

JAERI - M
91-089

核融合実験炉(F E R)炉心構造系の
概念設計と試作開発

1991年5月

西尾 敏・佐藤 瓊介・松岡 不識
金森 直和・山田 政男*・小泉 興一
阿部 哲也・細渕 英男・多田 栄介

日 本 原 子 力 研 究 所
Japan Atomic Energy Research Institute

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷機

核融合実験炉（FER）炉心構造系の概念設計と試作開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合実験炉特別チーム
西尾 敏・佐藤 瓊介・松岡 不識・金森 直和
山田 政男*・小泉 興一・阿部 哲也・細淵 英男
多田 栄介

（1991年5月7日受理）

核融合実験炉（FER）の炉心構造系の概念設計を実施し、これに基づいた技術開発課題を抽出した。それらの概要を以下に記す。

炉心構造系の構成要素は、真空容器、遮蔽体、容器内大型交換機器、各種ポート、各種配管等が主なものであり、概念設計を通して FER の使命を果たし得る炉心構造系が成立する見通しを得た。これらが充分高い信頼性をもって成立するための技術開発の優先順位としては、設計条件の多少の変更に関わらず共通性の高い要素技術を高位に置いた。一つは容器内大型交換機器の着脱機構の開発であり、水圧を駆動源としたコッター方式を採用した。駆動機構としてピストン型とフイゴ型と内圧による変形をストロークとして用いる形状可変管型の3種類を試作し、所期の性能が得られることをほぼ確認し、実機適用への見通しを得た。他の共通性の高い要素技術として、機器間に施す絶縁コーティング技術及び導通コーティング技術を取り上げ、コーティング材の選定をし、コーティング方法を確立した。現在、性能試験を実施中である。

一方では、炉心構造系の設計全体の妥当性を確認することを目的に、1/5サイズの模型を製作し、その結果いくつかの機器に対して寸法変更の必要性が明かとなった。

Conceptual Design and Technology Development of Containment Structure
in Fusion Experimental Reactor (FER)

Satoshi NISHIO, Keisuke SATO, Fushiki MATSUOKA
Naokazu KANAMORI, Masao YAMADA*, Koichi KOIZUMI
Tetsuya ABE, Hideo HOSOBUCHI and Eisuke TADA

Fusion Experimental Reactor Team
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 7, 1991)

A conceptual design of FER (Fusion Experimental Reactor) containment structure and its associated R&D activities, conducted from '89 to '90, are described.

The FER containment structure system which mainly consists of a vacuum vessel, shielding structures, in-vessel replaceable components, ports, a cooling pipe system, has been developed to fulfill the required function.

As an initial stage of R&D activities, the elemental technologies common to a tokamak reactor have been developed. Among them, a locking mechanism for supporting in-vessel replaceable components and a technique for insulation/conduction are described. For the locking mechanism, a caulking cotter driven by hydraulic pressure has been employed. Three kinds of hydraulic driving mechanism have been manufactured by trial: a "piston jack" type, a "bellows" type and a "flexible tube" type. In the latter type, the stroke is obtained by changing the cross section of the flexible tube from a flat racetrack shape to a fat shape by hydraulic pressure. As the result of preliminary performance test, the shape of "flexible tube" has been found to be improved.

* Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

For the insulation coating, Al_2O_3 has been selected as the material and a plasma spray method has been applied as the coating procedure. For the conduction coating, Cr_3C_2 has been selected as the material and JET-KOTE method has been applied as the coating procedure. Both methods have been successfully developed and have been confirmed to be applicable the actual machine.

A one fifth scale model has been fabricated in order to verify the design feasibility, mainly geometrical consistency. Then some design modifications were found to be needed for some of the components based on the manufacturing experience.

Keywords: Fusion Experimental Reactor, Containment Structure,
Supporting Structure, Locking Mechanism, Insulation Coating,
Conduction Coating

目 次

1. はじめに	1
2. 概 要	2
2.1 FER の使命	2
2.2 炉心構造系の設計思想	4
2.3 基本構造	8
3. 全体概念設計	12
3.1 機器設計	12
3.2 放射線遮蔽設計	20
3.3 初期組立	26
4. 重要検討課題	50
4.1 電気絶縁・接続構成	50
4.2 容器内交換機器の着脱機構	56
4.3 過渡電磁解析	64
4.4 冷却配管構成	88
5. 試作開発	104
5.1 炉内構造物支持機構	104
5.2 絶縁及び導通のためのコーティング技術	125
5.3 模型の製作	129
6. おわりに	137
謝 辞	137
参考文献	138

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of FER	2
2.1 FER's Mission	2
2.2 Design Guideline for Reactor Structure	4
2.3 Overall Machine Structure	8
3. Conceptual Design Study	12
3.1 Component Design	12
3.2 Shielding Design	20
3.3 Initial Assembling	26
4. Critical Issues for Design Integration	50
4.1 Surface Conditioning for Insulation/Conduction	50
4.2 Locking Mechanism for In-vessel Replaceable Component	56
4.3 Transient Electromagnetics	64
4.4 Layout of Cooling Pipe	88
5. Technology Development and Trial Production	104
5.1 Locking Mechanism for In-vessel Replaceable Component	104
5.2 Surface Conditioning for Insulation/Conduction	125
5.3 Fabrication of Scale Model	129
6. Conclusion	137
Acknowledgments	137
References	138

1. はじめに

1988年から概念設計が開始された核融合実験炉（FER：Fusion Experimental Reactor）は、従来のFER、即ち、INTOR（International Tokamak Reactor）¹⁾ 活動と並行して1987年までの約9年間に渡って概念設計が進められたFER²⁾とは明確に区別される。根本的な相違点は、プラズマ物理のデータベース、特に装置諸元に直接の影響を及ぼすプラズマエネルギーの閉じ込め時間にある。従来は、プラズマのエネルギー閉じ込め時間の経験則として、Alcator則あるいはINTOR則に基づいてプラズマ設計がなされたのに対して、1988年以降の装置設計では、プラズマ実験の進展に伴い新たに提唱されたLモード比例則に基づいている。端的に言えば、1988年以降は装置の大型化及びプラズマ電流の増大が要請されるようになり、工学上の設計思想を見直す必要が生じた。

大型化を最小限に抑えるためにプラズマ断面形状の楕円度が増大し、そのため各機器の形状及び配置が従来とは大幅に変更された。また、プラズマ電流の増加は各機器に発生する電磁力を増大せしめ、機器設計及び支持構造設計が格段に難しくなった。

本検討の目的は新しい設計条件のもとに、どのような炉心構造系が有り得るのかを示すことであり、また必要な技術開発を明らかにすることである。

第2章ではFERの使命（ミッション）を略記し、それを受けた炉心構造系の設計思想と基本構造について述べ、第3章では概念設計で実施された機器設計、放射線遮蔽設計および初期組立について述べ、第4章では重要検討課題として採り上げた、各機器間の電気絶縁・接続の構成、容器内交換機器の着脱機構、過渡電磁解析および冷却配管構成について述べる。更に、第5章では現在強力に進めている試作開発項目である、炉内構造物支持機構と絶縁及び導通のためのコーティング方法について述べると共に、炉心構造系の整合性を検証する目的で実施した模型の製作について述べる。

2. 概要

2.1 FERの使命

FERは核融合発電を実証する原型炉に至る一つ前の段階に位置付けられる。その役割は、実際に核燃焼を起こさせること、将来の核融合炉に必要な工学技術を総合的に実証すること、である。FERの使命は、1986年（昭和61年）の核融合会議の次期大型装置構想案に準拠して、以下の如く決定された。

物理上の使命：核燃焼プラズマの実証と定常運転の開発

1. 核融合燃焼の実証
2. 炉心プラズマの定常化に向けての開発

工学上の使命：核融合炉の総合的炉工学技術の実証と開発

1. 大型機器技術（超電導、炉構造、遠隔保守）の実証
2. 炉心プラズマ制御技術（加熱電流駆動、粒子・熱制御）の開発
3. 炉工学技術（燃料、ブランケット、安全性）の開発

上記の使命を果たし得る装置の基本性能として、エネルギー増倍率（Q）を5～20程度、中性子フルエンスを0.2～0.3 MWa/m²程度と設定した。³⁾また使命達成をより確実なものとするため、次のような2段階の建設と実験を経て順次成果を積み上げる段階的展開を行う。

- (1) コールドフェーズ：装置の主要機器の建設により、大型核融合装置技術を実証し、プラズマ電流15～20 MAの水素放電による炉心プラズマ特性を把握する。
- (2) ホットフェーズ：第2段階として、遮蔽体、安全系装置等を増設し、重水素／三重水素の実燃料による核燃焼の実証を行う。また、定常運転に必要な制御技術を開発する。

上記の設計目標に基づくFER概念設計案の基本諸元を表2.1-1に示す。

表2. 1-1 核融合実験炉 (FER) の基本諸元

	コールドフェーズ	ホットフェーズ	
使用燃料	H	D/T	
プラズマ主半径 (m)	4.5	4.7	
プラズマ副半径 (m)	1.8	1.7	
プラズマ楕円度	2.0	2.0	
プラズマ電流 (MA)	18~20	15	
プラズマ平衡配位	シングルヌル	シングルヌル	
軸上トロイダル磁場 (T)	5.4	4.2	
安全係数	3.0	3.0	
トロイダルリップル (%)	3.0	3.0	
トロイダル磁場コイル数	12	12	
磁束供給量 (Vs)	170	160	
核融合出力 (MW)	—	400	600
エネルギー増倍率 (Q値)	—	5	20
放電継続時間 (秒)	100	1000	100
中性子壁負荷 (MW/m ²)	—	0.6	0.9
フルエンス (Mwa/m ²)	—	0.2 ~ 0.3	—

2.2 炉心構造系の設計思想

炉心構造系の構成要素は、プラズマ真空容器、超電導コイルへの放射線損傷の防護及び炉停止後の炉室立ち入りを可能とするための遮蔽体、容器内（炉心部）大型交換機器、各種ポート、各種配管等がその主なものである。炉心構造系の概念を構築するに当たって必要となる情報は極めて多岐にわたり、それらの関連を図2.2-1に示す。直接関連を有する項目として容器内大型交換機器の交換方式、トーラス一周抵抗、プラズマ位置安定化の為にシェル構造／容器内制御コイル、電磁力、加熱／電流駆動、燃料／ブランケット等が考えられるが、これらの内最も影響の大きい容器内大型交換機器の交換方式とトーラス一周抵抗を取り上げ、以下これらの関連の具体的内容に付いて述べる。

(1) 容器内大型交換機器の交換方式

トカマク装置の容器内大型交換機器は炉の寿命中数回の交換が想定されており、その方式は”水平交換”と”垂直交換”に大別される。”水平交換”とは図2.2-2(A)に示すようにブランケット等の大型機器の出し入れを水平方向から行う。”垂直交換”における出し入れはトーラスの上方から行い、その概念を図2.2-2(B)に示す。INTORにおいて両者の比較検討が広範囲に渡ってなされた。²⁾ その主な結論として、直接的には水平交換は比較的容易で高い信頼性が期待されるが、垂直交換は複雑な動きが要求され、従って高度の支援機器の開発が不可欠となる。一方、間接的な影響として、水平交換の方はポロイダル磁場コイルの設置場所として広範囲に渡って禁止領域が設けられ、要求されるプラズマ平衡配位によっては過大なコイル電流が必要になる。

FERは可能な限り装置の小型化を図るため、プラズマの垂直位置不安定性の制御可能限界近くまでプラズマ楕円度 ($\kappa = 2.0$) を上げた。 $\kappa \leq 1.7$ の平衡配位では水平交換、垂直交換の両方で必要なコイル電流（コイル起磁力）に殆ど差は見られないが、 $\kappa \sim 2.0$ 程度の平衡配位になると、水平交換のコイル起磁力は垂直交換のそれより5割増し（蓄積エネルギーで2倍以上）となる。これは、ポロイダル磁場コイルの物量及び電源容量の増加に留まらず、トロイダル磁場コイルに過大な転倒力を誘発する。従って、FERの容器内大型交換機器の交換方式は”垂直交換”とした。

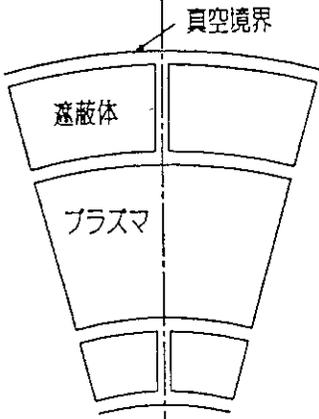
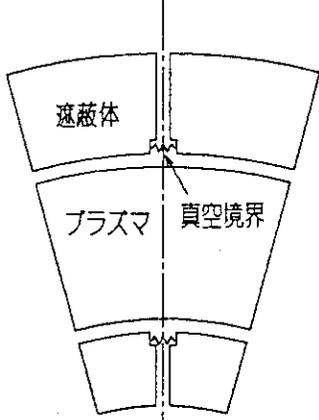
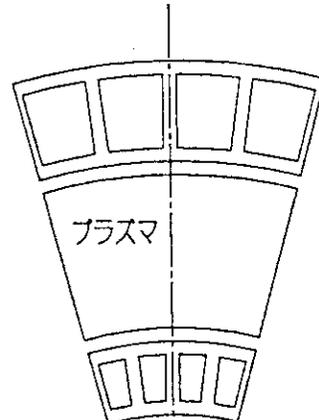
(2) トーラス一周抵抗

トーラス一周抵抗値は直接真空容器／遮蔽体の構造概念に影響を及ぼす。高抵抗真空容器は外部からの磁場が素早く浸透し、プラズマの制御上優れた応答特性を有する反面、プラズマ異常消滅時にはポロイダル磁場コイル系に誘起する電圧、電流が大きくなり、更には超電導用の低温構造体でのジュール発熱も大きくなる。一方、製作性及び構造信頼性の観点からは低抵抗真空容器が優れている。抵抗値の違いによって、真空容器／遮蔽体の取り得る構造概念を表2.2-1に示す。

FERではプラズマのブレークダウン（着火）及び初期立ち上げをより確実にするため、トーラス一周抵抗値は比較的高く取り、 $20 \mu\Omega$ に設定した。表2.2-1に示すように、均一

抵抗&真空容器/遮蔽体分離構造若しくは集中抵抗&真空容器/遮蔽体一体構造の何れかの構造解を取り得るが、FERでは後述するように前者を採用した。

表2. 2-1 真空容器/遮蔽体のトラス一周抵抗による構造比較

	構 造
高抵抗	 <div style="float: right; text-align: right;"> <p>均一抵抗</p> <p>分離構造</p> </div>
	 <div style="float: right; text-align: right;"> <p>集中抵抗</p> <p>一体構造</p> </div>
低抵抗 ($< 10 \mu\Omega$)	 <div style="float: right; text-align: right;"> <p>均一抵抗</p> <p>一体構造</p> </div>

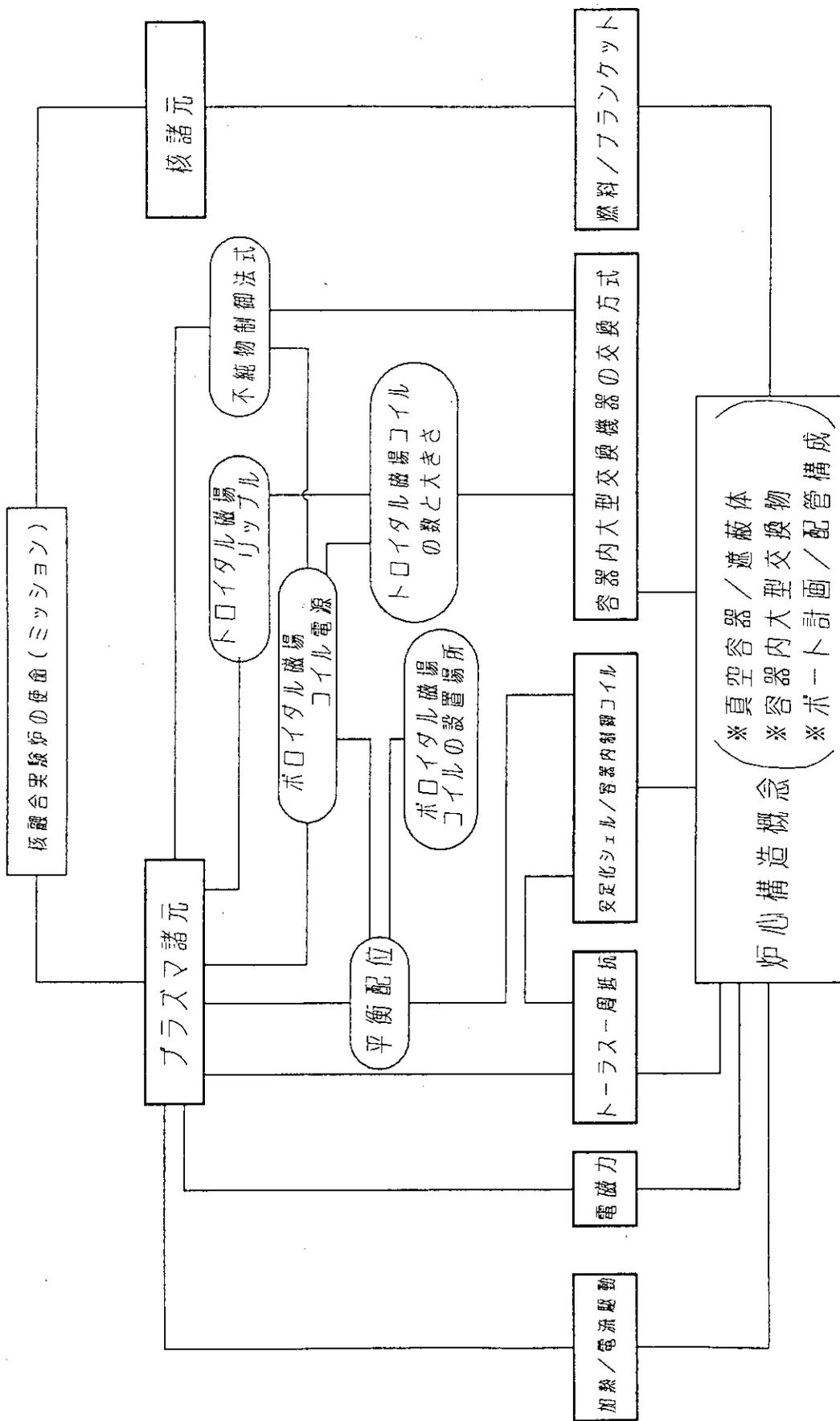


図2. 2-1 炉心構造概念の決定要因の関連図

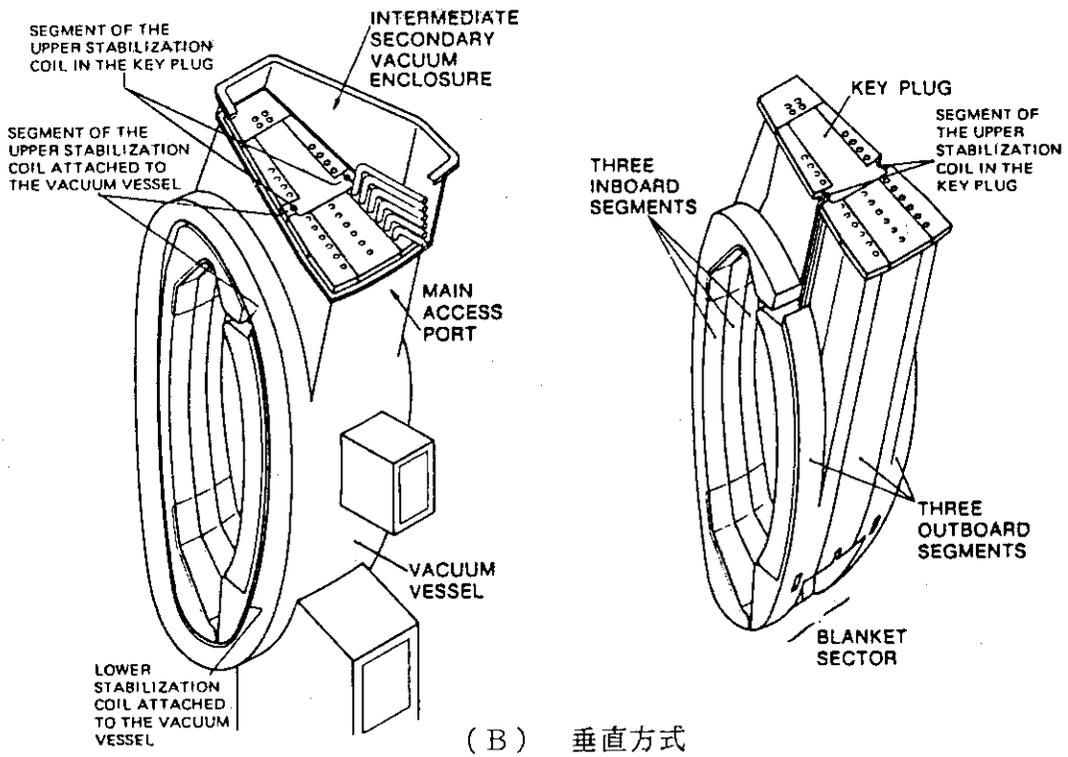
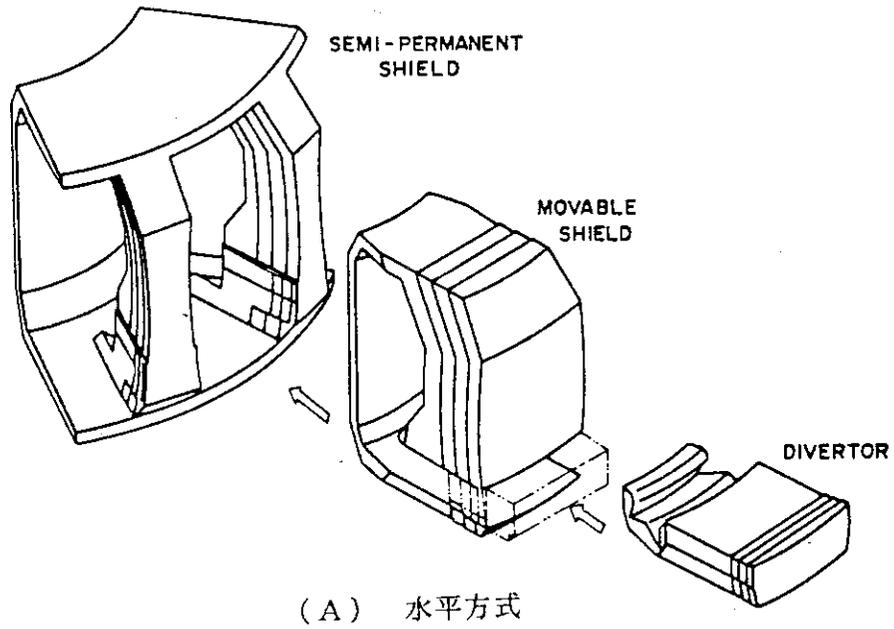


図 2. 2 - 2 容器内大型交換機器の交換方式

2.3 基本構造

F E Rの炉心構造設計を進めるに際し、小型化、高性能化及び高信頼性を基本姿勢とした。プラズマ真空容器及び遮蔽体については、真空境界、一周抵抗、支持構造、遮蔽及び高熱流束受熱という機能が要求されるが、それぞれの機能を分担する構造とすることによって信頼性を確保すると同時に、プラズマに面した損傷を受け安い第一壁付遮蔽体を薄型とし保守性の向上及び廃棄物の軽減を図った。高熱流束受熱機器であるダイバータ及び第一壁については、アーマタイルと構造体の階層化を図り、炉内修理及び炉外修理の二段階保守により作業性の向上に努めた。超電導コイルの真空容器であるクライオスタットについては、通常的金属性真空容器と鉄筋コンクリート容器の二つの概念があるが、F E Rの場合は円筒壁に薄いステンレス板ライニングを施した鉄筋コンクリート構造体を採用し、生体遮蔽及び建家強度壁を兼ねることによって炉本体棟の小型化を図った。クライオスタット上部ポートは代表的な容器内大型交換機器である可動遮蔽体（非増殖ブランケット）の出し入れに利用され、水平ポートはプラズマ対向機器の炉内交換保守を行う遠隔機器をはじめとして、加熱電流駆動装置、プラズマ計測装置、ブランケット・テストモジュール等を設置するために使用する。下部の排気ダクトは、プラズマ真空排気その他ダイバータ構造体を出し入れする空間を兼用している。図2.3-1にF E Rの炉心全体構造の三次元鳥瞰図を、図2.3-2にF E R炉心の立断面図を、図2.3-3に赤道断面図をそれぞれ示す。図2.3-4には炉本体と周辺機器の配置を示す。

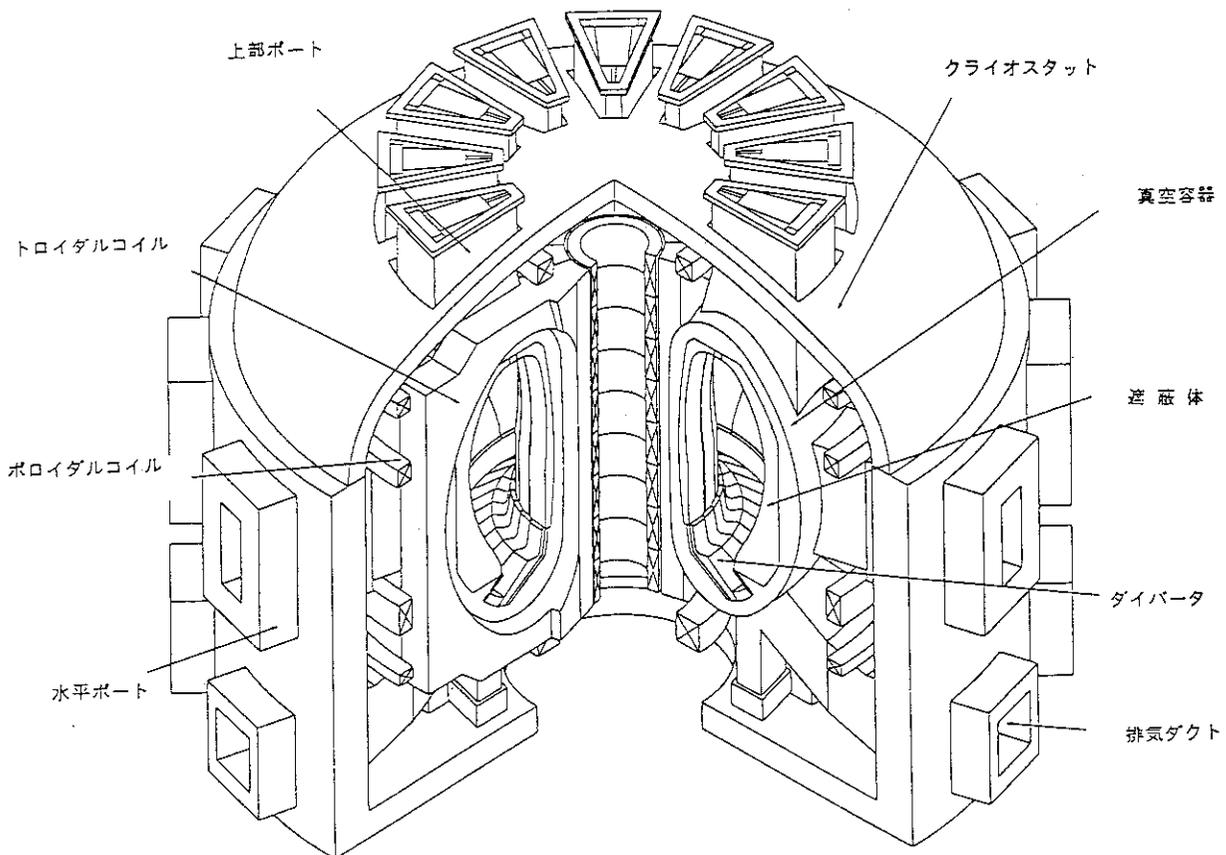


図2.3-1 F E R炉本体鳥瞰図

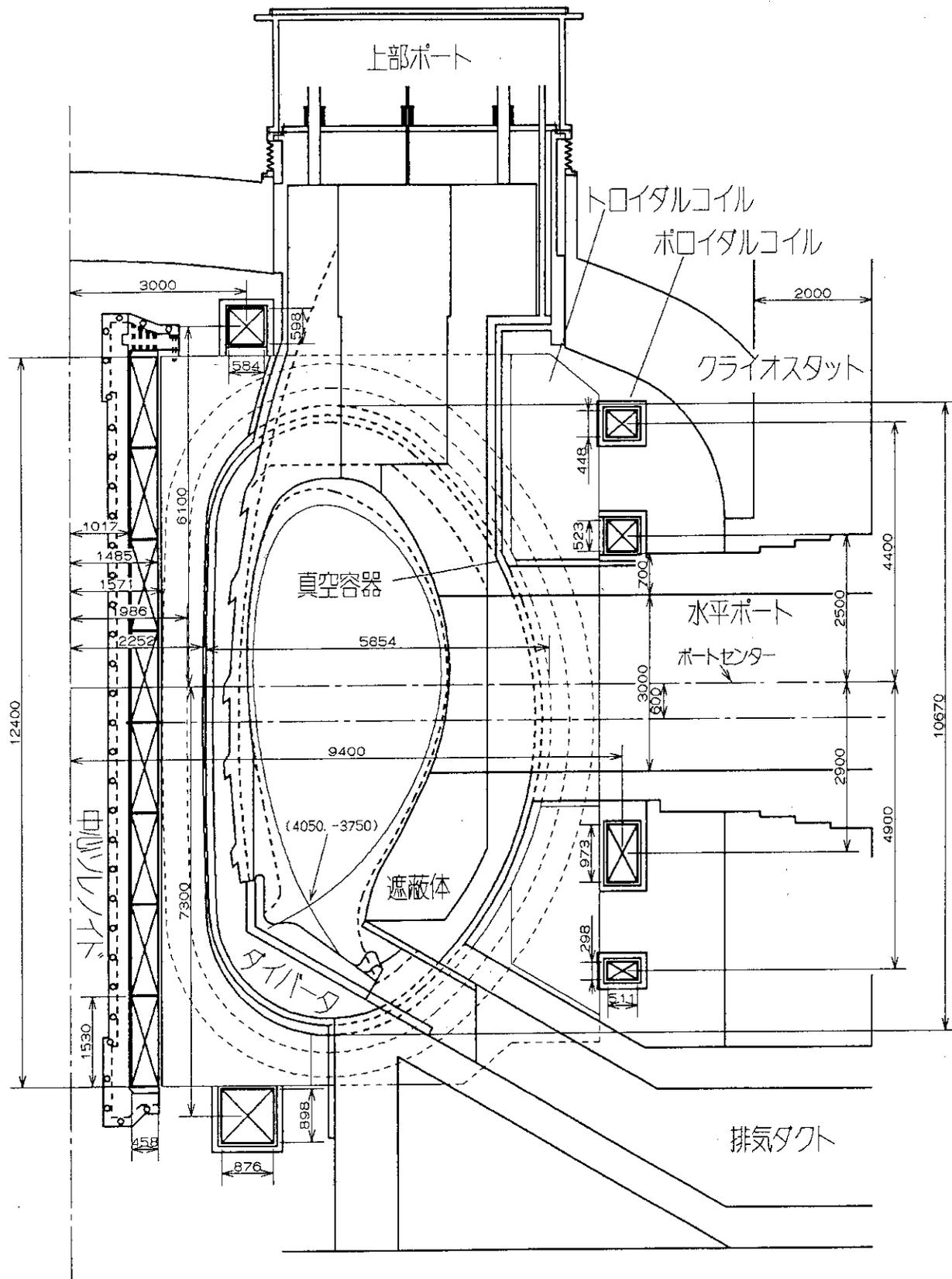


図 2. 3 - 2 FER炉心立断面図

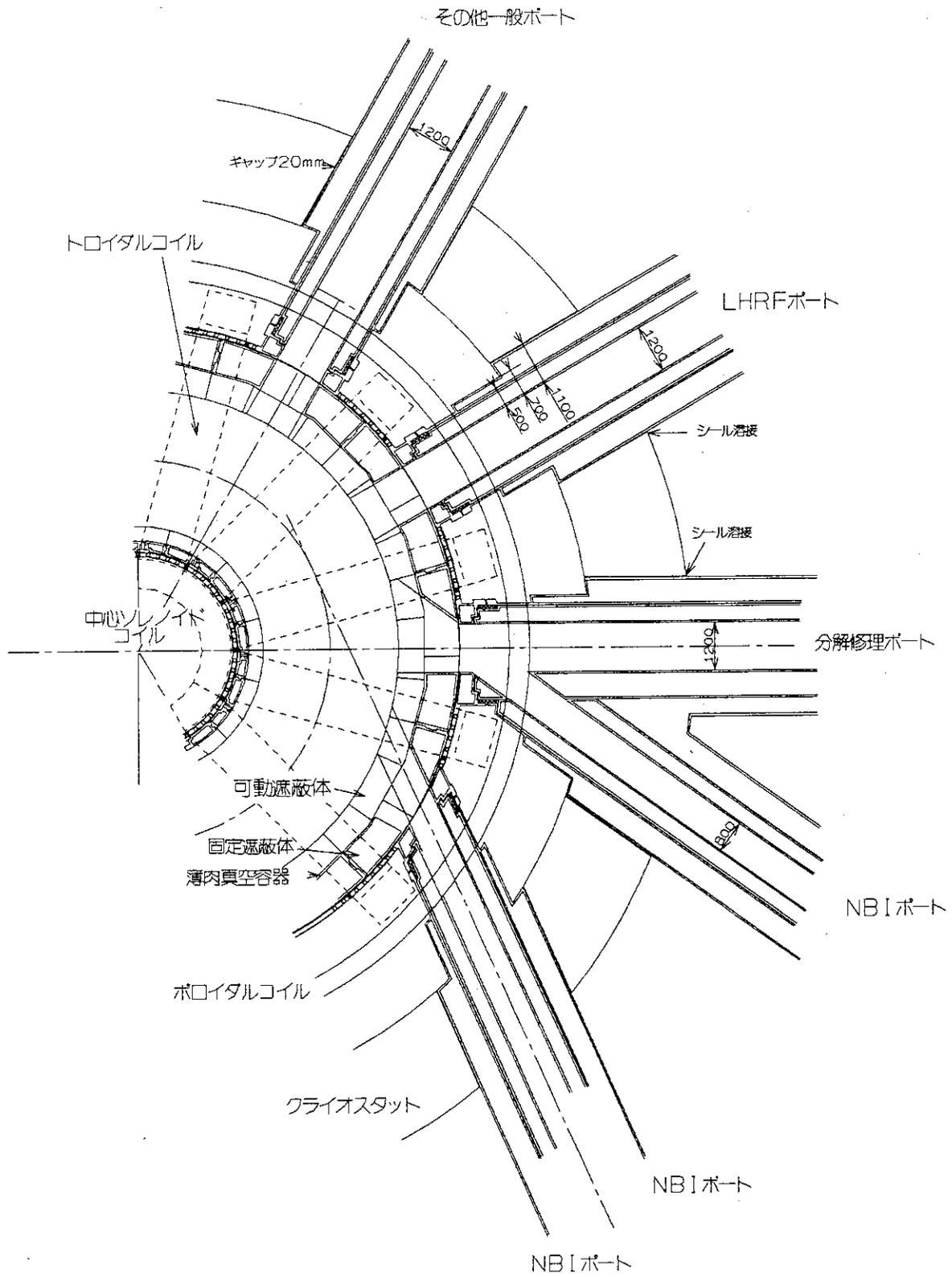


図 2. 3 - 3 FER 炉心赤道断面

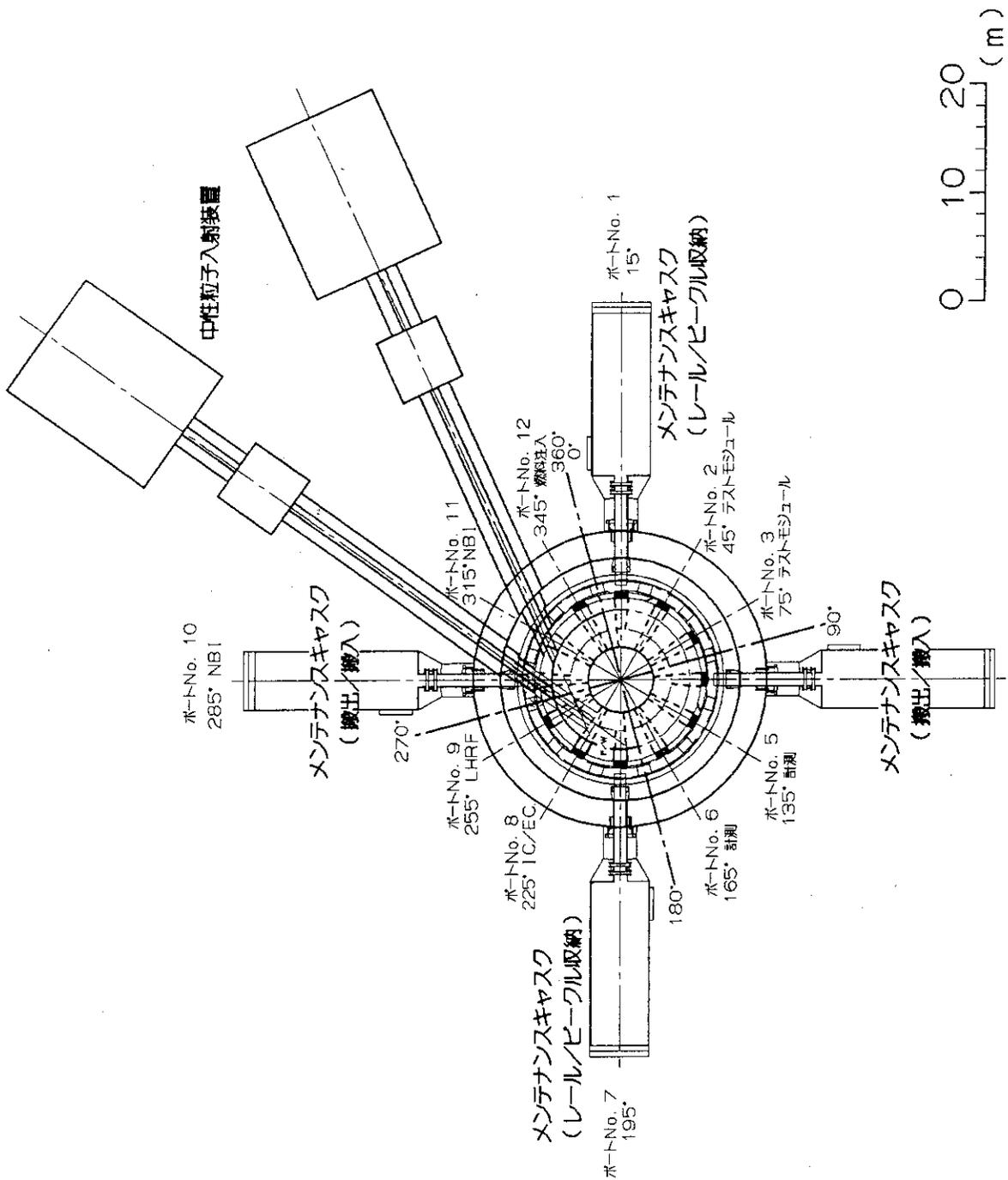


図 2. 3 - 4 FFR 炉本体と周辺機器の配置図

3. 全体概念設計

3.1 機器設計

3.1.1 プラズマ真空容器

プラズマ真空容器に課せられる主な機能は、

- 1) プラズマ真空境界、トリチウム一次格納壁の形成
- 2) 一周抵抗の確保
- 3) 炉内構造物の自重支持及び対電磁力支持
- 4) コイル遮蔽及び生体遮蔽への寄与

である。この要求を満たす真空容器の概念として機能を一体化した厚肉真空容器と、機能を分離した薄肉真空容器がある。

機能を一体化した厚肉真空容器の場合、一周抵抗確保のために厚肉真空容器内に高抵抗部を作る必要があり、この信頼性が課題となっている。また、セクター間結合のための厚肉溶接による溶接熱変形、厚肉であるための過大な熱応力の発生等の問題がある。FERでは、これらの問題を解決するために、機能を分離した薄肉真空容器を検討し、概念設計を実施した。

薄肉真空容器の概念を図3.1-1に示す。真空容器は、機能1)、2)を有する薄肉二重真空容器と機能3)、4)を有する固定遮蔽体から構成される。

薄肉二重真空容器は、厚さ13mmの板2枚が矩径チューブを挟んで一体化し、2枚の板の間隔が120mmとなるような構造である。トーラスは薄肉溶接(13mm板厚)により形成される。これにより均一の一周抵抗 $20\mu\Omega$ を確保する。サンドイッチされる矩径チューブは、容器の剛性向上と冷却流路の確保を主な目的としている。この二重真空容器は、トリチウムに対して二重格納壁を形成している。

固定遮蔽体は、強固なトーラスを形成することにより炉内構造物の自重及び対電磁力支持を行う。このトーラス形成はボルト、キー、コッター等の機械結合により行う。なお、固定遮蔽体には一周抵抗を切るため、TFコイル直下で電気絶縁がなされている。固定遮蔽体と二重真空容器は、プラズマ異常消滅時の電磁力あるいは地震による両者の衝突を避けるため、その間(初期組立を考慮して数十mmのギャップが存在する)に、板バネ、ボルト等の適当なスペーサを置き、一体化を図ることを考えている。この概念を図3.1-2に示す。

3.1.2 可動遮蔽体

可動遮蔽体は、第一壁を含む箱型構造体で、上部ポートから取りだし可能な構造とした。引き抜き及び対電磁力支持を考慮して、内側及び外側可動遮蔽体は、3分割/1セクターとした。可動遮蔽体の対電磁力支持は、図3.1-3に示すように、固定遮蔽体についている支持レールと水圧を利用した(形状可変管の駆動源:4.2節で詳述)キー、コッターにより、お互いに張り合っ1セクターを一体化し固定遮蔽体に支持させる。

3. 1. 3 ダイバータ

ダイバータの全体構成は、図3. 1-4に示すように、

- 1) C/Cコンポジットのアーマタイル付きCu冷却管、
- 2) 冷却管を支持するSUS316の支持板、
- 3) SUS316の冷却配管及び出入口ヘッダー、及び
- 4) SUS316のダイバータ支持構造体からなる。

ダイバータは、各種の負荷が厳しく分解修理が必須となるため、特に分解修理性を考慮した設計が重要である。FERでは、本構造物の分解修理シナリオとして、

- 1) アーマタイルの炉内修理、
- 2) ダイバータ板の炉外取りだし修理、
- 3) 支持構造体を含むダイバータカセットの炉外取りだし修理

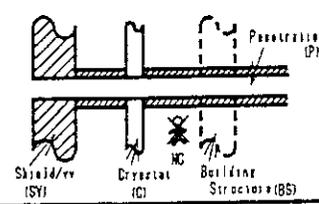
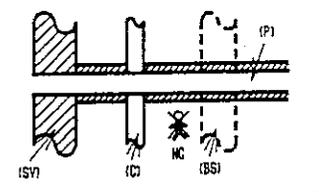
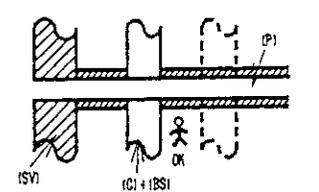
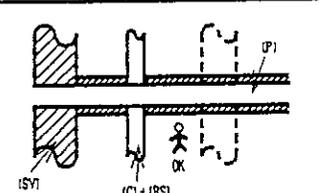
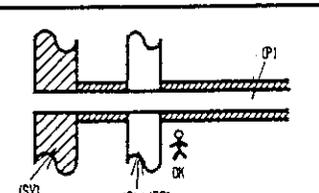
の3階層の修理構想を取ることにした。アーマタイルを冷却管にロー付けし、その冷却管を支持板上に設置する。支持板からの冷却管支持には、冷却管の熱伸び吸収機構としてスライド方式を取り入れている。この支持構造においては、電磁力低減の観点から隣合う冷却管同志が電氣的にループを組まないよう、電気絶縁構造としている。なお、支持板上には出入口ヘッダーも設置する。そして、この支持板はダイバータ支持構造体に支持される。この支持概念を図3. 1-5に示す。本支持は、水圧利用（ジャッキ型駆動機構）のコッターを考えている。

磁力線に沿った荷電粒子の排気ダクト内壁への侵入は、排気ダクト壁の保護のために、内壁へのアーマタイル装着を必要とする。一方、排気ダクト内壁のアーマタイルの交換修理は、炉内アクセス及び炉外取りだし共に複雑／困難なため、極力避けたい。したがって、FERでは荷電粒子の排気ダクト内壁への侵入衝突を防ぐため、ダイバータ板のサイドモジュール外側にテーパの付いた壁を設けた。

3. 1. 4 クライオスタット

本来クライオスタットに課せられる機能は、超電導コイルに対する真空断熱であるが、FERにおいては生体遮蔽の境界としているため、炉心構造からの遮蔽状況を踏まえた遮蔽性能が要求される。クライオスタットの構造形式はSUS・水構造とコンクリート構造の2種類が考えられるが、炉周辺の機器構成からクライオスタット周辺は階層構造となり、機器寸法・重量が大きいためクライオスタット周辺には階層構造を支持する構造体の配置が必要となる。しかし炉周辺の機器配置スペースは非常に厳しく、クライオスタット周辺に階層構造の支持構造体を配置することは難しい為、周辺階層構造の支持構造体の機能を兼ねた備えたクライオスタットが併せて要求される。以上の真空断熱・遮蔽・支持構造の要求機能と構造形式の比較を表3. 1-1に示す。その結果、FERにおけるクライオスタットは内部にSUSライニングを施した鉄筋コンクリート形式とした。すなわち側壁の構造は真空に対する気密機能をSUSのライナーで、遮蔽・支持構造を鉄筋コンクリートで構成する。なお支持機能の必要性の無い上部ドーム及び下部プレートの構造はSUS・水構造とした計画を行った。クライオスタットを含む炉心周辺の概要を図3. 1-6に示す。

表3. 1-1 クライオスタット構造概念の比較

Case No.	Cryostat/Shield/Building Configuration	Cryostat Structure	Penetration Shield (Inside/Outside cryostat)	Biological Shield Capability		Building Structure	Judgement
				Outboard Bulk	Cap Streaming		
1		SS:70cm equivalent SS thickness:7cm	inside:120cm outside:120cm	○	×	△ (Additional Structure Needed)	×
2		SS+H ₂ O:70cm 10% 90%	inside:80-90cm outside:120cm	○	×	△ (Additional Structure Needed)	×
3		SS+H ₂ O:160cm 20% 80%	inside:50cm outside:120cm	○	○	△ (Additional Structure Needed)	△
4		SS+H ₂ O:70cm 80% 20%	inside:50cm outside:120cm	○	○	△ (Construction Difficult)	△
5		concrete:200cm	inside:50cm outside:120cm	○	○	○	○

