

JAERI - M  
83-194

JFT-2M 装置の概要  
—設計・製作・試験—

1983年12月

莊司 昭朗・小田島和男・森 雅博・鈴木 紀男  
松崎 誠・谷 孝志・横倉 賢治・菊池 一夫  
長谷川浩一・岡野 文範・石堀 郁夫・樺村 隆則  
柏 好敏・梶沢 稔・的場 徹・船橋 昭昌  
田中 裕二・鈴木喜八郎・国枝 俊介・太田 完治\*  
柳沢 一郎\*\*木村 晴行・松本 宏・松田 俊明  
小川 俊英・川島 寿人・河西 敏・三浦 幸俊  
上杉 喜彦・小川 宏明・河上 知秀・山内 俊彦  
星野 克道・山本 巧・山本 新・前野 勝樹  
仙石 盛夫・大塚 英男

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、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）で複写による実費領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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 いばらき印刷株

JFT-2M 装置の概要  
—設計・製作・試験—

日本原子力研究所 東海研究所核融合研究部

莊司 昭朗・小田島和男・森 雅博・鈴木 紀男  
松崎 誠・谷 孝志・横倉賢治<sup>+</sup>・菊池 一夫  
長谷川浩一・岡野 文範・石堀 郁夫・樋村 隆則  
柏 好敏・桃沢 稔・的場 徹・船橋昭昌<sup>++</sup>  
田中 裕二・鈴木喜八郎・国枝 俊介・太田完治<sup>\*</sup>  
柳沢一郎\*\*・木村 晴行・松本 宏・松田 俊明  
小川 俊英・川島 寿人・河西 敏・三浦 幸俊  
上杉 喜彦・小川 宏明・河上 知秀・山内 俊彦  
星野 克道・山本 巧・山本 新・前野 勝樹  
仙石 盛夫・大塚 英男

(1983年10月22日受理)

JFT-2M 装置の設計・製作・試験時に経験した種々の検討事項をもとにして、装置の概要を述べる。JFT-2M 装置は、軸対称単純化ダイバータを備えた非円形高ベータプラズマを閉じ込めるトカマク型装置である。この装置の研究目的はトカマク炉心の高性能化、単純化に関する開発研究、例えば非円形高ベータプラズマのハイブリッド制御、安定な低  $q$  放電、INTOR 型ダイバータ試験、高温プラズマでのイオンサイクロトロン共鳴加熱、低域混成共鳴加熱による電流駆動効率の向上等を行うことである。

+ 大型トカマク開発部

++ 核融合計画室

\* 外来研究員；三菱電機(株)

\*\* 外来研究員；三菱原子力工業(株)

An Outline of the JFT-2M Device  
— Design, Construction, Test —

Teruaki SHOJI, Kazuo ODAJIMA, Masahiro MORI, Norio SUZUKI  
Yoshimi MATSUZAKI, Takashi TANI, Kenji YOKOKURA<sup>+</sup>, Kazuo KIKUCHI  
Koichi HASEGAWA, Fuminori OKANO, Ikuo ISHIBORI, Takanori KASHIMURA  
Yoshitoshi KASHIWA, Minoru KAZAWA, Toru MATOBA, Akimasa FUNAHASHI<sup>++</sup>  
Yuji TANAKA, Kihachiro SUZUKI, Toshisuke KUNIEDA, Kanji OHTA<sup>\*</sup>  
Ichiro YANAGISAWA<sup>\*\*</sup>, Haruyuki KIMURA, Hiroshi MATSUMOTO, Toshiaki MATSUDA  
Toshihide OGAWA, Hisato KAWASHIMA, Satoshi KASAI, Yukitoshi MIURA  
Yoshihiko UESUGI, Hiroaki OGAWA, Tomohide KAWAKAMI, Yoshihiko YAMAUCHI  
Katsumichi HOSHINO, Takumi YAMAMOTO, Shin YAMAMOTO, Masaki MAENO  
Seio SENGOKU and Hideo OHTSUKA

Department of Thermonuclear Fusion Research,

Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 22, 1983)

The JFT-2M device in JAERI is described, including design studies and preparatory experiments. It is a tokamak device with non-circular cross section capable of high- $\beta$  operation with an axisymmetric simple divertor.

The device is used to study the following issues : 1) hybrid control of noncircular high- $\beta$  Plasma, 2) stable low q discharge, 3) INTOR-type simple divertor, 4) ICRF heating in high temperature plasma, and 5) current sustain by LHRH.

Keywords: JFT-2M, High- $\beta$ , Hybrid Control, Tokamak, Magnetic Limiter, Low-q, ICRF , Design, Construction, Experiments

---

+ Department of Large Tokamak Development, Tokai, JAERI

++ Office of Planning, JAERI

\* On leave from Mitsubishi Electric Co.

\*\* On leave from Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

## 目 次

1. 序 論.....	1
2. 研究計画と設計方針.....	2
2.1 JFT-2M計画.....	2
2.2 JFT-2Mの設計方針.....	5
2.3 全体構成.....	11
3. 本 体.....	15
3.1 概 要.....	15
3.2 真空容器.....	19
3.3 真空容器内部品.....	46
3.4 磁気的検出器.....	64
3.5 トロイダル磁場コイル (TFコイル) .....	76
3.6 ポロイダル磁場コイル (PFコイル) .....	94
3.7 変流器用鉄心.....	121
3.8 架 台.....	131
4. 電源と制御.....	137
4.1 トロイダル電源.....	137
4.2 ポロイダル電源.....	140
4.3 プラズマ制御系.....	158
5. 運転制御設備.....	177
5.1 概 要.....	177
5.2 運転指令.....	177
5.3 放電運転.....	180
5.4 JFT-2Mの安全対策 .....	189
5.5 データの収集, 表示, 記録.....	194
5.6 補機電源.....	200
5.7 受電設備.....	204
6. 本体周辺設備.....	209
6.1 真空排気設備.....	209
6.2 冷却設備.....	217
6.3 ガス導入設備.....	225
6.4 予備電離設備.....	233
7. 総 括.....	238

## CONTENTS

1.	Introduction .....	1
2.	Research Program and Design Policy .....	2
2.1	JFT-2M program .....	2
2.2	Design policy .....	5
2.3	Components of JFT-2M .....	11
3.	JFT-2M Machine .....	15
3.1	Outline .....	15
3.2	Vacuum chamber .....	19
3.3	Auxiliary components of vacuum chamber .....	46
3.4	Magnetic probes .....	64
3.5	Toroidal field coils .....	76
3.6	Poloidal field coils .....	94
3.7	Iron core .....	121
3.8	Basic plate structure .....	131
4.	Power Supply and Control .....	137
4.1	Toroidal power supply .....	137
4.2	Poloidal power supply .....	140
4.3	Plasma control system .....	158
5.	Control System for Operation .....	177
5.1	Outline .....	177
5.2	Operational commands .....	177
5.3	Discharge operation .....	180
5.4	Safety system .....	189
5.5	Data records .....	194
5.6	Auxiliary power supply .....	200
5.7	Power center .....	204
6.	Auxiliary Subsystems of the Machine .....	209
6.1	Vacuum pumping system .....	209
6.2	Cooling system .....	217
6.3	Gas feed system .....	225
6.4	Preionization system .....	233
7.	Conclusion .....	238

## 1. 序 論

原研では、トカマク型核融合装置の効率化の観点から、非円型断面によるベータ値向上、およびダイバータ効果に関する実験研究を、高温プラズマ領域で行うために、JT-4 計画の検討を昭和 53 年まで進めてきた。<sup>(1)</sup> しかしながら、当時の研究動向を考え合わせて同計画は米国ダブレット III 計画への参加と JT-4 より小型の JFT-2M によってより有効に進めることになった。  
 (昭和 53 年 11 月、核融合会議、企画小委員会)

上記計画に基づき、昭和 53 年度末から JFT-2M の予備設計を開始した。予備設計においては、既説品との調和を含む全体設計に重点をおいた。54 年度には、JFT-2M の主追加熱を中性粒子入射加熱からイオンサイクロotron 周波数 (ICRF) 加熱に変更するとともに、真空容器分割部、ハイブリッド制御、ICRF 加熱等のいくつかの重点項目を中心に詳細設計を行った。ひきつづき、55 年度には、次年度に発注が予想された JFT-2M トカマク本体を中心に行最終的な調整設計を行った。

以上の設計検討をもとに、56 年度からは「高性能トカマク開発試験装置 (JFT-2M)」のトロイダル磁場コイルの製作を開始した。57 年にはトロイダルコイル以外の本体部分および既設設備の改造を開始し、58 年 4 月にプラズマ電流 300 kA の円型プラズマを生成するための工事を完了した。

装置の完成後、ただちに初期実験を開始し、現在実験を行っている。

上記以外の部分の製作に関しては、高周波加熱と計測部分については 58 年度から製作を開始しており、また非円型プラズマ生成用電源については 59 年度に製作の予定である。

JFT-2M 装置の研究目的はトカマク炉心の高性能化、単純化に関する開発研究、即ち、非円型高ベータプラズマのハイブリッド制御、安定な低  $q$  放電、INTOR 型ダイバータ試験、高温プラズマへの ICRF 加熱、低域混成共鳴加熱による電流駆動効率の向上等を行うことである。

## 2. 研究計画と設計方針

### 2.1 JFT-2M計画

JFT-2M計画の研究目標は、一言でいえば「トカマク装置の最適化」と表現できる。JT-60による臨界プラズマ条件達成によって、核融合が科学的に実証された後、次期装置は核融合の技術的実証の役割を担うことになると予想される。これについてはINTORの設計等国際的にも設計検討が積極的に進行している。そこでは、炉心プラズマは炉を構成する要素の一つとして、他の要素との共存性を経済性の面からも保たなければならない。このようなシステムとしての最適化を炉心プラズマの立場から行なうことによって、他の要素の機器設計条件を緩和することが期待される。次期装置建設の上で、コストの低減、建設期間の短縮等をはかることは重要である。

INTORや核融合実験炉(FER)の設計等から、炉心プラズマへの各種の要求が提出されている。これに応えるための創意工夫に富む斬新的な試みを、機動力をもって行なうためには、装置の最適規模というものが存在する。この立場から、JFT-2Mトカマクの寸法は主半径1.31m、プラズマ半径 $0.35 \times 0.53$ mのD型断面、プラズマ体積約4m<sup>3</sup>とした。

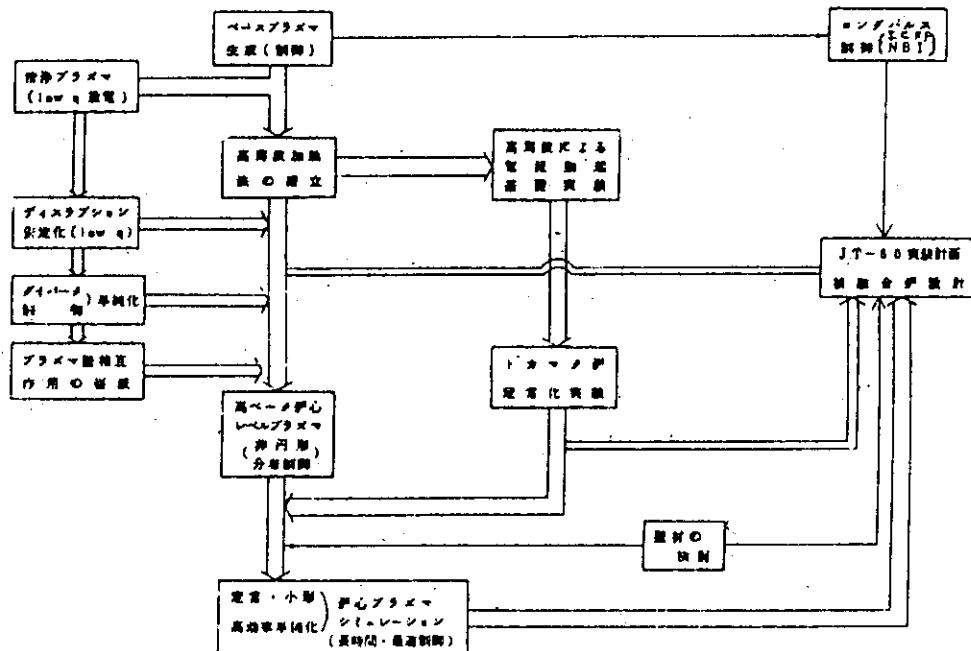
JFT-2M計画で実施を予定している実験課題は以下の通りである。

- (1) イオンサイクロotron周波数帯(ICRF)加熱を中心として、プラズマの径分布制御機能を有する最適加熱系を構成する。これによってトカマクプラズマ第二段の加熱の低コスト化及び簡素化を図る。
- (2) トカマク炉を定常運転するために、高周波加熱を応用し、プラズマの電流駆動及び立上げ技術を確立する。さらに、プラズマのディスラプション制御と併せて、安全な低q放電、トカマクの長時間運転のための技術を確立する。これによって、炉の構造材の熱疲労や、超電導コイルの磁束変化耐力の基準の大巾な緩和を目指す。
- (3) 温度1000万度以上の高ベータ・プラズマの不純物対策を確立する。このために、合理的な軽元素第一壁材料の選択、プラズマ中の不純物集中をさけるための選択的不純物排出策を工夫する。これによって、核融合炉の燃焼制御に対する見通しがえられるものと期待される。
- (4) 将来の炉で必要となる燃料給排気システムと両立する周辺プラズマ制御技術を開発する。これらは各種のダイバーター、リミタ、ペレット入射等の組合せ技術として実現されることが予想されるが、その結果、プラズマと第一壁の相互作用が軽減され、長寿命の炉を構成できることが期待される。
- (5) プラズマ形状及び分布制御の最適化を行った上で、効率よくプラズマを高ベータ化する。プラズマ断面はいずれにしてもD型に近いものとなるが、このための磁場制御法を確立する。特に非円形断面を造くする場合の、磁場コイル及び電源構成の簡素化を行うため、プラズマ平衡位置、橢円成分変形及び三角形成分変形の機能をハイブリッド化して、単純なコイル配置によってこれを実現する。プラズマの高ベータ化は炉を小型化することを可能とする。

研究計画のフローチャートを第 2.1-1 表に示す。

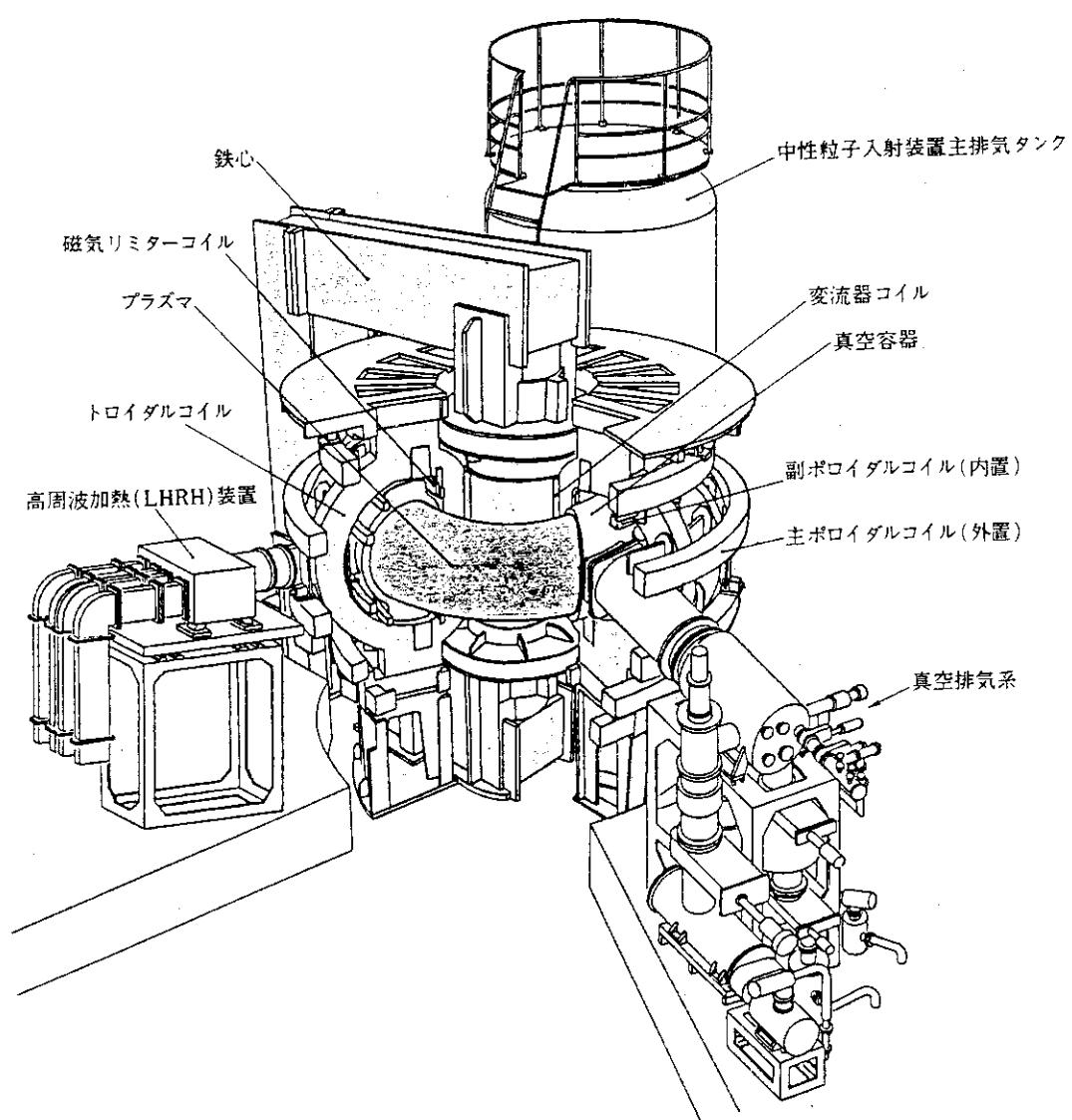
また、JFT-2M の鳥瞰図を第 2.1-1 図に、主要パラメーターを第 2.1-2 表に示す。

第 2.1-1 表 JFT-2M 実験計画



第 2.1-2 JFT-2M の主要パラメータ

項目	数値	
主断面積	R (m)	1.31
断面積	2a (m)	0.7
断面積	2b (m)	1.06
非円形度		1.7
トロイダル磁場	Bt (T)	1.5
変流器磁束	(V.S.)	2
第二段加熱		
(MW)	ICRF	4
	NBI	2
	LHRH	1
プラズマ電流	(MA)	0.5
Bt フラットトップ	(s)	0.5 ~ 1
プラズマ温度	(keV)	3 ~ 4
プラズマ密度	(cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>14</sup>
エネルギー閉込め時間	(s)	~ 0.05
ベータ値		~ 5 %



第 2.1-1 図 JFT-2M 鳥瞰図

## 2.2 JFT-2Mの設計方針

上記のような研究を行うための JFT-2M トカマク装置の設計の基本方針を以下に述べる。(構成については次節参照)

### (1) 装置規模

- ICRF の有効性を炉心プラズマに外挿するために 3 ~ 4 keV のプラズマが必要。
- 単純化ダイバータの組み込み空間の確保。
- 真空内構造物 (高周波ループアンテナ, ダイバータスロートリミタ, 第一壁材等) の容易な交換改良を行うまでの容器内作業空間の確保 (人が入れる。)

JFT-2M のポロイダル断面図を第 2.1-1 図に示す。

### (2) 真空容器

- シェル効果を出すため厚肉構造とする (25 mm 厚, 時定数 ~ 7 msec)。
- D 型形状, ブレイク方式 (組立て用引き抜き構造)。
- ベーキングは 120 °C (ヒーター方式) とし, TDC 放電洗浄を行なう。
- ポートは作業性から, 押えボルト方式, 中空 O リングは作業性から, 押えボルト方式, 中空 O リングシール (バイトン交換可) とし, 大きなポートを確保する。
- 単純化ダイバータを可能とする。
- リミター等は Low Z 材を基本とする。

### (3) トロイダル磁場コイル (TF コイル)

- 製作の容易性のため一様矩形断面とする。
- 非分割で, 直線と円弧からなる単純 D 型形状とする。
- 3 並列 1 素線として巻き易くする。
- 鉄心空間の確保できる向心力支持方式とする。
- 既存 MG (20 MW) を利用して装置規模の要請を実現するため低電流密度設計とする (~ 18 A/mm<sup>2</sup>)。従って, 温度上昇は低い。このことは将来の電源増力時 (Phase 2) において, 約 4 T を実現することと協調する。
- 真空容器を大きくとっているので, リップルは比較的大きい。

### (4) ポロイダル磁場コイル (PF コイル)

- 主コイルは TF コイルの外側に配置し, ハイブリッド制御を行う。(第 2.2-1 図)
- 電源節約のため, 一部 TF コイル内側にも配置し, コイルの電流密度を比較的小さくとる (15 ~ 25 A/mm<sup>2</sup>)。
- タップを設けて, プラズマ形状の自由度を大きくする。
- 不使用コイルを上下並列結線し, パッシブ効果を可能にする (特に, 上下不安定性に対して)。
- 鉄心の局所飽和及び洩れ磁場を小さくするため, OH コイルを一様に巻く。<sup>(2)</sup>
- 低 q 時ディスラプションによるサージ電圧に耐えること。
- 主コイルは, Phase 2 において, 規定格の 3 倍の電流が可能のこと。

### (5) 変流器鉄心

- 空間の節約のため片脚鉄とする ( $\sim 900 \phi$ ,  $2 \text{ V} \cdot \text{sec}$ )
- 組立ての容易なバット接合方式とする。
- 漏れ磁場の特性を十分に把握しておく。

## (6) 架台

- 上下ポート部がなるべく大きく貫通できる構造とする。

## (7) トロイダル電源

- 既設MGを利用する (1.7 kV, 12 kV, 20 MW, 200 MJ)

## (8) ポロイダル電源

- サイリスタ容量節約のため立上時は既設コンデンサを利用する。
- 遮断方式にしない場合には、統一電源方式はプラズマ加熱時にインバータ運転の範囲が広くなり不利になるので、分離電源ハイブリッド制御方式とする。
- フィードフォワードおよび微分制御が行えること。
- 加熱停止後の立下げ特性に追ついさせるため、位置制御電源は環流方式とする。

## (9) プラズマ制御系

- アナログ演算制御とする (目標制御時定数 5 msec)
- 等フラックス制御を基本とする。
- プラズマ中心もモニターできるようにする。
- 垂直および水平制御を混成して制御する。
- 高周波雑音に強い光転送方式とする。
- デジタルコンピューターでプリプロ波形を設定する。

## (10) 運転制御設備

- ハードウェア方式で単純明解な制御系とする。

## (11) 真空排気設備

- 約  $3 \times 10^5 \text{ Torr} \cdot \ell/\text{sec}$  の放出ガスに対応しうること。

## (12) 冷却設備

- 約  $5 \times 10^5 \text{ kcal}/\text{hr}$  の除熱能力をもつ。

## (13) ガス導入系

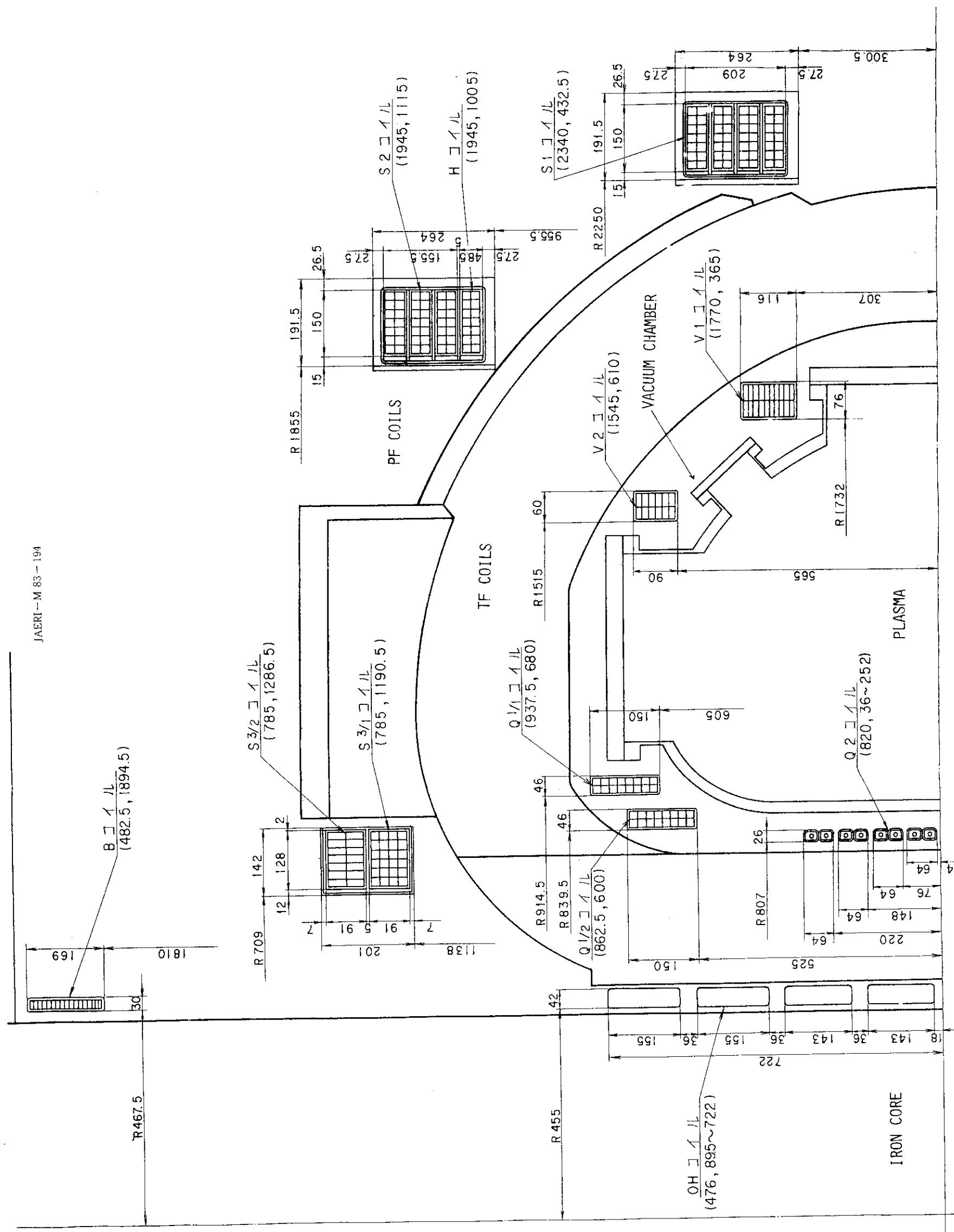
- 100 Torr  $\cdot \ell/\text{sec}$  のガス流入を可能とする。

## (14) 予備電離

- 10 ~ 30 V のブレイクダウン電圧でプラズマが得られること。

## (通電条件)

設計上の定格通電条件を第 2.2-1 表に示す。また円形および D 型形状のプラズマ平衡例を第 2.2-2 図に示す。



第2.2-1図 JFT-2M ポロイダル断面図

第2.2-1表 パルス放電モードにおけるコイルの  
結線モードおよび励磁AT条件

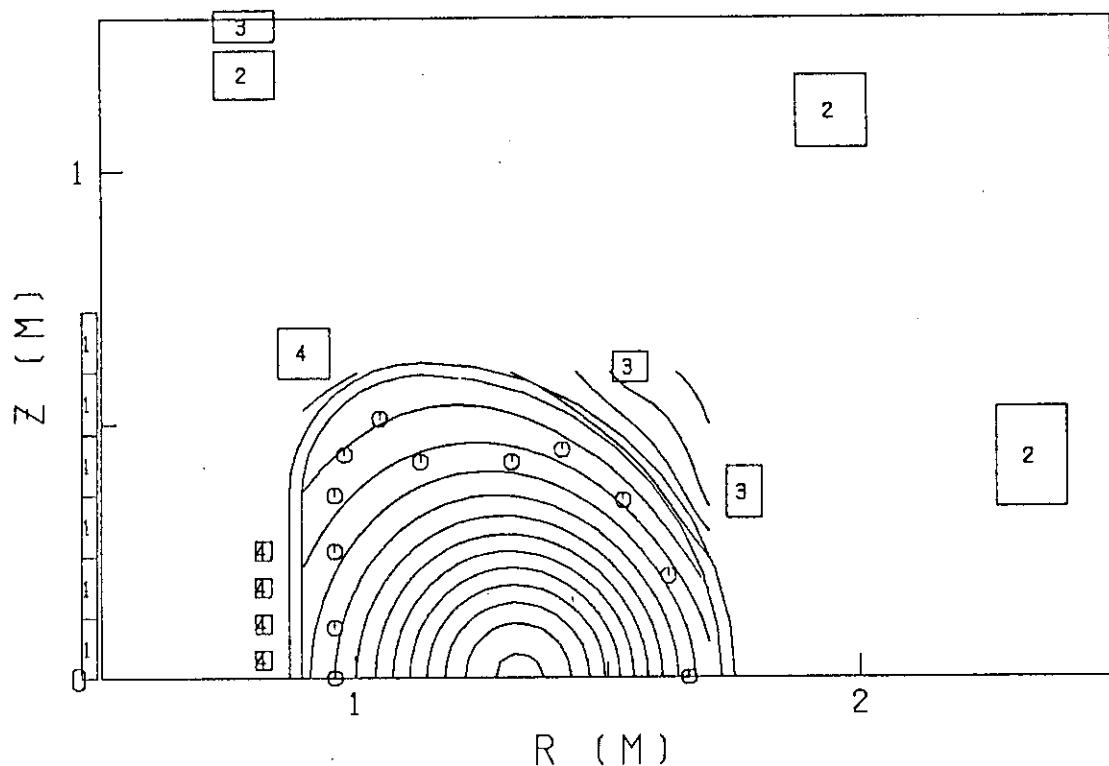
項目 コイル名	励磁電流 (kA), ターン数, 励磁AT (KAT)							
	M1				M2			
	円	楕 円	D 1型	D 2型	円	楕 円	D 1型	D 2型
OH	2.46 × (-21) × 2 ⊕ [51.66] × 2 ⊕	2.5 × (-42) × 2 [−146.16]	3.48 × (-42) × 2 [−146.16] × 2	3.48 × (-42) × 2 [−146.16] × 2	2.46 × (-21) × 2 [−51.66] × 2	2.5 × (-42) × 2 [−105] × 2	3.48 × (-42) × 2 [−146.16]	3.48 × (-42) × 2 [−146.16]
S1	3.86 × (-14) × 2 [-54.04] × 2	3.42 × (-56) × 2 [-191.52] × 2	3.2 × (-56) × 2 [-179.2] × 2	3.2 × (-56) × 2 [-179.2] × 2	3.86 × (-14) × 2 [-54.04] × 2	3.42 × (-56) × 2 [-191.52] × 2	3.2 × (-56) × 2 [-179.2] × 2	3.2 × (-56) × 2 [-179.2] × 2
S2	3.86 × (-42) × 2 [-162.12] × 2	3.42 × (-21) × 2 [71.82] × 2	3.2 × (-21) × 2 [−67.2] × 2	-	3.86 × (-42) × 2 [-162.12] × 2	3.42 × (-21) × 2 [71.82] × 2	3.2 × (-21) × 2 [−67.2] × 2	-
S3/1	3.86 × (24) × 2 [92.64] × 2	-	3.2 × (18) × 2 [57.6] × 2	3.2 × (6) × 2 [19.2] × 2	3.86 × (12) × 2 [92.64] × 2	3.42 × (12) × 2 [−82.08] × 2	3.2 × (24) × 2 [76.8] × 2	3.2 × (-24) × 2 [−76.8] × 2
V1	4.75 × (-6) × 2 [-28.5] × 2	4.54 × (-10) × 2 [-45.4] × 2	5.475 × (-10) × 2 [-54.75] × 2	5.475 × (-10) × 2 [-54.75] × 2	4.75 × (-6) × 2 [-28.5] × 2	4.54 × (-10) × 2 [-45.4] × 2	5.475 × (-10) × 2 [-54.75] × 2	5.475 × (-10) × 2 [-54.75] × 2
V2	4.75 × (-6) × 2 [-28.5] × 2	-	-	-	4.75 × (-6) × 2 [-28.5] × 2	-	-	-
S3/2	4.75 × (12) × 2 [57] × 2	4.54 × (10) × 2 [45.4] × 2	5.475 × (10) × 2 [54.75] × 2	5.475 × (10) × 2 [54.75] × 2	4.75 × (12) × 2 [57] × 2	4.54 × (10) × 2 [54.75] × 2	5.475 × (10) × 2 [54.75] × 2	5.475 × (10) × 2 [54.75] × 2
Q1/1	-	-	7.5 × (8) × 2 [60] × 2	7.5 × (8) × 2 [60] × 2	-	-	-	-
Q1/2	-	-	7.5 × (8) × 2 [60 × 2]	7.5 × (8) × 2 [60 × 2]	-	-	7.5 × (8) × 2 [60] × 2	7.5 × (8) × 2 [60] × 2
Q2	-	-	7.5 × (-8) × 2 [-60] × 2	7.5 × (-8) × 2 [-60] × 2	-	-	7.5 × (-8) × 2 [-60] × 2	7.5 × (-8) × 2 [-60] × 2
H	6.0 × (14) × 2	6.0 × (14) × 2	6.0 × (14) × 2	6.0 × (14) × 2	6.0 × (14) × 2	6.0 × (14) × 2	6.0 × (14) × 2	6.0 × (14) × 2
PLASMA	350 × (1)	450 × (1)	550 × (1)	550 × (1)	350 × (1)	450 × (1)	550 × (1)	550 × (1)
トロイダル	581.8 KAT × 16個							

ただし表において

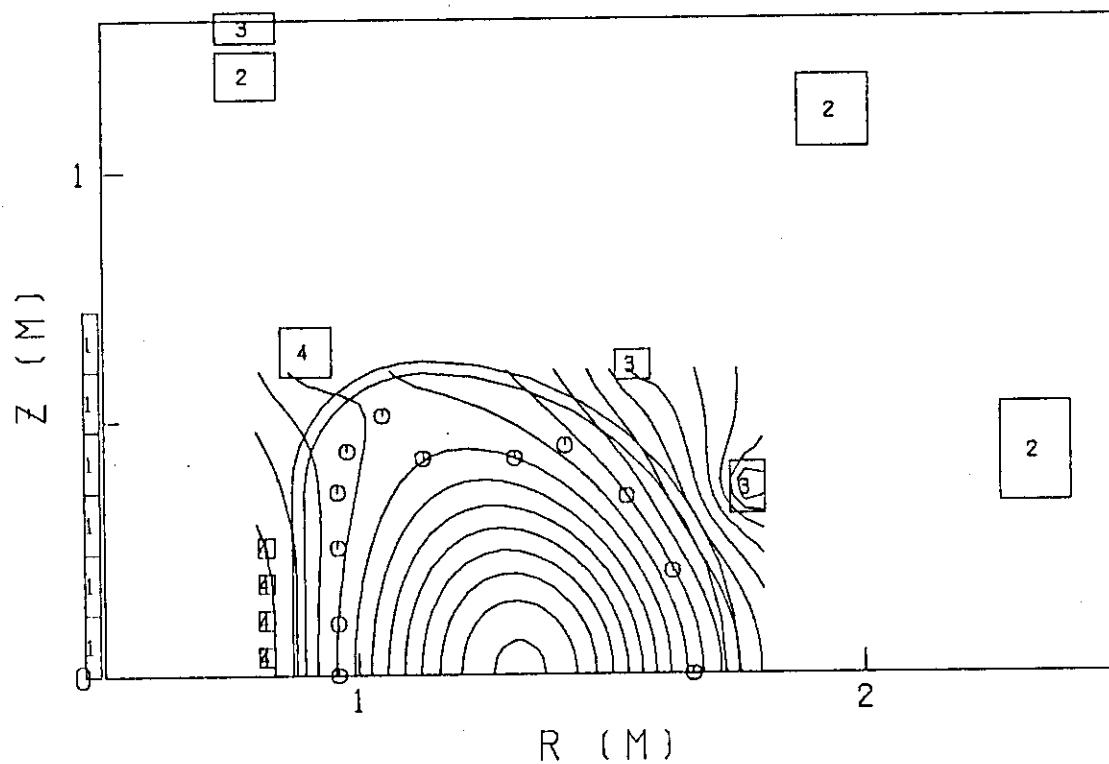
a ×
(b) × 2
[d] × 2

↓

a : kA  
 (b) : ターン数  
 [d] : 上or下側のKAT  
 2 : 上下のコイル対を示す



(a) 円形プラズマ平衡

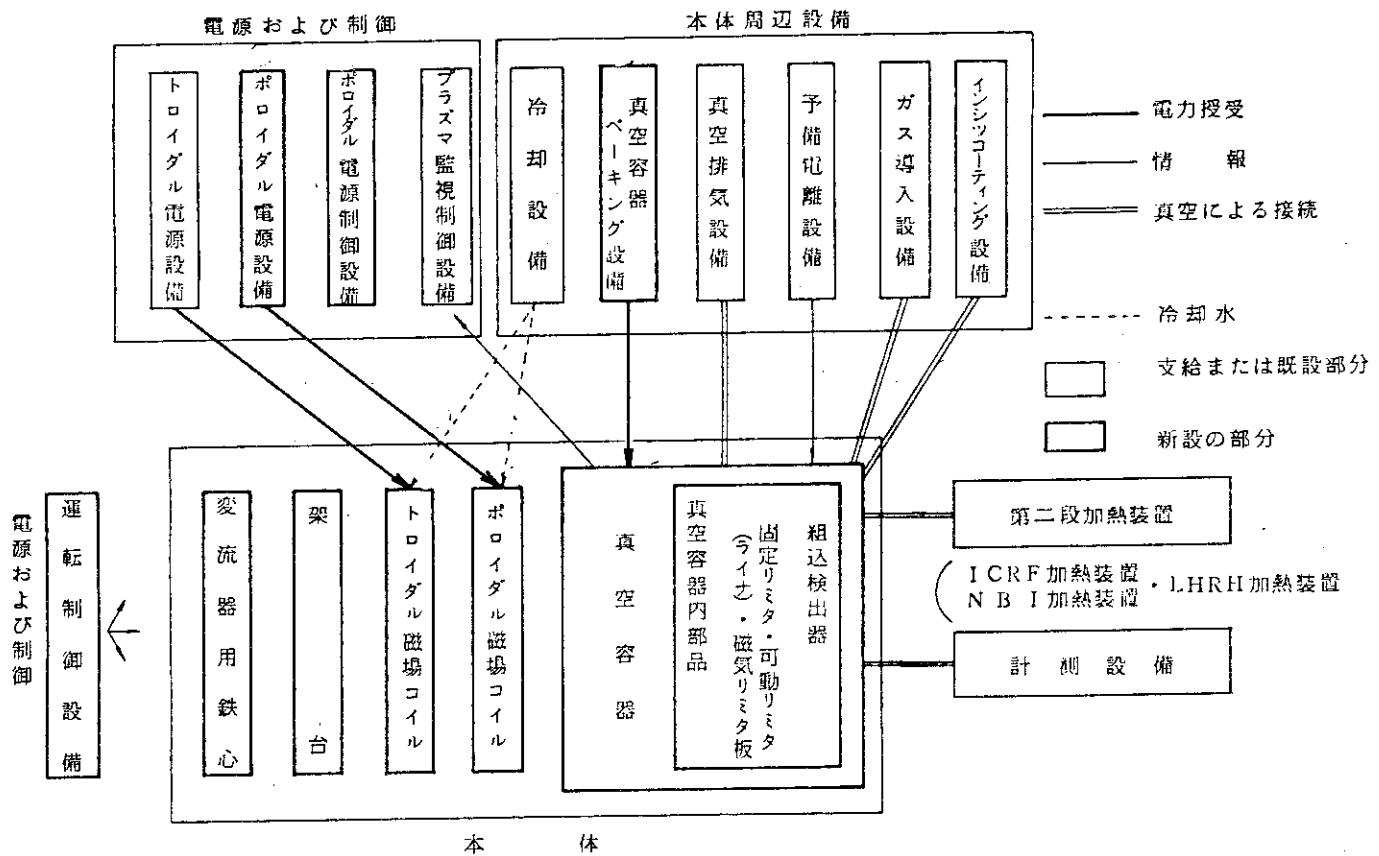


(b) 非円形プラズマ (b型) 平衡

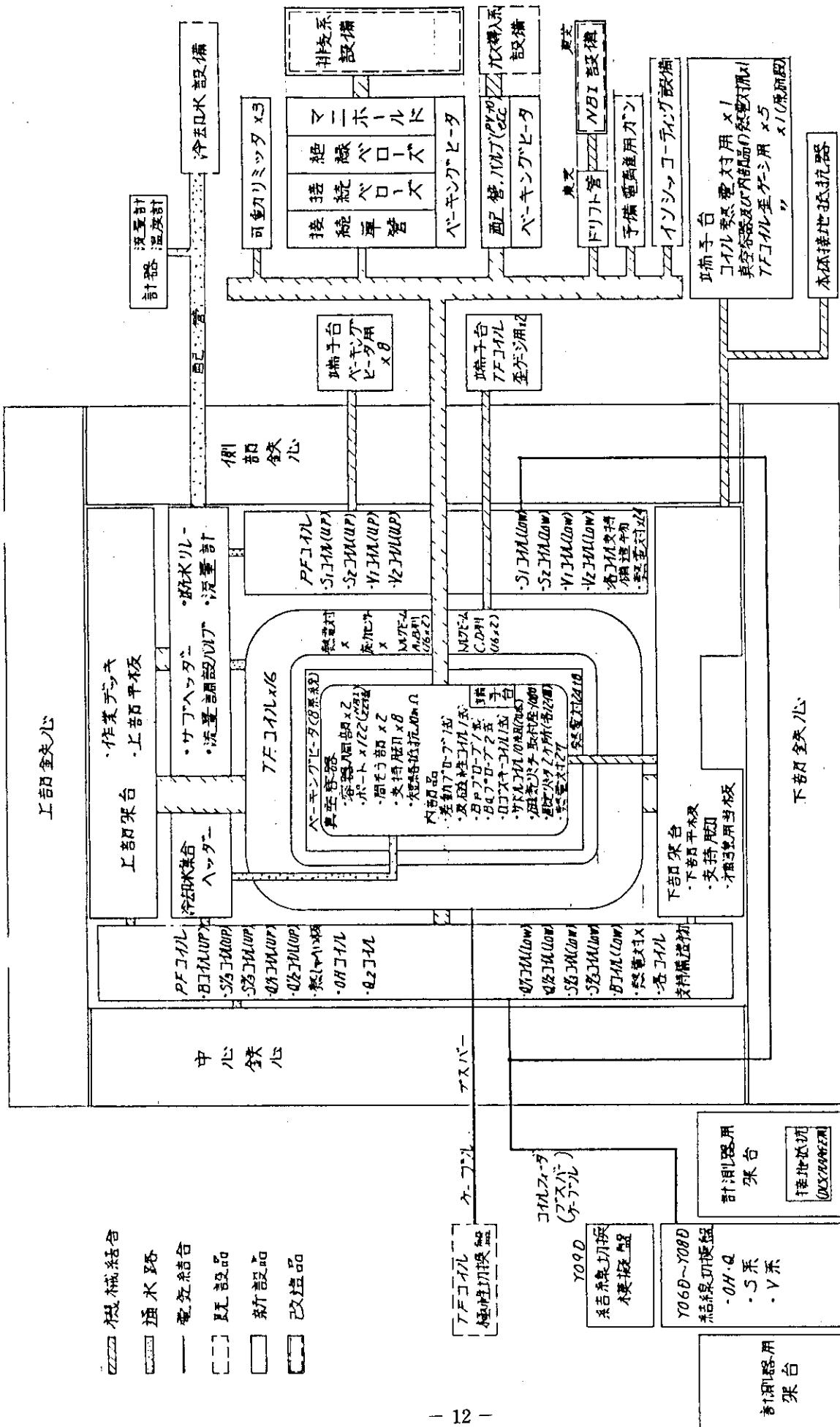
第2.2-2図 プラズマ平衡例

## 2.3 全体構成

JFT-2Mは、中空ドーナツ状の真空容器内にプラズマを発生、保持し各種の実験を行うための装置である。JFT-2Mの主要な構成を第2.3-1図に示す。各構成相互の間には、電力、制御、水、真空等多くの関連があり、これらの設備、電源が各々の機能を發揮すると共に各設備、電源間の整合性に不都合を来さず、装置全体としての所要の機能を有することが必要である。第2.3-2図にJFT-2M本体および本体周辺設備構成ブロック図を、第2.3-3図にJFT-2M電源関係構成ブロック図を示す。また、第2.3-4図にはJFT-2M機器全体配置図を示す。



第2.3-1図 全体のブロック構成図



第2.3-2図 JFT-2M本体及び周辺設備構成ブロック図

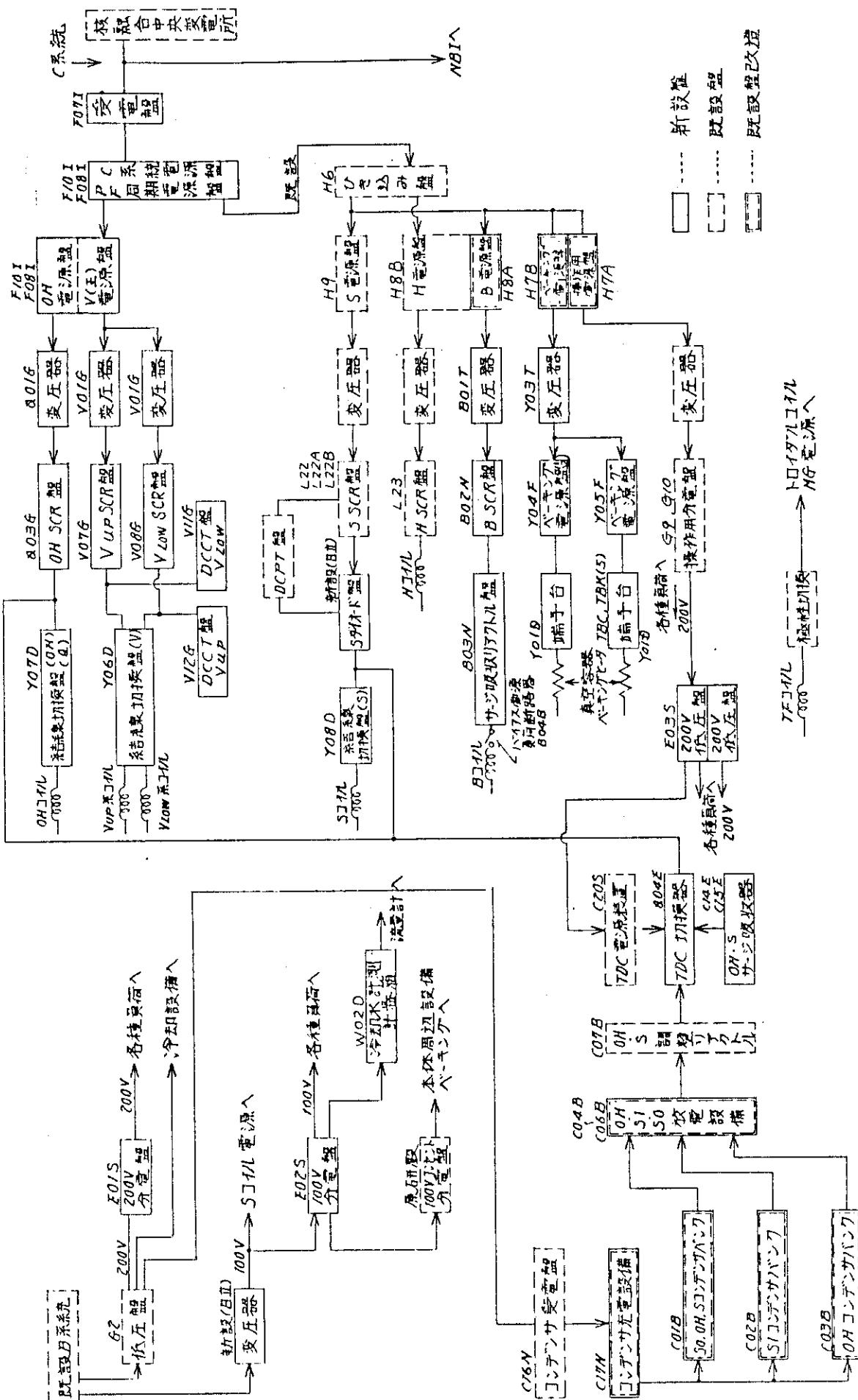
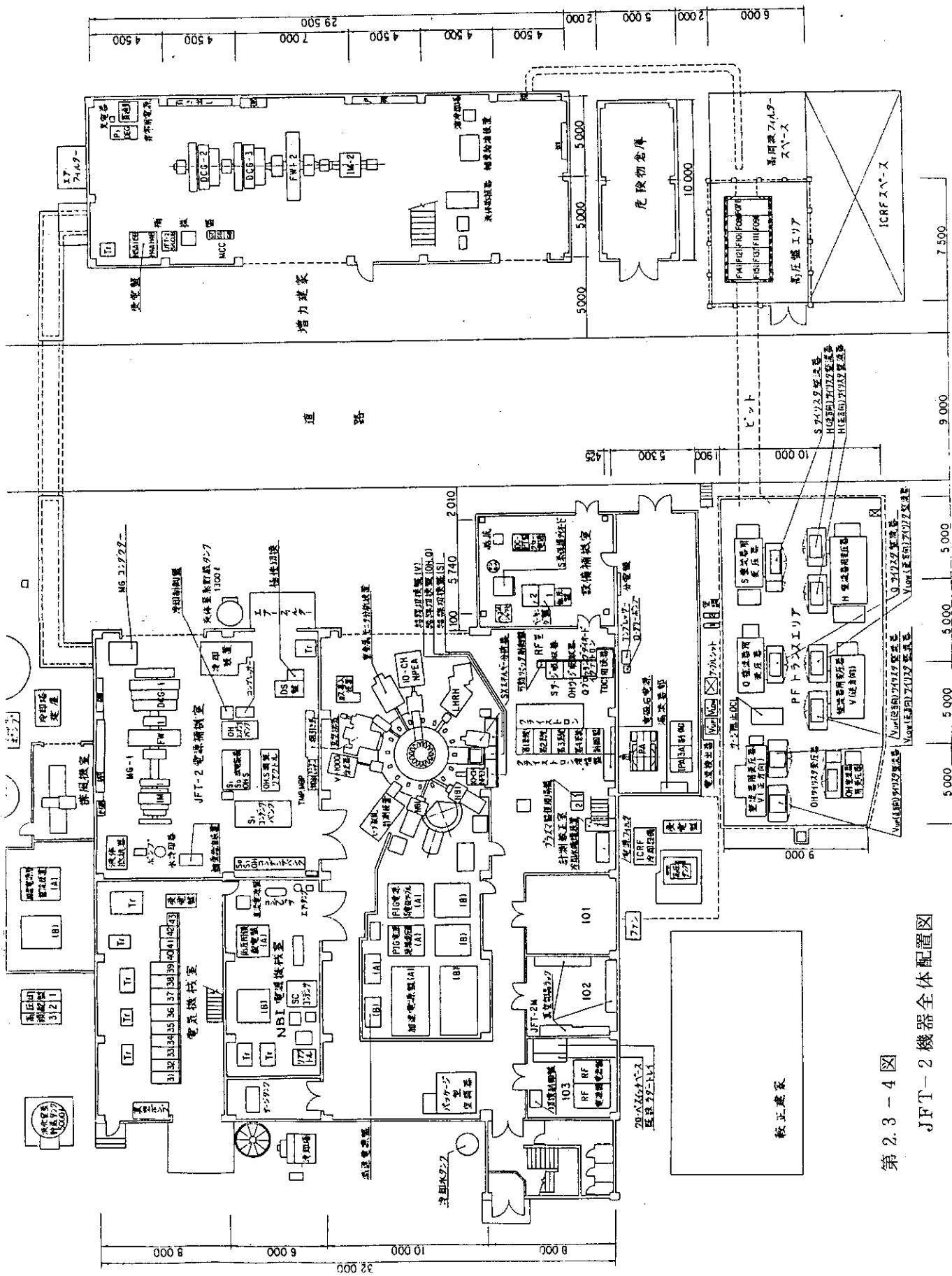


図 2.3-3 JFT-2M 電源関係構成ブロック図



第 2.3-4 図

JFT-2 機器全体配置図

### 3. 本 体

#### 3.1 概 要

##### 3.1.1 構 成

JFT-2Mのプラズマ閉じ込め部であり、高真空を実現するための真空容器、プラズマ電流を誘起するための変流器鉄心、プラズマを閉じ込める磁場を形成させるPFコイルとTFコイル、およびこれらを一体に結合・支持する架台で構成している。

真空容器には電磁気計測用組込み検出器やプラズマを規定するためのリミター等の真空容器内部品を装着しており、真空排気設備や計測器等との接続用ポートを備えている。

PFコイルとその駆動電源との間には、各ポロイダル磁場コイルの中間端子を集中させた結線切換盤を設けている。ここで、コイルの通電方向と巻数を選択し、閉じ込め磁場の基本形態を設定する。

本体垂直断面図を第3.1-1図に、本体水平断面図を第3.1-2図に示す。本体周辺配置図を第3.1-3図に示す。

##### 3.1.2 本体共通設計条件

###### (1) 電磁力最大仕様

(a) 最大トロイダルコイルAT	9.37 MAT
( 25 MAT / Phase 2 )	

(b) 最大プラズマ電流	550 KA
--------------	--------

(c) ポロイダルコイル	第2.2-1表
--------------	---------

###### (2) ディスラプション条件

上記の条件で、プラズマ電流は最短4 msec（目標1 msec）の時定数で遮断される。

###### (3) 真空容器入熱条件

(a) 定常運転	2.5分周期、10時間連続運転、最大 1 MW, 500 msec, ジュール加熱 + 2 MW, 200 msec, NBI 加熱 + 4 MW, 300 msec, ICRF 加熱
----------	--

(b) ティラー放電洗浄(TDC)	100時間連続運転
-------------------	-----------

40 k A, ワンターン電圧20 V, パルス巾 20 ms (矩形波換算)	
---	--

繰返周期	2回/秒
------	------

###### (4) 誤差磁場

トロイダル磁場およびポロイダル磁場の誤差については、真空容器内で10 G以下とする。

###### (5) 耐震条件

耐震評価は水平地震力0.3G、垂直地震力0.2Gに対し静的解析を行うものとする。

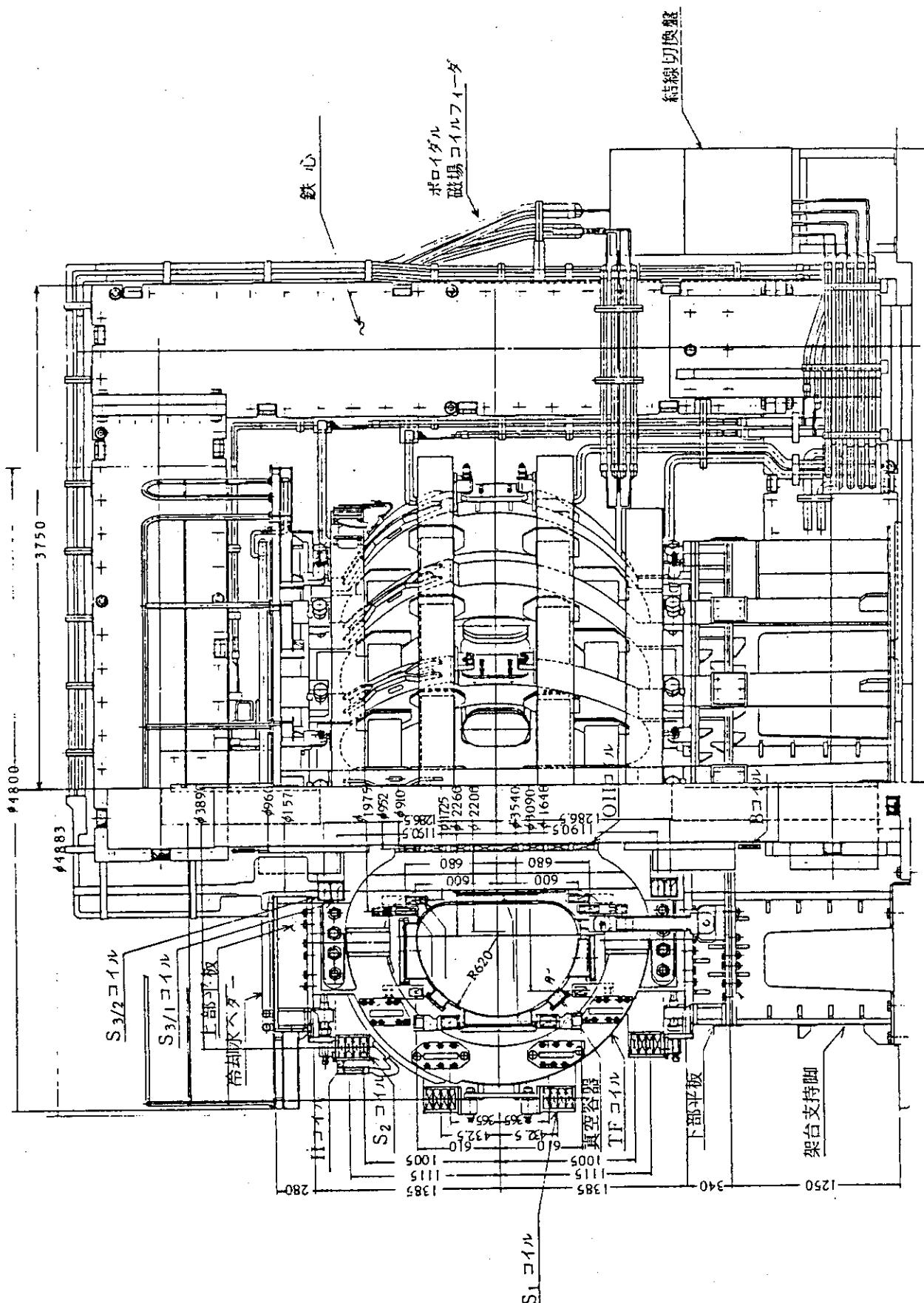
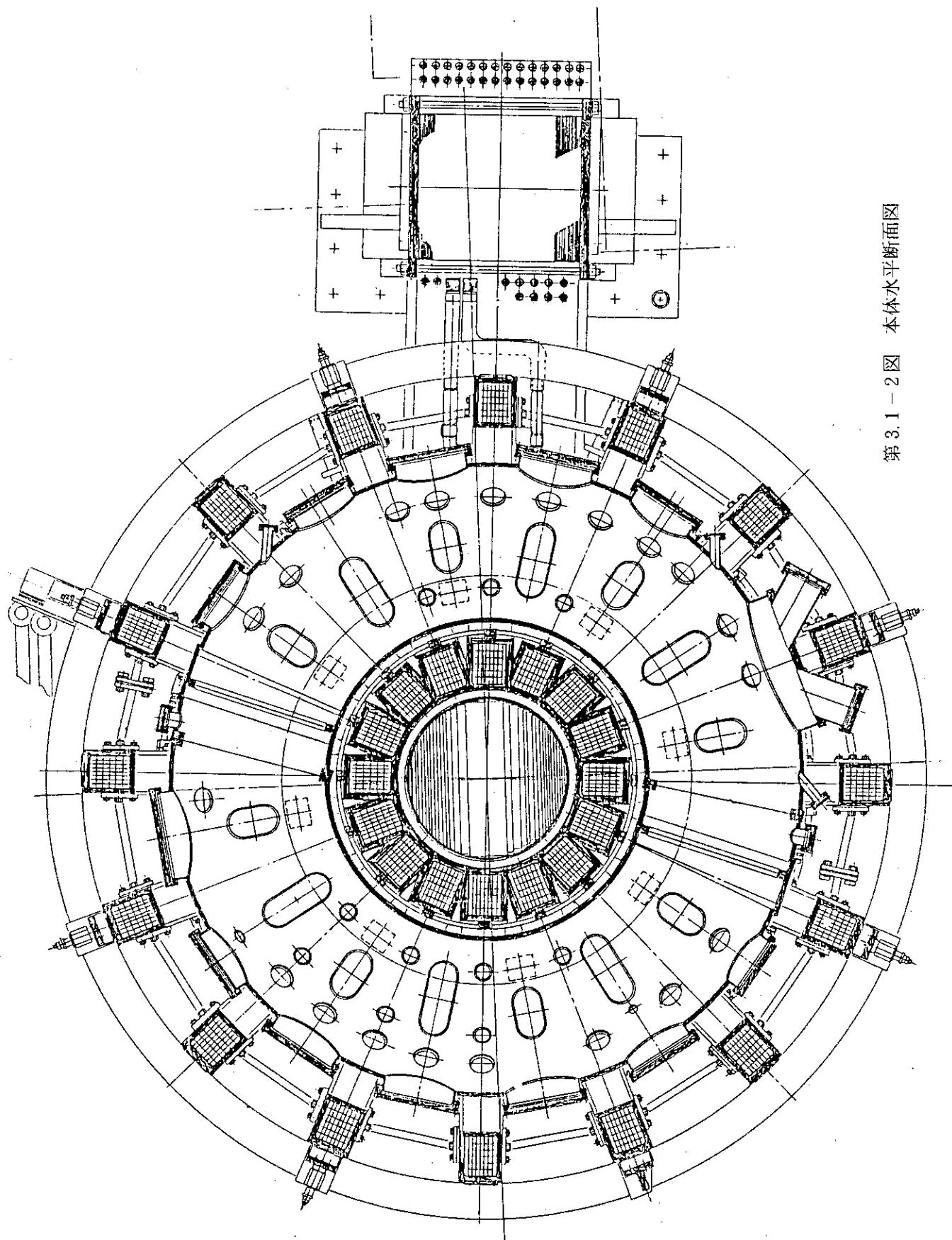
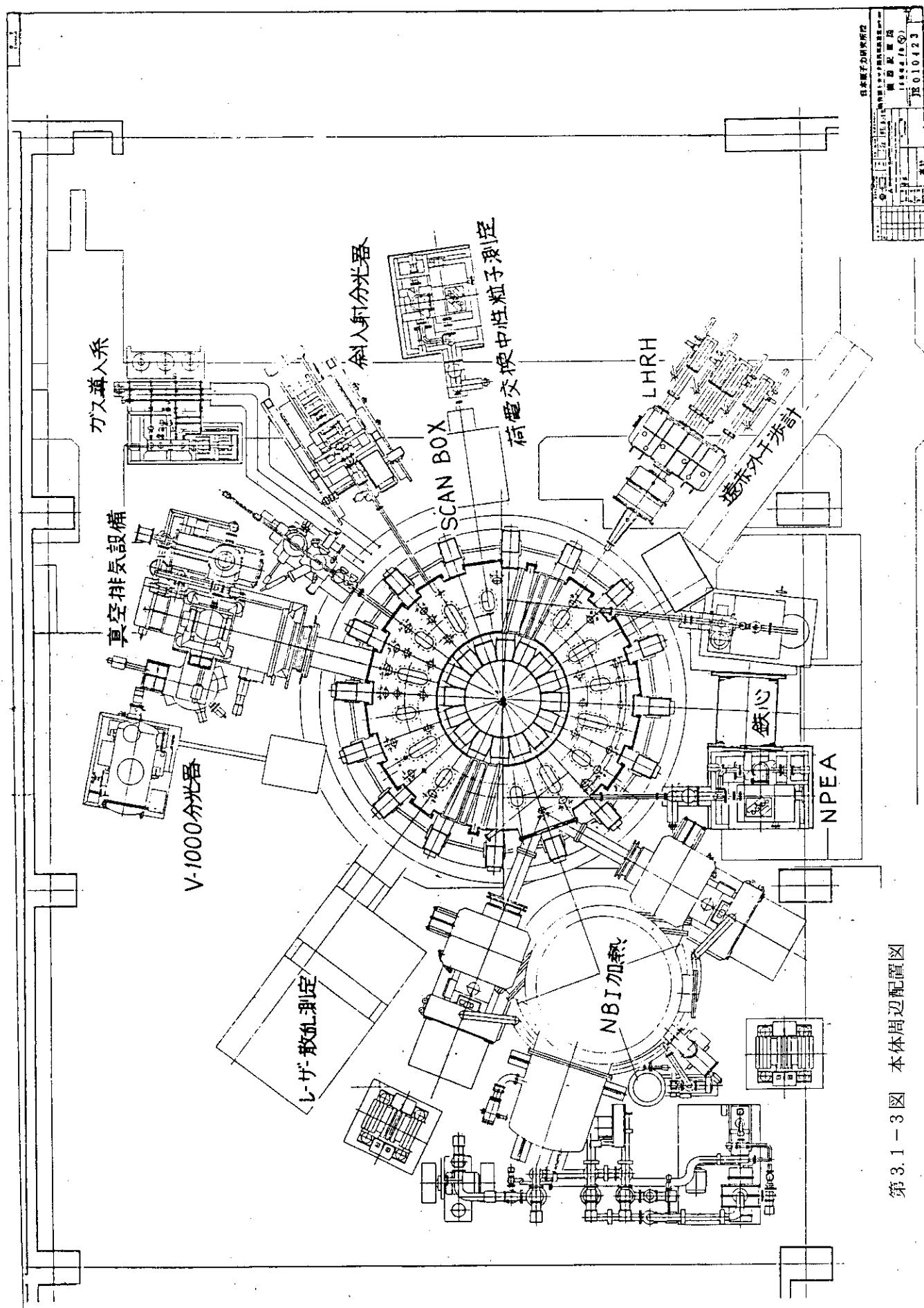


図3.1-1 図 本体垂直断面図

第3.1-2図 本体水平断面図





第3.1-3図 本体周辺配置図

### 3.2 真空容器

D型断面を持つ中空ドーナツ形状のステンレス鋼製厚肉容器であり、2個の容器胴、2個の容器間挿入部、120余個の大小ポートおよび各種の付属品等から構成される。真空容器は一周方向の二ヶ所でテフロン板によりブレークされ、内装型のシャント抵抗体が取り付けられている。超高真空を得るため、真空容器はリーク防止と内部の清浄度に十分注意して製作されており、また外面に取り付けられた電気ヒータによって120°Cのベーキングができる構造となっている。

#### 3.2.1 設計方針

トカマクの中で真空容器は実験の機動性を決定する重要な構成部分である。プラズマ実験の機動性を優先し以下の項目を考慮して設計を行った。

##### (1) ポート空間確保

- i) TFコイル間の上・下・横はできるかぎり大きいポートを確保した。
- ii) 真空容器を厚肉構造にすることにより、トロイダルコイル下にも小ポートを確保し、磁気プローブの引き出しに使った。

##### (2) ベーキング

ベーキングの温度を120°Cに設定した。これにより、ポート法兰ジの厚みが減り、大口径のポートが確保できるようになった。容器へのアクセスを良くするため、断熱材は用いていない。

##### (3) 厚肉構造、D型断面形状

プラズマの不安定性に対するシェル効果、トロイダルコイルと真空容器間の空間の有効利用、製作の容易性より、厚肉・D型断面形状とした。

##### (4) 分離構造

厚肉構造のため、半割部にテフロンの絶縁部を挿入し、1周抵抗が10mΩとなるようSiCの抵抗体を用いた。半割部の接続法兰ジは、容器内でボルト締めができる構造とした。

##### (5) 断面形状

第3.1-1図に示すように円弧と直線の組み合わせによって断面を構成した。

##### (6) 容器内部品の取付座

磁気プローブ等の容器部品を取り付けるための台座を容器内に約1000個設けた。座は原則として壁面に直角で直径15mm高さ10mmの円柱、M8のタップを持った形状である。

##### (7) 真空条件

- |              |  |
|--------------|--|
| i) 全体のHeリーク量 | $1 \times 10^{-7}$ Torr·ℓ/sec 以下       |
| 一ヶ所のHeリーク量   | $1 \times 10^{-9}$ Torr·ℓ/sec 以下       |
| ii) 放出ガス量    | $1.5 \times 10^{-5}$ Torr·ℓ/sec 以下(目標) |

#### 3.2.2 設計検討

##### (1) 真空容器に発生する電磁力

プラズマディスラップ・ショット時に真空容器に誘起される渦電流と、それにより発生する電磁力について評価した。渦電流の解析は、プラズマ定位置消滅の場合とプラズマ移動消滅の場合について

て行った。第3.2-1図に解析モデルを示す。真空容器は対称性を考慮し、 $\varphi = 0^\circ$ から $90^\circ$ までを考え、 $\varphi = 0^\circ$ 及び $180^\circ$ の位置でトーラス方向に完全に絶縁されているとする。図中で斜線部はポートを示す。真空容器肉厚は25 mm、比抵抗は $0.739 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ とした。ディスラッシュ条件としては、プラズマ電流は

$$I_P = I_{P_0} e^{-t/\tau}$$

$I_{P_0} = 550 \text{ KA}$ 、 $\tau = 4 \text{ msec}$ で消滅するものとし、さらに移動消滅の場合には、初期位置 $R = 1.31 \text{ m}$ 、 $Z = 0.0 \text{ m}$ から $20 \text{ m/sec}$ でトーラス内側へ移動するものとした。プラズマ電流は線電流で近似する。真空容器にかかる外部磁場としては、トロイダル磁場のみを考慮し、プラズマ初期位置 $R = 1.31 \text{ m}$ で $1.5 \text{ T}$ と仮定し、 $1/R$ に比例するとした。

解析結果としては、最も電磁力条件が厳しいと考えられるプラズマ移動消滅の場合を示す。第3.2-2図に電流値が最大となる $t = 3 \text{ msec}$ での渦電流流線図を示す。第3.2-3図にフランジ部( $\varphi = 0^\circ$ )に加わる電磁力を示す。第3.2-4図に、第3.2-3図のD点でのトロイダル方向の電磁力分布を示す。フランジ部に働く電磁力は約3気圧である。

## (2) 真空容器構造解析

大気圧、自重、電磁力に対しての真空容器の構造解析を行い、応力及び変形量を評価した。解析は三次元有限要素法により行った。

### i) 解析モデル

第3.2-5図に解析モデルの鳥瞰図を示す。これは、真空容器のトーラス方向 $1/4$ 周分をモデル化したもので、一端は接続部フランジに、他端は容器 $180^\circ$ セクターの中央部に対応している。容器(SUS 304 L)の胴部肉厚は接続部フランジ寄り約110 mmの範囲を25 mm、その他を20 mmとし、ポート部は穴あき構造とした。接続部は締付ボルト、外部ピンおよびフランジ接合面(テフロン絶縁材介材)に対応する各節点をバネ結合とし、胴部およびフランジ部は共に板要素として取扱った。また真空容器の支持脚部も解析モデルに含めている。

### ii) 荷重条件

次の4ケースについて解析を行った。

荷重ケース (1)	大気圧+自重
荷重ケース (2)	電磁力
荷重ケース (1)+(2)	大気圧+自重+電磁力(組合せA)
荷重ケース (1)-(2)	大気圧+自重+電磁力(組合せB)

このうち、電磁力はディスラッシュ時に発生する。渦電流とトロイダル磁場とにより発生するものである。(3.2-2(1)項の結果を使用した。)

### iii) 解析結果

#### a. 変形、変位

真空容器変形の鳥瞰図を第3.2-6図に示す。大気圧によるポロイダル断面の変位 $\delta$ は赤道面上最外部・トーラス方向 $\varphi = 90^\circ$ で最大となり、

$$\delta = 0.377 \text{ mm}$$

である。電磁力によりポロイダル断面全体が傾くような変形を示すが、大気圧による変形に比べ、変位量は小さい。<大気圧+電磁力>の荷重ケースでの最大変位は、大気圧の場合と同様の位置で

$$\delta = 0.377 \text{ mm}$$

である。

大気圧により、真空容器接合面に開きや傾きが生じるが、その最大変位は、真空容器の中心側赤道部で生じ、その値  $\delta$  は

$$\delta = 0.0158 \text{ mm}$$

である。これは絶対値としても、またシール材（ハイトンOリング）のつぶし代（~3mm）に比べても十分小さく、シール機能への影響は無視できると考えられる。なお、電磁力に関しては、真空容器の変形や倒れが生ずるもの微小であり、かつ、接続部フランジの倒れは、相手方フランジと同一方向へ変位（境界面に関する逆対称変位）するため、大気圧の場合のようにフランジ合わせ面を開くような変形は生じていない。

#### b. 応力

接続部フランジでは、ポロイダル断面の外周側、トーラス中心寄りの上部または下部のコーナー近傍および外フランジ（補強構造）端部の付け根付近で他の部分に比べ大き目の応力が生じている。胴で、比較的高い応力が発生している場所は、水平大ポートの近傍である。しかし、いずれも応力の絶対値としては小さく、最大値は

最大主応力  $3.43 \text{ kgf/mm}^2$  ( $\varphi = 10^\circ$  付近、ポート穴コーナー部内面)

最大応力強さ  $3.43 \text{ kgf/mm}^2$  (同 上)

である。

#### c. フランジ接合部に関する解析結果

フランジ接合部に発生する応力・変位の最大値は下記の通りである。

項目	結果	許容目安値
ボルト引張応力	$7.3 \text{ kgf/mm}^2$	$10.9 \text{ kgf/mm}^2$
テフロン圧縮応力	$0.30 \text{ kgf/mm}^2$	$< 1.2 \text{ kgf/mm}^2 >$
補強ピン 断応力	$1.42 \text{ kgf/mm}^2$	( $16.3 \text{ kgf/mm}^2$ )
シール面の開き	$0.016 \text{ mm}$	$\ll 3 \text{ mm} \gg$

#### d. 支持脚に関する解析結果

支持脚に対する荷重条件としては、<大気圧+自重>（容器解析結果の約1.8倍の値を使用）、<電磁力>、<TFコイル脚側からの反力>、<真空横荷重>（真空向心力）および<地震（垂直0.2G、水平0.3G）>を考慮した。これらの荷重条件により発生する応力、変位の最大値は下記の通りである。

項目	結果
応力強さ (通常時)	14.5 kgf /mm <sup>2</sup>
" (地震時)	29.0 kgf /mm <sup>2</sup>
上端部トロイダル方向	
変位 (通常時)	1.16 mm
" (地震時)	1.47 mm

以上の結果より、各種荷重条件に対する応力、変位とも許容範囲内であると判断された。

### (3) 一周抵抗部構造

真空容器の一周抵抗を得る構造としては、 i) 絶縁方式と ii) ベローズ方式と考えられる。

i) 案の長所としては、構造が簡単で製作性が良いこと、短所としては耐熱性が劣り、脱ガス量が比較的多いことである。ii) 案は、耐熱性に優れ、脱ガス量も少ないという長所があるが、一方、構造が複雑で製作性が悪いというのが短所である。ベローズ方式を採用した場合には、真空容器のプラズマに対するシェル効果や、内部品の取り付け構造を考慮すると、ベローズ設置か所は最小限に留める必要がある。この場合には、プラズマ立上げ、立下げ時、ディスラプション時、TDC 時の発熱が問題となる。このうち TDC 時が、発熱量としては最も大きいため、TDC 時のベローズの熱挙動を評価する。

TDC 時の電流条件としては、

一周電流 20 KA × 20 msec /shot  
通電周期 2 shot /sec

とする。またベローズのパラメータとしては、

周長	3.324 m
長さ	1.360 m
厚さ	0.6 mm
電気抵抗	$4.7 \times 10^{-4}$

とする。

上記の条件で一次元モデルにより、温度分布を評価した結果を第 3.2-1 表に示す。

計算モデルはベローズを引き伸ばして一枚の平板と考え、両端が一定温度の厚肉部でクランプされたものとし、熱損失としては放射も考慮した。最高温度は、厚肉部の温度プラス 100 °C 程度でステンレス製ベローズを使用する場合問題はないが、温度勾配は許容値を越えるものと考えられる。さらに、ベローズを平板と仮定しているため放射損失を過大評価している事を考え合わせると、ベローズ構造を採用した場合には冷却機構が必要となろう。

以上の結果から、JFT-2M にベローズ構造を採用する事は不可能ではないが、装置構成が複雑になると判断された。このため、一周抵抗部構造としては、有機絶縁物方式を採用した。

### (4) シャント抵抗体の熱および電磁力検討

シャント抵抗体は、絶縁分割部に取り付けられ、絶縁部に発生するサージ電圧を吸収し、真空容器を保護する機能を持つ。

シャント抵抗体構造図を第 3.2-7 図に示す。絶縁構造の締付ボルトに SiC 製の導通ワッシャーを介在させ、所定 ( $10 \text{ m}\Omega$  以上) の一周抵抗を得るようにしたものである。トロイダル方向 2 ケ所の絶縁分割部内フランジ側に各 52 個ずつ、計 104 個取り付けられている。

以下に、シャント抵抗体の熱および電磁力検討結果について述べる。

#### i) ディスラプション時の評価

##### a. 热的検討

ディスラプション時には、抵抗体の温度は断熱的に上昇すると考えられる。ディスラプション時に、プラズマの電磁エネルギーがすべて抵抗体に一様に吸収されると仮定すると、抵抗体の温度上昇は、 $\sim 260 \text{ }^\circ\text{C}$  程度である。これによる抵抗体の伸びは、 $\sim 0.1\% (0.01 \text{ mm})$  程度である。これにより、ボルトに発生する引張り応力は、 $\leq 2.5 \text{ kg/mm}^2$  となる。

##### b. 電磁力評価

最も安全側に立ち、真空容器には、最大プラズマ電流値 (550 KA) と同じ電流が流れると仮定する。したがって 1 本のボルトに流れる電流値は 10.6 KA となる。

ポロイダル磁場を 0.4 T とすると、ボルトに発生する電磁力は  $\sim 4.5 \text{ kg/cm}$  となる。これによりボルトにかかる最大曲げ応力は、 $\sim 1.1 \text{ kg/mm}^2$  であり、実際にボルトに流れる電流値はさらに小さくなるため、問題とならない値と考えられる。

#### ii) TDC 時の評価

TDC 時には定常に 4 kW の発熱があると仮定し、フランジ部、テフロン部の温度分布評価を行った。

抵抗体内に発生した熱は、抵抗体とフランジにはさまれた  $2 \text{ mm}^2$  の銅板によりポロイダル方向に散らされることを期待する。計算は 3 次元モデルで行った。計算モデルおよび結果を第 3.2-8 図に示す。

テフロン部の温度は、最高で  $\sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$  となる。

#### iii) まとめ

シャント抵抗体に働く熱、電磁力の検討結果からはディスラプション条件、TDC 条件によっては、その熱的条件はかなり厳しいものになると予想された。JFT-2M の初期実験後の大気時には、シャント抵抗体に数体の破損が見られたものの、第 2 回目の大気時には損傷は殆ど見られず、真空容器の保護の機能を充分に果たしている事が確認された。

### 3.2.3 構造

#### (1) 容器本体

真空容器本体は、D 型断面をもつ中空ドーナツ形状（トーラス形状）のステンレス鋼製厚肉厚構造であり、第 3.2-9 図に示すように 2 個の容器胴と 2 個の間挿部から成る。真空容器内部品を設置するためのネジ付台座 1100 余個は、容器の内壁に溶接で固定されている。容器胴の下部には全周 8 ケ所に支持脚台座があり、容器本体は 8 本の支持脚を介して、下部架台で支持される。真空容器の外表面には、ベーキング用の電気ヒータ、熱電対の他、組立時に使用する吊金具、仮固定治具台座等が設置されている。120  $^\circ\text{C}$  ベーキング時に容器本体の外周赤道部は、半径方向に約 3 mm、上方向に最大 1 mm 程度膨張変位する。容器胴部と間挿部の接合箇所は、全部で 4 ケ

所あるが、そのうち2ヶ所はテフロン板と絶縁ボルトでブレークされ、シャント抵抗体が装着されている。いずれの接合面も内フランジ、ボルト結合方式であり、バイトンO-リングによって真空シールされる。また、各接合フランジの上下には、ピンジョイント方式の補強構造が設置されている。

### (2) ポート

ポートの種類と個数は、第3.2-2表に示す通りである。

第3.2-10図(a)～(b)にポート配置および形状を示す。又、プラズマとの相対位置を第3.2-11図に示す。大ポートおよびSOB, SVC, SHTを除く小ポートは、金属中空Oリング(表面軟質銀メッキ)タイプであり、SOB, SVC, SHTの小ポートは銅板製ガスケットのコンフラット・タイプである。大ポートは、矩形、レーストラック、円形の各種形状のものがあるが、すべてO-リング溝は、内側開放型のリテーナ構造とし、シール面は、△△△△仕上げを行っている。リテーナは、止めねじ(押えボルト)により本体側フランジに固定されている。

大ポートの各フランジには、4本(LVBポートのみ2本)のノックピンが取付けられており、盲フランジ等の装着時ガイドとしての役目を持たせている。

大ポート、小ポートともボルト穴は本体フランジにねじが切ってあり、押えボルト方式で締付けを行う。ボルト類の種類・数量は第3.2-3表に示す。また、金属中空Oリングの形状・寸法は第3.2-4表の通りである。

### (3) 容器絶縁分割部および接続部

絶縁分割部に取付けられたシャント抵抗体は、絶縁構造の締付ボルトにSiCセラミック製の導通ワッシャーを介在させ、所定の一一周抵抗を得るようにしたものである。締付ボルトは、特殊な形状をしており、銅製のテーパ状リングを圧着させることにより、シャント抵抗体を流れる電流が締付ボルトのねじ部を通過することがないように工夫されている。

また、SiCセラミックワッシャーの外側面にTi蒸着装置で発生したTiベーパーが付着し抵抗値が著しく減少することを防ぐため、保護キャップが装着されている。シャント抵抗体(SiCセラミックワッシャー)は、各締付ボルトの頭側または先端側に交互(内フランジの両サイドに1個おき)に配置されており、通電時の発生熱を分散させる目的で鋼製の熱伝導板が内フランジの両サイド締付面に取付けられている。テフロン絶縁板の厚みは約6mmであり、締付状態での塑性変形の進行を押さえるため、製作時に予備熱間プレス加工を施したものを使用している。

絶縁分割部フランジの内周側にはステンレス製薄板構造のテフロン保護板(片側の銅製熱伝導板と一体構造)が設置されており、テフロン絶縁板等をプラズマ炉心側から保護する役目をもつている。

容器絶縁分割部および接続部の構成品は、以下に記載の通りである。接続部にはフランジ保護のためのステンレス製フランジ保護板が内フランジの両側締付面に取付けられている。

#### ○ 容器絶縁分割部

##### (a) テフロン絶縁板

数 量: 2枚

材 質: PTFE(純テンロン)

板 厚: 6 mm

## (b) 真空パッキング

形 式：O リング  
 数 量：4 本  
 材 質：フッ素ゴム（バイトン）  
 径 徑：φ 10 mm

## (c) シャント抵抗体

型 式：導通ワッシャ方式  
 配 置：絶縁分割部内フランジ  
 数 量：104 個（各 52 個 × 2 ヶ所）  
 材 質：SiC セラミック  
 尺 寸 法：φ 35 mm O.D × φ 20 mm I.D × 10 mm H  
 体積抵抗率：0.5 ~ 2.5 Ω · cm

## (d) テフロン保護板・熱伝導板

形 式：保護板・熱伝導板一体構造  
 数 量：20 組（40 枚）  
 材 質：SUS 304 および C 1020  
 板 厚：2 mm

## (e) 締付ボルト関係部品

## (f) 容器絶縁分割部温度モニター用熱電対

数 量：8 本  
 仕 様：C - C 非接地型 JIS 0.4 級  
 シース材質：SUS 321  
 シース外径：φ 3.2 mm

## ○ 容器接続部

## (a) 真空パッキング

型 式：O リング  
 数 量：2 本  
 材 質：フッ素ゴム（バイトン）  
 径 徑：φ 10 mm

## (b) フランジ保護板

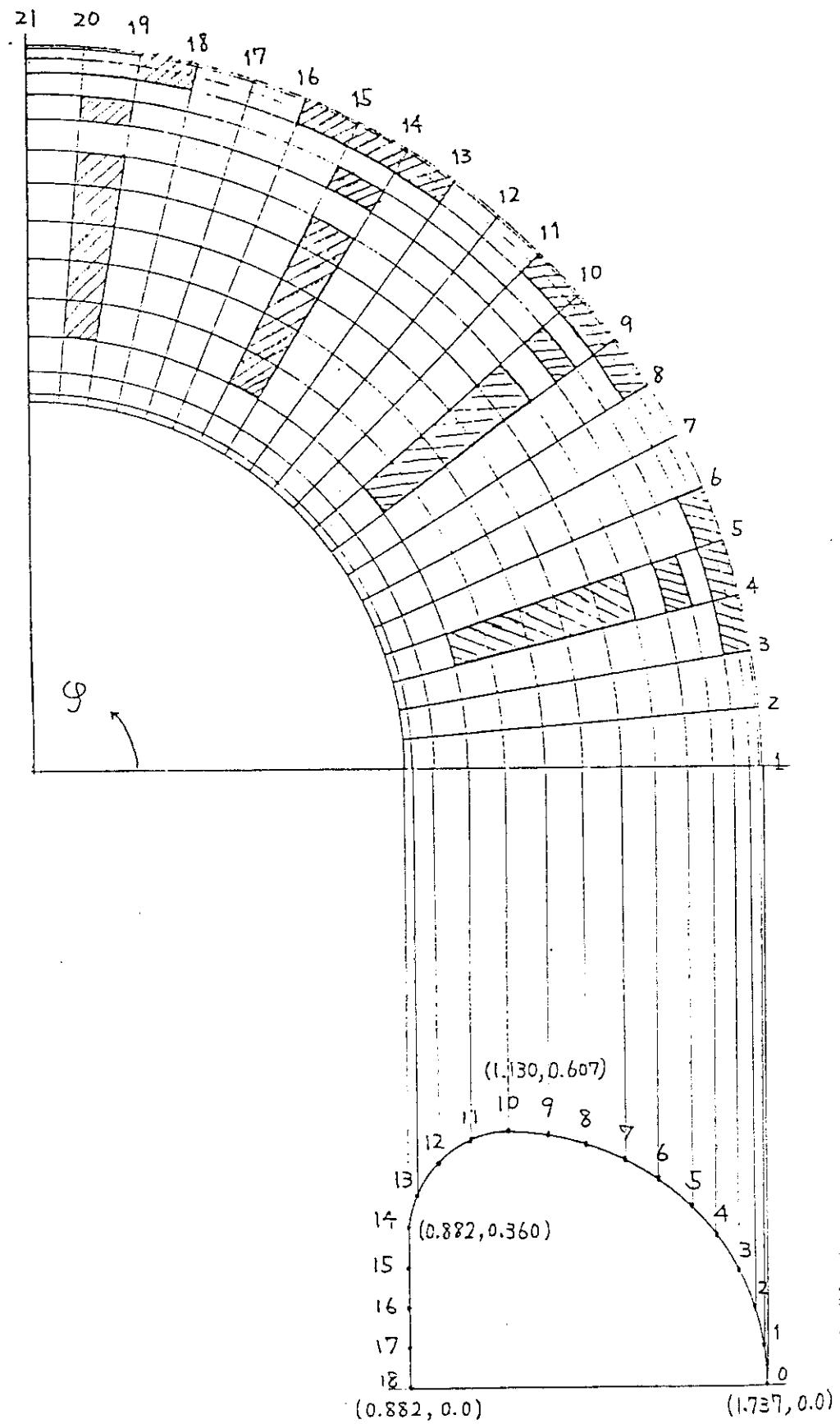
数 量：20 組（40 枚）  
 材 質：SUS 304  
 板 厚：4 mm

## (c) 締付ボルト関係部品

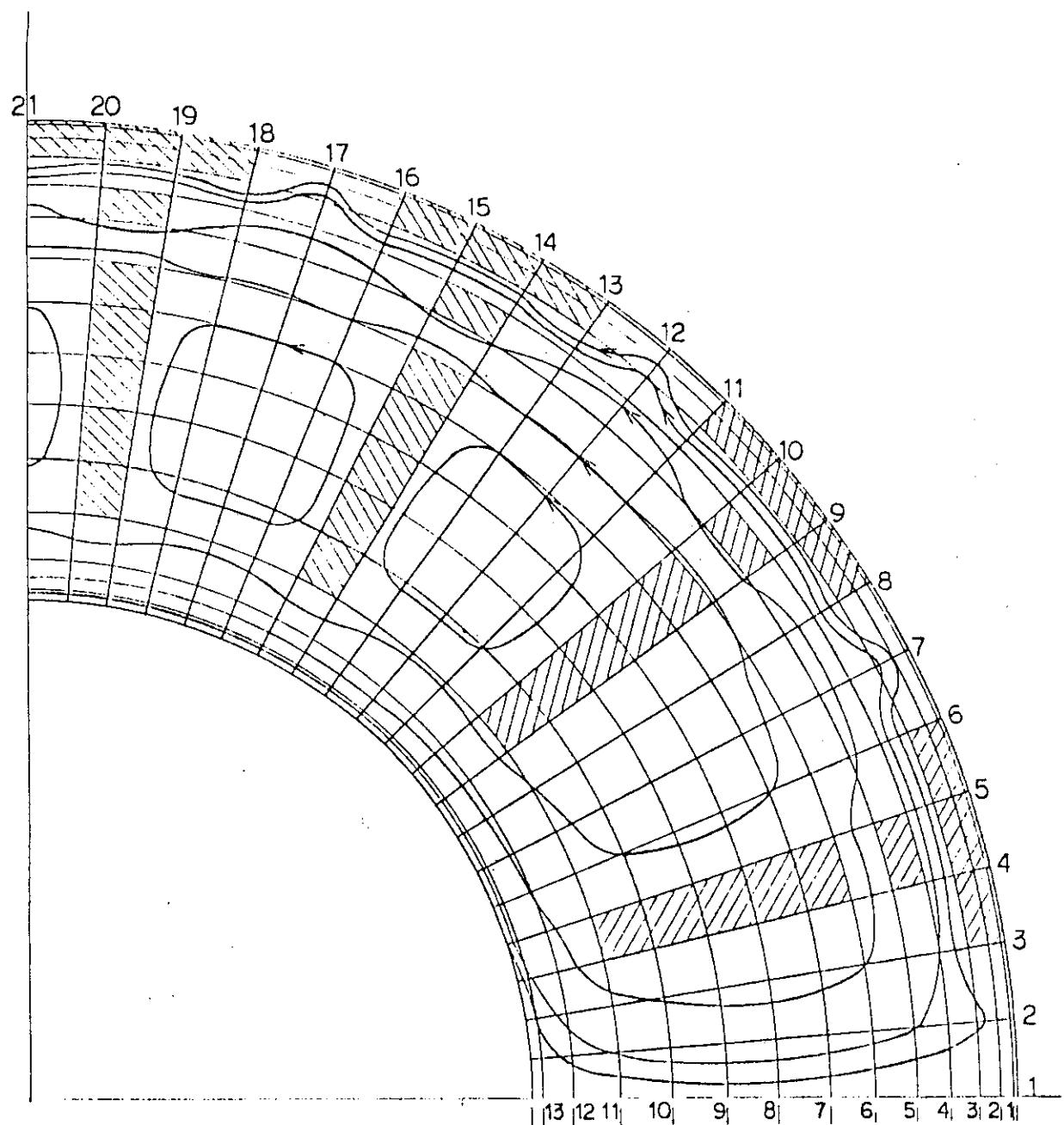
第3.2-1表 ベローズ温度及び温度勾配

位置 (cm)	温度 (°K)	温度勾配 (°K/cm)
0	300	15.2
5	350	6.1
20	381	0.4
50	383	0.0
68	383	0.0

