

JAERI-M

6 6 6 6

J T - 4 計 画

(J T - 4 設計報告書, II)

1976年8月

J T - 4 グループ

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

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

J T - 4 計 画
(J T - 4 設 計 報 告 書 , II)

日本原子力研究所 東海研究所
大型トカマク開発部
J T - 4 グループ*

(1976 年 7 月 19 日 受 理)

非円形断面トーラス試験装置 (J T - 4) による研究計画と装置の設計について, 1976年6月までの設計研究の全体についてまとめたものである。研究の目標, 設計の方針と概要について述べ, 計測, 第二段加熱などの検討についても簡単にふれている。

※ 狐崎晶雄 関 省 吾 斉藤龍太*
松田俊明 横溝英明** 吉川允二

* 外来研究員

** 特別研究生

JT - 4 Program

JT - 4 Group^{*}

Division of Large Tokamak Development, Tokai, JAERI

(Received July 19, 1976)

Design studies made on JT-4 since April 1975 are summarized. JT-4 is a tokamak device with non-circular cross section and axisymmetric divertors. Contents are the purpose of JT-4, basic design, results of the preliminary design by three manufacturers, diagnostics, further heating, and flow charts of the JT-4 program.

^{*} Akio KITSUNEZAKI, Shogo SEKI, Ryuta SAITO^{*}, Toshiaki MATSUDA,
Hideaki YOKOMIZO^{**} and Masaji YOSHIKAWA

* staff on loan

** Univ. of Tokyo

目 次

第1章 序 説	1
第2章 JT-4の研究目標	2
2.1 概 説	2
2.2 非円形断面効果	2
2.3 ダイバータ効果	4
2.4 中型装置の必要性	6
2.5 JT-4の研究目標(まとめ)	9
2.6 装置パラメータの選択	10
2.7 諸外国の計画との比較	16
第3章 基本的検討	21
3.1 非円形断面効果	21
3.1.1 概 説	21
3.1.2 ベータ値	21
3.1.3 MHD安定性	22
3.1.4 輸送現象	23
3.1.5 位置不安定性と平衡の分岐	23
3.1.6 非円形断面とダイバータ	24
3.2 JT-4プラズマのMHD平衡	24
3.2.1 縦長楕円断面トカマクのMHD平衡	24
3.2.2 外部ポロイダル磁場コイル	25
3.2.3 JT-4プラズマの平衡例	27
3.2.4 今後の検討事項	28
3.3 JT-4プラズマの制御	39
3.3.1 プラズマ平衡量のフィードバック制御	39
3.3.2 垂直方向位置不安定性のフィードバック安定化	41
3.4 ダイバータ(プラズマと壁の相互作用)	45
3.4.1 概 説	45
3.4.2 スクレープ・オフ層	47
3.4.3 ダイバータ室からの逆流中性ガス	48
3.4.4 中性粒子除去による不純物低減効果	48

3.4.5	スクレープ・オフ層による不純物遮蔽効果	48
3.4.6	壁面等への熱流	49
第4章	J T-4の技術的検討(予備設計)	60
4.1	概説	60
4.2	試験装置の構成	60
4.3	真空容器	65
4.3.1	形状, 構造	65
4.3.2	真空特性	71
4.3.3	真空容器の強度計算	72
4.3.4	ベローズ部の強度計算	81
4.3.5	真空容器の熱設計	82
4.4	真空容器内蔵部品	85
4.4.1	ライナ	85
4.4.2	リミタ	87
4.4.3	粒子中性化板	92
4.4.4	ダイバータ用高速排気装置	94
4.4.5	その他の真空容器内蔵部品および今後の検討事項	95
4.5	ダイバータ・コイル	96
4.6	真空排気設備	105
4.7	トロイダル磁場コイル(Tコイル)	108
4.7.1	概説	108
4.7.2	電磁気的特性	109
4.7.3	Tコイルの機械的設計	112
4.7.4	Tコイルに作用する電磁力	112
4.7.5	Tコイル接続部	125
4.7.6	Tコイルの設計	132
4.7.7	給電線および誤差磁場	137
4.8	ポロイダル磁場コイル(Pコイル)	139
4.8.1	Pコイル系の概説	139
4.8.2	Pコイルの配置	139
4.8.3	Pコイルの電磁力と支持	151

4.8.4	誤差磁場	154
4.8.5	絶縁耐圧	154
4.8.6	Pコイルの熱計算	154
4.9	架 台	161
4.1.0	ポロイダル電源	163
4.1.0.1	概 説	163
4.1.0.2	電源容量	163
4.1.0.3	OHコイル電源	166
4.1.0.4	Sコイル電源, Dコイル電源	169
4.1.0.5	Vコイル, Qコイル, Cコイルの電源	177
4.1.0.6	その他のPコイル電源	178
4.1.1	トロイダル電源	179
4.1.2	プラズマ制御	183
4.1.2.1	プラズマの水平位置, 断面形状制御	183
4.1.2.2	水平方向位置制御	183
4.1.2.3	断面形状制御	190
4.1.2.4	垂直方向位置不安定性のフィードバック安定化	197
4.1.3	付属設備	199
4.1.3.1	付属設備概説	199
4.1.3.2	受電設備	199
4.1.3.3	非常用電源	199
4.1.3.4	冷却設備	201
4.1.3.5	運転制御設備	201
4.1.3.6	建 屋	201
4.1.4	その他の事項	205
4.1.4.1	放電洗浄	205
第5章	付属装置(予備設計範囲外)	208
5.1	計測装置およびデータ処理装置	208
5.1.1	概 説	208
5.1.2	計測項目と計測方法	208

5.1.3	計測用ポートの配置	211
5.1.4	計測装置	211
5.2	第二段加熱	214
5.2.1	比例則による第二段加熱後プラズマ・パラメータの予想	214
5.2.2	中性粒子入射加熱	214
5.2.3	高周波加熱	218
5.3	ガス注入および予備電離	218
5.3.1	ガス注入	218
5.3.2	予備電離	218
第6章	科学的検討	220
6.1	概説	220
6.2	シミュレーション計算	220
6.3	捕捉粒子の軌道例	220
6.4	誤差磁場の存在下での粒子軌道	221
6.5	磁束変化量の推定	221
6.6	プラズマ電流立上り時, 立下り時の検討	222
6.7	コイル電流波形の検討	222
6.8	プラズマの安定性	222
6.9	不純物およびプラズマと第一壁の相互作用	222
第7章	J T - 4 計画および実験計画	226
7.1	計画のフローチャート	226
7.2	実験計画	226
7.3	年次計画	226
第8章	後記	232
付録1	比例則による装置パラメータの説明例	233
付録2	プラズマ温度の予想	236
付録3	比例則	237
付録4	諸外国の計画	238
付録5	J T - 4 におけるプラズマ位置・断面形状のフィードバック制御(予備設計用 ブロック線図)	240

付録 6. ダイバータに関する検討	252
付録 7. ライナ電流の計算例	255
付録 8. Tコイル接続部構造案	259
付録 9. アイデア	261
付録 10. レーザ散乱計測の検討	263

記号表

主半径	$R_p, (R)$
副半径	b
{ 長半径	a
{ 短半径	a, \bar{a}
平均半径	$\kappa (= b/a)$
楕円度	$\epsilon (= a/R)$
逆アスペクト比	$(R, \varphi, Z), (R, Z)$
座 標 [m]	$(r, \theta), (r, \omega)$
擬トロイダル座標	φ
トロイダル角	R
電気抵抗	

添 字

トロイダル	T
ポロイダル	P
全(トータル)	t
プラズマ	P, (PL)
真空容器, ライナ	u

コイル

トロイダル磁場コイル	Tコイル
ポロイダル磁場コイル	Pコイル
空心変流器コイル	OH
形状コイル	S
ダイバータ・コイル	D
Dコイル被覆管	DV
垂直磁場コイル	V
四重極磁場コイル	Q, (QD)
六重極磁場コイル	HX
位置制御コイル	C, (CD)
水平磁場コイル	H

第 1 章 序 説

原研では、トカマク型核融合装置のプラズマ断面形状を非円形とすることによる装置の効率化、およびダイバータ効果に関する研究を従来より行っており、1974年8月に完成したJFT-2a(DIVA)によって実験研究が開始された^{1)~3)}JFT-2aに引き続いて、将来の大型装置および核融合炉に関する非円形断面効果およびダイバータ効果の見通しを得るために計画された中型装置が、ここに述べるJT-4(正式名称は「非円形断面トラス試験装置」)である。

JT-4に関する最初の検討は1973年夏に、当時JFT-2aを設計していたグループにおいて行われ、1974年にはJFT-2aグループと理論解析グループから成るスタディ・グループによって数回の会合を行い、その調査および基本的検討の結果が報告書⁴⁾にまとめられた。

1975年にはJT-4設計グループが設けられ、設計のための検討と基本設計を行い、これに基づいて年度後半にはメーカーに予備設計を外注した。本報告は、現在までの1年3ヶ月の間に行れた各種の科学的検討と、メーカーによって行われた技術的検討(予備設計)の総まとめである。

1975年は、僅かな人数で予備設計を完了させる必要があったため、装置設計の基本となる科学的検討に十分な時間をかけることができず、多くの点で大局的判断あるいは決断によって計画を進めた。現時点で省て判断に誤りはなかったと考えているが、ここでJT-4計画の経緯および現状をまとめ、JT-4計画の目標および設計について広く検討、議論を行うことが必要であろう。本報告は、今後JT-4計画を進めるための検討資料としてまとめたものであり、現在までの検討結果を示し、また、未だ検討不十分な点を摘出して明記した。実験開始までに検討する必要がある未検討事項の主なものについても、検討の必要性を示す意味で項目のみを記した。

JT-4の設計研究に関しては、核融合研究部、大型トカマク開発部の森部長をはじめ、両部の多くの方々から常に有益な助言と援助を頂いており、我々の努力のみではこれだけ大きな計画はとて進めることはできないであろう。ここに、御協力を頂いている全ての方々に深く謝意を表します。また、第4章の技術的検討は、東芝、日立、三菱(五十音順)の3社による検討結果を中心としてまとめたものである。

1) Kitsunozaki, A., Maeda, H., Shimomura, Y., Yoshikawa, M. in Symposium on Toroidal Plasma Confinement (Proc. 3rd Int. Symp. Garching, 1973) G-2

2) Shimomura, Y. 7th European Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics Vol. 2 (1975, Lausanne)

3) JFT-2aは、主半径60cm、最高電子温度約200eVの小型装置であるが、現時点でも世界唯一の軸対称ダイバータ付きトカマク型装置である。

4) 下村, 若谷, 狐崎, 前田, 田中 JAERI-M 6105 (1975)

第2章 JT-4の研究目標

2.1 概 説

JT-4は、将来の大型核融合装置に外挿可能な高温プラズマ領域において、非円形断面効果とダイバータ効果に関する実験を行うために計画されている装置である。また同時にJT-60と並列して運転する中型装置としての意味もある。本章ではこれらの研究目標について説明を行う。装置設計のための具体的な検討は第3章に記す。

2.2 非円形断面効果

世界のトカマク研究は、従来、円形断面のものを主な対象として進められており、今後も、少なくともJT-60と並ぶ次期装置までは、円形断面のものが主流となっている。これは実験の数、規模などの点で、円形断面トカマクの方が、非円形断面トカマクに比べて格段に進んでおり、装置設計のために新たに必要となる検討項目が少ないからである。しかしながら、非円形断面トカマクは、円形断面トカマクに比べて安価に高温高密度の炉心プラズマを実現する可能性があり、ダブレット(米)、フィンガーリング(T-9, ソ), JFT-2a(日)など、いくつかの小型装置で実験が進められている。

大型実験装置あるいは核融合炉においては、プラズマを保持する為に必要な磁場強度を小さくすることが、技術的、経済的に大きな利点となるが、磁場強度とそれによって閉じ込められるプラズマの圧力の比であるベータ値が上記の有利さの指標となる。

$$\beta = \frac{n k T}{\left(\frac{B^2}{2\mu_0}\right)} \quad (2-1)$$

トカマク型装置においては、ポロイダル磁場に対するベータ値 β_p が平衡および安定性と直接関連する値である。 β_p に関しては、プラズマ圧力と磁気圧の平衡理論により、第2の磁気軸が現れて平衡のくずれる β_p の限界が、縦長楕円断面の場合には、円形断面の場合よりも値が高い。楕円度2の場合、同じアスペクト比(R/a , a は副半径、楕円については a は短軸半径)の円形断面トカマクよりも、 β_p 限界値は約1.3倍高い。

トロイダル磁場を含む全磁場に対するベータ値 β_t は

$$\beta_t = \frac{1}{q^2} \beta_p \left(\frac{\ell_p}{\ell_T}\right)^2 \quad (2-2)$$

と表わされる。 q は平均安全係数、 ℓ_p , ℓ_T は各々トーラス状プラズマ柱のポロイダル方向、トロイダル方向の周長である。円形断面の場合には、 $\ell_p = 2\pi a$, $\ell_T = 2\pi R$ である。 a と R の比は装置製作上の技術的限度があり、 $R/a \geq 3$ である。(2-2)式から分るように、保持されるプラズマの q , β_p が断面形状によらず一定値であると仮定しても、断面を非円形にして ℓ_p を大きくすることにより、 β_t を大にすることができる。すなわち、同一の圧力のプラズマを保持するために必要な磁場強度を小さくすることができる。例えば楕円度2の楕円断面の場合、

同じ β_p に対して β_t は約 2.5 倍に改善される。

現在までのトカマク実験では装置によらず、非円形断面の場合にも $q > 3$, $\beta_p \lesssim 1$ が限度になっている。これらはジュール加熱のみによる結果であり、第二段加熱を行った場合の安定範囲は、今後に残された問題である。 $q = 3$, $\beta_p = 3$, $R/a = 3$ が実現できれば、円形断面トカマクでも、経済的に採算がとれると言われている値、 $\beta_t = 4\%$ ¹⁾ に達する。もしも、現在の $\beta_p < 1$ が増加しない場合には、 $\beta_t = 4\%$ を実現するためには非円形断面にすることが不可欠となる。 $\beta_p = 3$ に達することが出来たとしても、同じ q , β_p に対して必要なトロイダル磁場の強度は、非円形断面の場合の方が円形断面の場合よりも l_T/l_p だけ小さくてすむ。トロイダル磁場の強度は、材料強度あるいは超電導線の特性によって限度があり、この点からも将来の大型装置は非円形断面にすることが有利であり、あるいは非円形断面とすることが不可欠となる可能性もある。

次に、不安定性に関しては、現在実験の行われている円形断面トカマクにおいて安定限界を決めている不安定性はプラズマ中心部における安全係数 q が 1 以下になるために発生するキンク不安定であるといわれているが、確実には解明されていない。したがって、非円形断面トカマクの安定性限界について予想することは不可能であるが、平均安全係数 \bar{q} を用いて円形断面の場合と同じ \bar{q} までプラズマ電流が流せるものとする、同じアスペクト比の円形断面トカマクよりも多くのプラズマ電流が流れ、電流密度も高い。トカマクのプラズマ閉込め特性が現在の比例則が示すようにプラズマ電流の 2 乗又は 4 乗に比例するならば、プラズマ電流が大きいことはプラズマ閉込め特性の良いことを意味する。また、プラズマ電流密度が高いことは、ジュール加熱による加熱パワー密度の高いことを意味し、ジュール加熱のみで比較すれば円形断面トカマクよりも高温高密度のプラズマを得ることが可能となる。

また、炉心プラズマ領域までプラズマを加熱することができた場合には、その領域でプラズマ密度の低い場合に問題となる捕捉イオン不安定性が、非円形断面の場合には抑制しやすいと言われている。²⁾

一方、上下方向に長い楕円断面の場合には上下方向の位置不安定性が危険であると言われており、不安定性（特に位置不安定性）を克服することが必要である。³⁾

この他、プラズマ内電流密度分布の変化、加熱に伴う β_p の変化などに対応してプラズマ保持のための平衡磁場配位を制御し、プラズマ断面の位置、形状を所定の値に制御することが必要である。

幾何学的形状の点では、非円形断面トカマクは 2 つの利点をもっている。第 1 には、トカマク型装置の特徴である軸対称性をくずさないでダイバータ（軸対称ダイバータ）を付加することが容易であり、第 2 には、縦長の非円形断面プラズマは、一定張力型の D 形トロイダル磁場コイル形状に適していることである。将来の大型装置では応力などの点で設計製作の容易な D 形トロイダルコイルを使用することが決定的であり、その縦長 D 形の強磁場空間を有効に使用することが必要である。

他方、プラズマの断面形状を非円形とするためのポロイダル磁場コイルをプラズマの近くに設置する必要があるが、これが空間的に、あるいは炉の場合は遮蔽の面で欠点となりうる。ポロイダル磁場コイルに必要な電力は、円形断面トカマクに必要な垂直磁場コイルの電力と同等に

することが可能な場合もあり、電力の点での得失は単純には論じられない。⁴⁾ また、超電導コイルを使用する場合には電力は問題とならない。

以上の考察から、非円形断面トカマクには多くの利点が期待され、これらを炉心プラズマ領域まで外挿可能な高温プラズマ領域で実験することが、JT-60に続く次期大型装置の設計自由度を増す為に必要であり、また、円形断面トカマクに比較して利得が1割、2割程度であっても、これが技術的経済的に大きな意味を持つ可能性すらあることが明らかであろう。

さて、プラズマ断面形状として現在までに提案された主なものは第2.1表に示す通りである。同表で< >に入れたものは小型装置であり、他はJT-4と同程度の主半径をもつ中型装置である。TESEEは計画のみで中止された。同図で分るように、縦長楕円(b)は、理論的によく取扱われていて、新たに必要となる解析が少なく、断面変形の回数も低いため形状制御およびその解析が容易である。また、JT-4の研究目標の1つであるダイバータを考慮すると、ダイバータ空間での測定などが容易な(b)又は(c)が適当である。(d)は、4個のダイバータを同時に作動させるようなプラズマ制御が困難である。非円形断面の実験については、最適形状は実験によって探究すべきものであり、形状自由度の小さい(d)、(e)、(f)は避けることが適当であろう。世界の計画に、小型装置であるT-12以外に(b)、(c)の形状のものがないことも1つの要因となり、JT-4は(b)又は(c)の形状を採用した。この形状が他にないのは、前記のように位置不安定性が危険であることが1つの原因であると考えられるが、JT-4では検討の結果、ダイバータ・コイルの副コイルによって位置不安定性を克服できる見通しを得たため、(b)、(c)の形状を採用することが可能となったものである。⁵⁾

2.3 ダイバータ効果

現在まではほぼ順調に実験の進行してきたトカマク型装置にも1つの弱点がある。それはプラズマ中に混入する不純物の問題であり、今後、装置が大型になると共に大きな課題となって来る。不純物がプラズマ中に混入すると電離されて多価イオンとなり、放射エネルギーが電荷Zの2乗に比例する制動放射によって大きなエネルギー損失を招き、また、不完全電離イオンによるライン放射は更に大きな放射損失となる。核融合反応による発生熱と放射損失の検討によると、核融合炉として成立するための混入不純物の上限は、酸素、炭素など軽いガス不純物は5~10%、鉄、モリブデンなど中間Z不純物は0.5~1%、タンゲステン、タンタルなど重い不純物は約0.1%である。⁶⁾ 一方、実験的には、不純物に関するデータのそろっているTFRの例では、⁷⁾ 放電初期にすでにO、Cなどが合計8%、Fe、Moなどが合計0.2%程度混入しており、これら不純物の量は放電中に増加する傾向がある。不純物による放射損失は入力パワーの35%にも達している。TFRは、未だ温度が1 keVであり、核融合炉より1桁近く低温のプラズマであるが、それでも許容量に近い不純物が混入している。後述のように、今後装置が大型化されプラズマ温度が上昇するとともに、プラズマ中に混入する不純物の量も飛躍的に増加するものと考えられ、不純物量を上記の許容量以内に抑制するための研究が必要である。

これらの不純物は、プラズマ粒子、すなわち高速イオンあるいは高速中性原子が真空容器壁に衝突するために発生すると考えられ、その発生機構は、融解蒸発、スパタリングなどに区別される。ガス不純物の発生源は、壁表面に吸着されている粒子、あるいは壁材に吸蔵されていたもので表面まで拡散してきた粒子が、壁面の温度上昇に伴って熱的に脱離するか、あるいは高速粒子によってたたき出される機構が主であると考えられている。金属不純物は、壁材が高速粒子にスパタされて放出されるものと、リミタなどが局所的に高温に加熱されて蒸発（融解）するものが考えられる。スパタ比は、衝突粒子のエネルギーが1～10 keVのときに最大となり、今後の大型装置ではプラズマ表面付近のプラズマ温度がこの程度になるため、何らかの対策を施さなければ、現在以上にスパタリング⁸⁾による金属不純物の増加が予想される。大型装置あるいは核融合炉に関しては、金属不純物に注意が向けられているが、プラズマ加熱や不安定性などを考慮するとガス不純物をも含めて、許容できる不純物量が上記の値よりも更に小さくなる可能性もある。

この様な不純物発生の対策としては、従来も行われているようなベーキング、放電洗浄による壁表面のガス不純物除去の他に、(1)スパタ比の低い壁材料を選択すること、(2)スパタしてもプラズマ中に不純物が入りにくい壁面形状を工夫すること、(3)壁面にプラズマが触れないようにプラズマ制御を行うこと、(4)金属（リミタ）と接触させないように磁気リミタを採用すること、(5)磁気リミタに高速排気装置を組合せ、ダイバータとすること、(6)プラズマ表面の温度を下げる（ガス・ブランケットなど）、などの対策が考えられている。(5)はプラズマ表面から流出するプラズマ粒子を別室へ導いて吸収し、プラズマ空間に戻る中性粒子を低減して、荷電交換による高速中性粒子（これが磁束を横切って飛び、壁をたたいてスパタリングを起す）の発生源を低減しようとするものである。また、同時にO、Oなどガス不純物の除去を行えるのも(5)のみである。

J T-4は、これらの点についても研究を行うことを計画している。すなわち、磁気リミタ形式の磁場配位を採用し、高速排気系を納めたダイバータ室を設けてダイバータ効果の実験を行う。さらに、真空容器の第1壁（ライナ）にはスパタ比の小さいモリブデンを採用し、場合によっては他の壁材と交換してその効果を調べる。

不純物は、プラズマのエネルギー収支に影響を与えるのみではなく、例えばプラズマの表面付近が放射によって冷却されるとその導電率が下り、プラズマ内のプラズマ電流密度分布が変化し、ひいてはプラズマの制御あるいは安定性にも影響を及ぼす。したがって、上記のような不純物対策を行ってはいじめて、不純物の影響のない状態で円形断面と非円形断面の特性の差異を実験的に研究することが可能となる。

将来の核融合炉においては、ダイバータは構造を複雑にするため避けるべきであるという意見もあるが、J T-4にとっては、上記の観点から、また放射損失を減らして高温プラズマ（炉心プラズマに見通しを得ることのできる領域）を得るために、ダイバータによる不純物制御の機能をもたせることが必要である。

さらに、今後の大型装置においては、現在以上に不純物の問題が重要事項となることは明らかである。この場合に磁気リミターおよびダイバータによってプラズマ表面を固体リミターから浮かせ、不純物の状態を制御する機能をもたせることは、たとえこれらによる不純物低減の

効果が顕著でないとしても、不純物の研究を行うために不可欠な条件である。実際、現在のトカマク型装置ではプラズマが固体に触れているための影響が大きく、外部から不純物を注入するなどして、不純物の振舞を測定すること自体が困難な状態である。

最近の情報では、第二段加熱として高速中性粒子入射を行う場合には、プラズマ柱の外周部の低温中性粒子密度を下げて加熱用ビームの周辺部での減衰をへらすために、またプラズマ密度の過剰な上昇を抑制するために、ダイバータが必要であるとも言われている。⁹⁾

2.4 中型装置の必要性

J T - 4 には、前記の非円形断面とダイバータに関する実験装置としての意味の他に、J T - 60 計画を補佐する中型装置としての意味もある。すなわち、高温プラズマ領域におけるトカマク型装置のプラズマ科学については、未だ十分に解明されていない事項が多く、各種の詳細な測定を行う必要がある。核融合研究は今後も未知の領域の研究開発を続行するものであり、研究の進展に伴って予測されない問題の生じる可能性もある。このような場合、新たな測定を行うにあたっては、また新しい問題点の解明を図るにあたっては、J T - 4 のような中型装置は J T - 60 のような大型装置に比して研究計画上の自由度が高く、また技術的にも対応しやすい。

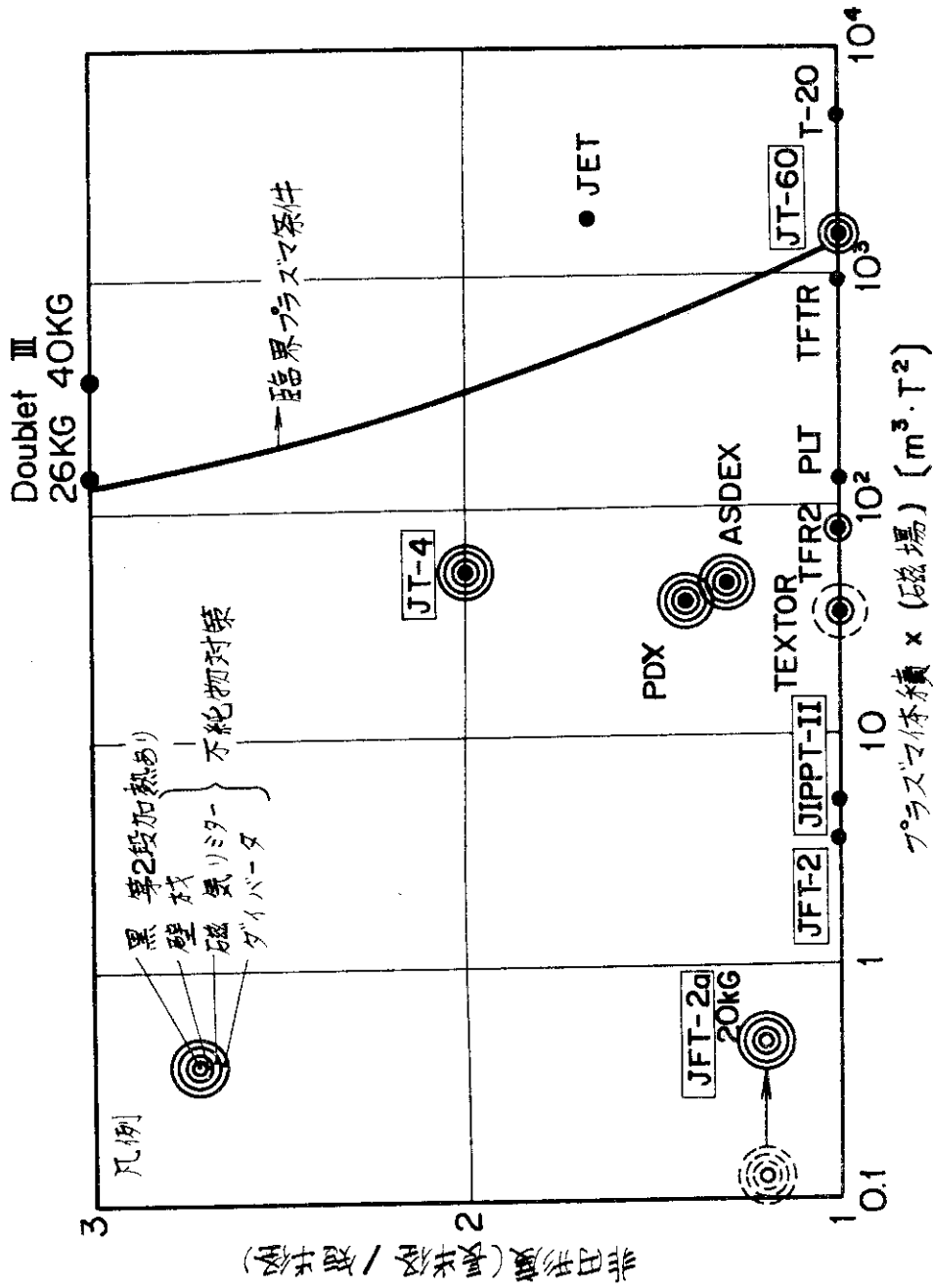
また、装置の大きさの下限としては、J T - 4 の完成が 1980 年以後に予定されることを考慮すると、実験結果を炉心プラズマに外挿可能とするため、捕捉イオン領域に達する可能性を持つ程度の大きさは必要である。この点において、2.6 節および付録 1 に述べるように本報告に示す J T - 4 の大きさは最低限のものである。

諸外国においても、第 2.1 図に示すように、J T - 4 と同程度の中型装置による研究計画が 1977 ~ 1979 年頃に開始される予定である。第 2.1 図は横軸にプラズマ体積と磁場強度の積、すなわち主要磁場の磁気エネルギーに比例する量を取り、装置の大きさを表わす指標とした。縦軸には非円形度をとり、一番下の非円形度 $\kappa = 1$ の線上にあるものは円形断面のいわば主系列のトカマク型装置である。右方の右下りの線は大略臨界プラズマ条件を示すものであり、非円形度を高くすると装置の大きさが小さくても磁界プラズマ条件に達することを示している。この曲線が非円形断面による装置の効率化を表わすと考えてもよい。同図で装置を表わす点につけた輪は、不純物対策に着目して装置の特徴を示したものであり、第 1 壁の工夫、磁気リミタ、ダイバータ（磁気リミタと同じ磁場配位で、高速排気装置を設けてガス粒子、ガス不純物の除去を行う）という 3 段階に分けて示した。同図で分るように、ダイバータまでの実験を行えるのは現時点でも原研の J FT - 2 a のみである。また、我国の装置は枠で囲んで示したが、J I P P T - II から J T - 60 までの 2 桁以上にわたる範囲内にある計画は J T - 4 のみである。

同図に示した諸装置の説明は、2.7 節および付録 4 に記したので参照されたい。

第2.1表 非円形断面トカマク型装置 (< > は小型装置)

形状	a	b	c	d	e	f
装置	<JFT-2a>	(JT-4) <T-12>	(JT-4) <T-12>	PDX	Doublet III	(TESEE)
変形次数	3	2	3	4	多	多
理論	多少あり	よく扱われる	多少あり	実験のために開発	同左	同左
形状制御	(シエル)	容易	(変形次数の増大と共に困難となる)			
平衡	β 低い	β 高い	同左	?	β 高い	(β 高い)
位置不安定	安定	不安定	不安定	安定	安定	(安定)
ダイバータ	可	可	可	可	無	無
ダイバタ空間	狭	広	広	内側は狭	—	—
Tコイル	大	D形に適	同左	同左	同左	同左



第2.1図 世界のトカマク型装置 (口内は日本)

2.5 JT-4の研究目標(まとめ)

前節2.4までに述べたJT-4の研究目標をまとめて以下に示す。

I JT-4の研究目標

- 1) 炉心プラズマ領域への外挿可能な高温プラズマ領域において、非円形断面効果およびダイバータ効果に関する実験的研究を行う。また、非円形断面プラズマの断面位置・形状の制御に関する実験的研究を行う。
- 2) JT-60と並行して運転する中型装置としての柔軟性をもち、JT-60計画を補佐する。

II 研究目標の説明

1) 非円形断面効果

- (利点) ① β_p が高い。(第2磁気軸が現れて平衡のくずれる限界 β_p が高い。)
- ② β_t が高い。(同じ β_p に対しても、全磁場に対するベータ値 β_t が高い。)
- ③ プラズマ電流値が高い。
- ④ プラズマ電流密度が高い。
- ⑤ ③の結果、プラズマ閉込め特性がよい。
- (⑥ 高温プラズマ領域の不安定性を抑制しやすい。)
- ⑦ ①~⑥の結果、円形断面の場合よりも小さな磁場、寸法、価格で核融合装置(核融合炉)を作ることが可能である。
- ⑧ 磁気リミタ(ダイバータ)の付加が容易である。
- ⑨ 大型のトロイダル磁場コイル形状(D形)に適合する。

(欠点) ① 位置不安定性がある。……これは下記2)の⑤で解決する。

2) ダイバータ効果

- (利点) ① 不純物の低減。
- ② JT-4で炉心プラズマを得るためには不純物低減が必要。(放射損失を減らす。電流密度集中を避ける。)
- ③ 不純物に関する実験の自由度が大きい。
- ④ 第二段加熱(中性粒子入射)に伴う密度過剰を抑制する。
- ⑤ ダイバータ・コイル(副コイル)による位置不安定性(上記1)の①)の安定化。

(欠点) ① 装置の複雑化、大型化。

3) プラズマ断面の位置・形状制御

プラズマ加熱による β_p の変化、不純物などによる電流密度分布の変化に対応して所定の位置、断面形状を保つ。

4) 中型装置の必要性

- ① 1980年以後に完成する装置として、炉心プラズマ領域に外挿の可能性をもつことが必要である。
- ② 研究計画、計測などの自由度、柔軟性が大きい。

- (③ 諸外国でも1977～79年にJT-4と同規模の装置による研究を開始する。)

2.6 装置パラメータの選択

前節までに述べたように、JT-4の目的は炉心プラズマに外挿できるような高温プラズマ領域で、(1)非円形断面の効果を調べ、(2)各種ポロイダル磁場コイルによる非円形プラズマ断面の位置・形状制御に関する研究を行い、また(3)ダイバータ効果を中心に不純物に関する研究を行うことである。まとめて言えば、「不純物の影響の少ない状態で高温プラズマ領域における非円形断面効果を実験的に研究する」とも言える。

この目的に適した装置の設計にあたり、完成予定が1980年以後であることを考慮すると、1975年以前の装置よりは大型で、PLT, T-10程度以上の装置とすることが適当であろう。あるいは、別の表現をすれば、ジュール加熱のみによってイオン温度が1 keV以上に達し、中性粒子入射加熱などの第二段加熱を行うことによって炉心プラズマと同じ捕捉イオン領域に入るという期待のもてるように設計することが適当であると考えられる。この条件は、実験結果を外挿して炉心プラズマでの非円形断面効果、ダイバータ効果の予想を得るために必要なものである。

この条件により、装置に必要な最小限の大きさを決められるはずであるが、実験経験則の外挿あるいは理論的に予想される比例則のいずれも、装置パラメータを精密に最適化するほどには、精度、信頼性が高くない。しかしながら、米国ERDAの報告書¹⁾にある比例則およびその比例係数は一応公に認められたものと考えられ、第1の検討方法としては、この比例則を用いる。この比例則によると、磁場強度が一定の場合にプラズマの特性、主にプラズマ電流値、したがってプラズマ閉込め特性およびジュール加熱によるプラズマ温度は、アスペクト比(R_p/a)の小さいほど良好であり、同じ副半径に対しては主半径の小さいことが望ましい。しかし、位置不安定性のない断面形状(楕円度1.1以下)から実験を始められるように、また楕円度の大きい場合に不純物を避けるためプラズマが壁面から充分離れるようにするため、真空容器の横幅はできるだけ広くとることが望ましい。真空容器の内側には空心変流器コイルはじめ各種コイルを設置する空間が必要である。さらに、トロイダル磁場コイルの中心側の断面積は、電流密度を過大としないために一定限度以上は小さくできない。このような技術的要請を考慮に入れて、ジュール加熱で1 keVに達するように比例則を用いて付録1に示す計算を行うと、第2.2表に示す装置パラメータが得られる。

なお、第2.2表中の括弧の中の量は比例則以外の検討によって決定した値である。

第 2.2 表 JT-4 の装置パラメータ

主半径	1.45 m ¹⁰⁾
副半径	$\left\{ \begin{array}{l} \text{長半径} \\ \text{短半径} \end{array} \right.$
	0.6 m
	0.25 ~ 0.5 m (可変)
楕円度	1 ~ 2.5 (可変, 設計中心値 2)
トロイダル磁場強度	30 kG
(同上 フラットトップ時間	5 秒)
最大プラズマ電流	1000 kA
(空心変流器磁束変化量	5 ~ 6 V · s)

装置の大きさを検討する第 2 の方法は、諸外国の従来の実験装置および計画中の諸装置を参考とすることである。まず、JT-4 の設計中には、準臨界を目指す装置である PLT, T-10 が稼動している予定であり、これら程度の大きさならばプラズマ生成に対する心配が少ない。次に、後述のように PDX, ASDEX という軸対称ダイバータ付きの類似装置が建設中であり、JT-4 はこれらよりも 2 ~ 3 年遅れて完成するので、予想されるプラズマ・パラメータをこれらよりも多少大きくしておくことが利点となる。装置性能を高くする点に関しては、JT-4 は JT-60 という大型装置と電源の一部を共用するため、少くも電源容量は心配なく設計を行うことができる。以上の第 2 の検討によっても、第 2.2 表に示した装置パラメータは妥当なものであると判断される。

上記のようにして決定した装置のパラメータを用いて、期待されるプラズマ・パラメータの予想値を文献 1) P. 41 の比例則を用いて計算した結果を第 2.2 図 ~ 第 2.6 図に示す。これらの図では、第 2.2 表の楕円度 2 の場合の副半径の平均値 0.45 m (JT-4 で生成できる円形断面プラズマの副半径も 0.45 m である。) をとり、副半径 0.45 m の円形断面プラズマとして比例則の計算を行っている。その理由は非円形断面トカマクについて確立した比例則がないからである。プラズマ電流が l_p/l_T 倍だけ増加するとして、その後は円形断面に対する比例則を用いる方法もあるが、ここで用いた方法よりも楽観的な値を与え、設計としては好ましくない。ここでは、実際に得ることのできる円形断面プラズマのパラメータで計算を行い、非円形断面効果が現れればこれよりも良好なプラズマが得られるという意味で、保持されるプラズマの予想値を示す。第 2.2 図は $\beta_p = 1.0$ の場合の Z_{eff} による閉込め特性の差異を、第 2.3 図は $Z_{eff} = 1$ の場合の β_p による差異を示す。また、第 2.4 図は $Z_{eff} = 1$, $\beta_p = 1.0$ の場合の $\bar{q} = 2.5$ と $\bar{q} = 3.0$ との差を示す。これらのグラフは、プラズマの閉込め特性を示すものであり、到達温度を示すものではない。生成されるプラズマ諸量を予想するには、エネルギー・バランスを考慮する必要がある。すなわち、定常状態においては、単位体積当りに与えられる入力パワー P_{in} と損失パワーが等しく、次式が成立する。

$$P_{in} = \frac{n k T}{\tau} \quad (2-3)$$

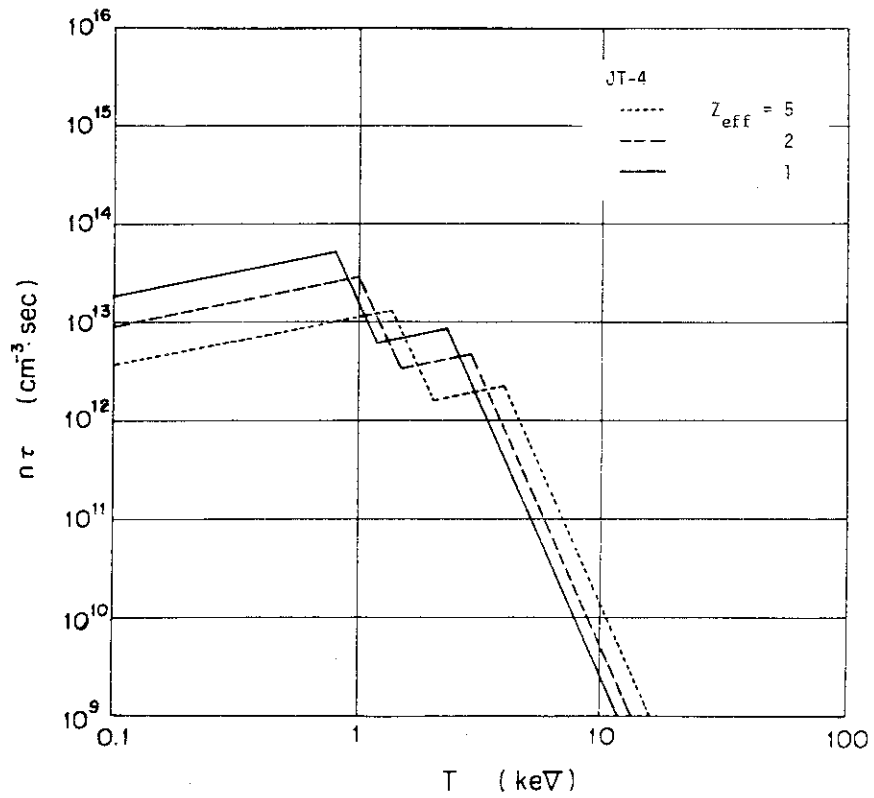
ここで、 τ はエネルギー閉込め時間である。また、 n 、 T 、 τ の間には、第2.2図～第2.4図に示したようにトカマクの閉込め特性の関係があり、

$$n\tau = f(T) \quad (2-4)$$

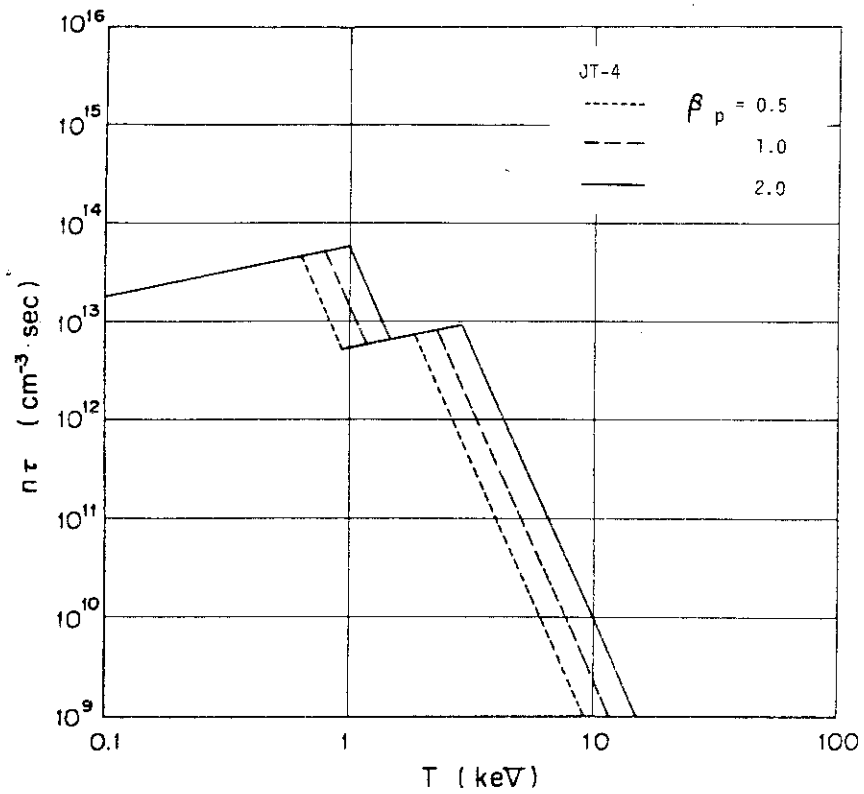
と表わされる。したがって、プラズマ諸量 n 、 T 、 τ の3量を求めるには、上の2式の他にもう1個の条件と P_{in} を与える必要がある。ここではジュール加熱によるプラズマ諸量の予想を行う。すなわち、 P_{in} を T に依存するプラズマ抵抗率とプラズマ電流の関数として与える。その結果は第2.5図、第2.6図のように密度と温度の関係として表わされる。なお、ここでは $T_i = T_e$ を仮定している。¹¹⁾ 実際のプラズマ密度は予想困難であるが現在までの実験を考慮すると $1 \sim 6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ が妥当な値と考えられる。JT-4では、 $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ を代表的予想値とする。¹²⁾

上記の検討では、プラズマを1つの n 、 T で代表させたが、実際にはプラズマ断面内で n 、 T は分布をもっており、分布を含めて検討するためにはシミュレーション計算を行う必要がある。しかしながら、シミュレーション計算は、計算に用いる拡散係数の値(異常拡散の係数)、初期値、境界条件などに任意性が大きく、計算結果はこれらの値の選択によって1桁以上の差異が生じる。したがって、シミュレーション計算は n 、 T の断面内分布の計算や、測定結果の解釈のためには重要な手法であるが、生成されるプラズマの諸量を予想する方法としては、比例則による方法よりも優れているとは言えない。第2.2図～第2.6図、および第2.3表の値は断面内分布の代表値を示すものである。

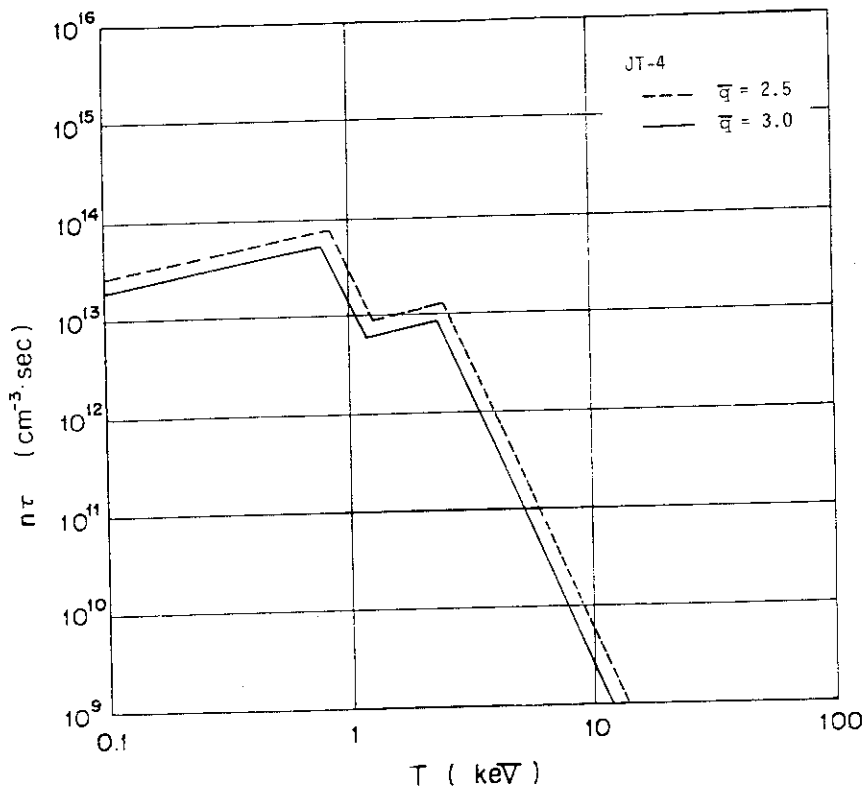
プラズマ電流の持続時間は、プラズマ粒子の振舞およびダイバータ効果を実験するために、粒子閉込め時間よりも長いことが必要である。JT-4予備設計では第2.3表の閉込め時間予想値の10倍以上として4秒と決めた。トロイダル磁場のフラットトップは、プラズマ電流の立上り、立下り時間を考えて5秒とした。これらの時間には余裕を見込んであり、今後の検討によって変更することもありうる。



第 2.2 図 J T - 4 閉込め特性 I ($\beta_p = 1.0, \bar{q} = 3$)



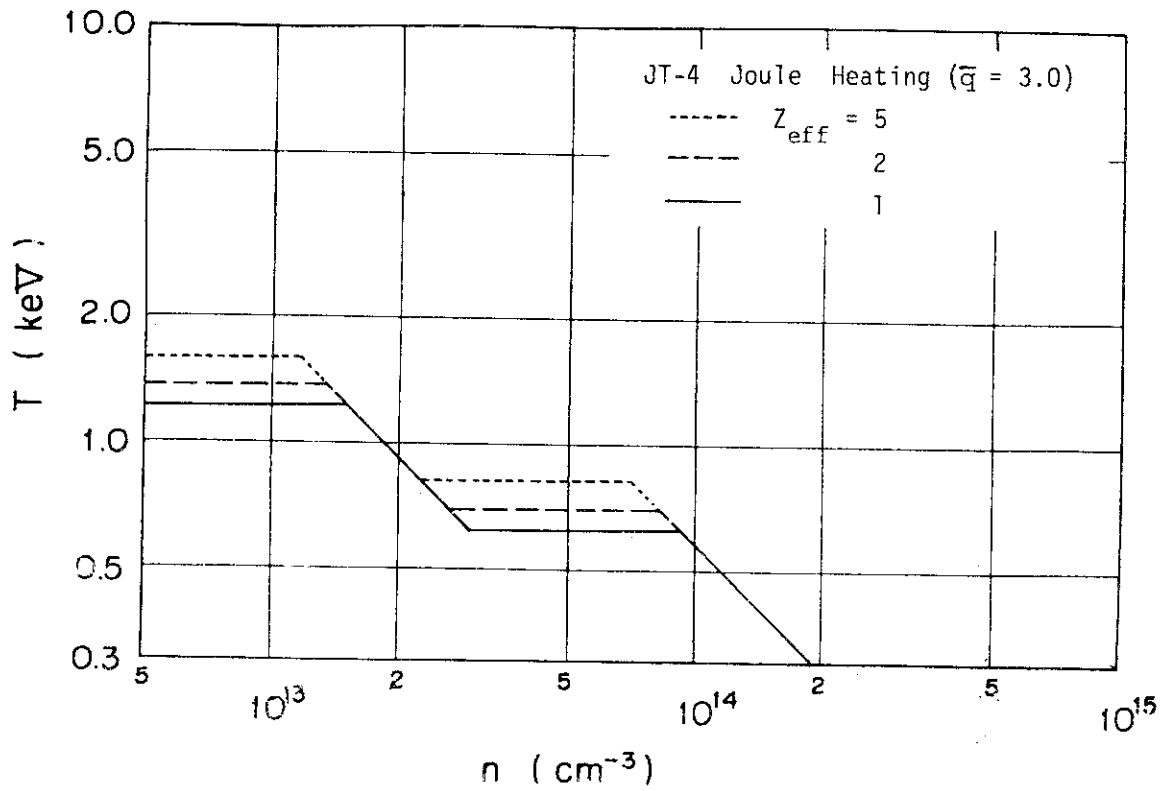
第 2.3 図 J T - 4 閉込め特性 II ($Z_{\text{eff}} = 1, \bar{q} = 3$)



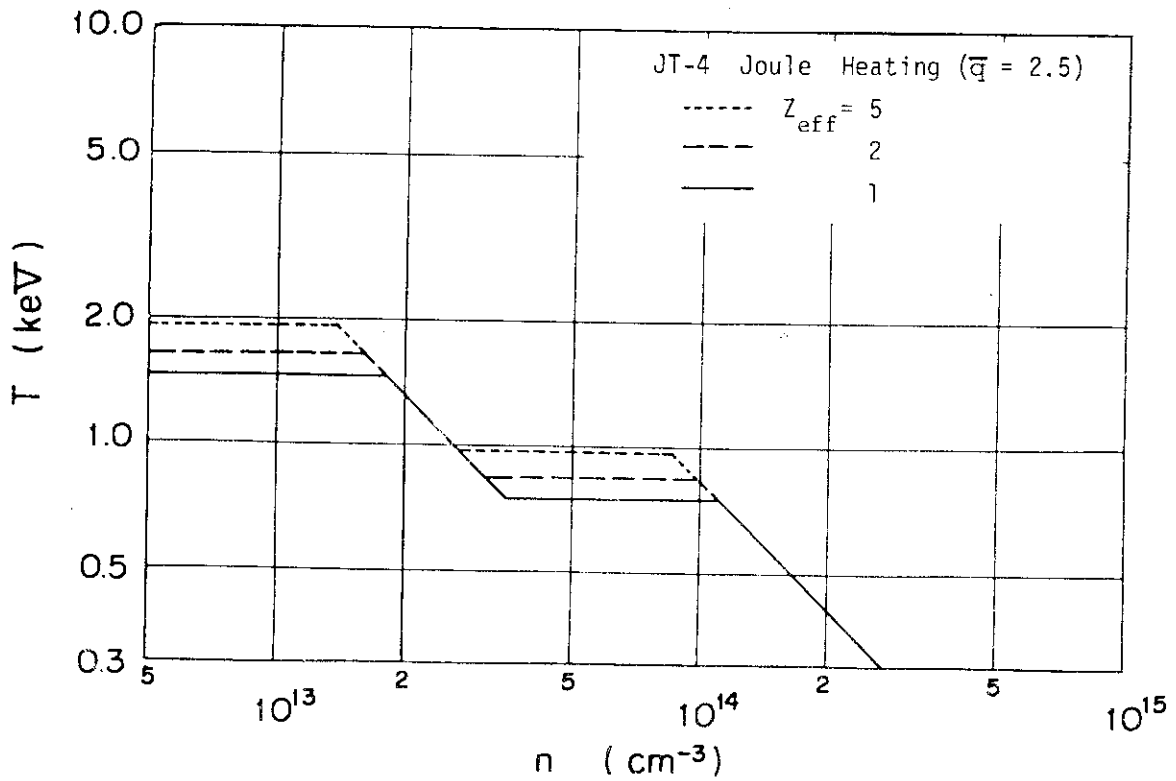
第2.4図 JT-4閉込め特性Ⅲ ($\beta_p = 1.0, Z_{eff} = 1$)

第2.3表 JT-4のプラズマ予想値
(ジュール加熱のみ。比例則による)

トロイダル磁場	30 kG
平均副半径	45 cm
プラズマ電流	700 kA
平均安全係数	3
プラズマ密度	$2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
プラズマ温度 ($T_i = T_e$)	1 keV
閉込め時間	0.1 ~ 0.3 秒



第 2.5 図 ジュール加熱による J T - 4 プラズマ ($\bar{q}=3$)



第 2.6 図 ジュール加熱による J T - 4 プラズマ ($\bar{q}=2.5$)

2.7 諸外国の計画との比較

非円形断面，プラズマ制御，不純物の研究は諸外国においても重視されており，付録4に述べるように諸計画が進行している。本節ではJ T - 4 と類似の主な装置をとり上げて解説を行う。

J T - 4 と類似の装置は，米国のP D X とドイツのASDEXであり，共に軸対称ダイバータを設置している。P D X は，正方形断面プラズマの四隅に軸対称ダイバータを付加し，ダイバータ効果およびプラズマ安定性の見地からダイバータをプラズマ断面のどこに付加するのが最適かを研究するものである。最近，四角断面プラズマを保持し，四ヶ所のダイバータを同時に働かせるためのプラズマ制御の困難が理論的に指摘され，その後は円形断面，D形断面および逆D形断面の実験を行うとしている。装置は四角断面に基いて製作が開始されており，プラズマ断面と同じ主半径位置の上下にダイバータを付加する実験はできない。真空容器断面はレーストラック形状で，上下分割および大周方向2分割可能である。真空シールにはバイトンを使用し，十字シール部分など広いバイトン面が高真空部分に面している。上下のダイバータ室にはT_i ボールによるチタン蒸着を行ってダイバータ用高速排気装置とする。トロイダル磁場コイルもレーストラック形状であり，各コイルは左右に2分割できる。各コイルを複雑に動かして次々と取り出すことにより，真空容器を分解せずにトロイダル磁場コイルと分離することができる。トロイダル磁場は25 kG，フラットトップ時間は1秒である。プラズマ電流は500 kAである。ASDEXは，円形断面プラズマの上下に軸対称ダイバータを付加し，ダイバータに的を絞って研究するための計画であり，非円形断面は目的ではない。真空容器は大周方向2分割可能で接続部にはポリイミドを使用している。トロイダル磁場コイルはD形で分割はできない。トロイダル磁場は30 kG，フラットトップ時間は5秒である。プラズマ電流は500 kAである。

上記の2装置とJ T - 4 を比較すると，J T - 4 は磁場の強度と時間はASDEXと同じであり，分解組立性はP D X よりも優れている。また，J T - 4 では真空容器は全て金属で囲み，バイトンあるいはポリイミドのような有機材は使用しないため，真空条件はこれらの2装置よりも優れている。

軸対称ダイバータの装置としては，この他にソ連のT - 12 およびTB - 0がある。T - 12 は主半径36 cmの小型装置であるが，縦長楕円断面プラズマの上下にダイバータを付加したトカマク型装置である。TB - 0は円形断面トカマクで計画中の装置であり，超電導コイルおよびプラズマ断面の上下に軸対称ダイバータを付加する案もある。しかし，TB - 0計画の詳細は不明である。英国のD I T Eはトロイダル磁場の一部を外に引き出すバンドル・ダイバータの実験を行う予定である。また，ドイツのTEXTORとソ連のT O - 2は大周上の2ヶ所にステラレータCと同様なトロイダル磁場ダイバータを付加する。TEXTORは第1期ではダイバータなしであるが，第2期に装置をプラズマ環（平面図）がレーストラック形状となるように改造し，直線部にトロイダル磁場ダイバータを付加する予定である。これらの非軸対称型ダイバータはトカマクにおいて未だ経験がなく，しかもトカマクの特徴である軸対称性を破る。J T - 4では，これらの点を考慮した上で軸対称ダイバータを採用した。軸対称ダイバータに

については、原研はJFT-2aで世界最初の実験を行っており、JT-4でも軸対称ダイバータを採用することが自然である。

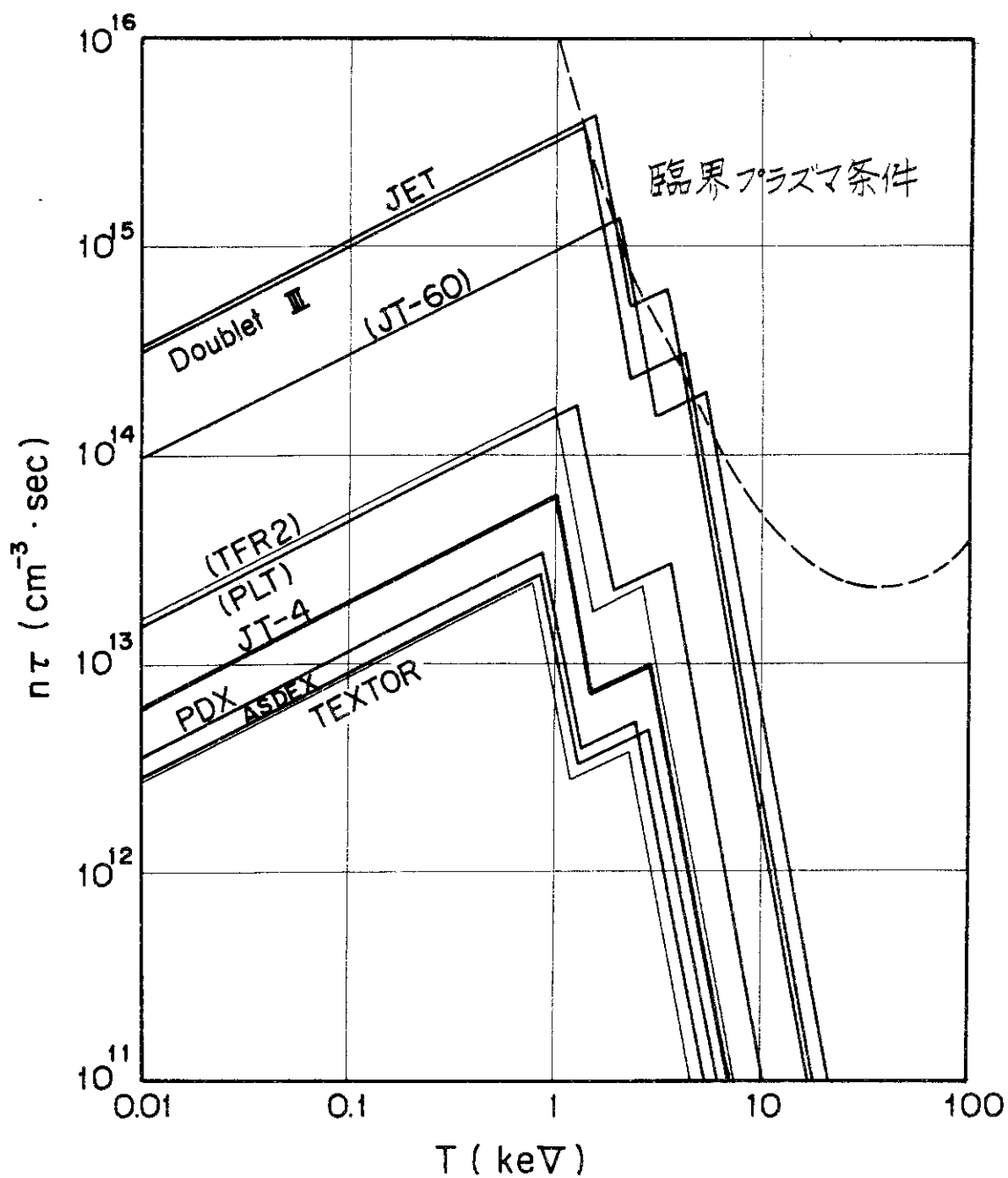
非円形断面のトカマク型装置としては、米国のダブレット、ソ連のフィンガー・リング(T-9)、T-12、および原研のJFT-2aがある。ダブレットはI, II, IIIA, IIIと次々に改良、大型化を重ねている一連の装置であり、非円形断面効果があると発表している。ダブレットIIIは1977年完成予定で、装置の大きさはJT-4と同程度であるが、プラズマ空間と磁場強度が大きく、非円形断面効果によって臨界プラズマ条件に達することを目指している。しかし、現在までのダブレット装置は測定自由度が小さく、断面内の n 、 T 分布の詳細、不純物量など、詳しい測定は行われていない。ダブレットIIIは第1壁をSiCにする計画がある以外には、不純物については心配していない。T-9は縦長D形断面の小型トカマク型装置であるが詳細な測定は行われずにT-12に改造された。T-12は1975年完成予定であるが、データは未だ発表されていない。

TFR2, TEXTOR, ISXは不純物(プラズマと第1壁の相互作用)に関する研究を行うことを主な目的とした装置であり、いずれもダイバータなしの円形断面トカマク型装置である。フランスのTFR2とドイツのTEXTORはいずれも主半径170cm近くの大型装置である。ISXは米国ORNLの装置で、JFT-2よりもやや小型で、炉心プラズマの周辺部を模擬するプラズマを生成し、ライナー材を次々と交換して実験を行う予定である。

以上の諸装置の中で、縦長楕円断面プラズマの実験を高温プラズマ領域で行う装置はJT-4のみである。楕円度の可変範囲が広いのもJT-4の特徴である。また、JT-4は類似装置のPDX, ASDEXよりも2倍近く多くのプラズマ電流を流すことが可能であり、これらよりも約2年遅れて完成する予定ではあるが、これらと相補的な独自の成果を期待できるように設計を行った。

第 2.4 表 世界の主要トカマク型装置

装置名	JT-4	PDX	ASDEX	TEXTOR	TFR2	DoubletⅢ	PLT	JT-60	JET
国	日	米	独	独	仏	米	米	日	EC
完成	1980	1977	1978	1979	1977	1977	1976	1980	1981
目的									
スケーリング					○	○	○	○	○
加熱	△	△	△	○	△	△	△	△	△
非円形	○	○				○			○
不純物	○	○	○	○	○			△	
ダイバータ	○	○	○					△	(△)
主半径 R	1.45m	1.4	1.65	1.75	1.7	1.4	1.3	3.0	2.96
断面形状	楕円, D	4角	円	円	円	ダブルット	円	円	楕円
小半径 a (b)	0.3(0.6)	0.42	0.4	0.5	0.8	0.45(1.35)	0.45	1.0	1.25/2.10
アスペクト比 R/a	3.1~4.7	3.3	4.1	3.5	2.1	3.1	2.9	3.0	2.37
磁場 B _T	3.0	2.5	3.0	2.0	2.2	2.6	5.0	5.0	3.4
B _T /R	2.1	1.8	1.8	1.1	1.3	1.9	3.5	1.7	1.1
T _p ($\bar{g}=3$)	0.72	0.53	0.48	0.48	1.2	4.2	1.2	2.8	4.0
B _T フラットトップ	5 s	1	5	3	1	1	0.5	1.0	20
T コイル形状	D	レーストラック	D	円	円	D	円	円	D
T コイル分割	○	○				○			
プラズマ体積	4.1~5.6	6	5	9	21	21	5	59	153



第 27 図 主要トカマク型装置の閉込め特性

- 1) US-ERDA WASH-1295 「Status and Objectives of Tokamak Systems for Fusion Research」
- 2) W.Tang Nuclear Fusion 13 883 (1974)
- 3) 第3章で述べるが, JT-4ではダイバータ・コイルの副コイルに位置不安定性の安定化効果を期待している。
- 4) ポロイダル磁場コイルの電力が大であっても, 冷却水の温度上昇を何かの形で利用できれば, 系全体としてはエネルギー損失とはならない。
- 5) Ninomiya, H. et al. Submitted to JJAP (1976)
- 6) Tazima, T et al. Proc. of 5th IAEA Conf. Tokyo, 1974 Paper CN33/A1-2 Behrish, R 同上 Paper CN33/S2
- 7) TFR group EUR-CEA-FC-783 (1975)
- 8) 曾根 JAERI-M 6243 (1975)
スパタリングに関するまとめ
- 9) Mense, A UWFD-137 (1975)
- 10) 予備設計時には140 cm
- 11) イオンと電子間のエネルギー等配分時間は, $n=10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $T=1 \text{ keV}$ のとき50msであり, 予想されるエネルギー閉込め時間100~300msよりも短い。
- 12) 最近発表されたORNLの村上氏の \bar{n} と B_T/R との比例則に一致する。

第3章 基本的検討

本章では、装置の設計に必要な最小限の科学的検討について述べる。科学的検討は、本章に述べる事項に限らず、実験開始後のデータ解析および実験計画作成のために更に検討を進めておく必要がある。

3.1 非円形断面効果

3.1.1 概説

非円形断面トカマクの非円形効果の理論的予想は文献4)に詳しく述べられている。しかし、現在までその実験的検証の例は著しく少なく、わずかにJFT-2a¹⁾、Doublet II²⁾、およびT-9³⁾で非円形断面トカマクのMHD的安定平衡が存在することが確認されたにすぎない。したがって、非円形効果に関する実験則はない。この現状でJT-4の実験は、まず非円形断面トカマクの磁気流体(MHD)的な特性を検証することが重要であろう。

非円形断面トカマク型装置で上記目標を達成するため、今後実験的に確かめるべきものの内、代表的な事項は次のものである。

(i) MHD的特性

- (a) β をどの程度大きくできるか。
- (b) プラズマ電流をどの程度多く流せるか。

(ii) 輸送現象に関するスケーリング

これらに関する解析は、断面形状の違いにより異なるため統一的な結論は出せないが、ここではJT-4の断面形状の基本形である縦長楕円断面について、その非円形効果を検討する。⁵⁾

3.1.2 ベータ値

プラズマ電流が一様分布している場合、MHD平衡の限界から求まるポロイダル・ベータ値の限界 β_p^{\max} は、次の様に評価されている。⁴⁾

$$\beta_p^{\max} \simeq \frac{R_p}{a} \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\kappa^2 - 1}{\kappa^2 + 1} \right) \quad (3-1)$$

JT-4のパラメータ ($R_p = 1.45 \text{ m}$, $q = 3.0$) を代入すると、

$$\begin{aligned} \kappa = 1 (a = b = 0.45) \text{ の時 } \beta_p^{\max} &= 3.2 \\ \kappa = 2 (a = 0.3, b = 0.6) \text{ の時 } \beta_p^{\max} &= 6.3 \end{aligned} \quad (3-2)$$

次に全磁場に対するベータ値 β_t は、ポロイダル・ベータ β_p とすると、

$$\beta_t = \frac{\beta_p}{q^2} \left(\frac{\ell_p}{\ell_T} \right)^2 \quad (3-3)$$

となる。ここで、 ℓ_p 、 ℓ_T はそれぞれ、ポロイダル方向及びトロイダル方向のconnection lengthであり、円形断面の場合 $\ell_p/\ell_T = a/R_p$ である。しかるに、楕円形断面の場合、

$$\begin{aligned}
 \ell_p &\simeq 2\pi a \cdot \frac{2\kappa}{\pi} E(\sqrt{1-\kappa^{-2}}) \\
 &\doteq \pi \sqrt{2(a^2+b^2)} \\
 &= 2\pi a \sqrt{\frac{1+\kappa^2}{2}} \quad (\kappa \geq 1) \quad (3-4)
 \end{aligned}$$

となり、 κ の増加とともに ℓ_p は増加する。ここで、 $E(k)$ は第2種完全楕円積分である。したがって、非円形断面にした場合、 β_p 、 q が円形断面の場合と同じ値であるプラズマが得られるとすると、円形断面の β_t より大きな β_t を得ることが出来る。 $\kappa=2$ の場合、 β_t は同一アスペクト比の円形断面の場合の約2.5倍である。⁶⁾したがって、 $q=3$ として、 $\kappa=2$ の時 β_t は最大7.5%となる。しかしながら、この β_t 値まではJT-4で実験できないだろう。何故なら、今、 $\beta_t=0.075$ とした時、 $B_T=3T$ ならプラズマの圧力 nT は、

$$nT=8.3 \times 10^{14} \quad [\text{cm}^{-3} \cdot \text{keV}]$$

(但し、 $Z_{\text{eff}}=1.0$ 、 $T_e=T_i$ を仮定)

となる。すなわち、 $n \simeq 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ の時、 $T=8.3 \text{ keV}$ となるが、この様なプラズマをJT-4で閉込めることは、現状の輸送現象理論に基づく限り、不可能であろう。

3.1.3 MHD安定性

次に、プラズマ電流の限界について考える。この値は、MHD安定性から決る。一様電流分布した場合の安全係数 q は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 q &= \frac{B_T}{R_p} \cdot \frac{1}{\mu_0 j_p} \cdot \frac{1+\kappa^2}{\kappa} \\
 &= \frac{B_T}{R_p} \cdot \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\pi a^2 (1+\kappa^2)}{I_p} \quad (3-5)
 \end{aligned}$$

ここで、 I_p はプラズマ電流、 j_p はプラズマ電流密度である。現在、円形断面トカマクで問題となっているMHDモードは、 $m=2, 3$ のkinkモード、 $m=1$ internal kinkモード、及び $m=2, 3$ のtearingモードである。JT-4で予定している非円形度($1 \leq \kappa \leq 2$)の非円形効果で、これらの不安定性が、安定化されるという結論にはならないが、円形断面と同程度の安定性は期待できるだろう。もし円形断面の場合と同じ安定限界でも、(3-5)式よりわかるように、楕円変形によってプラズマ電流密度を大きくできる可能性がある。すなわち、 q が同じとすると、円形断面時のプラズマ電流、及びプラズマ電流密度を I_p^0 、 j_p^0 とすると、楕円形断面時の電流 I_p 、及び電流密度 j_p は、

$$\begin{aligned}
 \frac{I_p}{I_p^0} &= \frac{1+\kappa^2}{2} \\
 \frac{j_p}{j_p^0} &= \frac{1+\kappa^2}{2\kappa} \quad (3-6)
 \end{aligned}$$

となり、 $\kappa=2.0$ に対しては、 $I_p/I_p^0=2.5$ 、 $j_p/j_p^0=1.25$ である。ただし、(3-6)式は楕円断面の短半径と円形断面の(副)半径が等しいときの比較であり、 I_p の増加の中には断

面積の増加による分が入っている。電流密度の高いことは、同じトロイダル磁場強度でのジュール加熱の効率が低いことを意味する。また、最近の Alcator の実験によると少くもジュール加熱のみでは、電流密度が高い程、高密度のプラズマが得られる傾向を示している。

(Alcator では $j_p = 7.0 \text{ A/mm}^2$ で $n = 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, JFT-2 では $j_p \approx 0.8 \text{ A/mm}^2$ で $n \approx 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) したがって、プラズマ電流密度が高いということは実験のパラメータ範囲を大きくできることを意味し、実験上重要な要素となる。⁷⁾ また、将来の核融合炉の見地から考えると、非円形効果によるプラズマ電流の増加は、同じプラズマを得るために必要なトロイダル磁場が円形断面の場合よりも小さくてすむことを意味している。(3-5)式より、非円形断面の場合のトロイダル磁場は、

$$B_T = q R_p \mu_0 j_p \frac{\kappa}{1 + \kappa^2} \quad (3-7)$$

したがって、 $q R_p \mu_0 j_p$ が等しい円形断面プラズマを閉込めるために必要な磁場 B_T^0 に比べて、

$$\frac{B_T}{B_T^0} = \frac{2\kappa}{1 + \kappa^2} \quad (3-8)$$

だけ必要な磁場強度は小さい。⁸⁾ $\kappa = 2$ のとき、この比は 0.8 である。

以上、非円形トカマクの MHD 的特性の代表的事項について考察したが、この他にも非円形効果の考えられる事項はいくつかある。例えば、高ベータ不安定性とか輸送現象がそれである。高ベータ不安定性は、非円形効果により円形断面プラズマよりもベータ値の高いプラズマが得られる可能性がある以上、今後検討する必要がある。

3.1.4 輸送現象

非円形断面トカマクにおける輸送現象の解析は新古典理論にはあるが、現在のトカマクの輸送現象自体が新古典理論だけでは説明できないこと、また JT-4 の目標とするプラズマは捕捉粒子領域のプラズマであることを考えると、理論的予想は必ずしも当るとは限らない。⁹⁾ 一方、非円形断面トカマクの実験例は、現在あまりに少く、したがって非円形断面効果の実験則はない。また、JT-4 にはダイバータを設けることを考えると、現存する理論または実験則から JT-4 プラズマの非円形効果を予測することは不可能である。現在、輸送現象解析は計算機シミュレーションによる方法が主であるが、この方法で非円形効果を解析する場合には、次の事に注意すべきである。すなわち、非円形断面トカマクの平衡は輸送現象から決まるプラズマ・パラメータ β_p , ℓ_i などに依存するので、輸送現象と平衡とを同時に考慮することが必要である。

3.1.5 位置不安定性と平衡の分岐

以上の考察からは、楕円度 κ を大にするほど非円形効果のプラス面が大きくなるが、他方ではマイナス面も現れてくる。⁴⁾ その代表例が垂直方向位置不安定性である。この不安定性は、

プラズマ電流が一様分布の場合 $\kappa \geq 1.3$ で不安定になるが、非円形断面トカマクの平衡を完全導体シェルによって維持する場合には、シェルによる安定化効果のため問題にならない。しかし、JT-4級の非円形断面トカマクではプラズマ電流維持時間が1秒以上でシェル電流の減衰時定数よりも長いためシェルを使用することができず、外部コイルによる磁場で平衡を維持する必要がある。真空容器は抵抗率が高くそのシェル効果による安定化は不十分であり、位置不安定性が問題となる。このため、フィードバック制御などによる安定化が必要になるが、これに関しては、3.3節で詳述する。

さらに、最近非円形断面トカマクの平衡に関して、その分岐 (bifurcation) が指摘されている。⁴⁾ 一様プラズマ電流分布、楕円断面トカマクでは $\kappa > 2.9$ の時に分岐が生じ、一方は縦長楕円断面、他方は円形断面に近い平衡となるが、前者は不安定になる傾向がある。

これらのマイナス面を考慮して、楕円度 κ には上限を決める必要がある。

3.1.6 非円形断面とダイバータ

最後に、非円形効果とダイバータとの関連について要点のみを述べる。まず、核融合プラズマ領域 (又は捕捉粒子領域) で先に述べた非円形効果を実験するためには不純物の対策が不可欠である。この観点からダイバータはJT-4にとって重要な要素である。また、縦長非円形断面トカマクの位置不安定性の安定化要素としてもダイバータは有効である。さらに、局所不安定性の非円形効果 (D形または逆D形変形) の実験のためには、ダイバータ・コイルは一種の shaping coil にもなる。D形変形をダイバータ・コイルでなく、真空容器外のポロイダル磁場コイル (例えば六重極磁場コイル) で制御しようとする、そのために必要な起磁力は非常に大きい。以上、非円形断面プラズマの実験の観点から見たダイバータの必要性の例を付言した。

3.2 JT-4 プラズマのMHD平衡

3.2.1 縦長楕円断面トカマクのMHD平衡

非円形断面トカマクとして縦長楕円断面を中心に考える。非円形断面トカマクプラズマのMHD平衡を特徴づけるプラズマのパラメータとして次のものが考えられる。

主半径	R_p
平均副半径	a
楕円度	$\kappa = b/a$
電流	I_p
規格化内部インピーダンス	l_i
ポロイダル・ベータ	β_p

これら6個のパラメータで指定されるMHD平衡を得るに必要な外部ポロイダル磁場 B_{ex} は、導体シェル上に流れる誘導電流または外部コイル電流によって作られる。JT-4級トカマク

の放電維持時間は秒オーダーであるため、前者の方法には依存できない。したがって、ここでは外部コイルにより B_{ex} を印加する方法での非円形断面トカマクの MHD 平衡を考える。この時 B_{ex} は平衡の式 $\nabla p = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ を自由境界問題として解くことにより得られる。しかし、プラズマ断面全領域にわたって B_{ex} 分布を求めてみても、ポロイダル磁場コイル設計の観点からは、その全てを満たすコイル配置を実現することは不可能である。そこで、この外部磁場 B_{ex} を特徴づけるパラメータとして次の2つの量を考える。(第3.1図, 第3.2図参照)

プラズマ断面中心 $R = R_p, Z = 0$ での B_{ex} の Z 方向成分 B_v

プラズマ断面中心 (同上) での B_{ex} の曲率を示す曲率指数 n

ただし,

$$n = - \frac{R}{B_z} \cdot \frac{\partial B_z}{\partial R} \Big|_{R=R_p} \quad (3-9)$$

平衡プラズマのパラメータ ($R_p, a, \kappa, I_p, \ell_i, \beta_p$) とその平衡に必要な外部ポロイダル磁場のパラメータ (B_v, n) との関係は、楕円形断面トカマクについては、アスペクト比 R_p/a が大きくて楕円度 κ が 1 に近い場合は解析的に求まる。¹⁰⁾ その結果はプラズマ電流が一様分布 ($\ell_i = 0.5$) の場合を第3.3図に、放物形電流分布 ($\ell_i = 1.0$) の場合を第3.4に示す。ただし、この結果は楕円度の大きいところで解析上の問題があるので、今後数値的手法による平衡解析を行って詳細につめる必要がある。¹¹⁾

3.2.2 外部ポロイダル磁場コイル

J T - 4 で実験を予定しているプラズマのパラメータは、次の通りである。

$$R_p = 1.45 \text{ m}^{12)}$$

$$a = 0.4 \sim 0.5 \text{ m}$$

$$\kappa = 1.0 \sim 2.0 \quad (2.5)$$

$$I_p \lesssim 1.0 \text{ MA}$$

$$(B_T = 3 \text{ T}, q = 3.0)$$

$$\ell_i = 0.5 \sim 1.0$$

$$\beta_p = 1.0 \quad (\text{第二段加熱あり})$$

詳細は第3.1表にある。ここで κ の範囲は次節で述べる位置不安定性のフィードバック安定化、平衡磁場用外部コイルの容量などの点から設定された。¹³⁾ また、プラズマ電流算出にあたっては、前節の非円形効果およびトロイダル効果¹⁴⁾ を考慮して、その上限を決定した。さらに、 ℓ_i, β_p はプラズマの輸送現象から決る訳であるが、稼動中のトカマクの実験からの推測と第二段加熱を考慮して決定した。¹⁶⁾

これらのプラズマ・パラメータに対応した外部磁場 B_{ex} は、第3.3図, 第3.4図より,

$$B_v \lesssim 2400 \text{ Gauss}$$

$$n = 0.8 \sim -4.0$$

程度と評価できる。このような仕様を満足する外部磁場は、第3.5図に示すように、一様分布した垂直磁場とプラズマ中心に零点をもつ四重極磁場との重畳で構成できる。このとき、上記

第 3.1 表 JT-4 のプラズマ・パラメータ概算

主半径 R_p	1.45 m				
楕円度 κ	1.0	1.5		2.0	
リミタ	金属	あり	あり		あり
	磁気	(あり)	あり		あり
副半径	b	0.45 m	0.60		0.60
	a	0.45	0.40		0.30
平均副半径	\bar{a}_s	0.45	0.49	0.50	0.42
	\bar{a}_ℓ				0.46
平均アスペクト比	R_p/\bar{a}_s	3.2	3.0	2.9	3.5
	R_p/\bar{a}_ℓ				3.2
プラズマ体積		5.8 m ³	6.9		5.2
トロイダル磁場 B_T	3.0 T				
プラズマ電流 ($q=3, MA$) I_p		0.70	0.80	0.89	0.61, 0.77

$$a_s = \sqrt{ab} \quad 2\pi\bar{a}_\ell = 4bE(1 - a^2/b^2)$$

$$I_p = \frac{2\pi\bar{a}_s^2 B_T}{\mu_0 q R_p}, \quad \frac{B_T}{\mu_0 q R_p} \pi ab \frac{1 + \kappa^2}{\kappa}$$

仕様を満す一様垂直磁場および四重極磁場を印加するに必要な外部ポロイダル磁場コイルの起磁力を評価してみる。第 3.6 図に示すような仮想平衡磁場コイル位置に、上下 120 本の導体を設置し、各導体に適当な電流を流すことにより 2 種類のポロイダル磁場を構成する。¹⁷⁾ 一様垂直磁場を形成する電流を $I_d(\theta)$ 、四重極磁場を形成する電流を $I_Q(\theta)$ とすると、外部ポロイダル磁場コイル電流の空間分布は、一例として第 3.7 図に示すようになる。この場合、各電流の合計起磁力が零 AT となるようにし、したがって、空心変流器コイルとの結合係数が零となるように配慮した。第 3.8 図には、 $B_v = 2.0, 2.5 \text{ kG}$ の場合の外部磁場コイルの全起磁力を示した。これらの図で、 $|I_d(\theta) + I_Q(\theta)|$ で示すものは、垂直磁場コイルと四重極磁場コイルとを分離せず、単一コイルの電流分布で平衡磁場を構成する場合（形状コイル方式）であり、 $|I_d(\theta)| + |I_Q(\theta)|$ で示すものは、両磁場コイルを各々設置し、両者の電流比によって平衡磁場を構成する場合（機能別コイル方式）である。（ $B_v - n$ ）図表上の任意の外部磁場を印加するという点からは後者が有利であるが、ハード上の観点から次の様な欠点がある。

(i) ($B_v - n$) 図表上任意の外部磁場を印加するための全起磁力が大きい。(→電源容量の増大)¹⁸⁾

(ii) 空間的にコイル設置面積の少ないトラス内側 ($120^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, 第 3.5 図, 第 3.6 図参照) での起磁力が大きい。¹⁸⁾

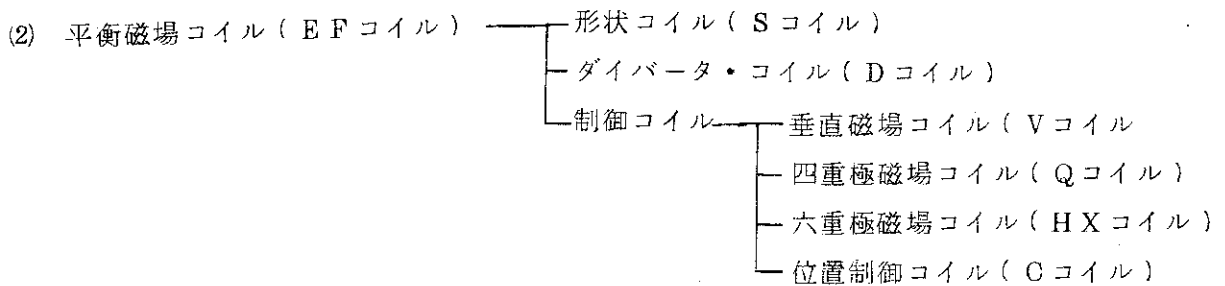
しかるに、JT-4 実験パラメータとしての楕円度は 1.0, 1.5, 2.0 の 3 種程度であろう。したがって、外部磁場として ($B_v - n$) 図表の n 方向に対して連続的な磁場を印加する必要はな

い。そこで、JT-4では楕円度 $\kappa=1.0, 1.5, 2.0$ に対応して3種類の n を決定してそれを満すコイル配置を設け、一様垂直磁場と四重極磁場を単一コイルで同時に発生する方法を採用することにより、上記の問題点を解決することが有利であると考えられる。以下、この形式のコイルを「形状コイル(Sコイル)」と呼ぶ。

「形状コイル」による外部磁場には、 $(B_v - n)$ 図表上の n 方向に自由度がない。一方、平衡プラズマのパラメータ $(R_p, a, \kappa, I_p, l_i, \beta_p)$ は、一放電期間中に時間的な変動を生じる。これに対してプラズマのパラメータのうち、 R_p, a, κ を一定に保つためには、 (B_v, n) を制御する必要がある。例えば、第3.9図に示すように、 R_p, a, κ を一定としたときに平衡プラズマを得るに必要な外部磁場は、プラズマ電流立上り時には $B_v = 0$ から出発して (B_{v0}, n_0) まで変化する。 (B_{v0}, n_0) はプラズマ電流 I_p が準定常値に達した時点での平衡に必要な外部磁場である。プラズマ電流が準定常状態(プラズマ電流維持時間)に達した後は、プラズマのパラメータ I_p, l_i, β_p の変動により第3.9図の斜線部で示される範囲内の任意の一点で表わされる外部平衡磁場が必要となる。一方、その外部平衡磁場を発生する形状コイルによる磁場はその電流値を変化させることにより、 $n = n_0$ 上を変動する。したがって、これら両者の間の差を時々刻々補償する磁場を発生するコイルとして、 δB_v を制御する垂直磁場コイル、 δn を制御する四重極磁場コイルが必要となる。

以上の考察および前節での考察(D形変形, 位置不安定性)に従ってJT-4の外部ポロイダル磁場コイルは次の各種コイルから形成される必要がある。

(1) 空心変流器コイル(OHコイル)



(3) 水平磁場コイル(Hコイル)¹⁹⁾

JT-4のプラズマ平衡は、これらのコイル電流のプログラム制御または帰還制御により得られる。各コイルの機能と制御方式は第3.2表にまとめて示す。

3.2.3 JT-4プラズマの平衡例

JT-4プラズマの平衡計算は、平衡方程式

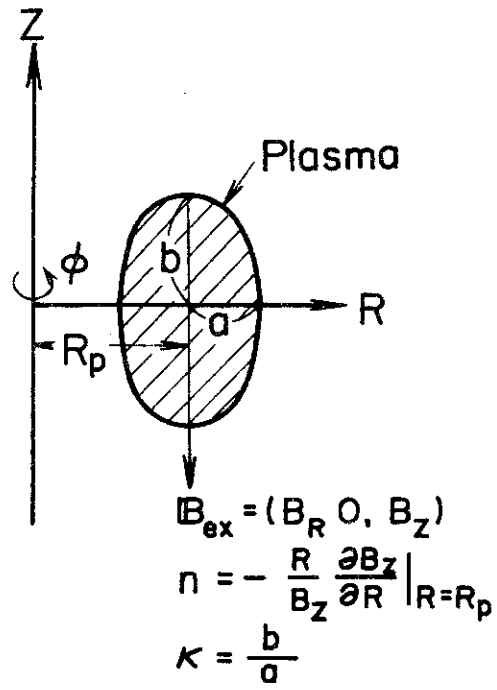
$$R \frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial \phi}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Z^2} = -\mu_0 R \cdot j_\phi(\phi, R)$$

$$= -\mu_0 \left[R^2 \frac{d}{d\phi} p(\phi) + \frac{d}{d\phi} \left(\frac{I^2}{2} \right) \right] \quad (3-10)$$

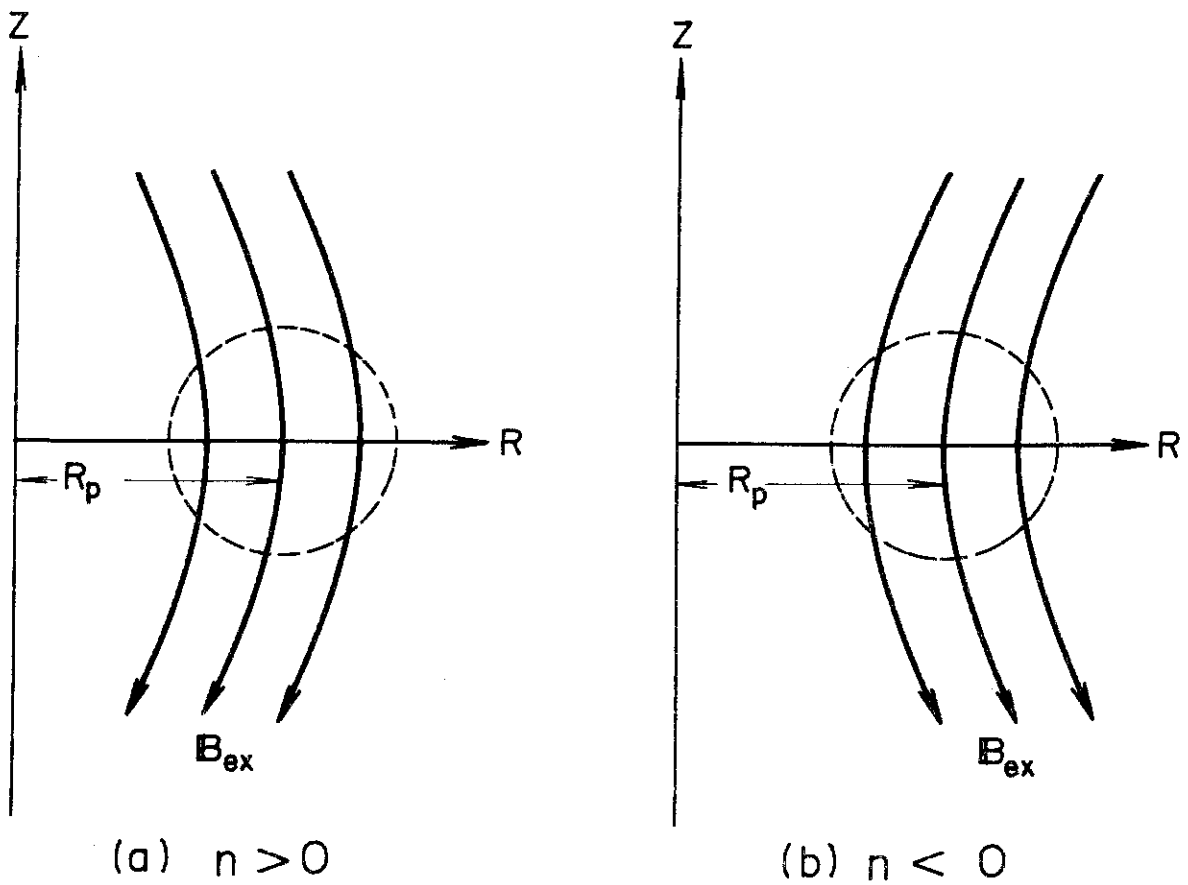
を数値的に解いて解を得た。用いた計算コードはEQUCO²⁰⁾ および Legendre 陪関数による級数展開法²¹⁾である。第3.10図はその結果であり、(a)は円形断面プラズマ(放物形電流分布)、(b)は一様電流分布の場合の $\kappa \approx 2.0$ の例、(c)は放物形電流分布の場合の $\kappa \approx 1.7$ の例である。

3.2.4 今後の検討事項

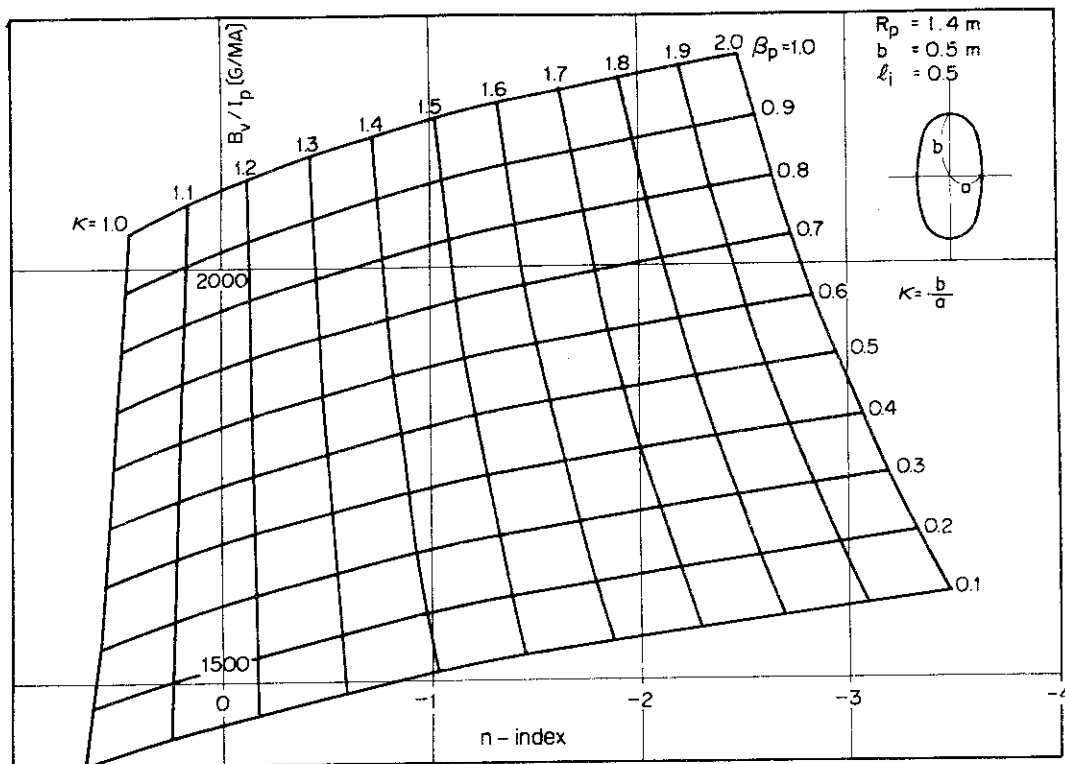
今後検討を進めるべき事項の主なものは、平衡計算を多くの場合について詳細に行うこと、 $(B_v - n)$ 図表を数値計算によって完成すること、シミュレーション計算と平衡計算の組合せ、制御範囲の検討、コイル方式の再検討(ハイブリッド方式を含む)、位置不安定性の計算(概算は次節で述べる。)などである。



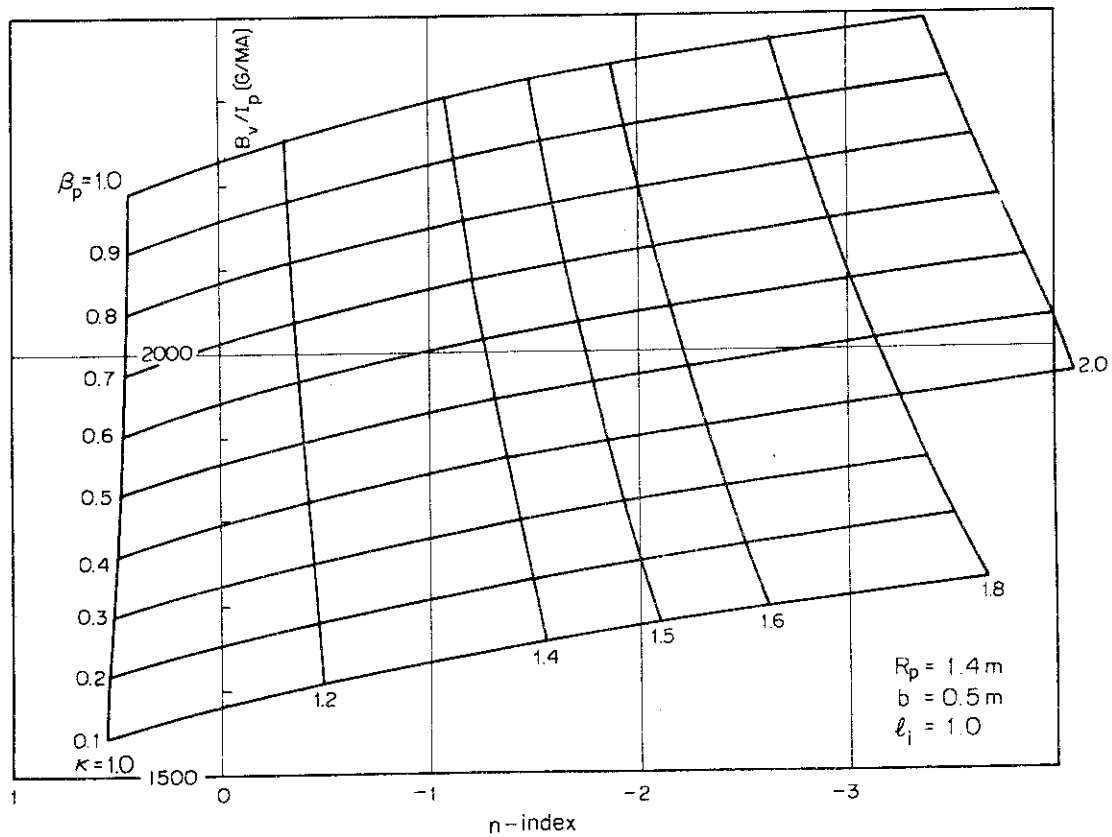
第 3.1 図 プラズマ・パラメータ



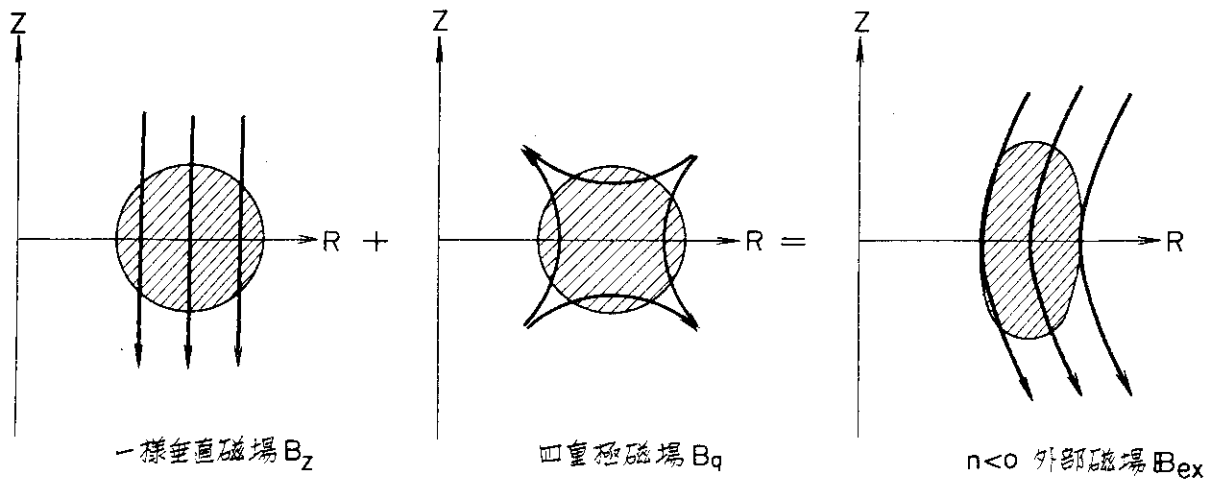
第 3.2 図 n index



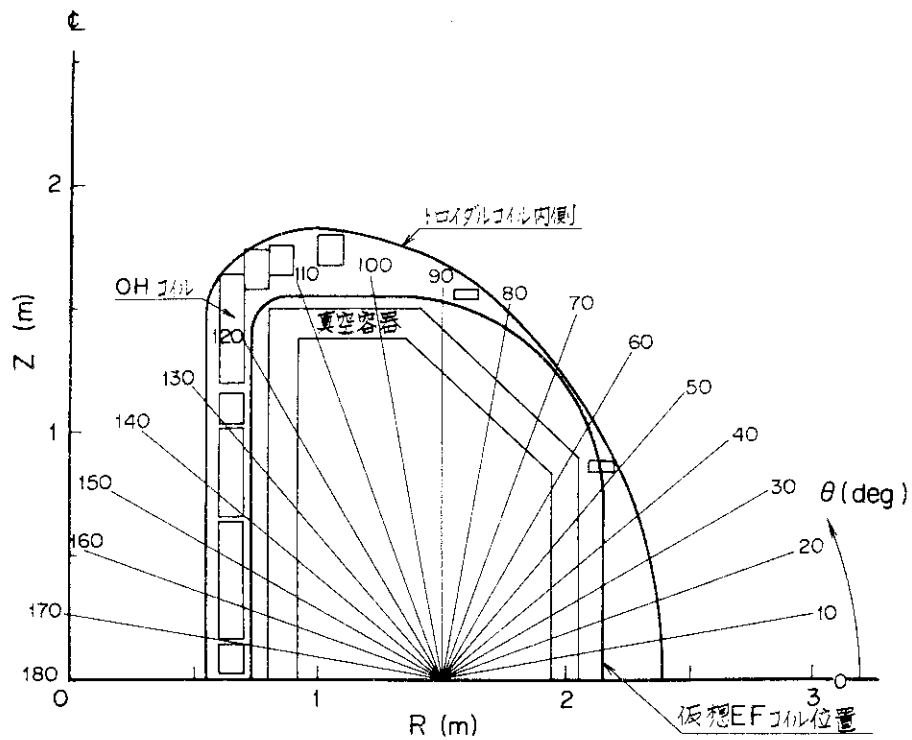
第 3.3 図 楕円断面プラズマの平衡磁場 I (一様電流分布)



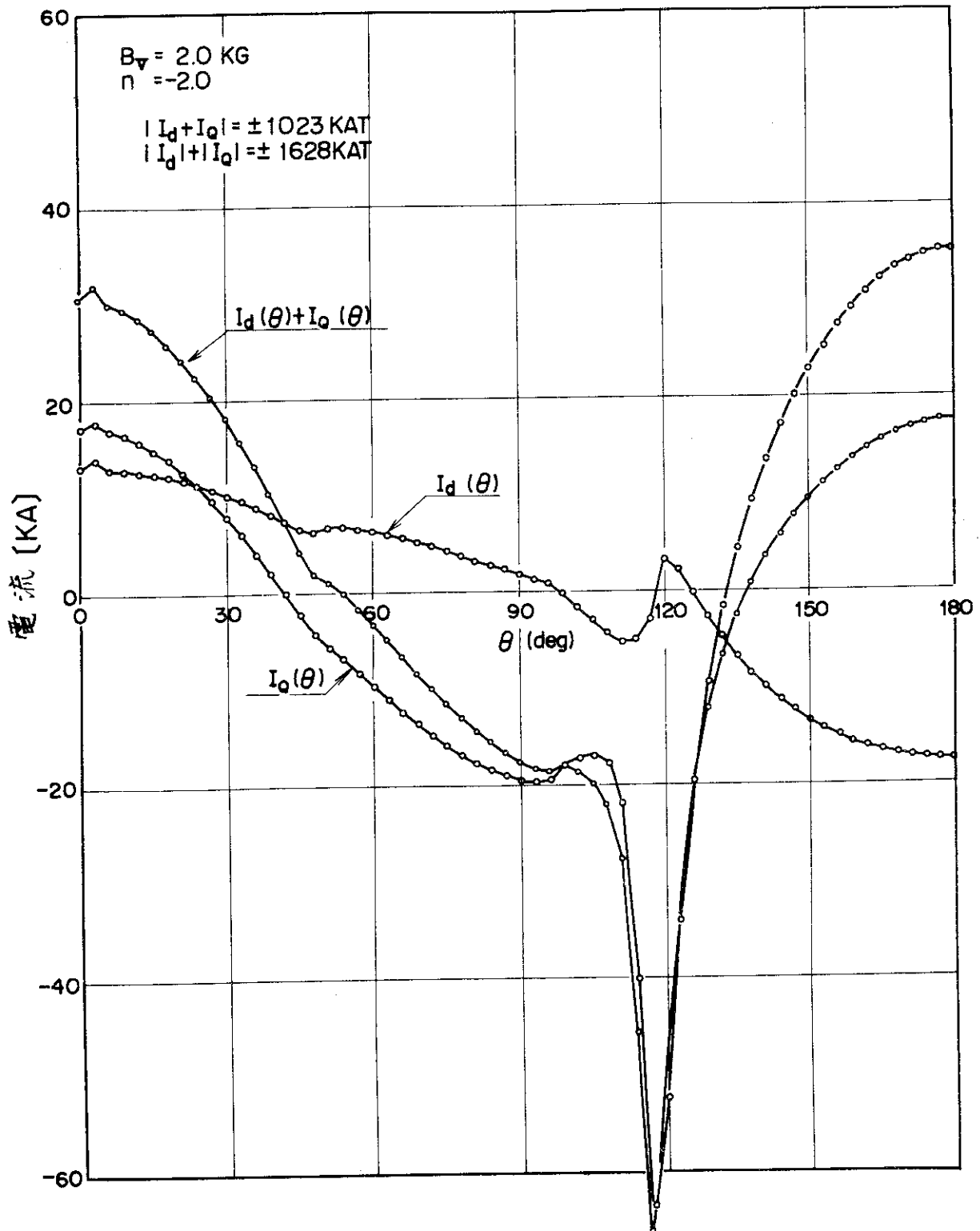
第 3.4 図 楕円断面プラズマの平衡磁場 II (放物形電流分布)



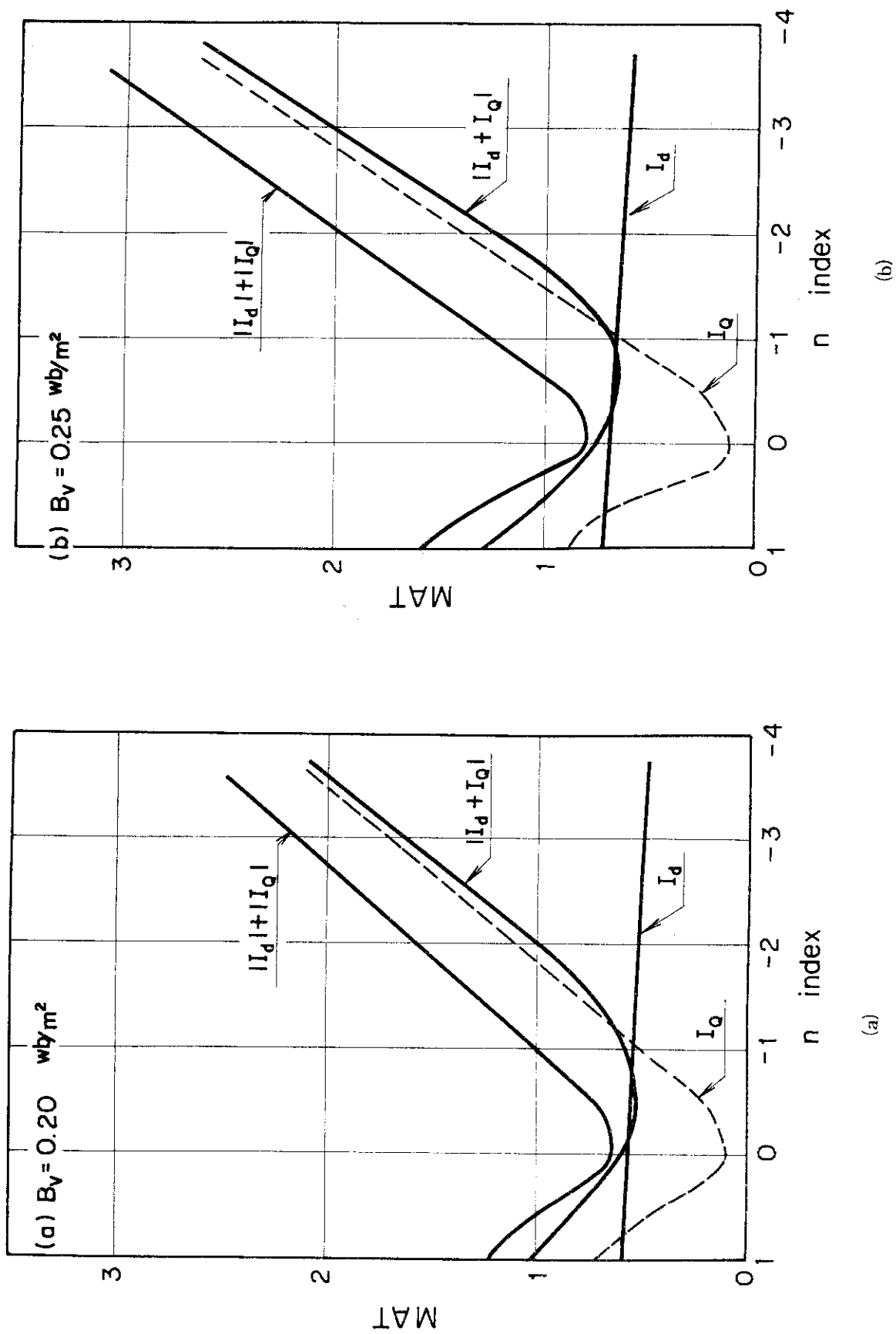
第 3.5 図 外部磁場 B_{ex} の構成



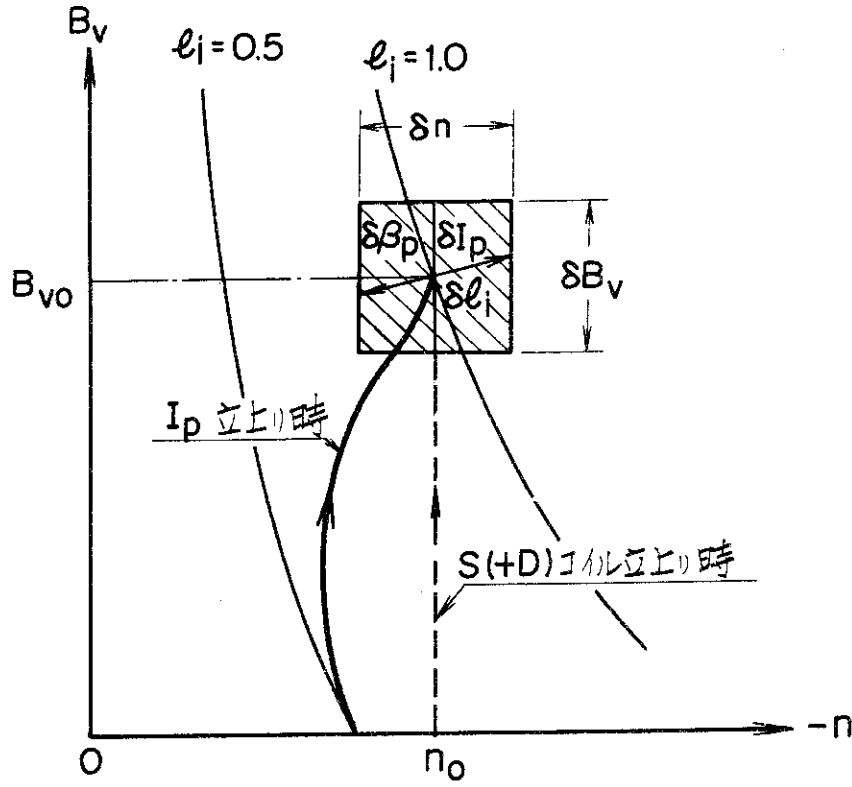
第 3.6 図 JT-4 (予備設計案) におけるポロイダル磁場コイル設置可能個所