○ : good △ : medium × : poor

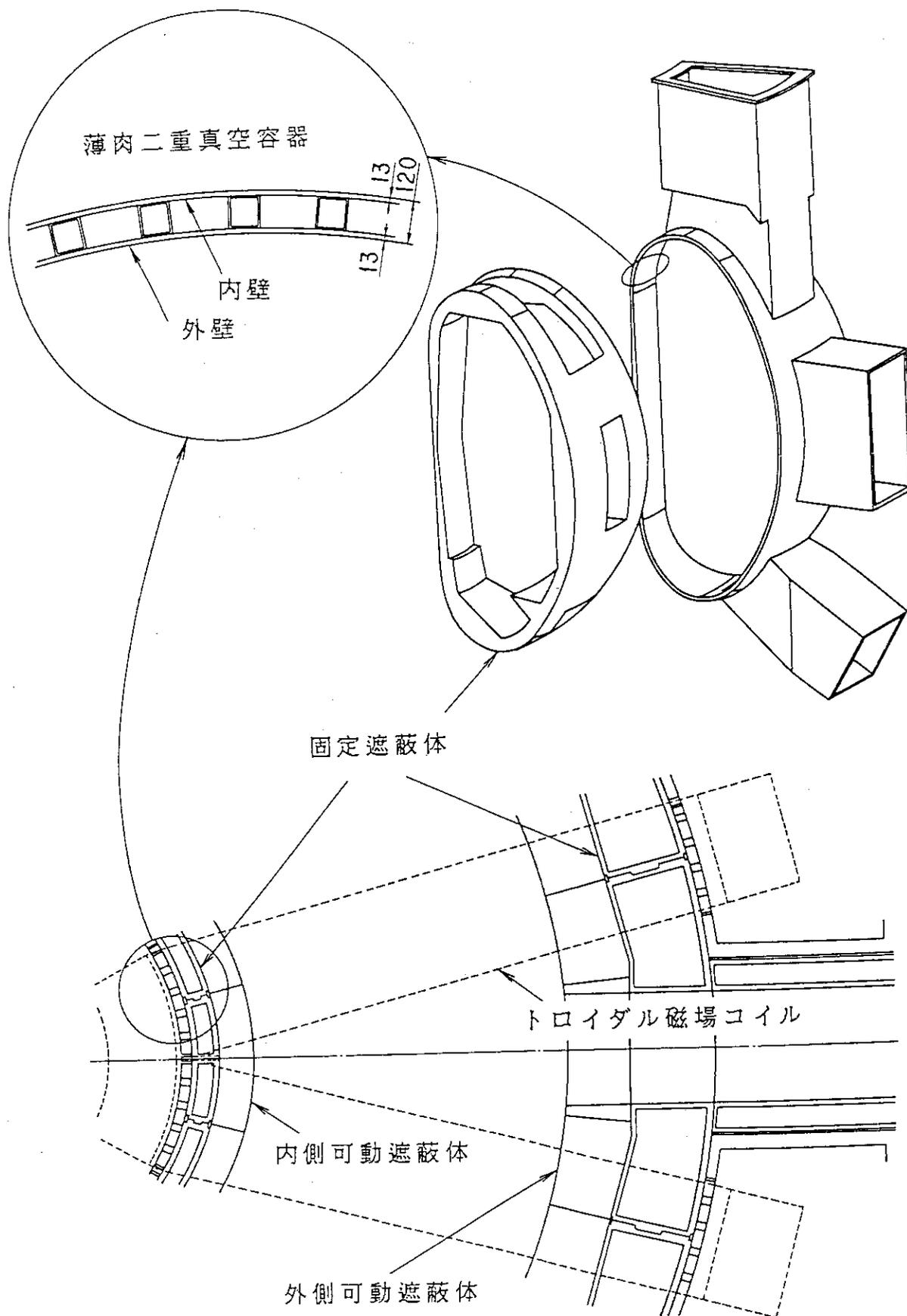


図3. 1-1 真空容器/固定遮蔽体分離型の炉心構造

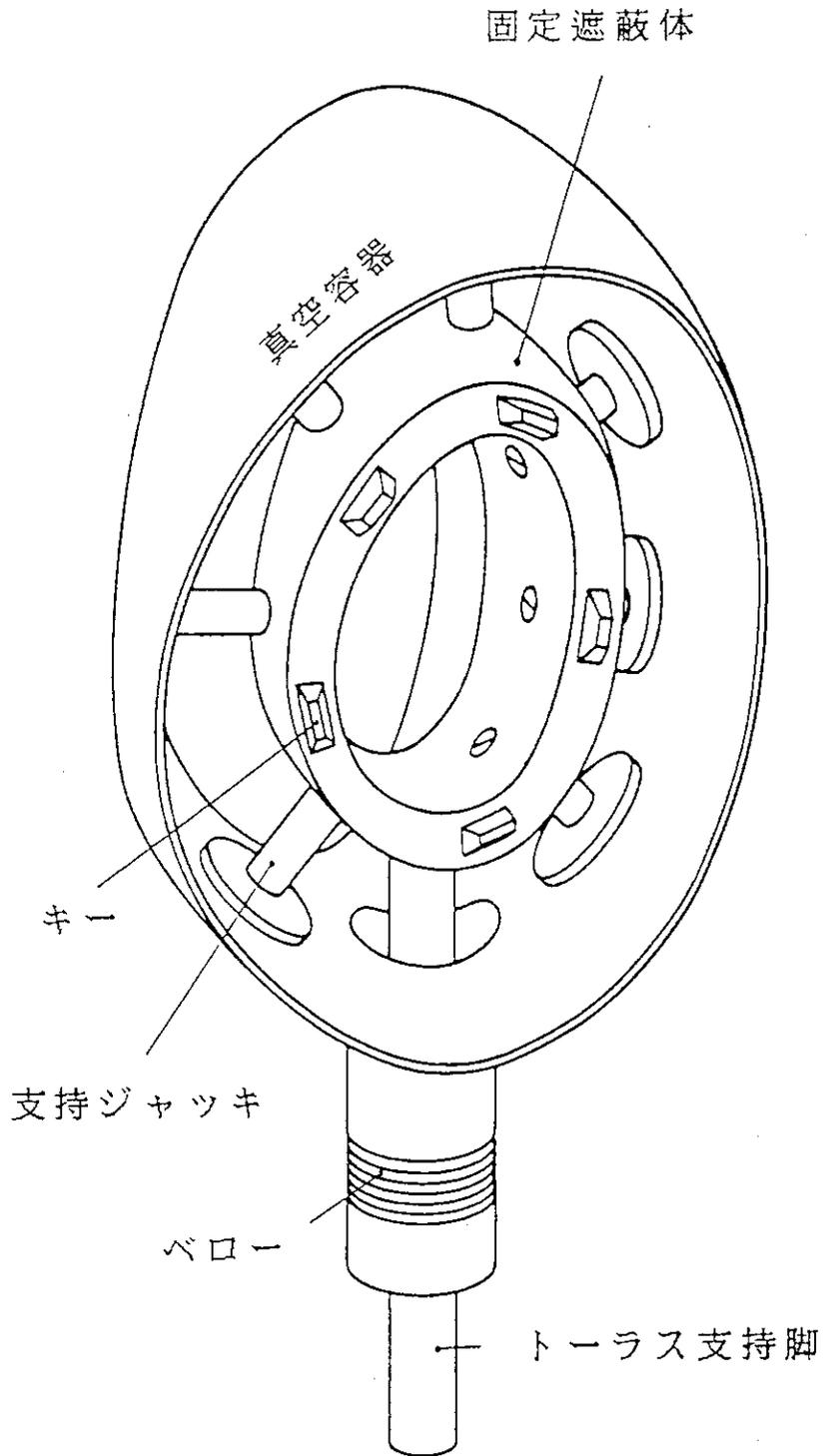


図3. 1-2 真空容器/固定遮蔽体分離型の支持構造概念

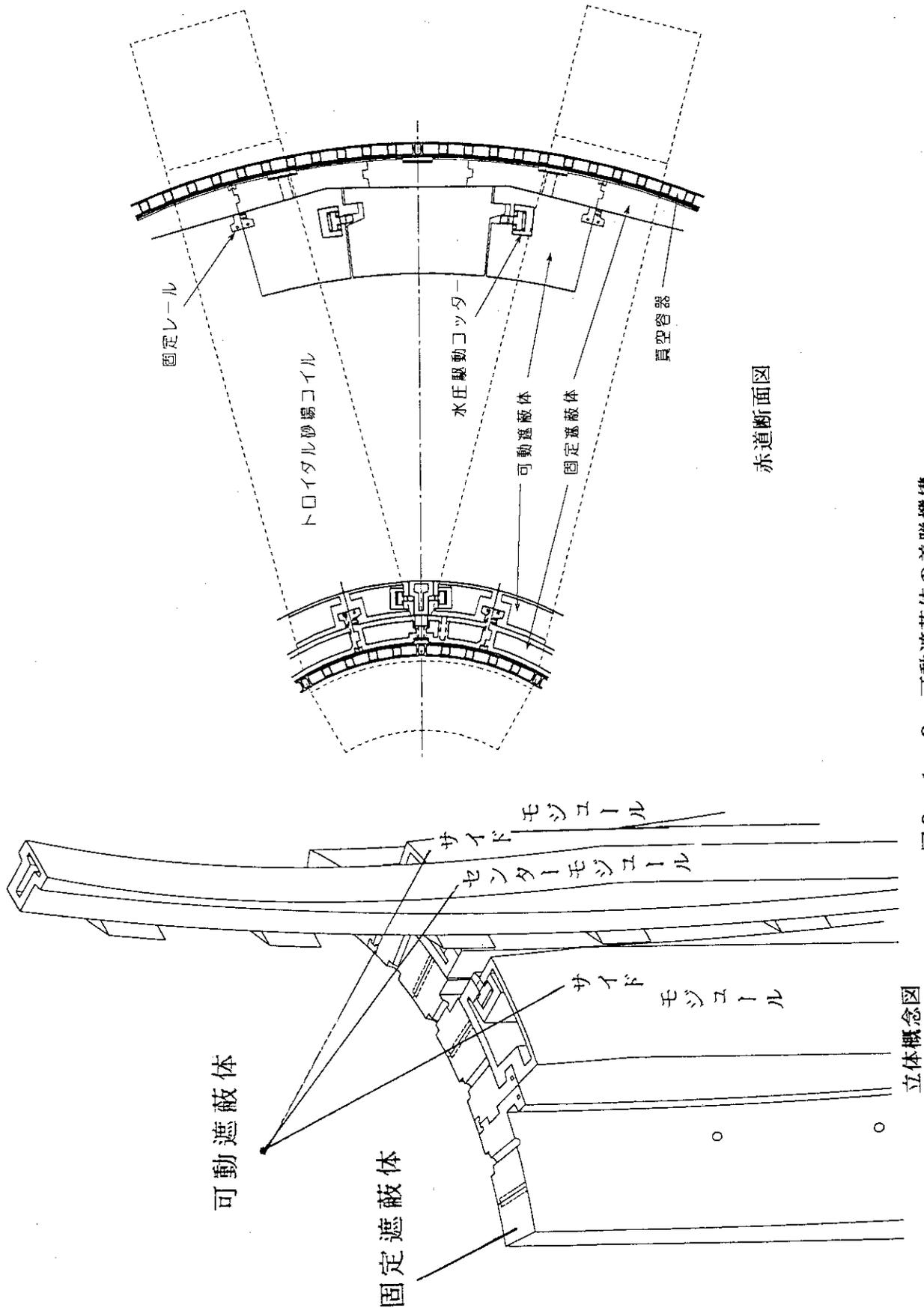


図3. 1-3 可動遮蔽体の着脱機構

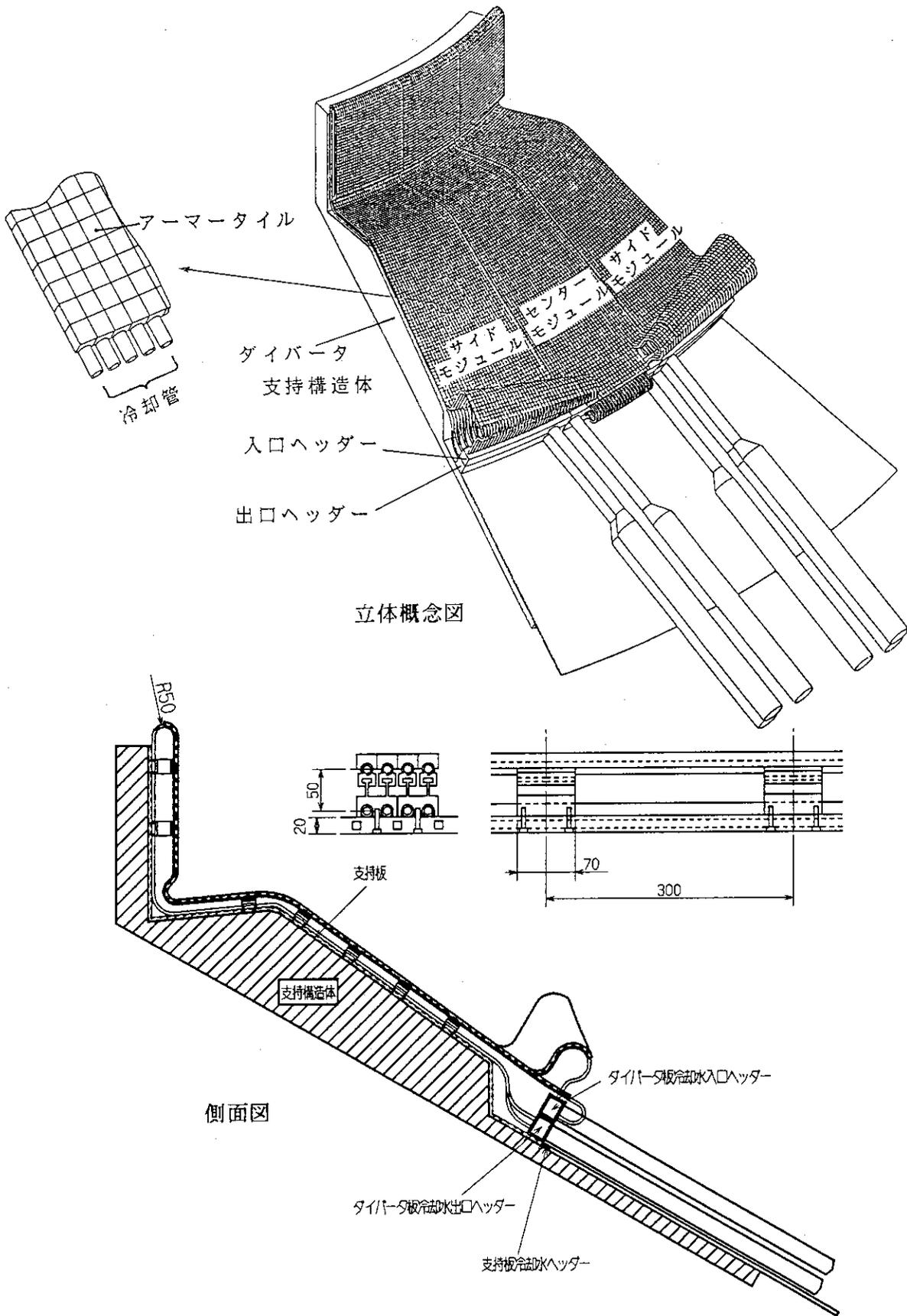


図3. 1-4 ダイバータ全体構造図

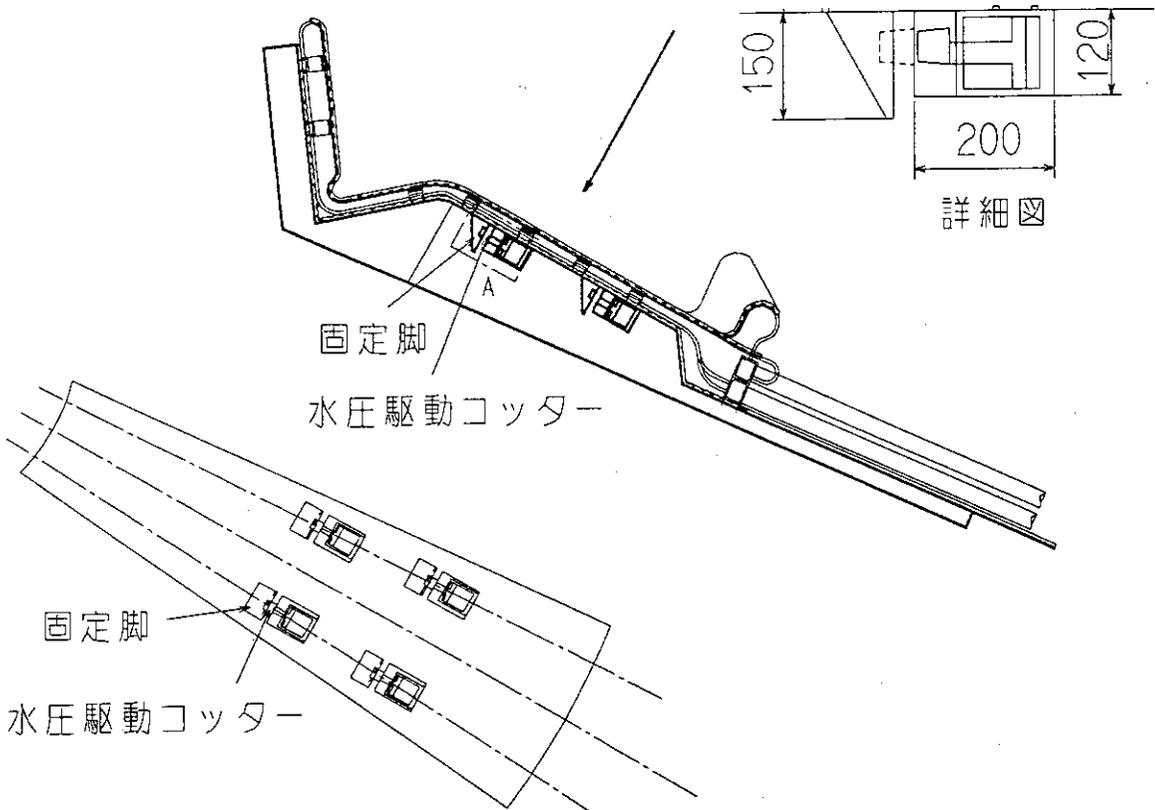


図3. 1-5 ダイバータ板支持構造

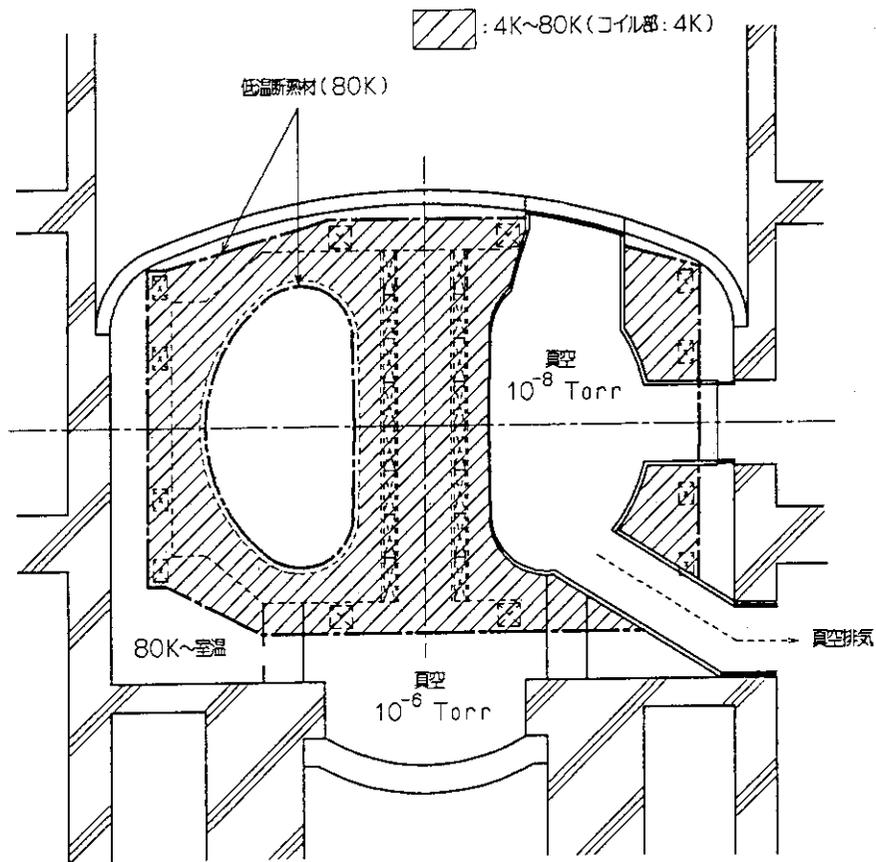


図3. 1-6 コンクリート型クライオスタットの全体構成

3.2 放射線遮蔽設計

3.2.1 遮蔽設計の考え方と設計基準

放射線遮蔽設計の主要項目は2つあり、それらは超電導コイルに対する放射線遮蔽と、分解修理組立時の炉室内の作業員及び公衆に対する生体遮蔽である。超電導コイルに対する放射線遮蔽に最も大きな影響を与える因子は、トラス内側の遮蔽体厚さであるが、評価量を直接左右する因子として、第一壁中性子負荷も考慮しなければならない。トラス内側の遮蔽体厚さは、超電導コイルに対する影響としては指数関数的である。この厚さは、主半径の寸法に大きなインパクトを与える因子の1つであり、主半径の大きさは装置の建設費用を最も大きく左右する装置パラメータである。従って、トラス内側の厚さは、超電導コイルに対する遮蔽特性を満足すると同時にできる限り薄くすることが要求される。一方、分解修理組立時の炉室内の作業員に対する生体遮蔽に関しては、炉停止後の炉室内の γ 線線量率を低減することが目標となる。これらの γ 線は、運転中に透過または漏洩した中性子によって放射化されたものが主であるため、運転中の中性子の透過及び漏洩を極力抑える設計が必要となる。

トラス内側の遮蔽体の厚さを決定する基準として、超電導コイルに対する遮蔽設計基準が表3.2-1のように定められている。これらの基準の中で、全核発熱量は、超電導コイルを冷却する液体ヘリウム冷凍機の設備容量との兼ね合いで決められる。一方、核発熱率の上限は、超電導コイルの安全性（超電導状態を安定に維持できるかどうか）によって決まり、この限界は、外乱と冷却能力の大小で決まり、更に巻線部の構造にも依存する。絶縁材の吸収線量の上限は、電気絶縁材の構成材の放射線損傷による材料強度の劣化の限界によって決定される。また、超電導コイルの安定化材である銅のdpa損傷の上限は、銅が中性子の照射下ではじき出し損傷による電気抵抗値の増加が限界となって決定される。更に、超電導コイルの巻線部の高速中性子フルエンスの上限は、巻線部超電導線材の放射線損傷の限界で決定される。これらの物理量の中で、巻線部の核発熱率とTFC（トロイダル磁場コイル）の全核発熱量は、運転中の瞬時値であるが、絶縁材の吸収線量、銅のdpa放射線損傷及び巻線部の高速中性子フルエンスの上限は、全運転時間に依存する量であり、第一壁における中性子フルエンスが 0.3 M W a/m^2 と低いFERでは問題とならない。

生体遮蔽に対する設計基準には、2つの項目が含まれる。1つは作業員の個人被曝線量に対する制限から起因しているものであり、運転中は炉室に作業員が立ち入ることを禁止しているが、前記したように、炉停止後の炉室内の線量率は作業員の立ち入り可能な放射線レベルに設定しなければならない。もう1つは、一般公衆の個人被曝線量に対する制限から起因しているものとして核融合施設の敷地境界の線量率の制限である。FERでは運転中及び炉の運転停止後における線量率の制限として、表3.2-2に示すような遮蔽設計基準が定められている。

3.2-2 超電導コイルの遮蔽

前節で述べたように、FERで問題とする量はTFCに対する遮蔽特性としては、巻線部の核発熱率と全核発熱量である。図3.2-1に1次元トラスモデルを示す。使用した1次元

輸送コードはANISN、核融合核計算用群定数セットはFUSION-J3Tである。超電導マグネットに対する遮蔽特性の計算結果を議論する前に、遮蔽設計の考え方について簡単に触れておく。トーラス内側遮蔽、トーラス外側遮蔽は共に、超電導コイルであるTFCに対する遮蔽性能を担保することにある。FERでは炉本体が厚さ150cmのコンクリート製のクライオスタットに囲まれているので、生体遮蔽に関しては充分と考える。従って、図3.2-1のモデルでは、トーラス外側の遮蔽体として赤道面で163.5cmの厚さがあり、第一壁から20cmの部分のみ95%SSと5%H₂Oで構成し、その外側は、所謂、水タンク型遮蔽体とし10%SSと90%H₂Oで構成している。水タンク型を採用しているのは、炉構造の軽量化と廃炉時の廃棄物量の低減を目的としているためである。

先ず、トーラス内側のTFCに対する遮蔽特性について述べる。実際のトーラス内側部は表面から30cmまでは85%SSと15%H₂Oで構成され、その残りの約40cmの厚さの部分は70%SSと30%H₂Oで構成されている。第一壁から真空容器の外壁までは、最も薄いところ68.9cm（スクレーパーオフ層が10cmの場合）である。図3.2-1に示す1次元トーラスモデルにより、中性子第一壁負荷を1MW/m²とした場合に、巻線部のピーク核発熱率は0.96mW/cm³であり、高さ1cmTFCの全核発熱率は16.2W/cmという結果が得られた。この値を用いて、上述した実際のトーラス内側部の構成と寸法のポロイダル方向の相違及び第一壁中性子負荷のポロイダル方向分布を考慮し、FERでは平均中性子第一壁負荷は0.6MW/m²であることを考えて補正する。また、FUSION-J3Tは、核融合核計算用群定数セットとして最終的に完成するFUSION-J3の暫定的なセットであり、γ線の処理上一部問題があることが解っている。その違いは、実験炉クラスの代表的な装置におけるTFC部の核発熱率で、40~50%過小評価である。この相違も補正として考慮すると、TFCの巻線部のピーク核発熱率は、2.1mW/cm³となる。この値に、ITERと同様にピーク値に対する安全率3を考慮すると、TFCの巻線部のピーク核発熱率は6.3mW/cm³となり、設計基準値より約2倍大きくなり、これは、遮蔽体の厚さとして約5cm不足していることを意味する。また、トーラス内側のTFCの核発熱は6.6kWとなり、ITERと同様に積分値に対する安全率2を考慮すると13.2kWとなって、設計基準値20kWを満足していることが解る。

トーラス外側のTFCに対する遮蔽特性については、図3.2-1で示されているように、第一壁から20cmの部分のみ95%SSと5%H₂Oで構成し、その外側を10%SSと90%H₂Oで構成している体系では、巻線部の核発熱率では、トーラス内側部より2桁小さく、全核発熱量でも1桁小さい。実際のトーラス外側部では、第一壁から20cmの部分は95%SSと5%H₂Oで構成することは困難で、85%SSと15%H₂Oで構成されるものと考えられる。また、その外側の10%SSと90%H₂Oで構成している水タンク型遮蔽体の部分も構造強度の点から、20%SSと80%H₂O程度で構成することになるものと考えられる。従って、遮蔽性能としては、図3.2-1よりも1桁程度向上するものと推定される。従って、トーラス外側部のTFCの核発熱は、以上述べた値よりも更に小さな値となるものと予想されるため、TFCの全核発熱への影響は無視できものと考えてよい。

上記以外の位置で、超電導コイル、TFCに対する遮蔽として問題となる部分は、NBI等

のダクト貫通部、下部の排気ダクト部である。特に、NBIダクト部で問題となる箇所は、NBIが接線入射しているためTFCがダクトに食い込む部分が生じる。この部分は、第一壁から～4 m程ダクトの軸に沿って入った部分で、ダクト壁の厚さが局所的に薄くなっている。2次元輸送コードDOT3.5を用いて2次元XYモデルで計算した結果、表3.2-1に示されている設計目標値の中で巻線部のピーク核発熱率の目標値を達成するために、NBIダクトのTFCが食い込んでいる部分について、85%SSと15%H₂Oから成るダクト壁の厚さとして30 cm以上必要であることが示された。また、排気ダクトについては次のようになる。排気ダクト両側壁は、一部TFCの容器の側壁と10 cmの隙間を隔てて平行な位置を採る。この部分のTFCに対する遮蔽特性量としては、巻線部のピーク核発熱率が問題となる。その目標値を達成するには、この箇所の排気ダクト壁の厚さは、2次元計算結果から50 cm必要であることが示された。

3.2.3 生体遮蔽

最初に、炉停止後の炉室の線量率について述べる。FERの全寿命運転の中性子第一壁フルエンスは、0.2～0.3 MWa/m²である。そこで高い方を探って、0.3 MWa/m²のフルエンスで運転し炉停止後1日、1週間の時点の線量率のを評価した。計算モデルは、前節で述べた図3.2-1であり、誘導放射能評価コードシステムTHIDA-2を用いた。その結果、炉停止後1日、及び1週間の時点でクライオスタット外部における線量率は、それぞれ $2.5 \times 10^{-1} \mu\text{Sv/h}$ ($2.5 \times 10^{-2} \text{mrem/h}$)及び $1.5 \times 10^{-1} \mu\text{Sv/h}$ ($1.5 \times 10^{-2} \text{mrem/h}$)であり、生体遮蔽設計基準値 $25 \mu\text{Sv/h}$ (2.5mrem/h)より2桁以上小さい値となっている。従って、これらの時点で作業員が炉室に立ち入ることは充分可能である。

一方、炉停止後1日のクライオスタット内部の線量率は、 $1.5 \times 10^{-2} \text{Sv/h}$ (1.5rem/h)である。この結果から、因に、ITERのように3.5 cmのSS製の板2枚から成るクライオスタットを採用する場合には、炉室の線量率は 3mSv/h (300mrem/h)で設計目標値よりも2桁も大きく、炉停止後炉室に立ち入ることは不可能となる。従って、このようなクライオスタットでは、水タンク型のアウトボード遮蔽体を採用することはできなくなる。建家構造との関連で、厚さ1.5～2 mのコンクリート製のクライオスタットを採用する方が望ましく、他の機器配置設計に問題がない場合には、水タンク型遮蔽体を採用しているのは、炉構造の軽量化と廃炉時の廃棄物量の低減から望ましい選択と言うべきである。

次に、0.3 MWa/m²のフルエンスで運転し炉停止後1週間の時点で炉内構造物の1セクターを天井クレーンで炉室のほぼ中心部に吊り下げた時の炉室内の線量率を評価した結果を述べる。1セクターの大きさは、赤道面で厚さ63 cm、幅100 cm、高さ800 cmである。

1 MWa/m²の第一壁中性子フルエンスで運転し炉停止後1日の1セクターのγ線全源強度は、1次元輸送コードANISNとTHIDA-2により図3.2-1の1次元トラスモデルを用いて評価した結果から評価すると、 $6.4 \times 10^{17} \gamma/s$ となる。2次元輸送コード

DOT 3.5を用いて2次元円柱モデルによる計算結果は、線量率で示すと次の通りである。セクターから4m離れた位置で 10^4 Sv/h (10^6 rem/h)、14m離れた位置で 10^3 Sv/h (10^5 rem/h)、炉室の内壁($\sim 27 \text{ cm}$)で $3 \times 10^2 \text{ Sv/h}$ ($3 \times 10^4 \text{ rem/h}$)である。これらの結果から、生体遮蔽設計基準値 $25 \mu \text{ Sv/h}$ (2.5 mre m/h)より7桁も大きな値となっており、FERの第一壁中性子フルエンスが 0.3 MWa/m^2 と 1 MWa/m^2 に比べて $1/3$ であることを考慮しても大勢には影響がなく、1セクターを引き抜いた時点では作業員が炉室に立ち入ることは不可能である。

一般公衆の個人被曝線量に対する生体遮蔽として核融合施設の敷地境界における線量率を評価した。敷地境界の線量率に関する設計目標値については、表3.2-2に示したが、この目標値には空気中に含まれるトリチウム水及びトリチウムガス、環境の水系を通したトリチウム等の放射性物質による線量率も含まれているので、中性子あるいは γ 線による線量率の寄与は、この設計目標値の $1/10$ 以下に低減しなければならない。従って、炉心からのスカイシャインによる敷地境界の線量率の設計目標値としては、表3.2-2の $1/10$ 、即ち $1 \mu \text{ Sv/y}$ (0.1 mre m/y)以下と考える。FERでは敷地境界を炉心から300mとして仮定し、建家の天井を1.6m厚さのコンクリート製で充分は生体遮蔽となっているかどうか、2次元スカイシャイン計算によって評価した敷地境界の線量率により評価する。仮に1年間1セクター引き抜いた状態に維持したとすると、計算結果は、炉心から300mの敷地境界の線量率は $\sim 1 \mu \text{ Sv/y}$ ($\sim 0.1 \text{ mre m/y}$)となる。この値は、設計目標値 $1 \mu \text{ Sv/y}$ (0.1 mre m/y)と同程度である。しかし、実際の分解保守時には、1セクターを1カ月以上も炉室に吊り下げた状態にしておくことは考えられないので、高々1カ月として検討すると、設計目標値 $1 \mu \text{ Sv/y}$ (0.1 mre m/y)より1桁小さくなる。スカイシャイン計算の精度を考慮して安全率を10倍とすると、設計目標値 $1 \mu \text{ Sv/y}$ (0.1 mre m/y)を達成できることを示している。言い換えると、建家のコンクリート製の天井として1.6m以上あれば充分であることを意味している。

3.2.4 まとめ

以上の結果を各部の必要な遮蔽体厚さとしてまとめると、表3.2-3のようになる。

表3. 2-1 超電導コイルに対する遮蔽設計基準

items	criteria
Winding peak nuclear heating rate(mW/cm ³)	3
Total nuclear heat in TFC (kW)	20
Insulator dose (peak dose) (rad)	2x10 ⁹
Fast neutron fluence (En>0.1MeV) (n/cm ²)	1x10 ¹⁹
Copper radiation damage (dpa)	5x10 ⁻⁴

表3. 2-2 一般公衆の個人被曝線量に関する設計目標

	regulated value	design target	remarks
Public exposure	5 mSv/y (500mrem/y)	10 μ Sv/y (1mrem/y)	• Site boundary
Worker exposure During normal operation	300 μ Sv/w (30mrem/w)	~1.8 μ Sv/h (~0.18mrem/h)	• No one can enter into the reactor room during operation. • Persons are permissible to work all through the day. [30mrem/(24h·7)]
During maintenance	50mSv/y (5 rem/y)	25 μ Sv/h (2.5mrem/h)	• Person is restricted to work 40hrs in every 50 week per one year. [5rem/(40h·50)]

表3. 2-3 FER各部の必要遮蔽体厚さ

items	thickness and composition
For SCM shielding	
Inboard shield	30cm(SS:H ₂ O=0.85:0.15)+45cm(SS:H ₂ O=0.70:0.30)
Outboard shield	20cm(SS:H ₂ O=0.85:0.15)+100cm(SS:H ₂ O=0.2:0.8)
Divertor area thinnest shield	30cm(SS:H ₂ O=0.85:0.15)+40cm(SS:H ₂ O=0.70:0.30)
NBI duct thinnest wall	30cm(SS:H ₂ O=0.85:0.15)
Exhaust duct thinnest wall	50cm(SS:H ₂ O=0.85:0.15)
For biological shielding	
Due to maintenance Cryostat	150cm(concrete with SS liner)
Due to site boundary Reactor room roof	160cm(concrete with support ribs)

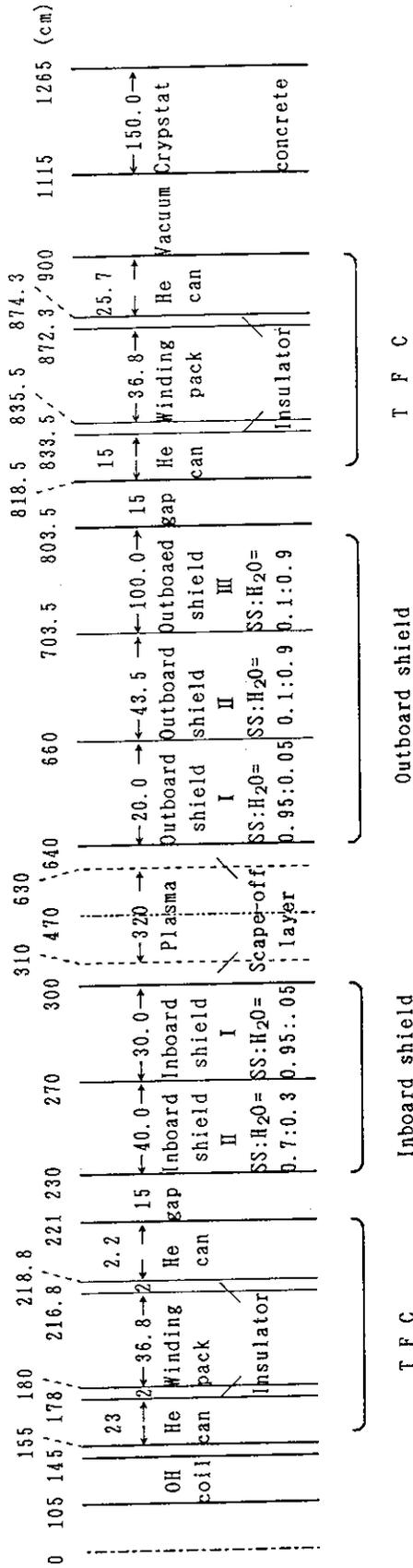


図3. 2-1 FER赤道面における1次元トラスモデル

3.3 初期組立

トーラス炉構造の大略寸法は外径20m、高さ16mにもおよび、またその重量は全体で1万トンを越える。これを全て工場にて製作し、現地搬入することは輸送上から無理である。また材料のうちから現地で製作し組立を行うことも、材料の品質保持、加工設備の調達、製作精度等で難点がある。これらを解決するには、輸送可能な単位までの製作を専門工場で行い、これをサイトに搬入して現地組立を行う方式を採る必要がある。本節では、現地にて行う炉本体の初期組立および検査の方式および、組立・接続を考慮した本体各部の構造に関して検討を行った結果を述べる。

3.3.1 TFコイル/真空容器セクターの組立方式

トカマク炉本体初期組立の検討において、方式選択上で重要な点は、構造同士の鎖交が本質的に避けられないTFコイルと真空容器の組立である。これに対していくつかの方法を候補として挙げ、各々の得失を検討した。

(1) 基本方式の比較検討

FER本体の初期組立方式としては、下記のことを候補として取り上げた

A案：TFコイル/真空容器ユニット方式

B案：TFコイル回し込み方式

C案：TFコイル先行組立（真空容器細分割方式）

A, B, C各案の概念を図3.3-1に示す。A案は、トロイダルコイル1本（もしくは数本）と真空容器（+固定遮蔽）のセクターを組立ユニットとして、組み立てる方式である。実績としては、TFTR, JET, TORESUPRAなどがある。B案は、真空容器をほぼフルトーラスに近いC型まで現地で組み上げたあと、開口部からTFコイルを挿入し回し込んでいく方式である。従来実績では、JT-60、TRIAM-1Mなど、PFコイル系がTFコイルと鎖交している装置がこの方式を採っている。これらの採用は、真空容器と同様にTFCに鎖交するPFコイルをユニット分割して組み上げることが現実的でないという理由による。C案は超電導コイル系の組立・試験を最優先させた方式であり、このため真空容器・遮蔽体ユニットはTFC間から挿入できるように分割されることとなる。

上記3案以外の方式としては、TFC上下分割法（Doubletで採用）、TFC先行組立&VV回し入れ（JFT-2Mで採用）などがある。しかしFERの場合、前者は超電導TFコイルの現地接続が必要とされることから現実的でない。また後者については半割（180°）程度組上がった、数千トンもの構造体を操作する必要があることから、これも実現性は薄い。

A, B, C各案の得失比較を表3.3-1に示す。超電導コイル系の現地組立・試験の便宜を取り上げた場合、C案が最も利点が多い。この面で、A案はC案より劣はするものの、致命的な問題はない方式と言える。B案では、通電試験でTFコイルの不具合があった場合にその交換が極めて困難であるという欠点がある。TFコイルの据え付け・調整と、転倒力支持用

補強に関しては、TFコイルの内側からのアクセスが可能かどうかで優劣がつけられるが、このアクセスが不可能であっても、トラス中心側および上・下側からのアクセスはどの方式でも保証されている。A、B案では通電試験時にコイルの内側にある真空容器、遮蔽構造体からの熱進入があるため、この遮蔽が必要である。(ただし、全ての断熱層をコイル側に設置する場合は問題とはならない。)通電試験後にTFコイルに不具合がありこれを交換する場合、C案では当該TFコイルの外はPFコイル系とTFコイル間の連結支持構造部材を取り外すだけで良い。これに対しA案ではTFコイルと共にモジュールで持ち込んだ真空容器・遮蔽構造体も分解して取り外す必要がある。C案では、殆どの場合、不具合のあったTFコイル以外の機器まで取り外さないと交換できない。

コイル通電試験を、PFコイル系まで含めた総合試験と考えれば、C案の場合は、試験後に真空容器・遮蔽体ユニットを持ち込むためにPFコイル系およびTFコイル間の連結支持構造部材などをいったん取り外す必要が生じる。このため、TFコイル系に不具合がなかった場合ではA、B案と比較して相当に余分な工程数を踏む結果となる。

真空容器・遮蔽体のセクター分割、接続、不具合時の対処の面ではB案は非常に大きい利点がある。これはトラス構造体形成の第1段階でほぼ一周のトラス形態まで真空容器を組み上げてしまうため、最終組立セクターを除いてはコイル系との干渉を考えずに独立に設計・施工が行えるからである。ただしTFコイルの回し込みの必要から、ポート接続の位置および施工などに関しては自由度が著しく制限される。A案では真空容器現地組立・試験の観点からすれば、セクター分割・接続、不具合時の処理、ポート接続の総てにおいて遜色の無い方式である。C案はTFコイルの間隙から真空容器セクターを挿入していく必要から、細分割をせざるを得ず、またそのトラス分割線の設定についても殆ど自由度はない。具体的には、集中応力が発生しやすいポートの付け根部付近にトラス分割線が来ることとなり、強度設計上好ましくない。加えて、分割が細かいため現地接続の工数も多くなる。

組立・分解時に各ユニットに必要とされる動きを考察すると、A案では基本的に大半径方向および上下方向の直線運動のみが必要とされるのに対して、B、C案では、直線運動の他に、それぞれTFコイル/真空容器の組立ユニットにトロイダル方向の曲線運動が必要とされる。

上記の各方式比較検討を踏まえ、FERでは致命的な問題が少なく、超電導コイル系、真空容器系のどちらもが許容できる方式として、A案を主案とした。

(2) セクター分割ラインの検討

上記A案を基本方式として採用して、次に検討すべき課題となるのはトラス分割線の設定である。組立時の機器の動きが単純であるというA案の特長を生かすものとしては、

a案：非対称セクタ分割方式(ポートの付け根近傍で分割)

b案：対称セクタ分割方式(ポートの中央で分割)

の2案が考えられる。それぞれの分割概念を図3.3-2に示す。a案では、ポロイダル断面で見た溶接線は閉曲線を形成するので真空密封性に対する信頼性が高く、溶接歪も小さくなるという利点があるが、分割線がトラス中心を向いていないことから、分割構造のトラス対称性が崩れ、設計・製作面での複雑さが問題となる。また分割線がポートの付け根近傍を通る

ことから、構造強度面での問題が考えられる。

一方、b案では、ポロイダル断面で見た溶接線がポート接続部で複雑となり施工上の問題がある。しかし、分割構造のトロイダルの対称性が良く、ポート付け根部を接続線が通るという問題もない。

ここでは、従来の真空容器設計での経験から、ポート付け根部での構造強度の確保が重要であるという知見と、分割構造の対称性を良くし、できるだけ設計の複雑化を避けるという観点から、b案を採った。

3.3.2 初期組立・試験の基本手順

炉本体の初期組立においては、各機器の組立・接続と、組み立上がった状態での試験が合理的に実施され、かつ不具合があった場合の分解、再組立ができるだけ容易な手順が望まれる。

FERにおいては、超電導コイル系の健全性確保のための試験および不具合の際の交換の容易性に重点を置いた手順を提案する。本方式は、コイルの通電試験を優先させるために、FERで採用した二重壁真空容器の特長を生かしたものとなっている。

二重壁真空容器は、内壁、外壁の間が冷却水の流路となり、この部分は、製作段階において単独で溶接部の真空密封試験が簡単に行える。また二重壁容器では、組立ユニット（セクター）間接続部も二重の真空境界を形成する必要があるため、この領域の部分的な真空密封試験も初期組立と併行して適宜行うことができる。従って本体室での大がかりな真空密封試験は基本的に必要としない。比較的大がかりな真空密封試験としては、ポート部までを含めた容器全体の放ガス特性を最終段階において調べるだけでよい。

一方TFコイルおよびPFコイルの総合通電試験は、コイル系の総合的性能を確認し、また初期故障があればそれを洗い出すためのものである。ここで、コイル系の試験に先だって、真空容器／固定遮蔽体の現地接続を完了させる手順を採れば、TFコイルに不具合があった場合、その交換には一度施工を終えた接続部を分離する必要が生じる等、工程上の無駄が生じる。

従って、FERでは、コイル系の通電試験を実施し、健全性を確認した後、真空容器／固定遮蔽体の各セクター間の接続する手順を採用する。FER本体の組立・試験の段階は、現地工場での準備作業も含めて下記の7段階に大別される。図3.3-3(1/7~7/7)に本体室での組立・試験の各段階第(2段階~第7段階)での概略の手順を示す。

1. 製造工場での機器製作と下準備
2. 本体室準備作業
3. TFコイルおよび大モジュール固定遮蔽体付き真空容器の仮組立
4. ポロイダル磁場コイル系の組立
5. クライオスタットの設置とコイル系の通電試験
6. 真空容器セクター間接続と小モジュール固定遮蔽体挿入
7. 炉本体組立完了

3.3.3 組立上の重要課題

炉心構造系は、真空容器、固定遮蔽体、可動遮蔽体、ポート類等に大別されるが、可動遮蔽体のみは単独組立品として項を改めて述べることとする。

炉構造組立においては工場製作した各ユニットを効率よく現地で組立する必要上、ユニットの分割方式、分割数、組立手順等を最適化する他、締結方式においても将来、遠隔取扱いを行う必要上、機械接合あるいは溶接接合について、治工具類の装着を考えた空間、取合条件を設定しておくこと、並びに組立、分解方案を考慮した炉構造と支援設備を確立することが重要である。

(1) セクター接合

真空容器内に組込まれる固定遮蔽体はセクターユニットを構成する要素として、トラス角度 22° の固定遮蔽体と、 8° の固定遮蔽体からなる。 22° 固定遮蔽体はトロイダル磁場コイルと同一のポロイダル断面に組込まれるもので、トラス角度の決定は真空容器の現地溶接作業に干渉しない範囲であること、さらにポートとの空間取合いに邪魔にならない大きさとする必要から選ばれたものである。 22° 固定遮蔽体の組立手順を図3.3-4に示す。 8° 固定遮蔽体は真空容器の現地溶接、および真空容器等の中間試験、検査が完了した後、組込まれるもので、組込む際の作業性、ポート部の切欠部等のため、ポロイダル方向に数分割して、各々真空容器内の 22° 固定遮蔽体間に組込まれる。 8° 固定遮蔽体と 22° 固定遮蔽体は自重支持、あるいは運転時の電磁力支持のため、分割部においては荷重を伝達する機構が必要となり、これらの分割部においては図3.3-5に、斜線部にて示すように、キー構造をポロイダル断面の全周必要箇所にて設けた。キー構造の詳細を図3.3-6に示す。図3.3-6において、インロー部に挿入するキーは蝶形孔より挿入して、キー溝内に落込み、固定遮蔽体のトラス主半径方向のずれを防止する。インロー部キーを挿入後、蝶形孔部のキーを上、下打込み、抜け止め防止を行うとともにポロイダル断面方向のずれを防止するものである。なお、トラス周方向の寸法調整は各々のモジュールの主半径方向の移動可能距離によって規定される。

(2) 支持脚取付

本体の初期組立はトロイダル磁場コイル、真空容器、固定遮蔽体を部分組立したセクター、いわゆるセクターユニットとして据付場所に順次設置して組立を行うが、据付場所ではトロイダル磁場コイル基礎架台、真空容器並びに固定遮蔽体基礎架台の上に設置される。トロイダル磁場コイルの基礎架台はコイルの真下に設置することが可能であるが、真空容器並びに固定遮蔽体の基礎架台はトロイダル磁場コイル間の、いわゆるポート空間部に設ける必要がある。この位置はまた、セクターになっている真空容器のセクターユニット間組立溶接部であるため、組立溶接作業の支障にならないようこの場所の固定遮蔽体は溶接後組込む必要があり、部分組立時には組込まれていない。予め、部分組立されている固定遮蔽体は 22° 固定遮蔽体であり、トロイダル磁場コイルと同じポロイダル断面にあるものである。セクターユニット組立時、トロイダル磁場コイルと真空容器／固定遮蔽体を一体として仮固定して吊込みするが、吊込み中は真空容器、固定遮蔽体は一時的にトロイダル磁場コイルおよびトロイダル磁場コイルの架台

で支持される。

吊込み後、および据付後は、コイル類の電氣的、あるいは機械的試験等単独試験実施を考えて、トロイダル磁場コイルと真空容器、固定遮蔽体の仮固定を解除すると共に真空容器、固定遮蔽体をこれらの支持架台上に据付する必要がある。これら真空容器、固定遮蔽体の基礎架台方式の代表的な考え方として、“アンビル設置型”、“分割アンビル型”、“ポート分割型”および“支持構造体設置型”を考案し、それぞれ図3.3-7～10に示すと共に特徴と問題点を表3.3-2に記載する。この中で組立作業および、工程の難易差により、より簡潔な方法並びに構造のより確実なものとして表3.3-2のなかで“支持構造体設置型”（図3.3-10に示す）が最も最適な構造として考えられている。この方法による組立手順を表3.3-3に示す。本組立手順は主作業の概念を示すもので、真空容器の溶接作業時の障害対策、あるいは組立治工具の用法、組立上のノウハウによる補助作業等、今後、詳細検討によって解決を図るべき問題点を含んでいることが前提となっているものである。

(3) ポート接続

真空容器に各種ポート類を取付ける場合、トロイダル磁場コイルの組込みが互いに交叉しており、組立方案によっては交互に行うか、あるいは、ポート取付を全トロイダル磁場コイル組込み後行うような構造と、接合方法を採用する必要がある。接合方法としては、溶接取付を行うことが、空間的、構造的に最も効果があると考えられるが、その溶接位置、施工法等構造に合わせ検討を行う必要がある。

3.3.4 R & D 課題

炉本体の初期組立において重要なR & D課題の概要としては下記のものと考えられる。

- (1) 全体
 - (a) 重量機器の精密操作
- (2) コイル組立
 - (a) TFコイル転倒力支持構造
 - (b) コイルサービス接続
- (3) 真空容器・固定遮蔽組立
 - (a) 真空容器セクター現地溶接接続技術（自動溶接）
 - (b) 真空容器ポート、支持脚接続構造
 - (c) 固定遮蔽体接続構造

いずれのR & Dも、各機器の製作設計や現地での施工方法に密接に関っている。今後行われる詳細設計において個々の内容を明らかにし、各機器（クレーン・遠隔機器を含む）の開発のなかに取り入れていくべきものと考えられる。

表3.3-1 TFコイル／真空容器セクターの各種組立方式の比較

	A案	B案	C案
●コイル現地組立・試験			
TFコイル据え付け調整（先端部など）	△	△	○
転倒力支持用補強（キー打ち込みなど）	△	△	○
通電試験時の熱侵入源の断熱処理	△	△	○
通電試験での不具合時のTFコイル交換	△	X	○
●コイル通電試験後の作業			
PFコイルの分解・再組立	○	○	X
TFコイル間支持構造の分解・再組立	○	○	X
●VV現地組立・試験			
セクター分割の自由度	△	○	X
セクター接続の現地工数・施工性	△	○	X
接続部真空密封試験での不具合時のVV交換	△	○	△
ポート接続の現地工数・施工性	△	X	△
●組立・分解時のユニットの動きの単純さ	○	X	X
●実績	TFTR	JT-60	
	JET	TRIAM-1M	
	TORESUPRA		

A案：TFコイル／真空容器ユニット方式
 B案：TFコイル回し込み方式
 C案：TFコイル先行組立（真空容器細分割方式）

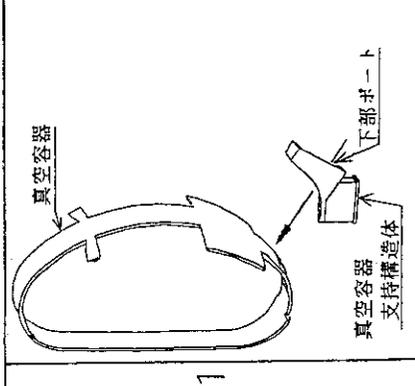
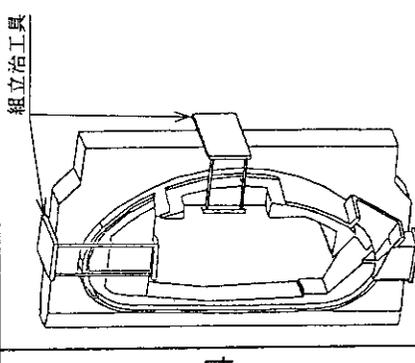
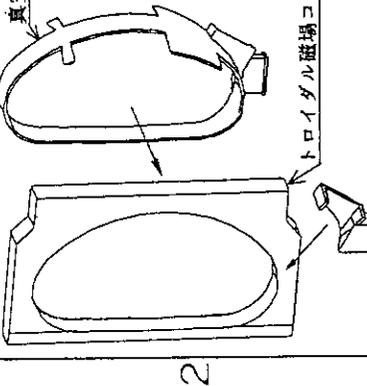
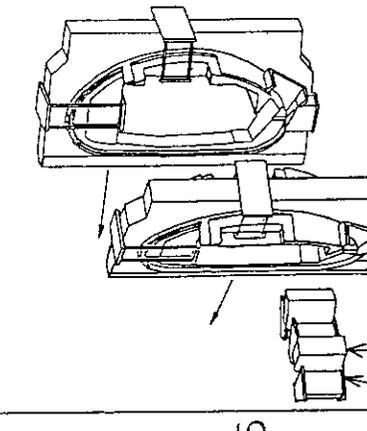
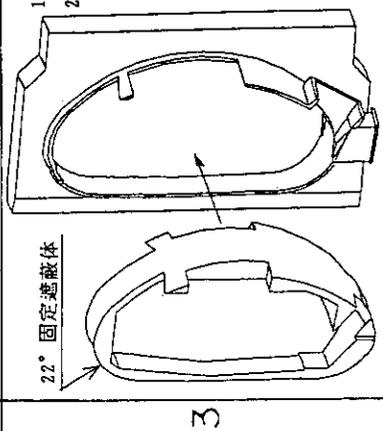
○：良 △：普通 X：不良

表3.3-2 トーラス支持脚の各種組み込み方式の比較

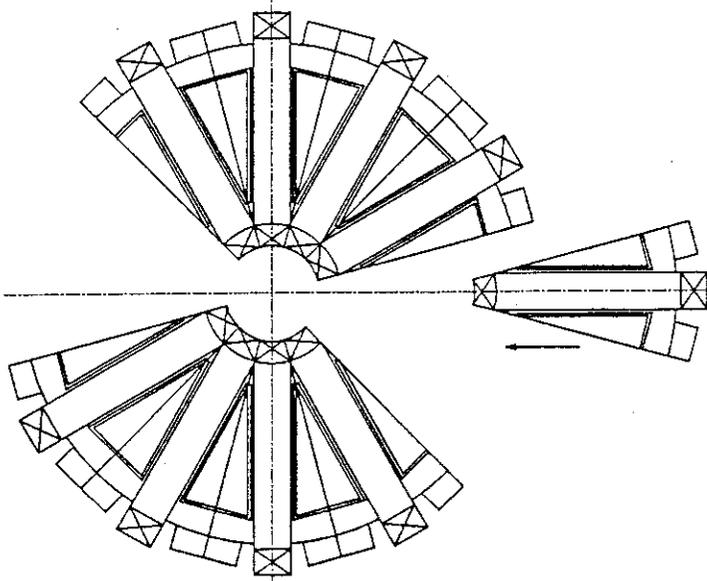
(評価説明; ○:優, △:良, ×:可)

構造	特徴	問題点	備考	評価
アンビル設置型 図 3.3-7 に示す	1) 真空器下部に固定遮蔽体を支持するアンビルを組込むポートを設けて、アンビルの設置し、固定遮蔽体を支持すると共に、真空器は固定遮蔽体にて保持される構造のため、下部ポートアンビル付近で真空器と固定遮蔽体の寸法調整、並びに両者の相互変位補償が必要となる。 2) アンビルの相互変位補償が必要のためベローズが必要となる。アンビルのアンビルのアンビル位置に設置すると共に、アンビルの上となる 8° 固定遮蔽体を介して全体を支持固定する。	1) アンビルの組立は、真空器内に設置された 22° 固定遮蔽体間を通す空間を必要とし、従って本固定遮蔽体は、アンビルの据付できるような構造とすることができず、アンビルの据付できない。このため、アンビルの真上となる、後から組立られる 8° 固定遮蔽体にて一旦支持し、22° 固定遮蔽体とアンビルの間を通過させる構造となり、強度構造としては弱い。からの作業となるため、仮組立架台が必要であり、試験、組立工程が煩雑となる。	先にアンビルの据付する方法では、相互の位置精度が確保できない上、真空器の一部セクター間溶接、外部からの作業となるため、外部外側にはその空間的余裕が無く不可能である。	×
分割アンビル型 図 3.3-8 に示す	1) 上記方式に準ずるが、アンビルの固定遮蔽体間を通すため、本固定遮蔽体をアンビルの上に設置することは困難となるためアンビルのトラス主半径方向、又は周方向に分割し、アンビル組入れ後、アンビルの固定遮蔽体の下に挿入し、固定遮蔽体を支持する。 2) 上記方式のように 8° 固定遮蔽体を介して支持すること無く主となる 22° 固定遮蔽体を支持することができ、組立時の仮支持具等不要である。	1) アンビルの 22° 固定遮蔽体の下へ挿入することになり、先に 22° 固定遮蔽体、真空器を一時仮置きしておく必要があるが、組立上、煩雑である。 2) アンビルの冷却を行う必要があるのは上記同様であるが、部品がさらに分割されるため、冷却配管が複雑になる。		△
ポート分割型 図 3.3-9 に示す	1) アンビルのトラス周方向に分割する構造において、下部アンビルポートも合わせて分割し、真空器のセクター間溶接施工を容易にするもので、従って真空器セクター組立時、トロイダル磁場コイル組立後、同ポート部も真空器セクターに取付け組み込む方式であり、22° 固定遮蔽体を支持することが可能である。	1) 下部の支持ポート部が 2 分割されるため、スペース的に制約されると共に、同ポートの長さ調整の必要性からベローズの取付を考える必要があり、構造が複雑になる。		△
支持構造体設置型 図 3.3-10 に示す	1) 真空器下部ポート部のアンビル組込部はやめて、排気ポート部を残す他、アンビル部に相当する所を支持構造体として、真空器雰囲気外に剛構造を設け、22° 固定遮蔽体を支持するもので、アンビル部品の組込を不用にすることができ。 2) 真空器のセクター間溶接部はポートの形状が簡単になったため、作業性が向上するとともに機器取付、組立工程が簡単になった。 3) 真空器下部のベローズが不要である。	1) 真空器は柔構造とし、固定遮蔽体に取付保持する構造であるが、真空器下部は剛構造として固定遮蔽体の支持架台を兼用するため、構造的、強度的に十分な検討が必要である。		○

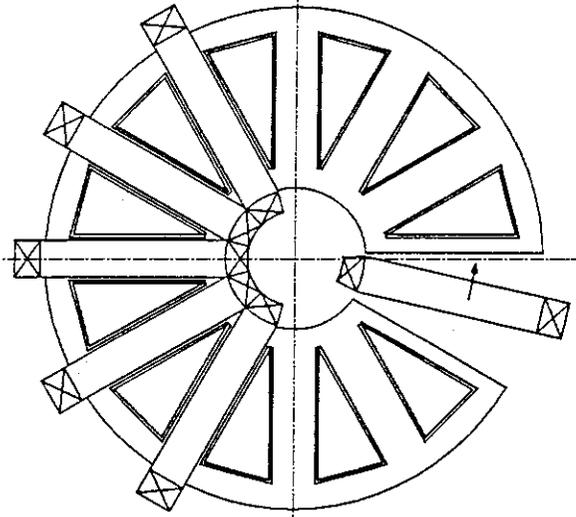
表3.3-3 真空容器/遮蔽体及びTFコイルの組立手順

<p>1) 真空容器30°分に、下部ポートおよび真空容器、固定遮蔽体支持構造体(片側のみ)を溶接する。</p> 	<p>組立治工具</p>  <p>1) 前作業によって、搬入用1セクターが出来上がる。</p>
<p>1) トロイダル磁場コイルに真空容器を挿入し、片側の下部ポート、および真空容器、固定遮蔽体支持構造体を真空容器に溶接する。</p> 	 <p>1) 真空容器並びに固定遮蔽体基礎架台とトロイダル磁場コイル基礎架台を所定位置に設置して、セクターを基礎架台の上に据付する。</p> <p>2) セクターを順次トラス状に組立て、真空容器を溶接してトラスを形成する。</p> <p>3) その後、真空容器の真空試験等を行い、真空部の健全性を確認した後、各種コイルの組立、試験を実施する。</p> <p>4) これらが完了した後、真空容器内の例えば8°固定遮蔽体等の組立や、トラス内、外部の装置、部品の組立を続行する。</p>
<p>1) 22°固定遮蔽体を挿入する。</p> <p>2) 吊り具と止め具で、真空容器と固定遮蔽体をトロイダル磁場コイルから支持する。固定遮蔽体は、ナニ構造等により支持構造体と仮固定する。また、真空容器は押付機構を用いて固定遮蔽体から仮支持する。</p> 	

TFコイル/真空容器のモジュール化方式(A案)



TFコイル回し込み方式(B案)



TFコイル先行組立方式(C案)

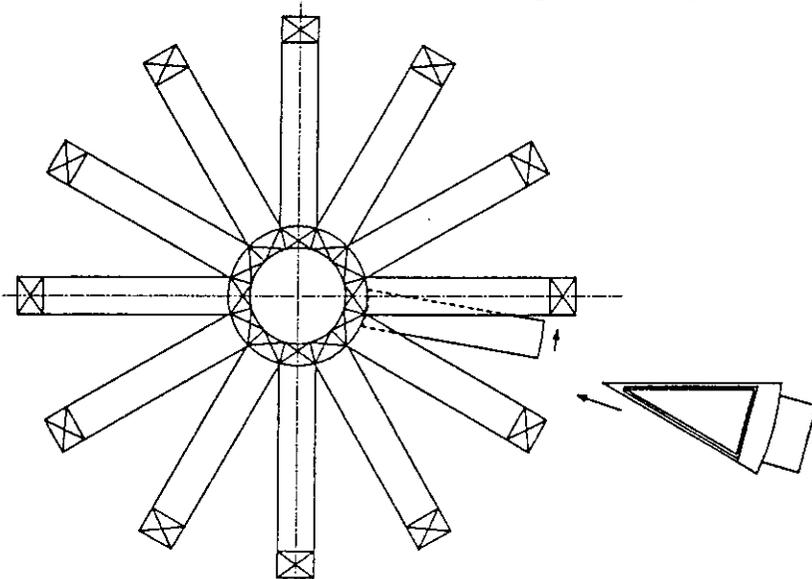
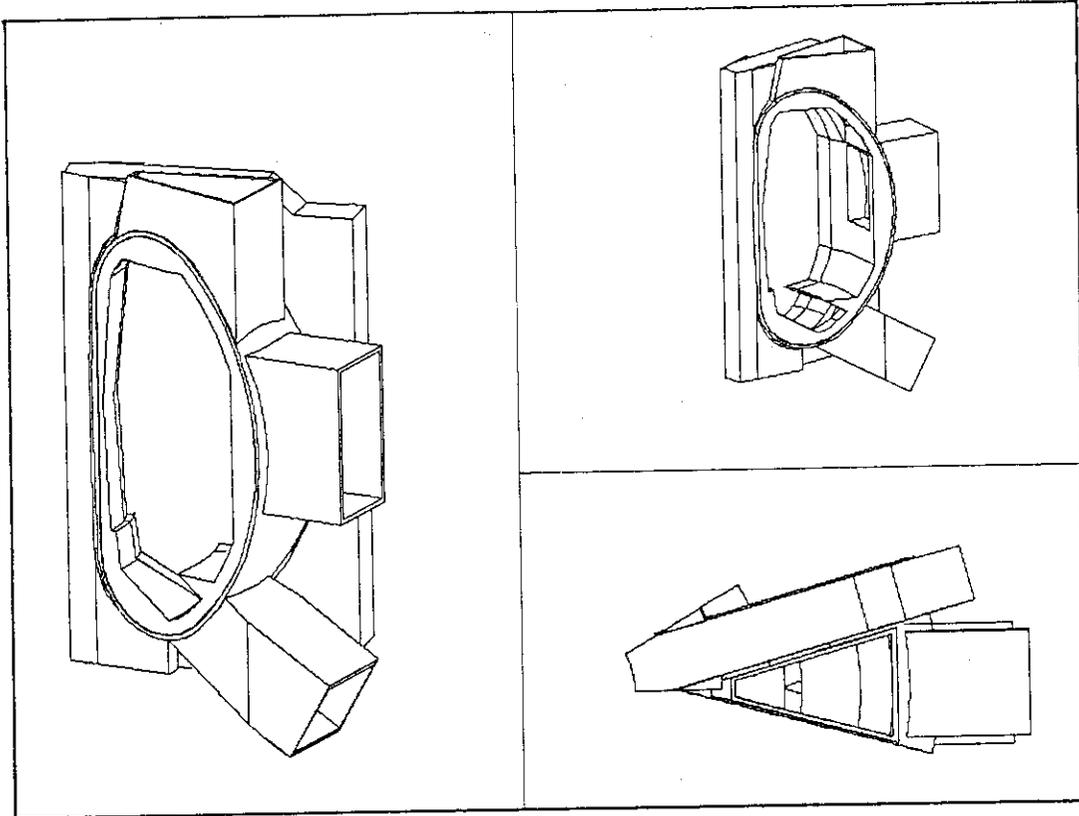


図3.3-1 トーラス組立方式の比較

非対称分割セクタ方式 (a 案)



対称分割セクタ方式 (b 案)

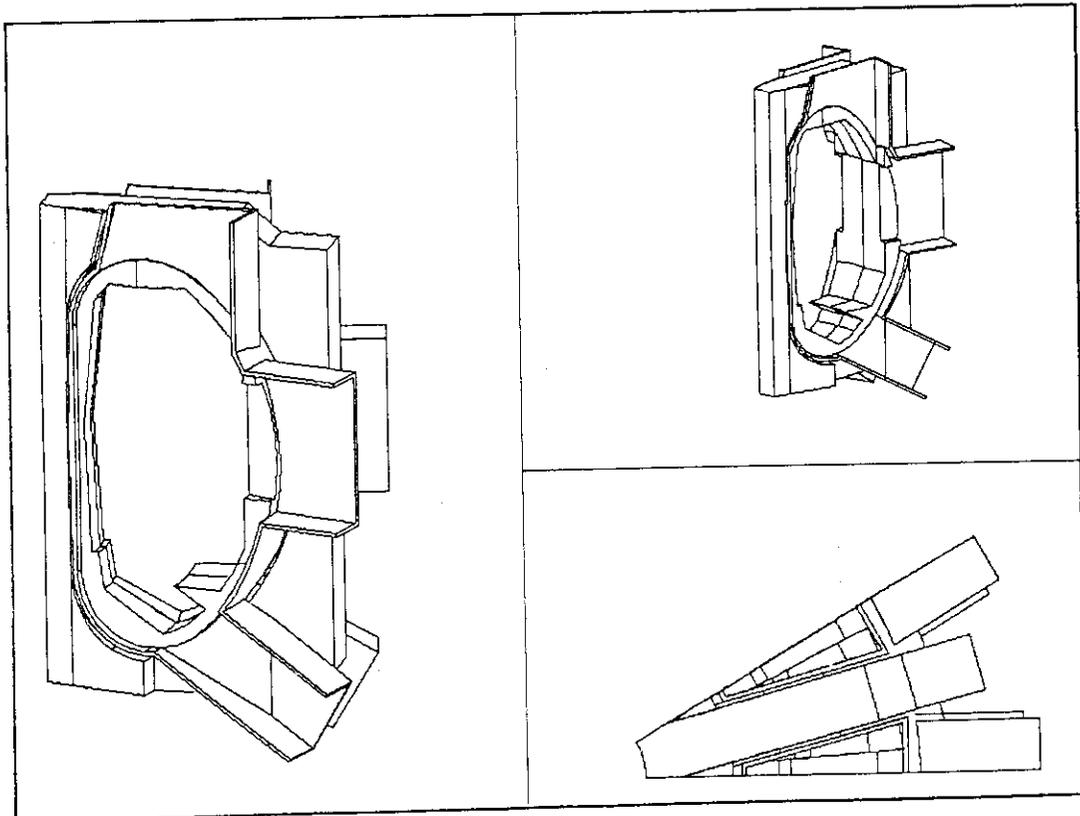
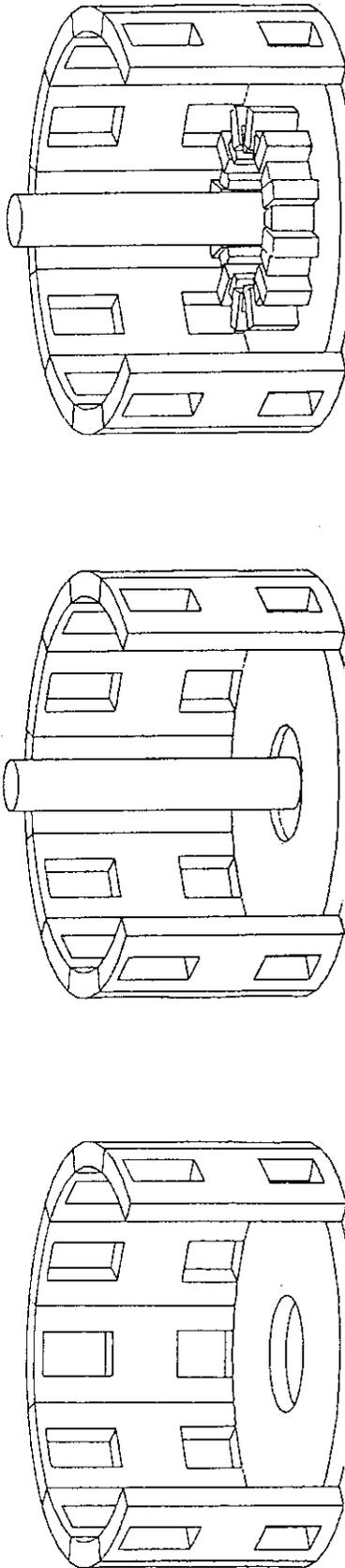


