

JAERI-M

6922

核融合炉における大容量真空排気系に関する
設計法についての調査

1977年2月

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.

核融合炉における大容量真空排気
系に関する設計法についての調査

日本原子力研究所東海研究所
核融合研究所炉設計研究室
(1977年1月14日受理)

核融合炉排気系の設計について検討が行なわれた。炉の排気は12の排気ポートを通して行なわれる。炉内の分圧(1000 K)は、DTおよびHeに対してそれぞれ 3.33×10^{-4} Torr以下、 1.67×10^{-5} Torr以下であることという条件が設定された。主真空ポンプとして4.2 KでのHeの収着を含むクライオポンプが選ばれた。排気速度は、DTおよびHeに対してそれぞれ $1.65 \times 10^6 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ 、 $9.98 \times 10^5 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ である。炉とクライオポンプ間のコンダクタンスは $7.8 \times 10^5 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ 以上必要である。そのために、たとえば引口の口径を2.5 mとし、排気ダクト内のパイプ類の配管を工夫する必要がある。補助排気系は、ターボ分子ポンプ、クリーンルーツポンプ、メカニカルブースターポンプ、ダイアフラムポンプで構成されている。このうち、メカニカルブースターポンプとダイアフラムポンプは回収系としても使われる。

Design Study of Pumping System
for Tokamak Fusion Power Reactor

Fusion Reactor System Laboratory,
Division of Thermonuclear Fusion Research, Tokai, Japan

(Received January 14, 1977)

Design study of the pumping system for tokamak fusion power reactor has been carried out. The reactor is pumped through twelve pumping ports. It is assumed that the partial pressures of DT and He at 1000 K in the reactor should be maintained less than 3.33×10^{-4} Torr and 1.67×10^{-5} Torr respectively.

The main pump is liquid helium cooled cryopump containing sorption panel for helium pumping. The pumping speeds for DT and He are 1.65×10^6 l.sec⁻¹ and 9.98×10^5 l.sec⁻¹ respectively. The conductance between the reactor and the cryopump should be more than 7.8×10^5 l.sec⁻¹ for DT. To satisfy this condition, inlet diameter of pumping duct should be extended to 2.5 m and the configuration of cooling pipes in pumping duct should be changed from original design.

Auxiliary pumping system contains turbo-molecular pump, clean roots pump, mechanical booster pump and diaphragm pump.

The mechanical booster pump and the diaphragm pump of auxiliary pumping system are also used as recovery pumping system.

目 次

1. 真空排気装置設計上の問題点	1
1.1 核融合炉の排気系として課された要請	1
1.2 真空工学からみた未踏の領域	1
2. 真空系のフローチャート	4
3. 設計計算書	6
4. ユーティリティ	15
5. 研究開発のタイムスケジュール	16
6. おわりに	16
参 考 文 献	17

本調査研究は下記の要領で実施したものである。

1) 調査題目

核融合炉における大容量真空排気系に関する設計法についての調査。

2) 調査目的

トカマク炉における真空排気システムの概要と排気系の主要コンポーネントの性能を明らかにし、核融合炉の設計へ反映させる。

3) 調査内容

実用炉の試設計にもとづき、排気系システム全体の概念と評価、システム構成法、各種方式における主要コンポーネントの性能容量の評価、問題点の摘出等の調査を行う。

4) 調査期間

昭和50年9月10日から昭和51年2月28日

5) 調査担当者

日本真空技術株式会社 小宮宗治, 水野正保, 斉藤正樹

1. 真空排気装置設計上の問題点

1.1 核融合炉の排気系として課された要請

要請は、およそつぎのとおりである¹⁾。

i) D-T反応およびリチウムによる三重水素生成反応の過程で生成するヘリウムと、燃料としてのDTガスが排気の対象となる。

ii) 三重水素が真空系内に長時間蓄積することは望ましくない。適当な蓄積ののち、回収系に送りこまれるべきである。

排気系の概念設計の基準として、つぎの数値が与えられた。

a) 炉から排気系へ流れこむDTガスの流量は167 mg/sである。

b) ヘリウムの流量は4 mg/sである。

c) これらの気体がトーラスから排気系にむかって流れこむときの、はじめの気体温度は1,000 Kである。

d) トーラス内の気体の分圧は、300Kに換算したとき、DTについて 1×10^{-4} Torr, ヘリウムについて 5×10^{-6} Torr以下に保たなければならない。

e) トーラス内の気体は、トーラスの周を12等分する位置にとりつけられる排気孔から排気される。

したがって、DTの流量167 mg/sは 2.01×10^{22} コ/s または 2.08×10^3 Torr \cdot ℓ/s に、ヘリウムの流量4 mg/sは 6.02×10^{20} コ/s または 623 Torr \cdot ℓ/s に相当する。また、1,000 KでのDTおよびヘリウムの分圧は、それぞれ 3.3×10^{-4} Torrおよび 1.7×10^{-5} Torrに相当する。

表1は、ひとつの排気孔ごとに必要なガス流量・平衡圧力・実効排気速度および1,000Kでの理想排気速度を示す。

表1 核融合炉の12コの排気口のひとつあたりの排気系設計の基礎になる諸数値(1,000K)

	記号	単位	D T	He
流量	Q	Torr \cdot ℓ \cdot s $^{-1}$	173	5.2
平衡分圧	P	Torr	$\leq 3.3 \times 10^{-4}$	$\leq 1.7 \times 10^{-5}$
実効排気速度	S	ℓ \cdot s $^{-1}$	5.2×10^5	3.1×10^5
理想排気速度	S _i	ℓ \cdot s $^{-1}$ \cdot cm $^{-2}$	51.2	57.5

1.2 真空工学からみた未踏の領域

(a)DTの大容量排気、(b)ヘリウムの大容量排気、(c)短時間でDTを回収することなどはまったく未踏の領域である。これらについて、現状でどこまで研究が進んでいるか、これからの開発事項に対してどのようなタイムスケジュールで取り組む必要があるか、などについてはあとで述べる。ここではまず、真空ポンプとしてなにが使えるかを概観したい。なお油拡散ポンプは、考慮の対象から外されている。

核融合炉の排気系として、どの真空ポンプをえらぶかという観点からとりあげられた5種類の真空ポンプを比較するには、処理しうる最大流量と有効排気速度と寿命の三点から考察する必要がある。

a) 嚴重な液体窒素トラップつきの水銀拡散ポンプ系が、プリンストン大学プラズマ物理研究所の実験装置 PLT に採用されている。²⁾ 同所で水銀ポンプを採用している理由は、万一水銀蒸気がトーラスまで逆流していったにせよ、再び排気をすることによって清浄な状態に復元できる点にある。この点は油拡散ポンプではまったく望めない。一度誤操作によって系内を汚してしまうと、油拡散ポンプ系では再び清浄な状態に復元することは困難である。

水銀拡散ポンプ系は、排気口での面積での理想排気速度の1/6より大きい有効排気速度は得られない。また取り付け位置の関係から、側面と下面が排気口として利用しうるにとどまる。たとえば、1m角の立方体にとりつけられる排気口は、最大で1m径のもの3コである。これは水素に対して最大17万ℓ/sの有効排気速度が期待できることを意味する。しかし現実には、口径25cmより大きな水銀拡散ポンプは市場で得られないから、その方で制限される。1m角の一面にたぶん3コの口径25cmの水銀ポンプがとりつけられるであろう。従って3面を全部利用するとして、18,000ℓ/s程度が望みうる排気速度の値であろう。流量と寿命の点は申し分ない。

b) ターボ分子ポンプは、いまではトカマク型実験装置の主ポンプとして多くの研究所で採用されているし、また将来も採用されるであろう。しかし、表1の要請に添うには、所要床面積と真空配管が膨大なものになるおそれがある。核融合炉の排気系では、補助ポンプとしての重要な役割を占めることになろう。1m径の排気口にとりつけられるターボ分子ポンプは、水素に対して7,000ℓ/sの排気速度をもっている。磁場の制約をのがれるための長い導管と、油蒸気をおとすための液体窒素トラップを、ターボ分子ポンプの先にとりつけることを考慮すると、水銀拡散ポンプと同様に3カ所の排気口に対して、合計で7,000ℓ/sの有効排気速度が望みうる値である。最大流量と寿命の点は申し分ない。

c) スパッタイオンポンプは大きな流量の負荷に耐えられないので、プラズマ実験装置の主ポンプにはならないが、維持用ポンプとしてトーラス内部をつねに清浄な真空に保つておくために使われている。