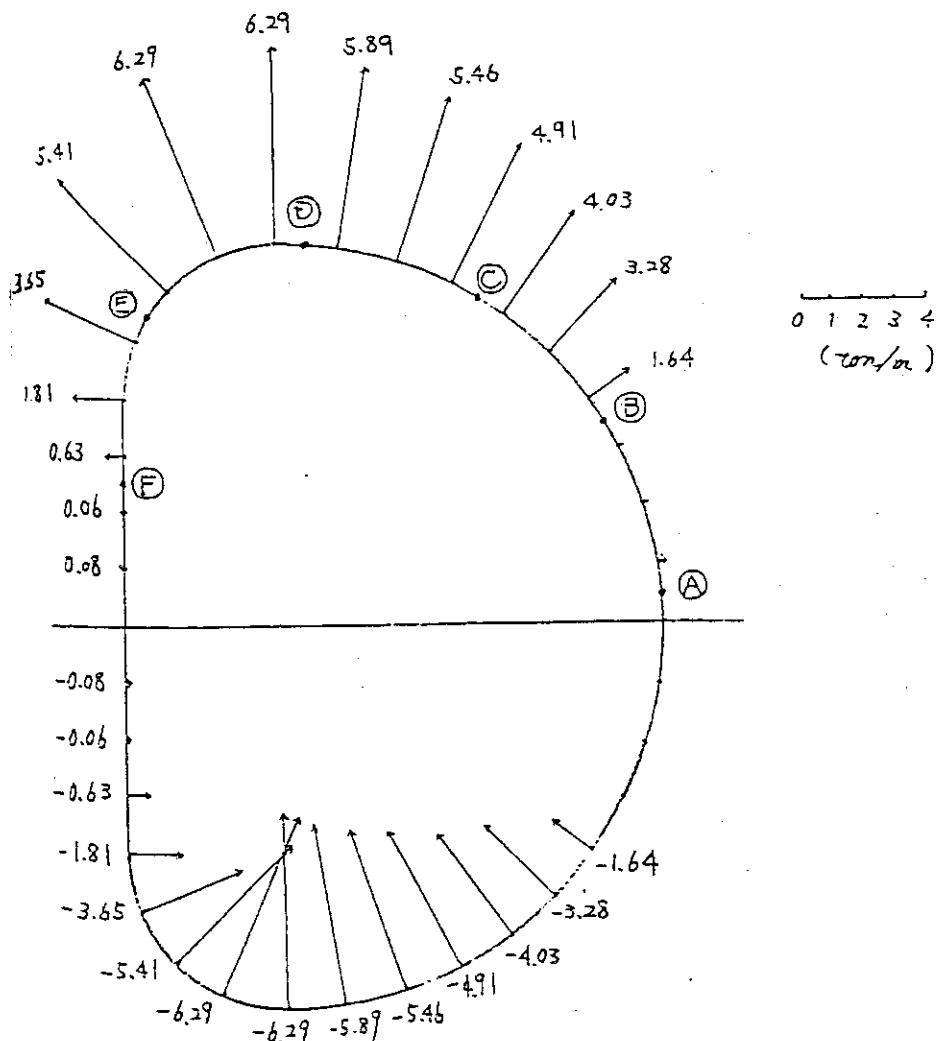
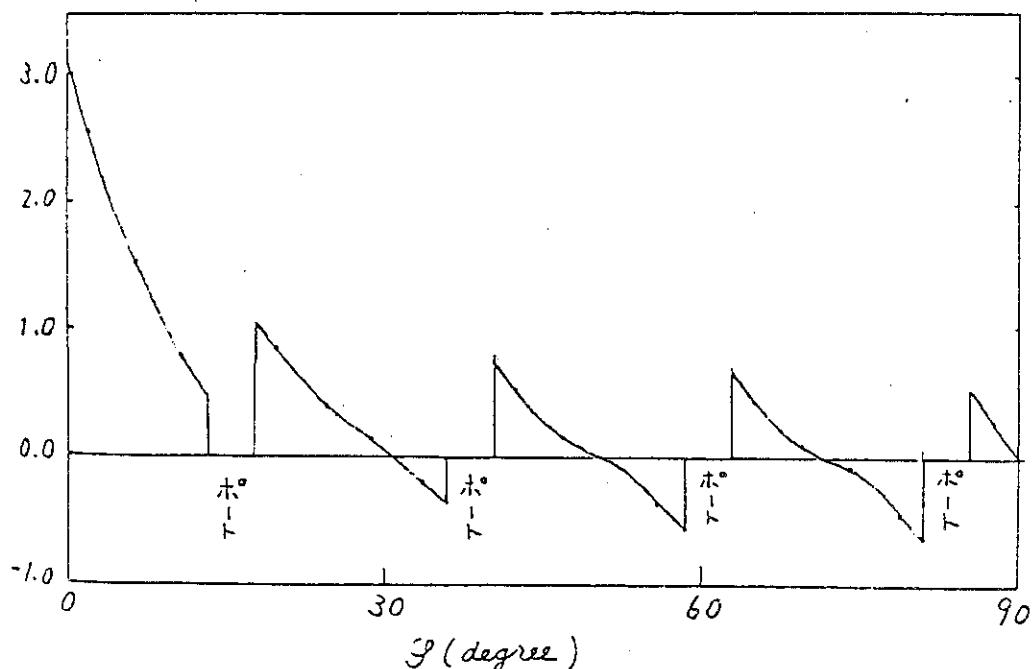
注) 真空容器温度を 300 °K と仮定した。



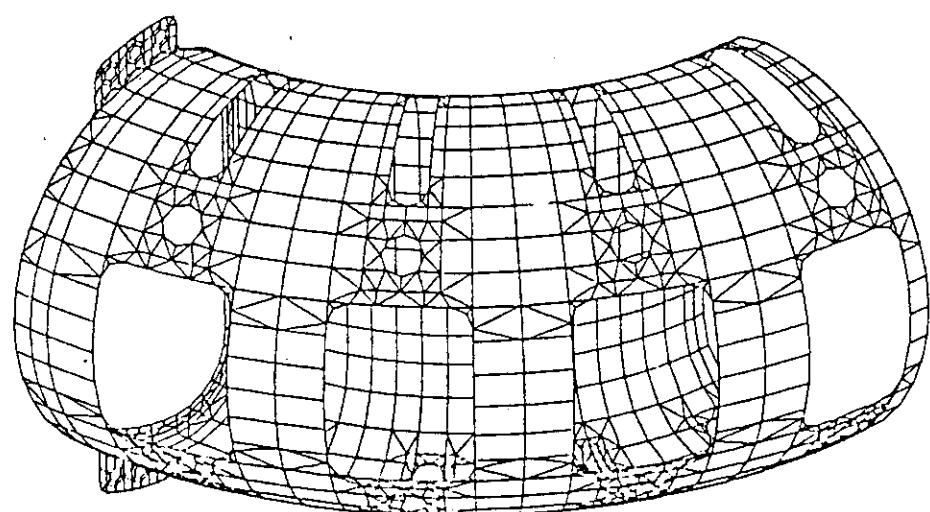
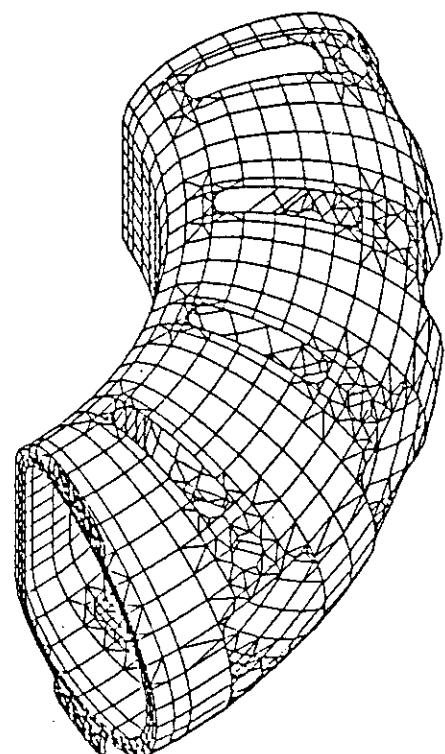
第3.2-1図 真空容器渦電流解析モデル



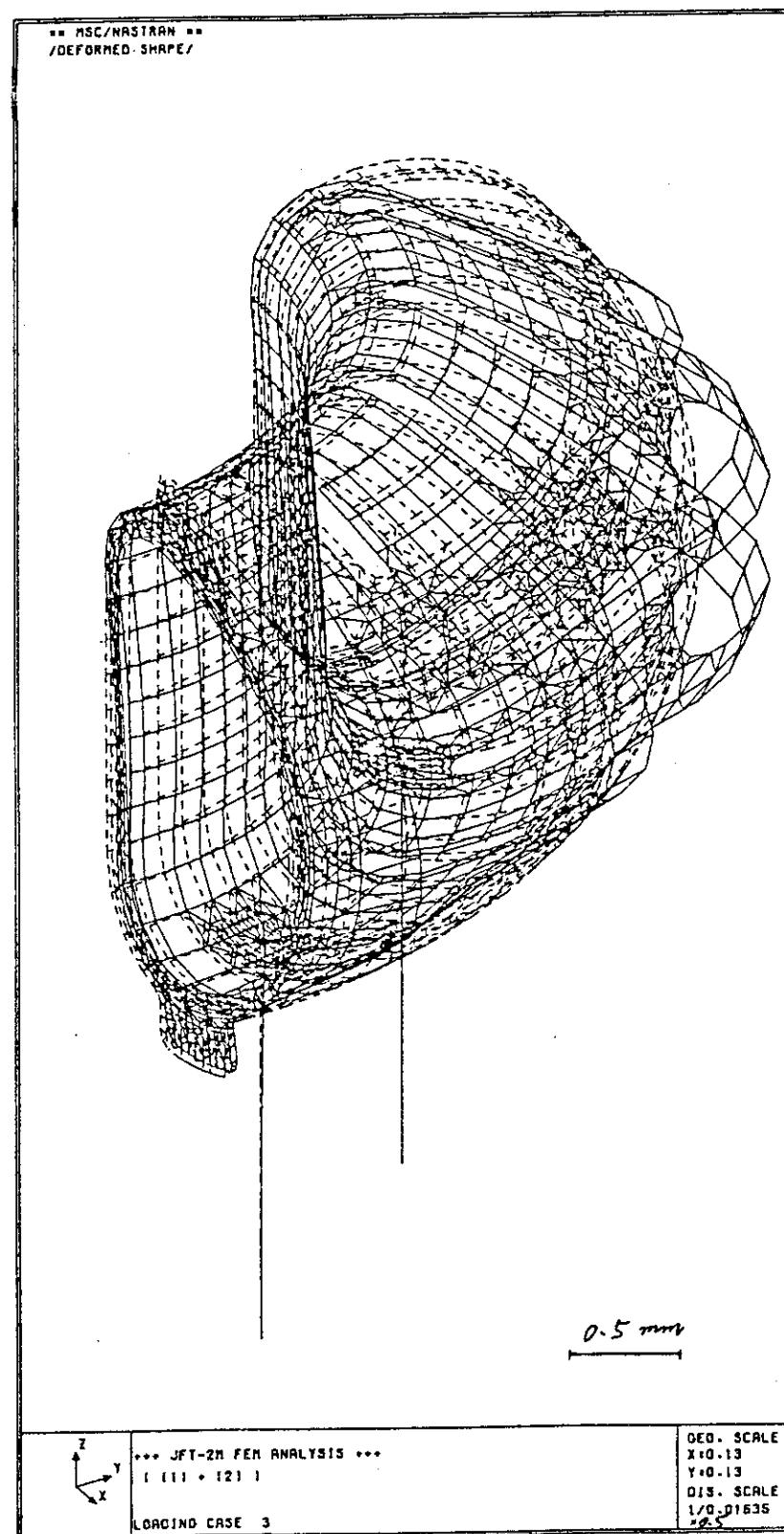
第 3.2-2 図 涡電流流線図  $t = 3 \text{ msec}$

第3.2-3図 フランジ部 ( $\varphi = 0^\circ$ ) に加わる電磁力 ( $t = 3 \text{ msec}$ )第3.2-4図 トロイダル方向電磁力分布 ( $t = 3 \text{ msec}$ )

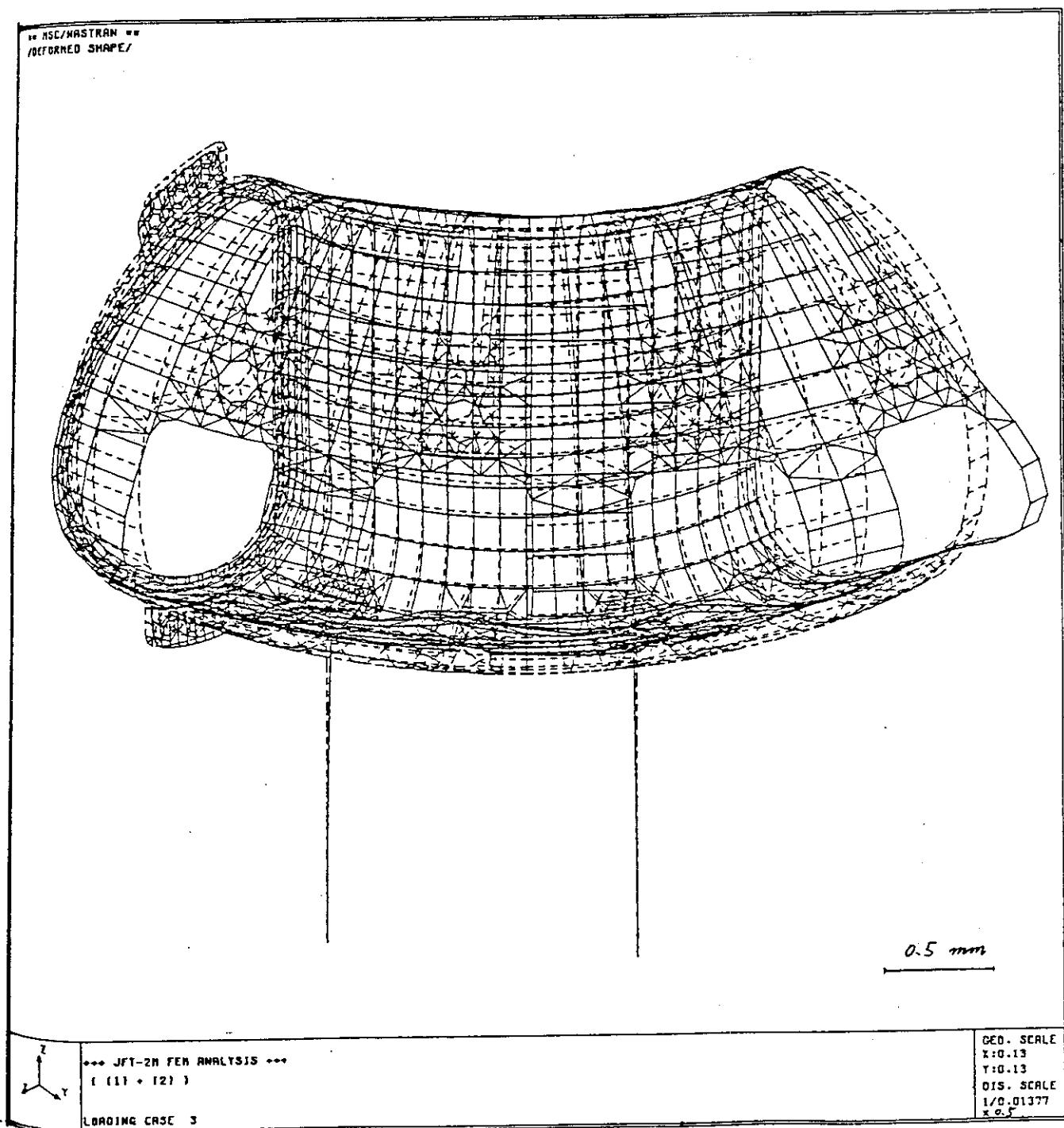
ポロイダル断面D点



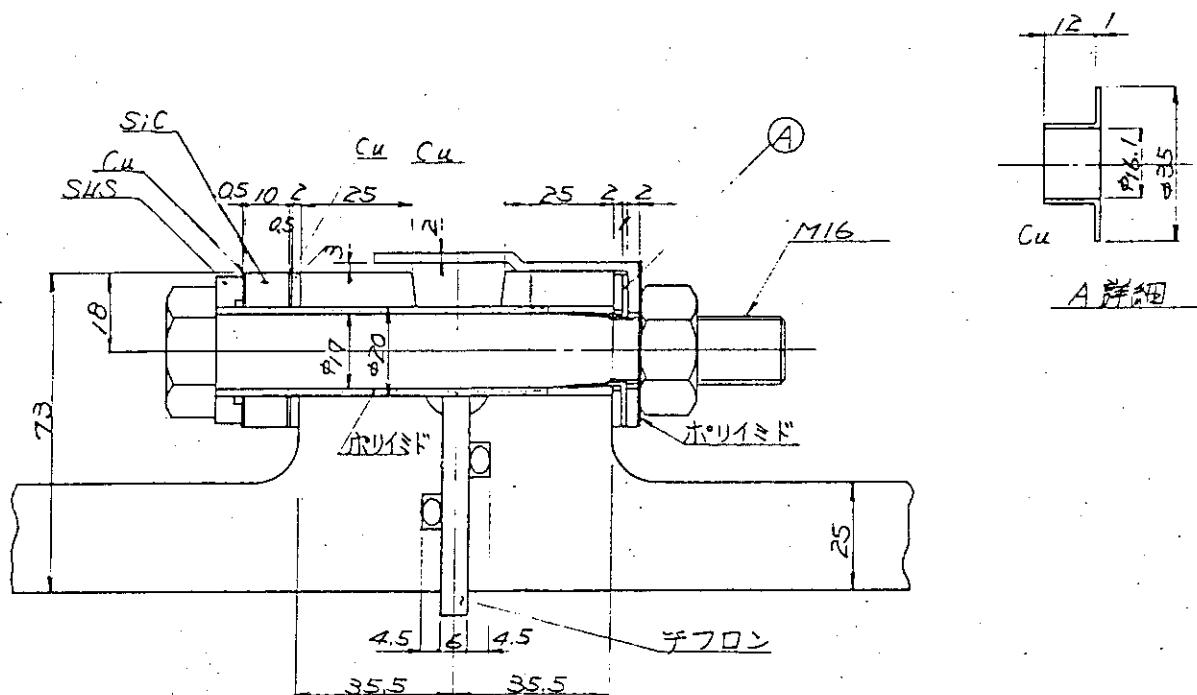
第3.2-5図 解析モデル鳥瞰図



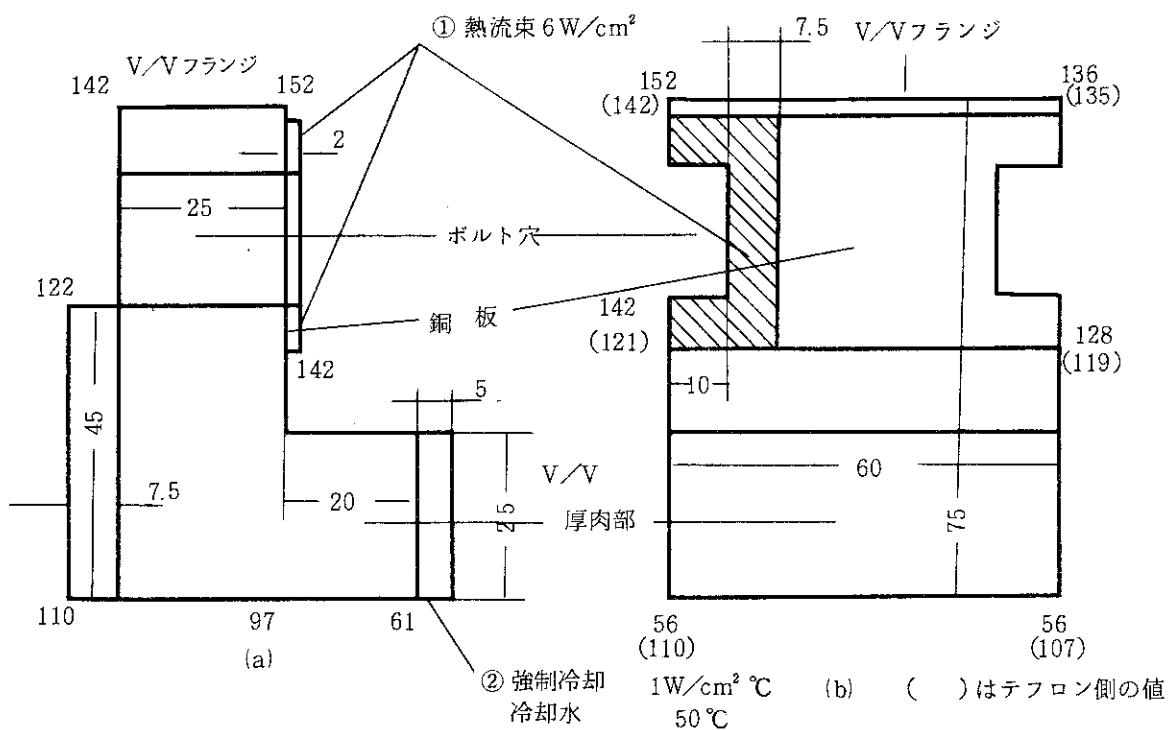
第3.2-6 図(a) 真空容器変形鳥瞰図A (荷重ケース(1)+(2))

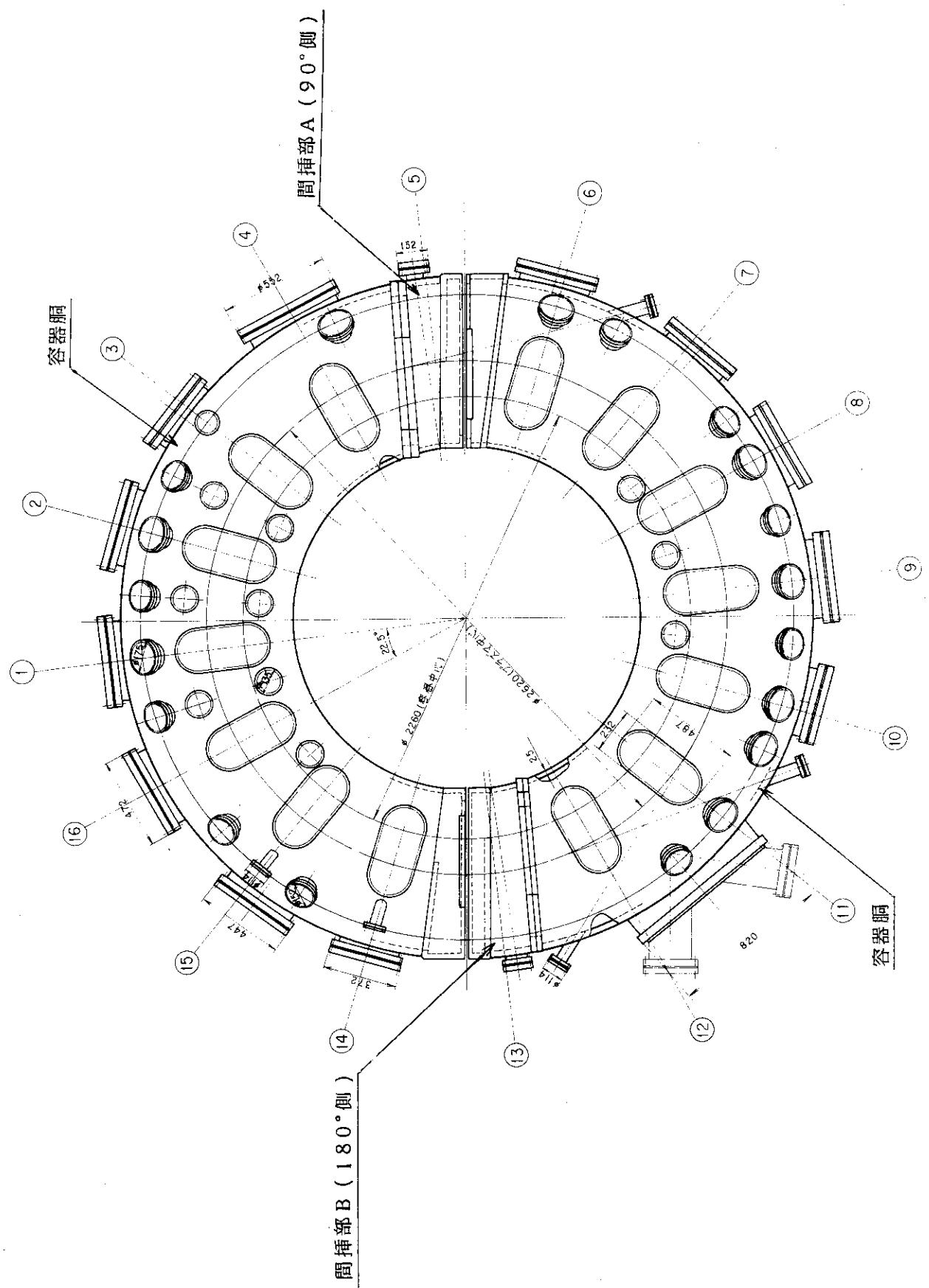


第3.2-6 図(b) 真空容器変形鳥瞰図B (荷重ケース(1)+(2))



第3.2-7図 シャント抵抗体基本構造図

第3.2-8図 TDC時のシャフト抵抗体発熱(4KW)  
によるフランジ部温度分布

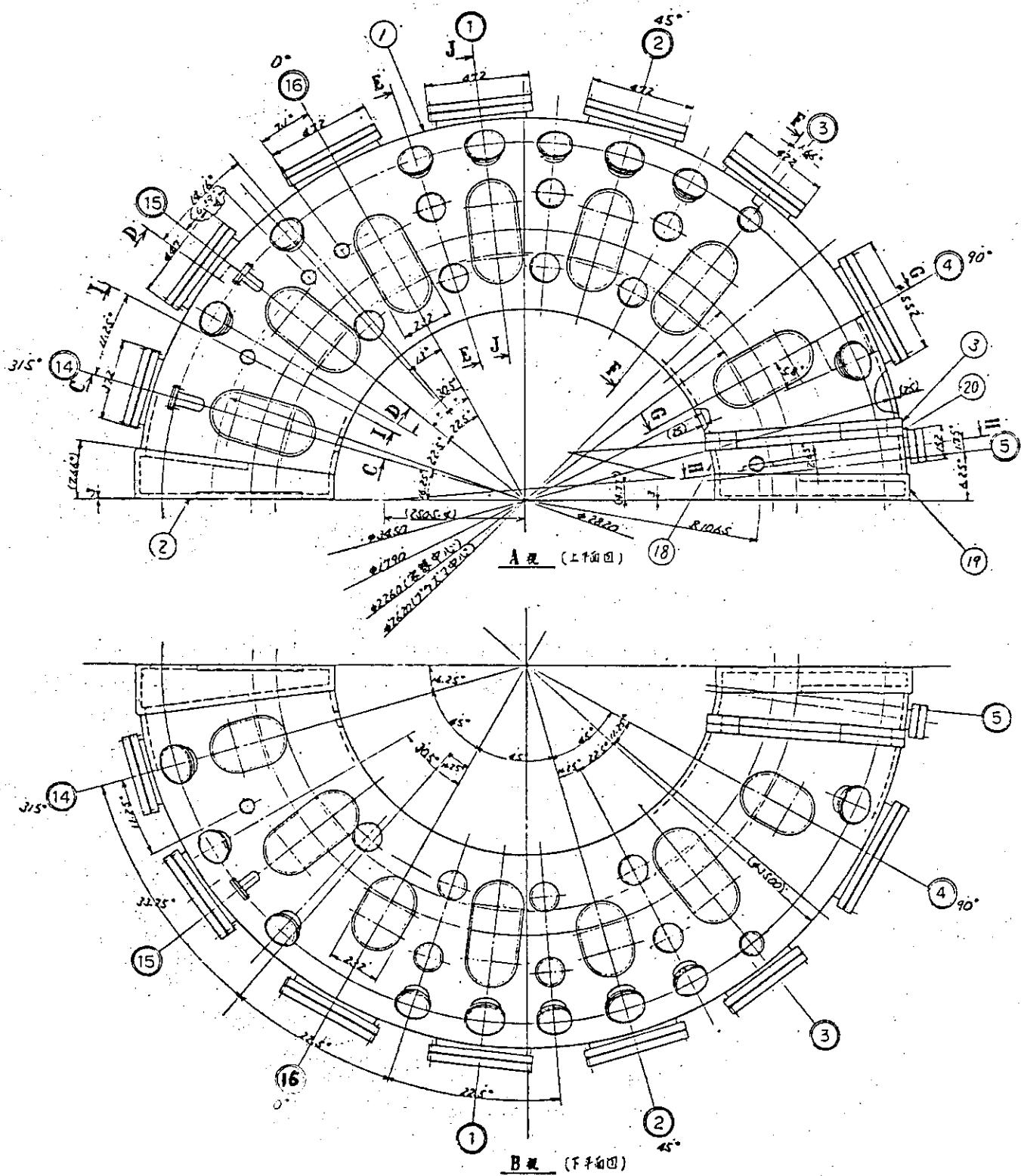


第3.2-9図 真空容器平面図

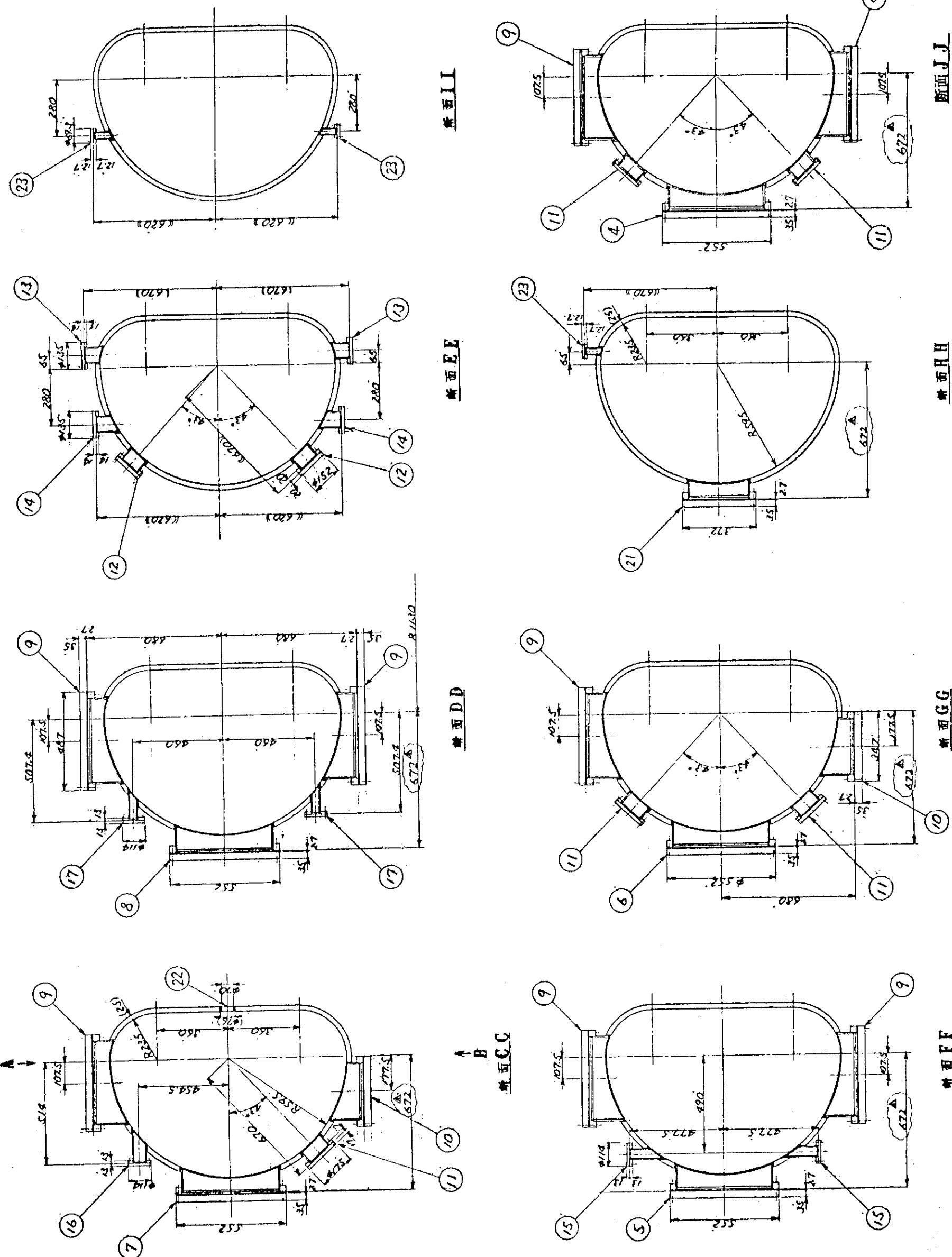
第3.2-2表 ポート種類・個数一覧表

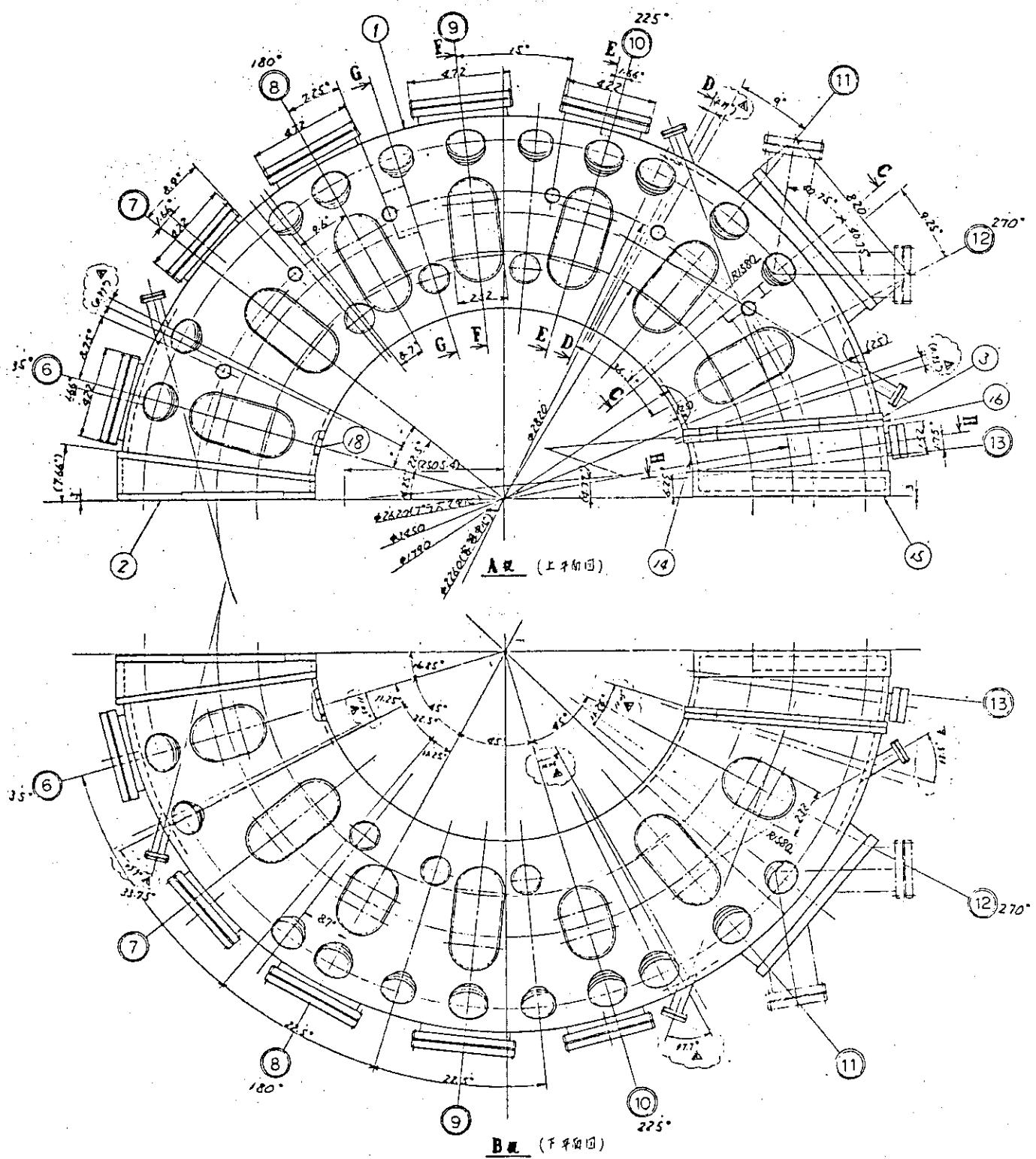
ポート仕様(種類・寸法・個数)				フランジ種類・個数					
名 称		略 称	ポート内径(mm) 形 状	個 数	盲	変 換	加工用盲	持 続	フィード スルー
大 ボ ー ト	NBIポート	NBI	200×400 レーストラック	2(分岐)	2				
	水平ポートA	LHA	400×480, R74 短形	5	3		2	(真空排気) 1	
	水平ポートB	LHB	350×480, R74 短形	4	3	1	3		
	水平ポートC	LHC	φ480 円形	1	1	1			
	水平ポートD	LHD	80×300 レーストラック	2	1		2		
	水平ポートE	LHE	300×480, R74 短形	1	1				
	水平ポートF	LHF	375×480, R74 短形	1	1		1		
	垂直ポートA	LVA	160×415 レーストラック	20	17	7	3	(接続管) 2	
	垂直ポートB	LVB	160×275 レーストラック	8	7	2	2		
合 計				44	36	11	13	3	
小 ボ ー ト	斜ポートA	SOA	φ120.1 円形	19	19	2			4
	斜ポートB	SOB*	φ95.4 円形(UFC152)	20	20				14
	垂直ポートA	SVA	φ82.9 円形	14	14				8
	垂直ポートB	SVB	同 上	6	6				
	垂直ポートC	SVC*	φ32.1 円形(UFC70)	11	11				
	水平斜ポート	SHT*	φ57.5 円形(UFC114)	3	3				
	水平ポート	SOH	φ57.5 円形 φ42.4 円形	1 2	1 2				
	垂直ポート	SOV	φ42.4 円形	2	2				
合 形				78	78	2			26

(注) \*のみ銅板製ガスケット使用、他は全て金属中空Oリング使用

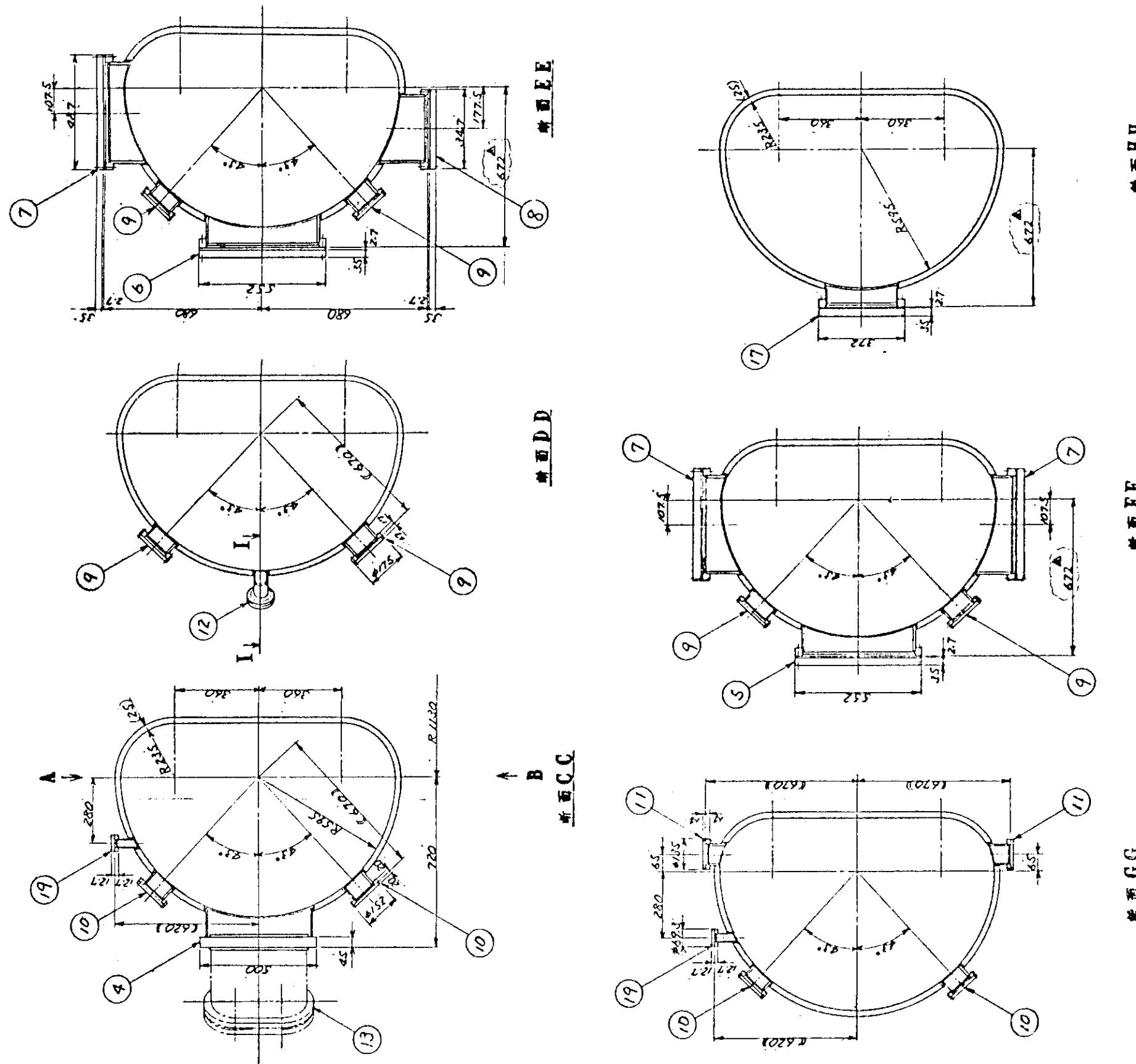


第3.2-10図(a) 真空容器 NE 側ポート配置

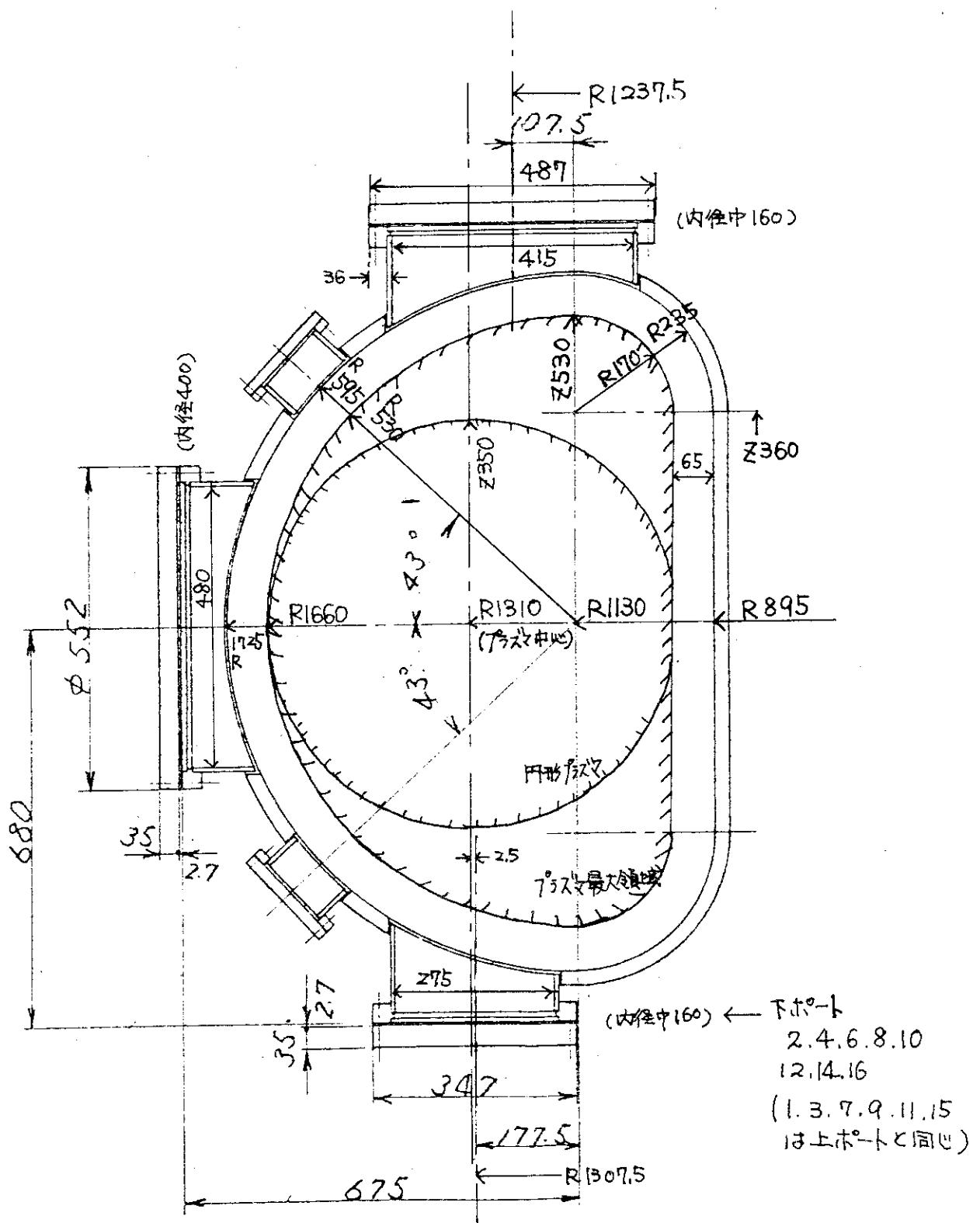




第3.2-10図(c) 真空容器 SW 側ポート配置



第3.2-10図(d) 真空容器 SW 側ボート断面図



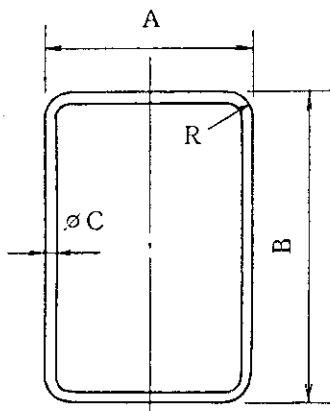
第3.2-11図 真空容器とプラズマ位置形状

第3.2-3表 ポートフランジ用ボルト類寸法・数量一覧

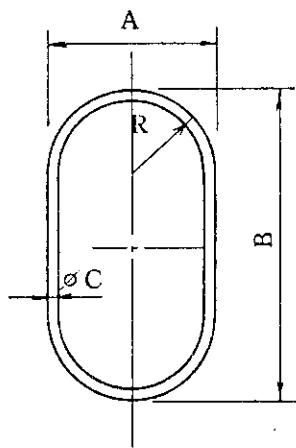
ポート名称	ポート 数 量	ボルト		平 座 金		ノックピン	
		寸法・仕様	数量*	寸法	数量*	寸法	数量*
N B I	2	M12×65, 硬質クロム メッキ	3 6	M12	3 6	M12	4
L H A	5	M12×75 "	5 6	"	5 6	"	4
L H B	4	M12×75 "	5 2	"	5 2	"	4
L H C	1	M12×75 "	5 0	"	5 0	"	4
L H D	2	M12×65 "	2 6	"	2 6	"	4
L H E	1	M12×75 "	4 8	"	4 8	"	4
L H F	1	M12×75 "	5 4	"	5 4	"	4
L V A	20	M12×75 "	3 6	"	3 6	"	4
L V B	3	M12×75 "	2 6	"	2 6	"	2
S O A	19	M8×35 "	1 2	M 8	1 2		
S O B	20	M8×40 "	1 6	"	1 6		
S V A	14	M8×30 "	8	"	8		
S V B	6	M8×30 "	8	"	8		
S V C	11	M6×25 "	6	M 6	6		
S H T	3	M8×40 "	8	M 8	8		
S O H	3	M8×30 "	6	"	6		
S O V	2	M8×30 "	6	"	6		
( K L F )	( 3 )	M12×50 "	2 6	M12	2 6	M12	2
		六角穴付ボルト					

(注) \*は、ポート1個当たりの数量を示す。

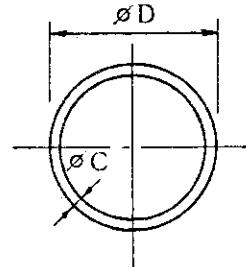
第3.2-4表 金属中空O-リング形状・寸法一覧

矩形O-リング

名 称	O-リング寸法 (mm)			
	A	B	R	C
L H A	423.5	503.0	85.5	318
L H B	373.5	"	"	"
L H E	323.5	"	"	"
L H F	398.5	"	"	"

レーストラック形O-リング

名 称	O-リング寸法 (mm)			
	A	B	R	C
N B I	223.5	123.5	111.75	3.18
L H D	103.5	323.5	51.75	"
L V A	183.5	438.5	91.75	"
L V B	183.5	298.5	91.75	"
K L F *	134.5	294.5	67.25	"

円形-Dリング

名 称	O-リング寸法 (mm)	
	D	C
L H C	505.0	3.18
S O A	139.76	2.39
S V A	98.49	"
S V B	98.49	"
S O V	81.04	"
S O H	81.04	"
H S F **	635.0	3.18

材質：SUS321

表面処理：

軟質銀メッキ

(厚み40μm)

（注1）「C」は、銀メッキ（厚み40μm）を行う前のチューブ径を示す。

2) \*は、可動リミタ取付用フランジを示す。

3) \*\*は、真空排気設備接続短管の円形フランジを示す。

### 3.3 真空容器内部品

真空容器内部品は、容器内部に装着される真空雰囲気に曝される各種部品、組込検出器等から構成される。しかしながら、組込検出器については、本節では主要目のみに言及し、詳細は次節にて述べる。

#### 3.3.1 設計検討

##### (1) NBI ビームダンパ

プラズマ消滅時の NBI ビームダンパの温度変化を、Mo と SUS 304 L について比較した。プラズマ消滅時のビームダンパへの熱流束は第 3.3-1 図に与えられる。ここでは熱流束のピーク値として  $1100 \text{ W/cm}^2$  を仮定する。熱流束ピーク点での表面温度を

$$\Delta T_{\text{surf}} = \frac{2q\sqrt{\Delta t}}{\sqrt{\rho c k \pi}}$$

にて評価する。ここで、 $\Delta T_{\text{surf}}$ ：表面の温度上昇、 $\Delta t$ ：プラズマ消滅時から、NBI ビーム停止までの時間、 $q$ ：熱流束、 $\rho$ ：比重、 $c$ ：比熱、 $k$ ：熱伝導率である。 $q = 1100 \text{ W/cm}^2$  とした場合の  $\Delta t$  と  $\Delta T_{\text{surf}}$  との関係を第 3.3-2 図に示した。 $\Delta t = 20 \text{ msec}$  とした場合、SUS 304 L では  $\Delta T_{\text{surf}} = 210^\circ\text{C}$ 、モリブデンでは  $\Delta T_{\text{surf}} = 85^\circ\text{C}$  である。仮に  $\Delta t = 100 \text{ msec}$  とした場合には、SUS 304 L では  $\Delta T_{\text{surf}} = 465^\circ\text{C}$ 、モリブデンでは  $\Delta T_{\text{surf}} = 185^\circ\text{C}$  となる。

ビームダンパの板材の肉厚を  $d = 5 \text{ mm}$  とすると、数秒以内にダンパの板厚方向の温度は一様となるが、この温度の初期温度に対する温度上昇  $\Delta T_{\text{bulk}}$

$$\Delta T_{\text{bulk}} = \frac{\Delta t \cdot q}{\rho c d}$$

も第 3.3-2 図に示した。

以上の結果から、NBI ビームダンパとしては、Mo の方が望ましいが、SUS（融点  $1500^\circ\text{C}$ ）でも使用に耐えることがわかる。このため、JFT-2M 装置のビームダンパとしては SUS 304 を使用するとともに、インターロック機構を設け、プラズマが生成していない場合には NBI の入射が行えないようにしている。

##### (2) ライナ渦電流および電磁力

ライナに発生する渦電流および電磁力を概算した。印加磁場は、トロイダル磁場  $1.5 \text{ T}$ 、ポロイダル磁場  $0.4 \text{ T}$ 、垂直磁場  $0.2 \text{ T}$  とし、ポロイダル磁場および垂直磁場は  $4 \text{ msec}$  の時定数で変化するとする。即ち、 $B_p = 100 \text{ T/sec}$ 、 $B_v = 50 \text{ T/sec}$  である。第 3.3-3 図から分かる様に、ライナ面には垂直に  $B_v \sin \theta$  の磁場が加わる。第 3.3-4 図に示すような矩形断面をもち、両端が真空容器壁に固定された導通したライナーを考える。第 3.3-5 図、第 3.3-6 図にこのライナーに働く電流値、電磁力を示す。

上記の結果より、ライナーに発生する電磁力について概略の評価は可能となる。

第 3.3-1 表に、SUS 製のライナーについての計算結果を示す。ライナー形状は、 $a = 100 \text{ mm}$ 、

$b = 30 \text{ mm}$ ,  $d = 3 \text{ mm}$  とし,  $\rho = 72 \mu \Omega \cdot \text{m}$ ,  $\theta = 90^\circ$  と仮定した。

ポロイダル方向ライナーには,  $B_T$  との結合により, 主にライナーを押し倒そうとする力が発生する。また  $B_P$  との結合により, ライナーを真空容器から引き離そうとする力が発生する。ライナーを 20 cm 間隔で, M 8 のボルトにより台座に固定すると仮定すると,  $B_P$  との結合により発生する電磁力により生ずるボルトへの引張り荷重は, 3 kg であり, 問題にならない値である。

トロイダル方向ライナーでは, ライナー面に一様に加わる電磁力は  $B_P$  との結合成分である。これによりボルトに働く引っ張り荷重は, ポロイダル方向ライナーと同様な支持条件で, 最大 10 kg 程度と考えられるが, 問題にならない値である。

また, いずれの場合もライナー材厚が 3 mm とすれば, ライナー自身に発生する応力も充分小さい。

次に発熱について検討する。第 3.3-1 表の結果より 3 mm 厚のライナーに 10 KA の電流が流れるとすると, 発熱量は,  $2.4 \text{ W/cm}^2$  となる。この値はプラズマからの輻射による入熱に比べ小さく無視しうる値である。

### (3) 可動リミター電磁力

可動リミターに働く電磁力を, リミタ面に垂直方向磁場 0.4 T が 4 msec で消滅するという条件で求めた。この時, 面に平行にトロイダル磁場 1.5 T, ポロイダル磁場 0.4 T が加わるとする。材質は Mo と SUS とし, それぞれの電気抵抗率を  $5 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ,  $72 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$  とする。可動リミター寸法は, 巾 10 cm, 長さ 20 cm, 厚さ 2 cm とする。第 3.3-7 図に可動リミター電磁力解析モデルを示す。第 3.3-8 図に最大電磁力分布を示す。また, x 方向, y 方向のモーメントを第 3.3-2 表に示す。

この電磁力により, リミター板取り付け部に曲げ応力が発生するが, SUS を使用した場合には構造上問題とならない。

グラファイトを使用した場合には, 電気抵抗率が SUS の約 1/10 となるため, インタクティブな効果が効かないとすれば, 電磁力, モーメントとも SUS の約 1/10 となり, 電磁力条件はさらに楽になる。

### (4) 磁気リミター板

磁気リミター板は, ダイバーター運転時の高熱負荷から真空容器と内部品を保護するためのものである。JFT-2M 本体完成時には, 台座が取り付いたのみであり, 磁気リミター板構造は現在検討中である。ここではその概要を示す。

i) リミター板構造 リミター板材料としては, Mo, グラファイト, SiC が候補材として検討されたが, 結局, 低 Z 材で耐熱衝撃性に優れたグラファイトが選定された。リミター板の概念図を第 3.3-9 図に示す。かさ型のグラファイト製耐熱ブロックを, ステンレス製のホルダーを介して真空容器上の台座に取り付ける構造としている。また磁気リミター板には冷却機構は設けず, 輻射とホルダーからの熱伝導により真空容器へ入熱を逃がすこととしている。

ii) 磁気リミター板入射熱条件 磁気リミター板への入熱条件としては

Joule 加熱  $1 \text{ MW} \times 0.5 \text{ sec}$

NBI 加熱  $2 \text{ MW} \times 0.2 \text{ sec}$

ICRF 加熱  $4 \text{ MW} \times 0.3 \text{ sec}$

のプラズマへの入射パワーを  $6 \text{ MW} \times 0.3 \text{ sec}$  の矩形波と換算し、そのうち 50 %が輻射に変換され、残り 50 %が内側と外側のセパラトリックスに沿って 1 : 4 の割合で磁気リミター板に入射すると仮定する。外側セパラトリックスのスクレーブオフ層の巾を 5 cm とし、熱流束分布のピーキングファクターを 2 と仮定すると、トロイダル円環面上への最大熱流束は  $600 \text{ W/cm}^2 \times 0.3 \text{ sec}$  となる。

iii 磁気リミター板表面温度上昇 磁気リミター板への表面熱流束  $q$  は、磁気リミター板の傾き  $\alpha$ 、セパラトリックスでの磁場の傾き  $\beta = B_p / B_t$  より次式で与えられるとする。

$$q = \frac{\alpha + \beta}{\beta / \sqrt{1 + \alpha^2}} q_0$$

ここで、 $q_0$  はトロイダル円環面上への熱流束である。リミター板のかさ部の傾斜  $\alpha$  を  $1/6$  とし、 $\beta = 1/20$  と仮定すると、

$$\begin{aligned} q &= 4.3 q_0 \\ &= 2.58 \text{ kW/cm}^2 \end{aligned}$$

となる。このとき、表面温度上昇  $\Delta T$  は

$$\Delta T = \frac{2q \sqrt{t}}{\rho c p k u}$$

より、 $\rho = 1.85 \text{ g/cm}^3$ 、 $C_p = 1.21 \text{ J/g}^\circ\text{C}$ 、 $K = 0.34 \text{ W/cm}^\circ\text{C}$  とすると

$$\Delta T = 1830^\circ\text{C}$$

となる。

### 3.3.2 構造および仕様

#### (1) 構造 (第 3.3-10 図、11 図参照)

i ビームダンパ 1組のビームダンパは、NBI ビーム投影部分の容器内壁およびポート短管内壁を保護する 9 個のステンレス鋼製ライナ部材（板厚 4 mm）から構成される。各ライナ一部材は六角穴ボルト（M 8）にて内部品取付用台座に固定されている。2組のビームダンパは基本的な構造は同じであり取付場所の条件に応じ、寸法・形状に一部相違がある（第 3.3-12 図参照）。

ii 固定リミター 1組（ポロイダル断面一ヶ所）の固定リミターは 12 個の直方体状のステンレス鋼製のブロック（厚み 47 mm）から構成される。各ブロックは 2 本の六角穴付ボルト（M 8）で内部品取付台座に固定される。六角穴付ボルトは、ブロックの表面から深く沈められた位置で締付けを行う構造としている。1組の固定リミターには 6 本（ブロック 1 つおきに 1 本）の熱電対が容器壁側から埋込まれた状態（計測点はリミッタ表面から約 15 mm の位置）で装着されている（第 3.3-13、14 図参照）。

iii 热電対 各熱電対の容器内シース線は全長にわたって 1.5 mm 厚のステンレス鋼製保護ライナで覆われ、各保護ライナはサドルコイルの場合と同様に溶接で容器内壁に固定されている。熱電対の容器外への引出し個所は磁気プローブと共に用の小ポートフィールドスルーフランジである。

## iv 内部品取付用台座

数 量 : 1121 個 (用途の内訳は第 3.3-3 表参照)

形 式 : M 8 ネジ穴付台座

寸 法 :  $\phi 15 \text{ mm} \times 10 \text{ mm H}$

材 質 : SUS 304

## (2) 仕 様

## i ビームダンパ

数 量 : 2 組

配 置 : ポートセクション⑦ および⑩ の水平大ポート付近  
(NBI ビーム投影部分)

形 式 : 薄板ライナー

寸 法 : 840 mm × 415 mm (外形寸法)

材 質 : SUS 304

板 厚 : 4 mm

## ii 固定リミタ

数 量 : 2 組 (12 個／1 組)

配 置 : ポートセクション⑦～⑧ および⑯～⑰ のボロイダル断面

形 状 : 直方体状ブロック

寸 法 : 50 mm<sup>W</sup> × 47 mm<sup>H</sup> × 150, 200 mm<sup>L</sup>

材 質 : SUS 304, グラファイト

## iii 可動リミタ

数 量 : 3 基

配 置 : ポートセクション⑪ の上部ポート, ⑩ の水平と下部ポート

可動ストローク : 200 mm (第 3.3-14 図)

作 動 : 遠隔操作モータ駆動

## iv 热電対

数 量 : 27 本

計測点内訳 : 固定リミター 12 点

$B_p$  プローブ保護板 2 点

差動プローブ保護板 2 点

ビームダンパ 2 点

その他 9 点

仕 様 : CC 非接地型 JIS 0.4 級

シース材質 : SUS 316

シース外径 :  $\phi 3.2 \text{ mm}$

## v 組込検出器保護ライナ

数 量 : 1 式

形 式 : M 8 ボルト止め

ただし、サドルコイルおよび熱電対の保護ライナは溶接により固定

材 質 : SUS 304

板 厚 : 4 mm, 3 mm, 1.5 mm, 1 mm

vi 容器絶縁分割部テフロン保護板

数 量 : 1式(2組)

形 式 : シャント抵抗部熱伝導板と一体構造

材 質 : SUS 304

板 厚 : 2 mm

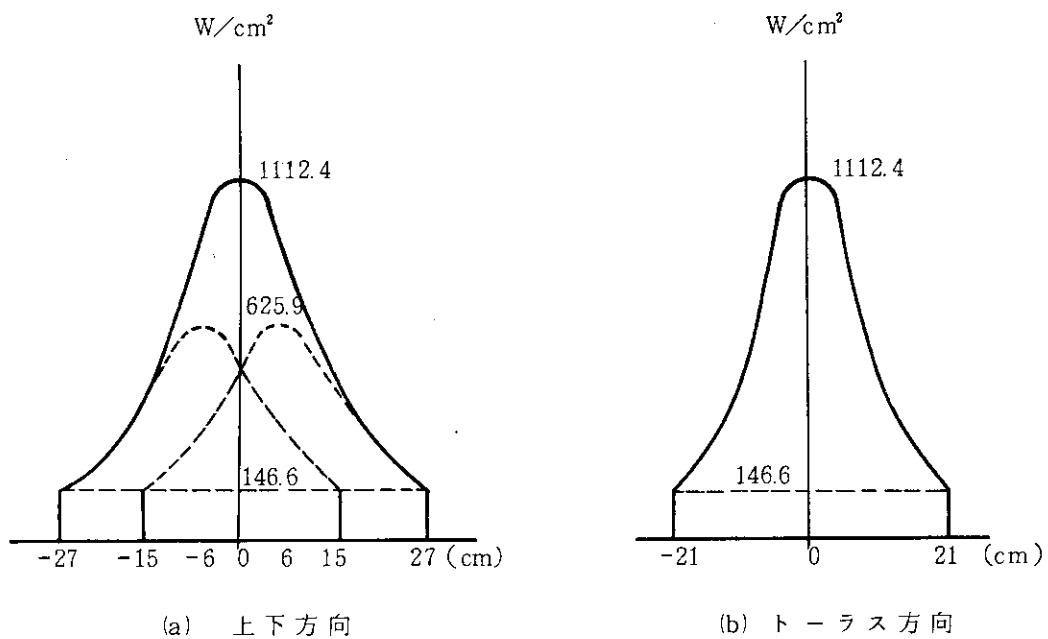
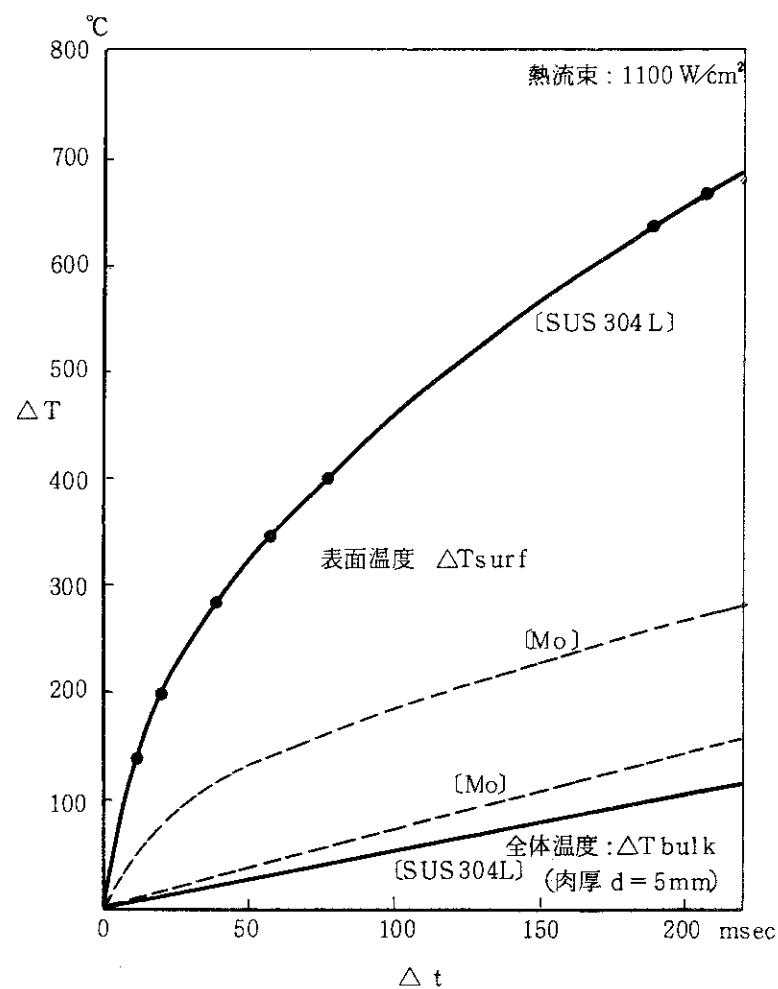
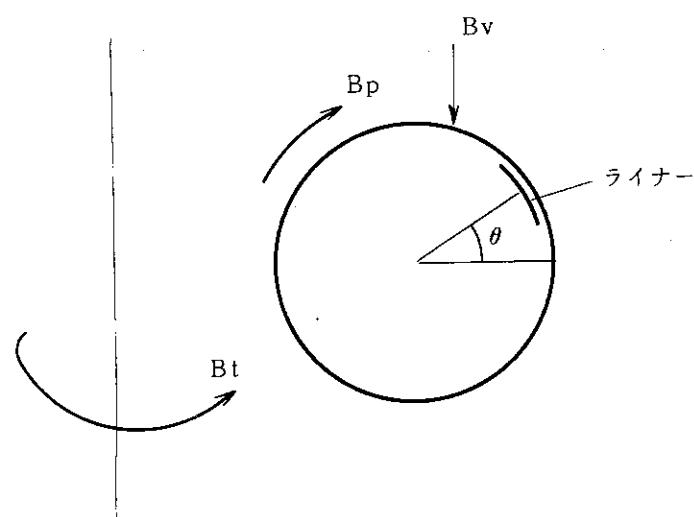


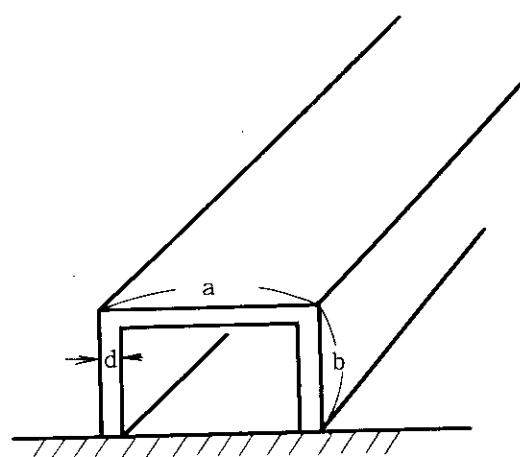
図 3.3-1 図 ビームダンパーへの熱流束分布



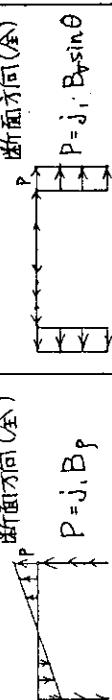
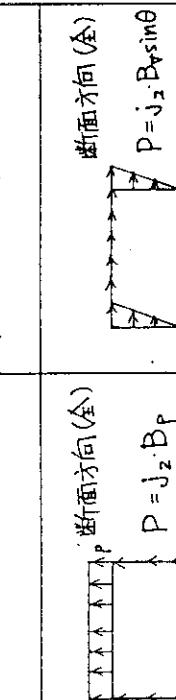
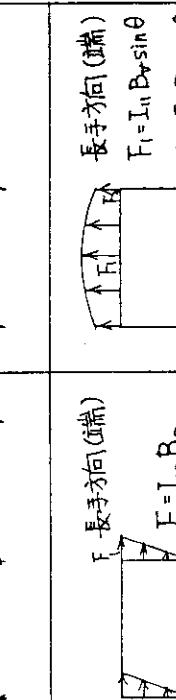
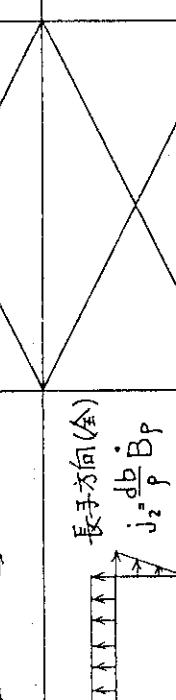
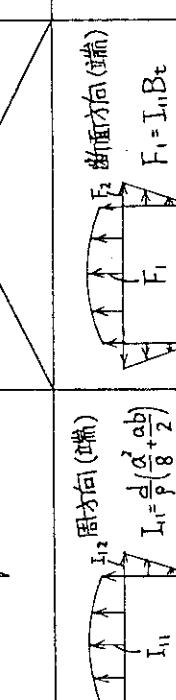
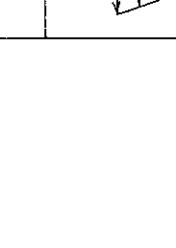
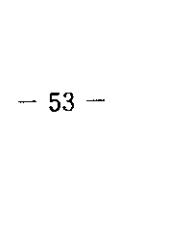
第 3.3-2 図 ビームダンパーの温度上昇



第3.3-3図 印加磁場とライナー位置の定義



第3.3-4図 矩形断面をもつライナー形状

電流分布	$B_t$	$B_p$	$B_{tr} \sin \theta$	
長手方向(全)	$j_1 = \frac{da}{2P} B_p \sin \theta$			
長手方向(全)	$j_2 = \frac{db}{P} B_p$			
周方向(端)	$I_{11} = \frac{d}{2} \left( \frac{\alpha^2 + ab}{8} \right) B_p \sin \theta$ $I_{12} = \frac{dab}{P} B_p \sin \theta$			
周方向(端)	$I_2 = \frac{dab}{P} B_p$			
				単位 A/m A N/m <sup>2</sup> N/m

第3.3-5図 トロイダル方向ライナ

電流分布	$B_t$	$B_p$	$B_r \sin \theta$
長手方向(全)			
周方向(全)			
周方向(端)			
			単位 I (A) P (N/m <sup>2</sup> ) F (N/m)
		$B_t$	$B_r \sin \theta$
		$B_p$	$b$
			$\alpha$

第3.3-6図 ポロイダル方向ライナ

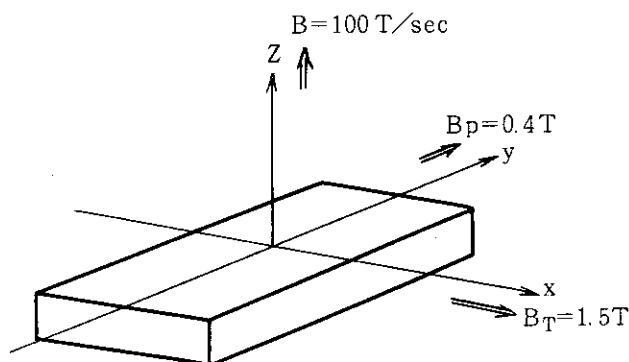
第3.3-1表 ライナーに発生する渦電流と電磁力

電流分布	$B_t = 1.5 \text{ T}$	$B_p = 0.4 \text{ T}$	$B_v \sin \theta = 0.2 \text{ T}$
$J_1 = 10.4 \text{ KA/m}$		$P = 0.04 \text{ kg/cm}^2$	$P = 0.02 \text{ kg/cm}^2$
$J_2 = 12.5 \text{ KA/m}$		$P = 0.05 \text{ kg/cm}^2$	$P = 0.03 \text{ kg/cm}^2$
$I_{11} = 537 \text{ A}$	$F_1 = 0.88 \text{ kg/cm}$	$F = 0.13 \text{ kg/cm}$	$F_1 = 0.12 \text{ kg/cm}$
$I_{12} = 313 \text{ A}$	$F_2 = 0.48 \text{ kg/cm}$		$F_2 = 0.07 \text{ kg/cm}$
$I_2 = 625 \text{ A}$	$F_3 = 0.97 \text{ kg/cm}$	$F = 0.25 \text{ kg/cm}$	$F = 0.13 \text{ kg/cm}$

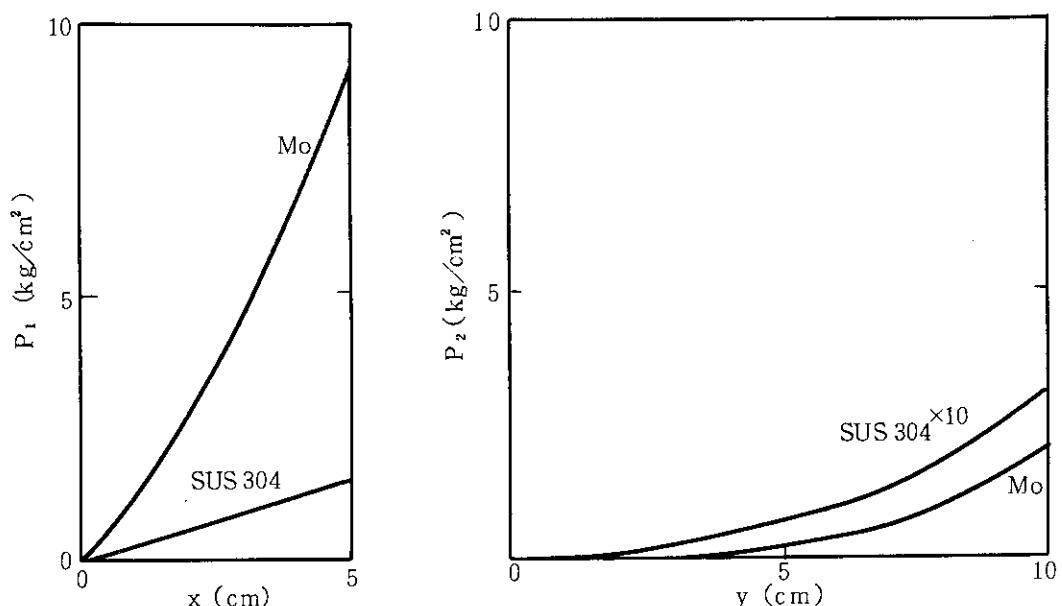
a) トロイダル方向ライナに発生する渦電流と電磁力

電流分布	$B_t = 1.5 \text{ T}$	$B_p = 0.4 \text{ T}$	$B_v \sin \theta = 0.2 \text{ T}$
$J_1 = 10.4 \text{ KA/m}$	$P = 0.16 \text{ kg/cm}^2$		$P = 0.02 \text{ kg/cm}^2$
$J_3 = 7.8 \text{ KA/m}$	$P = 0.12 \text{ kg/cm}^2$	$P = 0.03 \text{ kg/cm}^2$	$P = 0.016 \text{ kg/cm}^2$
$I_{11} = 573 \text{ A}$		$F_1 = 0.23 \text{ kg/cm}$	$F_1 = 0.17 \text{ kg/cm}$
$I_{12} = 313 \text{ A}$	$F = 0.48 \text{ kg/cm}$	$F_2 = 0.13 \text{ kg/cm}$	$F_2 = 0.07 \text{ kg/cm}$

b) ポロイダル方向ライナに発生する渦電流と電磁力



第3.3-7 可動リミタ電磁力解析モデル

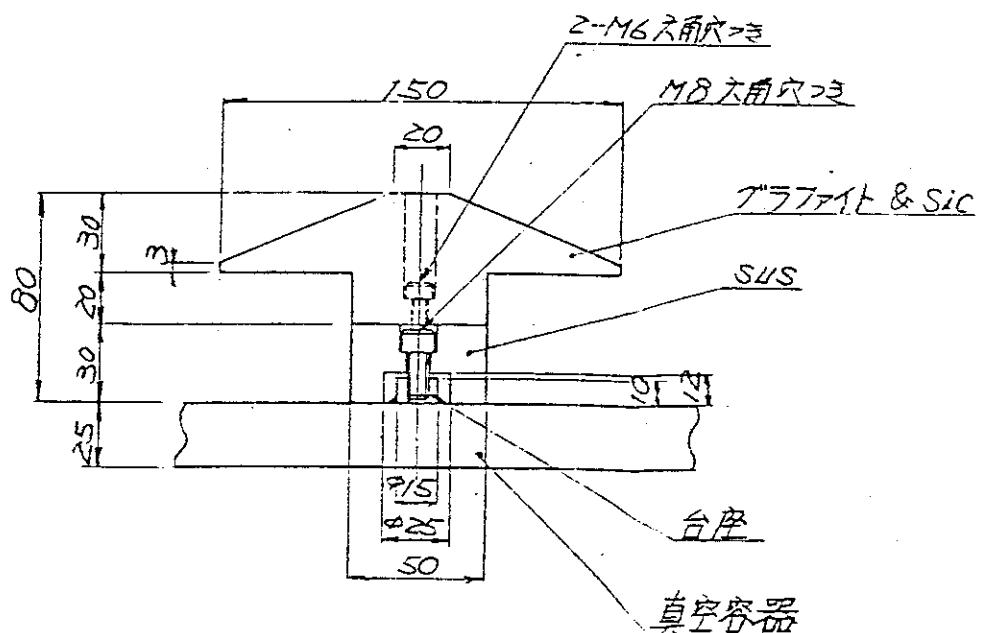


第3.3-8図 可動リミター電磁力分布

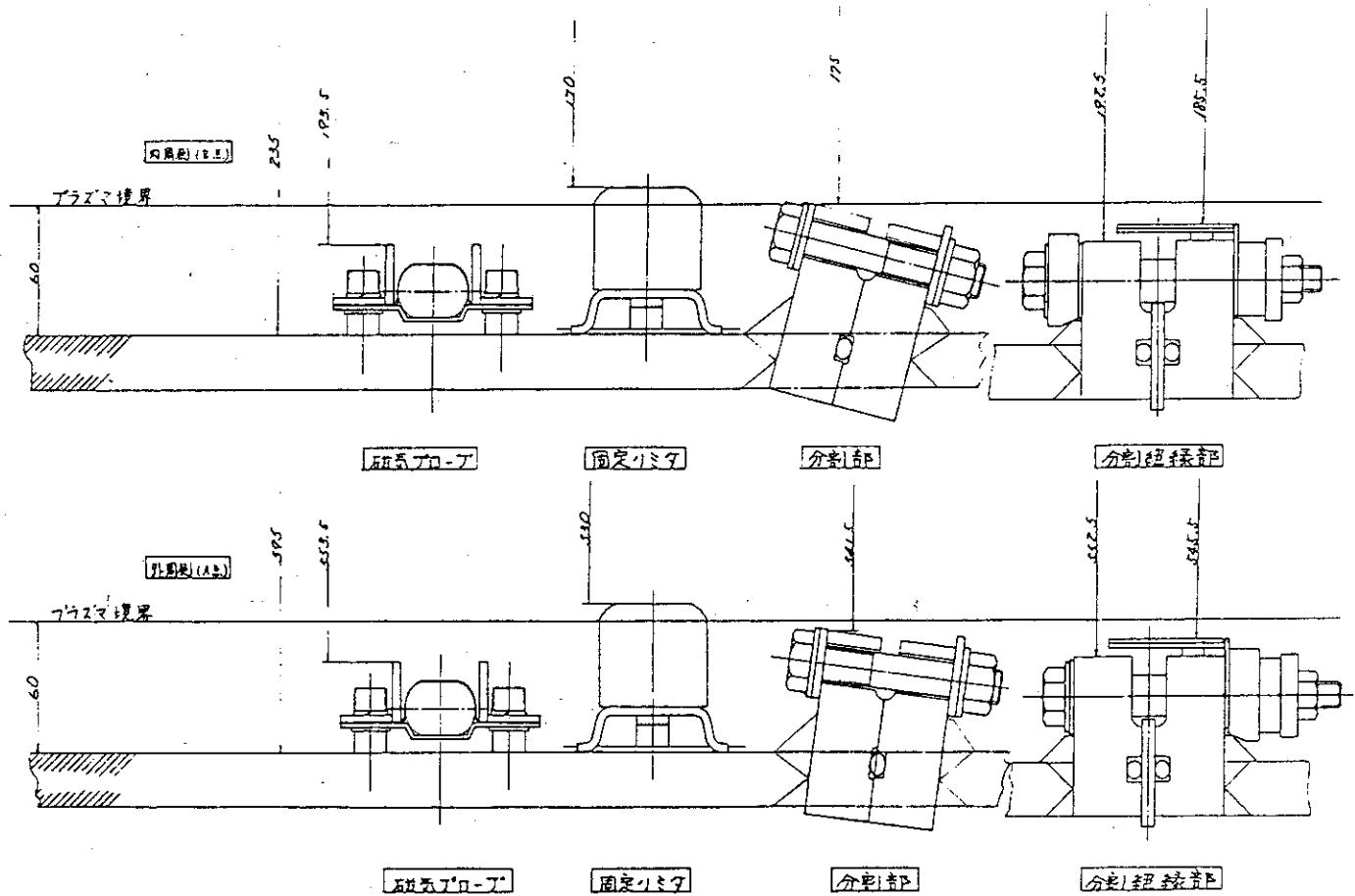
第3.3-2表 モーメント

	Mo	SUS 304
$M_x$	$816 \text{ kg} \cdot \text{cm}$	$147 \text{ kg} \cdot \text{cm}$
$M_y$	$2710 \text{ kg} \cdot \text{cm}$	$505 \text{ kg} \cdot \text{cm}$

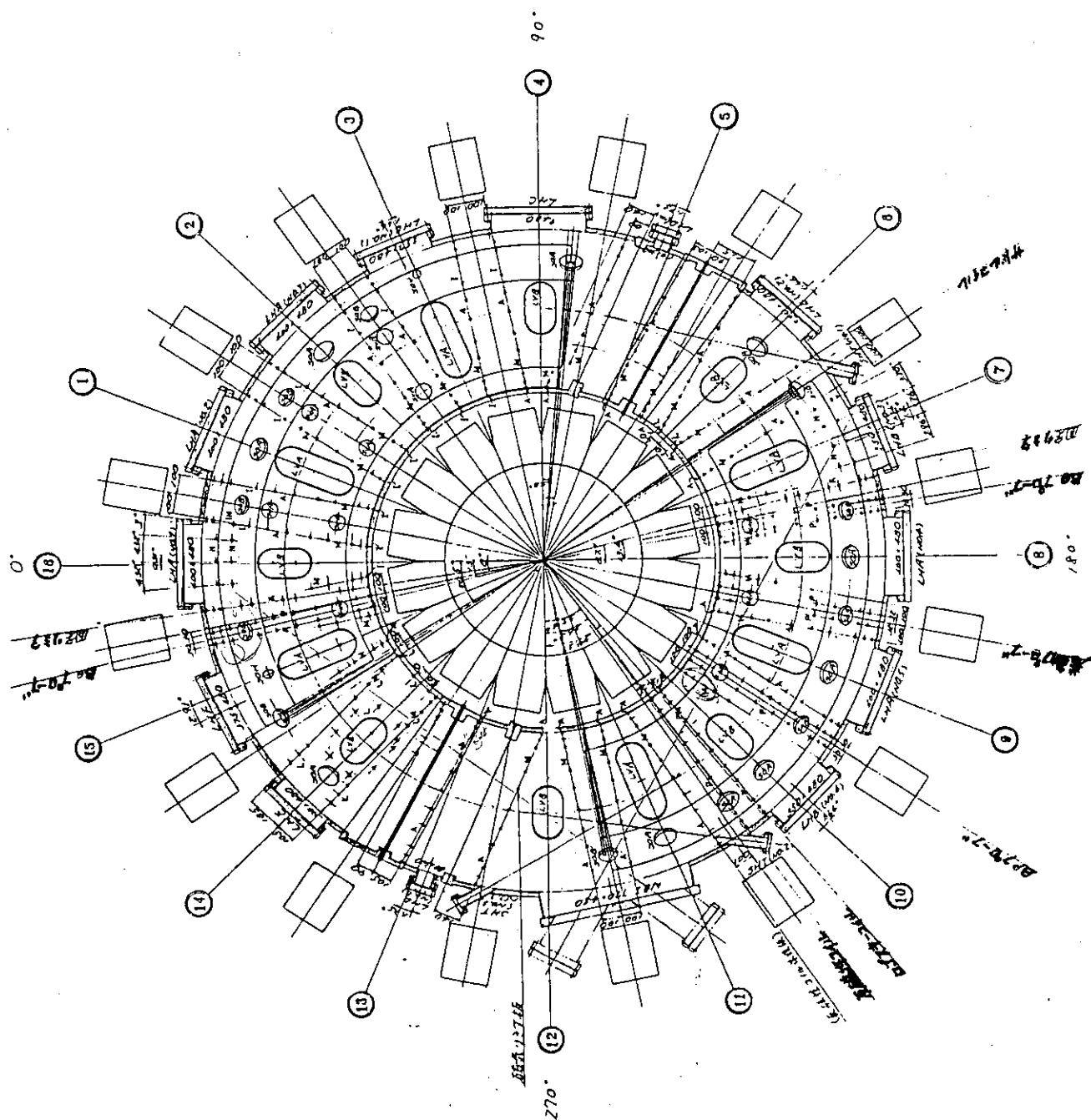
注)  $M_x$  : x 軸まわりの回転モーメント ( $P_2$  によるもの) $M_y$  : y 軸まわりの回転モーメント ( $P_1$  によるもの)