図 3. 3-2 TFコイル/真空容器の組立ユニット

本体室準備作業



① クライオオスタット容器胴部構築
② 下面水準の設定

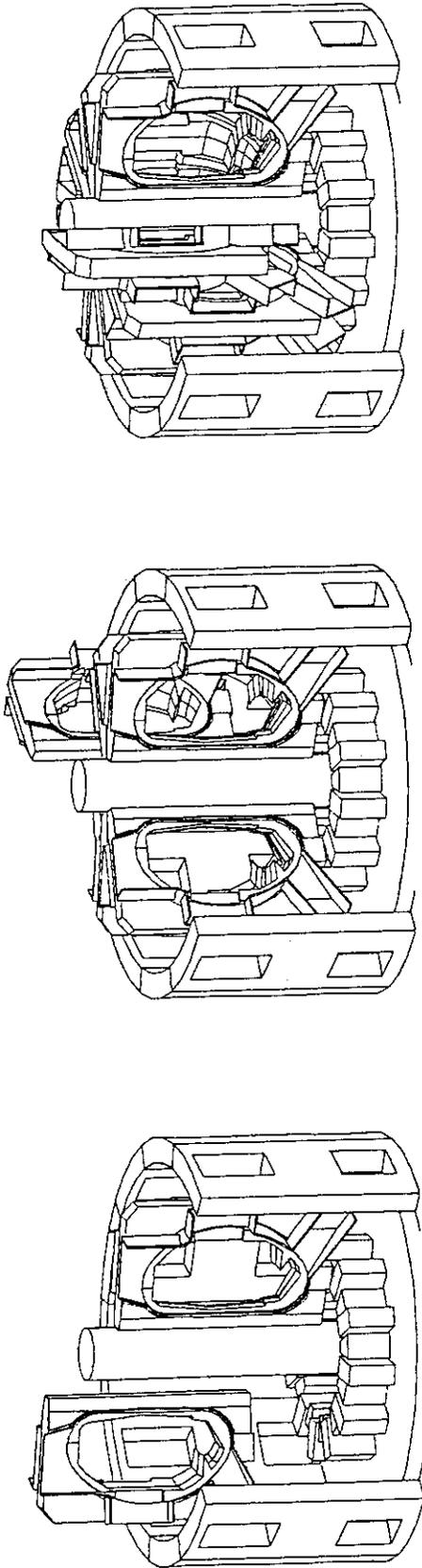
① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩ ⑪ ⑫ ⑬ ⑭ ⑮ ⑯ ⑰ ⑱ ⑲ ⑳ ㉑ ㉒ ㉓ ㉔ ㉕ ㉖ ㉗ ㉘ ㉙ ㉚ ㉛ ㉜ ㉝ ㉞ ㉟ ㊱ ㊲ ㊳ ㊴ ㊵ ㊶ ㊷ ㊸ ㊹ ㊺ ㊻ ㊼ ㊽ ㊾ ㊿

① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩ ⑪ ⑫ ⑬ ⑭ ⑮ ⑯ ⑰ ⑱ ⑲ ⑳ ㉑ ㉒ ㉓ ㉔ ㉕ ㉖ ㉗ ㉘ ㉙ ㉚ ㉛ ㉜ ㉝ ㉞ ㉟ ㊱ ㊲ ㊳ ㊴ ㊵ ㊶ ㊷ ㊸ ㊹ ㊺ ㊻ ㊼ ㊽ ㊾ ㊿

① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩ ⑪ ⑫ ⑬ ⑭ ⑮ ⑯ ⑰ ⑱ ⑲ ⑳ ㉑ ㉒ ㉓ ㉔ ㉕ ㉖ ㉗ ㉘ ㉙ ㉚ ㉛ ㉜ ㉝ ㉞ ㉟ ㊱ ㊲ ㊳ ㊴ ㊵ ㊶ ㊷ ㊸ ㊹ ㊺ ㊻ ㊼ ㊽ ㊾ ㊿

図 3. 3-3 炉本体の基本組立手順 (1/7)

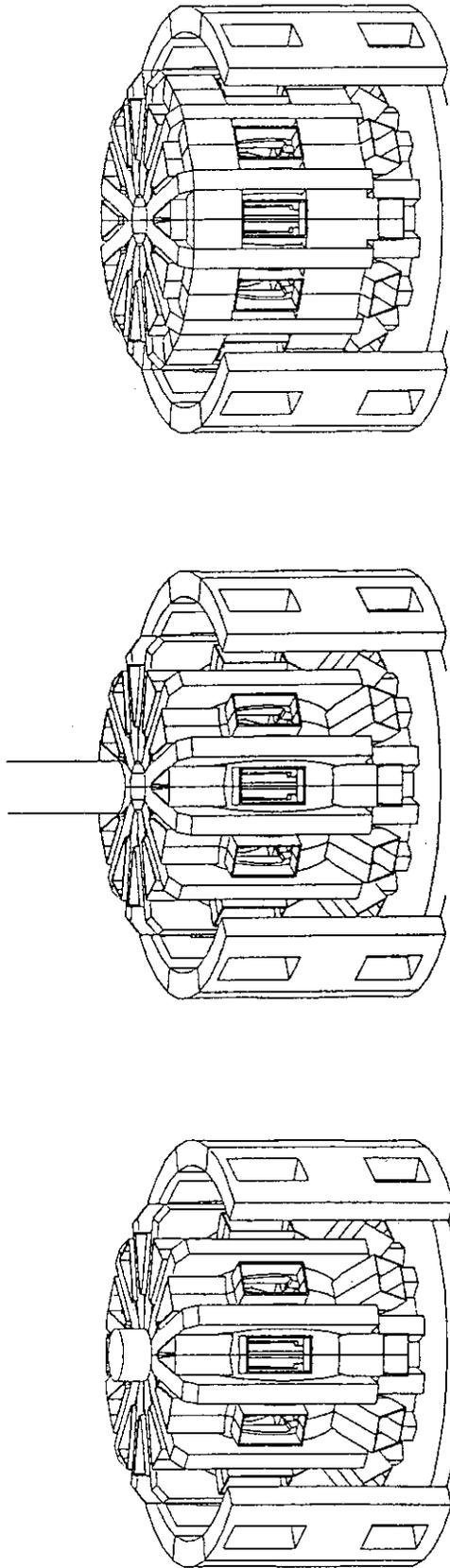
TFコイルおよび真空容器の組立



- ① TFコイル、真空容器および固定遮蔽よりなる組立ユニットの据付開始
- ① 組立進捗（5番目のモジュールの組立）
- ① 組立進捗（8番目のモジュールの組立）

図3. 3-3 炉本体の基本組立手順（2/7）

センターソレノイドおよびE Fコイル組立



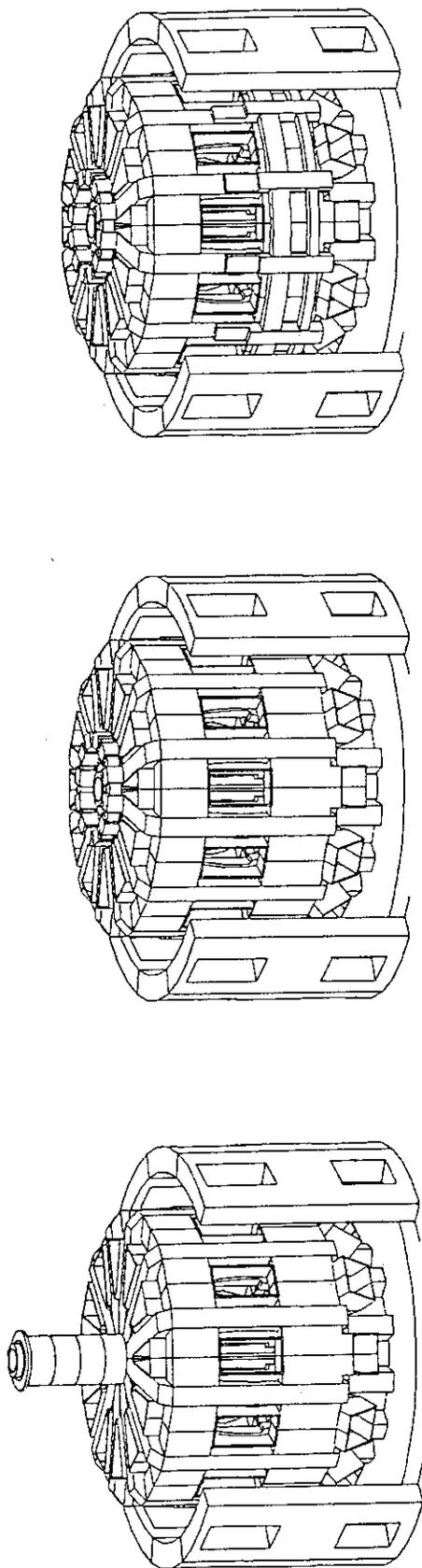
- ① TFコイルおよび真空容器の組立完了
- ② TFコイル同士を仮結合
- ③ 真空容器セクター同士を仮結合し、支持脚上に設置

- ① 仮中心支持柱および支持棒を取り除く

- ② TFコイルをトラス中心から打ち込みキーで結合する

- ① TFコイル間補強構造にてトラス外側でTFコイルを結合する

図3. 3-3 炉本体の基本組立手順 (3/7)



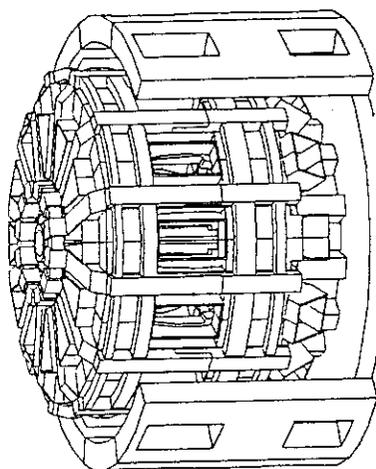
① センターソレノイドコイルを挿入し、TFコイルに取り付ける

① 上下PF5コイルをそれぞれ上方向、下方向から組み立てる

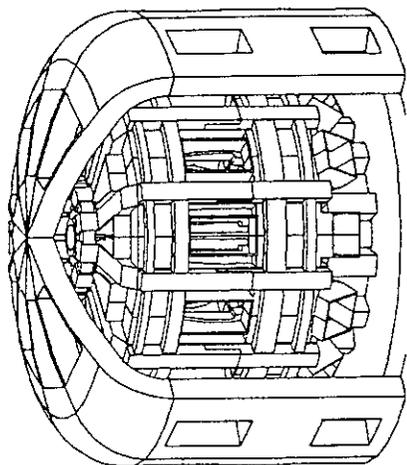
① 下側PF6・PF7コイル組立ユニットを吊下ろし、仮支持

図3.3-3 炉本体の基本組立手順(4/7)

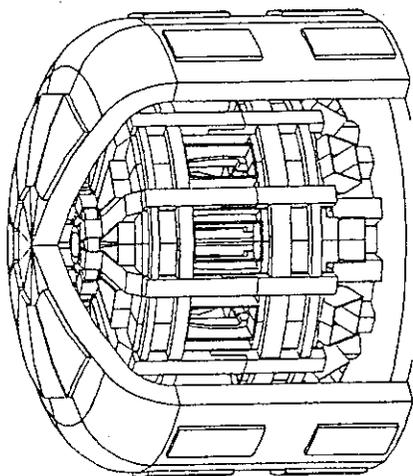
コイル試験



- ① 上側PF6・PF7コイル組立ユニットを吊下ろし、下側組立ユニットと結合して、これをTFコイルに取り付ける



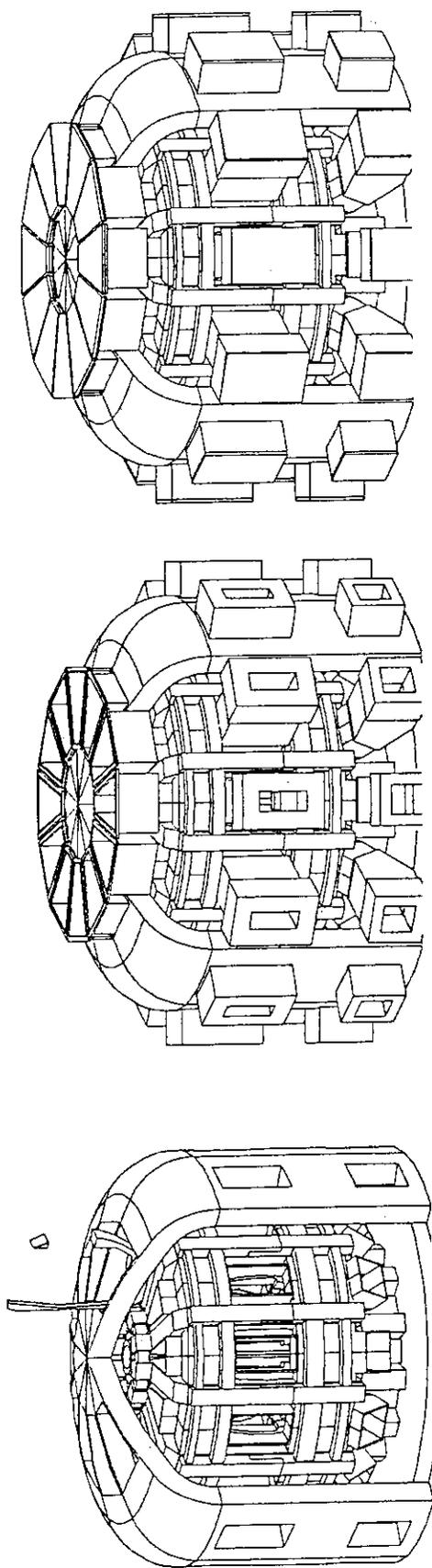
- ① コイルサービssystem (給電線、液体 He 供給ライン) の取付
- ② クラライオオスタット上部枠の設置



- ① 上部台形カバー板などの閉止板でクラライオオスタット貫通部の穴を塞ぐ
- ② フラウンジを真空密封して、クラライオオスタット容器内部を真空引きし、コイル系を極低温まで冷却
- ③ 絶縁抵抗測定、通電試験など、コイル試験を実施
- ④ 故障が発生し、必要があればコイルユニットを交換

図3. 3-3 炉本体の基本組立手順 (5/7)

真空容器組立



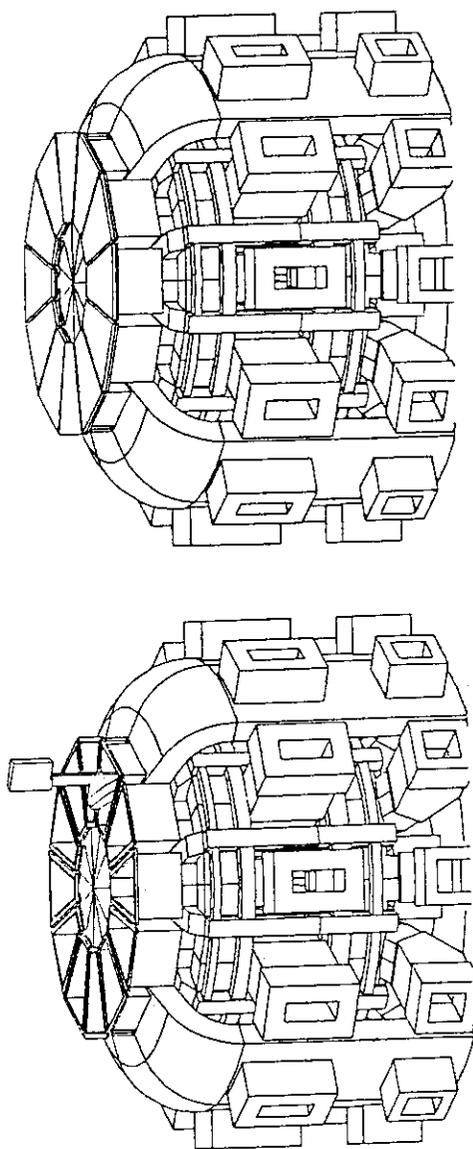
- ① コイルを常温に戻し、クライオスタット真空開放（仮カバーは取り外す）
- ② 2重壁真空容器の外壁を遮蔽セグメントの隙間から溶接接続
- ③ 2重壁真空容器の内壁を溶接接続後接合部真空密封試験（容器壁間の空隙部を真空引きすることによって行う）
- ④ 真空容器の仮結合を取り外す
- ⑤ 固定遮蔽体の小モジュールを設置

- ① 固定遮蔽小モジュールを取り付けて、容器内トラス構造体を構築
- ② ポートを取付けて真空容器と接続する

- ① ポートの開口部を仮閉止フランジで塞ぎ真空容器の最終密封試験および全体放出ガス測定を行う

図3.3-3 炉本体の基本組立手順（6/7）

本体組立の完了



- ① 仮閉止フランジを取り外す
- ② 容器内能動制御コイル、ブランケットモジュール、ダイバータプレート等の炉内機器を遠隔修理機器を用いて装着する

- ① 上側ポートのカバーフランジを取り付けて本体初期組立を完了

図3. 3-3 炉本体の基本組立手順 (7/7)

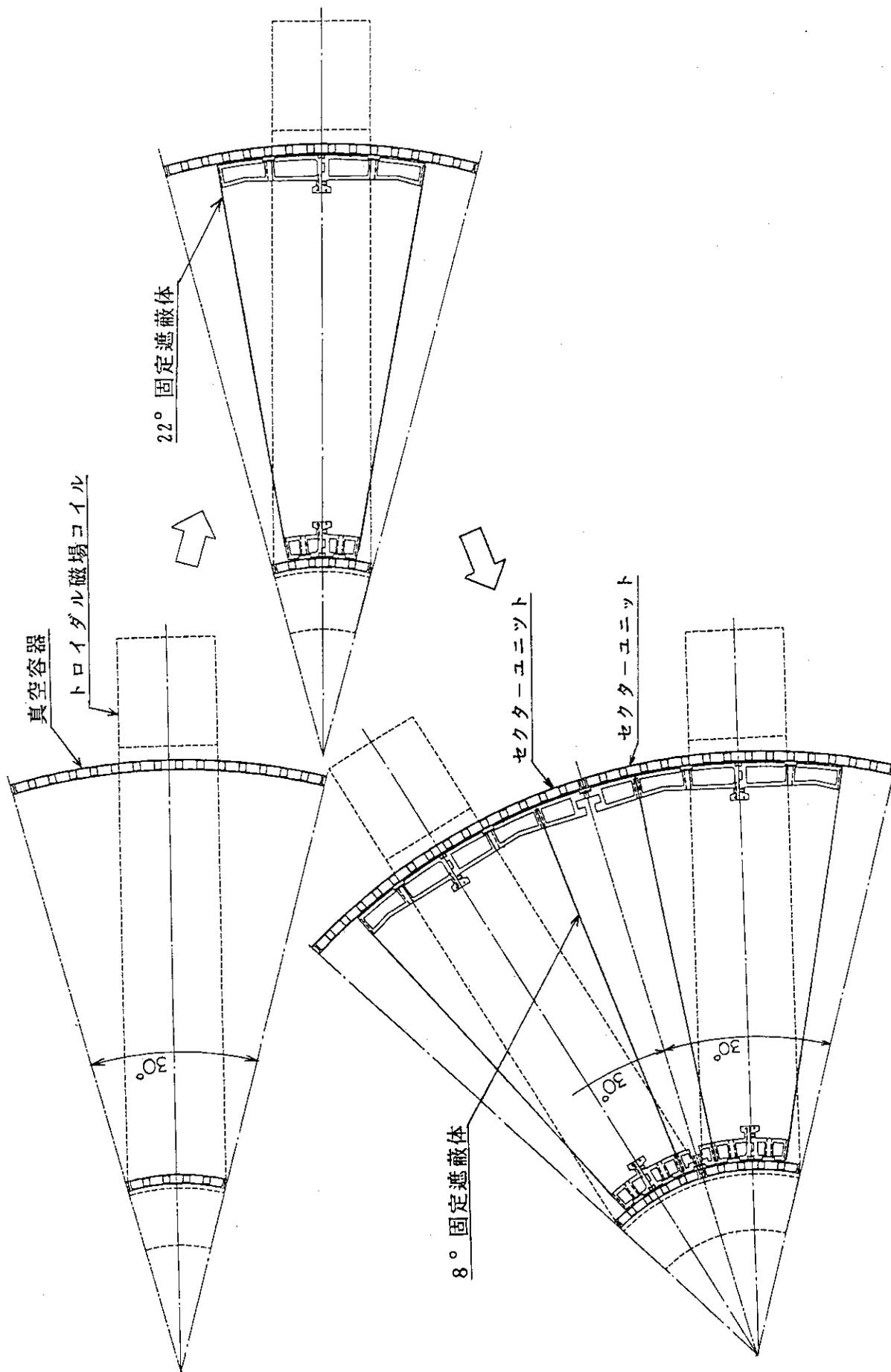


図 3. 3 - 4 固定遮蔽体の組立手順

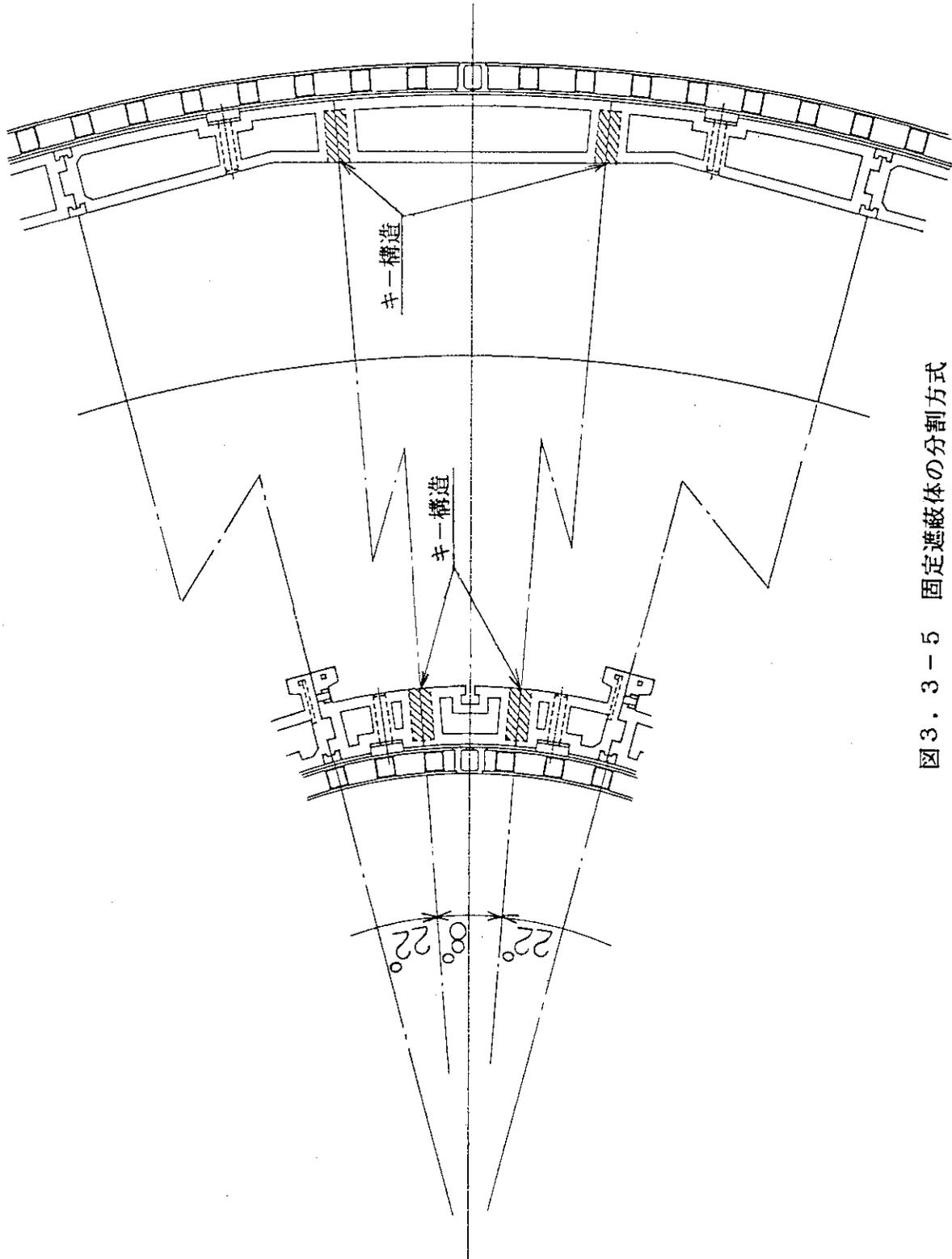


図3.3-5 固定遮蔽体の分割方式

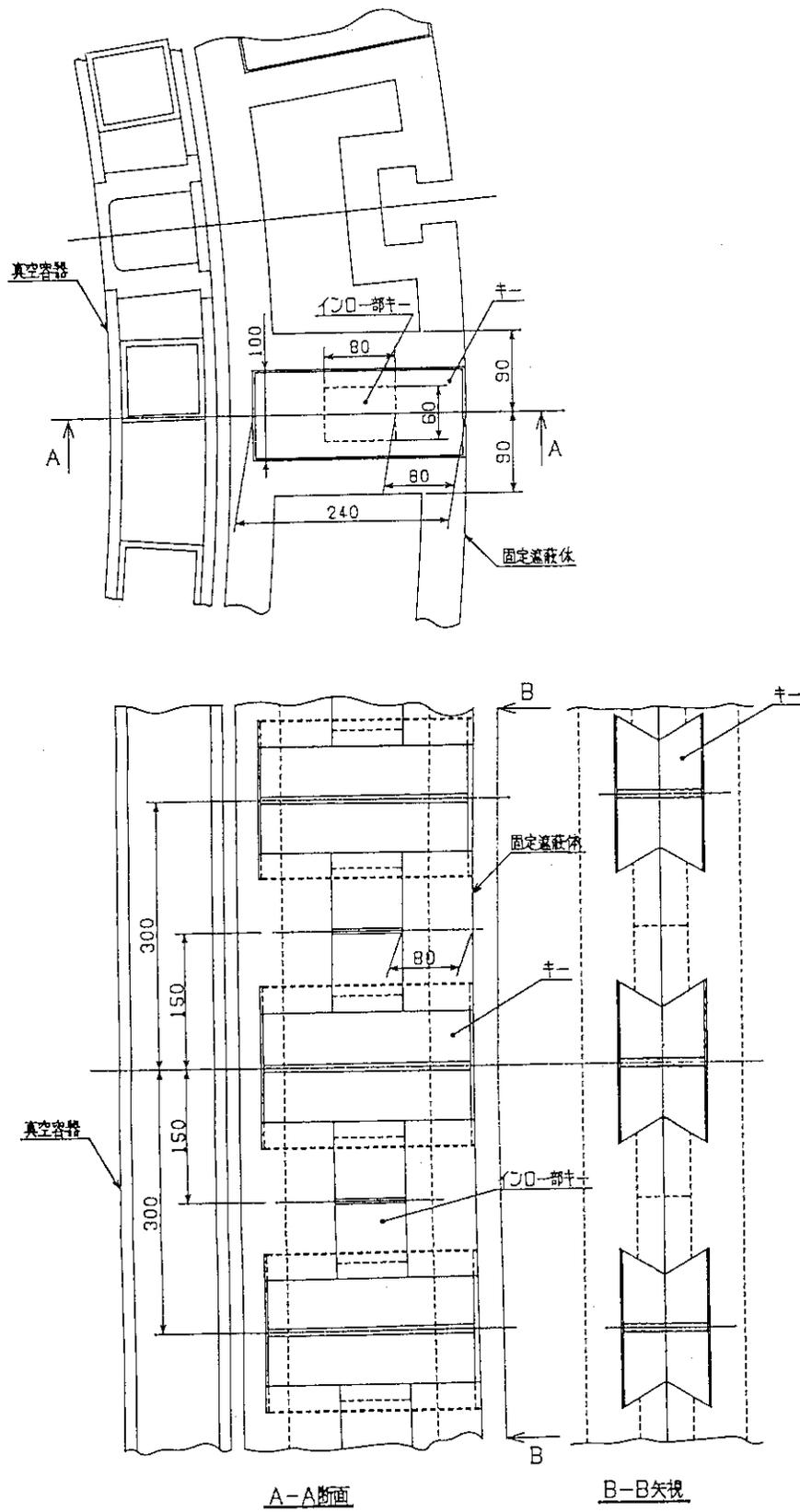


図 3. 3 - 6 固定遮蔽体大小モジュール間の連結方式

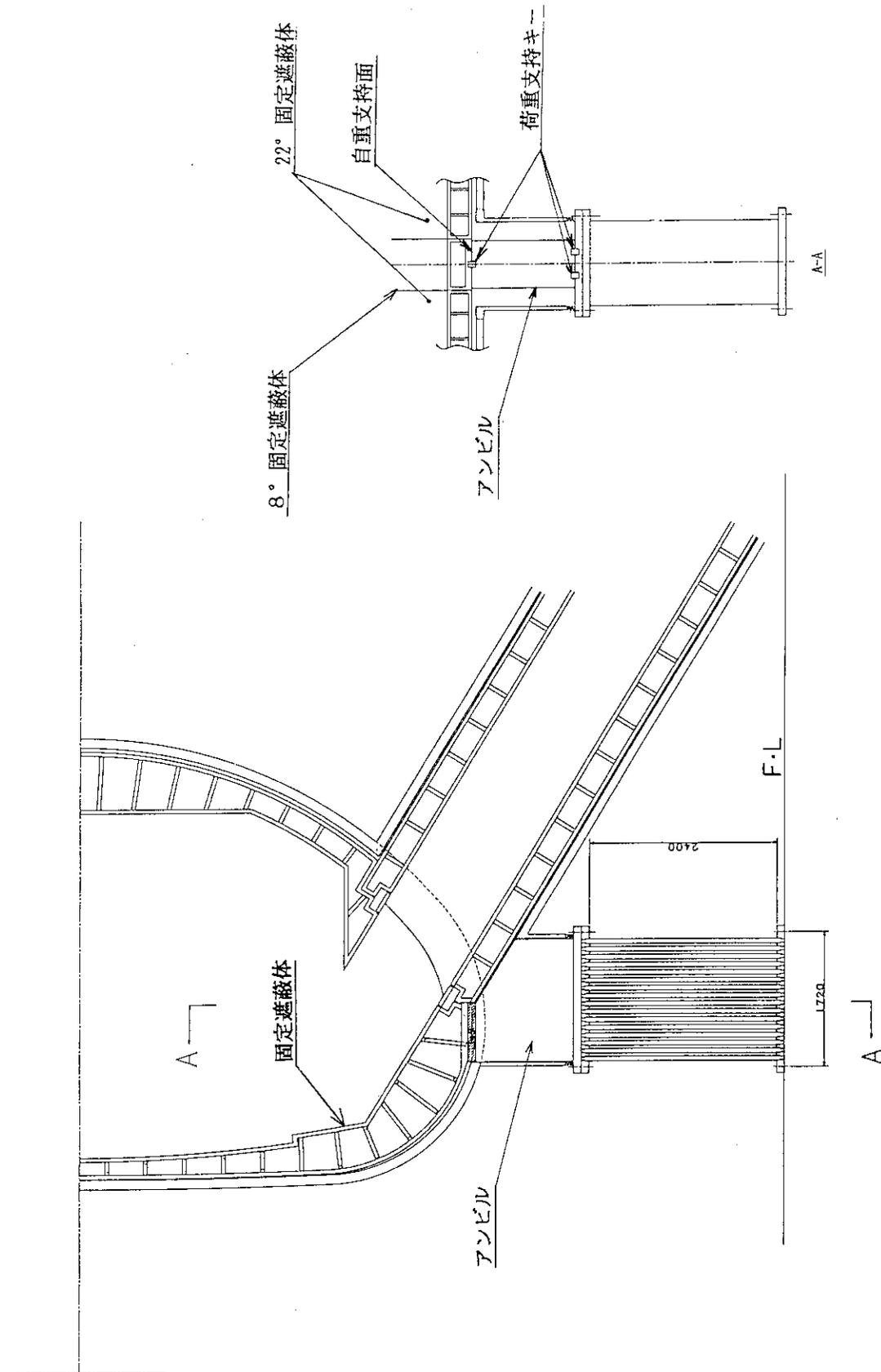


図 3. 3-7 アンビル設置型トラス支持脚

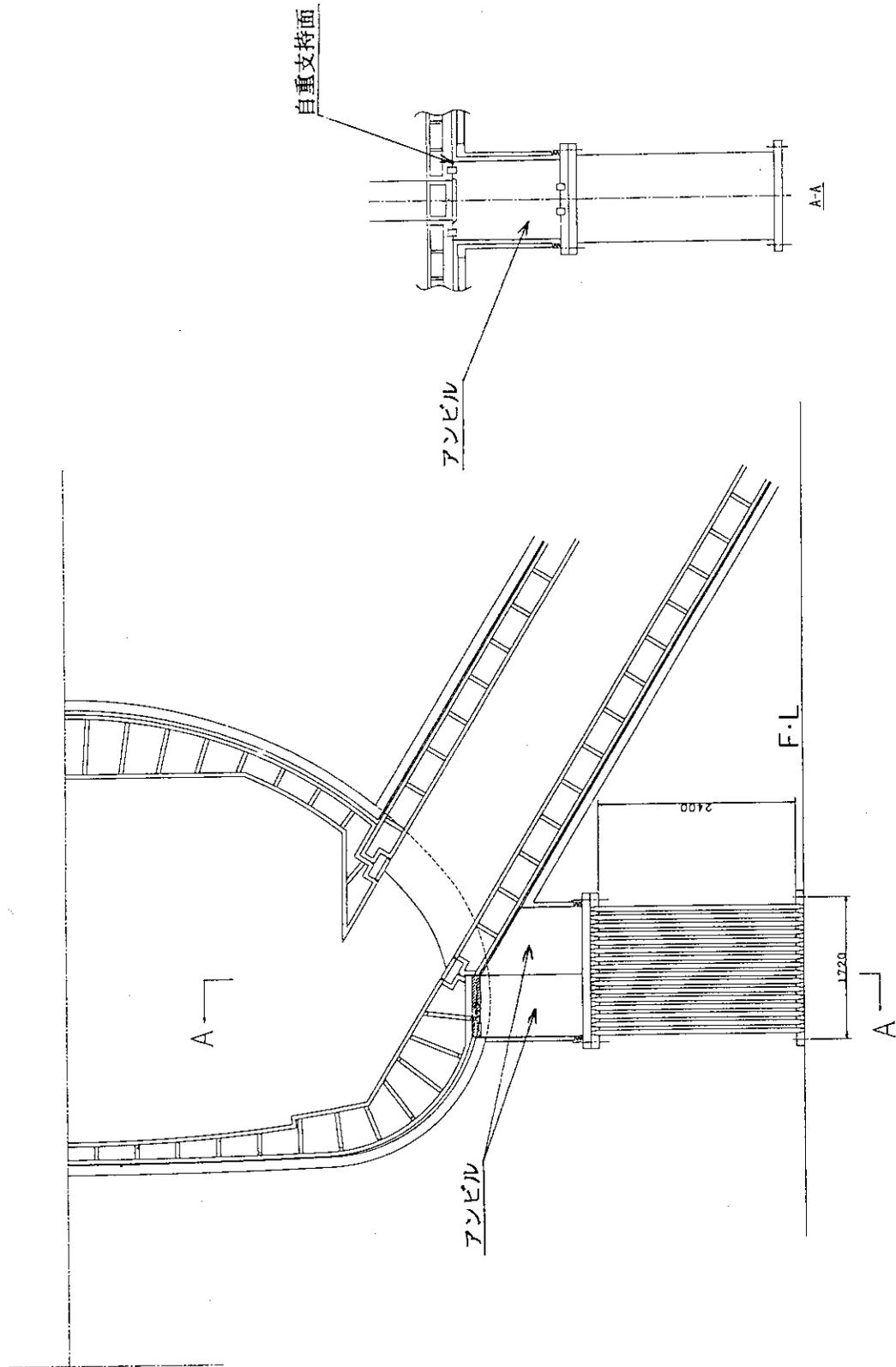


図3.3-8 分割アンピル型トラス支持脚

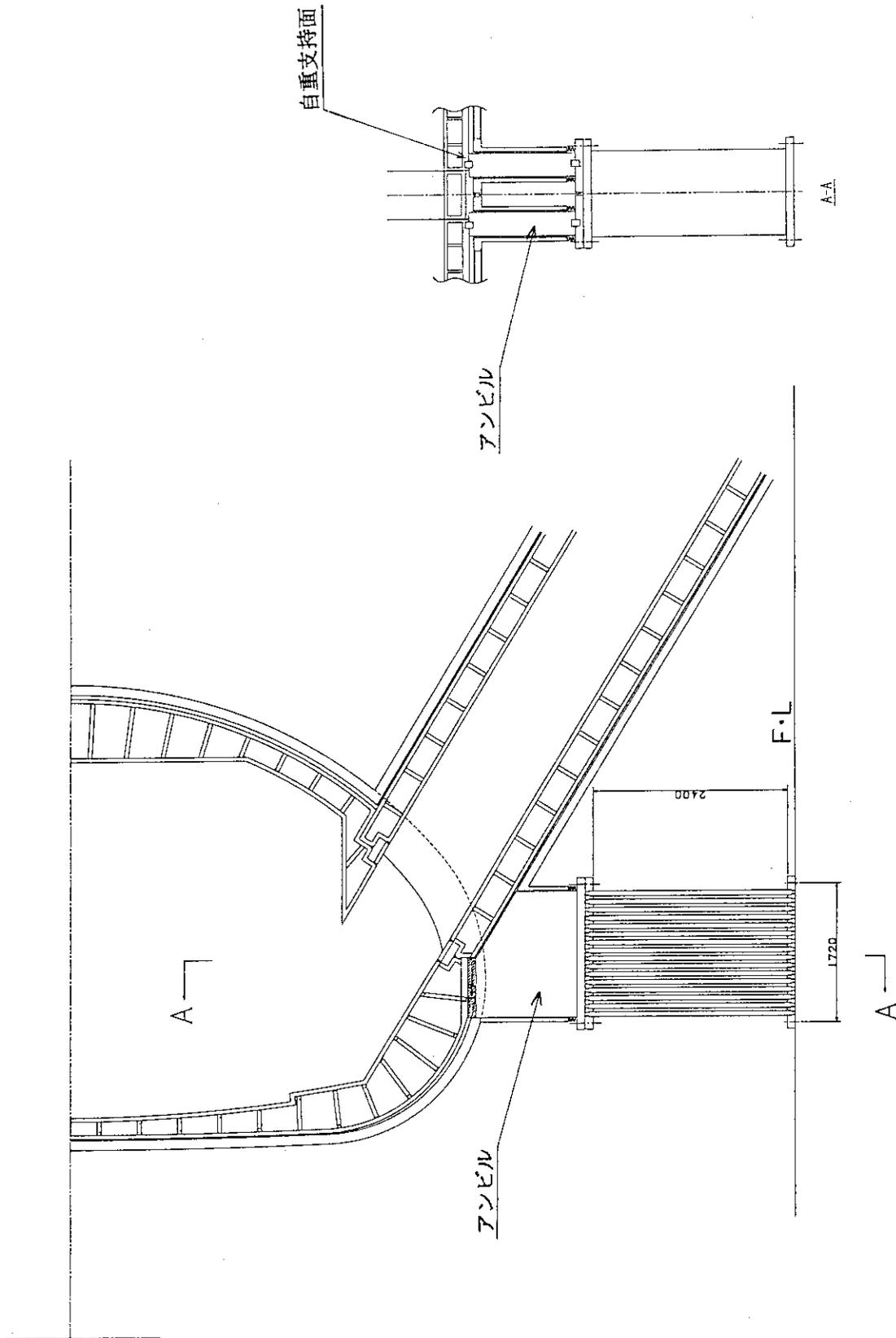


図3.3-9 ポート分割型トラス支持脚

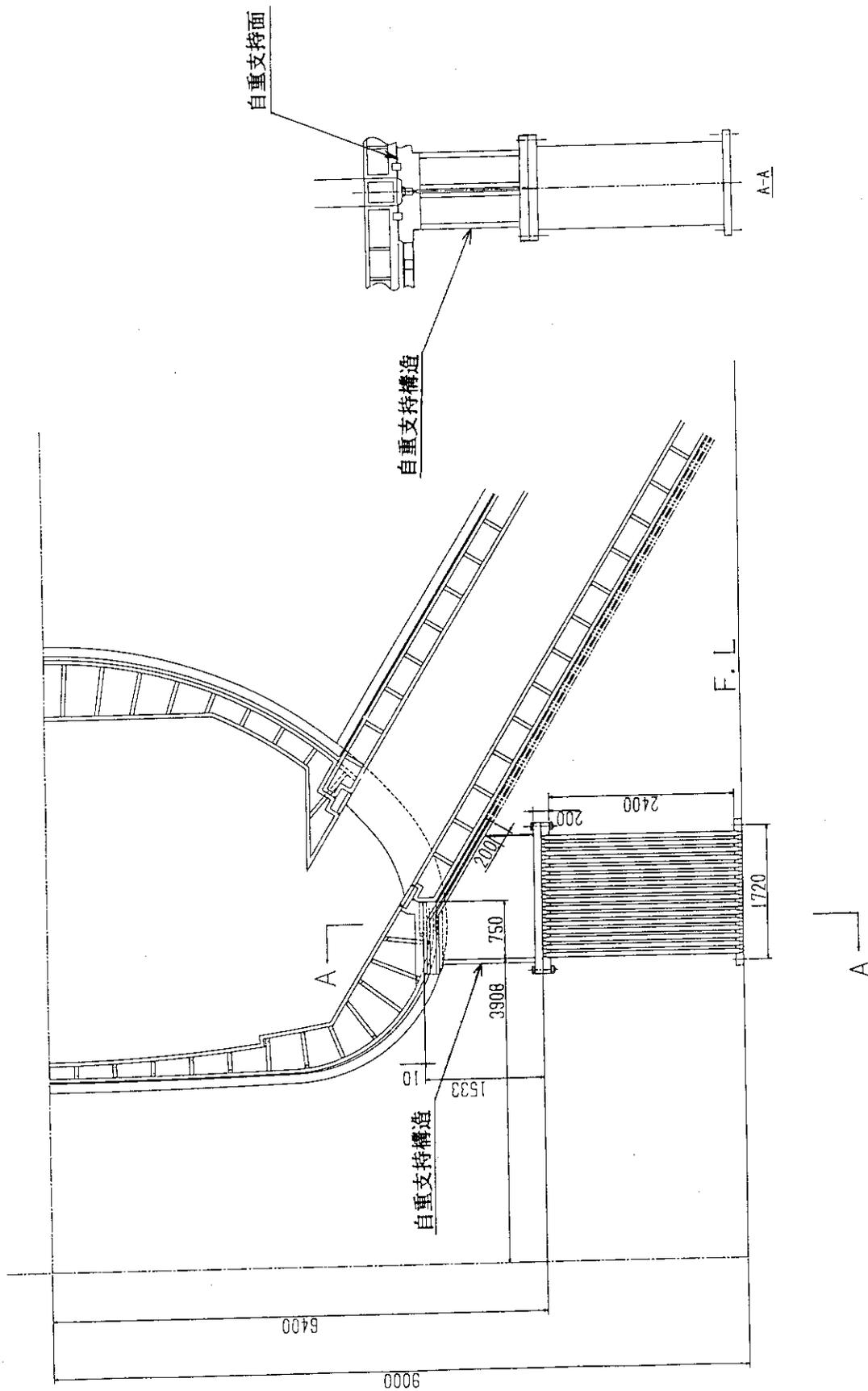


図 3.3-10 支持構造体設置型トラス支持脚

4. 重要検討課題

4. 1 電気絶縁・接続構成

プラズマ真空容器、容器内機器、超電導コイル、クライオスタット容器および加熱、計測、保守機器等の炉外機器は、総合して所定のトーラス一周抵抗値（FERでは $20\mu\Omega$ ）を有するものでなくてはならない。またこの他に、各機器は自らや、電磁的に大きな影響を与える他の機器に対して働く、プラズマ異常消滅時などの電磁力を軽減する目的にかなうに適切な電気絶縁・接続を有していることが望まれる。一方、電気絶縁・接続を管理する部分が多く存在すれば、その分、機器の設計が複雑になることや、真空管理上放出ガスが多くなるなどの問題が発生する。従って、炉心構造系の電気絶縁・接続構成は、トーラス一周抵抗、電磁力低減の要求を満足し、かつ機器設計上はできるだけ単純なものが望まれる。

4. 1. 1 設計仕様

(1) 炉内機器

炉内機器の各モジュールは、互いに絶縁され、かつ真空容器とも絶縁されていることが望ましい。ただし、各機器の電荷蓄積を防ぐためには、少なくとも1箇所、真空容器に接続されている部分があることが必要である。

(2) 炉外機器

理想的には、真空容器と炉外機器は完全に絶縁されていることが望まれる。ただし実際的には、大型の絶縁真空フランジの実現は非常に難しい。従って、下記の代替方式を許容するものとする。

- 炉外機器は他の炉外機器とは、クライオスタット容器外において完全に絶縁されていること。
- 加えて、ベローズ構造のような高抵抗要素が真空容器と炉外機器間に設置されていること。この抵抗要素の抵抗値は、各セクターあたり $100\mu\Omega$ 以上であること。（たとえばN本の配管が炉外機器と真空容器を結んでいたとすれば、各配管の抵抗値は $N \times 100\mu\Omega$ 以上あれば要求を満たす。）

4. 1. 2 設計

(1) 炉内機器

トーラス内側真空容器、クライオスタット容器および炉内機器（内側可動遮蔽体及びダイバータ）の電気絶縁・接続構成を図4. 1-1、2に示す。真空容器は均一抵抗体であり、一周抵抗値の仕様に対応した設計とする。容器内のセクター間絶縁は、固定遮蔽にて確保する。固定遮蔽は隣接セクター間に絶縁接続構造（ただし真空密封性は不要）を有し、トーラスを電

氣的に1/2分割する。内側可動遮蔽体及びダイバータはこの固定遮蔽体に取り付けられるが、ここでの支持機構は対電磁力強度の観点から、絶縁層を介さない支持構造を取ることができる。

ダイバータの受熱板・冷却配管の材料は銅などの高熱電導金属であり、必然的に高電気電導材料となる。このため、ダイバータの各冷却管は相互に絶縁され、また受熱板の取り付け基盤からも絶縁されている。

図4. 1-1は内側可動遮蔽体モジュール間の支持構造に絶縁（セラミックコーティングなど）を施して、相互に絶縁した構成を示す。これは電磁力低減と、絶縁管理の面では望ましい概念ではある。ところが、炉内での完全な絶縁管理を期すためには、内側可動遮蔽体と他の炉内機器間および、上部ポート部真空容器間の絶縁も考慮して、必要な絶縁処理（間隙の管理や絶縁層コーティング）を施す必要がある。これにはセクター内でのモジュール分割が異なることが障害となり、現実の設計を考えると困難が予想される。一方、図4. 1-2は、電磁力低減の効果を考えた場合に重要となる箇所だけに絶縁を施し、その他の支持、接触点では積極的な絶縁管理を行わない方式を示すものである。どちらの方式を選択するかは今後の詳細な設計・解析によって決定される。

トラス外側の機器である、外側可動遮蔽体及び炉内制御コイルについては、その電気絶縁・接続構成を図4. 1-3、4に示す。高電気電導材である制御コイル導体はコイルケースと絶縁されている。コイルケースは強度が問題とならない範囲で薄肉とし、抵抗体として機能させる。従って固定遮蔽体とコイルケースの間は殆どの場所では導通支持を採ってよいが、固定遮蔽体の絶縁層を渡る部分では、導通とならないよう一部絶縁を取る必要がある。外側可動遮蔽体の電気絶縁・接続構成に関しては内側部と同様、炉内の他の機器や真空容器間の完全な絶縁管理をする構成（図4. 1-3）と、電磁力低減効果の高い箇所の絶縁管理で済ませる方式（図4. 1-4）が考えられる。

（2）炉外機器

加熱装置、保守機器などの炉外機器の電気絶縁・接続構成は、炉内機器のそれと整合して、最終目的であるトラス一周抵抗の確保と電磁力低減を達成するものでなくてはならない。この具体化は各機器の設計作業として実施され、今後の工学設計において実現させていくものではあるが、全体システムとして下記の基本的な考え方則って行われることが望まれる。

- （a） 真空容器とはベローズなどの抵抗体を介して接続する。
- （b） 炉外機器は、他の周辺機器と絶縁される。
- （c） 炉外機器に対するサービスラインは、絶縁もしくは、高抵抗を介して接続される。
（実際的には絶縁、高抵抗フランジ接続などが入る。）

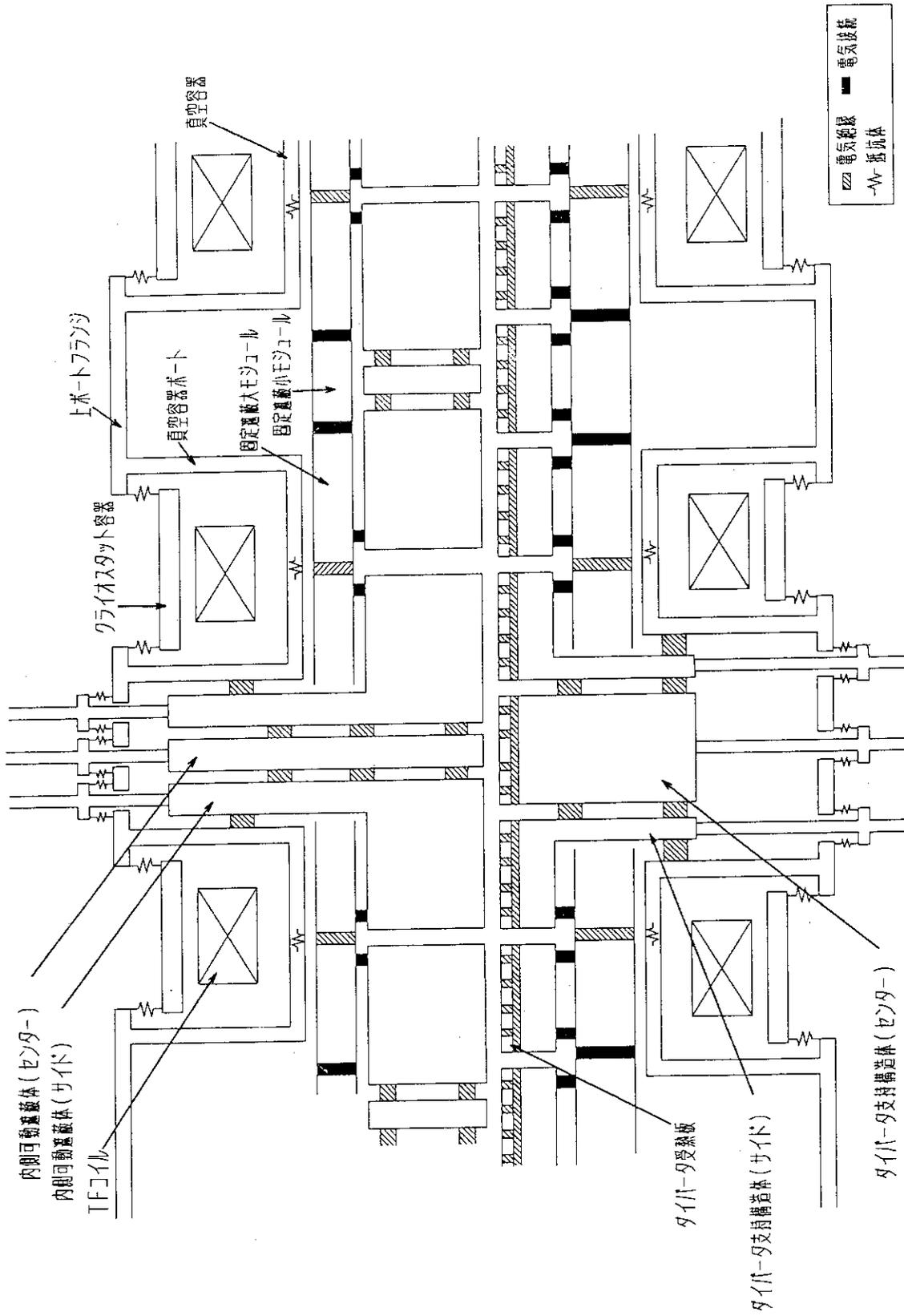


図 4. 1-1 トランス内側の各機器間における絶縁/導通構成 (モジュール間全面絶縁)

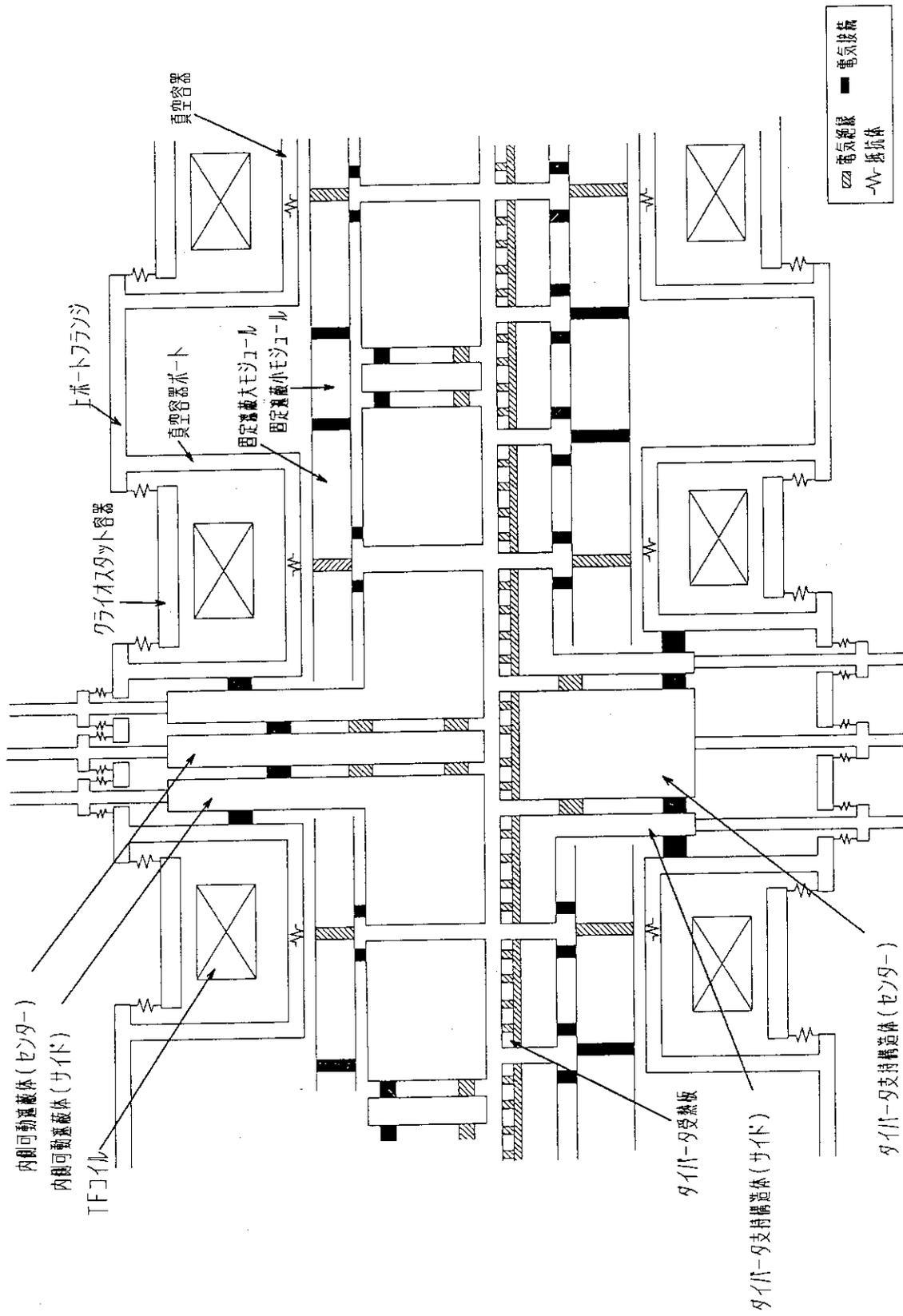


図 4. 1-2 トーラス内側の各機器間における絶縁/導通構成 (モジュール間部分絶縁)

