

JAERI-M
7198

トカマク型核融合動力炉分解修理
の設計研究

1977年8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.

トカマク型核融合動力炉分解修理の設計研究

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

(1977年7月12日受理)

トカマク型核融合動力炉の分解修理設計を行なった。核融合炉を12分割して、故障時にその分割炉ユニットを外部に取出し、修理作業を行なう方法について、その設計的検討を行ない、またそれに必要な設備と規模の検討を行なった。

検討内容は、核融合炉の故障と修理方法に関する設計、炉の解体設備と炉ユニットの移送設備およびブランケット修理設備に関する設計等である。

本設計研究の結果、今後解明すべき工学上の問題点はまだ多く残されてはいるが、この分解修理方法は有望であるとの結論に達した。

本報告書は住友重機械工業株式会社が原研からの委託によって行った設計研究の成果である。

(契約番号 51年度サ-0012)

Repair/Maintenance Design for Tokamak
Fusion Power Reactor

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

(Received July 12, 1977)

Disassembling and reassembling a tokamak fusion power reactor for repair and maintenance have been studied. The reactor is divided into twelve modules so only damaged modules can be removed from the reactor room and transferred to a repair shop. Repair process and method, facilities and their sizes were examined.

Repair method and dismounting equipments, transport system of the modules, repair facilities for blanket etc. were designed. Though with some problems for future study, the methods seem to be successful.

Keywords: Tokamak Fusion Power Reactor, Disassembling, Reassembling,
Repair, Maintenance, Transport System, Module, Blanket.

目 次

ま え が き	1
1. 核融合炉の構造と故障修理	2
1.1 炉 構 造	2
1.2 放 射 能	3
1.3 故障と修理	4
1.4 炉の解体と炉ユニット	5
1.5 炉ユニットの移送と修理	7
2. 核融合炉の解体と炉ユニットの取替	11
2.1 概 要	11
2.1.1 設計条件	11
2.1.2 炉ユニットの構造	12
2.1.3 取替作業手順	14
2.2 炉ユニット取出しの準備作業	15
2.2.1 機械的結合の解除	15
2.2.2 重量物の移動	16
2.2.3 真空シールの解除	18
2.2.4 まとめ	21
2.3 取出機の設計	21
2.3.1 移動台車	22
2.3.2 駆動装置	24
2.3.3 まとめ	25
2.4 旋回台車の設計	25
2.4.1 遮蔽室の検討	26
2.4.2 車輪方式による旋回台車の試設計	26
2.4.3 エアベアリング方式による旋回台車の試設計	28
2.4.4 まとめ	30
2.5 遠隔操作機器	31
2.5.1 炉室内作業車	32
2.5.2 天井クレーン	32
2.5.3 まとめ	32
3. ブランケット修理	54
3.1 ブランケット構造と修理範囲	54
3.2 ブランケット取り出し	54
3.2.1 ブランケット冷却配管	55
3.2.2 ブランケット支持固定法	57

3.3	ブランケット修理	58
3.3.1	ブランケット修理	58
3.3.2	ブランケット修理設備	59
4.	ま と め	63
4.1	修理作業手順と推定所要時間	63
4.2	問 題 点	63
4.2.1	解体修理が要求する炉ユニット構造	63
4.2.2	解体修理の問題点	64
4.3	結 語	64
	引 用 文 献	67
	設計研究担当者	67

ま え が き

本設計報告書は、日本原子力研究所核融合研究部炉設計研究室の設計になる、熱出力 2000MW トカマク型核融合実証炉の分解修理に関するものである。

同研究所の基本設計にもとずき、炉を12分割して、故障時にその一単位を外部にとり出し、修理作業を行う事についてその可能性の検討を行い、またそれに必要な設備と規模の検討を行った。

核融合炉は次の世代のエネルギー源として、各国に於て実用化への精力的な研究が進められている。この中で炉を成立させる為のプラズマ条件に関する研究、それを可能にする技術材料の開発と並んで炉の保守の問題も重要視されている。即ち放射能を滞びた巨大精密構造物の安全な取り扱い、人類が未だ経験した事のない技術である。単なる巨大構造物の建造、保守には多くの技術的蓄積があり、また放射化された物質の取り扱いについては、核分裂炉の保守、解体やその燃料再処理作業を通じて経験を得つつあるが、これら全ての条件が重なり、しかも実証炉として経済性を満足しながら、あらゆる故障に備える事は全く新しい技術と云って良いであろう。

現在、最も実現の可能性の高いものの一つとして、トカマク型の炉が取り上げられている。この様な形式の炉においては、ブランケット、トロイダルコイルその他の機器が空間的に閉じており、しかも他の機器を包囲する様な多重層構造となっている。一方、この多重層の最も内側に位置するブランケットは、プラズマ及び中性子によって照射され、また莫大な量のエネルギーが循環すると云う事から非常に苛酷な環境にさらされる。したがって炉の故障を考える場合は、まずこの炉の最も内部に位置するブランケットを取り上げなければならない。このことは、その外側に位置する機器に対しても何らかの作業を行なわなければならないことを意味する。また、例えばトロイダルコイルの一部が故障した場合にそれを取り外す事を考えれば、トロイダルコイルを切断するか、又はその内部に位置するトラス状構造物を切断する必要があるいずれにしても大規模な作業にならざるを得ないであろう。

現在まで、世界各国において核融合炉の試設計とその修理方法の提案が行なわれているが、特に修理に関しては概念的なものであり、必ずしもその可能性が明確になっているとは云えない。この論文では、日本原子力研究所の設計になるトカマク型核融合実証炉に関し、まず、それが放射化された状態で解体出来るかどうかを炉の構造条件と作業機器の面から検討するものである。炉の解体が行なわれれば故障部分の修理は外部の任意の場所に導いて行う事が出来る。ここでは故障として、ブランケット容器の破損を想定している。解体、修理に必要な設備の種類とその規模及び作業に要する概略の時間が与えられている。

1. 核融合炉の構造と故障修理

1.1 炉構造

故障修理の対象として想定する核融合炉は、日本原子力研究所の設計による熱出力 2000MW トカマク型実証炉である。その外形構造を Fig. 1.1 に、主要な諸元を Table. 1 に示す。発生されるプラズマは主半径 10.5 m 副半径 2.7 m の円形断面トーラス状のものである。

プラズマの周囲を包むようにブランケットが設置されるがその主材料は酸化リチウムの焼結体ボールである。ここで発生した熱とトリチウムを回収するため、20気圧のヘリウムガスが循環している。ヘリウムガスの温度は約 680°C である。この様な高温、高圧のガス圧を支え更に過渡的に発生する電磁力を支えるために、ブランケットは適当な大きさの壺型圧力容器細胞（ブランケットセル）から構成されている。ブランケットの外部はプラズマ空間と直結して高真空状態にあるのでこの圧力容器に対しては僅かのガス漏れも許されない。

ブランケットの外側に真空シールと放射線遮蔽の機能を持つ壁が配置される。この壁の主材料は重コンクリートであり、ブランケットで吸収されなかった中性子と壁の内部に発生する γ 線を遮蔽してトロイダルコイルその他外部環境を放射線から保護する。放射線の吸収に伴って熱が発生するので、壁の内部にはボロン水による冷却のための配管が埋め込まれている。トロイダル磁場コイルは円を基調とした D 型の単位コイル 24 個から成る。励磁に伴って発生する強大な電磁力を支えるために単位コイルの内側垂直直線部は相互に密着し突っ張り合うと同時に、コイルの各位置で支持棒により綱目のように結合されている。このコイルは超電導コイルであるので、断熱容器に收容されている。

トロイダルコイルの外側に、それを包む様にポロイダルコイルが配されている。このコイルも超電導コイルであり、断熱容器に收容されている。ポロイダルコイルには炉の中心部分に円筒状に配列され、一体の断熱容器に入った一群のコイルと、炉の外周部に上下対称にそれぞれ独立の容器に入った数組のコイルがある。ここでは便宜的にそれらのコイル群を、円筒ポロイダル及び（上側、下側）大径ポロイダルコイルと呼ぶ事にする。大径ポロイダルコイルはトロイダルコイルのケースに取り付けられているので、トロイダルコイルを動かすような場合は必ず取り外さなければならない。ここでは以上の機器で構成されている部分を炉心部と呼ぶ事にする。炉心部の周囲に炉心部とダクトで接続するポート（マニホールド）がある。このポートには、真空排気ポンプ（クライオポンプ及びその補助排気管）、中性粒子入射器が取り付けられており、またヘリウムガス配管もこのポートを介して外部の母管へ接続する。

次にこの炉の特徴的な構成法として、トロイダルコイルとその内部のトーラス状構造物に関し、そのトーラス方向の 12 等分に相当するセクターを一単位としこれにポート部を取付けたものを基本要素として炉を組立てている。ここではこの要素を炉ユニットと呼ぶ。したがって、炉ユニットは、ブランケットおよび放射線遮蔽壁 30° セクター、トロイダルコイル 2 単位およびポート部から成る。

炉のこのようなユニット化を現実的な意味のあるものとするためには、トロイダルコイルの少くとも2単位までの分離解体および放射線遮蔽壁、ブランケットの切断、結合が比較的容易に行い得る構造になっていなければならない。

炉のおよその大きさをまとめれば次のようになる。

- 炉の最大外周直径 約 59 m (中性粒子入射器外周)
- 炉の高さ 約 25 m (主排気ポンプ駆動軸まで)
- 炉ユニット横巾 約 10 m
- 炉ユニット長さ 約 26 m
- 炉の重量 約 6万トン (トロイダルコイルを除く)
- 炉ユニット重量 約 5千トン

1.2 放射能

炉の運転によって炉材料内に放射能が発生蓄積する。核融合炉に関する放射能の問題は主に2種類ある。その一つは運転時超電導コイルに対する遮蔽であり、もう一つは保守、解体作業に関するものである。ここでは後者の点からこの問題を検討する。

放射能が保守作業に及ぼす影響は二つに大別出来る。第一は保守用の機器を炉の周辺に常置する必要がある場合の性能劣化の問題である。第二は、放射化された材料による作業員の被爆の問題である。この炉に関して計算された^{1,2)}いろいろな場所での放射線量を Table 1.2 に示す。

運転中に作業員が炉の周辺に近寄る事は全く不可能である。上記第一の点に関しては10年間の積分照射量として表の値から中性子 10^{18} n/cm², γ 線 10^9 R/cm²程度と見積られる。金属材料は特に問題がないがその他に関しては、トロイダルコイルや中性粒子入射装置などの材料に準じて考えるのが实际的であろう。炉を停止して1週間程度冷却した後では放射線遮蔽壁の外側では、作業員に対する許容線量を2.5 mrem/hrとした時、Table 1.2の値はこの値以下となっている。但しトロイダルコイルのコイルケースに関してはそれ自身が相当放射化されており前の値より1ケタ高い場所がある。したがって炉の周辺の機材は遮蔽壁の外にあっても、この程度に放射化されると考えるべきであろう。

以上は炉から直接放射されるものについてであるが、作業員に関係するものとして炉室を満たす空気の汚染と炉室の床、壁などによる背景放射線がある。これらの定量的な評価は与えられていないが、炉室の空気を直接呼吸する事は不可能であろう。

従って、炉停止時に作業員が炉室に入る場合はある程度の放射線遮蔽機能を持つ気密服を着用するか又は気密運転室を持つ作業車による事になる。

次に、炉を解体してブランケットが露出した場合 $10^2 \sim 10^5$ R/hr程度の線量が照射される。したがって、作業員の接近作業は全く不可能である。即ち、遮蔽壁の一部を取り外す以上の作業は全て遠隔操作により行なわれる。

また、炉の停止中も放射性物質による崩壊熱が発生する。全崩壊量は炉ユニット当たり約 10^8 Ci程度でありほとんどブランケットに集中している。

試みに、1崩壊当たり1 MeVのエネルギーが β 線の形で出て、これが全てブランケットに与えら

れるとすれば、この熱量は300 kWである。

解体、修理、保管などの場合に必要に応じて放熱機構を用意しなければならない。

1.3 故障と修理

保守作業計画を立てる場合に問題となるのは、次の様な点であろう。

- (イ) 部品の種類 (保守対象)
- (ロ) 取付状態
- (ハ) 保守頻度
- (ニ) 作業環境
- (ホ) 致命度

これらのうちで、(ニ)に関し、一般的な意味で云えば放射線により人的作業が不可能と云う事である。(ハ)の保守頻度に関しては、作業計画に反映させる意味での定量的な評価を現状では下す事が出来ない。

以下では、この様な条件を踏えて主要な部品に付き修理計画を検討する。

(1) ポート部

ポート部は炉の外側にあり、作業環境は悪くない。ここでは、むしろ有限の寿命を持つような部品、例えば中性粒子入射器などの保守を、炉を停止しないで出来るかどうかと云う問題になろう。この場合、一個のポートの動作不良の炉に対する致命度と、完全遠隔操作により作業が完成するかどうか前提となる。いずれにしてもこの部分は核融合炉全体から見れば問題にならない。

(2) ポロイダルコイル

ポロイダルコイル以下炉心部を構成する機器の故障は、直ちにプラズマの維持に困難をきたすと考えてよいであろう。したがって、できるだけ速やかに修理を行う必要がある。超電導磁場コイルの故障は巻線に関するものが主となろうが、断熱容器に入って居り、それ自身が多重構造であるから現場での作業は不可能で、外部に取り出して作業する事になる。

ポロイダルコイルの作業を考える場合、その形状と取付位置から前に述べたように三種に分けて考えるのが便利である。上側大径ポロイダルコイルは、炉心上部のトロイダルコイル上に支持固定されているが、取り外しに関して空間的な制限がない。また、もしトロイダルコイル相互の空間が何らかの材料により充填され、放射線遮蔽の機構が施こされていれば、トロイダルコイル外表面上での放射線量が前の表によれば 10^{-3} rem/hr程度であるから人的作業(気密服着用の上)が可能かも知れない。ただしコイルの取付が強固で結合個所が多く、又高所作業となるので、効率的な作業補助機械が必要である。

次に炉中心部の円筒ポロイダルコイルであるが、これを炉から取り外す場合にはトロイダルコイルを移動させる必要がある。例えば、トロイダルコイルを放射状に後退させて中心部に空間を作り円筒ポロイダルコイルをそのままクレーンで吊り上げる方法などが考えられる。この時トロイダルコイルの後退に必要な移動量として、円筒ポロイダルコイル上下のフランジ状の部分通過する大きさとすると2 m程度となり、トロイダルコイルの移動だけでは吸収出来ない

いので、炉全体にわたる解体を要求する事になる。

第三番目に下側大径ポロイダルコイルについてであるがこれを取り外すためには、原則としてその上部に位置するものを取り除く必要がある。即ち炉心部の撤去に近い作業となろう。これを避ける為には、部品としての信頼性を格段に向上させるか、コイルの切断、結合を出来るようにするか、又は炉の下部にピットを設けここに取り込んで修理作業を行うかのいずれかとなる。

(3) トロイダルコイル

トロイダルコイルは、特に炉中心部でコイル相互にも、別の機器にも密着しているので、實際上作業空間はない。したがって、修理は炉から取り外して行う必要がある。この際大径ポロイダルコイルはトロイダルコイル取外しの邪魔になるので、上側、下側とも取り外される。トロイダルコイルの各単位コイルはその内部のトラス状構造物とリンクしているので、取外しの場合にはコイル自体か又はトラス構造物のどちらかを切断する必要がある。この場合、作業性と再結合の可能性を考えると、トラス構造物即ち、放射線遮蔽壁、ブランケットなどを切断する方が現実的である。

(4) 放射線遮蔽壁（真空シール壁）

放射線遮蔽壁は、特にそれ自身の内部構造を持っているわけではないので、保守の必要性は低い。ただ、他の機器の解体に伴って、取り外し、取り付けが要求され、この着脱に関する部分の構造と本来のシール機能とが相反する点が問題である。この部分の合理的設計が要求される。

(5) ブランケット

ブランケットの故障としては、ブランケットセル及びヘリウムガス配管からのガス漏れ、破損が考えられる。ピンホール、ヘアクラックなどによる小規模のガス漏れに対しどのような修理方法をとるかは検討を要するところであろう。炉を解体せずに修理が可能であれば、それにこした事はないが、この方法では欠陥の存在する場所により作業が行えない場合がある。

また、ブランケットセル一個を炉心内部で取り外し、又取り付ける事は殆んど不可能と考えられる。その理由として、①放射線遮蔽壁の内部でブランケットセルを取り扱う空間がないこと、②ブランケットセルはタイヤによってリング状に締め付け固定されているので一個だけ抜き出す様な作業が出来ないこと、③炉心内部でブランケットセルへの多数のヘリウムガス配管を切断したり、又信頼性良く結合するのは實際上不可能と考えられることなどによる。

したがって、ブランケットの修理を考える場合は少くともヘリウムガス配管に関し一組のヘッダーにまとめたブランケットセル集合体として外部に取り出す必要がある。このためには、トロイダルコイル相互の間隙から抜き出すか又は全く別に開口部を設ける必要がある。

1.4 炉の解体と炉ユニット

前節の検討で、ポロイダルコイル、トロイダルコイル、ブランケットなど、炉心部機器の故障修理には、炉の一部又は全体にわたる解体が必要であることが明らかになった。この場合、放射

線の下で人的作業が不可能であることは重要である。全ての作業が遠隔操作によって行なわれる場合には、それに応じた修理方法と手順が与えられなければならない。この事は、一部で実用化されている製品自動組立工場をみれば明らかである。ここでは、作業員を同様の機能のロボットに置き換えている訳ではない。その製品の構造自身及び部品の段階で自動組立が可能に設計され、単なる組立て機械で充分うまく行く様に考慮されている。この核融合炉の故障修理の場合にも、遠隔操作の条件の他、放射化された部品の管理、作業時間の一定化などから規格化され、合理的な作業方法を与えるべきであろう。この点で、炉それ自体の解体と、故障箇所の修理作業を分けて考えるのが、以下の作業を計画する上で有効である。炉が一定の方法により完全に解体出来る事が明らかであれば、原理的には、いかなる故障にも対応する事が出来よう。

この様な点から、核融合炉トラス部を12個の単位セクターから構成し、炉の解体に際し単位セクター（炉ユニット）を切り離し抜き出すという方法は原理的に炉の完全解体の方法を与えている。この場合、この様な炉心部の分割の方法は、個々の機器の機能とは全く矛盾するので多くの問題を派生する。

炉心の分割、解体に伴う問題の主なものは次の様であろう。

(1) ブランケット分割可能性

隣り合う炉ユニット内のブランケットユニット相互の結合、解除を炉心内部の限られた空間と強力な放射線下で行うこと。ブランケットは運転時と停止時とで大きな温度変化があり、このため、支持、固定には特別の工夫が必要である。

(2) 放射線遮蔽及び真空シール壁の構造

シールの為の条件は明らかに壁の切断の条件とは矛盾する。解体を可能にする為に、分割面に間隙が生ずる様であれば、何らかの方法でこれを真空的及び放射線的に塞がなければならない。この場合この壁のすぐ外側にトロイダルコイルが設置されるので、特に炉の中心部で作業空間は著しく制限を受ける。分割面の間隙に関し、炉ユニットでは密着させるべき分割面が三種類ある。ブランケット端面、放射線遮蔽壁及びトロイダルコイル端面である。炉ユニット組込みの場合にこの全ての面を一度の操作で一様に密着させる事は不可能である。

また、放射線遮蔽壁だけに限っても、その端面全周にわたって当てる事が出来るかどうかは疑問である。これらに関し、それぞれ適切な逃げと調整の機能が必要である。

(3) 磁場コイルの分離

トロイダルコイルの機械的な面については前項でも一部ふれたが、強大な電磁力を支えるための支持棒の取り付け、取り外しは相当困難な作業となろう。超電導コイルを分離する為には各々が独立したコイルケースに入っていないが、断熱及びコイル支持の点から困難な問題がある。

(4) 各種配線、配管の切断

炉ユニットの分離、移動に伴って切り離す必要のある配管、配線には次の様なものがある。

- ・超電導磁場コイルの配線（渡り線）と冷媒配管
- ・ブランケット冷却用ヘリウムガス配管
- ・遮蔽壁冷却用ボロン水配管
- ・クライオポンプ冷媒供給配管及び補助排気配管

・監視、制御及び各種動力用配線

(5) 超重量物の移動

炉ユニットの重量は約 5000 トンである。運搬機の信頼性組立ての際の位置決めなどに注意する必要がある。

(6) 放射能管理

今まで一般的な作業環境として放射能を論じて来たが、炉の解体に伴って露出する、主にブランケットからの放射線を外部環境に洩らさない様にする必要がある。特にブランケットおよびその冷却配管に蓄積、残留しているトリチウムの洩れ、拡散を防ぐ必要がある。

尙解体に先立って当然故障箇所の発見、診断が行なわなければならない。この為には、場合によっては診断装置を炉心内部に導入する必要があるかも知れない。この時強力な放射線下で動作するセンサの問題がある。また解体に伴って炉心内に空気が導入される事になるので高温部、極低温部は適切な処理が行なわれる必要がある。

1.5 炉ユニットの移送と修理

結合部を全て取り外して、炉の残り部分から切り離された後は必要な場所へ移送する事になる。もしその炉ユニットの内部に故障があるとすればそれはその修理のためによく整備された修理室に送り、炉全体としては別に用意してある予備の炉ユニットを組込んで起動にとりかかるのが合理的である。

炉ユニットを炉体から離脱させる時の基本的な動きの方向はその形状から水平半径方向外向きである。この事は炉ユニットが適当な台車に載っている事を意味する。この台車は炉ユニットを炉体に組み込んだ時も取り外す事が出来ないので炉ユニットの固定に新たな問題が生ずる。又この台車の駆動と案内に注意しなければならない。この台車は放射状にしか動かないので、炉ユニットを修理室に送るについては、少くとももう一つの動きが必要となる。この炉ユニットの修理室との間の移送については、いくつかの方法が考えられる。

その第一は、炉ユニットの動きは半径方向のみとし、炉の周囲を修理室が旋回移動する様な方法であり、第二は炉全体が回転しそれによって周方向の送りを行ないこれと炉ユニットの半径方向の動きと組合わせて、一定の場所にある修理室へ送りこむ方向である。この場合、炉は回転テーブルの上に組立てられ、外部への配管、配線の類は全てこの回転を許す構造を持たなければならない。

