

JAERI-M
87-111

核融合次期装置設計
(昭和61年度設計報告書)

—安全性—

1987年8月

関 泰・飯田 浩正・本多 力*

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行	日本原子力研究所
印刷	日立高速印刷株式会社

核融合次期装置設計

(昭和61年度設計報告書)

— 安全性 —

日本原子力研究所那珂研究所臨界プラズマ研究部

関 泰・飯田 浩正・本多 力*

(1987年7月9日受理)

核融合次期装置の安全性評価として、全体システム、コンポーネントのFMEA(Failure Modes and Effects Analysis), 事故シーケンス等、これまで検討してきた内容について総括的にまとめた。

第1章において、次期装置実験炉(FER)全体の事故シーケンスの検討をすることとし、1.1において対象コンポーネント及びシステムの内容について説明、1.2においてシステム、コンポーネントのFMEA、1.3において事故シーケンスについて各々検討結果をまとめた。また、1.4において放射性物質放出フローの検討をし、最後に1.5で今後の課題をまとめた。

核融合炉本体廻りシステムでは、既往の諸施設にみられないコンポーネントが多く、故障確率等データがそろわず定量評価が難しい。しかし、燃料ガス循環系の一部は、一般の化学プラントや、分裂炉プラントに類似のシステムがあり、データの流用できるものが多いと考えられる。そこで、第2章では、第1章で検討した全システムのうち、燃料ガス精製系、燃料ガス同位体分離系、燃料ガス貯蔵系の各システムについて確率論的評価手法による解析(PRA)を実施した。2.1においてFMEAの検討を詳細化し、2.2では事故シーケンスの検討及び起因事故の選定をした。2.3、2.4、2.5では各々ETA(Event Tree Analysis), FTA(Fault Tree Analysis),そしてトリチウム放出量及びリスクの評価をし、2.6で今後の課題をまとめた。

Conceptual Design Study of Fusion Experimental
Reactor (FY86FER)
— Safety —

Yasushi SEKI, Hiromasa IIDA and Tsutomu HONDA*

Department of Large Tokamak Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 9, 1987)

This report describes the study on safety for FER(Fusion Experimental Reactor) which has been designed as a next step machine to the JT-60. Though the final purpose of this study is to have an image of design base accident, maximum credible accident and to assess their risk or probability, etc., as FER plant system, the emphasis of this years study is placed on fuel-gas circulation system where the tritium inventory is maximum.

This report consists of two chapters. The first chapter of this report summarizes the FER system and describes FMEA(Failure Mode and Effect Analysis) and related accident progression sequence for FER plant system as a whole.

The second chapter of this report is focused on fuel-gas circulation system including the purification, isotope separation system and storage system. Here, probability of risk is assessed by the probabilistic risk analysis (PRA) procedure based on FMEA, ETA and FTA.

Keywords: FER, Safety, Tritium, FMEA, FTA, ETA, radioactivity, PRA,
Radiation, Fusion Reactor

* Toshiba Corporation

目 次

1. 実験炉 (FER) の事故シーケンスの検討	1
1.1 対象コンポーネント及びシステムの内容	1
1.2 システム、コンポーネントのFMEA	55
1.3 事故シーケンス	113
1.4 放射性物質放出フロー	128
1.5 今後の課題	132
2. 燃料ガス循環系安全性解析	133
2.1 システムコンポーネントのFMEA	133
2.2 事故シーケンスの検討及び起因事故の選定	145
2.3 ETA(Event Tree Analysis)	152
2.4 FTA(Fault Tree Analysis)	165
2.5 トリチウム放出量及びリスク	221
2.6 今後の検討課題	235
謝 辞	236
参考文献	236

Contents

1. Important accident progression in FER system	1
1.1 FER system	1
1.2 Failure mode and effects analysis	55
1.3 Accident progression sequence	113
1.4 Radioactive material release	128
1.5 Critical issues	132
2. Safety analysis of fuel gas circulation system	133
2.1 Failure mode and effect analysis	133
2.2 Accident progression sequence and selection of initiating event	145
2.3 ETA (Event Tree Analysis)	152
2.4 FTA (Fault Tree Analysis)	165
2.5 Tritium release and risk	221
2.6 Critical issues	235
Acknowledgement	236
References	236

1. 実験炉（FER）の事故シーケンスの検討

FERの事故シーケンスの検討については、既にJAERI-M85-178「9.4重要事故の選定」において実施している。しかし、その後設計の進捗により全体システムのあり方が若干変更され、また安全性の検討も進められたので、ここで見直すこととした。

第1に諸系統の変更等も考慮して、各システムあるいはコンポーネントに対するFMEA（故障の型と影響解析）を見直した。ここでは、今回は設計が進んでいないため対象外にしていたガードリミタ、中性粒子入射加熱装置、燃料循環システム、TCS/HVAC、電源／制御系などのシステムも加えた。

第2に、FMEAで検討された代表的な事象につき、事故の波及過程を明確にすることとして見直した。

第3に、これら波及過程毎に最も放射能の大量放出につながると考えられるシーケンスについて、建屋室内および環境への放出量を評価し直した。

1.1 対象コンポーネント及びシステムの内容

1.1.1 主要系統構成の概要

(1) 全体系統

Fig. 1.1.1-1に核融合実験炉（FER）の基本構成のブロックダイヤグラムを示す。炉心は下方向にシングルヌルポロイダルダイバータを有する非円形断面のプラズマである。現在のOption Cと呼ばれる候補炉心のパラメータをTable 1.1.1-1に示す。運転シナリオをFig. 1.1.1-2に示す。このプラズマをトーラス構造体が囲んでいる。トーラス構造体は第一壁、シールドブランケット、遮蔽体、ダイバータ、増殖ブランケットテストセクション、配管類から成る円環構造体であり複数のセクター構造体から組立てられている。炉本体断面図（Option C）をFig. 1.1.1-3に示す。

プラズマ発生領域を高真空に保つため炉心真空容器が置かれている。炉心真空容器の外側にトロイダル磁場コイル、更にその外側にポロイダル磁場コイルが配置されている。炉心真空容器及びクライオスタット真空容器にそれぞれ独立の真空排気設備が設けられている。トーラス構造体は本体1次冷却設備により冷却される。トーラス構造要素は架台によって相互に組合わされ本体を形づくる。

本体の周辺には、真空排気設備、加熱装置、計測装置、ベーキング設備、トリチウム燃料設備、トリチウム除染設備、換気空調設備、本体保守設備、コイル冷凍設備が配置される。炉本体建家の外には電源、制御設備、給電設備、2次冷却設備、廃棄物処理設備、給排水設備等が設置されている。

(2) トーラス構造体

(i) トーラス寸法

Fig. 1.1.1-4 に F E R (Option C) のラジアルビルトを示す。

(ii) 真空バウンダリーの構成

Fig. 1.1.1-5 にトーラスの概略構造を示す。プラズマの周囲は第一壁と一体型となった可動遮蔽体とセミパーマネント遮蔽体があり、セミパーマネント遮蔽体の内壁がプラズマ真空壁となり、外壁はコイル用断熱真空壁となる。真空境界には大型のアクセスポートを接続してベルジャーの外壁の窓部に挿入、接続する。共用型真空壁とした場合の問題点としてトーラス部の熱変位によるアクセスポートとベルジャ壁の接続構造があるがベローズを設置して熱変位を吸収する。

プラズマ真空容器はトリチウム閉じ込めのためのバウンダリーを構成するため十分な耐電磁力、耐熱応力強度、耐圧性、気密性を保持する必要がある。また、内圧が過大にならないような対策をほどこす必要がある。

(iii) トーラス支持

遮蔽体等トーラスの自重支持は T F コイル間に 1 2 ケ所支持脚を設け支持する。これらの支持脚はすべて排気ダクトを兼用している。プラズマ真空容器のベーキング時の熱変位に対しては支持脚ベースで装置径方向にスライドできる構造としている。

(iv) トーラス分割構造及び引抜構造

可動遮蔽体とダイバータの分割は 1 分割 / T F C (1 2 / トーラス) である。引抜は直線 1 モーションで行なわれる。Fig. 1.1.1-5 に Option C の例であるトーラス立体図を示す。可動遮蔽体はポロイダル方向につながっていないためトーラスを構成する時は固定遮蔽体側面の段により支持し、可動遮蔽体を引抜く時はジャッキ支持をして引抜く。

(v) トーラス構造

(a) ダイバータ基本構造

ダイバータ部分の受熱部分は W アーマ材 (タイル構造) , C u のヒートシンク, S U S 補強板から構成される。S U S の裏側は渦電流対策のため絶縁されてダイバータ板支持板に支持され、さらに絶縁されて支持フレームにボルト止めされている。冷却材はポロイダル方向に流れるような配管がなされている。Fig. 1.1.1-6 と Fig. 1.1.1-7 にダイバータ板概念図を示す。

(b) 第 1 壁 / シェル導体 / 遮蔽体基本構造

第 1 壁は、遮蔽体と一体型で表面にグループはない。構造材はステンレス鋼である。シェル導体は第 1 壁と一体で外側可動遮蔽内蔵の鞍型である。材質は C u である。遮蔽体は冷却流路付のステンレス鋼板あるいは水タンク形式である。

構造概念図は Fig. 1.1.1-5 に示されている。

第 1 壁 / ダイバータはプラズマ真空容器内に設置され、それらの受熱面は高熱負荷、高電磁力 (プラズマディスラプション) , 1 4 M e V 中性子照射, スパッタリングによる損耗を考慮した設計が必要である。

(3) コイル系

コイルは、プラズマの閉じ込めと位置、形状制御のための磁場を発生させる。通常時及び異常時の電磁力に耐える必要がある。また超電導コイルに対しては常電導への転移が起こると想定した場合、蓄積エネルギーを安全に外部に放出、吸収させる設計が必要である。

(i) トロイダル磁場コイル(TFコイル)

TFコイル数は12コである。最大トロイダル磁場は12Tである。マグネットの冷却は強制冷却方式を用いる。

トロイダルコイル向心力は中心支柱で支持し、転倒力はコイル間サポートで支持する。コイルの自重は断熱支持脚によって支持される。コイル形状をFig. 1.1.1-8に示す。

(ii) ポロイダル磁場コイル

PFコイルは垂直位置制御コイルをのぞいて、すべてTFコイル外周に設置する。コイルの冷却は液体ヘリウム強制冷却を採用している。ソレノイドコイルは中心支柱の内側に配置される。

(iii) コイル冷却系

Fig. 1.1.1-9に強制冷却システムの冷却系統図の一例を示す。この例は12TFコイルの3コイルを1コイルブロックとしたものである。図ではLN₂によるふく射シールド、80K支持ベース冷却システムは省略してある。

(4) 加熱系

(i) 高周波加熱

プラズマの高周波加熱はICRF, LHRF, ECRFの3種類の周波数により行なう。各加熱装置とも概略構成はアンテナ又はランチャと称する高周波をプラズマに結合する部分と高周波電力を発生する高周波発生装置と発生した高周波電力をアンテナまで伝送する伝送系とから成りたっている。一例としてICRF伝送系をFig. 1.1.1-10に示す。

ICRF加熱装置では結合系はアンテナとアンテナ前面で不要電場を打消すために用いるすだれ状のファラデーシールドから構成される。

概略構造をFig. 1.1.1-11に示す。高周波の伝送は径の異なる2つの管を同軸状に配置した同軸供給電線を使用する。高周波発生装置とアンテナの間でインピーダンスの整合をとるため、やはり同軸管で構成されたスタブが伝送線に接続される。大電力の高周波は4極真空管等による大電力増幅器で発生させる。

LHRF加熱装置のランチャはFig. 1.1.1-12に示すような多数本の方形導波管で構成され、隣り合う導波管の高周波の位相差を適当に選らび高周波のプラズマへの結合効率を最適化する。このランチャはグリルアンテナとも呼ばれる。伝送系はランチャと同様に方形導波管である。大電力の高周波はクライストロンによる大電力増幅器で発生させる。

同軸給電線と導波管内には絶縁耐圧を増すためにSF₆ガスが加圧封入される。各々途中で真空封止のため導入端子又は高周波窓を設ける。これらは同時にトリチウム閉じ込めバウンダリーを構成する。

ECRF加熱装置のアンテナ伝送系は形の上での区別はなく全体は準光学的伝送システムと称し、金属鏡を組み合わせて構成される。大電力の高周波発生は準光学的ジャイロト

ロンにて行なわれると予想される。ICRF, LHRFと異なる点はFig. 1.1.1-13に示すようRFビームを上下に振ってプラズマの温度分布制御をするための偏向装置を備えるところである。

(ii) 負イオン中性粒子入射加熱

ビームシステムは負イオン源部、ビーム分布制御装置、中性化セル、ビームダンプ、クライオポンプ(イオン源部及びビームダンプ部)さらに磁気シールド及び中性子シールドより成る。

システム概略構成をFig. 1.1.1-14に示す。

トーラスからイオン源まで連通しているために燃料トリチウムのイオン源側への漏洩が考えられる。ビームダンプ部排気系はトーラス主排気系に導かれる。

(5) 真空排気系

真空排気系はプラズマ真空容器中で発生する核融合生成物であるHe及び、未燃焼燃料であるトリチウムと重水素を排気する。プラズマ真空容器と真空排気系の間には緊急時に系統を遮断する隔離弁が設けられている。

FERの真空排気システム案をFig. 1.1.1-15及びFig. 1.1.1-16に示す。FERの真空排気系は液体ヘリウムで冷却した複合クライオポンプを主ポンプとし、ターボ分子ポンプとスパイラルブースタポンプを補助ポンプとして構成する。この真空排気系はトーラスの下部12組配置され、トーラス支持を兼ねる排気ダクトを介してトーラス真空容器内のダイバータ室に接続される。

クライオポンプは各真空排気系に2台ずつ設置され1台が運転中に他の1台の再生を行うといういわゆるバッチ方式をとる。クライオポンプの排気面はトーラス真空容器の引き口での有効排気速度 $1 \times 10^5 \text{ l/s}$ (クライオポンプ12台当り)を満足するに十分な面積を持つ必要がある。

超電導マグネット用クライオスタットの真空排気系は、油拡散ポンプ、メカニカルブースタポンプ及びロータリポンプで構成し、クライオスタットの周囲に配置する。

(6) 冷却系

FERでは第1壁、ブランケット、遮蔽体、ダイバータ等の熱発生部で生じた熱を除去するために冷却系が必要である。冷却系は1次系/放熱系から構成されるものとする。冷却ループは最もトリチウムの透過しやすいダイバータを別ループとすることが望ましい。

Fig. 1.1.1-17に冷却システム概念図を示す。Fig. 1.1.1-17では、ダイバータ、第1壁、遮蔽体の3系統にわけてある。各ループの主要機器としては1次冷却水ポンプ、中間熱交換器、2次系冷却水ポンプ、冷却塔がある。1次冷却系等において万一、冷却材の流量喪失や流出が生じた場合でも冷却機能を確保し、崩壊熱を除去しうる設計が必要である。また、1次冷却水系中のトリチウム濃度を低減するために必要があれば1次冷却水浄化系を設ける。

(7) テストモジュール冷却系

テストモジュールの冷却系は各テストモジュールで発生する熱を除去回収して、各テストモジュールの試験温度条件を達成することを目的としている。すなわち、低温テストモジュール(A)、(B)においては、それぞれ低温加圧水と低温加圧ヘリウムガスによりテストモジュール

ルの熱除去を行なう。高温テストモジュールにおいては、高温加圧水により熱除去を行ない、発電に利用可能なPWR相当の冷却材条件を得ることを目的としている。

冷却条件が異なるため、各テストモジュールにはそれぞれ別系統の冷却系を設ける。低温テストモジュール(A)、(B)の一次冷却系は冷却器とポンプまたは循環機により構成して、加熱された加圧水またはヘリウムを冷却、循環する。2次冷却系は非増殖ブランケットと共通する。高温テストモジュールの1次冷却系は蒸気発生器、過熱器およびポンプにより構成し、高温加圧水を循環して、発電可能な2次系蒸気を発生させる。

テストモジュール冷却系の設計にあたっては特に次の点を考慮して設計を行なう必要がある。

- ① 低温モジュール(A)では、1次冷却系のトリチウム含有水が2次系に放出されないよう考慮する。
- ② 低温モジュール(B)は、トリチウムのバッチ回収が可能な系統構成とする。
- ③ 高温テストモジュールは、発電のデモンストレーションが可能な系統構成とする。

Fig. 1.1.1-18~1.1.1-20にそれぞれのテストモジュール冷却系の系統構成を示す。

(8) トリチウム処理系

増殖ブランケットにより生産されたトリチウムあるいは、主排気系からの未燃焼燃料であるトリチウム、重水素の回収精製（不純物の除去）、同位体分離、貯蔵、注入を行なうシステムである。これらの装置はトリチウムが漏洩するような可能性があれば、グローブボックスの中に収納し直接室内に放出されることを防ぐ必要がある。

(i) 燃料ガス循環系統

真空排気系に続く4つの系統、燃料ガス精製系、燃料ガス同位体分離系、燃料ガス貯蔵系、燃料ガス注入系のほか中性粒子入射加熱装置もループの一部を構成する。概略全体フロー図をFig. 1.1.1-21に示す。

(a) 精製系の構成をFig. 1.1.1-22に示す。

パラジウム合金拡散器、触媒酸化器、フリーザー電解セルから構成される。

(b) 同位体分離系の構成をFig. 1.1.1-23に示す。

深冷蒸留塔により分離を行なう。

(c) 貯蔵系の構成をFig. 1.1.1-24に示す。

ZrNiの水素化合物により貯蔵を行なう。

(d) 注入系の構成をFig. 1.1.1-25に示す。

燃焼フェーズと加熱フェーズとも2段加速される。それぞれ1段目はアーク放電銃あるいは遠心加速器、2段目はレールガンである。

(ii) 増殖ブランケットテストモジュールトリチウム回収系

ブランケットテストモジュールは3種類あり、低温軽水冷却でヘリウムパージガスによりトリチウム連続回収を行なう低温テストモジュール(A)、低温ヘリウム冷却でトリチウムはバッチ回収を行なう低温テストモジュール(B)、高温ヘリウム冷却でトリチウム連続回収を行なう高温テストモジュールから成る。Fig. 1.1.1-26にトリチウム回収系の系統概要図を示す。除去・回収系は触媒反応器、モレキュラーシーブ乾燥塔および循環機等によ

り構成する。

これらの装置はトリチウムが漏洩するような可能性があれば、グローブボックスの中に収納し直接室内に放出されることを防ぐ必要がある。

グローブボックス内に漏れた場合、トリチウムはトリチウム浄化系によって捕集され、グローブボックス内のトリチウム濃度は十分低く保たれるものとする。

(9) 室内換気空調／雰囲気トリチウム浄化系(HVAC/TCS)

HVACは建家内機器の信頼性、作業員の作業性を維持するために、室内温湿度、気流を調整する。TCSは室内雰囲気のトリチウム濃度を目標値以下とし、建家外環境放出量を極力低減化するために、機器、装置から空气中へ漏洩したトリチウムを除去する。システムの概略をFig. 1.1.1-27に示す。

雰囲気トリチウム浄化系は触媒反応器とモレキュラーシーブよりトリチウム水としてトリチウムガス回収する。概略システム構成をFig. 1.1.1-28に示す。

(10) 電源・制御系

TFコイル電源、PFコイル電源、加熱／電流駆動電源、制御コイル電源及びそれぞれの電源制御系から構成される。プラズマの起動、制御、停止が確実にこなえるよう信頼性の高い設計が必要である。

Fig. 1.1.1-29に電源概略構成図を示す。

(11) 液体廃棄物処理系

液体廃棄物処理系の対象として、一次冷却系の廃液事故時、分解修理時の雰囲気トリチウムの回収によるトリチウム水廃液、その他洗濯廃液、シャワードレン系、使用済樹脂系、濃縮廃液系、雑固体系等がある。Fig. 1.1.1-30に例として低電導度廃液系、高電導度廃液系の処理フローの概略を示す。

(12) 固体廃棄物処理系

施設から排出される放射性廃棄物には、大型放射性固体廃棄物、トリチウム含有廃液、雑小物放射性固体廃棄物がある。処理法の基本的な考え方をFig. 1.1.1-31のフロー図に示す。

(13) 安全保護系及び安全設備

安全保護系は核融合炉の安全性を損なうおそれのある異常な過渡状態や誤動作が生じた場合、あるいは、このような事態の発生が予想される場合に、それを防止あるいは抑制するためには安全保護動作を起すなどにより、核融合炉を保護するために設ける。

安全設備は核融合施設の故障や破損等に起因してトリチウムの放出等の放散の可能性がある場合、これらを抑制もしくは防止するため設ける。核融合炉建家、グローブボックス、雰囲気トリチウム浄化系、排気塔等がそれらに該当すると考えられる。Fig. 1.1.1-32に核融合炉建家を示す。

Table 1.1.1-1 Plasma Parameters

Items	Type	Option C
Major radius	R (m)	4.92
Plasma radius	a (m)	1.32
Aspect ratio	A	3.7
Elongation	κ	1.7
Triangularity	δ	0.2
Toroidal Field	B_T (T)	4.68
Plasma Current	I_P (MA)	8.69
Temperature	T (keV)	12.0
Beta Total	β_T (%)	4.94
Beta DT	β_{DT} (%)	4.02
Electron density	n_e (m^{-3})	1.09×10^{20}
Ion density	n_i (m^{-3})	0.98×10^{20}
Safety Factors	q_ψ	2.6
	q_I	1.98
Fusion Power	p_f (MW)	45.9
Wall load	p_w (MW/m ²)	1.03

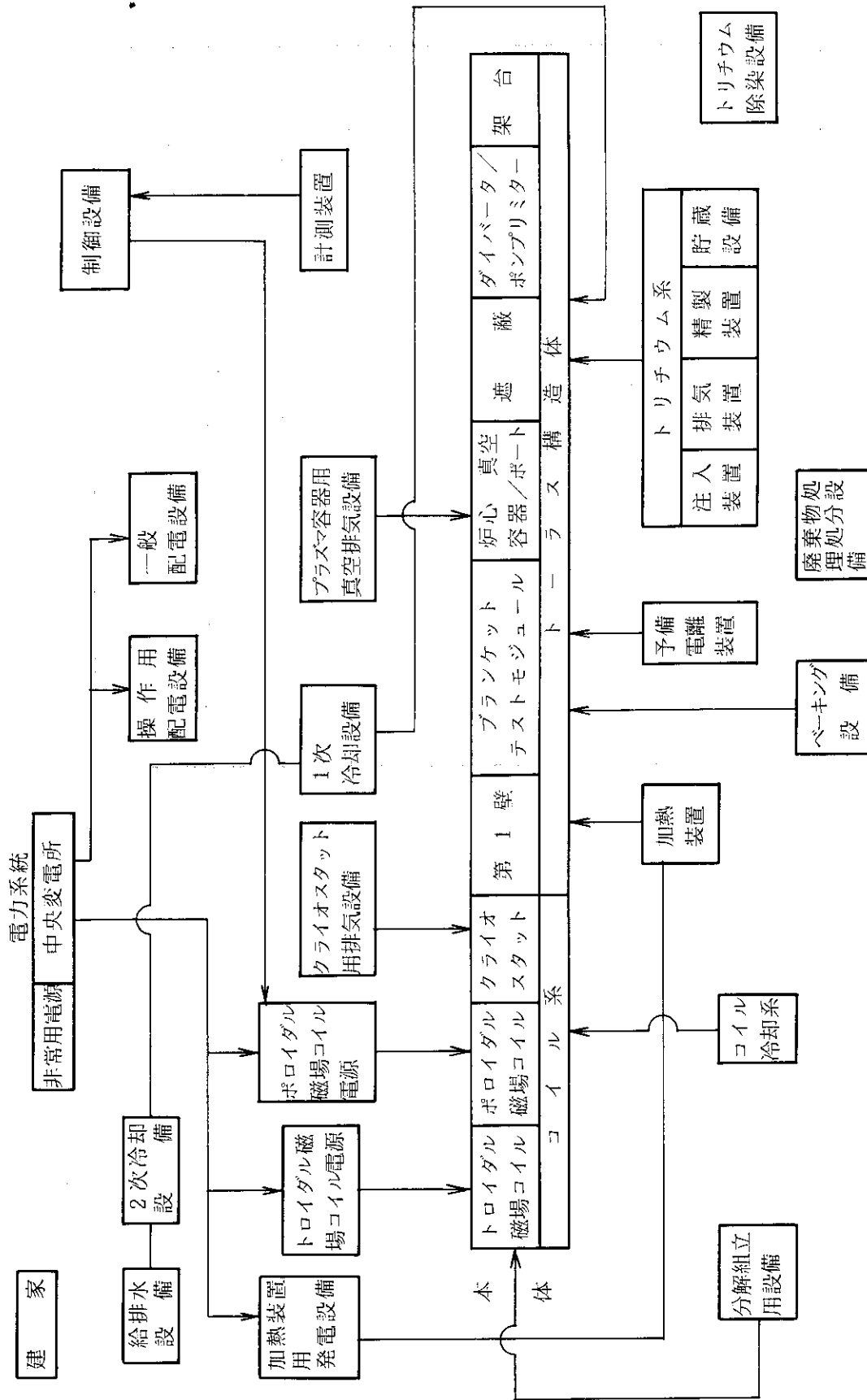


Fig. 1.1.1-1 Plant System Block Diagram

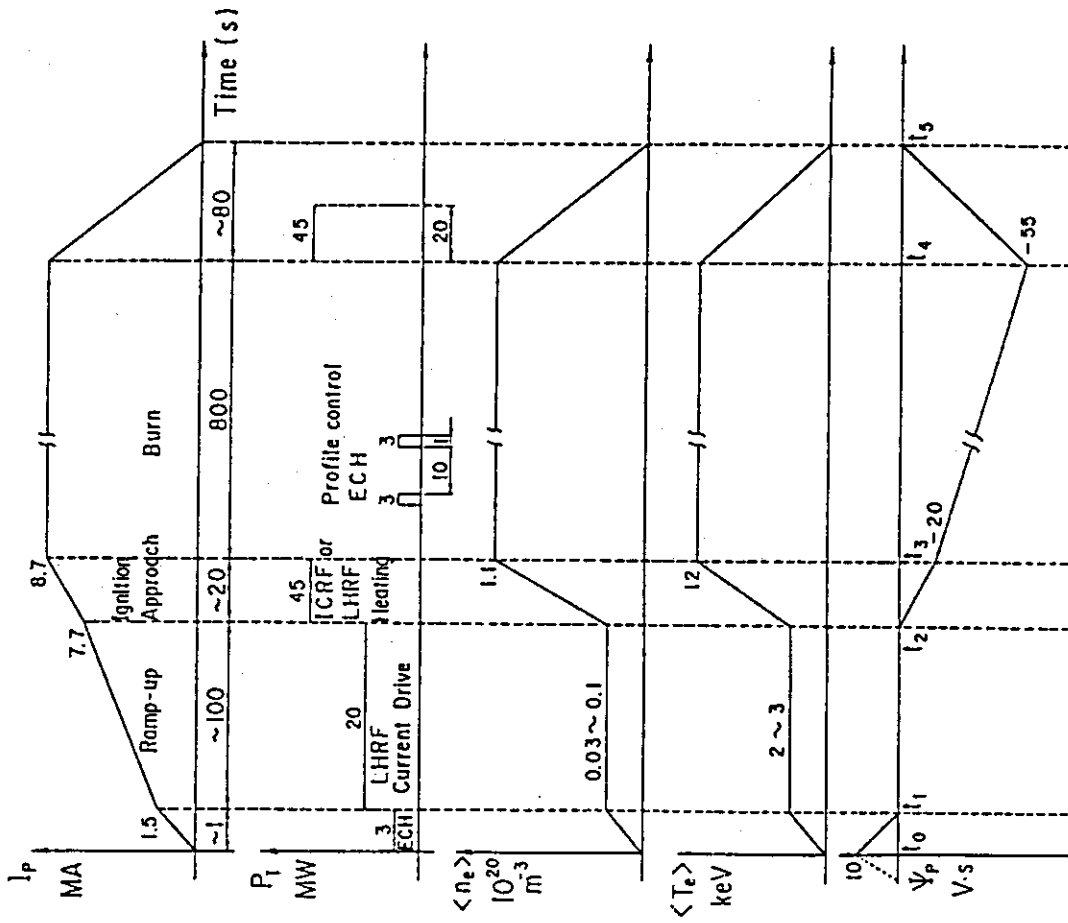
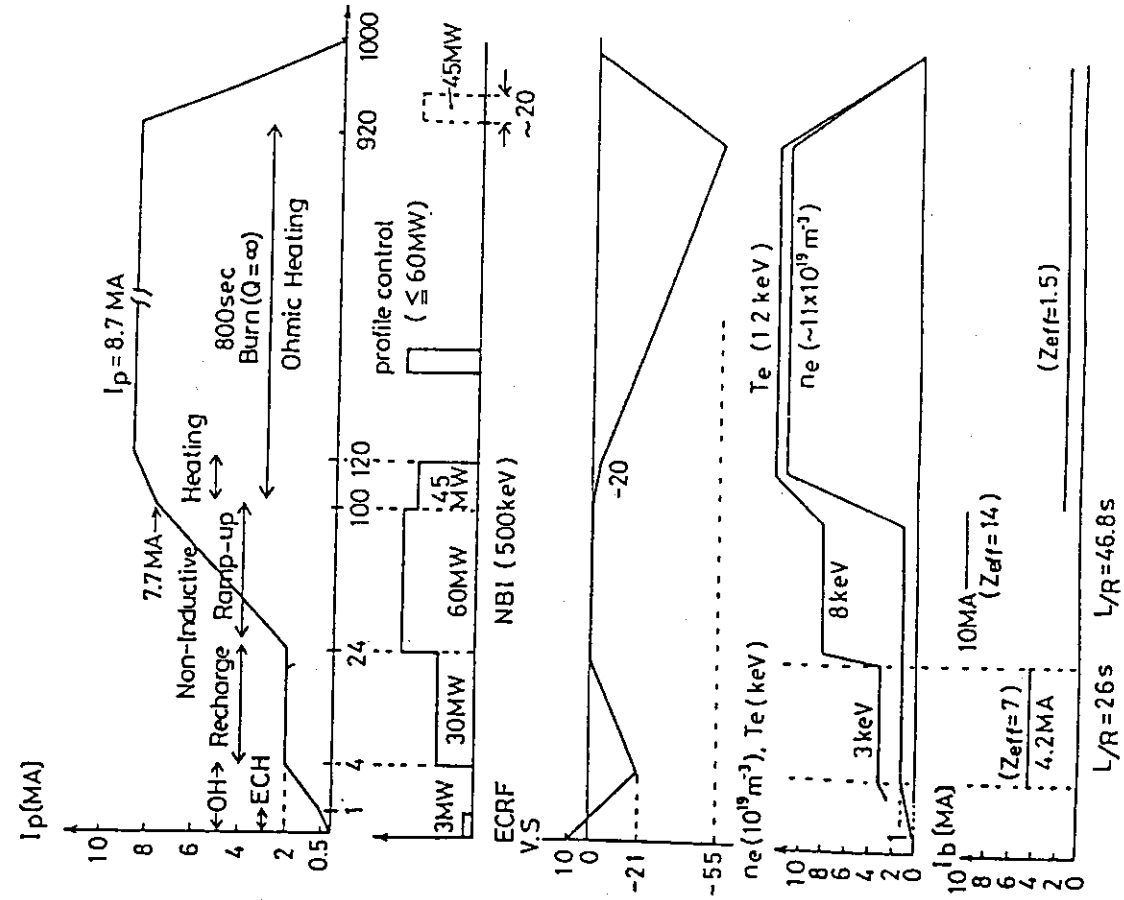


Fig. I.I.1-2 Operation Scenario (Option C)

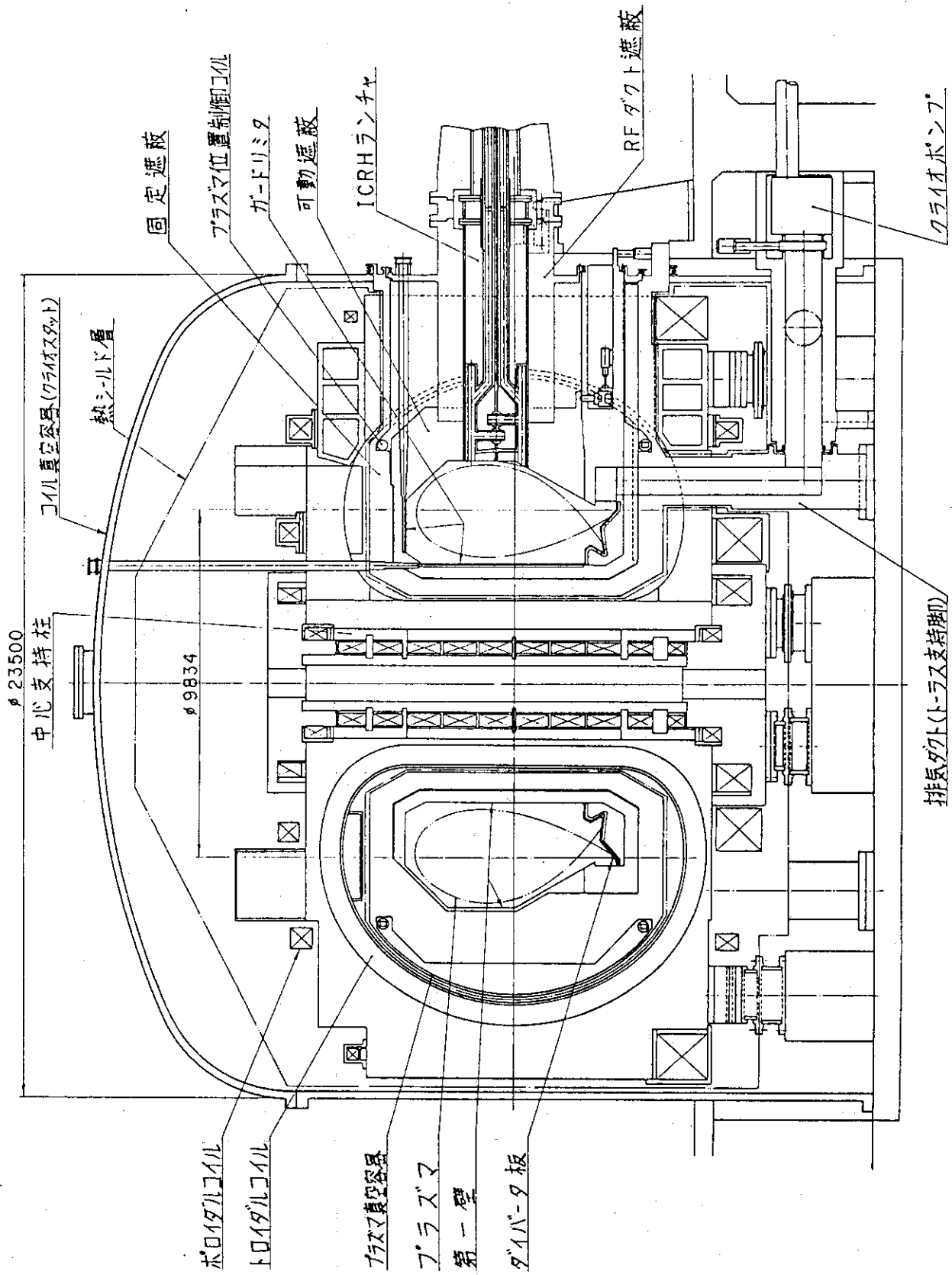


Fig. 1.1.1-3 FER Option C Type

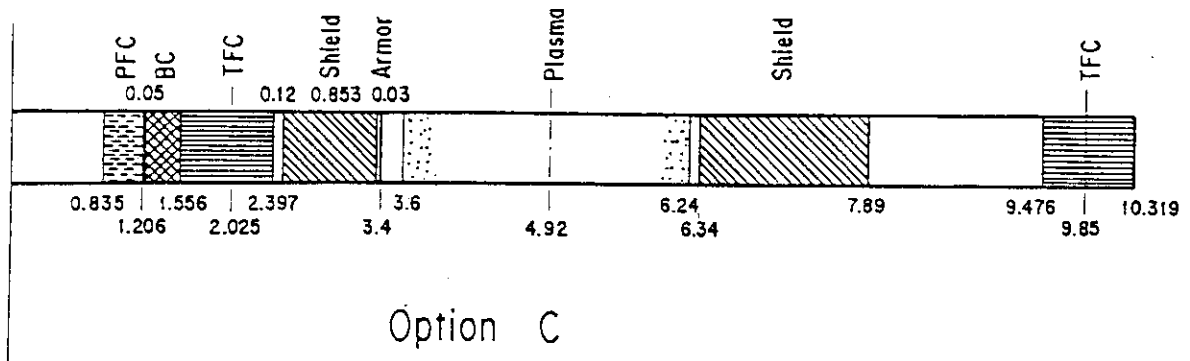


Fig. 1.1.1-4 FER Radial Build

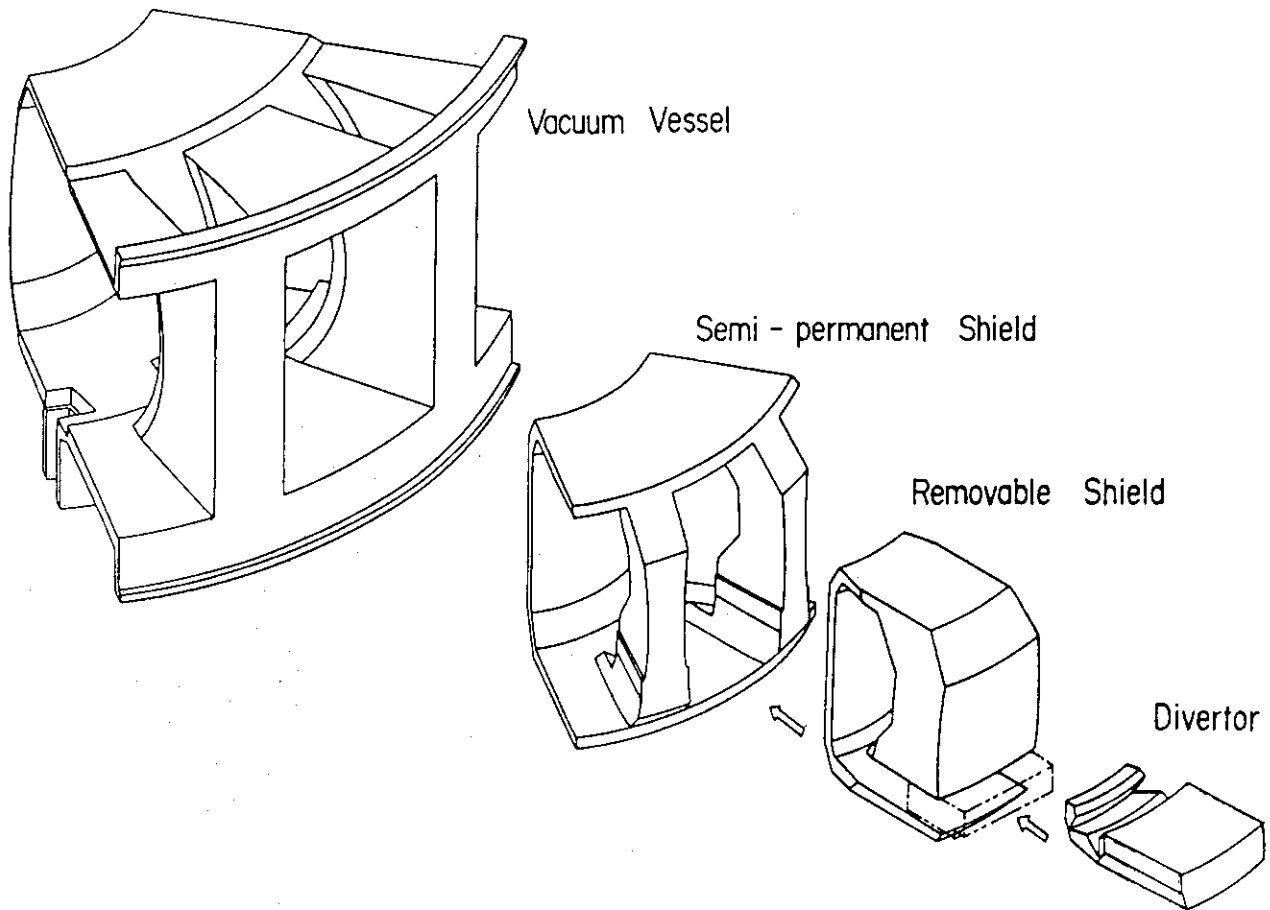


Fig. 1.1.1-5 Configuration of Reactor Structure

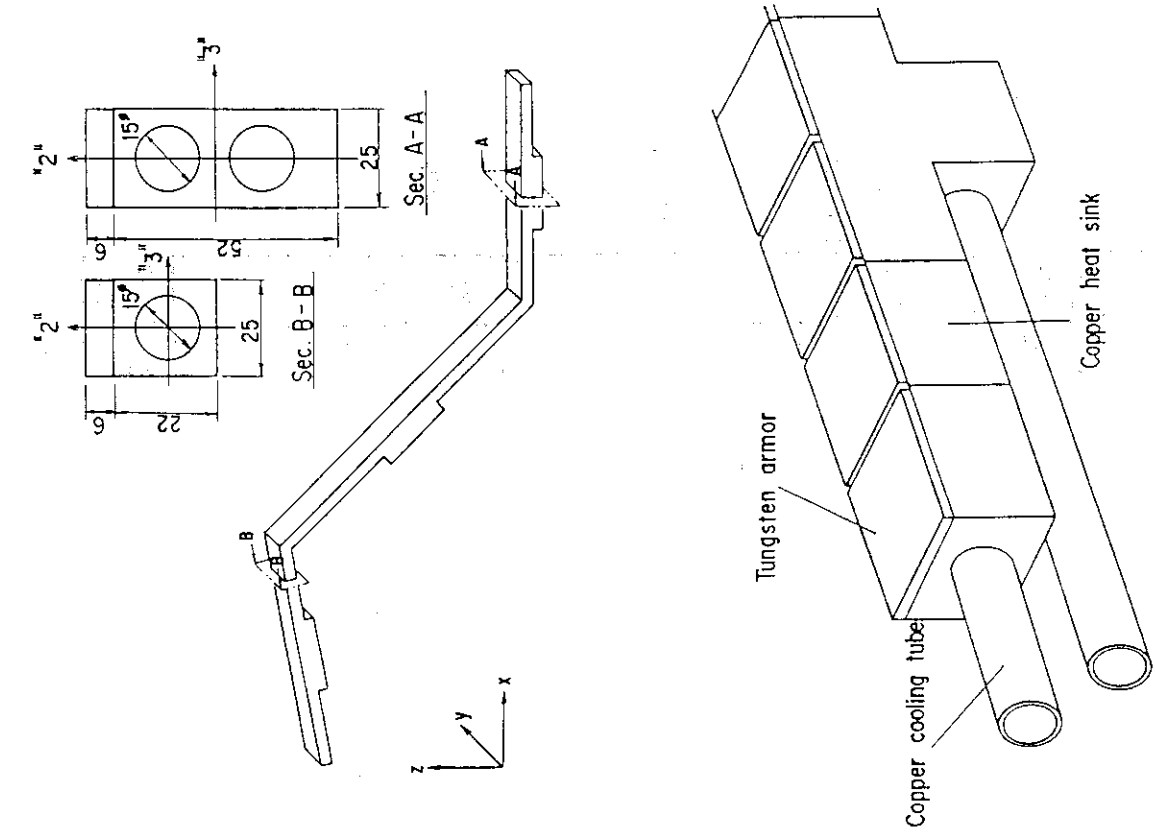


Fig. 1.1.1-7 Configurations of Divertor Collector Plate

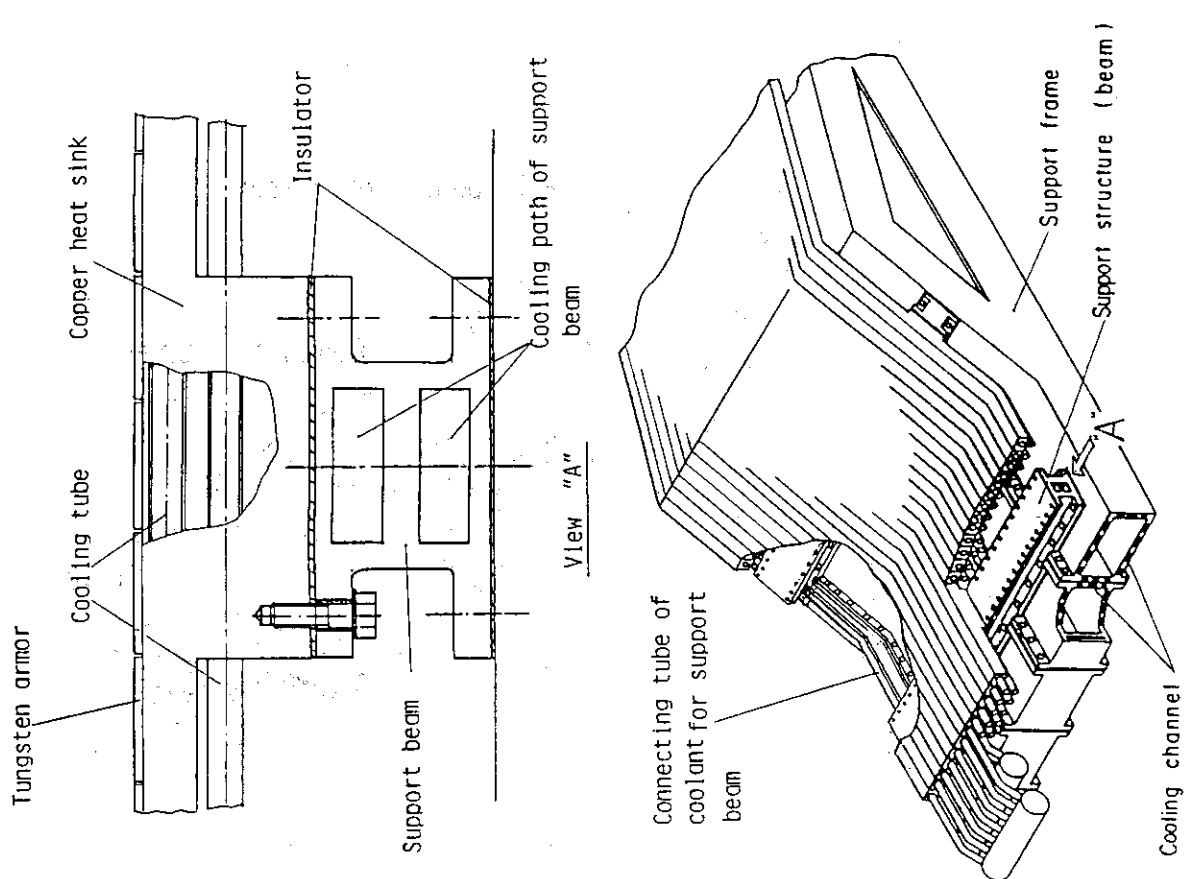


Fig. 1.1.1-6 Support Structures of Divertor Plates

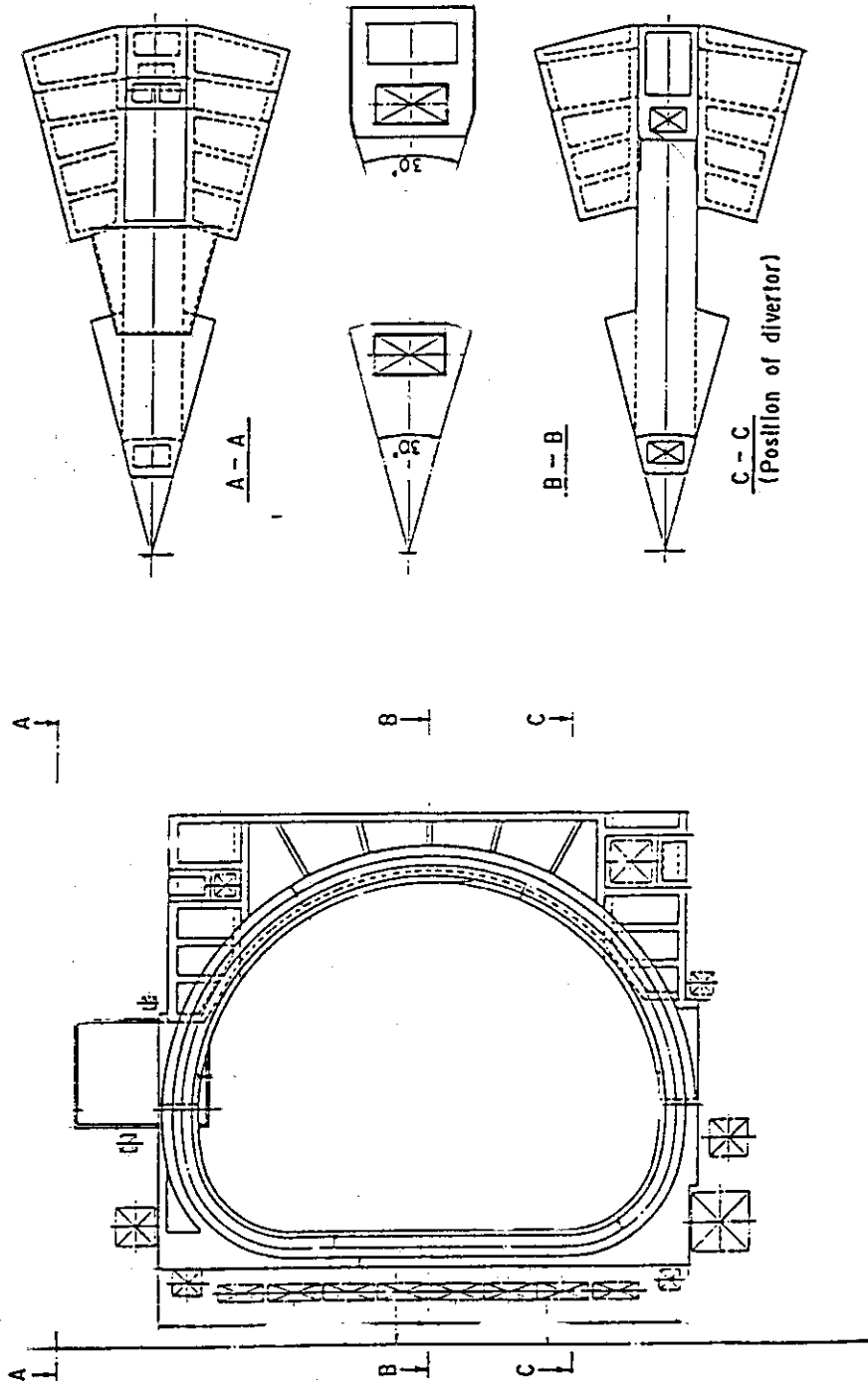
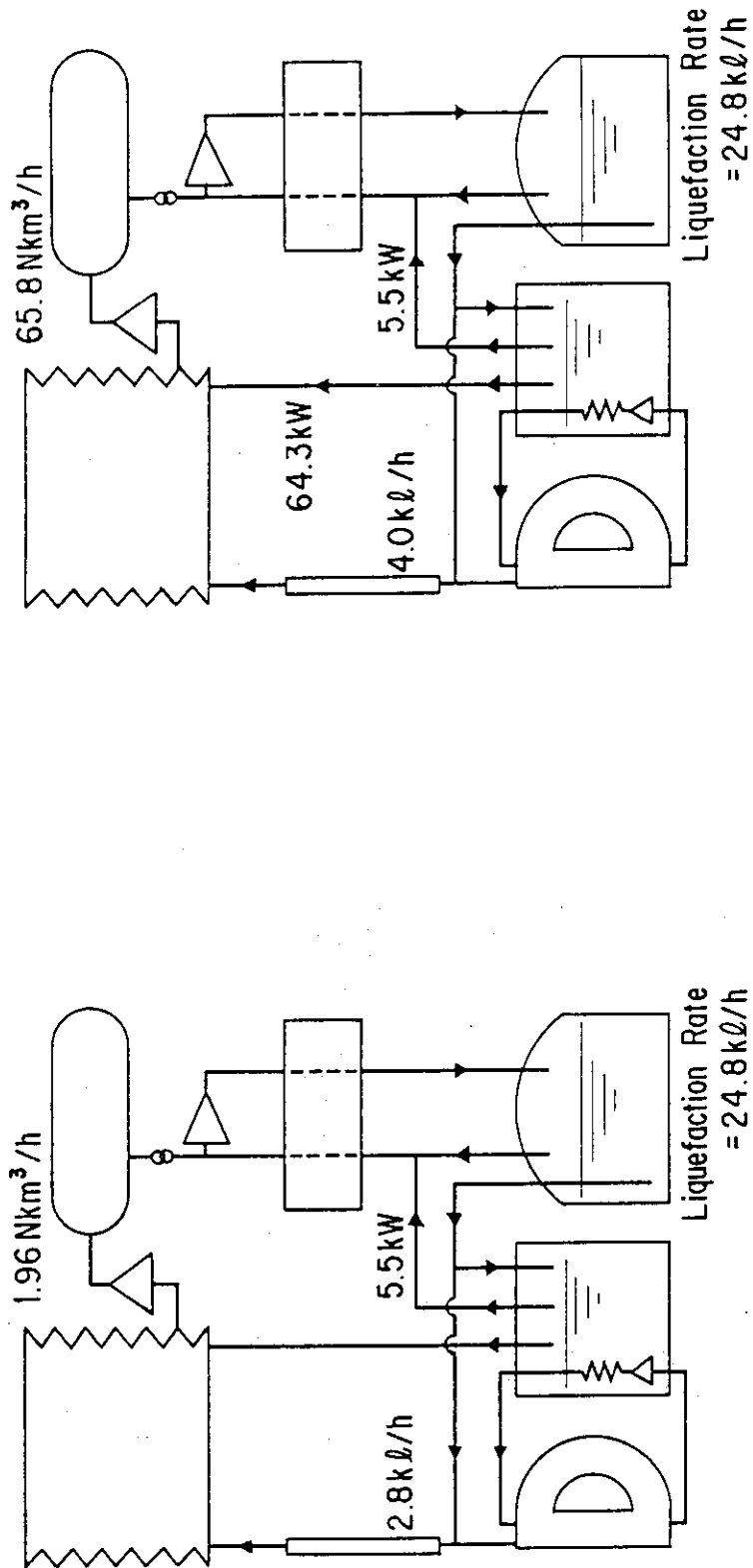


Fig. I.I.1-8 TF Coil Structure for the Advanced Type FER



(a) Non - Burn Phase

(b) Burn Phase

Fig. 1.1.1-9 Liquefaction System

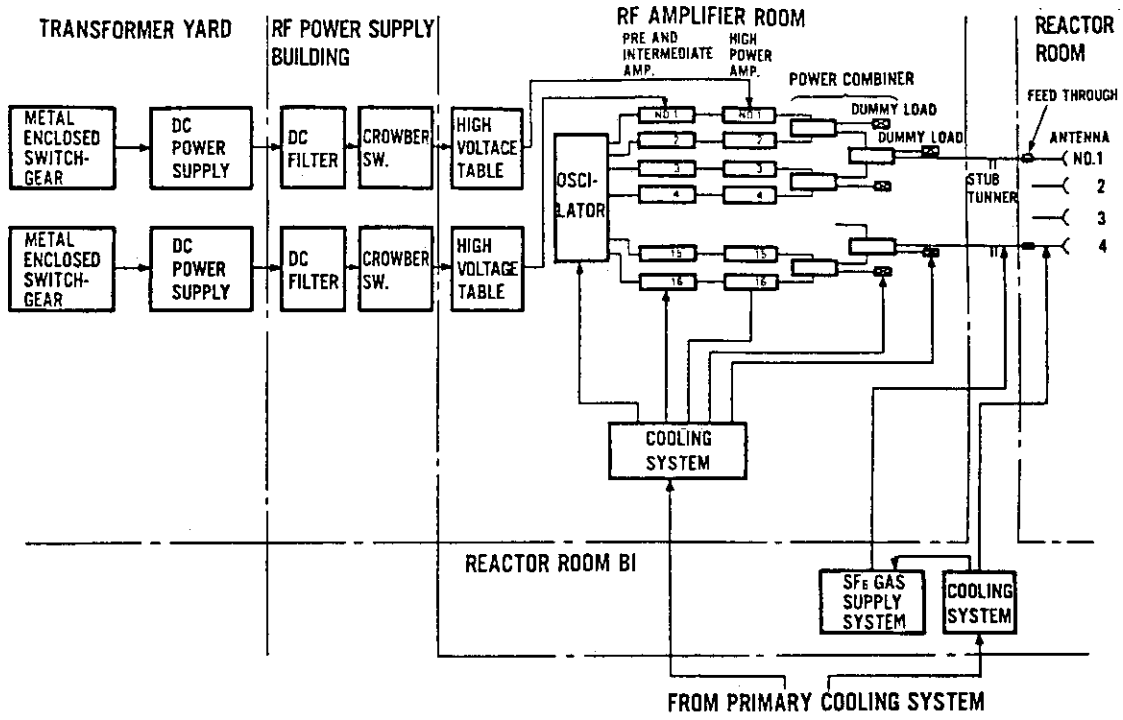


Fig. 1.1.1-10 ICRF Power Supply and Transmission System

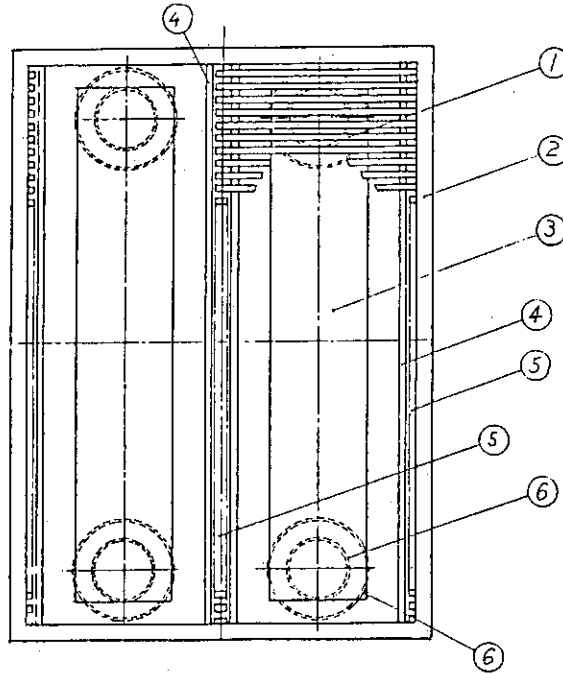


Fig. 1.1.1-11 ICRF Launcher

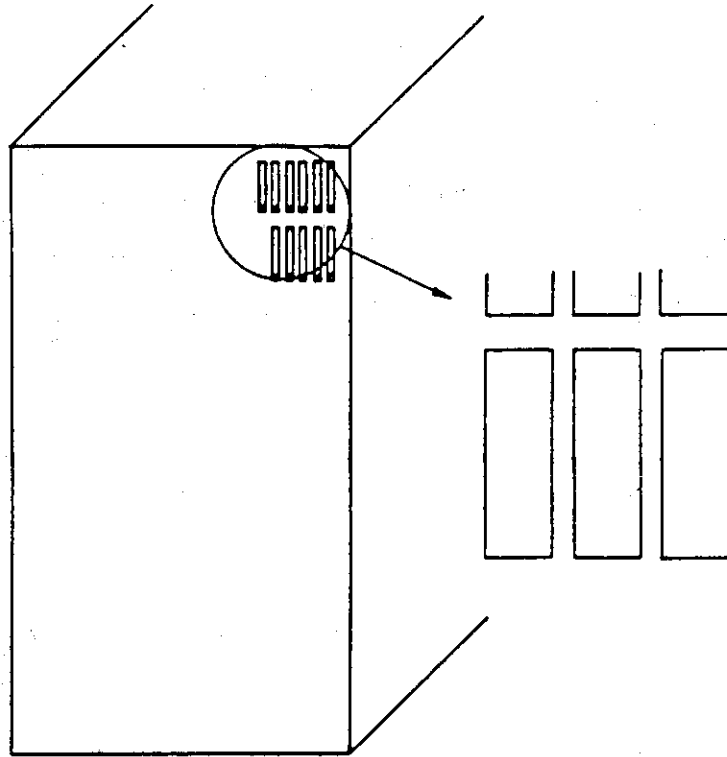


Fig. 1.1.1-12 Simplified Schematics of the Launching System for LHRF Heating.

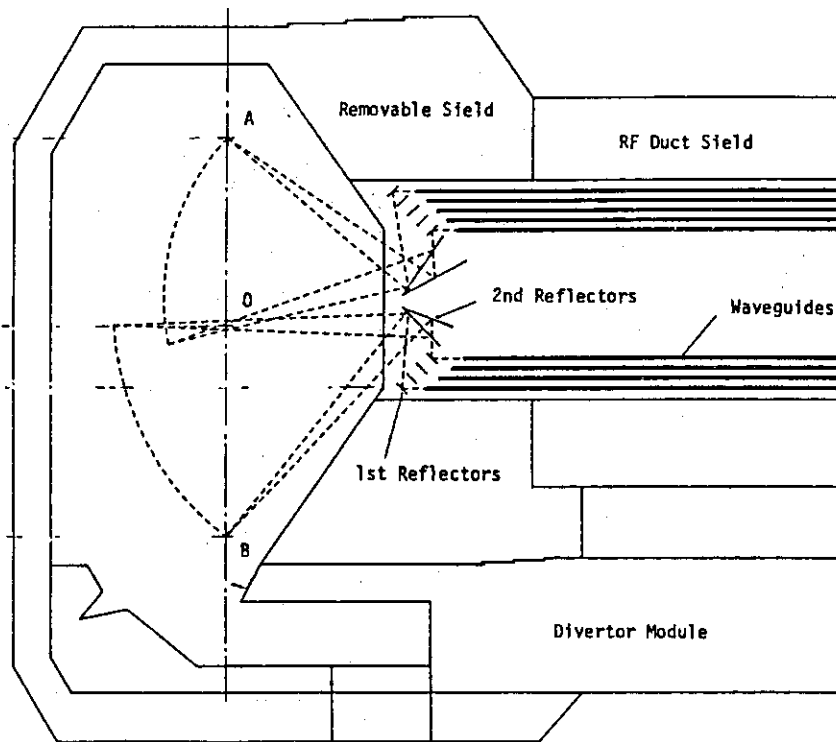


Fig. 1.1.1-13 Geometry of ECRF Launcher
(JAERI-M86-134, P460より引用)

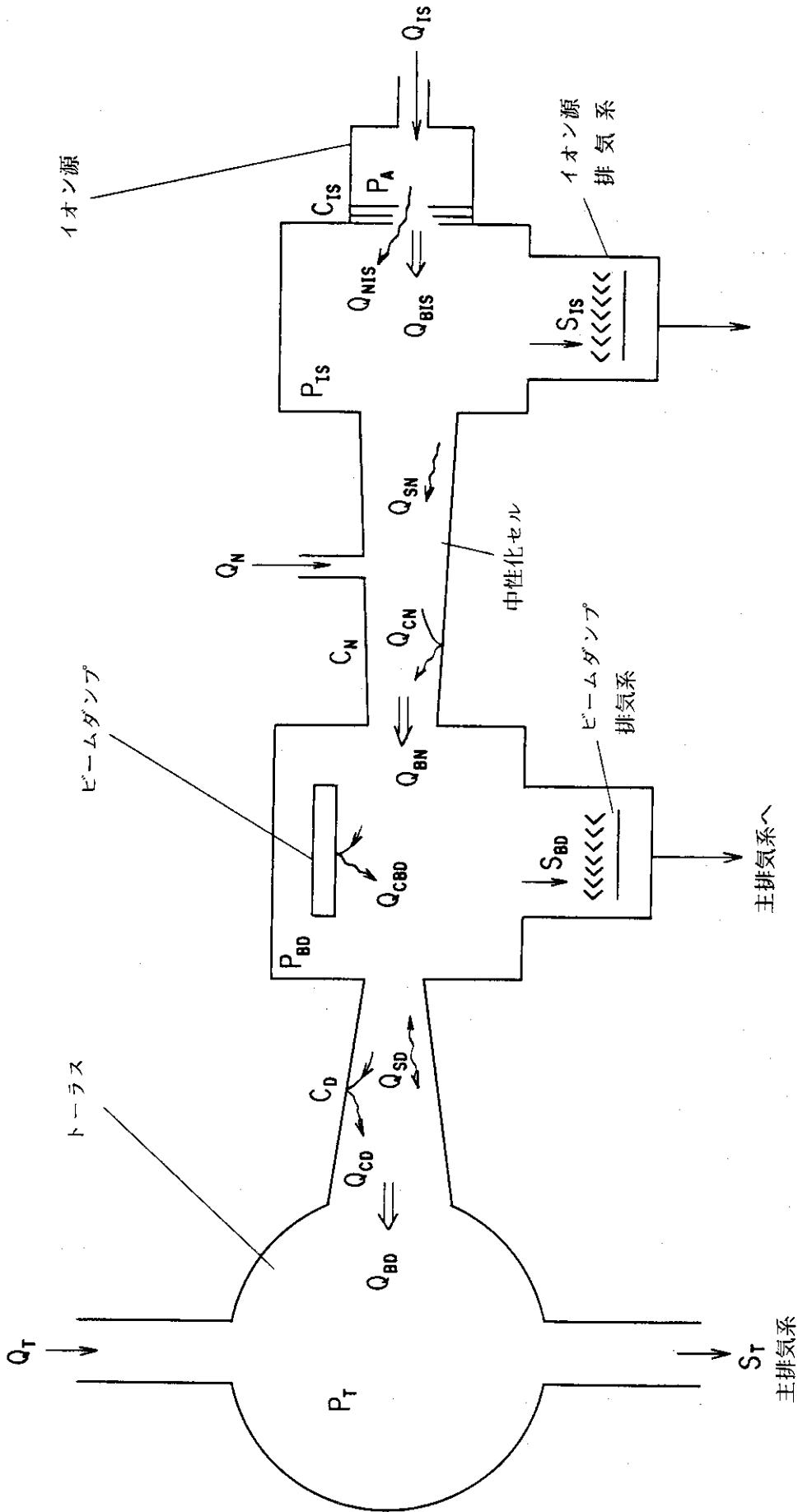


Fig. 1.1.1-14 Schematic of Negative Ion Source NBI

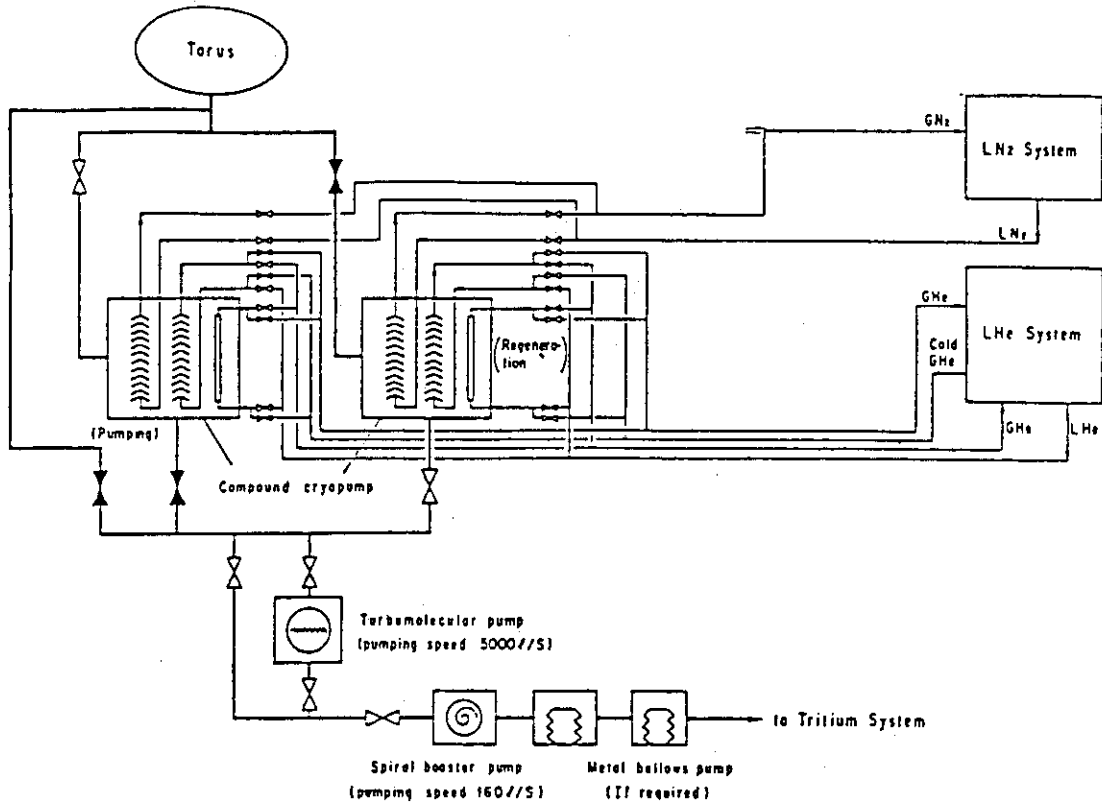


Fig. 1.1.1-15 Vacuum Pumping System:Active Charcoal Cryopanel is used for He gas Pumping.

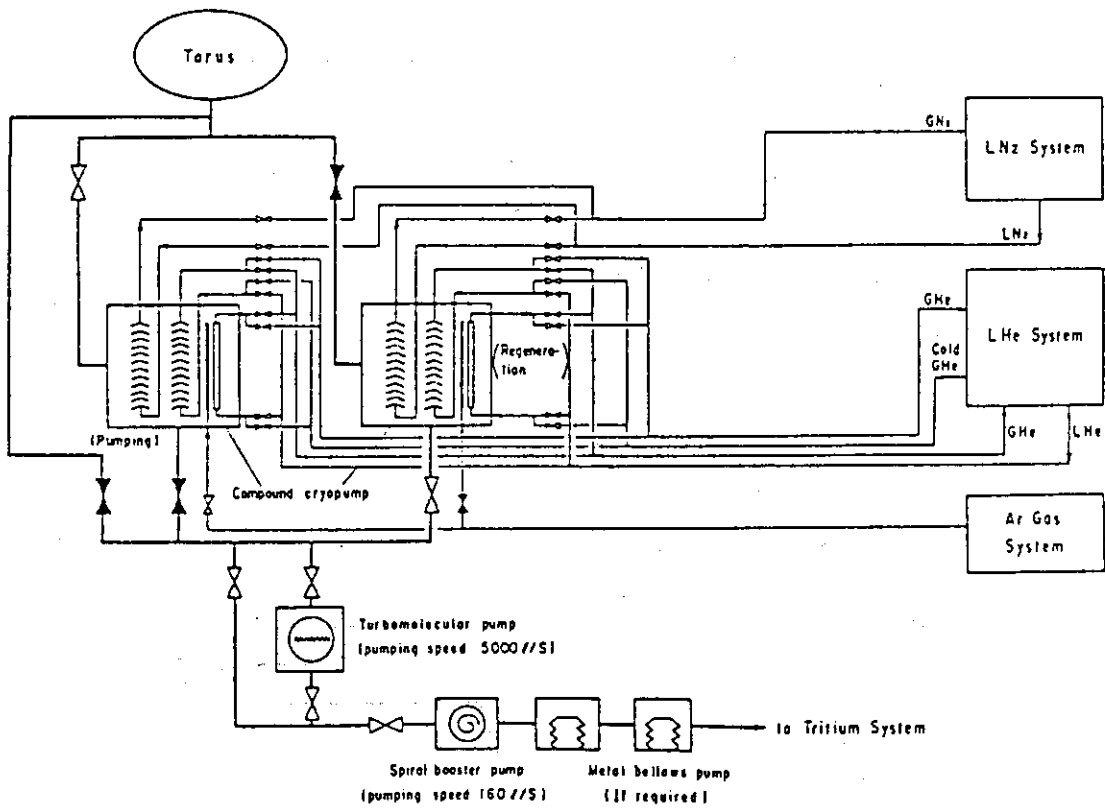


Fig. 1.1.1-16 Vacuum Pumping System:Ar gas Trapping Panel is used for He gas Pumping.

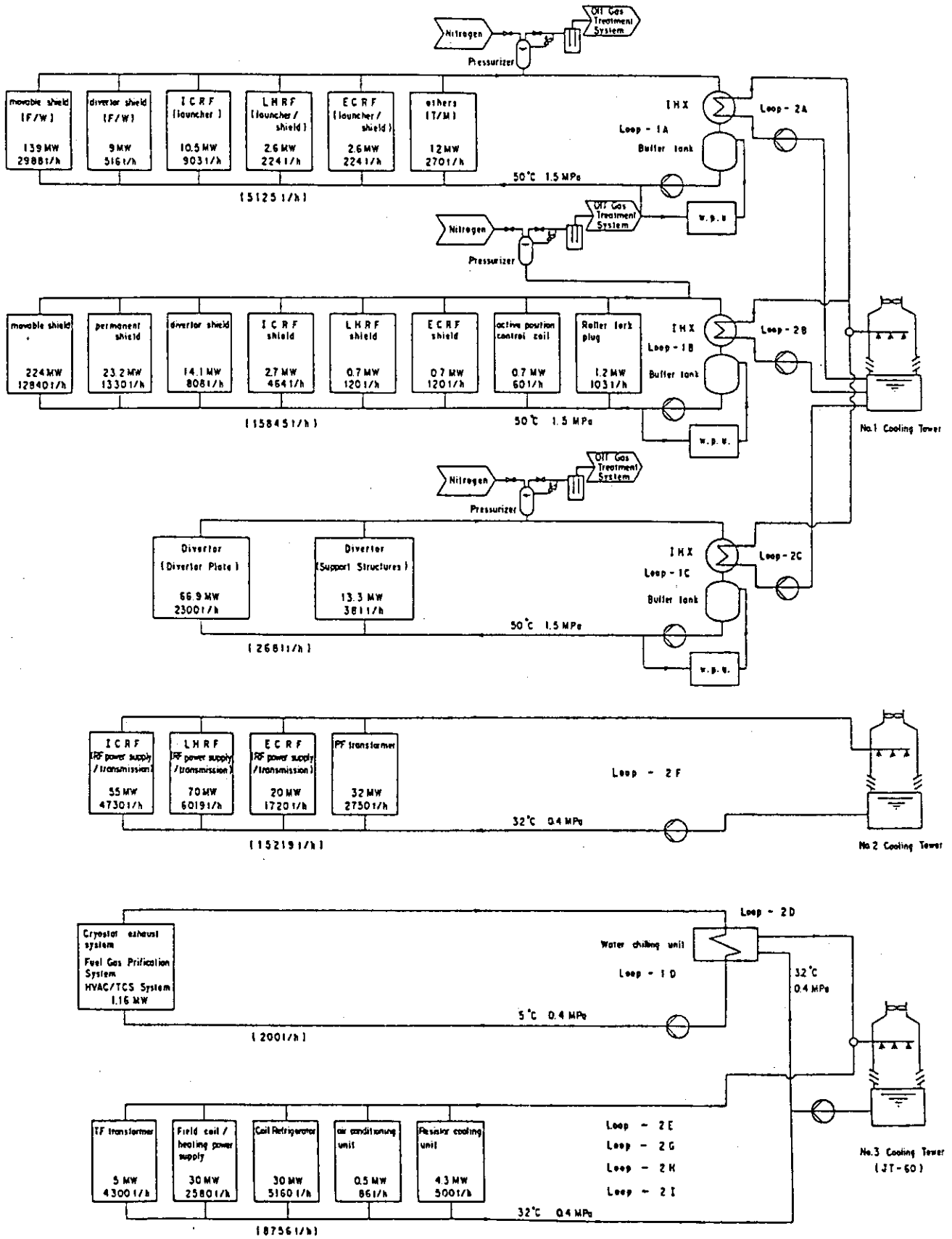


Fig. 1.1.1-17 Flow Diagram of FER Cooling System

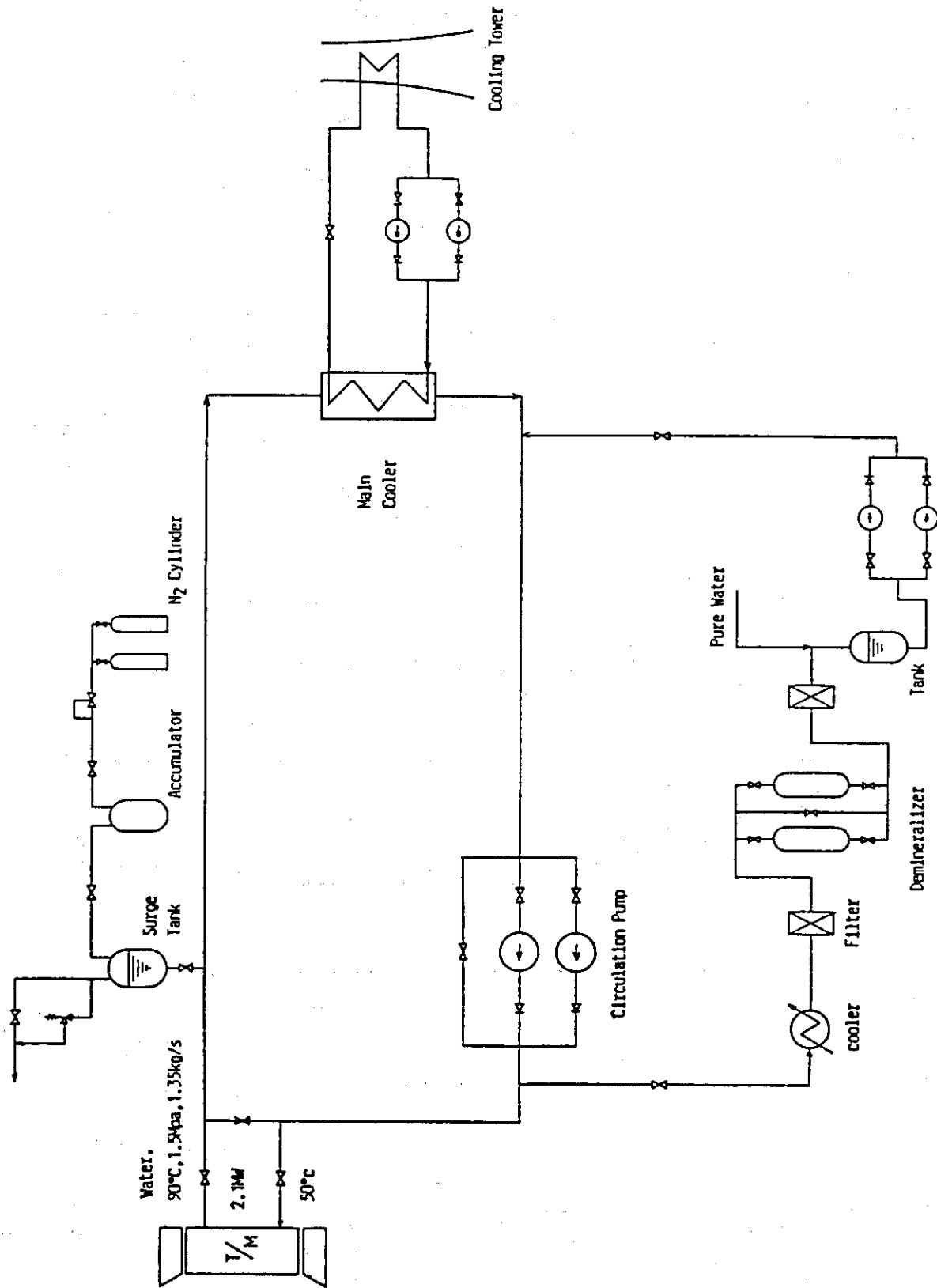


Fig. 1.1.1-18 Flow Diagram of low-temperature Test Module (A) Cooling System.

