

JAERI-M

7964

核融合実験炉炉心燃料給排系の安全性解析

1978年12月

核融合研究部炉設計研究室

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

核融合実験炉炉心燃料給排系の安全性解析

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部
炉設計研究室

(1978年10月19日受理)

トカマク型核融合実験炉炉心燃料給排系のトリチウム封入ならびに安全性の観点から、システム設計及び安全性解析を行った。トリチウムの環境放出量をできるだけ抑える為に3段階の封入システムを採用した。また、フォールトツリーならびにFMEAチャートを作成して第1次安全性解析を実施した。

第1次封入系は炉心燃料給排系構成機器および配管類であり、これらの機器類は十分なトリチウム漏洩防止対策を施した設計として、2次封入系内に収納する。第2次封入系は希ガス雰囲気のグローブボックスに類似したものであり、 $70\text{ m}^3/\text{min}$ の処理量を有する雰囲気精製系を設備する。第3次封入系は2次系ならびに各種トリチウム含有ガス処理系を収納する格納室、処理容量 $3\text{ m}^3/\text{min}$ の格納室換気系および処理容量 $150\text{ m}^3/\text{min}$ の緊急時格納室浄化系等から構成する。

Safety Analysis of Fuel Circulating System for
Tokamak Experimental Fusion Reactor

Fusion Reactor System Laboratory,
Division of Thermonuclear Fusion Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 19, 1978)

Design study and safety analysis on the fuel circulating system (FCS) for a Tokamak experimental fusion reactor have been carried out, in tritium containment and safety. A three-stage containment system of tritium fuel is settled to control tritium release to the environment as low as possible. The system safety is examined by fault trees, failure effect and related analyses.

FCS components and piping are designed to minimize leakage into the secondary containment which encloses most of the primary containment. The secondary containment is of glovebox type with an inert gas atmosphere, provided Glovebox Atmosphere Purification System of flow rate $70 \text{ m}^3/\text{min}$. The tertiary containment system consists of the rooms enclosing secondary system and tritium-bearing gas processing systems, a $3 \text{ m}^3/\text{min}$ Atmosphere Cleanup System and a $150 \text{ m}^3/\text{min}$ Emergency Containment System.

Keywords; Experimental Fusion Reactor, Fuel Circulating System, Safety Analysis, Tritium Release, Containment System, Glovebox, Tritium Recovery, Catalytic Oxidation, Failure Mode and Effect, Fault Tree.

The design study performed by Mitsubishi Electric Company, Mitsubishi Heavy Industries and Mitsubishi Atomic Power Industries under contract with JAERI.

—目 次—

まえがき	1
1. 炉心燃料給排系の安全性解析条件	2
1.1 基本思想	2
1.2 トリチウムによる放射線被曝と許容線量	4
1.3 環境基準	7
1.4 設計基準	7
2. 炉心燃料給排系の概要	9
2.1 基本機能	9
2.2 主真空排気系	18
2.3 燃料精製系	23
2.4 同位体分離系	28
3. 系統設計	35
3.1 系統計画	35
3.2 主系統設計	37
3.3 全体系統設計	44
3.4 不具合と安全対策	51
4. 配置設計	57
4.1 配置計画	57
4.2 主要コンポーネントの配置	57
4.3 全体配置	58
5. トリチウム封入設計	62
5.1 設計思想	62
5.2 トリチウム透過・漏洩量の検討	63
5.3 トリチウム除去装置の検討	66
5.4 トリチウム含有ガス精製システム	73
5.5 2次封入システム	80
5.6 3次封入システム	84
6. トリチウム機器の安全性検討	88
6.1 真空ポンプ	88
6.2 輸送ポンプ	96
6.3 圧縮ポンプ	97
6.4 バルブ類	97
6.5 フランジ	98
6.6 保 守	100
6.7 材 料	102

7. 事故解析	103
7.1 故障とその波及効果の検討	103
7.2 事故の摘出とその原因・過程の検討	113
7.3 トリチウム放出事故の検討	117
8. まとめ	120
8.1 報告概要	120
8.2 問題点および今後の課題の摘出	120
8.3 研究開発計画案	122
A. 付 録	124
A. 1 主真空排気系設計	124
A. 2 ヘリウム冷凍系設計	146
あとがき	161

Contents

Preface	1
1. Conditions for Safety Analysis of Fuel Circulating System ..	2
1.1 Basic Safety Criteria	2
1.2 Radiological Hazards and Permissible Dose Rate of Tritium	4
1.3 Performance Criteria	7
1.4 Design Criteria	7
2. Summary of Fuel Circulating System	9
2.1 Basic Function	9
2.2 Main Vacuum System	18
2.3 Fuel Gas Refine System	23
2.4 Isotope Separating System	28
3. Conceptual System Engineering	35
3.1 System Planning	35
3.2 Main System Engineering	37
3.3 Total System Engineering	44
3.4 Trouble Considerations	51
4. Layout	57
4.1 Layout Conditions	57
4.2 Layout of Main Components	57
4.3 Layout Planning of Fuel Circulating System	58
5. Tritium Containment Design	62
5.1 Design Bases	62
5.2 Tritium Leakage Considerations	63
5.3 Tritium Removal Analysis	66
5.4 Tritium Processing Systems	73
5.5 Secondary Containment System	80
5.6 Tertiary Containment System	84
6. Safety Considerations of Components	88
6.1 Vacuum Pumps	88
6.2 Transfer Pumps	96
6.3 Compressors	97
6.4 Valves	97
6.5 Flanges	98

6.6	Maintenance	100
6.7	Materials	102
7.	Analysis of Accidental Events	103
7.1	Failure Mode and Effect Analysis	103
7.2	Fault Tree Analysis	113
7.3	Tritium Release Considerations	117
8.	Conclusion	120
8.1	Summary	120
8.2	Research and Development Items	120
8.3	Research and Development Schedule	122
A.	Appendix	124
A.1	Main Vacuum System Design	124
A.2	Helium Refrigeration System Design	146
	Acknowledgement	161

ま え が き

本報告書はトカマク型核融合実験炉^{1), 2)}の炉心燃料給排系設計³⁾に基づく安全設計とその解析・評価に関するものである。

本作業の主な内容は、燃料給排系が水素の放射性同位体であるトリチウムを多量に取扱うシステムである所から、その安全な取扱いと、環境への放出防止策を施した設計の見直しと安全性解析に主眼を置いたものである。主要設計項目としては、全体システム設計、主要装置システム設計、配置設計、トリチウム封入システム設計等で、これ等の設計に基づいて、トリチウム機器の安全性の検討、トリチウム放出量の検討ならびに事故時の解析・検討を安全設計の基本的考え方によって行ったものである。

本作業は、大量トリチウム取扱い施設としての燃料給排系とその格納室に関する安全設計概念を明確にするとともに、安全性の観点からの問題点を明らかにし、今後の関連設計および開発研究に資することを目的とするものである。

燃料給排系の基本仕様は「核融合実験炉第I次予備設計(中間報告書)」¹⁾と「核融合実験炉第I次予備設計」²⁾によった。また設計仕様は「核融合実験炉炉心燃料給排系の設計研究」³⁾に基づいて行った。

参考文献

- 1) 原研 核融合研究部 炉設計研究室
「核融合実験炉第I次予備設計(中間報告書)」 JAERI-M 6670 (1976)
- 2) 原研 核融合研究部 炉設計研究室
「核融合実験炉第I次予備設計」 JAERI-M 7300 (1977)
- 3) 原研 核融合研究部 炉設計研究室
「核融合実験炉炉心燃料給排系の設計研究」 JAERI-M 7293 (1977)

1. 炉心燃料給排系の安全性解析条件

1. 1 基本思想

臨界ならびに核分裂性生成物質の問題がない核融合炉が、放射能に関して大きな問題がなく、安全性に優れていると結論するのは早計である。核融合炉の安全性についても核分裂炉の場合と同様十分な評価・検討を実施し、安全性確保に務めなければならない。従って、安全性関連の諸問題を解決するために、実験炉の設計と並行して安全性解析に着手された（本解析もその一貫として行われたものである）。特に、放射能の問題として重要なことは核融合炉が大量のトリチウム（実験炉全体で～500g、炉心燃料給排系で～300gのインベントリーをもつ。）を取扱うことである。

一般に云われる“安全性”には絶対的安全性という意味と社会通念としての安全性があるが、ここでは実験炉の意義を考慮した後者の安全性を論じるべきであろう。現在、原子力における安全の目標は「原子力発電所設置によるリスクの増加は、すでに社会に存在しているリスクに比較して充分低いものである」ことであるが、社会に許容されるリスクレベルの評価が重要である。原安協が調査した死亡リスク・レベルおよび病死率をFig. 1.1.1に示す。¹⁾

また、米国におけるリスクに対する人間の態度の分析結果²⁾をTable 1.1.1に示す。許容リスク・レベルとしては災害の大きさならびに災害密度についても考慮する必要がある。

核融合炉実験炉において、一般公衆や転業人（従業者）に対する安全性確保の観点から、起りそうもない事故（仮想事故）を想定し、その事故に対し安全性が確保できるような設計を行う必要がある。米国では現在10CFR 100（立地基準）のめやす線量を越える事故の発生確率を 10^6 /年より低くおさえることが要求されている。

炉心燃料給排系における安全設計の目標は職業人ならびに公衆の保護であり、通常時および事故時に対して夫々対策を講じる必要がある。職業人の保護としては通常時の作業環境の放射線量を低くおさえ被曝線量率が許容レベルを越えない様管理することであり、事故時には事故後処理が迅速かつ充分行える様な設備を設けることである。また一般公衆に対しては通常時トリチウムの放出を基準値以下で可能な限り低くし、万一の事故が気象条件の悪い時に発生しても退避する必要がないような安全設計を行うことであろう。

実験炉炉心燃料給排系は次の様な段階を経ることにより、その安全性が確保されるであろう。

- ① 安全基準の設定：放射線安全基準、環境基準、設計基準等の基準ならびに機器等の製作・検査等の標準・規格類を設定する。
- ② 安全設計：上記規準類を満足する設計および多重封入、緊急封入、装置冗長、安全装置等の設計を行う。
- ③ 安全性評価：上記設計者とは独立に、通常時および事故時の周辺への影響を評価する。
- ④ 安全性の実証：重要な機器・装置類の実験による機能の実証、全体系統のモックアップ試験を行う。

⑤ 製作・組立・据付中の品質保証：実際に据付けられる機器装置類ならびにシステム全体が設計通りの品質および性能を有していることを工場ならびに現場で各工程中に確認する。

⑥ 供用期間中検査：供用期間中に系統や機器が所定の性能を有していることを定期検査ならびに随時確認する。また、緊急処理系、安全装置類等の工学的安全施設等の性能確認を充分行う。

本安全性解析は上記の①および②に係るもので、第1次検討として“トリチウムの封入”に重点を置き実施した。

Table 1.1.1 リスクに対する人間の態度分析²⁾

リスク・レベル	事故のタイプ	人間の態度
10^{-3} /年	病 気	過大なリスクで一般に容認できない。
10^{-4} /年	交通事故, 転落	リスク減少のため支出する(交通信号, 柵)。
10^{-5} /年	火災, 溺死, 毒物	リスクを避ける配慮をしている(標語など)。
10^{-6} /年	航空機, 落下物, 鉄道	一般にはあまり注意を払わない。
10^{-6} /年以下	落雷, トーネイド	一般に無視しうるレベルと考えられる。

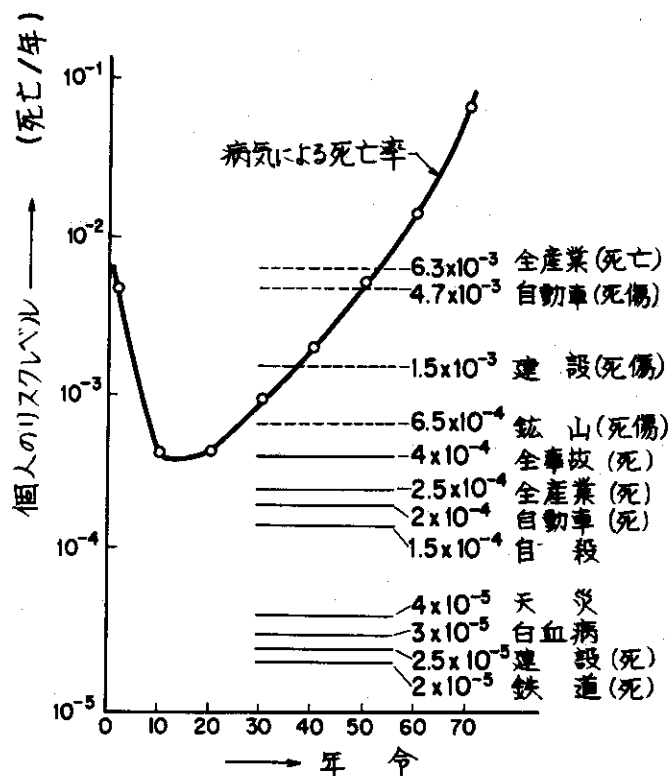


Fig. 1.1.1 Probability of Death in Japan¹⁾

1. 2 トリチウムによる放射線被曝と許容線量

トリチウムは通常の水素の3倍の原子量をもつ、水素の最も重い同位体である。化学的には水素と同じであるが、トリチウム原子は不安定であり、約12.3年の半減期で、 β 粒子とニュートリノを放出し、安定な ^3He に崩壊する。 β 粒子は0～最大18.6 keV、平均5.8 keVのエネルギーで放出される。この最も高いエネルギーの β 線でも人体組織内で6 μ 程度しか透過しない。これは表面の死んだ皮膚組織より薄い。従ってトリチウムは外的な放射線障害の原因とはならず、内部被曝が問題である。

最初体内に加えた放射性核種の量が、半分になる迄の時間を生物学的半減期と言い、放射性核種が体内にとどまる期間の尺度として最も普通に用いられている。

トリチウムが生物体内に取り込まれる割合は、その化学形に依存する。例えばトリチウムがHT、T₂、又はDTのガスの形態で体内に入った場合は、取り込みは遅く、従って内部被曝量も小さい。トリチウムを含むガス分子が体内の水素と平衡になると言う単純な仮定に基付いた線量率の計算をしてはならない。肺中に存在する水の水素と交換するトリチウムはごく微量であるとされている。

トリチウムを含な水（以後“トリチウム水”と言う）は普通の水と同様にふるまい、人体中の水の生物学的半減期は4～18日の範囲であり、以下の検討では平均値として12日を用いることとする。この値は消化管、肺、皮膚を通じて吸収されるトリチウム水に対して用いることが出来、肺及び消化管に入る水は総べて体内に吸収されると一般的に仮定出来る。さらに皮膚から吸収される水の量は肺で吸収される量と同程度の量から零までの間の量と考えられる。

トリチウム水中のトリチウムと体内の有機化合物中の水素との交換は線量率計算では一般に重要な因子とはならない。

消化管を通してトリチウム含有機物を取り込んだ場合はトリチウム水のみ込んだ場合とおよそ同じ線量率になると考えられる。肺に入った有機化合物の約10%が吸収されると想定され、皮膚を通して有機化合物の吸収は無いとして良いであろう。

トリチウムはトリチウム水の形がより有害であり、核融合炉ではトリチウム除去系のほとんどがトリチウム水として除去する方式を採用して居り、安全性解析においては、総べてのトリチウムはトリチウム水の形になっていると仮定した方が安全サイドである。但し、大量トリチウムガス放出事故等については、その環境条件下におけるトリチウムガスの水形への適当な転換率を考慮することが実際的と考えられる。

トリチウムによる線量率を計算するには、人体組織1gあたりに吸収される全エネルギー量を知ることは評価上重要である。トリチウムは β 線放出核種であり、放射されたエネルギーはすべて体内で吸収されるとするのが妥当であろう。安全指針で用いられる線量率の単位はレム（rem = roentgen equivalent man）である。 β 線の場合1 remは100 ergのエネルギーが1gに吸収されることに等しい、それ故QCiのトリチウムをトリチウム水の形で飲み込んだ場合に受ける線量は次式で計算される³⁾。Wは体重(g)である。

$$D = Q \left[3.7 \times 10^{10} \frac{\text{dis}}{\text{sec} \cdot \text{Ci}} \right] \left[0.006 \frac{\text{MeV}}{\text{dis}} \right] \left[1.6 \times 10^{-6} \frac{\text{erg}}{\text{MeV}} \right] \left[10^{-2} \frac{\text{rem}}{\text{erg} \cdot \text{g}} \right] \\ \times \left[\frac{12 \times 86.400}{0.693} \text{sec} \right] \left[\frac{1}{\text{W}} \text{g}^{-1} \right]$$

ICRP⁴⁾ (International Commission on Radiological Protection) と NCRP⁵⁾ (National Council on Radiation Protection) は、地域住民ならびに作業従事者について最大放射線線量に関する勧告を出している。これによると、

- 1) 一般公衆は年間 500 mrem 以上の全身線量を受けてはならない。
- 2) 一般公衆の平均全身線量は年間 170 mrem を超えてはならない。
- 3) 原子力工業作業従事者は年間 5 rem 以上の全身線量を受けてはならない。
- 4) 放射線の被曝は最少にすること。

であり、これに基付いて種々の規制が出されている。

The Code of Federal Regulation の title 10⁶⁾ (10 CFR) はこれ等をまとめたもので、動力炉に関係深いものは Part 20, 50 と 100 である。

核融合実験炉はこの規制に拘束されるものではないが、核融合分野も分裂炉の規制内で成立する様に設計されるべきと期待されるのは当然である。

Part 20 は最大許容線量を取扱って居り、管理区域と非管理区域について、空気中と水中の標準値が設定されている。

Table 1.2.1 に 10 CFR 20 及び放射線障害防止法から引用したトリチウムの最大許容濃度を示す。

Table 1.2.1 トリチウムの最大許容濃度

	状 態		管 理 区 域	非 管 理 区 域
	10CFR20 ⁶⁾	水 中 ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)		1×10^{-1}
空 気 中		摂 取	5×10^{-6}	2×10^{-7}
($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)		非 摂 取	2×10^{-3}	
放射線 障害防止法 ⁷⁾	水 中 ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)		3×10^{-3}	
	空 気 中 ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)		2×10^{-3}	

管理区域内に対する MPC 値は、2つの場合に分けて考えられる。前者は空気中のトリチウムはトリチウム水の形で存在し、体内に摂取された場合、でありこの値に基付くと、1年間に 5 rem の被曝線量になる。またもし作業従事者が管理区域内に居る時間が減ればその分許容濃度を上げることが出来る。一方後者は保護服を着用したり、マスクを付け、トリチウムを飲み込むことがないとして MPC を算出したもので、保護服の着用によりトリチウムはかなり高濃度でも作

業出来るが、作業効率や他の放射線（ α 線、中性子線）源の被曝を考慮する必要がある。

非管理区域に対する MPC もトリチウム水で存在した場合でその値のトリチウムを含む空气中に個人が居つづけたとすると年間 170 mrem ぐらいの線量を受ける。水中の MPC はトリチウム水を含む水を毎日連続 1.1 ㇵづつ飲むとして計算したものである。

10 CFR 20 ではこの MPC の要請の他に、放射性核種の放出は総べて "As low as practicable" の原則に従うべきであるという一般的陳述が含まれている。

立地条件は 10 CFR 100 に従うことになろう。基本的な立地条件に対する配慮は地質学、水文学、気象学及び民勢統計学が含まれている。10 CFR 100 による立地に関する放射性放出物に係る主要な限界値は次の様である。

1) 敷地は十分に大きく

2) 境界の外側に居住する者は誰でも最大想定事故に関連した放射性核種の放出によって、事故後 2 時間に 25 rem 以上の全身線量を受けてはならない。

3) 発電所のまわりに大きな周辺地帯があり、その外側境界に居住する人が最大想定事故に起因する放射能雲によって 25 rem 以上の全身線量を受けないこと。

4) 25,000 以上の最近接人口中心と発電所との距離は少くとも低人口密度地帯の外側周辺との距離の $4/3$ 倍はあること。

全身線量を 25 rem としたのは NCRP 勧告からの引用であり、同勧告に、生涯に一度事故で全身に 25 rem 被曝することは原子力産業従事者の放射線被曝を定める上で無視出来るであろうとしている。

1.3 環境基準

炉心燃料給排系の格納室内は管理区域であり、前項に述べた基準を適用するならば、特別な防備を施さない作業従事者に対する空気中のトリチウム濃度許容値は1ccあたり $5 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}$ である。しかし作業者がエアラインスーツを着用し、呼吸用マスクを付けて、経口摂取を完全に防止出来ればこの基準は大巾にひき下げられ $2 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}/\text{cc}$ 迄許容される。

格納室内は、原子炉建家と異り、中性子及び α 線による外部被曝は十分小さく押えられているとすると、対象となる放射線はトリチウムのみを考慮すれば良い。

本設計においては短期メンテナンスのために格納室に立ち入るためには防護具の着用をするものとし、格納室の雰囲気は $5 \times 10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cc}$ 以下とする。また長期メンテナンスを要する場合は、トリチウム除去系を作動し、格納室の雰囲気を $5 \times 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cc}$ 以下にした後立入るものとする。

最大想定事故の際のトリチウムの環境放出の実施基準の設定方法は確立した方法はない。前項で述べた最大想定事故によるトリチウム放出後の2時間に敷地境界で受ける全身線量が25rem以下であればその敷地は受け入れられるであろうが、核融合炉の安全性に対する一般の認識を考慮するとこの値は高い値であると言える。下限値としては前項で述べた一般公衆に対する平均全身線量の年間170mremがある。しかしながら核融合炉に対しては詳細設計データも欠けて居りトリチウム放出量、敷地条件、気象条件等線量計算には多くの任意な仮定を要するので、現時点では1.0rem程度の全身線量を実施基準の目標とすることが適当と思われる。

通常放出の場合、敷地境界での全身線量制限値は10CFR 50のAppendix I⁸⁾のガイドラインの精神から、年間5mremとすべきであろう。

1.4 設計基準

燃料給排システムならびにその格納室の設計ガイダンスを与えるために次の基本設計基準を設定する。

1) 相当量のトリチウムを含むシステムは総て密封し、これ等のエンクロージャーの雰囲気は、外圧に対しわずかに負圧に保ち、トリチウムを除去する様に設計された精製システムで処理される。

2) トリチウム封入システムは3次迄考える。すなわち、

① 一次封入システム；燃料給排システム機器ならびに配管類は密封構造とし、必要に応じて二重閉じ込め方式を採る。

② 二次封入システム；主要トリチウム機器類はすべてグローブボックスに類似した大型の密閉ボックス中に収納する。

③ 三次封入システム；全ての二次封入システムは密封構造の格納室内に収納する。

3) これ等封入システムは地震、水害、風害、ミサイル等外的原因によっても環境基準以上のトリチウムの環境放出を避ける。

4) 格納室は総て雰囲気精製システムを有し、このシステムは所定時間内に、最大想定事故の

際には敷地境界線量基準 1rem に合格し、また平常メンテナンス条件の空气中濃度基準、短期メンテナンス $5 \times 10^{-5} \mu\text{Ci (T)}/\text{cc}$ 及び長期メンテナンス基準 $5 \times 10^{-7} \mu\text{Ci (T)}/\text{cc}$ に合格するような能率でトリチウムを除去する。

5) 格納室はコンクリート造りの内張りにステンレス鋼製内張りを施し、格納室内へのトリチウム漏洩事故に対して、壁面吸着量を減らし、除染作業を容易にする。室内圧は大気圧より減圧とし、出入口は二重エアロック方式を用いる。短期メンテナンス時の出入りはエアラインスーツの着用と防護マスクの着用によって行うことが出来る。

6) モニターは、特にトリチウムリークの可能性の高い所に重点を置き、封入構造の要所に設置する。封入構造からの放出個所はモニターしなければならない。(漏洩の可能性のある場所のモニターは従事者の防護を助け、事故の拡大を防ぐ。放出個所のモニターは密封、精製システムの状況を評価し、放出の環境への影響を見定める助けとなる。)

参考文献

- 1) 原安協、原子力発電所の確率論的安全評価について、原安協報告-23 (1970)
- 2) The Safety of Nuclear Power Reactors WASH-1250, (1973)
- 3) J.S. Watson, et al., Scoping Studies of Tritium Handling in a Tokamak Experimental Reactor ORNL-TM-5080
- 4) International Commission on Radiological Protection. Pub. 2 (1959), Pub. 9 (1965), Pub. 39 (1971)
- 5) National Council on Radiation Protection (1959)
- 6) Code of Federal Regulation, Title 10, (Mar. 4, 1974)
- 7) 放射線障害防止法 科学技術庁告示第22号 (S 35年)
- 8) USAEC Regulations 10 CFR 50 App. I (1971)

2. 炉心燃料給排系の概要

本報告は、実験炉炉心燃料給排系の安全性解析に係るものであり、その実験炉（JXFR）は、原研を中心に計画が進められている熱出力100MWのもの¹⁾である。また、本安全性解析の対象となる炉心燃料給排系設計仕様は先の報告²⁾の通りであるが、ここに安全性解析の基本条件として、その概要を述べる。

2.1 基本機能

(1) システムの構成

核融合実験炉における燃料給排系の主な役割としては、次の4つが大きなものである。

- ① 炉心の燃料及び不純物の排気
- ② 排気した燃料をリサイクルする為の精製（不純物の除去）
- ③ Hの除去及びインジェクター供給の為の同位体分離
- ④ 炉心への燃料注入

①の役割を果すものが真空排気系であり、その主な機能は実験炉運転に先だって炉心内を 10^{-8} Torr以上の高真空に至らしめる事及び炉運転中に定期的な排気を行う事である。真空排気系として核融合反応生成物及び不純物だけを選択的に排気できれば非常に好都合であるが、現在の所これは不可能である。本設計では交互運転を考慮した2台のクライオポンプを主ポンプとして、ターボ分子ポンプから成る補助排気系を各真空ポート毎に合計8系列設け、メカニカルプースタポンプ等の回収系を4真空ポート毎に2系列設けた。

②の役割は排気された燃料を再び炉心に注入する為に燃料流中の不純物を除去する事である。燃料流中に同伴される不純物の中でHe及びHは通常の方法では除去し難く、特にHは燃料物質の同位体であり特殊な方法で分離しなければならない。本設計では、多くの不純物（Hは除く）を一挙に除去できる事及び製品純度の高い事等からPd-合金膜透過法による燃料精製系を採用した。これは24本のPd-合金管を有する分離器12台を直列に結合し、各分離器には2次側真空用（精製燃料回収用）ポンプを備えたものである。

③の役割は燃料物質の同位体である不純物Hの分離及び中性粒子入射加熱装置への供給燃料の分離を行う事である。現在、中性粒子入射加熱は重水素による方法が第1案であり、ここでは燃料流中から不純物H及び中性粒子入射装置用Dを抽出する同位体分離系を設定した。本設計の同位体分離系は、H分離用の第1カスケード及びD分離用の第2カスケードから成り、第1カスケードは必要に応じて運転可能な結合とした。第1カスケードは膜面積 $2.54 \times 10^3 \text{ cm}^2$ の分離器47段、第2カスケードは膜面積 $2.16 \times 10^4 \text{ cm}^2$ の分離器46段から構成される。

④に関して、現在の実験炉（JXFR）の設計ではプラズマへの燃料補給はコールドガスブランケット及び中性重水素粒子入射により行われる。従って、燃料給排系の燃料注入装置としてはコールドガスブランケットへガス状燃料を適当な圧力・流量で補給するバルブ及び配管等からなる

注入系、及び注入燃料のD/T比を適当に調整する燃料ガス調整系で構成される。この装置特有の開発課題は特になく考えられ、詳細な検討は今後譲るものとする。

その他実験炉(JXFR)炉心燃料給排系の構成要素として、(イ)中性粒子入射加熱装置、(ロ)燃料精製系及び同位体分離系からの廃ガスを処理、処分するシステム、(ハ)燃料の一時貯蔵システム、さらに(ニ)格納容器のカバーガスシステム及び格納室の換気システム等がある。(イ)についてはここでは触れないこととし、(ハ)及び(ニ)については別項で述べる。

本設計で採用した炉心燃料給排系の主要コンポーネント(真空排気系、燃料精製系、及び同位体分離系)の主要目をTable 2.1.1に示す。

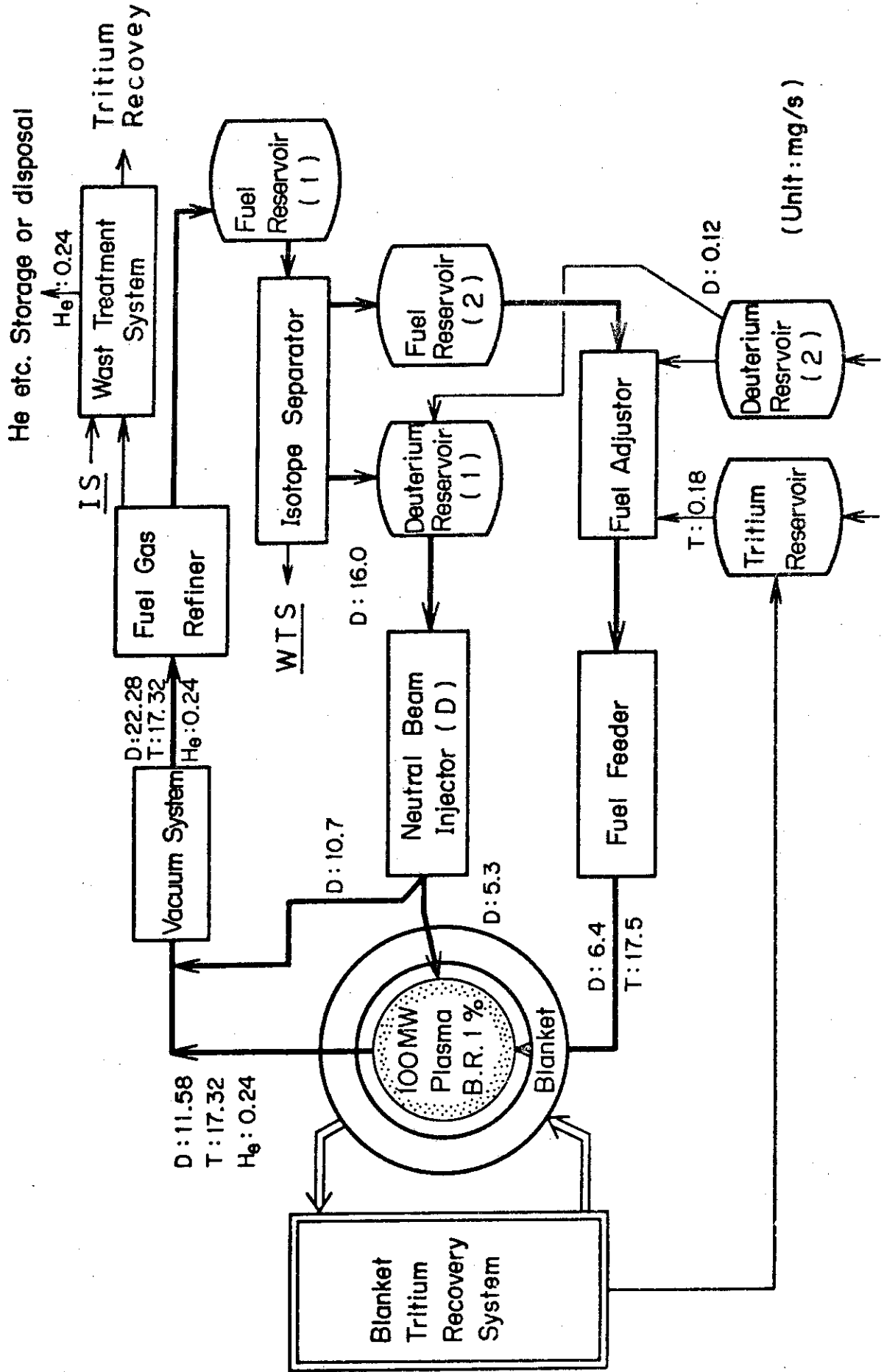
(2) システム作動原理

実験炉(JXFR)の燃料給排系フローシートをFig. 2.1.1に示す。これは、中性粒子入射加熱を重水素のみで行う設計に対するものであり、同位体分離系はHの分離を行う第1カスケードとDを抽出する第2カスケードから成る。現在の設計ではこれが第1案であり、これに沿ってシステムの原理を概説する。

燃料給排系を流れる物質は、燃料である水素同位体(T, D)と主な核融合反応生成物のHe及びH、さらに酸素、窒素、炭化水素等の不純物であるが、ここでは不純物としてはHeだけを考慮してフローシートに示した。図に示されている燃料物質及びHeの量は前報告¹⁾における解析に基づいて設定された量であるが、中性粒子入射装置からの重水素の炉心への注入量は入射エネルギーを最大の50 MWとし、粒子のエネルギーを200 keVとして入射粒子数を出し、その2倍量の粒子が真空排気系へバイパスするとした。これらの流量は、プラズマ条件としては、定常運転時の最大量と考えられる。

定常運転時には炉心部と中性粒子入射装置から水素同位体燃料物質(D₂, T₂, DT等)及びHe等の不純物が真空排気系によって排気される。真空排気系から排気された燃料流は燃料精製系に入り、水素同位体以外の不純物が除去され、燃料貯槽(1)に入る。一方、燃料精製系からの廃ガス(不純物、水素化合物の形等でPd-合金膜を透過しなかった燃料物質)は廃ガス処理系およびトリチウム回収系に送られ、燃料ガスとして再生されたものは燃料精製系へ加えられる。燃料貯槽(1)から同位体分離系に入り、ここで中性粒子入射用のDが分離され減重水素貯槽(1)へ送られる。同位体分離系は不純物Hを分離するシステムと中性粒子入射用Dを分離するシステムとから構成されており、前者で分離されたH中にはTが含まれているので必要に応じてトリチウム回収処理または管理貯蔵する。同位体分離系で、Dを抽出されTの濃縮されたD-T混合燃料は燃料貯槽(2)に入る。プラズマへの燃料注入は燃料注入系により行われるが、注入の前に燃料調整系で燃料のD/T混合比が適正になるように混合、調整される。燃料調整系への燃料供給源は燃料貯槽(2)、トリチウム貯槽、及び重水素貯槽(2)であり、ここからガスを導入して調整する。トリチウム貯槽には1次冷却材中から回収されたトリチウムが補給され、重水素貯槽(2)には消費された分に見合うだけの重水素が外部より供給される。

炉心燃料給排系における主要コンポーネントの基本機能をまとめてTable 2.1.2~2.1.6に示す。



(Unit: mg/s)

Fig. 2.1.1.1 Fuel Circulating System Flow Diagram

Table 2.1.2 炉心燃料給排系機能シート(1)主真空排気系

目的	炉運転準備としての初期排気および炉運転中の定常的な排気
基本機能	1) 初期排気 ① 圧力：大気圧→ 1×10^{-8} Torr ② 排気ガス種：空気（又は不活性バージガス）+ トリチウム ③ 真空の質：オイルフリー 2) 定常的排気 ① プラズマ燃焼時に 10^{-4} Torr 近傍の圧力維持 ② 排気ガス種：D, T 燃料と不純物 He, H その他（不純物のみ排気がベスト） ③ 排気ガス量：D；22, 28 T；17, 32 He；0.24 (mg/s) ④ 排気燃料の連続的な回数
機条件	1) クライオポンプ容器を含めて300~400℃のベークを行う。 2) 排気系連結ポート：8個 3) 運転温度：1000K（炉心近傍）→300K（ゲートバルブ付近） 4) 放出ガス量： 1×10^{-12} Torr・l/s・cm ² × 15,000 m ²
使用条件	1) 清浄な真空を得る。 2) 設計寿命：~10年 3) 磁場に対する考慮 4) 炉運転周期：420秒 5) 回収燃料中に真空排気系に寄因する不純物が混入しない。
制条件	1) Tインベントリーを小さくする。 2) 炉心部からの中性子が充分遮蔽されること。 3) T漏洩量が許容値以内 4) 環境汚染の問題に対し、精製・廃棄手段が講じられる。 5) 構造・配置・保守（補修）・適用法規に対する考慮が必要。

Table 2.1.3. 炉心燃料給排系機能シート(2)燃料精製系

目的	燃料ガス流中から不純物を除去
基本機能	1) 除去すべき不純物：核融合反応生成物 He (その他, 不純物として燃料流中に混入する可能性のあるもの; 主冷却系からのリーク (He), 第1壁からの脱ガス (炭化水素 N ₂ , O ₂ 等), 排気系に起因するもの) 2) 処理ガス種及び量 D : 22.28 mg/s T : 17.32 mg/s He : 0.24 mg/s
機能条件	1) ガス圧力：入口～1 kg/cm ² , 出口～1 kg/cm ² 2) ガス温度：入口～20℃, 出口～20℃ 3) プロダクト中不純物濃度：H 以外～0 4) 廃ガス中 T 濃度：できるだけ低くする 5) 連続処理 6) T インベントリをできるだけ小さくする。
使用条件	1) T 透過, 漏洩量が小さい 2) 不純物混入がない 3) 信頼度, 安全度が高い
制約条件	1) T 透過・漏洩量の許容値内 2) 環境汚染に対し, 精製・廃棄手段が講じられる。 3) 構造・配置・保守 (補修), 適用法規に対する考慮が必要。

Table 2.1.4 炉心燃料給排系機能シート(3)同位体分離系

<p>目的</p>	<p>不純物Hの除去とNB1供給Dの抽出</p> <p>1) Hの除去: H濃度1~10%に対して必要に応じて運転又は常時低濃度を維持</p> <p>① 除去率: ~100%</p> <p>② 廃棄T濃度: 可能な限り低くおさえる。</p> <p>2) Dの抽出: NB1用に連続的にD: 16.0 mg/s を抽出</p> <div style="text-align: center;"> </div>
<p>機能条件</p>	<p>1) 入口条件: ガス圧~1 kg/cm², 温度~20℃</p> <p>2) 出口条件: ガス圧~1 kg/cm², 温度~20℃</p> <p>3) NBI 用D中T濃度: ~1%</p> <p>4) Tインベントリをできるだけ小さくする。</p>
<p>使用条件</p>	<p>1) T透過, 漏洩量小</p> <p>2) 不純物混入がない</p> <p>3) 信頼性・安全度高い</p>
<p>制約条件</p>	<p>1) T透過, 漏洩量の許容値内</p> <p>2) 環境汚染に対し, 精製・廃棄手段が講じられる。</p> <p>3) 構造・配置・保守(補修)・適用法規に対する考慮が必要。</p>

Table 2.1.5 炉心燃料給排系機能シート(4)燃料ガス貯槽

目的	燃料ガスの一時貯蔵																														
基本機能	1) 水素同位体の一定量を安全に、オンライン中で保管 2) 必要時に必要量を正確に取り出せること。 3) 貯蔵ガス種及びび量（最低量） ① 燃料ガス貯槽(1); 同位体分離系インベントリと同程度のT (T: 50g, D: 65g) ② 燃料ガス貯槽(2); (1)と合わせて全系統流量の1時間分 (T: 15g, D: 5.5g) 4) 貯蔵量のモニター付																														
機能条件	<table border="1" data-bbox="657 587 938 1737"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th rowspan="2">圧力 (kg/cm²)</th> <th rowspan="2">温度 (°C)</th> <th colspan="2">流量 (mg/s)</th> </tr> <tr> <th>D</th> <th>T</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">燃料ガス貯槽(1)</td> <td>入口</td> <td>~1</td> <td>2.228+α</td> <td>17.32+α</td> </tr> <tr> <td>出口</td> <td>"</td> <td>"</td> <td>"</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">燃料ガス貯槽(2)</td> <td>入口</td> <td>~1</td> <td>6.28</td> <td>17.32</td> </tr> <tr> <td>出口</td> <td>"</td> <td>"</td> <td>"</td> </tr> </tbody> </table>							圧力 (kg/cm ²)	温度 (°C)	流量 (mg/s)		D	T	燃料ガス貯槽(1)	入口	~1	2.228+α	17.32+α	出口	"	"	"	燃料ガス貯槽(2)	入口	~1	6.28	17.32	出口	"	"	"
	圧力 (kg/cm ²)	温度 (°C)	流量 (mg/s)																												
			D	T																											
燃料ガス貯槽(1)	入口	~1	2.228+α	17.32+α																											
	出口	"	"	"																											
燃料ガス貯槽(2)	入口	~1	6.28	17.32																											
	出口	"	"	"																											
使用条件	1) T透過, 漏洩量小 2) 不純物の混入がない 3) 信頼性, 安全性が高い																														
制約条件	1) T透過, 漏洩量が許容値内 2) 環境汚染の問題に対し, 精製・廃棄手段が講じられる。 3) 構造・配置・保守(補修), 適用法規に対する考慮が必要。																														

Table 2.1.6 炉心燃料給排系機能シート(5)プロセス廃ガス処理系

目的	<p>燃料精製系および同位体分離系からの廃ガスを処理，若しくは貯蔵する。</p> <p>1) 燃料精製系からの廃ガス処理；除去した不純物に同伴又は含有してくるトリチウムの処理し回収するか放出可能になるまで貯蔵する。</p> <p>① 処理ガス</p> <p>He : 0.24 mg/s + α (冷却配管からのリーク)</p> <p>$\alpha \sim 50 \text{ g/day}$</p> <p>T : ガス (T₂, DT等) は全て T₂ として 6.4 cc (STP)/hr</p> <p>その他 (Ar, N₂, O₂, 炭化水素) : 精製系への Feed の $\sim 5\%$ とする。その内，炭化水素 (CH₄ 型を仮定) が 1% を占めるとする。</p> <p>② 処理条件</p> <p>T は全てを回収するものとする。</p> <p>2) 同位体分離系からの廃ガス処理；除去した H 中に含まれる T に対する処理，処分</p> <p>① 処理ガス； H₂； HD； HT；</p> <p>第 1 カスケードからの Feed として 0.4 g - atom/hr</p> <p>D : 0.0004 atomic % } 設計条件としては DT 1% 含まれるとするとする。 T : ~ 0</p> <p>② 処理条件</p> <p>T は全て回収する。</p>
機能条件	<p>1) T インベントリをできるだけ小さくする。</p>
使用条件	<p>1) T 透過・漏洩量小</p> <p>2) 信頼性・安全性高</p>
制約条件	<p>1) T 透過・漏洩量の許容値内</p> <p>2) 環境汚染に対し，精製・廃棄手段が講じられる。</p> <p>3) 構造・配置・保守（補修），法規等に対する考慮が必要。</p>

2.2 主真空排気系

実験炉炉心燃料給排系において、真空排気系の主要な役割は定常運転時にプラズマ内不純物を除去するためにガスブランケットから定常的に炉心内を排気することである。ここでは、この定常的排気の為の真空排気システムおよび主ポンプを記す。

(1) 排気系統

本真空排気系の系統図を Fig. 2.2.1 に示す。主ポンプはクライオポンプであり、排気ガスの蓄積量を制限するためにクライオ面を周期的に再生する必要があるので、本設計では8系列の排気系統毎に2台のクライオポンプを設置し、夫々をゲート弁によって締切り・隔離のできる構造とする。排気系としては、クライオポンプ2台を交互に使用することにより、連続的な運転ができるようになる。

クライオポンプの作動圧力を得るため、ならびに初期排気用の補助排気系としては、ダイナミカルなポンプであり、且つオイルフリー対策上も優れているものとして、ターボ分子ポンプを用いる。ターボ分子ポンプは2段直列に設置することとし、水素等に対する圧縮比を大きくし、排気能力を高めるようにする。

補助排気系の後段には、ターボ分子ポンプの作動圧力を得るための粗引系を設ける。これは大気圧より $10^{-1} \sim 10^{-2}$ Torr 程度まで排気するロータリーポンプとする。実験炉の運転開始に際し、初期排気はこれら補助排気系及び粗引系で行う。

クライオポンプの昇温、再生過程で、クライオ面より再放出されたガスを回収排気するために、補助排気・粗引系と並列に回収系を設ける。回収系としては、オイル汚染の少ないメカニカルブースターポンプとダイヤフラムポンプによる系統を設定する。

排気系統全体として、適宜コールドトラップ、バルブ等を設け、オイルフリー対策、メンテナンス・補修の便に供する。又、計測・モニター用として計測器を各部に適宜とり付ける必要がある。バルブ、フランジ等のガスケットは、高真空領域では特にメタルガスケットを用いることとし、又、真空配管には原則として非磁性材のSUS 304を用いるものとする。

(2) 排気速度

実験炉の定常運転時に排気しなければならない排気ガス種及びその流量は Fig. 2.1.1 の通りとし、ガスの温度は 300°K とする。排気系列1系列当りの排気流量、引口での運転圧力及び有効排気速度を Table 2.2.1 に示す。

Table 2.2.1 Conditions for main vacuum system
(per one vacuum port)

	Deuterium	Tritium	Helium
Gas load (Torr·ℓ/s)	12.92	6.71	0.14
Pressure at the entrance of vacuum way (Torr)	1×10^{-4}	1×10^{-4}	5×10^{-6}
Effective pumping speed (ℓ/s)	12.92×10^4	6.71×10^4	2.80×10^4

主ポンプは、重水素、トリチウム、ヘリウムに対して引口で Table 2.2.1 のような排気速度を有するものにする必要がある。ポンプの排気速度を S とすると、有効排気速度 S_o とその経路間のコンダクタンス C との間には次の関係が成立する。

$$\frac{1}{S_o} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S} \quad (2.2.1)$$

今回の設計では、 S_o に対する C と S の寄与が等しくなることを目標にし、排ガス種を D と T の混合ガス（分子量 5）として有効排気速度 S_o は $1.96 \times 10^5 \text{ l/s}$ 、コンダクタンス C は $3.93 \times 10^5 \text{ l/s}$ を目標とした。コンダクタンス C は、①引口部分、②容器開口部分、③ダクト部分、④ゲート弁部分の合成と考え、夫々の寸法・形状は① $1.5 \text{ m}^D \times 1.0 \text{ m}^L$ の円形導管、② $1.3 \text{ m}^W \times 3.5 \text{ m}^H \times 3.6 \text{ m}^L$ 、③ $2.5 \text{ m}^W \times 1.6 \text{ m}^H \times 0.7 \text{ m}^L$ と $5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}^H \times 2 \text{ m}^L$ 、④ 1.9 m^D のオリフィスとした。結果的に合成コンダクタンスは $C = 3.13 \times 10^5 \text{ l/s}$ となり目標値には達しないが、この値を設計値とする。このコンダクタンスの D_2 、 T_2 及び He ガスに対する換算値並びに (2.2.1) 式より求められるクライオポンプの排気速度を Table 2.2.2 に示す。

Table 2.2.2 Conductance (C) of all pumping ducts and pumping speed (S) of each cryopump

	Deuterium	Tritium	Helium
C (l/s)	3.49×10^5	2.85×10^5	3.50×10^5
S (l/s)	2.05×10^5	8.78×10^4	3.04×10^4

初期排気運転に必要な補助排気系は、炉心内の圧力として 1×10^{-8} Torr の超高真空が達成できるものとした。真空に面する総表面積を $15,000 \text{ m}^2$ とし、材料は全て SUS 316 と考える。又、壁を通じてのガス透過や冷却配管からのリークはないものとする。SUS 316 表面からの放出ガス総量を $Q = 1.5 \times 10^{-4} \text{ Torr} \cdot \text{l/s}$ とすると有効排気速度 S_{eff} は、 2.083 l/s が必要である。クライオポンプからターボ分子ポンプまでのコンダクタンスとして $C_5 = 1.1 \times 10^4 \text{ l/s}$ が得られ、(2.2.1) 式の S_o に S_{eff} 、C に C_5 を代入すると、ターボ分子ポンプ単体の排気速度が得られる。即ち、補助排気系として $4,100 \text{ l/s}$ のターボ分子ポンプが必要である。

粗引系はロータリーポンプによって大気圧から $10^{-1} \sim 10^{-2}$ Torr まで排気できるものとした。排気に要する時間を 8 時間とし、ポンプの排気速度 S を次式より求めた。

$$S = \frac{V}{\Delta t} \cdot \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (2.2.2)$$

即ち、容積 V を $2,000 \text{ m}^3$ とすると $S \sim 800 \text{ l/s}$ が得られる。

回収系は 2 時間周期のクライオポンプ運転により、ポンプ内に蓄積した排気ガスを 2,000 秒で排気回収するものとした。再生時のクライオポンプ内初期分圧は、D : 9.4 Torr, T : 5.0 Torr, He : 0.1 Torr であり、これを 1/100 の圧力にすることを回収系の設計条件とすると、メカニカ

ルプースターポンプに必要な排気速度は(2.2.2)式より $S=23\text{l/s}$ となる。

(3) 主ポンプ(クライオポンプ)の概要

クライオ面の様に極低温下で使用される構造材料の選択に際し、次の諸特性を検討する必要がある。

- ① 低温における強度・靱性に優れていること。
- ② クライオ面の冷却・加温が容易なように、熱容量が小さいこと。
- ③ クライオ面の表面温度が均一となるように、熱伝導率が良いこと。

又、一般に核融合超高真空機器としての要請より、

- ④ 表面の放出ガス量が小さいこと。
- ⑤ 非磁性材料であること。

その他、⑥製作性に優れていること、も重要な要件である。これらの条件を満足できる材料として、オーステナイト・ステンレス鋼、銅合金、アルミニウム合金等が考えられるが、クライオ面及びシュラウド材料としてはアルミニウム合金が適当と考えられる。クライオポンプ容器及びクライオ面等の支持具又は吊り金具等の材料としては、強度、放出ガス、熱伝導等の観点からオーステナイト・ステンレス鋼を用いるものとする。

重水素に対するクライオ面の温度と排気速度の関係を次式より求めた。

$$S = A \cdot S_0 \cdot \left(C_g - C_s \cdot \frac{P_s}{P_g} \cdot \sqrt{\frac{T_g}{T_s}} \right) \quad (2.2.3)$$

ここで、 A はクライオ面の面積、 S_0 は理想排気速度、 C_g はクライオ面に衝突する気体分子の凝縮係数、 C_s は凝縮蒸気の蒸発の確率、 P_s は温度 T_s での凝縮蒸気の蒸気圧、 P_g は気体の圧力、 T_g は気体の温度、 T_s はクライオ面の温度である。気体温度 $T_g = 300^\circ\text{K}$ とし、クライオポンプの通常作動圧 $\sim 10^{-4}$ Torr 及び炉運転休止中の $\sim 10^{-6}$ Torr までの排気を考慮してクライオ面の温度を 4.5°K とした。

クライオ面の必要面積は、シェプロン・バップルの通過確立を25%とし、 D_2 、 T_2 及びHeに対して夫々のクライオ面の有効排気速度を求め、(3)で求めた必要な排気速度からクライオ面の必要面積を算出した。さらに、クライオ面の必要総面積として、これらを合計して、 $A \sim 5.1 \times 10^4 \text{cm}^2$ を得た。