第三は炉室の周囲を旋回移動する特別の台車を用意する方法である。この場合は予め待機しているこの旋回台車に炉ユニットを引き込んだ後、周回してこれを修理室の位置に送り、次に炉ユニットの半径方向の動きを使って修理室に引き込む方法である。

これらのうちで第一の方法では修理室が動くと言う点から設備の規模が大きくなり、又炉ユニットの解体に伴って発生する放射性廃棄物の拡散を防ぐ意味から望ましくないと判断する。

第二の方法では炉の構成に大巾な制限が加えられると考えられる。

この点で第三の方法は他の部分に大きな新しい問題をもたらさないのでここではこの方法を採用する。

さて、修理室に送られた炉ユニットはその故障箇所に応じて取り扱われる事になる。従って例えばブランケットの処理は嚴重な放射線遮蔽を施した完全遠隔操作設備を持つ部屋で行なわれる。この部屋には、第一回の修理以後殆んど作業員は入り得ないものと考えられる。

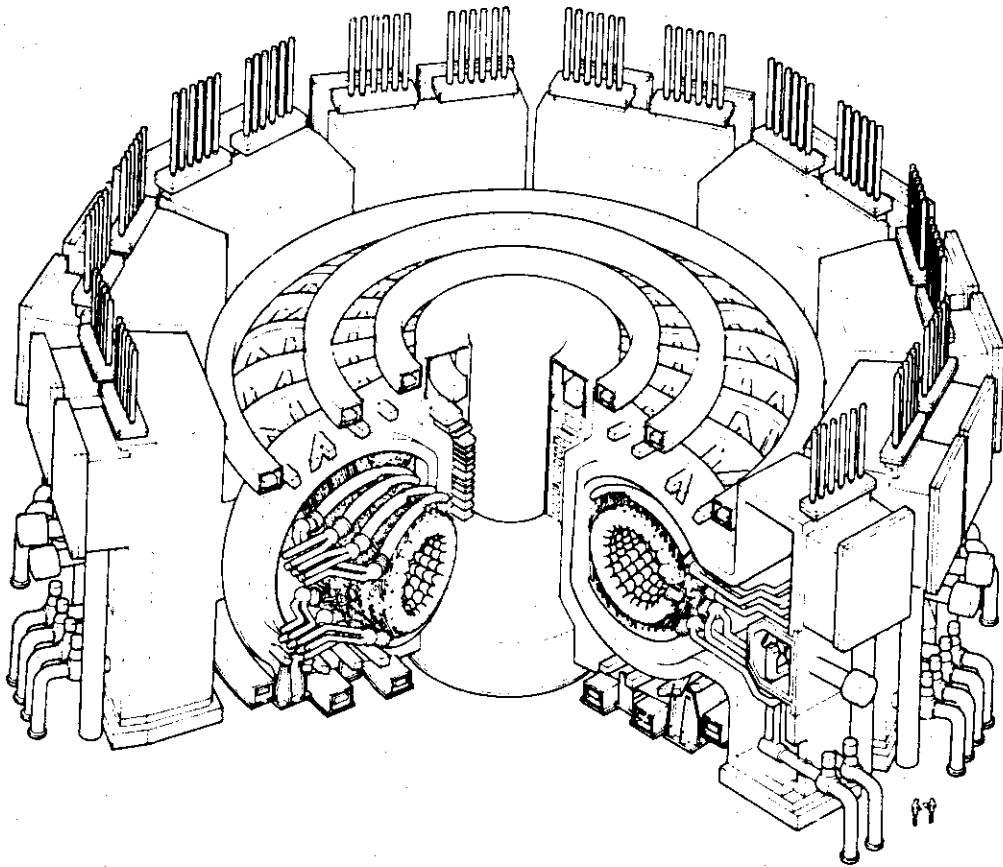


Fig.1.1 2000MW核融合動力炉の概念図

Table 1.1 200MW核融合動力炉の主要諸元

Fusion power (MW)	2000	SCM irradiation effects	
Reactor dimensions		Max. copper displacement (10^{-8} dpa y^{-1})	5.0
Major radius (m)	10.5	Max. nuclear heating rate (10^{-8} W cm^{-3})	5.72
Plasma radius (m)	2.7	Total nuclear heating in SCM (10^{-3} kW)	9.4
First wall radius (m)	3.0	Toroidal field magnet	
Plasma volume (m^3)	1510	Number of coils	24
Plasma		Inner diameter, W/H (m)	12.1/14.0
Mean temperature (keV)	15	Max. field strength (T)	12
Mean density (10^{14} cm^{-3})	1.1	Stored energy (GJ)	172
Effective charge	1.8	Superconductor	Nb ₃ Sn-NbTi
Confinement time (s)	3.3	Average current density	
Injection power (MW)	40	in conductor ($A\ mm^{-2}$)	70
(D-particle with 200keV)		Hoop force (ton/coil)	230,000
Toroidal field (T)	6.0	Centering force (ton/coil)	90,000
Safety factor	2.0	Lateral force (ton·m/coil)	100,000
Polooidal beta	2.1	Vertical field magnet	
Toroidal beta	0.035	Magnetomotive force (MAT)	24.0
Plasma current (MA)	10.4	Field intensity at plasma center (T)	0.44
Reactor structure		Stored energy (GJ)	4.6
Reactor module / Reactor	12	Primary winding	
Blanket cells / Reactor module	380	Magnetomotive force (MAT)	126
Injection and evacuation hole		Maximum field intensity (T)	8.5
/ Reactor module	1	Stored energy (GJ)	13.8
Nominal maximum 1st wall Temp.(°C)	680	Flux change (Wb)	410
Materials		Neutral beam injector	
Structural material	Mo alloy	Deutrium beam energy (keV)	200
Blanket fertile material	Li ₂ O	Ion beam output (MW)	290
Neutronics		Injection power (MW)	40
Neutron current at 1st wall		Total power efficiency	0.26
(10^{13} n $cm^{-2}s^{-1}$)	5.71	Cooling system	
Neutron wall loading (MW m^{-2})	1.29	Coolant (20 kg cm^{-2})	He
First wall displacement		Inlet / Outlet temperature (°C)	350/650
damage rate (dpa y^{-1})	6.4	Flow rate (kg s^{-1})	1270
Maximum helium production rate		Secondary system	Steam cycle
in first wall (appm y^{-1})	250	Operation	
Maximum hydrogen production rate		Operation period (s)	6000
in first wall (appm y^{-1})	566	Full power operation time (s)	5880
Tritium breeding ratio	1.24		
Nuclear heating			
per DT neutron (MeV n^{-1})	15.9		
Total induced activity of shutdown (Ci)			
(after two years operation)	5.4×10^9		

Table 1.2 各部の放射線量

1. 炉運転中		
	中性子 (n/cm ² sec)	γ線 (γ/cm ² sec)
ブランケット内壁	7×10^{14}	1×10^{14}
ブランケット外壁	1×10^{12}	1.2×10^{11}
遮蔽壁外表面	1×10^7	1×10^6
トロイダルコイル外表面	3×10^2	1×10^1
2. 炉停止時 (2年間運転, 冷却1週間後)		
全崩壊量	$8 \times 10^8 \text{Ci}^*)$	
	γ線 (rem/hour)	
ブランケット内側	6×10^5	
ブランケット-遮蔽壁間	2×10^2	
遮蔽壁外表面	9×10^{-4}	
トロイダルコイル内表面	1×10^{-2}	
トロイダルコイル外表面	1×10^{-6}	

データは文献¹⁾による

*) は文献²⁾による

2. 核融合炉の解体と炉ユニットの取替

2.1 概 要

本章では炉を解体し、炉ユニットを修理室に移送するまでを取扱い、炉の解体作業機械、解体した炉ユニットを炉室に引出す取出機および炉室から取出した炉ユニットを修理室に移送する旋回台車に分けて、問題点を検討し、現有の技術を前提として具体的な装置を提案する。

炉解体の問題点としては、被解体物が超重量物であること、解体場所が広域であること、作業空間に制限を受けることおよび放射線雰囲気下であるため人間が直接被解体物に近づく時間に制限を受けることなどがあげられ、各解体作業に対し、これら問題点を具体的に検討することが必要であろう。

取出機の問題点としては、重量物の移送方法と停止据付精度があげられる。前者に関しては、適正な移送方法と不整磁場を考慮した使用材料の検討が、後者に関しては炉ユニット製作時の加工精度、移送案内、停止時の位置決めなどを考慮した総合的な検討が必要であろう。

旋回台車の問題点としては、炉室から修理室へ移送する場合の放射線の遮蔽方法およびトリチウム漏洩防止方法、遮蔽壁を含めると移送重量約 20,000 トンと試算される超重量物の旋回移送方法があげられる。これら問題点の検討に先だち、本節では、炉の解体と炉ユニット移送装置の設計条件と基本構想を明らかにする。

2.1.1 設計条件

炉の解体と移送装置の試設計を進めるにあたって、想定した炉ユニットの設計条件を明らかにする。

(1) 炉ユニットの重量

炉ユニットはブランケットを内蔵する炉心部と、イオン源を接続するポート部の 2 つの剛体を接続部で連結した構造物と考え、炉ユニット及びその他の取扱う機器の重量を Table 2.1 の如く設定した。

(2) 使用材料の制限

磁場中の機械であるので、不整磁場を極力少なくするため、金属材料は非磁性材を使用するものとする。従って、歯車、車輪など動力伝達用機素の材質も通常使用される高炭素鋼または合金鋼の使用をやめ、オーステナイト系ステンレス鋼または耐熱合金を採用する。

また、放射線の影響で、油は高分子化（粘度の増加または固化）、低分子化、ガス化および酸化され、その許容値は 10^7 rad と言われており⁸⁾、炉室内に作動油、または潤滑油を使用する機器を置くことは好ましくない。したがって、炉室内での動力源として油圧機器の採用は考えず、電動機を動力源として設計をおこなうこととした。同様の理由で、潤滑を必要とする玉軸受、コロ軸受などのコロガリ軸受も不採用とした。

(3) 炉ユニットの加工精度

炉ユニット端面の精度がどの程度に出来るかは、炉ユニットに互換性があるかどうか、また相隣る炉ユニットの端面が密着するかどうかによって真空排気時の外圧支持方法、真空シール部のシール方法および放射線遮蔽方法に影響する。これらは重大な問題であるが現時点で核融合炉完成時代の機械加工能力を予測し、炉ユニットの加工精度を判断することは困難である。

従って、ここでは機械設計上常識的に考えられている如く、広い面を全域に渡って完全に密着させる事は困難であるとの見地にたち、炉ユニット再組立時、新たな炉ユニットを組込んだ場合は、炉ユニット端面は密着しないと想定する。

将来、端面が密着し得る加工精度が得られれば、炉の解体再組立はより容易になるので、この想定は安全側である。

2.1.2 炉ユニットの構造

炉ユニットの解体と移送の設計の前提となる炉ユニットの構造について明らかにする。

(1) 炉ユニットの支持、固定

炉ユニットの配置図を Fig. 2.1 に示す。

(i) 炉ユニットの支持

運転時核融合炉は建屋基礎に直接設置されることが好ましいが、こうした場合、故障した炉ユニットを修理室に移送する時、取出機を炉ユニット下面に持込む必要がある。相隣る炉ユニットの真空シール部を切離した後、強い放射線下で炉ユニットを取出機の移動台車を装入出来るまでジャッキアップすることは、人間が近づけないこと、狭い作業空間に自動作業機械を持ち込むことの困難さ（特に炉心部）を考えれば不可能に近い。

したがって、本設計では各炉ユニットに取出機の移動台車を取付けたままにしておくものとし、電磁力、地震などの外力に対して充分耐え得るよう、また移動台車の車輪が永久変形を起こさないよう定位置に移送し、真空シール部を遮蔽した後移動台車と床面の間をウエッジにより支持する構造とする。

(ii) 放射線遮蔽壁の支持と固定

放射線遮蔽壁は、取出機の移動台車にブランケットにより支持する構造とする。放射線遮蔽壁には外圧によるピンチ力に加え、ポロイダル電流遮断時に遮蔽壁に流れる渦電流により大きな電磁力が働くと考えられる。したがって遮蔽壁には強固な位置決めと固定が要求される。取出機の挿入ストローク端にはストップを設けることはもちろんであるが、遮蔽壁の重心が高いため、このままでは、炉ユニットに働く外圧により生ずるモーメントは自重で支持し得るものの、電磁力が働いた場合、もしくは地震時の転倒モーメントに耐え得ないであろう。したがって相隣る遮蔽壁の端面を密着させる必要がある。

一方、前節で述べた如く、遮蔽壁を機械加工したままでは端面を密着させることは困難であろう。さらに熱サイクルによる経年歪の発生等を考えると、端面を積極的に密着させる工夫が必要である。

ここでは、遮蔽壁のトラス内側に端面補正用の鉛ライナを貼り、再組立後外圧で端面を密着させる構造とし、ストップ端はシムにより炉ユニット端面とストップ端が一致する

よう調整するものとする。

なお、このライナには放射線遮蔽と、炉ユニット出入時の遮蔽壁端面の焼付防止の役目も兼ねさせるものとする。

(iii) トロイダルコイルの支持

トロイダルコイルは24等配されているものとし、2個をユニットとして取出機の移動台車上にブランケットによりそれぞれ支持する構造とする。

トロイダルコイルは遮蔽壁に比して柔構造であり、据付時の精度は放射線遮蔽壁のそれよりもさらに悪いと考えられる。従って、炉ユニット挿入時、相隣るトロイダルコイルの接続部端面と、相隣る放射線遮蔽壁の端面を同時に密着させることは困難であると考えられる。

したがって、トロイダルコイルは移動台車上で独自に移動し得る構造とする。すなわち炉ユニット取出時、また挿入時トロイダルコイルをジャッキを用いて半径方向に幾分後退させておき、移動時の相隣るトロイダルコイルとの干渉による損傷を防止するものとする。

(2) 放射線シールと真空シール

遮蔽壁とトロイダルコイルの間隙はトラス中心寄りでは200mmしかなく、相隣る炉ユニットの遮蔽壁端面に間隙が有る場合、この間隙を通して洩れる中性子を遮蔽する遮蔽材を装着できない。現実的には、相隣る遮蔽壁の端面を完全に密着させる事は困難であるので、ここでは外からの遮蔽ブロックの取付が困難なトラス内側は遮蔽壁端面に250mm幅の鉛板を埋め込んでおき、鉛板を密着させることとし、トラス外側は遮蔽壁端面の間隙を許容するものとし、シール溶接後、遮蔽ブロックを取付けるものとする。

真空シールは遮蔽壁外周で行なうものとし、相隣る遮蔽壁の端面を薄板により、シール溶接する方法によるものとする。放射線遮蔽と真空シール部をFig. 2.2に示す。

2.1.3 取替作業手順

炉ユニットの取り出し手順を下記に示す。但し、配線、配管の解体は適宜マニピュレータで行なえるものとし、記載を省略した。

作業項目	作業概要
① 下部ポロイダルコイルを吊下げる	天井クレーンを用いてピットに吊り下げる(1000トン)。取付ボルトの取りはずし、渡り線の分離は人力を考慮する。
② レール保護板を取付ける	保護板は床面上を移動する炉室内作業車により取付ける(重量5トン)。
③ 上部ポロイダルコイルの吊り上げ	上部ポロイダルコイルを天井クレーンを用いて吊り上げ、炉心に仮置きする(1000トン)。取付ボルトの取りはずしは天井クレーンに付設したゴンドラのマニピュレータを用いるものとする。
④ トロイダルコイルの移動	油圧ジャッキを持ち込み、トロイダルコイルを20mm程度外側へ移動させる。 渡り線、巻き戻し線及びコイル支持部の分離は現状では人力を考慮する。
⑤ 台車連結用ブラケットの取付け	台車連結用ブラケットは天井クレーンで吊下げる。締付ボルトの締結は人力によるものとする。
⑥ 台車ジャッキをゆるめ、荷重を車輪で受ける	くさび移動ネジにより、ジャッキダウンする。 人力によるものとする。
⑦ 遮蔽連結ボルトをゆるめ、真空シール部の遮蔽ブロックを取除く	上部はゴンドラのマニピュレータで、下部は炉室内作業車のマニピュレータを用いる。
⑧ 真空シール解除装置を取付ける	炉室内作業車又はマニピュレータにより固定側の遮蔽壁に取付ける
⑨ 周辺の整理	配線、配管など炉ユニット引出しの邪魔になるものを取除きレール面を点検した後、作業車は走行の邪魔にならぬ場所に待避する。
⑩ 旋回台車を炉室へ連結する	旋回台車を解体する炉ユニットの所定の位置に旋回移動させ、遮蔽室移動装置で旋回台車端面と炉室端面を密着させる。
⑪ 炉室扉を開く	炉室扉と旋回台車遮蔽室扉を開け炉室と旋回台車遮蔽室と連絡する
⑫ 取出機の駆動装置を走行台車に取付ける	旋回台車上の駆動装置を炉室に移動し走行台車に連結する
⑬ 真空シールの切断	自動切断溶接機によりシール部を切断する
⑭ 炉ユニットを旋回台車上に移動する	取出機により移動する

⑮ 炉室扉を閉める	炉室扉及び旋回台車遮蔽室の扉を閉める
⑯ 旋回台車を炉室から切離す	遮蔽室移動装置で旋回台車の上面板を移動させ、炉室と旋回台車の連結を切離す。
⑰ 旋回移動	炉ユニットを旋回させ修理室の前へ移送する
⑱ 旋回台車を修理室に連結する	ガイドプッシャーで旋回台車端面と修理室端面を密着させ、遮蔽扉を開く
㉑ 修理室へ移送	取出機により炉ユニットを修理室へ移送する

2.2 炉ユニット取出しの準備作業

炉ユニット取出しに先だち、各種結合の解除が必要である。これらを4項目に分類する。

- ①機械的結合の解除 各種ボルト類
- ②配線配管の結合解除 トロイダルコイル、ポロイダルコイル、渡り線、冷却配管など
- ③重量物の移動 トロイダルコイル、ポロイダルコイル、ブラケット類
- ④真空シールの解除

機械的結合に関しては、人力程度で解体可能な構造、規模であることが望ましい。それぞれの作業に専用の解体用機械を準備するのも一方法であるが空間的制約を受け、解体機械が近寄れない場合が生じた時、人力にたよれるからである。本設計では、機械的結合の解除は、真空シール部の遮蔽を取りはずす前に、人力により作業を行い得るものと考え、個々の作業に関しては2,3の問題を除いて深く検討しない。

配線、配管の解除に関しては、その構造寸法が現段階では不明であるため、検討を省略する。現実にはトロイダルコイル、ポロイダルコイルの熱絶縁を含めた渡り線、巻戻し線の結合の解除が比較的困難と思われるので今後詳細検討が必要であろう。

ここでは、炉ユニット取出しの準備作業に関しては、主として重量物の移動と真空シールの解除について検討をおこなうこととする。

2.2.1 機械的結合の解除

炉ユニットの機械的結合部は多岐にわたるが、そのほとんどは人力によって解体可能と思われる。従ってここでは比較的重量物を取扱うと思われるトロイダルコイル締付ボルトの解体および放射線遮蔽壁連結ボルトの解体について検討する。

(1) トロイダルコイル締付ボルトの解体

相隣るトロイダルコイルの連結部の分離は、渡り線、巻戻し線、コイルに働く電磁力の支持部材およびこれら連結部をつつむクライオスタットの解体を要し相当の困難性が推察される。

さらに、極低温に冷却されていた超電導トロイダルコイルを解体修理のため常温に戻した時のLH₂の回収、再冷却の問題など、トロイダルコイルの解体には検討すべき問題が多々存在する。

ここでは、トロイダルコイル連結部の分離は別途検討されるものとし、トロイダルコイルを取出機の移動台車に締付けているボルトの解体について検討する。

水平加速度 0.3 G の地震を考えた時、トロイダルコイルに働く転倒モーメントは 4.2×10^8 kg・cm となる。1 つのトロイダルコイルを 8 本のボルトで締付けるとし、ボルトの許容応力を 20 kg/mm^2 とすれば、所要ボルト直径は $100 \text{ mm}\phi$ となる。

一般に人力により締付可能なボルト径は $100 \text{ mm}\phi$ と言われているのでトロイダルコイル締付ボルトの解体は人力で可能である。

(2) 放射線遮蔽壁直結ボルトの解体

外圧による求心力 713 トン (1 炉ユニット当り) は放射線遮蔽壁炉心部の直線部分に貼付けた幅 250 mm の鉛ライナで支持する。ライナの全長は 19 m 程度となるので、平均面圧は 0.3 kg/mm^2 程度である。鉛の耐力は 0.85 kg/mm^2 (標準値) であり、外圧には耐え得るが、電磁力、又は地震時を想定した場合炉心部の外周弧部分にフランジを付け、フランジ間にスペーサをはさんでボルトで締付ける構造とする。

いま、水平加速度 0.3 G の地震を想定した場合、ボルト本数 40 本、ボルト直径 $100 \text{ mm}\phi$ とすれば、ボルトの応力は 6.7 kg/mm^2 程度となり充分耐え得る。

従って放射線遮蔽壁連結ボルトも人力で解体可能である。

(3) 問題点

機械的結合部は、締結ボルト径を $100 \text{ mm}\phi$ 以下にすることが可能と思われるので人力で解体可能である。

従って、機械的結合の解除に関しては大きな問題は無いと思われる。

2.2.2 重量物の移動

炉ユニットを引出す為には干渉する機器を退避させ、ウエッジで床面に支持されていた取出機の移動台車を着床させ車輪で炉ユニット自重を受けるようにする必要がある。

干渉機器としてはトロイダルコイル連結部および上下の大径ポロイダルコイルがある。このうちトロイダルコイルに関しては、移動台車上を微調整するだけであり、摺動面の摩擦係数を $\mu = 0.2$ としても 140 トン程度の推力を与えれば良く、市販のジャッキを必要時持込んで使用すればさして困難でない。従ってここでは、ポロイダルコイルの昇降と、移動台車の着床について検討する。

(1) ポロイダルコイルの昇降

上下の大径ポロイダルコイル群は、上下単位でそれぞれ機械的に連結して昇降させた方が、再組付時の位置決め点、また渡り線の解体が不用になる点などを考えれば有利である。

大径コイル群は上下それぞれ 1000 トン、最外周コイル径 37000 mm と見積る。これらコイル群を炉ユニット引出時、干渉しない位置まで退避させるには上側大径コイル群で 5500 mm、下側大径コイル群で 10800 mm 移動させる必要がある。