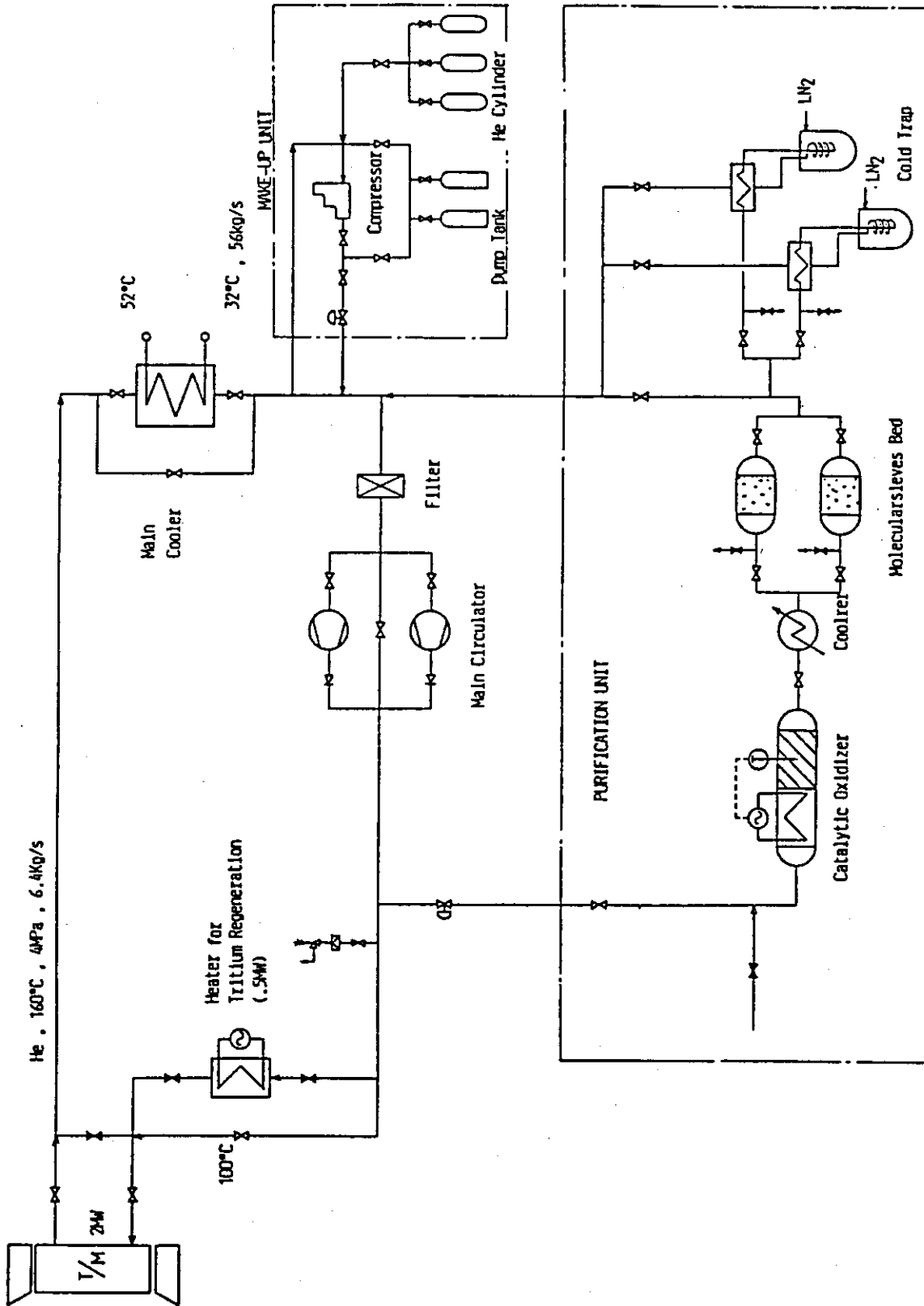


Fig. 1.1.1-19 Flow Diagram of low-temperature Test Module (B) Cooling System

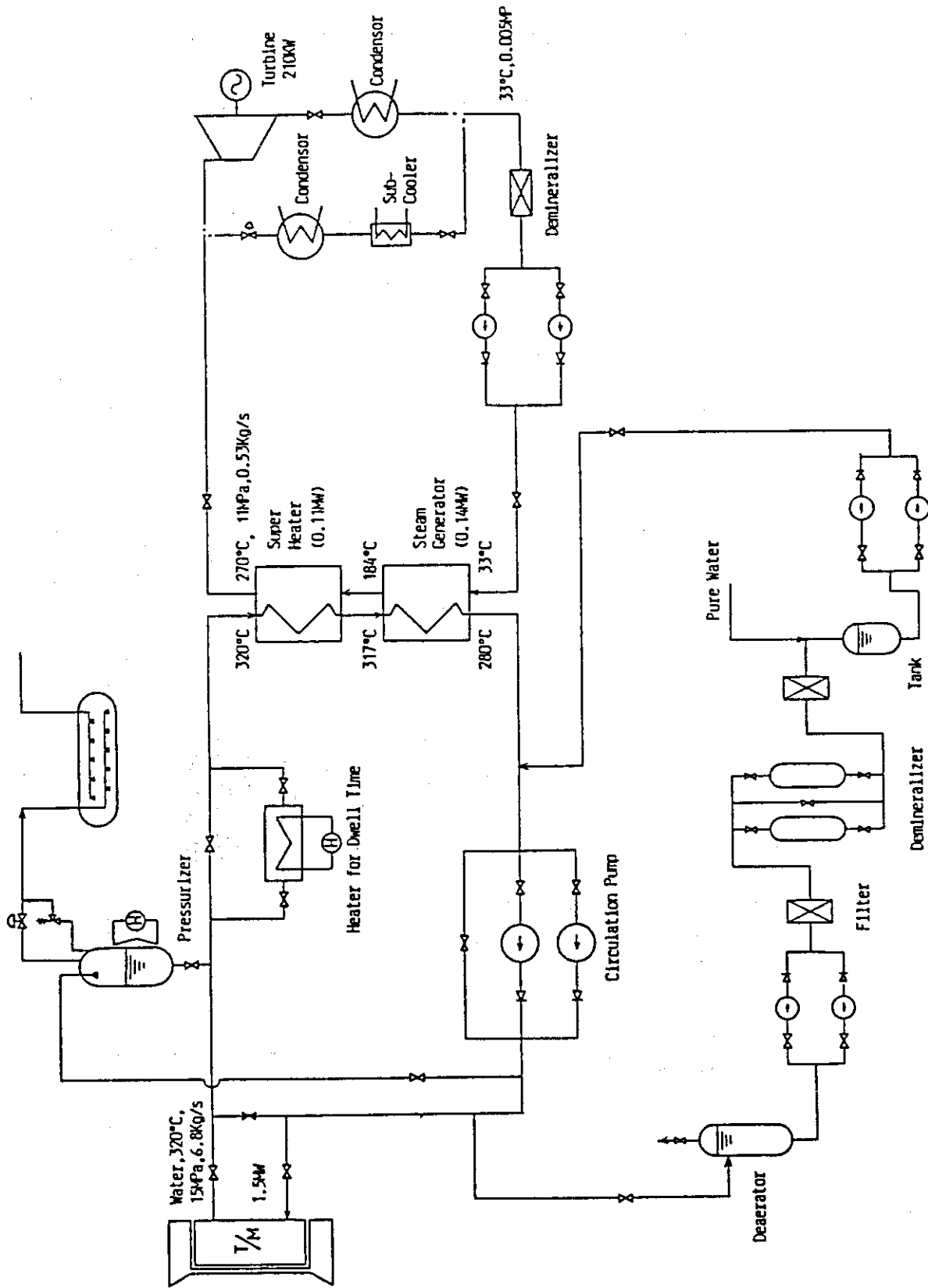


Fig. 1.1.1-20 Flow Diagram of high-temperature Test Module Cooling System

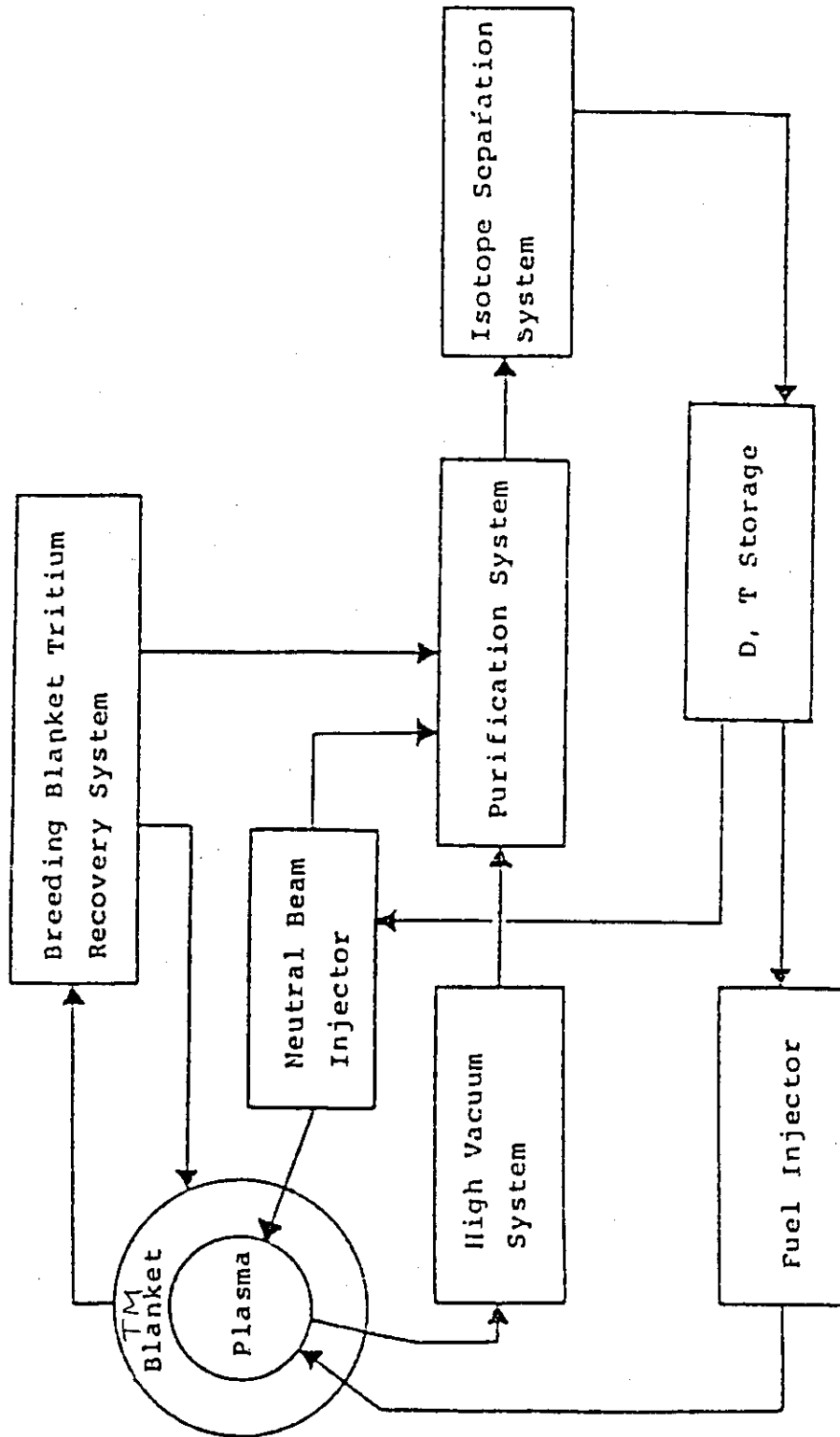


Fig. 1.1.1-21 Schematic Diagram of the Tritium Processing System.

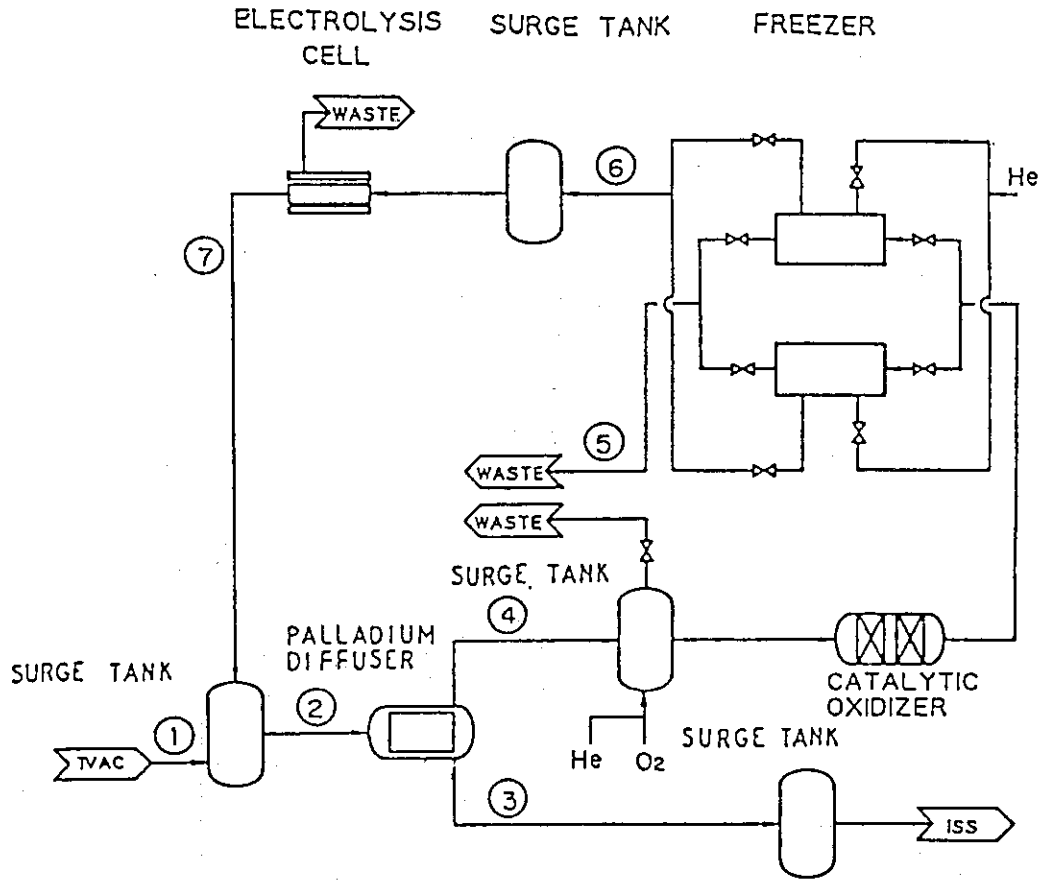


Fig. 1.1.1-22 FUEL Gas Purification System.

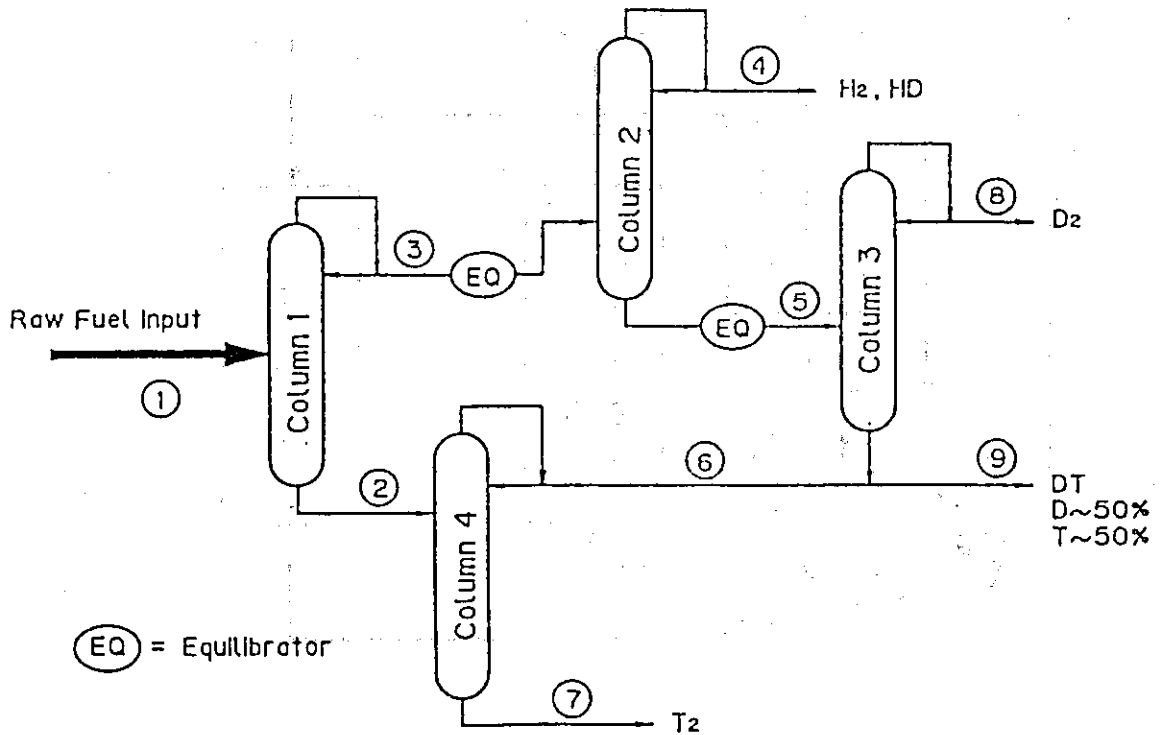


Fig. 1.1.1-23 FUEL Gas Isotope Separation System.

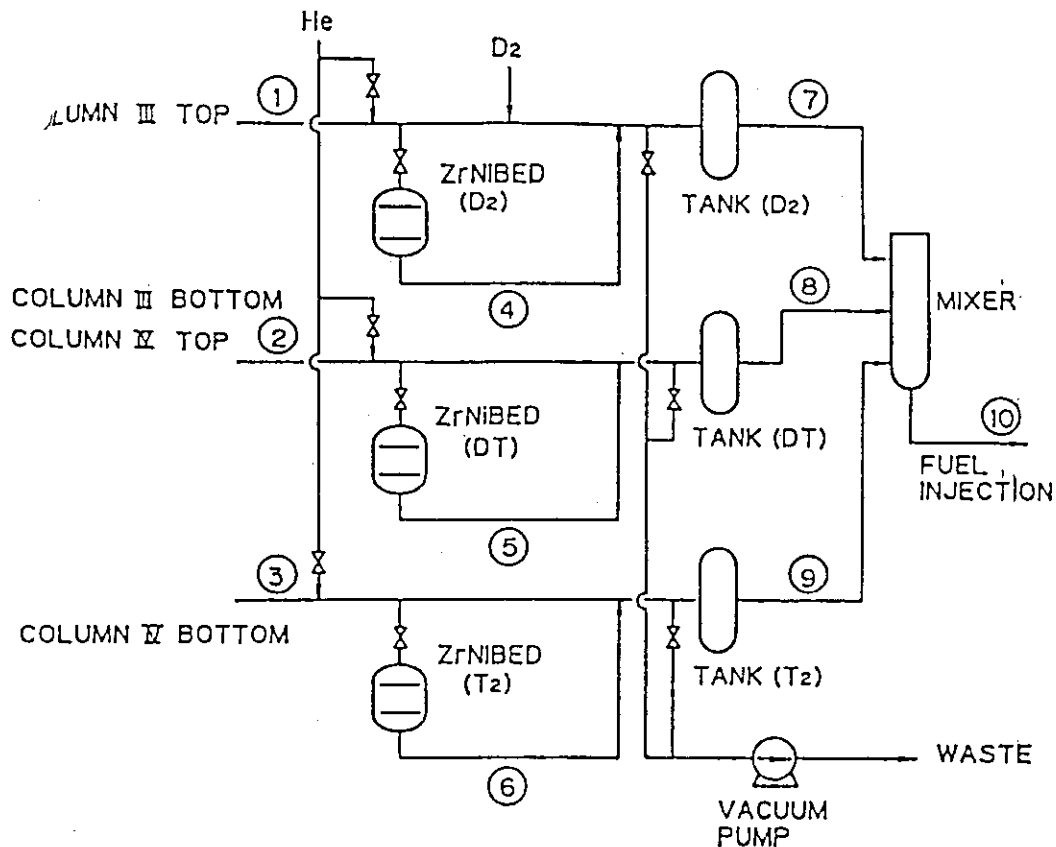


Fig. 1.1.1 -24 FUEL Gas Storage System.

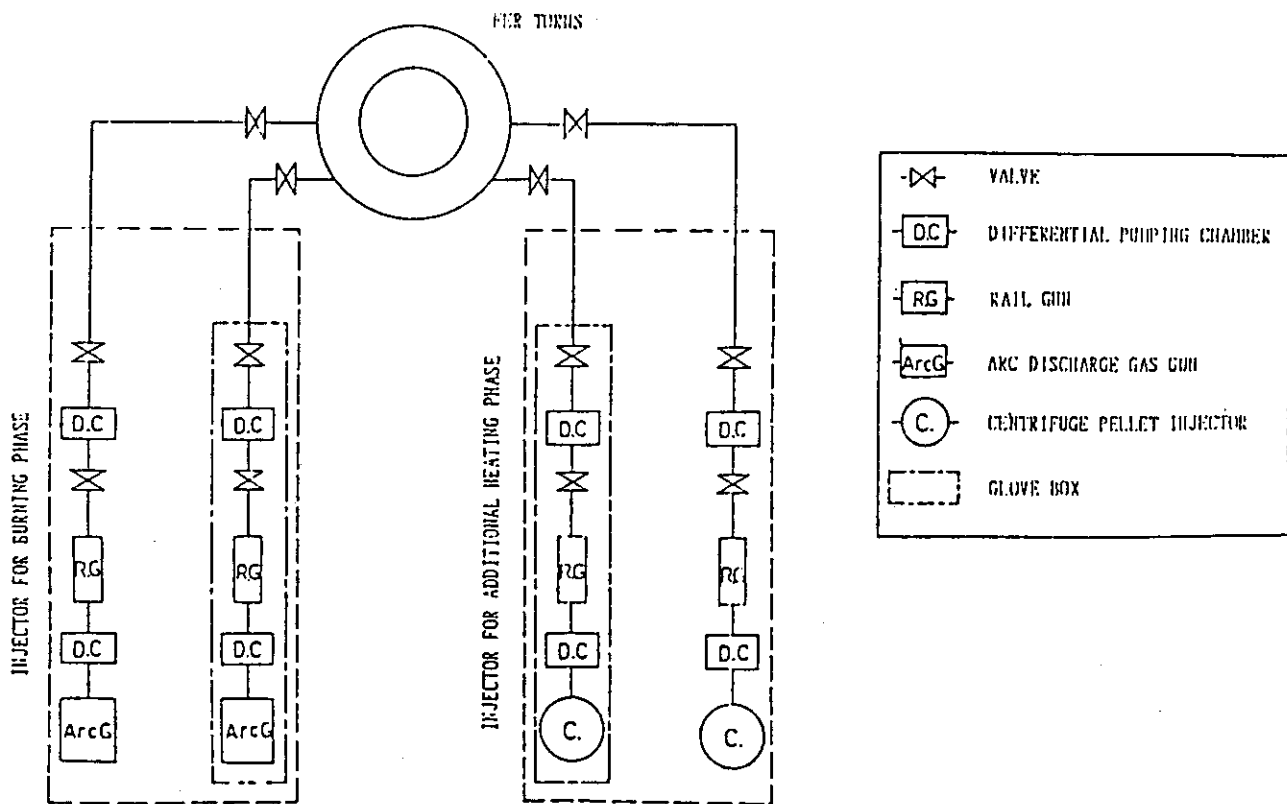


Fig. 1.1.1-25 Schematic Diagram of Fueling System.

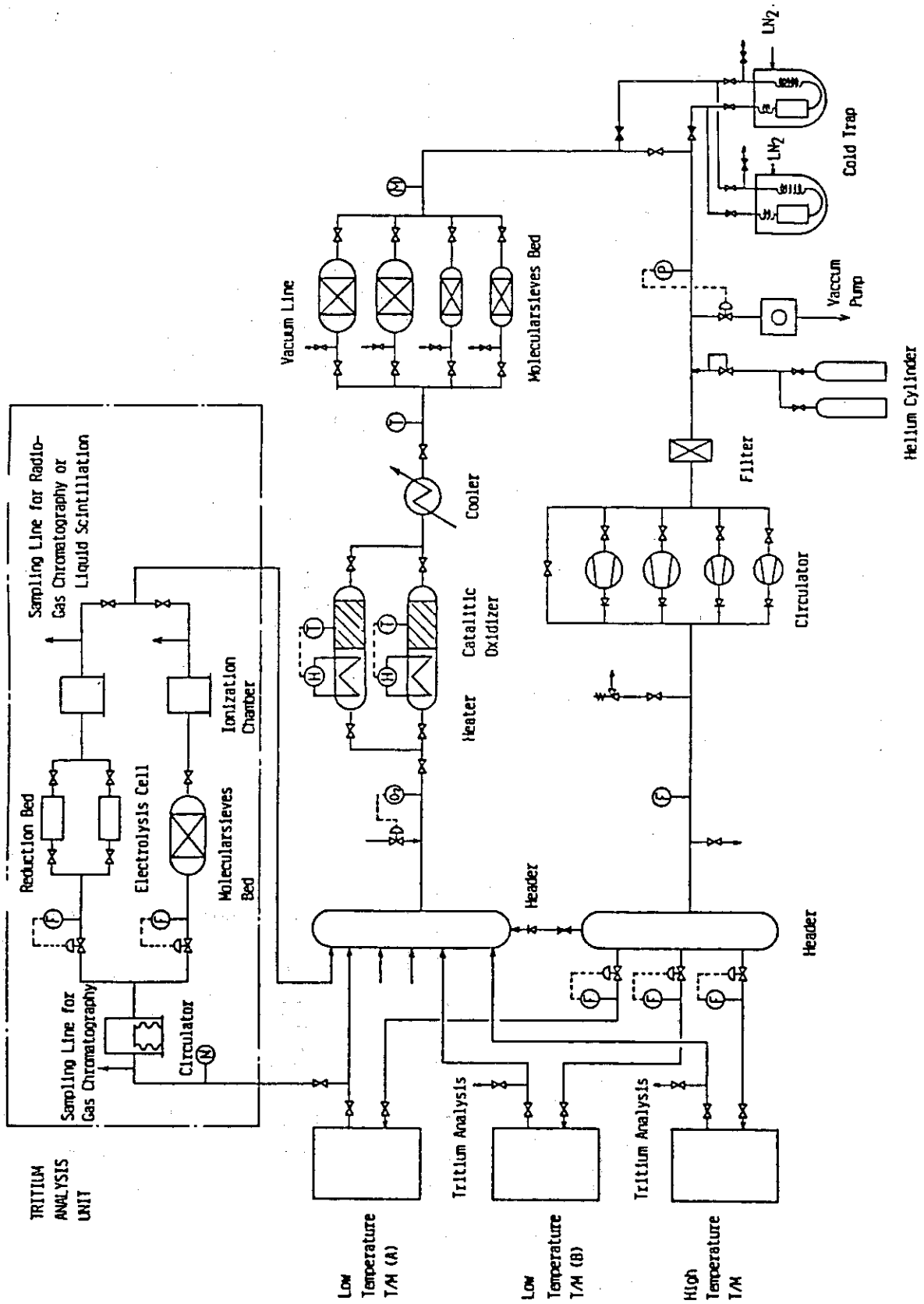


Fig. 1.1.1-26 Flow Diagram of Test Module Tritium Recovery System

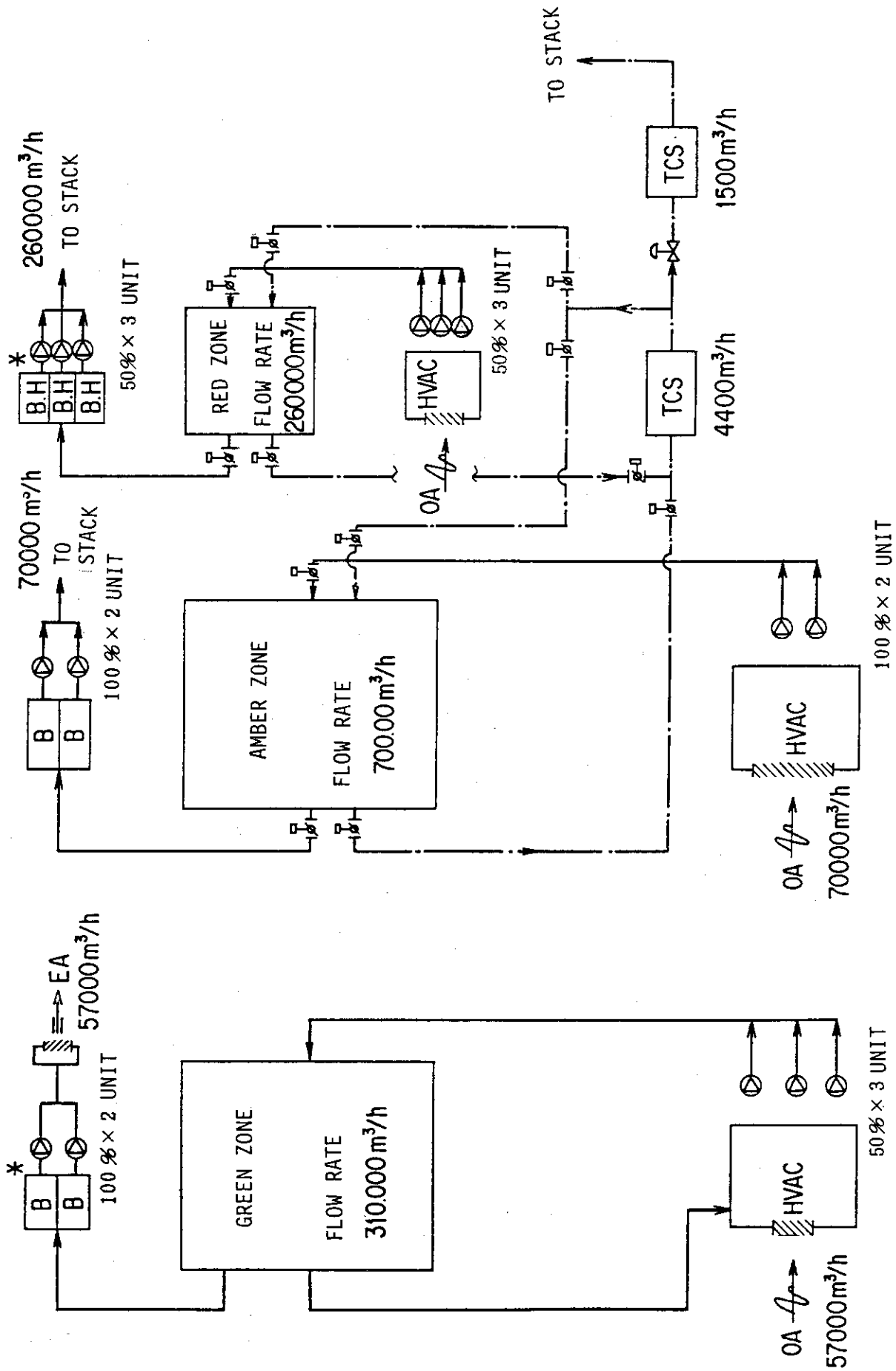


Fig. 1.1.1-27 Schematic Diagram of HVAC System

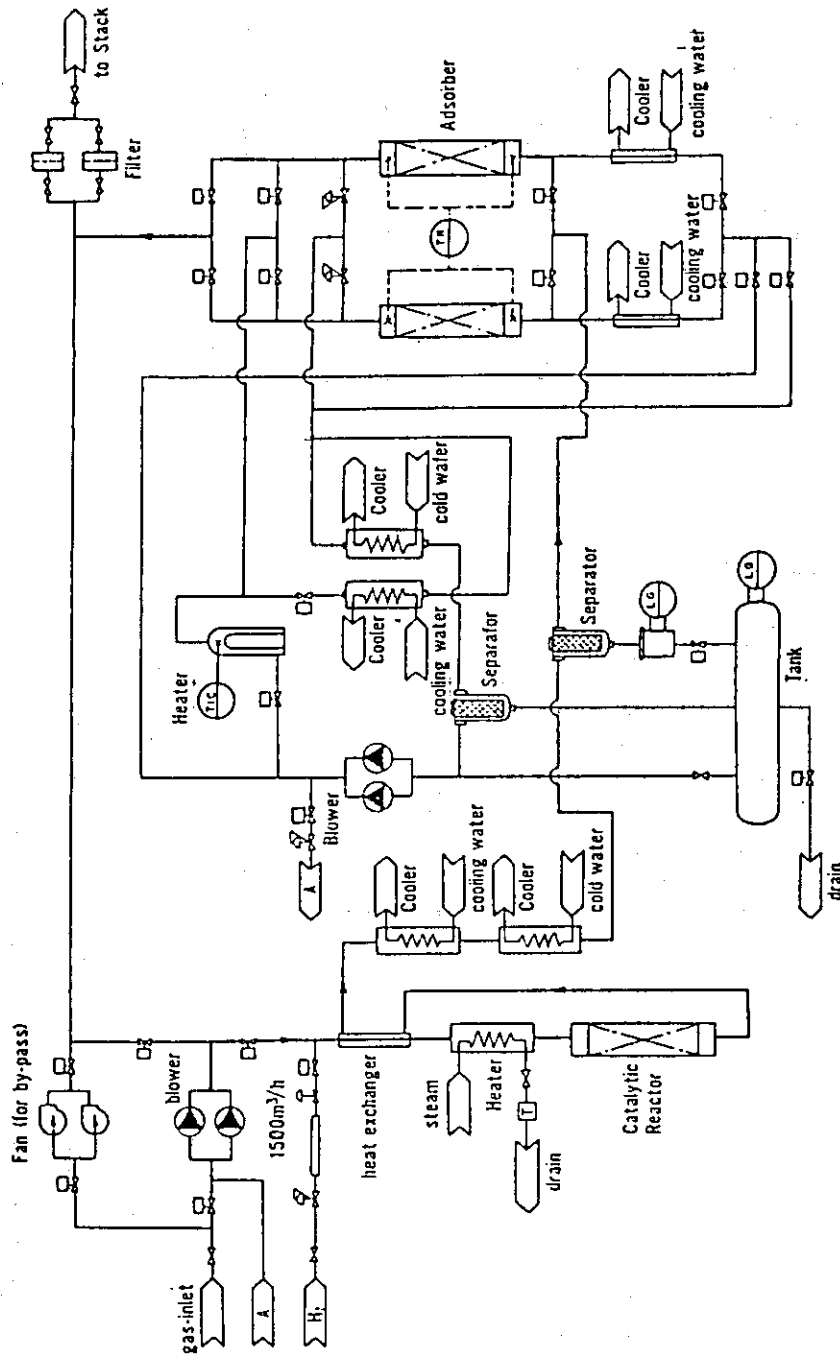


Fig. 1.1.1-28 TCS Flow Diagram (For Release to Environment)

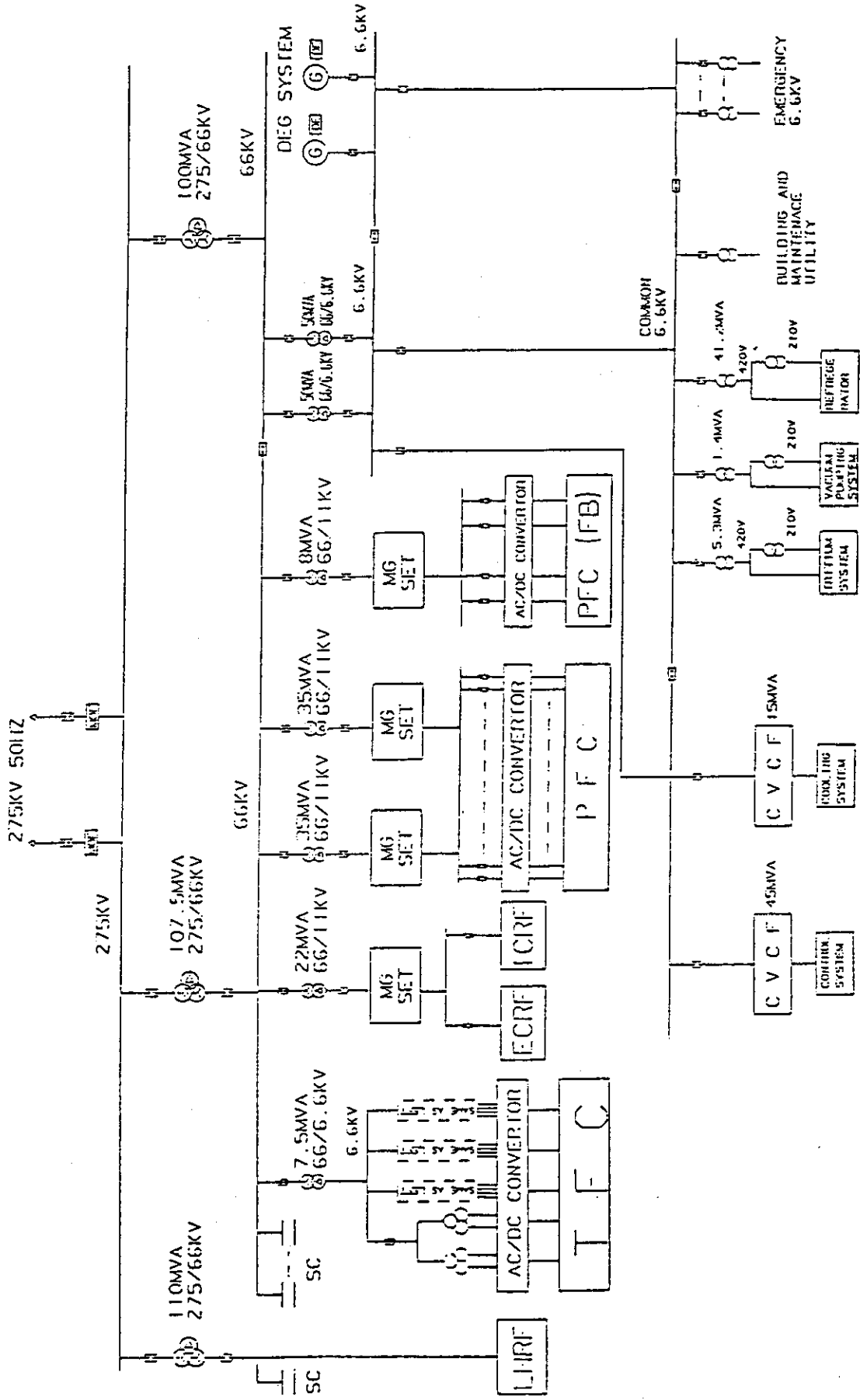


Fig. 1.1.1--29 One Line Diagrams of '86 FER

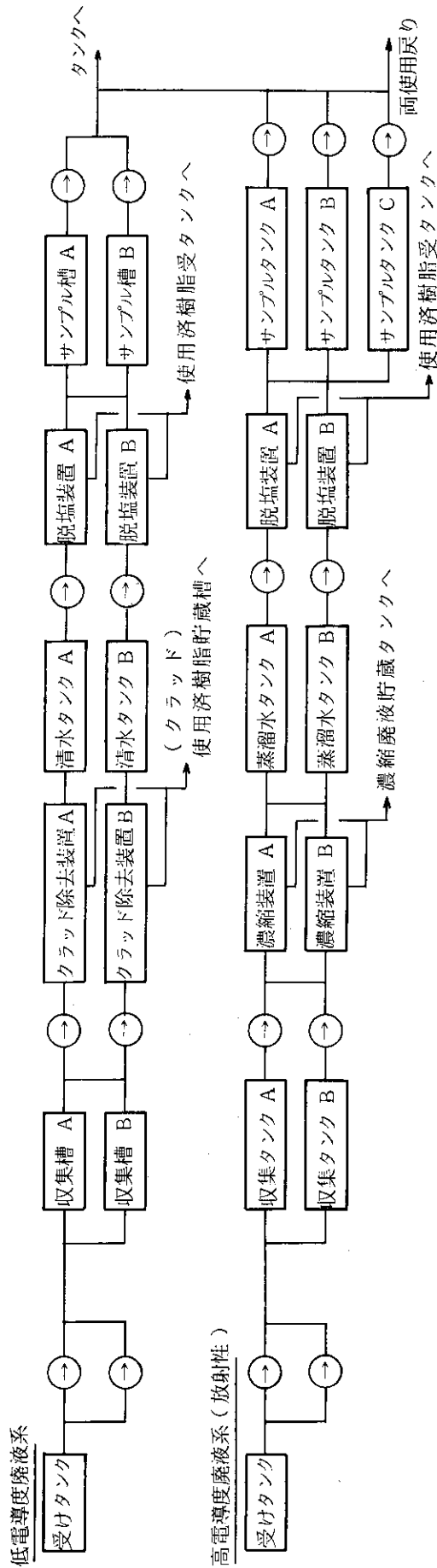


Fig. 1.1.1-30 Flow diagram of liquid waste treatment

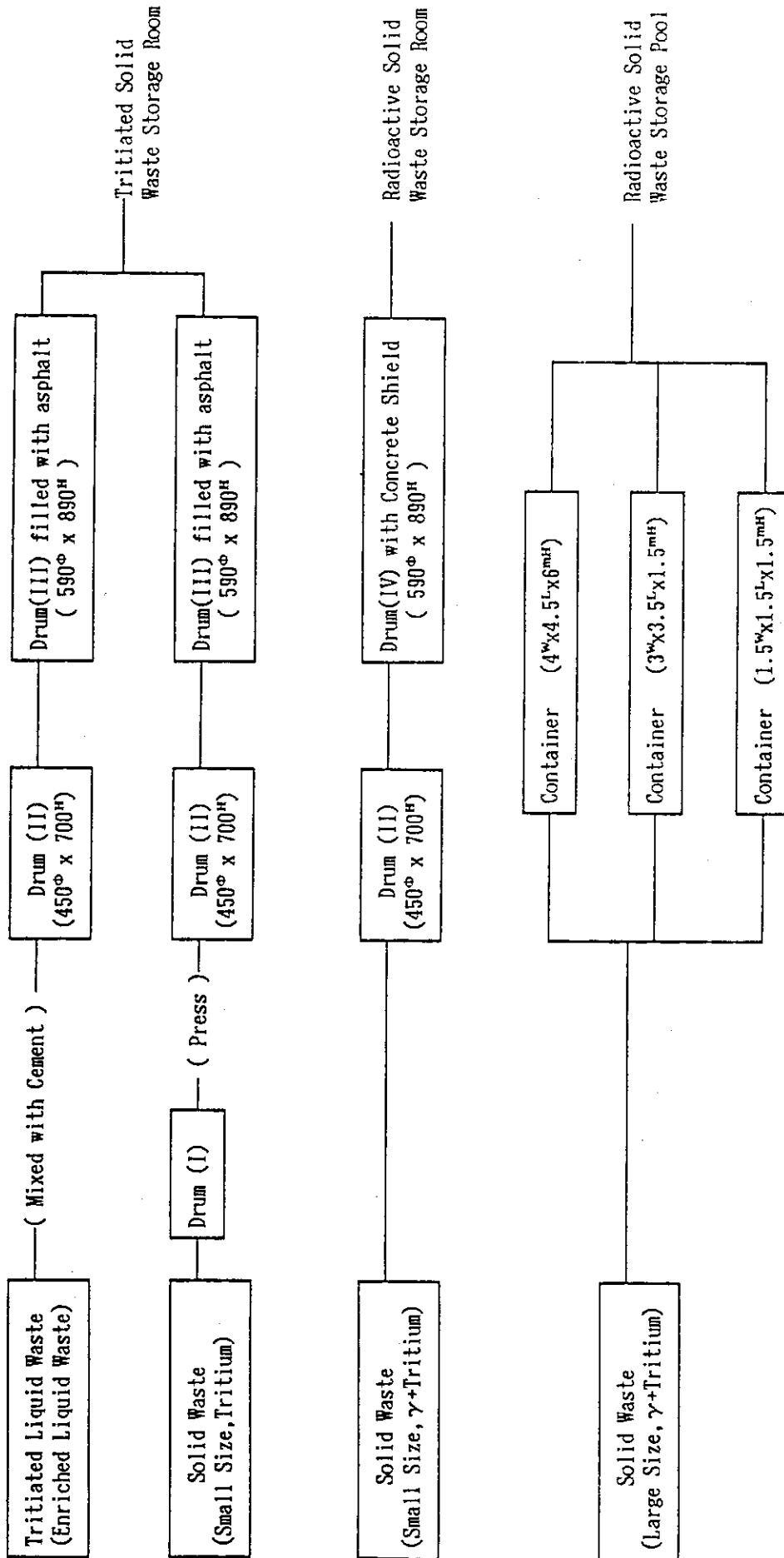


Fig. 1.1.1-31 Diagram of Rad-waste Treatment and Storage System

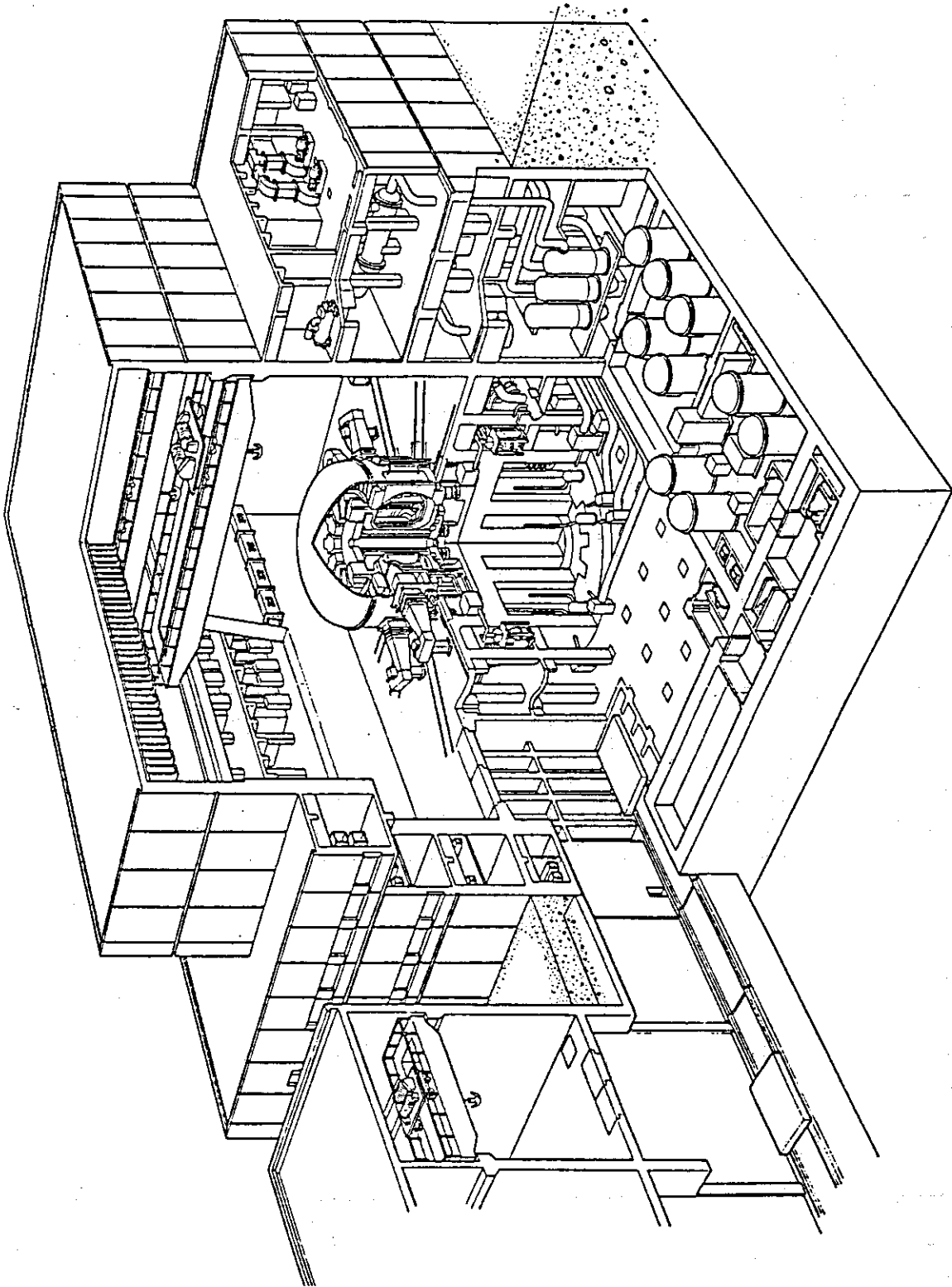


Fig. 1.1.1-32 Birds Eye View of FER Building

1.1.2 システム安全性基礎データ

(1) トリチウムインベントリー分布

システム全体のトリチウムインベントリー分布図をFig. 1.1.2-1に示す。

① 真空排気系

真空排気系の排気条件をTable 1.1.2-1に示す。12台あるクライオポンプの運転の各スタートを10分ずつ遅らせることにより、全体のインベントリーを半分にすることができる。従って21.9gとなる。下流のサージタンクは燃料ガス精製系に含め考える。

Table 1.1.2-1 Design Requirements for Vacuum Pumping System

		(Option C)
Pre-shot base pressure	1.3×10^{-3} Pa	(10^{-5} Torr)
Ultimate pressure	1.3×10^{-6} Pa	(10^{-8} Torr)
Required pumping speed at divertor slot	1.0×10^2 m ³ /s	
Gas load from divertor	3.1×10^{21} l/s	(for D,T)
	1.5×10^{20} l/s	(for He)
Gas load composition	D: 46.5%, T: 46.5%	
	He: 5%, H: 1%	
	C: 0.5%, N: <0.1%	
	O: 0.5%	

Nuclear heating of cryopanel <5 kW

② 燃料ガス循環系

燃料ガス循環系のトリチウムインベントリーとトリチウム流量をFig. 1.1.2-2に示す。

(i) 燃料ガス精製系

燃料ガス精製系のトリチウムインベントリーとトリチウム流量をFig. 1.1.2-3に示す。系全体のインベントリーは48.9gである。

(ii) 燃料ガス同位体分離系

燃料ガス同位体分離系のトリチウムインベントリーとトリチウム流量をFig. 1.1.2-4に示す。系全体で43.9gである。

(iii) 燃料ガス貯蔵系

燃料ガス貯蔵系のトリチウムインベントリーとトリチウム流量をFig. 1.1.2-5に示す。系全体で約1.5kgである。

(iv) 燃料注入系 (JAERI-M86-149より)

燃焼フェイズ用ペレット入射装置の総インベントリーは約30g, 追加熱フェイズ用入射装置の総インベントリーは約5g, 従って両フェイズの総インベントリー量は35gとなる。これらのインベントリー量算出の考え方は, ペレット入射装置の運転で

決まるものであり、設備の機能より算出すれば増大すると考えられる。これらを考慮して現在約100gのインベントリーと想定している。

- ③ ブランケットテストモジュール(JAERI-M 85-178より)各テストモジュールごとのトリチウムインベントリーをまとめたものをTable 1.1.2-2に示す。

Table 1.1.2-2 Tritium Inventory in the Test Modules
(JAERI-M85-178より)

	低温テスト モジュール(A)	低温テスト モジュール(B)	高温テスト モジュール
(g)			
・拡散インベントリー	3.5×10^{-7}		2.8×10^{-7}
・LiOT(s)生成/熱分解	1.8×10^{-5}		1.4×10^{-5}
・T ₂ (g)溶解	4.1×10^{-3}		3.1×10^{-3}
・T ₂ O(g)吸着	1.7		1.2
合計	1.7 g	17 g *)	1.2 g

*) 1回のバッチ処理の期間(約2ヶ月)内に生成されるトリチウムの総量

低温モジュール(A)及び高温モジュール(B)のトリチウムインベントリーはそれぞれ1.7g及び1.2gで飽和すると考えられる。これはほとんどT₂Oの吸着インベントリーであり、その他の寄与は小さい。低温テストモジュール(B)では最大17gのトリチウムがバッチ回収時まで蓄積される。

- ④ ブランケットテストモジュールトリチウム回収系

排気ガス脱湿塔には、ブランケット掃気ガス中の水素同位体が、掃気ガス酸化触媒塔にて全て酸素と化合しトリチウム水蒸気としてトラップされる。一般実績にもとづき運転周期24時間にて流入量の全量がトラップされるとして0.07gになる。再生ガス乾燥器のインベントリーは、掃気ガス脱湿塔のそれが移されるとして0.07gになる。

- ⑤ 1次冷却水系

冷却水系は、ダイバータ、第1種/遮蔽体、等独立の系統になっている。積分燃焼時間が短いので、第一壁中は冷却管までトリチウムが到達しない。ダイバータ冷却水系のインベントリーは透過量の4gと計算される。

- ⑥ 構造材表面吸着トリチウム

積分燃焼時間4ヶ月として計算すると、第1壁として200g、ダイバータとして60gと計算される。

- ⑦ プラズマ真空容器(プラズマ)

プラズマ密度 $\sim 1.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 、炉内容積 $\sim 200 \text{ m}^3$ として概略 $\sim 0.06 \text{ g}$ と計算される。

- (2) 炉運転時・炉停止時の放射線線量率分布(JAERI-M86-134より)

Fig. 1.1.2-6にFERの一次元体系モデルで計算した運転時の放射線量率の径方向分

布を示す。炉室内の線量率は約100mrem/hrとなっており、運転中に炉室内に立ち入ることはできない。Fig. 1.1.2-7にはFERの水平方向に二次元R-θ体系で計算した炉停止後1日後の水平方向放射線線量率分布を示す。線量率は遮蔽体厚の薄いセミパーマネントシールド背後で基準値である2.5mrem/hrを上回っているが、鉛の外張り等により対処可能である。

炉停止1日後の炉心構成機器表面の生体線量率をTable 1.1.2-3に示す。

Table 1.1.2-3 炉停止1日後の炉心構成機器表面の生体線量率

第1壁表面	1.3×10^6 rem/h
外側可動遮蔽外表面	1.1×10^{-4} rem/h
ダイバータ表面	9×10^5 rem/h
アクセスドア外表面	2.4×10^{-6} rem/h

(3) 崩壊熱分布 (JAER-M86-134より)

放射性核種の崩壊による単位体積当りの発熱率(W/cc)の分布と時間変化の評価によれば、(トラス)の外側構造では最も内側の第1壁においては停止直後に 3.2×10^{-1} W/cc、2~3日後に約 2×10^{-2} W/cc、1ヶ月後には 1.5×10^{-2} W/ccとなる。

炉の下側についてはFig. 1.1.2-8に崩壊熱の分布形を示す。最もプラズマ寄りにはタングステン、銅及びSUSから成るダイバータがある。最大値に炉停止から100秒後まで銅プレート中にあり、 6.2×10^{-1} W/cc程度である。

100秒をすぎるとタングステンアーマー中で最大となり、17分後に 5.5×10^{-1} W/cc、1ヶ月後に 4.2×10^{-2} W/ccとなる。

Table 1.1.2-4にモジュールごとの炉構造物の崩壊熱を示す。

Table 1.1.2-4 Decay Heats of Reactor Components(per Module)
(JAERI-M86-134より)

Components	at 1 day after reactor shutdown (kW)	at 1 week after reactor shutdown (kW)
Divertor	4.9	3.4
Movable shield	58	40
RF launcher	3.2	2.2
Test module	1.0	0.7

(4) トリチウム以外の放射性物質の分布 (JAERI-M86-134より)

Fig. 1.1.2-9に炉停止後の可動遮蔽体における放射性物質の分布を示す。また、Fig. 1.1.2-10には炉停止後のダイバータ及びその下側遮蔽体での放射性物質の分布を示す。炉停止一日後では第1壁では約15 Ci/ccを示すが、ダイバータではダングステンアーマーにおいて約150 Ci/cc、銅プレートにおいて約20 Ci/ccを示す。主要核種は、第1壁で ^{51}Cr 、 ^{55}Fe 、 ^{57}Co 、 ^{58}Co 、タングステンアーマー- ^{185}W 、 ^{187}W 、 ^{181}W 、銅プレートで ^{64}Cu である。

(5) 潜在的エネルギー分布

FERプラント内に潜在する主要なエネルギーを以下に示す。

- ① プラズマの熱エネルギー
- ② プラズマの電磁エネルギー
- ③ トロイダル磁場コイルに蓄積された磁気エネルギー
- ④ 重水系、トリチウムと空気の燃焼エネルギー

これら潜在的エネルギー源の大きさを下の表に示す。

Potential Energy Sources

Kinetic energy of the plasma	0.1 GJ
Magnetic energy of the plasma	0.06 GJ
Stored energy of the TFCs	2.25 GJ
Hydrogen fire	~0.4 GJ

(6) 通常運転時トリチウム漏洩量

トリチウム漏洩分布図をFig. 1.1.2-11に示す。

ブランケット・テストモジュール、トリチウム回収系及び、燃料ガス精製、同位体分離系、貯蔵系、注入系はいずれもグローブボックスないしは保冷槽により格納されていることも考慮し、室内へのもれは~0とする。室内への漏洩は主として一次冷却系のもれ~3 Ci/dayである。これはダイバータからダイバータ一次冷却系へ透過したトリチウム(800 Ci/day)で漏洩したものである。ブランケットテストモジュールから冷却系への漏洩量をTable 1.1.2-5に示すが、室内へのもれは~3 Ci/dayと比較して小さいものと考えられる。

(7) 一次冷却水系腐食生成物 (JAERI-M86-134より)

連続4ヶ月運転とし停止1日後の一次冷却水中の濃度及び配管・機器表面の付着放射能密度を求めたものをTable 1.1.2-6に示す。また冷却用配管まわりの空間線量率(配管の寸法は外径10 cm、管の肉厚が0.4 cm)をFig. 1.1.2-12に示す。

(8) 水の放射化量

FERの第1壁冷却系及びダイバータ冷却系の放射化量をTable 1.1.2-7に示す。放射化反応としては、 $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$ 、 $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ を考えた。前者の反応で生じる ^{16}N につ

Table 1.1.2 - 5 Tritium Permeation into Coolant (JAERI-M86-134)

透 過 量	低温テスト モジュール(A)	低温テスト モジュール(B)	低温テスト モジュール
第1壁インプラレーション (Ci/day)	2.86 ¹⁾	2.25 ²⁾ (160 °C) 3.62 × 10 ² ²⁾ (300 °C)	
テストモジュール内冷却管 (Ci/day)	< 2.5 × 10 ⁻³	8.0 × 10 ⁻²	7.7
合 計 (Ci/day)	2.9 ¹⁾	2.3 ²⁾ (160 °C) 3.6 × 10 ² ²⁾ (300 °C)	7.7

1) 寿命末期における値

2) 1回の試験期間終了時の値

Table 1.1.2-6 一次冷却水放射能濃度と非照射場付着放射能密度
(連続4ヶ月運転停止1日経過時)

核種	Loop A		Loop B		Loop C	
	濃度 p Ci/ml	付着密度 p Ci/cm ²	濃度 p Ci/ml	付着密度 p Ci/cm ²	濃度 p Ci/ml	付着密度 p Ci/cm ²
⁴⁵ Ti	5.5E-4	7.1E-3	1.8E-5	1.6E-3	1.5E-6	1.6E-5
⁴⁶ Sc	1.8E-2	1.1E+1	7.3E-6	8.1E-3	3.1E-6	4.0E-3
⁴⁷ Sc	2.0E-1	8.0E-0	3.7E-2	1.1E-2	4.7E-5	5.5E-3
⁴⁸ Sc	2.5E-1	3.0E+1	4.9E-3	4.2E-2	2.1E-4	2.2E-2
⁴⁷ Ca	1.6E-3	2.2E-1	5.6E-5	2.3E-4	1.0E-6	1.4E-5
³¹ Si	3.5E-2	-	3.0E-4	-	1.6E-4	-
⁵¹ Cr	7.3E+1	1.0E+4	1.4E+1	8.1E+2	1.2E-1	1. E+1
⁵² Mn	1.1E-1	1.7E+1	3.7E-3	8.9E-2	7.6E-5	9.7E-3
⁵⁴ Mn	1.4E+1	6.8E+3	1.8E+0	1.8E+2	5.9E-3	9.2E-1
⁵⁶ Mn	2.4E+1	3.1E+3	6.6E-1	1.3E+1	3.8E-2	2.6E+0
⁵⁵ Fe	5.8E+1	4.5E+4	3.9E+0	2.9E+3	1.3E-2	1.6E+1
⁵⁹ Fe	1.7E+0	8.9E+2	4.4E-3	3.2E+0	3.5E-4	3.0E-1
⁵⁷ Co	4.7E+0	3.1E+3	1.1E-1	3.9E+0	7.3E-3	2.6E+0
^{58m} Co	5.7E+0	8.3E+1	6.8E+0	9.9E+1	3.4E+0	5.0E+1
⁵⁸ Co	1.0E+1	5.8E+3	4.2E-2	9.9E+0	2.0E-2	4.6E+0
⁶⁰ Co	4.6E-1	1.8E+2	2.0E-1	5.3E+1	3.3E+0	6.6E+3
⁶¹ Co	7.0E-4	8.8E-2	1.5E-5	4.7E-4	1.4E-3	2.1E-2
⁵⁷ Ni	5.6E-5	4.4E-3	2.8E-7	2.1E-4	5. E-0	1.2E-8
⁵⁹ Ni	6.8E+0	2.0E+2	1.6E+0	4.1E+1	2.6E-1	5.7E+0
⁶⁵ Ni	5.9E-5	1.3E-3	4.2E-5	6.9E-4	1.4E+0	3.9E+1
⁶⁴ Cu	6.9E-2	1.0E+0	2.1E-2	3.0E-1	2.8E+3	4.1E+4
⁶⁷ Cu	-	-	-	-	3.1E-4	4.7E-3
⁶⁵ Zn	-	-	-	-	1.0E-2	8.0E-1
⁸⁹ Zr	1.9E-3	4.0E+0	1.9E-3	7.5E-1	1.1E-3	1.9E-2
⁹⁵ Zr- ⁹⁵ Nb	5.0E-5	8.9E+0	4.7E-5	1.6E-0	3.0E-5	3.8E-3
⁹⁷ Zr- ⁹⁷ Nb	1.1E-3	4.5E-1	1.0E-3	8.9E-2	6.6E-4	9.4E-3
^{92m} Nb	1.5E-3	9.2E+1	1.2E-3	1.4E+1	8.8E-4	2.6E-2
⁹² Nb	1.3E-7	5.5E-2	1.3E-7	9.6E+1	8.0E-8	1.9E-5
⁹⁴ Nb	1.9E-8	7.6E-3	1.7E-8	1.3E-4	1.1E-8	2.7E-7
^{115m} Cd	-	-	-	-	1.9E-5	-
¹¹⁵ Cd	-	-	-	-	1.6E-5	-
¹¹³ Sn	-	-	-	-	9.3E+0	-
¹²⁵ Sn	-	-	-	-	1.2E-7	-
⁷⁶ As	-	-	-	-	2.0E-0	-
^{108m} Ag	-	-	-	-	1.2E-2	-
^{110m} Ag	-	-	-	-	1.3E-2	-
¹⁰⁵ Rh	-	-	-	-	3.6E-6	-
¹⁰⁹ Pd	-	-	-	-	4.6E-6	-
¹⁹⁸ Au	-	-	-	-	3.7E-1	-

いては、半減期が7.1秒と短いのでループ循環中に十分減衰する。 ^{14}C は半減期が5730年と長く放射能は蓄積されるが、4ヶ月の積分炉運転期間後でも総放射能は、第1壁冷却系での0.13 Ci, ダイバータ冷却系で0.017 Ciと小さい。

Table 1.1.2-7 Radioactivity of ^{16}N and ^{14}C in the Coolant of First Wall and Divertor

	系 統	照射時生成率 (Ci/m ³ /sec)	比放射能 (Ci/m ³)	総放射能 (Ci)
^{16}N 半減期 7.1秒	第 1 壁	3.5×10^6	1.3×10^6 **	ループ循環中に減衰
	ダイバータ	3.5×10^6 *	3.2×10^5 **	"
^{14}N 半減期 5730年	第 1 壁	3.0×10^{-9}	5.2×10^{-4} ***	0.13
	ダイバータ	3.0×10^{-9} *	1.0×10^{-4} ***	0.017

* 第1壁と同じ仮定

** 第1壁またはダイバータ通過直後の比放射能

*** 積分炉運転時間 = 4ヶ月

注) 第1壁及びダイバータ冷却系のデータとして以下を使用

	第 1 壁	ダイバータ
冷却材循環時間(秒)	300	300
中性子照射時間(秒)	4	1
総 水 量(m ³)	248	166

(9) 空気の放射化量

F E R の炉建家内空気の放射化量を Table 1.1.2-8 に示す。この時、換気率は0.6回/日、建家内空気体積は $2.1 \times 10^5 \text{ m}^3$ とした。半減期の長い ^{14}C , T については、積分炉運転期間4ヶ月間にその濃度は上昇するが、炉停止直後での放射能は空気中の最大許容値よりも十分低い値である。半減期の短い ^{41}Ar , ^{16}N , ^{13}N については、運転開始後、半減期の数倍の経過時間で飽和状態となり、炉停止直後には急激に減衰する。 ^{41}Ar 炉停止直後の濃度は最大許容値を上回っているが、一日経過後には十分低い値となる。

(10) その他の有毒物質

プラント施設内に多量に存在する有毒物質は次のものが考えられる。

① ベリリウム及び酸化ベリリウム

酸化ベリリウムの塵を吸収するとベリリウム中毒症(慢性の肺の炎症)にかかる。従

って、ベリリウムは法律により取扱いが規定されていて、空気中におけるベリリウム粉塵の許容量は $0.002\text{mg}/\text{m}^3$ となっている。ベリリウムはブランケットテストモジュール内に中性子増倍材として約 600g が装荷されている。

② 鉛

放射線遮蔽用に各所に使用される。

(11) 漏れ磁場 (JAERI-M86-134より)

Fig. 1.1.2-13にFERプラント上での漏れ磁場分布 ($Z=0\text{m}$)である。 $R=100\text{m}$ の位置では 2Gauss 、 $R=200\text{m}$ においては 0.24Gauss となる。

(12) 施設周辺の線量率

(i) スカイシャイン線量率

Fig. 1.1.2-14に炉中心からの距離の関数として施設周辺の空間線量率 (mR/year)を示す。線量率に寄与する中性子はプラズマ中のD-T反応によって生じたものであるが、2次ガンマ線は中性子が炉本体及び建家の天井を漏洩する時に発生するものと、大気を透過する際に発生するものとに分かれる。これらの和である全線量率は、炉心から 100m で $2.4\text{mR}/\text{year}$ 、 200m で $0.58\text{mR}/\text{year}$ と急激に減衰しており、敷地境界を炉心から 400m の距離にとれば、FERで設計目標値である $5\text{mrem}/\text{year}$ (ガンマ線の場合 $5\text{mR}/\text{year}$)に比べて約60分の1ほどの小さな値となっている。

(ii) スタックから放出されるトリチウムによる線量率

通常運転時にスタックから放出されるトリチウムによる環境線量率の評価である。被曝経路としては、トリチウム水蒸気の吸入による内部被曝、食物摂取による内部被曝、トリチウムからの放出 β 線による外部被曝の3つが主要なものであるが、ここではその中でも最も寄与が多い、トリチウム水蒸気の吸入による内部被曝のみを考えた。評価方法は原子力安全委員会の定めた安全審査指針を参考としている。気象データは、東海研究所のデータを参照したが、保守的な評価を行うために、風向は一定とし、風下方向での線量率を求めた。また、スタックの高さは 100m とし、トリチウム放出率は $100\text{Ci}/\text{day}$ とする。

Fig. 1.1.2-15に、スタックからの水平距離と、地表付近の空気中トリチウム濃度及び線量率の関係を示す。トリチウムの濃度はスタックから水平距離 600m の所で最大約 $2 \times 10^{-9}\text{Ci}/\text{m}^3$ を示し、線量率もこの地点で最大約 $2\text{mrem}/\text{year}$ となる。(i)で評価したスカイシャインによる線量率と合わせると、境境界を炉心から 400m とした場合、線量率は約 $3\text{mrem}/\text{y}$ 以下である。

(13) 分解修理時の安全性基礎データ

崩壊熱、誘導放射能についてはすでに記してある。真空容器内でスパッタされた物質は放射化されており、分解修理時に炉室内に飛散しないような手段が必要である。炉心製造物からのトリチウム放射量については分解時の炉本体開放時間 (トリチウム放出時間) を24時間とすると、放出トリチウムは材料温度が 50°C の時、第一壁、ダイバータ各々 $5\text{Ci}/\text{day}$ であり、材料温度が 40°C の時は、第一壁、ダイバータ各々のトリチウム放出量は概略 $2\text{Ci}/\text{day}$ 、 $0.7\text{Ci}/\text{day}$ となり、材料温度を下げることによりトリチウム放出量

Table I.1.2-8 Induced radioactivity of reactor room air

NUCLIDE	REACTION	MPC (Ci/m ³)	HALF LIFE	PRODUCTS (n/m ³ /sec)	Concentration in the reactor room at shutdown (Ci/m ³)	AMOUNT OF RELEASE PER DAY (Ci/day)
⁴¹ Ar	⁴⁰ Ar(n, γ) ⁴¹ Ar	4 × 10 ⁻⁷	1.83 hr	1.1 × 10 ⁵	1.12 × 10 ⁻⁶	0.24
¹⁶ N	¹⁶ O(n, γ) ¹⁶ N		7.13 sec	5.7 × 10 ²	1.53 × 10 ⁻⁸	3.2 × 10 ⁻³
¹³ N	¹⁴ N(n, 2n) ¹³ N		9.96 min	2.5 × 10 ²	5.80 × 10 ⁻⁹	1.2 × 10 ⁻³
¹⁴ C	¹⁴ N(n, p) ¹⁴ C	1 × 10 ⁻⁶	5730 yr	3.2 × 10 ⁷	2.0 × 10 ⁻¹¹	4.2 × 10 ⁻⁶
T	¹⁴ N(n, T) ¹³ C	2 × 10 ⁻⁶	12.6 yr	1.8 × 10 ³	5.11 × 10 ⁻¹³	1.1 × 10 ⁻⁷

Ventllating ratio: 0.6/hr Volume of reactor room : 2.1 × 10⁵ m³

を低減できる。

炉本体開放時にトラス内を吸引(負圧維持)することによって、トリチウムの放出を抑えることができれば、室内へのトリチウムの放出は、引抜いたセクタの部分からの放出分のみであり、第一壁引き抜きの時50℃としても炉室内トリチウム濃度は 1.7×10^{-6} Ci/m³であり、最初から防護服なしで入室できる濃度となる。

(14) 事故時の安全性に関するデータ

① 炉室及び環境へのトリチウム放出量

後述する事故シーケンスに記述するが、最もVulnerableなものとしてクライオパネルの最大トリチウムインベントリー22gの放出を考える。Table 1.1.2-9に示すように100mのスタックから放出した場合敷地境界で0.1remである。

② トリチウム以外の放射性物質の放出量

後述する事故シーケンスに記述する。

③ 崩壊熱

崩壊熱が問題となるのは冷却材事故が生じたときに崩壊熱除去が不十分となり事故が拡大することである。事故の拡大要因として以下の項目が挙げられる。

- (i) 構造物の不均一な温度上昇が起こり局部的に大きな熱応力が発生する。その結果、真空境界が破損し真空容器内の放射性物質が炉室へ移行する。
- (ii) 構造物の変形が生じ、冷却管破損、構造物間ギャップ拡大による放射線ストリーミング量の増大が生じる。
- (iii) 昇華性放射化構造物、例えば三酸化モリブデン(昇華温度795℃)が昇華し移行する。

以上のような問題点が考えられるが、崩壊熱が比較的小さいこと、冷却系統構成及び冷却径路に工夫をこらす等により、温度上昇が大きな問題とならない可能性がある。今後、冷却系事故後の構造物健全性(放射性物質閉じ込め機能としての)詳細な検討が必要である。

Table 1.1.2-9 Tritium release to the environment (through 100m stack)

Operation mode		Release in reactor building	Release to environment	Design Criteria	Remarks
Normal Operation	Operation	<3 Ci/day	<3Ci/day*	100Ci/day	* Tritium is released directly to the environment through HVAC
	Maintenance	~100Ci/day	<100Ci/day* 0.042Ci/day**		** Tritium is released to the environment through the tritium clean up system
Accident		22 g	22 g (dose 0.1 rem)	25 rem	In the evaluation, the tritium clean up system (TCS) is assumed not to operate.