クライオポンプの構造をFig. 2.2.2に示す。クライオポンプ容器は矩形箱形とし、内部断面がコ字形になる様クライオ面を設置する。クライオ面はフィン付きAl合金管でHe吸着パネルをとり囲むように形成し、上下のヘッダーよりL-Heを配分する。クライオ面とポンプ容器間にフィン付きAl合金シュラウド、クライオ面の内側に同様のシェプロンバップルを設け、これらを80K Heガスで冷却する。クライオ面の寸法は、前面を $2,000\text{mm} \times 1,900\text{mm}$ 、上下面を $500\text{mm} \times 1,900\text{mm}$ とした。又、クライオポンプと炉本体との隔離用として $1,900\text{mm}$ φの空気作動往復動型ゲート弁を設置した。

なお、安全性解析を行うに際し、主真空排気系およびクライオポンプ用ヘリウム冷凍系について、より詳細な検討ならびに設計を実施した。その結果を付録に示す。

CYR: Cryosorption Pump
 TMP: Turbo Molecular Pump
 RP: Rotary Pump
 MBP: Mechanical Booster Pump
 DP: Diaphragm Pump
 CT: Cold Trap
 ST: Storage Tank

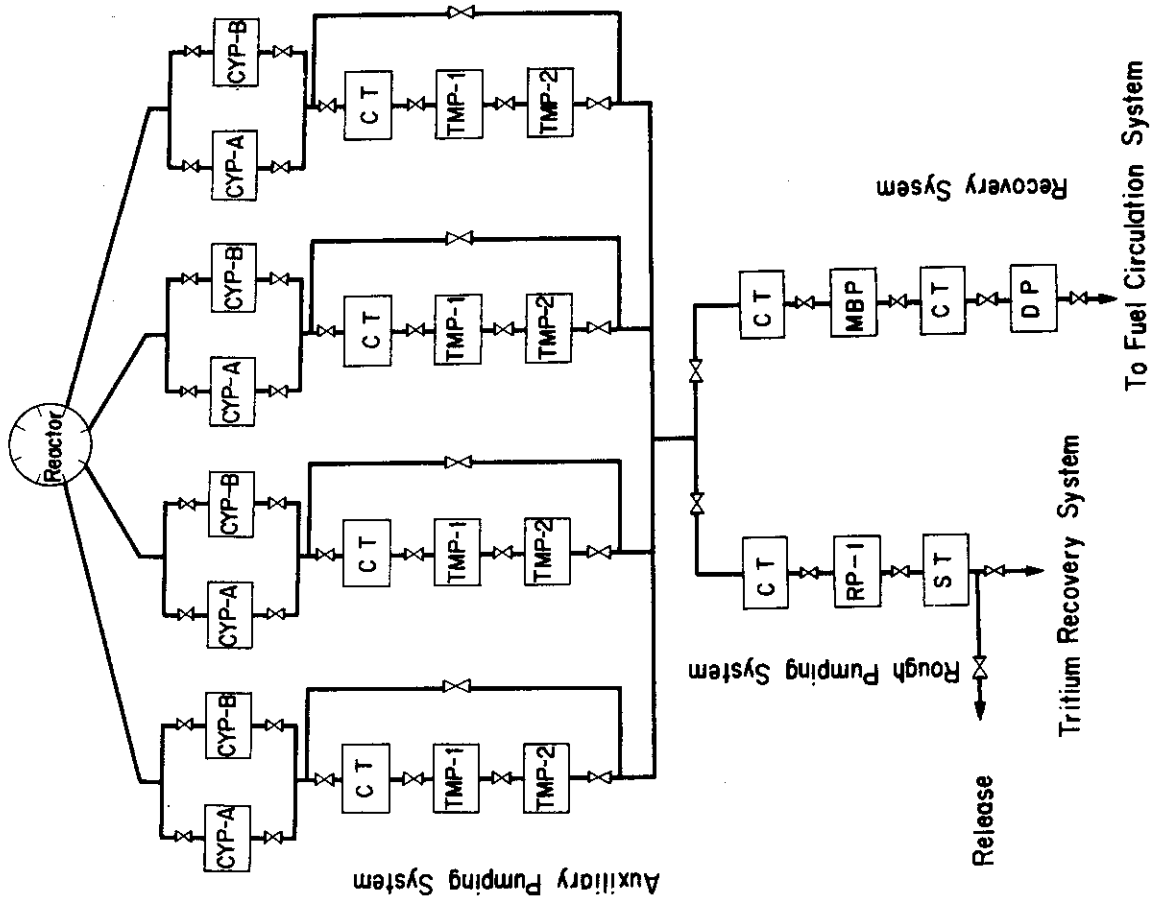


Fig. 2.2.1 Main Vacuum System

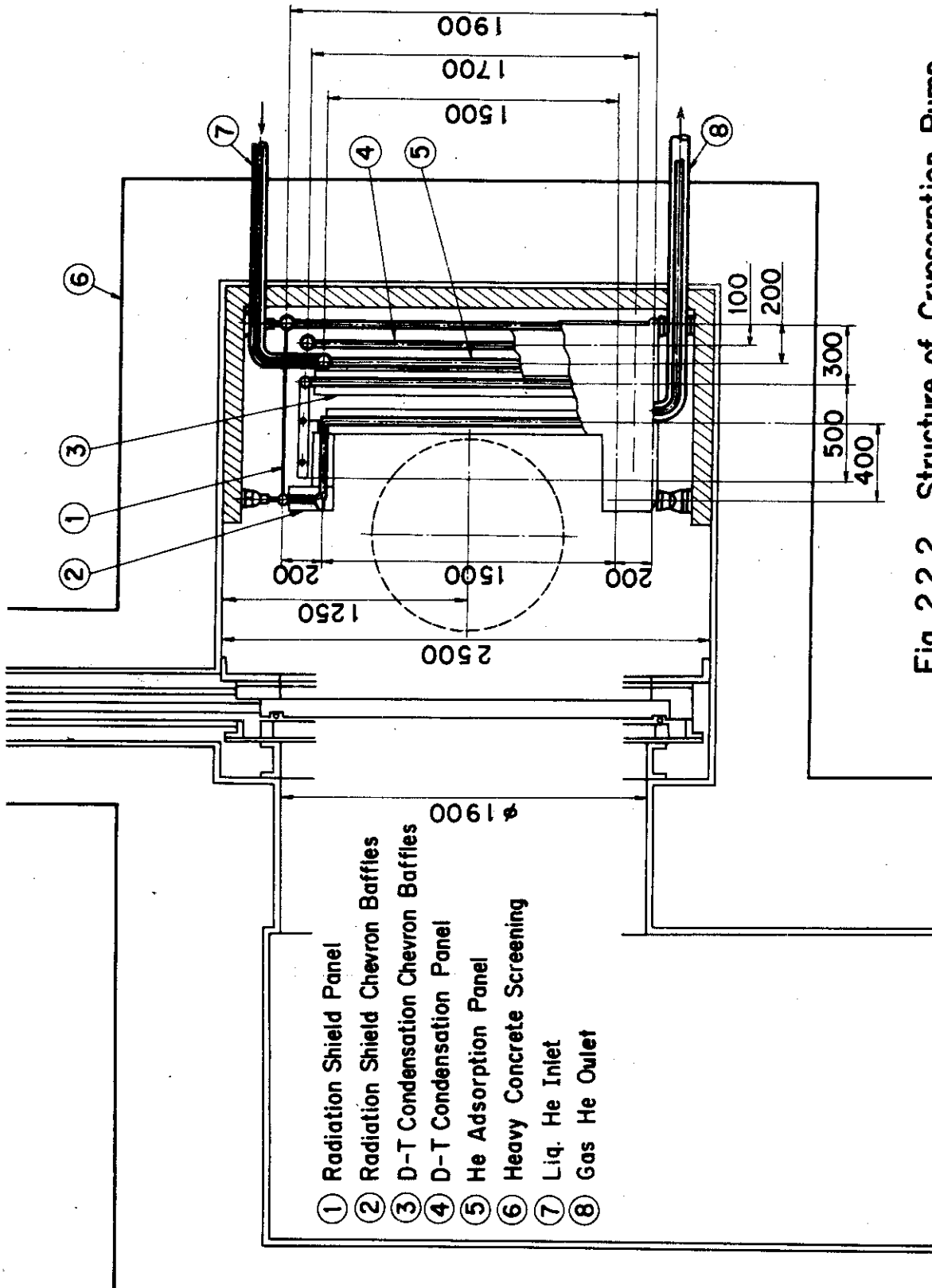


Fig. 2.2.2 Structure of Cryosorption Pump

2.3 燃料精製系

燃料精製系は、真空排気系から排出された燃料ガスを再び炉心に注入するために燃料流中の不純物を除去するものであるが、不純物の中でHは同位体分離系で除去するものとする。ここではPd-合金膜による水素同位体精製原理等を概説し、システム設計及び分離器本体の概略設計について述べる。

(1) Pd-合金膜による燃料ガス精製

Pd膜における水素透過について、現在一般に次の透過機構が受け入れられている。

- ① 1次側の水素分子がPd-膜に吸着する。
- ② 吸着した水素分子が水素原子に解離する。
- ③ 水素原子がイオン化し、プロトンと電子に分かれる。
- ④ プロトンがPd膜の1次側から2次側へ拡散する。
- ⑤ 2次側に到達したプロトンがPd膜面で電子と再結合して水素原子となる。
- ⑥ 水素原子は他の水素原子と結合して水素分子となる。
- ⑦ 水素分子がPd膜より脱離する。

この様にして拡散透過は進行するので、プロトンの状態(含、デューテロン、トリトン)となり得る水素のみがPd膜を透過して1次側から2次側に移動でき、この様な状態になり得ない他のガス(不純物)は一切Pd膜を透過しない。従って、Pd膜透過方式による精製水素ガスの純度はきわめて高いと予想される。

水素透過用の実用Pd合金(日特No.408575に基づく)の機械的性質について、実用的に充分焼鈍した場合の設計値としておよそ次の値が使用される³⁾。

高温(500℃)における

引張強度; 1,700~2,000 kg/cm²

降伏点; 680~800 kg/cm²

クリープ試験(450℃, 空气中, 10,000~15,000 hr)

応力 $\sigma = 5 \text{ kg/m}^2$ で伸び $3.4 \times 10^{-5} \%$ /hr

$\sigma = 20 \text{ kg/mm}^2$ で伸び $4.5 \times 10^{-4} \%$ /hr

これらの試験データから、実際の水素透過装置の常用応力を充分安全に低く設計・運転することは可能であり、従ってこの材料は高温(~420℃)条件下で長時間運転することに対して問題はないと考えられる。

膨張係数 α は常温から500℃まで測定されている³⁾。その結果、真空中や空気、Ar中では $\alpha = (1.07 \times 1.32) \times 10^{-5} / \text{℃}$ 程度で一定値を示すが、水素雰囲気中では全く異質の様態を示すことが明らかにされている。これはその取扱いに注意を要する所である。

(2) Pd-合金膜の燃料ガス処理量

Pd-合金膜を透過する燃料ガスの流量は実用的には2次側圧力を零として次の2つの式のいずれかで与えられる。

$$Q_1 = K_1 \cdot \sqrt{P_1 \cdot X_1} \quad (2.3.1)$$

$$Q_2 = K_2 \cdot P_1 \cdot X_1 \quad (2.3.2)$$

ここで、 $(P_1 \cdot X_1)$ は1次側水素の分圧
 K_1 は、文献⁴⁾から拡散係数 $D = 7.86 \times 10^{-3} e^{-3.73 \times 10^4 / RT}$ (cm^2/sec) を引用し、 $T = 420$ °C、膜厚 0.08mm として求めると $3.93 \text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min} \cdot (\text{kg}/\text{cm}^2)^{1/2}$ となる。又、 K_2 は膜厚 0.08mm で 420 °Cの実験値として $2.38 \text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min} \cdot (\text{kg}/\text{cm}^2)$ が得られている⁵⁾。
 この両式のいずれを用いるべきかは、現段階では断定できない。

(2.3.1) 及び (2.3.2) 式は水素(H)に対するものであり、 D 及び T に対するデータはほとんどない。拡散係数の同位体効果は、理論的には質量 m_a 、 m_b の同位元素の拡散係数を D_a 、 D_b とすると、 $D_a/D_b = (m_b/m_a)^{1/2}$ で表わせる。従って、ここでは (2.3.1) 及び (2.3.2) 式の K_1 、 K_2 に対し、 D については $1/2K$ 、 T については $1/3K$ を用いるものとした。これらから、1次側水素分圧に対する Pd-合金膜単位面積当りの透過流量を Fig. 2.3.1 に示す。

(3) システム設計

系統全圧 (1次側圧力 P_1) を $1 \text{kg}/\text{cm}^2$ 、2次側圧力を零とし、また必要膜面積として安全側の値を得るために燃料ガス全てがトリチウムとした場合の $K_2 = 6.14 \times 10^{-6} \text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot (\text{kg}/\text{cm}^2)$ を用いて、文献²⁾の Pd-合金管内水素残留率変化を与える式から24本の Pd-合金管 (1.6ϕ) 群 650cm で大略全ての燃料ガスが処理できると考えられる。一方、(2.3.1) 及び (2.3.2) 式においてトリチウムに対する K_1 及び K_2 を用い、燃料ガスの平均分子量 $M = 5$ とすると必要な膜面積は、前式で $5 \times 10^3 \text{cm}^2$ 、後式で $8.3 \times 10^3 \text{cm}^2$ となる。

Pd-合金膜透過法による燃料精製装置は分離器本体、2次側真空ポンプ、燃料ガス加圧及び輸送ポンプ、予熱器、冷却器等から構成される。燃料ガス精製系のフローシートを Fig. 2.3.2 に示す。真空排気系から排出された燃料ガスは分離器に入る前に予備加熱され、 420 °C に加熱されている Pd-合金管分離器に入る。分離器内の燃料ガスは2次側へとその差圧を推進力として透過し、燃料ガス中の水素同位体以外の不純物は Pd-合金膜を透過せずブリードとして排出される。全体として分離器は最小必要台数9台以上が直列に結合されている。最初の8台で日々 $\sim 5 \text{mg}/\text{s}$ の燃料ガスが処理され、最終段で残分を適当な運転条件で処理する。設計としては0.2程度の安全係数をとって12台の直列結合とし、不測の事故に対応できるようにバイパス系を備える。

(4) 分離器本体構造

現在高純度水素精製用として実用化されている Pd-合金膜は、直管、曲管、及び波板状のものであるが、ここでは直管式と曲管式の中間的なものを設計した。分離器の概略を Fig. 2.3.3 に示す。

分離器本体は3重管式であり、中心部の Pd-合金管内圧は $\sim 1 \text{kg}/\text{cm}^2$ 、外筒内は 1Torr 以下の真空、負圧管内は外圧に対して $-30 \sim -40 \text{mm H}_2\text{O}$ とする。Pd-合金管は、分離器外筒周囲のシースヒータにより 420 °C に保たれる。この外筒は高温になり外側へのトリチウム透過量が多いと考えられ、水冷却された負圧管内にこのトリチウムを封じ込める。この負圧管内はスイープガスとしてアルゴンガスを流し、透過してくるトリチウムガスをスイープガス精製系へ輸送

してトリチウムを回収する。この系統については安全設計の一貫として3章ならびに5章で検討を加える。高温部と低温部の熱膨張差による応力は、ベローズ又は波状円板構造で緩和する。又、Pd-合金管は、その熱応力を緩和するために、大ピッチのコイル状構造とした。燃料ガス供給口には、ガスを300℃程度に予備加熱するためのプレヒータを1次管内に導入し、ブリードガス出口には、ガスを10.0℃程度まで冷却する機構を設ける。構造材はトリチウム透過を低減する目的で厚肉のものを選んだ。

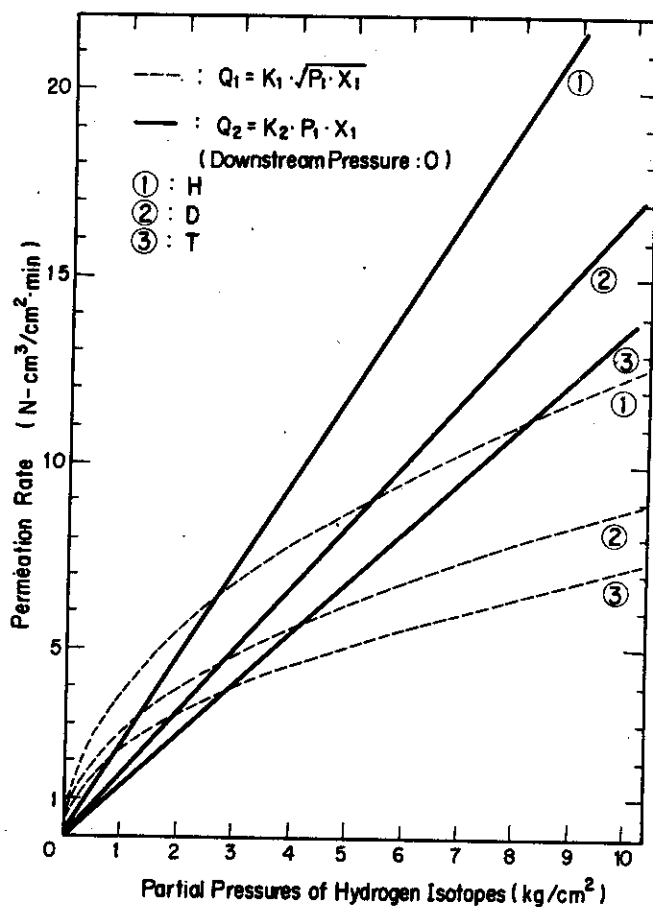


Fig. 2.3.1 Permeation Rate vs. Primary Pressure of Fuel

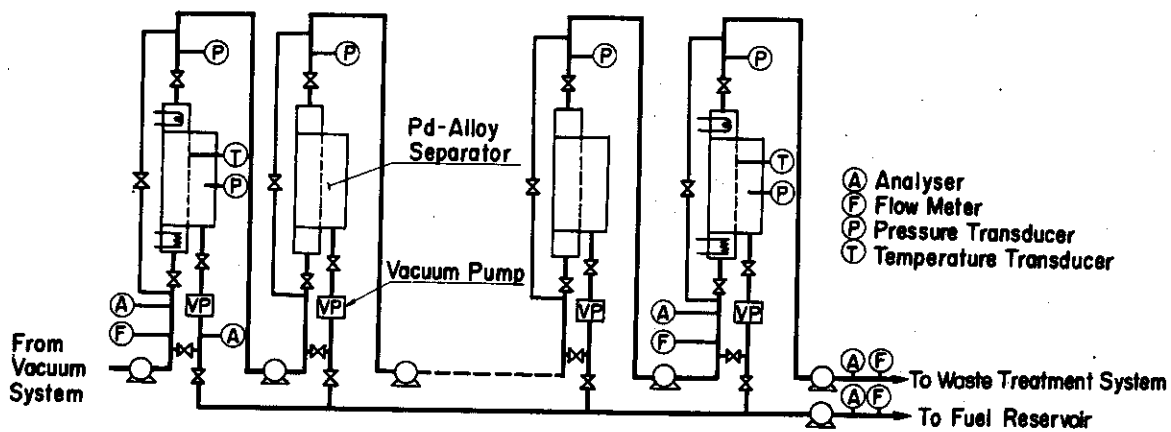


Fig. 2.3.2 Fuel Gas Refine System

2. 4 同位体分離系

同位体分離系は、燃料精製系でH以外の不純物を除去された燃料流中からHを除去し、中性粒子入射加熱装置への供給用Dを抽出するものである。ここでは、Pd-合金膜透過法による水素同位体分離の特徴、方形カスケードによる3成分同位体分離システム解析結果ならびに同位体分離器の設計概要を述べる。

(1) Pd-合金膜分離法の特徴

Pd-合金膜内の原子拡散を利用する水素同位体分離法は、その分離過程が原子状でおこなわれる点で、深冷蒸留法、熱拡散法およびガス拡散法等の分離法とは異なる。即ち、H、D及びTの3成分が比較的簡単なカスケード系で十分に相互分離でき、深冷蒸留法以上の分離条件が容易に達成できる。原子拡散法は深冷蒸留法に比べ次の利点がある。

- ① 基本的に3成分系の分離である。
- ② 蒸留塔2基に相当する2つの単位カスケードのみで分離システムが構成できる。
- ③ 同位体平衡器は不要である。
- ④ 燃料を液化する必要がない。
- ⑤ トリチウムインベントリが小さい。

また、Pd-合金膜透過法については(i)Pd-合金膜の透過係数が小さいので、十分な透過流量を得るために大きな差圧をとる必要がある、(ii)高温(～420℃)操作が必要なため、分離装置の構成材料を通してトリチウムが外部へ漏洩する可能性がある。等の問題があるが、これらは技術的に解決できるものであろう。さらに、今後のR&Dが燃料精製系と同種のものであるという利点も考慮して、今回の実験炉炉心燃料給排系のための同位体分離方式として原子拡散法(Pd-合金膜透過法)を採用した。

(2) システム解析結果

3成分系同位体分離方形カスケードシステム解析コード“TRIO”を開発し、これを使って同位体分離系のシステム解析を行った。このコードは次の2点を計算仮定としている。

- ① 分離係数 α_x 、 α_y はカスケード全体で一定値である。
- ② カスケード系外へのH、D、Tロスはなく、厳密に物質収支が成立する。

又、このコードの特徴は、次の通りである。

- ① 原料供給段は、原料ガスの成分比に最も近い段が選ばれる。
- ② カスケードの全透過流量 J_{es} が最小となるような設計パラメータが選ばれる。

各単位カスケードに対するインプット及びアウトプット項目をTable 2.4.1に示す。

下記の①～③の基本条件をもとに、供給流中のH濃度及び分離係数をパラメータとした解析を実施した。同位体分離系は2つの単位カスケードから構成され、第1カスケードでは供給流中のHを100%近く除去し、残るD-T混合物を第2カスケードの供給流として中性粒子入射装置用のDを濃縮する。

① 供給流組成

H; 1 at %前後

D; 40, 104 g - atom/hr

T ; 20.784 g-atom/hr

- ② H は 100% 近く除去する。H に伴う T は可能な限り少なくおさえる。
- ③ D は 99% 以上に濃縮する。

H 含有量として 0.5, 1 及び 2 at. % について, この変化がガスケードシステム構成に与える影響は比較的少ない。特に第 2 カスケードについては全く同じ分離カスケードであり, 第 1 カスケードの回収部について H 含有量が多くなると段数が増加し, 分離器当りの透過流量が多少大きくなる程度であった。

分離係数については, 一般的なカスケード理論として分離係数が大きくなると, 所定の分離をおこなうためのカスケード段数は少くなり, 同時に段当りの透過流量も少なくてよいことが知られている。本パラメータサーベイの結果では, 段数に関しては分離係数が大きくなるに従って所要段数は少なくなるが, 第 2 カスケードの透過流量に関しては逆の傾向となっている。

供給流中の H 濃度を 1 at. %, 分離係数を原子量の比の平方根とした解析結果を Table 2.4.2 に示す。インプットとして第 1 カスケードの廃棄 H 中の T 流量を 1×10^{-8} g-atom/hr とし, 第 2 カスケードの濃縮流 D : 28.584 g-atom/hr 中の T 流量を 1×10^{-2} g-atom/hr とした。Fig. 2.4.1 において, 燃料ガス貯槽(1)から F_1 なる流量で第 1 カスケードに供給された原料から, その中の H を 99.9% 以上含む P_1 なる製品が取り出され, H_2 , HD 貯蔵又はプロセス廃ガス処理工程に送られる。これに伴う T の濃度, 1×10^{-5} at. % 以下であって極めて小さい値である。この値をさらに小さくすることは段数 Ne_1 を増加することによりたやすく達成される。第 1 カスケードからの廃品 W_1 は主として原料中の D と T の混合ガスであって, 第 2 カスケードの原料 F_2 となる。第 2 カスケードの製品 P_2 は, D を 99% 以上含むガスであり, その比率は結果的に D : T \approx 1 : 2 となっている。この W_2 は燃料ガス貯槽(2)を経て, 燃料調整をうけたのち, 燃料注入装置へと送られる。

(3) 同位体分離装置の設計概要

同位体分離カスケードシステムを Fig. 2.4.1 に示す。図で上側が第 1 カスケードで濃縮部 39 段, 回収部 8 段からなり, 下側が第 2 カスケードで濃縮部 40 段, 回収部 6 段で構成される。主なシステムは, 水素同位体ガスが流れる主プロセス系統(太い実線), 冷却系統(細い実線), T 漏洩防止用負圧系及び廃ガス処理系統(細い一点鎖線), 及び分離器加熱用ヒータ, 圧縮機動力, 計装電気のための電力供給系統である。

同位体分離系への供給ガスは, f_1 の原料供給配管によって第 1 カスケードの No. 9 分離段からの未透過流(減損流)に加えられる。但し, 燃料流中の H 濃度が許容範囲内である場合には, 第 1 カスケードに原料ガスを供給せず, f_2 の原料供給配管によって直接第 2 カスケードの No. 7 分離段からの未透過流に加える。第 1 カスケード No. 47 分離段からの透過流(濃縮流)は大部分が H_2 ガスで微量の HD 等を含む。これは廃ガス処理装置へ送られる。No. 1 分離段からの未透過流は D_2 , DT, T_2 ガスが大部分でわずかの HT 等を含む。この 1 部は原料供給配管 f_3 によって第 2 カスケードに供給される。第 2 カスケード No. 46 分離段からの透過流は, わずかな HD, HT 等を含んだ D_2 ガスで, 重水貯槽へ送られる。また, No. 1 分離段からの未透過流は, D_2 , DT, T_2 ガスであり, 燃料ガス貯槽(2)に送られる。

同位体分離器の概念図を Fig. 2.4.2 に示す。これは第 2 カスケード用であるが, 第 1 カスケー

ド用分離器も、Pd-合金管の同心円状配置数が4番目までである以外は、ほとんど同じ構造である。設計条件としては、操作温度420℃、差圧 $\Delta P = 5 \text{ kg/cm}^2$ 、単位透過量 $11.9 \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ とした。Pd-合金管は $1.6 \text{ mm}\phi \times 1,000 \text{ mm}^L \times 0.08 \text{ mm}^t$ で1本当りの膜面積は 50.24 cm^2 である。分離器1台当りのPd-合金管本数は第1カスケードで51本、第2カスケードで431本である。分離器は縦型で、高さ $\sim 1.6 \text{ m}$ 、外径は第1カスケードで $14 \text{ cm}\phi$ 、第2カスケードで $17 \text{ cm}\phi$ である。差圧は高圧側を 6 kg/cm^2 、低圧側を 1 kg/cm^2 に設定することで得るものとする。

供給流は100℃以下で供給流管を通して導入され、減損流（未透過ガス420℃）との熱交換および分離器内筒でのソース・ヒーターによる加熱によって、向流管に到るときには420℃に昇温されている。Pd-合金管は外側が高圧で内側が低圧となっている。Pd-合金膜を透過したガスは濃縮流となって、冷却フィン筒を通過する際に冷却されて約100℃で圧縮機へと行く。また未透過流は、減損流管を通して分離器を去る。

分離器の操作温度は420℃と高いため、分離器内筒を通してトリチウムが漏出するので分離器外筒を設けて漏洩トリチウムを回収する。さらに分離器外筒は水冷することにより筒壁からの透過・漏洩を抑えると同時に、全体を負圧スweepガスジャケットで覆うことにより、その漏洩トリチウムをスweepガス精製系に導き回収する。従って、分離器本体は3重管型となっている。

参考文献

- 1) 原研, 炉設計研究室, JAERI-M 7300
- 2) 原研, 炉設計研究室, JAERI-M 7293
- 3) 山内, 齊藤, 日化協月報, 23, 1, 1970
- 4) 後藤, 工業レアメタル, 20, 1960
- 5) 西沢他, 昭和49年原子力学会要旨集 F, 16, 17

Table 2.4.1 Input and output in square cascade analysis

Input

Feeds :	F_x, F_y, F_z
Products :	P_y, P_z
Separation factor :	α_x, α_y

Output

Composition of feed :	x_F, y_F, z_F
Products and composition :	P, P_x, x_p, y_p, z_p
Wastes and composition :	$W, W_x, W_y, W_z, x_w, y_w, z_w$
Number of the stages :	N_e, N_s
Amount of flowing materials :	L_e, L_s
Cut :	θ_e, θ_s
Composition at each stage :	$x_i, x_i', x_i'', y_i, y_i'$ etc.
Total amount of permeation :	J_{es}

Table 2.4.2 Typical features of analytical results for isotope separation system

		1st cascade	2nd Cascade
Separation Factor			
	α_x	1.732	1.732
	α_y	1.225	1.225
Feed	F_x, x_F	0.420, 0.00686	0.097, 0.00159
	F_y, y_F	40.104, 0.65413	40.104, 0.65760
	F_z, z_F	20.784, 0.33901	20.748, 0.34081
	Total F	61.308	60.985
Product	P_x, x_P	0.32353, 0.99969	0.096, 0.00336
	P_y, y_P	0.00010, 0.00031	28.584, 0.99629
	P_z, z_P	0.0, 0.0	0.010, 0.00035
	Total P	0.32363	28.690
Waste	W_x, x_W	0.097, 0.00159	0.0, 0.00001
	W_y, y_W	40.104, 0.65760	11.520, 0.35672
	W_z, z_W	20.784, 0.34081	20.774, 0.64327
	Total W	60.985	32.294
Cut	θ_s	0.50050	0.50526
	θ_s	0.42079	0.49421
Amount of flowing materials ($L_e (=L_s - W)$)		161.98	1378.1
Reflux ratio (R_r) _e		499.50	47.035
(R_r) _s		2.6560	42.674
No. of stages	N_e	39	40
	N_s	8	6
	Total N_T	47	46
Total amount of permeation J_{es}		0.7613×10^4	6.3394×10^4

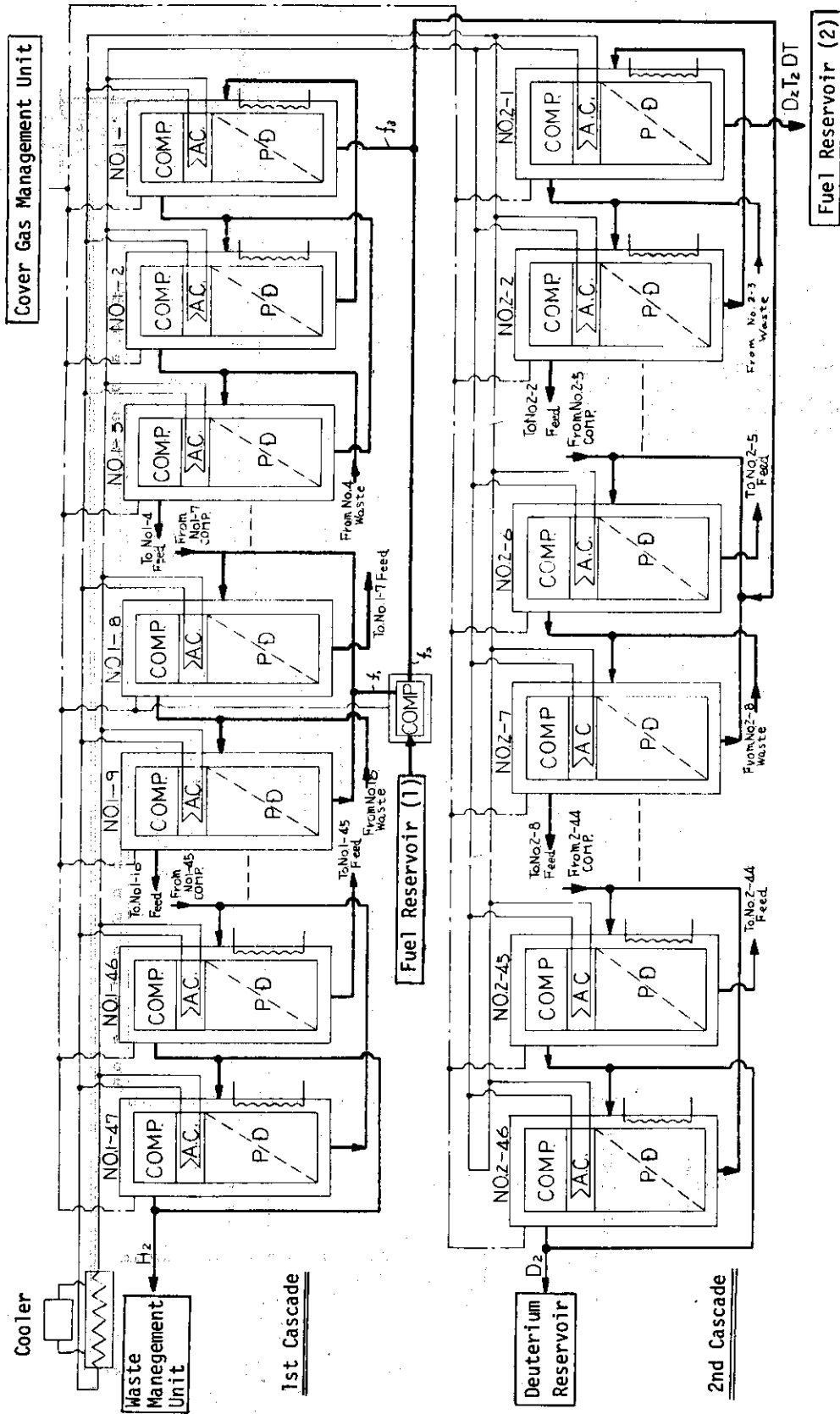


Fig. 2.4.1 Isotope Separation System

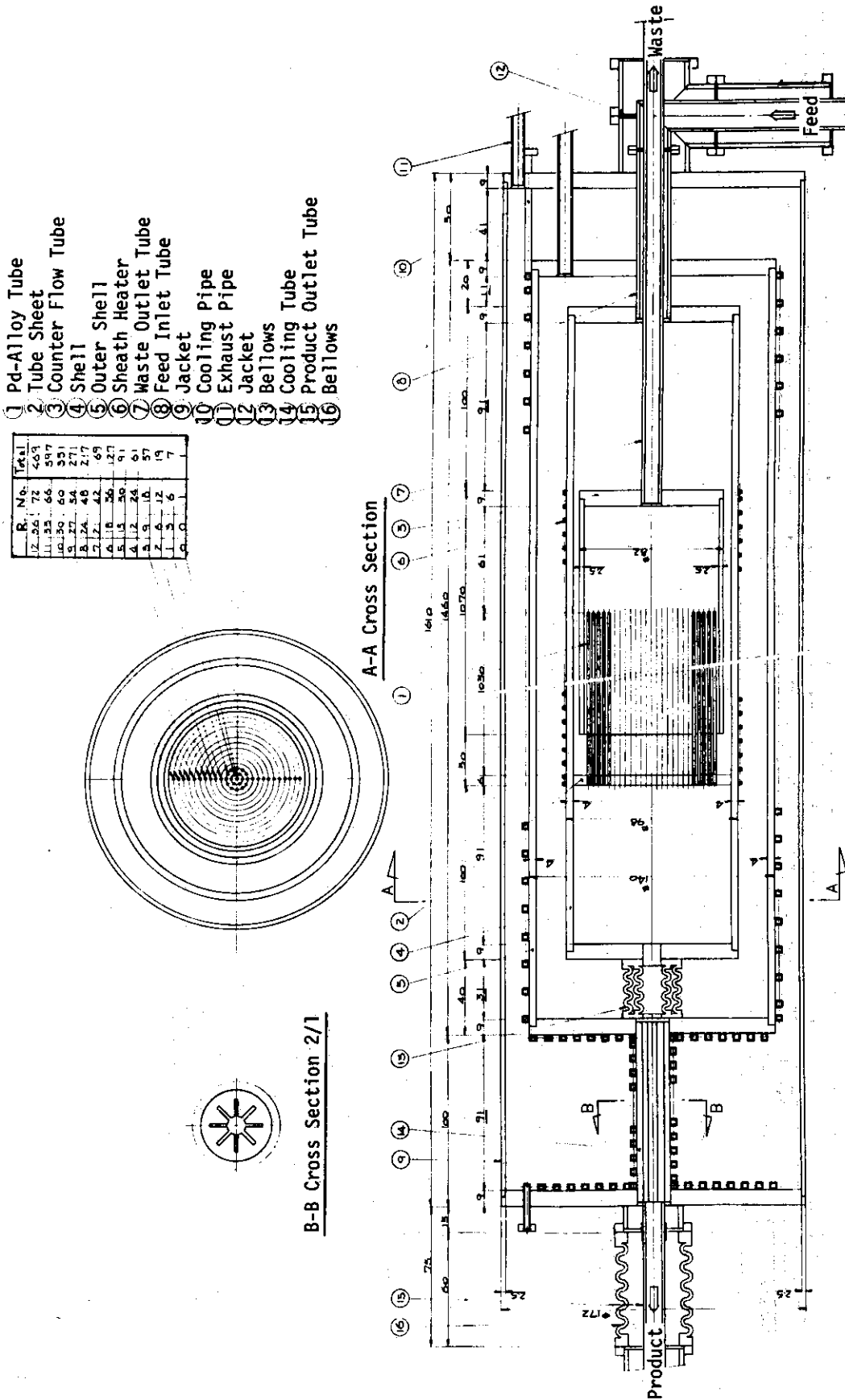


Fig. 2.4.2 Structure of Hydrogen Isotope Separator

3. 系統設計

3.1 系統計画

3.1.1 系統設計の考え方

燃料給排系は炉心からトリチウムガスおよび重水素ガスを回収して不純物を除去し、燃料注入装置および中性粒子入射装置より炉心に再注入すると共に、主冷却系のトリチウムを回収して燃料として使用するものである。本章には燃料給排系の系統設計のうち、安全性にかかわる問題点について検討し、その結果を反映した設計結果を述べる。

燃料給排系統には高濃度のトリチウムガスが循環しているので、この漏出対策をほどこす必要がある。平常時の漏出経路としては機器からの漏洩の他に、水素同位体ガスが金属を透過する性質によって機器や配管の表面から漏洩するものがある。また機器や配管の破損により放出されるトリチウムも考慮しなければならない。漏出防止対策として主にトリチウムガスを内蔵する機器はグローブボックスの中に設置する。グローブボックスはトリチウムガス封入のバウンダリとなると共に、トリチウム回収系統の一部としての役割も果す（二次封入システム）。トリチウムガスを内蔵する配管でグローブボックス外部に敷設されるものは二重配管とし、外部配管はやはり二次封入システムとして設計する。

また特にトリチウムガスの漏出が大きいと考えられる機器は二重閉じ込め方式とする。二重閉じ込め方式もトリチウムガス封入のバウンダリとなると共に、トリチウム回収系統の一部としての役割を果す（一次封入システム）。トリチウムガスを内蔵するこれらの装置および系統は、原則として全て格納室に収納される。格納室は外部環境との最終的なバウンダリとなる（三次封入システム）。このようにトリチウムガスの漏出は三重の封入システムによって防止されている。

主系統からのプロセス廃ガスのトリチウムおよび封入システムに漏出したトリチウムは、環境への放出を防止するために回収して保管しなければならない。プロセス廃ガスに含まれるトリチウムガスは酸素と結合させ含トリチウム水として保管する。また漏出ガスも各封入システムにおいて含トリチウム水として保管する。廃ガスはトリチウムを十分に回収した後に外部環境に放出される。

トリチウムの漏出の他に安全設計上の重要項目としては主系統への空気混入が考えられる。主系統にはPd膜分離器や各種ブロー、コンプレッサー等の熱源があるので、混入した酸素濃度が爆鳴気に達した場合は発火する可能性がある。発火事故は場合によっては人身および施設に被害があるばかりでなく、トリチウム漏出事故も引起す。従って空気が系統内に混入しない処置も検討する。

3.1.2 安全設計の考え方

前項にも述べた通り燃料給排系の基本的な安全性検討項目はトリチウムの漏出と空気混入による発火である。今回の検討はこれらの事故に直接関連するものに絞った。従って運転不能や機器

の故障につながる不具合であってもトリチウム漏洩や発火に結びつかないものは検討の対象から除外した。

主システムからの漏洩トリチウムは二重封入方式の二重シール部もしくはグローブボックスによって周囲への漏出が阻止するかということが重要であると判断し、封入システムに重点をおいて検討した。検討事項は封入すべき装置、封入方法、トリチウムの回収方法、回収したトリチウムの処置である。また運転停止後の主システム機器パージについても検討した。

回収したトリチウムは含トリチウム水として処理する。主システムの構成や特徴に基づいてトリチウム回収処理システムの設計を行なった。廃ガスは最終的にはスタックから放出されるが、廃ガス中のトリチウムは十分に除去されるよう配慮した。また補助系統（冷却水系、He供給系、N₂供給系）へのトリチウム混入についても検討した。

格納室の換気設備について検討し、緊急時には外気と遮断してトリチウムを除去する事とした。トリチウムガスを初めとした水素同位体ガスと空気との混合については、主システム内部に燃料ガスを入れる前に空気を排出できる設計とした。また二重シール部およびグローブボックス内の空気も排出して所定の不活性ガスに置き替えられるようにした。

今回の検討は主にガス系統に限定して行なったが、今回割愛した検討事項の中で主なものは次の通りである。

電気系統の検討は安全設計の検討上重要である。例えば、電気系統の故障によって封入システムのカバーガスが循環しなくなればトリチウムガスの漏洩が増加するし、トリチウム回収システムが機能を停止すれば環境に放出されるトリチウムは増加するだろう。また安全保護制御システムの機能も阻害される。従って電気系統の用途別分類や多重性等を主体とした設計検討が必要である。

含トリチウム水の最終的処分についても未検討である。トリチウムは全て回収し、環境には放出しない事が理想であるが、含トリチウム水の量によっては困難と考えられる。特に冷却水にトリチウムが混入した場合は、低濃度の水を多量に処分しなければならないので検討が必要であろう。

一次、二次封入は主システムにのみほどこす事としたが、他の部分にも適用する必要性については今後の課題である。

3. 2 主系統設計

実験炉燃料給排系の主系統設計については既に第1次予備設計^{1), 2)}一環として検討しているが、安全性検討の進捗に伴って各装置の設計を改良した。以下に主系統の概念および各装置の設計を述べて安全設計検討の明確化に資する。

3. 2. 1 主系統の概念

第1次予備設計で検討された主系統の概念をFig. 2. 1. 1に示す¹⁾。主ポンプ(クライオポンプ)および真空排気系により炉心から回収された燃料ガスは燃料ガス精製装置にて不純物(主にHe)を除去されて燃料ガス貯槽に貯留される。次に同位体分離装置には H_2 を除去されると共に、燃料ガス(T_2 , D_2 , DT)および中性粒子入射装置用ガス(D_2)に分類されてそれぞれの貯槽に貯留される。燃料ガスは燃料調整器にて調合されて、燃料注入装置によって炉心に注入される。燃料ガス精製装置からの廃ガスはプロセス廃ガス処理系にて処理される。この他に主冷却系からトリチウムを回収して貯留する系統および外部から供給される重水素を貯留する貯槽がある。

今回の検討の結果、第1次予備設計炉心燃料給排系の主系統について以下の設計変更ならびに改良を行なった。

(1) 主系統廃ガスの処理

燃料ガス精製装置からの廃ガスの他に、同位体分離装置からの廃ガスもプロセス廃ガス処理系で処理する。プロセス廃ガス処理系からの排出ガスはヘリウムガスが主体であるため、グローブボックスのカバーガス(後述)に加える。

(2) 燃料ガス再精製系統

燃料ガス貯槽(1), (2)およびトリチウム貯槽のガスは長期間貯留しておく、トリチウムの崩壊等で不純物が生じるため、燃料ガス精製装置の上流にもどすラインを設ける。

(3) グローブボックスおよび二重配管

次の装置はトリチウムガスを処理するため、グローブボックス内に設置する。グローブボックス内はカバーガスを流して、漏洩したトリチウムを除去する。

- ① 真空排気装置
- ② 燃料ガス精製装置
- ③ 同位体分離装置
- ④ 燃料調整器
- ⑤ 燃料ガス貯槽
- ⑥ トリチウム貯槽

また、トリチウムガスが流れる配管は全て二重配管とし、外部配管にはグローブボックス同様カバーガスを流して漏洩したトリチウムを除去する。

これらの設計変更及び改良は、燃料給排系の概念系統図Fig. 3. 3. 1に反映してある。

3.2.2 真空排気装置

真空排気装置の概念系統を Fig. 3.2.1 に示す。クライオポンプは合計 8 系列（1 系列 2 台ずつ）があるが、ここでは 4 系列のみ表わしている。各系列には専用の補助排気系があり、また 4 系列に 1 組ずつ粗引系と回収系がある。クライオポンプの初期排気は補助排気系と粗引系を使って行なう。初期排気時には機器や配管壁に残留しているトリチウムガスが放出して排気に混入する恐れがあるため、一時貯蔵タンクでモニタしてから排出する。クライオポンプは 2 台 1 組で使用し、炉排気運転と回収運転とを交互に行なう。回収運転でクライオポンプから放出される燃料ガスは補助排気系および回収系によって燃料ガス精製装置に送られる。

真空排気装置の保守を行なう時は系統内に残留している燃料ガスをパージしなければならない。パージガスはクライオポンプに注入され、後段の各ポンプで送られる事によって系統内の燃料ガスを同伴し、系統の下流から排気筒に回収される。補助排気系以後の系統のみパージすればよい場合にトリチウムのインベントリの多いクライオポンプのパージを避けるために、補助排気系からパージガスを注入する。パージガスの圧力、流量およびパージ回収ガスのトリチウム濃度を監視するモニタを設ける。

クライオポンプには冷却、加温用の He が供給される。He 供給源の圧力、温度および流量を監視するモニタを設けて He が正常に供給されている事を確認できるようにする。各クライオポンプの He 流量および温度もモニタする。また He 戻りラインには放射線モニタを設けてクライオポンプから He 供給系に混入するトリチウムを監視する。

各ポンプの吸込側にはポンプからの油による炉内の汚染を防止するために N_2 冷却によるコールドトラップを設ける。 N_2 供給源の圧力、温度、流量および各コールドトラップにおける流量、温度をモニタして、 N_2 が正常に供給されている事を確認できるようにする。また N_2 戻りラインには、放射線モニタを設けてコールドトラップから N_2 供給系に混入するトリチウムを監視する。

ポンプを冷却するための冷却水が供給される。冷却水源の圧力、流量、温度、各ポンプにおける流量と出口温度はモニタされる。冷却水戻りラインの放射線モニタはポンプからのトリチウムの混入をモニタする。

3.2.3 燃料ガス精製装置

燃料ガス精製装置の概念系統を Fig. 3.2.2 に示す。分離器内の Pd 合金膜の一方を真空ポンプで低圧に引いて、圧力差を利用して水素同位体のみを透過させることにより精製する。精製した燃料ガスは燃料ガス貯槽へ、未透過ガスはプロセス廃ガス処理系へ送られる。燃料ガスは加熱されて Pd 合金膜での透過効率を良くする一方、トリチウムの漏洩を減少させるために分離器の外筒と負圧管および分離器からの吐出ガスは冷却水で冷却される。最終段の分離器の真空ポンプには高真空用ポンプを用い、低圧側を高真空にして燃料ガスの回収率を高める。

分離器は 12 台が直列に接続され、そのうち 9 台を使用して 3 台を予備とする。従って分離器間には予備分離器をバイパスするためのバイパスラインを設ける。

燃料ガスを入れる前には系統内の空気を排出し、また運転停止後は系統内の燃料ガスはパージしておく必要がある。これらの要求を満たすためにパージ系統および初期排気系統を設ける。初

期排気系統およびパージガス回収ラインには共用の排気管を使用する。分離器はPd膜を隔てて2つの室に分かれるので、パージ系統および初期排気系統は各々の室に配管を接続する。パージガス源の圧力および流量を監視するモニタを設け、回収ラインには放射線モニタを設けてトリチウム濃度を監視する。

分離器はPd膜の透過効率を向上させるために加熱するが、このためトリチウムの漏洩量が増加する。その改善策として分離器は負圧管の中に置く事によって二重シール構造とする。負圧管の内部は負圧に引かれると共にスイープガスを循環して漏洩したトリチウムを除去する。スイープガスはスイープガス系統により循環される。スイープガス源の圧力、流量および各負圧管の圧力、流量をモニタして、スイープガスの適正な循環を監視すると共に、各負圧管の下流側に放射線モニタを設けてトリチウムの漏出状況を監視する。また二重シール部もスイープガスと置き替えるために初期排気を行なう必要があるが、これはスイープガスの戻りラインを排気管に接続して行なう。

分離器冷却用の冷却水系統および最終段分離器の真空ポンプ（クライオポンプ）を冷却するためのHe供給系統を設ける。冷却水源の圧力、流量、温度、各分離器出口の流量、温度および戻りラインのトリチウム濃度はモニタされる。またHe供給源の圧力、流量、温度および戻りラインのトリチウム濃度もモニタされる。

3.2.4 同位体分離装置

同位体分離装置の概念系統をFig. 3.2.3に示す。分離器の作動原理は燃料ガス精製装置と同じでありPd合金膜の一方を 6 kg/cm^2 、もう一方を 1 kg/cm^2 に維持して差圧で燃料ガス中の水素同位体を分離する。燃料ガスは第1カスケードのNo.1-8より入ってカスケードの中を移送されるが、左に行くほど H_2 が、右へ行くほど T_2 、 D_2 、DTが濃縮される。左端の分離器から出た H_2 はプロセス廃ガス処理装置へ送られる。また右端の分離器から出た T_2 、 D_2 、DTは第2カスケードへ送られる。第2カスケードではガスはNo.2-6の分離器から入って、左へ移送されるほど D_2 が濃縮される。左端の分離器から出た D_2 は中性粒子入射装置用ガス源として重水素貯槽(1)に貯留される。また右端の分離器から出た D_2 、 T_2 、DTは燃料ガス貯槽(2)に貯留される。燃料ガスに含まれるHの量が少なくHを分離する必要がない場合は直接第2カスケードへ送られる。

同位体分離装置は多数の分離器により構成されているので、分離器の故障を配慮してバイパスラインを設ける。分離器間の未透過ガス配管は1台おきに接続されているので、1台のみバイパスした場合には配管接続の変更が繁雑である。このため1台故障した場合でも隣り合う2台の分離器をバイパスする。