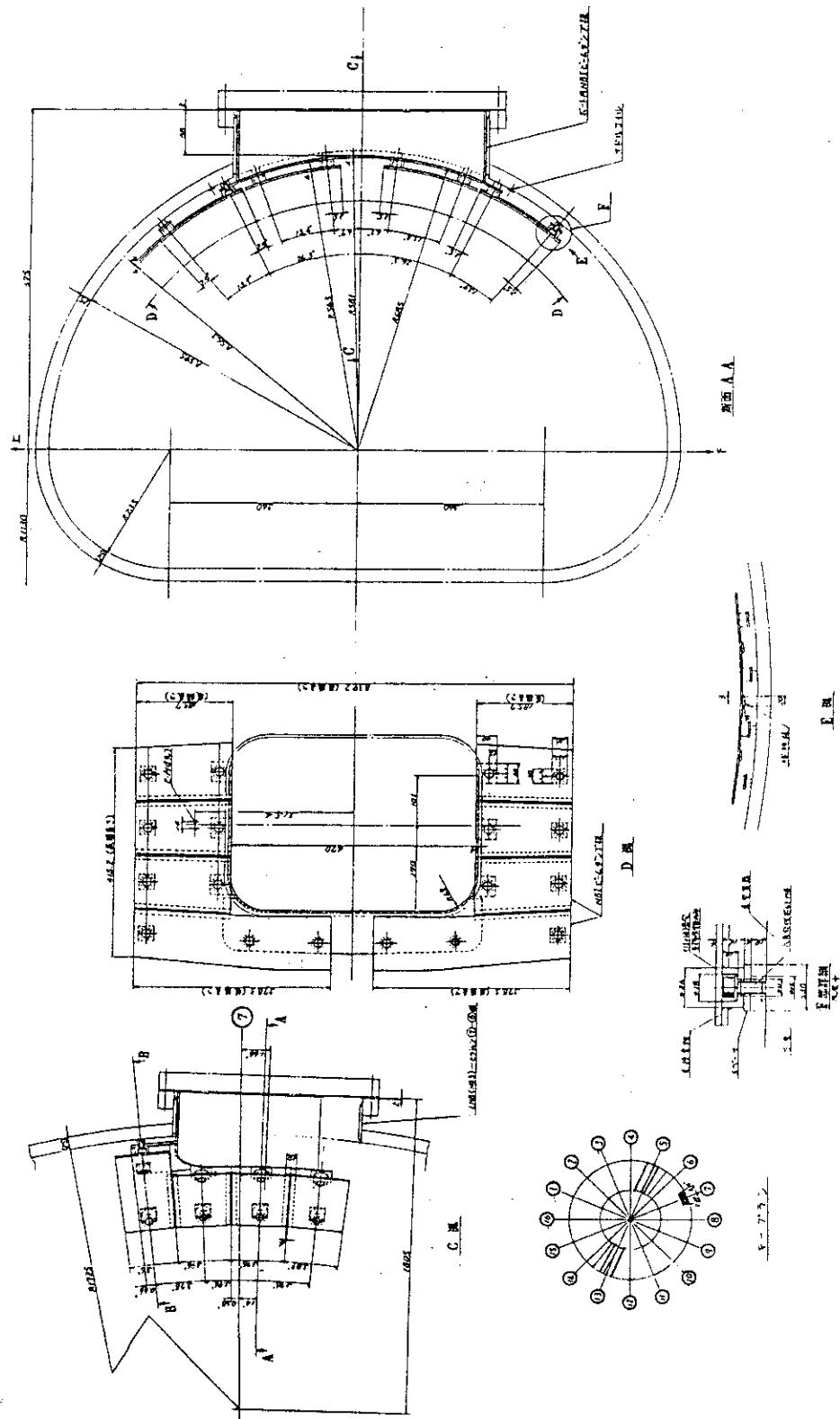
第3.3-9図 磁気リミター板概念図



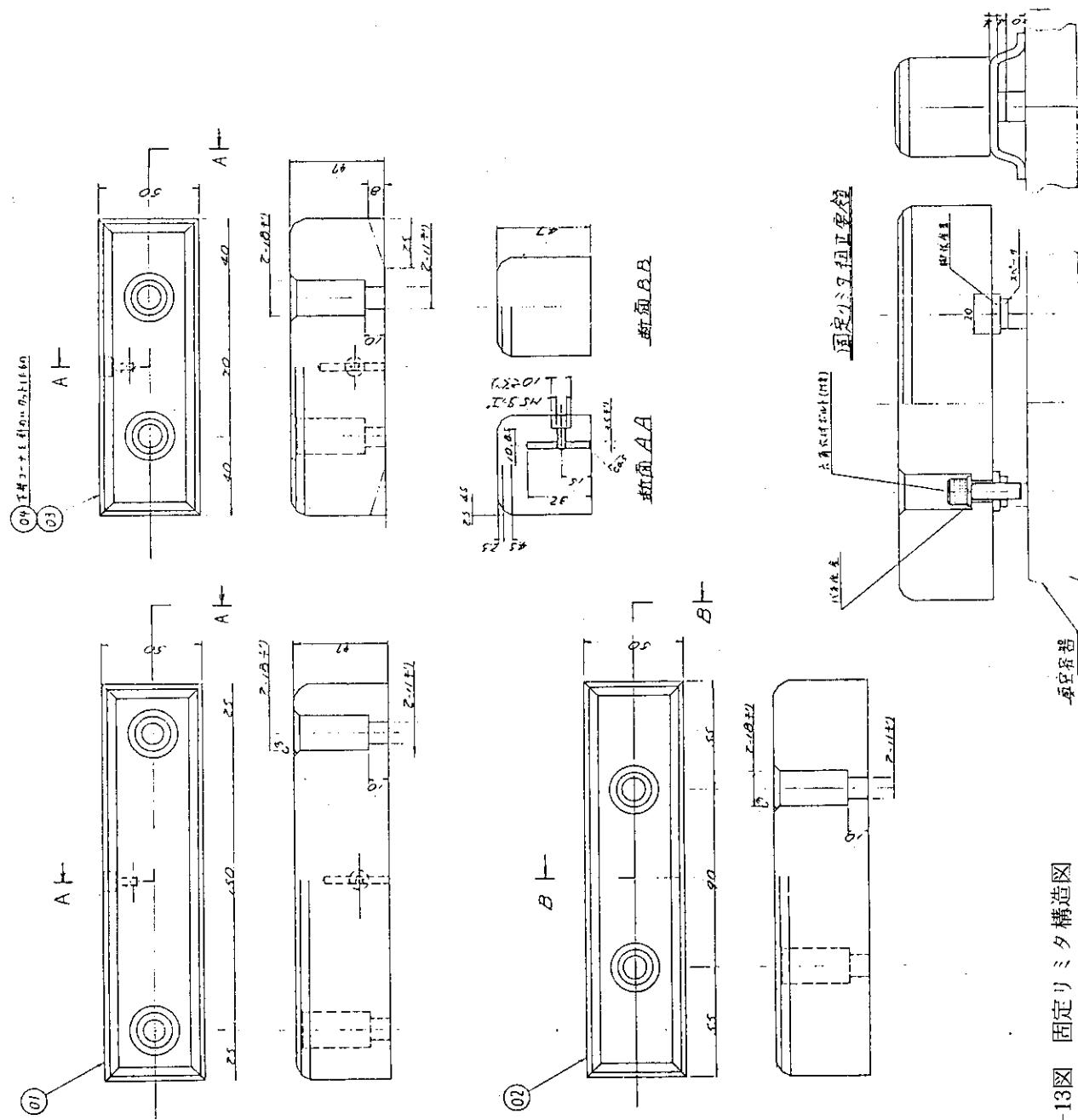
第3.3-10図 真空容器内部品断面レベル図



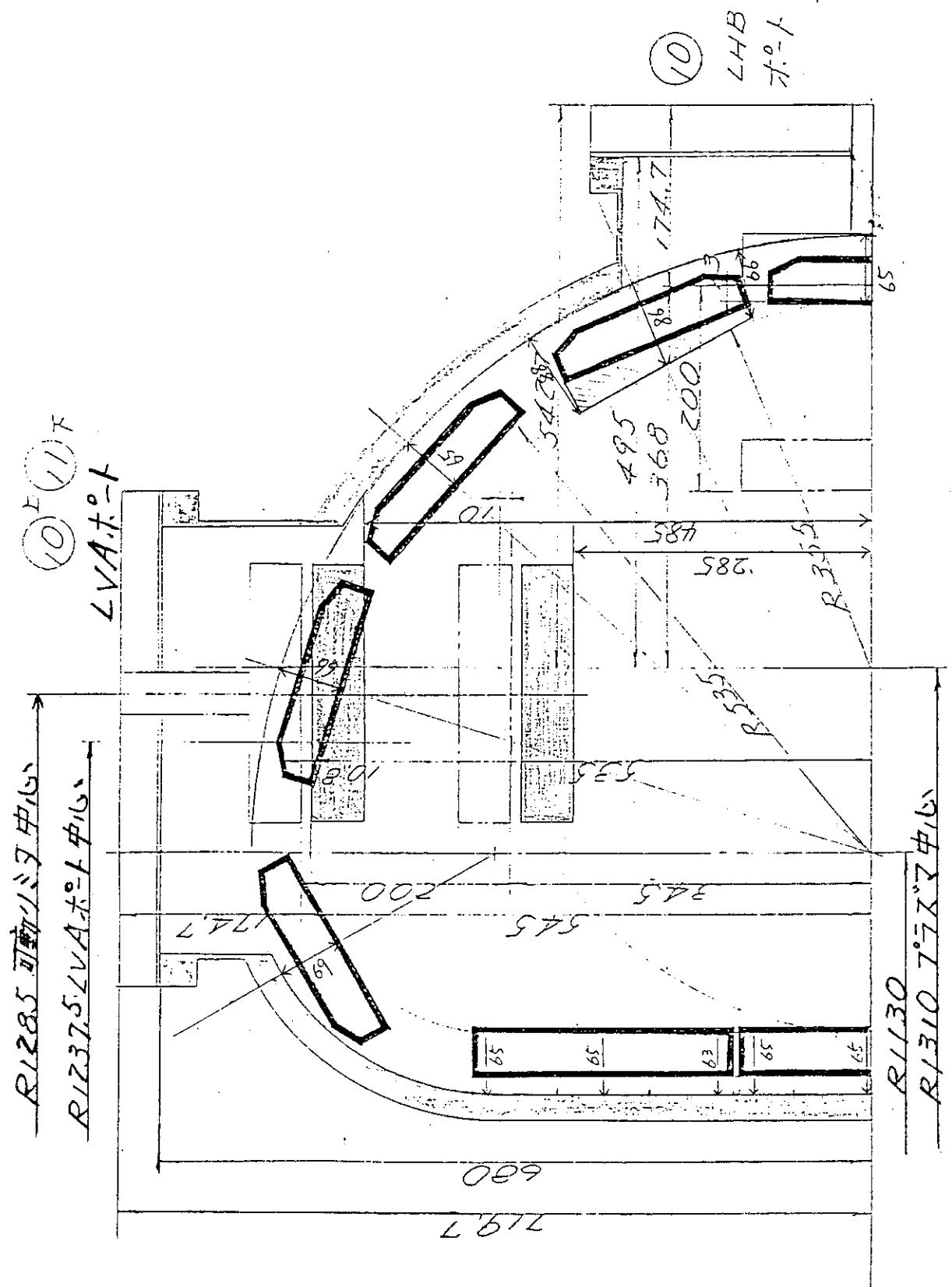
第3.3-11図 真空容器内部品平面配置図



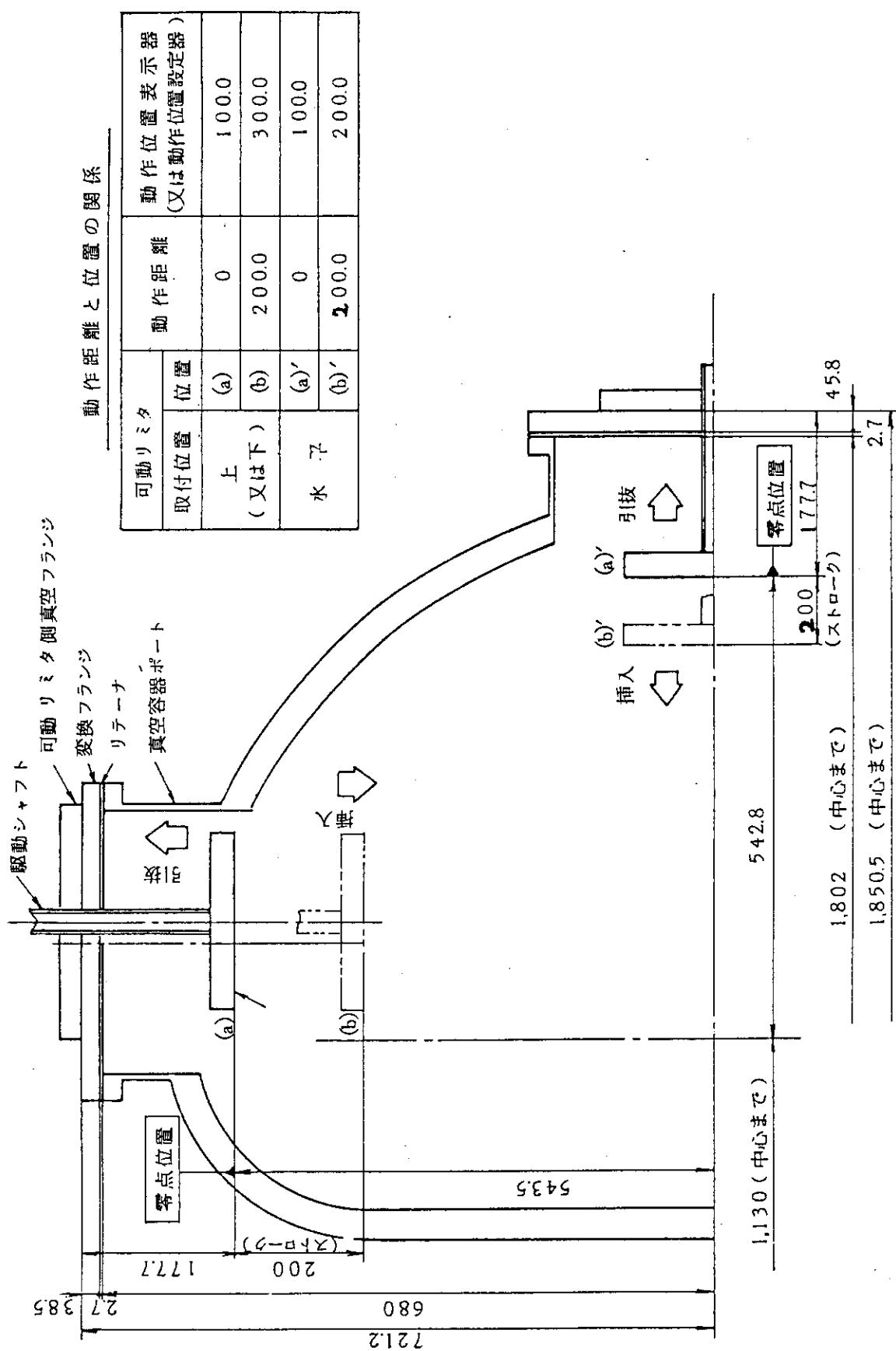
第3.3-12図 NBI ビームダンプ構造図



第3.3-13図 固定リミタ構造図



第3.3-14図(a) 固定リミターおよび可動リミター位置



第3.3-14図(b) リミタ板動作位置関係図

第3.3-3表 真空容器内部品取付用合巻の用途内訳一覧表

ポートセクションNo	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	計
I( ICRF用 )	32	32	32	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14
P( 磁気プローブ用 )	-	-	-	-	-	-	-	64	44	67	-	-	-	-	-	-	31
K( 固定リミタ用 )	-	-	-	-	-	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24
M( 磁気リミタ用 )	14	14	14	22	14	26	20	16	20	10	20	20	14	6	20	14	48
N( NBIビームダンプ用 )	-	-	-	-	-	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30
L( レーザビューフィンダンプ用 )	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	32	8	-	44
A( ライナ板用 )	4	4	12	31	34	11	-	36	-	31	24	25	-	5	2	223	
F( 検出器引出部用 )	-	-	-	8	-	4	6	22	16	16	4	4	-	-	16	8	104
I , M兼用	6	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	24
P , M兼用	-	-	-	-	-	-	-	4	-	10	-	-	-	-	-	-	14
L , M兼用	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	5	-	20
N , I兼用	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	6
合 計	56	56	56	53	45	68	79	106	116	103	55	48	39	53	85	103	1121

### 3.4 磁気的検出器

#### 3.4.1 検出器の構成

磁気的な測定対象には、プラズマ電流、磁場、2点の磁束関数の差、一周電圧、ポロイダルベータ値がある。第3.4-1表には、JFT-2Mにおける磁気的検出器と測定対象の関係、数量、設置場所をまとめてある。

また第3.4-1図(a)～(e)には、各検出器の構造および、ポロイダル断面での配置を示す。各検出器はノイズ対策としてシールド構造を持っている。また最も外側にあるステンレス製のケースが、真空と大気の間の境界となっている。

##### [ロゴスキーコイル]

ロゴスキーコイルは素線導体径0.2mmのポリイミド皮覆銅線を密に一相巻いたもので、プラズマ電流を囲んでいる必要がある。真空容器外ロゴスキーコイルは、すき間なく真空容器を囲んでいるが、真空容器内ロゴスキーコイルは3個の部分に分割されており、各部の間にすき間があいているため、検出感度を求める時には注意が必要である。以下にロゴスキーコイル感度の算出方法を述べる。アンペールの定理よりプラズマ電流のまわりの閉曲線にそった磁場の一周線積分は、以下の式で与えられる。

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I_p$$

ここで  $I_p$  はプラズマ電流、 $\mu_0$  は真空の透磁率、 $B$  は磁場であり、 $d\ell$  は閉曲線 C にそった線素である。 $d\ell$  方向の単位長さ当たりの巻き数  $n$ 、断面積  $S$  のロゴスキーコイルの出力電圧は、

$$V = \int n s B d\ell \\ = n s \cdot \mu_0 I_p$$

となる。従ってこの信号を積分時定数  $T_I$  の積分器に入力すると、出力電圧  $V_{out}$  は

$$V_{out} = \frac{N S \mu_0}{T_I} I_p$$

となる。ここで、 $N S \mu_0$  はロゴスキーコイルの感度を表わしている。

真空容器内ロゴスキーコイルでは、閉曲線上測定していない部分があり、ここからの寄与を補正してやる必要がある。プラズマの位置と半径を仮定した時に、この補正分を数値計算により求めることができ、第3.4-2図に結果を示す。第3.4-2図(a)はプラズマの小半径の影響を示したものであり第3.4-2図(b)はプラズマの垂直位置を示したものである。補正分を7.5%として、誤差1%以内でプラズマ電流を求めることが可能である。また、非円形度  $K = 1.42$ 、 $a = 0.35$  の非円形プラズマに対しても、補正分を7.5%としてよいことを確認している。

##### [ $B_\theta$ プローブ、 $B_\rho$ プローブ、差動プローブ]

これらの磁気プローブは、素線導体径0.1mmのポリイミド皮覆銅線をボビンに巻きつけたものである。実効的なボビンの断面積を  $S$ 、巻き数を  $N$  とすると出力電圧  $V$  は

$$V = N S B$$

となる。ここで  $B$  はボビンの巻き軸方向の磁場であり、 $N S$  がプローブの感度となる。 $B_\theta$  プローブのボビン断面は円形であるが、 $B_\rho$ 、差動プローブのボビン断面は、レーストラック形であ

る。

〔サドルループ〕

ある点の磁束関数を求めるには、1周ループを用いることができる。磁束関数の値を $\psi$ 、1周ループと交叉する磁束を $\phi$ とすると、出力電圧は、

$$V = \dot{\phi} = 2\pi \dot{\psi}$$

で与えられる。2点の磁束関数の差を求めるには、2つのループを第3.4-3図に示すようサドル状に接続すればよく、出力電圧 $V^*$ は

$$V^* = \theta (\Delta \psi)$$

で与えられる。ここで $\theta$ は、サドルループがトロイダル方向に占める角度であり、検出感度に相当する。

〔反磁性ループ〕

プラズマの反磁性測定の方法には、トロイダルコイルの作る磁束の保存を仮定して、トロイダル磁場コイル電流の変化から求める方法がよく用いられているが、JFT-2Mのトロイダルコイルの時定数が

$$L/R \sim 2\text{ sec}$$

で放電時間と大差ないため、測定データをかなり補正する必要が出てくる。またトロイダル磁場に対する真空容器の時定数が数十msecであるため、真空容器の外からトロイダル磁束を測定すると、応答速度が遅い。そこで、真空容器内部にプラズマを囲む大きさの異なる2本のループを設け、トロイダル方向磁束を測定する。

円筒プラズマを考えると

$$[P] + \frac{[B_T^2]}{2\mu_0} = \frac{B_{Ta}^2}{2\mu_0} + \frac{B_{pa}^2}{2\mu_0}$$

が成立する。ここで $[P]$ 、 $[B_T^2]/2\mu_0$ はプラズマ圧力、トロイダル磁場磁気圧のプラズマ領域での体積積分であり、 $B_{Ta}$ 、 $B_{pa}$ はプラズマ表面でのトロイダル磁場とポロイダル磁場である。

$$B_T = B_{Ta} + \delta B_T$$

とすると  $\beta_p = [P] / (\frac{B_{pa}^2}{2\mu_0})$  は

$$\beta_p = 1 - \frac{2B_{Ta}}{B_{pa}^2 S_p} \int \delta B_T ds$$

で与えられる。ここで $S_p$ はプラズマ断面積である。内側のループの面積と磁束を $S_1$ 、 $\phi_1$ 、外側ループの面積と磁束を $S_2$ 、 $\phi_2$ とすると

$$B_{Ta} = \frac{\phi_2 - \phi_1}{S_2 - S_1}$$

$$B_{pa} = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi a}$$

であるので

$$\delta B_T ds = \frac{\phi_1 S_2 - \phi_2 S_1}{S_2 - S_1}$$

より

$$\beta_p \sim 1 - \frac{2(\phi_2 - \phi_1)(\phi_1 S_2 - \phi_2 S_1)}{B_{pa}^2 S_p (S_2 - S_1)}$$

と得る。この式より  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $I_p$  を測定することにより  $\beta_p$  を求めることができる。

### 3.4.2 設計検討

磁気的検出器を設計するのにあたって検討せねばならないことは、検出信号の精度と耐久力である。以下に、耐熱条件、必要感度の決定、応答速度、耐電圧、設置精度の各項目について述べる。

#### (1) 耐熱条件

JFT-2Mでは、真空容器のブレーク部にテフロンを使用しているために、ベーキング温度は 150 °C と設定している。磁気的検出器の設計に当っては、200 °C に耐えることを考えて素材を選定している。

#### (2) 必要感度の決定

測定対象を Z, 検出感度を g, 積分時定数を  $T_I$  とすれば、積分器出力電圧 V は

$$V = \frac{g}{T_I} Z$$

で与えられる。ここで積分器に存在するオフセット電圧による誤差を評価する。積分器の仕様で入力換算オフセット電圧 ( $V_{off}$ ) を  $10 \mu V$  以下とすることが困難であるため、ここでは、 $100 \mu V$  として誤差を  $\epsilon$  以下におさえることを考える。オフセット電圧に起因する出力電圧 e は、測定時間を t とすると

$$e = \frac{V_{off}}{T_I} t$$

であり、

$$e/V = \frac{V_{off} \cdot t}{g \cdot Z} < \epsilon$$

を満足しておけばよい。例えば、ロゴスキーコイルを考えると、 $Z = 100 \text{ KA}$ ,  $t = 1 \text{ sec}$ ,  $V_{off} = 10^{-4} \text{ V}$ ,  $\epsilon = 10^{-2}$  を上式に代入することにより

$$g = \mu_0 n s > 10^{-7} (\text{V} \cdot \text{sec}/\text{A})$$

を得る。同様に、 $B\theta$  プローブ、差動プローブ、については、 $t = 1 \text{ sec}$ ,  $V_{off} = 10^{-4} \text{ V}$ ,  $\epsilon$

$$= 1 \times 10^{-2}$$

$$Z \cong \frac{\mu_0 I_p}{2\pi a} \sim 0.057 \text{ (T) として}$$

$$g = NS > 0.18 \text{ (m}^2\text{)}$$

を得る。

### (3) 応答速度

真空容器内部に取りつけられている磁気検出器はすべて、ステンレス製のケースの中におさめられている。また、電気的ノイズ対策として、アルミ箔をかぶせてある。したがって、これらの内部への磁場のしみ込み時間で応答速度が決まる。

直径  $d$ , 厚み  $h$ , の金属円管内への軸方向磁場のしみ込み時間  $\tau_s$  は

$$\tau_s = \frac{\mu_0 dh}{4\eta}$$

で与えられる。ここで、 $\eta$  は金属の抵抗率であり、ステンレス鋼の場合  $\eta \sim 7 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$  である。

#### - 真空容器内ロゴスキーコイルの場合 -

ケースについて

$d = 14 \text{ mm}$ ,  $h = 1 \text{ mm}$  を用いて

$$\tau_s \sim 6.3 \mu\text{sec}$$

アルミシールドについて

$d = 12 \text{ mm}$ ,  $h = 0.08 \text{ mm}$ ,  $\eta = 2.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$  より

$$\tau_s \sim 12 \mu\text{sec}$$

### (4) 耐電圧

先に、必要感度の検討において検出器感度の下限値を与えた。ここでは耐電圧の検討より、検出器感度の上限を与える。検出器出電圧が最も大きくなるのは、プラズマディスラップションが発生した場合であり、電流の減少が急峻であればあるほど、発生電圧が大きくなる。ここでは最も厳しい条件として、瞬時にして電流が  $500 \text{ kA}$  から零になる場合を考える。この場合にも、検出器がステンレス製ケースおよびアルミシールドの内部にあることを考えれば、発生電圧は、

$$V = \frac{g \cdot Z}{\tau_s}$$

程度におさえられる。 $0.1 \text{ mm} \phi \sim 0.2 \text{ mm} \phi$  ポリイミド皮覆銅線の耐電圧は、 $200^\circ\text{C}$  で  $10 \text{ kV}$  程度であるが、線が曲げられた状態で使用することもあり発生電圧を  $5 \text{ kV}$  で抑えることとする。したがって

$$g < 5000 \frac{\tau_s}{Z}$$

によって、検出器感度の上限を決めることができる。

-真空容器内ロゴスキーコイルの場合-

$$g < \frac{5000 \times 1.2 \times 10^{-5}}{500 \times 10^3} = 1.2 \times 10^{-7}$$

ただし、3分割構成となっているために、全体の感度としては  $3.6 \times 10^{-7}$  V. S/A で抑えておけばよい。

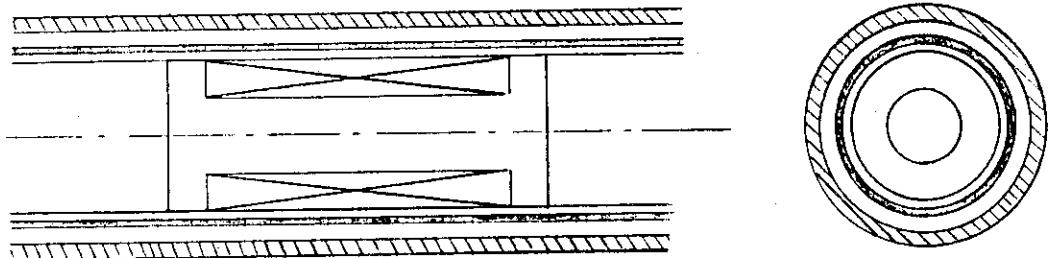
### 3.4.3 特性試験

$B_\theta$  プローブ,  $B_\rho$  プローブ, 差動プローブの周波数特性を、ケースの中に入れた状態で測定した結果を第3.4-4図(a)～(d)に示す。第3.4-4図(b)は30 m のツイストペア線を接続した場合の周波数特性で、共振周波数が 40 KHz から 13 KHz へ低下している。

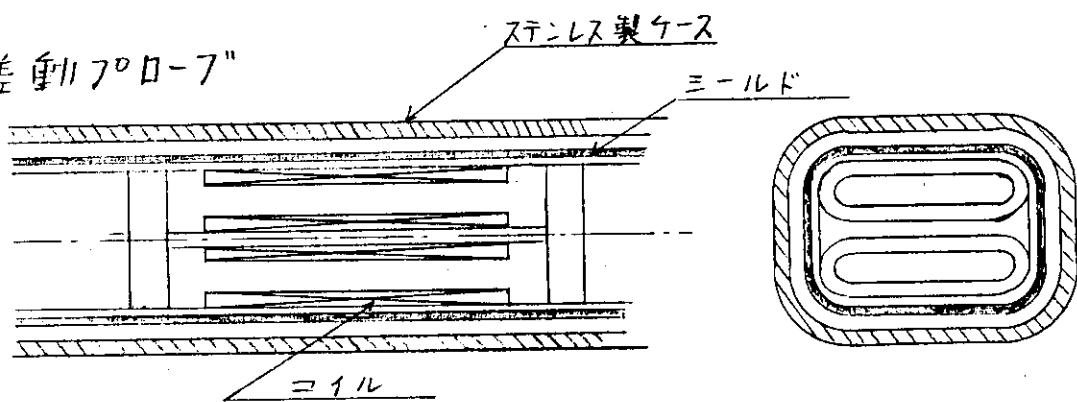
第3.4-1表

磁気的検出器名	巻数	感度(設計値)	感度(実測値)	測定対象	設置場所	数量
真空容器外 ロゴスキーコイル	13900	$1.95 \times 10^{-7}$	$1.95 \times 10^{-7}$	プラズマ電流	真空容器外	1式
真空容器内 ロゴスキーコイル	11560	$1.43 \times 10^{-7}$	$1.38 \times 10^{-7}$	同上	真空容器内	1式(3個)
Bθ プローブ	6700	0.434	0.40	真空容器接線 方向の磁場	同上	1組 24個で トロイダル方向に2組
Bρ プローブ	1550	0.508	0.36	真空容器接線 方向の磁場	同上	1組 24個
差動プローブ	4980	0.477	0.36	真空容器接線 方向の磁場	同上	1組 2個でボロイダル 方向に8組
サドルループ	1	1.96 2.16	— —	2点の磁束開 数の差	同上	1組 10本で 2組
1周ループ	1	1	—	1周電圧	真空容器外	8本
反磁性ループ	1	1	—	ボロイダルβ値	真空容器内	1組 2本

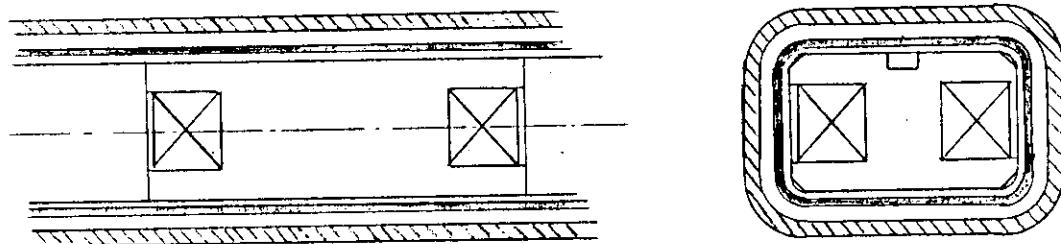
$B_\theta 7^\circ 0'-7''$



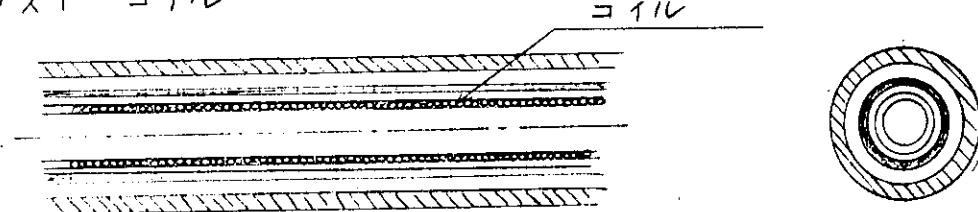
差動  $7^\circ 0'-7''$



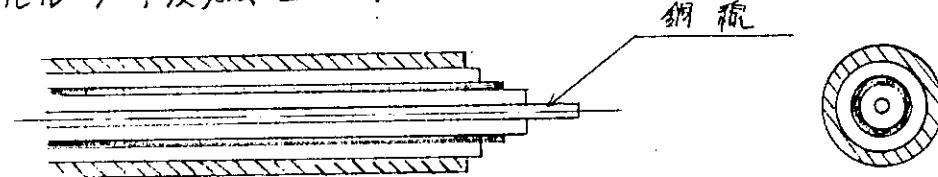
$B_p 7^\circ 0'-7''$



ロゴスキーコイル

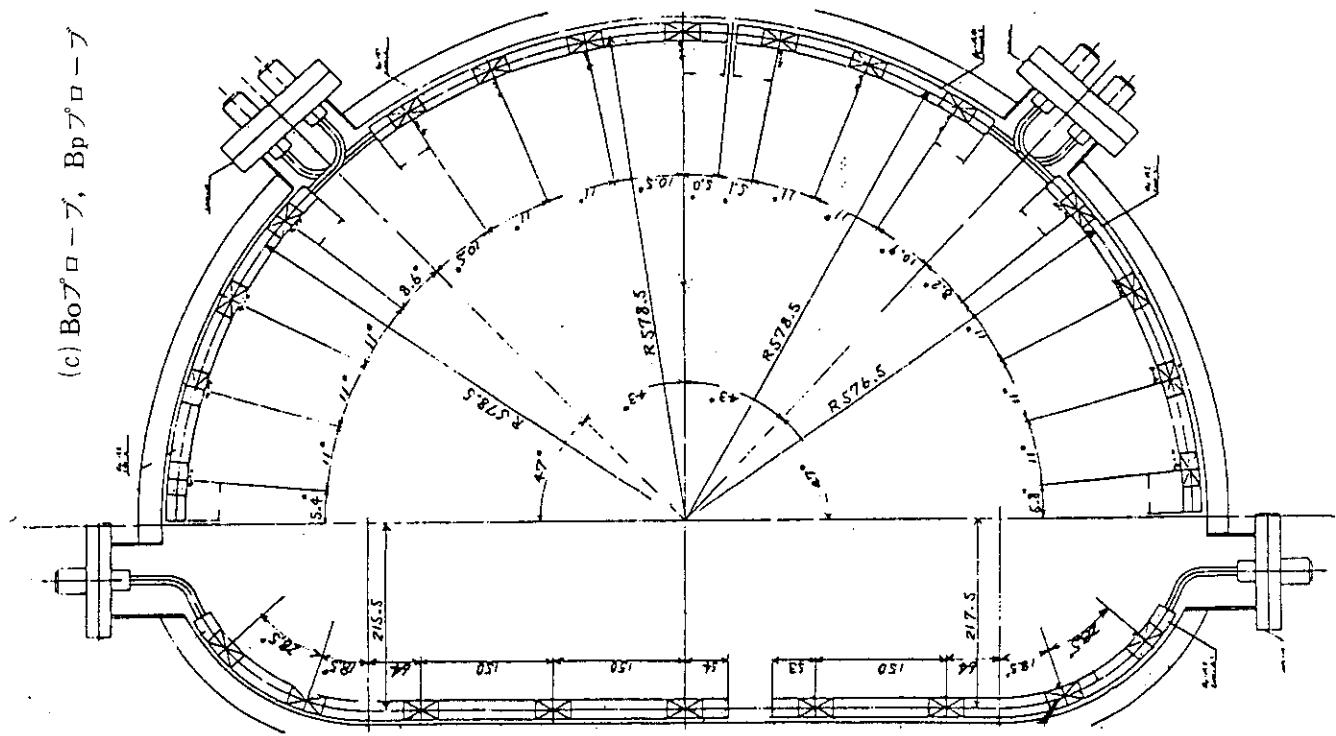


サドルルーフ<sup>°</sup>, 反磁性ルーフ<sup>°</sup>

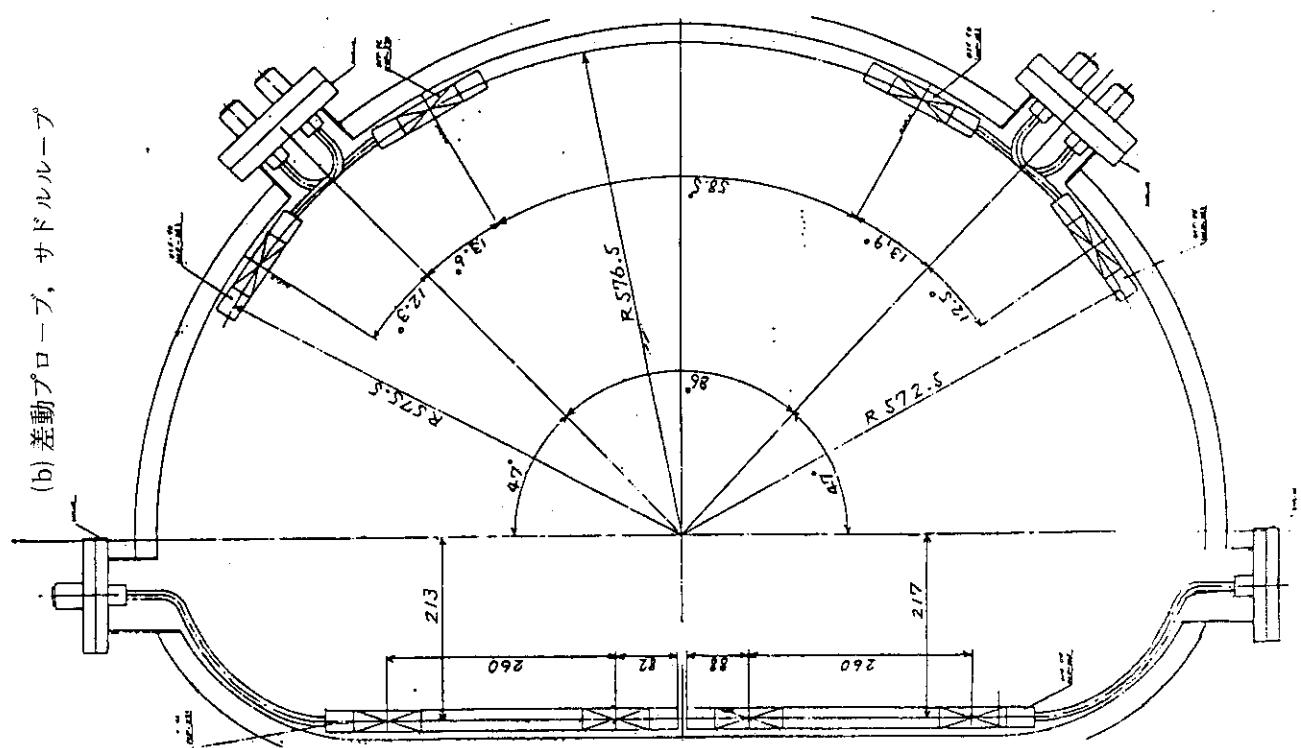


第3.4-1図(a) 各種検出器構造

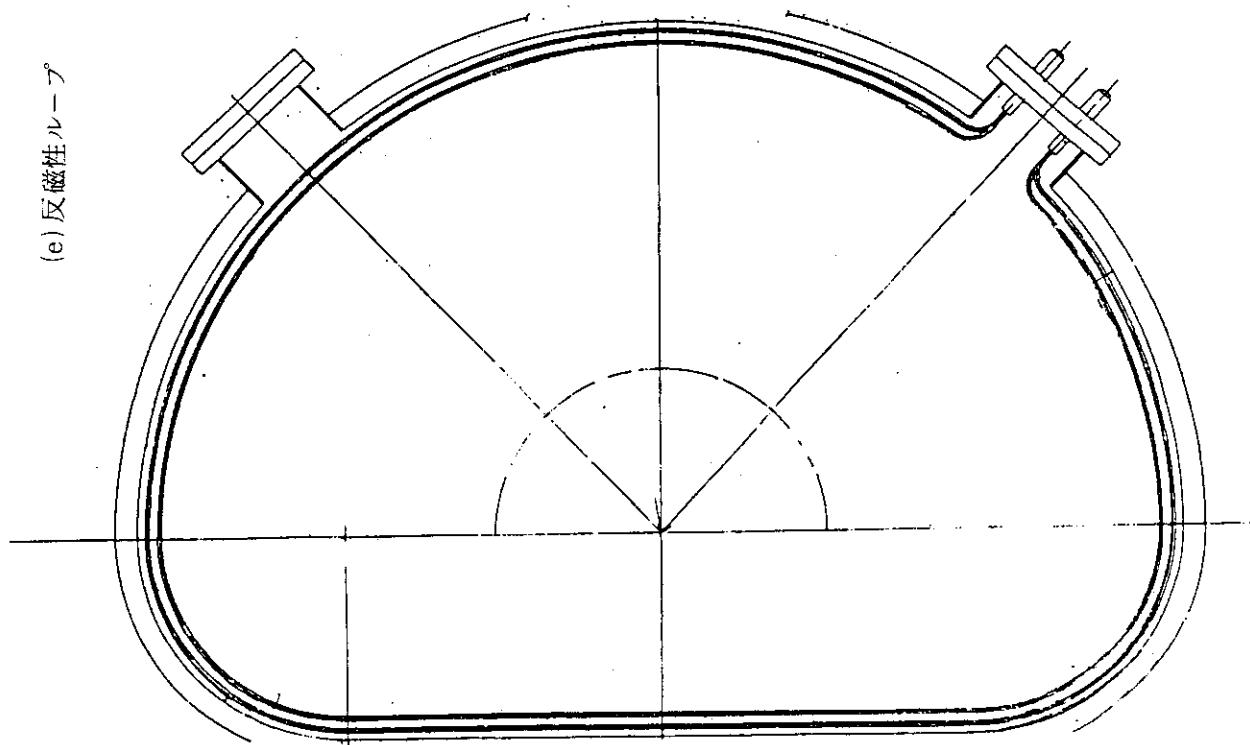
(c) Boプローブ、Bpプローブ



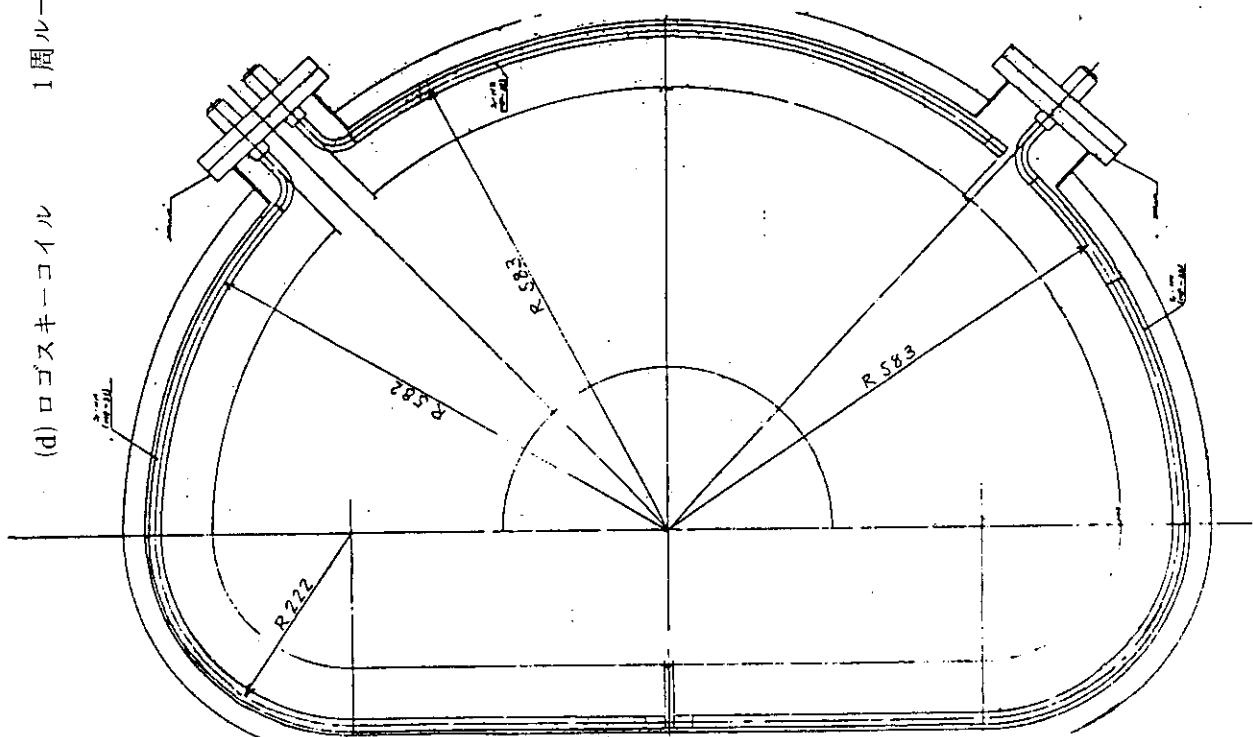
(b) 差動プローブ、サドルループ

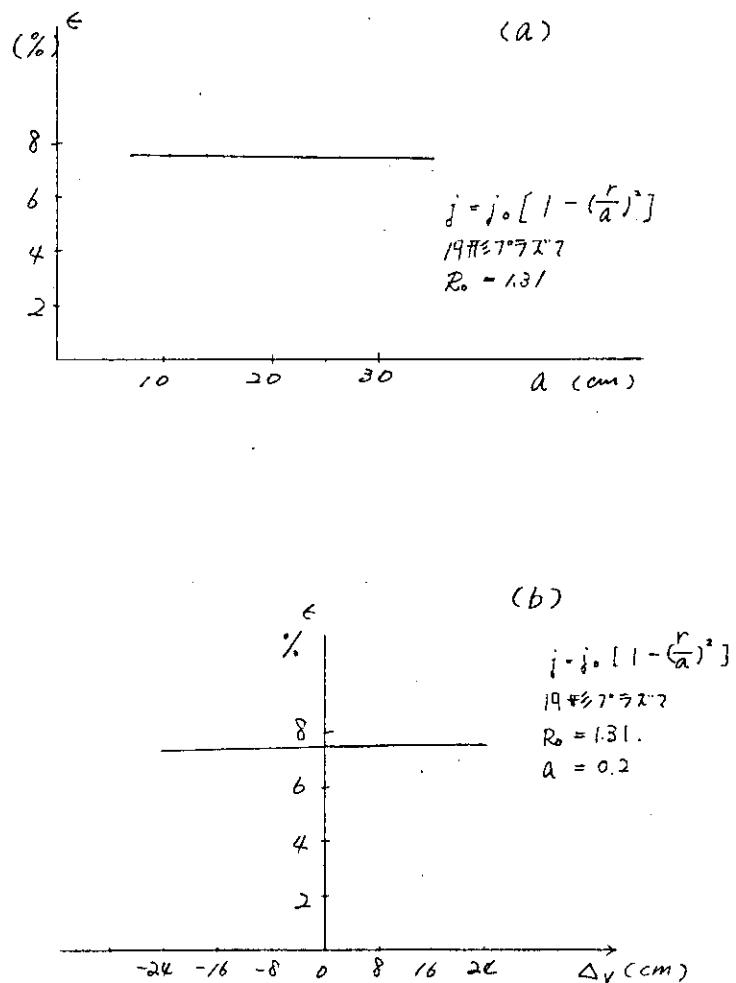


(e) 反磁性ループ

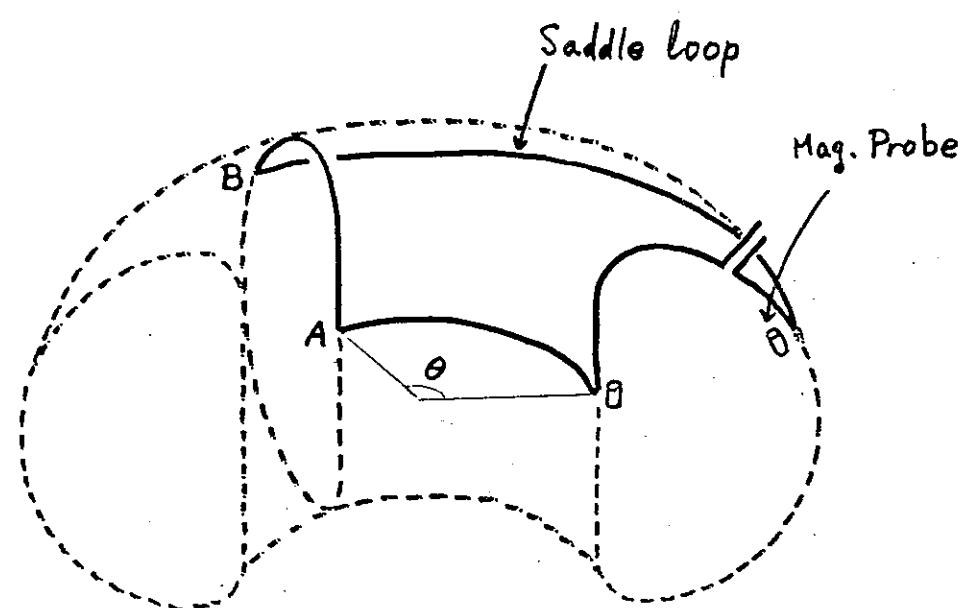


(d) ロゴスキー回路 1周ループ

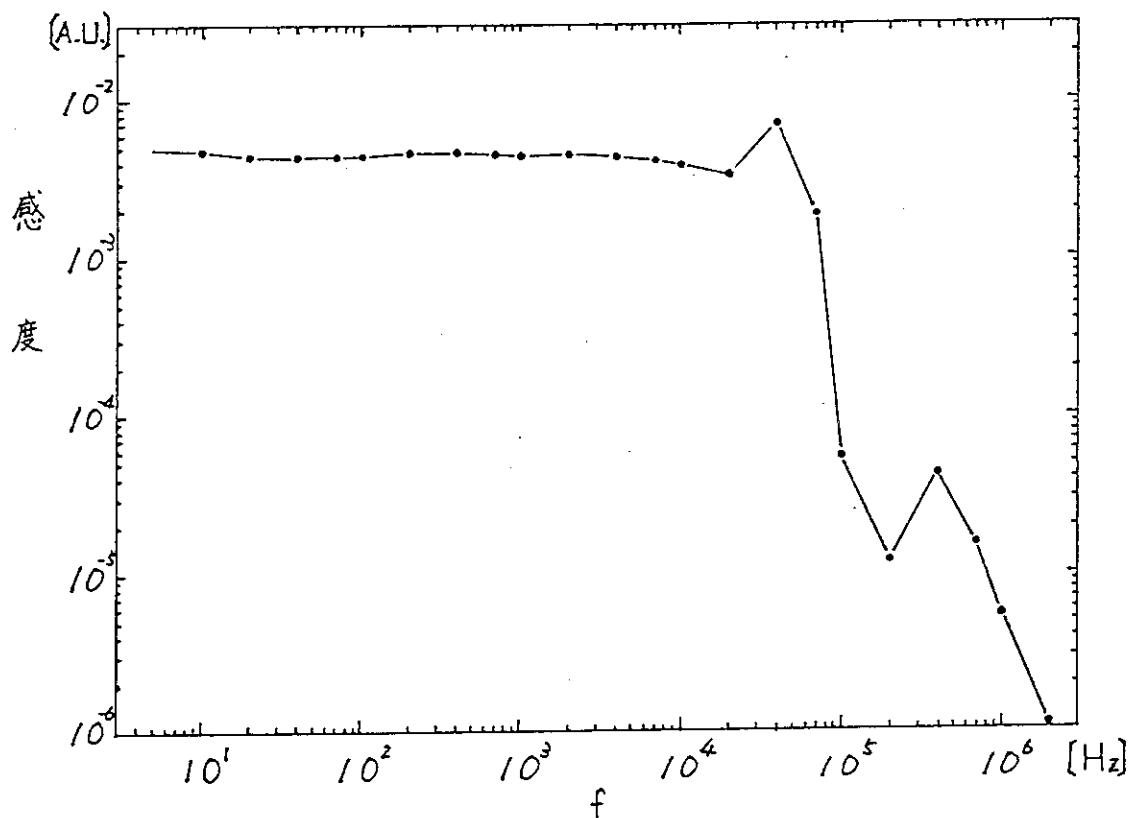




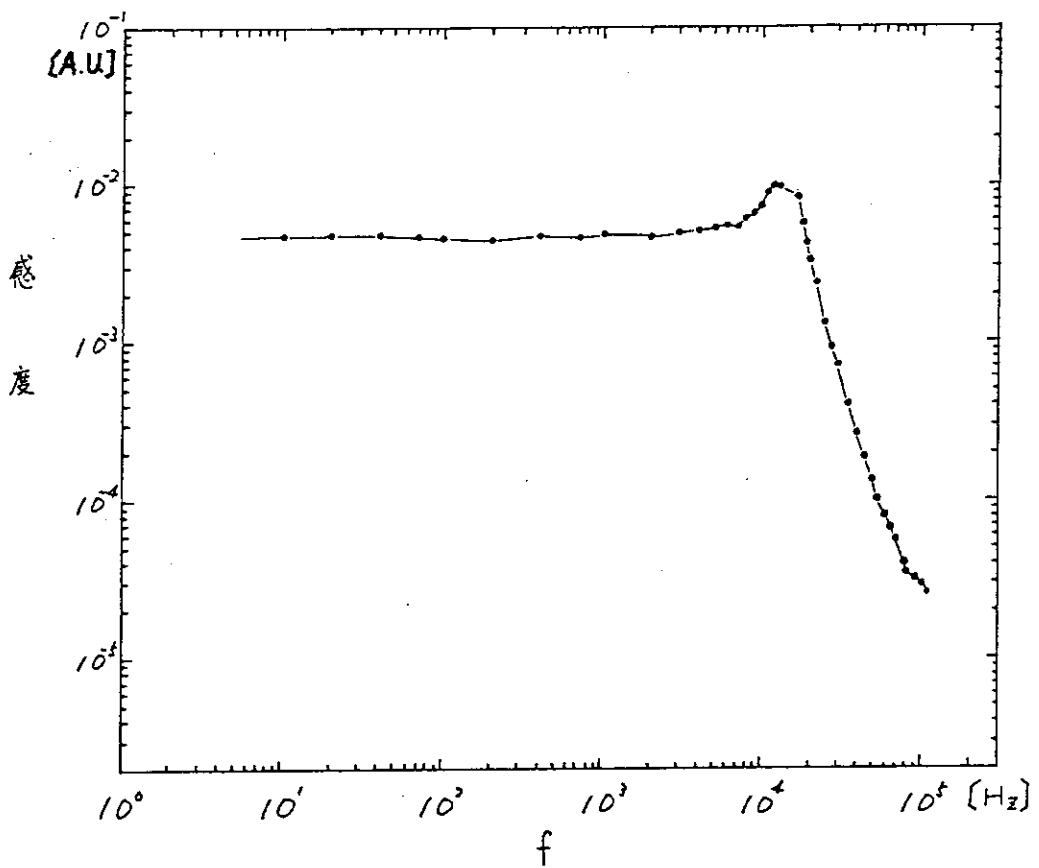
第3.4-2図 ロゴスキーコイルの感度

(間隙部の影響:  $\epsilon$ )

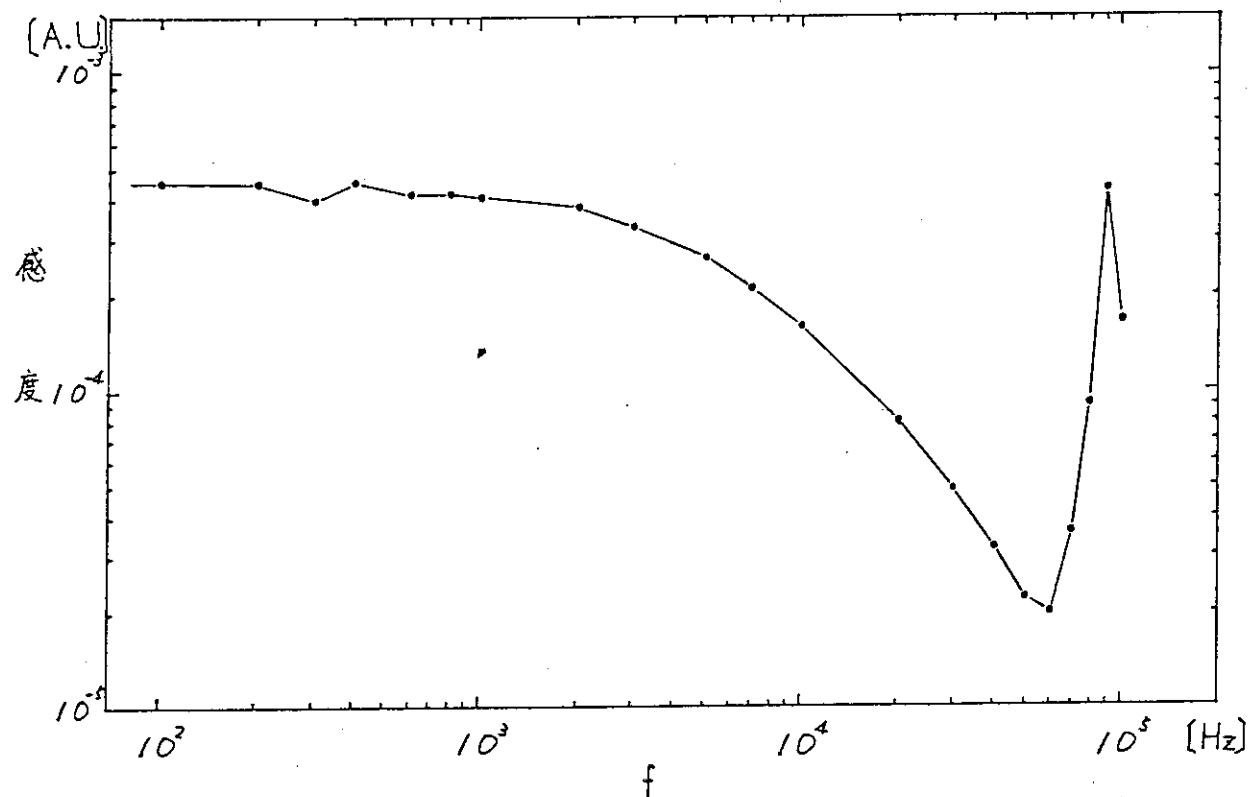
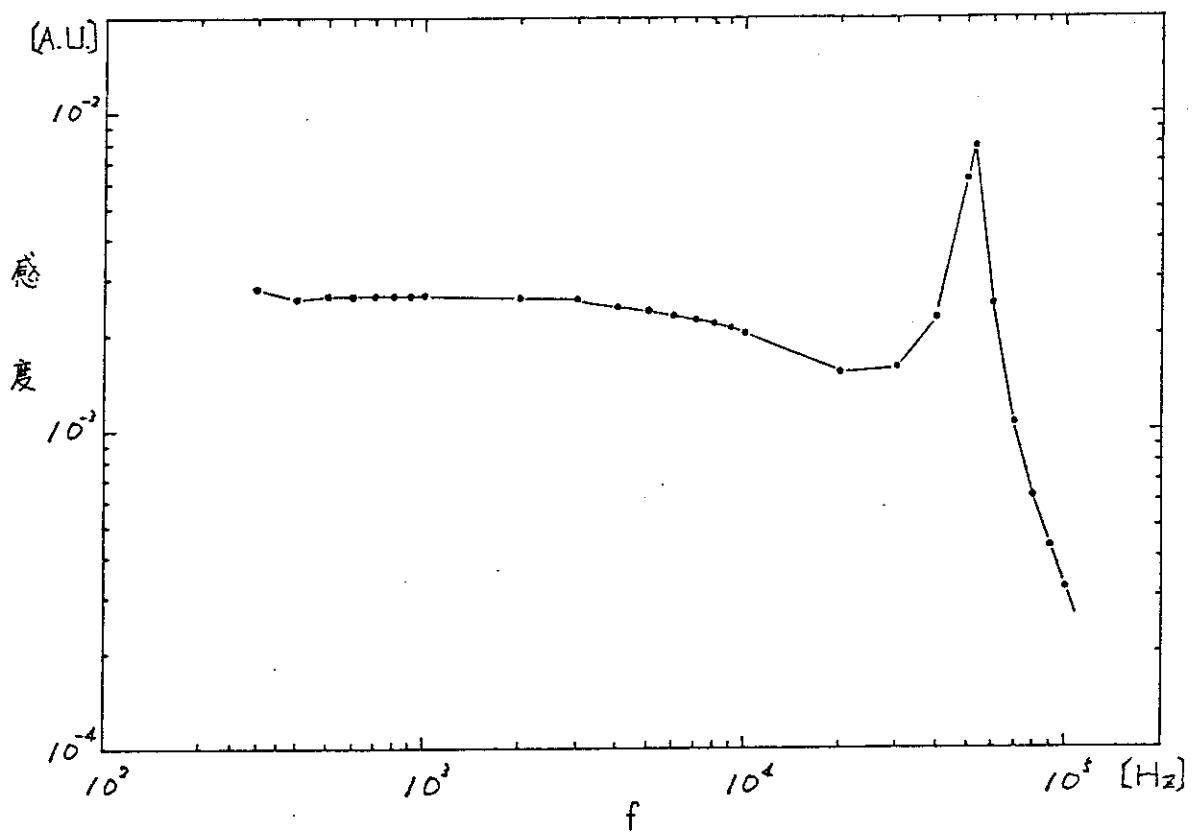
第3.4-3図 サドルループの接続図



第3.4-4図(a) Bθプローブ(ツイストペア線なし)



第3.4-4図(b) Bθプローブ(ツイストペア線30m)

第 3.4-4 図(c)  $B\rho$  プローブ

第 3.4-4 図(d) 差動プローブ

### 3.5 トロイダル磁場コイル (TF コイル)

トロイダル磁場コイルは、トーラス状のプラズマを安定化するため、トロイダル方向にはほぼ一様な強磁場を発生するためのコイルである。JFT-2Mの研究目的の一つである高ベータD型プラズマに対応して16個のD型コイルがトーラス状に配置される。

#### 3.5.1 設計方針

TFコイルは次のような設計条件を満足しつつ、単純な形状とすることを基本方針として設計を行った。

##### (1) Phase 1 条件

- ① 既設のトロイダル磁場電源（4.1項）により 9.37 MAT の起磁力が可能のこと。
- ② 通電時間 フラットトップ 0.5 秒以上
- ③ 通電周期 2.5 分
- ④ コイル内およびコイル間の渡り線、給電線、巻き戻し線の発生する誤差磁場を極小とすること。
- ⑤ 真空容器ポートへのアクセスが良いこと。

##### (2) Phase 2 条件

- ① TF 電源の増力により 25 MAT 以上の最大起磁力が可能のこと。
- ② 通電周期 10 分

#### 3.5.2 形状および構造

##### (1) 形状、構造

形状の選定にあたって、単純な形状とすることは製作性を良くするとともに、精度向上およびコストダウンにもつながる。まず、コイル形状は第3.5-1図のように等応力形状に近いD型形状であり、直線と2つの円弧からなる形を持つ。TFコイル巻き線を均一素線で構成するため、コイル断面はポロイダル方向に均一とした。第3.5-2図に示すように、TFコイルは6パタークのパンケーキコイル8層より成っており、48ターン/コイルである。コイル素線は3本の並列導体で形成し、曲げ易い構造とした。コイル内の温度差をできる限り小さくするために、1コイル当たり 24 (= 3 × 8) の冷却系統を設け、いずれの系統も真空容器側から給水することとした。

##### (2) キャン構造

コイルの電磁力に対する強度を補強するため、コイルは全体をステンレス製のキャンで覆われている。キャン断面寸法は一般部で 240 × 290 であり、直線部では 260 幅とし、一部隣のコイルと接近する部分ではテープ状に切り欠いている。

##### (3) 電磁力支持

TFコイルの向心力は鉄心で支持する。TFコイル間は 1 mm のすきまを設け接触しない構造となっている。

拡張力は TF コイルの導体自身およびキャンで支持する。

転倒力はTFコイル間のトルクビーム上・下の架台平板で支持する。

TFコイルと鉄心を密着させるため架台より平均25トンの力でコイルを押し付けた状態で組み立てている。架台とTFコイルはM36ボルト12本で規定トルク(100 kg·m)で締め付けられ、位置決めと横荷重を支えるためキーが打ち込まれている。(第3.5-3図)

#### (4) トルクビーム

トルクビームは架台とともにトロイダルコイルに作用する転倒力を支持するためのものであり、各トロイダルコイル間に計64個取り付けられている。各トルクビームはTFコイルとの間でライナ調整を行い、ライナーは溶接により固定されている。(第3.5-4図)

#### (5) 冷却水ヘッダ

冷却水ヘッダは給排水母管と20本の枝管より構成されている。冷却水系統図については6.2項で記述される。

#### (6) 絶縁構造

導体断面積をできるだけ大きくとるためスペースファクターを下げるよう心がけた。層間電圧がPhase 1で1.9, Phase 2でも10Vを越えないことから層間絶縁はスペーサをはさむ絶縁とした。

パンケーキ間の絶縁はスペーサ絶縁、およびテーピングとする。パンケーキ間には最大120 V程度の電圧が加わるが、この部分はパンケーキ間スペーサをつき出し、沿面距離を長くする構造とした。

最後に8個のパンケーキ全体にテーピングし耐地絶縁を施した。

コイルとキャンの間のすき間には絶縁スペーサを置き、同時にワニスを充填して、コイルに作用する電磁力をキャンで伝えるようにした。

#### (7) 計測器取付用ボルト穴

計測器取付用ボルト穴の位置を第3.5-5図に示す。

### 3.5.3 電磁諸量

#### (1) コイル抵抗

トロイダルコイルの抵抗値を30°C, 40°C, Phase 1最高温度上昇時, Phase 2最高温度上昇時で計算する。Phase 1での最高温度上昇時のコイル全体の平均温度は51°C, Phase 2では91.7°Cである。計算結果を以下に示す。

30 °C	.....	112.6 mΩ
40 °C	.....	116.8 mΩ
46 °C	.....	121.5 mΩ
91.7 °C	.....	138.8 mΩ

#### (2) インダクタンス

トロイダルコイルのインダクタンスを近似モデルによる解析解と計算機による解と比較する。

トロイダルコイルをトーラス全周に分布するコイルと考えるとそのインダクタンスは次式で表わされる。

$$L = \mu_0 \frac{SN^2}{\ell}$$

L : インダクタンス (H)

$\mu_0$  : 真空透磁率  $4\pi \times 10^{-7}$  (H/m)

N : 巻数 768 (ターン)

S : 磁路断面積  $2.523$  ( $m^2$ )

$\ell$  : 磁路長  $\ell = 2\pi R$  (m)

RとしてD型コイルの平均半径として1.25 mをとる。

$$H = 0.238$$
 (H)

一方、各ターンを線電流で近似した数値計算では

$$H = 0.260$$
 (H)

となつた

ここではトロイダルコイルのインダクタンスとして、0.260 Hを取る。これは計算機による数値計算の方がモデルを忠実に再現しているためである。

矩形波換算時間はPhase 1, Phase 2とも4.1 secを仮定した。

### (3) その他

その他の電磁諸量を計算する。抵抗値は46°Cの値を使用する。数値はPhase 1 のものである。

回路時定数

$$\tau = \frac{L}{R} = 2.14$$
 (sec)

磁気エネルギー

$$U_M = \frac{1}{2} LI^2 = 1.935 \times 10^7$$
 (J)  
 $= 19.35$  (MJ)

ジュール損

$$Q = RI^2 \cdot \tau$$
  
 $= 7.415 \times 10^7$  (J)  
 $= 74.15$  (MJ)

端子間電圧

$$V = 1482$$
 (V)

なお、電源に対する条件は、電源までのフィーダ分を見込んで抵抗  $0.133\Omega$ 、インダクタンス  $0.3\text{H}$ とした。

最終的な電磁諸量を第3.5-1表に示す。

### 3.5.4 設計検討

#### (1) 热計算

冷却水流路は各パンケーキを3本の導体で巻線を行うため、1本の導体で1系統とした。冷却系統を少なくするために各系路を直列に接続する事も考えられるが、冷却途中で導体間に温度差

ができ熱応力が発生するため上記の方法とした。

冷却水はパンケーキの内径側のターンから入れ、外側のターンから出す。これは冷却水の入口側が冷えやすく、逆に外側のターンから冷却水を流した場合にやはり冷却途中で熱応力が発生するためである。

従って冷却水系統は各パンケーキで3系統、1コイルで24系統、全コイルで384系統となる。

又、圧力損失は次式で表わされる。

$$P = \gamma (2 + \lambda \frac{\ell}{de}) \frac{v^2}{2g}$$

ここに

- $\gamma$  : 水の比重
- $\lambda$  : 管摩擦係数
- $\ell$  : 管路長
- $de$  : 等価直径
- $v$  : 流速
- $g$  : 重力加速度

これより Phase I では

$$v = 1 \text{ m/sec} \cdots \cdots P = 1.1 \text{ kg/cm}^2$$

Phase II では

$$v = 2 \text{ m/sec} \cdots \cdots P = 3.6 \text{ kg/cm}^2$$

の圧力損失となる。

TFコイル熱計算条件と熱計算の結果を第3.5-2表に示す。又、コイル代表点の温度経過図を第3.5-6～8図に示す。温度経過図は横軸を取り、ある点の温度が時間的にどのように変化するかを表わしている。点の位置は冷却水入口から冷却水の径路に沿って測った距離で表示した。Phase 1の場合4～6ショットで温度は飽和し13.55 Ton/hrの流量でも導体最高温度は66.3°Cである。それに対し、Phase 2では1ショットで導体最高温度は約90°Cとなるため、初期温度に戻るまで(約6分以上)次のショットを待つ必要がある。

### (2) 強度計算

#### TFコイルの電磁力

TFコイルの電磁力による拡張力分布(Phase 2)を第3.5-9図に、ポロイダル磁場によるTFコイルの転倒力分布(Phase 1, Phase 2)を第3.5-10～11図に、短絡事故時の転倒力分布(Phase 1)を第3.5-12図に示す。TFコイルが完全短絡を起こした時、短絡したコイルの電流は減衰し他のコイルの電流は増大する。しかし最悪の場合として電源トリップはかかるないものと考える。Phase 2の場合に同様の計算を行うと転倒力は500 Tonにもなるので検出回路を設け、トリップをかける必要がある。

### (3) 磁場計算

TFコイル磁場の強さおよびリップルの計算結果を第3.5-13図に示す。図から分るようにプラズマ中心においてはリップルは約0.2%であるが、大半径=160～165mの領域においては4～6%の比較的大きな値である。

TF コイルの巻線構造、渡り線、給電線をモデル化し、それによる誤差磁場の大きさの分布 ( $|B|$ ,  $B_R$ ) を第 3.5-14(a)~(d) 図に示す。最大誤差磁場は絶対値で 7.8 G、プラズマに直交する成分で最大 7.68 G である。この値はプラズマ生成上問題とならない値になっている。

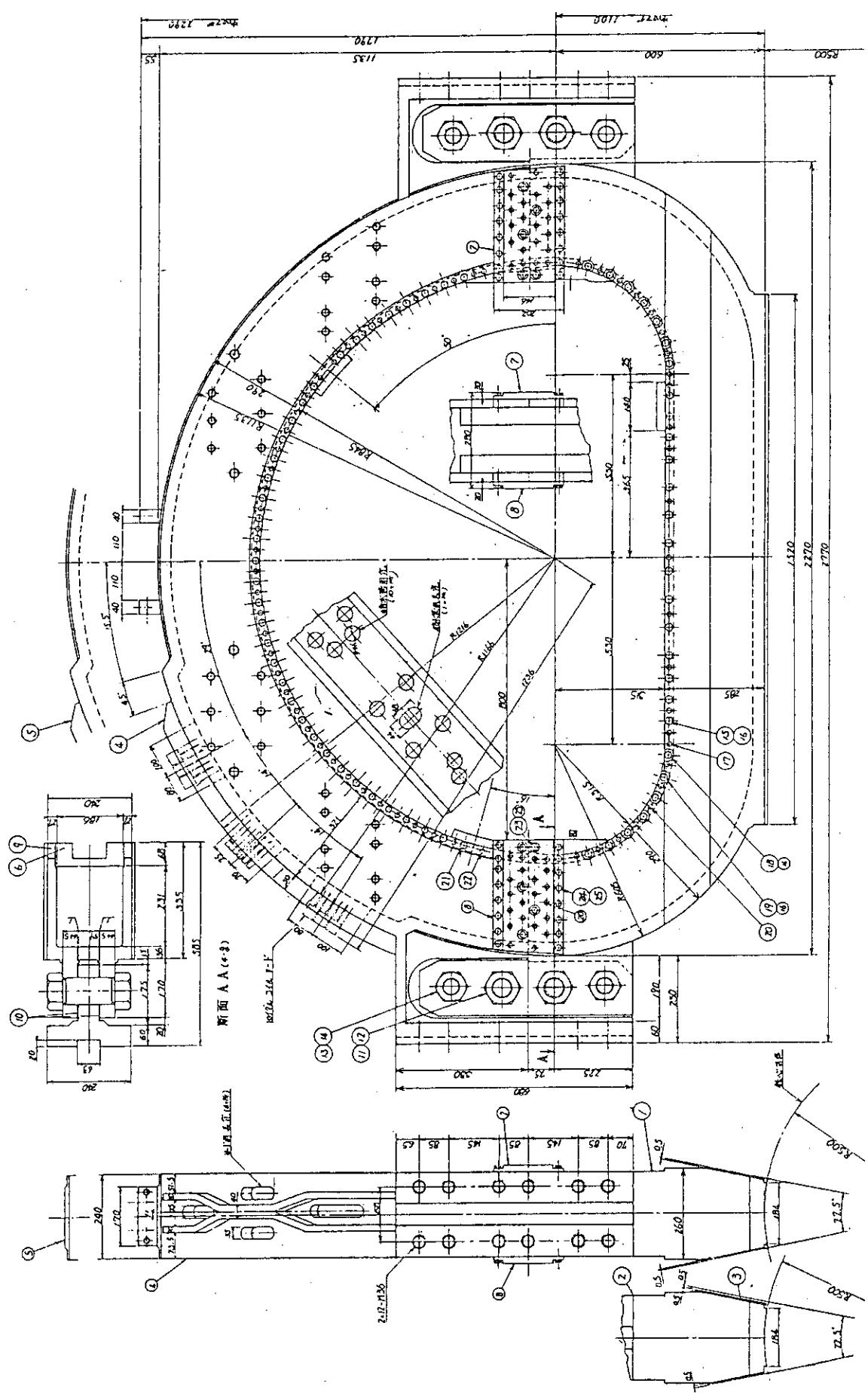
### 3.5.5 特性測定

#### (1) 単独コイルの試験

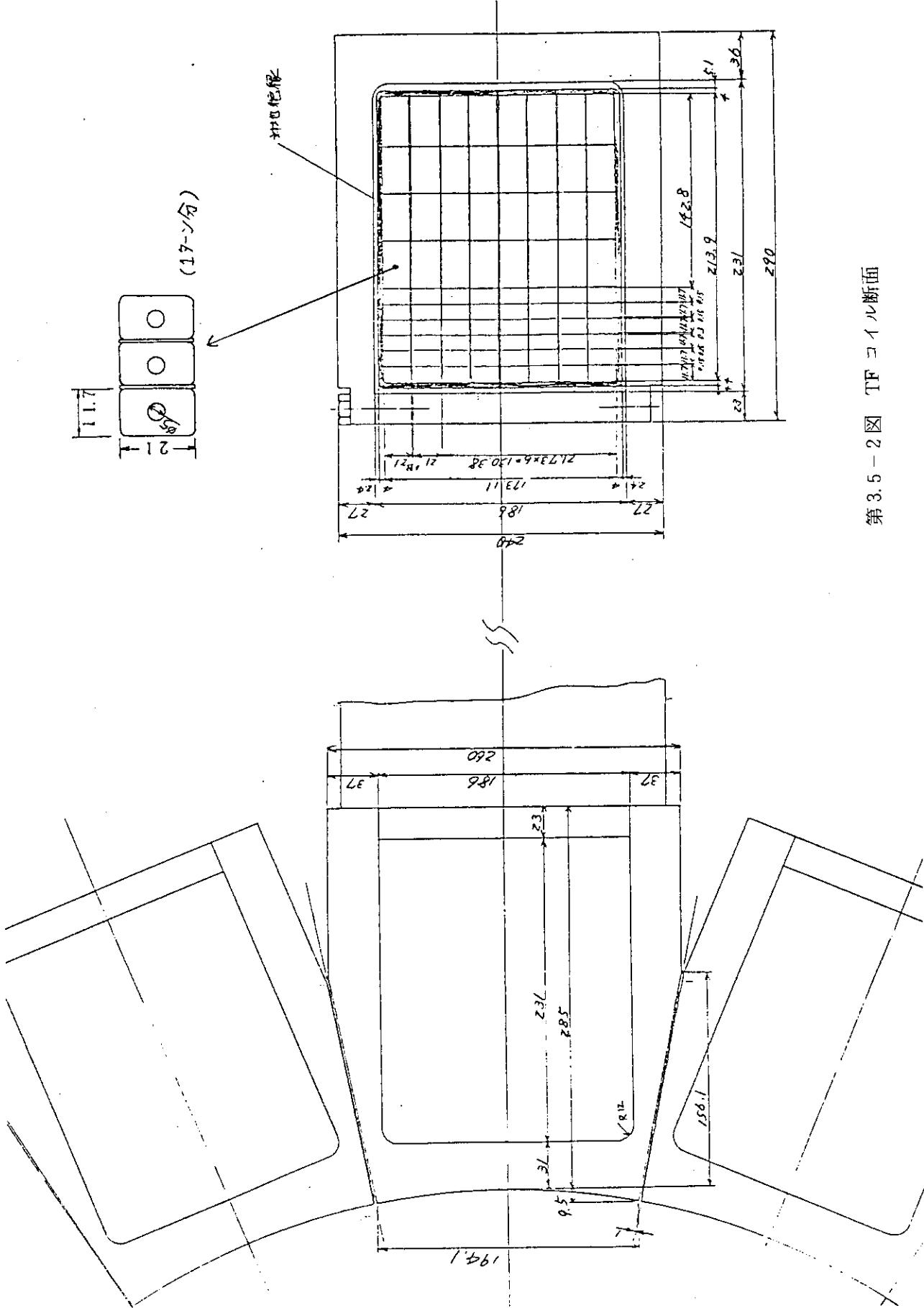
トロイダル磁場コイル 1 個についての電気抵抗、インダクタンスの測定値を第 3.5-3 表に示す。

#### (2) 通電試験

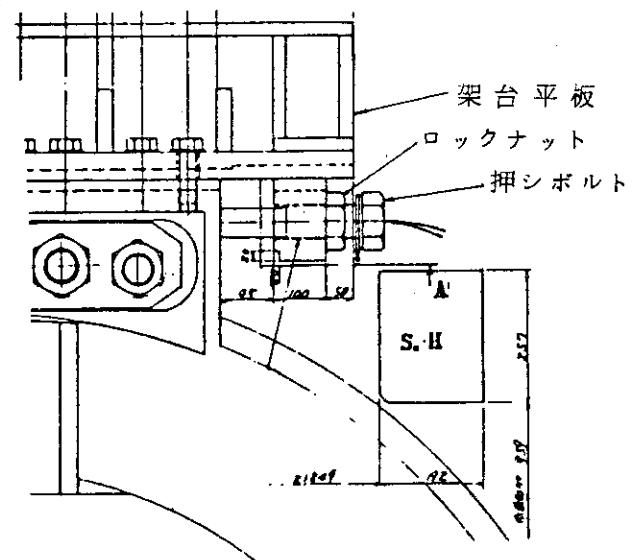
組みあがった 16 個のトロイダル磁場コイルを直列に接続し、定格電流 (12.1 kA) まで通電したときのトロイダル磁場コイルの温度上昇を測定した結果を次節第 3.6-9 表に示す。また、電源電圧を零にしたときのコイル電流の対数値の変化を第 3.5-15 図に示す。これらの測定結果から、全抵抗が  $0.107 \Omega$ 、自己インダクタンスが  $0.25 \text{ H}$  であることがわかる。



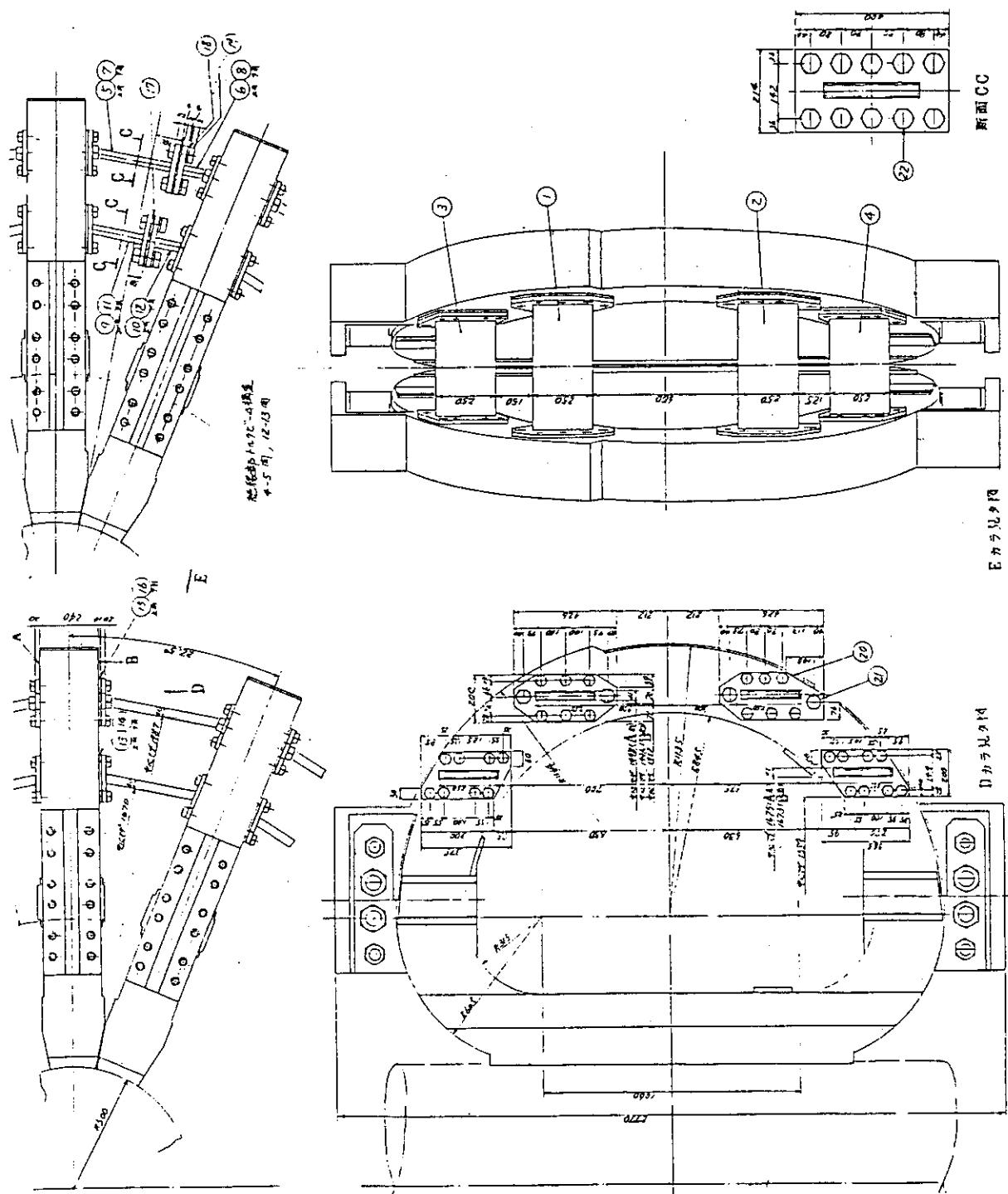
第3.5-1図 TFコイル外形図



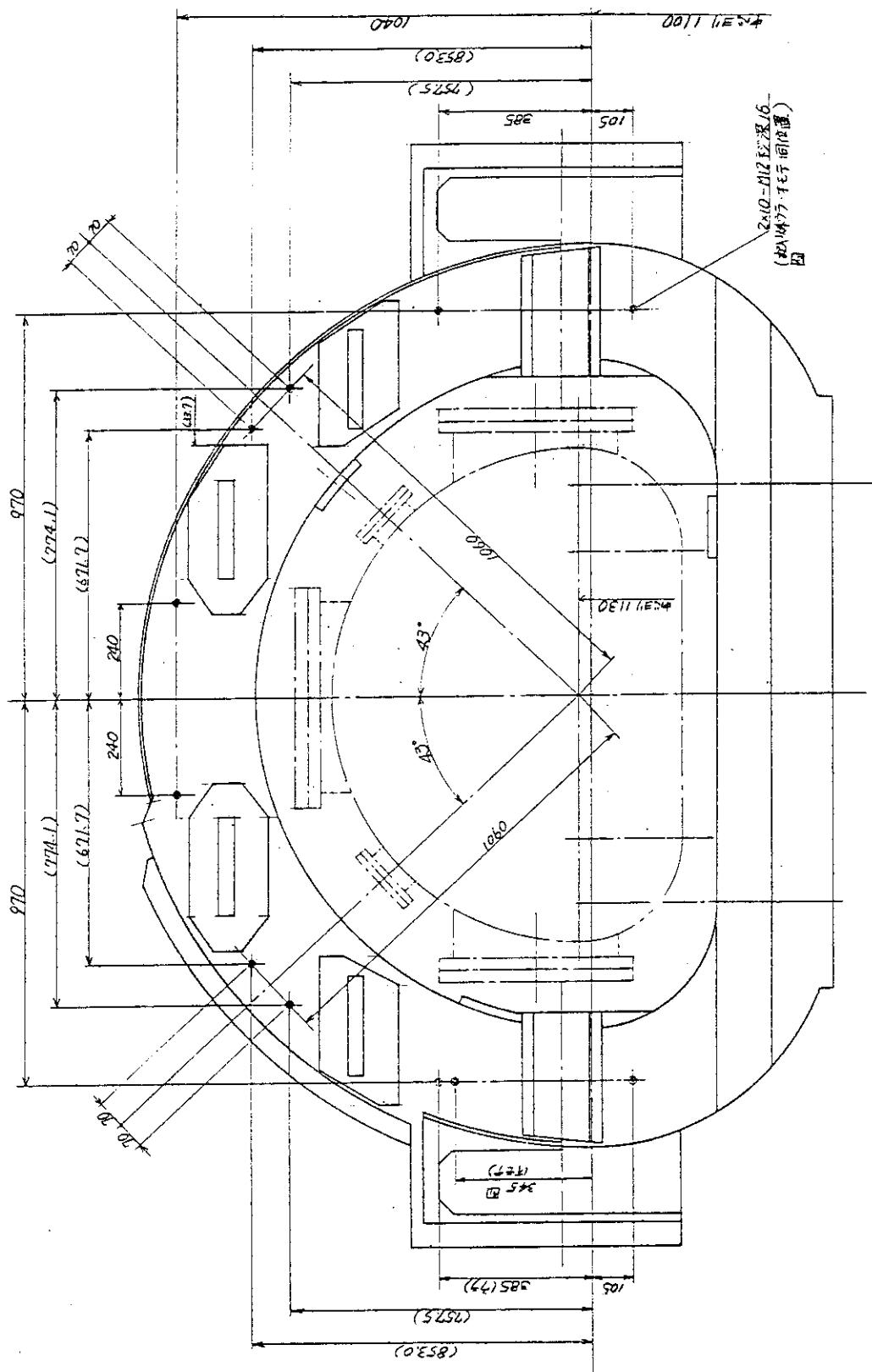
第3.5-2図 TFコイル断面



第3.5-3図 押しボルト



第3.5-4図 ツルクビーム構造図

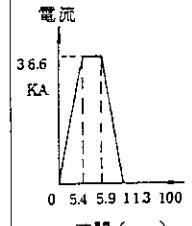


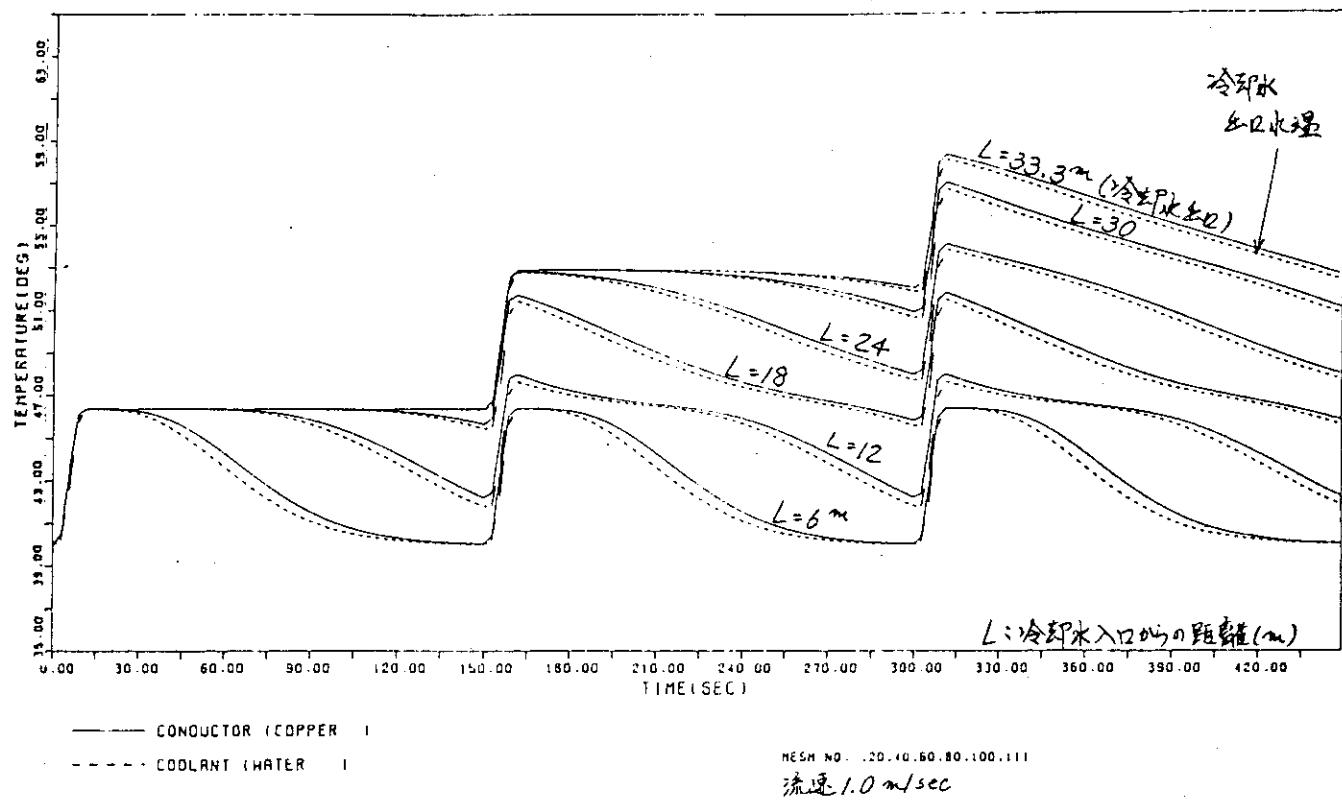
### 第3.5-5 図 TFコイル計測器取付用ボルト穴

第3.5-1表 トロイダルコイル電磁諸量

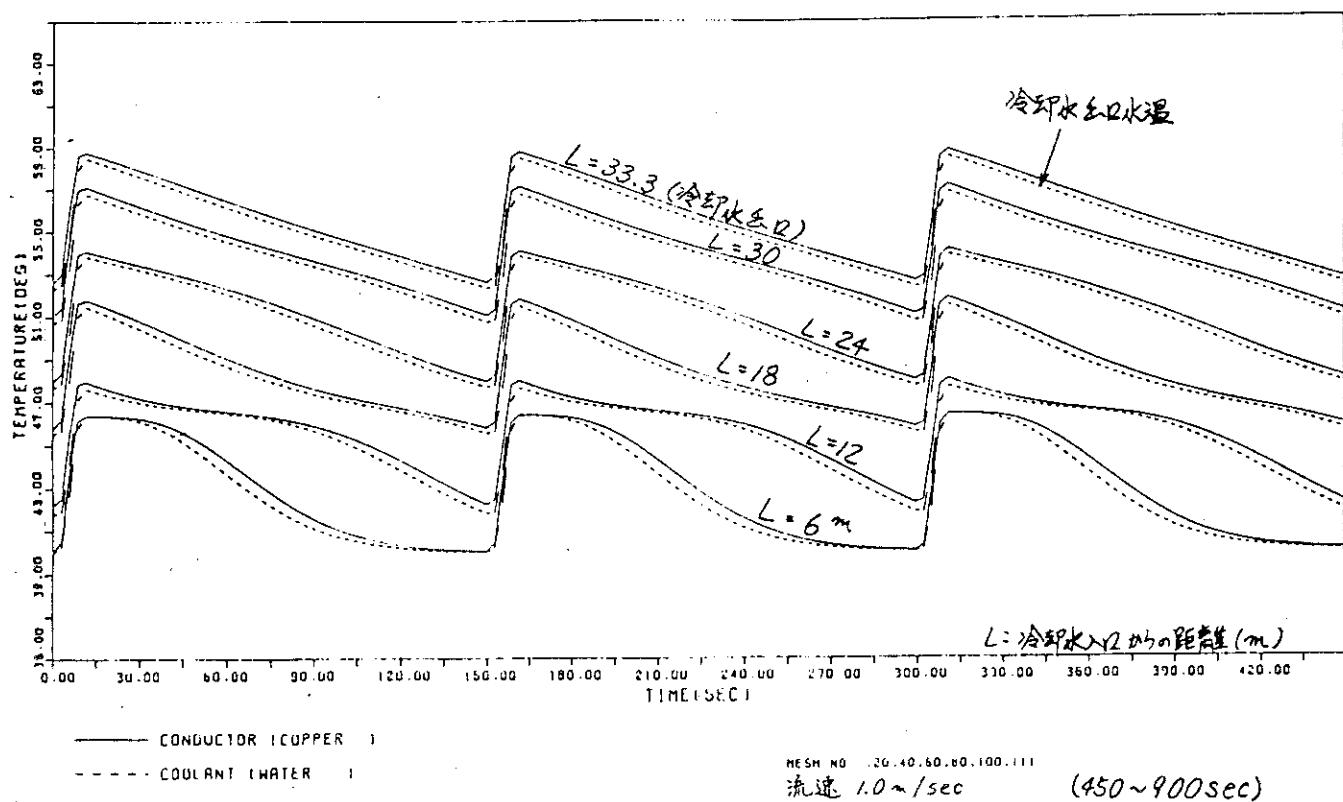
コイル数		16			Phase 1	Phase 2
巻数/コイル		48	最大電流		12.2 kA	32.53 kA
全巻数		768	最大起磁力		9.37MAT	25.0 MAT
導体		21 × 11.7 - $\phi$ 5 ホローコンダクター	中心磁場(於主半径 1.25 m)		1.5 T	4 T
材質		無酸素銅	フラットトップ		0.5 sec	0.5 sec
抵抗	(30 °C)	(112 mΩ)	矩形波換算通電時間		4.5 sec	4.1 sec
	(75 °C)	131 mΩ	フラットトップ電圧		1600 V	4260 V
インダクタンス		0.26 H	通電周期		2.5分	10分
重量		3570 kg	磁気エネルギー		19.35 MJ	138 MJ
			ジュール損 /shot		87.7 MJ	568 MJ
			冷却水量		27.1 ton/hr	54.3 ton/hr
			冷却水圧力損失		2 kg/cm²	8 kg/cm²