(15) 放射性気体の環境放出について

トリチウム，放射化空気の一般環境への放出については法律上の基準に基づき対処する必要がある。「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行規則」第14条の11第5号ロにおいて、「排気設備は，排気口における排気中の放射性同位元素の濃度を長官が定める許容濃度以下とする能力を有するものとする。」とあり，関連する「放射線を放出する同位元素の数量等を定める件」第7条において，「8時間についての平均濃度が前条件各号に規定する濃度の10分の1」とある。「定める件」別表第1の数値から計算すると，Table 1.1.2-8に示すMPC値の0.25(2.5倍 \times 1/10)倍になる。また，「法律施行規則」第14条の11第5号ロのただし書きとして「ただし，排気口における排気中の放射性同位元素の濃度を長官が定める許容濃度以下とすることが著しく困難である場合において……事業所等の境界の外の空気中の放射性同位元素の濃度を長官が定める許容濃度以下とするときは，この限りでない。」とあり，関連する「定める件」第7条2において「3月間についての平均濃度が前章各号に規定する濃度の10分の1とする。」とある。これは「定める件」別表第1の数値の1/10，即ちTable 1.1.2-8のMPC値の1/10に該当する。

FERは実験炉であり，環境への放出絶対量からすれば極めて小さく，事故時を想定しても，地上でのトリチウム放出量が50g以下の目標値を十分満たすものであり，装置そのものの環境へのインパクトも大きくはないと考える。

従って，今回は環境への放出量規制も，前述の「法律施行規則」のただし書きの値を満足することとして概念設計を計算するものとした。

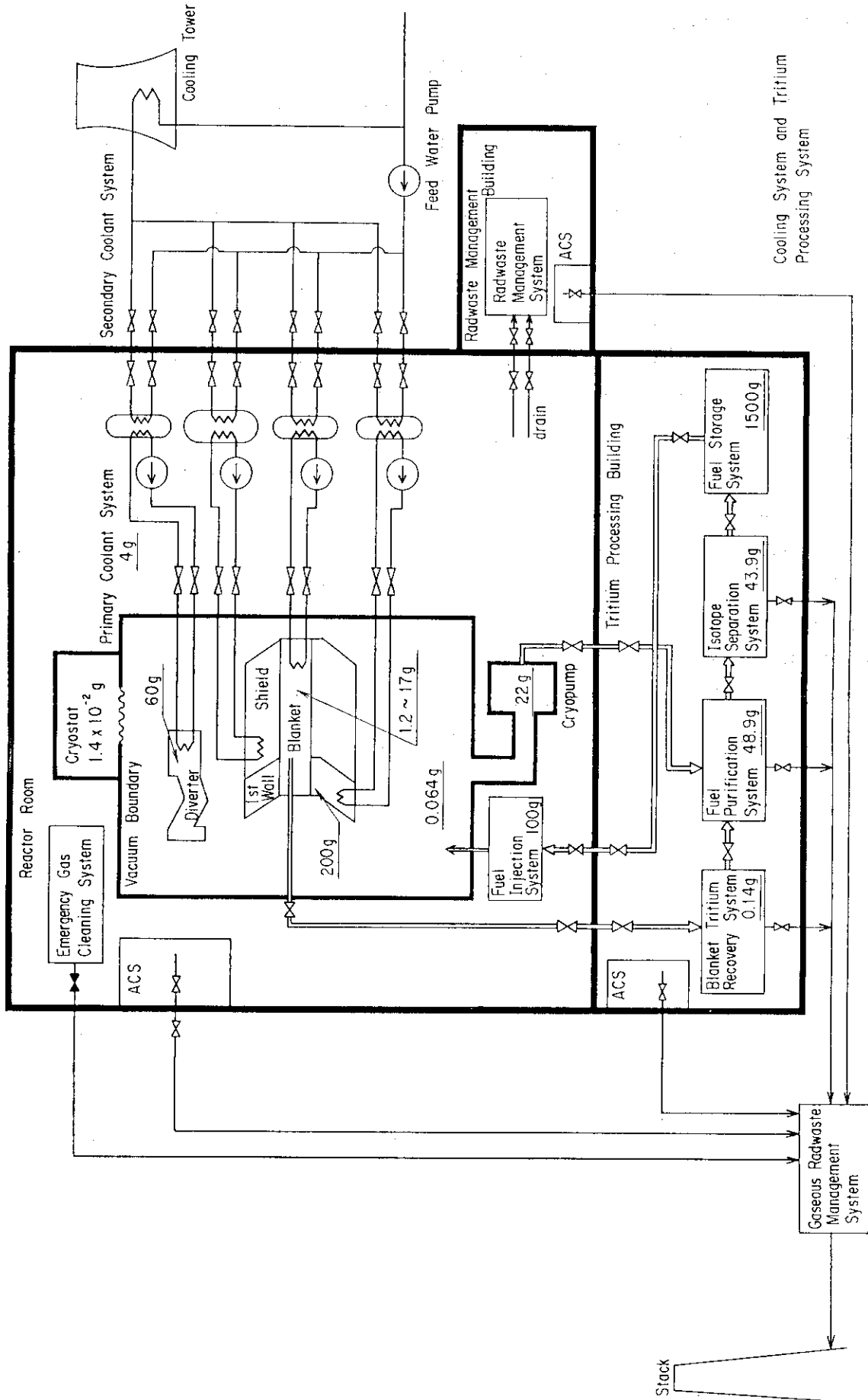


Fig. 1.1.2-1 Tritium Inventory (Option C)

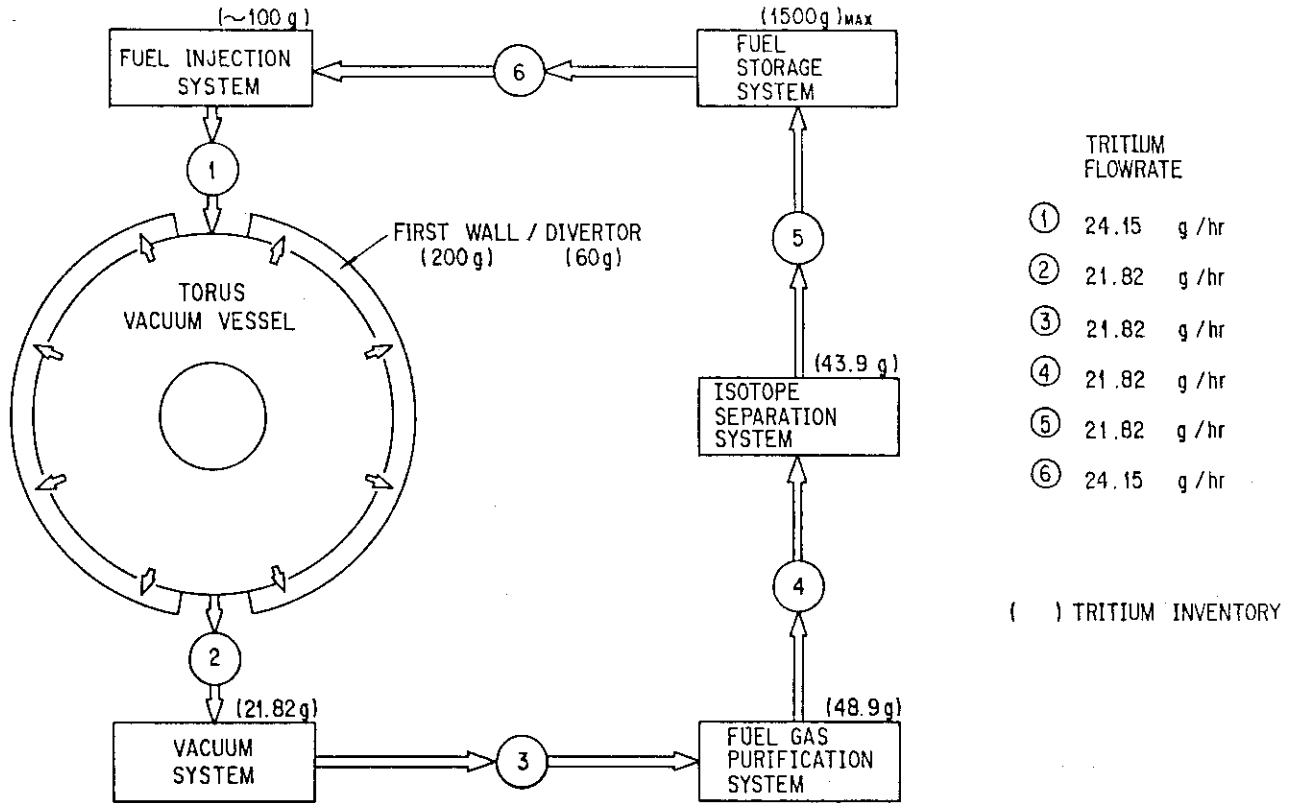


Fig.1.1.2-2 TRITIUM INVENTORY and FLOW RATE of FUEL GAS CIRCULATION SYSTEM (Option C, Duty 0.8)

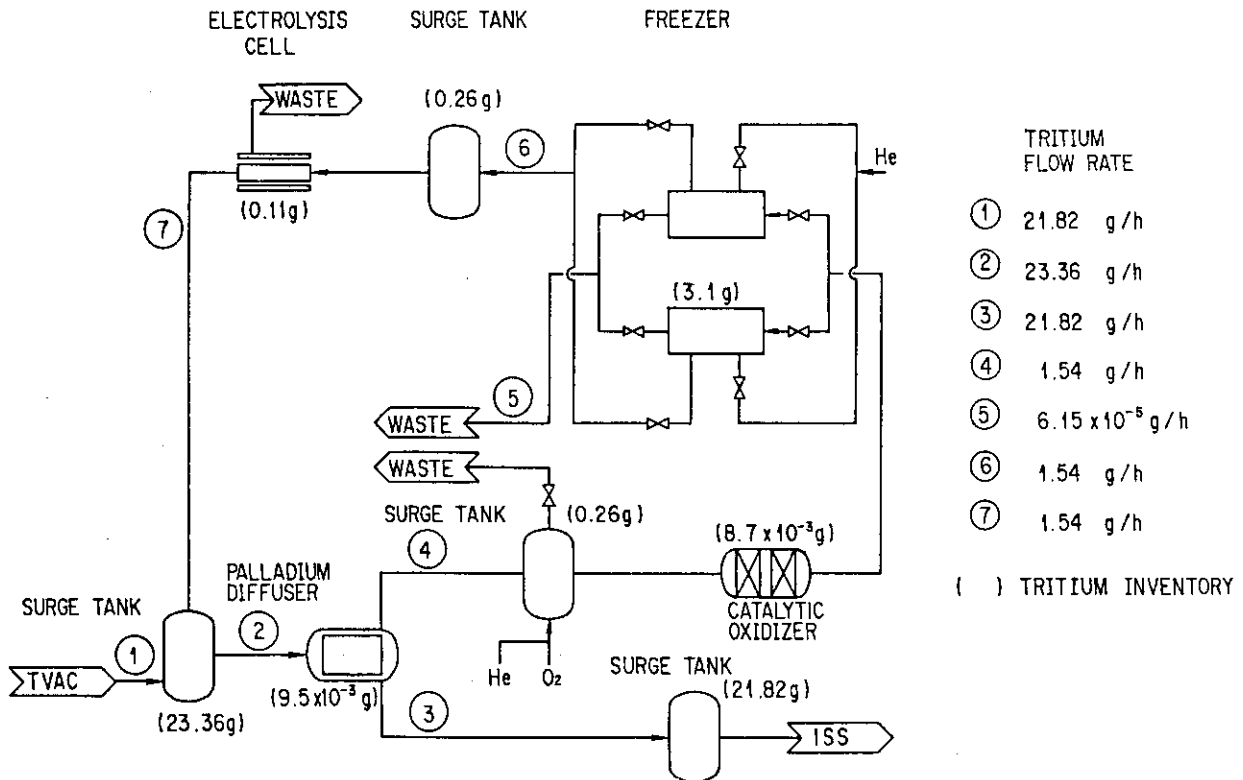


Fig.1.1.2-3 TRITIUM INVENTORY and FLOW RATE of FUEL GAS PURIFICATION SYSTEM (Option C, Duty 0.8)

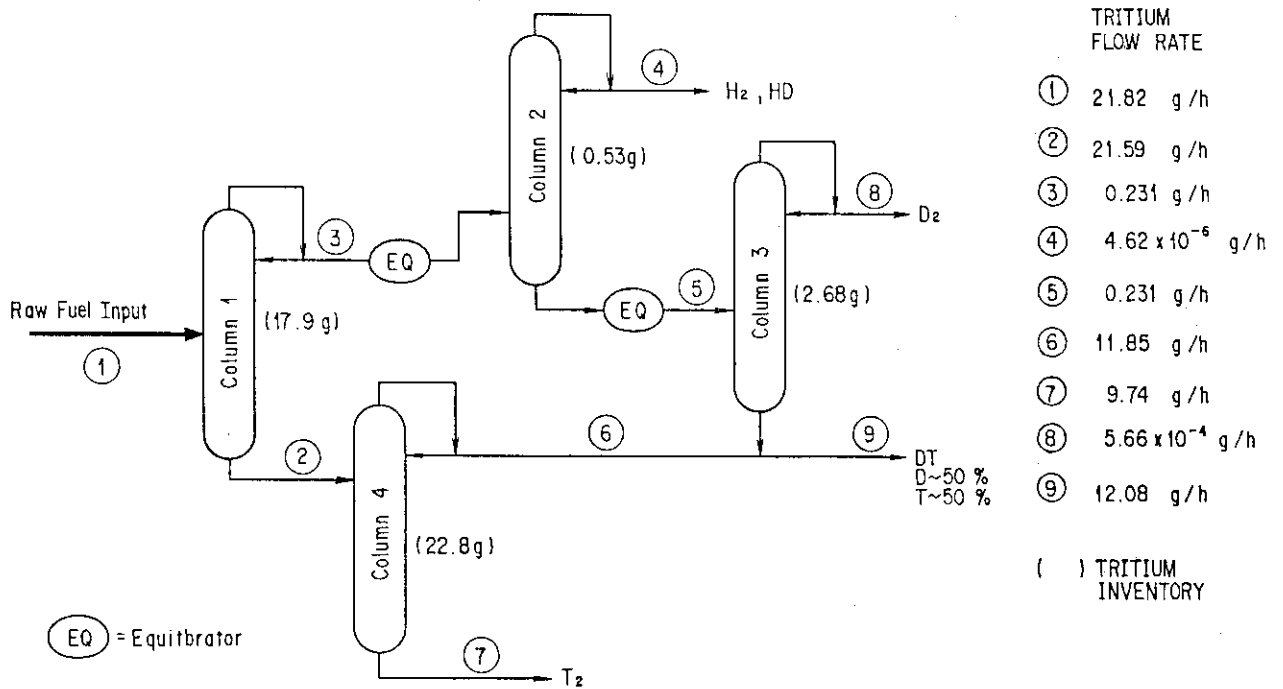


Fig. 1.1.2-4 TRITIUM INVENTORY and FLOW RATE of FUEL GAS ISOTOPE SEPARATION SYSTEM (Option C, Duty 0.8)

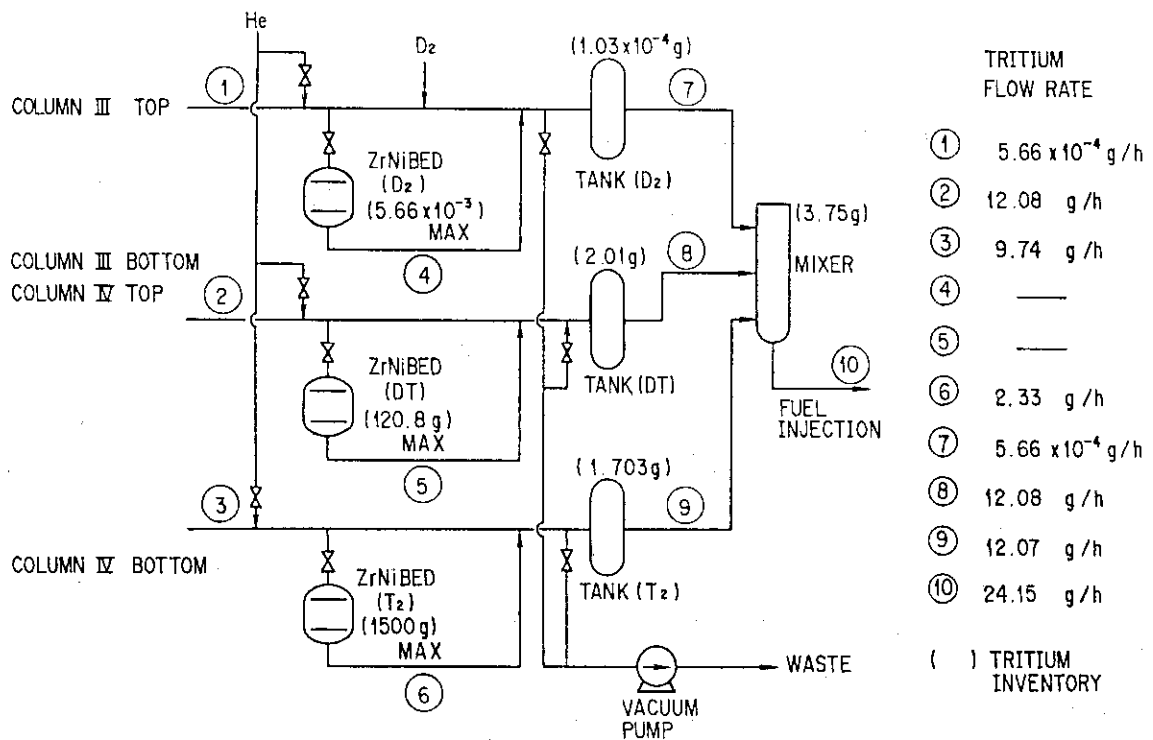


Fig. 1.1.2-5 TRITIUM INVENTORY and FLOW RATE of FUEL GAS STORAGE SYSTEM (Option C, Duty 0.8)

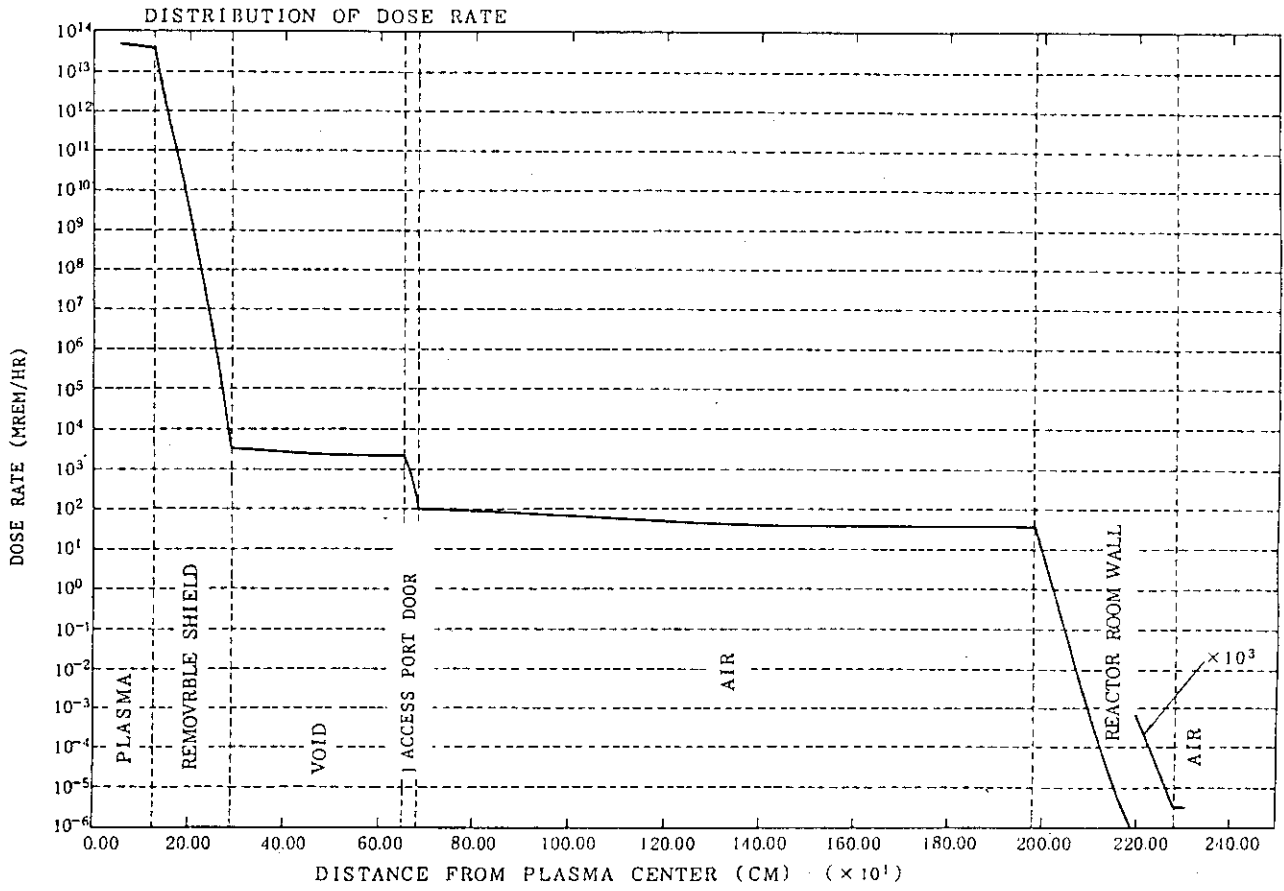


Fig. 1.1.2-6 Distribution of Dose Rate under Reactor Operation (Outboard-Access port).

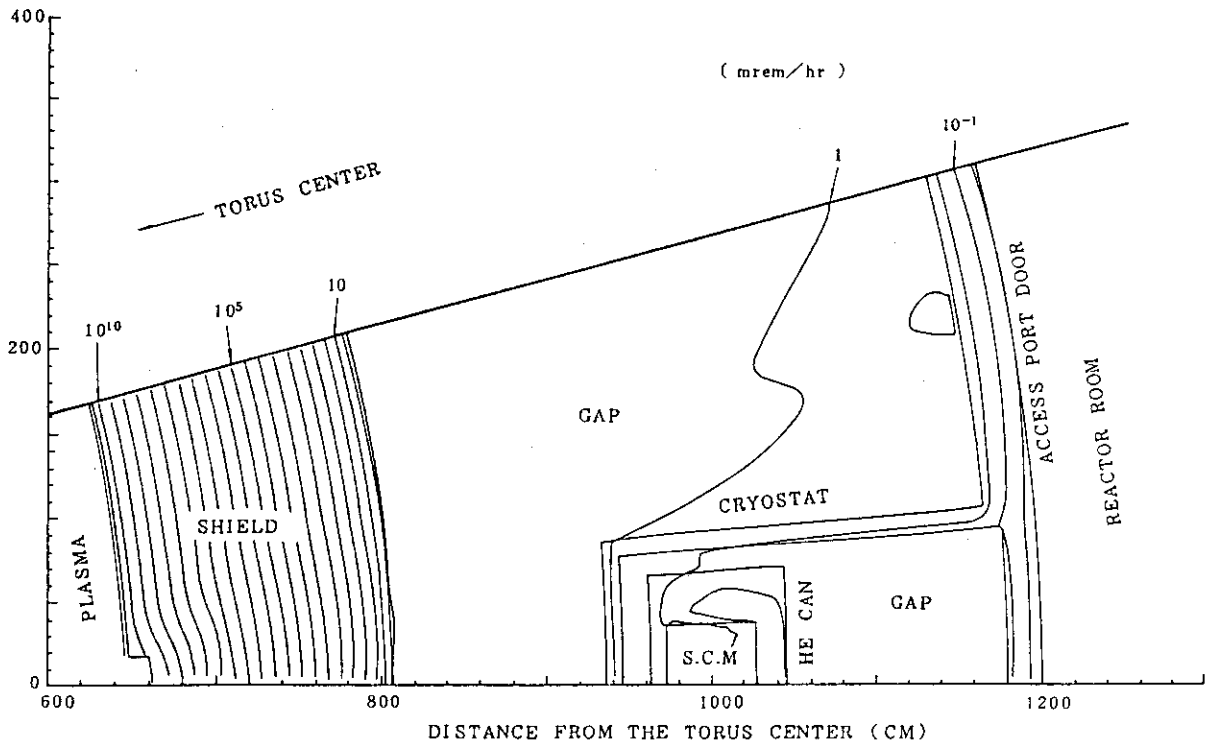


Fig. 1.1.2-7 Shutdown Dose Rate Contour (One day after shutdown)

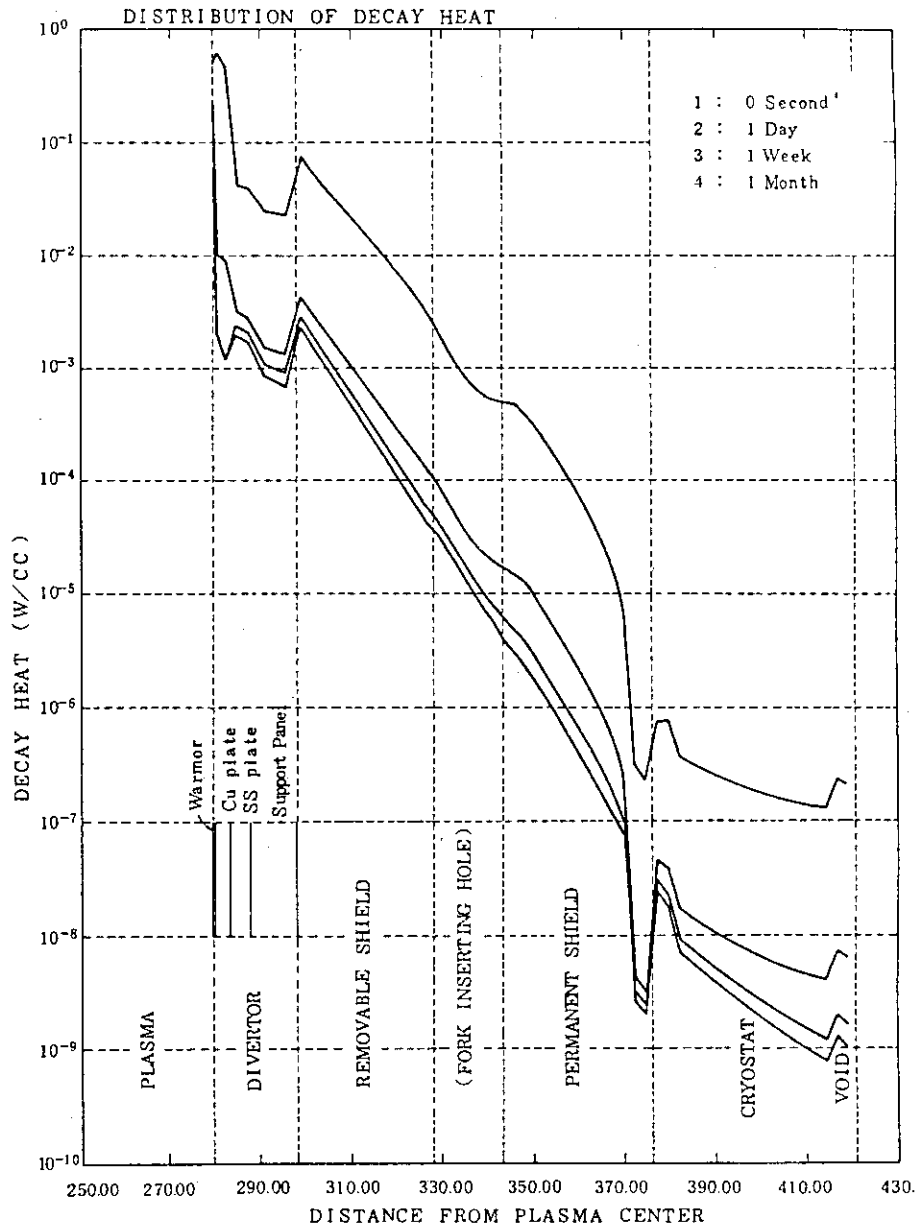


Fig.1.1.2-8 Decay Heat Distribution along the Downward Structure with the Divertor.

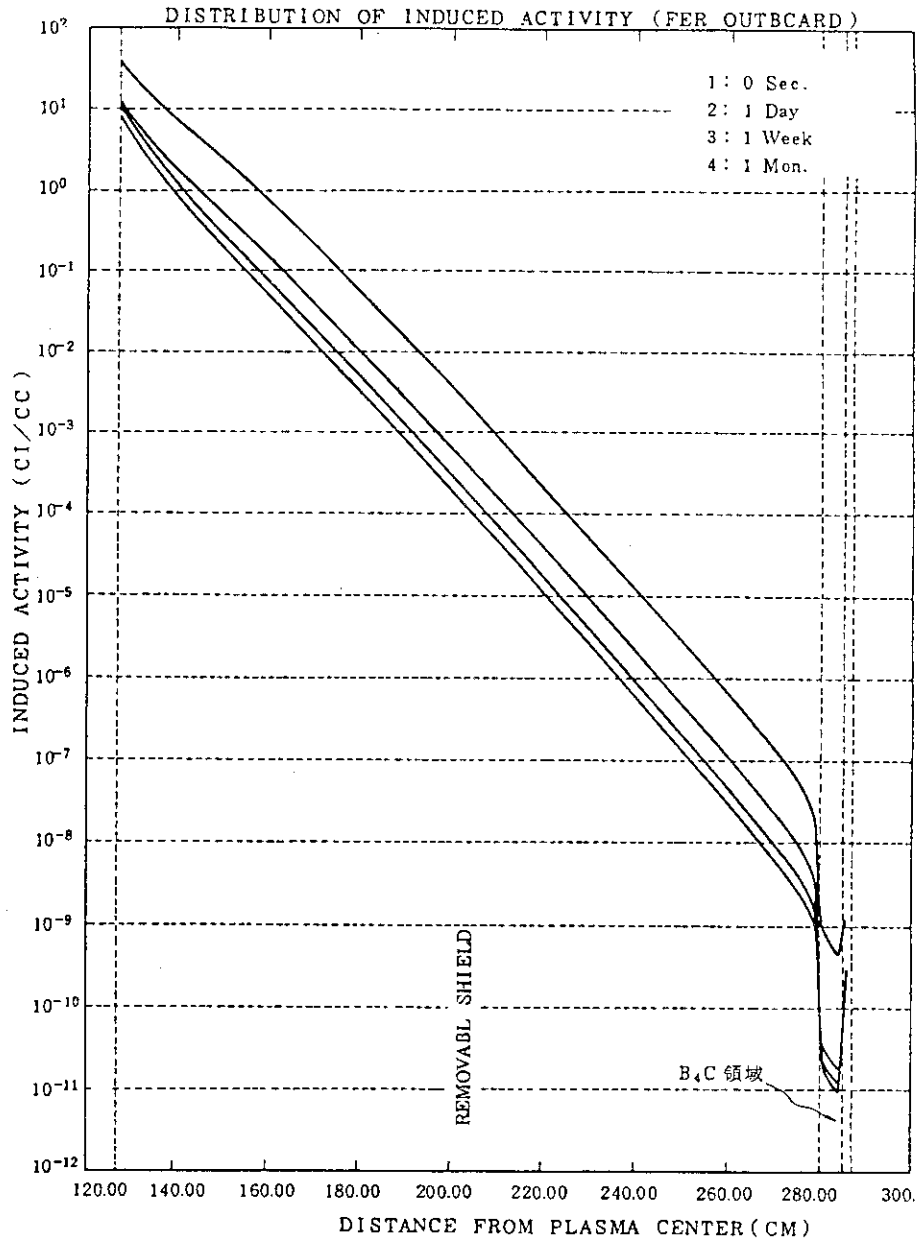


Fig. 1.1.2-9 Distribution of Induced Activity (Outboard-Access Port).

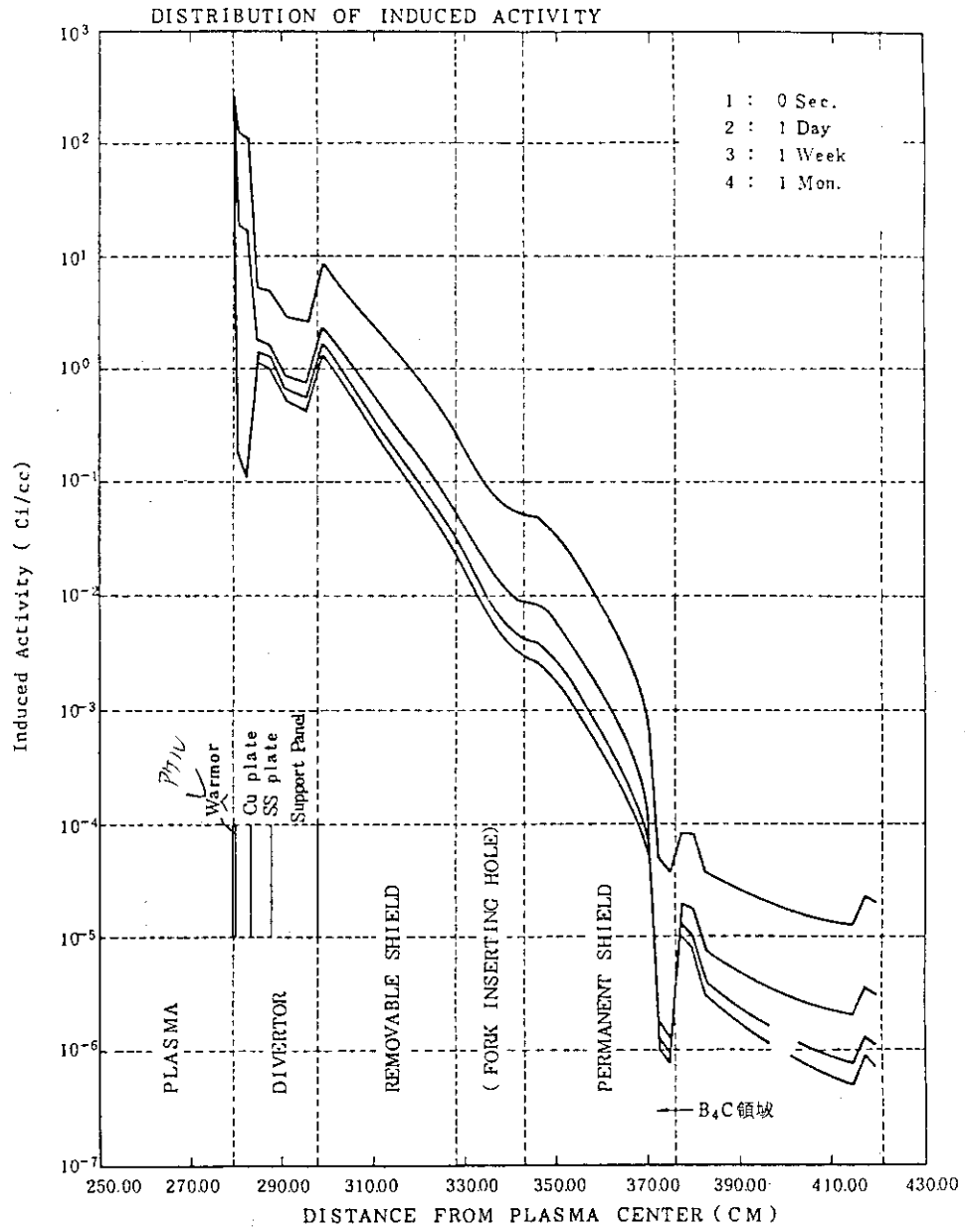


Fig.1.1.2-10 Distribution of Induced Activity (Downward).

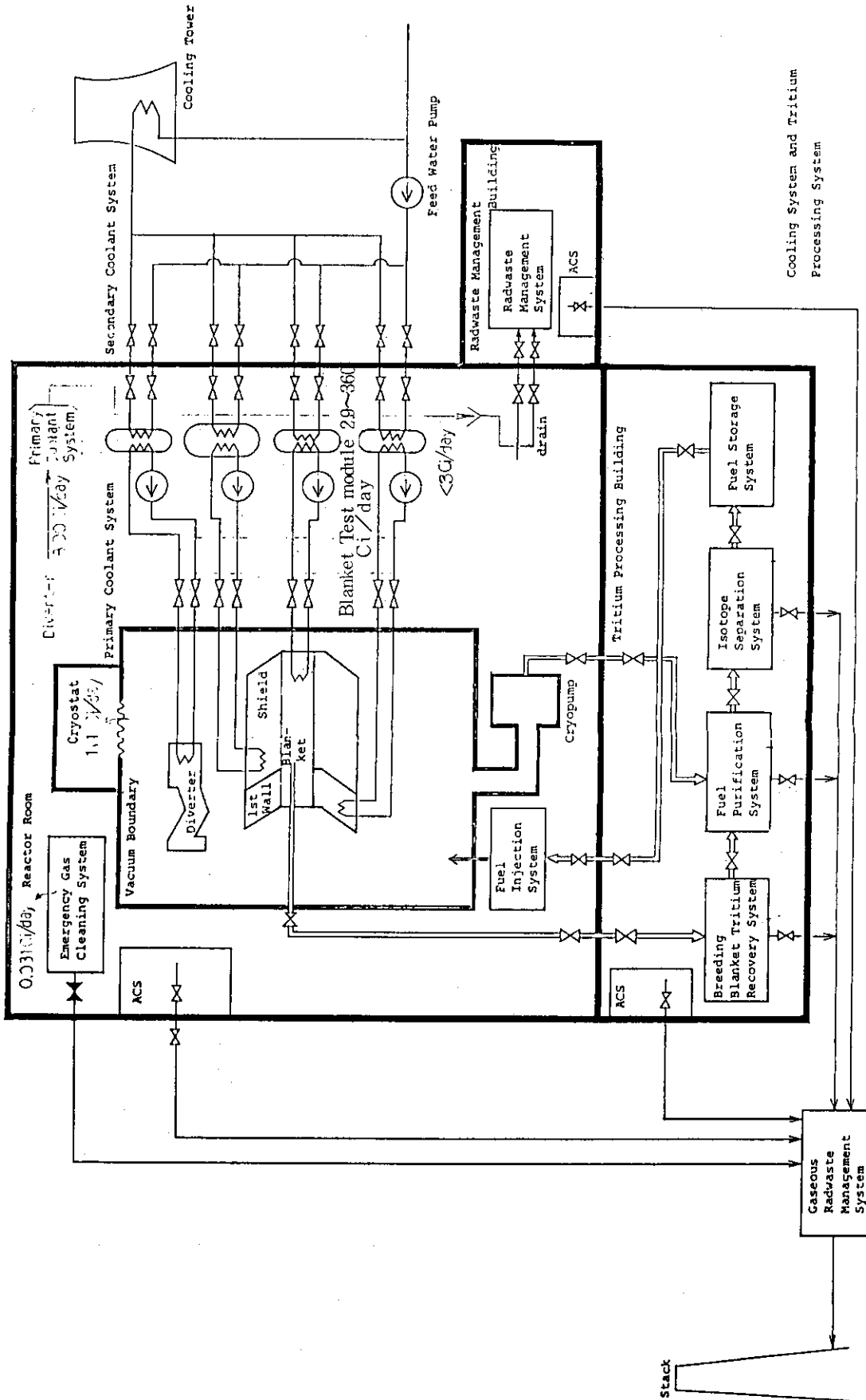


Fig. 1.1.2-11 Tritium release profile

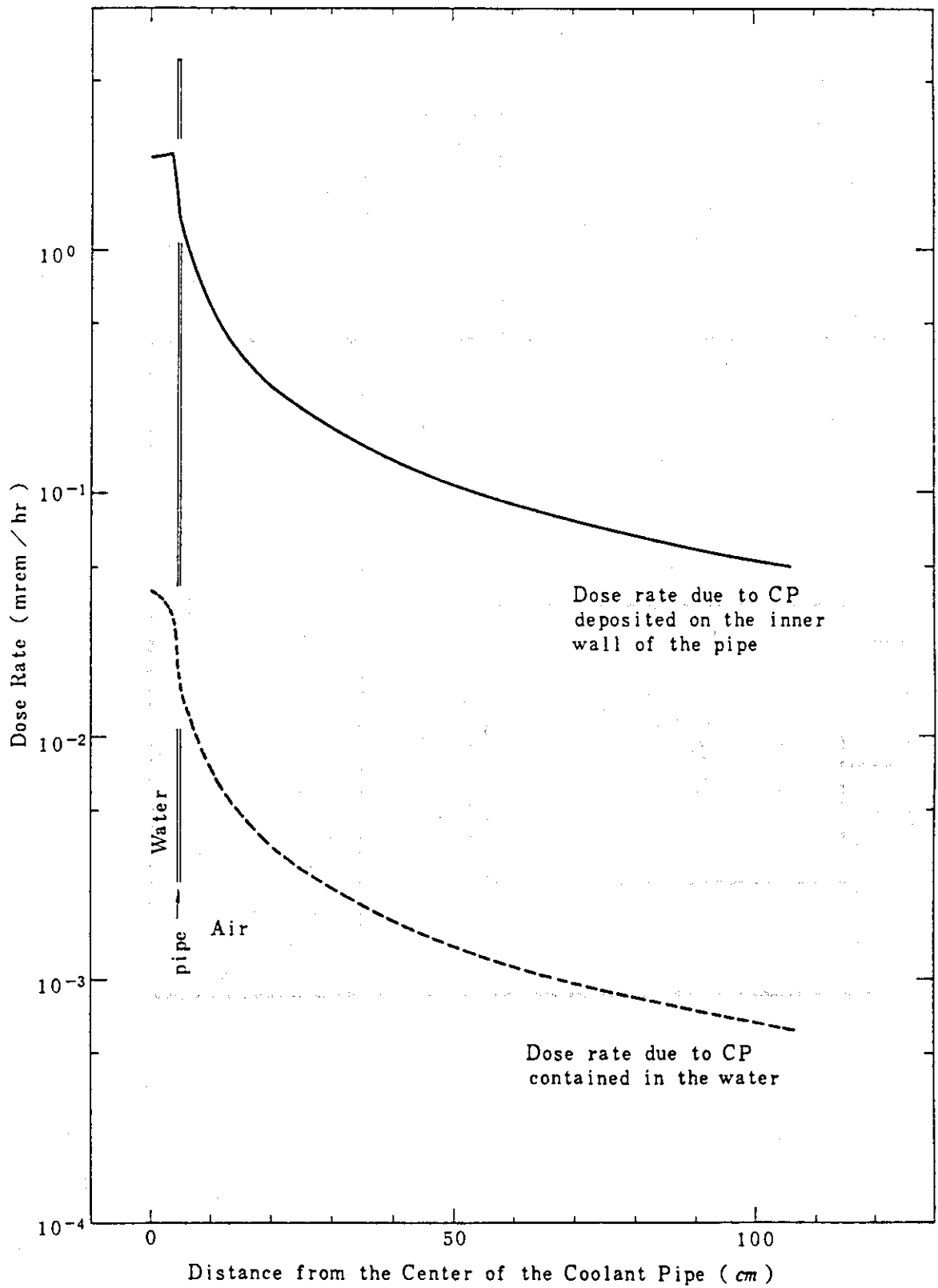


Fig.1.1.2-12 Dose Rate Distributions due to Corrosion Product around the Coolant Pipe (Loop A) of FER.

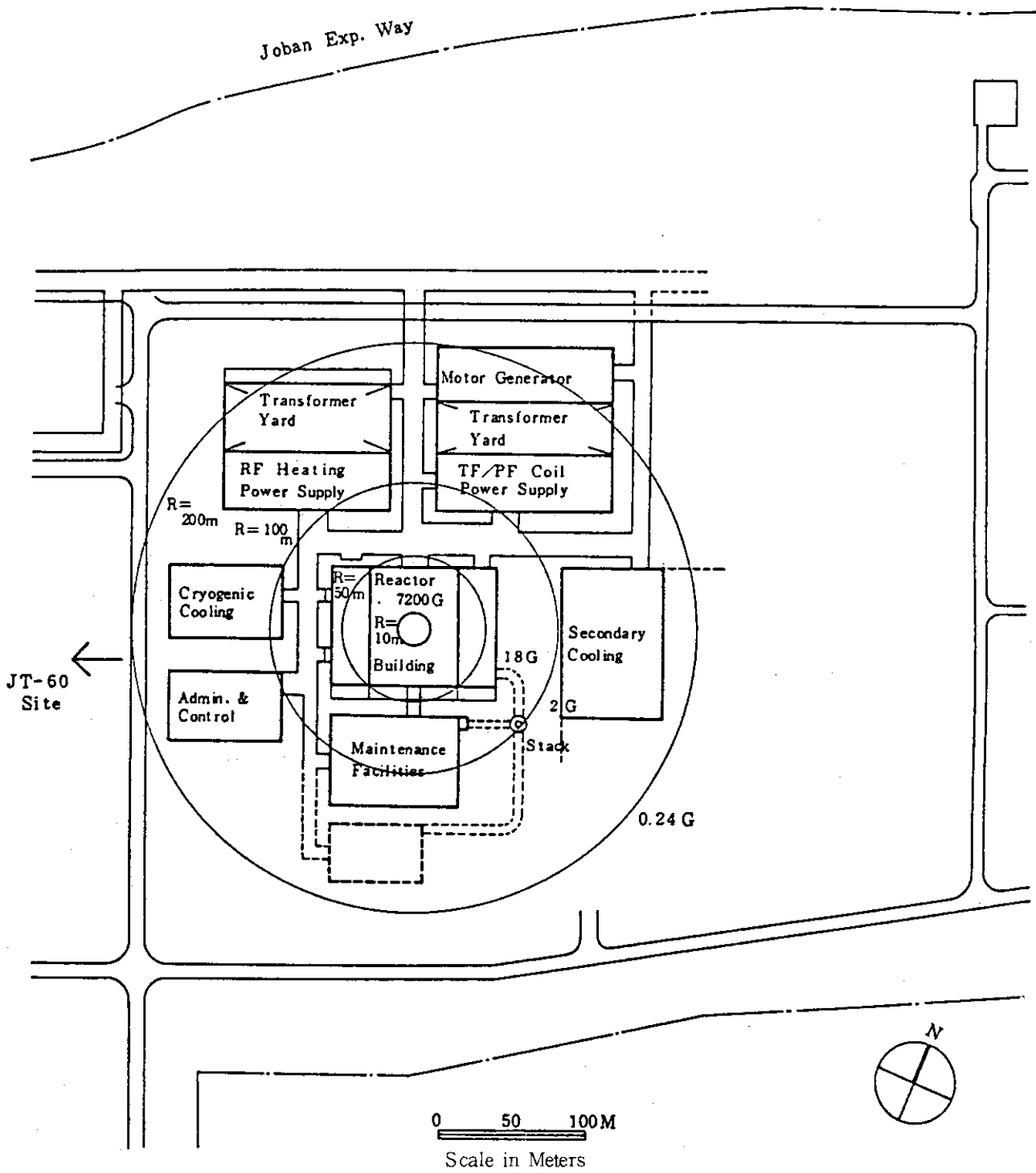


Fig. 1.1.2-13 Fringe Field on the FER Plant ($Z=0m$).

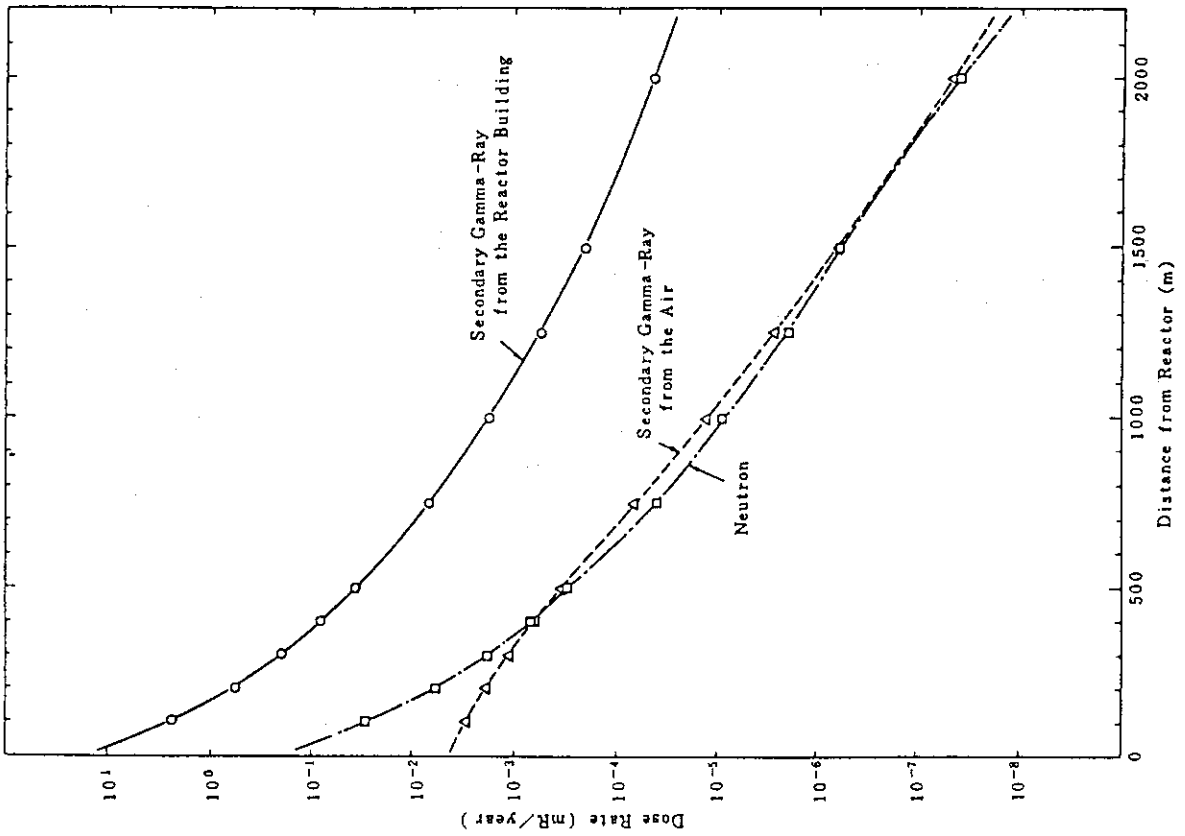


Fig. 1.1.2-14 Skyshine Dose Rate Distributions as a Function of Distance from the Reactor.

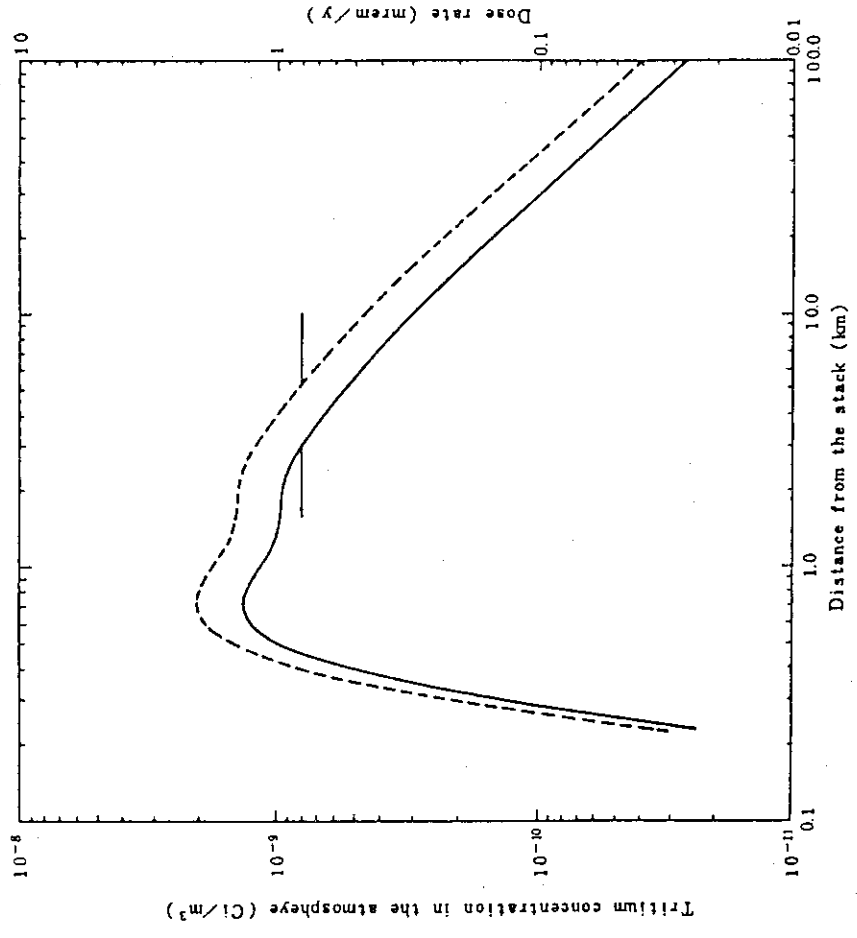


Fig. 1.1.2-15 Distribution of Tritium Concentration and Dose Rate in Normal Operation.

1.2 システム、コンポーネントのFMEA

各系統機器の故障が全体システムにどのような影響を与えるかを見るために、FER全体システムに対し故障の型と影響解析(FMEA)を実施した。結果をTable 1.2.1～55に示す。これより、代表的な事故起因事象を抽出し、次項の事故シーケンスの検討をする。Table 1.2.56(1/2)～56(2/2)に抽出された事故起因事象を列挙して示す。

Table 1.2.1 Failure modes and effects analysis for FER

システム : 炉本体 サブシステム : 真空容器		FER FMEA (1/1)						
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障システムの影響		故障分類 大中小	処置・対応
					サフシステム	影シム		
	真空容器本体	真空保持	リーク	溶接部不良 破損	真空劣化	プラズマ消滅	真空度	炉停止
	アクセスポート	真空保持	リーク	溶接部不良 破損	真空劣化	プラズマ消滅	真空度	炉停止
	一周抵抗部 (ベロー)	必要とされる真空容器の一周抵抗を供給するともに真空保持	リーク 電気的短絡	溶接部不良 破損	真空劣化	プラズマ消滅	真空度	炉停止
	アクセスドア	真空保持	リーク	溶接部不良 破損	真空劣化	プラズマ消滅	真空計	炉停止
	支持架台	重力支持	リーク	熱膨張に対するスライド不可	異常応力	異常応力	ひずみ計	炉停止
	冷却配管	コンポーネント冷却及び冷却管とりまとめ	破損、変形、われ	異常応力	冷却水のもれ	冷却水のもれ	真空計	炉停止

Table 1.2.2 Failure modes and effects analysis for FER

システム：炉本体		FER FMEA					(1/2)	
サブシステム：ダイバーター	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障シナリオ	影響	故障の種類	処置・対処
	ダイバーター板	熱負荷、粒子負荷処理（不純物He排気）	溶融	熱負荷異常増大	完全に溶融した場合には、冷却水の真空容器への漏れあるいは流入	・アーマー材座部にガス管設置し損耗による破断により検出	大中小	・交換、修理
			変形、割れ、亀裂	異常応力、電磁力、ワーキング、応力集中	変形、割れが冷却管等に達する場合、冷却水の漏れ、流出につながる。			
					変形によって磁力線に対する傾斜角の変化により招き起こる損傷増大			
			許容厚さを越えた損耗	疲労、異常粒子負荷				
			受熱板、Cu冷却管剥離（受熱板、Cu冷却管、接合部）	異常応力	ダイバーター機能喪失			・交換、修理

Table 1.2.3 Failure modes and effects analysis for FER

システム：ダイバーク		FER FMEA				(2/2)	
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障シナリオ	形状	故障分類
							故障の検知方法
	ダイバークCu 冷却管	・受熱板冷却	・流量喪失	・ポンプ軸固着 ・冷却管閉塞	・受熱板溶融蒸発		・炉停止
			・冷却材喪失	・破断 ・割れ ・クラック(異常応力) 受熱板に対する異常熱負荷	・受熱板溶融 ・蒸発 ・真空排気系への高温水流入		・炉停止 ・真空排気系保護
	ダイバーク板支持 構造(SUS補強板)	・受熱板、冷却管 支持	・破損、変形	・異常応力	・冷却管ヘッダ ・破損の可能性 ・真空容器への冷却水流入		・炉停止 ・交換修理 ・真空排気系保護
	ダイバーク遮蔽	・コイル	・破損、変形	・異常応力			
	ダイバーク遮蔽 延長部	・真空シール	・破損、変形	・異常応力			
	冷却配管 (ヘッダー合)	・コンポーネント冷却 及び冷却管とりまとめ	・破損、変形、割れ	・異常応力	・冷却水の真空容器排気ダクト への漏れ	・真空排気系での 水の検出	・炉停止 交換修理

Table 1.2.4 Failure modes and effects analysis for FER

システム : ガード・リミタ		FER FMEA					(1/2)			
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障システムのサ	形状のシ	警テ	故障の検知方法	故障分類	
									ム	ス
	・グラフィターマ ・熱負荷、粒子負荷 ・処理 ・タイル		・許容厚さを越えた損 ・耗	・疲労、異常粒子負荷						・交換、修理
			・変形、割れ、龜裂	・異常応力、電磁力、 ・アークキック、応力集中	・変形割れが冷却管等に連する場 合冷却水の漏れ、流出につながる					
					・変形によって磁力線に対する傾 斜角の変化により損耗量増大					
			・受熱板、支持基板 剥離 (受熱板、SUS冷却 管接合部)	・異常応力	・ガード・リミタ機能喪失					・交換、修理
	・支持基板	・クラファイトアー マータイル支持及び 冷却	・破損、変形	・異常応力	・冷却管ヘッダー破損の可能性 ・真空容器への冷却水流入					・炉停止 ・交換修理 ・真空排気系保護
	・冷却配管 (ヘッダー含む)	・コンポネント冷却 及び冷却管とりまと め	・破損、変形、割れ	・異常応力	・冷却水の真空容器排気ダクトへ の漏れ			・圧力計 ・排気系の水の検 出		・炉停止 ・交換修理

Table 1.2.5 Failure modes and effects analysis for FER

システム：炉本体		FER FMEA					(2/2)			
サブシステム：ガード・リミタ		対象機器	機能	故障モード	推定原因	サブシステムの故障	影響	故障の種類	故障の検知方法	処置・対処
No								大中小		
	遮電プラグ	・コイル、生体遮蔽	・破損、変形	・異常応力	・ストリーミング					
	ハンガローッド	・支持基板つり下げ	・破損、変形	・異常応力						
	ゲートバルブ	・真空/大気遮断	・破損、変形	・異常応力	・真空劣化					
	ベローズ	・真空バウングラリ	・破損、変形	・異常応力	・真空劣化					

Table 1.2.6 Failure modes and effects analysis for FER

システム : 炉本体 サブシステム : 可動遮蔽体		FER FMEA (1/2)						
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障の検知方法		故障分類 大中小	処置・対応
					サ ブ シ ス テ ム	影 響 テ ム		
・第一壁	・粒子、中性子、熱に対する防護 ・リップアル熱負荷に対する防護	・浴槽、蒸発等による損耗 ・クラック、割れ、破損、ミサイル	・ディスラプション時 異常応力 ・異常熱負荷 (ディスラプション、過出力) ・アーキング ・応力集中 ・疲労	・真空容器への冷却水の腐蝕 ・崩壊熱	・圧力計 ・温度計	・プラズマ停止 ・崩壊熱除去後、セクター引抜き		
・可動遮蔽	・超電導マグネットに対する放射線遮蔽と人身保護のための生体遮蔽	・クラック、割れ、破損	・ディスラプション時 異常応力 ・アーキング ・応力集中 ・疲労	・真空容器への冷却水の腐蝕 ・崩壊熱	・圧力計 ・温度計	・プラズマ停止 ・崩壊熱除去後、セクター引抜き		
・シェルスラット	・プラズマのPassive control (プラズマ垂直位置制御)	・クラック、割れ、破損	・ディスラプション時 異常応力 ・アーキング ・応力集中 ・疲労	・真空容器への冷却水の腐蝕 ・崩壊熱	・圧力計 ・温度計	・プラズマ停止 ・崩壊熱除去後、セクター引抜き		

Table 1.2.7 Failure modes and effects analysis for PER

システム： 炉本体		F E R F M E A					(2 / 2)		
サブシステム： 可動遮蔽体		サブシステム		故障の影		故障分類			
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	サブシステムの故障	影響	故障の検知方法	大中小	処置・対応
	・ローラーフォーク種 入部遮蔽ブラク	・ストリーミング防止	・クラック、割れ、破 損	・ディスプレイアブジョン時 異常応力 ・アキング ・応力集中 ・疲労	・真空容器への冷却水の漏洩	・真空容器への冷却水の漏洩	・圧力計	・プラズマ停止	
					・前壊熱	・前壊熱	・温度計	・前壊熱除去後、故障 セクター引抜き	
	・冷却配管	・サブシステムの冷却	・冷却材喪失 ・冷却流量喪失	・破断、クラック ・コンポネントの温 度上昇	・プラズマ真空容器への冷却水の 流入	・プラズマ真空容器への冷却水の 流入	・圧力計 ・温度計	・プラズマ停止	

Table 1.2.8 Failure modes and effects analysis for FER

システム：炉本体 サブシステム：固定遮蔽		FERFMEA (1/1)							
No.	対象機器	機能	故障モード	推定原因	サブシステムの故障	影響 シナシナ	故障の検知方法	故障分類 大中小	処置・対応
	第一壁	荷電粒子、中性子、熱に対する防護 ・リップアル損失に対する防護	・熔融、蒸発等による損耗 ・クラック、割れ、破損、ミサイル	・ディスプレイアブレーション時異常応力 ・異常熱負荷(ディスプレイアブレーション過出力) ・アークキング ・応力集中 ・疲労		・真空容器への冷却水の漏洩 ・崩壊熱	・圧力計 ・温度計		・プラズマ停止
	固定遮蔽	超電導マグネットに対する放射線遮蔽と人身保護のための生体遮蔽	・クラック、割れ、破損	・ディスプレイアブレーション時異常応力 ・アークキング ・応力集中 ・疲労		・真空容器への冷却水の漏洩 ・崩壊熱	・圧力計 ・温度計		・プラズマ停止
	遮蔽ポスト	超電導マグネットに対する放射線遮蔽と人身保護のための生体遮蔽	・クラック、割れ、破損	・ディスプレイアブレーション時異常応力 ・アークキング ・応力集中 ・疲労		・真空容器への冷却水の漏洩 ・崩壊熱	・圧力計 ・温度計		・プラズマ停止
	電気絶縁部	必要とされる真空容器の一周抵抗を供給とともに真空シール	・電氣的短絡	・アークキング ・絶縁部破損 ・絶縁不良		・異常電磁力発生			・プラズマ停止
	冷却配管	サブシステムの冷却・冷却材喪失 ・冷却流断喪失	・冷却材喪失 ・冷却流断喪失	・破断、クラック ・冷却管閉塞	・コンポーネントの温度上昇	・プラズマ真空容器への冷却水の流入	・圧力計 ・温度計		・プラズマ停止

Table 1.2.9 Failure modes and effects analysis for FER

システム： サブシステム：		炉本体 クライオスタット		FER FMEA			(1/1)		
№	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障システム サブシステム	影響 シナシム	故障の検知方法	故障分類 大中小	処置・対応
	・クライオスタット容器本体 (真空容器)	・大気との遮断	・空気もれ	・溶接部不良 ・異常応力	・クライオスタット内温度上昇 ・コイル容器温度上昇	・コイル熱負荷によるクエンチ ・真空度	・真空度	大	・プラズマ停止 ・コイル電流停止
	・断熱構造/LN ₂ シールド	・270°K→80°Kの温度差の維持	・断熱不良	・N ₂ もれ	・クライオスタット内温度上昇 ・コイル容器の温度上昇	・コイル熱負荷によるクエンチ ・真空度	・真空度	大	・プラズマ停止 ・コイル電流停止
	・支持部	・重力、耐震支持	・支持不良 ・割れ、亀裂	・異常応力					
	・排気設備	・クライオスタットの排気 排気	・排気不能	・ポンプ故障 ・電源喪失	・クライオスタット内温度上昇 ・冷媒系熱負荷増大 (コイル容器温度上昇)	・コイル熱負荷によるクエンチ ・真空度	・真空度	大	・プラズマ停止 ・コイル電流停止

Table 1.2.10 Failure modes and effects analysis for FER

システム : 炉本體 サブシステム : ブランケットテストモジュール		FER FMEA (1/1)					
対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障シナリオ	影響シナリオ	故障の種類 — 大 中 小 —	処置・対応
ブランケットテストモジュール	トリチウム生産及び 核融合中性子の熱化	トリチウム生産の異常	<ul style="list-style-type: none"> Li₂O 温度分布変化 T-回収量の減少又は異常増加 T-回収量の減少又は異常増加 	<ul style="list-style-type: none"> T-回収量の減少又は異常増加 T-回収量の減少又は異常増加 	<ul style="list-style-type: none"> T-回収量 	<ul style="list-style-type: none"> 大 	<ul style="list-style-type: none"> ・プラズマ停止
	核融合中性子の熱化	核融合熱変化	<ul style="list-style-type: none"> 核融合熱変化 Liの破損 ブランケットテストモジュール 容器の破損 冷却管破損による Li₂O ベッド への水 びれ T-回収He 流量の 喪失 入射中性子量異常 冷却管への漏れ 	<ul style="list-style-type: none"> 核融合熱変化 Liの破損 ブランケットテストモジュール 容器の破損 冷却管破損による Li₂O ベッド への水 びれ T-回収He 流量の 喪失 入射中性子量異常 冷却管への漏れ 			
	異常発熱	異常発熱	<ul style="list-style-type: none"> 入射中性子量増大 構造材の温度変化により異常発熱 Li₂O と 潤滑水との 反応 第1壁の破損 冷却水喪失による中 性子スベクトル硬化 	<ul style="list-style-type: none"> ブランケットテストモジュール 構造材の温度変化により異常発熱 Li₂O と 潤滑水との 反応 第1壁の破損 冷却水喪失による中 性子スベクトル硬化 	<ul style="list-style-type: none"> ブランケットテストモジュール 構造材の温度変化により異常発熱 Li₂O と 潤滑水との 反応 第1壁の破損 冷却水喪失による中 性子スベクトル硬化 	<ul style="list-style-type: none"> 大 	<ul style="list-style-type: none"> ・プラズマ停止

Table 1.2.11 Failure modes and effects analysis for FER

システム : マグネット系 サブシステム : トロイダル磁場コイル		FER FMEA (1/1)						
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障シナリオ	故障の検知方法	故障分類 大 中 小	処置・対応
	超電導コイル	・トロイダル磁場発生	・超電導状態の喪失	・超電導線断線 ・冷凍系事故 ・素線移動 ・熱線不良 ・コンジクト破損 ・絶縁材破損 ・異常電磁力発生 ・異常熱負荷発生 ・冷凍系故障	・コイルクエンチ ・プラズマ消滅	・電圧	・大	・プラズマ停止 コイル電流停止
			・破損	・電磁エネルギーの急激な放出 ・Heの放出	・本体構造物の破損 ・プラズマ消滅	・電圧	・中	・炬停止, 各系統隔離
	支持構造物	・コイル支持	・コイル支持不能	・異常電磁力発生 ・コイル支持のアンバランス ・支持シリンダの破損	・本体構造物の破損 ・電圧計	・電圧計	・小	・プラズマ停止 コイル電源停止
	保護回路	・コイル保護	・保護回路動作によるクエンチ時の最大電圧発生	・絶縁不良	・コイル破損 ・He放出	・電圧	・中	・プラズマ停止 コイル電流停止
	電源設備	・コイルへの電力供給	・電源喪失	・電源故障 ・短絡 ・断線	・炉起動不能	・電流・電圧	・中	
	パワーリード	・コイルへの電流供給	・リードの断線 短絡	・電磁力による断線 ・冷却不足による温度上昇	・電圧, 温度, ガス流量		・小	

Table 1.2.12 Failure modes and effects analysis for FER

システム： サブシステム：		FER FMEA (1/1)						
マグネット系 ポロイダル磁場コイル		故障のシナシテム				故障の種類		
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	サブシテム	シナシテム	故障の種類 大中小	処置・対処
	超電導コイル	・プラズマ電流維持、プラズマ平衡位置維持、ポロイダル磁場発生	・超電導状態の喪失	・素線の破断 ・コンソット破断 ・過度の素線運動 ・絶縁物の半裂 ・冷凍系故障 ・安定化材破損 ・異常電磁力発生 ・異常熱負荷発生 ・冷凍系故障	・コイルクェンチ ・電磁エネルギーの急激な放出 ・He放出	・プラズマ制御不能 ・電圧	・大 ・中 ・小	・プラズマ停止 コイル電流停止
	支持構造物	・コイル支持	・コイル支持不能	・異常電磁力発生 ・繰返し応力による機械的性質の劣化 ・コイル支持のアンバランス	・架台の破損 ・He放出	・本体構造物の破損 ・歪計		・プラズマ停止 コイル電流停止
	保護回路	・コイル保護	・保護回路動作によるクェンチ時の最大電圧発生	・絶縁不良	・コイル破損 ・Heの放出	・ミサイル、衝撃波		・プラズマ停止
	電源設備	・コイルへの電力供給	・電源喪失	・電源故障 ・短絡 ・断線	・コイル励磁不能	・炬起動不能		・電圧、電圧 ・電流、電圧
	パワーリード	・コイルへの電流供給	・リードの断線、短絡	・電磁力による断線 ・冷却不足による温度上昇	・コイル励磁不能			・電圧、温度、ガス流量

Table I.2.13 Failure modes and effects analysis for FER

システム : マグネット系 サブシステム : 制御コイル		FER FMEA					(1/1)	
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	サブシステムの故障の影響	検知方法	故障分類 大中小	処置・対応
	制御コイル	・プラズマ垂直制御	・プラズマ垂直制御	・破壊	・プラズマ制御不能	・電圧計 ・電流計		・プラズマ停止
	電流リード	・制御コイルへの給電	・給電不可	・異常応力	・プラズマ制御不能	・電圧計 ・電流計		・プラズマ停止
	冷却配管	・制御コイルの冷却	・冷却配管破損 つまり	・異常応力	・プラズマ制御不能	・温度計 ・流量計		・プラズマ停止

Table 1.2.14 Failure modes and effects analysis for FER

システム：He 液化冷凍系		FER FMEA				(1/1)			
サブシステム	対象機器	機能	故障モード	推定原因	サブシステムの故障	影響	故障の検知方法	故障分類	処置・対応
No								大中小	
	He 液化冷凍装置	He の液化冷凍	液化・冷凍能力喪失	動力源の故障 断熱破損 液体N ₂ 喪失	液体Heの不足	・コイルクエンチ		大中小	・フラスマ停止 コイル電流停止
	液体He貯槽	液体Heの貯蔵	液体He漏洩	破損	液体Heの不足	・同上	・貯室へのHe放出		
	液体He供給配管系	液体Heの輸送	輸送不能	閉塞 破断	・コイル冷却不足	・同上			
	Heガス回収	気化したHeの回収	回収不能	動力源の故障 破損	・Heの不足	・同上			

Table 1.2.15 Failure modes and effects analysis for FER

システム： 加熱装置 サブシステム： LHRF 加熱装置		FER FMEA			(1/2)		
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障シナリオ	故障の種類 人 中 小	処置・対応
1	ランチャ (グリルアンテナ)	高周波電力の入射	RF 入射不能	変形, 溶断 絶縁破壊 冷却水漏水	プラズマ加熱不能 真空破壊	定在破比, 反射 電力のモニタ	LHRF 加熱装置停止
2	導波管	高周波の伝送	RF 給電不能	変形, 破壊 絶縁破壊	プラズマ加熱不能	定在破比, 反射 電力のモニタ SF ₆ ガス圧力	同上
3	セラミック窓	導波管の真空封止	RF 給電不能	セラミック破損 絶縁破壊	プラズマ加熱不能 真空破壊	SF ₆ ガス圧力 真空度測定	同上
4	高周波発生装置	高周波の発振大電力増幅	発振停止 周波数変動	電源故障 励磁段故障 クライストロン故障	プラズマ加熱不能	出力モニタ 電源電圧	同上
5	遮蔽体	放射線の遮蔽	出力低下, 変動	電源不良 絶縁破壊 反射電力増大	プラズマ加熱効率低下	周波数モニタ	同上
				放射線リーク増加	放射線検出器 圧力計, 流量計	同上	
6	SF ₆ 供給装置	SF ₆ の供給	供給不能 圧力低下	ポンプ停止 配管破断	RF 給電不能	圧力計	同上

Table 1.2.17 Failure modes and effects analysis for FER

システム：ICRF加熱装置		FER FMEA					(1/2)		
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障シナリオ	影響	故障の検知方法	故障分類 大中小	処置・対応
1	アンテナ導体	・高周波電力の入射	・RF入射不能	・変形、溶融 ・絶縁破壊	・RF給電不能 ・冷却水漏れ ・真空容器内汚染 ・炉の運転停止	・方向性検出器に (アーク検出器) による反射電力 モニタ	・RF加熱装置停止		
2	ファラデーシールド	・不要電場短絡	・加熱効率低下	・同上	・プラズマ加熱効率低下 (不純物流入増大) ・中心導体、リターン導体の熱負荷大 → 導体部分の変形、溶融	・流量計 ・圧力計			・同上
3	フィードスルー	・真空封止	・RF入射不能	・セラミック破壊 ・絶縁破壊	・SF ₆ ガスの真空容器内流入	・方向性検出器に よる反射電力モ ニタ			・同上
4	スタブ	・インピーダンス整合	・インピーダンス整合不能	・短絡板溶着 ・同軸導体変形 ・絶縁破壊					・同上
5	同軸給電線	・高周波の伝送	・RF給電不能	・冷却不能 ・破断 ・絶縁破壊 ・スペーサ不良					・同上
6	高周波発生装置	・高周波の発生	・発振停止	・回路故障 ・電源 ・電子管の破損	・RF給電不能	・進行波の減少			・同上
7	導電体	・放射線の遮蔽	・変形、溶融	・冷却不能	・プラズマ加熱効率低下	・波形モニタ			・同上
8	SF ₆ 供給装置	・SF ₆ 供給	・供給不能 ・圧力低下	・ポンプ停止 ・配管破断	・放射線リーク増加	・放射線検出器、 圧力計、流量計			・同上

Table 1.2.19 Failure modes and effects analysis for FER

システム： ECRF 加熱装置		FER FMEA (1/1)						
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	サブシステム	故障の検知方法	故障分類	処置・対処
1	ランチャ(金属線)	・高周波入射	・RF入射不能	・変形、溶融 ・冷却水漏れ	・予備電離・プラズマ加熱不能 ・真空破壊	・冷却水漏れ-真空容器内汚染 ・炉の運転停止	・プラズマ温度低下 ・真空度低下 ・冷却水排出圧力 ・流量低下	・ECRF加熱装置停止 同上
2	高周波窓	・真空封止	・真空破壊	・窓材破損	・真空破壊 ・予備電離・プラズマ加熱不能	・SF ₆ ガスの真空容器内流入 ・炉の運転停止	・真空度低下	同上
3	伝送系	・高周波ビームの伝送	・伝送不能	・変形、破壊 ・絶縁破壊	・予備電離・プラズマ加熱不能		・プラズマ温度低下	同上
4	高周波発生装置	・高周波の発振	・発振停止 ・出力変動	・高周波ビーム偏向 不能、誤動作	・分布制御不能		・偏向角度モニタ	同上
5	運転廠体	・放射線の遮蔽	・変形、溶融	・冷却不能	・予備電離・プラズマ加熱不能		・出力モニタ ・放射線検出器 ・圧力計、流量計	同上
6	SF ₆ 供給装置	・SF ₆ の供給	・供給不能 ・圧力低下	・ポンプ停止 ・配管破断	・RF給電不能		・圧力計	同上
7	冷却水配管	・冷却水の供給、排出	・配管破断 ・冷却水喪失 ・流量喪失	・腐食 ・ポンプ停止 ・弁の誤動作	・LHRF各機器変形、溶融 ・真空破壊 ・RF給電不能	・冷却水漏れ-真空容器内汚染 ・炉の運転停止	・圧力計 ・流量計 ・真空計	同上

Table I.220 Failure modes and effects analysis for FER

システム： サブシステム： 負イオン中性粒子入射加熱装置		FERFMEA				(1/1)	
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障のシナリオ		故障分類 大 中 小
					サ	シ	
	イオン源	イオンの発生と引き出し	イオンの発生又は引き出し不能	引き出し電極の損耗 カソードの損耗 電源の故障	プラズマ加熱不能	電圧計 電流計	・NBI停止
	中性化セル	イオンの中性化	中性化効率低下	中性ガス圧の変化 イオンエネルギー変化	プラズマ加熱不能	電流計 真空計	・NBI停止
	ビームタンク	非中性化イオンの回収	イオン回収不能	ビームタンクの變形	・プラズマ加熱不能	電流計 温度計	・NBI停止
	ドリフト管	中性粒子の注入	中性粒子のドリフト不能	ドリフト管の變形	・プラズマ加熱不能	電流計 温度計	・NBI停止
	ゲートバルブ シャッター	プラズマ真空容器との遮断	開/閉不能	バルブ不良	・NBIの過渡の放射化 トリチウムの流入量の増大		
	イオン源排気系	注入ガス排気	排気不能	クライオパネル不良	・プラズマの加熱不能	真空計, 温度計	・NBI停止
	ビームタンク排気系	ガス排気	排気不能	クライオパネル不良	・プラズマの加熱不能	真空計, 温度計	・NBI停止
	プロセクショナルアーマー (炉本体側)	つきぬけNBI粒子の受板	NBIの過渡のつきぬけ	NBI制御不能	・プロセクショナルアーマーの損傷		