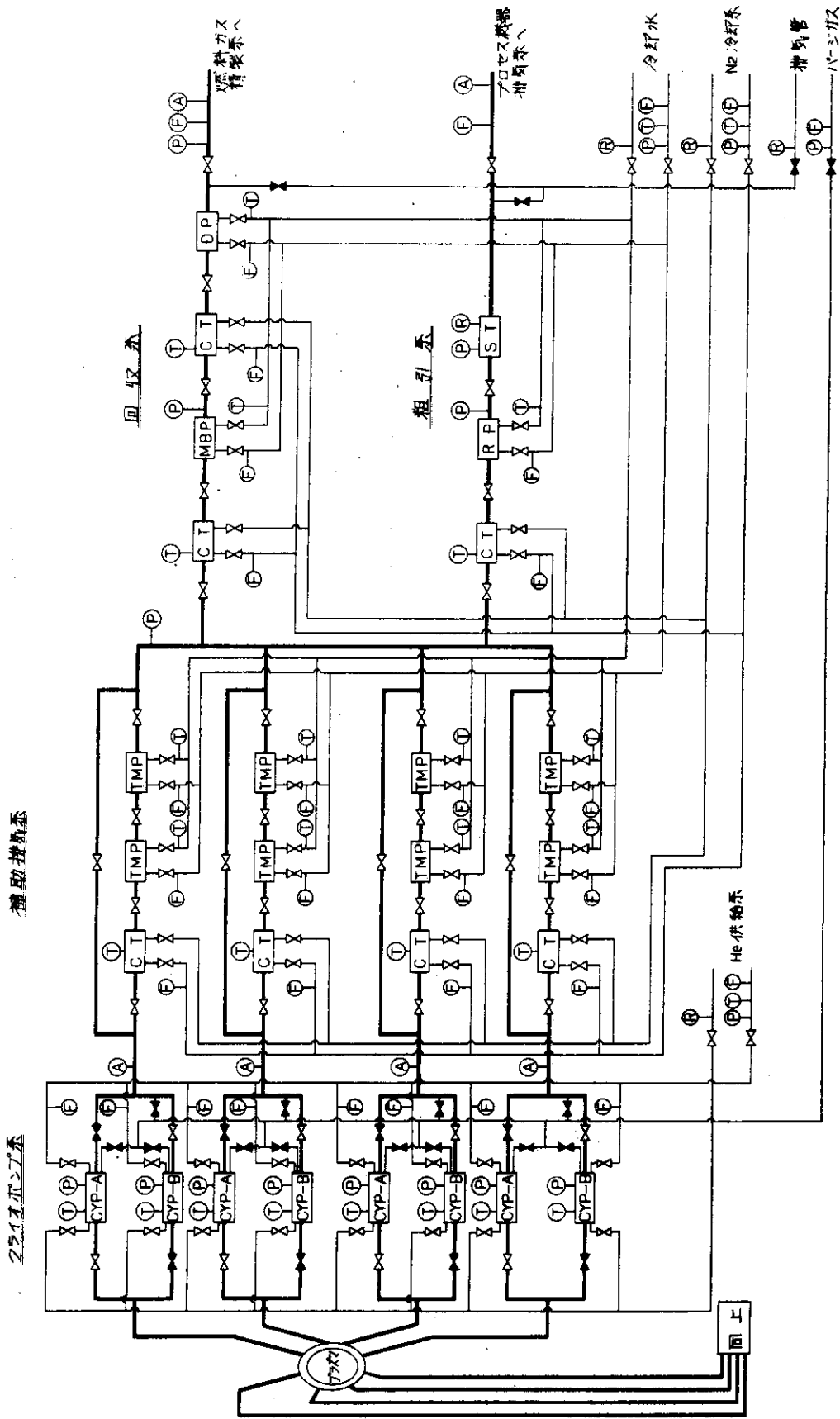
この他にパージ系統、初期排気系統、スイープガス系統、冷却水系統を設ける。これらについては燃料ガス精製装置の場合と同じである。

3.2.5 貯槽

貯槽には100ℓ程度のシリンダーを貯留ガスに相当する本数使用する。貯槽はガスのインベントリが大きい事、貯留量によっては加圧する場合もあり得る事等により、燃料ガスの漏洩量は無

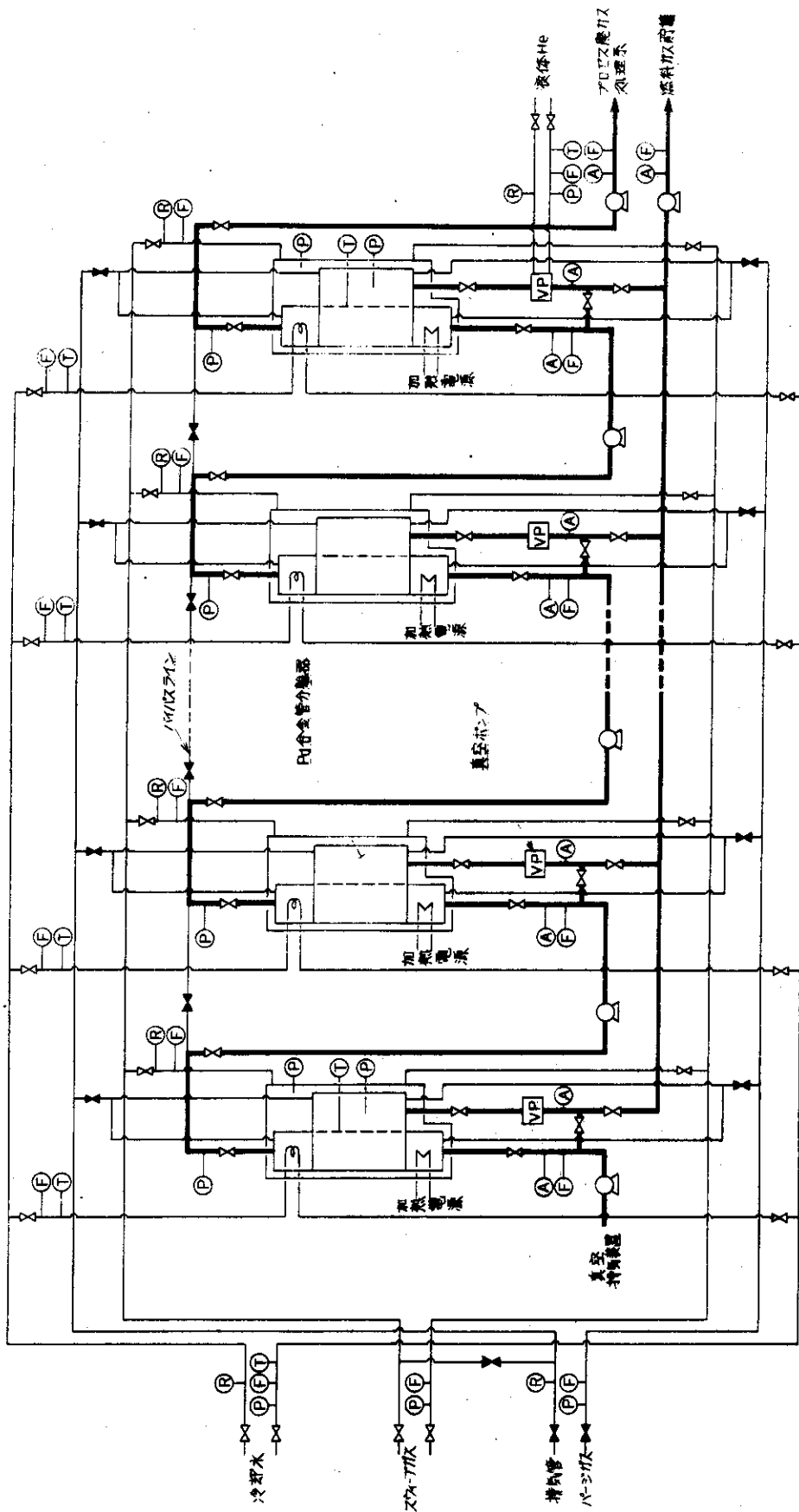
視できないと考えられる。また貯槽が破損した場合には大量の貯留ガスが放出される。このため燃料貯槽およびトリチウム貯槽は二重シール構造とし、二重シール部は負圧に引くと共にスウィープガスを循環させて漏出したトリチウムを回収する。

貯槽内のガス圧力、スウィープガスの圧力、流量、漏出したトリチウムの濃度の検出器を設置して監視する。



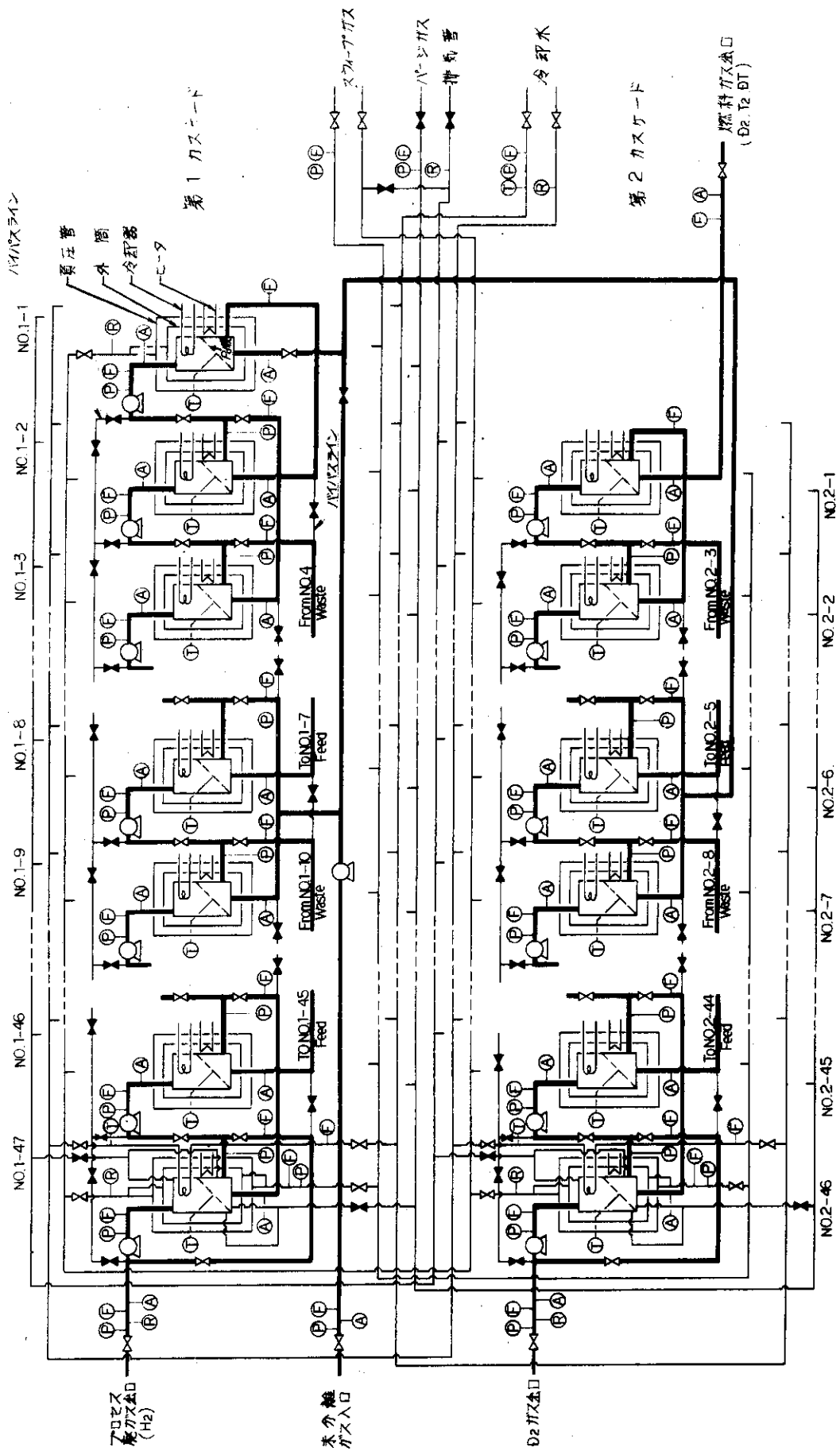
CYP クライオポンプ
 TMP タ-ホ分子ポンプ
 MBP メインバックアップポンプ
 DP ダイアフラムポンプ
 R P ロ-グリーポンプ
 C T コールドトラップ
 S T - 時間感タンク
 E 流量測定
 P 圧力測定
 T 温度測定
 R 放射線モニター
 A 弁

Fig. 3.2.1 Conceptual Flow Diagram of Vacuum System.



折
 介
 流量測定
 圧力測定
 温度測定
 真空器モーフ
 (A) (E) (T) (P) (R)

Fig. 3.2.2 Conceptual Flow Diagram of Fuel Gas Refiner.



- (A) 流量測定
- (E) 圧力測定
- (P) 温度測定
- (T) 放射線測定
- (R) 放射線測定

Fig. 3.2.3 Conceptual Flow Diagram of Isotope Separator.

3.3 全体系統設計

燃料給排系は多量のトリチウムを取扱うため、主系統を安全に運転するための装置や系統が必要である。これらはトリチウムの漏出を防止する、系統から排出される物質からトリチウムを回収する、燃料ガスと空気とが混合して爆鳴気を生成する事を防ぐ、等の役割を果すものであり、主系統と共に Fig. 3.3.1 に示す。以下にこれらの系統の具体的な役割を説明する事によって燃料給排系全体の系統概念を明らかにする。

3.3.1 グローブボックス初期排気

グローブボックスおよび二重配管の外管の初期排気系統を Fig. 3.3.1 に示す。主系統保守時等にはグローブボックス内には空気が入るが、そのまま主系統の運転を開始した場合、燃料ガスの漏出があると爆鳴気を生成して発火する恐れがある。このため主系統の運転に先立ってグローブボックス内の空気をGB排気系にて排出し、カバーガス(He)に置き替える。排気にはグローブボックス内の機器や配管の材質に潜入していたトリチウムが混入すると考えられるので、放出ガス処理系にてトリチウムを除去してからスタックより廃棄する。グローブボックスには圧力計を設けて排気状況を監視する。

3.3.2 プロセス機器初期排気

グローブボックス以外の機器の初期排気系統を Fig. 3.3.1 に示す。3.1項にも述べたとおり、主系統に空気が残留したまま燃料ガスを通すと爆鳴気を生成し、発熱体に接触して発火する恐れがある。機器の二重シール部に空気が残留している場合も燃料ガスの漏出によって爆鳴気となる場合が考えられるので不活性ガスに置き替えなければならない。またグローブボックスのグローブポートにはグローブを通してトリチウムガスが漏洩して来る可能性があるので、使用前にはパージしておく必要がある。この系統はこれらの機器を排気するものである。

排気には器材に吸着されていたトリチウムが混入して来ると考えられるので、放出ガス処理系にて除去してからスタックより廃棄する。各機器には圧力計を設けて排気状況を監視する。また主系統の排気が含まれるため、放射線モニタを設けて排気のトリチウム濃度を監視する。

なお本系統とグローブボックス初期排気系統とは同じ機能を有しているが、グローブボックスの排気量は多いので別系統にした。

3.3.3 GB カバーガス循環およびプロセス廃ガス処理

グローブボックスおよび二重配管のカバーガス循環系統およびプロセス廃ガス処理系からの廃棄ガス処理系統を Fig. 3.3.1 に示す。主系統の内でトリチウムガスを扱う装置からは機器のリークや機器材質からの透過によってトリチウムが漏出して来るので、これらの装置はグローブボックスの中に設置する。グローブボックスおよび二重配管の外管の中はカバーガスを充填して負圧に引く事によって環境へのトリチウムの漏洩を防止すると共に、カバーガスを循環させて漏出したトリチウムを回収する。負圧引、カバーガスの循環およびトリチウムの回収はGBカバーガス精製系で行なう。GBカバーガス精製系が故障するとグローブボックスからのトリチウムの漏

出が増加するためGBカバーガス精製系は予備を設ける。各グローブボックスには圧力計を設置して規定の負圧が保たれている事を監視する。各グローブボックスの入口配管には流量計を設けてカバーガスが正常に流れている事を監視する。また出口配管には放射線モニタを設けてカバーガスのトリチウム濃度を監視する。また微少なリークによって空気がカバーガス内に蓄積する事を監視するために酸素濃度計を設置する。

GBカバーガス精製系にもやはり同様なモニタを設けて正常に機能していることを確認すると共に、異常時には予備装置を起動するためのインターロックを設ける。カバーガスにはHeを使用し、閉ループ循環系統を構成する。カバーガスを廃棄する場合にはGB排気系によって放出ガス処理系に送られ、トリチウムを回収してからスタックを通して廃棄される。GBカバーガス精製系のトリチウム回収はトリチウムガスを酸素と反応させて含トリチウム水とし、モレキュラーシーブに吸着させる。このためGBカバーガス精製系に酸素が供給される。

プロセス廃ガス処理系からの廃棄ガスはHeが主体と考えられる。それゆえこの廃ガスはグローブボックスのカバーガス系に入れ、環境への廃棄ガス量を減少させる。

なお、GBカバーガス精製系は機器破損時にグローブボックス内に放出されるトリチウムを回収できる処理能力を有す。

3.3.4 スウィープガス循環

二重シール部のスウィープガス循環系統をFig. 3.3.1に示す。主系統のトリチウムを扱う機器の内、二重シールが必要な機器は次の通りである。

- (1) 燃料ガス精製装置および同位体分離装置の分離器
- (2) 燃料ガス貯槽およびトリチウム貯槽

二重シール部の中はスウィープガスを充填し、負圧に引く事によってトリチウムの格納室への漏出を防止すると共に、スウィープガスを循環させて漏出したトリチウムを回収する。負圧引、カバーガスの循環およびトリチウムの回収はスウィープガス精製系で行なう。計装、予備装置の設置、インターロック、廃棄するスウィープガスの処理、トリチウム回収用の酸素供給に関しては前項のグローブボックスのガス循環と同様である。

分離器の負圧管の温度が低い程トリチウムの漏洩量を少なくできる事から、スウィープガスとしてはHeよりも熱伝達率の低いArガスを使用する。

なお、スウィープガス精製系は機器破損時に二重シール内に放出されるトリチウムを回収できる処理能力を有する。

3.3.5 系統機器パージ

主系統の燃料ガスをパージする系統をFig. 3.3.1に示す。主系統の保守時に被曝やトリチウムの放出を防止するために燃料ガスをパージする必要がある事はもちろんであるが、カバーガスやスウィープガスが停止した場合もトリチウムの漏洩量が増加するのでパージしなければならない。パージ用ポンベのArガスを主系統の機器および配管に注入し、燃料ガスをパージした後プロセス機器排気系によって放出ガス処理系に送られ、トリチウムを回収してからスタックより廃棄される。各機器のパージラインに流量計を設けてガスの流量を監視する。ポンベには圧力計を

設けてガス源の量を監視する。ページガスの排気には多量のトリチウムが含まれるので放射線モニタによって監視する。

3.3.6 格納室空気処理系

格納室空気処理系統を Fig. 3.3.1 に示す。格納室およびフードの空気は通常時は格納室換気系により、フィルターを通してスタックから放出される。格納室のトリチウム濃度が高くなった時には空気処理は閉ループ運転に切換えられ、格納室緊急処理系によって空気中のトリチウムを回収する。格納室およびフードの排気口には放射線モニタを設置して排気中のトリチウム濃度を監視すると共に、トリチウム濃度高で格納室緊急処理系に切換えて起動するインターロックを設ける。

格納室緊急処理系はトリチウムガスを丹トリチウム水にして回収するので酸化用の O_2 が供給される。

3.3.7 放出ガス処理系

スタック放出ガスを処理する系統を Fig. 3.3.1 に示す。放出ガス処理系は燃料給排系から環境に廃棄するガスのトリチウムを最終的に回収する装置であり、次の系統からのガスを処理する。

- (1) 真空排気装置からはクライオポンプの心期排気ガスが送られる。
- (2) GB 排気系からはグローブボックスの初期排気ガスおよび余剰カバーガスが送られる。
- (3) プロセス機器排気系からはプロセス機器の初期排気ガス、余剰スウィープガス、主系統のページガスは回収トリチウム量が多い。
- (4) トリチウム回収系からはトリチウム回収後の回収用ページガスが送られる。

これらのガスは放出ガス処理系にてトリチウムを回収された後スタックから廃棄される。放出ガス処理系は閉ループ配管と緊急時には閉ループ運転に切換えてスタックからのトリチウム放出を防ぐ。

各装置からのガス配管には流量計を設けて放出ガス処理系への流入ガスを監視する。またスタックへの配管へは流量計と放射線モニタを設置し、トリチウムの排出量が多い場合に放出ガス処理系を閉ループ運転に切換えるインターロックを設ける。

放出ガス処理系はトリチウムガスを含トリチウム水にして回収するので酸化用の O_2 ガスが供給される。

3.3.8 トリチウム回収系

トリチウム回収系統を Fig. 3.3.1 に示す。

トリチウム回収系は下記のガス処理系のモレキュラーシーブに吸着された含トリチウム水を最終的に回収する系統である。

スウィープガス精製系および GB カバーガス精製系のモレキュラーシーブはそれぞれ Ar ガスと He ガスで回収ページされる。含トリチウム水はページガスと共にトリチウム回収系に送られて吸着される。なお、スウィープガス精製系と GB カバーガス精製系はループのガスで回収ページし、内部のコールドトラップにて含トリチウム水を回収できるようにも設計されており、この

回収方法の方がパージガスを放出しないで済むので望ましい。

プロセス廃ガス処理系のモレキュラーシーブはHeガスで回収パージされる。含トリチウム水はパージガスと共にトリチウム回収系に送られて回収される。

格納容器緊急処理系および放出ガス処理系のモレキュラーシーブに蓄積されている含トリチウム水も同様な方法でトリチウム回収系に送られて回収される。

集められた含トリチウム水は一旦トリチウム回収系のモレキュラーシーブに蓄積され、その後回収パージによりコールドトラップで液化される。含トリチウム水回収後のパージガスは放出ガス処理系を経てスタックから放出される。

GBカバーガス精製系、スウィープガス精製系およびトリチウム回収系のコールドトラップで液化された含トリチウム水は含トリチウム水貯槽に貯留される。

トリチウム回収系に出入する配管には流量計を設置して、各装置のパージ量およびトリチウム回収系に出入するガス量をモニタする。また含トリチウム水貯槽には水位計を設置して含トリチウム水の貯留量をモニタする。

3.3.9 冷却水系

冷却水系統をFig. 3.3.1に示す。冷却水の冷却対象は次のものである。

- (1) 真空排気装置のポンプ
- (2) 燃料ガス精製装置、同位体分離装置の分離器。
- (3) プロセス廃ガス処理系、スウィープガス精製系、GB精製系、格納室緊急処理系、放出ガス処理系のガス冷却器。

冷却水には各冷却対象機器にてトリチウムが混入して来る事がありうるため閉ループ系統とし、トリチウムに汚染された冷却水は汚染冷却水貯槽に貯留する。

各装置の冷却水供給管には圧力計、流量計、温度計を設置して供給される冷却水の状態を監視する。また戻り配管には放射線モニタを設置してトリチウムの混入を監視する。

3.3.10 He供給系およびN₂供給系

He供給系およびN₂供給系をFig. 3.3.1に示す。主ポンプ(クライオポンプ)は冷却(炉排気運転)も加温(回収運転)もHeで行なうので、所定の温度のHe(液体又は気体)をHe供給系より供給する。また燃料ガス精製装置のクライオポンプにもHeを供給する。

N₂供給系は次の各機器に冷却用のN₂を供給する。

- (1) 真空排気装置のオイル除去用コールドトラップ
- (2) GB排気系およびプロセス機器排気系のオイル除去用コールドトラップ
- (3) スウィープガス精製系の含トリチウム水回収用コールドトラップ
- (4) GBカバーガス精製系の含トリチウム水回収用コールドトラップ
- (5) 放出ガス処理系の含トリチウム水回収用コールドトラップ
- (6) トリチウム回収系の含トリチウム水回収用コールドトラップ

各装置のHeおよびN₂供給管には圧力計、流量計、温度計を設置して供給されるHeもしくはN₂の状態を監視する。また戻り配管には放射線モニタを設置してトリチウムの混入を監視する。

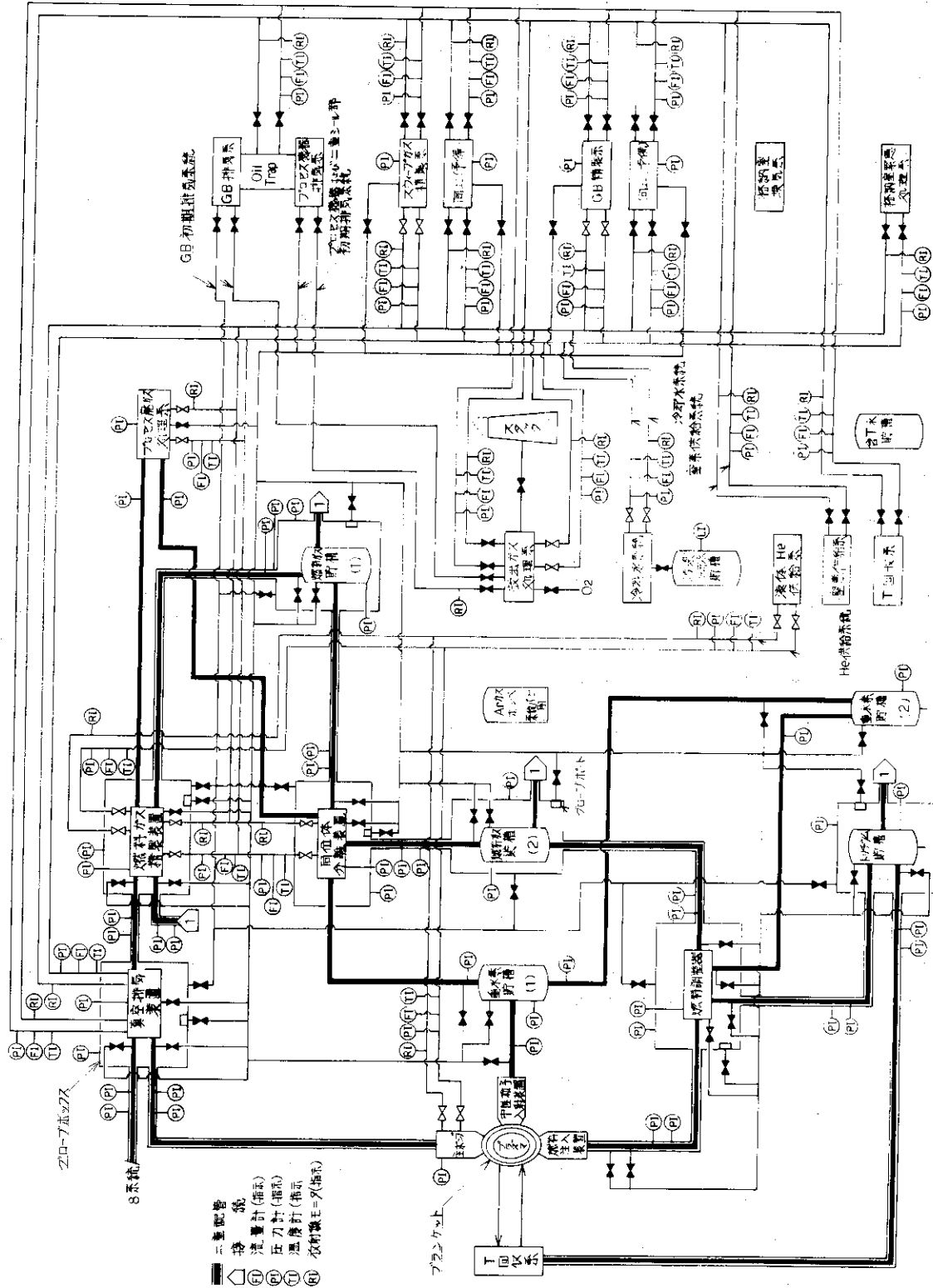


Fig. 3.3.1 Conceptual Flow Diagram of Fuel Circulating System (1)

3.4 不具合と安全対策

3.4.1 検討の概要

系統の具体的な不具合とその関連事項について検討する事は安全設計上有益である。3.1.2項にも述べた通り、燃料給排系の安全性に関係する不具合項目はトリウムの漏出と、燃料ガスと空気との混合による発火に関係するものである。次項においてこれらの項目を具体的に挙げ、それらの関連事項を述べる。関連事項としては次のものを検討する。

不具合の原因、影響、致命度を検討する。これらを検討する事によって部分的な故障が拡大波及して、上記の安全性に抵触する事態に至る過程を明らかにすると共に、それらの程度について推定するものである。これらの検討結果は系統概念の改善や機器類の仕様および制御、電気系統の設計に反映されるべきものである。

保護法、計装、インターロック、必要処置、防止法についても検討する。保護法は不具合発生の監視方法および発生した場合に安全性を保つための方法について述べる。保護法での検討に基づいて安全保護に必要な計装およびインターロックについて述べる。また必要処置には安全上特に留意が必要な処置について述べる。これらは詳細設計において保護制御要求書、計装制御ブロック線図、安全保護ロジック線図、運転や保守の要領書等に反映されるべきものである。

次項に検討するのは主系統を中心とした燃料給排系全体についての不具合である。この他にも各補助系統（放出ガス処理系等）の機器や電気関係の不具合についても検討が必要であるが、ここでは割愛した。

なお致命度の分類については、7.1節の致命度分類に従った。

3.4.2 不具合検討

(1) グローブボックス初期排気

不 合 : GB 排気不能

原 因 : ① GB 排気系故障
 ② 排気ラインの不具合（リーク、閉塞）
 ③ グローブボックスのリーク

影 響 : カバーガスの置換不能

致 命 度 : クラス2

（理由）保安処置は容易。他設備への波及は小。

保 護 法 : 各GBの圧力を検知して正常な排気機能を確認する。

計 装 : GB 圧力計

インターロック : ① 主系統起動禁止
 ② GB 精製系起動禁止

必要処置 : -

防止策 : -

(2) 二重シール部初期排気

不 合 : 二重シール部排気不能

原因 : ① プロセス機器排気系故障
 ② 排気ラインの不具合 (リーク, 閉塞)
 ③ 二重シール部のリーク

影響 : スウィープガスの置換不能

致命度 : クラス 2

(理由) 保安処置は容易。他設備への波及は小。

保護法 : 各二重シール部の圧力を検知して正常な排気機能を確認する。

計装 : 二重シール部圧力計

インターロック : ① 主系統起動禁止
 ② スウィープガス精製系起動禁止

必要処置 : -

防止策 : -

(3) 主系統初期排気

不具合 : 主系統初期排気不能

原因 : ① プロセス機器排気系故障
 ② 排気ラインの不具合 (リーク, 閉塞)
 ③ 主系統のリーク

影響 : 系統起動不可

致命度 : クラス 3

(理由) 燃料ガスを流した場合は爆鳴気を生成して発火に結びつく。

保護法 : 主系統の要所の圧力を検知して, 正常な排気機能を確認する。

計装 : 主系統圧力計

インターロック : 主系統起動禁止

必要処置 : -

防止策 : -

(4) カバーガス流量

不具合 : GB カバーガス流量小

原因 : ① GB 精製系の循環機能故障
 ② 循環ライン閉塞

影響 : カバーガスのトリウムガス含有量増大

致命度 : クラス 3

(理由) 時間の経過に伴って, GB からのトリチウム漏洩量が増大する。

保護法 : カバーガスの流量を監視して正常な循環状態を確認する。GB 精製系が故障の場合は予備装置を起動する。

計装 : カバーガス流量計

インターロック : GB 精製系の予備起動 (GB 精製系故障の場合)

必要処置 : 保安又は修理のために系統の運転を停止した場合には, 系統内部のトリチウムガスを速やかにパージする。

防 止 策 : -

(5) カバーガス圧力

不 具 合 : GB カバーガス負圧喪失

原 因 : ① GB の破損
 ② GB 精製系の故障
 ③ カバーガス循環ライン破損

影 響 : ① GB の内圧が上昇してカバーガスが流出。
 ② GB 内に空気が混入する。(GB 又は循環ライン破損の場合)

致 命 度 : クラス 3

(理由) カバーガスと共にトリチウムが漏洩する。

保 護 法 : カバーガス圧力を常時監視する。GB 精製系が故障の場合は予備装置を起動する。

計 装 : カバーガス圧力計

インターロック : GB 精製系の予備を起動 (GB 精製系故障の場合)

必要処置 : 保安又は修理のためにシステムの運転を停止した場合には、系統内部のトリチウムガスを速やかにバージする。

防 止 策 : -

(6) カバーガスのトリチウム濃度

不 具 合 : GB カバーガスのトリチウム濃度高

原 因 : ① GB 精製系故障
 ② プロセス機器又は配管からのトリチウム漏洩

影 響 : 格納室へのトリチウム漏洩

致 命 度 : クラス 3

保 護 法 : カバーガスのトリチウム濃度を監視する。GB 精製系故障の場合は予備を起動する。

計 装 : 放射線モニタ

インターロック : GB 精製系の予備起動 (GB 精製系故障の場合)

必要処置 : 保安又は修理のためにシステムの運転を停止した場合には、系統内部のトリチウムガスを速やかにバージする。

防 止 策 : -

(7) カバーガス内の空気混入

不 具 合 : GB カバーガス空気混入

原 因 : ① GB 又は循環ラインのリーク
 ② カバーガス置換時に空気が残留

影 響 : カバーガスへ空気が蓄積する。

致 命 度 : クラス 2

(理由) 機器の劣化を促進する要因であるが、直ちに事故に結びつく可能性は低い。

保 護 法 : カバーガスの酸素濃度を監視する。

計 装 : 酸素濃度計

インターロック : -

必要処置 : 保安又は修理のために系統運転を停止した場合には, 系統内のトリチウムを速やかにパーズする。

防止策 : O_2 , N_2 の吸着装置を設ける。

(8) スウィープガス流量

不具合 : 二重シール部スウィープガス流量小
(4)項 GBカバーガス流量小と同じ)

(9) スウィープガス圧力

不具合 : 二重シール部スウィープガス負圧喪失
(5)項 GBカバーガス負圧喪失と同じ)

(10) スウィープガスのトリチウム濃度

不具合 : 二重シール部スウィープガスのトリチウム濃度高
(6)項 GBカバーガスのトリチウム濃度高に同じ)

(11) スウィープガスの空気混入

不具合 : 二重シール部スウィープガスに空気混入
(7)項 GBカバーガス空気混入に同じ)

(12) 系統機器パーズ

不具合 : パーズ不能

原因 : ① パーズガスポンベのガス不足
② パーズライン閉塞

影響 : 運転停止時にトリチウムガスが漏洩

致命度 : クラス2

(理由) トリチウムガス漏洩につながる故障だが, カバーガス, スウィープガスの循環を継続していれば, トリチウムガスの漏洩は増大しない。

保護法 : ① ポンベのパーズガス量をモニタ

② パーズガスの流量をモニタ

③ パーズ不能の場合はスウィープガス, カバーガスの循環を継続

計 装 : ① パーズガスポンベ圧力計

② パーズライン流量計

インターロック : ① カバーガス循環継続

② スウィープガス循環継続

必要処置 : パーズガス以外の方法で (例えばプロセス機器排気系) 系統内のトリチウムを排気する

防止策 : パーズガスは常に十分用意する。

(13) He 系の冷却, 加温能力

不具合 : He 系の冷却又は加温能力低下

原因 : ① He 系の温度制御機構故障

- 影 響 : ⑥ He 系の循環機構故障
 : ① 主ポンプの吸着力低下
 : ② 主ポンプの再生力低下
 : ③ 燃料精製系の精製能力低下

致命度 : クラス 2

(理由) トリチウム回収処置をとれば漏洩量は増大しない。

- 保護法 : -
 計 装 : ① He 温度計
 : ② He 流量計

インターロック : -

必要処置 : -

防止策 : -

(14) N₂ 系の冷却能力

- 不 具 合 : N₂ 系の冷却能力低下
 原 因 : ① N₂ 系の温度制御機構故障
 : ② N₂ 系の循環機構故障
 影 響 : コールドトラップ昇温により,
 : ① 含トリチウム水の回収効率低下
 : ② 炉心にオイルミスト混入

致命度 : クラス 2

(理由) トリチウムを最終的に回収する手段が不能になるが、直ちにプラント停止やトリチウム放出事故には至らない。

- 保護法 : 環境へのトリチウム放出を防止する。
 計 装 : ① N₂ 温度計
 : ② N₂ 流量計

インターロック : 放出ガス処理系を閉ループ運転する。

- 必要処置 : ① 故障は速やかに修復する。
 : ② 故障の修復が遅れる場合は、吸着限界を超過したモレキュラーシーブは交換する等してトリチウムの放出を防ぐ。

防止策 : N₂ 系は予備を設ける。

(15) 冷却水の冷却能力

- 不 具 合 : 冷却水系冷却能力低下
 原 因 : ① 冷却水系の温度制御機構故障
 : ② 冷却水系の循環機構故障
 影 響 : ① Pd 膜分離器の温度上昇
 : ② ガス温度上昇によりモレキュラーシーブの吸着能力低下

致命度 : クラス 2

(理由) 直ちにプラント停止やトリチウム放出事故には至らない。

保護法 : 環境へのトリチウム放出を防止する。

計 装 : ① 冷却水温度計

② 冷却水流量計

インターロック : 放出ガス処理系を閉ループ運転する。

必要処置 : 故障個所を速やかに修復する。

防止策 : 冷却水系は予備を設ける。

(16) 格納室のトリチウム濃度

不 具 合 : 格納室のトリチウム濃度高

原 因 : 系統からのトリチウム漏洩量大

影 響 : 環境へのトリチウム漏洩量増加

致 命 度 : クラス4

保護法 : 格納室の換気を閉ループ運転に切換えると共に、格納室空気のトリチウムを除去する。

計 装 : 格納室放射線モニタ

インターロック : ① 格納室換気系停止

② 格納室緊急処理系起動

必要処置 : -

防止策 : -

参考文献

1) 原研, 核融合研究部炉設計研究室 JAERI-M 7300

2) 原研, 核融合研究部炉設計研究室 JAERI-M 7293

4. 配置設計

ここでは、核融合実験炉プラント全体の配置計画に反映するため、占有率が大いと思われる主真空排気系、燃料精製系、同位体分離系等の主要コンポーネントの機器配置を検討し、燃料給排系全体として概略配置を行った。

4.1 配置計画条件

配置計画として次の様な基本条件を設定した。

- (1) トリチウムを含む可能性がある装置は格納室内に納め、トリチウムを含む可能性がない装置は別建屋に納めてもよい。
- (2) 主真空排気系のクライオポンプ装置以外は実験炉本体格納容器地下室に配置する。
- (3) クライオポンプ用 He 冷凍系は SCM 用 He 冷凍系との共有も考慮し、He 冷凍系収納室に収める。
- (4) 主真空排気系以外の燃料給排系コンポーネントは、炉本体格納容器地下室周囲のドーナツ状室に格納室を設けて収納する。
- (5) (4)のドーナツ状室で燃料給排系の占有率は $60^\circ/360^\circ$ とする。

4.2 主要コンポーネントの配置

4.2.1 主真空排気系

主真空排気系のクライオポンプ以外の主要構成要素は、補助排気系、回収系、粗引系であり、これらは炉本体格納容器地下 2 階を格納室として収納した。この概略配置は Fig. 4.3.1 炉心燃料給排系全体配置計画図に示す。

4.2.2 ヘリウム冷凍系

ヘリウム冷凍系の機器の内、コールドボックス、液体ヘリウム容器およびヘリウム移送ポンプ装置は原子炉建屋地下のドーナツ状収納室内に設置する。

また、圧縮機ユニットおよびヘリウム回収精製装置の内、回収精製用圧縮器、ヘリウム精製器、バッファタンクは補助建屋内に、ガスホルダー、回収ガスタンク、精製ガスタンク、液化窒素容器は建屋外に設置する。

これらヘリウム冷凍系の概略配置は Fig. 4.3.1 炉心燃料給排系全体配置計画図に示す。

4.2.3 燃料精製系

燃料精製系を構成する主要機器は Pd-合金膜分離器、2 次側真空用ワブルポンプおよび燃料ガス輸送用ダイヤフラムポンプであり、各 12 台を有する。これら燃料精製系主要機器の配置案

を Fig. 4.2.1 に示す。

4.2.4 同位体分離系

同位体分離系は2つのカスケードで構成され、夫々のカスケードを2つのグローブボックス内に納めるものとした。主要構成機器はPd-合金膜分離器本体およびダイヤフラム（ペロー）型コンプレッサーで、合計台数は100台である。

4.3 全体配置

炉心燃料給排系全体の配置計画を Fig. 4.3.1 に示す。①～③は主真空排気系、④～⑮はヘリウム冷凍系、⑯～⑳ は燃料精製系ならびに同位体分離系等であり、㉑～㉒はトリチウム含有ガス精製・処理系である。⑯～㉑は地下1階、㉒～㉓は地熱2階に設置するものとした。

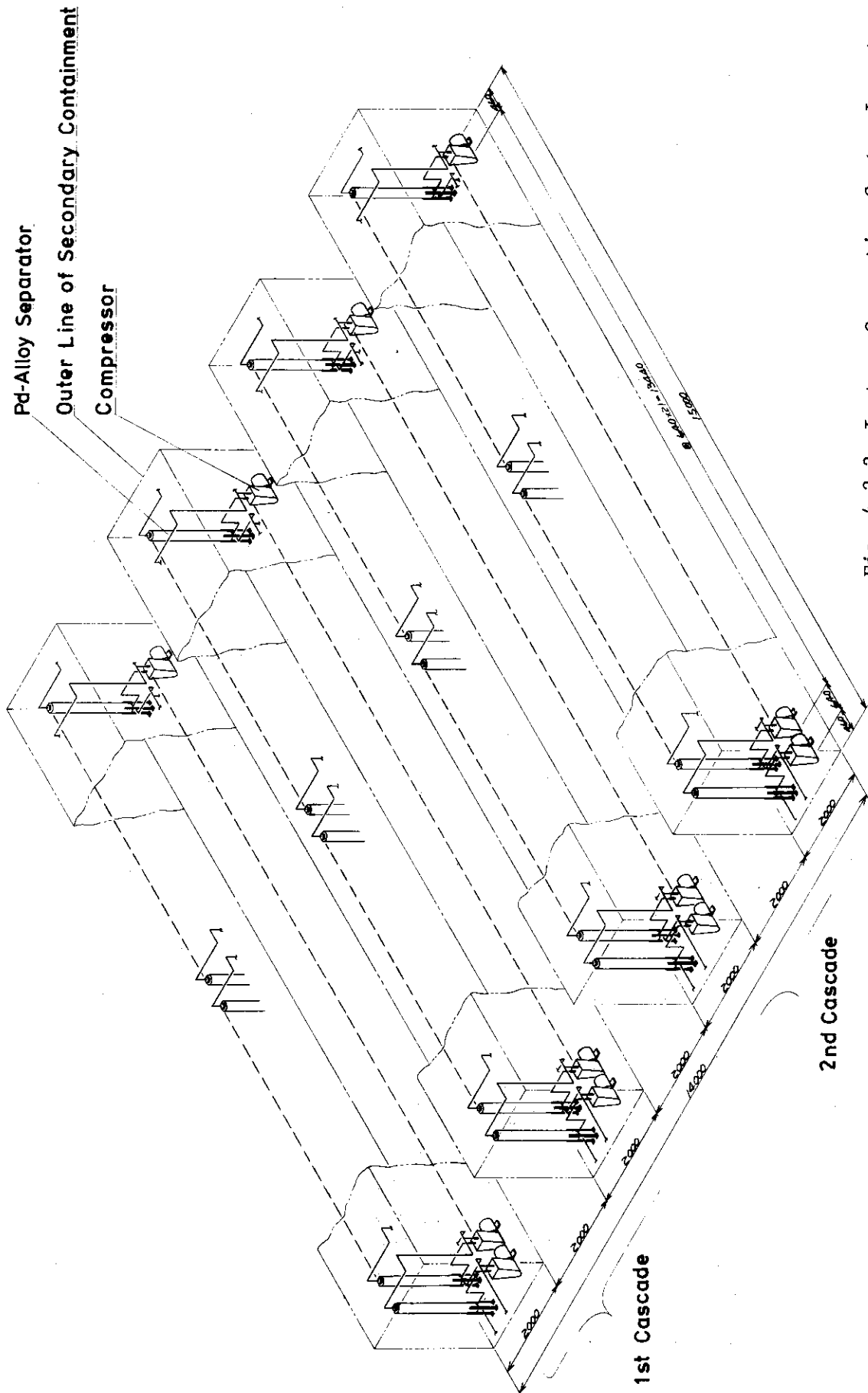


Fig. 4.2.2 Isotope Separation System Layout

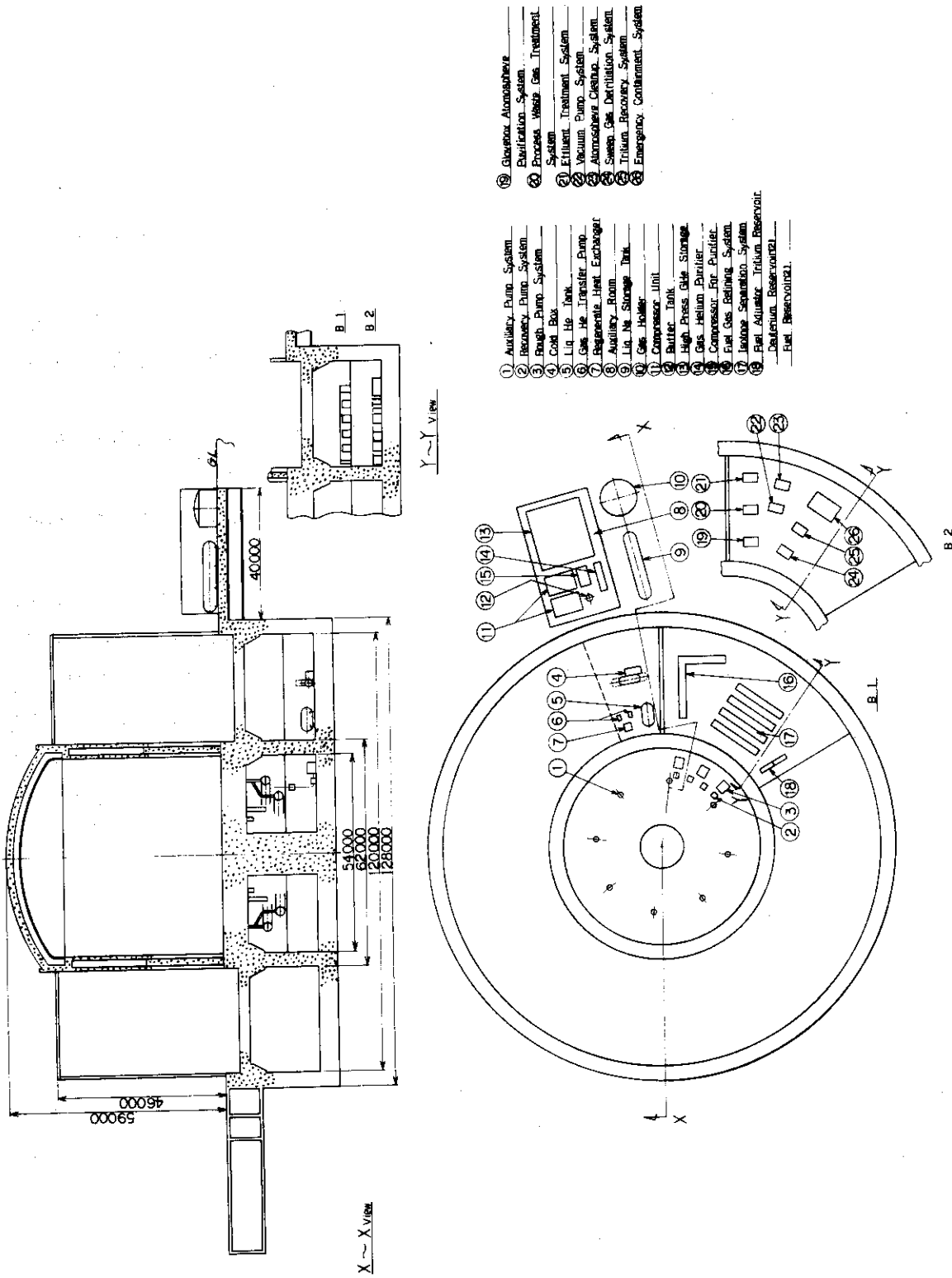


Fig. 4.3.1 Fuel Circulating System Layout

5. トリチウム封入設計

5.1 設計思想

炉心燃料給排系の安全を確保するために重要なことは各種機器類からの漏洩・拡散等でトリチウムが外部に放出することを防止することである。これに対し本設計では次の様な3重封入システムを採用する。

① 1次封入システム：高濃度トリチウムガスを取扱う機器および配管類はトリチウムの拡散・漏洩防止対策を考慮した構造および材料を選び（第6章参照），また必要に応じ透過・漏洩トリチウムを回収するためのスweepガスシステムを設ける。

② 2次封入システム：主要機器・装置類は全てグローブボックスに類似した大型の密閉ボックス中に格納し，全ての廃ガスは各種トリチウム除去装置を通して排出する。

③ 3次封入システム：全ての2次封入システムは外部放出に対する最終バリアである格納室に収納する。

本章では上記基本思想をもとにトリチウム含有ガス精製システムならびに格納室浄化システム設計等を行う。基本条件としてトリチウム濃度管理基準を Table 5.1.1 に示す。放射線障害防止法等で規定される排気中のトリチウム許容濃度は $2 \times 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ であるが化合物形については規定されていない。第1章で述べた如くトリチウム水はガス形トリチウムに比べ有害であり，本設計ではこの放出量をできるだけ少なくすることを目指してスタックからのトリチウム水放出濃度を $2 \times 10^{-8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ にすることを目標値として設定した。また格納室及びグローブボックス等の基準値は，スタックからの排出濃度を基準として設定した。

Table 5.1.1 トリチウム濃度管理基準

(1) スタックからの放出	
水素ガス	: $2 \times 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 以下
水蒸気	: $2 \times 10^{-8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 以下
(2) 格納室	
立入時	: $2 \times 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 以下
正常運転時	: $2 \times 10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 以下
(3) グローブボックス	
水素ガス	: $2 \times 10^{-1} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 以下
水蒸気	: $2 \times 10^{-2} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 以下
(4) スweepガス ジャケット内	
水素ガス	$2 \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 以下
水蒸気	$2 \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 以下

5.2 トリチウム透過・漏洩量の検討

ここでは各種ガス処理系で除去すべきトリチウムの量を求めるため、スイープガスジャケット中およびグローブボックス中へのトリチウムの漏入量を設定した。この漏入量は透過および漏洩を考慮し、SUS 構造材からの透過量については次式を用いた。¹⁾

$$F_T = \frac{A \cdot K \sqrt{P}}{\sqrt{3} t} \exp\left(-\frac{B}{R \cdot T}\right) \quad (5.2.1)$$

ここで、	F_T	: トリチウム透過量	(cm^3 (STP)/hr)
	A	: 面積	(cm^2)
	K	: 透過係数	(850 cm^3 (STP) \cdot mm/hr \cdot $\text{cm}^2 \cdot$ atm)
	P	: トリチウム分圧	(atm)
	B	: 活性化エネルギー	(16.1 kcal/mol)
	R	: ガス定数	(1.99 cal/mol \cdot deg)
	T	: 絶対温度	(K)
	t	: 肉厚	(mm)

