è volto un grosso sforzo di ricerca, anche se non è attualmente possibile definire quale sarà il grado di automazione da associare alle singole operazioni (per operazioni ausiliarie o per operazioni in bassi campi di radiazione, non è infatti previsto il ricorso all'automazione completa).

La presenza di elevati campi magnetici e di grandi sorgenti di onde a radiofrequenza (per confinare, riscaldare e sostenere il processo di fusione) comporta un'esposizione del personale di centrale.

Tali campi possono produrre effetti sul sistema nervoso, recare danni agli occhi (cateratte) e indurre tumori. Le norme USA richiedono che non si superi nelle aree lavorative il valore di 0.01 Tesla per l'induzione magnetica e  $10\text{W}/\text{m}^2$  per la radiofrequenza. Si ritiene che tali valori possano essere rispettati per STARFIRE, con l'ausilio di sistemi di monitoraggio, procedure amministrative e mezzi protettivi.

## 6.2 Conclusioni

Con riferimento agli impianti a confinamento magnetico tipo Tokamak, i principali problemi di sicurezza in condizioni di normale esercizio appaiono:

- . contenimento del trizio;
- . attivazione dei materiali;
- . produzione di rifiuti radioattivi solidi generati dalla sostituzione di componenti e parti del reattore;
- . presenza di elevati campi magnetici e di radiofrequenza negli ambienti dell'impianto;
- . dosi occupazionali non trascurabili per l'esercizio e la manutenzione.

Per quanto specificato nel precedente paragrafo, in condizioni di normale esercizio, l'impatto ambientale in termini di dose alla popolazione degli impianti a fusione appare comparabile con quello degli impianti a fissione.

## 7. ANALISI DEGLI INCIDENTI

### 7.1 Premessa

Nel presentare la sintesi dell'analisi incidentale di STARFIRE, è opportuno notare che tale impianto è basato su una densità di potenza di fusione nel plasma di circa  $5\text{ MW}/\text{m}^3$ , con un flusso neutronico associato di  $3,6\text{ MW}/\text{m}^2$  sulla prima parte.

Esso si colloca tra i reattori a "bassa densità di potenza" (Programma Europeo) e quelli "compatti", cioè sulla linea degli impianti sperimentali CIT ed IGNITOR.

I primi utilizzeranno tecnologie già acquisite o in via di acquisizione e pongono particolare attenzione ai problemi di sicurezza ed alla possibilità di realizzare sistemi di salvaguardia di tipo passivo; i secondi riducono invece notevolmente il volume della camera del plasma ed utilizzano campi toroidali e correnti di plasma molto elevate, portando i materiali di prima parete e dei magneti in condizioni di lavoro estreme.

Dal punto di vista della economicità di un reattore sarebbe infatti desiderabile aumentare il più possibile il valore della densità di potenza nel plasma. A questo obiettivo si oppongono però ragioni tecnologiche (resistenza di materiali ad un flusso neutronico elevato, capacità di creare campi magnetici elevati) e ragioni di sicurezza, legate all'entità del calore residuo, che aumenta al crescere della densità di potenza, ed alla maggiore severità di un incidente di perdita di refrigerazione con ritardato spegnimento del plasma.

Da quanto detto risulta che l'analisi incidentale condotta per STARFIRE è conservativa rispetto a quella dei reattori a bassa densità di potenza (linea europea) mentre non lo è rispetto alla linea dei reattori compatti (\*).

## 7.2 Incidenti di progetto

Gli incidenti di progetto, cioè gli incidenti assunti per il dimensionamento delle salvaguardie, considerati nell'analisi di STARFIRE, partono dalle seguenti ipotesi:

- in condizioni incidentali il plasma viene spento immediatamente dai sistemi di protezione (\*\*);
- la presenza di due circuiti di raffreddamento, anche se non completamente ridondanti, rende meno gravose le conseguenze della rottura di uno di essi (LOCA);
- solo l'attività contenuta nel refrigerante primario è considerata rilasciabile, in caso di LOCA, nel contenimento dell'edificio

(\*) Nello studio di cui al rif. 13, viene mostrato come, portando la densità di potenza del plasma a valori dell'ordine dei  $10 \text{ MW/m}^3$ , ci sarebbe un vantaggio economico di circa il 20-30%. Va però considerata la minore disponibilità d'impianto e l'esistenza di sistemi di sicurezza aggiuntivi (naturalmente non più di tipo passivo) necessari a fronteggiare i maggiori problemi di sicurezza.

(\*\*) Sono previsti 3 sistemi di spegnimento rapido del plasma: uno immediato (100 ms) per iniezione di materiale ad alto numero atomico, uno rapido (2,5 s) per interruzione dell'alimentazione del combustibile e del riscaldamento a radiofrequenza ed uno intrinseco (in circa 0,5 s), che provoca raffreddamento e rottura del plasma, per ablazione del berillio di rivestimento della prima parete.

reattore;

- la fusione e/o la volatilizzazione di materiali strutturali a seguito di incidente di "rottura del plasma" può al massimo interessare il rivestimento della prima parete;
- le interazioni chimiche tra il refrigerante ed i materiali della prima parete- mantello sono trascurabili.

Con queste ipotesi vengono esaminati gli incidenti di progetto:

- a - perdita di refrigerante (LOCA),
- b - rottura del plasma,
- c - transitori nei magneti,
- d - reazioni chimiche ed esplosioni,
- e - perdite di contenimento dei sistemi del trizio.

a - LOCA (incidente di perdita di refrigerante con rottura di uno solo dei due circuiti)

Con le ipotesi fatte, si valuta un innalzamento di temperatura di qualche centinaio di gradi centigradi sulla prima parete, senza arrivare a fusione e volatilizzazione di materiale. L'attività associata al refrigerante, come prodotti di erosione e corrosione attivati, è dell'ordine di  $10^4$  Ci e si considera che venga rilasciata nell'atmosfera dell'edificio reattore.

Postulando una perdita quasi istantanea del refrigerante nell'edificio reattore, la pressurizzazione conseguente è di 70-100 KPa (0.7 - 1 atmosfere), cioè entro i limiti di progetto del contenimento. In queste condizioni, con la metodologia classica usata nel caso dei reattori a fissione, si valuta il rilascio all'ambiente, nel tempo, dell'attività contenuta.