第3.5-2表 TFコイル熱計算条件及び結果

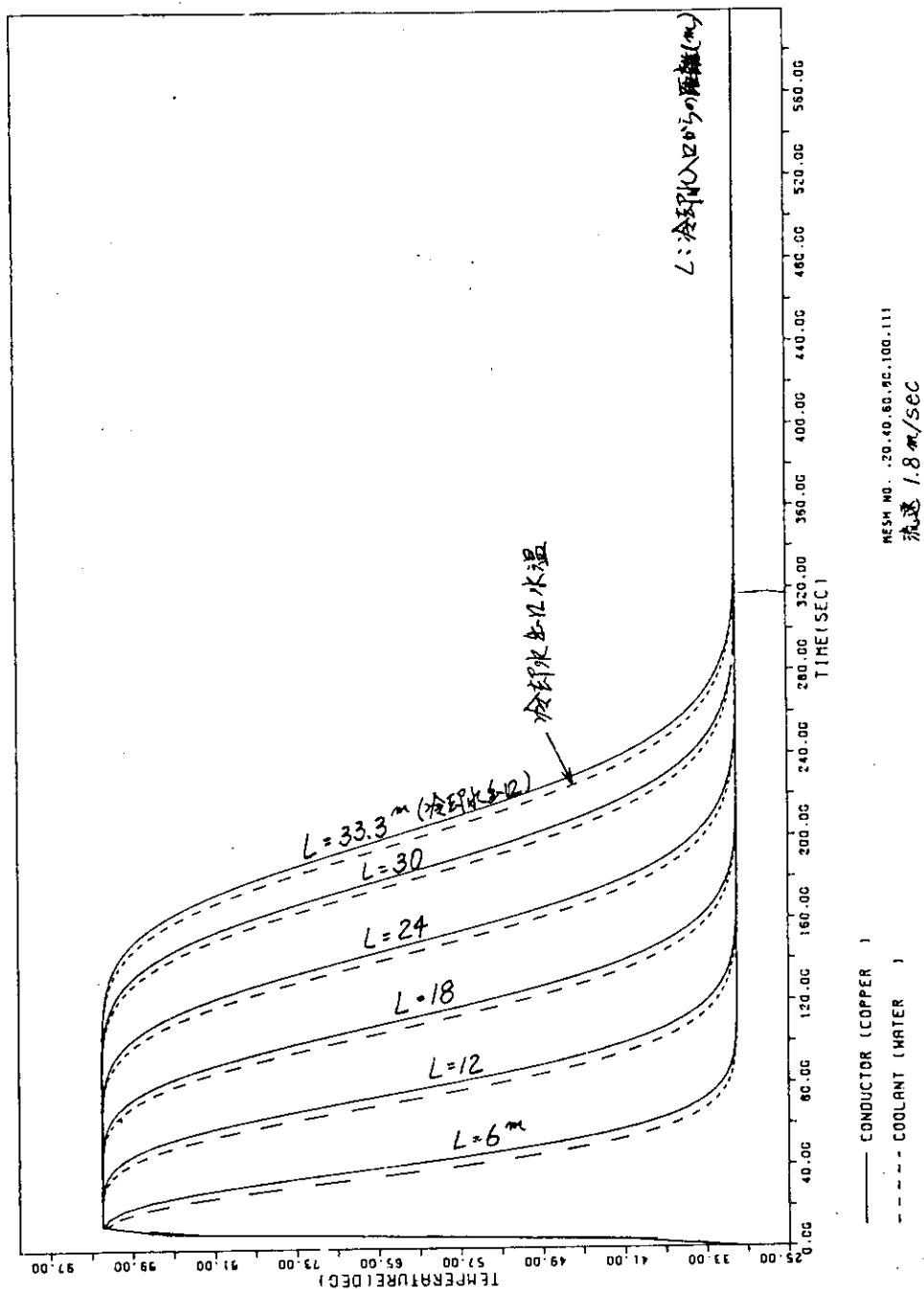
		Phase 1		Phase 2	放電洗浄運転	
電流	kA	12.2		36.6 *	2.85	
A T	MAT	9.32		28.1	2.19	
運動間隔	分	2.5		10	連続	
冷却水流量	Ton/hr	27.1	13.55	54.2	27.1	
冷却水流速	m/s	1	0.5	2	1	
冷却水入口温度	℃	40	32	30	40	
導体最高温度	℃	58.8	66.3	91.7	71.2	
導体最高温度上昇	℃	18.8	34.3	61.7	31.2	
圧力損失	kg/cm²	1.1	—	3.6	—	



第3.5-6図 温度経過図 (Phase 1)

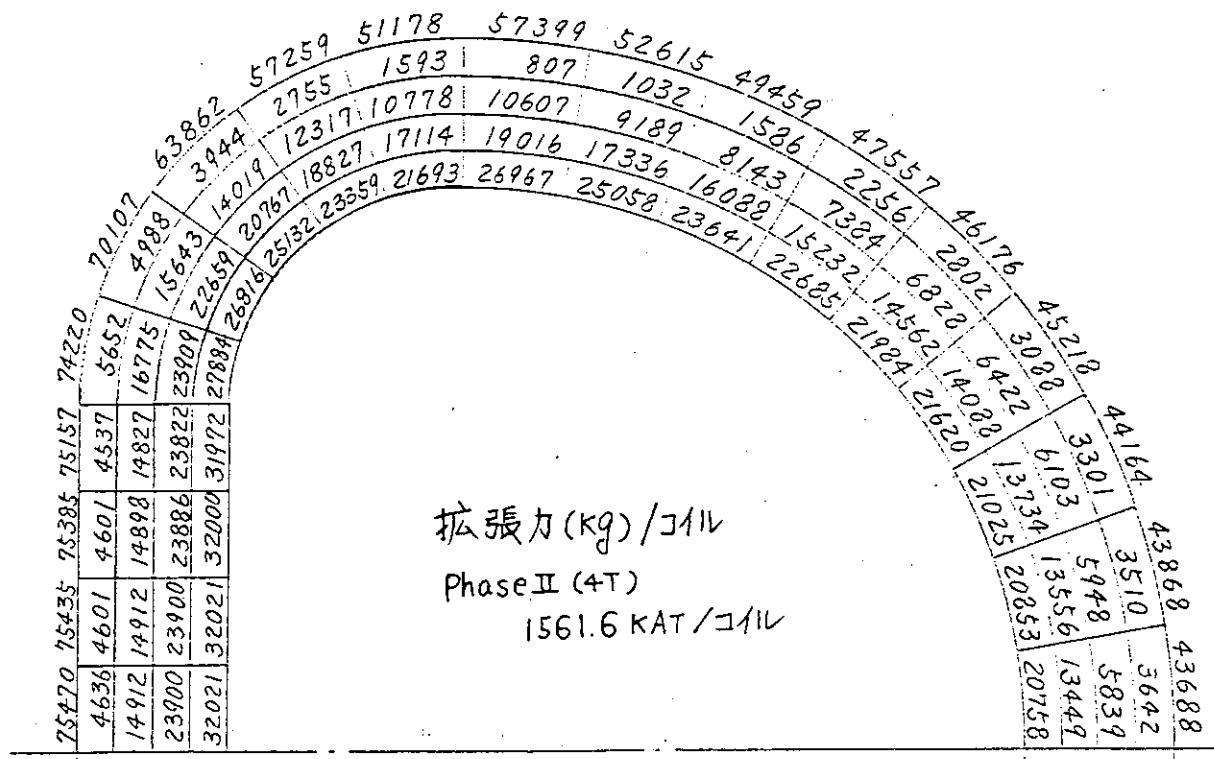


第3.5-7図 温度経過図 (Phase 1)

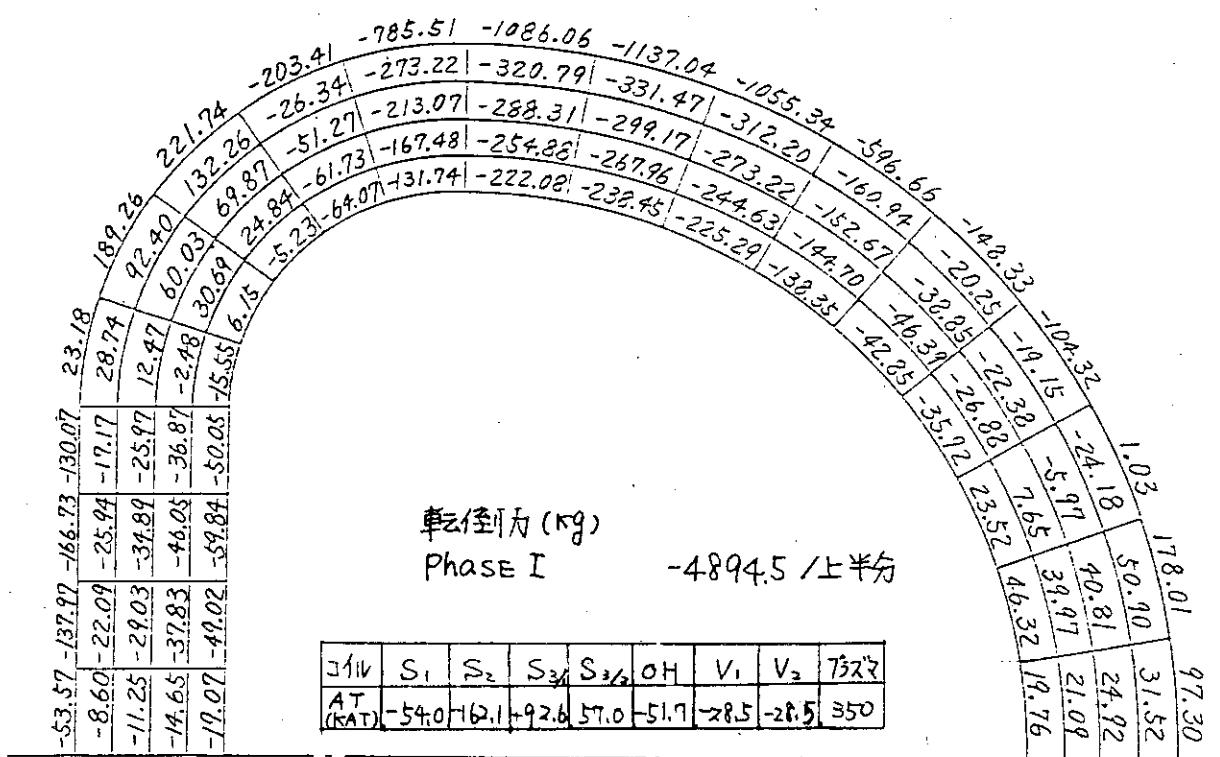


第3.5-8図 溫度経過図 (Phase 2)

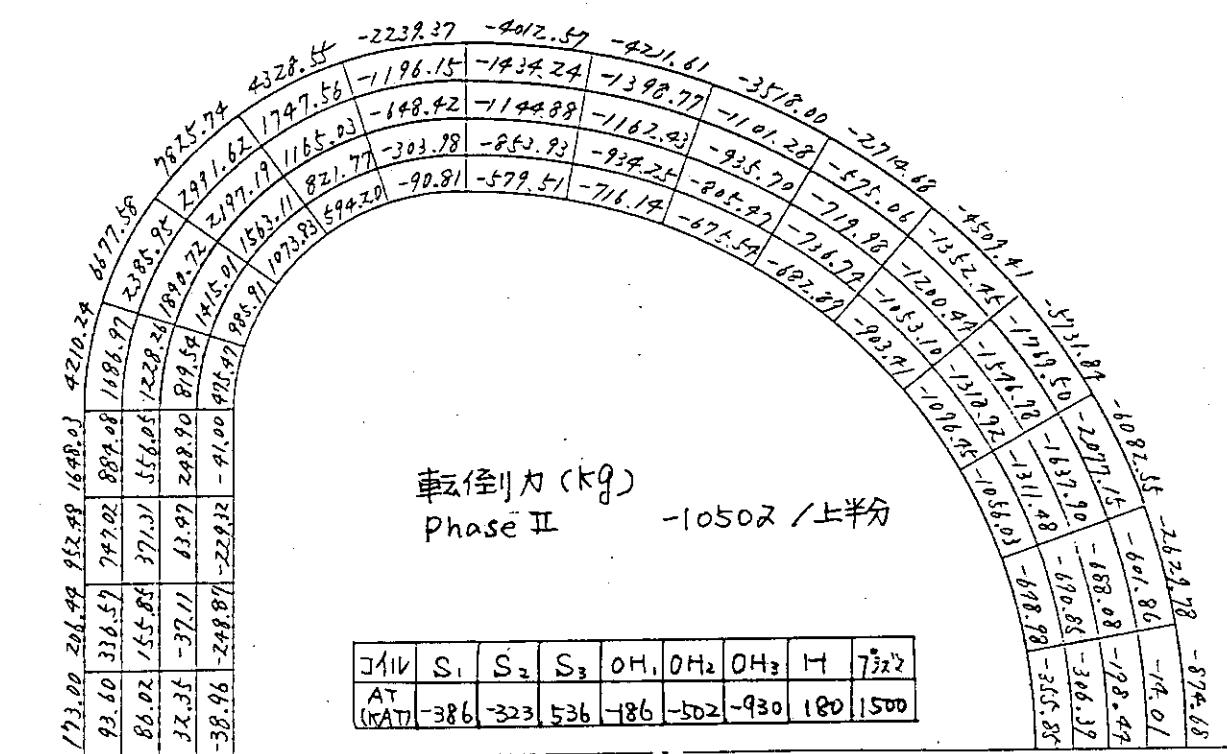
JFT-2M TOROIDAL COIL THERMAL ANALYSIS PHASE 2



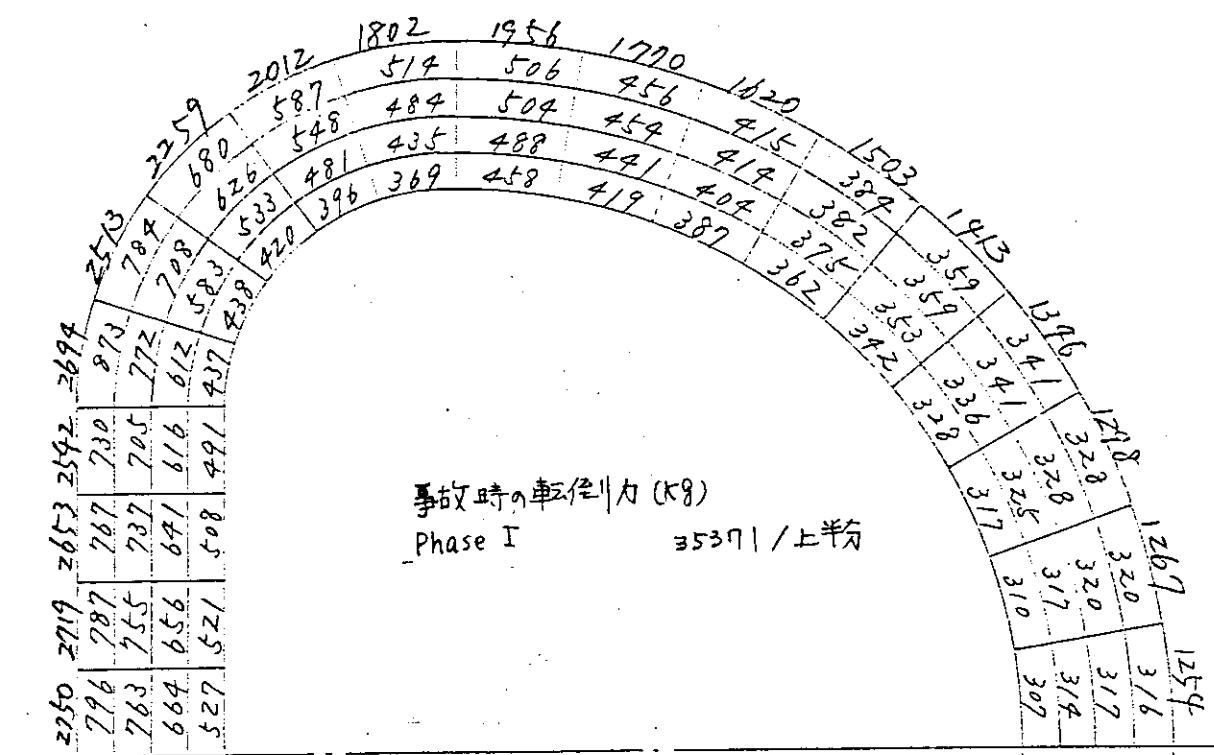
第3.5-9図 TFコイルの自己電磁力による拡張力



第3.5-10図 ポロイダル磁場によるTFコイルの転倒力-1

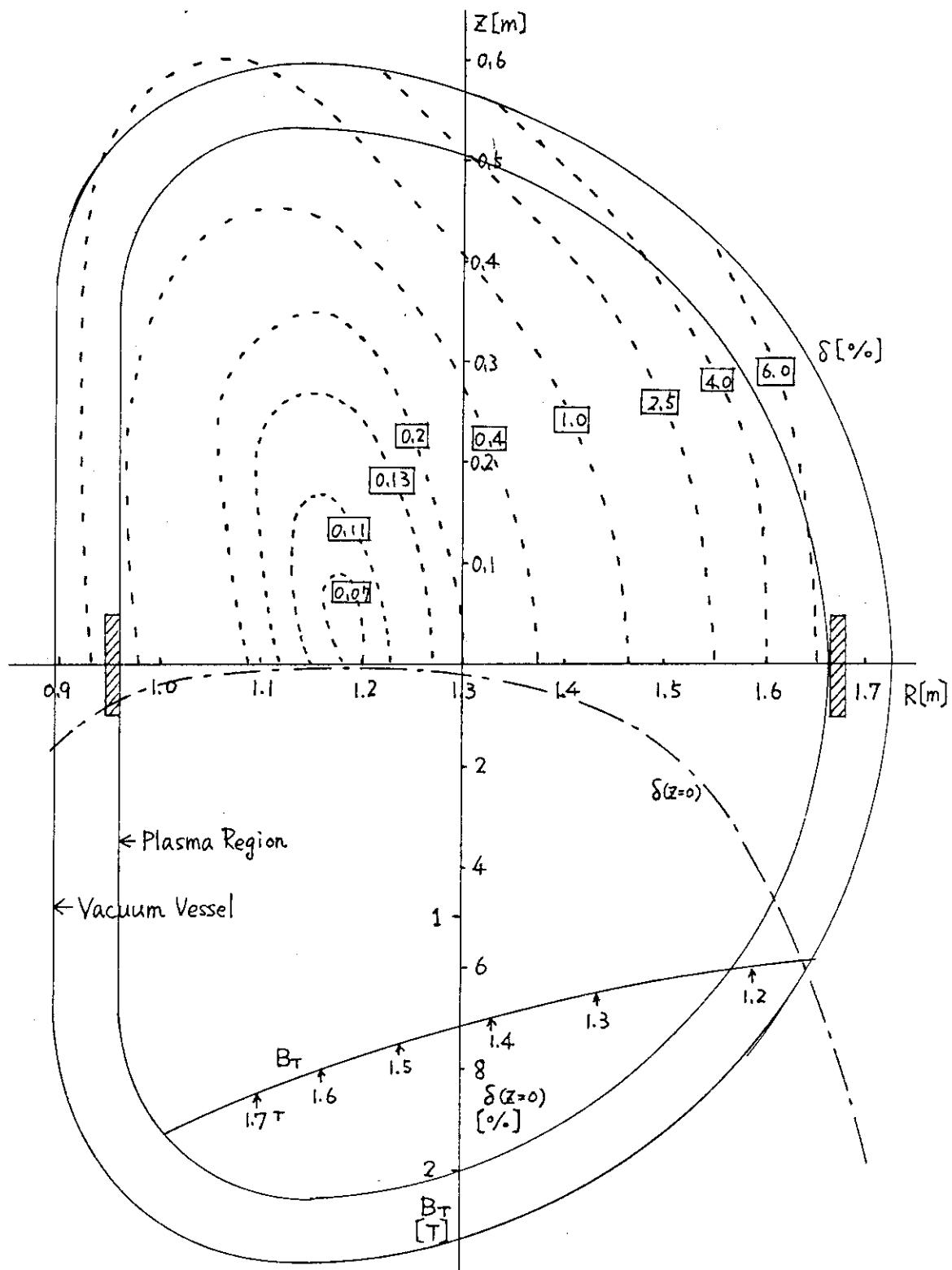


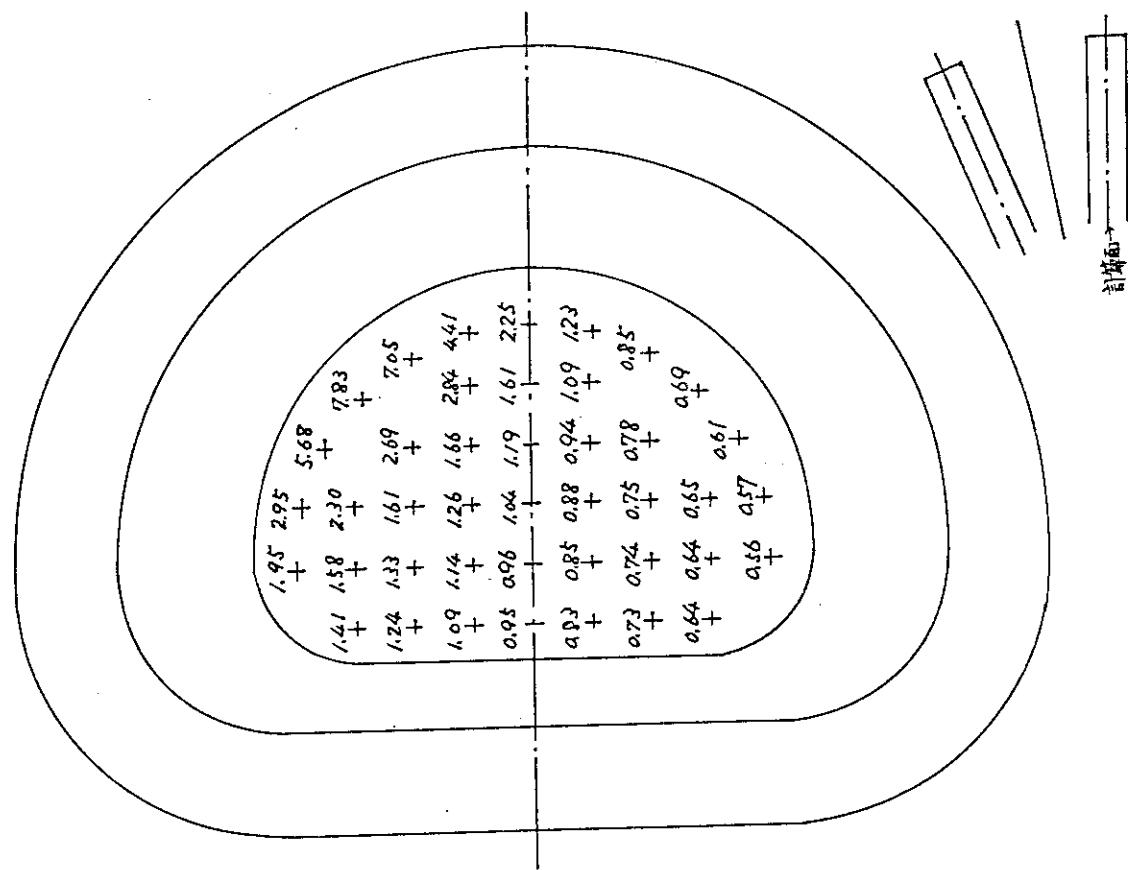
第3.5-11図 ポロイダル磁場によるTFコイル転倒力-2



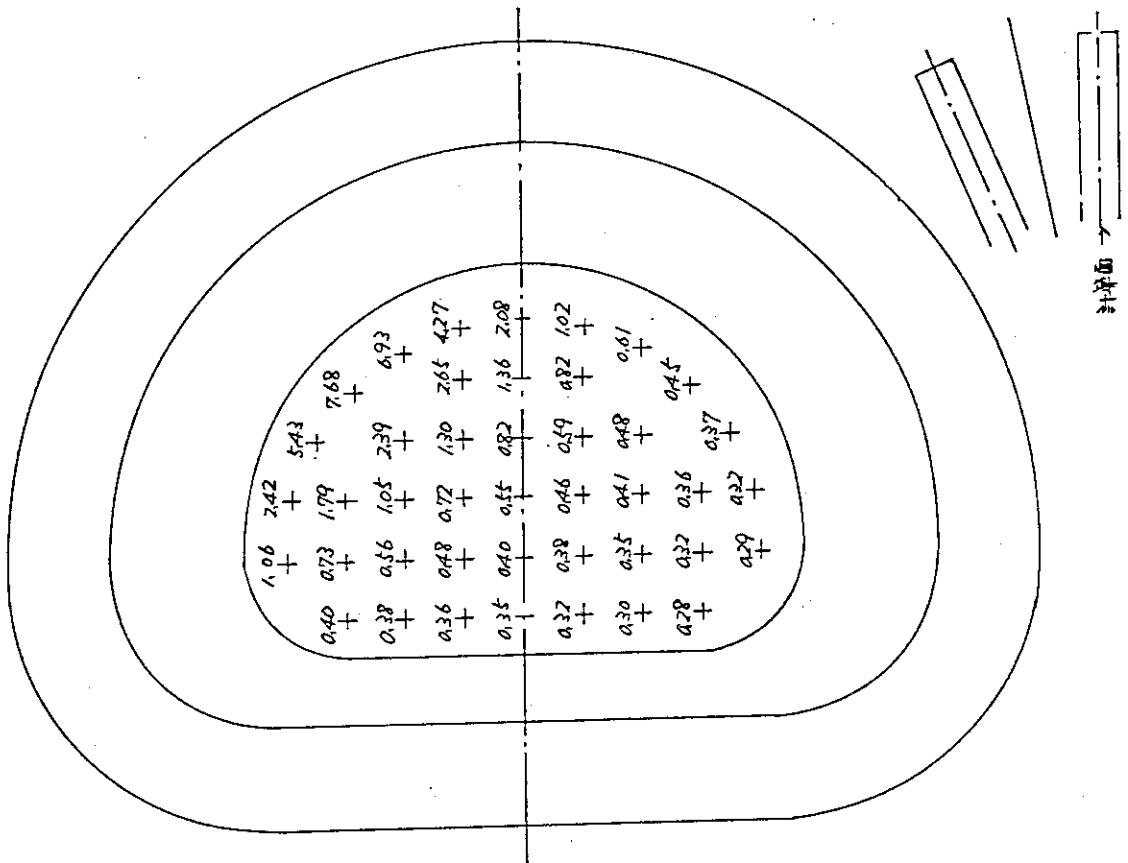
第3.5-12図 短絡コイルの隣のコイルに働く転倒力

(正常コイル電流 12.67 kA, 短絡コイル電流 5.1 kA)

第3.5-13図 トロイダル磁場のリップル( $\delta$ )



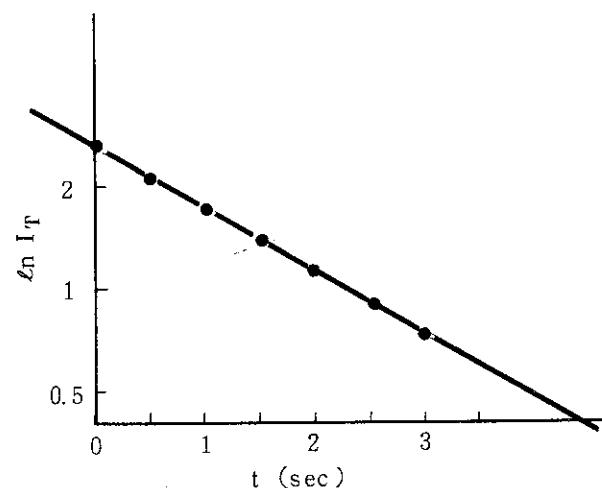
第3.5-14図(a) 渡り部・給電部による誤差磁場 |B| (G)



第3.5-14図(b) 渡り部, 給電部による誤差磁場 B\_r (G)

第3.5-3表 単独トロイダル磁場コイルの特性値

	最大	最小	条件
抵抗値	8.39 mΩ	8.19 mΩ	75 °C
インダクタンス	1.66 mH	1.65 mH	75 °C



第3.5-15図 トロイダルコイルの時定数測定

$$\left( \begin{array}{l} \tau = L/R = 2.35 \text{ sec} \\ R = 0.107 \Omega \text{ より} \\ L = 0.25 \text{ H} \end{array} \right)$$

### 3.6 ポロイダル磁場コイル (PF コイル)

#### 3.6.1 設計検討

##### (1) 平衡に必要な磁場

トカマクプラズマの平衡はトロイダル方向に巻かれたコイル (PF コイル) の作るポロイダル磁場によって保持される。プラズマ電流  $I_p$ , ポロイダルベータ値  $\beta_p$ , 非円形度  $\kappa$  の非円形断面プラズマを保持するに必要な磁場は第 3.6-1 図によって表わされる。<sup>(3)(4)</sup> 即ち、プラズマの  $I_p$ ,  $\beta_p$ ,  $\kappa$  を与えると必要なポロイダル磁場の垂直成分  $B_v$  とプラズマ中心  $R$  での磁場の曲率を表す指数  $n = - (R/B_v) \cdot \partial B_v / \partial R$  が図から求められる。ただし、プラズマ形状の 3 角度成分( $\delta$ )やポロイダル磁場の分布の効果は含まない近似的な関係である。これらの効果を考慮すると必要とされるポロイダル磁場の  $B_v$ ,  $n$  はもう少し緩やかなものとなる。実際プラズマ平衡の式

$$\begin{aligned} R \frac{\partial}{\partial R} \left( \frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \psi}{\partial Z^2} &= -\mu_0 R j_\psi (\psi, R) \\ &= -\mu_0 \left[ R^2 \frac{d}{d \psi} P(\psi) + \frac{d}{d \psi} \left( \frac{I^2}{2} \right) \right] \end{aligned}$$

$\psi$  : 磁束関数

$I(\psi)$  : 電流分布を与える流れ関数

$j_\psi$  : 電流分布

$P(\psi)$  : 圧力分布

を EQUCIR コード<sup>(5)</sup>を使って数値的に解いた場合の例を同図中に示すと点線のようになる。特に、ベータ値及び非円形度の大きい所で上記の効果の大きいことが分る。

##### (2) コイル位置と磁場の特徴

PF コイルの配置を決めるに当って、PF コイルの位置を TF コイルに沿って動かした場合のポロイダル磁場分布の変化を求めると第 3.6-2 図のようになる。又、その時のプラズマ中心から見たコイル位置角度とプラズマ中心での  $B_v$ ,  $n$  の値との関係を第 3.6-3 図に示す。すなわち、各コイル位置は次のような特徴を持つ。

(イ)  $\theta = 0 \sim 45^\circ$  の領域 :  $B_v = 大$ ,  $n < 0$

特に  $\theta = 0$  で  $B_v = 最大$ ,  $n \approx -1$

(ロ)  $\theta \approx 45^\circ$  の位置 :  $B_v = 一様分布$ ,  $n = 0$

(ハ)  $\theta = 45^\circ \sim 125^\circ$  の領域 :  $B_v = 中 \sim 小$ ,  $n > 0$

(ニ)  $\theta \approx 125^\circ$  の位置 :  $B_v = 0$ ,  $n = \pm \infty$

(ホ)  $\theta = 125^\circ \sim 145^\circ$  の領域 :  $B_v = 負で小$ ,  $n < 0$

(ヘ)  $\theta = 145^\circ \sim 180^\circ$  の領域 :  $B_v = \left\{ \begin{array}{l} \text{中心は負で小} \\ \text{内側は負で大} \end{array} \right\}$ ,  $n = 0$

##### (3) コイル位置の設定

上記の結果から、 $I_p$ ,  $B_v$ ,  $n$  を制御するという PF コイルの役目を最も効率よくはたすのは  $\theta = 0 \sim 60^\circ$  の位置であることが分る。円形プラズマの場合には  $\theta \approx 60^\circ$  の近く ( $n = 1/2 \sim 3/2$ ) で

あり、非円形プラズマの場合には $\theta = 0^\circ$  ( $n = -1$ ) の近くがよいことが分る。 $\theta = 0^\circ$ の位置は同一電流値に対して最も大きな $B_v$ と最も小さい負の $n$ を得ることができ、最も少ない電力で非円形プラズマを実現できる。しかしながら、JFT-2Mでは円形から非円形まで広い形状プラズマを得ること、及び、水平方向の実験上のアクセスを良くするために、ハイブリッドコイル配置の主コイルを $\theta \approx 20^\circ$ と $\theta \approx 60^\circ$ の近くに設定した。

特殊なプラズマ形状においては上記主コイルのみでプラズマを保持することができる。しかしながら、さらに大きい非円形度を得たり、三角形度を加えたり、ダイバータ配位を得る必要がある。このため、 $B_v \approx 0$  で三角成分及びダイバータ配位に効力のある $\theta \approx 125^\circ$  近くとこれと逆符号の磁場分布をもつ $\theta \approx 0$  の近くにコイルの設定を行った。又、PFコイルとプラズマとの距離効果を調べると共に、特殊な配置での電力の節約を行うため、TFコイルの内側に同様の角度で補助コイルを設けることとした。

以上のような設計方針に基づき決定した JFT-2M のポロイダルコイル配置を第 3.6-4 図および第 3.6-1 表に示す。

#### (4) 制御ベクトルダイヤグラム

上記で配置を決定した PF コイルの制御範囲を $B_v - nB_v$  ダイヤグラムで示すと第 3.6-5 図のようになる。同図には、第 3.6-1 図から決まるプラズマの目標領域を示すと同時に、各コイルに設けたコイルタップによる制御ベクトルの可変範囲も示してある。各コイルに必要な電流容量はこのダイヤグラムから大略決定するとともに平衡コードによって詳細に検討し最終決定を行った。

各コイルの制御ベクトルは、3.7 項で述べるように鉄心による漏れ磁場の効果を受るが、同図には鉄心によるイメージ電流の補正を行った最終ベクトルが実線で示されている。点線は鉄心による補正を加えない空心時のベクトルである。

### 3.6.2 構造および特性

#### (1) 通電条件

上記の検討により決定された PF コイルの最終的な通電条件を第 3.6-2 表に示す。試験電圧については、(5)項で述べるサージ電圧の検討から決定された。又、TFコイルの外側のコイルについては、Phase 2においてトロイダル磁場 4 T に対応するコイル電流を流すことのできる設計を行った。

#### (2) 構造

第 3.6-6 図に、各コイルの素線構造を示す。OH および Q<sub>2</sub> コイルは冷却水用の貫通穴があけられている。第 3.6-7 図には各コイルの組立構成図を示す。さらに、第 3.6-8 図にはコイルのタップ構造の方向性と温度モニター熱電対の位置が示されている。

#### (3) 電磁諸量

制御ベクトルの基礎になる各コイルの単位電流当りの $B_v$ 、 $nB_v$  の値を $\mu$ 、 $\nu$  で表わし第 3.6-3 表に示す。又、円形プラズマおよび D 型プラズマ時の自己および相互インダクタンスを第 3.6-4 a, 4 b 表に示す。

#### (4) 誤差磁場の評価

PFコイルの渡り部の作る誤差磁場をプラズマ領域について評価した。その結果、各コイルの渡り部の作る誤差磁場は10G以下であることが分った。

### 3.6.3 サージ電圧の検討

プラズマが消滅（ディスラプション）するとき、PFコイル及び電源にサージ電圧が発生する。このサージ電圧に耐えるコイルおよび電源である必要がある。

現象の見通しをよくするため、2段階に分けて解析を行った。初めは最も厳しくかつ本質的理解が得られる様に、PFコイルとしてプラズマと結合の強いOHコイルのみで代表させ、プラズマ、真空容器そしてOHコイルからなる系で解析した。次にJFT-2Mが定格運転されているときのプラズマ消滅の場合を解析した。

#### (1) OHコイルモデル

プラズマ、真空容器そしてOHコイルからなる系において、プラズマ消滅時のOHコイルに誘起するサージ電圧および真空容器のサージ吸収効果を3つのパラメータ（①プラズマ消滅時定数、②真空容器短絡抵抗値、③コイル通電状態）について、計算機シミュレーションにより定量的に評価した。シミュレーションに使ったモデル回路を第3.6-9図に示す。シミュレーションの結果、プラズマ消滅から10数 $\mu$ s経過後、OHコイル端子間電圧は負になるが、その負電圧の最大値のパラメータ依存性を第3.6-10図に示す。OHコイルに誘起する電圧は真空容器の短絡抵抗に依存し、短絡抵抗が小さいほど真空容器の遮蔽効果は大きいことが分る。短絡抵抗10mΩ、消滅時定数1msの場合のサージ電圧は、OHコイル開放時に約14kVである。

#### (2) 定格運転モデル

JFT-2Mの定格運転がなされているとき、プラズマの消滅（時定数 $\tau_p = 1\text{ ms}$ ）が各コイルの端子間にどの程度の誘起電圧を発生させるかを評価した。プラズマの消滅は、プラズマの断面が小さくなり内側にシフトし、容器に触れてなくなる場合などあるが、ここでは定位位置で電流が消滅するものとした。

条件を厳しくするためにコンデンサーは結合していない。JFT-2Mは鉄心を有しているが、プラズマの定格電流が消滅する場合、鉄心は磁気的に飽和していると思われ、コイル間の結合は空心として扱った。コイルを励磁している回路は、コイル端子間を短絡し、通電していないコイルはコイル端子間が解放されているとした。従って励磁している電流又は電圧にサージ分が重畠されることになる。真空容器も上下に10対のポロイダルコイルとして模擬した。又、各PFコイルに関し、上下コイルを直列に結線する場合を考えた。これはサージ電圧を厳しく評価することになる。計算の結果を第3.6-5表に示す。上段に通電されているコイル端子間に誘起する最大電圧を、下段に通電されていないコイル端子に誘起する最大電圧を記す。

#### (3) コイル耐圧

上記の検討結果およびその他の条件を考慮して決定したコイル耐圧の値を第3.6-6表に示す。

### 3.6.4 特性測定

#### (1) コイル冷却水流量-水圧特性の測定

第3.6-7表にその結果を示す。

## (2) コイル抵抗およびインダクタンスの測定

第3.6-8表にその結果を示す。

## (3) コイル通電温度上昇試験

第3.6-9表にその結果を示す。

## (4) JTT-2M周辺の磁場(計算値)

第3.6-12図に計算結果を示す。

## 3.6.5 結線切換

ポロイダルコイルの結線切換は、

- (1) 結線切換盤
- (2) 結線切換模擬盤
- (3) グラフィックパネル

より構成される。

## (1) 結線切換盤

第3.6-13図に示すようにSコイル、Q・OHコイル、V・Hコイル結線切換盤の3つの盤から成り、次の機能を有している。

- (1) 第3.6-10表に示すS、OH、Q系コイル面の電源の接続が出来る。
- (2) 第3.6-11表に示す各コイル系内の接続が出来る。
- (3) 各コイルのタップの選択、接続が容易に出来る。
- (4) ポロイダルコイルの極性切換が出来る。

以上の機能の他に、コイルの絶縁抵抗及び、抵抗、インダクタンス等の測定もこの盤にて測定する。ただし、バイアスコイルは極性のみ変更するのでバイアス電源にて極性切換を行う。

## (2) 結線切換模擬盤

模擬盤は結線切換盤で行った結線パターンをモニター盤IIのグラフィックパネルに接点信号を送るための盤である。

その他、下記の機能がある。

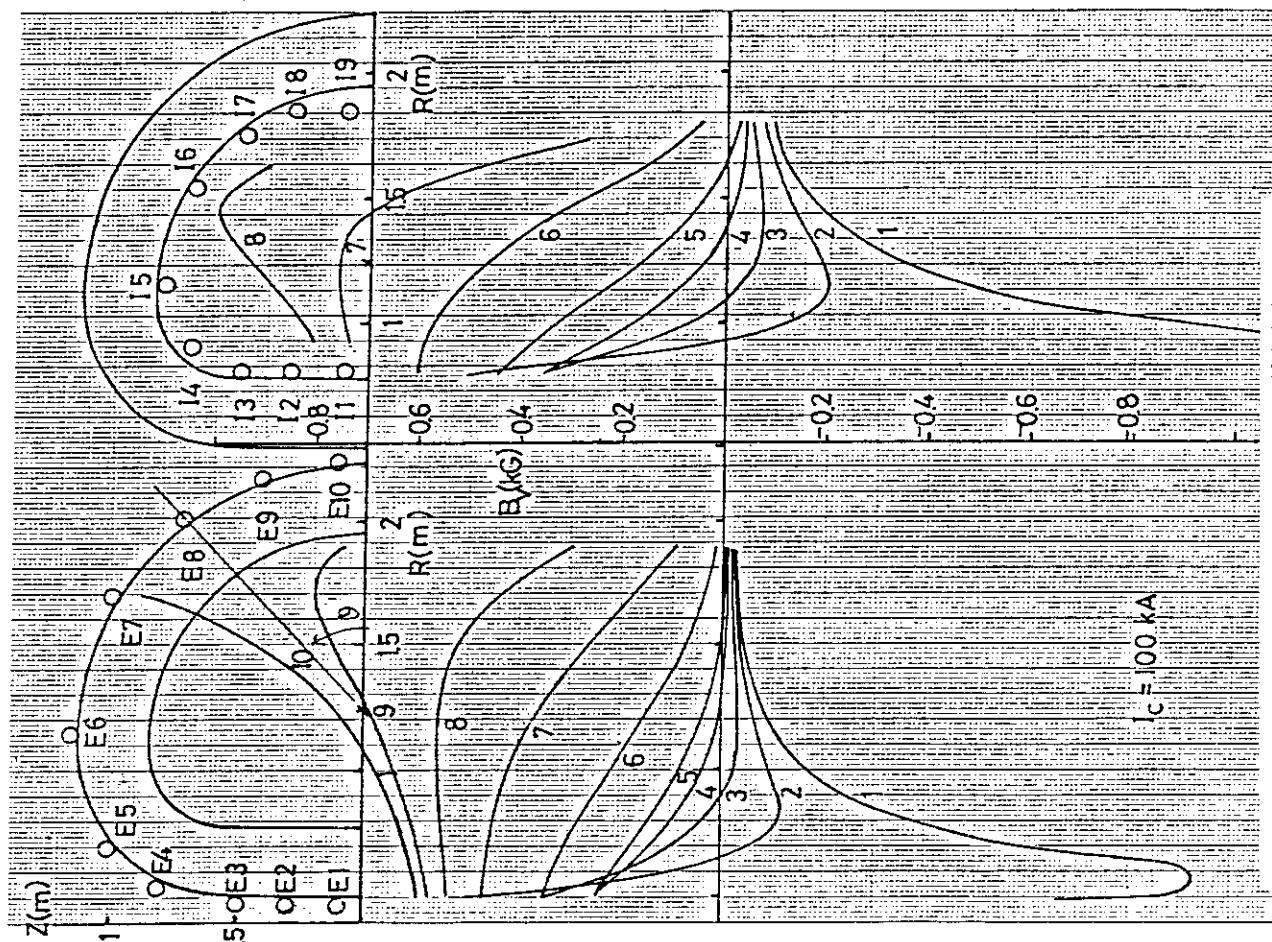
- (1) 現場で結線状態を表示する。
- (2) 結線の状態をチェックしP Fコイル電源投入可否の接点信号を出す。  
押ボタンスイッチの接点を使用し、各接点間にコイルを模擬するための抵抗を入れて、各コイル系の電源接続端子(S $\oplus$ -S $\ominus$ , Q $\oplus$ -Q $\ominus$ , OH $\oplus$ -OH $\ominus$ , V<sub>u</sub> $\oplus$ -V<sub>u</sub> $\ominus$ , V<sub>l</sub> $\oplus$ -V<sub>l</sub> $\ominus$ , H $\oplus$ -H $\ominus$ )に通電し一定の範囲内の電流値(2.2 mA < I < 14.3 mA)であれば閉となり、P Fコイル電源投入面の接点信号を出す。

また、切換盤のドアスイッチと連動して、ドアが開くと上記接点信号はリセットされる。

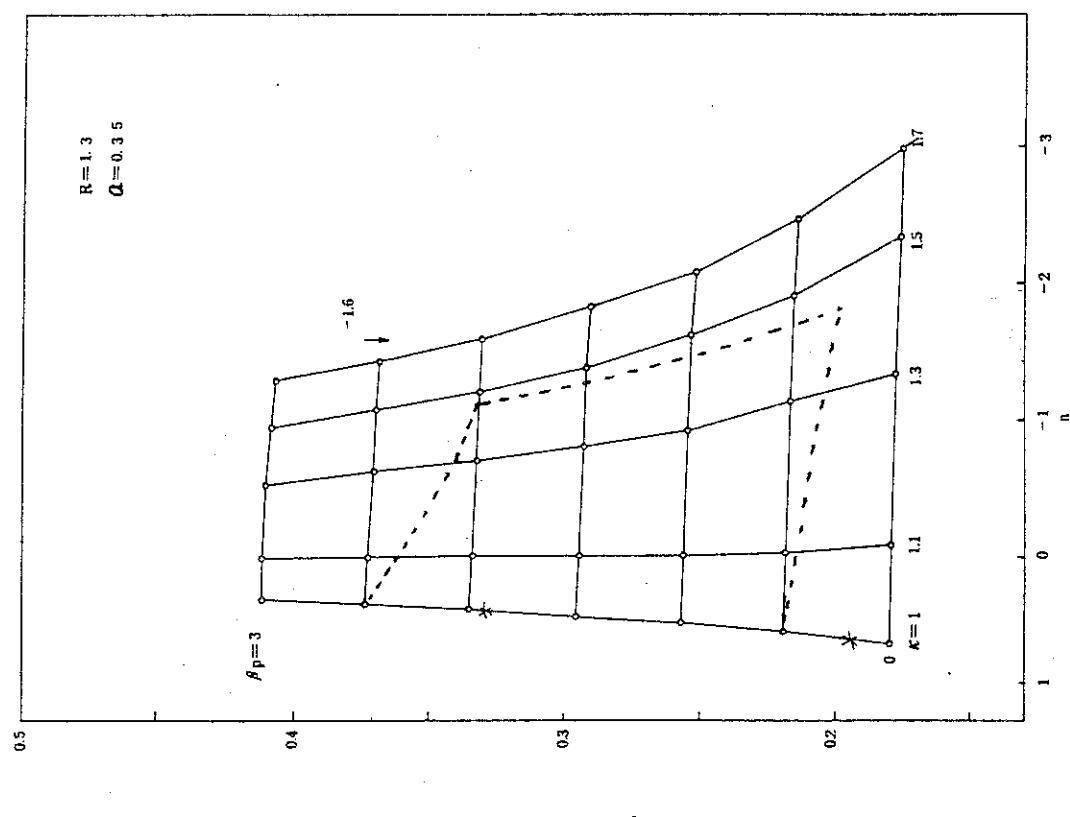
- (3) P Fコイル電源盤からの接点信号により、電源の通電状態「通電中」、「遮断中」を表示する。

## (3) グラフィックパネル

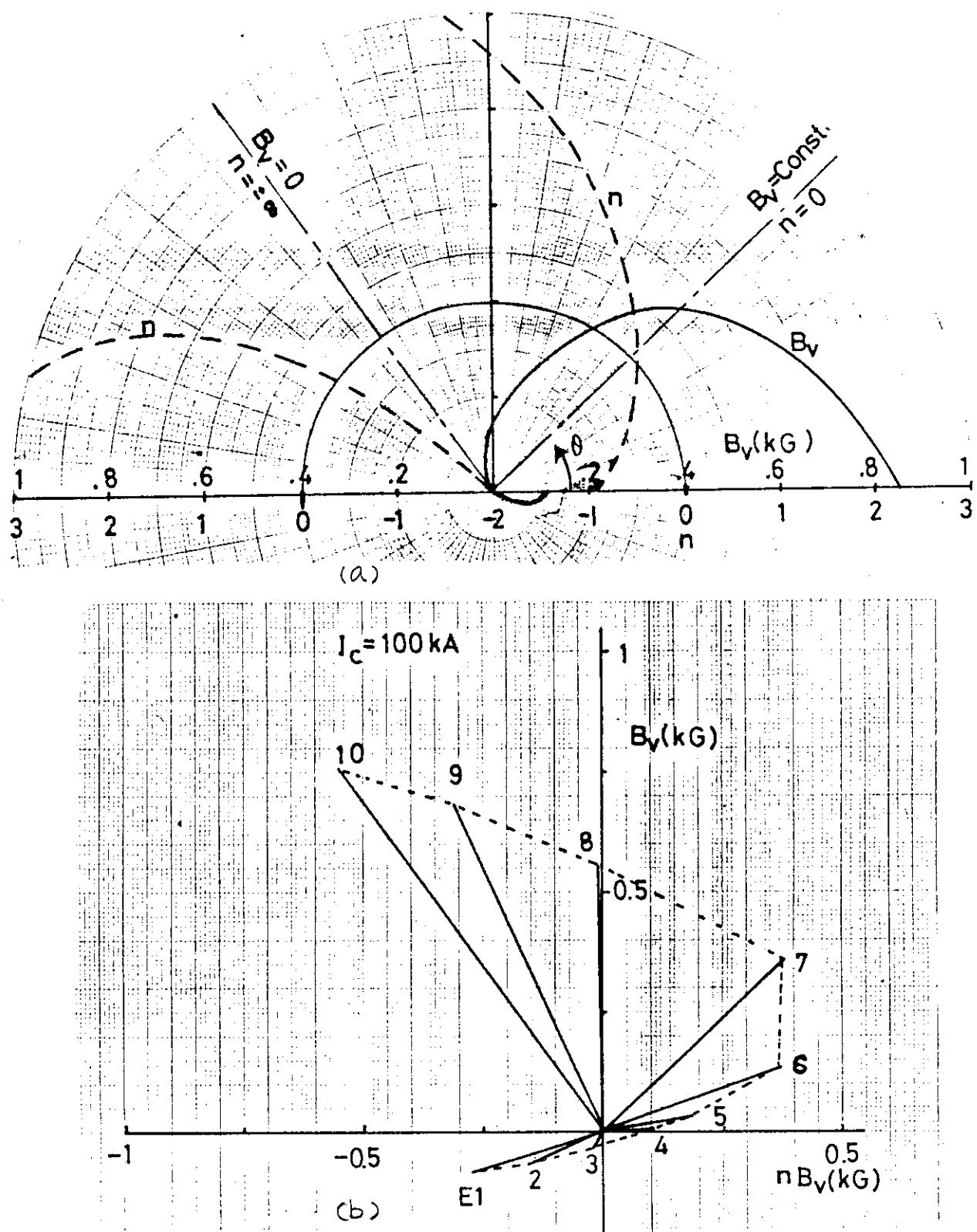
結線の状態を運転制御室にてモニターするパネルで、第3.6-10表のS, O H, Q系のコイル面の電源の接続についてはモザイクパネルの入れ換えにて行う。第3.6-11表の各コイル系内の接続については、Vコイル系(5), (6)の他は全て表示する事が出来る。第3.6-12~14表のプラズマの極性についてもパネルより極性が判る。

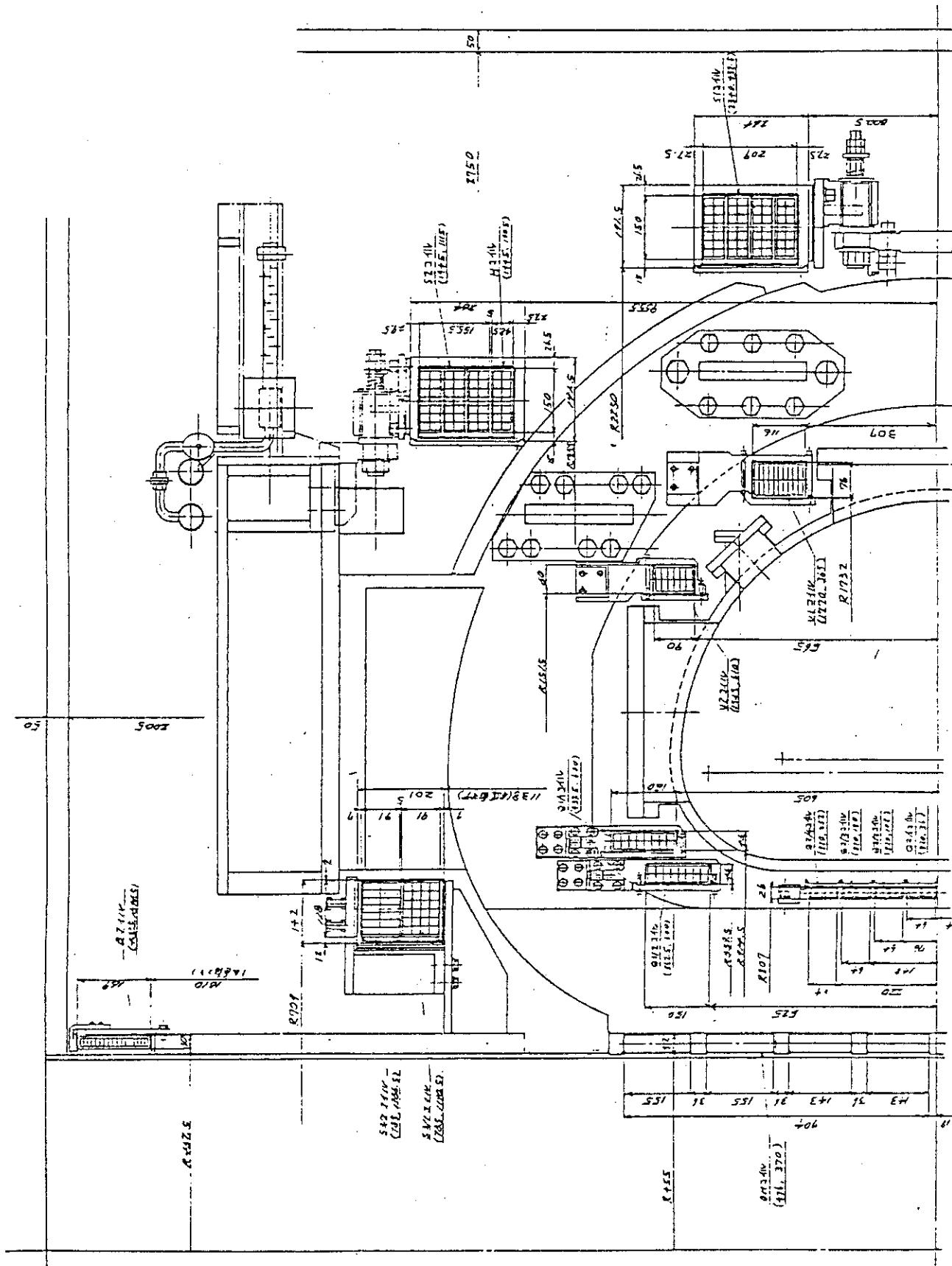


第3.6-2図 PFコイル位置と磁場分布



第3.6-1図 平衡に必要な磁場

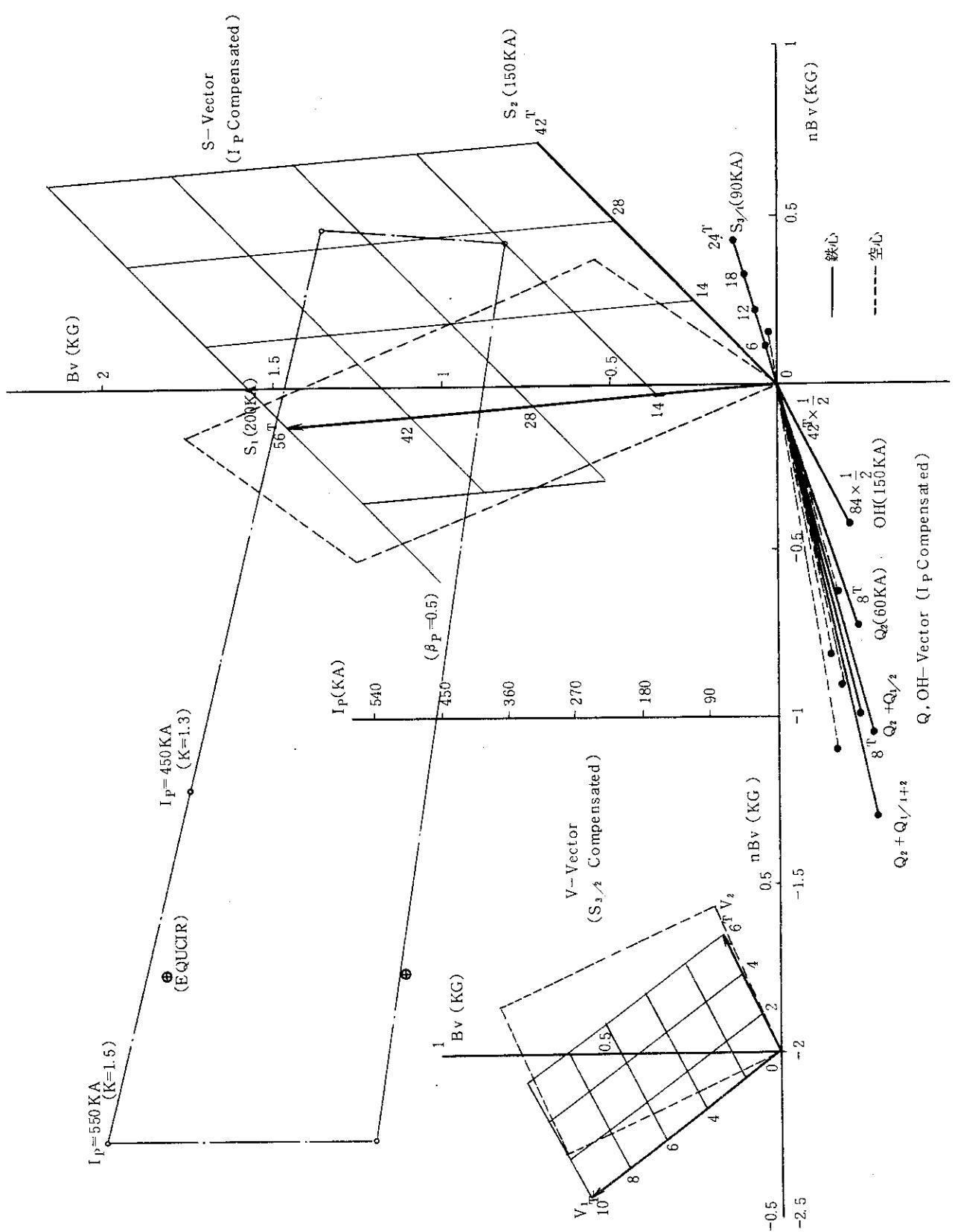
第3.6-3図 PFコイル位置と  $B_v$ ,  $n$  値 (TFコイルの外の場合)



第3.6-4図 JFT-2Mのボロイダルコイル配置

第3.6-1表 ポロイダルコイル諸元

コ イ ル 名	中心位置 R(m)	導 体 断面積 (mm <sup>2</sup> )	コイル外形寸法 (含、絶縁 ヨコ(mm))	総ターン 数 (上半分)	最 大 電 流 (kA)	実 効 電 流 (A)	コイル 最大AT (上半分) (kAT)	可変ターン数 (タップ)	抵 抗 (mΩ)	インダクタンス (mH)
S <sub>1</sub>	2.34	0.4325	321.8	194.5	257	56	4.3	248	241	0, 28, 42, 56
S <sub>2</sub>	1.945	1.115	321.8	194.5	257 (含Hコイル)	42	4.3	248	181	0, 14, 42
S <sub>3/4</sub>	0.785	1.1905	321.8	144	201	24	4.3	248	103	0, 12, 18, 24
S <sub>3/2</sub>	0.785	1.2865	597.8	144	14	7.5	433	105	0, 8, 10, 12, 14	2.0
V <sub>1</sub>	1.770	0.365	594	76	116	10	7.5	433	75	0, 6, 8, 10
V <sub>2</sub>	1.545	0.61	606	60	90	6	7.5	433	45	0, 4, 6
Q <sub>1/4</sub>	0.9375	0.68	590	46	150	8	8.5	491	68	0, 8
Q <sub>1/2</sub>	0.8625	0.6	590	46	150	8	8.5	491	68	0, 16
Q <sub>2/4</sub>	0.036	478.1	26							
<sup>2/2</sup>	0.82	0.108	478.1	26	284					
<sup>2/3</sup>	0.180	478.1	26							
<sup>2/4</sup>	0.252	478.1	26							
O H	0.476	0~0.722	182.1	42	722	42	3.6	208	151	0, 42, 84 (2並列) (2直列)
B	0.480	1.883	118.8	30	166	15	0.267	4	0, 15	13.2
H	1.945	1.005	321.8	150	257 (含S <sub>2</sub> コイル)	14	4.3	248	60	0, 14
										18.3
										1.88



第3.6-5図 JT-2M制御ベクトルダイヤグラム

第3.6-2表 通電条件

系 統	コイル名	ターン数	試験電圧 [kV]		冷却方式	電流 phase 1		電流 phase 2	
			対地	ターン間		peak [kA]	実効 [A]	peak [kA]	実効 [A]
S 系	S <sub>1</sub>	56	51	0.5	間接水冷	4.3	248	12.9	372
	S <sub>2</sub>	42	42		"				
	S <sub>3/1</sub>	24	31		"				
V 系	V <sub>1</sub>	10	10	1	自然空冷	7.5	433	—	—
	V <sub>2</sub>	6	6		"				
	S <sub>3/2</sub>	14	14		間接水冷			22.5	653
Q 系	Q <sub>1/1</sub>	8	20	1	自然空冷	8.5	491	—	—
	Q <sub>1/2</sub>	8	20		"				
	Q <sub>2</sub>	上 <sub>1</sub> 下 <sub>6</sub>	20		直接水冷				
H 系	H	14	7	0.5	間接水冷	4.3	248	12.9	372
B 系	B	15	30	1	自然空冷	0.267	49	—	—
O H 系	OH	42	25	1	直接水冷	3.6	208	—	—

注)

1. Bコイル以外ノ phase 1 電流ハ  
ノ波形トスル

peak  
2.5分 | 0.5秒

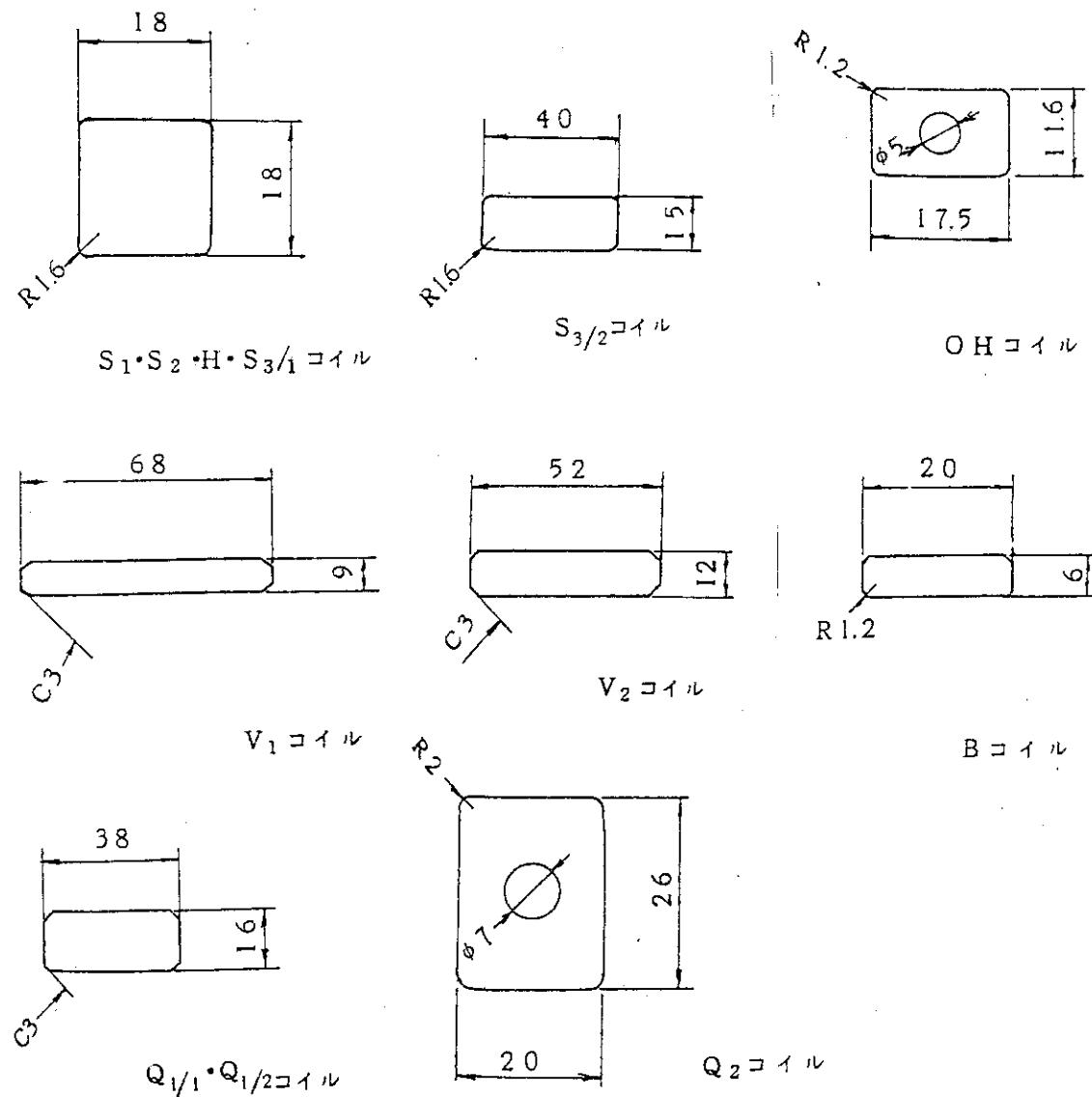
2. SHコイルノ phase 2 電流ハ  
ノ波形トスル

peak  
10分 | 0.5秒

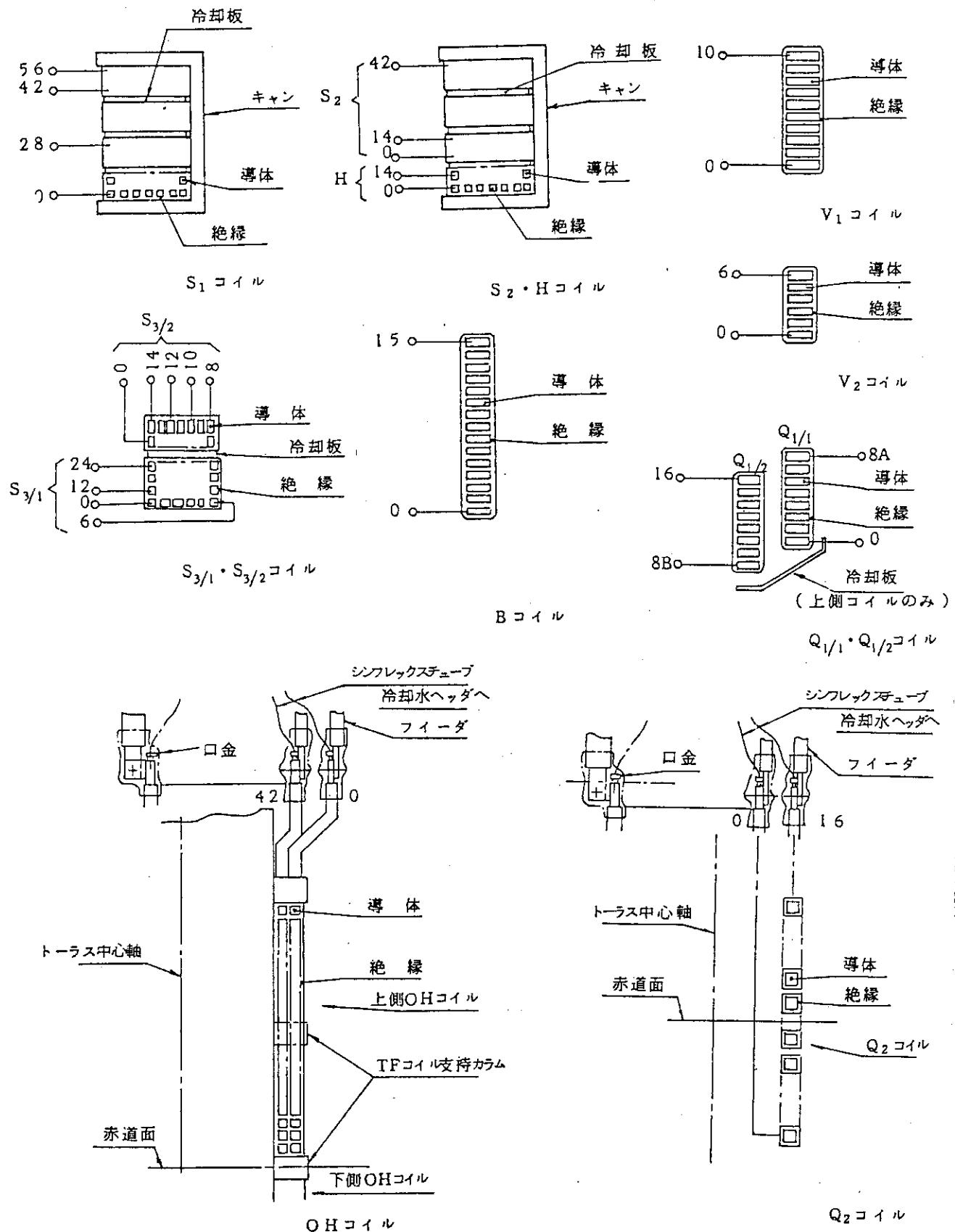
3. Bコイルノ phase 1 電流ハ  
ノ波形トスル

peak  
2.5分 | 5秒

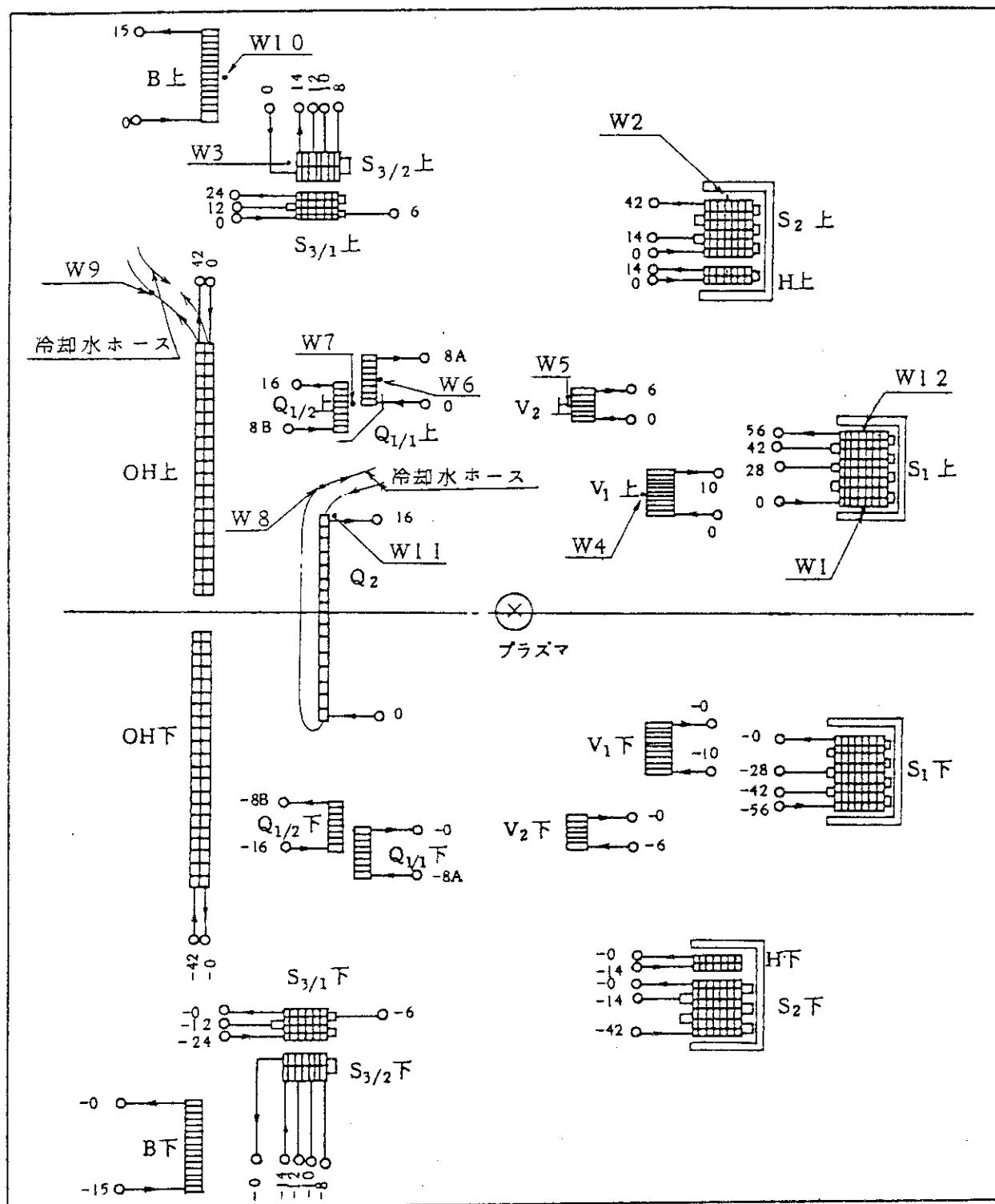
4. 耐電圧値ハ AC(50, 60Hz) peak 値 … 1分間  
ノ値トスル



第3.6-6図 ポロイダル素線構造



第3.6-7図 ポロイダルコイル構成図



第3.6-8図 コイルタップの方向と熱電対の位置

第3.6-3表 ワンターンコイル上・下1対当たり、  
1kA 当たりの空心コイルが  
作くる磁場

コイル名	$\mu$			$\nu$		
	R = 1.26m	R = 1.31m	R = 1.36m	$-RdB_z/dR$ <sup>*1</sup>	$-RdB_z/dR$ <sup>*2</sup>	$\nu$ <sup>*3</sup>
O H	0.501	0.458	0.419	1.08	1.01	1.04
S <sub>1</sub>	6.164	6.264	6.368	-2.52	-2.72	-2.62
S <sub>2</sub>	3.570	3.479	3.378	2.29	2.65	2.47
S <sub>3/1</sub>	0.485	0.416	0.353	1.74	1.64	1.69
V <sub>1</sub>	8.874	8.986	9.048	-2.82	-1.62	-2.22
V <sub>2</sub>	5.394	5.006	4.558	0.98	1.17	1.08
S <sub>3/2</sub>	0.484	0.423	0.368	1.54	1.44	1.49
Q <sub>1/1</sub>	0.423	0.216	0.049	5.21	4.39	4.80
Q <sub>1/2</sub>	-0.069	-0.215	-0.322	-3.68	-2.80	-3.24
Q <sub>2</sub>	-3.182	-2.750	-2.394	10.88	9.32	10.11
H <sup>*4</sup>	2.297	2.415	2.531	—	—	—
Plasma	4.223	3.294	2.365	—	—	—

\*1 R = 1.26 m, dR = 0.05 m  $dB_z = \mu(1.31 m) - \mu(1.26 m)$

\*2 R = 1.31 m dR = 0.05 m  $dB_z = \mu(1.36 m) - \mu(1.31 m)$

\*3  $\nu = \frac{1}{2}(*1 + *2)$

\*4 B<sub>r</sub> 成分

第3.6-4-a表 プラズマ円形断面時の上下1対ワントーン当たりの空心コイルインダクタンス(計算値)

(μH)

	Plasma	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3/1</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	S <sub>3/2</sub>	Q <sub>1/1</sub>	Q <sub>1/2</sub>	Q <sub>2</sub>	真空容器	OH
Plasma	2.691	2.859	2.289	0.800	3.836	4.128	0.714	1.791	2.025	1.750	1.763	0.527
S <sub>1</sub>		27.35	9.230	1.478	11.79	7.889	1.406	2.278	2.640	2.227	2.981	0.688
S <sub>2</sub>			20.94	1.651	7.330	6.625	1.612	2.032	2.431	1.759	2.163	0.591
S <sub>3/4</sub>				5.894	1.575	1.725	4.399	1.436	1.737	0.859	0.727	0.466
V <sub>1</sub>					21.84	10.14	1.457	2.864	3.259	2.972	4.109	0.881
V <sub>2</sub>						17.83	1.583	3.036	3.554	2.822	3.598	0.885
S <sub>3/2</sub>							5.980	1.206	1.463	0.740	0.740	0.391
Q <sub>1/1</sub>								7.314	5.458	2.746	1.800	1.214
Q <sub>1/2</sub>									8.108	2.518	1.942	1.078
Q <sub>2</sub> * <sup>1</sup>										8.116	1.999	1.591
真空容器* <sup>2</sup>											1.696	0.565
OH* <sup>3</sup>												1.455

\*1 4コイル対で計算し, 1コイル対に換算

\*2 10コイル対で計算し, 1ターンコイルに換算

\*3 7コイル対で計算し, 1コイル対に換算

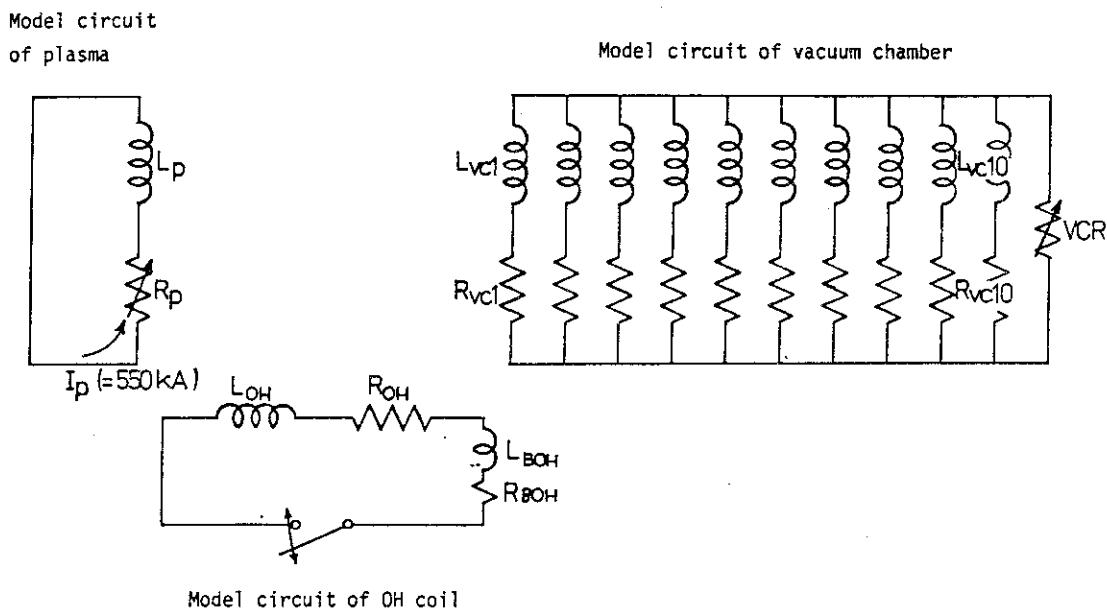
第3.6-4-1表 プラズマ横円又はD型断面時の上下1対ワントーン当たりの空心コイルインダクタス(計算値)

	Plasma	$S_1$	$S_2$	$S$	$V_1$	$V_2$	$S_{3/2}$	$Q_{1/1}$	$Q_{1/2}$	$Q_2$	真空容器	OH
Plasma	2.07	2.371	1.758	0.586	3.263	3.000	0.522	1.384	1.502	1.637	1.403	0.450
$S_1$		27.35	9.230	1.478	11.79	7.889	1.406	2.278	2.640	2.227	2.981	0.688
$S_2$			20.15	1.651	7.330	6.625	1.612	2.032	2.431	1.759	2.163	0.591
$S_{3/1}$				5.894	1.575	1.725	4.399	1.436	1.737	0.859	0.727	0.466
$V_1$					21.84	10.14	1.457	2.864	3.259	2.972	4.109	0.881
$V_2$						17.83	1.583	3.036	3.554	2.822	3.598	0.885
$S_{3/2}$							5.580	1.206	1.463	0.740	0.740	0.391
$Q_{1/1}$								7.314	5.458	2.746	1.800	1.214
$Q_{1/2}$									8.108	2.518	1.942	1.078
$Q_2^{*1}$										8.116	1.999	1.591
真空容器 <sup>*2</sup>											1.696	0.565
OH <sup>*3</sup>												1.455

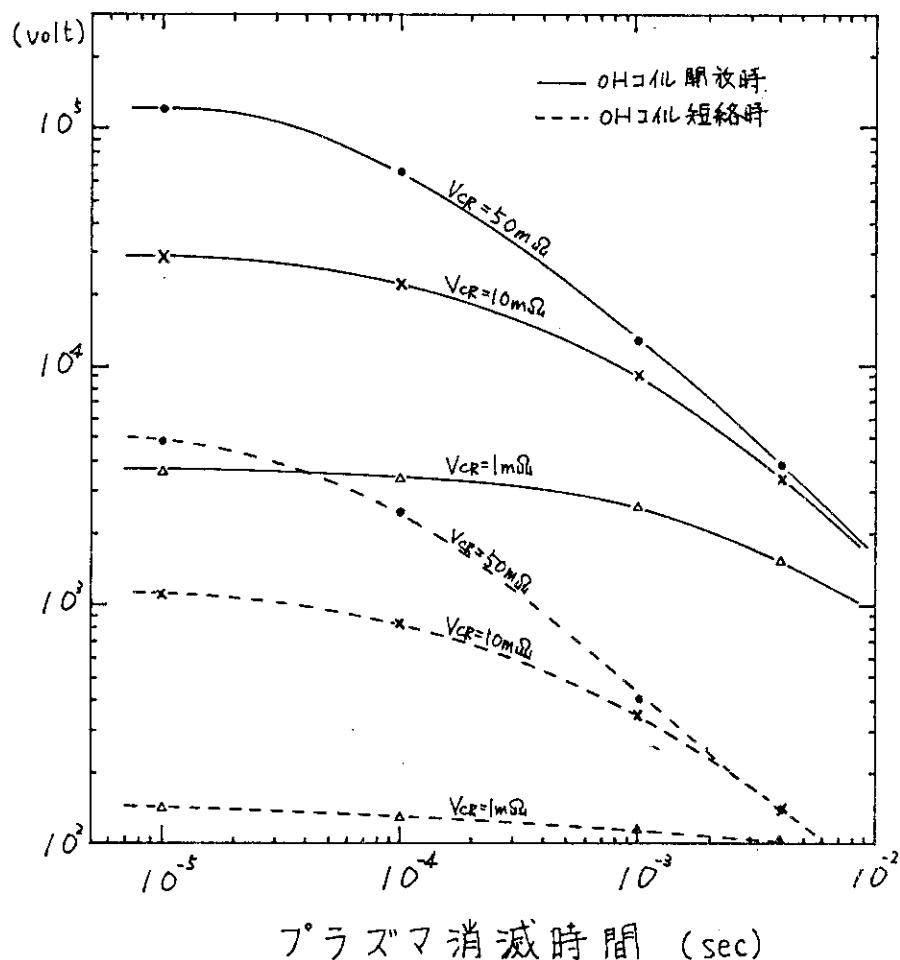
\*1 4コイル対で計算し, 1コイル対に換算

\*2 10コイル対で計算し, 1ターンコイルに換算

\*3 7コイル対で計算し, 1コイル対に換算



第3.6-9図 サージ電圧シミュレーション回路



第3.6-10図 OHコイル端子間に誘起する最大電圧

第3.6-5表 各コイルの電圧 / ターン (異常時)

通電分 / 非通電分 (単位: kV)

	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3/1</sub>	OH	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	S <sub>3/2</sub>	Q <sub>11</sub>	Q <sub>12</sub>	Q <sub>2</sub>
円	85	39	118	11	160	158	130	—	—	—
	83	—	—	—	161	—	—	182	173	231
2	62	11	106	11	155	153	124	—	—	—
	60	—	116	—	155	—	—	259	240	285
楕円	78	205	—	4	180	—	150	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	255	237	283
2	29	203	113	4	181	—	136	—	—	—
	—	198	—	—	—	333	130	180	171	230
D <sub>1</sub>	10	95	139	5	181	—	152	218	202	353
	—	98	151	—	—	324	141	—	—	—
2	68	57	111	5	165	—	134	213	297	310
	—	77	—	—	—	321	128	(308)	—	—
D <sub>2</sub>	15	—	138	5	181	—	150	218	202	353
	—	147	157	—	—	329	140	—	—	—
最大	49	—	116	5	172	—	140	214	299	312
	—	135	—	—	—	331	132	(310)	—	—
	(100)	205	157	(100)	181	333	152	310	299	353

1) ( ) は初期印加電圧 2) HコイルはS<sub>2</sub>相当と考える。

第3.6-6表 コイル耐圧

		コイル耐圧		印加電圧 (kV)			備 考	
		ターン間	対 地	電源定格	不着火時 <sup>3)</sup>	消滅時 <sup>4)</sup>	消滅時電圧 <sup>4)</sup> (V/ターン)	ターン数 (換算)
OH		1.0 <sup>1)</sup>	21	10 (TDC) (6)	8.4	1.0	(100) <sup>5)</sup>	84
S	S <sub>1</sub>	0.5	50	20	20	4.0	(100) <sup>5)</sup>	202
	S <sub>2</sub>	0.5	42		16.7	8.6	205	167
	S <sub>2/1</sub>	0.5	31		12.4	3.5	157	124
Q	Q <sub>1/1</sub>	1.0	16	3 <sup>2)</sup>	1.6	5.0	310	16
	Q <sub>1/2</sub>	1.0	16		1.6	5.0	299	16
	Q <sub>2</sub>	1.0	16		1.6	5.0	253	16
V	V <sub>1</sub>	1.0	10	0.275×2	1.0	1.8	181	10
	S <sub>3/2</sub>	1.0	14		1.4	2.2	152	14
	V <sub>2</sub>	1.0	6		0.6	2.0	333	6
H		0.5	7	0.5	1.4	2.9	205	14

1) 試験は行わないが、1 kV相当する。

2) OH, S と直列接続し最大10kV印加される。

OH, S の最小巻数、円形時 32 T, Q の最大巻数 16 T とし、印加電圧はこの巻数比で分圧されるとした。

3) 100 V / ターンで換算した値

4) 空心系での計算値

5) 計算上 100 V 以下

第3.6-7表 コイル冷却水流量-水圧特性

コイル名称		バルブ開度調整前		*1 バルブ開度調整後	
		定格流量(ℓ/min)	水圧(kg/cm <sup>2</sup> )	流量(ℓ/min)	*2 水圧(kg/cm <sup>2</sup> )
Q <sub>2</sub>		3.5	4.8	2.1	1.5
O H	上 側	0.9	3.2	0.7	1.5
O H	下 側	0.9	3.2	0.7	1.5
Q <sub>1</sub>	N E側	4.5	0.2	1.2	1.5
Q <sub>1</sub>	S W側	4.5	0.2	1.2	1.5
S <sub>1</sub>	上 側	5.4	5.2	1.2	1.5
S <sub>1</sub>	下 側	5.4	5.2	1.2	1.5
S <sub>2</sub>	上 側	5.4	5.2	1.2	1.5
S <sub>2</sub>	下 側	5.4	5.2	1.2	1.5
S <sub>3</sub>	上 側	1.9	0.3	1.2	1.5
S <sub>3</sub>	下 側	1.9	0.3	1.2	1.5
トロイダル				11.2	0.3

\* 1 ポンプ吐出圧力 5.0 kg/cm<sup>2</sup>, 全流量 192 ℓ / min

\* 2 入口圧力と出口圧力との差

第3.6-8表 コイル抵抗およびインダクタンスの測定

コイル名称		抵抗 (mΩ)		インダクタンス (mH)	
		20 ℃	75 ℃ * <sup>1</sup>	工場単体試験	組み立て完成時
トロイダル	直列	109.9			271
S <sub>1</sub>	上側	44.9	53.3	31.7	180.6
S <sub>1</sub>	下側	44.8	53.1	31.1	179.6
S <sub>2</sub>	上側	28.5	33.0	14.4	94.0
S <sub>2</sub>	下側	28.0	32.8	14.8	90.7
H <sub>3/1</sub>	直列	19.5	21.9	* <sup>2</sup> 1.98 1.86	35.4
S <sub>3/1</sub>	上側	7.75	7.63	1.53	4.6
S <sub>3/2</sub>	下側	7.03	7.63	1.54	3.7
S <sub>3/2</sub>	上側	2.92	2.42	0.53	1.8
S	下側	2.44	2.42	0.53	1.32
O H	上側	13.8	14.6		12.7
O H	下側	13.1	14.6		12.4
B	直列	* <sup>3</sup> 16.6	16.4	•	7.38* <sup>4</sup> 6.91
Q <sub>2</sub>		4.00			1.73
Q <sub>1/1</sub>	上側	2.21			0.51
Q <sub>1/1</sub>	下側	1.85			0.48
Q <sub>1/2</sub>	上側	2.09			0.50
Q <sub>1/2</sub>	下側	1.70			0.47
V <sub>1</sub>	上側	3.76			0.97
V <sub>1</sub>	下側	3.68			0.97
V <sub>2</sub>	上側	3.22			0.35
V <sub>2</sub>	下側	2.13			0.34

\* 1 75 ℃換算値

\* 2 上側 / 下側

\* 3 極性切換盤までのケーブルを含む抵抗

\* 4 上側 / 下側

第3.6-9表 コイル通電温度上昇試験

a トロイダルコイル (7分周期)

冷却水流量 182 ℥ / min 室温 18 °C

通電時間	電流	トロイダルコイル記録温度計 (°C)										冷却水温度 (°C)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
2.5 hr	12 kA	22.8	26.5	32.5	34.0	33.5	33.5	20.5	23.5	21.0	30.8	30.3

記録温度計取付位置 1 : #8 キヤン 2 : #8 キヤン 3 : #6 排水 4 : #7 排水 5 : #8 排水 6 : #5 排水 7 : #12 キヤン  
 8 : #12 キヤン 9 : #12 キヤン 10 : #9 排水 11 : #10 排水 12 : #11 排水

b V系コイル (5分周期 0.5 hr + 3分周期 1 hr )