Table 1.2.21 Failure modes and effects analysis for FER

システム： 一次冷却系		FER FMEA				(1/6)			
サブシステム： 第一壁冷却系	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障のシナリオ	故障の検出方法	故障分類 大中小	処置・対応	
1	・第1壁冷却管	・第1壁の除熱	(1) 冷却能力の低下	① ポンプ故障による流量低下	・第1壁除熱不能により 第1壁温度上昇	① ポンプ回転数 流量	① 大	① 炉停止	
				② 給水パイプのリーク		② 流量(IN, OUT) 炉室温度、湿度		② 炉停止	
				③ 2次系への熱伝達量の低下		③ 冷却材温度		③ 炉停止	
				④ 部分的な冷却能力の喪失	・第1壁の局所的な温度上昇 ・真空度が低下→プラズマ消滅	④ 流量(IN, OUT) 冷却材圧力、真空度	④ 大	④ 炉停止 排気系隔離	
				⑤ 冷却管の閉塞		⑤ 流量、圧力	⑤ 中	⑤ 炉停止	
				⑥ 冷却能力の喪失 (LOFA)	・第1壁温度急上昇	⑥ 流量、圧力、真空度、炉室温度、湿度	⑥ 大	⑥ 炉停止、排気系又は炉室の隔離	
				⑦ 給水パイプの閉塞		⑦ 流量、圧力	⑦ 中	⑦ 炉停止	
				⑧ バルブの誤閉止		⑧ 流量、圧力、バルブ閉閉信号	⑧ 中	⑧ 炉停止	
				⑨ ポンプ故障		⑨ 流量、圧力 ポンプ回転数	⑨ 中	⑨ 炉停止	
				⑩ ポンプの誤停止		⑩ 同上	⑩ 中	⑩ 炉停止	
				⑪ ポンプ電流喪失		⑪ 同上	⑪ 中	⑪ 炉停止	
				⑫ 破断 (LOCA)	・異常応力 ・疲労	⑫ 異常応力、真空容器内への蒸気 フローダウン ・真空容器外配管破断では 真空容器トリチウム汚染 蒸気移行	⑫ 流量、圧力、真空度	⑫ 大	⑫ 炉停止 排気系隔離

Table 1.2.22 Failure modes and effects analysis for FER

システム：一次冷却系 サブシステム：第一壁冷却系		FER FMEA					(2/6)		
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	サブシステム	故障のシナリズム	故障の検知方法	故障分類 大中小	処置・対応
2	配管		(1) 冷却材移送不能	<ul style="list-style-type: none"> ⑨ 管路閉塞 (LOFA) ⑩ ポンプ故障 (LOFA) ⑪ 破断 (LOCA) 	<ul style="list-style-type: none"> ⑫ 第一壁温度急上昇 	<ul style="list-style-type: none"> ⑬ 真空容器又は炉室への蒸気ブローダウン 	<ul style="list-style-type: none"> ⑭ 流量 	⑮ 炉停止	⑯ 炉停止
3	中間熱交換器	<ul style="list-style-type: none"> • 2次冷却系への熱量伝達 	<ul style="list-style-type: none"> (1) 熱量伝達の不能 (2) 熱伝達量の低下 (3) 伝熱管破断 	<ul style="list-style-type: none"> ⑩ 2次系流量喪失 ⑪ 2次系流量低下 ⑫ 2次系入口温度上昇 ⑬ 異常応力、疲労 	<ul style="list-style-type: none"> • 第一壁からの除熱不能 • 第一壁からの除熱量低下 	<ul style="list-style-type: none"> ⑭ 2次系流量、冷却材温度 	<ul style="list-style-type: none"> ⑮ 2次系流量、冷却材温度 	⑯ 炉停止	⑰ 炉停止
4	1次冷却水ポンプ	<ul style="list-style-type: none"> • 1次冷却水の循環 	<ul style="list-style-type: none"> • 停止 	<ul style="list-style-type: none"> • 電気系統不良 • ポンプ不良 	<ul style="list-style-type: none"> • 一冷却水温度上昇 	<ul style="list-style-type: none"> ⑱ 1次冷却材と2次冷却材との混合、2次系の放射能汚染 	<ul style="list-style-type: none"> ⑲ 流量計 ⑳ 温度計 	⑳ 炉停止	㉑ 炉停止
5	バルブ	<ul style="list-style-type: none"> • 冷却水の遮断、調節 	<ul style="list-style-type: none"> • バルブ閉塞 	<ul style="list-style-type: none"> • バルブ故障 • 電気系統不良 	<ul style="list-style-type: none"> • 冷却水不足 		<ul style="list-style-type: none"> ㉒ 温度計 ㉓ 圧力計 ㉔ 流量計 	㉕ 炉停止	㉖ 炉停止
6	バッファータンク	<ul style="list-style-type: none"> • 温度、流量の均一 	<ul style="list-style-type: none"> • 容器の破壊 	<ul style="list-style-type: none"> • ミサイル • き裂 			<ul style="list-style-type: none"> ㉗ 温度計 ㉘ 圧力計 ㉙ 流量計 	㉚ 炉停止	㉛ 炉停止
7	加圧器	<ul style="list-style-type: none"> • 冷却水の加圧 	<ul style="list-style-type: none"> • 加圧器の故障 	<ul style="list-style-type: none"> • 加圧器の故障 			<ul style="list-style-type: none"> ㉜ 温度計 ㉝ 圧力計 ㉞ 流量計 	㉟ 炉停止	㊱ 炉停止

Table 1.2.23 Failure modes and effects analysis for FER

システム：一次冷却系		FER FMEA				(3/6)			
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障シナリオ	影響	故障の検知方法	故障分類	処置・対処
							テ	大	
1	ダイバーク冷却管	ダイバークの冷却	(1) 冷却能力の低下	① ポンプ故障による流量低下	ダイバーク温度の上昇	① ポンプ回転数	① ポンプ回転数	① 炉停止	① 炉停止
							② 流量 (I/N/OUT)	② 炉停止, 排気系隔離	
							③ 真空度低下	③ 炉停止	
							④ 真空度低下	④ 炉停止	
							⑤ 2次系への熱伝達量の低下	⑤ 炉停止	
							⑥ 給水パイプのリーク	⑥ 炉停止, 排気系隔離	
							⑦ 部分的な冷却能力の喪失	⑦ 炉停止, 排気系隔離	
							⑧ 冷却能力の喪失	⑧ 炉停止, 排気系隔離	
							⑨ 給水パイプの破断	⑨ 炉停止, 排気系隔離	
							⑩ 冷却能力の喪失	⑩ 炉停止, 排気系隔離	
2	配管	冷却材の移送	(1) 冷却材移送不能	① 冷却管の閉塞	① プラズマ消滅, 排気系への高温蒸気移行	① 流量	① 炉停止, 排気系隔離	① 炉停止, 排気系隔離	
						② 真空度低下	② 炉停止, 排気系隔離		
						③ 2次系への熱伝達量の低下	③ 炉停止, 排気系隔離		
						④ 給水パイプのリーク	④ 炉停止, 排気系隔離		
						⑤ 部分的な冷却能力の喪失	⑤ 炉停止, 排気系隔離		
						⑥ 冷却能力の喪失	⑥ 炉停止, 排気系隔離		
						⑦ 給水パイプの破断	⑦ 炉停止, 排気系隔離		
						⑧ 冷却能力の喪失	⑧ 炉停止, 排気系隔離		
						⑨ 給水パイプの破断	⑨ 炉停止, 排気系隔離		
						⑩ 冷却能力の喪失	⑩ 炉停止, 排気系隔離		

Table 1.2.24 Failure modes and effects analysis for FER

システム：一次冷却系 サブシステム：ダイバータ冷却系		FER FMEA						(4/6)	
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障シナリオ	影響	故障の検知方法	故障分類 大中小	処置・対処
3	・熱交換器	・2次冷却系への 熱量伝達	(1) 熱量伝達の不能	① 2次系流量喪失	・ダイバータからの除熱不能		① 2次系流量、 冷却材温度		・炉停止
			(2) 熱伝達量の低下	② 2次系流量低下	・ダイバータからの除熱量低下		② 流量、圧力、 温度		・炉停止
				③ 2次系入口温度上昇			③ 流量、圧力、 温度		・炉停止
			(3) 圧熱管破断	④ 異常応力、疲労	・ダイバータからの除熱異常		④ 圧力、2次系放 射能温度		・炉停止
4									
5									
6									
7									
第1壁冷却系と同一									

Table 1.2.25 Failure modes and effects analysis for FER

システム： サブシステム：		FER FMEA				(5/6)																																					
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障のシナシナ		故障分類 大中小																																				
					サ ブ シ ス テ ム	形 態		検 知 方 法	処 置 ・ 対 処																																		
1	・シールド内冷却機 ・シールドの除熱	(1) 冷却能力の低下	① 冷却能力の低下	① ポンプ故障による 流量低下 ② 真空容器外部の給 水パイプリーク	① シールド温度上昇 ② 真空度の低下	① 流量、ポンプ回 転数、シールド 温度 ② 流量(IN/OUT)	① 炉停止、排気系隔 離 ② 炉停止																																				
								② 部分的な冷却能力 の喪失	③ 真空容器内部の給 水パイプリーク ④ 2次系への熱伝達 量の低下	③ 真空度の低下	③ 真空度 流量(IN/OUT)	③ 炉停止、排気系隔 離																															
													③ 冷却能力の喪失	⑤ 給水パイプ分岐管 下流部でのリーク ⑥ 冷却溝の閉塞	⑤ 真空度の低下	⑤ 流量、圧力、真 空度	⑤ 炉停止、排気系隔 離																										
																		④ 冷却能力の喪失	⑦ 給水パイプの破断 ・シールド温度の急激な上昇	⑦ 流量、圧力、真 空度又は炉室温 度、圧力	⑦ 炉停止、排気系隔 離																						
																						⑤ 冷却能力の喪失	⑧ 給水パイプの閉塞	⑧ 流量、圧力	⑧ 炉停止																		
																										⑥ 冷却能力の喪失	⑨ ハルプの誤閉止	⑨ 炉停止															
																													⑦ 冷却能力の喪失	⑩ 給水ポンプの故障	⑩ 炉停止												
																																⑧ 冷却能力の喪失	⑪ 給水ポンプの誤停 止	⑪ 炉停止									
																																			⑨ 冷却能力の喪失	⑫ ポンプ電源喪失	⑫ 炉停止						
																																						⑩ 冷却能力の喪失	⑬ 異常応力 ・真空容器への蒸気吹き出し	⑬ 炉停止、排気系隔 離			
																																									⑪ 冷却能力の喪失	⑭ 腐食	⑭ 炉停止

Table 1.2.26 Failure modes and effects analysis for FER

システム：一次冷却系 サブシステム：固定及び可動凝縮体冷却系		FER FMEA				(6/6)		
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障シナリオ		故障分類 大中小	
					シナリオ	検知方法		
2	配管	冷却材の移送	(1) 流体移送の不能	⑩ 流体閉塞 (LOFA) ⑪ ポンプ故障 (LOFA) ⑫ 破断 (LOCA)	シールド1からの除熱不能	⑬ 流量、圧力等	延滞・対処 ・炉停止	
						⑭ 流量計、ポンプの回転数の異常		・炉停止
3	熱交換器	2次冷却系への熱量伝達	(1) 熱量伝達の不能	⑬ 2次系流量喪失 ⑭ 2次系流量低下 ⑮ 2次系入口温度上昇	シールド1からの除熱不能	⑯ 2次系流量、冷却材温度	・炉停止	
			(2) 熱伝達量の低下					⑰ 流量、圧力、温度 ⑱ 速度、圧力、温度
4	第一壁冷却系と同	伝達管破断	(3) 伝達管破断	⑲ 異常応力、疲労	⑳ 一次冷却材の2次系への混入、㉑ 2次系放射能汚染	⑳ 圧力、2次系放射能	・炉停止	
								(3) 伝達管破断
5	第一壁冷却系と同	伝達管破断	(3) 伝達管破断	⑲ 異常応力、疲労	⑳ 一次冷却材の2次系への混入、㉑ 2次系放射能汚染	⑳ 圧力、2次系放射能	・炉停止	
6								7
7								

Table 1.2.27 Failure modes and effects analysis for FER

システム：二次冷却系		FER FMEA (1/1)							
システムサブシステム	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障システム	影響	検出方法	故障分類	処置・対応
1	配管系	冷却水の移送	移送不能	破損	2次冷却材温度上昇 2次冷却材温度上昇 2次冷却材温度上昇 2次冷却材温度上昇 2次冷却材減圧・喪失	1次冷却材温度上昇	流量、圧力、温度	大中小	炉停止
				閉塞					
				ポンプ故障					
				弁の誤閉止					
2	冷却塔	大気との熱交換	冷却不能	ファンの故障	2次冷却材温度上昇	1次冷却材温度上昇	ファン動力 電動機回転数 流量、圧力、温度	大中小	炉停止
				配管漏れ					
				冷却塔の破壊					
3	ポンプ	冷却水の循環	停止	電気系統不良	2次系、温度上昇	1次冷却材温度上昇	ファン動力 電動機回転数 流量、圧力、温度	大中小	炉停止
				ポンプ不良					
4	バルブ	冷却水流速調節	バルブ開閉不能 バルブ閉塞	バルブ故障	冷却水不足、LOFA	1次冷却材温度上昇	ファン動力 電動機回転数 流量、圧力、温度	大中小	炉停止
				電気系統故障					

Table 1.2.28 Failure modes and effects analysis for FER

システム : プランケット・テストモジュール冷却システム		FER FMEA			(1/2)		
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障の発生	故障の種類	
					サブシステム	影響	重大小
	プランケット・テストモジュール内冷却管	プランケット・テストモジュールの除熱	(1) 冷却能力の低下	① ポンプ故障による流量低下	・プランケット・テストモジュール全体にわたって温度上昇があり構造物の熱応力が増大する	① 流量計, 回転数 プランケット・テストモジュール 温度	① 炉停止
				② 真空容器外部の給水バイブリーク	② 炉室ヘトリウム水流出	② 流量計(IN, OUT)	② 炉停止
				③ 真空容器内部の給水バイブリーク	③ 真空度の低下がおりアガラスマディスプレイが生じる	③ 真空計	③ 炉停止, 排気系隔離
				④ 2次系への熱伝達量の低下	④ 冷却管の閉そく	④ 冷却材温度	④ 炉停止
			(2) 部分的な冷却能力の喪失	⑤ 給水バイブ分岐管下部でのリーク	⑤ 真空度の低下がおりアガラスマディスプレイが生じる	⑤ 真空計	⑤ 炉停止, 排気系隔離
				⑥ 冷却管の閉そく	⑥ プランケット・テストモジュール構造物の許容温度を超えし20溶融, プランケット容器破損	⑥ 冷却材温度	⑥ 炉停止
			(3) 冷却能力の喪失 (LOFA)	⑦ 給水バイブの破断	⑦ 炉室又は真空容器への冷却水フローダウン	⑦ 流量計, 圧力	⑦ 炉停止, 排気系隔離
				⑧ 給水バイブの開塞	炉室のトリチウム汚染	⑧ 流量, 圧力	⑧ 炉停止
				⑨ バルブの誤閉止	⑨ バルブ閉信号, 給水流量	⑨ バルブ閉信号, 給水流量	⑨ 炉停止
				⑩ 給水ポンプの故障	⑩ 給水流量, 回転数, 電流, 電圧	⑩ 給水流量, 回転数, 電流, 電圧	⑩ 炉停止
				⑪ 給水ポンプの誤管止	⑪ 給水ポンプの誤管止	⑪ プランケット温度, 流量	⑪ 炉停止, 給水ポンプ再起動
				⑫ ポンプの電源喪失	⑫ ポンプの電源喪失	⑫ 電流計, 電圧計	⑫ 炉停止, 非常用電源作動

Table 1.2.29 Failure modes and effects analysis for FER

システム : 一次冷却系 サブシステム : プランケットテストモジュール冷却システム		FER FMEA (2/2)						
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障の種類	故障の検知方法	故障分類 大中小	処置・対応
					サ ブ シ ス テ ム			
		(4) 破断 (LOCA)	③ 異常応力、疲労	・プランケット・テストモジュールへの冷却水ブローダウンとプランケット容器内圧の上昇がおこる。 ・プラズマ消滅が同時におこる。	⑩ 流量、圧力等	③ 炉停止 排気系隔離、1回収系隔離		
	・プランケット・テストモジュール外部配管	(1) 流体移送の不能	④ 流路閉 (LOFA)	・プランケット・テストモジュールからの除熱不能又は低下	⑩ 流量、圧力等	③ 炉停止		
			⑤ ポンプ故障 (LOFA)		⑩ 流量計、ポンプの回転数	③ 炉停止		
			⑤ 破断 (LOFA)	⑩ 真空容器又は炉室への冷却水のブローダウン、プラズマ消滅又は炉室のトリチウム水汚染	⑩ 圧力、流量等	③ 炉停止 排気系隔離又は炉室隔離		
	・熱交換器	・2次冷却系への熱量伝達	⑥ 2次系流量喪失	・プランケット・テストモジュールからの除熱不能	⑩ 2次系流量、冷却材温度	③ 炉停止		
		(2) 熱伝達量の低下	⑥ 2次系流量の低下	・プランケット・テストモジュールからの除熱量低下	⑩ 流量、圧力、温度	③ 炉停止		
			⑥ 2次系入口温度上昇		⑩ 温度、圧力	③ 炉停止		
		(3) 伝熱管破断	⑤ 異常応力、疲労	・プランケットからの除熱異常	⑩ 圧力、2次系放射能	③ 炉停止		
				⑤ 一次冷却材の2次系への混入、2次系への放射能汚染				

Table 1.2.30 Failure modes and effects analysis for FER

システム : 真空排気系		FER FMEA					(1/1)		
サブシステム : プラズマ真空容器真空排気系		故障モード		故障原因		故障の検出方法		故障分類	
No.	対象機器	機能	故障モード	推定原因	サブシステムの故障	シグナル	検出方法	故障分類	処置・対応
1	クライオポンプ パネル	He 排気	排気能力低下, 冷却材漏洩	冷却管閉塞 破断	吸着材温度上昇, ガス放出	プラズマ温度低下	圧力計 温度計 流量計	初の運転停止	
2	クライオコンデンサ ションパネル	D ₂ , T ₂ 吸着	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上
3	液体 N ₂ シェプロン	熱シールド	冷却能力喪失	同上	パネル温度上昇, ガス放出	D ₂ , T ₂ , He ガス放出	同上	同上	炬の運転停止
4	液体 He 配管	LHe 流路	配管破断 LHe 喪失	腐食 弁誤動作 内圧上昇	ソープション, コンデンション パネル 温度上昇 ガス放出	同上	同上	同上	同上
5	液体 N ₂ 配管	LN ₂ 流路	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上
6	排気系真空チェンバ	真空保持	チェンバ破壊	チェンバのクラック 進展	空気がリーク トリチウム放出 H ₂ , D ₂ , 他のガス放出	炬本体室トリチウム汚染	同上 トリチウムモニ タ	炬の運転停止	
7	ゲートバルブ	真空器と排気系 の隔離	閉閉不能	内部破損 電気系統故障	再生不能	排気不能	位置監視 センサー 動力源監視 センサー	炬の運転停止	
8	排気ダクトベローズ	熱膨張吸収	破損	クラック 内圧上昇	N ₂ リーク, Air リーク	同上	圧力計	同上	
9	ターボ分子ポンプ	補助排気 再生ガス排気	回転不能	破損 電気系統故障	再生モード未完	炉内圧力上昇	圧力計	炬の運転停止	
10	スパイラルベローズ ポンプ	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上

Table 1.23) Failure modes and effects analysis for FER

システム：真空排気系 サブシステム：クライオスタット排気設備		FER FMEA					(1/1)		
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	サブシステムの故障	影響	故障の検知方法	故障分類 大中小	処置・対処
1	油拡散ポンプ	・クライオスタット内排気 ・ノズル閉塞 ・油リーク	・排気不能	・ポンプ破壊	・排気不能	・コイルクウェンチ	・圧力計 ・流量計	・中の運転停止	
2	メカニカルブーストポンプ	・クライオスタット内排気	・回転不能	・破壊 ・電気系統故障	・排気不能	・コイルクウェンチ	・圧力計 ・流量計	・中の運転停止	
3	ロータリーポンプ	・クライオスタット内排気	・回転不能	・破壊 ・電気系統故障	・排気不能	・コイルクウェンチ	・圧力計 ・流量計	・中の運転停止	
4	ゲートバルブ	・ベルジャーカー内と排気系の隔離	・開閉不能	・破壊 ・電気系統故障	・排気不能 ・ポンプ過負荷		・圧力計 ・流量計		
5	コールドトラップ	・不純物除去	・冷媒喪失	・パイプ切断 ・き裂進展	・ベルジャーカー内汚染		・圧力計 ・流量計		

Table 1.2.32 Failure modes and effects analysis for FER

システム : 燃料循環システム サブシステム : 燃料精製システム		FER FMEA (1/4)						
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障シナリオ	故障分類	故障の検知方法	処置・対応
	貯蔵タンク(I)	・ガス貯蔵	・漏洩	・タンク損傷	・プラズマ排ガス及び再生ガスがG, B内へ放出	大	・圧力計	・燃料ガスを台金ヘッドへ吸蔵する
	移送ポンプ	・ガス移送	・出口圧力低下 ・流量低下 ・連続運転失敗	・駆動源故障	・精製水素ガス量の減少	中	・圧力計 ・流量計	・予備機へ切替
	Pd合金膜透過器	・不純物分離	・1次側ガス圧力低下 ・2次側ガス圧力上昇		・精製水素ガス量が減少又は精製不能	小	・1次側圧力計 ・2次側圧力計	・予備器へ切替 ・同上
			・1次側ガス温度低下				・温度計	・同上
			・精製ガス純度不良		・精製水素ガスが純度不良		・ガス分析計	・同上
			・Pd合金膜(チューブ)の破損				・2次側圧力計	・同上
	精製ガス冷却器	・冷却	・精製ガス出口温度高		・貯蔵タンク(II)の水素ガス温度上昇		・出口温度計	
	真空ポンプ		・真空度低下 ・連続運転失敗		・精製水素ガス量の減少又は精製不能		・真空計	・予備器へ切替
					・同上		・同上	・同上

Table 1.2.33 Failure modes and effects analysis for FER

システム： サブシステム：		燃料循環システム 燃料精製システム		FER FMEA		(2/4)	
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障シナリオ	影響	故障分類 大中小
	貯蔵タンク(II)	・精製水素ガスの貯蔵	・漏		・精製水素ガスのG・B内へ放出	・圧力計	・大
	貯蔵タンク(III)	・不純物ガスの貯蔵	・漏		・不純物ガスのG・B内へ放出	・圧力計	・大
	不純物移送ポンプ	・ガス移送	・出口圧力低下	・駆動源故障	・触媒反応器へのガス流量の低下	・圧力計	・大 ・予備器へ切換
			・流量低下			・流量計	
			・連続運転の失敗				
	ヘリウム及び酸素供給装置	・ヘリウム及び酸素供給	・酸素ガス量の低下 ・ヘリウムガス量の低下		・酸素流量低下→触媒反応器性能低下→貯蔵タンク(III)の水素濃度増加	・流量計 ・ガス濃度計	・大 ・酸素供給停止
	触媒反応器	・ガスの酸化	・ボール保持板破損		・酸化反応低下又は不能	・酸素計	・大 ・予備器へ切換
			・ヒータの故障		・トリチウム透過の増大(温度上昇時)		
			・チャンネルリンク				
	冷却器	・冷却	・出口ガス温度上昇		・コールド・トラップへ高温ガスが流入→コールド・トラップの性能低下	・出口温度計	・大

Table 1.2.34 Failure modes and effects analysis for FER

システム : 燃料循環システム		FER FMEA				(3/4)		
サブシステム : 燃料精製システム		故障の影 響				故障分類		
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	サブシステムの故障	故障の検知方法	大中小	処置・対応
	・コールド・トラップ 再生用加熱器	・トラップ内の水分の 気化	・出口ガス温度低下	・トラップ内の水分を気化できな い		・出口温度計		・予備器へ切換 (ヒータ交換が可能 なるように設計 変更が必要)
	・コールド・トラップ	・水分のトラップ	・冷却管の破損	・燃料ガスにN ₂ ガスが混入		・側圧力計		
			・膜の破損	・G, B 内ヘトリチウム水及び水 蒸気を放出		・ガス分析計		
			・フランジ部から冷媒 の漏洩					
			・L, N; 配管系の破損	・水分の凍結分離ができない		・L, N; 側圧力計		
			・Heガス圧力上昇	・燃料ガス側圧力上昇		・調節弁出口圧力 計		
	・移送ポンプ	・燃料ガスの移送	・連続運転失敗	・燃料ガスの移送不能		・流量計		・予備器へ切換
	・貯蔵タンク (IV)	・ガス貯蔵	・漏洩	・G, B 内ヘ貯蔵ガスの放出		・圧力計		
	・予熱ヒータ	・加熱	・出口ガス温度低下	・再生ガスの分離性能低下		・出口温度計		・予備器へ切換

Table 1.2.35 Failure modes and effects analysis for FER

システム：燃料循環システム サブシステム：燃料精製システム		FER FMEA (4/4)					
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障の検知方法	故障分類 大 中 小	処置・対処
	・固体電解質電池セル	・水素ガス生成	・固体電解質管の破損	・燃料ガスが廃ガス処理系へ流出する	・電圧計		・予備機へ切換
		・絶縁部の破損		・水素ガス流量低下	・廃ガス圧力計		
		・電位差のアンプ		・電流の分離ができない			
		・フランジ部の漏洩		・G. B 内の燃料ガス又は水素ガスの放出			
		・加熱室フランジ部の漏洩		・水素ガスの放出			
		・加熱不能					
	・冷却器	・ガス冷却	・出口ガス温度高	・燃料ガス温度上昇	・出口温度計		
	・移送ポンプ	・ガス移送	・連続運転失敗	・燃料ガス移送不能	・出口流量計		・予備機へ切換
	・ZrNゲッター		・合金ヘッド(貯蔵系)と同じ	・系内ガスの貯蔵不能			・予備機へ切換
	・配管		・漏洩	・G. B 内へ燃料ガスの放出	・圧力計		
	・配管 (Pd透過器～真空ポンプ)		・真空度低下	・Pd合金膜透過器のガス精製不能	・真空計		
			・漏洩	・精製ガスにN ₂ ガスが混入			
	・グローブ・ボックス	・トリチウム閉じ込め	・自圧維持不可	・トリチウムの漏洩	・トリチウムモニタ		
	・グローブ・ボックス	・トリチウム浄化	・システム故障	・グローブ・ボックス内トリチウム濃度増大	・トリチウムモニタ		
	・雰囲気浄化系	・浄化不能					

Table I.2.36 Failure modes and effects analysis for FER

システム： サブシステム：		燃料循環システム 水素同位体分離系		FER FMEA		（1/2）		
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障のシナリオ	影響	故障の種類 大中小	処置・対応
	深冷蒸留塔 I, II, III, IV	燃料ガス水素同位体分離	・リボイラヒータ故障 ・フラッディング	・ヒータ断線温度制御不能 ・分離性能低下又は分離不能	・電流計 ・液位計	・塔頂側は深冷活性炭の吸着塔のラインへ切換える ・塔底側は貯蔵系へ移送 ・リボイラヒータの停止	大中小	処置・対応
			・コンデンサチューブの破損	・冷媒用Heが漏入	・出口温度計			
			・塔内圧力低下 ・蒸留塔破断	・分離不能 ・分離不能	・圧力計 ・差圧計			
	ヒータ	加熱	・ヒータ故障	・ヒータ断線温度制御不能 ・分離性能低下	・温度計			
	同位体平衡器	燃料ガス水素同位体原子組合せ変換	・偏流 ・閉塞	・反応効率の低下	・流量計 ・圧力計			
	深冷活性炭吸着塔		・冷媒用ジャケットの腐損 ・活性炭の劣化 ・閉塞 ・破損	・系内ガスの吸着不能	・圧力計			

Table 1.2.37 Failure modes and effects analysis for FER

システム： <u>燃料循環システム</u>		FER FMEA		(2/2)		
サブシステム： <u>水素同位体分離系</u>		故障の影		故障分類		
対象機器	機能	故障モード	推定原因	サブシステム	故障の検知方法	処置・対処
・保冷槽	・深冷蒸留塔の保冷	・槽内温度上昇	・深冷蒸留塔の保冷不能→蒸留塔内圧力・温度上昇→同位体分離不能	・真空計	・真空計	・系統運転停止
		・槽内の真空度低下	・同 上	・真空計	・真空計	・系統運転停止
		・冷却He流量低下	・深冷蒸留塔、クーラへの冷媒、He流量低下→蒸留塔内圧力、温度上昇→同位体分離不能	・塔内温度計	・塔内温度計	・He冷却系点検
		・冷却He温度上昇	・同 上	・同 上	・同 上	・同 上
		・冷却用LN ₂ 、He配管破断	・同 上	・槽内温度計	・槽内温度計	
		・保冷槽破損	・G、B内へトリチウムガスの放出	・真空計	・真空計	・温度計
・グループ・ボックス	・トリチウム閉じ込め	・トリチウム閉じ込め不能漏洩	・トリチウム処理室へのトリチウム漏洩	・圧力計	・圧力計	・トリチウムモニタ
		・トリチウム浄化不能	・グループ・ボックス内トリチウム濃度増大	・トリチウムモニタ	・トリチウムモニタ	
・グループ・ボックス	・トリチウム浄化	・トリチウム浄化不能	・システム故障			

Table I.2.38 Failure modes and effects analysis for FER

システム : 燃料循環システム サブシステム : 燃料貯蔵システム		FER FMEA (1/3)			
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障の発生メカニズム 故障の種類 大中小 延滞・対策
	・移送ポンプ	・燃料ガスの移送	・出口圧力低下	・駆動源故障	・燃料ガスの移送の減少又は移送不能 ・出口圧力計
			・流量低下	・同上	・流量計
			・連続運転失敗	・同上	
	・循環ポンプ	・系内の残留水素ガスのバージ	・出口圧力低下	・駆動源故障	・系内の残留水素ガスの初期バージ(クリーニング)不能 ・出口圧力計 ・バイパスによりガス拡散による循環貯蔵
			・流量低下	・同上	・流量計
			・連続運転失敗	・同上	
	・貯蔵タンク	・燃料ガスの貯蔵	・漏洩	・タンク損傷	・燃料ガスの貯蔵不能及びガスのG・B内への放出
	・ガス混合器	・ガスの混合調整	・ガスの混合調整失敗	・ガス混合比調整不良	・ガス分析計
			・漏洩	・燃料注入系への流量低下及びガスのG・B内への放出	・圧力計

Table 1.2.39 Failure modes and effects analysis for FER

システム： <u>燃料循環システム</u> サブシステム： <u>燃料貯蔵システム</u>		FER FMEA (2/3)				
対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障のシナシナ	影響	
Na				故障の種類	処置・対処	
・ZrNi合金ベッド (1次側)	・トリチウムガスの吸蔵・放出 能及び2次側へトリチウムガスの漏洩	・トリチウムガスの吸蔵・放出又は破損	・トリチウムガスの吸蔵・放出能及び2次側へトリチウムガスの漏洩	・トリチウムガスの吸蔵/放出不能及び2次側へトリチウムガスの漏洩	・1次側圧力計 ・1次側温度計	・予備器へ切換える
				・トリチウムガスの放出性能低下	・1次側圧力計	
		・メタル温度上昇	・2次側へ水素透過の増加	・2次側へ水素透過の増加	・1次側温度計	
・ZrNi合金ベッド (2次側)	・トリチウムガスの吸蔵・放出	・トリチウムガスの吸蔵・漏洩又は破損	・トリチウムガスの吸蔵・漏洩又は破損	・トリチウムガスの吸蔵/放出不能及び冷却水側へトリチウムガスの漏洩	・2次側圧力計 ・2次側温度計	・予備器へ切換える
				・トリチウムガスの吸蔵不能又は放出ガス流量増加	・2次側温度計	
・ZrNi合金ベッド (加熱装置)	・合金ベッドの加熱	・2次側圧力上昇	・合金ベッドの加熱	・トリチウムガスの吸蔵/放出不能	・2次側圧力計	
				・放出ガス流量低下又は放出不能	・出口温度計	・予備器へ切換える
・ZrNi合金ベッド (冷却水側)	・合金ベッドの冷却	・出口ガス温度上昇	・合金ベッドの冷却	・放出ガス流量増加及び吸蔵不能	・出口温度計	・同上
				・トリチウムガス温度上昇	・冷却水流速計	・冷却水系点検
		・漏洩又は破損	・漏洩又は破損	・トリチウムガスの吸蔵/放出不能。G, B 内へ冷却水(及びトリチウムガスの可能性)の漏洩	・冷却水流速計	・予備器へ切換

Table 1.2.40 Failure modes and effects analysis for FER

システム： サブシステム：		F E R F M E A						(3 / 3)				
燃料循環システム 燃料貯蔵システム		対象機器	機能	故障モード	推定原因	サブシステム	故障のシナシ	影響	故障の検知方法	故障分類	処置・対応	
		配管	燃料引き廻し	・漏洩又は故障		・G. B 内へトリチウムガスの放出						
		・グローブ・ボックス	・トリチウム閉じ込め	・負圧維持不可		・トリチウム処理室へのトリチウムの漏洩						
		・破損										
		・グローブ・ボックス	・トリチウム浄化	・システム故障								
		・浄化不能										
		・グローブボックス内トリチウム濃度増大										

Table I.2.41 Failure modes and effects analysis for FER

システム：燃料循環システム サブシステム：燃焼フェーズ用ペレット入射装置		FER FMEA				(1/1)		
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障シナシテム	影響シナシテム	故障の種類 大中小	処置・対応
	連続式氷製造装置	ペレット冷凍	冷凍固化の不可	冷凍システムの故障	注入不可	温度計	大	炉停止
	アーク放電ガス採	ペレットの第1段加 速	加速不十分, 不能	駆動源故障	注入不可	速度計 電流計	大	炉停止
	レールガン	ペレットの第2段加 速	加速不十分, 不能	駆動源故障	注入不可	速度計	大	炉停止
	ガイドチューブ	ペレットへのトラ スへのガイド	ガイドの変形	異常応力	注入不可		大	炉停止
	排気ポンプ	ガス排気	排気能力低下	駆動源故障	注入不可	真空計	大	炉停止
	ガス供給システム	ガス供給	ガス供給能力低下, 不能	供給系故障	注入不可	流量計	大	炉停止
	グループ・ボックス	トリチウム閉じ込め 破損	グループ・ボックス	ミスアイル, 異常応力		居室へのトリチウム漏洩 トリチウムモニ タ	大	炉停止
	グループ・ボックス	グループ・ボックス 内のトリチウム濃度 低下, トリチウム濃 度防止	雰囲気浄化不能	システム故障	グループ・ボックス内トリチウ ム濃度上昇	トリチウムモニ タ	大	炉停止

Table 1.2.42 Failure modes and effects analysis for FER

システム： サブシステム：		F E R F M E A						(1 / 1)	
燃料循環システム 追加熱フェーズ用ベレット入射装置		機	能	故障モード	推定原因	故障シナシテム	影響シナシテム	故障の検知方法	故障分類
No	対象機器	機	能	故障モード	推定原因	故障シナシテム	影響シナシテム	故障の検知方法	故障分類
	・遠心式入射装置	・ベレットの第1段加 速	・加速不可	・駆動源故障	・注入不可	・速度計	・炉停止	・速度計	・炉停止
	・レールガン	・ベレットの第2段加 速	・加速不可	・駆動源故障	・注入不可	・速度計	・炉停止	・速度計	・炉停止
	・ガイドチューブ	・ベレットのトータル へのガイド	・ガイドの変形	・異常応力	・注入不可	・ガイドチューブ損傷	・炉停止		・炉停止
	・排気ポンプ	・ガス排気	・排気能力低下	・駆動源故障	・注入不可	・真空計	・炉停止	・真空計	・炉停止
	・ガス供給システム	・ガス供給	・ガス供給能力低下 不能	・供給系故障	・注入不可	・流量計	・炉停止	・流量計	・炉停止
	・グローブ・ボックス	・トリチウム閉じ込め 室へのトリチウム漏 洩の防止	・グローブ・ボックス 破損	・ミサイル, 異常応力	・炉室へのトリチウム濃度	・トリチウムモニ タ	・炉停止	・トリチウムモニ タ	・炉停止
	・グローブ・ボックス 内雰囲気浄化システム	・グローブ・ボックス 内のトリチウム濃度 低下	・雰囲気浄化系不能	・システム故障	・グローブ・ボックス内トリチウ ム濃度上昇	・トリチウムモニ タ	・炉停止	・トリチウムモニ タ	・炉停止

Table 1.2.43 Failure modes and effects analysis for FER

システム： サブシステム：燃料循環システム ブランケット・テストモジュールトリチウム回収設備		FER FMEA				(1/1)	
対象機器	機能	故障モード	推定原因	サブシステムの故障	影響	故障の種類	処置・対応
・触媒酸化器	・掃気ガス中の水素同位体の酸化	・掃気ガス中の水素同位体の酸化率低下 ・ヒータ断線 ・不能	・触媒性能劣化 ・ヒータ断線	・燃料ガス同位体回収機能低下	・温度計	故障の種類 大 中 小	処置・対応
・モレキュラシーブ ベッド	・脱湿	・水素同位体酸化化合物(水蒸気)の除去率低下	・脱湿剤性能劣化	・増殖トリチウム回収能力低下	・湿度計		
・コールド・トラップ	・トリチウム水回収	・トリチウム水回収不 可	・冷凍パネル機能せず ・ヒータ目詰まり	・増殖トリチウム回収能力低下	・温度計		
・フィルター	・微粉除去	・微粉等の除去不能 ・流路閉塞	・炉材破損 ・炉材目詰まり	・系統機器内沈着による機能低下 ・流量低下	・差圧計 ・掃気ガス配管系目詰まり		
・掃気ガスプロア	・掃気ガスの循環駆動	・掃気ガスの循環駆動 下、停止	・駆動源故障	・増殖トリチウム回収能力低下	・流量計		
・予熱器	・掃気ガスの加熱	・掃気ガスの予熱不能	・ヒータ断線	・掃気ガス酸化触媒塔反応機能低下	・温度計		
・冷却器	・掃気ガスの冷却	・掃気ガスの冷能不可	・冷却水流速低下または喪失	・下流の掃気ガス脱湿塔負荷増	・温度計 流量計		

Table 1.2.44 Failure modes and effects analysis for FER

システム： サブシステム： 雰囲気トリチウム浄化系		F E R F M E A				(1 / 1)	
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障シナリオ	影響	故障分類 大 中 小
	・ブローア	・空気の循環駆動	・空気循環駆動不可	・駆動源故障	・トリチウム除去不可	・流量計	大 中 小
	・触媒筒	・空気中の水素同位体の酸化	・反応能力低下、不能	・ヒータ断線、触媒性能劣化	・水素同位体酸化機能低下	・環境へのトリチウム放出増大	・濃度計 ・温度計
	・モレキュラーション高	・空気中水素同位体の酸化 ・水素化合物(水素気)の除去	・水素除去機能低下	・脱湿剤性能劣化	・トリチウム水素気除去機能低下	・環境へのトリチウム放出の増大	・湿度計
	・加熱器(再生用)	・空気の加熱	・加熱不能	・加熱器故障	・モレキュラーション再生不可	・温度計	
	・加熱器(触媒用)	・空気の加熱	・加熱不能	・加熱器故障	・触媒酸化機能低下	・温度計	
	・冷却器(モレキュラーション用)	・空気の冷却(トリチウム水回収)	・冷却不能	・冷却器故障	・トリチウム回収不可		

Table 1.2.46 Failure modes and effects analysis for FER

システム : 電 源 系		F E R F M E A					(1 / 1)	
サブシステム : 受 配 電 設 備		機 能	故 障 モ ー ド	推 定 原 因	故 障 分 類		処 置 ・ 対 処	
対 象 機 器	サ ブ シ ス テ ム				シ ス テ ム	大 中 小		
・ 275 kV 受電設備	・ 275 kV の系統電力を受電し、66 kV の配電電圧に降圧する	・ 停電	・ 機器の故障 ・ 短絡、地絡 ・ 系統の停電	・ プラント全停電	・ 電圧、電流	・ 電圧、電流	・ プラント停止	
・ 66 kV 受電設備	・ 66 kV の電力を各負荷設備に分配するとともに、各負荷設備に適切な電圧に降圧する	・ 停電	・ 機器の故障 ・ 短絡、地絡	・ 一部負荷設備の停電	・ 電圧、電流	・ 電圧、電流	・ 炉停止	
・ 操作用配電設備	・ プラントの補機類に必要な低電圧の電力を供給する	・ 停電	・ 機器の故障 ・ 短絡、地絡	・ プラントの補機類停電	・ 電圧、電流	・ 電圧、電流	・ 補機の重要度により炉停止 ・ 一部システム停止	
・ 無停電電源	・ 制御設備、機器に必要な無停電電力を供給する	・ 停電	・ 機器の故障 ・ 短絡、地絡	・ 制御設備の電源喪失	・ 電圧、電流	・ 電圧、電流	・ 炉停止	
・ 非常用発電機	・ 系統電力の停電時プラントの安全確保に必要な電力を供給する	・ 発電不能	・ デーゼル機関の故障 ・ 発電機の故障 ・ 短絡、	・ 停電時の非常電源喪失	・ 点検、試運転	・ 点検、試運転	・ 炉起動不可	

Table 1.2.47 Failure modes and effects analysis for FER

システム： サブシステム：		FER FMEA					(1/1)		
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	サブシステムの故障	影響	検知方法	故障分類	
								大	中 小
	電動発電機	ポロイダル磁場コイルの通電に必要なエネルギーを蓄積し、電源設備に電力を供給する。	発電不能	発電機軸振動過大 発電機補機の故障 駆動装置の故障 励磁装置の故障 短絡、地絡	ポロイダル磁場コイル電源の主回路停電	ポロイダル磁場の喪失	電圧、電流		プラズマ停止
	18 kV配電盤	電動発電機の電力を分配する。	停電	機器の故障 短絡、地絡	ポロイダル磁場コイル電源の主回路停電	ポロイダル磁場の喪失	電圧、電流		プラズマ停止
	サイリスタ変換装置	電動発電機から供給される交流電力を直流電力に変換し、負荷コイルに供給する。	コイル電流の喪失 コイル電流の過大	機器の故障 短絡、地絡 制御装置の異常		ポロイダル磁場の喪失	電圧、電流		プラズマ停止
	直流母線装置	サイリスタ変換装置の出力と負荷コイルを接続する。	コイル電流の喪失	短絡、地絡		ポロイダル磁場の喪失	電圧、電流		プラズマ停止
	電源制御系	サイリスタ変換装置を含む電源設備機器を、統制制御し、負荷であるポロイダル磁場コイルに所要の電流を通電させる。	制御シーケンス異常	機器の故障 制御電源の停電	ポロイダル磁場コイルの通電異常	ポロイダル磁場の喪失	電圧、電流		プラズマ停止

Table 1.2.48 Failure modes and effects for FER

システム : トロイダル磁場コイル電源		F E R F M E A (1/1)										
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障システム		影響	故障の検知方法	故障分類			
					サ	フ			シ	テ	ム	大
	・6.6 kV配電盤	・受電電力の分配	・停電	・機器の故障 ・短絡、地絡	・トロイダル磁場コイル電源の主回路停電	・トロイダル磁場の喪失	・電圧、電流	・電圧、電流				・プラスマ停止
	・サイリスタ変換装置	・交流電力を直流電力に変換し、負荷コイルに供給する。	・コイル電流の喪失 ・コイル電流の過大	・機器の故障 ・短絡、地絡 ・制御装置の異常		・トロイダル磁場の喪失	・電圧、電流	・電圧、電流				・プラスマ停止
	・直流母線装置	・サイリスタ変換装置の出力と自備コイルを接続する	・コイル電流の喪失	・短絡、地絡		・トロイダル磁場の喪失	・電圧、電流	・電圧、電流				・プラスマ停止
	・電源制御盤	・サイリスタ変換装置を含む電流設備機器を制御し、自向であるトロイダル磁場コイルに所要の電流を通電させる	・制御シーケンス異常	・機器の故障 ・制御電源の停電	・トロイダル磁場コイルの通電異常	・トロイダル磁場の喪失	・電圧、電流	・電圧、電流				・プラスマ停止

Table 1.2.50 Failure modes and effects analysis for FER

システム :		FER FMEA						(1/1)	
サブシステム :		制御系							
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障シナリオ		故障の検知方法	故障分類	
					サブシステム	影響		大	中
	・中央制御盤	・プラントの状態表示、 操作入力のためのマ シナジインター フェイス	・状態表示の異常 ・操作入力不良	・機器の故障 ・電源喪失	・操作監視機能の喪失		・状態表示の異常、 運転シーケンス 異常、電源電圧		・故障の状況によりブ ラント停止、炉停止 一部システム停止を 選択する
	・運転制御計算機シ ステム	・プラントの状態モニ ター補機種の運転制 御	・計算機システムダウ ン	・機器の故障 ・電源喪失	・プラントモニター、プラント運 転機能の喪失		・運転シーケンス 異常、状態表示 の異常、電源電 圧、自己診断ブ ログラム		・炉停止
	・放電制御計算機シ ステム	・プラズマ放電シーク エンス制御	・計算機システムダウ ン	・機器の故障 ・電源喪失	・プラズマ放電シークエンス異常		・放電シーケンス 異常、電源電圧、 自己診断プログ ラム		・プラズマ停止
	・プラズマ制御計算機 システム	・プラズマパラメータ の制御	・計算機システムダウ ン	・機器の故障 ・電源喪失	・プラズマパラメータ制御不能		・プラズマパラメー タ測定、電源電 圧、自己診断ブ ログラム		・プラズマ停止
	・タイミングシステム	・プラズマ放電シーク エンス制御に必要なタ イミング信号の供給	・タイミング信号喪失 ・誤信号の発信	・機器の故障 ・電源喪失	・プラズマ放電シークエンス異常		・放電シーケンス 異常、電源電圧		・プラズマ停止
	・保護インターロック システム	・プラント異常時の保 護インターロック制 御	・保護シーケンス異常	・機器の故障 ・電源喪失	・プラントの保護機能の喪失		・保護シーケンス 異常、電源電圧		・プラント停止

Table 1.2.51 Failure modes and effects analysis for FER

システム： サブシステム：		FER FMEA (1/1)									
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障の影 響		故障の検知方法	故障分類		処置・対処	
					サブシステム	システム		大	中小		
	加熱設備	・冷却系冷却水の加熱 ・加熱系冷却水の循環	・加熱不能	・ヒーターの故障	・ベークリング不可	・ベークリング不可	・温度計 ・電流計		・ベークリング系停止		
	循環系 (ポンプ)	・加熱冷却水の循環	・停止	・電気系統不良 ・ポンプ不良	・加熱水循環不可	・ベークリング不可	・流量計 ・温度計		・同上		
	配管	・加熱冷却水の循環	・破損	・異常応力	・トリチウム含有水の炉室内漏洩	・トリチウムモニタ			・同上		
	バルブ	・加熱冷却水の切り換え、遮断、調節	・バルブ機能不可		・加熱水制御不可	・ベークリング不可	・温度計 ・圧力計		・同上		

Table 1.2.52 Failure modes and effects analysis for FER

システム： <u>本体分解移動システム</u> サブシステム： <u>炉内外点検・補修システム</u>		F E R F M E A					(1 / 1)	
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障システム		故障の種類	処置・対処
					サブシステム	影響システム		
	炉内点検システム (含溶接マニピュレータシステム)	真空維持を行なって炉内を点検する	点検機能不可 暴走	駆動装置故障 制御不可	点検不可	炉内構造物の損傷 冷却配管の損傷		
	本体室内点検・補修システム	炉室内点検・補修システム	点検機能不可 暴走	駆動装置故障 制御不可	点検不可	炉室内構造物の損傷 炉室内配管の損傷		
	真空リーク探知・補修システム	真空リーク探知・補修	点検機能不可 暴走	駆動装置故障 制御不可	点検不可	炉構造物の損傷 配管の損傷		

Table 1.2.53 Failure modes and effects analysis for FER

No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障の発生		故障の検知方法	故障分類 大中小	処置・対処
					サブシステム	システム			
	システム : 本體分解移動システム サブシステム : 遠隔取扱システム								(1/1)
	床面走行型 マニピュレータシステム	床面走行マニピュレータ ・停止 ・暴走	・停止 ・暴走	・駆動装置故障 ・制御不可					
	クレーン搭載 マニピュレータシステム	クレーン搭載 マニピュレータ ・停止 ・暴走	・停止 ・暴走	・駆動装置故障 ・制御不可					
	配管自動溶接 切断システム	配管自動溶接 ・停止 ・暴走	・停止 ・暴走	・駆動装置故障 ・制御不可					
	真空シール自動溶接 切断システム	真空シール自動溶接 ・停止 ・暴走	・停止 ・暴走	・駆動装置故障 ・制御不可					
	治工具類	各種治工具							

Table 1.2.54 Failure modes and effects analysis for FER

システム : 本体分解移動システム サブシステム : 本体交換システム		F E R F M E A (1/1)							
No	対象機器	機能	故障モード	推定原因	故障シナリオ		故障分類 大中小	故障の検知方法	処置・対応
					サフ	シナ			
	ダイバータ交換システム	ダイバータ交換 ・ダイバータ冷却 ・ダイバータタスタ閉じ込め	交換機能不可 ・冷却不可	駆動装置故障 ・冷却装置故障 ・シャッター故障	・分修不可 ・コンポーネントの温度上昇 ・炉室内トリチウム放出増大 ・炉室内ダスト放出		大	・トリチウムモニタ ・放射能モニタ	・交換機器修理 ・TCS起動
	可動遮蔽交換システム	可動遮蔽交換 ・可動遮蔽冷却 ・可動遮蔽ダスト閉じ込め	可動遮蔽交換不可 ・冷却不可 ・ダスト閉じ込め不可	駆動装置故障 ・冷却装置故障 ・シャッター故障	・分修不可 ・コンポーネントの温度上昇 ・炉室内トリチウム放出増大 ・炉室内ダスト放出		大	・トリチウムモニタ ・放射能モニタ	・交換機器修理 ・TCS起動
	加熱装置交換システム	加熱装置交換 ・加熱装置冷却 ・加熱装置ダスト閉じ込め	交換不可 ・冷却不可 ・ダスト閉じ込め不可	駆動装置故障 ・冷却装置故障 ・シャッター故障	・分修不可 ・コンポーネントの温度上昇 ・炉室内トリチウム放出増大 ・炉室内ダスト放出		大	・トリチウムモニタ ・放射能モニタ	・交換機器修理 ・TCS起動
	テストモジュール交換システム	テストモジュール交換 ・テストモジュール冷却 ・テストモジュールダスト閉じ込め	交換不可 ・冷却不可 ・ダスト閉じ込め不可	駆動装置故障 ・冷却装置故障 ・シャッター故障	・分修不可 ・コンポーネントの温度上昇 ・炉室内トリチウム放出増大 ・炉室内ダスト放出		大	・トリチウムモニタ ・放射能モニタ	・交換機器修理 ・TCS起動

Table 1.2.55 Failure modes and effects analysis for FER

システム : 本体系解移動システム		FER FMEA				(1/1)		
サブシステム : 機送システム		故障モード	推定原因	サブシステムの故障モード	影響のシステム	故障の検知方法	故障分類	
No	対象機器						機能	機送システム
	床走行用機送システム	・停止 ・暴走	・駆動装置故障 ・制御不可		・床構造, 周辺措置, 配管の損傷			
	天井走行クレーン	・停止 ・暴走	・駆動装置故障 ・制御不可		・床構造, 周辺措置, 配管の損傷			
	移送キャスク	・停止 ・暴走	・駆動装置故障 ・制御不可		・床構造, 周辺措置, 配管の損傷			

Table 1.2.56 Accident initiating event categorization (1/2)

1. Plasma events

- Plasma out of control

2. Cooling system failures

- Rupture of blanket cooling pipes
- Rupture of blanket cooling system piping inside vacuum chamber
- Rupture of blanket cooling system piping outside vacuum chamber
- Loss of flow in the blanket cooling system
- Rupture of first wall cooling system piping inside vacuum chamber
- Rupture of first wall cooling system piping outside vacuum chamber
- Loss of flow in the first wall cooling system
- Rupture of diverter cooling system piping inside vacuum chamber
- Rupture of diverter cooling system piping outside vacuum chamber
- Loss of flow in the diverter cooling system
- Rupture of shield cooling system piping inside vacuum chamber
- Rupture of shield cooling system piping outside vacuum chamber
- Loss of flow in the shield cooling system
- Rupture of 1ry/2ry heat exchange tubes
- Rupture of 2ry cooling pipes
- Loss of flow in the 2ry cooling system
- Damage of the cooling tower

3. Cryogenic system failures

- Damage of cryostat vacuum boundary
- Failure of thermal insulation for cryostat
- Failure in cryogenic system

4. Vacuum system failures

- Damage of reactor room side boundary of vacuum chamber
- Damage of cryostat side boundary of vacuum chamber
- Failure of exhaust system

5. Tritium system failures

- Rupture of blanket tritium recovery system sweep gas piping inside vacuum chamber
- Rupture of blanket tritium recovery system sweep gas piping outside vacuum chamber
- Failure of Pd Gas Temperature Controller of Fuel Gas Purification System.
- Surge Tank(1) Large Leak of Fuel Gas Purification System.
- Failure of Dilution Helium & Oxygen Supply System in Fuel Gas Purification System.
- Over cooling of Freezer Tube in Cold Trap of Fuel Gas Purification System.
- He Gas Pressure increase in Cold Trap in Fuel Gas Purification System.
- Gas Feed Pipe Ruptures (in Glove Box) in Isotope Separation System.
- Distillation Column Damages in Isotope Separation System.
- Loss of Cooling Water in Fuel Gas Storage System(ZrNi Bed).
- Failure of ZrNi Bed Heater Control in Fuel Gas Storage System.

Table 1.2.56 (2 / 2) Accident initiating event categorization

6. Magnet failures

- Plasma Control System Malfunction.
- Loss of Poloidal Field Coil Current.
- Poloidal Field Coil Over Current.
- Loss of Toroidal Field Coil Current.
- Toroidal Field Coil Over Current.
- Substation Malfunction.

7. Plasma heating device failures

1.3 事故シーケンス

Fig.1.3.1～15に、Table 1.2.56(1/2)～56(2/2)に摘出された事故起因事象について、事故シーケンス図を示す。

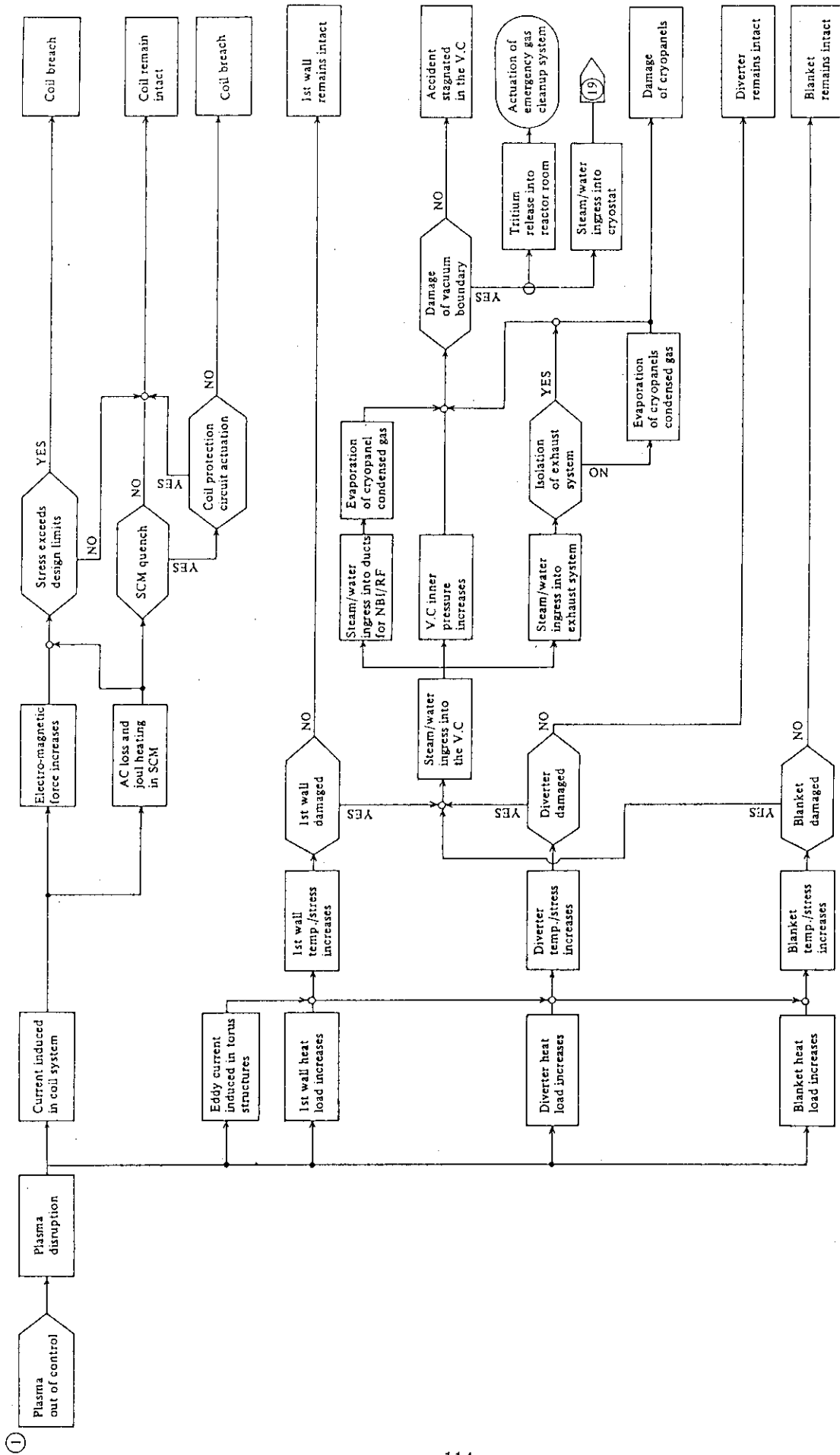


Fig. 1.3.1.1 FER Accident Progression Sequences

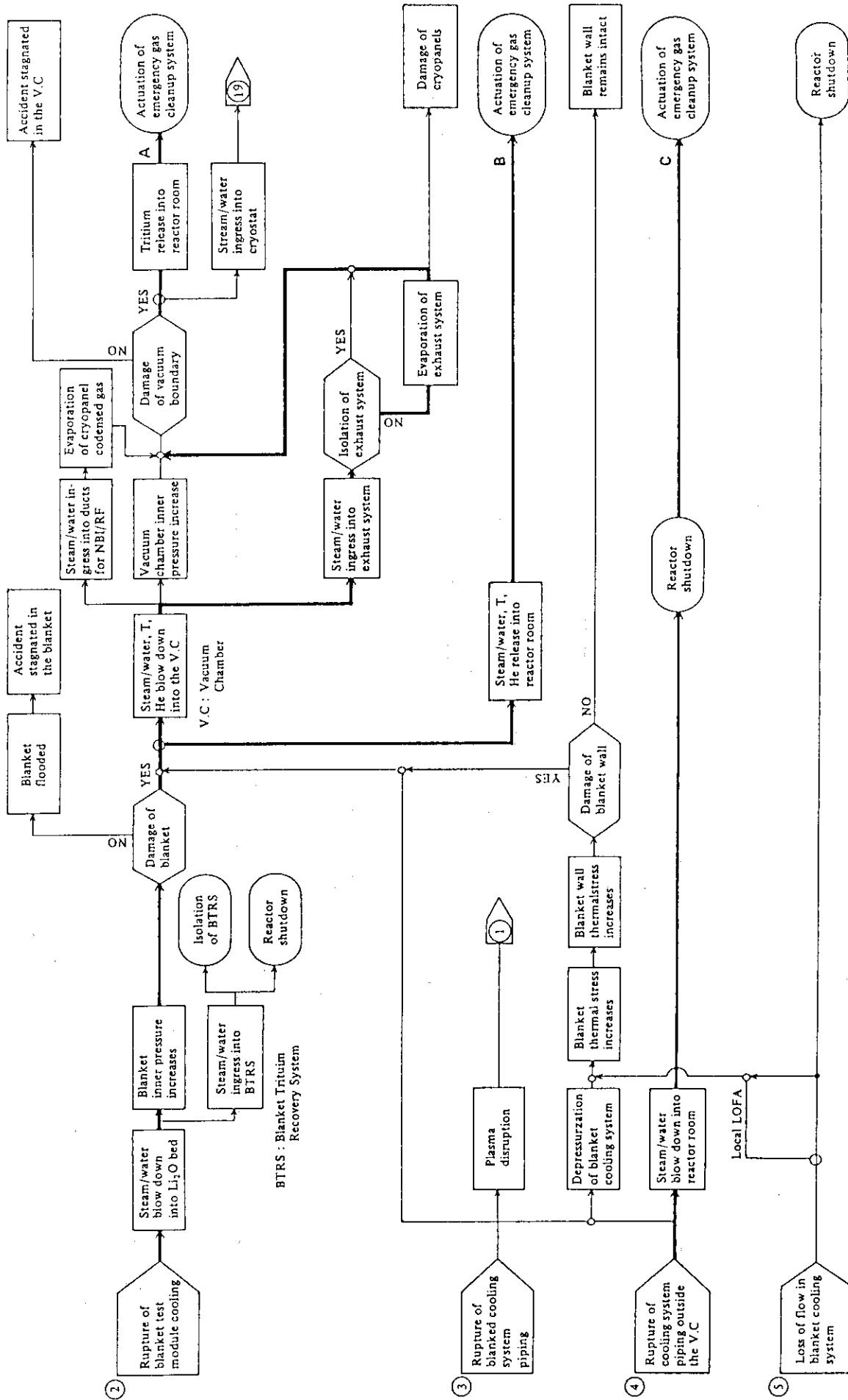


Fig. 1.3.2 FER Accident Progression Sequences (continued)

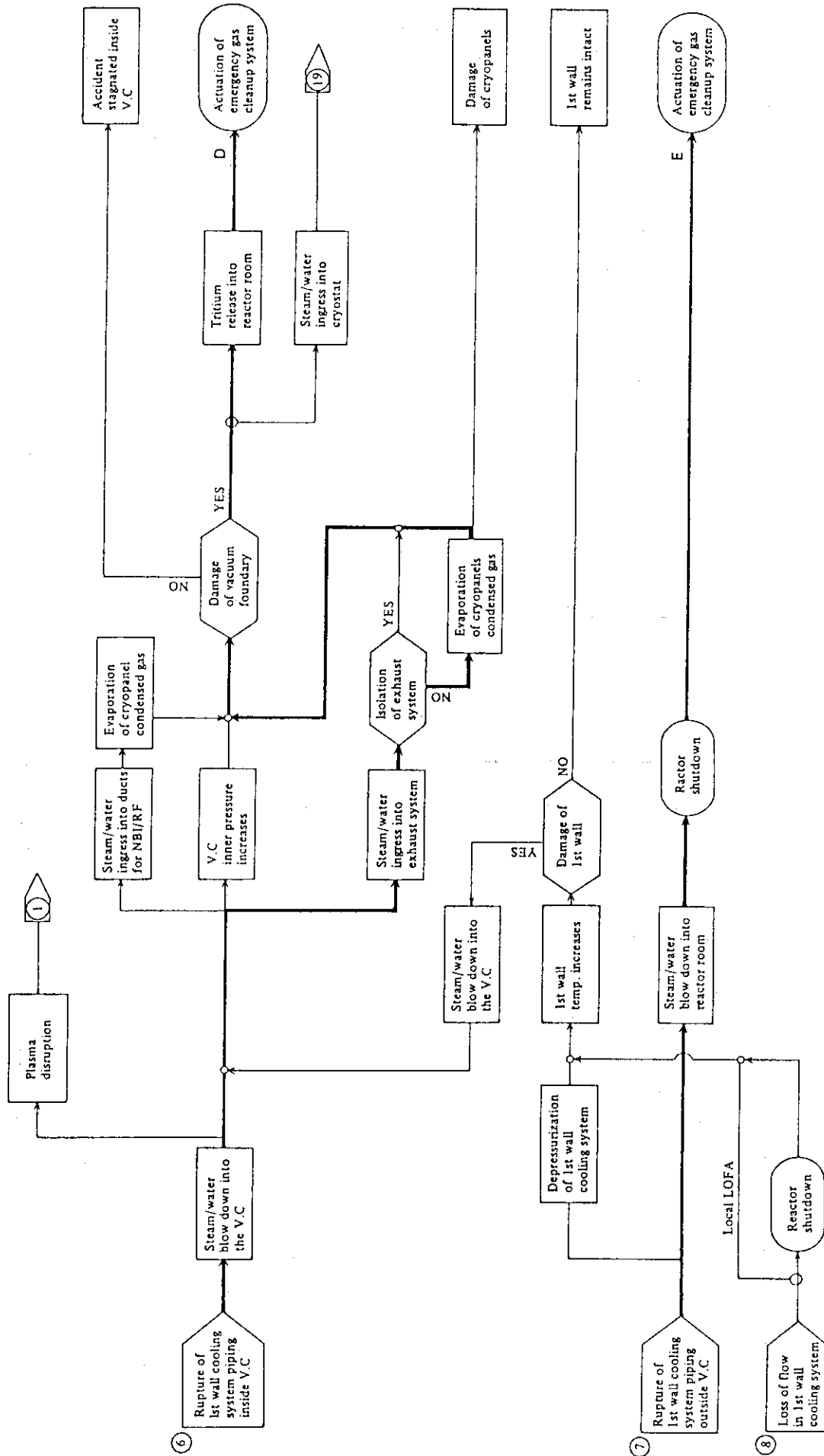


Fig. 1.3.3 FER Accident Progression Sequences (continued)

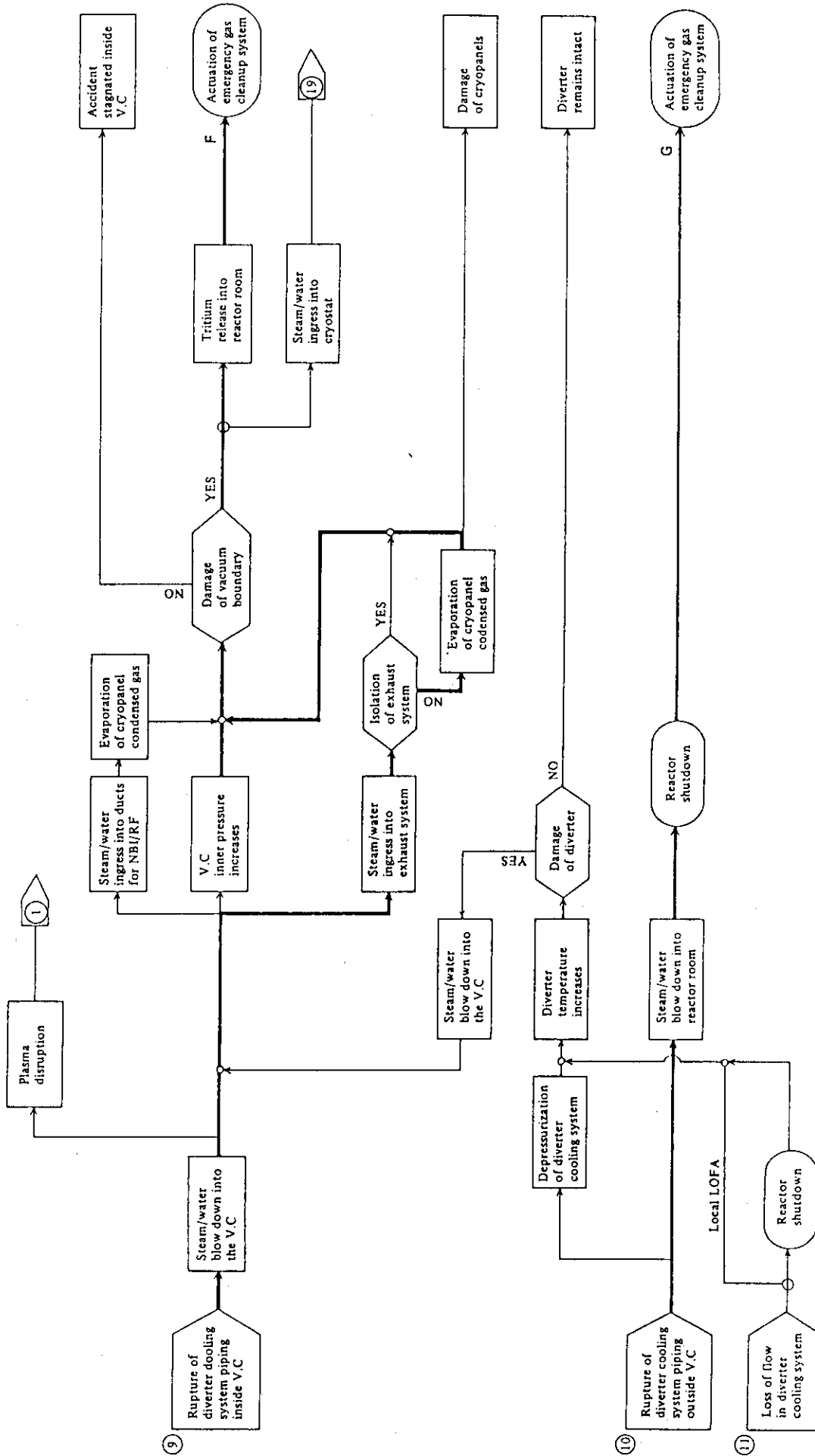


Fig. 1.3.4 FER Accident Progression Sequences (continued)

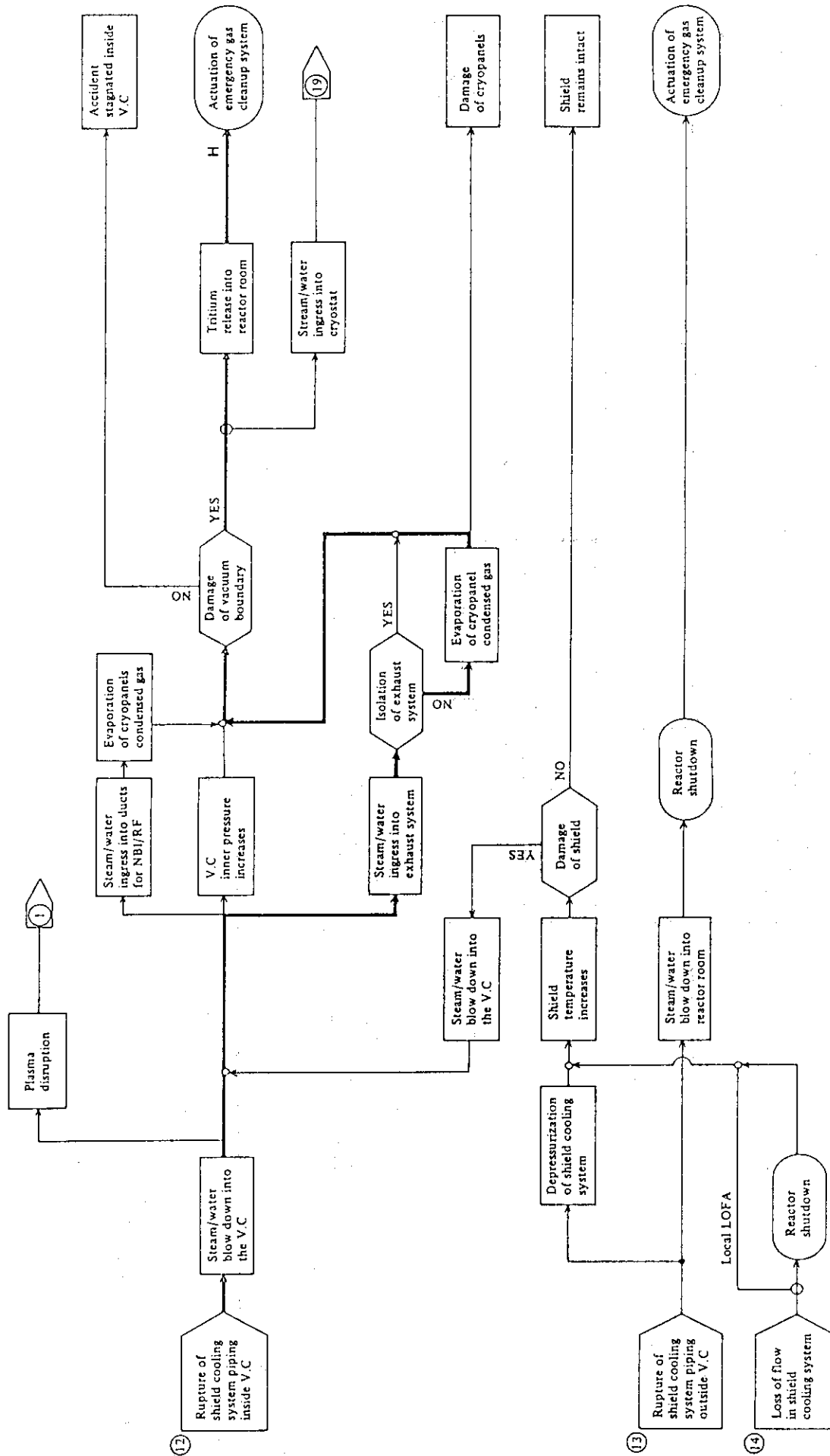


Fig. 1.3.5 FER Accident Progression Sequences (continued)

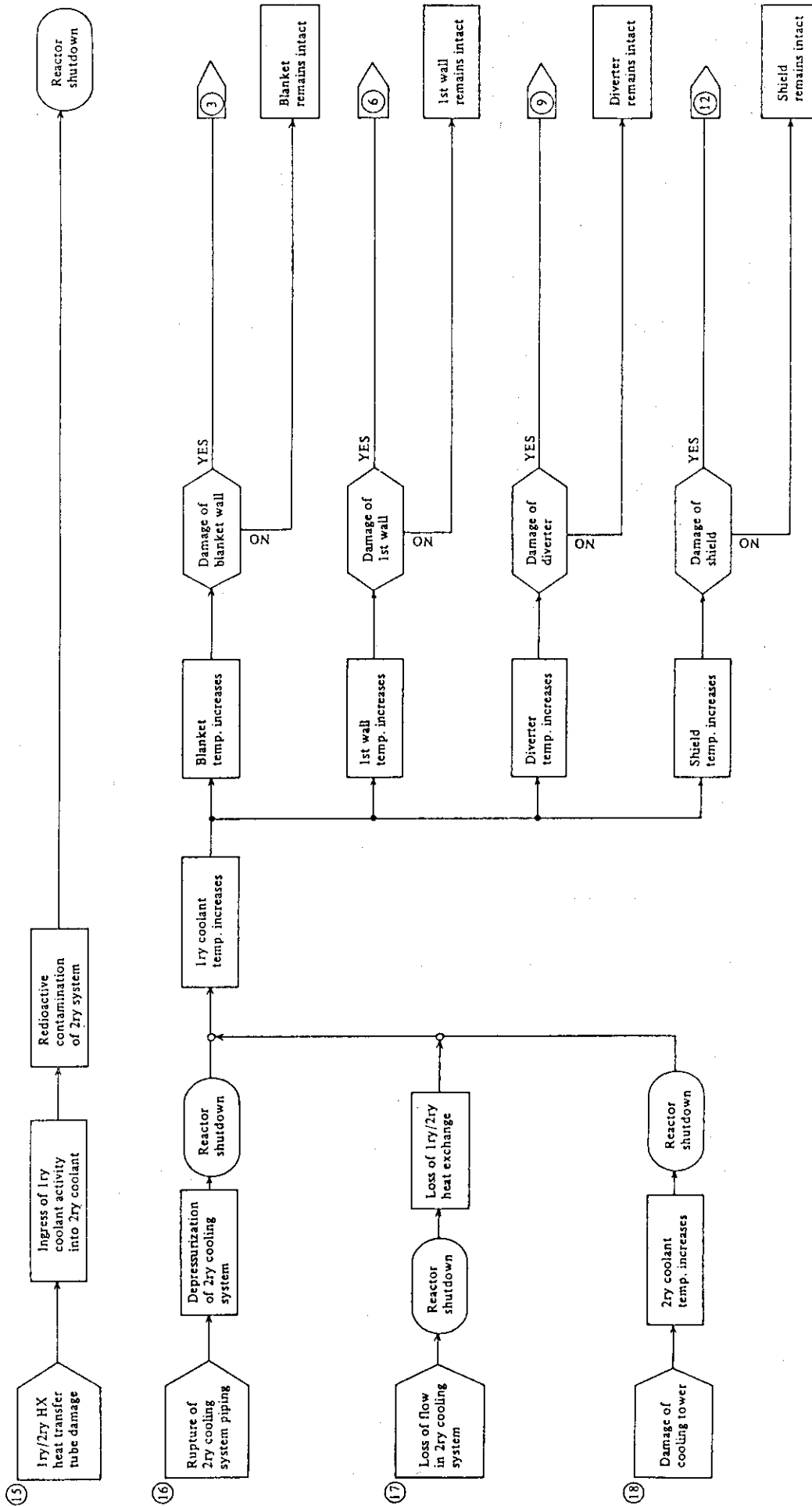


Fig. 1.3.6 FER Accident Progression Sequences (continued)