第 3.7 図 外部磁場コイル電流の空間分布
 ($B_v = 2.0 \text{ kG}$, $n = -2.0$ の場合)



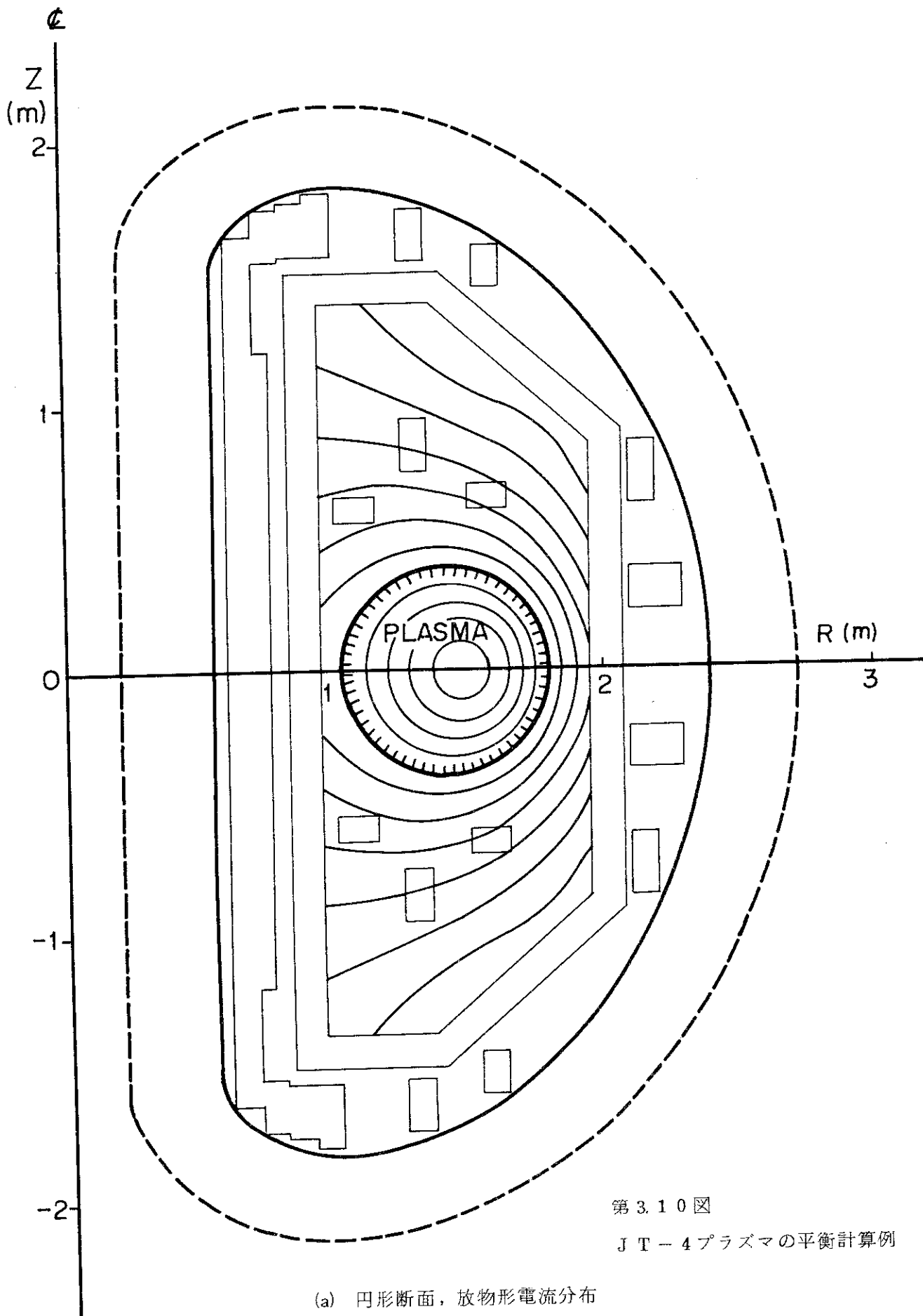
第 3.8 図 外部磁場コイルの全起磁力 (a) $B_v = 2.0 \text{ kG}$, (b) $B_v = 2.5 \text{ kG}$



第 3.9 図 プラズマの平衡制御概念図

第3.2表 JT-4各種ポロイダル磁場コイル一覽表

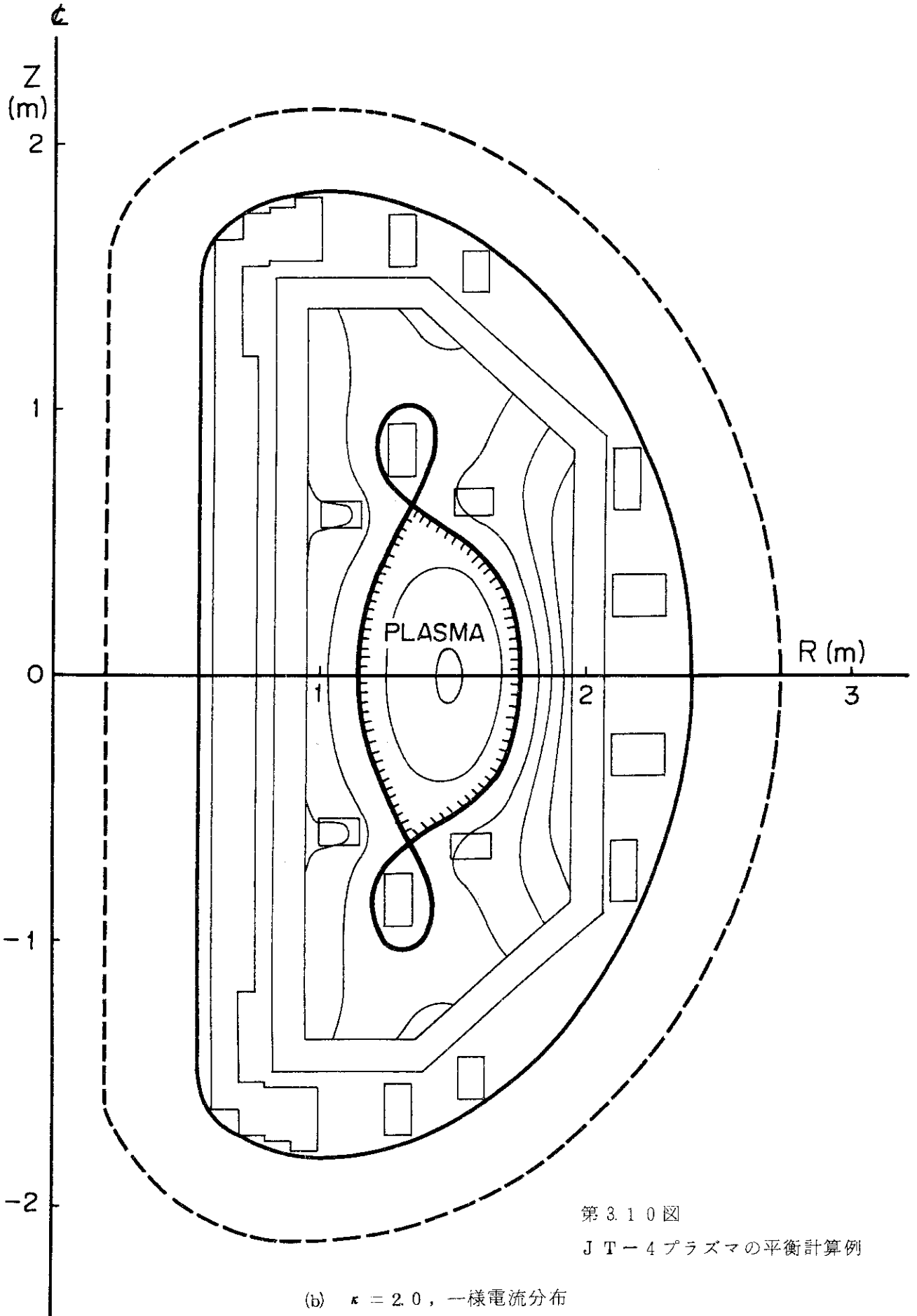
コイル名	機能	デザイン上の要求		備考
		磁場分布	電磁氣的	
空変流器コイル (OHコイル)	トロイダルプラズマ電流の駆動	plasma regionでの漏れ磁場が出来るだけ小さいこと		
形状コイル (Sコイル)	非円形断面プラズマの平衡形成のための主磁場発生	($B_v - n$) diagram に於て $B_v = 0 \sim 3.0 \text{ kG at } R = 1.4 \text{ m}$, $n = -4 \sim +1 \text{ at } R = 1.4 \text{ m}$ の範囲をカバーできると	本質的にはOHコイル系との相互インダクタンスがゼロ	プラズマパラメータ ($I_p, R_p, a_p, k, \beta_p, k_1$) と ($B_v - n$) diagram との関係から, タップ切換方式にて, 数種類のコイル配置が可能なものとする
ダイバータコイル (Dコイル)	磁氣的リミター及びダイバータ用磁場の発生			
垂直磁場コイル (Vコイル)	平衡の制御用 ie プラズマパラメータの時間変化に応じた平衡用	$B_v = -0.5 \sim +0.5 \text{ kG at } R = 1.4 \text{ m}$ $n \sim 0 \text{ at } R = 1.4 \text{ m}$		pre-programming + feedback 方式 立上り時 and/or 立下り時は preprogramming flat-top 時は両者の併用 (主に feedback 系を用いたい)
4重極磁場コイル (Qコイル)	磁場の内, Sコイルの補正用	$B_v \sim 0 \text{ at } R = 1.4 \text{ m}$ $\delta_n = \pm 0.5 \text{ at } R = 1.4 \text{ m}$		7/1 現在 不確定要素大 全ての実験で用いるとは限らない ie プラズマ電流立上げ方式の実験的検討用 将来, 形状コイルの一部として, プラズマ断面の三角形制御用に使用することも可
6重極磁場コイル (HXコイル)	プラズマ電流立上り時 and/or 立下り時の制御			
位置制御コイル (Cコイル)	縦長非円形断面トカマクの位置不安定性 ($n = 0, m = 1$) の安定化	$ B_R _{DC} \leq 150 \text{ G}$, 一様分布		実験第1段階では, passive coil として使用 実験第2段階では, feed back 系として stabilization を行う
水平磁場コイル (Hコイル)	主にトロイダル磁場用コイルの巻戻し線及び継線などによる不正磁場の内の B_R 成分を打消すこと	$ B_R \leq 150 \text{ G}$, 一様分布		



第 3.10 図

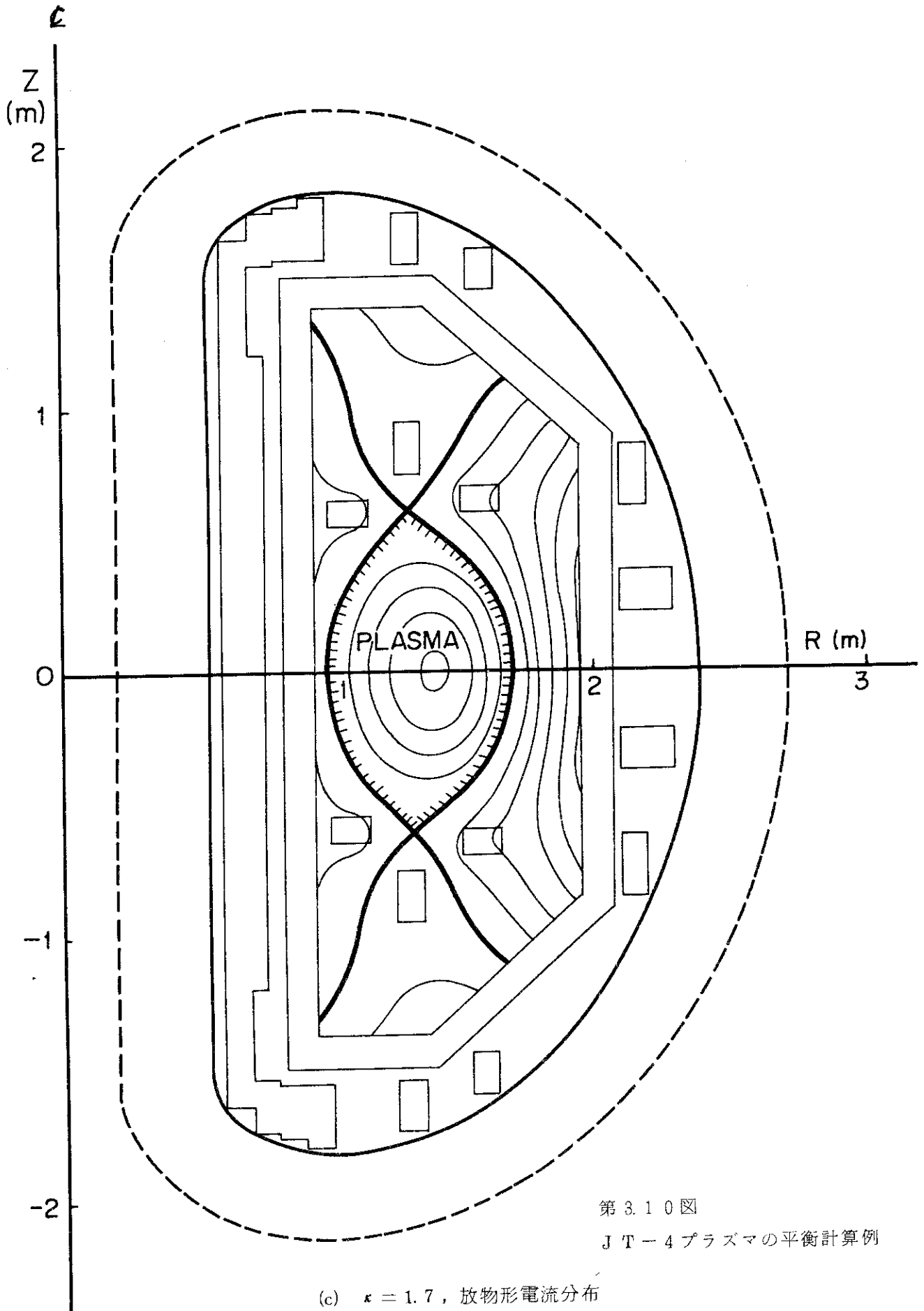
J T - 4 プラズマの平衡計算例

(a) 円形断面，放物形電流分布



第 3.10 図
J T-4 プラズマの平衡計算例

(b) $\kappa = 2.0$, 一様電流分布



3.3 JT-4 プラズマの制御

本節で触れる JT-4 プラズマの制御とは、前節で述べた制御コイルの電流をフィードバック制御してプラズマ諸量をコントロールすることである。²²⁾ JT-4 プラズマの制御は次の2種に大別される。

- (i) プラズマの平衡量のフィードバック制御
- (ii) 垂直方向位置不安定性のフィードバック安定化

以下、この2種類の制御について解説し、それぞれ制御ブロック線図を与える。ただし、制御ブロック線図の導出過程の詳細は付録5を参照されたい。

3.3.1 プラズマ平衡量のフィードバック制御

前記のように、プラズマのMHD平衡諸量 ($R_p, a, \kappa, I_p, \beta_p, \ell_i$) は、一放電期間中に時間的に変化する。これら諸量の内、 R_p, a はプラズマと真空容器壁 (ダイバータ実験時にはダイバータ入口のスリット) との相互作用を防止するために、一放電中一定に保つ必要がある。また、楕円度 κ は、非円形断面効果についてSN比のよい実験データを得るために、一放電期間中一定に保ちたい。しかし、これら (R_p, a, κ) は誤差磁場などの磁場の外乱により変化する。したがって外部磁場 (B_v, n) を制御する必要がある。一方、 I_p, β_p, ℓ_i はプラズマの輸送現象あるいは安定性などにより時々刻々変化する。しかるに、これら (I_p, β_p, ℓ_i) を一定に保つ様に直接制御する方法は未だ見通しがたない。したがって、これら磁場の外乱、 I_p, β_p, ℓ_i の変化にもかかわらず平衡の幾何学的諸量 R_p, a, κ を一定に保つには、外部磁場 (B_v, n) を時間的に制御する必要がある。制御の方式としては、輸送現象の特徴的時間程度で変化し、かつ再現性のある現象に対してはプログラム制御、再現性がなく時間的変化も速い現象に対してはフィードバック制御を考える。

フィードバック制御をするためには、第3.9図において、まず何らかの計測法によって実時間で磁場の外乱 $B_d, \delta I_p(t), \delta \beta_p(t), \delta \ell_i(t)$ を検出する。これらに応じて外部磁場の制御量 ($\delta B_v, \delta n$) を決定する。 $(B_d, \delta I_p, \delta \beta_p, \delta \ell_i) \leftrightarrow (\delta B_v, \delta n)$ の関係は、一般的に解析解を得ることはできないが、例えば第3.3図、第3.4図より数値的に得ることはできる。その一例を第3.11図に示す。制御量 ($\delta B_v, \delta n$) が決れば、それに応じて δB_v に対しては一樣垂直磁場コイル電流 I_v 、 δn に対しては四重極磁場コイル電流 I_Q を制御する。 δn と I_Q との関係は四重極磁場 $B_Q(R, Z)$ が $R=R_p, Z=0$ でゼロである点を考慮すると次の様にして求まる。

$$\begin{aligned} n &= -\frac{R}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial R} \Big|_{R=R_p} \\ &= -\frac{R}{B_v + B_Q} \frac{\partial}{\partial R} (B_v + B_Q) \Big|_{R=R_p} \\ &= -\frac{R}{B_v} \cdot \frac{\partial B_Q}{\partial R} \Big|_{R=R_p} \end{aligned}$$

ゆえに

$$\delta n \approx \frac{R}{B_{v0}} \left[\frac{\delta B_v}{B_{v0}} \cdot \frac{\partial B_{Q0}}{\partial R} - \frac{\partial}{\partial R} \delta B_Q \right]_{R=R_p} \quad (3-11)$$

ところが、現在のプラズマ計測法では $\delta \beta_p(t)$ 、 $\delta \ell_i(t)$ を SN 比よく検出することが困難であること、また $(\delta I_p, \delta \beta_p, \delta \ell_i) \leftrightarrow (\delta B_v, \delta n)$ の関係自体に理論的に不十分な点があることなどを考えると、上記のようなフィードバック制御は現時点では実用的であるとは思えない。そこで、これら $(\delta I_p, \delta \beta_p, \delta \ell_i)$ の変動はプラズマの幾何学的諸量の変動 $(\delta R_p, \delta a, \delta \kappa)$ になって観測される（実際に磁気プローブで計測可能）ことを利用して、 $(\delta I_p, \delta \beta_p, \delta \ell_i)$ は一括して外乱として取扱う方式を考える。このような方式での制御ブロックの構成概念図は第 3.1.2 図のようになる。同図で示すシェル効果とは、次の様な現象のことである。すなわち、プラズマ電流が流れているプラズマ柱が運動するとき、その周囲にある真空容器、ポロイダルおよびトロイダル磁場コイルなどの金属物質に誘導電流が流れる。誘導電流はプラズマ柱の運動により生じた磁場の変動を打消す方向、すなわちプラズマ柱の運動を妨げる方向に流れる。これがシェル効果である。

以上の概念のもとに JT-4 プラズマ（予備設計仕様）の水平位置、断面形状のフィードバック制御のブロック線図を第 3.1.3 図、第 3.1.4 図に示す。詳細は付録 5 を参照されたい。このような方式でのプラズマ平衡制御については、JT-60 の R&D、詳細設計の過程で詳細な検討が続けられているので、逐次 JT-4 にも取入れるように考慮している。^{23~27)}

最後に、今後更に検討を行うべき事項として次のものを挙げておく。

(a) 水平位置—断面形状制御の一体化

本来、 $(\delta R_p, \delta a, \delta \kappa)$ と $(\delta B_v, \delta n)$ との関係は分離できないこと、また現実的には理想的一样垂直磁場コイルおよび四重極磁場コイルを設置できないこと、などから、第 3.1.3 図、第 3.1.4 図に示した制御ブロック線図は両者間の相互作用を考慮して一体化していくべきである。²⁴⁾

(b) 非円形効果の導入

JT-60 で制御対象となるプラズマは準円形断面であるので、²⁶⁾ JT-4 で制御対象となる楕円断面効果の積極的導入を計る。さらに、D 形変形（三角形変形）の制御（対象コイルは六重極磁場コイル）の可能性を検討する。

(c) プラズマの境界条件の制御

ダイバータ実験時を考慮して、ダイバータ・コイル電流のフィードバック制御、高速弁によるガス注入などを通じて、セパトリックス面の固定を計る。

(d) 高ランクの制御

プラズマの平衡量 (I_p, β_p, ℓ_i) の積極的制御を考える。例えば I_p に対しては変流器コイル電流 I_{OH} のフィードバック制御、 β_p に対しては第二段加熱による制御、 ℓ_i に対しては局所加熱による制御である。特に、最後の ℓ_i の制御、すなわちプラズマ電流密度分布の制御は非円形断面形状制御の立場からも重要である。なぜなら、プラズマ電流がプラズマ中心に集中すると、外部四重極磁場の制御に要する電力が著しく大となり、コイル設計上実用的でなくなる。

3.3.2 垂直方向位置不安定性のフィードバック安定化

前節で示したように、JT-4で目標とする縦長楕円断面トカマクのMHD平衡を外部コイル系で得るために必要な外部磁場の曲率指数 (n -index) は、負の領域に存在する。しかるに、 $n < 0$ なる垂直磁場中でのトカマク・プラズマは垂直方向の rigid な摂動 (断面形状不変のまま中心位置が変動) に対してMHD的に不安定である。(positional or displacement or $n=0$ instability)^{28~30)} したがって、このモードに対して安定平衡を得るために、JT-4としてはフィードバック (F.B.) 安定化を試みようとしている。

まず、プラズマ柱の垂直方向の摂動に対する運動を記述する方程式を線型解析で考えると次のようになる。(第3.1図参照)

$$m_p \ddot{z} = -I_p B_R \quad (3-12)$$

ここで、 m_p : プラズマ柱単位長さ当りの質量

z : プラズマ柱中心の垂直方向の変位 ($z/a \ll 1$)

R 方向の外部磁場 B_R は、大別して次の3種類から成る。

- (a) 平衡用外部磁場 B_{ex} の R 方向成分 B_{RE}
- (b) 真空容器など導体群に誘起されるイメージ電流による R 方向磁場 B_{RS}
- (c) フィードバック制御により印加される R 方向磁場 B_{RC}

すなわち、

$$B_R = B_{RE} + B_{RS} + B_{RC} + B_d \quad (3-13)$$

ただし、 B_d は外乱である。

B_{RE} は、 $\text{rot } B_{ex} = 0$ より

$$B_{RE} = B_{v0} \frac{n}{R_p} \cdot z \quad (3-14)$$

で与えられる。ここで、 B_{v0} は $R = R_p$, $Z = 0$ での B_{ex} の Z 成分の絶対値であり、円形断面プラズマでは、

$$B_{v0} = \frac{\mu_0 I_p}{4\pi R_p} A_0, \quad A_0 = \ell_n \frac{8 R_p}{a} + \frac{\ell_i - 3}{2} + \beta_p \quad (3-15)$$

で与えられる。今、 $n < 0$ とすると、(3-14) 式を (3-12) 式に代入すれば明らかなように、上半面 ($Z > 0$) では $-I_p B_{RE} > 0$ 、下半面では $-I_p B_{RE} < 0$ となり、(3-12) 式の解 $z(t)$ は単調増加 (不安定) になる。

B_{RS} は、シェル効果を表わす磁場である。トカマク型装置において、シェル効果を有する導体群としては、真空容器 (ライナを含む)、各種ポロイダル磁場コイル、トロイダル磁場コイル、金属製架台など多数存在するが、その中で最も効果の大きいものは一般的に真空容器である。(数値的に確認済み) 第3.15図(a)に示すように、プラズマ電流が流れているプラズマ柱が Z 方向に変動すると、真空容器には、上半面で $-\varphi$ 方向、下半面で φ 方向の誘導電流が生じる。この電流は真空容器断面全体に分布している。例えば、円形断面真空容器 (内径 r_s) の場合、 $r_s/R_p \ll 1$ 近似では $\sin \theta$ 状分布に流れることは解析的に示されている。²³⁾ しかし、第3.15図(a)に示すように、一般的断面形状を有する真空容器の場合、その電流分布は解析的

に与えられないので数値計算に頼ることになる。³¹⁾ いずれにしても、その電流分布は真空容器の上下で反対向き双極子電流分布になる。この分布した双極子電流の片半面内の積分値をシェル電流 I_s とすると、第 3.15 図(a)のような現象は、同図(b)のような等価集中回路として取扱える。すなわち、

$$L_s \frac{dI_s(t)}{dt} + R_s I_s(t) = - \frac{dM_{ps}}{dt} I_p$$

$$= - \frac{\partial M_{ps}}{\partial z} \cdot I_p \cdot \frac{dz(t)}{dt} \quad \left(\left| \frac{z}{a} \right| \ll 1 \right) \quad (3-16)$$

ここで、 L_s 、 R_s 、 M_{ps} は、それぞれプラズマ柱の Z 方向変動時の真空容器の自己インピーダンス、電気抵抗、プラズマ柱との相互インダクタンスであり、その算出方法は、文献 23、26、31 を参照されたい。この双極子電流 I_s により、プラズマ断面内に印加される R 方向磁場の平均値を B_{RS} とし、その比を ν_s とする。

$$\nu_s = \frac{B_{RS}}{I_s} \quad (3-17)$$

(3-16) 式、(3-17) 式をラプラス変換して次式を得る。

$$B_{RS}(s) = \nu_s I_s(s) = -\nu_s \frac{\partial M_{ps} / \partial z}{L_s} I_p \frac{s \tau_s}{1 + s \tau_s} z(s)$$

$$\equiv n_s \frac{B_{vo}}{R_p} \frac{s \tau_s}{1 + s \tau_s} z(s) \quad (3-18)$$

ここで、 $\tau_s = \frac{L_s}{R_s}$ 、 $n_s = -\nu_s \frac{\partial M_{ps} / \partial z}{L_s} I_p \frac{R_p}{B_{vo}}$

$$\nu_s > 0, \quad \frac{\partial M_{ps}}{\partial z} < 0$$

ここで注意すべき点は、 B_{vo} と I_p が比例することを考えると n_s は I_p に依存しない点であり、主に真空容器の幾何学的寸法で決る点である。このような真空容器のシェル効果計算を文献 31 から引用して、第 3.16 図に示しておく。同図から分るように、矩形断面真空容器に誘起される電流分布は、円形断面真空容器での $\sin \theta$ 状電流分布と大きく異なる。

最後に、フィードバック制御による磁場 B_{RC} をラプラス変換して、

$$B_{RC}(s) = N_C(s) \frac{B_{vo}}{R_p} z(s) \quad (3-19)$$

とすると、(3-12) 式、(3-13) 式より、第 3.17 図のようなブロック線図を得る。したがって伝達関数 $F(s)$ を、

$$F(s) \equiv \frac{z(s)}{B_d(s)}$$

$$= \frac{R_p / B_{vo}}{s^2 \tau_0^2 + \left[n + n_s \frac{s \tau_s}{1 + s \tau_s} + N_C(s) \right]} \quad (3-20)$$

と定義すると、位置不安定性を考える場合、この $F(s)$ の極 (pole) が s - 複素平面上の右半面

($\Re e s > 0$) に存在するか否かを調べればよい。(存在すれば不安定)

まず、フィードバック制御なしの場合を考える。($N_C(s) = 0$) このとき、(3-20)式の極の内、 $\Re e s > 0$ なる極を第3.18図に示す。同図で、

$$\gamma_g \equiv \Re e s \quad (\text{不安定性の成長率})$$

$$\tau_0^2 \equiv \frac{m_p R_p}{I_p B_{v0}} \quad (\sim 10^{-12}, \text{MHD 不安定性の特征的時間})$$

n_{su}, τ_u : 真空容器 (JT-4 予備設計仕様) の n_s, τ_s

である。すなわち、次の事が分る。

- (a) $n+n_s > 0$ では、シェル効果が有効で、 $\gamma_g \sim \tau_s^{-1}$ のオーダーまで抑制されるが、安定にはならない。
- (b) $n+n_s < 0$ では、シェル効果は無効で成長率は通常のMHD不安定性の成長率と同程度となる。すなわち、 $\gamma_g^{-1} \sim \tau_0 \sim 10^{-6}$ 秒

次に、このようなシェル効果のもとでの垂直方向位置不安定性のフィードバック安定化を考える。($N_C(s) \neq 0$) (3-20)式より、第3.17図で示す系の特性方程式は、

$$s^2 \tau_0^2 = - \left[n + n_s \frac{s \tau_s}{1 + s \tau_s} + N_C(s) \right] \quad (3-21)$$

となる。この式からフィードバック安定化のための必要条件が得られる。

- (a) $s \tau_s \gg 1$

$$\boxed{n + n_s > 0, N_C(s \gg \tau_s^{-1}) \approx 0 \text{ でも系は安定である。}} \quad (3-22)$$

この条件はフィードバック回路特性の現実案 (ハードの意) を考慮すると、

$$\boxed{n + n_s > 0} \quad (3-22')$$

と考えてよい。

- (b) $s \tau_s \rightarrow 0$

$$\boxed{n + N_C(0) > 0} \quad (3-23)$$

フィードバック回路 $N_C(s)$ の設計にあたっては (3-22), (3-22') と (3-23) 式を満足するように考えていくべきである。

以上の考察で、垂直方向位置不安定性のフィードバック安定化の概要は明らかとなった。しかし、ここで考えたモデル第3.17図はシェル効果として代表的なもの一つだけ (例えば真空容器) を考えたが、実際のトカマク型装置では、シェル効果をもつ導体が多数存在する。したがって、装置設計にあたっては、それら全ての効果を含めて上記の考察が必要となる。その場合には数値的手法に頼らざるを得ない。ここではその一例を示す。

第3.19図にJT-4プラズマ (予備設計仕様) の垂直方向位置不安定性のフィードバック安定化のためのブロック線図の実用例を示す。このブロック線図の導出方法は、前の平衡量制御の場合と同様であり、詳細は付録5を参照して頂きたい。同図において添字は、

- u 真空容器
- f シェル効果を有するコイル群 (位置制御コイル以外)
- c 位置制御コイル

を意味する。fコイルとしては、予備設計過程では、ダイバータ・コイルを passive 結線

(上下反対称極性結線)を採用したが、その他にトロイダル磁場コイル、OHコイルなどを考慮する必要がある。第3.19図より明らかな様に、この場合シェル効果を有する要素が3個あり、それら各要素のシェル効果指数 n_s は、

$$\left. \begin{aligned} n_{su} &= 1.13 \\ n_{sf} &= 0.11 \\ n_{sc} &= 0.76 \end{aligned} \right\} \text{(予備設計仕様)}$$

となる。これらの量を比較すると、JT-4におけるシェル効果の主力は真空容器であることが分る。そこで、第3.19図において真空容器以外のシェル効果要素を無視したブロック線図を考えると、第3.20図のようになる。第3.20図を第3.17図と比較すると、

$$n_s = \nu_u K_{pu} \frac{R_p}{B_{v0}} \equiv n_{su}$$

$$N_c(s) = \nu_c \left[1 - \frac{\nu_u}{\nu_c} K_{cu} \frac{s \tau_u}{1 + s \tau_u} \right] \frac{1/R_c}{1 + s \tau_c} G_c(s) \frac{R_p}{B_{v0}} \quad (3-24)$$

なる対応がある。この場合、一般に $\tau_u \ll \tau_c$ (JT-4 予備設計仕様では、 $\tau_u = 8.5 \text{ ms}$, $\tau_c = 34 \text{ ms}$) であることを考えると、 $G_c(s) = \text{const.}$ (比例制御) の場合 $s \tau_u \gg 1$ で $N_c(s) \rightarrow 0$ となる。すなわち、JT-4 予備設計仕様における垂直方向位置不安定性制御 (第3.19図) についても上記のフィードバック安定化条件 (3-22'), (3-23) 式が成立することを示している。実際、数値計算によると上記のことが成立する。第3.19図のブロック線図において、各要素の定数はJT-4 予備設計仕様値を用いる。また、 $G_c(s)$ としては、比例制御を考える。すなわち、

$$G_c(s) = G_0 \frac{B_{v0}}{R_p} \quad (3-25)$$

フィードバック部利得 G_0 をかえて、位置不安定性の成長率 r_g を数値的に計算した結果を第3.21図に示す。同図に於て係数 α は (3.23) 式から求まる安定化に必要な最小利得との比である。

$$G_{0 \min} = \left| n \right| \frac{R_c}{\nu_c}$$

$$G_0 = \alpha \cdot G_{0 \min} \quad (3-26)$$

同図から次の事が分る。

- フィードバック部の利得を増すにつれて、 $n + n_{su} > 0$ の領域では不安定性の成長率 r_g が小さくなる。
- この時、 $\tau_0 \approx 10^{-6} \text{ sec}$ かつ放電維持時間は約 1 sec であることを考えると、 $r_g \tau_0 \ll 10^{-6}$ の場合、実質上安定と見なせるので、フィードバック利得が (3-23) 式で定まる臨界利得より大きければ ($\alpha \geq 1$) フィードバック安定化が可能である。
- $n + n_{su} < 0$ の領域ではフィードバック安定化は比例制御を考える限り不可能である。

以上の数値計算の結果からJT-4における垂直方向位置不安定性のフィードバック安定化の必要条件として (3-22'), (3-23) 式を設計基準としてよいことが分る。すると、第3.3図、第3.4図よりフィードバック安定化が可能なJT-4プラズマの楕円度は高々 $k \leq 1.5$

となり，JT-4の設計基準 $1.0 \leq \kappa \leq 2.0$ (2.5) を満足できない。設計基準を満たすためにはもっと大きなシェル効果をもつ要素 ($n_s \geq 4$) を設置する必要がある。その方策の例を第3.3表に示す。

以上，縦長楕円断面トカマクでの垂直方向位置不安定性およびそのフィードバック安定化について検討した。今後更に制御ブロック図の詳細化，シェル効果要素の開発，フィードバック制御として高周波領域で利得が大きくなる微分制御の導入などを検討する必要がある。また理論的には位置不安定性の非線形領域での振舞の解析も必要である。

なお，ダイバータ・コイル（副コイルを含む）のある場合の断面形状固定（リジッド・モデル）の垂直方向位置不安定性の検討が数値計算によって行われ，³⁹⁾位置不安定性がダイバータ・コイルによって安定化できることが示されている。

3.4 ダイバータ（プラズマと壁の相互作用）

3.4.1 概 説

第2章でも述べたように，トカマク型装置のプラズマに混入する不純物は，今後解決を要する問題点の1つである。トカマクにおける不純物は，(1)C，Oなどの低電荷不純物（ガス不純物）と，(2)F_e，M_nなどの高電荷不純物（金属不純物）とに大別され，その発生機構および低減対策に差異がある。これらの不純物の発生機構は主に次のように考えられている。

- (1) 不純物ガスの壁面からの脱離 (desorption)
- (2) 真空容器壁やリミタのプラズマ・イオンによるスパタリング
- (3) 真空容器壁やリミタの高速中性粒子によるスパタリング
- (4) 逃走電子の衝突，プラズマの接触など，局所的な温度上昇によるリミタ材などの蒸発

これらの機構は壁面の状態，プラズマの状態などと複雑に関連しており，真空条件，放電条件，あるいは放電開始後の時刻によって主たる不純物発生機構も異なる。特に放電初期はプラズマ電流分布が確立されておらず，トカマクとしての閉込め性能が不十分であり壁面などとプラズマが接触することが考えられ，不純物の混入がある。しかし，この時期の不純物は閉込め時間が短いため放電時間が長い場合には，初期に混入する不純物は問題にならないだろうとする考え方もある。

以上のような不純物混入に対するダイバータの効果は次のように考えられる。

- (1) 磁場配位（セパトリックス磁気面）によってプラズマ閉込め領域を決定するため，物体によるリミタが不要である（磁気リミタ）。したがって，リミタ材の蒸発などリミタから発生する不純物を避けることができる。
- (2) 磁気リミタ配位の磁場により，逃走電子をプラズマに害のない領域（ダイバータ室）に導く。³²⁾これはJFT-2aで実験的に検証されている。
- (3) プラズマ閉込め領域から流出するプラズマ粒子を壁面に当てずにプラズマに害のないダイバータ室に導く。
- (4) (3)と同時に，ダイバータ室に設ける高速排気装置によりプラズマ周辺の（水素）中性粒

子を除去するため、荷電交換による高速中性粒子の発生源が減る。したがって、壁を衝撃して不純物をたたき出す高速中性粒子も減少する。³³⁾

(5) 壁から出た不純物粒子をイオン化し、ダイバータ室に向う磁力線に沿ってダイバータ室へ導き、プラズマ本体に不純物が混入することを防ぐ。(シールド効果)

(3)と(5)の効果はプラズマ表面に形成される境界層(scrape-off layer)の作用として行われるものである。プラズマ閉込め領域のすぐ外側にはセパトリックス磁気面があり、粒子吸収端(ダイバータ室に連結されている。ここには、磁気面に沿うプラズマ粒子の速度 $v_{||}$ と磁気面を横切るプラズマ拡散係数 D_{\perp} との関係によって決る厚さ λ_d をもつ境界層が形成されると考えられている。これがスクレep・オフ層である。プラズマ閉込め領域から流出した粒子は境界層の中を荷電粒子の形で磁気面に沿って流れ、ダイバータ室に達する。また、プラズマと壁面との間にある中性粒子(水素および不純物)は境界層の中で電離されれば、磁気面に沿ってダイバータ室に導かれ、プラズマ内には侵入しない。これが上記の(4)および(5)の効果として現れる。

ダイバータの作用は上述のように、定性的にはダイバータ室に流入したプラズマ粒子を吸収することであるが、一方、ダイバータを設けた上でプラズマ密度を定常状態とするためにはプラズマ粒子の補給が必要である。ダイバータのない従来のトカマク型装置では、プラズマ粒子は、ある閉込め時定数で閉込め領域から流出して壁面に達し、そこでエネルギーを失って低温の中性水素粒子となって再びプラズマ表面を通過してプラズマ閉込め領域に戻り、電離、加熱されるというリサイクリング現象によって、プラズマ粒子数が一定に保たれている。ダイバータはこのリサイクリングを断つことを意味し、粒子補給がなければプラズマ密度は定常に保たれ得ない。プラズマ粒子の補給方法としては、外部から低温の水素ガスを高速弁によって補給する方法、第二段加熱を兼ねて高速中性子ビームとしてプラズマ閉込め領域内に直接注入する方法、あるいは極低温を用いて固体化した水素ペレットを高速でプラズマ中に打込む方法などが考えられている。高速弁による補給では、プラズマ周囲に中性粒子を入れるので、前記(4)の効果は失うことになる。また、ダイバータ室内では不純物粒子のみを吸収して水素ガスだけは吸収しないでプラズマ室に逆流させてプラズマ粒子数を一定に保つことも考えられるが、この場合にも前記(4)の効果はなくなる。しかしながら、荷電交換によって発生する高速中性粒子による壁面からの不純物たたき出しが、他の機構による不純物発生量に比べて小さければ、(4)の効果はなくてもよい場合も考えられる。これに関しては未だ実験が不充分であり、今後の研究が必要である。

さて、ダイバータ室に流入した不純物粒子は粒子中性化板(neutralizer plate)に衝突して低温の中性ガスとなり、ダイバータ室内に設置した高速排気装置によって排気されるが、一部はダイバータ室の入口スリットを逆行してプラズマ領域に戻る。この過程では、流入するプラズマ流による再イオン化など、複雑な現象が起るが、プラズマ流を無視して単純化して考えれば、逆流する粒子の割合はダイバータ室内の排気速度と、ダイバータ入口スリットのコンダクタンスとの比、あるいは排気装置の等価無反射面積とスリット面積との比で決る。入口スリットのコンダクタンスはかなり大で、これを無視できるような大きな排気速度の排気装置を設けることは困難であり、これに関して今後の理論的、実験的な検討が必要である。また、ダ

ダイバータ室内で発生した金属不純物は、一度壁と衝突すればほとんど全て付着する。したがって、発生位置からプラズマを直接見えない構造にしておけば、金属はイオン化して磁束に巻きつかない限りプラズマ中に逆流することはない。

以上、ダイバータに関する主な問題点を定性的に説明した。以下には、これらの問題点のうちいくつかに関して考察を行う。

3.4.2 スクレープ・オフ層

一次元モデルでスクレープ・オフ層の厚さを評価してみる。スクレープ・オフ層のプラズマ粒子バランスを、磁力線方向の流速と磁力線を横切る拡散で取扱うと（電離などを無視すると）、プラズマ表面からの距離 x による密度変化は、

$$n_b(x) = n_{b0} e^{-\frac{x}{\lambda_d}} \quad (3-27)$$

となる。ここで、

$$\lambda_d = \sqrt{D_{\perp} \cdot L / v_{\parallel}} \quad (3-28)$$

（スクレープ・オフ層の厚さ）

L 磁力線に沿ってダイバータまでの距離

v_{\parallel} 磁力線に沿ってのプラズマ粒子の速度

FM-1³⁴⁾, JFT-2a³⁵⁾の結果によれば、 v_{\parallel} はイオン音波速度の $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ である。この結果を使うと、種々の輸送現象に対する λ_d は第 3.2.2 図に示すようになる。ただし、同図は次式を計算したものである。

$$\lambda_d(\text{Bohm}) = 5.45 \left(\frac{qR}{B_0} \right)^{1/2} T_e^{1/4}$$

$$\lambda_d(\text{Pseudo}) = 3.54 A \left(\frac{n q^3 R}{B_0^2 T_e} \right)^{1/2}$$

$$\lambda_d(\text{Plateau}) = 7.56 \frac{q}{B_0} T_e^{1/2}$$

$$\lambda_d(\text{Banana}) = 7.53 \times 10^{-5} A^{3/4} \left(\frac{n q^3 R}{B_0^2 T_e} \right)^{1/2}$$

$$R = 145 \text{ cm}$$

$$B_0 = 30 \text{ kG}$$

$$q = 3.0$$

$$A = 3.0 \quad (= R_p/a)$$

$$z = 1.0$$

$$\frac{m_i}{m_p} = 1.0$$

JT-4 のプラズマ・パラメータでは、 $n_{b0} \approx \frac{1}{10} \bar{n} \approx 2 \times 10^{-12} \text{ cm}^{-3}$, $T_b \approx \frac{1}{5} T \approx 200 \text{ eV}$, また D_{\perp} として Bohm 拡散の 0.1 倍³⁵⁾をとると、 $\lambda_d = 1 \text{ cm}$ となる。ダイバータ・スリット幅

5 cm で、(3-27)式の密度分布を切りとるとすれば、ダイバータへ流れ込む粒子の割合(捕捉効率) C_p は0.99以上となる。スクレープ・オフ層内の磁気ミラー効果、非軸対称性誤差磁場の影響などによる λ_d の拡がりにより C_p は低下する可能性がある。

3.4.3 ダイバータ室からの逆流中性ガス

ダイバータ容器内の中性ガスがプラズマ室へ戻る現象は、a) 粒子中性化板におけるプラズマ粒子の中性化と諸粒子の放出、b) ダイバータ室内の排気速度、c) ダイバータ室入口スリット内での中性ガスの電離に関連している。

ここで b)のみをとり上げて検討すると、ダイバータ室内へ流入するプラズマ粒子束 Γ_d は、

$$\Gamma_d = C_p \cdot \frac{N_p}{\tau_p} \quad (3-29)$$

ここで、 C_p : ダイバータによる粒子捕捉効率($1-C_p$)はダイバータ以外の壁などに行く。

N_p : プラズマの全粒子数

τ_p : プラズマ粒子閉込め時間

逆流する粒子の割合は、ダイバータ室内の排気装置の実効排気面積 A_p (粒子を完全吸収する等価面積)と、ダイバータ室入口スリット面積 A_s との比で決り、逆流粒子束 Γ_r は、

$$\Gamma_r = \frac{A_s}{A_p + A_s} \cdot \Gamma_d = \frac{A_s}{A_p + A_s} \cdot C_p \frac{N_p}{\tau_p} \quad (3-30)$$

となる。ここで明らかなように、逆流粒子を減らすためには、スリット幅を狭くして A_s を小さくするか、排気速度を増して A_p を大きくすることが必要である。予備設計仕様では、 $1.5 \times 10^5 \text{ t/s}$ の超高速排気系を設けることとしたが、それでも $A_s \approx 1.5 A_p$ であり、逆流粒子を減らす必要があればスリット幅を狭めるなどの検討が必要である。ただし、c)の効果およびプラズマ流による逆流抑制効果を入れることによって、逆流は小さくなる可能性がある。

3.4.4 中性粒子除去による不純物低減効果

3.4.1の(4)で述べた効果による不純物低減効果については付録6で述べるが、その結果のみをここに記すと、 $C_p = 0.95$ 、逆流粒子の割合 C_r を0.7、荷電交換により発生した高速中性粒子のうちプラズマの外へ流出する割合 γ を0.2とすれば、イオンと高速中性子の衝撃による不純物発生量は、ダイバータの設置によって $\frac{1}{2}$ 以下に減らすことができる。ただし、イオンによるスパタリングが小さく、高速中性粒子によるスパタリングが主体の場合には、不純物発量は50%に減るだけである。

3.4.5 スクレープ・オフ層による不純物遮蔽効果

真空容器壁で発生した不純物がスクレープ・オフ層によって電離されてダイバータ室へ導か

れ、主プラズマへ流入する不純物量が減少する Shielding Divertor としての効果を検討する。

Shielding 効果を S で表わすと、一次元モデルでは、

$$S = 1 - \exp\left(-\int n_b(x) \langle \sigma_i v_e \rangle dx / v_I\right) \quad (3-31)$$

とかける。積分は $x=0$ から真空容器壁まで行う。ここで、 $\langle \sigma_i v_e \rangle$ は不純物粒子の電離率を表わす。(3-27)式を代入すると、

$$S = 1 - \exp\left(-\frac{\langle \sigma_i v_e \rangle}{v_I} n_{b0} \lambda_d\right) \quad (3-32)$$

$S \geq 0.9$ となる条件は、

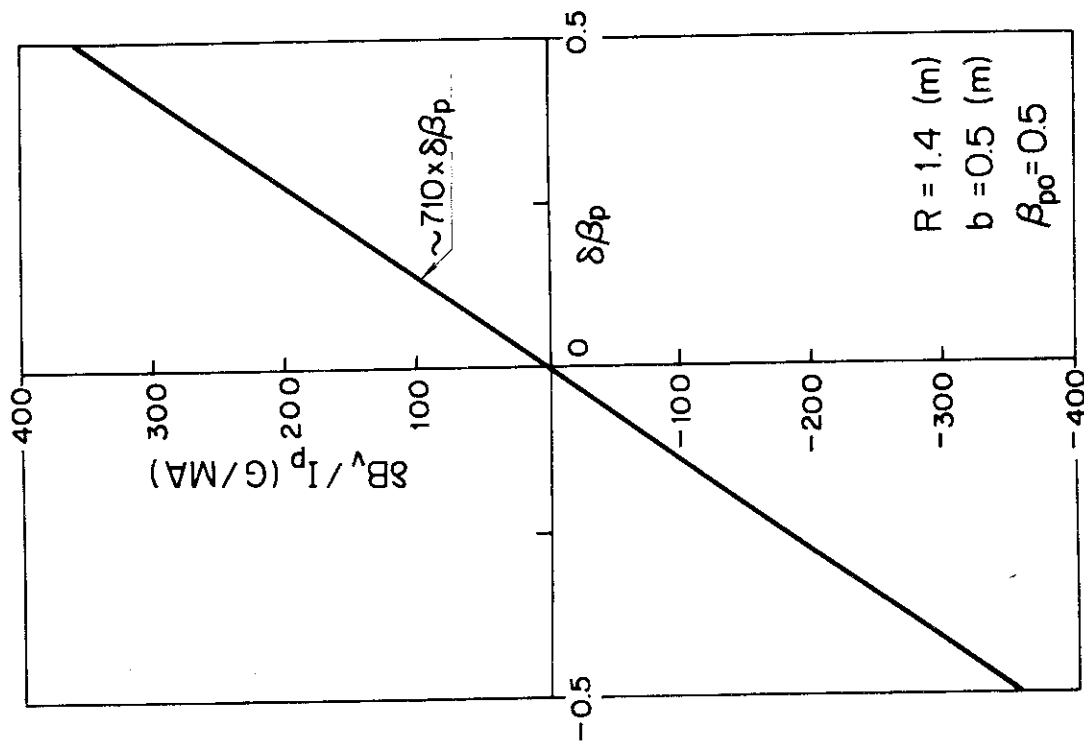
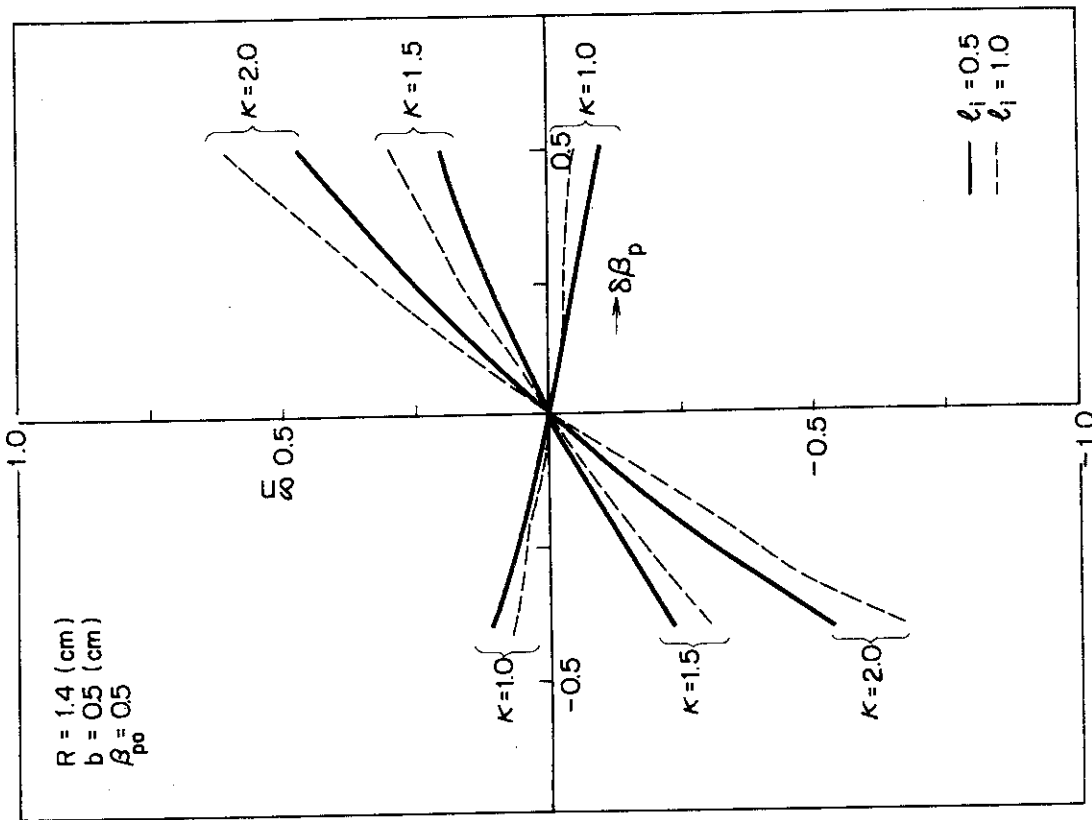
$$\frac{\langle \sigma_i v_e \rangle}{v_I} n_{b0} \lambda_d \geq 2.3 \quad (3-33)$$

ここに Hinnov³⁶⁾ の結果を用い、 v_I として 10 eV ³⁷⁾ をとると、 $T_e \approx 200 \text{ eV}$ のとき、次の結果を得る。

$$\begin{aligned} n_{b0} \lambda_d &\geq 2.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} && (\text{C}) \\ &1.1 \times 10^{13} && (\text{O}) \\ &5.6 \times 10^{12} && (\text{F}_e) \end{aligned}$$

3.4.6 壁面等への熱流

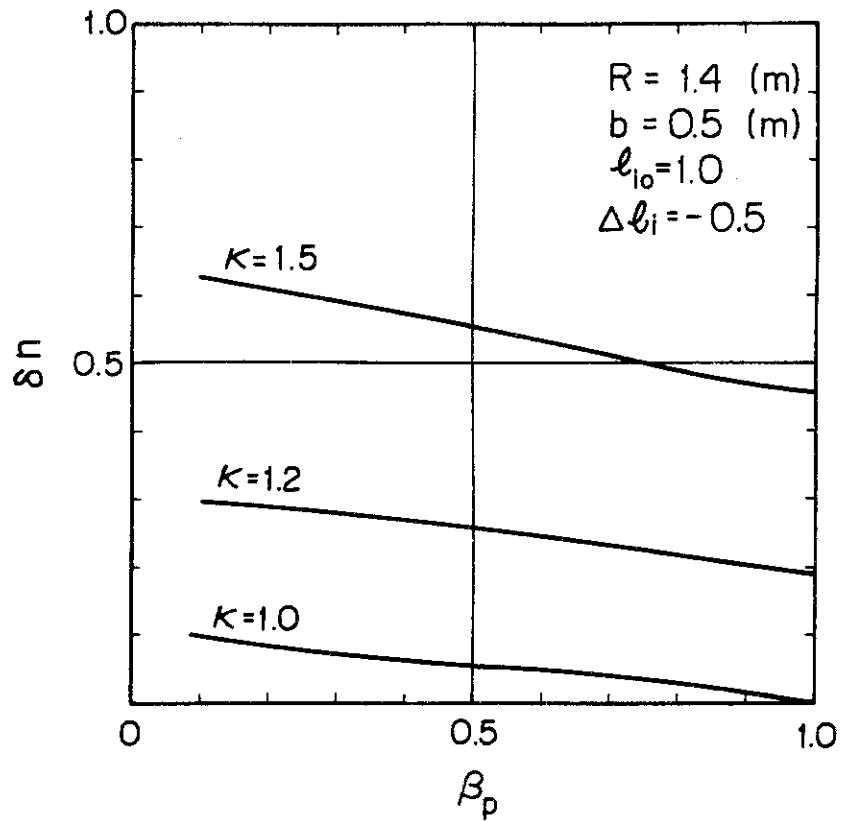
トカマク型装置では、放電状態によって量の多少はあっても必ず高エネルギーの逃走電子が存在する。JFT-2a の実験によれば、これらは磁気面に沿って、かなり狭い帯状のビームとなってダイバータ部に導かれる。この逃走電子ビームの熱流束はかなり大きく、JFT-2a でも 1 kW/cm^2 程度であり、衝突する金属面を融解し、磁力線に沿って不純物をプラズマ空間に送りこむことが考えられる。粒子中性化板 (neutralizer plate) の構造、あるいはガス注入によるプラズマ表面の冷却、ダイバータ入口スリット部におけるガス・カーテン方式³⁸⁾ あるいはディファレンシャル・ポンピングなど、今後更に検討が必要である。



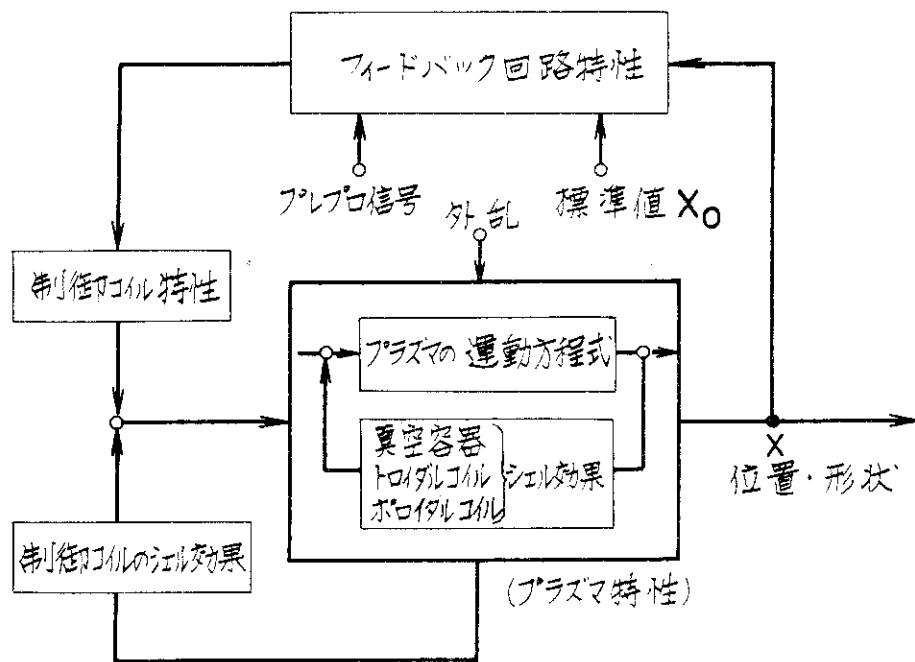
(b)

(a)

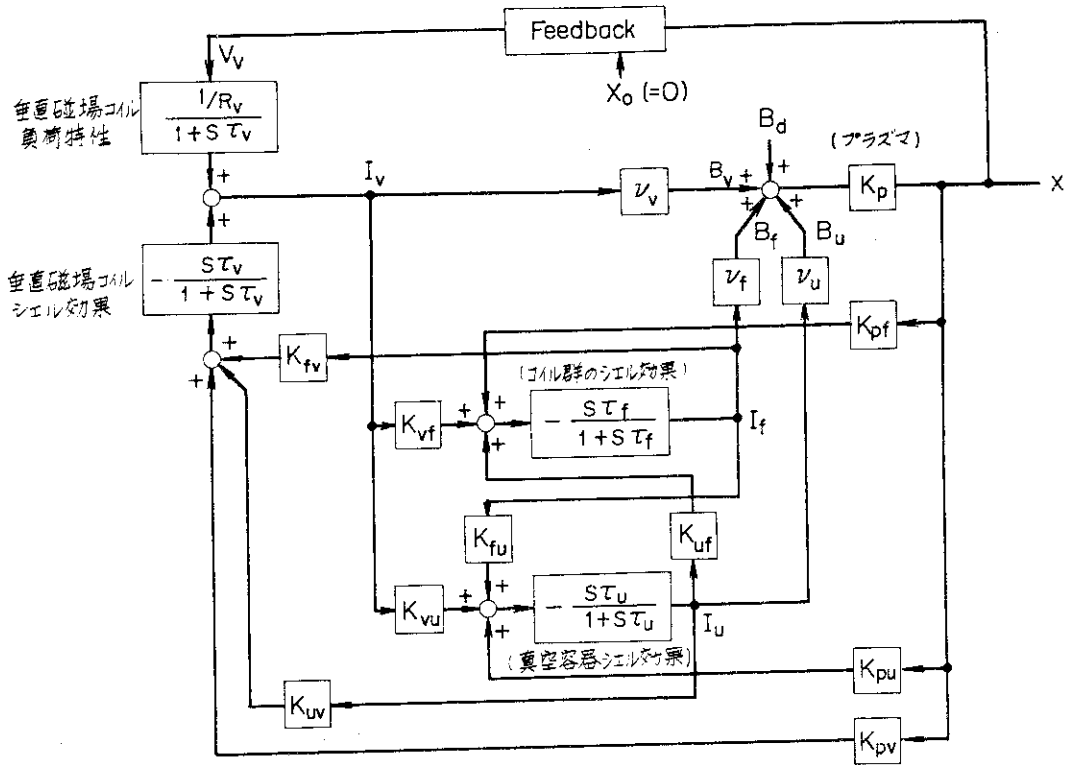
第 3.1.1 図 JT-4 プラズマの制御量の範囲の例



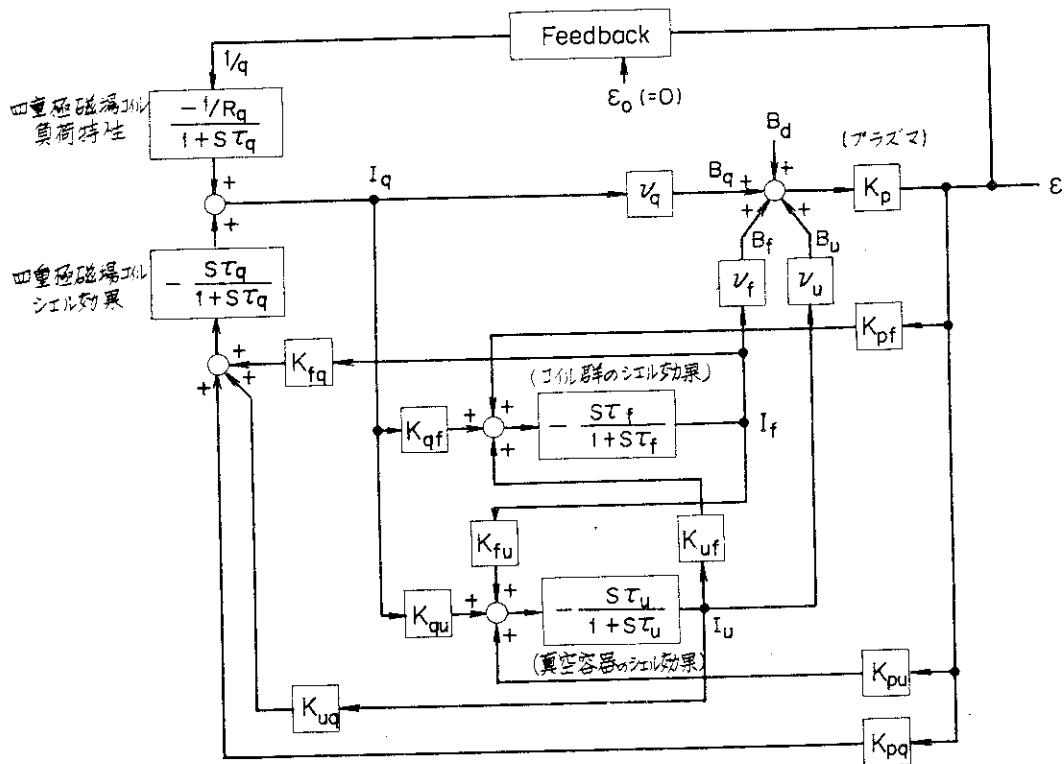
第 3.1.1 図 JT-4 プラズマの制御量の範囲の例 (c)



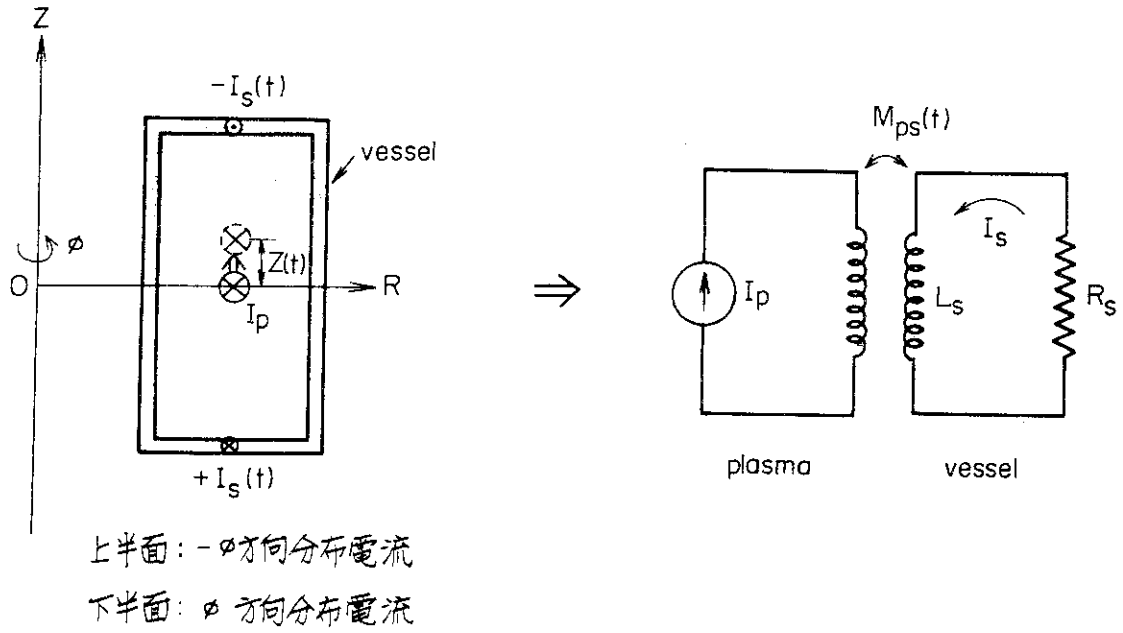
第 3.1.2 図 JT-4 における制御構成概念図



第 3.13 図 JT-4 におけるプラズマ水平位置制御ブロック線図



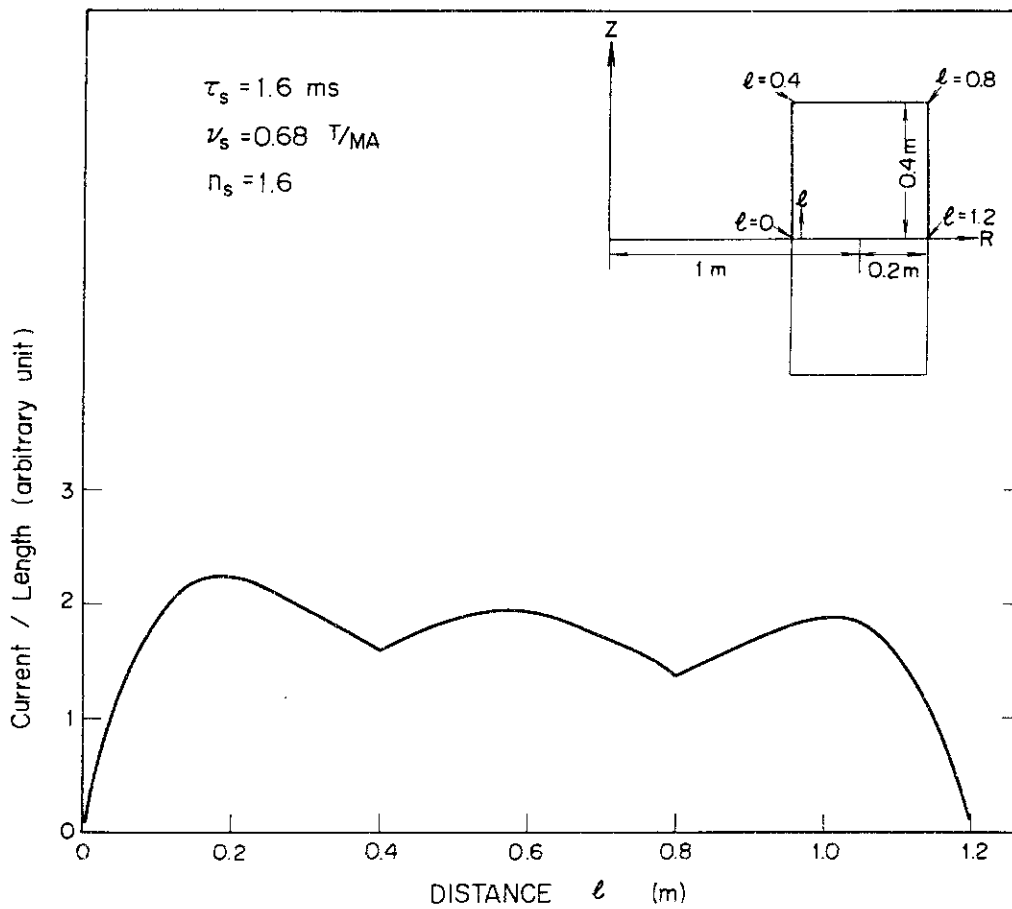
第 3.14 図 JT-4 におけるプラズマ断面形状制御ブロック線図



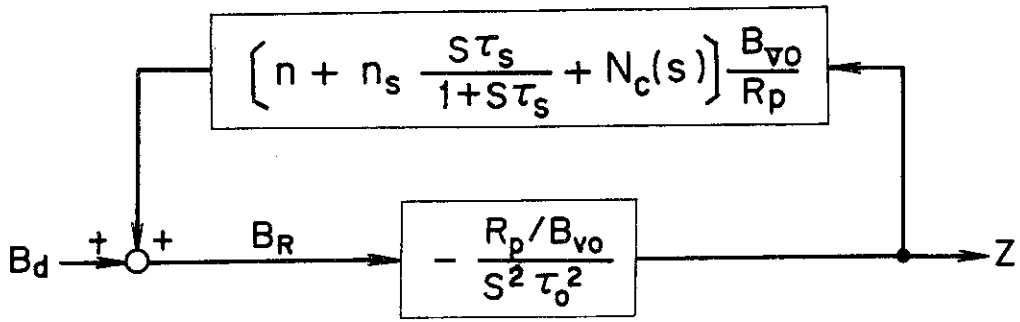
(a) 分布定数回路

(b) 等価的集中定数回路

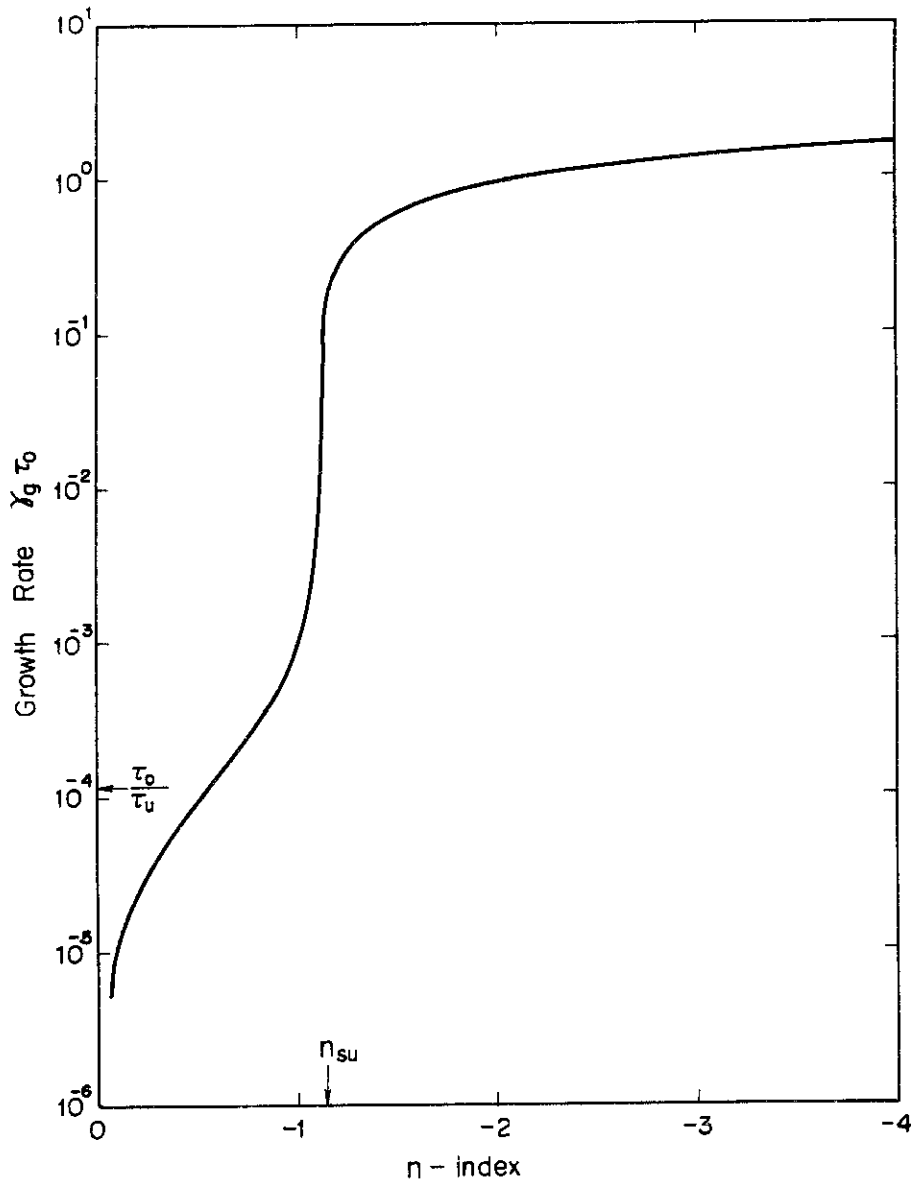
第 3.15 図 プラズマ柱の垂直方向変動に対する真空容器のシェル効果



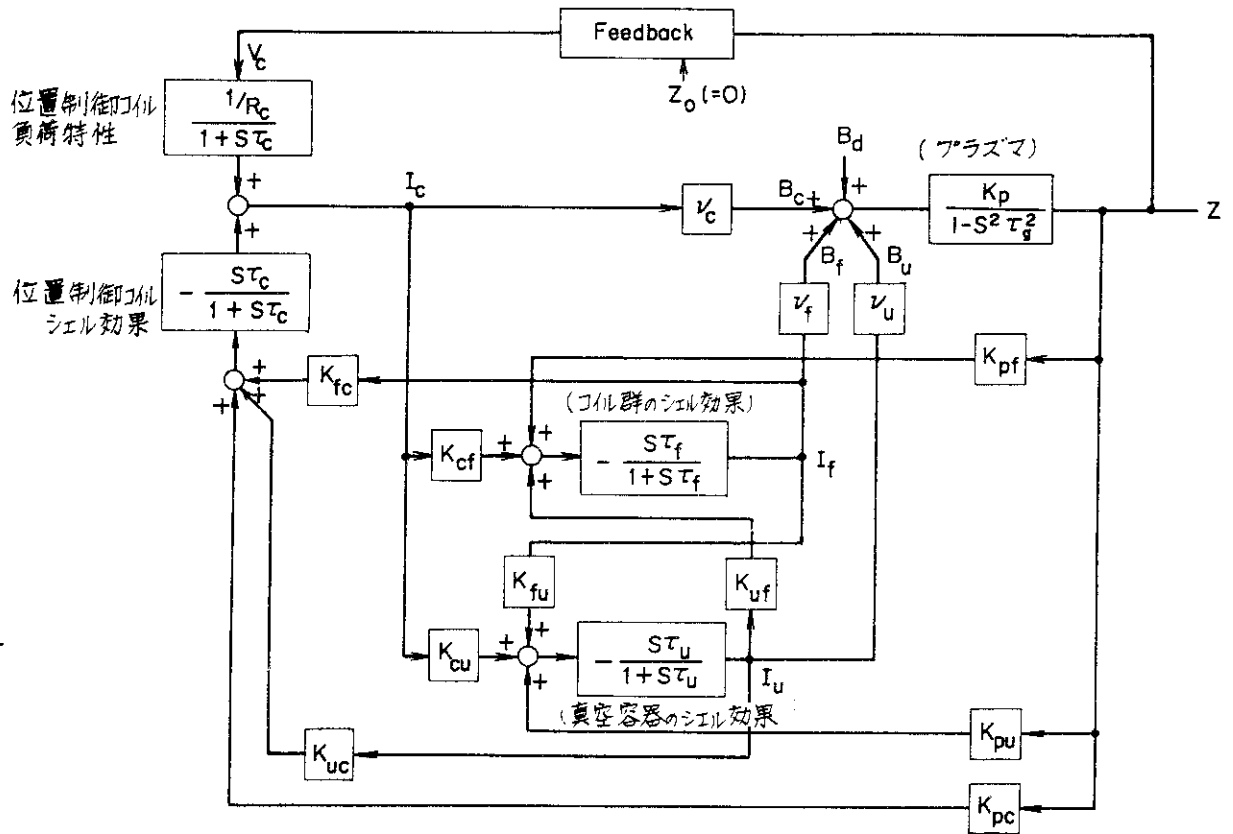
第 3.16 図 矩形断面真空容器内に誘起される双極子電流の分布



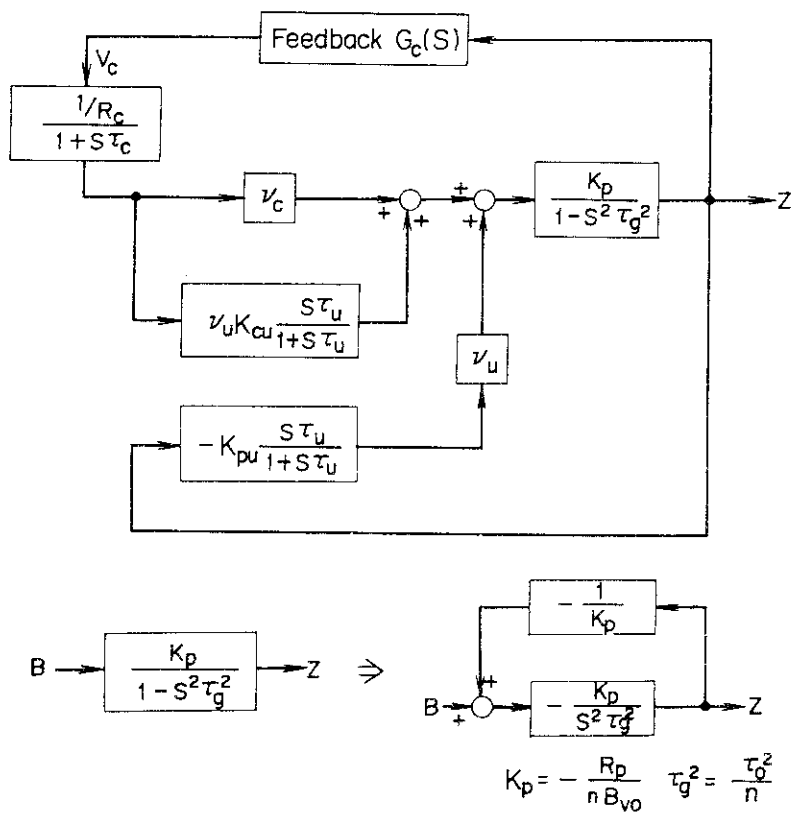
第 3.17 図 プラズマ柱の垂直方向変位に関するブロック線図



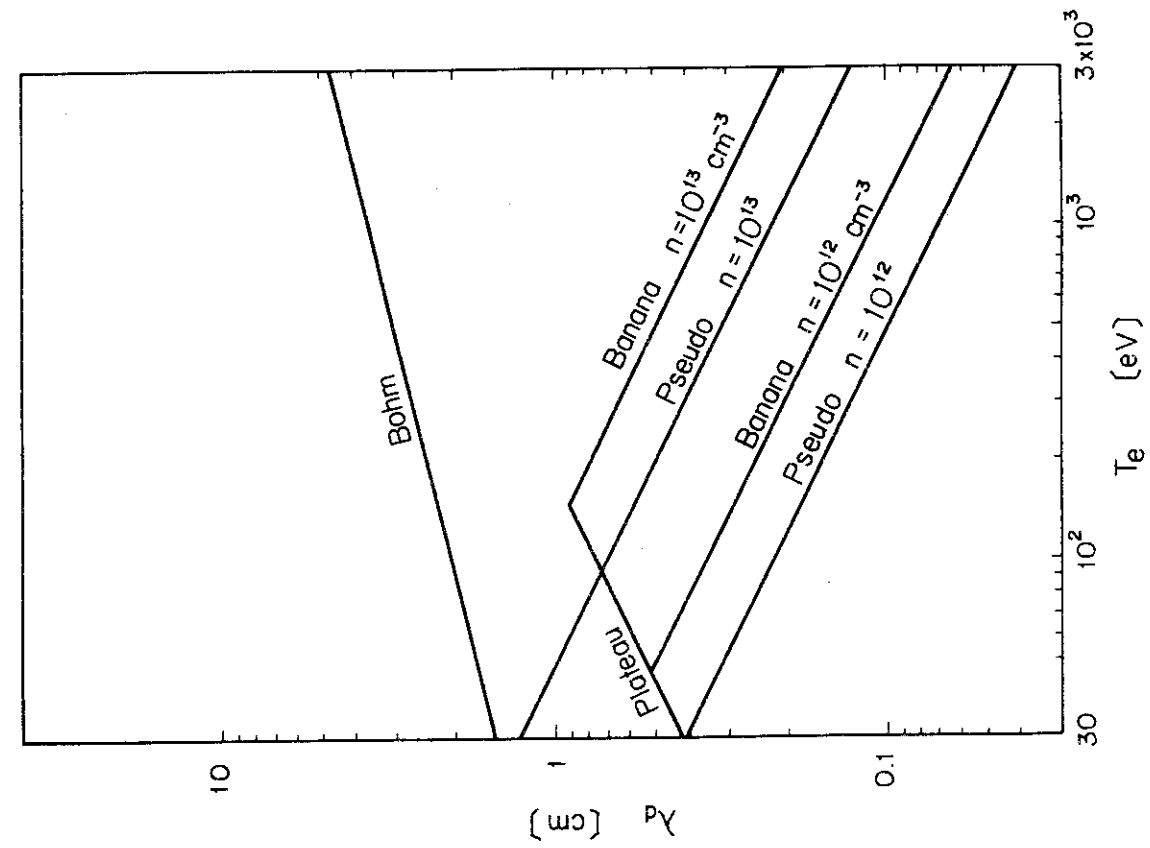
第 3.18 図 垂直方向位置不安定性の成長率 (真空容器のみ考慮した場合)



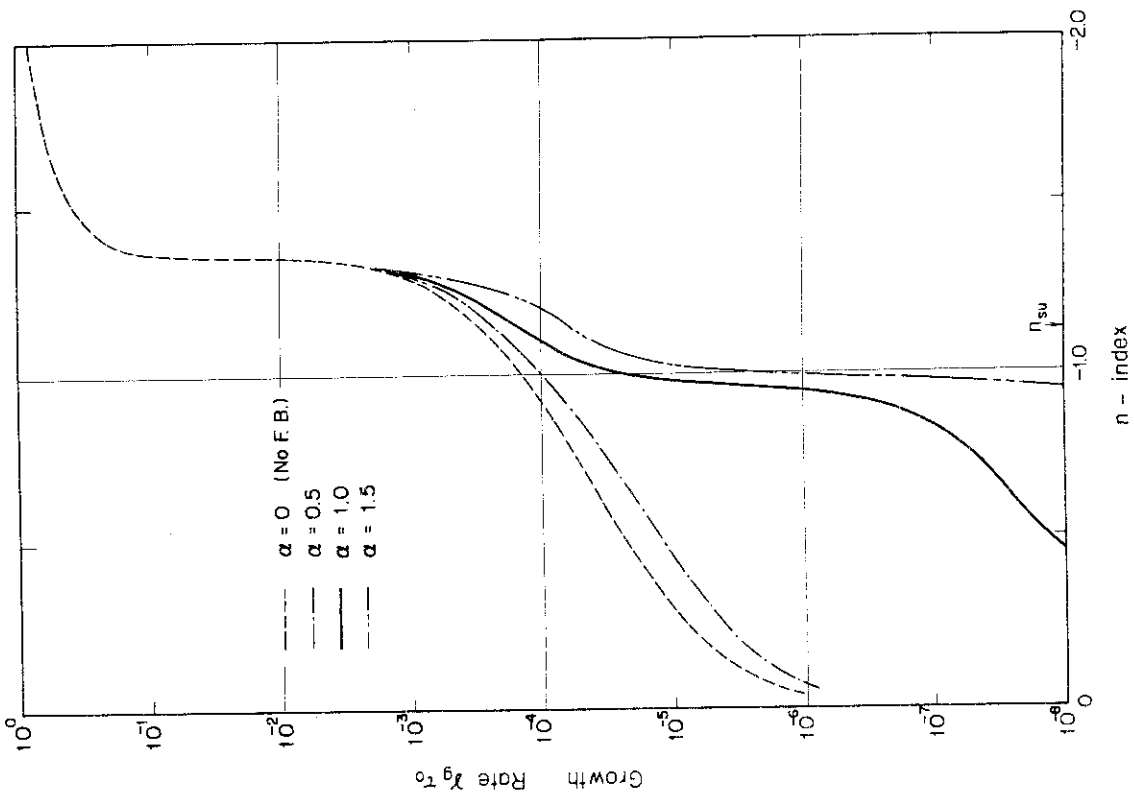
第 3.19 図 JT-4 におけるプラズマ垂直方向位置不安定性制御ブロック線図



第 3.20 図 第 3.19 図を簡略化したブロック線図

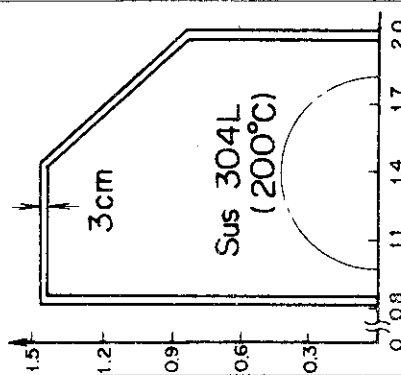
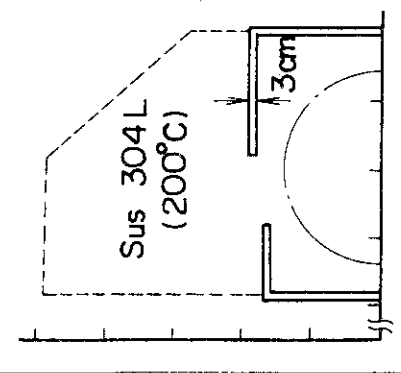
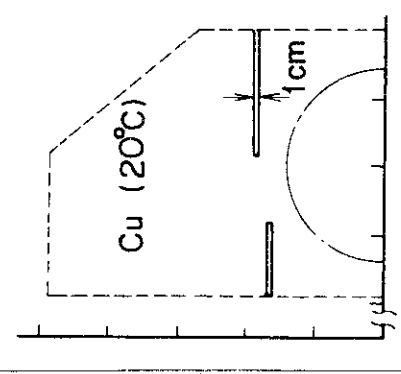
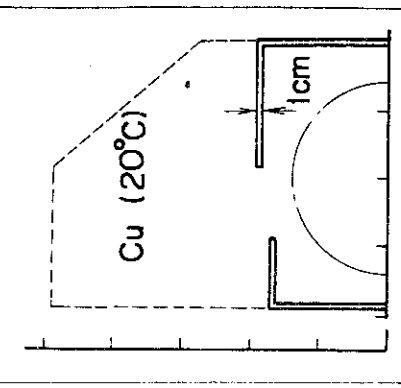


第 3.2.2 図 スクレープ・オフ層の厚さ λ_d



第 3.2.1 図 J T - 4 予備設計仕様に基く位置不安定性
フィードバック制御時の成長率

第 3.3 表 垂直方向位置不安定性に対するシェール効果

真空容器又は 安定化用導体板	予備設計真空容器 	Sus 板 	Cu 板 (1) 	Cu 板 (2) 
L_s (μH)	2.4	2.8	5.2	3.8
M_{ds} (μH)		2.4	3.9	3.3
R_s ($m\Omega$)	0.28	0.60	0.043	0.027
τ_s (ms)	8.5	4.6	121	141
ν_s (T/A)	2.0×10^{-7}	4.1×10^{-7}	4.8×10^{-7}	4.5×10^{-7}
$\frac{\partial M_{ps}}{\partial Z}$ (H/m)	-1.95×10^{-6}	-3.7×10^{-6}	-6.0×10^{-6}	-5.0×10^{-6}
$\eta_s (\frac{R_0}{B_{T0}} = 7.0)$	1.14	3.83	3.59	4.13

- 1) Shimomura, Y. 7th European Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics Vol.2 (1975, Lausanne)
- 2) Freeman, R.L. et al. GA-A13781 (1976)
- 3) Bortnikov et al 5th IAEA Conf. CN33/A7-2 (1974, Tokyo)
- 4) 下村他 JAERI-M 6105 (1975)
- 5) JT-4で実験を予定している楕円度は $\kappa = 2$ を目標とする。 $\kappa = 2.5$ 程度まで試みる可能性もある。
- 6) Doublet II A のデータでは、(GA-A13781, 1976)
 $\kappa = 1.0$ のとき $q_a = 2.8$, $\beta = 0.6\%$
 $\kappa = 1.4$ のとき $q_a = 2.8$, $\beta = 1.0\%$
 したがって β の利得は1.6である。一方、(3-3), (3-4)式に $\kappa = 1.4$ を代入すると利得は1.5となる。
- 7) 電流密度とプラズマ密度の関係、特に放電開始後にスロー・パフでガスを注入する実験は今後多くの装置で行われるであろう。データを整理しておく必要がある。
 また、Alcator では密度を高くすると Z_{eff} が下る傾向が示されたが、これはダイバータとも関連して注意すべき事項である。
- 8) これは、JT-4の磁場を下げてよいということの意味していない。すなわち、(I)の目標に重点があるため、円形断面で同一パラメータを有するプラズマ実験を行えることが必須条件である。JT-4で円形断面で捕捉粒子領域のプラズマを得るためには、第2章で述べたように30 kGは最低限の必要条件である。
- 9) 非円形断面によって捕捉粒子不安定性を安定化するには q を下げるのが本質的である。(本章注4) しかし、JT-4のような $\kappa \approx 2.0$, $q \approx 3.0$ 程度の非円形断面トカマクでは、捕捉粒子不安定性に対する条件は、円形断面に対するものと大差ないであろう。
- 10) Green, J.M. et al: Phys. Fluids 14 671 (1971)
- 11) JT-4では、ダイバータ付き非円形断面プラズマの実験を行うので、ダイバータ付きプラズマの平衡についても同様の検討をする必要がある。
- 12) 予備設計時は $R = 140$ cm。本メモの平衡・制御の検討は予備設計仕様に沿っている。 $R = 145$ cmの場合との差は4%以下であり、ハードの設計には影響なく、その他の検討もこのまま変更なしに適用できる。
- 13) プラズマ電流値を下げるなどして楕円度 $\kappa = 2.5$ 程度まで試る可能性はある。位置不安定性の点で現在ほぼ確められているのは、 $\kappa = 2.0$ までである。
- 14) トロイダル効果を考慮した場合の安全係数 q は次のようになる。¹⁵⁾

$$q = \frac{2\pi a^2 B_T}{R_p I_p} \left(1 + \frac{a^2}{R_p^2} + \frac{2\Delta_a}{R_p} \right)$$

ここで Δ_a はプラズマ磁気軸のトロイダル・シフトであり、 β_p が大きい程その値は大きくなる。JT-4のパラメータでは、 $\beta_p = 1.0$ の時 $\Delta_a \sim 0.1$ mである。したがって、トロイダル効果を考慮すると第3.1表のプラズマ電流は1.1~1.5倍になる。JT-4では、この可能性を含めて最大プラズマ電流を1 MAとした。

- 15) Frieman, E.A. et al. Phys. Fluids 16 1108 (1973)
- 16) ℓ_i については、不純物による電流チャンネルの集中等を考慮して $\ell_i > 1.0$ での検討を行う必要もあろう。
- 17) 小林朋文 他 JAERI-M 5898 (1974)
- 18) $B_v = 2.0 \text{ kG}$, $n = -2.0$ を例にとると
- (i)
$$\frac{1586 (\text{kAT})}{999 (\text{kAT})} = 1.59 \text{ 倍}$$
- (ii) 代表例として $\theta = 180^\circ$ のコイルをとると
- $$\frac{52.5 (\text{kAT})}{17.5 (\text{kAT})} = 3.0 \text{ 倍}$$
- 一方、この時空間的に許されるコイル断面積は $4 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 程度であるので、電流密度は 52.5 kAT の場合 26.3 A/mm^2 程度になる。
- 19) 誤差磁場（主にトロイダル磁場コイルによる）の補正用。目的および電流波形が全く異なるので制御用水平磁場である位置制御コイルと分離して別に設ける。
- 20) 亀有 他 JAERI-M 6028 (1975)
- 21) 関 省吾 他 JAERI-M 予定 (1976年10月)
- 22) ここに述べない制御として次の様なものも考えられる。
- (i) $I_p = \text{一定}$ とするための OH コイル電流のフィードバック制御
- (ii) NBI, RF など第二段加熱のフィードバック制御による β_p , ℓ_i の制御
- 23) 鈴木康夫 他 JAERI-M 6050 (1975)
- 24) 小方 他 JAERI-M 6323 (1975)
- 25) 亀有 他 JAERI-M 6468 (1975)
- 26) 鈴木康夫 他 JAERI-M 6531 (1976)
- 27) 谷 啓二 他 JAERI-M 5999 (1975)
- 28) Rebhan, E. Nuclear Fusion 15 277 (1975)
- 29) Wakatani, M. J. Phys. Soc. Japan 38 1555 (1975)
- 30) Seki, S. et al J. Phys. Soc. Japan 36 1667 (1974)
- 31) 横溝英明 他 JAERI-M 6693 (1976)
- 32) 誤差磁場の影響を検討する必要がある。
- 33) この点については付録 6 で詳述する。
- 34) Hsuan, H et al. Nuclear Fusion 15 191 (1975)
- 35) JFT-2a 私信
- 36) Hinnov, E MATT-777 (1970)
- 37) Cohen, S.A. ANS Transactions 22 31 (1975)
- 38) Princeton Reference Reactor Design のダイバータ構造もこの方式である。
- 39) 二宮 他 物理学会年会 (1976) 4 pJ7

第4章 JT-4の技術的検討(予備設計)

4.1 概 説

前章までの検討に基づいて装置の基本的設計を行い、その仕様書に従って昭和50年度後半に原子力関係3社(東芝, 日立, 三菱, 五十音順)に予備設計を発注し、装置製作上の技術的検討を行った。第2章に述べたように、本装置と類似の装置が外国では1978年頃には完成する予定であり、JT-4計画はできる限り急ぐ必要がある。しかしながら、本計画が正式に発足したのは昭和50年度であり、十分な科学的検討を行うための時間的人的余裕がなかったため、予備設計仕様のうち、いくつかの重要な点に関してはJT-60の設計において行われた設計検討の結果をそのまま採用した。

JT-4の予備設計においては、いくつかの項目で数個の設計例を挙げ、メーカーにおいて比較検討を行った。このような方法をとった理由は複数個の設計案の科学的効果の差が小さいため、技術的な検討によって優劣の判断を行い、かつ、技術的検討の範囲を広くするためである。また、いくつかの個所においては仕様を確定するための科学的検討が不足していることもあったが、簡単な検討を行った上で妥当と考えられる仕様を与え、一例としての設計を行った。このような方法をとっても、設計における検討過程を見直すことによって、多少の仕様変更に対しては技術的評価が可能である。

装置設計のための手順は第7章にフロー・チャートとして示すが、装置各部の概略的な配置、構成は第3章に述べた考察と、測定ポートの空間を確保することに注意して、第4.1図に示す形状を採用した。これを「予備設計案」と呼ぶ。予備設計発注後に、Tコイルを変えずに真空容器を大きくし、Pコイル配置を変更した改良案(第2次案)を設け、予備設計発注以後の原研における検討は第2次案に基づいている。第2次案を第4.2図に示すが、予備設計案との差異は小さく、設計上影響はないものと考えられる。第2次案は、予備設計案よりも真空容器断面の横幅が広く、プラズマ断面が円形に近い形状を得ることができる。これにより円形断面プラズマと非円形断面プラズマとの比較を容易とした。また、ダイバータ室も大きくし、設計の自由度を増した。Pコイルの配置は、平衡およびプラズマ制御の研究進展に伴って改良を加える予定であり、建設発注までに確定する。空心変流器コイルの設計方法にも進歩があり、第2次案では予備設計案よりも洩れ磁場をはるかに小さくすることができた。本報告では、予備設計案と第2次案が混合しているが、その影響は小さく、必要な場合にはこれを明記した。

以下、JT-4の各部ごとに、予備設計仕様の解説、設計結果および今後の問題点について述べる。なお、装置各部の名称は、本報告の最初に示した記号表に従って略記する。

4.2 試験装置の構成

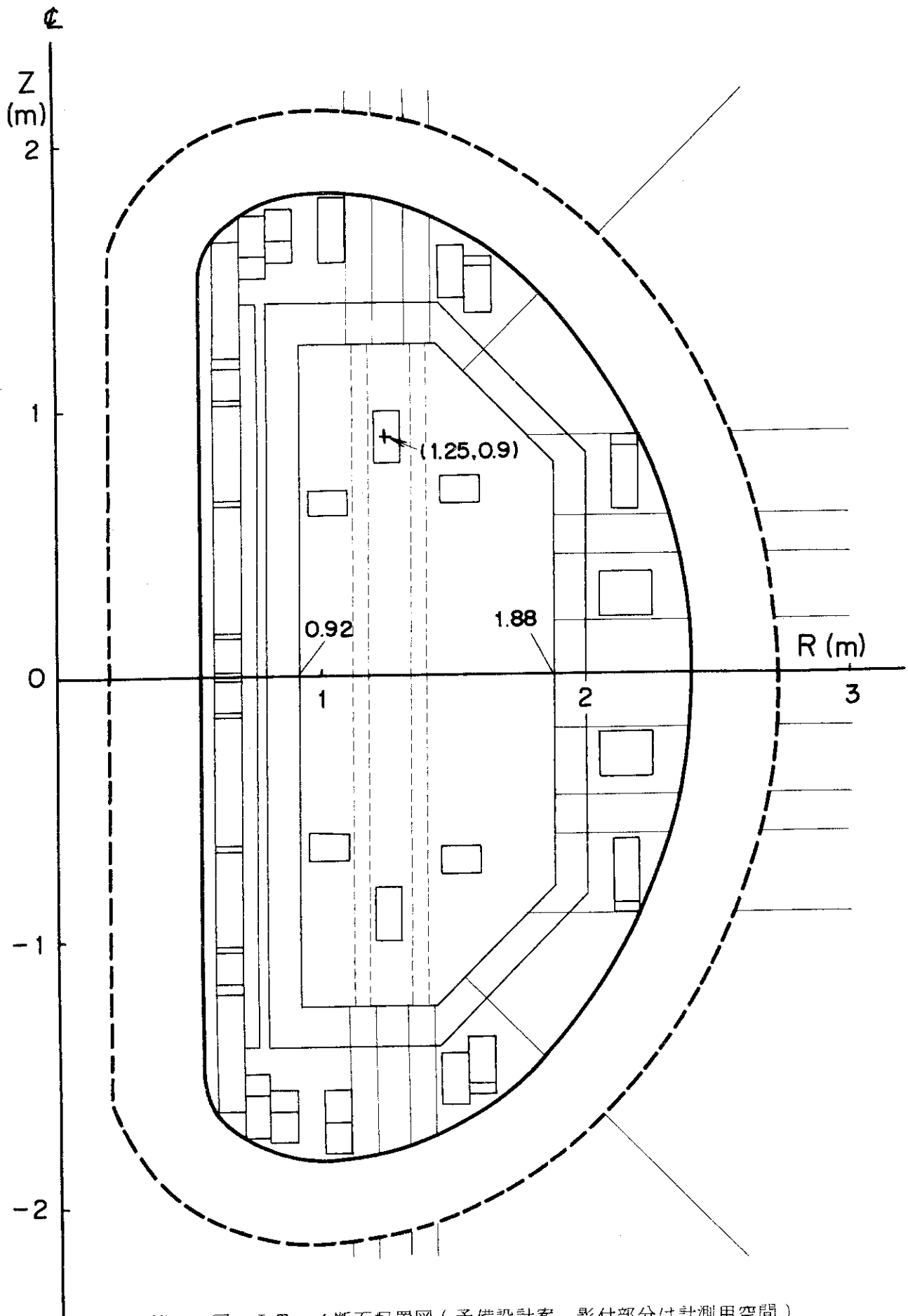
本試験装置(JT-4)は、大別すると本体、電源、付属設備の3部分から構成されており、その内容は第4.3図にブロック図として示されている。

本体はトカマク型装置が全てそうであるように、Tコイルと真空容器が鎖交する。かつ、非

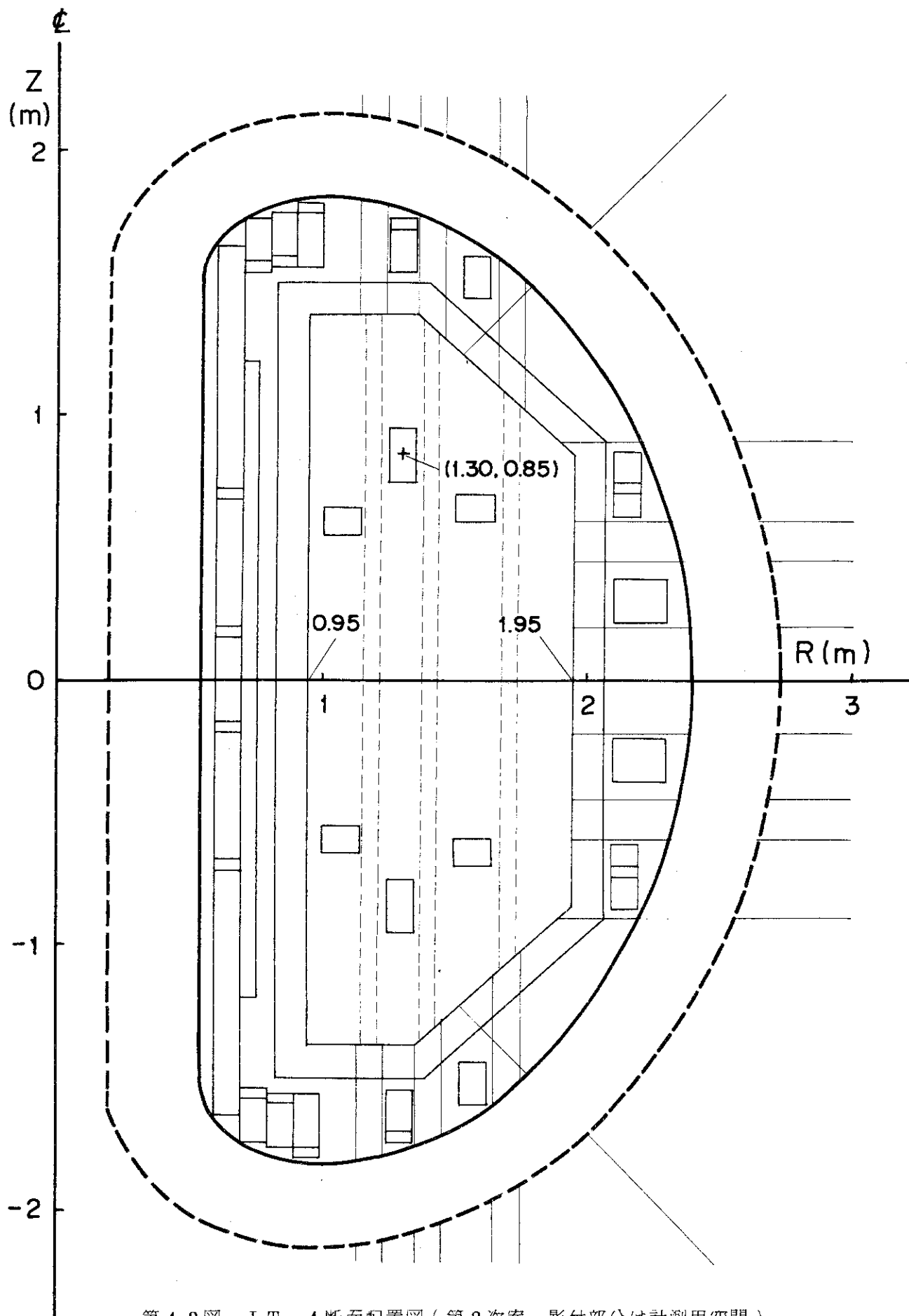
円形断面プラズマを制御するためのPコイルはプラズマとの結合を良くするために真空容器にできるだけ近く、すなわちTコイルの内側に設置する必要がある。したがってPコイルもTコイルと鎖交する。本体を組立てるためには、Tコイルを分割するか、あるいは真空容器とPコイルを共に分割してTコイルの中で組立てる必要がある。接続部の数、接続組立て作業の空間、接続部の電気絶縁などを考慮の上で、JT-4ではTコイル分割方式を採用することとした。

電源は、Tコイル、Pコイルに制御された電流を通電するための大電力設備であり、一部をJT-60と共用し、設備の効率的利用を図る。

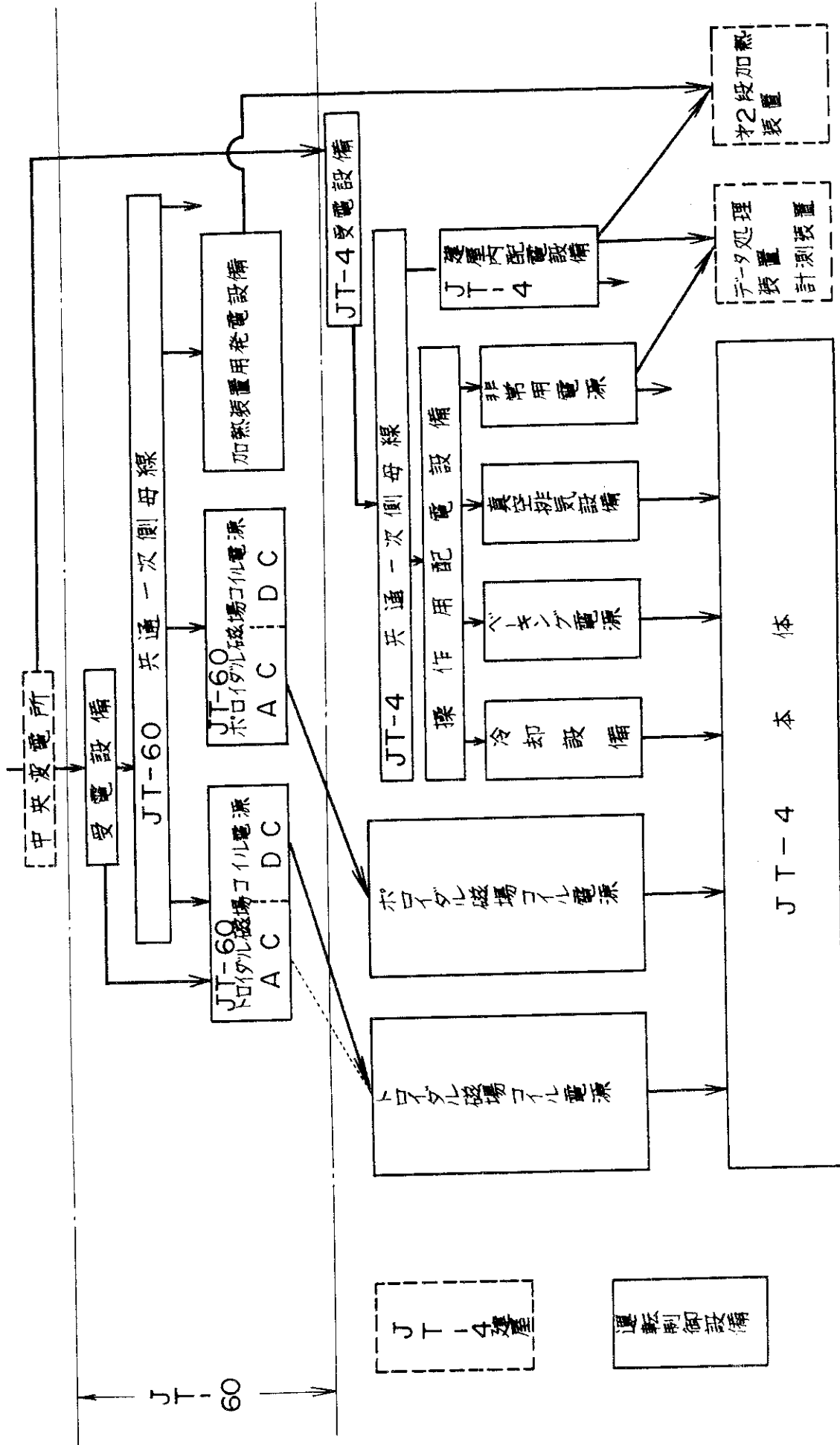
付属設備は、本体および電源以外の設備で、本体と電源が各々の機能を発揮して、全体としての性能を満すために必要なものである。