Considerando un fattore di abbattimento pari a 10, dovuto a fenomeni di deposizione superficiale, e trascurando il decadimento radioattivo, si stima un rilascio esterno di prodotti di attivazione compreso tra 10 e 100 Ci.

La dose che ne risulterebbe all'individuo più esposto per questa via, è di qualche ordine di grandezza inferiore ai limiti imposti a incidenti di tale frequenza (1 - 10 rem al corpo intero).

Per quanto riguarda il rischio da trizio contenuto nel refrigerante, e con esso rilasciato all'edificio reattore, si ottiene, nello stesso modo, un rilascio massimo di  $4 \times 10^5$  Ci di T. Un rilascio di questa entità, attraverso un camino alto 100 m, impartirebbe, ad una distanza dell'ordine di 500 m, una dose inferiore al rem, anche considerando la trasformazione del T elementare in acqua triziata.

b - Rottura del plasma

Consiste nell'annullamento incontrollato della corrente di plasma che, in tempi brevi (alcune decine di ms) passa dal valore

---

(\*) Rilascio dall'edificio al tasso di 0.1%/giorno per 30 giorni

nominale (milioni di ampere) a zero. Si ammette che questo evento avvenga con una frequenza di una volta all'anno.

Questo fenomeno comporta:

- un rilascio immediato di energia sulle pareti della camera da vuoto toroidale, pari a circa  $10^3$  MJ, con conseguente significativo innalzamento della temperatura,
- un rilascio immediato di energia magnetica, pari a circa  $2 \cdot 10^3$  MJ, con conseguenti sollecitazioni meccaniche (forze e momenti) sulle strutture.

Il tempo durante il quale questo fenomeno si verifica è stato assunto, nelle analisi di STARFIRE, pari a 25 ed a 100 ms. Si assume inoltre che:

- il calore venga depositato tutto sulla prima parete e sul rivestimento,
- l'energia termica non si distribuisca uniformemente ma si concentri su  $1/3$  della prima parete ( $240\text{m}^2$ ).

In queste condizioni si ha un repentino innalzamento di temperatura del rivestimento di Be e dello strato di materiale costituente la prima parete, con possibilità di raggiungere e superare le temperature di fusione, limitatamente al Be. Inoltre, essendo il Be in ambiente ad alto vuoto, si stima anche una certa volatilizzazione dello stesso.

Le sollecitazioni elettrodinamiche indotte sulle strutture (vincoli della camera toroidale) non superano, per ipotesi, le sollecitazioni di progetto.

Le conclusioni delle analisi svolte per STARFIRE mostrano che, con un tempo di 25ms, si ha fusione di parte del Berillio con una volatilizzazione stimata in circa 1 gr.

#### c - Transitori nei magneti

Il guasto più severo dei magneti superconduttori è la transizione dallo stato di superconduttività a quello resistivo, dovuto ad un loro aumento di temperatura. I possibili eventi iniziatori sono: rottura del plasma, guasto al sistema criogenico dell'elio di raffreddamento, spostamenti relativi dei magneti, mancata protezione da parte dello schermo neutronico (fessurazione). Si ammette che, in queste condizioni, intervenga il sistema di protezione dei magneti, limitando l'aumento di temperatura e di pressione dell'elio entro i limiti di progetto.

Un altro transitorio dei magneti, preso a riferimento per STARFIRE, ipotizza l'annullamento della corrente in una bobina del campo toroidale, che può comportare sulle bobine adiacenti, ancora superconduttrici, il raggiungimento di una corrente pari al 130% della nominale. In queste condizioni si calcola che sulle bobine agiscano forze dell'ordine di  $10^8$  Newton, che portano a deformazioni locali, ma per le quali si esclude il collasso strutturale.



**d - Incidenti con reazioni chimiche ed esplosioni da idrogeno**

Nel caso del progetto STARFIRE, la presenza di Zirconio-Piombo come moltiplicatore e di Alluminato di Litio come fertilizzante esclude la possibilità di grosse cessioni di energia in condizioni incidentali per reazioni con l'acqua di raffreddamento o con l'aria.

Le esplosioni da idrogeno non si ammettono nell'edificio reattore, che è inertizzato a  $CO_2$ . Nell'edificio del trizio, d'altronde, il rilascio massimo ammesso per il trizio stesso è tale da comportare solo possibilità di deflagrazioni locali di idrogeno, con conseguenze quindi limitate. Non si danneggia il contenimento totale.

**e - Incidente di perdita di contenimento nei sistemi di processo e stoccaggio del Trizio**

Entro l'edificio del Trizio sono presenti alcune centinaia di grammi di T rilasciabile, in fase liquida o gassosa, contenute nelle varie apparecchiature di processo ed 1Kg di T circa, immagazzinato per adsorbimento su supporto solido.

La probabilità di rilascio di T da questa parte dell'impianto è maggiore che dall'edificio reattore, dato l'elevato numero di componenti (tubi, serbatoi, apparecchiature di processo) che possono subire difetti di tenuta.

L'entità di rilascio è determinata dall'inventario di T contenuto nell'apparecchiatura che si immagina difettosa (prima barriera). L'incidente più rappresentativo si ritiene sia la rottura o un guasto multiplo al sistema di separazione isotopica D-T, nel quale sono contenuti 50gr di T in forma elementare. Le apparecchiature sono contenute in proprie camere di isolamento e pertanto il Trizio deve superare questa seconda barriera prima di diffondere nell'edificio, che, a sua volta, costituisce l'ultima barriera al rilascio verso l'esterno.

Si ritiene che un rilascio istantaneo di 50gr di T elementare dovuto ad una perdita di contenimento della camera, comporti, per un lavoratore non protetto da indumenti, un rateo di dose superiore al rem/min. In tal caso risulterebbe necessaria l'evacuazione immediata del personale ed un sistema pronto di monitoraggio di fughe di T.

Per quanto riguarda infine l'inventario di T stoccato in forma solida come triziuro metallico, l'energia da cedere per dissociare il T rappresenta un'ulteriore barriera al suo rilascio. Inoltre lo stoccaggio è suddiviso in più parti aventi ciascuno un carico di 12 gr di T. Per STARFIRE quindi non è considerato credibile un incidente che rilasci tutto l'inventario di T allo stoccaggio.

### 7.3 Conclusioni

Con riferimento agli impianti a confinamento magnetico tipo Tokamak i principali problemi di sicurezza, a seguito degli incidenti base di progetto appaiono:

- . possibilità di rilascio di trizio;
- . possibilità di rilascio di materiale attivato;
- . possibilità di rilascio di prodotti tossici (in particolare berillio).