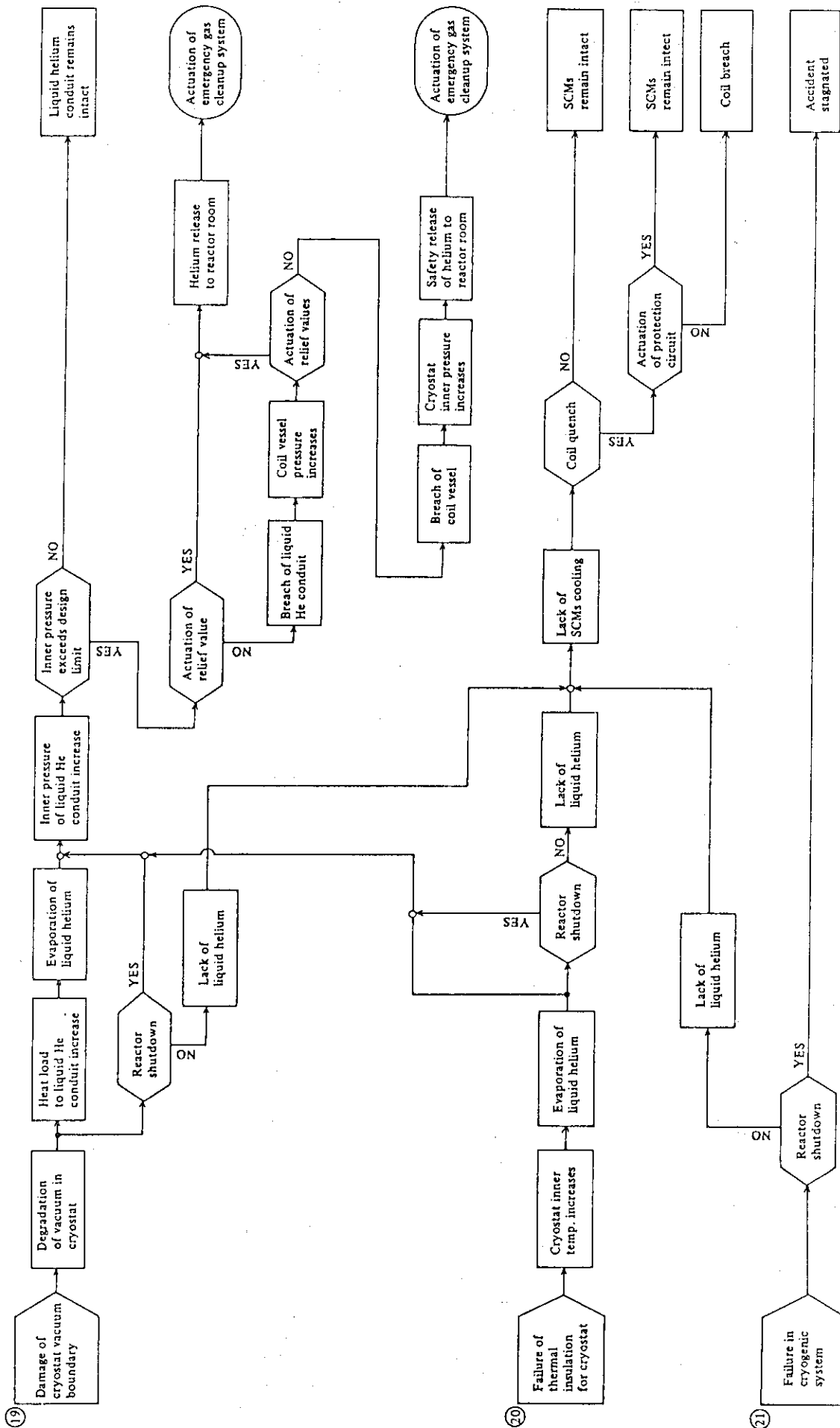


Fig. 1.3.7. FER Accident Progression Sequences (continued)

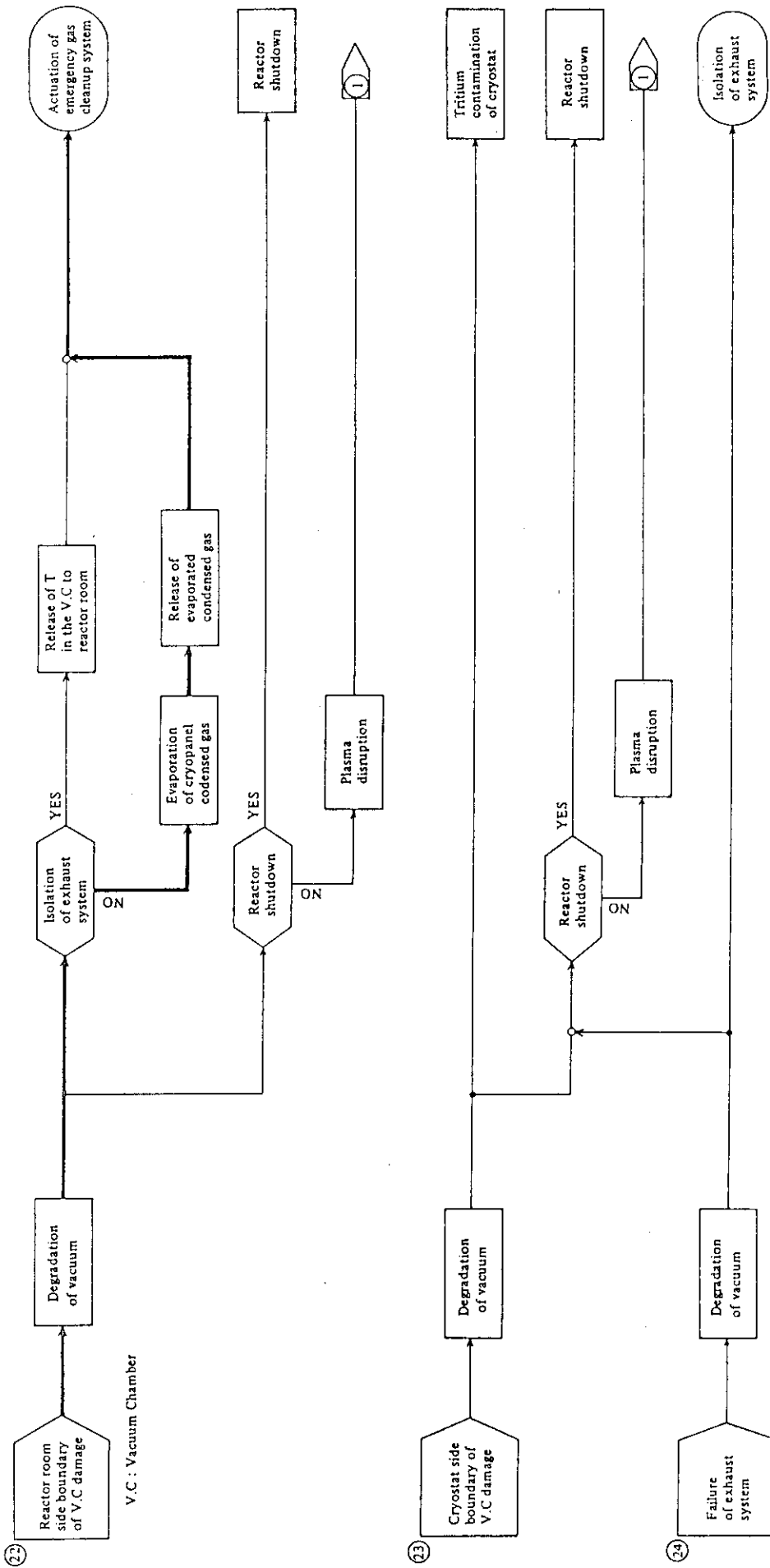


Fig. 1.3.8 FER Accident Progression Sequences (continued)

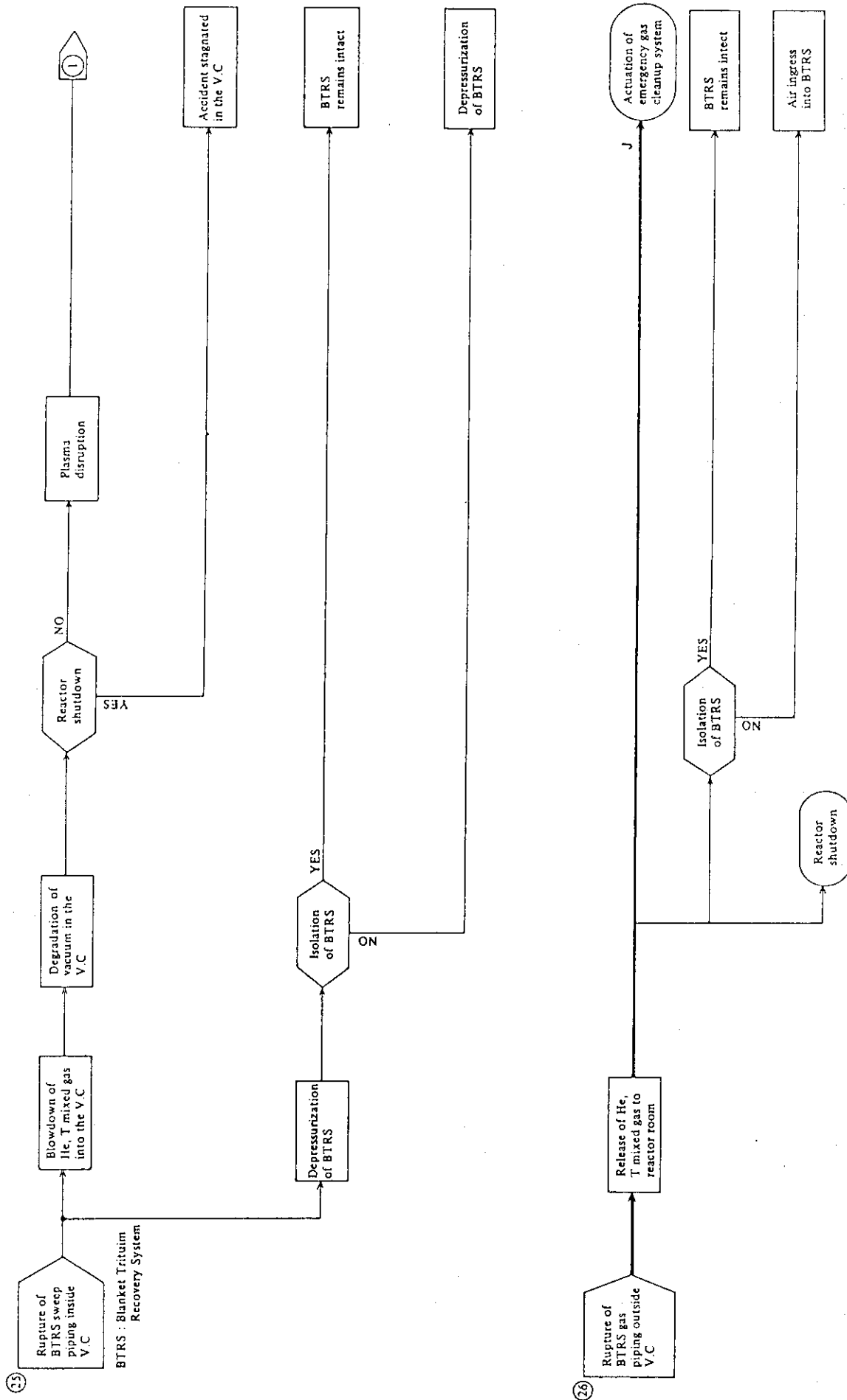


Fig. 1.3.9 FER Accident Progression Sequences (continued)

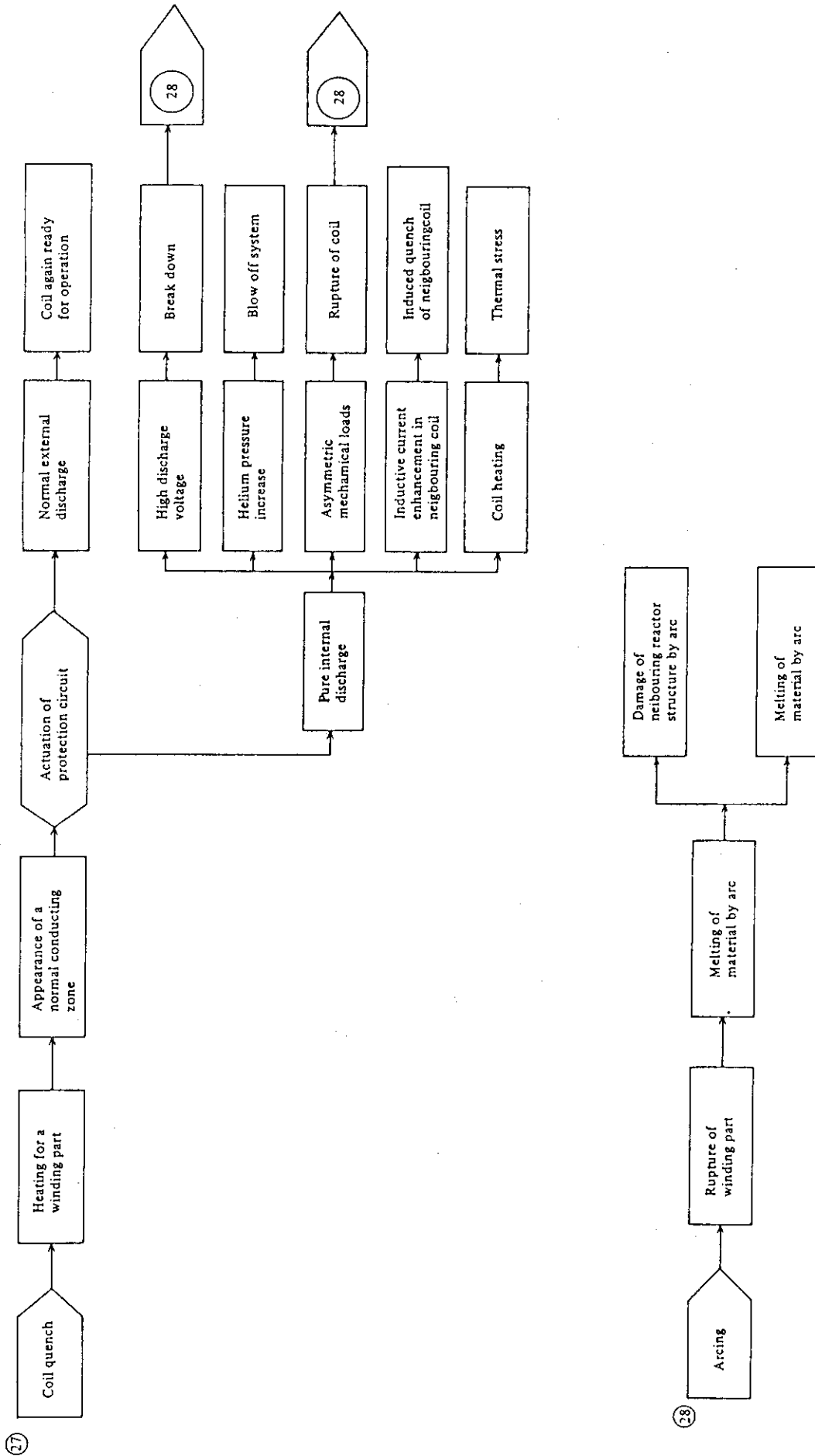


Fig. 1.3.10 FER Accident Progression Sequences (continued)

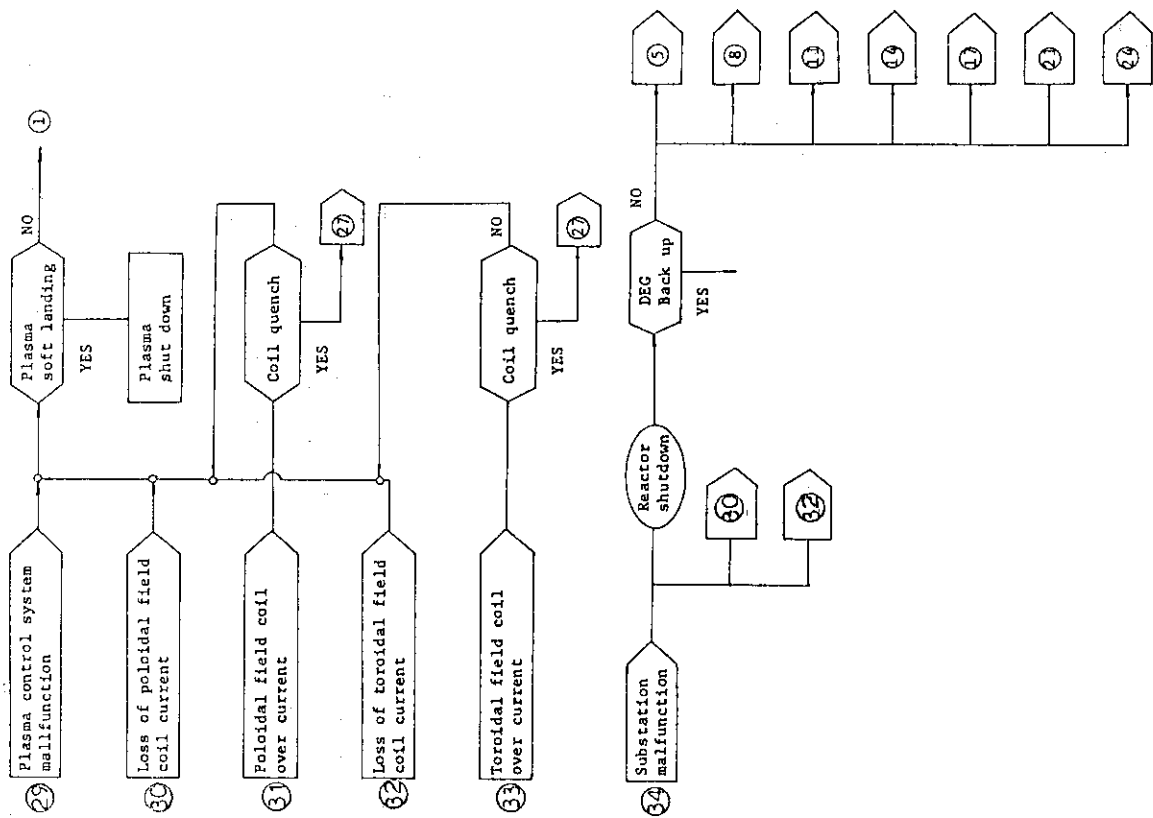


Fig. 1.3.11 FER Accident Progression Sequences (continued)

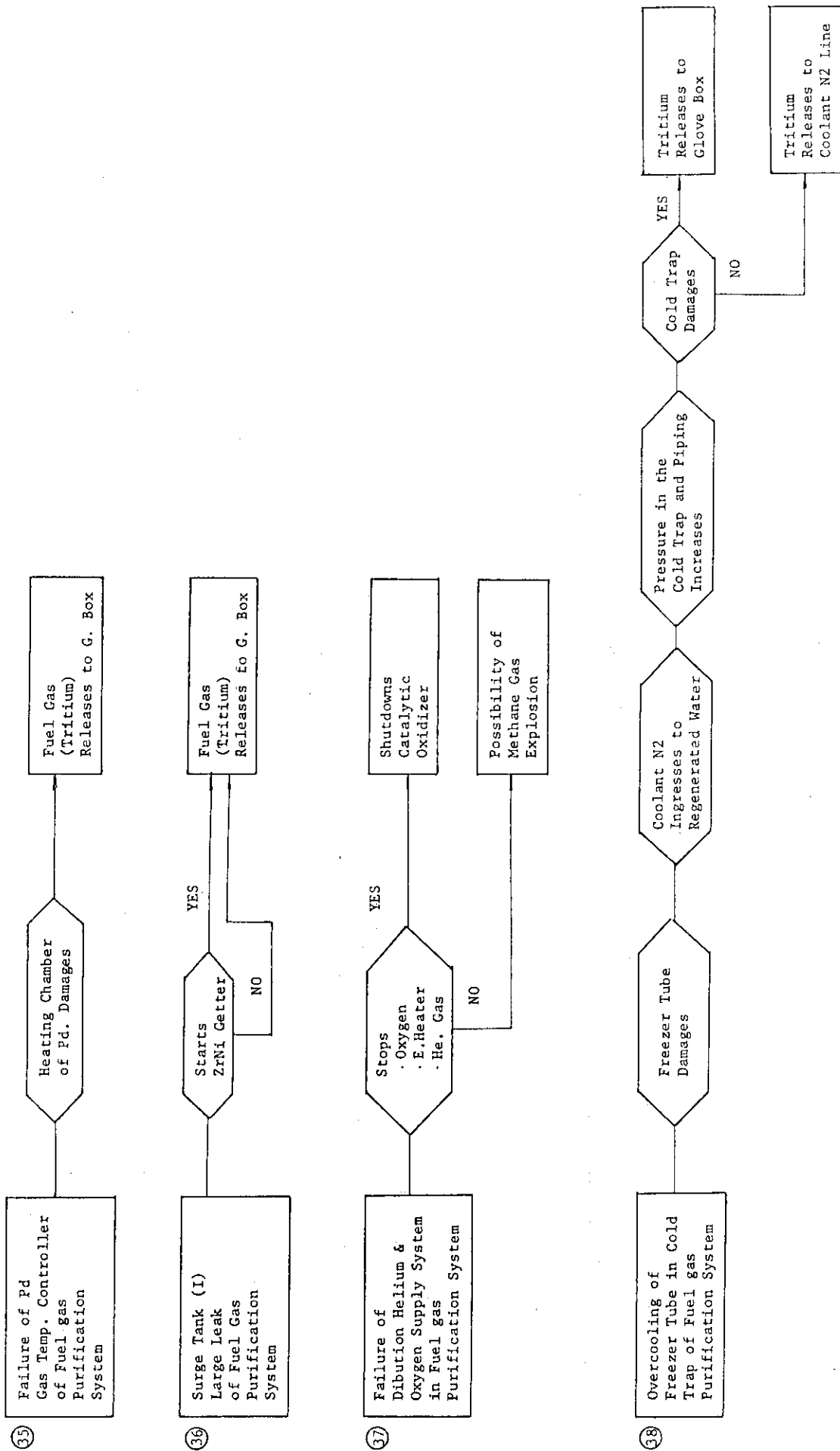


Fig. 1.3.12 FER Accident Progression Sequences (continued)

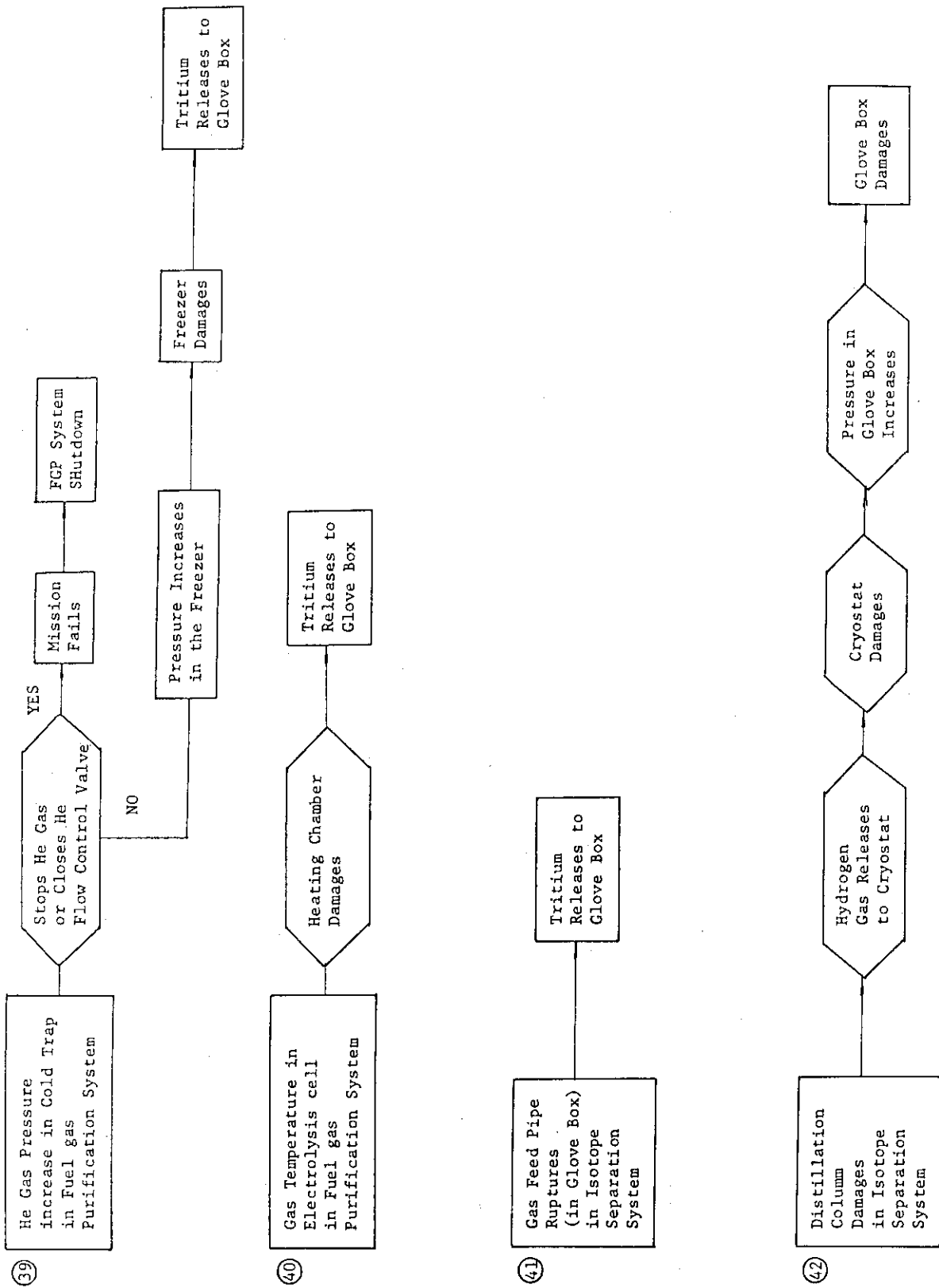


Fig. 1.3.13 FER Accident Progression Sequences (continued)

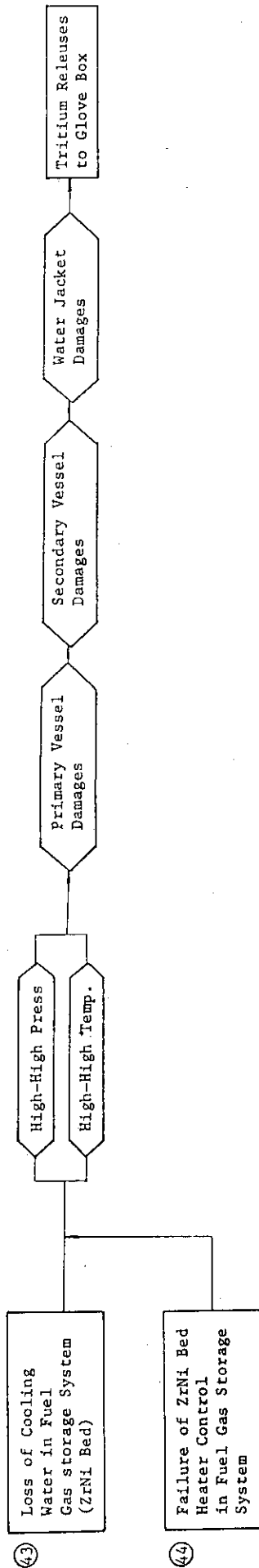
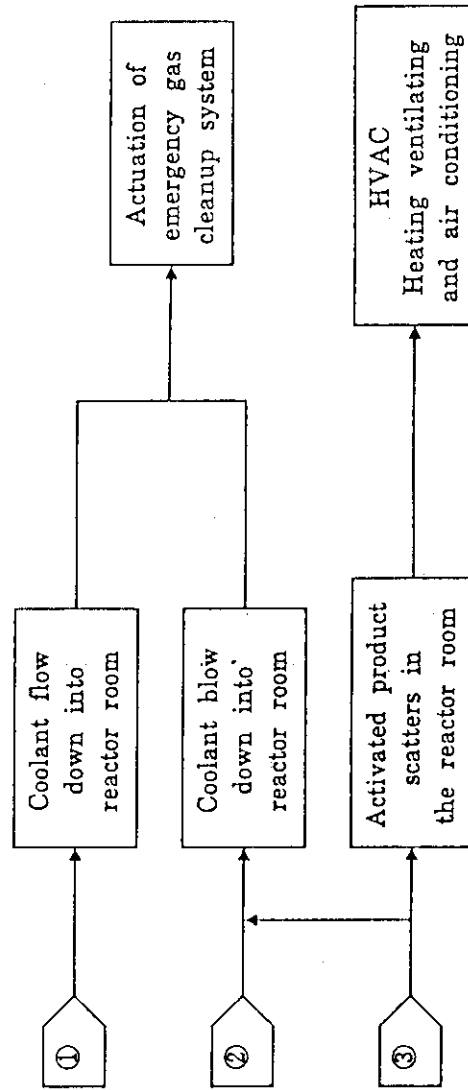


Fig. 1.3.14 FER Accident Progression Sequences (continued)

Accident sequence on maintenance.



- ① Cut the cooling pipe without sufficient drain.
- ② Cut the cooling pipe by mistake of human beings, or trouble of remote systems.
- ③ Turn over the movable shield by trouble of remote systems.

Fig. 1.3.15 FER Accident Progression Sequences (continued)

1.4 放射性物質放出フロー

前述の事故シーケンスの検討結果より、放射性物質の環境への放出につながるシーケンスの中で、各シーケンスの最も厳しいパスの事故の重要度を見くらべると、結局はJAERI-M85-178と同様となり、放射性物質を最多量放出する可能性を有するシーケンスはダイバータ冷却管の破断を起因事象とするシーケンスである。JAERI-M86-134「12.5.1 代表事象の選定」における環境への放射性物質放出量計算結果を見直し、Fig.1.4.1に示す。なお、放出量計算モデルをFig.1.4.2に示す。図中のパラメータは以下の通りである。

Q_i : 炉室内に放出された i 種の放射性物質の量

q_0^i : i 種の放射性物質の内蔵量

S_0^i : 破損場所から炉室内に放出される放射性物質質量

$$S_0^i = q_0^i \times F_1^i$$

F_1^i : 破損場所から炉室内に放出される i 種の放射性物質の内蔵量に対する割合

F_2^i : 炉室で放射性物質がフォールアウト又はプレートアウトする割合

F_g^i : 炉室内で気相中にある放射性物質の割合

λ_1 : 炉室の漏洩率

λ_2 : 雰囲気トリチウム浄化系の換気率

E_f : 雰囲気トリチウム浄化系の放射性物質除去効率

R : 雰囲気トリチウム浄化系からの還流率

事故後、炉室から環境への放出が無期限に行われるとすると、 λ を崩壊による減衰率とすると環境への全放出量は次式により与えられる。

$$C = \frac{S_0^i \cdot [\lambda_1 + \lambda_2(1-E_f)](1-R) \cdot F_g^i}{[\lambda_1 + F_2^i + \lambda_2 \cdot E_f - \lambda_2(1-E_f)R] \cdot F_g^i + \lambda} \dots\dots\dots (1)$$

上式により事故時における環境への放出量を評価する場合の各パラメータを次のように設定する。

(1) F_2^i

炉室の壁や構造物表面にフォールアウト又はプレートアウトする放射性物質の割合は安全側に見積って0とする。

(2) F_g^i

トリチウムガスについては100%、トリチウム水については、通常運転時炉室温度を40℃、炉室に流出した冷却水の温度を90℃（運転時冷却水最高温度）とし、この時の炉室温度を65℃（ $= \frac{90+40}{2}$ ℃）、炉室圧力を1 kg/cm²とすると飽和状態にある炉室雰囲気中の水蒸気量は次式により概算できる。

$$m = \frac{0.25502 \times 9.8 \times 10^4 \times 2.5 \times 10^5}{461.5 \times (273+65)}$$

$$= 40055 \text{ kg}$$

事故時に炉室内に放出される冷却水量をMとすると、トリチウム水について $F_g = m/M$ で与えられる。ただし、 $M \leq m$ のときは、 $F_g = 1.0$ である。即ち、全量水蒸気になる。

(3) λ_1

事故時における炉室内圧は負圧に維持されるものとして0。

(4) λ_2

雰囲気トリチウム浄化系の換気量は

$$\lambda_2 = (4.400 \text{ m}^3/\text{h} \times 24 \text{ h}/\text{day}) / 2.5 \times 10^5 \text{ m} = 0.4224$$

(5) E_f

雰囲気トリチウム浄化系除去効率を99%とする。

(6) R

雰囲気トリチウム浄化系除(4400 m³/h)で処理された雰囲気ガスは1500 m³/hだけ、別の大気放出用トリチウム浄化系を通して環境へ放出する。

$$R = \frac{4400 - 1500}{4400} = 0.659$$

(7) λ

放出性物質はトリチウムのみとする。

$$\lambda = 1.549 \times 10^{-4} / \text{day}$$

以上から、環境への放出量は、(1)を使って、

$$C = 7.6 C_i$$

と計算される。

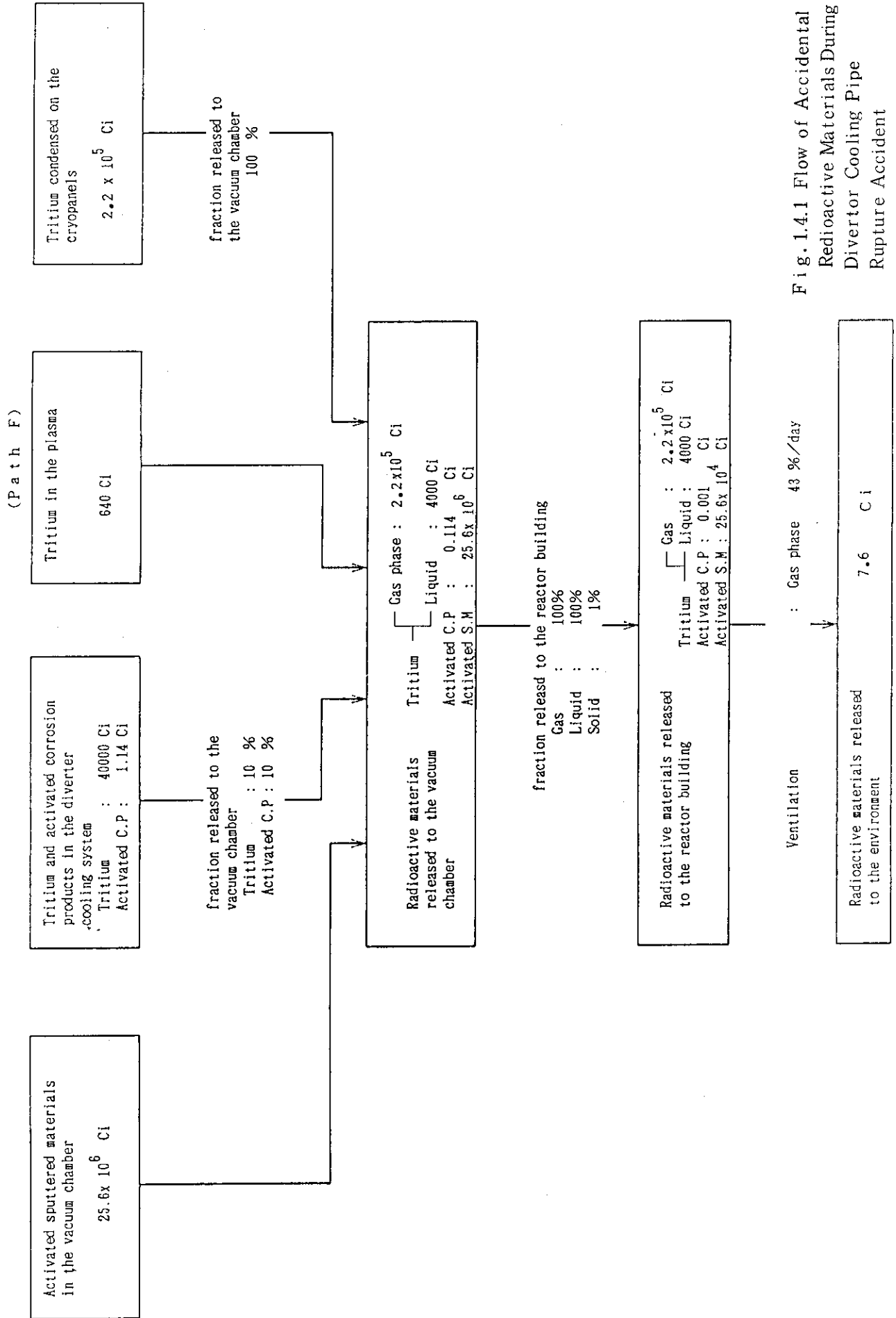
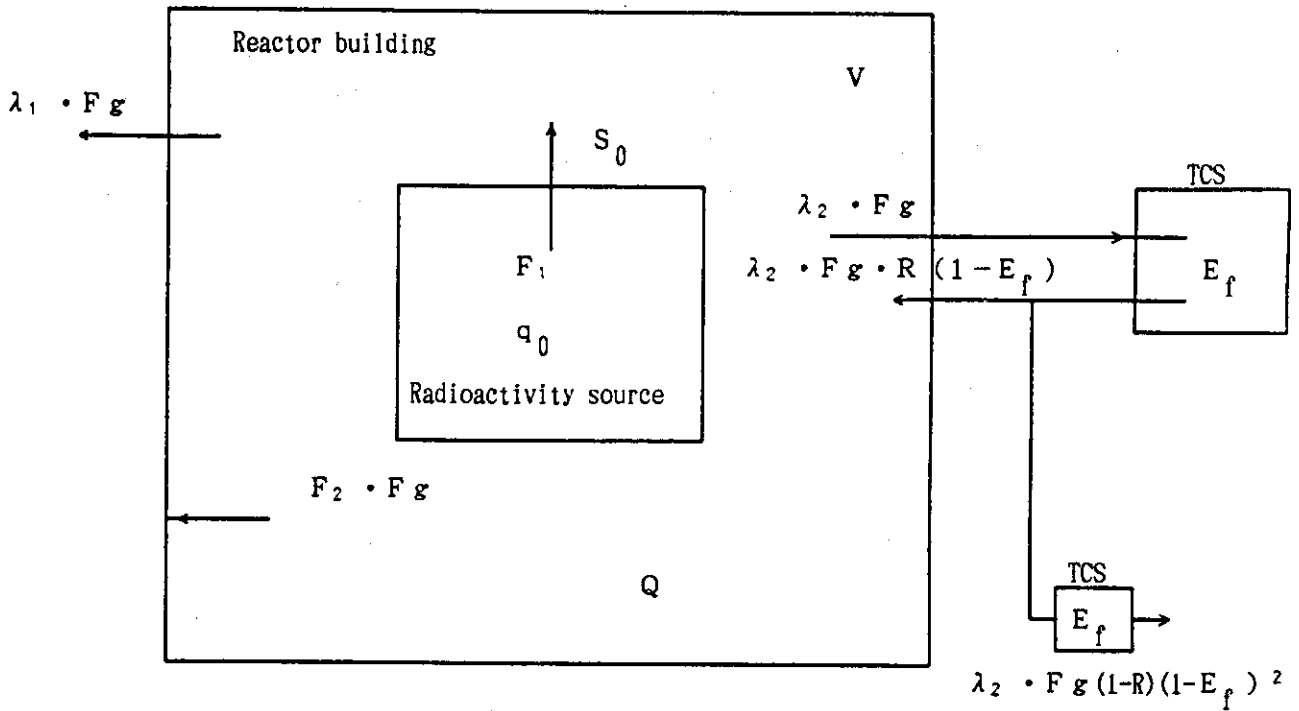


Fig. 1.4.1 Flow of Accidental Radioactive Materials During Divertor Cooling Pipe Rupture Accident



- q_0 : source of radioactive materials
- Q : radioactive materials in the reactor building at time t following accident
- S_0 : radioactive materials released to the reactor building
- λ_1 : leak rate from reactor building
- λ_2 : ventilating ratio of reactor building atmosphere
- $F g$: steam water ratio in the reactor building
- F_1 : ratio of released radioactivity and source activity
- F_2 : fraction of fall-out radioactivity in the reactor building
- E_f : fraction of radioactivity to be removed by TCS
- R : feedback fraction of cleaned-up gas from TCS

Fig. 1.4.2 Calculation model of radioactivity accidental release

1.5 今後の課題

核融合炉本体廻りの諸システムについては、既往の化学プラント、原子力プラントに類似のシステムがなく安全評価上、あるいは事故解析をすすめる上で、今後解決しなくてはならない課題は多々ある。現時点における主な課題を以下に列挙する。

- (1) ETA, FTA に必要な故障確率データが、既往のものが使えるシステムと使えないシステムを区別し、データの無いものについては、作り出す必要がある。
- (2) 全システムにわたるETA, FTAの実施、立地選定に影響の大きい事象の抽出。
- (3) 抽出された立地選定事象の解析
- (4) 設計指針等の確立

2. 燃料ガス循環系安全性解析

2.1 システム・コンポーネントのFMEA

2.1.1 概要

JAERI-M 86-149に設計検討した燃料ガス循環系につき、安全性の立場から検討、解析を実施した。

対象とした系統（サブシステム）は次の通りである。

- (1) 燃料ガス精製系
- (2) 燃料ガス同位体分離系
- (3) 燃料ガス貯蔵系

これらのうち、(3)については新たに、JAERI-M 87-091設計による内容をベースとしている。

今次の検討・解析に於ては系統・機器のFMEA^{*(1)}、事故シーケンスの検討、起因事故の選定、およびFTA^{*(2)}、ETA^{*(3)}による事故発生確率と、それに対応する事故の大きさ（トリチウム放出量）をもとにしたリスク評価を試みた。

又、これらの検討を通じて、安全面で系統ならびに機器設計へ反映すべき事項及び問題点等を抽出した。

2.1.2 検討内容および方法

燃料ガス循環系は多量のトリチウムを取扱うシステムであるため、故障が起きた場合、環境へのトリチウム漏洩という重大事故につながる恐れがある。従って基本設計段階に於て、想定される事故の大きさを把握し、事故を最小にすべくシステム設計へ反映させる必要がある。

本年度の安全性検討では、グローブボックスへのトリチウム放出と室内へのトリチウム放出を主にして、事故シーケンス、発生確率およびトリチウム放出量を評価する。

検討内容および手順を以下に示す。

- (1) 各系統の機器に対するFMEA
- (2) 事故シーケンスの検討及び起因事故の選定
- (3) Event Tree法によるシーケンス確率の計算（FTAを含む）
- (4) 事故の大きさ（トリチウム放出量）の算定
- (5) 事故の定量的評価
- (6) 設計への反映事項、問題点等の抽出

* (1); FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)

* (2); FTA (Fault Tree Analysis)

* (3); ETA (Event Tree Analysis)

なお、解析にあたり、下記条件にもとづき実施する。

- (1) 解析のベースとした設計が概念設計に近いものであり、運転方法等に関して未検討の部分がある。このため解析は定常運転時を想定した解析とする。
- (2) 解析は、対象とした3つのサブシステムに対して、それぞれ単独に故障解析を実施し、それをもとに事故の進展を検討する。
- (3) 各サブシステムを構成するすべての機器に対して、FMEAを行なうが、特に計測器系、ユーティリティ系は一部想定を織込んで検討する。(なお、計測器、ユーティリティ系はFMEAの対象外とする。)
- (4) 事故シーケンス、Event Treeの作成に当たって計測器系は1系列構成を前提とする。(冗長はないものとする)。

2.1.3 FMEA結果

各サブシステムのFMEAの結果を以下の表に示した。

Table 2.1

Table 2.2

Table 2.3

Table 2.4

Table 2.5は3つのサブシステムの主要な故障モードと、その影響を一覧表示したもので、他サブシステムに対する影響も併せて示している。

なお、問題及び今後の検討課題については、2.4.5項にまとめて記載する。

トリチウム系の安全解析

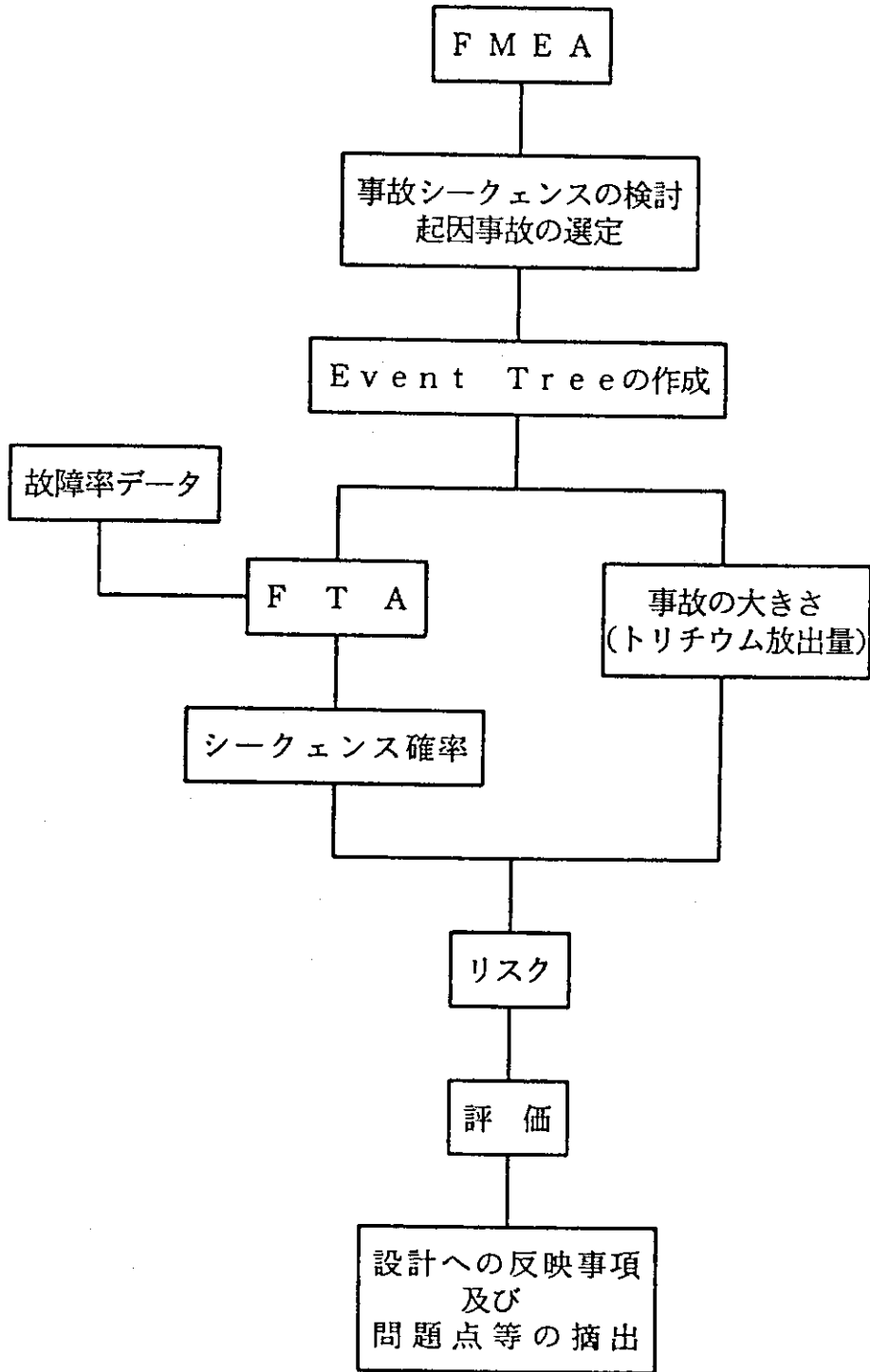


Table 2.1 FMEA for Fuel Gas Purification System(1/3)

No.	機器名	故障	検出法	故障の影響	対策
1.	貯蔵タンク(Ⅰ)	1) 漏洩	圧力計	プラズマ排ガス及び再圧がG. B. 内へ放出。	燃料ガスを合金ベットの吸蔵する。
2.	移送ポンプ	1) 出口圧力低下 2) 流量低下 3) 連続運転失敗	圧力計 流量計	精製水素ガス量が減少。	予備機へ切替える。
3.	Pd 合金膜透過器	1) 1次側ガス圧力低下 2) 2次側ガス圧力上昇 3) 1次側ガス温度低下 4) 精製ガス純度不良 5) Pd 合金膜(チューブ)の破損	1次側圧力計 2次側圧力計 温度計 ガス分析計 2次側圧力計	精製水素ガス量が減少又は精製不能。 同上 同上 精製水素ガスが純度不良 同上	予備器へ切替える。 同上 同上 同上 同上
4.	精製ガス冷却器	1) 精製ガス出口温度高	出口温度計	貯蔵タンク(Ⅱ)の水素ガス温度上昇。	
5.	真空ポンプ	1) 真空度低下 2) 連続運転失敗	真空計 真空計	精製水素ガス量の減少又は精製不能。 同上	予備器へ切替える。 同上
6.	貯蔵タンク(Ⅱ)	1) 漏洩	圧力計	精製水素ガスのG. B. 内へ放出。	
7.	貯蔵タンク(Ⅲ)	1) 漏洩	圧力計	不純物ガスのG. B. 内へ放出。	
8.	不純物移送ポンプ	1) 出口圧力低下 2) 流量低下 3) 連続運転失敗	圧力計 流量計	触媒反応器へのガス流量の低下。	予備機へ切替える。

Table 2.1 Continued (2/3)

No.	機器名	故障	検出法	故障の影響	対策
9.	ヘリウム及び酸素供給装置	1) 酸素ガス量の低下 2) ヘリウムガス量の低下	流量計 ガス濃度計	酸素濃度低下→ 触媒反応器性能低下→ 貯蔵タンク(Ⅲ)の酸素濃度増加。	—— 酸素供給停止
10.	触媒反応器	1) ボール保持板破損 2) ヒータの故障 3) チャンネリング	酸素計	酸化反応低下又は不能。 トリチウム透過の増加。 (温度上昇時)	予備器へ切換える。
11.	冷却器	1) 出口ガス温度上昇	出口温度計	コールドトラップへ高温ガスが流入 →コールドトラップの性能低下。	——
12.	コールドトラップ 再性用加熱器	1) 出口ガス温度低下	出口温度計	トラップ内の水分を気化できない。	予備器へ切換える。 (ヒータ交換が可能なら 設計変更が必要)
13.	コールドラップ	1) 冷却管の破損 2) 胴の破損 3) フランジ部から冷媒の漏洩 4) LN ₂ 配管系の破損 5) He ガス圧力上昇	胴側圧力計 ガス分析計 LN ₂ 側圧力計 調節弁出口圧力計	燃料ガスにN ₂ ガスが混入。 G. B. 内ヘトリチウム水及び水蒸気 を放出。 水分の凍結・分離ができない。 燃料ガス側圧力上昇。	
14.	移送ポンプ	1) 連続運転失敗	流量計	燃料ガスの移送不能。	予備機へ切換える。
15.	貯蔵タンク(N)	1) 漏洩	圧力計	G. B. 内へ貯蔵ガスの放出。	
16.	予熱ヒータ	1) 出口ガス温度低下	出口温度計	再生ガスの分離性能低下。	予備機へ切換える。

Table 2.1 Continued (3/3)

No.	機器名	故障	検出法	故障の影響	対策
17.	固体電解質電解セル	1) 固体電解質管の破損 2) 絶縁部の破損 3) 電位差のアンバランス 4) フランジ部の漏洩 5) 加熱質フランジ部の漏洩 6) 加熱不能	電位差計 廃ガス圧力計	燃料ガスが廃ガス処理系へ流出する。 水素ガスの流量低下。 酸素の分離ができない。 G. B. 内へ燃料ガス又は水素ガスの放出。	予備機へ切換える。
18.	冷却器	1) 出口ガス温度高	出口温度計	燃料ガス温度上昇	—
19.	移送ポンプ	1) 連続運転失敗	出口流量計	燃料ガス移送不能。	予備器へ切換える。
20.	ZrNiゲッター	1) 合金ベット (貯蔵系) に同じ		系内ガスの貯蔵不能。	予備器へ切換える。
21.	配管	1) 漏洩	圧力計	G. B. 内へ燃料ガスの放出。	—
22.	配管	1) 真空度低下 2) 漏洩	真空計	Pb 合金膜透過器のガス精製不能。 精製ガスにN ₂ ガスが混入。	—

Table 2.3 FMEA for Fuel Gas Storage System (1/2)

No	機器名	故障	検出法	故障の影響	対策
1.	移送ポンプ	1) 出口圧力低下 2) 流量低下 3) 連続運転失敗	出口圧力計 流量計	燃料ガスの移送の減少又は移送不能。	—
2.	循環ポンプ	1) 出口圧力低下 2) 流量低下 3) 連続運転失敗	出口圧力計 流量計	系内の残留水素ガスの初期パージ（ク リーニング）不能。	バイパスによりガス拡散による 循環貯蔵。
3.	貯蔵タンク	1) 漏洩	圧力計	燃料ガスの貯蔵不能及びガスのG.B. 内へ放出	—
4.	ガス混合器	1) ガスの混合調整失敗 2) 漏洩	ガス分析計 圧力計	ガス混合比調整不量。 燃料注入系への流量低下及びガスのG. B.内へ放出。	—
5-1	Zr Ni 合金ベット (1次側)	1) 漏洩又は破損 2) 出口圧力上昇 3) メタル温度上昇	1次側圧力計 " 温度計 " 圧力計 " 温度計	トリチウムガスの吸蔵放出不能及び2 次側へトリチウムガスの漏洩。 トリチウムガスの放出性能低下。 2次側の水素透過の増加。	予備器へ切換える。
5-2	Zr Ni 合金ベット (2次側)	1) 漏洩又は破損 2) メタル温度上昇 3) 2次側圧力上昇	2次側圧力計 " 温度計 " 温度計 圧力計	トリチウムガスの吸蔵/放出不能及び 冷却水側へトリチウムガスの漏洩。 トリチウムガスの吸蔵不能又は放出ガ ス流量増加。 トリチウムガスの吸蔵/放出不能	予備器へ切換える。

Table 2.3 Continued (2/2)

No	機器名	故障	検出法	故障の影響	対策
5-3	Zr Ni 合金ベット (加熱装置)	1) 出口ガス温度低下 2) 出口ガス温度上昇	出口温度計 "	放出ガス流量低下又は放出不能 放出ガス流量増加及び吸蔵不能	予備器へ切替える。 同上
5-4	Zr Ni 合金ベット (冷却水側)	1) 冷却水系故障 2) 漏洩又は破損	冷却水流量計 "	トリチウムガス温度上昇 トリチウムガスの吸蔵/放出不能 G. B. 内へ冷却水 (及びトリチウムガスの可能性) の漏洩。	冷却水系点検。 予備器へ切替える。
6	配管	1) 漏洩又は破断	圧力計	G. B. 内へトリチウムガスの放出	

Table 2.4 FMEA for Fuel Gas Circulation (1/2)

各系統への影響		1. 精製系	2. 同位体分離系	3. 貯蔵系	4. グローブ・ボックス(G.B)	5. 室内TCS系, 廃ガス処理系など
主要な故障モード 1. 精製系	(1) パラジウム合金膜透過器チューブ破損 (2) " " (3) 加熱室破損 (4) メインヒータ断線 (5) 貯蔵タンク(III)への希釈He流量低下 (6) コールドトラップ再生用ヒータ断線 (7) コールドトラップ冷却管閉塞・破損 (8) コールドトラップ出口腐ガス温度調節器故障 (9) コールドトラップHeガス圧力調節器故障 (10) 固体電解質電解セルチューブ破損 (11) 固体電解質電解セル加熱室リーク (12) タンク(I~IV)リーク (13) 配管(Pd遷過器→真空ポンプ)リーク	(1) ガス精製不能→予備機へ切替 (2) 全上 (3) 全上 (4) タンク内水素濃度増加 (5) トラップ内の水分の気化不能 (6) 水分の除去不能 (7) 水分の除去不能 (8) 燃料ガス側の圧力上昇 (9) 酸素の分離ガス不能→予備機へ切替 (10) 精製ガス流量低下 (11) 系統圧力低下 (12) 精製処理能力低下	(1) 不純物が混入 (12) 精製ガスにN ₂ ガス混入		(2) G.Bへトリチウム放出 (6) G.BへN ₂ , H ₂ , Heガス放出 (10) G.Bへトリチウム放出 (11) G.Bへトリチウム放出 (12) G.B圧力低下	(6) N ₂ ガス排出ラインへトリチウム放出 (7) 全上 (9) 廃ガス処理系へトリチウム放出
2. 同位体分離系	(1) 深冷蒸留塔ポリラヒータ故障 (2) 深冷蒸留塔コンデンサチューブ破損 (3) 深冷蒸留塔胴体破損(配管) (4) 吸着塔 目詰り	(3) 貯蔵タンク(III)のトリチウムが同位体分離系保冷槽へ放出	(1) 分離性能低下 (2) 冷媒用Heが系へ混入 (3) 機能喪失→保冷槽圧力, 温度上昇 (4) 圧力, 流量低下, トリチウムの吸蔵減少		(3) 保冷槽圧力上昇→保冷槽破損→G.Bへガス放出の可能性	

Table 2.4 Continued (2/2)

各系統への影響		1. 精製系	2. 同位体分離系	3. 貯蔵系	4. グローブ・ボックス(G.B)	5. 室内TCS系, 廃ガス処理系など
主要な故障モード 2. 同位体分離系 (5) 保冷槽内温度上昇 (6) " 真空度低下 (7) " 冷却He配管破損 (8) G.BOX内燃料ガス供給配管破損	(8) 貯蔵タンク(II)のトリチウムが同位体分離系G.BOXへ放出	(5) 分離性能低下→分離不能 (6) " (7) 分離不能→保冷槽圧力, 温度上昇 (8) 機能喪失	(8) G.B.へトリチウム放出	5. 室内TCS系, 廃ガス処理系など		
3. 貯蔵系 (1) ZrNi合金ベット1次側容器漏洩又は破損 (2) ZrNi合金ベット2次側容器漏洩又は破損 (3) 加熱装置故障(ガス温度上昇) (4) 冷却水断 (5) ZrNi合金ベット冷却ジャケット破損 (6) ガス貯蔵タンク漏洩 (7) 循環ポンプ故障		(1) 水素ガス貯蔵能力低下又は不能→予備機へ切替④(吸蔵時) (2) 冷却水が2次側へ流入, 水素透過の増大→④ (3) ガス供給量増大→④ (4) ガス貯蔵運転が不能 (5) ガス貯蔵不能, →④(2次側へ冷却水流入) (6) ガス貯蔵不能 (7) 初期装荷時のトリチウムの吸蔵が不能→予備機へ切替	(1) 水素ガス貯蔵能力低下又は不能→予備機へ切替④(吸蔵時) (2) 冷却水が2次側へ流入, 水素透過の増大→④ (3) ガス供給量増大→④ (4) ガス貯蔵運転が不能 (5) ガス貯蔵不能, →④(2次側へ冷却水流入) (6) ガス貯蔵不能 (7) 初期装荷時のトリチウムの吸蔵が不能→予備機へ切替	(5) G.B.へ冷却水が流出 (6) G.B.へガス放出	(7) 初期装荷時のクリーニング(循環運転)不能	

Table 2.5 Classification of the Accident and Countermeasures

記号 ○：該当する（対策必要）
 ×：該当しない（対策不要）

サブシステム	精製系	同位体分離系	貯蔵系	各G.BOX
(1) サブシステムからのリークにより、室内のトリチウム増大に至る場合	×	×	×	○
(2) トリチウムが環境へ直接リリースする場合	×	×	×	×
(3) サブシステムの破損の結果、これが他のサブシステムからのリリースを招く場合	(注1) ○	(注2) ○	(注3) ○	×
(4) サブシステムの破損の結果、これが他のサブシステムの破損を招く場合	○	○	○	×
(1) リークの範囲を限定する。 →ブロックに分割して閉じ込める。	(注4) ○	(注4) ○	(注4) ○	—
(2) ブロック毎に緊急トリチウム処理機能及びこれのコントロールシステムを設ける。	×	×	×	○
(3) サブシステムの破損が、これにつながる他のサブシステムからのリリースに波及するのを防止する。	○	○	○	×
(4) サブシステムの破損が他のサブシステムの破損につながるのを防ぐ。 →隔壁の設置、直接衝撃をうけないような配置とする。	○	○	○	×

注1：真空系, BTR3系よりのリリース
 注2：精製系(タンクII), NBI系よりのリリース
 注3：同位体分離系(カラムIII, IV)よりのリリース

注4：精製系用G.BOX, 同位体分離系用G.BOX, および貯蔵系用G.BOXに分割

事故の種類

対策

2.2 事故シーケンスの検討及び起因事故の選定

FMEAによって系統機器の故障想定，検出および故障の影響を解析したが，他方，正常運転から逸脱した状態を起点として，故障が回避されるもの，単に系統停止で終るもの，及びさらに事故へ進展するものなどの事象を検討し事故シーケンスとしてまとめた。

それらを以下の図に示した。

Fig. 2.1

Fig. 2.2

Fig. 2.3

起因事故としては，グローブ・ボックス或いは室内へのトリチウム放出につながる事故である下記の事象を選定した。

図中○印番号を付したものが起因事故である。

(1) 燃料ガス精製系の起因事故

- ① パラジウム合金膜透過器ガス温度調節器故障
- ② 貯蔵タンク(I)大リーク
- ③ 希釈用ヘリウム供給装置故障
- ④ コールドトラップ冷却管過冷
- ⑤ コールドトラップヘリウムガス圧力調節器故障
- ⑥ 固体電解質電解セルガス温度調節器故障

(2) 燃料ガス同位体分離系の起因事故

- ⑦ グローブ・ボックス内燃料ガス供給管破断
- ⑧ 深冷蒸留塔破損

(3) 燃料ガス貯蔵系の起因事故

- ⑨ 冷却水系故障
- ⑩ ZrNi合金ベット加熱装置故障

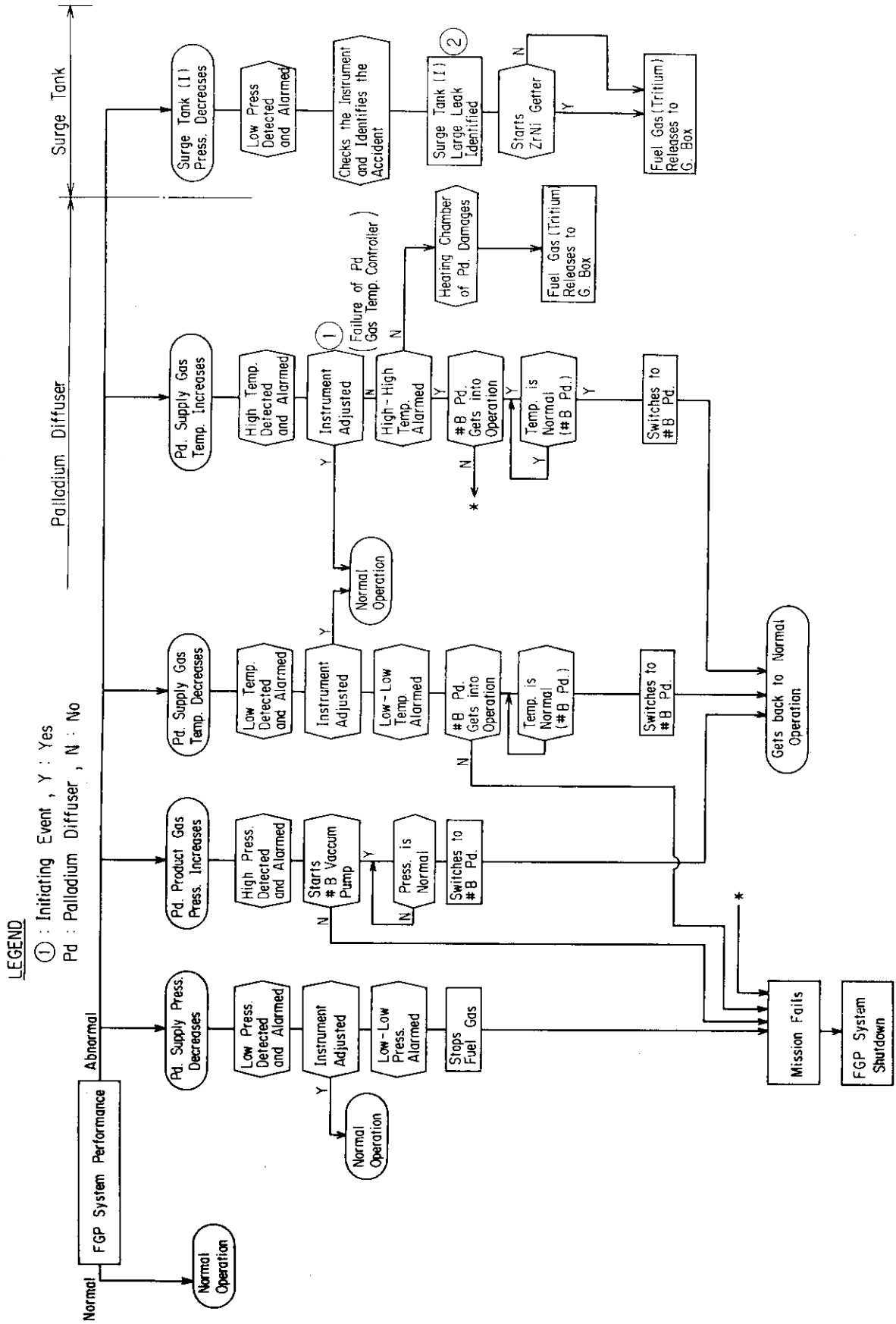


Fig. 2.1 Accident Sequence for Fuel Gas Purification System (1/3)

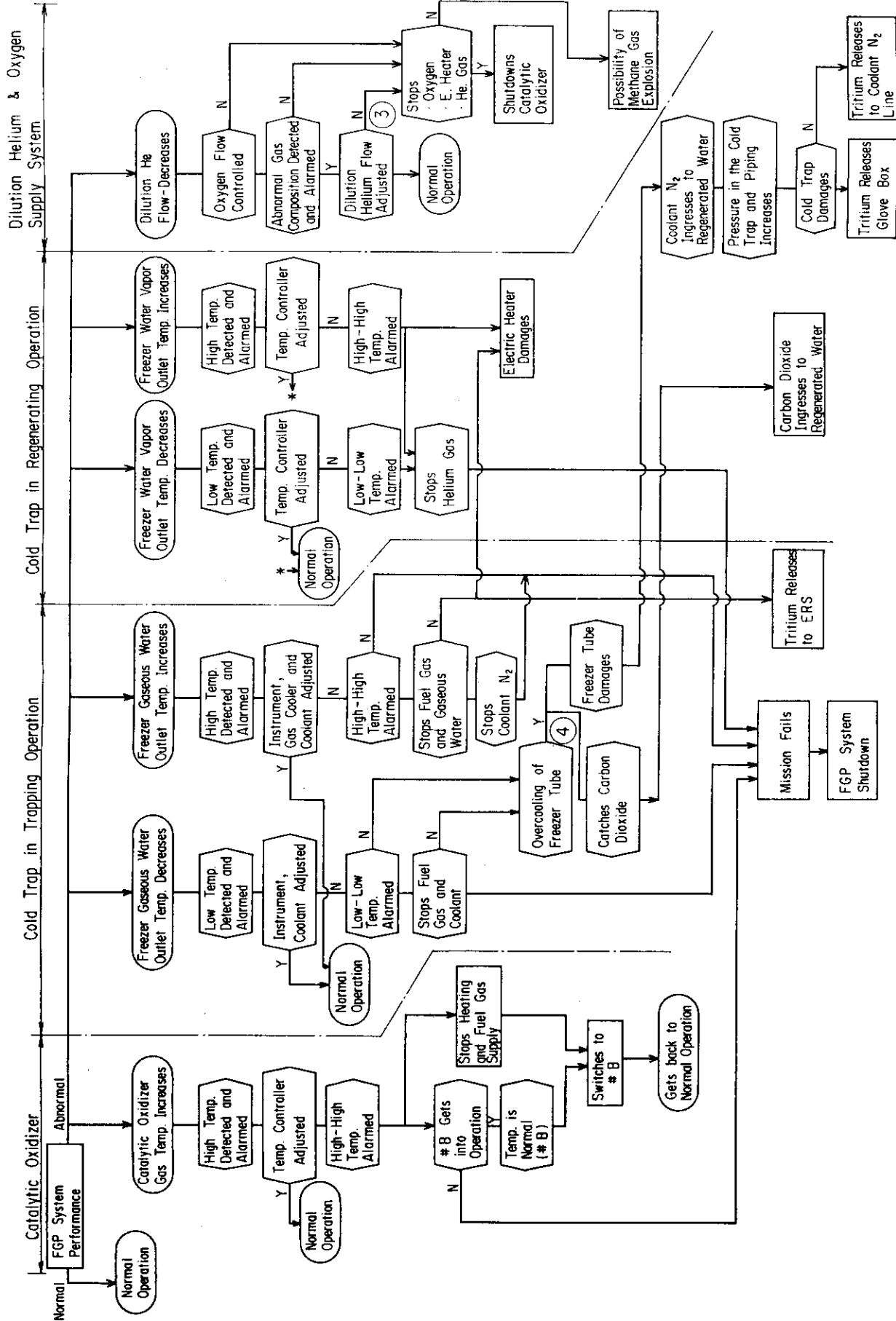


Fig. 2.1 Accident Sequence for Fuel Gas Purification System (2/3)

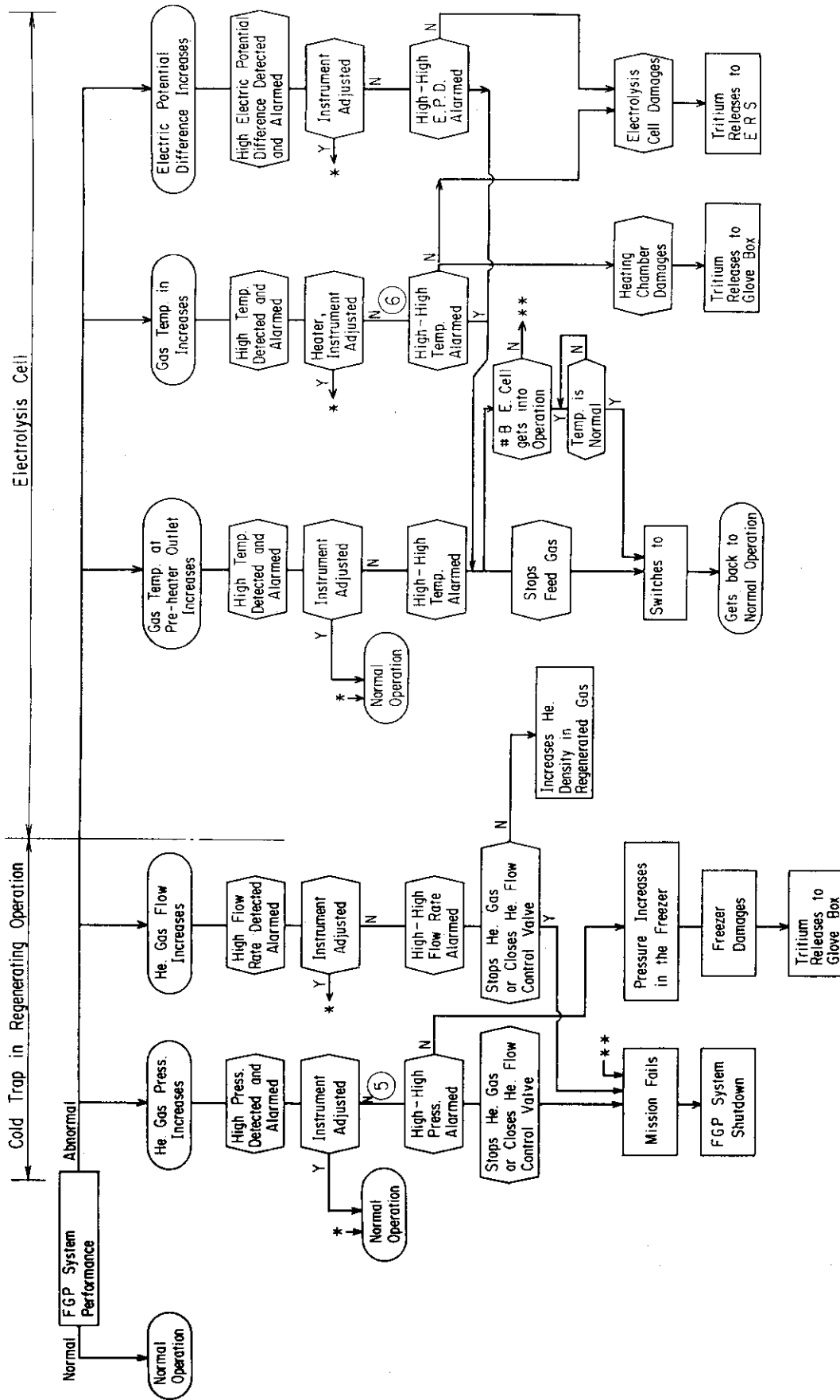


Fig. 2.1 Accident Sequence for Gas Purification System (3/3)