スパッタイオンポンプは、口径1mのものをつくると水素に対して40,000ℓ/sの排気速度が得られる。取り付け位置の制約はないから、4面を利用しうる。従って16万ℓ/sの排気速度をもたせることは可能である。しかし最大流量は、同じ排気速度のターボ分子ポンプにくらべて百分の1程度である。また寿命は、最大流量でスパッタイオンポンプを動かせつづければ、たかだか400h程度である。

d) ゲッターポンプは、活性ガスに対して安価に大きな排気速度が得られることが評価されている。蒸発式のゲッターポンプがターボ分子ポンプと組み合わせて使われている例がある。たとえばTFRの主排気系として、³⁾あるいはクルチャトフ研究所やローレンスリバモア研究所の中性粒子入射装置の排気系として使われている。⁴⁾ ダイバーターつきのトーラスのダイバーター部の排気のための、JFT-2a(日本原子力研究所)に組みこまれている。⁵⁾ 同じ目的のために、多数のチタンゲッターポンプの使用がプリンストン大学のトーラス実験装置PDXで計画されている。⁶⁾

蒸発式ゲッターポンプで、蒸発ゲッター(チタン)を室温の壁に蒸着したもので、 $4 \sim 12 \ell \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2}$ の水素に対する排気速度が得られる。したがって、4面の排気面で16万~48万ℓ/sが水素に対して期待される。しかし最大流量は、チタン蒸発量によって制限される。たとえば、

臨界プラズマ実験装置JT-60の47台の中性粒子入射装置にチタンゲッターポンプを利用するとすると、1台あたり、1カ月に1.2kgのチタンを蒸発する必要があることが計算の結果判っている。トカマク型実験装置の、とくにダイバーターをもつ装置のダイバーター部の排気という意味では、最大流量に対する要請が中性粒子入射装置にくらべて軽減されているので利用できる可能性をもっている。しかし、壁面に蒸着したゲッター材の除去作業は手間のかかる仕事である。核融合炉のDT排気用として、何より不都合なのはDTの回収ができないことである。

e) 非蒸発式ゲッターポンプは、ターボ分子ポンプおよびスパッタイオンポンプと組み合わせられて、JFT-2(日本原子力研究所)の排気系の主ポンプとして採用された。⁸⁾ステラレーター-WVIIb(ガルピングプラズマ物理研究所)の主排気系にも、ターボ分子ポンプと組み合わせられて使用することが計画されている。⁹⁾JT-4(日本原子力研究所)のダイバーター部の排気にも使用が検討されつつある段階である。¹⁰⁾バルクゲッターポンプは、蒸発ゲッターポンプでつねにきらわれる蒸着膜の剝離片のようなものは発生しない。その点ではスパッタイオンポンプよりも、固形のゴミを生成することが少ない。バルクゲッターポンプの活用がしばしば躊躇されるのは、一度大気にさらしたら必ず再活性化が必要なことと再活性化が20回で最終寿命に達するという2点である。

f) 触媒式ポンプは、日本で発明されたユニークな水素排気専用の真空ポンプである。¹¹⁾その実用的な規模での試作試験が理化学研究所で行なわれた。¹²⁾ $10^{-7} \sim 10^{-5}$ Torrで水素に対して5,000 ℓ/s の排気速度をもつポンプが得られている。

g) クライオポンプは筆者の印象からいえば、ごく最近核融合研究の分野にとり入れられてきた。しかもその要望は急速に増しつつある。核融合研究の実験装置に、クライオポンプがその排気系としてはじめに必要とされるのは、大量の中性粒子ビームを数百ミリ秒以上にわたってトラスに打ちこむための中性粒子入射装置においてである。この傾向は、すくなくとも米国と日本では一致している。日本原子力研究所における臨界プラズマ試験装置JT-60の第2段加熱のための中性粒子入射装置でその必要性がでてきた。それは水素に対して排気速度と処理すべき流量が、ともに大きい排気系が要請されているからである。そしてその要請を満たすには、もはや市販の真空ポンプの組み合わせでは得られない大きさのものを必要としている。1975年10月に筆者の一人が訪問したローレンスリバモア研究所、¹³⁾オークリッジ国立研究所、¹⁴⁾ブルックヘブン国立研究所およびプリンストン大学プラズマ物理研究所において、中性粒子入射装置の排気系としてクライオポンプが検討されつつあった。これらの現在進められつつあるクライオポンプは、すべて、4.2Kにおける H_2 、 D_2 の飽和蒸気圧はそれぞれ 3.2×10^{-7} Torrおよび 2.7×10^{-11} Torrである。いくつかの実験によれば、到達圧力はこの飽和蒸気圧から推定した値によく一致している。クライオポンプであれば、排気速度、最大流量、寿命のいずれについても、水素の排気に対してはわれわれの要請を満足する。

周囲の壁からの熱ふく射を遮蔽する目的で、クライオ面の四面を77~150Kの壁でかこむのがふつうの設計であるが、これでも理想排気速度の25%が有効排気速度として確実に期待できる。1m角の立方体の例でいえば、4m²の排気面が得られて44万 ℓ/s の水素に対する排気速度が期待できる。この型式のポンプの配慮すべき点は、クライオ面の温度により選択排気が行なわれる点である。たとえば、4.2Kのクライオ面ではヘリウムが排気できない。

h) クライオソーブションポンプは、D-T反応を行なう核融合炉の排気系として重なる研究課題になる。それは、D-T反応およびリチウムによる三重水素生成反応の過程ででてくるヘリウム

の排気について、現在計画されているヘリウム流量とヘリウムの要求分圧からすれば、既製の商品のポンプではとうてい処理しきれないからである。ヘリウムの排気の問題は、たぶん4.2Kでのクライオソープションの効率のよい収着材を、そのクライオ面への密着の手段を含めて探¹⁷⁾ことになるだろう。

以上のような考察をへたのち、核融合炉の真空排気系の主ポンプとして4.2Kのクライオ面による水素排気と、4.2Kのクライオソープション面によるヘリウム排気を組合わせたものが、試設計の原案として採用された。

2. 真空系のフローチャート

実用炉の真空系のフローチャートを図1に示す。炉は12個の排気ポートをもち、各ポートに主排気系、補助排気系、回収系がつく。主排気系はクライオポンプ、補助排気系はターボ分子ポンプおよびクリーンルーツポンプ、回収系はメカニカルブースターポンプとダイアフラムポンプで構成されている。炉全体は1つの粗引系で粗引排気される。各ポンプの排気速度を図1に示す。炉は粗引系で 10^{-3} Torrまで排気される。次に補助排気系で 10^{-5} Torrまで排気される。補助排気系の背圧系は回収系が兼用される。次にクライオポンプで 10^{-7} Torr以下に排気される。補助排気系は、クライオポンプ作動中にも並用される。1個のポートには2個のクライオポンプが取り付けられている。12000 secの周期で交互に使われ、一方が作動中のとき他は凝縮・吸着した気体を放出し、次の排気の準備をする。このとき回収系でD-T, Heなどが回収される。

の排気について、現在計画されているヘリウム流量とヘリウムの要求分圧からすれば、既製の商品のポンプではとうてい処理しきれないからである。ヘリウムの排気の問題は、たぶん4.2Kでのクライオソープションの効率のよい収着材を、そのクライオ面への密着の手段を含めて探ることになるだろう¹⁷⁾。

以上のような考察をへたのち、核融合炉の真空排気系の主ポンプとして4.2Kのクライオ面による水素排気と、4.2Kのクライオソープション面によるヘリウム排気を組合わせたものが、試設計の原案として採用された。

2. 真空系のフローチャート

実用炉の真空系のフローチャートを図1に示す。炉は12個の排気ポートをもち、各ポートに主排気系、補助排気系、回収系がつく。主排気系はクライオポンプ、補助排気系はターボ分子ポンプおよびクリーンルーツポンプ、回収系はメカニカルブースターポンプとダイアフラムポンプで構成されている。炉全体は1つの粗引系で粗引排気される。各ポンプの排気速度を図1に示す。炉は粗引系で 10^{-3} Torrまで排気される。次に補助排気系で 10^{-5} Torrまで排気される。補助排気系の背圧系は回収系が兼用される。次にクライオポンプで 10^{-7} Torr以下に排気される。補助排気系は、クライオポンプ作動中にも並用される。1個のポートには2個のクライオポンプが取り付けられている。12,000 secの周期で交互に使われ、一方が作動中のとき他は凝縮・吸着した気体を放出し、次の排気の準備をする。このとき回収系でD-T, Heなどが回収される。