第 4.1 図 JT-4 断面配置図 (予備設計案, 影付部分は計測用空間)



第4.2図 JT-4断面配置図(第2次案, 影付部分は計測用空間)



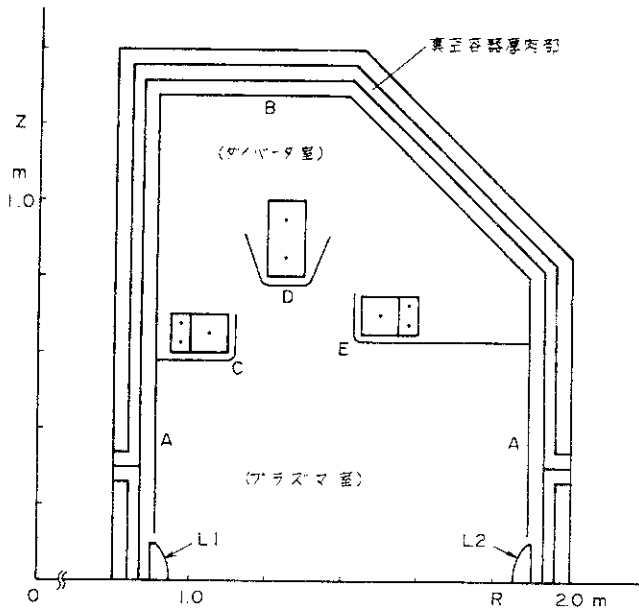
第4.3図 JT-4大分類ブロック図

4.3 真空容器

4.3.1 形状, 構造

真空容器の概形は第2章, 第3章に述べたように, プラズマ閉込めの比例則, Tコイル中心部の導体断面積, 平衡計算などの検討結果に基づいて決定した。上下のダイバータ室は, ダイバータ・プラズマの空間, 粒子中性化板 (particle neutralizer), 高速排気装置の設置空間を検討の上で, 妥当と考えられる形状 (第4.4図) に決定した。

真空容器の構造は, 測定などのために多数のポートを設けるため, またダイバータ・コイルを支持するために, 厚肉構造とした。一方, プラズマ電流を誘起するための磁束変化 (OHコイル電流を変化させる) を電磁遮蔽しないように, 真空容器の大周方向一周電気抵抗を充分高くとる必要がある。このため, 真空容器の大周の一部分に高電気抵抗区間を設ける必要があり, 真空条件 (放出ガス等) を充分検討の上, 第4.5図に示すような溶接ベローズを採用した。この構造は, ベローズの両側の厚肉部の間に働く力は絶縁物を介した厚肉構造で支持し, ベローズには外力を加えない構造である。ベローズの外側空間をロータリポンプで排気すれば, ベローズに加わる大気圧をも取り除くことができる。インタロックを充分にすれば, 大気圧と電磁力が同時に加わることはない。したがってベローズに加わる力が小さく, 薄板を使用することが可能となり, 短い距離で高抵抗を得ることができる。また, 絶縁物は高真空部分に面さないため, 放出ガスなど真空特性が悪くても差支えないし, 絶縁物と金属との間のパッキングの仕様も厳しくない。高真空部分は真空特性のよい金属のみで囲み, 全溶接で封じることができる。

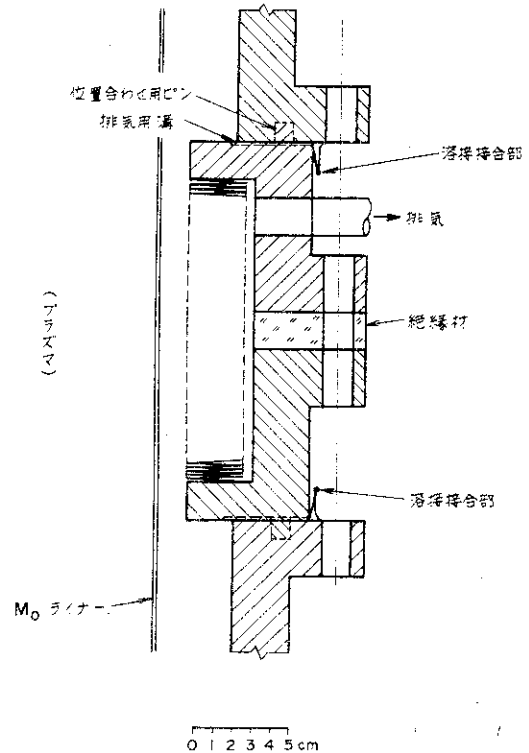


第4.4図 真空容器断面図

A~E ライナ

L1, L2 リミタ

上下分割部は $Z < 0$ にはない。



第4.5図 ベローズ部構造

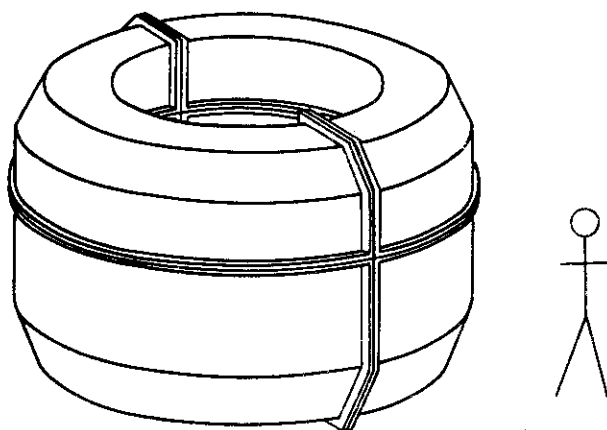
この構造により、長さ150mmのベローズ4ヶ所で、1周抵抗 $4\text{ m}\Omega^2$ 以上が得られる。

真空容器の内部にはダイバータ・コイルを設置するが、その組立てのために、真空容器を上下に2分割するか、あるいはダイバータ・コイルを分割して真空容器の中で組立てる必要がある。予備設計においては、分割組立て構造を数種の組合せとして示し、メーカーで技術的検討を行った。その中には第4.6図(a)のように真空容器を上下にも分割する案や、第4.7図に示すようにダイバータ・コイルを2つの半周部分で構成し、接続作業を不用とする案を含めた。第4.6図の構造でも、ベローズ部は上下分割できないが、厚肉部が分割できることにより組立て作業は極めて容易となる。また、十字シール(2個のT字シール)部分は、同図(b)のように全溶接によって行うことができる。

メーカーからの予備設計報告書では、メーカーによって採用した案が異なるが、ダイバータ・コイル接続部の誤差磁場がなく、技術的にも製作可能であることの判明した方式、すなわち、真空容器を上下にも分割してダイバータ・コイルを組込む方式が優れていると考えられる。この構造は真空容器内面の工作時に大型旋盤が使える、精度を出すためにも有利である。また、基本構造としては滑らかなトーラス(円形)ではなく、短い直線部(くさび形)を接続してトーラスを構成する殻構造も今後の検討に含める。

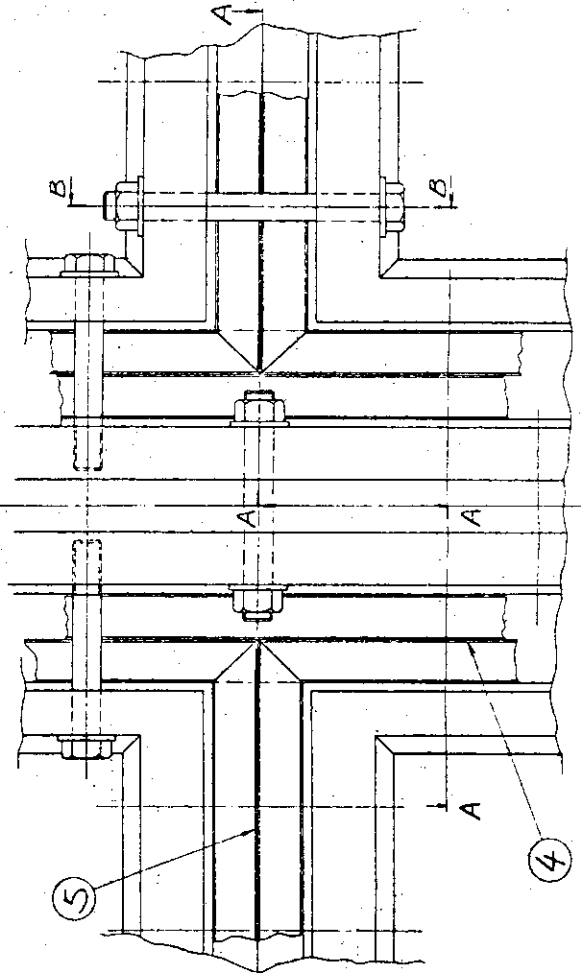
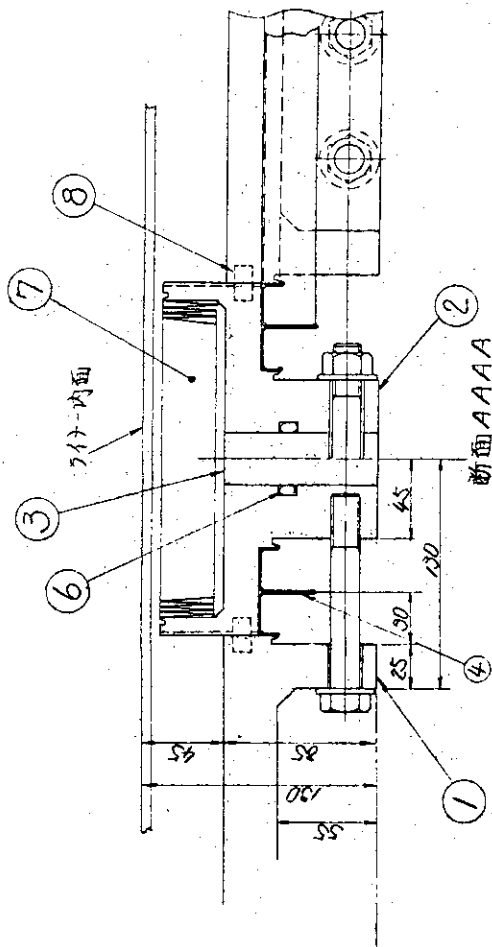
ポートは、計測、ダイバータ室内の操作などのために出来るだけ多数設けることとし、予備設計仕様では計114個とした。この中には、第二段加熱(中性粒子入射)のための4個の接続ポートが含まれる。TコイルとTコイルの間には、ダイバータ室(上下)と側面中央に大型ポートを設けることを原則とし、また、垂直方向見通しのポートも設ける。予備設計におけるポート配置案を第4.8図に示す。実際のポート配置は計測などの検討を待ち、今後更に検討を加える。

真空容器全体の支持構造は、空間のとり合い、特に各種Pコイルの給電線が多数あり、これらはできるだけ下側に出したいこと、また後述のようにベーキング時の熱膨脹で最大7mmの変位があること、などを考慮して、第4.9図のように真空容器の側面ポートを利用して支持する方式がよいと考えられる。側面ポート支持方式の強度は検討されており、強度は充分である。この方式は、計測あるいは組立て、保守の点からも優れている。



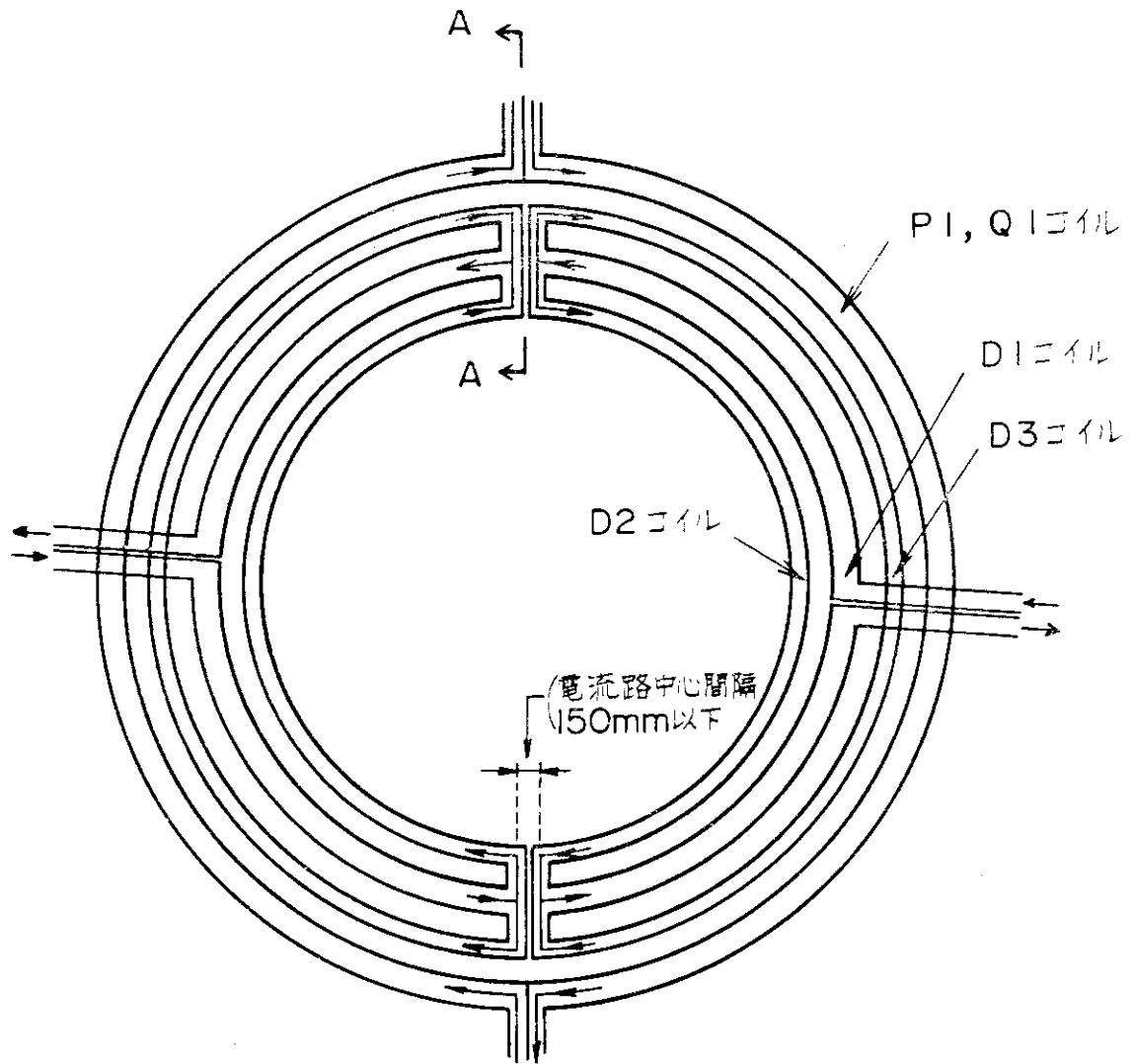
第4.6図 (a) 上下分割型真空容器構造

9	ボルト	一式	SUS304	
8	ピン	一式	インコネルX	
7	ベローズ	1	インコネル685	
6	ガスケット	2	ハイトン	
5	フレヤ(大周部用)	1組	SUS304L	
4	フレヤ(小周部用)	2組	SUS304L	
3	絶縁リング	1	ポリイミド	
2	分割部リング	2	SUS304L	
1	真空容器	1組	SUS304L	
PMO	部品名称	個数	材質	備考

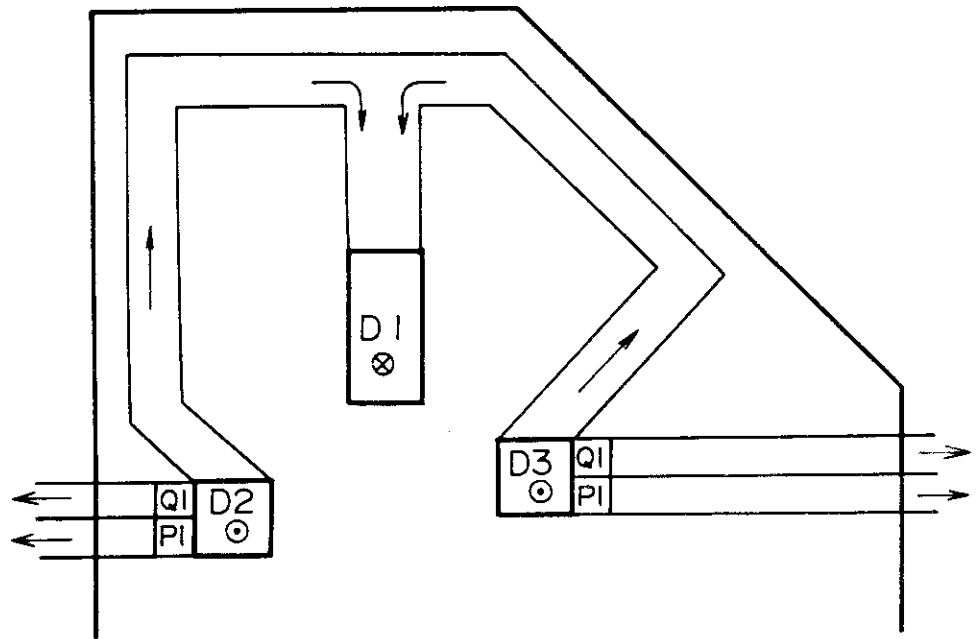


断面BB (エイトセロ)

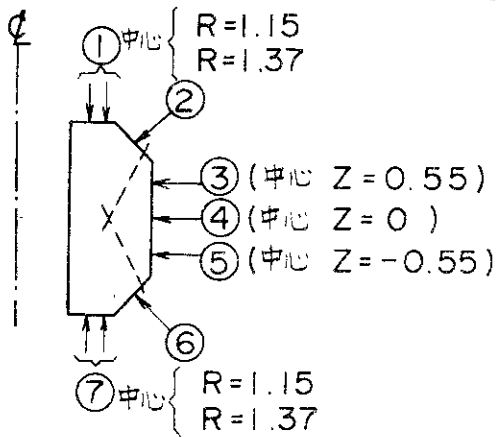
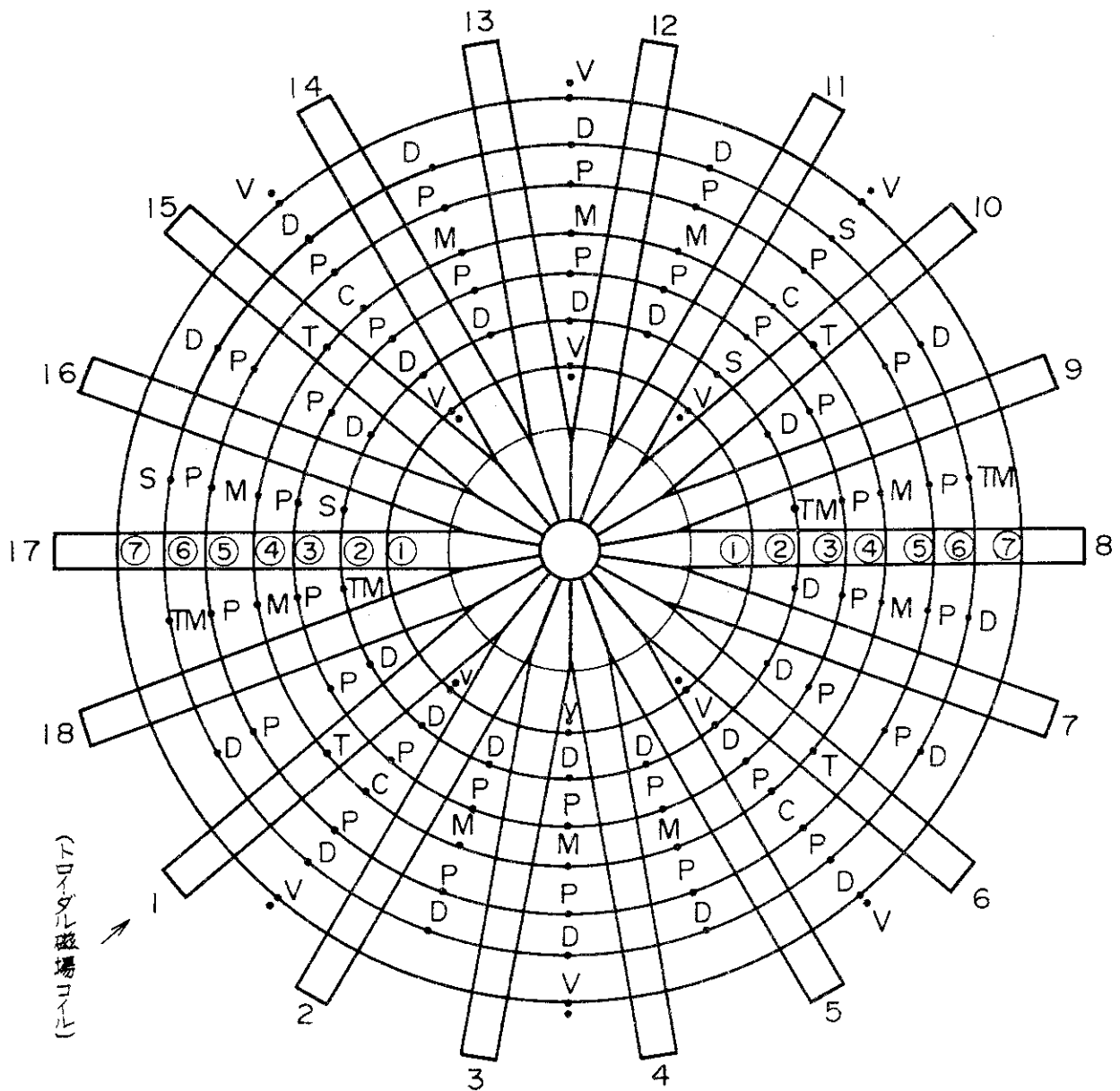
第4.6図 (b) 全溶接十字シール



A-A 断面図



第 4.7 図 半周型ダイバータ・コイル

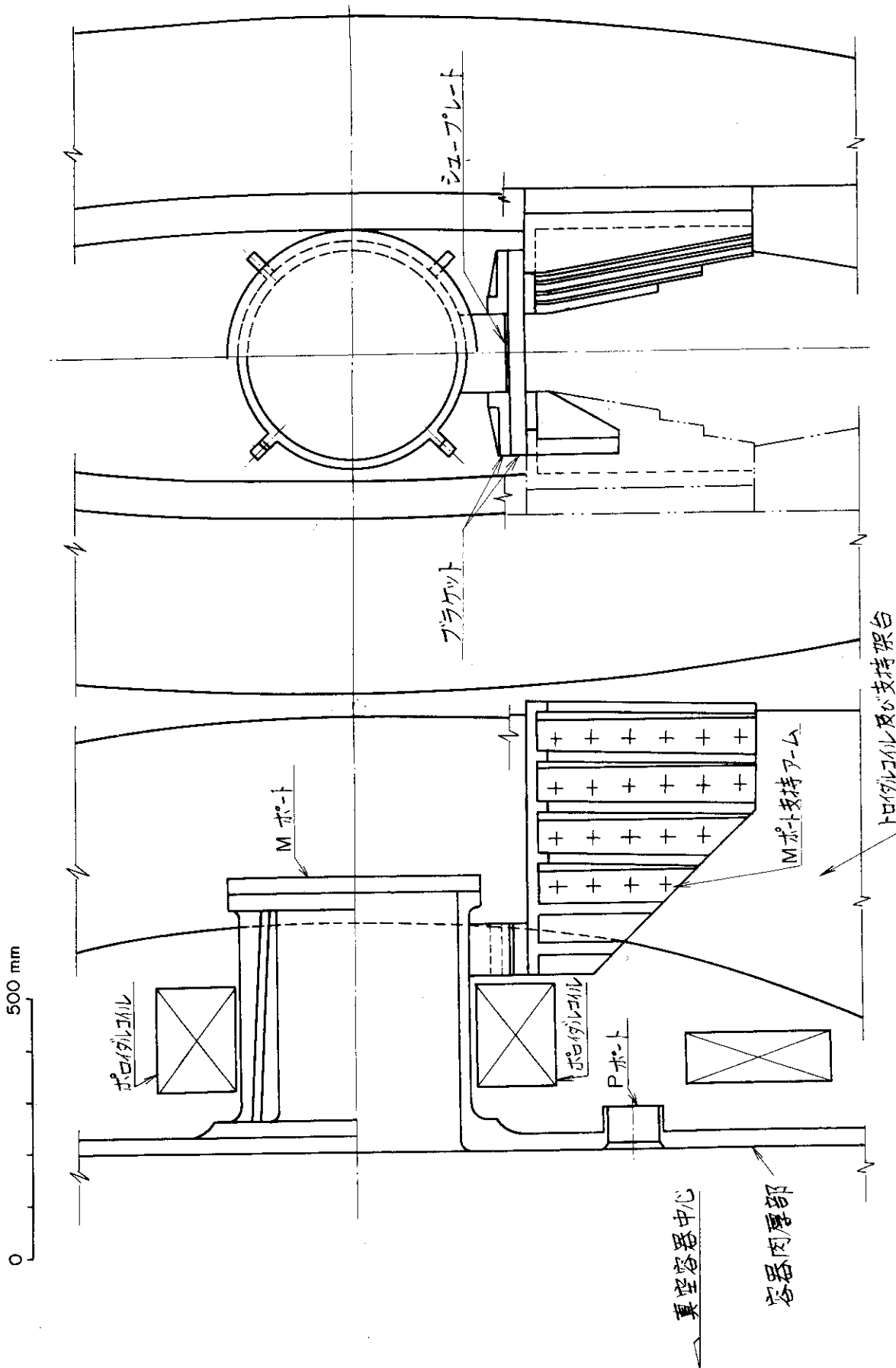


*有効面積は
(指円: 300X450)

T	接線ポート	* 300 ^φ	4
M	測定用ポート	400	10
P	〃	100	36
C	〃	100	4
TM	排気ポート	300	4
D	ダイバータポート	300	28
S	中心測定用ポート	300	4
V	垂直測定用ポート	100	24
合計			114

Sポートの中心軸は左図破線のように
点(1.35, 0.0)を通る。

第 4.8 図 ポート配置案 (予備設計仕様)



第 4.9 図 真空容器の支持 (側面ポート支持方式)

4.3.2 真空特性

世界における現在までのトカマク実験は、装置の真空条件が良くなるほど良好なプラズマの得られることを示している。高い真空条件を保つことは、トロイダル磁場強度を高くすることと共に、トカマク型装置の最も重要なポイントである。

高真空条件を要求する理由の一つは、プラズマ中に作動ガス（水素）以外の不純物を混入させないことであるが、作動ガスと同種の粒子であっても中性粒子は荷電交換によるエネルギー損失や壁面への粒子衝突の原因となる。したがって、壁面からは作動ガス種の粒子を含めて、粒子を全く放出しないことが望ましい。すなわち、粒子に衝撃される壁面をスパタ比の小さい材質で構成し、かつ、その表面にガス粒子が吸着しないようにすることが必要である。このためには、ベーキングなどで吸着しているガス粒子を除去すると共に、真空容器内を高真空に保ち、空間から壁面に吸着するガス粒子の数を減らすことが必要である。トカマク型装置にとっては壁面の清浄度が重要であり、壁面を汚したままで排気速度のみを高くして高真空を得ても意味がない。

以上の観点から、真空容器の材質としては、JFT-2, JFT-2a で高真空の経験のある SUS304L がよいと考えられる。しかし、材質については今後更に検討を行う。一方、プラズマ粒子の衝撃を受ける面にはスパタ比が小さく、高融点の材質がよい。JT-4 の予備設計では JT-60 と同じく、モリブデンのライナを内張りすることとしたが、後述のようにライナに関しては今後更に検討する必要がある。いずれにしても、ライナを設けるために SUS の真空容器内面にはプラズマ粒子が衝突せず、放電洗浄がきかない。また、ポートおよびパッキングの特性により真空容器を高温にベーキングすることも困難である。そこで、SUS 容器の内面を清浄に保つため、JFT-2a で経験のある金蒸着を施すこととした。真空容器のベーキング温度は、パッキングの特性、真空容器の近くにある P コイルとの熱絶縁などを考慮して 200℃ とした。（ライナのベーキング温度は 500℃ とした。）

このほか、ネジ穴の排気溝を設けるなど、排気しにくい閉空間（ポケット）をつくらないことを仕様とした。

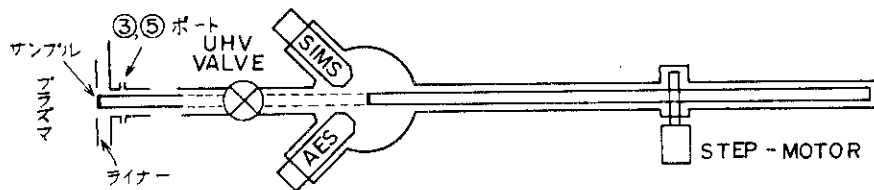
真空条件の指標としては、予備設計では物を作って検査を行うわけではないことを考慮して、真空条件に充分配慮して設計を行うべきことを示す意味で、放出ガス量を仕様とした。仕様値は、真空容器内の全放出ガス速度 5×10^{-6} Torr·ℓ/sec 以下である。この値は TFR で実現されている放出ガス速度 2×10^{-13} Torr·ℓ/sec·cm² の 5 倍と、全表面積の概算値をかけた値であり、充分実現可能と考えられる。

実機製作のための仕様の与え方は今後更に検討する。

真空排気装置の仕様、すなわち排気速度は、到達真空度、ショット間の真空度回復、および後述の Sorbac（ダイバータ用超高速排気装置）の再活性時排気、などを考慮して決定する。到達真空度は、ショット間にガス粒子が壁面に衝突して付着し、壁面上にガス粒子が蓄積しないための条件として決められる。ライナのベーキング温度 500℃ の下で、ショット間の 10 分間に 1 原子層以下の蓄積量となる条件を求めると、付着率を 1 として 3×10^{-10} Torr 以下となる。この値はかなり困難な値と考えられる。JT-4 予備設計では、真空容器の到達真空

度は仕様としなかった。ただし、負荷となるガス源のない場合には 1×10^{-9} Torr まで排気のできる排気装置を使用することを仕様とした。排気速度は1系列 1000 l/s （真空容器と排気装置の結合ポート位置において）のものを4系列設けることとした。この場合、排気の時定数³⁾は約8秒であり、2分間あれば圧力は初期の 3×10^{-7} になる計算となる。Sorbacの再活性化に関しては、予備設計では検討していない。

ポートのパッキングは全て金属を使用するものとした。⁴⁾ また、表面状態を検査するために表面汚染モニター装置を設けることとした。これは第4.1.0図⁵⁾に示すようにAES⁶⁾およびSIMS⁷⁾によって表面を測定する装置である。

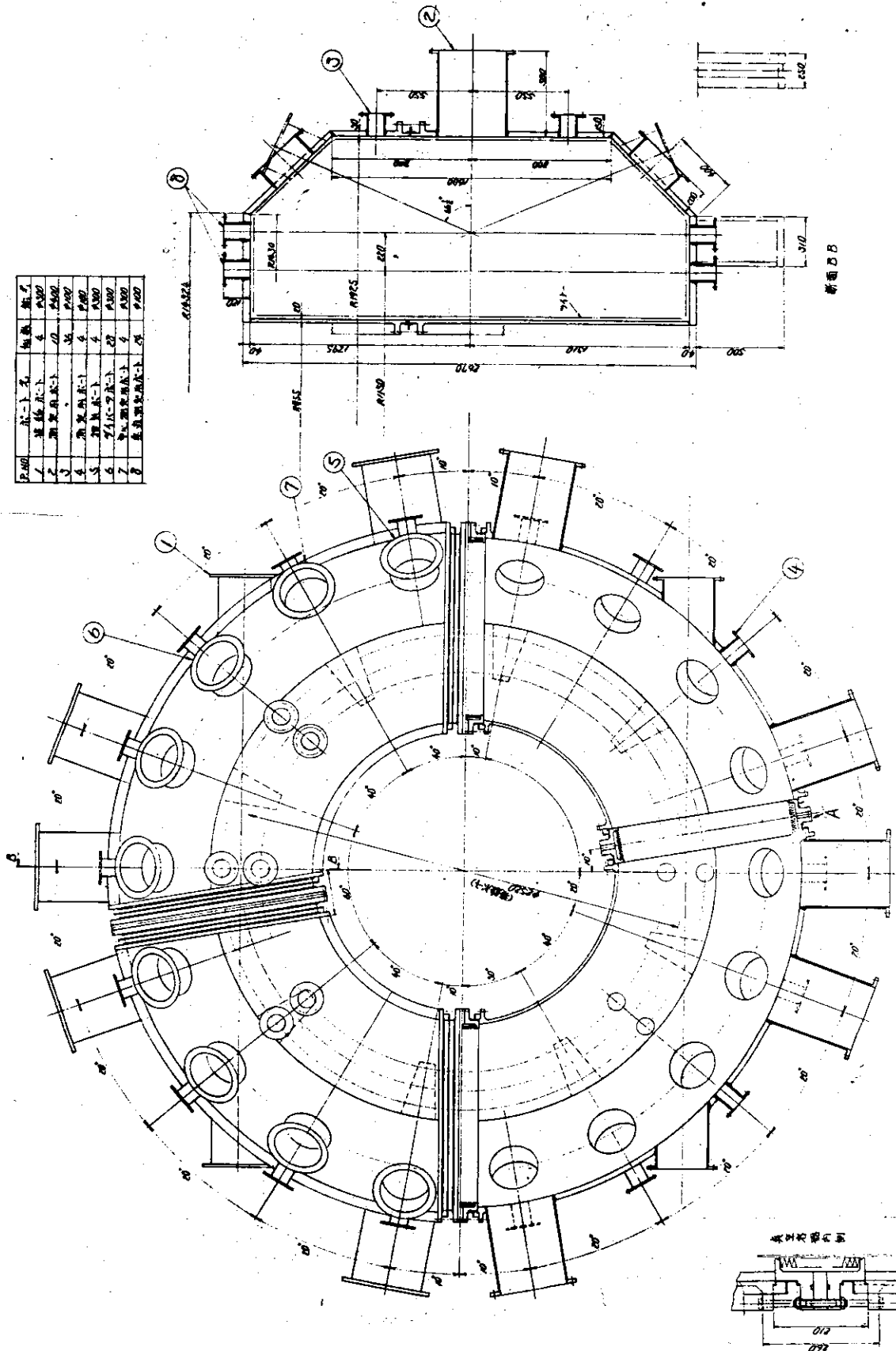


第4.1.0図 表面汚染モニター装置

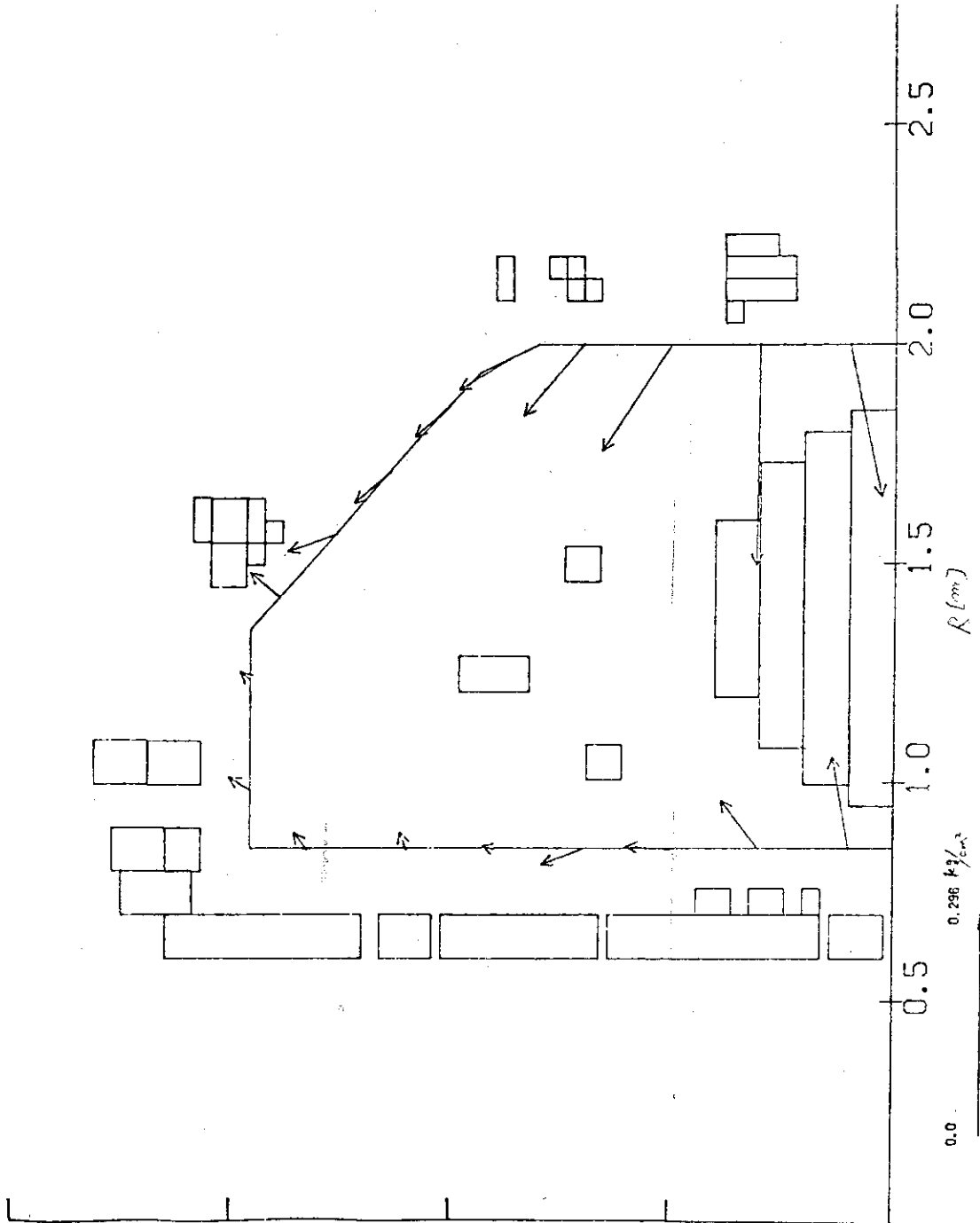
4.3.3 真空容器の強度計算

真空容器には、大気圧および電磁力が加わる。電磁力は真空容器に誘起される電流と磁場の相互作用によって生じるものであり、真空容器の誘導電流を検討する必要がある。真空容器には、各種Pコイル電流あるいはプラズマ電流に変化があるときに誘起電流が生じる。この中で最大のものは、プラズマ電流消滅時に誘起される。その計算例は付録7に示すが、その結果は第4.1.2図に示す通りである。これはプラズマ電流が時定数1msで遮断した場合の誘起電流をもとに計算した結果である。同図で分るように、容器外側の側面中央部に最も強い電磁力、約 0.3 kg/cm^2 が加わる。また、真空容器にはベローズによる高抵抗区間があるため、付録7の大周方向一様とした計算には現れない「くら型電流」が第4.1.3図のように流れる。⁸⁾ この場合、同図Aの部分の電流がトロイダル磁場と交わり、 $i \times B$ による強い力を生じる。予備設計では、付録7で計算した容器内側と外側の誘起電流の差を参考にしてくら型電流を 10 kA とし、厚肉部の端部 10 cm 幅の部分に 3 ton/m の力が加わるという仕様を与え、検討を行った。⁹⁾

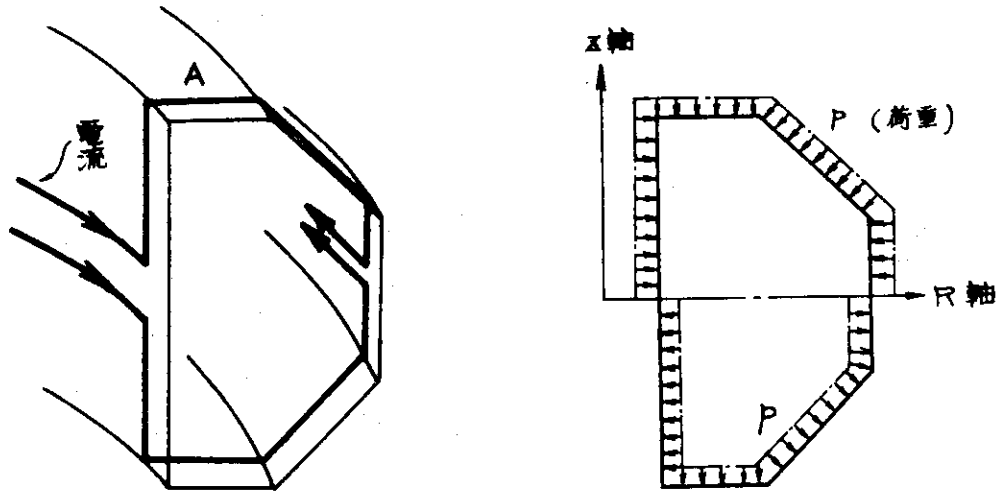
真空容器厚肉部の断面図は第4.1.4図に示す通りであり、肉厚は設計によって多少の差があるが、いずれも 30 mm 前後である。このような構造の真空容器に、前記の電磁力が印加された場合の応力計算は詳細に行われた。その結果によると、応力の大きい場合、すなわち、くら型電流を含めた厚肉部端部の応力解析（第4.1.5図）でも、最大応力は、引張り 5 kg/mm^2 、圧縮 6 kg/mm^2 であり、 300°C のSUS304Lの0.2%耐力 15 kg/mm^2 に対して充分余裕がある。第4.1.6図は、くら型電流を除く電磁力による変位分布の計算例である。



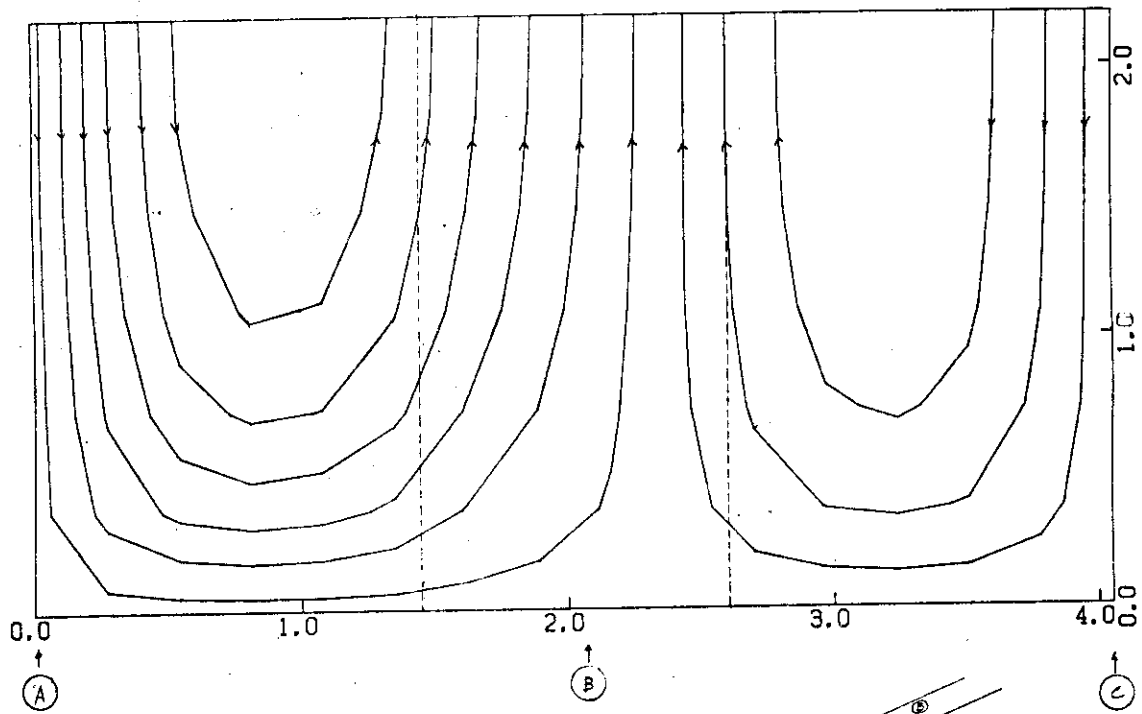
第 4.1.1 図 真空器全体図 (a) 上面図



第 4.1.2 図 真空容器の電磁力



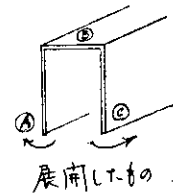
(a) 仕様図



THICKNESS= 0.03 (cm)

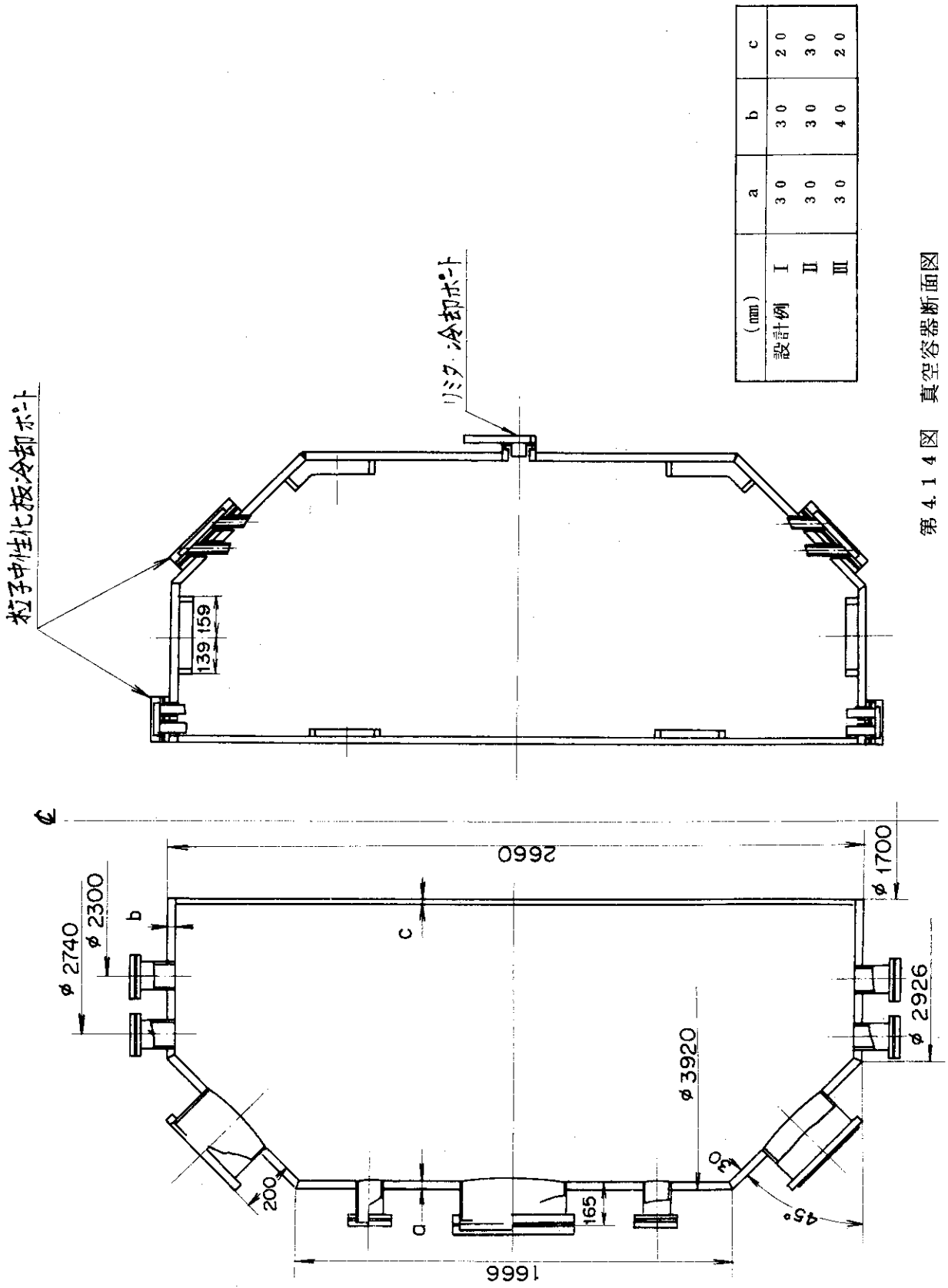
PLASMA = 1000000 (A)
ROU = 86.0 ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)

$$I_p = 10^6 e^{-1000T}$$

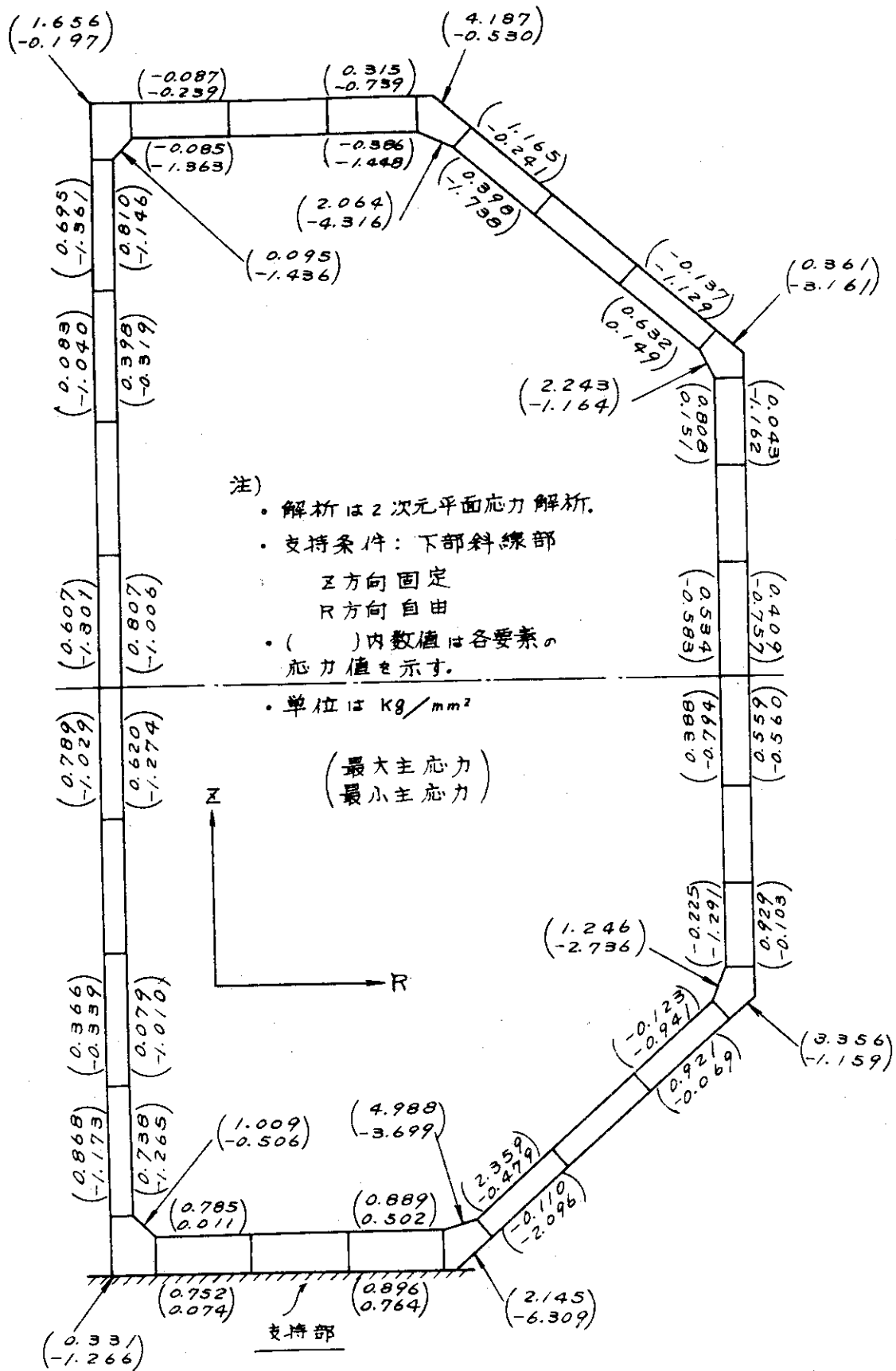


(b) 計算結果

第 4.1.3 図 くら型電流



第 4.14 図 真空器断面図



第4.15図 厚肉部端部の応力

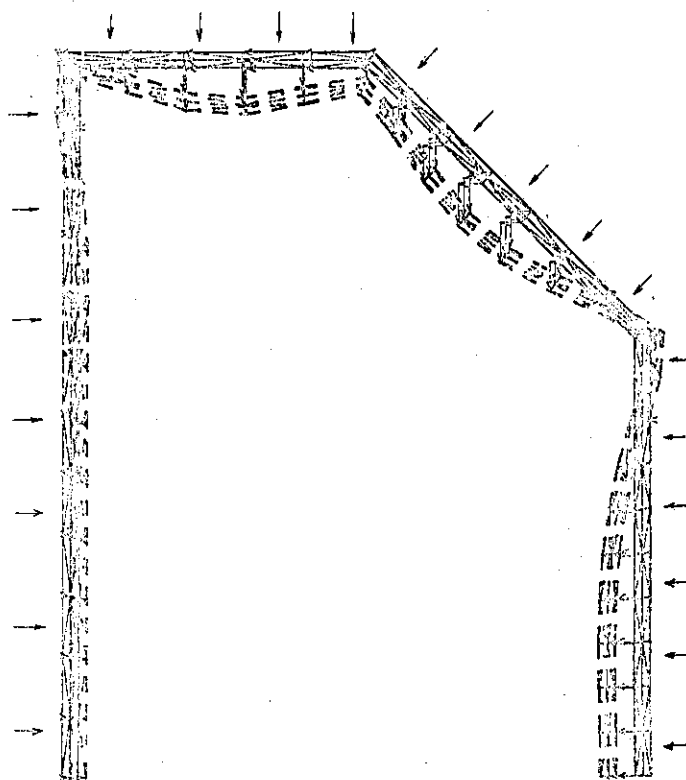


FIG. \square 85.38461
 DEF. \square 0.08305 mm

(a) 大気圧による変位

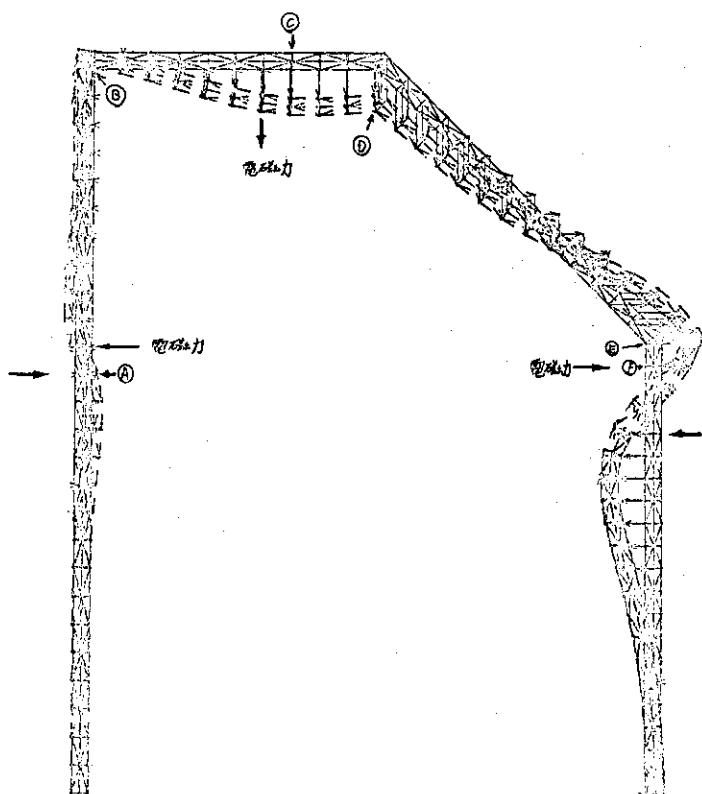
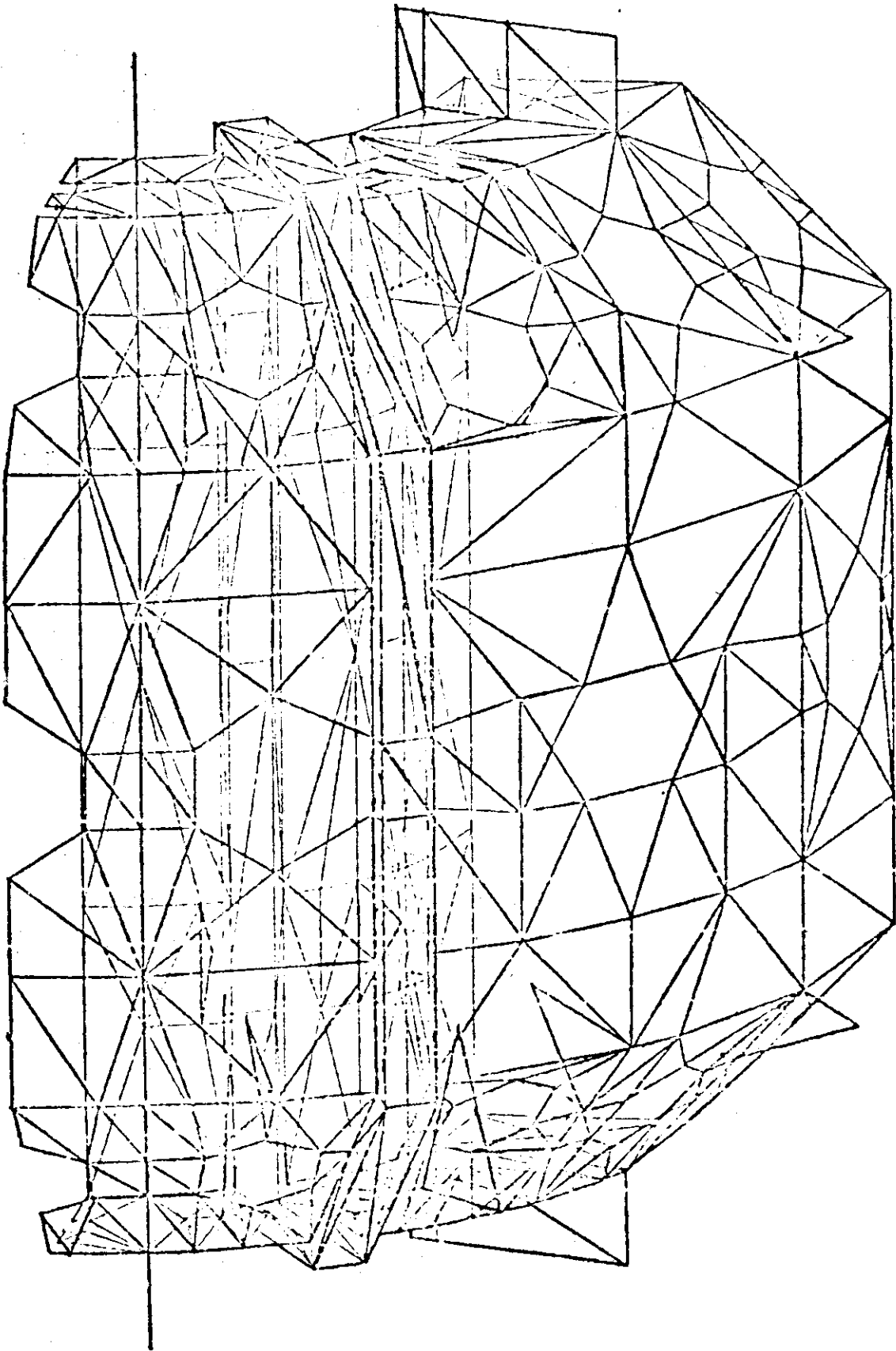


FIG. \square 81.53845
 DEF. \square 0.20866 mm

(b) 電磁力による変位

第 4.1.6 図 電磁力による真空容器の変位



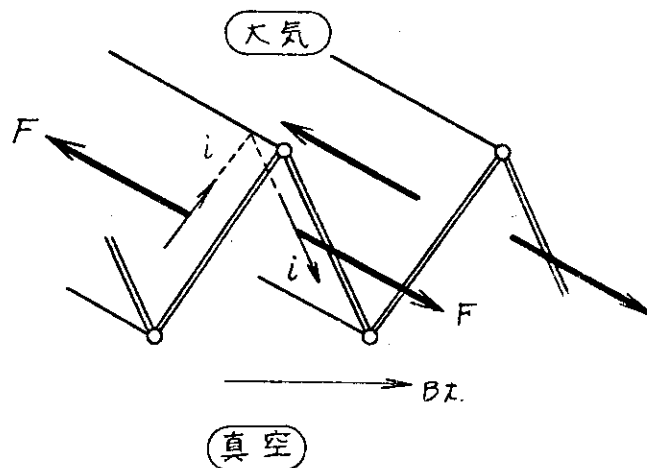
第 4.17 図 3次元応力解析（入力データ例）

ポートなどの非一様性を入れた3次元応力解析も行われたが(第4.17図), この場合にはダイバータ・コイルを半月型として半周分ごとのフープ力を容器で支え, またPコイルを容器で支える構造としたために真空容器に大きな力が加わり, 応力的に厳しい結果となっている。しかし, この2点を他の設計例のようにして, この分の応力を差引くと, 応力はやはり高々5~6 kg/mm² となり問題はない。

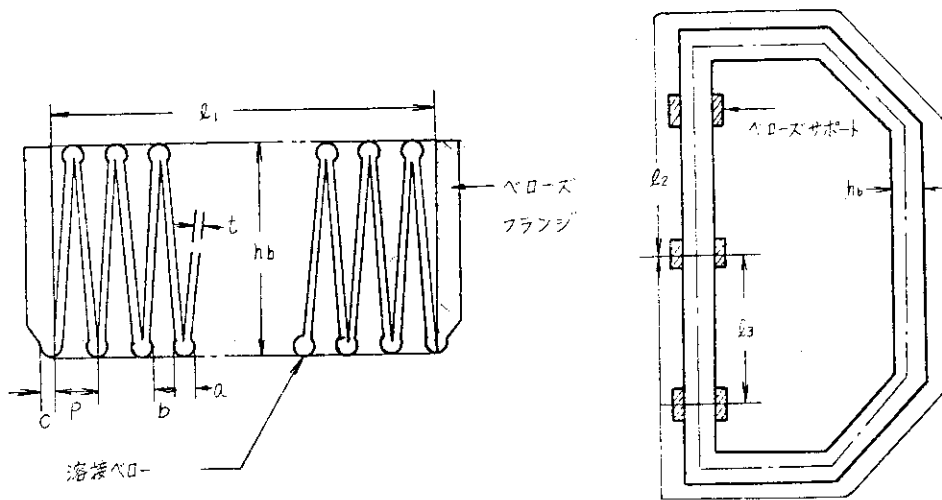
4.3.4 ベローズ部の強度計算

ベローズは, 真空容器の大周方向一周抵抗4 mΩ以上を得るための真空容器の断面形状に合わせた不等辺6角形の溶接ベローズである。ベローズには電磁力が加わるほか, 2重真空破壊事故の際には大気圧が加わる。また, 大気圧から排気する際には両側の空間の排気速度の差により圧力が加わる。電磁力としては, 厚肉部と同様にポロイダル磁場と誘導電流の相互作用によるものと, ベローズに沿って大周方向に流れる誘起電流とトロイダル磁場の相互作用によるひねり力とがある。後者は, 第4.18図のようにベローズの薄板毎に交互に逆向きに加わる力であるが, これによるせん断応力は, 0.4~0.7 kg/mm² であり問題はない。前者の電磁力は厚肉部と同じく0.2気圧相当の力と見なす。これによる応力は, 横座屈の応力限界が最も厳しく, 安全側の検討結果によれば, 0.5 mm厚のインコネル製のベローズとした場合には20 cm毎に支持をする必要がある。(大気圧を考慮。ベローズ高さ30 mm, ピッチ2.7 mm)

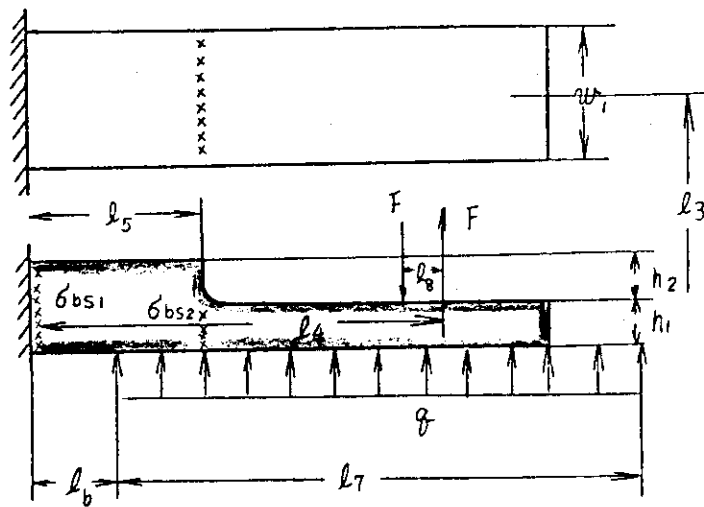
ベローズを20 cm毎に支持する構造材についても応力の検討が行われ, 第4.20図のものが適当である。なお, プラズマの不安定性, あるいはプラズマ電流遮断によってベローズに大電流が流れ, 電磁力と発熱が問題となる可能性があるが, これはベローズ両側の厚肉部を結ぶ放電ギャップまたはSCRなどに電流をバイパスして避けることができる。



第4.18図 ベローズに加わる電磁力



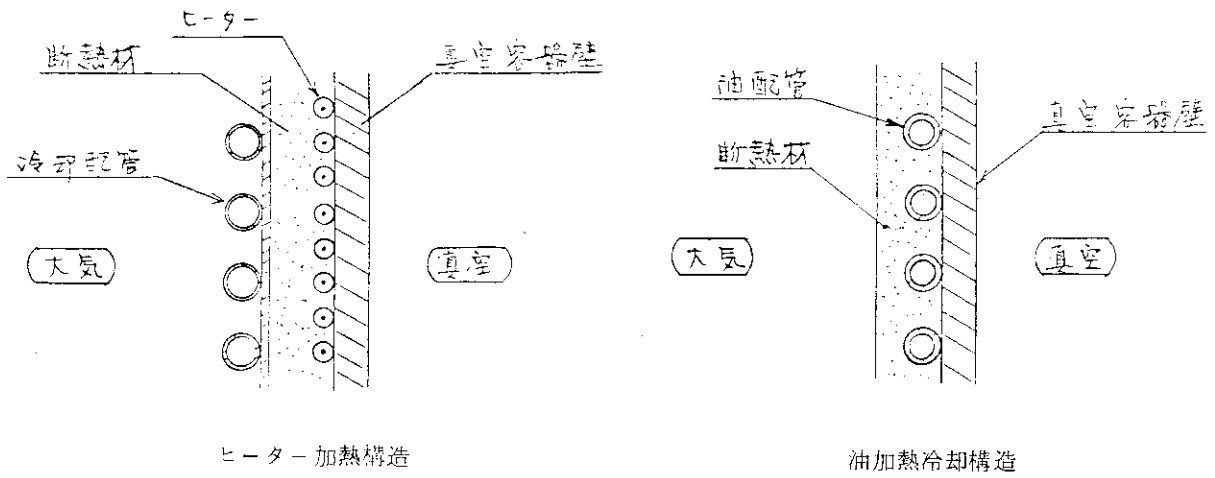
第 4.19 図 ベローズの設計



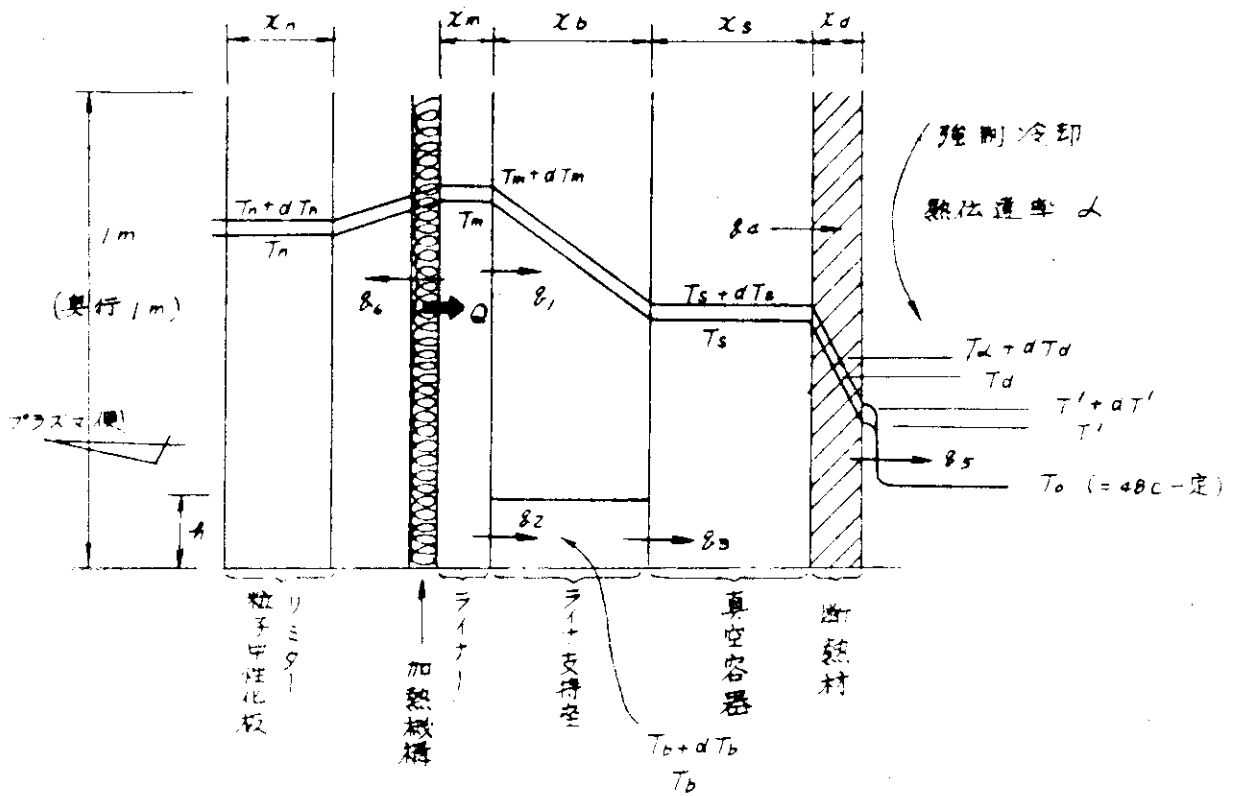
第 4.20 図 ベローズ支持構造

4.3.5 真空容器の熱設計

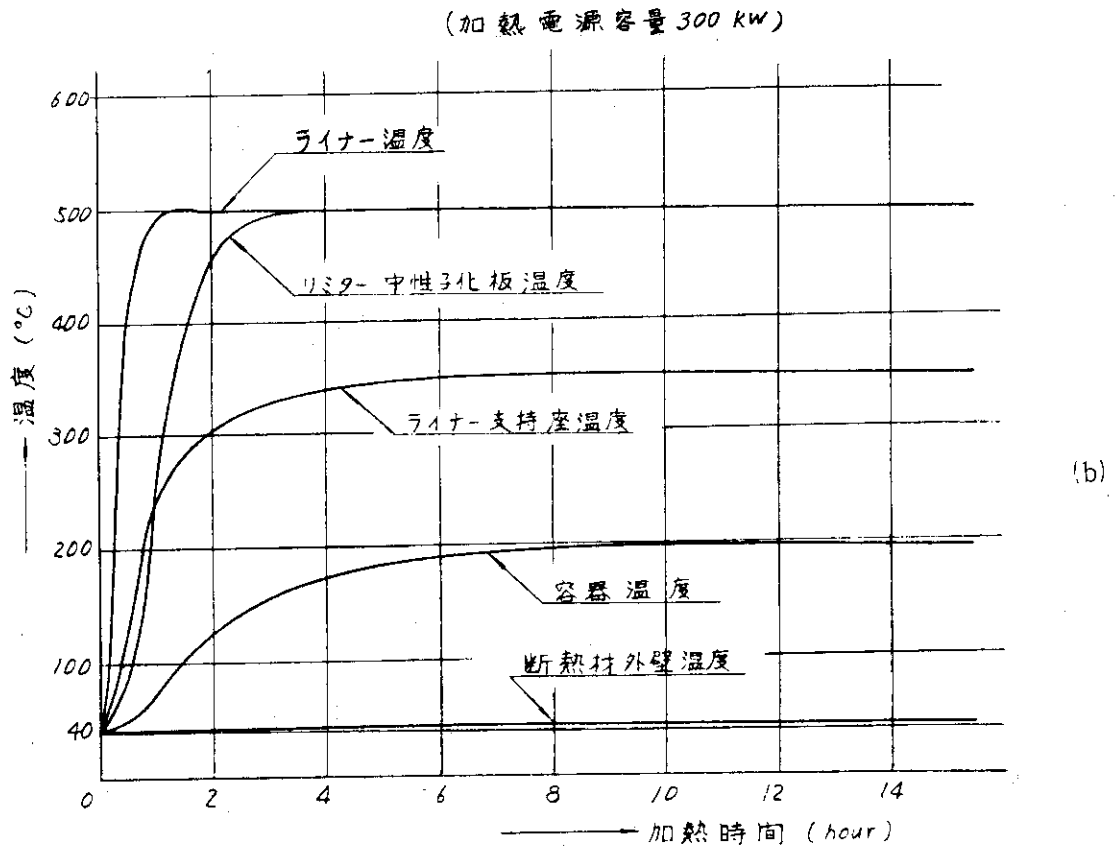
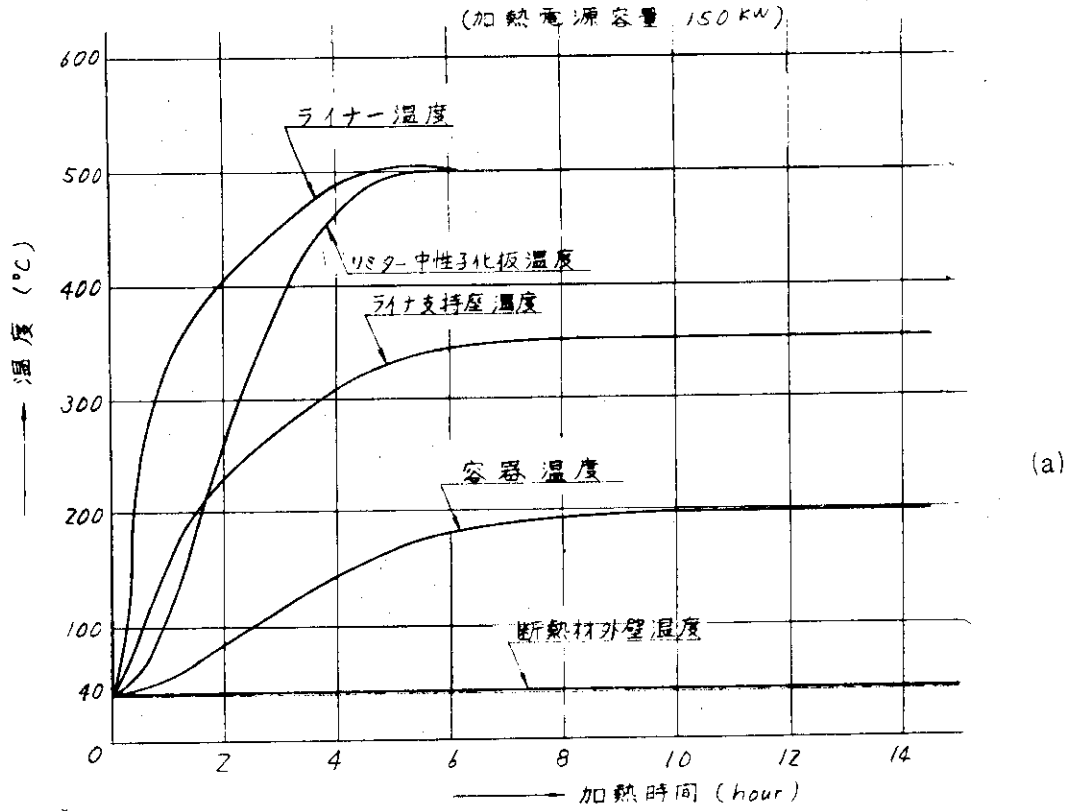
真空容器は前述のように 200℃ にベーキング可能とするが、予備設計ではライナを 500℃ に加熱するため、真空容器はライナからの入熱によって加熱する。真空容器を 200℃ に抑え、また真空容器の外に近接して設置される P コイルを熱から保護するために、真空容器の外側には油冷却パイプと断熱材を第 4.21 図のように設ける。第 4.22 図のモデルで熱計算を行った結果を第 4.23 図に示す。同図で分るように、ライナ加熱電力、あるいは冷却系を制御することにより、各部を所要の温度に設定することが可能である。



第 4.2 1 図 真空容器の冷却・断熱材構造



第 4.2 2 図 熱計算モデル



第 4.2.3 図 真空容器熱計算の結果

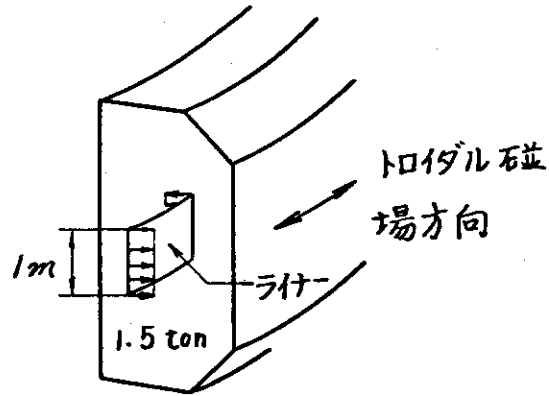
4.4 真空容器内蔵部品

4.4.1 ライナ

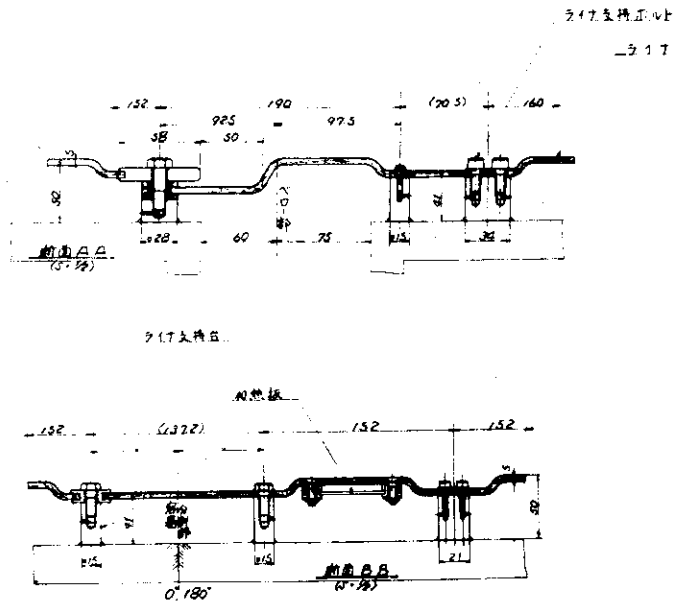
ライナは真空容器の内壁に直接プラズマ粒子が当たることを防ぎ、また強度の弱いベローズをプラズマ粒子の衝撃から保護するための壁材である。従来のトカマク型装置JFT-2a, T-6, ORMAKなど数例を除き、ステンレス鋼製の真空容器が直接プラズマに面しているが、いずれも壁面材料(F_e など)、あるいはC, Oなど不純物がプラズマ中に混入している。JT-4では、これら不純物混入を減らすため、プラズマ粒子の衝撃に強く、表面に吸着する不純物あるいは材料内部に吸蔵している不純物の少ない壁材を使用することを計画している。すなわち、低スパタ比、高融点、清浄表面という条件を満たす材料で第一壁を構成する。このような材料としては、JT-60で採用する予定のモリブデンをはじめ、数種の材料が考えられるが、予備設計においては検討の余裕がなかったため、交換可能な構造でモリブデン板(厚さ5mm)を使用することとした。予備設計の進行過程で、電磁力の支持および真空容器とライナの熱膨脹差の点で、ライナの設計が困難となる可能性が生じたため、インコネルなど強度、工作性、真空特性の良い材料の表面にモリブデンをコーティングすることを考案し、このような設計でもよいこととした。そのため、予備設計においてインコネル上に爆着あるいはイオンプレーティングによってモリブデンをコーティングすることに関する検討も行われ、機械的強度(曲げに対するはがれ)については、爆着の方が良好であった。予備設計の結果では、種々の工夫を加えて、モリブデン板でもライナ製作が可能となった。なお、真空容器内に組込んだままの状態で(in situで)金属をライナ上に蒸着することが可能であれば、基板上に付着した不純物を包み隠して清浄な金属面を得ることができる。これにより、放電洗浄なしでも清浄な壁面が得られ、プラズマに混入する不純物を減らすために極めて効果的であると考えられる。蒸着に使用する金属としては、 M_o , T_i , W , Al , あるいは金属以外のC, S_i , Cなどの低Z材、などが考えられる。JT-4のライナをJT-60と異なるものとした方が実験で得られる情報が多い、という考え方もあり、今後更に検討する必要がある。さらには、ベローズ部分および組込み測定器部分以外はライナなしとすることも考えられ、これを含めて検討を行う。

ライナに加わる力としては誘導電流による電磁力のみを考慮すれば充分である。電磁力の1つはプラズマとの間に作用する磁気圧である。これは、プラズマ電流のつくるポロイダル磁場が急激に生成、又は消滅すると仮定した場合にライナの受ける力(磁気圧)を考えておけば最大の力となる。ライナ位置でプラズマ電流の作る磁場強度は、 $I_p = 1MA$ としても0.4Tであり、一気圧相当の磁気圧を考えておけば充分である。第2の電磁力は、ライナがトロイダル方向に電氣的に切れているために発生するもので、プラズマ電流の遮断時などにライナに誘起される渦電流がトロイダル磁場と交わることによる。この力は、第4.2.4図に示すようにライナの端部に逆方向に作用し、いずれか一方では必ずライナをひきはがすように働く。この力はトロイダル磁場との相互作用によるものであるため非常に強く、予備設計仕様では付録7に示す計算に基づいて、1.5 ton/mとした。

ライナの熱的条件としては、ベーキング温度とプラズマからの入熱がある。ベーキング温度



第 4.24 図 ライナに加わる電磁力



第 4.25 図 ライナの設計例

は、JT-60と同じく、M₀表面での水素粒子の滞在時間を短くし、またM₀の水素還元による酸化物除去を行うために、500℃のベーキングを行い、これをプラズマ実験時にも続けるものとした。しかしながら、500℃に加熱することは設計を極めて困難なものとするため、前記のライナの表面特性の検討とも関連させつつ、ベーキング温度を下げることに關する検討を行う予定である。

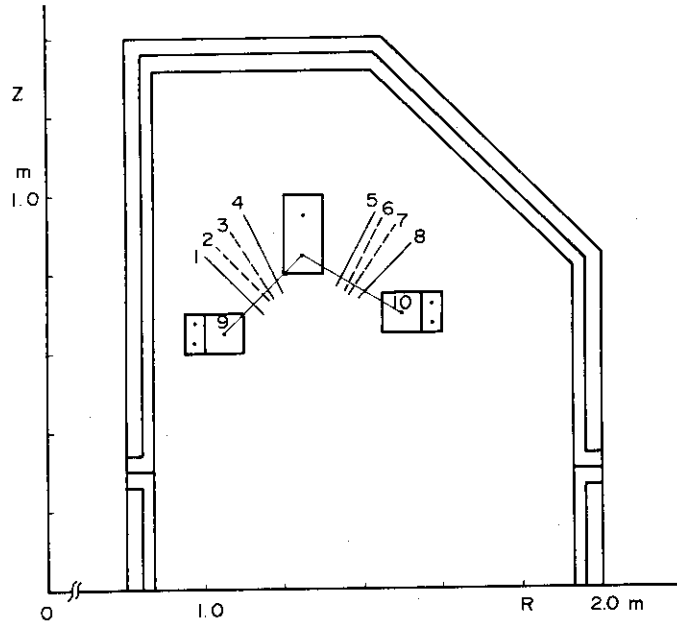
プラズマからライナへの入熱は、プラズマが制御された状態にあってライナと直接触れていなければ、主に放射による加熱のみであり高々 $2\text{W}/\text{cm}^2$ である。¹⁰⁾ プラズマが乱れてライナに接触する場合、あるいは逃走電子がライナに当たる場合などの入熱は推測によるしかないが、現在までの実験結果では熱流束が大きく($1\text{kW}/\text{cm}^2$ 以上)、そのような値でも耐えるような設計は不可能である。そこで、厚さ5mmのM₀材ライナの特性値から逆算して最大入熱束の仕様値を $50\text{W}/\text{cm}^2$ (5秒間)とした。これは、M₀のベース温度を500℃としたときに、M₀の再結晶温度約1200℃になる限界値に3倍の安全率を見込んだ値である。(厚さ5mmのM₀板の断熱温度上昇 $\approx 190^\circ\text{C}$)

上記の電磁力と熱の仕様の下で行った設計結果の例を第4.25図に示す。ライナは厚さ5mmのM₀板であり、一点を固定、他はバカ穴とスプリング・ワッシャによるスライド可能の支持とする。加熱方法は、ライナの裏側(真空容器との間)に設けたM₀またはインコネルの加熱板に電流を流す半直接通電法が良い。ポートのための穴などのあるライナ形状に合わせて加熱板の形状、寸法を調整することにより、ライナを一様に加熱することができる。シーヒーターによる方法は、シースの信頼性に問題があり、また直接通電は強い電磁力を受けるライナを絶縁材で支持する必要がある。

ダイバータ室入口スリット部のライナは、第4.26図に示すように、2段階可変とした。これは、ダイバータ室へのプラズマの流れについて未知の事が多いため、実験によってダイバータ室へのプラズマ流の位置を探し、プラズマ流の厚さが薄いものであれば逆流粒子を減らすために追加ブロックを加えてスリット幅を狭くしようとするものである。この部分のライナにも大きな電磁力が作用するため、所要形状のブロックを強固に固定する。必要となるブロックの形状は未知であり実験の結果によるが、第4.26図の仕様が満されれば、如何なる形状のものも可能である。第4.27図に設計結果の例を示す。

4.4.2 リミタ

リミタは、プラズマが直接ライナに接触しないように保護すると共に、磁気リミタのない場合にはプラズマの寸法を規定する金属ブロックである。予備設計においては、ライナと同一材料、すなわちM₀を使用することとした。形状は軸対称リミタを原則とし、装置側面の中央に設置する。外周ではポートのない部分にのみ設ける。リミタの大きさは、リミタがプラズマから熱を受けても、M₀の再結晶温度約1200℃以上に達しないことを目標に設計した。その一例が第4.28図に示すもので、断面積は約 50cm^2 であり、プラズマからの熱、500kW(ジュール加熱のみ)が全てリミタに入るとして、500℃のベース温度から断熱温度上昇した場合に1200℃以下に納まるために必要なリミタ長は35cmである。リミタの長



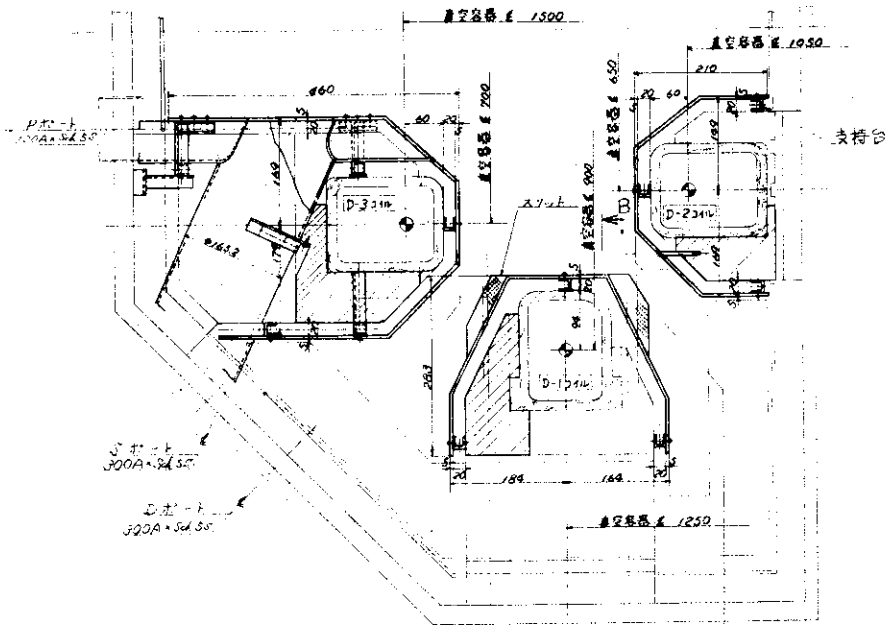
第 4.26 図 ダイバータ室入口スリットの可変範囲

(イ)の場合 1と4, 5と8の間を開ける。

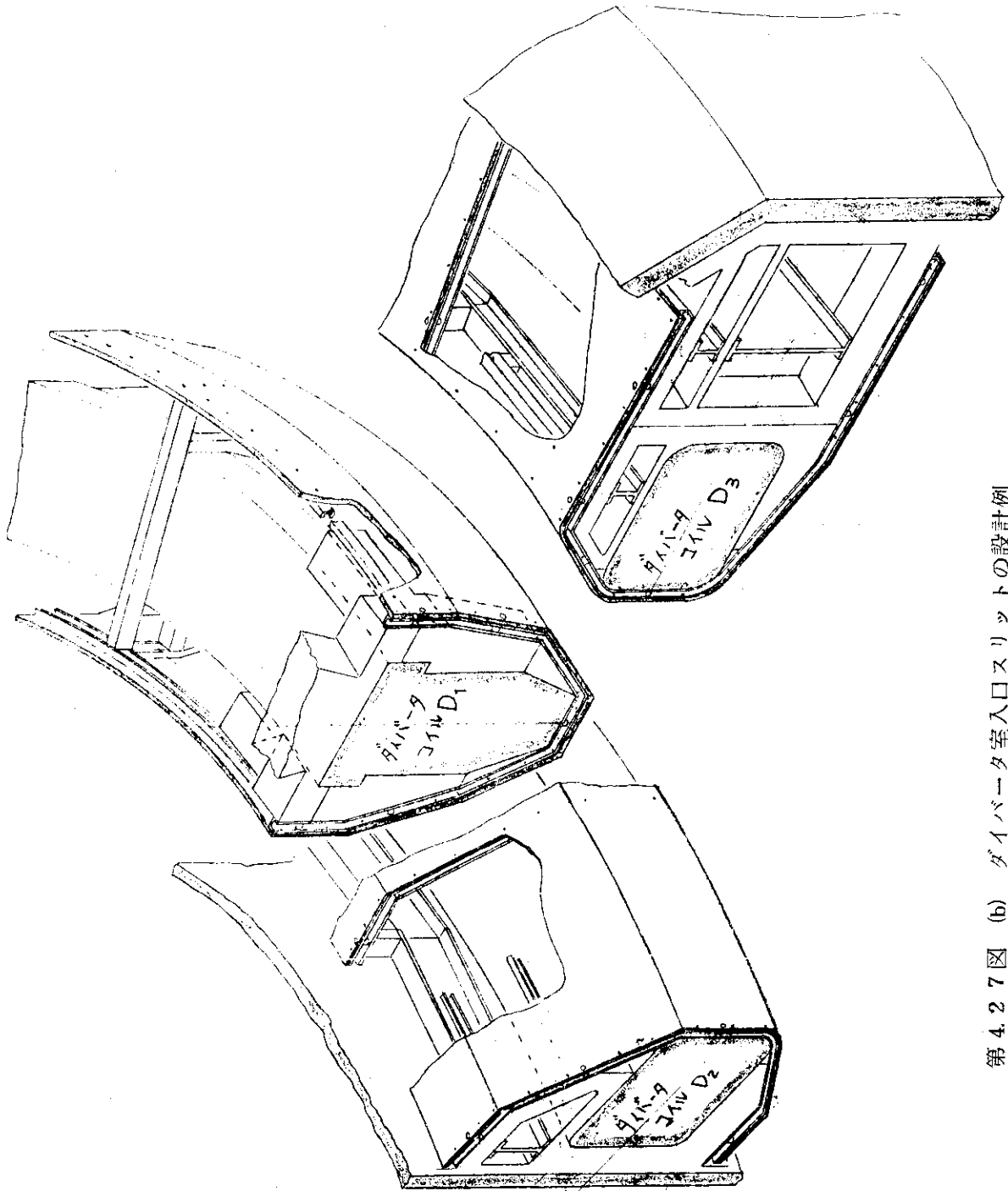
(ロ)の場合 2と3, 6と7の間を開ける。

ただし、直線9, 10よりもプラズマ本体から離れた位置にスリットを設ける。
各直線は各々次の2点を通る直線として定められる。

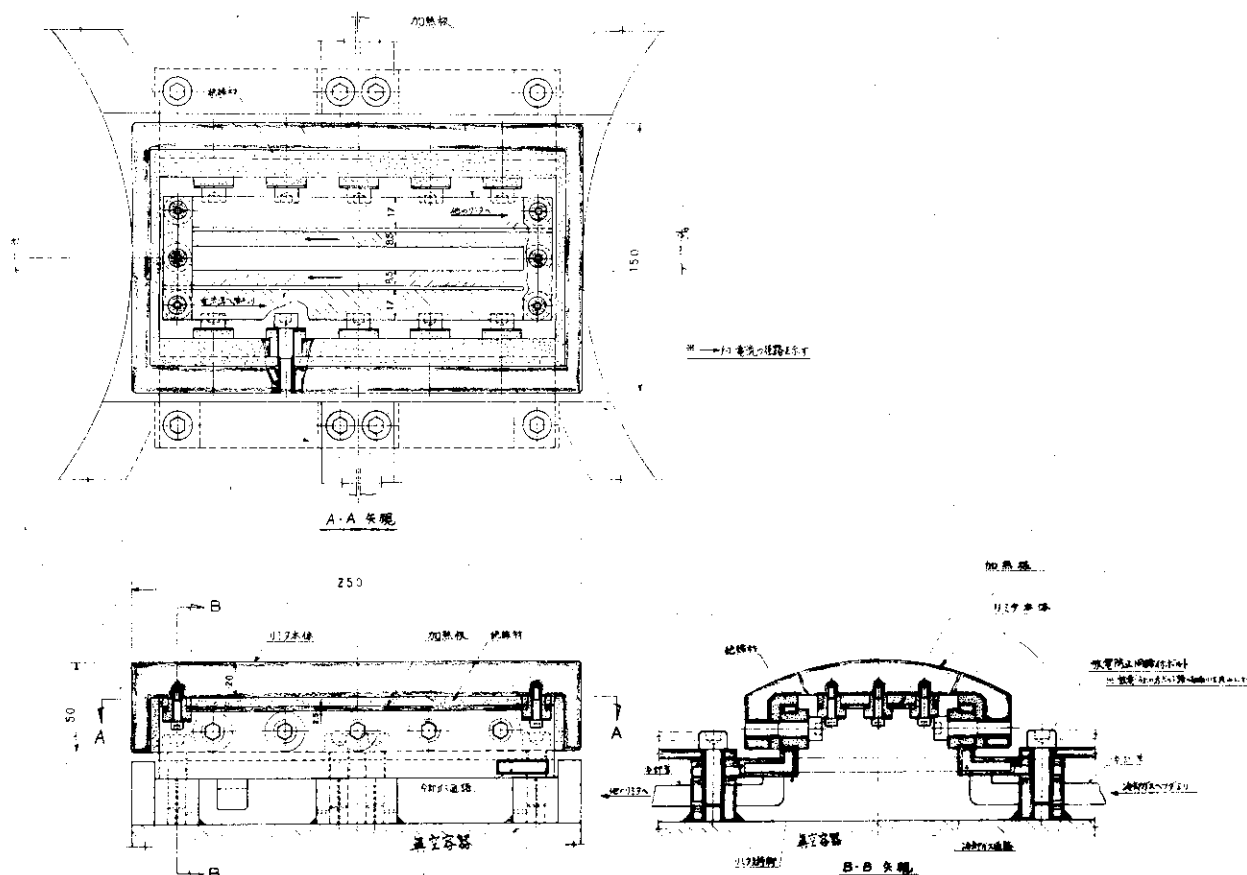
- | | |
|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 : (1.0, 0.85) と (1.15, 0.7) | 6 : (1.35, 0.75) と (1.45, 0.95) |
| 2 : (1.05, 0.85) と (1.15, 0.75) | 7 : (1.4, 0.8) と (1.55, 1.0) |
| 3 : (1.1, 0.85) と (1.2, 0.7) | 8 : (1.4, 0.75) と (1.5, 0.85) |
| 4 : (1.1, 0.85) と (1.2, 0.75) | 9 : (1.05, 0.65) と (1.25, 0.85) |
| 5 : (1.35, 0.85) と (1.45, 1.0) | 10 : (1.25, 0.85) と (1.5, 0.7) |



第 4.27 図 (a) ダイバータ室入口スリットの設計例



第 4.27 図 (b) ガイバータ室入口スリットの設計例



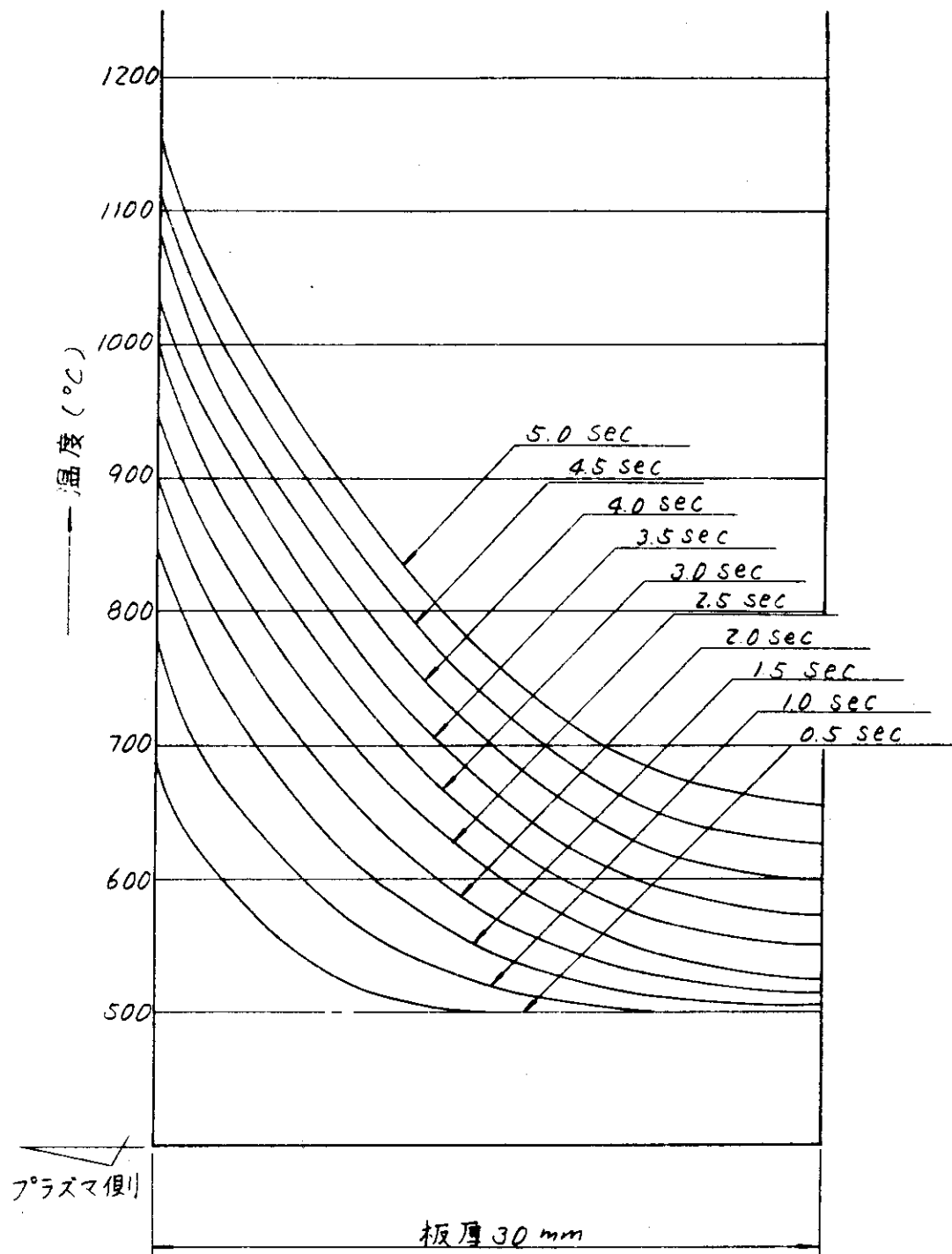
第 4.28 図 リミタ

さは、内周リミタが約 5.5 m，外周リミタはポート部分が多いので短かく約 4.5 m，合計約 10 m である。したがって、第 4.28 図の例では、プラズマからの熱損失がリミタの 3.5% の部分に集中しても耐える設計となっている。第二段加熱のある場合には、余裕は小さくなるが十分に耐えることができる。

リミタの冷却は、ショット間の 10 分間に放射，熱伝導，ガス冷却，あるいは、これらの併用によって行う。ベーキング (500℃) のためには、ライナと同じくヒータをとりつける。

リミタにプラズマから 500 W/cm^2 の入熱があり、冷却は放射のみ，という厳しい条件での熱計算の結果を第 4.29 図に示す。この場合には、定格運転 10 発目 (1.5 時間後) にベース温度は 500℃ から 1300℃ まで上昇し、M₀ の再結晶温度を越えてしまう。また、リミタ内には、表面と内部で大きな温度差を生じ、材料内部で大きな圧縮応力 (熱衝撃応力) がショット毎にくり返し加わり、疲労が問題である。

固定リミタのほか、大周方向 2 ケ所には手動で位置を可変とする手動リミタを設ける。これは磁気リミタなしの非円形断面プラズマ実験を行う場合、あるいは磁気リミタを使用する場合にその補助として、楕円度に応じてプラズマ境界を規定するためである。手動リミタを使用する場合には、上記の熱入力手動リミタのみに集中するため、個数を増すか、1 個の寸法を大きくするなどの対策が必要である。手動リミタの可動範囲 (ストローク) は、予備設計では 20 cm としたが、平衡計算の結果によっては、これよりも可動範囲を拡げることも検討する。



第 4.29 図 リミタの熱計算結果

リミタは真空容器と電氣的に絶縁して電流導入端子を設け、接地法に自由度をもたせる。実験開始当初は適当な抵抗を介して接地することを予定している。

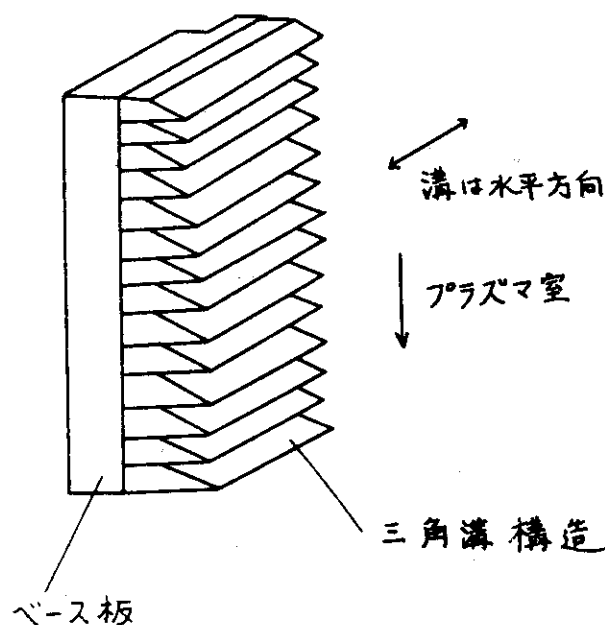
なお、リミタの材料もライナ材料と同じく更に検討を行う予定であり、特に手動リミタは材料交換が容易であるように設計する。¹¹⁾