昇降装置として、液圧シリンダによる昇降、巻上げリフト装置、天井クレーンの利用などが考えられ、それぞれ技術的には可能であるが、前二者はコイル自身が破損した場合、昇降装置を取除かねば予備コイルを所定の位置に持ち込めないのが不便である。

従って、ここでは天井クレーンによる昇降を考える。また上大径コイルの昇降は、空間的制約が無く昇降は容易であるので、以下では下大径ポロイダルコイルについて検討する。

Fig. 2.3 にポロイダルコイル解体の概念を示す。

(i) ポロイダルコイルに働く応力

6点支持の吊下治具を用いてコイル群を吊下す時、自重によりコイルに発生する応力を算出する。

支点に働く曲げモーメントを M_A とすれば

$$M_A = \sum_{i=1}^n \frac{\theta_i}{2\pi} R W_i \sin \theta_i$$

n 支点の個数

θ : 支点と荷重作用点のなす角度

W : 支点反力

R : コイル半径

$n = 6$, $R = 18500$ mm コイル断面寸法 1000 mm \times 600 mm とすれば、コイルに働く最大曲げ応力は支点部に発生し、 2.8 kg/mm² となり、6点支持で充分である。

(ii) 走行用レール保護板

コイル群は天井クレーンにより床面下に設けられたポロイダルコイル収納溝に吊下ろしコイル収納後走行用レール保護板を持ち込んで移動台車の軌道を完成させるものとする。この保護板の寸法について検討する。

収納溝の幅を $L = 3000$ mm とすれば、最大モーメント M は移動台車の車輪が溝の中央に來た時に発生し、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{4} WL \\ &= 1.73 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{cm} \end{aligned}$$

いま保護板を幅 $B = 1000$ mm, 高さ $h = 800$ mm, 板厚 $t = 25$ mmの箱型構造とすれば、保護板の最大曲げ応力 σ 及び中央の撓み δ はそれぞれ $\sigma = 5.66$ kg/mm², $\delta = 0.38$ mm となり強度的にはこの程度で充分である。なおこのとき、保護板の重量は 4800 kgとなる。

(2) 移動台車の着床

移動台車を昇降させるに要する力について検討する。

移動台車の着床は、移動台車車輪軸受部と床面の間にくさびを打ち込むことによりおこなう。

くさびは、各車輪軸受に備え付けるものとすれば、くさびを移動させるに要する力 F は次式で与えられる。

$$F = 2 \frac{Q}{\cos \alpha} (\mu \cdot \cos \alpha + \sin \alpha)$$

$$Q = \frac{W}{2N}$$

W : 炉ユニット重量 5000 トン

N : 車輪個数 22

α : くさび角度	3°
μ : まさつ係数	0.05

$$\therefore F = 22.1 \text{ トン}$$

この推力をM 48の押しネジで得るとすれば所要トルクTは次式で与えられる。

$$T = F \cdot r \frac{h + 2\pi r \mu}{2\pi r - h \mu}$$

r : ボルト半径	24
h : ボルトリード	5 mm
μ : 摩擦係数	0.05

$$\therefore T = 1783 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

一般に腕力で締め得るトルクは3000 kg・cm程度であるので充分人力で締め得る。

従って、移動台車の昇降は人力でウエッジを順次昇降させることによりおこなうことが出来る。

(3) 問題点

トロイダルコイルの微動、移動台車の着床に関しては、人力で問題なくおこなえ、移動のため持込む機材についても人力で搬送し得る程度のもので充分であろう。

大径トロイダルコイルの昇降に関しても、天井クレーンを用いれば高所作業であることを除いて特に問題は無いと考える。

重量物の移動で問題となるのは、炉ユニット下半面に取付けられている部品、たとえば放射線遮蔽壁接続部の遮蔽ブロック、取出料挿入端ストッパ、レール保護板などの移動であろう。これらは天井クレーンが使用出来ず、相当の重量部品であるので、それぞれに適した自動作業機械を設計する必要がある。

2.2.3 真空シールの解除

真空シール解除のため、炉ユニット端面部を遮蔽する遮蔽ブロックを取除いた後、炉室は強い放射線下にさらされる。従って遮蔽ブロック取除き以降の作業はすべて自動化する必要がある。

遮蔽ブロック取除作業に関しては2.5節にゆずり、本項では真空シール部の概略寸法、自動真空シール解除装置について検討する。

(1) 真空シール部の構造

真空シールはFig. 2.4に示す如く、遮蔽壁表面に溶接されたステンレス鋼薄板を互に溶接しておこなう。この薄板は切りはなした後は夫々の側へ若干収縮後退することが望ましい。これは炉ユニットを取り出す際、薄板部を傷つけるのを防ぐためである。

板厚を $t = 1.5 \text{ mm}$ とすれば、外圧により薄板に発生する応力は最も厳しい条件として、たてリブを無視した片持ち梁を仮定しても、 $\sigma = 3 \text{ kg/mm}^2$ 程度であり十分な強度を有する。

(2) 真空シール解除手順

真空シールの解除は自動切断溶接機を真空遮蔽壁外周にあるガイドレール上に取付け、自動的に真空シール部を一周させて切断する。

再組立時の真空シールは次の手順でおこなうものとする。

- ① 自動切断溶接機をガイドレール上に取付ける。
- ② 薄板を圧着ローラで密着させ、端面を揃えるための切断と溶接を同時におこなう。
- ③ 自動切断溶接機を遮蔽壁から取りはずす。
- ④ 切断機によりトリムした切粉を取り除く。
- ⑤ テレビカメラを搭載した走行台車をガイドレールに取付け一周させることにより溶接部を目視検査する。
- ⑥ 洩れ検出器により検査する。

従って真空シール解除装置としては、自動切断溶接機と自動検査機について検討すれば良い。

(3) 真空シール解除装置

(i) 自動切断溶接機

真空シール解除装置を構成する機器は、既に実用化されており単品では特に技術的問題はない。真空シール解除装置として問題となるのは、遮蔽壁とトロイダルコイルとの隙間 200 mm を通過し得る程度に装置が小型化し得るかどうかである。

ここでは、搭載機器要素の最も多い自動切断溶接機についてその概略寸法を検討する。

(イ) 走行台車

走行台車の機器重量として次の値を仮定する。

台車ベース板	20 kg
シャー	6 kg
車輪及駆動機構	10 kg
溶接トーチ, その他	10 kg
駆動モータ	8 kg
ギヤボックス	6 kg
合計	60 kg

従って、自動切断機の総重量として 100 kg を仮定する。

走行速度は溶接速度により決まり 200 mm/min とする。

ただし、走行台車には、シールドガス用の配管が接続されているので、シール部一周後、走行台車はもと来た道を引きかえす必要がある。復路は高速で走行させることが可能であるので 1 m/min とする。この時の動力 P を概算する。

$$P = \frac{W \cdot v}{\eta}$$

η : 効率 50 %

W : 台車重量 100 kg

v : 走行速度 1000 mm/min

$$\therefore P = 3.32 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{sec} \doteq 32.7 \text{ joule} / \text{sec}$$

従って走行台車の動力としては 40 W を考えればよい。走行は遮蔽壁に設けたレール溝をコーン型車輪が圧着しつつ回転することによりおこなう。

走行速度は溶接姿勢の変化に対応し、プログラム制御で変え得るものとし、溶接点の

検出、制御は、シール薄板端部を差動トランス型ナライ装置でフィードバック制御するものとする。これら制御は通常の自動溶接機でもコンパクトな装置でおこなわれており従来技術がそのまま応力出来る。

走行台車で問題となるのはケーブルの処理である。溶接距離は40m程度となり台車にケーブルを接続した場合、ケーブルの自重、走行時のケーブルの摺動抵抗などで走行台車重量に匹敵する動力損失を生じる。

従って本装置では、遮蔽壁に設けたシューから、走行台車に取付けたブラシを介して動力を得る構造を採用する。

(ロ) 圧着ローラ

シール部の切断および溶接時、2枚のシール材を圧着ローラで密着させる圧着ローラ間隔を40mmとし、シール材の間隙を4mmとすれば、シール材を密着させるに要するローラの圧下力は50kg程度である。この力はコイルバネで容易に得られる。

なお、圧着ローラ直径を20mmとした時、面圧は 42.8 kg/mm^2 である。

(ハ) 切断機

溶接部の切断はフライス加工、ニブリング加工、またはシャー加工が考えられ、いずれも小型のポータブル工具が市販されており使用可能である。

ここでは切粉の処理の容易さを考慮し、シャーを採用する。

切断能力3mmの時、動力420W、重量6kg程度である。

切粉は長い帯状になって出て来るので適宜切断し、取出すことは比較的容易であろう。

(ニ) 溶接機

溶接は自動TIG溶接とし、切断直後シール材の両側を圧着ローラで押え、2枚のシール材を密着させた状態で自動溶接する。

溶接条件としては、空冷式溶接トーチを使用し、溶接電流100~150A、溶接速度200~250mm/min程度で溶接棒は不用とする。

自動切断溶接機概念図をFig. 2.5に示す。

(ii) 自動検査機

走行台車は自動切断溶接機と同様のものを考えれば良い。

検査方法に関しては、テレビカメラによる目視、漏洩検出器による検査が考えられるがそれぞれ問題点があり、適用の選択は今後の検討を待つこととする。

(イ) テレビカメラによる目視

カラーチェック等による溶接線の目視検査を対象とする。

炉停止時とは云え、 γ 線等の放射線が出ているのでテレビカメラが使用出来るか否かに関しては多少疑問が残る。

テレビカメラが使用出来ない場合は、同様の理由でX線探傷も使用出来ないがファイバースコープは長さの制約がなければ使用可能である。

(ロ) 漏洩検出器

漏洩の有無の検査方法としては次の3法が考えられるが、それぞれ欠点があり、適用には今後の詳細な検討が必要である。

① He リークディテクタによる検出(1)

真空容器内にHeを充満させ、外側から先端を絞ったプローブを溶接線にそって走査させ、漏れの有無を検出する方法が最も装置としては容易であるが、感度が悪く小さい漏れが検出できない。

② He リークディテクタによる検出(2)

溶接部をテープシールで覆い、溶接部とテープシールの間にHeガスを導入し、真空容器を排気して検出する方法。真空外覆法として最も一般的であるが、真空容器の容量が大きい場合、検出までに時間がかかり、漏れ箇所が分からない。

③ He を用いない方法

例えばトリチウムを真空容器に導入し、漏れたトリチウムの β 線をカウントする方法などが考えられる。

2.2.4 まとめ

機械的結合の解除に関しては放射線雰囲気下の作業でないので、適当な省力治工具を使用することにより、人力で解除可能であろう。

また、核融合炉設計時機械的結合部は、可能な限り人力で解体可能な構造にすることが望ましい。

重量物の移動に関しても、天井クレーンを使用することを前提にすれば、ポロイダルコイル、トロイダルコイル等の大型超重量物の移動には大きな問題は無いと考える。ただ、炉ユニット下面に取付けられている遮蔽ブロック、レール保護板等は重量が1～5トン程度になると考えられこれら部品の移動には天井クレーンが使用出来ないのも、それぞれ専用の運搬機械が必要と考えられる。炉設計時、作業空間、運搬機械の能力を考慮して炉の設計を行なうことが必要である。

なおポロイダルコイル自身が損傷した場合、炉中心の円筒コイル群は炉室外へ搬出可能であるが、大径のポロイダルコイルに関しては搬出不能である。大径ポロイダルコイルが損傷しない余裕のある設計をおこない、もし損傷した場合は下側大径ポロイダルコイルに付いては床下に予備コイルをあらかじめ貯蔵しておく、上側大径ポロイダルコイルについては、炉室天井を一部取除き屋外から予備コイルを持ち込むなどの対策も検討しておく必要がある。

真空シールの解除に関してはFig. 2.6に示す如く設計寸法上は可能である。ただ、放射線遮蔽壁に設けたガイドレールの加工誤差や解除装置各部のバックラッシュなどの及ぼす溶接の信頼性については試作機により確認する必要がある。また溶接後の検査方法に関しては、現在の技術では完全な検査が行えないと思われるので今後の技術開発が必要であると考えられる。

2.3 取出機的设计

解体した炉ユニットを炉室から引出し、旋回台車を介して修理室へ移送するため取出機をもうける。

取出し方法としては、車輪による方法、エヤベアリングによる方法が考えられるが、炉心部の床面積が少ないため、エヤベアリングでは各ベアリングユニットに均等荷重がかからず不安定と

なるので好ましくない。従ってここでは車輪による方式のみを検討する。

取出機は移動台車と駆動装置とから構成する。

移動台車は12個の炉ユニットのそれぞれに取付けるものとし、炉ユニットの炉心部とポート部をそれぞれ独立した台車A、台車Bで支える構造とする。走行時は台車A、台車Bをブラケットにより連結し、炉心部とポート部の接続部の遮蔽壁に無理な力が働かないよう保護する。

駆動装置は夫々の炉ユニットに設けてもよいが、自走式の駆動装置1台を修理すべき炉ユニットにそのつど連結して使用するのが経済的である。

駆動源としては油圧機器が使用出来ないので、床面に設けたラックに噛合うピニオンを電動機によって回転させる方式とする。

組入時の位置決めは、炉ユニット挿入端ストッパに押付けて停止させるものとし、押付けは電動機出力軸に連結した摩擦クラッチをスリップさせておこなうものとする。

以下の項では、移動台車と駆動装置の詳細について検討する。

2.3.1 移動台車

(1) 車輪荷重

移動台車自身の重量を、台車A 150トン、台車B 300トンとすれば、車輪で支持すべき荷重はそれぞれ2450トン、3000トンである。

車輪の許容支持荷重はDINによれば(1)式で与えられる。

$$P = \kappa \cdot B \cdot D \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \quad (1)$$

κ 材料の面圧係数

B レール踏面有効幅

D 車輪直径

C_1 材料係数

C_2 回転係数

C_3 作業時間係数

P 車輪荷重

ここで、 κC_1 は、Pittingを起こさない許容Herz面圧である。DINでは通常の車輪材質について κC_1 値を実験的に決定しているが、非磁性鋼の κC_1 値については規定が無い。

ここでは、機械構造用炭素鋼、炭素鋼鑄鋼など熱処理をしない炭素鋼の許容ヘルツ面圧が降伏応力の1.8~2.0倍程度であることから、非磁性鋼の許容ヘルツ面圧についても耐力の1.8倍を許容値と想定する。

設計上の許容値としては、移動台車走行時、鉛直加速度0.5Gの地震が起こった場合を想定し許容面圧Pを(2)式で与えるものとする。

$$P = \frac{1.8 \sigma_{0.2}}{1.5} = 1.2 \sigma_{0.2} \quad (2)$$

移動台車の車輪材質として、オーステナイト系ステンレス鋼YUS 304-Nを選び、その機械的性質及び許容面圧をTable 2.2に示す。

支持荷重を車輪に均等に支持し得る台車フレームを有すること、移動台車フレームと床面の間を保守用マニピュレータが通り抜け得る空間を有すること、及び床面レールの共用性を考慮し、設計した移動台車の車輪構造を Fig. 2.7 に、また車輪の仕様を Table 2.3 に示す。

(2) 車輪軸受

車輪荷重は 127 kg/mm^2 程度であり、軸受荷重としては特に問題となる値ではない。ただ軸受部は放射線を受けるので、潤滑油を必要とする従来の軸受は使用出来ない。

潤滑油を必要としない軸受として、軸受表面に MoS_2 又は WS_2 の固体潤滑薄膜をコーティングした軸受が近年高温下又は真空中などの潤滑油の使用出来ない場所の軸受として採用されている。これら軸受は放射線の影響を受けないので、移動台車の軸受として使用可能である。 MoS_2 薄膜の焼付面圧は大気圧下で 204 kg/mm^2 であるとの報告⁴⁾もあり、面圧のうえでも全く問題ない。

(3) 駆動力

車輪の走行抵抗は次式で与えられる。

$$W_r = \frac{Q}{R} \left(\mu \frac{d}{2} + f \right) \quad (2)$$

$$f = 1.522 \sqrt{\frac{Q \cdot R}{E \cdot B}} \quad (3)$$

Q：車軸に働く荷重

R：車輪半径

d：軸受部の車軸直径

μ ：車軸周上の摩擦抵抗

W_r ：走行抵抗

f：ヘルツ公式により決まる偏心量

B：車輪幅

E：横弾性係数

軸受の静摩擦係数を $\mu = 0.2$ 、動摩擦係数を $\mu = 0.1$ とし、走行台車 A、台車 B の走行抵抗を算出した結果を Table 2.4 に示す。

(4) 問題点

移動台車に関しては大きな問題点はないと考えられる。ただ今後詳細な検討を進めるに当たっては、次の点に注意する必要がある。

第一は、移動台車への炉ユニットの取付けである。炉心部では Fig. 2.8 に示す如く、遮蔽壁支持ブラケットとトロイダルコイル支持ブラケットで台車 A の上面をほとんど占めており、V5 コイルの保守解体には、わずかに人間が近づける程度の空間しか残されていないこと、トロイダルコイル自身が損傷した時、炉心部遮蔽壁支持ブラケットの一部を取除かねばならず、このとき炉心部が不安定になることなどが問題となる。

また、炉ユニットの機械加工精度とも関連して、台車 A、台車 B に分かれた床面への炉ユニットの据付についてもレベル、振れなど検討を要する問題が存在する。

第二に、床面と車輪との接触である。床面の平面度が悪いと車輪の負荷が不均一となり、水

平度が悪い場合は、斜面を走行することになり走行抵抗が変動する。ただこれらは、前者については車輪に次節に述べる如き負荷調整機構を追設し、後者に関しては動力に余裕をもうけておけば良いので本質的な問題では無いと考えられる。

車輪自身については面圧を低くするため、一般に使用される車輪に比して車輪幅を広くとっている。車輪と床面の接触面圧を一定に保つには、車輪外径をクラウニングするなど生産技術面の詳細な検討が必要である。

2.3.2 駆動装置

駆動を車輪駆動とした場合（駆動車輪の荷重）×（車輪と床面の摩擦係数）以上の駆動力を与えることは出来ない。

いま、所要駆動力：312トン、1個の車輪に掛かる荷重：250トン、摩擦係数0.2とすれば、ドライブする必要のある車輪個数は7個となり、台車Bの半分以上の車輪をドライブすることになり合理的でない。

従って、駆動方式は床面にラックを配し、これに噛合う駆動歯車を駆動するラック-ピニオン方式とする。

駆動装置の両端にピニオンを配することにより、台車走行時の蛇行を防止するイコライジング装置を兼ねることが出来るので有利である。

以下において駆動装置の概略寸法を検討する。

(1) 駆動歯車

歯車としては使用頻度が少ないので、曲げ強度のみを考慮すれば良い。Lewisの式により計算する。

$$P = k_b \cdot \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \xi_3 \cdot t \cdot b \cdot y$$

P : ピッチ円上の伝達可能接線力

k_b : 材料による許容応力

ξ_1 : 速度係数 $\xi_1 = \frac{3}{v+3}$ (v m/sec) $\xi_1 = 1$

ξ_2 : 荷重係数 $\xi_2 = 0.74$

ξ_3 : 噛合い係数 $\xi_3 = 1$

t : 円ピッチ $\pi m / 10$ $t = 14.14$

b : 歯幅 $b = 600$

y : 歯形係数 $y = 0.114$

使用材質としてインコネル625を考えた場合、許容応力は明確でないが一般の歯車材料との引張強さ及び硬さとの比較において $k_b = 2400 \text{ kg/mm}^2$ 程度は期待出来る。

モジュール $m = 45$ 、歯数 $Z = 30$ とすれば伝達可能接線力は $P = 173$ トンとなる。

所要駆動力は312トンゆえ、上記の歯車2個で駆動すればよい。

駆動歯車の仕様をTable 2.5に示す。

(2) 減速機構

定位置から旋回台車までの移動距離は約 38 m である。これを 30 分で移動させるとすれば、取出機の走行速度は 20 mm/sec となる。

いま、電動機回転数を 4P 1500 rpm とすれば、電動機から駆動歯車までの所要減速比は $R=10600$ となる。

大減速比を得られる減速機の一つであるサイクロ減速機では、現在低速軸トルク 10 ton-m 減速比 1/43 の減速機が市販されている。本機をベースにして減速機構を試算する。

減速機構は (1/17×1/43) の 2 段サイクロ減速機と減速比 1/7.25 の 3 段歯車減速機で構成する。

所要駆動力を W_r 312 トンとして各軸の所要トルク及びモータ 動力を算出した結果を Table 2.6 に示す。

駆動装置は、核融合炉運転時は炉室外に置かれるので、ラックと噛合う歯車以外材質上の制限はない。

サイクロ減速機の出力軸定格トルクは 9 ton・m ゆえ使用可能である。また歯車減速機に関しても、現有の設備で充分製作可能である。

減速機構の歯車列を Fig. 2.9 に、また駆動装置の外形を Fig. 2.10 に示す。

(3) 問題点

駆動装置に関しては、特に問題なく、現有の技術能力で充分製作可能である。

2.3.3 まとめ

取出機に関しては、移動台車、駆動装置とも本質的な問題はない。

ただ今回の炉ユニットの如く、機械加工された大形重量物を高精度で移動させた実績は無いので生産技術面ではさらに多くの検討が必要であろう。

2.4 旋回台車の設計

旋回台車とは、炉ユニットを炉室から修理室へ導く台車である。炉ユニット全体を囲う遮蔽室を有し、炉室外を旋回する。また、炉室及び修理室との密着位置決め機能をも有する。

炉ユニットを積載した旋回台車の重量は約 19000 トンにもなり、この超重量物の搬送には様々な方式が考えられる。従来から用いられている車輪方式、最近開発された圧縮空気を利用したエアベアリング方式、さらには磁気浮上方式等がある。しかし、放射化された炉ユニットの搬送を考慮すると、高信頼性並びに故障時、炉ユニットを載せたまま修理が可能であることなどが要求される。

これらの中で磁気浮上方式に関しては、超電導体冷却用ヘリウムが容易に入手できる点や、他の方法に比較して、駆動力が極端に少なくすむ点などから考慮する価値はあるが、まだまだ未開発な点が多く、採用するには時期尚早である。

したがって車輪方式とエアベアリング方式の 2 案を現実的な立場から検討した。共通的な問題点としては遮蔽室の大きさが関係する。車輪方式では、車輪面圧、軸受強度、旋回駆動、遮蔽室