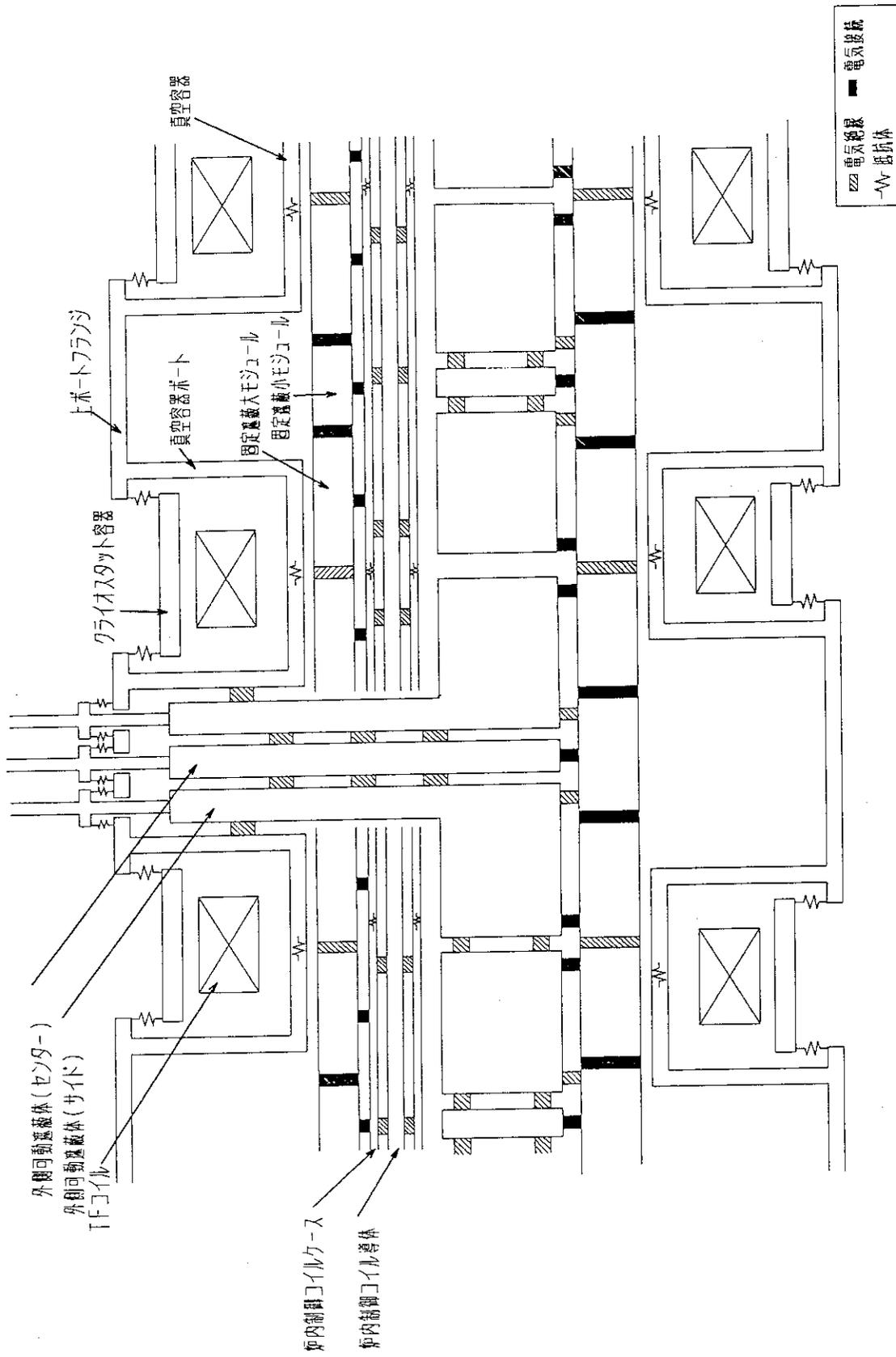


図 4. 1-3 トーラス外側の各機器間における絶縁/導通構成 (モジュール間全面絶縁)

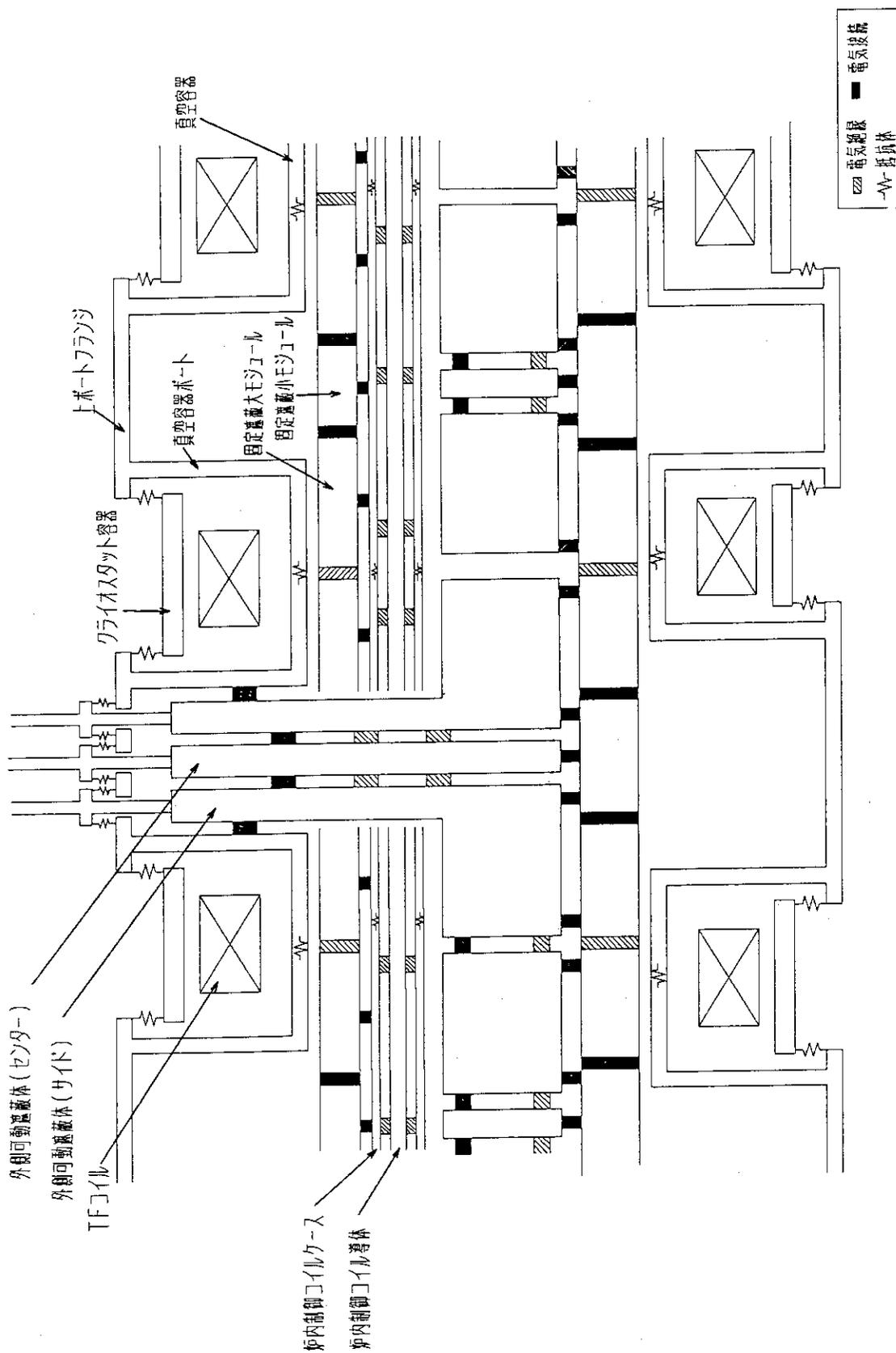


図4. 1-4 トーラス外側の各機器間における絶縁/導通構成 (モジュール間部分絶縁)

4.2 容器内交換機器の着脱機構

容器内大型交換機器の支持構造にとって、プラズマ異常消滅時に生じる電磁力は構造設計上、最も重要な鍵となる。支持機構の基本構想として、炉内構造物に発生する電磁力を自重の支持程度で可能となるまで低減させる方法と強大な電磁力に対して耐え得るような支持構造を構築する方法の二つ考えられる。

前者の設計概念として、図4.2-1に示すように強大な電磁力を誘発する渦電流モードを断ち切るように絶縁機能傾斜材料を用いた可動遮蔽体の容器構造が考えられる。本構造概念は、極めて魅力的でもあるが、機能傾斜材料の選定、製造方法、大型化及びブランケット容器の製作性、信頼性等の開発課題も大きく、現段階で全面的にこれを採用することは危険である。

一方、後者の方法は一般的であり、これまでに多くの支持構造概念が提案されている。本節では、強固な対電磁力支持が要求される後者の場合について以下に述べる。

4.2.1 設計要求事項

F E Rの炉内構造物支持機構に対する主な設計要求を以下に示す。

- ・分解修理に対処可能なこと（着脱性）
- ・核発熱に対処可能なこと（核発熱除去性）
- ・支持機構の損傷に対して炉内構造物を取り出すバックアップ方法が有ること
- ・信頼性が高いこと

4.2.2 支持概念

炉内構造物の対電磁力支持に対する考え方は二通りある。

- (A) 炉内構造物を真空容器に結合し、真空容器に持たせる。この場合、真空容器は十分な強度を有していることが前提となる。
- (B) 真空容器の強度があまり期待できない場合あるいは着脱作業の観点から真空容器に結合させることが不可能な場合は、炉内構造物同志を結合しトラスを形成することにより自己支持させる。

現在提案されている炉内構造物の支持機構は、(A)に対して水圧式コッターによる結合（図4.2-2）及び低融点金属を用いた結合（図4.2-3）があり、(B)に対して水圧式コッターによる結合（図4.2-4）、ボルト結合（図4.2-5）及び溶接による結合（図4.2-6）がある。

表4.2-1は、現在提案されている支持概念を比較評価したものである。詳細について次に述べる。

(1) 水圧式コッターによる結合

本概念は、ピストン型駆動機構、形状可変管型駆動機構、フイゴ型駆動機構等を利用したコッター／キー構造により容器内機器と真空容器あるいは容器内機器を結合しようとするもので

ある。本概念の最大の利点は、極めて容易な着脱性であり、しかも外からのアクセスを必要とせず設置場所を任意に選択できる。また、水を使用するため核発熱除去は本質的に問題がない。さらに、概念の実現可能性の検証（特に、駆動機構の検証）について現在試作開発中であり、その見通は得られつつある。試作開発の成果については後述する。

本概念の課題は、

- ・ 支持機構の損傷に対して容器機器を取り出すバックアップ方法の確立
- ・ 機器間の間隙の程度／精度への柔軟性
- ・ 所定の支持が得られているか否かの確認方法の確立

である。したがって、今後、設計上からまた試作開発の結果より上記課題を明らかにする必要がある。尚、本概念は、着脱の容易性から、頻繁に交換が要求される定期的保守対象機器、例えばダイバータ板の支持機構あるいは第一壁付可動遮蔽体の支持機構に適した方法と考えられる。

(2) 低融点金属による結合⁴⁾

本概念は、結合構造物間に低融点金属を置き（低融点金属が溶融した時漏れない工夫が必要）、近傍に設置した加熱源により、低融点金属を溶融・凝固させることによって構造物を着脱させるものである。本概念は、広い面結合が可能であり、また、外からのアクセスを必要としないため基本的には結合場所を任意に設定できる。本概念の成立性は、低融点金属の選択とその加熱方法にある。特に、加熱方法については以下の課題がある。

- ・ 抵抗加熱的なものかそれとも他の方法か？
- ・ 加熱源の設置方法は？
- ・ 加熱容量は（構造材の熱伝導を考えた時所定の温度に加熱可能か）？
- ・ 加熱器の故障に対するバックアップ方法

があり、これらが解決されるならば、ダイバータ支持構造体と真空容器の面結合方法として有望なものになると考えられる。

(3) ボルト結合⁴⁾

本概念の最大の利点は、構造が最も単純であり、基本的に開発を必要としない確立技術という点である。一方、この欠点は、外からのアクセスを必要とするため使用場所、作業空間等に制約があることである。また、核発熱の大きな場所で使用しようとする（作業性を考慮すると、殆どこの場合になる）、ボルトの核発熱除去の方法が問題となる。

(4) 溶接による結合

本概念は、容器内交換機器同志を溶接により結合してトーラスを形成し、真空容器からの支持を必要とせず、電磁力に耐えようとするものである。本概念は、他の支持機構（水圧式コッターによる支持、低融点金属を用いた支持）と比較して、装置の故障、例えば水圧式の場合の駆動源の故障、低融点金属の場合の加熱器の故障、に対するバックアップ方法を考慮する必要が無いこと、また、構造が単純であること等大きな利点を有している。しかし、一方では外か

らのアクセスを必要とするため、結合場所、作業空間等に制約がある。

本概念に対する主要な要求／制約事項には次のようなものが考えられる。

- ・核発熱に対処可能なこと（強制冷却を考えるか、必要な距離だけ第一壁から遠ざけること）
- ・機器間の切り離しが可能なこと
- ・溶接開先合わせが可能なこと
- ・溶接部の品質が評価可能なこと
- ・ブランクセット間の間隙は最大20mmを前提とすること

これらの要求を満たすものとして、図4.2-6に示したような第一壁から離れた交換対象機器の側壁に設けたボルト溶接構造が提案されている。溶接開先合わせはボルトの出し入れにより行い、ボルト溶接部の核発熱は第一壁から遠ざけることにより小さくして接触熱伝達によって除去する。また、機器間の切り離しのためのボルト切断は機械切断を適用するということである。種々の利点を持つ本概念の成立可能性を考えた時、以下のような不確かさがある。狭隘かつ深部（間隙20mm，深さ500mm）において管理された遠隔自動溶接における、開先合わせの方法、溶接の狙い位置の設定方法、アーク発生状況の確認方法、溶接終了の設定方法、検査方法、補修方法等がある。

したがって、本概念の成立性を検証するためにはこれらの疑問に答える必要がある。

すなわち、以下の技術開発が必要である。狭隘、深部（間隙20mm，深さ500mm）での溶接及び切断の方法については、

- ・遠隔操作による開先合わせ
- ・遠隔操作による溶接（狙い位置の設定、アークの確認、溶接終了の設定）
- ・溶接ボルトの切断

を確立する必要があり、溶接部品質の評価方法については、非破壊検査方法（狭隘・深部、放射線環境下を考慮）を確立する必要がある。

4.2.3 まとめ

これまでに提案されている炉内構造物の対電磁力支持構造として、水圧式コッターによる結合構造、低融点金属を用いた結合構造、ボルト結合構造及び溶接による結合構造がある。これらについて比較を行い、課題を明らかにした。

水圧式コッター結合構造は、現在概念実証のため試作開発中である。本概念は、容易な着脱性から、頻繁に交換が要求されるダイバータ板の支持機構として有望視される。本概念の最大の課題は、駆動機構の故障に対するバックアップ方法の確立である。

低融点金属を用いた結合構造は、ダイバータ支持構造体と真空容器の面結合方式として有望なものと考えられるが、課題は、概念の実証及びバックアップ方法の確立である。

ボルト結合構造は、着脱作業に対して外からのアクセスを必要とするため、使用場所に制限がある。また、核発熱除去も課題である。

溶接による結合構造は、基本的にバックアップ方法を必要としない大きな利点を有している。しかし、本方式に対しては一般的に着脱作業に大きな空間的制約が生じる。本方式の最大の課

題は、限定された空間内での信頼性ある着脱作業の実証である。

表 4. 2 - 1 支持機構概念の比較

	水圧式コッター 結合	ボルト結合	溶接結合	低融点金属結合
実現可能性	R & D中 高い	高い	概念の検証を 要する	概念の検証を 要する
着脱性	優	普通	劣	優
核発熱除去性	優	劣	劣	優
バックアップ方法	今後の課題	基本的に可能	必要無し	今後の課題
信頼性が懸念され る箇所	駆動源	特に無し	溶接部	加熱源

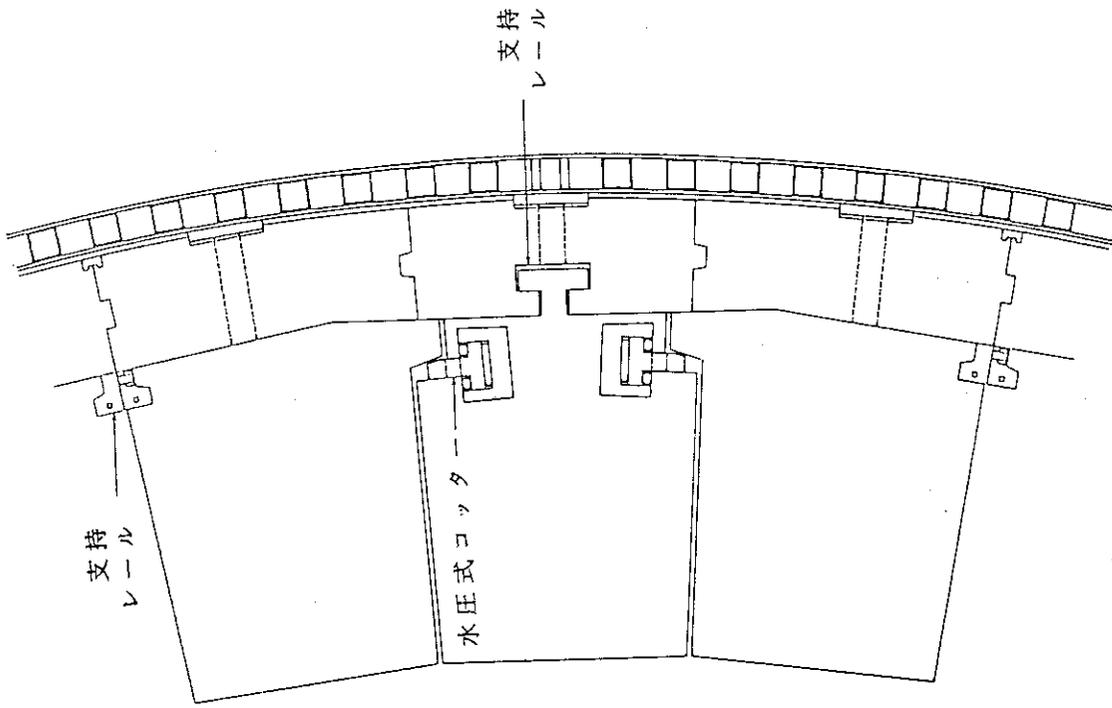


図4.2-2 水圧式コッターによる容器内大型交換機器の支持機構(セクター自立型)

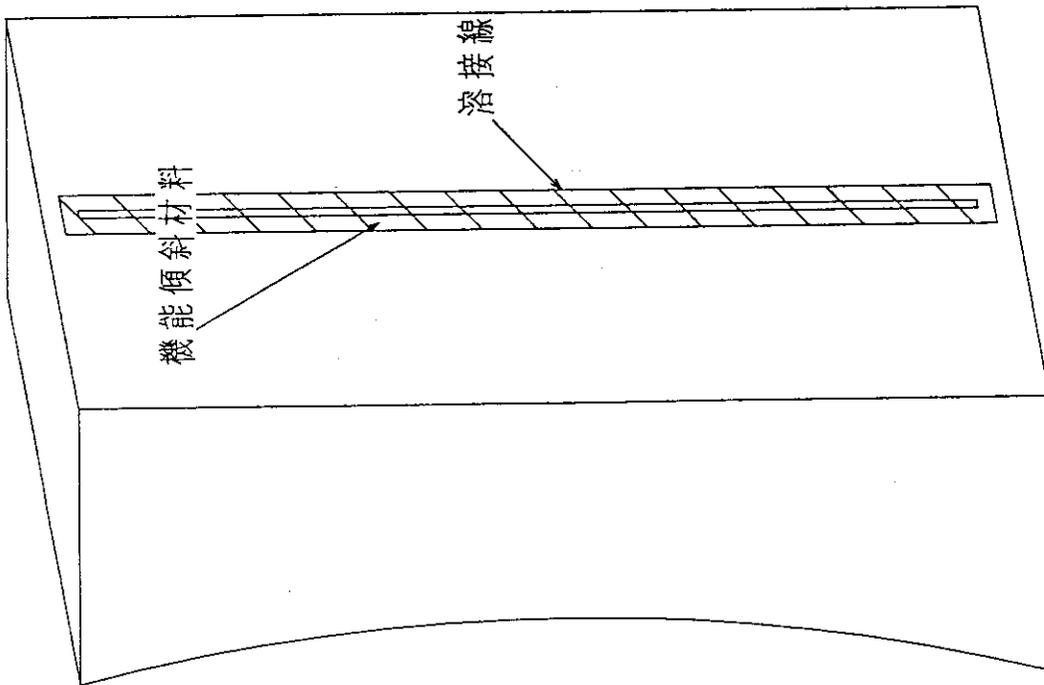


図4.2-1 容器内大型交換機器磁力低減対策概念図

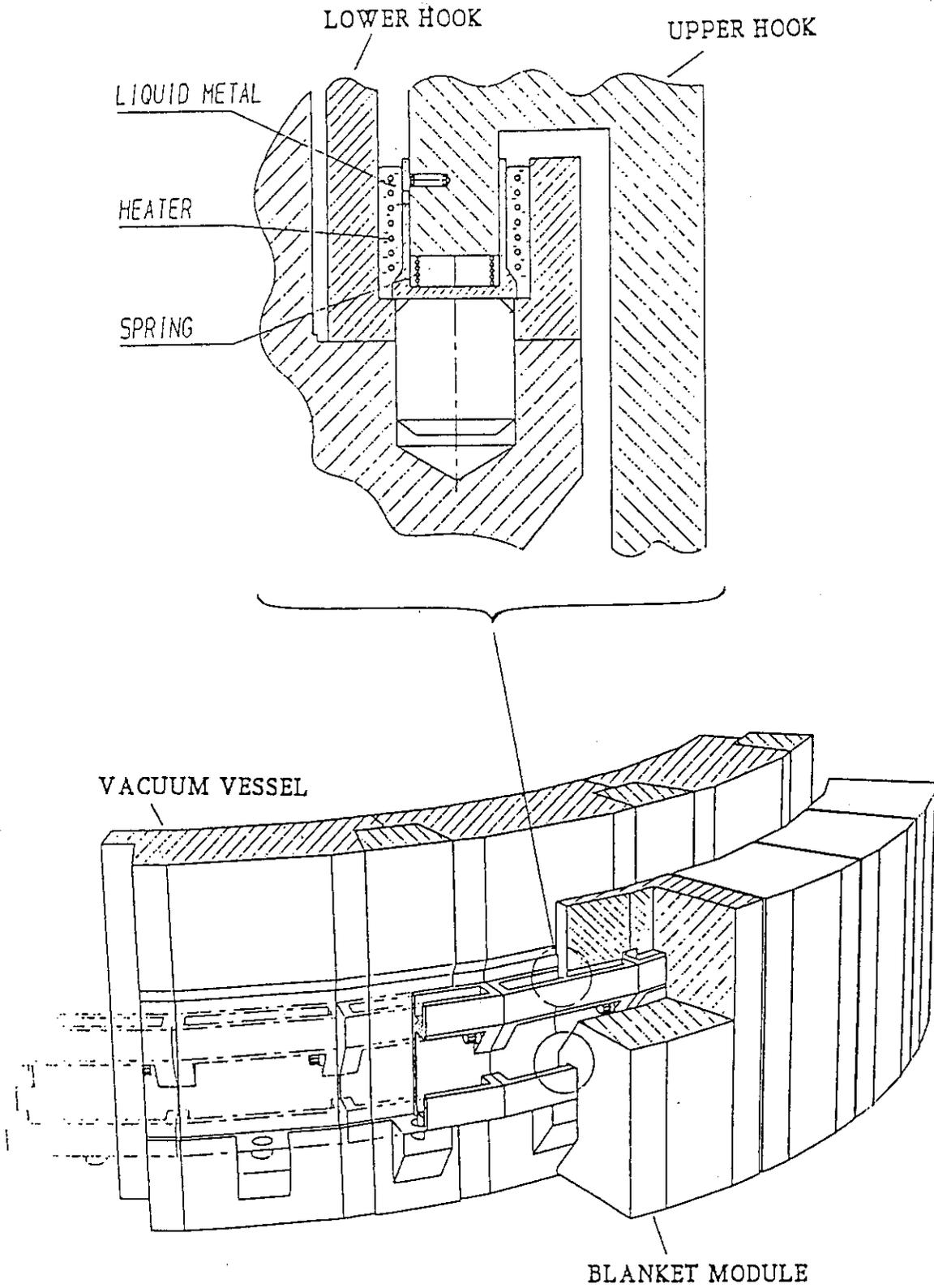


図4. 2-3 低融点金属による容器内大型交換機器の支持機構

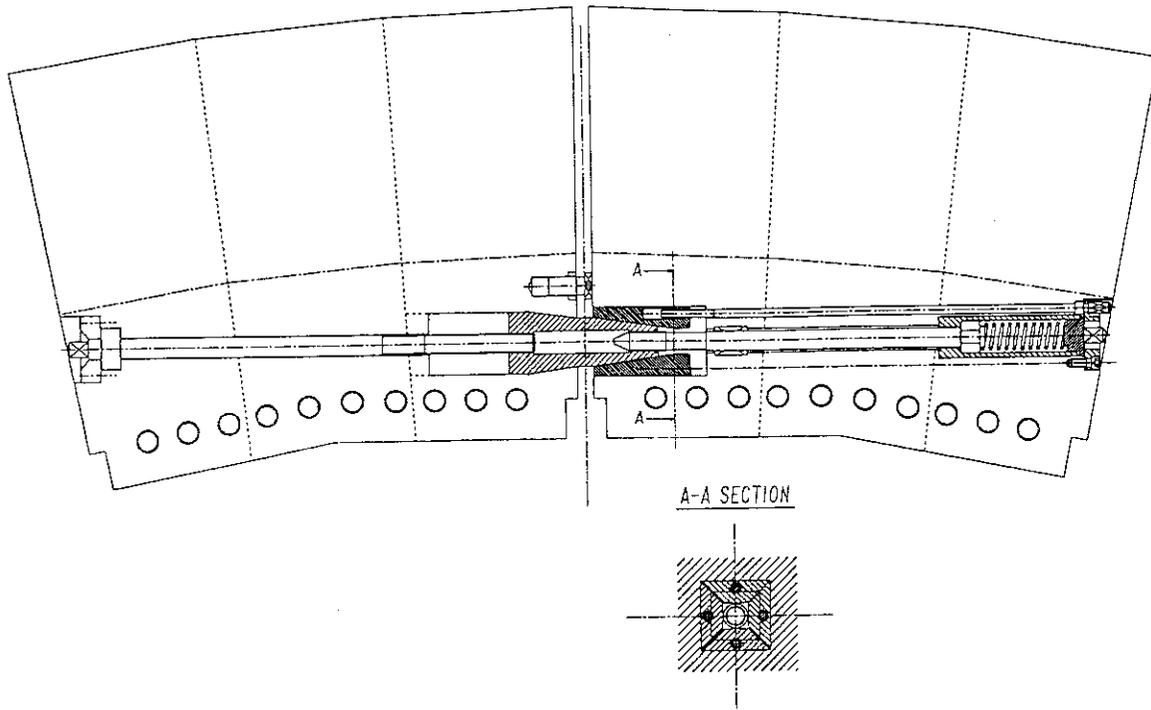


図4.2-5 ボルト締結による容器内大型交換機器の支持機構（トラス形成型）

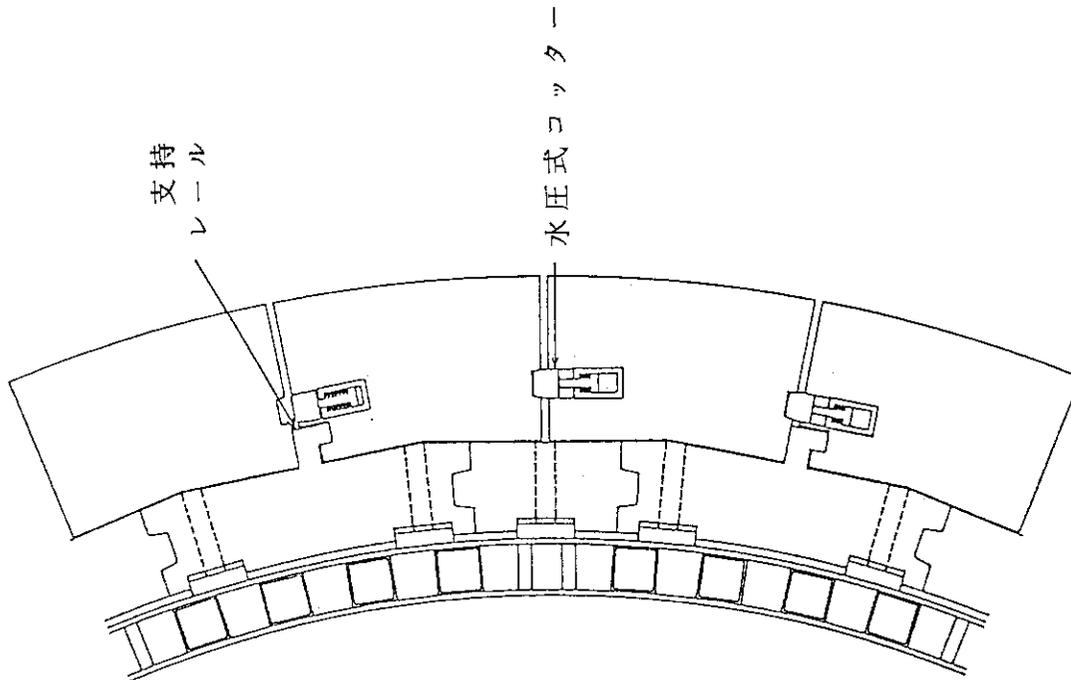


図4.2-4 水圧式コッターによる容器内大型交換機器の支持機構（トラス形成型）

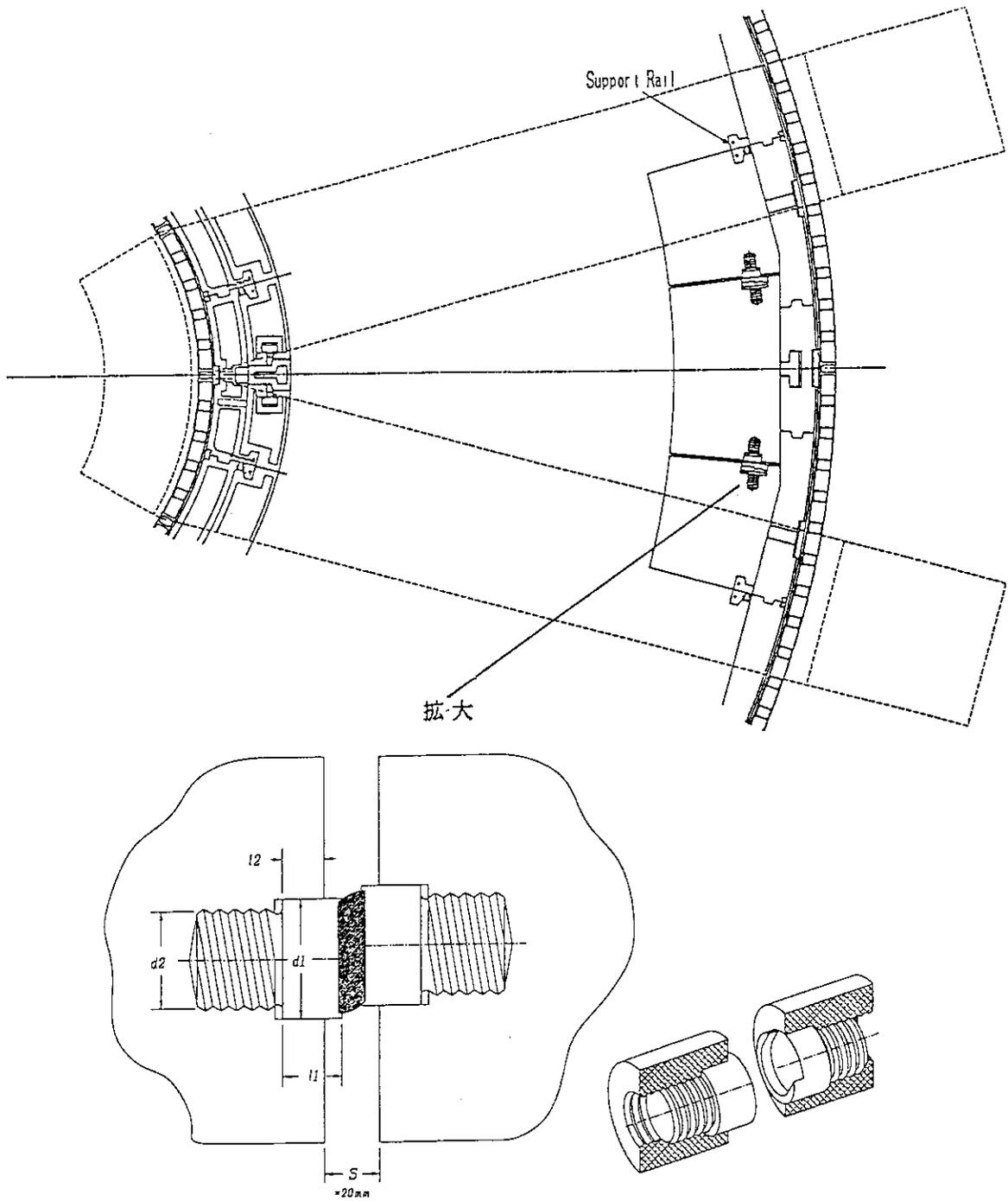


図 4. 2 - 6 溶接による容器内大型交換機器の支持機構 (トラス成型)

4.3 過渡電磁解析

トカマク装置における過渡電磁解析については以下のような項目が考えられる。

(i) 放電開始時及びプラズマ電流立ち上げ初期

- ・真空容器を始め炉心構造機器の電磁遮蔽効果を考慮して、ポロイダル磁場コイル（PFコイル）系がプラズマにトーラス一周電圧を印加して放電開始する時の電界の浸込み特性の評価（必要なトーラス一周抵抗を保証する真空容器の厚みを求める場合、この解析手法を利用した印加電圧法によれば、高精度の値が得られる。）
- ・プラズマ電流立ち上げ初期（強固なプラズマ平衡配位が確立されていない）に炉心構造機器に誘起される渦電流による不整磁場の評価

(ii) プラズマ異常消滅磁

- ・心構造機器に誘起される渦電流による電磁力の評価
- ・PFコイル系に誘起される電圧及び電流の評価
- ・低温構造材（TFコイルのケース及び支持構造材、ソレノイドコイルのケース）に誘起される渦電流によるジュール発熱の評価

(iii) プラズマの位置不安定性

- ・プラズマの移動によって心構造機器に誘起される渦電流の受動安定化効果の評価
- ・位置制御のための能動制御コイルに対する心構造機器に誘起される渦電流の電磁遮蔽効果の評価

4.3.1 過渡電磁応答特性

(1) 印加電圧法による真空容器の厚みの評価

PFコイル系を変流器一次巻線としてプラズマ領域での洩れ磁場が最小となるように、プラズマとの鎖交磁束が $60.59 \text{ V} \cdot \text{s}$ （FERでのプラズマ放電開始前状態）まで充電し、これを6秒で開放する。従って、PFコイル系は6秒間二次巻線側に 10.1 V の電圧を印加し続けていることになる。この確認のため、プラズマ中心に高抵抗のトーラス一周コイルを設置し、誘起電流と抵抗の積をもって二次巻線側への誘起電圧とする（この一周コイルを高抵抗とする理由は誘起電流を小さく抑え構造物に誘起される渦電流を乱さないためである）。構造物（真空容器）の誘起電流が定常状態になれば、プラズマ中心で 10.05 V 印加されていることが図4.3-1から見てとれる。 10.1 V と 10.05 V の差は磁束の洩れ量に対応する。

定常状態後の真空容器一周電流値からトーラス一周抵抗値が求まる。今仮に、肉厚 26 mm として比抵抗値をパラメータにトーラス一周抵抗を計算した結果を図4.3-2に示す。図より $20 \mu\Omega$ のトーラス一周抵抗を確保するための比抵抗値は、 $4.88 \times 10^{-7} \Omega \text{ m}$ となり、比抵抗値 $8.02 \times 10^{-7} \Omega \text{ m}$ のSS（ステンレス鋼）で $20 \mu\Omega$ のトーラス一周抵抗を確保するためには、肉厚は 42.7 mm となる。因みに、図4.3-2の元図とも言うべき真空容

器の誘起電流の過渡状態を図4.3-3に示す。

一方、トーラス一周抵抗の確保の仕方はプラズマの位置不安定性を抑制するための受動安定化機構の構成に依存する。受動安定化機構の回路構成には図4.3-4に示す様に大別して、“鞍型回路”⁵⁾と“双対型回路”⁶⁾が提案されている。“鞍型回路”はブランケットの様な箱型構造物自身で閉じた回路構成が得られ、安定化効果は真空容器のトーラス一周抵抗値にあまり影響を受けない。“双対型回路”はNBI等のためブランケットが上下に分断されても影響を受けない反面、ブランケットの裏に流れる電流を打ち消す電流が真空容器に流れなければならぬ。そのため、真空容器のトーラス一周抵抗値が高い場合は適用できない。“双対型回路”を採用する場合、 $20\mu\Omega$ のトーラス一周抵抗値は充分低い。比抵抗値 $8.02 \times 10^{-7}\Omega\text{m}$ のSS(ステンレス鋼)で $20\mu\Omega$ のトーラス一周抵抗を確保するためには、肉厚は42.7mmとなるが、“双対型回路”の効果をより高めるため真空容器の当該部に、厚さ5mm、幅1mの銅板を張り付けて真空容器の肉厚を26mmとする。

(2) プラズマの位置不安定性に対する受動安定化効果

楕円度の高いプラズマは優れた性能を有するが、上下方向に不安定である。垂直方向に移動するプラズマは周りの導体構造物に渦電流を誘起する。この誘起された渦電流はプラズマの移動を抑制する働きを持ち、これを受動安定化効果と呼び N_s で表す。

$$N_s(s) = \sum_i \frac{n_i s \tau_i}{1 + s \tau_i} \quad 4.3-1$$

ここで、 s はラプラス変換の像関数の独立変数であり、 τ_i は i 番目の固有渦電流モードの時定数であり、 n_i は、

$$n_i = - \frac{(\partial M_{pi} / \partial z)^2 I_p}{2 \pi B_v \tau_i} \quad 4.3-2$$

と表され、ここで、 M_{pi} はプラズマと i 番目の固有渦電流モードとの相互誘導係数であり、 z はトーラスの軸方向を表し、 I_p はプラズマ電流であり、 B_v は平衡磁場の垂直成分である。FER炉心構造系の過渡電磁解析モデルを、図4.3-5に示す。FERではプラズマから外側に順に、可動遮蔽体、固定遮蔽体、真空容器と構成されているため、双対型回路は図4.3-4に閉ループが一つ追加される。 N_s の周波数特性を鞍型回路、双対型回路の双方について、図4.3-6に示す。安定性における裕度として、下式が提案されている⁷⁾。

$$m_s = \frac{n + N_s(\infty)}{-n} \quad 4.3-3$$

ここで、 n は平衡磁場の曲率指数である。FERにおける m_s は、高ベータプラズマでは0.6、

低ベータプラズマでは0.36が確保されており、通常考えられるプラズマの不確定性の幅では、制御不能となることはない。

4.3.2 低温構造材におけるジュール発熱

トカマク炉における超電導コイル系の冷凍設備容量を決定する二大要因は、3.2節で述べた中性子による核発熱と誘起渦電流による低温構造材でのジュール発熱である。大きいジュール発熱が現れる低温構造領域は、電磁力による荷重条件が厳しく多くの強度部材が必要となるトロイダル磁場コイルのケース（コイル間に設置される転倒力防止用のシェアパネルを含む）と中心ソレノイドコイルの内側に設置される円筒形の補強部材である。ここでは、これら低温構造材への絶縁の施し方を幾つか選び、それぞれに対するジュール発熱を解析した。外部磁場の変動条件としては、プラズマ異常消滅（表4.3-1参照）と通常の1サイクル運転を採った。通常の1サイクル運転におけるポロイダル磁場コイルの通電条件は、50秒で表4.3-2に示す状態に達し、これが50秒間保持され、次の50秒で停止に至る。

真空容器の存在を考慮したTFコイルケースの解析モデルを図4.3-7に示し、解析結果を表4.3-3に示す。因みに、図4.3-8にプラズマ異常消滅時の場合のジュール発熱の時間変化を示す。表4.3-4に中心ソレノイドコイルの支持部材でのジュール発熱を示す。表中の板モデルは、所謂、部材の肉厚を考慮しないシェルモデルであり、箱モデルは肉厚の効果がほぼ考慮されている。

プラズマ異常消滅時のジュール発熱は真空容器等のトーラス一周抵抗値に強く依存し、抵抗値とほぼ比例関係にある。

4.3.3 電磁力

プラズマの急速な異常消滅（ディスラプション）によって炉内構造物に誘起される渦電流は、トロイダル磁場及びポロイダル磁場との電磁気的な結合によって炉内構造物に巨大な電磁力を発生させる。この電磁力は、短時間の間に大きく変動するうえに同一構造物の内部で分布を持ち、各部分で作用する大きさと方向が異なるため、炉内構造物の構造設計にとって最も重要な荷重条件である。各構造物に誘起される渦電流の大きさと分布は、

- ・ディスラプション発生時のプラズマ電流値、
- ・ディスラプション時のプラズマの位置・形状、電流減衰率、
- ・炉内構造物の肉厚と導電率、
- ・隣接する他の炉内構造物の有無と相対的位置関係、
- ・モジュール間のギャップの有無、
- ・炉内構造物間、モジュール間の電気絶縁方式

等、多くの要因によって変化する。また、渦電流の分布に幾何学的な対称性がある場合でも、発生する電磁力の方向は、渦電流の方向と構造物に作用する磁場の各成分との電磁気的な結合によって決定されるため電磁力の分布は渦電流と同一の対称性を持たない。このため、電磁力解析では、周期対称性を有する炉内構造物の1/12セクターを解析の対象とし、その左右の1/24セクターを別個に解析した後、両結果を合わせて各構造物に作用する電磁力の分布と時間的

変化を検討した。本章では、解析結果の一例として、ホット・フェイズにおける15 MAプラズマ燃焼時（EOB）に異常消滅が発生した場合について、電磁力の解析結果を示す。

(1) 電磁力解析モデルと解析条件

トーラスの1セクターの左半分（1/24セクター）についての電磁力解析モデルは図4.3-5に示すものと同じである。薄肉二重構造を持つプラズマ真空容器は、実際の構造物と等価的に等しい肉厚（26 mm）を有する板シェル要素、固定遮蔽体と可動遮蔽体は、実際の構造物と等しい肉厚を持つシェル要素の箱型構造で近似した。また、トーラス内側、トーラス外側の可動遮蔽体については、各々、実際の構造と同様にサイド・モジュールとセンター・モジュールに分割した。各構造物間のギャップは下記の通りである。

- ・プラズマ真空容器－固定遮蔽体間 : 140 mm
- ・プラズマ真空容器－外側可動遮蔽体間 : 140 mm
- ・固定遮蔽体－内側可動遮蔽体間 : 20 mm
- ・固定遮蔽体－外側可動遮蔽体間 : 50 mm
- ・隣接した固定遮蔽体モジュール間 : 30 mm
- ・隣接した内側可動遮蔽体モジュール間 : 30 mm
- ・隣接した外側可動遮蔽体モジュール間 : 20 mm

前節で述べたようにプラズマの受動安定化機構を形成する方法には、鞍型安定化機構を構成する方式と双対型を構成する方式の2つがあるが、本解析では外側可動遮蔽体に低抵抗体の鞍型安定化機構を形成する方式をで解析した。

プラズマ異常消滅によって発生する電磁力の大きさと分布は、消滅過程のプラズマ挙動に大きく依存する。このため本解析では、FERのホット・フェイズにおける15 MAプラズマ燃焼時のディスラプションに対して、ITER概念設計共同作業で合意された標準ディスラプション・シナリオを適用し、ディスラプション後のプラズマ変位挙動を下記の2式で近似した。

$$\Delta R(t) = \Delta R_0 - (a + \Delta R_0) \times [(1 - (I_p(t) / I_p(0)))],$$

$$\Delta Z(t) = \Delta Z_0 + (b - \Delta Z_0) \times [(1 - (I_p(t) / I_p(0)))]$$

ただし

- ΔR_0 : プラズマの半径方向の初期変位 = -0.15 m、
- ΔZ_0 : プラズマの垂直方向の初期変位 = -0.45 m、
- a : プラズマ小半径、
- b : プラズマの垂直方向半径（k；プラズマ楕円度）
- $I_p(t)$: プラズマ電流値（1 MA/msの減衰率を仮定）

本近似によって定めたディスラプション時のプラズマの位置・形状、及びプラズマ・パラメー

タの時間的変化を表4.3-1に示す。プラズマ燃焼時（EOB）におけるポロイダル磁場コイルの通電条件は、表4.3-2に示すとおりである。解析では、このポロイダル磁場にトロイダル磁場コイルの定常磁場（プラズマ中心にて5.2 T）とプラズマ電流が作る磁場が重畳された条件とした。

（2）解析結果

15 MAプラズマの異常消滅によって各構造物に発生する電磁力の時間的変化を図4.3-9～14に示す。各図の縦軸には、電磁力の各成分の幾何学的対称性を検討するため、1/12セクターをさらに左右に2分割し1/24セクターごとに各方向の電磁力成分の合計値の変化を示した。

トロイダル方向に連続した構造体であるプラズマ真空容器に発生する電磁力の時間的変化（図4.3-9）をみるとトーラス中心へ向かう半径方向の成分が最も大きく、プラズマ電流が消滅する15 msにおいて最大値に達することがわかる。隣接したモジュール間に30 mmのギャップを有する固定遮蔽体（図4.3-10）の場合には、各成分の値が時間とともに大きく変動し最大値に達する時刻も成分によって異なるが、半径方向の電磁力が最も支配的であり最大となる時刻も真空容器の場合と同一である。外側可動遮蔽体の場合には、センター・モジュール、サイド・モジュールともに真空容器の場合と同様にプラズマ電流消滅時に最大値を示す傾向がみられるが、垂直方向の電磁力成分が最も支配的となり、左右のサイド・モジュール間には図4.3-14に示すように垂直方向の剪断力が作用することがわかる。

真空容器の1/12セクターについて各部の電磁力の大きさや方向を図4.3-15に示す。トーラス中心側では同一面内で半径方向の電磁力の方向が複雑に反転し、構造物には捻れ力が作用すること、及びプラズマがトーラスの中心下側に移動しながら消滅する結果、水平ポート付近ではトーラスの中心に向かって下向きの電磁力が作用することがわかる。固定遮蔽体の1/12セクターにおける電磁力の分布を図4.3-16に示す。真空容器と同様にトーラスの中心側で構造物に捻れ力が作用することがわかる。

プラズマ電流の消滅する15 msにおいて、各炉心構造物（1/12セクター）に作用する電磁力の合計値をまとめ、表4.3-5に示す。

（4）簡易モデルによる電磁力支持方式の検討

プラズマ異常消滅によって炉内構造物に発生する電磁力の方向は、消滅条件（プラズマの移動方向）に依存するが定性的にはいくつかのパターンに分類することができる。プラズマが消滅する場合に箱状の構造物モジュールの各面に発生する電磁力は一つの箱の中で互いに相殺され、モジュール全体を移動させる力は働かないが、捻れ力は作用する。図4.3-17は可動遮蔽体に作用する電磁力の方向を模式的に示す。上下方向の力は、モジュールを周回する電流の側板領域でトロイダル磁場によって引き起こされ。一方、半径方向の力は、プラズマの移動に伴ってモジュール側板を上下方向に流れる電流とトロイダル磁場によって引き起こされる。そこで、容器内構造物の支持構造の検討においては電磁力の形態及び分布を考慮する必要がある。

このような観点から、FERの設計では、炉心建造物の電磁力に対する健全性を評価する作業に先だって典型的な荷重のパターンについて規格化された電磁力条件の下に簡易モデルによる構造解析を行い、建造物に発生する各方向の電磁力に対して最も効果的な支持条件と補強構造を検討した。

解析に使用した簡易モデルの基本寸法を図4.3-18に示す。解析モデルは、半径方向の電磁力と上下方向の電磁力が同時に作用する外側可動遮蔽体のサイド・モジュールを想定したものであり、実際の構造を板シェル要素からなるボックス構造で単純化した。各部の板厚は、第一壁側となるモデルの前面が15mm、両側板が30mm、真空容器側となる後部パネルが50mm、上下板が各30mmである。解析では、本この基本モデルに、4種類の支持条件と3種類の補強リブ構造を組み合わせて典型的な荷重モードに対する変形・応力を比較した。

解析に使用した3種の荷重モードを図4.3-19に示す。荷重条件1は、モデルの両側面で方向の異なる20MNの上下方向荷重を等分布荷重として加えた場合、荷重条件2は、モデルの水平面で反対称となる±10MNの半径方向荷重を両側面に分布荷重として与えた場合、荷重条件3は、上下方向、半径方向の荷重が同時に作用する場合である。モデル前面及び後部壁に作用する荷重は影響が小さいものとして無視した。

解析に使用した4種の支持条件を図4.3-20に示す。これらの支持条件はトラス方向の隣接モジュール間の接続方式に対応するものである。各荷重モードに対する補強方式として想定した3種の補強リブ構造を図4.3-21に示す。各補強方式の特徴は下記の通りである。

- ・補強方式1 : モデル断面の上下方向に1m毎に水平リブ(厚さ:30mm)を追加
- ・補強方式2 : 補強方式1の水平リブに加えて後部パネルから400mm離れた位置に縦方向のリブ(厚み30mm)を追加
- ・補強方式3 : 補強支持条件2支持条件に加えてモデルのトロイダル方向中央面に縦方向のリブ1枚(厚さ:30mm)を追加

解析で得られた最大トレスカ応力と電磁力の支持条件並びに最大トレスカ応力と補強方式の関係を荷重モード毎に整理して図4.3-22に示す。一連の解析で得られた電磁力の支持方式及び補強リブ構造に対する知見は下記のとおりである。

- (i) 4種の支持条件を比較すると荷重モードを問わず、両側面の支持が変形・応力の低減に最も効果的である。
- (ii) 後部パネルに対する3種の支持条件による変形応力の差は認められない。
- (iii) 水平方向の補強リブの追加は半径方向の電磁力による変形・応力の低減に効果的であるが、上下方向の電磁力に対する効果はない。
- (iv) 縦方向の補強リブは上下方向の電磁力に対して効果的であるが、半径方向の電磁力に対する効果は小さい。
- (v) 一連の解析で得られたモデルの最大変位量は、0.16~0.32mm、最大トレスカ応力は、5.5~11.0kg/mm²の範囲である。

表4.3-1 プラズマの異常消滅過程におけるプラズマパラメータの時間変化

時間 (ms)	プラズマ電流 I _p (MA)	プラズマ中心座標 R (m) Z (m)		小半径 a	楕円率 κ	δ	n	m
0.0	15.0	4.70	0.78	1.60	2.0	0.2	2.0	1.5
0.1	15.0	4.55	0.33	1.45	1.9	0.2	2.0	1.5
5.1	10.0	4.07	-0.04	0.97	1.6	0.1	4.0	1.0
10.1	5.0	3.58	-0.97	0.48	1.3	0.0	4.0	0.5
15.1	0.0	3.58	-0.97	0.1	1.3	0.0	4.0	0.1
100.0	0.0	3.58	-0.97	0.1	1.3	0.0	4.0	0.1

表4.3-2 プラズマ燃焼時におけるポロイダル磁場コイルの通電条件

コイル番号	中心座標		コイル断面寸法		コイル電流値 (MA)
	R (m)	Z (m)	ΔR (m)	ΔZ (m)	
PF-1U	1.265	0.775	0.426	1.530	-17.30
PF-2U	1.265	2.325	0.426	1.530	-13.76
PF-3U	1.265	3.875	0.426	1.530	-8.04
PF-4U	1.265	5.425	0.426	1.530	-2.28
PF-5U	3.000	6.700	0.511	0.598	0.49
PF-6U	9.400	5.000	0.511	0.298	-0.86
PF-7U	9.400	3.200	0.511	0.673	-5.32
PF-7L	9.400	-2.300	0.511	1.048	-9.32
PF-6L	9.400	-4.300	0.511	0.448	1.45
PF-5L	3.000	-6.700	0.876	0.898	9.34
PF-4L	1.265	-5.425	0.426	1.530	0.45
PF-3L	1.265	-3.875	0.426	1.530	-4.97
PF-2L	1.265	-2.325	0.426	1.530	-12.16
PF-1L	1.265	-0.775	0.426	1.530	-17.30

表4.3-3 トロイダル磁場コイルのケースにおけるジュール発熱

モデル	条件	プラズマ異常消滅 (3秒まで)	1サイクル運転 (150秒まで)
TFコイルのみ (絶縁無)		$3.02 \times 10^7 \text{ J}$	$4.9 \times 10^6 \text{ J}$
TFコイルのみ (内・外周絶縁)		$2.93 \times 10^6 \text{ J}$	$4.46 \times 10^5 \text{ J}$
TFコイルのみ (内周絶縁、外周直部絶縁)		$4.27 \times 10^6 \text{ J}$	$1.12 \times 10^6 \text{ J}$
上欄+ シェアパネル (絶縁有)		$7.44 \times 10^6 \text{ J}$	$5.38 \times 10^6 \text{ J}$
上欄+ シェアパネル (絶縁無)		$1.18 \times 10^7 \text{ J}$	$7.42 \times 10^6 \text{ J}$

表4.3-4 中心ソレノイドコイルの支持部材におけるジュール発熱

ソレノイドコイルのケースの トーラス方向の絶縁箇所数	プラズマ異常消滅 (3秒まで)	1サイクル運転 (150秒まで)
12 (板モデル)	$215 \times 10^3 \text{ J}$	$128 \times 10^3 \text{ J}$
12 (箱モデル)	$827 \times 10^3 \text{ J}$	$653 \times 10^3 \text{ J}$
6 (板モデル)	$474 \times 10^3 \text{ J}$	$369 \times 10^3 \text{ J}$
6 (箱モデル)	$126 \times 10^3 \text{ J}$	$103 \times 10^4 \text{ J}$
4 (板モデル)	$693 \times 10^3 \text{ J}$	$626 \times 10^3 \text{ J}$
4 (箱モデル)	$157 \times 10^4 \text{ J}$	$135 \times 10^4 \text{ J}$
0 (板モデル)	$215 \times 10^5 \text{ J}$	$587 \times 10^5 \text{ J}$
0 (箱モデル)	$237 \times 10^5 \text{ J}$	$626 \times 10^5 \text{ J}$

表4.3-5 プラズマ異常消滅の炉心構造機器に作用する最大電磁力

構造物名	電磁力成分	右側 1/24 セクター	左側 1/24 セクター	1/12セクター における合計値
プラズマ 真空容器	FR (MN)	-9.66	-9.97	-19.63
	FY (MN)	-1.67	1.68	0.01
	FZ (MN)	1.94	-5.06	-3.12
固定遮蔽体	FR (MN)	-1.97	2.77	0.80
	FY (MN)	-1.65	0.11	-1.54
	FZ (MN)	-0.85	1.18	0.33
可動遮蔽体 インボード セクタ・モジュール	FR (MN)	-2.59	0.17	-2.42
	FY (MN)	-0.02	-0.01	-0.03
	FZ (MN)	-0.86	0.86	0.0
可動遮蔽体 インボード セクタ・モジュール	FR ($\times 10^4$ N)	-0.04	0.07	0.03
	FY ($\times 10^4$ N)	0.02	-0.006	0.014
	FZ ($\times 10^4$ N)	0.03	-0.11	0.08
可動遮蔽体 アウトボード セクタ・モジュール	FR (MN)	0.82	-0.009	0.811
	FY (MN)	-0.19	-0.50	-0.69
	FZ (MN)	-4.53	4.82	0.29
可動遮蔽体 アウトボード セクタ・モジュール	FR (MN)	0.23	0.20	0.43
	FY (MN)	0.13	-0.019	0.111
	FZ (MN)	-0.13	0.52	0.39