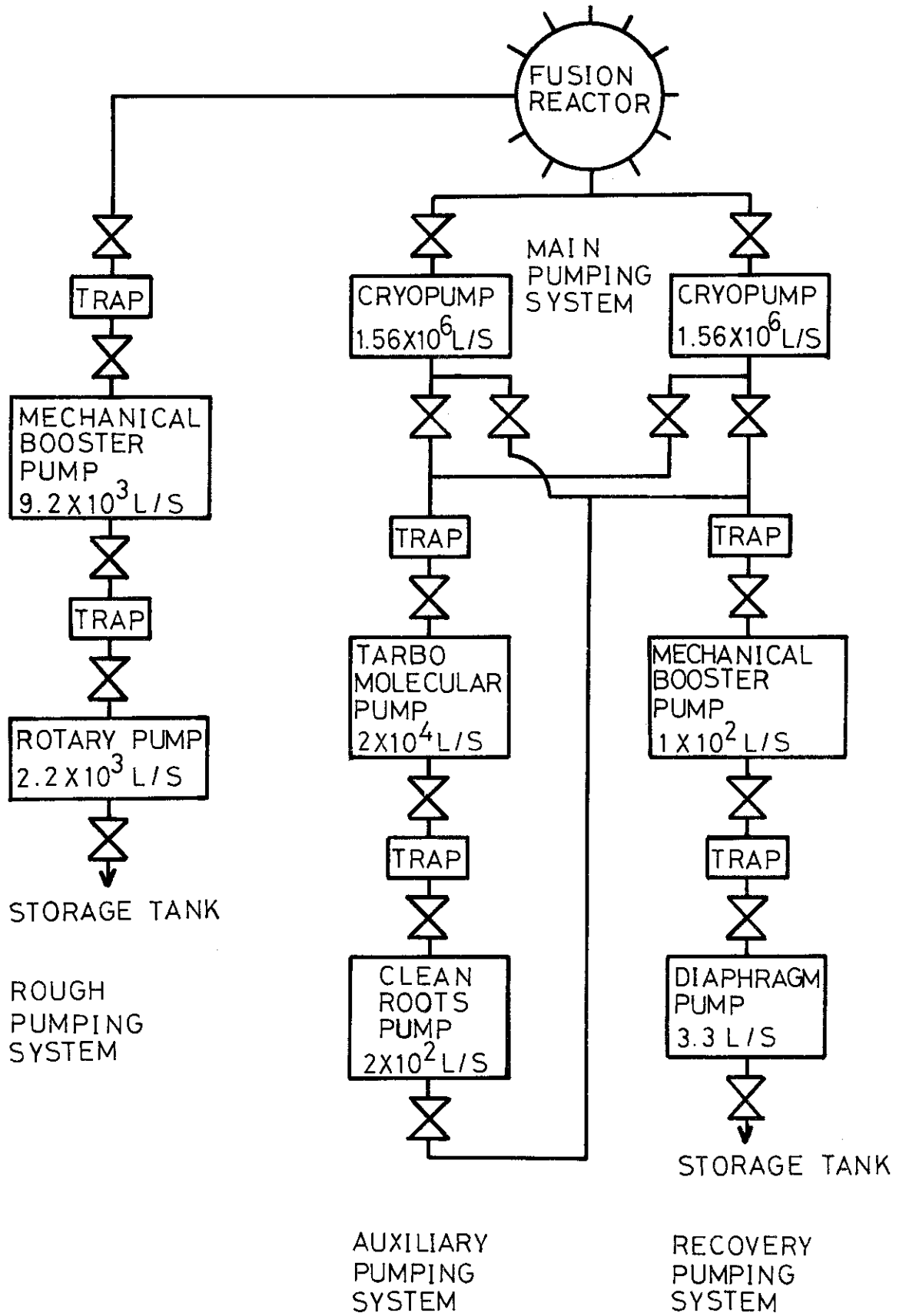


图1 核融合炉真空排气系

3. 設計計算書

排気の対象となる気体を、重水素-三重水素(D-T)とヘリウム(He)の2種類で代表させる。

炉全体の流量Qは、重水素-三重水素(D-T)について $167 \text{ mg} \cdot \text{sec}^{-1}$ 、ヘリウム(He)について $4 \text{ mg} \cdot \text{sec}^{-1}$ とする。これらの気体の温度は $1,000 \text{ K}$ とする。

排気速度とコンダクタンスを計算するために、流量の単位として $\text{mg} \cdot \text{sec}^{-1}$ の代わりに $\text{Torr} \cdot \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ をつかう。

流量単位の換算は次の(1), (2), (3), (4), (5)式による。

$$1 \text{ mg} \cdot \text{sec}^{-1} = \frac{10^{-3}}{M} \times 6.02 \times 10^{23} \quad \text{molecules} \cdot \text{sec}^{-1} \quad (1)$$

M: 分子量 ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)

$$1 \text{ molecules} \cdot \text{sec}^{-1} = 1.38 \times 10^{-16} \times T \text{ dyne} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}^{-1} \quad (2)$$

T: 気体の温度 (K)

$$1 \text{ dyne} \cdot \text{cm}^{-2} = 7.50 \times 10^{-4} \text{ Torr} \quad (3)$$

$$1 \text{ dyne} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}^{-1} = 7.5 \times 10^{-7} \text{ Torr} \cdot \ell \cdot \text{sec}^{-1} \quad (4)$$

(1), (2), (3), (4)式により

$$1 \text{ mg} \cdot \text{sec}^{-1} = 6.23 \times 10^{-2} \times \frac{T}{M} \text{ Torr} \cdot \ell \cdot \text{sec}^{-1} \quad (5)$$

表2は、炉全体の流量Qの各単位における値を示す。

表 2

	D - T	He
$\text{mg} \cdot \text{sec}^{-1}$	167	4
$\text{molecules} \cdot \text{sec}^{-1}$	2.01×10^{22}	6.02×10^{20}
$\text{Torr} \cdot \ell \cdot \text{sec}^{-1}$	2.08×10^3	6.23×10^1

炉には12個の排気ポートがある。炉の分圧Pは気体温度 300 K において、重水素-三重水素(D-T)について $1 \times 10^{-4} \text{ Torr}$ 以下、ヘリウム(He)について $5 \times 10^{-6} \text{ Torr}$ 以下に保たねばならない。気体温度 $1,000 \text{ K}$ においては、これらの分圧は重水素-三重水素(D-T)について $3.33 \times 10^{-4} \text{ Torr}$ 以下、ヘリウム(He)について $1.67 \times 10^{-5} \text{ Torr}$ 以下に対応する。表3

に1個の排気ポートの排気条件を示す。以下の計算における気体温度は1,000Kとする。

1個の排気ポートの引口における必要な合成排気速度Sは(6)式で計算される。

$$S = \frac{q}{P} \quad \ell \cdot \text{sec}^{-1} \quad (6)$$

q; 1個の排気ポートの流量 (Torr · ℓ · sec⁻¹)

P; 分 圧 (Torr)

表 3

	D - T	He
q molecules · sec ⁻¹	1.68 × 10 ²¹	5.02 × 10 ¹⁹
q Torr · ℓ · sec ⁻¹	173	5.21
P Torr	≤ 3.33 × 10 ⁻⁴	≤ 1.67 × 10 ⁻⁵
S ℓ · sec ⁻¹	5.2 × 10 ⁵	3.12 × 10 ⁵
S _i ℓ · sec ⁻¹ · cm ⁻²	51.4	5.75

S_i; 理想排気速度 (ℓ · sec⁻¹ · cm⁻²)

図2は主要排気系の構成を示す。主要排気系は①引口、②排気ダクトとマニホールド、③真空ポンプの3つの部分で構成されている。引口のコンダクタンスをC₁、排気ダクトとマニホールドのコンダクタンスをC₂、真空ポンプの排気速度をS₀で表わす。

合成排気速度Sと各部分のコンダクタンスC₁、C₂および排気速度S₀の関係は(7)式で示される。

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{S_0} \quad (7)$$

目標は、これら3つの部分が合成排気速度Sに対して、平衡のとれた寄与をするように設計することとする。

表3から明らかなように、重水素-三重水素(D-T)に対する要求が満足されれば、Heに対する要求は自動的に満足される。

そこで以下では、C₁、C₂については、重水素-三重水素(D-T)についてのみ計算する。表4はC₁、C₂、S₀の目標値を示す。

表 4

	D - T	He
C ₁ ℓ · sec ⁻¹	1.56 × 10 ⁶	1.74 × 10 ⁶
C ₂ ℓ · sec ⁻¹	1.56 × 10 ⁶	1.74 × 10 ⁶
S ₀ ℓ · sec ⁻¹	1.56 × 10 ⁶	4.87 × 10 ⁵

3.1 引 口

形状は円形導管とする。長さは130 cmとする。コンダクタンスと円形導管断面積Aの関係は(8)式で示される。

$$C_1 = K \cdot S_i \cdot A \quad \ell \cdot \text{sec}^{-1} \quad (8)$$

K; Clausing 係数

S_i ; 理想排気速度 $\ell \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$

A; 円形導管断面積 (cm^2)

$C_1 = 1.56 \times 10^6 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ を満足する円形導管の形状は、直径250 cm、長さ130 cmである。

3.2 排気ダクトとマニホールド

図3は排気ダクトとマニホールドの構成を示す。構成部分とそのコンダクタンスは、

$$\begin{array}{llll} (1)\text{ダクト水平部} & C_{21} & (2)\text{ダクト斜部} & C_{22} & (3)\text{ダクト垂直部} & C_{23} \\ (4)\text{マニホールド部} & C_{24} & (5)\text{ゲートバルブ部} & C_{25} & & \end{array}$$