4.4.3 粒子中性化板

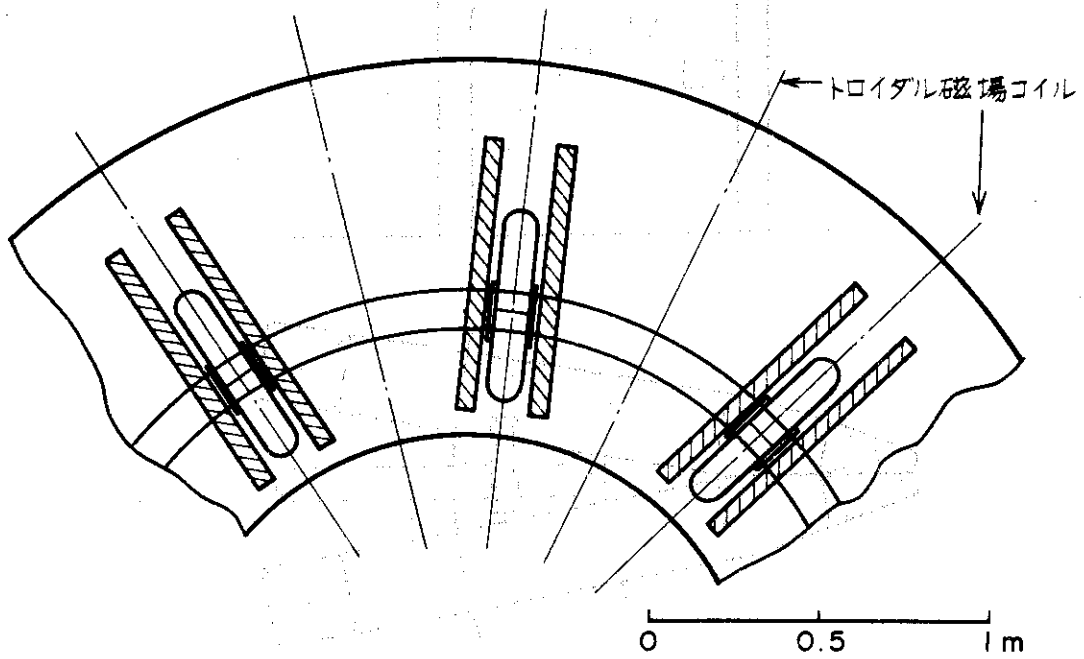
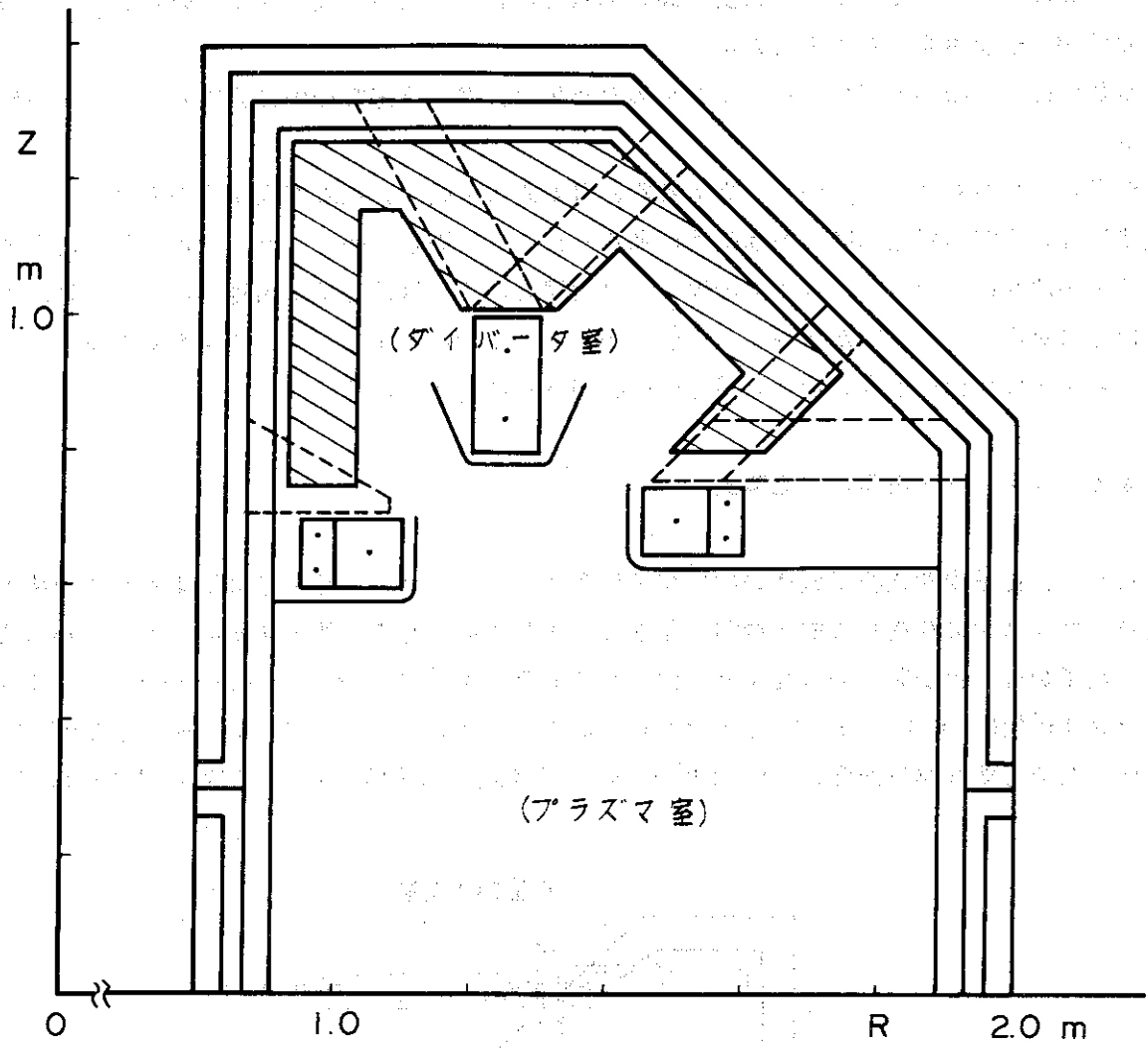
粒子中性化板という名称は、particle neutralizer plate の訳であり、ダイバータ付き装置に特有の部品である。その主な目的は、ダイバータ室に流入したプラズマ粒子を低エネルギーの中性粒子として反射し、あるいは吸着することである。粒子中性化板は流入する粒子流を衝突させるため、セパトリックス磁気面付近の磁力線と交叉するように設置される。

トカマク型装置で軸対称ダイバータを付加したPDX, ASDEXでは、粒子中性化板とプラズマ粒子の衝突でたたき出される不純物粒子が直接プラズマに戻ることを防ぐために、プラズマ空間を見込まない部分に軸対称形状の粒子中性化板を設けている。JT-4では、第3章第3.10図に示すように、特にプラズマ電流密度分布が中心付近に集中している場合には、セパトリックス磁気面が上下で拡がり、プラズマを見込まない影の部分に入らないことが予想される。このため、予備設計では第4.30図に示すように大周方向に数個所の粒子中性化板を設け、¹²⁾ その表面を第4.31図のような三角溝として逆流粒子を減らすものとした。この形状は、粒子の衝突によってたたき出される粒子の角度分布は、入射粒子の入射角によらず面の法線方向に最も強いこと、また金属粒子は一回面に衝突すればほとんど吸着されてしまうこと、という2つの性質を利用して、少くも金属粒子に対しては逆流をかなり減らすことができると考えられる。また、第4.30図に示した配置は、ダイバータ室内に中性粒子を排気する高速排気装置の設置空間を設け、かつ、粒子中性化板の表面で生じた中性粒子が高速排気装置に達する移動性(コンダクタンス)を高くするために適した配置である。粒子中性化板はまた、ダイバータ・コイル(特にD1コイル)の支持構造をプラズマ粒子の衝撃から保護する役割も果たす。

プラズマが磁気リミタ配位をとっているときには、プラズマから流出する粒子の大部分は粒子中性化板に当り、粒子中性化板は通常のリミタと同様の状況におかれる。したがって、粒子



第4.31図 粒子中性化板の表面構造



第 4.30 図 粒子中性化板の配置

中性化板は、スパタ比の小さい材質で高い熱入力に耐えるように設計する必要があり、予備設計では M₀ を使用することとした。

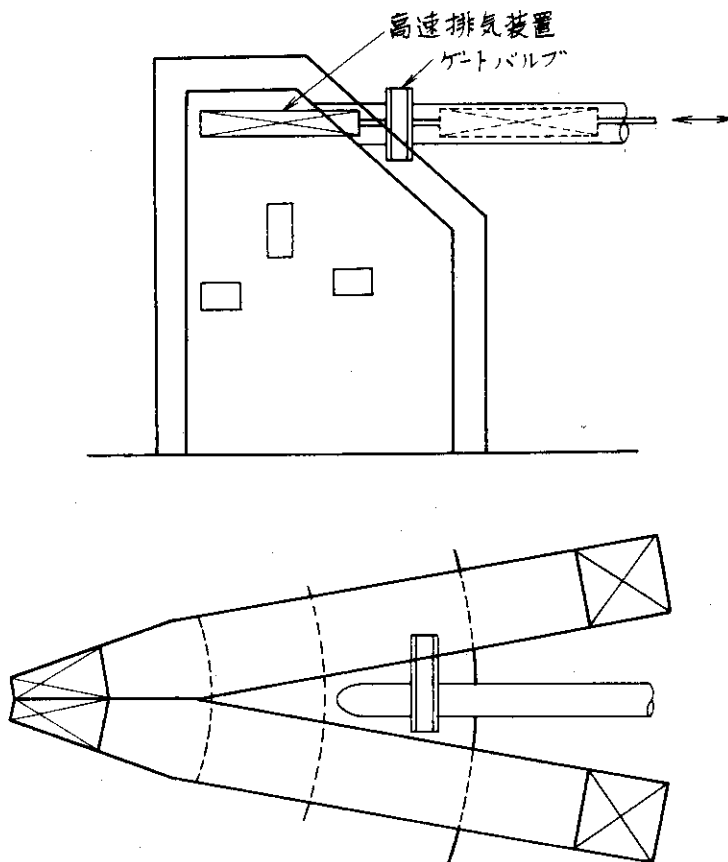
冷却にはガス冷却を用い、ベーキングのためには、ガス冷却管の中に設置したヒータを使用する。

粒子中性化板もリミタと同じく真空容器と電氣的に絶縁し、電流導入端子を設ける。また、支持には、真空容器との間に熱膨脹差があるため、一点固定、他はスライド可能な支持とする。

粒子中性化板に当るプラズマ流の幅および大周方向の一樣性は予想困難であるが、熱入力有一部分に集中すると材料が溶解する可能性がある。この点に関しては、3.4.6でも述べたように、粒子中性化板の配置、形状、構造の検討がさらに必要である。

4.4.4 ダイバータ用高速排気装置

これは、粒子中性化板で低速の中性粒子に変えられたプラズマ粒子を排気するための装置であり、プラズマの存在する約4秒間に非常に大きな排気速度を必要とする。プラズマから流出する粒子数は、粒子閉込め時間を0.2秒として約 5×10^{20} 個/秒 = 15 Torr・ℓ/s, 4秒間で 2×10^{21} 個 = 60 Torr・ℓ と予想される。これだけの粒子束に対して、圧力を 10^{-4} Torr に保つため必要な排気速度、 1.5×10^5 ℓ/s を予備設計の仕様とした。実際には1桁ほど大き



第 4.3.2 図 高速排気装置の設置法

な排気速度が望ましいが、現実的ではないと考えたため、これより大きな排気速度に関しては検討事項として残したものである。 $1.5 \times 10^5 \text{ l/s}$ の排気速度を得るためのポンプとしては、小型で排気速度が大きく、真空容器内を汚さず、¹³⁾交換・保守の容易なものとして、SORBAC¹⁴⁾を候補とした。予備設計では、SORBACの運転に関しては検討事項としなかったが、吸蔵性の排気装置を使用する場合には、再活性化および交換を検討する必要がある。このため、実機においては、第4.3.2図に示すように、真空容器全体の真空を破らずにブロック毎の再活性化、交換を可能とする方法を検討する。さらに、高速排気装置として、SORBAC以外の案も更に検討する。

また、第3章で述べたように、プラズマ室への逆流粒子の割合は、ダイバータ室入口スリットのコンダクタンスと高速排気装置の排気速度との比によって決る。スリットのコンダクタンスは、スリットの幅を5 cm、奥行きを10 cmとして2ヶ所で約 $2.5 \times 10^5 \text{ l/s}$ （常温、水素）である。逆流粒子を減らすためには、スリット幅を狭くするか、排気速度を大きくする必要があり、この点に関しても検討の余地がある。

4.4.5 その他の真空容器内蔵部品および今後の検討事項

真空容器内には、以上の他にダイバータ・コイルが設置され、また、真空排気装置が接続されるが、これらに関しては別項4.5および4.6において述べる。

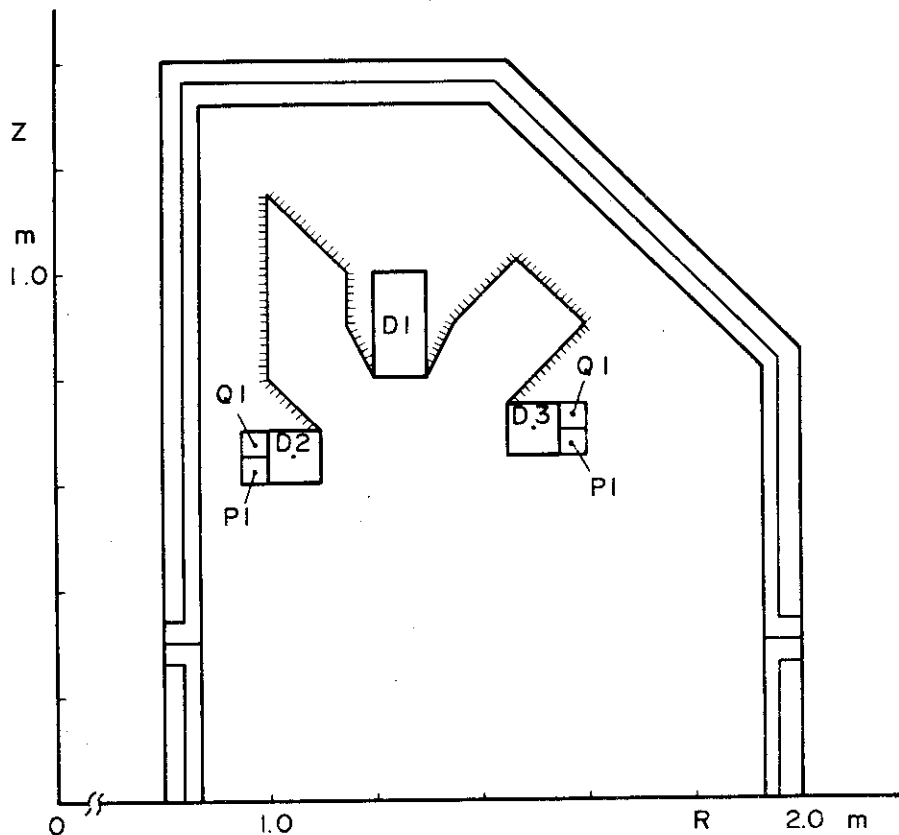
今後の検討事項としては、いままでに述べたもの以外に、ダイバータ室内の構造（ダイバータ室のライナは不要？、粒子中性化板を軸対称にする？など）、真空容器のポートおよびゲート・バルブ（計測などに関連する）、プラズマ制御に関連した事項（誘導電流の分布、シェル効果、安定化のためにシェルを設ける？など）がある。

4.5 ダイバータ・コイル

ダイバータ・コイルは、磁気リミタ（ダイバータ）付きのプラズマ断面形状を形成するために真空容器内に設置するポロイダル磁場コイルである。その電磁気的性能については第4.8節において述べる。ダイバータ室の容積を広くするため、またセパトリックス磁気面付近の磁力線と交叉しないように、支持構造も含めて断面形状をできる限り小さくし、しかも、大きな電磁力に耐え、また、コイル導体、被覆管、真空容器の3者間の熱膨脹差に耐える必要があるため、設計は相当困難である。予備設計の結果でも期待通りのものがなく、ここでは予備設計結果の各案の良い点を集め、また我々の改善案を加えて内容を記述する。

JT-4のダイバータ・コイルは第4.3.3図のように、磁気リミター付きの平衡を形成するためのDコイル（通常の意味では、これだけをダイバータ・コイルと呼ぶ）の他に、位置制御コイル（Cコイル、ダイバータ・コイル内に設置したものはCDコイルと呼ぶことにする。）と四重極磁場コイル（Qコイル、同じくQDコイルと呼ぶ。）の2コイルを同一の真空被覆管の中に収めてあり、必要な場合には被覆管全体をDVコイルと呼び分けることにする。

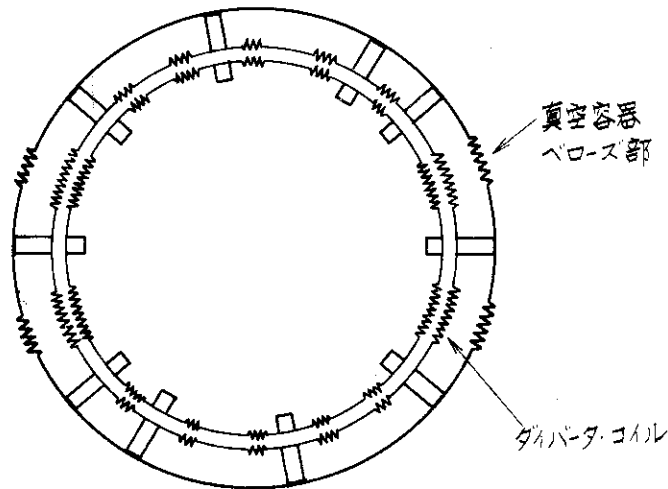
コイルは、電磁力のうちフープ力を導体自身の強度で支持するために、また接合部の誤差磁場を避けるために、一周構造とすることがよい。真空容器内に組込むためには、4.3で述べたように真空容器を上下に分割する。ただし、ベローズ区間は上下分割できないので、厚肉部を



第4.3.3図 ダイバータ・コイル断面図

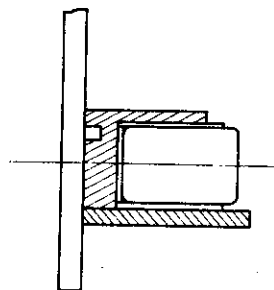
(影付線は、支持構造などの許容領域を示す。)

リップで溶接接合する前に、あるいは溶接後に真空容器内に人が入って、ダイバータ・コイルの導体および被覆管を接続する。一度接続すれば、内部改修時にもDVコイルを分割する必要はなく、厚肉部の一部を開けて作業することができる。コイルの被覆管には第4.3.4図に示すように多数のベローズ部分を設け、被覆管が内部の導体にしがたって動けるようにし、導体と被覆管との熱膨脹差の問題を解決する。断面の熱膨脹は、導体、絶縁材、被覆管の弾性で逃げるができるであろう。ベローズのうち、真空容器のベローズ区間と同位置の4ヶ所は一周抵抗を得るためであり、厚さ0.2mmのインコネル625の板を用いた溶接ベローズ（高さ10mm、ピッチ4.2mm、長さ150mm）で、1ヶ当たり16mΩである。真空容器のベローズ区間（4mΩ）と、上下6本のダイバータ・コイルのベローズにより、全体としての一周抵抗は2.9mΩとなる。なお、ダイバータ・コイル被覆管の一周抵抗（絶縁）をとるために、ベローズを介してセラミック・リングを入れることも検討されたが、ベローズのみの場合に比べて技術的困難が増す割に利点が少ない。



第4.3.4図 ダイバータ・コイル全体図

被覆管は内部の水冷された導体にしがたって膨脹収縮し、一方、真空容器は200℃にベーキングされるため、支持構造と被覆管は互にR方向にスライドできる構造とする。（第4.3.5図）スライド面にはSUS同志は使えず、窒化処理など真空特性のよい滑り面を使用する。



第4.3.5図

ダイバータ・コイル
支持構造

コイル接続部の構造は第4.3.6図に示す案がある。

ダイバータ・コイルに加わる電磁力は、他のPコイル電流およびプラズマ電流との相互作用によるものが強く、第4.1表の通りである。フープ力はコイルの導体自身で耐えられる。また、給電線として第4.3.7図のものをとると、その誤差磁場および給電線に働く電磁力は第4.3.8図、第4.3.9図の通りになる。第4.3.8図は、プラズマ空間を表わす7点（第4.3.7図のA～Fと0点、E、FはC、Bと上下対称位置）における誤差磁場の値であり、 B_M 、 \bar{B} は誤差磁場の最大値と7点の平均値、 b_M 、 \bar{b} は誤差磁場の子午面内成分の最大値と7点の平均値である。半周型ダイバータ・コイルを用いた場合の誤差磁場の検討は、6.4に述べる。

第4.4.0図に示す構造で、2m/sの水冷を行った場合の温度分布計算例を第4.4.1図に示す。500℃ベーキングをしている時に冷却水が停止すると、ダイバータ・コイルの絶縁材などが直ちに破損するため、故障対策、インタロックの検討においてはダイバータ・コイルの冷却水系には十分な配慮を行うことが必要である。

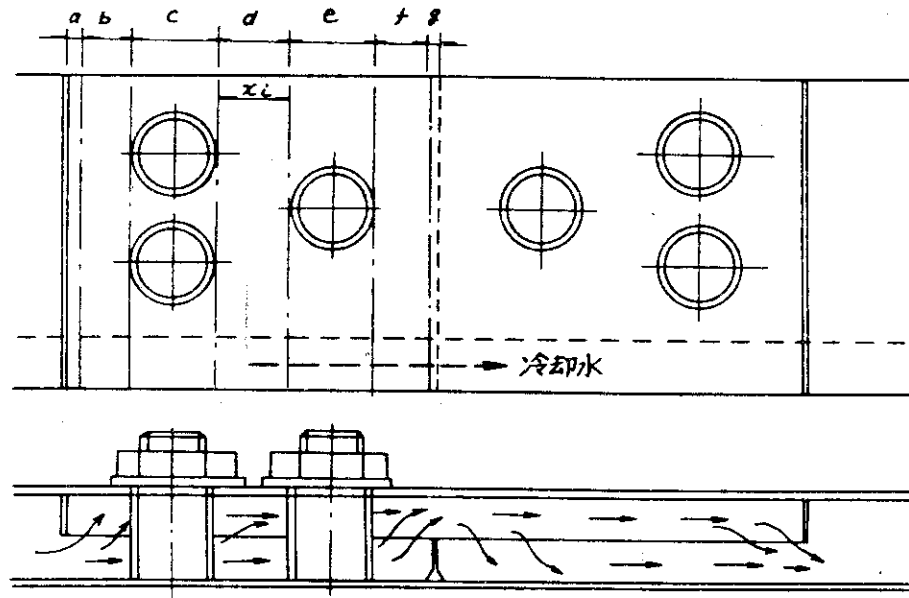
第4.1表 ダイバータ・コイルに作用する電磁力

D ₁ コイルに働く電磁力		
電磁力の方向	電磁力の大きさ	電磁力発生条件
+ Z	60.7 ton	S・D; 100%, PL: 0%
- Z	21.8	D, PL; 100%, S: 0%
+ R	44.5	D, PL; 100%, S: 0% その他のポロイダル磁場コイル; 100%
- R	26.2	D, S; 100%, PL: 0% その他のポロイダル磁場コイル; -100%

(記号) PL: プラズマ電流, S: 形状コイル電流

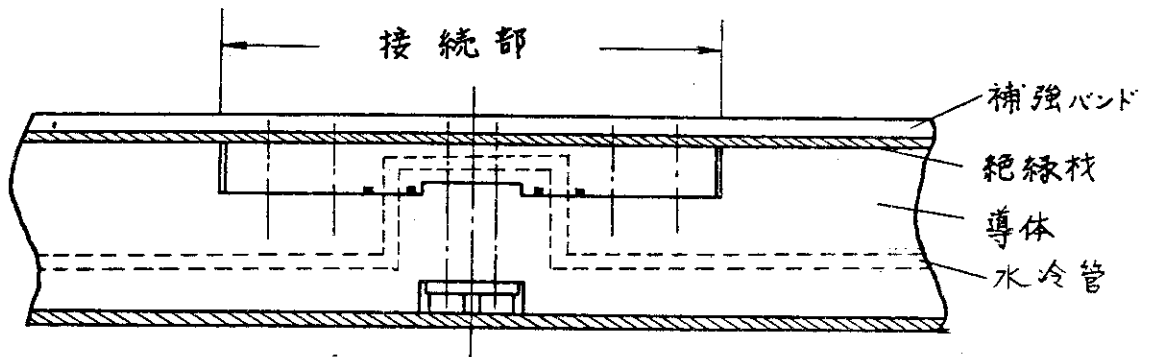
D: ダイバータ・コイル電流

電流の方向は、プラズマ電流の方向を正とし、負号は逆方向電流を示す。



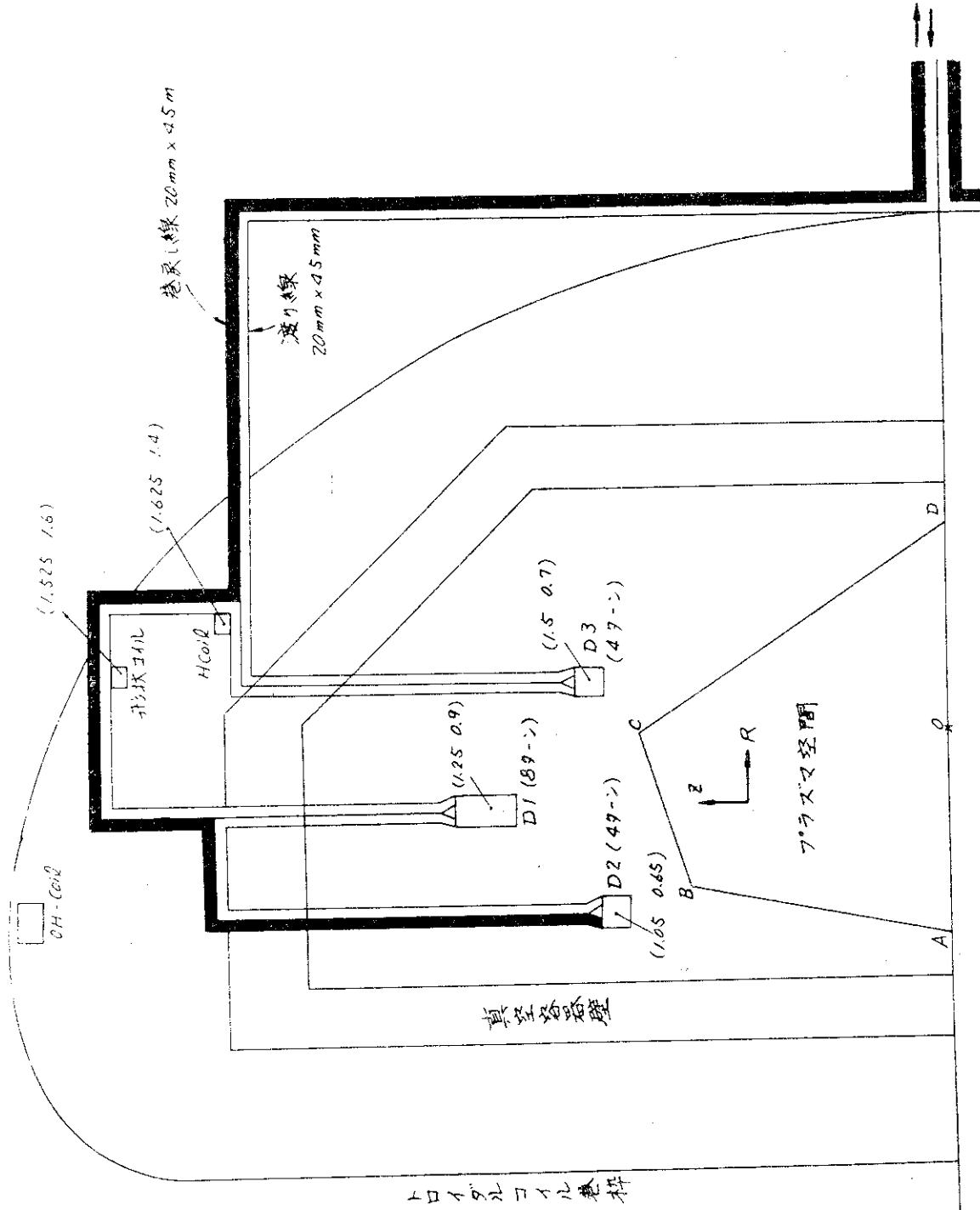
注) 矢印は電流の流れを示す。

(a)

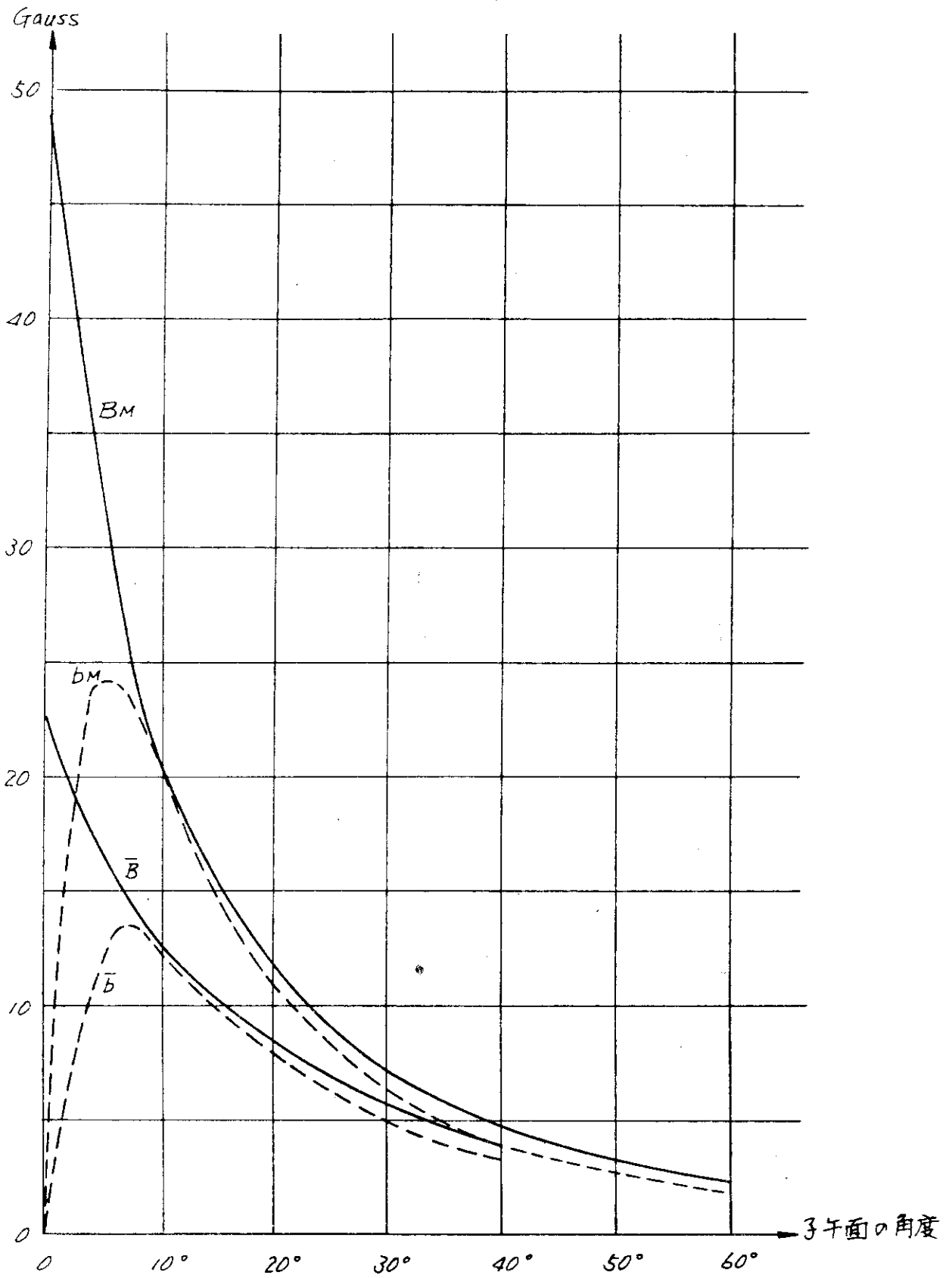


(b)

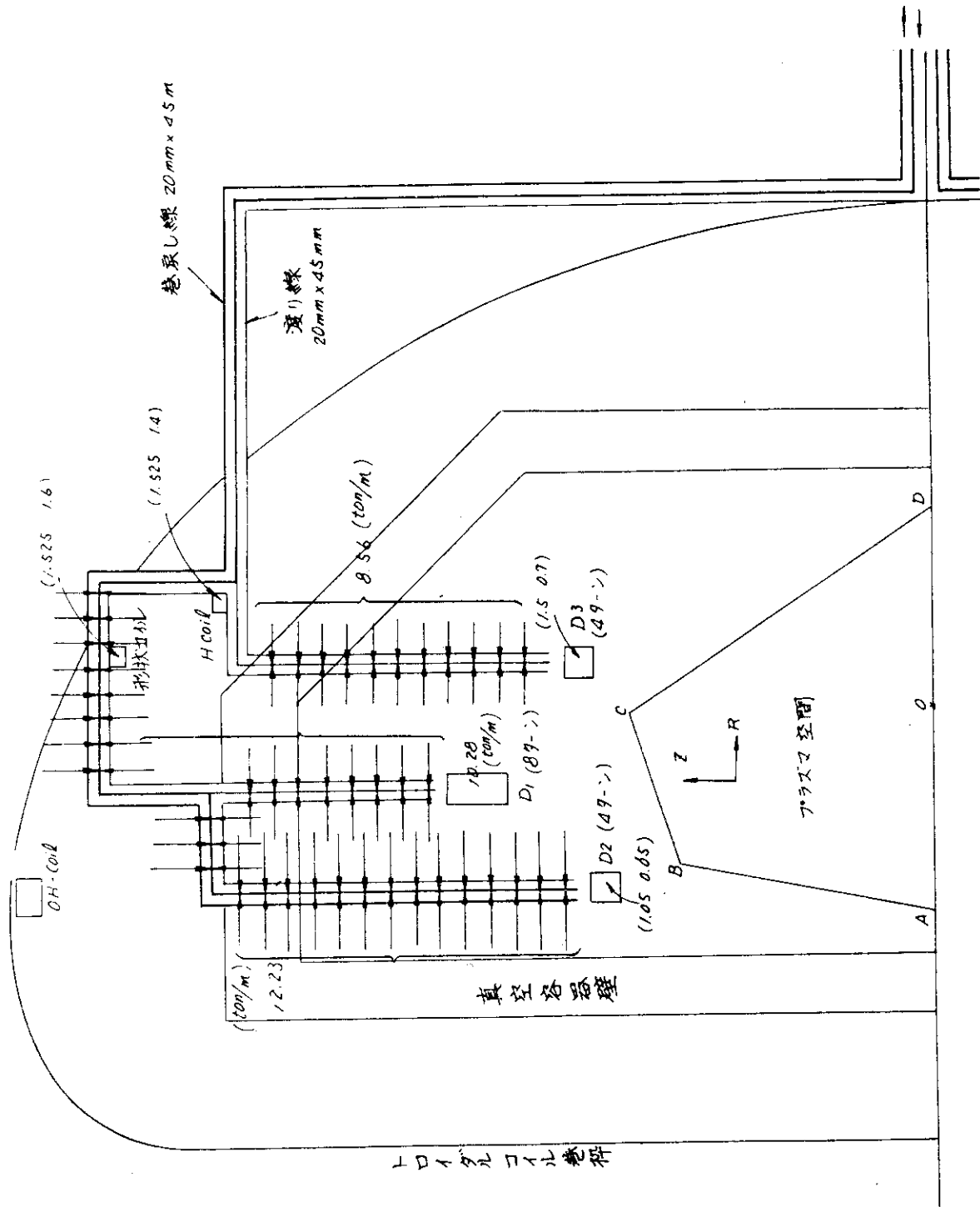
第 4.3.6 図 ダイバータ・コイル接続部構造



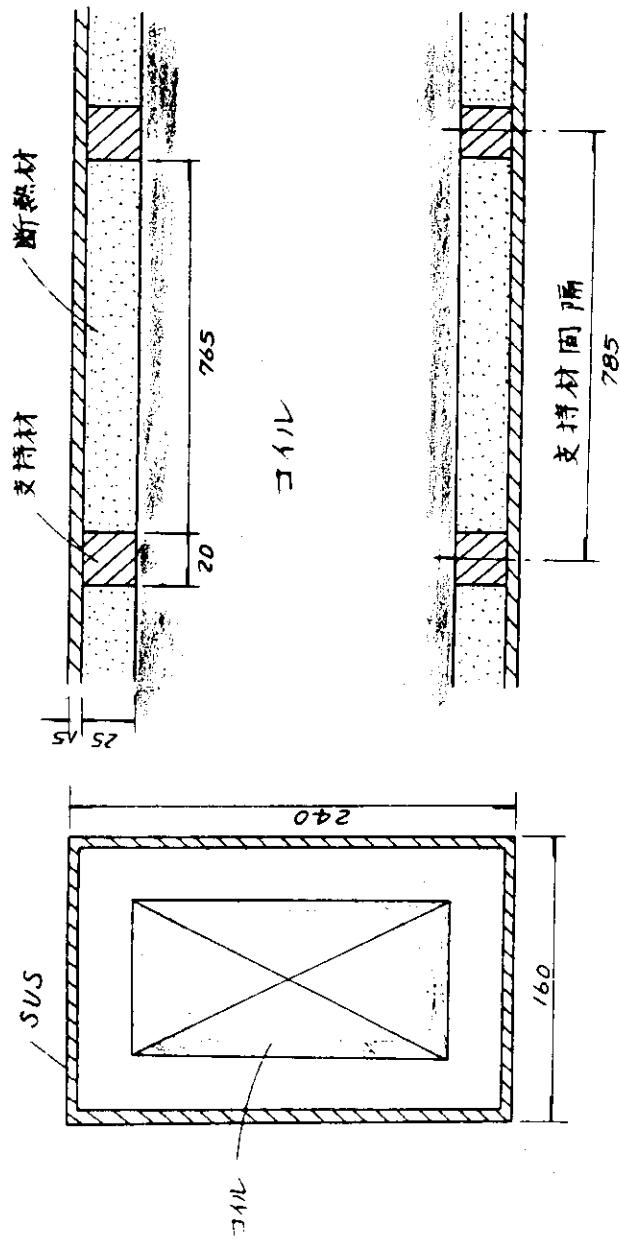
第 4.37 図 ダイバータ・コイル給電線



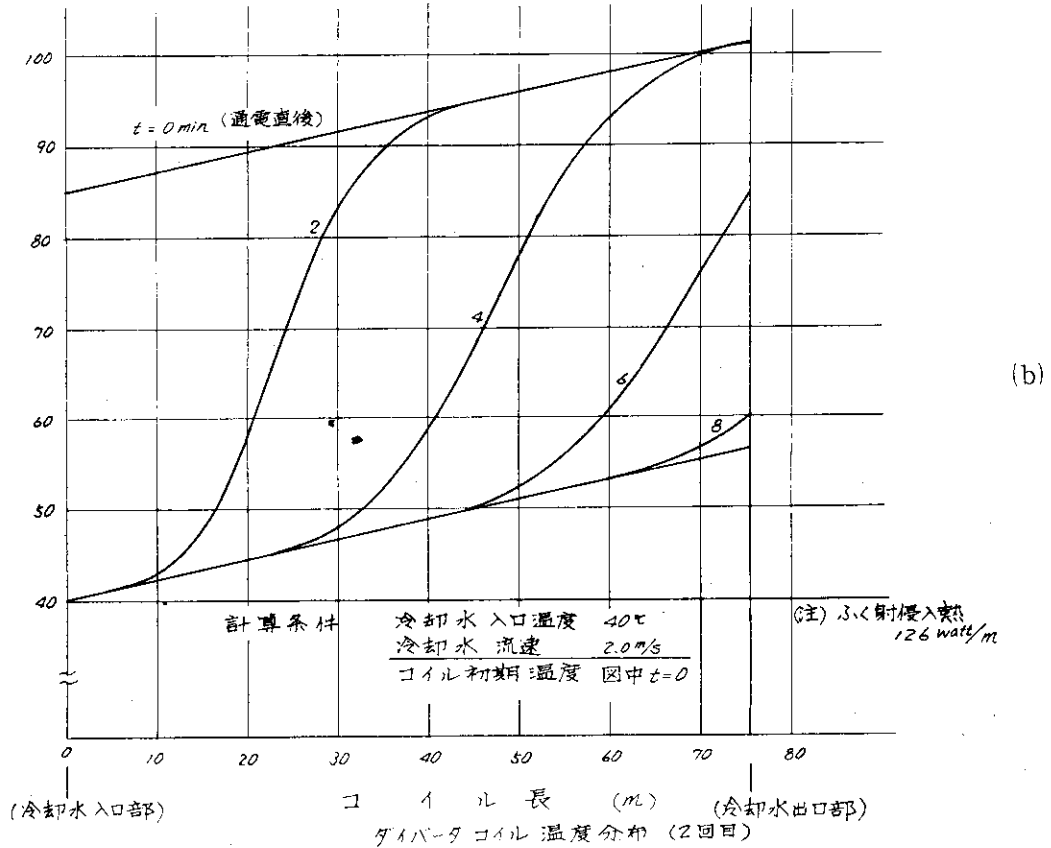
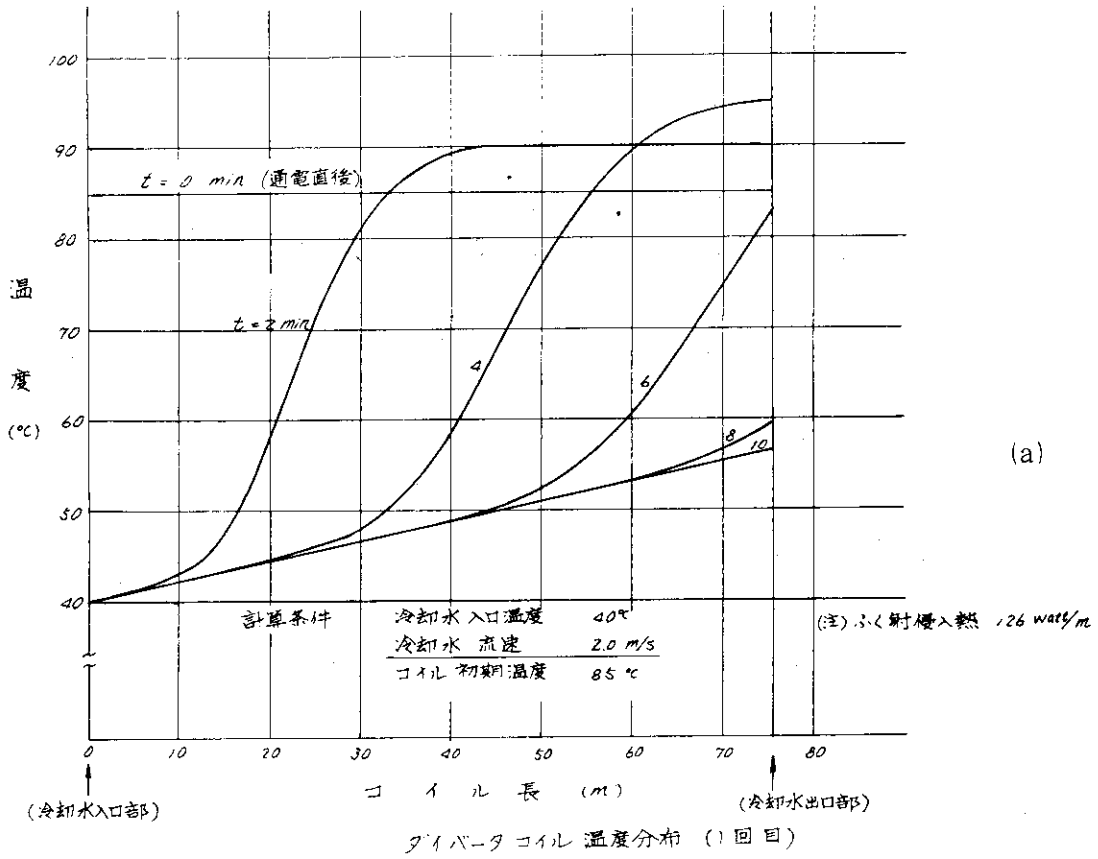
第 4.38 図 給電線による誤差磁場



第 4.3.9 図 給電線に働く電磁力



第4.4.0図 ダイバータ・コイル構造



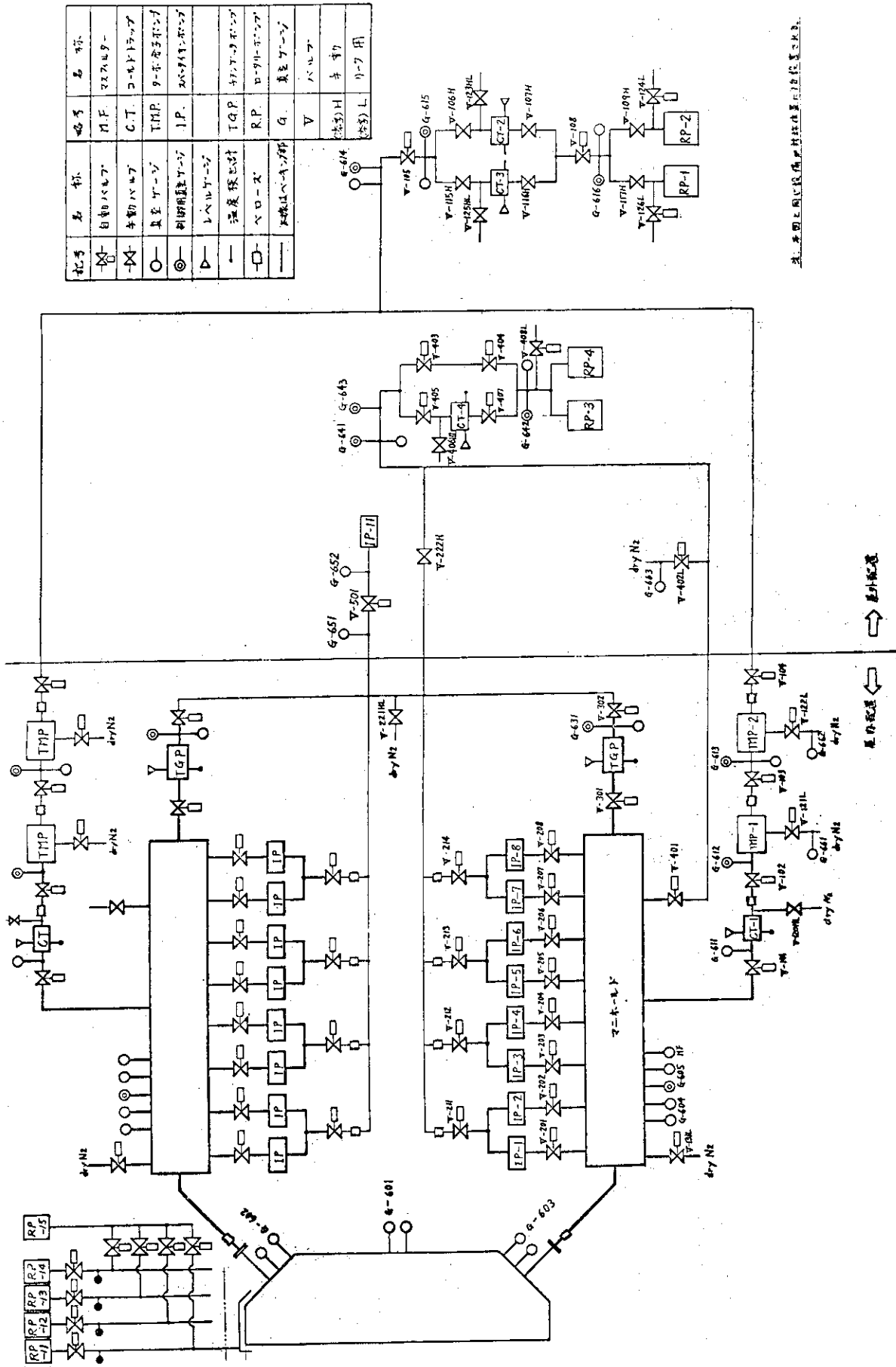
第 4.4.1 図 ダイバータ・コイルの温度分布計算例

4.6 真空排気設備

真空排気設備は、真空容器のTMポートに接続され、各種排気装置等の設置されるマニホールは真空容器と電氣的に絶縁する。真空排気設備の構成は、ベローズ、配管、絶縁フランジ、マニホール、および各種排気装置と真空測定器である。高真空側の主排気装置はターボ・モレキュラー・ポンプ(TMP)であり、他に保守用のイオン・ポンプを設ける。TMPは直列2段に使用する。排気速度の予備設計仕様は、TMポートにおいて1000ℓ/s以上のもの4系列、合計4000ℓ/s以上である。保守用ポンプの排気速度は特に指定しなかったが、1000ℓ/sのもの2系列程度が適当であろう。排気系は、保守および信頼性向上のために、すべて多重系とした。すなわち、2系列の低真空側排気系を設け、各々に2系列の高真空側排気装置を接続する。こうすることによって、高真空排気運転を行った状態で排気装置の保守、特にトラップのベーキングを系列毎に部分的に行うことが可能となる。TMPの他に、炭化水素のガスを排気するための排気装置、例えばチタンゲッター・ポンプ、クライオ・ポンプなどを併用することも検討する。なお、ベローズ部分の2重真空は、ベローズ両側の圧力差が過大とならないように自動調整しながら別個のロータリ・ポンプで排気する。ベローズは事故時を考慮して、1気圧に耐える設計であり、排気過程で生じる圧力差にも耐える。

真空排気設備の設計例を第4.4.2図、第4.4.3図に示す。この例は、真空条件を高める観点から理想的な設計であり、今後コストを下げるための最適化の検討を加える予定である。

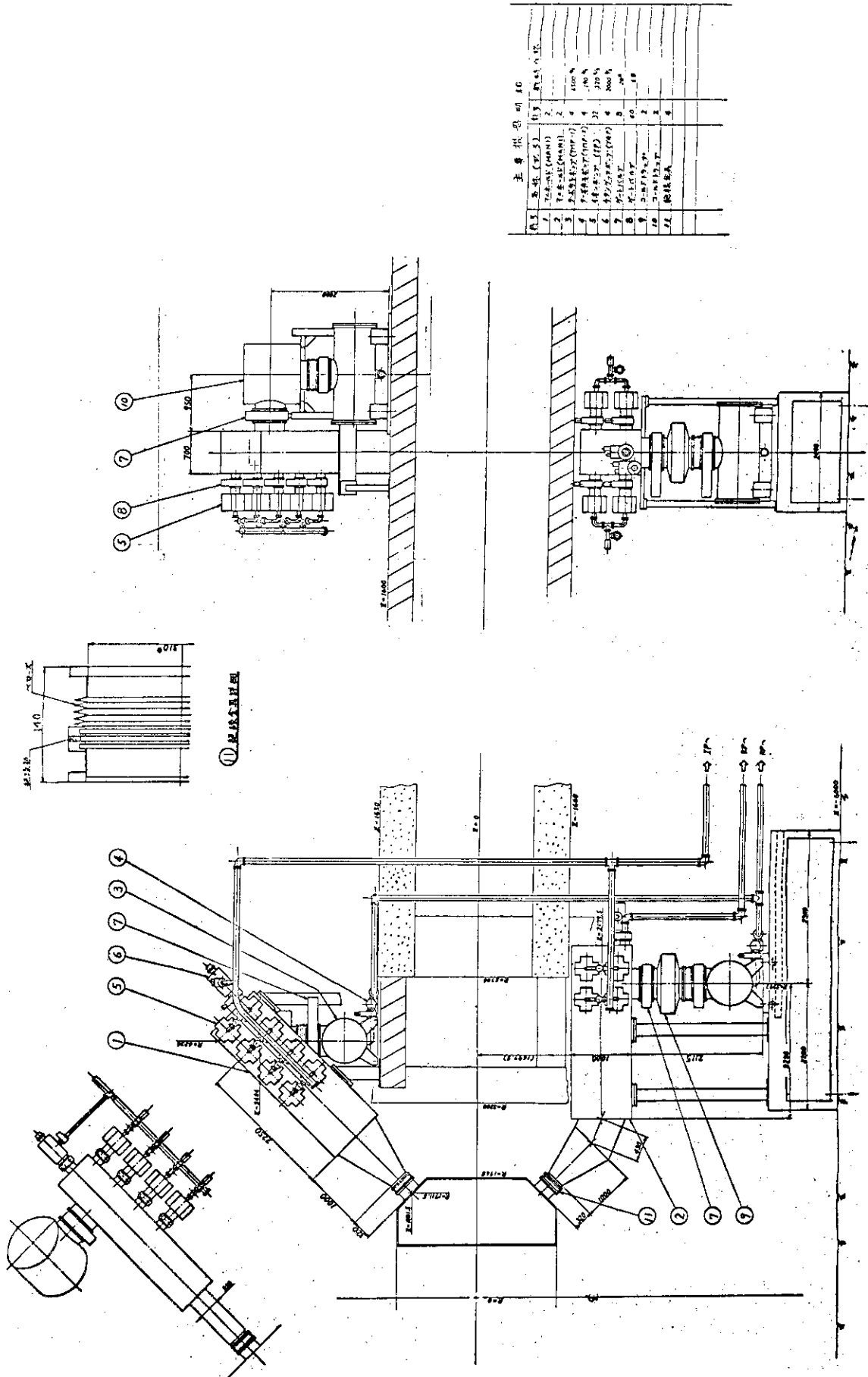
構成部品の中で、ベーキング可能な金属パッキングを用いたゲート・バルブは口径200mm以上のものは入手できず、今後開発するか、あるいは小口径ゲート・バルブを並列に使用する必要がある。また、実機製作時には、真空容器組立て時のリーク・テスト用にもう1系列の真空排気装置が必要である。この排気装置は、測定器等の組込み前試験のためのテスト・チャンバーの排気装置としても使用できる。



記号	名称	番号	名称
○	自動バルブ	115	真空バルブ
△	手動バルブ	116	真空バルブ
○	真空バルブ	117	真空バルブ
◎	制御用真空バルブ	118	真空バルブ
▷	バルブ	119	真空バルブ
—	温度検出計	120	真空バルブ
□	バルブ	121	真空バルブ
—	乾燥配管	122	真空バルブ
—	湿気配管	123	真空バルブ

乾燥配管は真空バルブを付設し、湿気配管は真空バルブを付設しない。

第 4.2 図 真空排気設備設計例



主要機器明細表

品名	仕様	数量	単位
1. 弁組 (弁組)		2	個
2. 弁組 (弁組)		4	個
3. 弁組 (弁組)		2	個
4. 弁組 (弁組)		2	個
5. 弁組 (弁組)		2	個
6. 弁組 (弁組)		2	個
7. 弁組 (弁組)		2	個
8. 弁組 (弁組)		2	個
9. 弁組 (弁組)		2	個
10. 弁組 (弁組)		2	個
11. 弁組 (弁組)		2	個

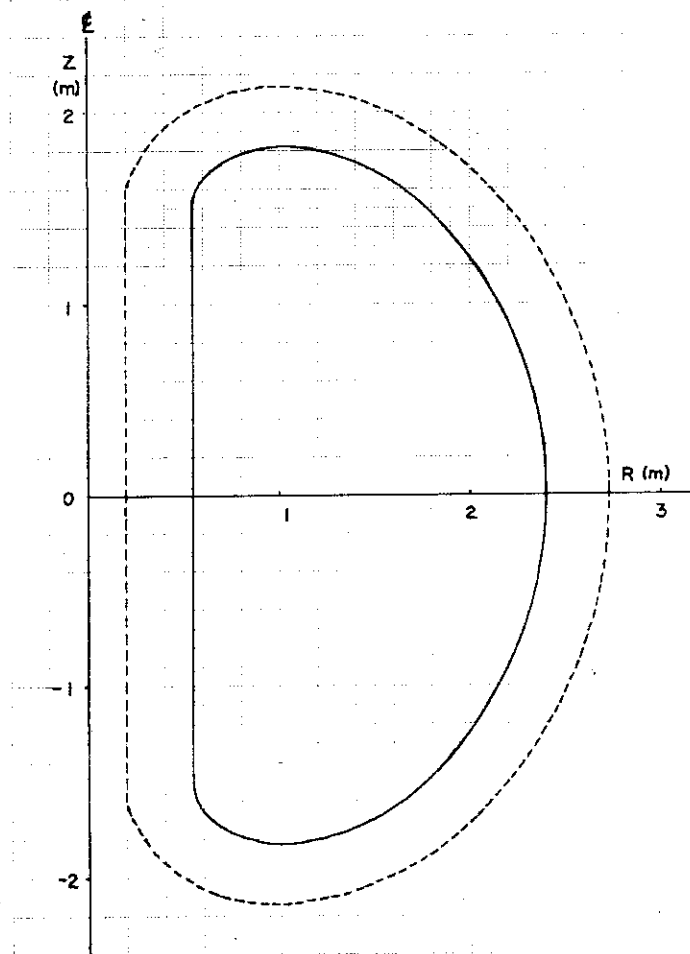
第 4.4.3 図 真空排気設備の配置例

4.7 トロイダル磁場コイル (Tコイル)

4.7.1 概 説

J T-4 の T コイルは、その中に入る真空容器の断面形状が縦長であるため、装置のアスペクト比を大きくし、また所要電力を小さく (抵抗又は周長を小さく) するために、縦長の非円形とする。一方、constant tension 型の T コイルが縦長 D 形であり、J T-4 の T コイル形状としては、第 4.4.4 図に示す形状を採用した¹⁵⁾

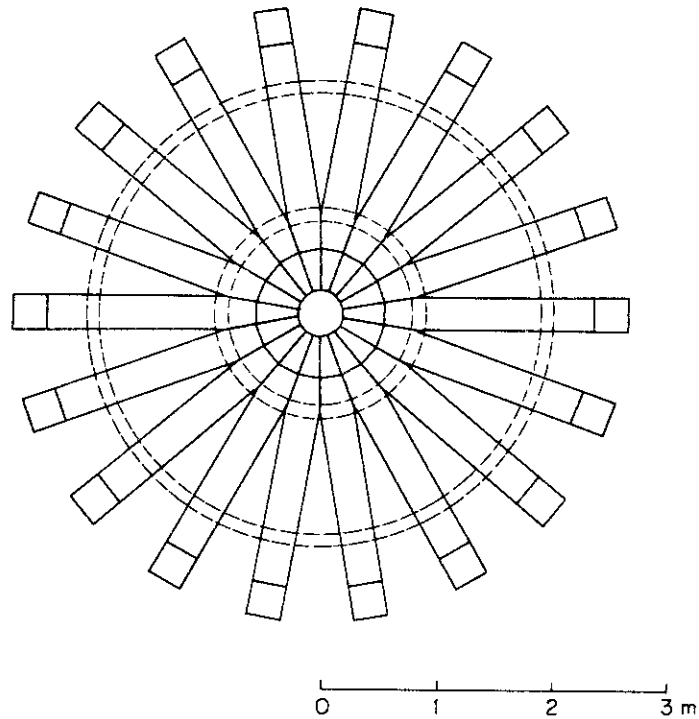
また、4.1 にも述べたように、装置の組立てのために、T コイルは上下 2 分割可能なものとし、分割した状態では真空容器および各種 P コイルを分解せずに外にとり出せることを仕様とした。T コイルを分割可能とすることは、J T-4 の柔軟性、信頼性を高める¹⁶⁾ 点で特徴的な事項であり、T コイルの設計は J T-4 の設計全体の中でも重要なポイントである。



第 4.4.4 図 T コイル形状

内側の制限曲線は、次の 1 直線と 7 円弧の囲む外に凸な閉曲線である。

- 1) 直線 $R = 0.55$, 2) 円: 中心 $(0.8, \pm 1.5)$, 半径 0.25 ,
- 3) 円: 中心 $(1.0, \pm 1.23)$, 半径 0.59 , 4) 円: 中心 $(0.95,$
- $\pm 0.63)$, 半径 1.2 , 5) 円: 中心 $(0.3, 0.0)$, 半径 2.1



第 4.4.5 図 T コイル上面図

4.7.2 電磁気的特性

T コイルは、合計 $21\text{MAT}^{17)}$ の起磁力によって、主半径 1.4 m の位置で 30 kG のトロイダル磁場を発生する。コイルの中心部形状は、平均電流密度が 25 A 以下（スペースファクタ $= 0.75$ のとき 33 A/mm^2 ）となるように決定した。磁場強度は強いほど科学的には好ましいが、上記の電流密度、接続部の温度上昇の概算と絶縁材の耐熱性を検討し、比例則の計算によって科学的に必要となる最低値 30 kG に決定した。T コイルの個数は、トロイダル磁場の空間的リップルが過大とならないように、かつ、測定などのためにコイル間の空間をできるだけ広くとるように検討し、 18 個と決定した。T コイルの直下における磁場分布を第 4.4.6 図に、磁場の空間的リップルを第 4.4.7 図に示す。

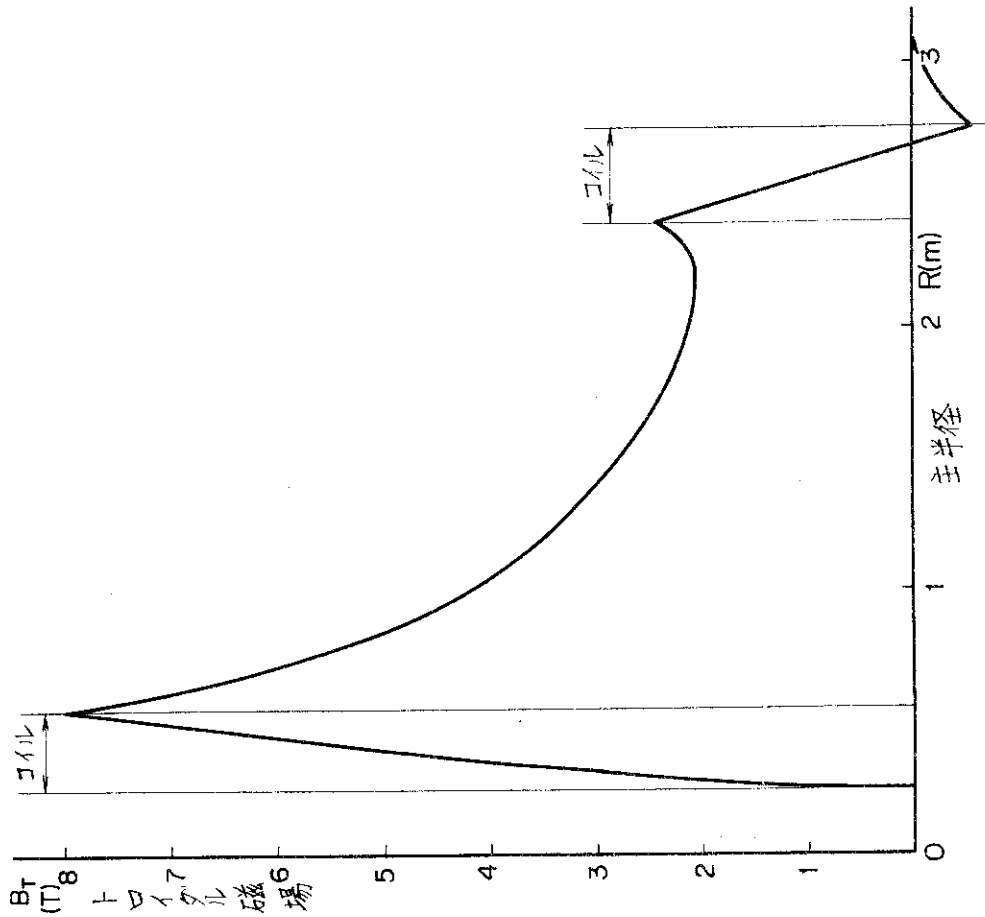
T コイルの通電時間はフラットトップ 5 秒である。

T コイルの導体（中心部）には、空心変流器コイル（OH コイル）磁束の変化によって渦電流が誘起される。したがって、T コイル導体が OH コイル磁束の動きを妨げ、また OH コイルの磁場分布を乱すことのないように、T コイルの巻数には下限を設ける必要がある。JT-4 では簡単なモデル計算¹⁸⁾ によって渦電流効果を検討の上で、T コイル巻数を各コイル 10 巻以上（T コイル全体で 180 ターン以上）とした。各コイル 10 巻の場合、OH コイル磁束による T コイル導体内渦電流の減衰時定数は約 9 ms である。（フラット巻き）予備設計では、1 個当たり 10 巻以上としか指定しなかったが、接続部の信頼性の点から、巻数は少ない方がよい。本報告では 1 個のコイルの巻数を 10 として、検討の結果を述べる。

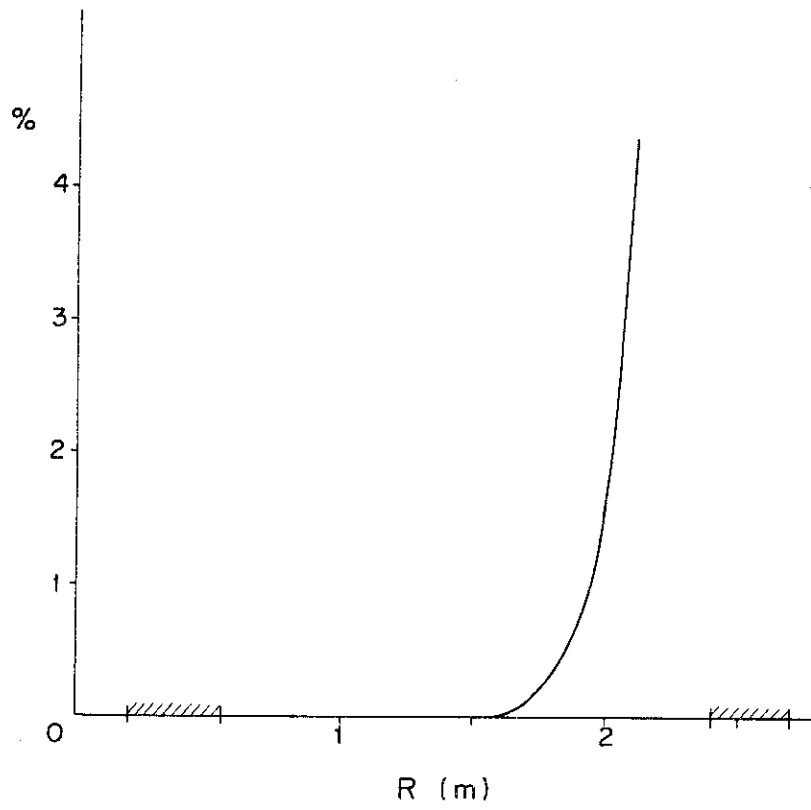
第 4.2 表に JT-4 のトロイダル磁場コイルの諸定数を示す。

第 4.2 表 トロイダル磁場コイル定数表

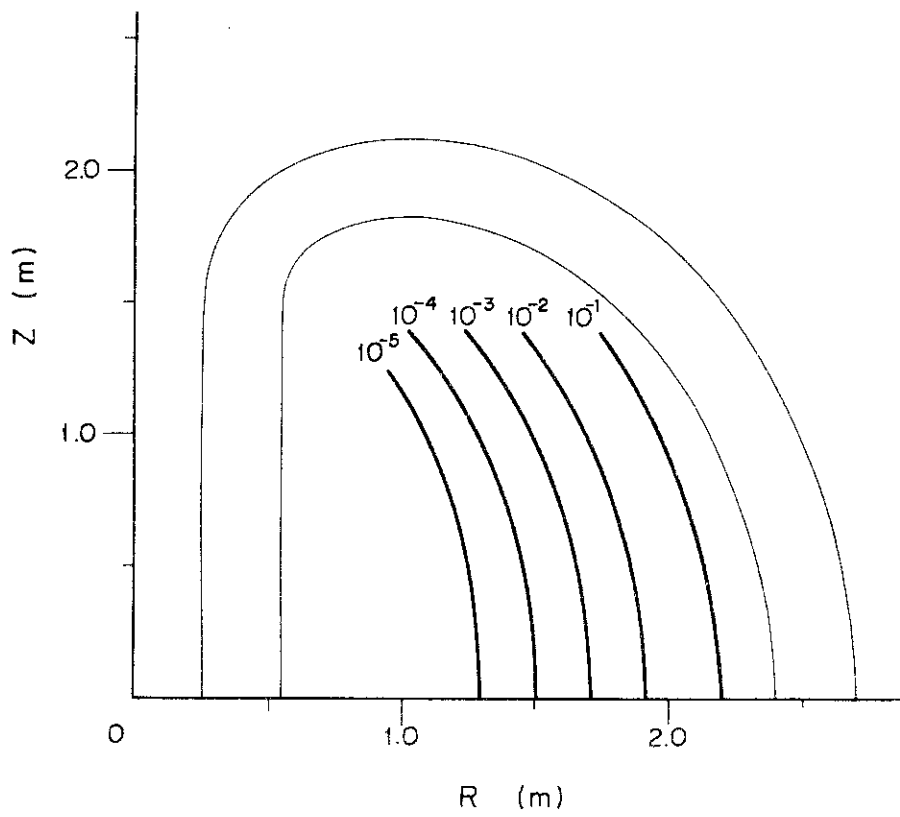
磁場強度 (R = 1.4 m)	30	KG
起磁力	21	MAT
個数	18	
巻数 (1 個当り)	10	
周長	約 10	m
中心部断面積	8250	cm ²
中心部平均電流密度	25	A/mm ²
中心部導体電流密度 (スペースファクタ・0.75)	33	A/mm ²
抵抗 (75 °C, 給電線なし)	8.2	mΩ
インダクタンス	45	mH
時定数	5.5	秒
蓄積エネルギー	306	MJ
フラットトップ電流	116.7	kA
" 電圧 (75 °C)	956.7	V
" 電力	111.6	MW
" ターン間電圧	53	V
" コイル間電圧	53	V
立上り時間 (フェーシング 160%)	5.4	秒
立上り中の必要エネルギー (同上)	252	MJ
スラットトップ中の消費エネルギー (")	558	MJ
1 回の通電で消費するエネルギー (")	810	MJ
等価矩形波時間中	7.3	秒



第 4.4 6 図 トロイダル磁場分布



(a) 中心面上分布



(b) 断面内分布

第 4.47 図 トロイダル磁場の空間的リップル分布

4.7.3 Tコイルの機械的設計

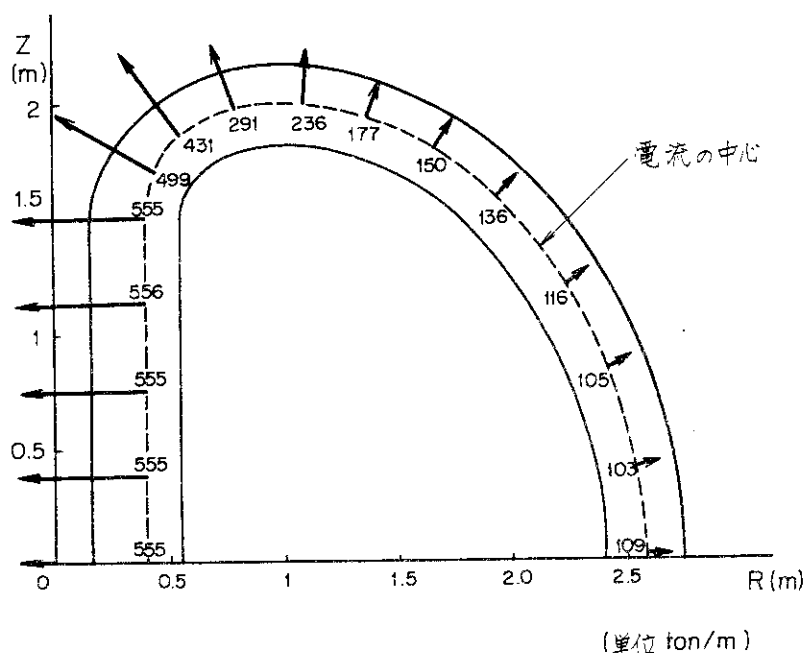
Tコイルの機械的設計は、前記のように導体断面積など概略の形状が与えられた上で、1) 加わる力の解析、2) 接続部構造の検討、3) コイル全体の支持構造の検討の順に行う。

1)には、電磁力、熱応力、地震力が含まれるが、電磁力以外は支持構造の設計によって決る要素が大きく、当初は電磁力のみの検討を行う。2)では、導体断面積、電流密度、局所的温度上昇、および応力分布を検討して最適な接続部を設計する。2)の検討によって接続部の強度が与えられた上で、3)においてTコイル全体の支持、架台の設計を行う。

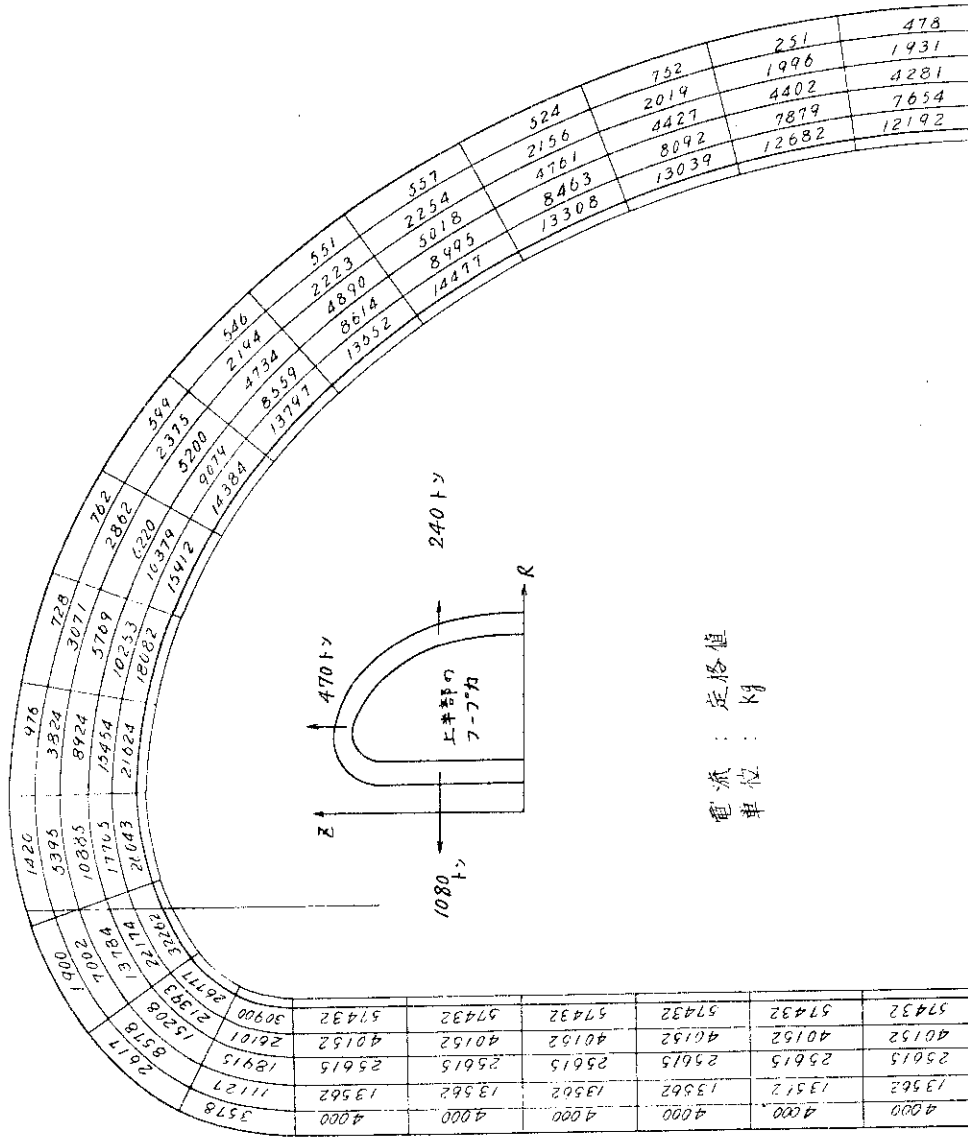
4.7.4 Tコイルに作用する電磁力

Tコイルに作用する電磁力は、1) トロイダル磁場による力、2) ポロイダル磁場による力、3) 事故時の力に分類される。

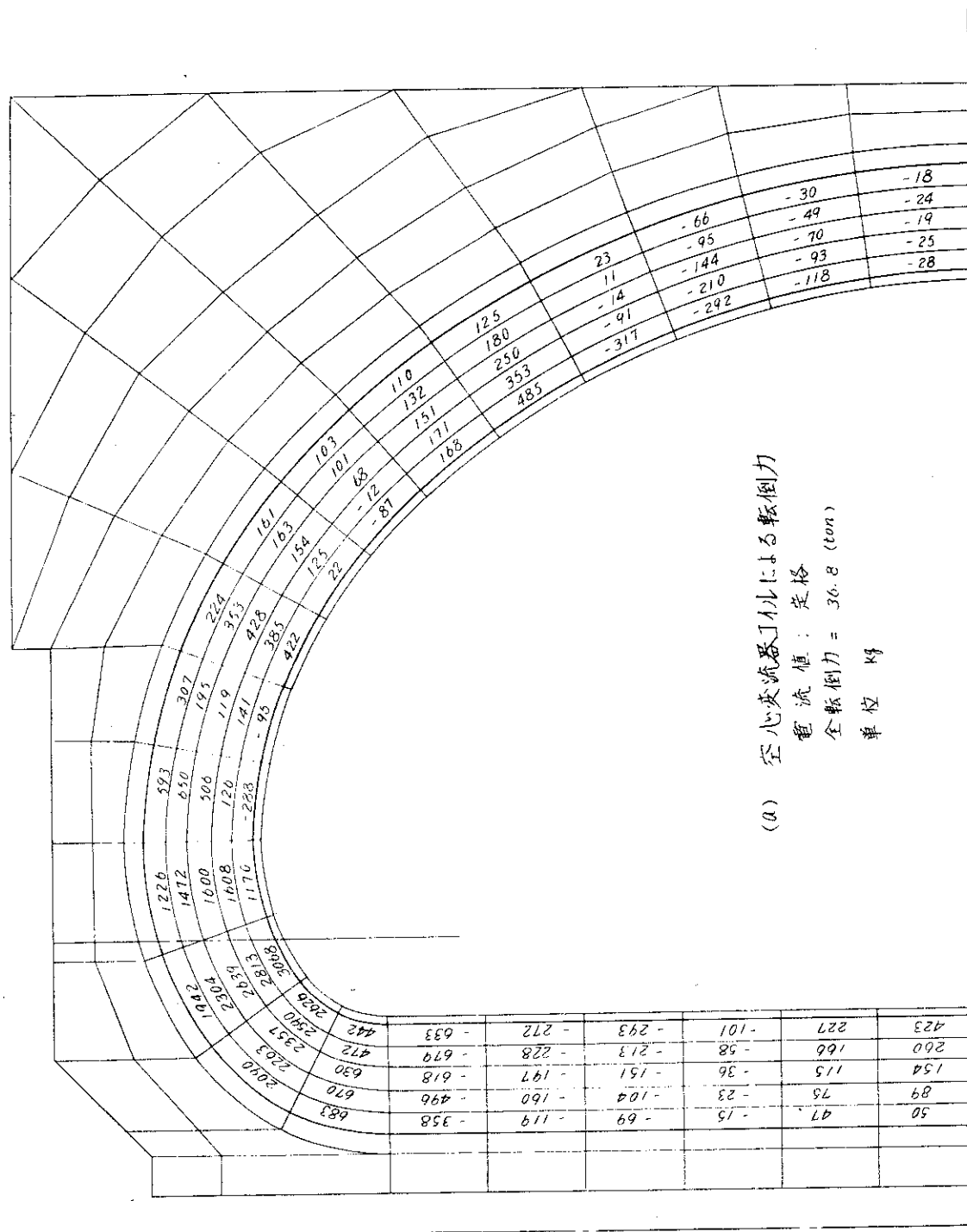
1)は、Tコイルを拡げるように働くフープ力であり、装置中心軸に向う向心力が強い。第4.48図、第4.49図に、1個のコイルの上半部分に働くフープ力を示す。2)は、各種Pコイル電流およびプラズマ電流の作る磁場との相互作用による力である。力の向きは、コイル面の垂直方向すなわちトロイダル方向であり、上部と下部で逆方向に、Tコイルを倒すように働く。(転倒力)この力の大きさは、第4.50図に示すように、空心変流器コイルによる力が最大であり、次にプラズマ電流による力が大きい。コイル電流の組合せで、最大の力が働くのは $t=0$ のとき、または円形プラズマを生成するとき(形状コイル case I)の放電終了直前($t=T_2$)のときであり、いずれもOHコイルに最大電流が流れている時である。前者の場合の電磁力分布を第4.51図に、後者を第4.52図に示す。すなわち、1個のコイルに働く最大転倒力



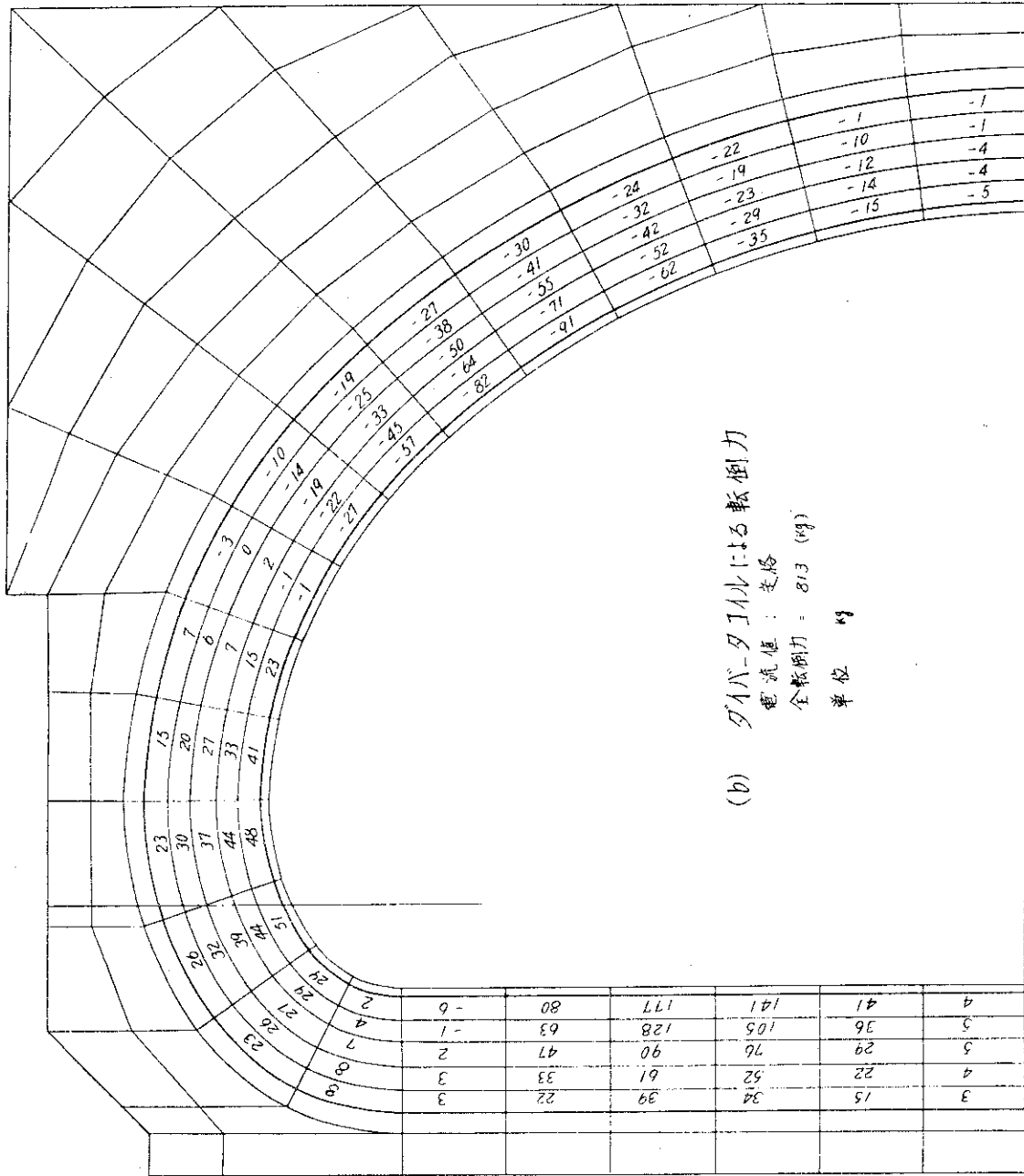
第4.48図 Tコイルに働くフープ力 I



第 4.49 図 T コイルに働くフープ力 II

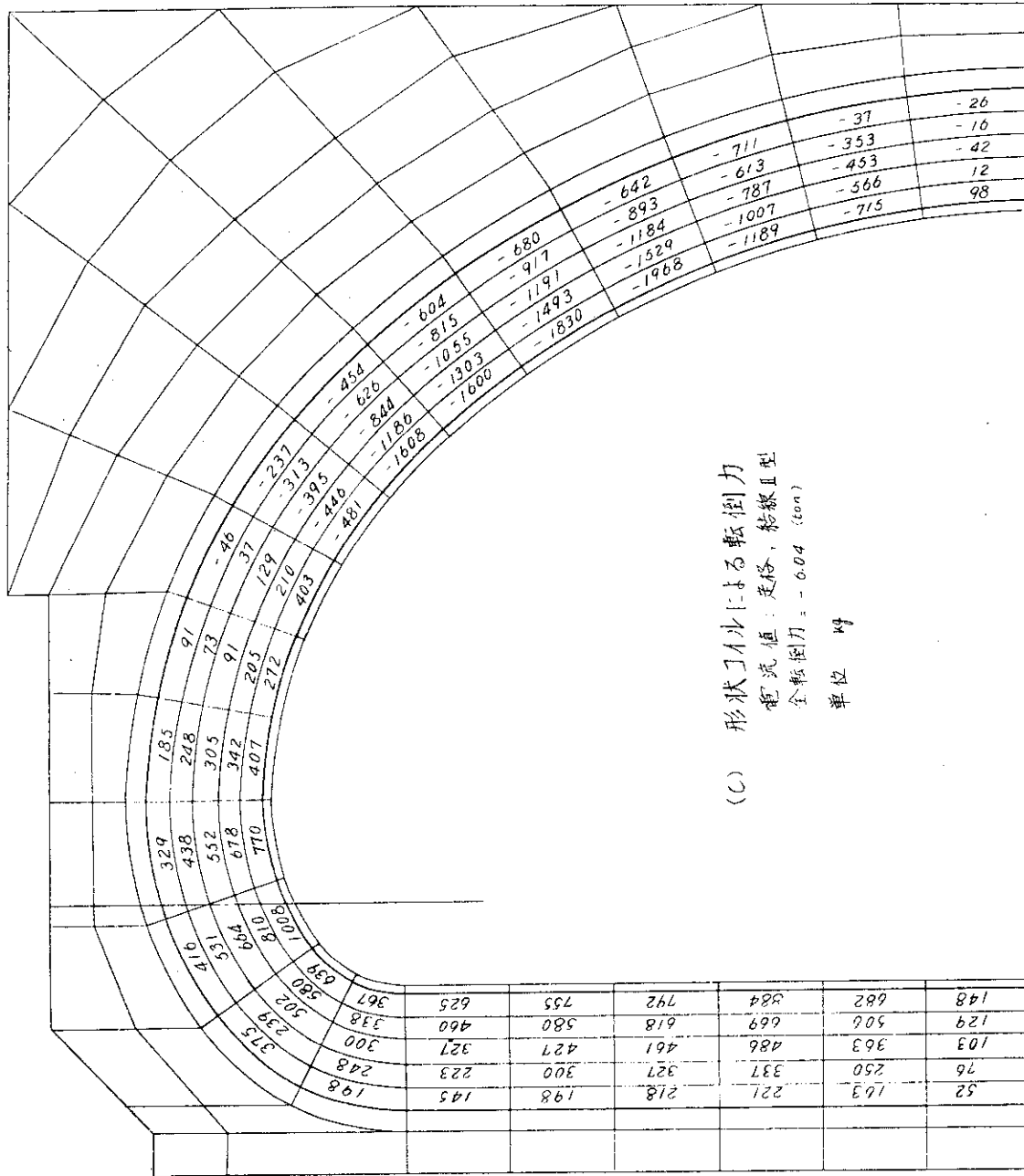


第 4.50 図 T コイルの転倒力 I



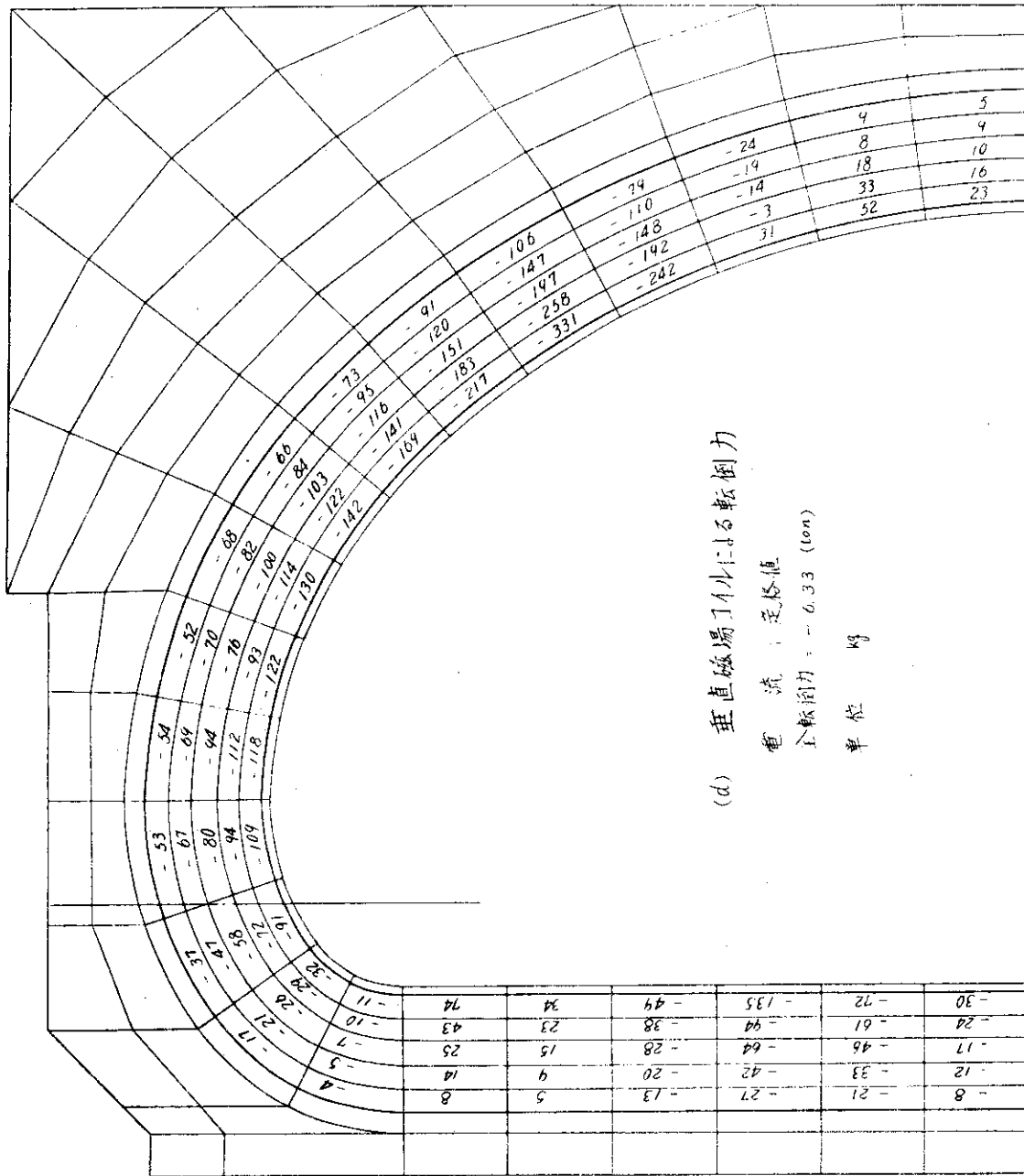
(b) ダイバ-タコイルによる転倒力
 電流値 : 巻絡
 全転倒力 = 813 (kg)
 単位 : kg

第 4.50 図 Tコイルの転倒力 I

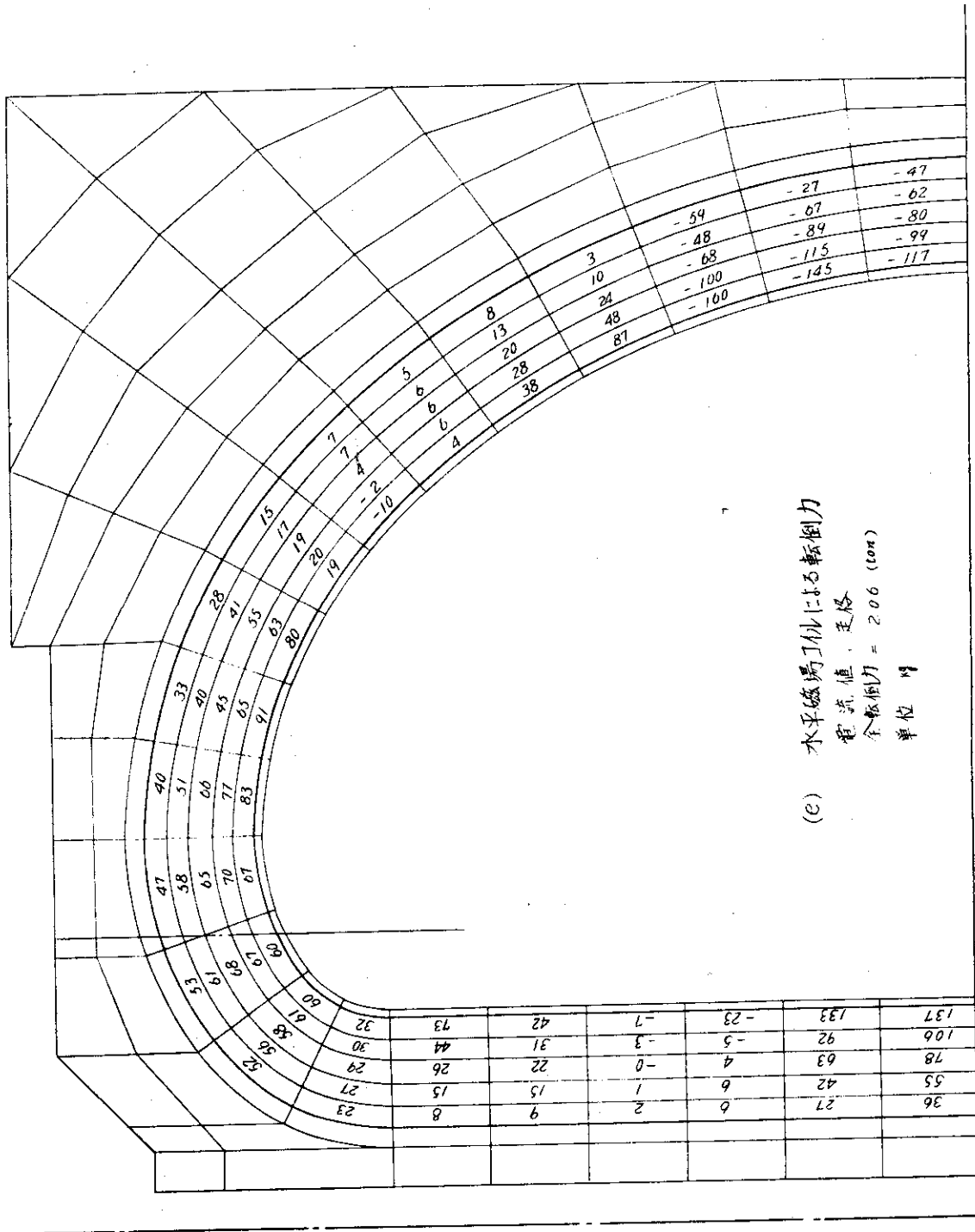


(C) 形状コイルによる転倒力
 電流値: 定格, 結線II型
 全転倒力 = -0.04 (ton)
 単位 kg

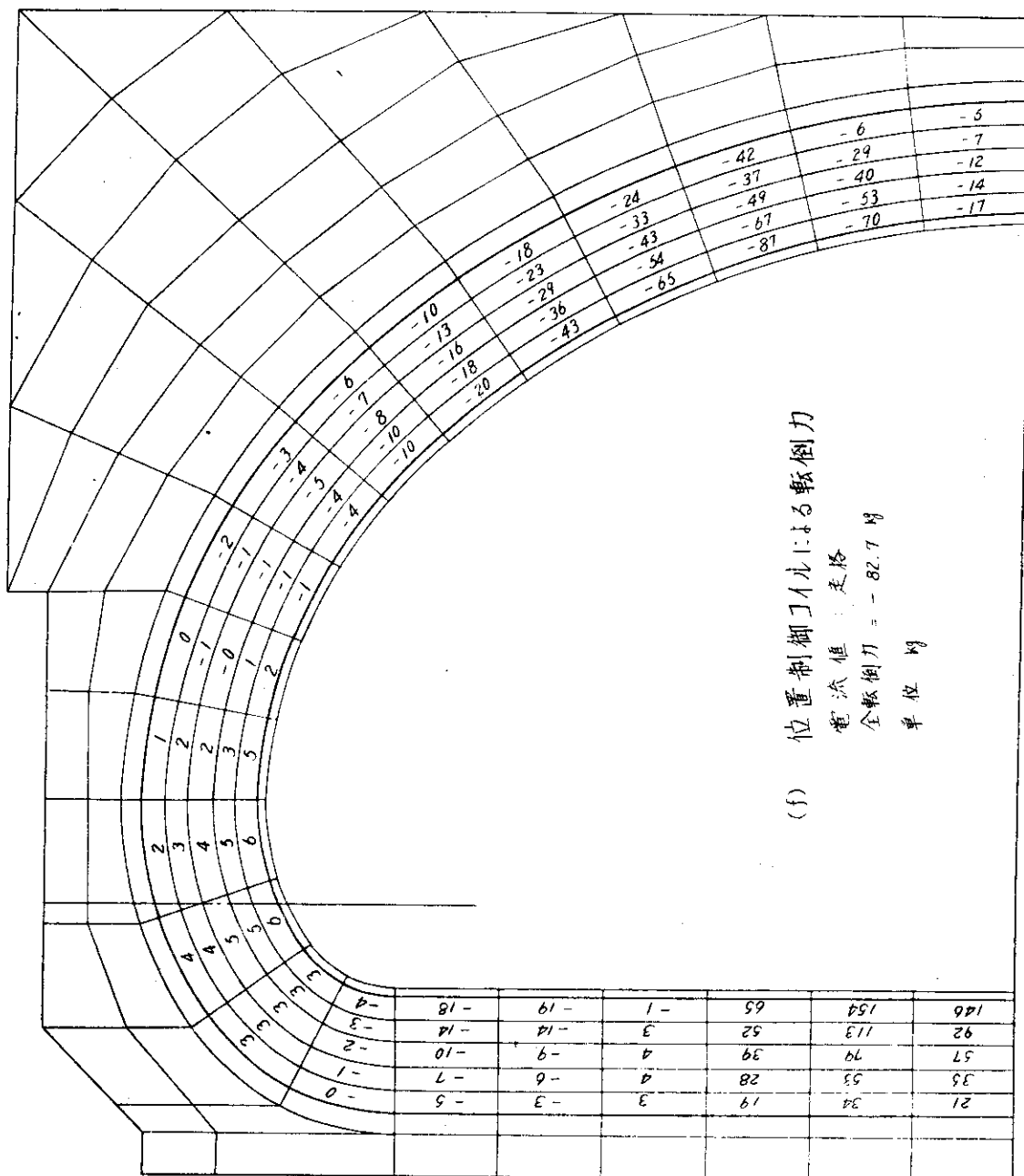
第4.50図 Tコイルの転倒力 I



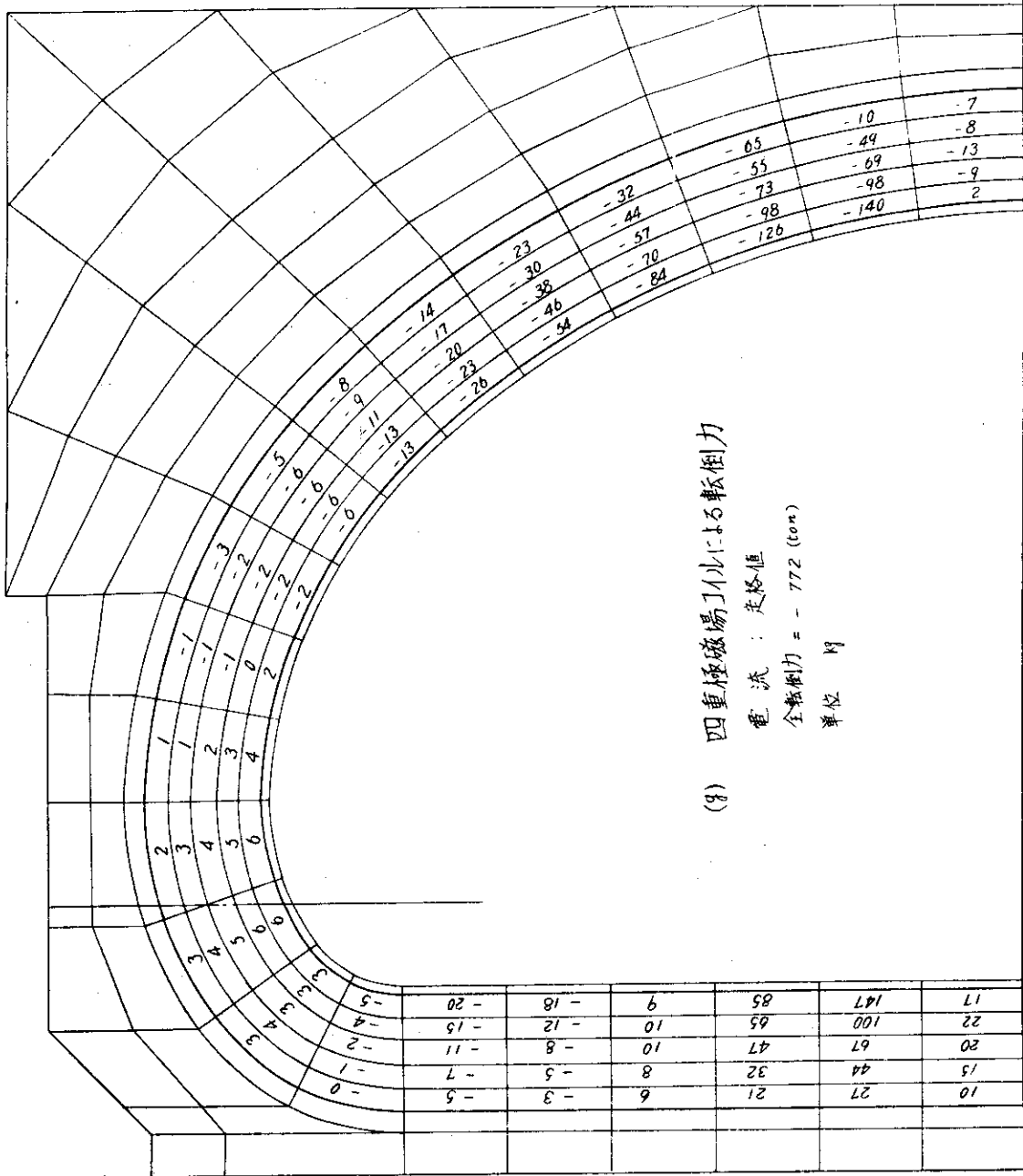
第 4.50 図 T コイルの転倒力 I



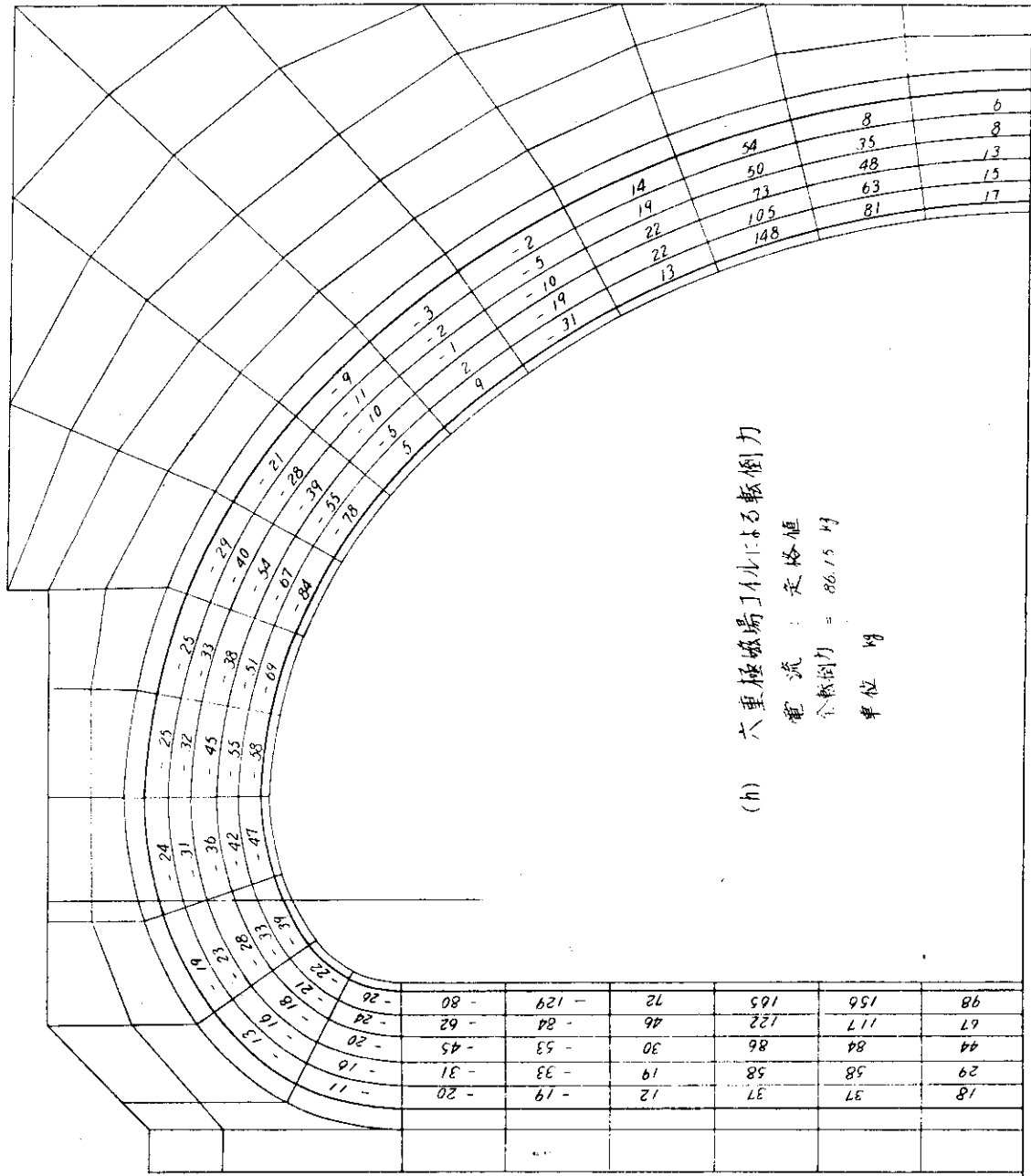
第 4.50 図 T コイルの転倒力 I



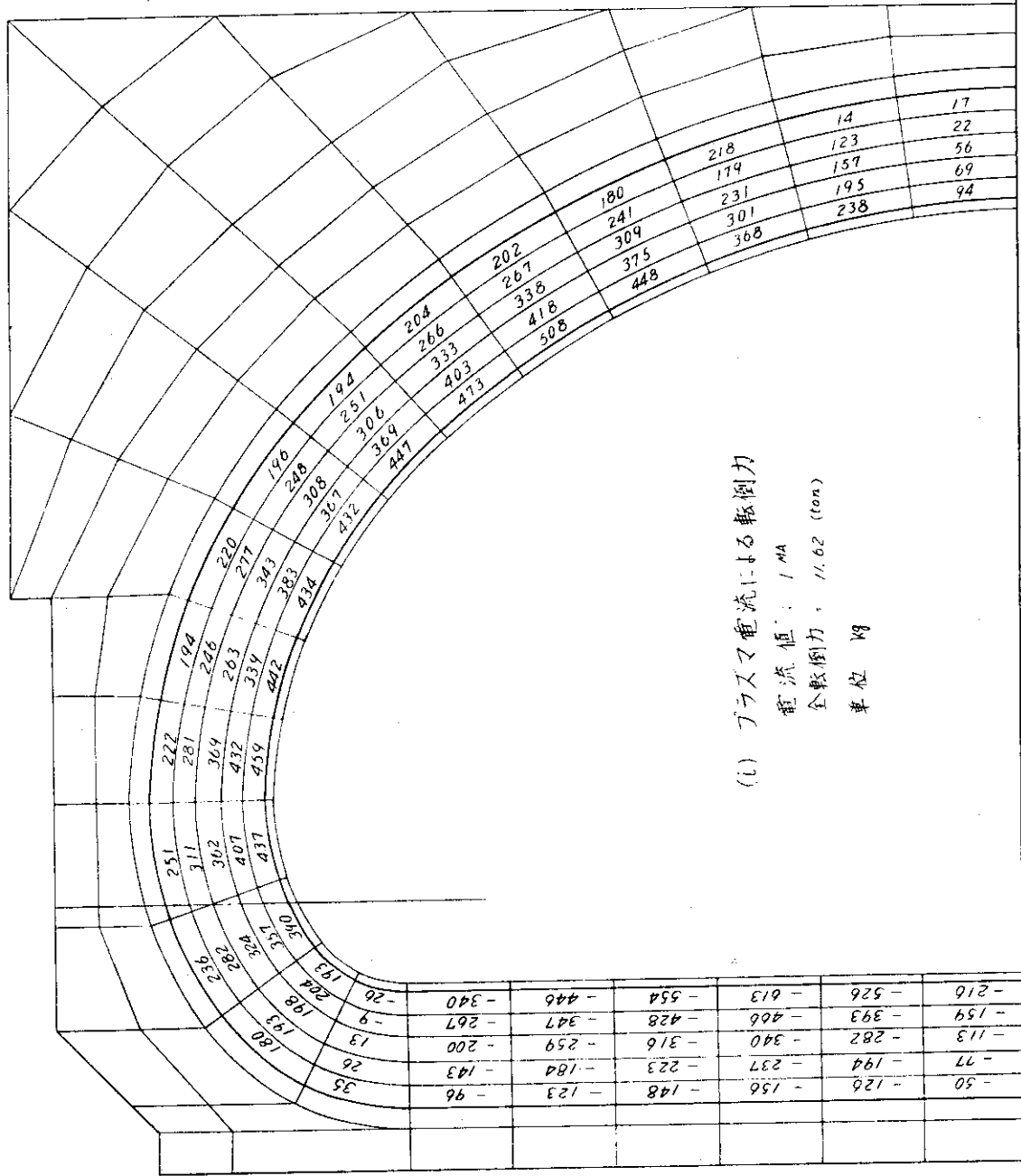
第4.50図 Tコイルの転倒力 I



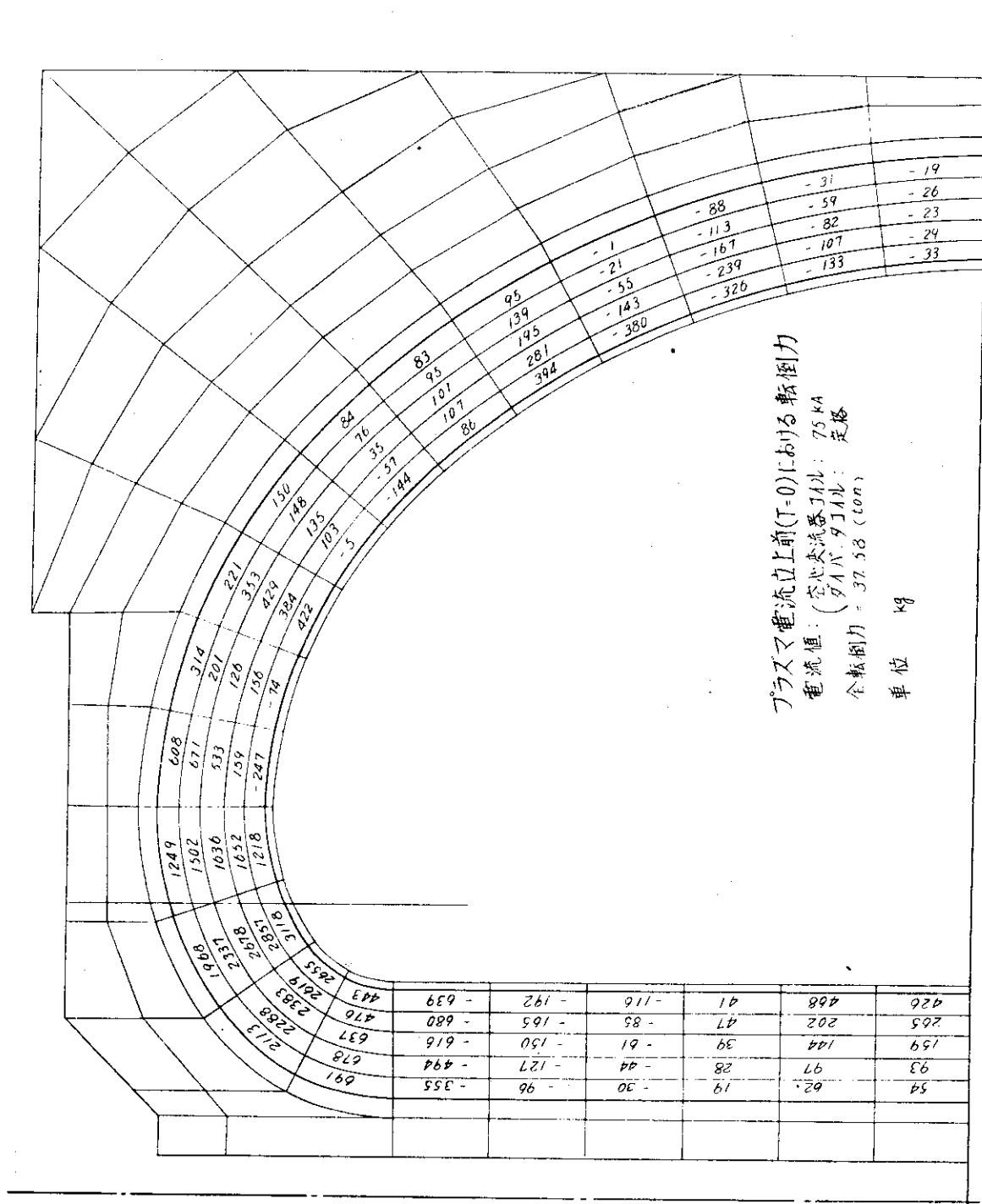
第 4.5 0 図 T コイルの転倒力 I



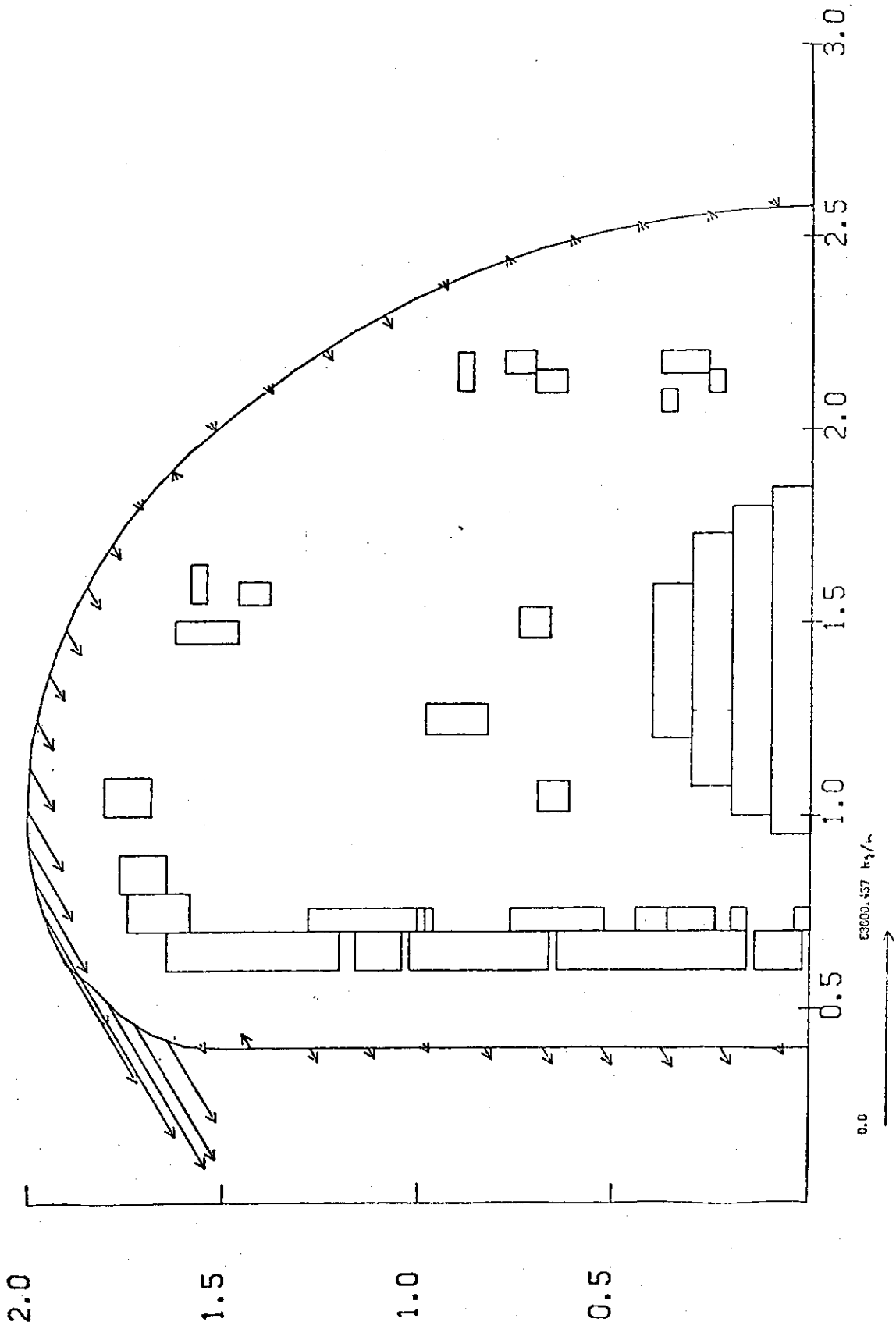
第 4.50 図 T コイルの転倒力 I



第 4.5 0 図 T コイルの転倒力 I



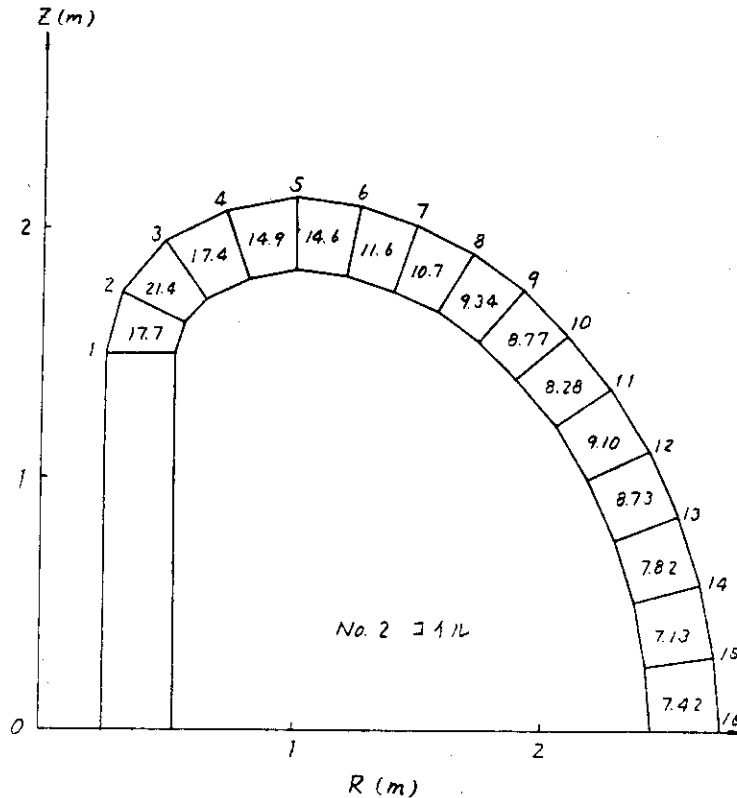
第 4.51 図 T コイルの転倒力 II (t = 0)