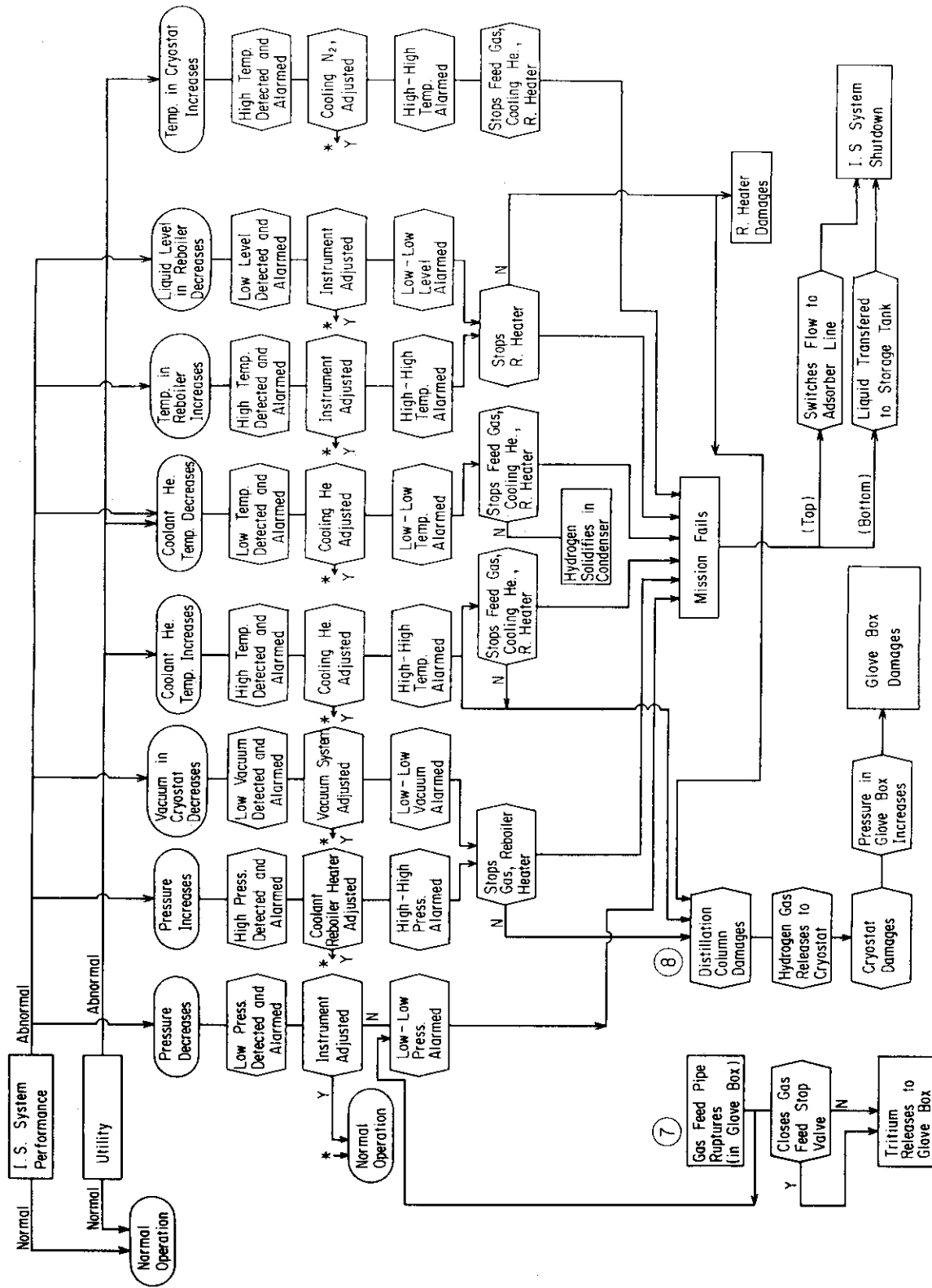


Fig. 2.2 Accident Sequence for Isotope Separation System

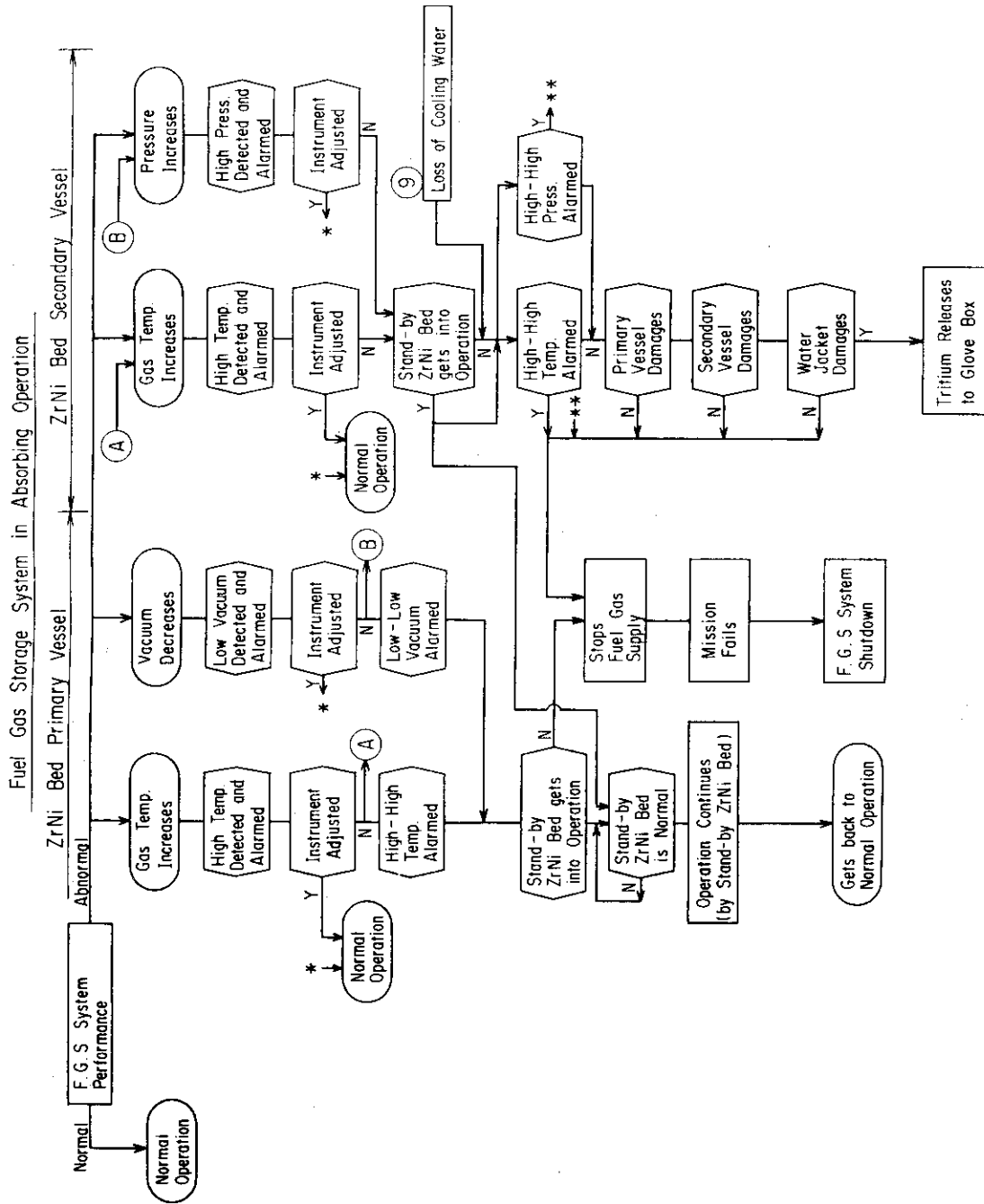


Fig. 2.3 Accident Sequence for Fuel Gas Storage System (1/2)

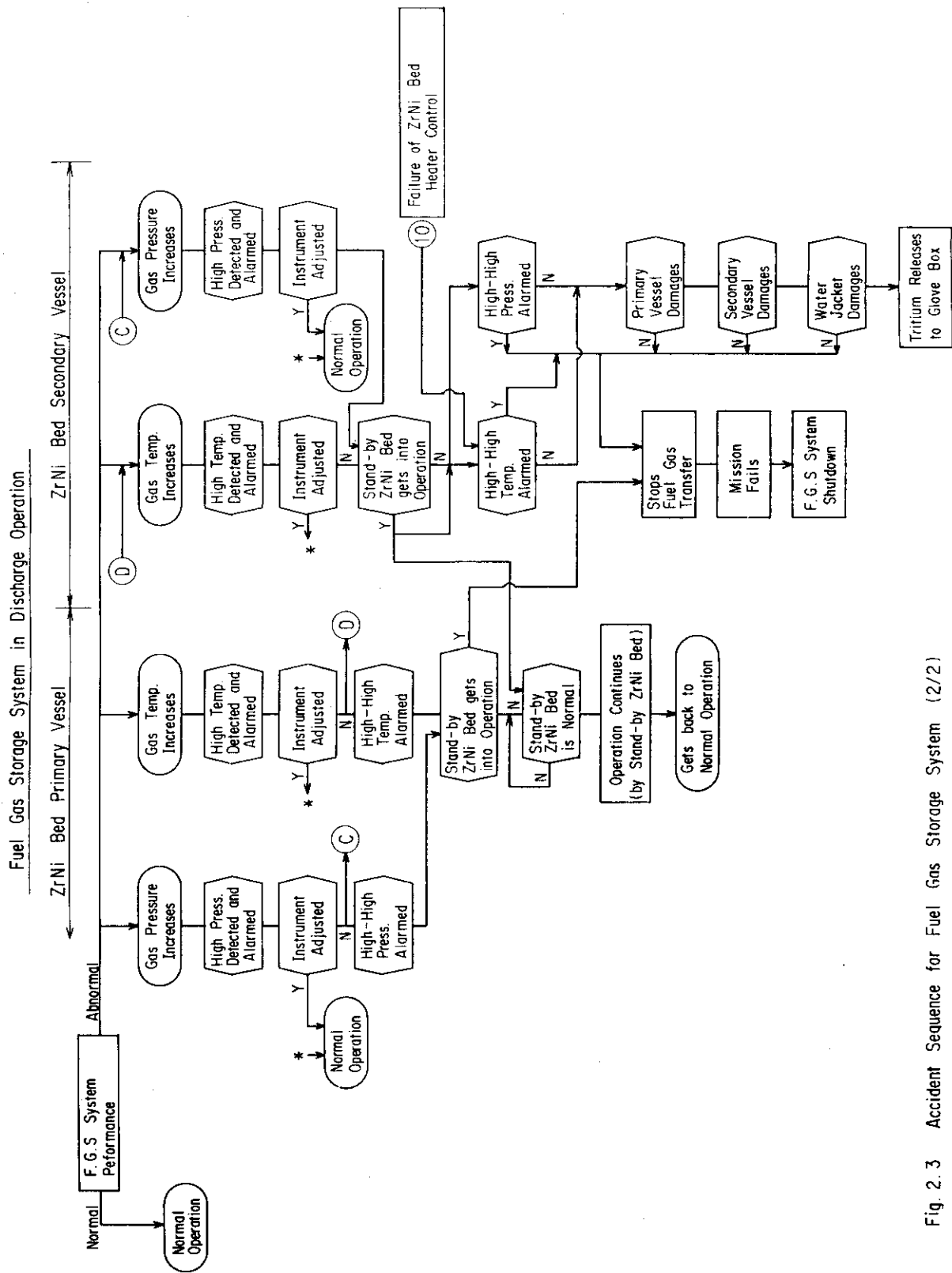


Fig. 2.3 Accident Sequence for Fuel Gas Storage System (2/2)

2.3 E T A (Event Tree Analysis)

選定された起因事故すべてに対してE T Aを行なうべきであるが、今回は事故の大きさ等を勘案して、以下の4つの事象に限定して解析した。

- (1) 貯蔵タンク(I)大リーク(精製系)
- (2) 希釈用ヘリウム供給装置故障(精製系)
- (3) 深冷蒸留塔破損(同位体分離系)
- (4) ZrNi合金ベットの冷却水系故障(貯蔵系)

(1)は燃料ガス精製系にあってトリチウムインベントリーが最も大きいこと、(2)は触媒反応器内でメタンガス爆発の可能性があること、(3)は液体水素の蒸発による多量のガス発生をもたらすこと、および(4)は燃料ガス貯蔵系の起因事故で事故発生確率が大きく、かつトリチウムインベントリーが3つのサブシステムのうちで最大であるZrNiベット(T₂)の破損にかかわることなどがその選定理由である。

以下、各起因事故毎に計算結果を報告する。なお、各分岐点事象の発生確率については、2.4.3のF T Aの項を参照のこと。

- (1) 貯蔵タンク(I)大リーク

計算結果をFig. 2.4に示した。

貯蔵タンクのうち、トリチウムインベントリーが最大の本タンクをタンクリークの代表として選んだ。事故発生時、ZrNiゲッターを起動し、吸蔵によってトリチウム放出を低減させる。

従って事故の大きさはゲッターによる吸蔵の成功、失敗に依存する。

ZrNiゲッターの設計仕様は燃料ガス貯蔵系のそれと同一と仮定し、吸蔵運転準備が成功又は失敗の場合のうち、グローブボックスに対してバウンダリーを形成する2次側容器及び冷却水側容器の健全性を分岐点事象とした。

発生確率は以下の通りである。

- (1) グローブボックスへのトリチウム放出事象

シーケンス	A-1	$4.88 \times 10^{-3} / R \cdot Y$
	A-3	$2.14 \times 10^{-5} / R \cdot Y$
	A-6	$1.19 \times 10^{-4} / R \cdot Y$

- (2) 室内へのトリチウム放出事象

シーケンス	A-5	$1.47 \times 10^{-10} / R \cdot Y$
	A-7	$8.10 \times 10^{-8} / R \cdot Y$

なお、シーケンスA-1はZrNiゲッターの吸蔵成功の事象である。

- (2) 希釈用ヘリウム供給装置故障

計算結果をFig. 2.5に示した。

希釈用ヘリウム流量喪失が起きれば、触媒反応器入口のガス組成が危険な状態になるのを防止するため、酸素流量は調節弁により自動停止のインターロック機構が働くことを前提とする。その場合、酸素流量調節装置の故障が重なると酸素の供給が継続され、危険な

状況に進展する。

通常は警報により、オペレーターが事故に気づき、触媒反応器の停止操作（ O_2 供給停止、ヒータ停止、入口ガス止弁閉）により事故は回避される。

発生確率は以下の通りである。

(1) グローブ・ボックスへのトリチウム放出事象

シーケンス	B-6	$3.65 \times 10^{-6} / R \cdot Y$
	B-15	$1.16 \times 10^{-6} / R \cdot Y$

(2) 室内へのトリチウム放出事象

シーケンス	B-7	$2.49 \times 10^{-9} / R \cdot Y$
	B-9	$1.74 \times 10^{-10} / R \cdot Y$
	B-16	$7.89 \times 10^{-10} / R \cdot Y$
	B-18	$9.00 \times 10^{-11} / R \cdot Y$
	B-19	$3.36 \times 10^{-7} / R \cdot Y$

シーケンスB-6, B-15, B-7およびB-16は入口止弁閉成功につき、触媒反応器内でのメタンガス爆発の可能性はないものと考えられ、シーケンスB-9, B-18, およびB-19については爆発の可能性があると考えられる。

なお、爆発の可能性については、2.4.4(5)項を参照のこと。

(3) 深冷蒸留塔破損

保冷槽内で蒸留塔が破損すると、急激な蒸発により、保冷槽圧力が上昇し、破損に至ることを想定した事故である。分岐点事象としては「リボイラヒータ停止」, 「吸着塔ラインへの切替」, 及び「塔底部貯液の移送」を考慮する。

計算結果をFig. 2.6に示したが、発生確率は以下の通りである。

シーケンス	C-9	$2.52 \times 10^{-9} / R \cdot Y$
	C-12	$1.93 \times 10^{-10} / R \cdot Y$
	C-15	$1.01 \times 10^{-13} / R \cdot Y$

(4) ZrNi合金ベットの冷却水系故障

冷却水系の故障（断水等）により除熱機能が失われた場合、合金ベット容器の破損をまねき、グローブボックスへトリチウムが放出される。

分岐点事象としては、「ガス温度高警報装置作動」, 「オペレータによる事故発見」, 「ガス入口弁閉」, 「1次側容器健全」, 「2次側容器健全」, 「冷却水側容器健全」および「グローブボックス健全」を選んだ。

なお、燃料貯蔵系の事故を検討するに当たり、運転モードとしては、

- ① 初期装荷のためのクリーニング運転
- ② 吸蔵運転
- ③ 放出運転
- ④ 貯蔵タンクへの貯蔵

が考えられており、これらの運転モードのうち、運転条件の厳しい②及び③をとりあげETAを実施した。

計算結果をFig. 2.7及びFig. 2.8に示した。

発生確率の点で両者を比較すると、「ZrNi合金ベットの加熱装置故障」の方が小さいので、評価は「ZrNi合金ベットの冷却水系故障」についてのみ行なう。(事故の大きさは同じとしている。)

発生確率は以下の通りである。(Fig. 2.7参照)

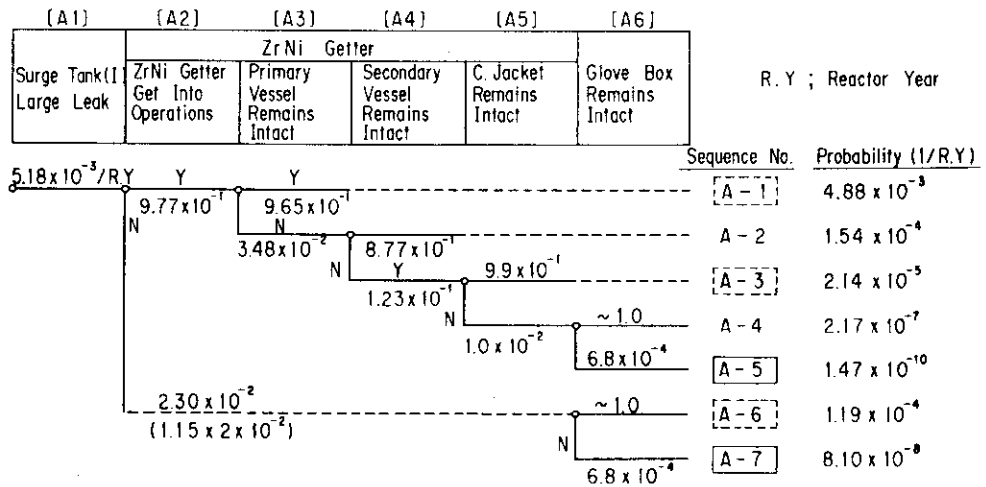
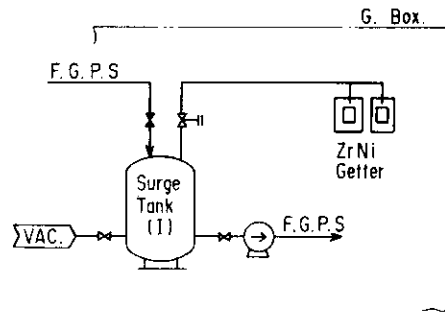
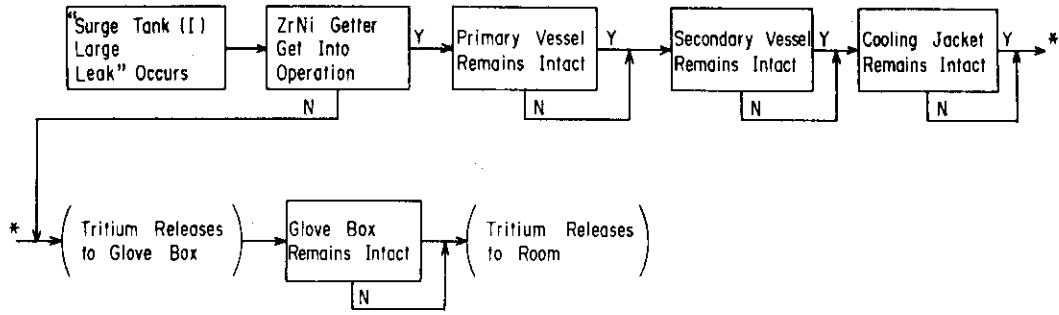
(1) グローブボックスへのトリチウム放出事象

シーケンス	D-3	$5.77 \times 10^{-9} / R \cdot Y$
	D-9	$7.58 \times 10^{-11} / R \cdot Y$
	D-14	$7.66 \times 10^{-11} / R \cdot Y$

(2) 室内へのトリチウム放出事象

シーケンス	D-5	$2.06 \times 10^{-13} / R \cdot Y$
	D-11	$2.71 \times 10^{-15} / R \cdot Y$
	D-16	$2.74 \times 10^{-15} / R \cdot Y$

なお、ETAを行なわなかった起因事故に対する事故の進展を参考までにFig. 2.9に示した。



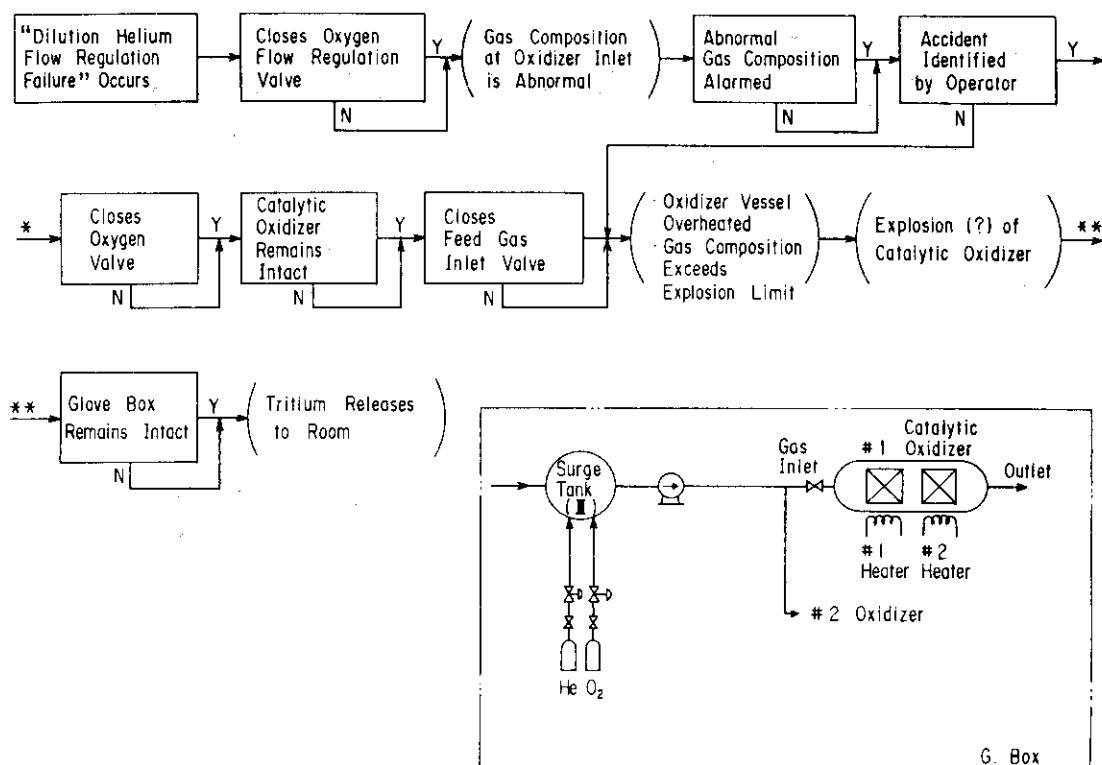
Note

Risk evaluation is performed on the framed sequence number.

[A-XX] : Tritium Releases to G. Box.

[A-XX] : Tritium Releases to Room

Fig. 2.4 Event Tree for Surge Tank (I) Large Leak



[B1]	[B2]	[B3]	[B4]	[B5]	[B6]	[B7]	[B8]
Dilution He. Flow Regulation Failure	Closes O Regulation Valve	Abnormal Gas Composition Alarmed	Accident Identified by Operation	Closes Oxygen Valve	Catalytic Oxidizer Remains Intact	Closes Feed Gas Inlet Valve	G. Box Remains Intact

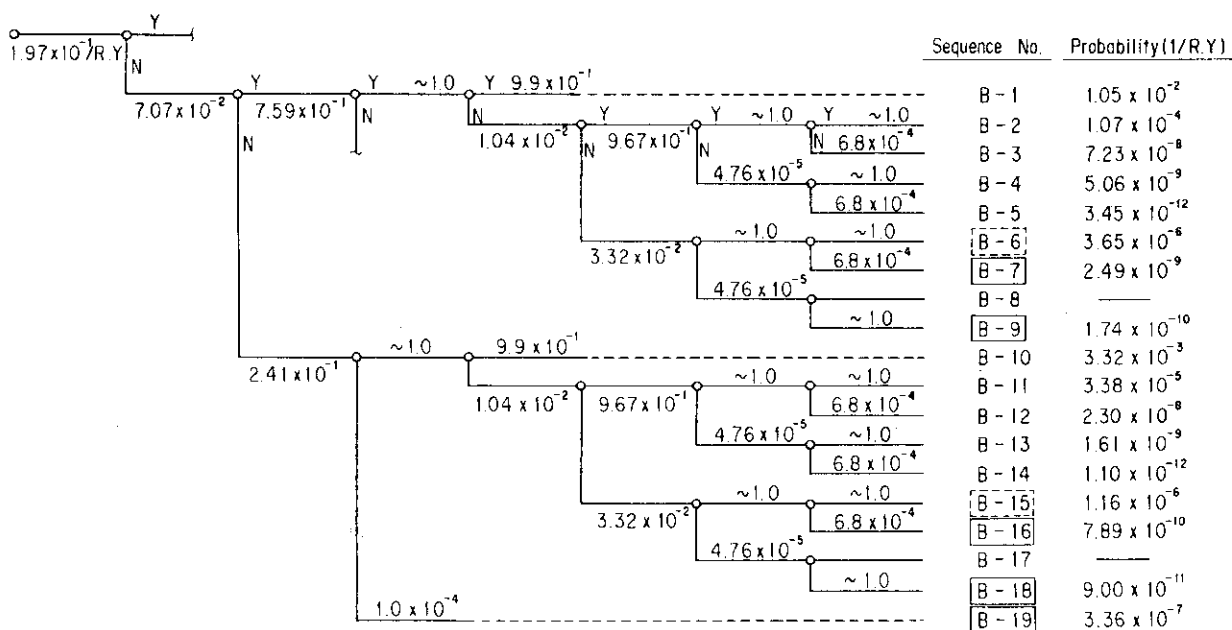


Fig. 2.5 Event Tree for Dilution He. Supply System Failure

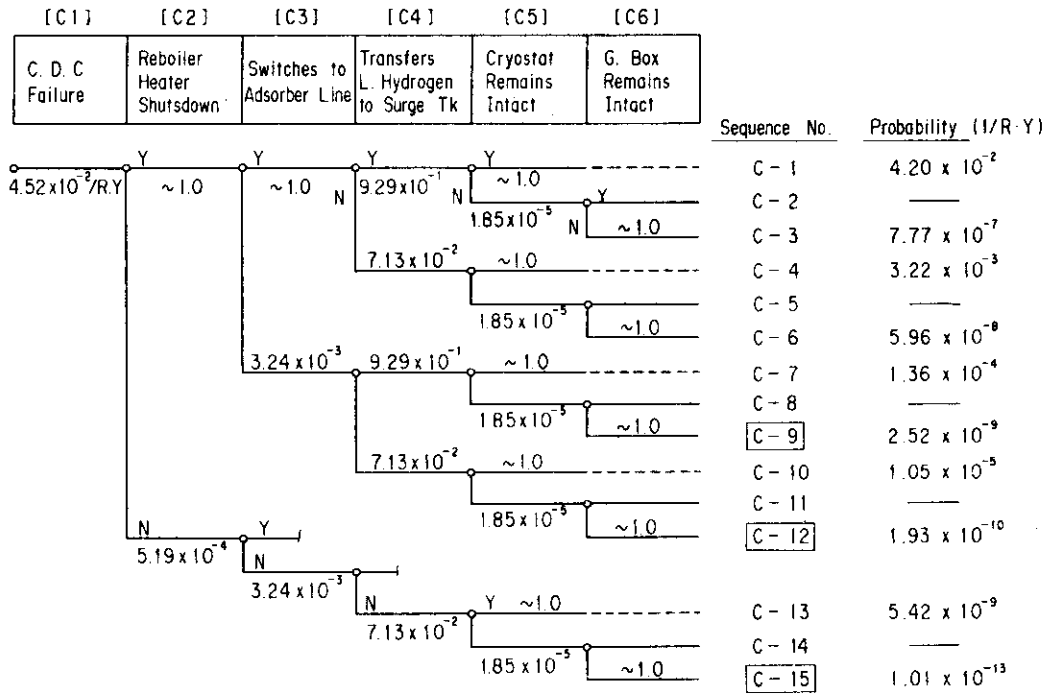
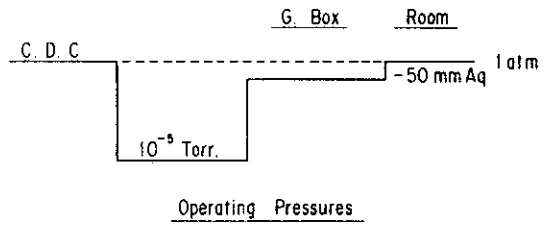
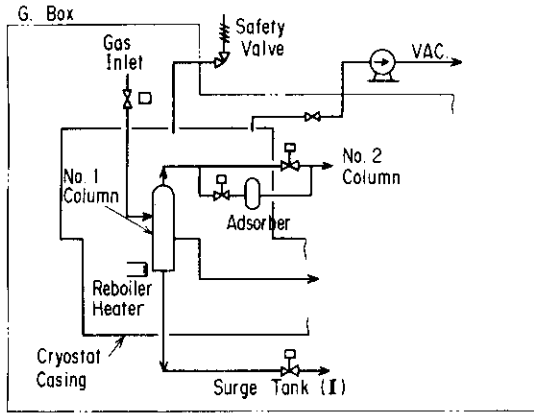
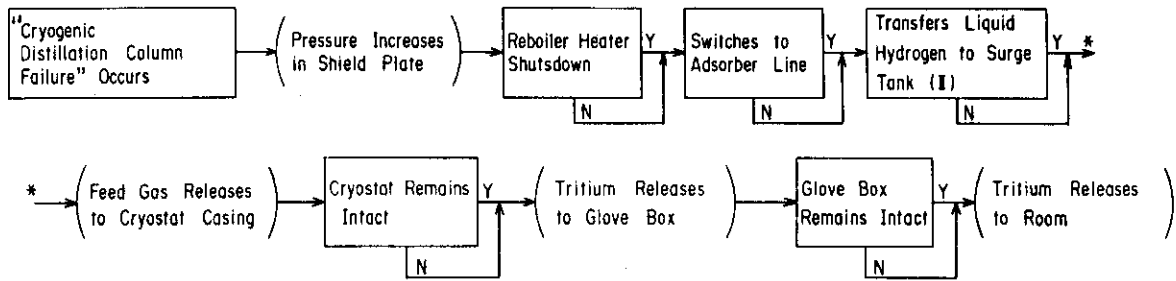
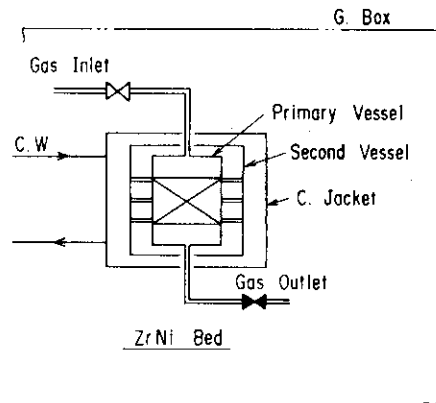
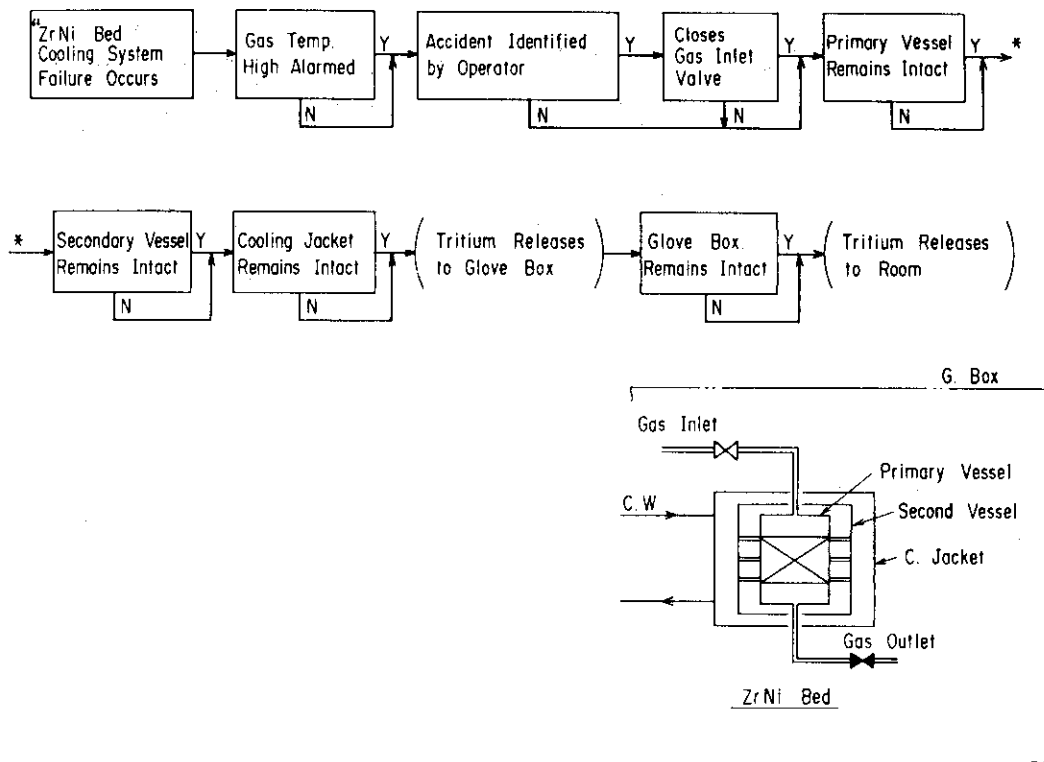


Fig 2.6 Event Tree for Cryogenic Distillation Column Failure



[D1]	[D2]	[D3]	[D4]	[D5]	[D6]	[D7]	[D8]
ZrNi Bed C. System Failure	Gas Temp. Alarmed	Accident Identified by Operator	Closes Gas Inlet Valve	Primary Vessel Remains Intact	Secondary Vessel Remains Intact	C. Jacket Remains Intact	G. Box Remains Intact

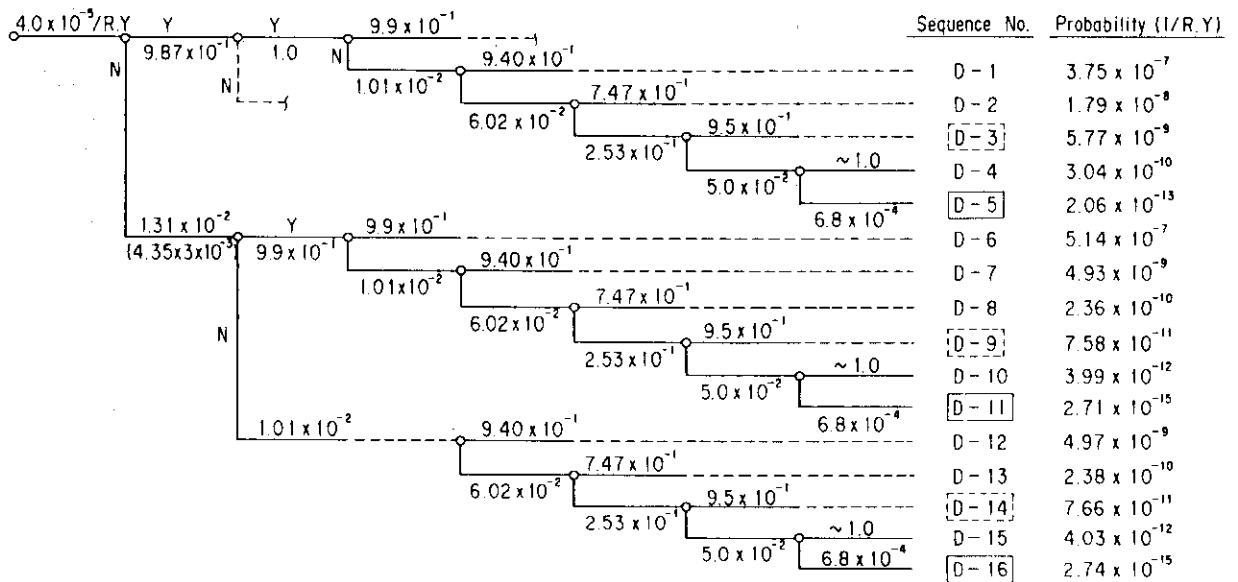


Fig 2.7 Event Tree for ZrNi Bed Cooling System Failure

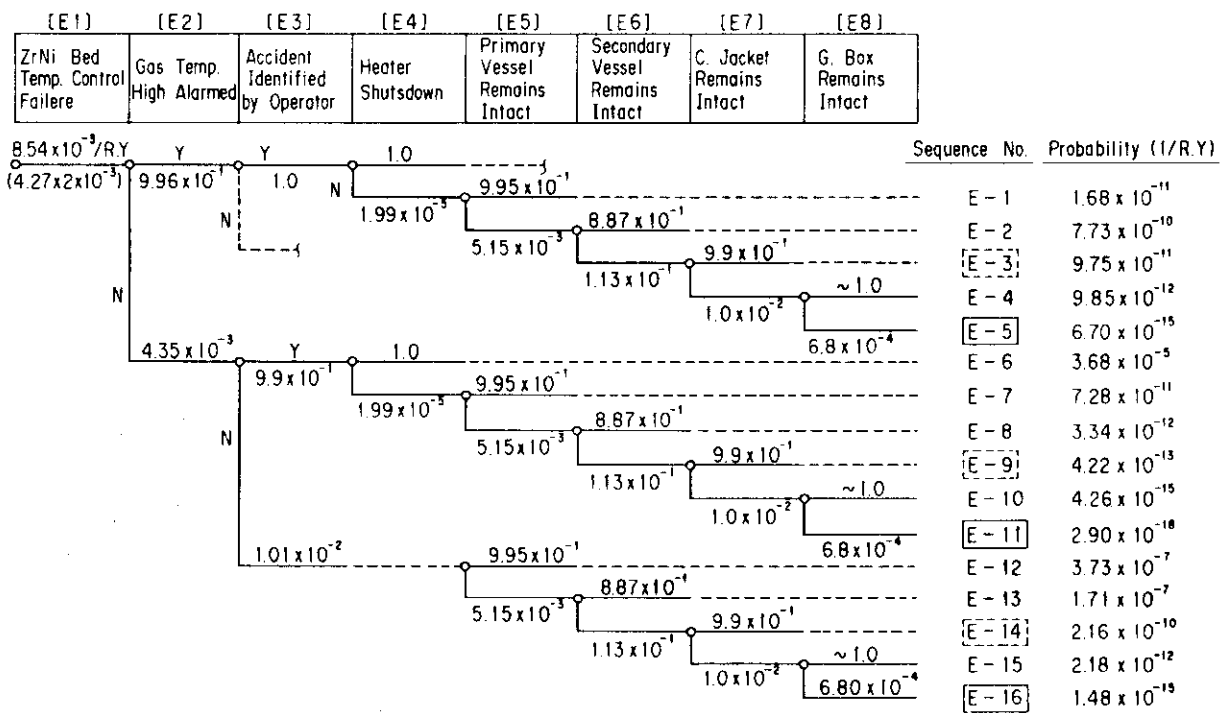
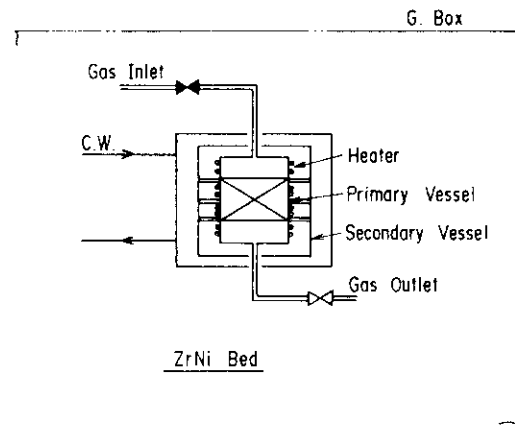
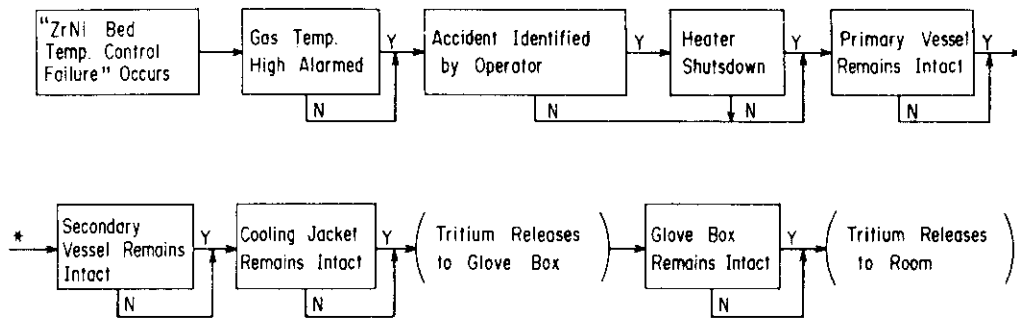
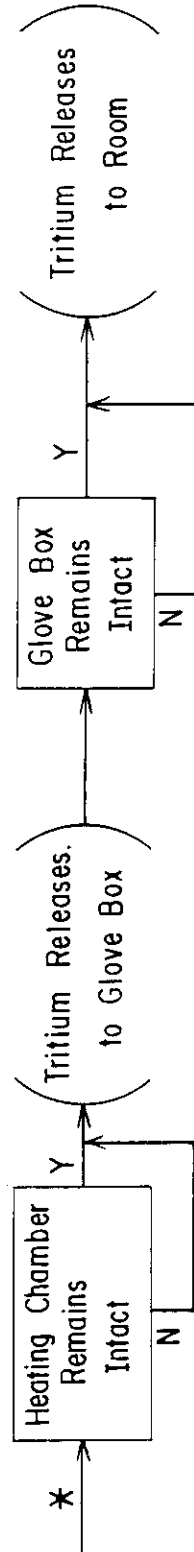
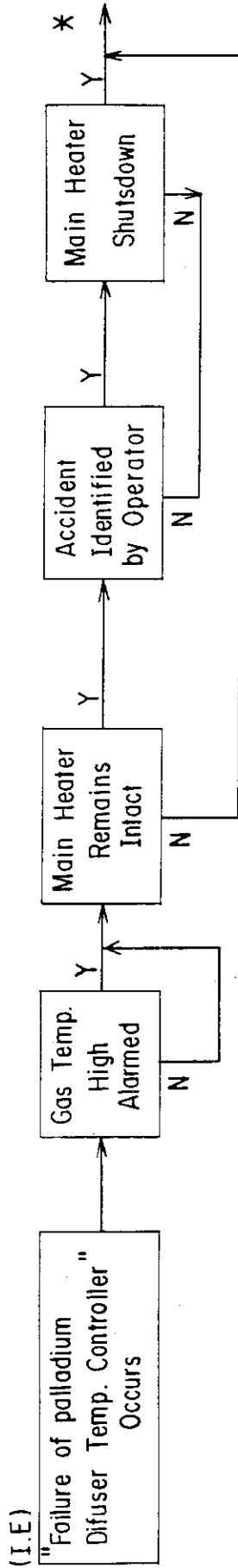


Fig. 2.8 Event Tree for ZrNi Bed Heater Failure



Remarks

- (I . E) : Initiating Event
- : Branch Point.
- () : Condition or State of the Event.

Y : Yes, N : No.

Fig. 2.9 (1/5) Event Sequence Block Diagram.

Failure of palladium Diffuser Temp. Controller.

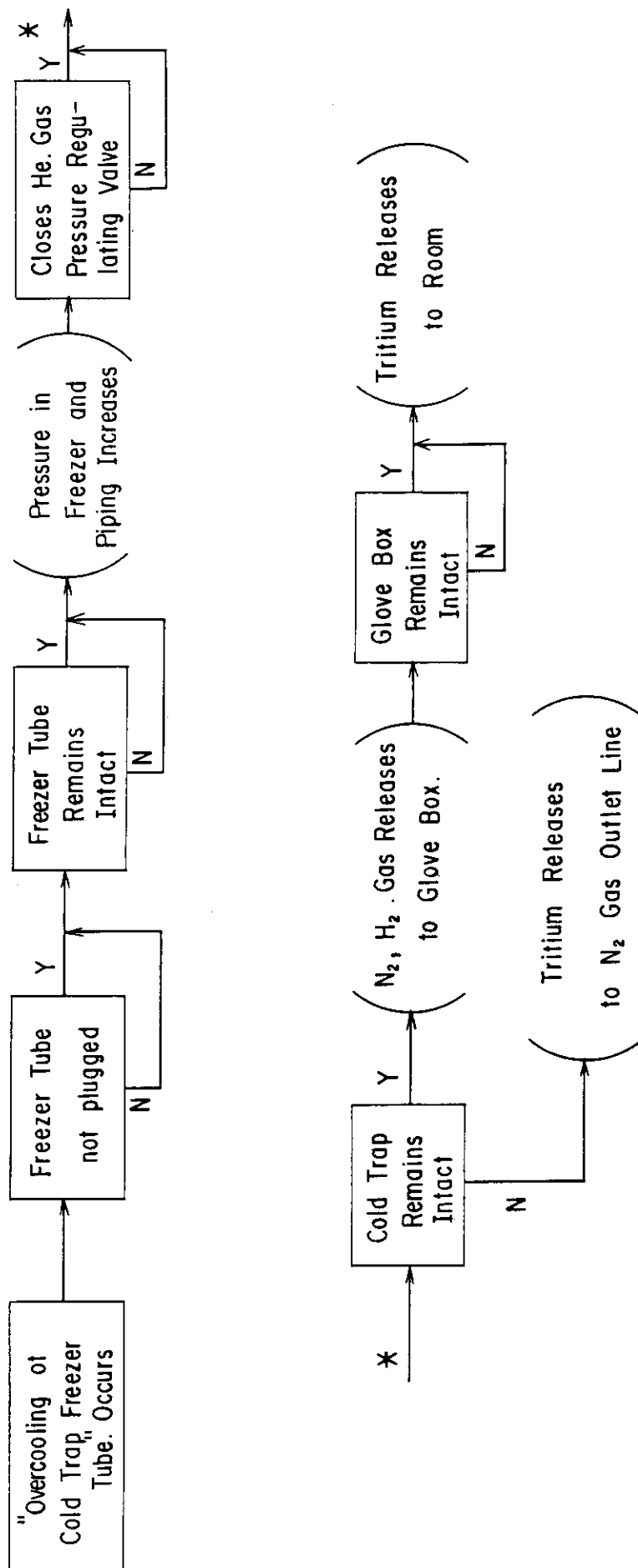


Fig. 2.9 (2/5) Continued: Overcooling of Cold Trap Freezer Tube.

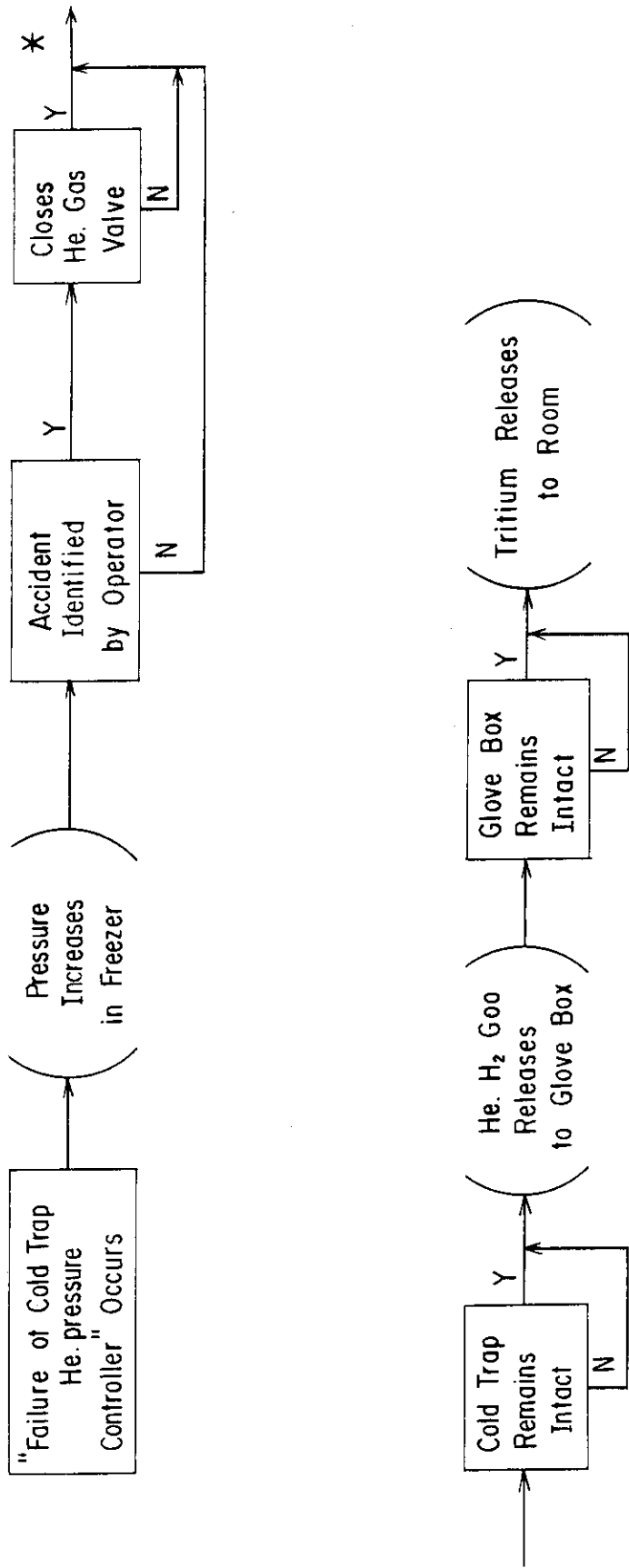


Fig. 2.9 (3/5) Continued. Failure of Cold Trap He. Press. Controller.

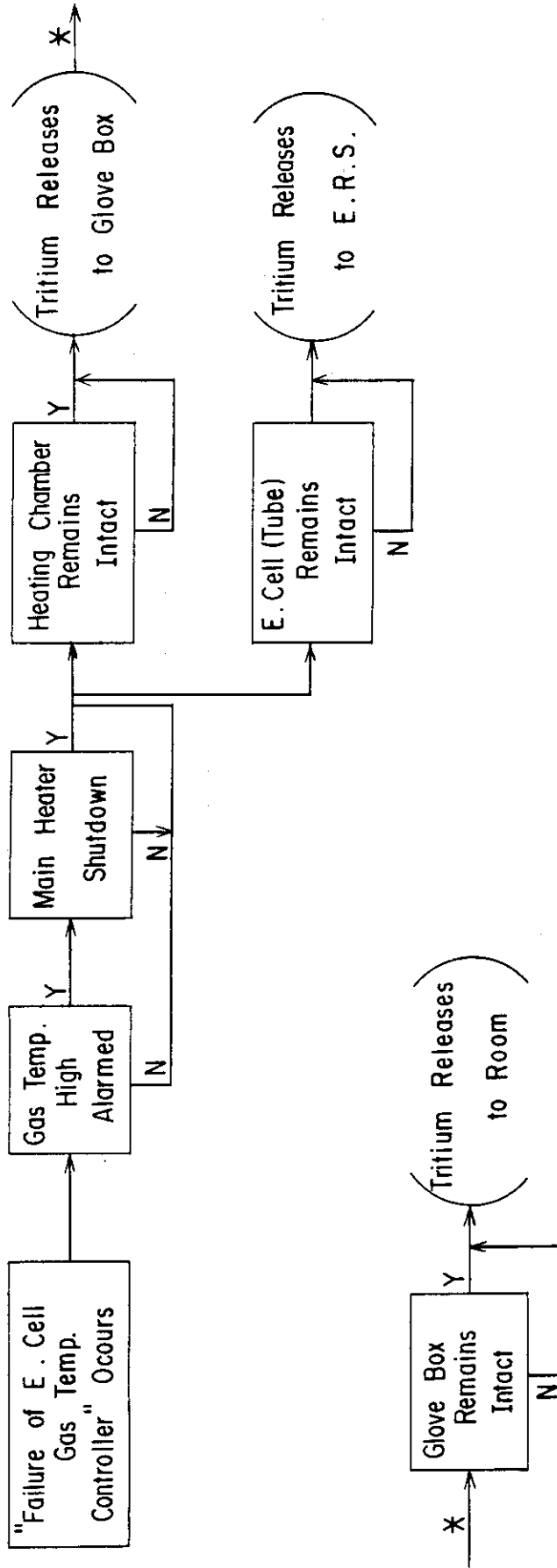


Fig. 2.9 (4/5) Continued. Failure of Electrolysis Cell Gas Temp. Controller.

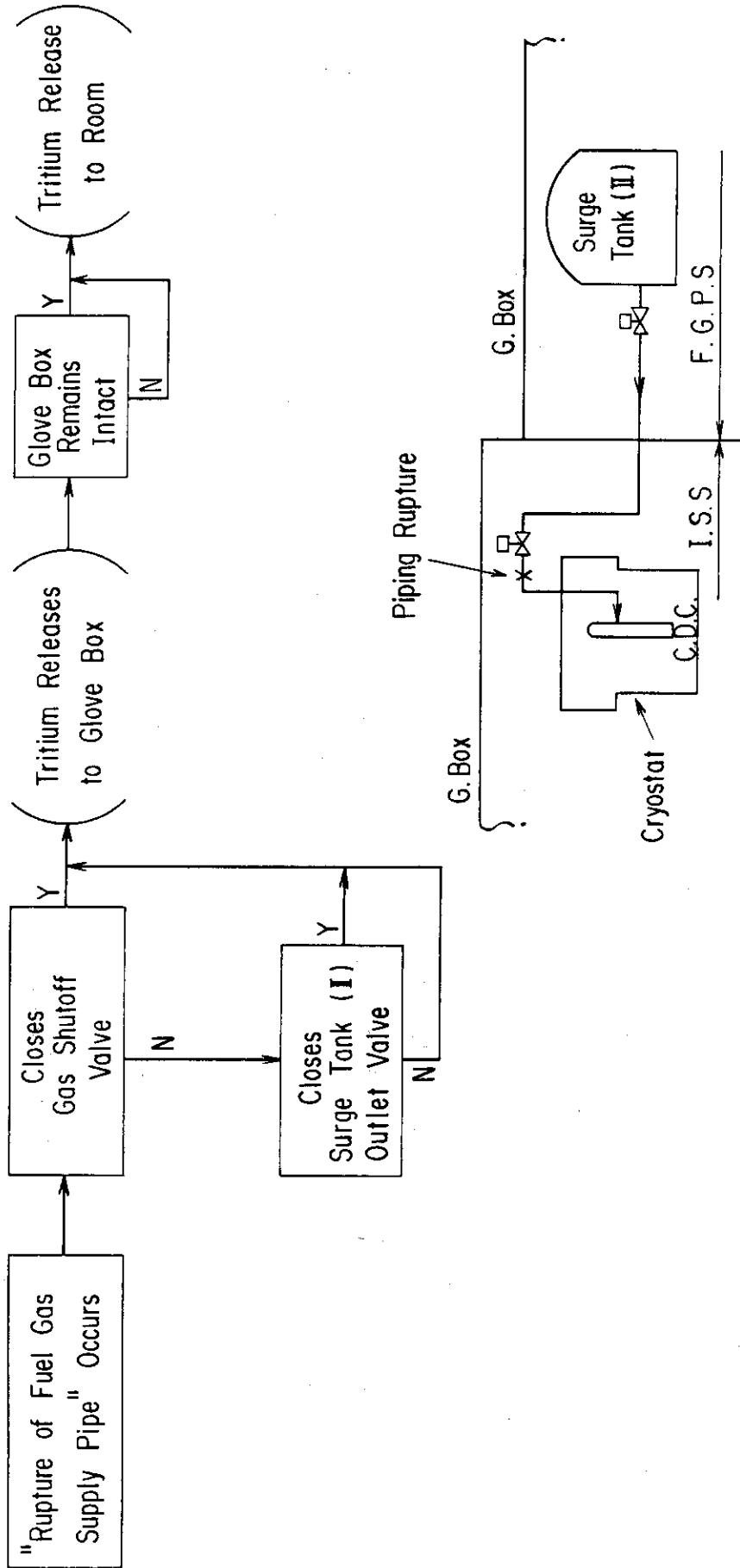


Fig. 2.9 (5/5) Continued. Rupture of Fuel Gas Supply Pipe in Glove Box.

2.4 FTA (Fault Tree Analysis)

前項に述べた E T A における起因事故および分岐点事象の確率計算に関して、主な計算条件等を以下に述べる。

故障率データは、IEEE Std. 500-1984⁽¹⁾ をベースに、一部 WASH-1400⁽²⁾ のデータを用いた。

又、オペレーターエラーに関するデータは WASH-1400 によった。

システムの運転時間に関しては、予備機を備えたシステムは 1 ヶ月 1 回の点検がなされるものと仮定し、720 時間とし、予備機のないシステムでは、1 年間 (8,640 時間) とした。

なお、解析対象システムの設計仕様、運転条件等が未定の部分が多いため、主観的な F T A となっている。

(1) 貯蔵タンク(I)大リーク

(1) 貯蔵タンク(I)大リーク

この起因事故の発生確率は F T A によらないで IEEE Std. 500-1984 のデータを用いた。

$$\begin{aligned} \text{レシーバーの故障率} &= 0.6 \times 10^{-6} / \text{hr} \times 8,640 \text{ hr} = 5.18 \times 10^{-3} / R \cdot Y \\ &R \cdot Y ; \text{Reactor year} \end{aligned}$$

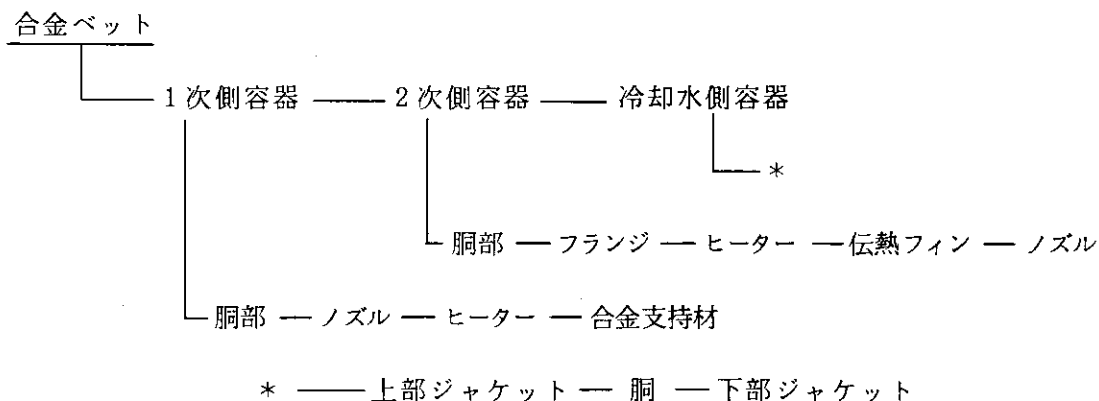
(2) 吸蔵運転準備失敗

Table 2.6 (1/5) 及び Fig. 2.10 (1/5) 参照

合金ベットの 2 基使用する前提で、2 基のうち、1 基が失敗した場合を Top 事象の失敗とした。

(3) ZrNi 合金ベット 1 次側容器破損 (吸蔵運転時)

燃料ガス貯蔵系の系統図を Fig. 2.11 に示した。合金ベットの構造図を Fig. 2.12 に示したが、構成は次の通りである。



なお、解析上は、1 次側容器の破損だけではグローブボックスへガス放出しないとしている。

F T A の結果を、Table 2.6 (2/5) 及び Fig. 2.10 (2/5) に示した。

- (4) ZrNi 合金ベットの二次側容器破損（吸蔵運転時）二次側容器の破損はグローブボックスへのガス放出をもたらす。

F T Aの結果を、Table 2.6 (3/5) 及び Fig. 2.10 (3/5) に示した。

- (5) ZrNi 合金ベット冷却水側破損（吸蔵運転時）

上流のイベントが既に発生しており、1次側及び2次側容器は破損している。従って冷却水水蒸気及び燃料ガスがグローブボックスへ放出されており、水側が破損すれば、さらに水の放出が加わる事故となる。

F T Aの結果をTable 2.6 (4/5) 及び Fig. 2.10 (4/5) に示した。

- (6) グローブボックス故障

グローブボックスについては設計仕様が未確定であるのでその故障解析も不可能となるが、F T A解析の必要上、下記の条件で簡便な解析を試みた。

グローブボックス故障としては、

- ① グローブボックス本体の漏洩又は破損
- ② 負圧制御装置の故障による負圧維持不能

の2つを想定し、その故障モードを通常運転時故障と事故時の負荷条件下での故障とを検討する。

解析結果をTable 2.6 (5/5) 及び Fig. 2.10 (5/5) に示した。

本起因事故の場合は、タンク大リークによるグローブボックスの圧力上昇は小さいと推定されるので事故時負荷条件下の故障率は0とした。

- (2) 希釈用ヘリウム供給装置故障

- (1) 希釈用ヘリウム流量調節不能

F T Aの結果をTable 2.7 (1/8) 及び Fig. 2.13 (1/8) に示した。

故障としては流量の完全喪失と規定流量が流れない場合を検討した。

- (2) 酸素流量調節弁故障

F T Aの結果をTable 2.7 (2/8) 及び Fig. 2.13 (2/8) に示した。

希釈用ヘリウム流量が喪失（又は部分負荷流量）した場合本調節弁によって酸素供給を停止するが、弁本体又は調節器等の故障により弁が閉止されない故障である。

- (3) ガス組成異常の警報失敗

触媒反応器入口における混合ガスは不活性ガスを含む多成分であり、反応器内部での加熱及び反応によって温度、圧力、組成の諸条件が相互に影響する。従って厳密な爆発範囲を求めるのは困難である。

ここでは、組成異常の原因を、希釈ヘリウム流量、酸素流量、反応器入口ガス組成とし、これらの検出と警報のための計器等の故障を検討した。

F T Aの結果をTable 2.7 (3/8) 及び Fig. 2.13 (3/8) に示した。

- (4) オペレータによる異常発見失敗

Table 2.7 (4/8) 及び Fig. 2.13 (4/8) 参照。

上流のイベント「ガス組成異常の警報」が作動時はオペレーターは故障に気付くものと考えられるので、F. Tree は展開せず異常発見確率は1.0とした。

一方、警報作動失敗時は、Fig. 2.13(4/8)に示すTreeとした。

(5) 酸素供給弁閉失敗

FTAの結果をTable 2.7(5/8)及びFig. 2.13(5/8)に示した。

(6) 触媒反応器破損

容器の破損はガス温度或いはメタル温度の制御不能に起因するものと考えてTreeを展開した。

FTAの結果をTable 2.7(6/8)及びFig. 2.13(6/8)に示した。

(7) 触媒反応器入口弁閉失敗

FTAの結果をTable 2.7(7/8)及びFig. 2.13(7/8)に示した。

(8) グローブボックス故障

Fig. 2.13に示したシーケンス番号B-9, B-18及びB-19は触媒反応器破損及び入口弁閉失敗を含んだ事象であるのでメタンガス爆発は起りうると考え、グローブボックス故障確率を1.0とした。それ以外のシーケンス番号の事象についてはFTAによった。Table 2.7(8/8)及びFig. 2.13(8/8)参照。

(3) 深冷蒸留塔破損

(1) 深冷蒸留塔(C.D.C)又は配管の破損

4カラム方式の場合について検討した。

対象機器としては、蒸留塔のみならず、その破損により燃料ガス、冷媒用ヘリウム又は窒素等を保冷槽に放出するものすべてを考えた。

FTAの結果をTable 2.8(1/6)及びFig. 2.14(1/6)に示した。

(2) リボイラ・ヒータ停止失敗

FTAの結果をTable 2.8(2/6)及びFig. 2.14(2/6)に示した。

(3) 吸着塔ラインへの切替え失敗

FTAの結果をTable 2.8(3/6)及びFig. 2.14(3/6)に示した。

(4) 塔底部液の貯蔵タンク(Ⅲ)への移送失敗

FTAの結果をTable 2.8(4/6)及びFig. 2.14(4/6)に示した。

(5) 保冷槽破損

解析に当り、以下の前提条件を設けた。

- ① 蒸留塔4基のうち、1基の破損を考える。
- ② 真空排気装置は常時運転しているものとする。
- ③ 圧力逃し装置が設置されているものとする。
- ④ 保冷槽圧力が上昇した場合、燃料ガス供給弁は、自動的に閉止される。

又、保冷槽の破損は、槽内圧力の異常な上昇をもたらす。

以下の故障をもって保冷槽破損と考えた。

- ① 冷却用窒素ガスが継続的に保冷槽へ放出される。
- ② 蒸留塔破損後も燃料ガスが継続的に保冷槽へ放出される。
- ③ 圧力逃し装置の故障
- ④ 真空排気装置の故障

F T Aの結果をTable 2.8 (5/6) 及びFig. 2.14 (5/6) に示した。

(6) グローブボックス故障

保冷槽破損が起きている条件下での、グローブボックスの圧力挙動は詳細な解析を行なわないと判らないが、ここではグローブボックスは故障するものと考えた。

Table 2.8 (6/6) 及びFig. 2.14 (6/6) 参照。

(4) ZrNi合金ベツト冷却水系の故障

(1) 合金ベツト冷却水系故障

ユーティリティ系統の故障と考え、F T Aによらないで以下のような推定値を用いた。
WASH-1400に於てAuxiliary Feedwater Systemの故障確率は 3.7×10^{-5} ~ 3.8×10^{-3} と報告されている。

又、JAERI-M6400に於て後備冷却系は 4.8×10^{-5} の故障確率である。

これらのデータからシステム条件は異なるが、合金ベツト冷却水系の故障確率を $4.0 \times 10^{-5}/R \cdot Y$ と仮定した。

(2) ガス温度高警報装置作動失敗

F T A結果をTable 2.9 (1/7) 及びFig. 2.15 (1/7) に示した。

なお、合金ベツトは吸蔵運転時として、3基が運転されているものとした。

(3) オペレータが事故発見に失敗

Table 2.9 (2/7) 及びFig. 2.15 (2/7) 参照。

(4) ガス入口弁閉

Table 2.9 (3/7) 及びFig. 2.15 (3/7) 参照。

(5) 1次側容器破損

Table 2.9 (4/7) 及びFig. 2.15 (4/7) 参照。

(6) 2次側容器破損

Table 2.9 (5/7) 及びFig. 2.15 (5/7) 参照。

(7) 冷却水側容器破損

Table 2.9 (6/7) 及びFig. 2.15 (6/7) 参照。

(8) グローブボックス破損

Table 2.9 (7/7) 及びFig. 2.15 (7/7) 参照。

A 3 : Zr・Niゲッター1次側容器破		Table 2.6 Continued (2/5)					
記号	事 名 称	象		故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備 考
		故障モード					
A 301	材 料	不	良			1.0×10^{-6}	
A 302	工 作	溶 接	不 良			1.0×10^{-6}	
A 303	材 料	経 年 的	劣 化			1.0×10^{-6}	
A 304	冷 却 水 断	流 量	喪 失	48.0×10^{-6}	720	3.46×10^{-2}	
A 305	設 計	不	良			1.0×10^{-6}	
A 306	工 作	溶 接 線	ク ラ ッ ク			2.0×10^{-4}	

Table 2.6 Continued (3/5)

A 4 : 2 次 側 容 器 破 損		象		故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備	考
記号	事 名 称	故障モード						
A 401	材 料	不 良				1.0×10^{-6}		
A 402	工 作	溶接部クラック				2.0×10^{-2}		
A 403	材 料	経年的劣化				1.0×10^{-6}		
A 404	ボ ル ト	締付力低下		1.0×10^{-6}	720	7.2×10^{-4}		
A 405	パ ッ キ ン	選定不良		3.0×10^{-6}	720	2.16×10^{-3}		
A 406	設 計	不 良				1.0×10^{-6}		
A 407	フ ラ ン ジ	熱膨張量大				1.0×10^{-1}		
A 408	材 料	経年的劣化				1.0×10^{-6}		
A 409	材 料	経年的劣化				1.0×10^{-6}		
A 410	材 料	不 良				1.0×10^{-6}		
A 411	工 作	溶接不良				1.0×10^{-6}		
A 412	設 計	不 良				1.0×10^{-6}		

Table 2.6 Continued (4/5)

A 5 : 冷却側容器破損		事 象		故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備 考
		記号	名称				
A 501	工	作	溶	良		1.0×10^{-6}	
A 502	材	料	不	良		1.0×10^{-6}	
A 503	工	作	溶	良		1.0×10^{-6}	
A 504	材	料	不	良		1.0×10^{-6}	
A 505	工	作	溶接部クラック			1.0×10^{-2}	1次側, 2次側破損による過大荷重
A 506	入	口 弁	誤	閉		1.5×10^{-6}	
A 507	出	口 弁	誤	閉		1.5×10^{-6}	

Table 2.6 Continued (5/5)

事 象		故障モード	故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備 考
A 601	G.B.過大圧力	破 損	$\approx 0.$	8,640	$\approx 0.$	
A 602	配管貫通部 配線	漏 洩	0.1×10^{-6}		8.64×10^{-4}	
A 603	G.B.本 体	↓	0.6×10^{-6}		5.18×10^{-3}	
A 604	G.B.ガスケット	漏 洩	3.0×10^{-6}		2.59×10^{-2}	
A 605	負圧制御装置	故 障	2.46×10^{-6}		2.13×10^{-2}	
A 606	負 圧 維 持	不 能	$\approx 0.$	↓	$\approx 0.$	事故時負荷による負圧維持不能

Table 2.7 Failure Rate Data for Dilution He. Supply System Failure. (1/8)

B1: 希釈用He流量調整不能		象		故障率デ-タ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備	考
記号	事 名 称	故障モード						
B 101	オペレーターエラー	弁操作誤り				1×10^{-2}		
B 102	オペレーターエラー	運用ミス				1×10^{-3}		
B 103	流量調節弁	全モード		6×10^{-6}	8,640	5.18×10^{-2}		
B 104	流量調節器	全モード		1.19×10^{-6}		1.03×10^{-2}		
B 105	流量調節弁	全モード		6×10^{-6}		5.18×10^{-2}		
B 106	流量調節器	全モード		1.19×10^{-6}		1.03×10^{-2}		
B 107	配管	破損		1.0×10^{-9}		8.64×10^{-6}	WASH - 1,400	
B 108	圧力調節弁	全モード		6×10^{-6}		5.18×10^{-2}		
B 109	圧力調節器	全モード		1.19×10^{-6}	8,640	1.03×10^{-2}		

Table 2.7 Continued (2/8)

記号	事象		故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備考
	名称	故障モード				
B 201	O ₂ , He 流量信号	信号不良	0.5×10^{-6}	8,640	4.32×10^{-3}	
B 202	ガス濃度信号	信号不良	0.5×10^{-6}		4.32×10^{-3}	
B 203	流量調節器	全モード	1.19×10^{-6}	↓	1.03×10^{-2}	
B 204	流量調節弁	閉失敗	6×10^{-6}	8,640	5.18×10^{-2}	

Table 2.7 Continued (3/8)

記号	事象		故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備考
	名称	故障モード				
B 301	サンプリングライン	詰り, リーク	1×10^{-7}	8,640	8.64×10^{-4}	
B 302	ガス分析計	検出失敗	11.5×10^{-6}		9.94×10^{-2}	Chemical Eng. All works $\times 1/10$
B 303	He 流量計	検出失敗	3.94×10^{-6}		3.40×10^{-2}	
B 304	O ₂ 流量計	検出失敗	3.94×10^{-6}		3.40×10^{-2}	
B 305	ガス組成警報装置	全モード	4.31×10^{-6}	↓	3.72×10^{-2}	
B 306	希釈 He 警報装置	全モード	4.31×10^{-6}	8,640	3.72×10^{-2}	

Table 2.7 Continued (4/8)

B 4 : オペレータによる異常発見失敗							
記号	事 名 称	象		故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備 考
		故障モード					
B 401	オペレーターエラー	指示値誤認				1×10^{-2}	
B 402	オペレーターエラー	記録値誤認				1×10^{-2}	

Table 2.7 Continued (5/8)

記号	事象		故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備考
	名称	故障モード				
B 501	供給止弁	閉失敗			2.05×10^{-6}	
B 502	制御回路	故障	0.1×10^{-6}	8,640	4.32×10^{-4}	
B 503	オペレーターエラー	誤操作			1×10^{-2}	

Table 2.7 Continued (6/8)

B6:触媒反応器破損		Table 2.7 Continued (6/8)						
記号	事 名 称	象		故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備 考	
		故障モード						
B 601	胴 本 体	破 損		3×10^{-6}	720	2.2×10^{-3}		
B 602	欠 番							
B 603	オペレーターエラー	弁 誤 閉				1×10^{-2}		
B 604	オペレーターエラー	弁 誤 閉				1×10^{-2}		
B 605	2次ヒータ停止回路	故 障		0.1×10^{-6}	720	7.2×10^{-5}		
B 606	オペレーターエラー	誤 操 作				1×10^{-2}		
B 607	1次ヒータ制御装置	故 障		1.19×10^{-6}	720	8.57×10^{-4}		
B 608	2次ヒータ制御装置	故 障		1.19×10^{-6}	720	8.57×10^{-4}		
B 609	ガス温度警報	故 障		0.05×10^{-6}	8,640	5.23×10^{-2}		

Table 2.7 Continued (7/8)

記号	事象		故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備考
	名称	故障モード				
B 701	反応器入口ガス濃度 信号	入力失敗	3.0×10^{-6}	720	2.16×10^{-3}	
B 702	反応器1次, 2次ヒータ 停止信号	入力失敗	3.0×10^{-6}	720	2.16×10^{-3}	
B 703	反応器入口止弁	閉失敗			2.05×10^{-6}	
B 704	反応器入口止弁制御 回路	故障	0.1×10^{-6}	720	7.2×10^{-5}	
B 705	オペレーターエラー	誤操作			1×10^{-2}	
B 706	反応器入口ガス流量 低信号	入力失敗	3.94×10^{-6}	720	2.84×10^{-3}	

Table 2.7 Continued. (8/8)

記号	事 名 称	象		故障率データ λ (1/hr)	要求 運 転 時間 (hr)	故 障 確 率 Median Value	備 考
		故障モード					
B 801	配管等の貫通部	リ	ク	0.1×10^{-6}	8,640	8.64×10^{-4}	
B 802	グローブガasket	全	モ	3×10^{-6}		2.59×10^{-2}	
B 803	グローブボックス本体	破	損	0.6×10^{-6}		5.18×10^{-3}	レシーバーの故障率
B 804	事故時過大圧力による破損	破	損		↓	~ 0	
B 805	負圧制御装置	故	障	2.46×10^{-6}	8,640	2.13×10^{-2}	
B 806	負圧維持	不	能			~ 0	

Table 2.8 Failure Rate Data for Cryogenic Distillation Column Failure. (1/8)

C 1 : 深冷蒸留塔破損 (1/3)		Table 2.8 Failure Rate Data for Cryogenic Distillation Column Failure. (1/8)				
記号	事 象 名 称	故障モード	故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備 考
C 102	燃料ガス遮断弁	破 損	0.01×10^{-6}		8.64×10^{-5}	
C 103	リボイラ出口調節弁	破 損	0.01×10^{-6}		8.64×10^{-5}	
C 104	N ₂ 配 管	破 断	1.0×10^{-9}		8.64×10^{-6}	
C 105	He 配 管	破 断	1.0×10^{-9}	8,640	8.64×10^{-6}	
C 106	オペレーターエラー	故障に気付かず			1×10^{-2}	
C 107	冷媒移送ポンプ	全 モ ー ド	10×10^{-6}	8,640	8.64×10^{-2}	
C 108	冷 凍 機	全 モ ー ド	50×10^{-6}	8,640	4.32×10^{-1}	
C 109	オペレーターエラー	故障に気付かず			1×10^{-2}	
C 110	温 度 計	故 障	5×10^{-6}	8,640	4.32×10^{-2}	
C 111	温 度 制 御	不 能	1.19×10^{-6}	8,640	1.03×10^{-2}	
C 112	オペレーターエラー	故障に気付かず			1×10^{-2}	
C 113	圧 力 計	故 障	9×10^{-6}	8,640	7.78×10^{-2}	
C 114	圧 力 制 御	不 能	1.19×10^{-6}	↓	1.03×10^{-2}	
C 115	真空ポンプ	全 モ ー ド	10×10^{-6}	8,640	8.64×10^{-2}	

Table 2.8 Continued (2/8)

C 1 : Continued. (2/3)		Table 2.8 Continued (2/8)				
記号	事 象 名称	故障モード	故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備 考
C 117	液位計	故障	5×10^{-6}	8,640	4.32×10^{-2}	
C 118	液面制御	不能	1.19×10^{-6}	↓ 8,640	1.03×10^{-2}	
C 119	吸着塔容器	破損	0.01×10^{-6}	8,640	8.64×10^{-5}	
C 120	オペレーターエラー	故障に気付かず			1×10^{-2}	
C 121	温度計	故障	5×10^{-6}	8,640	4.32×10^{-2}	
C 122	温度制御	不能	1.19×10^{-6}	8,640	1.03×10^{-2}	
C 123	オペレーターエラー	故障に気付かず			1×10^{-2}	
C 124	温度計	故障	5×10^{-6}	8,640	4.32×10^{-2}	
C 125	温度制御	不能	1.19×10^{-6}	8,640	1.03×10^{-2}	
C 126	オペレーターエラー	故障に気付かず			1×10^{-2}	
C 127	温度計	故障	5×10^{-6}	8,640	4.32×10^{-2}	
C 128	温度制御	不能	1.19×10^{-6}	8,640	1.03×10^{-2}	
C 129	オペレーターエラー	故障に気付かず			1×10^{-2}	
C 130	圧力計	故障	9×10^{-6}	8,640	7.78×10^{-2}	