の移動について検討した。エアベアリング方式では、エアベアリングの原理、支え圧、旋回駆動等について検討した。

以下の項ではこれらについて具体的に述べる。

2.4.1 遮蔽室の検討

炉ユニット移送時、炉端面から強い放射線が出る。この放射線遮蔽には端面に遮蔽材を密着させる方法及び旋回台車上に遮蔽室をもうけ、炉ユニット全体を囲う方法が考えられるが、ここでは安全を期して後者について検討する。

遮蔽対象としては、ブランケット第1壁からの γ 線を考え、下記の値を想定した。

放射線量	6×10^5 R/hr
エネルギー	平均 1 MeV
遮蔽室外許容放射線量	2.5 mR/hr

いま、遮蔽材料として、鉛、コンクリート、ステンレス鋼を考え、それぞれの所要遮蔽厚さを算出した結果を Table 2.7 に示す。

一方、遮蔽室の形状は、炉ユニットとの取合から内法寸法で 33 m (高さ) \times 11 m (幅) \times 29 m (高さ) となり、構造物としての強度が要求される。

従ってここでは、遮蔽厚さ 1000 mm とし、厚さ 100 mm のステンレス鋼の間にコンクリートを流し込んだ遮蔽壁を想定する。

このとき、遮蔽室重量は約 10000 トンとなる。

遮蔽室としては、このほかに耐震性を考慮した強度計算と遮蔽室扉の開閉装置の検討が必要であるが、前者に関しては、空間的に余裕があり所定の強度を持たせることが可能と考えられる。また、後者に関しても、巻上ウインチ機構を使用することにより解決されると考えられる。

2.4.2 車輪方式による旋回台車

車輪式旋回台車は、所定の位置で遮蔽室を炉室または修理室に気密接続させる。遮蔽室移動装置を備えた自走式台車である。

旋回運動は旋回軌道の内、外周端壁に設けられたラックに噛合う台車上のピニオンを電動機で駆動することによりおこなう。また台車の4隅には旋回運動のガイドをするプッシャー式ガイドローラを設け、歯車への負荷を軽減させる構造とする。

遮蔽室移動装置は旋回台車に乗っている遮蔽室を、炉室または修理室に気密接続させると共に炉室又は修理室の取出機用レールと、旋回台車のレール面を密着させるもので、ここで支持された遮蔽室をラックピニオンで移動させる構造とする。

以下において、旋回台車および遮蔽室移動装置の概略寸法を検討する。

(1) 旋回台車

(i) 車輪荷重

旋回移動すべき重量を下記の如く想定する。

遮蔽室	10,000トン
炉ユニット	6,000トン
旋回台車	3,000トン
計	19,000トン

従って車輪に働く総荷重を 19,000 トンとして設計する。

取出機と同程度のヘルツ面圧を許容するとして算出した車輪の仕様を Table 2.8 に示す。

(ii) 車輪軸受

車輪は円錐型であり、取付を多少とも容易にするため軸受としては球面軸受とする。潤滑は取出機同様、 MoS_2 又は WS_2 の焼付薄膜によるものとする。軸受幅を 400 mm とすれば軸受面圧は 1.2 kg/mm^2 程度となり軸受荷重としては問題ない。

旋回台車は 80 個の車輪を使用し、かつ形状が円錐形で加工精度が幾分悪くなる事が考えられるので、そのままでは全ての車輪と床面が密着し均等な荷重を受けるとは考え難い。従って軸受の上部にアジャスト機構を設け車輪荷重の均一化を計る。アジャストは皿バネによるものとし、台車走行時 22.5 mm まで調整可能とする。

Fig. 2.11 に軸受部の構造を示す。

(iii) 駆動機構

(イ) 走行抵抗

軸径 $500 \phi \text{ mm}$ 、軸と車輪との間の摩擦係数を $\mu = 0.1$ とすれば、旋回台車の走行抵抗は取出機の場合と同じ式を用いて $W_r = 645$ トンとなる。

(ロ) 所要動力

いま、内・外周に設けたラックピニオンがそれぞれ走行抵抗の半を受け持つとし、台車の走行速度として旋回軌道半周を 3 時間で走行するとして、旋回軌道内・外周に設けたラックピニオンの所要動力を算出した結果を Table 2.9 に示す。

(ハ) 駆動歯車

ラックに噛合うピニオンは外周 3 個、内周 3 個の合計 6 個とし、それぞれ周期させた電動機により負荷が一定になるよう駆動されるものとする。

Lewis の曲げ強度式より決定した歯車の仕様を Table 2.10 に示す。

(2) 遮蔽室移動装置

(1) ころ面圧

ころに働く荷重は遮蔽室、炉ユニット及びころ自身であり約 16,300 トンである。この荷重を $500 \phi \text{ mm} \times 6,000 \text{ mm}$ のころ 30 本で受けるとすれば、ころの面圧 P は、 $P = 37.2 \text{ kg/mm}^2$ である。

(2) 駆動機構

走行抵抗は旋回台車と同じ式を用いて $W_r = 110$ トンとなる。この駆動力を得るには、Table 2.11 の仕様の歯車 4 個を使用すれば良い。また 10 mm/sec の速度で移動させるとすれば所要動力は 15 kw である。

(3) 固定用ジャッキ

炉室または修理室の取出機用レールと旋回台車のそれを連結し、炉ユニットを取出す時

レールの接続部をジャッキによって支持し、レールが炉ユニットの重量によって撓み走行抵抗が増大するのを防止する。

ジャッキは機械式ジャッキとし、 300ϕ の 30° 台形ネジをウォーム減速機を介して昇降する方式を用い、このジャッキ30基で支持すればよい。

(3) 問題点

検討結果で明らかな如く、原理的には可能である。

しかし約19000トンもの超重量物を旋回搬送した実績はない。しかも台車面積が $15\text{m} \times 35\text{m}$ と巨大であり、旋回台車を設計製作する上では多くの生産技術上の問題が存在すると思われる。具体的には次の様な問題が考えられる。

(i) 軌道の精度

台車面積は $15\text{m} \times 35\text{m}$ にも及びこの面積間で軌道は充分な真直度と平面度を有する必要がある。現在据付に用いられている水準器によるレベル出しでは、据付後のレベル調整に長期間を要することが想像される。

また軌道の真円度も問題である。外周では半径70mであり、具体的にどの様な測定器を用いて検査を行なうか事前に充分な検討が必要である。

(ii) 歯車精度

駆動歯車とラックの噛合いがどの様な精度で可能であるかは重要な問題である。特に外周ラックはピッチ円直径が140m歯数3500にも及び累積ピッチ誤差をどのように吸収しかつピッチ円直径を真円に近ずける方策に関しては充分な検討が必要である。

(iii) 遮蔽室の加工精度

両端が扉となるため、比較的柔構造となるのは避けられない。遮蔽室移動装置で炉室又は修理室と連結した時、気密性がどの程度保たれるかについても検討が必要である。

2.4.3 エアベアリング方式による旋回台車

近年重量物の運搬用に注目されているエアベアリング⁵⁾を用いた旋回台車について検討する。

構成は、車輪方式の場合と同じ遮蔽室および遮蔽室移動装置を備えた旋回台車（エアパレット）と、台車を旋回移動させる4台の駆動台車とからなる。

エアベアリングの特長は、床面が良ければ面積効率、立体効率の良い運搬が可能なる点である。

以下ではエアベアリングを用いた場合固有の問題について検討する。

(1) 旋回台車

エアベアリングの能力は次式で与えられる。

$$W = P_c \cdot S_e$$

P_c 支持圧

S_e 有効面積

長円形エアベアリングの場合、 S_e は一般に次式で与えられる。

$$S_e = K_{S_2} \left\{ \ell (L - \ell) + \frac{\pi}{4} \ell^2 \right\}$$

$$K_{S_2} = 0.85 \sim 0.95$$

L 長軸 ℓ 短軸

ここでは、すでに市販されているエアベアリングの適用を考える。市販エアベアリングパッドの仕様を下記する。

寸法	2440 ^L ×3660 ^L
有効面積	6.62 m ²
空気消費量	3.0～4.5 Nm ³ /min
支持圧	3.5 kg/cm ²
能力	230 ton

このエアベアリングユニットを用いた場合、80個のユニットを旋回台車下面に敷きつめれば良い。

このとき消費する空気量は360 Nm³/minとなる。これを4台の空気圧縮機で供給すれば空気圧縮機としては、出力630 kw、吐出量90 Nm³/minの市販の空気圧縮機で充分まかなえる。旋回台車の外形図をFig. 2.13に示す。

(2) 駆動台車

旋回台車のエアベアリング自身では推力を出し得ないので、別に駆動台車が必要である。駆動台車は旋回推力を出すと共にエアパレットの動力源である空気圧縮機も搭載するものとする。

旋回台車の走行抵抗はエアベアリングの摩擦係数が $\mu = 5 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-3}$ であるので非常に小さく、72トン以下と算出される。この駆動力を4台の駆動台車で発生させるとする。

この程度の力を発揮させるのは容易であり特に検討を要さない。ただ、エアベアリングを使用する場合、床面を傷つけない配慮が必要である。ここでは、車輪にウレタンゴムを使用した場合について、耐荷重をチェックしてみる。ウレタンゴムの摩擦係数を $\mu = 0.4$ とすれば、所定の推力を生じさせる駆動台車重量は45トンとなる。一方、ウレタンゴムでは撓み率5%で単位軸長あたり200 kg/cm²～300 kg/cm²の負荷が許容出来る。これらの数値から外径800^φmm、車輪幅300 mmのウレタンゴム車輪8個を使用すれば良いことになり問題なく使用可能である。駆動台車の構造をFig. 2.14に示す。

(3) 問題点

エアベアリング性能に最も影響を及ぼすのが床面である。床面仕上は「金ゴテ仕上のコンクリート上仕上」以上の程度を考えている。また床面の傾斜については、2/1000～5/1000程度が一般的な許容値である。

この様な精度の床面を広範囲にわたって作りあげることは容易でないと考えられる。

地耐力に関しては、エアベアリングのダイヤフラム内の空気圧3.5 kg/cm²より35トン/m²の分布荷重がかかるが、台車底面積に占めるエアベアリングの有効面積が50%程度なので、長期許容地耐力としては、20トン～25トン/m²が必要と考えられる。従って地耐力に関しては問題ない。

もう一つの問題はエアベアリングの個数が多いことである。床面とエアベアリングの隙間を一定に保つには、旋回台車の構造強度を増し慎重に組立てを行なう必要があると考えられる。またエアベアリングが故障した場合、台車下面に人が入れず修理が困難であることが想定されるので旋回軌道床面の適当な位置に保守用ピットを設けておくことも必要であろう。

2.4.4 まとめ

旋回台車の方式として、車輪方式とエアベアリング方式の2式を検討した。

両者の優劣を比較検討してみる。

比較すべき項目として次の項目を考える。

超重量物の移動実績

装置の規模

信頼性と保守

建屋に対する影響

① 超重量物の移動実績

被駆動重量は19000トンにも及ぶ。このような超重量物移送の実績の有無は旋回台車を詳細設計する時に生じるであろう生産技術上の問題点を解決する指針を与え、装置の実現をより容易にすると言う意味でも方式選定の重要な項目の一つである。

車輪方式に関しては、近似の方法としてボールベアリングを使用した船の進水用駆動台車で30,000トン程度の船体を移動させる方法が実用化されている。

移動重量	25,000～30,000トン
移動物床面積	800～1,000m ²
重量支持法	90φmmの球を移動物と床面の間に敷きつめる。
支持面圧	300kg/mm ²

重量、床面積とも旋回台車に近い仕様であり、旋回台車は面圧が約50kg/mm²低く押えて設計されているので、車輪方式の旋回台車は有望であると言える。

エアベアリング方式では、米国ハワイスタジアムで6,000～7,000トンの観客席をスタジアムの用途に応じて、移動配置替えを行なう設備として使用されており、我国でも圧力容器など構造物の移動用に600トン程度の重量物を90m程度移動させる装置に利用されている。ただ歴史が新しく、19000トンの移動実績は無い。

② 装置の規模

床面積に関しては、車輪方式が15m×35m、エアベアリング方式が30m×35mであり、装置の小型化の面では車輪方式の方が有利である。ただ駆動力に関しては車輪方式の方がエアベアリング方式の10倍程度の推力を要し駆動機構の剛性、機構の複雑さの点でエアベアリング方式の方が有利であるので、装置の規模に関しての両方式の優劣は今後の詳細な検討による必要がある。

③ 信頼性

車輪方式に関しては、在来技術の組合せで実現可能と思われる。

エアベアリング方式では、エヤコンプレッサの冷却水の供給方法、騒音および多数のエヤベアリングパッドに均一にエヤを供給する制御方法などに装置が大規模になった場合、未経験の問題点が生じる可能性がある。

また、使用材質面でエアベアリングは、ウレタンゴムのベアリングパッドを使用しており、ゴムの劣化、床面との摩擦摩耗に起因するゴム寿命により定期交換が必要になる可能性があるが、車輪方式では特に定期交換が必要となる材質を使用しないですむ利点がある。

④ 保守

小規模のメンテナンスは車輪方式、エアベアリング方式のいずれにも必要であろう。大規模な保守としては、旋回台車の足廻りである。車輪、又はエアベアリングパッドの修理、交換が考えられる。

保守設備としては、いずれの方式でも台車下面に車輪又はベアリングパッドが敷きつめられており、スペース的に故障した部分のみを取出し交換することは困難である。

軌道面の一部に、旋回台車走行時は軌道面を構成するリフタを備えた保守用ピットを設け故障した車輪又はベアリングパッドを床面下に取出す設備が必要である。

各々の保守頻度は想定し難いが、ベアリングパッドの寿命が装置の耐用年数に比して短い場合、エアベアリング方式が不利である。

⑤ 建屋に対する影響

旋回軌道の下に地下室を作る場合を想定し、旋回台車のピット深さと、地耐力および床面施工の難易につき検討する。

旋回台車の台車高さは車輪方式で8 m、エアベアリング方式で4 mとなる。

車輪方式		エアベアリング方式	
遮蔽室下面板厚	2.5 m	旋回台車車体	3.5 m
微動用ローラ	0.5 m		
旋回台車車体	2.5 m		
車輪高さ	2.5 m	エアベアリングパッド高さ	0.5 m
計	8.0 m		4.0 m

地耐力に関しては、台車の床面積が車輪方式15 m×35 m、エアベアリング方式30 m×35 mであり、受圧面積に反比例してエアベアリング方式が地耐力として有利である。唯、車輪方式にしても台車面積を広げることで地耐力を下げることは可能であり、地耐力に関しては比較の対象にする必要がない。

床軌道面の精度出しに関しては、車輪方式はレール面のみの平坦度に注意すれば良く、エアベアリング方式の全床面の平坦度を出すのに比して容易であると考えられる。

以上5項目に就いて比較検討したが総合的に判断した場合、実績及び信頼性を考慮した装置の実現の可能性の高さを重視し、車輪方式による旋回台車を採用する。

2.5 遠隔操作機器

炉ユニット解体から取出しまでに要する遠隔操作機器について検討する。

真空シール部の遮蔽ブロックを取除くまでは、放射線雰囲気下の作業ではないので、クレーン又は床面上に搬入した作業台およびしかるべき省力治工具を用いて人力により解体しうるものと考え、ここでは検討を省略する。今後空間的な配位がより具体化した時点で適宜自動化を考へても遅くない。

遮蔽ブロック取除き以降の作業のうち主たるものは

- ① 遮蔽ブロックの取付け、取りはずし

- ② 真空シール解除装置の取付け、取りはずし
- ③ 真空シール解除
- ④ 炉ユニットの取出し
- ⑤ 遮蔽扉の開閉
- ⑥ 旋 回

である。③以降の作業機械に関してはすでに述べた。これら機械のシステム制御に関しては検討が充分でないが、炉設計に大幅な変更を与えるものではないと考えられる。

従ってここでは、①②の作業用として、天井クレーンに取付けた作業用ゴンドラ床面を自走する炉室内作業車を考え、これらについて検討する。

2.5.1 炉室内作業車

遮蔽壁ボルトの着脱、遮蔽ブロックの着脱、真空シール解除装置の着脱、その他配管の切離し、監視などのため炉室内作業車を考える。

各々の機能は、先端のアタッチメントを交換することによりおこなうものとし、ここでは作業車が炉心部まで入り込めるか否か、作業車のカバー出来る作業空間について検討する。

炉室内作業車としては、すでにUSAFにより多自由度の自走マニピュレータがShielded-Cab Vehicle "Beetle" として試作されている⁶⁾。ここで検討している核融合炉に対しては、車体の高さが高く、取出機の移動台車下面にもぐり込めないので使用範囲は制限されるが、炉心部へ近づく小型のものを製作すれば、炉の中心線より下位のほとんどの作業が可能になるであろう。

また、一般の掘削作業に使用されている掘削機を基本とする作業車を考えた場合は、Fig 2.15 Fig 2.16に示す如き作業範囲で使用可能となる。

作業の種類により、これら作業車を数種用意すれば、解体作業は支障なく行えると考えられる。

2.5.2 天井クレーン

円筒ポロイダルコイル群、トロイダルコイルおよび大径ポロイダルコイル群の保守用に炉室内に旋回式2000トン天井クレーンを、旋回台車の保守用および炉ユニット解体組立機材の移送用に炉室外に1000トン天井クレーンを備えるものとする。

炉室内クレーンは、遮蔽ブロックの解体及び玉掛け作業用として作業用ゴンドラを備えるものとする。

作業用ゴンドラは、The RALPH M. PARSONS Co. による設計例⁶⁾があり、ほぼ同一仕様の装置がここでも使用可能である。

炉室内用天井クレーンの外型図をFig 2.17に示す。

2.5.3 まとめ

炉ユニット周辺の解体作業は、炉上半面を天井クレーン及び作業用ゴンドラで、また炉下半面を床面を自走する炉室内作業車でおこなうものとする。炉心部、下半面のトラス内側の範囲は真空遮蔽壁支持ブラケットおよびトロイダルコイル支持ブラケットのため作業車が入り得ないので、人力により解体しよう炉設計をおこなう必要がある。

解体作業範囲と、使用機器の関係をFig 2.18に示す。

Table 2.1 炉ユニットの重量 (単位トン)

機 器	重 量
炉 心 部	2300
(ブランケット	250)
(トロイダルコイル	1400)
ポ ー ト 部	2700
計	5000

Table 2.2 YUS304Nの機械的性質

引 張 強 さ	82.9 kg/mm ²
耐 力	49.3 kg/mm ²
許 容 面 圧	59.1 kg/mm ²

Table 2.3 車 輪 仕 様

	台車A	台車B
車 輪 直 径	2000 mm	2000 mm
車 輪 幅	500 mm	500 mm
車 輪 個 数	10	12
車 輪 面 圧	42.3 kg/mm ²	42.7 kg/mm ²

Table 2.4 台車の走行抵抗

	台車A	台車B
荷 重	2450 トン	3000 トン
起 動 抵 抗	79.4	97.2
走 行 抵 抗	140.6	172.2

Table 2.5 駆動歯車仕様

モジュール	45
歯数	30
ピッチ円直径	1350 mm
歯幅	600 mm
材質	インコネル 625

Table 2.6 減速機所要トルク

歯車減速機出力軸トルク	110.8 ton·m
歯車減速機入力軸トルク	8.5 ton·m
サイクロ減速機出力軸トルク	8.5 ton·m
サイクロ減速機入力軸トルク	15.3 kg·m
モータ動力	48 kW

Table 2.7 所要遮蔽厚さ (単位mm)

材質	遮蔽厚さ
鉛	250
コンクリート	1500
ステンレス鋼	500

Table 2.8 車輪仕様

車輪平均直径	2000 mm
車輪幅	500 mm
車輪個数	80
車輪面圧	41.7 kg/mm ²

Table 2.9 走行速度と所要動力

	走行速度	所要動力
外周駆動	32.0 mm/sec	160 kW
内周駆動	20.0 mm/sec	96 kW

Table 2.10 歯車仕様

	ピニオン	内ラック	外ラック
モジュール	40	40	40
歯幅	500	600 mm	600 mm
歯数	40	1750 mm	3500 mm
基準ピッチ円直径	1600	70000 mm	140,000 mm