また、漏洩量としてバルブおよびフランジを考慮し、前者については $3 \times 10^{-7} \text{ cm}^3$ (STP)/sec を基準とし、後者については $1 \times 10^{-9} \text{ cm}^3$ (STP)/sec \cdot cm をリーク基準とした。

5.2.1 スイープガスジャケット

ここでスイープガスジャケットは高温操作を行う燃料精製系ならびに同位体分離系のPd-合金膜分離器だけに設置するものとする。スイープガス中へのトリチウム漏入量は主に構造材を透過拡散したものが寄与すると考えられる。

燃料精製用分離器の外筒は外径216.3 mm、肉厚8.2 mmのSUS 304であり、管内のトリチウム分圧を1 Torr、運転温度を420℃、外筒の表面積 $6.2 \times 10.3 \text{ cm}^2$ とすると、トリチウム透過量は $3.2 \times 10^{-5} \text{ cm}^3$ (STP)/sec となり、12台の分離器で全透過量は $3.8 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$ (STP)/sec となる。

同位体分離器の外筒は外径172 mm、肉厚5 mmのSUS 304であり、外筒内のトリチウム分圧を第1カスケードで0.432 atm、第2カスケードで0.732 atm、外筒の温度を80℃、表面積を $7.3 \times 10^3 \text{ cm}^2$ とすると、トリチウム透過量は第1カスケードで $1.5 \times 10^{-8} \text{ cm}^3$ (STP)/sec、第2カスケードで $1.9 \times 10^{-8} \text{ cm}^3$ (STP)/sec となり、100台の分離器で全透過量は $1.7 \times 10^{-6} \text{ cm}^3$ (STP)/sec となる。また、外筒の温度を250℃と設定すると同位体分離系におけるスイープガス中への全トリチウム透過量は $3 \times 10^{-8} \text{ cm}^3$ (STP)/sec となる。

5.2.2 グローブボックス

グローブボックスは炉心燃料給排系機器全体を封入する2次封入システムである。従ってグローブボックスカバーガス中へのトリチウム漏入経路は構造材からの透過及び機器類からの漏洩を想定する必要がある。考慮すべき主要機器類は主真空排気系、燃料精製系、同位体分離系である。

(1) 主真空排気系

主真空排気系での構造材からの透過量は表面積 $1.3 \times 10^7 \text{ cm}^2$, 肉厚 10 cm, トリチウム分圧 0.4 Torr, 温度 300 K として (5.2.1) 式より $\sim 7 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ (STP)}/\text{sec}$ 程度である。

フランジ部からの漏洩は接続部全長 $7 \times 10^4 \text{ cm}$ とし, $1 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ (STP)}/\text{sec} \cdot \text{cm}$ の基準を用いると $7 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 \text{ (STP)}/\text{sec}$ となる。

バルブ類からの漏洩量は 100 個所のバルブ想定し, バルブ 1 個当りの漏洩量基準 $3 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ (STP)}/\text{sec}$ を用いると $3 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 \text{ (STP)}/\text{sec}$ となる。

(2) 燃料精製系

構造材からの透過量としてはスweepガスジャケット (肉厚 1.03 mm, 表面積 $2.5 \times 10^5 \text{ cm}^2$, トリチウム分圧 10 ppm 温度 400 K), 燃料輸送配管 (肉厚 3.7 mm, 表面積 $1.7 \times 10^5 \text{ cm}^2$, トリチウム分圧 0.5 atm, 温度 100°C), sweepガス配管 (肉厚 7.1 mm, 表面積 $3.8 \times 10^5 \text{ cm}^2$, トリチウム分圧 10 ppm, 温度 400 K) を考慮すると合計 $1.8 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ (STP)}/\text{sec}$ となる。

フランジ部からの漏洩量としては接続部全長 $1.7 \times 10^4 \text{ cm}$ とし, 上記の基準を用いると $1.7 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 \text{ (STP)}/\text{sec}$ となる。

バルブ類としては 200 個所を考え, 上記の基準を用いると $6 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 \text{ (STP)}/\text{sec}$ のリーク量となる。

(3) 同位体分離系

透過量としてはスweepガスジャケット (肉厚 2.5 mm, 表面積 $4.6 \times 10^5 \text{ cm}^2$, トリチウム分圧 10 ppm, 温度 400 K), 燃料輸送配管 (肉厚 5.1 mm, 表面積 $5.35 \times 10^5 \text{ cm}^2$, 第1カスケード用トリチウム分圧 0.432 atm, 第2カスケード用トリチウム分圧 0.732 atm, 温度 100°C), sweepガス配管 (肉厚 7.1 mm, 表面積 $1.2 \times 10^6 \text{ cm}^2$, トリチウム分圧 10 ppm, 温度 400 K) を考慮すると合計 $4.4 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ (STP)}/\text{sec}$ のトリチウム透過量となる。

フランジ部は接続部全長を $1.6 \times 10^4 \text{ cm}$, バルブ数は 1000 個所として上記漏洩基準を用いると, 前者について $1.6 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 \text{ (STP)}/\text{sec}$, 後者は $3 \times 10^{-4} \text{ cm}^3 \text{ (STP)}/\text{sec}$ となる。

(4) その他

炉心燃料給排系としてその他に考慮しなければならない漏入源としてフランジ接続部長 $1 \times 10^4 \text{ cm}$ およびバルブ数 1000 個を含める。前者は $1 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 \text{ (STP)}/\text{sec}$, 後者は $3 \times 10^{-4} \text{ cm}^3 \text{ (STP)}/\text{sec}$ となる。

これらの漏入源全てをまとめて Table 5.2.1 に示す。

Table 5.2.1 グローブボックス中へのトリチウム漏入量

	透 過 量 ($\text{cm}^3(\text{STP})/\text{sec}$)	リ ー ク 量 ($\text{cm}^3(\text{STP})/\text{sec}$)	合 計 ($\text{cm}^3(\text{STP})/\text{sec}$)
真 空 排 気 系	7×10^{-10}	1×10^{-4}	1×10^{-4}
燃 料 精 製 系	1.8×10^{-6}	7.7×10^{-5}	8×10^{-5}
同 位 体 分 離 系	4.4×10^{-6}	3.2×10^{-4}	3.3×10^{-4}
そ の 他	-	3.1×10^{-4}	3.1×10^{-4}
合 計	6.2×10^{-6}	8.1×10^{-4}	8.2×10^{-4}

5.3 トリチウム除去装置の検討

ここでいうトリチウム除去装置とは前に記したグローブボックスの様な格納系のカバーガスを循環して精製(脱トリチウム)する装置である。本節では一般論としてトリチウム除去方法、装置のトリチウム除去特性、トリチウム回収に必要な触媒量等について検討した。

5.3.1 ガス中のトリチウム除去方法

ガス中の脱トリチウムシステムとしては、低温方式と高温方式が考えられる。これらの例として Mound Lab. のグローブボックスカバーガス精製系(GADS)ならびにパスボックス雰囲気精製系(ADS)があり、²⁾ これらのフローシートを Fig. 5.3.1 および 5.3.2 に示す。前者はコールドトラップおよび低温吸着利用してトリチウム水ならびにトリチウムガスを除去するもので、後者はトリチウムガスは触媒酸化反応で水にしてトリチウムを全て水分として回収するものである。これらの方式は使用条件により選択されるべきであるが後者の方式は Engelhard 社の実績として各所のトリチウム研究施設で用いられているようである。

5.3.2 循環方式によるトリチウム除去特性

格納系内に放出されたトリチウムを除去するための装置の特性を検討するため、次のパラメータを設定する。

格納系容積	: V_T (m ³)
処理ガス流量	: \dot{V} (m ³ /hr)
基準トリチウム濃度	: C_0
初期トリチウム濃度	: C'
除去に要する時間	: t (hr)
装置の除去効率	: ϵ

格納容積 V_T の格納系内のトリチウム濃度の変化率は次式で表わされる。

$$\frac{dc}{dt} = - \frac{\epsilon \cdot \dot{V} \cdot C}{V_T} \quad (5.3.1)$$

$$\ln \frac{C}{C'} = - \frac{\epsilon \cdot \dot{V}}{V_T} t \quad (5.3.2)$$

ここで、 \dot{V}/V_T は換気回数であり、これをパラメータとして系内のトリチウム濃度減少率 (C/C') と除去装置運転時間の関係を Fig. 5.3.3 および 5.3.4 に示す。図に示された様に、系内に放出されたトリチウムを回収し設定濃度に戻すために要する時間は換気回数に依存するところが多く、放出量が多い程この換気回数の設定は重要な意味を持つ。

5.3.3 トリチウム回収に必要な触媒量

格納系内へ放出されたトリチウムを触媒酸化方式で回収する場合に必要な触媒量 V_C は、除去効率 ϵ と処理流量 \dot{V} の関係を表わした次式により求められる。

$$\epsilon = 1 - \exp\left(-k \cdot \frac{V_0 C}{\dot{V}}\right) \quad (5.3.3)$$

ここで、 k (sec^{-1}) は1次反応速度定数であり、これは次式から求めることができる。³⁾

$$k = 2.27 \times 10^5 \exp(-7100/RT) \quad (5.3.4)$$

(5.3.2)式および(5.3.3)式から(5.3.5)式が導かれ、必要触媒量 V_0 は系内のトリチウム濃度減少率 C/C' 、処理ガス流量 \dot{V} および処理時間 t を決めることにより求めることができる。

$$V_0 = -\frac{\dot{V}}{k} \ln\left(1 + \frac{V_T}{\dot{V} \cdot t} \ln \frac{C}{C'}\right) \quad (5.3.5)$$

必要触媒量や処理ガス流量が大規模になると思われる設備は緊急時のトリチウム回収システムであり、格納室容積 V_T を $4.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ としてその処理ガス流量、処理時間ならびに必要触媒量を評価してみた。

Table 5.3.1はトリチウム放出量と処理時間を与えた時に必要とされるガスの処理流量を(5.3.2)式より求めたものである。 $C_0 = 5 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$ とした。

Table 5.3.2はTable 5.3.1の処理流量をもとに(5.3.5)式より求められる必要触媒量を1次反応定数 k として反応温度 $T = 300 \text{ K}$ ($k = 1.525$)および 450 K ($k = 8.082$)の場合について示したものである。

Table 5.3.1 格納室緊急換気系のガス処理流量

放出量	$\frac{C'}{C_0}$	$\ln \frac{C'}{C_0}$	$\dot{V} \text{ (m}^3/\text{min)}$								
			t = 4時間 0.5 = ϵ = 0.9	t = 8時間 0.5 = ϵ = 0.9	t = 1 day 0.5 = ϵ = 0.9	t = 4 day 0.5 = ϵ = 0.9	t = 7 day 0.5 = ϵ = 0.9				
0.01g	2×10^3	7.6	26585	13314	7392	4452	2478	1105	61.32	63.42	34.9
1g	2×10^5	12.2	42672	21336	11844	7098	3948	1781	991	101.6	56.3
10g	2×10^8	14.5	50732	25368	14112	8442	4704	2113	117.2	120.9	67.2
100g	2×10^7	16.8	58758	2940	16336	9786	5418	2449	136.1	138.6	76.9
300g	6×10^7	17.9	62622	31332	17388	10458	5796	2608	144.9	149.1	82.7

注: $C_0 = 5 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$, $V_T = 4.2 \times 10^4 \text{ m}^3$

Table 5.3.2 格納室緊急換気系の必要触媒量

放出量	$\frac{C'}{C_0}$	$\frac{C'}{1n \frac{C_0}{Co}}$	$V_C (m^3)$									
			t = 4時間	t = 8時間		t = 1 day		t = 4 day		t = 7 day		
0.01g	2×10^3	7.6	1.525=k=8082	1.525=k=8082		1.525=k=8082		1.525=k=8082		1.525=k=8082		
			37.3	0.70	18.6	0.35	6.1	0.12	1.57	0.030	0.9	0.016
			$\dot{V}=1477.1$	$\dot{V}=739.2$		$\dot{V}=247.8$		$\dot{V}=61.3$		$\dot{V}=34.9$		
1g	2×10^5	12.2	59.8	1.13	29.9	0.56	10	0.19	2.5	0.047	1.4	0.026
			$\dot{V}=2371.3$	$\dot{V}=1184.4$		$\dot{V}=394.8$		$\dot{V}=99.1$		$\dot{V}=56.3$		
10g	2×10^6	14.5	71	1.34	35.4	0.67	11.8	0.22	3.0	0.057	1.7	0.032
			$\dot{V}=2818.1$	$\dot{V}=1411.2$		$\dot{V}=470.4$		$\dot{V}=117.2$		$\dot{V}=67.2$		
100g	2×10^7	16.8	82.1	1.55	41.1	0.78	13.9	0.26	3.4	0.064	2.0	0.038
			$\dot{V}=3263.4$	$\dot{V}=1633.6$		$\dot{V}=541.8$		$\dot{V}=136.1$		$\dot{V}=76.9$		
300g	6×10^7	17.9	87.8	1.66	44	0.83	14.6	0.28	3.7	0.070	2.1	0.040
			$\dot{V}=3477.6$	$\dot{V}=1738.8$		$\dot{V}=579.6$		$\dot{V}=144.9$		$\dot{V}=82.7$		

注: $C_0 = 5 \mu Ci/m^3$, $V_T = 4.2 \times 10^4 m^3$

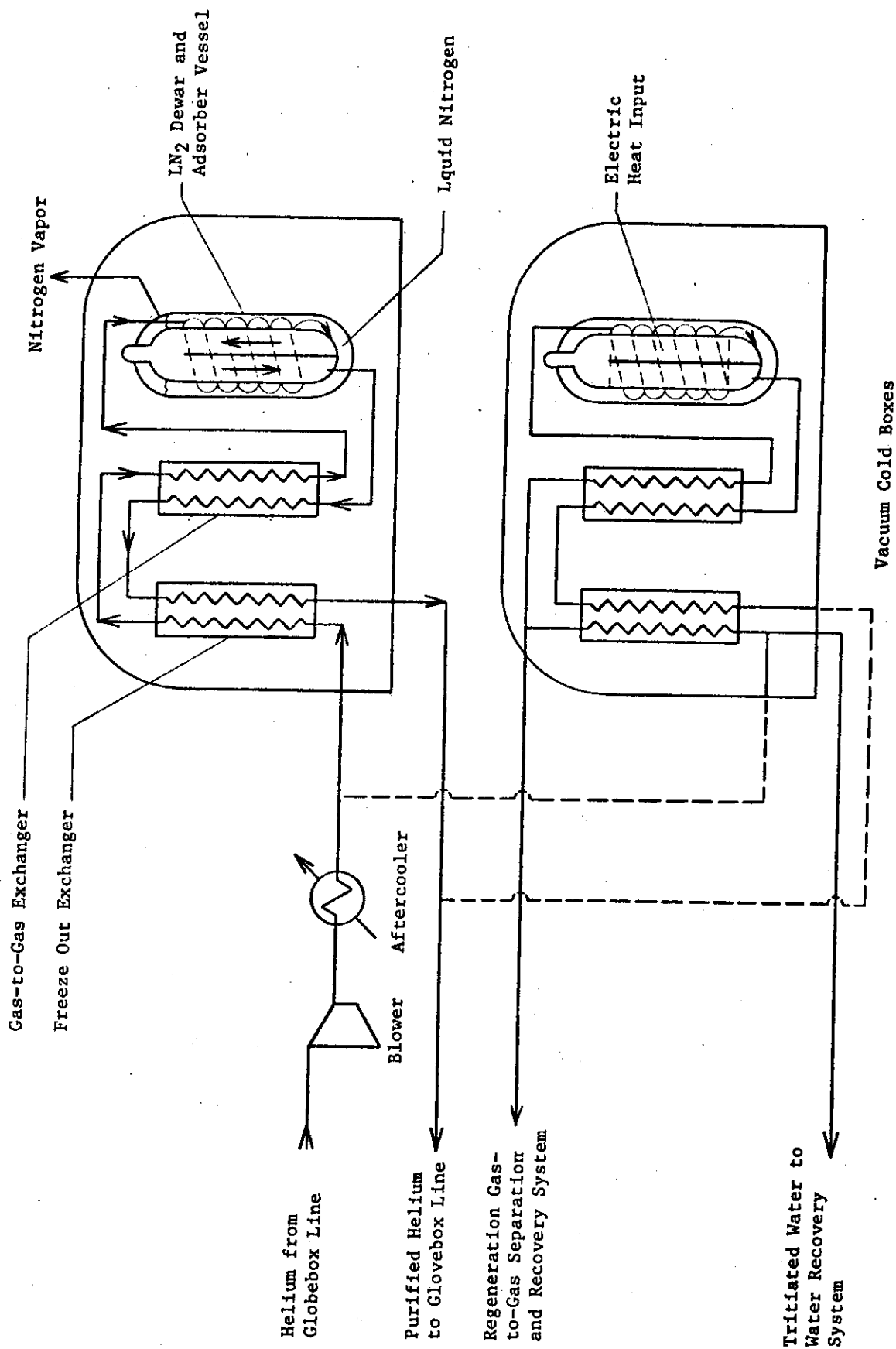


Fig. 5.3.1 Mound Laboratory Cryogenic Helium Purifier Schematic (GADS)

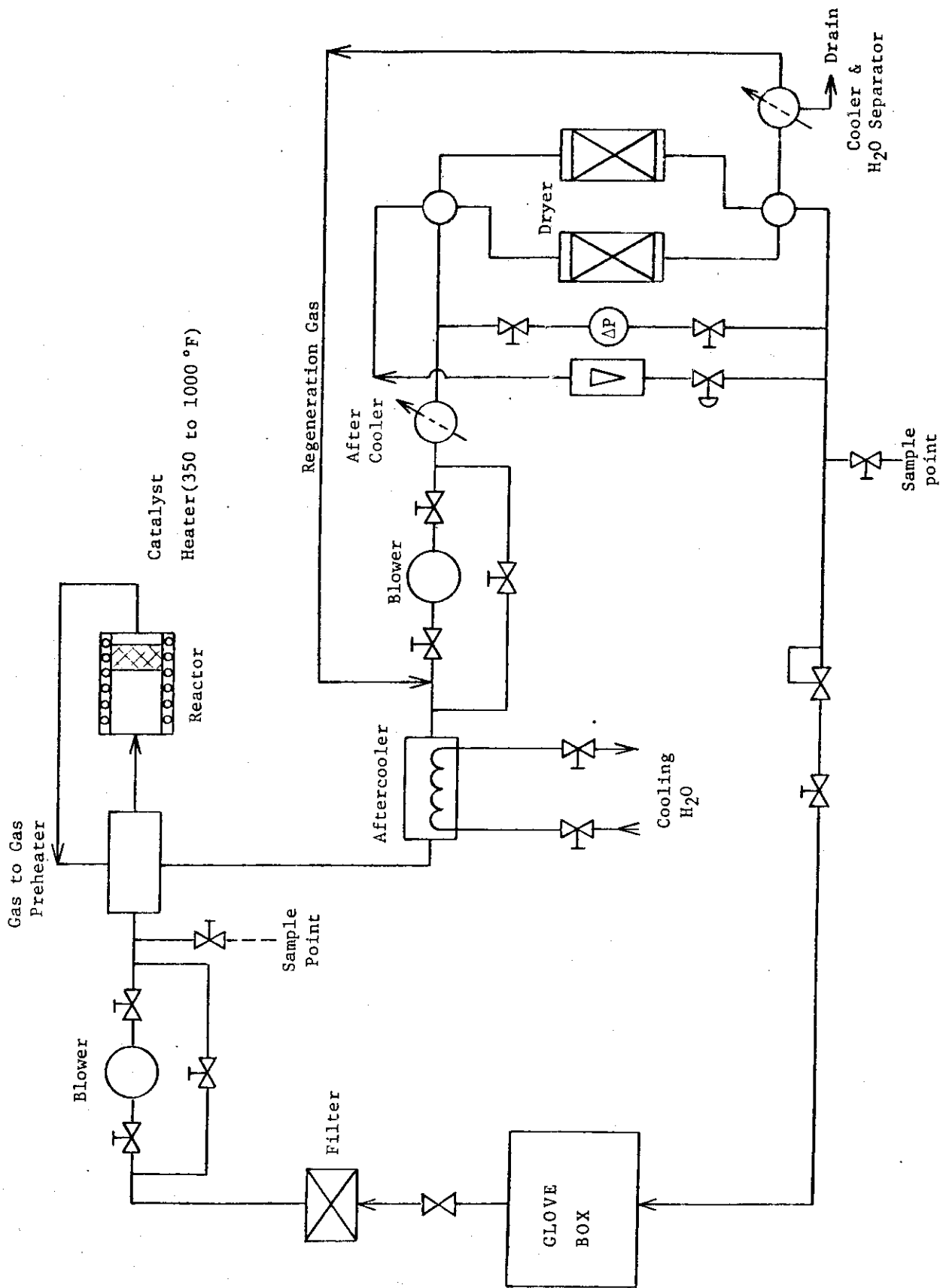


Fig. 5.3.2 Mound Laboratory Air Detritiation System (ADS)

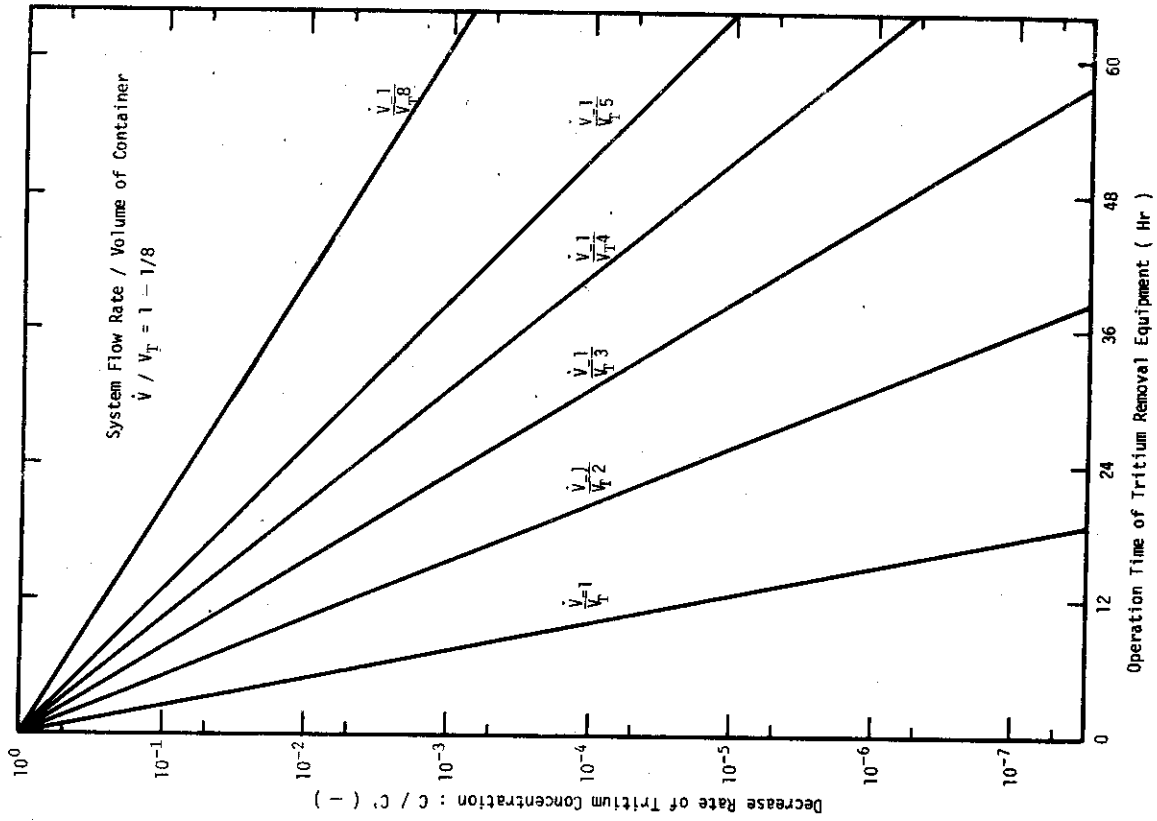


Fig. 5.3.4 Decrease Rate of Tritium Concentration (Removal Efficiency : $\epsilon = 0.9$)(2)

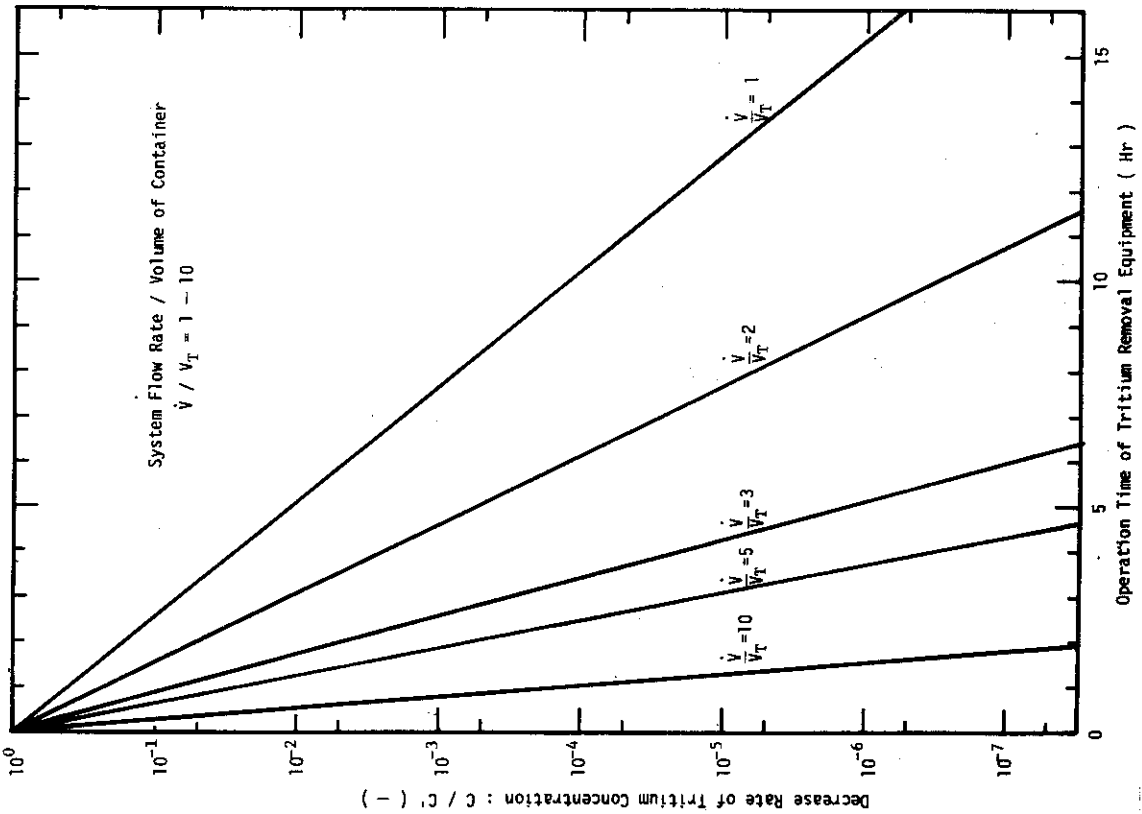


Fig. 5.3.3 Decrease Rate of Tritium Concentration (Removal Efficiency : $\epsilon = 0.9$)(1)

5.4 トリチウム含有ガス精製システム

炉心燃料給排系はトリチウムが主要取扱い物質であり、プロセスから出る廃ガス、グローブボックスカバーガス、各種排出ガスにはかなりのトリチウムが含まれているので充分な管理およびトリチウムの除去が必要である。ここではトリチウムを含む可能性のある下記のガスを処理するシステムについて検討を行う。

トリチウム含有ガス	処理システム
スweepガス	スweepガス精製系 (SGDS)
プロセス廃ガス	プロセス廃ガス処理系 (PWTS)
グローブボックスカバーガス	グローブボックス雰囲気精製系 (GAPS)
各種 真空排気ガス ページガス	放出ガス処理系 (ETS)
フード換気	
格納室換気	格納室換気系 (ACS)
トリチウム水回収ページガス	緊急処理系 (ECS)
	トリチウム回収系 (TRS)

5.4.1 全体構成

トリチウム含有ガス精製システムの全体概念を Fig. 5.4.1 に示す。主系統である炉心燃料給排系 (FCS) の燃料精製系ならびに同位体分離系から排出する廃ガスはプロセス廃ガス処理系 (PWTS) で処理し、トリチウムを回収する。燃料精製系分離器ならびに同位体分離器等トリチウム放出量が多い機器類にはスweepガスジャケットを設けスweepガス精製系によりトリチウムを除去回収する。FCS主系統は全て密封された格納系(グローブボックス)に収納し、グローブボックス雰囲気 (He ガス) は常時グローブボックス雰囲気精製系 (GAPS) により脱トリチウムされる。これは、5.1 節設計思想の2次封入システムに相当するものである。保守・修理時における各種構成機器の真空排気およびページガス、グローブポートの排気、主真空排気系粗引系からの排気ならびにグローブボックスの排気等は放出ガス処理系 (ETS) でトリチウムを除去した後外部放出を行う。また、各種ガス処理系等はフード内に納めることとし、その換気ならびに格納室換気は格納室換気系 (ACS) でトリチウムを除去して炉外放出を行う。これらフードならびに格納室内への異常トリチウム放出が万一発生した場合、換気流を緊急処理システム (ECS) を通して循環し、トリチウム濃度が設定レベルになるまでトリチウムの除去を行う。これら格納室浄化システムについては5.6 節で詳述する。

この様にトリチウム含有ガスは多重性の精製システムでトリチウムを除去し、外部への放出を最小限に抑えるものとする。

5.4.2 各システムの構成および機能

(1) スweepガス精製系 (SGDS)

FCS 構成機器の中で特にトリチウム漏洩量が多いと考えられるものに対しジャケットを設け、スweepガスを流しトリチウム除去装置で透過・漏洩トリチウムを回収してグローブボックス中へのトリチウム放出量を少なくするシステムである。ここでは高温 (~400℃) 操作を行うPd-

合金膜透過器を対象としてSGDSを検討した。スweepガスはジャケット外側の冷却効果を少しでも良くすること、ならびに高温条件を配慮してアルゴンガスとした。

スweepガス精製系の基本構成をFig. 5.4.2に示す。スweepガス中に含まれたトリチウム（ほとんどが水素ガス型）はブローにより再生熱交換器および加熱器を通して約200℃とし、解媒反応器へ送られ添加された酸素と反応させて水の型とする。トリチウム水を含んだアルゴンガスは再生熱交換器並びに冷却器で冷却され、モレキュラーブ充填吸着塔へ入り水分が除去される。

(2) プロセス廃ガス処理系 (PWTS)

FCSの燃料精製系で除去された不純物流ならびに同位体分離系第1カスケードで濃縮された軽水素流中には若干のトリチウムが含まれると思われる。これらの廃ガスからトリチウムを回収する装置がPWTSである。FCSの燃料流中に混入するHの量は微量と考えられるので、同位体分離系第1カスケードは常時運転する必要はなくそのH濃縮流に混入するトリチウムの総量も非常に少量である。従って、その組成も水素ガスで不純物を含まないとすれば、第1カスケードからのH濃縮流は処理可能な量が蓄積するまで貯蔵し同位体分離処理を行って再使用可能と考えられるが、今回の検討ではプロセス廃ガスとしてPWTSへ導くものとした。

プロセス廃ガス処理系の基本構成をFig. 5.4.3に示す。このシステムはSGDSと大略同様の構成であるが、 N_2 、 O_2 等の不純物を除去する装置があり、トリチウム炭化水素を分解するために触媒反応塔は高温操作を行う。また、PWTSからのブリードは～100% Heと考えられるのでグローブボックスカバーガスへ導入できるものとしてPWTSから廃ガスが生じない様な閉ループとした。

(3) グローブボックス雰囲気精製系 (GAPS)

GAPSはFCS構成機器を納めたグローブボックス内雰囲気中のトリチウム濃度を設定値以下に保持し、設定負圧を維持するためのカバーガス(He)循環システムである。

グローブボックス雰囲気精製系の基本構成をFig. 5.4.4に示す。このシステムはSGDSと同様の構成であるが、水分除去用のモレキュラーシーブ吸着塔を2段として水蒸気添加により除染係数を大きくしている所が異なる。この系統については2次封入系として5.5節で詳細に述べる。

(4) 放出ガス処理系 (ETS)

FCSならびにトリチウム含有ガス精製系から出る放出ガスは全て大気放出する前にETSを通してトリチウムを除去する。ETSに入るガスは主真空排気系粗引系からの排出ガス、各種機器類真空排気系からの排出ガスおよびページガス、グローブボックスの排気ならびにグローブポートの排気等である。

放出ガス処理系の基本構成をFig. 5.4.5に示す。各種ポンプ等からの排気は全てプレフィルターおよび活性炭床を通してオイルミスト等を除去して一時貯蔵タンクに導入する。このタンク内圧が設定値を越えるとコンプレッサーが作動し、放出ガスはモレキュラーシーブ吸着塔に入る。ここで微量の有機物・水分等が除去された後トリチウムガスは触媒反応器で水になり、このトリチウム水は2段のモレキュラーシーブ吸着塔で除去される。最終放出ガスはトリチウムモニターを通してスタックから放出するが、トリチウムレベルが高い場合は放出ガスを一時貯蔵タンクへ戻す。

(5) トリチウム回収系 (TRS)

スweepガス精製系 (SGDS), プロセス廃ガス処理系 (PWTS), グローブボックス雰囲気精製系 (GAPS), 放出ガス処理系 (ETS) 等で回収したトリチウム水を電気分解および同位体分離を行い, 燃料ガスとして再生するシステムである。

トリチウム回収系の基本構成を Fig. 5.4.6 に示す。ページガスに同伴されたトリチウム水はコールドトラップで液体として回収し, 電気分解セルから生成される水素ガスを同位体分離器でトリチウムを濃縮して燃料として再生する。

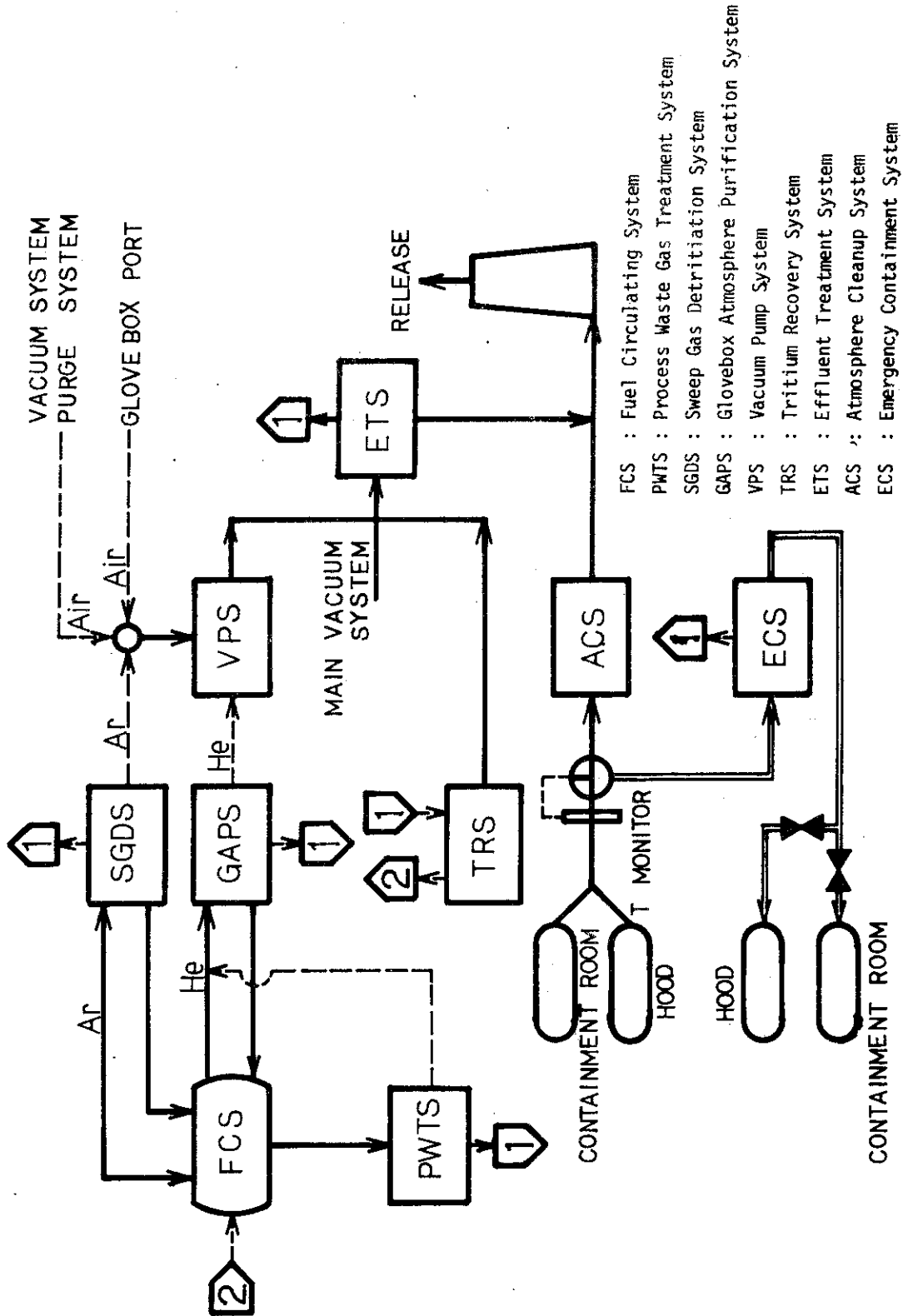


Fig. 5.4.1 Schematic Diagram of Tritium Containment Concept

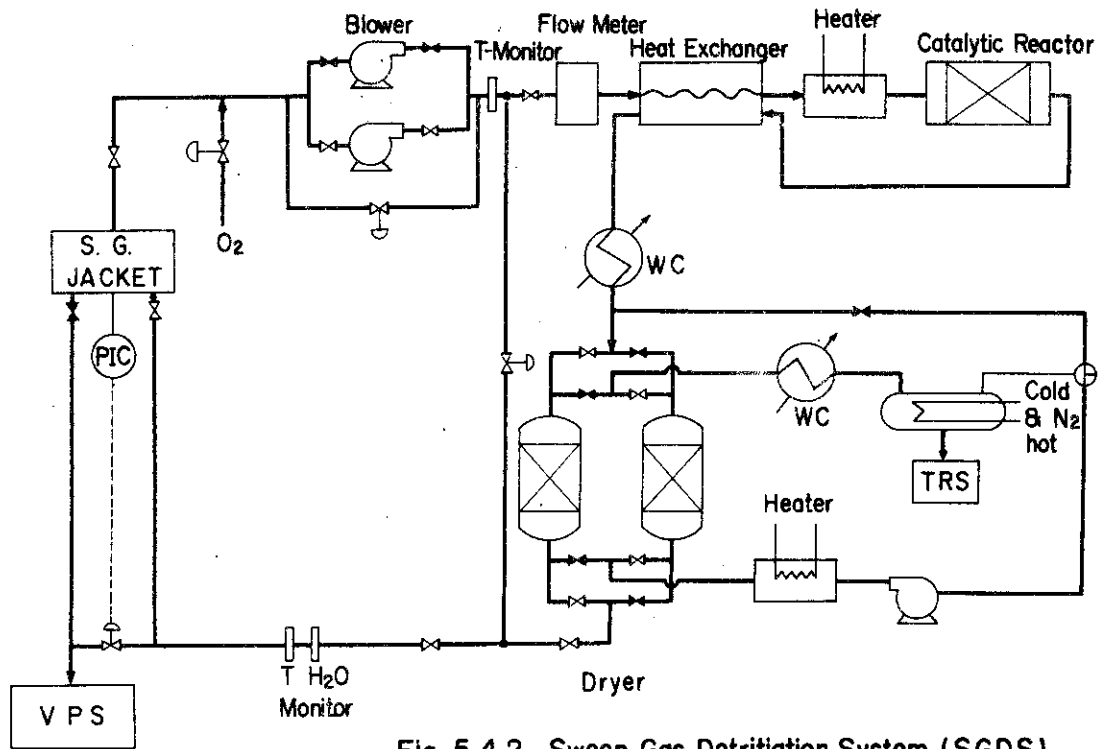


Fig. 5.4.2 Sweep Gas Detritiation System (SGDS)

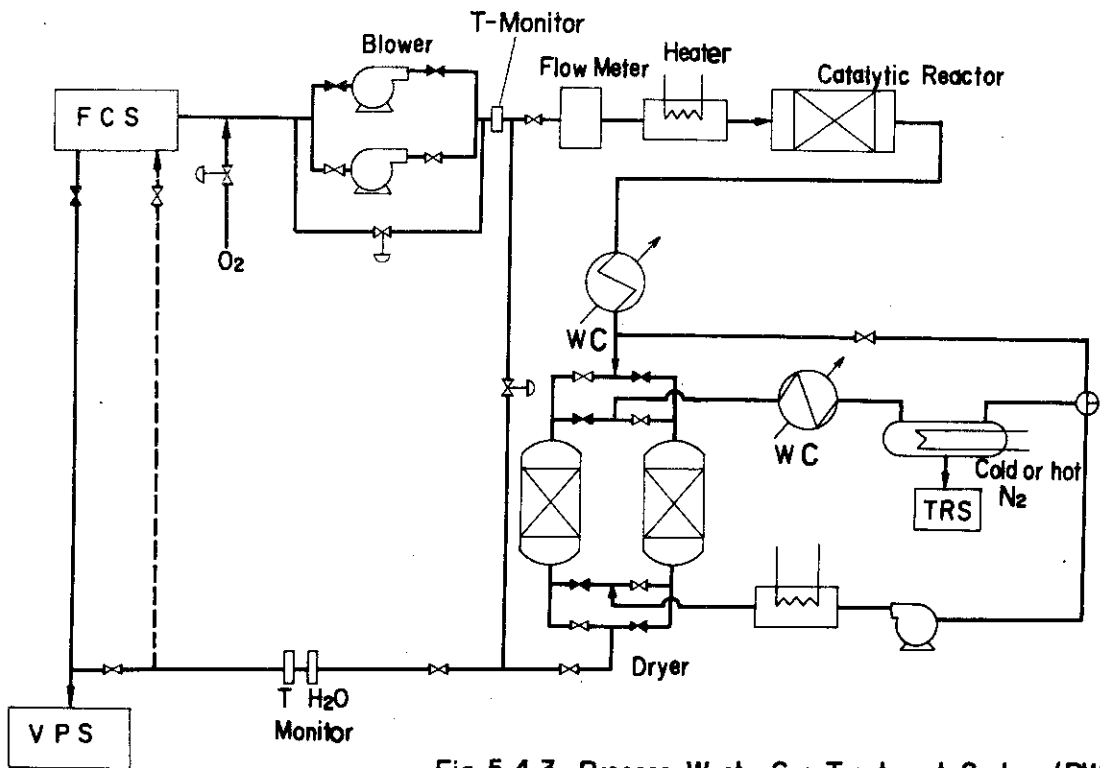


Fig. 5.4.3 Process Waste Gas Treatment System (PWTS)

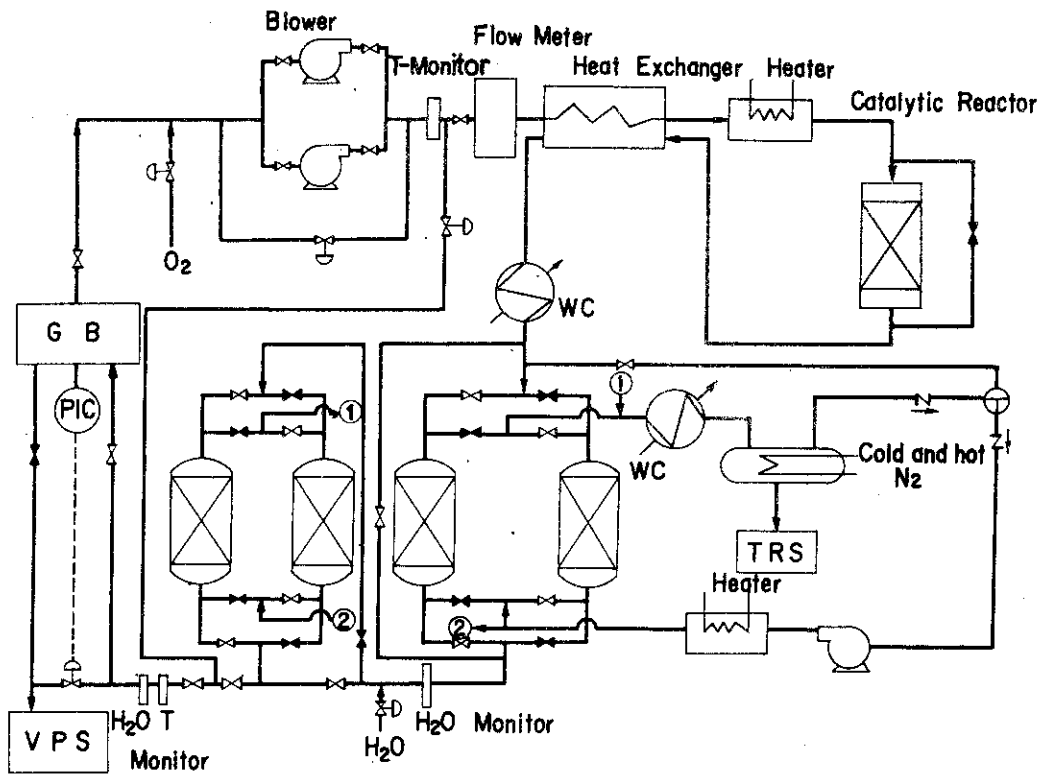


Fig. 5.4.4 Glovebox Atmosphere Purification System (GAPS)

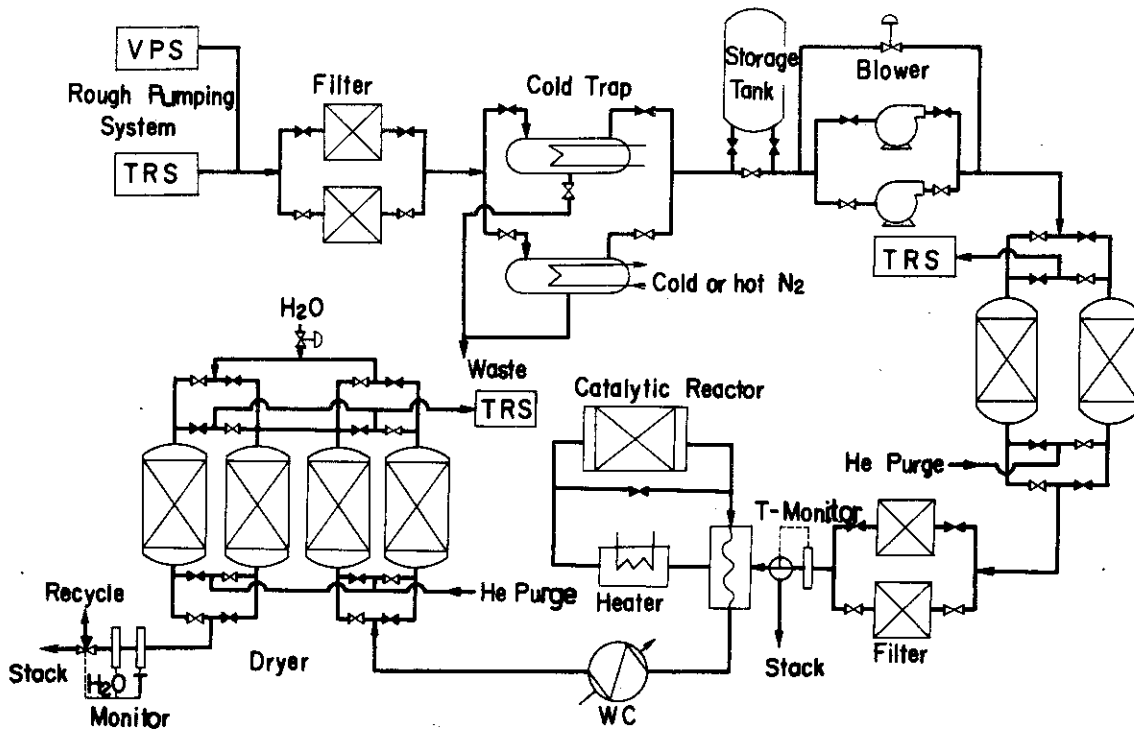


Fig. 5.4.5 Effluent Treatment System (ETS)

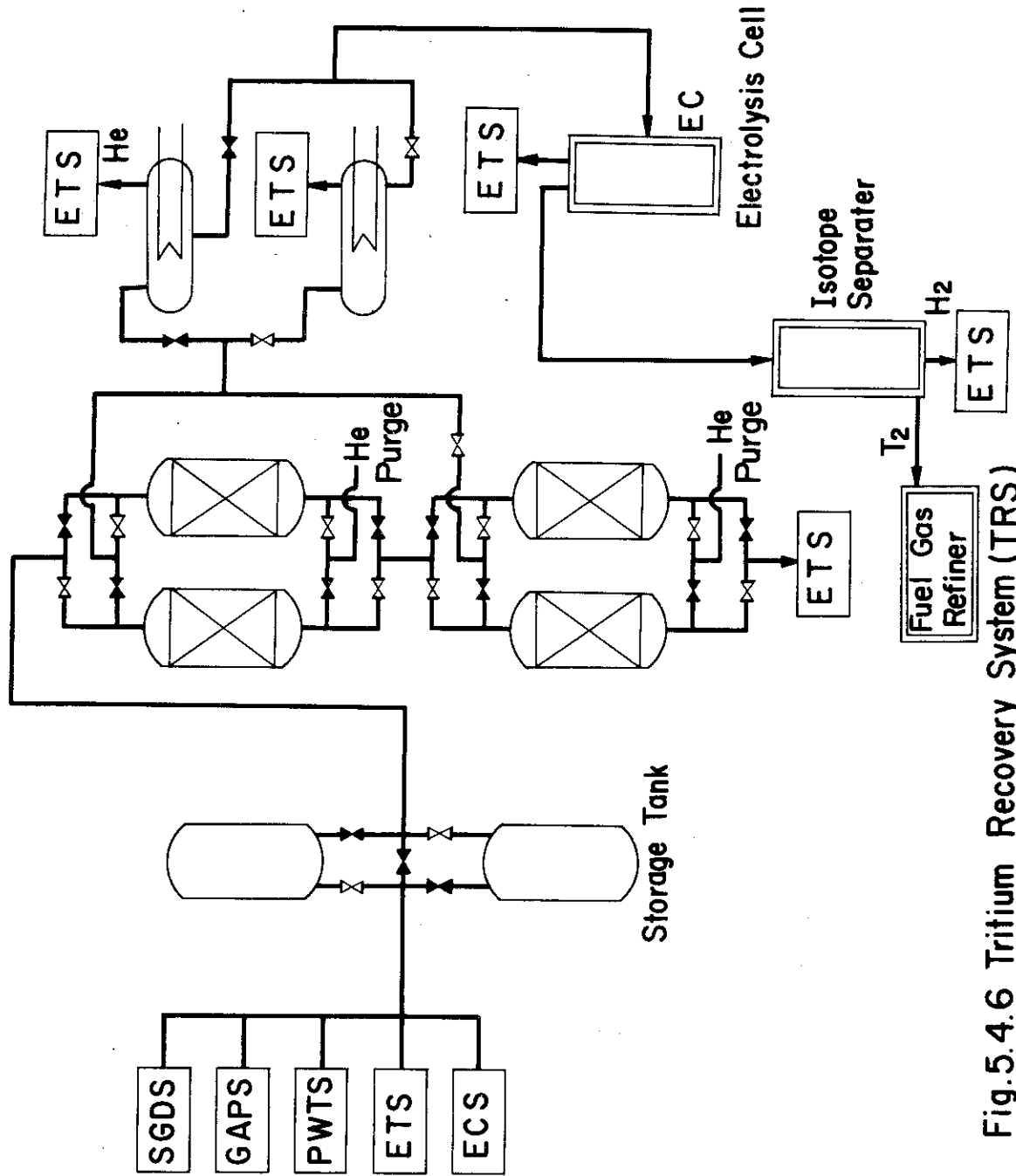


Fig.5.4.6 Tritium Recovery System (TRS)