注) FR: 半径方向の電磁力成分
FY: トロイダル方向の電磁力成分
FZ: 上下方向の電磁力成分

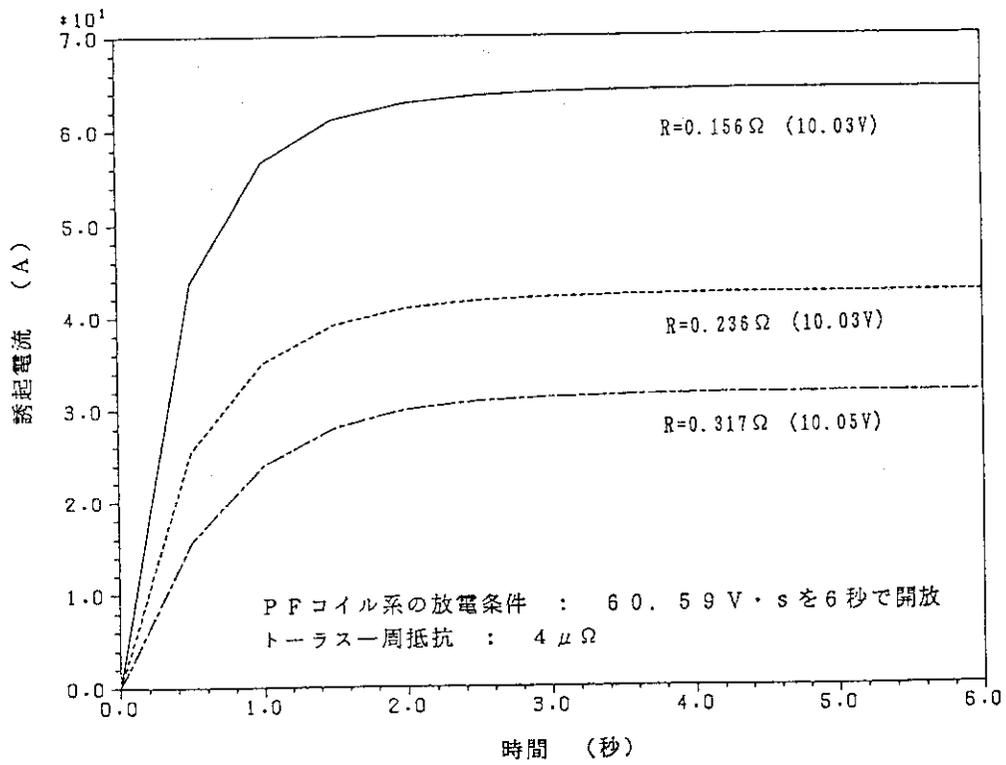


図 4. 3 - 1 印加電圧法によるトーラス一周電圧の確認

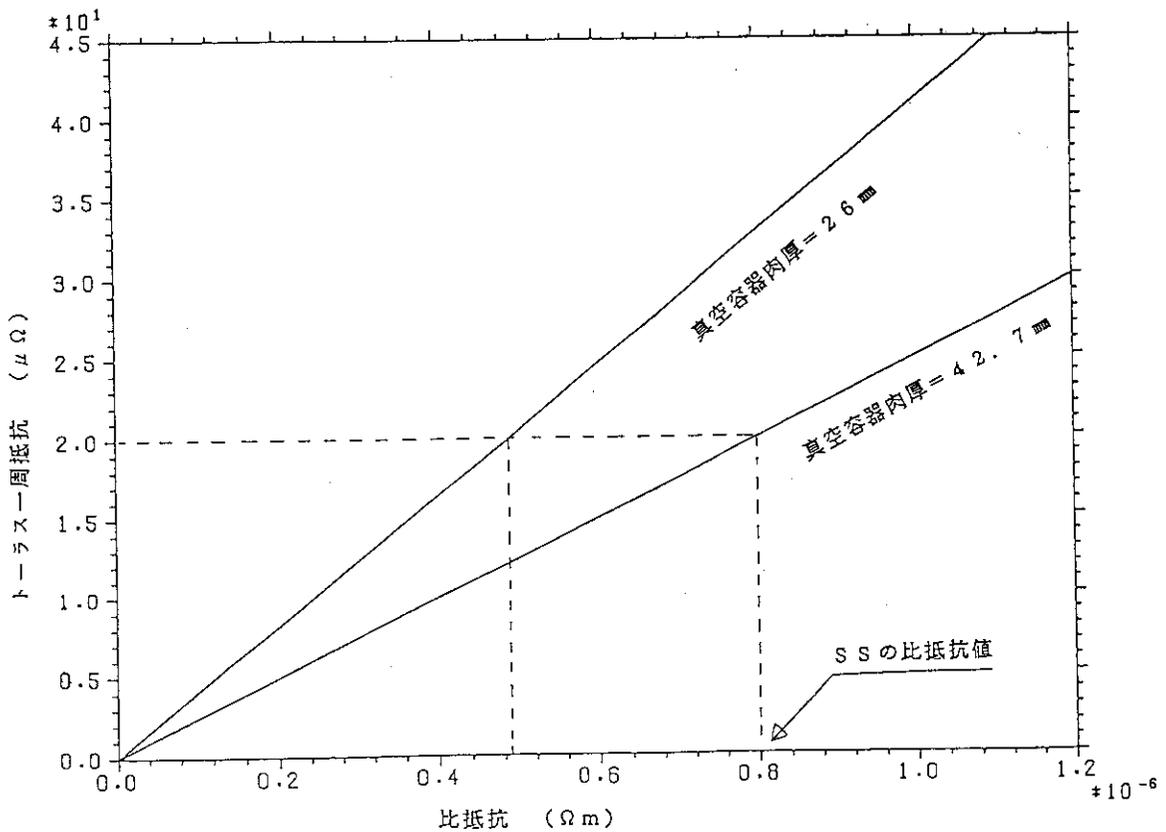


図 4. 3 - 2 印加電圧法によるトーラス一周抵抗の算出結果

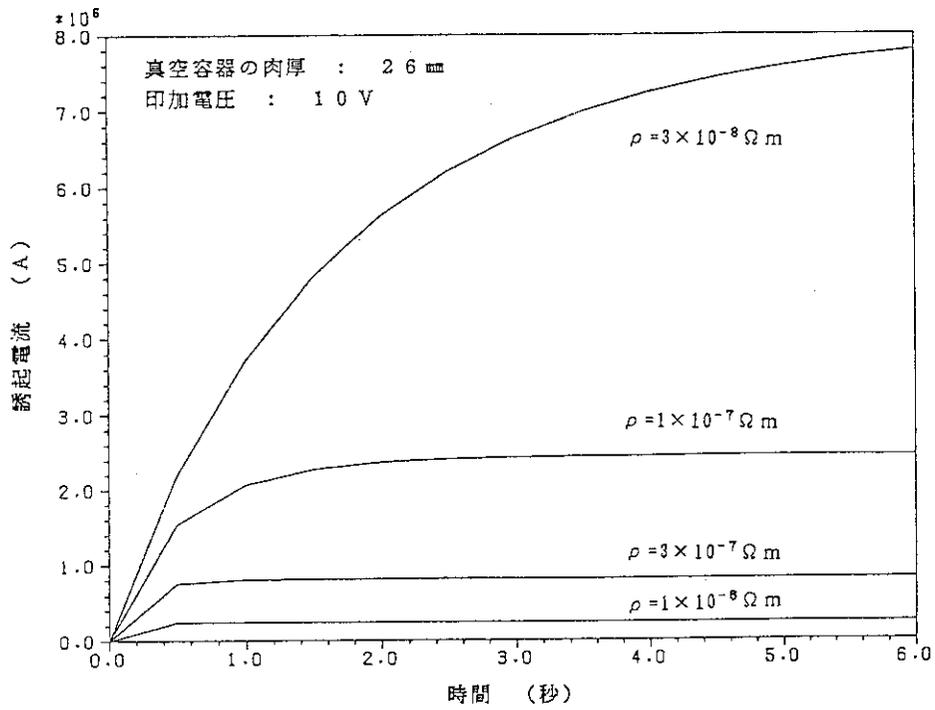


図4.3-3 真空容器トーラス電流の時間変化

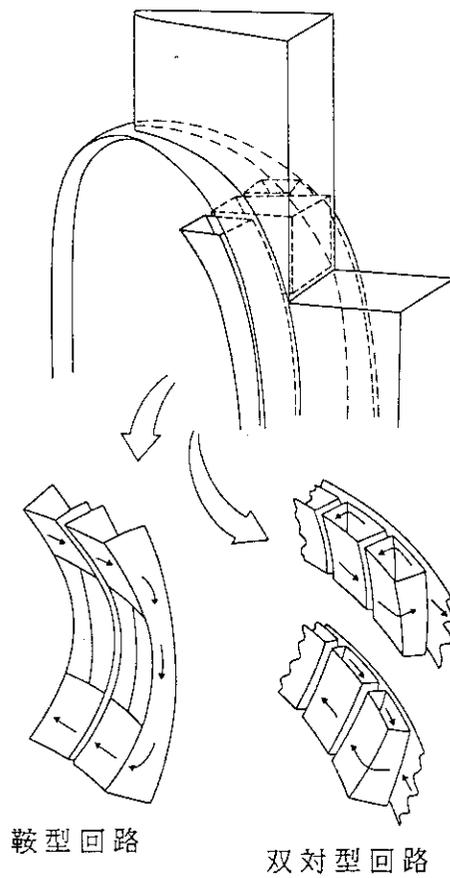


図4.3-4 プラズマ位置不安定性に対する受動安定化機構

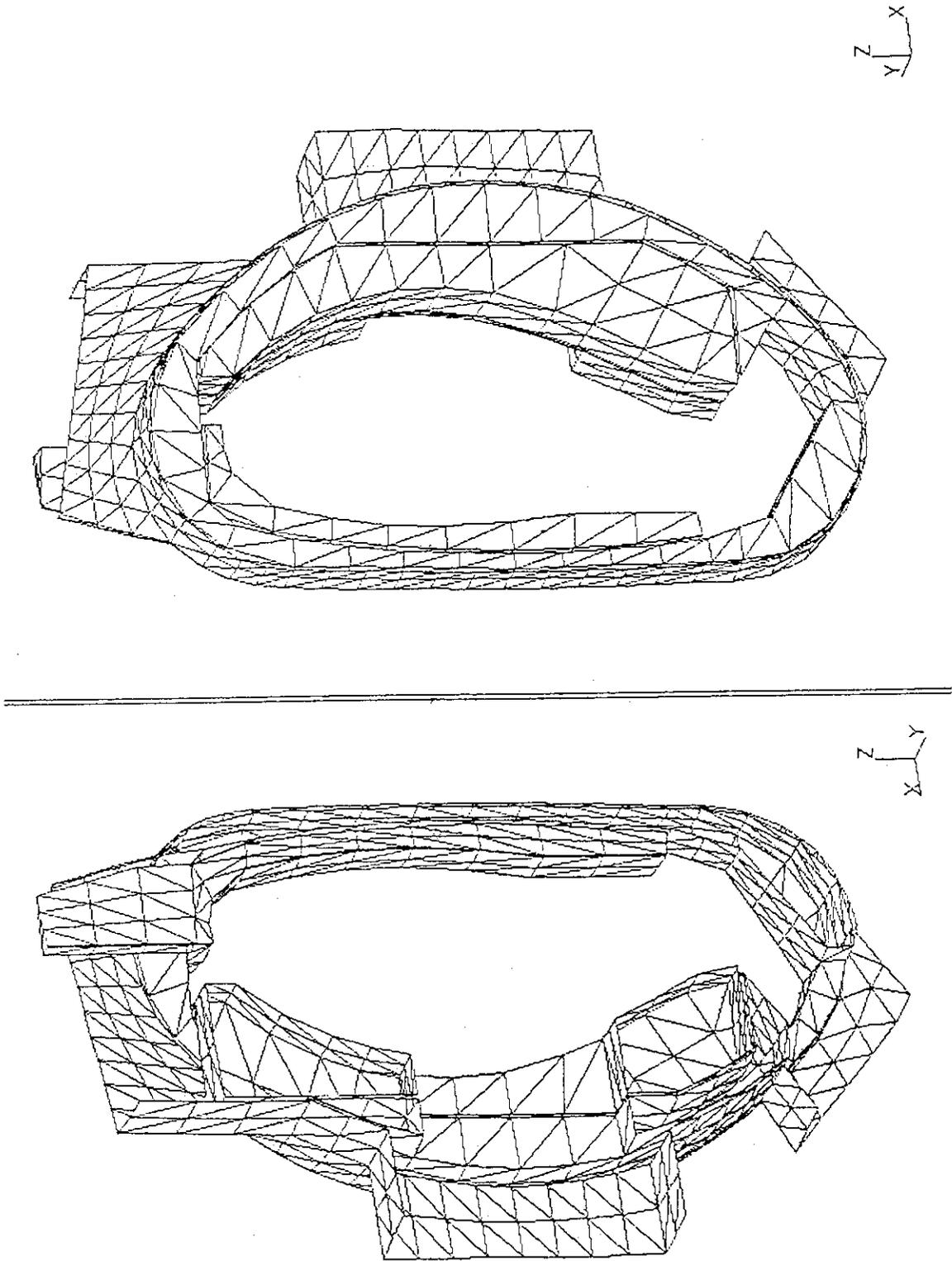


図4.3-5 FER炉心構造系の過渡電磁解析モデル

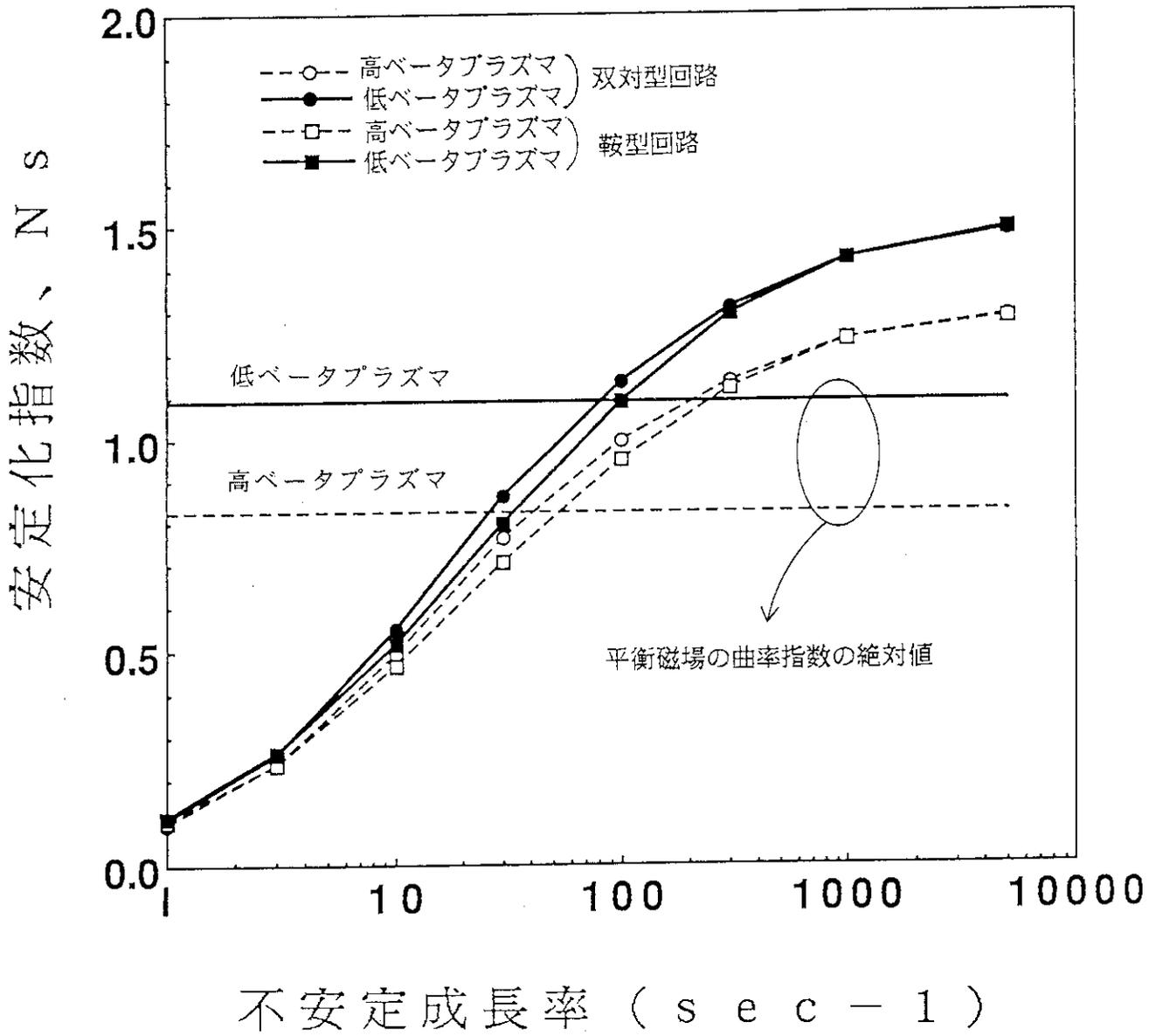


図4. 3-6 プラズマ位置不安定性に対する受動安定化指数の周波数特性

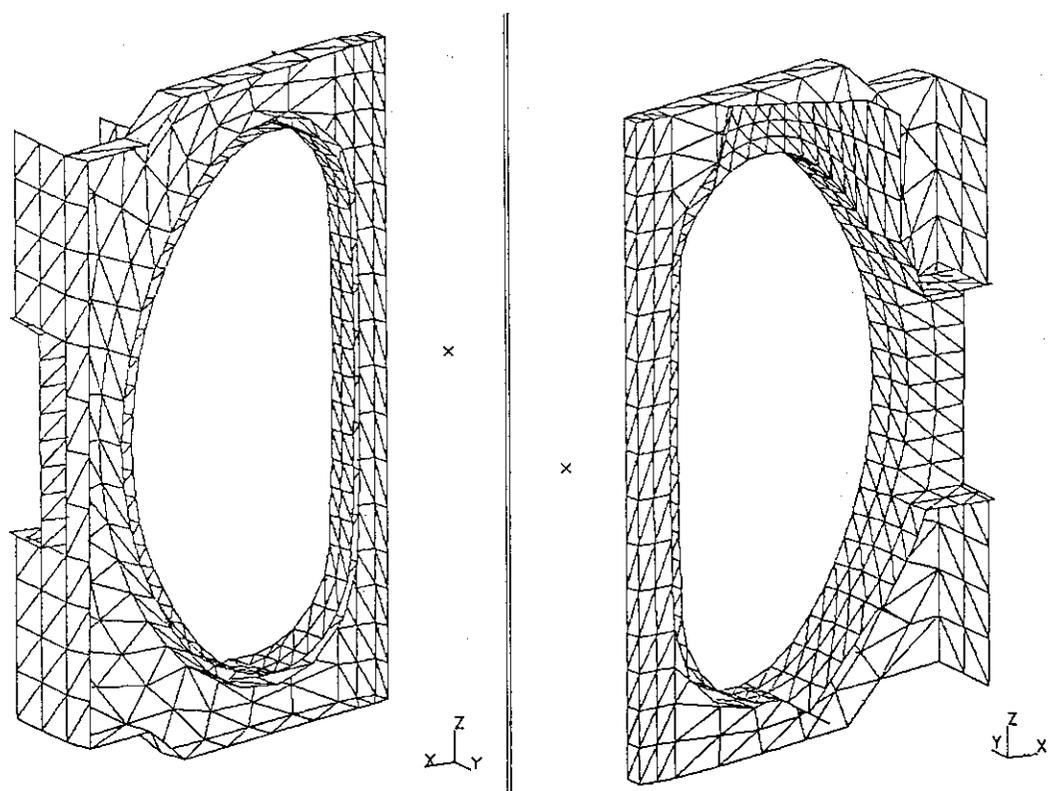


図 4. 3 - 7 TFコイルケースのジュール発熱計算モデル

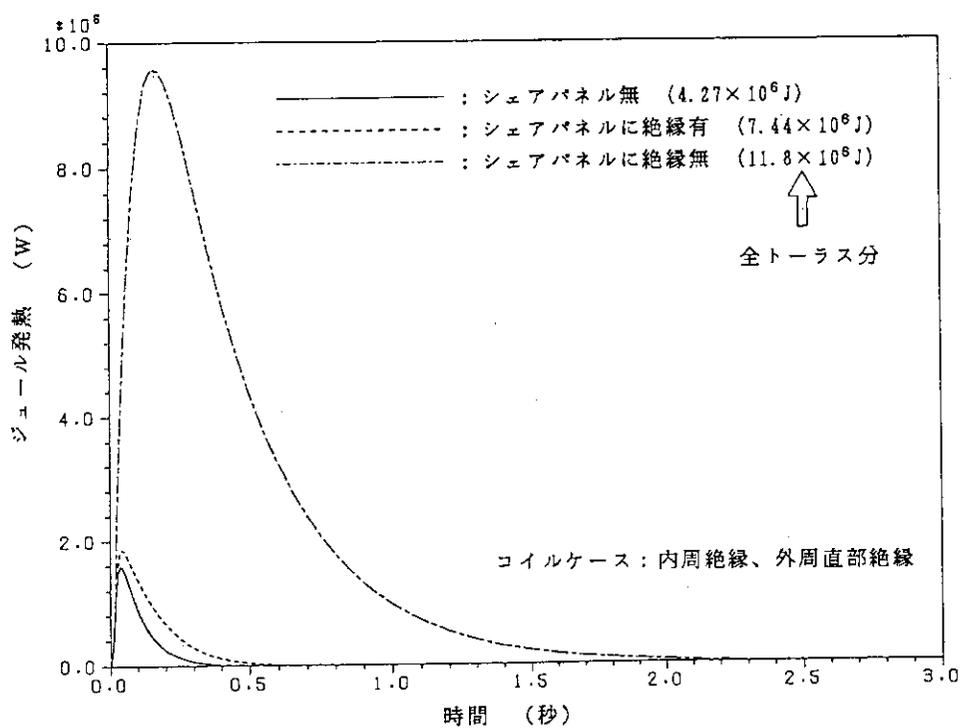


図 4. 3 - 8 プラズマ異常消滅時にTFコイルケースのジュール発熱の時間変化

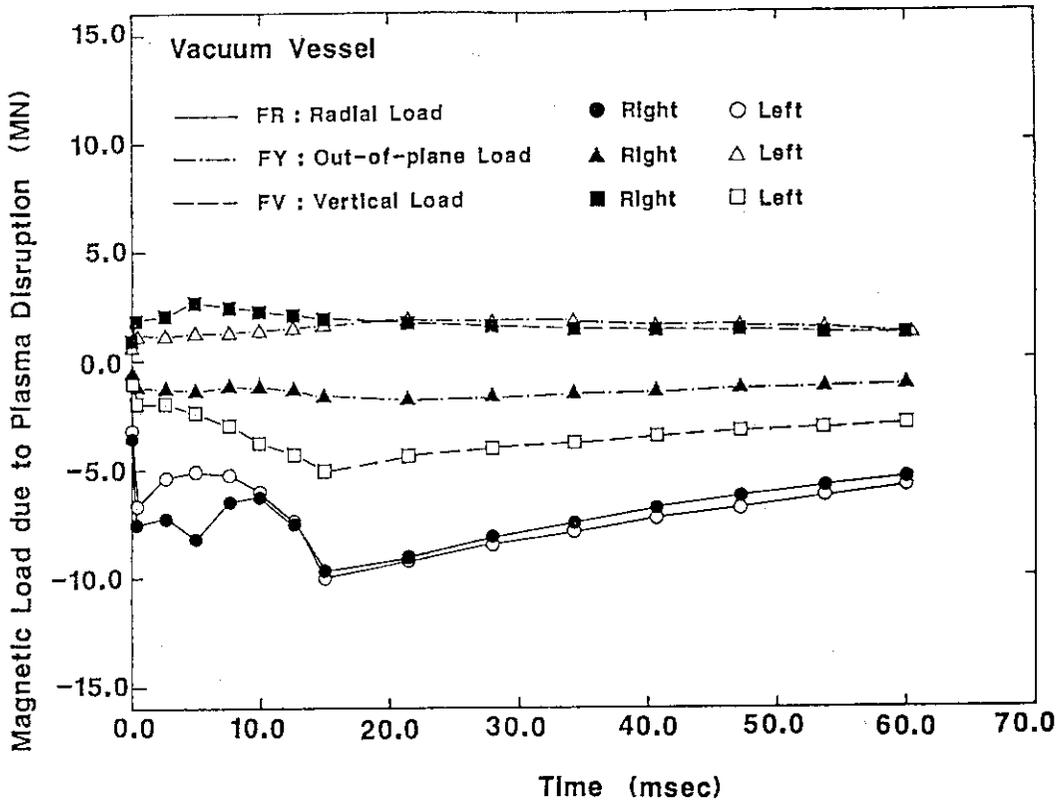


図 4. 3-9 プラズマ異常消滅時に真空容器に発生する電磁力の時間変化

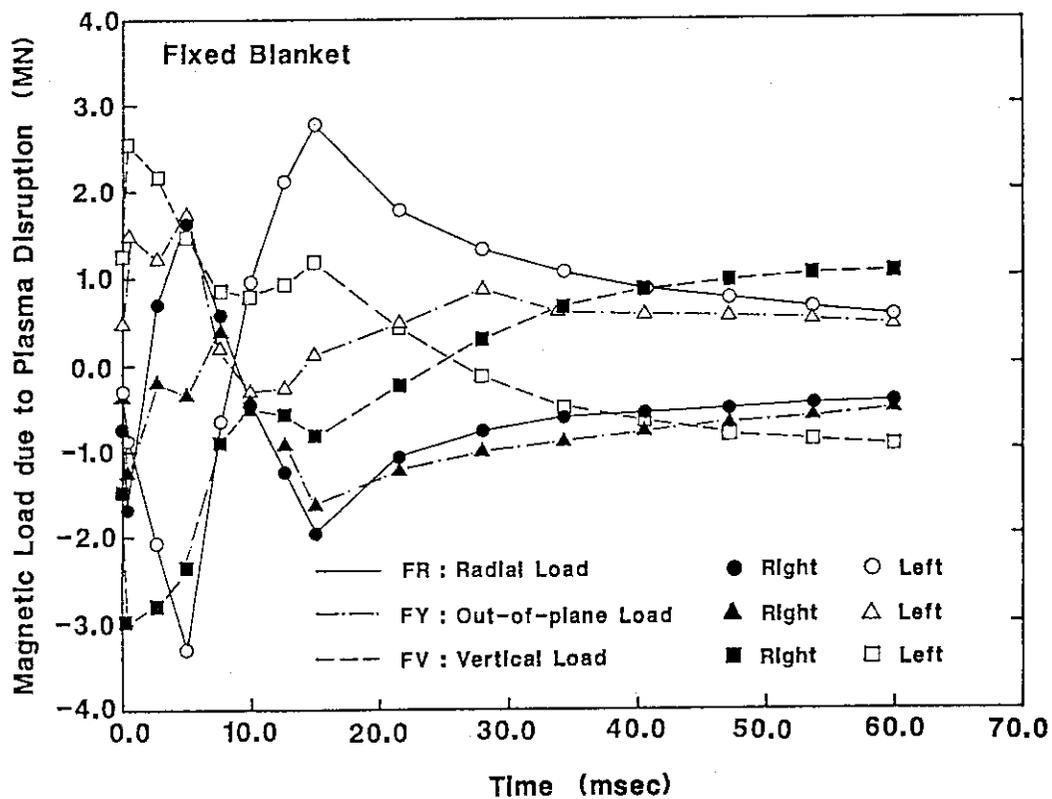


図 4. 3-10 プラズマ異常消滅時に固定遮蔽体に発生する電磁力の時間変化

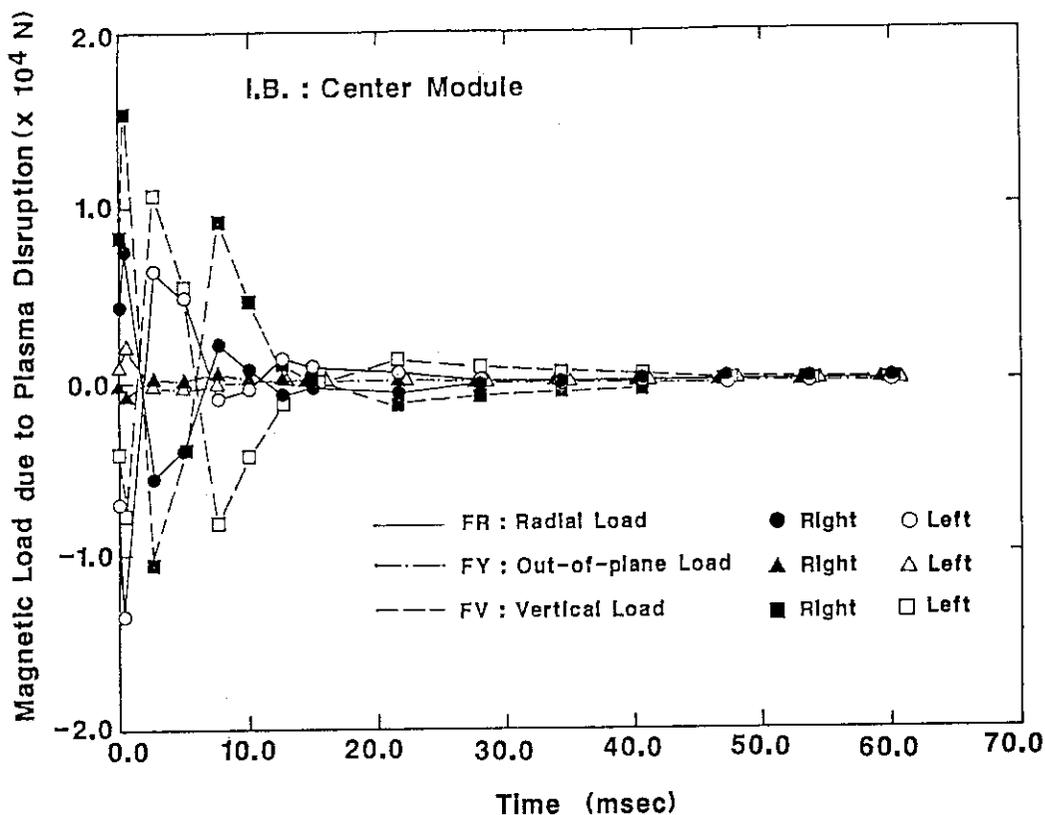


図 4. 3-11 プラズマ異常消滅時に内側可動遮蔽体センターモジュールに発生する電磁力の時間変化

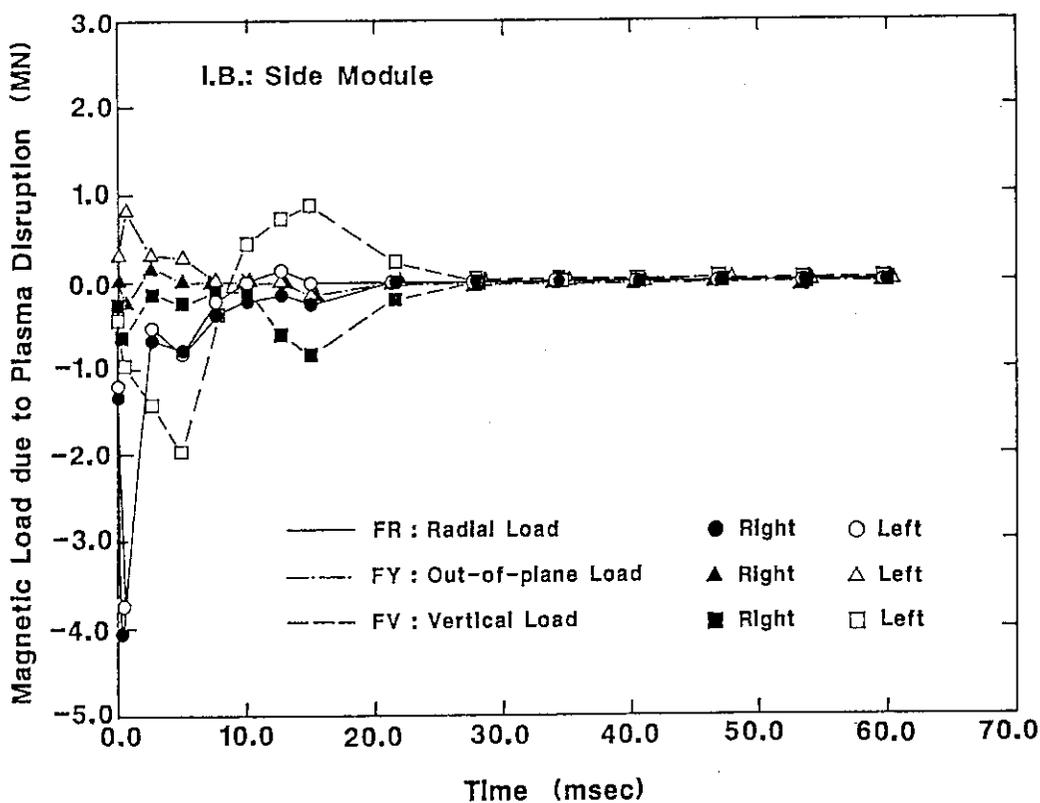


図 4. 3-12 プラズマ異常消滅時に内側可動遮蔽体サイドモジュールに発生する電磁力の時間変化

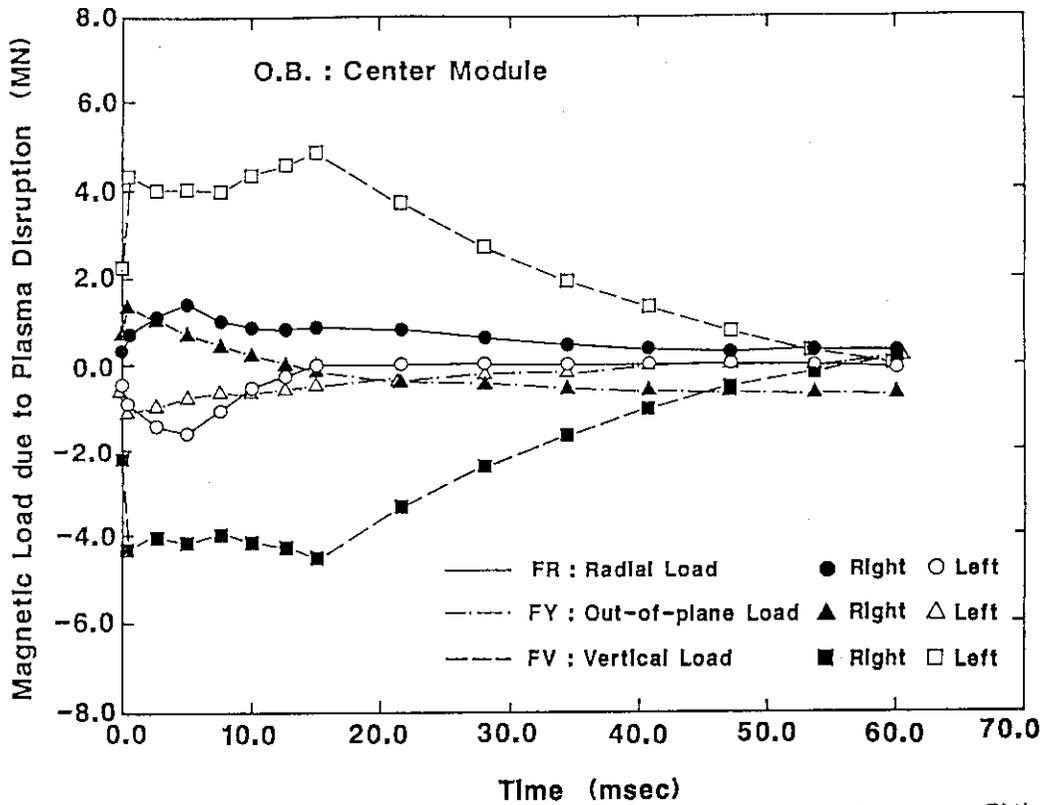


図 4. 3-13 プラズマ異常消滅時に外側可動遮蔽体センターモジュールに発生する電磁力の時間変化

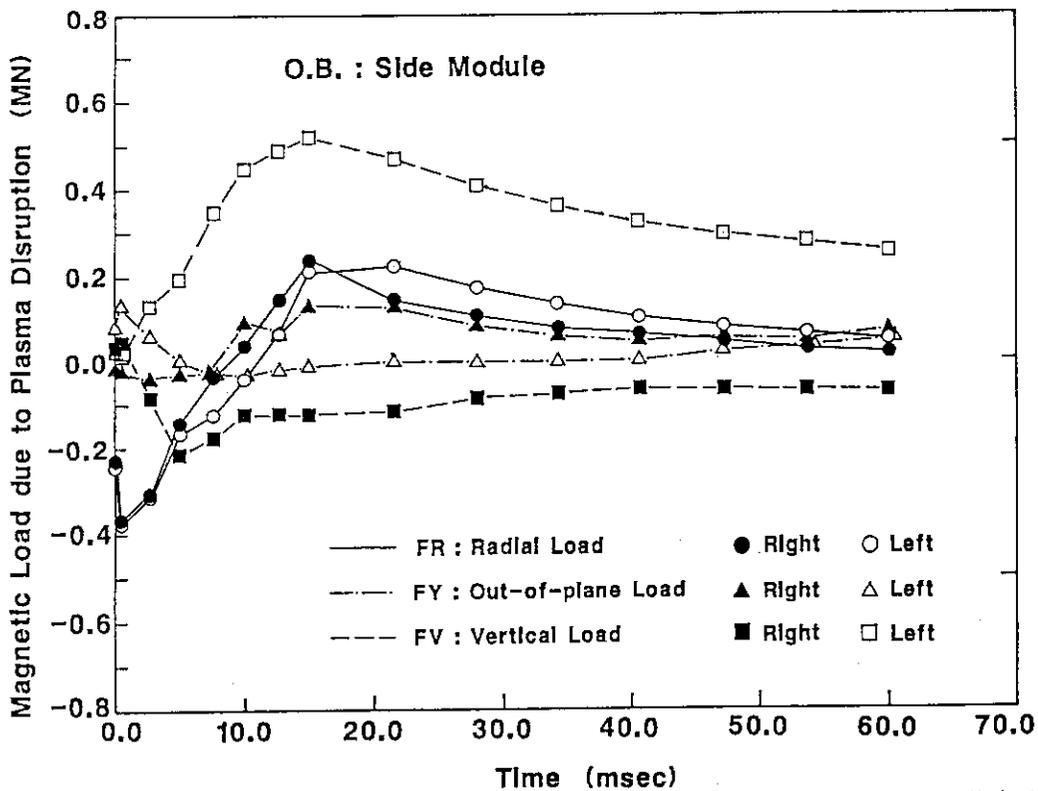


図 4. 3-14 プラズマ異常消滅時に外側可動遮蔽体サイドモジュールに発生する電磁力の時間変化

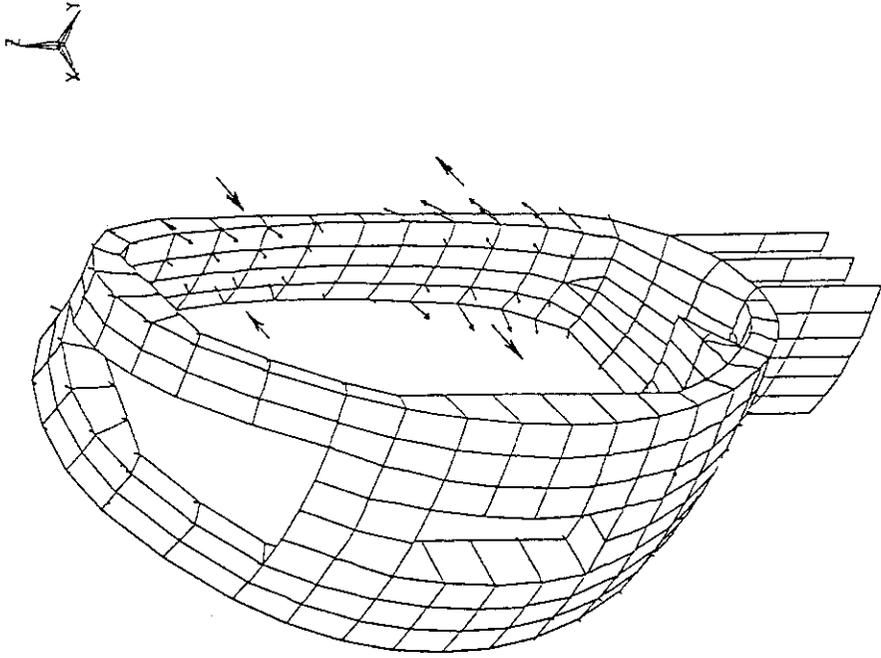


図 4. 3-16 プラズマ異常消滅時に固定遮蔽体に発生する最大電磁力の分布

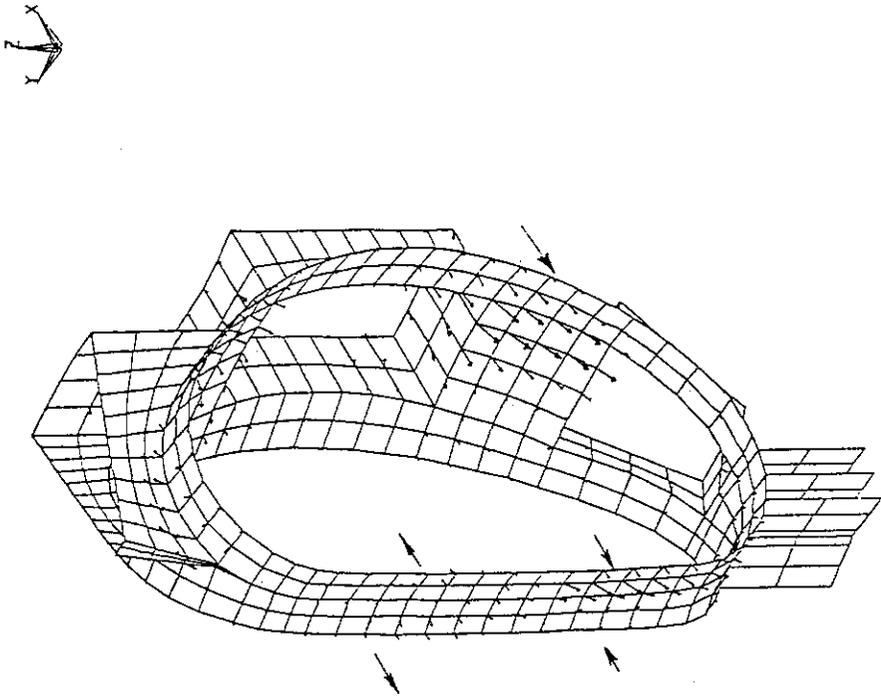
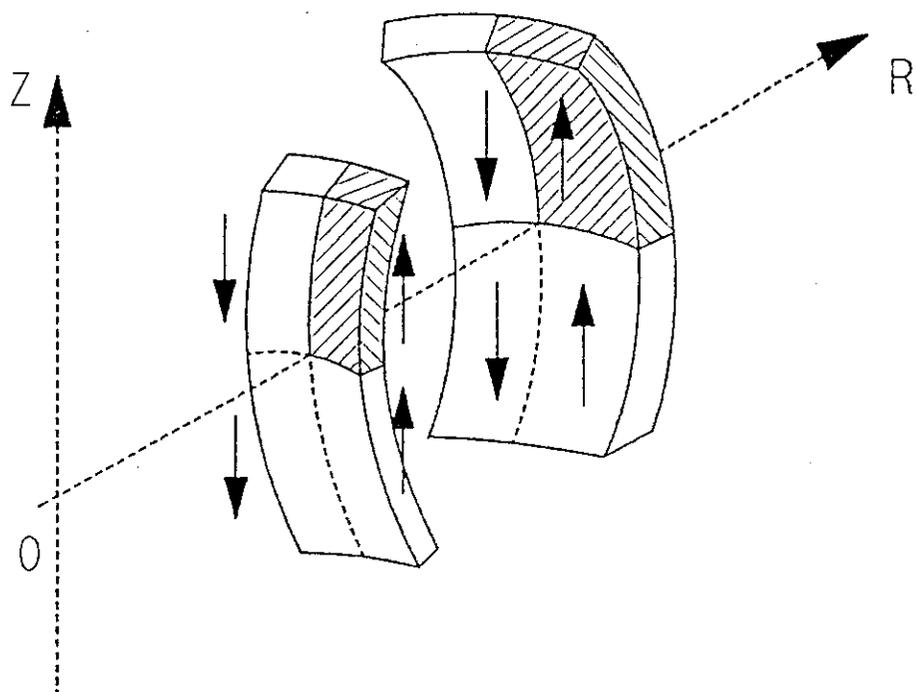
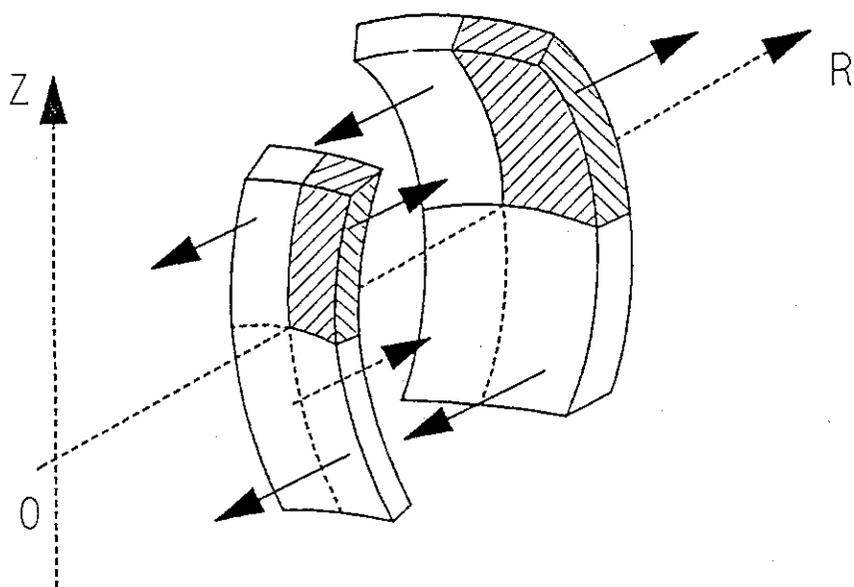


図 4. 3-15 プラズマ異常消滅時に真空容器に発生する最大電磁力の分布



(a) 定位置消滅時 (側板R方向電流とトロイダル磁場による)



(b) 移動消滅時 (側板Z方向電流とトロイダル磁場による)

図4. 3-17 プラズマ異常消滅時に可動遮蔽体に発生する電磁力の方向の概念図

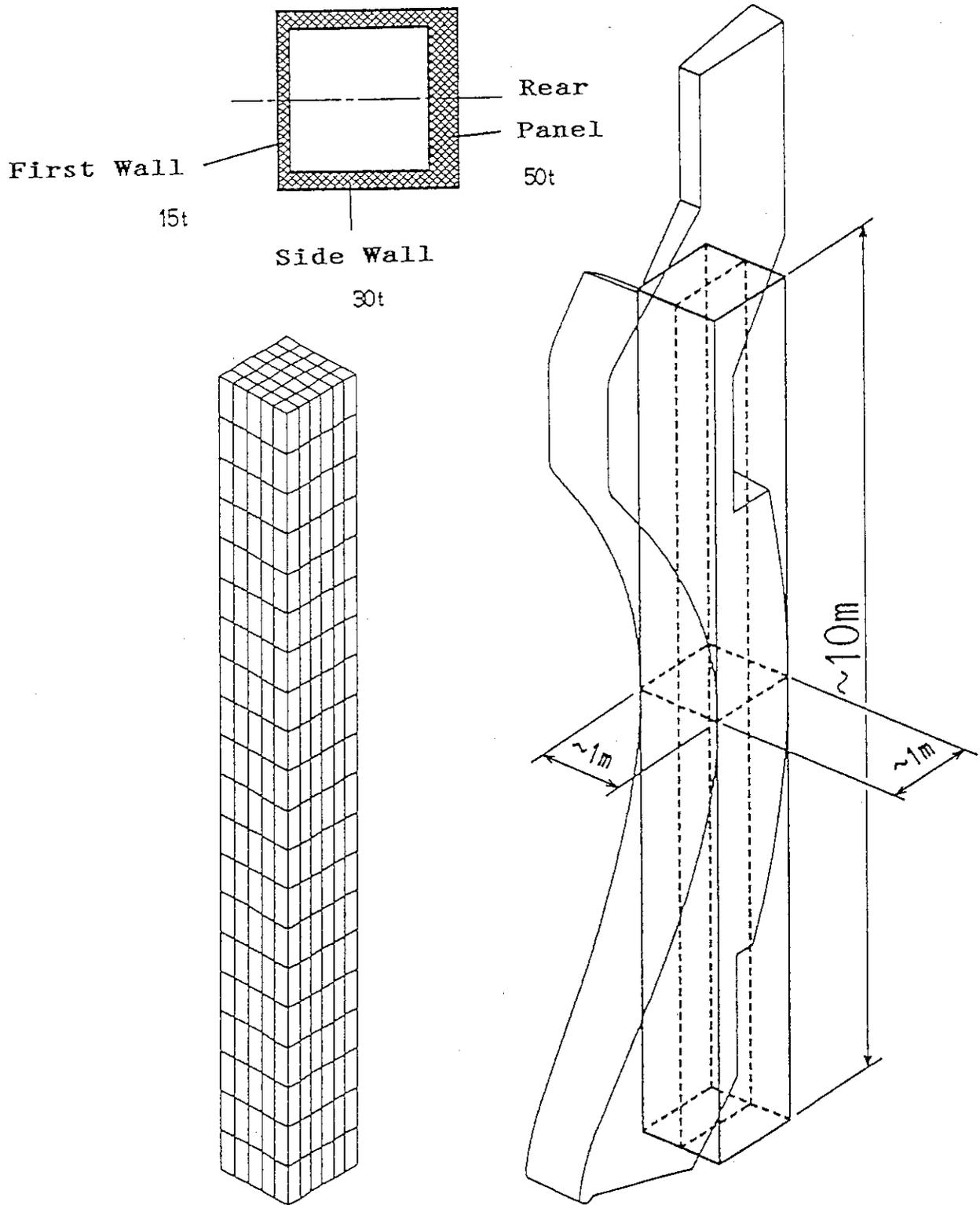


図4.3-18 可動遮蔽体構造解析簡易モデル

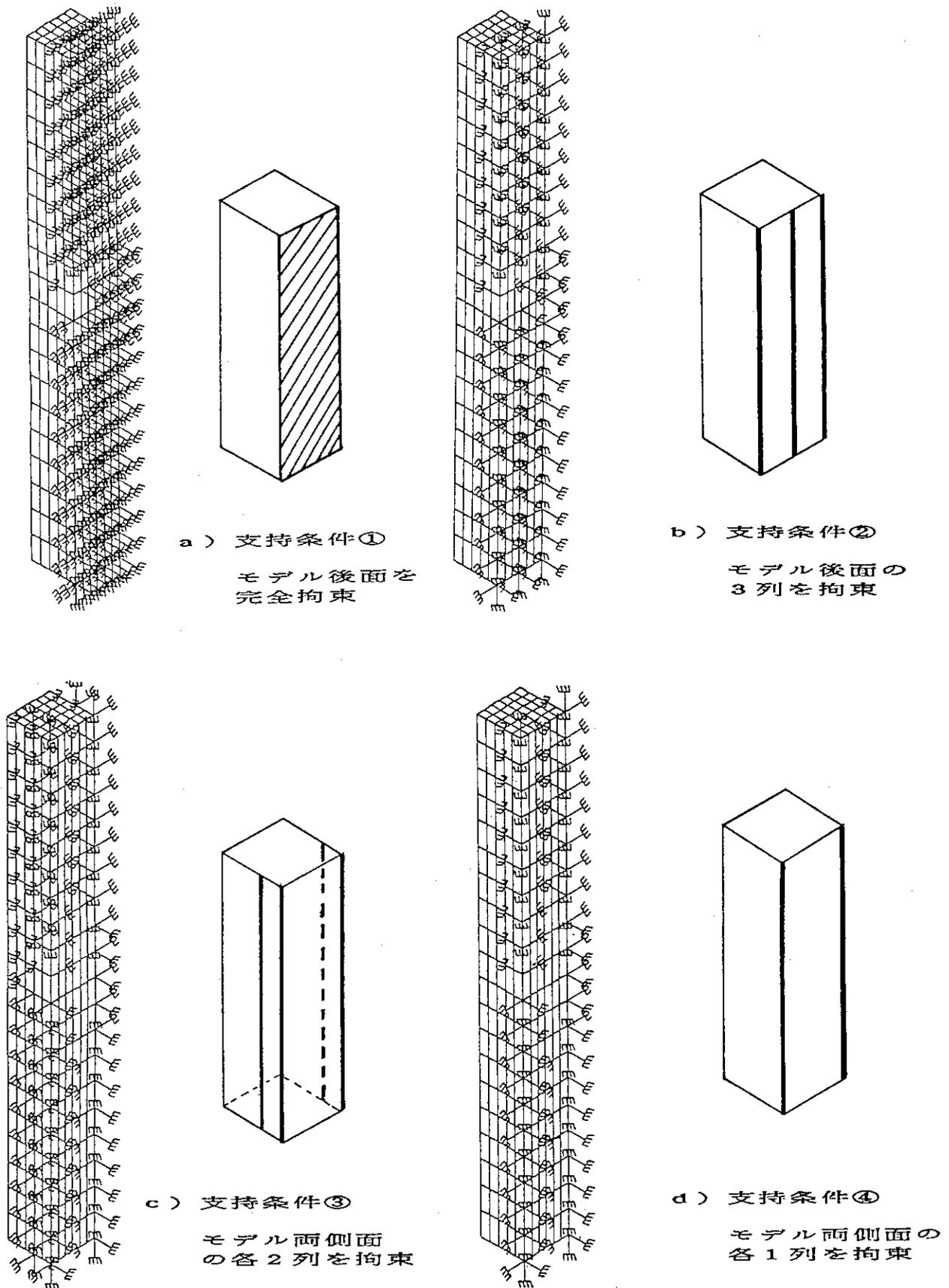
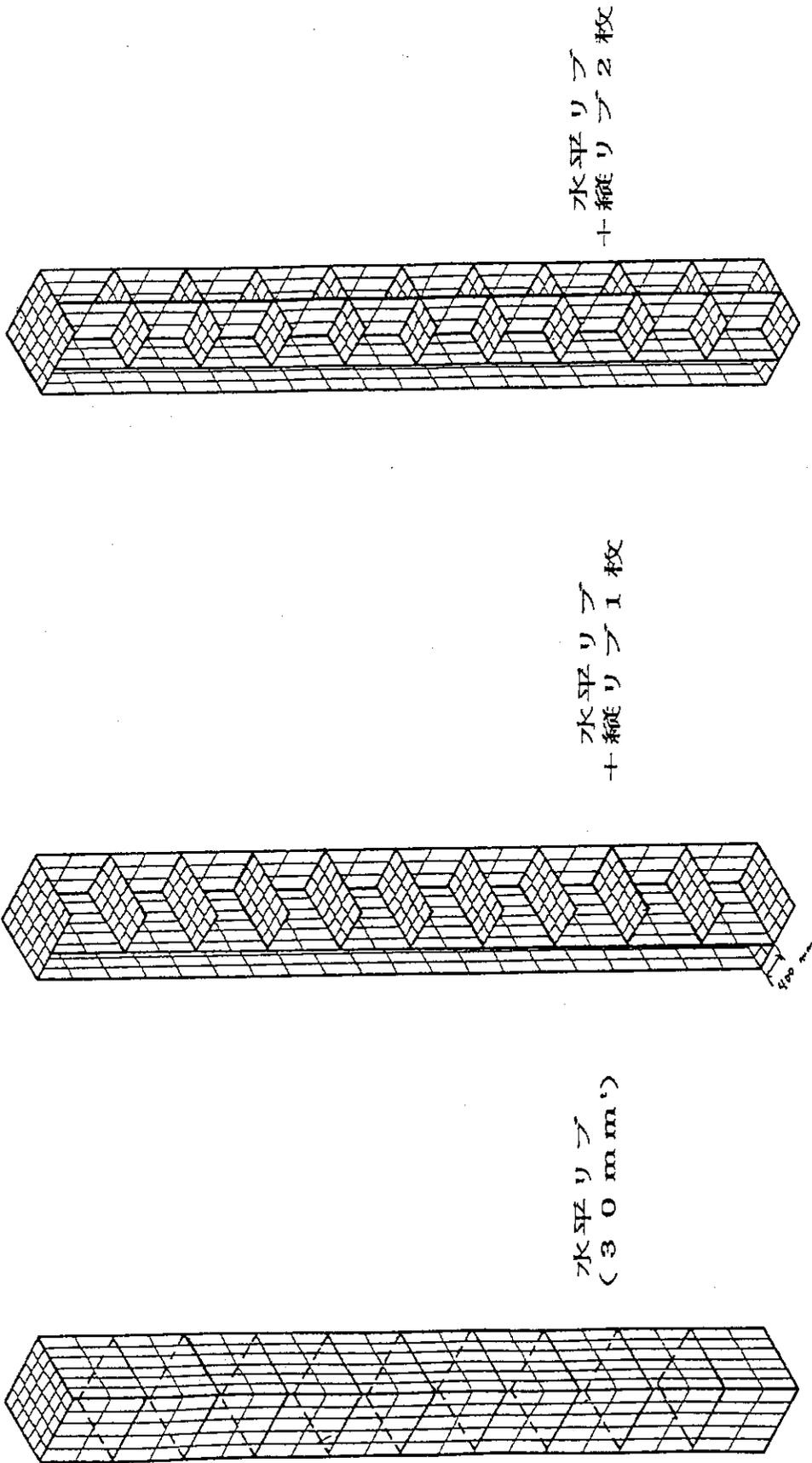


図4.3-20 可動遮蔽体の支持条件



a) 補強方式 1

b) 補強方式 2

c) 補強方式 3

図 4. 3 - 2 1 可動遮蔽体の内部補強構造

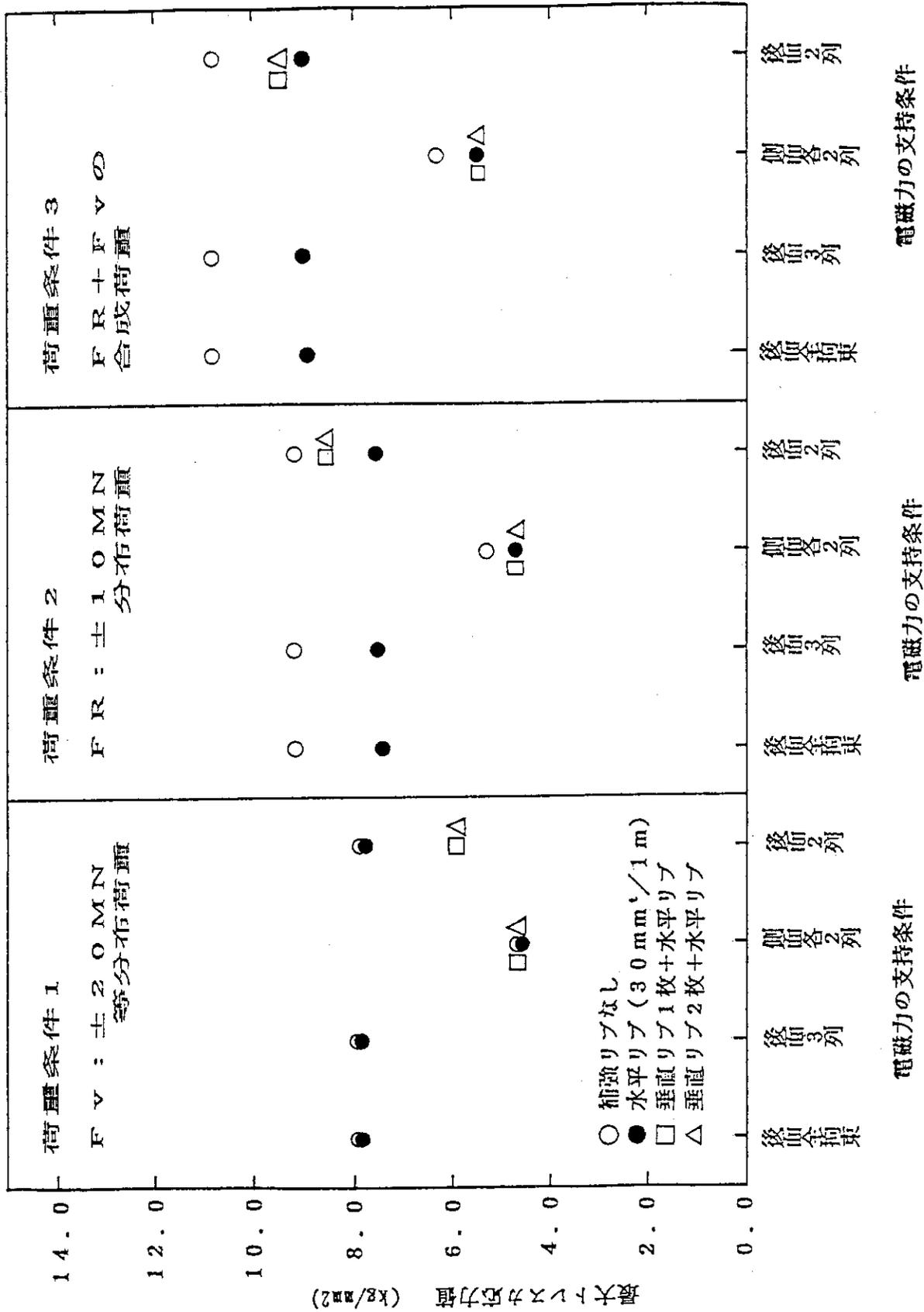


図 4. 3 - 2 2 簡易構造モデルによる電磁力支持方式と補強構造の検討結果

4.4 冷却配管構成

4.4.1 炉心構成機器の冷却系統分類

F E Rの通常の運転条件において、炉心構造系の各機器が必要とする冷却水流量を図4.4-1に示す。炉心構造系の構成機器は、1セクターの中でも多数のモジュールに分割されており、各モジュールはそれぞれ独自の冷却管出入口を有する。それぞれの冷却管寸法を表4.4-1に示す。図4.4-1および表4.4-1の値は、図4.4-2に示す炉心プラズマからの熱の流れ、およびプラズマ対向機器以外の機器での熱負荷については、2次元輸送コードD O T 3.5を用いて計算した中性子と γ 線の分布をもとに算出した発熱分布から決定された。