Table 2.11 駆動歯車仕様

モジュール	20
歯幅	250 mm
歯数	40
ピッチ円直径	800 mm

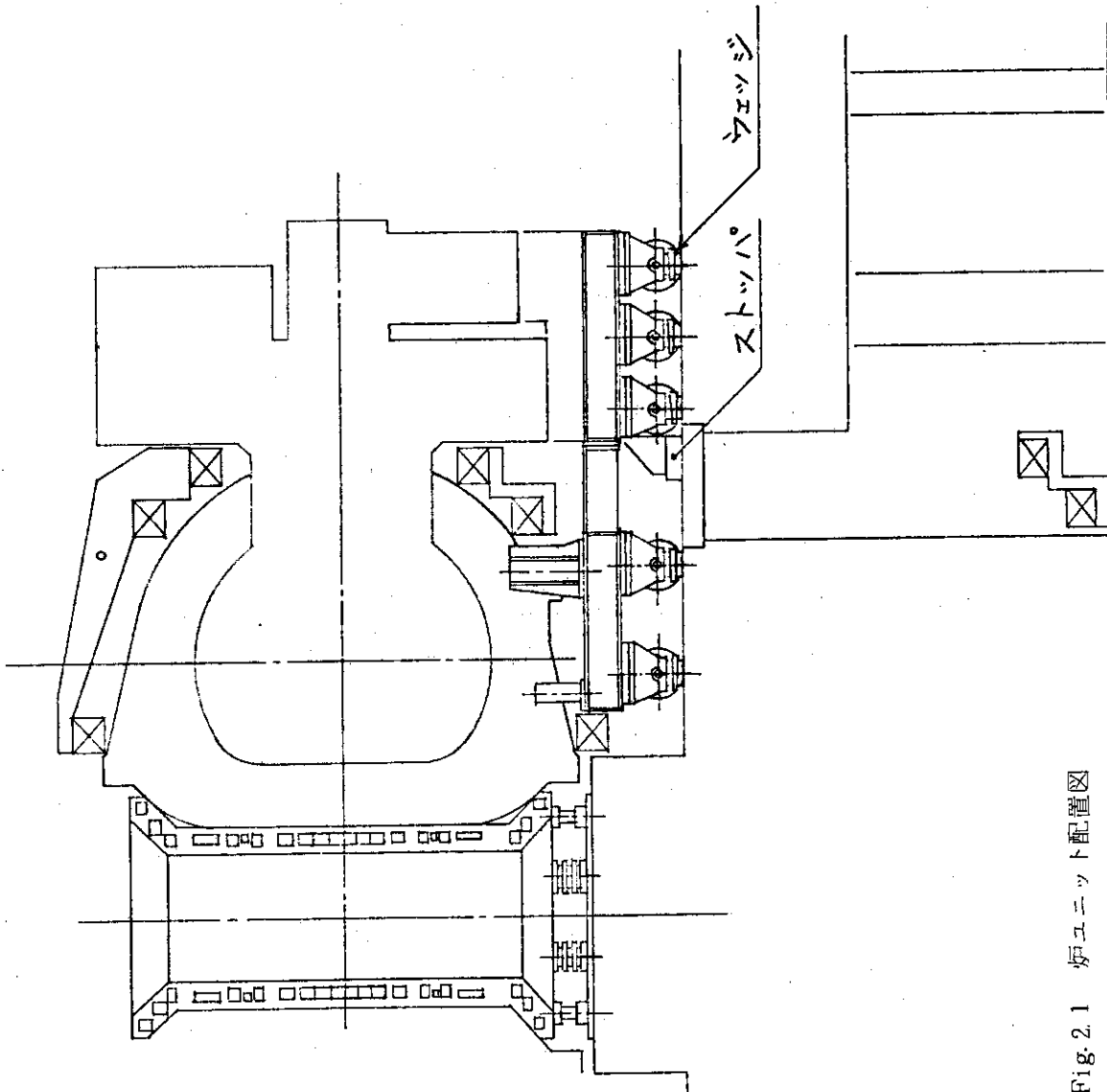


Fig. 2.1 炉ユニット配置図

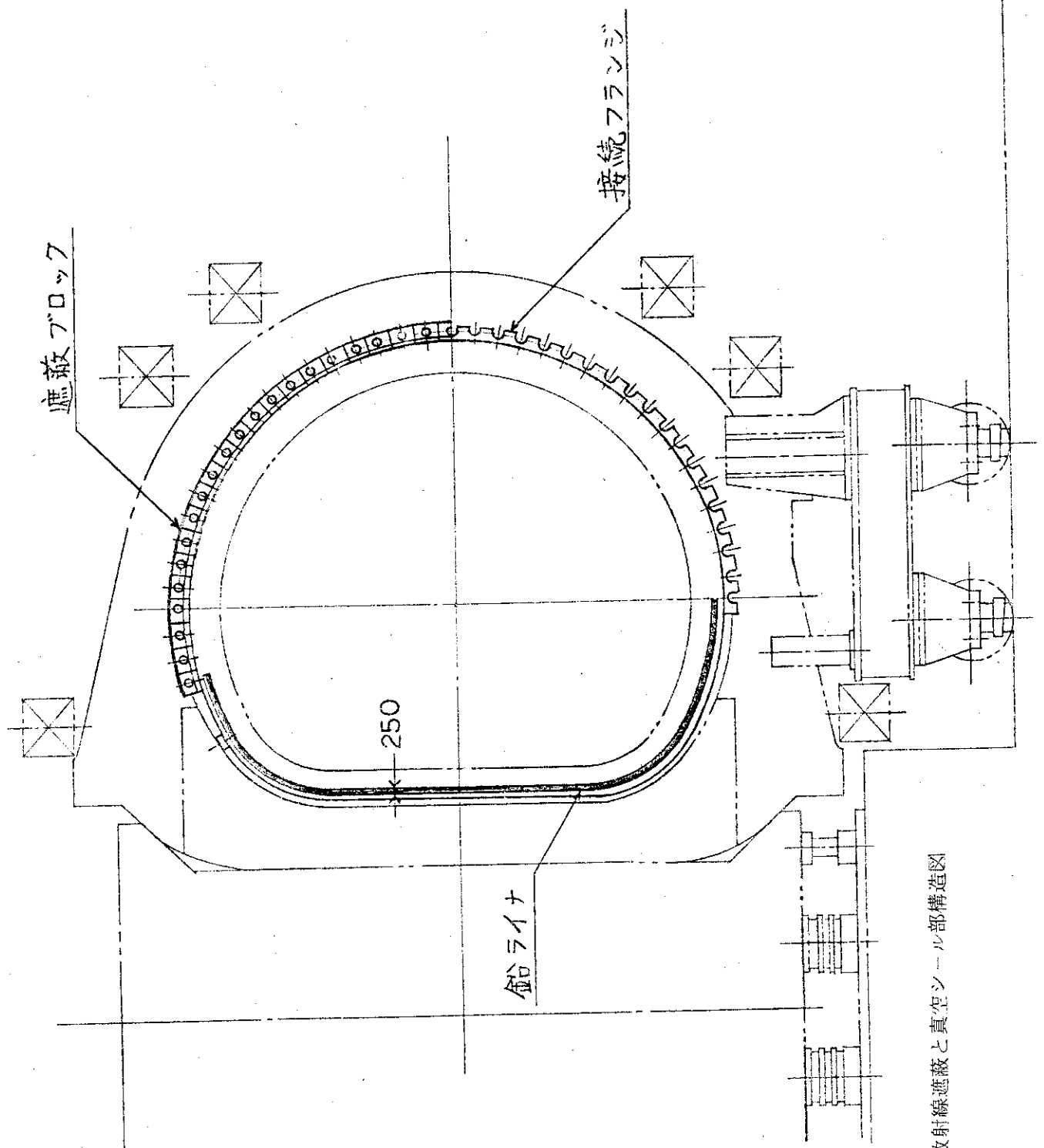


Fig. 2.2 放射線遮蔽と真空シールド部構造図

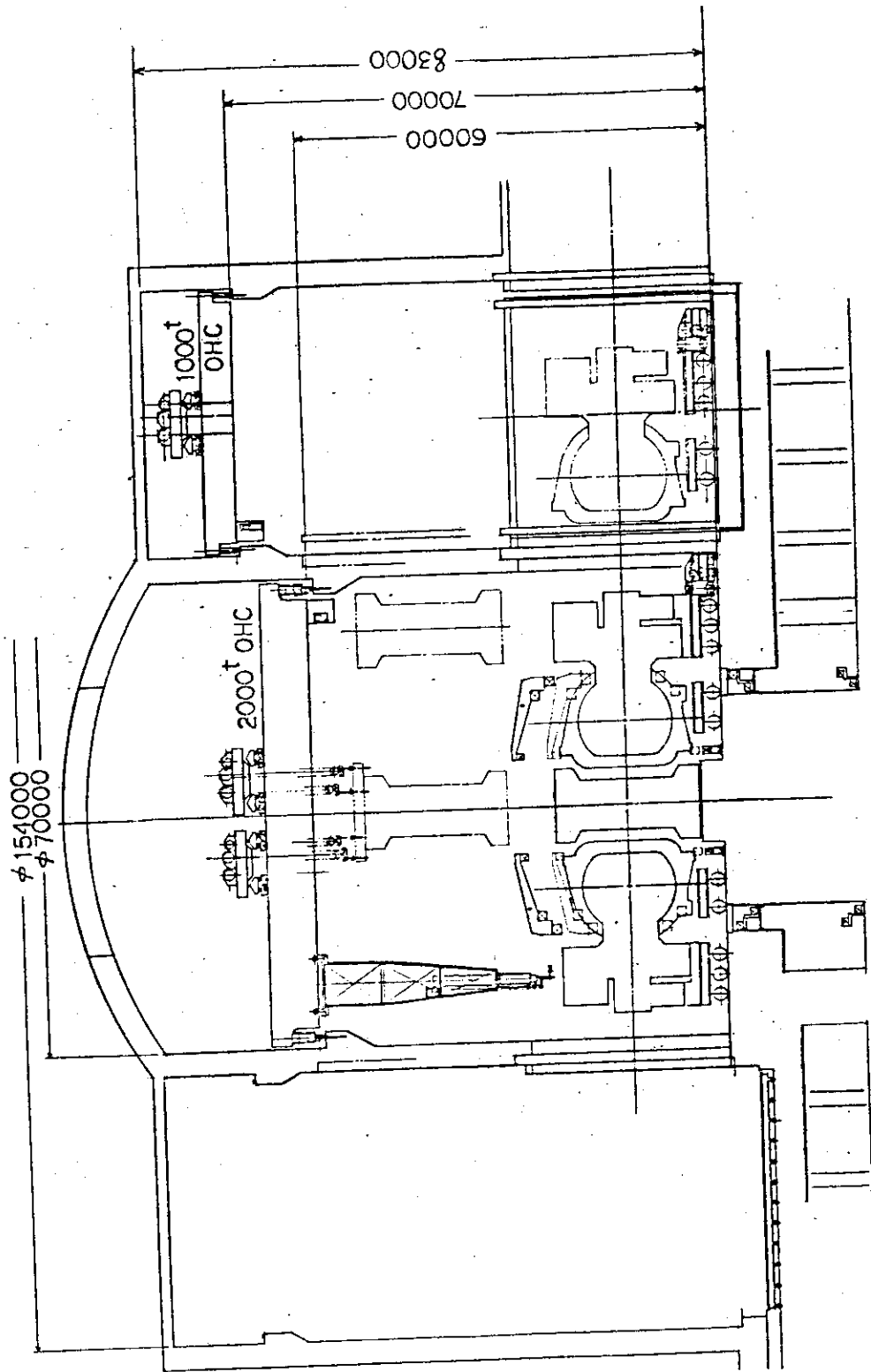


Fig. 2.3 ポロイダルコイル解体概念図

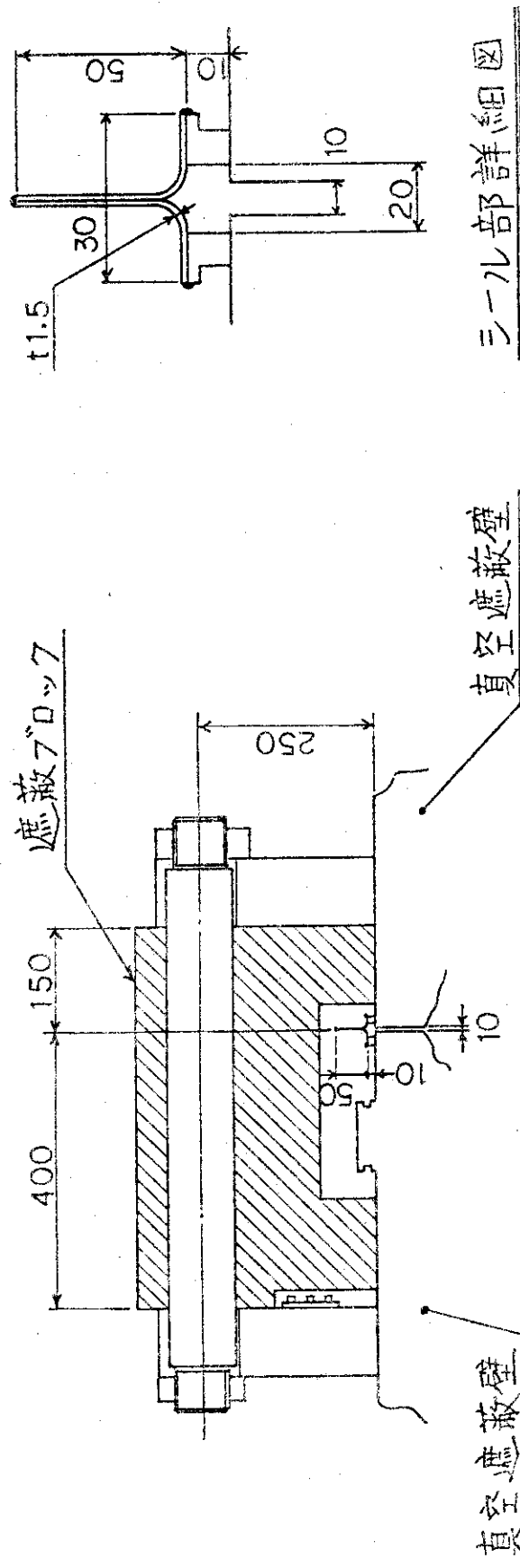


Fig. 2.4 真空シール部詳細寸法図

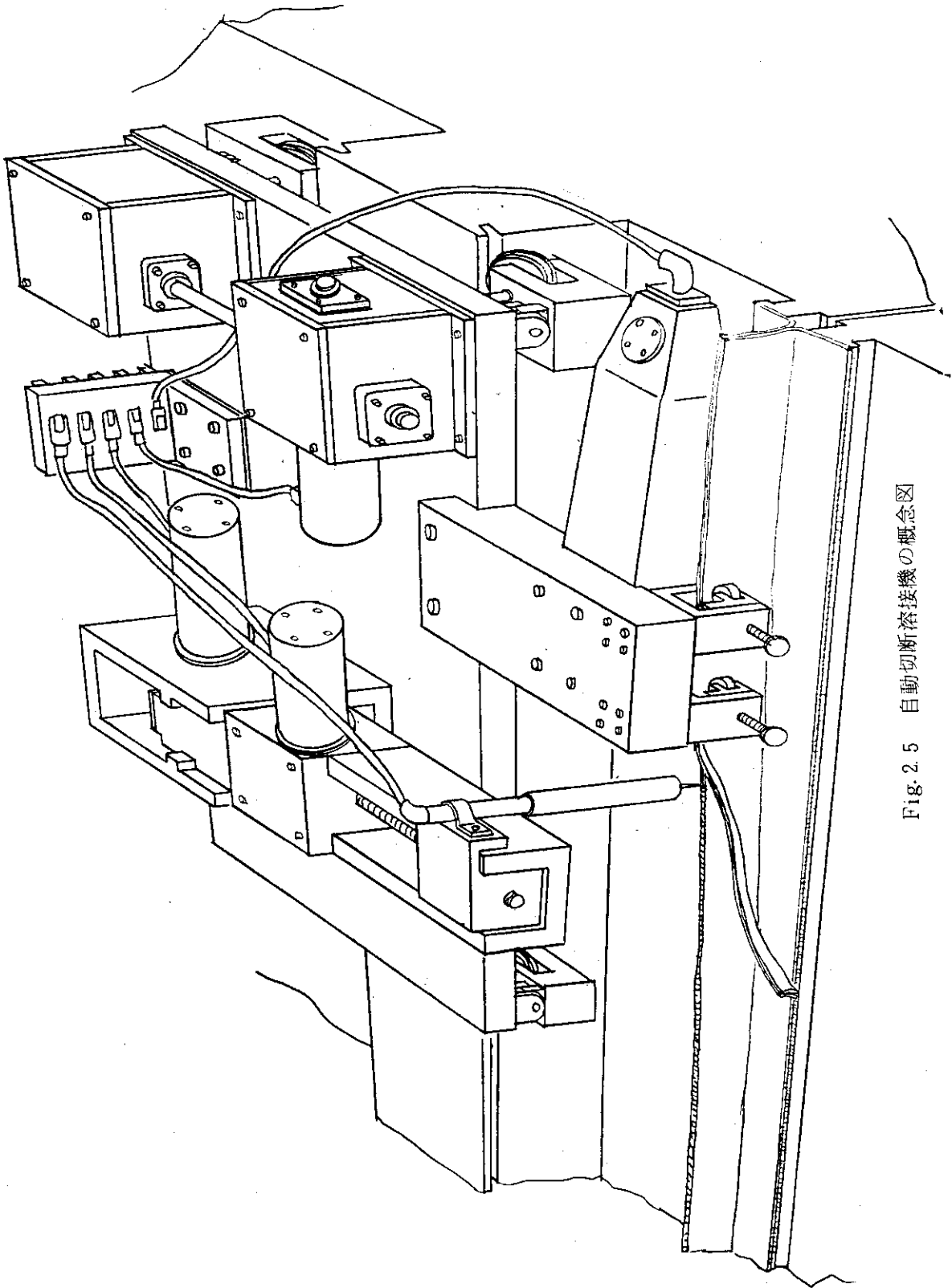


Fig. 2.5 自動切断溶接機の概念図

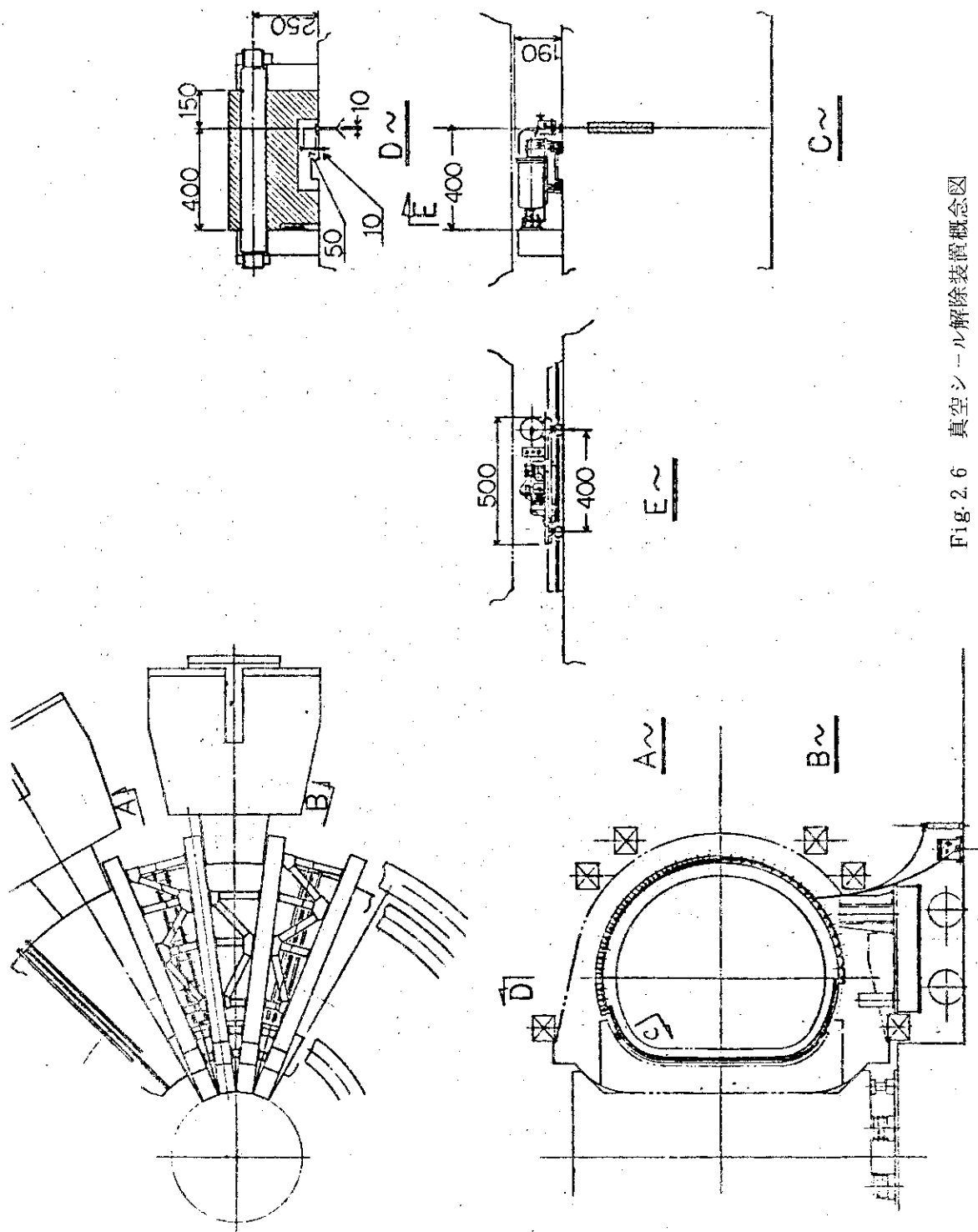


Fig 2.6 真空シール解除装置概念図

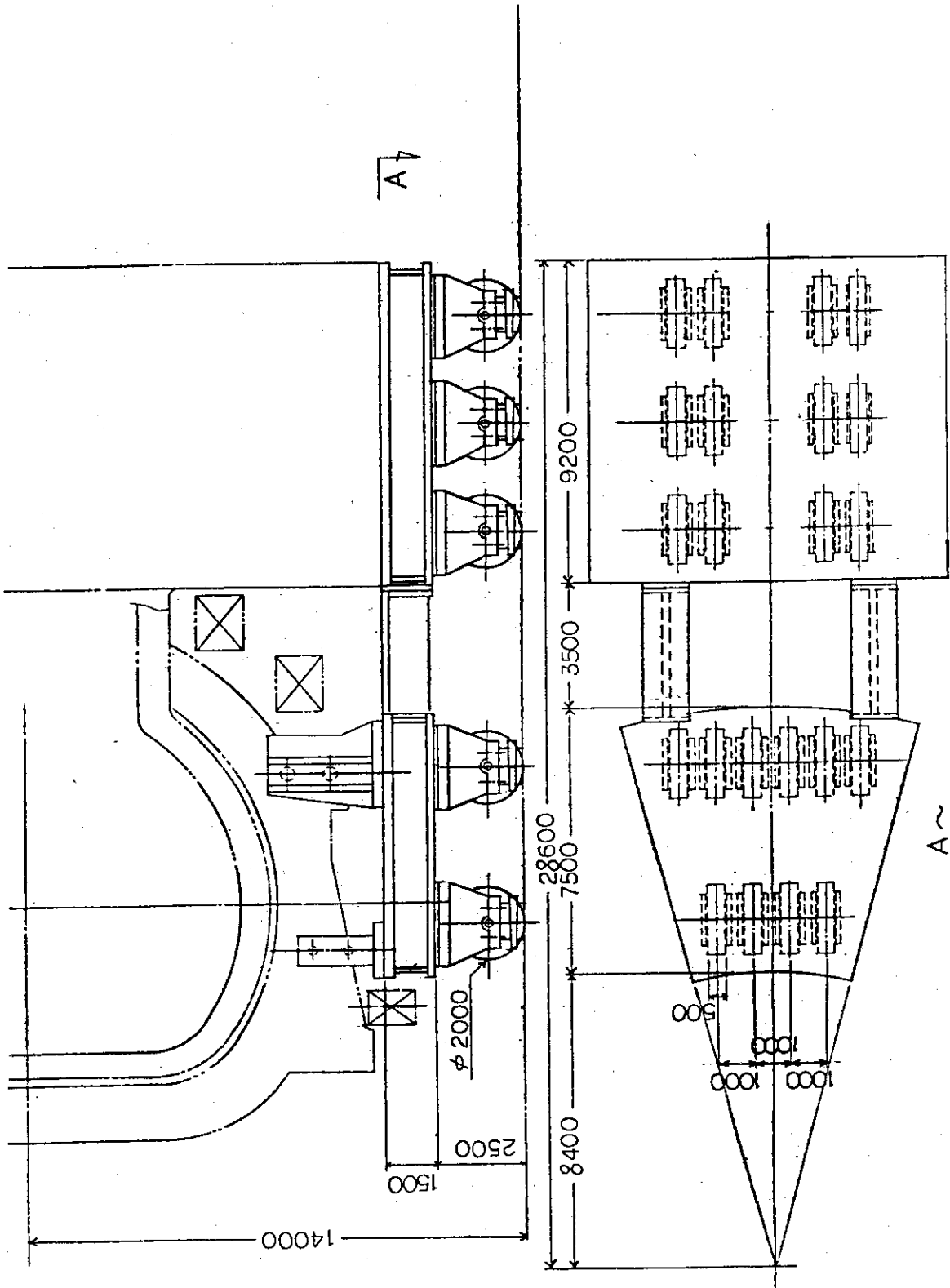


Fig. 2.7 移動台車構造図

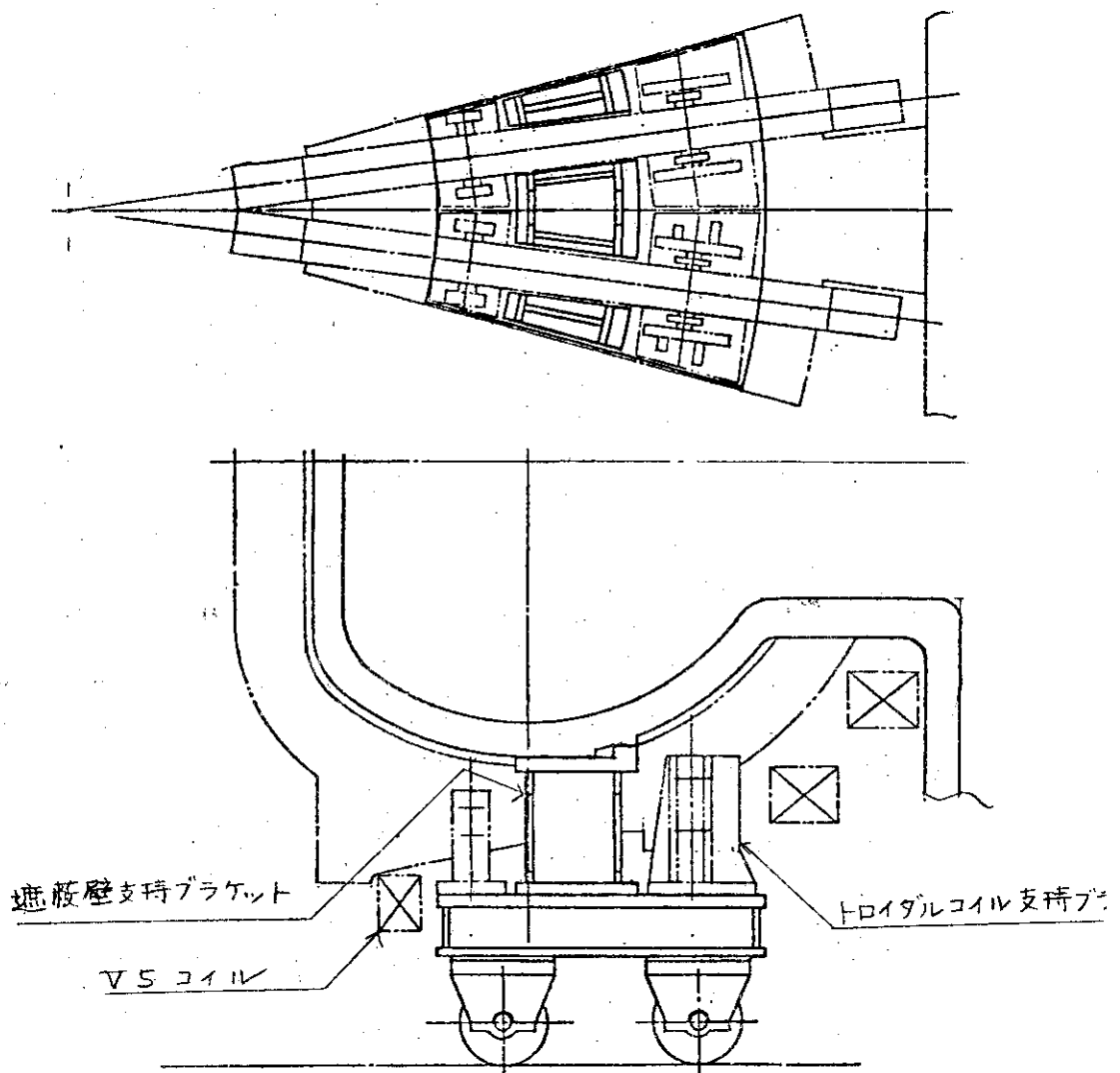


Fig. 2.8 炉ユニット取付図

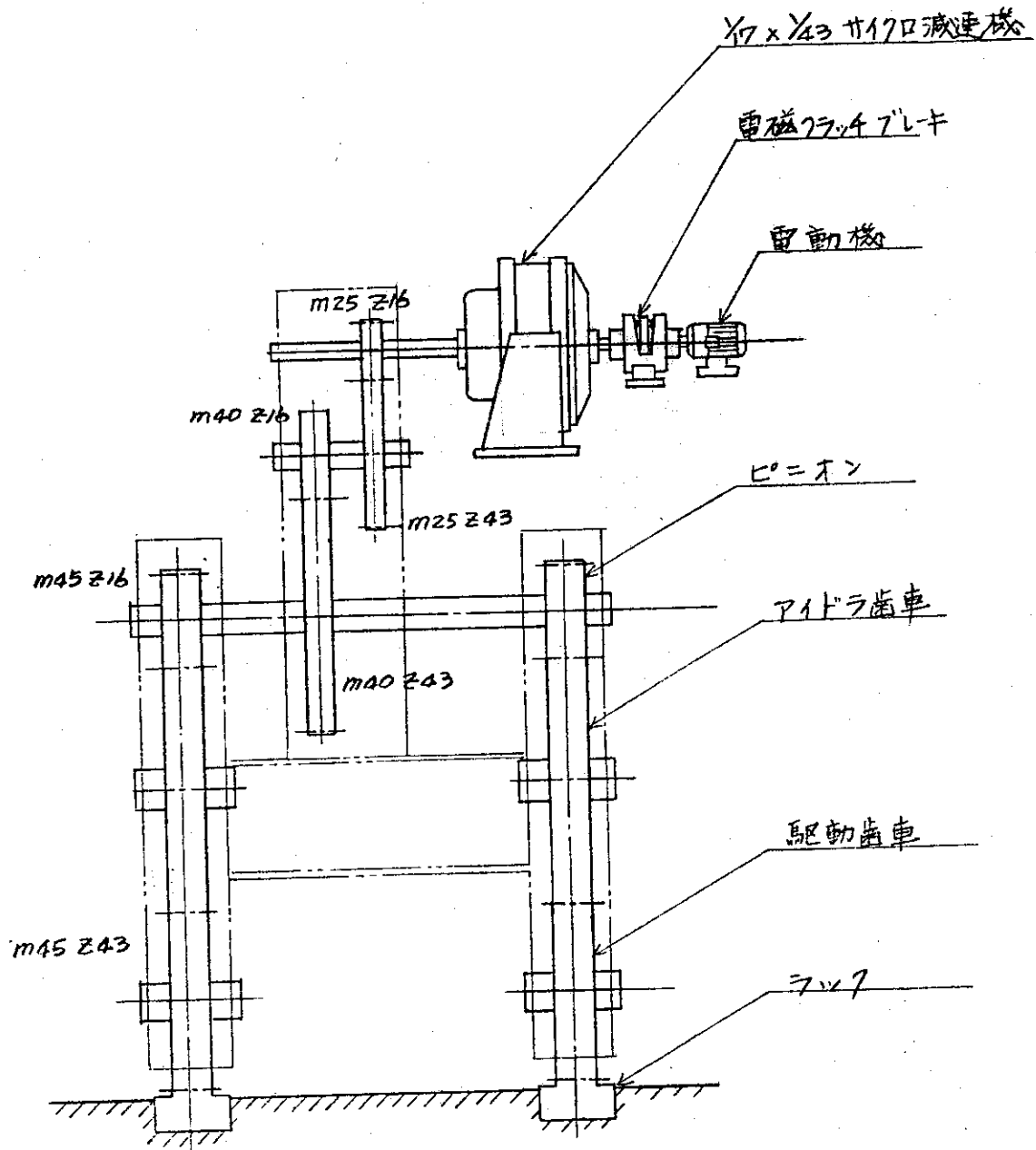


Fig. 2.9 減速機構図

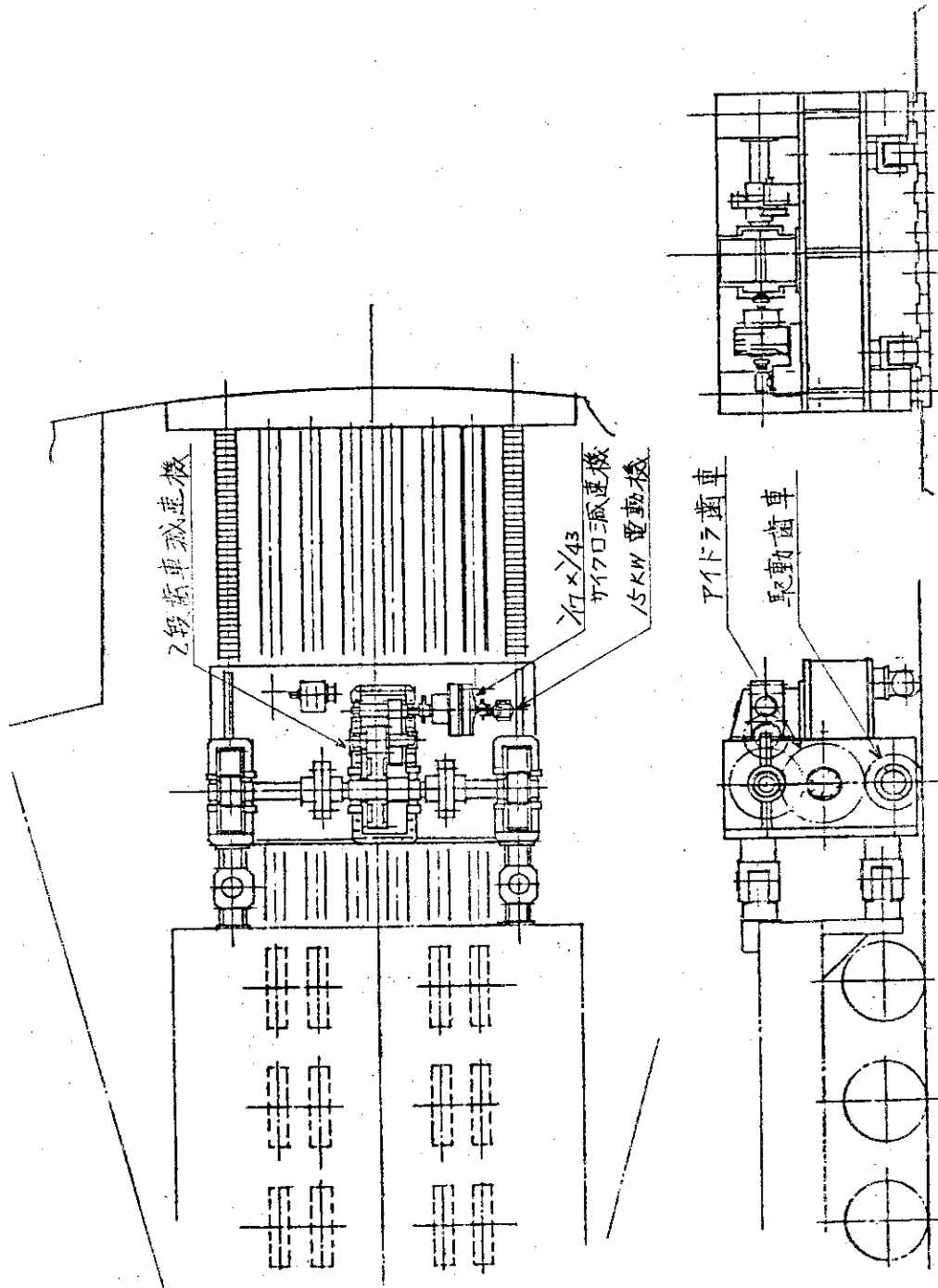


Fig. 2.10 駆動装置外形図

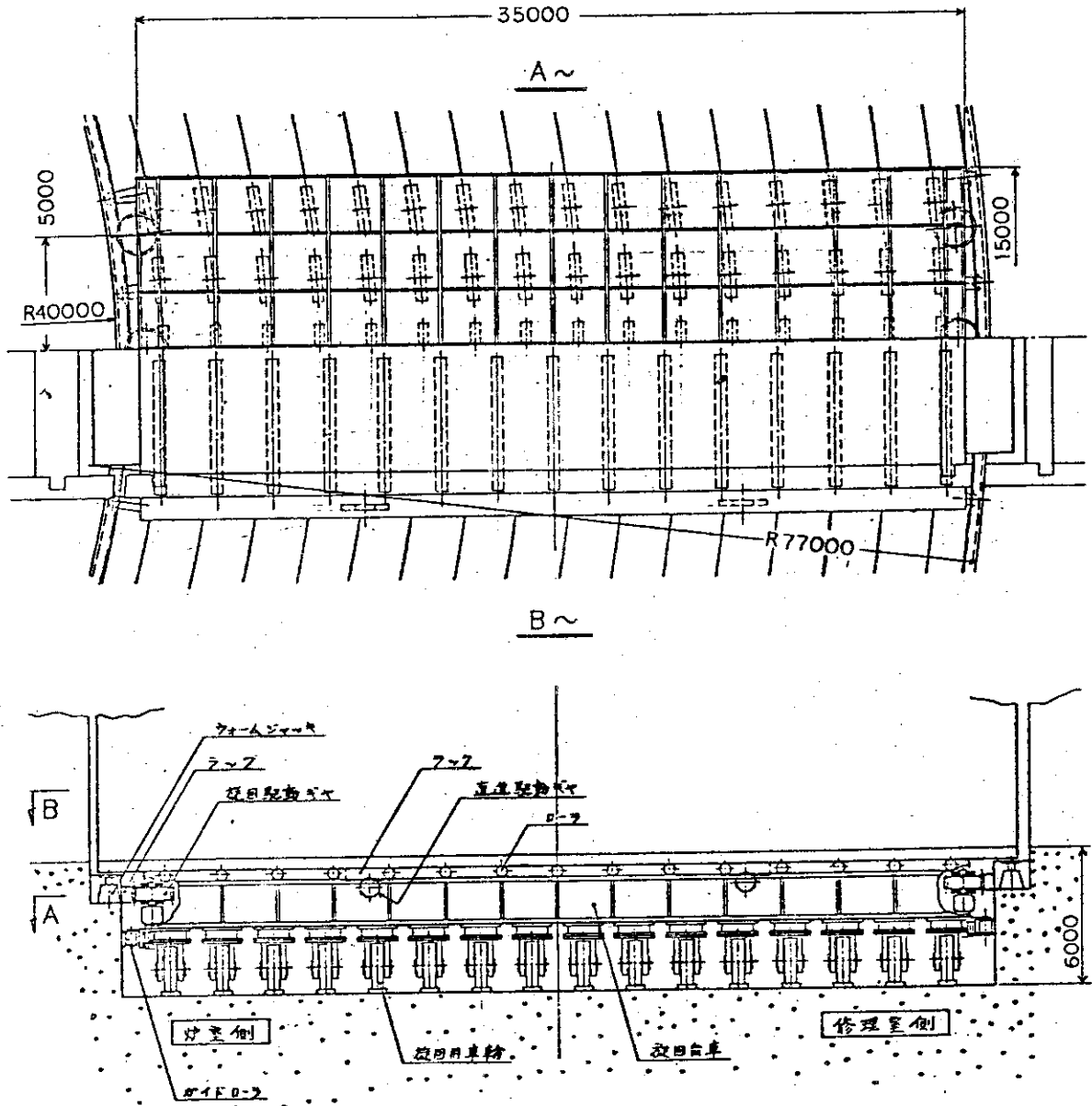


Fig. 2.12 旋回台車構造図

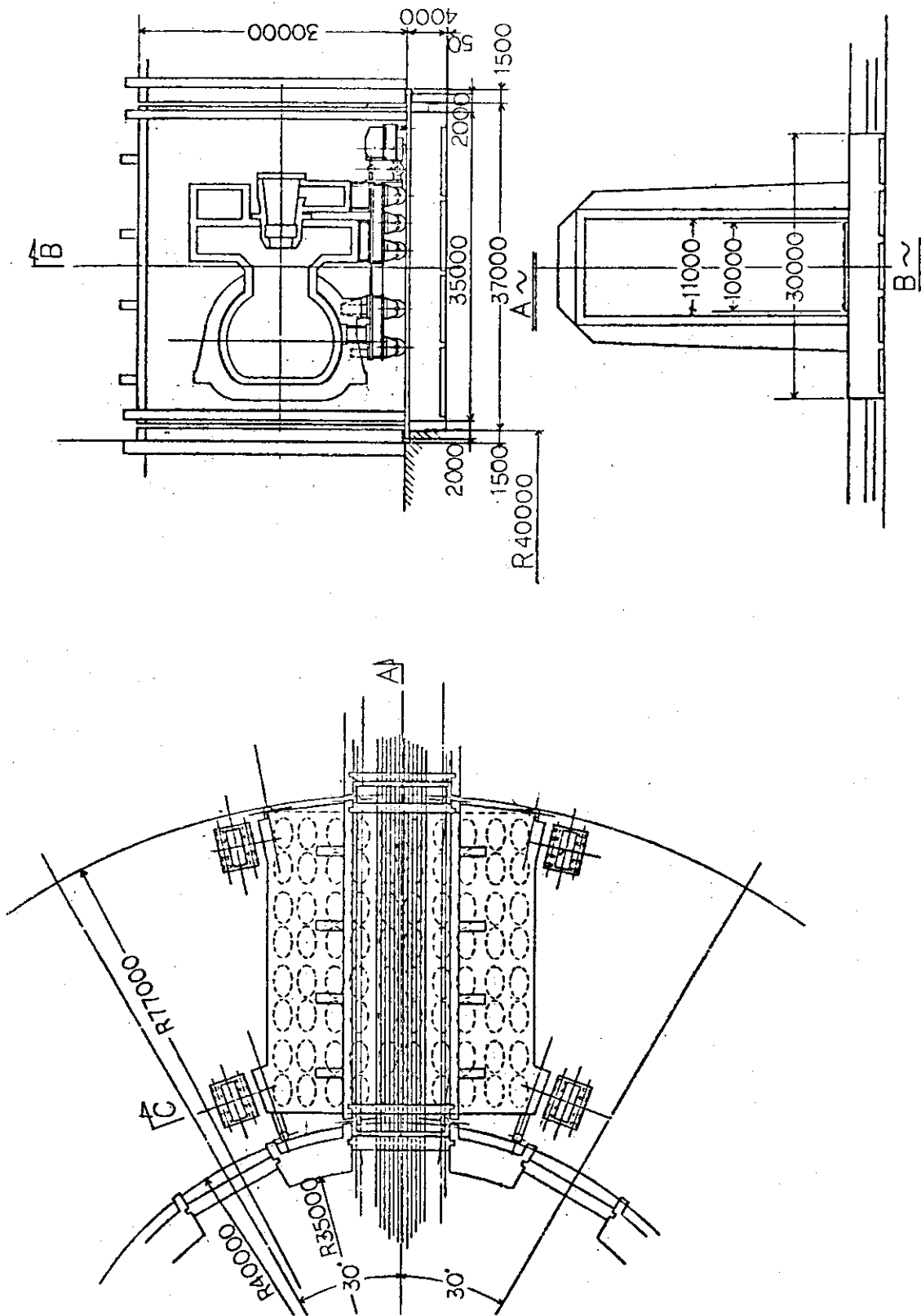


Fig. 2.13 旋回台車配置図

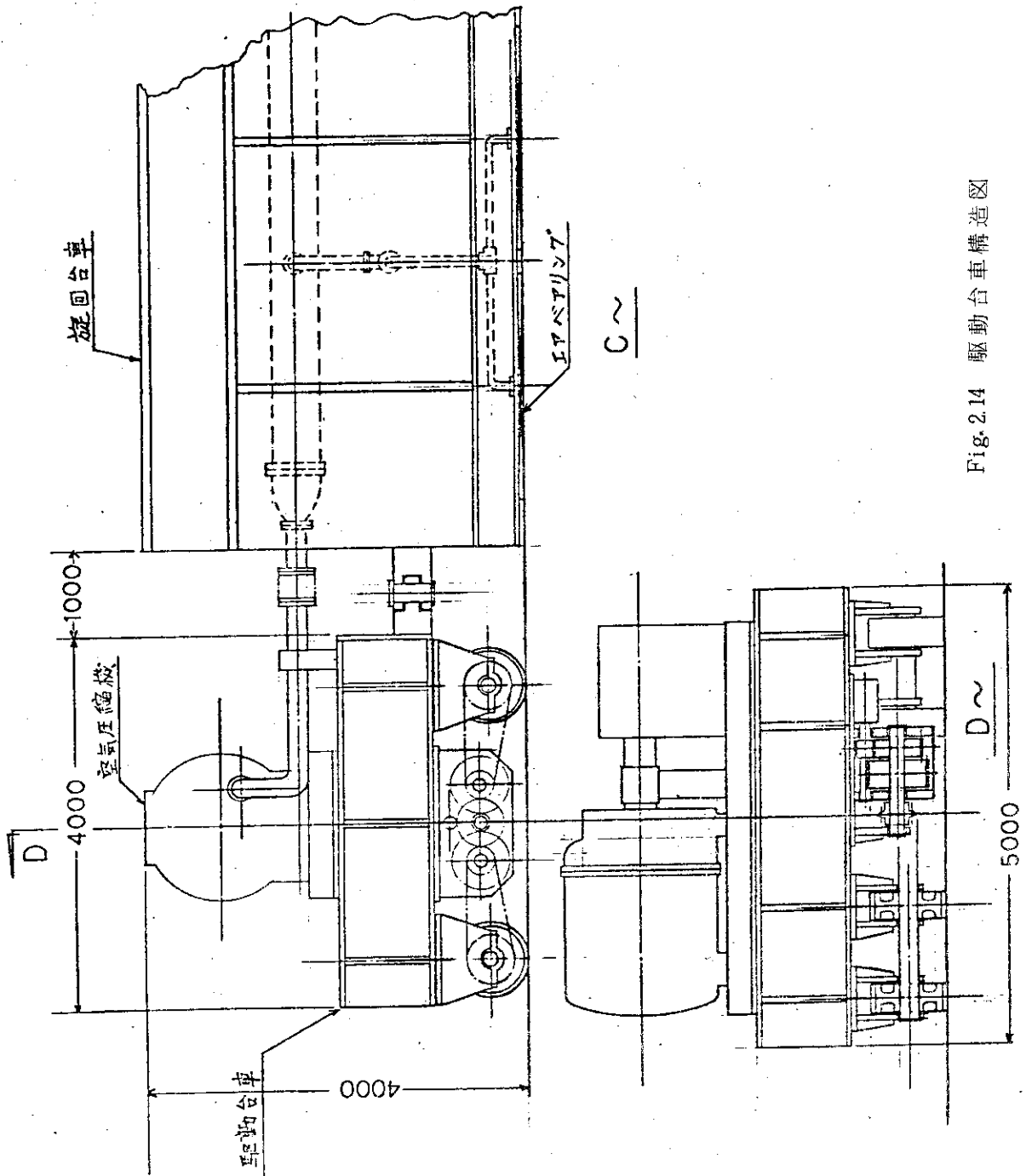


Fig.2.14 駆動台車構造図

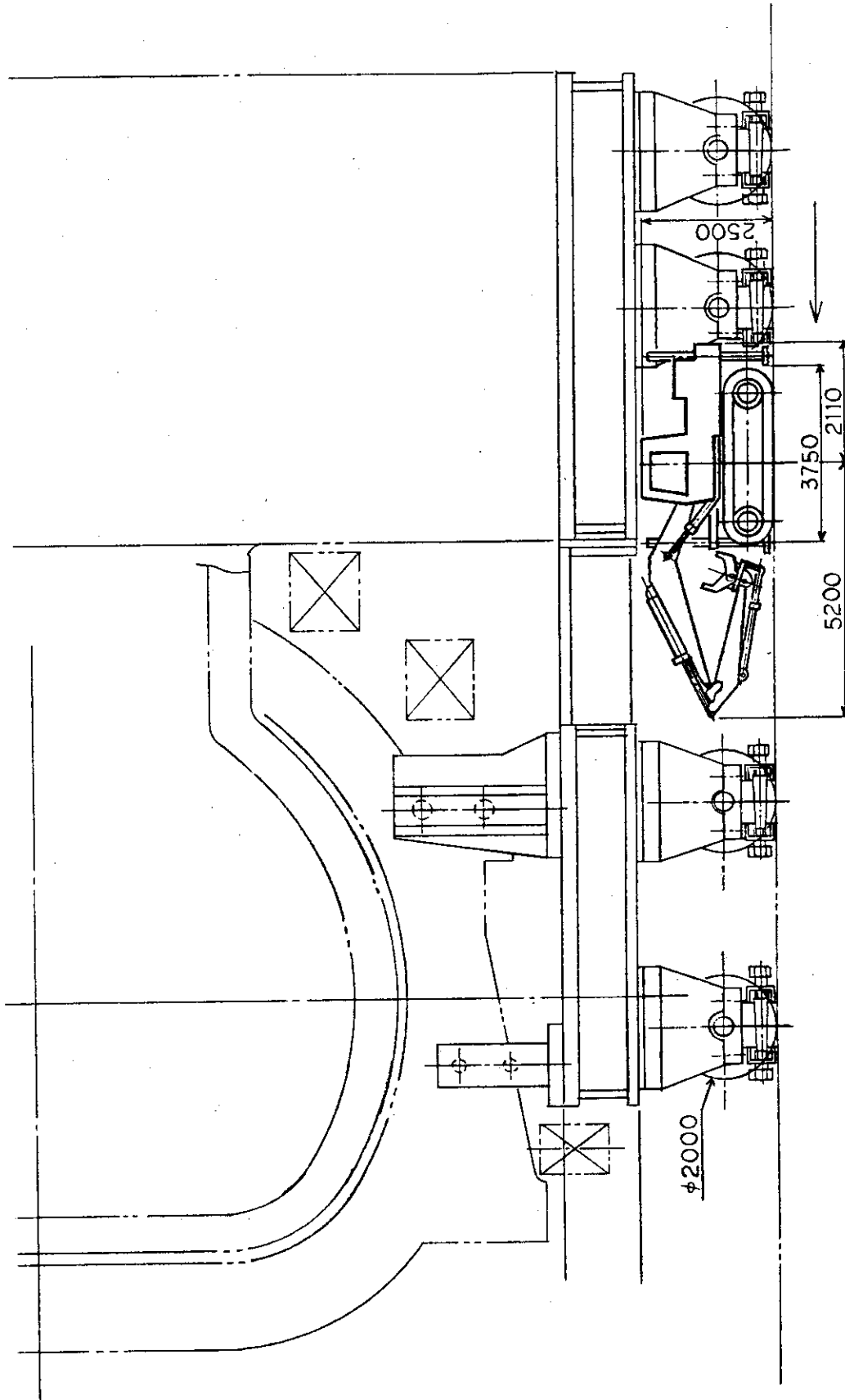


Fig. 2.15 炉室内作業車

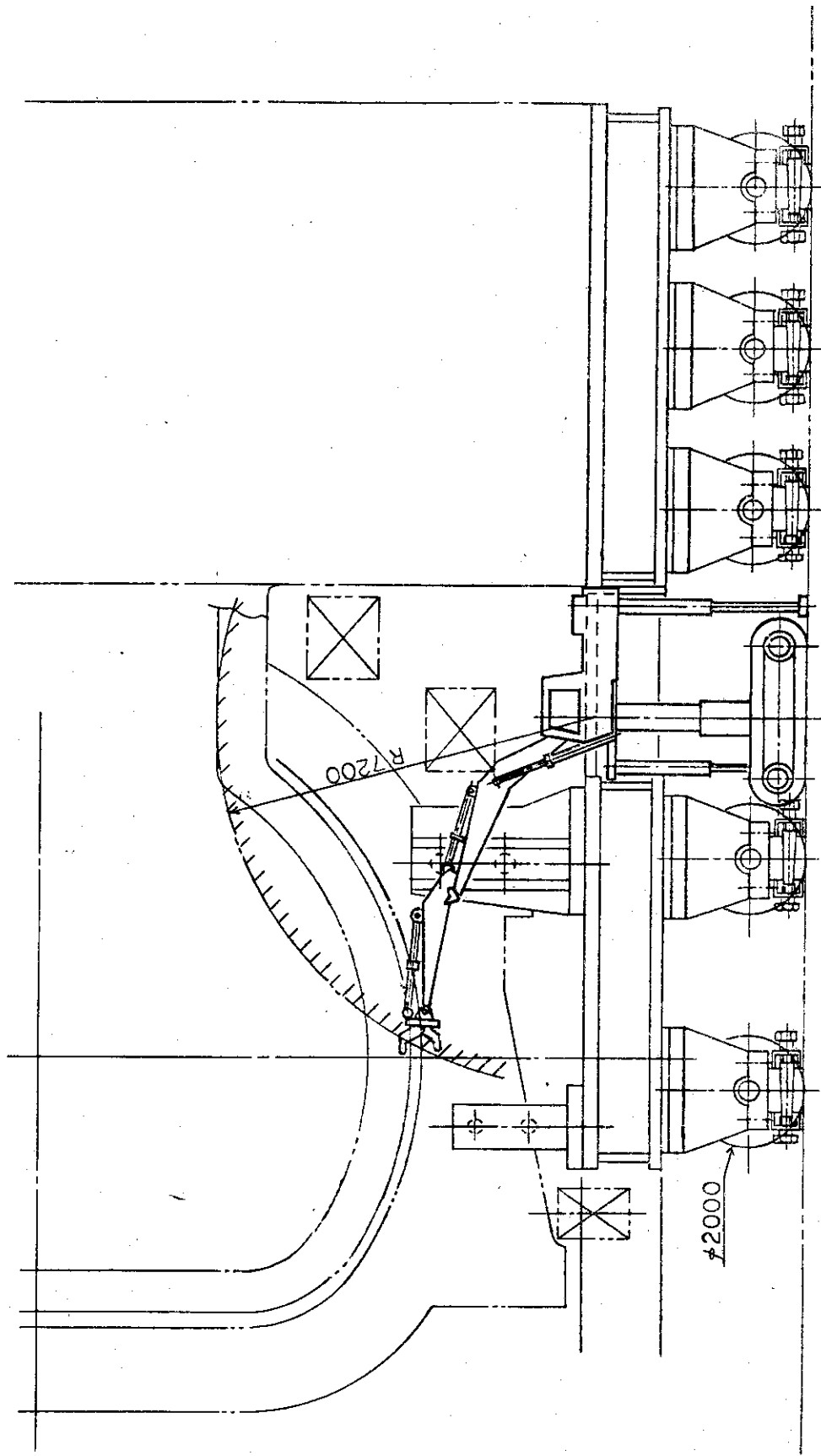


Fig.2.16 炉室内作業車

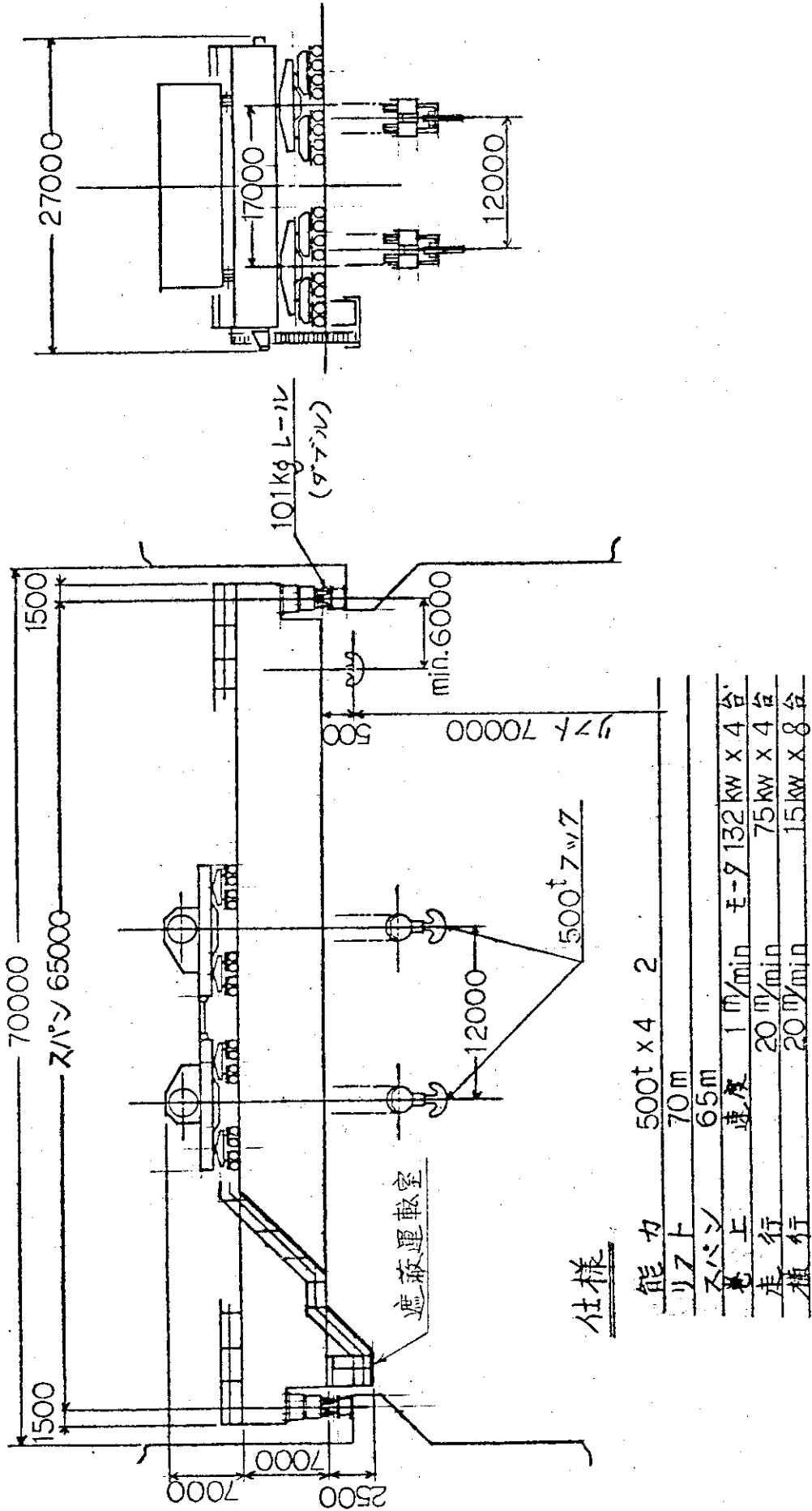


Fig. 2.17 炉室内天井クレーンの外形図

- A 天井クレーン及びゴンドラ=ヨル作業
- B 炉室内作業車=ヨル作業
- C 人刀=ヨル作業
- D 作業不能

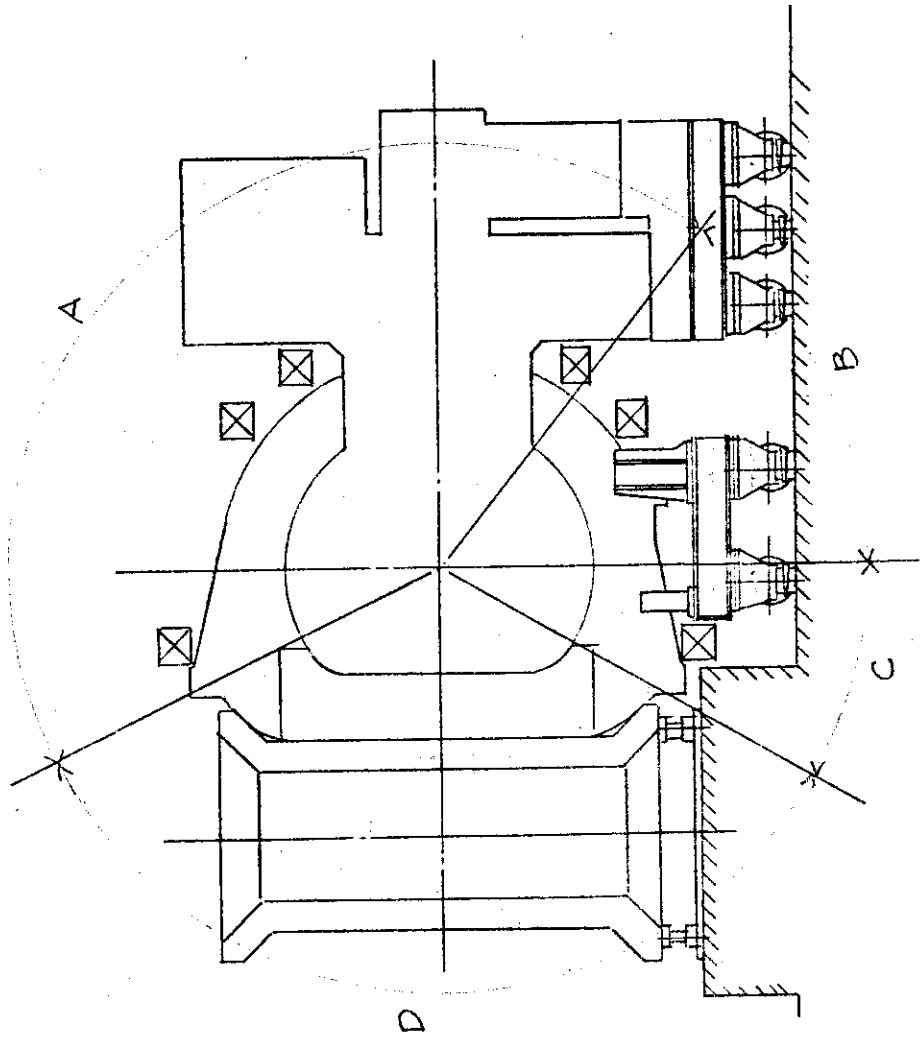


Fig 2.18 解体作業範囲図

3. ブランケット修理

3.1 ブランケット構造と修理範囲