5.5 2次封入システム

2次封入システムは全ての1次封入系（炉心燃料給排系の機器・装置類）をグローブボックス内に格納し、1次封入系からの漏出トリチウムが格納室（3次封入システム）へ拡散することを防ぐものである。

5.5.1 システム構成および主要設計値

2次封入システムはグローブボックスおよびその雰囲気を精製するGAPS（グローブボックス雰囲気精製系）とからなる。これらの検討を進めるための基本的な条件を設定した。これらを基本仕様としてTable 5.5.1および5.5.2に示す。グローブボックス内容積の内訳は主真空排気系 150 m^3 、燃料精製系 150 m^3 、同位体分離系 300 m^3 、その他 100 m^3 とした。処理ガス流量はトリチウム漏入量に対し1 ppbが維持でき、3次封入系（格納室）からの水分漏入量を $\sim 1\text{ ppm}$ に保つことができる流量である。入口におけるトリチウムガス濃度は基準濃度の100倍と設定し、出口濃度はEngelhard社の公称値⁴⁾である。

Table 5.5.1 2次封入系の基本仕様

項 目	基本仕様
型 式	箱型密閉構造
グローブボックス内容積	$7 \times 10^2\text{ m}^3$
グローブボックス内圧	-25 mm Aq
グローブポート数	1400
グローブ表面積	$0.5\text{ m}^2/\text{グローブ}$
グローブ肉厚	0.5 mm
換気回数	6回/hr

Table 5.5.2 グローブボックス雰囲気精製系(GAPS)の基本仕様

項 目	基本仕様
カバーガス	ヘリウムガス (99.9%以上)
トリチウム漏入量	$1 \times 10^{-3}\text{ cm}^3\text{ (STP)}/\text{sec}$
基準トリチウム濃度	$2 \times 10^{-2}\text{ }\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$
トリチウム除去方式	触媒酸化-脱水方式
入口濃度	100 ppm
出口濃度	1 ppb 以下
処理ガス流量	$\left\{ \begin{array}{l} 70\text{ m}^3/\text{min} : \text{水分除去用} \\ 30\text{ m}^3/\text{hr} : \text{トリチウムガス除去用} \end{array} \right.$

GAPSはグローブボックスカバーガス(He)からトリチウムガスおよびトリチウム水を全

て水分として除去・回収するシステムであり、Fig. 5.4.4に示した通り主要な構成機器は循環送風機、触媒酸化反応器およびモレキュラーシーブ吸着塔等である。GAPSに必要な触媒量は(5.3.3)および(5.3.4)式より除去効率 ϵ (トリチウムガス-水変換係数)を0.999、反応温度473 K、処理ガス流量 $30 \text{ m}^3/\text{hr}$ として求めると0.5 ℓ 程度である。また、本システムで回収される水量の最大値は処理ガス流量中に1 ppmの水分が含まれるとして、 0.6 g/day 程度である(但し、スワンピングを行うとすると水量はその分増加する。)

5.5.2 2次封入系からのトリチウム漏出

2次封入系(グローブボックス)から3次封入系(格納室)へのトリチウム漏出経路は、①漏洩(リーク)と②構造材等からの透過拡散が考えられる。前者については、グローブボックスそのものを密閉(リークタイト)構造とすること、ならびにグローブボックス内を外気に対して負圧に維持して空気流入速度をトリチウム拡散が無視できる様にするにより、マイナーな経路とすることができる。従って、ここでは後者の問題に対する考察を行うが、グローブボックスから格納室への透過経路としては、他の構成材料に比べ非常に薄いバリアであること、および透過係数が高いことからグローブを通しての透過が最も重要と考えられる(本設計では通常運転時はグローブポートは密閉し、グローブと格納室雰囲気とを隔離することを考えているので、②についても問題は小さいと考えられる。)

エラストマーに関するトリチウム透過データは少ないが、その1例をFig. 5.5.1に示す。⁵⁾⁶⁾⁷⁾図から明らかな様にトリチウム水の透過率はトリチウムガスより100倍程度大きい。最も透過量が小さいブチルゴムの水分透過率は $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 8.4 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 (\text{STP}) / \text{cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{ppm}$ であり、グローブの材質として安全性の観点からはブチルゴムが良さそうである。ブチルゴムのトリチウムガスの透過に関するデータはないが、他の類推から上記 $Q_{\text{H}_2\text{O}}$ の0.01程度と考えられる。

以上のことからグローブボックス(2次封入系)から格納室(3次封入系)へのトリチウムの移動は、主にトリチウム水としてグローブを透過する経路で進行すると考えられる。グローブボックスからグローブを通して格納室へ透過するトリチウム水の量はグローブボックス雰囲気のトリチウム水分圧 P_{HTO} から算出できる。グローブとして0.5 mm厚のブチルゴムを使用すると、グローブボックス内トリチウム水分を1 ppmとするとFig. 5.5.1より 14 Ci/day が放出されることになる。これはグローブボックス中の水分を1 ppmに管理するならば、水分が全てトリチウム水であると仮定したことになる。実際はトリチウム水はその1部と考えられる。ドライグローブボックス内でHT: 10 ppm領域ではその1%が水と交換するというデータ⁸⁾があり、これを引用すると格納室へのトリチウム水透過量を 1 Ci/day 以下に維持するためには、トリチウム水を0.07 ppm、即ちグローブボックス雰囲気の水分を7 ppm以下に保持すれば良いことになる。

5.5.3 グローブボックス雰囲気中の水分の回収

2次封入系から3次封入系へのトリチウムの透過を小さくするためには、グローブボックス雰囲気におけるトリチウム水の生成を抑制する事が重要である。これはグローブボックス雰囲気から酸素および水分を定常的に除去することによって可能であるが、トリチウム水生成反応として

は酸化反応より H_2O との同位体交換反応が支配的であり、水分の除去を第1義とすべきであろう。

グローブボックス中の水分レベルはGAPS（グローブボックス雰囲気精製系）の水分除去能力によって決定されるものである。格納室（3次封入系）雰囲気気温 $20^\circ C$ 、湿度 50% (0.02 atm) とするとグローブを通してグローブボックス内に透過してくる水分は全グローブ使用時で $1.2 \text{ cm}^3 \text{ (STP)}/\text{sec}$ 程度と考えられる。この水分量をグローブボックス内で 1 ppm 以下に保つために必要な換気容量は $72 \text{ m}^3/\text{min}$ となる。この時にGAPSで回収される水分は約 $85 \text{ g}/\text{day}$ となる。

5.5.4 トリチウムガスの回収

トリチウムガス (T_2 , HT) の透過はトリチウム水に比べて問題は小さいが、十分に管理する必要があることは言うまでもない。ブチルゴム製のグローブを通してのトリチウムガス透過率を水の $1/100$ と仮定し、グローブボックス中のトリチウムガス濃度を 1 ppm とすると、全てのグローブボックスから格納室（3次封入系）へ移動するトリチウムガスは全グローブボックス使用時に $0.14 \text{ Ci}/\text{day}$ となる。グローブボックス内で 1 ppm- HT という量は、1次封入系から $700 \text{ cm}^3 \text{ (STP)}/\text{day}$ または約 $0.1 \text{ g}-T_2$ (1000 Ci)/day の漏入を許すことになる。これは基本仕様の漏入量 $1 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ (STP)}/\text{sec}$ の約 10 倍である。

このトリチウムガスを回収するための処理ガス流量は、 $700 \text{ cm}^3 \text{ (STP)}/\text{day}$ の漏入量を 1 ppm に保持できるものとする $30 \text{ m}^3/\text{hr}$ のガス処理容量を必要とすることになる。

5.5.5 GAPS の運転方法

上記の検討より、GAPS の運転方法は水分の除去とトリチウムガスの除去を分離して考え、前者に対しては $70 \text{ m}^3/\text{min}$ で連続的に運転し、後者に対しては必要に応じて（例えば、2 ppm で作動し、1 ppm で停止する様設計する。）運転する方式を基本線とする。ただし、燃料給排系が定常的に運転されている場合、グローブポートは密閉することを原則としており水分の漏入量もかなり少ないと考えられるので、全ての運転はトリチウムモニターとそれに連なる制御系で自動制御運転されるものとする。

以上の様にグローブボックス中の水分量を充分低く管理することは人体に対する安全性の観点からも利点がある。即ち HT や T_2 の様なトリチウムガスは人体に吸収されにくく、 HTO や T_2O 等の化学形のトリチウムに比べて危険度が小さいということであり、米国の職業人に対する RCG (Radiation Concentration Guideline) でも $2 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ と $5 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ で 400 倍の危険度を考慮している（但し、日本の法規ではこの差異は考慮されていない）。

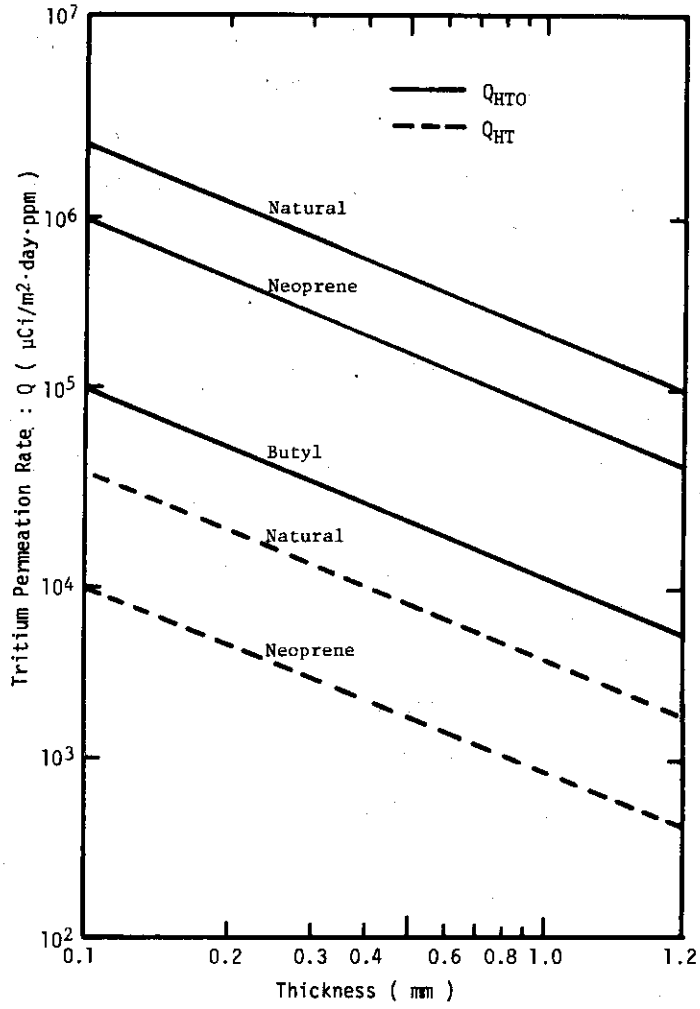


Fig. 5.5.1 Tritium Permeation Through Rubber Films

5.6 3次封入システム

3次封入システムはトリチウムの環境放出に対する最終的なバリアであり、通常運転時の定常的な環境へのトリチウム移動をできるだけ少なくし、万一のトリチウム放出事故時においてもトリチウムが環境へ散逸しないよう封入する機能を有するものである。

3次封入システムは格納室およびその排気処理系（ACS）ならびに緊急処理系（ECS）からなっている。1次および2次の封入システムを有する格納室内トリチウム濃度はかなり低く管理されているが、通常時の格納室の排気はACSを通してスタックから放出する。また、主要機器、配管等の破損事故あるいは2次封入システムの重大事故時における格納室内へのトリチウム放出事故を想定して、そのトリチウムを回収するためのECSを設置する。

5.6.1 格納室

コンクリート造りの格納室は、機器・装置・配管類またはグローブボックスあるいは各種ガス精製装置類からのトリチウムリーク事故を想定して、トリチウムの壁面吸着量を少なくし、除染作業を容易にするためにステンレス鋼製の内張りを設置する。室はリークタイトにし、室内圧は大気圧より負圧（ -15 mm Aq ）とする。

また、出入口は二重エアロック方式を用い、人の出入に際して格納室シールの完全性を保持できる設計とする。汚染状態の格納室への出入はエアラインスーツ^{9), 10)}を着用して行うことができるが、この種のスーツを着用すると $2 \times 10^4 \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ の雰囲気における8時間の作業で従事者はHTOとして 1 mCi を取込む程度である。

炉心燃料給排系およびその補助装置類を格納する室は、Fig. 4.3.1に示した様に炉本体格納室地下およびその周囲のドーナツ状室の1/6を占め、合計 $4.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ である。格納室の基本仕様をTable 5.6.1に示す。

Table 5.6.1 格納室の基本仕様

項 目	基 本 仕 様
雰囲気ガス	空 気
室 温	20℃
湿 度	50%
気 圧	-15 mm Aq
容 積	$4.2 \times 10^4 \text{ m}^3$
基準トリチウム濃度	運転時： $2 \times 10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 保守時： $2 \times 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$
トリチウム漏入量	1 Ci/day
空気漏入量	0.1%/day

5.6.2 格納室浄化システム

格納室の雰囲気浄化は、通常運転時は格納室換気系（ACS）を通して定常的にスタックから放出することにより、異常時（トリチウム放出事故時）には緊急処理系（ECS）を通して循環することにより、トリチウムの除去等を行う。これらはFig. 5.4.1に示した様にトリチウム濃

度を絶えずモニターし、異常が検出された時には自動的に ECS が作動し環境放出経路が遮断される様に自動制御装置を有する。

通常時の建屋内空気の流れは非管理区域から格納室を通りグローブボックスならびにフード中へ、即ち放射能レベルの低い方から高い方へ空気が流れる様に換気系を設計する。通常運転時に ACS へ送られるガス流量は、格納室内容積の 10%/day として $175 \text{ m}^3/\text{hr}$ ($3 \text{ m}^3/\text{min}$) とする。ACS へ送られるガス中に含まれるトリチウムはほとんどが HTO 型と考えられる。従って ACS を構成する主要機器は通常のプレフィルターおよび高性能アブソリュートフィルターの他に水分吸着用のモレキュラーシーブ吸着塔を備えるものとする。ACS を通過する水分を全て除去するためには吸着塔は $\sim 40 \text{ kg-水/day}$ の吸着容量をもたなければならないが、格納室へのトリチウム漏出が 1 Ci/day 以下に管理されている場合は水分の除去は特に必要ないと考えられるので、水分除去装置の規模および運転モードの最適化が必要である。

5.6.3 緊急処理システム (ECS)

ECS は格納室内への異常トリチウム放出事故に対応させるものであり、基本的には炉心燃料給排系の全トリチウムインベントリーが格納室に放出された場合にも緊急処理可能なものである。

緊急処理系 (ECS) の基本構成を Fig. 5.6.1 に示す。格納室内に放出されたトリチウムは ECS の大型ブロワーにより再生熱交換器およびヒータを通して昇温され触媒酸化反応器で空気中の酸素と反応してトリチウム水となる。トリチウム水は格納室内の水分と共にモレキュラーシーブ吸着塔で ECS を流れる空気中から除去される。ECS の基本仕様を Table 5.6.2 に示す。基準トリチウム濃度は法規による許容濃度とし、入口濃度は全インベントリー 300g のトリチウムが格納室内に均一に分布した場合のトリチウム濃度とした。

Table 5.6.2 緊急処理系 (ECS) の基本仕様

項目	基本仕様
雰囲気ガス	空気
基準トリチウム濃度	$2 \times 10^{-7} \mu \text{Ci}/\text{cm}^3$
トリチウム除去方式	触媒酸化-脱水方式
入口濃度	30 ppm
出口濃度	1 ppb 以下
処理ガス流量	$150 \text{ m}^3/\text{min}$

5.6.4 主要装置の検討

3次封入システムで大規模な装置は ECS であり、ECS は主要機器として大容量ブロワー、触媒酸化反応塔および大吸着塔等で構成される。ブロワーとしては $150 \text{ m}^3/\text{min}$ 程度の容量を確保すればよいと考えられ、余裕をみても市販のものが使えるであろう。触媒酸化反応は HT (又は T_2) を HTO (又は T_2O) に酸化させるものでその必要触媒量は (5.5.3) および (5.5.4) 式から算出できる。反応温度を 200°C とすると 1次反応速度定数は 120 sec^{-1} 、トリチウムガス除去係数 $\epsilon = 0.999$ とすると必要触媒量は 0.15 m^3 となる。また、水分吸着材はモレキュラーシーブとしその吸着量は 0.1 g-水/g-吸着材 とする。ECS に輸送される水分は、格納室

の温度 20 °C および湿度 50 % とすると、 2×10^3 kg/day となり、吸着塔を 24 hr で破過するとして設計すると必要吸着材は 2×10^4 kg となる。吸着塔は 2 基並列に設置し一方が使用されている時、他方は切替運転に備える。

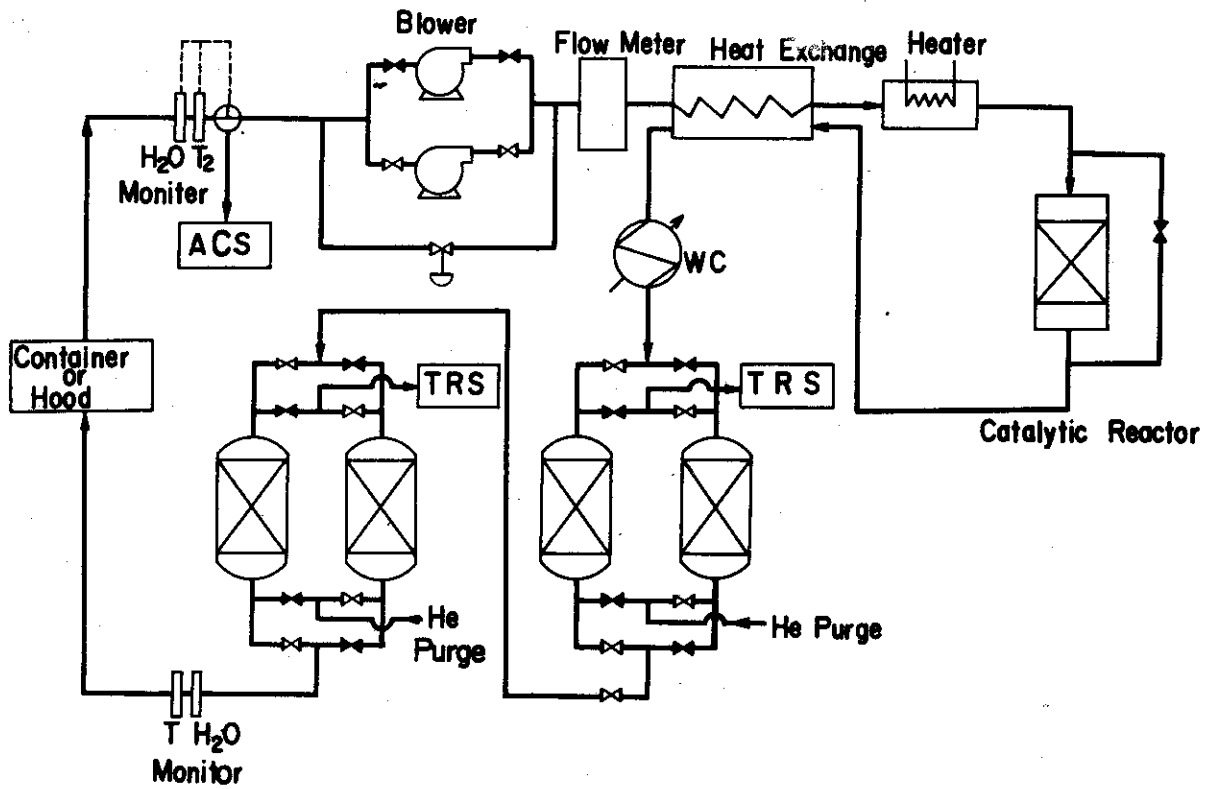


Fig. 5.6.1 Emergency Containment System (ECS)

参 考 文 献

- 1) 原研 炉設計研究室, JAERI-M 7293, 1977
- 2) C.J. Kerchner and J.C. Bixel, "Tritium Effluent Control Laboratory", CONF-740807
- 3) J.C. Bixel and C.J. Kerchner "A study of Catalytic Oxidation and Oxide Adsorption for the Removal of from Air", WASH-1332, 1974
- 4) W.M. Rogers and R. Michalek, Tritium Removal Systems, Engelhard
- 5) R.H. Steinmeyer and J.D. Braun, "Hydrogen Isotope Permeation in Elastomeric Materials", CONF-750989, 1976
- 6) R. Hughes, "The Permeability of Neoprene and PVC to Hydrogen, Denterium and Tritium", AWRE-0-17/62, 1962
- 7) J. Crank and G.S. Park, "Diffusion in Polymers", Academic Press, London, 1968
- 8) C.J. Kerchner and T.B. Rhinehammer, "Tritium Effluent Control Program at Mound Laboratory", CONF-72/030, 1972
- 9) G.L. Phillabaum and P.C. Adams, "The Development of the Mound Laboratory Supplied-Air Bubble Suit", MLM-2008, 1973
- 10) W.R. Bush, "Assesing and Controlling the Hazard from Tritiated Water", AECL-4150, A.E. of Canada Ltd., 1972

6. トリチウム機器の安全性検討

本設計では、トリチウムに対して3重の封入システムを採用している。すなわち、各機器での第1次封入、グローブボックスによる第2次封入、格納室による第3次封入である。第2次および第3次のトリチウム封入システムについては第5章に述べた。ここでは、第1次封入システムである機器類について安全性検討を行なう。

燃料給排系でのトリチウム利用機器では、安全上および機能上次のような点に留意する必要がある。

- (1) 外部系に対して気密であること。
- (2) 機器の潤滑材等を流体が汚染しないことおよび潤滑材等が流体を汚染しないこと。
- (3) 防爆構造であること。

このうち、(3)については、水素ガス用機器で実績のある技術なので、ここでは主として(1)、(2)の点について検討する。

6.1 真空ポンプ

本稿での検討対象は、Fig. 2.2.1 に示す主真空排気系のうちクライオ・パネルを除いた真空ポンプおよびFig. 2.3.2 に示すガス精製系の真空ポンプとする。これらのポンプの概略仕様をTable 6.1.1に示す。上記の要求を満すようなポンプとしては、クライオポンプ、クライオソープションポンプ、ゲッターポンプ、水銀拡散ポンプ、揺動ポンプ、ダイアフラムポンプがある。

Table 6.1.1 真空ポンプの概略仕様

項目	粗引系 ロータリーポンプ	補助排気系 ターボ分子ポンプ	回収系メカニカル ブースターポンプ	ガス精製系 揺動ポンプ
排気ガスの種類	空気または不活性ガス	空気、不活性ガス、重水素、トリチウム、ヘリウム	重水素、トリチウム、ヘリウム	重水素、トリチウム、ヘリウム
吸入温度	300 °K	300 °K	300 °K	300 °K
到達圧力	1×10^{-2} Torr	1×10^{-8} Torr	1×10^{-2} Torr	1 Torr
ポンプ単体排気速度	800 l/s	4100 l/s	40 l/s	20 l/s

6.1.1 粗引系ロータリーポンプ

粗引系ロータリーポンプは、完全停止状態の実験炉を起動する場合に使用する。したがって、このポンプの排気ガス中には通常状態ではトリチウムは存在しない。このため、粗引ポンプとしては、信頼性、排気特性、使用実績、経済性等から判断してロータリー・ポンプを使用し、機器

による1次封入は行なわない。仮に何等かの理由*により排気ガス中にトリチウムが混入した場合の対策としては、ロータリー・ポンプ全体をスニープガスを満した気密容器内に封入して外界へのトリチウム漏洩を防止している。また、粗引系から排出されたガスは炉に再注入される事はない。したがって油によるガスへの不純物混入の問題は発生しない。

6.1.2 補助排気系ターボ分子ポンプ

補助排気系は、Table 6.1.1に示すように、 10^{-8} Torr の到達圧力を得なければならず、また排気速度も大きい。Table 6.1.1に示されているような補助排気系用真空ポンプの要求仕様を満たすような気密ポンプは存在しない。しかし補助排気系での真空ポンプの作動圧力範囲は排気開始時で 10^{-2} Torr、到達圧力で 10^{-8} Torrである。このように排気雰囲気中の圧力範囲が低いことによりトリチウムの分圧も低い。このような事情から、補助排気系用真空ポンプとしてはターボ分子ポンプを採用した。

(1) ターボ分子ポンプの安全対策

トリチウムガスに対してターボ分子ポンプを採用した場合の安全上の問題点としては、①ポンプからのトリチウムリーク、②潤滑油へのトリチウム混入、③回収ガス中への油の混入、の3点が考えられる。

ポンプからのトリチウムリークに関しては、回転力をポンプ内に伝達する部分からのトリチウムリークが一番大きな問題であるが、Balzers社のターボ分子ポンプはFig. 6.1.1に示すようにポンプ内にモータを設置している。したがって、回転軸受シールは存在しない。また、軸受部ベアリングに供給する油もポンプ内へ密封されている。現在のところ、このポンプからのトリチウムリークのデータは未入手であるが、上に述べたような構造から考えて密封型ポンプと大差ないトリチウム封入特性が期待できる。ただし、低真空側のシール部分および電力導入部分については若干の改良を必要とするかもしれない。上に述べたように、本ターボ分子ポンプからのトリチウムリークは極めて小さい事が期待できるが、“as low as practicable”の観点から、粗引系ポンプの場合と同様にポンプ全体を密封容器内に封入する。

潤滑油中へのトリチウム混入に対しては、油がポンプ内に密封されているので、通常運転時には潤滑油を通しての外部へのトリチウムリークの問題はない。Balzers社の指定によれば、潤滑油は5,000時間毎の交換が指定されているが、この交換作業については、6.6にて触れる。なおターボ分子ポンプ停止中に潤滑油蒸気がポンプ内に侵入する事を防止するため、一般には乾燥空気または乾燥窒素ガスをパージする。本設計では、ヘリウムガス分離装置としての観点から、ヘリウムガスをパージすることが適当である。このようなシステムを採った場合のガス精製装置でのヘリウム処理量の増加は1%以下である。

燃料ガス中への潤滑油の混入に対しては、ターボ分子ポンプの背圧側にコールドトラップを設置する。

* 修理等のため実験炉を完全停止した場合、炉心内は不活性ガスを注入する。この不活性ガスの初期排気は粗引系によって行なわれるが、炉内の機器等に吸着されていたトリチウムが不活性ガス中に混入することがあり得る。

(2) 保 守

ターボ分子ポンプの保守としては、ベアリング用潤滑油の交換、ベアリングの交換、羽根部分のクリーニング等である。潤滑油交換は5,000時間毎^{*}、ベアリング交換と羽根のクリーニングは20,000～30,000時間毎である。ターボ分子ポンプの運転は、2時間に1回10分間運転するのみである。このような運転モードから、保守部品の寿命を単純に推定すると潤滑油の交換は6～7年に1回、ベアリング交換、羽根のクリーニングは25年以上は必要ない。すなわち、潤滑油交換は実験炉の寿命中に1回程度となる。実際には、より高い頻度での保守が必要であるが、いずれもグローブ・ボックス内で作業が可能であり、保守上の問題はない。

6.1.3 回収系用ブースターポンプ

回収系用ブースターポンプは、作動圧力範囲、経済性、信頼性、使用実績などから考えてメカニカルブースターポンプを採用している。このポンプも、ターボ分子ポンプ同様に非密封型真空ポンプであり、前述のターボ分子ポンプの場合と同一の安全上の問題がある。

(1) メカニカルブースターポンプの安全対策

現在のところ、既存のメカニカルブースターポンプは全て、回転軸受を通して外部から内部に回転力の伝達を行なっている。ターボ分子ポンプでモータをポンプに内蔵している例から考えるならば、メカニカルブースターポンプでもモータ内蔵とすることは技術的には可能と思われる。このような、リーク無しのメカニカルブースターポンプの需要が多い場合には、開発費の投入も無駄ではないが、それ程の需要が見込めない場合には、Fig. 6.1.2に示すようにモータ部をポンプ本体とは別の密封容器内に封入する方が合理的であろう。Fig. 6.1.2に示すような構造であれば、ポンプ筐体の1部を改良するのみで実質的な密封メカニカルブースターポンプとする事ができる。

軸受部の潤滑油へのトリチウムの混入に対しても、Fig. 6.1.2に示すように潤滑油を密封容器内に封入するならば外部汚染の問題は発生しない。

燃料ガス中への油の混入については、前記ターボ分子ポンプについてと同様コールドトラップにて対処する。

(2) メカニカルブースターポンプの保守

メカニカルブースターポンプは十分に信頼性の高いポンプであり、軸受部の潤滑油の供給が適切に行なわれていれば、少なくとも20,000～30,000時間の連続運転が可能である。油の供給に関しては、Fig. 6.1.2に示したように密封容器中に潤滑油の供給タンクおよび廃油タンクを設けておけば十分に長期にわたってメンテナンス・フリーとできるまた潤滑油の交換は、グローブボックス内で比較的容易に行うことができる。

一方、回収系メカニカルブースターポンプは、2時間毎に40分間運転する。したがって、メカニカルブースターポンプのベアリング交換等は6～7年に1度の割合で行なえば良く、実験炉の寿命中に1～2回の解体保守を必要とする。しかし、グローブボックス内でのポンプ解体は必ずしも容易ではない。回収系で使用されているメカニカルブースターポンプは比較的小型であり、またポンプ価格も低廉である。このような点から、回収系用メカニカルブースターポンプは

*放射線劣化は考慮されていないが、耐放射線性オイルでこの程度の寿命は得られるであろう。

2～3台のポンプを並置して交互に運転して実験炉の全寿命にわたって解体保守を行なわない方式、もしくは適当な期間毎にポンプを交換する方式を採用する事がむしろ合理的である。

なお、メカニカルブースターポンプについても前記ターボ分子ポンプと同様、ポンプ停止時に潤滑油蒸気のポンプ内への侵入防止のためヘリウムガスをパージする必要がある。

(3) 完全密封型ポンプ使用の検討

上に述べたように、回収系用のポンプとしてはメカニカルブースターポンプに若干の改良を加えればトリチウム使用に対しても安全上大きな問題は発生しない。しかし、安全性の高いポンプとしては、揺動ポンプ (Wobble Pump) が開発されている。このポンプの詳細については次項に述べるが、PR型と呼ばれる揺動ポンプは回収系用ポンプの要求仕様を満している。このポンプは完全密封型であるため、トリチウムの外部への漏洩、潤滑油中へのトリチウム拡散、潤滑油による燃料ガスの汚染の問題は発生しない。メーカー発表によれば、揺動ポンプは20,000時間以上の連続運転の実績を持っている。安全を見込んで10,000時間で保守するとしても、回収系の揺動ポンプは実験炉の寿命中に2～3回程度の解体保守を行なえば良い。揺動ポンプでは、潤滑油がトリチウムに接触しないため、トリチウムに汚染された潤滑油、コールドトラップでの付着油等の処理の問題が発生しない。以上の点から考えると、回収系用メカニカルブースターポンプは揺動ポンプに変更する方が有利である。ただし、現時点で比較する限りでは、揺動ポンプはメカニカルブースターポンプに比較して約2桁程度価格が高い点が問題である。

(4) まとめ

回収系用メカニカルブースターポンプは、若干の改良を加えればトリチウムに対して充分安全と考えられる。しかし、安全の信頼性、保守の点を考えれば揺動ポンプを使用する方が有利である。ただし、価格的にはメカニカルブースターポンプが有利である。

6.1.4 ガス精製系用揺動ポンプ

ガス精製系用ポンプは、作動圧力もそれ程低くなく、また流量も少ない。このため、本設計では完全密封型ポンプである揺動ポンプ採用している。

(1) 揺動ポンプの作動特性とトリチウム安全性

揺動ポンプは、フランス原子力庁の要請に基づいて1955年に設立されたSRTI社 (Societe de Recherches Techniques et Industrielles) で製造されている特殊ポンプであり、トリチウムガス用ポンプとして多数の実績を持っている。

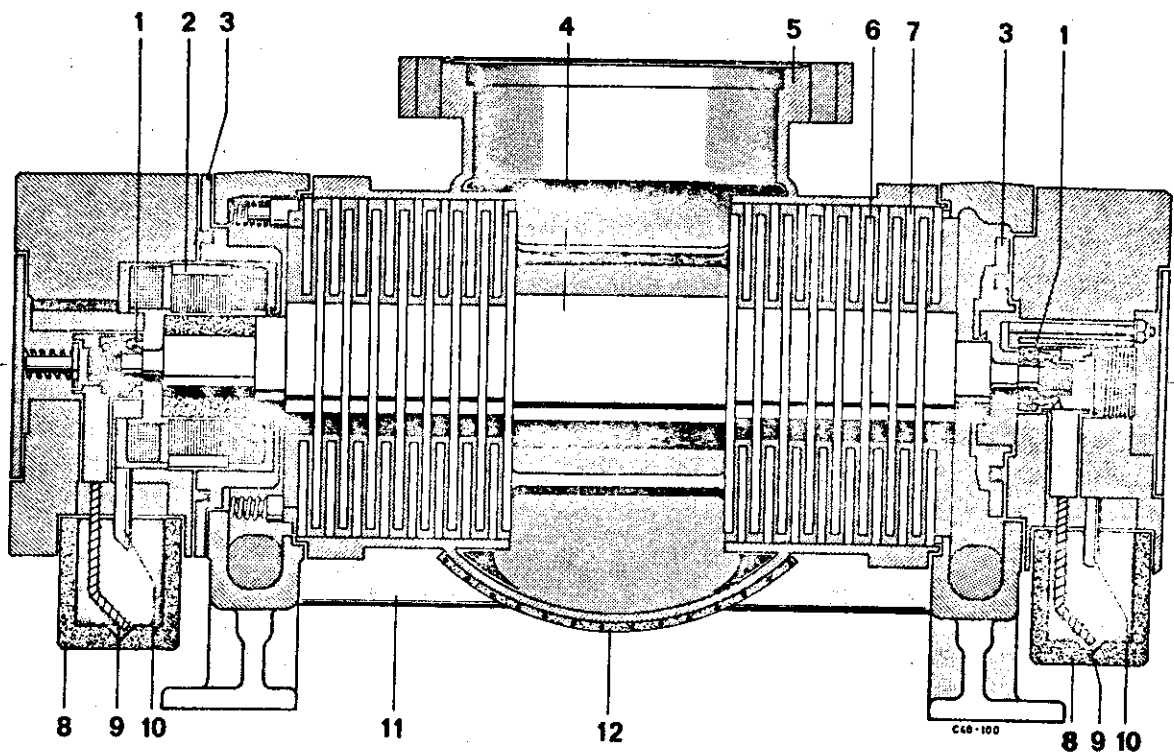
揺動ポンプの原理は、Fig. 6.1.3に示すように連続循環式容積型圧縮機の一つであり、本来は圧縮ポンプであるが 10^{-3} Torr程度までであれば真空ポンプとしても使用可能である。図から判るように、移送流体は外部に対して全く気密であり、潤滑油と移送ガスが直接接触することなく、また有機物も使用されていない。このような点から、揺動ポンプはトリチウム用機器としての条件を完全に満している。

揺動ポンプの種類としては、PR型 (Wobble-movement pump), PRB型 (Wobble-movement and barrel pump), PBT型 (Wobble-movement pumps for tritium) の3種がある。PBT型は安全性向上のため2重ベローズを採用したポンプである。フランジ部シールとしては中空Oリングを用いており、ポンプ全体からのリーク量は 2×10^{-10} cc (STP)/sec

(He) とされている。移送ガスの温度領域としては、0～100℃とされている。現時点での揺動ポンプの作動圧力および排気速度の作動可能範囲をFig. 6.1.4に示す。

以上に述べたような揺動ポンプの特性から考えて、ガス精製装置の真空ポンプとしては揺動ポンプを用いることが適切である。揺動ポンプの種類としては、十分な安全性を得るため、PBT型の使用が望ましい。このように、ガス精製装置用真空ポンプとして揺動ポンプを用いた場合には、トリチウムの系外へのリークを最少にすることができ、また潤滑油へのトリチウム拡散問題も発生しない。

(2) 揺動ポンプで保守を必要とする部品はベローとベアリングである。ベローの寿命は15,000～20,000時間とされており、安全性を重視する場合のメーカー推奨交換時間は10,000時間、運転実績時間は20,000時間以上である。ベアリングの寿命は、20,000～30,000時間とされているが、メーカーではベロー同様10,000の交換を推奨している。



Sectional drawing of the TPU 200

- | | |
|----------------------|------------------------------|
| 1 Bearing | 7 Stator vane |
| 2 Motor | 8 Oil reservoir |
| 3 Labyrinth chambers | 9 Oil supply for the bearing |
| 4 Rotor | 10 Oil return |
| 5 UHV-connection | 11 Fore-vacuum channel |
| 6 Rotor vane | 12 Heater |

Fig. 6.1.1. Cross section of turbo-molecular pump which contains the motor within the pump room. (after catalogue of Balzers Aktiengesellschaft)

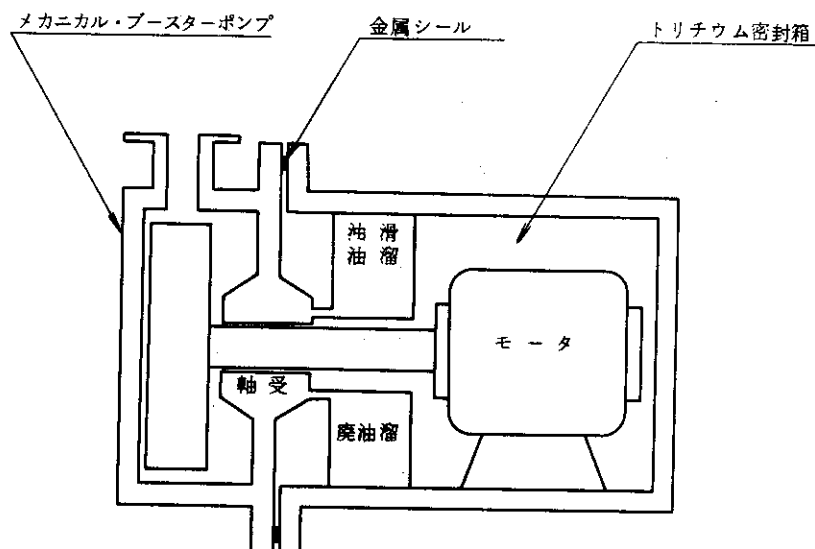


Fig. 6.1.2 Mechanical booster pump for tritium

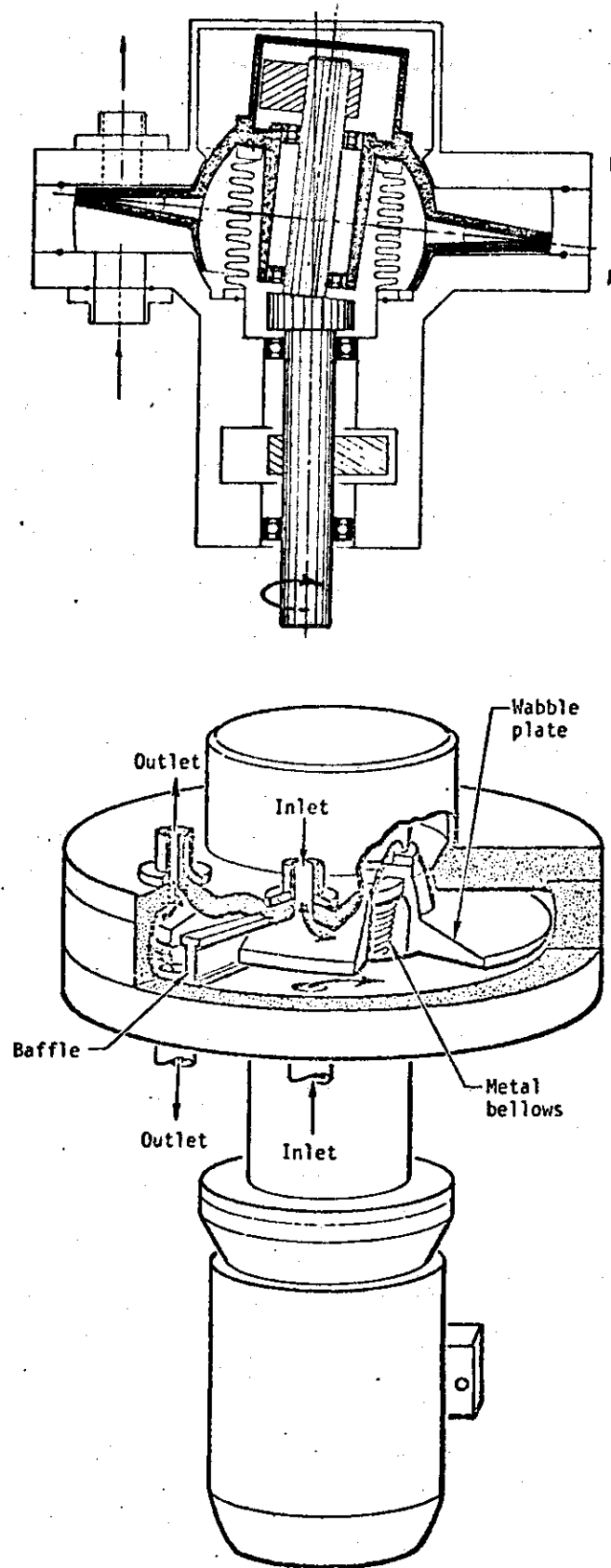


Fig. 6.1.3. Cross section and cutaway view of wobble pump. (1)

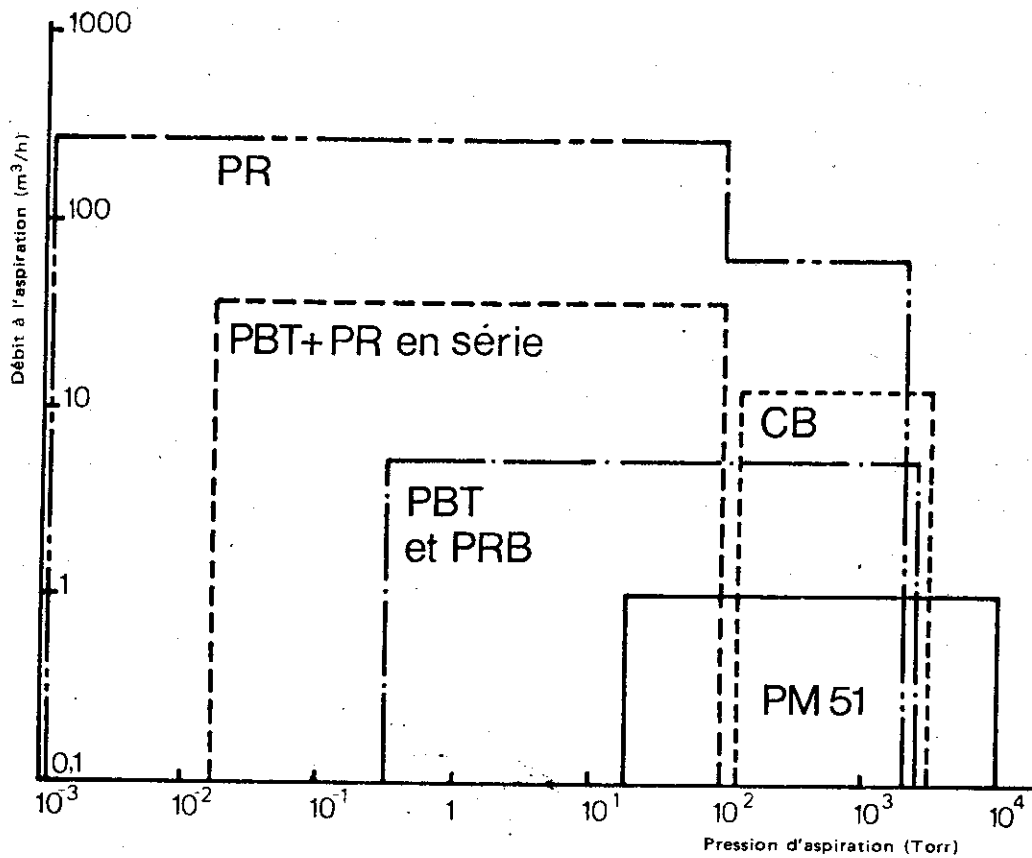


Fig. 6.1.4 Wobble pump applicable region of pumping speeds and aspiration pressure. (after catalogue of S.R.T.I.)