第 4.5.2 図 Tコイルの転倒力 III ($t=T_2$)

は約 39 ton, 18個の T コイル全体に働く転倒モーメントは約 430 ton-m である。また, T コイル中心軸寄り上下の曲率半径最小の部分に最大の面圧が発生し, その値は約 0.36 kg/mm² である。

3)の事故としては, 18個のうち数個のコイルが短絡して, そのコイルには電流が流れない状態を想定する。この場合には, 短絡コイルと隣接するコイルに最も大きな力が加わり, その向きは短絡コイル側から押す向きである。1個のコイルが短絡したときの電磁力は第 4.5.3 図に示す通りであり, 短絡コイルの個数が増しても電磁力は同図の約 2 倍以上にはならない。



第 4.5.3 図 T コイルの短絡時電磁力

4.7.5 T コイル接続部

T コイルの接続部は, J T-4 各部の中でも最も設計の困難な部分である。特に中心部直線部分では空間が小さく, 電氣的, 機械的, 熱的に厳しい。接続部で問題となる点は, 1) 導体断面積の小さい部分を作らないこと。これは電気抵抗, したがって局所的発熱密度と T コイル電源容量に影響があるからである。2) 各部分の応力が過大とならないこと。3) 電磁力および熱膨脹による歪, 接触面のずれを抑えること。4) 金属材料のみでなく, 絶縁物の応力, 歪にも注意すること。5) 機械工作など製造が可能であること。6) 組立が可能, 容易であること, の諸点である。

接続部以外では, 導体自身にフープ力に対する機械的強度を期待できる。中心直線部でも応力は 6 kg/mm² であり, 銅材で充分耐えることができる。しかし, 接続部では導体断面積が小さく, 応力が 10 kg/mm² 以上になるので, 銅材が引張り力に耐えられない。このため, 上記

の2), 3)の点に関しては, Tコイル全体の支持法との関連に注意して設計を行う必要がある。接続部の設計には二通りの考え方があり, 一つは, 接続部に機械的強度を期待せず, 接続部以外の部分で導体と機械的に結合した高耐力材で力を支持する案であり, 他は, 接続部導体に特殊な銅合金を用いて電氣的接触と共に機械的強度をもたせる案がある。後者の例としては, 例えばダブレット皿に使われている方法がある。前者には, コイルの2分割片全体をケース(キャン)に入れて, キャンの結合によるものと, 接続部近傍だけに導体以外の接続用副板を使用するものとが考えられる。キャンによる支持の場合には, 導体の温度上昇による熱膨脹がキャンで抑えられるため, 接続部をはじめ導体には圧縮応力が働く。熱膨脹による圧縮力と電磁力による引張力の加わる時刻が異なるため, この場合には, コイルに通電する度に接続部に引張り力と圧縮力が交互に作用し, 接続部は常に往復運動をすることになる。また, キャンと導体の間にはエポキシなどの絶縁材があり, これに圧縮力がくり返し加わるため, 歪, 変形などが問題である。絶縁材が変形すると導体の力はキャンに伝わらず, 接続部に力が加わることになる。この他, ボルト, 接触面など, 常時強い力の加わっているところでは, 材料のクリープについても検討する必要がある。さらに, 製造方法も問題であり, 例えば絶縁層と導体が積層している部分に貫通穴をあける場合は, 導体の切り粉やびれなどの対策を施す必要がある。

予備設計においては, 第4.5.4図に示すように多くの案が検討されたが, 上記の1)~6)のすべての問題点で満足できるものではなく, 今後更に検討する必要がある。一例として, 同図A案を説明すると(第4.5.5図), この場合には, 導体をキャンで強固に支持するため, 熱膨脹による熱応力が大きい。コイルのターン毎に熱計算を行って最高温度を求め(第4.5.6図), 支持枠を40℃のSUSとして熱応力を計算した結果を第4.5.7図に示す。この設計例では,

第4.3表 Tコイル各部の応力

単位: kg/mm^2

コイル銅帯応力

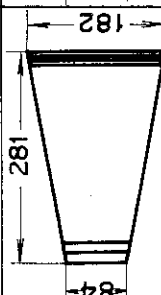
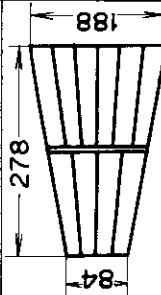
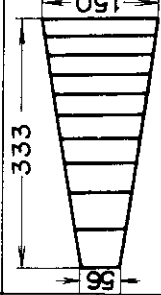
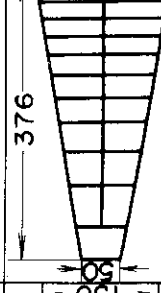
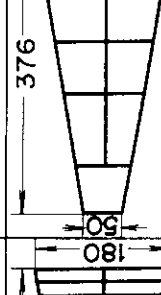
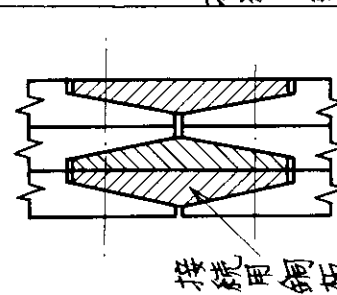
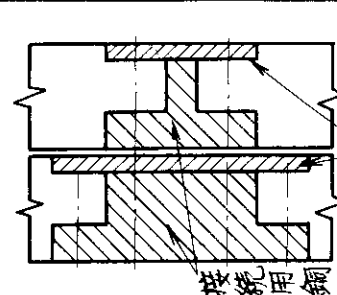
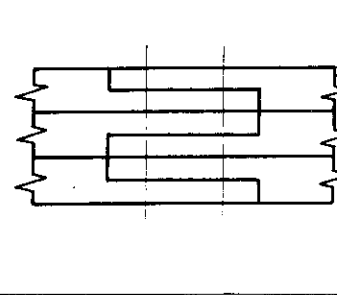
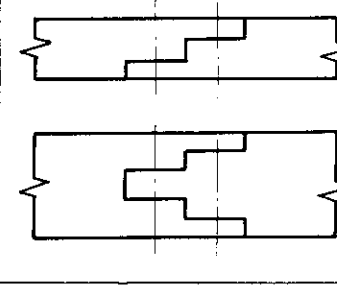
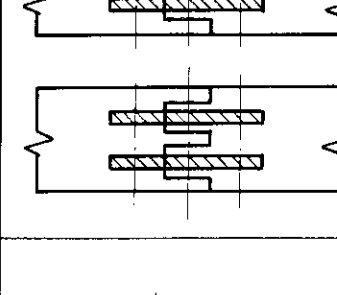
	(イ)	(ロ)	(ハ)
コイル平均応力 σ_c	3.59	-1.60	-1.25

コイル支持枠母材の応力

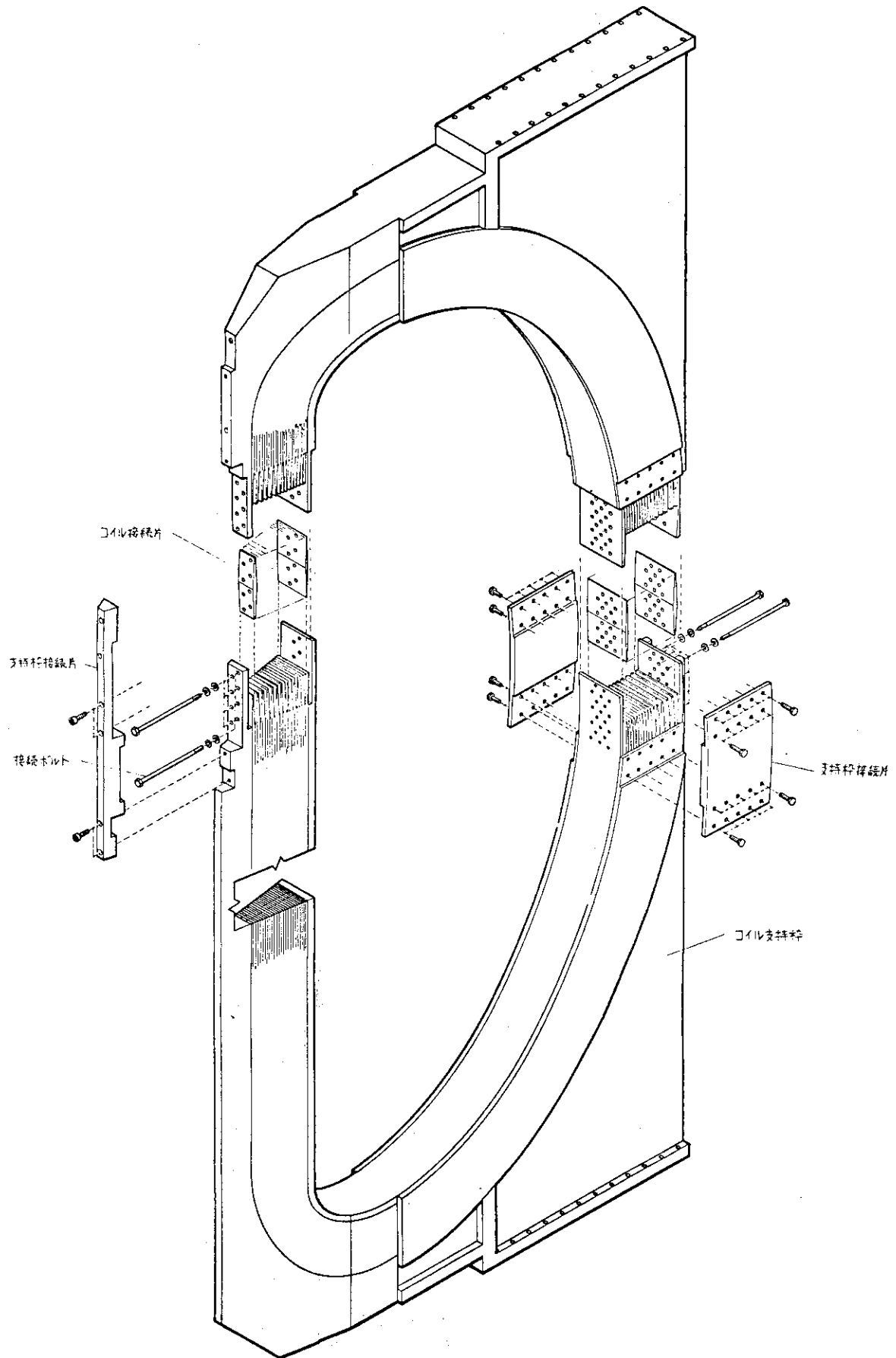
	(イ)	(ロ)	(ハ)
支持リング平均応力 σ_{s1}	6.326	2.463	3.095
支持枠平均応力 σ_{s2}	7.078	2.739	3.445

接続ボルト, アゴ部に生ずる応力

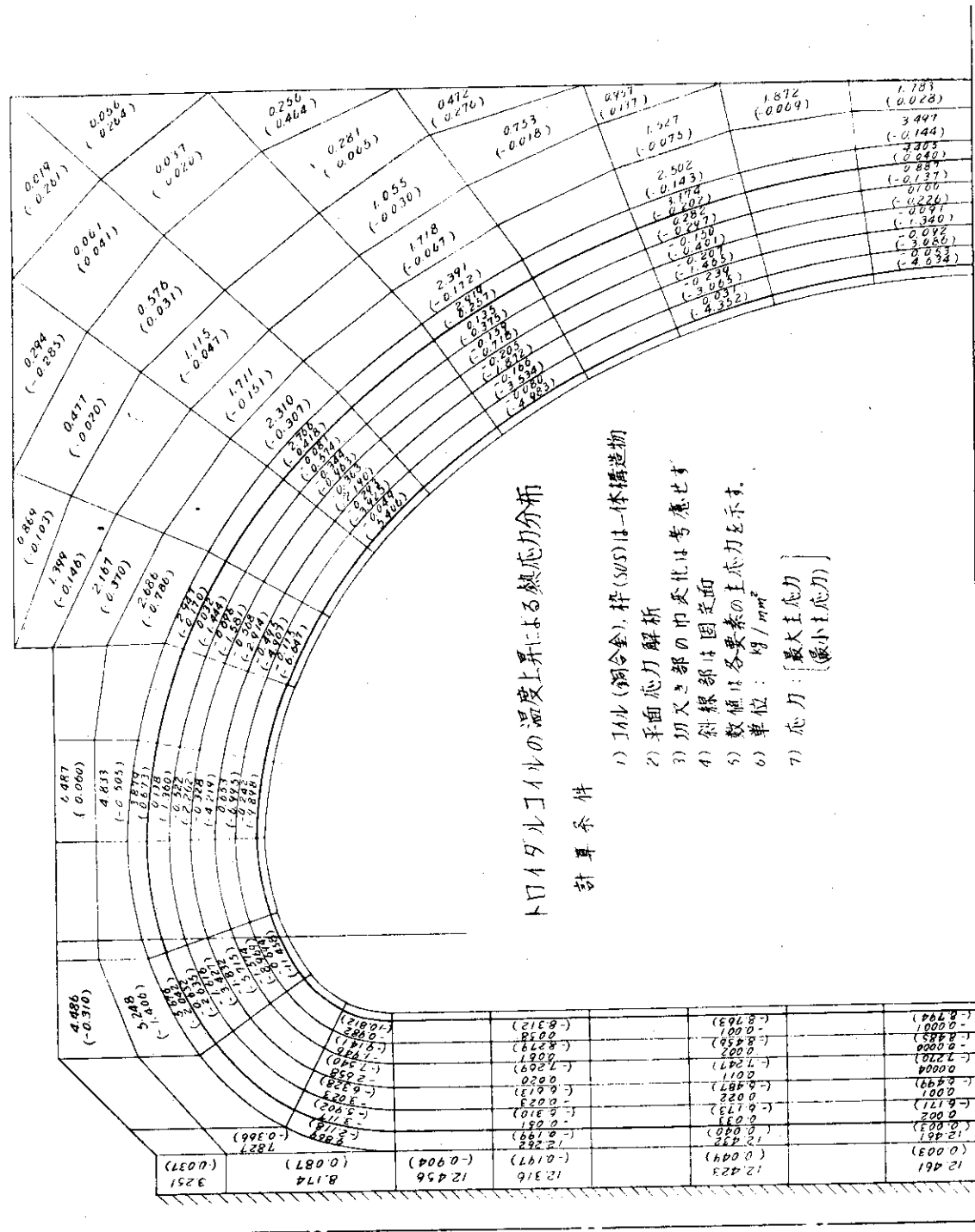
		(イ)	(ロ)	(ハ)
コイル接続 ボルト	コイル部	4.625	2.067	1.608
	支持リング部	4.815	1.875	2.356
支持枠	剪断応力 τ	3.176	1.233	1.550
アゴ部	面 面 P	1.059	4.109	5.167

	A	B	C	D	E
1コイル当り数	30	10	10	23	11
中心部断面概略図					
同上断面積	37370 mm ²	37810	34300	43240	43240
接続構造概略図					
接続構造特徴	電磁力の大半はキャンの接続部で支持する。導体はピンのせん断力により電磁力の一部を支持する。	同左 絶縁ボルト不要 インコネル接続板	接続部には電磁力の支持を期待しない。架台とキャンで押す。	導体とピンのみ導体で全応力を支持。絶縁ボルト不要 (導体引張 17 Kg/mm ²)	接続用挿入板使用 同左 (導体引張 14 Kg/mm ²) (挿入板引張 54 Kg/mm ²)
Tコイル全体の支持	キャンと架台 中心柱あり	同左	キャンと架台 キャン、導体の接続による支持を期待しない。堅固な架台と建屋によりかけ架台でコイルの上下方向電磁力を押える。	導体各々を無拘束でする。転倒力のみの架台で支持。中心柱あり。	同左

第 4.5.4 図 Tコイル接続構造の諸案

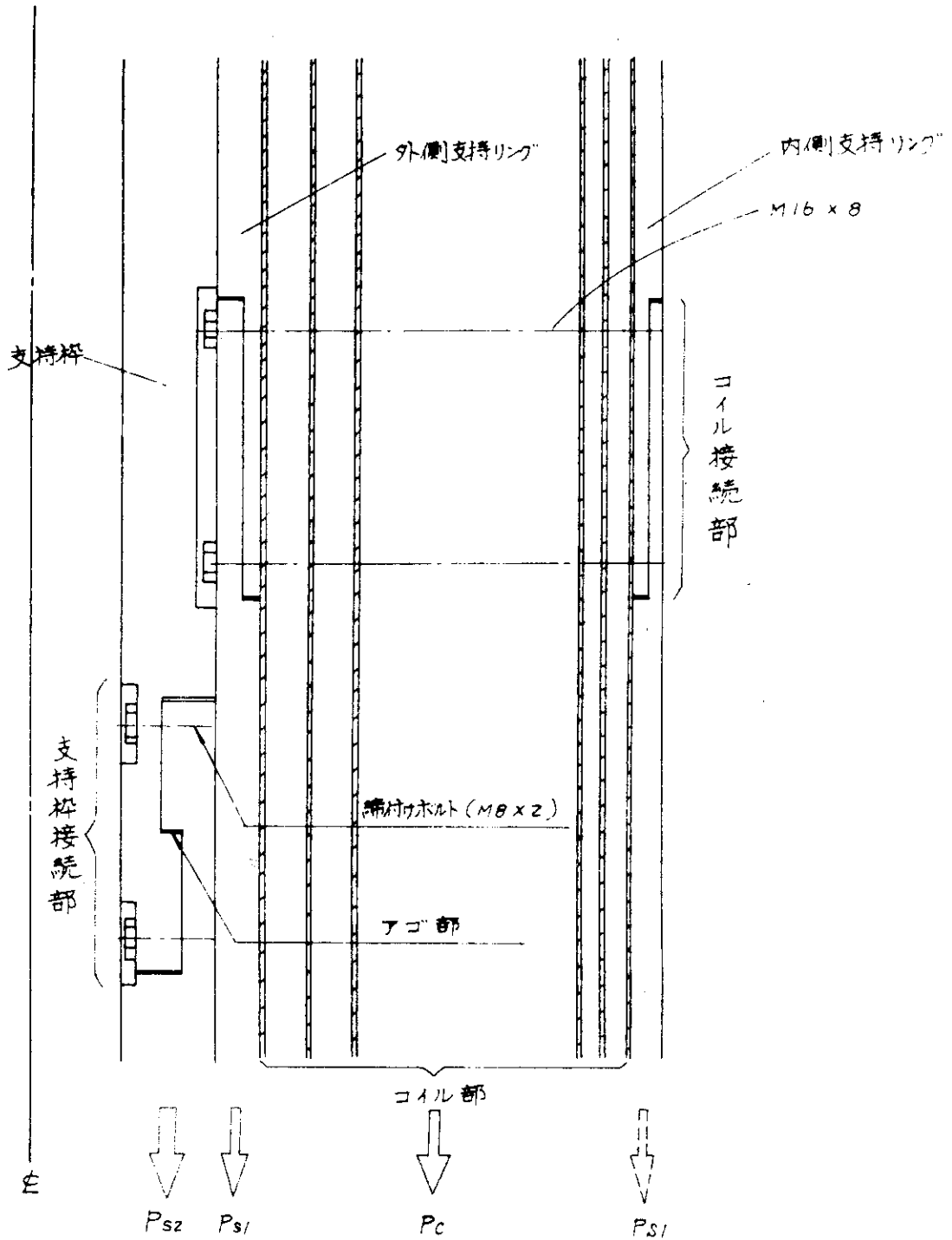


第 4.55 図 T コイル 設計例

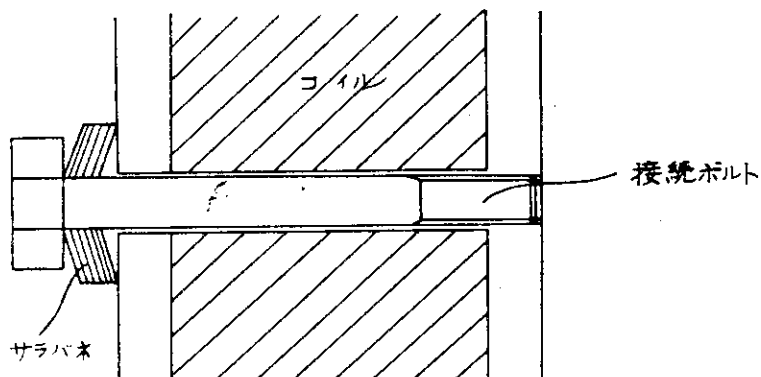


第 4.57 図 熱 応 力 分 布

接続部の力は大部分を内側と外側のインコネル支持リング（副板）によって支持し、内側のリングは、第4.5.8図に示すようにアゴのある接続用部材で結合する。接続部で導体を貫通するボルトによる断面減少を考慮して計算した各部の応力は第4.3表の通りである。接続部のボルトには、導体の板厚方向の熱膨脹により引張り力が加わるので、第4.5.9図に示すようにサラバネを用いる。



第4.5.8図 キャン接続部



第4.59図 Tコイル接続ボルトのサラバネ

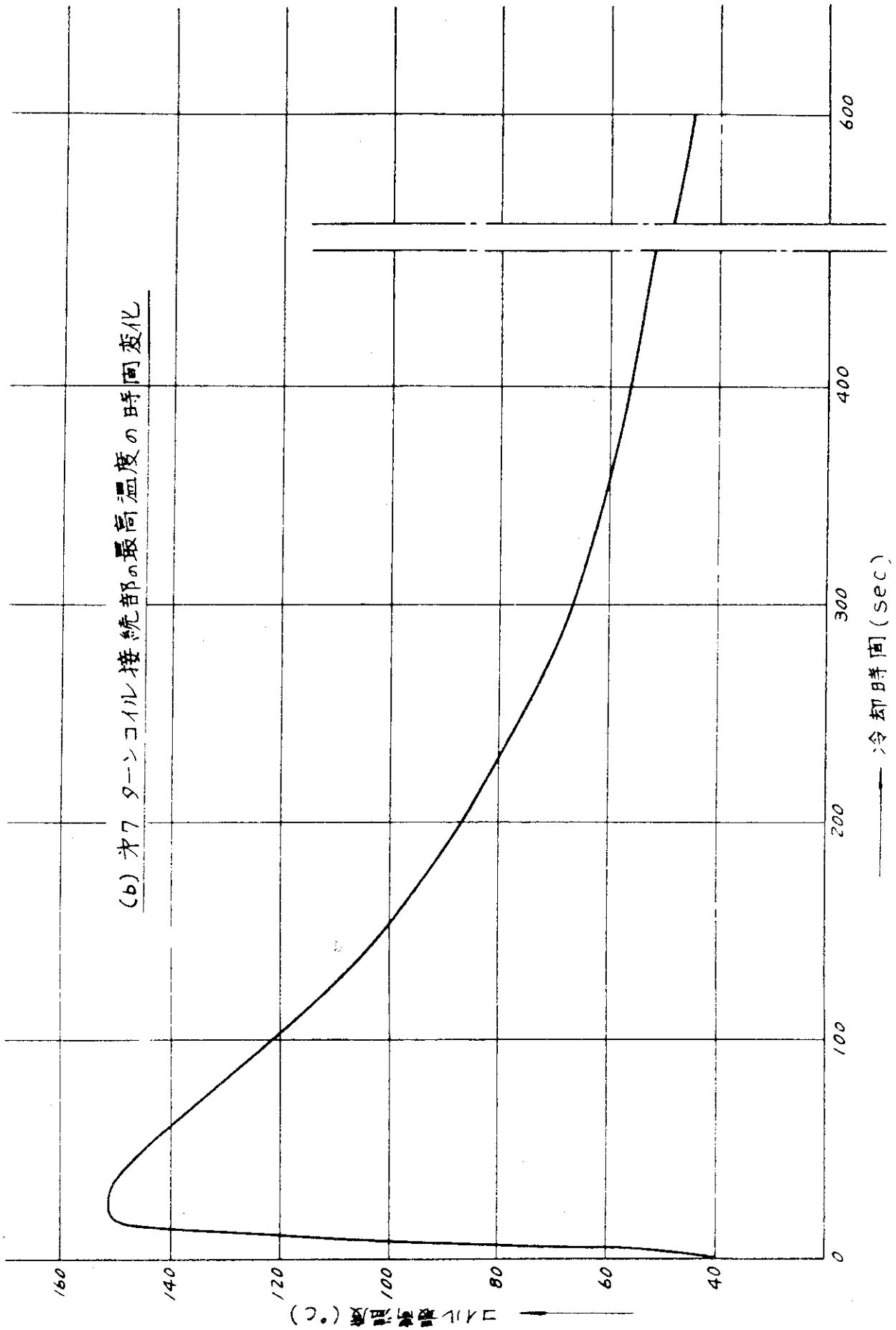
接続部の熱計算は、上記の設計例で計算されている。それによると、接続部には冷却パイプがなく、接続部は熱伝導のみによって冷却されているが、ボルト穴のあることによる断面積減少を考慮した熱計算の結果、最も温度の高い第7ターン（全30ターン、内側から7ターン目）での最高温度の温度変化は第4.60図のようになる。この計算には接触抵抗（約 $0.6\ \mu\Omega$ ）は含まれていないが、接続部の導体抵抗約 $4\ \mu\Omega$ ¹⁹⁾に比べて小さく、影響は少ないと考えられる。したがって、接続部の温度は絶縁材（カプトンなど）の使用温度以内に収めることができる。

4.7.6 Tコイルの設計

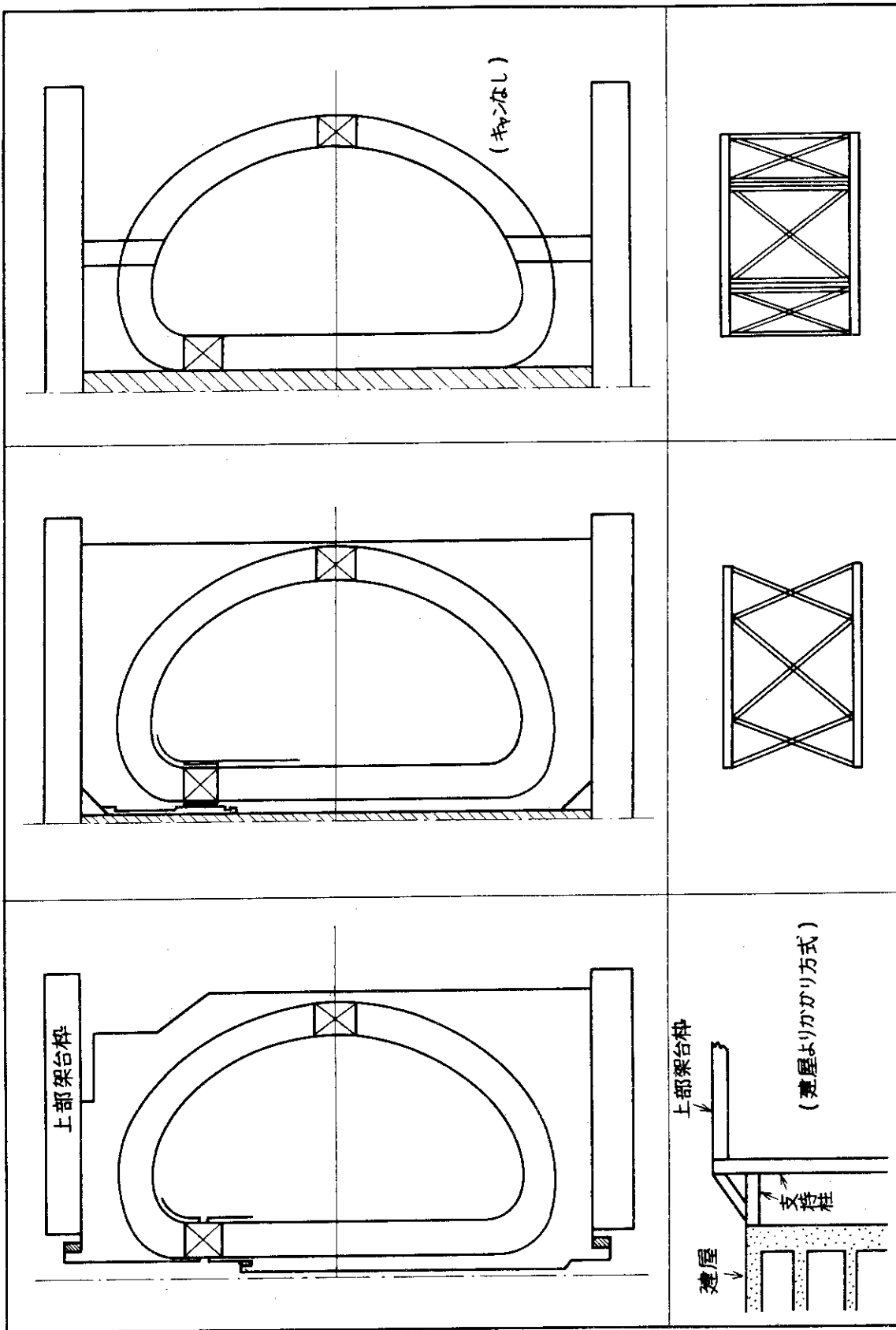
接続部を検討した上でTコイル全体の設計を行う。まず、巻線の巻き方にはエッジワイズとフラットワイズがあるが、全巻数を180以上とすることを考えると、エッジワイズでは中心直線部で導体厚みが薄くなりすぎて、分割構造が不可能となる。したがって、フラットワイズあるいは2重エッジワイズとして、巻線の厚みを大きくする必要がある。

全体の支持構造は、前述のように接続部の設計と関連し、第4.61図に示すように各種の案がある。左はキャンの接続を期待せず架台で上下から抑えてフープ力を支え、中はコイル導体とキャン、右は導体だけでフープ力を支える。転倒力は、上下の架台と各コイル間に設けるくさび状ブロックによって支持する。上下架台間は、回転防止用の棒材によって結合する。あるいは、上下架台を建屋に結合して建屋によって支持する案もある。いずれの場合にも、上下架台、固定用ボルト、Tコイル固定用ミズなど各部について強度計算が行われており、問題はない。

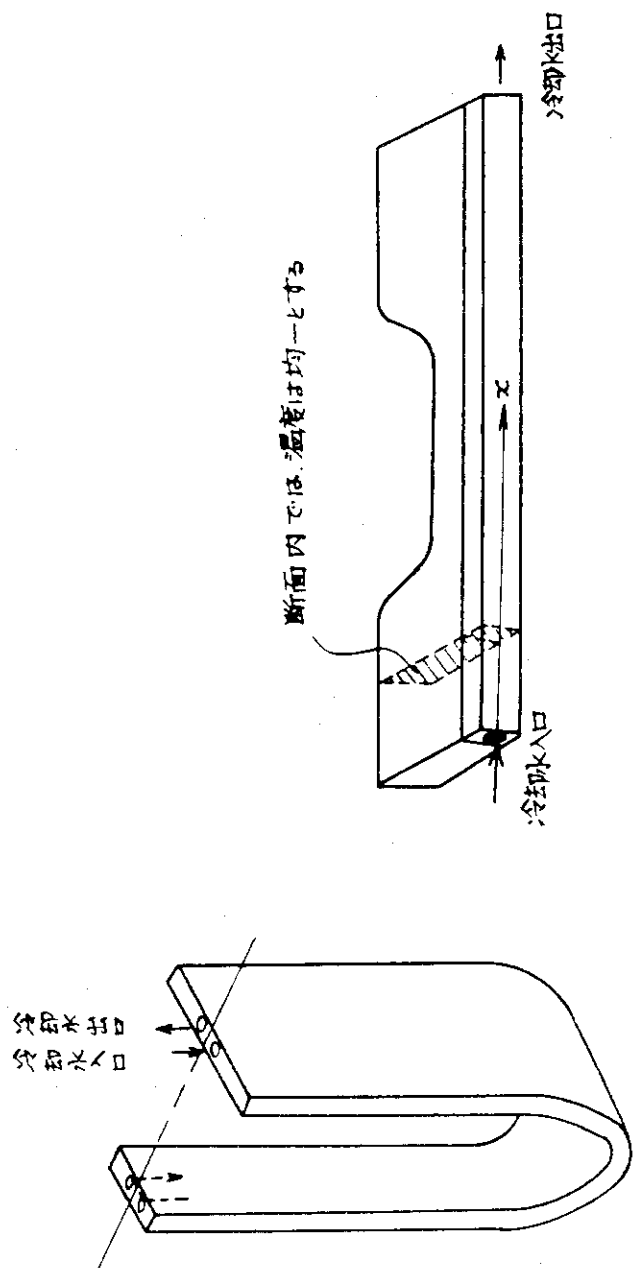
導体の冷却は、例えば内径 $4\text{mm}\phi$ の水冷管に 2m/s の流速で冷却水を流して行う。水冷管は接続部で折返す往復水路である。Tコイル中心部の断面積の小さい部分を第4.62図のように近似して温度計算した結果を、最も厳しい第7ターンについて第4.63図に示す。これは30ターンの場合の計算例であり、10ターンのときに温度上昇を同じにするためには、水冷管を1ターンに3本設けるか、あるいは断面積を3倍（内径 $7\text{mm}\phi$ ）にする必要がある。



第 4.60 図 Tコイル接続部の温度変化



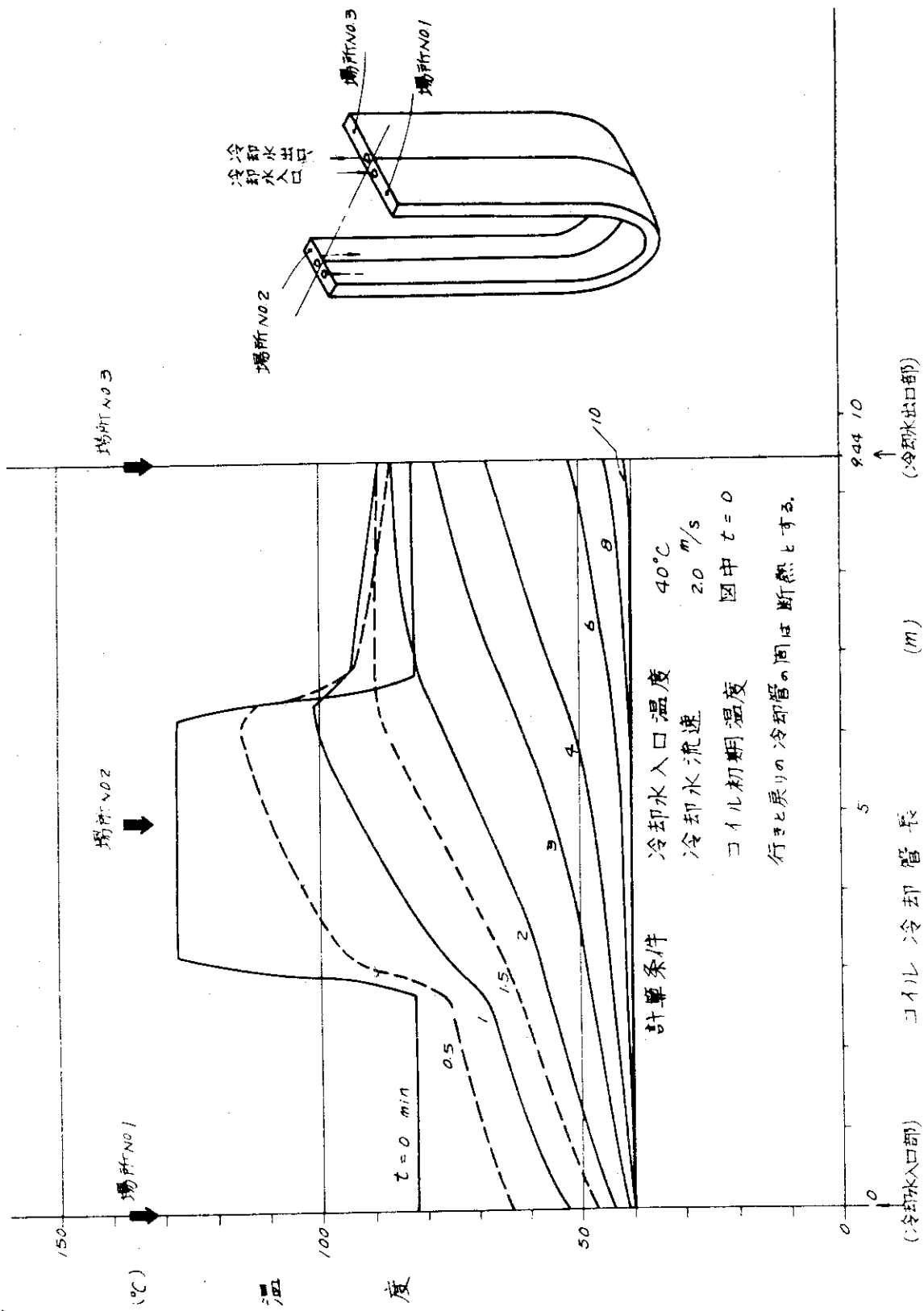
第4.6.1図 Tコイル支持と架台構造



コイルの冷却計算モデル

コイルの冷却構造略図

第 4.6.2 図 Tコイル全体の熱計算モデル

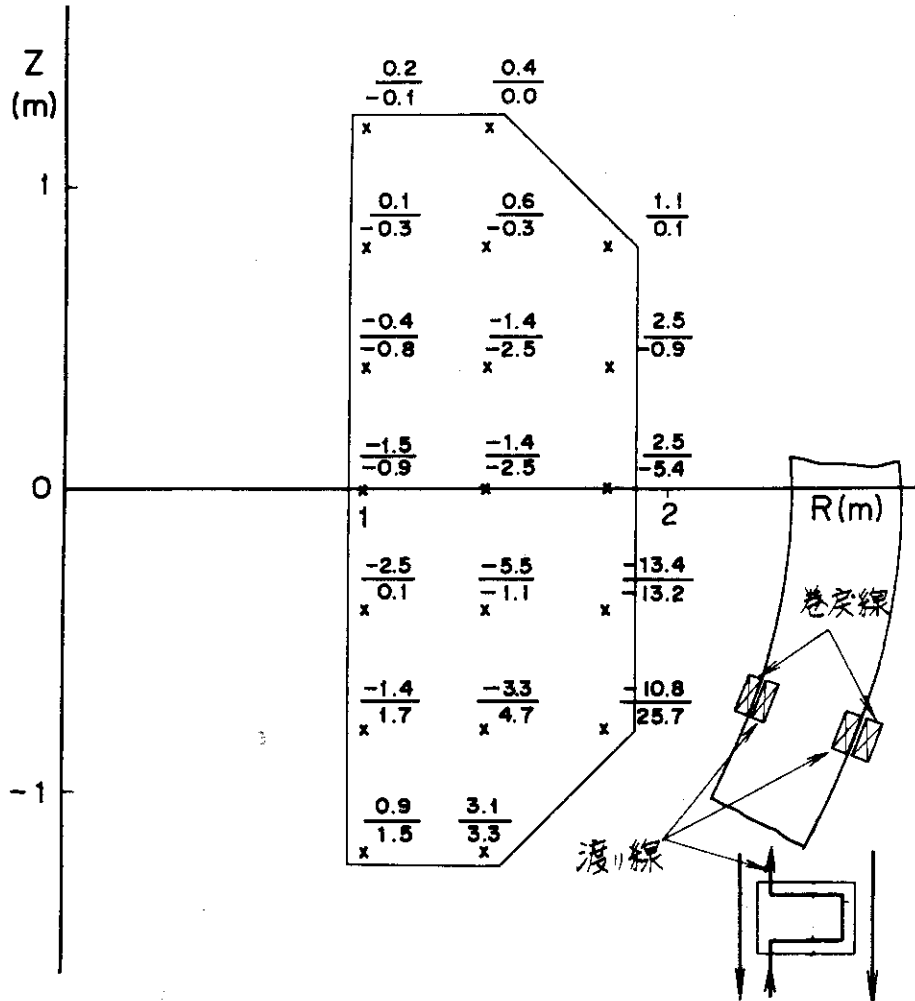


第4.6.3図 Tコイル全体の温度変化
定格運転時のトロイダルコイル温度分布(オ7ターニコイル)

4.7.7 給電線および誤差磁場

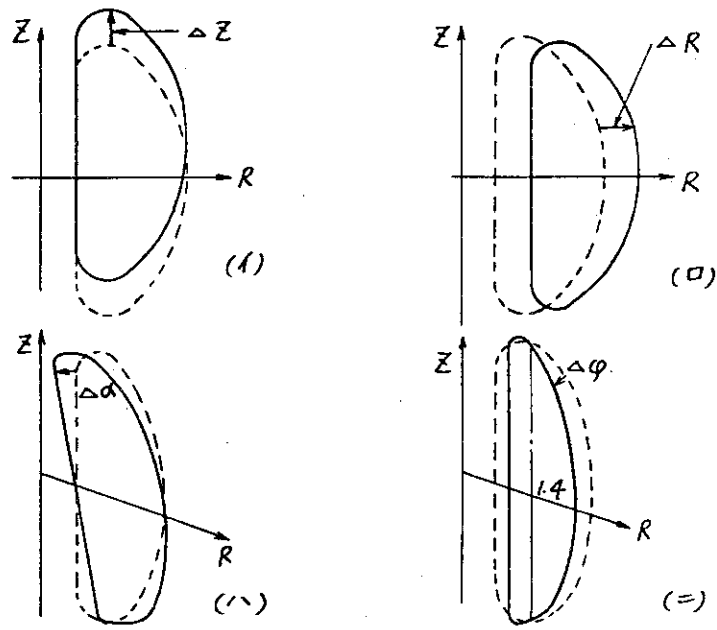
Tコイルの電流は総巻数180の場合、117kAであり、給電線、渡り線の配置を工夫して誤差磁場を小さくする必要がある。第4.64図のように巻戻し線をTコイルの内外に分け、電流比を適当に選ぶと誤差磁場は同図に示したように小さな値とすることができる。電流比は、巻戻し線あるいは給電線の断面積によって設定することができる。給電線による誤差磁場は1G以下である。(中心間隔2cmの平行線)

Tコイルの設置誤差による誤差磁場についても検討を行った。第4.65図のような変位を考えた場合、プラズマ領域内の最大誤差磁場を50G以下とするための許容設定誤差は第4.4表の通りである。これらの値は検出、調整いずれも可能な値である。



第4.64図 Tコイル渡り線および巻戻し線

(数値は誤差磁場, $\frac{B_z}{B_R}$, ガウス)



第 4.6 5 図 Tコイルの設置誤差

第 4.4 表 Tコイルの誤差磁場を 50 G 以下とする
ための許容設置誤差

設定誤差の種類	許容設定誤差
ΔZ	7 mm
ΔR	2.5 mm
$\Delta \alpha$	0.05°
$\Delta \varphi$	0.05°

4.8 ポロイダル磁場コイル (Pコイル)

4.8.1 Pコイル系の概説

Pコイルは、プラズマとの鎖交磁束を変化させて、プラズマ電流を誘起する空心変流器コイル(OHコイル)と、各種のポロイダル磁場を発生して、プラズマの平衡を実現し、プラズマの平衡を実現し、プラズマ断面位置・形状の制御を行う各種Pコイルから構成される。

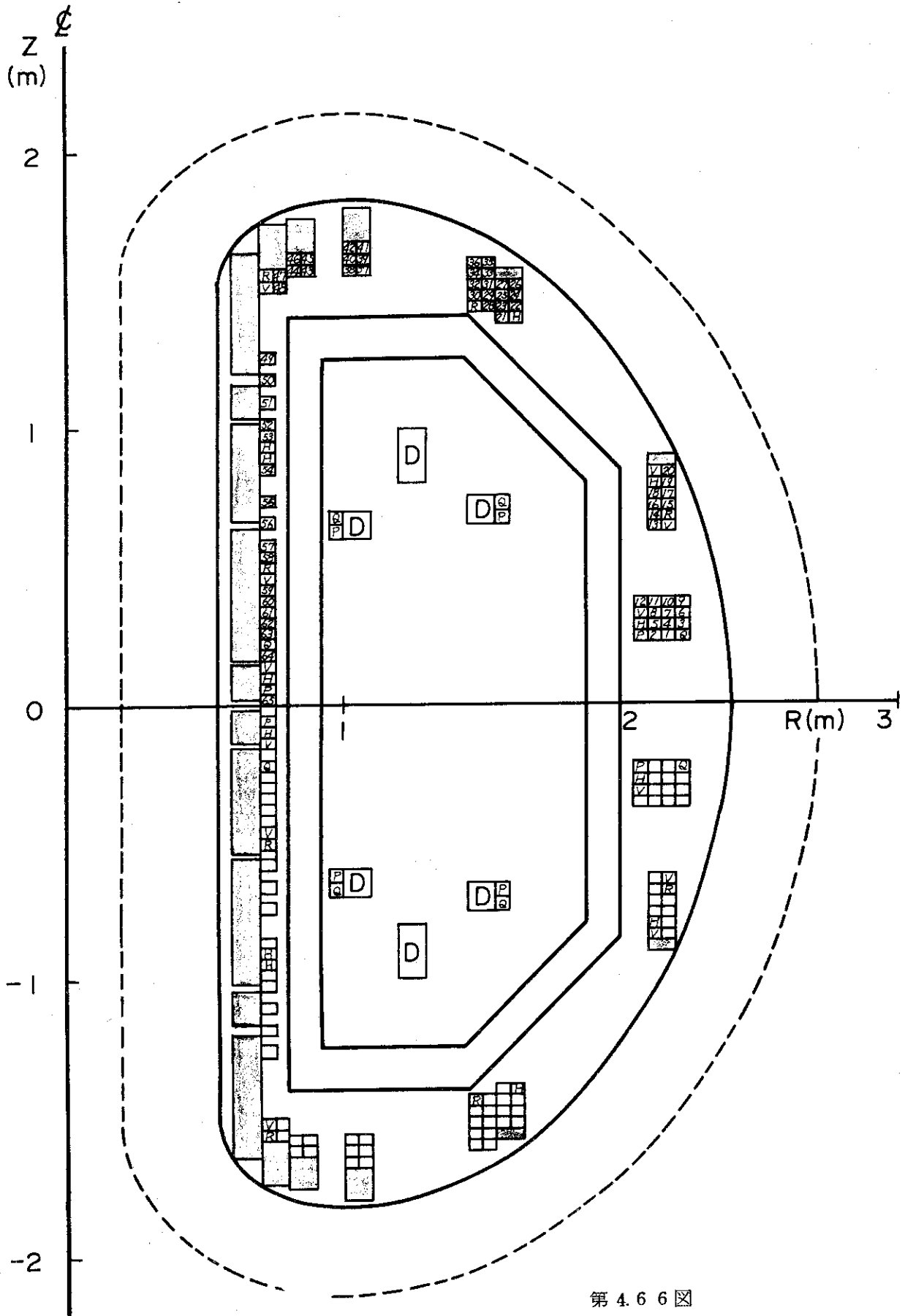
Pコイル設計の順序は、まず、Pコイルの作るべき磁場の分布、強度、および、波形(時間変化)を、第3章第2節で述べたプラズマの特性とその制御方法の検討の上で決定する。次に、Pコイル、及び、その電源を、所要の空間分布、波形の磁場を発生できるように設計する。必要な磁場分布、及び、磁場強度によって、コイルの総アンペア・ターンと、その空間的配分は決定されるが、ターン数とコイル電流値の組合せは、電源をも考慮して決定すべきである。しかし、予備設計においては、コイル・ターン数をまず決定し、電源をそれに合わせて設計した。その為、4重極磁場コイル、位置制御コイルなど、一部のコイルでは電源が不適当なものとなっており、再検討が必要であるが、ここでは、予備設計のままで記述する。

本節で述べるPコイル設計の範囲は、1)電磁力解析、2)構造検討、及び、支持方法の検討、3)強度計算、4)給電源の検討、5)熱計算、6)誤差磁場の検討、である。結論としては、給電線配置の空間が少ない点を除き問題はなく、給電線の問題も、形状コイルのタップを減らすことで解決できる。²⁰⁾本報告では、Pコイルの代表例として、最も応力が高く、電流値も大きい、OHコイルについての検討を主に述べる。他のPコイルについても、全く同様の検討が行なわれているが、特に問題点はなく、繰返しになるので省略する。

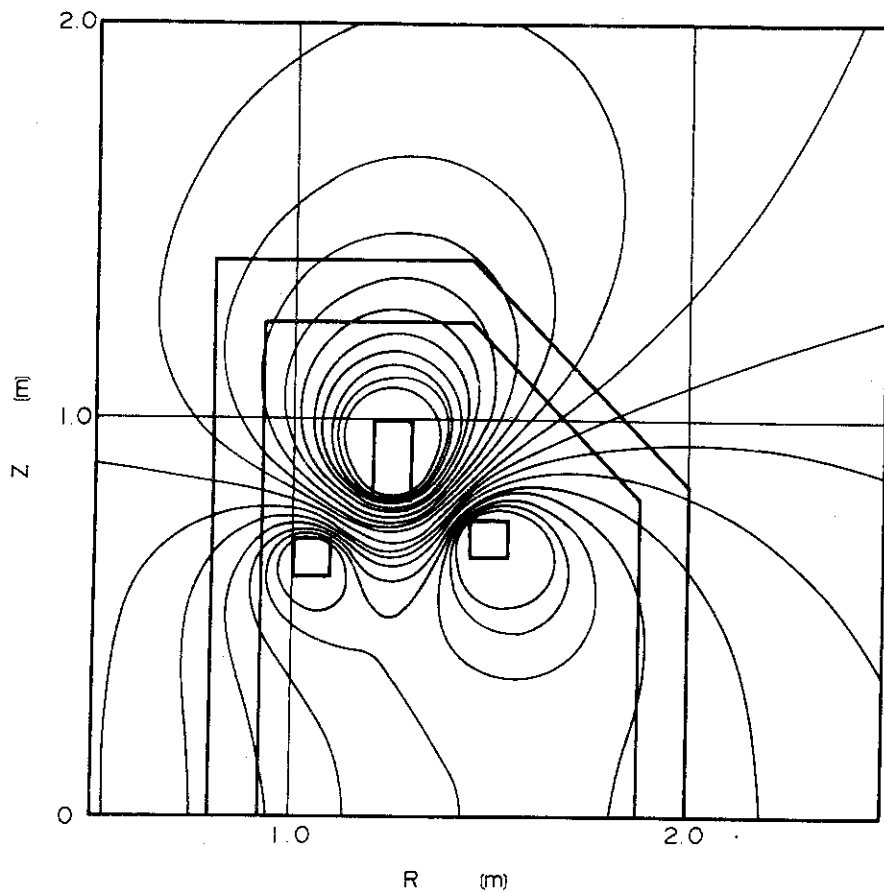
4.8.2 Pコイルの配置

予備設計におけるPコイルの配置は、第4.6.6図に示す通りである。その主なコイルによる磁場分布は、第4.6.7～7.1図に示す通りである。なお、OHコイルは、プラズマ空間に磁場を作らないことが望ましいが、予備設計時よりも改良したものの洩れ磁場を、第4.7.2図に示す。予備設計案における各コイルの定数を、第4.5表、第4.6表に示す。形状コイルコイルは、非円形断面のプラズマに平衡を形成する磁場配位を得るためのコイルであり、JT-60の垂直磁場コイルに相当する。JT-4の垂直磁場コイルは、4重極磁場とともに、平衡磁場の変化分(補正分)を発生するためのものであり、フィードバック制御を行う。

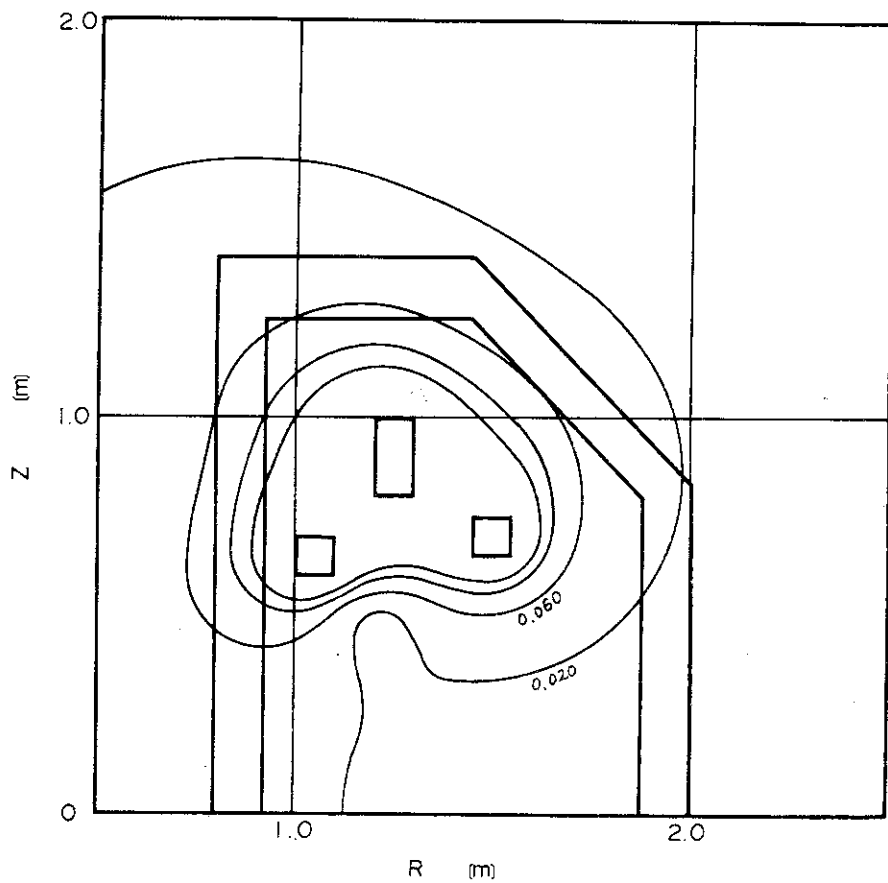
非円形断面プラズマの平衡に必要な磁場分布は垂直磁場と四重極磁場の組合せとして得られるが、これを垂直磁場コイルと四重極磁場コイルという2種類のコイルを用いて発生する方法をとると、空間の狭い装置中心付近に正負逆電流を流すことになる。すなわち、磁場をつくらぬ電流を流すことになり、空間的、電力的に効率が低下する。JT-4では、これを改善するために非円形断面プラズマの平衡磁場を1つのコイルで発生する「形状コイル」を設けた。必要なプラズマ断面形状に応じて電流分布を変えるために、形状コイルには多数のタップを設ける。予備設計では、タップ接続の例として第4.7表に示すように、楕円度1, 1.5, 2に対応す



第 4.6.6 図
P コイル配置図 (予備設計案)

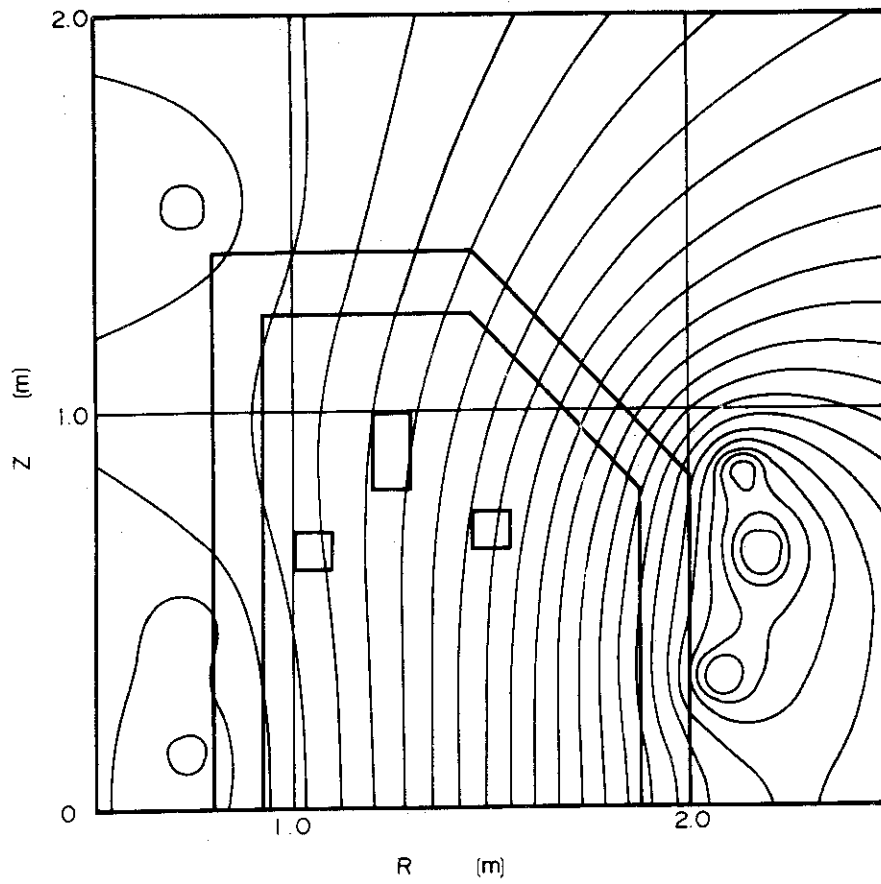


(a) 磁 力 線

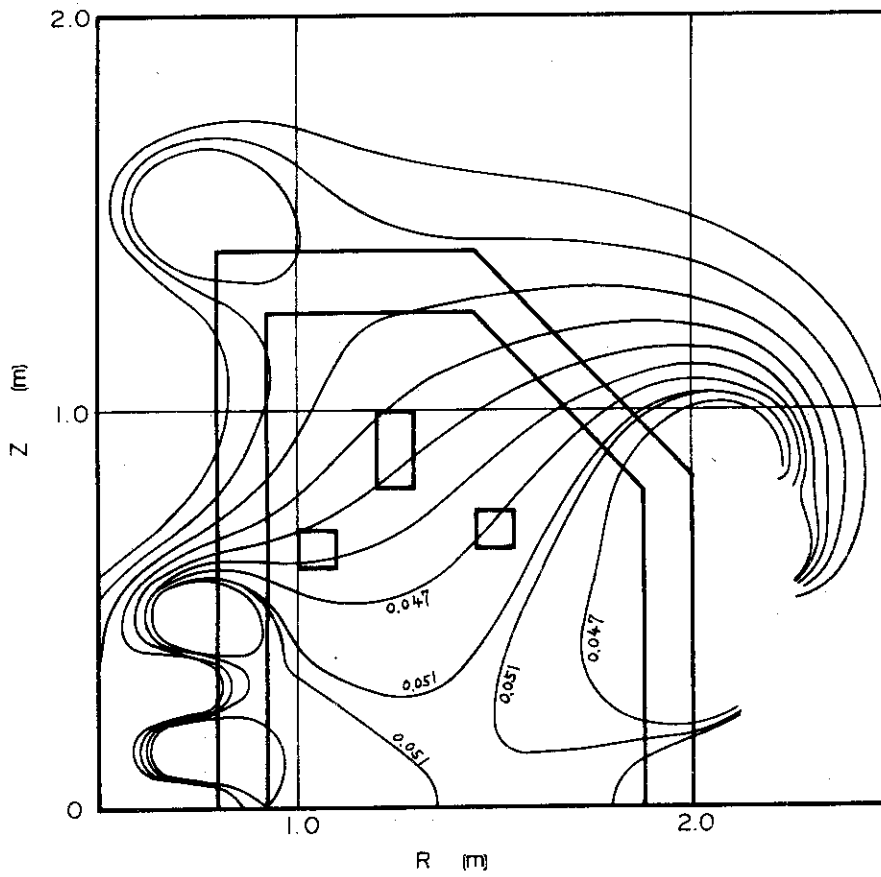


(b) 磁 場 強 度

第 4.67 図 D コイル 磁 場 分 布

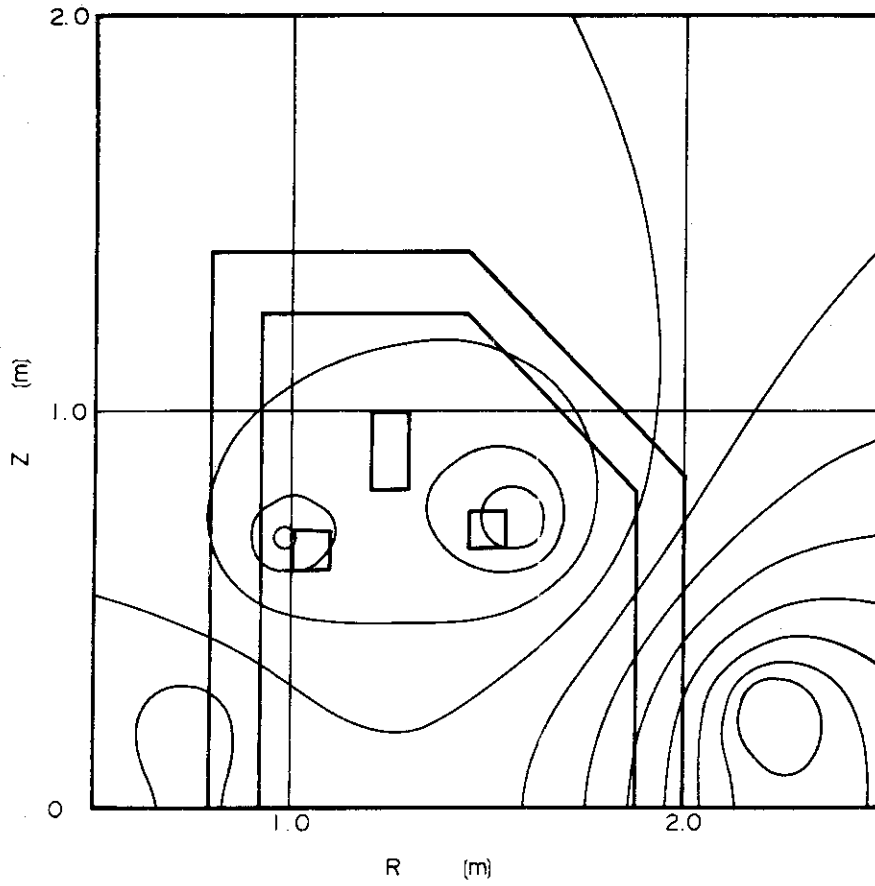


(a) 磁力線

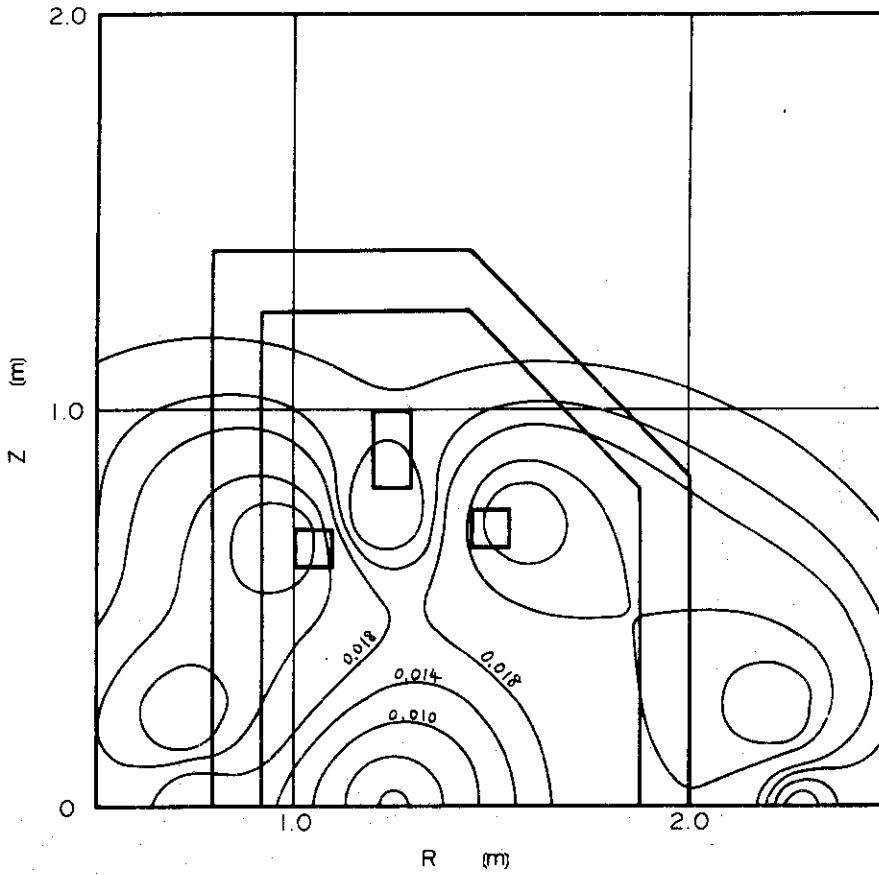


(b) 磁場強度

第 4.68 図 垂直磁場コイルの磁場分布

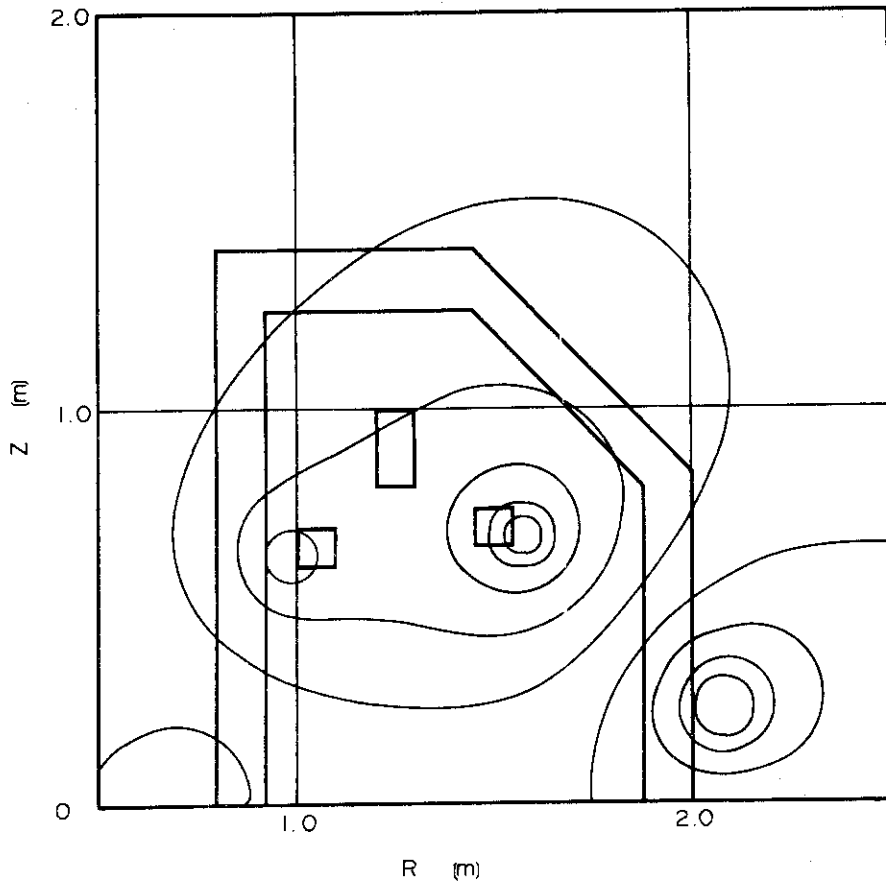


(a) 磁 力 線

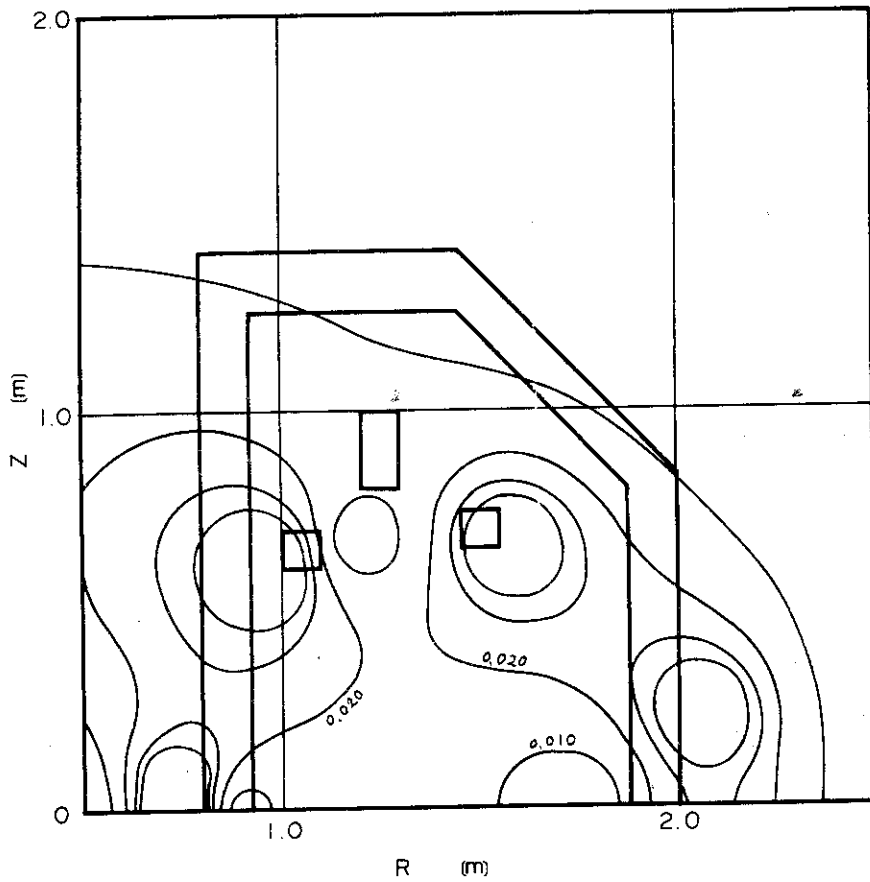


(b) 磁 場 強 度

第 4.6 9 図 四重極磁場コイルの磁場分布

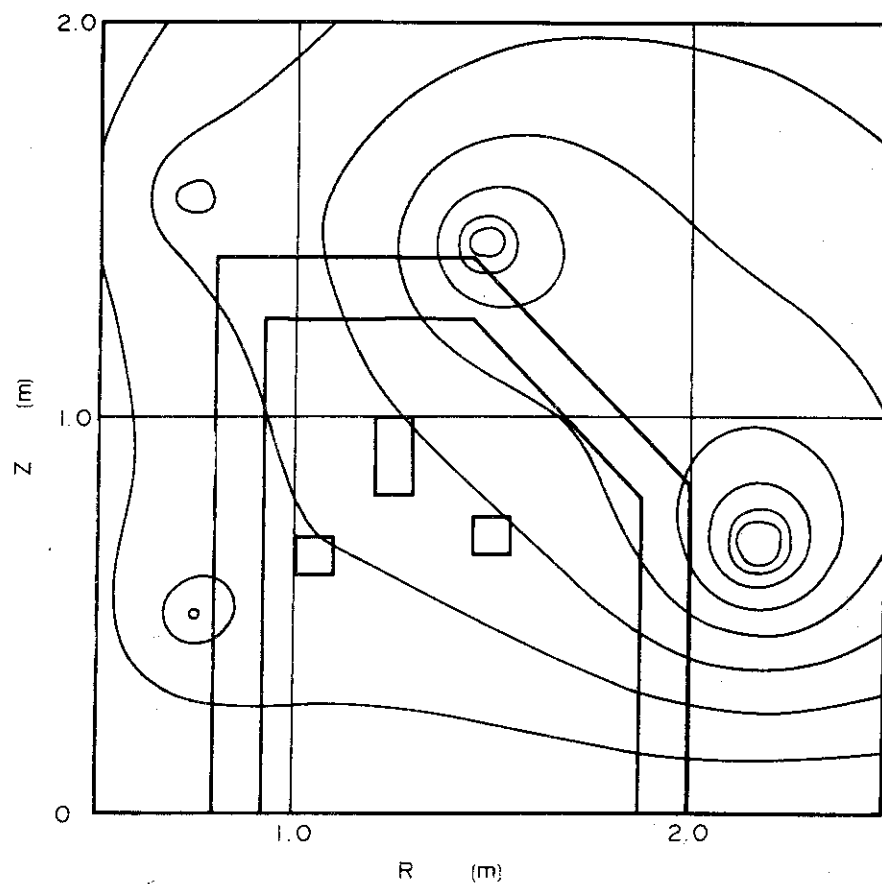


(a) 磁 力 線

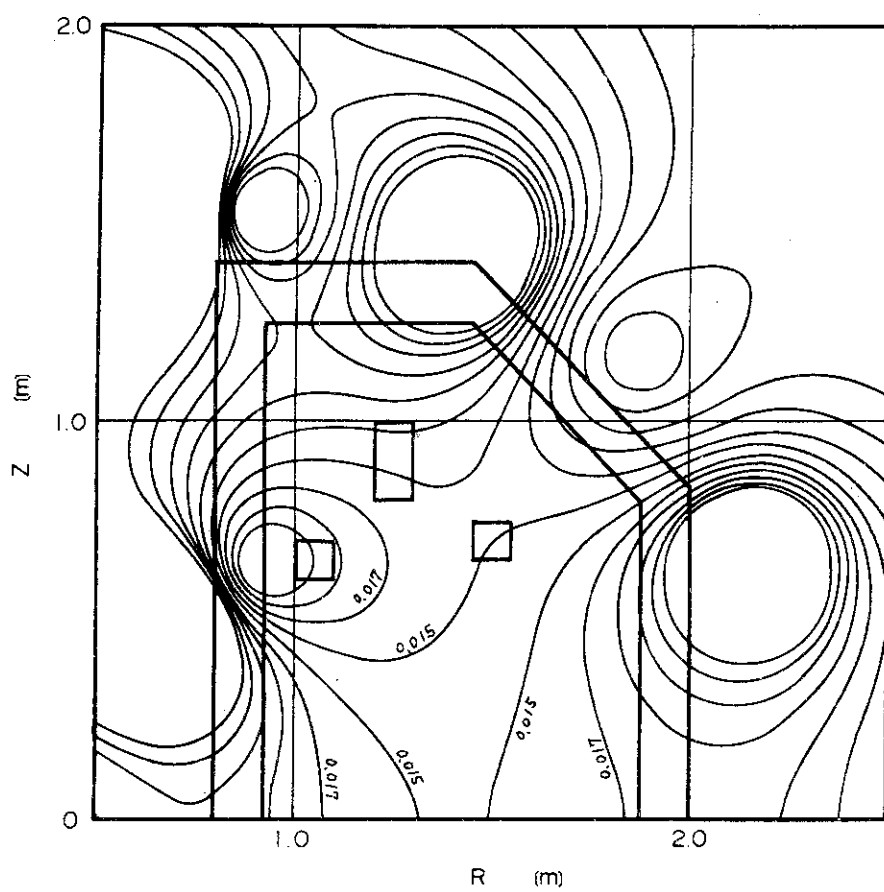


(b) 磁 場 強 度

第 4.7 0 図 位置制御コイルの磁場分布

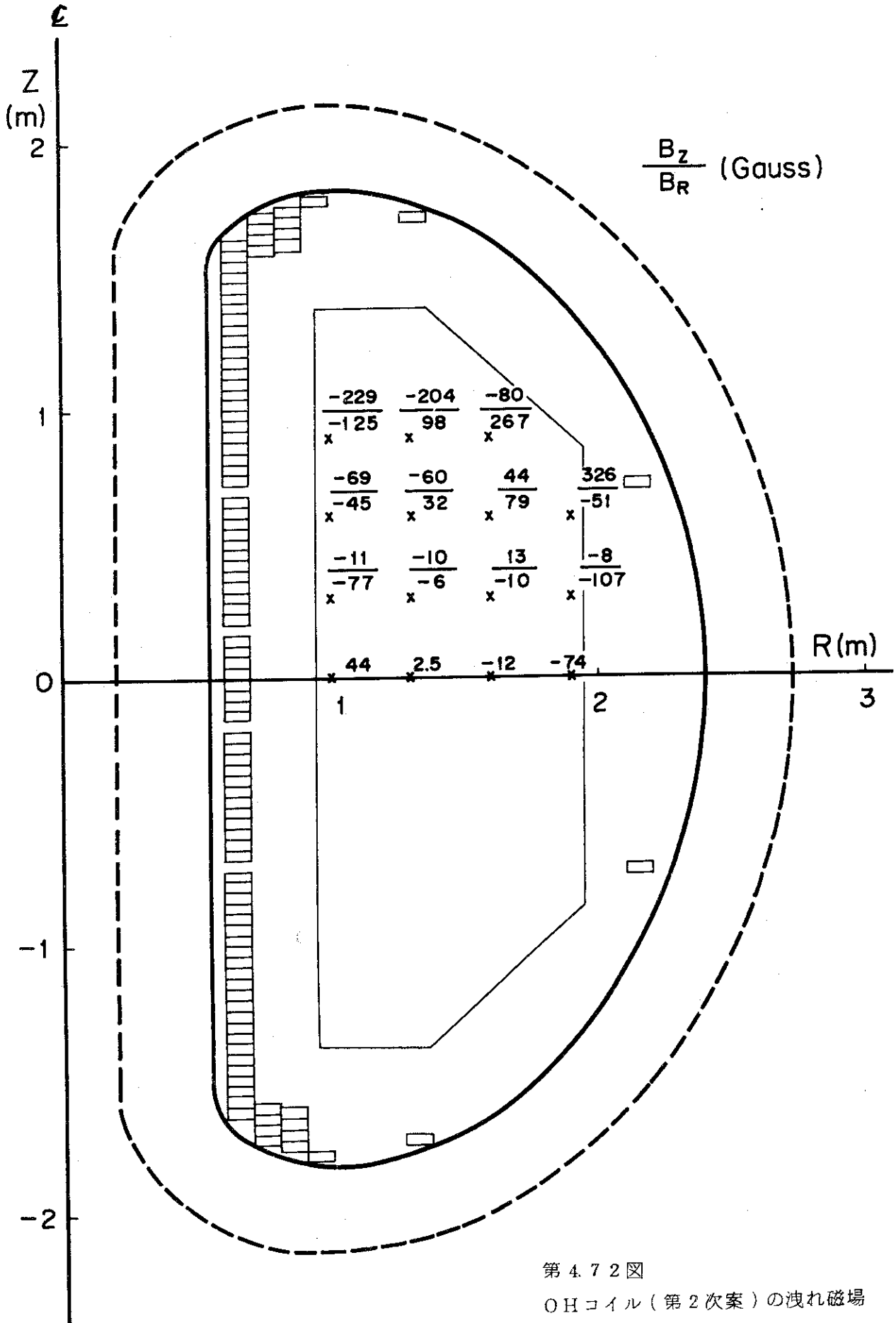


(a) 磁力線



(b) 磁場強度

第 4.7 1 図 水平磁場コイルの磁場分布



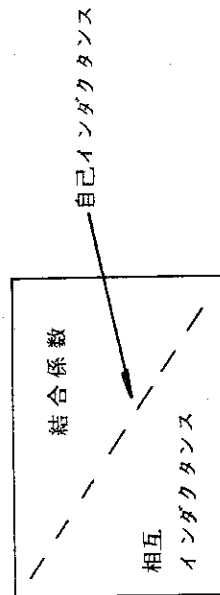
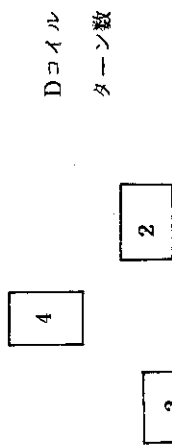
第 4.7.2 図
OHコイル (第 2 次案) の洩れ磁場

第4.5表 Pコイル一覧表 (予備設計案)

電磁諸量	コイル名	空心変流器 コイル	D-コイル	形状コイル			四重極磁 場コイル	六重極磁 場コイル	垂直磁場 コイル	位置制御 コイル	水平磁場 コイル
				Case I	Case II	Case III					
抵抗	mΩ	4	1.5	14	25	21	1.5	1.8	2.0	1.5	1.2
自己インダクタンス	H	3.7m	0.12m	25m	6.7m	4.8m	50μ	77μ	0.18m	44μ	58μ
時定数	S	0.93	0.08	0.18	0.27	0.23	0.033	0.043	0.09	0.03	0.048
最大起磁力	kAT	7500	±240	±750	±968	±800	±100	±120	±150	±100	±100
巻数	ターン	100	8	60	88	64	8	12	12	8	8
最大電流	kA	75	60	25	22	25	25	20	25	25	25
自乗平均電流	kA	7.81	5.5	2.3	2.0	2.3	2.17	1.73	2.17	2.17	2.17
最大電圧	V	300	410	350	550	525	37.5	36	50	37.5	30
最大電力	MW	2.25	5.4	8.85	1.21	1.31	0.94	0.72	1.25	0.94	0.75
自乗平均損失	kW	2.44	5.4	7.3	1.00	1.10	7.0	5.4	9.4	7.0	5.7
導体断面積	mm ²	2620 ~3170	2000 ~2463	1070~1240			1120 ~1410	1390 ~1410	1240 ~1410	1120 ~1410	1240 ~1410
導体重量	tons	1.23		1.18	1.18	1.18	0.95	1.40	1.39	0.79	0.94
プラズマからの誘起電圧	kV/1ターン	0.9	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.1

第 4.6 表 P コイル結合定数表 (予備設計案)

	記号	P	OH	D	S	V	Q	HX	C	H
プ ラ ズ マ	P	2.8 μ	0.38	-0.13	-0.34	-0.32	-0.036	-0.021	0	0
空 心 変 流 器 コ イ ル	OH	3.9 μ	3.8 m	0.00077	0.019	-0.014	0.0077	-0.012	0	0
D コ イ ル	D	-2.6 μ	0.56	0.14 m	0.12	0.047	-0.13	-0.0085	0	0
形 状 コ イ ル	S	-4.7 μ	9.6 μ	0.12 m	6.7 m	0.55	0.42	-0.21	0	0
垂 直 磁 場 コ イ ル	V	-7.2 μ	-1.1 μ	7.5 μ	0.6 m	0.18 m	0.19	0.043	0	0
四 重 極 磁 場 コ イ ル	Q	-0.44 μ	3.5 μ	-1.1 μ	0.25 m	1.9 μ	5.3 μ	-0.053	0	0
六 重 極 磁 場 コ イ ル	HX	-0.32 μ	-6.7 μ	-0.91 μ	-0.16 m	5.2 μ	-3.5 μ	8.3 μ	0	0
位 置 制 御 コ イ ル	C	0	0	0	0	0	0	0	4.2 μ	0.13
水 平 磁 場 コ イ ル	H	0	0	0	0	0	0	0	6.9 μ	6.1 μ



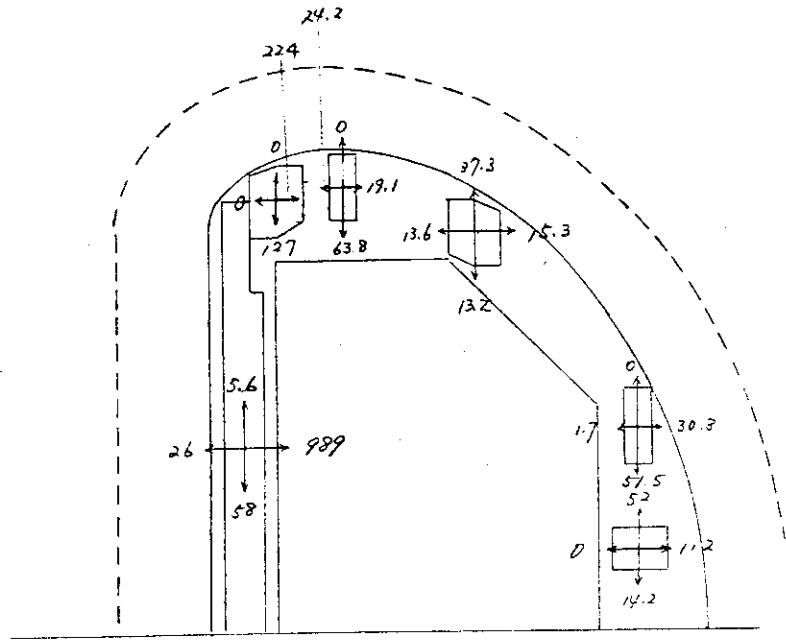
$\bar{a} = 0.4 \text{ m}$, Sコイル Case II ($\epsilon = 1.5$)

第 4.7 表 S コイルの結線

下半面は Z を負にする。(上下対称)

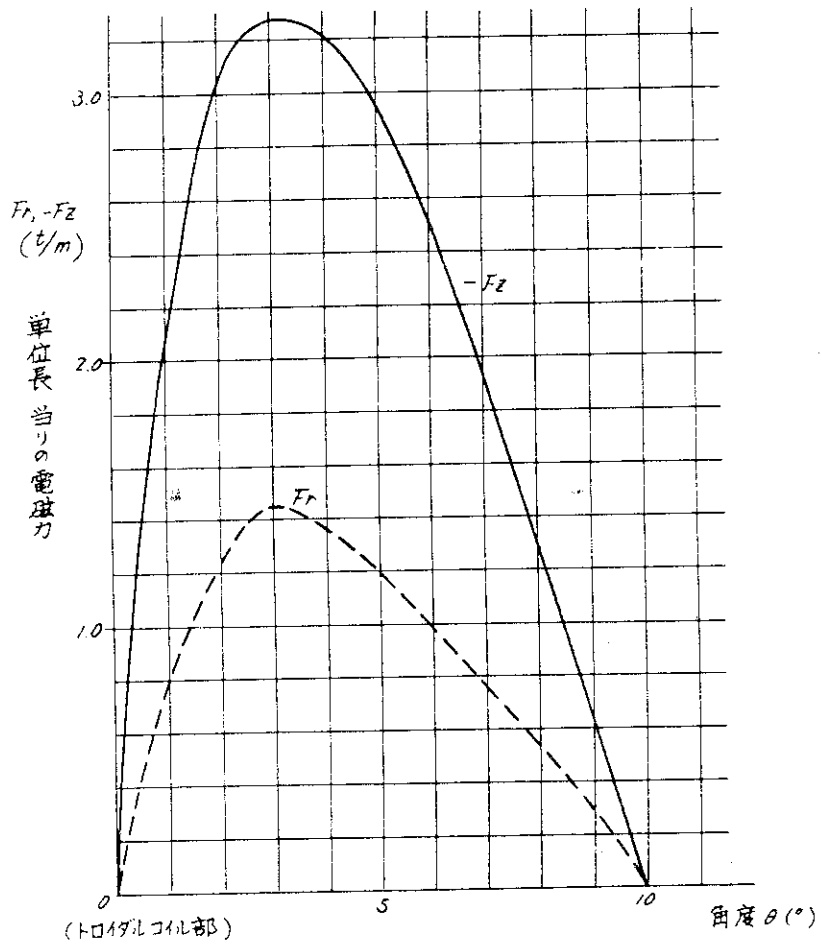
t = 0 での空心変流器コイルの電流の向きを + とする。

No	中心位置		I	II	III	No	中心位置		I	II	III
	R	Z					R	Z			
1	2.175	0.240		-		35	1.525	1.600			+
2	2.125	0.240	-	-		36	1.475	1.600	-		+
3	2.225	0.280		-	-	37	1.075	1.580		+	+
4	2.175	0.280	-	-	-	38	1.025	1.580		+	+
5	2.125	0.280		-	-	39	1.075	1.620		+	+
6	2.225	0.320		-	-	40	1.025	1.620		+	+
7	2.175	0.320	-	-	-	41	1.075	1.660		+	+
8	2.125	0.320		-	-	42	1.025	1.660		+	+
9	2.225	0.360		-	-	43	0.875	1.580		+	
10	2.175	0.360	-	-	-	44	0.825	1.580		+	
11	2.125	0.360		-	-	45	0.875	1.620		+	
12	2.075	0.360	-	-	-	46	0.825	1.620		+	
13	2.125	0.640	-		-	47	0.775	1.560			
14	2.125	0.680	-	-	-	48	0.775	1.520			
15	2.175	0.720	-	-	-	49	0.730	1.260	+		
16	2.125	0.720		-	-	50		1.180	+		
17	2.175	0.760	-	-		51		1.100	+		
18	2.125	0.760				52		1.020			
19	2.175	0.800				53		0.980	+		
20	2.175	0.840				54		0.860			
21	1.575	1.400	-	+		55		0.740	+		
22	1.625	1.440		+		56		0.660	+		
23	1.575	1.440	-	+		57		0.580	+		
24	1.625	1.480		+	+	58	"	0.540	+	-	
25	1.575	1.480		+	+	59		0.420	+	-	
26	1.625	1.520		+	+	60		0.380	+		
27	1.575	1.520		+	+	61		0.340	+		
28	1.525	1.440		+		62		0.300	+	-	
29	1.475	1.480		+		63		0.260	+	-	
30	1.475	1.480	-	+		64		0.180	+	-	-
31	1.525	1.520		+	+	65		0.020	+	-	-
32	1.475	1.520	-	+	+	最大電流 kA/Turn			25	22	25
33	1.525	1.560			+	同上合計起磁力 kAT			±750	±968	±800
34	1.475	1.560	-		+	上記に対応するプラズマ電流 kA			800	1000	1000



(単位: t/m)

第 4.7 3 図 P コイルの電磁力



第 4.7 4 図 トロイダル磁場リップルによる電磁力

る結線を示した。²¹⁾ プラズマ内の電流密度分布が第4.7表の計算に用いたものと異なる場合が考えられ、それに対応して形状コイルの電流分布も変える必要があるので、第4.7表では使用しない巻線も用意してある。これらの巻線は、その周囲の巻線に準じて設計を行う。

位置制御コイルは、フィードバック制御によって非円形断面プラズマの垂直方向位置不安定性を安定化するためのコイルである。

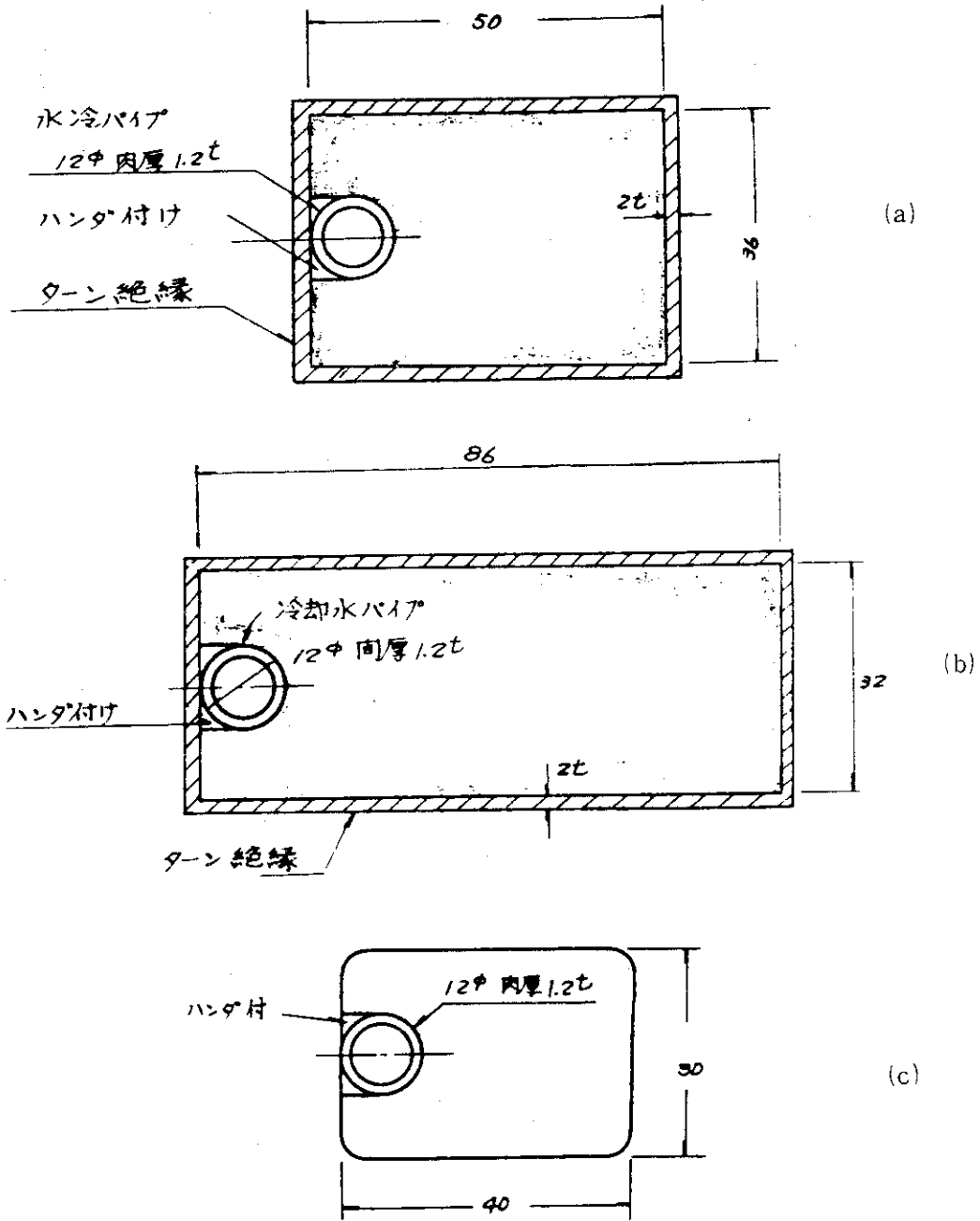
これらのPコイルは、予備設計の検討結果を基礎として、プラズマ制御の検討、電源の検討など、今後の検討を更に深めて最適化を計る予定である。

4.8.3 Pコイルの電磁力と支持

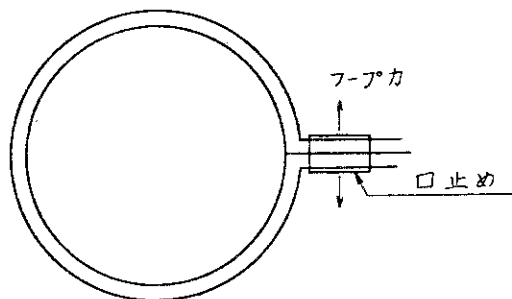
Pコイルには、自重の他、1) 自分の電流によるフープカ、2) 他のPコイル電流、及び、プラズマ電流との相互作用による電磁力、3) トロイダル磁場のリップルによる電磁力が作用する。自重は、他に比べて小さいのでここでは考慮しない。2)は、各種Pコイルの電流値の組合せによって異なるが、電磁力が最大となる組合せにおいて、1)と、2)の合計の電磁力を第4.7.3図に示す。同図は、上半分($Z \geq 0$)のPコイルのみについての値である。3)は、装置の外側ほど大きく、変流器コイルNo.50が最大である。その電磁力は、第4.7.4図に示す通りである。

これら電磁力に対する支持、及び、強度解析のごく一部を次に述べる。各コイルの断面形状の例として、第4.7.5図に示すものを取り、又、各コイルは、R方向に可動の支持とする。空心変流器コイルNo.38のフープカは、3.6 ton であり、導体応力は、 2 kg/mm^2 となり、コイル自身で充分耐えることができる。又、形状コイルなどのように、1ターンで給電線を設けるもの(第4.7.6図)では、フープカが口止め材に作用する。この種のコイルで最大の電磁力が働く形状コイルNo.12では、フープカが、2.9 ton であり、導体内の引張り応力は、 2.4 kg/mm^2 、口止め材断面積を 300 mm^2 とすれば、口止め材応力は、 1.0 kg/mm^2 となり、充分耐えることができる。3)の電磁力は、第4.7.3図の各ブロックが一体として扱える場合には全く問題ないが、安全側で検討するため、空心変流器コイル1ターンだけとして計算すると、各コイルを全周18ヶ所(20° 毎)に支持すると、No.49、No.50のコイルに対して、最大応力は、各々 6.6 kg/mm^2 、 8.6 kg/mm^2 となり、銀入り銅(硬銅)にすれば、コイル導体自身で耐えることができる。なお、各ブロックを一体として扱うと、No.49、No.50(第5、6ブロック)に対しても、応力は約 1 kg/mm^2 であり、全く問題ない。

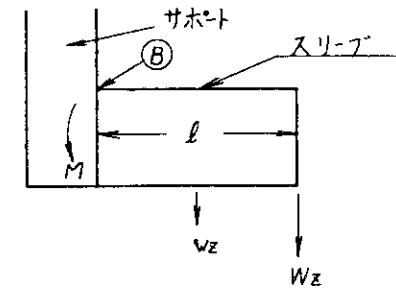
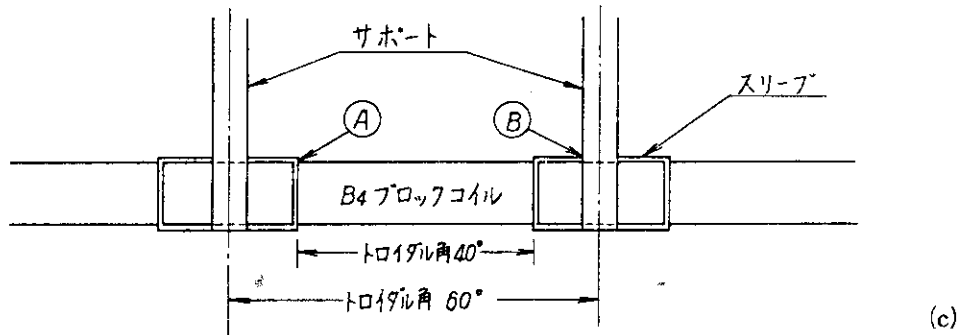
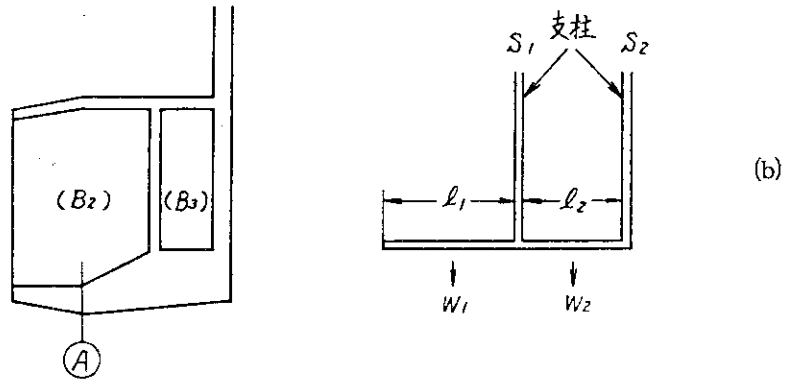
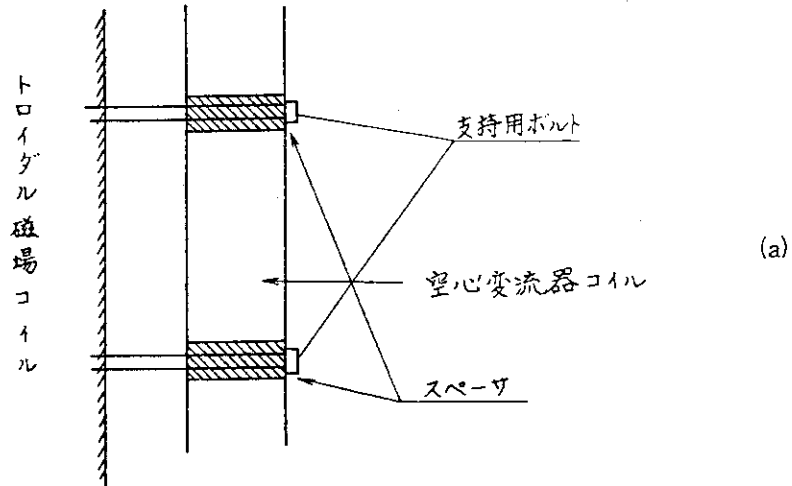
Pコイル支持の設計例を、第4.7.7図に示す。内側のコイルは、同図(a)に示すように、Tコイルによって支持する。固定ボルトの強度も、計算によれば充分である。第2、3ブロックは、同図(b)のように、他は(c)のように、架台に固定したサポートによる。これらの応力解析も行なわれており、強度は充分である。