核融合炉の典型的な故障として、ブランケット容器の破損が考えられている。前の章で炉全体としての故障修理方法が与えられた。ここでは、炉ユニットに対する故障修理としてこのブランケットの例を取り上げて検討する。

ブランケットの構造については第二章で触れているが、ここではまずそれについてもう少し詳しく述べる。ブランケットの主体である酸化リシウムの焼結体ボールは、高圧のヘリウムガスによってその内部に発生する熱とトリチウムを回収する為に、ブランケットセルと呼ばれる壺型圧力容器に詰められており、従ってこのブランケットセルがブランケット構成の基礎単位である。その構成の方法としては、まずプラズマ断面に沿ってこのセルを一周に配列して、これにタイヤをはめて固定し、リングを形成する。次にこのリング2単位に対し一組のヘリウムガス配管ヘッダーを配し、セルからの配管をまとめて外部の母管へ接続する。ここではこのヘッダーにまとめられたブランケットセル集合体をブランケット冷却単位と呼ぶ事にする。炉ユニットにはこの冷却単位4組が含まれる。ここではこの大きさの集まりをブランケットユニットと呼ぶ。

ブランケットセルの一個が破損した場合にその修理方法を規定する必要がある。最もキメ細かい修理方法としては、そのセルの交換であるが、この為にはブランケットユニットを冷却単位に解体し、更にヘッダーから各セルへの配管を取り外しタイヤを切断して不良セルを取り外す事になる。次にそれを組立て直す。

もう一方の極に位置する修理法としては、トロイダルコイルなど少数の部品を残して炉ユニットをスクラップとする方法である。この場合には「炉の修理」は存在するが炉ユニットの修理という概念は存在しない。これらの間の選択は総合的な見地から行なわれるが、ここでは放射性廃棄物の量をなるべく減らし、また作業を余りに高度なものとしないと云う意味で、ブランケット冷却単位の交換によりブランケット修理を行うものとする。この場合故障冷却単位はスクラップとされ、必要があればリシウムは原材料として回収される。残りの冷却単位、放射線遮蔽壁などは再利用される。

3.2 ブランケット取り出し

修理作業の為に必要な部位を露出させる必要がある。炉ユニットからブランケットを取り出すには原理的に二つの方法が考えられる。

第一は放射線遮蔽壁の端面開口部から抜き出す方法であり、第二はトロイダルコイルを含めてその放射線遮蔽壁を取り除く方法である。

ところで、この時炉ユニットとブランケットを結合している要素の脱着を行なわなければならない。又この結合部は炉の運転期間にわたって充分の信頼性を持つ必要がある。従って、炉ユニ

配管などには高度の信頼性が要求されるので、作業が制限された場合に信頼性が低下するのであれば採用出来ないが、まだ検討する余地は残されている。これに対し、ブランケット、配管部などを蔽っている放射線遮蔽壁を取り除けば、前記の困難はなくなる。この場合には、切断の位置は自由に選ぶ事が出来る。