Dalle analisi sopra riportate appare che le quantità di radioattività potenzialmente rilasciabili non sono trascurabili, anche se risultano, per quelle radiologicamente significative, di un ordine di grandezza inferiore alle corrispondenti grandezze della fissione (tab. 10).

Bisogna tener presente che le valutazioni relative alla fusione sono fatte dal progettista, mentre nel caso della fissione sono prese a confronto le assunzioni fatte cautelativamente al fine di valutare un limite superiore di impatto ambientale.

In ogni caso è da considerare il più basso rischio radiologico dei radioisotopi rilasciati dall'impianto a fusione (tab. 11).

## 8. **CONSIDERAZIONI FINALI**

8.1 Allo stato attuale di studio dei reattori a fusione di potenza non è possibile avere un quadro completo degli aspetti connessi alla sicurezza in condizioni normali ed incidentali.

Le principali incertezze sono connesse alla fisica del plasma, alla scelta del sistema di confinamento, al tipo dei materiali utilizzati (prima parete, mantello, etc.), alla densità di potenza di fusione, al tipo di refrigerante da adottare, al valore delle energie in gioco.

Un'analisi completa degli incidenti richiederebbe la considerazione di scenari più severi, con probabilità di accadimento inferiore a quella degli incidenti base di progetto, ma con conseguenze più gravose in termini di rilascio all'esterno.

Allo stato attuale, le valutazioni di sicurezza svolte nel campo dei reattori a fusione si limitano a considerare scenari degradati di questo tipo solo dal punto di vista del confronto tra possibili alternative di progetto e della scelta dei materiali, senza dare una valutazione delle conseguenze. E' tuttavia da rilevare che le quantità di energie in gioco e l'inventario dei prodotti radioattivi rendono immaginabili incidenti di portata più rilevante rispetto a quelli base di progetto. Questi incidenti dovranno essere opportunamente valutati a fronte di un progetto congelato di impianto e di una analisi

sistematica delle possibili sequenze incidentali.

- 8.2 Un aspetto importante per la sicurezza dei reattori a fusione consiste nella possibilità di ridurre il calore residuo e l'inventario dei prodotti radioattivi. Infatti l'impiego di materiali con attivazione ridotta o di breve durata e con una bassa ritenzione del trizio, unita ad una contenuta densità di potenza di esercizio, attenuerebbe i problemi di sicurezza sopra citati, portando l'impianto verso condizioni di sicurezza intrinseca (per ottenere la quale cioè non sono necessari sistemi attivi).

Lo sviluppo della robotica, unita ad una completa automazione dell'impianto, potrà portare a valori accettabili la dose occupazionale (radioattiva, da campi elettromagnetici e da radiofrequenza) per l'esercizio e la manutenzione di tali impianti.

D'altro lato potrebbero anche sorgere nuovi problemi di sicurezza, legati all'evoluzione degli attuali impianti sperimentali verso il reattore a fusione.

**9. RIFERIMENTI**

1. Argonne National Laboratory - STARFIRE - "A commercial Tokamak fusion power plant study" - September 1980 - ANL/FPP - 80 - 1
2. Department of Energy - "Background of information and technical basis for assessment of environmental implication of magnetic fusion energy" - August 1983, DOE/R - 0170
3. STEVEN J. PIET - INEL - "Approaches to achieving inherently safe fusion power plant" - Fusion Technology - Vol. 10 July 1986
4. ENEA-DISP - Guida Tecnica n° 26 - Gestione dei rifiuti radioattivi (Bozza)
5. NRC (USA) - BRANCH TECHNICAL POSITION ASB 9-2 "Residual decay energy for light water reactors for long term cooling" - All. alla SRP 9.2.5
6. M. S. KAZIMI - "Safety aspects of fusion" - Nuclear fusion Vol. 24 N° 11 (1984)
7. IAEA - Technical Report n° 203 - "Handling of T"
8. NUREG/CR-0672-Technology, Safety and Costs of Decommissioning a Reference Boiling Water Reactor Power Station - June 1980
9. NUREG 0772 - Technical Bases for Estimating Fission Product Behavior During LWR Accident - June 1981
10. ENEL-PUN - Progetto di massima - Rapporto Preliminare di sicurezza - Rev. 2 - Ottobre 1985
11. ENEA-RT/PROT(83)24 - "Equivalenti di dose impegnata da introduzione di attività unitaria di radioelementi, per quattro classi di età relative agli individui appartenenti alla popolazione per lo studio dell'impatto ambientale dagli scarichi radioattivi"
12. NUREG 0017 - Calculation of releases of radioactive materials in gaseous and liquid effluents from PWR - April 1976.
13. James E. O'NEILL - "Economic Comparison of Fusion Power Plant Designs".  
ANS Transactions, Vol. 52 - 1986 Annual Meeting - Reno, Nevada - June 15-19, 1986

TAB. 1 - ENERGIE POTENZIALI PRESENTI NEL REATTORE STARFIRE

SISTEMA	FORMA DI ENERGIA	QUANTITA' * (10 <sup>3</sup> MJ)
Plasma	- termica	0.92
	- elettromagnetica	2
Magneti:		
campo toroidale		50
campo poloidale	elettromagnetica	10
riscaldam. ohmico		1.1
Refrigerante	termica	0.24
Reazione alluminato acqua		Trascurabile
Reazione berillio aria	chimica	60
Reazione grafite-aria		200

\* -----  
 Valori tratti dal rif. 1 tranne quelli relativi alle reazioni chimiche  
 che sono stati tratti dal rif. 3

TAB. 2 - CALORE DI DECADIMENTO DELLA RADIOATTIVITA' INDOTTA DAL FLUSSO NEUTRONICO SULLA PRIMA PARETE E SUL MANTELLO DEL REATTORE \*

TEMPO DALLO SPEGNIMENTO (ore)	POTENZA (MW)	ENERGIA <sub>3</sub> INTEGRATA (10 <sup>3</sup> MJ)
0	90	----
1	60	250
10	45	1900
24	40	4000

\* Valori stimati dal rif. 1

TAB. 3 - CONFRONTO TRA ENERGIE SIGNIFICATIVE \*

REATTORE	A FISSIONE DA 1200 MWe TIPO PWR (10 <sup>3</sup> MJ)	A FUSIONE DA 1200 MWe TIPO STARFIRE (10 <sup>3</sup> MJ)
TIPO DI ENERGIA		
ENERGIA DEL REFRIGERANTE	200	200
CALORE DI DECADIMENTO DOPO 1' DOPO 1 <sup>h</sup>	15 310	4,5 250
ALTRE ENERGIE	Calore sensibile del nocciolo 100	Cal. sensibile del mantello comparabile Plasma 3 Magnetici 61

\* I valori sono dedotti da dati riportati nei riferimenti 1 e 5 rispettivamente per STARFIRE e per il PWR.