6.2 輸送ポンプ

実験炉燃料給排系に用いられる輸送ポンプの作動条件は、圧力で $\sim 1 \text{ kg/cm}^2$ 、流量で最大 13 l/min である。この程度の圧力流量範囲に対しては、完全密封型ポンプとしてダイアフラムポンプが存在する。ダイアフラムポンプの原理構造図をFig. 6.2.1に示す。図に示すように、このポンプは前述の揺動ポンプ同様に完全密封型であり、ポンプからのトリチウム漏洩、潤滑油へのトリチウム混入の問題は発生しない。

Fig. 6.1.4からわかるように、先に述べた揺動ポンプを用いても輸送ポンプの要求仕様を満たすことができる。しかし价格的な面から考えるならば、揺動ポンプを使用することは得策でない。

(1) ダイアフラムポンプの安全性と保守

ダイアフラムポンプは、先に述べたようにトリチウム漏洩および潤滑油へのトリチウム混入の問題は発生しない。安全の信頼性を向上させる目的でダイアフラム（ベロー）を2重にする事は可能である。ダイアフラム（ベロー）の動作は、揺動ポンプのベローに比較して単純であり、揺動ポンプのベローと同程度のベロー寿命（15,000～20,000時間）を得ることは可能であろう。その他の保守項目としては、軸受部の油交換およびベアリング交換がある。前者は数千時間に1回、後者は20,000～30,000時間に1回の割合に行なう必要があるが、いずれもトリチウムに直接々触する部分ではないので保守上大きな問題はない。なお、Fig. 6.2.1に示すダイアフラムポンプの例では、ダイアフラムが破損した場合のトリチウム検出器が設けられている。このため、ダイアフラムのわずかな破損も検出可能である。

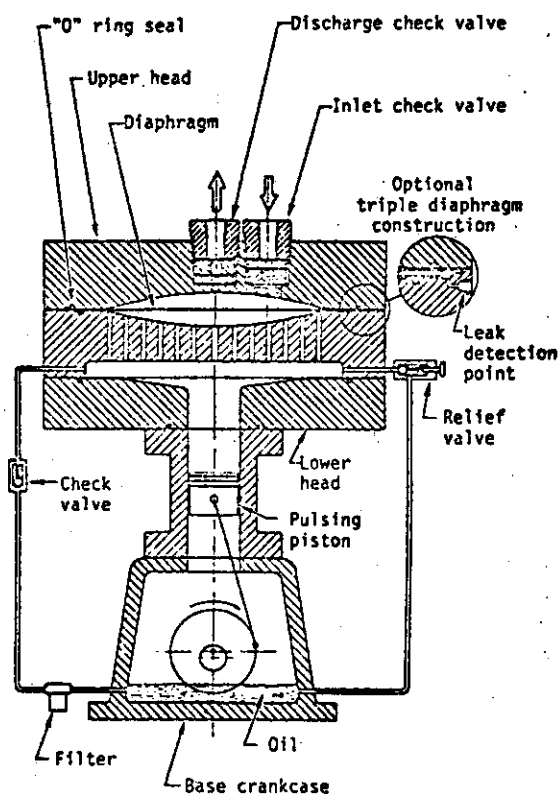


Fig. 6.2.1. Cross section of diaphragm compressor (1)

6.3 圧縮ポンプ

実験炉燃料給排系用圧縮ポンプに要求される仕様としては、吐出圧力：6 kg/cm，圧縮比 \approx 5，流量が最大500 l/minである。このような要求仕様を満足する完全密封型ポンプとしては前述のダイヤフラムポンプがある。

前述の揺動ポンプでも、圧縮ポンプの要求仕様を満すことができるが (Fig. 6.1.4)，ポンプ価格が高価である。

以上いずれのポンプについても、トリチウムに対する安全性は既に述べたように充分高いといえる。

6.4 バルブ類

実験炉燃料給排系に使用されるバルブ類は非常に数が多い。このうち炉心とクライオポンプの間およびクライオポンプの背圧側に設置されたバルブは、各々1.900 ϕ ，1.100 ϕ と大口径超高真空バルブであるが、他のバルブは100 ϕ 以下の口径である。

(1) 大口径バルブ

既存の大口径超高真空バルブの最大径は300 ϕ 程度である。したがって、非放射性的の通常ガスに対しても、このような大口径超高真空バルブは研究開発の対象である。一般に超高真空用ゲートバルブでは、脱ガスの点から有機物パッキングは用いず、またリークに対する配慮からバルブ操作もベローズを介して行なわれている。このため大口径化に成功するならば、このバルブは放射線によるシール特性の劣化、同位体交換によるトリチウム汚染の問題は発生せず、また外部に対して完全密封である。つまり、現在の超高真空用ゲートバルブを大型化できるならばトリチウム用バルブとして使用することができる。

燃料給排系用大口径ゲートバルブの研究開発にあたっては、上記のようなトリチウム封入特性のみでなく、寿命についても留意する必要がある。すなわち、これらの超高真空用ゲートバルブでは弁座部のシールに金または無酸素銅のパッキングを採用している。したがって、バルブの開閉可能回数は数百回程度といわれている。一方、実験炉燃料給排系の大口径バルブは2時間に1回の割合で開閉を繰返す。バルブの開閉寿命を500回とすれば、約1ヶ月に1回の割合でバルブの解体保守を必要とする。大口径バルブの解体保守は、大型精密機器をリモートハンドリングにより補修しなければならず、また炉心を大気にさらす必要がある。このような事情から、少なくとも10,000回（約2年）程度の開閉寿命が要求される。

(2) 小口径バルブ

小口径バルブについては、高真空用と低真空用（常圧も含む）に分けて考える必要がある。

高真空用バルブとしては、前述の大口径バルブ同様に全金属性ゲートバルブを用いる必要がある。この場合は、弁座シール部分の寿命の問題が研究開発課題として残される。

低真空用バルブとしては、ベローバルブが適している。このバルブは、ベローを介して駆動力を伝達するため、外部に対して完全密封であり、またバルブ内に潤滑油が存在しないため油中へのトリチウム混入の問題は無い。

いずれのバルブについても、トリチウム封入の信頼性向上のため、駆動力伝達用のペローを2重にすることは可能である。しかし、バルブに使用されているペローの伸縮回数は揺動ポンプ、ダイヤフラムポンプに比較すれば桁違いに少ないので必ずしもこのような2重安全処置を施す必要はない。

6.5 フランジ

実験炉燃料給排系に用いられるフランジは多数あるが、仕様条件が厳しいフランジとしては、前記大口径バルブ用の大口径超高真空用フランジ、同位体分離装置に用いられる高温フランジがある。

フランジは可動部分がないため、トリチウムフランジとしては金属パッキングを用いリークを防止した構造とすればよい。現在実用化されている技術としては、超高真空用フランジに金属シールが用いられている。これは、有機物からの脱ガスを避け、また高温でのベーキングを可能とするためである。このような超高真空用フランジのリーク量は、ヘリウム漏洩検出器の検出感度以下 ($\sim 10^{-9}$ Torr \cdot ℓ/sec) 以下である。したがって、既開発の金属パッキング超高真空フランジはトリチウム用フランジとして使用可能である。

金属パッキングの種類としては、ナイフエッジ、ステップ、コンフラット(ホイラー)、中空0リングなどがある。これらのうち、着脱の容易さ、熱繰返し特性、着脱繰返し時の真空特性、シール信頼性などから考えて、コンフラット(ホイラー)または中空0リングによるシールが適切である。トリチウム用フランジはグローブボックス内に設置される点から、着脱作業性の良否は重要である。

(1) コンフラット(ホイラー)フランジ

コンフラット(ホイラー)フランジの概略構造は、Fig. 6.5.1に示す。図に示されているように、コンフラット(ホイラー)フランジでは塑性変形した無酸素銅が半径方向の内側に閉じこめられる(Capturing)ため大きな圧着面圧が得られる事を特徴としている。このため、比較的小さな締付力(平均360 kg/cm)でシールでき、着脱繰返し回数も20回以上である。温度条件は、カタログデータで-196℃ \sim +450℃であり、燃料給排系に使用されるフランジ類の使用温度領域を満足している。口径に対する制限は、現在のところコンフラットフランジで最大 $\sim 300\phi$ 、ホイラーフランジで最大450 ϕ 程度であり、燃料給排系の大部分のフランジに使用することができる。

(2) 中空0リングフランジ

中空0リングを用いた超高真空フランジは最近になって開発された技術である。原理はFig. 6.5.2に示すように、中空0リングを変形(パイプ径の16 \sim 22%)させ、この時の反力によってシール面圧を確保するものである。0リングの表面には、良好なシール特性を得る目的で軟質銀メッキまたは銅メッキを施してある。フランジの締付圧力は270 kg/cmであり、コンフラットフランジよりも低く、また締殺し型であるため厳密なトルク管理は不要であり、グローブボックス内の作業や遠隔操作に適している。使用温度条件は、カタログ値で-270 \sim +650℃であり、燃料給排系に使用される全てのフランジの温度条件を満している。口径は、現在のところ最

大 4,000φまでは製作可能とされており，燃料給排系の全てのフランジに適用可能である。また，中空 Oリングは円形フランジばかりでなく楕円，矩形などのフランジのリーク無しシールが可能であり，機器構造設計上の自由度が大きい。ただし現時点では使用実績が必ずしも充分ではなく，今後の実績積上げが期待される。

(3) まとめ

以上に，コンフラット（ホイラ）および中空 Oリングシールについて述べたが，トリチウム用フランジとしては，作業性の点から中空 Oリングフランジの方がやや適合性が高いように思われる。ただし，使用機器の規格等によってはコンフラット（ホイラ）フランジを用いる事も可能である。

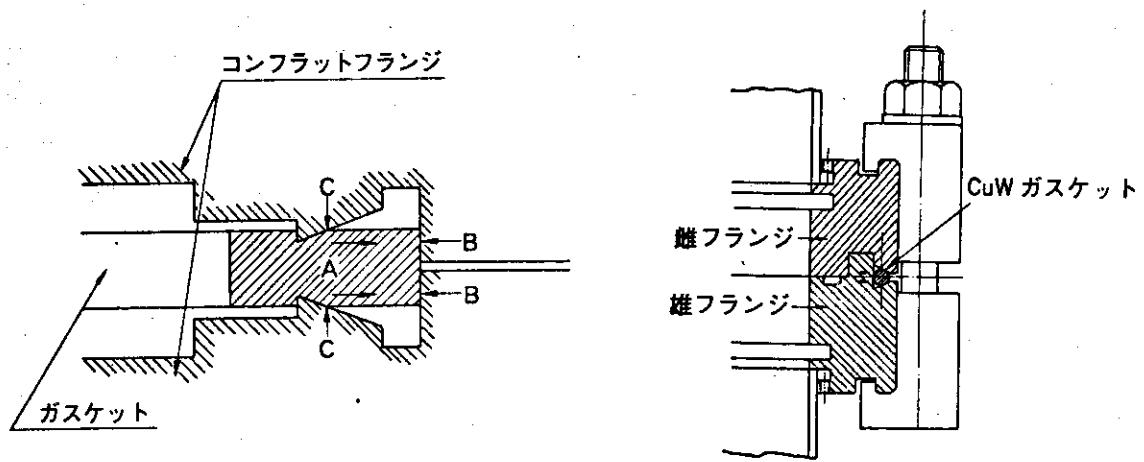


Fig. 6.5.1 Mechanism of Cone Flat and Hoyler Seal
(after Catalogue of NEVA)

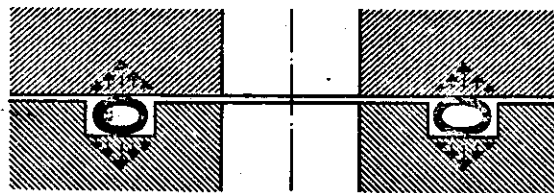


Fig. 6.5.2 Mechanism of O-ring seal. (after catalogue of K.K. Fuji Termo)

6.6 保守

各機器の保守必要事項および時期については、各機器毎に述べたので、ここでは保守の際の手法について述べる。

保守に際して先ず留意しなければならない点は、第1次封入系である機器からできる限りトリチウムを飛散させない事である。次に、保守はグローブボックス内での作業であるため、できる限り操作性の良い事が必要である。第2の点については各機器の構造に依存する点が多いが、第1の点については次のようなシステム的対処を行なう。

(1) 機器内のガス状トリチウムへの対策

機器を保守点検する場合、各機器内にトリチウムガスが残存していないことが安全上重要である。LASLでは、このような要求を満たすため、Fig. 6.6.1に示すような2重バルブ・パージシステムを採用している。¹⁾ このシステムでは2重バルブの中間に補助真空ラインが接続されており、機器内あるいはパイプ内の汚染気体を排気し、また必要に応じてHeガス・パージに使用される。このような2重バルブ・パージシステムは、殆んど使用されない余分のバルブを多数設置することになるが、第1次封入システムからのトリチウム放出を最少にすることができる。なお、実験炉燃料給排系にこの2重バルブ・パージシステムを採用する場合、補助真空ラインの排ガスは廃ガス処理装置に導入する事が適切である。

(2) 潤滑油中へ混入したトリチウムへの対策

ターボ分子ポンプ、メカニカルブースターポンプの潤滑油はトリチウムに接触しているため、油中へのトリチウム混入が発生する。これらの潤滑油は、各ポンプの潤滑油溜めおよびコールドトラップ内に溜っている。これら潤滑油を外気にさらさないように廃棄および再注入するシステムとしてFig. 6.6.2のような方式を用いる。

ポンプ潤滑油溜め内の廃油に対しては、ポンプの油ドレインに廃油タンクを接続しておき、廃油タンク内を排気したのちにドレインコックを開放し廃油をタンク内に移す。その後、予め計量された潤滑油をポンプに注入する。このような廃油処理システムは、作業性の観点からポンプに組込まれたシステムとし、取外しは廃油タンクのフランジのみとする。廃油タンクのフランジとポンプの油ドレインの間は安全上の観点から先に述べた2重バルブシステムを用いる。

コールドトラップ内の潤滑油は廃棄するのみで補給の必要はないが、有機溶媒によるトラップ内洗浄が必要である。このため、ポンプ内潤滑油の交換と同様の手順で新しい潤滑油のかわりに有機溶媒を注入する。このような手順を何度か繰返すことによりトラップ内の洗浄が可能となる。

いずれの場合も、廃油タンク内にはバーミキュライトを充填し、廃油を吸着させる。LASLの例では、30ガロンのバーミキュライトに7ガロンの廃油を吸着させている。¹⁾

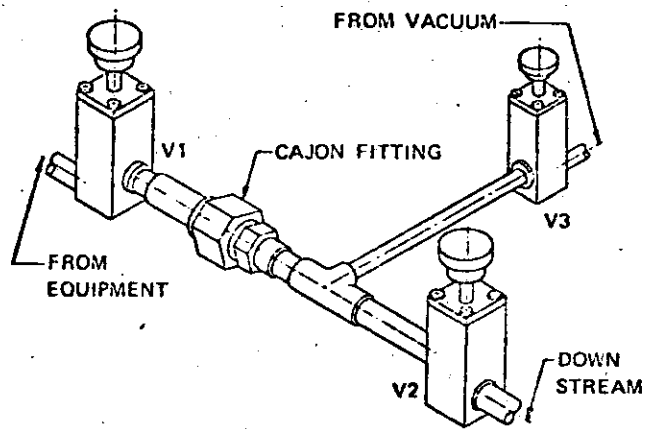


Fig. 6.6.1, Double valve-purge system used in LASL.⁽¹⁾

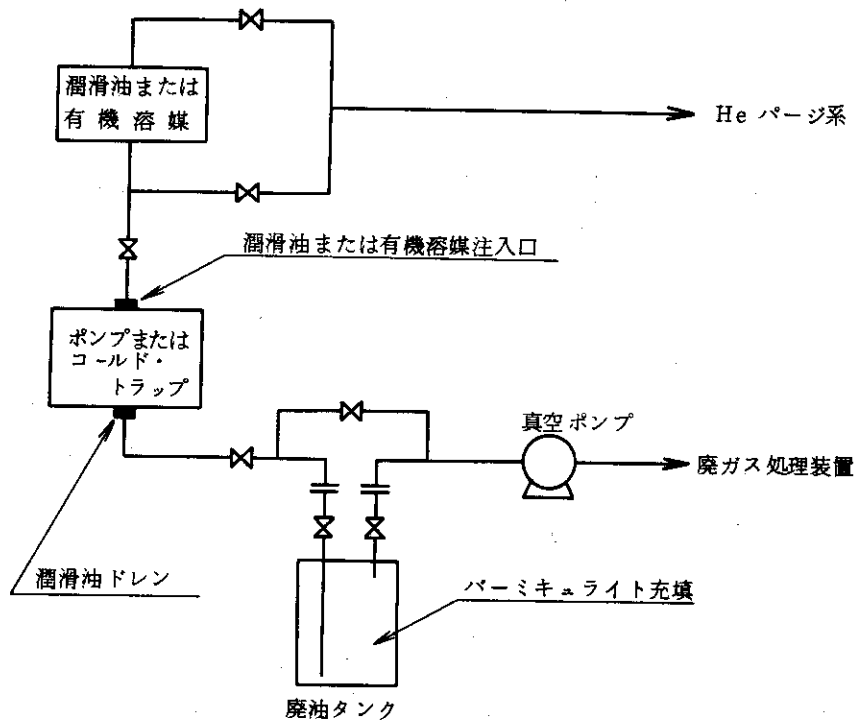


Fig. 6.6.2 Lubricant oil or trapped oil exchange or clean system

6.7 材料

トリチウム機器用材料のうち、トリチウムに接する部分の材料は原則として全て金属製とする必要がある。有機物は、その構成元素である水素の同位体交換によるトリチウム汚染の可能性があり、また β 線による材料劣化が起るためトリチウム用機器の材料としては望ましくない。

文献(1)によれば、構造材料としては原則的にはステンレス鋼、アルミニウムあるいは無酸素銅に限るとしている。文献(2)のトリチウム透過特性から考えれば、ハステロイも使用できると思われる。モリブデン、タングステンはトリチウム透過特性からいえば構造材料として良好であるが、加工性が悪い。LLLでは、殆んど装置はSUS316を用いている⁽¹⁾。

ジョイント部は溶接もしくは低カドミウム銀ロウを用いたロウ付けとする必要がある⁽¹⁾。

シール材料としては、金、銀、無酸素銅、鉛、軟鋼などが使用できる。また、場合によっては水銀も使用できるが、この場合は他金属との共存性に留意する必要がある。

参考文献

- 1) J. L. Anderson, F. A. Dawiano and J. E. Nasise, "Tritium Handling Facilities at the Los Alamos Scientific Laboratory", Proceeding of the 23rd Conference on Remote Systems Technology, 1975
- 2) R. W. Webb; "Permeation of Hydrogen through Metals" NAA-SR-10462, 1965

7. 事故解析

7.1 故障とその波及効果の検討

システムの事故LOGICを検討する方法としては、何等かの事故を想定しその影響を検討する方法と、逆に事故を想定してその発生原因を塑及する方法がある。これらはいずれも宇宙工学や航空機工学の分野で発達した手法であり、現在では大くの分野で用いられている。

ここでは、先ず何等かの事故を想定しその影響を検討する方法について述べる。このような事故解析手法としては、FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)*がある。この方法は、システムをその構成設備、装置に区分し、区分された装置、設備での故障モードを想定し、その原因、他設備等への影響、故障の検出方法、故障の発生確率、影響度の大きさ等を検討するものである。具体的には、Table 7.1.1 に示すような様式に上記のような検討項目を記入してゆく。

実験炉燃料給排系のFMEAチャートの機器レベルの例として主真空排気系、He冷凍系及びGEカバーガス精製系についてTable 7.1.1～7.1.3に、系統レベルの例としてTable 7.1.4～7.1.7に示す。現時点では燃料給排系の構成機器のハードウェア設計は未だ実施されていない。したがって、ここでは故障モードとして機器の機能停止、低下等を想定した。故障の発生確率、影響度については定量的な判定に困難な面が多いため、ここでは以下に示すような判定を行った。

致命度 (C)

- クラス1 ○ 安全
- クラス2 △ 非致命的、プラント停止せず
- クラス3 × プラント停止又は人身事故の可能性あり
- クラス4 ×× 主要機器破壊又は人身事故の可能性大

発生確率 (P)

- クラス1 ○ 起りそうにない
- クラス2 △ 起りそう
- クラス3 × 極めて起りそう

以上の致命度および発生確率の組合せにより故障の重大度 (E) を以下のように決める。

P \ C	クラス1	クラス2	クラス3	クラス4
クラス1	A	A	B	C
クラス2	A	B	C	C
クラス3	B	B	C	C

- クラスA ○ 軽事故
- クラスB △ 中事故

* ここでは便宜上、FMEAとFMECA (Failure Mode Effect and Criticality Analysis) は区別しない。

クラスC × 重大事故

以上に述べたような考え方に基づいた解析によれば、重大事故としては対策を施さなければトリチウム放出が起るような故障モードとなった。したがって、今後のシステム設計および機器設計にあたっては、このような故障に対してはインタロック、冗長系の設置などの設計上の対策を施す必要がある。

Table 7.1.1 主真空排気装置のFMEAチャート

No.	機器名	故障原因	故障モード	検出法	故障の影響		(1) C	(2) P	(3) E	必要処置
					設備内	設備外				
1	・クライオポンプ	・クライオ面温度上昇	・排気能力低下	・温度計	・排気不能	・炉運転障害	×	○	△	・修理
		・吸着能力低下	・ "	・真空計	・ "	・ "	×	○	△	・ "
		・昇温能力低下	・再生能力低下	・温度計	・回収不能	・ "	×	○	△	・ "
		・回収 "	・ "	・真空計	・ "	・ "	×	○	△	・ "
		・冷却 "	・ "	・温度計	・ "	・ "	×	○	△	・ "
		・ゲート弁作動不良	・切替不可	・リミットスイッチ	・排気不能	・ "	×	○	△	・ "
		・再生不可	・ "	・真空計	・ "	・ "	×	○	△	・ "
		・MBPの不良	・回収能力低下	・真空計	・回収不能	・ "	×	○	△	・予備系で排気, 修理
		・TMP "	・ "	・ "	・ "	・ "	△	○	○	・ "
		・RP "	・初期排気能力低下	・ "	・排気不能	・ "	△	○	○	・ "
2	・回収系	・TMP "	・ "	・ "	・ "	△	○	○	・ "	
		・ "	・ "	・ "	・ "	△	○	○	・ "	
3	・粗引系	・TMP "	・ "	・ "	・ "	△	○	○	・ "	
		・ "	・ "	・ "	・ "	△	○	○	・ "	

(1) C : 致命度, (2) P : 発生確立, (3) E : 重大性

Table 7.1.2 He 供給装置のFMEAチャート

No	機器名	故障原因	故障モード	検出法	故障の影響		(1) C	(2) P	(3) E	必要処置	
					設備内	設備外					
1	・圧縮機ユニット	・ピストンリング損傷	・吐出圧低下	・圧力計	・液化量の減少 又は圧縮機停止	・クライオポンプ冷却不可	△	△	△	・修理, 予備系により運転	
		・ピストンリング損傷 又は吸入圧低下	・処理量低下	・流量計	・ "	・ "	△	△	△	・ "	
		・冷却水不足又はオイル循環量不足	・吐出温度上昇	・温度計	・ "	・ "	△	△	△	△	・ "
		・オイル除去装置つまり	・オイル除去効率低下	・純度計	・ Heの油汚染	△	△	△	△	△	・ "
		・ "	・吐出圧上昇	・圧力計	・コンプレッサ過負荷	△	△	△	△	△	・ "
2	・コールドボックス	・圧縮機の異常	・液化能力低下	・圧力計	・液化量の減少	・ "	△	△	△	・修理, LHe容器から供給	
		・真空断熱劣化	・ "	・真空計	・ "	・ "	△	○	○	・ "	
		・熱交効率低下	・ "	・温度計	・ "	・ "	△	○	○	・ "	
		・膨張タービン効率低下	・ "	・ "	・ "	・ "	△	△	△	△	・ "
		・圧損増大	・ "	・圧力計	・ "	・ "	△	△	△	△	・ "
3	・LHe容器	・J-T弁作動不良	・ "	・圧力計, 温度計	・ "	・ "	△	△	△	・ "	
		・断熱劣化	・貯蔵能力低下	・真空計	・貯蔵量の減少	・クライオポンプ冷却不可	△	○	○	・修理	
4	・He移送ポンプ装置	・圧力減少	・ "	・圧力計	・ "	・ "	△	○	○	・ "	
		・吸入圧低下	・処理量低下	・流量計	・移送量低下	・クライオポンプ冷却昇温不可	△	○	○	・修理, 予備系にて運転	
		・圧損増大	・ "	・ "	・ "	・ "	△	○	○	・ "	
		・吸入圧低下	・吐出圧低下	・圧力計	・ "	・ "	△	○	○	○	・修理
		・熱交換器つまり	・再生熱交不良	・ "	・ "	・ "	△	○	○	○	・ "
		・LN ₂ 供給不可	・ "	・温度計	・ "	・ "	△	○	○	・ "	
		・吸着器つまり	・ "	・圧力計	・移送量低下	・ "	△	○	○	・ "	
		・熱交換器不良	・加熱流体温度不良	・温度計	・加熱能力低下	・ "	△	○	○	・ "	
		・流量調整不良	・ "	・流量計	・ "	・ "	△	○	○	・ "	

No	機器名	故障原因	故障モード	検出法	故障の影響		(1) C	(2) P	(3) E	必要処置
					設備内	設備外				
5	•He回収精製装置	<ul style="list-style-type: none"> •He移送ポンプ不良 •圧縮器不良 •精製器つまり •再生不可 •LN₂供給不可 •弃作動不良 •再生不可 	<ul style="list-style-type: none"> •Heガス回収能力低下 • " •精製能力低下 • " • " •精製器切替不可 • " 	<ul style="list-style-type: none"> •圧力計 • " •純度計 •温度計 •液面計 •リミットスイッチ • " 	<ul style="list-style-type: none"> •Heガス回収不可 • " •Heガス精製不可 • " • " • " • " 	<ul style="list-style-type: none"> •クライオポンプ冷却昇温不可 • " • " • " • " • " • " 	△	△	△	<ul style="list-style-type: none"> •修理, 予備系にて運転 • " •修理 • " • " • " • "

(1) C : 致命度, (2) P : 発生確立, (3) E : 重大性

Table 7.1.3 GBカバナーガス精製装置のFMEAチャート

No.	機器名	故障原因	故障モード	検出法	故障の影響		(1) C	(2) P	(3) E	必要処置	
					設備内	設備外					
1	循環ブロー	・吸入圧低下	・処理量低下	・流量計	・カバナーガス中のトリチウム濃度増大	・トリチウムが格納室へ漏出	△	○	○	・修理, 予備系にて運転	
		・圧損増大	・ "	・圧力計	・ "	・ "	△	○	○	・ "	
2	触媒反応器	・触媒能力低下	・トリチウム反応効率低下	・放射線モニタ	・ "	・ "	△	○	○	・ "	
		・酸素供給量低下	・ "	・酸素濃度計	・ "	・ "	△	○	○	・ "	
		・予熱温度低下	・ "	・温度計	・ "	・ "	△	○	○	・ "	
		・入口トリチウム濃度増大	・ "	・放射線モニタ	・ "	・ "	△	○	○	・ "	
		・供給ガス温度上昇	・トリチウム水除去能力の低下	・温度計	・トリチウム回収不能	・ "	・ "	△	△	△	・ "
3	乾燥器	・吸着材能力低下	・ "	・放射線モニタ	・ "	・ "	△	△	△	・ "	
		・添加水分量不足	・ "	・水分計	・ "	・ "	△	△	△	・ "	
		・冷却温度上昇	・再生能力低下	・温度計	・ "	・ "	△	△	△	△	・ "
		・再生ガス循環量減少	・ "	・圧力計	・ "	・ "	△	○	○	○	・ "
		・ " 温度低下	・ "	・温度計	・ "	・ "	△	○	○	○	・ "
		・ " 冷却水量減少	・ "	・ "	・ "	・ "	△	○	○	○	・ "
		・水分分離器の劣下	・ "	・放射線モニタ又は水分計	・ "	・ "	△	○	○	○	・ "
		・トラップの飽和	・ "	・ "	・ "	・ "	△	○	○	○	・ "
		・弁作動不良	・切替不可	・リミットスイッチ	・ "	・ "	△	○	○	○	・ "
		・再生不可	・ "	・放射線モニタ	・ "	・ "	△	○	○	○	・ "

(1) C : 致命度, (2) P : 発生確立, (3) E : 重大性

Table 7.1.4 初期排気系統のFMEAチャート

No	機器名	故障原因	故障モード	検出法	故障の影響		(1) C	(2) P	(3) E	必要処置
					設備内	設備外				
1	・グロープボックス排気系	・GB排気系故障 ・排気ライン不具合(リーク, 閉塞) ・GBのリーク	・GB排気不能 ・" ・"	・圧力計 ・" ・"	・カバークラスの置換不能 ・" ・"	・主系統起動不可 ・" ・"	△	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ・GB精製系起動禁止 ・主系統起動禁止
							△	○	○	
							△	○	○	
2	・2重シールド部排気系	・プロセス機器排気系故障 ・排気ライン不具合(リーク, 閉塞) ・2重シールド部リーク	・2重シールド部排気不能 ・" ・"	・圧力計 ・" ・"	・スウィープガスの置換不能 ・" ・"	・主系統起動不可 ・" ・"	△	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ・スウィープガス精製系起動禁止 ・主系統起動禁止
							△	○	○	
							△	○	○	
3	・主系統排気系	・プロセス機器排気系故障 ・排気ライン不具合(リーク, 閉塞) ・主系統リーク	・主系統排気不能 ・" ・"	・圧力計 ・" ・"	・主系統起動不可 ・" ・"	・実験炉運転不能 ・" ・"	×	○	△	<ul style="list-style-type: none"> ・主系統起動禁止
							×	○	△	
							×	○	△	

(1) C : 致命度, (2) P : 発生確率, (3) E : 重大性

Table 7.1.5 GBカバ-ガス精製系統のFMEAチャ-ート

No.	機器名	故障原因	故障モード	検出法	故障の影響		(1) C	(2) P	(3) E	必要処置
					設備内	設備外				
	• GBカバ-ガス精製系	<ul style="list-style-type: none"> • 精製機器故障 • カバ-ガス循環ライン閉塞 • 精製機器故障 • GB破損 • カバ-ガス循環ライン破損 • 精製機器故障 • 機器からのトリチウム漏洩 • GBリーク • カバ-ガス循環ラインリーク • カバ-ガス置換時に空気残留 	<ul style="list-style-type: none"> • カバ-ガス流量小 • " • カバ-ガス負圧喪失 • " • " • カバ-ガストリチウム濃度高 • " • カバ-ガス内に空気混入 • " • " 	<ul style="list-style-type: none"> • 流量計 • " • 圧力計 • " • " • 放射線モニタ • " • 酸素濃度計 • " • " 	<ul style="list-style-type: none"> • カバ-ガスのトリチウム濃度増大 • " • GBの内圧上昇 • (• GBの内圧上昇 • (• GB内に空気混入 • GB精製系の処理量増加 • カバ-ガスに空気蓄積 • " • " 	<ul style="list-style-type: none"> • 格納室へトリチウム漏洩 • " • カバ-ガスと共にトリチウム流出 • " • " • 格納室にトリチウム漏洩 • " • " 	△	○	○	<ul style="list-style-type: none"> • 予備のGB精製系起動 • 主系統停止処置をとった場合はパーズする • 予備のGB精製系起動 • (主系統停止処置をとった場合はパーズする • 予備のGB精製系起動 • 主系統停止処置をとった場合はパーズする • (主系統停止処置をとった場合はパーズする

(1) C : 致命度, (2) P : 発生確率, (3) E : 重大性

Table 7.1.6 スウィープアップガス精製系統のFMEAチャート

No	機器名	故障原因	故障モード	検出法	故障の影響		(1) C	(2) P	(3) E	必要処置	
					設備内	設備外					
	スウィープアップガス精製系	<ul style="list-style-type: none"> 精製機器故障 ガス循環ライン閉塞 精製機器故障 二重シール部破損 ガス循環ライン閉塞 精製機器故障 機器からのトリチウム漏洩 二重シール部リーク ガス循環ラインリーク ガス置換時に空気残留 	<ul style="list-style-type: none"> スウィープアップガス流量小 " スウィープアップガス負圧喪失 " " スウィープアップガス濃度高 " スウィープアップガス内に空気混入 " " 	<ul style="list-style-type: none"> 流量計 " 圧力計 " " 放射線モニタ " 酸素濃度計 " " 	<ul style="list-style-type: none"> スウィープアップガスのトリチウム濃度増大 " 二重シール部の内圧上昇 二重シール部の内圧上昇 二重シール部に空気混入 " スウィープアップガス精製系の処理量増加 スウィープアップガスに空気蓄積 " 	<ul style="list-style-type: none"> 格納室へトリチウム漏洩 " スウィープアップガスと共トリチウム流出 " " 格納室にトリチウム漏洩 " " " 	△	△	△	<ul style="list-style-type: none"> 予備のスウィープアップガス精米起動 主系統停止処置をとった場合はペーシング 予備のスウィープアップガス精製系起動 主系統停止処置をとった場合はペーシング 予備のスウィープアップガス精製系起動 主系統停止処置をとった場合はペーシング 予備のスウィープアップガス精製系起動 主系統停止処置をとった場合はペーシング 	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○
			△	△	△	△	△	△	△	△	△
			△	△	△	△	△	△	△	△	△
			△	△	△	△	△	△	△	△	△
			△	△	△	△	△	△	△	△	△
			△	△	△	△	△	△	△	△	△
			△	△	△	△	△	△	△	△	△
			△	△	△	△	△	△	△	△	△
			△	△	△	△	△	△	△	△	△

(1) C : 致命度, (2) P : 発生確率, (3) E : 重大性

Table 7.1.7 炉心燃料給排系のユーザーティリティシステムのFMEAチャート

No	機器名	故障原因	故障モード	検出法	故障の影響		C	P	E	必要処置
					設備内	設備外				
1	・系統機器パー ジ系	・パージガスポンベ のガス不足 ・パージライン閉塞	・パージ不能 ・ "	・圧力計 ・流量計	・主系統にトリチウムガ ス残留 ・ "	・カバ-ガス、スウイ -アップガスの循環継続 ・主系統のトリチウム ガスをプロセスマ 排気系で排出	△	△	△	△
							△	△	△	
2	・He供給系	・He温度制御機構故 障 ・He循環機構故障	・He系の冷却、加 温能力低下 ・He系の冷却、加 温能力低下	・温度計 ・流量計	・主ポンプ吸着力、再生 力低下 ・燃料ガス精製装置のク ラライオポンプ能力低下 ・主ポンプ吸着力、再生 力低下 ・燃料ガス精製装置のク ラライオポンプ能力低下	・炉心排気能力低下 ・プロセス廃ガス処理系 処理量増大 ・炉心排気能力低下 ・プロセス廃ガス処理系 処理量増大	△	△	△	△
							△	△	△	
3	・N ₂ 冷却系	・N ₂ 温度制御機構故 障	・N ₂ 系の冷却能 力低下	・温度計	・コーールドトラップ吸着 力低下	・含トリチウム水回収効 率低下 ・オイルミスト拡散	△	△	△	△
							△	△	△	
4	・冷却水系	・冷却水温度制御機 構故障	・冷却水系の冷却 能力低下	・流量計 ・温度計	・分離器からトリチウム 漏洩 ・モレキュラ-シープの 含トリチウム水吸着	・冷却水系の冷却能力を 緊急回復 ・放出ガス処理系を閉 ループ運転する ・N ₂ 系の冷却能力を緊 急回復 ・飽和したモレキュラ -シープの交換	△	△	△	△
							△	△	△	

7.2 事故の抽出とその原因過程の検討

本節では、安全性にとって重要な要素を洗い出し、それらを制御することにより重大な事態が発生しない保証を得るための諸対策・設計（安全設計）に資することを主要目的として、重大事故を想定してその原因ならびに事故に至る過程について第1次的な検討を行った。その手法として、ここではFTA (Fault Tree Analysis) を用いる。

原子力産業では、その安全性を確保するために施設の設計、製作、評価等の段階でFTA が使用されている。フォールト・ツリーは、ある与えられた事象に対しその発生をもたらす原因・事象が論理的に結合されたもので、与えられた望ましくない事象の原因となる事象を追求することにより基本的な原因を求めるものであり、その対策の検討に用いられる。

フォールト・ツリーの表示法として、本節で使用した記号を Table 7.1.2 に示す。

炉心燃料給排系は“多重封入”の思想に基づいて、1次、2次および3次の封入システムを採用している。これらのトリチウム格納設計を前提として格納室外へのトリチウム放出をトップイベントとしてフォールト・ツリーを展開すると Fig. 7.2.1 が得られる。

また、主真空排気系における排気不能をトップイベントとしてフォールト・ツリーを展開すると Fig. 7.2.2 が得られる。

今回の検討は、FTA の第1段階としてフォールト・ツリーの1部の作成にとどまったが、フォールト・ツリーの作成は、その作成中にシステムに対するアイデアが生れたり、システムの欠点が発見されたりすることで、作成そのものに意味があるとされており、今後フォールト・ツリーを完全なものにしていく必要がある。また、フォールト・ツリーが完成されると、それはトップイベントの発生モードの分類、各モードの発生確率の計算とクリティカルパスの発見、さらにトップイベントの発生確率の評価に利用され、システムの安全設計に反映されるものである。ちなみに、格納室外へのトリチウム放出という最終事象の発生確率 P は、Fig. 7.2.2 から近似的には次式より求めることができる。

$$P = (P_1 + P_2) \times P_4 + (P_2 + P_3) \times P_4 + P_4 \times P_5$$

ここで、 P_1 は格納系（格納室）破損に至る外力の存在確率

P_2 は格納系（格納室）破損に至る内力の存在確率

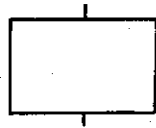
P_3 は換気系誤動作の確率

P_4 格納容器（グローブボックス）外へのトリチウム放出の確率

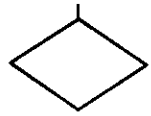
P_5 は緊急換気（トリチウム回収）系の作動不良の確率

従って、トリチウムの環境放出を防止するための第3次封入システムである格納系は、各種事故時においてもその外力および内圧に耐える設計とし、格納室内へのトリチウム放出事故時に換気系（ACS）が作動したり、緊急換気系（ECS）が作動しないことのない様な安全設計がなされる必要がある。また格納容器外（格納室内）へのトリチウム放出事故は格納室の設計基準事故として捉えることができる。

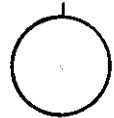
Table 7.2.1 フォールド・ツリーの記号



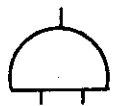
: Event (条件, 故障, 結果等の組合せにより発生する事象)



: Secondary Event (さらに原因が考えられる事象若しくはここではより詳細な検討を省略した事象)



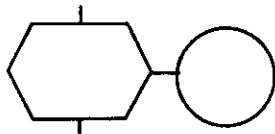
: Primary Event (構成要素自体のランダムな故障, 基本事象(原因))



: AND Logic Gate (論理積)



: OR Logic Gate (論理和)



: INHIBIT Gate (上位事象の発生に条件が必要な場合, その条件を明示する)

△: TRANSFER Out

(結合記号)

△: TRANSFER in

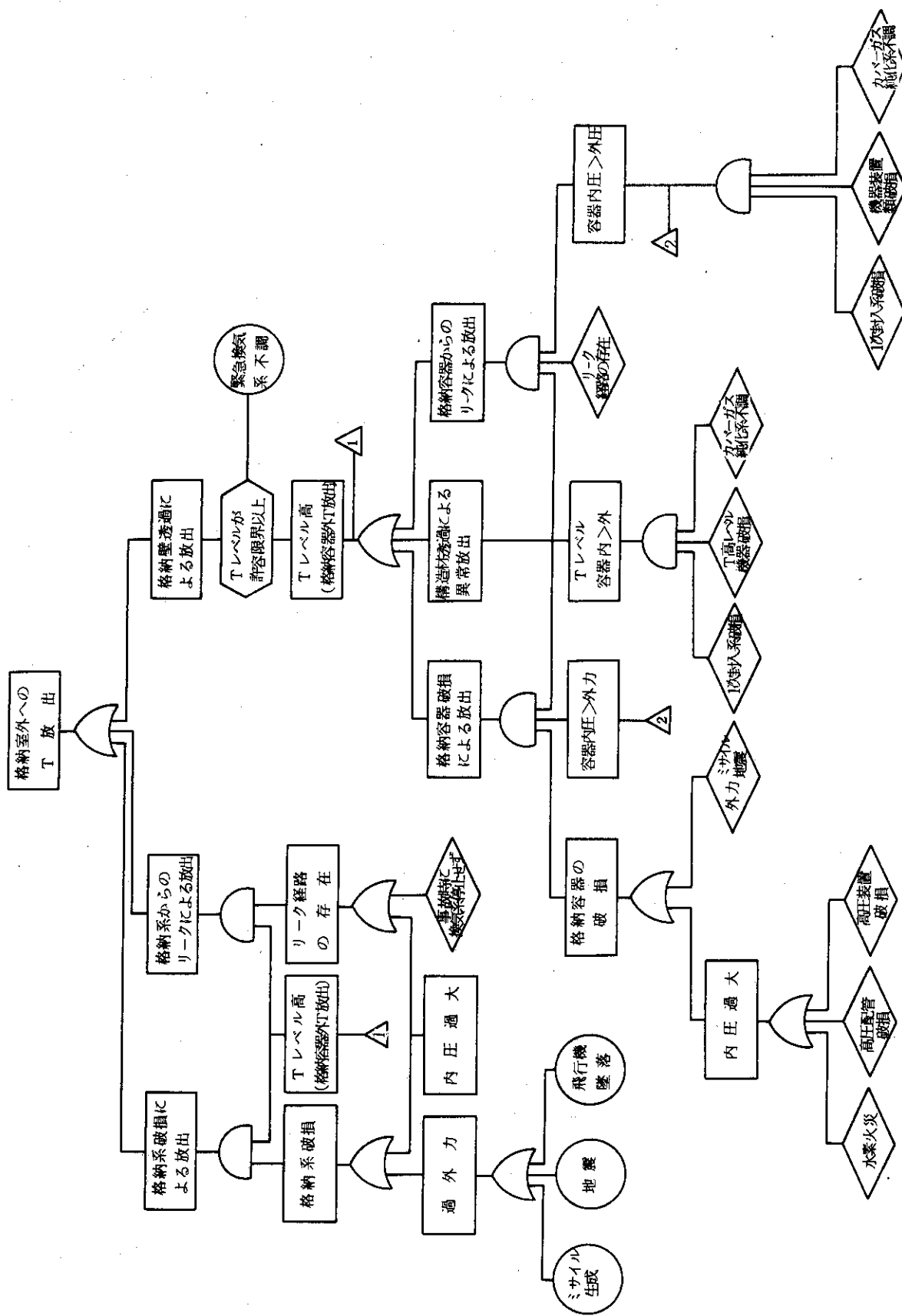


Fig. 7.2.1 Fault Tree of Tritium Containment System

7.3 トリチウム放出事故の検討

ここでは1次封入系ならびに2次封入系が破壊してトリチウムが放出した事故を想定し、そのような事故に対してトリチウムの挙動について検討する。

7.3.1 2次封入系（グローブボックス内）へのトリチウム放出

5.5節で述べた様に、我国でもトリチウムの許容濃度を化学形で分け、RCG (Radiation Guide-line) の様な許容濃度基準が採用されるなら、本設計の様にグローブボックス内の水分濃度を低くコントロールすることは、トリチウム放出事故時においても大きな利点がある。

今、1次封入系が破損し、トリチウムの全インベントリー（300 g）が2次封入系内に放出した事故を想定する。このトリチウムはグローブボックス雰囲気中で完全に混合してグローブを通して透過拡散し、3次封入系内で均一に分布する様な放出過程を仮定する。グローブボックス内トリチウムガス分圧は約1,000 ppmとなり、この分圧が維持されるとするとトリチウムガス透過量は140 Ci/dayであり、格納室トリチウム濃度がRCGの $2 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ に達するのに半日以上を要することとなる。従って、この間は従事者が格納室内に入り修理することが可能である。

この様な事故は1次封入系ならびに2次封入系を分割することにより、発生確率を非常に小さくすることができると思われるし、万一この様な事故が発生した場合にも2次封入系としてグローブボックス雰囲気精製系（GAPS）によりトリチウムを回収することができる。GAPSのトリチウムガス除去能力を回収に要する時間とグローブボックス内トリチウム濃度減少率の関係としてFig. 7.3.1に図示した。これによると上記の様な事故に対してグローブボックス内トリチウムガス濃度を基準濃度 $2 \times 10^{-2} \text{mCi}/\text{cm}^3$ に戻すために要する時間は2 hr以内である。

7.3.2 3次封入系（格納室内）へのトリチウム放出

発生頻度は非常に小さいと考えられるが、1次封入系の破損と2次封入系の破損が同時に発生すると、3次封入系内へのトリチウム放出事故となる。この様な事故が発生した場合、高感度トリチウムモニターにより異常が検出され自動制御装置によりECS（緊急処理系）が作動すると同時にACS（格納室換気系）による放出経路および給気経路のダンパーが閉じて、格納室内換気は循環流となりトリチウム回収が行われる。

上記の様な事故が発生し、トリチウム全インベントリー300 gが格納室内に放出された事態を想定する。この様な大放事故時の格納室内初期濃度は、内容積 $4.2 \times 10^4 \text{m}^3$ 中に均一に混合したとすると、 $68.6 \text{Ci}/\text{m}^3$ である。これをECSで処理して基準トリチウム濃度（ $2 \times 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ ）まで格納室内トリチウムレベルを下げるのに要する時間は、ECSのトリチウム除去効率 $\epsilon = 0.99$ と仮定すると、Fig. 7.3.2より約36 hr以内である。この間にECSで除去される水分量は、格納室内温度を 20°C 、湿度を50%とすると、約 3m^3 である。

しかしながら、放出トリチウムが格納室内の壁や床ならびに機器類への吸脱着現象を考慮すると、格納室内濃度が連続的に減少するのは $1,000 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$ のレベルまでであるという指摘¹⁾がある。これについては、今後のシミュレーション試験等で確認していく必要があり、低レベルにおける挙動についても十分な考慮が必要であろう。 $1,000 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$ のレベルで格納室内に存在するトリチウム量は42 Ciであり、これはACSで回収されるか、又は長時間かかって放出されることになろう。

また、トリチウム濃度の減少による ECS のトリチウム除去効率の低下があるとすれば、格納室内が基準トリチウム濃度に戻るまでには、さらに長時間を要するかもしれない。

以上の事故想定は、トリチウム放出量としては最大のものであり、このような事故が発生することはほとんど考えられない。しかし、このような事故の重大性を小さくする配慮はすべきであり、これに対して次の様なことが考えられる。

- (1) 1次封入系を分割して破損事故時の放出量を小さくする。
- (2) 1次封入系の大事故にも対応できる様に、2次封入系の封入力を大きくする。
- (3) 3次封入系の容積を小さくして、トリチウム放出時の汚染面積を小さくする。これは ECS の効率が良くなることにもつながる。
- (4) 3次封入系を幾つかの室に分割することにより、汚染が全格納室に広がることを防ぎ、各室の緊急処理が独立にできる様に設計する。

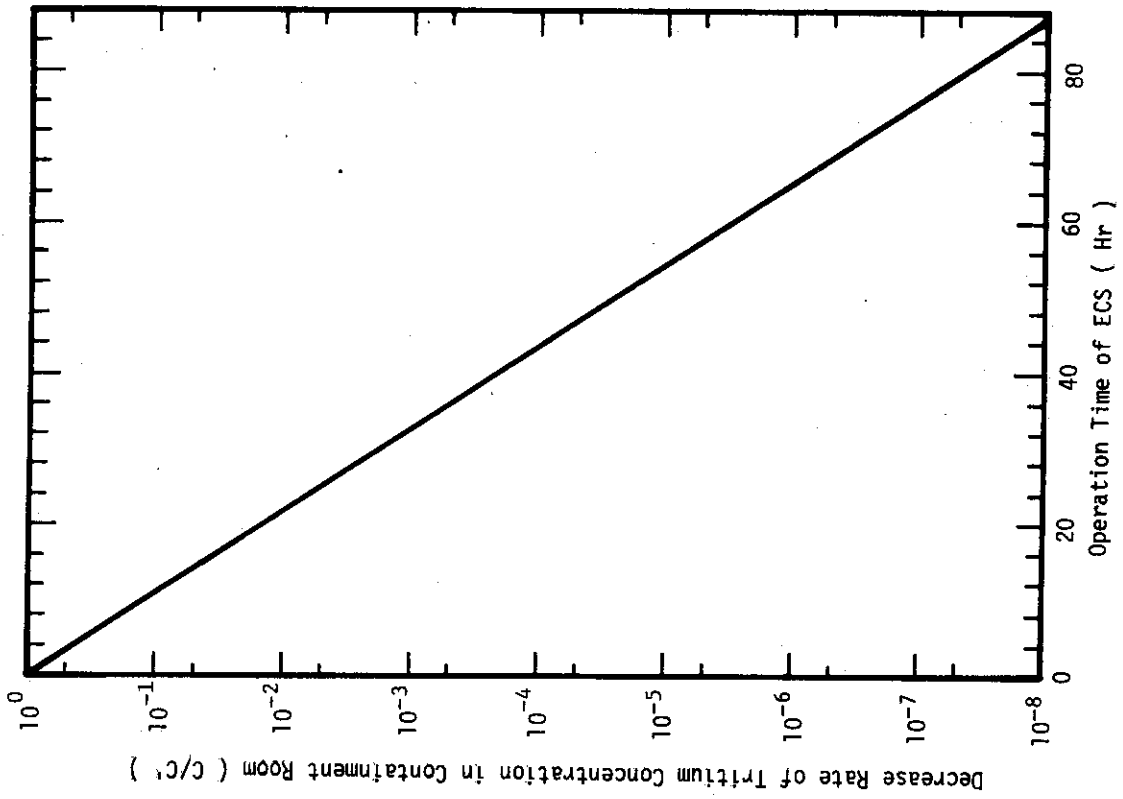


Fig. 7.3.2 Decrease Rate of Tritium Concentration in Containment Room

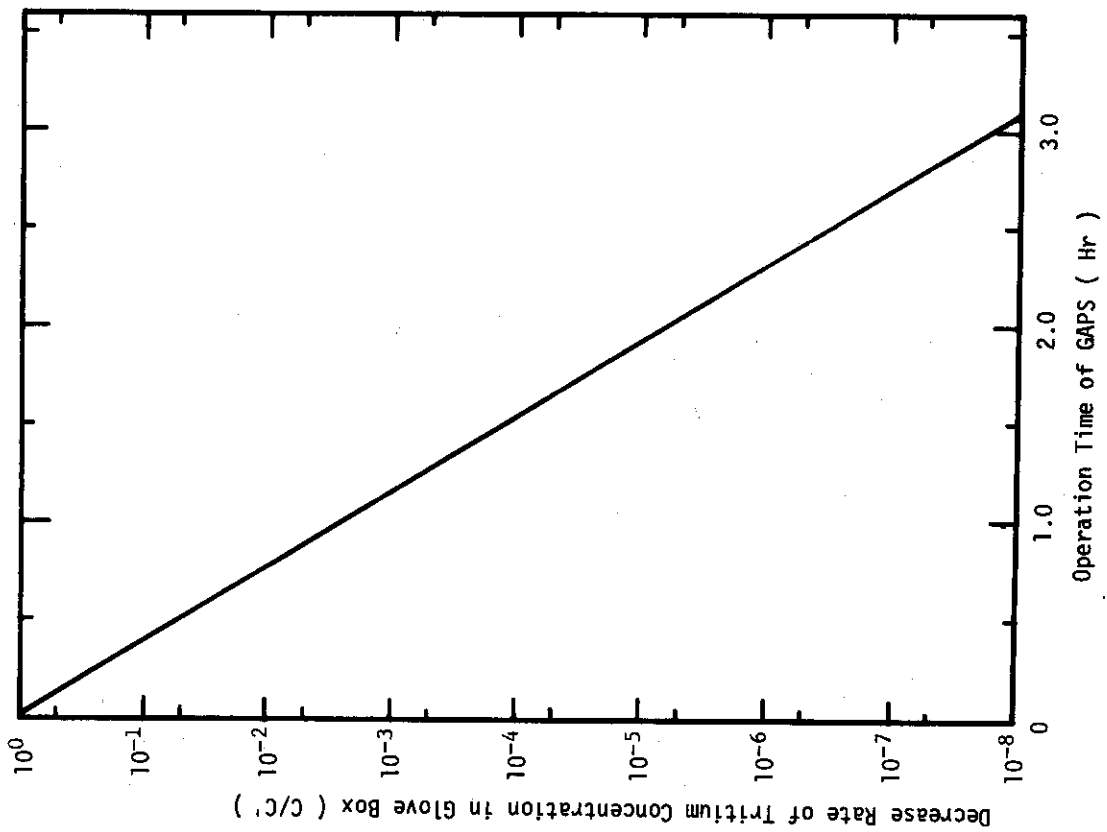


Fig. 7.3.1 Decrease Rate of Tritium Concentration in Glove Box

8. ま と め

8.1 報告概要

本報告書は実験炉炉心燃料給排系の安全性解析に係るものである。ここで実施した作業内容は以下の通りで、唯一の放射性物質であるトリチウムを如何に取扱い、封入するかという問題に主眼をおいた。

- 1) 本安全性解析における基本条件の設定
- 2) 炉心燃料給排系の概要説明
- 3) 燃料給排系の系統設計
- 4) 主要機器の配置計画
- 5) トリチウム封入システムの検討
- 6) トリチウム用機器類の検討
- 7) 事故解析

1章では一般的な安全設計の考え方ならびに本解析における基本思想を明らかにし、トリチウムによる障害や法規類に関する調査結果を述べた。

2章では本解析を進める上での基本的な設計条件となる実験炉の炉心給排系の設計概要をまとめた。

3章では全体の系統計画をまとめトリチウムガス取扱い系統に主眼をおいて、主要コンポーネントおよび給排系全体の系統設計をおこない、安全制御系検討に反映するための不具合検討を行った。

4章では燃料給排系の占有体積を見積るために主真空排気系、ヘリウム冷凍系、燃料精製系および同位体分離系の概略配置を検討し、全体配置案を作成した。

5章では定常運転時におけるトリチウムの透過および漏洩量を試算し、トリチウム含有ガス精製システムについて検討し、2次封入系および3次封入系のシステム設計を行った。

6章は、1次封入系として、各種ポンプ類、バルブ類、フランジおよび材料に関してトリチウムに対する安全性の検討を行い、機器類の保守に対する考察を行った。

7章では事故解析として故障とその波及効果ならびに重要な事故の発生経路について検討し、大量トリチウム放出事故時の対応について述べた。

以上の他、本安全性解析を行う上で必要と思われた主真空排気系およびヘリウム冷凍系について概念設計を行った。その結果は付録として本報告書末に掲げた。

8.2 問題点および今後の課題の抽出

炉心燃料給排系は、実験炉にとってその炉心に大きな係りを持つばかりではなく、実験炉全体としての安全性及び経済性に対し重要な寄与をする。また、その主要な取扱い物質がトリチウムであり、全てのコンポーネントについて透過並びに漏洩対策を施し、保守・修理の容易な機器・装置を開発する必要がある。従って今後幅広い研究開発に着手する必要があるが、これに資する

ために本設計の実施により明らかになった研究開発課題を次にまとめる。

1) 最適システムの開発

本設計で採用したシステムは現時点で大きな問題はないと考えられるが、各コンポーネントの選定における他の方法との定量的な比較評価を実施し、これに基づいて燃料循環条件、不純物種及び量、運転モード等に対して安全性・信頼性及び経済性について最適化したシステムを開発していく必要がある。