配管の切断、結合を行う場合には、いわゆる継手を用いられる。高温・高圧の用途には溶接継手、フランジ継手がある。一般的には、解体の必要のある場合にフランジ継手を用い、取り外す必要のない場合に溶接継手を用いるが、本機の場合には、作業性と同時に長期的な信頼性が重要である。

どの継手を使う場合でも

- 1) 作業空間
- 2) 管軸合せ、管端面合せ
- 3) 遠隔操作作業機械
- 4) 検査装置

などが必要となる。

以下では、まず上記二つの継手についてその特徴を見る事にする。

(1) フランジ継手

フランジ継手を使用する場合には、シール機構としてガスケットが必要である。高温、高圧の用途にはメタルガスケットが用いられるが、近年メタルOリングの使用実績が得られつつあり、種々の使用条件に対しOリングの選択基準を与えた文献⁸⁾もある。

通常メタルガスケットを使った場合のフランジの形状はJISに規定されている。

700°C20気圧の条件で管の内径が500 mm程度の場合、フランジの大きさは次の様に与えられる。

- ・フランジ外径 795 mm
- ・肉厚 52 mm
- ・締付ボルト M36 20本

炉ユニット内に於て、配管の状況はFig 3.1の様であるので、上記の様なフランジは殆んど収容する事が出来ない。

但しメタルOリングの場合は、締付圧力を上で想定しているものより小さく出来るのでフランジを若干小さくする事は可能である。メタルOリングの当る面は一般に表面粗さ1.6 S以上が要求される。また一度締付をゆるめると当たりの状態が悪くなるので注意を要すると同時に取り付に先立ちリングの当る面を研磨する必要がある。

また、組立てにあたっては、少くともOリングの締代を吸収する機能が配管に組込まれていなければならない。これは一般にはベローズが使われる。

(2) 溶接継手

溶接継手を用いる場合は、その切り離しの際管自身を切断する事になる。従ってこの継手を用いて、何度かの取り付け取り外しを行う場合は寸法の変化を補償し、また前の溶接部には影響を及ぼさない作業方法が必要となる。

尚、継手部の形状としては、単純な管の突合せを考える。管の切断の方法として、機械的な

カッターによる方法と溶断がある。切断の際に、切り粉又はスラグが生ずる事は避けられない。管の外側へ飛び散る分については原理的には処理可能であり、飛び散る方向を注意深く吟味して収集する事になろう。

一方、管の内部へ飛び込む分については、外部へ接続している側はフラッシングなどによって清掃が可能であるがブランケット側の管内へ入ったものは困難である。従って、再利用するものの切り離しの際は、切断の位置に注意して掃除が出来る様配慮しなければならない。

組立ての際の突合せ溶接の際、管の肉厚が相当あるので管端部の開先加工が必要である。この開先の形状には種々のものがあるが、溶接の信頼性を確保する為には、加工精度が要求される。この作業の場合には、ブランケット管、炉ユニット配管側とも作業空間を確保出来ると考えられるので、専用のカッターにより特別の困難なく作業が行える。