第4.75図 Pコイルの断面



第4.76図
ワンターンのPコイル
口止め



第 4.7.7 図 P コイルの支持

4.8.4 誤差磁場

Pコイルには、ターン毎のコイル内渡り線、給電線による誤差磁場、及び、製作誤差、設置誤差による誤差磁場が発生する。Pコイルの中で、空心変流器コイルは電流が最大であり、誤差磁場も大である。そこで、主にOHコイルについて誤差磁場を検討する。第4.7.3図の第1ブロックでは、トロイダル方向1ヶ所で段落しをするため、巻もどしをする必要がある。巻もどし、及び、給電線の配置について、多くの案が検討されたが、第4.7.8図に示すものが適当である。これは、上下のコイルを別々に給電するものであり、対地絶縁耐圧を低減する意味もある。この場合の誤差磁場計算結果を、第4.7.9図に示す。ここで、誤差磁場の表記方法は、4.5節の第4.3.8図と同様である。OHコイル以外のPコイルの渡り線、給電線による誤差磁場を、第4.8表に示す。

OHコイルの製作誤差による誤差磁場は、OHコイル全体の半径が±5mm変化したとすると、その時の誤差は、第4.9表に示す通りである。この場合の基準磁場は高々200G(平均77G)であり、製作誤差による誤差磁場は最大10G程度である。又、OHコイルの中心位置が、R方向、又は、Z方向に5mmずれた場合の誤差磁場は、各々、最大6G、及び、約1Gであり、これも問題ないものと考えられる。

4.8.5 絶縁耐圧

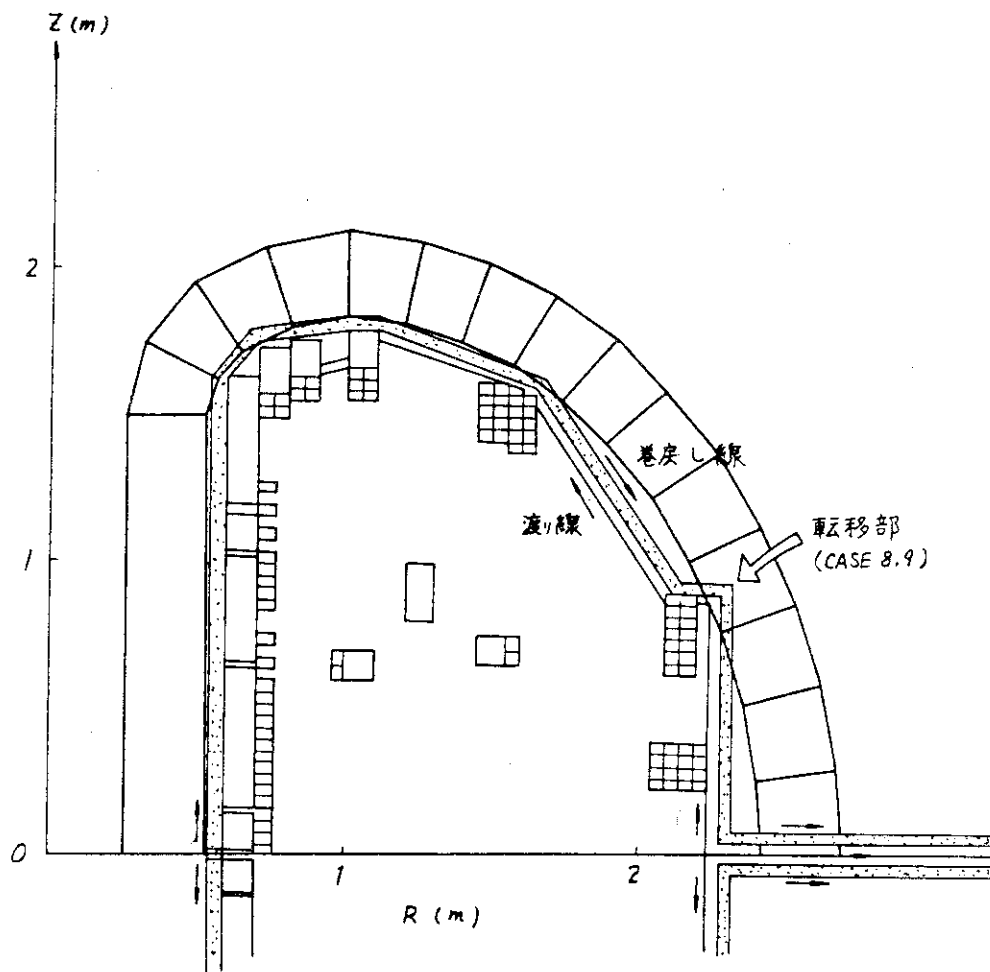
Pコイルは、相互に誘導結合があり、又、プラズマ電流との結合がある。そのため、他のPコイル、又は、プラズマ電流が急激に変化すると、 $E_i = M_{ij} \frac{dI_j}{dt}$ の起電力が発生する。中でも、プラズマ電流は、プラズマの不安定性などにより、急激に遮断する可能性がある。実際には、コイルとプラズマの間に真空容器があり、急激な変化はシールドされるが、予備設計においては、Pコイル各ターンに $\frac{M_{ip}}{L_p} \times V_p$ の電圧が誘起されるものとした。ここで、 M_{ip} は、コイルとプラズマとの相互インダクタンス、 L_p は、プラズマの自己インダクタンス、 V_p は、プラズマの一周電圧である。 V_p としては、プラズマ電流遮断時間約2msに対応する1500Vをとった。 $\frac{M_{ip}}{L_p}$ はコイル位置によって決り、その値は、第4.8.0図に示す通りである。

コイルの絶縁は、コイルの種類と配置によって異なるが、ある設計例の結果を示すと次の通りである。ブロック内で、同一コイルが隣接する場合の素線絶縁の厚さは1mm、異なるコイル間はアース絶縁を行なうものとし、OHコイルには7.5mm厚、その他のコイルには3~5mmの絶縁層を設ける。形状コイルは、全ターンを同時に使用することではなく、各ターン独立と考える必要がある。たのため、形状コイルの素線絶縁は2mm厚である。

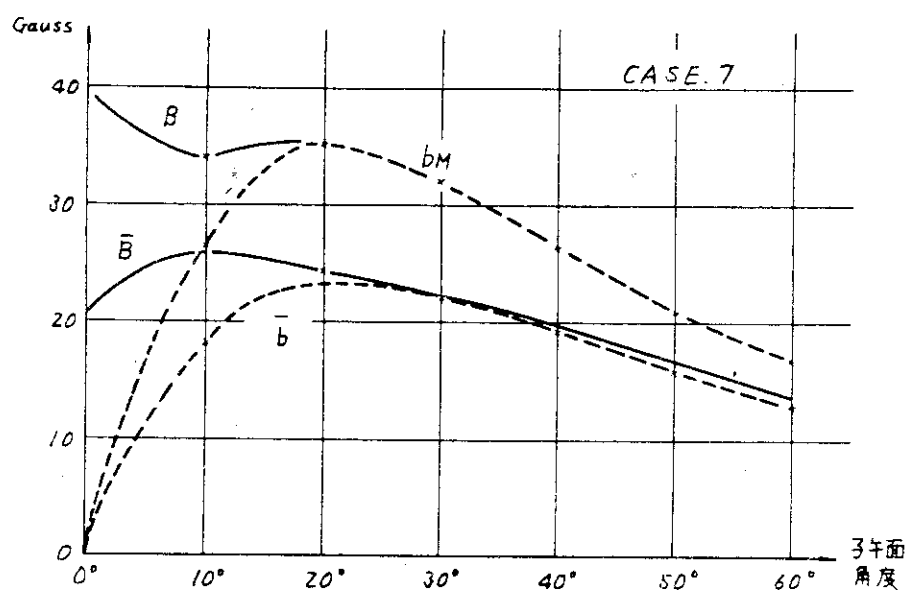
4.8.6 Pコイルの熱計算

Pコイルは水冷を行う。OHコイルの1つの設計例では、冷却パイプは、内径9.6mmφ、流速は、2m/s、冷却水系は、9系列である。

発熱は、最も厳しい例として、第4.8.1図のような波形を仮定する。この場合の導体の断熱



第 4.78 図 OHコイルの給電線



第 4.79 図 OHコイルの給電線による誤差磁場

第 4.8 表 各種 P コイルの給電線による誤差磁場

単位：ガウス

最大誤差磁場		B*	B _φ **
コイル名			
形状コイル	Case I	-91.8	167.5
	II	58.4	126.6
	III	37.4	33.6
位置制御コイル		-30.5	-93.8
四重極磁場コイル		42.7	30.1
六重極磁場コイル		36.6	26.9
垂直磁場コイル		48.6	35.6
水平磁場コイル		45.9	33.5

$$* \quad B = (B_R^2 + B_Z^2)^{\frac{1}{2}}$$

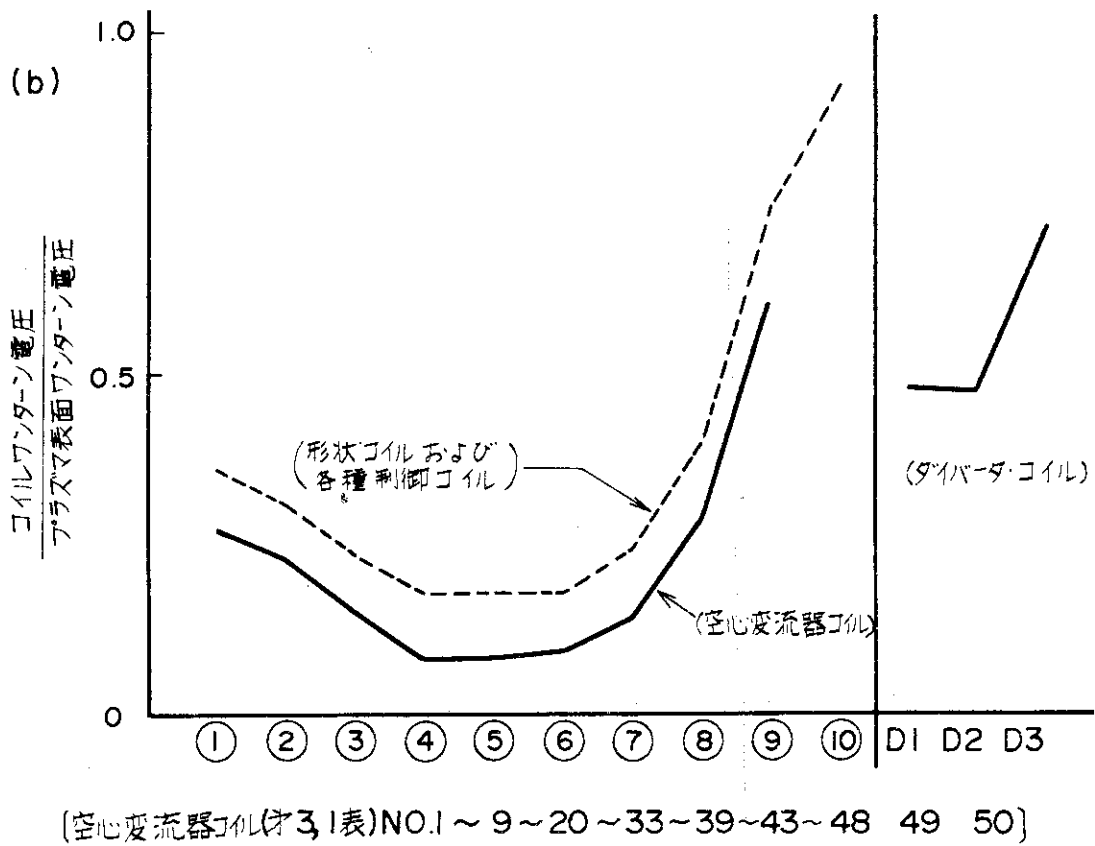
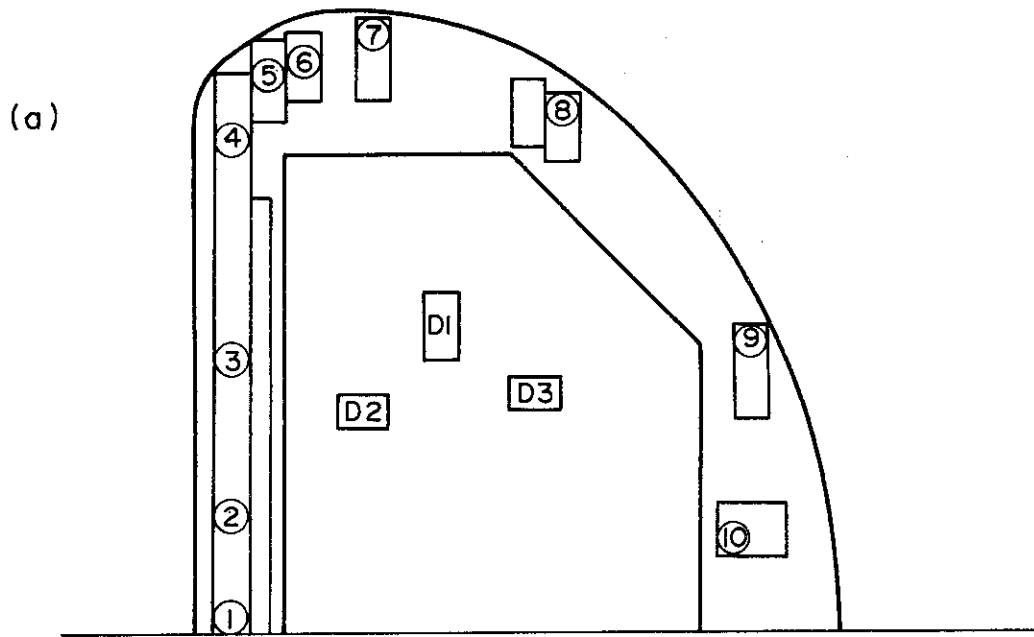
B_φ : 誤差磁場のトロイダル方向成分

** 給電線の電流中心は、トロイダル方向に 50 mm 離れているとした。

第 4.9 表 O H コイル製作誤差による誤差磁場

評価位置	ΔB _Z /B _Z * (%)	
	R+5 mm	R-5 mm
0	3.0	-2.9
A	1.8	-2.1
B	3.6	-5.3
C	0.7	-0.7
D	2.5	-2.7
E	0.7	-0.7
F	3.6	-5.3

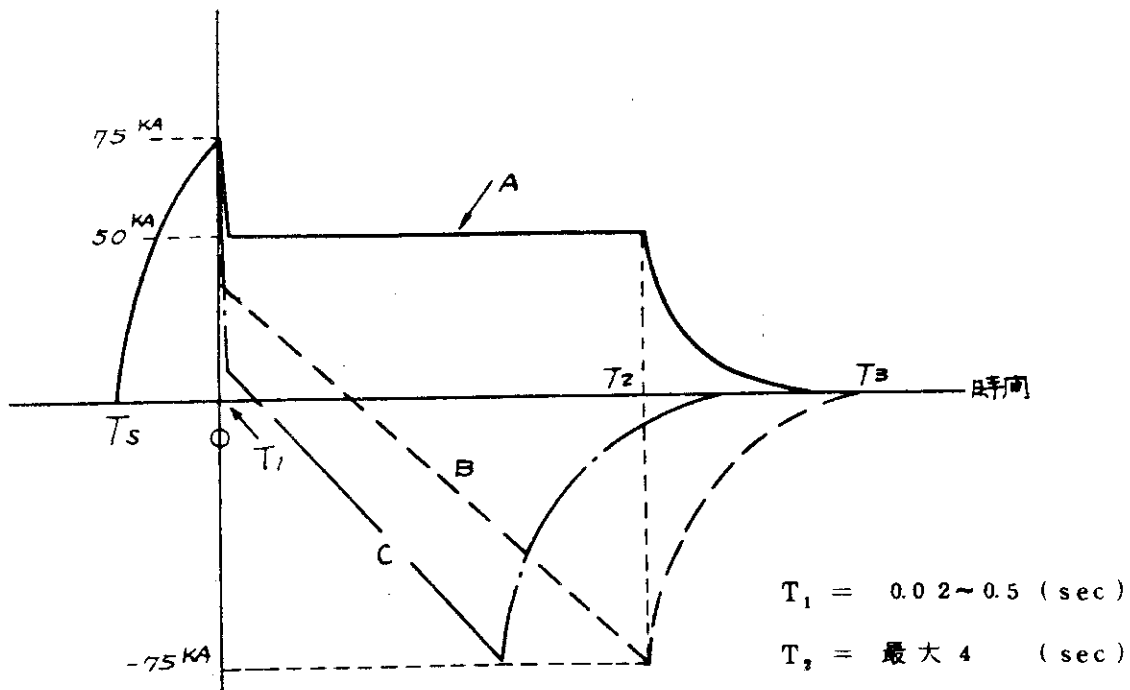
*) B_Z : 空心変流器コイルが正規の位置にある場合の軸対称性誤差磁場の Z 成分。



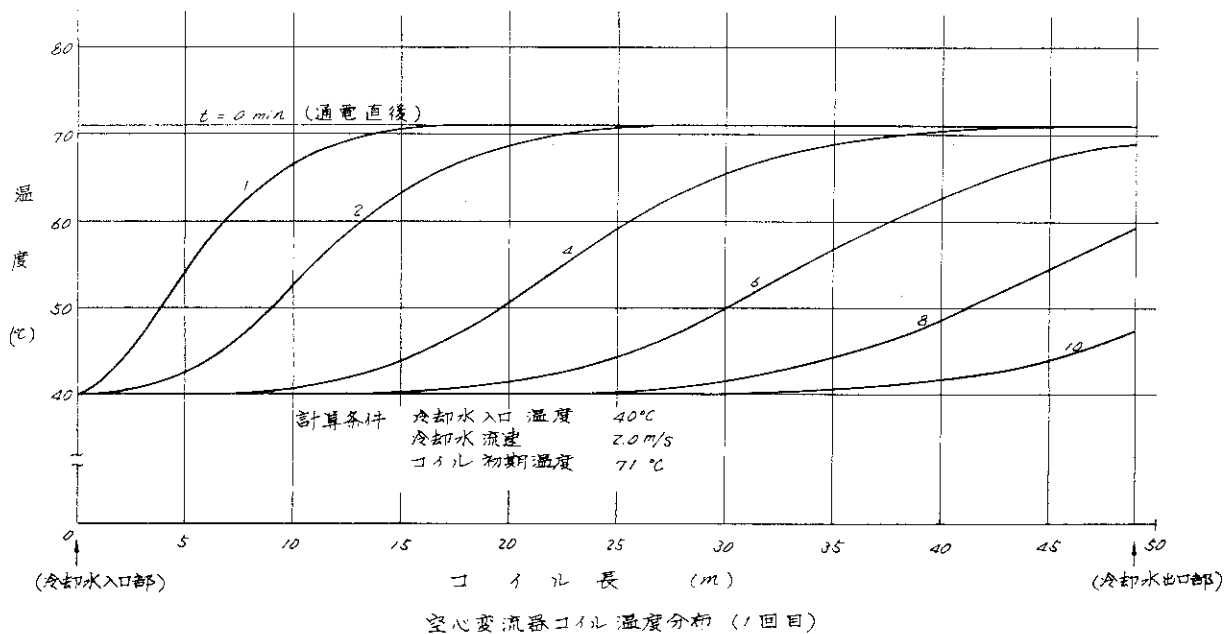
第 4.80 図 P コイルの絶縁耐圧

温度上昇は、 30.6°C であり、問題はない。又、最も厳しいNa 2, Na 3水系について、冷却水による熱除去の計算結果を第4.82図に示す。10分間隔の通電で、2回目以降は、ほぼ温度分布が安定している。この場合、冷却水管長49mでの圧力損失は、24.2m水柱である。

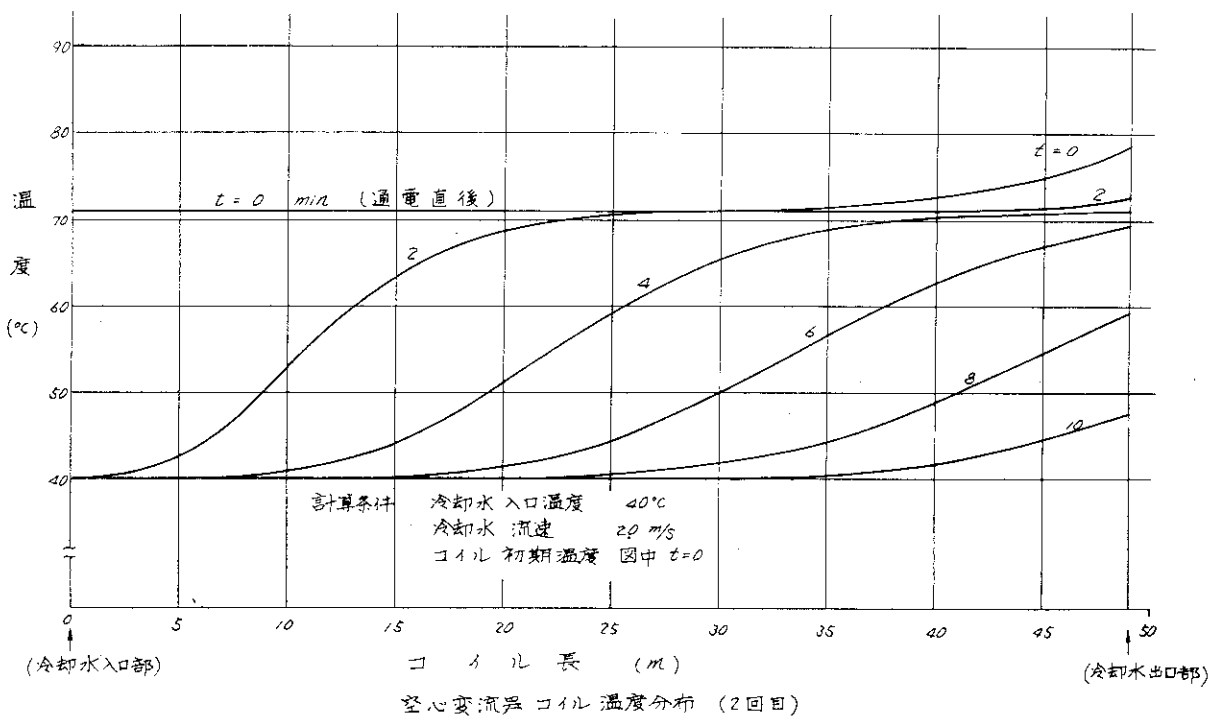
Pコイルの熱計算結果の一例を、第4.10表に示す。この例は、第4.75図に示すものと多少異なる設計によるものであるが、OHコイル以外のPコイルは、電流密度に余裕のあることがわかる。



第4.81図 Pコイル熱計算のための電流波形



(a)



(b)

第 4.3.2 図 OHコイルの温度変化

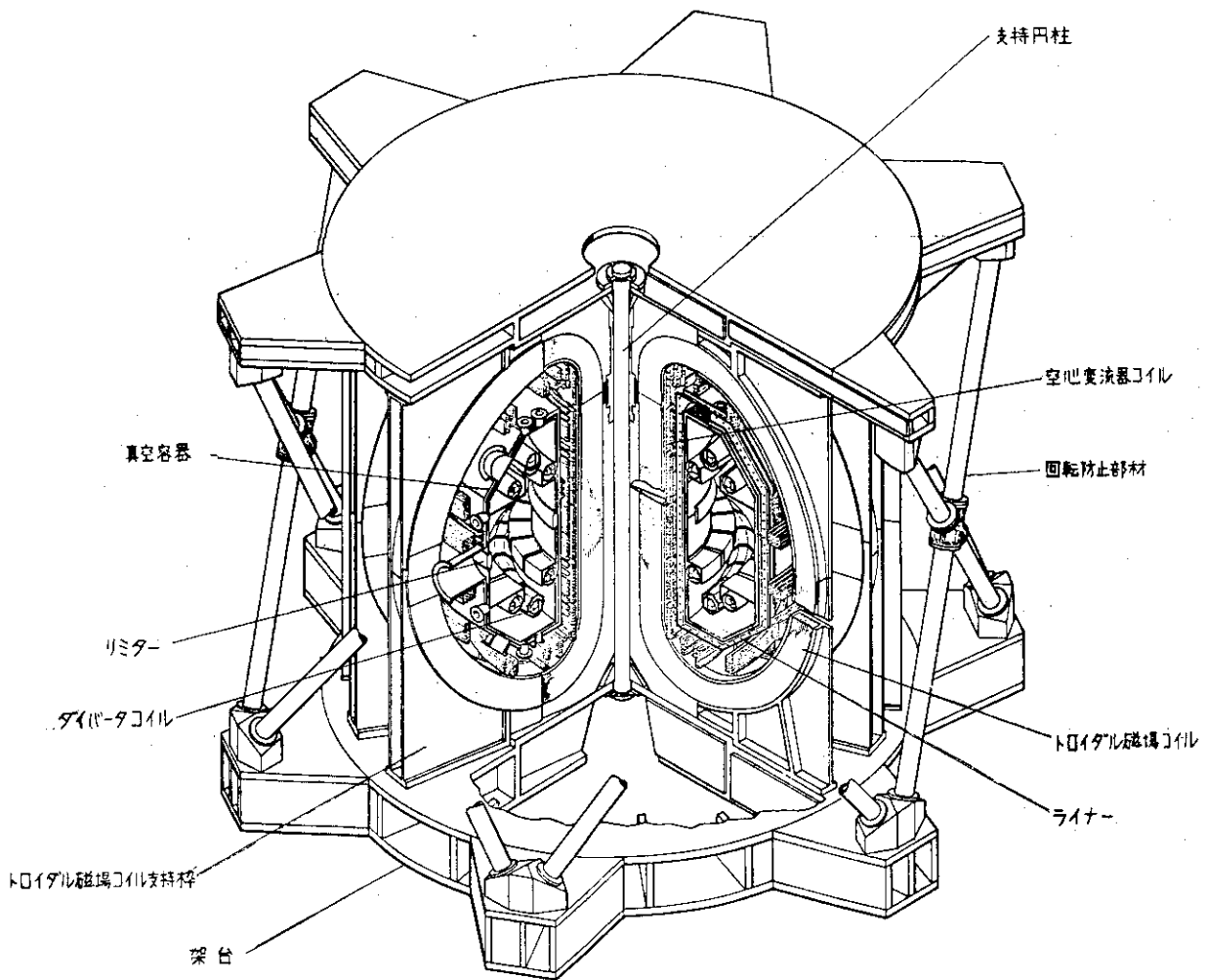
第4.10表 Pコイルの冷却計算結果

コイル名	自乗平均電流 による発熱量 W/m	ピーク電流に よる発熱量 kW/m	冷却水流量 ℓ/min	冷却水温度 上昇 °C	導体-冷却水 温度差 °C	通電時温度上昇 °C	最高到達温度 °C
空心変流器コイル	488	588	9.2	20	1.8	54.4	117
形状コイル	129	153	4.7	8.3	1.3	25.5	75.1
位置制御コイル	70	9.3	4.7	5.3	0.4	8.5	54.2
四重極磁場コイル	70	9.3	4.7	7.0	0.4	8.5	55.9
六重極磁場コイル	45	6.0	4.7	16.4	1.1	5.5	63.0
垂直磁場コイル	70	9.3	4.7	10.7	0.4	12.3	63.4
水平磁場コイル	70	9.3	4.7	7.1	0.4	12.3	59.8

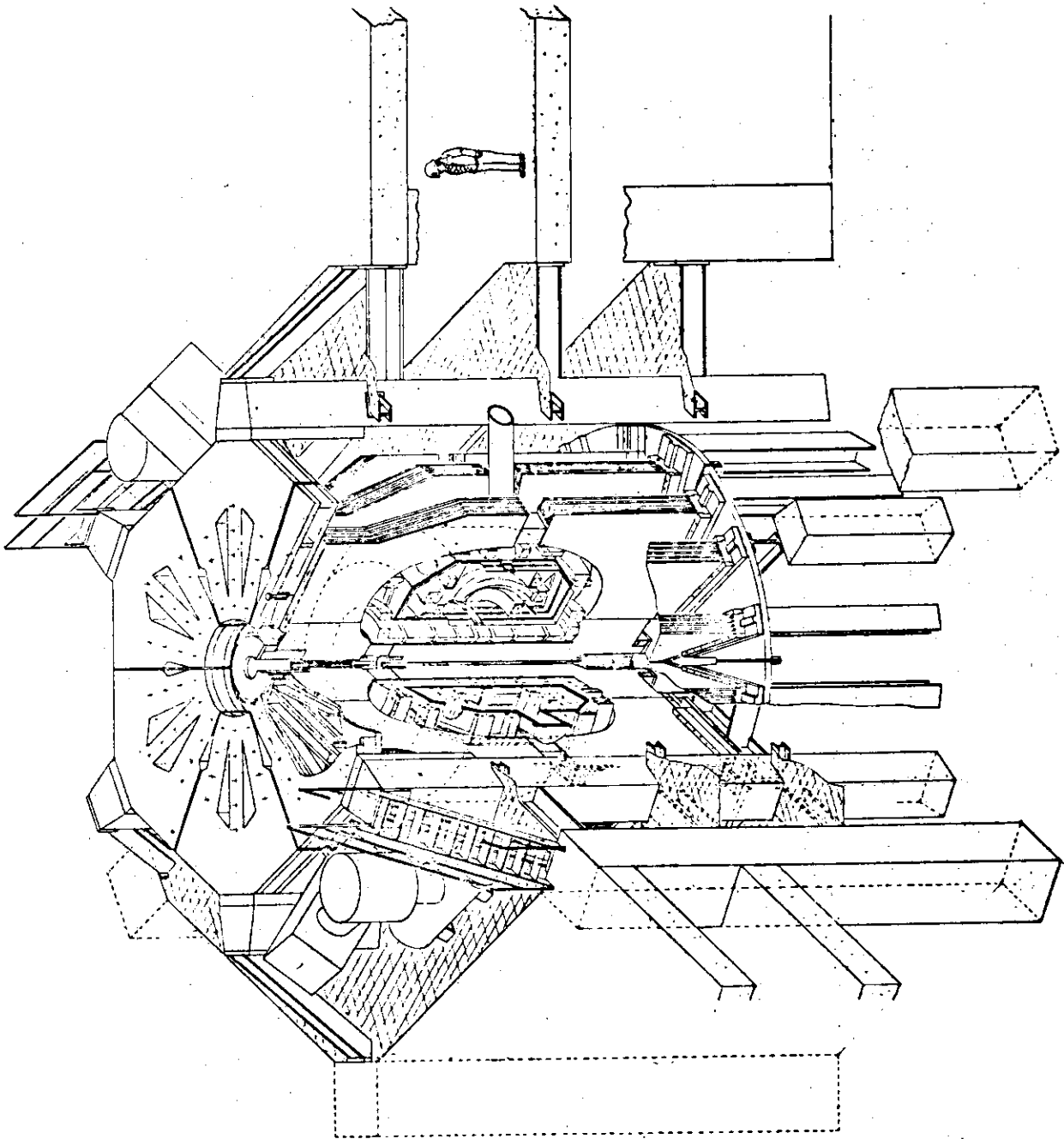
(注) 冷却水流量 : 1冷却系当りの流量
冷却水入口温度 : 40°Cとする

4.9 架 台

架台は、上下2枚の架台（枠）と、これらを連結する回転防止材から構成されている。架台は、真空容器、Pコイル、Tコイルの重量を支持するが、最大の力は、Tコイルの電磁力である。電磁力のうち、フープ力は、接続部の設計次第ではコイル自身、及び、キャンで耐えることができるが、第4.5.4図Cの場合には、上下の架台枠によって上下から抑える必要がある。Tコイル電磁力のうち、転倒力は架台によって支持され、上下の架台枠はこれに耐えるよう回転防止材で結合される。回転防止材の名称もこの意味からきている。架台は、第4.5.4図にも示した各種の案があるが、これらを第4.8.3図に示す。



第4.8.3図 (a) 架 台



第 4.8.3 图 (b) 架 台

4.10 ポロイダル電源

4.10.1 概 説

ポロイダル電源は、Pコイルに、制御した電流を通電する電源であり、整流素子、SCRなどの電源素子とコイルを組合せて最適に設計すべきものである。前述のように、予備設計では、コイル仕様を与えたため、電源としては不都合な点もある。しかし、コイル巻数を変更して、合理的な電源設計も予備設計の一部で行われた。又、プラズマ制御の面から、Pコイルの配置は再考の余地があり、実機のPコイル、ポロイダル電源は、予備設計時よりも改善されたものとする予定である。さらに、OHコイル、Sコイルの電源については、各種の回路方式があり、今後、最適化の検討が必要である。

第4.1.1表 Pコイルの制御方式

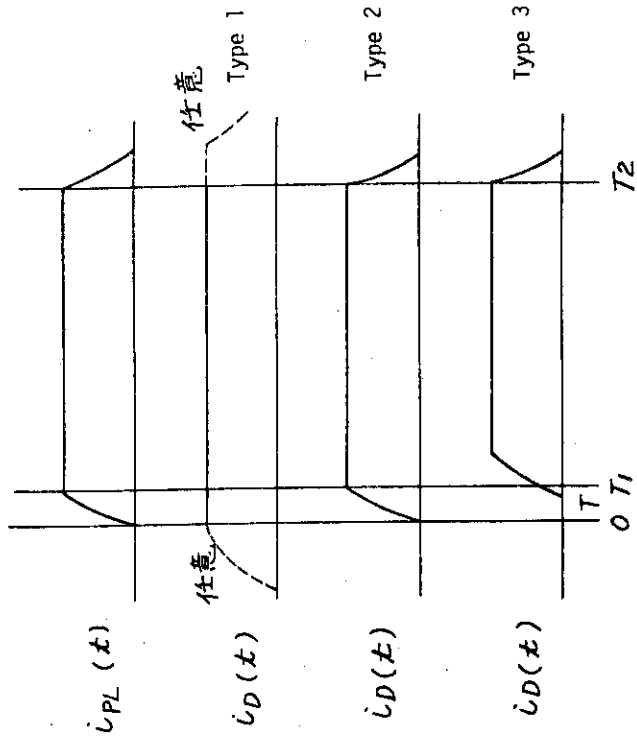
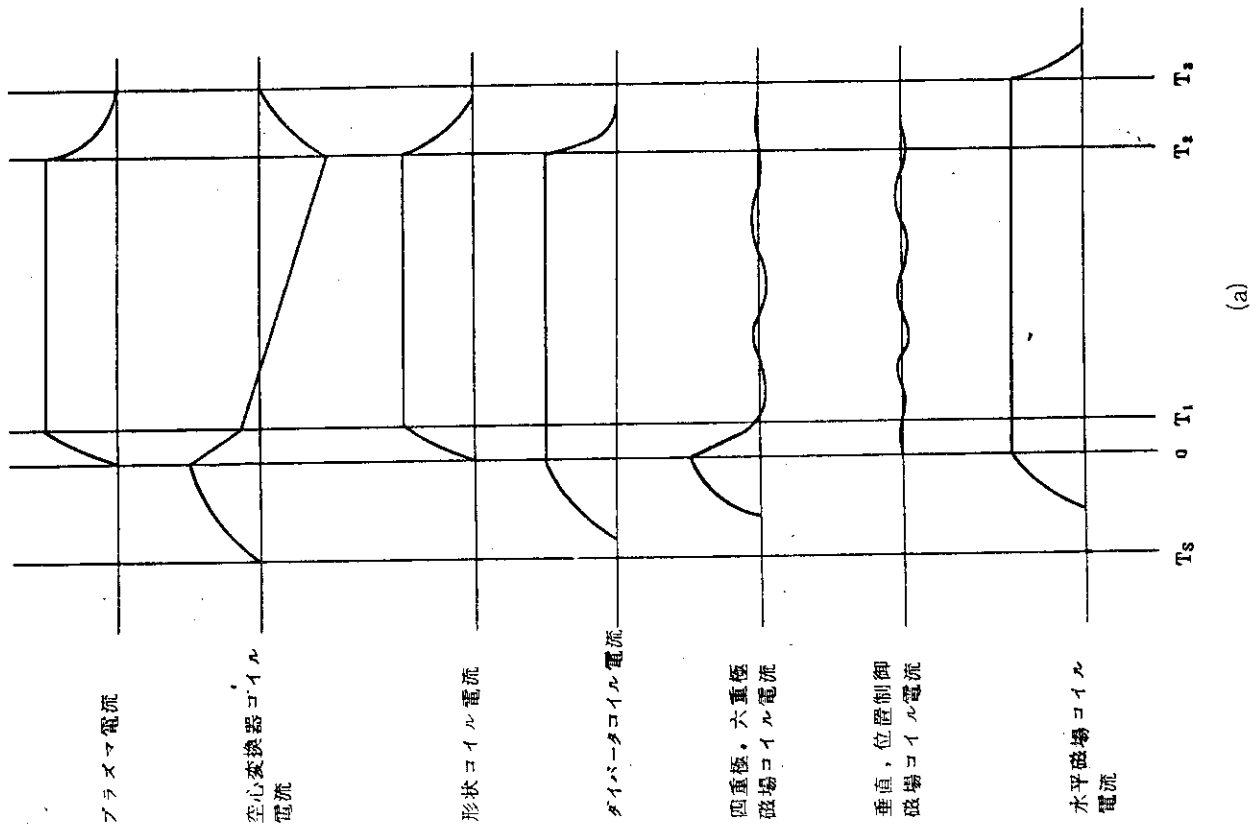
ポロイダルコイル	制 御 方 式		
	プラズマ電流立上り時間 ($0 < t < T_1$)	プラズマ電流維持時間 ($T_1 < t < T_2$)	プラズマ電流消滅時間 ($T_2 < t < T_3$)
空心変流器コイル	プログラム制御		
水平磁場用コイル	プログラム制御		
形状コイル	プログラム制御	プログラム制御	プログラム制御
ダイバータコイル	プログラム制御	プログラム制御	プログラム制御
垂直磁場コイル	プログラム制御	+プログラム制御 帰還制御	同 左
四重極磁場コイル	プログラム制御	プログラム制御 帰還制御	同 左
位置制御用コイル		帰還制御	同 左
六重極磁場コイル	プログラム制御	(+プログラム制御 帰還制御)	同 左

4.10.2 電源容量

コイル給電のために必要な電源の大きさは、最大電圧、最大電流、及び、それらの積で表わされる。負荷となるコイルは、第4.5表の通りであり、これに、第4.8.4図の電流を与える電源を考える。電源容量は、励磁期間、プラズマ電流立上り期間、フラットトップ期間の3期に区分して考えることができる。コイルの最大電流は第4.5表の通りであるが、電圧は、

$$V_i = RI_i + L_i \dot{I}_i + \sum M_{ij} \dot{I}_j$$

で与えられる。したがって、各コイルの電源波形、プラズマ電流および他のコイルとの結合を考慮する必要がある。予備設計における各Pコイルの電源容量を第4.1.2表、第4.1.3表に示す。ただし、同表で制御コイルに必要な最大電流および立上り時間はプラズマ制御の検討に基い



第 4.84 図 P コイル電流波形

第 4.1.2 表 OH, S, D コイルの電源容量

I _D モード	T _i (msec)	R ₀ (μΩ)	τ (msec)	T _i r	OHコイルピークV _{OH} , I _{OH}			DコイルピークV _D , I _D			SコイルピークV _S , I _S			ビーク電力		
					励磁期	立上り期	維持期	励磁期	立上り期	維持期	励磁期	立上り期	維持期	OH	D	S
type 1	20	0.1	2	10	608 V	162 V	324 V	318 V	324 V	324 V	324 V	7040 V	536 V	45.6 MVA	9.7 MVA	73.7 MVA
	"	1.05	2	"	75 kA	29.6 kA	30 kA	30 kA	30 kA	30 kA	30 kA	22 kA	2.2 kA	(励磁)	(flat)	(立上り)
	"	2.0	2	"	"	-5.40	"	"	"	"	"	7010	"	45.6	9.7	73.6
type 2	200	0.1	104	10	"	-7.50	"	"	"	"	"	7140	534	46.9	9.7	71.0
	500	1.05	125	4.0	"	-6.25	"	"	"	"	7230	22	22	(flat)	(flat)	(立上り)
	20	2.0	2	2.5	"	-7.50	"	"	"	"	7230	22	22	47.3	9.7	71.2
type 3	200	0.1	104	10	"	-6.30	"	"	"	"	753	535	45.6	9.7	15.3	
	500	1.05	200	2.0	"	-7.50	"	"	"	"	30	22	22	(励磁)	(flat)	(立上り)
	20	2.0	2	2.5	"	-5.40	"	"	"	"	1000	538	45.6	2.23	2.23	76.6
type 3	250	0.1	104	10	"	-5.40	"	"	"	"	30	22	22	(励磁)	(立上り)	(立上り)
	500	1.05	200	2.0	"	-6.31	"	"	"	"	318	534	47.3	9.7	13.8	
	20	2.0	2	2.5	"	-7.50	"	"	"	"	1020	22	22	(flat)	(flat)	(立上り)
type 3	200	0.1	200	2.0	"	-5.40	"	"	"	"	326	534	45.6	9.8	13.0	
	500	1.05	200	2.0	"	-7.50	"	"	"	"	30	22	22	(励磁)	(立上り)	(立上り)
	20	2.0	2	2.5	"	-5.00	"	"	"	"	1010	697	45.6	2.48	2.48	79.9
type 3	250	0.1	104	10	"	3.10	"	"	"	"	30	22	22	(励磁)	(立上り)	(立上り)
	500	1.05	200	2.0	"	-5.40	"	"	"	"	352	548	45.6	1.06	1.06	
	20	2.0	200	2.0	"	-7.50	"	"	"	"	324	22	22	(励磁)	(立上り)	(立上り)
type 3	250	0.1	200	2.0	"	-5.40	"	"	"	"	324	534	45.6	9.7	11.7	
	500	1.05	200	2.0	"	-7.50	"	"	"	"	30	22	22	(励磁)	(flat)	(flat)
	20	2.0	2	2.5	"	-7.50	"	"	"	"	30	22	22	(励磁)	(flat)	(flat)

(電源しな時)

但し、コイル群としては ① plasma ② OH ③ D ④ S のみ (コイルの結電線、渡り線は入っていない)

plasma 抵抗 $R_p = R_0 (1 + e^{-T_i/r - a - t/r})^{-3/2}$ for $0 \leq t \leq T_i$
 $= R_0$ for $t > T_i$

I_D モード

type 1 $I_D(t) = \text{const}$ for $t \geq 0$
 type 2 $I_D(t) = K_0 I_p(t)$ for $t \geq 0$
 type 3 $I_D(t) = K_0 I_p(t - T_0)$ for $t \geq T_0$ $T_0 = \frac{1}{2} T_i$

て今後変更がありうる。OHコイルは、他のコイルとの結合が小さく、回路方式にも検討の余地がある。これについては次節において述べる。

第4.13表 V, Q, HX, C, Rコイルの電源容量

	時定数*	所要電圧	電流	電力
垂直磁場コイル	20 ms	841 V	25 kA	21.0 MVA
四重極磁場コイル	20	257	25	6.4
六重極磁場コイル	20	115	20	2.3
位置制御コイル	10	167	25	4.2
水平磁場コイル	50	61	25	1.5

* $\frac{dI}{dt} = \frac{\text{定格電流}}{\text{時定数}}$ とし、所要電圧を $V_i = L_i \dot{I}_i + \sum |M_{ij}| \dot{I}_j$ によって算出する。

4.1.0.3 OHコイル電源

OHコイルは、プラズマ電流とだけ結合が強く、他のPコイルとは結合が小さいので、ほとんど単体として検討することができる。OHコイルの検討のために必要なプラズマの電磁気的特性は、予備設計では次のように指定した。すなわち

プラズマ断面中心 (1.4, 0.0), 断面半径 0.45 m

プラズマの1周抵抗 R_p

立上り時 ($0 \leq t < T_1$)

$$R_p = R_0 \{ 1 - \exp(-t/\tau) + \alpha \}^{-3/2}$$

フラットトップ時 ($T_1 \leq t \leq T_2$)

$$R_p = R_0$$

ただし, $R_0 = 0.1 \sim 2 \mu\Omega$

$$T_1 = 0.02 \sim 0.5 \text{ 秒}$$

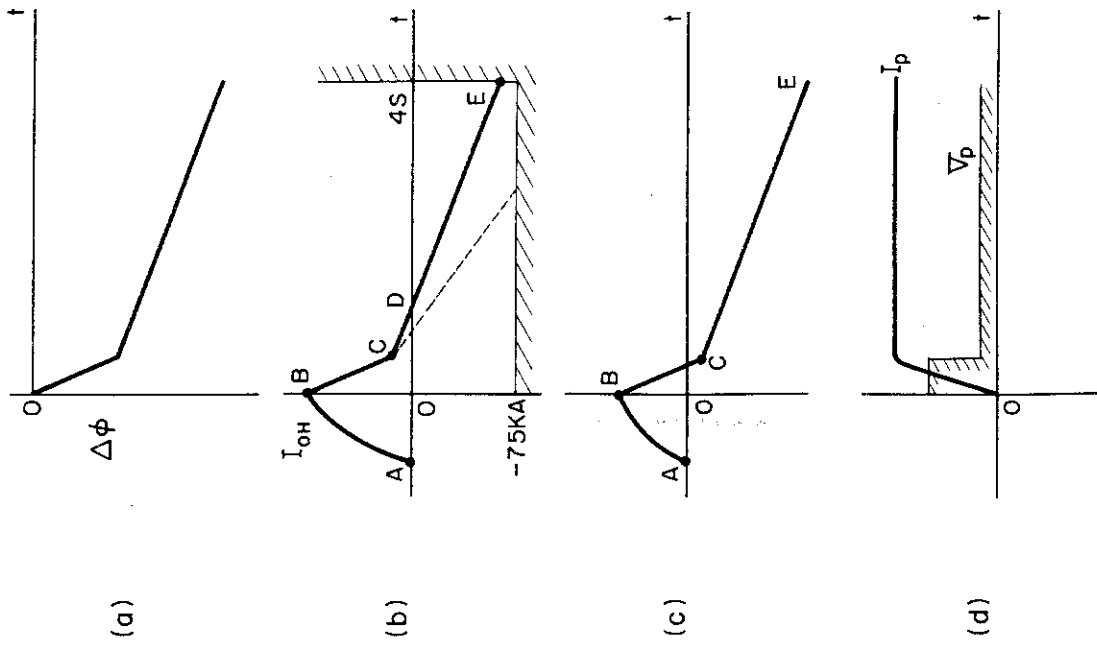
$$\tau = 0.1 T_1 \sim 0.4 T_1$$

$$\alpha = \exp(-T_1/\tau)$$

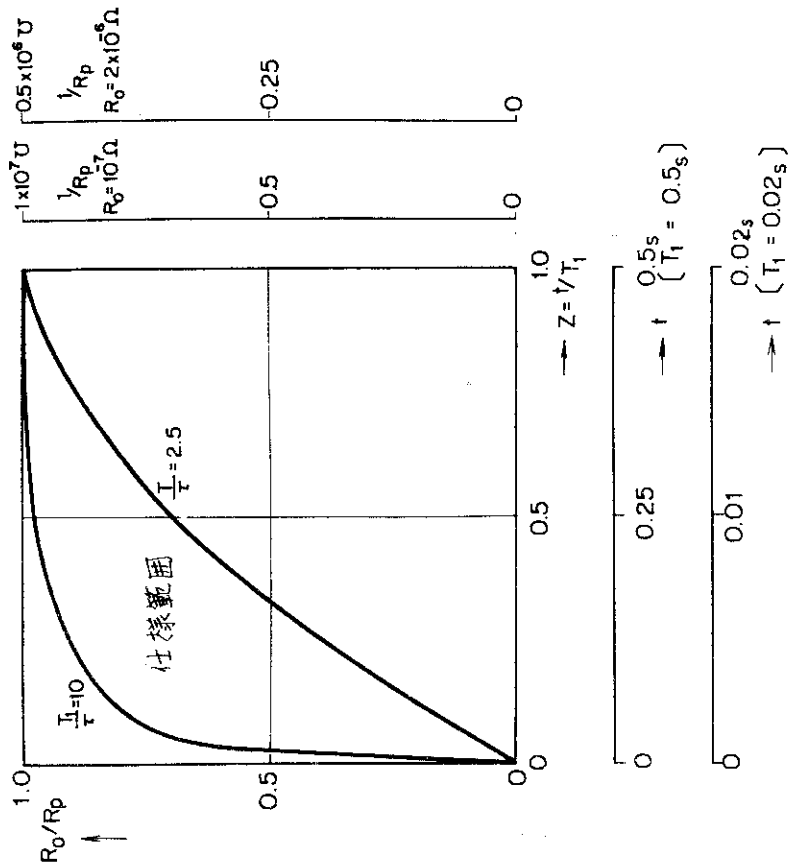
$$T_2 \leq 4 \text{ 秒}$$

この仕様の範囲は第4.85図のように表示できる。回路方式によっては、この全範囲をカバーできない場合もあるが、可能範囲を明示することとした。実際には、 $T_1 = 20 \text{ ms}^{22)$, $R \sim 1 \mu\Omega$ を重点的に検討した。

OHコイルが発生する磁束変化の量は、6.5に述べる検討から示されるように、 $5 \sim 6 \text{ V}\cdot\text{s}$ 必要であり、OHコイルの仕様はこれを満すように決定した。プラズマ例から見ると、必要なものは $t=0$ 以後の磁束変化の波形であり、OHコイルの電流値そのものではない。したがって、コイルおよび電源側からは、所要の磁束変化波形を発生する最適の電流波形を選択するこ



第 4.8 6 図 OHコイルの電流波形

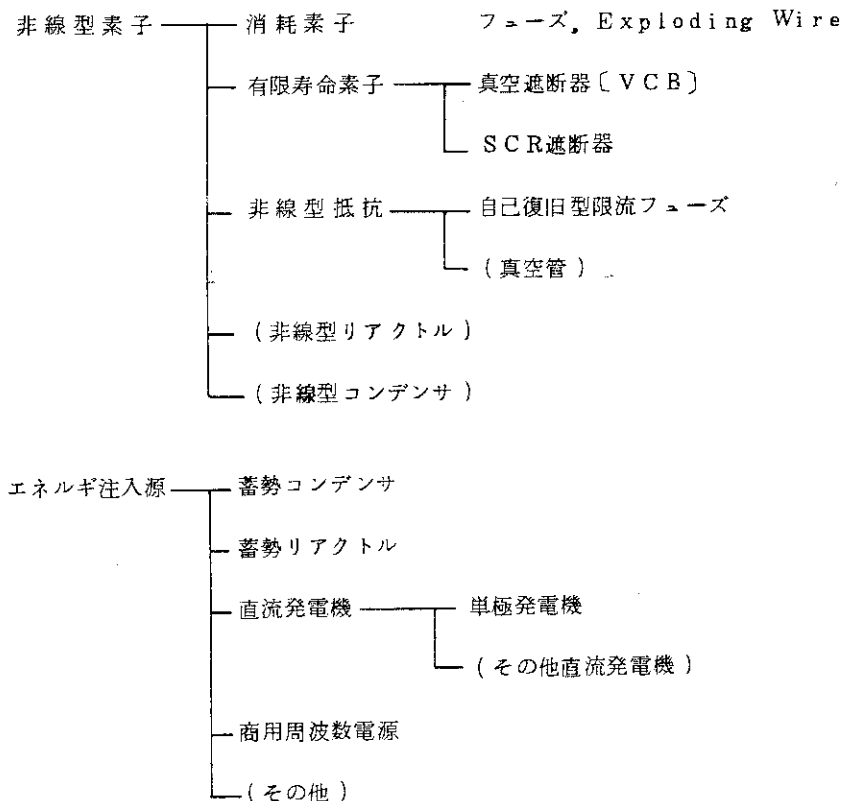


第 4.8 5 図 OHコイル検討範囲 (予備設計仕様)

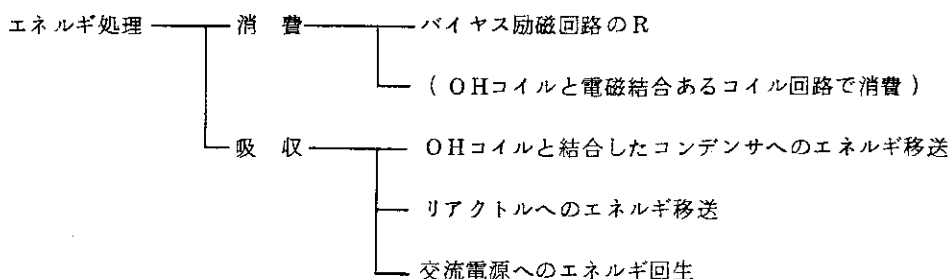
とができる。必要な磁束変化は、プラズマの性質（導電率，すなわちプラズマ温度と Z_{eff} ）によって異なるが，予備設計においては OH コイルの電流波形として，第 4.8.6 図(b)のものを指定した。しかし，次に述べるように回路方式によっては，同図(c)のように，C点を負とする方が良い場合もある。

OH コイル電源の要点は，プラズマ電流立上り時に大きな dI_{OH}/dt を発生することと，プラズマ電流のフラットトップ時に， I_{OH} を制御しつつゆっくり変化させることである。まず，立上り時の高電圧発生方法としては，第 4.1.4 表に示す種々の方法が考えられる。同表のうち（ ）内は実現性が小さいものである。高電圧発生は，エネルギーとしては，OH コイルに蓄えた磁気エネルギーを急速にとり去ることを意味する。エネルギー処理の方法としては，第 4.1.5 表のように各種の方法がある。JT-4 で処理すべきエネルギーの量は約 11 MJ である。上記の 2 表の方式の組合せによって，OH コイル電源としては多くの回路方式が考えられる。予備設計では第 4.8.6 図(b)のように C 点を正と指定したため，OH コイル励磁電流を直流遮断器を用いて遮断し，減衰抵抗を用いて時定数 L/R で I_{OH} を減衰させる方法が採用された。この中でも，直流遮断器の位置によって回路方式が何通りか考えられる。いずれにしても直流遮断器の容量は，最大電流（75 kA）と最大電圧の積だけ必要である。最大電圧は，プラズマ電流立上り時の最大ワンターン電圧と OH コイル巻数の積であり，予備設計では，ワンターン電圧 300 V に対応する 30 kV である。必要なワンターン電圧は予想困難な量であり，この値によって適した回路方式も異なる。

第 4.1.4 表 OH コイル電源方式



第 4.15 表 OHコイル電源のエネルギー処理方式



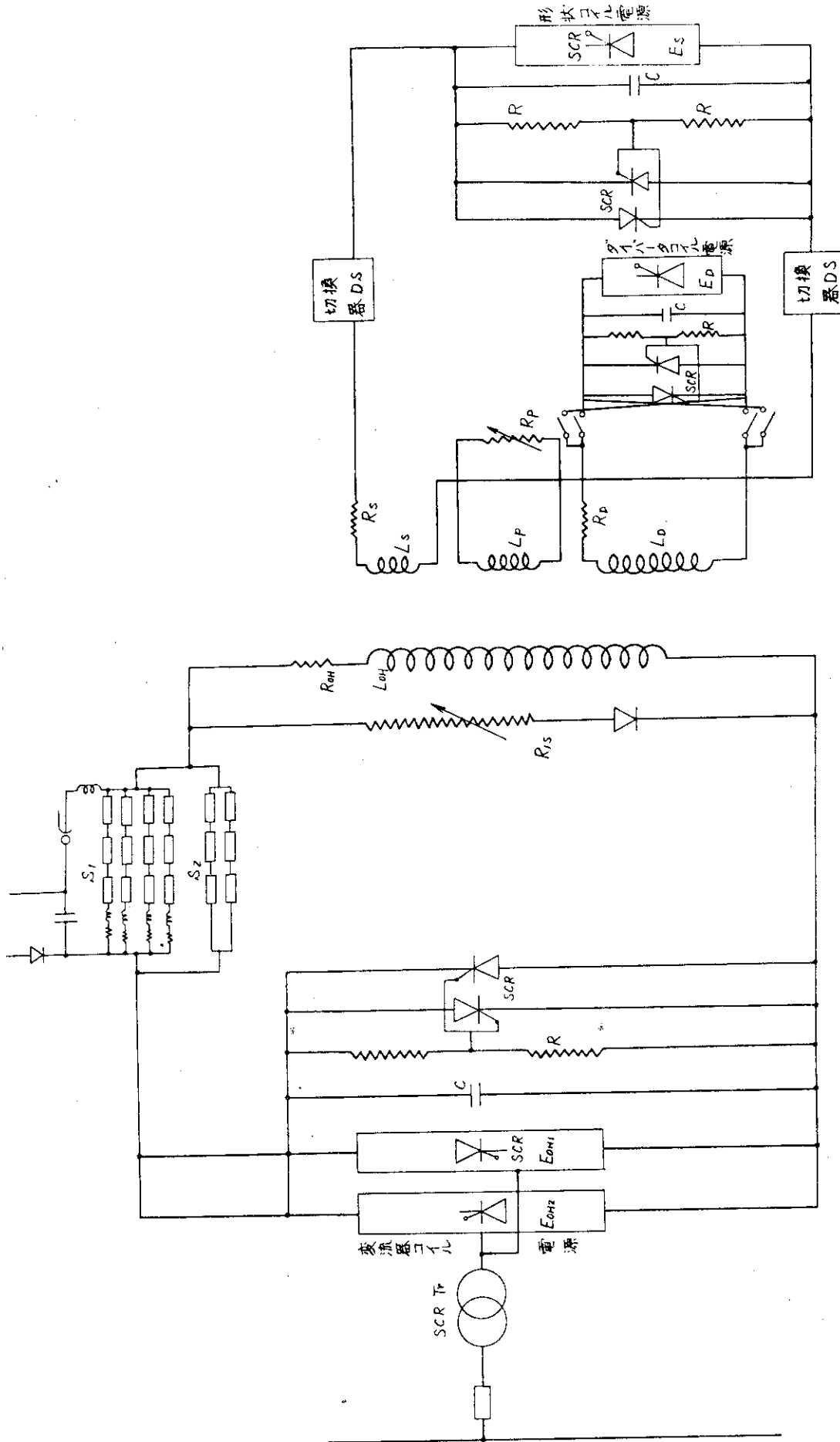
第 4.87 図に予備設計の 1 例を示す。この方式では、遮断器の容量が大きく、遮断器に SCR を用いる場合には非常に高価となる。また、フラットトップ時に SCR 電源を使用するため電圧リップル²³⁾が大きく、電流が正負反転する第 4.86 図(b)の D 点付近で、無制御状態が数 10ms あることが欠点である。遮断器には VCB (真空遮断器)²⁴⁾を使うことも可能であり、これに関しては JT-60 で R & D が行われている。電流波形を第 4.86 (c) のようにすれば、正負反転 (D 点) を避けられ、また電流極小の期間がないため SCR 電源のリップルも小さくできる。その代り、立上り時に一気に電流を反転するために、コンデンサあるいはエネルギー蓄積インダクタンスが必要である²⁵⁾ これらも今後検討する必要がある。予備設計では、第 4.14, 15 表の多くの方式について検討が行われた。

立上り時のワンターン電圧は、従来の装置の実験から予想すると通常は 100 V 程度で充分と考えられる。しかし、JT-4 では不純物の実験およびダイバータ付きプラズマの実験をするため点火しにくい場合を予想して、300 V まで印加できることを仕様とした。通常の実験時はワンターン電圧 100 V 程度として遮断器の容量を下げ、必要な場合にはコンデンサを組合せて 300 V まで印加できるような方式についても今後検討する必要がある。

なお、プラズマ側から発生する異常電圧に対しては、サージ吸収回路あるいは放電ギャップを設けて SCR 電源を保護する。

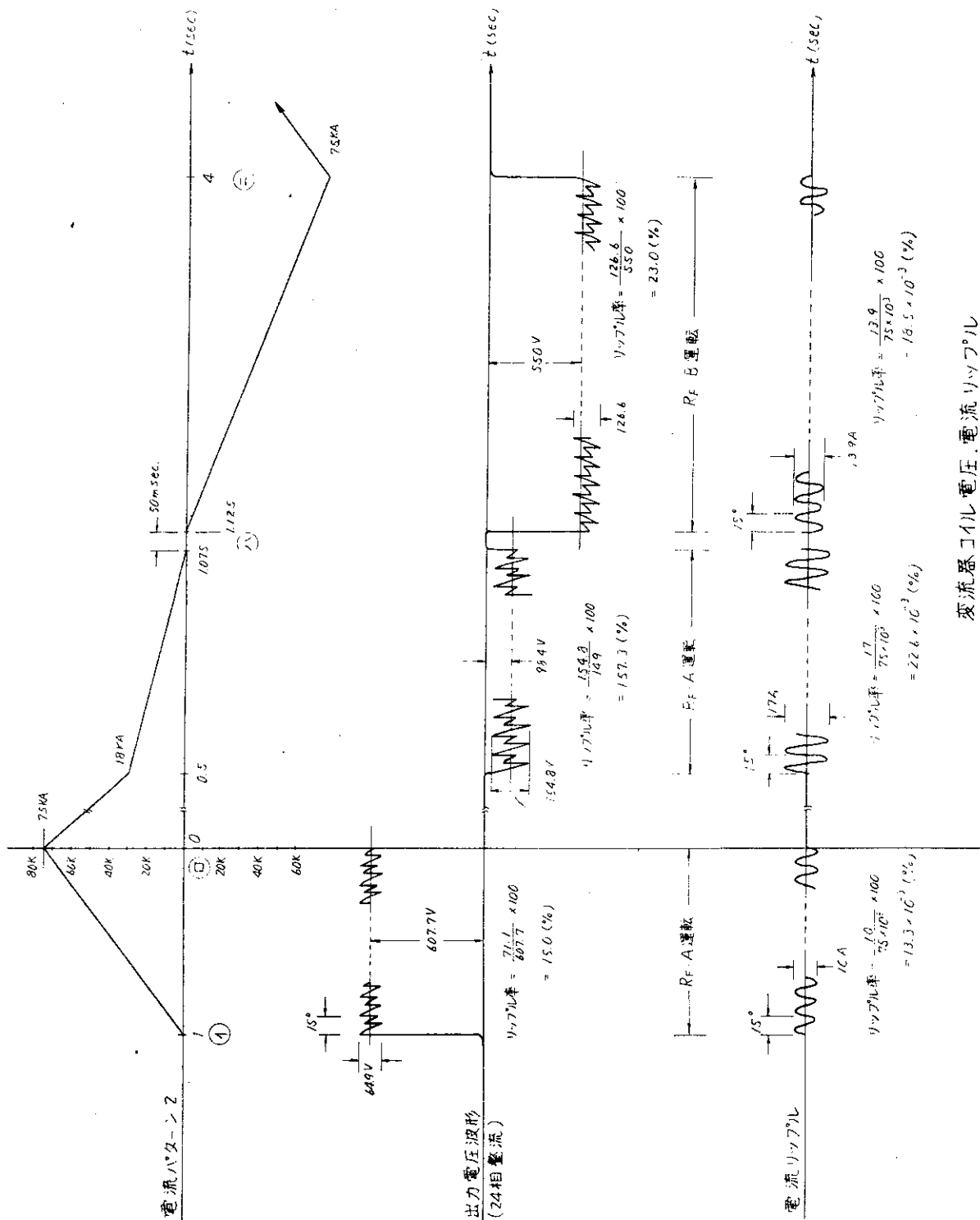
4.10.4 S コイル電源, D コイル電源

S コイルは、プラズマ電流との結合が大きく、逆方向 (結合係数負) であるため、プラズマ電流と同時に S コイル電流を立上げるには非常に高い電圧が必要である。立上り時間を 20 ms とした場合、必要な電圧は第 4.12 表に示したように 7,200 V にも達する。また D コイルもプラズマ電流との結合が高く、プラズマ電流と同時に、あるいは遅れて D コイル電流を立上げるには 1,000 V 必要である。このような、短期間のみに必要な高電圧に合わせて SCR 電源を設計すると、装置容量が増し高価になるばかりでなく、フラットトップ時の出力が装置容量に比して非常に小さく、低力率運転となる。これを避けるため、電流立上げ時にはコンデンサ投入方式を用いることが考えられる。コンデンサ投入方式の基本回路を第 4.88 図に示す。予備設計仕様書においては、S コイルと OH コイルの間をトランス結合し、S コイル立上げに OH コイルの蓄積エネルギーを利用することを提案したが、検討の結果、S コイル, OH コイルを単

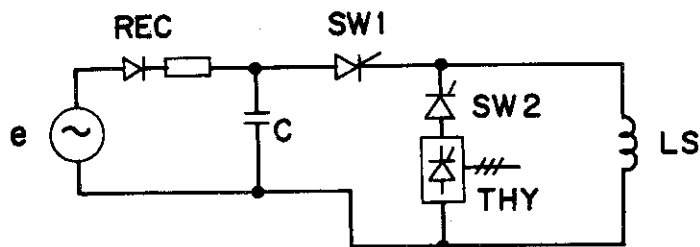


(a) 回路図

第 4.87 図 OHコイル回路の 1 例



第 4.8.7 図 OHコイル回路の I 例 (b) SCR電源のリップル



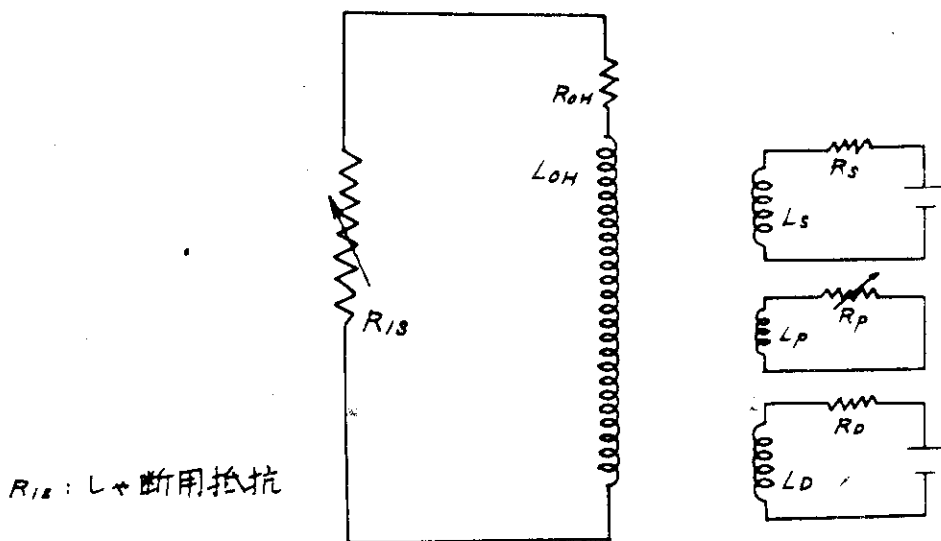
第 4.88 図 コンデンサによる電流立上げ方式

独に制御する方が良策であることが判明した。なお、Dコイルの電源容量は小さく、コンデンサ投入方式を用いる必要はない。

Sコイル、Dコイル、およびOHコイルの電流波形は放電前に波形を設置し、プレプログラミング制御を行う。プレプログラミングの可能な波形範囲は回路方式によって異なり検討事項である。予備設計ではプレプログラミング可能範囲を明らかにすることまでは行わなかった。

OH、S、Dの各コイルの相互結合を考えた場合のプラズマ電流と各コイルの電流波形の例を第 4.89 図に示す。

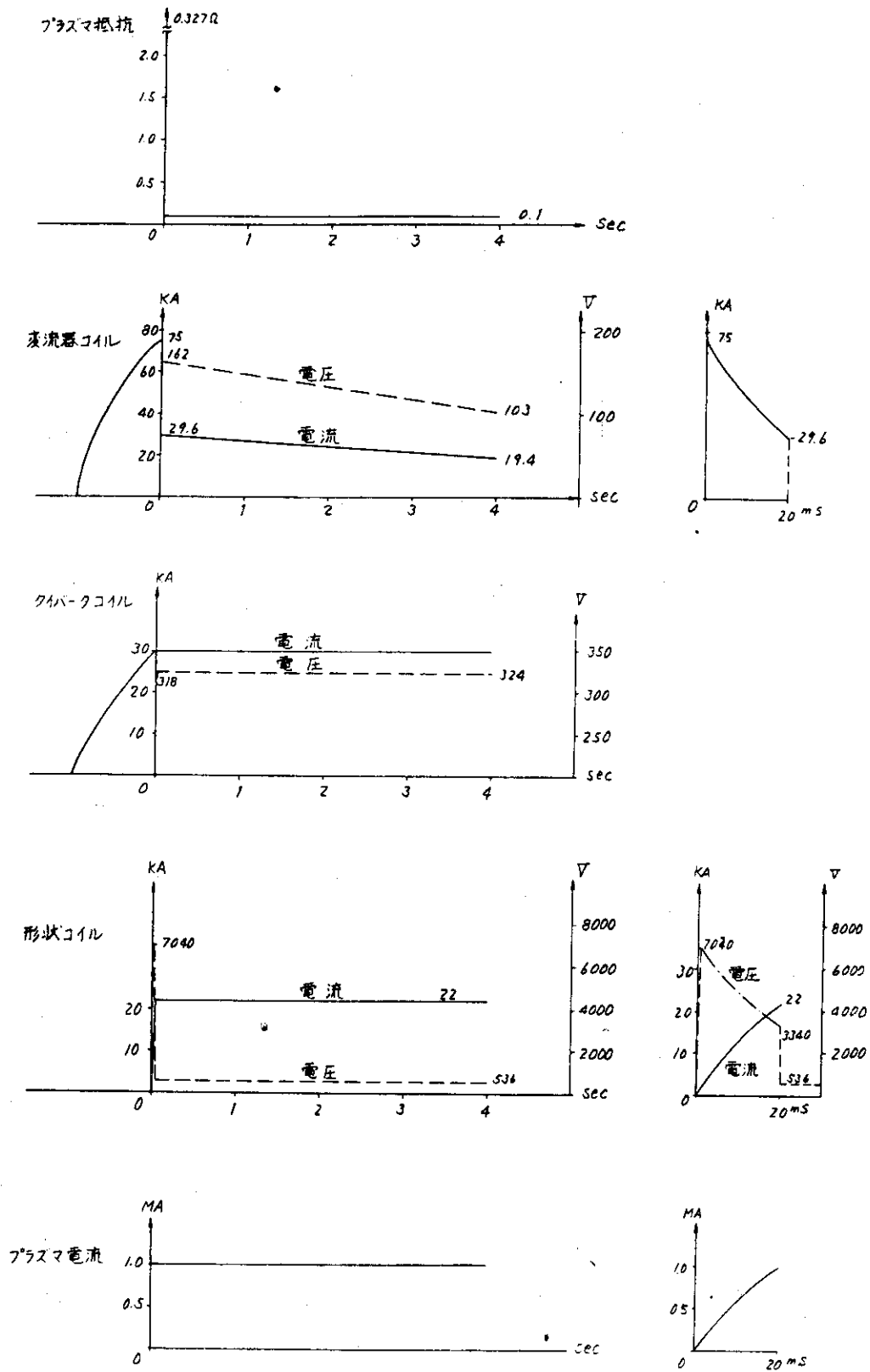
なお、Sコイルは次節に述べるように、Vコイル、Qコイルと組合せて、電源および電流制御の点から最適な電流配分を選択することが可能であり、これに関しては今後検討を進める。



完全別電源方式

第 4.89 図 プラズマ電流および OH, S, D コイル電流のシミュレーション計算結果 (a)

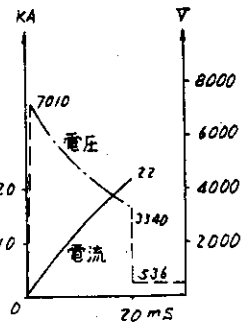
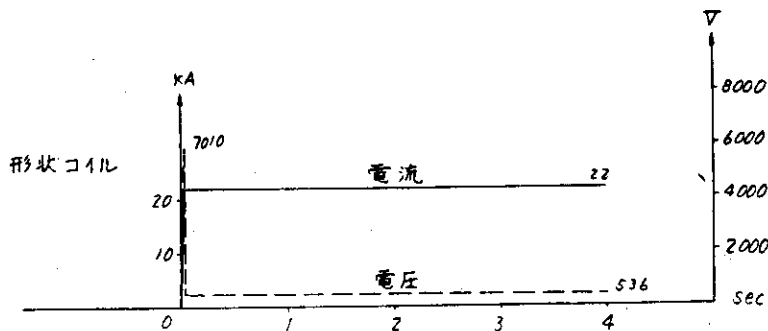
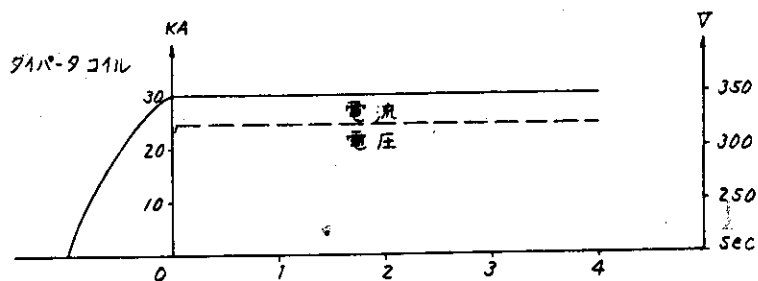
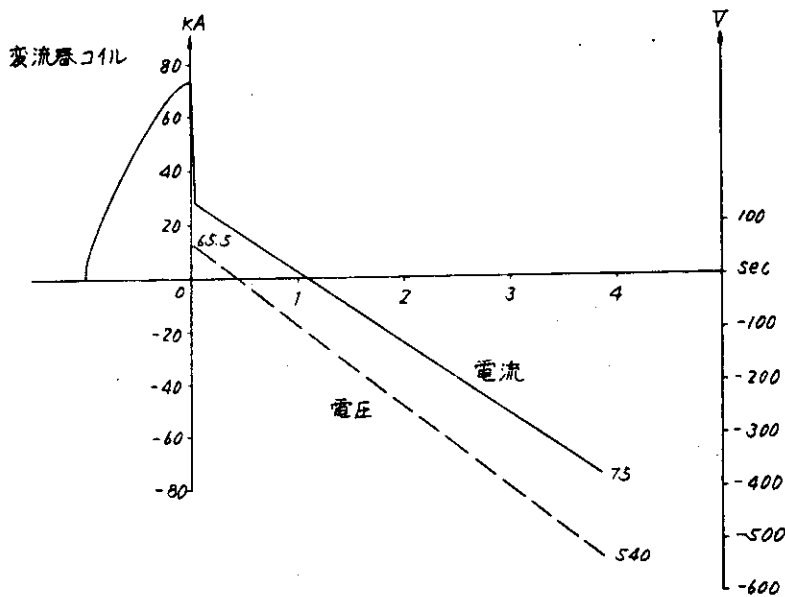
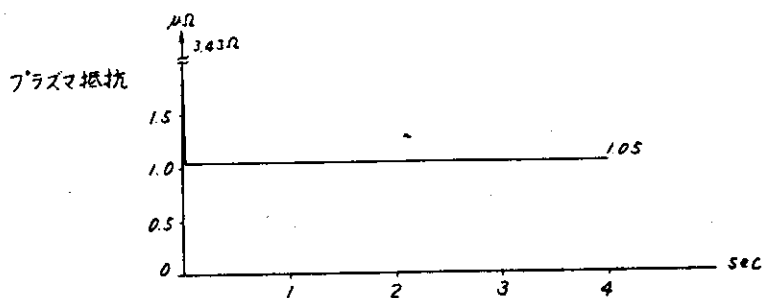
ホロイダル系電源回路計算 (完全別電源方式) Type 1
 設定条件: $T_i = 20 \text{ ms}$, $R_o = 0.1 \mu\Omega$, $C = 0.002 \text{ sec}$, $R_{is} = 0.12 \Omega$



第 4.89 図 プラズマ電流および OH, S, D コイル電流のシミュレーション計算結果 (b)

ポロイダル系電源回路計算 (完全別電源方式) Type 1

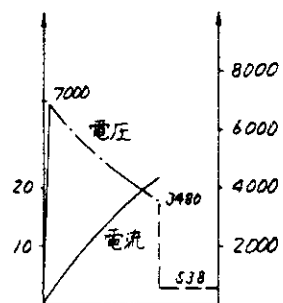
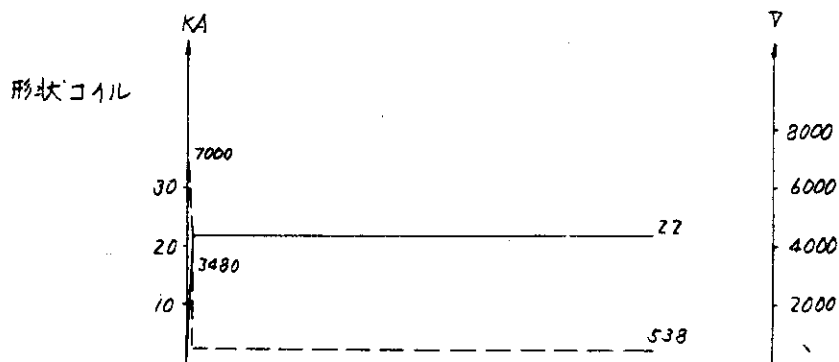
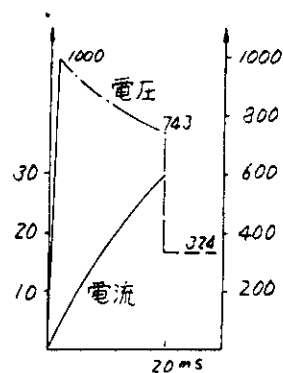
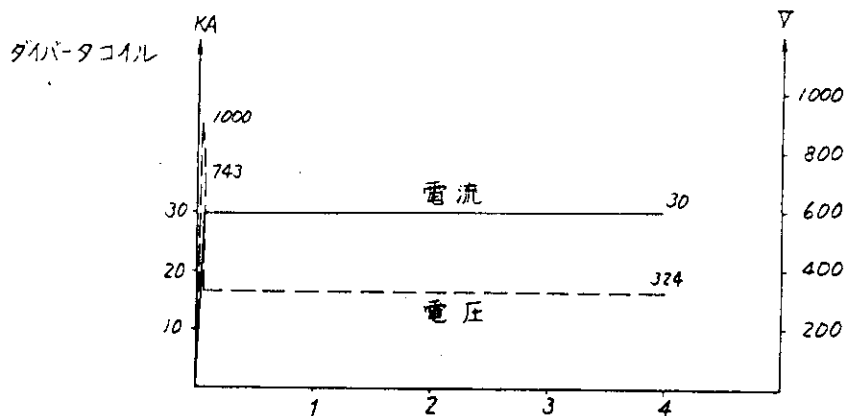
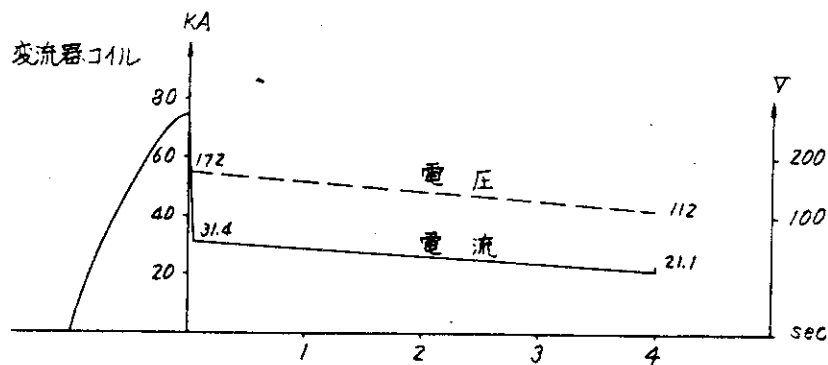
設定条件: $T_1 = 20 \text{ ms}$ $R_0 = 1.05 \mu\Omega$ $\tau = 0.002 \text{ sec}$ $R_{is} = 0.12 \Omega$



第 4.8.9 図 プラズマ電流およびOH, S, Dコイル電流のシミュレーション計算結果 (c)

ポロイダル系電源回路計算 (完全別電源方式) Type 2

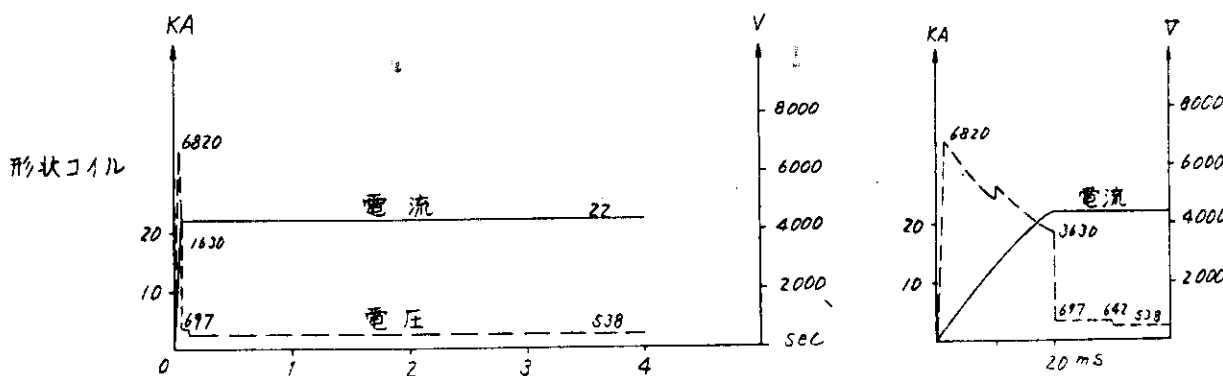
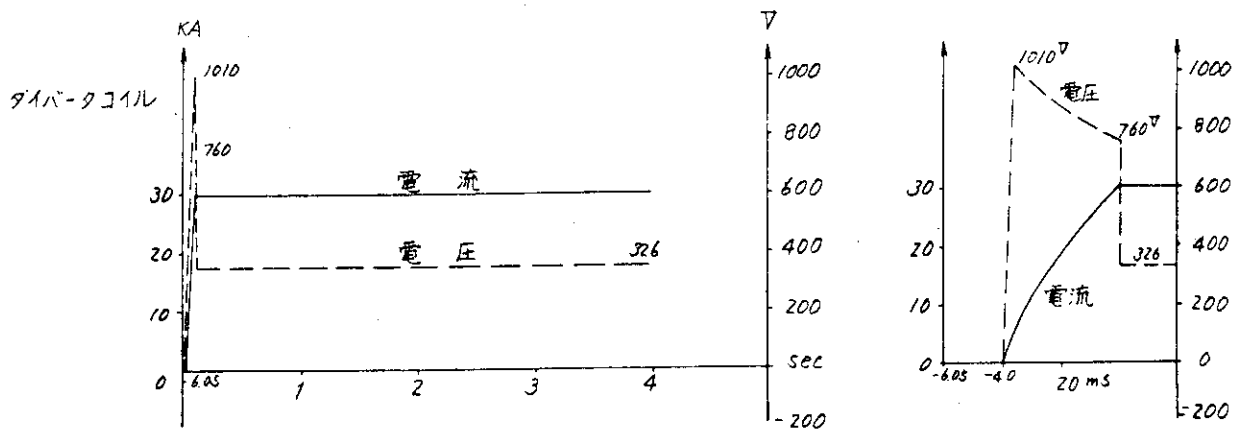
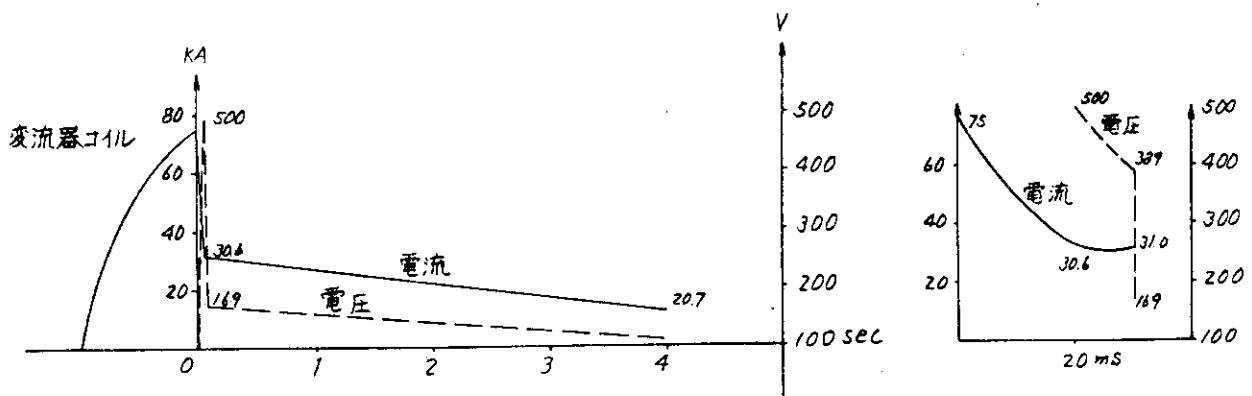
設定条件: $T_1 = 20 \text{ ms}$ $R_D = 0.1 \mu\Omega$ $\tau = 0.002 \text{ sec}$ $R_{is} = 0.108 \Omega$



第 4.8.9 図 プラズマ電流および OH, S, D コイル電流のシミュレーション計算結果 (d)

ポロイダル系コイル電源回路計算 (完全別電源方式) Type 3

設定条件: $T_1 = 20 \text{ ms}$ $R_0 = 0.1 \mu\Omega$ $\tau = 0.002 \text{ sec}$ $R_{1s} = 0.116 \Omega$



第 4.8.9 図 プラズマ電流およびOH, S, Dコイル電流のシミュレーション計算結果 (e)

4.1 0.5 Vコイル, Qコイル, Cコイルの電源

これらのコイルは、プラズマの電流分布などの速い変化に応じて磁場を作り、プラズマ断面の位置、形状を制御するためのコイルである。VコイルはR方向変位、Qコイルは断面形状の楕円度、CコイルはZ方向変位を制御するためのもので、磁気プローブなど、プラズマ断面の位置、形状を検出するためのセンサー信号によりフィードバック制御を行う。

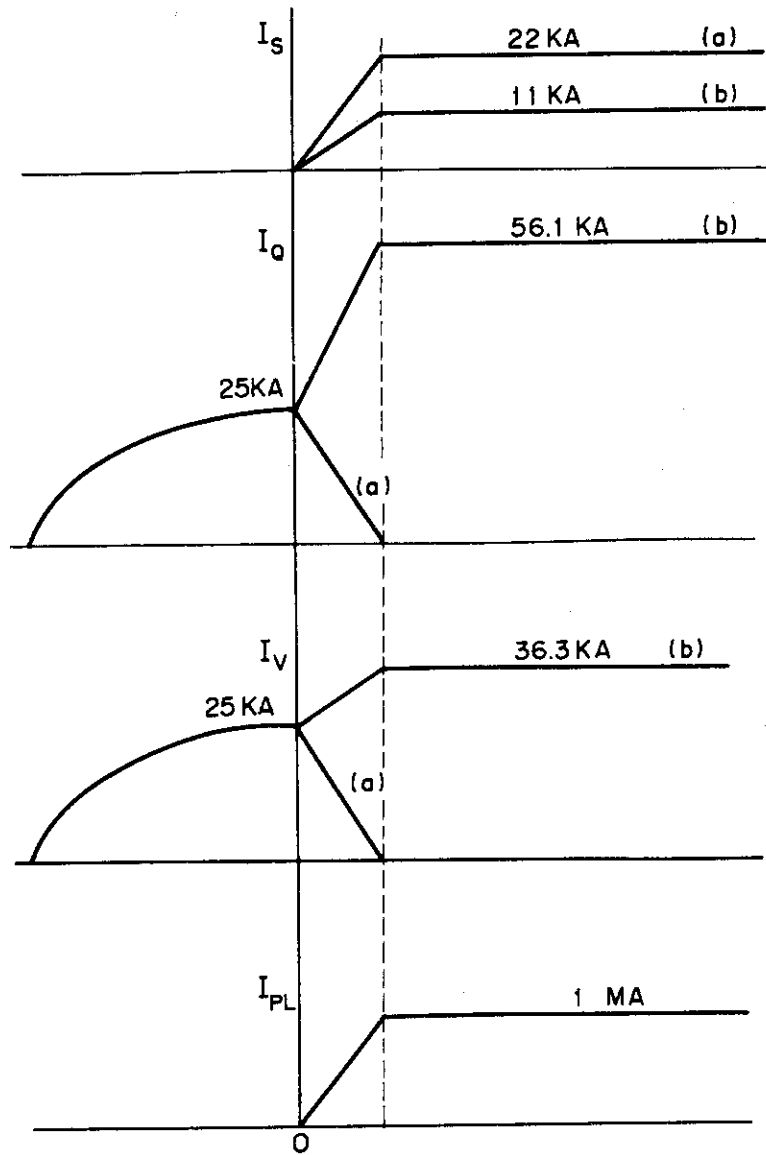
コイルの定格電流を20msで立上げることになると、電源容量は第4.13表に示す通りとなり、しかも、制御のためには、正負両向き用に2台のSCR電源を、逆並列に接続する必要がある。

予備設計仕様では、Sコイルは、垂直磁場 (B_V) 成分と4重極磁場 (B_Q) 成分とを合成した平衡用主磁場を発生し、VコイルとQコイルの電流は、各々、正負に制御することとしていたが、装置の最適化としては、Vコイル、Qコイルの電流を一方向だけにすることが望ましい。これは、容量は多少大きくなるが一方向(一台)の電源ですむこと、及び、零電流近辺でSCR電源を使用すると、力率が悪く、リップルも大きくなることを避けるためである。そのためには、Sコイルの発生する平衡用主磁場のうちの B_V 成分、 B_Q 成分の一部を、Vコイル、Qコイルに振り分けて、Vコイル、Qコイル電流に定常分を与えることが考えられる。(第4.90図) この方法に関する検討も予備設計で行われ、その結果、第4.16表に示すように、Sコイル電源を1/4に、V、S、Qコイルの電源の総和で1/2に減らすことができる。ただし、ここに示した検討は、制御する電流値を過少にとっているため、値そのものは再検討を必要とする。コイルの電流密度の点は、4.8.6で述べたように問題ない。

Cコイルは、コイルとしては上下に分けてあるが、最初の使用法は上下を直列に接続して1つの水平磁場コイルとして使用する。したがって、Cコイル電源は1個である。

第4.16表 S → V + Qコイル方式の検討

コイル名	ケース	励磁時電圧	プラズマ立上り時電圧	フラットトップ時				耐圧	最大電流	耐圧×最大電流
				コイル抵抗	電流	降下電圧	コイルジュール損			
Sコイル	ケース(a)	→	6280 V	68.8 mΩ	22 kA	1514 V	33.300 kW	6280 V	22 kA	138160 kW
	ケース(b)	→	3062	68.8	11	757	8.324	3062	11	33682
Qコイル	ケース(a)	→	151 V	300	5.65	0	0	300	25	7500
	ケース(b)	→	151	690	5.65	56.1	317	17.781	690	56.1
Vコイル	ケース(a)	→	258	300	9.24	0	0	300	25	7500
	ケース(b)	→	258	550	9.24	36.3	335	12.175	550	36.3



第 4.90 図 S コイルと V, Q コイルの最適化

4.10.6 その他の P コイル電源

水平磁場コイル (H コイル) は, 設定誤差などによる誤差磁場を補正するためのコイルであり, 電流波形もゆるやかなプレプログラミングのみである²⁶⁾。六重極磁場コイル (HX コイル) は, プラズマ断面形状の三角変形度の制御あるいはプラズマ電流立上り時の制御に使用するもので, 電流波形仕様は Q コイルに準じる。

4.1.1 トロイダル電源

トロイダル電源は、Tコイルにフラットトップ5秒の電源を給供する。その電力源には、JT-60のフライホイール付き電動発電機を共用する。電力系統から直接電力をとることも予備設計において検討されたが、ピーク電力185MVA全部を系統からとることはできない。²⁷⁾ 必要電力のうちどのくらいを系統からとるか、あるいは全く使用しないかはまだ決定していない。この点に関する決定は、JT-60の電源設計が確定した後で行われる。ここでは、JT-60の予備設計時電源を想定し、全電力をフライホイール付き電動発電機からとる場合について述べる。この場合にも、整流装置をJT-60と共用する案と、JT-4用に新設する案とが考えられる。新設する場合には、後述の発電機の界磁制御特性に注意する必要がある。ここでは、より問題点の多い例をとり、JT-60と整流装置まで共用する場合について述べる。JT-60では、Tコイル導体の温度上昇による抵抗変化に対してフラットトップ電流を一定に保つための制御方法として、発電機の界磁制御方式をとり、整流装置にはSCRよりもはるかに安価なSRのみで構成することとした。JT-4でも、フラットトップ時の電流制御はJT-60と同じ方法をとるが、JT-4のフラットトップ時間およびTコイルの時定数がJT-60よりも短いため、界磁制御の時定数をJT-60予備設計時よりも短くする必要がある。しかし、この点に関して設計、製作上の問題はない。

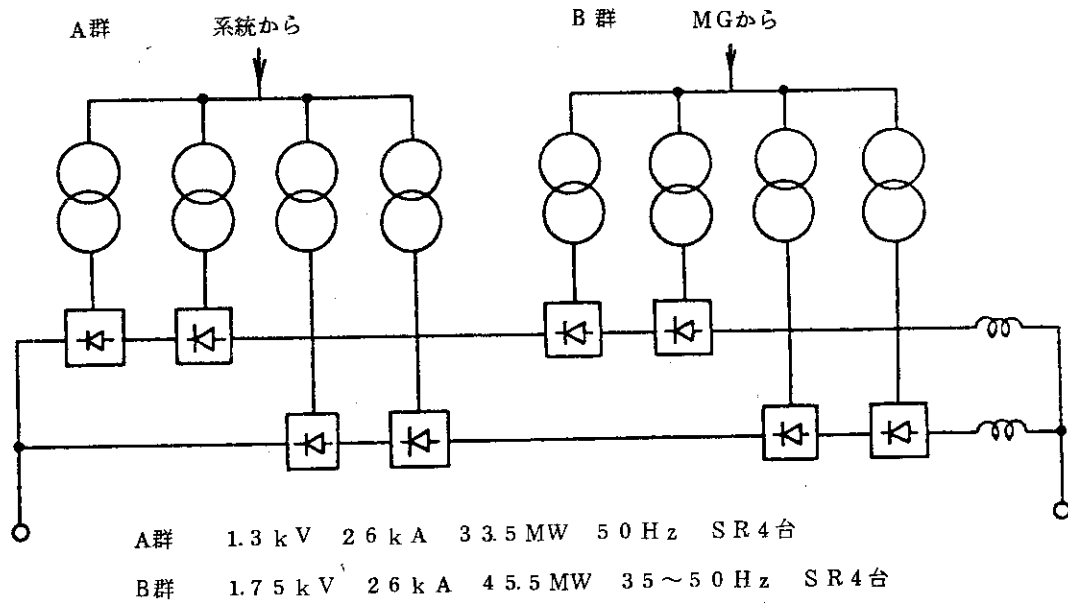
整流器を共用する場合には、直流出力の電圧電流を合わせる必要がある。一つの設計例ではJT-60運転時(フラットトップ52kA)よりも出力電流を増加させて、JT-4の所要電流(10ターン/個の場合、58kA×2、並列)に合わせ、他の設計例では、JT-4のTコイルを11ターン/個として所要電流を106kA(53kA×2、並列)としている。いずれの場合も、第4.91図(a)に示すJT-60用整流回路を同図(b)のように接続切換えする必要がある。切換えは、電流零のときに行えるが、大電流切換機は検討の必要がある。電流制御系(センサーおよび設定電流値)も切換えの必要がある。また、JT-4とJT-60の位置が離れている場合には、長い直流大電流ブスが必要となる。周囲温度40°C、空気の対流で冷却する場合、導体としては断面形状10mm×150mmのものを6枚(往復計12枚)使用するとよいことが示されている。定格運転時の上記導体の温度上昇は44°Cと計算される。(20°Cでの銅の固有抵抗 $1.78\mu\Omega\text{-cm}$ 、温度上昇による抵抗増加は計算に入っている。)

電流リップルはTコイルのLが大きいいため、約0.05%で問題にならない。フラットトップ時の電流設定にはプレプログラミングと定電流制御を併用する方式が検討されている。第4.92図は制御回路のブロック図であり、第4.93図は制御回路に与えるリファレンス電圧 E_1 の波形である。この方式によって、電流設定誤差を±1%以下にすることが可能である。

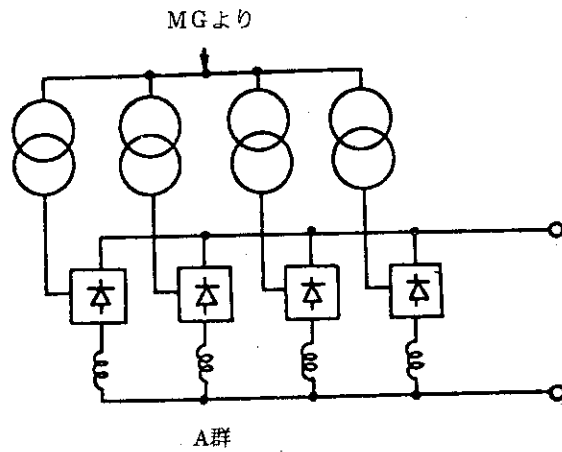
JT-4とJT-60のフライホイール付き電動発電機の共用方式は、全系の制御や実験計画、価格などを考慮して更に検討を行う必要があるが、予備設計では、理想的な場合として、JT-4とJT-60を両方とも10分間隔で交互に運転するとした。このときのフライホイール付き電動発電機の運転特性は第4.94図に示す通りである。

JT-4とJT-60をshot毎の交互運転ではなく、1日おき、あるいは3日-4日の交互運転にする、などを含めて今後検討を行う。また、設定誤差は、第4.92図のような複雑な

制御系を設けてまで小さな値に抑える必要があるか、などの点も検討の対象となろう。

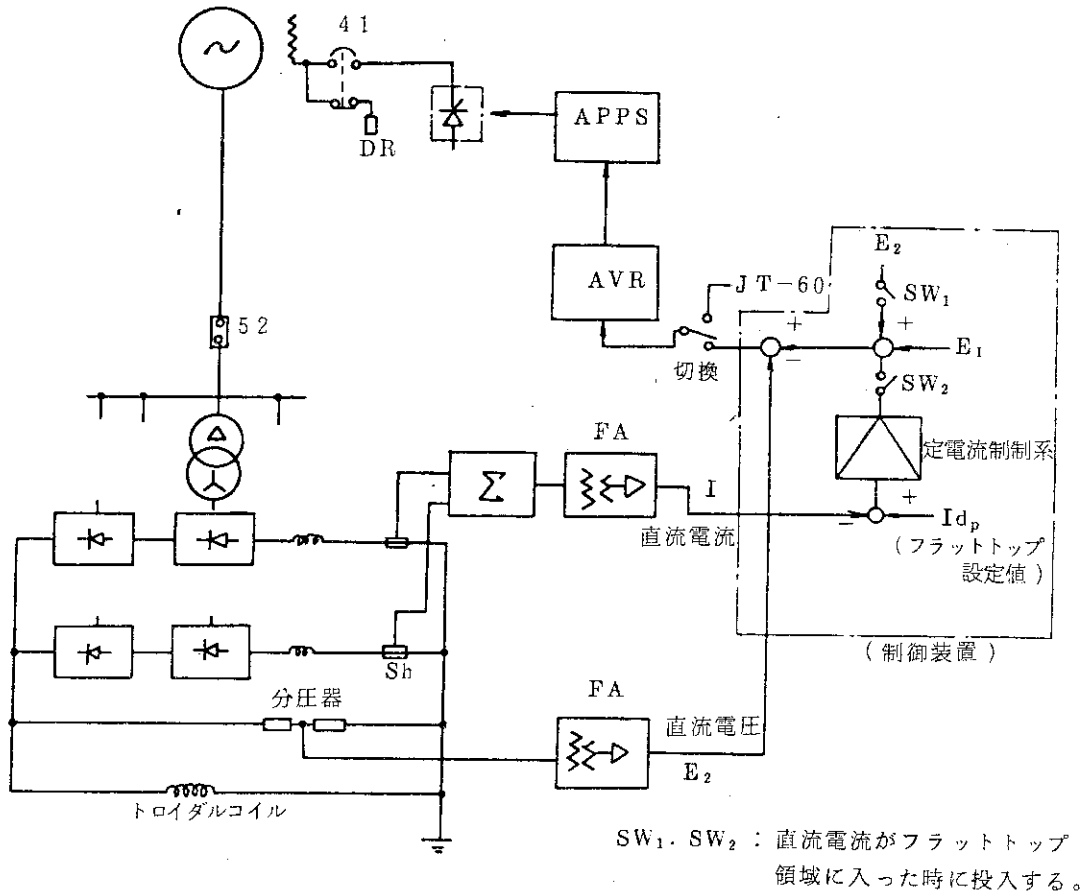


(a) JT-60 通電時

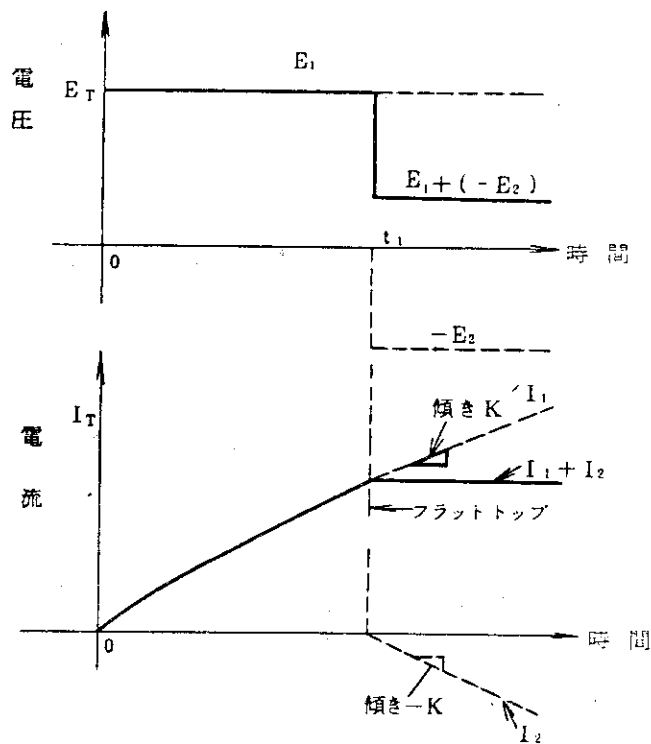


(b) JT-4 通電時

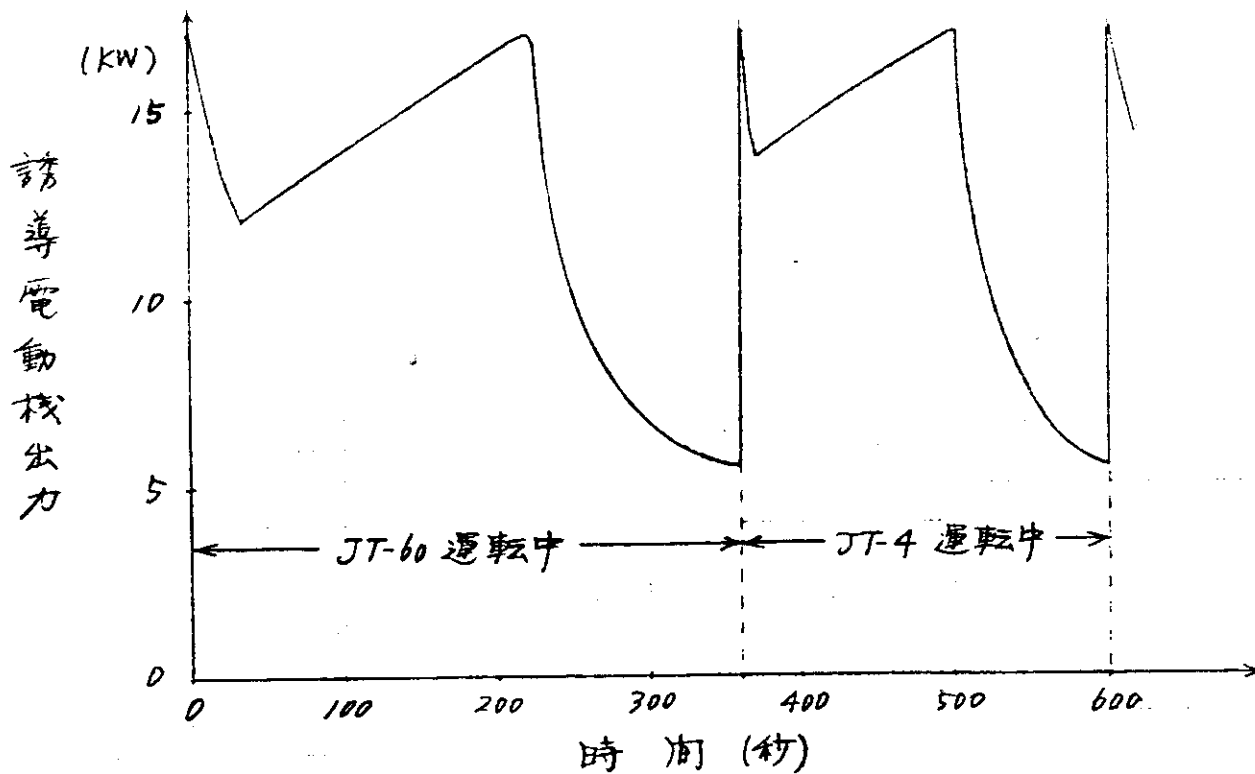
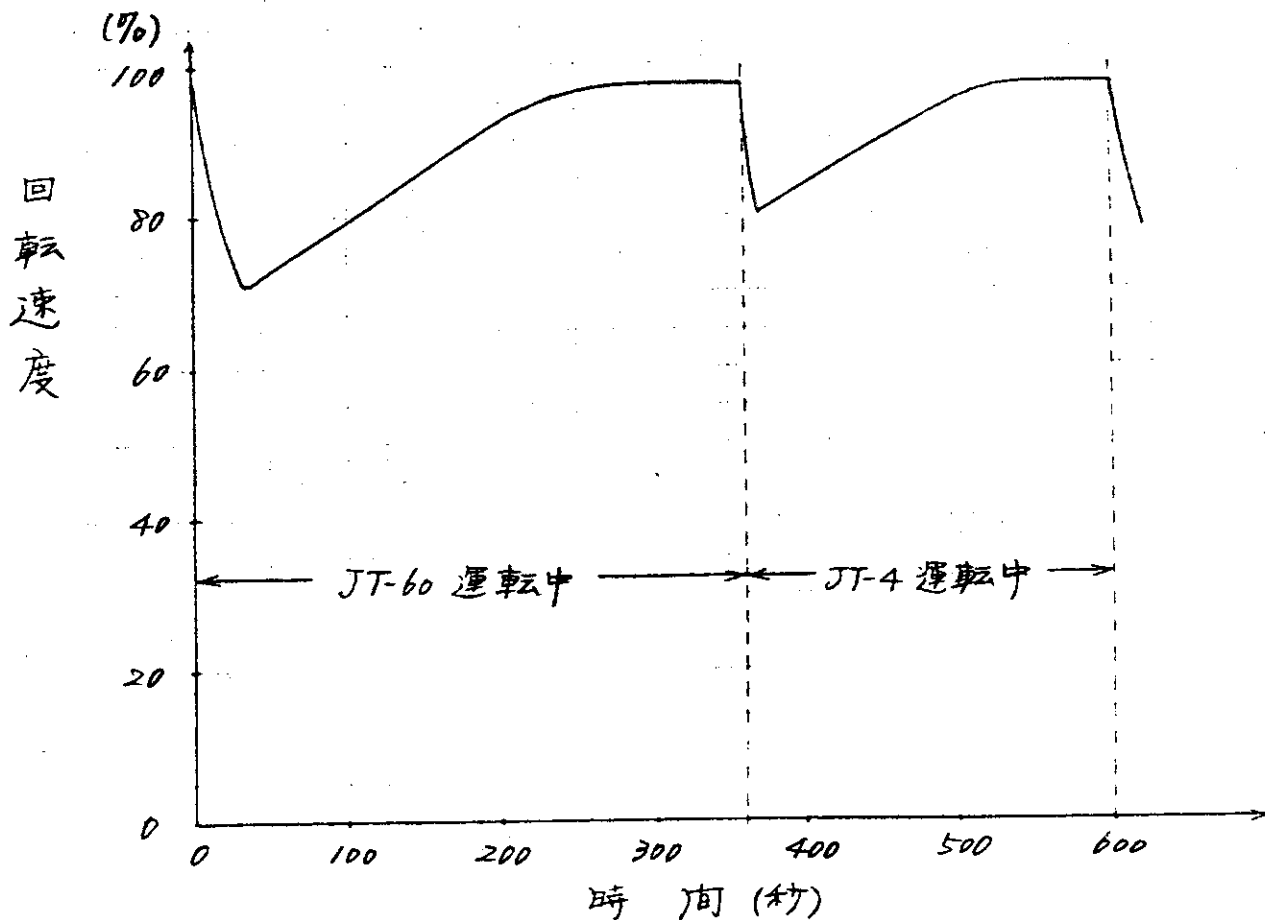
第4.9.1図 トロイダル電源回路