である。

排気ダクトとマニホールドのコンダクタンス C_2 は(9)式で表わされる。

$$\frac{1}{C_2} = \frac{1}{C_{21}} + \frac{1}{C_{22}} + \frac{1}{C_{23}} + \frac{1}{C_{24}} + \frac{1}{C_{25}} \quad (9)$$

目標は、各部分が C_2 に対して以下の寄与をするようにすることである。

3.2.1 ダクト水平部

ダクト水平部の形状は、炉設計図による図4に示す角型導管である。角型導管のコンダクタンスは、一定断面の導管に対する一般的な(10)式で計算される。

$$C_{21} = \frac{16}{3} S_i \frac{A^2}{H\ell} \quad \ell \cdot \text{sec}^{-1} \quad (10)$$

S_i ; 理想排気速度 $\ell \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$

A; 導管断面 cm^2

H; 導管の周囲長 cm

ℓ ; 導管の長さ cm

結局、 $C_{21} = 1.88 \times 10^7 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ となる。この結果、 $C_{23} = C_{24} = 1.88 \times 10^7 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ 、 $C_{22} = C_{25} = 4 \times 10^6 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ が設計目標値となる。

炉設計図では、ダクト水平部からダクト斜部への気体の通過は冷却配管で極度に妨害される。ダクト斜部への必要な開孔面積は、以下のダクト斜部の計算で求められる。

3.2.2 ダクト斜部

ダクト斜部の形状は、炉設計図から巾250 cmの角型導管となる。 $C_{22} = 4 \times 10^6 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ のコンダクタンスは、ダクト水平部からダクト斜部への開孔コンダクタンス C_{221} とそれにつづく角型導管コンダクタンス C_{222} から構成される。

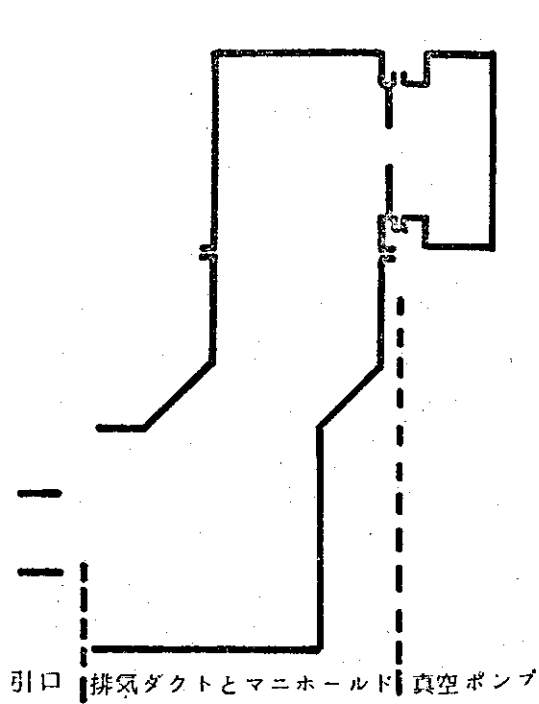


図2 主要排気系

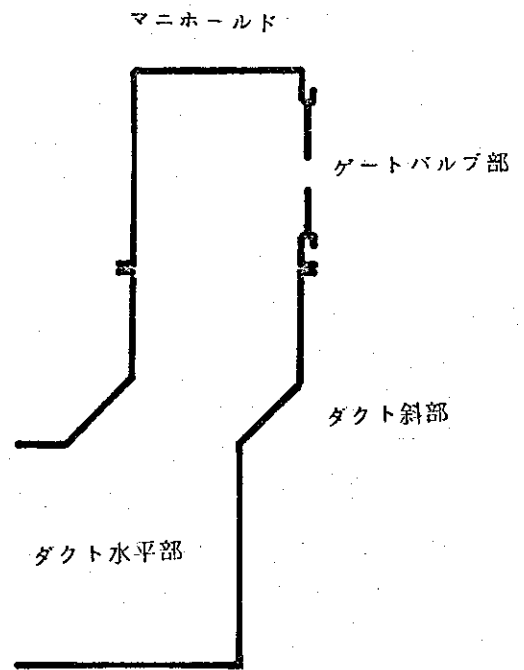


図3 排気ダクトとマニホールド

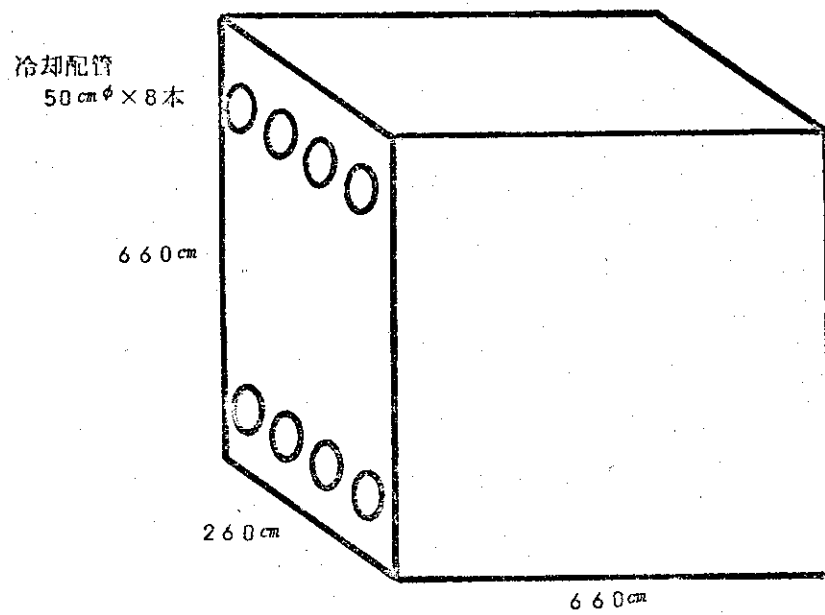


図4 角型導管

$$\frac{1}{C_{22}} = \frac{1}{C_{221}} + \frac{1}{C_{222}} \quad (11)$$

C_{221} と C_{222} の C_{22} への寄与は $C_{221} = C_{222} = 8 \times 10^6 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ とする。

開孔面積 A は、(12)式から求まる。

$$C_{221} = S_i A \quad \ell \cdot \text{sec}^{-1} \quad (12)$$

$$A = 1.56 \times 10^5 \text{ cm}^2$$

たとえば、 $250 \text{ cm} \times 600 \text{ cm}$ の孔が必要である。

角型導管の形状は(10)式から求まる。結局、巾 250 cm 、たて 640 cm 、長さ 300 cm の角型導管がダクト斜部として必要である。

3.2.3 ダクト垂直部

ダクト垂直部の形状は、炉設計図から長さ 330 cm の円形導管を仮定すると、 $C_{23} = 1.88 \times 10^7 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ を満足する直径は 500 cm となる。

しかし、ダクト斜部が上記の計算により大きくなり、円形導管のダクト垂直部を設定することが適当でなくなった。そこで調査案では、ダクト斜部をそのままマニホールドに延長し、延長部をダクト垂直部のかわりにすることにした。

この延長部のコンダクタンスは、 $2 \times 10^7 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ で、設計目標値と同等である。

3.2.4 マニホールド部

ダクト垂直部と同一のコンダクタンスを満せばよい。ここは2本のゲートバルブ部を分岐する部分であり、変形した五角形の異形管とする。後で計算される真空ポンプの大きさから、高さは 660 cm 、ゲートバルブ部につながる巾は 500 cm とする。

C_{24} は、垂直方向のコンダクタンス C_{241} と水平方向のコンダクタンス C_{242} で構成される。

$$\frac{1}{C_{24}} = \frac{1}{C_{241}} + \frac{1}{C_{242}}$$

$C_{241} = 3.54 \times 10^7 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ 、 $C_{242} = 6.54 \times 10^7 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ となり $C_{24} = 2.3 \times 10^7 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ となる。これは設計目標値を満足している。

3.2.5 ゲートバルブ部

後で計算される真空ポンプの大きさから、巾 400 cm 、高さ 400 cm 、長さ 200 cm の角型導管にゲートバルブがつけられる。

C_{25} は、開孔部コンダクタンス C_{251} と、角型導管のコンダクタンス C_{252} とゲートバルブのコンダクタンス C_{253} で構成される。

$$\frac{1}{C_{25}} = \frac{1}{C_{251}} + \frac{1}{C_{252}} + \frac{1}{C_{253}}$$

C_{251} は(12)式により $8.22 \times 10^6 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ である。