TAB. 4 - STIMA DELL'INVENTARIO DI TRIZIO IN STARFIRE\*

SISTEMA	Quantità di T (g)	Attività Ci	Forma fisica
MANTELLLO	$10^4$	$10^8$	Adsorbito
IMPIANTO TRATTAMENTO TRIZIO	$6 \times 10^2$	$6 \times 10^6$	Gassoso o liquido
STOCCAGGIO	$10^3$	$10^7$	Adsorbito
TOTALE	$1,16 \times 10^4$	$1,16 \times 10^8$	--

\* Si fa notare che le più moderne concezioni di reattore (progetti europei) limitano l'inventario a non più di 5 Kg. I valori sono stati dedotti dal rif.1



TAB. 5 - STIMA DEI PRODOTTI DI ATTIVAZIONE A LUNGA VITA PRODOTTI IN STARFIRE \*

T fus °C	RADIONUCLIDE	ORIGINE	ATTIVITA' SPECIFICA (allo spegnimento)** Ci/m	VOLUME DEL MATERIALE m <sup>3</sup>	ATTIVITA' TOTALE Ci	T 1/2 anni
1560	Be - 10	Riv. prima parete	N.D.	0.6	N.D.	2.5 10 <sup>6</sup>
1610	Al - 26	Fertilizzante (Li Al O <sub>2</sub> )	2	178	3.6 10 <sup>2</sup>	8 10 <sup>5</sup>
	Sr - 90	Moltiplicatore (Zr <sub>5</sub> Pb <sub>3</sub> )	10 <sup>3</sup>	37	3.7 10 <sup>4</sup>	28
1400	Pb - 205		10		3.7 10 <sup>2</sup>	5.10 <sup>7</sup>
	Zr - 93		10 <sup>2</sup>		3.7 10 <sup>3</sup>	1.1 10 <sup>6</sup>
	Co - 60	Prima parete	5 10 <sup>6</sup>	57	2.8 10 <sup>8</sup>	5.26
1430	Fe - 55		1 10 <sup>8</sup>		5.7 10 <sup>9</sup>	2.6
	Ni - 63		5 10 <sup>5</sup>		2.8 10 <sup>7</sup>	192
	Mb - 93		1 10 <sup>3</sup>		5.7 10 <sup>4</sup>	9
3652 ***	C - 14		Riflettore (Grafite)		2.38 10 <sup>-2</sup>	102

Totale 6 10<sup>9</sup>

\* Valori tratti dal rif. 1

\*\* Dopo irraggiamento per 5 anni alla massima potenza

\*\*\* sublimazione

TAB. 6 - CONFRONTO DELL'INVENTARIO DEI PRODOTTI RADIOATTIVI SIGNIFICATIVI PRESENTI IN REATTORI DA 1200 MWe

REATTORE PRODOTTI RADIOATTIVI	FUSIONE (Ci)*	FISSIONE (Ci)
Trizio	$10^8$	$6-7 \cdot 10^4$ **
Attivazione materiali	$7 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^6$ *** $7 \cdot 10^6$ ----- Tot. $1.5 \cdot 10^7$
Prodotti di fissione	Assenti	Xe, Kr $3 \cdot 10^8$ I $8 \cdot 10^8$ Cs $2 \cdot 10^7$ **** Sr $5 \cdot 10^6$ Te $1 \cdot 10^8$ Pu $2 \cdot 10^5$ Altri .....
TOTALE (ordine di grandezza)	$10^9 - 10^{10}$	$10^9 - 10^{10}$

\* Rif. 1

\*\* Rif. 7

\*\*\* Rif. 8

\*\*\*\* Rif. 9

TAB. 7 - CONFRONTO TRA I RILASCI IN NORMALE ESERCIZIO

	FUSIONE* (Ci/a)	FISSIONE (LWR)** (Ci/a)
LIQUIDI		
Prodotti di corrosione	0.17	$2 \cdot 10^{-3}$
Trizio	910	380
Prodotti di fissione	—	0.22
AEREIFORMI		
Prodotti di corrosione	0.28	$10^{-3}$
Trizio	7145	1100
Prodotti di fissione I-131	----	0.05
Gas nobili	----	13000

\* Rif. 2  
 \*\* Rif. 12

TAB. 8 - CLASSIFICAZIONE RIFIUTI SOLIDI IN STARFIRE

TIPO DI RIFIUTI SOLIDI	CARATTERISTICHE FISICHE	CONCENTRAZIONE	CLASSIFICAZIONE DISP*
Rifiuti di alta attività	Richiedono raffreddamento per circolazione forzata e forti spessori di schermature	$> 10^4 \text{ Ci/m}^3$	III
Rifiuti di media attività	Richiedono schermature ma è sufficiente il raffreddamento per convezione naturale	$10-10^4 \text{ Ci/m}^3$	III
Rifiuti di bassa attività	Non richiedono nè schermature nè raffreddamento	$< 10 \text{ Ci/m}^3$	II

\* Rif. 4

TAB. 9 - CONFRONTO TRA I VOLUMI DI RIFIUTI SOLIDI GENERATI ANNUALMENTE DAL REATTORE STARFIRE E DA UN LWR\*

REATTORE TIPO DI RIFIUTI SOLIDI	STARFIRE (m <sup>3</sup> /a)	LWR (m <sup>3</sup> /a)	
		PWR	BWR
RIFIUTI ALTA ATTIVITA'**	63	14	19
RIFIUTI BASSA ATTIVITA'	1200	400	900

\* Elaborato sui dati dei riff. 2, 5, 6

\*\* Complesso prima parete-mantello nel caso della fusione e combustibile esaurito nel caso della fissione.