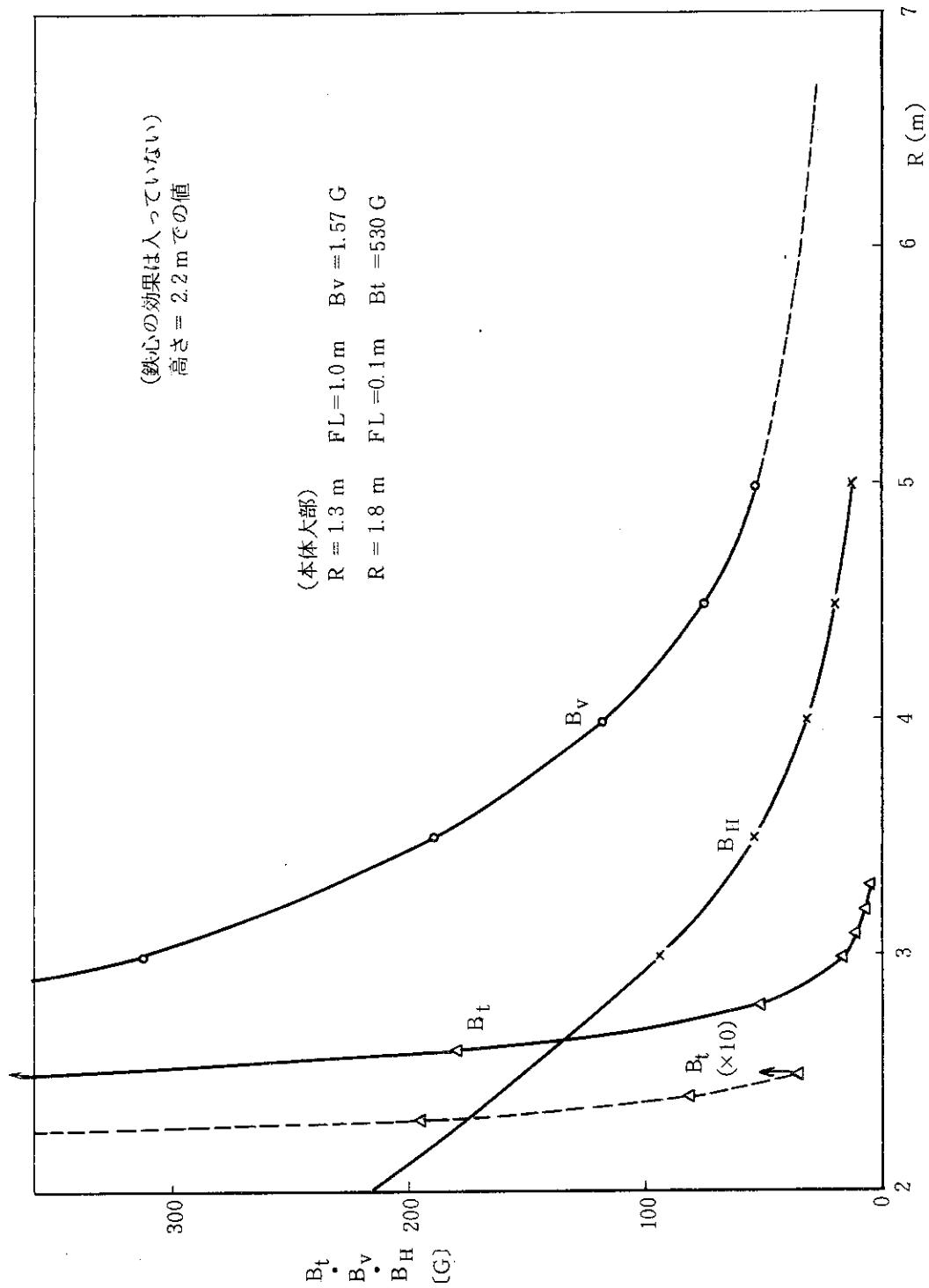
通電時間	電流	ボロイダルコイル温度計(°C)			冷却水温度(°C)			冷却水流量 192 ℥ / min (S <sub>3</sub> コイル 1.2 ℥ / min )	記録温度計取付位置
		3	4	5	給水	排水			
1.5 hr	7.5 kA	17.5	22.0	21.0	15.0	15.0			3 : 上 S <sub>3</sub> コイル絶縁 4 : 上 V <sub>1</sub> コイル絶縁 5 : 上 V <sub>2</sub> コイル絶縁

c Q系コイル Q<sub>2</sub>+Q<sub>1/2</sub> (5分周期 1 hr + 3分周期 1 hr )

通電時間	電流	ボロイダルコイル温度計(°C)			冷却水温度(°C)			冷却水流量 189 ℥ / min (Q <sub>2</sub> コイル 2.1 ℥ / min , Q <sub>1</sub> 冷却板 1.2 ℥ / min )	記録温度計取付位置
		7	8	11	給水	排水			
2.0 hr	8.25 kA	21.0	15.3	11.5	10.0	11.0			7 : 上 Q <sub>1/2</sub> コイル絶縁 8 : Q <sub>2</sub> 排水 11 : Q <sub>2</sub> コイル絶縁

d OHコイル (5分周期)

通電時間	電流	ボロイダルコイル温度計(°C)			冷却水温度(°C)			冷却水流量 190 ℥ / min (OH コイル 0.7 ℥ / min )	記録温度計取付位置
		9	9	9	給水	排水			
50 min	3.6 kA		19		15.5	17.5			9 : OH排水



第3.6-12図 JFT-2M本体周辺での磁場の強さ

Q, OH 2 1/2 系 結線切換盤

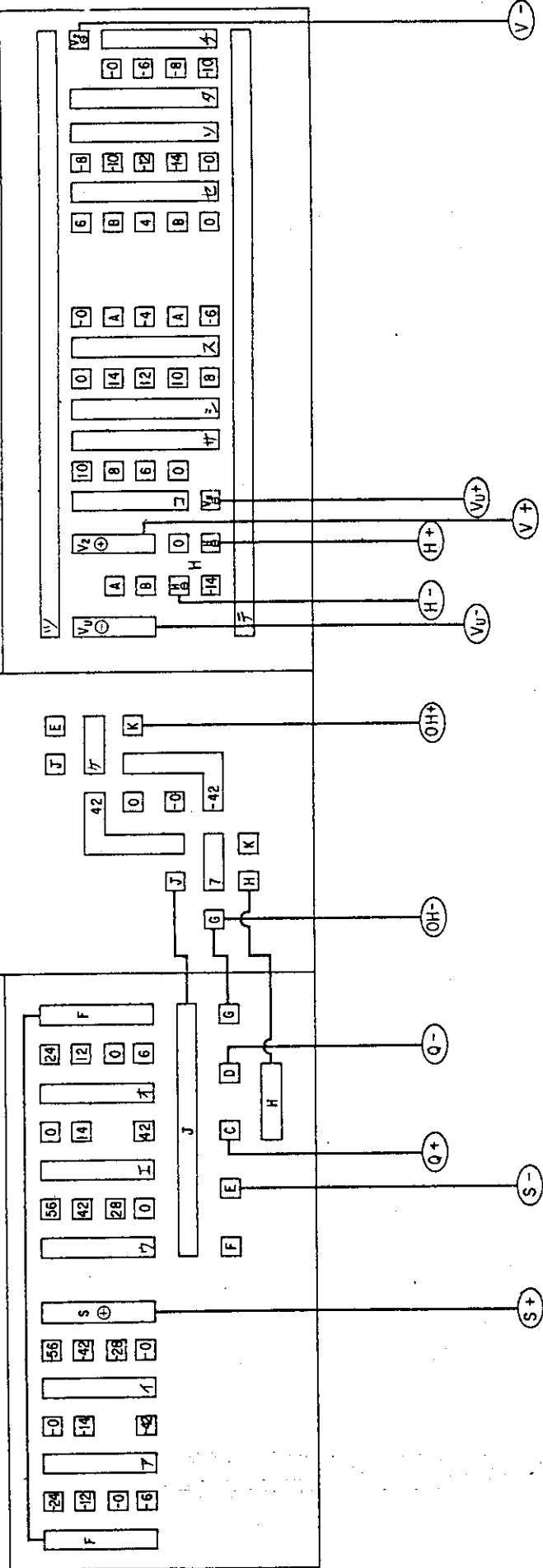
Q 1/1, Q 1/2, Q 2

S 2 1/2 系 結線切換盤

S 3/1 F S 2 F S 1 F S 1上 S 2上 S 3/1 上

V, H 2 1/2 系 結線切換盤

Q 2	Q 1上	Q 1 F	Q 2	V 1上	S 3/2上	V 2 F	V 2上	S 3/2 F	V 1 F
16	16	16	16	V 1	V 2	V 3	V 4	V 5	V -
64	64	64	64						
C	D	E	F						
16	16	16	16						
0									



第3.6-13図 結線切換盤

第3.6-10表 S, OH, Q系コイル面の接続パターン表

接続パターン	S (TDC) 電源	OH電源	Q 電源
1	S	OH	
2	S→Q	OH	
3	S→OH	Q	
4	S	OH→Q	
5	S→OH→Q	—	
6	S	OH	Q
7	S→OH	—	Q

(6) (7)は、Q電源が出来てから(将来)

第3.6-11表 各コイル系内の接続パターン表

コイル		接 続	
Sコイル系	(1)	直列接続	$S_{1\ell} \rightarrow S_{2\ell} \rightarrow S_{3/1\ell} \rightarrow S_{3/1u} \rightarrow S_{2u} \rightarrow S_{1u}$
	(2)	並列接続	$S_{1\ell} \rightarrow S_{2\ell} \rightarrow S_{3/1\ell}$ $S_{1u} \rightarrow S_{2u} \rightarrow S_{3/1u}$
Qコイル系	(1)	$Q_{1/1u} \rightarrow Q_{1/2u} \rightarrow Q_2 \rightarrow Q_{1/2\ell} \rightarrow Q_{1/1\ell}$	
	(2)	$Q_{1/1u} \rightarrow Q_{1/2u} \rightarrow Q_{1/2\ell} \rightarrow Q_{1/1\ell}$	
	(3)	$Q_{1/2u} \rightarrow Q_2 \rightarrow Q_{1/2\ell}$	$Q_{1/1u}, Q_{1/1\ell}$ パッシブ
	(4)	$Q_{1/1u} \rightarrow Q_{1/1\ell}$	$Q_{1/2u}, Q_{1/2\ell}$ パッシブ
	(5)	$Q_{1/1u}, Q_{1/1\ell}$ パッシブ, $Q_{1/2u}, Q_{1/2\ell}$ パッシブ	
OHコイル系	(1)	直列接続	
	(2)	並列接続	
Vコイル系	(1)	$V_u$ 電源 $V_\ell$ "	$V_{1u} \rightarrow S_{3/2\ell} \rightarrow V_{2u}$ $V_{2\ell} \rightarrow S_{3/2u} \rightarrow V_{2\ell}$
	(2)	$V_u$ 電源 $V_\ell$ "	$V_{1u} \rightarrow S_{3/2\ell}$ $S_{3/2u} \rightarrow V_{1\ell}$
	(3)	$V_u + V_\ell$ 電源	$V_{1u} \rightarrow S_{3/2\ell} \rightarrow V_{2\ell} \rightarrow V_{2u} \rightarrow S_{3/2u} \rightarrow V_{1\ell}$
	(4)	$V_u + V_\ell$ 電源	$V_{1u} \rightarrow S_{3/2\ell} \rightarrow S_{3/2u} \rightarrow V_{1\ell}, V_2$ パッシブ
	(5)	$V_u$ 電源 $V_\ell$ "	$V_{2\ell} \rightarrow V_{2u}$ $S_{3/2u} \rightarrow V_{1u} \rightarrow S_{3/2\ell} \rightarrow V_{1\ell}$
	(6)	$V_u + V_\ell$ 電源 H 電源	$V_{1u} \rightarrow S_{3/2u} \rightarrow S_{3/2\ell} \rightarrow V_{1\ell}$ $V_{2\ell} \rightarrow V_{2u}$
	(7)	OUTER INNER	
Hコイル系	(1)	OUTER	
	(2)	INNER	

Vコイル系の(5)(6)は、グラフィックパネルには表示出来ない。

第3.6-12表 プラズマの方向の組合せ

	トロイダル電源 Bt コイル	プラズマ電源 $I_p$
	1 CW	CW
2	CW	CCW
3	CCW	CCW
4	CCW	CW

第3.6-13表 トロイダルの方向により変更するもの

	トロイダル電源 Bt コイル	H電源 (磁場の方向)	(フィラメントの位置)
A	CW	INNER	下
B	CCW	OUTER	上

第3.6-14表 プラズマ電流の方向による各コイル通電方向

	プラズマ 電 流 $I_p$	バイアス 電 源	OH電源	Q電源		S電源		V電源	
				B コイル	OH コイル	$Q_1$ コイル	$Q_2$ コイル	$S_1, S_2$ コイル	$S_{3/1}$ コイル
A	CW	CW	CCW	CW	CCW	CW	CCW	CW	CCW
B	CCW	CCW	CW	CCW	CW	CW	CCW	CW	CCW

### 3.7 変流器用鉄心

#### 3.7.1 設計検討

##### (1) 磁束

電流値 550 kA のプラズマを 0.5 秒以上実現するために必要な磁束は大略次式から求められる。

$$\phi = L_P I_P + \int_0^t R_P I_P dt$$

$L_P$  : プラズマのインダクタンス

$R_P$  : プラズマの抵抗

$L_P \sim 2 \mu H$ ,  $R_P \sim 3 \mu \Omega$  とすると  $\phi \sim 1.9 V \cdot S$  となる。したがって、鉄心による磁束の設計目標値を  $2 V \cdot S$  とした。第 3.7-1 図の B-H カーブから方向性磁性鋼板の最大磁束密度は  $1.9 \sim 2.0 T$  である。鉄心の磁束を両方向 ( $-B_{max} \sim +B_{max}$ ) 分利用すると、必要な鉄心の断面積は、 $2 V \cdot S / 1.9 T \times 2 \sim 0.53 m^2$  である。積層構造であることによるスペースファクターを 0.9 とするとき、約  $0.6 m^2$  (874 φ) の面積が必要となる。これから中心鉄心径を  $880 \phi$  とすることにした。

##### (2) 片脚形状と磁場の非一様性

鉄心の基本形状としては、プラズマへのアクセスポートを少しでも多く確保するため片脚型とした。又、既設建家の基礎荷重制限 (約 200 トン) 及び許容スペース上可能な限りコンパクトな設計を行った。しかしながら、片脚型でコンパクトにすればするほど磁場のトロイダル方向の非一様性が大きなものとなる。

このため、3 次元磁界解析コードにより、プラズマ領域の垂直磁場に対する鉄心の効果を調べた。その計算結果を第 3.7-2 図に示す。計算は  $V_1$  コイル電流 6 KAT,  $V_2$  コイル電流 6 KAT,  $S_{3/2}$  コイル電流 -12 KAT のものである。実線が脚鉄側のプラズマ領域での垂直磁場の分布であり、点線は脚鉄と反対側のプラズマ領域での垂直磁場の分布である。図から分るように、脚鉄側の磁場に較べ脚鉄の反対側の磁場の値の方がやや小さく、その非一様性は約 2 % である。これによるプラズマ柱の変位量の差はおよそ 3 mm であるが、周辺の低温プラズマ層の厚さに較べ小さく、実験上のアクセスの方を優先した。

##### (3) バット接合の検討

鉄心は中心部、脚部、上部及び下部の 4 部分からなるが、その接合方式にはラップ接合方式とバット接合方式の二つがある。積層鋼板一枚一枚交互に重ねて接合するラップ接合は、磁気回路の抵抗が小さい反面鉄心の組立作業は大変困難である。これに対し、切断面を突き合せて各部を接ぐバット接合方式は全く逆の性質を持つ。

このため、必要な起磁力に対する両者の比較を行った。その際バット接合は 4 つの接合個所に各々 1 mm のギャップを持つものとした。計算の結果を第 3.7-3 図に示す。図から分るように、バット接合はラップ接合に較べ約 2 KAT の起磁力を余分にギャップ部分において消費する。この結果から、JFT-2M の変流器鉄心としては組み立て性の非常によいバット接合方式と共に、バイアス電源の容量にギャップ部における 2 KAT の起磁力を余分に見込んだ設計を行った。

##### (4) 応答特性の検討

薄板磁性材の交流透磁率（複素数）を表わす式を使って、その位相角から立上り時の時間遅れの評価を行った。その結果次の値を得た。

$$\text{時間遅れ} = \begin{cases} 0.56 \text{ mS} & : \text{比透磁率 } \mu_s = 20000 \\ 1.9 \text{ mS} & : \quad " \quad = 85000 \end{cases}$$

### 3.7.2 構造

#### (1) 構造・寸法

変流器用鉄心の外形図を第 3.7-4 図に示す。

中心、下部、脚部、上部各鉄心の積層コアは、新日鉄 Z 7 Ht 0.35 mm である。各鉄心間は積層コアが突合させになっており、突合せ面内でのワンターン絶縁のため、突合せ面間には絶縁シートを入れてある。

中心鉄心は第 3.7-5 図に示すように、コア板を階段状に積層して円形を近似し、外側を E P G テープで巻き固めたものであり、更にその外側に OH コイルと TF コイル支持カラムをはめた構造となっている。TF コイル支持カラムは F R P 製であり、TF コイルが押当てられ、OH コイルに直接 TF コイルが当らない構造となっている。中心鉄心上、下部には SUS 304 製の鉄心締付金具がありこれに S<sub>3</sub> コイルが固定されている。

下部、脚部、上部鉄心は角形断面をしており、積層コアを両側から側板ではさみ、側板間をボルトで締結する構造となっている。ワンターン絶縁のために、側板と積層コア間には絶縁板が入っており、ボルトと側板間は絶縁座金、絶縁スリーブで電気絶縁している。

下部、脚部、上部鉄心間の結合部には、側板にフランジが設けられており、このフランジで各ブロックを結合している。

鉄心各部の主要寸法、重量を第 3.7-1 表に、その材質を第 3.7-2 表に示す。

#### (2) ワンターンコイル配置

V-S 測定用ワンターンコイル取付位置寸法を第 3.7-6 図に示す。

コイル端子は BNC-P-58 u で端子記号はコイル番号と J または K となっている（例えば 1 J, 1 K）。端子記号と巻線方向の関係も同図に示す。

### 3.7.3 特性測定

#### (1) 磁化特性曲線の測定

一次側 OH コイル（上下各 42 ターン並列）を正・逆方向に励磁し、二次側ワンターンコイルに発生する起電力の時間積分（積分時定数 100 mS）を測定して、鉄心の磁化特性の測定を行った。

その結果を第 3.7-7 図に示す。図に見られるように JFT-2M 鉄心の磁化特性曲線の巾はせまく、残留磁気の小さな特性を示す。この特性は、磁性材と接合部のギャップの重ね合せによるものであり、等価的に約 3 mm（4箇所合計）のギャップに相当している。このことは、接合部のギャップ巾が一箇所につき 1 mm であるという先の仮定がほぼ正しいことを示している。

#### (2) 漏れ磁場の測定

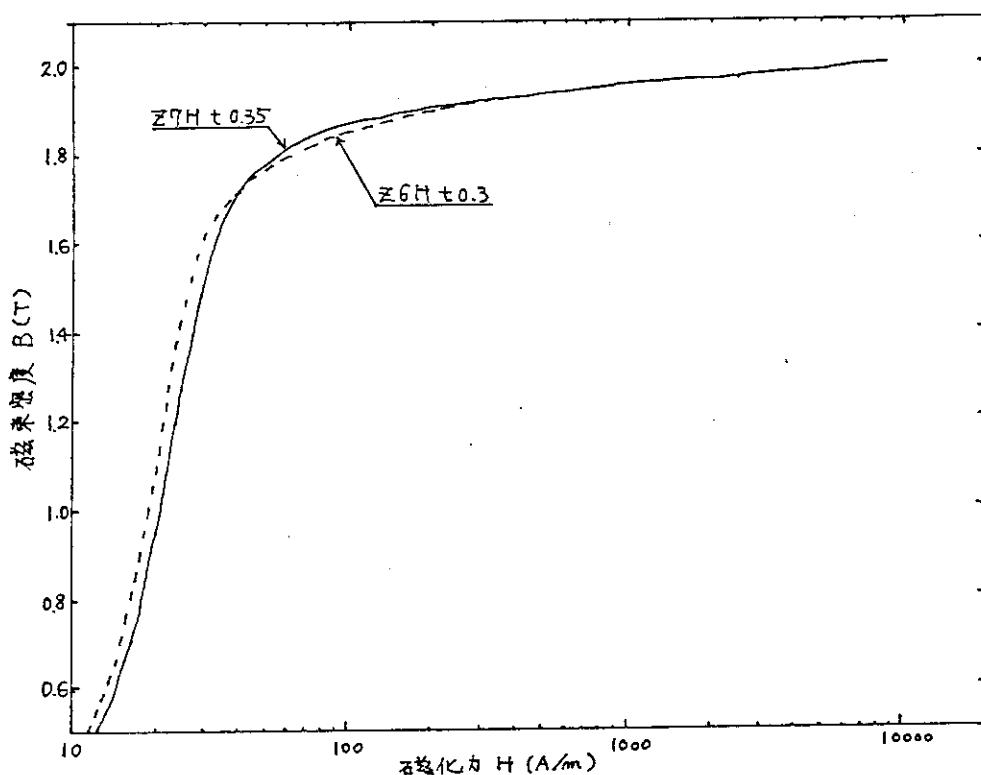
OH コイルを短絡し、S<sub>1</sub> コイルに通電した時の磁場強度の空間分布測定データを第 3.7-8 図に示す。左側の図はプラズマ赤道面上での磁場の垂直成分を示す。右側の図はプラズマ赤道面

上から上下 0.2 m の面でのものであり、磁場の垂直成分と水平成分を示している。両図とも主半径 ( $R = 1.31\text{ m}$ ) を中心に  $\pm 0.3\text{ m}$  の領域のものである。図中○印はコイル組み立て後の実測値（鉄心有）を示し、◎印は鉄心有の場合の計算値、そして×印は空心の場合のものである。

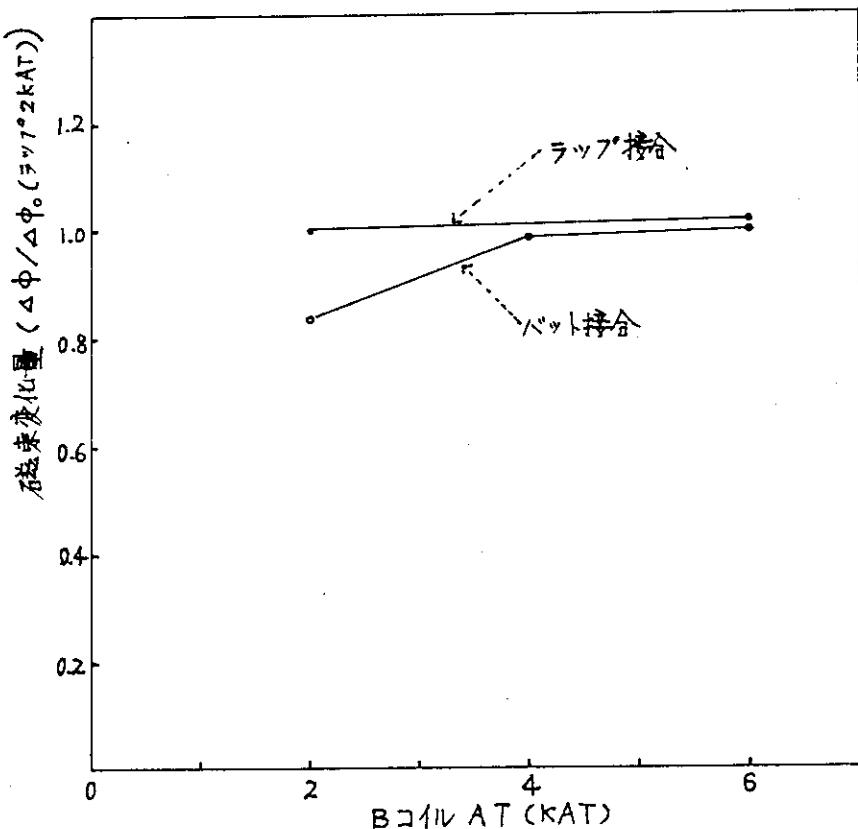
図から分るように、垂直成分  $B_z$  の測定値は鉄心の効果を考慮したモデルによる計算値と大変良く一致している。このことは、その後の実験における制御磁場の評価に対する確かな見通しの基礎となった。一般的に鉄心から漏れ磁場はポロイダル磁場の  $n -$  指数を正の方向にする傾向をもっている。

### (3) 鉄心据付位置精度

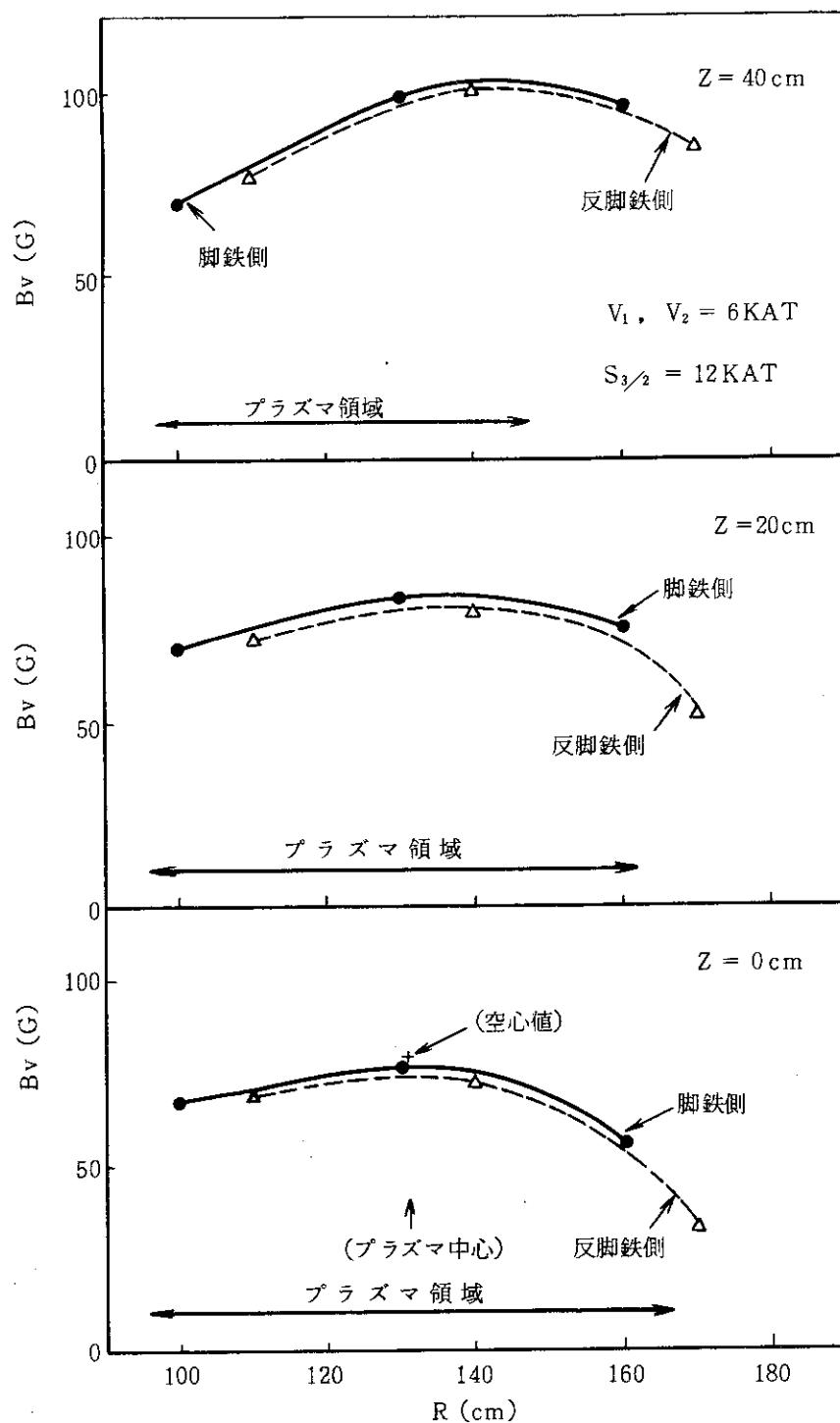
JFT-2 棟大実験室に対する JFT-2M 装置の鉄心の相対位置関係の測定データを第 3.7-9 図に示す。



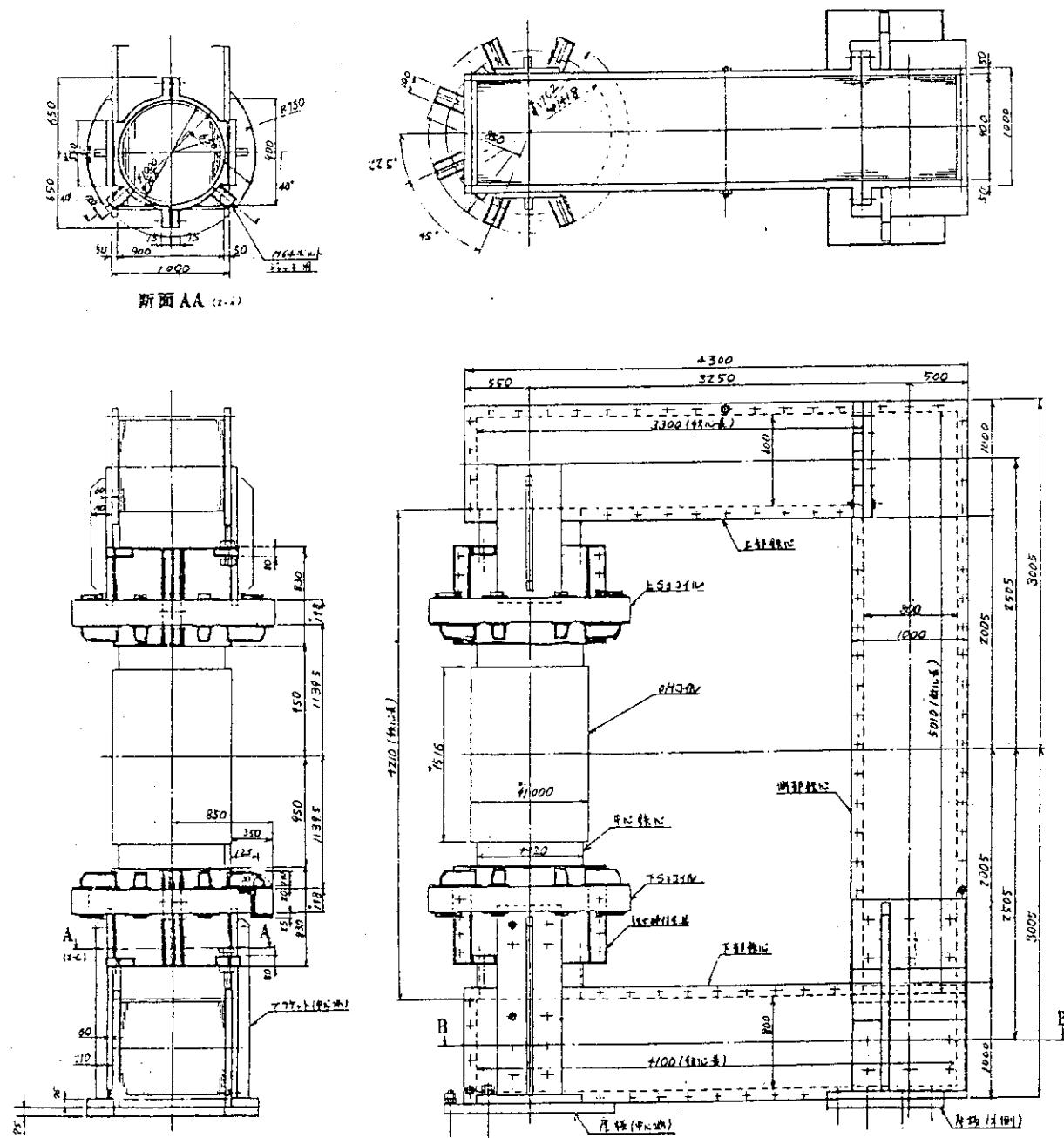
第3.7-1図 コア材磁化特性曲線



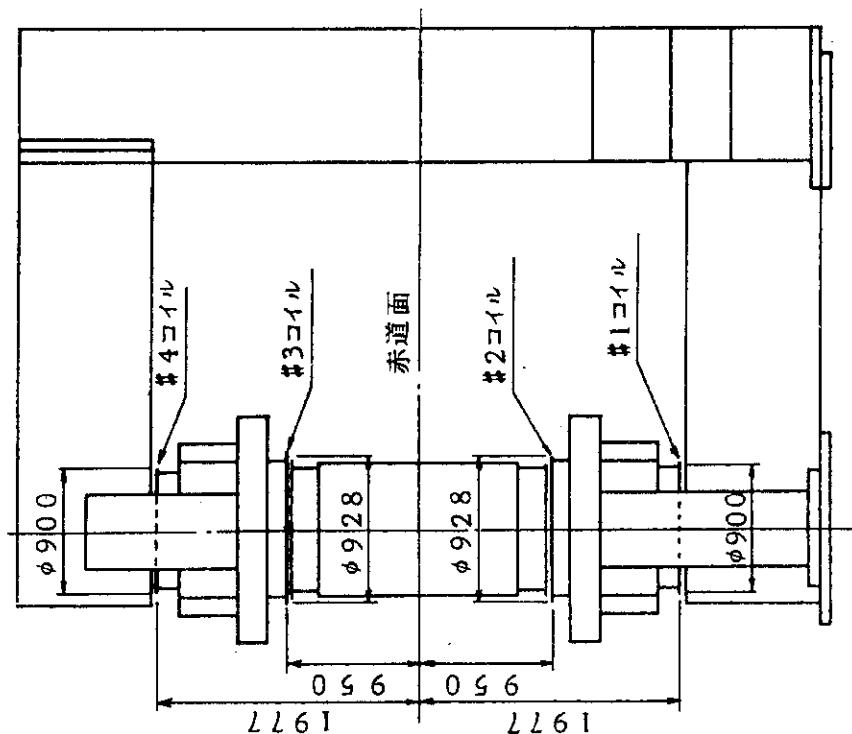
第3.7-3図 BコイルATと磁束変化量



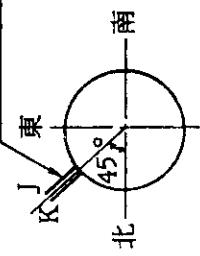
第3.7-2図 鉄心による垂直磁場のトロイダル方向非一様性



第3.7-4図 鉄心外形図

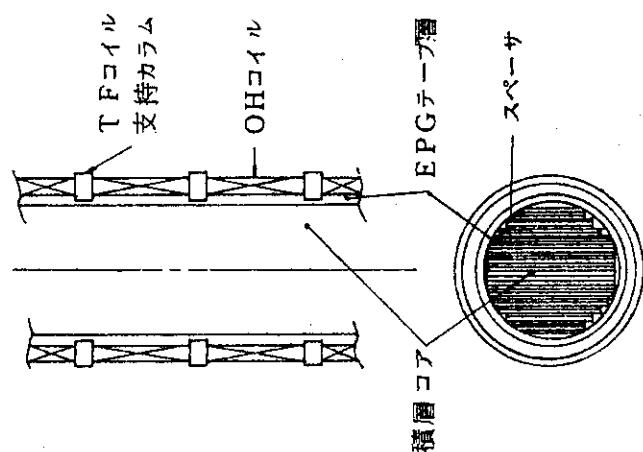


実際にはリード線を燃ってある

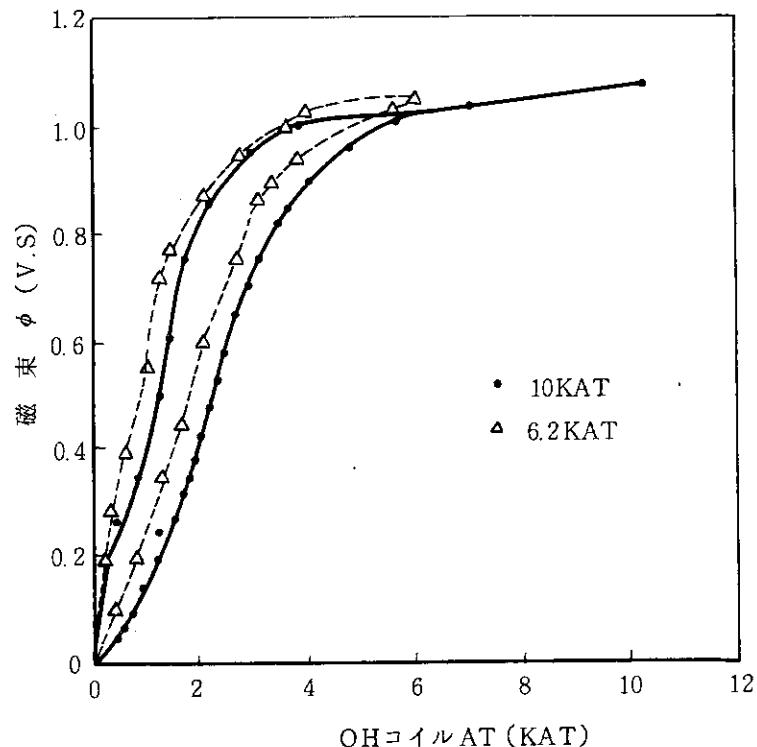


1 ターンコイル口出位置と  
端子記号(上からみた図)

第3.7-6図 ワンターンコイル配置図



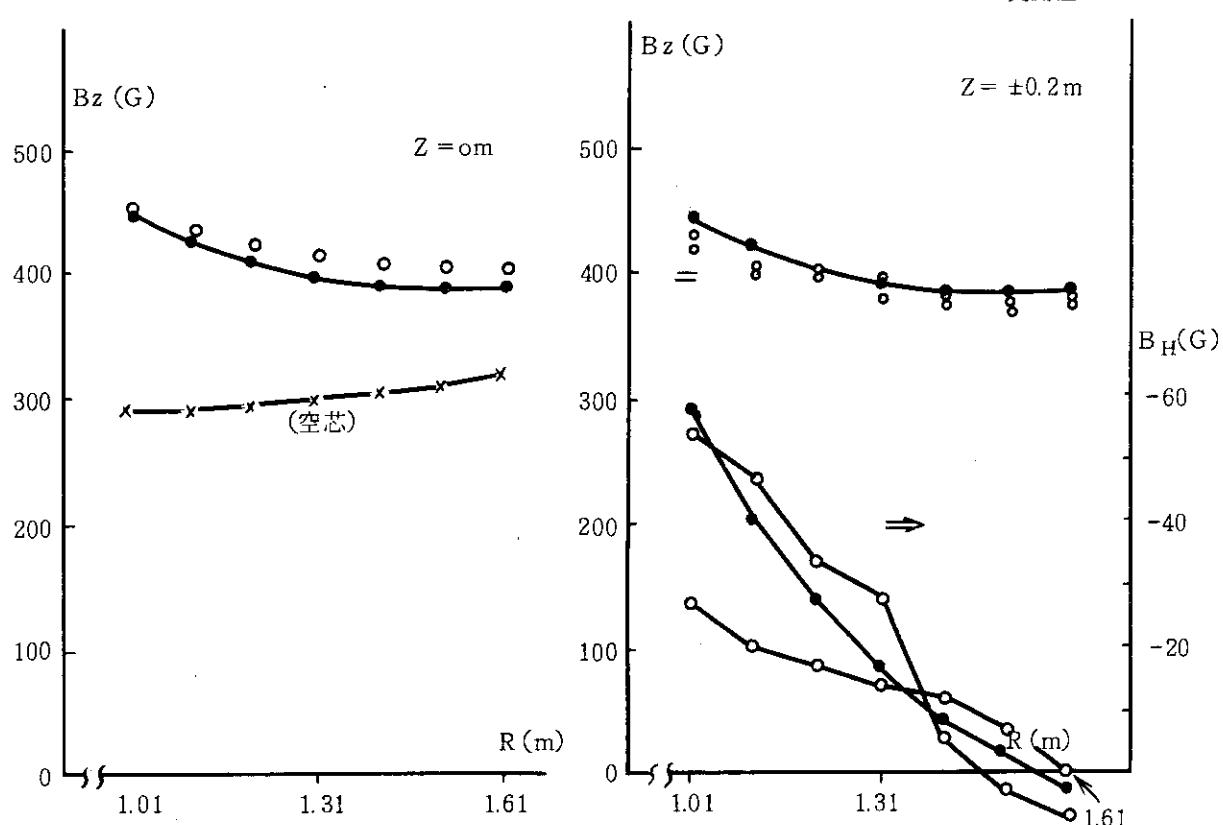
第3.7-5図 中心鉄心構造



第3.7-7図 磁化特性曲線

S<sub>1</sub>(88.5KA)+O.H.-88.5KA

- 計算値(鉄芯)
- ×— , (空芯)
- 実測値



第3.7-8図 鉄心からの漏れ磁場の効果

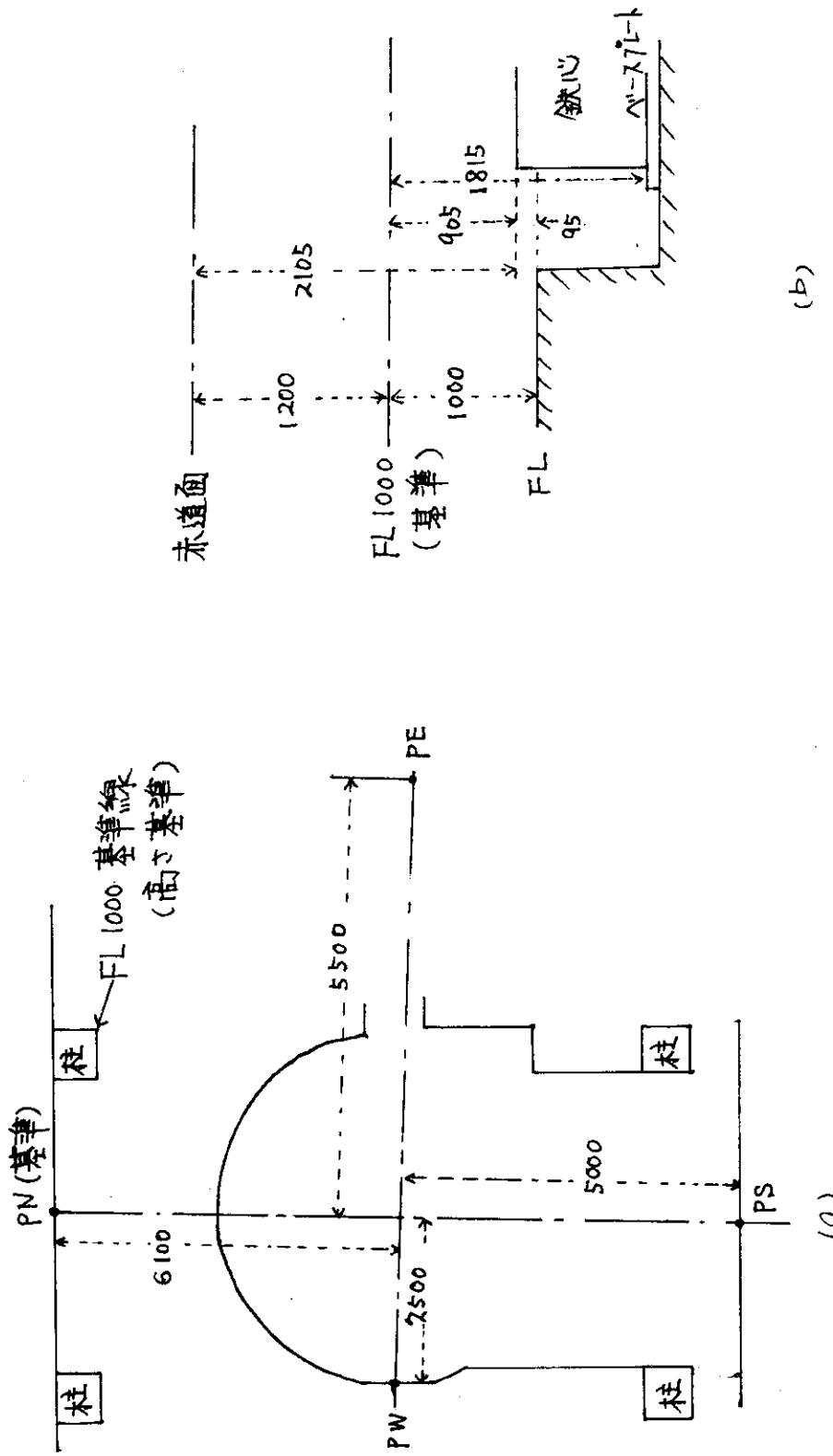
第3.7-1表 鉄心寸法・重量

鉄心ブロック	中心鉄心	上部鉄心	下部鉄心	側部鉄心	
断面寸法mm	-	1000×1000	1000×1000	1000×1000	
積層コア断面寸法mm	Φ880	800×894	800×894	800×894	
有効断面積 $\text{m}^2$	0.562	0.68	0.68	0.68	
積層コア長mm	4210	3300	4100	5010	鉄心全重量
重量ton	* 28	23	28	34	* 130

\*OHコイル, S<sub>3</sub>コイル重量を含む

第3.7-2表 鉄心材質

品名	材質
積層コア	新日鐵Z7H t 0.35
側板	SS41P
鉄心締付金具	SUS304



第3.7-9図 鉄心据付位置測定

### 3.8 架台

#### 3.8.1 構造

##### (1) 構成

架台は、第3.8-1図に示すとおり架台支持脚、下部平板、上部平板および真空容器支持脚より構成されており、真空容器およびコイルの自重、地震力、運転中の電磁力、熱膨張等の荷重に耐える構造であると共に、大周方向に分割され絶縁がとられている。

##### (2) 機能

###### ① 架台支持脚

架台支持脚は鉄心をまたぐ支持脚と他の支持脚間を完全に絶縁すると共に、他の支持脚もグラウト、鉄筋等を切断することにより絶縁し、ワンターン抵抗を取る機能と、真空容器、コイル、上下部平板等の自重および各種の運転荷重を支持する機能を有する。

###### ② 上部平板

上部平板はTFコイル押ボルトでTFコイルを鉄心に押し付ける事によりコイルの位置出しをする機能と、その反力および各種の運転荷重を支持する機能を有する。

###### ③ 下部平板

上部平板で述べた機能の他に真空容器、コイル等の自重を支持し、絶縁ボルトにより架台支持脚と堅固に締結されている。

###### ④ 真空容器支持部

真空器支持脚は真空容器を支持し、これに加わる電磁力、地震力等に耐えると共に、ベーキング時の容器熱膨張を逃がす必要から、ピン構造を採用し放射状に据付けられている。また下部平板に絶縁板を介して取付けられており真空容器をコイル、鉄心、架台等から絶縁している。

##### (3) 仕様

###### ① 架台支持脚

型式	放射状脚方式
数量	一式
概略寸法（内径×外径×高さ）	φ 1540 × φ 3900 × 1200
電気的絶縁箇所	架台支持脚上面 16 箇所
主要構造材	軟 鋼

###### ② 下部平板

型式	絶縁分割方式
数量	一式
概略寸法（内径×外径×高さ）	φ 1600 × φ 3600 × 1200
電気的絶縁箇所	架台支持脚上面 16 箇所
主要構造材	軟 鋼

###### ③ 上部平板

型式	絶縁分割方式
----	--------

数量	一式
概略寸法（内径×外径×高さ）	φ 1640 × φ 3600 × 280
主要構造材	SUS 304相当
<b>(4) 真空容器支持脚</b>	
型式	ターンバックル方式
数量	8個
概略寸法（外径×高さ）	φ 115 × 1010
電気的絶縁箇所	真空容器支持脚下面，8箇所
主要構造材	SUS 304相当

### 3.8.2 下部平板分割部の設計検討

架台の強度検討の結果、比較的応力の大きい下部平板分割部の荷重・応力についての計算結果を第3.8-1表に示す。表中の荷重及び応力の値は、その左側列の効果を全て含んだ値である。

例えば、④列の値は①～③の荷重を全て含んだ場合の値である。①～③の荷重のかかり方を模式的に示すと第3.8-2図のようになる。このように変動分は比較的小さく、定常分の大きい設計である。

### 3.8.3 本体継線及び周辺の位置標示

#### (1) 本体構造物継線図

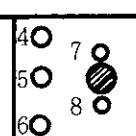
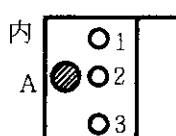
本体各部の接続、絶縁、接地を表す模式図を第3.8-3図に示す。

#### (2) 本体周辺位置指示標式

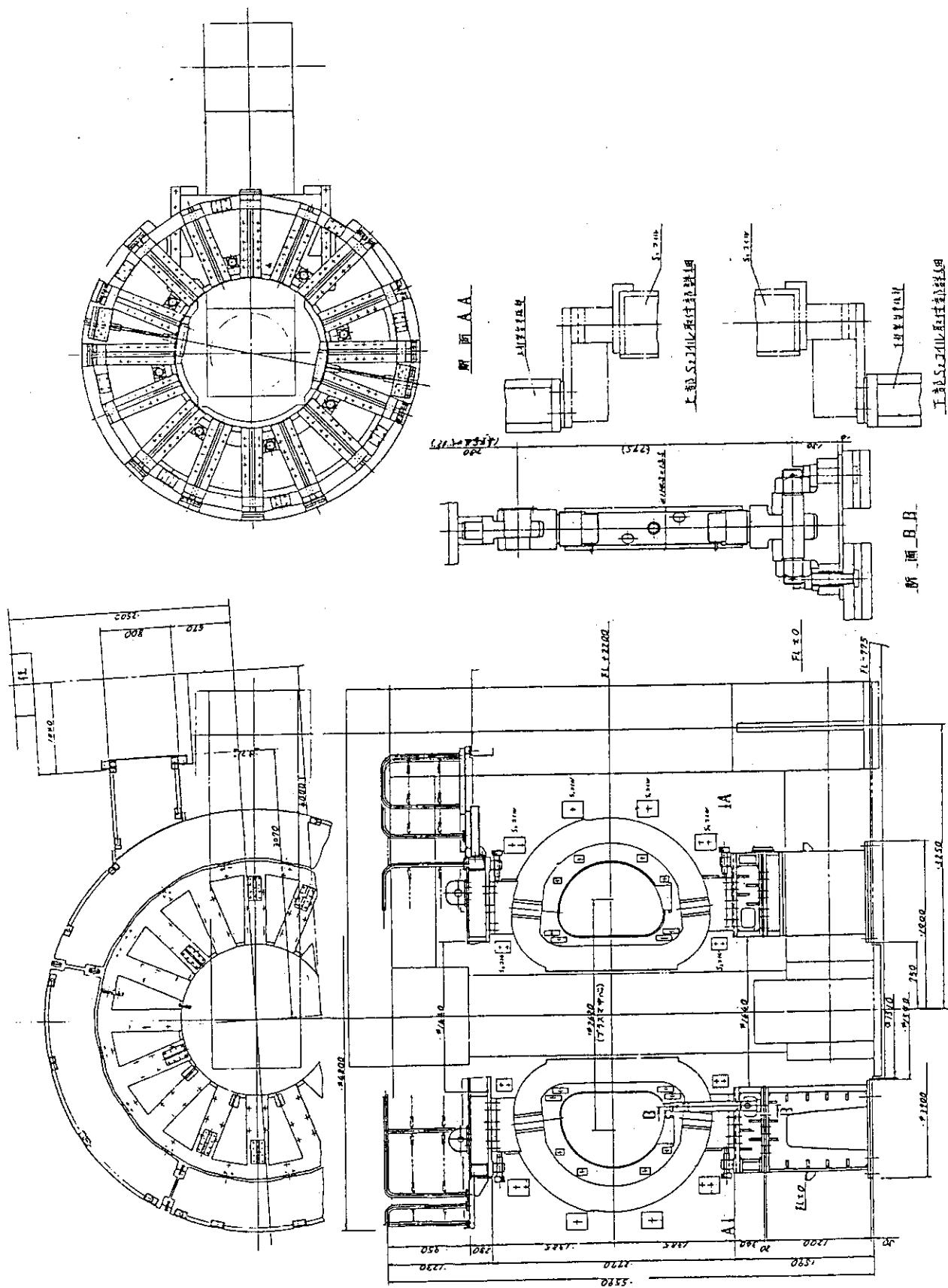
本体との相対位置関係を示すために、本体周辺の各ポートセクションの床に第3.8-4図に示すような位置にポンチが打たれている。これにより計測器等の機器の位置調整を行うことができる。

第3.8-1表 下部平板分割部の荷重、応力

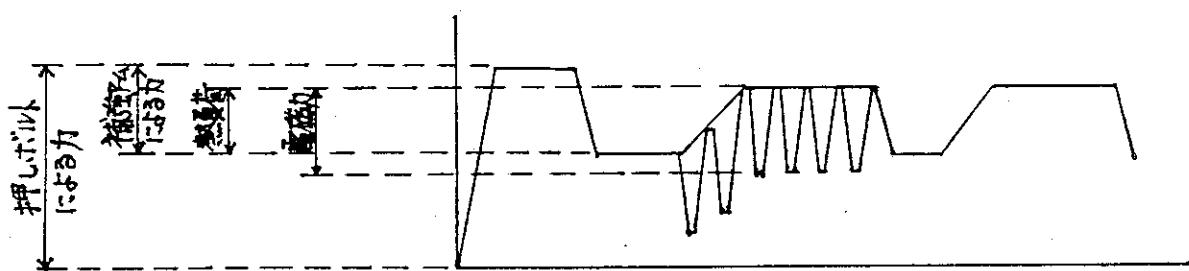
	② 押しボルト 荷重 12.5 ton	⑤ 押しボルト 荷重 + 12.5 ton	③ 補強アーム 効 果	④ TFキャン一架台 温度差 (116°C)	⑥ 電磁力荷重
1	3.6 ton	4.8 ton	4.2 ton	4.4 ton	4 ton
2	1.9	3	2.4	2.6	2.2
3	3.6	4.4	3.9	4.1	3.7
4	2	3.2	2.6	2.8	2.4
5	—	1.1	0.5	0.7	0.3
6	10	2.8	2.3	2.5	2.1
7	10	15.6	12.6	13.6 *	11.6
8	16 kg / mm <sup>2</sup>	15.2	12.5	13.4	11.5
A	12.8	21.5 kg / mm <sup>2</sup>	18.5 kg / mm <sup>2</sup>	19.5 kg / mm <sup>2</sup>	18 kg / mm <sup>2</sup>
B		20.2	16.5	17.6	15

\*) 18 kg / mm<sup>2</sup> に対応

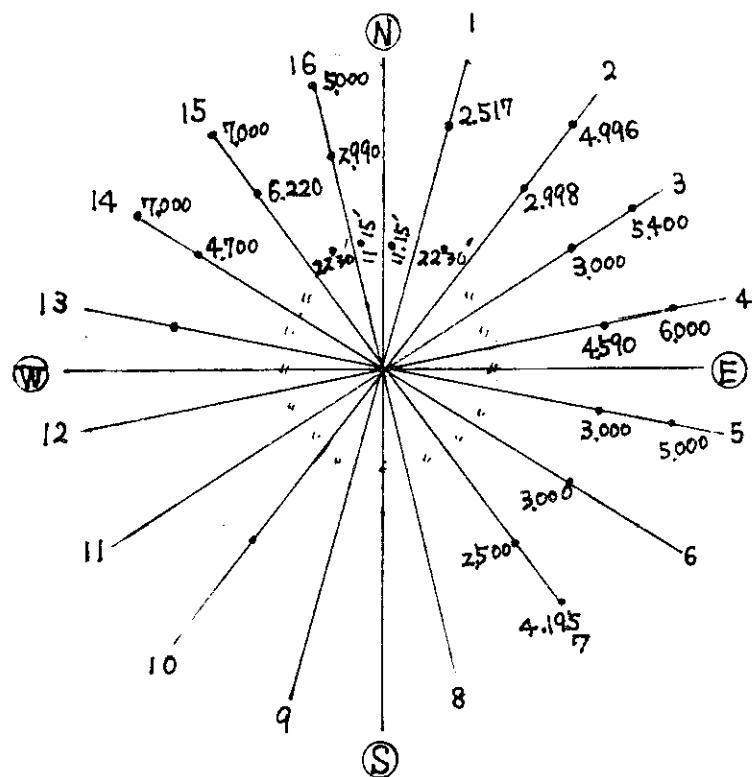
外 1~8 ボルト  
B A, B 平板



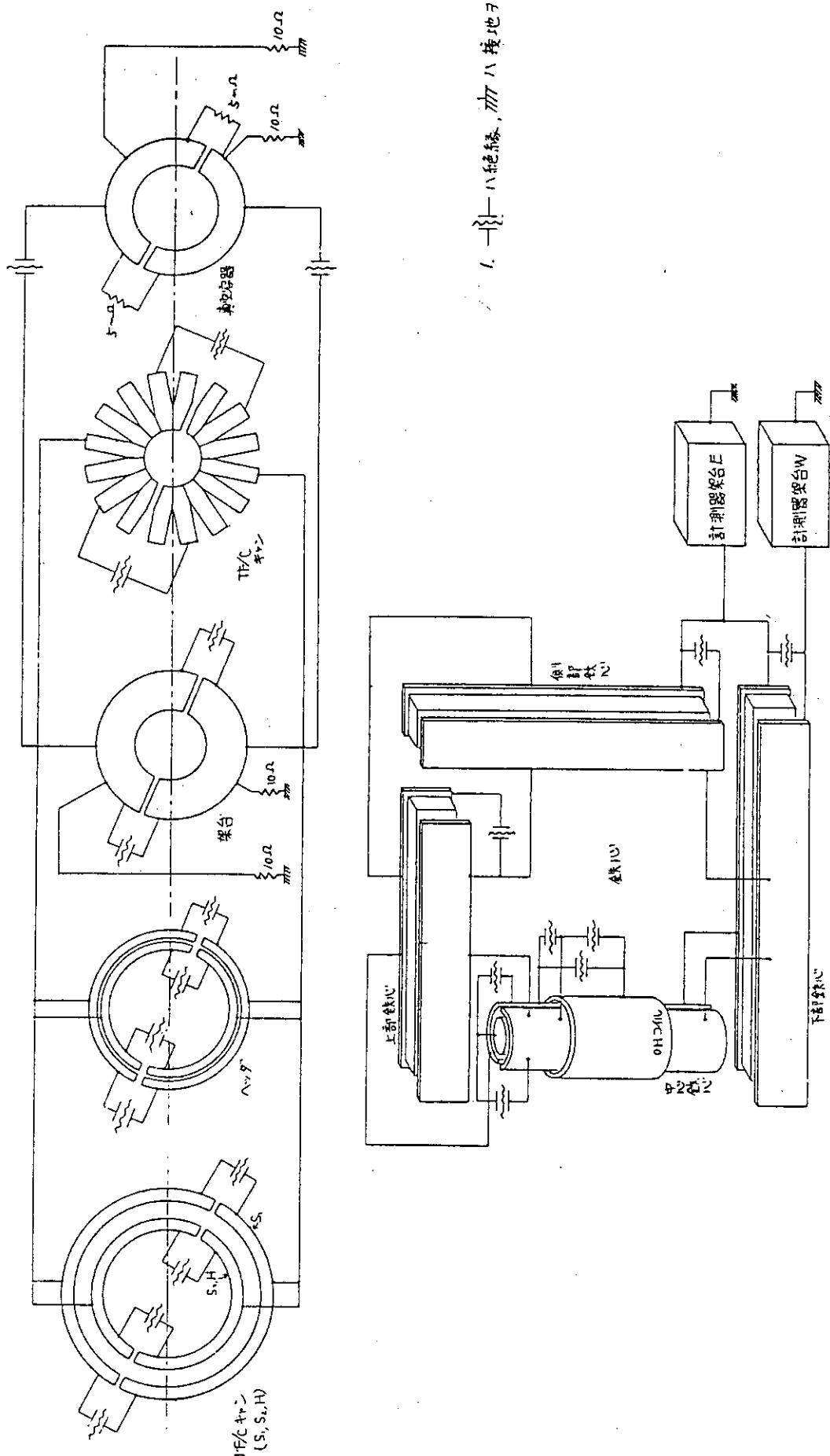
第3.8-1図 架台組立図



第 3.8-2 図 下部平板分割部の荷重



第 3.8-4 図 分角心及び中心距離設定



第3.8-3図 本体構造物結線図

## 4. 電 源 と 制 御

### 4.1 トロイダル電源

JFT-2Mのトロイダルコイルを励磁するための直流電源で既設JFT-2のトロイダル用MG(直流発電機)電源を使用した。

これらの主回路を第4.1-1~2図に示す。

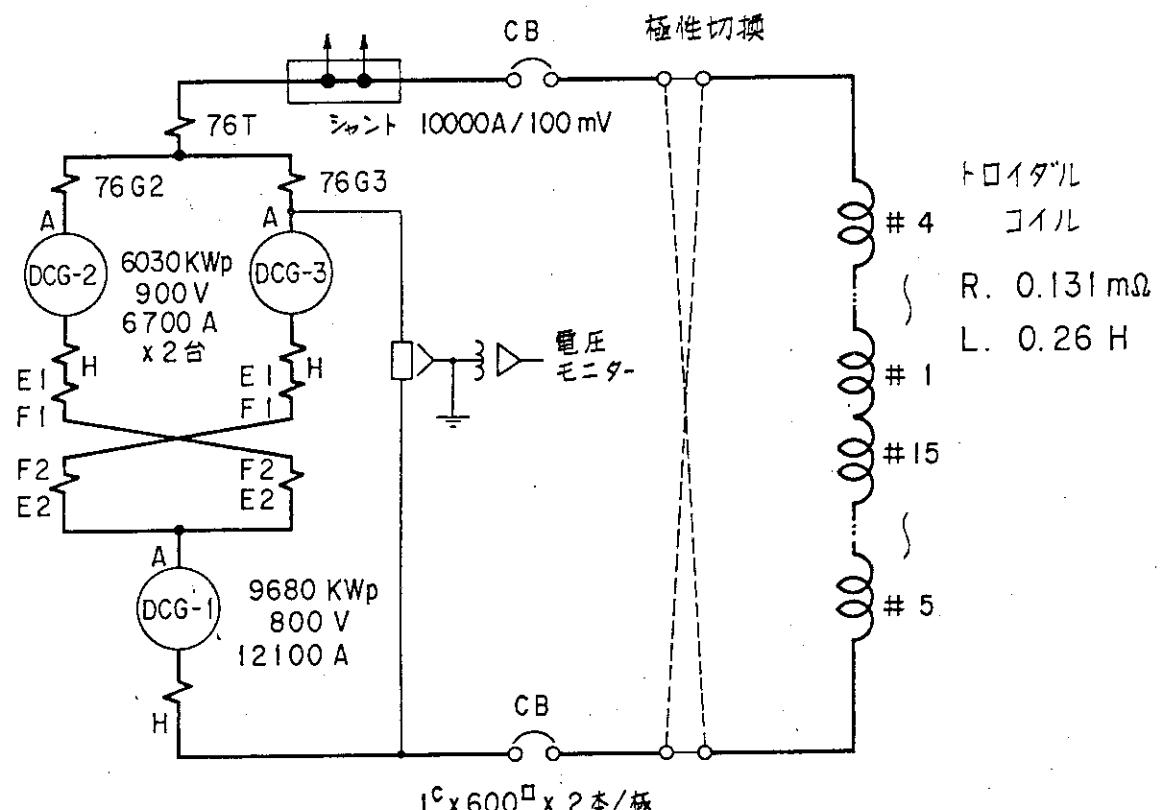
最大許容定格は、12100 A 1700 V 15秒定格であり、RmS値の最大は1500 Aである。これら主要機器の定格は第4.1-1表のとおりである。

JFT-2Mのトロイダルコイルは、JFT-2に較べLが3倍に増加(R: 0.131 mΩ, L, 0.26 H)したため以前のように通電すると通電間隔が長くなるので、制御系の改造によりどの電流整定においても立上げ時に、定格電圧の1700 Vのフォーシングをかけることにより立上げ時間を短縮、通電間隔を最大磁場(12100 A, 14.2 KG)で4.0分で行えるようにした。

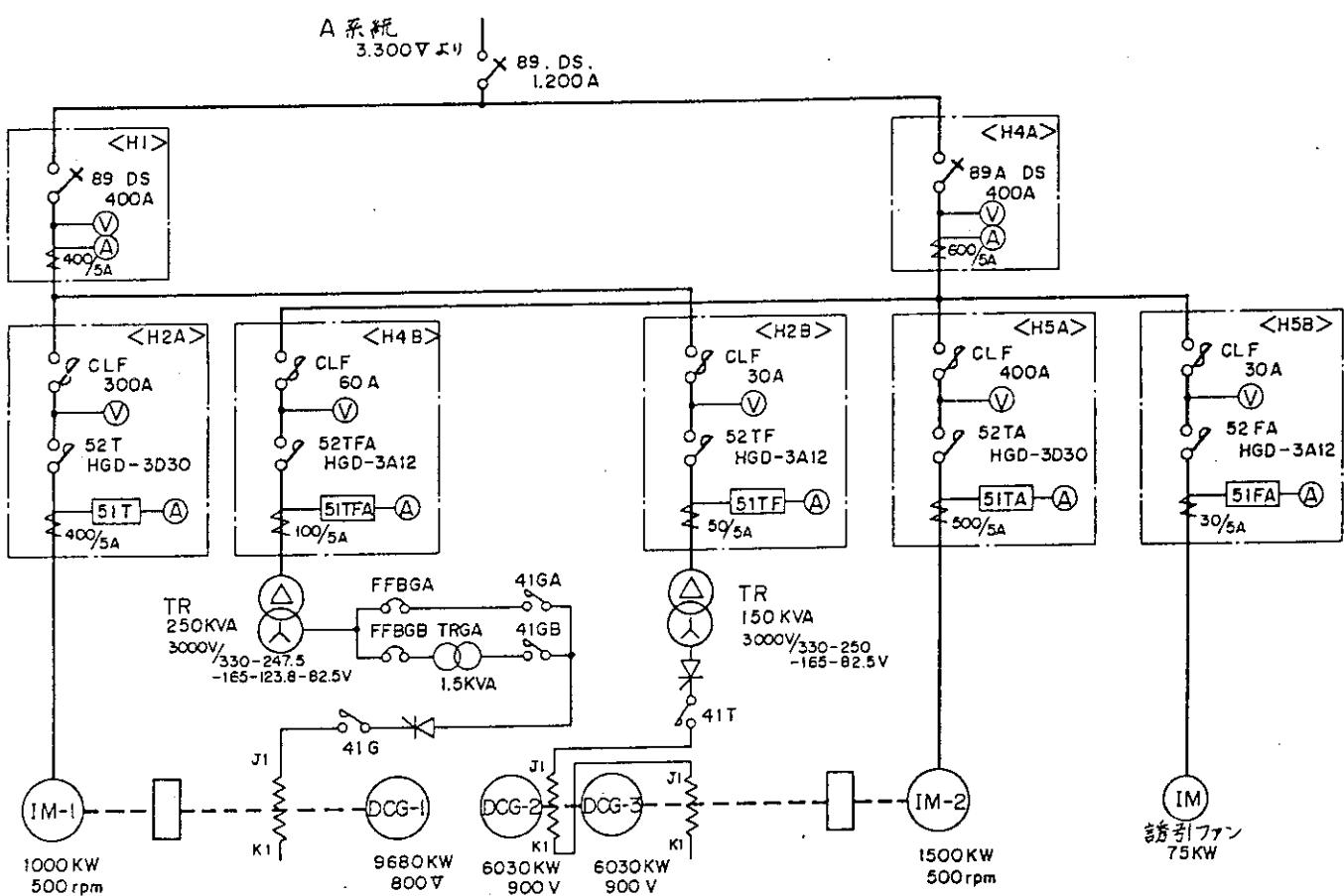
ただし、この方法第4.1-3図によると電流により通電時間が異なる他、電流整定がタイマーの整定に大きく依存するため、セレクトCSにておおまかな電流整定を行いヘリポットで微調を行っている。この整定結果を第4.1-2表に示す。

第4.1-1表 MG電源主要機器の定格

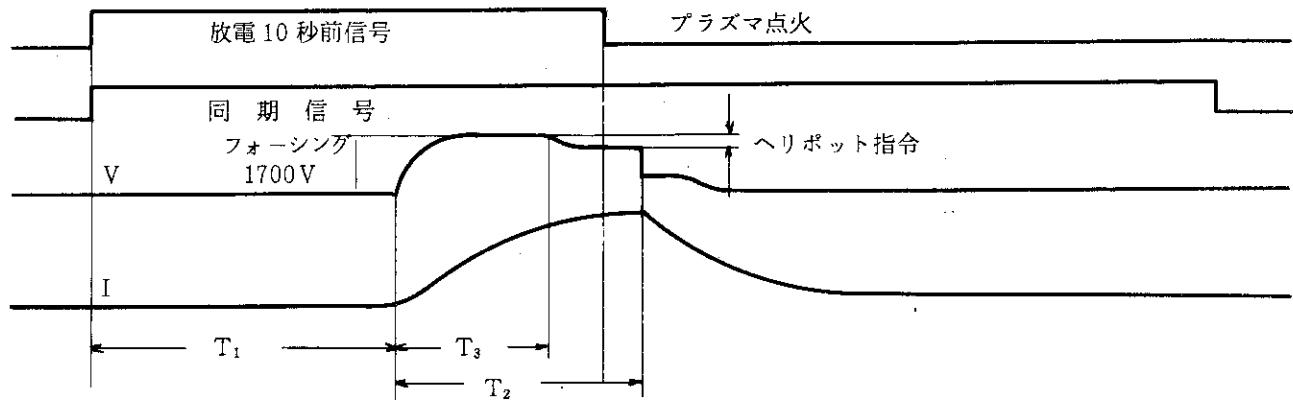
機 器	項 目	MG - 1	MG - 2
I M	出 力	1000 KW	1500 KW
	電 圧	3000 V	3000 V
	回 転 数	490 rpm	490 rpm
	定 格	連 続	連 続
D C G	台 数	1 台	2 台
	出 力	9680 KW	6030 KW
	電 圧	800 V	900 V
	電 流	12100 A	6700 A
F W	定 格	15秒	15秒
	蓄 勢 輸 效 果	280 t-m <sup>2</sup>	330 t-m <sup>2</sup>
	蓄 勢 勢 力	96000 KW・sec	113000 KW・sec



第4.1-1図 トロイダル電源 直流側回路



第4.1-2図 トロイダル電源 MG一次回路



第 4.1-3 図 JFT-2M のトロイダル通電方法

第 4.1-3 図 JFT-2M のトロイダル通電方法

第 4.1-2 表 セレクト CS と磁場の整定 (タイマーは整定後, 固定)

セレクト CS	周期	磁場(電流)	ヘルポット	T <sub>1</sub> (同期タイマー)	T <sub>2</sub> (通電時間)	T <sub>3</sub> (フォーシング時間)
1	4.0 分	14KG (11.930 A)	200	6.8S (2-121)	3.8S (62-121)	3.0S (62-221)
2	3.7 分	13KG (11.080 A)	200	7.0S (2-221)	3.7S (62-321)	2.8S (62-421)
3	3.0 分	12KG (10.230 A)	500	7.2S (2-321)	3.5S (62-521)	2.5S (62-621)
4	2.5 分	11KG (9.380 A)	700	7.5S (2-421)	3.2S (62-721)	2.1S (62-821)
5	2.5 分	10KG (8.500 A)	750	7.9S (2-521)	2.9S (62-921)	1.6S (62-1001)

## 4.2 ポロイダル電源

ポロイダル電源はポロイダルコイルに通電し、プラズマの点火、ジュール加熱、プラズマの位置形状制御、ダイバータ配位の形成、TDC放電洗浄を行うための直流電源および制御系である。

電源の構成は、OH電源（OHコイル）、S電源（ $S_1 - S_2 - S_{3/2}$ コイル）、 $V_1$ 、 $V_2$ 電源（ $V_1 - V_2 - S_{3/2}$ コイルの上および下側）、H電源（Hコイル）、バイアス電源（Bコイル）およびTDC電源からなっている。OHおよびS電源は立上げ時にコンデンサを利用した後にサイリスタ制御を行う制御方式となっている。

本電源において、 $V_{UP}$ 、 $V_{LOW}$ 電源は非還流部分の製作のみを行い、還流部分については設計および配置の検討を行った。OH電源は、サイリスタ容量のみ半分の容量で製作、将来においてサイリスタを附加すれば全定格運転が可能な状態である。また、OHおよびS電源のコンデンサー、S電源のサイリスタ電源、H電源、およびTDC電源は、JFT-2の電源を流用して使用している。これらは円形300KAのプラズマを発生するための電源であり、上記未製作分を含め非円形全定格運転を可能にするための電源については59年度に製作を予定している。

ここでは現状のポロイダル電源について下記の項目に分類し述べる。

- 4.2.1 コンデンサ電源設備
- 4.2.2 ポロイダル磁場用サイリスタ電源
- 4.2.3 サイリスタ電源の制御
- 4.2.4 バイアス電源
- 4.2.5 TDC電源

### 4.2.1 コンデンサ電源設備

JFT-2Mのプラズマ立上げおよびジュール加熱を行うS、OHコイル用の電源は、コンデンサ電源設備とサイリスタ電源設備の組み合せにより行っている。

高圧に充電したコンデンサを放電してSおよびOHコイルに電流を励起することにより発生する誘導電圧で、真空容器内部に気中ブレーキを起こし、プラズマを生成するとともに、プラズマ電流を立ち上げる。コンデンサ電圧がサイリスタ電源出力電圧より低くなった時点で、サイリスタ電源に転流し、以後サイリスタ電源にてプラズマ電流の制御を行う。

第4.2-1図には、コンデンサ電源とポロイダル磁場コイルの接続を等価的に示す。

OHコイル電流とSコイル電流を同時に立ち上げる場合に必要な条件は次の3点である。

- (i) 各電流波形が相似であること。
- (ii) 各電流のイグナイトロンを同時に投入し得ること。
- (iii) OH電流とS電流の比が、プラズマの平衡を保てる値であること。

これらの条件を満足するように調整できる要素に、時定数調整用インダクタンス、コンデンサ容量、コンデンサ充電電圧、ポロイダル磁場コイルのタップおよび接続法がある。ここでは、(i)および(ii)をコンデンサ電源のパラメータで満足させておき、(iii)を満足するには、必要に応じてポロイダル磁場コイルのタップを調整するものとする。

(i)の条件を満足するためには、

$$\frac{C_S}{C_{OH}} = \frac{\ell_{OH} + L_{OH}}{\ell_S + L_S}$$

が必要となる。ここで  $L_{OH}$ ,  $L_S$  は各電源からみたコイルの等価インダクタンスである。 $\ell_{OH}$ ,  $\ell_S$  は時定数調整用インダクタンスであり、 $C_S$ ,  $C_{OH}$  も結線を変えることにより変化できるようになっている。

(ii)の条件を満足するためには充電電圧  $V_{OH}$ ,  $V_S$  の間に

$$\frac{V_{OH}}{N_{OH}} \cong \frac{V_S}{N_S}$$

なる関係が満たされることが必要となる。ここで  $N_{OH}$ ,  $N_S$  は各コイルの巻き数である。

このようにプラズマの立上げに使用するコンデンサ電源は、コイルの接続および目標とするプラズマ電流により、容量および充電々圧を変更して使用する。第 4.2-1 表に設計時における設定の代表例を示す。

第 4.2-1 表 コンデンサによるプラズマ立上げ例

期 期 条件	コイル 形状	モード ケース	定格 電流	算定 電流	S				O H				設定上優先項目			
					コンデンサ		サイリスタ		コンデンサ		サイリスタ					
					容量	充電 電圧	電流	電圧	容量	充電 電圧	電流	電圧				
1	S コ イ ル 並 列 + Q コ イ ル	円	1	1	KA 350	KA 350	mF 28.8	KV 4.00	KA 6.97	V 480	mF 26.0	KV 1.92	KA 3.02	V 142	1. S サイリスタ電圧	
			2	2	↓	350	↓	4.22	↓		11.5	1.63	1.03	110	1.	
		ダ円	1	3	450	411	10.4	8.30	6.42		5.0	6.00	2.23	214	1. 2. OH充電々圧	
			2	4	↓	415		9.63	6.47		1.0		0.40	120	1. ↓	
		D 1	1	5	550	452		8.62	5.15		8.5	↓	2.93	179	1. ↓	
			2	6		429		10.00	4.89		1.0	3.81	0.16	77	1. 2. S充電々圧	
	D 2	D 2	1	7			↓		8.19	5.92		6.5	6.00	2.71	192	1.
			2	8	↓	371	↓	10.00	5.88	↓	2.0	5.28	0.59	96	1. ↓ 2. S充電々圧	
	2	S コ イ ル 直 列	1	9	350	350	7.2	6.71	3.48	916	22.0	1.90	3.02	155	1. dip/dt=10KA/min	
			2	10	↓	↓		7.53		912	10.0	1.60	1.03	120	1.	
		ダ円	1	11	450	450		7.90	3.51	1377	13.0	3.05	2.44	400	1.	
			2	12	↓	↓		9.04	↓	1493	2.5	3.07	0.43	303	1.	
		D 1	1	13	550	550		8.72	3.14	1710	24.0	2.98	3.57	481	1. ↓	
			2	14				10.00	↓	2187	4.5	2.18	0.42	390	1. S充電々圧	
		D 2	1	15				8.06	3.80	1677	18.0	2.92	3.45	530	1. dip/dt=10KA/ms	
			2	16	↓	↓	↓	10.00	↓	1960	5.5	2.57	0.74	409	1. S充電々圧	

注. サイリスタ電圧 1 期 S 電源にはブロッキングダイオード電圧 15V を含み (サイリスタ電源端子電圧)

1 期 OH 電源 2 期 S 電源はブロッキングダイオード電圧を含まない (コイル端子電圧)

コンデンサ電源機器一覧表

機 器 名 称	S コイル用電源	OH コイル用電源																				
コンデンサバンク	<p>S<sub>0</sub> コンデンサバンク            10 KV 50 <math>\mu</math>F 4 台  <math>(10 \text{ KV } 200 \mu\text{F})</math>  <math>(20 \text{ KV } 50 \mu\text{F})</math></p> <p>S<sub>1</sub> コンデンサバンク            5 KV 200 <math>\mu</math>F 144 台  <math>(5 \text{ KV } 28.8 \text{ mF})</math>  <math>(10 \text{ KV } 14.4 \text{ mF})</math></p>	<p>OH コンデンサバンク            3 KV 493 <math>\mu</math>F 60 台  <math>3 \text{ KV } 2 \text{ mF} \sim 30 \text{ mF}</math>  <math>2 \text{ mF 每に 容量切換可能}</math></p> <p>6 KV 0.5 mF ~ 7.5 mF  <math>0.5 \text{ mF 每に 容量切換可能}</math></p> <p>S<sub>1</sub> 兼 OH コンデンサバンク (接続可能)            5 KV 200 <math>\mu</math>F 12 台            10 KV 50 <math>\mu</math>F 52 台  <math>(10 \text{ KV } 3.2 \text{ mF})</math>  <math>(6 \text{ KV } 3.2 \text{ mF})</math></p>																				
放電設備	S <sub>0</sub> 放電設備																					
サイリスタ	FT 500 AH-80-5 S 20 個 直列接続																					
サージアブソーバ	ERZ-A 20 GK 113																					
リアクトル	1.3 mH																					
S W	<p>S<sub>1</sub> 放電設備            イグナイトロン MI-3300 E (三菱電機)</p> <p>陽極電圧 20 KV            陽極電流 450 KA            放電電気量 240 A · sec / 回</p> <table> <tr> <td>スタート用</td> <td>2 本</td> <td>スタート用</td> <td>2 本</td> </tr> <tr> <td>クローバ用</td> <td>4 本</td> <td>クローバ用</td> <td>3 本</td> </tr> <tr> <td>過電流用</td> <td>1 本</td> <td>過電流用</td> <td>1 本</td> </tr> <tr> <td>1 本用</td> <td>1 本</td> <td>1 本用</td> <td>2 本</td> </tr> <tr> <td>2 本用</td> <td>3 本</td> <td>2 本用</td> <td>2 本</td> </tr> </table> <p>電圧平衡リアクトル 1 台</p> <p>過電流保護用 吸収エネルギー 600 Kj</p> <p>抵抗 0.7 <math>\Omega</math></p> <p>クローバ用抵抗 吸収エネルギー 600 Kj            0.7 <math>\Omega</math></p>	スタート用	2 本	スタート用	2 本	クローバ用	4 本	クローバ用	3 本	過電流用	1 本	過電流用	1 本	1 本用	1 本	1 本用	2 本	2 本用	3 本	2 本用	2 本	<p>OH 放電設備</p>
スタート用	2 本	スタート用	2 本																			
クローバ用	4 本	クローバ用	3 本																			
過電流用	1 本	過電流用	1 本																			
1 本用	1 本	1 本用	2 本																			
2 本用	3 本	2 本用	2 本																			

機器名称	Sコイル用電源			OHコイル用電源		
クローバ検出用 絶縁アンプ	1台			1台		
電流測定 CT 差動分圧器	1台			1台		
逆流防止用 ダイオード	FD 1600 A - 50 (1600 A, 2.5 KV) 6素子内蔵×3			FD 1600 A - 50 (1600 A, 2.5 KV) 6素子内蔵×2		
調整リアクトル	20 mH (1 mH, 2.25mH, 4mH) × 5			20 mH (1 mH, 2.25mH, 4 mH) × 5		
サージ吸収器 保護ギャップ	27.5 KV± 2.5 KV			14 KV± 2.5 KV		
ギャップ用抵抗 コンデンサ	72 Ω 2 μF 0.05 μF	270 W 20 KV 20 KV	12 2 1	48 Ω 2 μF 0.05 μF	500 W 20 KV 20 KV	8 2 1
振動防止用抵抗	10 Ω 200 Ω	20 KW 150 W	1 1	20 Ω 200 Ω	20 W 20 W	1 1
測定用分圧器	分圧比 1/2000			分圧比 1/2000		
充電設備	受電設備 入力, 200 V			出力, 三相 200 V 30 KVA 単相 100 V 3 KVA		
容 量	S <sub>0</sub> 2 KVA	S <sub>1</sub>		10 KVA		
無負荷直流電圧	14 KVADC ×2			7 KVADC × 2		
短時間電流	0.1 A			1.75 A		
連続定格電流	0.045 A			0.6 A		
最大設定電圧	20 KV	10 KV		10 KV		
過電圧保護整定 (並列)	10.1 KV	5.1 KV		3.1 KV		
(直列)	20.2 KV	10.2 KV		6.1 KV		

機器名称	Sコイル用電極	OHコイル用電極
ノーヒューズブレーカ	.1	1
電磁開閉器	1式	1式
限流リクトル	"	"
短絡器	"	"
絶縁アンプ	1	1
高圧開閉器	1式	1式
コンデンサ制御盤	コンデンサ電源操作盤	1
	S <sub>0</sub> 充電制御盤	1
	S <sub>1</sub> "	1
	OH"	1
	過電流クローバ制御盤	1
	6CH遅延パルサー	2
	トリガ充電制御盤	1
	サイリスタ故障表示盤	1
	バイアス電源操作盤	1も収納

#### 4.2.2 ポロイダル磁場用サイリスタ電源

第4.2-2表にポロイダル磁場用サイリスタ電源の定格値、整流相数等を記す。各サイリスタ電源の定格は以下に述べる設計方針に基づき決定している。

##### (1) サイリスタ電源電圧設計

コンデンサ放電により早く立ち上げたあと、コンデンサ端子電圧がサイリスタ電圧より小さくなった時点でサイリスタを投入する。そして今度はゆっくりコイル電流を立ち上げたあと、フラットトップ電流へもっていく。この期間次の回路方程式が成り立つ。

$$\frac{d}{dt}(L_P I_P) + R_P I_P + \sum_i \frac{d}{dt}(M_{Pi} I_i) + \frac{d}{dt}\Phi = 0$$

$$\sum_j M_{ij} \frac{d}{dt} I_j + \frac{d}{dt}(M_{Pi} I_P) + R_i I_i + N_i \frac{d}{dt}\Phi = V_i$$

ここで、添字Pはプラズマを、i, jはi種、j種のコイルを意味する。L<sub>P</sub>はプラズマの自己インダクタンス、M<sub>Pi</sub>はプラズマとi種コイルとの相互インダクタンス、M<sub>ij</sub>はi種コイルとj種コイルとの相互インダクタンス、R<sub>P</sub>、R<sub>i</sub>はプラズマおよびi種コイルの抵抗、N<sub>i</sub>はi種コイルのトロイダル方向の総ターン数、Φは鉄心中の磁束を表わす。コイルおよびプラズマの電流時間変化とその相互インダクタンスの時間変化を代入すれば、コイルに必要な電圧を求めることができる。電流の時間依存はプラズマの平衡から求まる。プラズマの抵抗は立ち上げ期に時間的に

変化するが、等価的なインダクタンスに置換えて評価する (JAERI - M 7810)。即ち、

$$R_P I_P = \alpha \frac{d}{dt} (L_P I_P)$$

$\alpha$  が大きい程コイル電圧は高くなり厳しい条件となる。プラズマがフラットトップに達したあとには、

$$R_P I_P = 2 \text{ (volt)}$$

として評価する。

ジュール加熱のみから NBI 追加熱時のポロイダルベータ値の変化分の平衡は V コイル電流の変化分のみでとることとし、これに対する電圧変動分や、プラズマ抵抗の変化による電圧変動分等は次式で評価する。

$$\Delta V_i = -N_i \Delta (R_P I_P) \quad (R_P \text{ 分})$$

$$\Delta V_i = \Delta (R_i I_i) \quad (R \text{ 分})$$

ポロイダル磁場コイルの諸元を第 3.6-1 表に示されている。第 4.2-3 表～第 4.2-6 表に  $\alpha = 0.5$  のときの求まった各コイルの電源電圧をプラズマ断面形状毎に、各 phase での値を示した。ここで、Fast rise 期はサイリスタ制御ではなく、コンデンサ放電制御である。

以上の結果より、各サイリスタ電源 (slow rise 以後) と必要とされる最大電流・電圧を拾うと、次のようになる。

OH 電源	595 V (楕)	3.57 KA (D(1))
S 電源	1003 V (D(1))	7.60 KA (D(1))
V 電源	349 V (D(1))	6.95 KA (D(1))
Q 電源	76 V (D(1))	7.5 KA (D(1))

ここで、円、楕、D はそれぞれプラズマの断面形状を意味する。

プラズマの抵抗は、立ち上げ期とフラットトップ期とでは大きく違い、プラズマ抵抗のインダクタンス換算係数  $\alpha$  の値も本来は時間依存する。今回の評価は  $\alpha$  の値が 0.5 とかなり大きくとられ、かつ立ち上げ期の間でも一定とされているので、実際には上記計算値より小さくなると考えられる。

消費磁束はトータルで円形モード (2.36 V・sec), 楕円モード (2.61 V・sec), D 型モード (2.67 V・sec) となる。これはプラズマ抵抗を高く見積ったもので、もしワンターン電圧が 1 V 下がると、0.7 V・sec 消費磁束は減少し、2 V・sec 以内となる。

## (2) トランスの設計

各整流電源用の変圧器の容量は、変圧器二次側直流電圧ドロップ約 10 V、電源変動を ±10 %、変圧器のパーセントリアクタンスを 20 % とすると、例えば、OH 電源の場合、所要最大容量が 3.57 KA, 595 V より

$$VA = 2 \times 3.57 \times \omega^3 \times \frac{(595 + 10) \times 1.1}{1.35 \times 0.9} = 2.77 \text{ MVA} \quad (3.712 \text{ MVA})$$

以上の整流器用変圧器容量が必要となる。同様に、

$$S \text{ 電源用変圧器容量} \quad 9.86 \text{ MVA} \quad (14.975 \text{ MVA})$$

$$V \text{ 電源用変圧器容量} \quad 3.19 \text{ MVA} \quad (2 \times 4.096 \text{ MVA})$$

Q 電源用変圧器容量 0.73 MVA (4.458 MVA)

以上の容量が必要である。尚、括弧内は設定容量である。

現在の JFT-2M のポロイダル磁場コイル電源には 1 部 JFT-2 時代容量のものを用いており、円形断面 300 KA のプラズマ ( $R = 1.31 \text{ m}$ ,  $a = 0.35 \text{ m}$ ) をつくることができるが、550 KA, D 型プラズマ等を実験しようとするれば、ポロイダル電源系の増力が必須となる。

#### 4.2.3 サイリスタ電源の制御

各サイリスタ電源は、電流あるいは電圧命令を受けて点弧位相角を決定し、サイリスタのゲートへ点弧パルスを送る機能を持ったサイリスタ制御盤を持っており、サイリスタ電源の制御はここで行われる。

位相制御サイリスタ電源では、電圧制御モード (AVR) と電流制御モード (ACR) の 2 つのモードで運転することが可能である。電圧制御モードでは、命令信号を電圧命令と解釈し、出力電圧が命令値と一致する様に制御位相角  $\alpha$  を変化させフィードバック制御を行うのに対し、電流制御モードでは命令信号を電流命令と解釈し、出力電流が命令値と一致するようにフィードバック制御を行う。ポロイダル磁場電源のように、インダクタンス負荷に通電する場合には電流と電圧は一般に比例しないため、2 つのモードの差が重要になる。

第 4.2-7 表は、各サイリスタ電源の制御上の特徴をまとめたものであり、第 4.2-4 図に例として  $V_{UP}$  サイリスタ制御部のブロック図を示す。

プラズマの位置等を制御する場合に重要な要素となるのが応答速度である。速い応答特性を得るために、サイリスタ制御盤で信号の遅れをできるだけ下げる事が重要であり、特にむだ時間を数百  $\mu\text{sec}$  以下におさえることが必要となる。したがって、今回新設の電源ではむだ時間に対する命令値をコンパレータで比較することによりゲートパルスを発生する方式 (アナログ方式) を採用した。

また、電流制御モードの場合、より速い応答を得るためにフィードフォワード回路をフィードバック回路に連結することが考えられる。第 4.2-5 図には、電源の電流波形をフィードフォワード回路がある場合とない場合について数値計算によって検討した結果を示す。応答の遅れが小さくなっていることがわかる。電流のフィードバック演算には、比例、積分、微分 (PID) 演算ができるよう構成している。第 4.2-6 図には、フィードバック演算に微分要素を入れることにより制御特性が改善される効果を数値計算により示したものである。

電流検出器には、DCCT を用いており、ノイズ耐策として、シールドケースの中に収納されている。第 4.2-7 図には電流検出器のシールドケースの構造図を示す。

#### 4.2.4 バイアス電源

バイアス電源は、鉄芯の  $V \cdot \text{sec}$  を最大限活用するために、プラズマ点火前に鉄芯内磁束にバイアスをかけておくための電源であり、励磁コイルに B コイル (15 ターン  $\times 2$ ) を用いる。鉄芯を飽和させるには、約 6 kAT の励磁が必要であり、バイアス電源電流には 200 A の電流が必要となる。