C 1 : Continued (3/3)		Table 2.8 Continued (3/8)					
記号	事 名 称	象		故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備 考
		故障モード	不 能				
C 131	圧力制御	不	能	1.19×10^{-6}	8,640	1.03×10^{-2}	
C 132	オペレーターエラー	故障に気付かず				1×10^{-2}	
C 133	温度計	故	障	5×10^{-6}	8,640	4.32×10^{-2}	
C 134	温度制御	不	能	1.19×10^{-6}	8,640	1.03×10^{-2}	

Table 2.8 Continued (4/8)

記号	事象		故障率 λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備考
	名称	故障モード				
C 201	オペレーターエラー	故障発見失敗			1×10^{-2}	
C 202	ヒータ停止スイッチ	全モード	0.1×10^{-6}	8,640	8.64×10^{-4}	
C 203	ヒータ用回路(リレー)	全モード	0.1×10^{-6}	↓	8.64×10^{-4}	
C 204	リボイラ液位計	全モード	5×10^{-6}	8,640	4.32×10^{-2}	
C 205	供給ガス遮断弁	閉失敗			2.05×10^{-6}	

Table 2.8 Continued (5/8)

C 3 : 吸着塔ラインへの切換え失敗		象		故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備	考
記号	事 名 称	故障モード						
C 301	オペレーターエラー	故障に気付かず				1×10^{-2}		
C 302	電磁弁	開保持失敗			8,640	2.05×10^{-6}		
C 303	移送ポンプ	連続運転失敗		10×10^{-6}		8.64×10^{-2}		
C 304	流量計	故障		6×10^{-6}		5.18×10^{-2}		
C 305	流量制御	不能		1.19×10^{-6}	8,640	1.03×10^{-2}		
C 306	オペレーターエラー	故障に気付かず				1×10^{-2}		
C 307	圧力計	故障		9×10^{-6}	8,640	7.78×10^{-2}		
C 308	圧力制御	不能		1.19×10^{-6}		1.03×10^{-2}		
C 309	真空ポンプ	故障		10×10^{-6}	8,640	8.64×10^{-2}		

Table 2.8 Continued (6/8)

事 象		C 4 : 蒸留塔底部液の貯蔵タンクへの移送失敗					
		記 号	事 名	故障モード	故障率 λ (1/hr)	要求運 転時 間 (hr)	故障確 率 Median Value
C 401	リボイラ液ブロー弁	閉	失 敗		8,640	2.05×10^{-6}	
C 402	オペレーターエラー	ス イ ッ チ 操 作 エ ラ ー				1×10^{-2}	
C 403	リボイラブローライン の圧力調整弁	開	失 敗	6×10^{-6}	8,640	5.18×10^{-2}	
C 404	リボイラブローライン のパイプヒーター	故	障	1.1×10^{-6}	8,640	9.5×10^{-3}	

C 5: 保 冷 槽 破 損		Table 2.8 Continued (7/8)					
記 号	事 名 称	象		故障率データ λ (1/hr)	要 求 運 転 時間 (hr)	故 障 確 率 Median Value	備 考
		故障モード	故障に気付かず				
C 501	給給ガス遮断弁	閉	失 敗			2.05×10^{-6}	
C 502	圧力計 (警報用)	全	モ ー ド	9×10^{-6}	8,640	7.78×10^{-2}	
C 503	オペレーターエラー	故障に気付かず				1×10^{-2}	
C 504	圧力計 (指示用)	全	モ ー ド	9×10^{-6}	8,640	7.78×10^{-2}	
C 505	真空計 (インターロック用)	全	モ ー ド	9×10^{-6}		7.78×10^{-2}	
C 506	リボイラレベルスイッチ	全	モ ー ド	5×10^{-6}		4.32×10^{-2}	
C 507	LN ₂ 冷却コイル	破	断	1×10^{-9}		8.64×10^{-6}	
C 508	N ₂ 止 弁	閉	失 敗			2.05×10^{-6}	
C 509	真空計 (警 報)	全	モ ー ド	9×10^{-6}	8,640	7.78×10^{-2}	
C 510	オペレーターエラー	故障に気付かず				1×10^{-2}	
C 511	真空計 (指示用)	全	モ ー ド	9×10^{-6}	8,640	7.78×10^{-2}	
C 512	真空排気装置	故	障	30×10^{-6}		2.59×10^{-1}	
C 513	圧力逃し装置	開	失 敗	10×10^{-6}	8,640	8.64×10^{-2}	

Table 2.8 Continued (8/8)

C 6 : グローブボックス故障

記号	事象		故障モード	故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備考
	名称	象					
C 601	配管等の貫通部 リーク	リ	ク	0.1×10^{-6}	8,640	8.64×10^{-4}	
C 602	グローブガasket	破	損	3×10^{-6}		2.59×10^{-2}	
C 603	グローブボックス本体	破	損	0.6×10^{-6}		5.18×10^{-3}	
C 604	事故時 過大圧力による破損	破	損	≈ 1.0		≈ 1.0	
C 605	負圧制御装置	故	障	2.46×10^{-6}	8,640	2.13×10^{-2}	
C 606	(事故時) 負圧維持			~ 1.0		~ 1.0	

D 2 : ガス温度高, 警報装置作動失敗 Table 2.9 Failure Rate Data for ZrNi Bed Cooling System Failure. (1/7)

記号	事象		故障率データ λ (1/hr)	要求運転時間 (hr)	故障確率 Median Value	備考
	名称	故障モード				
D 201	熱電対	故障	1.74×10^{-6}	720	1.25×10^{-3}	
D 202	変換器	↓	3.0×10^{-6}	↓	2.16×10^{-3}	
D 203	アナシユータモジュール	故障	1.31×10^{-6}	720	9.43×10^{-4}	

Table 2.9 Continued (2/7)

事象		故障モード	故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備考
D 301	オペレーターエラー	指示値誤認			1.0×10^{-2}	
D 302	オペレーターエラー	指示値誤認				
D 303	オペレーターエラー	指示値誤認			1.0×10^{-2}	

Table 2.9 Continued (3/7)

D4: ガス入口弁閉失敗		象		故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備	考
		事	名 称					
D 401	入口弁	閉	失敗			1.0×10^{-4}		
D 402	オペレーターエラー	誤	操作			1.0×10^{-2}		

水素貯蔵合金ベレット
D5: 1次側容器破損
Table 2.9 Continued (4/7)

記号	事象		故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備考
	名称	故障モード				
D 501	材料	不良			1.0×10^{-6}	
D 502	工作	溶接不良			1.0×10^{-6}	
D 503	材料	経年的劣化			1.0×10^{-6}	
D 504	流量調節	制御失敗	10.0×10^{-6}	720	7.2×10^{-3}	
D 505	オペレーターエラー	誤操作			3.0×10^{-3}	
D 506	設計	不良			1.0×10^{-6}	
D 507	工作	溶接線クラック			5.0×10^{-2}	

Table 2.9 Continued (5/7)

D6: 2次側容器破損								
記号	事 名 称	象		故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備	考
		故障モード						
D 601	材 料	不	良			1.0×10^{-6}		
D 602	工 作	溶接部クラック				5.0×10^{-2}		
D 603	材 料	経年的劣化				1.0×10^{-6}		
D 604	ボ ル ト	締付力低下		1.0×10^{-6}	720	7.2×10^{-4}		
D 605	パ ッ キ ン	選定不良		3.0×10^{-6}	720	2.16×10^{-3}		
D 606	設 計	不	良			1.0×10^{-6}		
D 607	材 料	不	良			1.0×10^{-6}		
D 608	工 作	溶接不良				1.0×10^{-6}		
D 609	フ ラ ン ジ	熱膨張量大				2.0×10^{-1}		
D 610	材 料	経年的劣化				1.0×10^{-6}		
D 611	材 料	経年的劣化				1.0×10^{-6}		
D 612	材 料	不	良			1.0×10^{-6}		
D 613	工 作	溶接不良				1.0×10^{-6}		
D 614	設 計	不	良			1.0×10^{-6}		

Table 2.9 Continued (6/7)

記号	事象		故障率データ λ (1/hr)	要求運転 時間 (hr)	故障確率 Median Value	備考
	事名	故障モード				
D 701	工 作	溶接不良			1.0×10^{-6}	
D 702	材 料	不 良			1.0×10^{-6}	
D 703	工 作	溶接不良			1.0×10^{-6}	
D 704	材 料	不 良			1.0×10^{-6}	
D 705	工 作	溶接不良			1.0×10^{-6}	
D 706	工 作	溶接部クラック			5.0×10^{-2}	

Table 2.9 Continued (7/7)

事象		故障モード	故障率データー λ (1/hr)	要求運転時間 (hr)	故障確率 Median Value	備考
D 801	G.B.内過大圧力	破損	≈ 0	8,640	≈ 0	
D 802	配管貫通部配線	漏洩	0.1×10^{-6}		8.64×10^{-4}	
D 803	G.B.本体	↓	0.6×10^{-6}		5.18×10^{-3}	
D 804	G.B.ガスケット	漏洩	3.0×10^{-6}		2.59×10^{-2}	
D 805	負圧制御装置	故障	2.46×10^{-6}		2.13×10^{-2}	
D 806	負圧維持	不能	≈ 0		≈ 0	事故時負荷による負圧維持不能

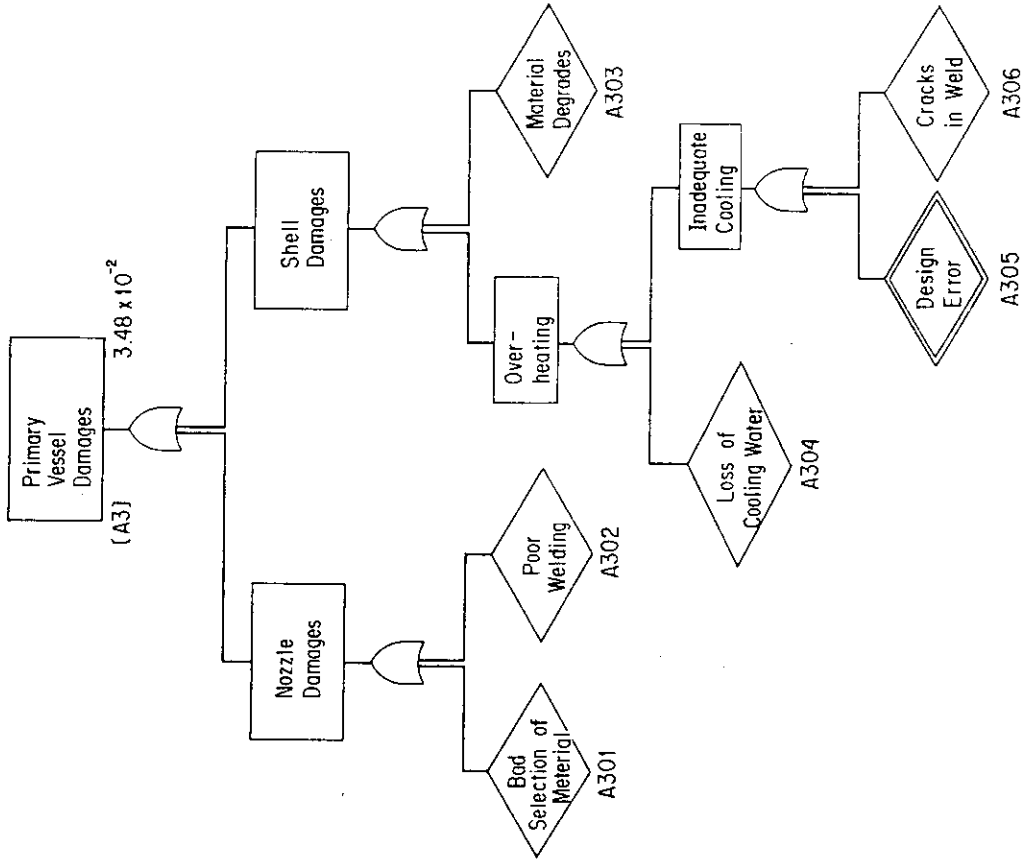


Fig. 2.10 (2/5) Continued.

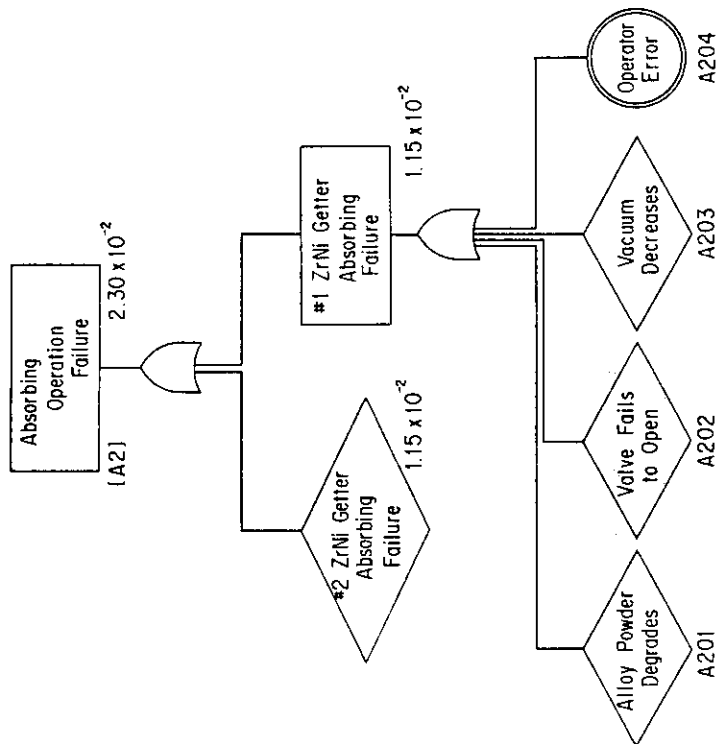


Fig. 2.10 (1/5) Fault Tree for Surge Tank (1) Large Leak

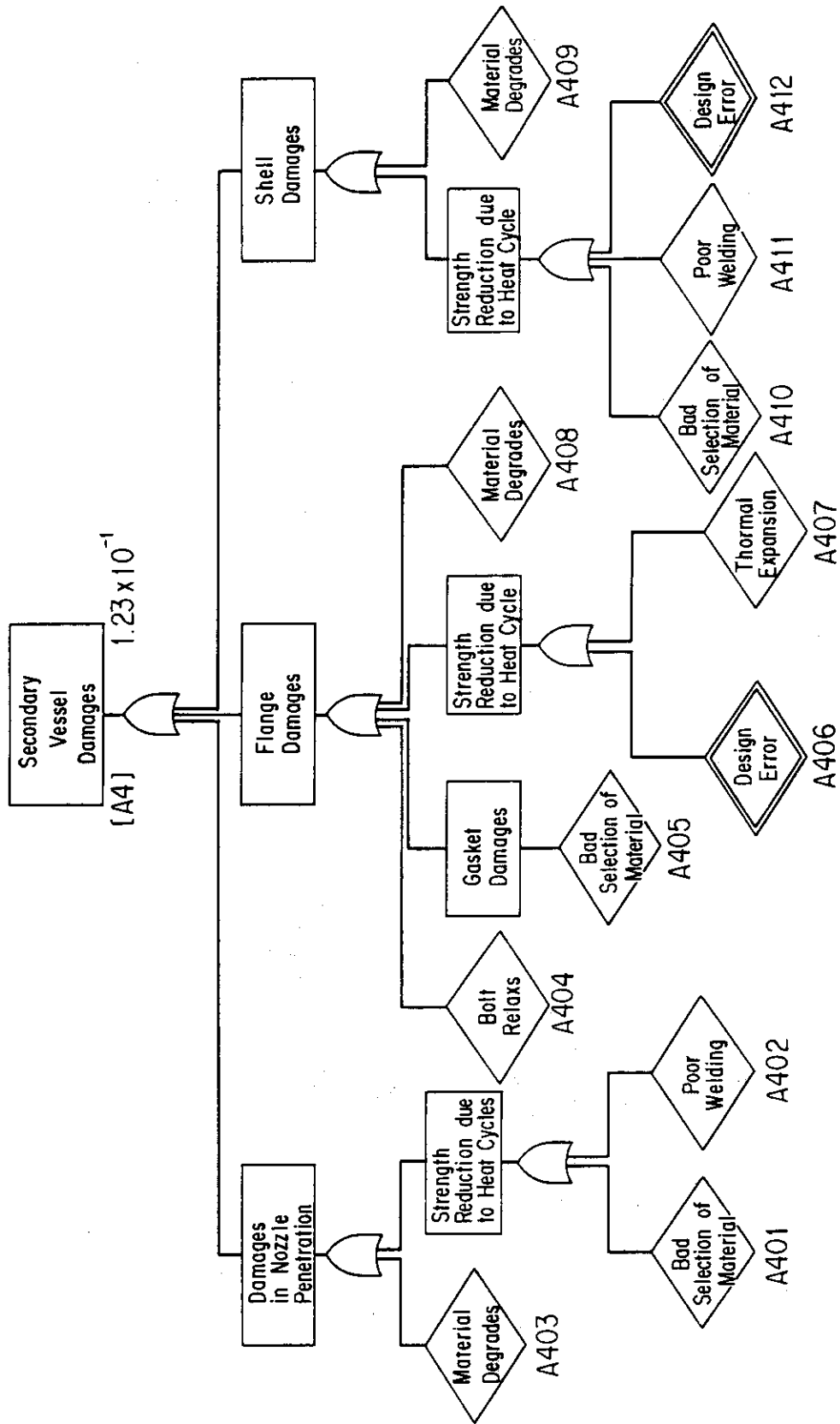


Fig. 2.10 (3/5) Continued.

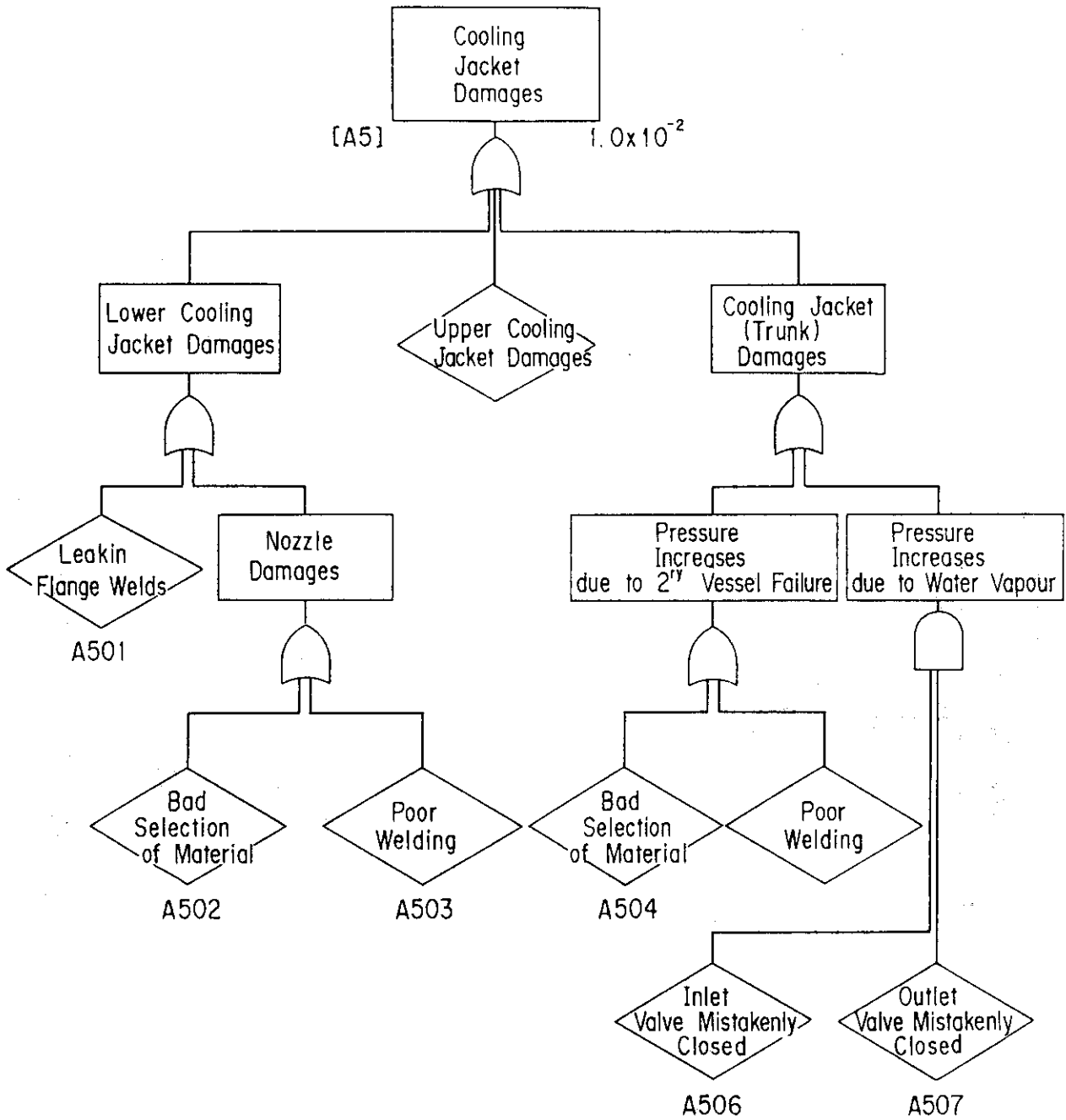


Fig. 2.10 (4/5) Continued.

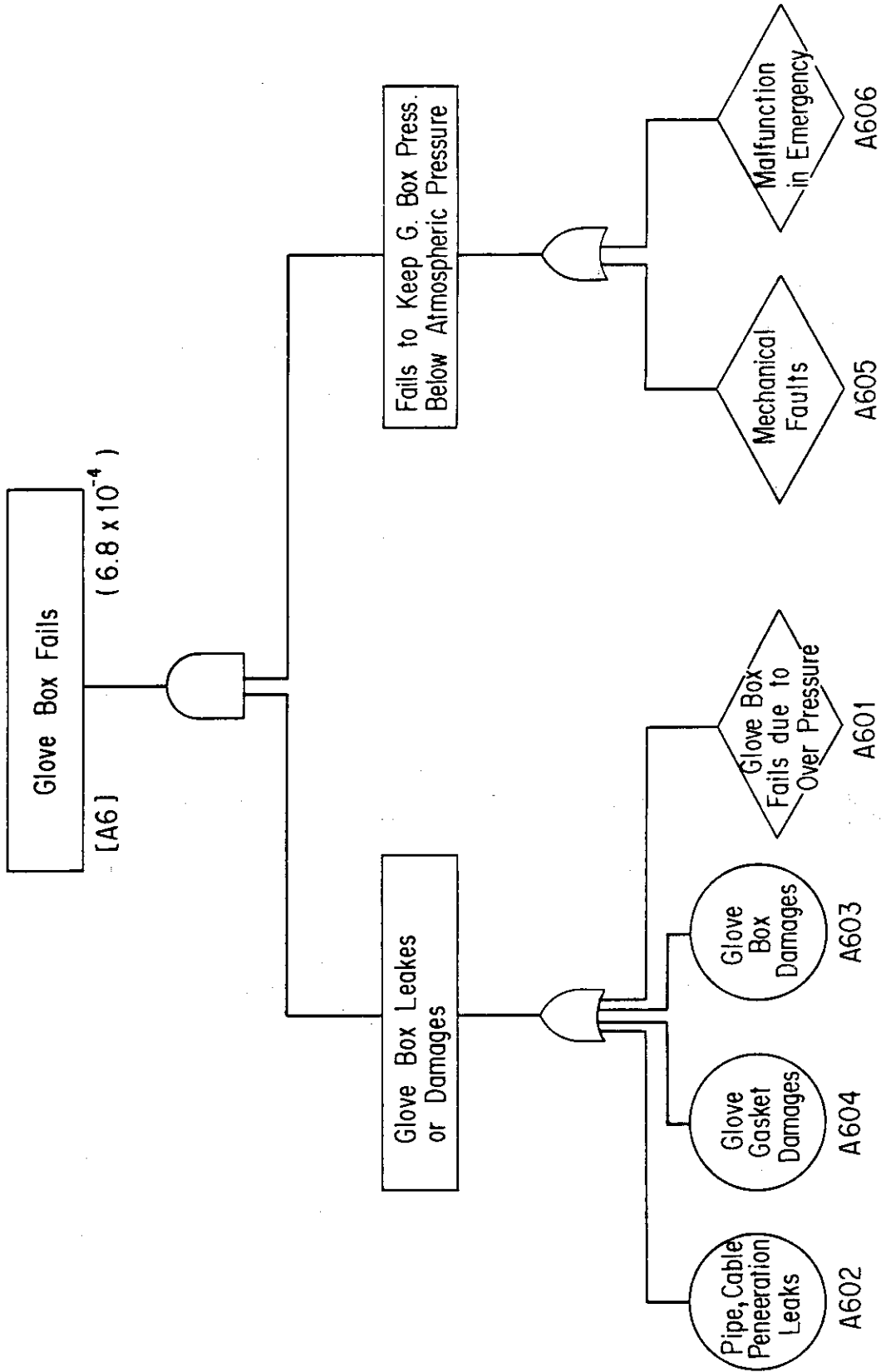


Fig. 2.10 (5/5) Continued

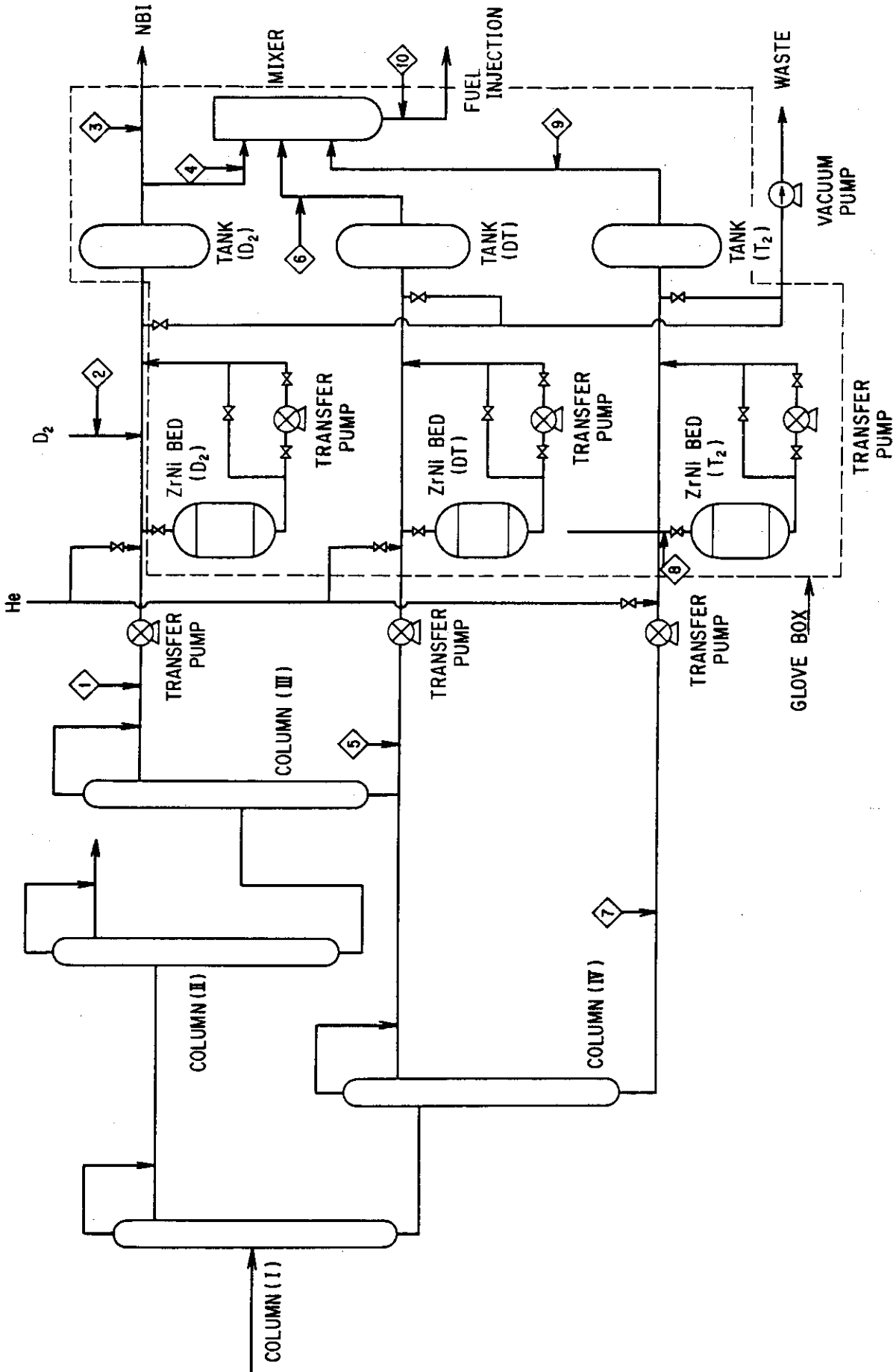


Fig. 2.11 PFD OF FUEL GAS STORAGE SYSTEM

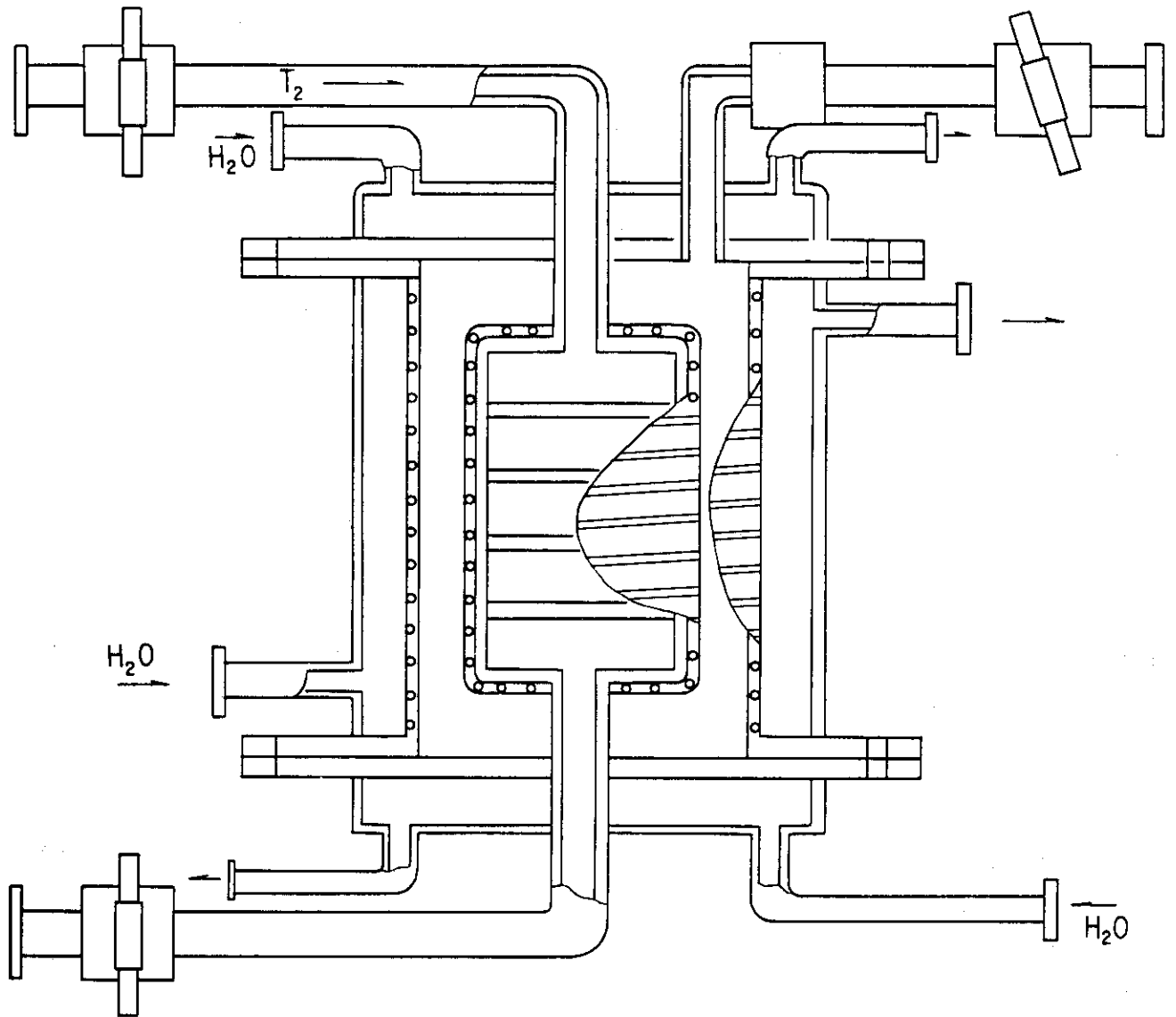


Fig. 2.12 ZrNi Bed.

R.Y : Reactor year

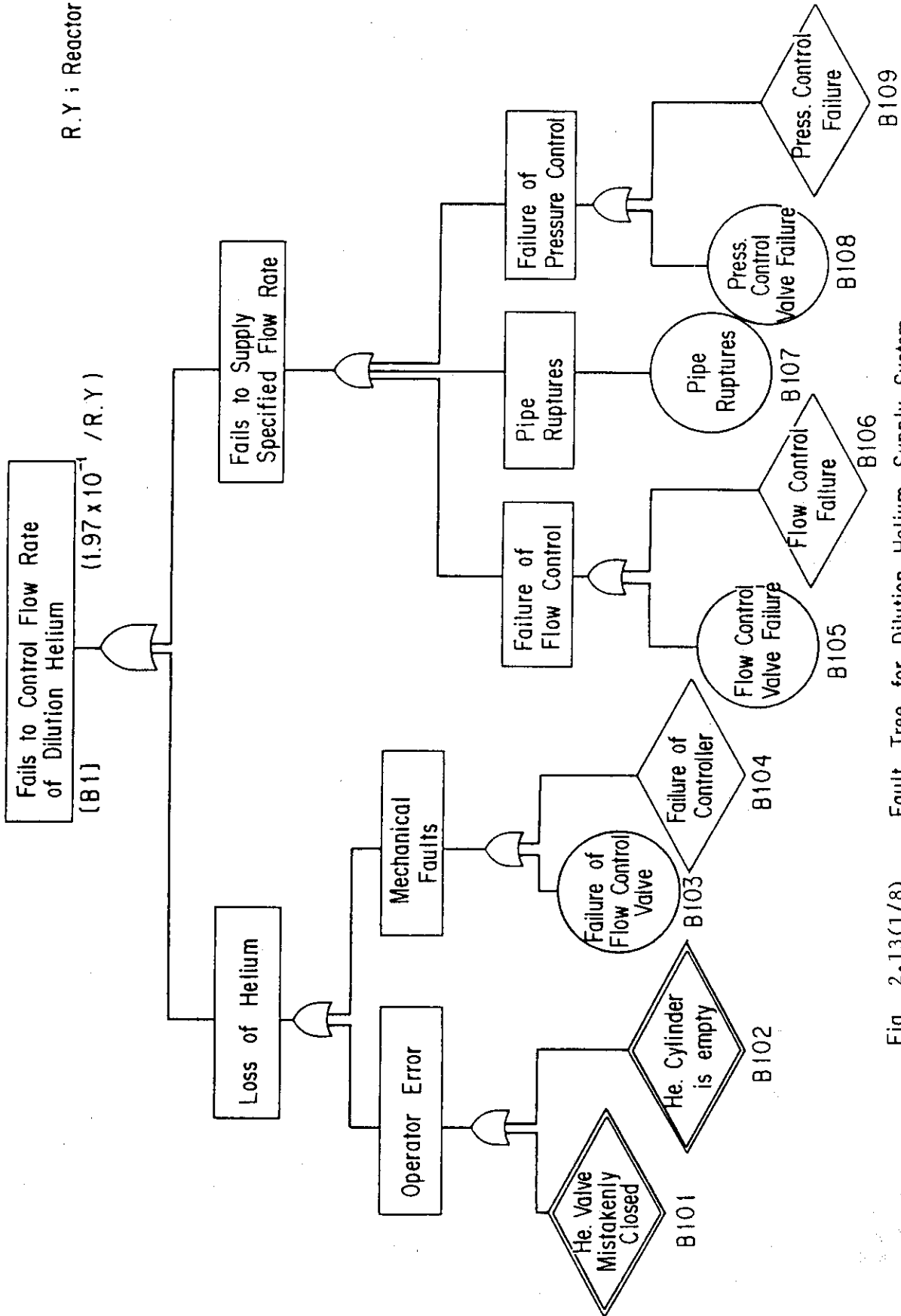


Fig. 2.13(1/8) Fault Tree for Dilution Helium Supply System.

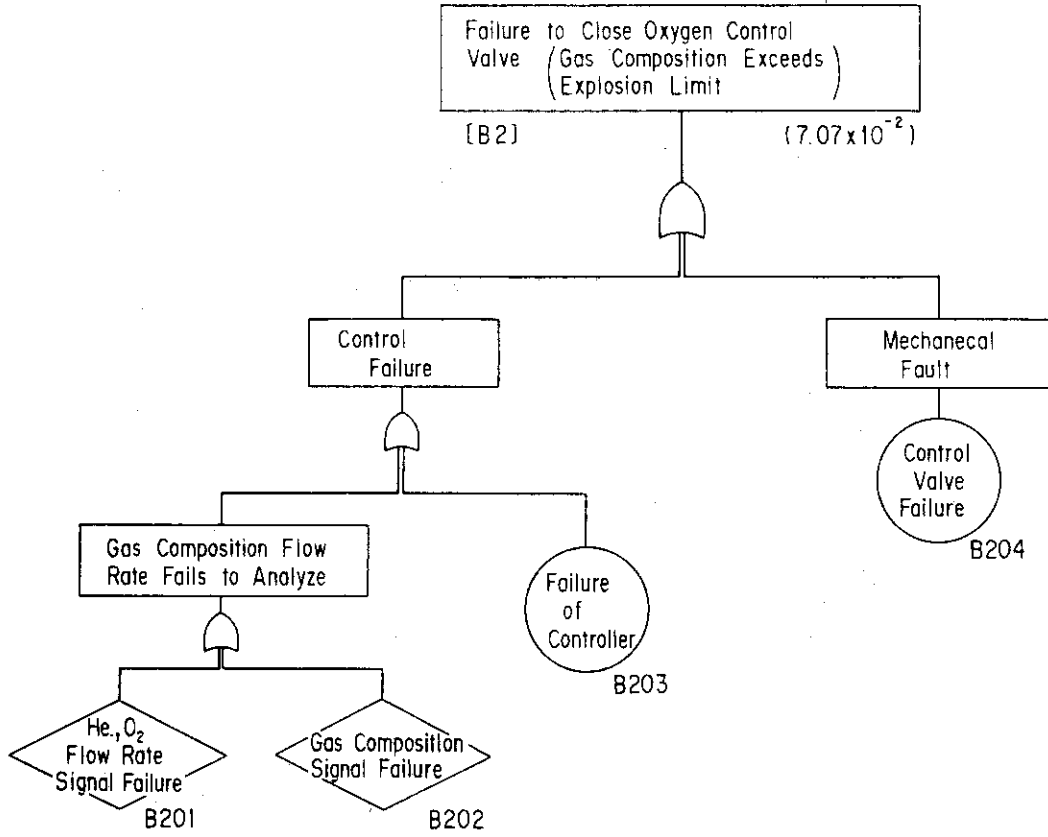


Fig. 2.13(2/8) Continued

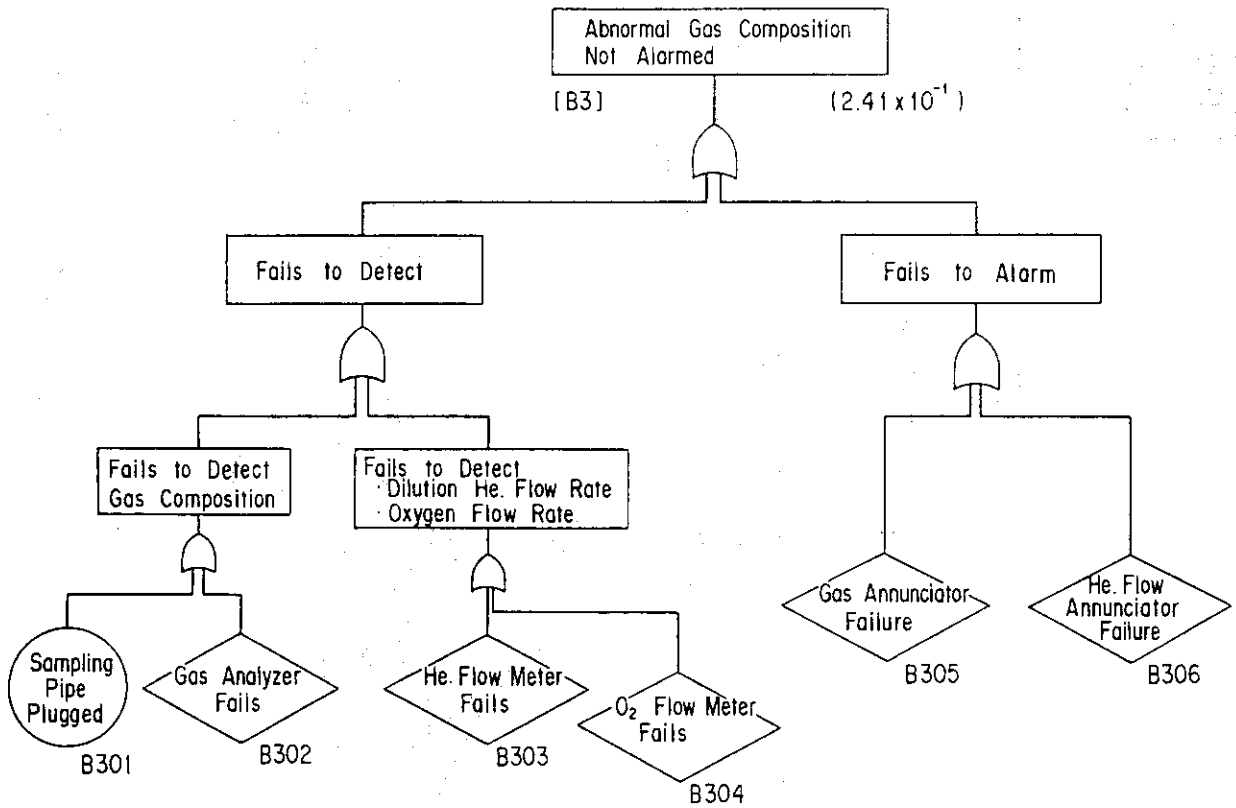


Fig. 2.13(3/8) Continued.

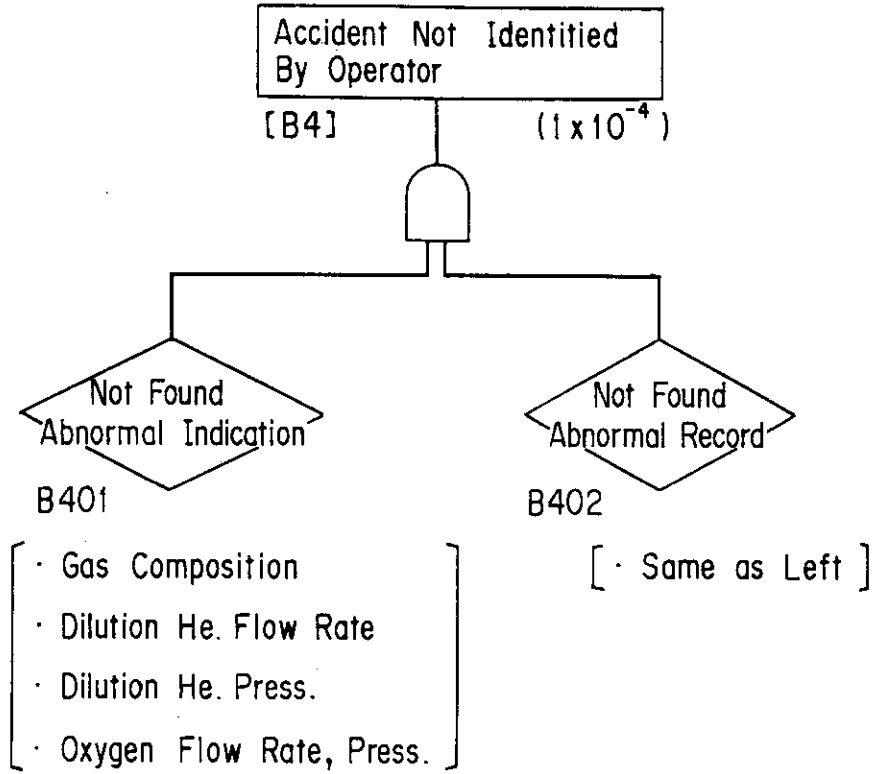


Fig. 2.13(4/8)

Continued.

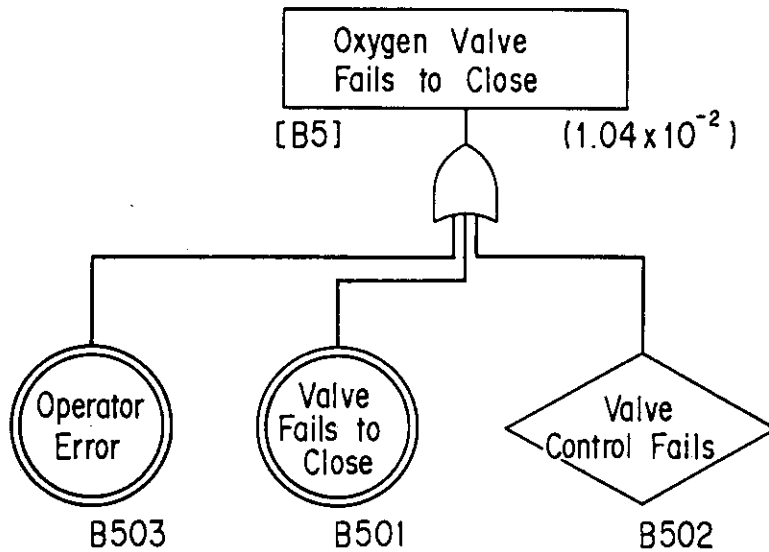


Fig. 2.13(5/8)

Continued.

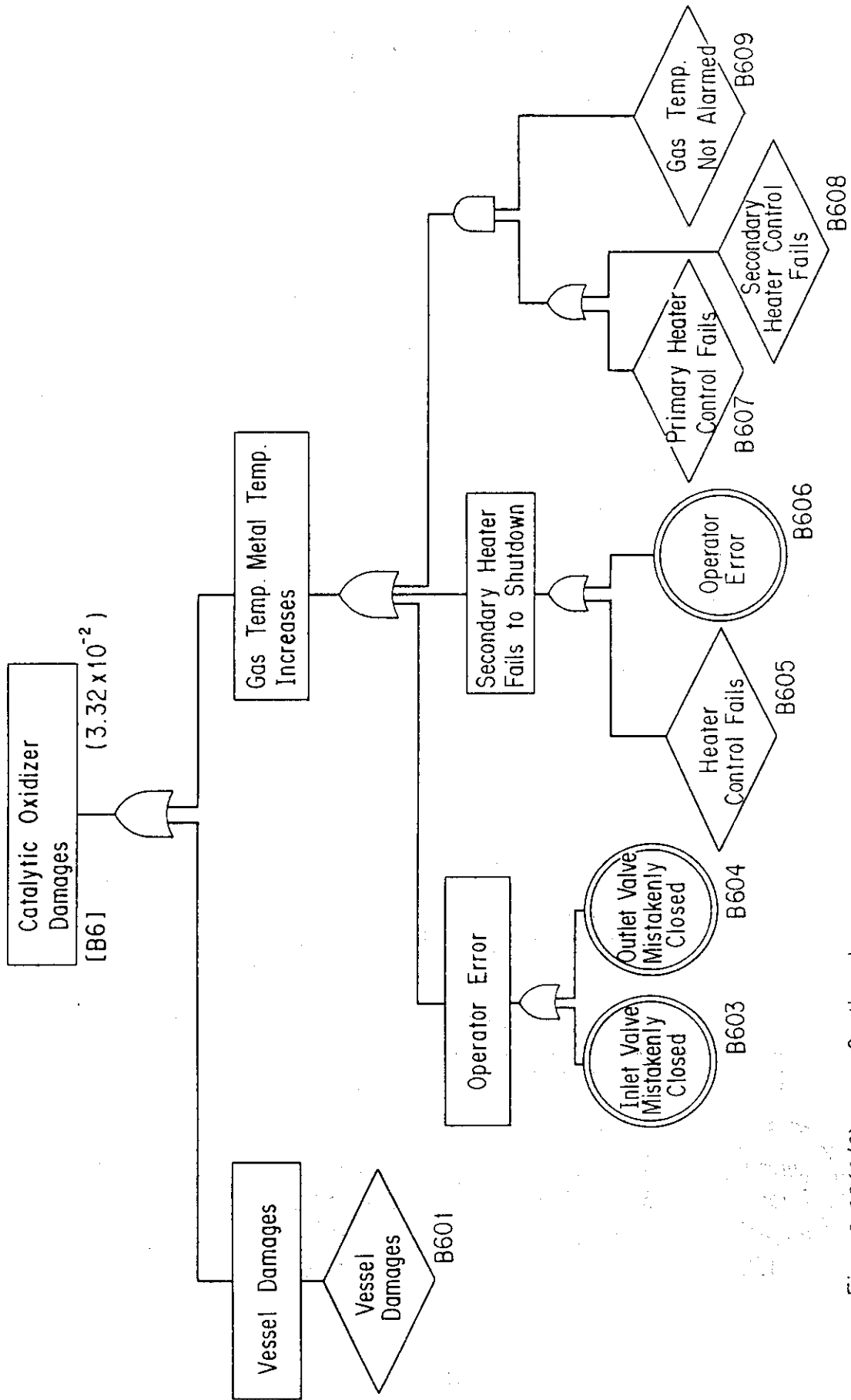


Fig. 2.13(6/8) Continued.

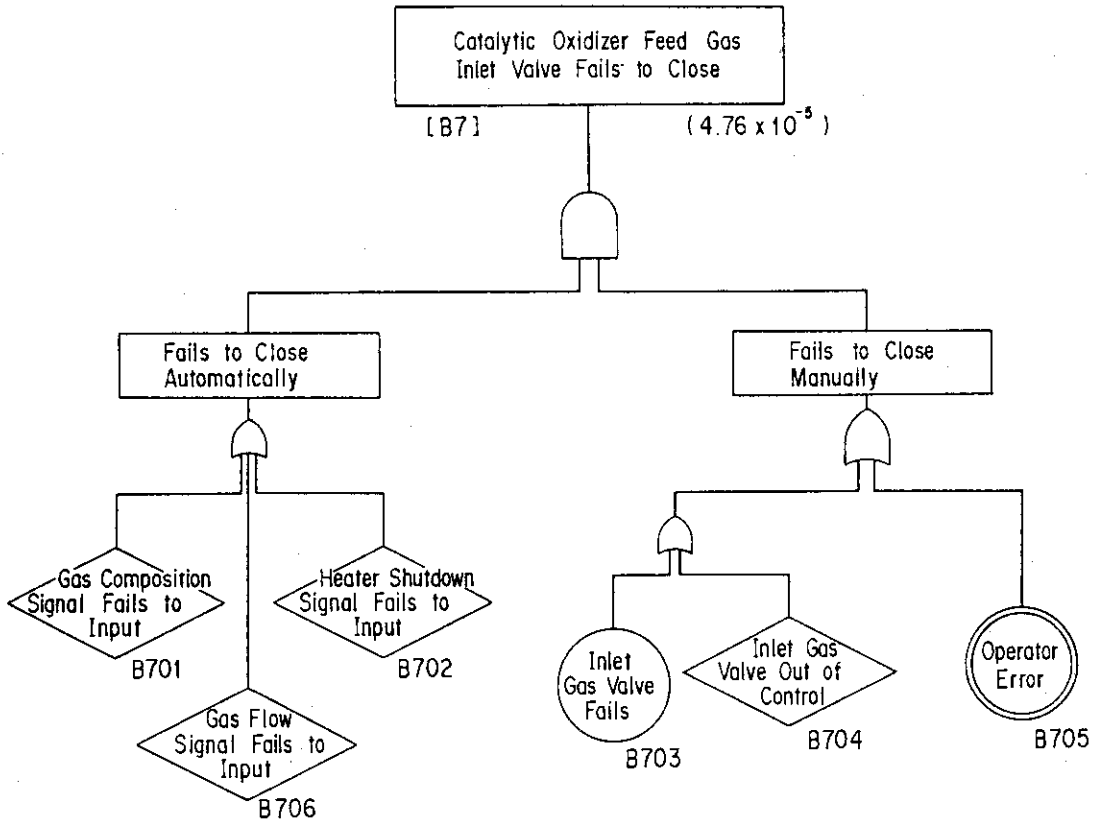


Fig. 2.13(7/8) Continued.

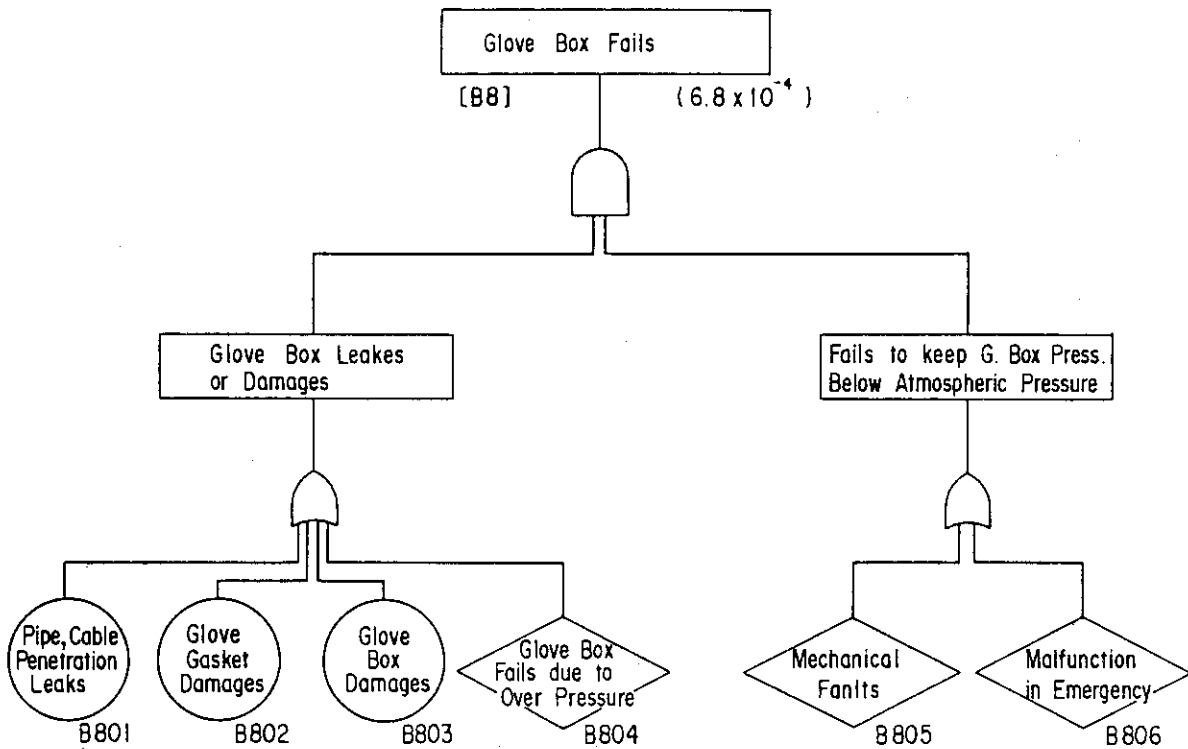


Fig. 2.13(8/8) Continued

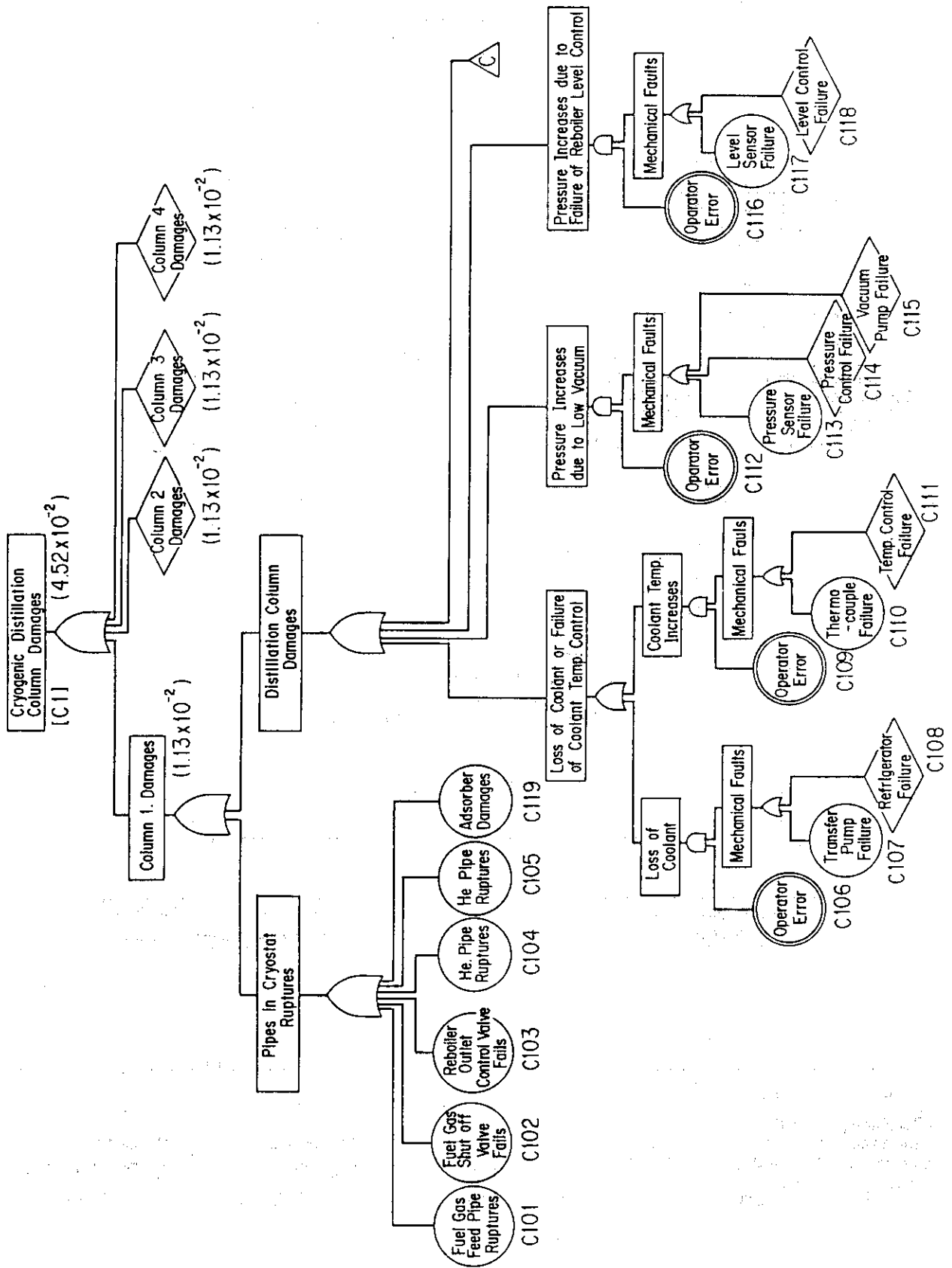


Fig. 2.14(1/6a) Fault Tree for Cryogenic Distillation Column.

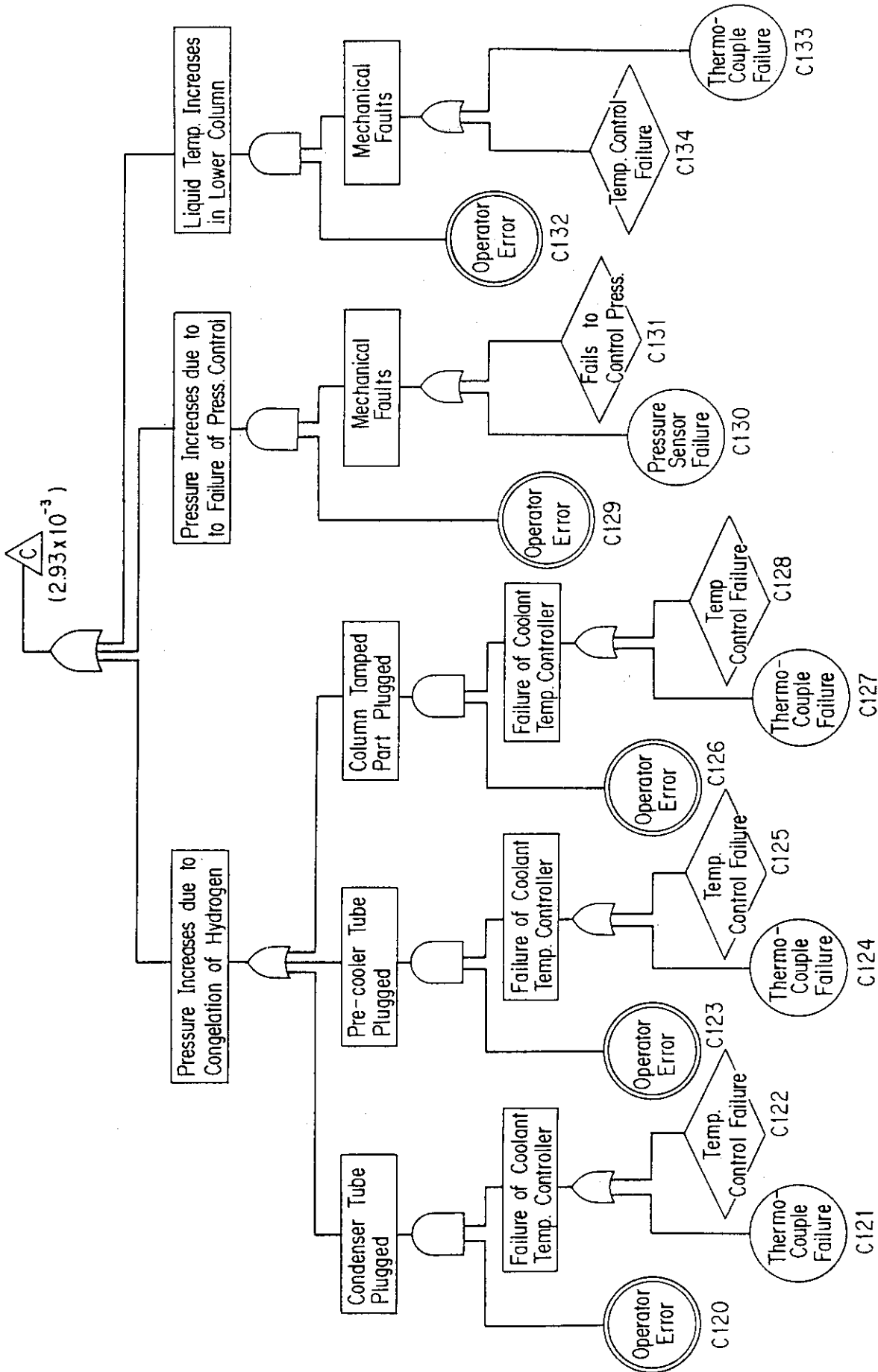


Fig. 2.14(1/6b) Continued.

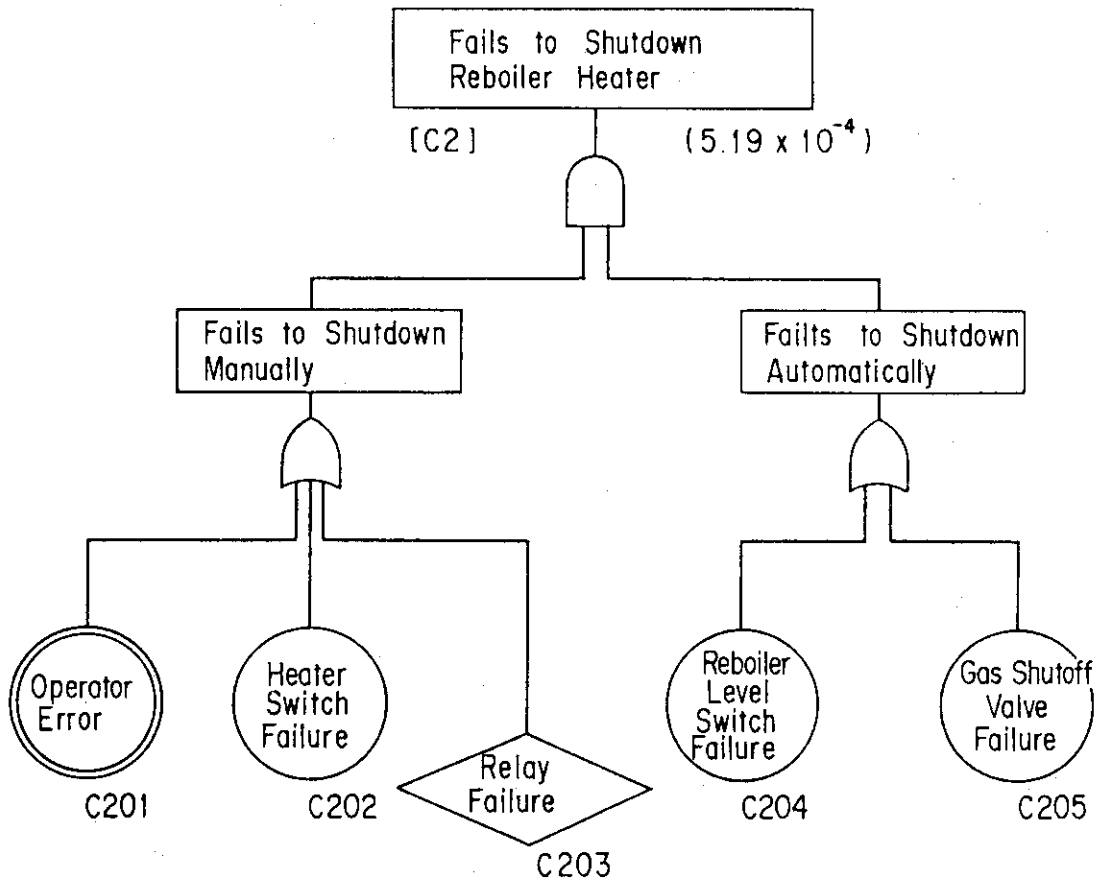


Fig. 2.14(2/6)

Continued.

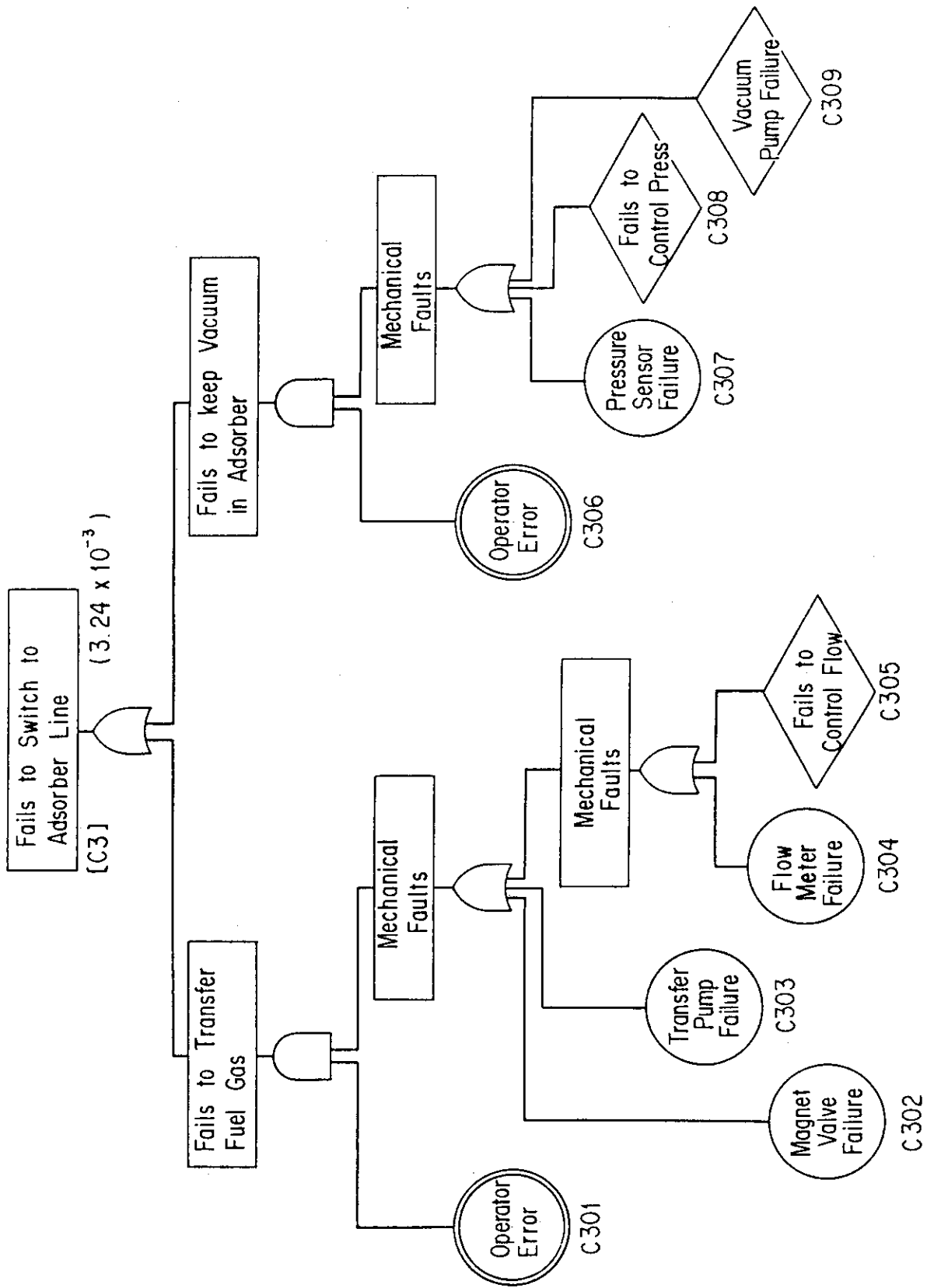


Fig. 2.14(3/6) Continued.

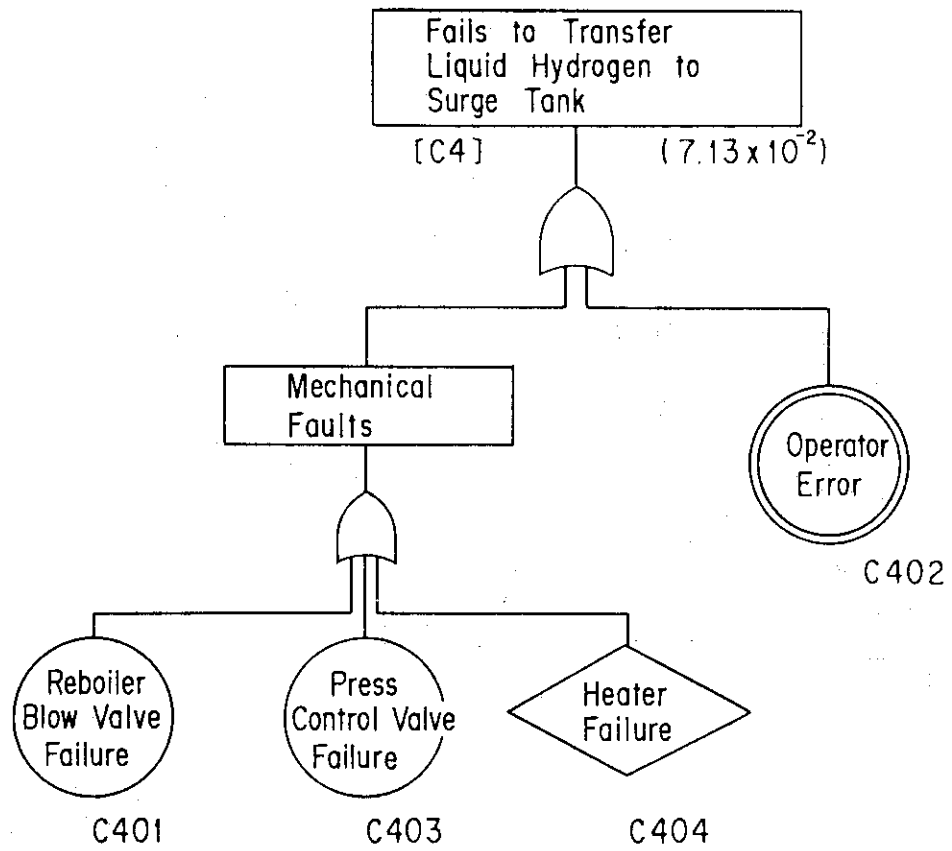


Fig. 2.14(4/6) Continued.

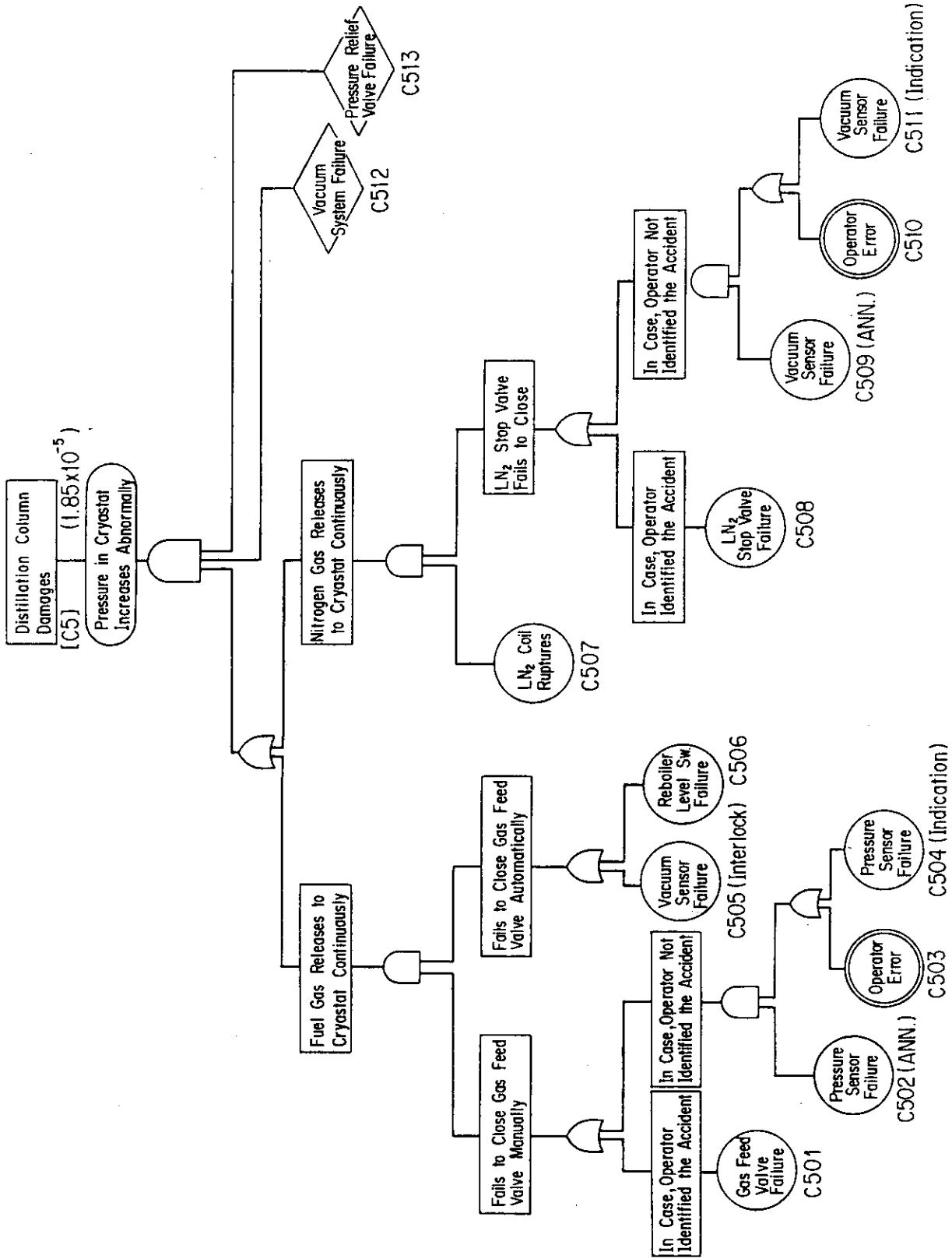


Fig. 2.14(5/6) Continued.