TAB. 10 - RILASCI INCIDENTALI AL SISTEMA DI CONTENIMENTO, PER LOCA DI PROGETTO

IMPIANTO RILASCIO	FUSIONE (Ci)*	FISSIONE (Ci)
TRIZIO	$2,5 \cdot 10^5$	$6-7 \cdot 10^4$ **
PRODOTTI DI ATTIVAZIONE (Ci)	$3 \cdot 10^4$	3 ***
PRODOTTI DI FISSIONE (Ci)	ASSENTI	Xe, Kr $10^6$ *** I $5 \cdot 10^5$ Cs $2 \cdot 10^5$ Sr $9 \cdot 10^3$

\* Rif. 1

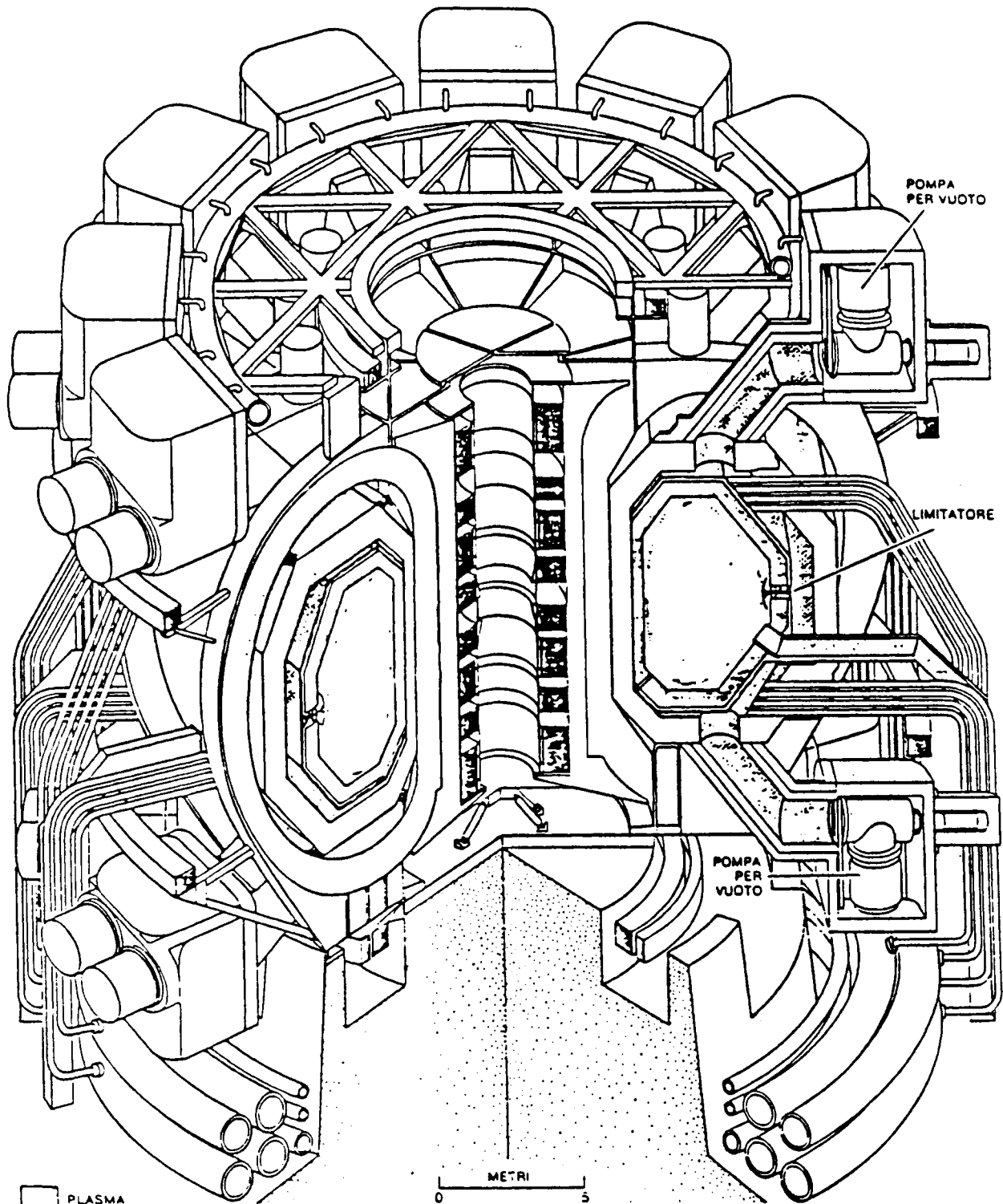
\*\* Rif. 7

\*\*\* Rif. 10

TAB. 11 - DANNO BIOLOGICO RELATIVO (RAPPORTATO AL TRIZIO) PER ALCUNI RADIOISOTOPI SIGNIFICATIVI PER INGESTIONE ADULTI \*

RADIOISOTOPO	IMPIANTO	DANNO BIOLOGICO RELATIVO
T	FUSIONE	1
<sup>60</sup> Co <sup>55</sup> Fe <sup>90</sup> Sr	FUSIONE-FISSIONE	146 7 2063
<sup>144</sup> Ce <sup>137</sup> Cs <sup>131</sup> I <sup>242</sup> Pu	FISSIONE	317 698 825 5396

\* Rif. 11



- PLASMA
- PRIMA PARETE E MANTELLO
- SCHERMO
- MAGNETI DEL CAMPO TOROIDALE
- MAGNETI DEL CAMPO POLOIDALE E  
MAGNETI DEL RISCALDAMENTO OHMICO
- CONDOTTO PER ONDE  
DI RADIOFREQUENZA
- CONDOTTI PER VUOTO

Il reattore a fusione STARFIRE è il frutto di uno studio condotto dall'Argonne National Laboratory per due anni. Esso prevede l'impiego di campi magnetici per il confinamento di un plasma di fusione, ossia di un gas di deuterio e trizio ionizzati, entro una camera toroidale. Si osservano due sezioni del toro. Quella di sinistra attraversa uno dei dodici magneti superconduttori anulari posti attorno al toro. Altri magneti superconduttori sono concentrici al toro. La sezione di destra mette in evidenza le apparecchiature tra i magneti anulari. Le pompe per vuoto rimuovono il plasma, che viene in contatto solo con il «limitatore» sporgente dalla prima parete del reattore. Nelle tubazioni circola il termovettore che va alla prima parete e al mantello. Le onde di radiofrequenza attraversano il mantello in appositi condotti. Esse contribuiscono al pilotaggio della corrente nel plasma e al riscaldamento del plasma stesso fino a temperature di decine di milioni di gradi. Ogni reazione di fusione tra deuterio e trizio produce elio, un neutrone ed energia.