JFT-2Mで用いる変流器鉄芯はバット結合で構成されており、見かけ上ヒステリシスが小さくバイアス電流を切った時の残留磁束はほぼ0となる。したがって、プラズマ点火前から消滅後までバイアス電流に一定電流を供給する必要があり、電源には定電流特性が要求される。また、プラズマ点火、消滅時には、OH電源、S電源、およびプラズマからの誘起電圧がBコイル両端に発生するため、これに対してバイアス電源の健全性を保持せねばならない。以上の二点を解決するために、本バイアス電源には、位相制御サイリスタ電源を用い、Bコイルと直列にサージ吸収リアクトル(0.5 H)を挿入している。電源電圧が580 Vであるので1周電圧20 V相当の誘起電圧に対しては、サイリスタ電源の定電流特性で対応でき、これを越えるものについては、サージ吸収リアクトルで対応する。

#### 4.2.5 TDC 電源設備

TDC (Taylor Discharge Cleaning) による放電洗浄を行う為のポロイダル電源設備で高速放電洗浄用電源（以下、TDC 電源）と TDC 切換器より構成される。

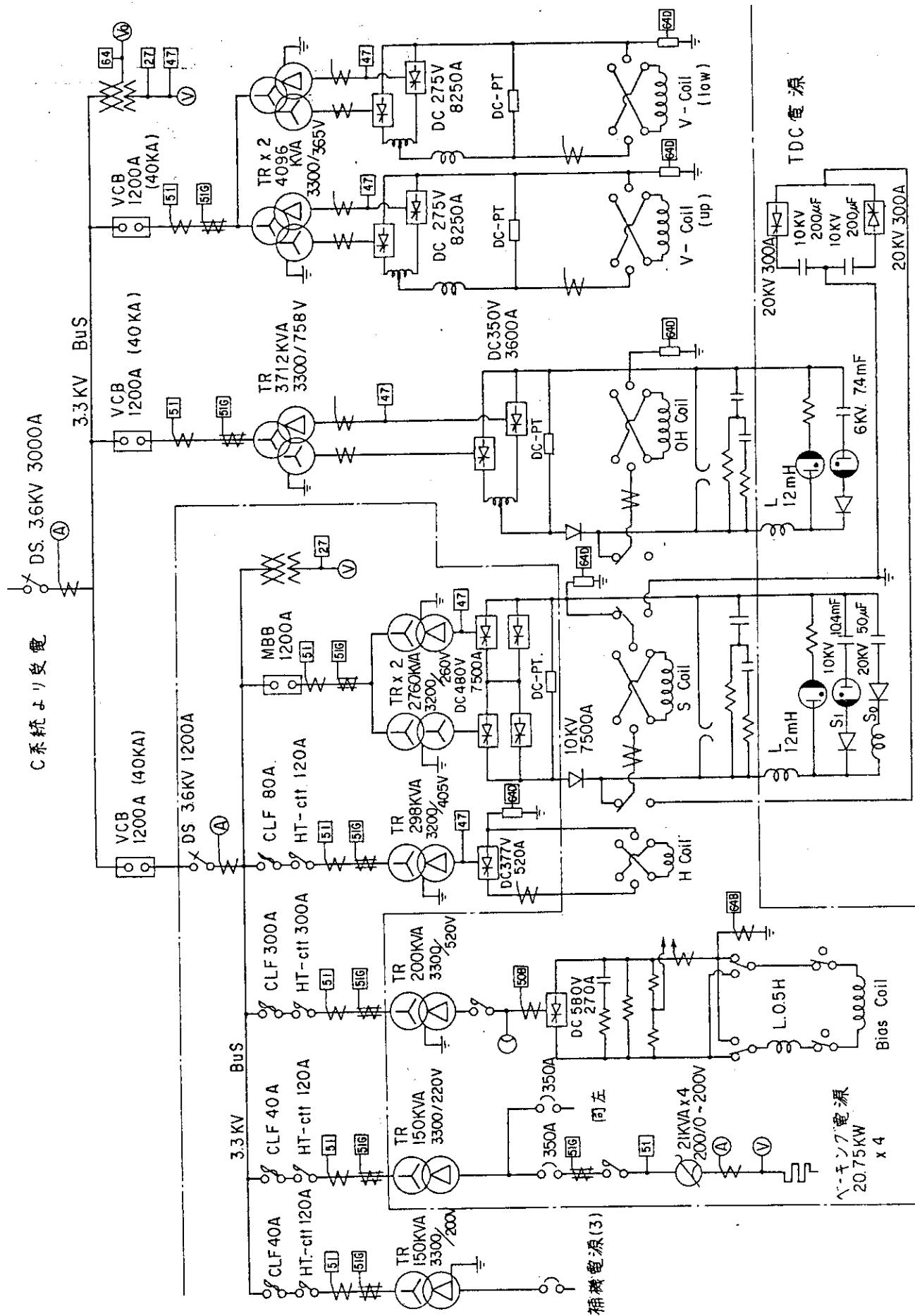
##### (1) TDC 電源

JFT-2Mにおいて、正負両方向に充電されたコンデンサをSコイル（又はS→OH→Qコイル）へ交互に放電し、繰返しの早い低電流のプラズマを発生させる電源で、コンデンサ 10 KV, 50 μF × 4台 2組を各々 10 KV, 4秒間隔で連続充放電（実際の使用状態で多いのは、5 KV, 1.6 秒間隔）するものであり、この為に必要な充電器、電圧調整用スライダック、放電用サイリスタスイッチ、トリガ用パルサー、および充放電制御盤より構成される。

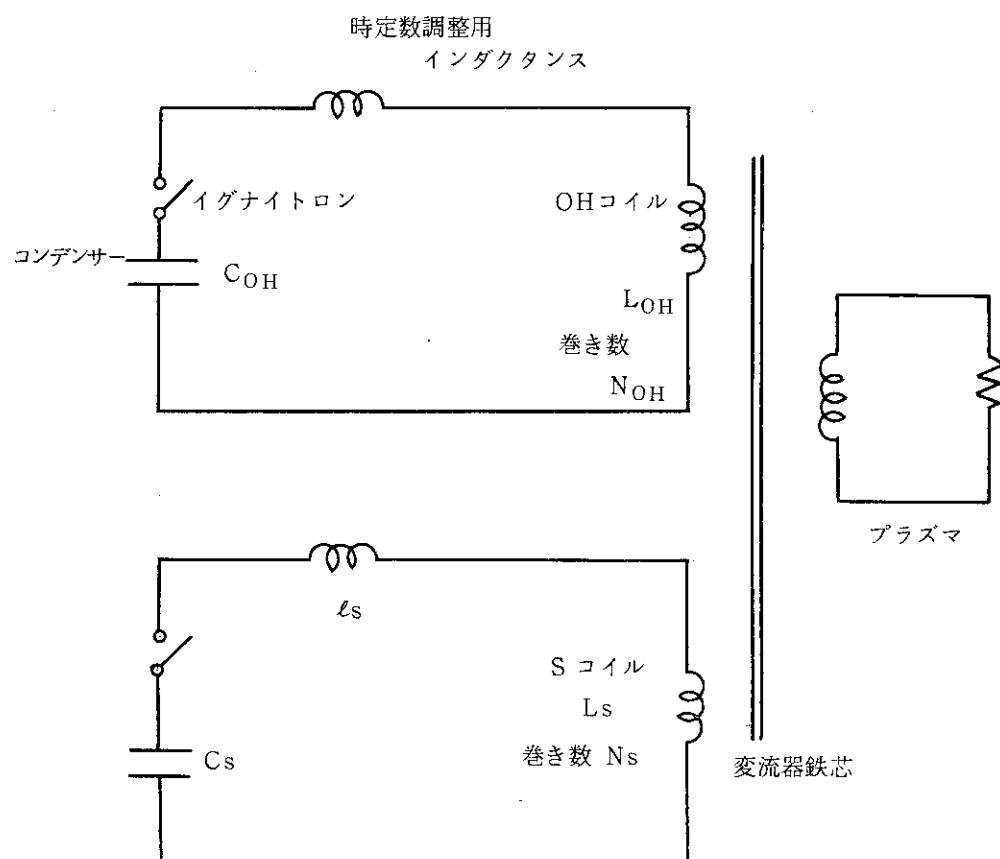
##### (2) TDC 切換器

TDC 切換器は3極双投の電動操作方式の断路器で、パルス放電側（S系サイリスタ電流、S系コンデンサ電源）と TDC 放電側に電源を切換え、（TDC 放電側の時には OH 系ポロイダル電源も開放。）S系コイル、OH系コイルの各種電源設備を取りまとめて S系コイル、OHコイル結線切換器に接ぐものである。

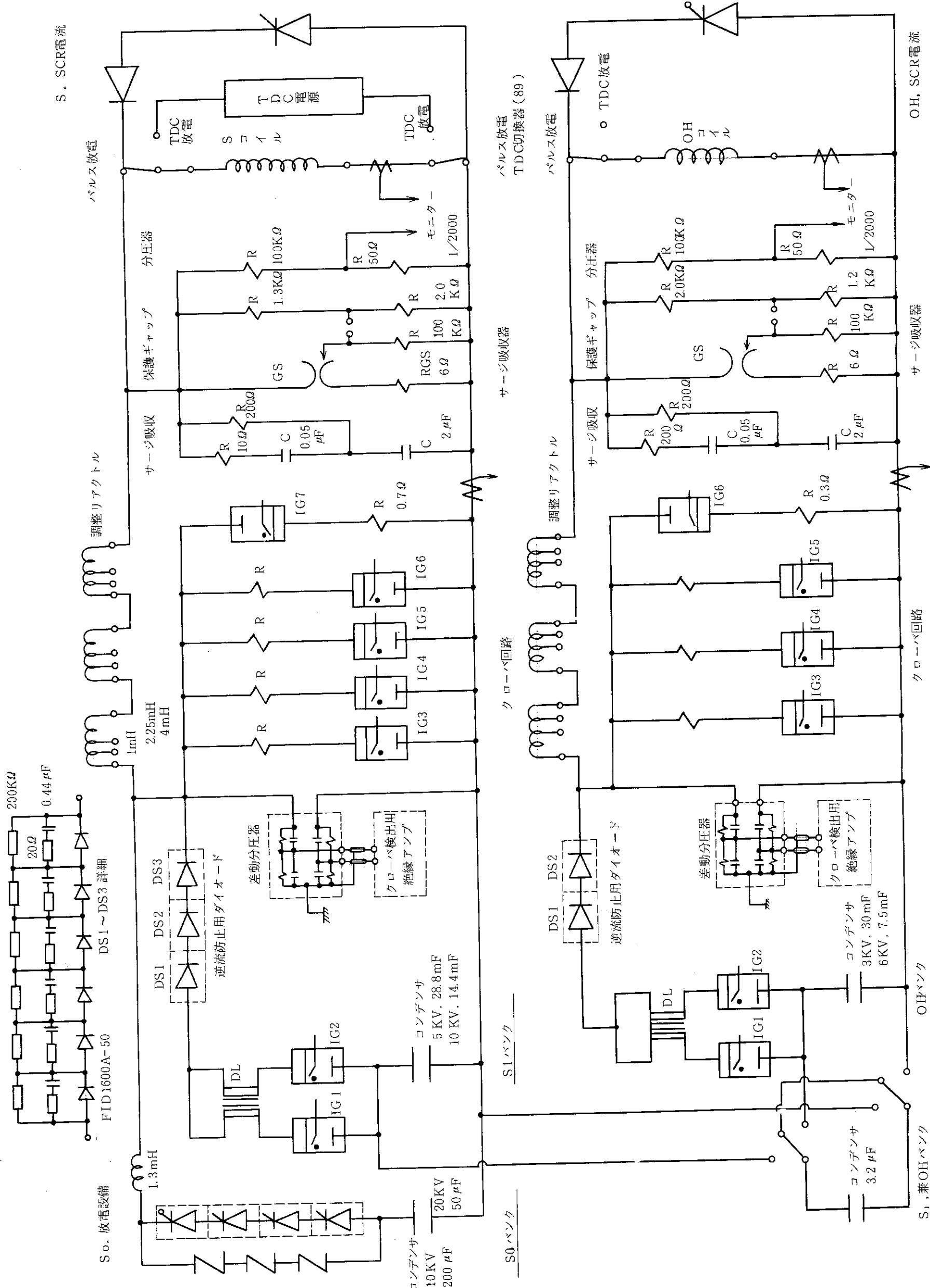
TDC 切換器は切換器収納盤（盤番号 004 E）に有り、収納盤には TDC 電圧、電流モニター用 DCCT の他、S系、OH系の電流検出器、地絡検出継電器も収納されている。



#### 第4.2-1 図 ポロイダル電源系統図



第 4.2-2 図 OH, S 系の等価回路



第4.2-2表 ポロイダル磁場用サイリスタ電源の定格

電源名	定格電圧	定格電流	トランス・タップ(%)	電流検出器感度	整流相数	備考
O H	(350 V) (700 V)	3.6 kA	100, 80, 60	5V / 3.6 kA	12相	
S	(480 V) (2.42 V)	7.5 kA (4.3 kA)	100	5V / 7.5 kA 5V / 4.5 kA	12相	JFT-2の電源を流用
V <sub>UP</sub>	275 V	8.25 kA	100, 80, 60	5V / 7.5 kA	12相	増力時に還流制御化の予定
V <sub>LOW</sub>	275 V	8.25 kA	100, 80, 60	5V / 7.5 kA	12相	"
Q	(250 V)	(8.5 kA)	—	—	(12相)	増力時に新設
H	(330 V)	(520 A) (4 kA)	100, 74, 49	—	(6相) (12相)	JFT-2の電源を流用
バイアス	580 V	270 A	100	—	6相	

( ) 内数字は増力時設計値

第4.2-3表 円形モード電流、電圧波形

Phase	Fast rise	Slow rise	Flat $\beta_P=0.5$	NBI rise	Flat $\beta_P=2.3$	NBI down	Flat $\beta_P=0.5$
Time (msec)	0~20	20~97	97~200	200~250	250~300	300~400	400~700
I <sub>P</sub> (kA)	0~200	200~350	350	350	350	350	350
O 電流 (kA)	0~1.73	1.73~3.03	3.03	3.03	3.03	3.03	3.03
H 電圧 Total (V)	1418~1426	284~291	98	98	98	112~260	98
R <sub>P</sub> 分	656	128	84	84	84	84	84
R <sub>C</sub> 分	0~8	8~14	14	14	14	14	14
S 電流 (kA)	0~3.98	3.98~6.97	6.97	6.97	6.97	6.97	6.97
C 電圧 Total (V)	2902~3006	669~747	246	425~386	246	294~142	246
I 分	500	97	64	64	64	64	64
V 電流 (kA)	0	0	0	0~5.86	5.86	5.86~0	0
C 電圧 Total (V)	107	21	0	263~331	68	-195~-263	0
I 分	0	0	0	0	0	0	0
V 電圧 (V)	0	0	0	0~68	68	68~0	0

第4.2-4表 楊円形モード電流、電圧波形

Phase	Fast rise	Slow rise	Flat $\beta_p=0.5$	NBI rise	Flat $\beta_p=2.3$	NBI down	Flat $\beta_p=0.5$
Time (msec)	0~20	20~149	149~200	200~250	250~300	300~350	350~700
I <sub>p</sub> (KA)	0~200	200~450	450	450	450	450	450
O H 電流 (KA)	0~1.08	1.08~2.44	2.44	2.44	2.44	2.44	2.44
C I <sub>p</sub> 分 Total 電压 (V)	2831~2852	569~595	214	92	214	425~336	214
S C I <sub>p</sub> 分 電流 (KA)	1263	244	168	168	168	168	168
V C I <sub>p</sub> 分 電压 (V)	0~21	21~46	46	46	46	46	46
Total	3354~3459	754~886	306	433	306	215~178	306
R <sub>p</sub> 分	526	102	70	70	70	70	70
R <sub>c</sub> 分	0~105	105~236	236	236	236	236	236
電流 (KA)	0	0	0	0~5.65	5.65	5.65~0	0
電压 (V)	-6	-1	0	238~260	22	-216~-238	0
R <sub>p</sub> 分	0	0	0	0	0	0	0
R <sub>c</sub> 分	0	0	0	0~22	22	22~0	0

第4.2-5表 D型(1)モード電流、電圧波形

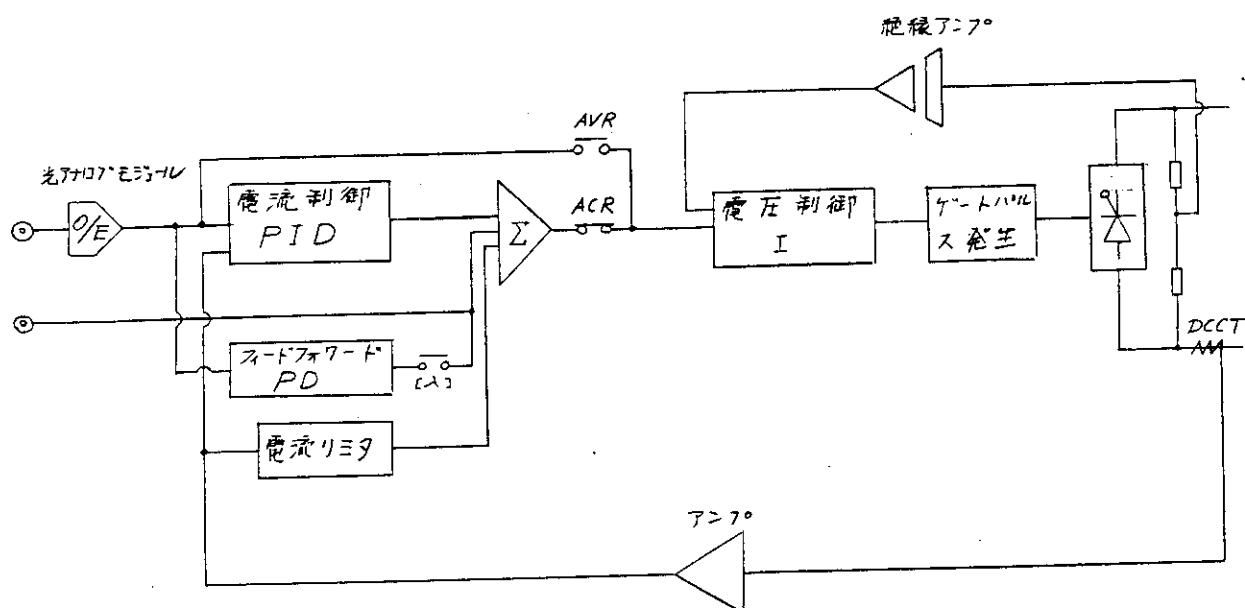
Phase	Fast rise	Slow rise	NBI rise	Flat $\beta_p=0.5$	NBI down	Flat $\beta_p=0.5$
Time (msec)	0~20	20~200	200~250	250~300	300~350	350~700
I <sub>p</sub> (KA)	0~200	200~550	550	550	550	550
O H 電流 (KA)	0~1.30	1.30~3.57	3.57	3.57	3.57	3.57
C I <sub>p</sub> 分 Total 電压 (V)	2611~2635	533~576	207~73	236	398~264	236
S C I <sub>p</sub> 分 電流 (KA)	1120	233	168	168	168	168
V C I <sub>p</sub> 分 電压 (V)	0~25	~68	68	68	68	68
Total	3982~4065	~1003	669~575	346	118~237	346
R <sub>p</sub> 分	840	163	118	118	118	118
R <sub>c</sub> 分	0~83	~228	228	228	228	228
Q 電流 (KA)	0~2.73	~7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
C I <sub>p</sub> 分 Total 電压 (V)	-277~-251	-17	47~73	39	5~31	39
R <sub>p</sub> 分	-228	-44	-32	-32	-32	-32
R <sub>c</sub> 分	0~26	~71	71	71	71	71
V 電流 (KA)	0	0	0~6.95	6.95	6.95~0	0
C Total R <sub>p</sub> 分	65.3	12.7	281~349	68	-213~-281	0
R <sub>c</sub> 分	0	0	0	0	0	0

第4.2-6表 D型(2)モード電流、電圧波形

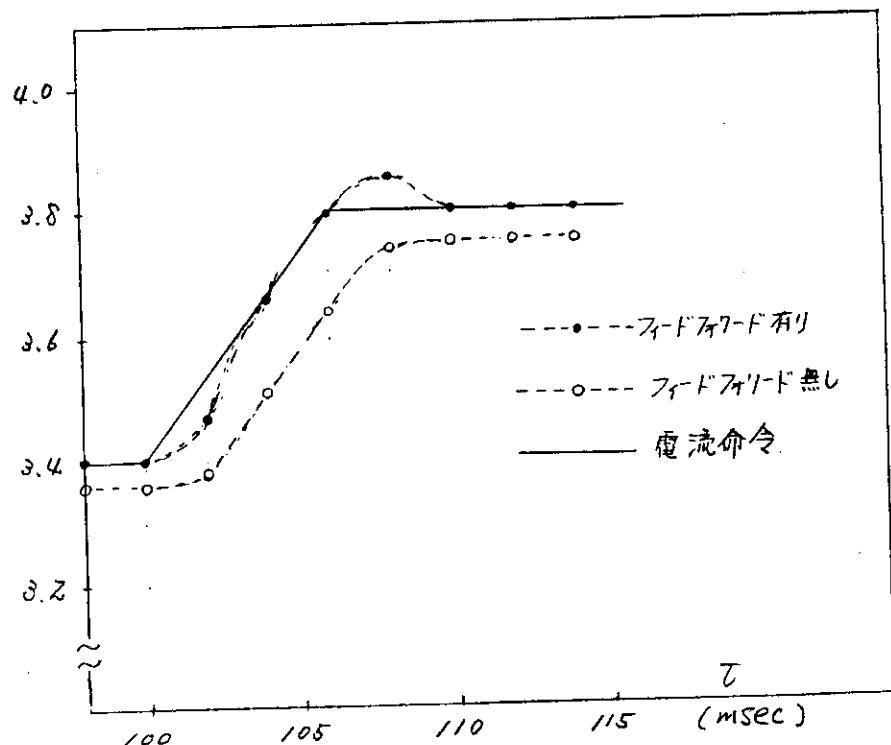
Phase		Fast rise	Slow rise	NBI rise	Flat $\beta_p=2.3$	NBI down	Flat $\beta_p=0.5$
Time (nsec)		0~20	20~200	200~250	250~300	300~350	350~700
I <sub>P</sub> (KA)	0~200		200~550	550	550	550	550
	電流 (KA)	0~1.26	1.26~3.45	3.45	3.45	3.45	3.45
O <sub>H</sub> 電圧 (V)	Total	2654~2677	540~582	192~66	233	403~275	233
	R <sub>P</sub> 分	1208	352	168	168	168	168
S <sub>C</sub> 電圧 (V)	電流 (KA)	0~2.76	2.76~7.60	7.60	7.60	7.60	7.60
	Total	3627~3700	779~907	497~422	302	183~107	302
Q <sub>C</sub> 電圧 (V)	R <sub>P</sub> 分	719	140	100	100	100	100
	電流 (KA)	0~2.73	73~202	202	202	202	202
V <sub>C</sub> 電圧 (V)	Total	-286~-312	-30~-15	7.5	7.5	7.5	7.5
	R <sub>P</sub> 分	-230	-45	-32	-32	-32	-32
V <sub>C</sub> 電圧 (V)	Total	0~26	26~71	71	71	71	71
	R <sub>P</sub> 分	0	0	0~6.29	6.29	6.29	6.29
S <sub>H</sub> 電圧 (V)	電流 (KA)	49	10	246~307	61	-183~-245	0
	R <sub>C</sub> 分	0	0	0	0	0	0
		0	0	0~61	61	61~0	0

第4.2-7表 各サイリスタ電源の特徴

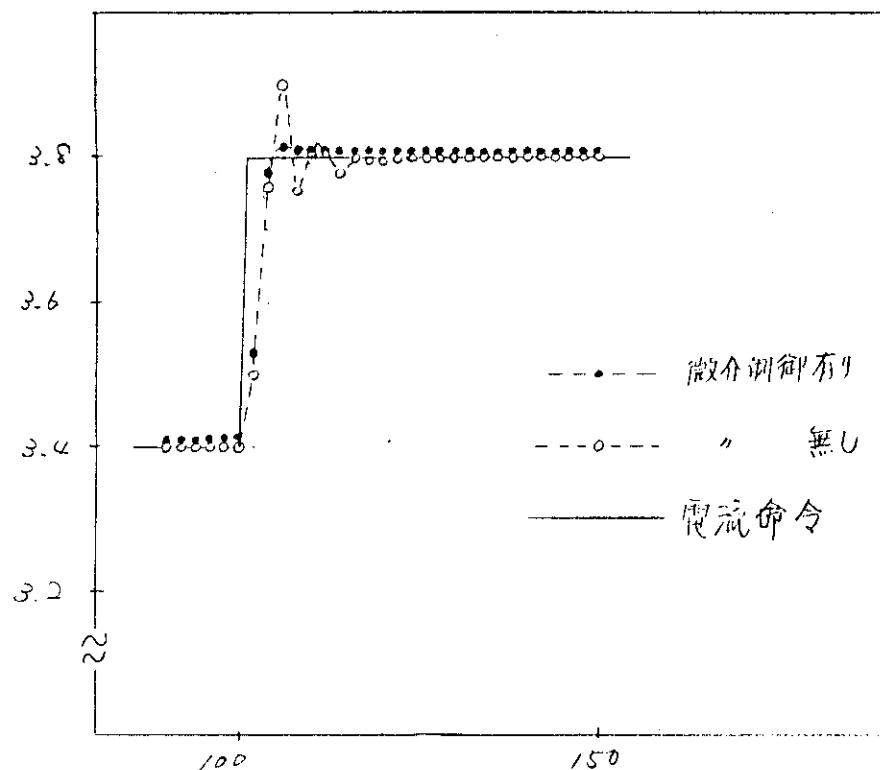
サイリスタ電源名	ゲートパルス発生方式	制御モード	ファイードフォワード回路
O <sub>H</sub>	アナログ方式	ACR / AVR	有
V <sub>UP</sub>	アナログ方式	ACR / AVR	有
V <sub>LOW</sub>	アナログ方式	ACR / AVR	有
S	デジタル計算機方式	ACR / AVR	ソフトウェアにより可能。
H	デジタル計算機方式	ACR / AVR	ソフトウェアにより可能。



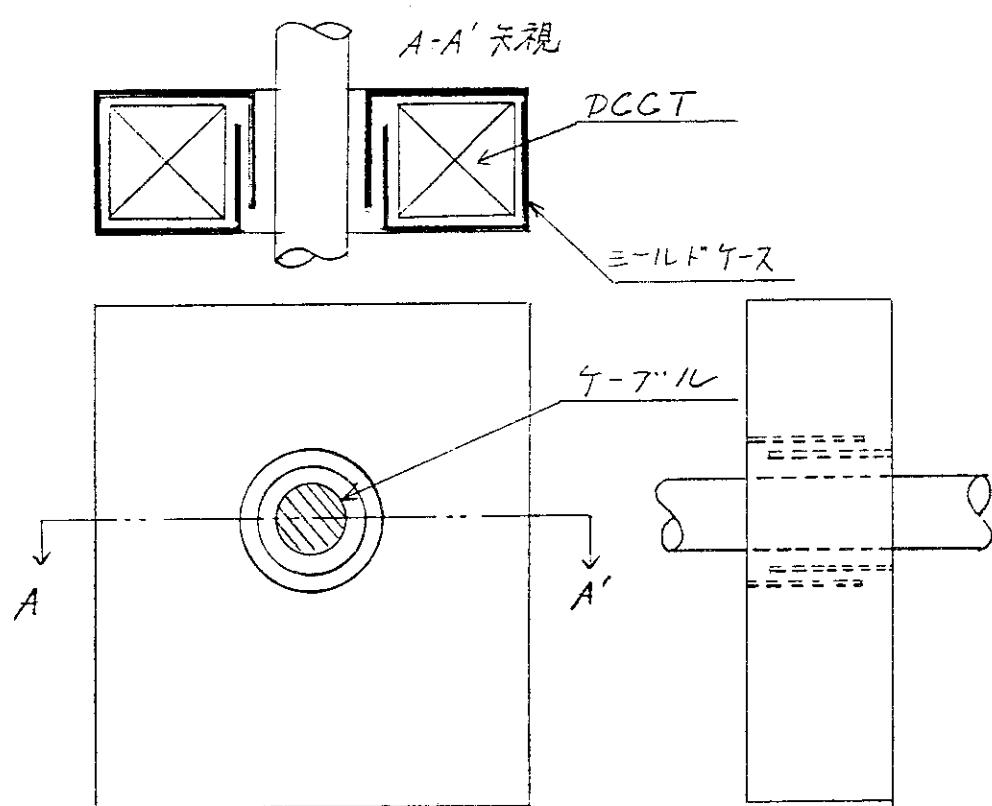
第4.2-4図 サイリスタ制御部ブロック図



第4.2-5図 フィードフォワード



第4.2-6図 微分制御



第4.2-7図 DCCT用シールドケース

## 4.3 プラズマ制御系

### 4.3.1 概要

制御対象となるプラズマ平衡量には、プラズマ電流、プラズマの断面形状、垂直位置、及び、水平位置があり、これらはすべて、ポロイダル磁場コイル電流によって変化させることができる。JFT-2Mでは、ポロイダル磁場コイル系の簡素化、および、ポロイダル磁場コイル中で発生する電力の抵抗損失を少なくするために、プラズマ電流と位置および概略のプラズマ断面形状を相互に分離せず制御するハイブリッド制御を行っている。ここで「概略のプラズマ断面形状」と述べたのは、各制御対象を測定して目標値に一致する様S, OH, Q系コイル電流を制御するいわゆるフィードバック制御を行っていないからであり、あらかじめプログラムされている電流の電流波形または電圧波形を変化させることと、各ポロイダル磁場コイルのタップ接続を変化させることにより、制御を行っている。

精密でかつ高速なプラズマ位置のフィードバック制御を行うためには、トロイダル磁場コイルの内側に置かれているV系コイルを用いるのが有利であり、垂直位置と水平位置をV系コイルで同時にフィードバック制御する「垂直・水平ハイブリッド制御」を行っている。

なおトロイダル磁場コイル等から発生する定常誤差磁場を消去するためにはH系コイルを用いている。

以下に、プラズマ制御系の構成を述べ、プラズマ電流値の制御、プラズマ位置の制御について述べる。

### 4.3.2 プラズマ制御系の構成

本制御系は第4.3-1図に示す様に、磁気的な微分信号を検出する検出部、検出部からの信号をJFT-2M本体そばで受けて積分するプラズマ監視現場盤、プラズマ監視現場盤からの信号を受け制御対象の測定値を求め、目標値との比較を行うことにより各ポロイダル磁場電源への命令信号を演算するプラズマ制御盤、ポロイダル磁場電源、ポロイダル磁場コイル、およびプラズマにより構成される。

本制御系を製作するにあたって、次の2点が重視されている。すなわち

- (i) ICRF 加熱装置、NBI 装置等から発生する電気ノイズ対策
- (ii) フィードバック制御系の応答速度

である。ICRF周波数帯(20~40 MHz)になってくると、直流通じてループを形成していくよりも、ケーブルを長く配線すると浮遊容量が原因で電気的ループを形成してしまい、ノイズの誘発に連がる。したがって本制御系をいくつかのブロックに分割し、ブロック間の信号伝送には、光伝送を用いている。プラズマ監視現場盤とプラズマ制御盤、プラズマ制御盤とポロイダル電源の間でのアナログ信号伝送にはFM変調方式による光アナログ伝送を、またタイミングパルス伝送には、光デジタル伝送を用いている。さらに、検出器シールドとプラズマ監視現場盤を電気的に一体化するとともに、検出器から積分器までの信号伝送にシールド付き平衡型ツイストペア線を用いて積分器に差動入力することにより、ノイズレベル下げている。

またフィードバック制御系の応答速度に関しては、計算時間等による無駄時間がどうしても発生し

やすいデジタル計算機を演算部に用いることをやめ、アナログ計算機を用いていること、およびサイリスタ電源にもデジタル計算機による位相制御を行わずに、アナログ的位相制御を行っていることがあげられる。

以下に各部の説明を行う。

### (1) 検出器

プラズマ電流を測定するにはロゴスキーコイルを用い、位置の検出には、真空容器内に置かれた $B_\theta$  プローブ、差動プローブ、サドルループを用いる。どの検出器もシールドを持った構造となっている。(4.3 磁気的検出器を参照)

### (2) プラズマ監視現場盤

本現場盤は、JFT-2M本体近くに設置され、ローパスフィルター、ゲート積分器、および光アナログ変換用送信器等が収納されている。プラズマ監視現場盤は、シールドボックスの機能も兼ねそなえている。

検出信号には、数 KHz 以上のプラズマの磁場揺動信号も重畠されており、この信号の振幅が大きくなつて線形動作範囲を越えると、ゲート積分器の正常な動作が期待できなくなる。一方、当面制御上必要となる信号は数 KHz 以下であるため、積分器に入れる前にローパスフィルターを通す。第 4.3-2 図には、ローパスフィルターの周波数特性を示す。

また、積分器は差動入力とし、コモンモードノイズのレベルを下げている。JFT-2Mで用いる積分器は、ミラー積分器を改良したものであり、積分時定数の満足すべき条件を以下に求めておく。

ミラー積分器の伝達関数は增幅器開ループゲインを  $\alpha$ 、積分時定数  $T_I$  とするとき

$$G(S) = \frac{\alpha}{1 + (\alpha - 1)T_IS}$$

で与えられ、理想的な積分動作  $1/T_IS$  とは低周波数領域で異なってくる。ここで、放電時間  $t$  の信号の積分値が 1%程度の精度で求められるべきである。入力  $v_{in}$  として

$$v_{in} = v^* \delta(t)$$

なる信号を考えると出力  $v_{out}$  は

$$\begin{aligned} v_{out} &= \frac{v^*}{T_I} e^{-\frac{t}{T_I\alpha}} \\ &\sim \frac{v^*}{T_I} \left( 1 - \frac{t}{T_I\alpha} \right) \end{aligned}$$

となる。ここで  $\delta(t)$  はデルタ関数である。

したがって

$$\frac{t}{T_I\alpha} \leq 10^{-2}$$

より、 $t = 1 \text{ sec}$ 、 $\alpha \sim 10^4$  では

$$T_I \gtrsim 0.01 \text{ sec}$$

で測定する必要がある。

## (3) プラズマ制御盤

本制御盤内部には、プラズマ監視現場盤からの信号を処理して各制御対象の測定値を求めるアナログ計算機、各制御対象の目標値をプログラムするためのプリプロ波形設定装置、測定値と目標値を比較してポロイダル磁場電源に出す命令値をアナログ演算するPID演算回路等が、収納されている。

プリプロ波形設定装置のH/W構成を第4.3-3図に示す。動作の概要は次の通りである。

- (i) キーボードより各系の電流基準パターンの定数（立上り、立下り時定数、目標値など）を設定する。
- (ii) CPUは、プログラムメモリにストアされている各系の電流基準パターン関数式に従って時間きざみ $\Delta T$ ごとの値を予め計算し、データメモリに記憶する。
- (iii) システムの起動と同時に、CPUはデータメモリ中に記憶されている各系の電流基準パターン値を、それぞれ時間 $\Delta T$ ごとに順次読み出し、各データラッチに出力する。
- (iv) 各データラッチに保存された電流基準パターン値はデジタル→アナログ変換され、各系の電流コントローラへ供給される。

波形は1.67 msec毎にサンプリングされ、時刻 $t_i$ とそのときの電流値 $I_i$ の形 $(t_i, I_i)$ 、( $i=1 \sim 256$ )で設定される。又、必要となった波形は、フロッピーディスクに書き込み、永久保存することもできる。第4.3-1表にアナログ出力の仕様を示す。

第4.3-4図は中央処理システムS/Wを示す。

## 4.3.3 プラズマ電流値の制御

第4.3-5図にはプラズマ電流制御系のブロック図を示す。Vコイル系は巻きもどしをつけて使用するためにプラズマ電流との結合は小さく無視でき、Sコイル、OHコイル、Qコイルが関係してくる。このうちどのコイル電流にもプラズマ電流値をフィードバックすることが可能であるがSコイル電流にフィードバックした例が第4.3-5図に示されている。他のコイル系にはプリプロ波形設定装置によってあらかじめ設定された命令波形どおりに電流を流すこととし、フィードバックループを構成しない。したがって、各コイル間の電流比率を変化させることにより、プラズマ断面形状およびプラズマの概略位置を変化させることが可能である。

しかし鉄芯変流器を持つJFT-2Mにとってこのプラズマ電流のフィードバックは次に述べる理由によりさほど重要とは考えられない。Sコイル、OHコイル、Qコイルに流れるアンペアターンを $I_S$ 、 $I_{OH}$ 、 $I_Q$ としプラズマ電流を $I_P$ とするとプラズマ抵抗が最初から零であれば $I_P$ は以下の式でできる。

$$I_P = I_{OH} + I_S + I_Q$$

実際にはプラズマ抵抗が零でないために各コイル電流を一定に保っていても $I_P$ は時間的に減少し、減少分 $\Delta I_P = I_{OH} + I_S + I_Q - I_P$ は増大する。一般に鉄芯が飽和しない状態で運転を行うため、 $\Delta I_P$ は、鉄芯が飽和しない大きさ、すなわち10 kA以下としてよく、 $I_P = 100 \text{ kA} \sim 500 \text{ kA}$ に対して比較的小さな変動であるため、 $I_S$ 、 $I_{OH}$ 、 $I_Q$ を制御しておけば、プラズマ電流のフィードバックをあえて形成する必要はないと考えられる。

#### 4.3.4 プラズマ位置の制御

第4.3-6図には、プラズマ位置制御アナログ演算部のブロック図を示す。JFT-2Mでは、垂直位置と水平位置のハイブリッド制御を計画している。すなわち水平磁場専用のポロイダル磁場コイルを使用することなしに、垂直磁場発生用のポロイダル磁場コイルに流す電流の調整のみで垂直および水平位置を制御するものである。以下に位置検出方法と、垂直水平位置制御法について述べる。

##### (1) プラズマの位置検出法

プラズマの位置制御に用いられる位置検出法は、次の条件を満足する必要がある。

- (i) 正しい位置が求められること。特に位置の真の値と測定値の間に線形な関係があること。
- (ii)  $A (= \beta_p + \frac{\ell_i}{2} - 1)$ , 非円形度  $\kappa$  の変化があってもこれらの影響による誤差が小さいこと。
- (iii) 処理手続きが簡単であること。

(i)の条件はフィードバック制御系の安定性にも大きな関係がある。すなわち真の値と測定値の間に線形関係が成立しないと、制御系の安定領域がせまくなる可能性がある。

(ii)の条件は、非円形、高ベータプラズマを取り扱うこれからの装置の宿命とも言える。

(iii)の条件は、演算をデジタル計算機で実行する場合にも計算時間を短かく必要性から課せられるが、JFT-2Mのようにアナログ演算を行う場合には、不可欠な条件となる。

第4.3-2表にいくつかの位置検出法をあげる。方法(1)は、 $A$ の時間変化が比較的小さなジュール加熱プラズマにしか適用できない。円形プラズマについてのShafranovの平衡解は次式で与えられる。

$$\psi = \frac{\mu_0 I_p R}{2\pi} \left( \ell_n \frac{8R}{\rho} - 2 \right) - \frac{\mu_0 I_p}{4\pi} \left[ \ell_n \frac{\rho}{a} + \left( A + \frac{1}{2} \right) \left( 1 - \frac{a^2}{\rho^2} \right) \right] \rho \cos \omega$$

ここで、 $\psi$ は最外殻磁気面の中心から見たトロイダル座標 ( $\rho, \omega$ ) なる点の磁束関数であり、 $R$ は主半径、 $a$ はプラズマの小半径、 $\mu_0$ は真空の透磁率である。したがって、2点の磁場の表式からプラズマ電流を消去し、 $A$ の値を仮定することにより、プラズマの位置を求めることができる。しかし、高ベータプラズマのように $A$ の値が時間的に変化する場合に正しい位置を与えることができない。そこでさらに測定点を増やし、 $A$ をも消去しておけば、 $A$ の影響を補正できる。これが、方法(2)である。円形プラズマを仮定したShafranovの平衡解に基づいているため、この方法でも、非円形プラズマの制御を行う場合には問題が残る。そこで、JFT-2Mでは方法(3)すなわち、Iso-flux 法を採用している。

第4.3-7図は、Iso-flux法の原理を示したものである。磁束関数の空間的変化を一次関数で近似すると、サドルループとそのそばに置かれた磁気プローブにより、リミター点での磁束関数の内外差を外挿することができる。

$$\Delta\psi_L = \Delta\psi + B_{out} R_{out} x_{Lout} - B_{in} R_{in} x_{Lin} \quad (4.3-1)$$

ここで、 $\Delta\psi$ はサドルループ信号より求まる磁束関数の差、 $B_{out}, B_{in}, R_{out}, R_{in}, x_{Lout}, x_{Lin}$  はそれぞれ内外の磁気プローブ信号、プローブ位置の主半径、サドルループからリミター表面までの距離である。 $\Delta\psi_L$ の値を零とするようにポロイダル磁場コイルの通電電流を制御してやれば、プラズマ最外殻磁気面の中心がリミター間の中心にくるよう制御することになる。またプラズマ

の位置を変動させたい場合には、サドルループからプラズマ表面の目標位置までの距離を  $x_{Lout}$ ,  $x_{Lin}$  として上式を評価してやればよい。

真空容器内には、各サドルループの前面に差動プローブが 2 個ずつ置かれており、 $\phi$  の空間変化を二次関数で近似するところまで精度を向上させることができるようにになっている。ここで、磁気プローブおよびサドルループに要求される精度を求めておく。

式 (3.4-1) より、 $\Delta\phi_L = 0$  のとき

$$x_{Lout} = \frac{-\Delta\phi + B_{in} R_{in} x_{Lin}}{B_{out} R_{out}}$$

である。したがって  $\Delta\phi$  および  $B_{in}$ ,  $B_{out}$  の評価に誤差  $\delta(\Delta\phi)$ ,  $\delta B_{in}$ ,  $\delta B_{out}$  が含まれているとすると  $x_{Lout}$  の評価誤差  $\delta x_{out}$  は、

$$\delta x_{out} = -\frac{\delta(\Delta\phi)}{B_{out} R_{out}} + \frac{R_{in} x_{in}}{R_{out}} \frac{\delta B_{in}}{B_{out}} - x_{Lout} \frac{\delta B_{out}}{B_{out}}$$

となる。 $B_{out} \sim B_{in} \sim \frac{\mu_0 I_p}{2\pi a}$  より  $\delta x_{out}/a$  を  $10^{-2}$  程度におさえるためには

$$\left| \frac{\delta x_{out}}{a} \right| < \left| \frac{2\pi \delta(\Delta\phi)}{\mu_0 I_p} \right| + \frac{R_{in} x_{in}}{R_{out} a} \left| \frac{\delta B_{in}}{B_{in}} \right| + \frac{x_{Lout}}{a} \left| \frac{\delta B_{out}}{B_{out}} \right| < 10^{-2}$$

が要求され、

$$\frac{\delta B_{out}}{B_{out}} < 1 \times 10^{-2}, \quad \frac{\delta B_{in}}{B_{in}} < 1 \times 10^{-2}$$

$$\delta(\Delta\phi) < 1 \times 10^{-5} I_p$$

としておけば充分である。これらの値はサドルループ、差動プローブ設計の指針となる。

## (2) 垂直水平ハイブリッド制御

第 4.3-8 図には、垂直水平ハイブリッド制御の原理を示す。電源  $V_{up}$  をポロイダルコイル②および④と接続し、電源  $V_{LOW}$  をポロイダルコイル①および③と接続する。 $V_{up}$  電源電流よりプラズマに及ぼす力を  $F_1$ ,  $V_{LOW}$  電源電流からは  $F_2$ , 合成力を  $F_3$  とすると両電流の差分で  $F_3$  には垂直方向の成分が発生し、電流値の和で水平方向の成分が決定される。したがって両電源電流値をうまく制御することにより、垂直、水平の位置を同時に制御することが可能となる。このことを実現するために、水平変位を PID 演算した結果は両電源に加算し、垂直変位を PID 演算した結果は、 $V_{up}$  電源には加算、 $V_{LOW}$  電源には (-1) を乗じて加算する。

この制御法を採用することは、(1)位置制御用コイルの数を減少できること、(2)単一極性電源のみで位置制御電源を構成することができ、コスト的に有理であること、の 2 つの長所がある。

### 4.3.5 垂直位置不安定性に関する検討

プラズマの特性改善のために、プラズマ断面形状を非円形にすることが考えられており、JFT-2M でも、縦長橍円プラズマ、D 形プラズマ、ダイバータ配位のプラズマなどでの実験が計画されている。このとき、磁場の曲率を指す指標  $n_{index}$  ( $= -\frac{B_z}{r} \frac{\partial B_z}{\partial r}$  :  $B_z$  は外部から加えら

れた垂直磁場,  $r$  は対称軸からの距離) は負の値となり, プラズマは垂直方向の位置的に不安定な配位となる。したがって, 何らかの方法で, プラズマの位置, 不安定性を安定してやる必要がある。JFT-2Mでは, 真空容器が厚肉であるために, このシェル効果とフィードバック制御により, 安定化を行っている。ここでは, 真空容器のシェル効果の特性, フィードバック制御系の時間遅れの影響, サイリスタ電源の特性の影響について検討を行う。

検討を行うに当って, 次のことと仮定する。

- プラズマの形状, およびプラズマ中の電流分布は不変であり, プラズマは剛体として上下に動く。
- プラズマおよびコイル配置は上下対称とする。
- 真空容器(シェル)はトロイダル方向電流に対する絶縁部を一ヶ所持つ。
- プラズマの変位により真空容器に誘導される電流は, 殆どトロイダル方向に流れ, 真空容器を一周コイルの集合体として取り扱う。ただし, この一周コイルの集合は両端で並列に接続されている。
- プラズマの変位は充分に小さく, 平衡値に対する摂動量と考え, 基礎方程式を線型化する。
- プラズマ電流, コイル電流については集中定数化して考える。
- 空芯結合の仮定をする。

これらの仮定に従って, プラズマ柱の運動方程式, コイル電流の相互結合の式を解けば, 成長率  $\gamma_G$  および変位の時間的変化を求めることができる。

#### (1) 真空容器のシェル効果

シェル無しトカマクにおいて,  $n$ -インデックスを負にすると,  $10^{-6}$  sec程度の成長率で垂直位置不安定性が発生し, プラズマが破壊されてしまう。これを安定化するためにフィードバック制御のみにたよろうとすると,  $10^{-6}$  sec以下で応答できる電源が必要となり, 現実的でない。実際には真空容器などに誘導電流が流れ, 不安定性の成長率はおさえられる。JFT-2Mでは真空容器(ステンレス製)の厚みが 25 mmと厚いために, この効果が期待できる。一方, D-IIIの様に, 真空容器が非常に薄いため真空容器外においてポロイダル磁場コイルにシェル効果を持たせている例もある。JFT-2Mの真空容器についてこのようなシェル効果による不安定性成長率の低減がどの程度期待できるのかを調べてみる。真空容器を第 4.3-9 図に示すような上半分で 26 個の SUS 製シェルコイルで近似する。第 4.3-10 図は成長率  $\gamma_G$  の  $n$ -インデックスによる変化を真空容器の導電率を変えて計算した結果である。理想導体シェル中では, 真空容器の位置できまる  $n$ -インデックス  $n_s$  よりも  $n$ -インデックスを下げるはじめて不安定となる。シェルが抵抗を持つると, シェルによる安定化は不完全となり, 不安定となるが, 成長率を小さな値におさえることはできる。従って, 有効なシェル効果が期待できるのは,  $n > n_s$  の場合であり, このことからシェル効果を持たせる部分をどの程度プラズマに近づけねばならないかが決まる。第 4.3-11 図は成長率と  $n$ -インデックスの関係をいくつかのプラズマ密度について示したものである。 $n < n_s$  の領域で, プラズマ密度(プラズマの質量)を大きくすることにより, 成長率が下がることがわかるが,  $n > n_s$  の領域では, 大きな影響をうけていない。これは, 成長率の大きいところでは, プラズマの慣性( $M dv/dt$ )が電磁力に比べて無視できないのに対し, 成長率の小さいところでは, 慣性による力が小さく, 電磁力のみでプラズマの運動がきまっていることによ

る。

次に示す簡単なモデルにより導出される成長率と、第4.3-10図および第4.3-11図に示す成長率とを比較してみると興味深い。<sup>(6)</sup>

$$\tau_0^2 r_G^2 = - \left[ n_{ind} - n_s \frac{\tau_s r_G}{\tau_s r_G + 1} \right] \quad (4.3-2)$$

ここで、 $\tau_0$ は、プラズマの質量とポロイダル磁場により定まる時定数で、

$$\tau_0^2 = MR / I_{PO} B_{Z0}$$

であり、 $\tau_s$ は真空容器の水平磁場成分に対するしみこみの時定数である。 $\tau_s = 7.71 \text{ msec}$ 、 $n_s = -2.73$ の場合について(4.3-2)式により求まる $r_G$ を数値計算による $r_G$ と比較すると、1割以内の誤差で一致する。

## (2) フィードバック制御系の解析

すでに述べてきたように、真空容器等のシェル効果により、垂直位置不安定性成長率を下げることができる。しかし、真空容器の導電率が無限大でない以上、安定化するまでにはいたらず、成長率が小さいとは言え、不安定性は残る。放電時間が充分に短ければ、これでも問題ないが、そうでない場合には不安定性をおさえるために、外部から制御磁場を加えるフィードバック制御が必要となる。

JFT-2Mでは、フィードバック制御用電源として位相制御サイリスタ電源を用いる。線型電源を利用する場合には、系が線型であるために、線型理論による系の解析を行うことができるが、サイリスタ電源の場合には線型理論による結果が適用可能であるかどうかは疑問となる。6相整流器による場合、このサイリスタ電源の近似として、1.67 msecの遅れ $\tau_D$ をもつ線型電源を使うことがよく行われている。そこで、第4.3-16図に示す外乱を考え時間遅れのない線型電源( $\tau_D = 0 \text{ msec}$ )、時間遅れのある線型電源( $\tau_D = 1.67 \text{ msec}$ )、サイリスタ制御電源の3種の電源について、比例・微分制御の場合の変位の時間変化を比較したものが第4.3-12図に示してある。ここでは制御コイルとしてQ-1コイルを用い、外部抵抗として $10 \text{ m}\Omega$ が入っているものとした。また、サイリスタ制御電源の計算ではサイリスタの点弧・転流が正しくシミュレートできるように考慮した。この結果を見る限り、JFT-2Mにおいてサイリスタ制御電源を近似する場合に $\tau_D = 1.67 \text{ msec}$ とするよりも、 $\tau_D = 0 \text{ msec}$ の遅れのない線型回路を採用する方が適当であると言える。

線型電源の場合には、制御ゲインを決定すれば、系は定まってしまうが、サイリスタ制御電源の場合には、制御ゲインの他に、トランス二次側電圧を決定しなければ、系が決定されない。また、外乱の大きさによっても系の応答が変化していく可能性がある。外乱の特性値を $\tilde{e}$ 、出力定格電圧を $V_0$ とすると、 $\tilde{e}/V_0$ を一定にしておけば、外乱と変位の間には、線形関係が成立する。第4.3-13図には一定の外乱に対して同一制御ゲインで、 $V_0$ を変化させた場合の変位の時間変化を示したものである。 $V_0$ を小さくすると、外乱に対して、充分な制御電圧が得られないために、系は不安定になる(第4.3-13図(a))。一方、 $V_0$ が大きい場合には、外乱よりもむしろサイリスタ電源の鋸歯状の電圧変動に同期した変位が大きくなってくる(第4.3-13図(e)(f))。 $V_0/\tilde{e} = 2 \times 10^5$ から $V_0/\tilde{e} = 10^6$ の間では、全体としての波形の特徴はそれほど変化しておらず、変位

が  $V_0$  に対して敏感に左右されないことがわかる。すなわち、 $2 \times 10^5 < V_0 / \tilde{e} < 10^6$  にとっておけば、制御ゲインのみではほぼ系の特性が決定されることになる。従って、想定される外乱に対して、上不等式を満足するように  $V_0$  が決定されることが望ましい。また、外乱の無い場合に  $V_0$  で決まる 600 Hz の変位が許容できる値であるように  $V_0$  を決定しておくべきである。

第 4.3-14 図、第 4.3-15 図は、線型電源の場合 ( $\tau_D = 0$  msec) に成長率の計算より求めた安定領域を、比例ゲイン -  $n$  インデクス平面にて示したものである。第 4.3-14 図は比例制御の場合であり、第 4.3-15 図は比例 - 微分制御の場合 (微分ゲイン  $G_D = 5 \times 10^{-5}$ ) である。同図には、遅れ時間 1.67 ms の線型電源について変位の時間変化より求めた安定限界も示す。また、サイリスタ制御電源の場合の変位の時間変化より安定であったもの (○) と不安定であったもの (●) を示す。これらの結果からも JFT-2 Mにおいては回路設計に  $\tau_D = 0$  msec の線型電源を用いて良いことがわかる。

また、第 4.3-14 図と第 4.3-15 図の比較をすると、微分制御を導入することにより制御可能な  $n$  インデクスの範囲を大幅に広げることができ、 $n$  インデクスが -2 程度までは制御可能であることがわかる。積分項を導入しない比例 - 微分制御では定常誤差を零にすることはできないが、想定される外乱について定常誤差は充分に小さいと言えるので積分制御の導入をあえて行う必要はないようと思われる。むしろ定常誤差を速く零とすべく積分ゲインを大きくすると、応答特性をかえって損うことすらあるので注意が必要である。

### (3) まとめおよび考察

JFT-2 Mについて、真空容器のシェル効果およびフィードバック制御系の解析を行うことにより、次の事を得た。

非円形断面プラズマを長時間制御するには、真空容器やその他のコイルによって生ずるシェル効果を利用する必要がある。このシェル効果はシェルの位置によって定まる  $n$ -インデクス  $n_s$  よりも大きな  $n$  インデクス領域にて期待でき、この領域では、プラズマの質量による成長率の変化は小さい。シェルの導電率を大きくとることによって、 $n_s$  の近くまで、制御可能となる。

シェル効果のない系においてサイリスタ制御電源によるフィードバック制御のみを行う場合、12 相整流器程度の応答速度では明らかに、 $n$  インデクスが -1 程度のプラズマを制御することは不可能であり、サイリスタ制御電源を理想線形電源で近似することはできない。本論文で、JFT-2 M の場合に、サイリスタ制御電源を遅れなしの理想線形電源で近似できることがわかったが、これは、真空容器のシェル効果のために成長率  $\gamma_G$  が小さな値におさえられていたためである。どの程度のシェル効果から線型近似が成立するのかは残された検討事項である。

サイリスタ制御電源において注意しておかねばならないのは、トランス 2 次側電圧であり、取り得る値に上限下限がある。トランス 2 次側電圧がこの範囲に入っておれば、系の最適化などは線型理論の範囲で行っておけばよい。また  $n$  インデクスが -2 程度のプラズマを JFT-2 M にて制御することはできそうである。

第4.3-1表 アナログ出力

## アナログ出力

チャネル数 10Ch

$$(I_{po}, I_{OH}, I_{so}, I_{v10}, I_{v20})$$

$$(I_{qo}, I_{HO}, I_{voff}, R_o, ヨビ)$$

データ数 256/ch

データビット 8 bit

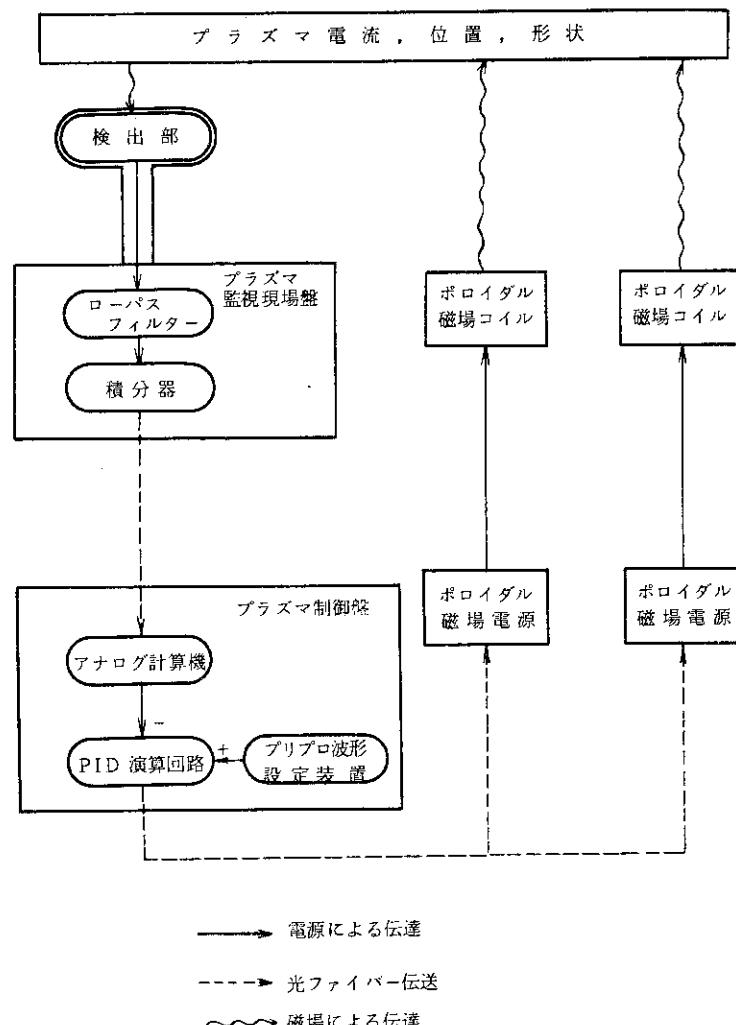
出力電圧 ±10 V

最大サンプリング速度 1.67 ms

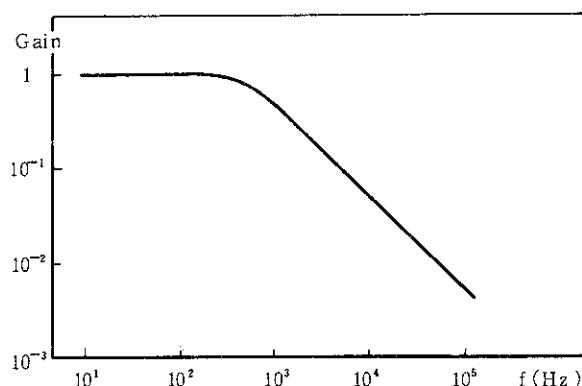
(1.67, 3.33, 5.00 ms に切換可能)

第4.3-2表 各種位置検出法

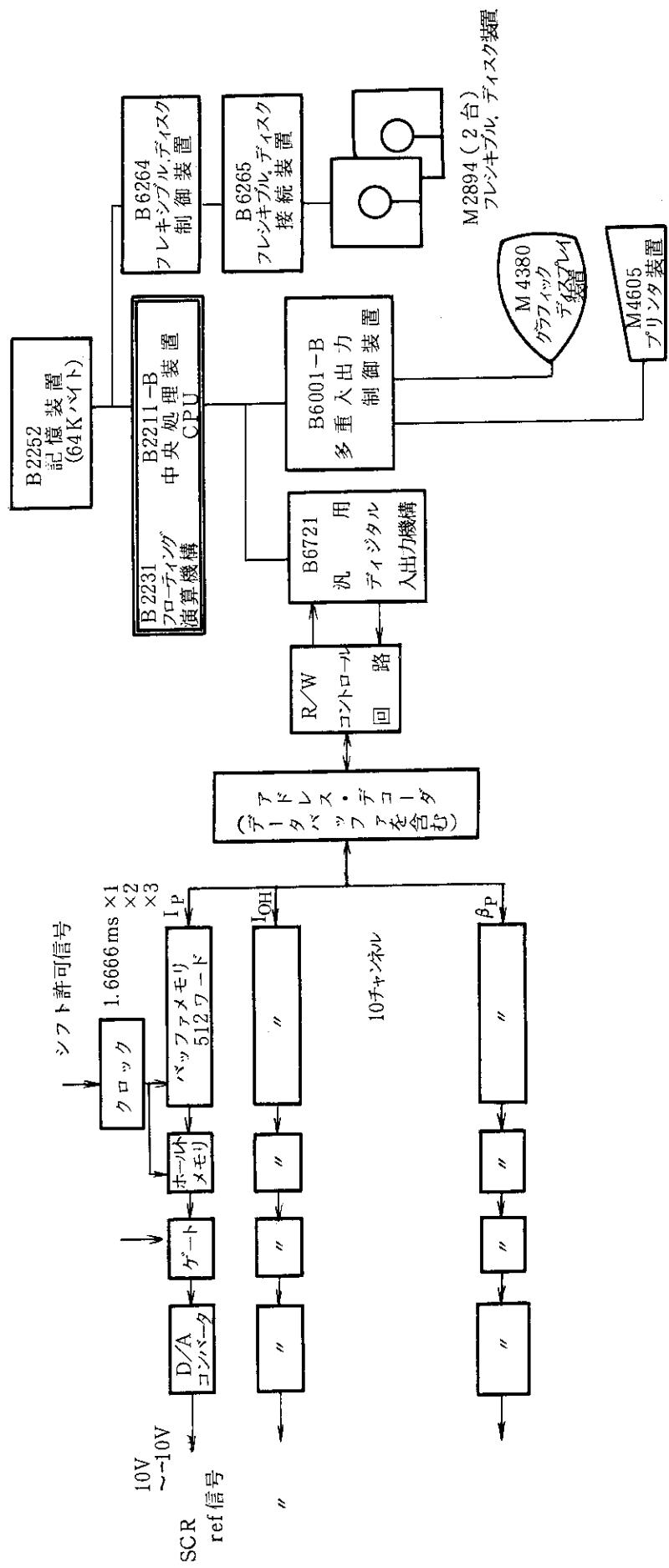
測定法	検出器	特徴
(1) $B_\theta$ 法	$B_\theta$ (in) $B_\theta$ (out)	Shafranovの解を仮定 円形, $A + \frac{1}{2}$ , $a$ を仮定
(2) $B_\theta, B_\rho$ 法	$B_\theta$ (in) $B_\theta$ (out) $B_\rho, I_p$	Shafranovの解を仮定 円形, $a$ を仮定
(3) Iso-flux法	$\Delta\psi$ $B_\theta$ (in), $B_\theta$ (out)	非円形にも適用可



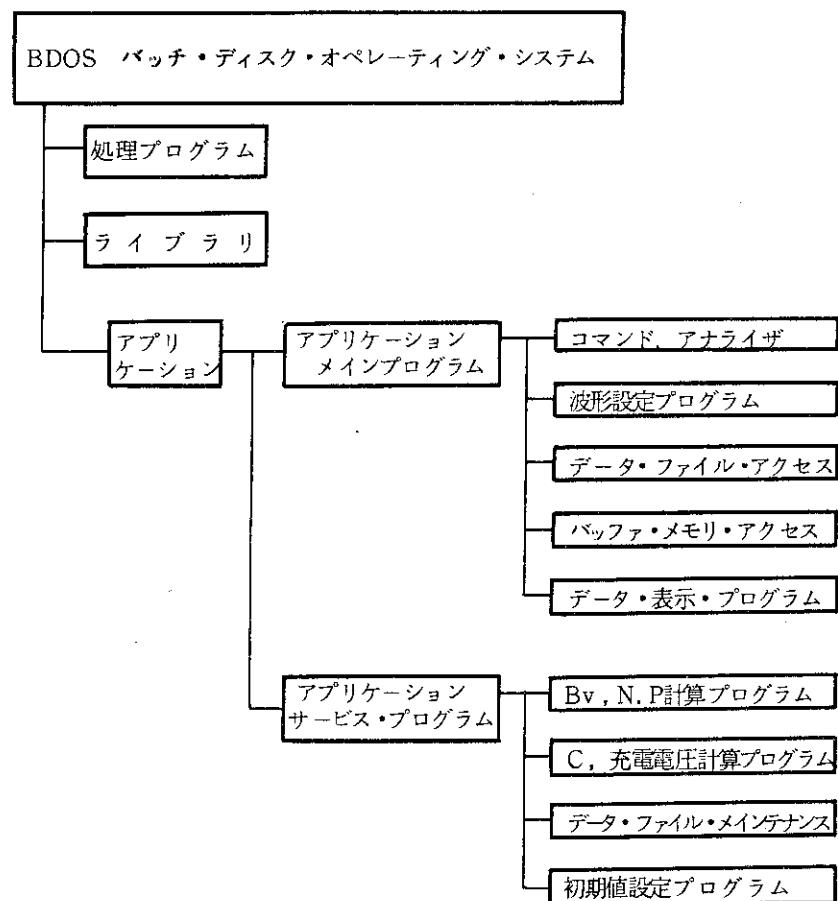
第4.3-1図 プラズマ制御系の構成



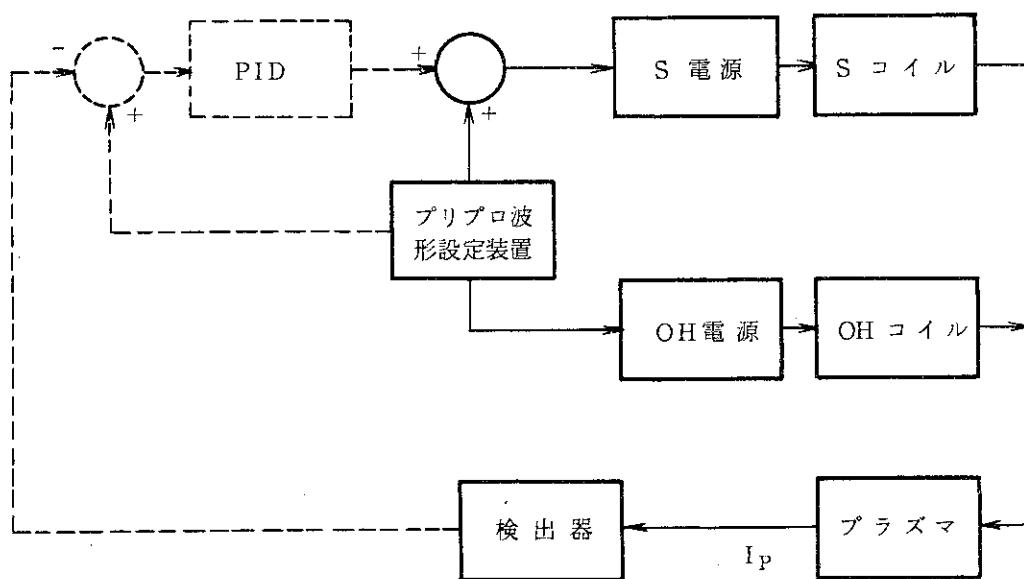
第4.3-2図 ローパスフィルターの周波数特性



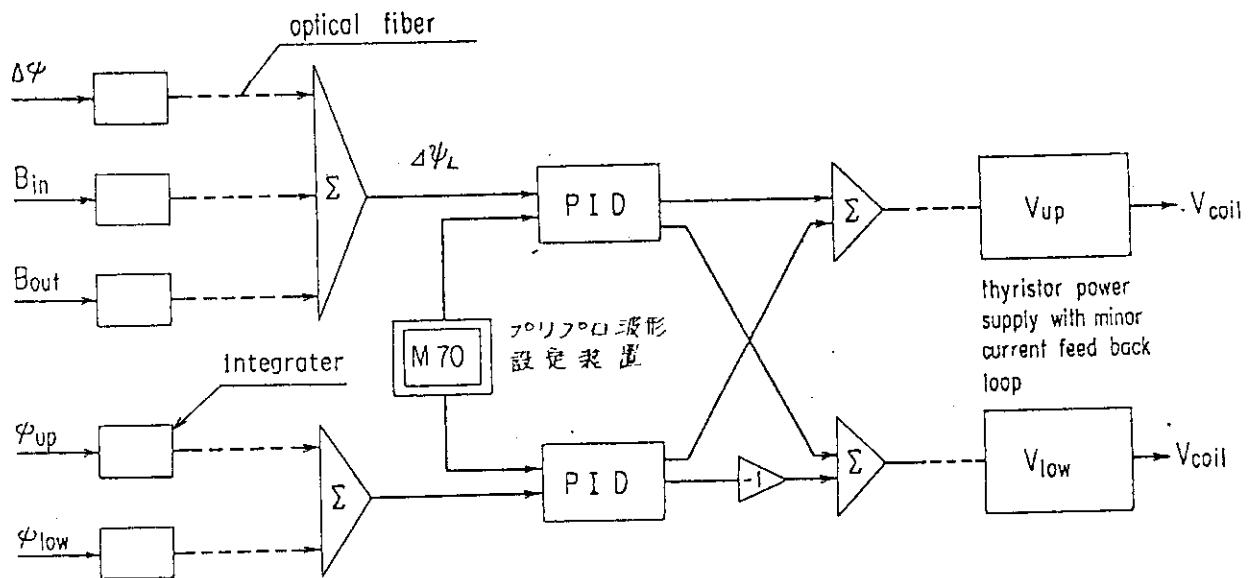
第4.3-3図 プリプロ H/W システム



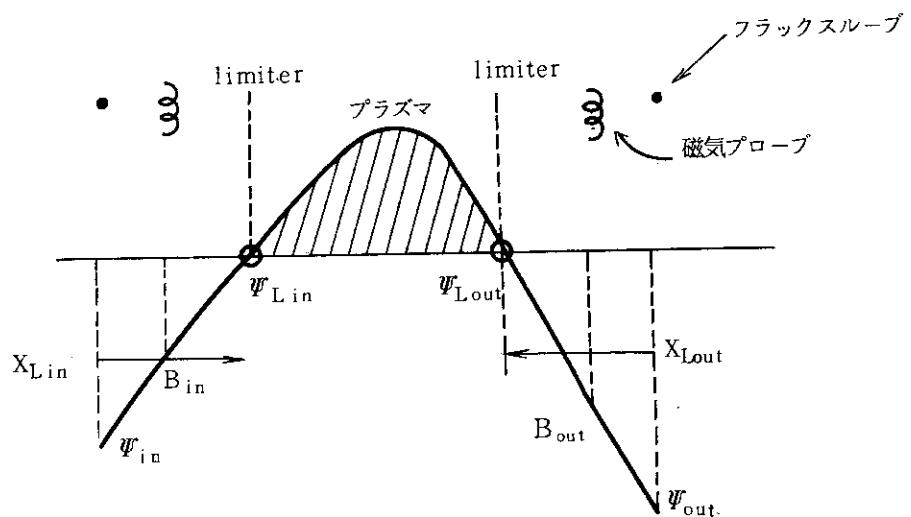
第4.3-4図 ソフトウェアシステム



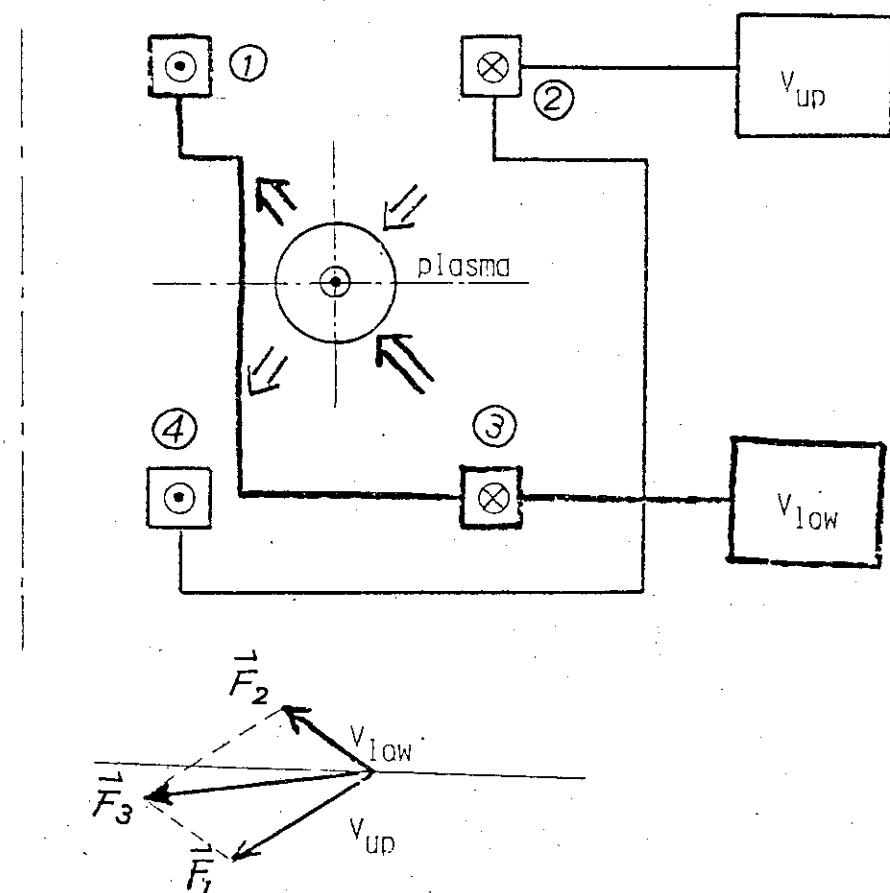
第4.3-5図 プラズマ電流制御系



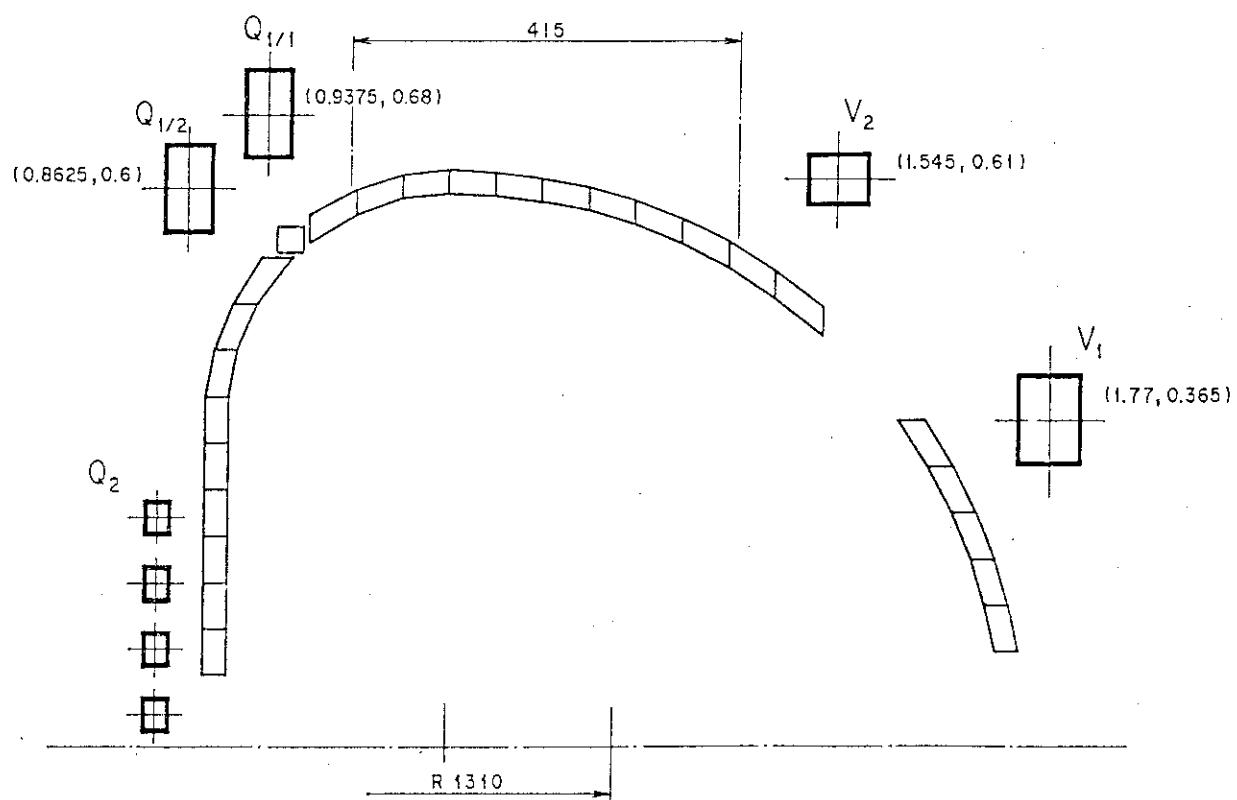
第4.3-6図 Diagram of Feedback control



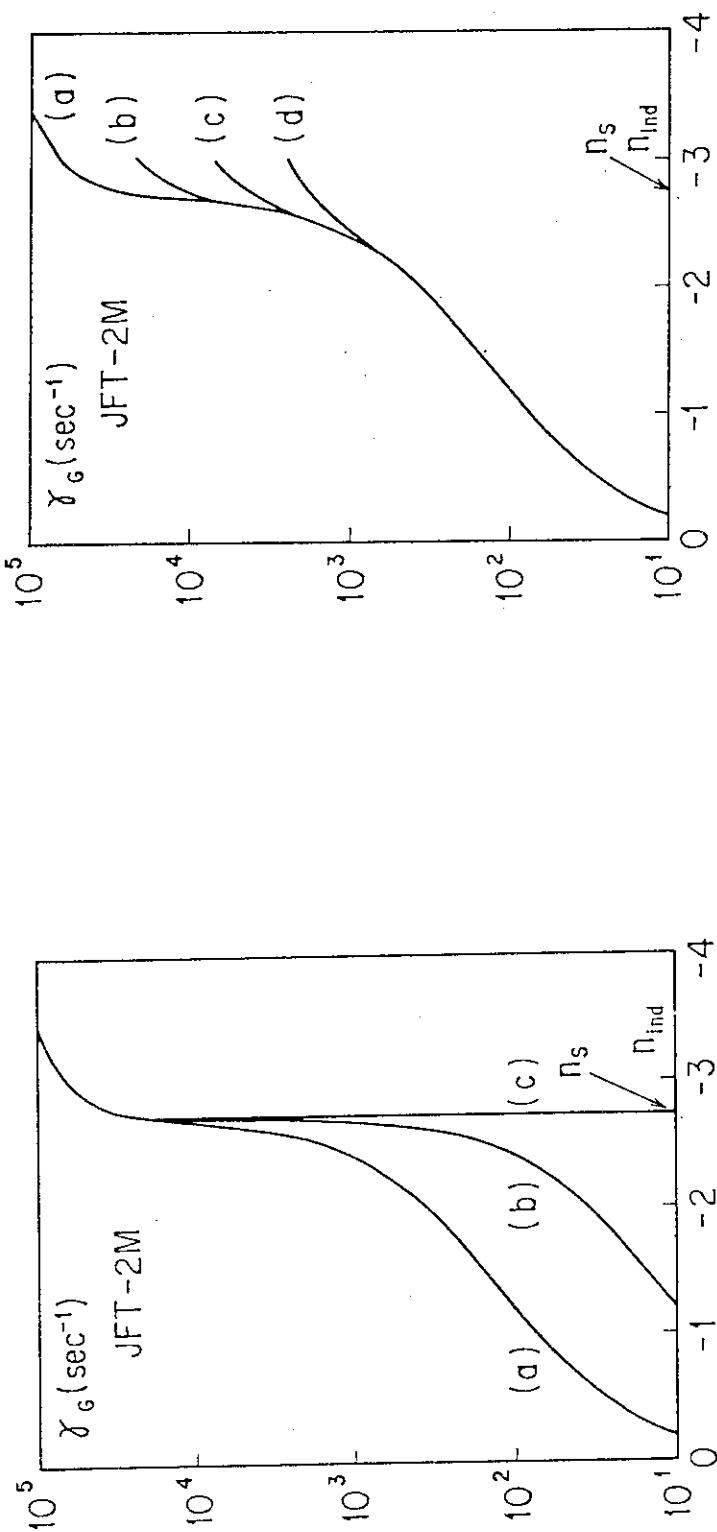
第4.3-7図 ISO-Flux法の原理



第4.3-8図 垂直水平ハイブリット制御の原理



第4.3-9図 真空容器モデルとポロイダル磁場コイル

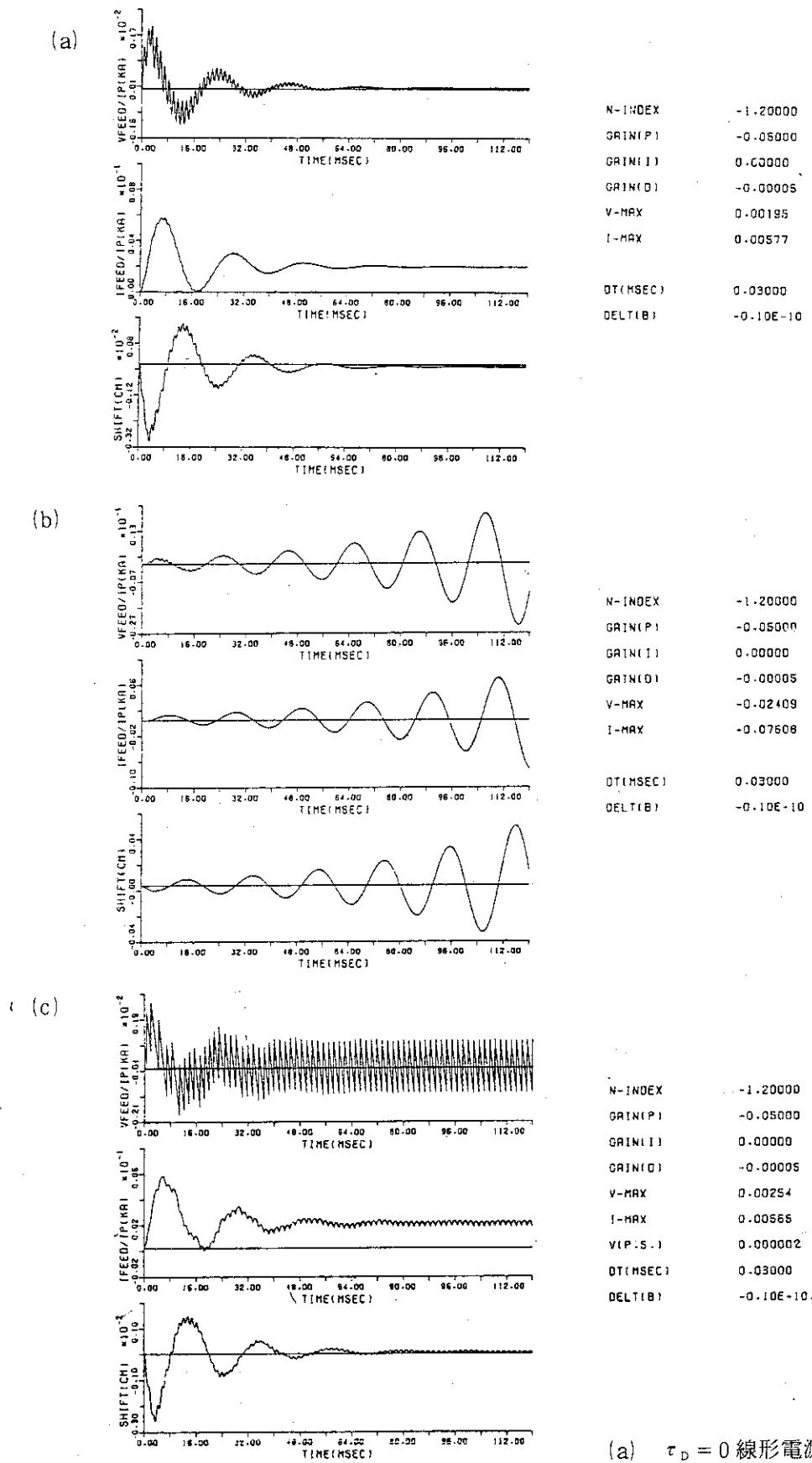


- D プラズマ  
(a)  $n_e = 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$   
(b)  $n_e = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$   
(c)  $n_e = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$   
(d)  $n_e = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
- (a)  $\sigma = 1.4 \times 10^6 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$  (ステンレス鋼)  
(b)  $\sigma = 1.4 \times 10^7 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$   
(c)  $\sigma = 0$  (理想導体)

第4.3-10図 シェル効果の導電率( $\sigma$ )による変化第4.3-11図 シェル効果のプラズマ密度( $n_e$ )による変化

D プラズマ

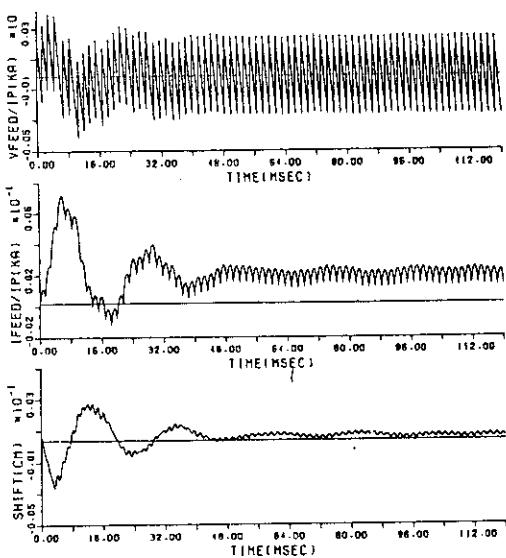
- (a)  $n_e = 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$   
(b)  $n_e = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$   
(c)  $n_e = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$   
(d)  $n_e = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$



第4.3-12図 各種電源の比較

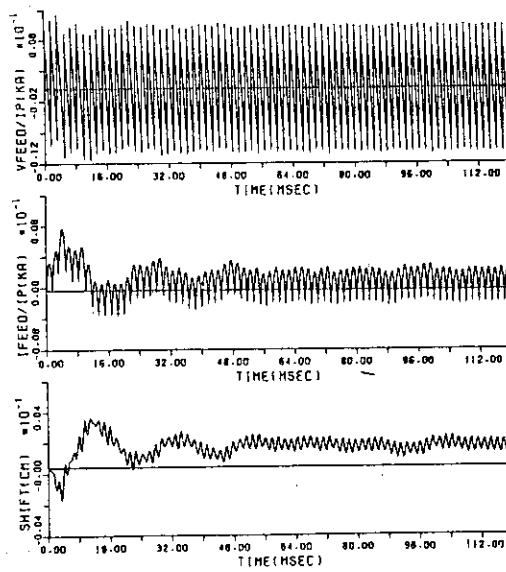
- (a)  $\tau_D = 0$  線形電源
- (b)  $\tau_D = 1.67$  ms 線形電源
- (c) サイリスタ電源

(d)



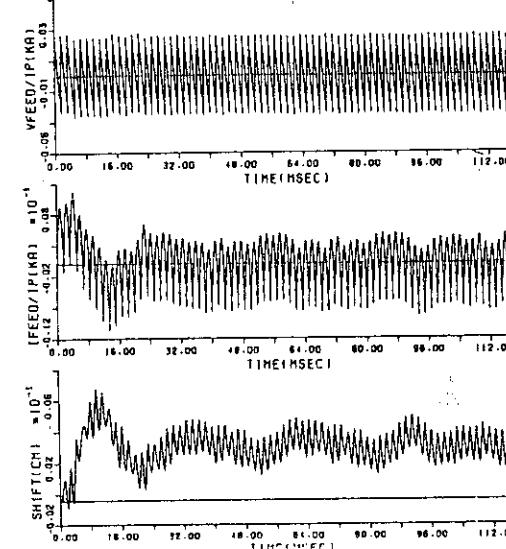
N-INDEX	-1.20000
GRIN(P)	-0.05000
GRIN(I)	0.00000
GRIN(D)	-0.00005
V-MAX	0.00419
I-MAX	0.00697
DT(MSEC)	0.03000

(e)



N-INDEX	-1.20000
GRIN(P)	-0.05000
GRIN(I)	0.00000
GRIN(D)	-0.00005
V-MAX	0.01220
I-MAX	0.00809
DT(MSEC)	0.03000

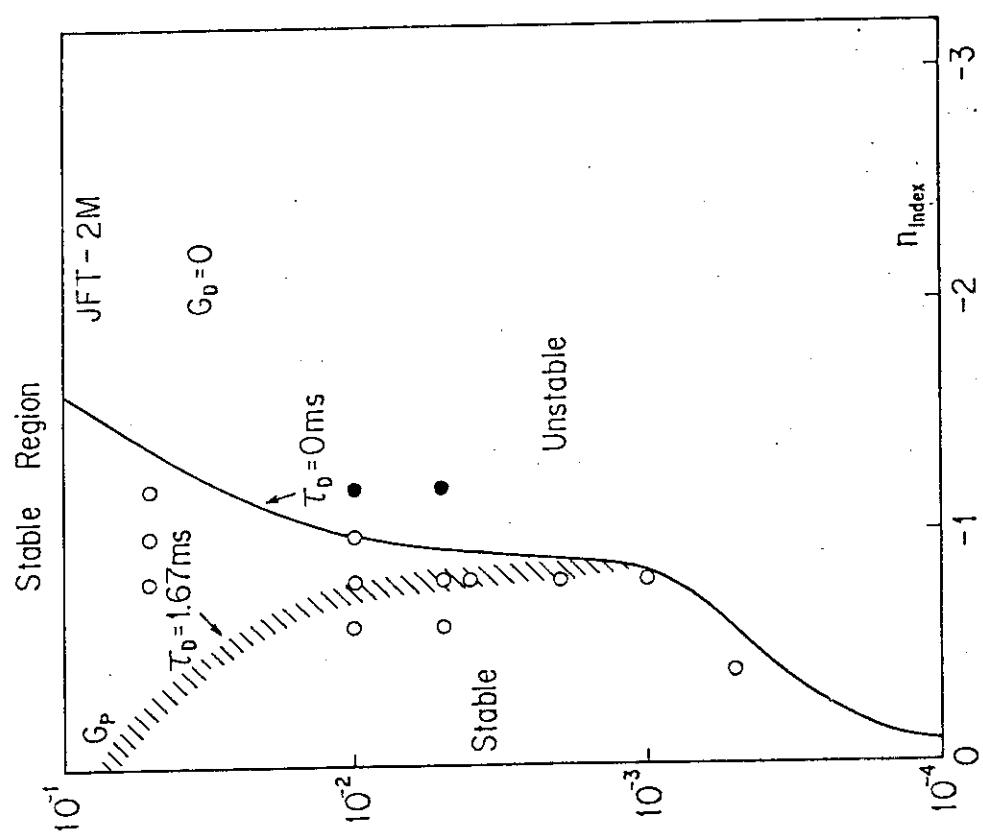
(f)



N-INDEX	-1.20000
GRIN(P)	-0.05000
GRIN(I)	0.00000
GRIN(D)	-0.00005
V-MAX	-0.02709
I-MAX	0.01153
DT(MSEC)	0.03000

- (a)  $V_o/\sqrt{\epsilon} = 1 \times 10^5$   
 (b) " " =  $2 \times 10^5$   
 (c) " " =  $4 \times 10^5$   
 (d) " " =  $1 \times 10^6$   
 (e) " " =  $4 \times 10^6$   
 (f) " " =  $1 \times 10^7$
- $V_o$  は定格電圧