C_{252} は(10)式により計算される。 $C_{252} = 2.2 \times 10^7 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ よって $C_{253} \geq 1.3 \times 10^7 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ となるような、ゲートバルブの大きさを求める。 C_{253} は(13)式により計算される。

$$C_{253} = \frac{C_0}{1 - A/A_0} \quad (13)$$

$$C_0; S_i A_0 \quad \ell \cdot \text{sec}^{-1}$$

$$A_0; \text{角型導管断面積} \quad \text{cm}^2$$

$$A; \text{ゲートバルブ面積} \quad \text{cm}^2$$

結局, $A = 9.36 \times 10^4 \text{ cm}^2$ となり, 巾 360 cm, 高さ 260 cm の矩形のゲートバルブ孔とする。

3.3 真空ポンプ

真空ポンプは, D-T および He の大容量排気に対応できるものでなければならない。液体ヘリウムを使用するクライオポンプが唯一のものである。

3.3.1 D-T の排気

クライオ面温度は 4.2K で, 凝縮作用により D-T を排気する。D-T 排気面の後に He 排気面をとりつけるので, D-T 排気面はシェブロン構造とする。クライオ面は 77K 液体窒素で冷却され, ふく射熱遮蔽を目的とするシェブロンバッフルを前面にもつ。これらのシェブロンバッフルは, 簡単な構造と大きな有効排気速度を得るため平面的な配置とした。2つのシェブロンバッフルは同じ形状とした。シェブロンバッフルの気体の通過確率は 0.25 である。

排気速度 S_0 は, シェブロンバッフルのコンダクタンス C_{77} とクライオ面排気速度 $S_{4.2}$ からなる。

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{C_{77}} + \frac{1}{S_{4.2}}$$

$$= \frac{1}{0.25 S_i A} + \frac{1}{S_i A}$$

結局, $S_0 = 1.56 \times 10^6 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ のためには $A = 1.52 \times 10^5 \text{ cm}^2$ の平面断面積をもつようなクライオ面とシェブロンバッフルを用意すればよく, 巾 400 cm × 高さ 400 cm の面とする。

3.3.2 He の排気

クライオ面は 4.2K の吸着面で, D-T 凝縮シェブロントラップの後に置かれている。排気速度 S_0 は, シェブロンバッフルのコンダクタンス $C_{77} = 2.19 \times 10^6 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$, D-T 凝縮シェブロントラップコンダクタンス $C_{4.2} = 2.19 \times 10^6 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ と, He 吸着面排気速度 $S_{4.2}$ で構成される。

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{C_{77}} + \frac{1}{C_{4.2}} + \frac{1}{S_{4.2}}$$

$S_0 = 4.87 \times 10^5 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ のためには, $S_{4.2} = 8.77 \times 10^5 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ あればよい。このためには, He 吸着面積 $A = 1.53 \times 10^4 \text{ cm}^2$ あればよいことになる。しかし, 吸着面には He 排気面として役立つ限界吸着容量が存在する。

たとえば, 限界吸着容量 $2.7 \times 10^{19} \text{ molecules} \cdot \text{cm}^{-2}$ の吸着材の場合を考えてみよう。真空ポ

ンプは12,000 secの連続作動時間が設定されている。12,000 secに真空ポンプに吸着されるHe量は、表2から 6.02×10^{23} moleculesである。これを吸着するために必要な吸着面積Aは、 2.23×10^4 cm²である。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、吸着面積は凝縮面と同じ巾400 cm、高さ400 cmとする。

3.4 回収系

回収系の作動の内容を(1)残留液体ヘリウムの回収、(2)D-T Heの回収、(3)液体ヘリウムの供給に分ける。それぞれに4,000 secをかけるとする。回収すべきD-T量は、表2の流量qに $t = 12,000$ secを乗じた値である。

$$\begin{aligned}qt &= 2.02 \times 10^{25} \text{ molecules} \\ &= 5.56 \times 10^5 \text{ Torr} \cdot \ell \quad (273\text{K})\end{aligned}$$

クライオ面が15K以上となれば、ほとんどD-Tが気体となる。

クライオポンプの容積は 8.4×10^4 ℓである。回収時におけるD-Tの初期分圧は、

$$\frac{5.56 \times 10^5 \text{ Torr} \cdot \ell}{8.4 \times 10^4 \ell} = 6.74 \text{ Torr}$$

となる。Heの初期分圧は0.2 Torrとなる。初期分圧の $\frac{1}{100}$ の圧力まで、4,000 secで排気して回収するとする。このためには、排気速度 $100 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ のメカニカルブースターを中心とする排気系が必要である。この後にはダイアフラムポンプが続き、気体は1気圧で貯蔵タンクに送られる。

3.5 補助排気系

補助排気系は、クライオポンプと並用して使われる。さらにクライオポンプを作動させずに、炉装置の部分的な運転を可能とするための排気系としても使われる。

JT-60の排気系の排気速度は $2 \times 10^3 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ である。実用炉はJT-60の60倍の炉容積をもつ。そこで実用炉全体で $1.2 \times 10^5 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ 、1ポートあたり $1 \times 10^4 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ の排気速度をもつ補助排気系をつけることとする。

主真空ポンプは、ターボ分子ポンプとクリーンルーツポンプの組合わせである。その後には回収系の排気系が直列につながり、背圧系として働く。

クライオポンプ容器からターボ分子ポンプへの配管は直径130 cmφ、長さ12mの円管で、コンダクタンスは $2 \times 10^4 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ である。合成排気速度を $1 \times 10^4 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ とするため、ターボ分子ポンプの排気速度は $2 \times 10^4 \ell \cdot \text{sec}^{-1}$ のものとする。

3.6 粗引系

粗引系は炉空間の圧力を大気圧から 10^{-3} Torrまで減圧し、補助排気系あるいはクライオポンプの作動開始圧力を得るためのものである。粗引系は、メカニカルブースターポンプとロータリーポンプの組合わせである。

始めにロータリーポンプのみで760 Torrから10 Torrまで減圧する。次にメカニカルブースターポンプを作動させ、ロータリーポンプを背圧ポンプとして使用し、10 Torrから 10^{-3} Torrまで減圧する。760 Torrから10 Torr、10 Torrから 10^{-3} Torrまでの減圧は、そ

それぞれ12,000 secで行なわれるものとする。

3.6.1 ロータリーポンプ

容積 V ℓの空間を、 t secで圧力 P_1 Torrから P_2 Torrに減圧するために、炉の引口で必要な排気速度 S ℓ・sec⁻¹は、次の式であらわされる。

$$S = \frac{V}{t} \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (14)$$

12,000 secで、 $P_1 = 760$ Torrから $P_2 = 10$ Torrに減圧するものとする。

$V = 6 \times 10^6$ ℓなので、 $S = 2200$ ℓ・sec⁻¹となる。

3.6.2 メカニカルブースターポンプ

$t = 12,000$ secで、 $P_1 = 10$ Torrから $P_2 = 10^{-3}$ Torrまで減圧するものとする。

(4)式から、メカニカルブースターポンプに対して、炉の引口での排気速度は $S = 4600$ ℓ・sec⁻¹必要となる。このため、配管コンダクタンス $C = 9200$ ℓ・sec⁻¹と、メカニカルブースターの排気速度 $S_0 = 9200$ ℓ・sec⁻¹の構成とする。配管は直径85 cmφ、長さ10 mとなる。

3.7 まとめ

以上の計算結果を表5にまとめる。さらに概念設計との主要な変更点を表6に示す。これらの結果をもとに、合理性を加味したクライオポンプの組立図と配管図を添付する。

表 6

	概 念 設 計	調 査 案
1. 引口円筒	直径100 cmφ, 長さ130 cm	直径250 cmφ, 長さ130 cm
2. 排気ダクト		
(1) 水平部	冷却配管により、気体の通過が非常に妨害されている。	ダクト斜部に対して、開孔面積16 m ² をとるように、冷却配管の位置を変更する。
(2) 斜 部	冷却配管と粒子入射装置により、気体の通過が非常に妨害されている。	マニホールドに通ずる導管として、断面250 cm×500 cm, 長さ300 cmの角型導管とする。
(3) 垂直部	直径300 cmφ, 長さ330 cm	ダクト斜部の延長部