FIG. 1 - IL REATTORE STARFIRE



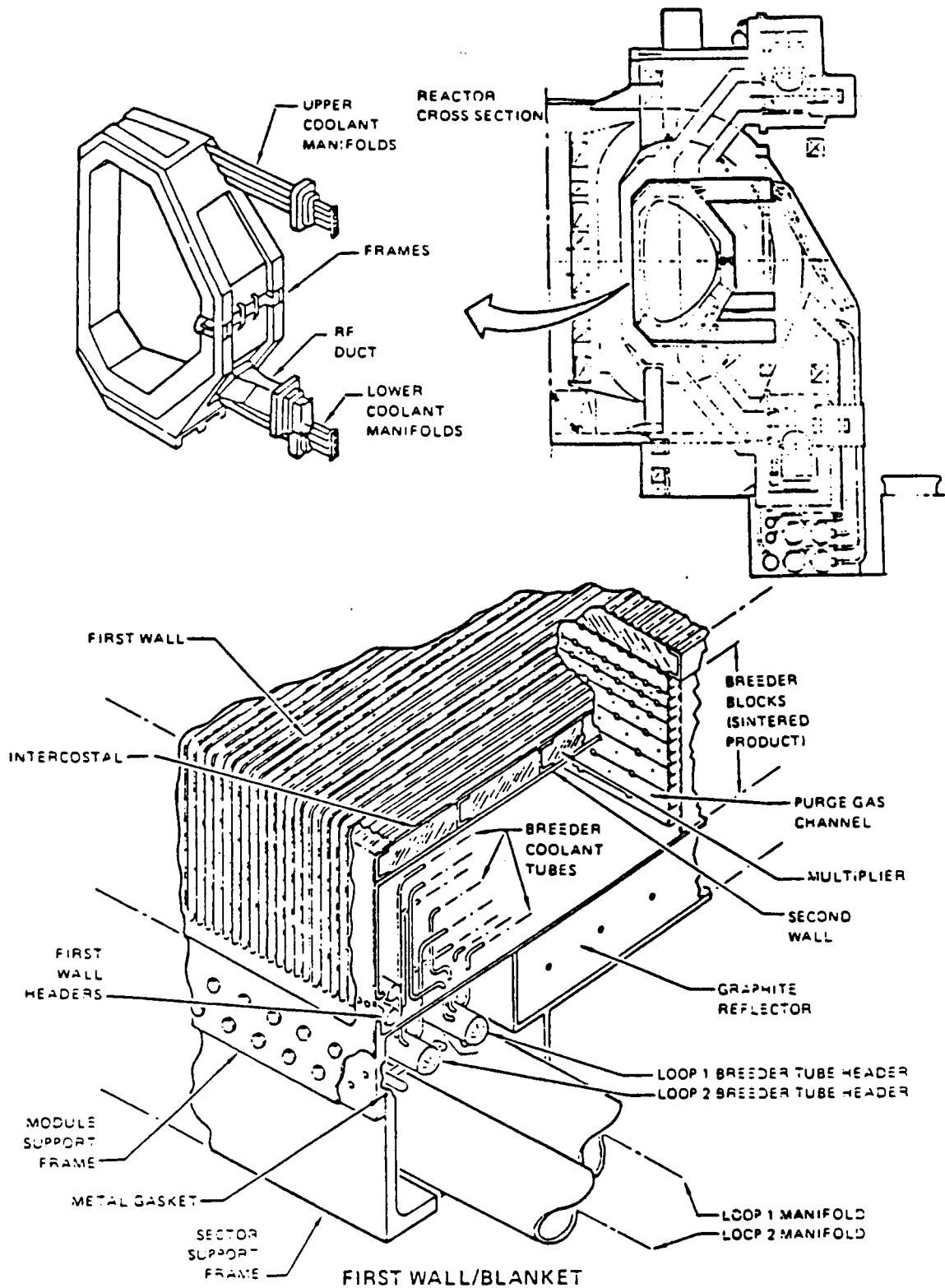
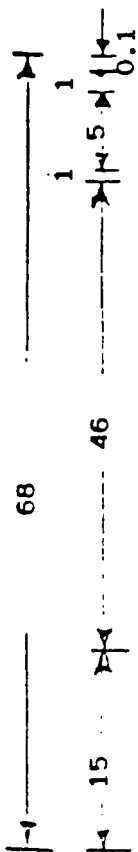
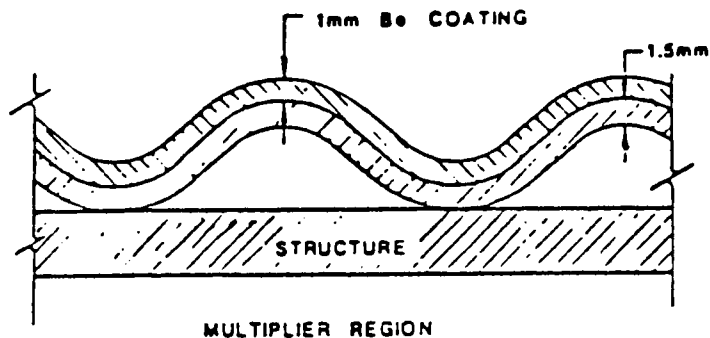