一般に、径の大きな管の場合には管の内外両側からの溶接が行なわれる。その時第一層目の溶接では、溶け込み不足などの欠陥が生じ易いので、片側第二層目以降の溶接が終った後に、反対側から第一層目を取り除き再溶接を行う。中小径管あるいは管内での作業が出来ない場合は外面から裏波溶接により管の内面にビードをまわして行く。この為には溶接棒、開先の寸法精度（特にルート部の間隔）トーチ運棒などに注意を要す。この場合に適用する溶接法としては不活性ガスアーク溶接などが考えられる。一般用の不活性ガスとしてはアルゴンであるが、特に精密さを要求される場合はヘリウムを用いる。この不活性ガスにより大気を充分シールドし条件を吟味すれば管の内側でも良い溶接面が得られ、フラッシングをしなくても済まし得るものとする。

継手部の検査には管の外周該当部に排気の出来るカバーを取り付け、管内にヘリウムを満した状態で、ヘリウムの洩れを測定するのが合理的である。

これら二つの継手の方法のうちで核融合炉の場合は、特に

- ・ヘリウムガスのリークは炉運転上大きな障害となる。
- ・不良管に盲栓をして殺すといった使い方が出来ない。
- ・強力な放射線によって照射される。
- ・炉の運転上、必然的に熱サイクルがある。

など一般の場合に比べ格段に厳しい使用条件である。従って、ここでは溶接時の注意によって長期的な信頼性を得易い溶接継手を採用するものとする。

3.2.2 ブランケット支持固定法

ブランケットの支持を考える場合、作用する力としては次の三種類が考えられる。

- 1) 自重
- 2) 電磁力
- 3) 冷却用ヘリウムガス圧

また支持構造を考える場合には、熱変形に対する逃げを考える必要がある。

上記の力のうちで、3) のガス圧に関しては、全てのブランケットセルが側面で当って相互に突っ張り合う状態が望ましい。しかし、熱変形と炉ユニットの組立てを考えると困難な問題である。次に2) の電磁力としてはプラズマ電流の急変に伴って発生するが、二種類の作用が考えられる。

第一はブランケットセルに対し内、外として作用するものであり、第二は前に述べたブランケットセルのリング状構造に於て上下端面を互いに逆にひねる様な力である。これらの力はここでは現在のブランケット構造自身で支持出来るものとする。

次に1)の自重を支える方法としては、その下部に脚を取り付けるのが基本的である。ブランケットユニットを解体し、ブランケット冷却単位の交換によって修理を行う事としているので、この冷却単位自身が自立出来る支持構造を持つ事が望ましいので、この単位毎に支持脚を取り付けるものとする。この時冷却配管ヘッダーを避けて、ブランケットセル締め付け強め輪に取り付ける事になろう。支持脚は脚部と足部から成る。足部は炉ユニット内に敷設された座に当る部分である。これらの構造がFig 3.1に示されている。

荷重を受ける為の足部の面積は、一冷却単位当り、この場合 1 m^2 程度の広さとなろう。

一方この重量は62.5トン程度であるから、足部の面荷重は 6.25 kg/cm^2 の程度である。

ここで、このブランケットに関して 600°C 程度の温度変化がある場合の寸法の変化量として、ブランケットリングの外径の変化が約28mm、冷却単位のトラス方向の巾の変化として平均4.5mm程度と考えられる。もし一体のブランケットトラスを作った場合には、この寸法変化によりトラスの大半径、小半径、更に下部を支持する場合にはトラス軸の高さに変化する。この熱変形を吸収する方法として、ここでは冷却単位毎に独立に一点を固定する事とし、動作温度では相互に密着し、停止冷却時には相互間に間隙を生ずるような構造を採用するものとする。従って、冷却単位に取り付けられている脚は合計5本であるが、そのうちの1本を固定し残りの4本は炉ユニットの座の上を滑る事が出来る。この場合、ブランケットの任意の変形を防ぎ、熱変形による変位のみを許す様なスライド機構の結合を冷却単位相互間に施すものとする。

炉ユニットからブランケットを取り外す場合に必要な作業は、従って固定脚の固定を取り外す事と、スライド機構の取り外しである。炉ユニット一台についてこの固定脚は4本ある事になれば、Fig 3.1の構造によれば、開口部からの作業で全て取り外す事が出来る。

3.3 ブランケット修理

3.3.1 ブランケット修理

前節の検討に於て配管の継手は溶接継手が望ましい事が明らかになった。この為には配管継手部の位置があまりヘッダーに近くない方が良い。また溶接作業を管の外周を一周して行うので隣り合う管の間隔をある程度保つ必要がある。更にこの間隔は継手部の検査のためにも必要である。これらの点から、より配管部作業のしやすい方法として、ここでは前に述べたブランケットを取り出す方法のうちで、遮蔽壁を取り除く方法を採用するものとする。この場合作業は次の様な順序となる。この作業の為の部屋の例がFig 3.2に示されている。

(1) 炉ユニットの解体室への導入

旋回台車によって運ばれて来た炉ユニットは修理室内に引き込まれる。修理室内での炉ユニットの移動はパレットと呼ばれるエアベアリングを用いた台車によって行なわれる。修理を受ける炉ユニットは炉ユニット解体室へ運ばれる。

(2) トロイダルコイルの取外し

トロイダルコイルは各コイル単位毎に独立した断熱容器に入っているため、一つづつ炉ユニットから取り外す事が出来る。トロイダルコイルの炉ユニットに対する固定は、トロイダルコイル相互間の結合より簡単である。

1個のトロイダルコイルは約700トンであるが、クレーンと炉の解体に用いた程度の遠隔操作作業機械を用いて作業を進める。取り外したコイルは別の場所に退避させる。

(3) 放射線遮蔽壁の取外し

放射線遮蔽壁の取外しの必要性についてはまだ検討の余地はあるが、取外す場合は少なくとも炉心部の上部と炉心部とポート部を接続している部分の上部及び下部の一部を取り外すものとする。この時真空シールの方法は、炉の解体の場合の方法に準ずる。

放射線遮蔽壁内には冷却水配管が埋め込まれているからその切り離しの作業が必要である。炉心部遮蔽壁の重量は約670トン、また引き出し部の重量は約260トンと見積られている。一回の作業に取り扱うブロックの大きさは、これより大分小さい。作業はクレーンと遠隔操作による作業車によって行う。

(4) ブランケット冷却単位の取り出し

前に述べた方法により、ブランケット冷却単位を結合している機構を解除する事により故障した単位を取り出す事が出来る。この場合、冷却単位は相互に数mmの間隙をもっているためふれ止めなど吊る場合の案内を作業車によって行う事により故障単位だけを抜き出す事が出来る。抜き取られた故障単位はスクラップとして処理される。炉ユニットには予備の単位を組み込んで、今の逆の手順により組立てることができる。

3.3.2 ブランケット修理設備

ブランケットの修理のために、炉ユニットをほぼ完全に解体する事としたので、炉ユニットの解体設備と取り外した個別部品の処理設備から成る。個別部品処理設備はそれぞれの放射能レベルに応じてその部屋の配置が決められる。

部品の移動に際しては、除染室を通過して次の部屋へ移る様な配慮が必要である。

この様な修理室の例がFig 3.2に示されている。

ここでブランケット修理の為に必要となる機器をまとめると次の様になる。

1) 天井走行クレーン (1000トン)

トロイダルコイル、放射線遮蔽壁ブロック、ブランケット冷却単位などを吊る

2) 作業車

炉ユニット解体作業を行う

クレーンと連動し、遠隔操作により作動する

3) 溶接、切断機

ブランケット冷却用ヘリウムガス管の切断、溶接放射線遮蔽壁の真空シール部作業

4) 各種作業ヘッド

ボルト脱着用レンチ

開先加工用カッター

作業車のアームに取り付けて使用する。

5) 継手部検査装置

6) 中央制御装置

クレーン，作業車，各種作業用ヘッドの動作
修理室扉の開閉，修理室雰囲気管理

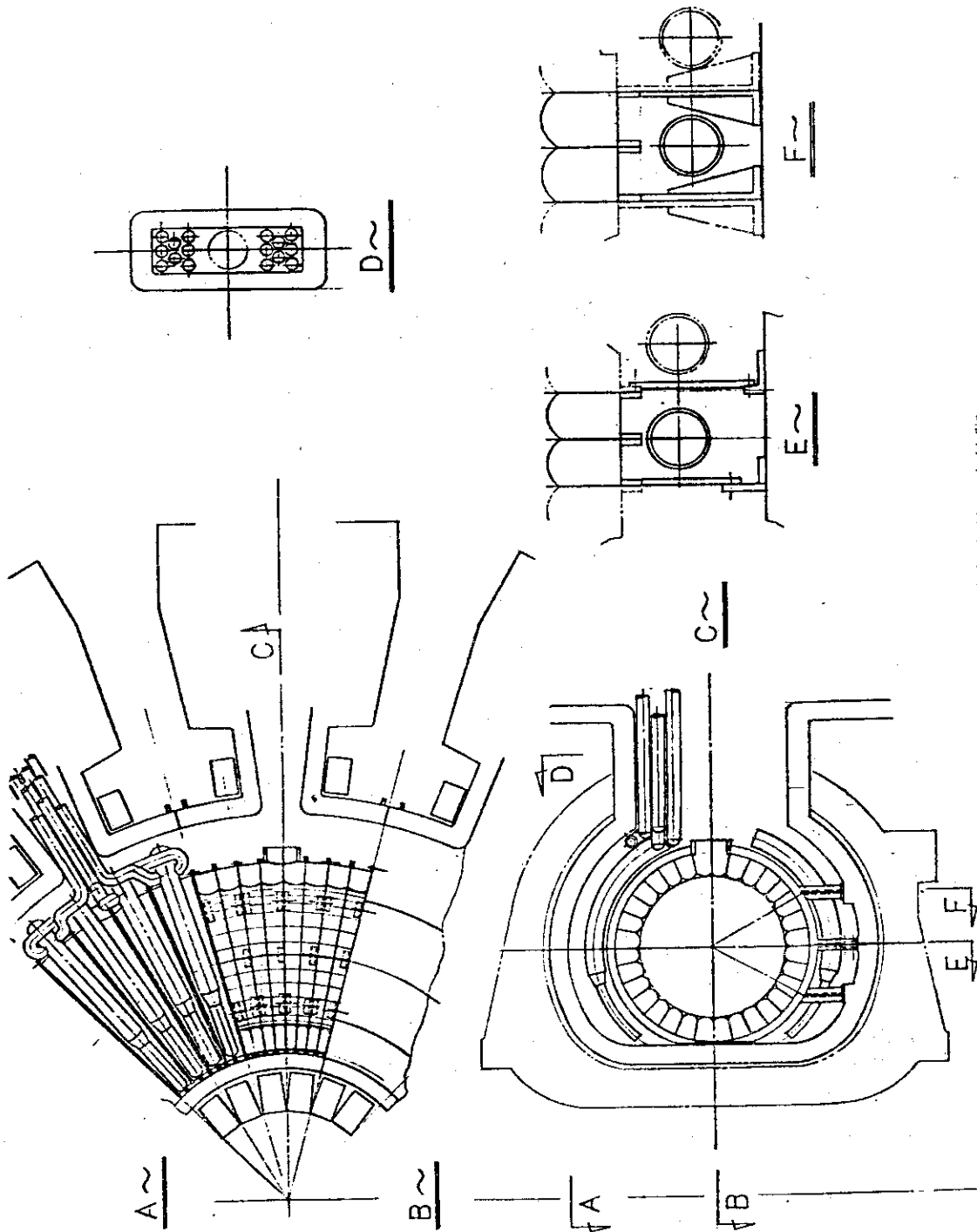


Fig.3.1 ブランケット冷却配管と支持脚

4. ま と め

4.1 修理作業手順と推定所要時間

故障が発生し、その原因と場所が固定され、電磁石の消磁、炉の冷却、極低温部の処理およびコイルの給合解除を行なった後の炉の修理の作業手順と推定所要時間をまとめると Table 4.1 の様になる。

ただし故障箇所はブランケット容器とし、組立ては解体の逆の手順をたどって行なわれるものとする。また所要時間の推定は各項の作業のための段取りと作業機器の動作速度を基にして行なっている。

炉を解体し、炉ユニットを修理室に移送するのに約1ヶ月を要する。また修理室での炉ユニットの解体はトロイダルコイル相互結合の取り外しにどの程度の時間が必要か不明であるが、それを除いて半月程度と見積られる。

4.2 問題点

炉の解体修理から要求する炉ユニット構造とその問題点、および解体修理機器自身の問題点についてまとめる。

4.2.1 解体修理が要求する炉ユニット構造

炉の解体を行なうため、各部に解体を容易にする構造を要求することとなった。それに伴って発生する問題点として次の様なものがある。

① 放射線遮蔽壁トラス部端面接合部の逃げ

必ずしも端面に逃げを付けないと解体不能と言うことではないが、現実的に端面の全面を密着させることは不可能であろうとの判断から、積極的に端面の一部に隙間をもうけてこの部分は鉛の遮蔽ブロックを取付ける方法を提案した。

全面密着構造に比して強度低下をまねくので、遮蔽壁の詳細な強度の再検討が必要であろう。

② 炉ユニットを台車に載せた状態で固定していること。

炉ユニットの取出しを容易にするため、炉ユニットを台車に載せた状態で支持固定する構造を提案した。

炉に大きな電磁力が働いた場合、地震時などにおける強度、固有値などについて検討しておくことが必要であろう。

③ 放射線遮蔽壁の分割

ブランケットを取出すには、冷却母管を切断する必要があるが現状の冷却母管寸法では切断不能である。ここでは現実的な作業性を重視し、母管寸法はそのままにし、放射線遮蔽壁

をいくつかのブロックに分割し、分割部を真空シールする遮蔽壁構造を提案した。

このようにした場合、遮蔽壁の冷却方法、構造強度、真空シール性などについて再検討が必要であろう。またこの問題に関しては、冷却母管寸法を小さくする方向での検討もおこない適当な方法の採用を考えるべきであろう。

4.2.2 解体修理の問題点と今後の課題

前項の炉構造のもとでは、解体修理が炉構造に本質的な変更をもたらすことなしに、炉の解体修理が可能であると考えられる。ただ、製作時においてはさらに詳細な多くの生産技術上の検討が必要である。

なお、本設計で検討が充分でない項目を今後の課題として下記する。

- ① 超電導コイル取り外しの問題点
- ② 作業機械の自動運転制御システム
- ③ 広範囲にわたって動く小型の重荷重高精度マニピュレータ
- ④ 検査方法を含めた全自動溶接機の大型作業物に対する信頼性
- ⑤ 本設計をフィードバックし、全体的観点からの見直しと、修理作業計画の精密化、作業時間見積手法の確立

4.3 結 語

トカマク型核融合炉を12個の炉ユニットから組み立て、炉の故障の場合にこの炉ユニットを外部に引き出して修理作業を行う事について検討した。炉ユニットは放射状に動く車輪付き台車の上に組み立てられる。炉ユニットを組立てる際、接合する種々の要素のうち放射線遮蔽壁は、炉中心部分でその相互端面を密着させ、外側部分は寸法精度、その他の誤差を吸収する為に逃げを作るものとしている。この為に生ずる隙間は特に効果的な材料により遮蔽ブロックを用いて塞ぐ。この部分の真空シールは薄板の突合せ溶接によって行う。炉室の外側に旋回台車を用意し、これによって炉ユニットを周方向に送り、修理の場所へ導く。この台車は放射線遮蔽壁を備え、この為約13,000トンと巨大なものとなった。

ブランケットの修理は、その為に用意された場所でトロイダルコイル、放射線遮蔽壁を取り外し、作業の必要な部位を出来る限り露出させて行う事とした。この為汎用の装置によって作業が遂行出来る。

尚、ブランケットの修理は故障、冷却単位の交換によって行なわれ、又その故障単位はスクラップとして扱うものと考えている。

核融合炉故障修理の点からみた建物の概念的な構成をFig 4.1に示す。

炉室は内径70m、高さ90mの円筒形で2000トンのボラークレーンを備えている。尚このクレーンの自重は約4000トン程度と推定される。炉室の周囲に炉ユニット旋回移動空間があり、結局炉建屋としては直径154m程度のものとなる。炉ユニットを解体し、ブランケットなどの修理を行う建物として30000m²程度のものを考えた。この他に核融合実証炉としての発電、コイル電源、冷凍機、空調、熱交換などの設備、施設が付属する事になる。

Table 4.1 炉ユニット修理所要時間

分類	作業項目	主な使用装置	所要日数
炉ユニットの解体	下ポロイダルコイル取外し	天井クレーン	5日
	レール保護板取付け	作業車	1日
	上ポロイダルコイル取外し	天井クレーン	5日
	トロイダルコイル移動, ブラケット取付など	天井クレーン, 作業車, 人力	2日
	取出準備作業, 台車の着床	人力	1日
	ブラケット冷却母管の切離し	作業車	3日
	真空シール部遮蔽ブロック取外し	天井クレーン, 作業車	3日
	真空シール切断	自動切断溶接機, 検査機	4日
	炉ユニット引き出し準備	取出機駆動台車	1日
炉ユニット移送	遮蔽屏の開閉	ウィンチ	1日
	炉ユニット移送	取出機, 旋回台車	2日
ブランケット修理	炉ユニット搬入	取出機	1日
	トロイダルコイル取外し	天井クレーン, 作業車	-
	真空シール切断	切断機	2日
	放射線遮蔽壁解体	クレーン, 作業車	10日
	ブランケット冷却管切断	溶断機	2日
	ブランケット冷却単位変換	天井クレーン, 作業車	3日

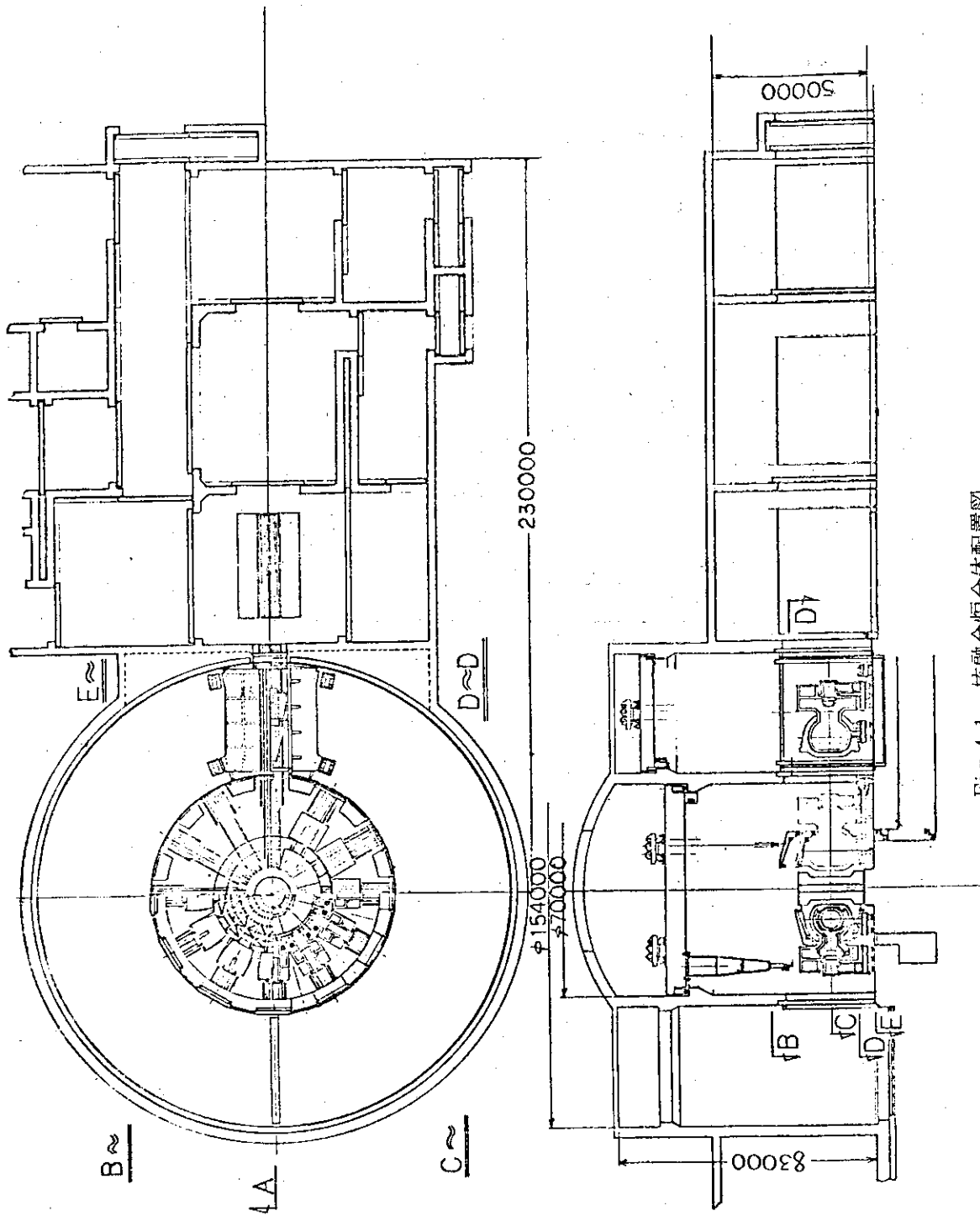


Fig. 4.1 核融合炉全体配置図

引用文献

- 1) K. Sako et al., CONF-760935-P2, 607 (1976)
- 2) 関 他 , 日本原子力学会講演(於東海) (1976)
- 3) 日本石油技術資料, 耐放射線潤滑油, グリス (1973)
- 4) 今泉他, 私信, 住友重機械可動リミタ試験報告書 (1976)
- 5) 東洋機器(KK)技術資料, 東洋エアベアリングシステム適用の御紹介 (1976)
- 6) G. A. PROJECT REPORT, EXPERIMENTAL FUSION POWER REACTOR
CONCEPTUAL DESIGN STUDY Vol. III of III (1976)
- 7) ステンレス鋼便覧, 日刊工業新聞社 (1973)
- 8) 近森徳重, 機械設計, Vol. 17, No. 3 (1973)

設計研究担当者

(1) 主たる設計研究者

住友重機械工業(株) 豊田英二郎, 水口 忠良
齊藤 肇, 深海 庸孝

(2) 原研側担当

炉設計研究室 迫 淳