2) 主要コンポーネントの開発

① 真空排気系としては次の開発項目が挙げられる。

- a) クライオポンプの試作開発
- b) He の吸着材の開発
- c) 大口径ゲートバルブの開発
- d) オイルフリーなトリチウム無漏洩補助ポンプ系の開発
- e) 排気燃料の回収システムの開発

② 燃料精製系としては次の開発項目が挙げられる。

- a) Pb-合金膜の水素同位体透過に関する基礎研究
- b) 加熱方法を含めた透過漏洩防止対策
- c) モックアップ試験
- d) オイルフリーなトリチウム無漏洩高真空ポンプの開発

③ 同位体分離系としては次の開発項目が挙げられる。

- a) ②の(a)と同様で特に分離系数を求める基礎研究
- b) ②の(b)と同様
- c) モックアップ試験
- d) オイルフリーでトリチウム無漏洩コンプレッサー

燃料給排系として、上記の主要コンポーネントの他に、次のコンポーネントを開発しなければならない。

④ 燃料貯槽としては基礎研究を実施し、貯蔵システムを開発

⑤ 廃ガス処理系は各コンポーネントの廃ガス組成に応じたトリチウム回収及び処理方法の基礎研究並びにシステムの開発

⑥ 燃料注入系は燃料ガス組成・流量制御注入システムの開発

⑦ 大量トリチウムを含んだ燃料ガス分析システムの開発

3) 格納室技術の開発

① 二次封入システム技術開発

- a) 高信頼性、高能率グローブボックス・パスボックス
- b) 遠隔操作技術

② 三次封入システム技術開発

- a) 高安全性格納室技術
- b) 高汚染地域立入技術
- c) 緊急廃ガス処理系（大容量）

③ 関連機器技術開発

- a) トリチウム用真空ポンプ, 圧縮機
- b) バルブ類, 接手類
- c) 圧力計, 流量計, 等計測機器
- d) トリチウムモニター

4) 安全設計手法の確立

まず大量トリチウム取扱い機器・装置及び施設に対する安全設計基準（法規を含めて）の確立が急務であり、これに従ったトリチウム漏洩、透過防止法の開発が必要である。さらに、この安全設計基準及び大量トリチウム管理・取扱い技術をベースとした機器・装置及び施設の安全設計手法を確立し、設計開発を進めていく必要がある。

8.3 研究開発計画案

前項に炉心燃料給排系に係る研究開発課題を述べたが、ここで別の観点から見直してみると

- 1) システム設計と解析を要する項目
- 2) 試験研究を必要とする項目
- 3) 試作開発を必要とする項目
- 4) モックアップテストによる実証試験を要する項目

とに大分類出来よう。

ここで研究開発を開始して10年後に核融合実験炉を建設するとした時、この10年間の開発スケジュールとして次の様な案が考えられる。

I 0～1.5年 システム解析・評価・開発計画 (①, ②)

実験炉に適用すべきトリチウム取扱いシステムと、主要機器の選定作業を行い、開発を要する技術を見極め、その優先度を付け具体的な詳細開発計画を行う（代替技術開発も含む）。

II 1.5～3年 実験炉予備設計見直し (②, ③)

実験炉予備設計の見直しを続けて行う。

III 1.5～4年 小規模R&Dと試作開発（実証試験用） (②, ④, ⑥)

試験ループによる選定機器、サブシステムの試験

IV 4～7年 実証試験 (⑤, ⑧)

モックアップテストによる実証試験

V 4～8.5年 改良試験 (④, ⑦), (⑧, ⑨)

安全性, 信頼性, 経済性の向上を旨とした開発試験

VI 7～10年 二次試作開発 (⑧, ⑩)

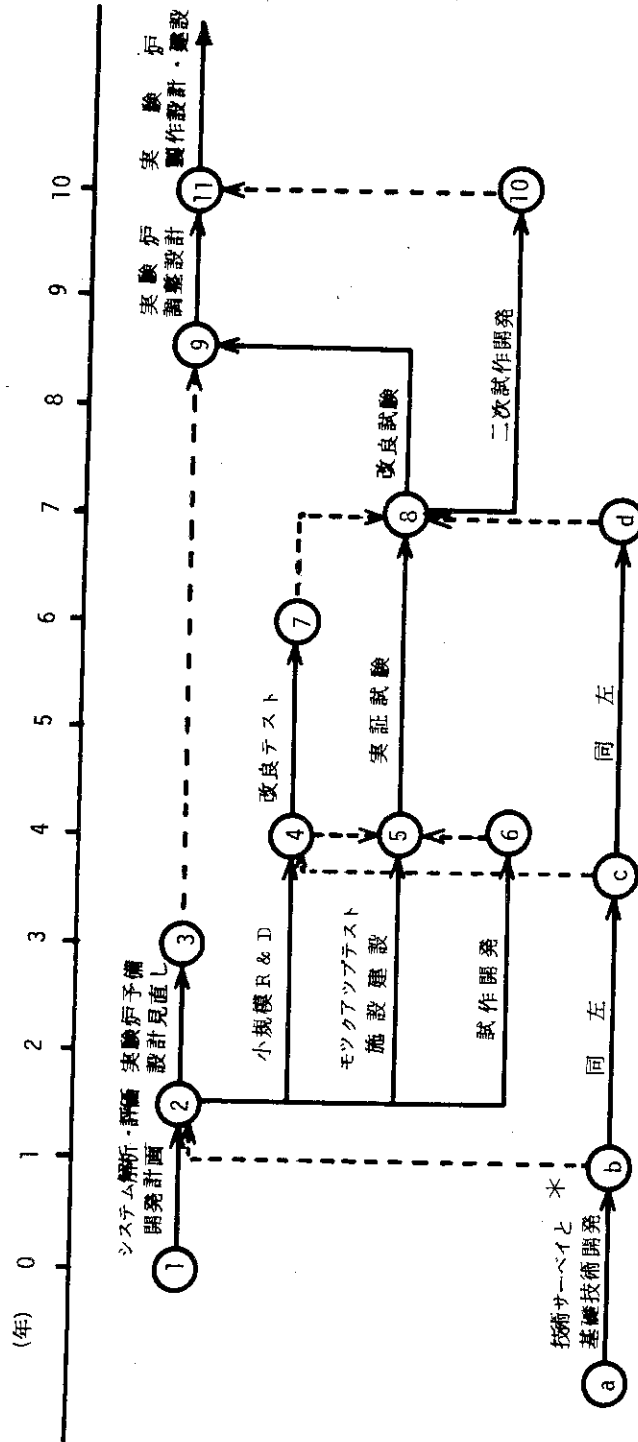
実証試験又は改良試験の結果実機大の試作開発を要する機器については建設開始までに開発する。

VII 8.5～10年 実験炉調整設計 (⑨, ⑪)

開発成果を反映した実験炉調整設計

上記開発スケジュールをまとめてFig.8.3.1に示す。

燃料給排系研究開発スケジュール(10年計画)



* 技術情報サーベイと大学関係その他研究機関の基礎技術開発の成果の取り入れ

Fig. 8.3.1 Research and Development Schedule for JXFR Fuel Circulation System

A. 付 録

A.1 主真空排気系設計

実験炉炉心燃料給排系安全性解析の実施に当り、前回設計の見直しならびに機器類の信頼性検討を行った。以下にその結果を示す。

1) 基本条件

本真空排気系は、系統図 Fig.A. 1.1 及び Fig.A. 1.2 に示す通り、主真空ポンプ（クライオポンプ）、粗引系、及び補助排気系より構成される。

実験炉には引口を8系列設けるものとし、クライオポンプは各引口に2台ずつ設ける。補助排気系は各系に1式ずつ設け、粗引系、回収系は4系列に1式、即ち全系で2式設置するものとする。

実験炉の排気モードは、①運転開始時（炉休止後、2回目以降を含む）の初期排気、②クライオポンプ作動中の炉運転中排気、③クライオポンプ再生時の回収排気、に分けることができる。

真空排気系の設計を行う上での基本条件を Table A. 1.1 に示す。この基本条件を考慮した初期排気、炉運転中および、回収排気の各排気モードにおける設計前提条件を Table A. 1.2 ~ A.1.4 に示す。

Table A. 1.1 真空排気系の基本条件

運転圧力	<ul style="list-style-type: none"> ・初期排気時 1×10^{-8} Torr ・炉運転時 <ul style="list-style-type: none"> D₂ : 1×10^{-4} Torr T₂ : 1×10^{-4} Torr He : 5×10^{-6} Torr
運転圧力	<ul style="list-style-type: none"> ・炉心引口 1000 K ・排気口 300 K 設計温度 300 K
排気ガス量	<ul style="list-style-type: none"> ・初期排気時 1.5×10^{-4} Torr l/s (out GAS) ・炉運転時 <ul style="list-style-type: none"> D₂ : 22.28 mg/s T₂ : 17.32 mg/s He : 0.24 mg/s
排気ポート	8ヶ所

2) 主ポンプ（クライオポンプ）

主ポンプとしては、重水素、トリチウム、ヘリウムの大容量排気に対応しうるものとしてクライオポンプを採用した。ここではこのクライオポンプについて検討する。クライオポンプは重水素、トリチウムについて低温面（クライオ面）に凝縮させて排気する機能と、Heなどのように凝縮排気ができないものを吸着させて排気する機能とを有する構造とする。

(1) 設計条件

本設計条件は、炉運転中排気時の設計前提条件 Table A. 1.3 に示す値を基準として1系統当りの排気口でのものとする。

① 排気方式

重水素、トリチウムは低温面に凝縮排気させるものとする。Heは、凝縮排気ができないため、吸着排気方式とする。吸着排気方式には、②吸着材（活性炭、モレキュラーシーブなど）を排気ガスの沸点以下の温度に冷却して排気する方式と、③排気ガスよりも沸点の高いガス（Ar, CO₂など）をクライオ面に凝縮させて、その凝縮面がポーラスな状態を利用して排気する方式があるが、今回の吸着排気方式としては吸着材による排気方式を採用するものとする。

② クライオ面温度

クライオポンプの凝縮面及び吸着面とも、炉運転休止中に10⁻⁶ Torrまで排気する必要があるため、クライオ面の温度は4.5 K以下とする。H₂, D₂, T₂, の蒸気圧線図をFig.A. 1.3に示す。

③ 排気ガス量

炉運転中の排気口での排気ガス量は、重水素、トリチウム、ヘリウムに対してそれぞれ次の値になる。

$$\text{重水素} \quad Q_D = 12.92 \text{ Torr } \ell/S$$

$$\text{トリチウム} \quad Q_T = 6.71 \text{ Torr } \ell/S$$

$$\text{ヘリウム} \quad Q_{He} = 0.14 \text{ Torr } \ell/S$$

④ 排気圧力と必要排気速度

炉運転中の排気口での排気圧力と必要排気速度は次の値になる。

	排気圧力	必要排気速度
重水素	$6.30 \times 10^{-5} \text{ Torr}$	$2.05 \times 10^5 \ell/S$
トリチウム	$7.64 \times 10^{-5} \text{ Torr}$	$8.78 \times 10^4 \ell/S$
ヘリウム	$4.61 \times 10^{-6} \text{ Torr}$	$3.04 \times 10^4 \ell/S$

よって排気口での全圧は $1.44 \times 10^{-4} \text{ Torr}$ になり全必要排気速度は $3.23 \times 10^5 \ell/S$ になる。

⑤ クライオポンプの台数

8系列の排気システムのそれぞれに各2台のクライオポンプを設置しそれぞれはゲート弁によって締切り、隔離のできる構造とする。

⑥ 排気時間

炉運転中のクライオポンプの排気時間は、2時間とし、1台のクライオポンプによって排気運転をしている間に他の1台は昇温、再生を行うものとする。

⑦ 構成材料

クライオ面など低温材料としては、低温における強度、靱性に優れており、熱容量が小さく、熱伝導率がよく、非磁性材料であることなどから、アルミニウム合金を用いるものとし、クライオポンプ容器及び支持材として、熱伝導率が悪く、非磁性材料で、かつ強度の高いオーステナイト・ステンレス鋼を用いるものとする。

(2) 排気構造

クライオポンプの構造をFig.A. 1.4に示す。クライオポンプ容器は矩形箱形とする。クライオポンプは輻射シールドとして80 Kシェブロン、凝縮排気シェブロン（シールド付）及び吸着排気

パネルから構成される。この凝縮排気シェブロンは吸着排気パネルに対して不純ガス成分となる重水素、トリチウムなどを凝縮排気させるものであり、吸着排気パネルは、対象排気ガスのHeのみを排気させるもので凝縮排気シェブロン及びシールドに囲まれた系内に設置する。

凝縮排気シェブロン（シールド含）、吸着排気パネルはフィン付きアルミニウム管により構成し、上部・下部に設けたヘッダーにより各流路へ液体ヘリウムを分配するものとする。80 Kシェブロン（シールド含）はクライオ面と同様にフィン付きアルミニウム管により構成し、冷却は蒸発Heガスの顕熱によって行うものとする。80 Kシェブロン及び凝縮排気シェブロン・バッフルはフィンの角度を90度とする。クライオ面などの支持構造についても出来るだけ熱損失が少なく、熱収縮が吸収できることを留意し、クライオ面は80 Kシールドより支持し、80 Kシールドはポンプ容器より支持する構造とする。輻射入熱を低減するために、80 Kシールドの外表面及び80 Kシールドに相対するクライオ面を光沢面とし、80 Kシールドの内表面及びクライオ面の内表面を黒色面とする。

(3) 重水素及びトリチウムの排気

重水素及びトリチウムの凝縮排気におけるクライオ面の必要面積について検討する。重水素及びトリチウムの凝縮排気面は、その後にヘリウムの吸着排気面をとりつけるため、シェブロン構造とし、その前面に輻射熱遮蔽のため、80 Kシェブロンバッフルを取り付けるものとする。この2つのシェブロンバッフルは同じ形状とし、その射影面積も同じであるとする。

排気口での必要排気速度 S は、80 Kシェブロンバッフルのコンダクタンス C_{80} と凝縮排気面の排気速度 $S_{4.5}$ との間に次式の関係がある。

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{C_{80}} + \frac{1}{S_{4.5}}$$

ここでシェブロンバッフルの通過確率を0.25、クライオ面に衝突する気体分子の凝縮係数を0.9 (1×10^{-6} Torr, 4.5 K)とすると²⁾

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{0.25 S_0 A} + \frac{1}{0.9 S_0 A}$$

となる。 S_0 は理想排気速度、 A はシェブロンバッフルの射影面積である。重水素の必要排気速度は $S_{D_2} = 2.05 \times 10^5 \text{ l/s}$ で理想排気速度は 31.40 l/s cm^2 であるから、クライオ面の必要面積 A_{D_2} は約 $3.34 \times 10^4 \text{ cm}^2$ となる。

同様にしてトリチウムの必要排気速度 $S_{T_2} = 8.78 \times 10^4 \text{ l/s}$ で理想排気速度は 25.64 l/s cm^2 であるからクライオ面の必要面積 A_{T_2} は約 $1.75 \times 10^4 \text{ cm}^2$ となる。従ってクライオ面及びシェブロンバッフルの射影面積は、 $5.1 \times 10^4 \text{ cm}^2$ 以上あればよいことになる。

(4) ヘリウムの排気

ヘリウムの吸着排気におけるクライオ面の必要面積及び必要吸着材量などについて検討する。

ヘリウムの吸着排気面は重水素及びトリチウムの凝縮排気シェブロンバッフルの後に置かれている。排気口での必要排気速度 S は80 Kシェブロンバッフルのコンダクタンス C_{80} 、凝縮排気シェブロンバッフルのコンダクタンス $C_{4.5}$ 、吸着排気面の排気速度 $S_{4.5}$ と次式の関係がある。

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{C_{80}} + \frac{1}{C_{4.5}} + \frac{1}{S_{4.5}}$$

吸着排気パネルのヘリウムに対する補獲係数を0.9 (10^{-7} Torr, 4.5 K)とすると³⁾ 上式は、

$$\frac{1}{S} = \frac{2}{0.25 S_0 A} + \frac{1}{0.9 S_0 A}$$

となりヘリウムの必要排気速度は $S_{He} = 3.04 \times 10^4 \text{ } \ell/\text{s}$ 、理想排気速度は $31.51 \text{ } \ell/\text{s cm}^2$ であるから、クライオ面及びシェブロンバップルの射影面積 A_{He} は約 $6.65 \times 10^3 \text{ m}^2$ となる。

以上により重水素及びトリチウム凝縮排気に関する必要面積を考慮すると 80 K シェブロンバップルの必要射影面積は $5.8 \times 10^4 \text{ cm}^2$ (He 排気分含)、凝縮排気パネルの必要面積は $5.1 \times 10^4 \text{ cm}^2$ 、凝縮シェブロンバップルは $6.7 \times 10^3 \text{ m}^2$ 、また吸着排気パネルは $6.7 \times 10^3 \text{ cm}^2$ 以上あればよいことになる。従って、クライオポンプの外形寸法は $2.2 \text{ m} \times 1.9 \text{ m} \times 0.9 \text{ m}$ とし、80 K シェブロンバップルの射影面積及び凝縮排気パネル面積は $7.14 \times 10^4 \text{ cm}^2$ 、凝縮シェブロンバップルの射影面積及び吸着排気パネル面積は $3.42 \times 10^4 \text{ cm}^2$ とする。

ヘリウムの全排気容量は、 $0.14 \text{ Torr} \cdot \ell/\text{s}$ で約 2 時間排気した量であるから、 $1.008 \text{ Torr} \cdot \ell$ (0.216 gr) になる。これは大気圧換算 (300 K) で $1.33 \text{ } \ell$ になり、吸着排気用の吸着材をモレキュラーシーブ 5 A を採用するものとする、その平衡吸着量³⁾ は 4.2 K で $1 \times 10^{-7} \text{ Torr}$ の状態で約 90 cc/gr であるから有効吸着材量は、約 15 gr 以上あればよいことになる。吸着材の吸着排気による排気速度は、吸着表面に付着する量が平衡吸着量の 20~25% になると減少する傾向を示すこと、また凝縮性ガスの重水素、トリチウムなどの吸着を考慮して吸着材の吸着効果を 10~20% 程度と仮定すると、必要吸着材量は約 150 g となる。吸着材は熱伝導率が悪く、熱接触効果も悪いので吸着パネルに粒状のものを取り付けるなどのことから吸着容量を $0.2 \text{ Torr } \ell/\text{cm}^2$ とすると、約 $5 \times 10^3 \text{ cm}^2$ の吸着面積があればよいことになる。しかし設計としては吸着面積を小さくしなければならない強い理由はないので吸着排気パネル面積を凝縮シェブロンバップルの射影面積と同じ $3.42 \times 10^4 \text{ cm}^2$ とする。

(5) クライオポンプの再生

クライオポンプはクライオ面上に排気ガスを凝縮または吸着排気して蓄積していくものなので、その蓄積量が多くなるとクライオポンプの排気性能が低下する。他吸着排気面の圧力が吸着材の飽和圧力に達すると排気能力がなくなる。排気ガスの蓄積量を制限すること、並びに凝縮排気面でのトリチウムの蓄積インベントリーを極力小さくするために、クライオ面を周期的に再生する必要がある。

クライオポンプの再生は連続 2 時間排気運転後に行い、再生方法は、クライオ面を 80 K のヘリウムガスにて加温させることにより凝縮した重水素及びトリチウムと吸着したヘリウムを脱着させるものである。1 台のクライオポンプにより蓄積される排気ガス量と再生時の初期分圧を、Table A. 1.5 に示す。ここでクライオポンプ容器の空間容積は約 10 m^3 とした。

Table A. 1.5 クライオポンプ中の排気ガス蓄積量と初期分圧

ガス種	蓄積量 (Torr·ℓ)	初期分圧 (Torr)
重水素	9.30×10^4	9.30
トリチウム	4.83×10^4	4.80
ヘリウム	1.01×10^3	0.10

凝縮排気された重水素及びトリチウムは、Fig.A. 1.3の蒸気圧線図より、凝縮パネルの温度を15 K以上にすれば、ほぼ完全脱着が可能である。また吸着排気されたヘリウムもFig.A. 1.5の吸着特性から20 K以上にすればほぼ脱着する。しかし、クライオ面を20 Kに昇温させて排気ガスを脱着させても凝縮パネルから脱着した重水素及びトリチウムは、Fig.A. 1.6の水素の吸着特性から明らかな様に吸着排気面に再吸着されてしまうため、クライオ面の再生温度を、重水素及びトリチウムが再吸着されない温度40～60 Kまで昇温させることが必要である。従って、クライオ面の再生は80 Kヘリウムガスの冷媒による加温再生方式を採用するものとする。クライオポンプの再生は、2時間以内に下記のステップを終了し、次の運転に備えて切り換えできる状態にする。

- ① クライオ面の加温
- ② 排気脱着ガスの回収
- ③ クライオポンプ容器内の補助排気
- ④ クライオ面の冷却

①のクライオ面の加温は、80 Kヘリウムガスの循環により行い、約45分間でクライオ面の温度を約60 Kまで昇温させ、凝縮または吸着された排気ガスを脱着させる。②の排気脱着ガスの回収は、回収排気ポンプにより行い、脱着した排気ガスの初期分圧の百分の一以下の圧力までの排気回収を約30分で行う。次にクライオポンプ容器内を、クライオポンプが作動できる圧力まで補助排気系により約10分間で排気を行う。次に④のクライオ面の冷却を液体ヘリウムにより60 Kから4.5 Kまで約25分間で行う。

以上クライオポンプの回収再生運転は、約1時間50分で終了し、次の切り換えまで待機するものとする。

(6) クライオポンプの冷却

クライオ面を冷却する方法として、①液留方式、②強制冷却方式、などがある。①の場合は、数万 ℓ/s 程度の排気量に対して用いられ、②の場合は、数10～数100万 ℓ/s の大排気量に対して用いられる方式である。本設計では②の強制冷却方式を採用するものとする。

強制冷却方式の中で液体ヘリウムにより冷却する場合の移送方法としては、①加圧式、②減圧式、③循環ポンプ移送式などがあるが、クライオ面の温度を4.5 K以下にしたいこと、蒸発ヘリウムガスの顕熱を利用したいことなどから、②の減圧式による2相流体で液体ヘリウムを移送し冷却する方法を採用するものとする。

クライオ面の初期冷却及び定常時冷却、再生時の加温などに関するシステムについては、A.2ヘリウム冷凍系設計で検討する。

(7) クライオポンプに関する問題点および開発課題

クライオポンプは、従来の真空ポンプとは異なり低温面に排気ガスをため込むため、長時間の連続排気ができないので、周期的な再生が必要である。そのため、排気及び再生が短時間で繰返され、構成材料は低温領域で冷却、加温のサーマルサイクルを受けることになる。また放射性物質であるトリチウムが排気対象ガスであるため、系内外の安全性についての対策が必要である。ここではトリチウムに対する安全性以外の問題としてクライオポンプの構造及び機能上の問題について以下にまとめる。

- ① クライオポンプの構造は、スペース及び内容量の関係から矩形箱形で、内部断面をコ字形

としているため製作面での困難性及び冷媒液体ヘリウムの分配などについて検討する必要がある。

- ② クライオポンプの構成材料の低温における放射性損傷，また短時間の周期的なサーマルサイクルによる影響を検討する必要がある。
- ③ 重水素及びトリチウムに対する凝縮排気特性データが少ないため，十分な検討を行なうことは困難である。必要な排気特性の因子は，(I)圧力とクライオ面の温度と関連つけた排気速度，(II)凝縮係数，(III)脱着温度と圧力の関係，(IV)中性子等プラズマの影響などである。
- ④ 吸着排気パネルに使用される吸着材について，熱伝導率の悪さによる吸着材内の温度分布と平衡吸着量に関連した吸着破過特性の評価，ならびに吸着材と冷却面の熱接触及び熱伝達などの問題について基礎研究が必要である。
- ⑤ 低温で吸着排気する場合，排気速度は排気ガスの導入量，熱負荷，吸着材の熱接触法などに関与するものと考えられる。ヘリウム及び重水素，トリチウムなどの吸着排気特性データが少なく，今後の基礎実験が待たれる。検討を要する排気特性に関与する因子は，(I)吸着前の熱輻射率，(II)吸着材の熱伝導率，(III)吸着容量と平衡圧力，(IV)付着確率，(V)脱着温度と圧力，(VI)中性子等のプラズマからの影響などである。
- ⑥ クライオポンプの再生時に凝縮パネルから脱着した重水素及びトリチウムが吸着パネルに再吸着されるため，重水素及びトリチウムの吸着特性及び脱着特性などについても今後十分に解明する必要がある。特にトリチウムの吸着材への蓄積が考えられるため，トリチウムによる吸着材への影響を検討する必要があり定期的に吸着材からトリチウムを脱着させる処置も考慮する必要がある。
- ⑦ クライオポンプの排気口には，コンダクタンスの大きな大口径ゲートドルブ（1900 ϕ mm）が必要不可欠であり，そのR&Dが必要である。また，このゲートドルブは，直接中性子損傷を受けるため，構成材料などの十分な検討を要する。
- ⑧ クライオポンプのメンテナンス及び補修については，クライオポンプ本体が誘導放射化されていると考えられ，炉本体と同様に遠隔操作で作業を行う必要がある。
このため遠隔操作で作業ができるような構造の開発が必要になる。特に，低温配管は断熱用の真空部があり低温と真空をどのような方法で解除するか今後の開発研究が待たれる。

3) 主ポンプ以外のポンプおよび機器類

(1) 主ポンプ以外のポンプ

Fig.A. 1.2 に示した様に，主真空排気系を構成する各種ポンプとして，主ポンプ以外に粗引系ロータリーポンプ，補助系ターボ分子ポンプ，および回収系，メカニカルブースターポンプがある。これらのポンプに対して，前述の設計前提条件によるポンプ単体の排気速度をもとに，各々の仕様およびユーティリティ等の検討を行った。その結果をTable A. 1.6 に示す。また上記3つのポンプについて信頼性およびメンテナンスについて検討を加えた。この結果をまとめてTable A. 1.7～A. 1.9 に示す。

(2) 機器類

主真空排気系に使用される弁類および配管について，運転温度，真空の質等との関連を述べる。

① 運転温度

初期排気時（炉休止後の排気を含む）には、炉内を超高真空領域まで排気するためベーキングを行う必要がある。その温度は $300 \sim 400^{\circ}\text{C}$ ($573 \sim 673\text{ K}$) 程度とする。前記の設定条件では、排気ガス温度を常温 (300 K) として各ポンプ類の必要排気速度を決定しているが、ベーキングでの排気ガスが 300°C (573 K) で排気されるとすれば、分子速度が早くなるので排気速度としては、安全サイドにある。但し、クライオポンプに関しては、排気運転中は 4.2 K という極低温であるので、 573 K まで加熱を行えば温度振幅が他の構造材に対して約 2 倍となり、強度上好ましくない。即ち、たびたび繰返されると考えられるベーキングの範囲は、クライオポンプ容器入口のゲート弁までとし、クライオポンプ及び、それ以降の真空排気系配管は行わないものとする。

② 真空の質

清浄（オイルフリー）な真空であることが要求されるので、各ポンプは目的に応じ出来得る限り清浄なポンプを選定しているが、油蒸気の逆流を完全に止めるのは不可能であるので、各ポンプ吸入側にはコールドトラップを設ける。コールドトラップは、液体窒素を使用したシェブロンパッフルタイプとする。液体窒素の供給は、貯蔵タンクからポンプによる液移送で行う。弁類、計装機器、配管材料に対してもオイルフリーが必要であるので、製造、加工、組立時において充分油脂類に注意し、禁油処理する。

③ 磁場

排気系の運転により、炉運転に支障のあるような磁場を形成したり、磁場を乱さないことは勿論であるが、炉本体からの磁場により排気系の運転に支障が出ないように、機器の選定や、据付位置等を考慮しなければならない。機器に使用する材料は、支障のない限り、非磁性体であるオーステナイト系ステンレス鋼を用いる。

④ トリチウムによる影響

炉休止後の初期排気時及び回収排気時の排気ガスにはトリチウムが含まれているので、真空排気系に使用する機器類（ポンプ、弁、計装機器、配管材料）の本体、潤滑油、パッキンなどに対するトリチウムの影響を考慮する必要がある。トリチウムに対する種々材質のデータは非常に少いので、今后はこれらのデータを取得し、検討する必要がある。

⑤ その他

- a) 上記の如く、各機器類はトリチウムを取扱うので、配管は二重配管とし、ポンプ、弁類は、グローブボックスに収納し、グローブボックス内に He カバーガスを流し、トリチウムがもし漏洩しても検知でき、格納室内へのトリチウム漏出を防止できるような構造とする。これらについては第 5 章で述べている。
- b) クライオポンプ容器に設置されるゲート弁は、非常に大型であり、且つ、超高真空、高温、中性粒子など厳しい環境で使用されるので、開発にあたっては、強度、材料、シール性（パッキン）などの検討も必要である。

4) 排気タイムスケジュールの検討

実験炉の主真空排気系の運転サイクルを図示すると、Fig.A. 1.7 の様になる。運転サイクルは図示した様に初期排気と排気サイクルに大別される。初期排気は、A.1-1) 項の設計前提条件より、粗引系による粗引排気が約 8 時間、補助排気系と粗引系による補助排気が約 4 時間、合計

12時間とし、He冷凍系による初期冷却が、約9時間で行えるものとする、全初期排気時間は、約21時間となる。

実験炉運転中の排気サイクルは、炉排気運転と、主ポンプ冷却を含んだ回収排気運転より成る。実験炉8系列の引口に各2基ずつ設けられた主ポンプ（クライオポンプ）は連続2時間炉排気運転を行った後、切替られ回収排気運転を行う。主ポンプ切替時、ゲート弁の開閉を行うが、ゲート弁の構造上、及び非常に大型であることを考慮すると、ゲート弁を瞬間的に開閉させることは困難である。それ故、最低限、ゲート弁の開閉に必要な時間だけは、1系列についている2台の主ポンプが同時に作動（排気）していることが必要である。今、この時間を約5分とすると、主ポンプの回収排気運転は、1時間50分以内に行う必要がある。上記の項目、並びにA.1-1)項、設計前提条件等を考慮に排気スケジュールをFig.1-8に示す。

5) 予備排気システムの容量と信頼性

ここではA.1-3)項“主ポンプ以外のポンプ”で検討した各系のポンプ類の単体の信頼性を基にして、システム全体での信頼性、並びに、予備排気システムの容量を検討する。

粗引系は、四つの引口系列に対して一式、合計二式設置している。粗引系を使用するのは、Fig. A.1.7 真空排気系運転サイクルより、初期排気運転の時だけである。実験炉の運転（又は休止）の年間日程が現在未定であるので、今、仮に年間12回運転されるとすると、粗引系は年間12回運転されることになる。また、初期排気運転における粗引系の運転時間は、Table A.1.2 初期排気時の設計前提条件より12時間であり、ロータリーポンプは、年間144時間の運転が行われるものとする。ロータリーポンプのMTBF (Mean Time Between Failure), 及び定期修理に要する時間を考慮すると、100% (同仕様のを同数量) の予備系は必要ないと考えられるので、粗引系ロータリーポンプの予備系は、同仕様のを1台設置するものとする。しかし、炉運転中にロータリーポンプが、何らかの理由で停止した場合、ポンプを交換することは不可能であるので、2台のポンプから予備系ポンプへ、それぞれバイパス可能な様な配管設備とする。

補助排気系は、初期排気運転と回収再生運転に使用され、回収系は、回収再生運転のときに使用される。初期排気運転は前記の通り、年間144時間とした。回収再生運転は、炉運転中2時間毎に切替えが行われる。一つの引口系列において考えると、Fig.A.1.8 排気スケジュールより、2時間のうち回収系、補助排気系が運転されている時間は、それぞれ、40分、10分である。実験炉の稼働時間は年間50% = 4380時間と想定すると、回収系及び補助排気系の年間稼働時間及び年間稼働率は下記のようなになる。

$$\text{回収系: } 4380 \text{ H} \times \frac{40 \text{ min}}{2 \text{ H}} = 1460 \text{ H} \rightarrow \frac{1460 \text{ H}}{8760 \text{ H}} = 16.7 \%$$

$$\text{補助排気系: } 4380 \times \frac{10 \text{ min}}{2 \text{ H}} + 144 = 509 \text{ H} \rightarrow \frac{509 \text{ H}}{8760 \text{ H}} = 5.8 \%$$

補助排気系のターボ分子ポンプ、回収系のメカニカルブースターポンプのMTBF及び定期修理に要する時間を考慮すると、粗引系と同様に100%の予備系を設ける必要はないが、この二つの系統は、炉運転中に停止させることは不都合があり、粗引系とは性格が異なる。以上の検討の結果

果、補助排気系及び回収系のポンプは、予備ポンプをそれぞれ1台ずつ（即ち、100%）設ける。ものとし、各々にバイパスを設け、炉運転中であっても切替え可能な配置構造とする。

- 1) H. M. Roder, et al, NBS Technical Note 641, 1973
- 2) J.N. Chubb, Vacuum, **16**, 681, 1960
- 3) R.J. Powere, et al, J. Vac. Sci, Technol, **8**, 319, 1973

Table A. 1.2 初期排気時の設計前提条件

使用系統	設定条件			備考
粗引系 ロータリーポンプ	排気開始圧力	P_1 Torr	760	排気ガスは空気又は不活性ガス $S_{eff} = \frac{V}{t} \ln \frac{P_1}{P_2}$ クライオポンプ容器出口からポンプ迄のコンダクタンスは無視できる
	到達圧力	P_2 Torr	1×10^{-2}	
	排気容積	V m ³	2000	
	排気時間	t Hr	8	
	クライオポンプ容器出口での有効排気速度	S_{eff} l/s	780	
	ロータリーポンプ単体の排気速度 (1台当り)	S_1 l/s	800 (400)	
補助排気系 ターボ分子ポンプ 粗引系 (背圧) ロータリーポンプ	排気開始圧力	P_2 Torr	1×10^{-2}	$Q_B = q \cdot A_0$ $S_{eff} = Q/P$ $S_i = 3.64 \sqrt{T/M}$ 急縮少部 1 m φ オリフィス 長大円管部 1 m φ × 23 mL コールドトラップ K = 0.25
	到達圧力	P_3 Torr	1×10^{-6}	
	排気時間	t_2 Hr	4	
	放出ガス量	q Torr l/s · cm ²	1×10^{12}	
	全表面積	A_0 m ²	15000	
	総ビルドアップ量	Q_B Torr l/s	1.5×10^4	
	クライオポンプ容器出口での有効排気速度	S_{eff} l/s	2083	
	理想排気速度	S_i l/s	11.72	
	合成コンダクタンス	C_s l/s	4.31×10^3	
		├ C_{s1}	6.89×10^5	
	├ C_{s2}	5.35×10^3		
	└ C_{s3}	8.20×10^3		
ターボ分子ポンプ単体の排気速度	S_2 l/s	4100		

Table A. 1.3 炉運転中排気時の設計前提条件
(主真空ポンプ=クライオポンプ)

項 目	重水素	トリチウム	ヘリウム	備 考	
排気ガス量	mg /s	22.28	17.32	0.24	
	molecules/s	3.327×10^{21}	1.724×10^{21}	3.609×10^{19}	
全排気ガス量	Torr l/s	103.35	53.67	1.12	at 300 K
1系列当りの排気流量	Torr l/s	12.92	6.71	0.14	"
炉引口での運転圧力	Torr	1×10^{-4}	1×10^{-4}	5×10^{-6}	
炉引口での有効排気速度	l/s	12.92×10^4	671×10^4	2.80×10^4	
理想排気速度	l/s·cm ²	31.40	25.64	31.51	
合成コンダクタンス C _T	l/s	3.49×10^5	2.85×10^5	3.50×10^5	
├ C ₁		9.96×10^5 (分子量 5)			
├ C ₂		1.08×10^6 (")			
├ C ₃		3.10×10^6 (")			
└ C ₄		1.06×10^6 (")			
主ポンプ単体の排気速度	l/s	2.05×10^5	8.78×10^4	3.04×10^4	
主ポンプ排気口での圧力	Torr	6.30×10^{-5}	7.64×10^{-5}	4.61×10^{-6}	

Table A. 1.4 回収排気時の設計前提条件

使用系統	項目	重水素	トリチウム	ヘリウム	備考
回収系 メカニカルブースター ポンプ ダイアフラムポンプ	蓄積ガス量 Torr ℓ	93024	48312	1008	全圧 14.5 クライオポンプ 容器出口から ポンプ迄のコ ンダクタンス は無視できる
	再生時分圧 (排気前分圧) Torr	9.4	5.0	0.1	
	主ポンプ内容積 m^3		10		
	排気後圧力 (全圧) Torr		1×10^{-2}		
	排気時間 sec		2000		
	クライオポンプ容器出口 での有効排気速度 ℓ/s		36.40		
	ポンプ単体の排気速度 ℓ/s		40		
補助排気系 ターボ分子ポンプ + 回収系 (背圧) メカニカルブースター ポンプ ダイアフラムポンプ	排気開始圧力 Torr		1×10^{-2}		$T = \frac{V}{S} \ln \frac{P_1}{P_2}$ $\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{G}$
	到達圧力 Torr		1×10^{-6}		
	排気時間 sec		31 *2		
	クライオポンプ容器出口 での有効排気速度 ℓ/s		2933		
	理想排気速度 $\ell/s \cdot cm^2$		27.96 (分子量 5)		
	合成コンダクタンス $C_T \ell/s$		1.03×10^4		
	└ C ₅₁		1.65×10^6		
	└ C ₅₂		1.27×10^4		
	└ C ₅₃		5.49×10^4		
	ポンプ単体の排気速度 ℓ/s		4100 ℓ *1		
<p>* 1 初期排気時の補助排気系ターボ分子ポンプのポンプ単体必要排気速度</p> <p>* 2 上記の排気速度と合成コンダクタンスより有効排気速度が求められ、これより排気時間が定まる。</p> <p>排気タイムスケジュールでは、余裕を見て10分とする。</p>					

Table A.1.6 各種ポンプの仕様及びユーティリティー

項目	粗引系 ロータリーポンプ	補助排気系 ターボ分子ポンプ	回収系 メカニカルブースターポンプ	備考
・排気ガス種	空気又は不活性ガス	{ 空気又は不活性ガス* 重水素, トリチウム, ヘリウム }	重水素, トリチウム, ヘリウム	
・吸入温度	300 K	300 K	300 K	
・排気開始圧力	760 Torr	1×10^{-2} Torr	14.5 Torr	
・到達圧力	1×10^{-2} Torr	1×10^{-8} Torr	1×10^{-2} Torr	
・排気すべき容積	2000 m ³	{ 2000 m ³ 10 m ³ }	10 m ³	
・排気時間	8 H	{ 4 H 600 sec }	2,000 sec	
・主ポンプ室出口での有効排気速度	780 l/s (全系)	2083 l/s (1系列)	36.40 l/s (1系列)	
・コンダクタンス	$N_{EG} \cdot S_{SMALL}^{**}$	1.03×10^4 l/s	$N_{EG} \cdot S_{SMALL}^{**}$	
・ポンプ単体排気速度	800 l/s (全系)	4100 l/s (1系列)	40 l/s (1系列)	
・ポンプ1台当りの排気速度	400 l/s	4100 l/s	160 l/s	
・台数 (予備)	2台 (1台)	8台 (8台)	2台 (2台)	合計(全系)
・回転数	360 rpm	15000 rpm	2000 rpm	
・冷却水	2.5 m ³ /H・台	0.09 m ³ /H(min)1台	0.024 m ³ /H・台	
・電動機(周波数変換器容器)	45 kw/台	2.0 kw/台	3.7 kw/台	114kw
・外形寸法 mm	3000L×2000W×2000H	600φ×700 H	500L×600W×1000H	
・重量	2600 kg/台	300 kgw/台	250 kg/台	

* 補助排気系 { } 内上段, 粗引排気時, 下段: 回収排気時

** $N_{EG} \cdot S_{SMALL}$ 無視しうる程微小

Table A.1.7 粗引系ロータリーポンプの信頼性

信頼性検討項目	対策又は備考
<ul style="list-style-type: none"> • 油の逆流：作動流体として油を使用しているの でその蒸気圧に見合った油蒸気の逆 流がある。 	<p>運転中の油蒸気逆流はポンプ吸入口前にコールド トラップを設けることにより低減できる。</p>
<ul style="list-style-type: none"> • 油洩れ：シャフトシール部からの洩れ及び、油 量を適量以上注入した場合吐出側に油 が洩れる。 	<p>遠心式又は電気集塵式の濾過装置を排気口に設け る。</p>
<ul style="list-style-type: none"> • トリチウム排気の場合：粗引系の排気は、初期 排気のみであるので、排気ガスは空気 又は不活性ガスであると考えられるが、 炉休止後の排気ではトリチウムが混入 することも考えられる。 	<p>作動油のトリチウムによる汚染、劣化並びに後処 理は今後の検討を要する。 ロータリーポンプ等をグローブボックスに収納す る。</p>
<ul style="list-style-type: none"> • 材料関係：ほとんど部分が鋳鉄でできており、 シャフト、スプリング、弁部などは 鋼製。 	<p>トリチウムに対処するため、シリンダー内面など、 ガスに接触する部分はステンレス系を使用する。</p>
<ul style="list-style-type: none"> • MTBF 	<ul style="list-style-type: none"> • 約6ヶ月～1年
<ul style="list-style-type: none"> • メンテナンス項目 	<ul style="list-style-type: none"> • 排気弁（6ヶ月毎）、ベルト オイルシール ベアリング 油（適宜）
<ul style="list-style-type: none"> • メンテナンス時間 	<ul style="list-style-type: none"> • 約1週間

Table A.1.8 補助排気系ターボ分子ポンプの信頼性

信頼性検討項目	対策又は備考
<ul style="list-style-type: none"> • 油蒸気の逆流：シャフトのベアリングおよびシールは、背圧側にあるので、運転中はこれからの油蒸気の逆流がないが、停止中は逆流が考えられる。 	<p>ポンプ手前にコールドトラップを設けて油の逆流を防止する。</p>
<ul style="list-style-type: none"> • トリチウム排気 	<p>作動油のトリチウムによる汚染、劣化並びに後処理は、今後の検討を要する。グローブボックスに収納。</p>
<ul style="list-style-type: none"> • 圧縮比、排気速度：排気ガスが空気の場合、背圧が10^{-2}Torrで圧縮比は5×10^7であるが、水素では250程度である。排気速度は、空気に対して水素はわずかに良い。 	<p>分子量の小さい、重水素、トリチウム、ヘリウムに対して圧縮比を大きくするため、ターボ分子ポンプを2台直列に設ける。</p>
<ul style="list-style-type: none"> • 背圧により性能が異なる。 	<p>粗引排気、背圧=粗引系ロータリーポンプ1×10^{-2}Torrを使用して、到達圧力1×10^{-8}Torr程度。</p>
<ul style="list-style-type: none"> • 現在あまり大型のものの実績は無く、高価である。 	<p>各引口系列に1台ずつ設置し、1台当りの排気速度を小さくする。</p>
<ul style="list-style-type: none"> • MTBF 	<ul style="list-style-type: none"> • 約1年(現在までの実績ではポンプ自体の故障は少ない。)
<ul style="list-style-type: none"> • メンテナンス時間 	<ul style="list-style-type: none"> • 約1ヶ月(シャフトベアリング交換、ダイナミックバランス調整他)
<ul style="list-style-type: none"> • メンテナンス項目 	<ul style="list-style-type: none"> • シャフトベアリング • 潤滑油

Table A.1.9 回収系メカニカルブースターポンプの信頼性

信頼性検討項目	対策又は備考
<ul style="list-style-type: none"> • 背圧からの逆流：メカニカルブースターポンプは構造上、背圧からの逆流が相当あり、背圧によって到達圧力が影響される。 	<p>クリーンな真空を得るため、背圧のポンプとしてダイアフラムポンプを用いる。</p>
<ul style="list-style-type: none"> • 油の逆流：このポンプのインペラ部などガスとの接触部は本来クリーンであるが、背圧からや、ケーシングへのシャフトシールからの油の洩れによる影響が考えられる。 	<p>炉心への油の逆流を防ぐため、メカニカルブースターポンプ吸入口前にコールドトラップを設ける。</p>
<ul style="list-style-type: none"> • トリチウムの排気 	<p>作動油のトリチウムによる汚染、劣化並びに後処理は、今後の検討を要する。 ポンプ等は、グローブボックスに収納する。</p>
<ul style="list-style-type: none"> • MTBF 	<p>(長時間連続運転可能)</p>
<ul style="list-style-type: none"> • メンテナンス時間 	<ul style="list-style-type: none"> • 約1週間
<ul style="list-style-type: none"> • メンテナンス項目 	<ul style="list-style-type: none"> • ストレーナー (防塵器) • 油 • バルト

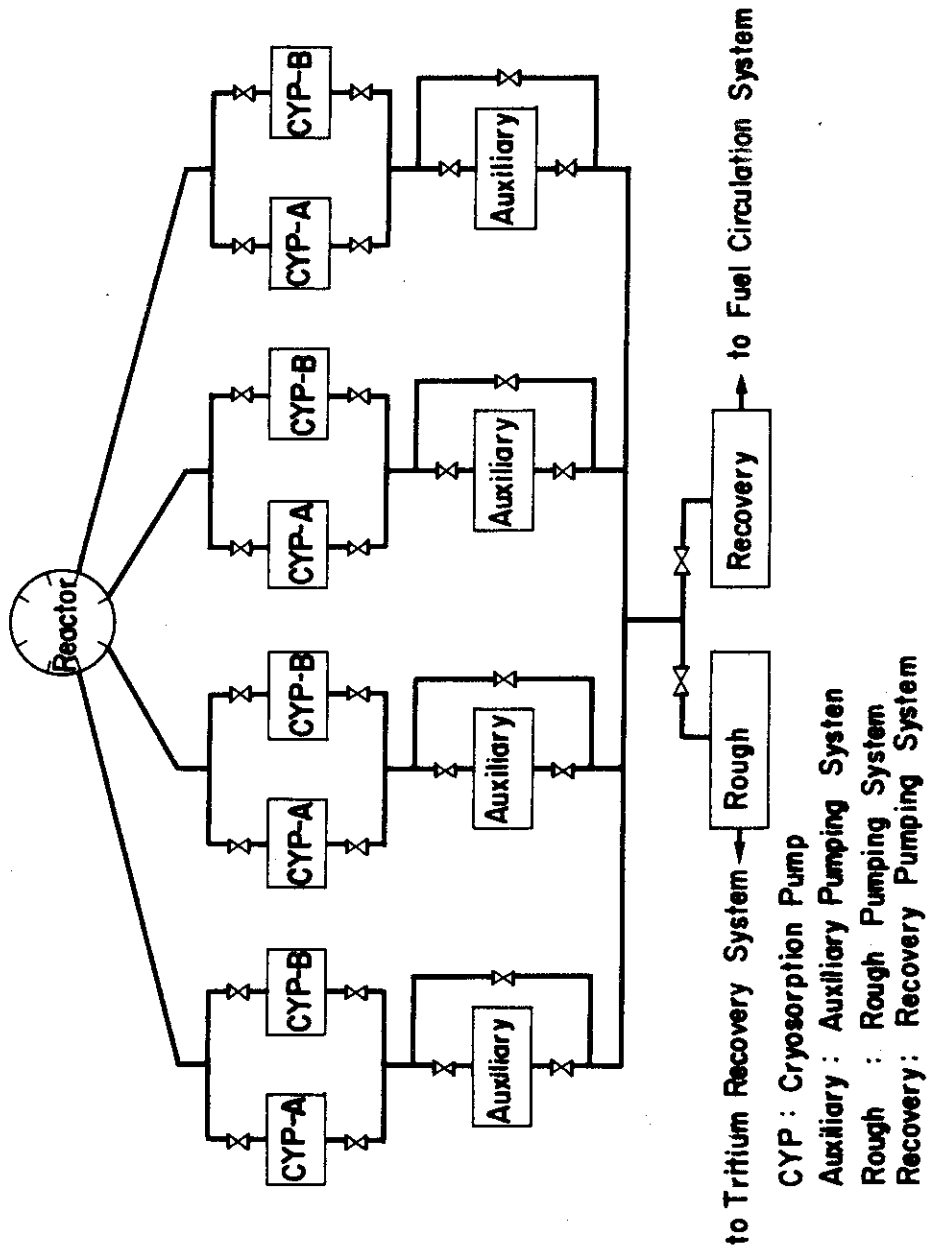


Fig. A.1.1 Main Vacuum System

(Rough Pumping System) (Auxiliary Pumping System) (Recovery System)