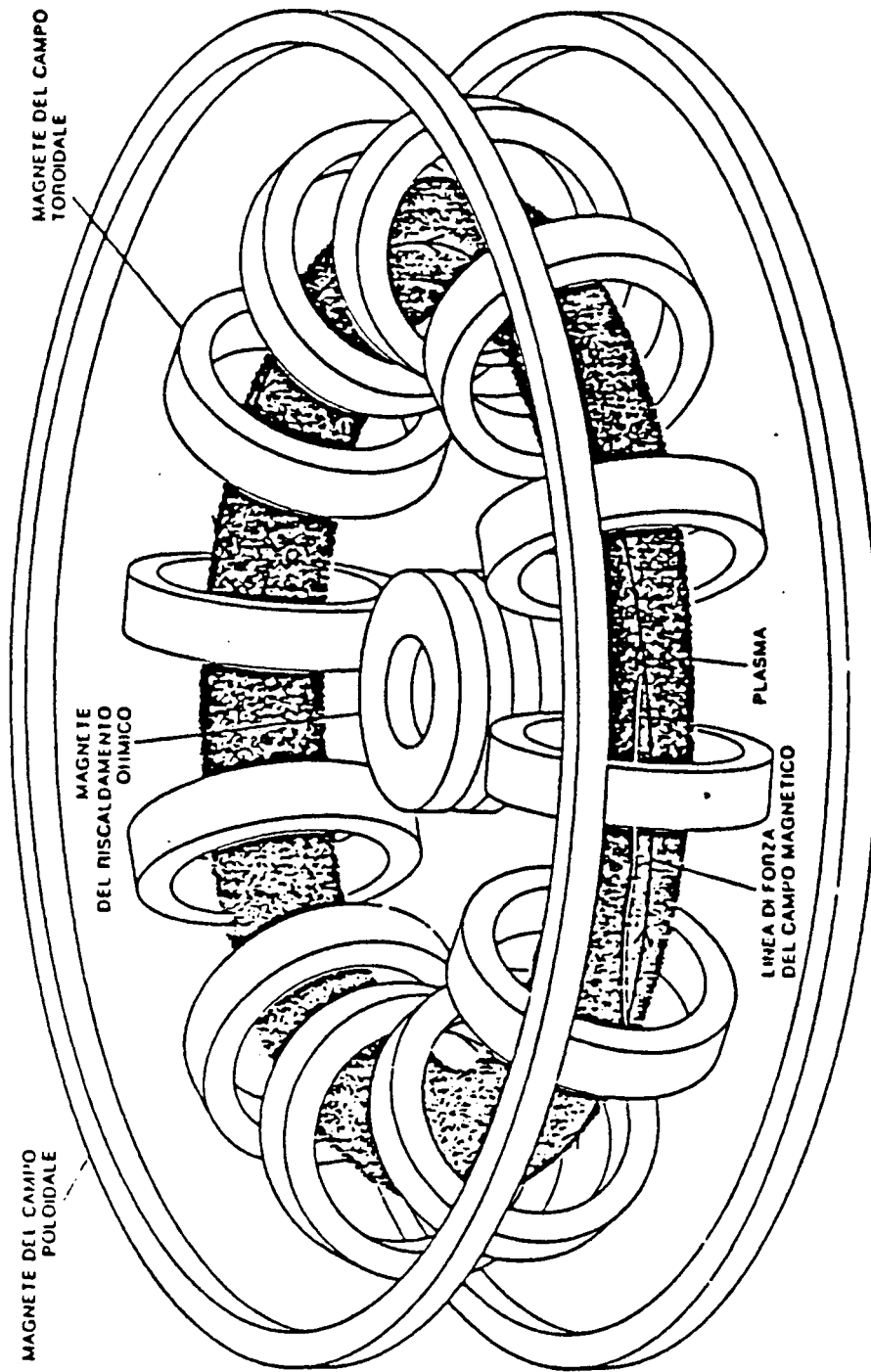
FIG. 2 - IL COMPLESSO PRIMA PARETE - MANTELLO DEL REATTORE STARFIRE



- RIVESTIMENTO (BE)
- PRIMA PARETE (AISI)
- MOLTIPLICATORE (Zr Pb)
- SECONDA PARETE (AISI)
  
- FERTILIZZANTE  
(Alluminato di Litio)
  
- RIFLETTORE  
(Grafite)

(Quote in cm)

FIG. 3 - PARTICOLARI DEL SISTEMA  
PRIMA PARETE - MANTELLO



Il sistema adotta il sistema di confinamento del plasma di tipo tokamak, che utilizza tre gruppi di magneti. I magneti del campo toroidale generano un campo le cui linee di forza sono concentriche al loro formato dal plasma. I magneti di riscaldamento ohmico hanno una funzione analoga a quella degli avvolgimenti del primario di un trasformatore, inducendo una corrente elettrica nell'avvolgimento secondario, che è costituito dal plasma stesso. La corrente provoca il riscaldamento del plasma; inoltre, genera un campo poloidale avente linee di forza anulari disposte perpendicolarmente al campo toroidale. Il magnetore genera un campo con linee di forza verticali che impedisce la fuga del plasma dalla geometria toroidale. Le linee di forza del campo risultante sono elicoidali. Ogni particella carica nel plasma ruota attorno a una linea di forza e progredisce mentre la percorre; la particella risulta vincolata perché la linea è chiusa (ritorna dopo alcuni giri attorno alla colonna toroidale la particella al punto di partenza).

Il sistema adotta il sistema di confinamento del plasma di tipo tokamak, che utilizza tre gruppi di magneti. I magneti del campo toroidale generano un campo le cui linee di forza sono concentriche al loro formato dal plasma. I magneti di riscaldamento ohmico hanno una funzione analoga a quella degli avvolgimenti del primario di un trasformatore, inducendo una corrente elettrica nell'avvolgimento secondario, che è costituito dal plasma stesso. La corrente provoca il riscaldamento del plasma; inoltre, genera un campo poloidale avente linee di