冷却管の出入口はモジュール交換のための上部ポート領域に局在せざるを得ない。幾何学的取り合い条件を考慮して、図4.4-3～5に示す冷却管配置計画図を作成した。各モジュールの交換作業に先だって、冷却管の切り離しが必要となり、その箇所を図4.4-4に示す。

4.4.2 ダイバータ

炉内構造物の中で最も高い熱負荷を受けるダイバータは、大量の冷却流量、すなわち、冷却材の高流速が要求される。このため、ダイバータ設計では冷却材の圧力損失を考慮することが重要になる。冷却材の圧損を少なくするためには、プラズマ対向面を冷却する小口径管の長さを極力短くする必要がある。例えば、プラズマ対向冷却面だけを小口径管として、それ以外は可能な限り大口径管の使用を考える。図4.4-6は、この考えに基づいて設計したダイバータ配管である。上段の入口ヘッダーから出た冷却管はプラズマ対向面が終わった折り返し点近傍で数本まとめてマニホールドに集められ、マニホールドから中口径配管によって出口ヘッダーにつながる。この概念は、しかし、マニホールドと出口ヘッダーの間でプラズマ消滅時に渦電流の閉回路を形成し、大きな電磁力を生じる問題がある。F E Rでは、電磁力低減の観点から多少の圧損を覚悟し、図4.4-7に示す構造とした。すなわち、上段の入口ヘッダーから出た冷却管は折り返してそのまま下段の出口ヘッダーに戻る構造とした。なお、各ヘッダーにはそれぞれ一本の直管の冷却配管が接続される。

4.4.3 真空容器

真空容器の冷却系統は、容器本体の冷却系と独立した各ポートの冷却系によって構成される。薄肉二重構造を有する容器本体の冷却には、断面内の空間を冷却水の流路として利用する。プラズマ対向面に比べて熱負荷条件は穏やかであり、大量の冷却流量、高流速を必要としないので冷却流路長の長いポロイダル方向流れでも充分対応が可能である。真空容器本体の流路構成を模式的に図4.4-8に示す。冷却水は、下部の排気ダクトの側壁内に埋設させた給水配管から真空容器下部の入口ヘッダーに導入された後、さらにトーラスの内側と外側の2系統に分岐される。各系統の冷却方式を図4.4-9に示す。各系統の冷却水は、薄肉二重構造の断面

内をポロイダル方向に沿って下から上に流れながら真空容器を冷却し、真空容器上部の出口ヘッダーで再び1系統にまとめられて排水配管に接続される。この排水配管は上部ポートの側壁外側に沿って上端まで導かれ外部配管に接続される。

4.4.4 固定遮蔽体

固定遮蔽体は初期組立の観点から8°モジュールと22°モジュールに分割されているが、この冷却配管に対する基本的な考え方は、外部からの配管を22°モジュールに接続し、22°と8°モジュールを内部で接続するものである。図4.4-10に固定遮蔽体の配管ルートを示す。給水、排水配管は、上部ポートから22°モジュールの固定遮蔽体に接続する。冷却水は、固定遮蔽体内の給水導入管によって下部ヘッダーまで行き、そこでトラスの内側、外側に分流し、上部ヘッダーに向かって流れながら固定遮蔽体を冷却する。上部ヘッダーには排水配管が接続される。8°モジュールと22°モジュールの連絡管接続については、図4.4-11に示すように、22°モジュール側にベローズを設置し、8°モジュールと22°モジュール間に配管を通し、8°モジュール側では配管と固定遮蔽、22°モジュール側では配管とベローズを溶接する。ポロイダル断面における接続箇所を図4.4-12に示す。

4.4.5 第一壁および可動遮蔽体

FERの第一壁は、箱型の可動遮蔽体の一部として組み込まれた構造で、トロイダル方向の幅が約0.3m(内側)~1.6m(外側)、上下に渡る長さが約8mである。第一壁の冷却流路方向としては、図4.4-13に示すようにトロイダル方向とポロイダル方向の2方向が考えられる。冷却流路をHIP(Hot Isostatic Pressing)で製作することを考えた場合、トロイダル方向流れの方が製作性の観点から有利となる。トロイダル方向流れの設計例として、図4.4-14、15に外側可動遮蔽体の冷却構造を示す。第一壁の冷却材にはプラズマ側からのトリチウム侵入が考えられるため、第一壁と遮蔽部の冷却を2系統に分けることにした。第一壁の冷却材は上部ポートから可動遮蔽体の後部を通して低部に行き、低部で第一壁入口ヘッダーに導入される。第一壁をトロイダル流れで冷却した冷却材は出口ヘッダーに集められ、上方から配管によって上部ポートを通り出ていく。第一壁冷却とは別系統の遮蔽体冷却材は、遮蔽体中央部を前後に二分する仕切板により、ポロイダル流れとした。なお、遮蔽の観点から遮蔽前部にはポロイダル方向に溝を切ったSUS製の遮蔽板を密に充填している。

冷却流路を小口径管で製作する場合は、製作性の観点から管の本数が少なくなるポロイダル方向流れが有利である。ポロイダル方向流れの設計例として、図4.4-16、17に内側可動遮蔽体の冷却構造を示す。内側可動遮蔽体の厚さは外側遮蔽体に比べてかなり薄いため、ヘッダー空間を考えると、第一壁と遮蔽部の冷却系統を1系統にせざるを得ない。内側可動遮蔽体の冷却材は、上部ポートから遮蔽後部を通して低部に行き、低部で第一壁の各冷却管に分岐されると共に遮蔽部にも分岐され、上に向かって流れ、上部ポートから出ていく。

表4. 4-1 FER炉心構造系の冷却管寸法

名称	No.	エリア	配管径1 (A)	管外径 (mm)	L-Elbow *1 (mm)
内側遮蔽PFC(右側)	A1R	F/w エリア	200	216.3	304.8
内側遮蔽PFC(中央)	A1C	F/w エリア	80	89.1	114.3
内側遮蔽PFC(左側)	A1L	F/w エリア	200	216.3	304.8
外側遮蔽PFC(右側)	A2R	F/w エリア	200	216.3	304.8
外側遮蔽PFC(中央)	A2C	F/w エリア	200	216.3	304.8
外側遮蔽PFC(ポート)	A2P	F/w エリア	100	114.3	152.4
外側遮蔽PFC(左側)	A2L	F/w エリア	200	216.3	304.8
遮蔽プラグPFC(右側)	A3R	F/w エリア	50(25)	60.5	76.2
遮蔽プラグPFC(中央)	A3C	F/w エリア	50(25)	60.5	76.2
遮蔽プラグPFC(左側)	A3L	F/w エリア	50(25)	60.5	76.2
ダイバータPFC(右側)	C1R	F/w エリア	150	165.2	228.6
ダイバータPFC(中央)	C1C	F/w エリア	150	165.2	228.6
ダイバータPFC(左側)	C1L	F/w エリア	150	165.2	228.6
外側遮蔽Shield(右側)	B2R	遮蔽 エリア	100	114.3	152.4
外側遮蔽Shield(中央)	B2C	遮蔽 エリア	80	89.1	114.3
外側遮蔽Shield(ポート)	B2P	遮蔽 エリア	50	60.5	76.2
外側遮蔽Shield(左側)	B2L	遮蔽 エリア	100	114.3	152.4
遮蔽プラグShield(右側)	B3R	遮蔽 エリア	50(15)	60.5	76.2
遮蔽プラグShield(中央)	B3C	遮蔽 エリア	50(15)	60.5	76.2
遮蔽プラグShield(左側)	B3L	遮蔽 エリア	50(15)	60.5	76.2
ダイバ-タShield(右側)	D1R	遮蔽 エリア	40	48.6	57.2
ダイバ-タShield(中央)	D1C	遮蔽 エリア	40	48.6	57.2
ダイバ-タShield(左側)	D1L	遮蔽 エリア	40	48.6	57.2
ダイバ-タ底板(右側)	D2R	遮蔽 エリア	50(15)	60.5	76.2
ダイバ-タ底板(中央)	D2C	遮蔽 エリア	50(15)	60.5	76.2
ダイバ-タ底板(左側)	D2L	遮蔽 エリア	50(15)	60.5	76.2
固定遮蔽	B1 MAX	遮蔽 エリア	***** 200	216.3	304.8
真空シールド	E1	遮蔽 エリア			
真空容器ダクト	E2	遮蔽 エリア			
真空容器支持脚	E3	遮蔽 エリア			
内側/外側遮蔽(F/W)	A系	F/w エリア	500	508.0	762.0
外側遮蔽(遮蔽)	B系	遮蔽 エリア	200	216.3	304.8
ダイバ-タ(F/W)	C系	F/w エリア	250	267.4	381.0
ダイバ-タ(遮蔽)	D系	遮蔽 エリア	80	89.1	114.3

*1 : エルボ曲率半径は, ロングエルボの数値を表示したが, 炉本体
取り出し部近傍は圧損の制限もあり極力緩やかな曲率を採用の事.

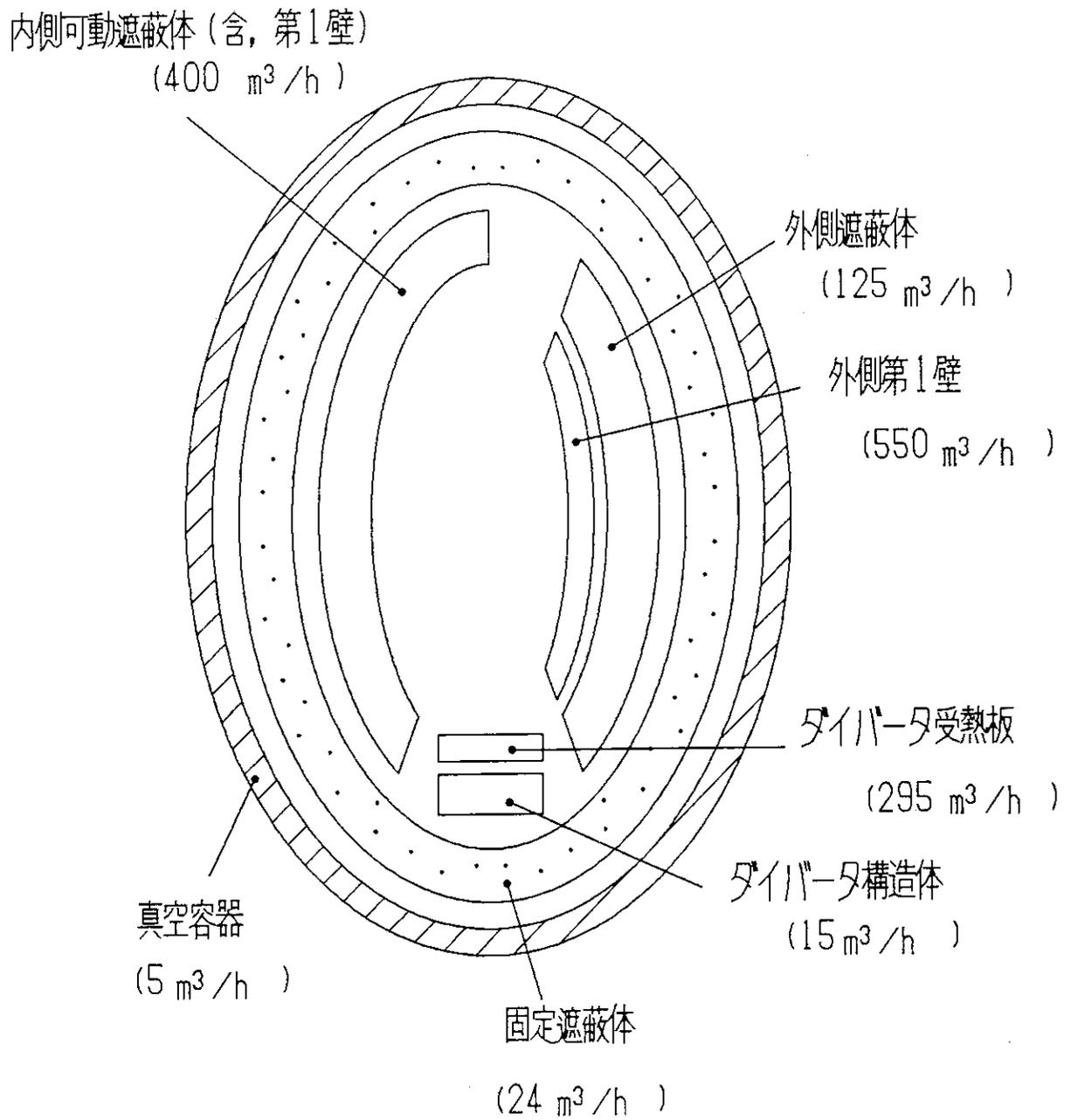


図 4. 4-1 炉心構造系各機器の必要冷却流量 (1 セクター分)

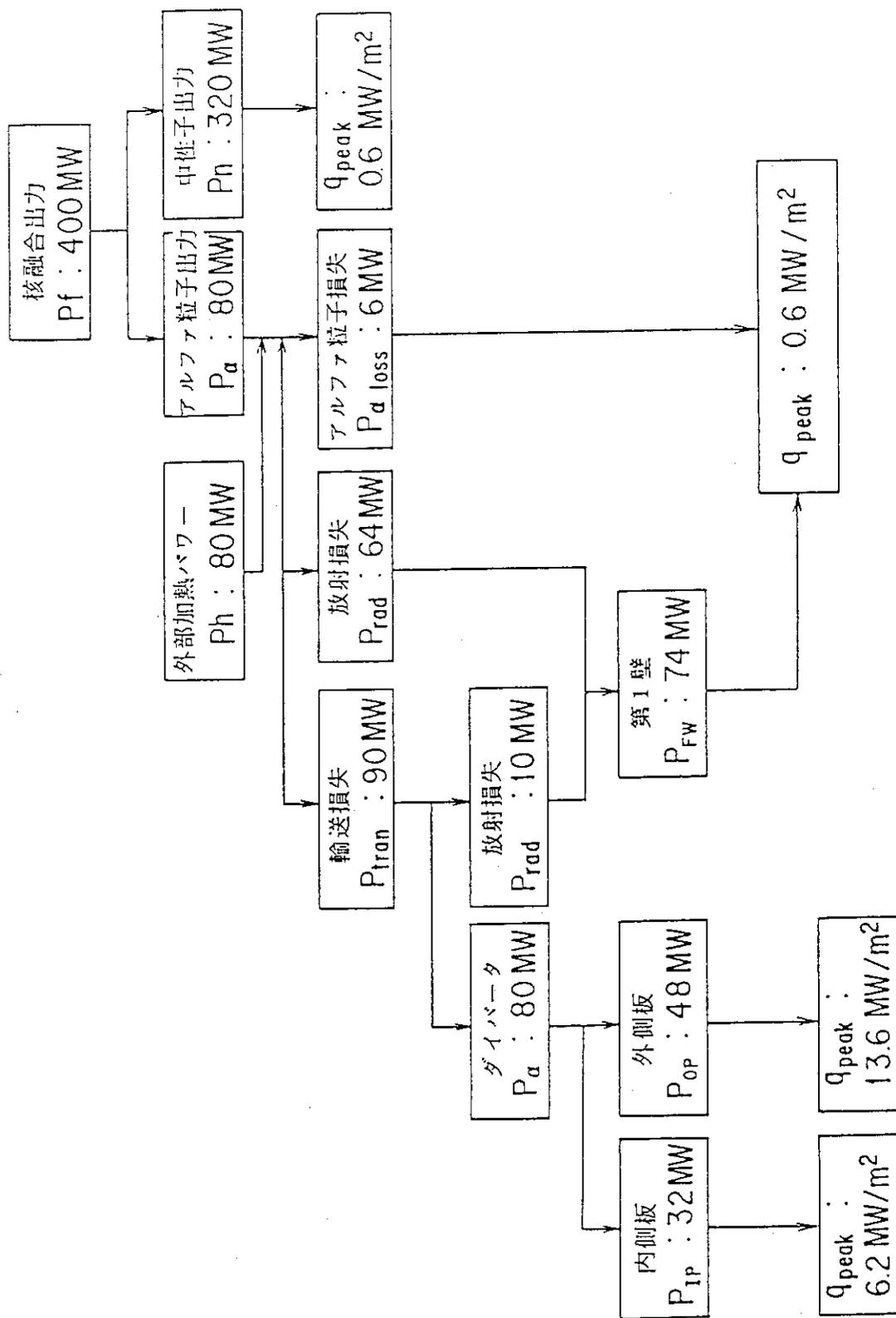


図4. 4-2 炉心プラズマからの熱の流れ

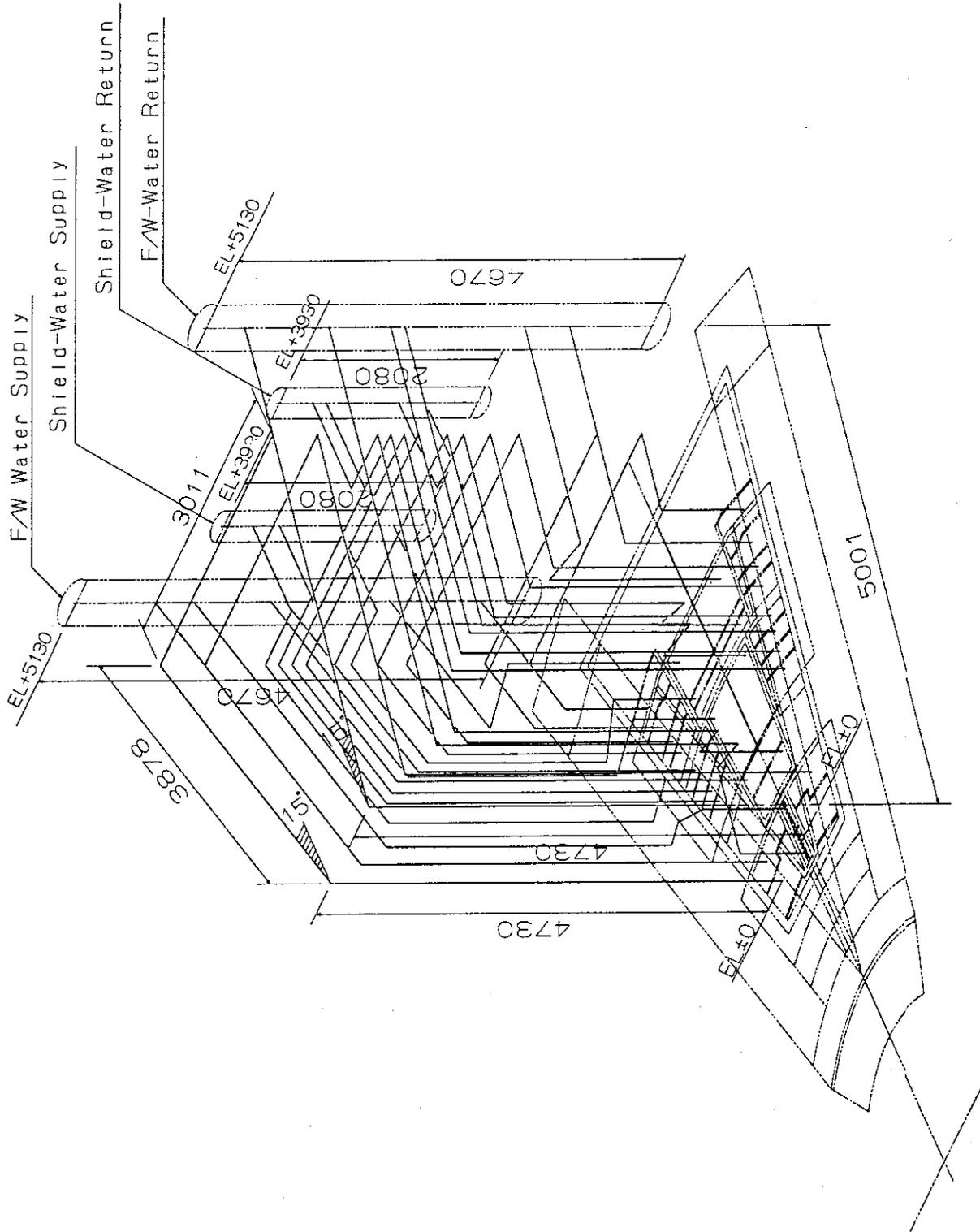


図4.4-3 上部ポータ部における冷却管配置構成(立体図)

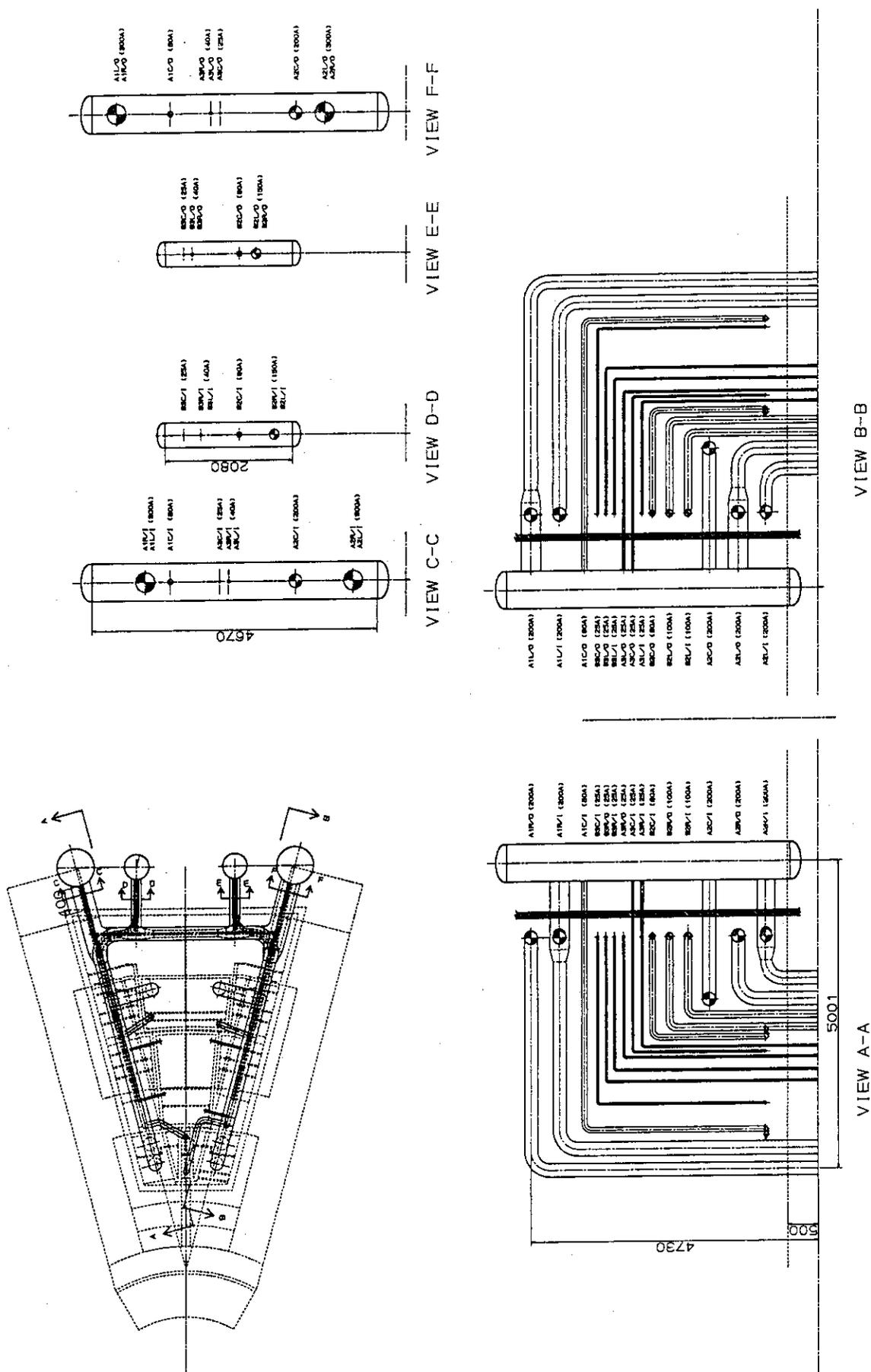


図 4. 4 - 4 上部ボート部における冷却管配置構成 (断面詳細図)

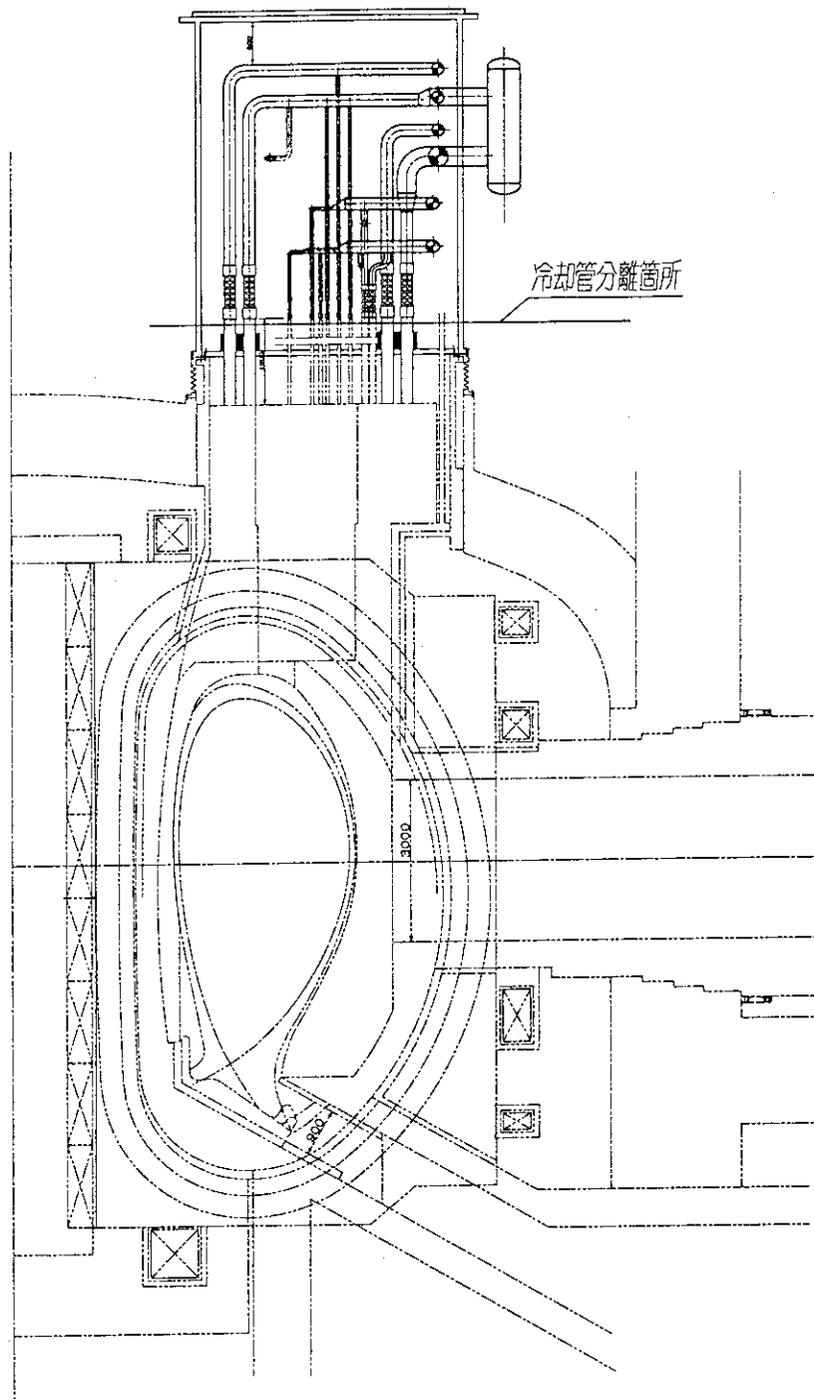


図4.4-5 上部ポート部における冷却管配置構成（断面全体図）

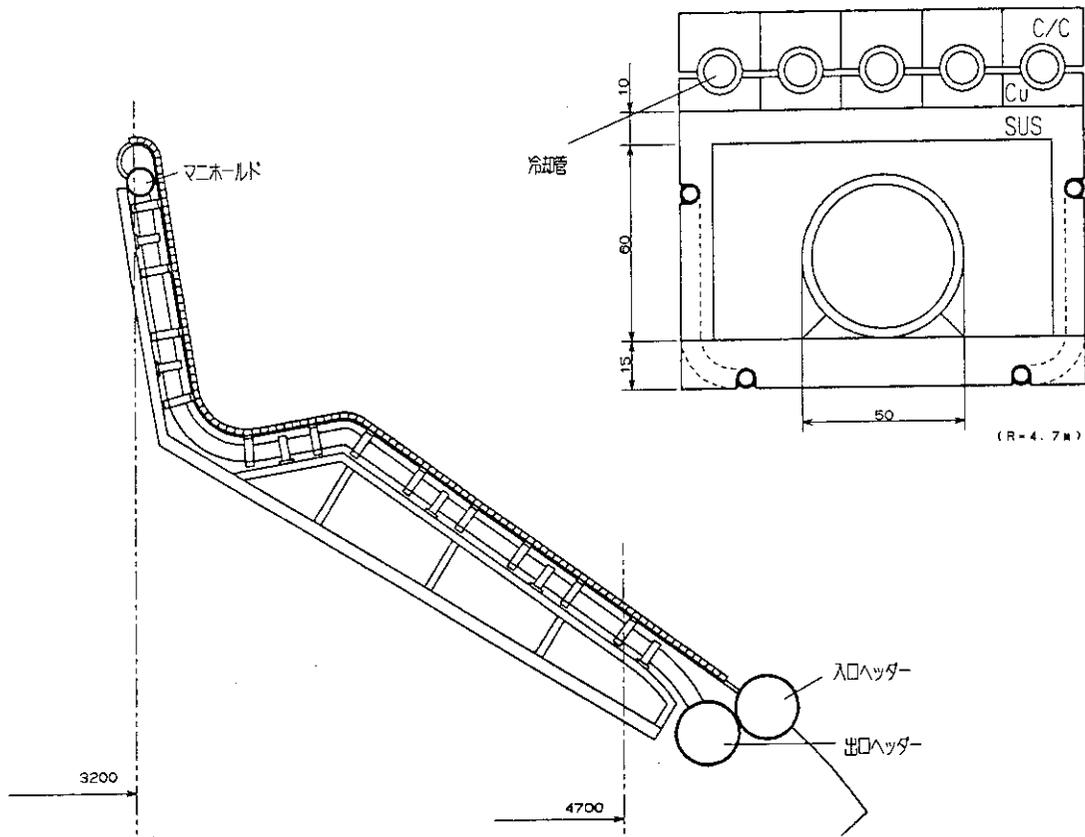


図4. 4-6 ダイバータ冷却配管構造 (マニホールド型)

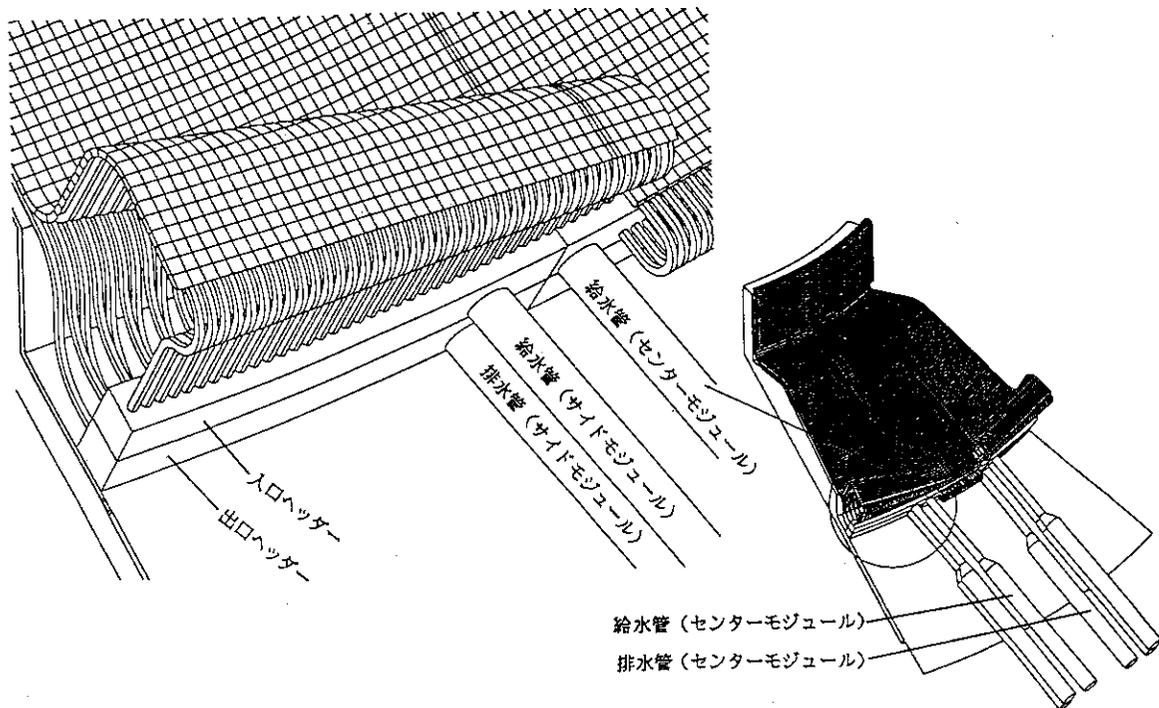


図4. 4-7 ダイバータ冷却配管構造 (全管独立型)

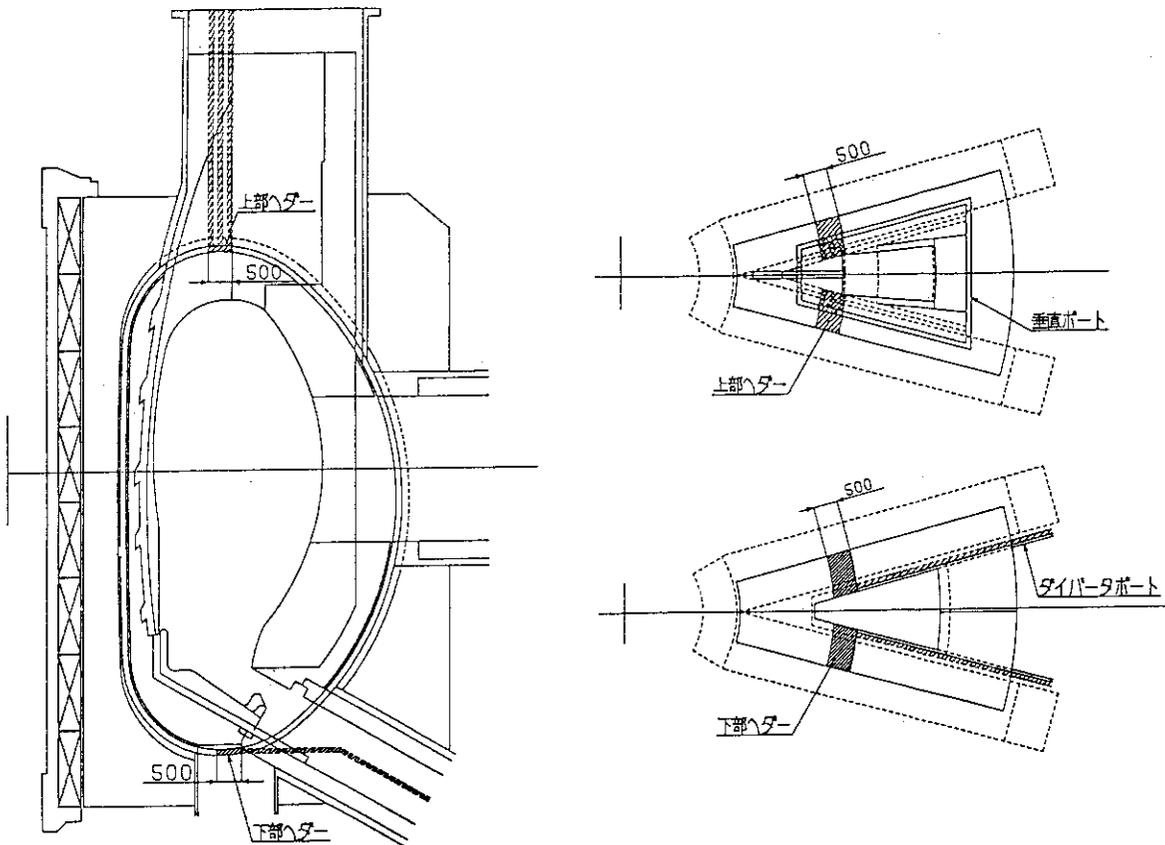


図 4. 4 - 8 真空容器本体の冷却方式

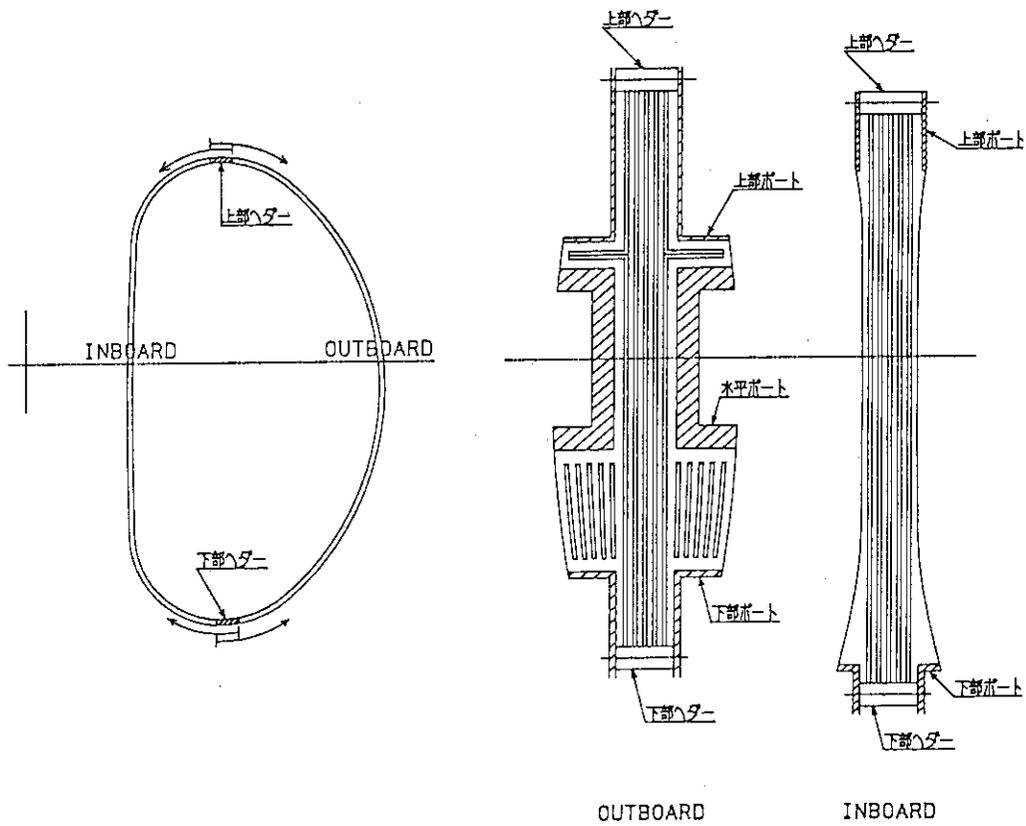


図 4. 4 - 9 真空容器本体の流路構成

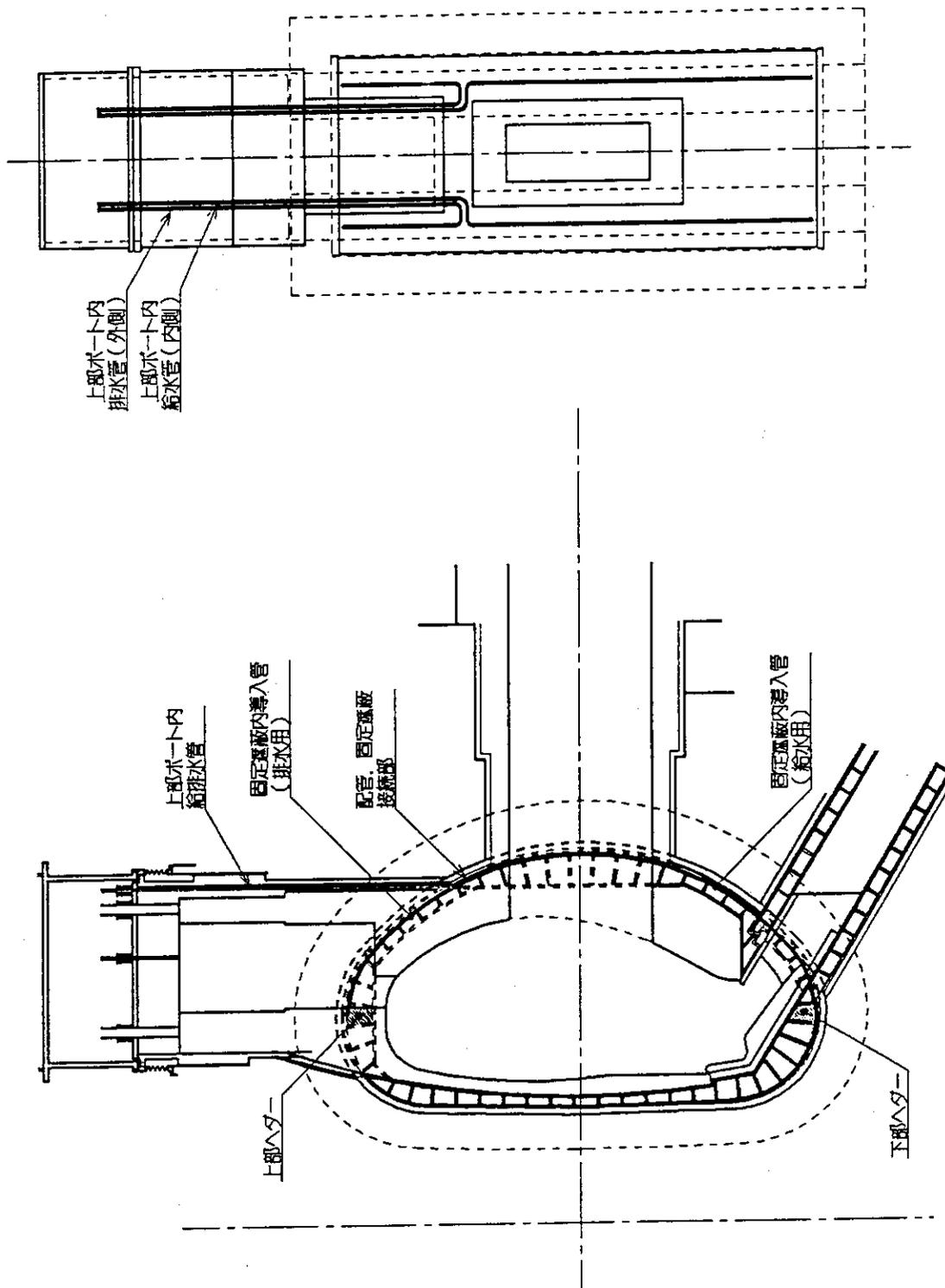


図 4. 4-10 固定遮蔽体の配管引き回し

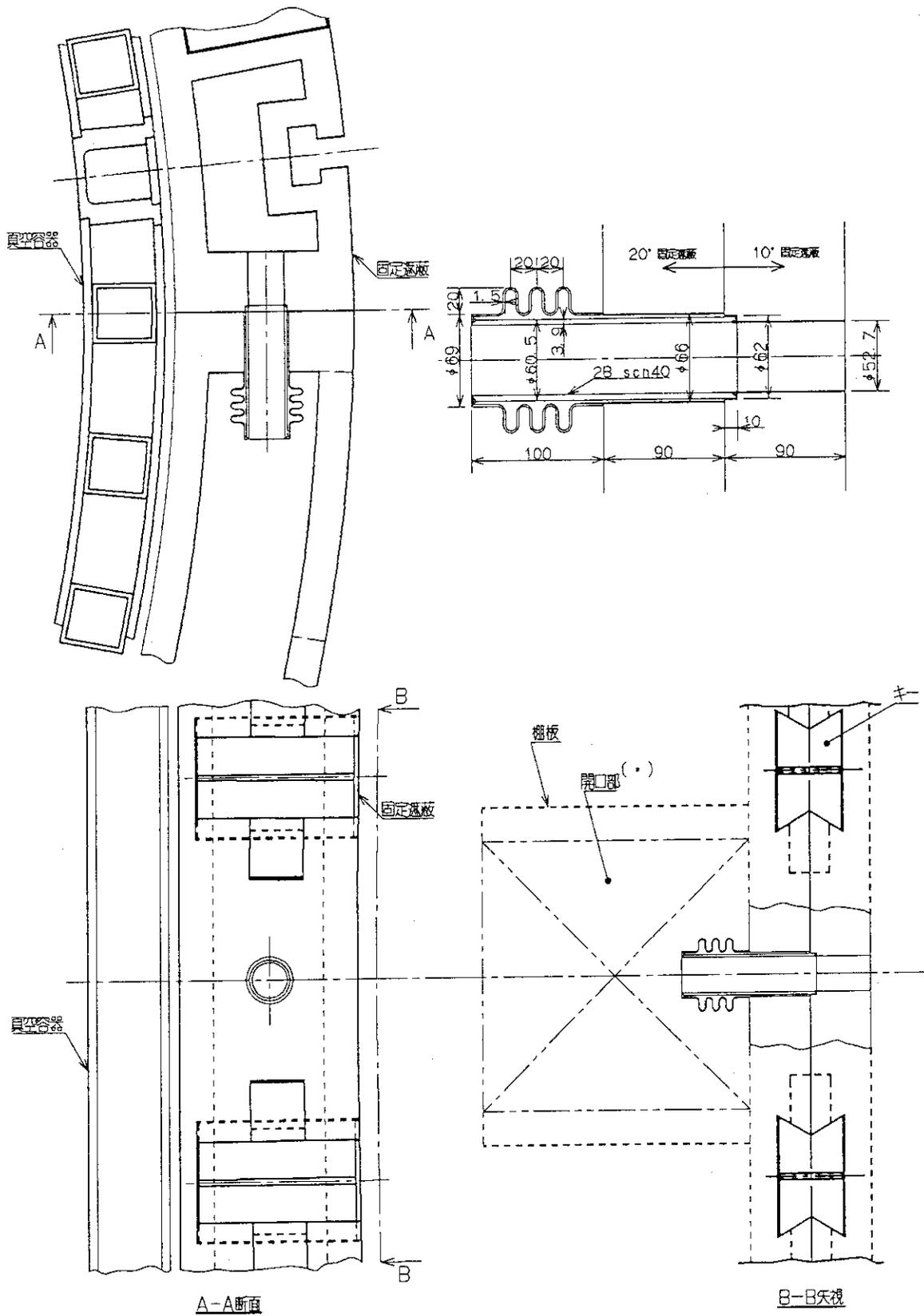


図 4. 4 - 1 1 固定遮蔽体、モジュール間の配管接続方法

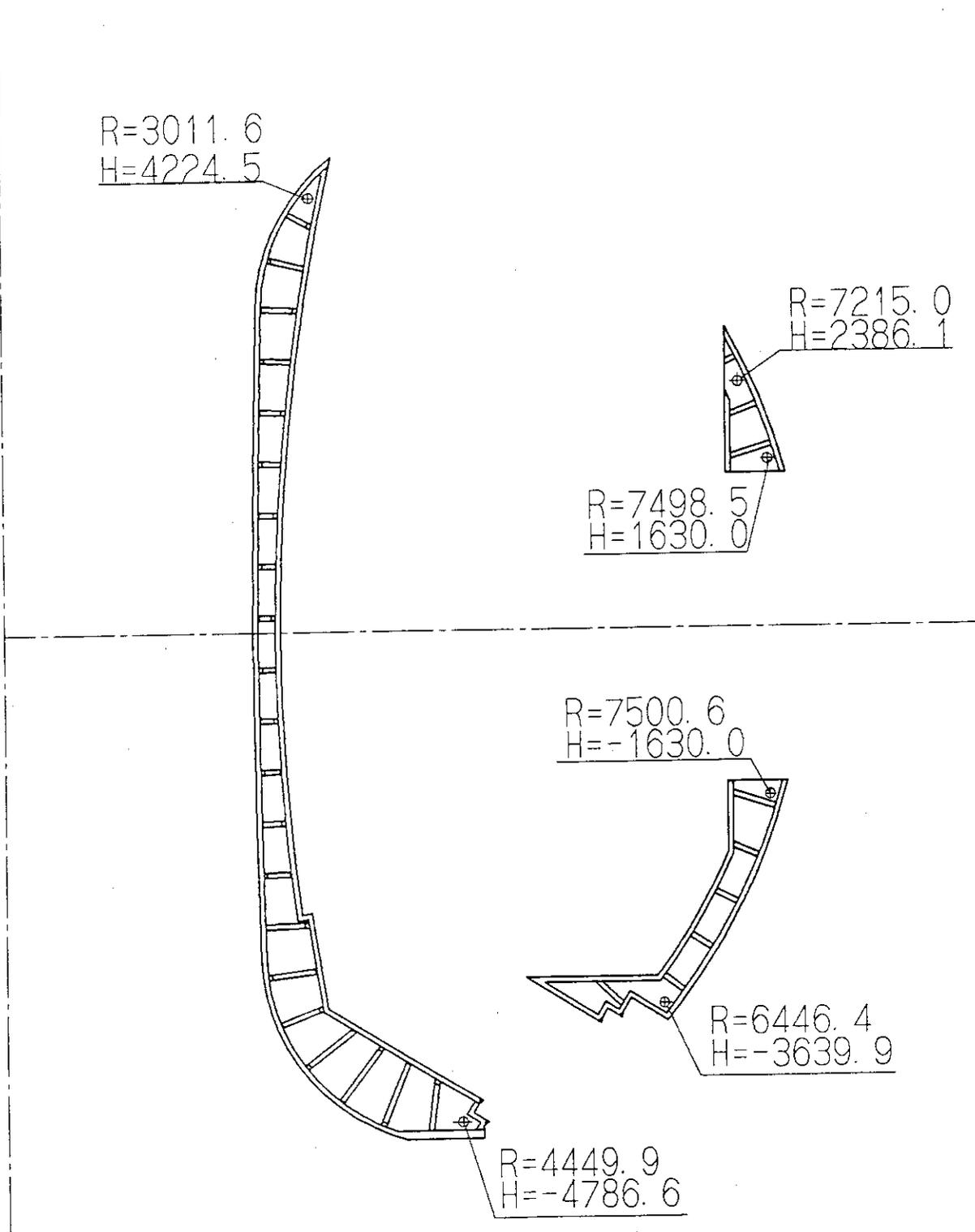


図4. 4-12 固定遮蔽体、モジュール間の配管接続箇所

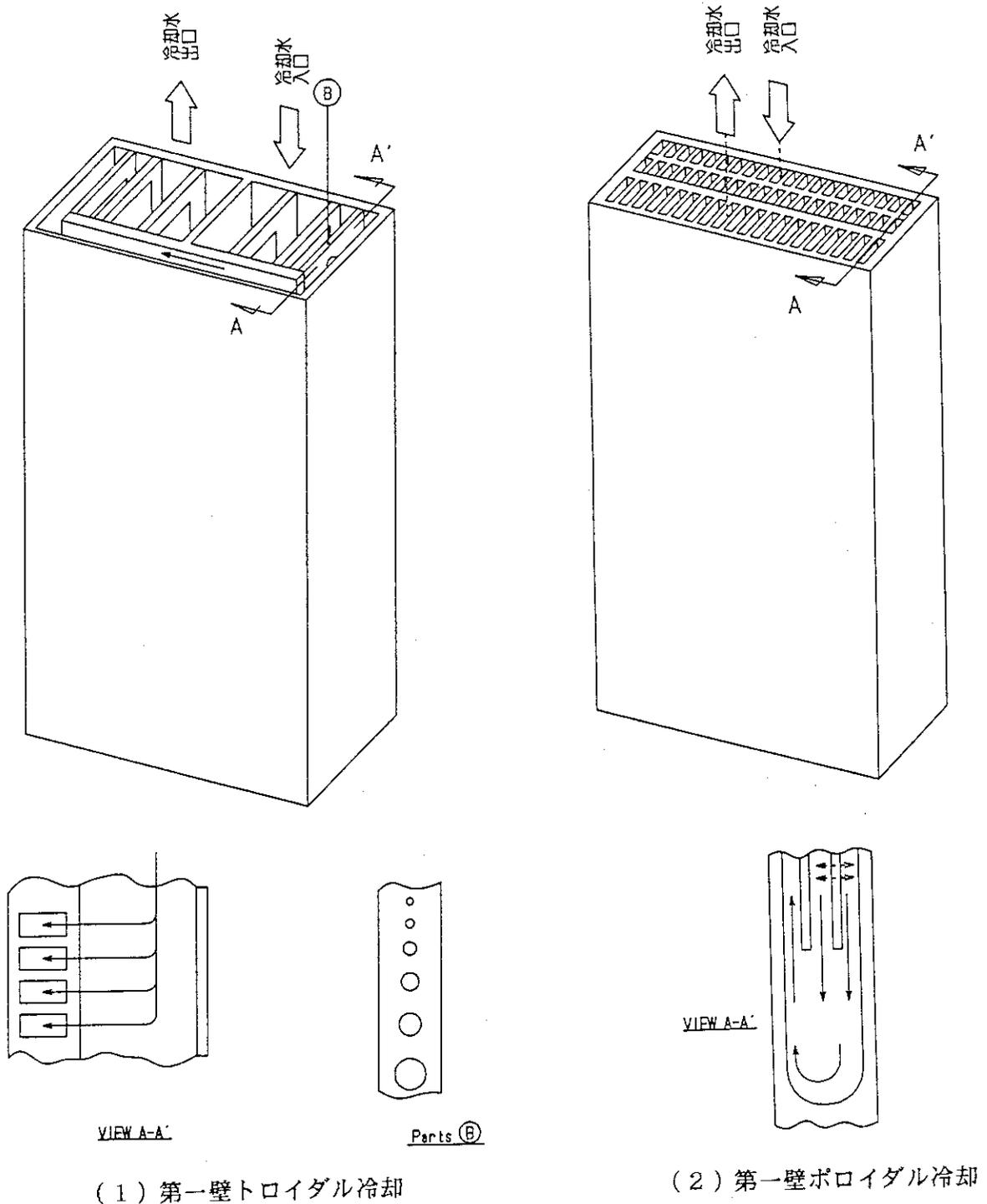


図4.4-13 容器内大型交換機器(可動遮蔽体)冷却流路の模式図

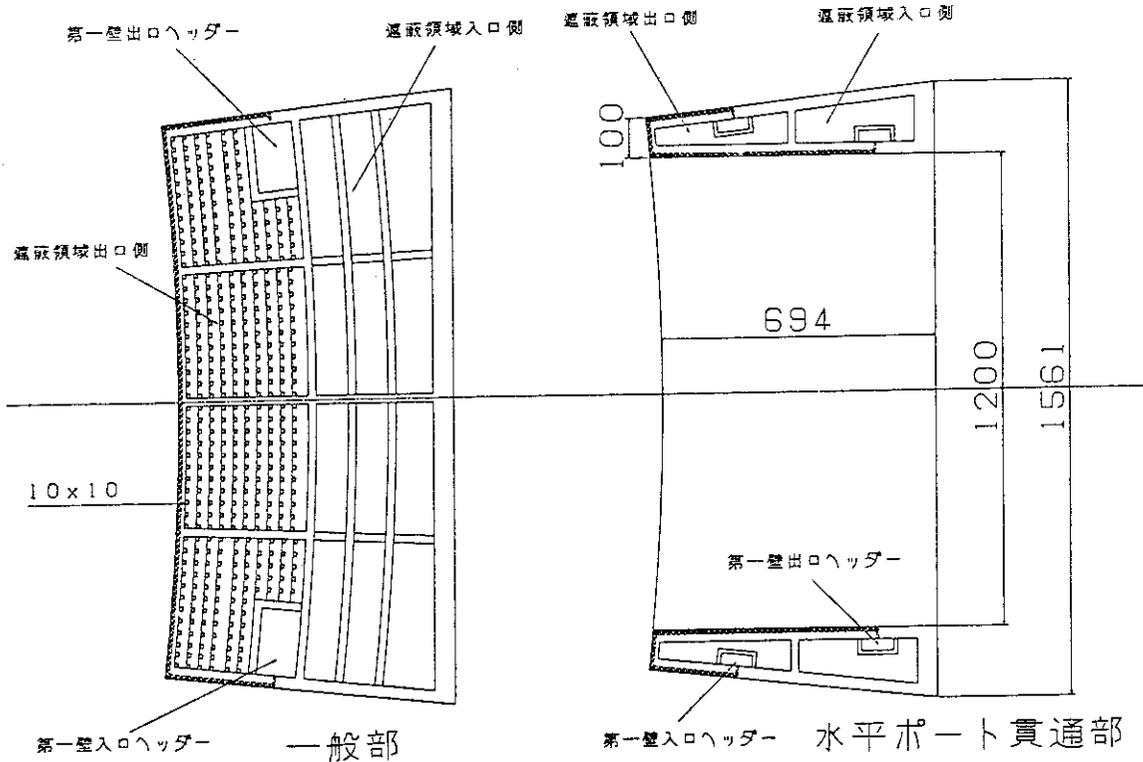


図 4. 4 - 1 4 外側可動遮蔽体の冷却構造 (水平断面)