表5 計算結果のまとめ

		D-T	He	備考
クライオポンプ (1,000Kでの値) (1ポートあたり)	qmolecules.sec ⁻¹	1.67×10 ²¹	5.02×10 ¹⁹	1ポートあたりの流量
	q Torr.ℓ.sec ⁻¹	173	5.21	"
	p Torr	<3.33×10 ⁻⁴	<1.67×10 ⁻⁵	引口圧力の上限
	C ₁ ℓ.sec ⁻¹	1.56×10 ⁶	1.74×10 ⁶	直径250cm 長さ130cm円管 引口コンダクタンス
	C ₂ ℓ.sec ⁻¹	1.56×10 ⁶	1.74×10 ⁶	排気ダクトとマニホールドのコンダクタンス
	C ₂₁ ℓ.sec ⁻¹	1.88×10 ⁷	1.99×10 ⁷	縦660cm 横260cm 長さ660cm角型導管
	C ₂₂ ℓ.sec ⁻¹	4.10×10 ⁶	4.34×10 ⁶	縦500cm 横250cm 長さ300cm角型導管
	C ₂₃ ℓ.sec ⁻¹	1.88×10 ⁷	1.99×10 ⁷	直径500cm以上 長さ330cm相当の異型管
	C ₂₄ ℓ.sec ⁻¹	2.30×10 ⁷	2.43×10 ⁷	辺長500cm五角型 長さ660cm異型管 マニホールド
	C ₂₄₁ ℓ.sec ⁻¹	3.54×10 ⁷	3.74×10 ⁷	マニホールド垂直方向コンダクタンス
C ₂₄₂ ℓ.sec ⁻¹	6.54×10 ⁷	6.92×10 ⁷	マニホールド水平方向コンダクタンス	
C ₂₅ ℓ.sec ⁻¹	4.10×10 ⁶	4.34×10 ⁶	ゲートバルブ部コンダクタンス 巾360cm 高さ260cm	
C ₂₅₁ ℓ.sec ⁻¹	8.22×10 ⁶	8.69×10 ⁶	対マニホールド開孔コンダクタンス 巾400cm 高さ400cm	
C ₂₅₂ ℓ.sec ⁻¹	2.20×10 ⁷	2.33×10 ⁷	縦400cm 高さ400cm 長さ200cm角型導管	
C ₂₅₃ ℓ.sec ⁻¹	1.30×10 ⁷	1.37×10 ⁷	バルブ開孔コンダクタンス	
S ₀ ℓ.sec ⁻¹	1.65×10 ⁶	9.98×10 ⁵	クライオポンプ排気速度	
C ₇₇ ℓ.sec ⁻¹	2.06×10 ⁶	2.18×10 ⁶	77Kシェブロンパッフルコンダクタンス	
C _{4,2} ℓ.sec ⁻¹		2.30×10 ⁶	42Kシェブロンパッフルコンダクタンス	
S _{4,2} ℓ.sec ⁻¹	8.22×10 ⁶	9.20×10 ⁶	42Kクライオ面の排気	
S* ℓ.sec ⁻¹	5.30×10 ⁵	4.65×10 ⁵	引口での合成排気速度	
P* Torr	3.26×10 ⁻⁴	1.12×10 ⁻⁵	引口での圧力	
補助排気系 (300Kでの値) (1ポートあたり)	S _a ℓ.sec ⁻¹	1×10 ⁴	1.06×10 ⁴	補助排気系クライオポンプ容器引口での排気速度
	C _a ℓ.sec ⁻¹	2×10 ⁴	2.12×10 ⁴	直径130cm 長さ12×10 ³ cm円管配管
	S _t ℓ.sec ⁻¹	2×10 ⁴	2.12×10 ⁴	ターボ分子ポンプ排気速度
	S _c ℓ.sec ⁻¹	2×10 ²	2.12×10 ²	クリーンルーツポンプ排気速度
回収系 (300Kでの値) (1ポートあたり)	S _{rec} ℓ.sec ⁻¹	1×10 ²	1.06×10 ²	回収系クライオポンプ容器引口での排気速度
	S _m ℓ.sec ⁻¹	1×10 ²	1.06×10 ²	メカニカルブースターポンプ排気速度
	S _d ℓ.sec ⁻¹	3.3×10 ⁰	3.5×10 ⁰	ダイアフラムポンプ排気速度
粗引系 (300K空気に対する値) (炉全体で)	S _{rough} ℓ.sec ⁻¹	AIR 4.6×10 ³		粗引系排気ダクト引口での排気速度
	C _{rough} ℓ.sec ⁻¹		9.2×10 ³	直径85cm 長さ10 ³ cm円管
	S _m ℓ.sec ⁻¹		9.2×10 ³	メカニカルブースター排気速度
	S _{rot} ℓ.sec ⁻¹		2.2×10 ³	ロータリーポンプ排気速度

4. ユーティリティ

電力、水、冷媒の使用量を表7に示す。

表 7

	ELECTRIC POWER	WATER	
MAIN PUMPING SYSTEM			
CRYOPUMP LIQ He	280 KW	20 M ³ /Hr	100 L/Hr
LIQ N ₂	70 KW	6 M ³ /Hr	50 L/Hr
AUXILIARY PUMPING SYSTEM			
TARBO MOLECULAR PUMP	12 KW	0.24M ³ /Hr	
CLEAN ROOTS PUMP	1 KW	0.18M ³ /Hr	
TRAP	11 KW	0.75M ³ /Hr	6 L/Hr
RECOVERY PUMPING SYSTEM			
MECHANICAL BOOSTER PUMP	22 KW	0.18M ³ /Hr	
DIAPHRAGM PUMP	1 KW		
TRAP	11 KW	0.75M ³ /Hr	6 L/Hr
TOTAL CONSUMPTION / PORT	390 KW	28 M ³ /Hr	
ROUGH PUMPING SYSTEM			
MECHANICAL BOOSTER PUMP	210 KW	16.8 M ³ /Hr	
ROTARY PUMP	210 KW	6 M ³ /Hr	
TRAP	380 KW	30 M ³ /Hr	300 L/Hr
TOTAL CONSUMPTION / REACTOR	5,500 KW	370 M ³ /Hr	

5. 研究開発のタイムスケジュール

図5は、昭和59年までに、前章にのべられた真空排気系の試作を終えるために必要と考えられる開発項目と問題解決のためのタイムスケジュールである。

6. おわりに

本稿に、核融合炉の排気系として課された要請と、その要請を満たすために真空工学の現状からみて開発すべき方向をのべた。大容量のDTおよびヘリウムの排気は、核融合炉の排気系ではじめて遭遇した新しい困難である。その困難を解決するために筆者らは、4.2 Kでのヘリウムの収着を含むクライオポンプの採用を提案した。この方式が実現しうる科学的な見通しはある。しかし、実現までに踏まなければならない技術的な開発が、われわれを待っている。筆者らは実現段階にいたるまでの技術開発のスケジュールの試案を示した。

5. 研究開発のタイムスケジュール

図5は、昭和59年までに、前章にのべられた真空排気系の試作を終えるために必要と考えられる開発項目と問題解決のためのタイムスケジュールである。

6. おわりに

本稿に、核融合炉の排気系として課された要請と、その要請を満たすために真空工学の現状からみて開発すべき方向をのべた。大容量のDTおよびヘリウムの排気は、核融合炉の排気系ではじめて遭遇した新しい困難である。その困難を解決するために筆者らは、4.2 Kでのヘリウムの収着を含むクライオポンプの採用を提案した。この方式が実現しうる科学的な見通しはある。しかし、実現までに踏まなければならない技術的な開発が、われわれを待っている。筆者らは実現段階にいたるまでの技術開発のスケジュールの試案を示した。

参考文献

- 1) K. Sako; Private Communication.
- 2) G. Lewin and F.H. Tenney; Japan. J. appl. Phys. Suppl. 2 pt. 1. 221 (1974).
- 3) Z. Sledziewski, M. Huguet P.H. Rebut and A. Torossian; Japan. J. appl. phys. Suppl. 2pt. 1. 217 (1974).
- 4) Yu. M. Pustovoi; Japan. J. appl. Phys. Suppl. 2pt. 1. 233 (1974).
- 5) "Baseball II-T program plan and major project proposal" LLL-Prop-126. June 10, 1975 Lawrence Livermore Lab.
- 6) Y. Shimomura et al.; JAERI-M 6135, (1975).
- 7) S.A. Cohen; J. Vac. Sci. Technol. 13 449 (1976).
- 8) N. Fujisawa, T. Sugawara, K. Toi, T. Matoba, S. Kasai and S. Itoh; Japan. J. appl. phys. 13 851 (1974).
- 9) H. Hoegelsperger W. Heiland, W. Poschenrieder and R. Scherzer; Proc. 8th Symp. on Fusion Technol. (Commission of the European Communities Directorate General Scientific and Technical Information and Information Management. (Luxembourg 1974) P. 99.
- 10) A. Kitsunozaki; Private Communication.
- 11) Y. Murakami; J. Vac. Sci. Technol. 10 359 (1973).
- 12) Y. Murakami, T. Kurisaki, Y. Ishibe and K. Okamoto; Japan. J. appl. Phys. Suppl. 2. Pt. 1. 89.
- 13) J. Duffy and L. Oddon; 6th Symp. On Engineering Problems of Fusion Research.
- 14) W.K. Dagenhart, J.S. Culver, H.H. Haselton, R.L. Johnson, G. Schilling, W.L. Stirling, M.R. Busby and S.A. Stern; 6th Symp. on Engineering Problems of Fusion Research Cl-10 Nov. 18-21 (1975) San Diego.
- 15) H.J. Halama and J.A. Bamberger; 6th Symp. On Engineering Problems of Fusion Research. Cl-11 Nov. 18-21 (1975) San Diego.
- 16) G.D. Martin; Private Communication.
- 17) H.J. Halama and J.R. Aggus; J. Vac. Sci. Technol. 11 336 (1974).