第 4.9 2 図 トロイダル電源制御ブロック図



第 4.9 3 図
トロイダル電源制御用
基準電圧 E_1



第 4.9 4 図 トロイダル電源用フライホイール付き電動発電機の運転特性

4.1 2 プラズマ制御

4.1 2.1 プラズマの水平位置，断面形状制御

プラズマの水平位置のずれ (x)，断面形状のずれ (y) のフィードバック制御について，第3章で与えた制御方式に基づいて技術的検討が行われた。検討のもとにしたブロック線図および各定数については，付録5に示されている。制御の目標は次の通りである。

水平方向制御

$$\text{変位} \quad |x - x_0| \leq 5 \text{ cm}$$

断面形状制御

$$|y - y_0| \leq 1 \text{ cm} \quad (y = a\epsilon)$$

4.1 2.2 水平方向位置制御

第3章の第3.12図に示した水平方向位置制御ブロック線図をもとにして，フィードバック用電源としてサイリスタ電源を想定して，フィードバック回路部の設計が検討された。第4.95図にそのブロック線図を示す。プラズマ特性部は第3.13図と同じである。同図においてデジタル計算機部は，プラズマの位置検出法については具体的に考えず，計算機処理まで含めて一括してむだ時間として考えられた。また，制御特性部には機器の構成あるいは保護およびプログラム制御の効率などの観点から電流制御用マイナーループを有する。プラズマ特性部の各要素の定数は付録5の中の一覧表に示した。同表において，受注者で決定すべき定数については，次の様に定めた。

$$L_{vf} = 180 \times 10^{-6} \text{ H}$$

$$R_v = 2.5 \times 10^{-3} \Omega$$

$$\tau_v = 87.2 \times 10^{-3} \text{ sec}$$

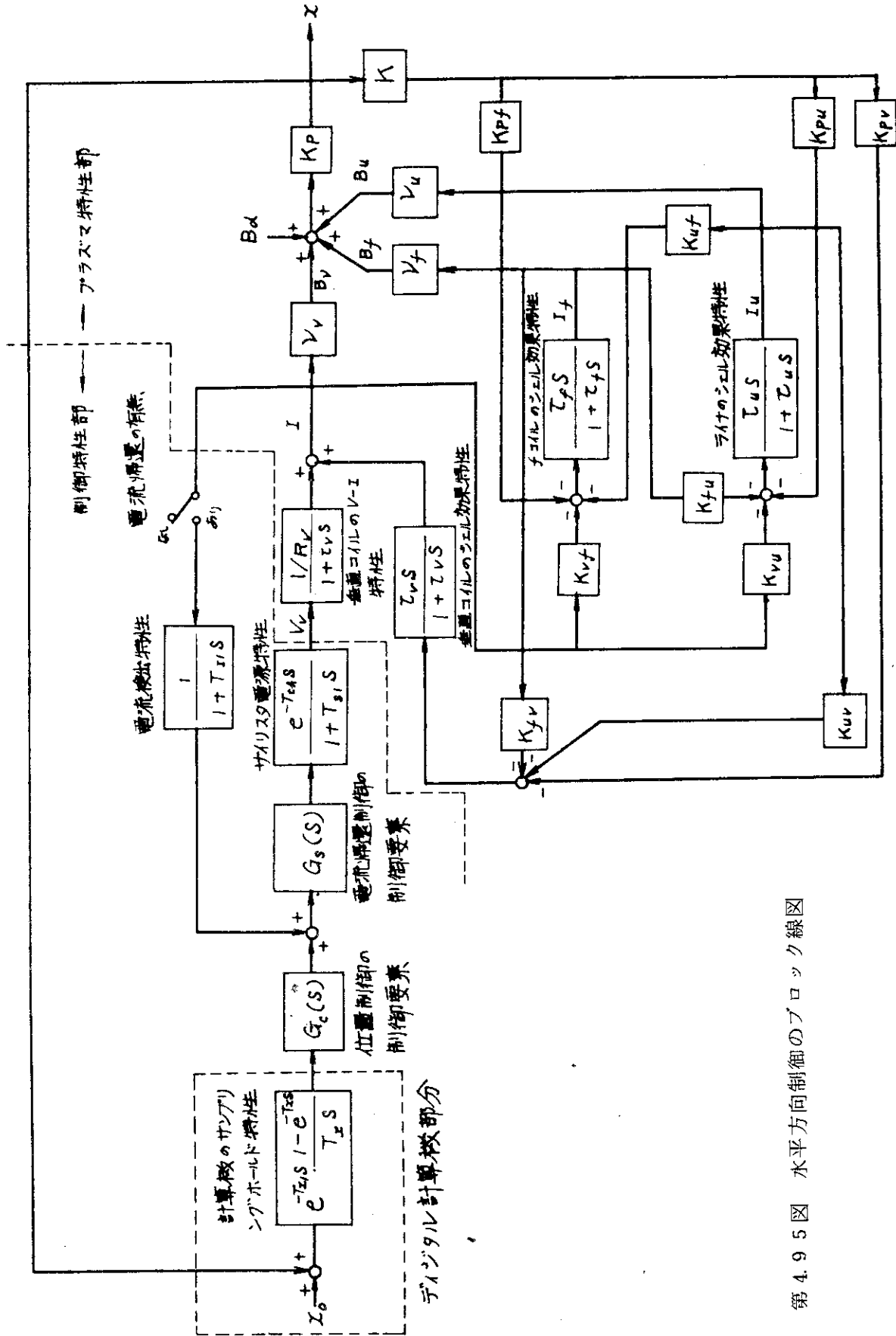
$$L_f = 6.8 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$M_{vf} = 0.62 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$\tau_f = 0.461 \text{ sec}$$

まず，フィードバック制御なしの場合の制御対象の特性を第4.96図に示す。同図にはfコイルを考慮していないが，fコイルを考慮すると $\omega = 1 \sim 10 \text{ rad/sec}$ の領域でややゲインが小さくなる他は，fコイルなしの場合とほとんど変わらない。したがって，fコイルのシェル効果は期待できないので，以下の設計ではfコイルを考慮しないことにする。同図によるとゲインの最大は周波数 ω の小さいところで約19dB (= 9.0m/T)になり， ω の大きいところ ($\omega > \tau_v^{-1}$)ではシェル効果によりゲインは約4dB (1.6m/T)になっている。第4.97図に外乱 B_d に対する変位 x および I_v ， I_u の変化をシミュレーションで求めたものを示す。この時，外乱 B_d は，

$$B_d(t) = 0.025 \left(1 - e^{-\frac{t(\text{ms})}{1.0}} \right) \quad [\text{T}]$$



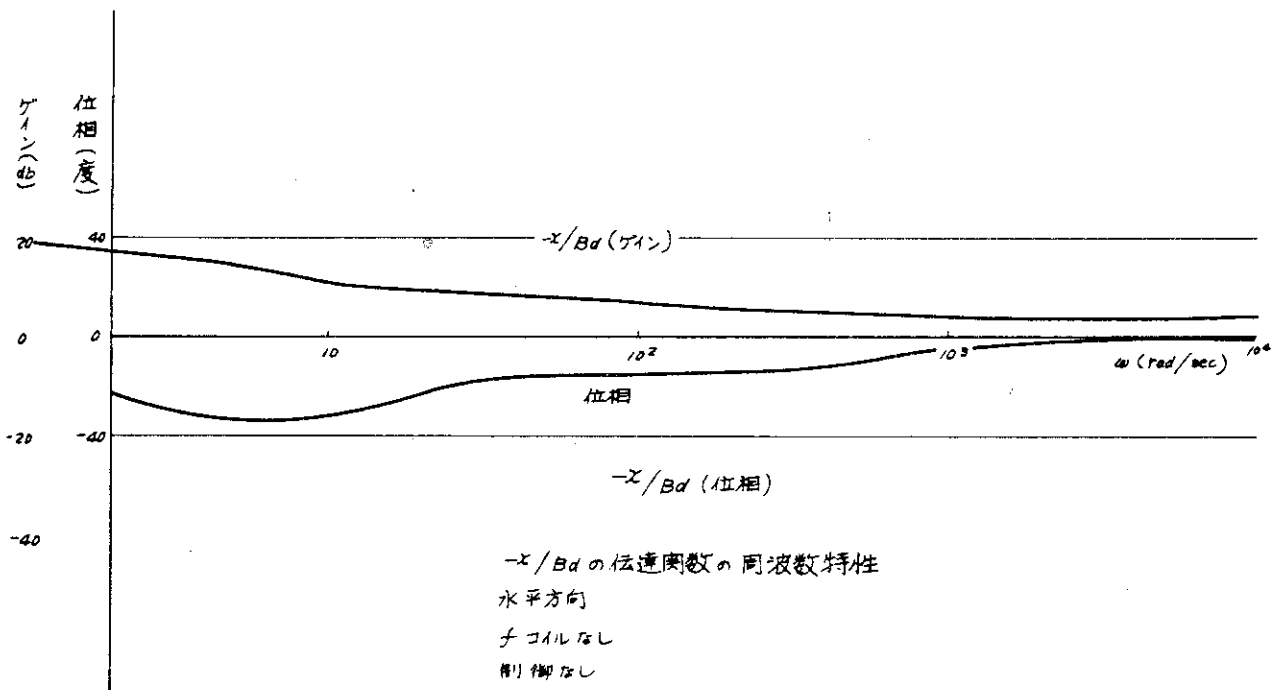
第 4.9.5 図 水平方向制御のブロック線図

で与えた。この外乱の大きさは、 $I_p=1\text{MA}$ のとき、 $\delta\beta_p + \delta l_i / 2 = 0.35$ 程度に相当する。(第 3.1.1 図参照) x の最大値は、 13.7cm ($t \rightarrow \infty$ では $K_p B_d = 22.5\text{cm}$)、シエル効果により垂直磁場コイルおよび真空容器に流れる電流はそれぞれ最大 $I_v = 6.8\text{kA}$ 、 $I_u = 4.4\text{kA}$ となる。

次に、フィードバック制御を考える。第 4.9.5 図に示す制御特性部の時間遅れ要素は次の値を標準として考える。

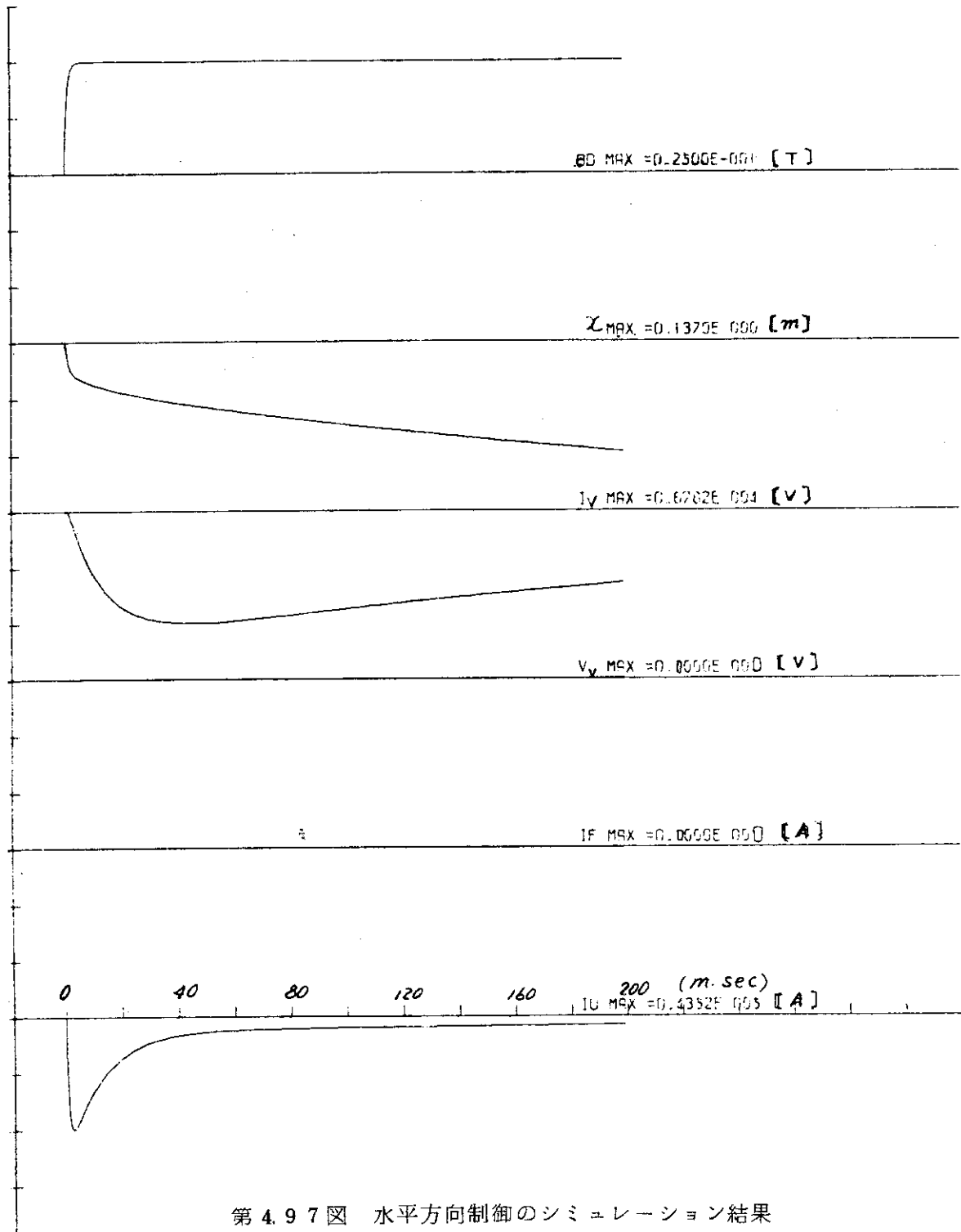
- 位置検出の計算のむだ時間 $T_{x1} = 3\text{ msec}$
- 計算機サンプリング時間 $T_x = 3\text{ msec}$
- サイリスタ電源のむだ時間 $T_{th} = 3\text{ msec}$
- サイリスタ制御回路の遅れ $T_{st} = 1\text{ msec}$
- 磁場コイル電流検出の遅れ $T_{H1} = 2\text{ msec}$

位置制御および電流帰還制御としては、定常時での変位のオフセットを零にする効果を考慮して P I 制御を考える。第 4.9.8 図に P I 制御を加えた後の外乱に対する変位 x の周波数特性を示す。制御のない場合の第 4.9.6 図に比べると、 ω が約 30 rad/s 以下の領域でゲインが下っており、制御を加えたための効果が出ている。このときの利得余裕 16 dB (6.3 m/T)、位相余裕 64° である。第 4.9.9 図は電流帰還ありの場合の $-x/B_d$ 周波数特性であり、これは第 4.9.7 図に比べてほとんど差がない。第 4.10.0, 10.1 図にそれぞれ位置制御をした場合、位置制御+電流帰還の場合の外乱 B_d に対する変位 x および I_v 、 V_v 、 I_u の変化のシミュレーションを示す。電流帰還制御した場合の方が、制御コイル電流および電圧とも位置制御のみの場合よりも大きくなっているが、変位 x は時間的に早く標準値に落ち着く。この時の制御電圧

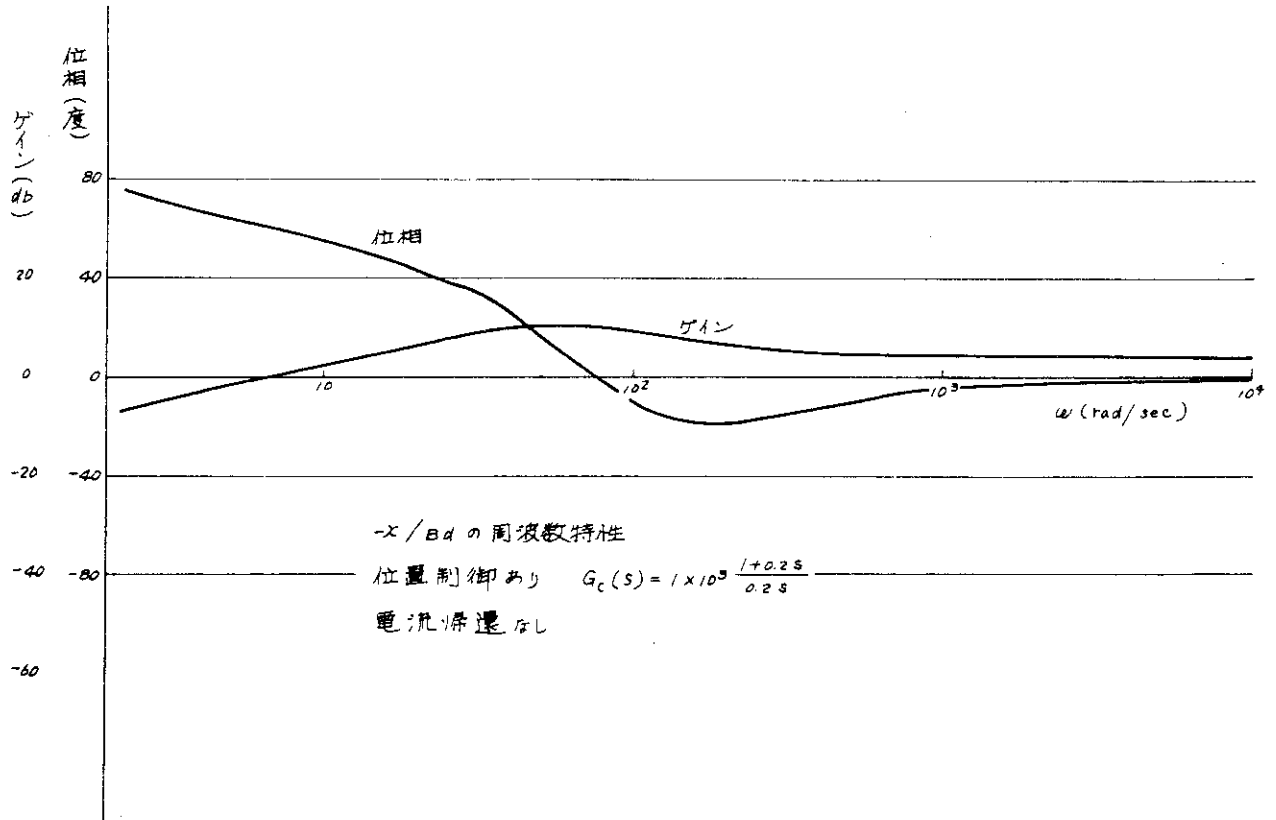


第 4.9.6 図 水平方向伝達関数 ($-x/B_d$) の周波数特性

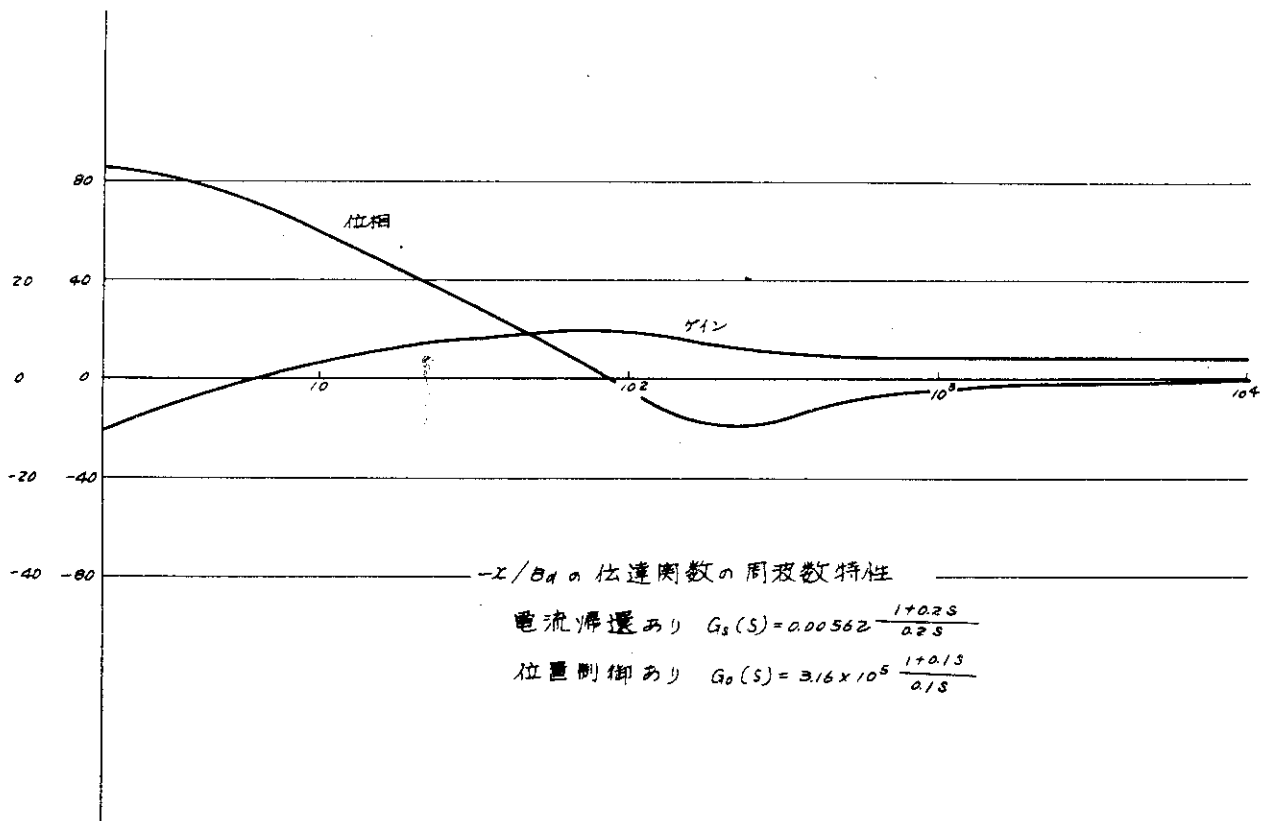
V_v および制御コイル電流 I_v とも、現仕様のVコイル電源で出力可能と思われる。今後、外乱 B_d としていろいろな波形を入力してシミュレーションを行い、 $V_v - I_v$ 波形を求め、Vコイル電源の容量決定に反映させる必要がある。また、以上の検討過程ではSCR電源のむだ時間 $T_{th} = 3 \text{ msec}$ としたが、Vコイル電源の最大出力電圧を正負反転するためにはSCR電源の特性として 9.7 msec 必要であるので、この値の妥当性についても検討する必要がある。



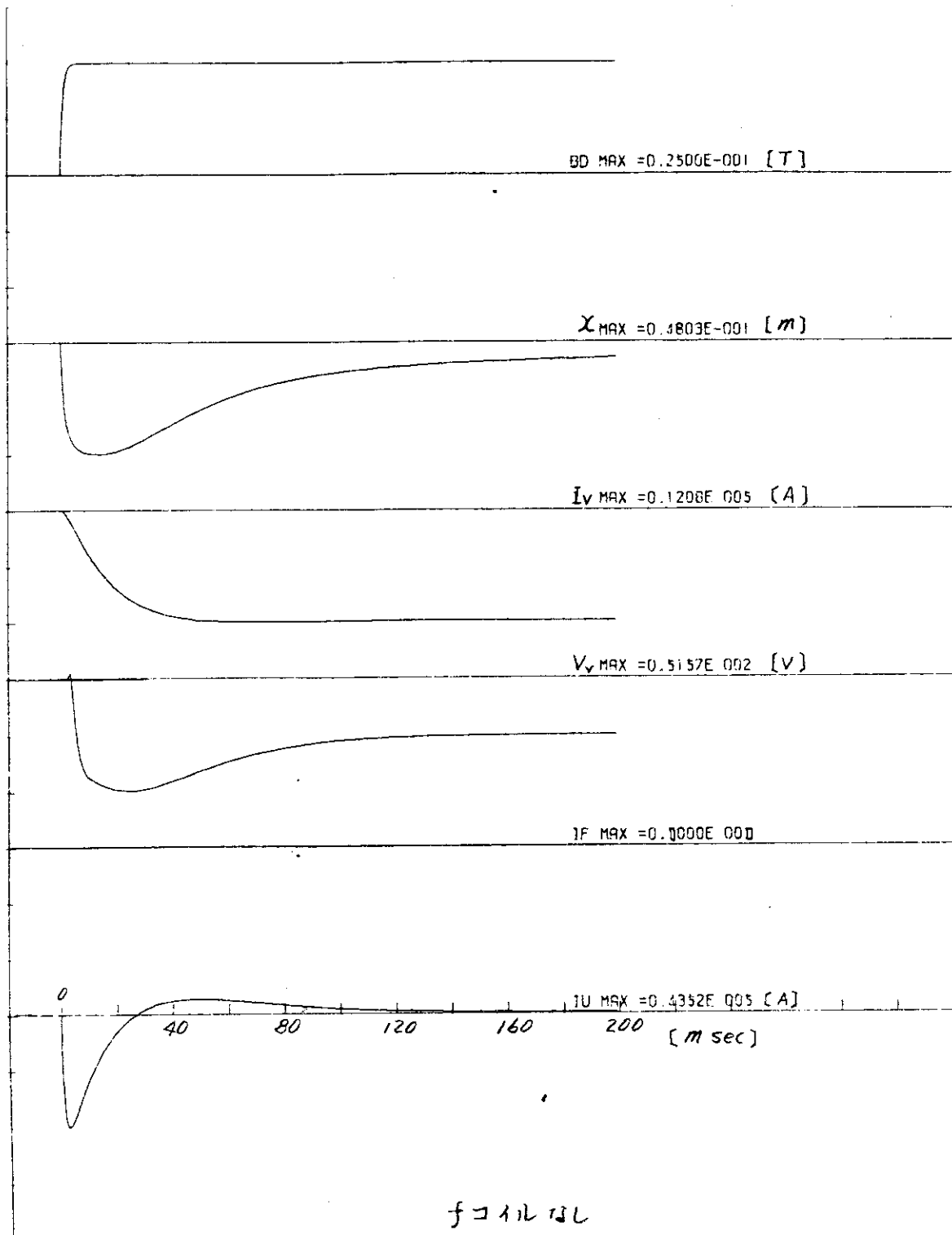
第 4.9.7 図 水平方向制御のシミュレーション結果
(f コイルなし, 制御なし)



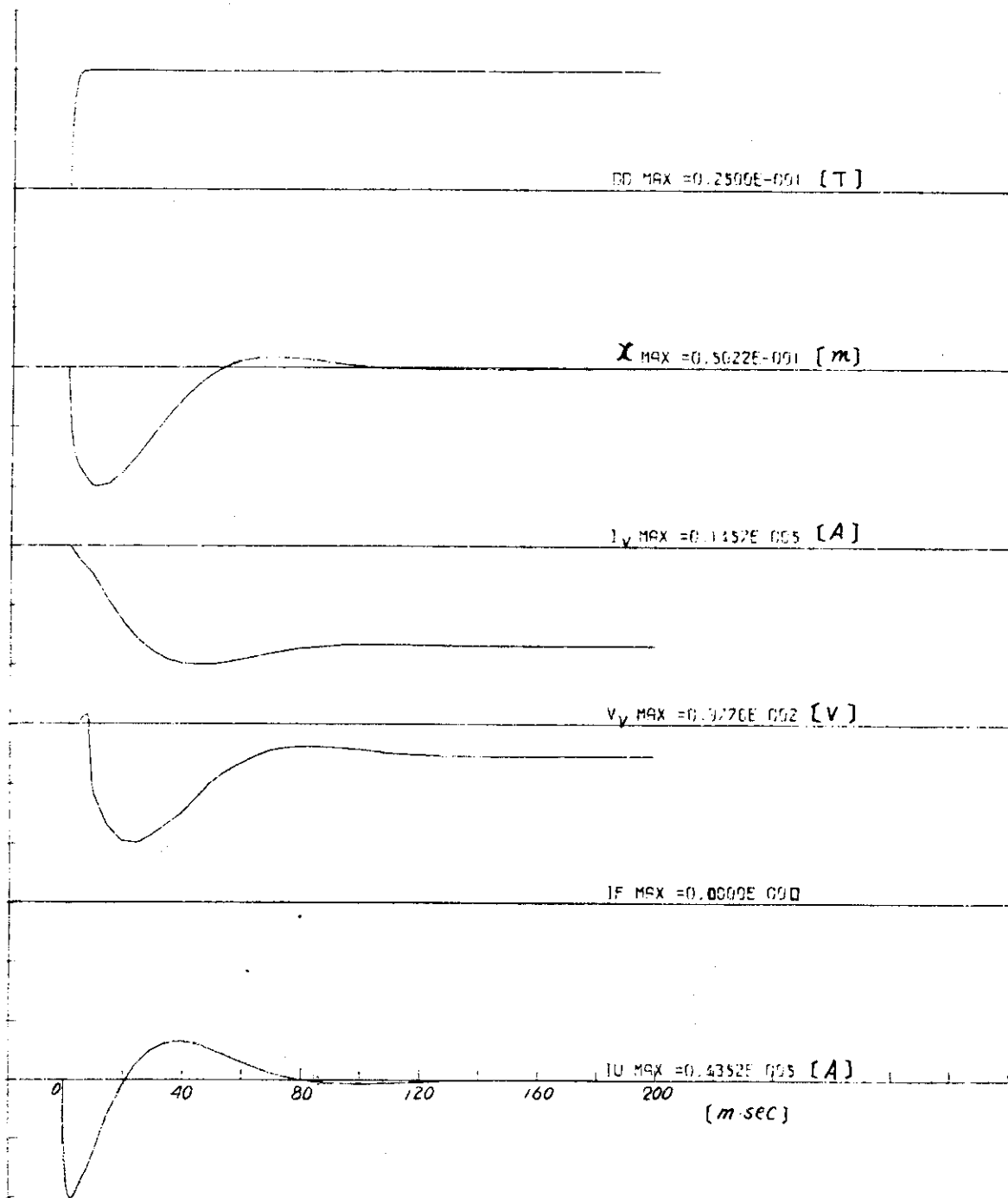
第 4.98 図 水平方向伝達関数 ($-x/B_d$) の周波数特性
 (位置制御あり, 電流帰還なし)



第 4.99 図 水平方向伝達関数 ($-x/B_d$) の周波数特性
 (位置制御あり, 電流帰還あり)



第4.10.0図 水平方向制御のシミュレーション結果
(fコイルなし, 位置制御あり)



電流帰還あり $G_S(S) = 0.00562 \frac{1+0.2S}{0.2S} \text{ [V/A]}$
 位置制御あり $G_C(S) = 3.16 \times 10^5 \frac{1+0.1S}{0.1S} \text{ [A/m]}$

第4.101図 水平方向制御のシミュレーション結果
 (位置制御あり, 電流帰還あり)

4.1.2.3 断面形状制御

第 3.1.4 図に示した断面形状制御ブロック線図に基いて水平位置制御の場合と同様な検討が行われた。第 4.1.0.2 図にそのブロック線図を示す。プラズマ特性部の各要素の定数は、付録 5 の中の一覧表に示した。同表で、受注者で決定すべき定数については次の様に定めた。

$$\begin{aligned} L_Q &= 53 \times 10^{-6} \text{ H} \\ R_Q &= 1.76 \times 10^{-3} \Omega \\ \tau_Q &= 36.6 \times 10^{-3} \text{ sec} \\ L_f &= 6.8 \times 10^{-3} \text{ H} \\ M_{Qf} &= 82 \times 10^{-6} \text{ H} \\ \tau_f &= 0.461 \text{ sec} \end{aligned}$$

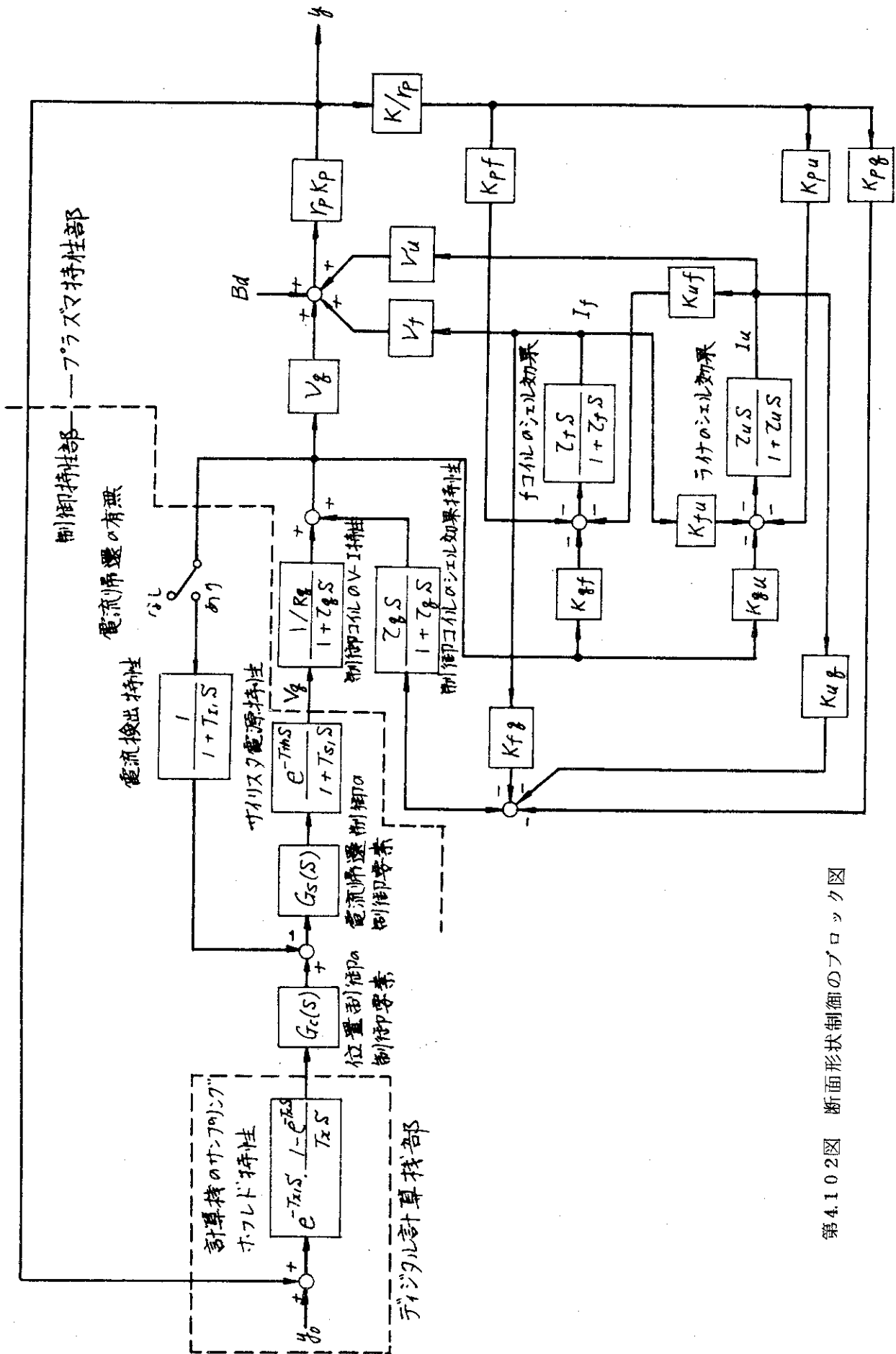
この場合も水平位置制御の場合と同様に制御特性部設計に当っては f コイルは考慮しない。外乱 B_d に対する変位 y および I_q , V_q , I_u の変化のシミュレーションを行う時の外乱 B_d としては、

$$B_d(t) = 0.016 \left[1 - e^{-\frac{t(\text{msec})}{1.0}} \right] \quad (\text{T})$$

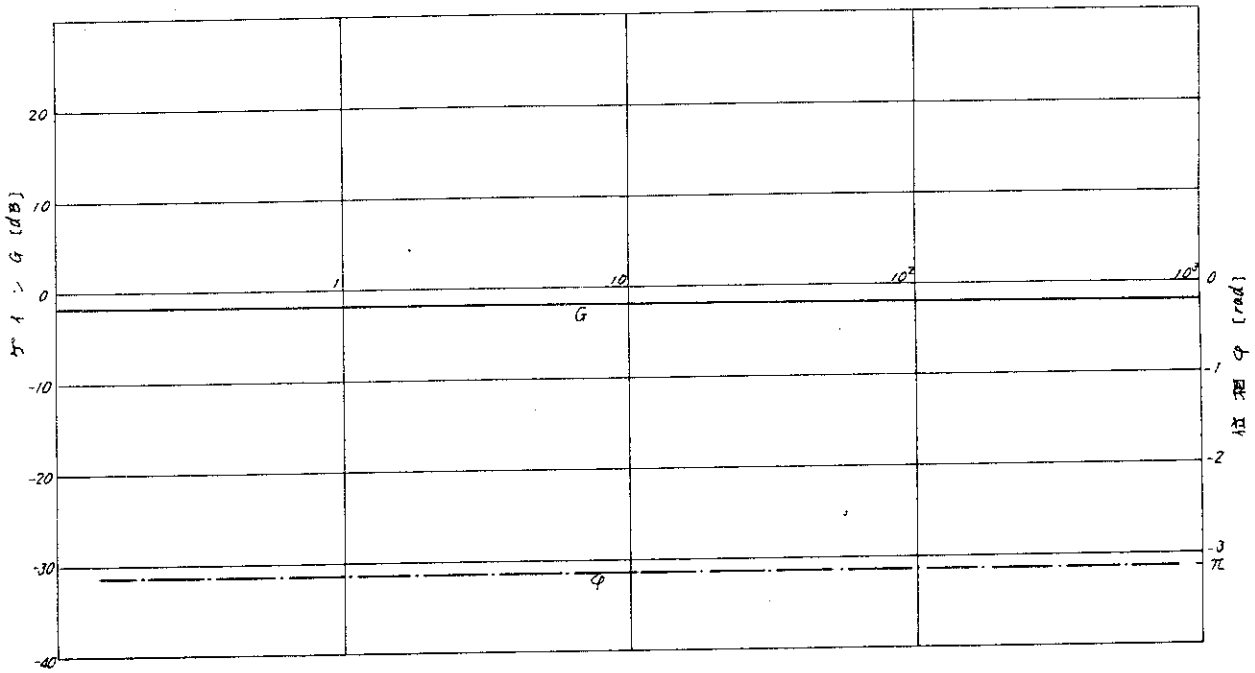
を用いる。この外乱の大きさは、楕円度 $\delta\kappa = 0.07$ に相当する。²⁸⁾

制御特性部の時間遅れ要素は、サイリスタ電源むだ時間を 2 msec とする外は水平位置制御の場合と同じである。位置制御および電流帰還制御としては、水平位置制御と同時に P I 制御を考える。第 4.1.7 表に検討の結果を示す。第 4.1.0.3 図より、プラズマの断面形状の変化に対してはシェル効果が非常に小さいことが分る。第 4.1.0.5, 1.0.6 図より、フィードバック制御の効果があるのは $\omega = 100 \text{ rad/sec}$ 以下の周波数であることが分る。第 4.1.0.7, 1.0.8 図のシミュレーションによると、変位 y の最大値 1.26 cm となり、制御目標 $y < 1 \text{ cm}$ を満たさない。この目標を満たすためには、 $T_{th} = T_y = T_{y1} = 0.3 \text{ msec}$, $T_{s1} = 0$ の程度にすればよいが、これは技術的に非常に困難である。変位 y が大きくなる原因は高周波領域でのシェル効果が有効でないことによる。したがって、今後断面形状の変化に対するシェル効果の再検討を必要とするが、一応今回の検討結果を信用すると、制御コイル電流 $I_q \sim 21 \text{ kA}$ は、今回考えた外乱の大きさが小さいことを考慮すると相当大きい。Q コイル定格としてもっと大きなものが必要となる可能性があり、今後の検討が必要である。

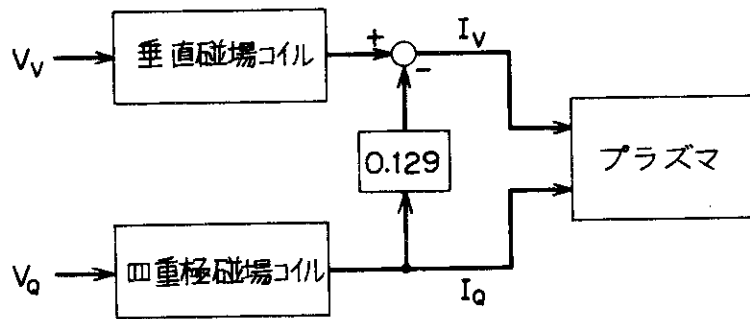
以上、プラズマの水平位置、断面形状制御について技術的予備検討を行った。しかし、これら 2 系列の制御は本来総合的に取扱うことが望ましい。何故なら、これらの制御対象コイルである垂直磁場コイル (V コイル) と四重極磁場コイル (Q コイル) とは電磁的に相互結合を有している (第 4.6 表)。また、予備設計仕様による Q コイルがプラズマ領域に印加する四重極磁場は第 4.6.9 図に示したように理想的ではないので、第 4.1.0.9 図に示すように V コイルによる垂直磁場の重畳で補償する必要がある。したがって、今後これら 2 系列の総合制御を含め、その他各ブロック線図要素の定数の周波数特性、外乱の波形など、詳細に検討し制御系の最適化を計ってゆく必要がある。これらの検討は、現在 J T - 6.0 の R & D および詳細設計を通じて実行されているので、逐次 J T - 4 に取入れてゆく計画である。



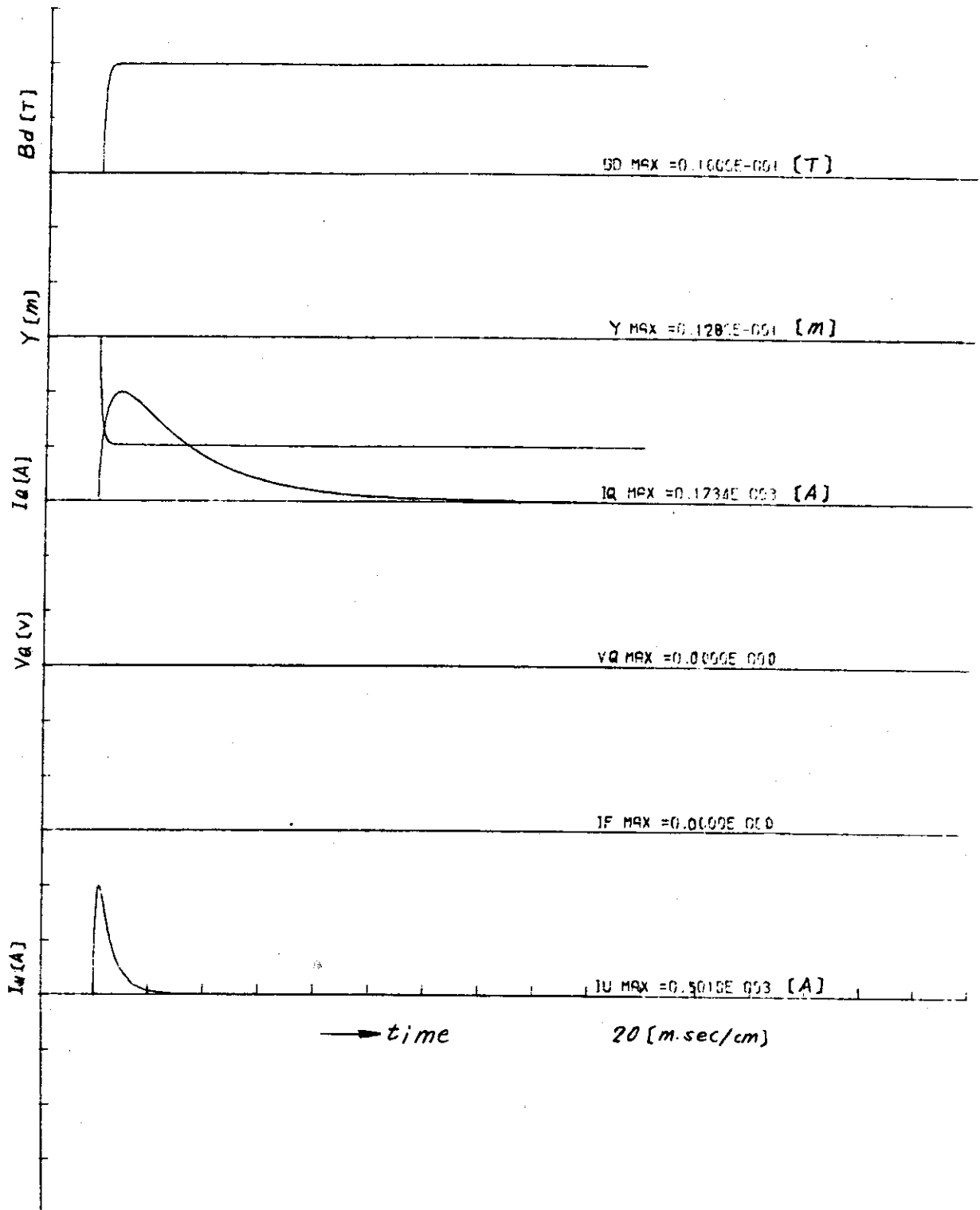
第4.1.02図 断面形状制御のブロック図



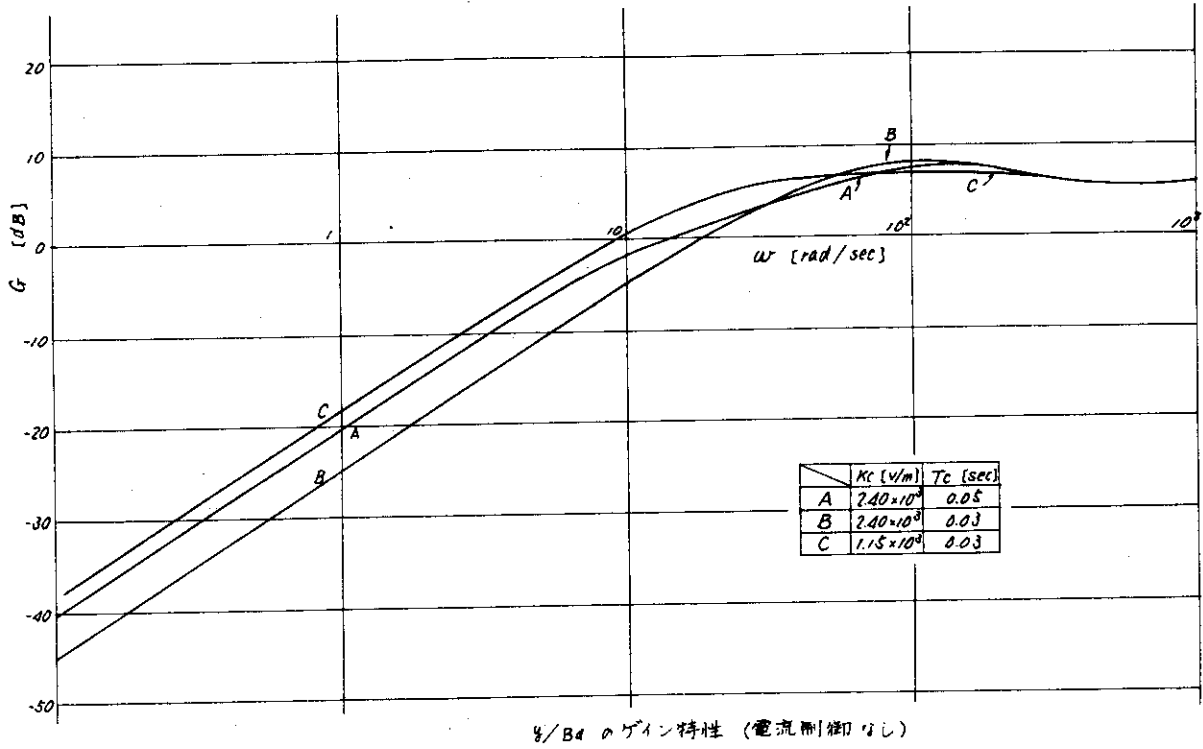
第4.103図 断面形状制御伝達関数 ($y-B_d$) の周波数特性 (制御なし)



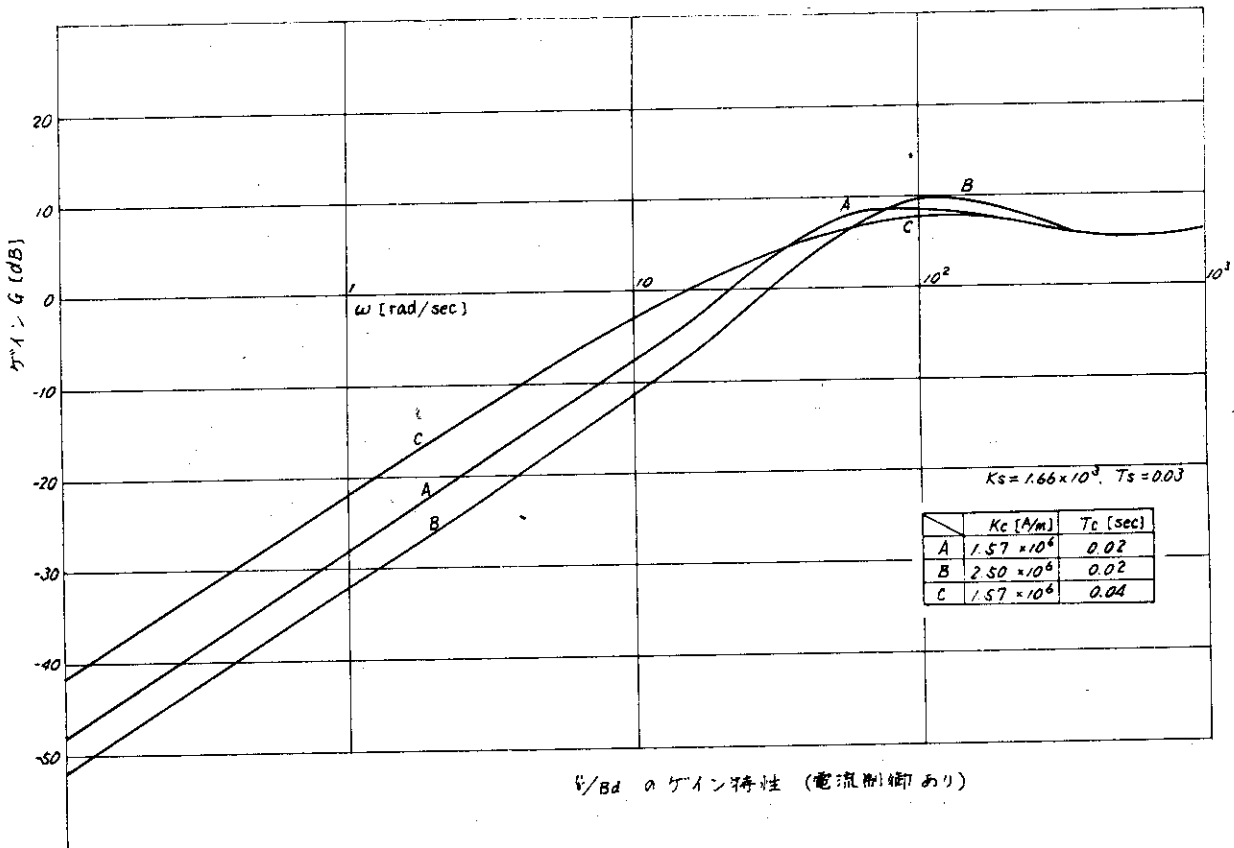
第4.109図 VコイルによるQコイルの補償



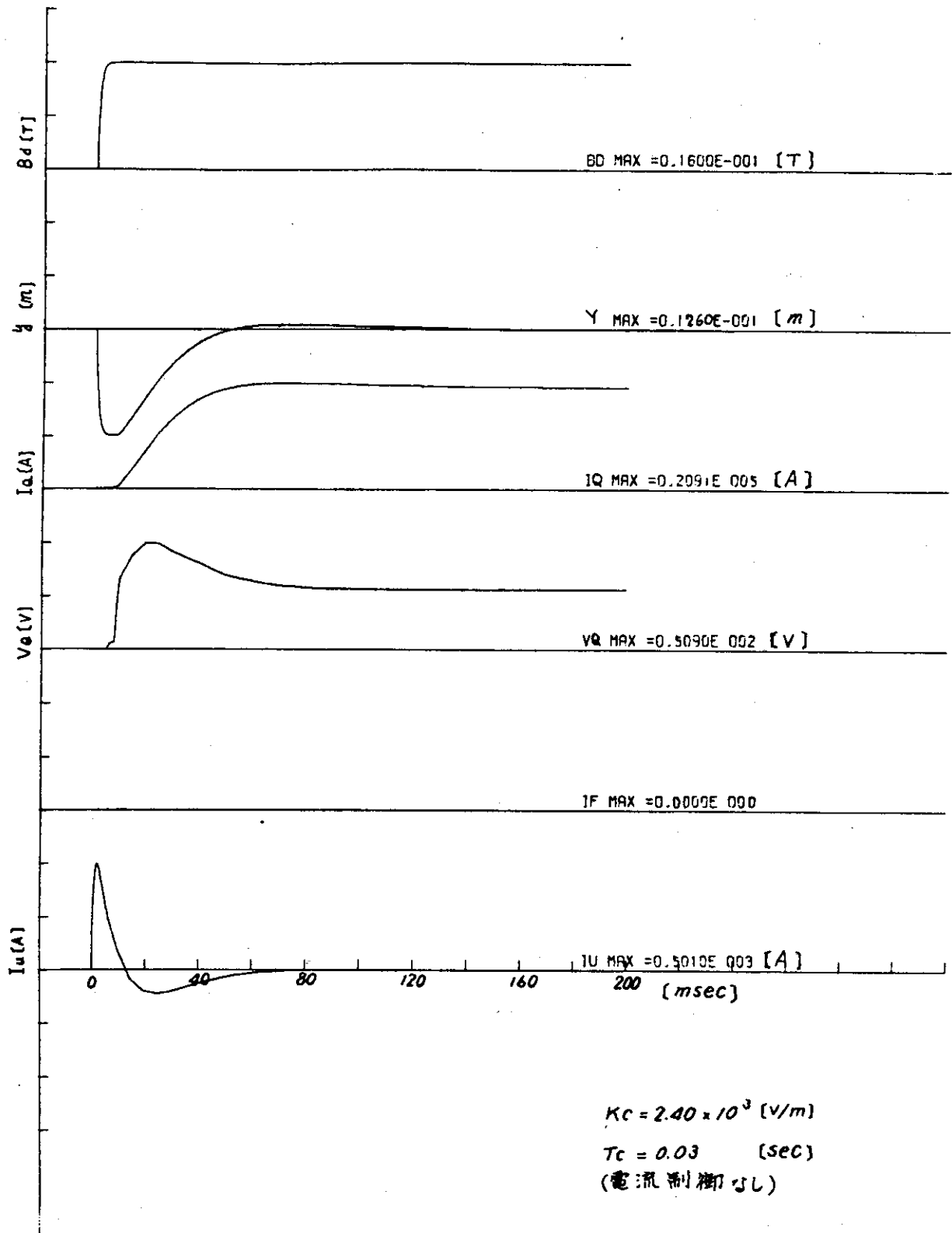
第4.10.4図 断面形状制御のシミュレーション結果
(制御なし)



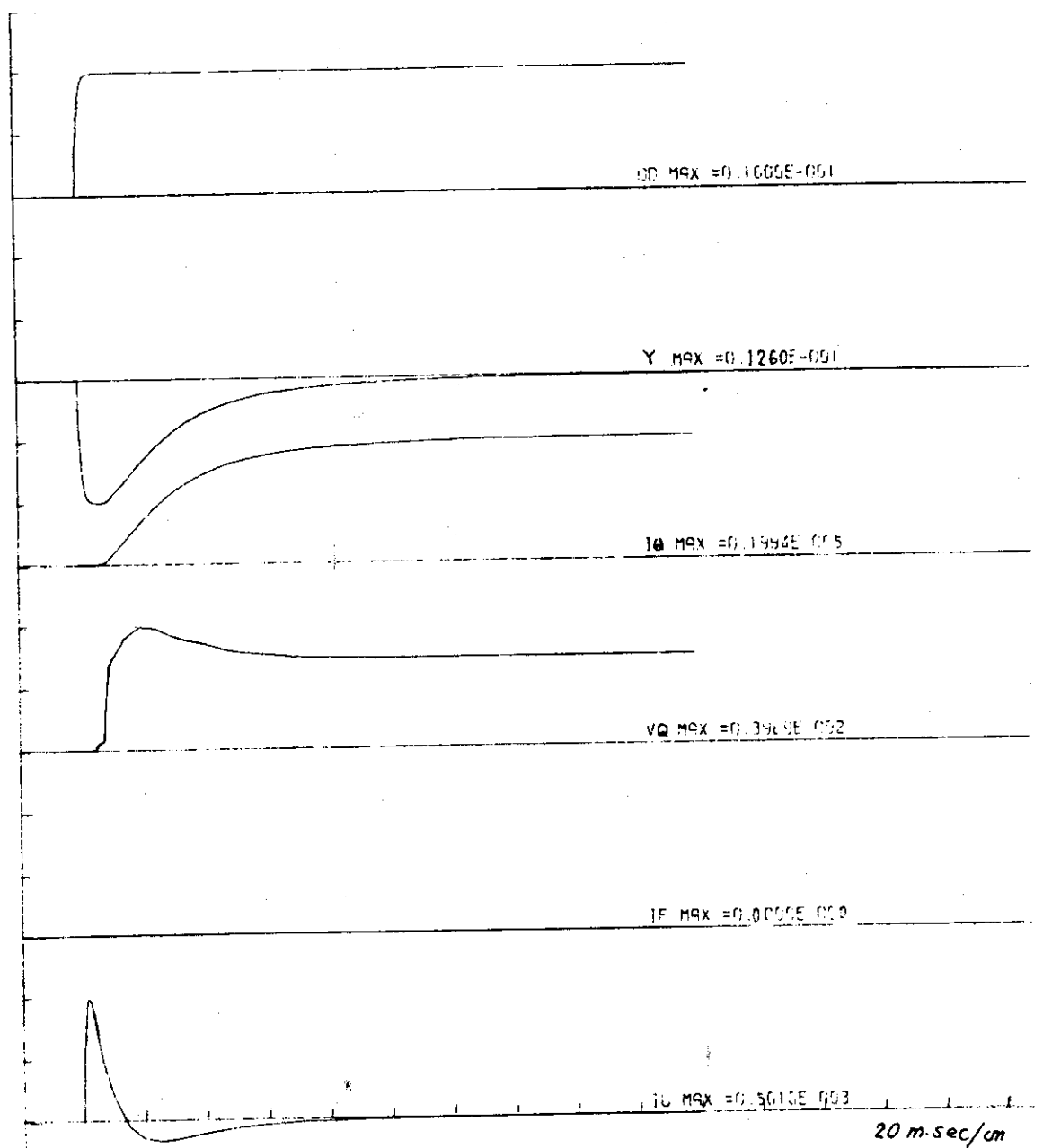
第4.105図 断面形状制御伝達関数 (y/B_d) の周波数特性 (電流制御なし)



第4.106図 断面形状制御伝達関数 (y/B_d) の周波数特性 (電流制御あり)



第4.107図 断面形状制御のシミュレーション結果
(電流制御なし)



$$\begin{aligned}
 K_s &= 1.66 \times 10^{-3} \text{ (V/A)} \\
 T_s &= 0.03 \text{ (sec)} \\
 K_c &= 1.57 \times 10^6 \text{ (A/m)} \\
 T_c &= 0.04 \text{ (sec)}
 \end{aligned}$$

第4108図 断面形状制御のシミュレーション結果
(電流制御あり)

4.1 2.4 垂直方向位置不安定性のフィードバック安定化

垂直方向位置不安定性のフィードバック安定化の場合、制御対象自身が不安定な系である点
が、前項までの制御と体質的に異なる点である。このような系のフィードバック制御は、通常の
系（過去に設計経験が多い系）に比べて技術的情報が少い。このため、予備設計においてはそ
の把握に留まった。

まず、第3章の検討に引続き第4.1 1 0 図で示す様な系で特性方程式を与える。

$$T \tau \tau_g^2 s^4 + (\tau + T) \tau_g^2 s^3 + [\tau_g^2 + T \tau (K_p K - 1)] s^2 + [-T + \tau (K_p K - 1) + K_p K_H \tau] s + (K_p K_H - 1) = 0$$

この特性方程式に Routh - Hurwitz の安定条件を適用して安定化に必要なゲイン K_H を求め
た。その結果を下表に示す。基本的定数の値は付録5の値を用いた。結果は第4.1 7 表に示す
が、 τ 、 K は次の値を用いた。

シェル効果として真空容器のみが効くとした場合 $\tau = \tau_u$, $K = -\nu_u K_{pu}$

シェル効果としてCコイルのみが効くとした場合 $\tau = \tau_c$, $K = -\nu_c K_{pc}$

また、安定化制御の遅れ時間 T としては、Cコイルの時定数、SCRの遅れ等を合計したも
ので一応 200 msec とした。第3章で述べたシェル効果を表わす指数 n_s は次の値をもつ。

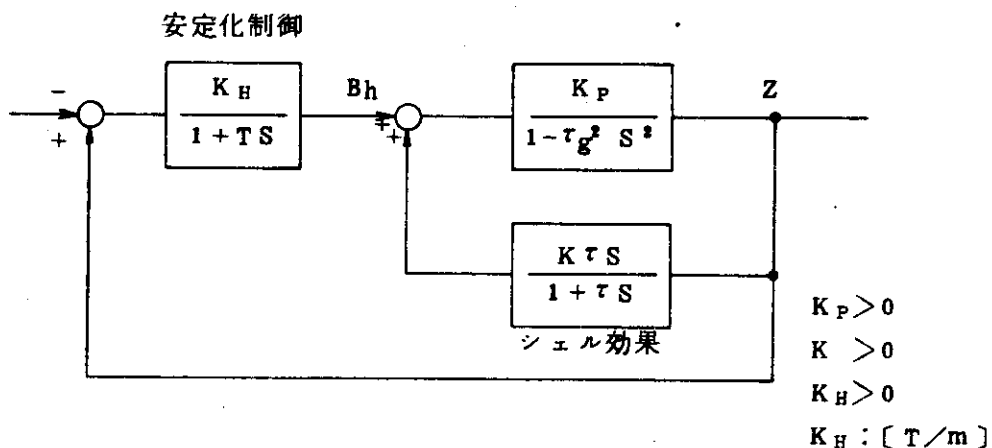
真空容器 $n_{su} = 1.13$

Cコイル $n_{sc} = 0.76$

第4.1 7 表から次の事が言える。(a) $n + n_s < 0$ の時、安定化制御は不可能である。(b) $n + n_s > 0$ の時、安定化制御は理論的には可能である。(b)のときに必要な制御コイルの電圧電流は次の通りである。

$$34 < \frac{V_c}{z} < 108 \quad (\text{V/cm})$$

$$20 < \frac{I_c}{z} < 64 \quad (\text{kA/cm})$$



第4.1 1 0 図 垂直方向不安定性の安定化ブロック図

この値は、予備設計仕様のCコイル電流定格が不充分であることを示している。さらに、実際の安定化制御ループにはSCRの点弧制御のむだ時間、計算機で位置Zの算出用むだ時間等が含まれるが、むだ時間要素 e^{-TS} を含む場合、制御は更に困難であろう。

以上、垂直方向位置不安定性の安定化制御は技術的に相当困難であろう。今後、むだ時間要素 e^{-TS} を含む特性方程式の安定条件、微分制御(D制御)の開発、大きなシェール効果要素 (n_s, τ_s の大きな要素)の技術の開発等について詳細な検討を行い、結論を出す必要がある。

第4.17表 プラズマ制御検討結果

水平位置制御シミュレーション結果

	$-\frac{x}{B_d}$	シミュレーション	利得余裕	位相余裕	X_{max}	I_{vmax}	V_{vmax}	I_{umax}
制御なし	第4-96図	4-97	-	-	2.25 ^{cm}	6.8 kA	-	4.4 kA
位置制御	4-98	4-100	16 dB	64°	4.8	1.2	5.0 V	4.4
位置制御 電流帰還	4-99	4-101	13	6.0	5.0	1.5	9.8	4.4

断面形状制御シミュレーション結果

	$\frac{y}{B_d}$	シミュレーション	利得余裕	位相余裕	y_{max}	I_{qmax}	V_{qmax}	I_{umax}
制御なし	第4-103図	4-104	-	-	1.28 ^{cm}	1.70 A	-	5.00 A
位置制御	4-105	4-107	15 dB	48.5°	1.26	2.09 ^{kA}	5.09 V	5.01
位置制御 電流帰還	4-106	4-108	15	6.4	1.26	1.9.9	3.9.9	5.01

垂直方向位置不安定性のフィードバック安定化

n	τ_g (s)	K_p (m/T)	τ (s)	K (T/m)	T (s)	安定条件
(a) -3.0	1×10^{-6}	3.0	0.0085	0.1625	0.200	安定化不可能
			0.0429	0.0557		
(b) -0.5	2.45×10^{-6}	1.8.0	0.0085	0.1625		1.2 < K_H < 3.82 (T/m)
			0.0429	0.0557		

4.1.3 付属設備

4.1.3.1 付属設備概説

付属設備は、4.1.2までに含まれない受電設備、非常用電源設備などを意味する。これらは、本体および電源が確定した後でなければ詳細に検討する意味がなく、かつ設計、製作に困難な点もない。したがって予備設計では、これらに重点をおかず、マンパワーを本体と電源に向けるようにした。本節では、予備設計で簡単に検討された結果を述べる。

4.1.3.2 受電設備

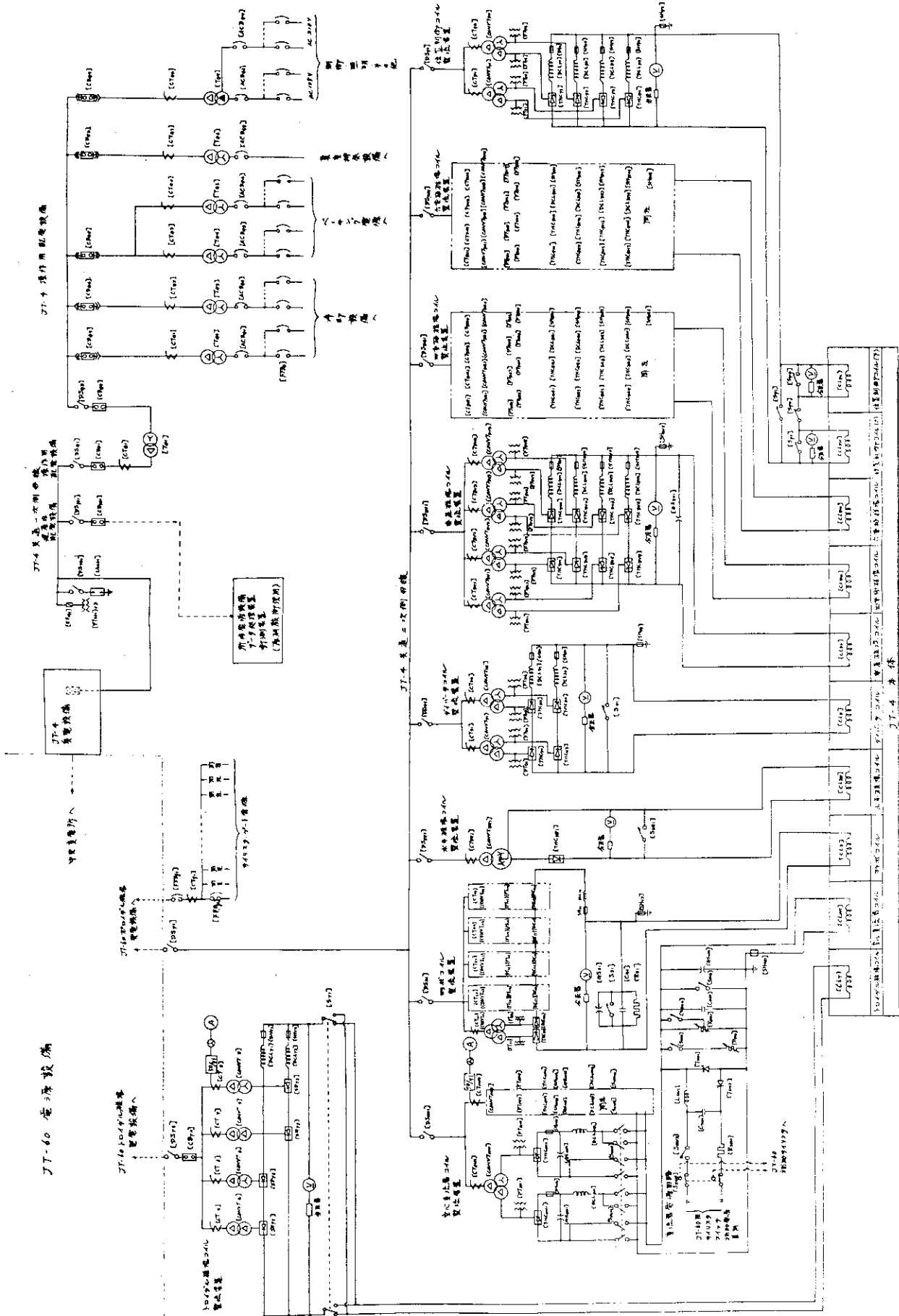
受電設備は、中央変電所から66kV系を受け、降圧して操作用配電設備と建屋内配電設備に電力を供給する。これらの構成は第4.3図に示す通りである。その内容は、配線設備と変圧器、断路器である。操作用配電設備はJT-4本体に関連の深い各設備に電力を供給し、建屋内配電設備はJT-4関係建屋に所要電力を供給すると共に、計測装置、データ処理装置、第2段加熱装置（定常分）に電力を供給する。電力系統図の1例を第4.1.1.1図に示す。JT-60の詳細設計時には、JT-4の建屋内配電設備に10MVA、操作用配電設備に5MVAの電源容量を準備することとした。

4.1.3.3 非常用電源

非常用電源は、停電時に各装置を安全に休止状態に移行させ、休止中の保守運転を継続するための設備であり、ディーゼル発電機、蓄電池および制御用計算機の非常電源であるCVCF（定電圧定周波装置）から成る。非常用電源はJT-60と共用するが、JT-4のために必要な容量は第4.1.8表の通りである。

第4.1.8表 非常用電源

バッテリ 100V系(1.8V/cell×52) 1500AH/10H	負荷 ① AC100V, 200AのCVCF ② DC165A×30分 ③ DC200A×0.25分
ディーゼル発電機 (JT-60と共用)	負荷 ① バッテリー充電 100kW ② 非常灯, 制御用など200kW



第4.111图 電力系統圖

4.1.3.4 冷却設備

真空容器，コイル類その他の冷却を行う。真空容器は油冷却，リミタ，粒子中性化板などは窒素ガス冷却，コイル類は純水冷却とする案を第4.1.1.2図に示す。必要な2次冷却水量は約700 ton/h，補給水量は約30 ton/hである。

前述のように，ダイバータ・コイルの冷却は信頼性に充分留意する必要がある。

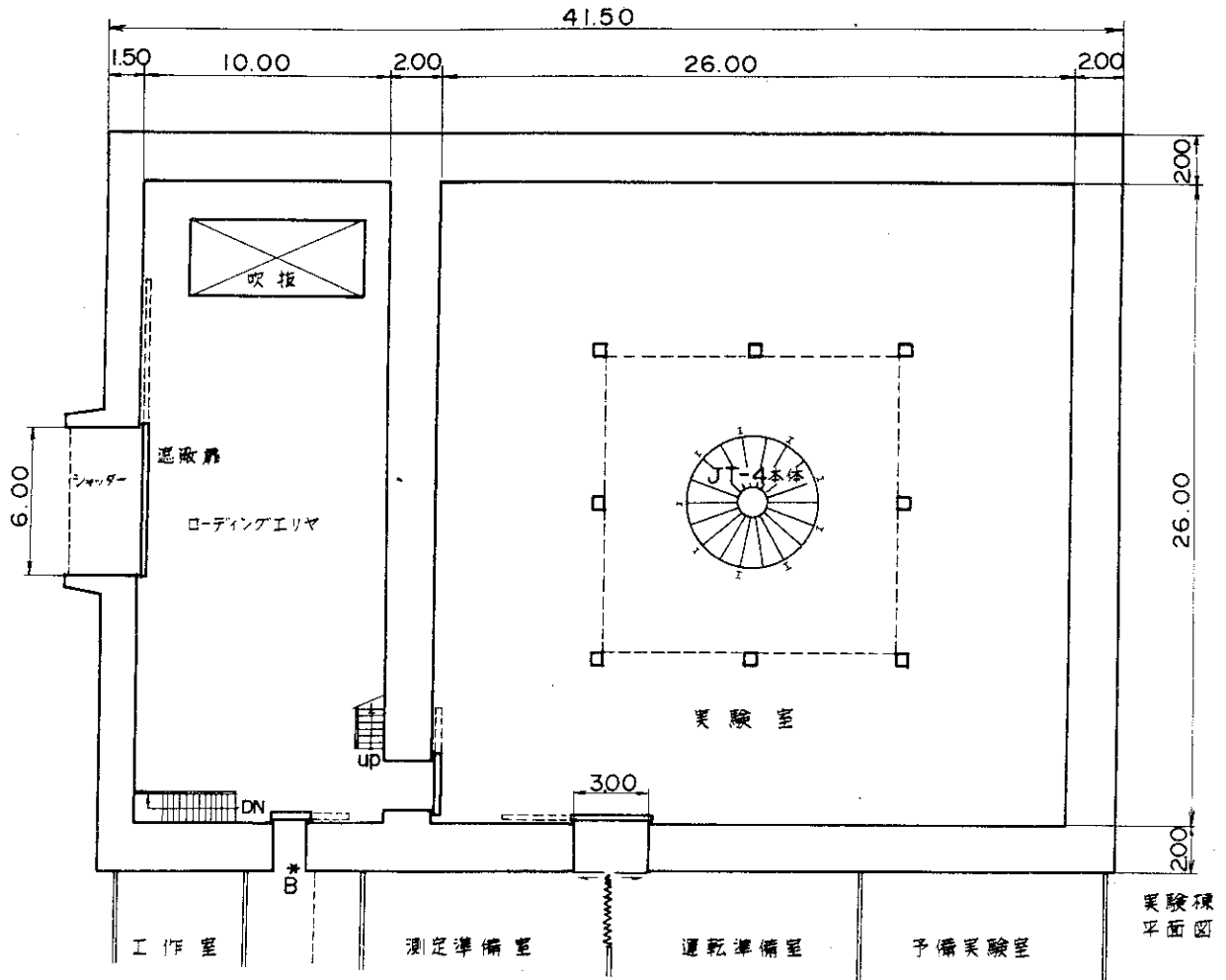
4.1.3.5 運転制御設備

J T - 4 を構成する全設備を統率する設備であり，運転連繫，安全保護などを行う。本設備は，他の設備の設計が進まないと詳細な検討の意味がなく，予備設計では基本的な方針の検討と，インタロック，モニタ項目の検討のみを行った。

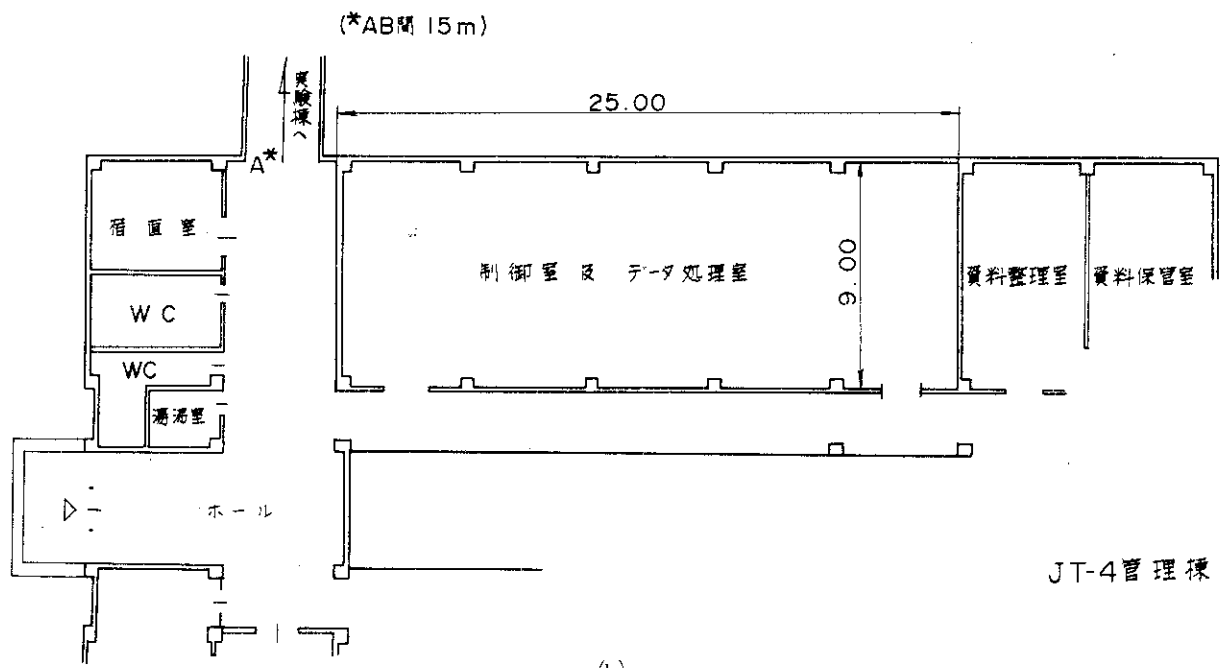
基本的な構成は，必要とするインタロック，モニタ等の数と，操作の種類，あるいはこれらの柔軟性を考慮して，十分な信頼性をもつように決定する。プラズマ制御（Pコイルの電流制御）など，一部分は電子計算機を必要とするが，他はhard wired とする案と，全ての制御を計算機で行う案とがあり，²⁹⁾ J T - 6 0 での検討結果などを参考として決定する。インタロックおよびモニタ項目表は各社の予備設計報告書に詳しいが，ここでは省略する。装置各部の故障解析および安全維持に関して，今後更に検討を行う。

4.1.3.6 建屋

J T - 4 関係の建屋は未確定であり，J T - 6 0 の建屋とも関連して検討を進めているが，予備設計時には，J T - 6 0 建屋とは全く別個のものとして，第4.1.1.3図に示すものを想定した。管理棟，実験棟，電源棟の3建屋から成る。実験棟では装置本体を半地下に設置し，主要計測ポートを一階床面から操作し易い高さとする。上，下のポートも各々の床面から扱えるように3面の床を設ける。一階床面と2階床面の間隔は，この間で踏み台を必要とするほど拡げないように考えたため，天井が低い。この点も今後検討する必要がある。装置本体付近の床面は，組立てのために着脱可能とする。また，二階床面は部分的に取り外し可とし，一階床面への測定器設置のためにクレーンを使用できるようにする。電源棟は，装置をできるだけ屋外型として建屋を不要とする案もあるが，いずれにしても必要な床面積は約5,000 m² である。

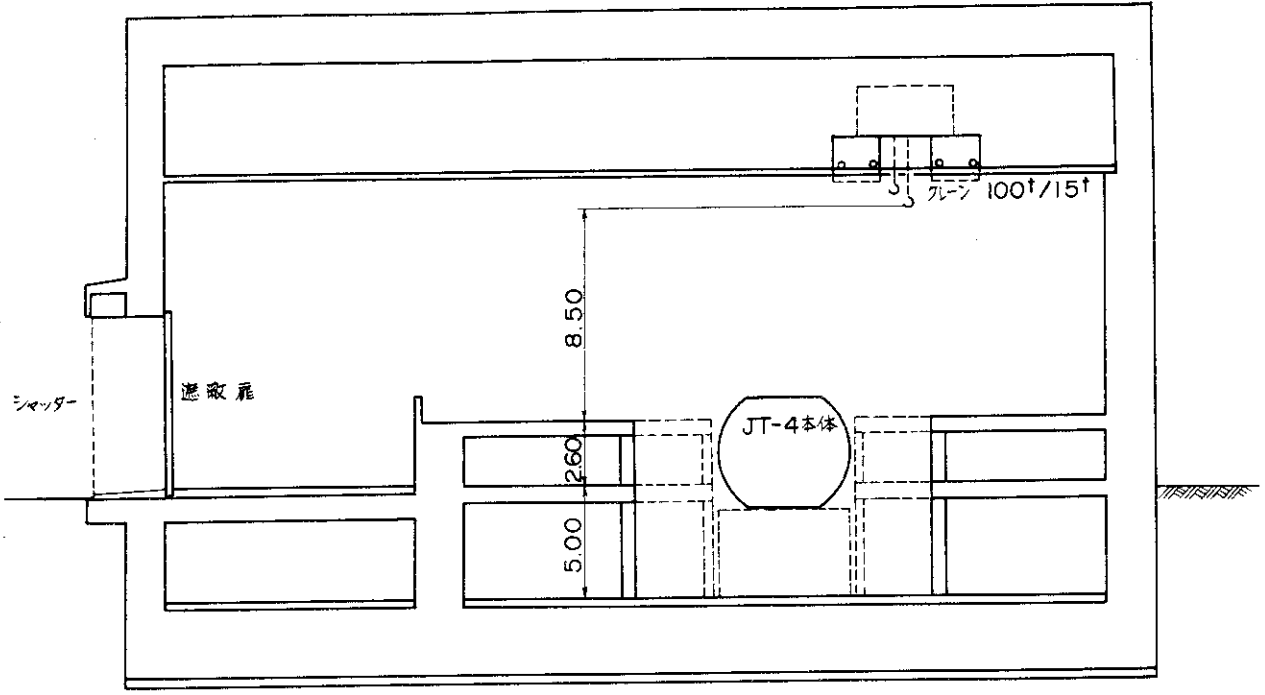


(a)



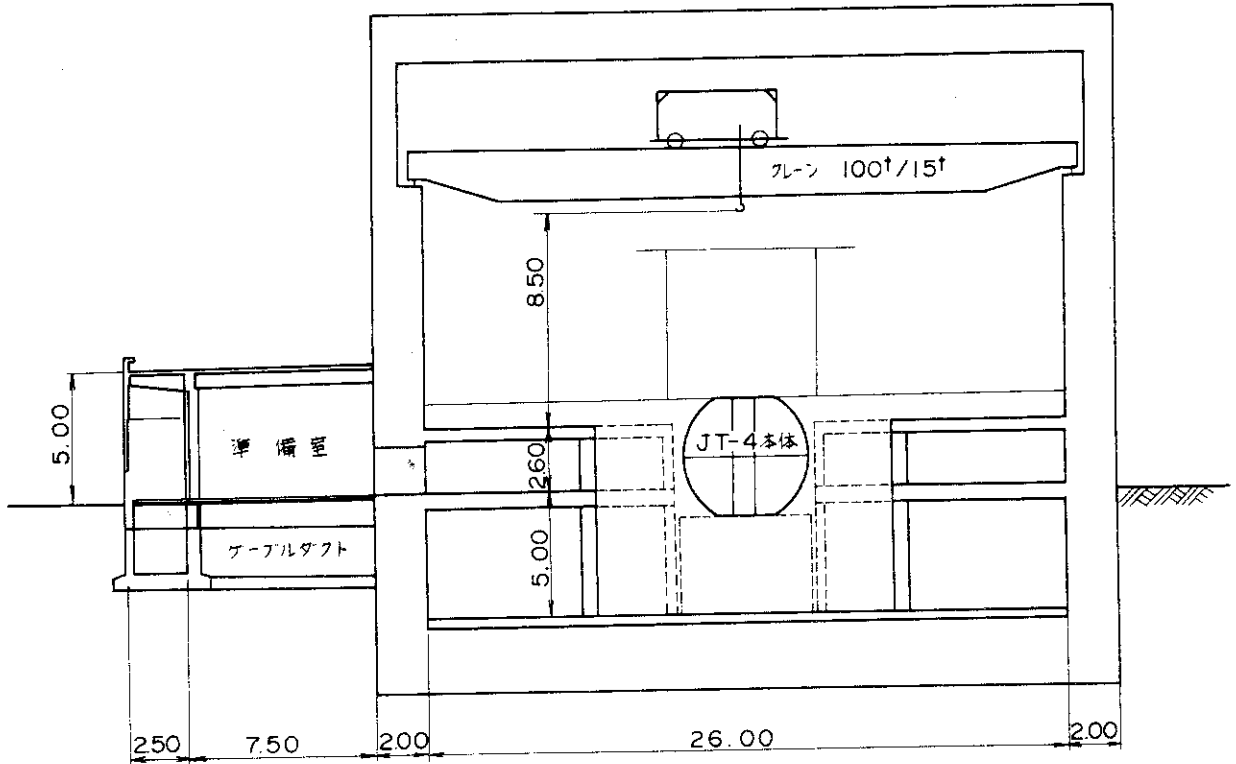
(b)

第4.1.1.3図 建屋案(予備設計時)



(c)

実験棟
断面図(1)



(d)

実験棟
断面図(2)

第4.113図 建屋案(予備設計時)

4.1.4 その他の事項

4.1.4.1 放電洗浄

装置の運転モードとしては定格運転（10分間隔で定格電流通電）の他にもいくつか考えられる。電源あるいはコイル類の熱設計のために、放電洗浄運転を予備設計の検討事項とした。

放電洗浄は、トロイダル磁場を定常運転して短パルス放電を早くり返しで行うものと、トロイダル磁場も短いパルスで早くり返し放電するものと考えた。これらはJT-60との相関を検討の上で決定する必要がある、現在進行中のJT-60詳細設計の中で検討が行われる。次に、JT-4予備設計時に提示した放電洗浄運転を示す。

放電洗浄運転では、ライナ温度 500°C 、真空容器 200°C に加熱した状態で、次の(I)または(II)の通電を行う。

- (I) Tコイルは直流定常通電約 2.7MAT （約 3.9kG ）。Pコイルは熱的に許容される範囲内で高くり返し通電を行う。電流値は定格値の 25% 以下。ただし、プラズマ電流の持続時間は $0.2\sim 0.5\text{sec}$ とする。（例えば、Pコイルの電流値を定格の 25% として、くり返し周期約 10sec ）
 - (II) Tコイルを高くり返しでパルス通電する。例えば 9MAT （約 12kG ）、くり返し周期 30sec 、フラットトップ 0.5sec 。Pコイルの通電は(I)と同じ。ただし、Pコイルの電流値は定格の 50% 以下とする。
- (I)、(II)とも、熱的あるいは電源容量の点で、仕様値（定格運転時）を越える場合は、電流値を下げ、定格運転時仕様以下に納めるものとする。

- 1) 狐崎, 関, 斉藤, 吉川, 森 「JT-4 予備設計仕様書」(1975)
- 2) この値は, $T_e = 5 \text{ eV}$, $Z = 1$, $a = 45 \text{ cm}$ のプラズマ抵抗の約3倍である。
- 3) 真空容器容積/排気速度
- 4) パッキングも今後の検討事項であるが, コンフラット, コンプレッション・シール, あるいは中空金属リングが適当である。
- 5) 同図は Pulsator で使用している方式である。
- 6) Auger Electron Spectroscopy
- 7) Secondary Ion Mass Spectroscopy
- 8) 実際には, 第 4.1.3 図(b)のように流れる。
- 9) 付録 7 は, プラズマ位置一定のまま電流が遮断する場合の計算であり, プラズマ位置が移動する場合の誘導電流の方が大である。
- 10) (加熱パワー)/(壁面積), 加熱パワー = 500 kW (ジュール加熱のみ)。第二段加熱を含めると, この値は 10 W/cm^2 程度とする必要がある。(約 4 MW に対応する。)
- 11) ST トカマクでは, AL のリミタを用いた実験が行われた。
- 12) プラズマ粒子は磁束に沿って流れ, ほとんどトロイダル方向に飛来することに注意。
- 13) 壁面に T_i 蒸着する方式は, T_i 面に吸蔵されるガスの再放出が問題であり, 一旦蒸着すると取除くことが不可能であること, また, 蒸着した T_i 薄膜のはがれ, など問題点が多い。
- 14) SAES ゲッター社 (日本真空KK)
- 15) コイル導体のみ, それもトロイダル方向に一様としたときの計算結果による。コイルが有限個の場合, あるいは導体以外の支持構造のある場合には, 応力分布はその影響を受けて, 一定張力ではなくなる。
- 16) 真空容器の真空試験を T コイルの外で充分に行ってから, 真空容器をそのままの状態でも T コイルの中に収めることができる。
- 17) 第 2 次案で, 主半径を 1.45 m に増したことに伴って, 22 MAT に変更する可能性もあるが, 今後の検討による。
- 18) 谷 啓二 他 JAERI-M 5999 (1975)
- 19) 長さ 40 cm , 断面積 18 cm^2 (各ターンの半分の断面積)
- 20) 1つのコイル・ブロック内で, タップを $1, 2, 4, \dots, 2^n$ ターン毎に出しておけば, 任意のターン数を得ることができる。
- 21) プラズマ内電流密度分布がフラットな場合の平衡計算結果による。
- 22) JFT-2, JFT-2a において, 立上り時間の短い方が, プラズマ特性の良い傾向がある。
- 23) OHコイルはじめ, Pコイル電源にSCRを用いる時は, そのリップル, ノイズを検討する必要がある。特にOHコイルでは電圧リップルがプラズマ本体および計測器に及ぼす影響が心配である。
- 24) 最近の情報によれば, ASDEXでは shot 毎に自動交換する exploding wire を使用する。

- 25) JT-60 の多段式立上げ方式
- 26) 誤差磁場の大部分はTコイルによると予想され, Tコイル電流波形程度の電流変化でよいであろう。
- 27) 系統からとることのできるピーク電力は160MVAである。
- 28) 予備設計仕様値は小さすぎた。 $\delta \kappa = 0.2$ 程度 ($\delta n \doteq 0.5$) が適当である。
- 29) 小方 他 「臨界プラズマ試験装置の制御システム」 (1976)

第5章 付属装置（予備設計範囲外）

5.1 計測装置およびデータ処理装置

5.1.1 概 説

J T - 4 の目標である非円形断面効果，ダイバータ効果を研究するためには，プラズマの詳細な計測が不可欠であり，計測の充実を計りたいと考えている。予備設計においては，ポートを多数設けることに関して検討を行い，ほとんど問題ないことが分った。したがって，計測器およびポートは自由に設計することができる。ここでは，現在までに計測に関して行った検討内容を述べ，今後の詳細検討のための資料とする。データ処理装置は今後検討する。

5.1.2 計測項目と計測方法

J T - 4 において計測すべき対象は，電気磁氣的諸量，真空諸量，壁面に関する諸量の他，プラズマ粒子に関する諸量がある。プラズマ粒子としては，電子，水素（重水素）イオン，中性水素粒子，各種の不純物の中性粒子，それらの各価イオンと非常に多種類に及ぶ。これらの粒子各々の密度，温度の空間分布の時間変化を計測することが理想である。第 5.1 表には，これらの測定対象と測定方法，および検討事項を整理して示す。

J T - 4 において，これらのうちどれを実行するか，あるいは優先度については今後さらに検討を行うが，最小限必要な基本的計測としては，電気磁氣的測定，レーザ散乱測定（多パルス多分光器による密度，温度の同時測定），および各種の分光測定が挙げられる。

第 5.1 表 主プラズマ計測方法

時間変化	{	A 連続測定可能 B 不連続点測定 C 時間積分量	空間分布	{	A 連続分布測定可能 B 不連続点（少数）測定 C 光路積分値測定 D 空間積分又は空間平均測定
------	---	---------------------------------	------	---	---

測定量	測定法	時間変化	空間分布	検討
電気磁氣量	ログスキー・コイル	A	—	長時間積分回路または計算機処理
	ワンターン・コイル	A	—	"
	磁気プローブ	A	B	高温高真空中へのコイル設置法要検討
電子温度	プラズマ抵抗	A	D	ルビー，CO ₂ ，Ar（多パルス多分光器） ラインX線との分離必要
	トムソン散乱	P	B	
	X線	A	C	
	不純物ライン	A	C	

測定量	測定法	時間変化	空間分布	検討
イオン温度	中性粒子分析	A	C	断面内分布の効果の換算必要(1 keV以下?) Dプラズマ super hybrid resonance CO ₂ レーザで励起する CH ₃ Fレーザ(496 μ) H ⁰ , 不純物の温度から推定
	中性子発生数	A	D	
	μ波散乱	A	B	
	遠赤外散乱	B	B	
	(ドップラー巾)	A	C	
H ⁰ 温度	ドップラー巾	A (C)	C	中心部は不可能, 干渉フィルタで多ch, 化
電子密度	トムソン散乱	B	B	ルビー, CO ₂ , Ar 測定系の機械的変位要対策, 多ch, 化 同上
	μ波干渉	A	C	
	遠赤外レーザ干渉	A	C	
イオン密度	H ⁰ ビームの減衰	A	C	
	荷電交換中性粒子	A	C	
H ⁰ 密度	分光絶対測光	A	C	中心部は不可能, 干渉フィルタで多ch, 化
	中性粒子分析	A	C	
	UV共鳴散乱	B	B	
不純物 (種別, 価数)	分光	A	C	可視, UV, VUV
	X線分析	A	C	
不純物密度	分光線対測光	A	C	可視, UV, VUV
不純物温度	ドップラー巾	A (C)	C	同上
プラズマ中のB	重イオンビーム αビーム μ波反射 Zeeman偏向(H _β) " (L ₁ ビーム) CO ₂ レーザ散乱			elec, hybrid 波
プラズマ中のE	ライン発光の微細構造			Stark効果
発光形状	高速度カメラ			平衡, 不安定性(MHD)
Z _{eff}	導電率 H ₂ ビームの散乱 分光			各種不純物の量の測定
その他 σ分布 振動 逃走電子	高周波インピダンス μ波散乱 硬 X 線			導電率分布の測定 → j(r) (ターゲット・プローブ法など)

第 5.2 表 周辺プラズマ計測方法

測定量	測定法	時間変化	空間分布	検討
電子温度	静電プローブ	A	A	
	ファラデーカップ	A	A	
	(トムソン散乱)	B	B	
イオン温度	ファラデーカップ	A	A	
	イオンプローブ	A	A	
	(静電プローブ)	A	A	
H° 温度	ドップラー巾	A	C	
電子密度	静電プローブ	A	A	
	μ波干渉	A	C	
	ファラデーカップ	A	A	
	レーザ干渉	A	C	
	(トムソン散乱)	B	B	
イオン密度	(H° ビームの減衰)			
	静電プローブ	A	A	
H° 密度	分光絶対測定	A	C	H° 以外の効果除外困難
	高速真空計	A	B	
	UV共鳴散乱	B	B	
不純物 (種別, 密度)	分光絶対測光			
	X線			
	マスアナ			
	UV共鳴散乱			
不純物温度	ドップラー巾			
B	磁気プローブ			
E	静電プローブ			
粒子束	感圧素子			(Wave 励起)
	感熱素子			
	Wave 伝搬測定			
壁面, リミタ	赤外線測定			(赤外写真など)
	AES			
	SIMS			
	感熱素子			

5.1.3 計測用ポートの配置

前節に述べた各種の計測法の中から、現在すでに確立されている基本的計測法の配置案を第5.1図に示す。計測および第二段加熱は主に一階床面を使用するが、この位置（装置の側面）には、四個の中性粒子入射加熱用接線ポートの他、多数の計測ポートを設ける。計測用ポートもできるだけ接線見通しを得られるような形状とした。これは、プラズマ断面の測定を行えるように、また必要な場合には、追加中性粒子入射加熱のポートとしても使用できるように考慮したものである。大型計測ポートの概念図を第5.2図(a)に示す。また、レーザ散乱計測のZ分布測定などに使用するZポートは、第5.2図(b)に示すように、プラズマの垂直方向分布を測定できるようにする。

これらのポート配置および形状は、計測の立場から考えた案であるが、製作も可能であると考えられる。ただし、これらのポートに付けるゲート・バルブ、あるいは光学用ポートのシャッターは今後の検討事項である。ガラス・ポートは石英ガラスで 200°C 、 300ϕ までの金属シール型的设计図がメーカーですでに作られている。

5.1.4 計測装置

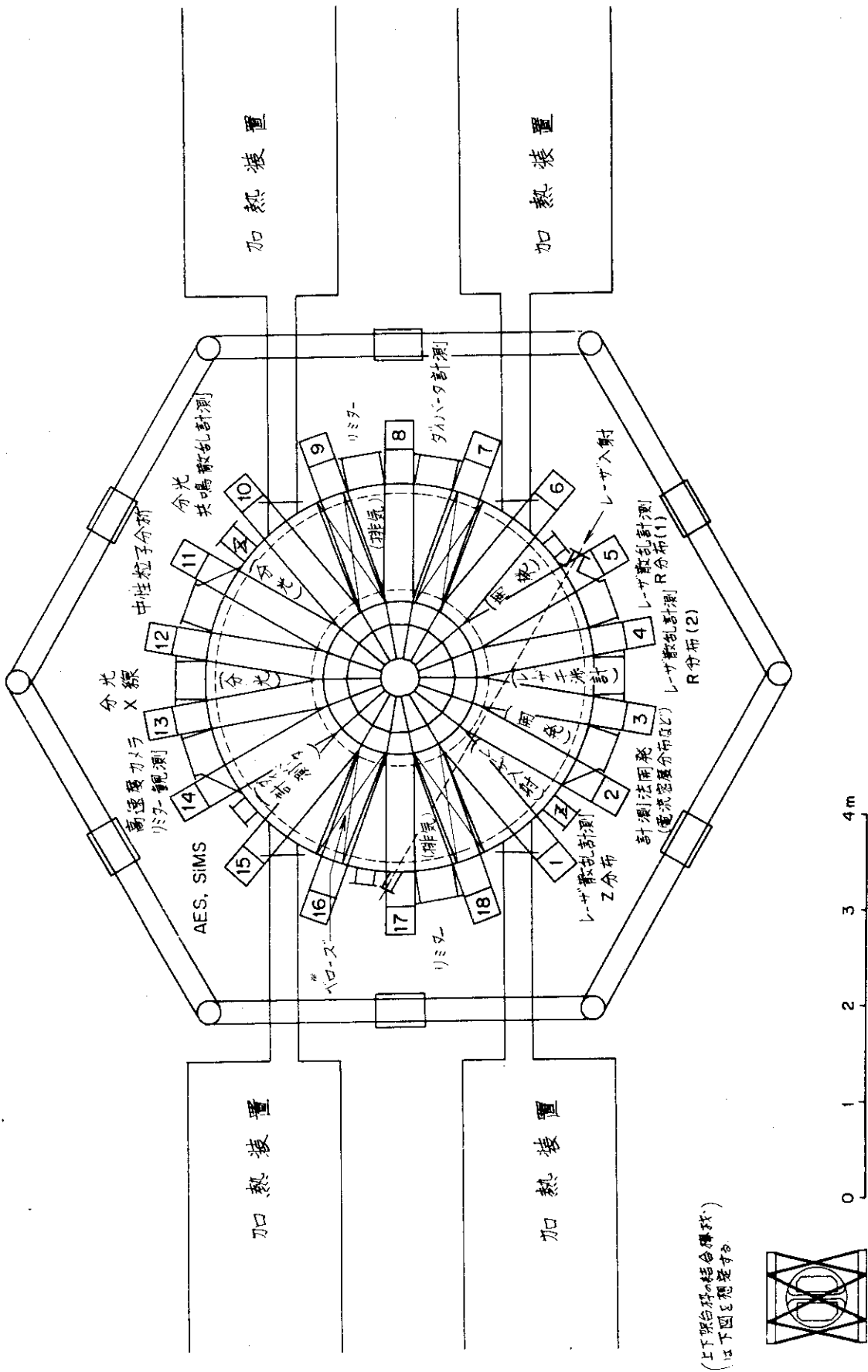
計測装置の具体案については、現在までのところJT-4独自には検討していない。計測装置の大部分は、JT-60に関して開発される予定の技術を適用して製作する予定であるが、中でも多パルス多分光器レーザ散乱計測装置に期待している。その理由は、JT-4は非円形断面プラズマを生成するために、干渉法では逆変換が困難で、各点の密度を得ることができないからである。

干渉法による密度測定は、プラズマの断面長が長い場合、測定し易いフリンジ数とするためには、波長 $0.1\sim 1\text{ mm}$ の可干渉（コヒーレント）な電磁波が必要である。シアン・レーザ（ 336μ ）干渉計もJT-60で開発される予定であるが、光路長数 m に対して装置の機械的振動（変位）を波長以下に抑える方法、あるいは変位を補正する方法を開発する必要がある。

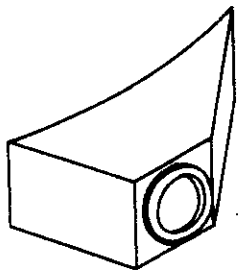
可視、UV、VUVなどの分光器、X線エネルギー分析も欠かせない計測器である。

この他、AES、SIMS、質量分析器など真空、壁面に関する計測器も必要である。

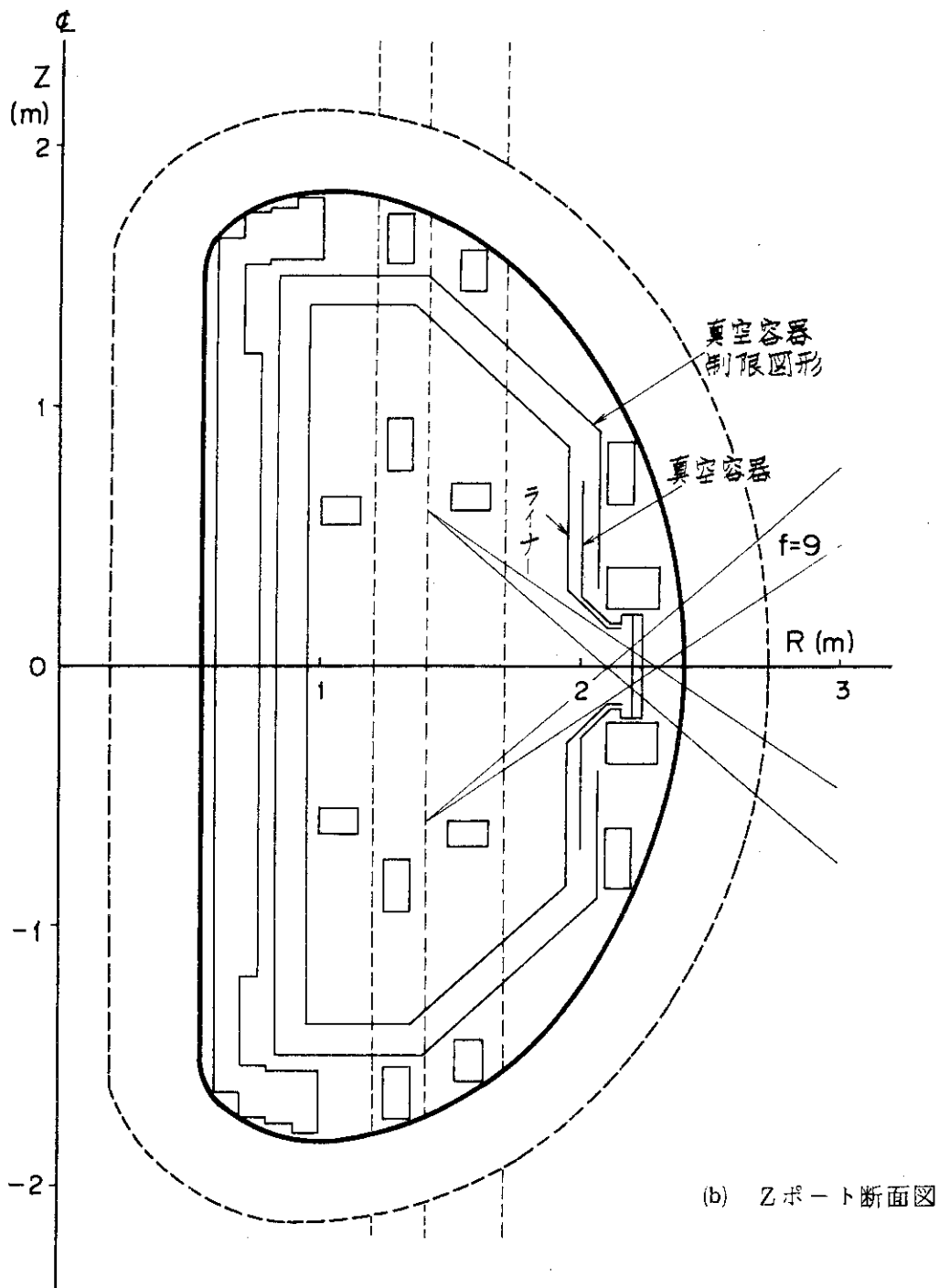
なお、計測装置用の電源としては、SCR電源、遮断器などの電源雑音を避けるため、MG対などで電氣的に完全に分離した電源を準備する必要がある。これに関しては、実機仕様の建屋内配電設備に含める予定である。



第 5.1 図 計測器配置表



(a) 大型計測用ポート
見取図



(b) Zポート断面図

第5.2図 計測用ポート

5.2 第二段加熱

5.2.1 比例則による第二段加熱後プラズマ・パラメータの予想

J T - 4 は、ジュール加熱の後にプラズマを捕捉イオン領域に入れることを期待して第二段加熱を行う。付録 2 に述べる方法によって、比例則によって第二段加熱後のプラズマを予想したものが第 5.3 図である。これによると、例えばプラズマ中に正味 2 MW 注入したときに、 $n = 5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 、 $T = 2.2 \text{ keV}$ 、 $\beta_p = 1$ で捕捉イオン領域との境界上に達する。しかし、一方、正味 5 MW 注入して、 $n = 3.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ という高密度が維持できると仮定しても、 β_p は高々 3 に達するのみである。通常考えられる密度、 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 以下で $\beta_p = 3$ とするためには 10 MW、 $\beta_p = 4$ とするためには 20 MW 以上の正味加熱パワーが必要である。

第二段加熱の方法としては、中性粒子入射あるいは高周波による方法を予定している。次に、これらの方法についての検討を述べる。第二段加熱装置は、中性粒子入射、高周波、ともに J T - 60 に関して開発される結果を利用する。

5.2.2 中性粒子入射加熱

(本節の検討は、加熱工学研究室、菅原 享氏によるものである。)

本節では、J T - 4 の第二段加熱に必要なビーム・エネルギーに関する検討を行う。ビーム・エネルギーは、エネルギーがプラズマに効率よく空間的に一様に吸収される値に設定する必要がある。すなわち、ビームのエネルギーがプラズマ内の一部だけで吸収されたり、あるいは吸収されずに透過して真空容器ライナに当たらないように(不純物をたたき出さないように)選ばなければならない。

ビームの吸収は、プラズマの密度によって決るが、プラズマ密度の空間分布を第 5.4 図のように仮定して、ビームの吸収を検討する。同図の 3 区分は、各領域でのプラズマ体積が 1/3 ずつになるように分けたものである。