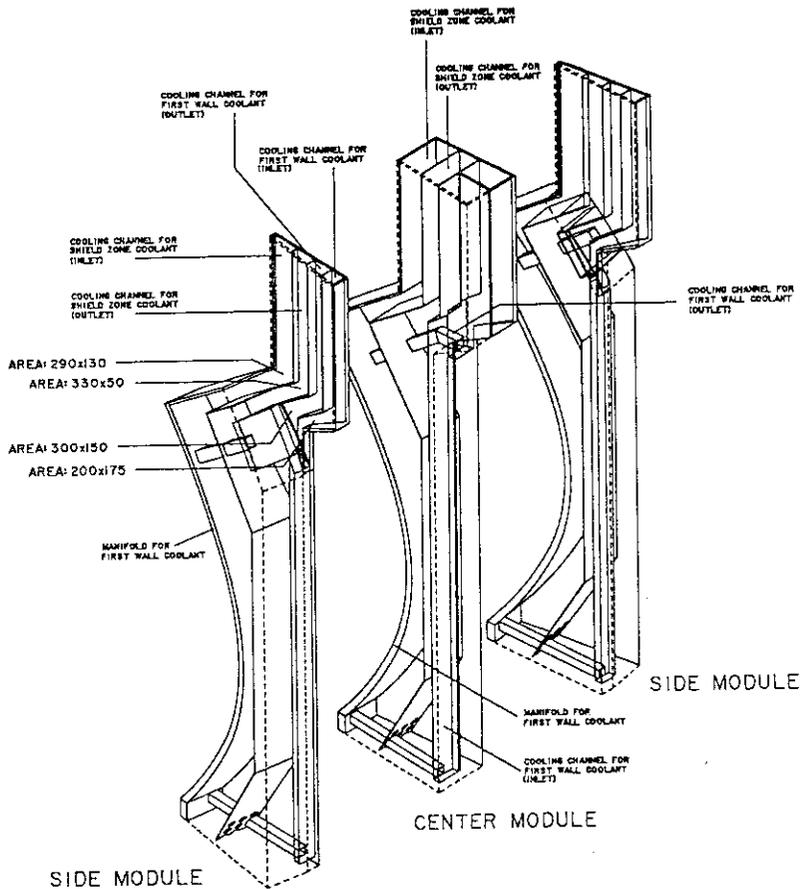
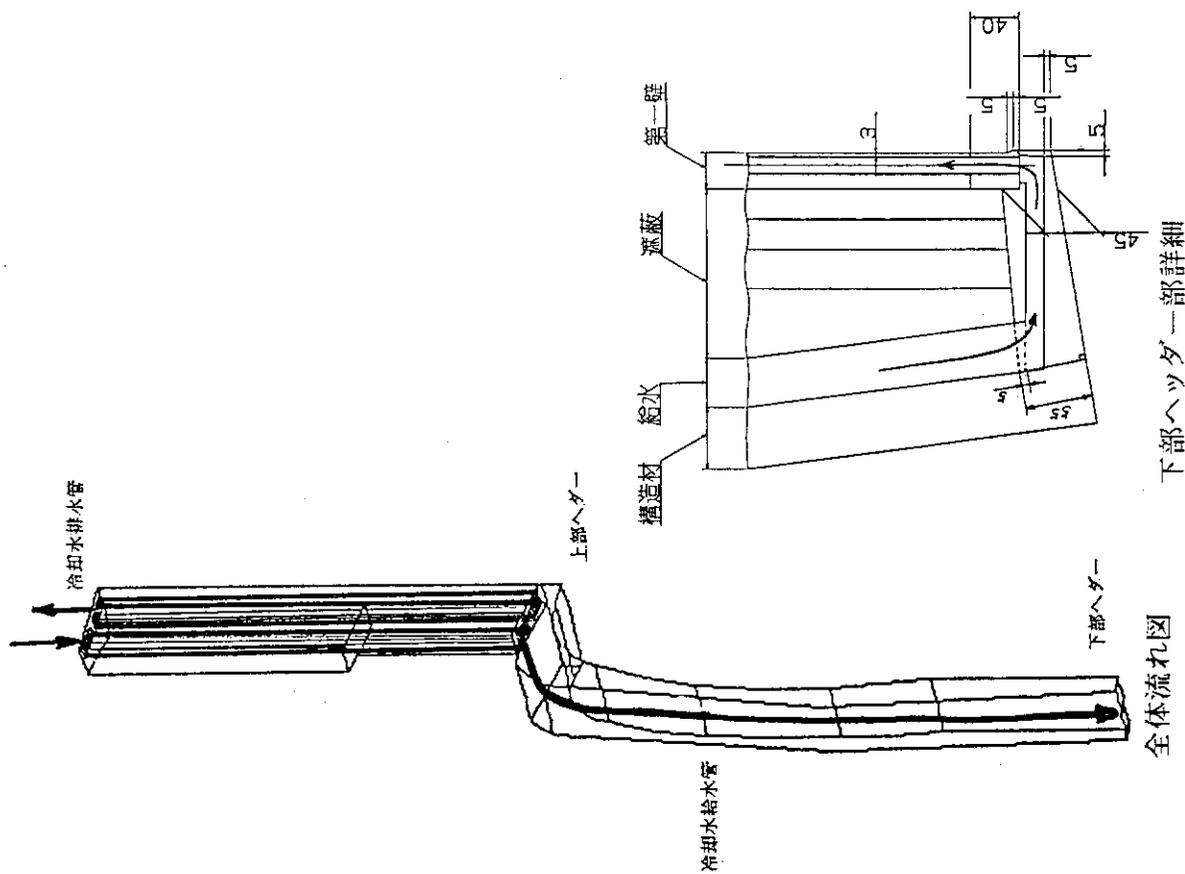
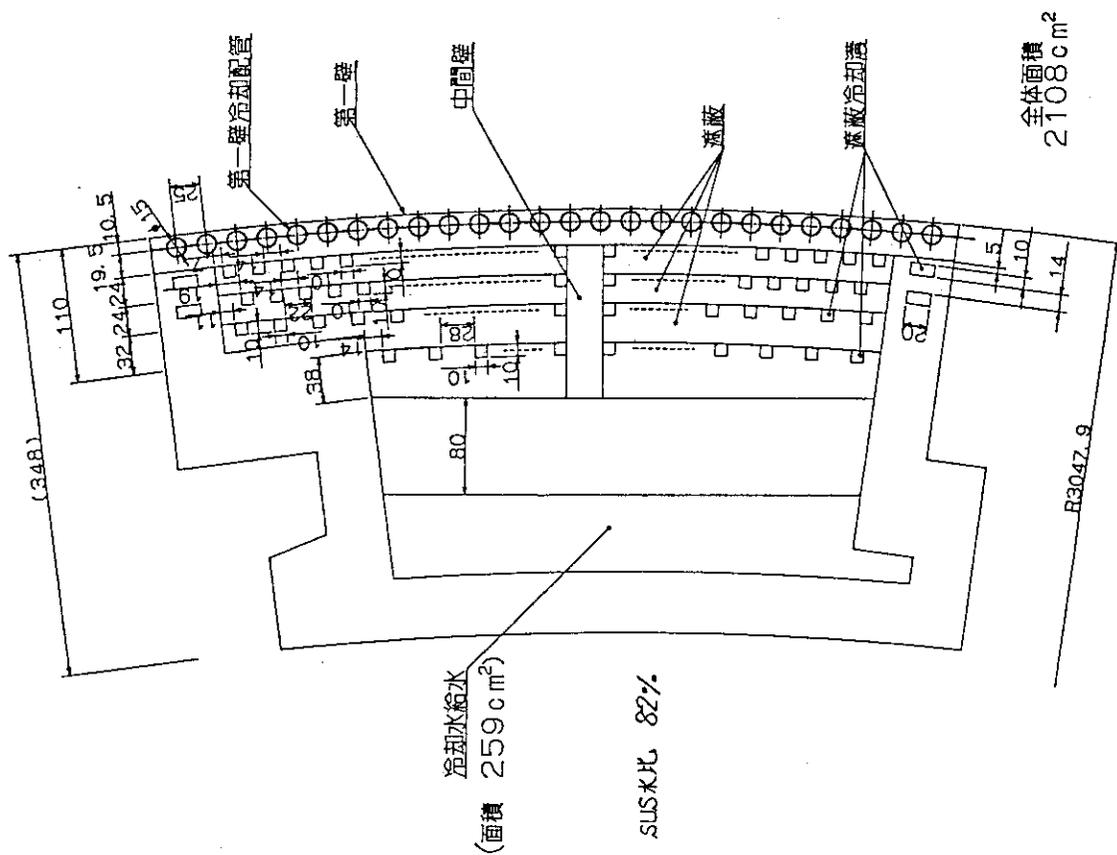


図 4. 4 - 1 5 外側可動遮蔽体の冷却構造 (立体図)



全体流れ図 下部ヘッダー部詳細
 図 4-17 内側可動遮蔽体の冷却構造 (立体図)



全体面積 2108 cm²
 図 4-16 内側可動遮蔽体の冷却構造 (水平断面)

5. 試作開発

5.1 炉内構造物支持機構

水圧コッター方式の成立性を検証するためには、まず駆動源の開発が必要である。駆動源の概念としては表 5.1-1 に示す3種類を候補として取り上げた。形状可変管型は、断面がレーストラック形状をした管の内部に水圧を印可し、断面形状が円形に近づこうとする変形を利用するものである。形状可変管型で長ストロークを期待することは難しいが、大きな駆動力を期待することができ、構造は極めて単純である。ピストン型は、水圧によるピストンの動きを利用するものである。ただし、本装置は高真空下で使用するため、駆動部にペローを用いて水洩れを防ぐ必要がある。ピストン型は長いストロークを期待できる反面、構造が複雑になる。また、強度上問題となり易いペロー部については、設置場所を工夫することによってピストンを押し込もうとする外からの衝撃荷重を受けないようにすることが可能である。フイゴ型は、フイゴ内部に水圧を印可し、ペローの伸縮を利用するものである。フイゴ型は、形状可変管型とピストン型との中間的な特徴を有するものと考えられる。

5.1.1 形状可変管型駆動機構

(1) 形状可変管の解析

試作に先だつて簡単なモデルを用いて、性能（使用可能条件）の評価をおこなった。

管の断面形状はレーストラック形状とし、直線部の長さを l 、曲線部の曲率半径を ρ と置けば、周囲長 L は、 $L = 2l + 2\pi\rho$ と表されるが、変形によって L は変わらないものとする。

ここで、管の内圧と駆動力及びストロークの関係について考察する。内圧 P と荷重 W （管の長手方向の単位長さ当たり）が釣合いの状態なら、 $P = W/l$ と表される。管の高さ（厚さ）を h とすると、 $l = (L - \pi h) / 2$ から $P = 2W / (L - \pi h)$ となり、管の断面形状と内圧と駆動力（荷重）の関係は模式的に図5.1-1のように示される。形状可変管の確保し得る最大ストロークは、管の肉厚を無視すれば、原理的には $h = 0$ の状態から管が断面形状が真円状態となることによって実現される。 $h = 0$ では曲げ応力が無限大になり、真円状態では内圧による膜応力が無限大となる。

そこで、必要なストローク $d = |h_2 - h_1|$ を、どの h_1 と h_2 の間で確保するのが合理的であるのか、という問題がある。言うまでもなくこの場合の評価関数は発生応力である。定性的には、初期形状の偏平度を大きく設定すると、必要圧力は比較的低い状態で必要な駆動力が確保され、周方向の引張応力（膜応力）は低くなるが、曲線部では大きい曲率変動が生じ曲げ応力が高くなる。図5.1-2に各部の曲率変動に対する管の高さの影響を模式的に示す。

考慮すべき応力には、管の断面形状の変化による曲げ応力と内圧による引張応力と圧縮応力である。管の高さの変動（ h_1 から h_2 ）によって内圧、曲げ応力、引張応力および圧縮応力が

どのような履歴を辿るかを模式的に、図5. 1-3に示す。従って、必要な駆動力とストロークが与えられた時、最適な初期形状が一義的に決まる。

(2) 試作体設計条件および形状

設計条件は下記の如く設定した。

- ・電磁荷重 : 100-500 ton/m
- ・核発熱密度 : 1-5 w/cc
- ・ストローク : 5-10 mm
- ・動作温度 : 100 °C
- ・動作圧力 : 10 kg/cm²-g (通常運転時)
- : 100 kg/cm²-g (プラズマ異常消滅時)
- ・周囲環境 : 真空
- ・構造 : 単層および多層

試作する形状可変管を図5. 1-4に示す。層構造としては、単層の他に曲げ応力の低減のため三層も試作の対象とした。

(3) 冷間加工による試作

冷間加工の試作に供した素管の仕様は次に示す通りである。

- ・材質 : SUS316 シームレス管 固溶化熱処理材
- ・寸法 : 単層管用 ; 外径12.0mm、肉厚1.2mm
- 三層管用 ; 外層管 外径12.0mm、肉厚0.4mm
- 中層管 外径11.1mm、肉厚0.4mm
- 内層管 外径10.2mm、肉厚0.4mm

上述の素管を使用し、成形ダイスと高静水圧を利用して拡管し、拡管後偏平成形を行って図5. 1-4の形状を得ようとした。すなわち、外径に対する拡管率は約540%である。拡管成形の治具を図5. 1-5に示す。素管を成形ダイスにセットした後、室温で素管内に高油圧を負荷して拡管するものである。1回の拡管率が約40%以下になるよう最終拡管までに5段階以上の成形ダイスを用意した。1回の拡管が終了する毎に、拡管試料は、加工硬化を除去するため真空中で溶体化熱処理を行った。

(i) 単層管試作

第一段階の成形加工では、拡管率が35%を越えると管の破裂が生じ、25%以下では破裂が生じなかった。しかし、拡管成形の段階が増すにしたがい偏肉の程度が増大し、また、表面アラサも増して、25%以下の低拡管率でも破裂する現象が生じ、結局、最終目標寸法に到達することができなかった。

(ii) 三層管試作

三層管の成形においては、成形装置との関係上、三層管の両端部をシール溶接して一体化する必要があり、これをTIG溶接にて実施した。このため、層間に空気が存在し、第一段階成形後の溶体化熱処理時に空気が膨張して、三層管が破損してしまった。

(iii) 偏平成形

拡管成形では最終目標寸法まで到達しなかったため、外径を素管の約1.9倍に拡管成形した外径約22.5mmの管を使用して偏平成形を行った。偏平成形は、管内にガラス粒を充填して約2mmずつ段階的に行い、その都度充填材を入れ替えて約1.4mmの厚さまで行った。その結果、比較的均一な偏平管として成形できた。

(4) 超塑性加工による試作と試験

数百%を越える拡管を冷間加工で行おうとすると数段階の加工を重ねる必要がある。加工段階が増えると偏肉も増大して、結果として目標とする寸法まで加工できないことが判明した。このため、一段階で目標とする寸法に加工できるように、高温で超塑性特性を有する材料を選択し、試作することにした。

試作に供した材料は、室温レベルでの強度がオーステナイトステンレス鋼に比べてはるかに優れ、航空機産業で超塑性加工の実績がある2種類のチタン合金(Ti-3Al-2.5V, Ti-6Al-4V)の円管(外径12mm、肉厚1.2mm)である。加工は、写真5.1-1に示すように形状可変管の最終形状を有する治具に円管を設置し、それを約850°Cに加熱後、円管内に約7気圧のアルゴンガスを入れて行った。成形加工の全体構成の概念を図5.1-6に示す。なお、治具は以下の二種類を用意した。

- ・形状可変管の高さ(厚さ)12mm, 幅44mm, 平均歪み量160%
- ・形状可変管の高さ(厚さ)12mm, 幅74mm, 平均歪み量310%

加工に際し、管の酸化は伸び変形に悪影響を及ぼすため事前に管外表面に酸化防止のためのコーティングを施した。さらに、管と治具間のすべり抵抗を良くするため、酸化防止コーティングの上に窒化ボロンのコーティングも施した。

Ti-3Al-2.5Vの円管は、超塑性加工性がやや悪く、幅44mmの形状可変管を加工出来たものの幅74mmの加工が出来なかった。しかし、Ti-6Al-4Vの円管はTi-3Al-2.5V円管より加工性が良く、幅74mmの加工が可能であった。試作した形状可変管の外観写真を写真5.1-2に示す。本加工法の場合、形状可変管の平坦部は加工の早い時期に治具と接触し滑り抵抗を受けるため伸び難く、一方、曲率部は最後まで治具に接触しないため伸び易い。この結果幅74mmの形状可変管の肉厚分布は、測定結果の一例を図5.1-7に示すが、曲率部が約0.2mmと薄く、平行部が約0.4mmと厚い偏肉を示す。形状可変管の使用を考えた時この偏肉は、上述の解析からも判るように、悪い傾向ではない。

試験を実施した試作物は、Ti-3Al-2.5V材で幅44mmの単層管(試験体 α)と三層管(試験体 β)およびTi-6Al-4V材で幅74mmの単層管(試験体 γ)の三体である。試験項目は、(i)変形特性試験、(ii)駆動力特性試験および(iii)耐圧力特性試験である。試験結果と考察を以下に記す。

(i) 変形特性試験

- ・変形過程でレーストラック形状は保たれず、平坦部中央から膨らみ始める。これは、曲率部の曲げ応力の観点からは好ましいが、被駆動体との接触面積が少なくなることを意味し、

必要な駆動力を得るのに大きな内圧を印加しなければならない。

- ・自由変形では内圧 $2 \sim 3 \text{ kg/cm}^2\text{-g}$ 程度でほぼ円形断面形状まで膨らみ、除荷後はほぼ元の形状まで復帰し、塑性変形は残らなかった。このように、弾性変形の範囲内で使用可能な Ti 合金は形状可変管の目的から極めて好ましい。
- ・ただし、変形量が大きくなると、偏平部から直管部に至る肩の部位で座屈による破損が生じる(写真5.1-3)。これは偏平部から直管部に至る勾配が急なためと考えられ、今後の試作においては、勾配を緩やかにする必要がある。

(ii) 駆動力特性試験

- ・試験体 γ を用いて、変形量を 5 mm に固定したときの内圧と駆動力および内圧と有効接触面積の関係を図5.1-8に示す。図中の理想変形は形状可変管の断面形状がレーストラックに保たれている場合である。
- ・(i)の変形特性試験で述べたことが、図5.1-8の実験値から読み取れる。現在、駆動力測定器の容量の関係で、充分高い内圧条件での測定がなされていないが、実機レベルでの内圧条件($\sim 100 \text{ kg/cm}^2\text{-g}$)ではほぼ理想変形に従うものと思われる。

(iii) 耐圧力特性試験

- ・試験体 α を用いて、変形量を 15 mm に固定したとき、内圧 $214 \text{ kg/cm}^2\text{-g}$ にて破裂した。破損の状況から、内圧による膜応力によるものと判断される。
- ・試験体 β を用いて、変形量を 5 mm に固定したとき、内圧 $380 \text{ kg/cm}^2\text{-g}$ にて破裂した。破損の状況から、試験体 α 同様、内圧による膜応力によるものと判断される。この高い耐圧特性は、試験体 α の肉厚が 0.4 mm 程度であるのに対し、試験体 β の肉厚は三層の合計が $0.5 \sim 0.6 \text{ mm}$ と厚いためと考えられる。
- ・試験体 γ を用いて、変形量を 5 mm に固定したとき、内圧 $60 \text{ kg/cm}^2\text{-g}$ にて破裂した。破裂の状況および歪の変化特性から、変形時の肩部への応力集中による座屈が破損の原因と推定される

5.1.2 フイゴ型駆動機構

(1) 試作

5.1.1項における設計条件を考慮し、図5.1-9に示す形状のものを試作した。レーストラック状の一山ペローを成形にて2個作成し、そのペローを受圧板および中立板に溶接して所定の形状に製作した。ペロー、受圧板、中立板のいずれも材質は、SUS316である。

(2) 性能試験

試作体について一定のギャップ($0 \sim 8 \text{ mm}$)に対する発生力(駆動力)試験を行ったが、図5.1-10に示すように、同一内圧でも変形のために一部内圧が用いられギャップが大きくなるに従い発生力が小さくなる。 30 kg/cm^2 の内圧で約 $8 \sim 9 \text{ ton}$ の発生力が得られた。また、この時のペローの周方向ひずみをひずみゲージで測定した。測定位置は、レーストラック直線部の中央、直線部の端部および円周部の中央の3カ所である。測定結果を図5.1-11に示すが、ギャップが増大するにつれペローの周方向ひずみは大きくなる。また、内圧

が大きくなるに従いレーストラック直線部の中央が最も大きなひずみを示し、次に直線部の端部、円周部の中央という順になる。

定歪サイクル試験では、初期ギャップを10mmとして、 $0\sim 10\text{kg/cm}^2$ の繰り返し内圧を5000回与えて試験を行ったが、破壊は生じなかった。しかし、本駆動源全体の高さが500回繰り返し後で約4mm、5000回繰り返し後で約5mmの塑性変形量が残った。すなわち、ペローが繰り返し内圧によってラチェット変形をしたことになる。

5.1.3 ピストン型駆動機構

(1) 試作

試作したピストン型駆動機構は、コッターの打ち込み、引き抜きの2方向動作ができるように複動型のピストンとし、適用箇所と使用条件に応じて”大駆動力型”、”小型”および”長ストローク型”の三種を取り上げた。それらの概念図と主な仕様を図5.1-12に示す。ピストンのストロークを吸収し、かつ本体外部とシールするために、溶接ペローズを用いた。溶接ペローズは二重ペローズであり、各板厚は約0.3mm(12mil)である。ペローズ材質はインコネル718相当品である。それぞれの”型”の開発目的を以下に述べる。

大駆動力型 : 三種の型の中で最初に試作した型であり、基本的機構の成立性の確認とシールリングの材質選定およびシールリングの設置箇所(ピストン側かシリンダー側か)の選定を主な目的とした。一方、この大駆動力型は形状可変管型駆動機構およびフイゴ型駆動機構の開発が成功しなかった場合のバックアップとして位置づけている。

小型 : ダイバータ板をダイバータ構造体に取り付けるためのコッター駆動機構であり、狭隘なダイバータ構造体の内部に埋め込まれるため小型でなければならない。ただし、駆動力およびストローク量に対する条件は厳しくない。この試作に際しては大駆動力型で得られた開発成果はそのまま取り入れられる。

長ストローク型 : ダイバータ板を交換する際、マニピュレータ先端の把持部が充分ダイバータ板を把持できるように、ダイバータ板を15~20cm持ち上げる必要があるが、本試作はそのため駆動機構である。比較的長いストロークが要求されるが、駆動力はダイバータ板の重量程度で充分である。ダイバータ構造体の中への収納空間の観点から、制作に際しては軸方向の寸法にはある程度制限が加えられるが、径方向の寸法に厳しい制限はない。従って、長ストロークを確保するのに、二段階のテレスコピック型とした。

(2) 性能試験

(i) 大駆動力型

ピストンとシリンダー間での気密を保持するためのシールリングは、三種類の材質、即ち軽水炉の制御棒に用いられている水との親和性の良いグラファイト、ステンレル鋼より軟らかい材質としてマンガン青銅および、ステンレル鋼より硬い材質としてインコネルのそれぞれを試

験に供した。シールリングの設置箇所についてはピストンに取り付ける場合とシリンダーに取り付ける場合を試験し、シールリング材にはグラファイトを用いた。マンガン青銅とインコネルについてはピストン側に設置した。試験条件とそれぞれにおけるシールリングからの水の洩れ量の結果を表5. 1-2に示す。洩れ量に対する明確な基準を設けることは難しいが、洩れ量が甚だしいと印加した水圧が有効に駆動力に伝達されない可能性がある。印加水圧と得られる駆動力は比例関係に有り、 $100 \text{ kg/cm}^2\text{-g}$ の水圧で、いずれの場合も押し込み時で ~ 17.5 トン、引き抜き時で ~ 13 トンの駆動力が得られ、有効断面積からの計算と一致し洩れの影響は無視できる。これらの結果を踏まえ、シールリングの材質は加工の容易なマンガン青銅とし、設置箇所は少しでも多くの有効面積が確保できるピストン側とした。

設計圧力の1.5倍の圧力($150 \text{ kg/cm}^2\text{-g}$)を印可し、ペローズの耐圧試験を行ったが、ペローズからの水洩れ及びペローズの異常変形は見受けられなく、健全であった。更に、水圧シリンダーの押し込み側と引き込み側に交互に圧力を印可し、ペローズの疲労試験を実施した。ペローズの伸縮量は25mm、印可圧力は $100 \text{ kg/cm}^2\text{-g}$ である。その結果、ペローズは約200回で破損した。破損状況を写真5. 1-4に示す。疲労亀裂は溶接境界に生じている。

(ii) 小型

基本的な技術は先の”大駆動力型”で確立され、ここでは駆動力と洩れ量を主な試験項目とした。印加水圧 $65 \text{ kg/cm}^2\text{-g}$ で6.4トンの駆動力が得られ、この水圧での洩れ量は700m /分で実用上問題はない。

(iii) 長ストローク型

”小型”同様、基本的な技術は先の”大駆動力型”で確立され、ここでも駆動力と洩れ量を主な試験項目とした。印加水圧 $10 \text{ kg/cm}^2\text{-g}$ で1.0トンの駆動力が得られ、この水圧での洩れ量は250回の往復運動後でも1000m /分程度であり実用上問題はない。

5. 1. 4 まとめ

(1) 形状可変管型駆動機構

SUS316の円管(外径12mm、肉厚1.2mm)を5段階以上の冷間拡管加工により所定の寸法の形状可変管を得ることは、偏肉増大による破損により、出来なかった。このため、高温で超塑性特性を有するチタン合金を用いて超塑性加工により形状可変管の試作を行った。その結果、所定の形状の形状可変管を得ることが出来、初期性能試験の結果からも実機適用の可能性が得られた。今後の課題として以下に記す。

- ・ 偏平部から直管部に至る勾配が急なため変形による座屈が生じ、今後の試作においては、勾配を緩やかにする必要がある。
- ・ 幅74mmの多層管の製作及び性能確認
- ・ 形状可変管とコッターの組み合わせによる性能試験
- ・ 実機部分モデル試作、試験

(2) フイゴ型駆動機構

試作したフイゴ型駆動機構では、内圧 $3.0 \text{ kg/cm}^2\text{-g}$ で約9トンの発生力が得られた。また、ストローク 10 mm で $0 \sim 10 \text{ kg/cm}^2\text{-g}$ の繰り返し内圧を5000回与えても破壊は生じなかった。しかし、製作には多くの溶接箇所を要し、信頼性の点で難がある。今後の課題を以下に記す。

- ・薄型化
- ・フイゴ型駆動機構とコッターの組み合わせによる性能試験
- ・実機部分モデル試作、試験

(3) ピストン型駆動機構

試作したピストン型駆動機構では、“大駆動力型”、“小型”および“長ストローク型”いずれの場合も必要な駆動力、ストローク共に得られ、シールリングからの洩れ量も充分許容範囲内であり、現状では問題はない。繰り返し寿命も250回で、実機適用に際し、不安材料はない。今後の課題を以下に記す。

- ・ピストン型駆動機構とコッターの組み合わせによる性能試験
- ・実機部分モデル試作、試験

表5. 1-1 炉内構造物着脱用駆動機構の概念と開発課題

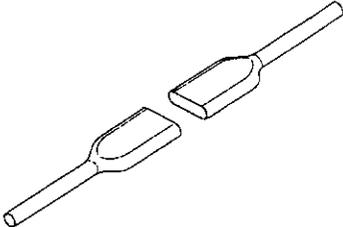
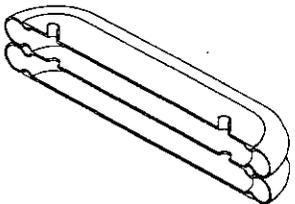
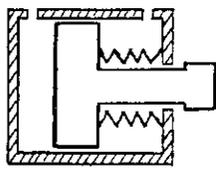
<p>【形状可変管型】</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 製作性 ・ 偏肉 ・ 多層管の層間癒着 ● 性能試験 ・ 耐衝撃性 ・ 繰り返し回数
<p>【フイゴ型】</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 性能試験 ・ 耐衝撃性 ・ 繰り返し回数 ・ ベロー溶接部の健全性
<p>【ピストン型】</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 性能試験 ・ シールリングの特性 ・ 繰り返し回数 ・ ベロー溶接部の耐圧性

表5. 1-2 シールリングの材質および設置箇所と洩れ量

	回数	引き抜き側加圧		押し込み側加圧		水温(°C)
		水圧 (kg/cm ² -g)	漏れ量 (ml/分)	水圧 (kg/cm ² -g)	漏れ量 (ml/分)	
マンガン青銅	0	99.5	737.5	100	632.5	-
	200	-	-	100	740	14
	400	-	-	99.2	630	-
	800	-	-	102	830	-
	1000	100.4	795	102	705	25-28.5
グラファイト (ピストン側)	0	97.2	3720	97	4410	27.3
	200	97.2	3510	94	4500	26.5
	1000	97.2	3810	97.2	4140	23.5
グラファイト (シリンダー側)	0	98	130	98	125	13
	246	98.8	78	98.4	40	18.5
	1000	98.4	39	98.8	25	16
インコネル	0	99.2	770	100	815	23
	500	100	785	100	745	18.5
	1000	100	760	100	815	13-21

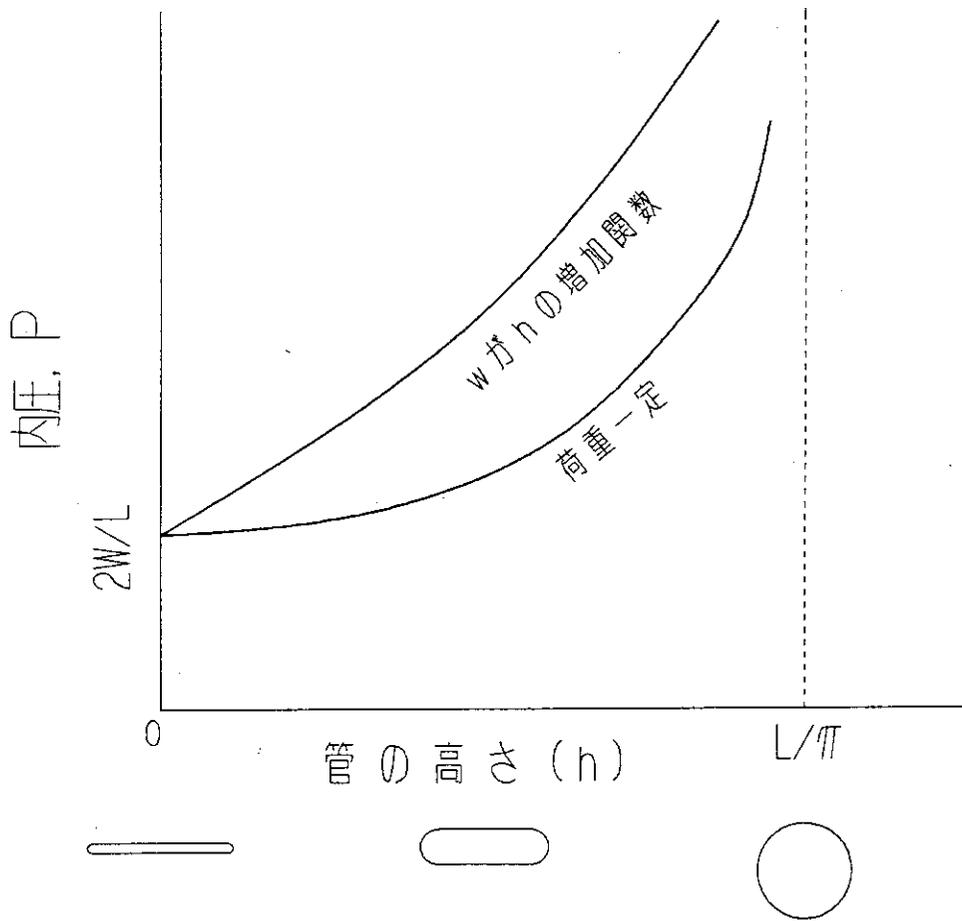


図5. 1-1 形状可変管高さ（偏平厚み）と必要内圧の関係

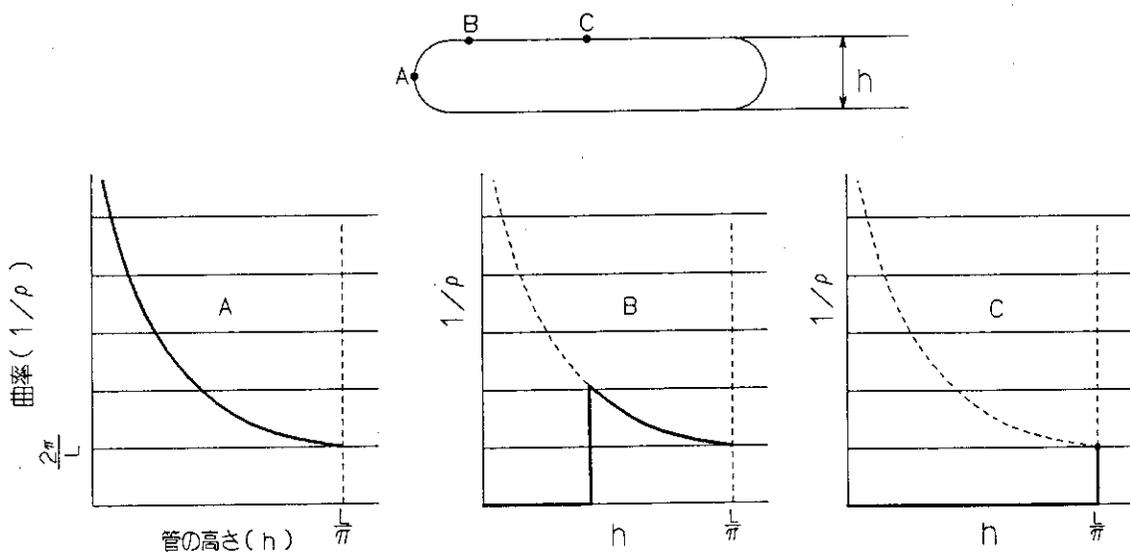


図5. 1-2 形状可変管各部の曲率変動に及ぼす偏平厚みの影響

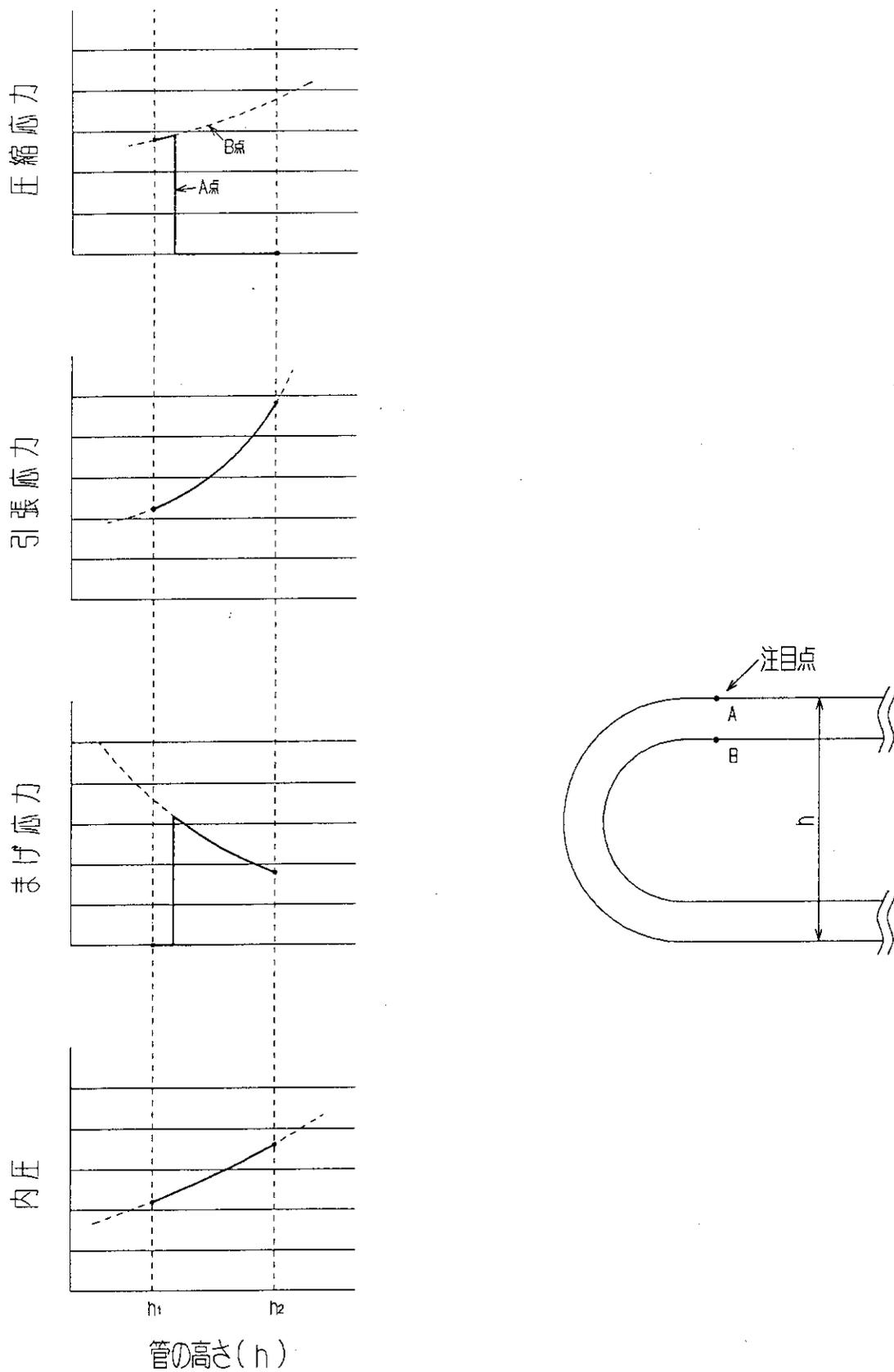


図5. 1-3 形状可変管偏平度の変動による内圧および各種応力の履歴

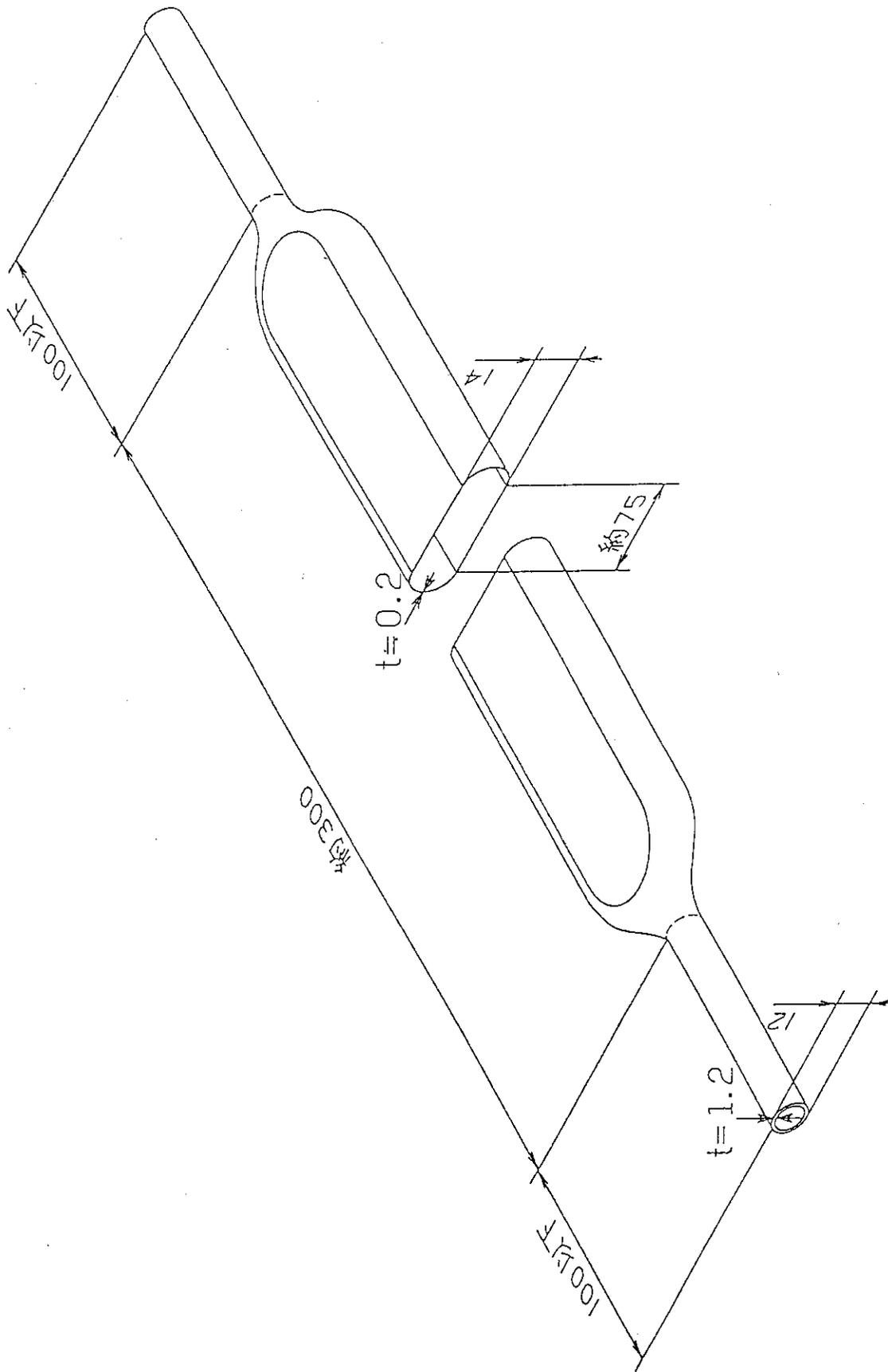


图 5. 1 - 4 形状可变管试件概念图

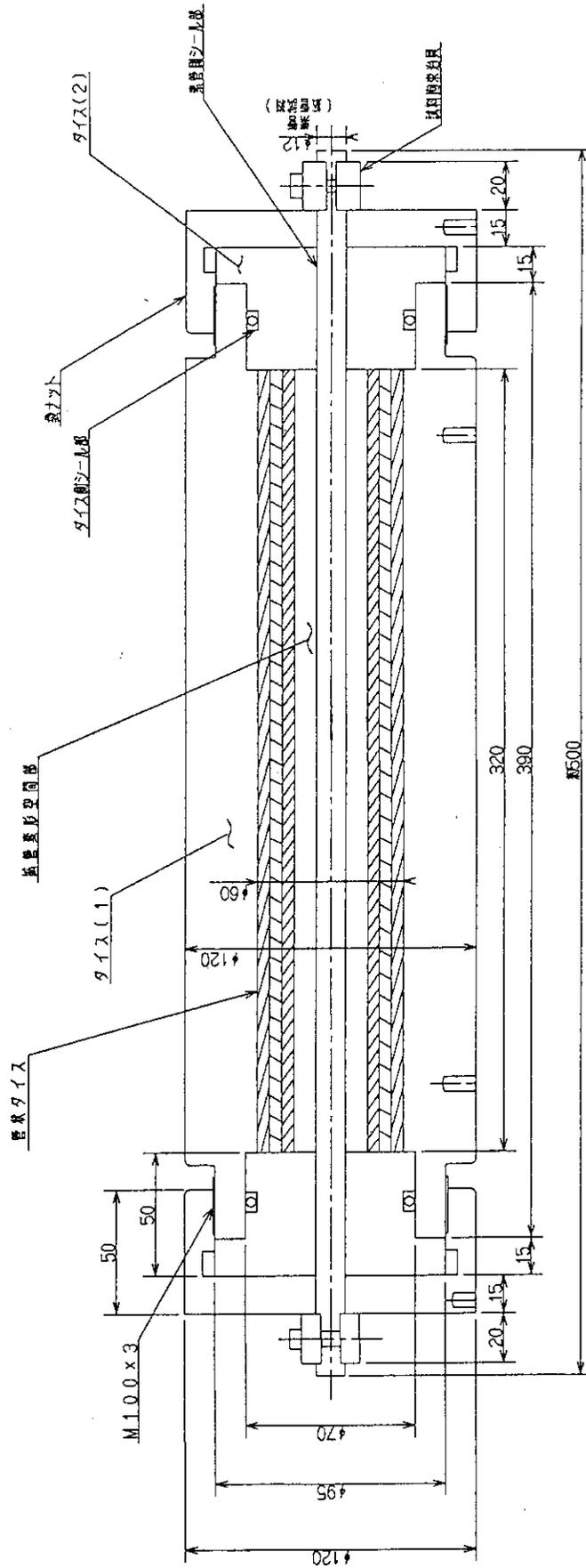


図5. 1-5 冷間加工用拡管成形治具

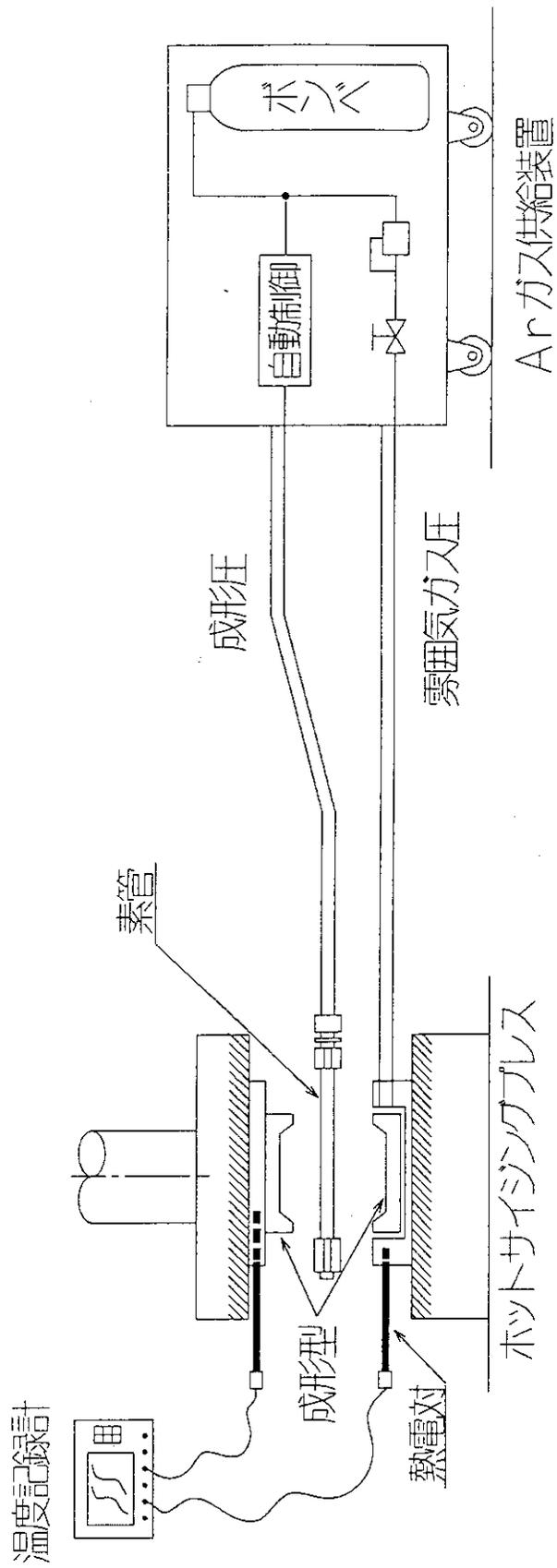


図5. 1-6 超塑性材熱間成形加工の全体構成

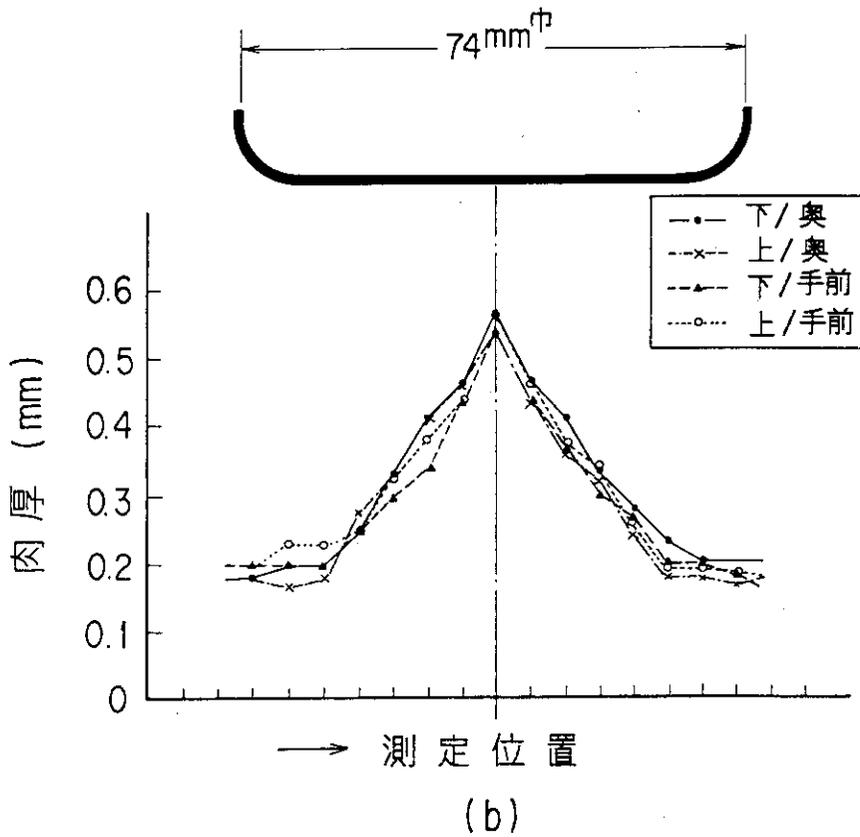
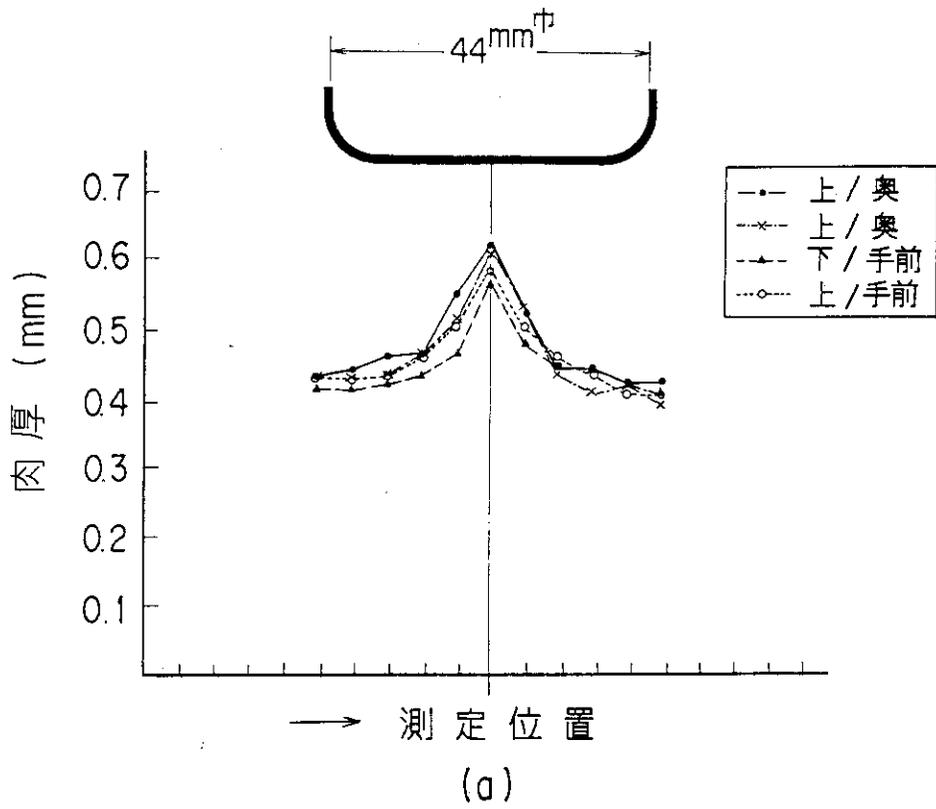


図5. 1-7 形状可変管の肉厚分布

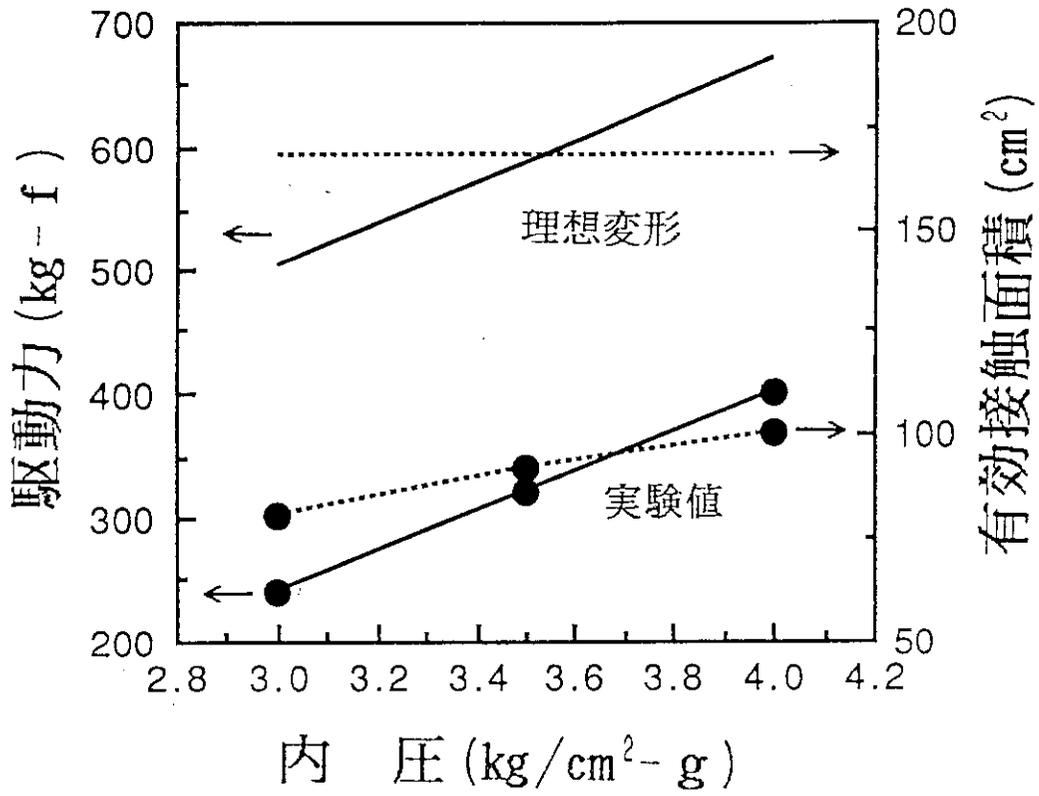


図5. 1-8 形状可変管の駆動力特性

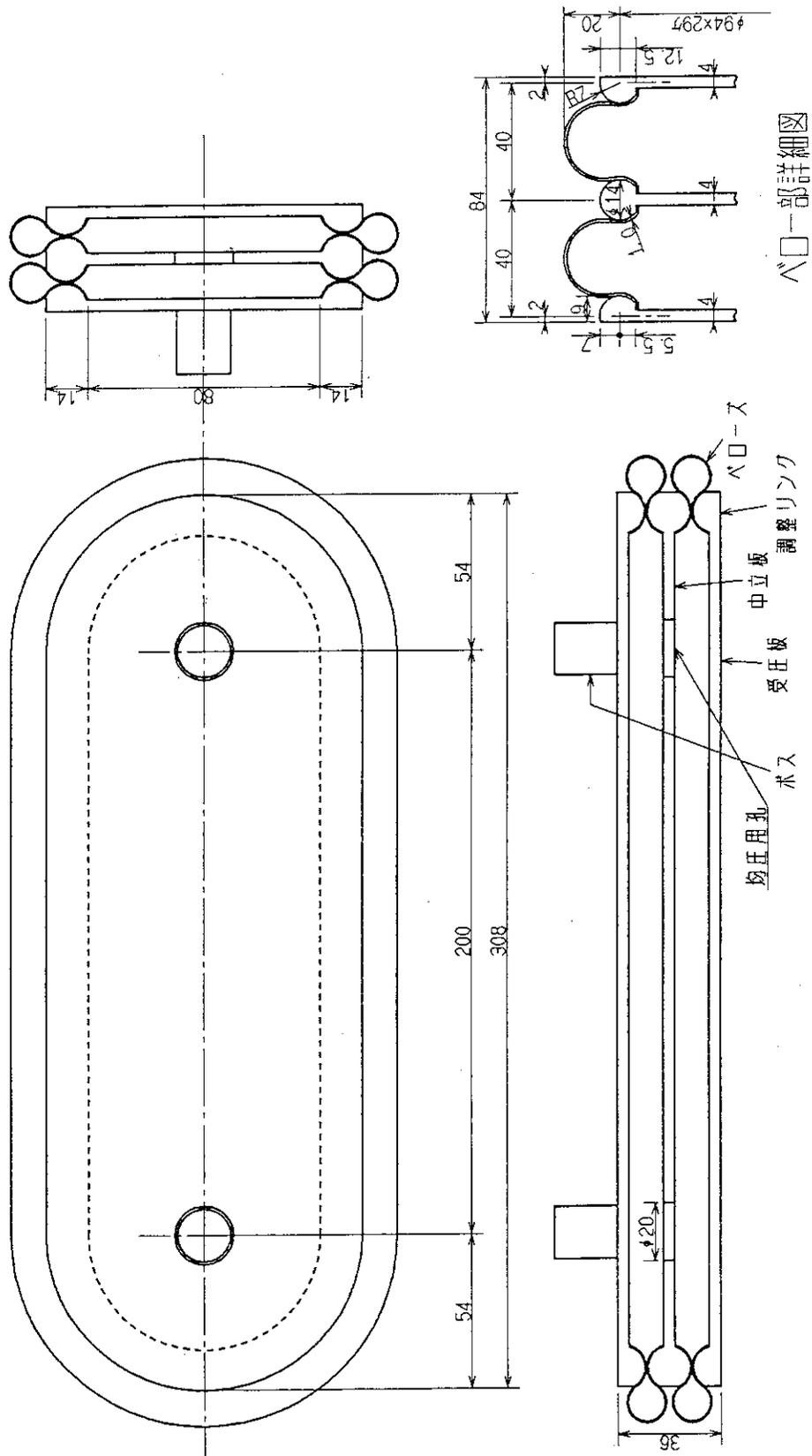


図5. 1-9 フイゴ型駆動機構の全体図

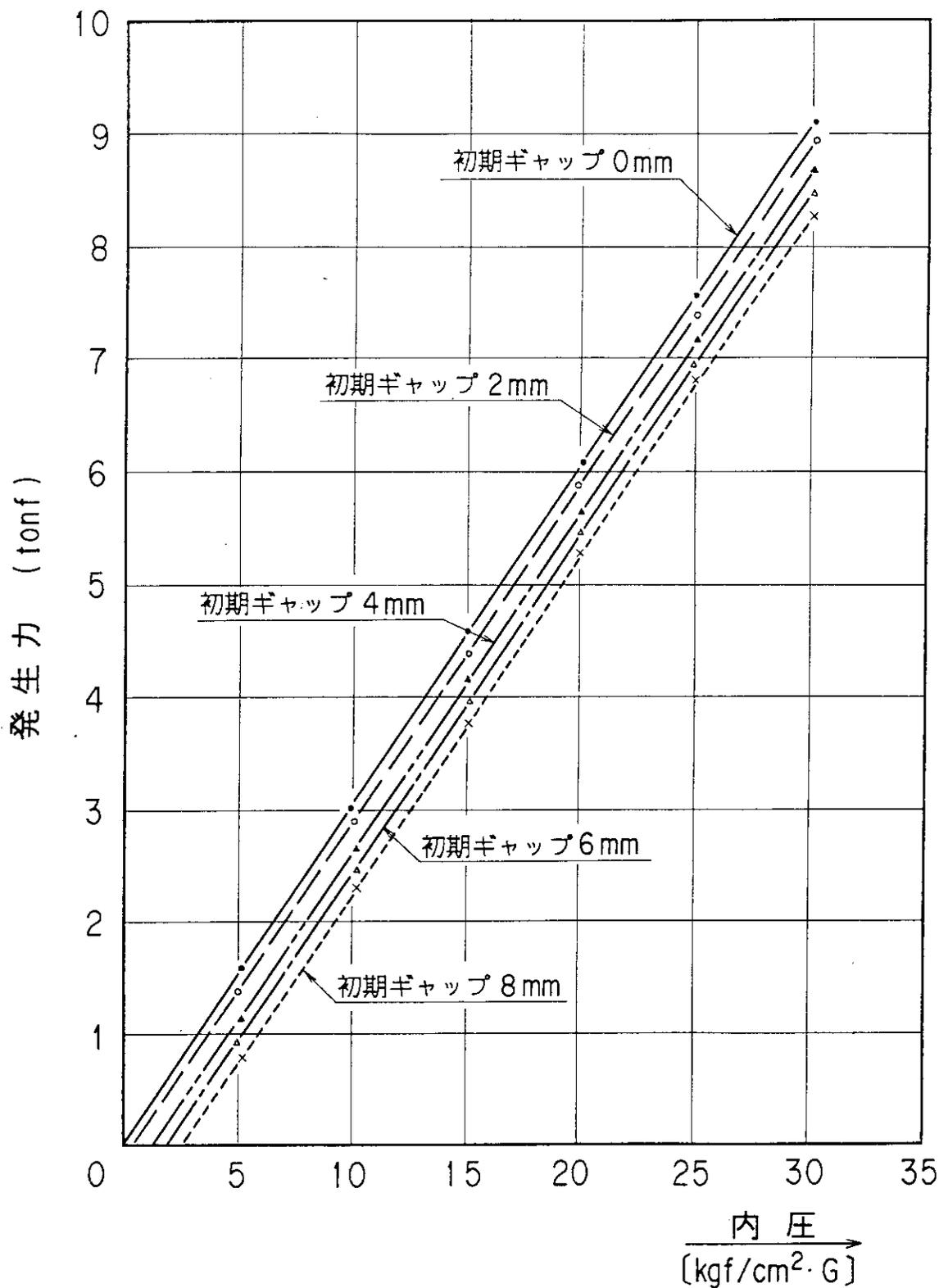


図5. 1-10 フィゴ型駆動機構の内圧-発生力特性に及ぼす初期ギャップの影響

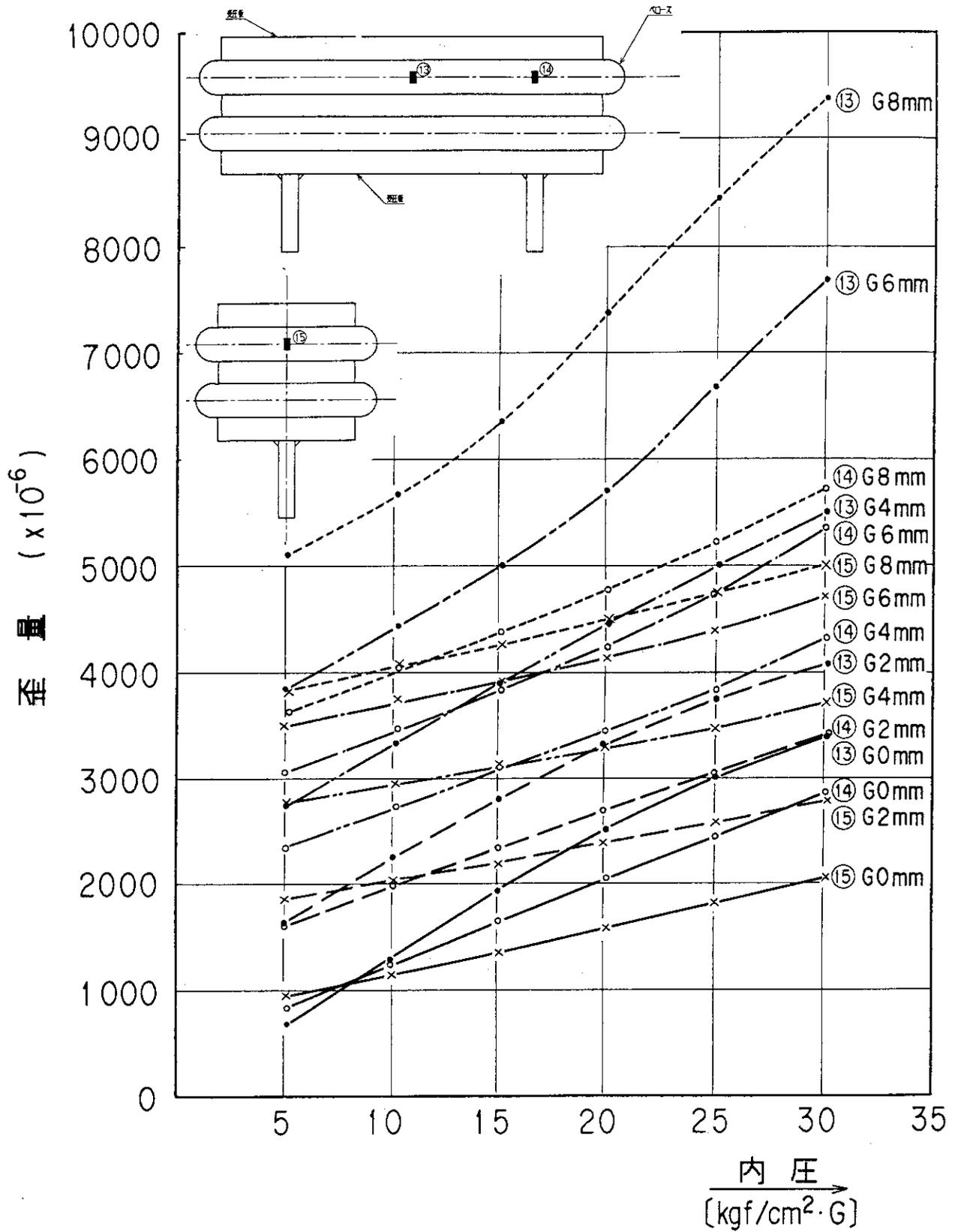
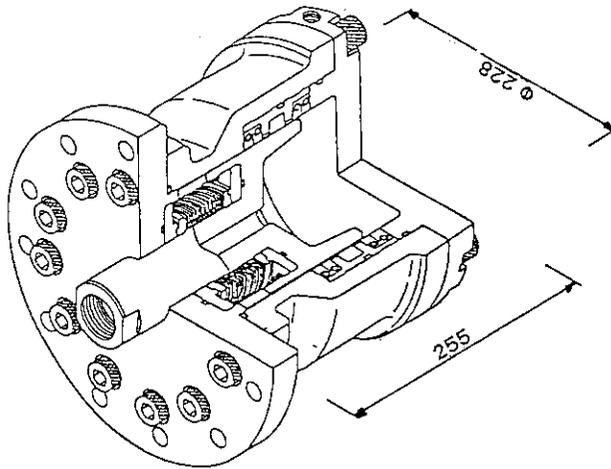