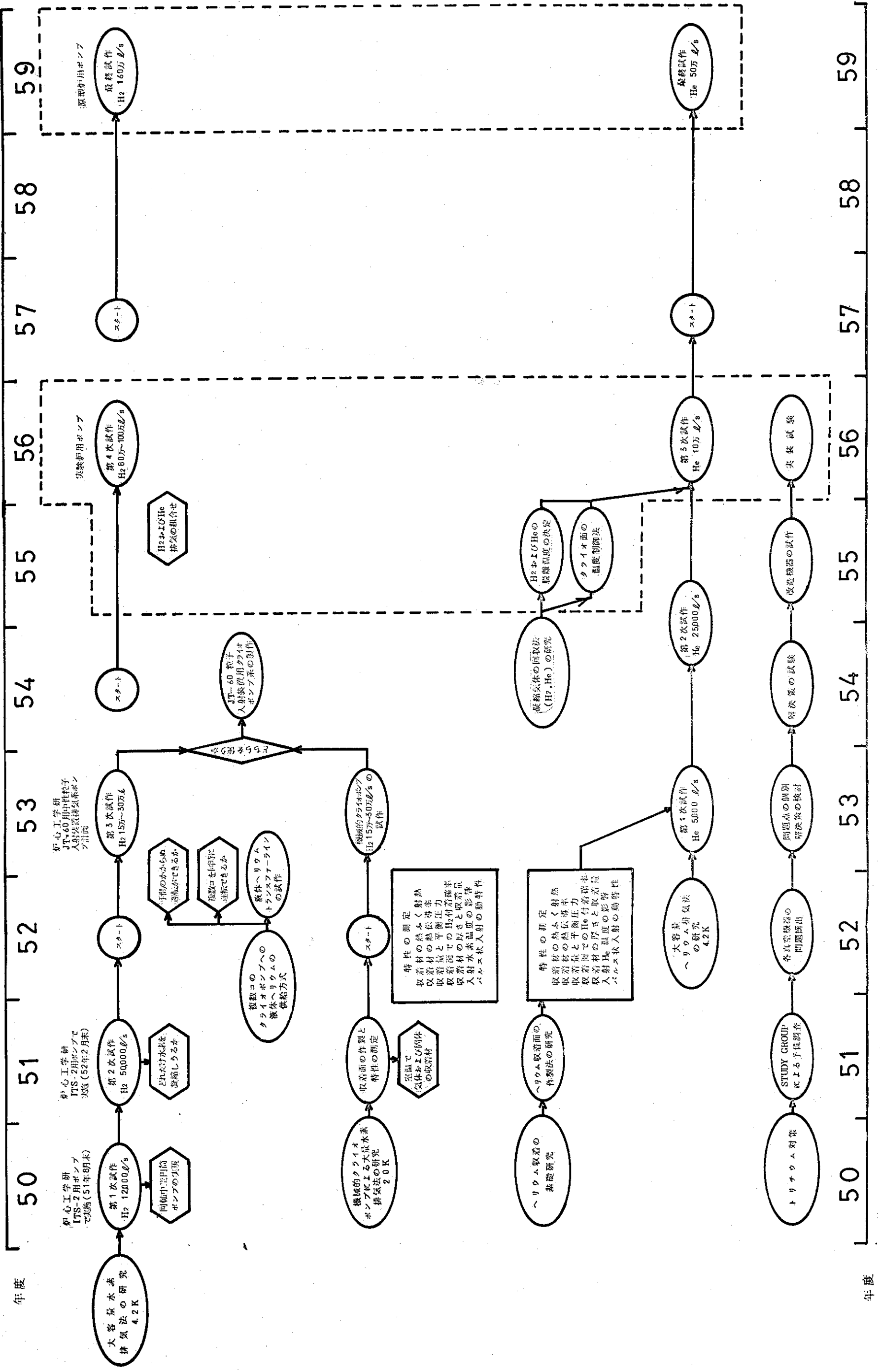
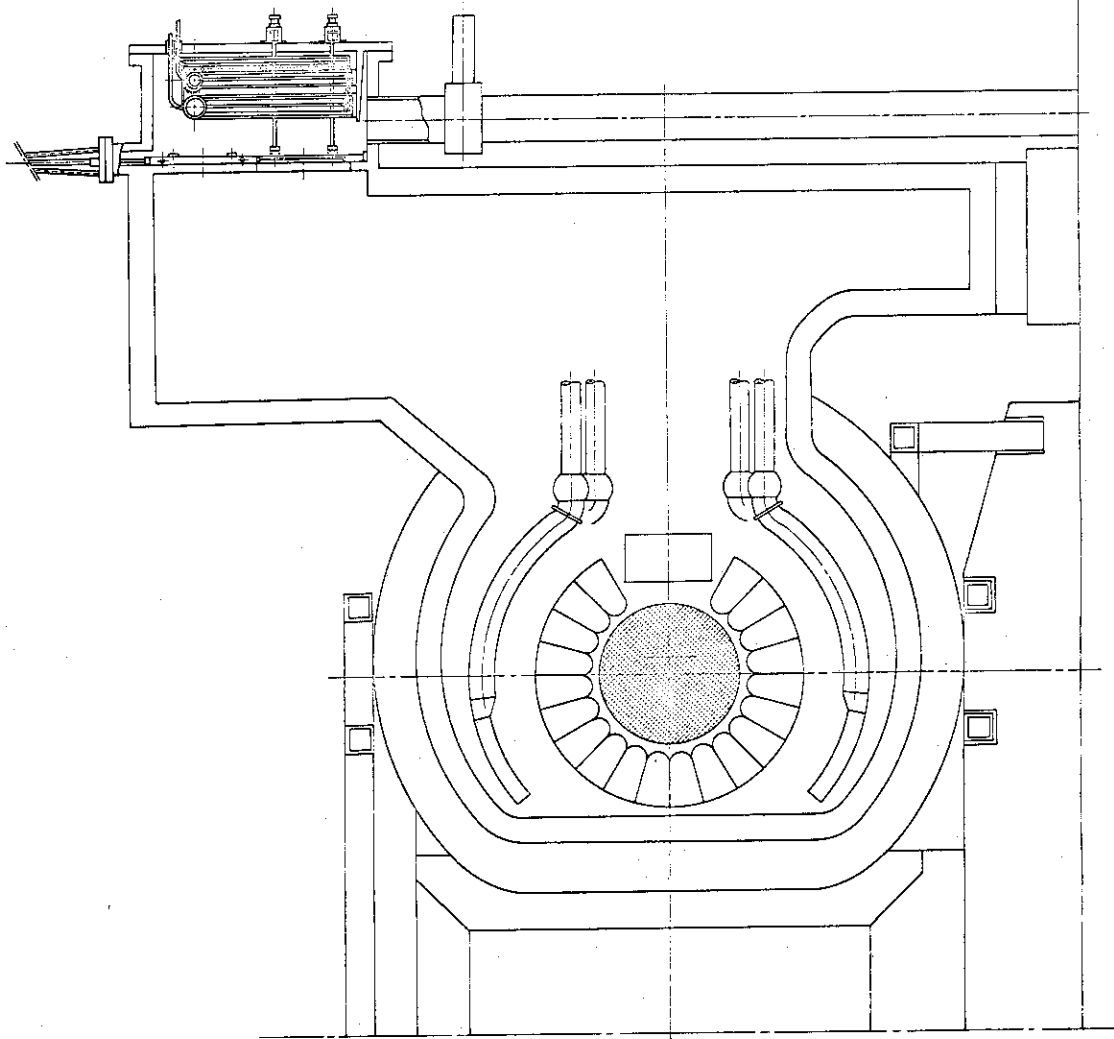
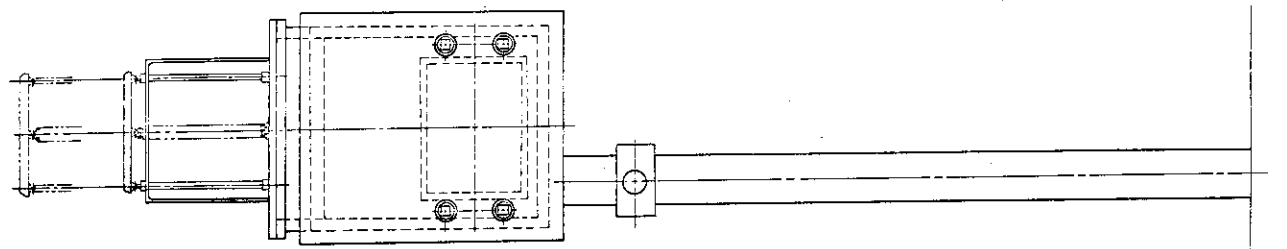
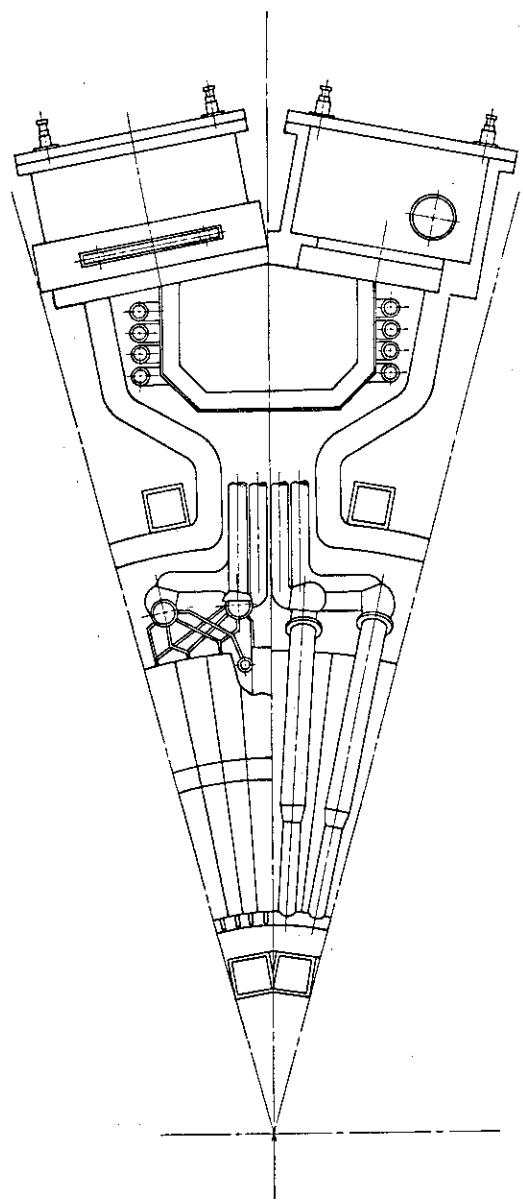
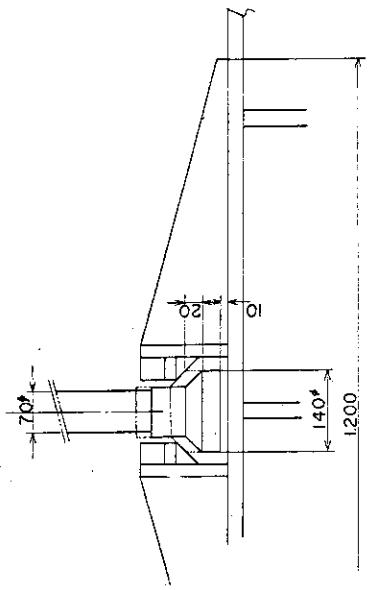
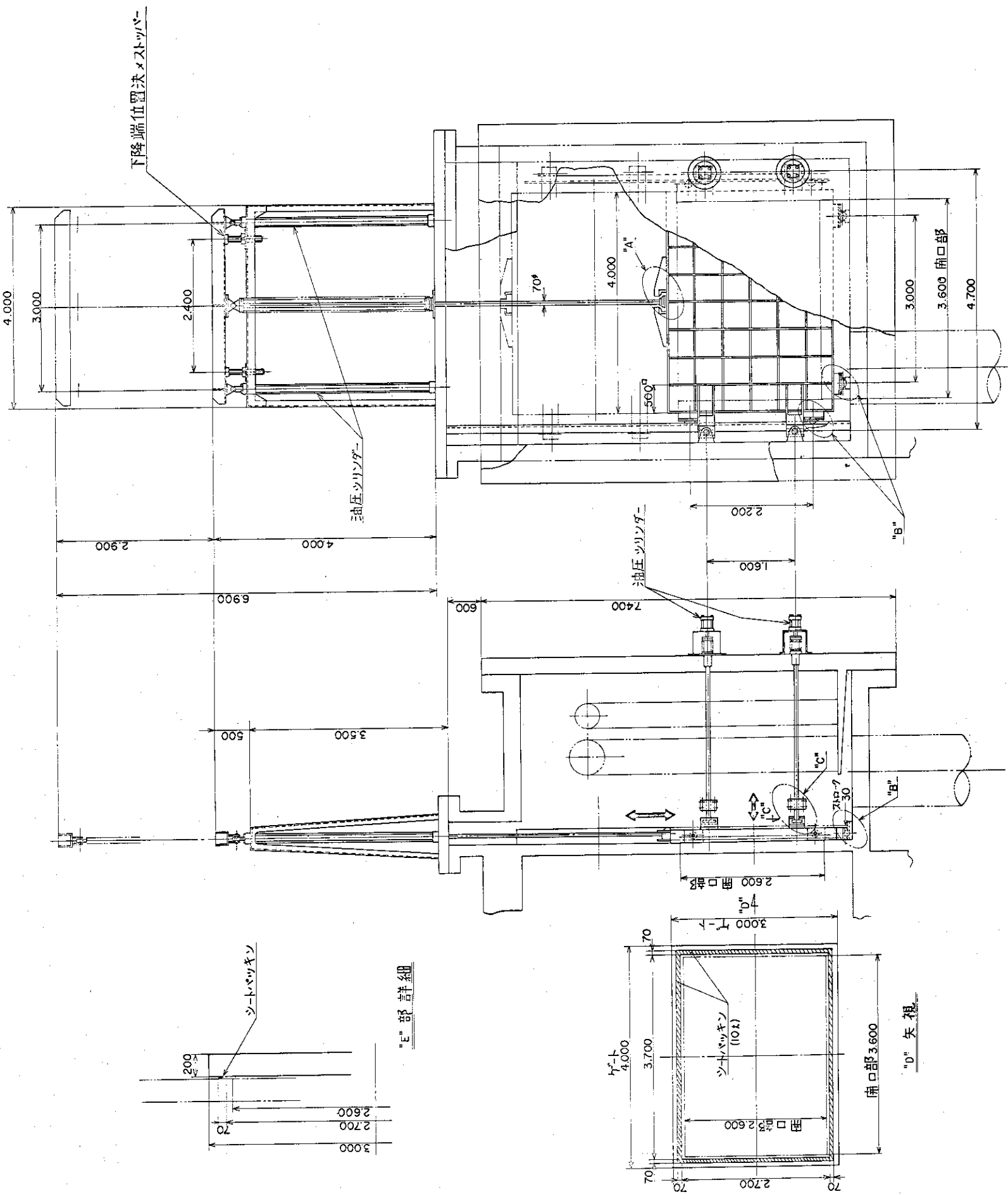
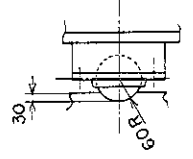