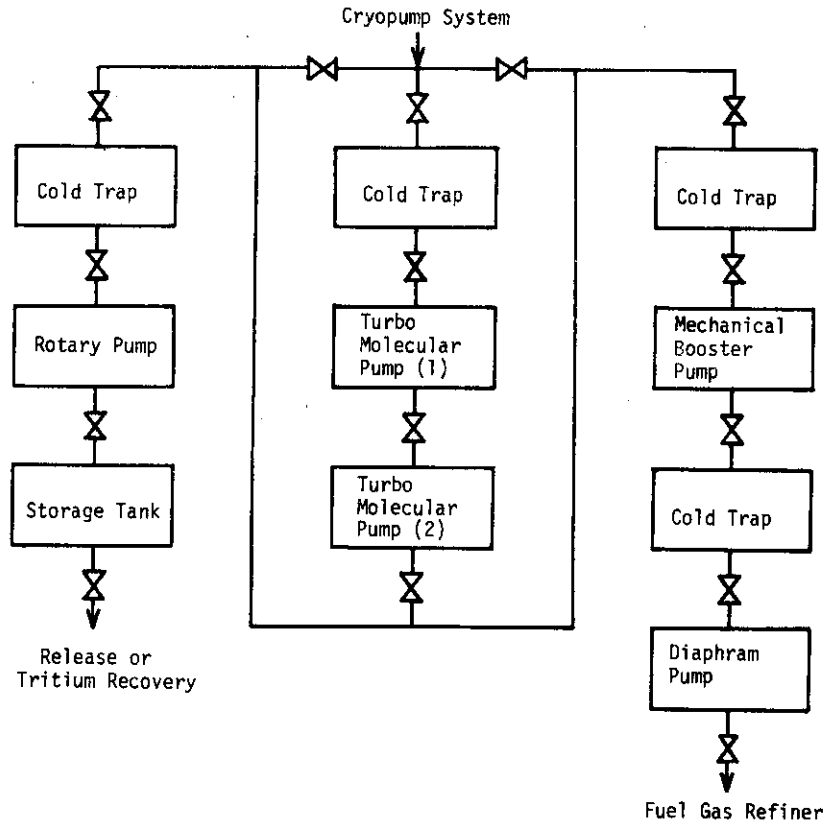


Fig. A.1.2 Composition of Rough, Auxiliary and Recovery Pumping System

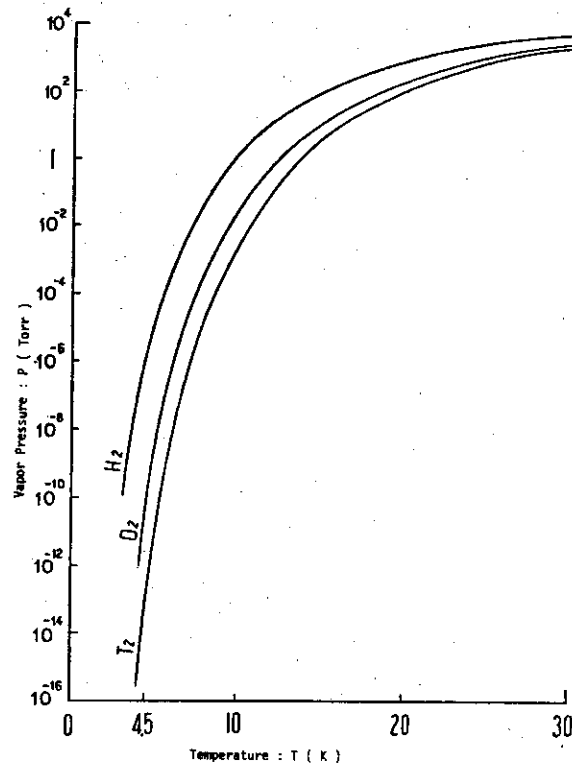


Fig. A.1.3 Vapor Pressure of Hydrogen

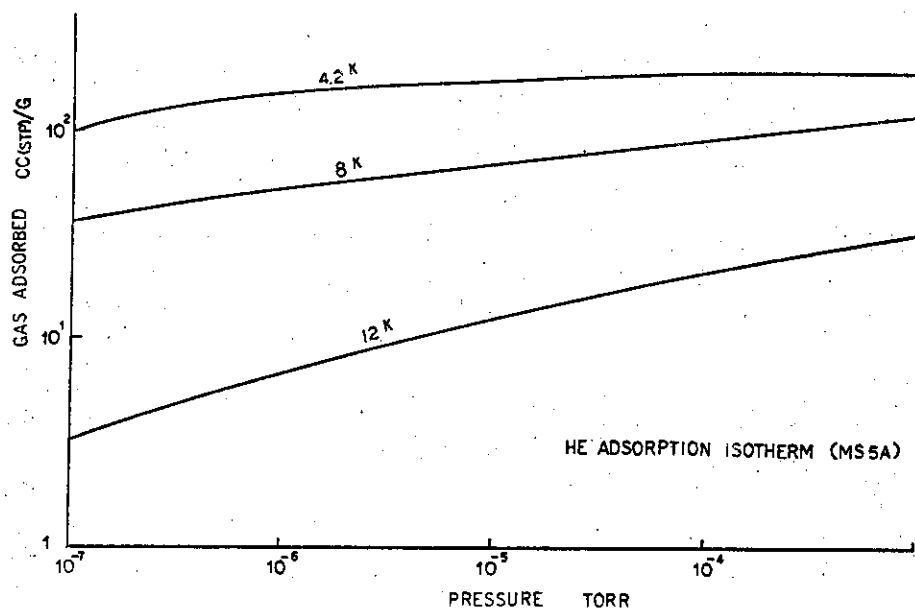


Fig. A.1.5 He Adsorption Isotherm (MS5A)

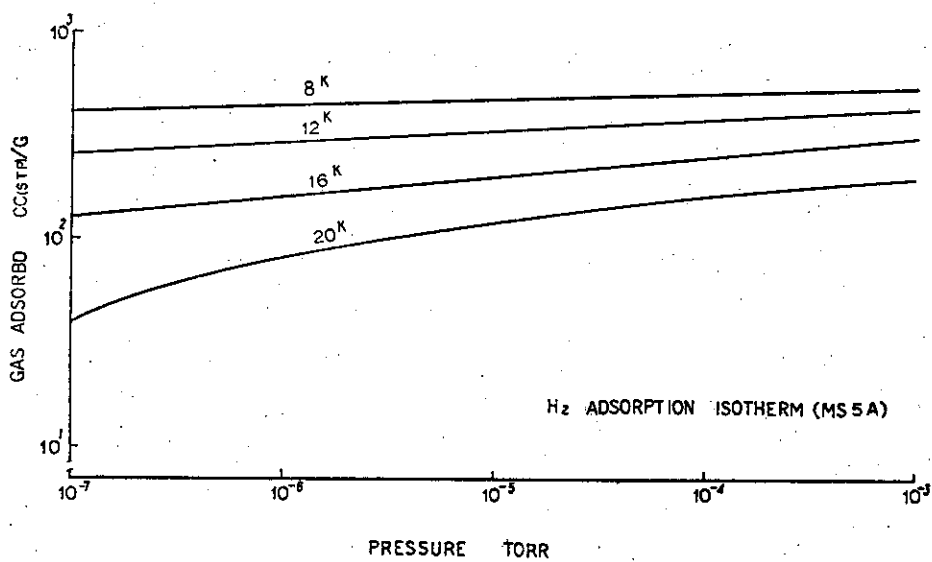


Fig. A.1.6 H₂ Adsorption Isotherm (MS5A)

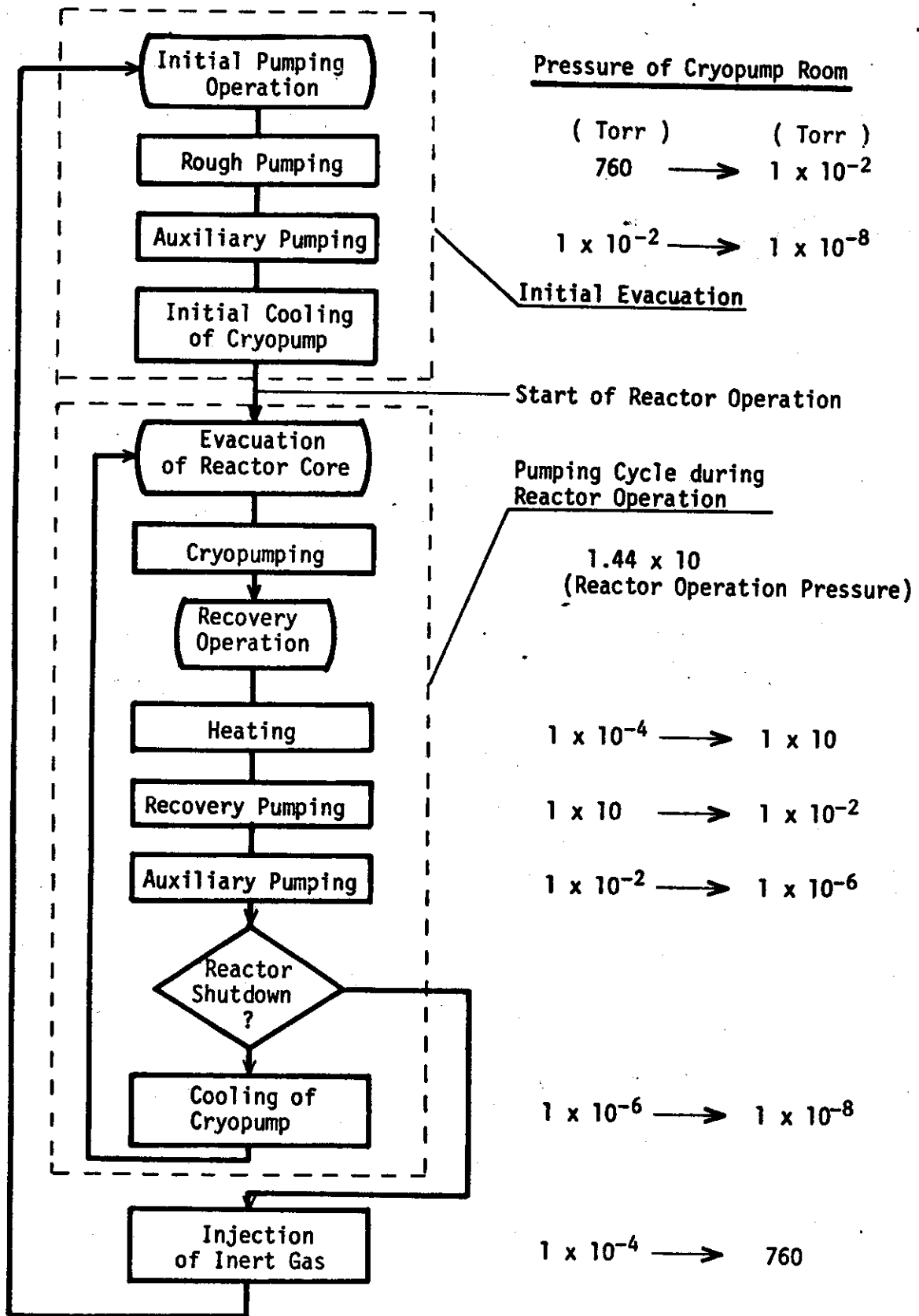


Fig. A.1.7 Operation Cycle Scheme of Main Vacuum System

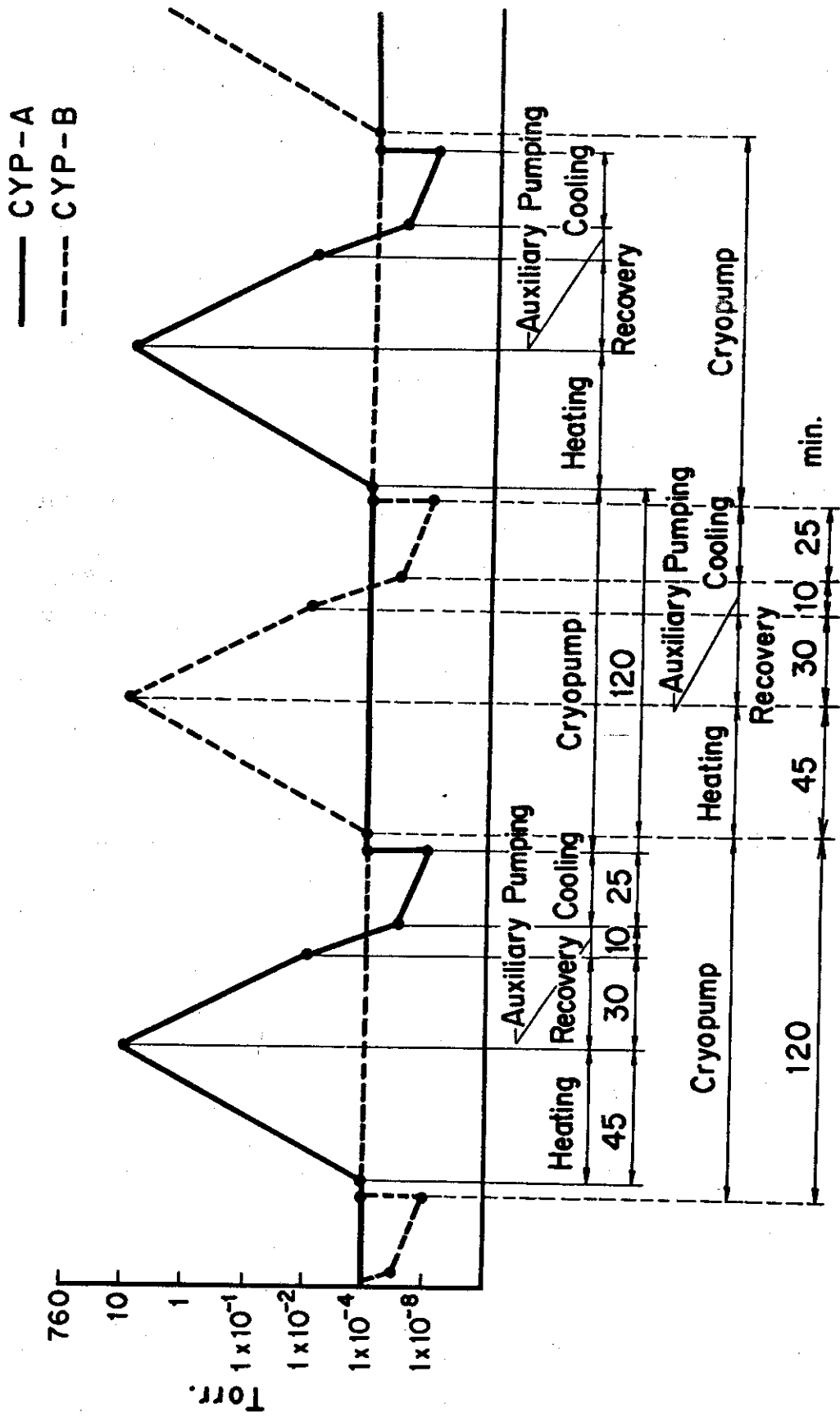


Fig. A.1.8 Operating Pressure in Cryopump Room

A.2 ヘリウム冷凍系設計

実験炉主真空排気系の主ポンプであるクライオポンプは、液体ヘリウム冷却が必要である。安全性解析の前提条件を得るため、ヘリウム冷凍システム設計を行い、系統の信頼性について検討を行った。

ヘリウム冷凍系は、ヘリウム液化装置、液体ヘリウム容器、ヘリウム移送ポンプ装置、ヘリウム回収精製装置などから構成され、主真空排気系の主ポンプであるクライオポンプへの冷媒液体ヘリウムの供給機構及びクライオポンプの再生時の加温機構などを有している。ヘリウム冷凍系の系統図をFig. A. 2.1に示す。本系統の役割は、ヘリウム液化装置によりヘリウムガスを液化して、液体ヘリウム容器に貯蔵し、冷媒の液体ヘリウムはクライオポンプを冷却するため、ヘリウム移送ポンプ装置の移送ポンプにより吸引して移送する。クライオポンプのクライオ面（凝縮パネル、吸着パネル）は液体ヘリウムの潜熱により、また輻射熱シールドは蒸発ヘリウムガスの顕熱により冷却するものとする。

クライオポンプの加温・再生は80 Kのヘリウムガスにより行うが、その方法は、移送ポンプで加圧されたヘリウムガスを再生熱交換器にて蒸発ヘリウムガスと熱交換させ80 K以下に冷却されたヘリウムガスによりクライオ面を加温して再生を行う。

ヘリウム冷凍系は大型ヘリウム液化装置を1系列、ヘリウム移送ポンプ装置を2系列設置し、各クライオポンプ系へは1台の液体ヘリウム容器から冷媒液体ヘリウムを供給できれば機能が果たせるように各機器とも独立した装置としている。

1) 基本条件

ヘリウム冷凍系設計における基本条件をTable A. 2.1に示す。この基本条件は、クライオポンプ系からの要求事項である。また、クライオポンプ系に対するヘリウム冷凍系の運転モードは、①初期冷却、②定常冷却、③再生加温、④予備冷却からなる。

①の初期冷却はLN₂で冷却されたHeガスによりクライオポンプを約80 Kまで冷却してから、LHeにて4.5 K以下まで冷却する。②の定常冷却は、LHeをLHe容器から供給して4.5 K以下の温度を保持し、輻射シールド板もその蒸発Heガスによって冷却する。③の再生加温は、蒸発Heガスによって冷却された80 KのHeガスによりクライオ面を加温する。④の予備冷却は、再生時に加温されたクライオ面をLHeによって冷却をする。これらの運転モードは5)項で検討する。

2) 必要冷凍量

ヘリウム冷凍系の全熱負荷量を求め、ヘリウム液化機で発生させなければならない液化量についての概略検討を行う。

ヘリウム冷凍系の熱負荷量はクライオポンプ系内の熱負荷量とLHe容器及びLHeの移送損失などの熱負荷量からなる。

(1) クライオポンプの熱負荷量

クライオポンプは、クライオ面（4.5 K）と輻射シールド面（80 K）からなる。その熱負荷は、①輻射による熱侵入、②重水素、トリチウム、ヘリウムの付着熱、③プラズマからの輻射及び中性子による発熱、④支持材などからの固体伝導による熱侵入、などである。クライオ面（4.5 K）への全熱負荷量は、Table A. 2.2に示す。また、80 K輻射シールド面への全熱負荷量はTable A. 2.3の通りである。

クライオポンプ1台の熱負荷量は、クライオ面(4.5 K)で15.4 W、輻射シールド面(80 K)で747 Wとなり、それぞれ液体ヘリウムの潜熱及び蒸発ヘリウムガスの顕熱を利用して冷却する。

(2) 液体ヘリウムの移送損失量

液体ヘリウムを容器からクライオポンプへ移送する時の移送熱損失としては、①メイン(主移送)配管への侵入熱、②サブ(分岐)配管への侵入熱などがある。各配管の侵入熱は、弁類及び接手類を含むものとする。メイン配管への侵入熱量をTable A. 2.4に、サブ配管への侵入熱量をTable A. 2.5に示す。これらより液体ヘリウムの移送損失熱量は274 Wになる。

(3) 必要冷凍量

必要冷凍量は、クライオポンプ8台当りの熱負荷量123 W(4.5 K)と液体ヘリウムの移送損失熱量274 Wにより約400 Wとする。液体ヘリウムの潜熱は、4.5 Kで1 ℓ/hr当り0.62 Wであるから、有効液化量は4.5 Kで645 ℓ/hrになる。液体ヘリウム容器の熱損失及びクライオポンプの冷却損失などを含めて、必要液化量を800 ℓ/hrとする。

1台当りのクライオポンプに供給する液体ヘリウム量は、約80 ℓ/hr(4.5 K)であるからヘリウムの質量流量は、2.64 g/sになる。80 K輻射シールド板の冷却は、この蒸発ヘリウムガスの4.5 Kから80 Kまでの顕熱を利用するから、この時の冷凍量は、約1056 Wになり、80 Kの必要負荷熱量750 W(Table A. 2.3)を充分満たすことができる。

3) 冷凍システム

ヘリウム冷凍系は、大型ヘリウム液化装置により冷媒液体ヘリウムを製造し、その冷媒を各クライオポンプユニットへ分岐供給するものである。

液体ヘリウムの移送方法には、①加圧移送、②減圧移送、③液体ヘリウムポンプ移送等がある。本設計ではクライオポンプ冷却方式として②の減圧移送による強制冷却方式を採用するものとする。ヘリウム冷凍系は、ヘリウム液化装置、液体ヘリウム容器、ヘリウム移送ポンプ装置、液化窒素容器、ヘリウム回収精製装置などから構成される。この冷凍系の系統図をFig.A. 2.1に、また主要機器及びクライオポンプの主要目をTable A. 2.6及びA. 2.7に示す。本ヘリウム冷凍系では、定常運転時は液化装置及びクライオポンプに液化窒素を使用していないが、クライオポンプの初期冷却時(300 K→80 K)のみヘリウムガスの冷却に液化窒素を使用するものとする。

(1) ヘリウム液化装置

ヘリウム冷凍系における液化量として800 ℓ/hr(96 kg/hr)(4.5 K)が必要である。この800 ℓ/hrを液化するための圧縮機のヘリウムガス処理量は高圧流量とタービン流量を加えたものである。JT(Joule-Thomson)弁までの高圧流量と液化量との質量比は、ほぼ2:1とすると高圧流量は200 kg/hrになる。

ヘリウムループの高圧側を12 atm、低圧1.3 atmとし、膨張タービンは2段とし、1段の入口温度を75 K、2段の出口温度を8 Kとする。これらの温度条件と膨張タービン効率を80%とすることから高圧流量とタービン流量の比は、約1:6となり、タービン流量は1200 kg/hr程度である。従って、1400 kg/hr(7800 km³/hr)となり、圧縮機動力は、約1200~1500 kW程度のものが必要になるだろう。

ヘリウム液化装置の液化サイクルをFig.A. 2.2に示す。本装置は、圧縮機ユニットとコールドボックス(液化器)から構成される。圧縮機ユニットは、現状の技術水準で最も信頼性の高い、

油注入式スクリー型圧縮機と油除去装置からなるものとし、このユニットの信頼性を高めるため並列配置とする。コールドボックスは、2台のガスベアリング式タービンと5基のアルミプレートフィン型熱交換器、内部低温精製器及びJT弁からなる。ヘリウム液化装置は、スクリー型圧縮機、ガスベアリング式タービン及び各段の熱交換器などの諸特性を考慮して、システムの最適液化サイクルに関する検討が必要であるが、これは今後の検討課題とする。

圧縮機ユニットおよびコールドボックスからなるヘリウム液化装置の主要目を、Table A. 2.8 に示す。またコールドボックスの外形を Fig. A. 2.3 に示す。

(2) 液体ヘリウム容器

ヘリウム液化装置により、800 ℓ/hr で連続液化し、初期時に約 24 hr 分の貯蔵量を確保するものとする。液化ヘリウム容器の容量は 20 m³程度が必要である。液体ヘリウム容器の主要目を Table A. 2.9 に示す。

(3) ヘリウム移送ポンプ装置

液体ヘリウム容器から液体ヘリウムを減圧移送してクライオポンプを冷却する機能とクライオポンプの再生加熱の為にヘリウムガスを 80 K まで冷却する機能、さらにクライオポンプを 300 K から 80 K まで初期冷却する機能をもっている。クライオポンプの初期冷却は、液化窒素で冷却されたヘリウムガスを移送ポンプで循環させて行うものである。本装置は、クライオポンプ系の全系統に 1 ユニット設置するもので、移送ポンプ及び再生熱交換器、などから構成される。ヘリウム移送ポンプ装置の主要目を Table A. 3.10 に示す。

(4) ヘリウム回収精製装置

本装置は、ヘリウム冷凍系の周辺装置であり、ヘリウムガスの回収・精製及び貯蔵などの機能をもっている。ヘリウムガス回収のためのガスホルダーの容量は、液体ヘリウム流量 800 ℓ/hr の 1 時間分が貯蔵できる容量として 600 m³とする。

ヘリウムガスの回収精製用圧縮機および精製器の能力は He 液化機の故障時の LHe 移送に要するヘリウムガス量以上が必要であるから 600 Nm³/hr とし、精製器は連続運転が出来るように 2 筒設置するものとする。圧縮機は、精製回収ガス及び精製ガスを高圧ポンプに貯蔵するものとして、吐出圧力を 150 kg/cm²とする。精製ガスの貯蔵容量は、液化ヘリウム容量の貯蔵量の約 1.5 倍程度とすると 2 × 10⁴ m³が必要である。ヘリウム回収精製装置の主要目を Table A. 2.11 に示す。

4) クライオポンプの冷却・加温

クライオポンプ系の、①初期冷却、②再生加温、③予備冷却などに要する時間及び定常冷却時の圧力損失などは以下の通りである。

(1) 初期冷却

クライオポンプの初期冷却は、ヘリウム移送ポンプにより LN₂ で冷却されたヘリウムガスの循環で 300 K から 98 K まで冷却してから、液体ヘリウムにて 4.5 K 以下まで冷却する 2 次予冷方式である。クライオポンプは、アルミ合金製であり、80 K 輻射シールド板及び 4.5 K パネルの各重量は 350 kg 及び 270 kg とする。冷却対象物の総重量は 620 kg の 8 台分として約 5,000 kg で、冷却材流量 450 Nm³/hr × 2 で 900 Nm³/hr とし、アルミ合金の比熱を 10 deg 毎に変化させて計算すると、1 次予冷として 80 K ヘリウムガスにより 300 K から 90 K までの冷却に要する時間は約 8 hr

となる。次に2次予冷として、4.5 Kパネルのみを液体ヘリウムの潜熱及び顕熱により90 K から4.5 K までの冷却に要する時間は、冷却対象物の重量を2200 kg、冷却流量を560 L/hr (4.5 K) とし、温度分割を2~5 K おきに計算すると約50 min となる。よってクライオポンプの初期冷却とし300 K から4.5 K までに冷却に要する時間は約hrとなる。

(2) 再生加温

クライオポンプの再生のための加温は、ヘリウム移送ポンプにより80 Kヘリウムガス循環にて行うもので、4.5 Kパネルを約60 Kまで昇温する。クライオポンプの再生加温は4台同時に行うもので循環流量を360 Nm³/hr とし、4.5 Kパネル重量を約1100 kg とすると、60 Kまでの昇温には約40 min を要する。再生加温用のヘリウムガスは、クライオポンプ冷却中の蒸発ガスとの熱交換により冷却し、液化窒素は使用しない。

(3) 予備冷却

クライオポンプの再生終了後、4.5 Kパネルを60 Kから4.5 Kまで冷却する必要がある。この冷却は、液体ヘリウムの潜熱及び顕熱により行うもので、この時の冷却時間は約25 minである。

(4) 定常冷却時の圧力損失

液体ヘリウム容器から液体ヘリウムを減圧移送した時の圧力損失は、①2相流体によるもの、②単相流体(ガス)によるものとがある。前者の2相流体ヘリウムによる圧損は液体ヘリウム容器の出口からクライオポンプの4.5 Kパネル冷却管までで、約0.02 atmである。後者の単相流体ヘリウムによる圧損は4.5 Kパネル以降の80 K放射シールド板、分岐管、熱交換器、移送ポンプまでで、約0.4 atmになる。

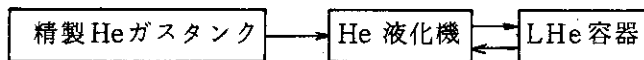
従って液体ヘリウム容器から移送ポンプまでの全圧力損失は約0.42 atmになり、液体ヘリウム容器の圧力は1.3 atmで、移送ポンプの吸入圧力は0.8 atmであるから差圧が0.5 atmとなり、圧力損失0.42 atmを満たすことができる。

5) ヘリウム冷凍系の運転モード

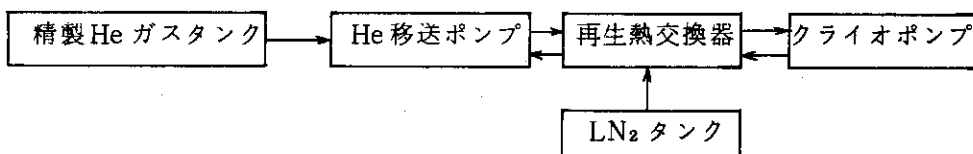
クライオポンプ系に対するヘリウム冷凍系の運転モードは、次のとおりである。

① 初期冷却

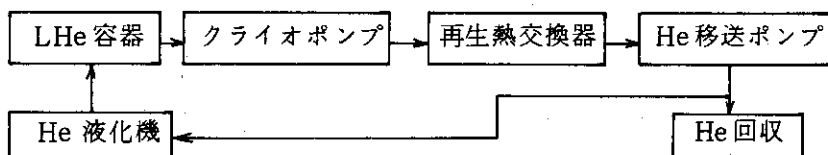
㉑ He 液化機及び LHe 容器の予冷及び He 液化運転



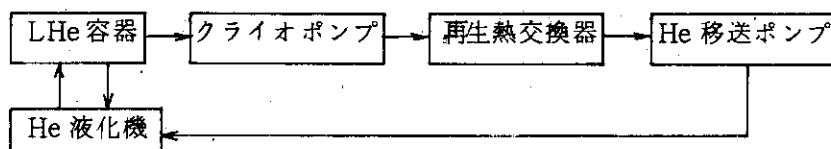
㉒ クライオポンプの1次予冷



㉓ クライオポンプの2次予冷



② 定常冷却



③ 再生加温



④ 予備冷却

初期冷却のクライオポンプの2次予冷と同じ運転モードである。

各運転モードに対する運転時間は、初期冷却時のHe液化機及びLHe容器の予冷時間が約8~10hr程度であり、He液化開始後にLHe容器を満杯にするまでの時間は、800 ℓ/hrで液化したとして約25 hrを要す。クライオポンプの初期冷却は、4)-(1)項より1次予冷(300→90 K)が8 hr、2次予冷(90→4.5 K)が1 hrで行えるものとする。定常冷却時は、クライオポンプの運転時間が2 hrであるからその間LHeの供給ができるようにする。再生加温時は、4)-(2)項より、4.5 Kパネルを4.5 Kから60 Kまで加温するのに要する時間が約40 minであり、また予備冷却として60 Kから4.5 Kまで冷却する時間は約25 minであるから、結論的にはFig.A. 1.8の排気スケジュールの加温及び冷却時間は満足できると考えられる。

6) ヘリウム冷凍系の信頼性

ヘリウム冷凍系の各構成機器及び冷凍システムの信頼性について以下にまとめる。

(1) 冷凍システム

クライオポンプの連続運転時間を最大1カ年とすると、He冷凍システムについても1カ年の連続使用が要求される。He冷凍システムの高信頼性を得ることは、液体ヘリウムをいかに連続して供給できるかということであり、また、このシステムで信頼性が低いと考えられる機器は、圧縮機、移送ポンプ、膨張タービンなどの駆動部であるといえる。

本システムの信頼性の検討に際し、高信頼性を得るための条件および設計として下記の項目を考慮した。

- ① 圧縮機及び油除去系を並列配置とする。
- ② 液体ヘリウム容器からの供給可能時間(24 hr)内に機器の修理、取替ができるものとする(コールドボックスを1台設置)。
- ③ 主要計測機器に予備をもうける。
- ④ He液化機はコンピューター、プロセスコントロール方式とする。
- ⑤ ヘリウム移送ポンプを並列配置とする。

これらに基づいて信頼性の検討を行った結果、1年間連続してLHeを供給できる確率は96.6%になり、コールドボックスを2台並列にしても信頼性の確率は97.7%にしか向上しないので1台で充分であると考えられる。但し、我国のヘリウム冷凍システムの技術水準はまだ低いものであり、今後のシステム開発が待たれる。

(2) 各構成機器の信頼性

大型ヘリウム冷凍システムでエネルギー効率や信頼性の鍵を握るのが大型He圧縮機であり、次いで膨張タービンであり、熱交換器などの周辺機器である。

① He 圧縮機

ヘリウム液化機には、He 圧縮機が必要欠くべからざるものであるにもかかわらず、構成機器の中で一番信頼性が低いものであると共に、汚染防止、気密性、騒音の防止、軽量化、小型化などあらゆる点で、多くの開発要素を残している機器である。各種の圧縮機の中で本システムに適用できるものとしてはスクリー型の大形圧縮機の開発が必要である。

② 膨張タービン

ヘリウム液化機の主要機器である膨張タービンは、動圧型ヘリウム軸受によるものであり、動力の回収及び断熱効率の向上（80%以上）及び信頼性の向上に関してR&Dが必要である。

③ 熱交換器

低温用熱交換器は冷凍システムの中でその熱損失が圧縮機に次いで大きいものであり、エネルギー効率が悪く液化率を上げることができない。従って効率向上が要求されるが信頼性の面では、駆動機器に比べるとはるかに高いと考えられる。

④ 移送ポンプ

移送ポンプは、常温のルーツブローを使用しているため、動力は大きい、圧縮機より信頼性が高い。将来液化窒素温度で使用できる大容量移送ポンプが開発されると動力の低下、小型軽量化などが期待できるであろう。

⑤ 周辺機器

ヘリウム温度で使用する弁類、計測機器は信頼性の面で問題があり、システムのトラブル原因になり易い。従って各種低温機器・計器類に対してサーマルサイクルや長時間使用等の問題を含めて、R&Dが必要である。

各構成機器の信頼性について各機器の機能の時間的安定性を中心にMTBFなどの検討が必要であると考えられるが、低温分野の各機器とも工業的な規模のものが少ないため、今後の検討を待つ所が多い。また、冷凍システムとしても本システムが必ずしも最適なものとは限らないので、大容量液化ヘリウム移送ポンプなどの開発経過をみながら冷凍システムの見直しが必要である。

Table A. 2.1 ヘリウム冷凍系の基本条件

項 目	基 本 条 件
冷却流体	・ 2相流流体 He
冷却温度 (排気時)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 凝縮排気パネル ・ 吸着排気パネル $\} \leq 4.5 \text{ K (LHeの潜熱利用)}$
再生温度 (回収時)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 凝縮排気パネル ・ 吸着排気パネル ・ 輻射シールド板 $\} \leq 80 \text{ K (GHeの顕熱利用)}$
運転時間	<ul style="list-style-type: none"> ・ 冷却 (排気時) 2 hr ・ 再生 (回収時) 2 hr
クライオポンプ台数	・ 16台

Table A. 2.2 クライ面の熱負荷量

項 目	熱負荷量	設 計 条 件
・ 輻射による熱侵入量	5.2 W	輻射シールド板 80 K, クライオ面 13m ² 0.4 W/m ² ($\rho_1 = \rho_2 = 0.2$)
・ ガス付着熱	3.2 W	20 Ton ℓ/s (D ₂ 換算) 0.16 W/Ton ℓ/s (80 K → 4.5 K)
・ 放射線発熱	1.0 W	仮定値
・ 支持材などからの固体伝導による熱侵入量	6.0 W	キポート (80 - 4.5 K) 0.5 W/ケ × 12 ケ
小 計	15.4 W	クライオポンプ1台当り

Table A. 2.3 80 K 輻射シールド面の熱負荷量

項 目	熱負荷量	設 計 条 件
・ 輻射による熱侵入量	600 W	300 Kからの輻射量とし, 輻射シールド面 20 m ² 30 W/m ² ($\rho_1 = \rho_2 = 0.1$)
・ ガス付着熱	7 W	20 Ton ℓ/s (D ₂ 換算) 0.35 W/Ton ℓ/s
・ 放射線発熱	80 W	中性子: 2 W, γ 線: 78 W
・ 支持材などからの固体伝導による熱侵入量	60 W	サポート (300 K - 80 K) 5 W/ケ × 12 ケ
小 計	747 W	クライオポンプ1台当り

Table A.2.4 メイン配管への侵入熱量

項 目	侵入熱量	設 計 条 件
・移送管	75 W	2"管全長 150 m (炉円周管含) 0.5 W/m
・弁類	8 W	2"弁 4ヶ×2 W/ヶ
・接手部	20 W	2"接手 20ヶ所 (伸縮接手含) 1 W/ヶ
小 計	103 W	

Table A.2.5 サブ配管への侵入熱量

項 目	侵入熱量	設 計 条 件
・移送管	120 W	1"管 25 m × 16 系列 0.3 W/m
・弁類	32 W	1"弁 32ヶ×1 W/ヶ
・接手部	19 W	1"接手 64ヶ (伸縮接手含) 0.3 W/ヶ
小 計	171 W	

Table A.2.6 冷凍システム主要機器の仕様

(a) ヘリウム液化装置	
型 式	クロードサイクル式
数 量	1 式
液化容量	800 ℓ/hr at 4.5 K
(b) 液体ヘリウム容器	
型 式	ガスシールド付多層断熱容器
数 量	1 基
容 量	10 m ³
貯蔵圧力	1.3 atm
(c) ヘリウム移送ポンプ装置	
型 式	ルーツプロワー式
数 量	2 式
流 量	450 Nm ³ /hr
圧 力	吸入圧 0.8 atm 吐出圧力 1.8 atm

Table A.2.7 クライオポンプの仕様

(a) 4.5 K 冷却パネル部	
冷却方式	液体ヘリウム強制冷却
冷媒温度	4.2 ~ 4.5 K
“ 圧力	1 ~ 1.3 atm
“ 流量	80 ℓ/hr (2.64 g/s)
(b) 80 K 輻射シールド部	
冷却方式	蒸発ヘリウムガス強制冷却
冷媒温度	4.5 ~ 80 K
“ 圧力	1 atm
“ 流量	2.64 g/s

Table A.2.8 ヘリウム液化装置の主要目

(a) 圧縮機ユニット	
型式	油注入式スクルー型2段圧縮機
数量	1基(予備1基)
吸入圧力	1.0 atm
吐出圧力	12 atm
処理流量	7800 Nm ³ /hr
所要電力	1500 KW
冷却水量	130 m ³ /hr
附属機器	<ul style="list-style-type: none"> ・油除去装置(油分離器, ミストセパレーター, 吸着器) ・アフタークーラー ・オイルポンプ, オイルクーラー
(b) コールドボックス	
型式	2段タービン式クロードサイクル
数量	1基
圧力	高圧 12 atm, 中圧 6 atm, 低圧 1.3 atm
流量	JT流量 200 g/gr タービン流量 1200 kg/hr
液化量	800 ℓ/hr (4.5 K)
計装電力	30 KW (真空排気装置の入力含)
計装空気	50 m ³ /hr
附属機器	真空排気装置 膨張タービン制御装置 制御操作盤

Table A.2.9 液体ヘリウム容器の主要目

型 式	円筒型ガスシールド容器
数 量	1 基
貯蔵容量	20 m ³
常用圧力	1.3 atm
断熱方式	多層真空断熱ガスシールド方式

Table A.2.10 ヘリウム移送ポンプの主要目

(a) 移送ポンプ	
型 式	ルーツブロワー式
数 量	2 基 (予備 1 基)
吸入圧力	0.8 atm
吐出圧力	1.8 atm
処理流量	450 Nm ³ /hr
所要電力	50 KW
冷却水量	4 m ³ /hr
附属機器	・加温器
(b) 再生熱交換器	
型 式	アルミプレートフィン型
数 量	1 式
圧 力	低圧側 1.8atm 減圧側 0.8 atm
流 量	低圧側 360 Nm ³ /hr 減圧側 900 Nm ³ /hr
附属機器	・液化窒素冷却熱交換器 (初期冷却時) ・低温吸着器

Table A. 2.11 ヘリウム回収精製装置の主要目

(a) ガスホルダー 型式 数量 容量 圧力	堅形円筒負圧式 1基 600 m ³ 水柱 - 30 mm
(b) 回収精製用圧縮機 型式 数量 吸入圧力 吐出圧力 処理量 所要電圧 冷却水量	堅形4段往復動圧縮機 1基 (予備1基) 大気圧 150 kg/cm ² G 600 Nm ³ /hr 150 KW 4 m ³ /hr
(c) ヘリウム精製器 型式 数量 精製圧力 外理量 精製ガス純度 運転時間	低温吸着精製方式 2基 (予備1基) 150 kg/cm ² G 600 Nm ³ /hr He 99.995 %以上 精製時 24 hr 再生時 24 hr (自動運転)
(d) 精製ガスタンク 型式 数量 常用圧力 容量	高圧長尺ポンベ 334本 150 kg/cm ² (max) 20000 Nm ³
(e) パッファタンク 型式 数量 常用圧力 容量	堅形円筒形 1基 大気圧 10 m ³
(f) 液化窒素容器 型式 数量 常用圧力 容量	横形円筒形真空パーライト断熱方式 1基 3 kg/cm ³ G 100 m ³

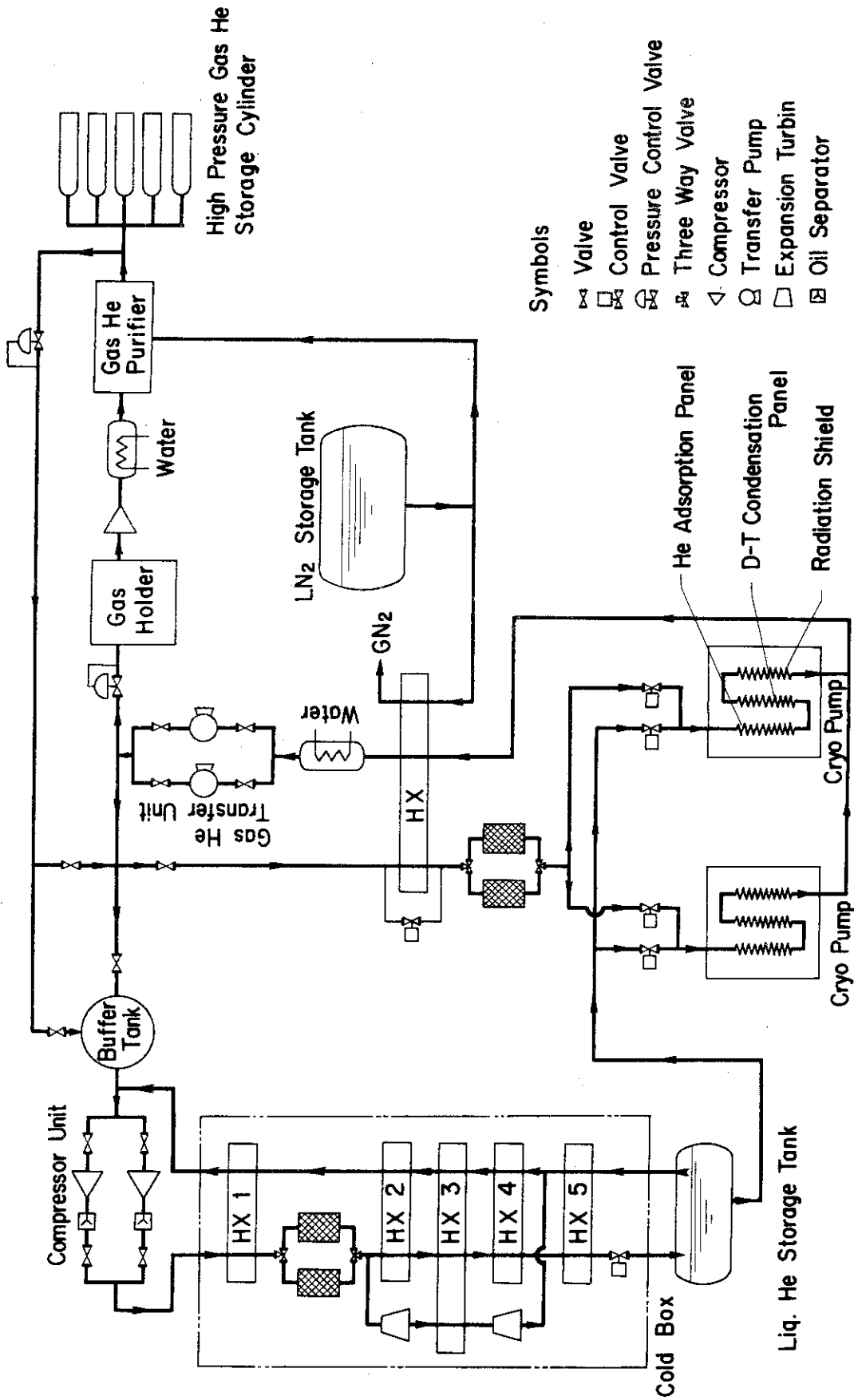


Fig. A.2.1 Helium Refrigeration System

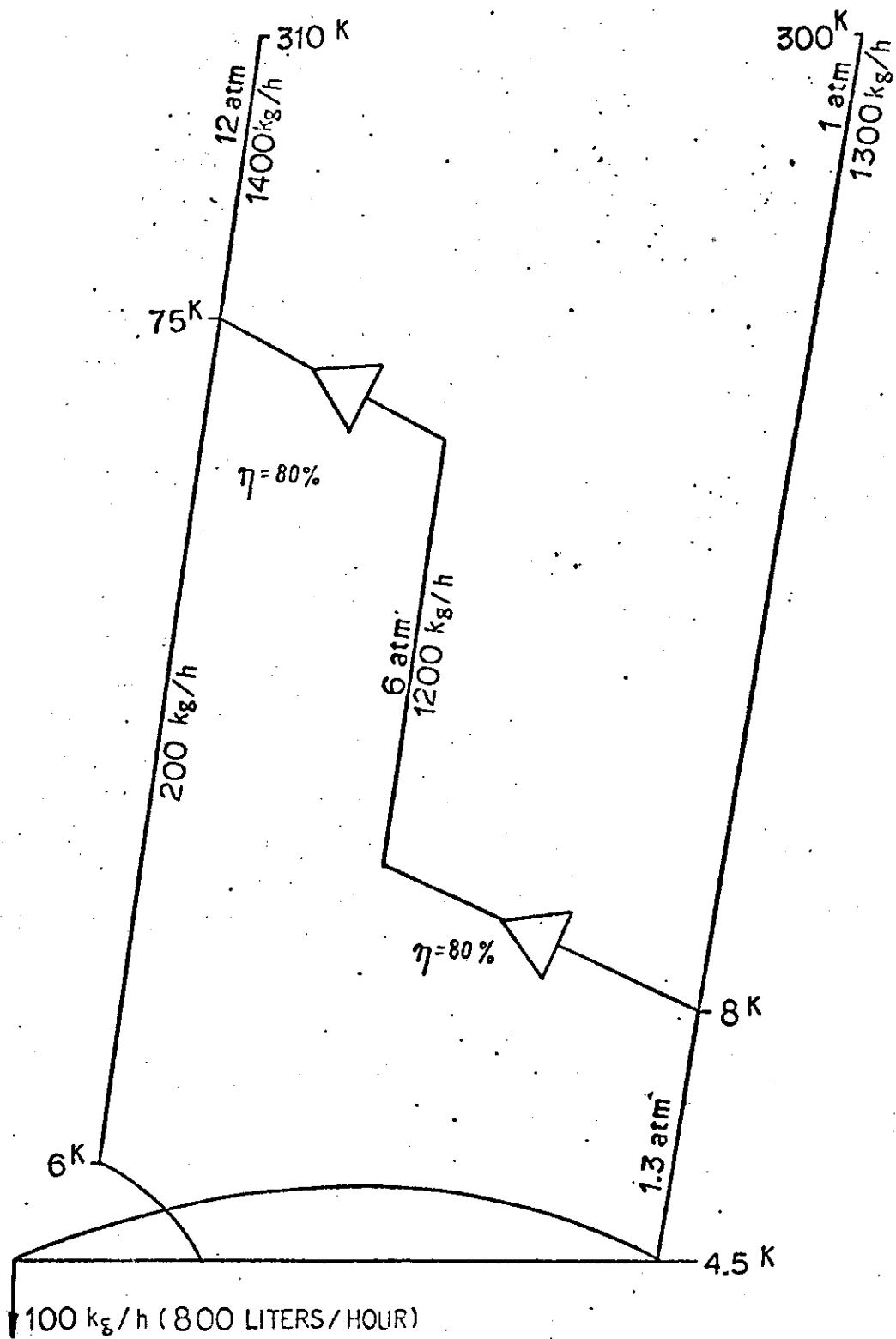
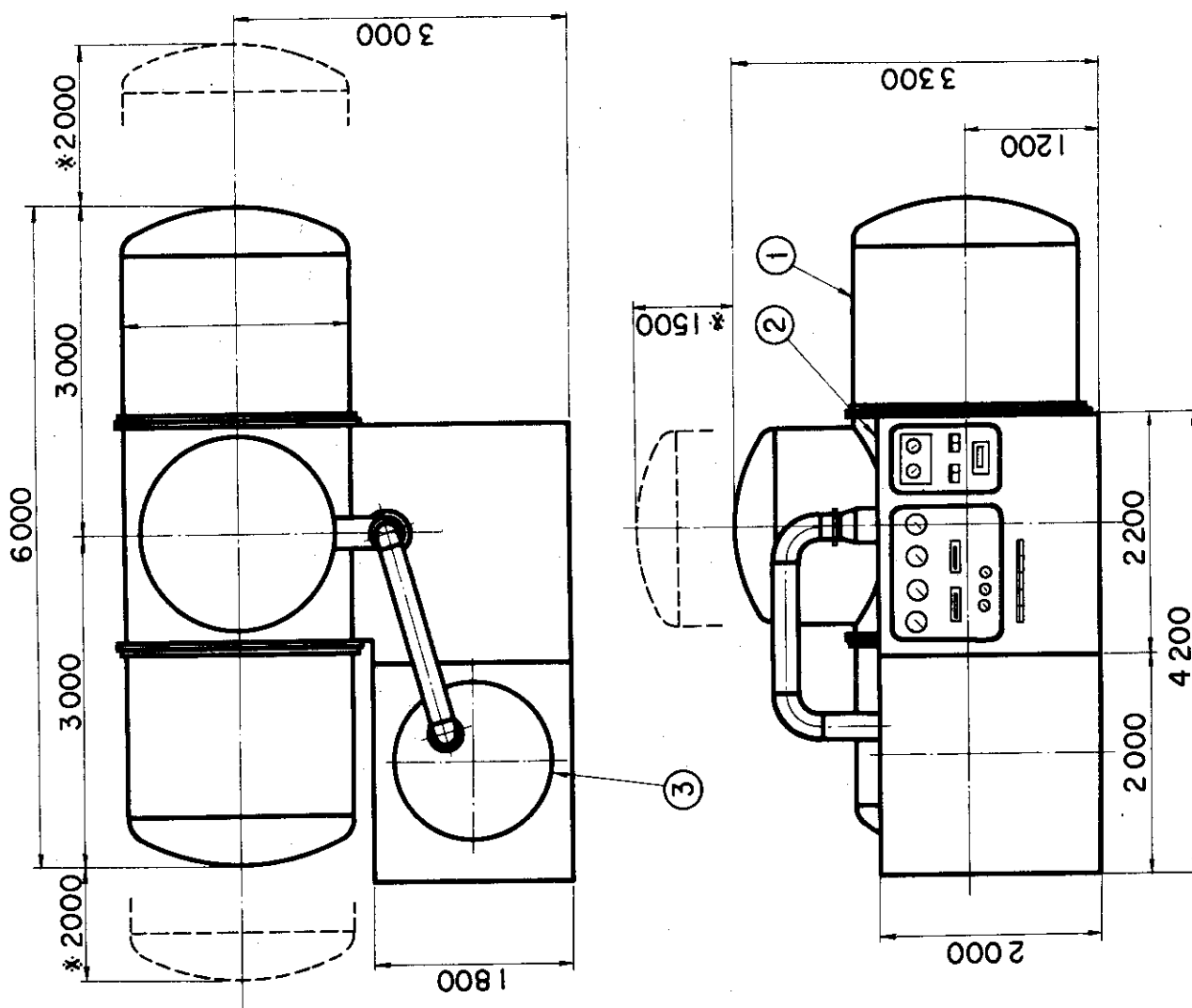


Fig. A.2.2 Liquefaction Cycle of Helium Liquefier



- ① Cold Box
- ② Control Panel
- ③ Helium Purifier

* Maintenance Clearance

Fig. A.2.3 Helium Liquefier (Cold Box)

あ と が き

核融合実験炉の炉心燃料給排系は約300gのトリチウムインベントリーを有して居り炉全体の約6割にあたる。本作業は大量トリチウム取扱い施設としての安全性に視点を置いた設計と解析を行ったものであり、その結果として本システムは放射線作業基準と環境基準を満足させることが可能であることを明らかに出来たと考える。

本安全性解析は燃料給排系の安全性に対する見通しを付けるためのもので、今後大量トリチウム取扱い関連技術の開発研究や試作開発、ならびに実証試験を進め、実績に裏付けられた解析を行う必要があることは言をまたない。

本作業実施にあたって主真空排気系ならびにヘリウム冷凍系の安全設計について大阪酸素工業(株)開発部の協力を得たのでここに感謝する次第である。

終りに本安全性解析実施の機会を得たことを感謝すると共に、この成果が今後の炉設計研究ならびに開発研究の基礎として役立てば幸いである。

設計担当者

(1) 主たる設計研究者

三菱原子力工業株式会社 内藤 大靖・笠原 健夫・山田 隆・西川 正名
浅見 直人

(2) 主たる設計協力者

大阪酸素工業株式会社 後藤 正敏

(3) 原研側担当者

炉設計研究室 迫 淳