図5. 1-11 フィゴ型駆動機構ベロ部の歪量に及ぼす内圧の影響

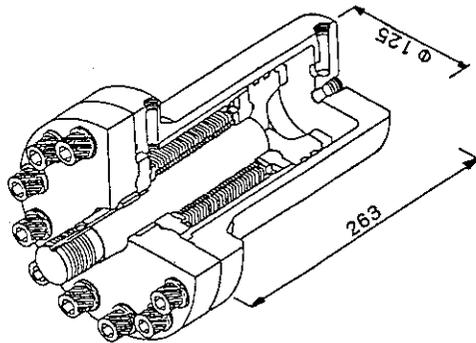


主要諸元	
全長	255 mm
シリンダ径	228 mm
ストローク	25 mm
駆動力	17.7ton

ベローズ	
二重溶接ベローズ	
外径/内径	92.56/65.85mm
板厚	12MIL(0.305mm)
材質	インコネル718

シールリング	
材質	カーボン

大駆動力駆動機構
(ピストン突出状態)

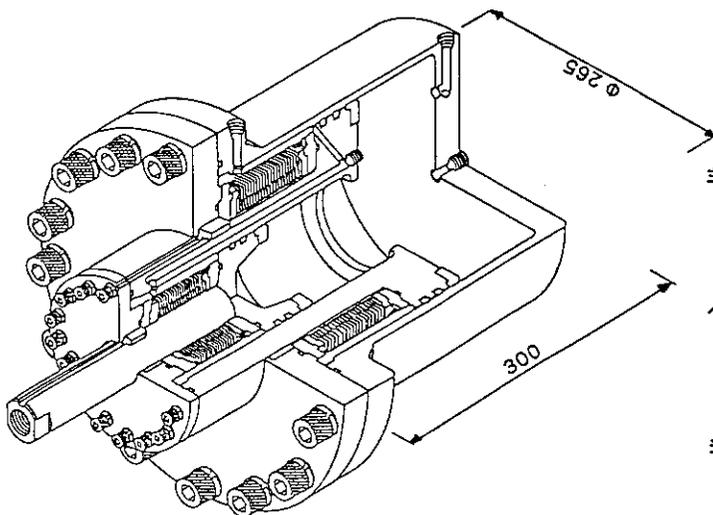


主要諸元	
全長	263mm
シリンダ径	125mm
ストローク	30mm
駆動力	5ton

ベローズ	
二重溶接ベローズ	
外径/内径	69.59/42.87mm
板厚	12MIL(0.305mm)
材質	インコネル718

シールリング	
材質	マンガン青铜

小型駆動機構
(ピストン突出状態)



主要諸元	
全長	300mm
シリンダ径	265mm
ストローク	170mm
駆動力	1ton

ベローズ	
二重溶接ベローズ	
外径/内径	外径 206/166mm 内径 73/43mm
板厚	12MIL(0.305mm)
材質	インコネル718

シールリング	
材質	マンガン青铜

長ストローク型駆動機構 (テレスコピック型)
(ピストン突出状態)

図5. 1-12 ピストン型駆動機構の概念図と仕様

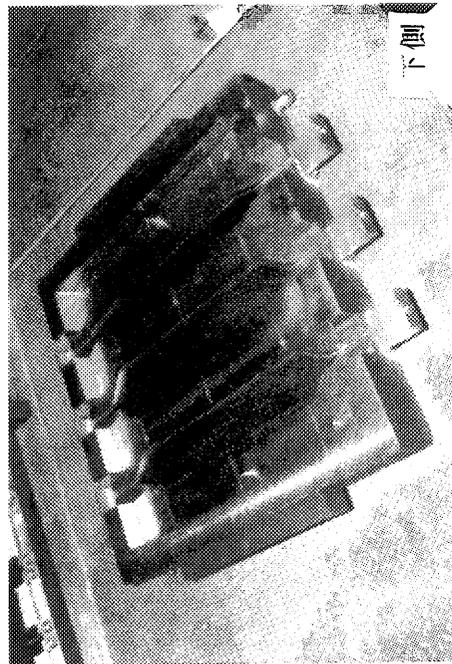
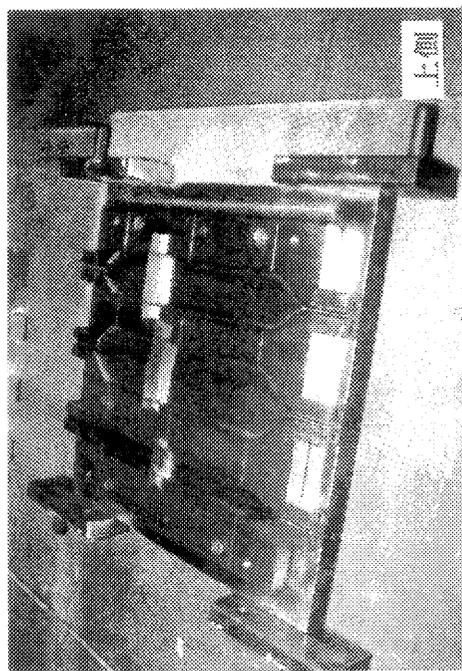
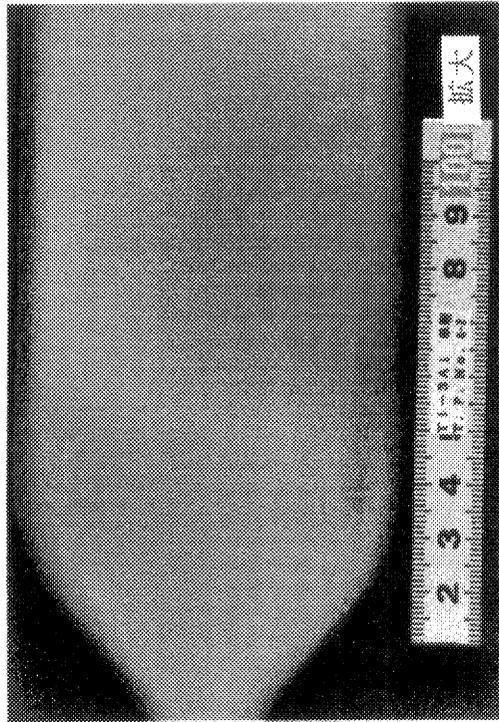
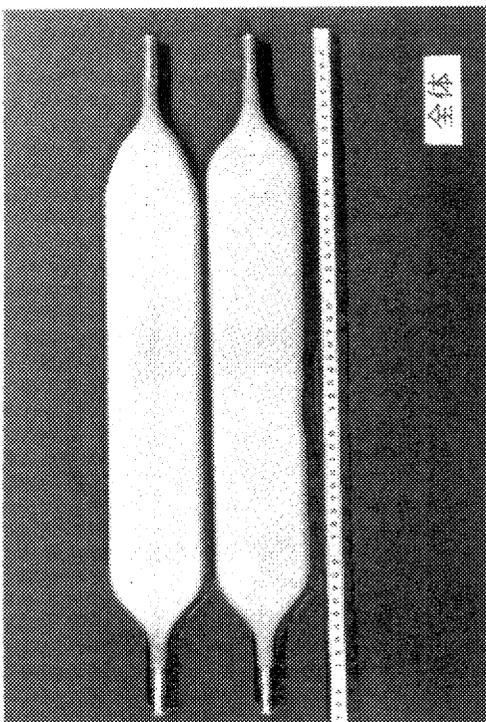


写真5. 1-1 超塑性材熱間成形加工治具

写真5. 1-2 成形された形状可変管

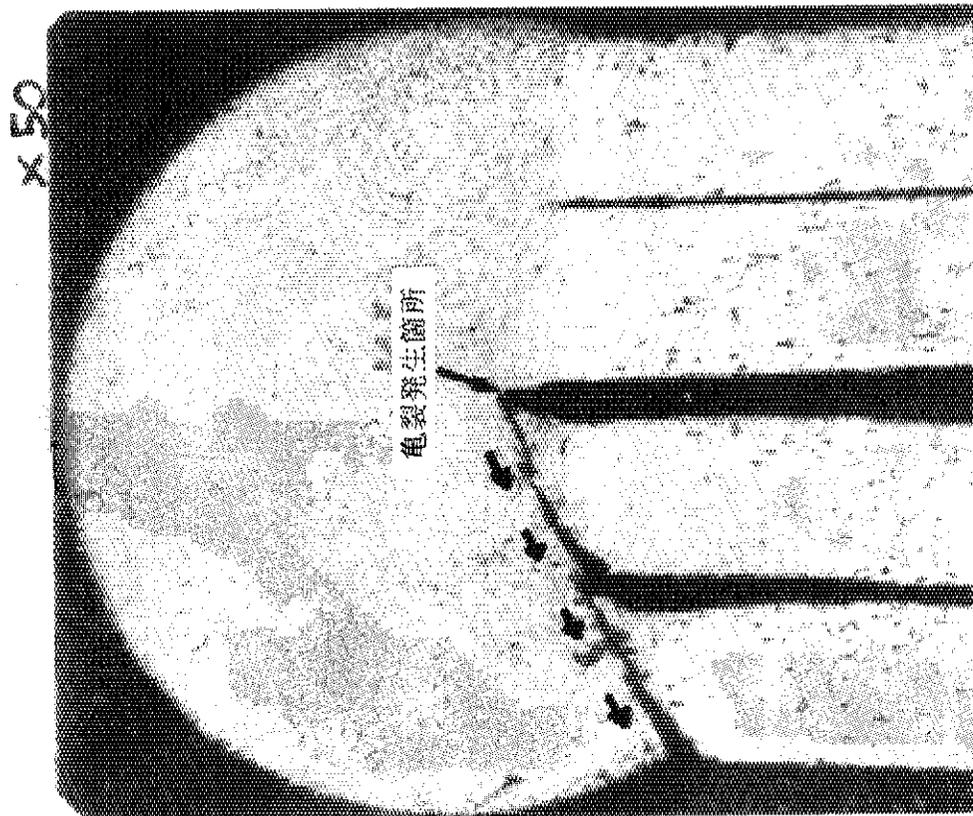


写真5. 1-4 ピストン型駆動機構ペロ一部での疲労亀裂

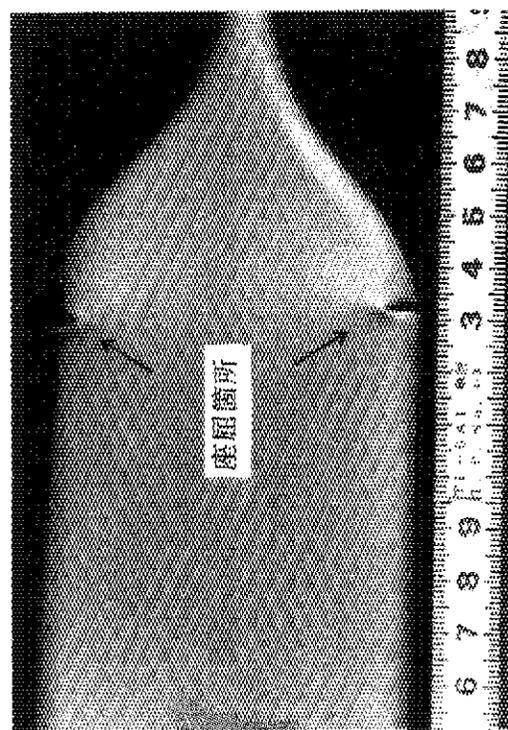


写真5. 1-3 形状可変管の変形による座屈

5.2 絶縁及び導通のためのコーティング技術

トーラス一周抵抗の確保および電磁力低減の要請から炉心構造系各機器間の絶縁施工および導通施工が不可欠となり、各機器に対する表面処理技術の確立が急務となる。処理面積が広大であることを考慮に入れ、被覆膜剥がれが生じにくく、且つ大気中での補修の容易なコーティング方法としてプラズマ溶射法と Jet Kote 法を取り上げた。両者の特徴を以下に記す。

プラズマ溶射法：アーク中に不活性ガス（Ar, He, H₂, N₂ 等）を供給し、プラズマジェットを発生させて、溶射材料を溶融し、高速で母材に連続的に噴射する方法。粒子の噴射速度が約マッハ1と比較的緩やかであるため、母材との親和性の高い溶射材料あるいは高速（高温）では化学的に解離し易い溶射材料などに本方法は適している。

Jet Kote 法：超高速燃焼ガスジェット（プロピレン、エチレン、水素ガス等と酸素）で粉末粒子を加熱すると同時に加速させ、母材に噴射する方法。粒子の噴射速度が約マッハ2と大きいため、高速（高温）でも化学的に解離し難い溶射材料で且つ、母材との親和性の低い溶射材でも本方法によりコーティングが可能である。プラズマ溶射に比べて費用は高くなるが、皮膜特性（硬さ、気孔率など）は優れている。

皮膜材の選定に当たっては、先に述べた母材との親和性と化学的安定性の他に、中性子場においても核変換を起こし難いこと及び摺動性、製作性等も考慮しなければならない。

絶縁皮膜：核変換を起こし難いと言う観点から軽水炉で使用実績のある Al₂O₃ を選定した。

Al₂O₃ は必ずしも化学的に安定でないので、コーティング方法にはプラズマ溶射法を適用した。

導通皮膜：核変換を起こし難いと言う観点及び化学的安定性（特にトリチウムとの非結合性）の観点から Cr₃C₂ を選定した。コーティング方法には Jet Kote 法を採用することによって、母材との親和性の悪さを補うこととした。尚、Cr₃C₂ の摺動性は極めて優れている。

炉心構造機器間に要求される絶縁／導通皮膜の性能として、以下の如く設定した

絶縁皮膜：

雰囲気	：	真空
絶縁耐圧	：	> 1 kV
面積抵抗	：	> 100 Ω cm ²
熱伝導率	：	> 0.1 x t ² W/cm °C (t: 絶縁膜厚み (cm))
耐熱性	：	最高350 °C
密着強度	：	> 50 MPa
耐摩耗性	：	面圧50 MPaにて10000回
耐凝着性	：	350 °C、面圧50 MPaにて凝着しないこと

導通皮膜：

雰囲気	：	真空
面積抵抗	：	$< 0.1 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$
電流密度	：	$> 1 \text{ MA/m}^2$ (200 msec)
熱伝導率	：	$> 0.1 \times t^2 \text{ W/cm}^\circ\text{C}$ (t:導通膜厚み (cm))
耐熱性	：	最高350 °C + 電流によるジュール発熱
密着強度	：	$> 50 \text{ MPa}$
耐摩耗性	：	面圧50 MPaにて10000回
耐凝着性	：	350 °C、面圧50 MPaにて凝着しないこと

皮膜材及びコーティング法の性能試験の項目として、引張試験、熱衝撃試験、曲げ試験、耐電圧試験、電気抵抗測定及び熱物性測定を選定し、実施した。

(i) 引張試験

母材との接着面の強度及びコーティング材自身の強度の測定を目的に表5. 2-1の欄外に示す試験片 ($\phi 25 \times L 40 \text{ mm}$) を用いて、方法はJIS-H 8666により実施した。結果を表5. 2-1に示すが、破断位置を考慮すれば、母材との接着面の強度は概ね 1 kgf/cm^2 以上あり、機器間の通常の接触で剥がれることはない。

(ii) 曲げ試験

表5. 2-2の欄外に示す試験方法 (試験片形状: $150 \times 20 \times 3 \text{ mm}$) で、基材との曲げ角度と、皮膜への亀裂の発生状況と皮膜の基材からの剥離状況を観察する。結果を表5. 2-2に示すが、電磁力等による変形で亀裂の発生及び剥離現象は生じない。

(iii) 熱衝撃試験

室温から液体窒素中に冷却し、皮膜の剥離現象の観察し、結果を表5. 2-3に示す。基材形状は $60 \times 60 \times 3 \text{ mm}$ とした。

(iv) 耐電圧試験

試験方法及び結果を表5. 2-4に示す。いずれの場合も十分な耐電圧特性を有している。

(v) 電気抵抗測定

Al_2O_3 については2端子法、 Cr_3C_2 については4端子法を用いて測定し、結果を表5. 2-5に示す。

(vi) 熱物性測定

熱物性として比熱、熱拡散率及び熱伝導率を測定し、結果を表5. 2-6に示す。

これまでの性能試験結果から実機への適用に際し、特に問題は無いことが判明した。

表 5. 2 - 1 引張試験結果

皮膜の種類	皮膜の厚さ	破断荷重 (kgf)	引張強さ (kgf/mm ²)	破断位置*
Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ : 590 μm	440	0.9	B
	Al ₂ O ₃ : 520 μm	580	1.2	B
	Al ₂ O ₃ : 590 μm	672	1.4	B
Cr ₃ C ₂	125 μm	1100	2.2	C
		950	1.9	C

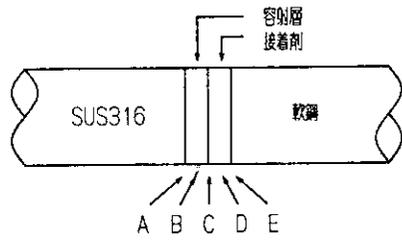


表 5. 2 - 2 曲げ試験結果

皮膜の種類	皮膜の厚さ	割れ発生 曲げ角	剝離角	最終角
Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ : 260 μm	30°	40°	29°
	Al ₂ O ₃ : 580 μm	20°	40°	28°
Cr ₃ C ₂	125 μm	10°	40°	35°
		10°	90°	80°

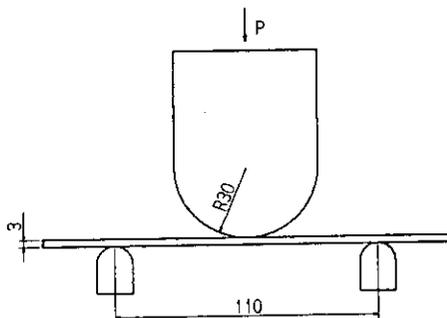


表5.2-3 熱衝撃試験結果

皮膜の種類	皮膜の厚さ	サイクル数	試験片外観
Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ : 200 μm	10	変化なし
	Al ₂ O ₃ : 660 μm	10	変化なし
Cr ₃ C ₂	125 μm	10	変化なし

表5.2-4 耐電圧測定結果

皮膜の種類	皮膜の厚さ	絶縁破壊電圧(V)	備考
Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ : 210 μm	2500	60秒間保持し 電流が1 mA (最低値)未満 であればOK とした。
	Al ₂ O ₃ : 580 μm	>5000	
Cr ₃ C ₂	125 μm	< 200	

表5.2-5 電気抵抗測定結果

皮膜の種類	試験片形状 (mm)	抵抗値 (Ω)	比抵抗 (Ω·cm)
Al ₂ O ₃	φ9.8 x t0.95	4.4 x 10 ⁷	3.5 x 10 ⁸
Cr ₃ C ₂	2.05 x 0.25 x 10	7.0 x 10 ³	7.2 x 10 ⁻⁵

表5.2-6 熱物性測定結果

皮膜の種類	嵩密度 (g/cm ³)	比熱 (J/g°C)	熱拡散率 (cm ² /sec)	熱伝導率 (J/cm·°Csec)
Al ₂ O ₃	3.28	0.823	0.017	0.0465
Cr ₃ C ₂	7.34	0.579	0.033	0.1422

5.3 模型の製作

核融合装置の模型製作が展示用になされることは従来も多く見受けられたが、概念設計の段階から設計活動の一環として、所謂エンジニアリングモデルとして製作されることは殆どなかった。D-T燃焼を実施する核融合実験炉は、従来の水素プラズマを用いた実験装置とは大きく異なり、容器内大型交換機器の設置が必要となり、それに伴う配管の増加と相まって機器間の幾何学的取り合い条件が格段に難しい。従って、図面上のみで設計の不都合を遺漏なく指摘することは極めて難しく、模型製作を通じて設計にフィードバックする手法は、合理的設計活動の点からも充分意義のあることである。

ここでは、12セクターから成るトラス構造体の1セクター分を取り出し、実機の1/5寸法でアクリル材を主体として模型の製作を実施した。

5.3.1 炉本体上部ポート配管模型

炉心構造系の内容器内大型交換機器は、1セクターの中でも多数のモジュールに分割されており、各モジュールはそれぞれ独自の冷却管出入口を有する。それらの出入口はモジュール交換のための炉本体上部ポート領域に局在せざるを得ない。これらの配管構成は4.4節で詳述し、併せて図4.4-2、3に示した。写真5.3-1(A)に製作した炉本体上部ポート配管模型の全体を掲載し、(B)に炉内構造物(可動遮蔽体)の交換に先だって、配管を切断した場面を掲載する。

5.3.2 炉心構造物模型

製作の対象とした機器は、真空容器、固定遮蔽体、可動遮蔽体、ダイバータ板、遮蔽プラグ、ダクト遮蔽体、トロイダル磁場コイル、ソレノイドコイル及び各機器間の支持構造物である。尚、分割/接続の箇所及び、分解/組立の手順は全て実機での考え方を踏襲した。図5.3-1に1セクター分の組上がり概念図を示し、図5.3-2~6に各機器のそれぞれのモジュールもしくは組立ユニットを示す。写真5.3-2に固定遮蔽体を真空容器に挿入した場面を掲載し、写真5.3-3に内側可動遮蔽体挿入後の上部ポートから見た場面を示し、写真5.3-4に外側可動遮蔽体センターモジュール(可動遮蔽体中最後のモジュール)挿入前の炉内の下部領域を示し、写真5.3-5に遮蔽プラグセンターモジュール(このモジュールが挿入されて遮蔽密封が完了)挿入前の上部ポートから見た様子を示し、写真5.3-6にダイバータ板挿入後に排気ダクトから炉内を覗いた様子を示し、写真5.3-7に組立完了の状況を掲載する。

模型の製作、組立を通じて以下の知見を得た。

- (i) 上部ポートの配管の切断/接続のためには簡易着脱継ぎ手の開発が必要である。
- (ii) 真空容器/固定遮蔽は分離型より一体型のほうが製作・分解組立性の面から優れている。
- (iii) 炉内構造物各機器間の隙間は実機では3~5cmは見込む必要がある。

	左	中央	右
遮蔽プラグ			
内側可動遮蔽体			
外側可動遮蔽体			
ダイアータ			

図5. 3-2 容器内交換機器各モジュール概念図

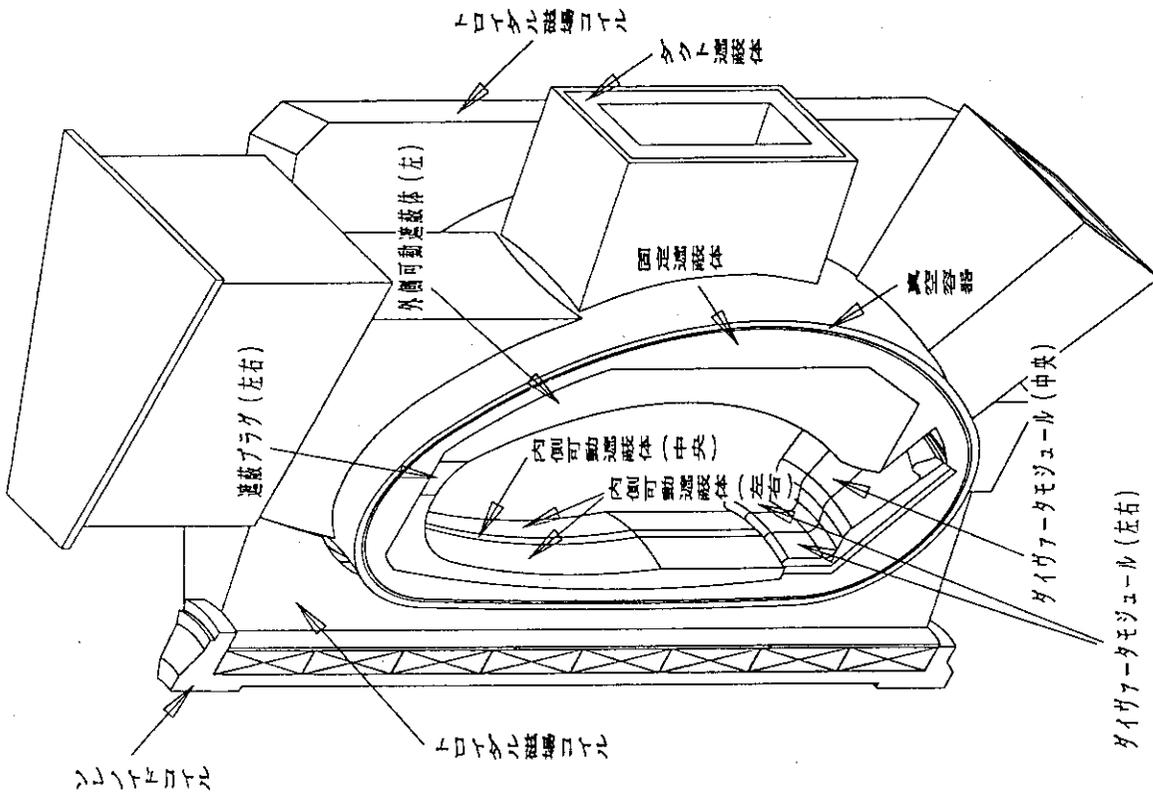


図5. 3-1 FER1セクター組上がり概念図

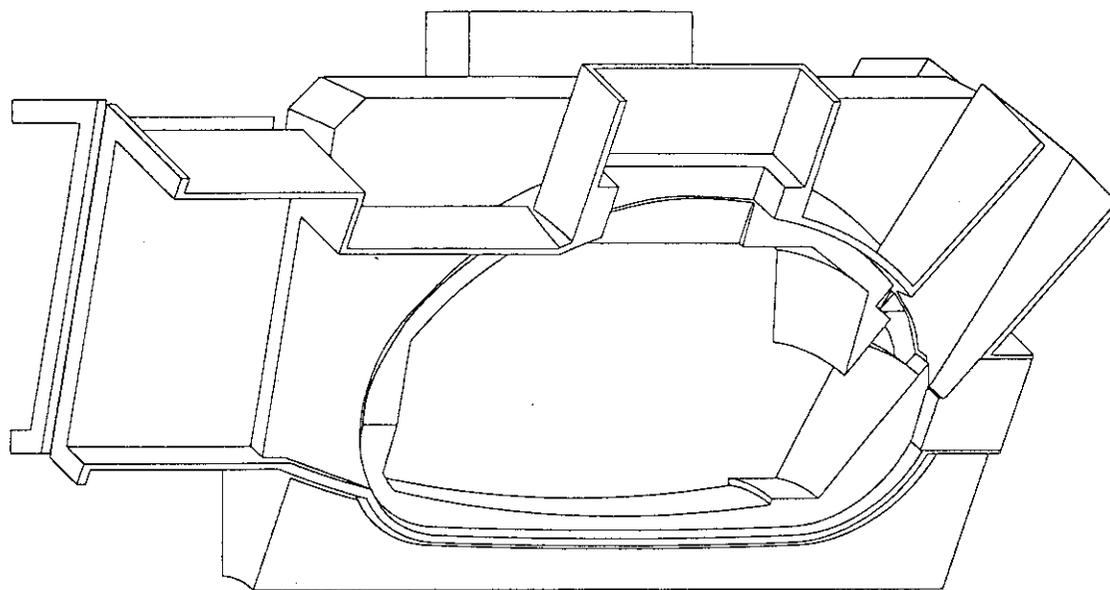


図5.3-4 真空容器／固定遮蔽体大モジュール／TFコイル組立ユニット概念図

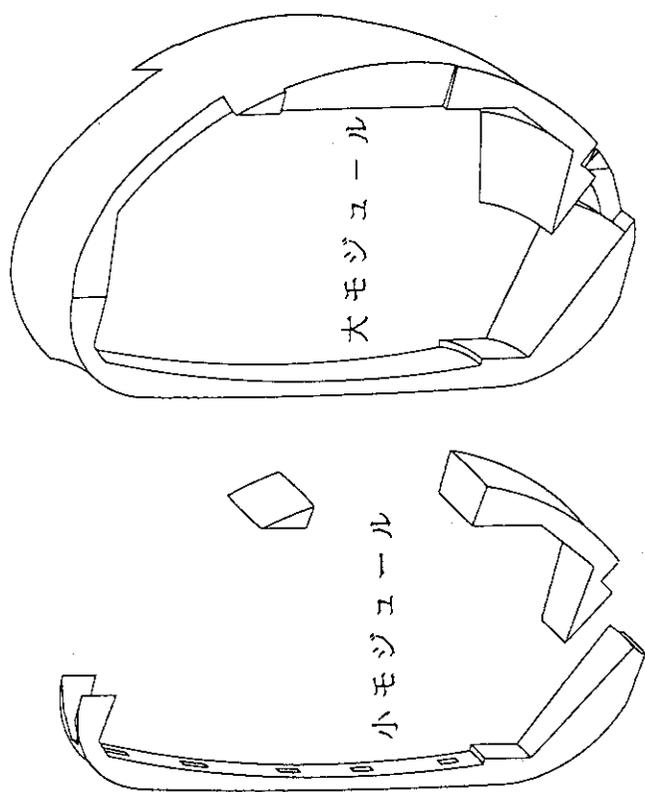


図5.3-3 固定遮蔽体各モジュール概念図

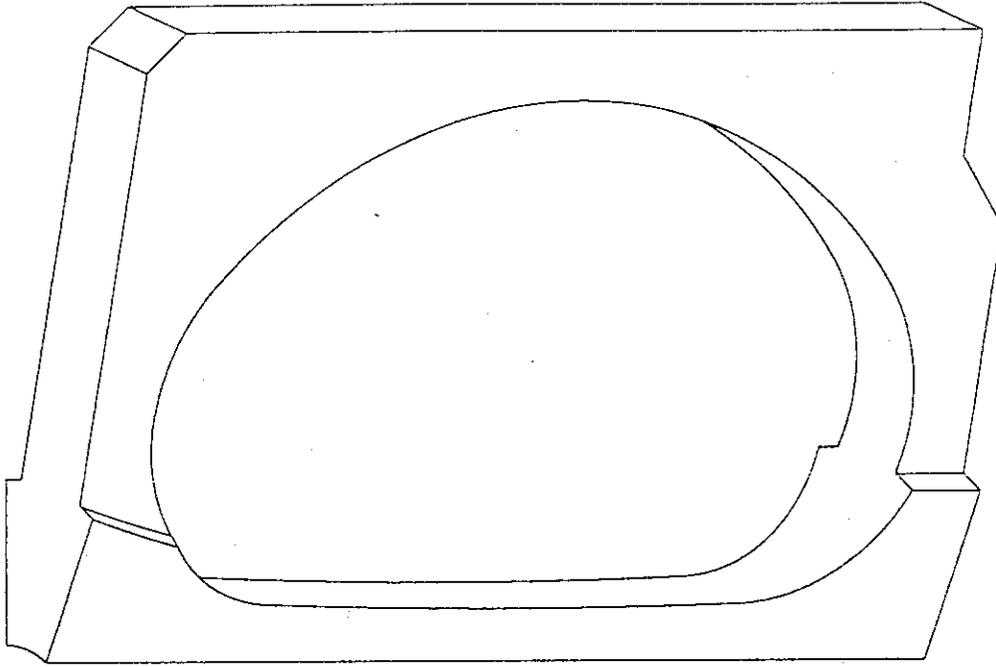


図5.3-6 トロイダル磁場 (TF) コイル概念図

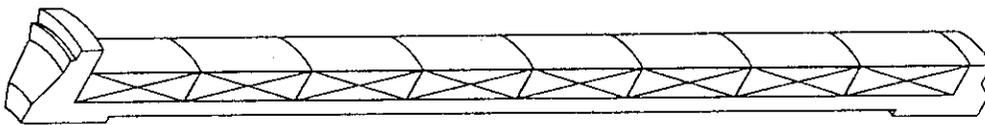
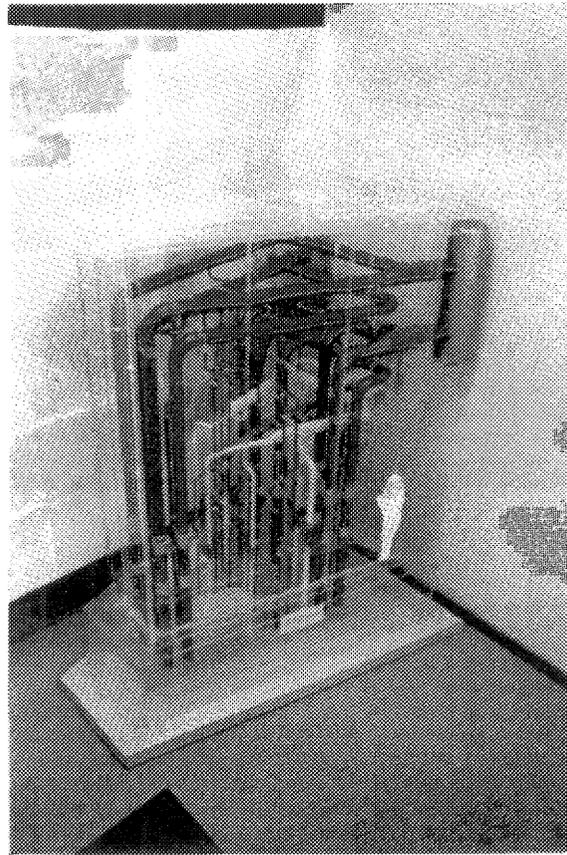
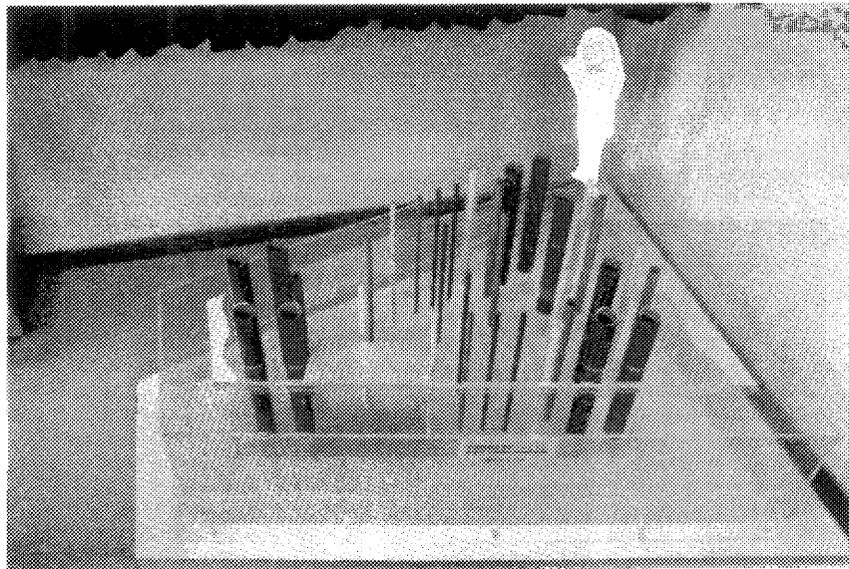


図5.3-5 ソレノイドコイル概念図

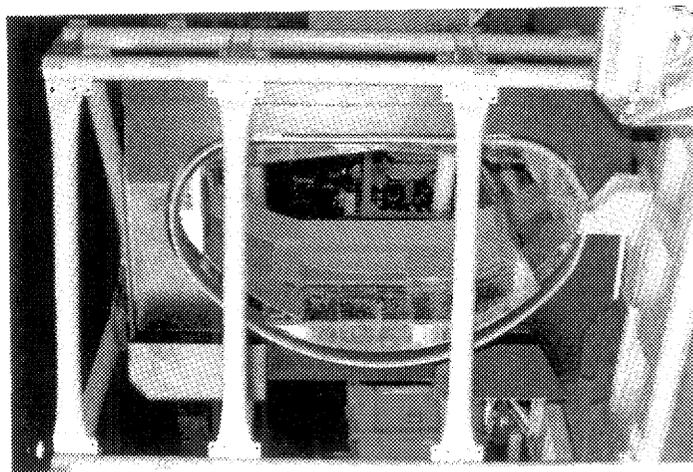


(A) 全体

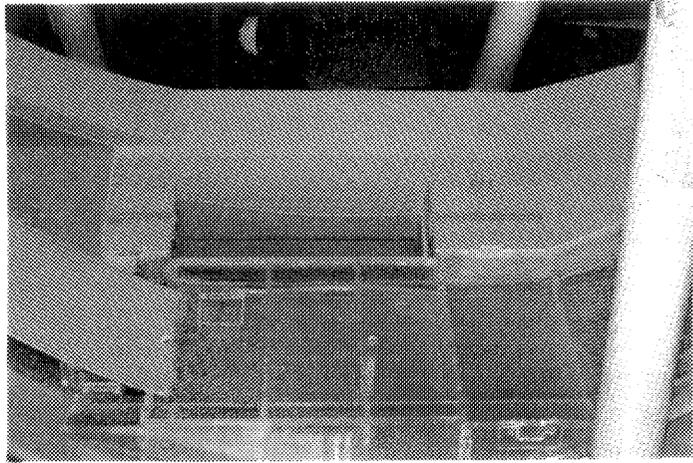


(B) 配管切断後の上部ポート

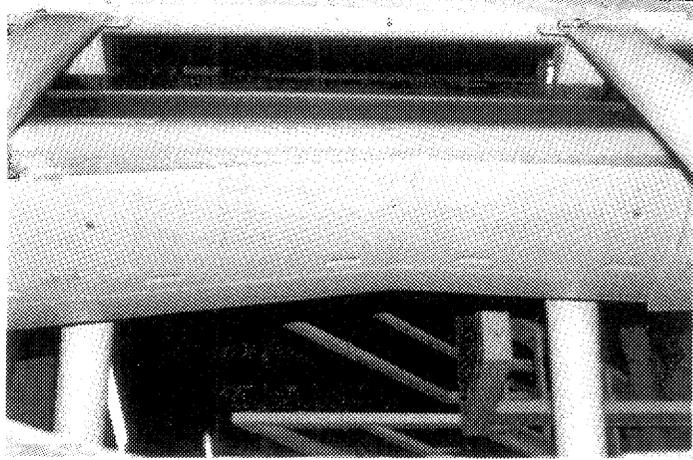
写真5.3-1 炉本体上部ポート配管



(A) 全体



(B) トーラス外側水平ポート付近



(C) トーラス内側

写真5. 3-2 固定遮蔽体小モジュールの組み込み完了

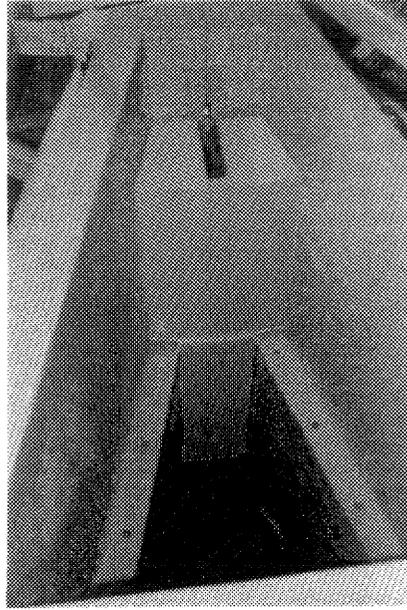


写真5.3-3 内側可動遮蔽体組み込み後の上部ポート

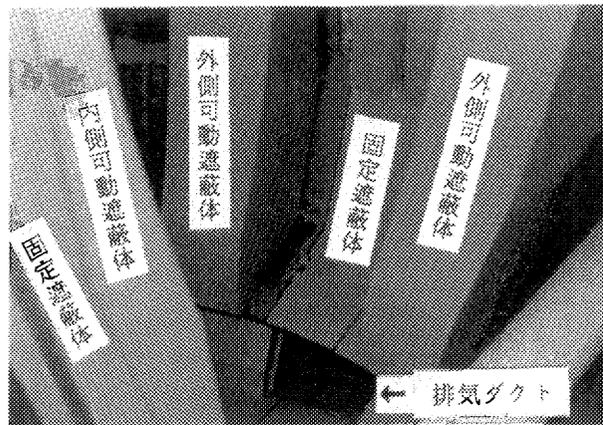


写真5.3-4 外側可動遮蔽体センターモジュール組み込み前の炉内下部

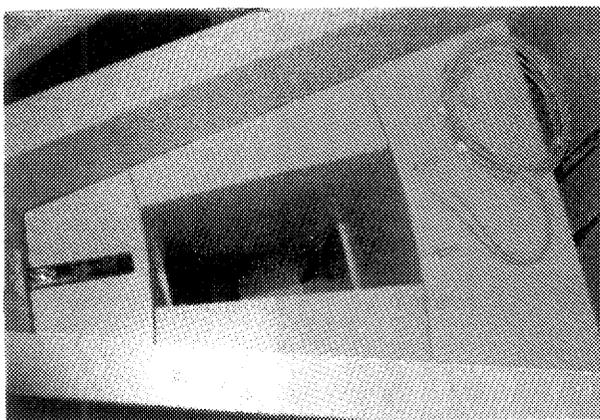


写真5.3-5 遮蔽プラグセンターモジュール組み込み前の上部ポート

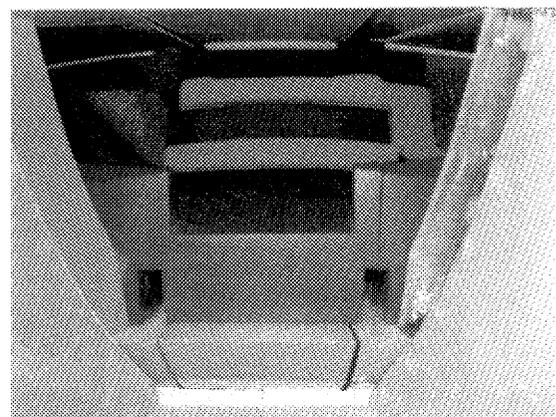
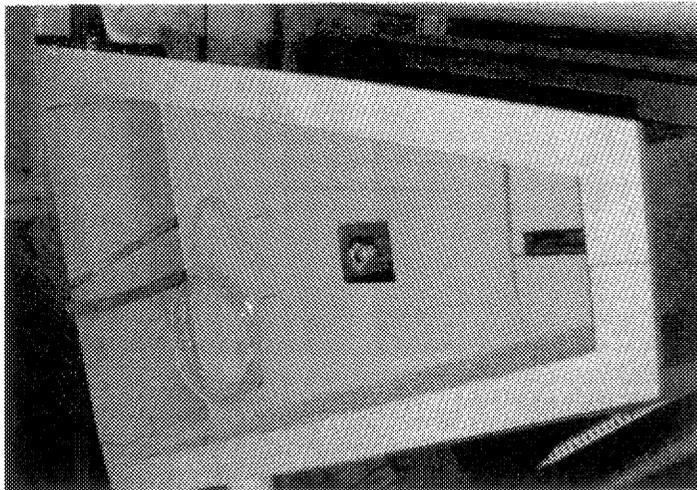
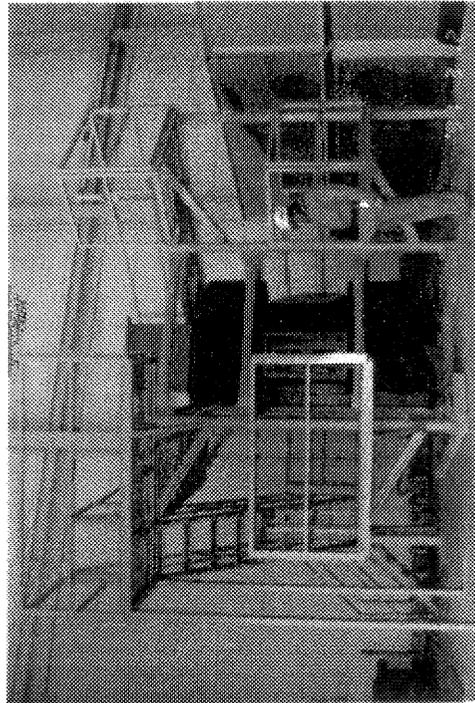


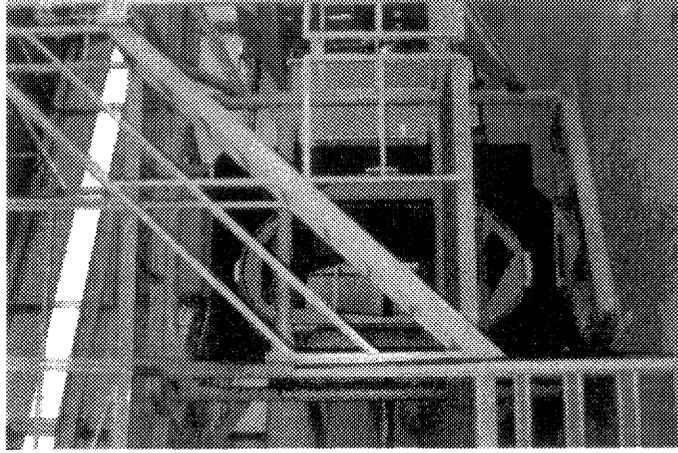
写真5.3-6 ダイバータ板組み込み後の排気ダクト



(A) 上部ポートより



(B) 水平ポート正面より



(C) 側面より

写真5. 3-7 全体組立完了

6. おわりに

核融合実験炉としてのF E Rの炉心構造系に課せられた基本的な設計条件は、将来の動力炉のそれと本質的に変わるものは何もない。従って、F E Rにおける設計検討及び試作開発で得られた成果は、次の実証炉さらには動力炉の設計にとっても充分有益であると考えられる。このような問題意識のもとに、設計上の決定採択事項については、現状で最適と思われる概念の記述のみならず、決定採択の根拠もできるだけ詳しく述べた。併せて、設計条件に変更が加えられた場合あるいは技術の進展に応じて浮上してくる代替概念についても併記した。また、設計検討を具体的に進めるに当たっては、開発すべき技術課題が明確にできることを念頭に置いた。開発すべき技術課題は極めて多岐に渡るが、設計変更の影響を受けず、トカマク炉にとって共通性・普遍性の高い要素技術に高い優先順位を与え、着手した。現在の試作開発の状況は順調に進展しており、実機適用への見通しが得られつつある。

一連の設計検討及びそれを受けて実施した1/5寸法の模型の製作、組立を通じて、今後改善すべき点も幾つか明かとなり、それらの中で主なものを以下に記す。

- (1) 真空容器/固定遮蔽体を現状の分離型から一体型とする。その根拠としては、
 - ・インローキー方式によって固定遮蔽体を高剛性のトラス構造に組み上げることの困難さ、
 - ・真空容器と固定遮蔽体の隙間管理の困難さ及び両者間の支持構造の信頼性への疑問、
 - ・トラス構造体自重支持脚の信頼性への疑問、及び
 - ・固定遮蔽体に設けられている外側可動遮蔽体センターモジュール支持用のキー溝の長さ（水平、垂直両ポート間の狭さに起因）が充分確保されない、等である。
- (2) トロイダル磁場コイルの断面形状を現状の正方形に近い形から可能な限り縦長形状として、コイル間の空間を広くする。その根拠としては、可動遮蔽体及びダイバータ板のサイドモジュールのポート通過部が狭く十分な剛性が確保されない点と共に冷却配管の設置にも困難をきたすこと、である。

謝辞

本報告書を作成するに際し、有意義な助言を頂きました核融合実験炉特別チームの方々には感謝の意を表します。試作開発に労を惜しまれなかった、川崎重工（超塑性加工による形状可変管）、東芝（ピストン型駆動機構）、三菱重工（冷間加工による形状可変管、フィゴ型駆動機構および絶縁/導通コーティング）および日本エンジニアリングモデル（模型）の担当者の方々には格別の謝意を表します。本報告書に掲載している膨大な数におよぶ図面の作成に協力して頂いたCADグループの方々に謝意を表します。また、本研究を進めるにあたり多くの御支援を頂いた松田慎三郎核融合実験炉特別チームリーダーに感謝致します。

6. おわりに

核融合実験炉としてのF E Rの炉心構造系に課せられた基本的な設計条件は、将来の動力炉のそれと本質的に変わるものは何もない。従って、F E Rにおける設計検討及び試作開発で得られた成果は、次の実証炉さらには動力炉の設計にとっても充分有益であると考えられる。このような問題意識のもとに、設計上の決定採択事項については、現状で最適と思われる概念の記述のみならず、決定採択の根拠もできるだけ詳しく述べた。併せて、設計条件に変更が加えられた場合あるいは技術の進展に応じて浮上してくる代替概念についても併記した。また、設計検討を具体的に進めるに当たっては、開発すべき技術課題が明確にできることを念頭に置いた。開発すべき技術課題は極めて多岐に渡るが、設計変更の影響を受けず、トカマク炉にとって共通性・普遍性の高い要素技術に高い優先順位を与え、着手した。現在の試作開発の状況は順調に進展しており、実機適用への見通しが得られつつある。

一連の設計検討及びそれを受けて実施した1/5寸法の模型の製作、組立を通じて、今後改善すべき点も幾つか明かとなり、それらの中で主なものを以下に記す。

- (1) 真空容器/固定遮蔽体を現状の分離型から一体型とする。その根拠としては、
- ・インローキー方式によって固定遮蔽体を高剛性のトラス構造に組み上げることの困難さ、
 - ・真空容器と固定遮蔽体の隙間管理の困難さ及び両者間の支持構造の信頼性への疑問、
 - ・トラス構造体自重支持脚の信頼性への疑問、及び
 - ・固定遮蔽体に設けられている外側可動遮蔽体センターモジュール支持用のキー溝の長さ（水平、垂直両ポート間の狭さに起因）が充分確保されない、等である。
- (2) トロイダル磁場コイルの断面形状を現状の正方形に近い形から可能な限り縦長形状として、コイル間の空間を広くする。その根拠としては、可動遮蔽体及びダイバータ板のサイドモジュールのポート通過部が狭く十分な剛性が確保されない点と共に冷却配管の設置にも困難をきたすこと、である。

謝辞

本報告書を作成するに際し、有意義な助言を頂きました核融合実験炉特別チームの方々には感謝の意を表します。試作開発に労を惜しまれなかった、川崎重工（超塑性加工による形状可変管）、東芝（ピストン型駆動機構）、三菱重工（冷間加工による形状可変管、フィゴ型駆動機構および絶縁/導通コーティング）および日本エンジニアリングモデル（模型）の担当者の方々には格別の謝意を表します。本報告書に掲載している膨大な数におよぶ図面の作成に協力して頂いたC A Dグループの方々に謝意を表します。また、本研究を進めるにあたり多くの御支援を頂いた松田慎三郎核融合実験炉特別チームリーダーに感謝致します。

参考文献

- 1) IAEA, "International Tokamak Reactor Phase Two A Part 1", (1983)
- 2) Department of Large Tokamak Research, "Conceptual Design Study of Fusion Experimental Reactor(FER)", JAERI-M 86-134 (Nov. 1986)
- 3) Fusion Experimental Reactor Team, "Overview of FER", JAERI-M 90-090 (June 1990)
- 4) Private Communication with the ITER Containment Structure Group
- 5) S.Nishio, K.Ueda, et al., "Japanese Contribution to IAEA Workshop Phase Two A Chapter XI : Electromagnetics" JAERI-M 82-177 (1982)
- 6) Y.Gribov, S.Nishio, et al., "Twin Loops for Vertical Control of High Elongated plasma", to be published as ITER Documentation Series, IAEA, (1990)
- 7) M.Yamane, et al., "Passive control of Vertical Instabilities in ITER", ITER Documentation Series, No.4, IAEA, (1989)