図5 開発スケジュール

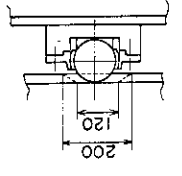




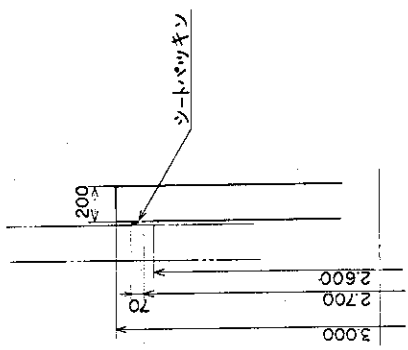
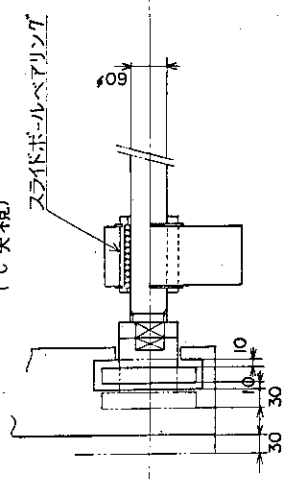
"A"部詳細



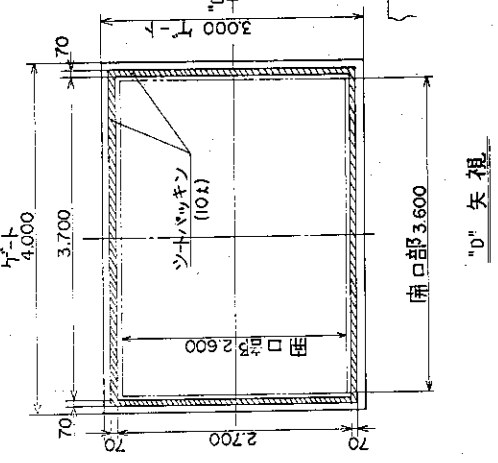
"B"部詳細



"C"部詳細
(C)矢視



"E"部詳細



"D" 矢視

ゲートバルブ 構想図