FIG. 4 - SISTEMA DI CONFINAMENTO MAGNETICO DEL PLASMA

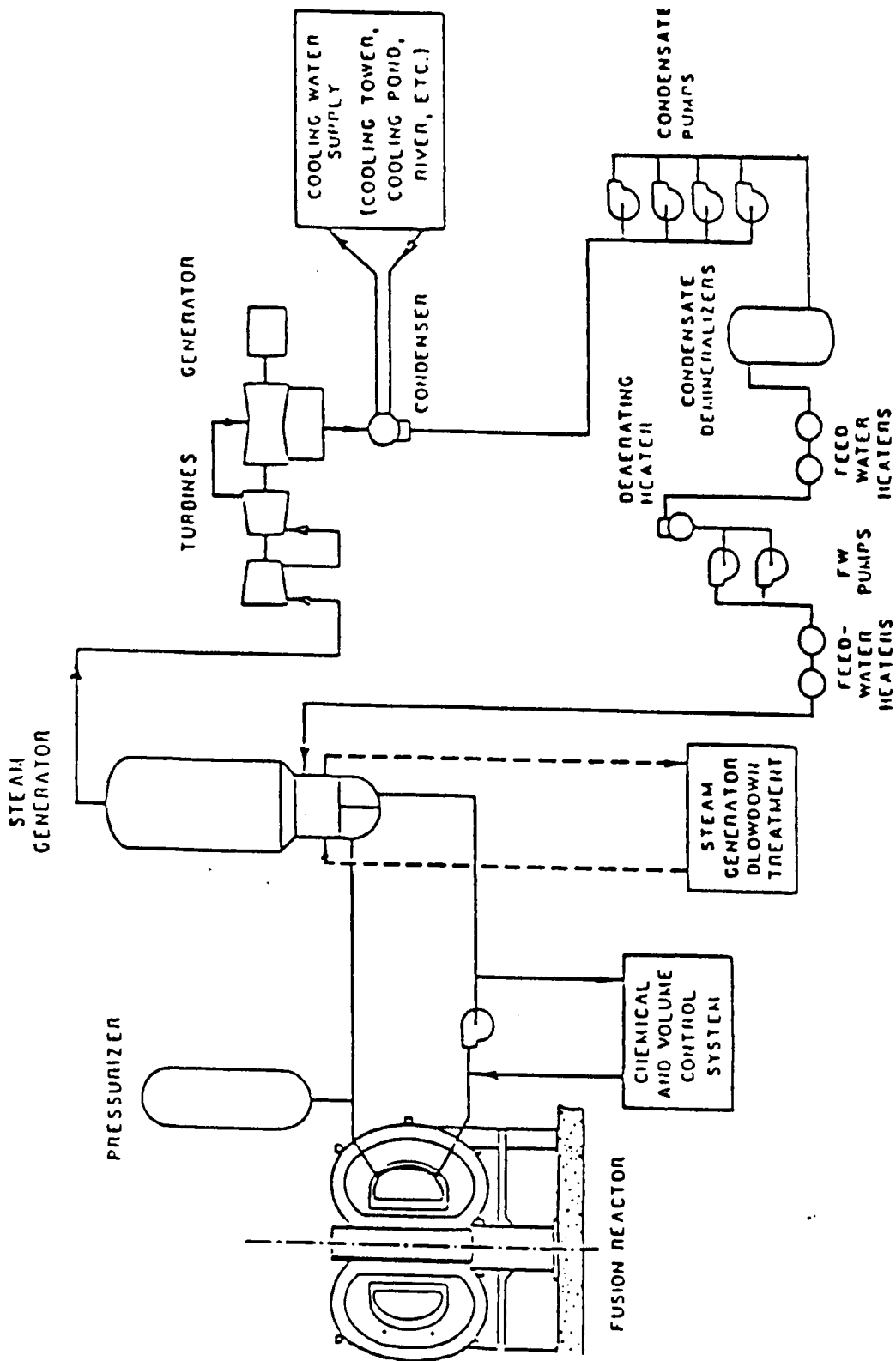
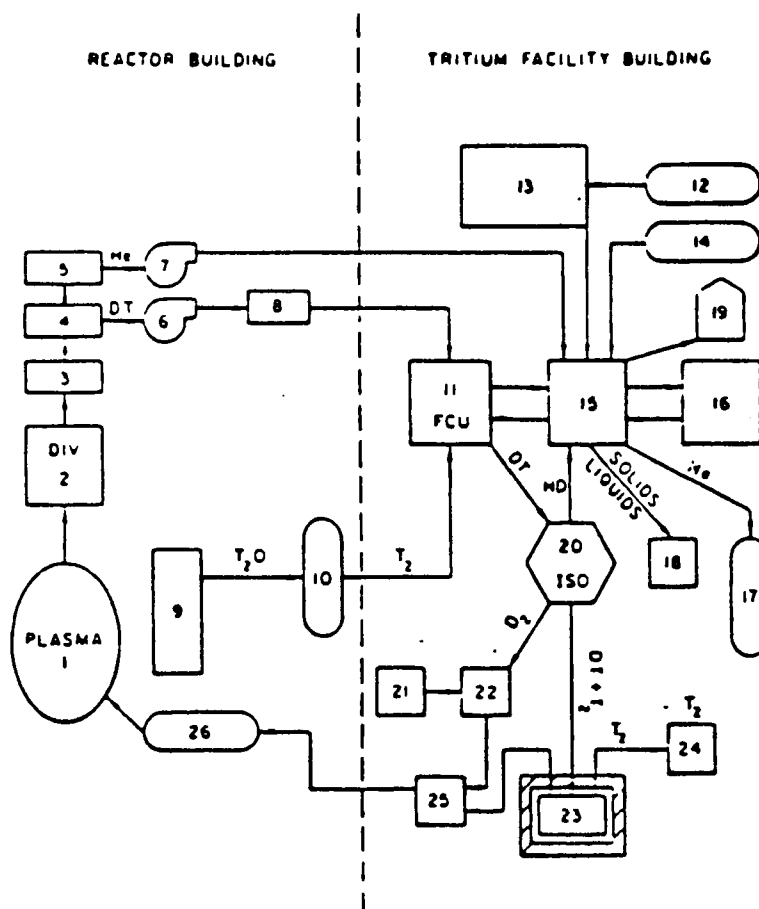


FIG. 5 - SCHEMA DELL'IMPIANTO STARFIRE



- |   |  |
|---|--|
| 1. Plasma Chamber                       | 15. Tritiated Waste Treatment                      |
| 2. Limiter Plates                       | 16. Tritiated Water Recovery Unit                  |
| 3. Debris Separator                     | 17. Helium (tritium-free)                          |
| 4. L-T Cryocondensation Pump            | 18. Tritiated Waste -- Liquids and Solids          |
| 5. Helium Pump                          | 19. Detririated Gases: $N_2$ , $O_2$ , $CO_2$ , Ar |
| 6,7. Regeneration Pumps                 | 20. Isotopic Separation Unit                       |
| 8. Metal Bellows Pumps                  | 21. $D_2$ Supply                                   |
| 9. Breeder Blanket                      | 22. $D_2$ Storage                                  |
| 10. Electrolysis Unit                   | 23. DT and $T_2$ Storage                           |
| 11. Fuel Cleanup Unit                   | 24. $T_2$ Shipment/Receiving                       |
| 12. Tertiary Enclosures                 | 25. Fuel Blender                                   |
| 13. Atmospheric Tritium Recovery System | 26. Gas Fueling                                    |
| 14. Secondary Enclosures, Purge Streams |  |

FIG. 6 - IL CICLO DEL COMBUSTIBILE IN STARFIRE