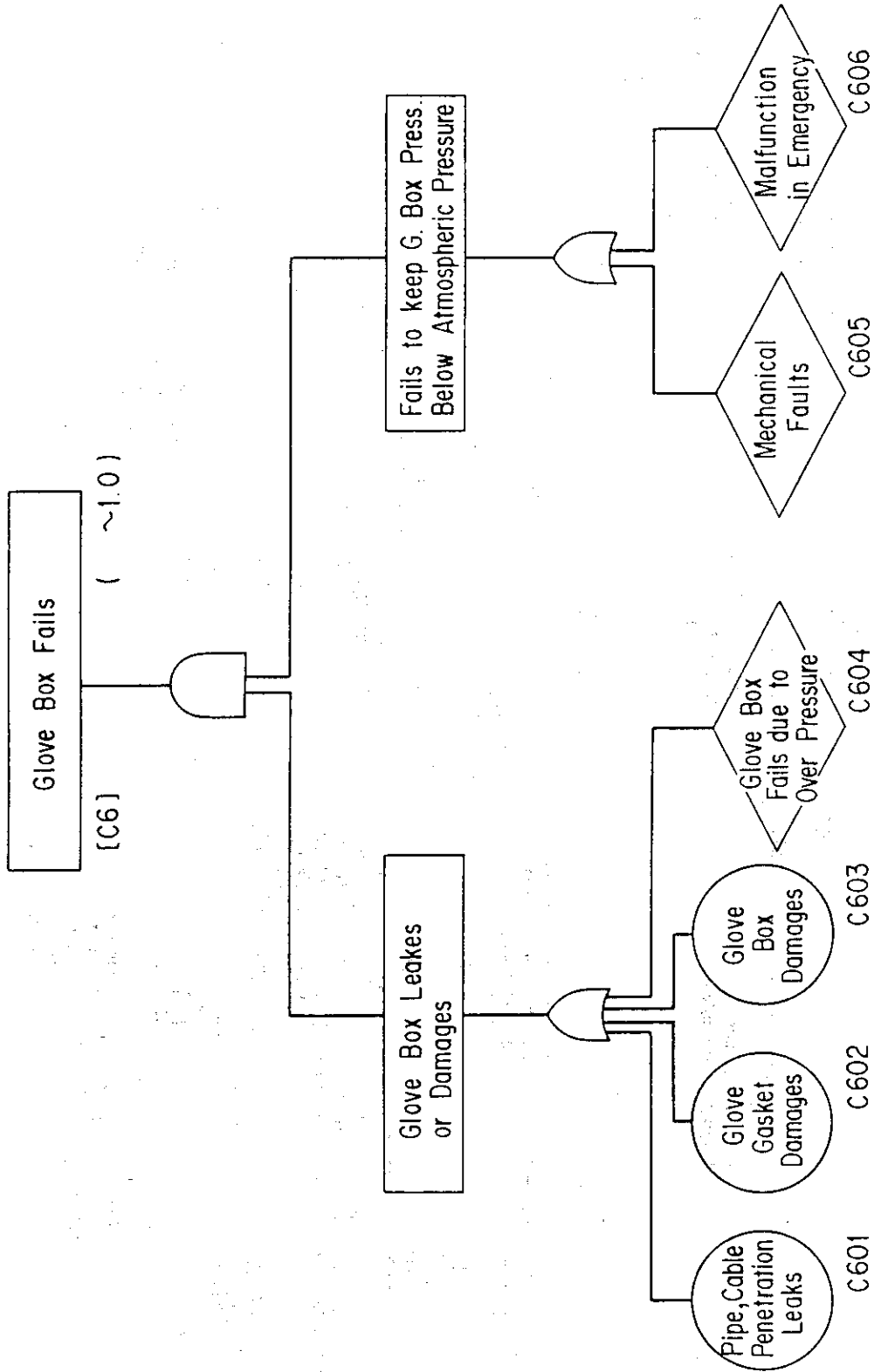


Fig. 2.14(6/6) Continued.

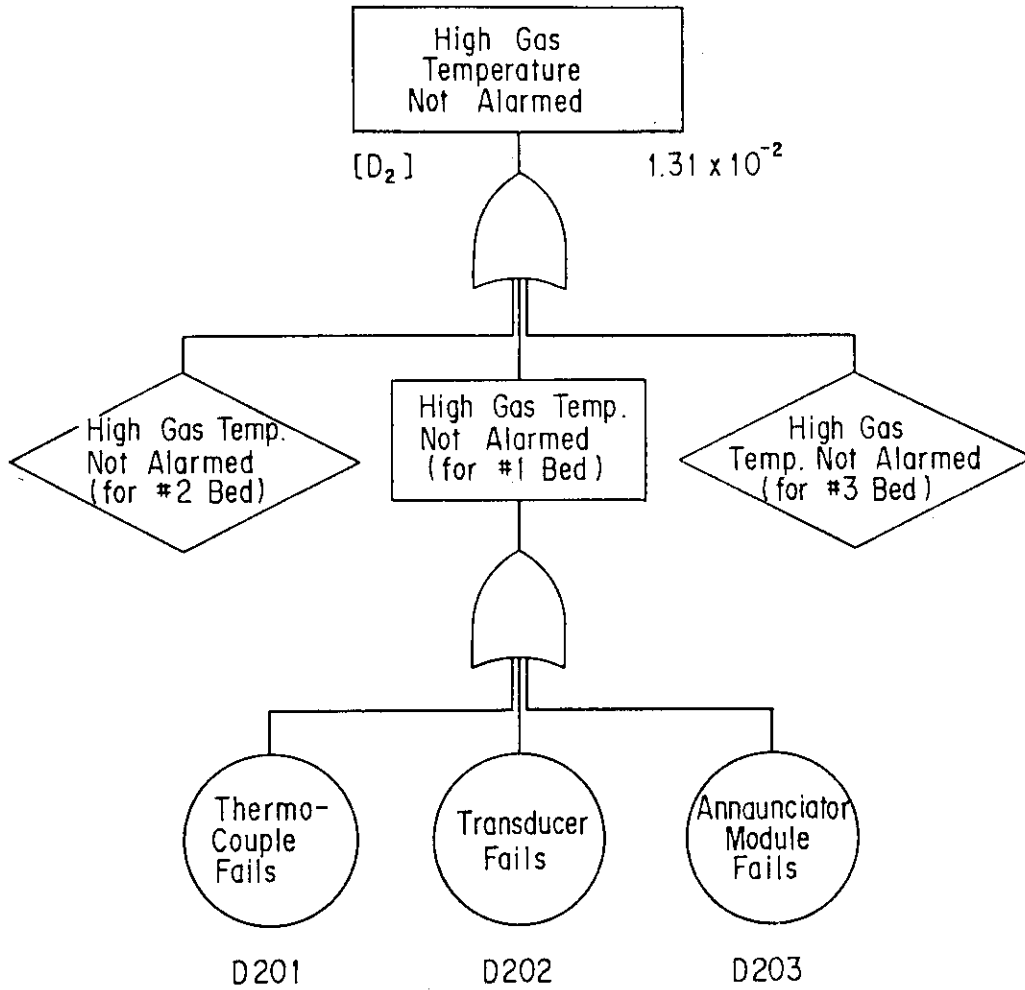


Fig. 2.15(1/7) Fault Tree for ZrNi Bed Cooling System.

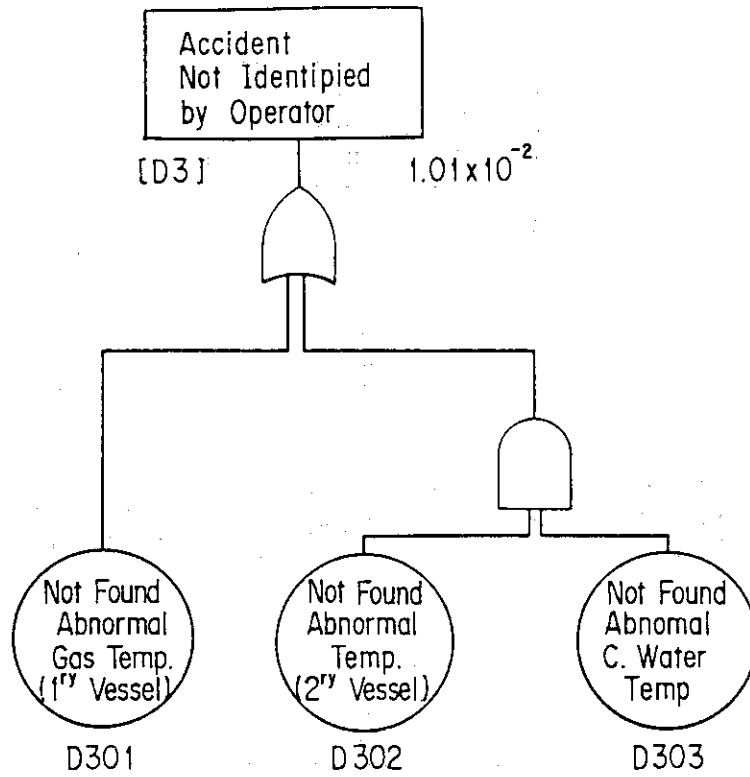


Fig. 2.15(2/7) Continued.

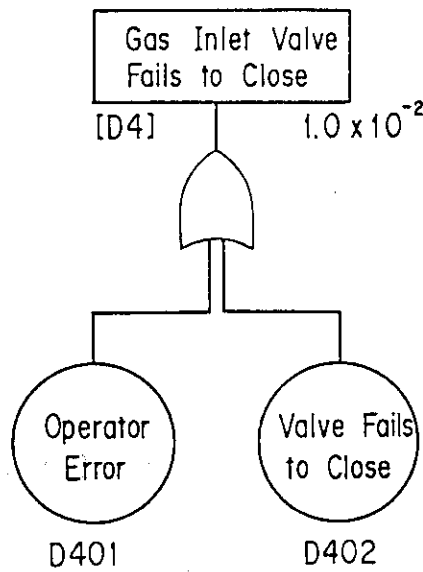


Fig. 2.15(3/7) Continued.

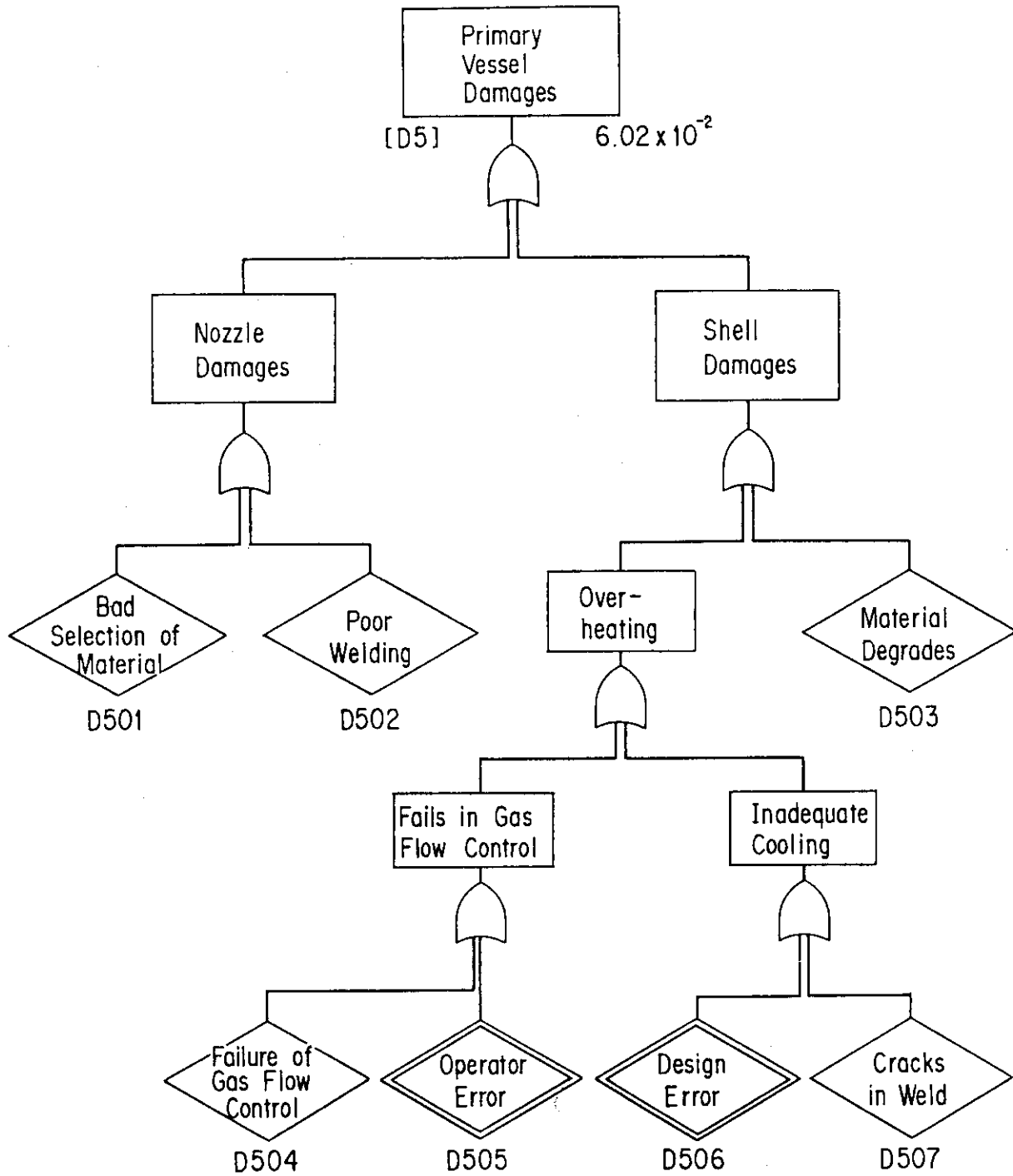


Fig. 2.15(4/7)

Continued.

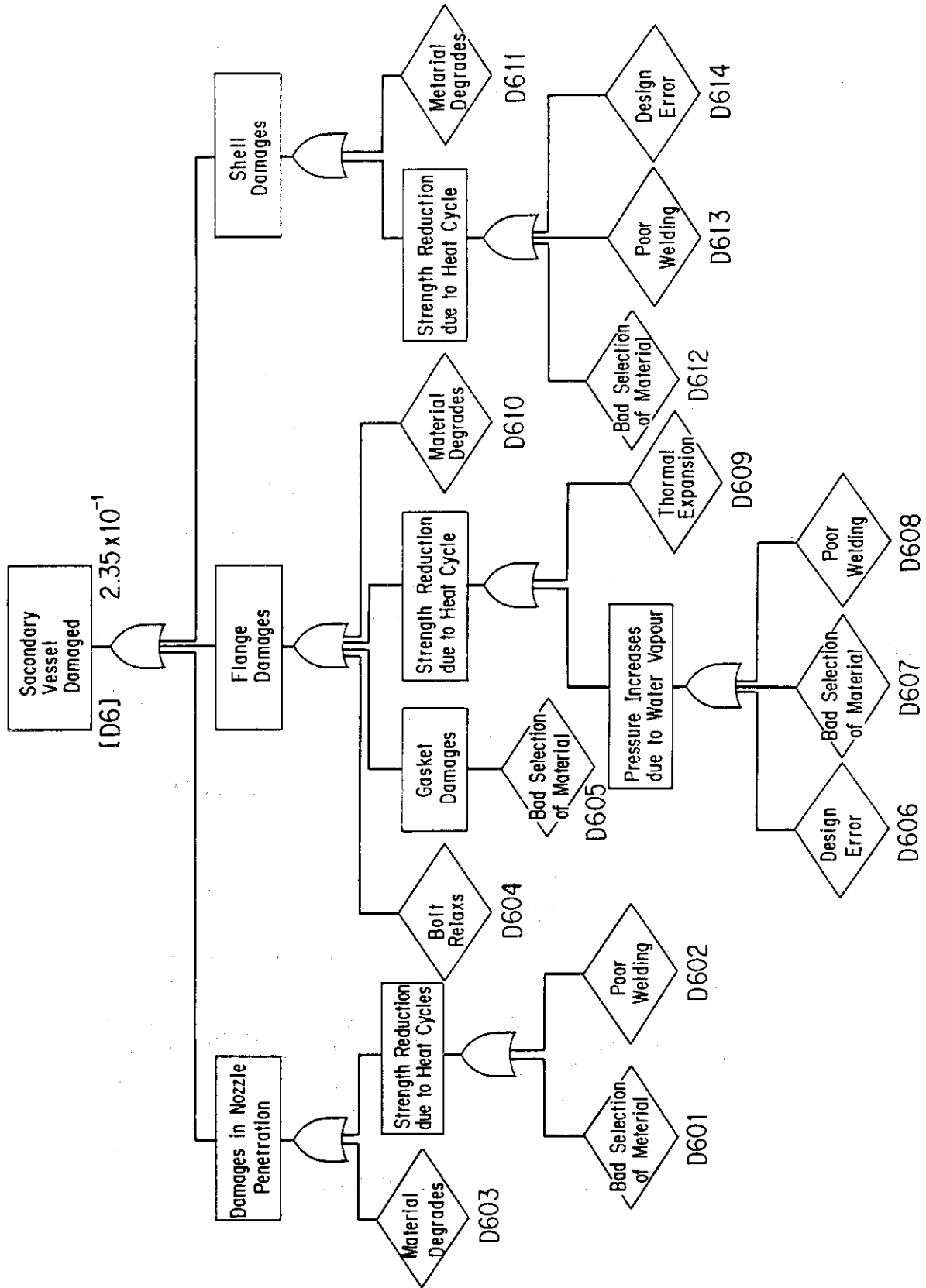


Fig. 2.15(5/7) Continued.

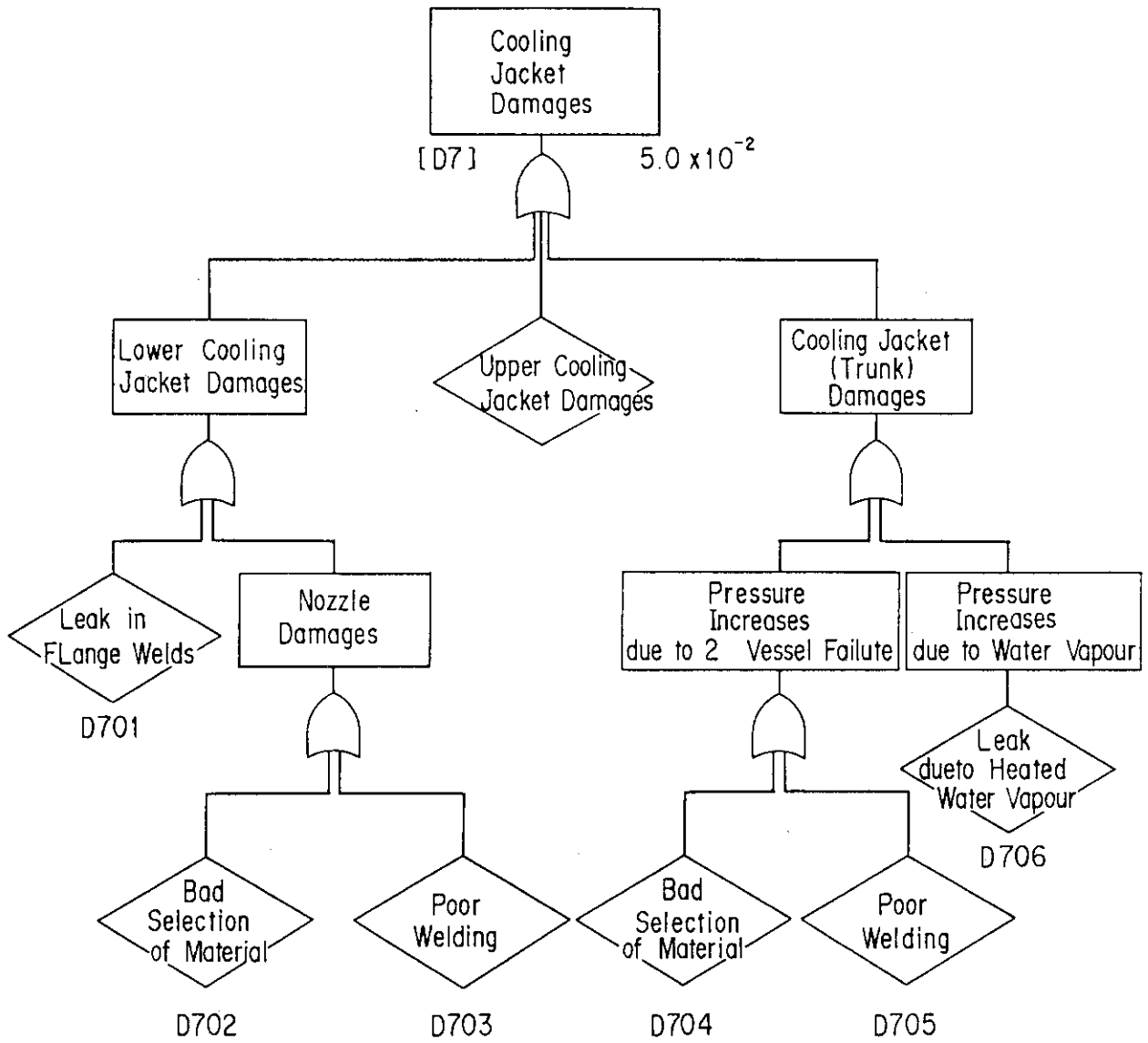


Fig. 2.15(6/7) Continued.

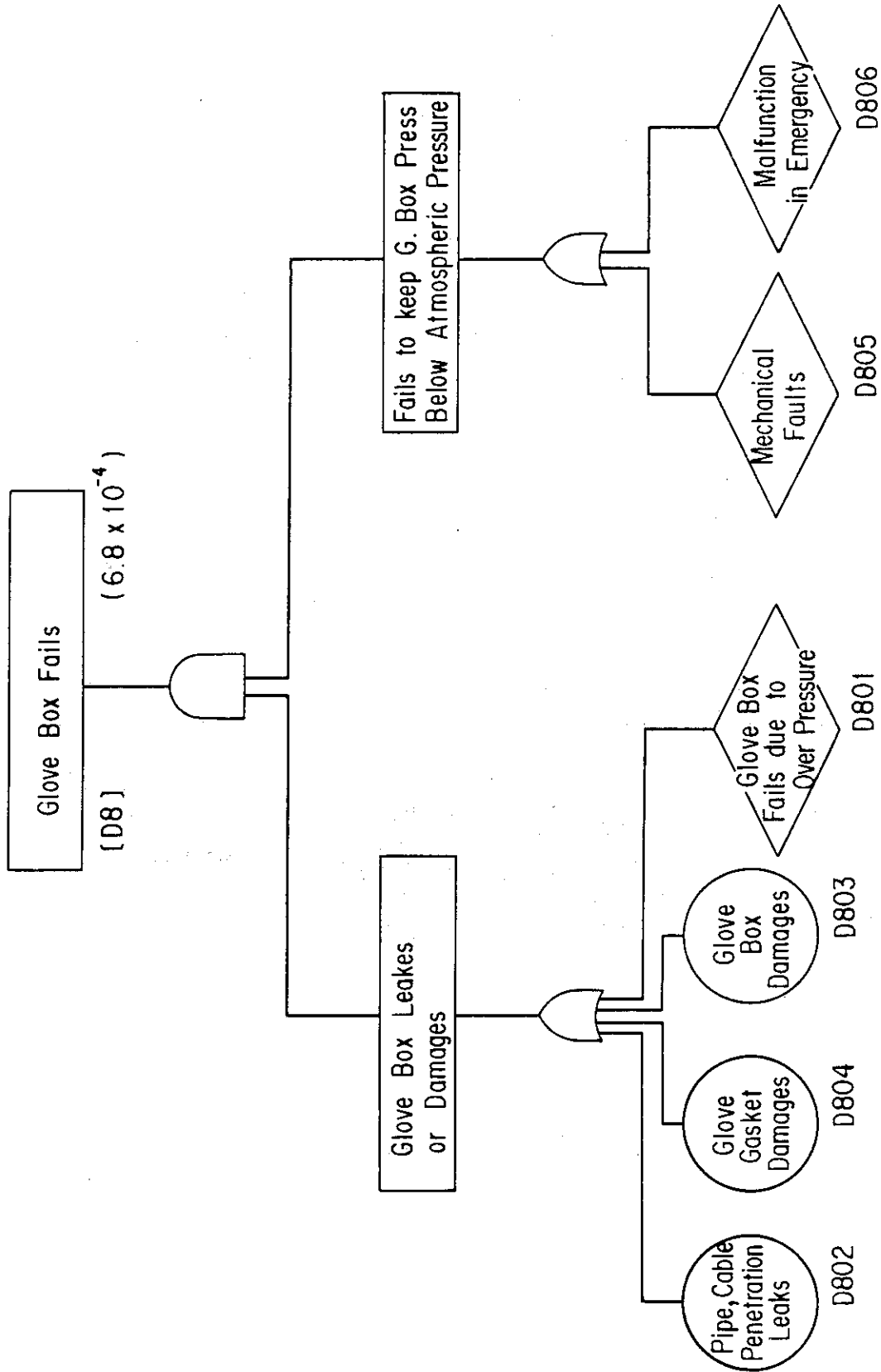


Fig. 2.15(7/7) Continued.

2.5 トリチウム放出量及びリスク

トリチウム放出過程の説明図をFig. 2.16に示した。

トリチウム放出量の算定結果を以下に示す。なお、トリチウムインベントリーについては本年度設計データを使用した。(Fig. 2.17参照)

(1) 「貯蔵タンク(I)大リーク」によるトリチウム放出量

	事故区分	シーケンス 番号	トリチウム放出量		算定根拠
			g	Ci	
①	ZrNiゲッターへのガス移送が成功した場合	A-1	2137	2.05 $\times 10^5$	貯蔵タンク(I)のインベントリーのうちZrNiゲッターへ移送された分(8.5%)を除いた量が放出される。 ($2336 \times 91.5\% = 2137\text{g}$) ^(注1)
②	ZrNiゲッターへのガス移送が失敗した場合 (吸蔵運転準備失敗又は2次側容器破損)	A-3 A-5 A-6 A-7	2336	2.24 $\times 10^5$	貯蔵タンク(I)のインベントリー(2336g)の全量が放出される。

(注1)

タンク大リークとして破口の大きさを接続配管の肉厚程度と想定し、3mmφ以上の孔を考えた場合、タンク内圧は1分以内にグローブボックス圧力まで低下する。従ってZrNiゲッター(2基)への移送、回収分のみ放出量算定で考慮した。

(2) 「希釈用ヘリウム供給装置故障」によるトリチウム放出量

	事故区分	シーケンス 番号	トリチウム放出量		算定根拠
			g	Ci	
①	触媒反応器破損で反応器入口弁閉成功の場合 (ガス爆発は起こらないと考える。)	B-6 B-7 B-15 B-16	8.7× 10 ⁻³	8.4× 10 ¹	触媒反応器1基分(8.7×10 ⁻³ g)のインベントリが放出される。
②	触媒反応器破損,かつ反応器入口弁閉失敗の場合。 (ガス爆発は起こると考える。(注2))	B-9 B-18	0.27	2.59× 10 ³	イ) 貯蔵タンク(Ⅲ)のインベントリ(0.26g) ロ) 触媒反応器1基分(8.7×10 ⁻³ g) イ),ロ)の合計が放出される。
③	オペレーターが異常発見失敗の場合。 ガス爆発は起こると考える。	B-19	0.27	2.59× 10 ³	同上

(注2) 爆発の可能性に関しては(5)項参照。

(3) 「深冷蒸留塔破損」によるトリチウム放出量

	事故区分	シーケンス 番号	トリチウム放出量		算定根拠
			g	Ci	
①	蒸留塔破損で,かつ保冷槽破損	C-9 C-12 C-15	44.62	4.28× 10 ⁵	(イ) インベントリが最大のコラム4のインベントリ (ロ) (22.8g) (ロ) 同位体分離系への流入量として貯蔵タンク(Ⅱ)のインベントリ(21.82g) イ),ロ)の合計が放出される。 (注3)

(注3) 上流側のイベントの成功/失敗により,トリチウム放出量は,変わるが保守的に見積って各シーケンスとも同じ放出量とした。

(4) 「ZrNi 合金ベットの冷却水系の故障」によるトリチウム放出量

	事故区分	シーケンス 番号	トリチウム放出量		算出根拠
			g	Ci	
①	2次側容器破損で冷却 水側容器健全の場合	D-3 D-9 D-14	125	1.2×10^6	ZrNi 合金ベット (T ₂)1 基分 のインベントリーが放出される。 (1500g/12基=125g) (注4)
②	2次側容器破損でかつ、 冷却水側容器破損の場 合	D-5 D-11 D-16	125	1.2×10^6	同上

(注4) ZrNi 合金ベットは、構造上2次側容器破損の場合、グローブボックスへのトリチウム放出をもたらす。又、放出量は容器内の圧力、温度によって変わるが、全量が放出されるものとした。

(5) 触媒反応器におけるガス爆発の可能性について

反応器入口における成分ガスの流量及び組成を以下に示す。

	通常運転時		希釈He喪失時	
	Mol/h	Vol%	Mol/h	Vol%
水素 (T ₂ , D ₂ , H ₂)	0.0245	0.08	0.0245	0.19
メタン (CH ₄)	0.608	1.93	0.608	4.83
ヘリウム (He)	24.749	78.72	5.889	46.80
酸素 (O ₂)	6.0444	19.22	6.0444	48.03
アンモニア, 他	0.0178	0.06	0.0178	0.14

メタンの種々の不活性ガス中での爆発限界を Fig. 2.18 に示したが、単純に反応器入口ガス組成でみる限り、本図で爆発範囲に入ることが判る。

なお、本図は空気雰囲気におけるものであるが、爆発下限値については酸素中でもほとんど変わらないとされているので爆発の可能性はあると考えて対処すべきである。

(6) リスク

リスクプロット図を Fig. 2.19 及び 2.20 に示した。

ここで、[リスク] = [発生確率] × [トリチウム放出量] とした。

1) グローブボックスへのトリチウム放出 (Fig. 2.19 参照)

4つの起因事故にかかわる事故を検討したが、グローブボックスの放出事故では、「貯蔵タンク(I)大リーク」に起因する事故 (シーケンス A-1, A-6 及び A-3) の発生確率及びリスクが共に大きい。

シーケンス A-1 の確率は、ほぼ起因事故の確率になるが、放出量については低減可能と考える。

本解析においては、貯蔵系の ZrNi 合金ベットと同容量のものを 2 基使用した場合を

検討したが、緊急時のダンプ機能を満足するような容量，台数等の選定を今後行なう必要がある。

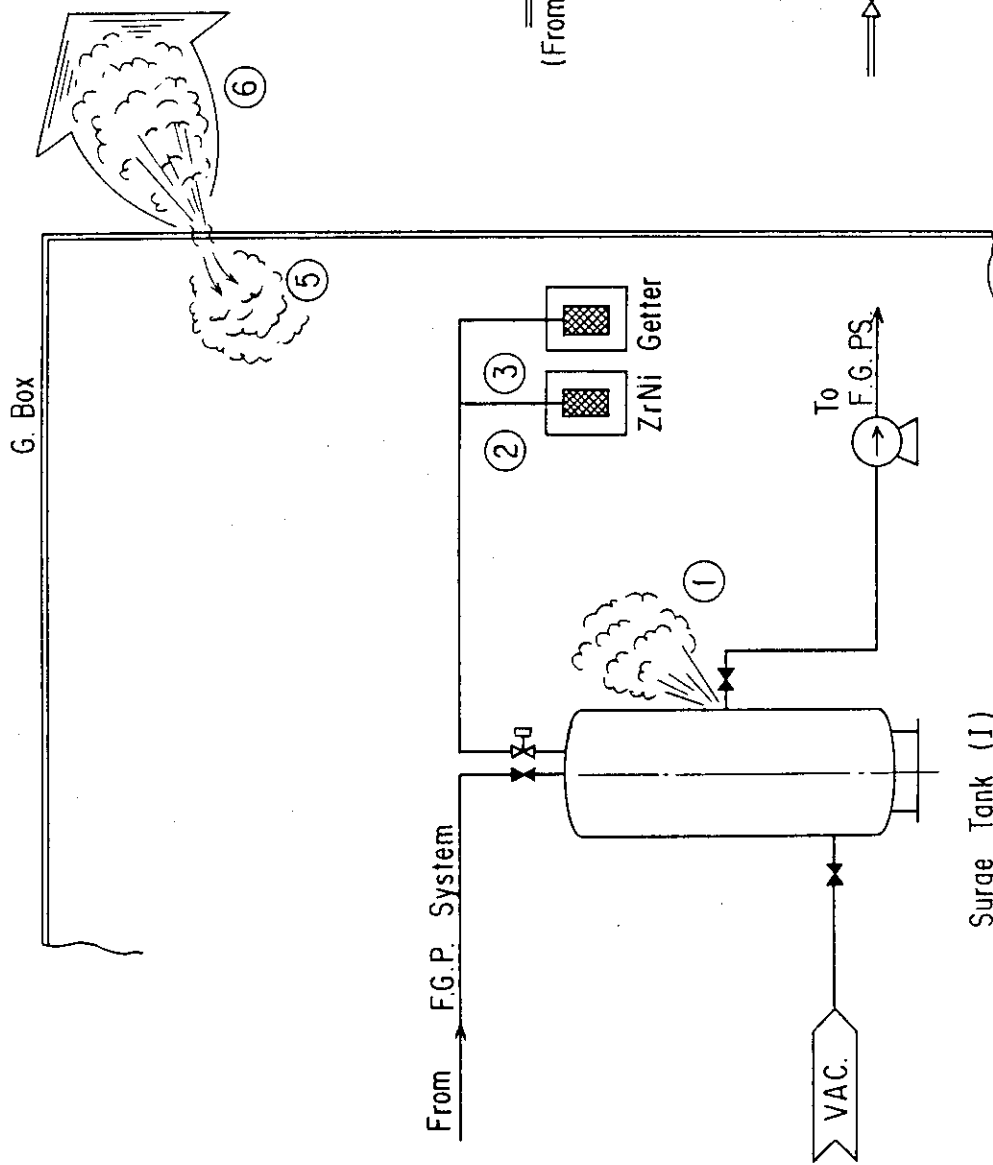
(2) 室内へのナトリウム放出 (Fig. 2.20 参照)

室内への放出は最終的なバリアーであるグローブ・ボックスの健全性にかかっている。本解析においてはグローブボックスの仕様，構造等が未確定であり，ごく簡易な解析にもとづいた結果である点をふまえて評価する必要がある。

発生確率はすべて 10^{-6} / Reactor・year 以下である。

但し，シーケンス B-9，B-18 及び B-19 の事故は触媒反応器でのガス爆発の可能性がある点に注意すべきである。

A : Surge Tank (I) Large Leak



The Progressin of the Accident

- ① Tank Large Leak Occurs
- ② ZrNi Getter get into Operation : Yes/No
- ③ Gas Transferred and Stored : Yes/No
- ④ ZrNi Getter Damages
- ⑤ Glove Box Damages
- ⑥ Tritium Releases to Room

Fig. 2.16(1/4) Illustration of Tritium Release

B : Failure of Dilution Helium Supply System

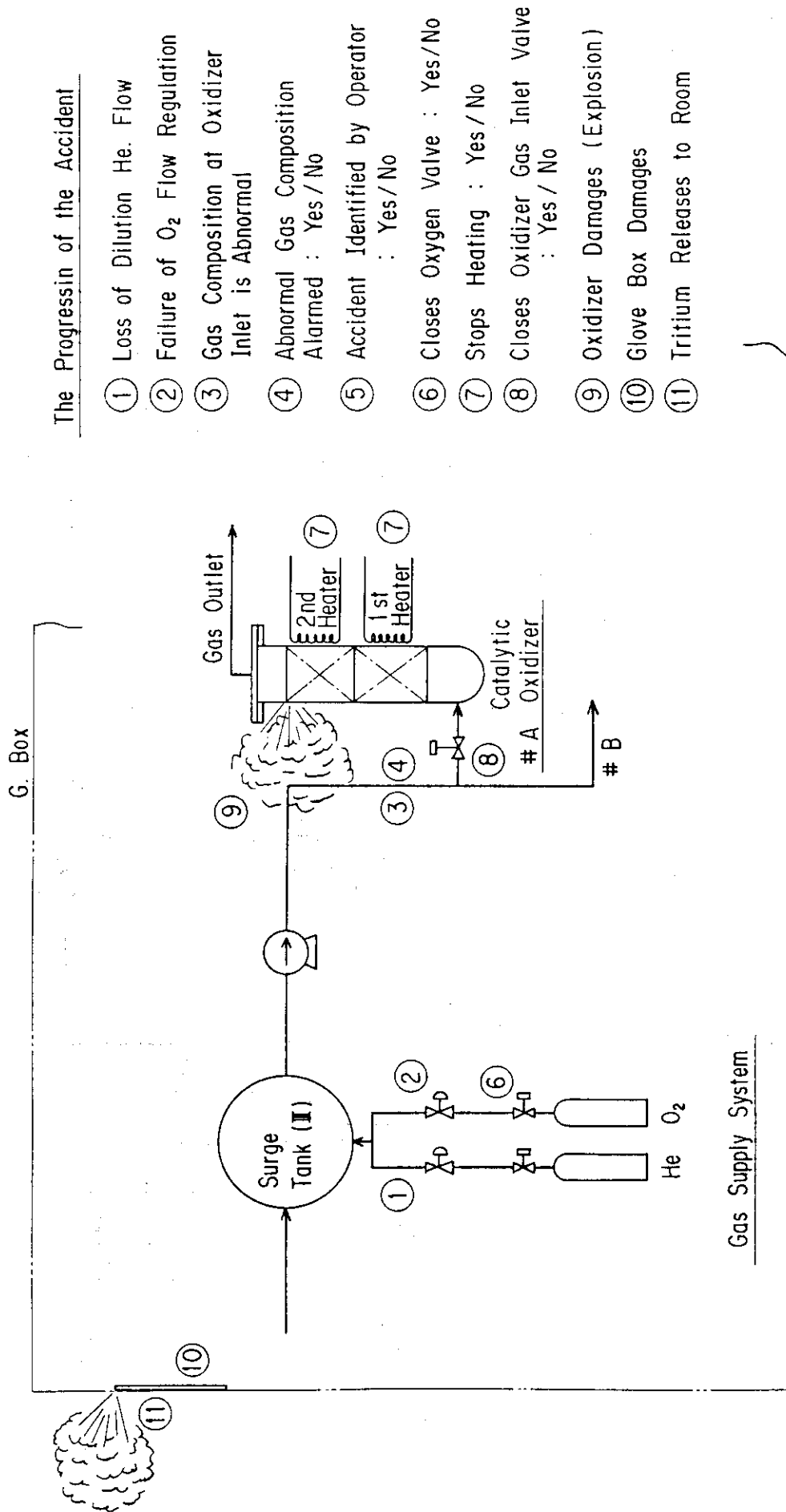


Fig. 2.16(2/4) Illustration of Tritium Release

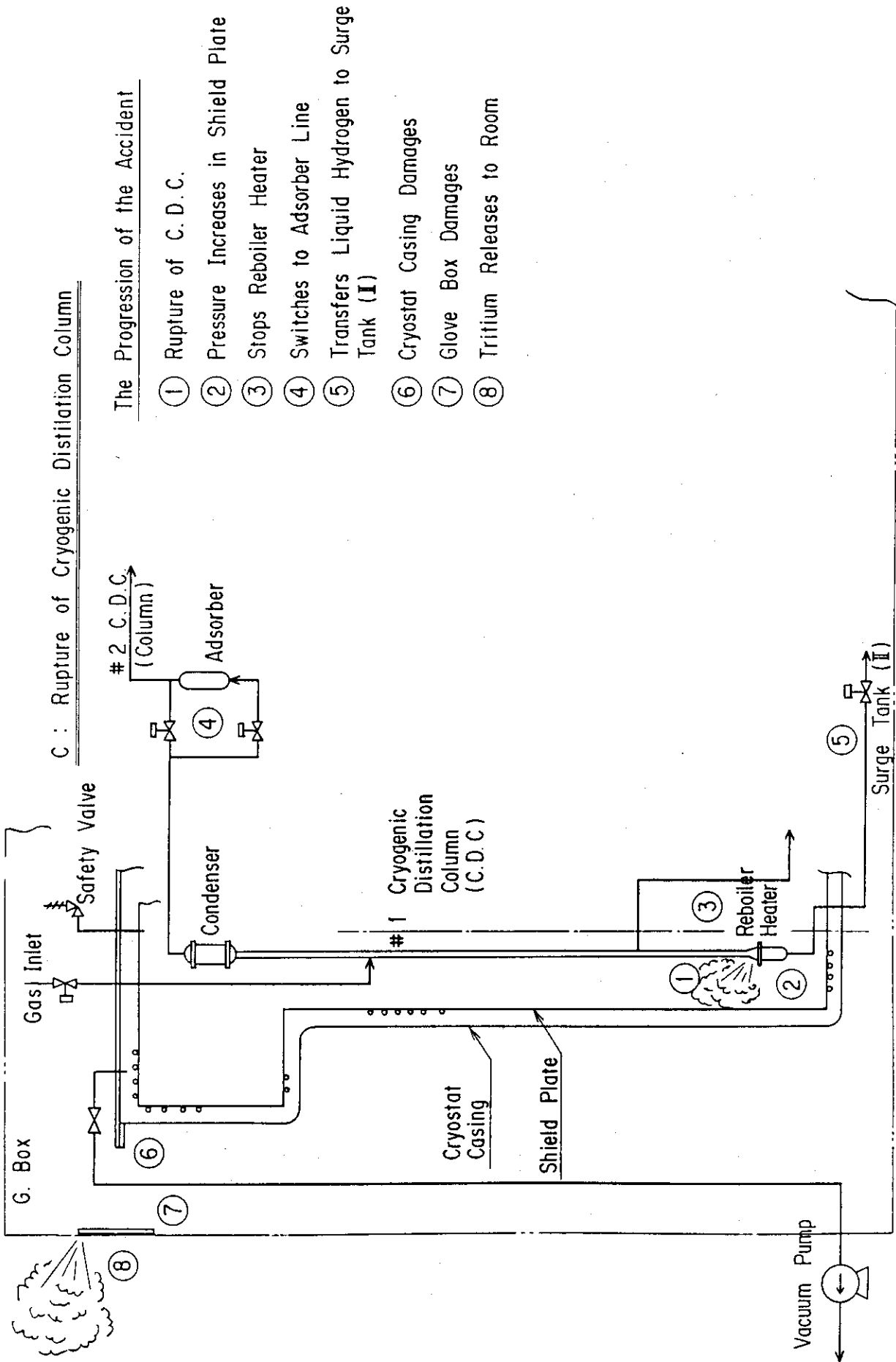


Fig. 2.16(3/4) Illustration of Tritium Release

D : Loss of Cooling Water for F.S.S

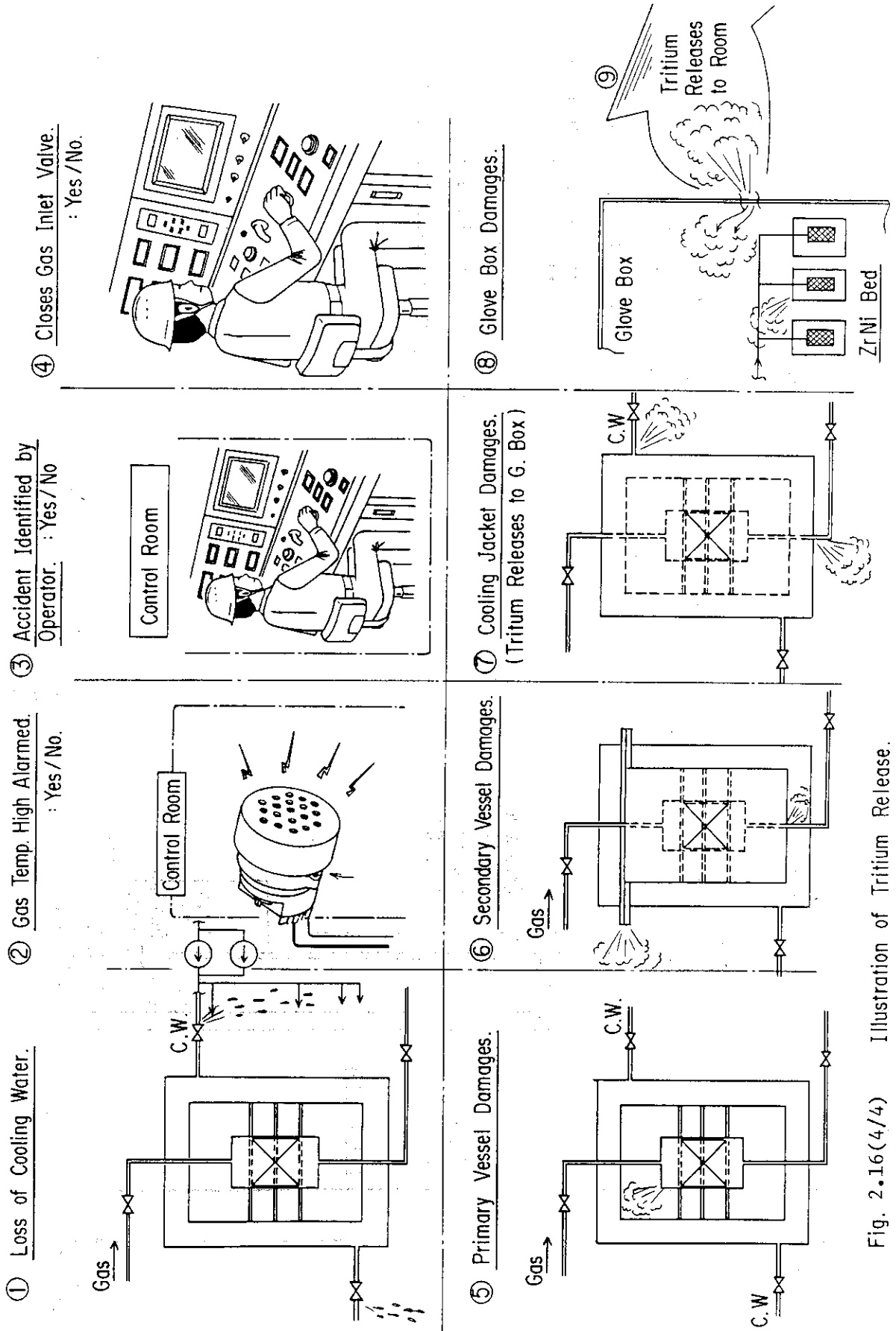


Fig. 2.16(4/4) Illustration of Tritium Release.

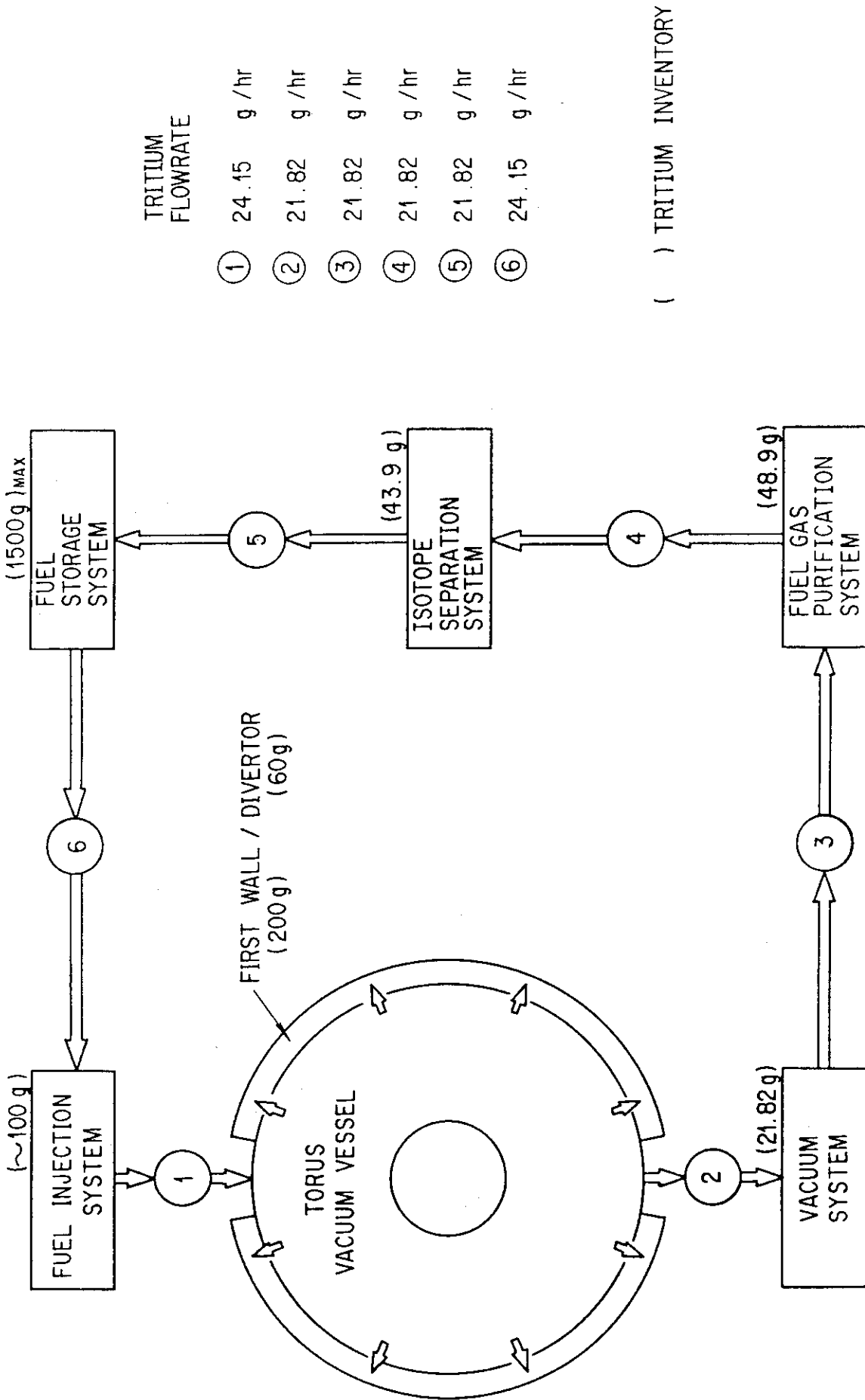


Fig. 2.17(1/4) TRITIUM INVENTORY and FLOW RATE of FUEL GAS CIRCULATION SYSTEM (Option C, Duty 0.8)

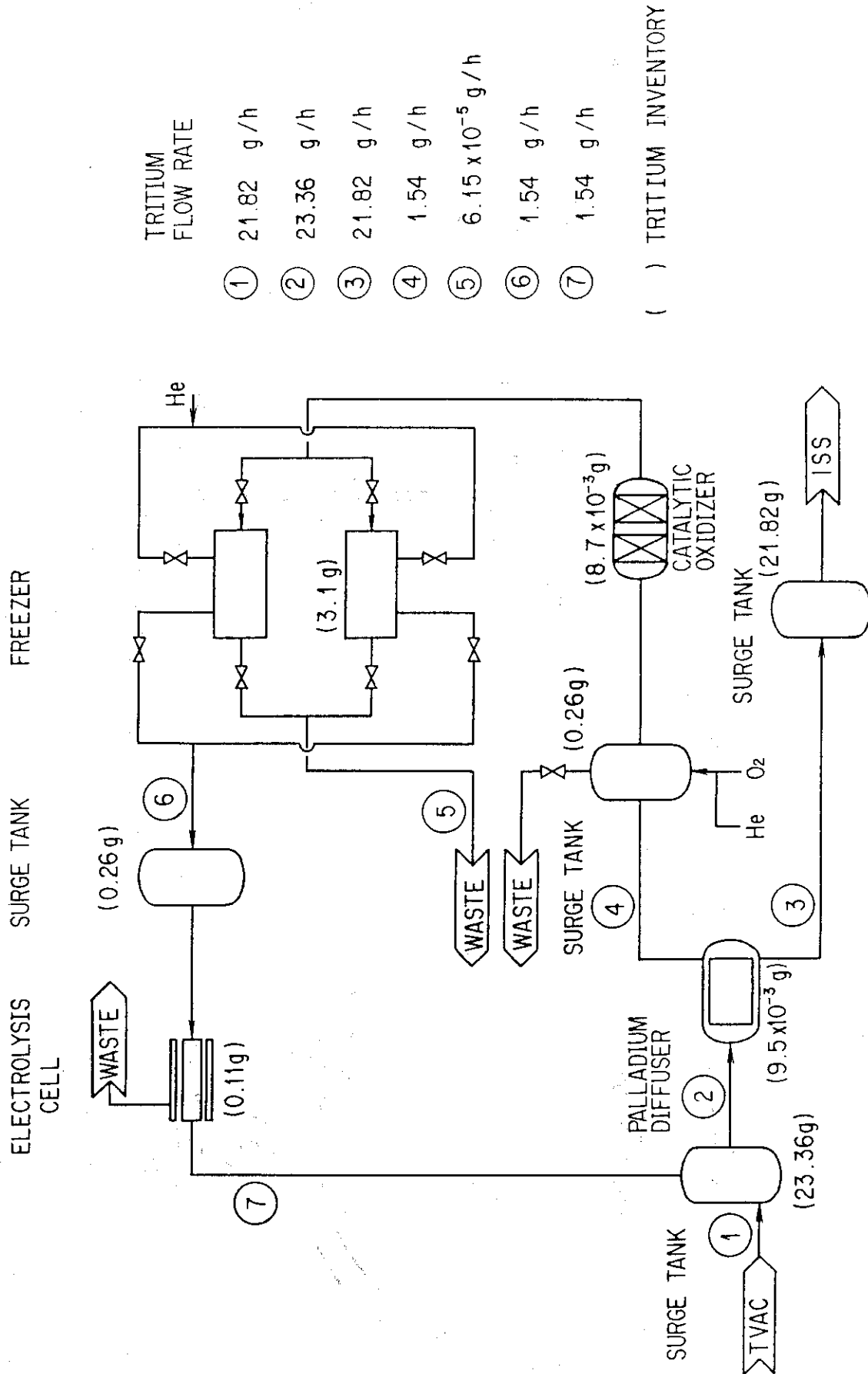


Fig. 2.17(2/4) TRITIUM INVENTORY and FLOW RATE of FUEL GAS PURIFICATION SYSTEM (Option C,Duty 0.8)

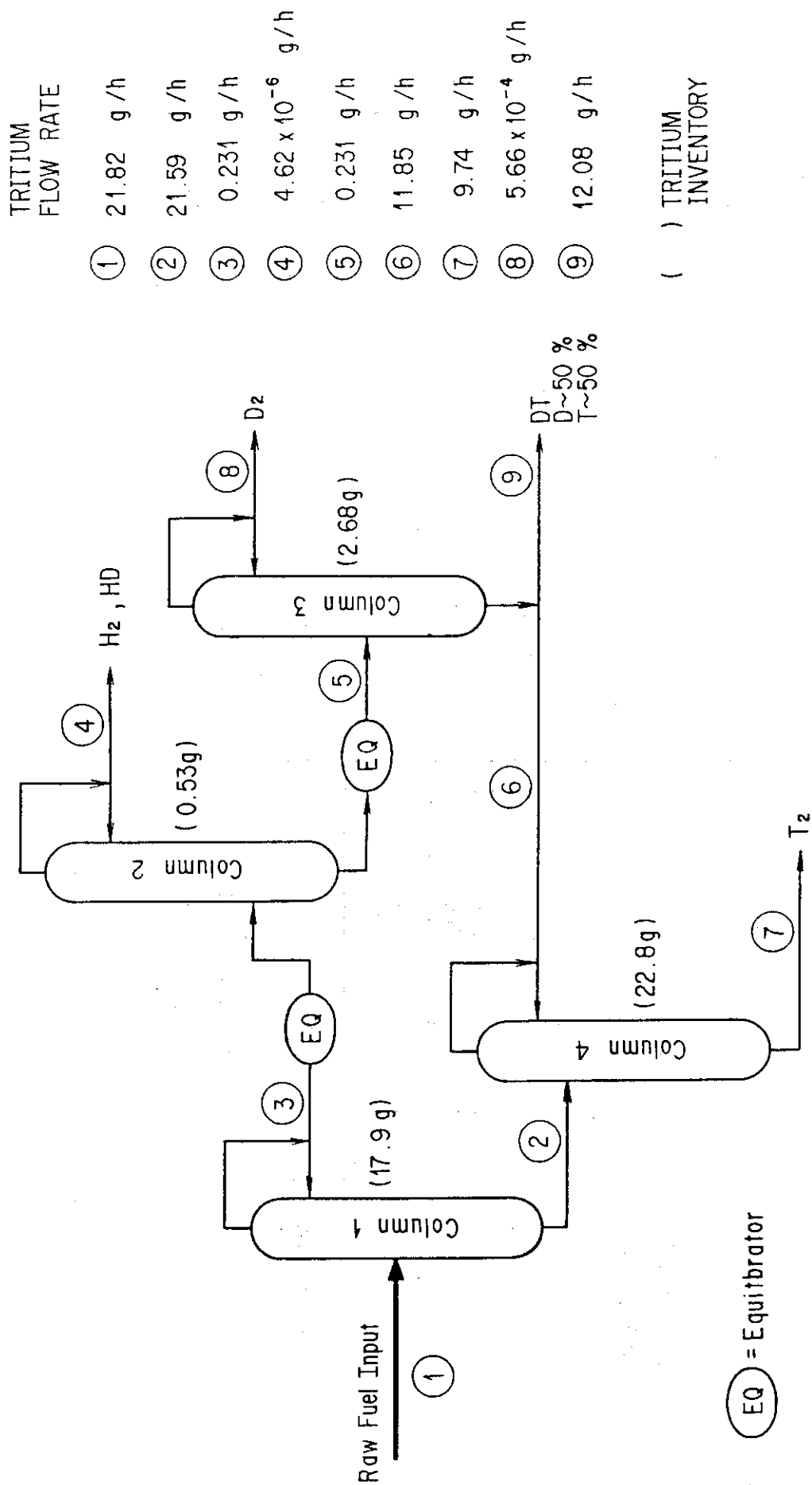


Fig. 2.17(3/4) TRITIUM INVENTORY and FLOW RATE of FUEL GAS ISOTOPE SEPARATION SYSTEM (Option C, Duty 0.8)

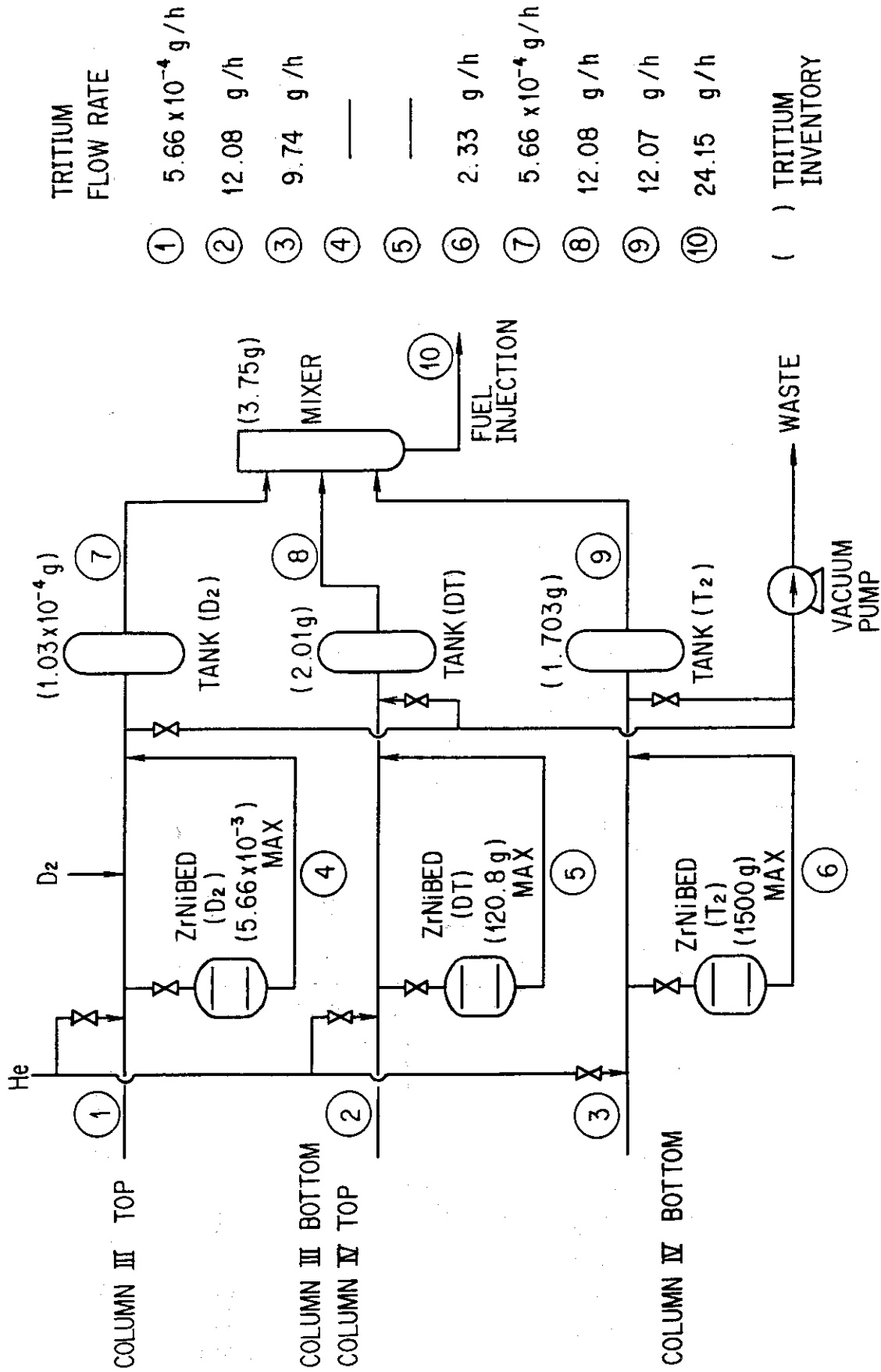
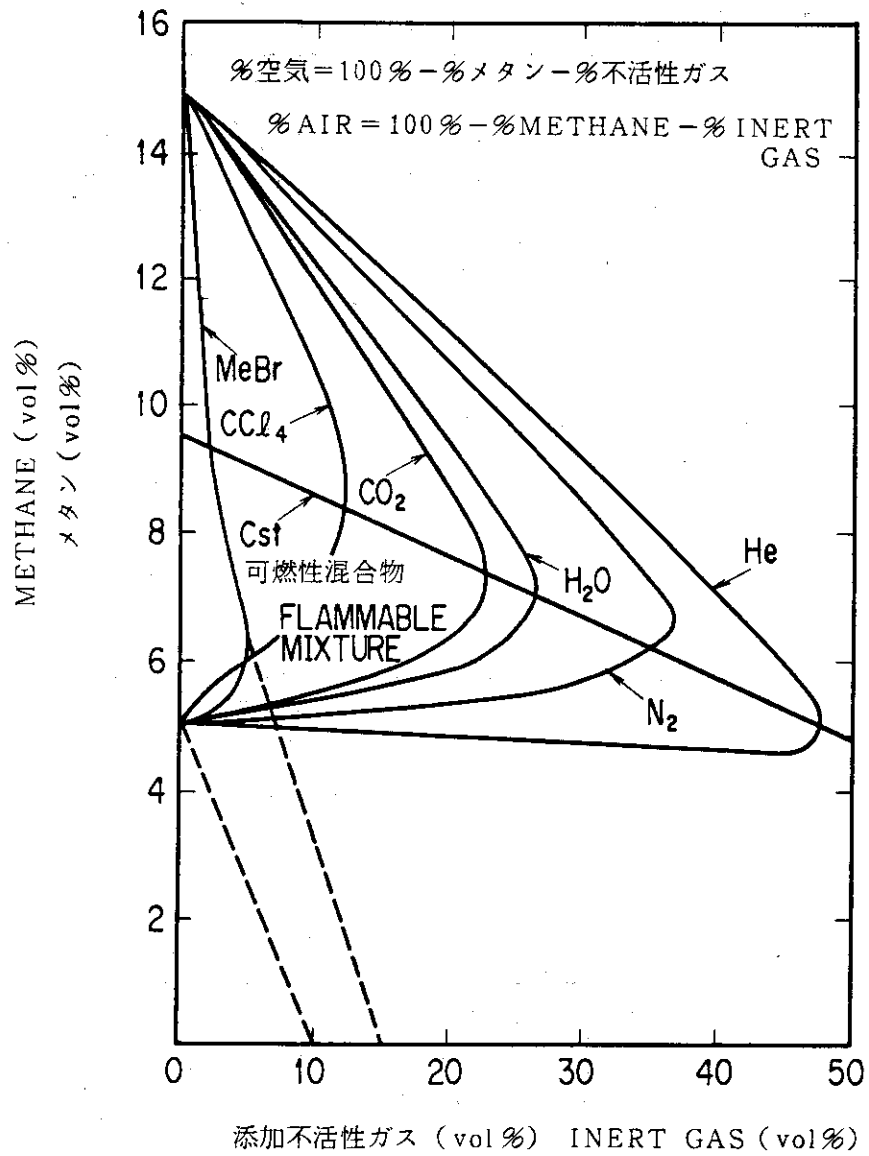


Fig. 2.17(4/4) TRITIUM INVENTORY and FLOW RATE of FUEL GAS STORAGE SYSTEM (Option C, Duty 0.8)



種々のメタン-不活性ガス-空気混合物
の25°C, 大気圧における爆発限界

Fig. 2.18 Explosion Limits for Methane in Various Inert Gas.
-Air Mixture. 25°C, 1atm⁽³⁾

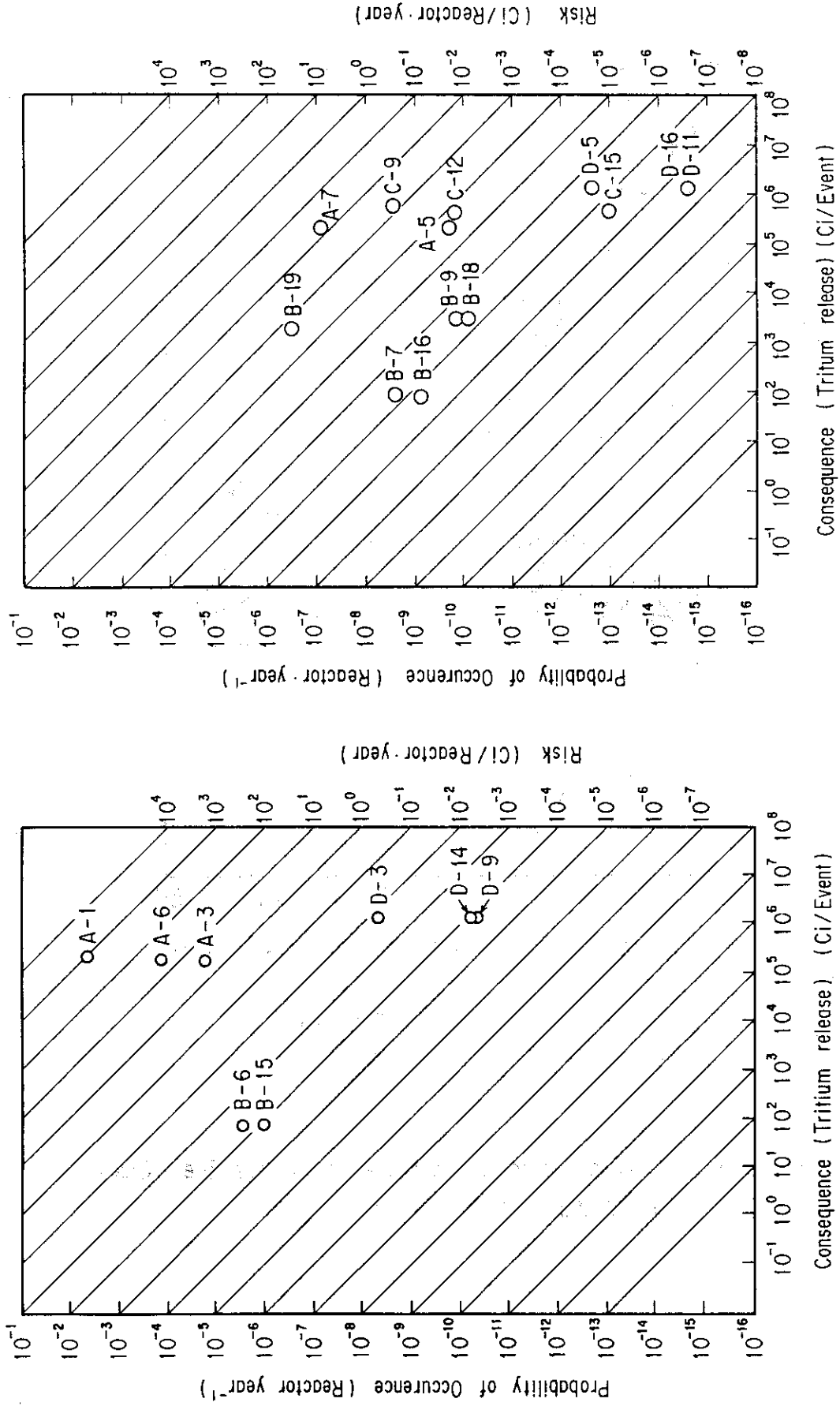


Fig. 2.19 Risk plot - Tritium release to glove box

Fig. 2.20 Risk Plot - Tritium Release to Room

2.6 今後の検討課題

燃料ガス循環系についてFMEA, ETA等を通じて安全性の検討を実施した。

以下に、本検討で明らかになった問題点及び今後の検討課題を列挙する。

(1) 全般的事項

- 1) 各サブシステムの構成を運転方法との関係で見直し、確定する必要がある。

下表は各サブシステムの故障時の運転方法を示すが、特に同位体分離系は予備機を持たないので故障時の運転方法を検討する必要がある。

運転方法 故障サブシステム	精製系	同位体分離系	貯蔵系
精製系 (予備機有 *1)	予備機へ切替 故障	正常運転	正常運転
同位体分離系 (予備機無)	?	故障 ?	?
貯蔵系 (予備機有 *2)	正常運転	正常運転	予備機へ切替 故障

*1 : 主要機器は2系列, 配管は1系列

*2 : ZrNiゲッター, 循環ポンプは予備機ある。他は1系列。

- 2) 事故時のトリチウム閉じ込め対策について総合的に検討必要がある。(火災, 停電, 断水等の共事事象又は大リーク発生時)

事故分類と対策の一覧表をTable 2.5に示した。

- 3) 予備機への切替え方法(運転中 or 停止後)の決定。

(2) 各サブシステムに関する事項

1) 精製系

- ① 貯蔵タンク大リーク発生時のグローブボックスへのトリチウム放出量の低減対策。
- ② コールドトラップ(現状は機能上1系列)の故障時対策及びヒータ構造の検討(交換可能なものとする)。
- ③ 触媒反応器入口の希釈ヘリウム及び酸素供給装置の故障時対策。
- ④ 希釈ヘリウム喪失時はメタンガス爆発の危険性があるので事故防止のため運転・制御方法の検討が必要である。
- ⑤ トリチウムの放出経路としてグローブボックス→室内への放出以外に廃ガス処理系, 窒素ガス排出系を経由する事故も考えられるので, それらに対しても防止対策が必要である。(Fig. 2.9(2/5), (4/5)参照)

2) 同位体分離系

- ① 吸着器, 同位体平衡器の閉塞対策
- ② 燃料ガス供給弁の閉止条件を事故時保冷槽へのガス放出を防止する観点で検討する。

③ 保冷槽の圧力逃し装置設置の検討

3) 貯蔵系

① 吸蔵・放出特性の定量化と系統構成，運転要領の確立（循環ポンプ，冷却水ポンプ台数の削減）

② 合金ベットの1次側ヒータの故障対策等。

現状構造ではヒータ故障の場合，合金ベット全体が使用不能となり，その廃棄処分も問題となる。

③ 合金ベットの圧力逃し弁，過熱防止対策の検討

なお，トリチウム処理系の安全解析については類似の検討がBruske⁽⁴⁾ 5によりなされている。ただし双方のシステム，検討範囲は異なっており，使われているデータの解釈等異なる部分もある。いずれにしてもこうした故障解析は絶対的なものではなく，一つの安全性を判断する目安としてなされるものと考えられる。

今後さらに詳細な設計の課程において見直して行くものとする。

謝 辞

本研究を行うに当り，終始御指導を頂いた関係課室各位，及び多大なる御協力を頂いた参加企業の各位に対し厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) IEEE Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, Sensing Component, and Mechanical Equipment Reliability Data for Nuclear-Power Generating Station; IEEE Std 500-1984.
- (2) Reactor Safety Study-An Assessment of the Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400, NUREG-75/014 (October 1975)
- (3) 安全工学協会編，安全工学講座 2.「爆発」
- (4) S.Z.Bruske, D.F.Holland: Risk Assessment of a Fusion-Reactor Fuel-Processing System, EGG-2266 (July 1983)

③ 保冷槽の圧力逃し装置設置の検討

3) 貯蔵系

① 吸蔵・放出特性の定量化と系統構成，運転要領の確立（循環ポンプ，冷却水ポンプ台数の削減）

② 合金ベットの1次側ヒータの故障対策等。

現状構造ではヒータ故障の場合，合金ベット全体が使用不能となり，その廃棄処分も問題となる。

③ 合金ベットの圧力逃し弁，過熱防止対策の検討

なお，トリチウム処理系の安全解析については類似の検討がBruske⁽⁴⁾ 5によりなされている。ただし双方のシステム，検討範囲は異なっており，使われているデータの解釈等異なる部分もある。いずれにしてもこうした故障解析は絶対的なものではなく，一つの安全性を判断する目安としてなされるものと考えられる。

今後さらに詳細な設計の課程において見直して行くものとする。

謝 辞

本研究を行うに当たり，終始御指導を頂いた関係課室各位，及び多大なる御協力を頂いた参加企業の各位に対し厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) IEEE Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, Sensing Component, and Mechanical Equipment Reliability Data for Nuclear-Power Generating Station; IEEE Std 500-1984.
- (2) Reactor Safety Study-An Assessment of the Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400, NUREG-75/014 (October 1975)
- (3) 安全工学協会編，安全工学講座 2.「爆発」
- (4) S.Z.Bruske, D.F.Holland: Risk Assessment of a Fusion-Reactor Fuel-Processing System, EGG-2266 (July 1983)

③ 保冷槽の圧力逃し装置設置の検討

3) 貯蔵系

① 吸蔵・放出特性の定量化と系統構成，運転要領の確立（循環ポンプ，冷却水ポンプ台数の削減）

② 合金ベットの1次側ヒータの故障対策等。

現状構造ではヒータ故障の場合，合金ベット全体が使用不能となり，その廃棄処分も問題となる。

③ 合金ベットの圧力逃し弁，過熱防止対策の検討

なお，トリチウム処理系の安全解析については類似の検討がBruske⁽⁴⁾ 5によりなされている。ただし双方のシステム，検討範囲は異なっており，使われているデータの解釈等異なる部分もある。いずれにしてもこうした故障解析は絶対的なものではなく，一つの安全性を判断する目安としてなされるものと考えられる。

今後さらに詳細な設計の課程において見直して行くものとする。

謝 辞

本研究を行うに当たり，終始御指導を頂いた関係課室各位，及び多大なる御協力を頂いた参加企業の各位に対し厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) IEEE Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, Sensing Component, and Mechanical Equipment Reliability Data for Nuclear-Power Generating Station; IEEE Std 500-1984.
- (2) Reactor Safety Study-An Assessment of the Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400, NUREG-75/014 (October 1975)
- (3) 安全工学協会編，安全工学講座 2.「爆発」
- (4) S.Z.Bruske, D.F.Holland: Risk Assessment of a Fusion-Reactor Fuel-Processing System, EGG-2266 (July 1983)