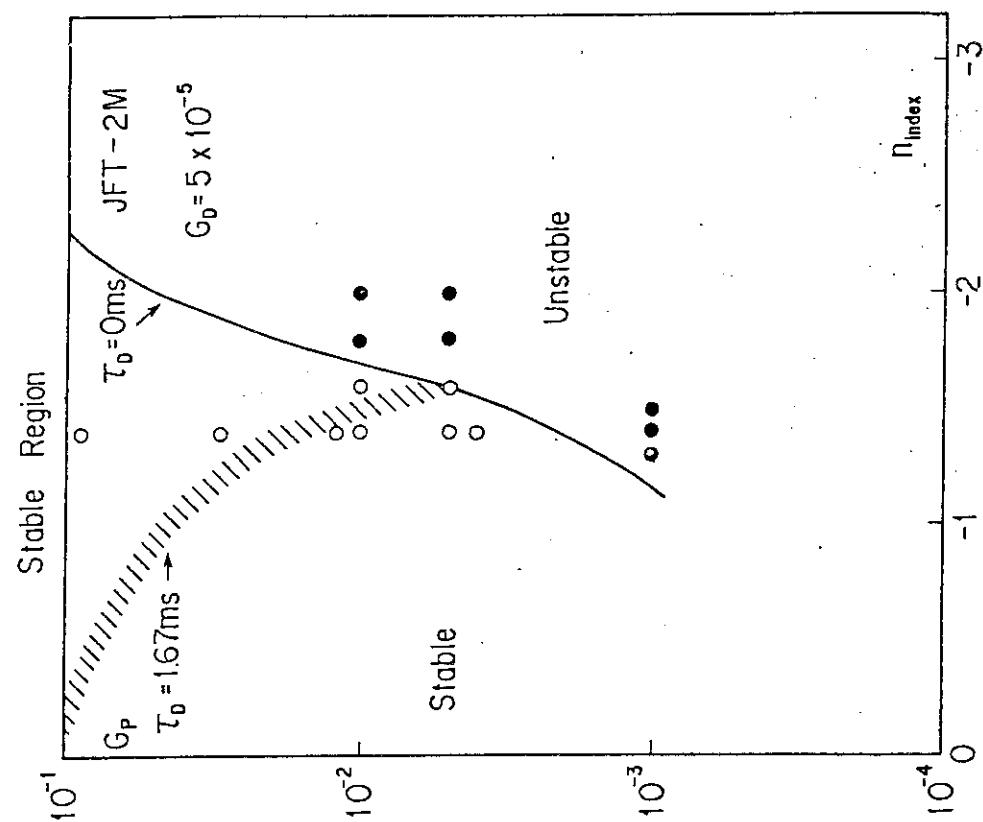
第4.3-13図 電源変圧器電圧と変位の関係



第4.3-14図 P制御の安定領域

- サイリスタ電源 (不安定)
- " " (安定)

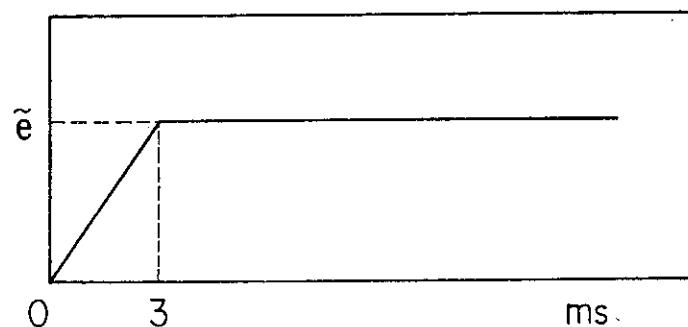
—— 遅れのない線形電源  
 /// 遅れ (1.67 ms) のある  
 線形電源



第4.3-15図 PD制御の安定領域

- サイリスタ電源 (不安定)
- " " (安定)

—— 遅れのない線形電源  
 /// 遅れ (1.67 ms) のある  
 線形電源



第4.3-16図 外乱波形  
~eの値はプラズマ電流で  
規格化したものである。

## 5. 運転制御設備

### 5.1 概要

JFT-2Mを構成している設備機器を運転指令、放電モード切換等により統括的に、しかし円滑に管理し相互間の協調を計ると共に、全体の運転状態を監視し安全維持を計るための設備である。

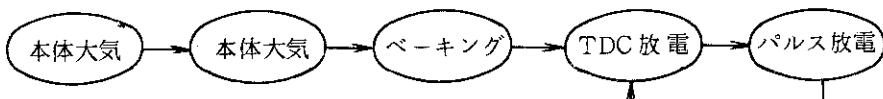
また、運転に関する各種データの収集、表示、記録を行う。

全体を統括管理する盤は、主制御盤、モニタ盤Ⅰ、モニタ盤Ⅱ、補助リレー盤の各盤より構成される。

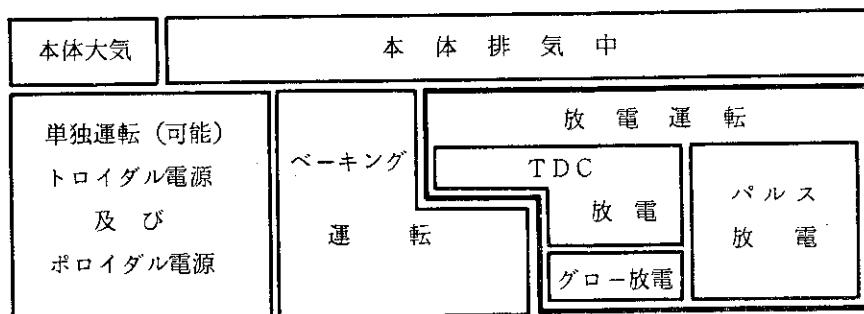
ここでは運転制御系を機能別に記載したので、上記盤以外のパロイダル電源、補機電源を運転し監視しているパロイダル電源盤や、放送設備、運転状態表示器、パイライト等の諸設備についても記載した。

### 5.2 運転指令

核融合装置の運転状況の概略の流れは、どこでも大体第5.2-1図のようになる。これをJFT-2Mの実際の運転の状態に近づけて書くと第5.2-2図の様になり、ひとつの運転モード切替で運転を指令し、運転状態をつかむのは難しいので、JFT-2Mにおいては、放電運転モードのみ運転モード切替スイッチを設け、運転の指令は設備毎に必要な運転指令を出すようにした。そして本体大気、本体排気中、ベーキング中は別途運転表示を行った。



第5.2-1図 核融合装置の運転状況の流れ



第5.2-2図 JFT-2Mの運転の流れ

ここでは設備毎に行う運転指令についてのべ、放電運転については第5，3項、運転表示については、第5，5項にてのべる。

(1) 運転指令により運転を行う設備

- ① 冷却系
- ② 真空排気系
- ③ ガス導入系
- ④ ベーキング設備
- ⑤ トロイダル電源
- ⑥ OH, S系コンデンサ電源
- ⑦ S系、サイリスタ電源
- ⑧ OH, Q系サイリスタ電源
- ⑨ U, H系サイリスタ電源
- ⑩ バイアス電源

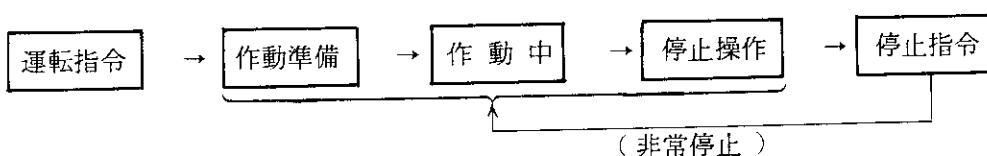
(2) 運転指令によらないで運転出来る設備、機器

本来は運転指令により統括的に管理した方が良いが既設設備であったり、設備が少なく運転状態が監視出来るものである。

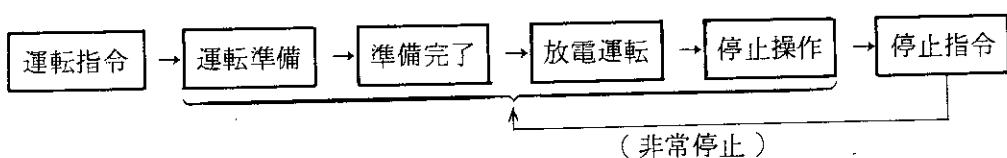
- ① 補機電源（配電設備も含む）
- ② TDC電源
- ③ 予備電離
- ④ Ti, 蒸着装置
- ⑤ グロー電源

(3) 運転指令の流れ

- ① 主に常時継続して運転する設備で、冷却系、真空排気系、ガス導入系、及びベーキング設備などがこれに当り、運転状態を“作動中”で表示した。



- ② 放電をつけるために運転する設備で、トロイダル電源、ポロイダル電源がこれに当り、運転状態を“準備完了”で表示した。



- ③ 運転指令、停止指令は運転員の判断にて行う。

(2) 各運転状態における設備、機器の可、不可を第5.2-1表

第5.2-1表 運転モードと諸設備の運転状態

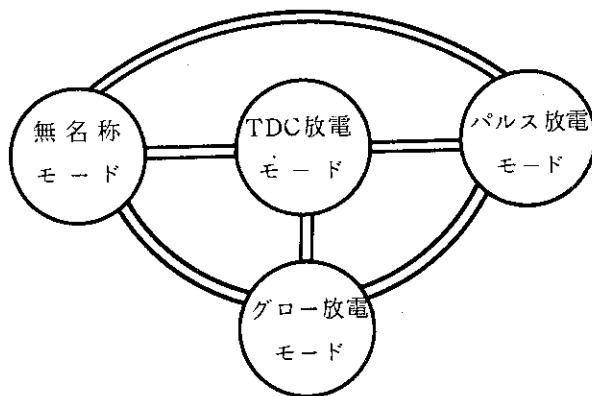
No.	備考	運転モード	無名モード			T D C 放電モード	グロー- 放電モード	パルス 放電モード
			ベーキング運転	排気運転	DC 放電モード			
1	発電設備		○	○	○	○	○	○
	(1) A系系統		○	○	○	○	○	○
	(2) B系系統		○	○	○	○	○	○
	(3) C系系統		○	○	○	○	○	○
	(4) D系系統 (将来)		○	○	○	○	○	○
2	冷却系		○	○	○	○	○	×
	(1) MG用冷却系		○	○	○	○	○	○
	(2) Bt.コイル用冷却系		○	○	○	○	○	○
3	真空排氣系		○	○	○	○	○	○
4	ベーキング電源	×	○	×	○	○	×	○
5	ガス導入系	○	○	○	○	○	○	○
6	トロイダル電源(MG)	○	×	○	○	○	○	○
7	ポロイダル電源		○	○	○	○	○	○
	(1) コンデンサ電源		×	○	○	○	○	○
	(2) SCR電源		×	○	○	○	○	○
8	バイアス電源	○	×	○	○	○	○	○
9	T D C電源	○	×	○	○	○	×	×
10	(1) インシュレーティング装置	○	×	○	×	×	○	○
	(2) 予備電離	○	×	○	○	○	○	○
	(3) ガスコントロール	○	×	○	○	○	○	○
	(4) 運転回数	×	×	×	×	×	×	○

◎：運転されるべき設備  
○：設備回りの状況によっては運転が考えられる設備

×：停止しているべき設備

### 5.3 放電運転

JFT-2Mにおいては放電運転のみ運転モードにて管理する。これらの運転モード間の移行は下記のとおり。



第 5.3-1 図 運転モード間移行図

#### (1) パルス放電モード

プラズマの発生、加熱、閉じ込めを行う運転である。

鉄心の励磁に関しパルス放電中もバイアスコイルを通電するバイアスマード2と通電しないバイアスマード1がある。

#### (2) TDC (Taylor Discharge Cleaning) 放電モード

密度も温度も低いプラズマを真空容器や内部品にあて、これらに付着しているガスを叩き出し洗浄する運転である。

#### (3) グロー放電モード

真空容器内でグロー放電を起こさせ真空容器内をクリーンにする洗浄運転の一つである。

#### (4) 無名称モード

上記以外の全ての状態であって、設備の単独運転、真空容器のベーキング運転、本体排気等の運転を行う事が出来る。

##### 5.3.1 パルス放電モード

パルス放電が可能な環境（真空状態、JFT-2Mを取りまく状況）であり、且つトロイダル電源、ポロイダル電源の運転準備が完了、及び付属設備の準備も完了していれば、主制御盤でパルス放電モードにセレクトしてパルス放電の開始指令を与えれば別に停止指令を与えるまで自動にてパルス放電を行う。

操作、動作の概要は、運転操作ブロック図、インターロック線図、タイムチャート、トリガーパルス信号等の図、第 5.3-2～5 図のとおり。

設備の異常が検出された時は、設備保護のため検出時点で当該設備とタイムシーケンスを停止

する。ただし、放電時点で異常検出した場合は、当該設備のみ停止し、全系を停止せず次回放電禁止にしている。

### 5.3.2 TDC放電モード

TDC放電の操作、動作の概要は第5.3-6図運転操作ブロック線図、および第5.3-7図インタロック線図による。

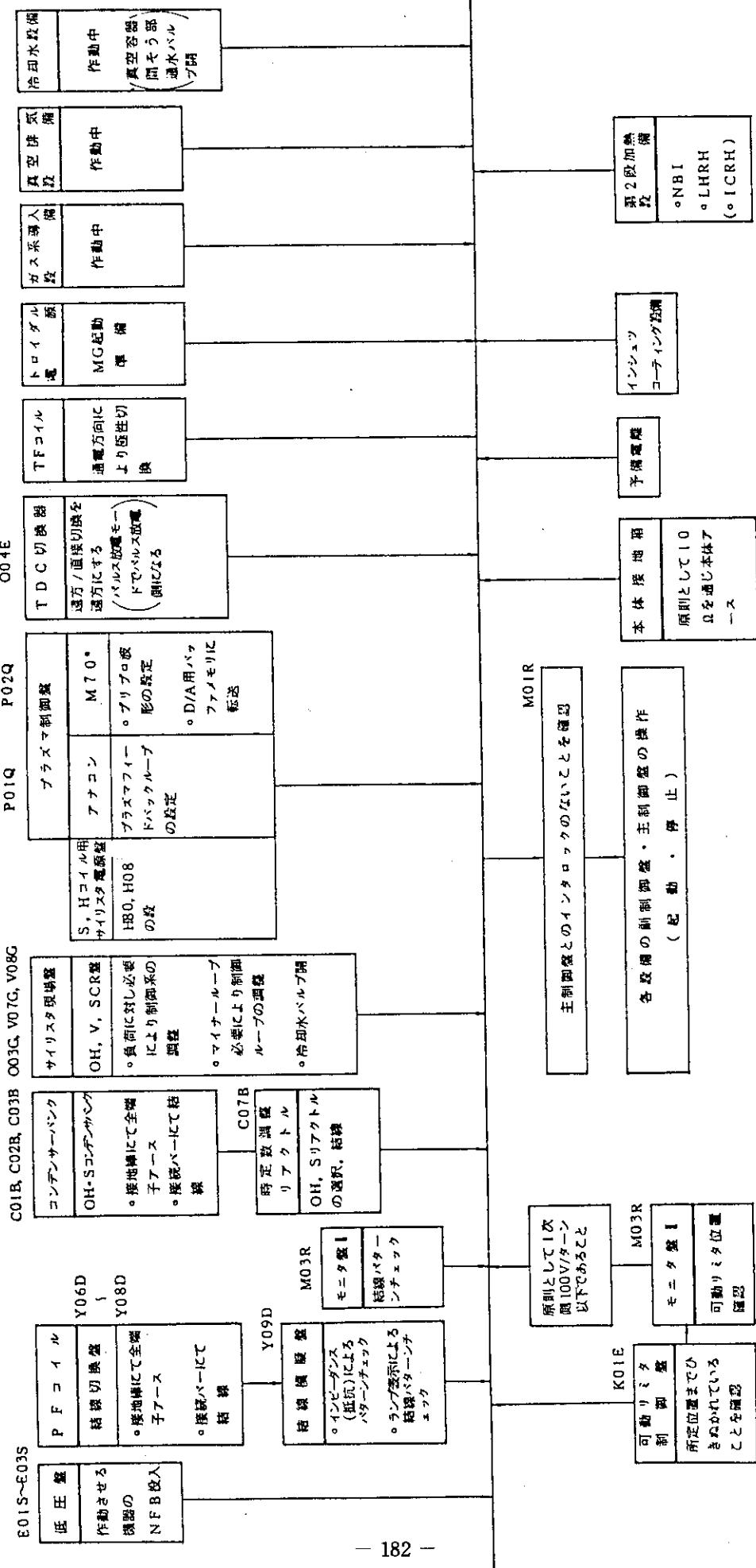
### 5.3.3 グロー放電モード

グロー放電は本体廻りの健全性が保たれていて真空排気系、ガス導入系が正常に作動していればグロー放電モードにセレクトしてグロー放電を行う事が出来る。（第5.3-8図 グロー放電モード時の運転操作ブロック図参照）

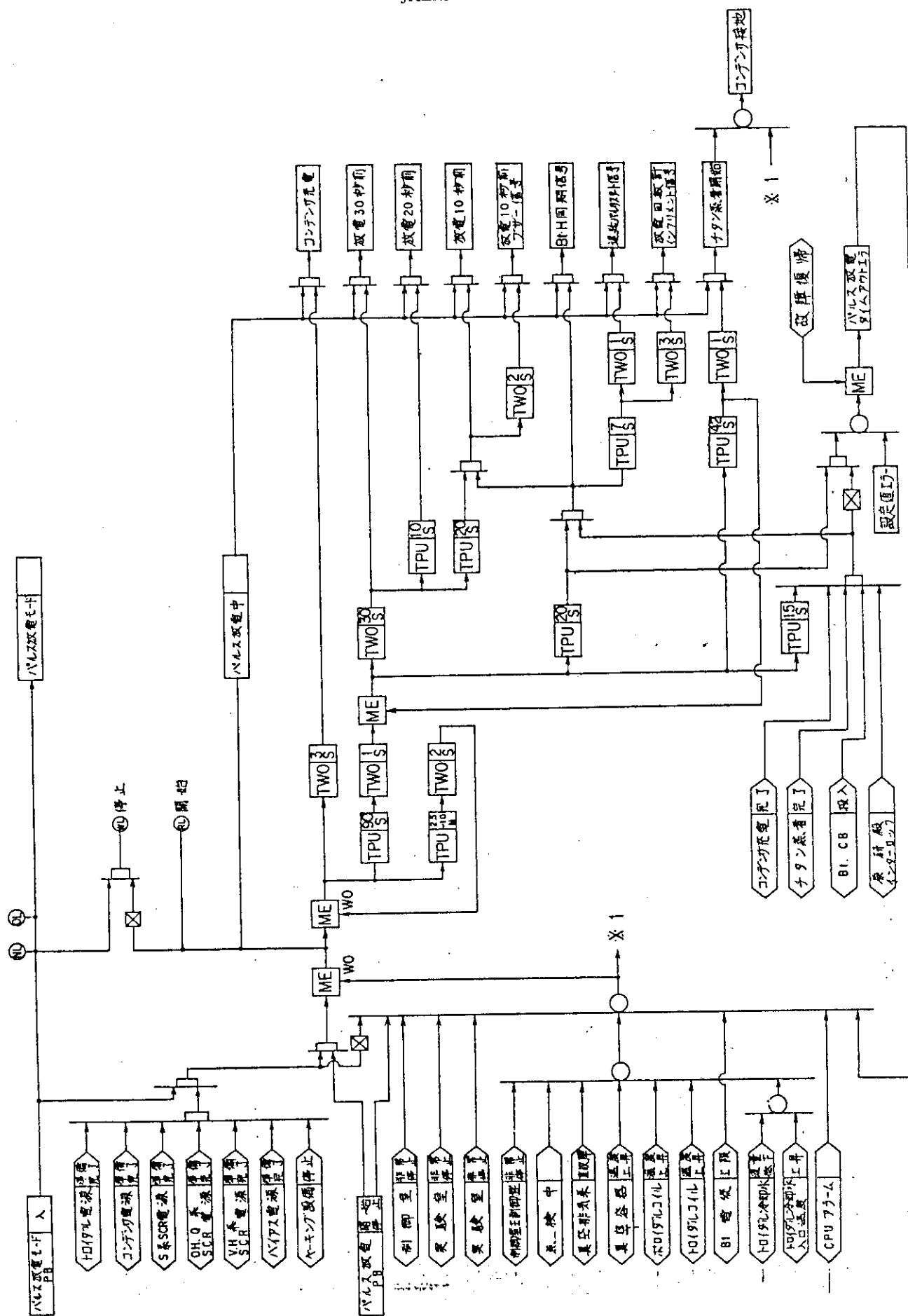
グロー放電による洗浄はJFT-2Mではまだ確立された方法ではないが、この運転制御系では主制御盤においてグロー放電モードにセレクト後、開始、停止の指令が出来、下記のインタロックにより運転を停止するようにしてある。

- ① 真空排気系重故障（本体真密度劣化）
- ② 真空容器温度上昇
- ③ 非常停止および点検中

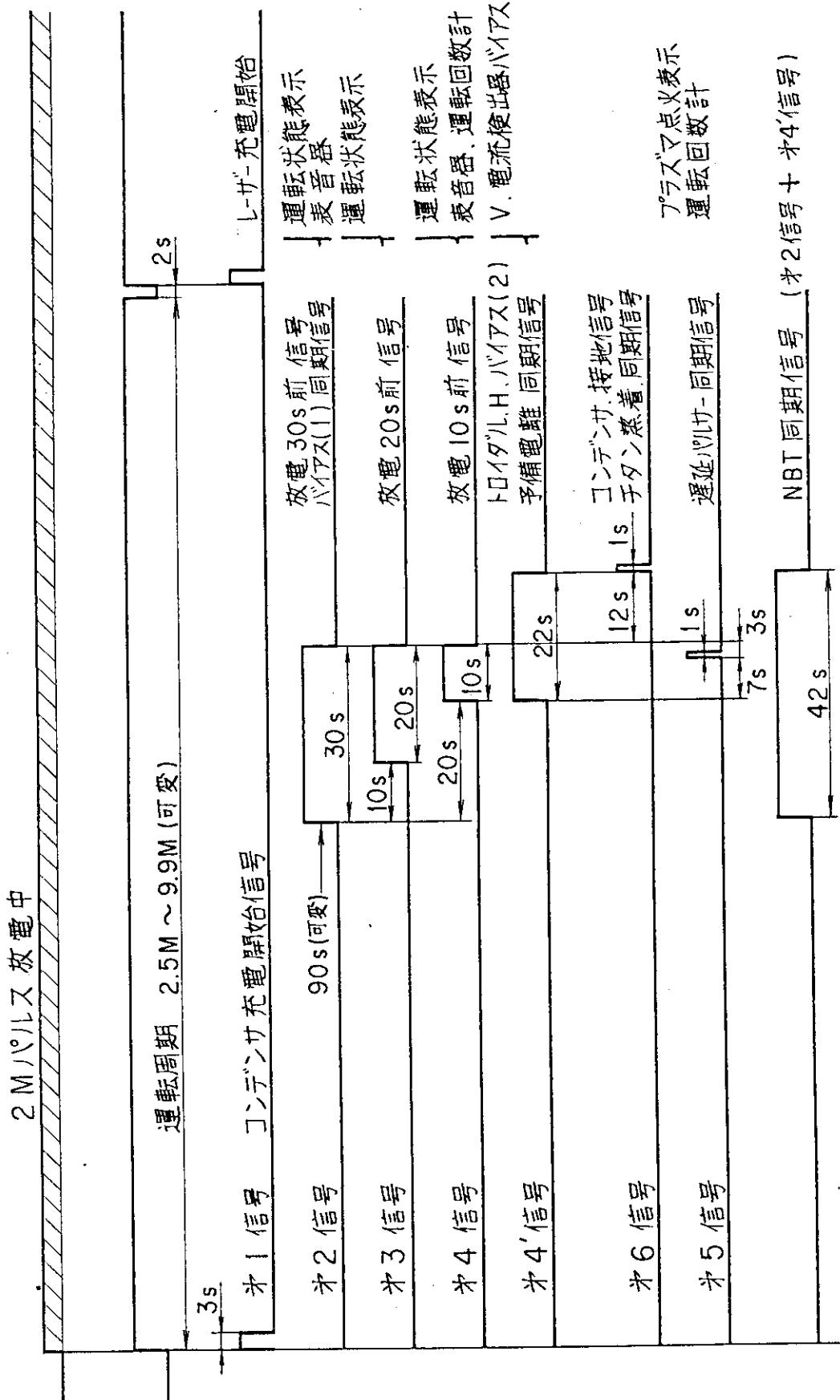
このほか運転状態表示、パトライト表示もパルス放電と同様に行うが、グロー電源の準備等は上記操作に合せて別途準備する必要がある。



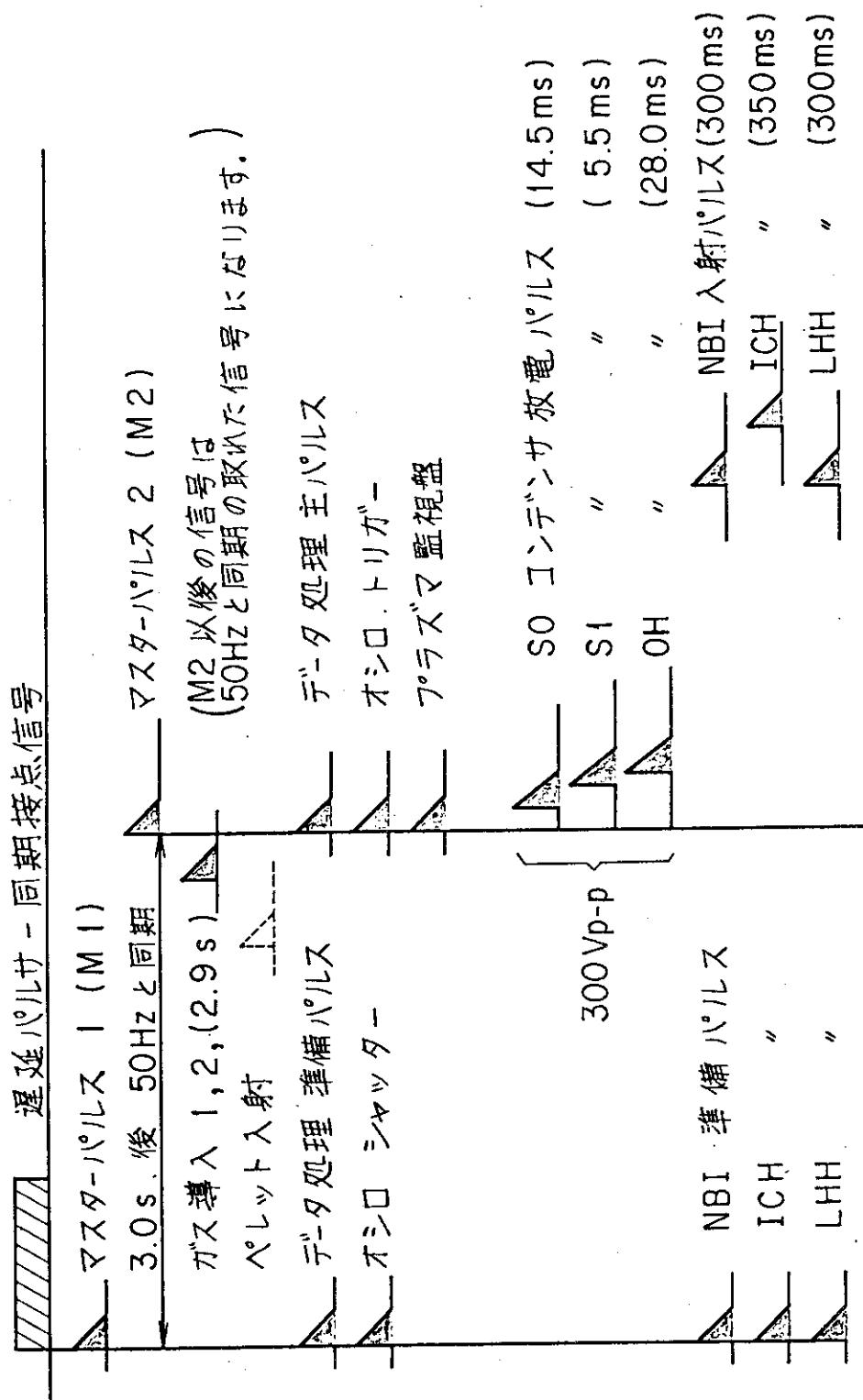
### 第5.3-2 図 パルス放電モード時の運転操作ブロック図



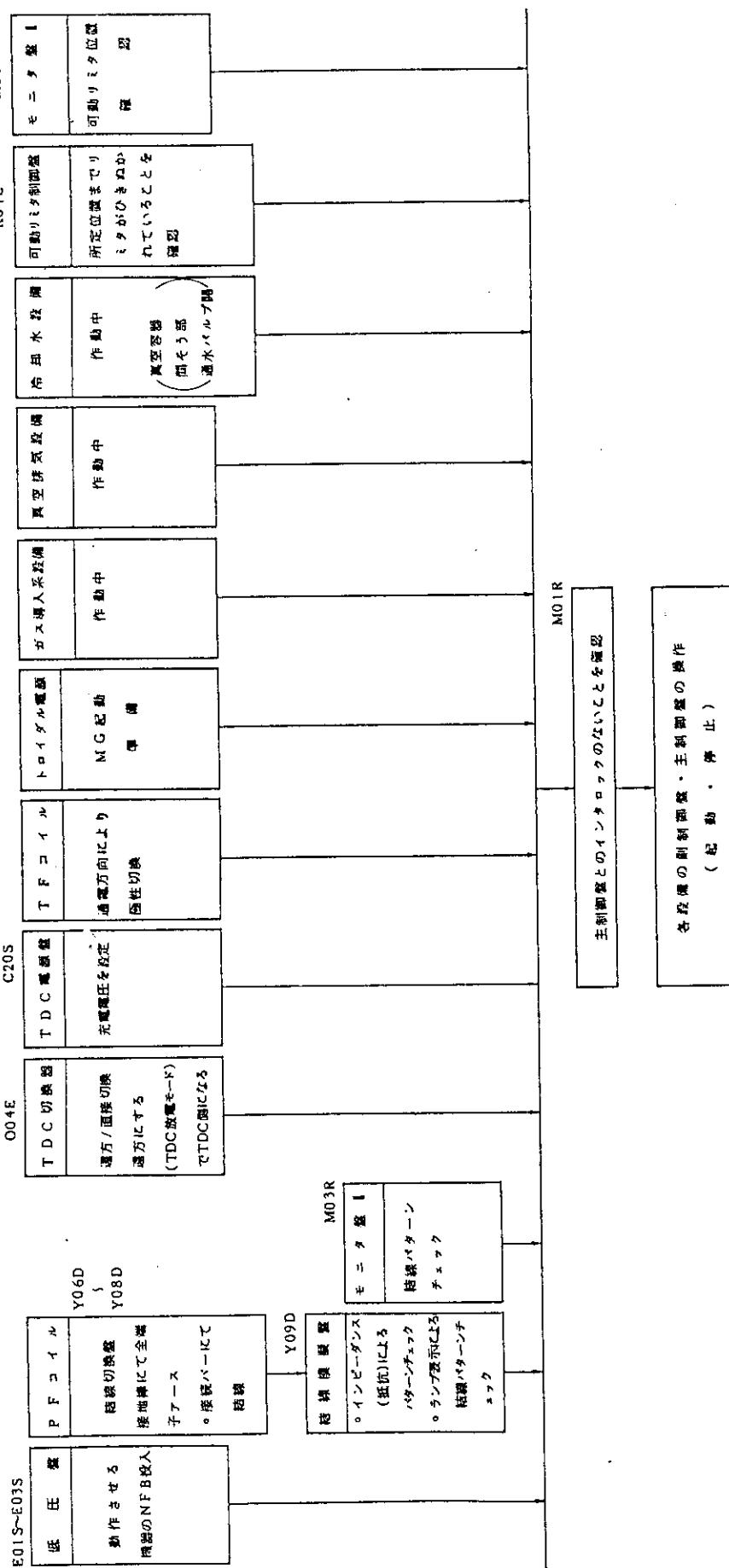
第5.3-3 図 JFT-2M パルス放電インターロック線図



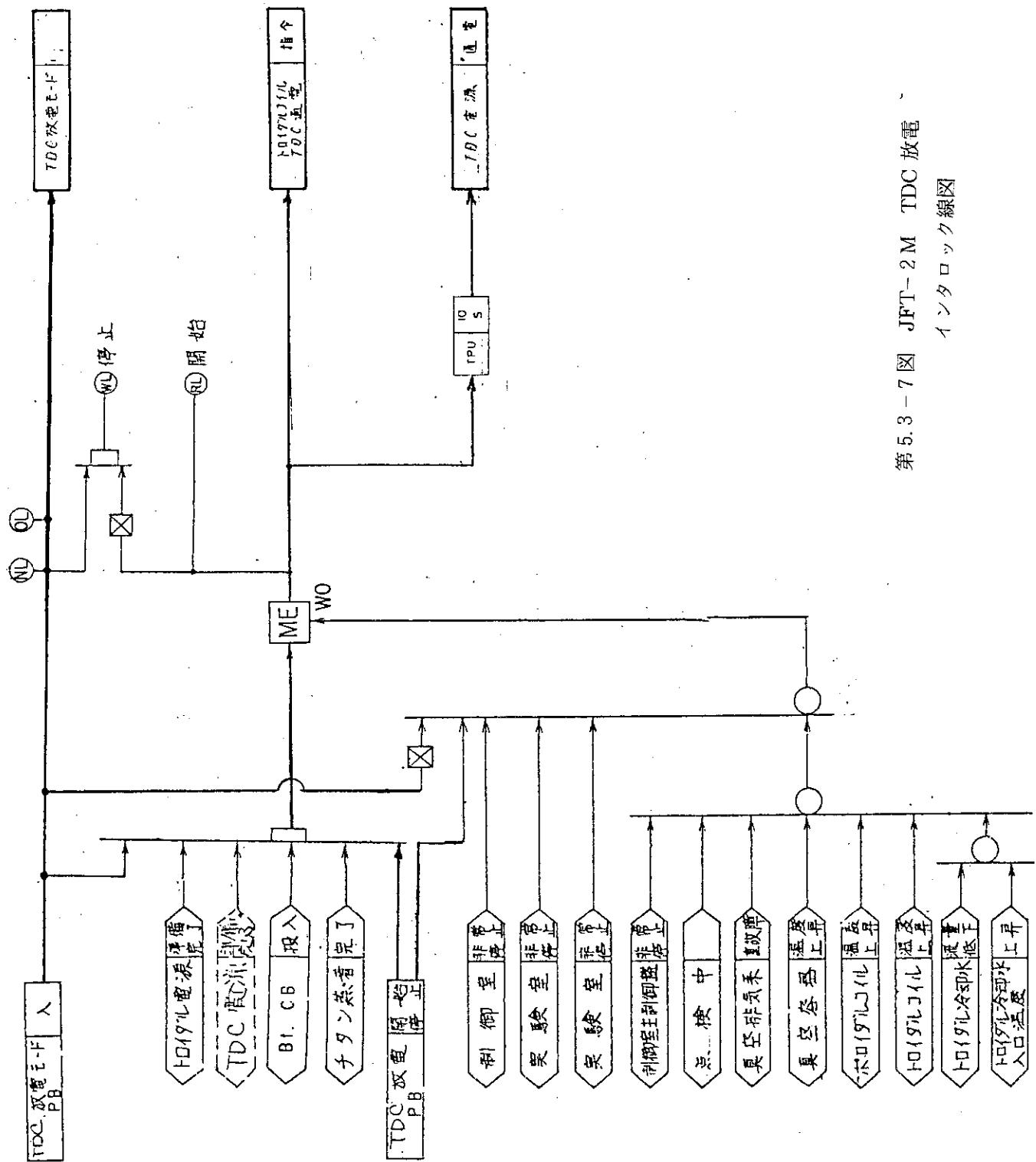
第5.3-4図 JFT-2M パルス放電 タイムチャート



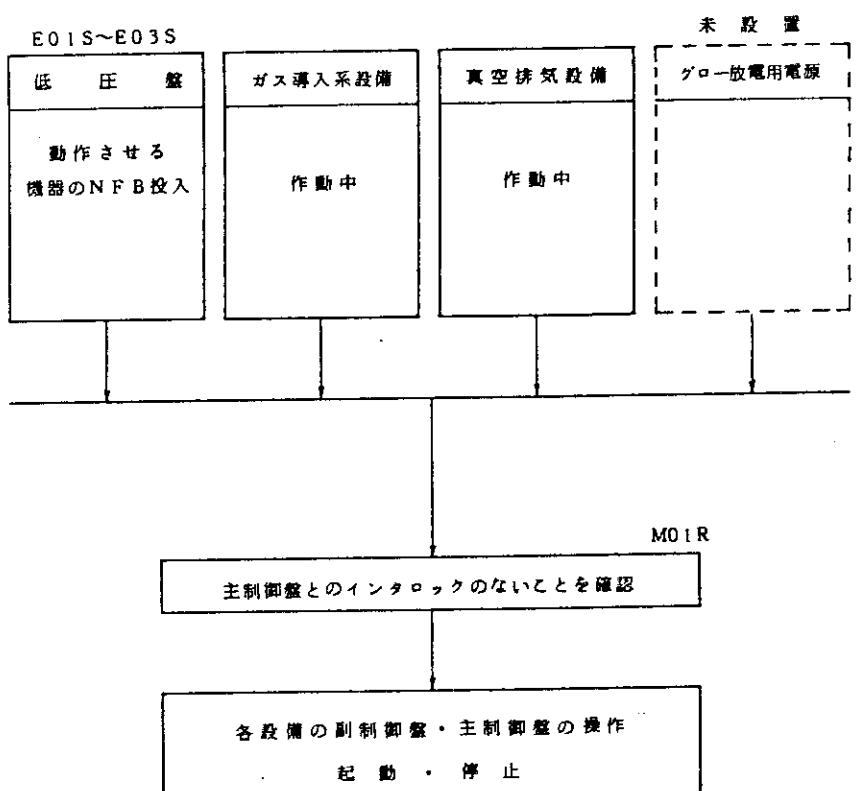
第5.3-5図 JFT-2M トリガーパルス信号



第5.3-6図 TDC 放電モード時の運転操作プロック図



第5.3-7 図 JFT-2M TDC 放電  
インターロック線図



第5.3-8図 グロー放電モード時の運転操作ブロック図

## 5.4 JFT-2Mの安全対策

### 5.4.1 放電設備

JFT-2Mの運転時、及び、保守点検時において放送により安全を計る他、各作業箇所間での相互の連絡を行う事により作業の円滑性を高める放送設備であるが、安全対策の一環としてここに概要を述べる。

放送設備のブロック図は第5.4-1図に示すとおり、建屋各所にマイクおよびスピーカを12箇所設置してあり特に実験室はワイヤレスマイク2箇も使用出来る。

主要機器（○内の番号はブロック図の番号に相当）

① マイクロホーン 12個

フォステクス<sup>株</sup>製

形 式 M 85 RP フラットコイル型

公称インピーダンス 600 Ω

周波数 50 ~ 12000 Hz

② ワイヤレスマイクロホーン 2個

東亜特殊電機<sup>株</sup>製

形 式 WM-200 ダイナミック型

送信周波数 40.68 MHz と 44.87 MHz

変調方式 水晶制御方式

③ ミキシングアンプ 1台

フォステクス<sup>株</sup> MX 12

マイクロホーン入力	12回路	600 Ω	平衡型
-----------	------	-------	-----

ワイヤレスマイクロホーン入力	2回路	660 Ω	平衡型
----------------	-----	-------	-----

外部入力	2回路	10 KΩ	不平衡型
------	-----	-------	------

出 力	3回路		
-----	-----	--	--

④ パワーアンプ 1台

フォステクス<sup>株</sup> # 300

入 力	2回路	10 KΩ	不平衡型
-----	-----	-------	------

出 力	2回路	8 Ω	
-----	-----	-----	--

定格出力	100 W		
------	-------	--	--

⑤ パワーアンプ 1台

光音電波<sup>株</sup> TA-248 DK

入 力	マイク	3回路	50 KΩ - 54 dB
-----	-----	-----	---------------

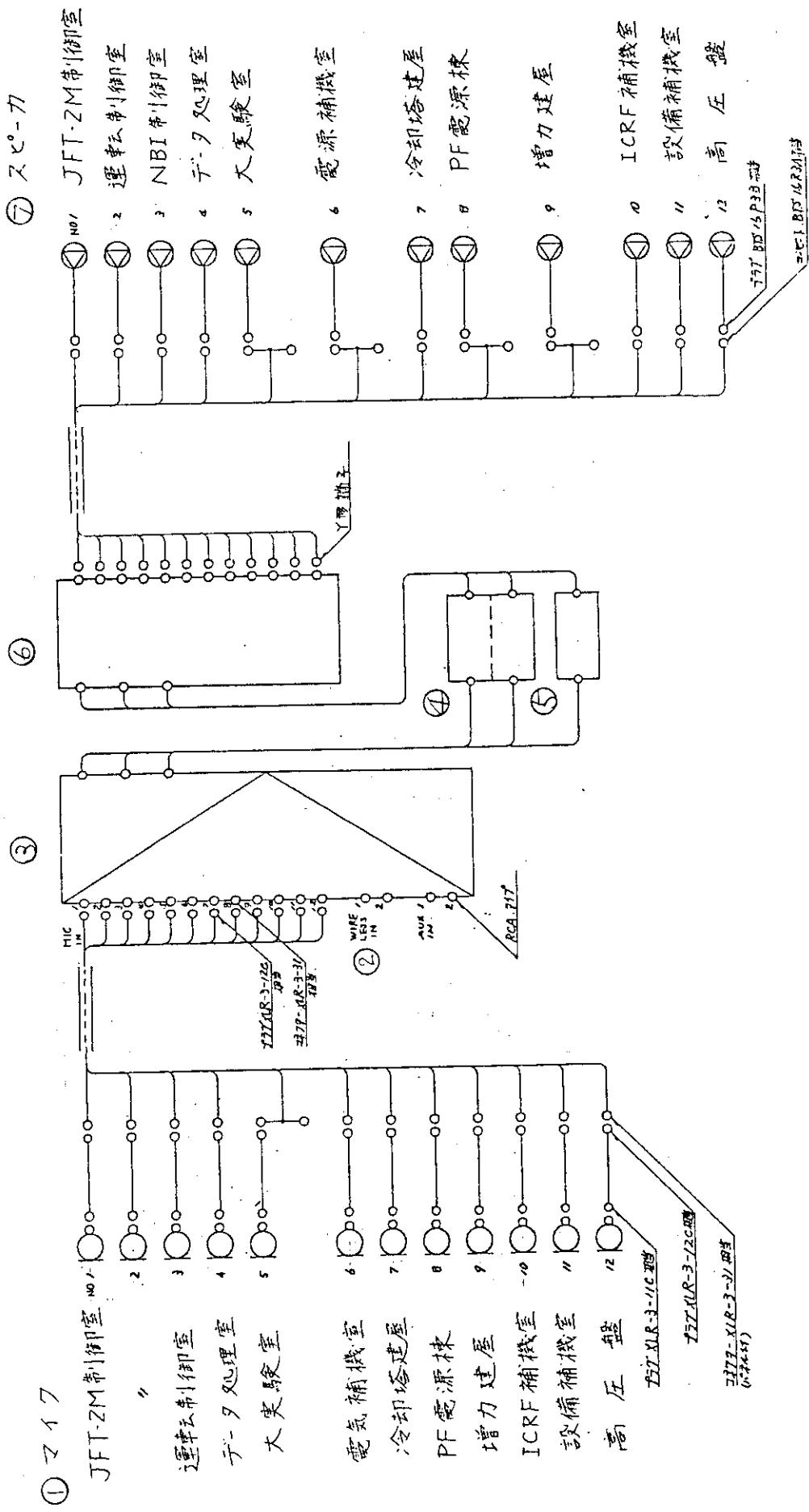
AUX	3回路	500 KΩ - 20 dB
-----	-----	----------------

出 力	5回路（の内 70V / 50Ω 1回路使用）		
-----	-------------------------	--	--

定格出力	100 W		
------	-------	--	--

⑥ スピーカ選局器 1台

フォステクス<sup>株</sup> SX 12



第5.4-1図 JFT-2M 放送設備ブロック図

入力 3回路  
出力 12回路  
選局方式 対話方式（但し一斉通話可能）

⑦ スピーカ 12台  
フォステクス(株) SP 102  
公称インピーダンス 16Ω（マッチングトランス付）  
入力 40W  
再生周波数帯域 180～16,000 Hz  
出力音圧レベル 95 dB/W (1m)

#### 5.4.2 非常停止機能

JFT-2Mの運転において、機器或いは人命に関する何らかの重大な異常が発生する恐れがある場合、または発生した場合に非常停止押釦SWにより入為的に運転を停止する機能を有している。この方法には2つあり、

- (1) パルス、TDC、グローの放電運転を停止させるもので、この方法による非常停止は実験室に2カ所、2M制御室コンデンサ副制御盤に1つの計3つある。
- (2) 各設備の運転許可を取り消すもので、実験室を除く2M補機室、PF電源棟1階に押釦SWを設置しており、そこに設置してある設備のみ運転許可を取り消す様になっている。なお運転制御室の主制御盤には全ての設備の運転許可を取り消す非常停止も設けられている。

#### 5.4.3 ITV設備

建屋の5ヶ所を運転制御室のモニター盤に設置しているモニターテレビで監視している。

テ レ ビ	テレビの設置場所	カメラの設置場所
① 13インチカラーテレビ	モニター盤-II	大実験室、又は2Mプラズマモニター
② 9インチ白黒テレビ	モニター盤-I	大実験室
③ "	"	2M補機室
④ "	"	増力建屋
⑤ "	"	PF電源棟、Tr, SCRエリヤ

#### 5.4.4 パトライト表示

建屋の内外各所に設置された赤パトライト(9カ所)、黄パトライト(6カ所)でJFT-2Mの概略の運転状態を表示する事により、入室関係者の注意を喚起している。

パトライトの点灯する運転状態

- 「赤パトライト」
- ① パルス運転中 (休止中は除く。)
  - ② TDC運転中 ( " )
  - ③ グロー運転中 ( " )

- ④ ベーキング運転中
- ⑤ トロイダル電源及びポロイダル電源の単独通電が可能な時

「黄パトライト」

- ① ベーキング設備の運転許可が出ている時
- ② トロイダル電源の運転許可が出ている時
- ③ ポロイダル電源の運転許可が出ている時

以上①～③の運転状態の時で「赤パトライト」が廻っていない時。

なお、ポロイダル電源の運転許可は

1. S, OH コンデンサ電源
2. S, SCR 電源
3. OH, Q, SCR 電源
4. V, H 電源
5. バイパス電源

の5つに分かれており、どれかひとつの電源でも運転許可が出されると「黄パトライト」が廻る。

\* 単独通電が可能の時とは、準備完了の状態であってどの放電モードにもなってなく、且つ点検中でない時である。

#### 5.4.5 運転状態表示

##### (1) 電源の運転状態表示

JFT-2Mに使用する高圧電源は、A. B. Cの3系統があり、補機電源もB系統のAC 200V系、AC 100V系とC系統のAC 200Vの3系統がある。これらの電源の高圧しゃ断器の運転状態は、

- ① A系統電源 Bt用MG電源のみに使用
- ② ベーキング電源 (C系統) 使用頻度が少ないため、ベーキング監視盤にて。

以上、2件の他は主制御盤の側盤のポロイダル電源盤にて運転状態を監視する事が出来る。

##### (2) 2Mの運転状態

2Mの運転状態は一部を除き主制御盤に表示される。この他に2M制御室、大実験室、NBI制御室、データ処理室の4箇所には別に運転状態表示器を設け状態の表示を行っている。内容は第5.4-1表の他に主制御盤には各設備の“運転指令”“作動中”“準備完了”“故障”的表示がある。

##### (3) 加熱装置の運転状態表示

2Mに取り付けられる加熱装置の運転状態を加熱側より信号を接続すれば表示が出来るようになっている。

#### 5.4.6 通電警報器、表音器

放送設備を通して警報音及び言葉により建家内の人達に運転状態を知らせる。

## (1) 通電警報器

① TDC 放電中, ② パルス放電 30 秒前, ③ パルス放電 30 秒前, に異なった警報音を出す。

## (2) 表音器

① TDC 放電 "只今放電 洗浄中"

② パルス放電 "放電 30 秒前"  
"放電 20 秒前"

以上を言葉にて放送。この他、ショット番号のアナウンスも行う。

第 5.4-1 表 運転状態表示器の表示内容

運 転 状 態	1. 運転制御室 (主制御盤 一部モニタ盤Ⅱ)	2. 2M制御室	3. 大実験室	5. データ処理室
	4. NBI制御室			
T D C 放 電	○	—	—	—
グ ロ 一 放 電	○	—	—	—
パ ル ス 放 電	○	—	—	—
放 電 中	○	○	○	○
放 電 30 秒 前	○(モニタ盤Ⅱ)	○	○	○
放 電 20 秒 前	○( " )	○	○	○
放 電 10 秒 前	○( " )	○	○	○
放 電 休 止 中	○	—	—	—
点 檢 中	○	○	—	—
コ イ ル 通 電 中	○	○	—	—
本 体 排 気 中	○	○	—	—
本 体 大 気 中	○	—	—	—
ベ キ ン グ 中	○	○	—	—
非 常 停 止	○	—	—	—

## 5.5 データの収集、表示、記録

## 5.5.1 収集

ここではデータ収集のうち表示及び記録は、次頁以下に記載するので、表示、記録されないモニタ盤にあるBNC端子に集まる情報及びこれらの計測器について述べる。

(1) トロイダル、ポロイダルコイル電圧、電流モニタ30端子(BHC)モニタ盤-IIにて

第5.5-1表 電圧、電流モニター一覧表

番号	モニター名称	変換比(最大)		信号を送っている盤
CH 3	トロイダルコイル電圧	500V/V	1700V/3.4V	Bfコイルctl CuB.
CH 4	" 電流	2KA/V	12.1KV/0.05V	JFT-2, SH, CuB.
CH 5	S コイル 電圧	2KV/V	20KV/10V	サージ吸収器
CH 6	" 電流	900A/V	7.5KA/8.3V	サイリスタ制御盤
CH 7	OH コイル 電圧	2KV/V	6KV/3V	サージ吸収器
CH 8	" 電流	1KV/V	3.6KV/3.6V	サイリスタ制御盤
CH 9	V コイル(上) 電圧	100V/V	300V/3V	"
CH10	" 電流	2KA/V	8KA/4V	"
CH11	T D C 放電電圧	1KV/V	10KV/10V	T D C 切換器
CH12	" 電流	500A/V	500A/1V	"
CH14	H コイル 電流	104A/V	520A/5V	サイリスタ制御盤
CH16	S系サイリスタ電流	1600A/V	8KA/5V	"
CH29	U コイル(下) 電圧	100V/V	300V/3V	サイリスタ制御盤
CH30	" 電流	2KV/V	8KA/4V	"

CH. 1, 2, 13, 15, 17~28は予備端子

(2) 連絡用、10端子(BNC)モニタ盤-IIにて

表5.5-2表 連絡用端子の使用一覧

端子番号	連絡場所	用途
CH 31	コンデンサ制御盤(2M制御室)	M IIトリガ (予備)
CH 32	"	( " )
CH 33	"	
CH 34	"	M Iトリガ
CH 35	"	NBI入射トリガ
CH 36	HBI制御盤	VLOOP
CH 37	"	I <sub>P</sub>
CH 38	"	マスター(MI)
CH 39	"	シンクロ(入射トリガ)
CH 40	"	トリガ(M II)

(3) プラズマ電流 ( $I_P$ ) , ワンターン電圧 ( $V\ell$ )

10端子(BNC)モニタ盤-Iにて

信号はプラズマ監視制御盤より光ファイバーで送られていく,  $I_P$ はすでに積分器を通った信号ですぐに計測出来る。変換比, プラズマ電流( $I_P$ ) 51 KA/Vワンターン電圧( $V\ell$ ) 10 V/V

出力は各々1端子づつ 2M運転制御室

NBI制御系

LHH制御系に使用

各々2端子は, 現在予備端子

光送信の構成および性能は第5.5-1図に示す。

## (4) 計測器 モニタ盤-Iに収納

## ① 入出力絶縁形直流増幅器 10台

トロイダル, ポロイダルコイルの電圧, 電流モニタは信号はこの絶縁増幅器をとおしてオシロスコープ等でモニタする。

形 式 3132(YEW製)

方 式 パルス幅変調方式による入出力絶縁

ゲイイン 0.1~100倍

直線性 フルスケールの±0.05%以内

最大出力 ±10V/±50mA

周波数特性 DC~5KHz ± $\frac{1}{3}$ dB

10, 30, 300Hzのフィルタ付

耐電圧 AC 1500V 1分間

## ② オシロスコープ 1台

形 式 R 7613型(ソニー製)

時 間 軸 T 1353A型 1台

5ns/DIV~5s/DIV

垂 直 軸 TA 18型 2台(4CH)

感度 5mV/DIV~5V/DIV

f 帯域 DC~80MHz

カメラ C 5C オプション 01型

## ③ オシロスコープ 1台

形 式 R 5111A型(ソニー製)

時 間 軸 5B 12H型 1台

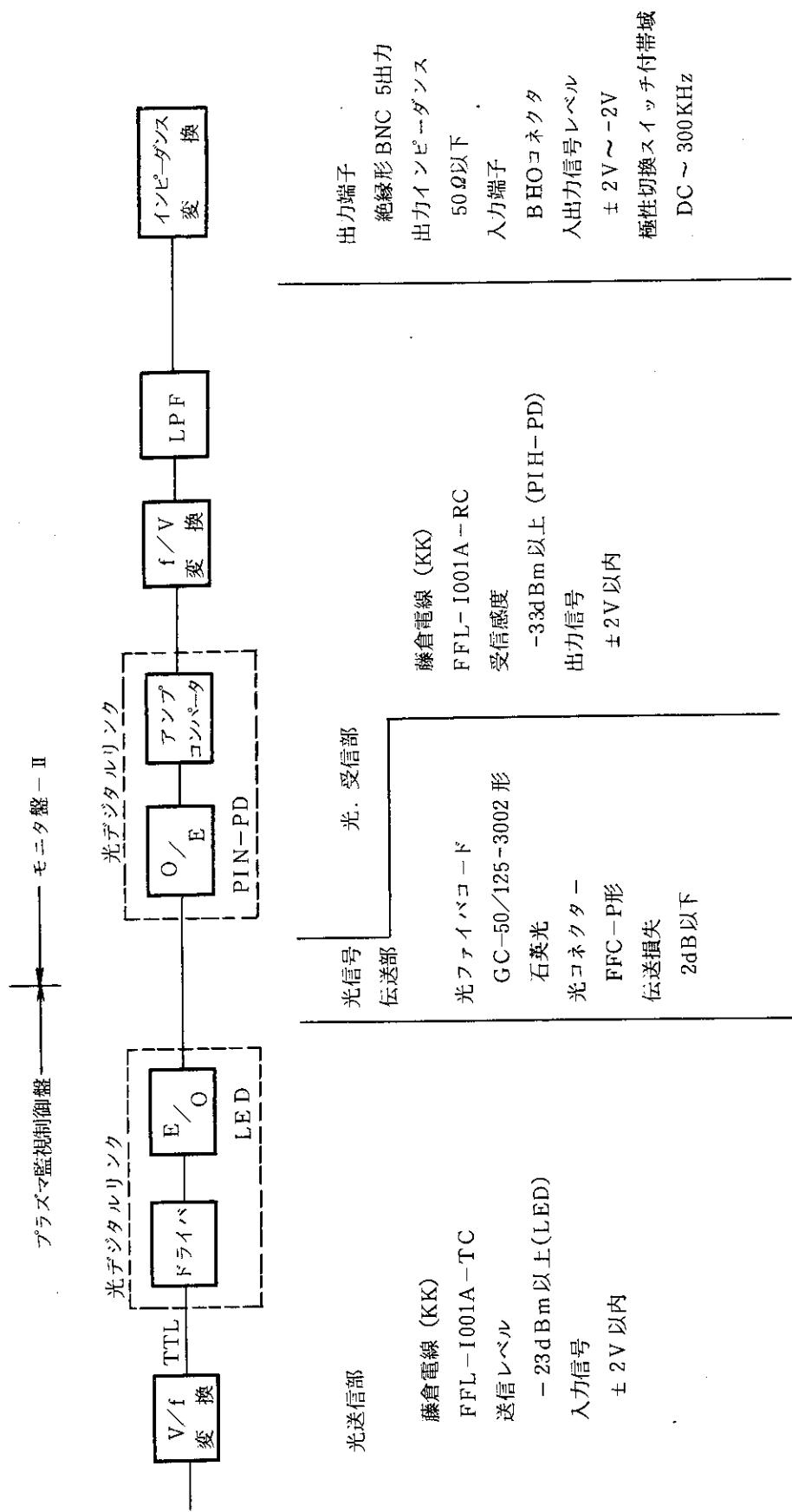
100ns/DIV~5s/DIV

垂 直 軸 5A 18A型 2台(4CH)

感 度 1mV/DIV~5V/DIV

f 帯域 DC~2MHz

カメラ C 5C オプション



第5.5-1図 光送信器の構成および性能

## 5.5.2 表 示

(1) 運転状態の表示 第 5.4.5 を参照

(2) 電源の運転状態の表示 "

(3) 放電回数計

パルス放電の回数を、モニタ盤-II(運転制御室), 2M制御室, データ処理室, NBI制御室の4カ所に表示している。これを2つの方法で行っているがどちらも6ケタ, 99999回までの積算表示が可能である。

① モニタ盤-II, 第5信号にてカウント マグサイン表示器

② 2M制御室  
データ処理室  
NBI制御室 } 第4信号にてカウント フラップ表示器

コントローラーは、予備電離盤に収納

(4) TDC 運転積算時間計

主制御盤にありTDC放電開始から停止までの時間を積算表示する時間計で、3桁のマガサイン表示器で99.9Hまで表示される。表示入力はマスター・パルサから6分ごとのインクリメントパルスとして与えられる。

表示値の設定は裏面の電磁カウンタにより行える。

(5) コイルの接続, 極性およびターン数表示

モニタ盤-IIにありトロイダルコイルの接続状態および電源との組み合せをトロイダルコイル結線切換模擬盤からの接点信号等によりモザイクパネルで表示している。コイルの接続により同時に極性も判明出来るようになっていて、トロイダルコイルの極性はトロイダル電源極性切換盤からの信号により、プラズマの極性、バイアスコイルの極性はバイアス電源の極性切換模擬信号にて連動して表示している。

(6) コイルの通電表示

モニタ盤-IIにおいて本体断面の1/4をモザイクしたパネルに、トロイダルコイル、バイアスコイルの各々の通電でランプを点灯する。プラズマもランプ点灯を行っているが、模擬的に行ってるので実際の着火タイミングより多少ずれている。

(7) 可動リミタ位置表示

可動リミタは上部(No.1), 水平(No.2), 下部(No.3)の3機あり位置の表示は現場のコントロール盤と主制御盤においてそれぞれのリミタにつきデジタル表示により、可動リミタ板の挿入および引抜距離を示している。

表示範囲 100.0 mm (引抜状態)

300.0 mm (挿入状態)

## 5.5.3 記録

本体真空度, X線モニタを除き、モニタ盤-IIにおいてレコーダでモニタしている。

(1) 真空容器温度 12打点記録計 2台

24点 ER 187 (YEW)

入 力 : C-C 熱電対 (JIS タイプT)  
 記録紙繰出速さ : 25, 50, 100 mm/h, mm/min  
 記 録 紙 : E 906 MGB  
 レ ン ジ : 0 ℃ ~ +150 ℃  
 バーンアウトアップスケール  
 警 報 : 6点上限個別設定 各点識別 6出力  
 №. 1 ~ №. 6 打点に適用

- (2) トロイダルコイル温度  
 12点 12打点記録計 1台  
 以下は同上
- (3) ポロイダルコイル温度  
 12点 12打点記録計 1台  
 ER 187 (YEW)  
 入 力 : C-C 熱電対 (JIS タイプT)  
 記録紙繰出速さ : 25, 50, 100 mm/h, mm/min  
 記 録 紙 : E 906 MGB  
 レ ン ジ : 0 ℃ ~ +150 ℃  
 バーンアウトアップスケール  
 警報ユニット付  
 EATH (YEW)  
 12点用上限個別設定  
 各点識別, 12出力
- (4) トロイダルコイル  
 電 流 2ペン記録計  
 ER 102 (YEW)  
 冷却水流量 (第1ペン)(第2ペン)  
 入 力 : 0 ~ 10 V 1 ~ 5 V  
 記録紙繰出速さ : 20, 40, 80 mm/h, mm/min  
 記 録 紙 : 下記レンジによる  
 レ ン ジ : 第1ペン 0 ~  $2 \times 10^4$  A  
 第2ペン 0 ~ 200 ℥/min  
 警 報 : 第1ペン (Bt 電流) 上限警報
- (5) トロイダルコイル  
 入口温度 2ペン記録計  
 ER 102 (YEW)  
 出口温度 入 力 : JIS-Pt-100 Ω (1 ~ 5 V DC)  
 記録紙繰出速さ : 20, 40, 80 mm/h, mm/min  
 記 録 紙 : E 9653 BQ  
 レ ン ジ : 0 ~ 100 ℃  
 警 報 : 第1ペン (入口温度) 上限警報
- (6) 本体真空度 6ペン記録計  
 (真空排気系, 制御盤にて) R-106 (RDK)

レンジ : 1 mV ~ 200 V  
速さ : 2 ~ 60, cm/M, cm/H  
記録紙 : H - 25 - 1 Z

(7) X線モニタ 3ペン記録計

3056 (YEW)  
レンジ : 0.5 mV ~ 5 V/cm  
速さ : 2 ~ 60 cm/M, cm/H  
記録紙 : TX - 127

## 5.6 補機電源

JFT - 2 Mに使用する補機電源は

- ① B 系統 AC 200V 容量 300 KVA
- ② B 系統 AC 100V 容量 100 KVA
- ③ C 系統 AC 200V 容量 150 KVA

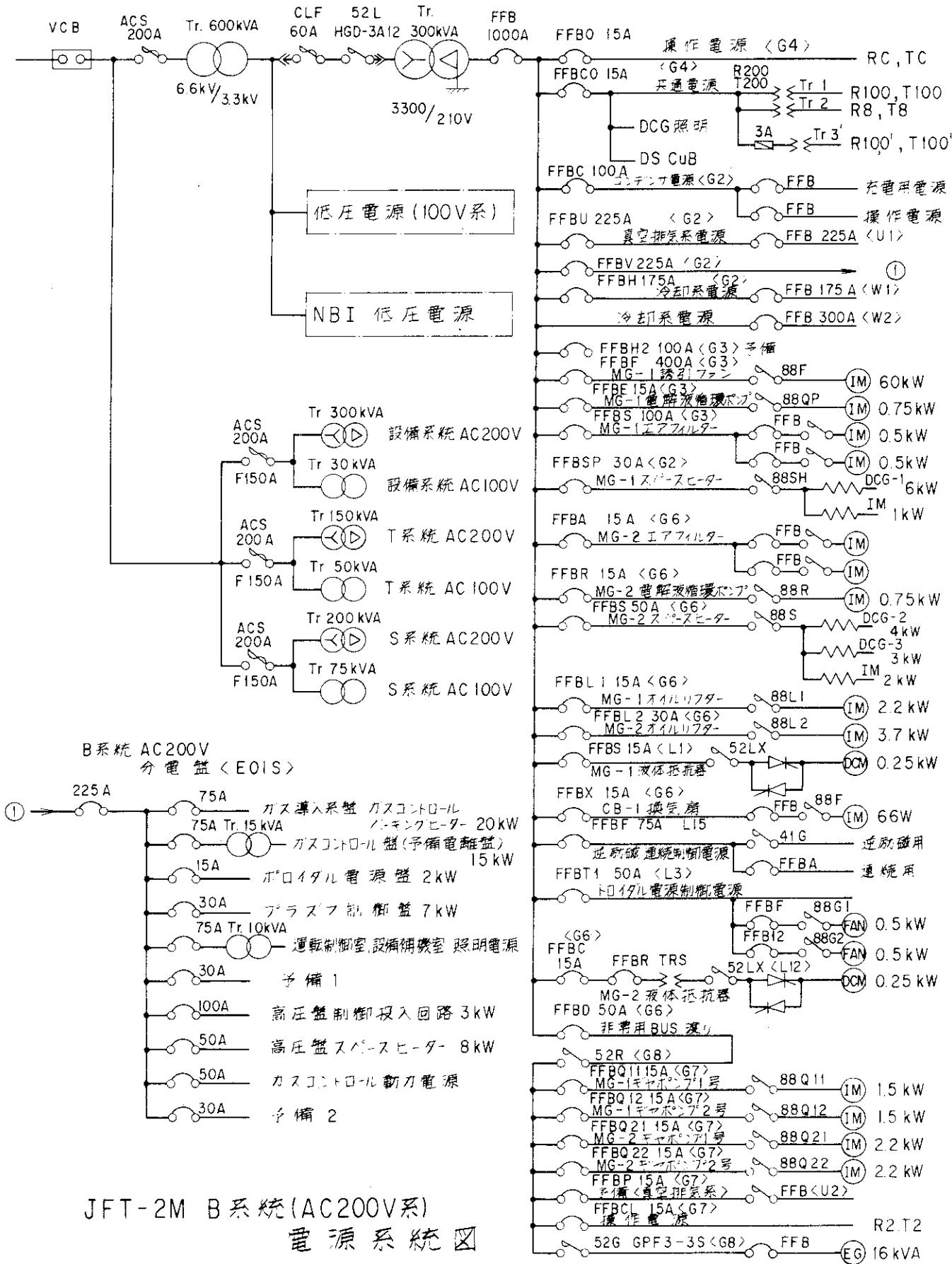
以上の3系統があり、ボロイダル電源盤にて遠隔操作、故障表示、電圧、電流のモニタが可能である。ただし、B系統AC 200VはMAIHの操作電源に使用しているため故障の表示はない。

補機電源の構成機器は第 5.6 - 1 表のとおりである。

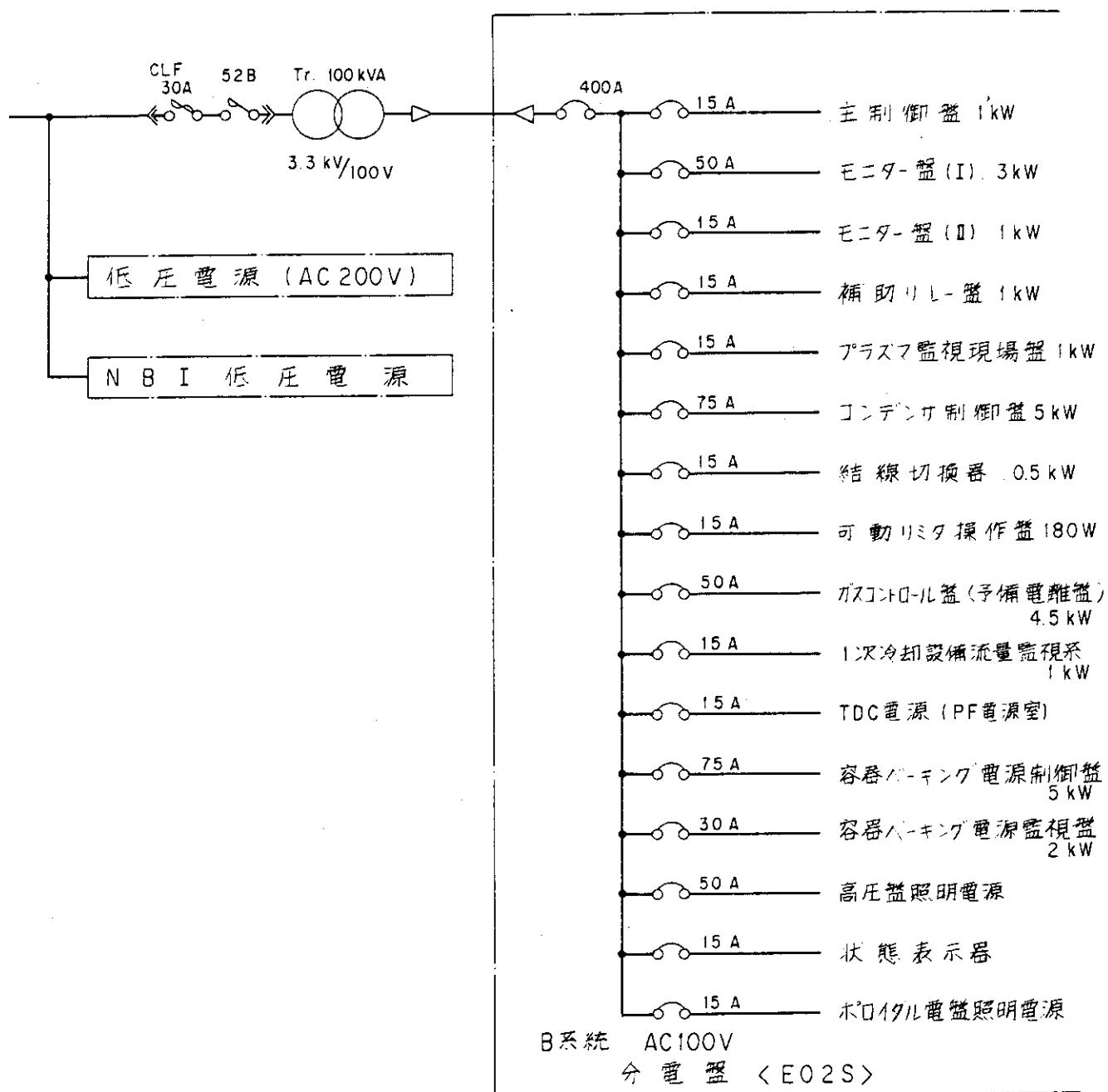
負荷の接続は第 5.6 - 1 ~ 3 図のとおりで、B系統に操作電源と常時使用の負荷を接いでいる。

第 5.6 - 1 表 補機電源構成機器

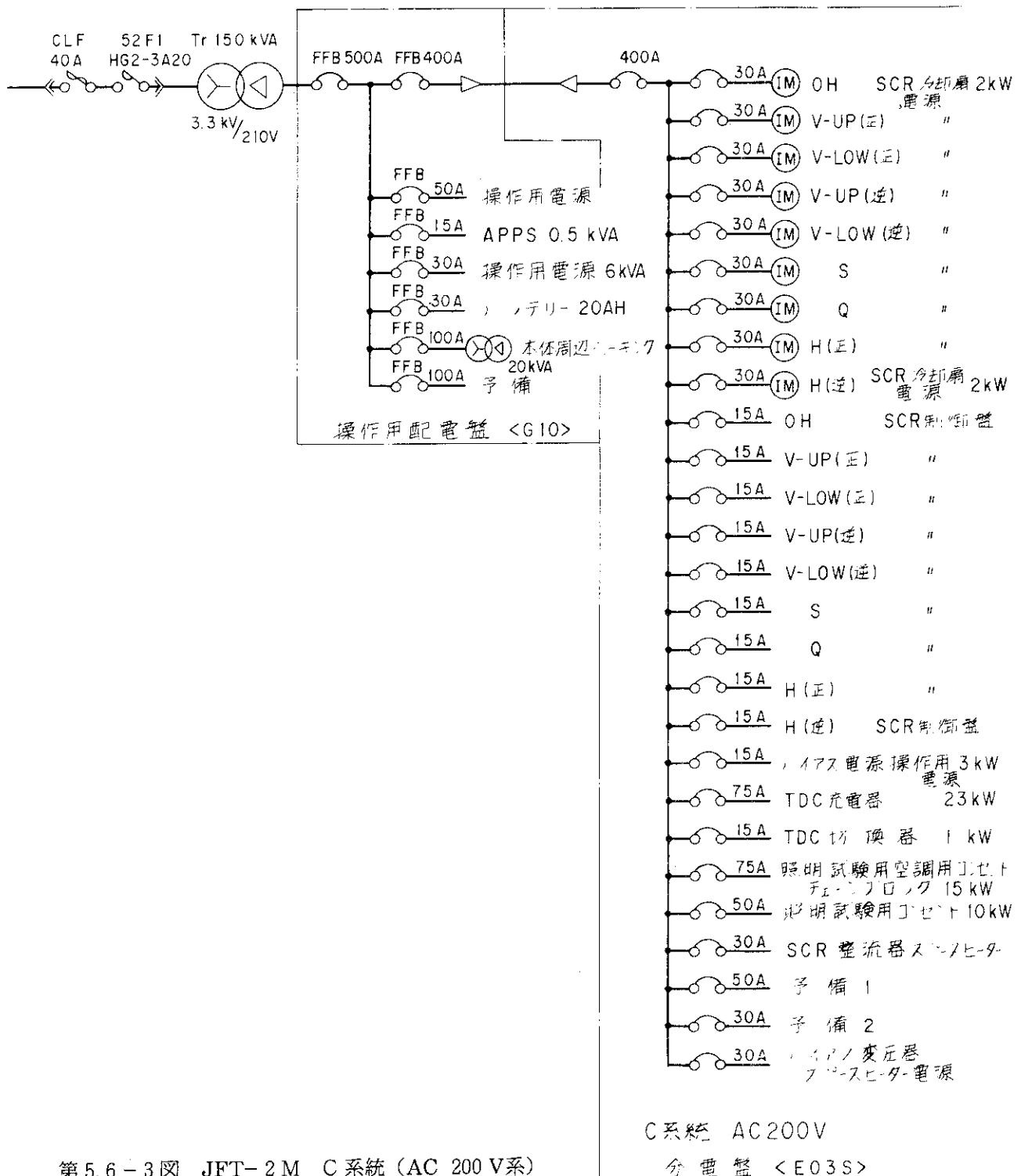
電源系統	短絡容量	しゃ断器	CLF	Tr	操作、故障
(1)B 系統 AC 200V 補機電源	190 MVA	高圧電磁接触器 HGD - 3A 12 3300V 120A 12.5 MVA #H 3B, 補機室中 2 階	II 種 M - 25 3600V 60 A 250 MVA	油入変圧器 3 φ, 300 KVA 一次, 3300V(タツ) 二次, 210V 二次側, 1相接地 補機室, 設置	ボロイダル電源盤にて 遠隔操作 故障, 51(2) 51G(1) 表示なし
(2)B 系統 AC 100V 補機電源	190 MVA	高圧電磁接触器 HGD <sub>2</sub> - 3A 20 3300V 120A 20MVA #H 3A, 補機室中 2 階	II 種 M - 25 3600V 40 A 250 MVA	乾式変圧器 3 φ, 100 KVA 一次, 3300V(タツ) 二次, 105V 二次側, 1相接地 補機室中 2 階設置	ボロイダル電源盤にて 遠隔操作 故障, 51(2) ボロイダル電源盤にて "高圧故障" 表示
(3)C 系統 AC 200V 補機電源	125 MVA	高圧電磁接触器 HG 2 - 3A 20 3300V 120A 20MVA #HTA 増力建屋中 2 階	II 種 M - 25 3600V 40 A 250 MVA	乾式変圧器 3 φ, 150 KVA 一次, 3300V(タツ) 二次, 210V 二次側, 1相接地 増力建屋中 2 階設置	ボロイダル電源盤にて 遠隔操作 故障, 51(2) ボロイダル電源盤にて "高圧故障" 表示



第 5.6-1 図 JFT-2M B 系統 (AC 200V系) 電源系統図



第5.6-2図 JFT-2M B系統(AC 100V系)電源系統図



第5.6-3図 JFT-2M C系統 (AC 200V系)  
電源系統図

## 5.7 受電設備

### 5.7.1 JFT-2Mの受電

#### (1) 電源系統(A, B, C系統)

第5.7-1図に示す様にA及びC系統は、6と15MVAの変圧器容量の異なった二つの系統名として呼称している。(核融合実験装置専用電源系統)

A系統の負荷として主なものは、トロイダルコイル用直流発電機(以下MGと呼ぶ)が接続している。(MGの概要については、別項4.1参照)

C系統の負荷として主なものは、ポロイダルコイル用サイリスタ整流器(別項4.2ポロイダル電源参照)、補機電源(別項5.6参照)、高調波フィルター(別項9.2参照)等が接続してある。

B系統については、第5.6-2図に示すように主な負荷は、A及びC系統(動力用電源)負荷の制御用電源であり、A及びC系統とも系統が違う為、B系統と呼称している。

#### (2) 高圧盤

C系統用変圧器(15MVA)よりの高圧電気(3.3KV)を受電し、各ポロイダルコイル(OH, Q, V, S, H)用電源、バイアスコイル用電源、ベーキング用電源等とそれぞれ単独負荷となるよう、配電する為のしゃ断器類を内蔵した盤である。(第5.7-2図)

#### (3) しゃ断器

三相及び二相短絡、地絡事故時における健全な回路の保護や負荷の定期点検等の為、負荷を系統より切り離す必要が生じる。この場合、突入、定格電流はもちろんの事、事故電流さえもしゃ断する能力のある機器(しゃ断器)を負荷上部に設置しなければならない。

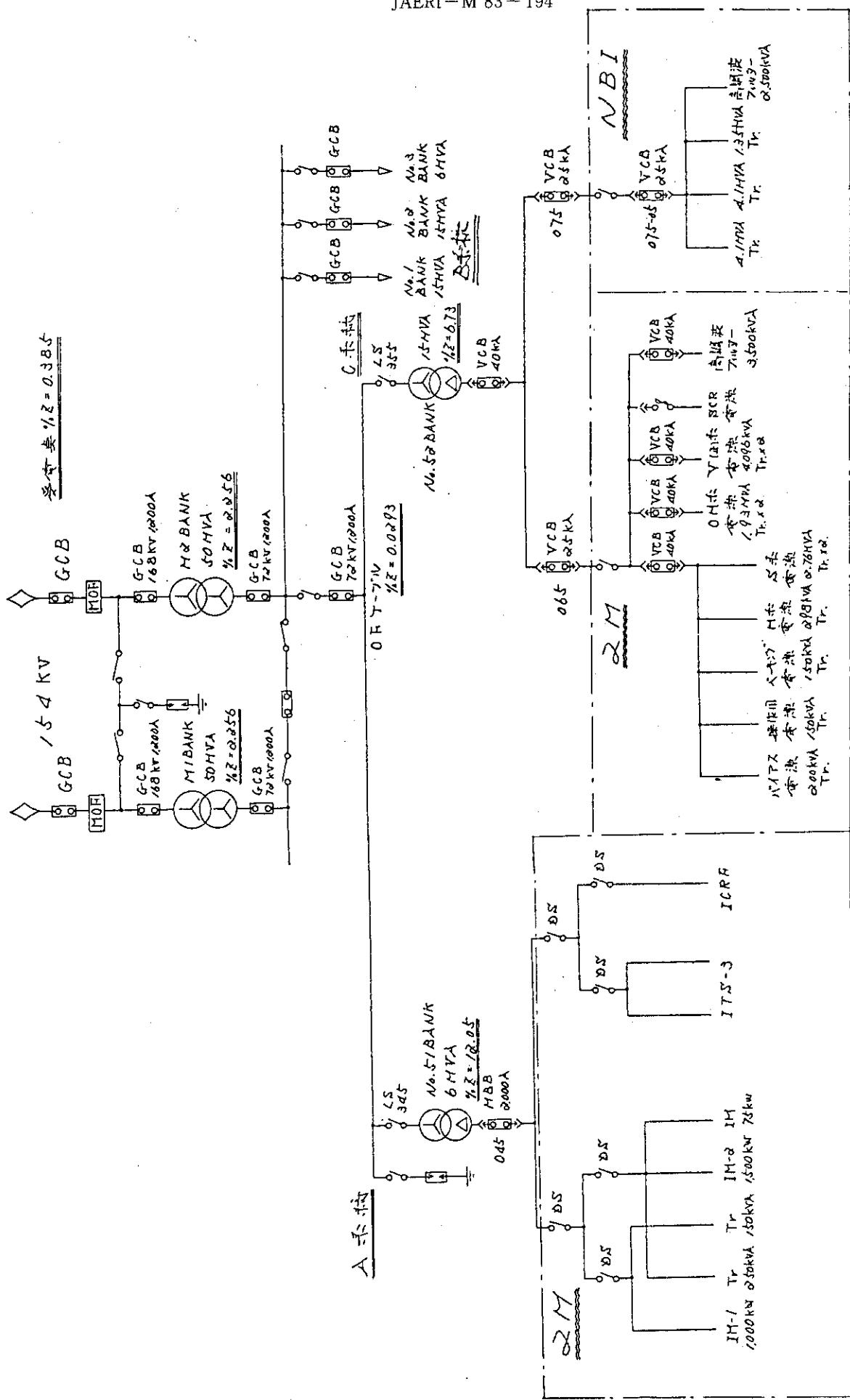
上記理由により、第5.7-1表に示すように、事故電流以上の電流しゃ断容量(電流)を持つしゃ断器を各負荷毎に設置し、機器の保護を行っている。

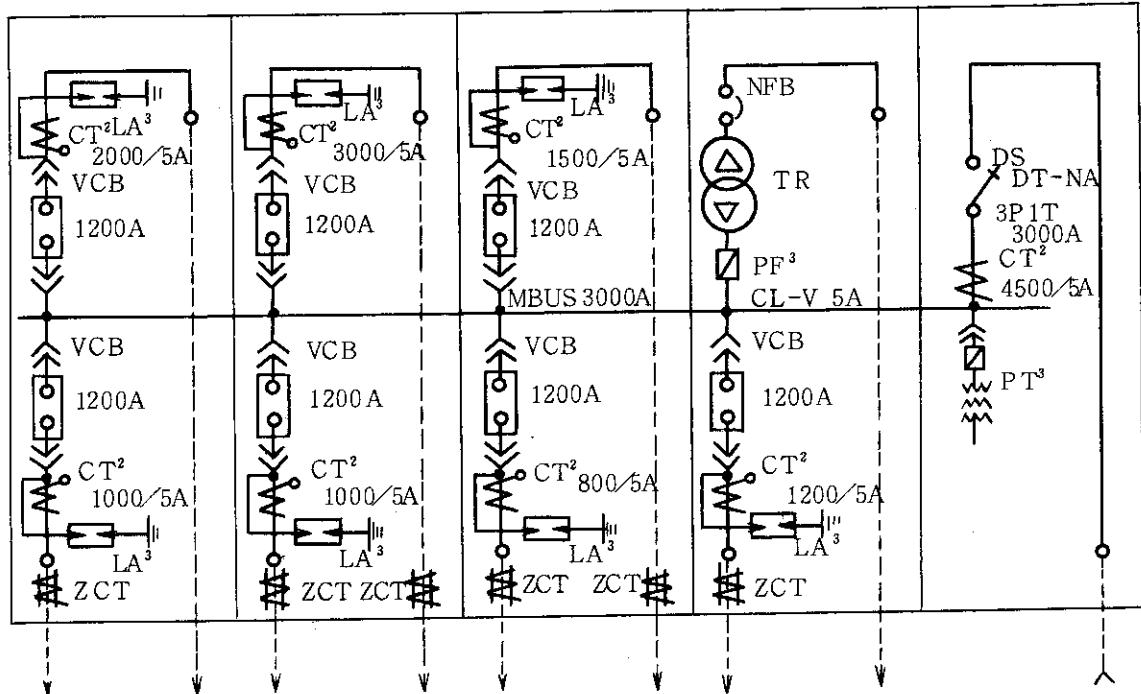
### 5.7.2 高調波フィルター設備

JFT-2Mでは、ポロイダルコイル用電源にサイリスタ整流器(6相及び12相)を用いている。

このサイリスタ整流器により発生する高調波は、理論波で5, 7, 高次、非理論波で4次の次数が大きなものとなる。

したがって、第5.7-2表(a)(b)の高調波フィルターを設置し、66KVラインでの等価妨害電流(各次1.9A以下、総合3.8A以下)及び系統電圧歪率(各次1%以下、総合2%以下)を低減し、高調波障害の防止を行っている。





盤番号	名板記入文字	ケーブルサイズ mm <sup>2</sup> CuAl	盤番号 名板記入文字
5	上 H 電 源 盤	3KVCV 1×3C-100	F 14 I
	下 Q 電 源 盤		将来 F 15 I
4	上 V (逆方向) 電源盤	3KV CV 1×3C-150	F 12 I
	下 高調波 フィルタ -		F 13 I
3	上 V (正方向) 電源盤	3KV CV 1×3C-100	F 10 I
	下 OH 電 源 盤		F 11 I
2	上 ポロイダル同期電源盤	3KV CV 1×3G-100	F 08 I
	下 SI 低 壓 電 源 盤		F 09 I
1	ポロイダル電源受電盤	1×3C-325	F 07 I

第 5.7-2 図 高圧盤名称及び内部配電系統図

第 5.7-1 表 真空しゃ断器定格表

形 式 名	6-VX-40
メ 一 カ 一	三 菱 電 機 株
準 抛 規 格	JEC-181(1971)
定 格 電 壓(KV)	3.6
定 格 電 流(KA)	1.200
定格しゃ断電流(KA)	40
(参考)しゃ断容量(MVA)	250
定格投入電流(KA)	100
定格短時間電流(KA)	40
定格周波数(Hz)	50
定格再起電圧上昇率(KV/US)	0.16
定格しゃ断時間(サイクル)	3
絶縁階級(号)	6 A
無負荷投入時間(S)	0.12
重 量 (kg)	260
投 入 操 作 方 式	電気, 手動
投 入 制 御 方 式	電 気
投 入 操 作 電 流 (A)	140 (DC 100V)
引きはずし操作方式	電気, 手動
引きはずし制御電流(A)	5.5 (DC 100V)
開 極 時 間 (S)	0.035

㊂ V, OH, 高調波フィルター, S, 低圧電源三相短絡時の短絡電流は,  
全部同じで, 2115 KAである。(計算値)

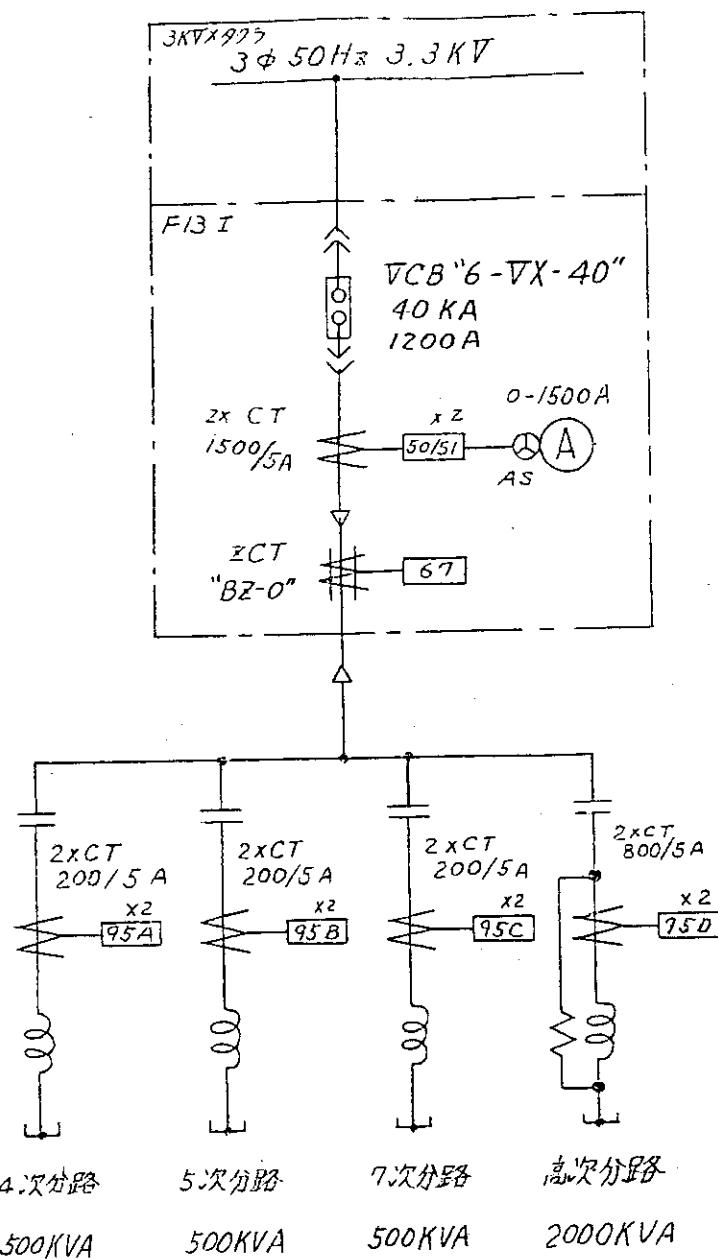
第 5.7-2 表 (a) 高調波フィルタ一定格表

名 称	コンデンサ容量 ( $\mu F/\phi$ )	リアクトル容量 ( $mH/\phi$ )	冷却方式	形 式
4 次 フィルター	137	4.88	油入自冷式	KBU
5 次 フィルター	140	2.95	"	"
7 次 フィルター	143	1.44	"	"
HP(11次)フィルター	580	0.144	油入自冷式	KBU

㊂ { 定格電圧 3.300V  
基本周波数 50 Hz  
相 数 3 相

第 5.7-2 表 (b) HP フィルター用抵抗器定格表

定格電圧 (V)	16 (基本波)
回路電圧 (KV)	3.3 (± 10 %)
基本周波数(Hz)	50
相 数	3
抵 抗 値 ( $\Omega$ )	3.0 (± 10% at 20 °C)
損 失 (W)	270 (基本波連続)
温 度 上 昇 (°C)	300
絶 縁 耐 力 (KV)	AC. 16



第 5.7-3 図 高調波フィルター単線結線図

## 6. 本体周辺設備

### 6.1 真空排気設備

#### 6.1.1 はじめに

本設備はJFT-2M真空容器内を超高真空中に排気し、また、維持するための装置である。真空容器は、ドーナツ状の容器内にプラズマを生成するためのもので、プラズマ封じ込めの際に真空容器壁からの不純物、あるいは真空中の不純物を限りなく減少させなければならない。不純物が混じり合うとプラズマを冷却する現象が生じることになる。真空排気設備として重要なことは、多量のガスを注入排気する特殊な要求を満足し、放電洗浄処理等に対して有効に作用することにある。また、リーク検出能力に優れた、放出ガスの極めて低い真空装置を作成することである。

#### 6.1.2 排気量の見積

JFT-2M真空容器は付属設備を含め一部にエラストマー材が使用されている。これらのシール材による真空封止は、経年変化等によるリークの問題をかかえており、排気主ポンプは排気口径に見合った、できるだけ大排気容量でダイナミックに排気できるポンプが望ましい。総排気量が多いこととポンプ自身が汚染源にならない条件から現状では、ターボ分子ポンプとクライオポンプが適合する。JFT-2M真空容器で真空にさらされる表面積は、付属真空容器を含めステンレス表面で $\sim 1 \times 10^6 \text{ cm}^2$ である。また、真空容器の一周電気絶縁体としてテフロンが使用されており、真空にさらされる表面積は $\sim 2 \times 10^2 \text{ cm}^2$ 程度である。これらの表面の量と構成から放出ガス量は $\sim 8 \times 10^{-6} \text{ Torr} \cdot \ell/\text{s}$ 程度と見積ることができる。しかし、JFT-2の経験から本体真空容器そのものより付属設備である加熱装置とプラズマ計測装置からの放出ガスが大きくほとんどはこれらより逆流する不純物ガスにより決定される。また、放出ガスを見積る場合、トカマク装置特有である、いろいろな作業を行ったあとに生じる微少なリークの問題を考え合わせる必要がある。ここでは、JFT-2同様の付属設備を結合することを考え合わせ、ガスを流入しない無負荷時の排気量として $1 \sim 2 \times 10^{-5} \text{ Torr} \cdot \ell/\text{s}$ を想定している。必要とする到達圧力は $\sim 10^{-8} \text{ Torr}$ 以下、 $10^{-9} \text{ Torr}$ 台でありたいとすれば、トーラス排気口での排気速度は $2000 \sim 4000 \ell/\text{s}$ を必要とする。

#### 6.1.3 排気設備の性能と構成

はじめに設計の方針を述べる。JFT-2M真空設備では、すでに述べたように良好な真空環境を作成、維持することと、これに加えて特に稼動率の向上に重点をおいた。以下に特徴を述べる。

- (1) 真空が何らかの事故により破られたり、真空ポンプあるいは部品等の故障は、不意に発生するものでこれらに俊敏に対応できる設備でなくてはならない。ここでは、許される範囲で予想される排気量を大きくとり、ポンプの故障が生じても常に別系統のポンプが動作状態にあるように、2系統以上の主ポンプ及び前段ポンプを設けた。

(2) 粗引き段階での排気時間の短縮とターボ分子ポンプの起動、停止操作をできるだけ少なくすることを理由に、粗引き段階のみで使用する専用の排気系を設けた。

(3) 本真空容器は、核融合特有である複雑な真空にかかる部品が数多く組み込まれており、音を発する大リークから、 $10^{-9} \sim 10^{-10}$  Torr · l/s程度の微少なリークまで、広範囲で複雑なリークが発生する。これらを敏速に見つけだし、ただちにリークを止める作業に入らねばならない。そのため、リーク検出残留ガス測定系として、流量可変バルブとターボ分子ポンプから成る差動排気システムを採用している。検出器は、マスフィルター2台により、1台はリーグテスト専用として高感度検知能力を持つ高性能型、もう一方は放電洗浄効果等の日常残留ガスモニター用として過酷な使用に耐える汎用型を設けた。

このような観点で計画され、設置された真空排気系の外観写真を第6.1-1図に示す。また、系統図を第6.1-2図に示す。はじめに主排気系であるが、この系はすでに述べたようにトカマク特有の要求にしたがって設計されたもので主排気系の中でも各系統にはそれぞれ次のような役割がある。定常放電時には各4系統いずれの系の使用も可能であるが、放電洗浄、ベーキング、クライオポンプの活性等の多量の不純物を処理する系と常に清浄であるべき系とを区別している。

以下に各系の特徴を述べる。

#### (1) A系統

定常放電時使用を主目的とした系であり、プラズマ放電間における不純物ガスを含む水素ガスの排気を行うため、実験周期2.5分間隔の2/3時間程度でプラズマ放電直後の圧力～ $5 \times 10^{-4}$  Torrから、真空容器のベース圧力～ $10^{-8}$  Torr台まで排気する能力を持つ系である。公称排気速度6500 l/s ( $N_2$ )のターボ分子ポンプと500 φ口径のゲートバルブから構成する。

#### (2) B系統

第6.1-3図に示すP-Q特性図からもあきらかであるが、 $10^{-3} \sim 10^{-2}$  Torrの圧力領域での連続使用が可能であり、特にできる限り大きな排気速度を要求され、高い圧力領域で使用するグロー放電洗浄に焦点を合わせた系である。公称排気速度2000 l/s ( $N_2$ )のターボ分子ポンプと250 φ口径のゲートバルブから構成する。

#### (3) C系統

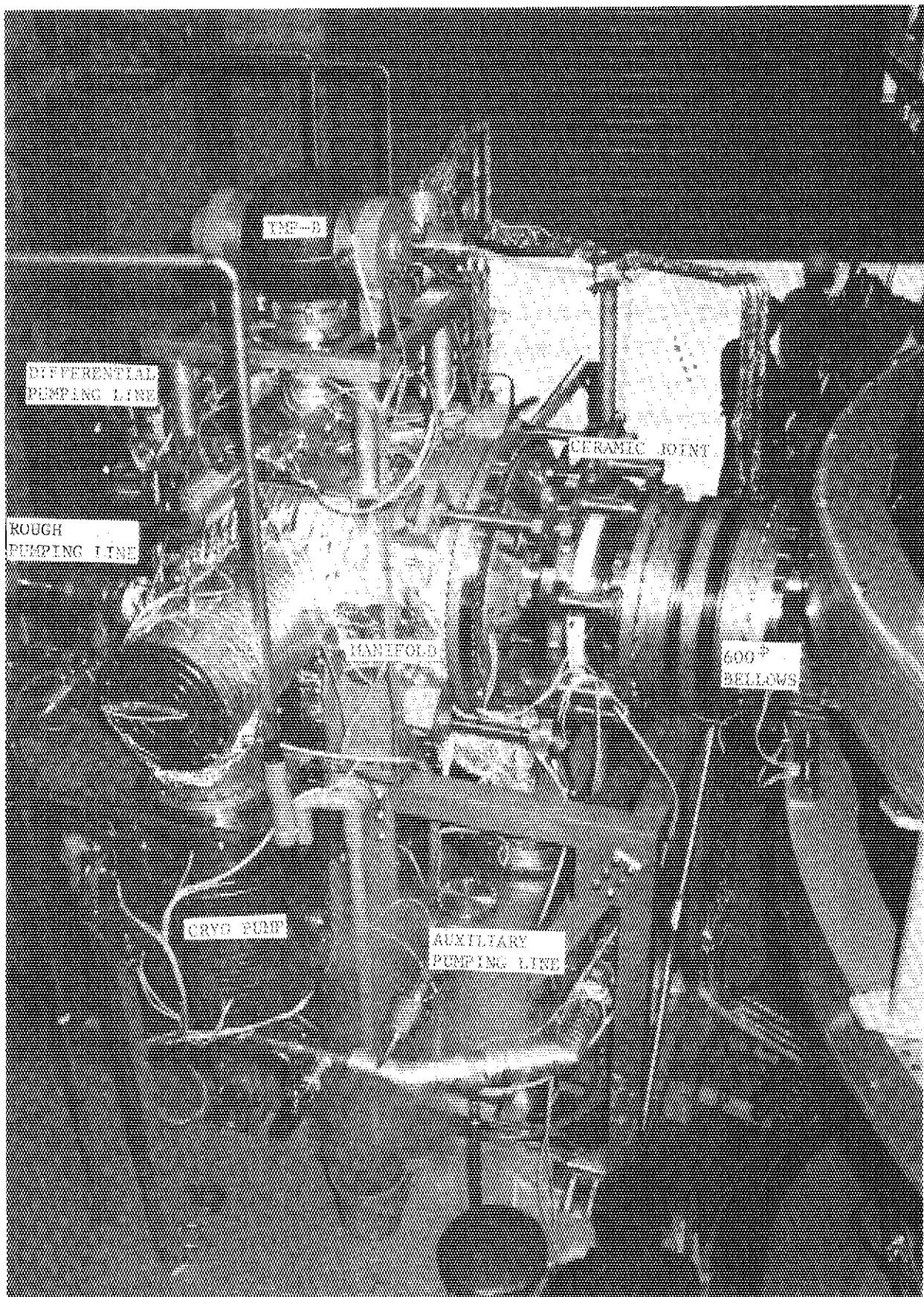
多量の不純物ガスを取扱うことを目的とした系であり、クライオポンプの活性、大気直後の真空立ち上げ、ベーキング等で主に使用される。公称排気速度1700 l/s ( $N_2$ )のターボ分子ポンプと350 φ口径のアングルバルブから構成する。

#### (4) D系統

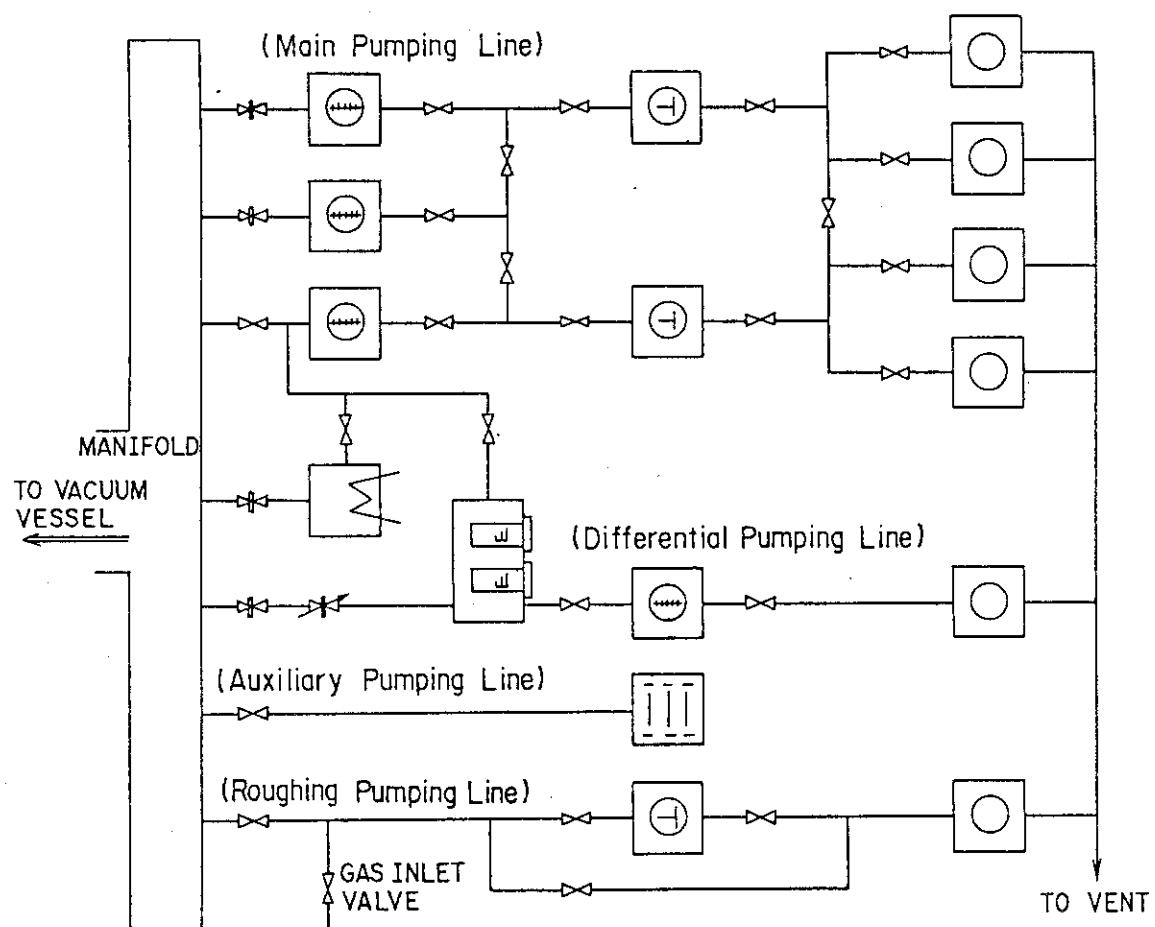
放電洗浄として不可欠なTDCによって放出される不純物ガスの排気を目的にした系であり、不純物のガスの中でも代表的な水蒸気に焦点を合わせた系で、水蒸気に対する排気速度は～ $10^4$  l/sを有している。液体窒素を併用した18 °K機械式冷凍機によるクライオポンプから構成する。

第6.1-4図にA, B, C, D全系を動作させた場合の、質量数に対するトーラス排気口における有効排気速度を示す。測定は、水素、ヘリウム、窒素、アルゴン各ガスを高速弁により注入し、排気時定数より求めたものである。排気速度は水素において5000 l/s、窒素において3000 l/sを有している。

その他の系として、残留ガス測定系であるE系統、スペッタイオノンポンプにより構成する補助排気設備であるS系統、粗引系としてR系統が接続する。また、主排気系の前段ポンプとして、 $500\text{ m}^3/\text{h}$ のメカニカルブースターポンプ2台と $760\text{ l}/\text{min}$ の油回転ポンプ4台が並列構成で接続する。第6.1-5図に粗引段階での圧力低下曲線を示す。大気圧から $10\text{ Torr}$ まで $3000\text{ l}/\text{min}$ の油回転ポンプ単独により排気V、 $10\text{ Torr}$ より $500\text{ m}^3/\text{h}$ のメカニカルブースターポンプを加え排気した場合の粗引時間である。大気圧から $0.1\text{ Torr}$ までの所要時間は約20分である。真空度の経過であるが20時間以内で $10^{-7}\text{ Torr}$ 台に降下し、ベーキング( $\lesssim 150\text{ }^\circ\text{C}$ )を約70時間行うことにより $3 \sim 5 \times 10^{-8}\text{ Torr}$ になる。放電洗浄により $1 \sim 2 \times 10^{-8}\text{ Torr}$ の真空度まで降下する。第6.1-6図に重水素による高温プラズマを生成～12時間後に測定した真空容器内の残留ガスを示す。JFT-2の定常時の代表的な残留ガス<sup>(7)</sup>は水素62%、水蒸気18%、一酸化炭素19%に対し、JFT-2Mでは、水素+重水素55%、水蒸気25%、一酸化炭素12%程度の割合であり、特に水蒸気分圧が高い。ベーキング温度が最大 $350\text{ }^\circ\text{C}$ であったJFT-2真空容器に比較し $150\text{ }^\circ\text{C}$ 以下であることと、テフロンあるいはバイトン材に吸収する水蒸気分の放出が影響していると考えられる。



第 6.1-1 図 JFT-2 M 真空容器と結合された真空排気装置



[Diagram symbol] Turbomolecular pump (6500 l/sec, 2000 l/sec, 1700 l/sec)

[Diagram symbol] 18 °K Cryo condensation pump (3000 l/sec)

[Diagram symbol] Mechanical booster pump (500 m³/hour)

[Diagram symbol] Rotary pump (760 l/min, 3000 l/min)

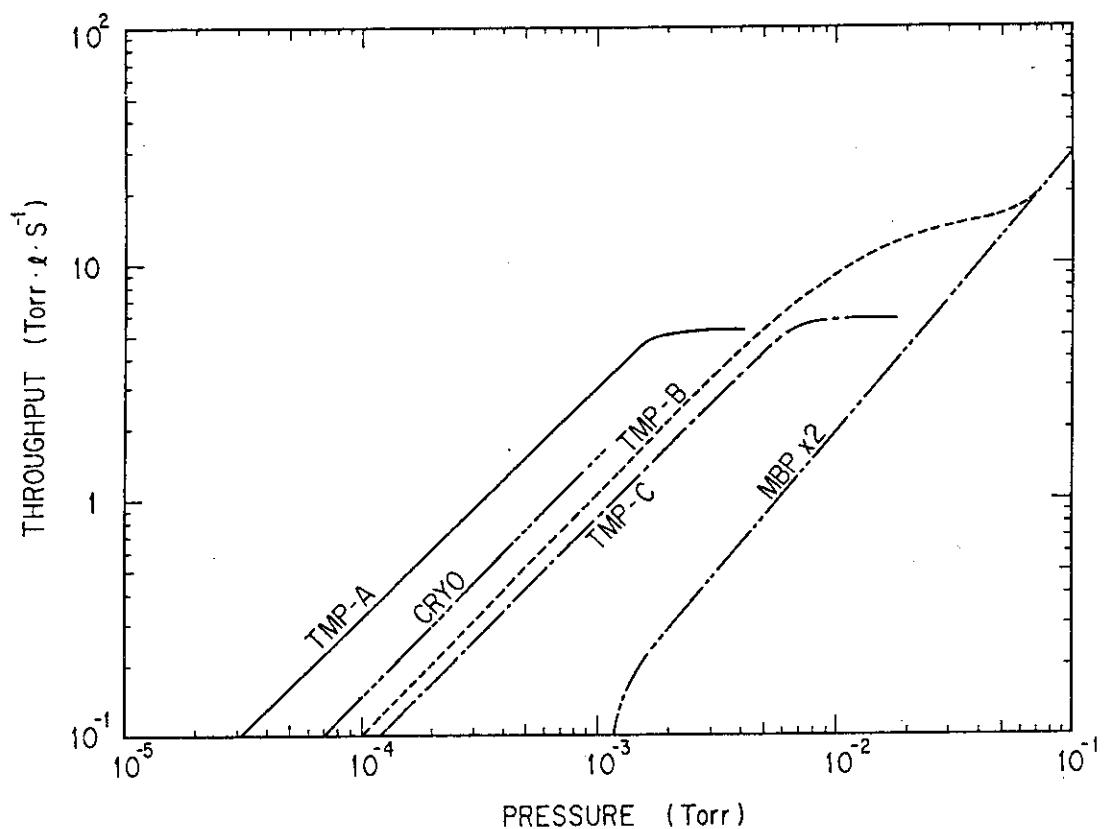
[Diagram symbol] Sputter-ion pump (500 l/sec)

[Symbol] Gate valve

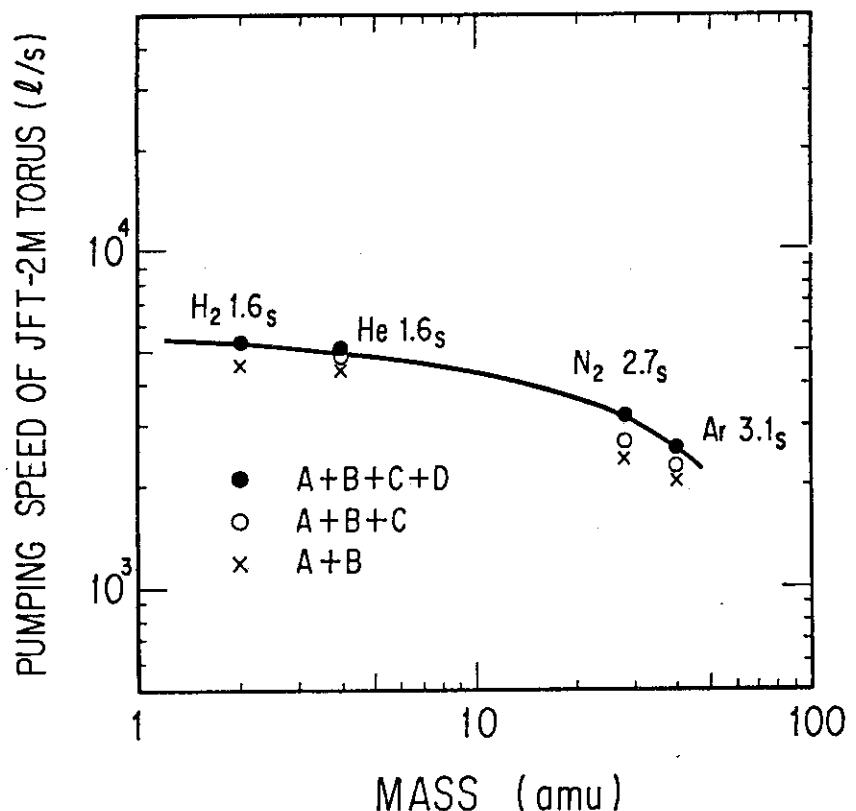
[Symbol] Angle valve

[Diagram symbol] Mass filter

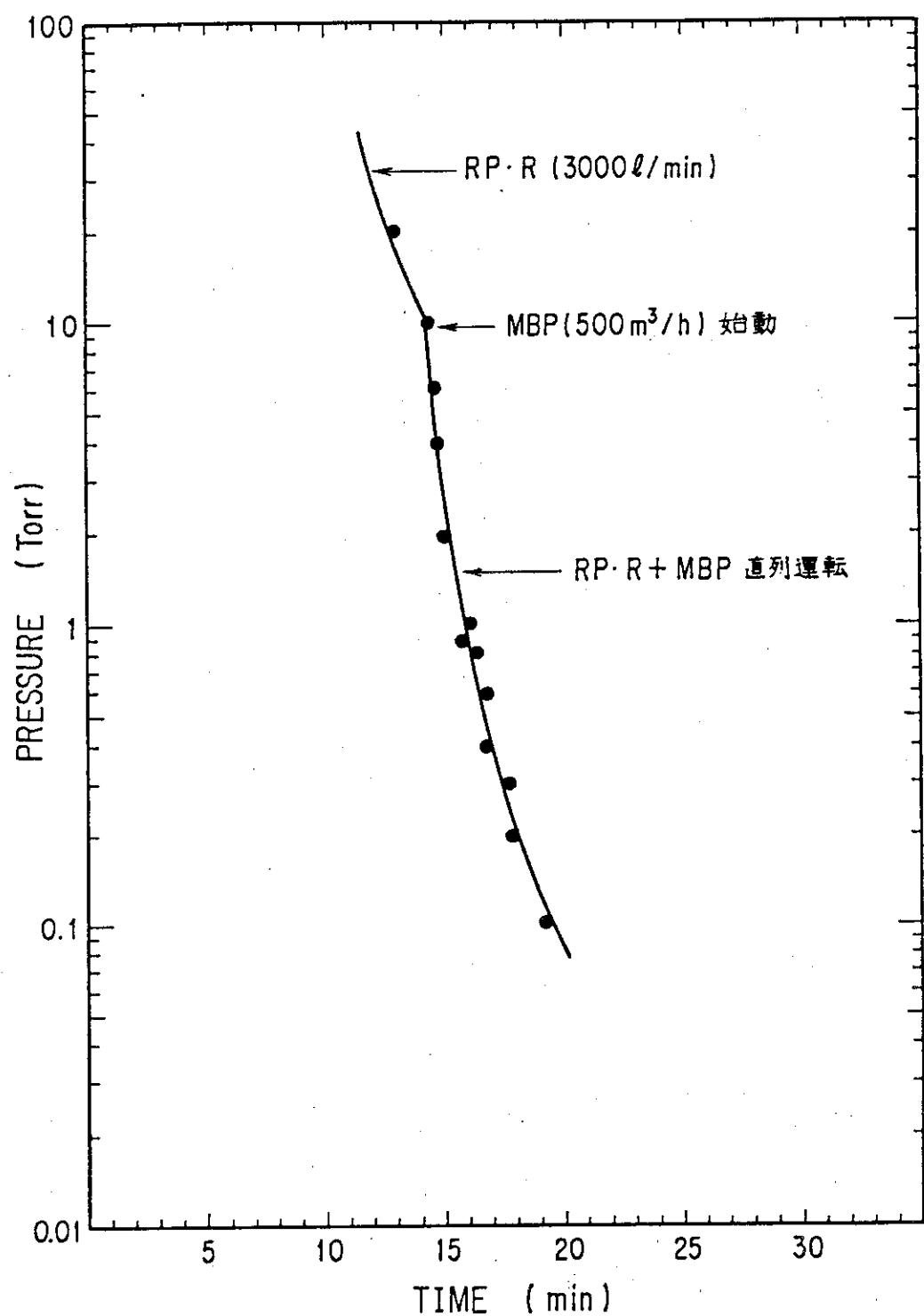
第 6.1-2 図 真空排気系系統図



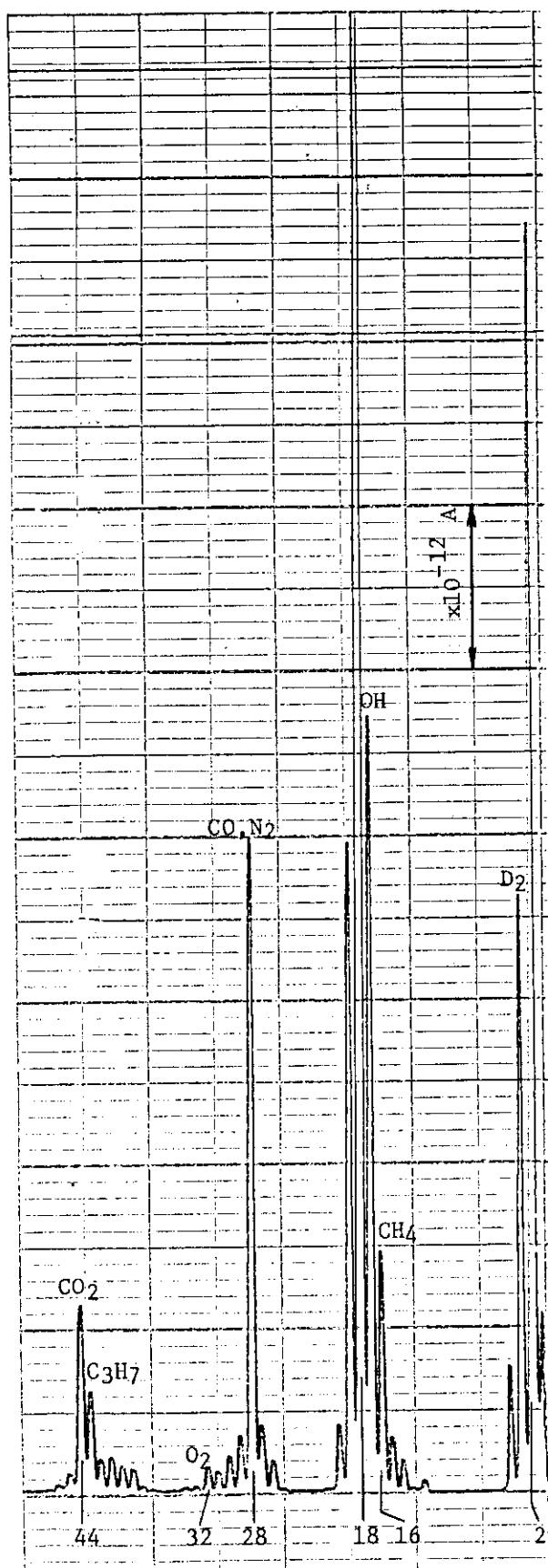
第 6.1-3 図 真空ポンプの圧力に対する流量特性



第 6.1-4 図 質量数に対するトーラス排気口における排気速度



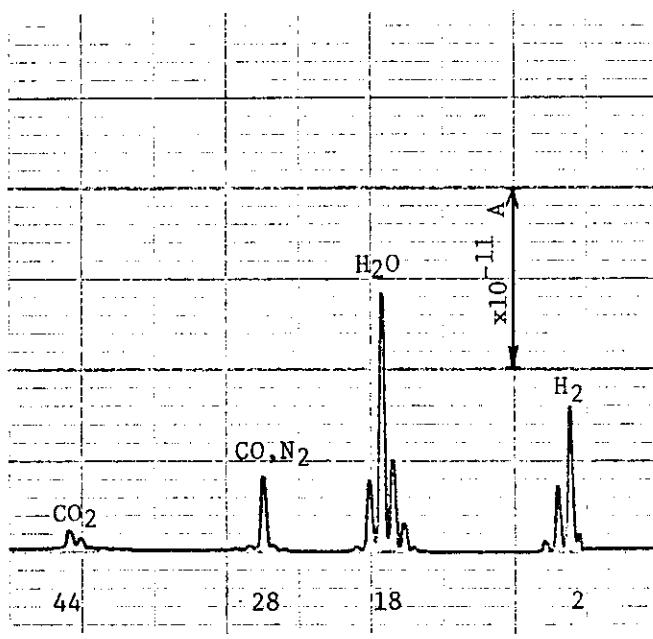
第 6.1-5 図 粗引排気曲線



Background Pressure :  $1.5 \times 10^{-8}$  Torr

Emission : 3 mA

Vacuum Pump : TMP-A + TMP-B + CRYO



第 6.1-6 図 重水素による高温プラズマ生成 12時間後に測定した  
真空容器内の代表的残留ガス

## 6.2 冷却設備

### 6.2.1 概要

JFT-2Mでは、トロイダルコイル、ポロイダルコイル、真空容器分割部、可動リミターの強制循環冷却を行っている。第6.2-1図「JFT-2M冷却系統図」に示す様に一次冷却水ポンプから熱交換器を通して送られてくる一次冷却水を、往水冷却ヘッダに渡し、各熱負荷を通して熱くなった一次冷却水を、還水冷却ヘッダに集め、一次冷却水タンクに戻す設備である。又この一次冷却水を熱交換器を介して、冷却するための二次冷却設備がある。一次水冷却設備は、JFT-2M完成時より約半年間は、既存の冷却設備で流用していたが、58年11月より、改造工事を終了し、現在の様な純水設備として完成した。

また、この一次冷却水設備とは別に、トロイダル電源用の直流発電機の軸受並びに液体抵抗器を冷却するMG冷却設備があり、これらを総称してJFT-2M冷却設備としている。(第6.2-2図参照)

### 6.2.2 一次冷却水設備

#### (1) 熱負荷

一次冷却設備の熱負荷は第6.2-1表「発生熱量」に示すようにトロイダルコイルの $4.95 \times 10^5$  kcal/h の発熱量が、全熱負荷の95%をしめている。ポロイダル、真空容器分割部、可動リミタの発熱量を合わせた全熱量は、通常パルス運転時において5.18kcal/h である。

#### (2) 一次冷却設備の除熱量

実験運転時に熱負荷より発生した熱を、強制循環方式により、除熱する。又熱負荷で暖められた一次冷却水は熱交換器で二次冷却水によって冷やされる。この熱交の設計条件、設計値は、次の通りである。

##### ① 設計流量

一次冷却水流量： $28 \text{ m}^3/\text{h}$

二次冷却水流量： $72 \text{ m}^3/\text{h}$

補給水 :  $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$  (max)

##### ② 設計温度

一次冷却水ライン :  $70^\circ\text{C}$  (イオン交換器  $60^\circ\text{C}$  以下)

二次冷却水ライン :  $40^\circ\text{C}$

補給水ライン :  $35^\circ\text{C}$

##### ③ 热交換器能力

熱交換器除熱能力 :  $540.000 \text{ kcal}/\text{h}$

##### \* 設計条件

###### <一次冷却水>

・流量  $28 \text{ m}^3/\text{h}$

・温度 入口  $53.4^\circ\text{C}$

出口  $35^\circ\text{C}$

###### <二次冷却水>

$72 \text{ m}^3/\text{h}$

入口  $20^\circ\text{C}$

出口  $27.5^\circ\text{C}$

### 6.2.3 二次冷却水設備

一次冷却水を冷却する。二次冷却水のループ回路で、クーリングタワー（MT-10011）によって二次冷却水を冷却する設備であり二次冷却水ポンプにより強制循環し熱交へ送っている。

### 6.2.4 MG 冷却設備

トロイダルコイル電源用直流発電機（MG-1, MG-2）の軸受、液体抵抗器を冷却する設備で、ポンプにより強制循環し各熱負荷で暖められた冷却水をクーリングタワーによって除熱する。

### 6.2.5 冷却設備の運転操作

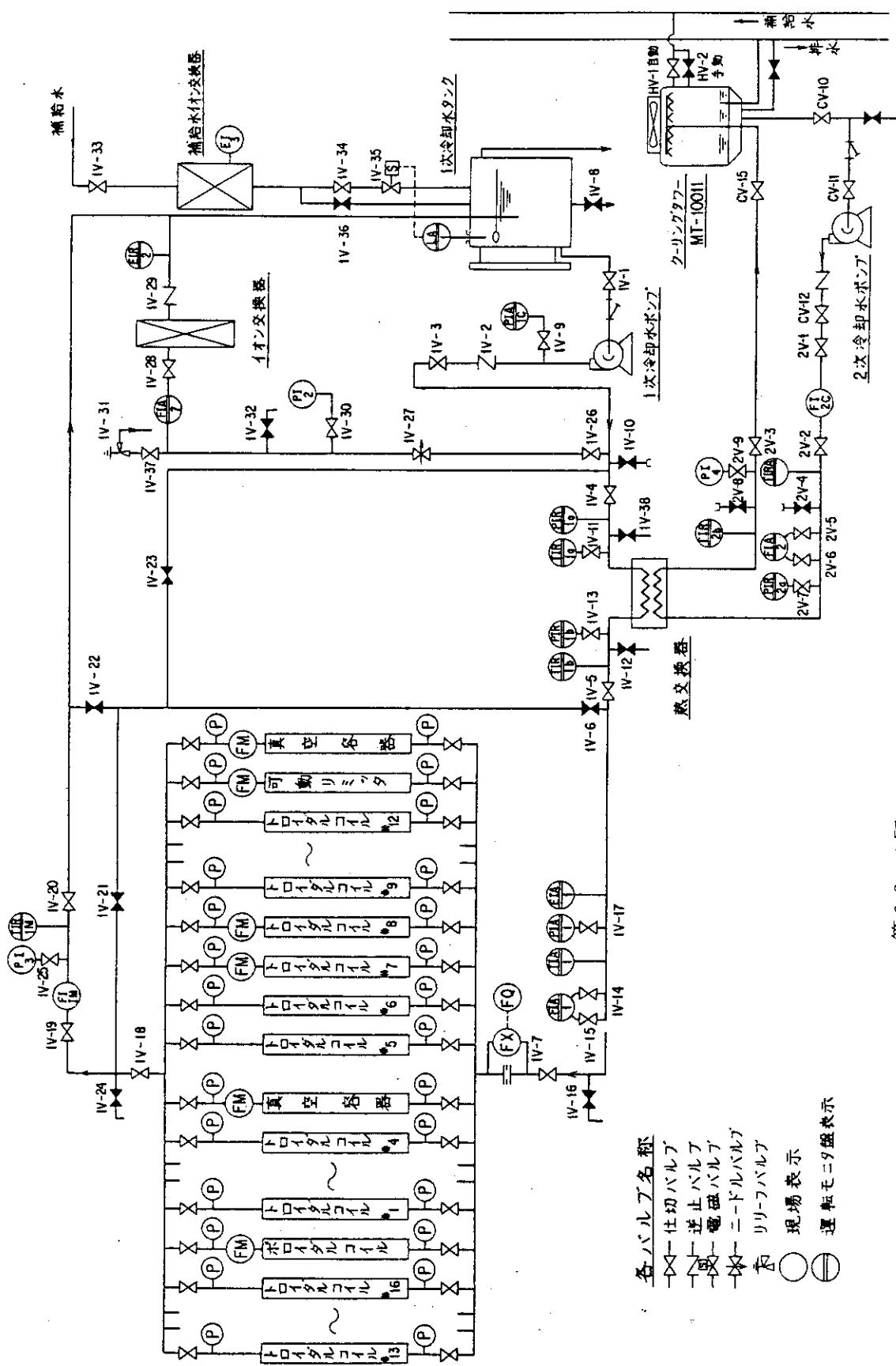
冷却設備の運転及び操作は、JFT-2電源補機室内の現場制御盤、運転制御室内のモニタ盤の双方での運転操作が可能である。各ポンプ、設備の保護には、各種の保護装置が設けられていて機器の損傷を防ぐ事のできる構造となっている。又モニタ盤において重要な箇所の圧力、流量、温度がモニタできる設備になっている。なお、この冷却設備の一次冷却水は純水を使用しているため、トロイダルコイル、ポロイダルコイル、可動リミター、真空容器分割部の電気的絶縁を高める事ができ、安全の確保に大きな役割を果たしている。

### 6.2.6 まとめ

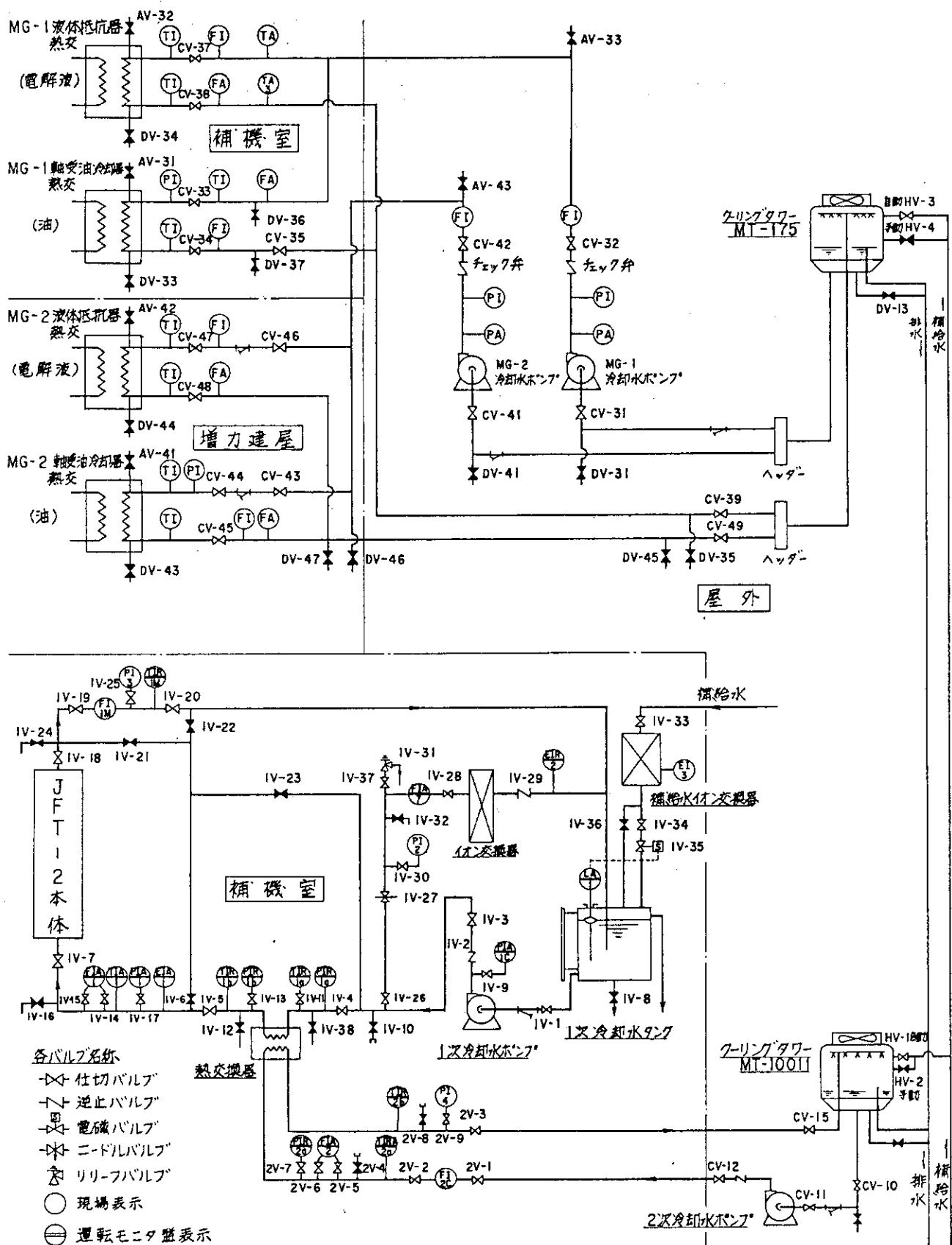
冷却設備は各コイル及び設備機器の異常な発熱を防ぎそれらの機器の健全性を確保する役割を果たしている。

又純水を使う事により電気的な安全性を向上させ、JFT-2Mの実験を安全にかつ、円滑に行う事を目的とした設備である。

注) 第6.2-2表に冷却設備の主要機器を示す。



第 6.2-1 図 JFT-2M 冷却系統図



第 6.2-2 図 JFT-2 M 冷却系統図(2)

第 6.2-1 表 JFT-2M 発生熱量

	流量 1系統	系統数	定格			
			全流量	圧損	短形波換算 通電時間	熱量
TF/C	1.178 $\text{ton}/\text{hr}$	16×24	27.1 $\text{ton}/\text{hr}$	1.5 $\text{kg}/\text{cm}^2$	4.5 sec	$4.95 \times 10^5 \text{kcal}/\text{hr}$
S <sub>1</sub>	5.4 "	2×1	0.65 "	3.3 "	0.5 "	$5.7 \times 10^3$ "
S <sub>2</sub>	5.4 "	2×1	0.65 "	3.0 "	" "	$3.44 \times 10^3$
S <sub>3</sub>	1.9 "	2×1	0.23 "	0.3 "	" "	$1.96 \times 10^3$
OH	0.9 "	2×1	0.054 "	3.0 "	" "	$1.03 \times 10^3$
Q <sub>1</sub> 冷却板	4.5 "	2	0.54 "	0.3 "	(ベーキング時)	$7.6 \times 10^3$
Q <sub>2</sub>	3.5 "	1	0.21 "	4.5 "	0.5 sec	620
					ベーキング時	$3 \times 10^3 \text{kcal}/\text{hr}$
真空容器 分割部 ⑤	30 "	1	1.8 "	1 "	-	-
" ⑬	30 "	1	1.8 "	1 "	-	-
可動リミター	10 "	1	0.6 "	1 "	-	-
計		398	33.63 $\text{ton}/\text{hr}$			

第 6.2-2 表 冷却設備主要機器

(名 称)	(規 格 • 型 式 • 性 能 )
一次冷却水ポンプ	型 式 : GS 528-2 吐 出 量 : 30 m <sup>3</sup> /h 全 揚 程 : 100 m 回 転 数 : 2900 rpm 電 動 機 : SF-E 30kw 200v 2p
一次冷却水タンク	型 式 : CLN 型 寸 法 : Φ 18.20 × 1810 H 容 量 : 4 m <sup>3</sup> 材 質 : 架橋ポリエチレン
熱 交 換 器	型 式 : KSH-1 型 伝熱面積 : 20 m <sup>2</sup> (一次冷却水) (二次冷却水) 流 量 : 28 m <sup>3</sup> /h 72 m <sup>3</sup> /h 入口温度 : 54.3 °C 20 °C 出口温度 : 35 °C 27.5 °C 設計圧力 : 10 kg/cm <sup>2</sup> 2.1 kg/cm <sup>2</sup> 交換熱量 : 540.000 kcal/h
イオン交換器循環用	型 式 : C-40S イオン交換樹脂容量 : 40 ℥ 流 量 : 2 m <sup>3</sup> /h 設計温度 : 60 °C 設計圧力 : 3 kg/cm <sup>2</sup> G
イオン交換器補給水用	型 式 : C-10S イオン交換樹脂容量 : 10 ℥ 流 量 : 500 ℥/h 設計温度 : 35 °C 設計圧力 : 3 kg/cm <sup>2</sup> G
二次冷却水ポンプ	型 式 : OV-CH 100R4-57.5 容 量 : 72 m <sup>3</sup> /h 全 揚 程 : 22 m 回 転 数 : 1430 rpm 電 動 機 : TFDA-KK 7.5kw 200v 4p

(名 称)	(規 格 • 型 式 • 性 能 )
クーリングタワー MT - 10011	型 式 : MT - 10011 使用区分 : 二次冷却水用 冷却能力 : 390.000 kcal/h 冷却水量 : 72 m <sup>3</sup> /h 入口温度 : 37 °C 出口温度 : 32 °C 電動機 : 22 kw 200v
MG - 1 冷却水ポンプ	型 式 : OV - CH 80R4 - 537 容 量 : 30.4 m <sup>3</sup> /h 全揚程 : 19.7 m 電動機 : TFQA - K 3.7kw 200v 2p
MG - 2 冷却水ポンプ	型 式 : HC - 826 容 量 : 27.8 m <sup>3</sup> /h 全揚程 : 20 m 電動機 : SF - E 200v 3.7kw 2p
MG - 1 用熱交換器	(1) MG - 1 軸受油用 伝熱面積 : 4 m <sup>2</sup> 流量 : 110 ℥/min 循環油量 : 55 ℥/min (2) MG - 1 液体抵抗器用 冷却水量 : 240 ℥/min
MG - 2 用熱交換器	(1) MG - 2 軸受油用 伝熱面積 : 6.3 m <sup>3</sup> 冷却水量 : 160 ℥/min 循環油量 : 80 ℥/min (2) MG - 2 液体抵抗器用 型 式 : WUC - 225 冷却水量 : 150 ℥/min

(名 称)	( 規 格 • 型 式 • 性 能 )
MG用 クーリングタワー	型式 : MT-17511 使用区分 : MG 冷却水用 冷却能力 : 682500 kcal/h 冷却水量 : 58.2 m <sup>3</sup> /h 設計水温 : 入口 37 °C 出口 32 °C 電動機 : 5.5kw 200v 2p

### 6.3 ガス導入設備

ガス導入設備は、真空容器に動作ガス( $H_2$ ,  $D_2$ )または希ガス( $Ne$ ,  $He$ ,  $Ar$ )を注入するための設備であり、測定用マニホールド、ガス導入系統配管、真空排気ポンプ、真空計、各種ガスボンベ、及び各バルブ類で構成されていて、圧電素子型高速弁を使って、ガスを注入している。また、この設備の操作は、主に、JFT-2M制御室内のガス導入系制御盤によって遠隔操作で行われる。ガス導入設備は、より純度の高いガスを、段階的に注入量の制御をしながら安定性良く注入することを目的としている。

#### 6.3.1 ガス導入系統

JFT-2Mのガス導入装置の系統は主に3系統ある(系統図を第6.3-1図に示す)1つは水素ガスや重水素ガスを、圧電素子型高速弁、大容量用、約100 Torr. l/s注入できる、高速弁を使用して、注入する系統であり、ポートNo.1. ポートNo.12の2ヶ所から注入できるようになっている。

2つ目の系統は不純物及び重水素系統で主に、 $Ne$ ,  $He$ 等の希ガス若しくは重水素を注入する系統である。

ガス注入弁には、PV-10(Veeco社製、圧電素子型高速弁)を使用していて、ポートNo.6. No.15の2ヶ所から注入できるようになっている。先に述べた、水素ガス系統と併用して、同時にガス注入ができるシステムになっている。

3つ目の系統は、アルゴンガス系統で、これはAr専用配管で、とくに同軸マグネットロン型、RFチタンスパッタ蒸着装置によるチタン材の蒸着の際の雰囲気ガスとして、アルゴンガスを注入する為の系統である。この系統は、他の系統から独立している。又この系統もPV-10を使用し、ポートはNo.12の1ヶ所である。

#### 6.3.2 ガスの種類

JFT-2Mのガス導入設備は、4種類のガスを常時注入できるようになっている。代表的なものを以下に掲げる。

- (1) 水素及び重水素：燃料ガスであり、JFT-2Mの各種の実験において、ターゲットプラズマ生成の基本となるガスである。
- (2) 希ガス( $Ne$ ,  $He$ 等)：JFT-2Mにおける希ガス類は、主に不純物の計測等において使用する場合がほとんどであり、通常の実験においては、利用する機会が割合少ないガスである。
- (3) アルゴンガス：(2)項で述べた様に、主に同軸マグネットロン型、RFチタンスパッタ蒸着装置による。チタン蒸着に使用するガスである。JFT-2Mでは、昭和59年3月より、同型装置によるチタン蒸着を開始する予定である。

#### 6.3.3 ガス注入方式

JFT-2Mにおけるガスの注入方式には連続注入とパルス注入の2種類がある。これらの切換は、JFT-2M制御室のガス導入系制御盤操作パネル面の、切換スイッチを使って切換えること

ができ、同時に複数のガス注入弁を動作する事が可能である。以下にその特徴を記載する。

(1) 連続注入：主に放電洗浄(TDC)，グロー放電、および、同軸マグнетロン型、RFチタンスパッタ蒸着で行われる注入方式で、圧電素子型高速弁に連続的に電圧を印加し、 $0.1 \sim 1 \text{ Torr} \cdot \ell/\text{sec}$  程度のガスを、JFT-2M、本体真空容器に注入する。

この時の注入量の設定は、Veeco社製の定電圧電源、APC-110を使用し、 $0 \sim 100\text{v}$ まで可変し、目標とする注入量(ガス圧)に設定する。

(2) パルス注入：実験放電の時に行われる注入方式で、パルス電源により $0 \sim 200\text{v}$ まで段階的に可変し、パルス電圧を圧電素子型高速弁に印加してガスを注入する。

1台のパルス電源は、5個のパルスジェネレータを接続する事ができ、各ジェネレータがおののおの $0 \sim 100\text{ms}$ の間でパルス幅の可変が可能である。

JFT-2Mでは実験条件により、印加電圧、パルス幅の設定をし、各種ガスを注入している。

また、58年9月末からは制御用計算機(M-70)によりパルス波形を設定して、ガス注入量を制御する方式で実験が行われる事もあり、当分は、マニアルでの設定と併用して行く予定である。

#### 6.3.4 ガス注入弁

JFT-2Mのガス導入設備では、2種類の圧電素子型高速弁を使用していて、真空容器の下側4ヶ所のポートより、合計8個の高速弁を使用しガスを注入している。

以下に各高速弁の特徴を示す。

(1) PZV-100：この高速弁は、 $\phi 75\text{ mm} \times t 1.2\text{ mm}$  の圧電素子(Transducer社製)を使用し試作した高速弁であり、注入目標を、 $100\text{ Torr} \cdot \ell/\text{sec}$  としている。JFT-2Mの高密度プラズマ生成に使用する為に、ガス導入設備に組込まれているが、より大容量のガスを安定供給できるよう、現在も試作開発中である。

注) 第6.3-2図にPZV-100の構造図を示す。尚PZV-100の名称は、JFT-2M独自で、銘名したものである。

注) 第6.3-3図にPZV-100のガス注入特性を示す。

(2) PV-10：この高速弁は、Veeco社で市販されている圧電素子型高速弁で、通常 $1 \sim 10\text{ Torr} \cdot \ell/\text{sec}$  程度の注入量を得られる高速弁である。ガス導入設備には、合計6個、組込まれている。

注) 第6.3-4図にPV-10の構造図、第6.3-5図にPV-10の流量特性を示す。

#### 6.3.5 排気システム

ガス導入設備の、ガス充てん部分の排気系統は、大きく2系統に分かれています、1つは実験終了後、充てんされているガスなどを高い圧力( $\approx 760\text{ Torr}$ )から、 $1 \times 10^{-2}\text{ Torr}$ 程度の圧力に排気する粗引き系統と、 $\approx 10^{-7}\text{ Torr}$ の超高真空まで排気する主排気系統とがある。これらは、仕切バルブVE-1, VR-1で切換えられ、操作は制御室の制御盤から遠隔操作で行われる。

これとは別に、水素リザーバの真空槽を、排気するためのロータリーポンプを備えている。この水素リザーバは液体窒素で、ガス充てん部の壁面を冷却し、水素ガス中の不純物を、壁面に吸着

させ、不純物の低減化をはかるために試作されたものである。ガス導入設備は、通常は真空排気され、JFT-2M 真空容器へ注入するガスの純度をより高くするよう配慮している。第 6.3-6 図に水素リザーバの構造図を示す。

### 6.3.6 ベーキング

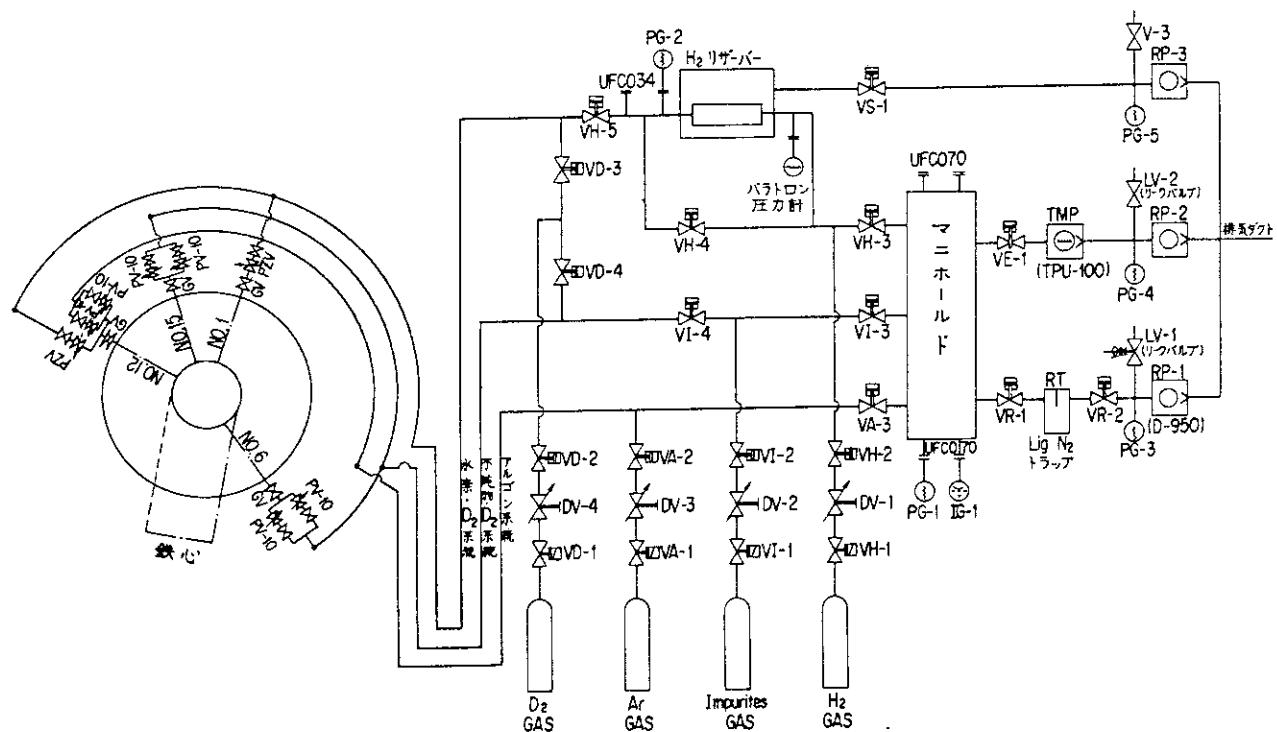
ガス導入設備の配管、マニホールド、及びリザーバにはシースヒータが巻かれている。各配管・マニホールド・リザーバごとにベーキングできる構造となっている。

操作及び温度設定は、制御室のガス導入系制御盤で行われる。最高加熱温度は 200 °C であるが JFT-2M 本体真空容器のベーキング温度に合わせて通常 100 ~ 120 °C で加熱され、水蒸気等を除去し、系全体の清浄化をはかっている。

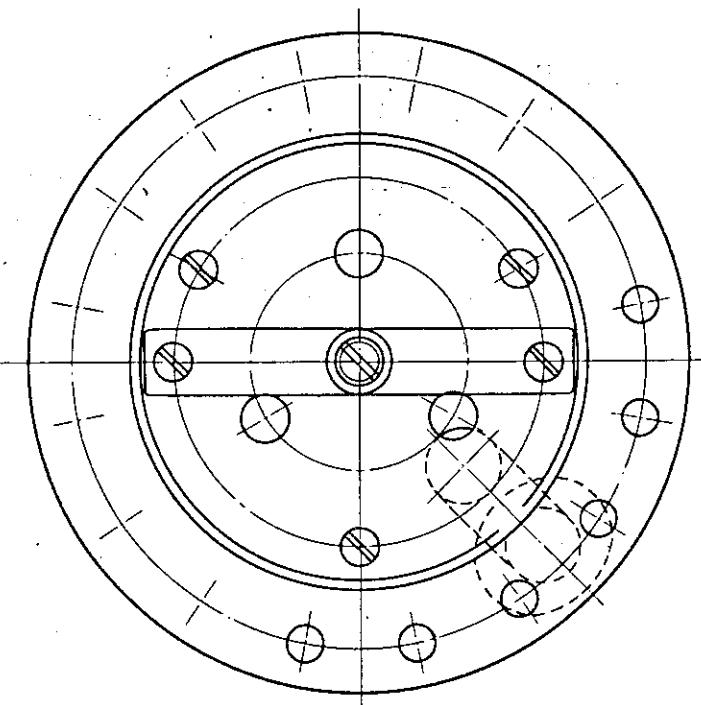
### 6.3.7 まとめ

今まで述べてきたように、JFT-2M ガス導入設備においては、操作性の向上、ガス純度の向上、ガス注入量の安定性の向上などを目指し、現在でも、高速弁の改良モニタ系の整備等の種々の改良を進めている。又 59 年 3 月からは、水素ペレットによる、燃料としての水素の補給実験も計画されている。単にガスの状態での燃料ガスの注入だけでなく、固体として、プラズマ中心へ、水素を補給するこれらの実験とともに、燃料ガス等の補給（注入）技術の開発も進めて行く予定である。

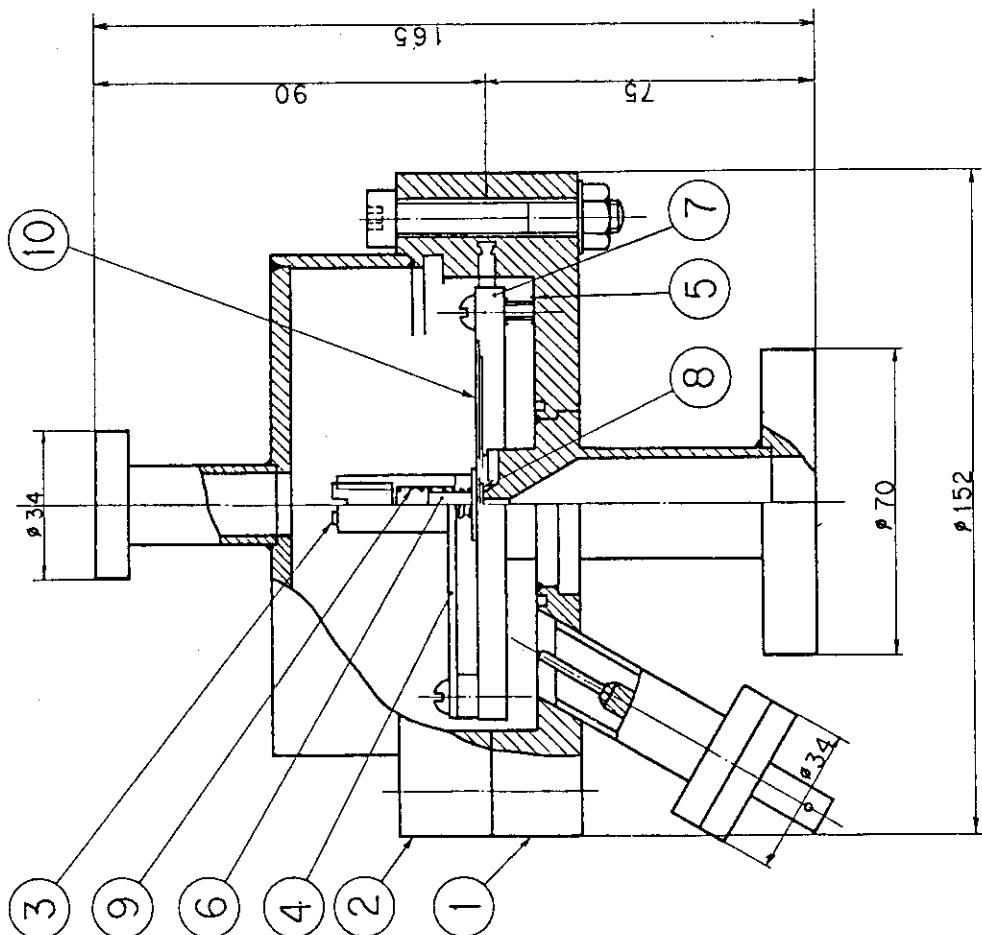
なお、ガス導入設備における主要機器を第 6.3-1 表に記載する。



第 6.3-1 図 JFT-2M ガス導入装置

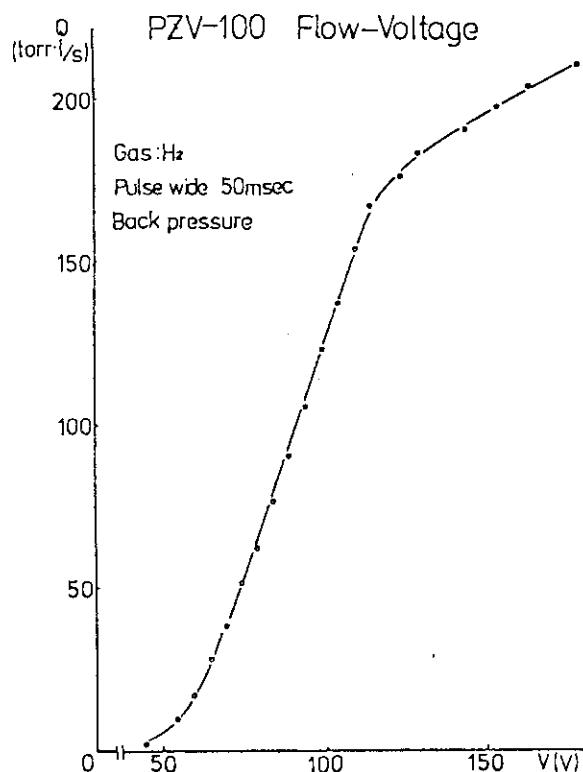


部品番号	部品名	規格	備考
10	電離子子井	1	LITZ-2H
9	ME-27889 調整用コイルバネ	1式	
8	*	8 バイオントレーツ	1
7	*	セラミックプレート	1
6	*	ボルト	1
5	*	5 微調整用コイルバネ	1式
4	*	4 ドリード押工	1
3	*	3 微調整ネジ	1
2	*	2 ベンチ	1
1	ME-27881 井	1	

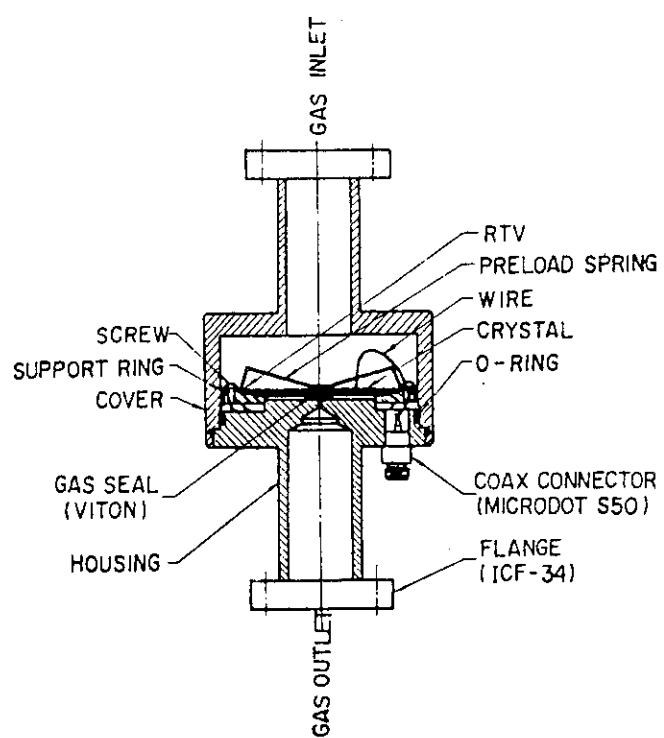


第6.3-2図

圧電素子井 (PZV-100)

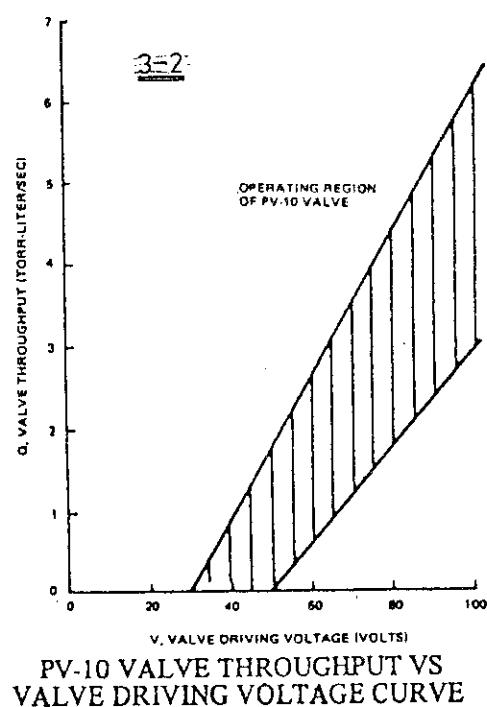


第 6.3-3 図



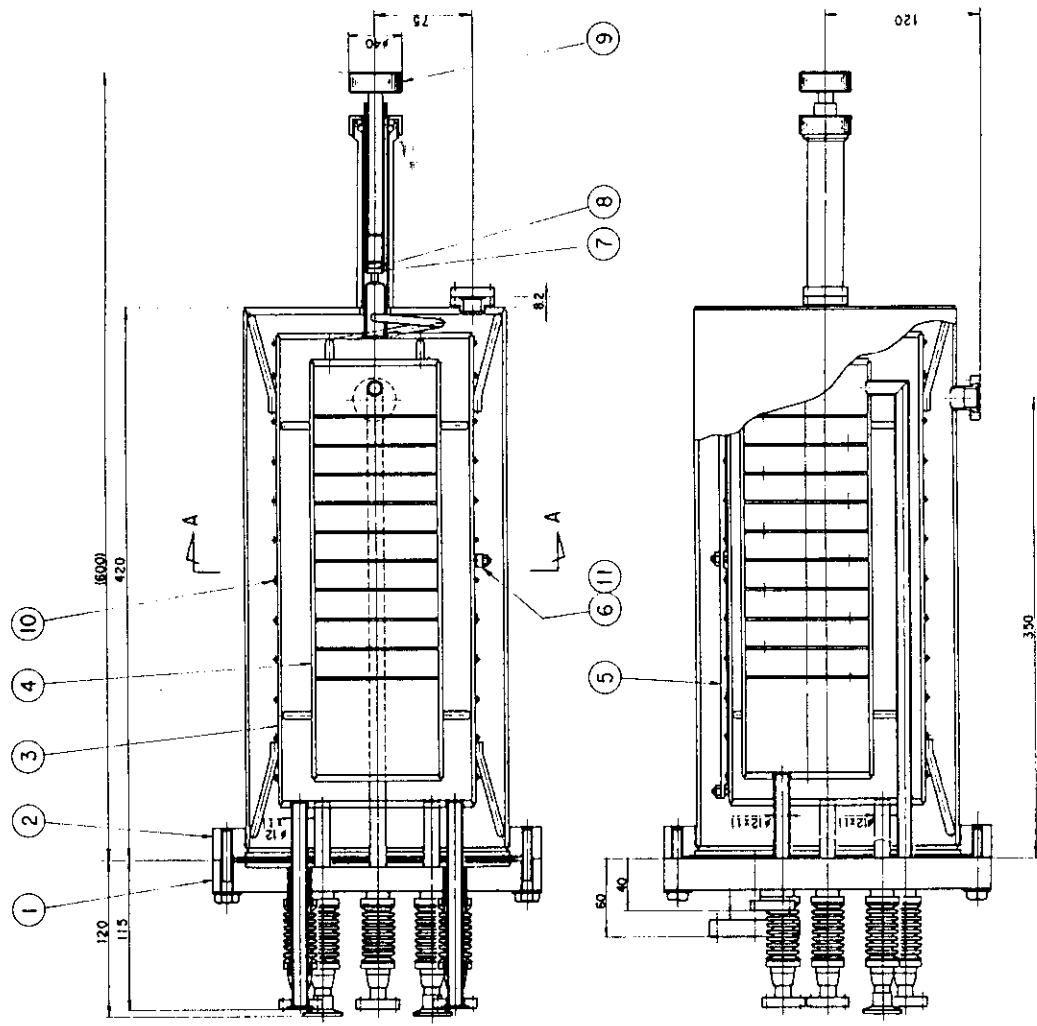
P V - 1 0 の 適

第 6.3-4 図

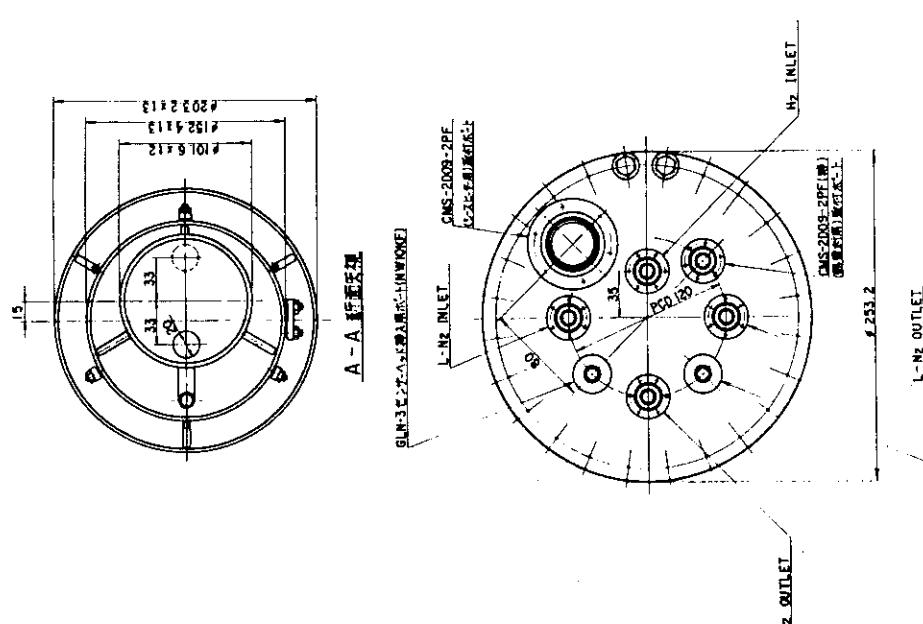


第 6.3-5 図

Liq N<sub>2</sub> 冷却トラップ。(H<sub>2</sub>リザーバー)



第6.3-6回



ITEM NO.	DESCRIPTION	DRAWING NO.	MATERIAL	REMARKS	
				量	吋
1	1-17ラーナシ	SUS304			
1	2. 瓶				
1	3. ハサウエ	SUS316			
1	4. ハサウエ				
1	5. ハサウエ	SUS304			
1	6. ハサウエ				
1	7. ハサウエ				
1	8. ハサウエ	SUS304			
1	9. ハサウエ				
1	10. ハサウエ				
1	11. ハサウエ	C.A.			
1	12. CMS-2019-2TF	UV			
1	13. L-40 溶接部	SUS304			
2	14. L-40 溶接部	SUS304			

第 6.3 - 1 表 ガス導入主要機器(1)

使 用 節 所	型 名 ・ 名 称	仕 様 ・ 性 能
主 配 気 系	TMP ( ターボ分子ポンプ ) 型式 TPU-100  油回転ポンプ 型式 2008 A ( RP-2 )	BALZERS 社製 排気速度 100 ℥/s  ALCATEL 社製 直結型 排気速度 167 ℥/min 到達圧力 $1 \times 10^{-4}$ Torr
粗 引 き 系	油回転ポンプ 型式 D-950 ( RP-1 )	日本真空技術株製 排気速度 960 ℥/min 到達圧力 $5 \times 10^{-4}$ Torr
真 空 度 モ ニ タ	電離真空計 ( IG-1 ) 型式 GI-TL2  ピラニ真空計 型式 GP-2T ( PG-1 ~ PG-5 )  ダイアフテム真空計 型式 220B	日本真空技術株製 圧力測定範囲 $\simeq \times 10^{-8}$ Torr  日本真空技術株製 圧力測定範囲 20 Torr ~ 0.003 Torr  MKS BARATRON 社製 圧力測定範囲 0 ~ 1000 Torr ( G )
高 速 弁 電 源	連続注入用 型式 APC-110	Veeco 社製 圧力レンジ $4 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-6}$ Torr 精度 1.5 % 制御 自動および手動 内部および外部ゲージ可能 内部および外部設定可能

第 6.3 - 1 表 ガス導入主要機器(2)

使 用 築 所	型 名・名 称	仕 様・性 能
高 速 弁 電 源	パルス電源 パルス発生部  ミキサードライバ部	<p>入力信号 :</p> <p>入力インピーダンス <math>50\Omega</math></p> <p>入力電圧 DC +30V</p> <p>パルス幅 <math>\geq 5 \mu\text{s}</math></p> <p>パルス波形 ディケイパルス</p> <p>遅延時間 : <math>1 \sim 100\text{ ms}</math> (可変)</p> <p>パルス電圧 : <math>1.2 \sim 12\text{ V}</math></p> <p>入力信号</p> <p>入力インピーダンス <math>1\text{ K}\Omega</math></p> <p>入力信号電圧 <math>0 \sim 12\text{ V}</math></p> <p>ゲイン <math>\times 10</math></p> <p>出力信号</p> <p>出力インピーダンス <math>50\Omega</math></p> <p>出力振幅 <math>0 \sim +120\text{ V}</math></p>
高 速 弁	PV-10 圧電素子型高速弁	<p>Vee co社製</p> <p>流量 <math>&gt; 1\text{ Torr} \cdot \ell/\text{sec}</math></p> <p>シートリーク量 <math>\simeq 1 \times 10^{-7}\text{ Torr} \cdot \ell/\text{sec}</math></p> <p>応答速度 <math>&lt; 2\text{ msec}</math></p> <p>最大印加電圧 DC + 100V</p>
	PZV-100 圧電素子型高速弁	<p>原研, 製作品</p> <p>流量 <math>&gt; 1\text{ Torr} \cdot \ell/\text{sec}</math></p> <p>シートリーク量 <math>\simeq 1 \times 10^{-7}\text{ Torr} \cdot \ell/\text{sec}</math></p> <p>応答速度 <math>&lt; 2\text{ msec}</math></p> <p>最大印加電圧 DC + 100V</p>
	※ PZV-100の名称は原研独自のものである。	

## 6.4 予備電離

JFT-2Mの実験用プラズマ生成において、圧電素子型高速弁により、真空容器内に注入された動作ガス、(水素及び重水素)を短時間で点火し、プラズマ電流をより早く仕上げるため、予備電離として、電子流入射型予備電離装置(第6.4-1図参照)を用いて、実験プラズマを生成している。

### 6.4.1 構造及び原理

電子流入射型予備電離装置は、6本のフィラメントと2枚の電離板で構成されていて、材質は、イリジウム線及びトリタン(トリウムとタングステンの合金)線を併用していて、実効長は約30mm、線径はΦ0.5mmのフィラメントである。又電極板には、SUS304、磁器スペーサーにはアルミナを使用している。

電子流入射による予備電離は、フィラメントに電流を13~18A通電し、赤熱したフィラメント周辺の、動作ガスを加熱し、熱電子を放出させる。更にフィラメントの両端に設けた電極板にDC電圧を1kV程度印加して、フィラメント周辺の熱電子をEXBの作用を利用し、真空容器内へ押し出す方式の予備電離である。

### 6.4.2 通電方式

電子流入射型予備電離装置のフィラメントの通電は、JFT-2Mパルス放電、各ショット毎に約10~15秒間の長パルス形式で通電される。この時のスタート信号は、JFT-2M主制御盤より、放電10秒前に接点信号の形で受け取り、予備電離コントロール回路(第6.4-2図参照)を介し、直流安定化電源へスタート信号を送り、フィラメントに通電している。

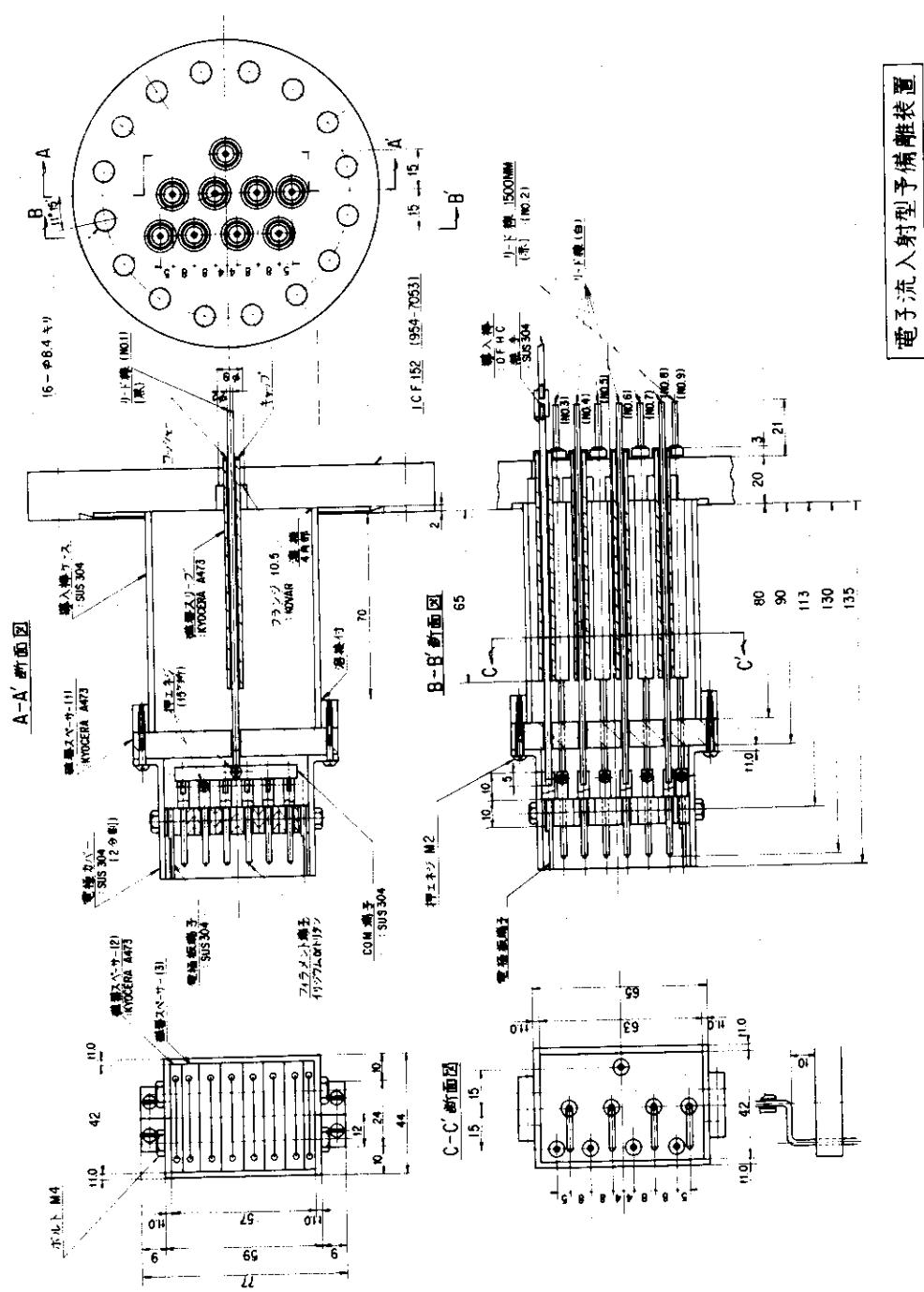
### 6.4.3 取付位置

電子流入射型予備電離装置は、第6.4-3図に示すような位置で、真空容器の上部、下部ポートに各1基取付けられていて、プラズマ中心からの距離は612mmである。そして、トロイダル磁場の方向によって、上部、下部の予備電離装置を使い分けている。

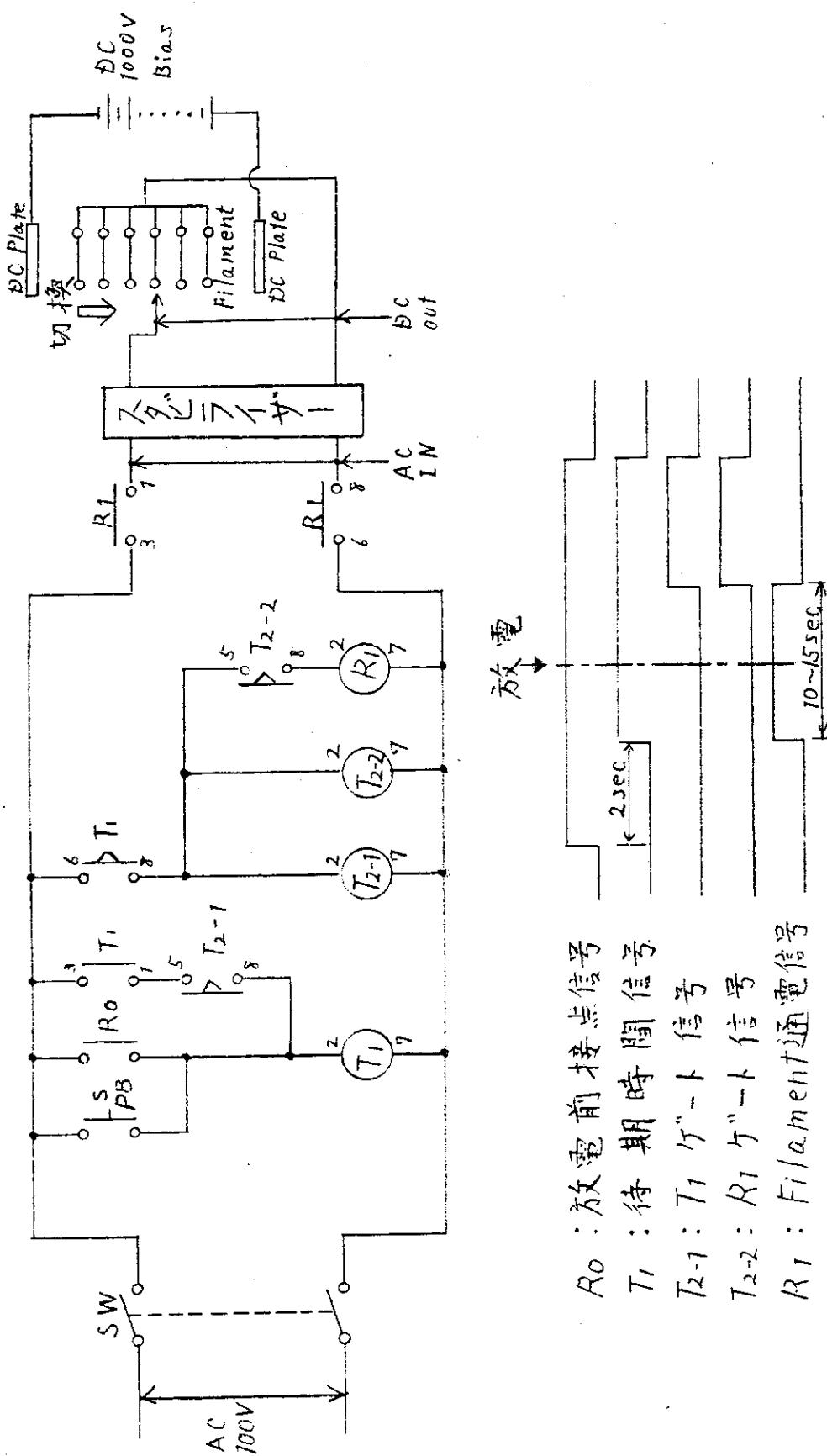
### 6.4.4 フィラメントの加熱温度及びエミッション電流

フィラメントに通電した際のフィラメントの加熱温度は、第6.4-4図に示す様に、15Aで約2500°K程度まで加熱している。また、この時、真空容器とフィラメントとの間に加速の電圧を、560V、1.02KV印加して、真空容器とフィラメントの間で流れるエミッション電流を測定した結果を第6.4-5図に示す。この時のフィラメント材質は、Th-W、Φ0.5mmの線で、実効長30mmのものである。

この電子流入射型予備電離装置を用いた実験では、放電破壊後のプラズマ、ワンターン電圧を約12V~2V程度に下げる事に成功している。

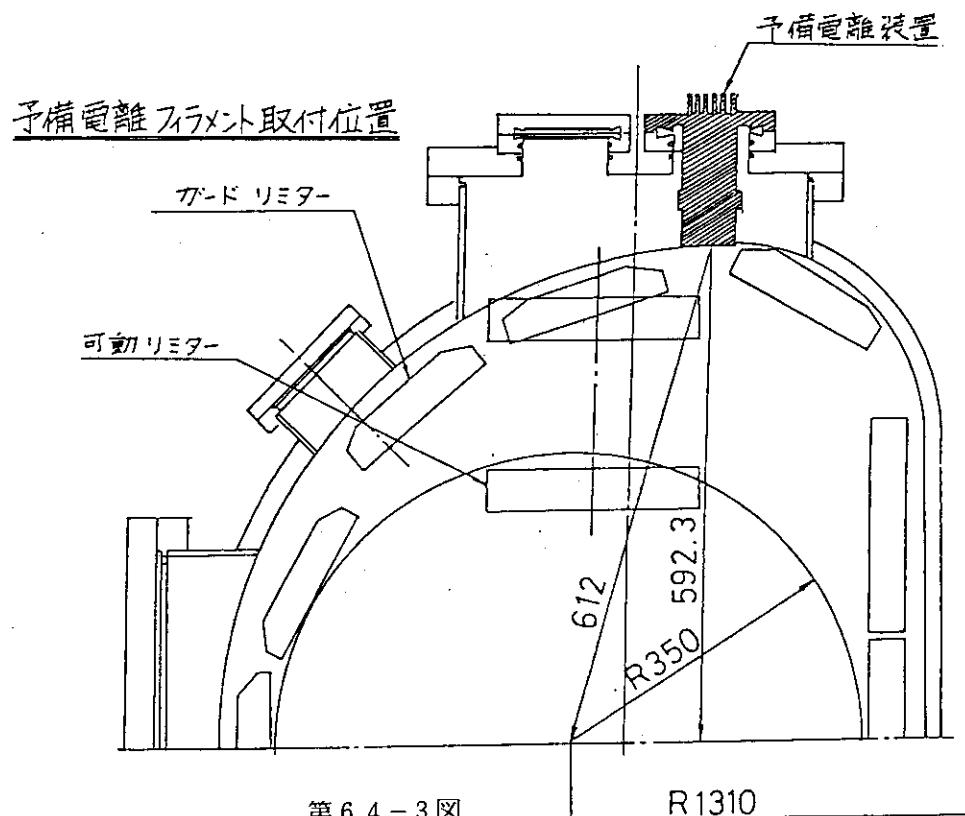


第6.4-1図

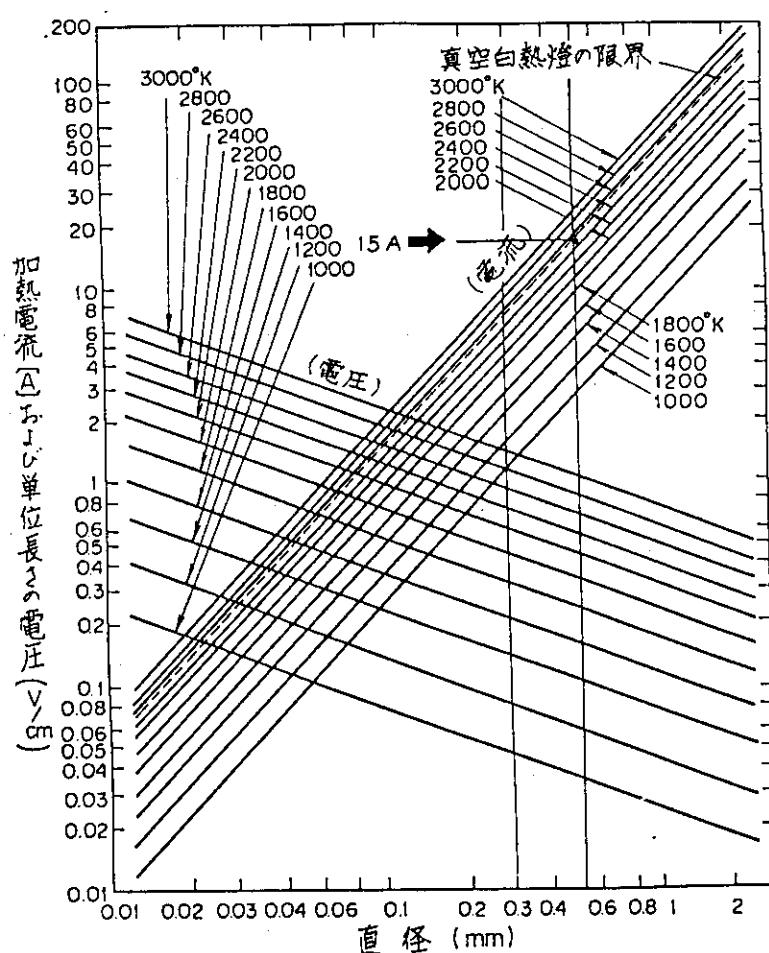


第6.4-2図

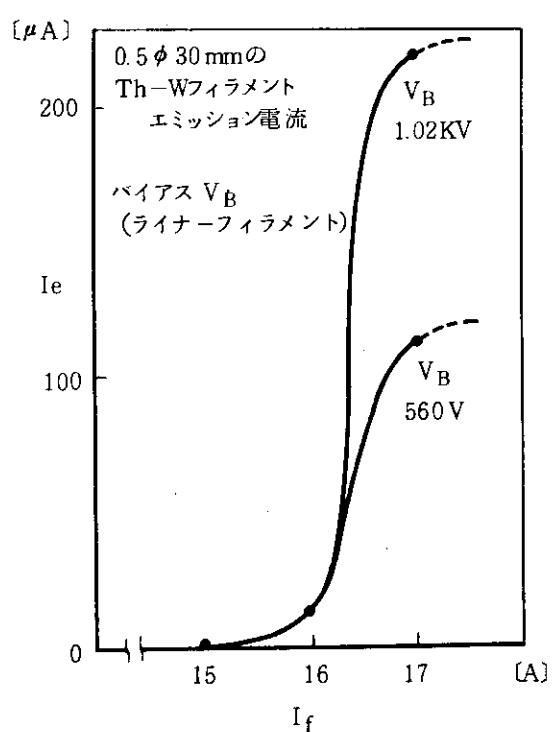
$R_0$ : 放電前接点信号  
 $T_1$ : 待期時制信号  
 $T_{2-1}$ :  $T_1$  フ"ト信号  
 $T_{2-2}$ :  $R_I$  フ"ト信号  
 $R_I$ : Filament通電信号



第 6.4-3 図



第 6.4-4 図



第 6.4 - 5 図

## 7. 総括

本報告の各部で述べたように、設計性能の多くは、58年3月における据付後の機器試験において認められた。ひきつづき行った初期実験においては、順調に真空容器の洗浄、プラズマ制御系の調整を進め、比較的短期間のうちにプラズマ電流300KAの円形プラズマを実現することができた<sup>(8)</sup>。

## 参考文献

- (1) JT-4 グループ : JAERI -M 7853 ( 1978 )
- (2) 嘉本, 荘司, 田中, 吉田 : JAERI -M 8725 ( 1980 )
- (3) Shafranov, V.D. : Plasma Phys., 5 ( 1963 ) 251
- (4) Green, J. M. et,al : Phys., Fluids 14 ( 1971 ) 671
- (5) 二宮, 龜有, 新谷 : JAERI -M 9127 ( 1980 )
- (6) 上田, 二宮, 新谷他 : JAERI -M 9854 ( 1981 )
- (7) 横倉他 : 真空 26 ( 1983 ) 300
- (8) Shoji, T, Funahashi, A, Hoshino, K, et. al.  
: Proc. of the 11th Europ. Conf. on Controlled  
Fusion and Plasma Physics (Aachen) 1, ( 1983 ) 55

## 謝辞

本研究を遂行するに当り、常に暖かい御支援および御指導をいただいた森茂理事、核融合開発推進センター磯康彦センター所長、核融合研究部小幡行雄部長、田中正俊次長、大型トカマク開発部吉川允二次長に感謝いたします。また、多くの御助言をいただいた下村安夫副主任研究員はじめとする核融合研究部、大型トカマク開発部の方々に感謝いたします。