入射粒子の平均自由行程は次式で与えられるものとする。

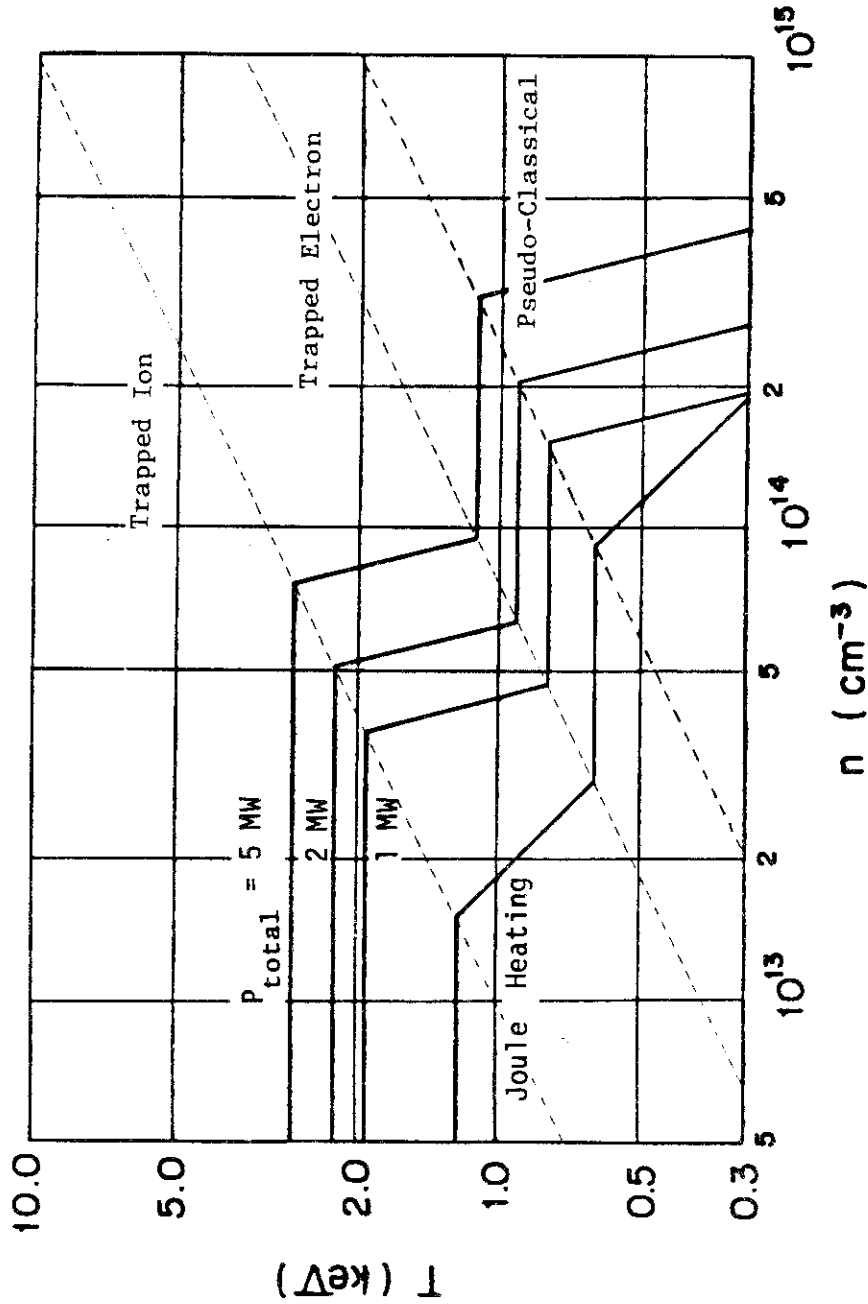
$$\frac{1}{\lambda} = n_e \frac{\langle \sigma_e v \rangle}{v} + n_p (\sigma_{cx} + \sigma_{pi}) + n_I Z^2 \sigma_{pi} \quad (5-1)$$

ここで、 p は水素イオン(陽子)を表わす。不純物によるイオン化断面積は Z^2 に比例するものと仮定した。実効面積 σ_{eff} は、

$$\sigma_{eff} = \frac{\langle \sigma_e v \rangle}{v} + \frac{n_p}{n_e} \sigma_{cx} + Z_{eff} \sigma_{pi} \quad (5-2)$$

この値は、第 5.5 図に示す通りである。第 5.4 図の分布における高速イオンの発生割合を示すと第 5.6 図のようになる。ビームの透過が少なく、プラズマ中心近くの 2 領域での発生割合がほぼ等しい(空間的に様な加熱)領域は、 $n_0 \sigma_{eff} = 2 \sim 10 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ である。 $n_0 = 2 \sim 4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ とすると、第 5.5 図より、適当なビーム・エネルギーは次の通りとなる。

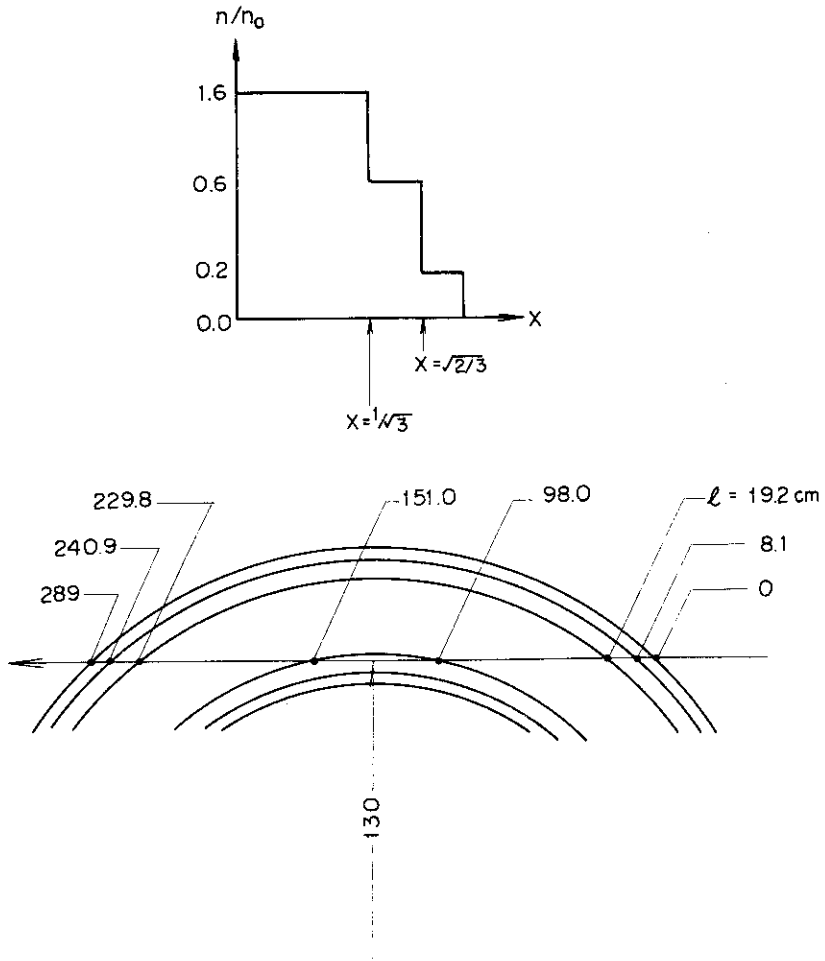
$$Z_{eff} = 1 \quad \text{のとき} \quad E_b \approx 35 \text{ keV}$$



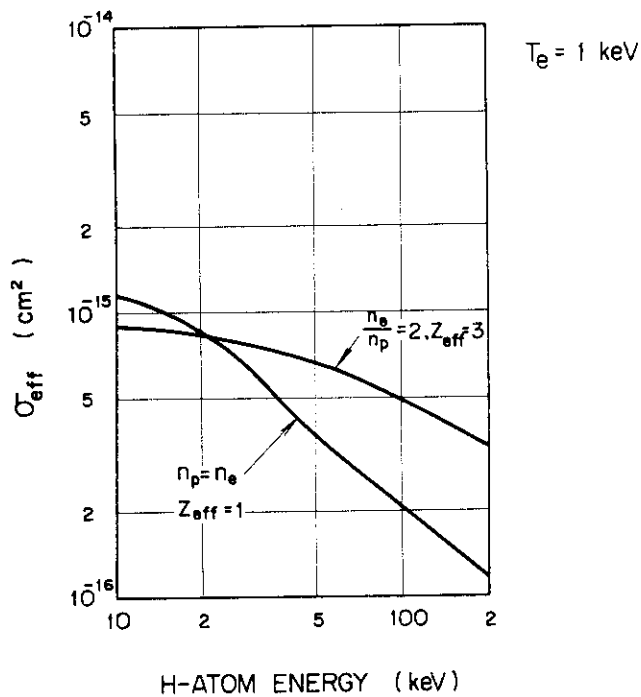
JT-4 Further Heating

第 5.3 図 第二段加熱後プラズマの予想値

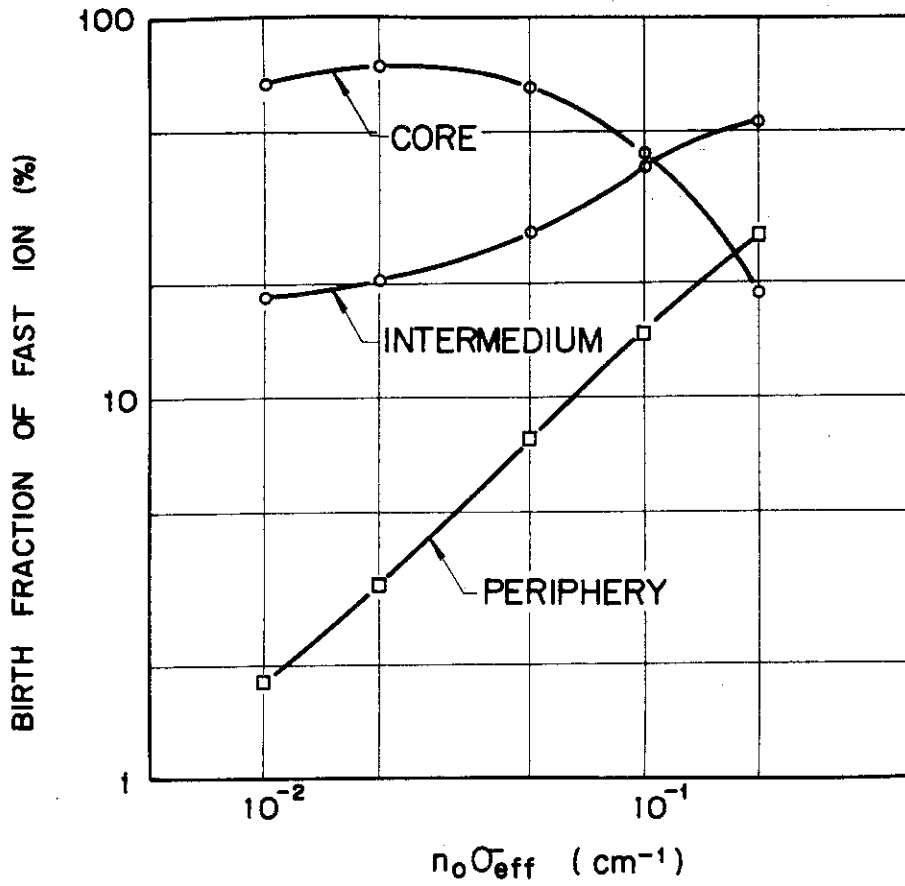
($Z_{eff} = 1, \bar{q} = 3$)



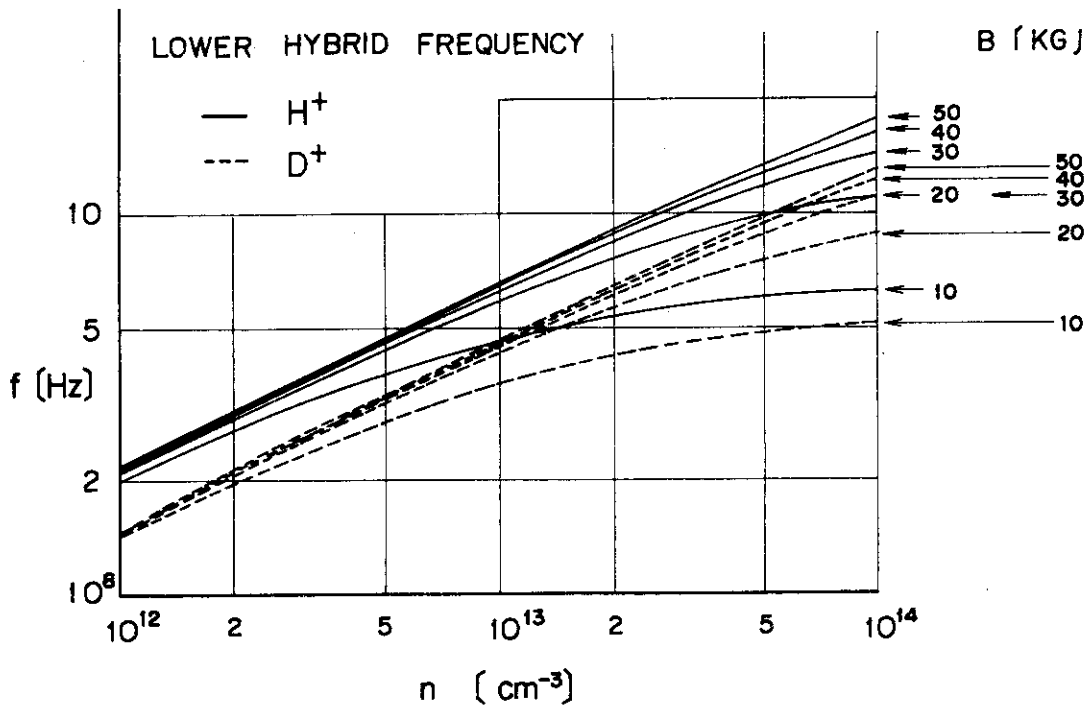
第 5.4 図 プラズマ密度の空間分布想定図



第 5.5 図
中性粒子ビームの
実効断面積



第 5.6 図 各部分での高速イオン発生割合



第 5.7 図 Lower Hybrid 周波数

$Z_{\text{eff}} = 3$ のとき $E_b \approx 90 \text{ keV}$

$E_b \approx 40 \text{ keV}$ のとき、イオン・ビームから中性粒子ビームへの変換効率は約50%であり、他の効率も考慮すると、イオン・ビームのパワーは必要な中性粒子ビーム・パワーの約3倍となる。

なお、 300° のポート1個から注入できる中性粒子ビームのパワーは1 MW以上と予想される。

5.2.3 高周波加熱

高周波加熱としては、種々の方法が考案されており、例えば、ICRH、LHRHなどがある。ICRHの周波数は約18~53 MHz (10~30 kG, 水素), LHRH周波数は、

$$\frac{1}{\omega_{\text{LH}}^2} = \frac{1}{\omega_{\text{pi}}^2 + \omega_{\text{ci}}^2} + \frac{1}{\omega_{\text{ce}} \omega_{\text{ci}}} \quad (5-3)$$

で表わされ、この値は第5.7図に示す通りである。

5.3 ガス注入および予備電離

5.3.1 ガス注入

ガス注入に関する具体的検討は未だ行っていないが、ここには概算結果を示す。この結果によると、現在使用している装置をそのまま応用できるものと考えられる。

プラズマ中に含まれる水素イオンの数は約 10^{20} コ (3 Torr・ℓ), 一放電当りの粒子数は 4×10^{21} コ (100 Torr・ℓ, $\tau_p = 0.1$ 秒, リサイクリングなしの場合) である。水素分子の数としては、上記の半分となる。

初期のガス 5×10^{19} コを注入するには、例えば、0.5 ccのプレナムに1気圧のガスを満した4個の高速弁を用いる方法が適当である。現在、JFT-2aで使用している高速弁⁹⁾は1気圧まで使用可能であり、プレナムを0.5 ccとすることも容易である。

ダイバータが期待通り作動した場合には、プラズマを定常状態に保つためにはガス補給を行う必要がある。その量は、 5×10^{20} コ/秒 = 13 Torr・ℓ/sec (水素分子数) であり、slow puffによる方法と中性粒子入射 (NBI) による方法を考えている。NBIによる補給については、付録5の中で述べている。slow puffの場合は、直径1 mmの穴を通して約40 Torrの水素ガスを流すと、ほぼ13 Torr・ℓ/sのガス流を得ることができる。40 Torrの場合に必要なガス体積は1.3 ℓである。ガス溜めを充分大きくして、ガス補給中のガス圧変化 (補給量変化) を抑え、バルブを4秒間だけ開いてガス補給することを検討する。

5.3.2 予備電離

予備電離は、再現性のよいプラズマを得るために重要なものである。方法としては、ECRH、電子銃などが使用されている。ECRHは、磁場によって変化するため、磁場をかえて実験す

る際に不便である。電子銃による方法は、プラズマ断面の上又は下においた電子銃から出る電子を垂直方向のドリフト運動によってプラズマ空間に導くものであるが、電子銃をプラズマ粒子の衝突から保護することが困難であり、特にJT-4のように上下にダイバータのある場合には使用が難しい。

現在、JT-4の予備電離方法の第一候補と考えているのは、やはりJFT-2aで予備実験の行われた $j \times B$ プラズマ・ガン方式である。これは、高速弁のガス出口に2枚の対向電極を設け、コンデンサ電源を用いて約 $100 \mu s$ 間放電させるものである。この方法の詳細はJFT-2aから報告される予定である。

- 1) 前野 他 JAERI-M 5204 (1973)
- 2) 河西 他 JAERI-M 5400 (1973)
- 3) 的場 他 JAERI-M 5515 (1974)
- 4) 的場 他 JAERI-M 6042 (1975)
- 5) 狐崎 他 JAERI-M 6144 (1975)
- 6) 船橋 他 JAERI-M 6166 (1975)
- 7) 大塚 他 JAERI-M 6135 (1975)

第6章 科学的検討

6.1 概 説

本章では、少くも現在までは装置のハード設計に大きな影響を与えなかった科学的検討を述べる。科学的検討は、人数および時間が限られているため、残念ながら現在までのところ極めて不十分である。このような方針をとった理由は、スケジュール的に装置設計のためにハードの検討を先行せざるを得なかったためである。したがって、科学的側面からハードに対して与えるべき仕様は、粗い検討によって、あるいは決断によって決定せざるを得ない状況にあった。実際、トカマク・プラズマに関する科学的理解は未だ不十分であり、科学的検討を詳細に行ってもその結果の確度は高いとは言えず、科学的検討の結果が大きな参考になることは間違いないが、結局のところハードの仕様は決断によって決定するものが大部分である。また、このような状況であるからこそ実験を行う意味がある。しかしながら、これは科学的検討をしなくてもよいという意味ではなく、むしろ、なお一層科学的検討に力を注ぐべきであると考えの方が正当であろう。JT-4では、今年度以後、できるだけ科学的検討を進め、実験開始までに実験データの解析および実験計画立案のための準備を進めたいと考えている。本章では現在までに行った検討を簡単に述べ、未検討のものも項目のみを記すこととする。

6.2 シミュレーション計算

シミュレーション計算は、プラズマの輸送現象と、温度、密度の空間分布、時間変化とを結合するために欠くことのできないものであるが、JT-4については未だ計算を行っていない。計算の中に用いる異常拡散係数、初期条件などに自由度（不確定さ）があり、これらによって得られる結果が大きな影響を受けるため、プラズマ特性の予想法としては利用しにくい。しかし、近い将来に、JFT-2およびJT-60の係数で計算を行い、JT-4で円形断面プラズマを生成すれば、これらの中間に入るであろうという予想を得たいと考えている。また、非円形断面効果のとり入れ方についても検討したいと考えている。

6.3 捕捉粒子の軌道例¹⁾

上下にダイバータのある場合、粒子の軌道、特に捕捉粒子の軌道は、従来円形断面プラズマに関して計算されているものと大巾に異なったものとなる。これに関する報告は別に行われる予定であるが、第6.1図に軌道計算結果の1例を示す。同図は3種の粒子1, 2, 3を点Sから出発させて軌道をドリフト近似で追跡したものであり、 v_{\parallel}/v_{\perp} の比を1, 2, 3の順に小さく設定している。1の粒子はドリフト面上を回転し続け、2の粒子はr点まで行き、磁気ミラー効果によって反射されてダイバータ室に流出している。この粒子は、セパトロックス磁気面がなければ、捕捉粒子となるものである。3の粒子は磁気鏡に捕捉された粒子（バナナ粒子）である。上記のように、粒子軌道の特徴の一つは、（楕）円プラズマの捕捉粒子に対応す

るものの一部が捕捉されずにダイバータ室へ流出して失われる点である。

6.4 誤差磁場の存在下での粒子軌道

J T-4は磁気リミタ(ダイバータ)付きのプラズマ平衡を作り、セパトリックス面には停留点(X点)、すなわちポロイダル磁場が零となる点がある。したがって、微小な誤差磁場でも基本磁場との比が大きく、その影響が現われる可能性がある。そこで、非軸対称な誤差磁場の存在下で粒子軌道を計算するコードを開発した。誤差磁場は任意の線分電流の和として入力することができる。一例として、X点での誤差磁場の大きい半周型ダイバータ・コイル(第4.7図)による粒子軌道の影響を計算した。この誤差磁場の影響が大きい場合には、ダイバータ室入口スリット巾を狭くできないことになり、あるいは半周型ダイバータ・コイルを採用することが不可能となる。第4.7図に示すような配線の場合の結果は、第6.2図に示す通りである。(a)は閉じ込め領域外周部の粒子ドリフト面の誤差磁場の影響を、(b)はダイバータ室入口スリット部における粒子軌道のずれを示す。これはいずれも $v_{\parallel} = v_{\perp} = 1 \text{ keV}$ の水素イオンの軌道であり、誤差磁場による軌道の影響は旋回半径の2~3倍である。したがって、プラズマ閉込めおよびダイバータ室入口スリット設計への影響は小さいものと考えられる。

ポートなど、真空容器に流れる誘導電流の非一様性による非軸対称性誤差磁場の影響は文献2に詳しく検討されており、この結果によれば、誤差磁場の源(ポート)が多数あつて、誤差磁場のモード数が多い場合には、その影響は小さいものと予想される。

6.5 磁束変化量の推定

トカマク型装置における変流器コイルの磁束変化量に関しては定説がなく、ふつうはプラズマの磁束量 $L_p \cdot I_p$ の何倍かをとり、磁束変化量を $\Delta\phi$ としたときに、 $\alpha = \Delta\phi / L_p I_p - 1$ で与えられる指数 α で磁束量を表わすことも行われている。³⁾ 大型装置では、 $\alpha = 0.7 \sim 1.0$ が多い。J T-4では、楕円度2のときに $L_p \approx 3.9 \mu\text{H}$ 、円形プラズマのときに $L_p \approx 3.2 \mu\text{H}$ 程度であり、最大プラズマ電流が流れたときに、 $L_p I_p = 3 \sim 4 \text{ V} \cdot \text{s}$ となる。 $\alpha = 1$ とするには $6 \text{ V} \cdot \text{s}$ 必要であるが、J T-4 予備設計の仕様では、 $\Delta\phi = 5.7 \text{ V} \cdot \text{s} (\pm 2.85 \text{ V} \cdot \text{s})$ である。円形断面プラズマで $\bar{q} = 3$ の場合には、 $I_p = 700 \text{ kA}$ 、したがって $\Delta\phi = 2.2 \text{ V} \cdot \text{s}$ 、 $\alpha = 1.6$ となり、円形断面プラズマに関しては余裕のある設計とも考えられる。

また、上記とは全く別に、プラズマのワンターン電圧と時間巾による推定方法もある。すなわち、第6.3図に示すように、立上り時とフラットトップ時の各々の電圧と時間巾を予想し、その積分から必要な磁束量を予想する方法である。J T-4での立上り電圧は、現在までの実験データから推定すると 100 V と考えられる。また立上り時間は $20 \sim 50 \text{ ms}$ (PLTでの立上り時間)と予想され、この間に電圧はほぼ直線的に下るとすれば、立上り時に必要な磁束量は $1.0 \sim 2.5 \text{ V} \cdot \text{s}$ と予想される。また、フラットトップ時には、プラズマ温度 1 keV のときプラズマ抵抗 $0.5 \mu\Omega$ であり、最大プラズマ電流 1 MA が流れたと仮定してワンターン電圧は 0.5 V である。フラットトップ時間は約4秒であるから、この期間に必要な磁束量は約

2 V・s と予想される。したがって、必要な全磁束変化量は両者の和より、約 4.5 V・s となる。

以上のように、磁束変化量の設計には確立された方法がなく、余裕を見ておく必要がある。JT-4 の予備設計の 5.7 V・s は適切な余裕のある設計値である。

6.6 プラズマ電流立上り時、立上り時の検討

6.7 コイル電流波形の検討

6.8 プラズマの安定性

これらは、プラズマ制御および電源に関する検討の一部として今後行う予定である。6.8 は現在までに行った以外の不安定性、例えば、断面形状変化を伴う（高次モードの）不安定性に関する検討を含む。

6.9 不純物およびプラズマと第一壁の相互作用

これは第 2 章、第 3 章でも述べたが、今後更に詳細に検討を進める必要がある。

1) この計算コードは若谷誠宏氏が原研に於て開発したコードに改良を加えたものである。

齊藤竜太 他 JAERI-M 出版予定 (1976年8月)

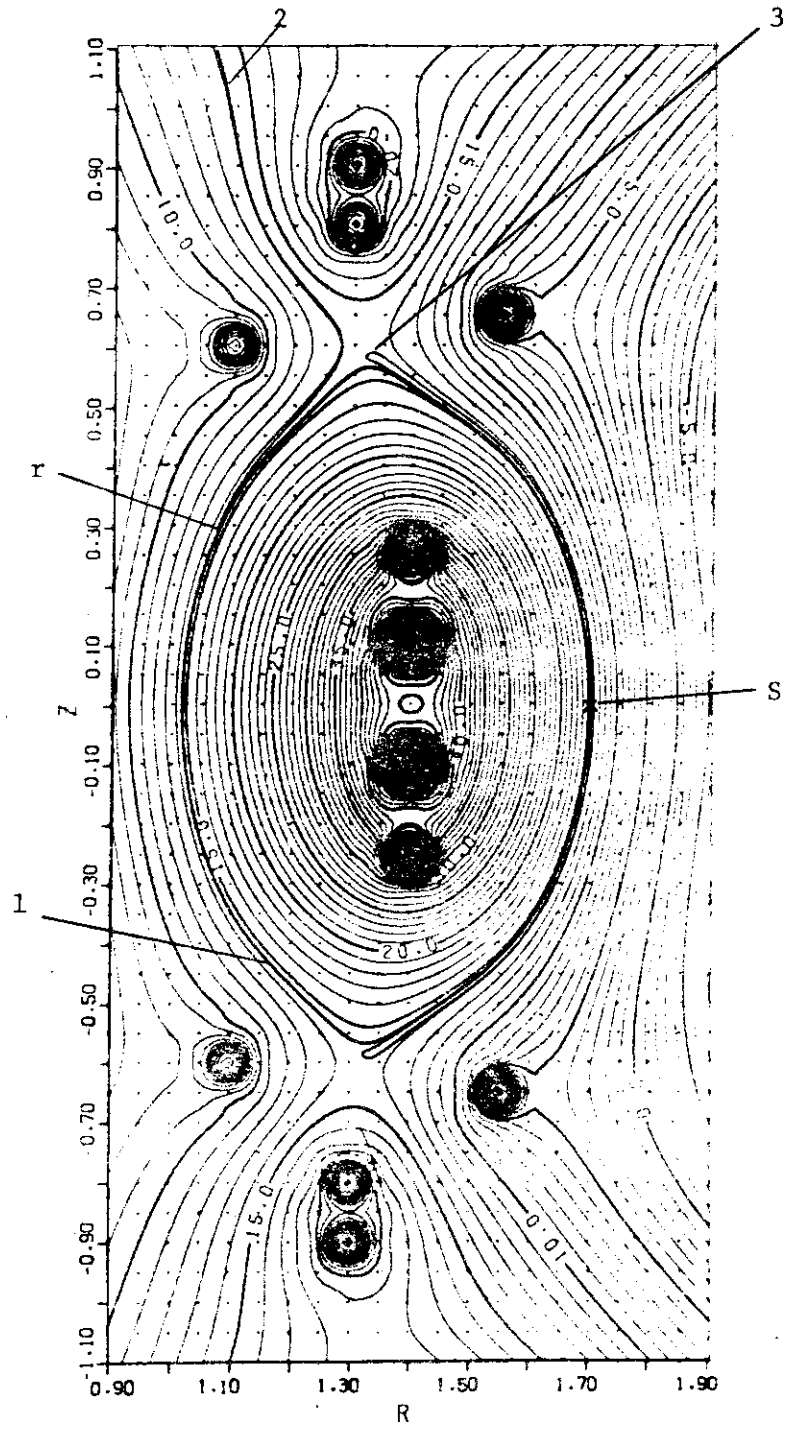
2) Matsuda, M JJAP 14 2021 (1975)

3) 本来は、

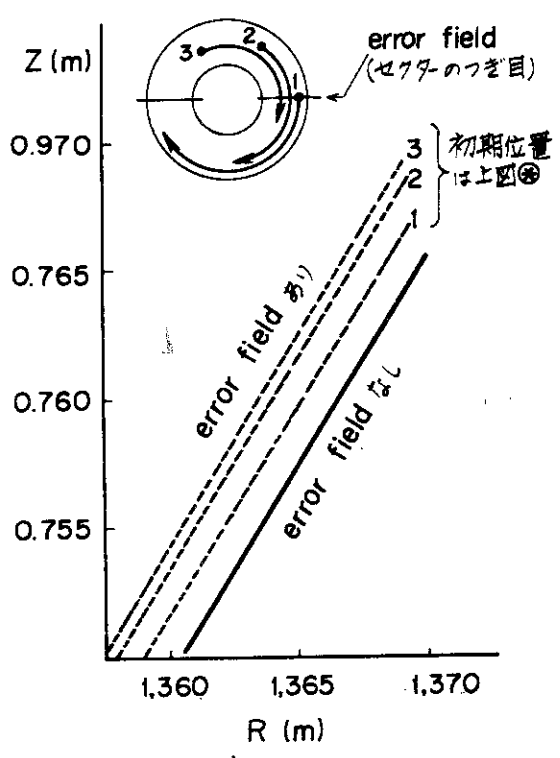
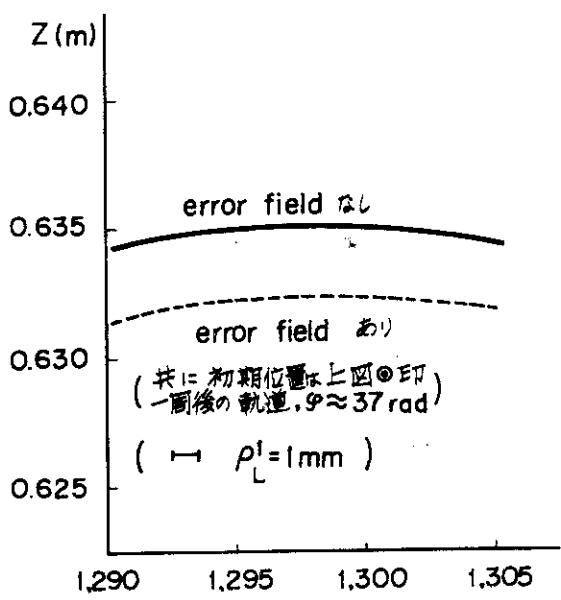
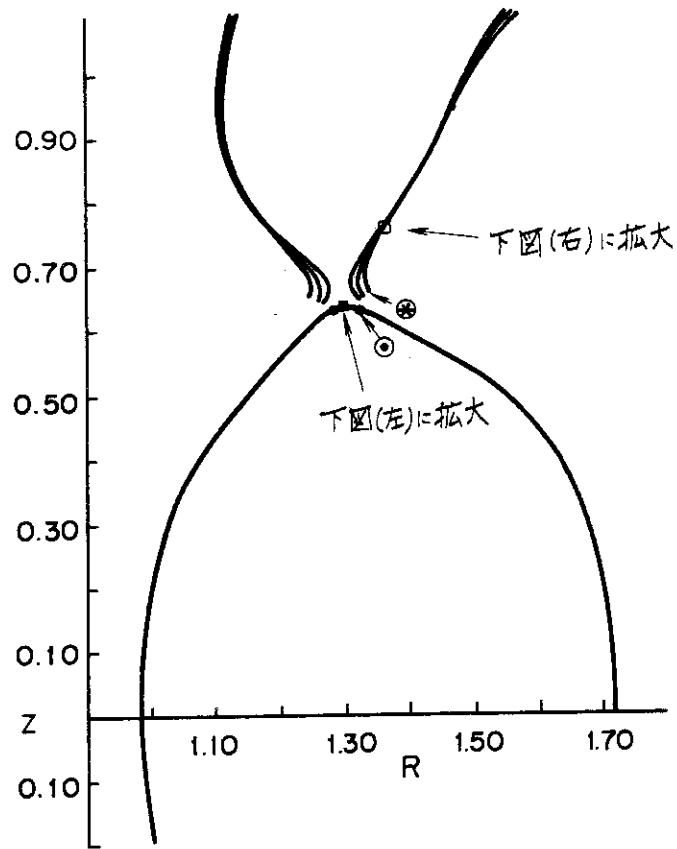
$$a = \frac{\int_0^T R_p I_p dt}{L_p I_p}$$

であるが、装置設計上では、次の様に考える。

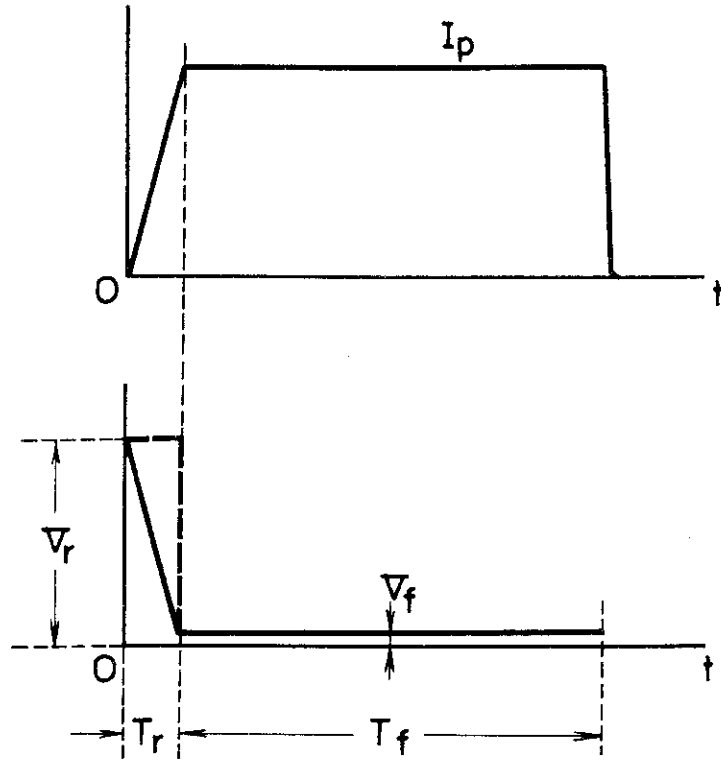
$$\Delta\phi = L_p I_p + \int_0^T R_p I_p dt$$



第 6.1 図 JT-4 の粒子軌道例
 (プラズマ電流を 4 本のリング電流で置換)



第 6. 2 図 半周型ダイバータ・コイルの誤差磁場の影響



第 6.3 図 変流器コイル磁束量の推定

第7章 JT-4計画および実験計画

7.1 計画のフローチャート

JT-4計画のように大きな計画を進めるためには、非常に多くの事項に関する検討を行う必要がある。どの項目をとっても重要でないものはないが、限られた人数と時間で計画を進めてゆくためには、優先的に検討すべき項目の選択を行うことが重要である。項目の選択を誤ると、検討の順序が乱れ、せっかく検討してもその結果が生かされないことになる。JT-4では計画開始時の人数が極めて少なかったため、この点を特に重視し、検討事項を列挙してその関連をフローチャートにまとめた(第7.1図、第7.2図)。同図によって検討すべき項目の優先順位を考えることができ、また、1つの項目が他のどの項目に影響を及ぼすかが分る。

装置の設計とは、多くの項目からの要請を整理し、その妥協点を探すことである。したがって、1つの検討項目が他のどの項目と関連するかを常に考え、よく協議しながら検討を進めることが重要である。

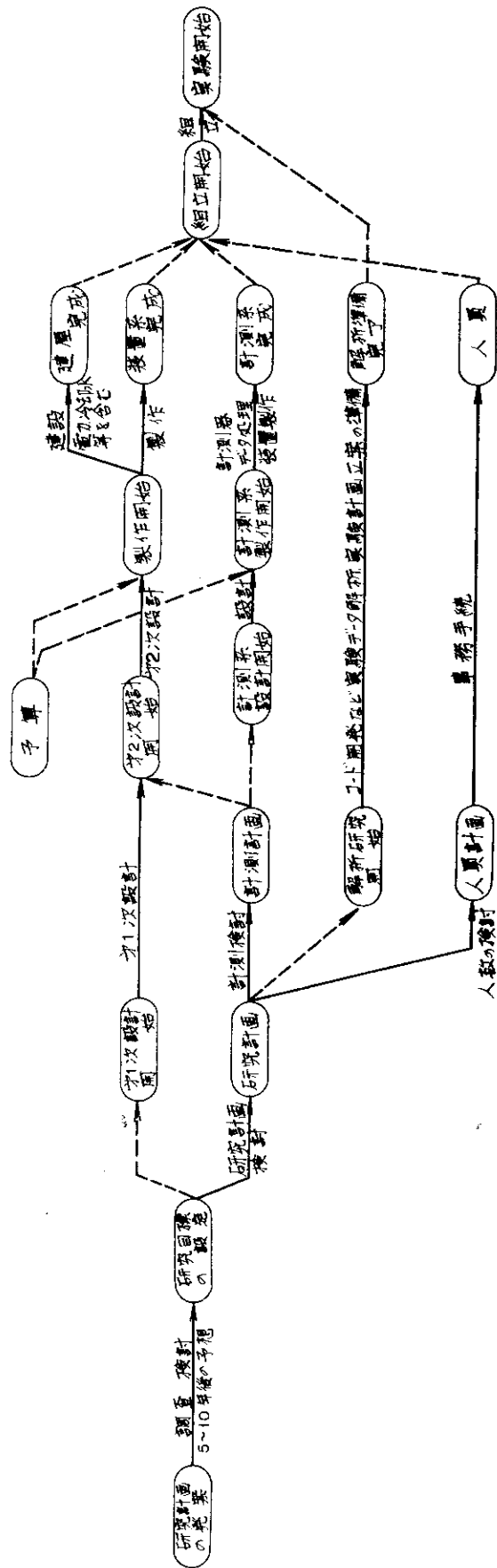
第7.1、7.2図はPERTの手法を用いてフローチャートとしたものであるが、項目間には種々の関連があり、多くのことに目をつぶって割り切らないとこのような図は描けない。したがって、割り切り方によって同じことを全く別のフローチャートで表わすこともでき、ある場合には、ここに示したのとは別のフローチャートの方が適切なこともある。ここに示した図を基礎として、各人なりにフローチャートを考えて検討を進めることが望ましい。なお、ここに示したものは検討(仕様作成)のためのフローチャートであり、製作過程を示すものではない。

7.2 実験計画

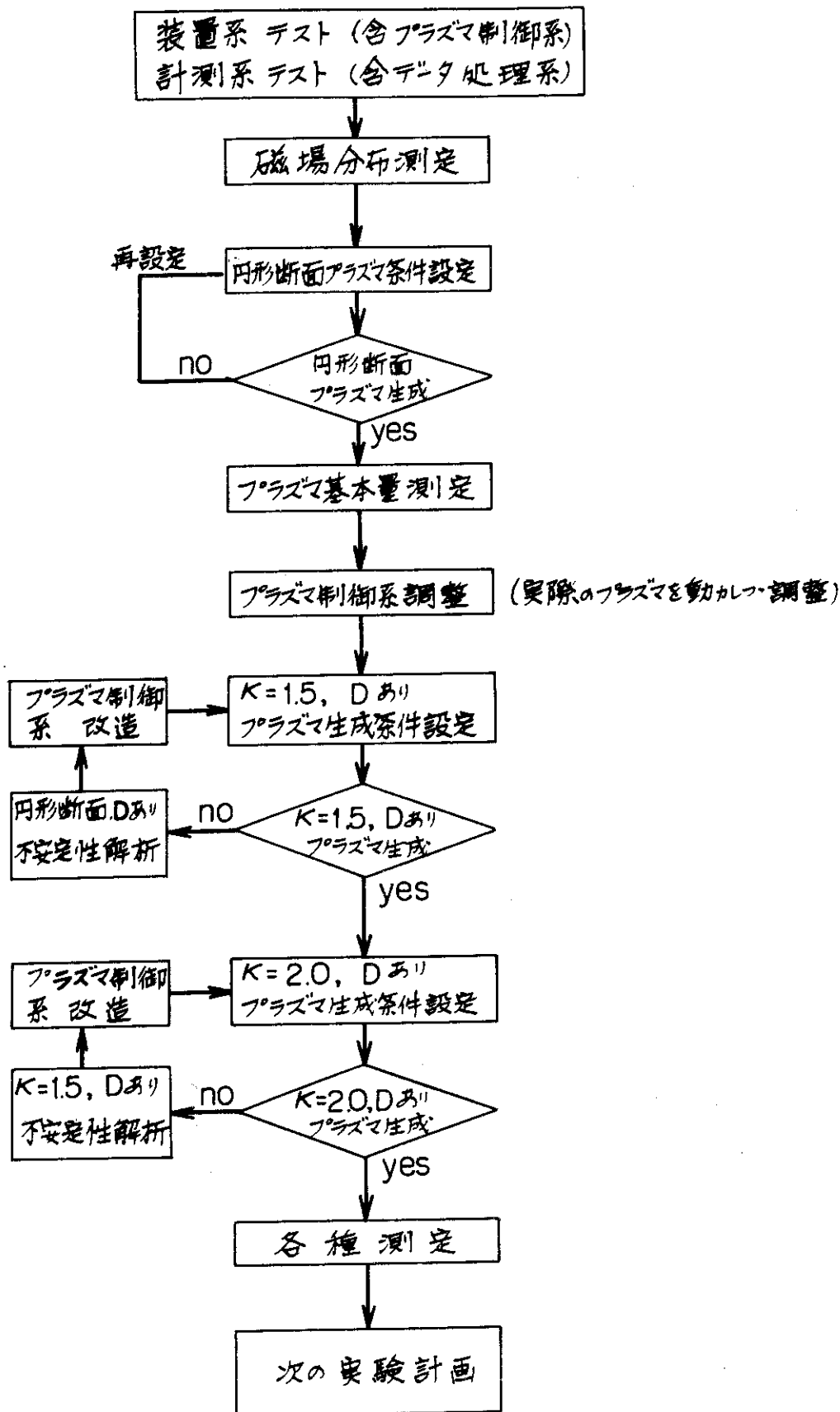
JT-4完成後の実験計画は、今後詳細に検討するが、計測器の優先度を定めるために検討した現時点での実験計画を第7.3図に示す。これは、まず円形断面プラズマを生成して、装置の動作および計測器、データ処理などの整備を行い、次いで非円形断面など、JT-4本来の研究を行うものである。

7.3 年次計画

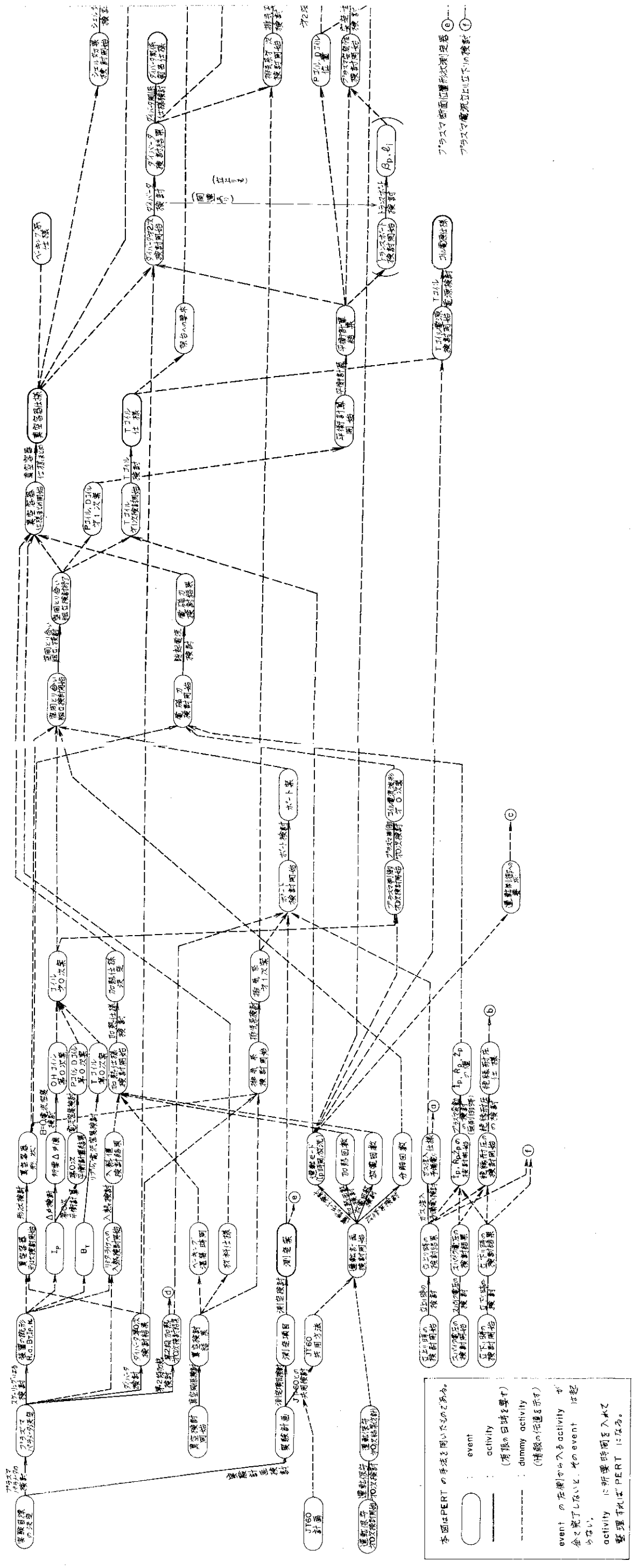
JT-4の年次計画は、1976年7月現在、第7.1表の通りである。この計画は、1つの大テーマを半年で完了するというかなり厳しい計画である。



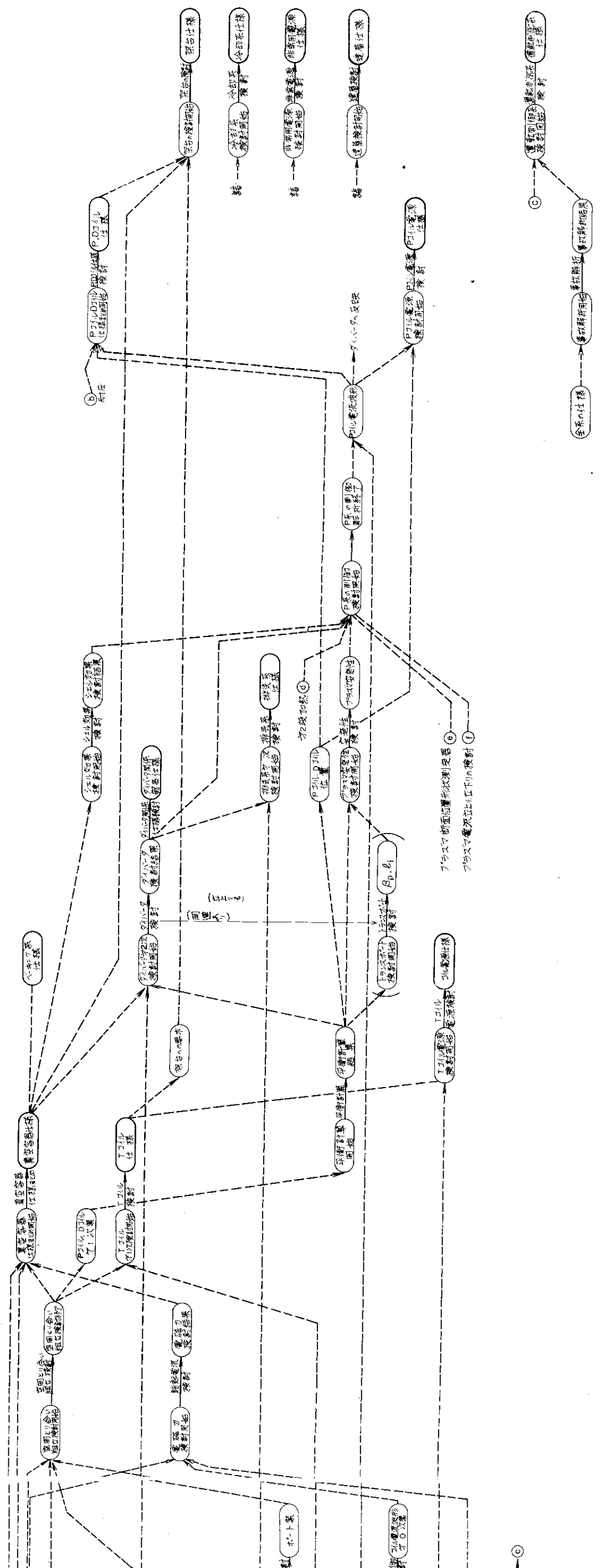
第 7.1 図 J T - 4 計画フローチャート



第 7.3 図 JT-4 の実験計画案



第 7.2 図 J T - 4 仕様作成のプロローチャート



第7.2図 J T - 4仕様作成のフローチャート

第 7.1 表 JT-4 年次計画

昭和50年度	51	52	53	54	55	56	57
予備設計	コンポーネント技術の評価検討	計測器 R&D (JT-60)	発注 建 計測器データ処理	設 屋 作	納入 テスト 加熱電源建屋	中性粒子入射装置製作 円形 非円形 磁気リミタ ダイバータ または第二段加熱	RF加熱装置 次期装置建設開始

第8章 後 記

J T-4は、その正式名称「非円形断面トーラス試験装置」が示すように、研究目標の「非円形断面」については既定のものとして設計を進めてきた。また、第2章、第3章に述べたように、ダイバータの研究も必要であり、たとえ非円形断面のみを実験目標とする場合にも、少くとも磁気リミタまでは必要であると考えている。外国に類似の装置はあるが、現設計は他にない特徴をもたせてあり、日本で核融合開発をするためにはJ T-4計画が必要であると我々は考えている。しかし、J T-4計画には多くの人員と巨額の費用を要するため、その方針に対しては広く議論を行う必要がある。また、J T-4の建設が実現するためには、原研のみでなく、さらに広範囲な合意が必要であろう。すなわち、核融合研究全体の流れ、あるいは世界の情勢などを検討の上で、日本としての決断が必要であろう。現在は我々の方針が認められることを前提として設計を進めているが、設計を行う立場からは、一刻も早く基本方針の決断が行われることを希望する。なぜならば、装置の設計とは、一般的な研究と異なり、設計に応じた具体的かつ詳細な検討の積み上げであり、装置が建設されない場合には努力の成果が生かされない事が多いからである。設計が進むほど、一般性のない作業が増加し、またそれに費されるマンパワー、費用も増大する。

この報告書の目的の1つは、上記の議論の資料となること、また、それによって基本方針に関する決断を早く得ることである。

付録1 比例則による装置パラメータの説明例

本文にも述べた様に、比例則の精度、信頼度がそれ程高くない為、これによって設計パラメータを精確に決定することはできない。しかし、ここに述べる様に、比例則を使用しても本設計に近い値が求められ、本設計が不適当なものでないことの傍証になる。

与える設計条件は次の通りである。

- (i) $Z_{\text{eff}} = 1$ の時、ジュール加熱によって温度 1 keV に達すること。
- (ii) (i) の時は、捕捉電子領域にあると仮定する。
(TFR などの実験からの予想)
- (iii) $n = 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ と仮定。(この程度の装置では、 $1 \sim 6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ を予想するのが普通である。)
- (iv) $\bar{q} = 3$ とする。
- (v) トロイダル磁場コイルの中心側での平均電流密度を、 25 A/mm^2 以下とする。
- (vi) 空心変流器コイル等の各種コイル、真空容器肉厚等、真空容器内壁とトロイダル磁場コイルとの間隔として必要な空間の厚さを 35 cm とする。
- (vii) プラズマとライナーの距離 (円形断面プラズマとして) を 5 cm とする。
- (viii) プラズマ電流密度を 1 A/mm^2 以上とする。
- (ix) $B_T/R_p \geq 2$ とする。(これは、Alcator 等最近の結果を取り入れたものである)

以上の条件によって計算を進める。

(i), (ii) より (注1) $Z_{\text{eff}} = 1$ として

$$T = (0.32 \sqrt{\frac{R_p}{a}})^{1/2} \cdot \frac{I_p^2}{n a^2} \geq 1 \quad (1)$$

但し、 R_p 、 a は、プラズマの主半径、副半径 [m]、 I_p は、プラズマ電流 [MA]、 T は、プラズマ温度 [keV]、 n はプラズマ密度 [10^{13} cm^{-3} を 1 とする] である。(1) 式に (iii) を代入すると、

$$(0.32 \sqrt{\frac{R_p}{a}})^{1/2} \cdot \frac{I_p^2}{a^2} \geq 2 \quad (2)$$

(iv) より

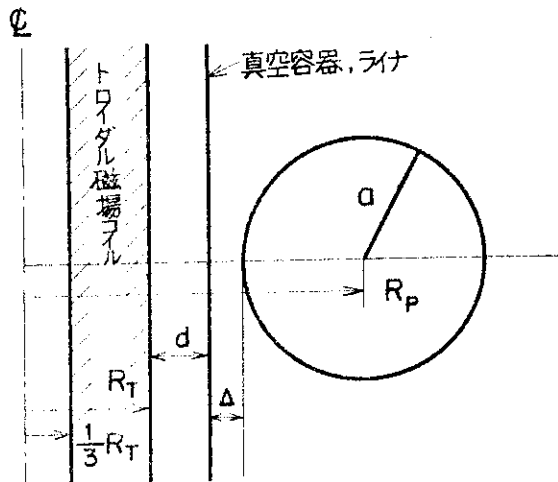
$$I_p = \frac{5 a^2 B_T}{3 R_p} \quad (3)$$

(v) より

$$\frac{I_T}{\frac{8}{9} \pi R_T^2} \leq 25 \quad (4)$$

ただし、 I_T はトロイダル磁場コイルの総起磁力である。

(4) 式においては、トロイダル磁場コイルの中心部の寸法を、第付 1.1 図の様に仮定した。又、同図の d 、 d' を使用して、(vi), (vii) より、



第付 1.1 図
装置パラメータ

$$\begin{aligned} R_p &= R_T + d + \Delta + a \\ &= R_T + 0.4 + a \end{aligned} \tag{5}$$

(viii) より,

$$I_p \geq \pi a^2 \tag{6}$$

(ix) は,

$$\frac{B_T}{R_p} \geq 2 \tag{7}$$

なお,

$$B_T = \frac{I_T}{5 R_p} \tag{8}$$

まず, (3)と(7)より,

$$I_p = \frac{10}{3} a^2$$

これは, (6)式を満足しており, (6)式は(3)式に含まれることが分る。(4), (7), (8)より,

$$\begin{aligned} R_T^2 &\geq 0.143 R_p^2 \\ R_T &\geq 0.378 R_p \end{aligned} \tag{9}$$

(9)式の等号を用いて(5)式に代入すると,

$$R_p = 1.6 (0.4 + a) \tag{10}$$

(7)の等号を用いて, (3), (2)に代入すると,

$$\left(0.32 \sqrt{\frac{R_p}{a}} \right)^{1/2} \cdot a^2 \geq 0.18 \tag{11}$$

(11)をそのまま使うと誤差を生じるので, アスペクト比 R_p/a を 2~3 と仮定して解く。
 $R_p/a = 2$ とすると, $a \geq 0.52$ 。 $R_p/a = 3$ とすると, $a \geq 0.49$ 。(10)式を使うと,
 R_p , R_p/a は各々, 1.47, 2.8 及び, 1.42, 2.9 となり, 後者の方が矛盾がない。こ

の時 $B_T = 2.8$ となる。本文に述べた設計値はこれらの値に極めて近く、 $B_T = 3.0$ 、 $R_p = 1.45$ 、 $a = 0.45$ である。これらの設計値は、ここに述べた (I) ~ (IX) の条件をほぼ満足する。(注2)

(注1) $T_e = T_i = T$ の場合、ジュール加熱による定常温度は、

$$T = \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{Z_{eff} I_p^2 \tau}{n a^4} \right)^{\frac{2}{5}}$$

と表わされ、捕捉電子領域においては、文献(注3)より、

$$n \tau = 0.64 \frac{I_p^2 T^{\frac{1}{2}} R_p^{\frac{1}{2}}}{Z_{eff} \cdot a^{\frac{1}{2}}}$$

$Z_{eff} = 1$ のとき、上の2式を結合して(1)式が導かれる。

(注2) (I)によると、 $T = 0.92 \text{ keV}$ である。

(注3) WASH-1295 UC-20 (1974)

付録2 プラズマ温度の予想

ジュール加熱のもとでエネルギー・バランスの式は、電子に対して、

$$\frac{3}{2} n k \frac{dT_e}{dt} = r \eta \tau^2 - W_{ei} - \frac{3}{2} \frac{n k T_e}{\tau_e} \quad (1)$$

ここで、 r は異常抵抗係数であり、プラズマの抵抗率 η に $Z=1$ の値を入れれば、 r は実効 Z と考えるとよい。 W_{ei} は、電子からイオンへのエネルギー伝達である。又、イオンに対しては、

$$\frac{3}{2} n k \frac{dT_i}{dt} = W_{ei} - \frac{3}{2} \frac{n k T_i}{\tau_i} \quad (2)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \eta &= C T_e^{-\frac{3}{2}} \quad [C \sim m, eV] \\ C &= 7.8 \times 10^{-4} \quad (\ln A = 15) \end{aligned} \quad (3)$$

である。(1)、(2)の左辺を0として定常解を求めると

$$r C T_e^{-\frac{3}{2}} J^2 = \frac{3}{2} n k \left(\frac{T_i}{\tau_i} + \frac{T_e}{\tau_e} \right) \quad (4)$$

ここで、 J はプラズマ電流密度である。 $T_i = T_e = T$ 、 $\tau_i = \tau_e = \tau$ とおくと、

$$T = \left(\frac{1}{3} \frac{r C J^2 \tau}{n k} \right)^{2/5} \quad (5)$$

すなわち、

$$T [keV] = \left(\frac{1}{2} \frac{r \cdot I_p^2 [MA] \cdot \tau [s]}{n [10^{13} cm^{-3}] a^4 [m]} \right)^{2/5} \quad (6)$$

第2段加熱を行う場合は、(1)式のジュール加熱の項の代わりに、全入力エネルギー密度
(total input power) / (plasma volume)

を使用する。その結果、

$$T \approx 200 \times \frac{\tau P_{in}}{n V} \quad (7)$$

となる。単位は、 P_{in} [MW]、 V [m³]、他は(6)式と同じである。

付録3 比例則 (文献(1)より)

本レポートで使用した比例則は、文献(1)によるものであり、以下に引用しておく。

(A) pseudo-classical ($D = 10 \times D_{clp}$)

$$n \tau = 12 \frac{I_p^2 T^{-\frac{1}{2}}}{Z_{eff}}$$

(B) trapped electron I

$$n \tau = 0.45 \frac{I_p^4 B^2 \beta_{pe}^2 Z_{eff} a_s^{-\frac{3}{2}}}{T^{\frac{11}{2}}}$$

(C) trapped electron II

$$n \tau = 0.64 \frac{I_p^2 T^{\frac{1}{2}} a_s^{\frac{1}{2}}}{Z_{eff}}$$

(D) trapped ion

$$n \tau = 8.2 \frac{I_p^4 B^2 \beta_{pe} Z_{eff} a_s^{\frac{5}{2}}}{T^{\frac{11}{2}}} \left(\frac{1}{2} + \frac{T_e}{2T_i} \right)^2$$

ただし、単位は、 n [10^{13} cm^{-3} を1とする]、 τ [s]、 I_p [MA]、 T [keV]、 B [T] であり、 a_s はアスペクト比 (R_p/a) である。また、必要な場合には、

$$\beta_{pe} = 4 \times 10^{-3} \left(\frac{q R_p}{a B} \right)^2$$

の換算を行った。

(1) US-ERDA WASH1295 UC-20 (1974)

付録4 諸外国の計画

第付4.1表 諸外国のトカマク計画

1	装置名	JT-4	PDX	ASDEX	DITE	TEXTOR	TFR2	ISX
2	国	日	米	独	英	独	仏	米
3	完成	1980	1977	1978	1975	1979	1977	1977
4	主半径	1.45m	1.4	1.65	1.17	1.75	1.7	0.77
5	副半径	0.6/ 0.3~0.5m	0.42	0.4	0.27	0.5	0.8	0.15
6	断面形状	楕円, D	四角	円	円	円	円	円
7	非円形度	1~2	(1.4)	1	1	1	1	1
8	アスペクト比	3.2~4.8	3.3	4.1	4.2	3.5	2.1	5.1
9	ダイバータ	軸対称	軸対称	軸対称	バンドル	—	—	—
10	磁場	3.0T	2.5	3.0	2.8	2.0	2.2(3.0)	2.0
11	B_T/R	2.1	1.8	1.8	2.4	1.1	1.3	2.6
12	$I_{p \max}$	1 MA	0.7	0.5	0.34	0.48	1.2(1.7)	0.1
13	$I_p(q=3)$	0.7 MA	0.53	0.48	0.31	0.48	1.2	0.1
14	T_i	1~2keV	1~2	2	0.7	0.76	1.5~2.5	
15	T_e	1~2keV	1~2	4	1.2	1.12	1.5~2.5	
16	n	$2 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$	$2 \sim 6 \times 10^{13}$	2×10^{13}	4×10^{13}	2×10^{13}	$\sim 5 \times 10^{13}$	
17	壁材, 温度	$M_o, 500^\circ\text{C}$	$M_o, 400$	SUS, 180	SUS, 600	インコ625,450	インコ625,400	SUS, 400
18	容器1周抵抗	4 m Ω	バイトン絶縁	ポリイミド絶縁	セラミック	4	1.4	
19	真空ポンプ	TMP 4000ℓ/s	10 ⁴	TMP 12000他	TMP 1400	8000	TMP 3000	TMP 1000
20	到達真空度	$\sim 10^{-9}$ Torr	$< 2 \times 10^{-9}$	$10^{-7} \sim 10^{-8}$	$10^{-7} \sim 10^{-8}$	$< 10^{-8}$	$\sim 10^{-10}$	3×10^{-9}
21	プラズマ体積	4.2~5.8m ³	6.2	5.2	1.8	8.6	21.5	0.34
22	B_T flattop	5 s	0.5	5	1	3	1	0.4
23	interval	600 s	120			300~600		60
24	B_T コイル形状	D, 分割	レーストラック 分割	D	円	円	円	四角
25	B_T コイル数	18	18	16	16	16	24	24
26	B_T リプル	$< 0.5\%$		0.5	4	< 3	< 3	
27	B_T コイル 最大電流密度	33A/mm ²	50	(25.6)	42	(16)	233	40
28	Tコイル電力	115MVA	79.4	106		34	48	30
29	同上ピーク電力	180MVA	(120)	(160)	11.2		120	
30	Tコイル 電源形式	フライホイール	PLTのMG		C バッテリ	フライホイール	フライホイール	
31	OHコイル形式	air	air	air	鉄心	鉄心	鉄心	鉄心
32	OHコイル $\Delta\phi$	5.7V·s	1.67	5.8	1.87	4.1	6	0.9
33	最大 V_{loop}	300V	130			200	100	400
34	NBI power	net 2 MW	2	? (有)	0.6	2	net 2	
35	NBI energy	(30~90)keV			15, 30	40	60	
36	RF power	(1)MW	5				1	
37	RF freq.	(0.8 GHz)	0.8				$2\omega_{ci}$	

1	Doublet III	JET	T-12	TO-2	PLT	T-10	JT-60	TB-0
2	米	EC	ソ	ソ	米	ソ	日	ソ
3	1977	1980	1976	1976	1976	1975	1980	1980
4	1.4	2.96	0.36	0.6/直線 0.72	1.3	1.5	3	1.9 (SC20)
5	1.35/0.45	210/1.25	0.15/0.08	0.14	0.45	0.35	1	0.5 (0.65)
6	ダブルレット	楕円	D	円	円	円	円	円
7	3	1.68	≲ 2	1	1	1	1	1
8	3.1	2.4	4.5	4.3	2.9	4.3	3	3.8 (3.1)
9	—	—	軸対称	トロイダル	—	—	—	軸対称
10	2.6 (4.2)	3.4	0.8	1.5	5.0	5.0	5.0	2.0 (4.0)
11	1.9	1.2	2.2	2.5	3.5	3.3	1.7	1.1 (2.0)
12	5 (8)	4.8	0.05	(0.03)	1.5	0.8	3.3	0.5 (1.2)
13	4.2	4.8			1.2	0.7	2.8	0.5 (1.7)
14	5	5			1~3	1.6	5~10	2.6 (8~10)
15	5	5			3~4		5~10	2.6 (8~10)
16	1×10^{14}	5×10^{13}			$2 \sim 10 \times 10^{13}$	1×10^{13}	$2 \sim 10 \times 10^{13}$	$3(5) \times 10^{13}$
17	SUS	インコ, 500			SUS		M ₀ , 500	
18					10		1.5	
19		3×10^4			4000		2×10^4	
20	10^{-9}	2×10^{-10}			3×10^{-8}		1×10^{-9}	
21	21.4	153		0.32	5.2	3.6	59	9 (17)
22	1	20			0.5	0.8	10	10 (100)
23	300	600			100		600	
24	D, 分割	D	四角	円	円	円	円	円
25	24	32			18		24	
26		3.5				3	0.05	
27		(25)			74.4		(18)	
28	55	280			77.8		230	
29		330					350	
30	系統 フライホイール	系統 フライホイール			フライホイール		系統 フライホイール	
31	air	鉄心	air	鉄心	air	鉄心	air	
32	9.6	34			7.4	4	30	
33					(100)	(60)	300	
34	5.5	3~25				なし	10~20	25 (4)
35	50	80, 160					50~100	25 (80)
36		3~20			5		10	
37		0.8			0.8		1.0	

付録5 JT-4におけるプラズマ位置・断面形状の フィードバック制御(予備設計用ブロック線図)

付5.1 はじめに

JT-4のプラズマ制御は、プラズマの位置・断面形状を所定のものに保つため、フィードバック制御を行う。

プラズマの位置の制御とは、トーラス状のプラズマの中心位置を、水平、垂直二方向について所定の位置に保つことであり、それぞれのずれを適当な測定器によって検出しつつ、垂直磁場コイル(Vコイル)電流を操作してフィードバックを行う。断面形状を制御するとは、プラズマ断面を所定の形に保つことであり、変形の対象としては、楕円、及び、三角形変形を考える。そのために、4重極コイル(Qコイル)電流、及び、6重極コイル(HXコイル)電流を操作する。したがって、JT-4では、4系列の制御系をもつことになる。

本文の目的は、このような制御系を考察するために、プラズマの動作を記述する式を導出し、そのブロック線図を書くことである。ただし、プラズマ断面の三角形変形の制御、すなわち、6重極コイル電流の制御に関して、解析が終了していないので記載しない。

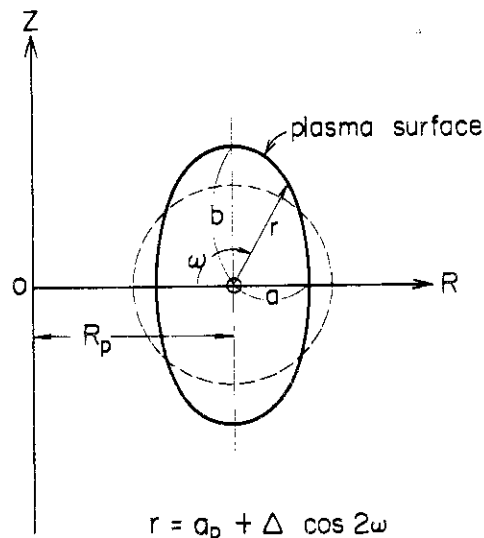
解析方法の詳細は、JAERI-M 6050に詳しいので参照して頂きたい。ただし、JAERI-M 6050は、JT-60の制御用に書かれたものであるので、次の点は、JT-4の制御を考える場合、変更しなければならないので注意すること。

- (1) JT-60は、円形断面プラズマであるが、JT-4は、基本的には縦長非円形断面プラズマである。すなわち、第付5.1図に於て、JT-4のプラズマ表面は、近似的に、

$$r = a + d \cos 2\omega$$

で与えられる。JT-4で実験が予定されている非円形断面プラズマは、

$$\frac{d}{a} = 0 \sim -0.33$$



第付5.1図
座標と記号

$$\left(\frac{b}{a} = 1.0 \right) \sim \left(\frac{b}{a} = 2.0 \right)$$

したがって、JAERI-M 6050 内でプラズマの副半径 a_p は、JT-4 にあつては、平均のプラズマ副半径 a と考えるべきである。

- (2) JT-4 では、垂直方向に対して、プラズマが不安定である（非円形断面プラズマの実験時）。すなわち、フィードバック制御がない時、プラズマは、外乱の形によらず、垂直方向のずれを自動的に発生成長させる（位置不安定性）。したがって、JT-4 の垂直方向位置の制御は、不安定性のフィードバック安定化が目的である。

以上の他に、本解析のための仮定は、次のことである。

- (3) プラズマは、理想的 MHD 理論（プラズマ抵抗 = 0）で取扱う。
- (4) プラズマの内部インダクタンス、及び、圧力の変化に伴うインダクタンスの変化は、外乱として一括する。
- (5) 制御用磁場は、多くのポロイダルコイル群と互いに電磁結合している。しかし、解析を簡単にするため、制御コイル相互間の電磁結合が無視される。これらの効果は、将来は考慮されるべきものである。
- (6) ライナ、真空容器、及び、トロイダルコイルなどによるシェルの効果は、簡単化する。すなわち、プラズマの変位によって、上記の導体中に誘起されるうず電流には、平均一様電流成分、双極電流成分、4重極電流成分、……なる成分が含まれているが、制御対象にとって主成分となる電流成分のみ考慮する。このことは、上記導体を円柱近似したことにもなる。
- (7) プラズマ表面に誘起されるうず電流は、無視する。

以上の条件の下では、3系列の制御系は、それぞれ独立に分離でき、各々の制御系の概念図は、本文第 3.1.2 図のようになる。

付 5 における添字の意味は、次の通りである。

- p : プラズマ
 u : ライナ、及び、真空容器
 v : 垂直磁場コイル
 f : トロイダルコイル、又は、ポロイダルコイル
 c : 位置制御コイル
 q : 4重極磁場コイル

ただし、f コイルとしては、以下の解析では、トロイダルコイルで代表して記述する。

記号の意味

- L : 自己インダクタンス
 M : 相互インダクタンス
 R : 抵抗
 τ : 時定数
 R_p : プラズマのトロイダル主半径
 a : プラズマの平均副半径

付 5.2 水平方向のずれ制御

水平方向のプラズマリングの運動は、プラズマ副半径方向の圧力バランスを仮定すれば、次式によって支配される。

$$m_p \ddot{R}_p = \frac{\mu_0 I_p^2}{4\pi R_p} A_0 - I_p B_z^e \quad (\text{付 5-1})$$

$$m_p = \pi a^2 n_e (m_e + m_i / Z_i) \\ \approx \pi a^2 \frac{n_e}{Z_i} m_i$$

：プラズマの単位長当りの質量

$$A_0 = \ell_n \frac{8 R_p}{a} + \beta_p + \frac{\ell_i - 3}{2} \quad (\text{円形断面に対して})$$

$$\beta_p \equiv \frac{\bar{P}}{B_a^2} \left(B_a = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi a} \right) \quad : (0.1 \sim 1.0)$$

ℓ_i : 規格化された内部インダクタンス (0.5 ~ 1.5)

B_z^e : プラズマ中心での z 方向外部磁場

プラズマの水平方向のずれを表わすのに、ある基準位置 R_0 からのプラズマ中心の距離を x とし、 R_p を次式のように置く。

$$R_p = R_0 + x \quad (\text{付 5-2})$$

プラズマの水平方向の運動に従って、プラズマ電流 I_p 、プラズマ副半径 a も変化する。その変化を次式で表わす。

$$I_p = I_0 \left(1 - \frac{\mu}{R_0} x \right) \quad (\text{付 5-3})$$

$$a = a_0 \left(1 + \frac{\lambda}{R_0} x \right)$$

ここで、 μ 、 λ は、プラズマの運動の際に、プラズマリングと鎖交する磁束が、どの程度保存されるかによるものであり、詳細は、JAERI-M 6050、又は、文献1)を参照して頂きたい。

$$\lambda \approx 0.5$$

$$\mu \approx 0.5 \sim 1$$

(但し、プラズマ柱がリミターなどでけずられる効果がない時)

プラズマ領域に作用する外部垂直磁場 B_z^e としては、S、又は、Dコイル、あるいは、制御用各種コイルのプレプログラム電流による平衡用垂直磁場 B_{VE} 、垂直磁場コイル (Vコイル) に流れる電流による空間的に一様な制御用垂直磁場 B_V 、真空容器 (ライナ含む) 中に誘起される 2重極イメージ電流による磁場 B_0 、トロイダルコイルの導体表面 (又は、S、Dコイル

等)に誘起される2重極イメージ電流による磁場 B_f である。

$$B_{VE} = B_{V0} \left(1 - \frac{n}{R_0} x \right) \quad (\text{付5-4})$$

$$B_{V0} = \frac{\mu_0 I_0}{4\pi R_0} A_0$$

B_v, B_u, B_f : B_{V0} に比べて $\frac{x}{R_0}$ のオーダーの(付5-1)式を, $\frac{x}{R_0} (\ll 1)$ として線形化する。

$$m_p \ddot{x} = I_0 B_{V0} \Gamma \frac{x}{R_0} - I_0 (B_v + B_f + B_u + B_d) \quad (\text{付5-5})$$

$$\text{ここで } \Gamma \equiv \frac{1 - \lambda}{\lambda_0} - \mu + n - 1$$

B_d : 外乱 (ℓ_i, β_p の変化の分まで含むものとする)

ここで n は第3章で説明した外部平衡磁場の n -index である。

(付5-5)式において, 右辺第2項を定数と単純化して考えると, $x \propto e^{rt}$ となり, 成長率 r は次式で与えられる。

$$r^2 = \frac{V_{AP}^2}{a^2} \frac{4\Gamma}{A_0}$$

$$\text{ここで, } V_{AP} = \sqrt{\frac{B_{V0}^2}{\mu_0 \rho}} \quad \text{ポロイダルアルフベン速度}$$

ρ : プラズマの密度

故に, 水平方向のプラズマリングの安定条件は,

$$\Gamma \equiv \frac{1 - \lambda}{A_0} - \mu + n - 1 < 0 \quad (\text{付5-6})$$

である。JT-4の実験条件は, 上式を満たす。($n = -3 \sim 0.5$) この時, JT-4の実験パラメータ ($I_p = 1 \text{ MA}, R_0 = 1.4 \text{ m}, a = 0.4 \text{ m}, n = 10^{19} \text{ m}^{-3}$) では, $r^2 \sim -(4 \times 10^6)^2$ となる。したがって, プラズマリングは, R_0 のまわりに, 振動数約 $4 \times 10^6 \text{ rad/sec}$ の振動をすることになる。制御の対象とするのは msec 以上の現象に対してであり, これは考慮外とする。すなわち, (付5-5)式において, $m = 0$ と考えてよいことになる。したがって,

$$x = \frac{R_0}{\Gamma B_{V0}} (B_v + B_f + B_u + B_d) \quad (\text{付5-7})$$

(付5-7)式の右辺の磁場 B_v, B_f, B_u 等は, 互いに結合をもっており, それぞれの起因となる電流を, I_v, I_f, I_u とすると, 次式で記述できる。

$$\begin{aligned} L_f \dot{I}_f + M_{pf} I_p + M_{pf} \dot{I}_p + M_{uf} \dot{I}_u + M_{vf} \dot{I}_v + R_f I_f &= 0 \\ M_{fu} \dot{I}_f + M_{pu} I_p + M_{pu} \dot{I}_p + L_u \dot{I}_p + M_{vu} \dot{I}_v + R_u I_u &= 0 \\ M_{fv} \dot{I}_f + M_{pv} I_p + M_{pv} \dot{I}_p + M_{uv} \dot{I}_u + L_v \dot{I}_v + R_v I_v &= V_v \end{aligned} \quad (\text{付5-8})$$

I_u, I_f は、イメージ電流内の2電極成分の空間的積分値である。各々、自己インダクタンス L 、相互インダクタンス M 、抵抗 R は、各回路に2重極電流が流れた時の値であることに注意しなければならない。

(付5-8)式において、第2項と第3項とを比較すると、

$$\frac{\dot{M}_{pj} \dot{I}_p}{\dot{M}_{pj} I_p} \sim 0 \left(\frac{x}{R_0} \right) \quad \text{[JAERI-M 6050 p.6]}$$

であるから、第3項は、高次の微少量として無視する。又、 \dot{M}_{pj} は

$$\dot{M}_{pj} I_p = I_0 \frac{\partial M_{pj}}{\partial x} \dot{x}$$

と書くことにする。

(付5-7)、(付5-8)式は、ラプラス変換を行って時間微分を s とおくと、

$$x = \frac{R_0}{\Gamma B_{v0}} (\nu_v I_v + \nu_f I_f + \nu_u I_u + B_d)$$

$$I_f = -\frac{s \tau_f}{1 + s \tau_f} \left\{ \frac{I_0}{L_f} \frac{\partial M_{pf}}{\partial x} x + \frac{M_{vf}}{L_f} I_v + \frac{M_{uf}}{L_f} I_u \right\}$$

$$I_u = -\frac{s \tau_u}{1 + s \tau_u} \left\{ \frac{I_0}{L_u} \frac{\partial M_{pu}}{\partial x} x + \frac{M_{vu}}{L_u} I_v + \frac{M_{fu}}{L_u} I_f \right\} \quad \text{(付5-9)}$$

$$I_v = \frac{1/R_v}{1 + s \tau_v} V_v - \frac{s \tau_v}{1 + s \tau_v} \left\{ \frac{I_0}{L_v} \frac{\partial M_{pv}}{\partial x} x + \frac{M_{fv}}{L_v} I_f + \frac{M_{uv}}{L_v} I_u \right\}$$

ここで、 $B_v = \nu_v I_v$ 、 $B_f = \nu_f I_f$ 、 $B_u = \nu_u I_u$ である。

$$\nu_j, \frac{\partial M_{pj}}{\partial x}, M_{ij} \text{ の符号は,}$$

$$\nu_j > 0, \frac{\partial M_{pj}}{\partial x} < 0, M_{ij} > 0 \quad i = u, v, f \quad (j \neq i)$$

のように定義する。

したがって、ブロック線図を書くと、第313図の様になる。ただし、ここで、

$$K_p = \frac{R_0}{\Gamma B_{v0}}, \quad \tau_j = \frac{L_j}{R_j} \quad (j = v, f, u),$$

$$K_{pf} = I_0 \frac{\partial M_{pf} / \partial x}{L_f}, \quad K_{vf} = \frac{M_{vf}}{L_f}, \quad K_{uf} = \frac{M_{uf}}{L_f}$$

$$K_{pu} = I_0 \frac{\partial M_{pu} / \partial x}{L_u}, \quad K_{vu} = \frac{M_{vu}}{L_u}, \quad K_{fu} = \frac{M_{fu}}{L_u}$$

$$K_{pv} = I_0 \frac{\partial M_{pv} / \partial x}{L_v}, \quad K_{fv} = \frac{M_{fv}}{L_v}, \quad K_{uv} = \frac{M_{uv}}{L_v}$$

(付5-10)

付 5.3 垂直方向の位置不安定性のフィードバック制御¹⁾

垂直方向のプラズマリングの運動は、次式によって支配される。

$$m_p \ddot{z}_p = - I_p B_R^0 \quad (\text{付 5-11})$$

z_p : プラズマリング中心の垂直方向位置

B_R^0 : プラズマ中心での R 方向外部磁場

プラズマの垂直方向の基準位置 z_0 からのずれ z を用いて、 z_p を、

$$z_p = z_0 + z \quad (\text{付 5-12})$$

z_0 : 基準位置 (= 0)

と表わす。プラズマリングの垂直方向の運動に際しては、それに伴う δI_p , δa は、考慮する必要はない。

プラズマ領域に作用する外部水平磁場 B_R^0 としては、平衡用垂直磁場 B_{VE} の R 方向成分 B_{RE} , 位置制御コイル (C コイル) に流れる電流による空間的に一様な水平磁場 B_C , 真空容器 (ライナ) 中に誘起される上下 2 重極イメージ電流による磁場 B_u , トロイダルコイルの導体表面 (又は, S, D コイル) に誘起される上下 2 重極イメージ電流による磁場 B_f である。

$\text{rot } B_{VE} = 0$ より, [(付 5-4) 式より]

$$\left. \begin{aligned} B_{RE} &= B_{V0} \frac{n}{R_0} z \\ B_C, B_u, B_f \end{aligned} \right\} B_{V0} \text{ に比べて } \frac{z}{R_0} \text{ のオーダーの量}$$

(付 5-11) 式を z/R_0 ($\ll 1$) に関して線型化する。

$$m_p \ddot{z} = - I_0 B_{V0} \frac{n}{R_0} z - I_0 (B_C + B_f + B_u + B_d) \quad (\text{付 5-13})$$

水平方向のずれ制御の場合と同様に考えて、 $z \propto e^{\gamma_g t}$ とすると、成長率 γ_g は、次式で与えられる。

$$\gamma_g = - \frac{V_{AP}^2}{a^2} \frac{4n}{A_0} \quad (\text{付 5-14})$$

故に、垂直方向へのプラズマリングの安定条件は、

$$n > 0 \quad (\text{付 5-15})$$

であるが、JT-4 の非円形断面プラズマの実験では、上式は満たされない。すなわち、JT-4 の非円形断面プラズマでは、垂直方向に“位置的に不安定”である。したがって、垂直方向に関するフィードバック制御の目的は、位置不安定性のフィードバック安定化にある。

(付 5-13) 式の右辺の磁場 B_C , B_f , B_u 等は、互いに結合をもっており、それぞれの起因になる電流を I_C , I_f , I_u とすると、次式で記述できる。

$$\begin{aligned} L_f \dot{I}_f + M_{pf} I_p + M_{uf} \dot{I}_u + M_c \dot{I}_c + R_f I_f &= 0 \\ M_{fu} \dot{I}_f + M_{pu} I_p + L_u \dot{I}_u + M_c \dot{I}_c + R_u I_u &= 0 \\ M_{fc} \dot{I}_f + M_{pc} I_p + M_{uc} \dot{I}_u + L_c \dot{I}_c + R_c I_c &= V_c \end{aligned} \quad (\text{付 5-16})$$

I_u , I_f は、イメージ電流の内、上下 2 重電極成分の積分値である。JT-4 の様に、真空容

器 (ライナ) やトロイダルコイルの形状が, 非円形の場合, (付5-16) 式の各係数 L_i , M_{ij} , R_i は, 数値的に検討する必要がある。⁴⁾

また, \dot{M}_{pj} は,

$$\dot{M}_{pj} I_p = I_0 \frac{\partial M_{pj}}{\partial z} \dot{z}$$

と書くことにする。

(付5-13), (付5-16) 式は, ラプラス変換を行って, 時間微分を s とおくと,

$$z = \frac{R_0}{n B_{V0}} (\nu_c I_c + \nu_f I_f + \nu_u I_u + B_d)$$

$$I_f = - \frac{s \tau_f}{1 + s \tau_f} \left[\frac{I_0}{L_f} \frac{\partial M_{pf}}{\partial z} z + \frac{M_{cf}}{L_f} I_c + \frac{M_{uf}}{L_f} I_u \right]$$

$$I_u = - \frac{s \tau_u}{1 + s \tau_u} \left[\frac{I_0}{L_u} \frac{\partial M_{pu}}{\partial z} z + \frac{M_{cu}}{L_u} I_c + \frac{M_{fu}}{L_u} I_f \right]$$

$$I_c = \frac{1/R_c}{1 + s \tau_c} V_c - \frac{s \tau_c}{1 + s \tau_c} \left[\frac{I_0}{L_c} \frac{\partial M_{pc}}{\partial z} z + \frac{M_{fc}}{L_c} I_f + \frac{M_{uc}}{L_c} I_u \right]$$

(付5-17)

ここで,

$$B_c = \nu_c I_c, \quad B_f = \nu_f I_f, \quad B_u = \nu_u I_u$$

$$\tau_i = \frac{L_i}{R_i} \quad (i = f, u, c)$$

$$\tau_g = - \frac{a^2}{V_{AP}^2} \frac{A_0}{4n} \quad \left(V_{AP}^2 \equiv \frac{B_{V0}^2}{\mu_0 \rho}, \quad \rho : \text{プラズマ密度} \right)$$

ここで, $\nu_j, \frac{\partial M_{pj}}{\partial z}, M_{ij}$ の符号は,

$$\nu_j > 0, \quad \frac{\partial M_{pj}}{\partial z} < 0, \quad M_{ij} > 0 \quad i, j = u, c, f, \quad i \neq j$$

のように定める。

したがって, ブロック線図を書くと, 第3.19図のようになる。⁵⁾ ただし, ここで

$$K_p = - \frac{R_0}{n B_{V0}}, \quad \tau_j = \frac{L_j}{R_j} \quad (j = c, f, u)$$

$$K_{pf} = I_0 \frac{\partial M_{pf} / \partial z}{L_f}, \quad K_{cf} = \frac{M_{cf}}{L_f}, \quad K_{uf} = \frac{M_{uf}}{L_f}$$

$$K_{pu} = I_0 \frac{\partial M_{pu} / \partial z}{L_u}, \quad K_{cu} = \frac{M_{cu}}{L_u}, \quad K_{fu} = \frac{M_{fu}}{L_u}$$

(付5-18)

$$K_{pc} = I_0 \frac{\partial M_{pc} / \partial z}{L_c}, \quad K_{fc} = \frac{M_{fc}}{L_c}, \quad K_{uc} = \frac{M_{uc}}{L_c}$$

付 5.4 断面形状制御

断面形状に関する不安定性については、詳細な検討は終了していないが、今、問題にしている楕円変形については、安定であると考えられるので、この解析では、楕円変形に関しプラズマはMHD的に安定だとし、したがって、水平方向のずれ制御と同様に、プラズマの質量を無視する。

JAERI-M 6050 に基づいて、次の仮定をする。

- (i) $a/R_p \ll 1$ として、プラズマのトロイダル効果は無視する。
- (ii) プラズマの断面形状は、次式で近似する。

$$r = a + \Delta \cos 2\omega \quad \text{かつ} \quad \left| \frac{\Delta}{a} \right| \ll 1$$

$$\left(\text{JT-4 の実験範囲は } \frac{\Delta}{a} = 0 \sim -1/3 \right)$$

- (iii) プラズマのトロイダル電流のプラズマ断面内の分布は、一様分布とする。(実際には、放物分布とした方がいいが、解析できない。)

JAERI-M 6050 Eq. (17) に基づいて

$$\Delta = - \frac{2\pi a^2}{\mu_0 I_0} B_\omega^e \quad (\text{付 5-20})$$

ここで、 B_ω^e は、外部印加した4重極磁場の $r=a$ での振巾である。すなわち、 $r=a$ での外部4重極磁場 $B_q^e(\omega)$ は、 $B_q^e(\omega) = B_\omega^e \cdot \cos 2\omega$ で与えられるとする。

プラズマ断面の変形 Δ を、ある基準値 Δ_0 とそれからのずれ ϵ とを用いて、

$$\Delta \equiv \Delta_0 + a\epsilon \quad \epsilon < \frac{\Delta_0}{a} \quad (\text{付 5-21})$$

と書く。又、 B_ω^e としては、非円形断面プラズマを作るために、S、又は、Dコイルのプレプログラム電流で誘起された4重極磁場 $B_{\omega_0}^e$ と、4重極磁場コイル(Qコイル)に流れる電流による4重極磁場 B_q 、真空容器(ライナ)中に流れる4重極イメージ電流による磁場 B_u 、トロイダルコイルの導体表面に誘起される4重極イメージ電流による磁場 B_f である。

$$B_{\omega_0}^e = - \frac{\mu_0 I_0}{2\pi a} \frac{\Delta_0}{a} \quad (\text{付 5-22})$$

$B_q, B_u, B_f : B_{\omega_0}^e$ に比べてオーダー ϵ の微少量

故に、(付 5-20)式より、

$$\epsilon = - \frac{2\pi a}{\mu_0 I_0} (B_q + B_f + B_u + B_d) \quad (\text{付 5-23})$$

(付 5-23)式の右辺の磁場 B_q, B_f, B_u のそれぞれの起因になる電流を I_q, I_f, I_u とすると、相互結合は次式で記述できる。

$$\begin{aligned} L_f \dot{I}_f + \dot{M}_{pf} I_p + M_{uf} \dot{I}_u + M_{qf} \dot{I}_q + R_f I_f &= 0 \\ M_{fu} \dot{I}_f + \dot{M}_{pu} I_p + L_u \dot{I}_u + M_{qu} \dot{I}_q + R_u I_u &= 0 \\ M_{fq} \dot{I}_f + \dot{M}_{pq} I_p + M_{uq} \dot{I}_u + L_q \dot{I}_q + R_q I_q &= 0 \end{aligned} \quad (\text{付5-24})$$

I_u, I_f は、イメージ電流の内の、4重極成分の積分値である。各々の係数 L_j, M_{ij}, R_i 等は、各回路に4重極電流が流れた時の値である。又、 \dot{M}_{ij} は、

$$\dot{M}_{ij} I_p = I_0 a \frac{\partial M_{pj}}{\partial \Delta_0} \varepsilon$$

と書くことにする。

(付5-23), (付5-24)式は、ラプラス変換すると、次の様になる。

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -\frac{2\pi a}{\mu_0 I_0} (\nu_q I_q + \nu_f I_f + \nu_u I_u + B_d) \\ I_f &= -\frac{s\tau_f}{1+s\tau_f} \left[\frac{a I_0}{L_f} \frac{\partial M_{pf}}{\partial \Delta_0} \varepsilon + \frac{M_{qf}}{L_f} I_q + \frac{M_{uf}}{L_f} I_u \right] \\ I_u &= -\frac{s\tau_u}{1+s\tau_u} \left[\frac{a I_0}{L_u} \frac{\partial M_{pu}}{\partial \Delta_0} \varepsilon + \frac{M_{qu}}{L_u} I_q + \frac{M_{fu}}{L_u} I_f \right] \\ I_q &= \frac{1/R_q}{1+s\tau_q} V_q - \frac{s\tau_q}{1+s\tau_q} \left[\frac{a I_0}{L_q} \frac{\partial M_{pq}}{\partial \Delta_0} \varepsilon + \frac{M_{fq}}{L_q} I_f + \frac{M_{uq}}{L_q} I_u \right] \end{aligned} \quad (\text{付5-25})$$

ここで、

$$B_q = \nu_q I_q, \quad B_f = \nu_f I_f, \quad B_u = \nu_u I_u$$

ここで $\nu_j, \frac{\partial M_{pj}}{\partial \Delta_0}, M_{ij}$ の符号は、

$$\nu_j < 0, \quad \frac{\partial M_{pj}}{\partial \Delta_0} > 0, \quad M_{ij} > 0 \quad i=q, f, u \quad i \neq j$$

のように定める。

したがって、ブロック線図を書くと、第3.14図の様になる。ただし、ここで

$$\begin{aligned} K_p &= -\frac{2\pi a}{\mu_0 I_0} \quad \tau_j = \frac{L_j}{R_j} \quad (j=q, f, u) \\ K_{pf} &= a \frac{I_0}{L_f} \frac{\partial M_{pf}}{\partial \Delta_0}, \quad K_{qf} = \frac{M_{qf}}{L_f}, \quad K_{uf} = \frac{M_{uf}}{L_f} \\ K_{pu} &= a \frac{I_0}{L_u} \frac{\partial M_{pu}}{\partial \Delta_0}, \quad K_{qu} = \frac{M_{qu}}{L_u}, \quad K_{fu} = \frac{M_{fu}}{L_u} \\ K_{pq} &= a \frac{I_0}{L_q} \frac{\partial M_{pq}}{\partial \Delta_0}, \quad K_{fq} = \frac{M_{fq}}{L_q}, \quad K_{uq} = \frac{M_{uq}}{L_q} \end{aligned} \quad (\text{付5-26})$$

- 1) 鈴木康夫 他 JAERI-M 6050 (1975)
- 2) S. Seki et al. J. Phys. Soc. Japan 36 1667 (1974)
- 3) A. Fukuyama et al. JJAP 14 871 (1975)
- 4) 横溝英明 他 JAERI-M 6693 (1976)
- 5) 垂直方向位置不安定性に各種導体のシェール効果を考慮した場合の成長率 γ'_g は、第 3.19 図で、 $V_e = 0$ にして特性方程式を解けば求まるが、その値のオーダーは $\gamma'_g \sim \tau_s^{-1}$ である。ここで、 τ_s はシェール効果を持つ導体群の実効的時定数である。詳細は文献 3) に詳しい。

第付 5.1 プラズマ制御の検討資料 (I)

		水平方向のずれ制御 (δR -制御)	断面形状制御 ($\delta \epsilon$ -制御)	垂直方向位置不安定性制御 (δz -制御)
制御対称		垂直磁場コイル (Vコイル)	四重極磁場コイル (Qコイル)	位置制御コイル (Cコイル)
設計	外乱	$B_d = B_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau_d}})$ $B_0 = 2.5 \times 10^{-2} \text{ [T]}$ $\tau_d = 10^{-3} \text{ [sec]}$ $x(t=0) = 0$	$B_d = B_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau_d}})$ $B_0 = 1.6 \times 10^{-2} \text{ [T]}$ $\tau_d = 10^{-3} \text{ [sec]}$ $\epsilon(t=0) = 0$	$B_d = 0$ $z(t=0) \neq 0 \text{ (任意)}$
	基準	許容値 $ x - x_0 \leq 5 \text{ [cm]}$	許容値 $a_0 \epsilon - \epsilon_0 \leq 1 \text{ [cm]}$	許容値 $ z - z_0 \leq 5 \text{ [cm]}$
標準値		$x_0 = 0$ 但し $x_0 = x_0(t)$ とする場合もある	$\epsilon_0 = 0$ 但し $\epsilon_0 = \epsilon_0(t)$ とする場合もある	$z_0 = 0$
プラズマ特性	諸パラメータ	$I_0 = 1.0 \text{ (MA)}$ $R_0 = 1.4 \text{ (m)}$ $a_0 = 0.4 \text{ (m)}$ $\mu = 0.5, \lambda = 0.5$ $\beta_p = 0.1 \sim 1.0$ $\mathcal{L}_i = 0.5 \sim 1.5$ $n = 0.5 \sim -3.0$ $A_0 = 2.15 \sim 3.55$ $\Gamma = -4.0 \sim -1.0$	$I_0 = 1.0 \text{ (MA)}$ $R_0 = 1.4 \text{ (m)}$ $a_p = 0.4 \text{ (m)}$ $A_0 = -0.08 \text{ (m)}$	$I_0 = 1.0 \text{ (MA)}$ $R_0 = 1.4 \text{ (m)}$ $a_0 = 0.4 \text{ (m)}$ $\beta_p = 0.1 \sim 1.0$ $\mathcal{L}_i = 0.5 \sim 1.5$ $n = 0.5 \sim -3.0$ $A_0 = 2.15 \sim 3.55$ $\tau_g = 10^{-6} \text{ (sec)}$
	K_p	$-9.0 \text{ } \left[\frac{\text{m}}{\text{T}} \right]$	$-2.0 \text{ } \left[\frac{1}{\text{T}} \right]$	$3.0 \text{ } \left[\frac{\text{m}}{\text{T}} \right]$
制御対象コイル	K_{pi}	$\frac{\partial M_{pv}}{\partial x} = -2.2 \times 10^{-5} \left[\frac{\text{H}}{\text{m}} \right]$	$\frac{\partial M_{pq}}{\partial d} = 0.4 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{H}}{\text{T}} \right]$	$\frac{\partial M_{pc}}{\partial z} = -7.7 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{H}}{\text{m}} \right]$
	K_{fi}	(受注者)		
	K_{ui}	$M_{uv} = 19.1 \times 10^{-6} \text{ [H]}$	$M_{uq} = 9.6 \times 10^{-6} \text{ [H]}$	$M_{uc} = 4.1 \times 10^{-6} \text{ [H]}$
	ν_i	$2.04 \times 10^{-7} \left[\frac{\text{T}}{\text{A}} \right]$	$-8.0 \times 10^{-7} \left[\frac{\text{T}}{\text{A}} \right]$	$6.0 \times 10^{-7} \left[\frac{\text{T}}{\text{A}} \right]$
	τ_i	$\frac{L_i}{R_i}$ 電源インピーダンスまで考慮して決定すること		
	R_i	電源抵抗まで考慮して決定すること		

第付 5.2 表 プラズマ制御の検討資料 (II)

		δR - 制御	$\delta \epsilon$ - 制御	δz - 制御
f コ イ ル	想定コイル	S _I コイル	S _{II} コイル	Dコイル (短絡結線)
	K _{pf}	$\frac{\partial M_{ps}}{\partial x} = -83.2 \times 10^{-6} \left[\frac{H}{m} \right]$	$\frac{\partial M_{ps}}{\partial A} = 0.25 \times 10^{-6} \left[\frac{H}{m} \right]$	$\frac{\partial M_{ps}}{\partial z} = -5.2 \times 10^{-6} \left[\frac{H}{m} \right]$
	K _{if}	(受 注 者)		
	K _{uf}	$M_{uf} = 67.1 \times 10^{-6} [H]$	$M_{uf} = 115 \times 10^{-6} [H]$	$M_{uf} = 2.8 \times 10^{-6} [H]$
	ν_f	$79.3 \times 10^{-7} \left[\frac{T}{A} \right]$	$-35.6 \times 10^{-7} \left[\frac{T}{A} \right]$	$4.0 \times 10^{-7} \left[\frac{T}{A} \right]$
	τ_f	(受 注 者)		
真 空 容 器 ・ ラ イ ナ !	K _{pu}	$-1.26 \times 10^6 \left[\frac{A}{m} \right]$	$9.41 \times 10^3 [A]$	$-0.81 \times 10^6 \left[\frac{A}{m} \right]$
	K _{iu}	4.57	1.13	1.71
	K _{fu}	16.1	13.6	1.56
	ν_u	$4.1 \times 10^{-7} \left[\frac{T}{A} \right]$	$-2.4 \times 10^{-7} \left[\frac{T}{A} \right]$	$2.0 \times 10^{-7} \left[\frac{T}{A} \right]$
	τ_u	$8.4 \times 10^{-3} [sec]$	$4.7 \times 10^{-3} [sec]$	$8.5 \times 10^{-3} [sec]$
動作 シミュレーション	(1) 外乱に対する時間応答 (i) 外乱の大きさ 設計基準の項の B ₀ と する (ii) 外乱の形 ステップ状 正弦波、 ($\omega = 10, 10^2, 10^3$) (2) 目標値変更 (3) フィードバックなし	同 左		(1) フィードバック回路のゲイン (i) 安定化のための最小ゲイン (ii) " 最大ゲイン (2) フィードバックなし
備 考	S _I コイルとは S (形状) コイルを結線 I にしたもの	S _{II} コイルとは S (形状) コイルを結線 II にしたもの	Dコイルは上下を逆極性にして 短絡したもの。但し巻数は D ₁ = 4 D ₂ = D ₃ = 2 である。	
留 意 事 項	各種定数は一応設計中心値を与えた。しかし、これらの定数はある巾を持つ点は設計時に考慮しておくこと。定数が巾を持つ原因としては、(i) プラズマ特性の一放電中の時間的変化 (ii) コイル etc は温度変化に伴う定数の時間変化 (iii) 真空容器ライナは周波数特性を持つ (iv) 真空容器は複雑な形状をしているので解析解がない などである。			

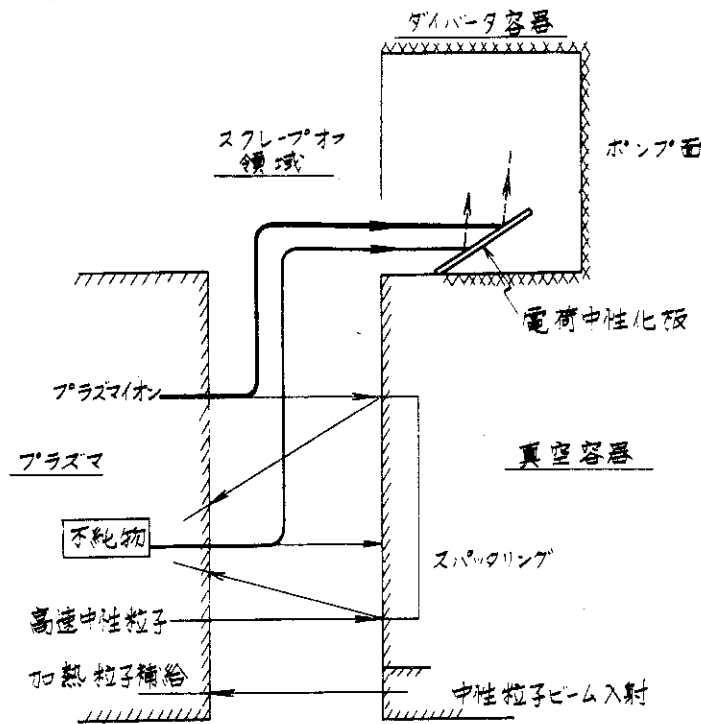
付録6 ダイバータに関する検討

付6.1 スパタリングによる不純物発生の減少

本文3.4で述べたダイバータ効果のうち、荷電交換で発生する高速中性粒子が壁から不純物をたたき出す機構について検討する。ここではプラズマ本体は定常状態であること、そのための粒子補給は高速中性粒子入射などによるものとし、プラズマ壁との間の空間には中性ガスを注入しないものとする。このときのスパタリングによる不純物発生プロセスは第付6.1図のように表わされる。すなわち、不純物は高速中性粒子と、ダイバータに捕捉されなかったプラズマ・イオンとが壁をスパタすることによって発生するものとする。このときの粒子バランスは、

$$\frac{dn_p}{dt} = \langle \sigma_i v_e \rangle n_o n_p + (1 - \gamma) \langle \sigma_{ex} v_i \rangle n_o n_p - \frac{n_p}{\tau_p} + \epsilon \frac{I}{e V_p} \quad (\text{付6-1})$$

$$\begin{aligned} \frac{dn_o}{dt} = & -\langle \sigma_i v_e \rangle n_o n_p - (1 - \gamma) \langle \sigma_{ex} v_i \rangle n_o n_p + \frac{n_p}{\tau_p} (1 - C_p) \\ & + C_r \frac{n_p}{\tau_p} + (1 - \epsilon) \frac{I}{e V_p} \quad (\text{付6-2}) \end{aligned}$$



第付6.1図 ダイバータのある場合のスパタリングによる不純物発生プロセス

$$\frac{dn_I}{dt} = (1-S) \left\{ -\frac{n_I}{\tau_I} + a_s^n \gamma \langle \sigma_{ex} v_i \rangle n_o n_p + a_s^i (1-C_p) \frac{n_p}{\tau_p} + (1-\epsilon) a_s^{NB} \frac{I}{eV_p} \right\} \quad (\text{付6-3})$$

- ここで, n_p, n_o, n_I : プラズマ密度, 中性粒子密度, 不純物イオン密度
 τ_p, τ_I : プラズマ閉込め時間, 不純物イオン閉込め時間
 C_p : ダイバータによるプラズマ捕捉効率
 C_r : ダイバータ室よりの逆流率
 ϵ : 中性粒子ビームの電離される割合
 a_s^n, a_s^i, a_s^{NB} : 高速中性粒子, プラズマイオン, 中性粒子入射ビームによる真空容器壁のスパタ比
 γ : 荷電交換で生じた高速中性粒子のうち, プラズマ外へ流出する割合
 V_p : プラズマ体積
 S : スクレープ・オフ層による不純物遮蔽効率
 I/e : 中性粒子入射ビームの粒子束

さて, $\epsilon = 1, \frac{dn_p}{dt} = 0, \frac{dn_o}{dt} = 0$ と仮定すると,

$$\begin{aligned} n_o &= \frac{1}{\langle \sigma_i v_e \rangle + (1-\gamma) \langle \sigma_{ex} v_i \rangle} \left(1 - \frac{I \tau_p}{e V_p n_p} \right) \frac{n_p}{\tau_p} \\ &= \frac{1}{\langle \sigma_i v_e \rangle + (1-\gamma) \langle \sigma_{ex} v_i \rangle} (1 - C_p + C_r) \frac{n_p}{\tau_p} \end{aligned} \quad (\text{付6-4})$$

となり, 不純物の割合は,

$$\begin{aligned} \frac{n_I}{n_p} &= (1-S) \frac{\tau_I}{\tau_p} \left\{ \frac{a_s^n \gamma \langle \sigma_{ex} v_i \rangle}{\langle \sigma_i v_e \rangle + (1-\gamma) \langle \sigma_{ex} v_i \rangle} (1 - C_p + C_r) + a_s^i (1 - C_p) \right\} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_I}}) \end{aligned} \quad (\text{付6-5})$$

$\tau_I \gg \tau_p$ とすれば,

$$\begin{aligned} \frac{n_I}{n_p} &= (1-S) \frac{t}{\tau_p} \left\{ \frac{a_s^n \gamma \langle \sigma_{ex} v_i \rangle}{\langle \sigma_i v_e \rangle + (1-\gamma) \langle \sigma_{ex} v_i \rangle} (1 - C_p + C_r) + a_s^i (1 - C_p) \right\} \end{aligned} \quad (\text{付6-6})$$

ダイバータのない場合は,

$$\frac{n_I}{n_p} = \frac{t}{\tau_p} \left\{ \frac{a_s^n \gamma \langle \sigma_{ex} v_i \rangle}{\langle \sigma_i v_e \rangle} + a_s^i \right\} \quad (\text{付6-7})$$

であり、右辺の2項が各々 $(1 - C_p + C_r)$, $(1 - C_p)$ だけダイバータにより軽減されること
 とが分る。 $C_p = 0.9$, $C_r = 0.5$ と効率の低いダイバータを考えると、各々の軽減率は、0.6倍、
 0.5倍であり、ここで取扱った機構(スパタリング)によって発生する不純物は低く見積つて
 も半分になるであろう。

付 6.2 粒子補給としての NBI 電流

プラズマを定常に保つために必要なビーム電流を概算する。

定常プラズマ条件

$$1 - \frac{e I \tau_p}{e V_p n_p} = 1 - C_p + C_r$$

すなわち

$$I = (C_p - C_r) \frac{e V_p}{e} \frac{n_p}{\tau_p}$$

ここで記号の意味は本文と同じである。

$V_p = 4 \times 10^6 \text{ cm}^3$, $C_p = 0.95$, $n_p = 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ とすると、定常プラズマを保つため
 に必要な中性粒子ビーム(NBI)電流は次の通りである。

(単位 A)

$e \tau_p (\text{sec}) \backslash C_r$	0.1	0.3	0.5	0.7
0.1	109	83	58	32
1.0	10.9	8.3	5.8	3.2

付録7 ライナ電流の計算例

真空容器とライナを円形コイルにおきかえ、各々適当なLとRを与えて、そこに誘起される電流を解析した。電流源はプラズマ電流の急激な変化(電流遮断)であり、プラズマ電流と相互インダクタンスで結合されるRL回路(真空容器およびライナ)に誘起される電流波形を求めた。方程式は、

$$R_i I_i + L_i \dot{I}_i + \sum_{j \neq i} M_{ij} \dot{I}_j = 0$$

であり、RL回路相互間の結合も考慮している。解法はRKG法であり、FACOMのADSL言語を使用した¹⁾

ライナは、M。またはSUS(M。コーティングを想定)に相当する抵抗値を入れ、真空容器は、代用コイル全ての並列抵抗が4 mΩとなるように抵抗値を与えた。コイルの配置は、第付7.1図に示す通りである。

プラズマ電流が1 MAから時定数1 msで指定関数的に減衰するときの誘起電流の波形を第付7.2図に、またそのピーク値を第7.1表に示す。減衰時定数が5 msのときは、ピーク電流値がほぼ1/2になる。

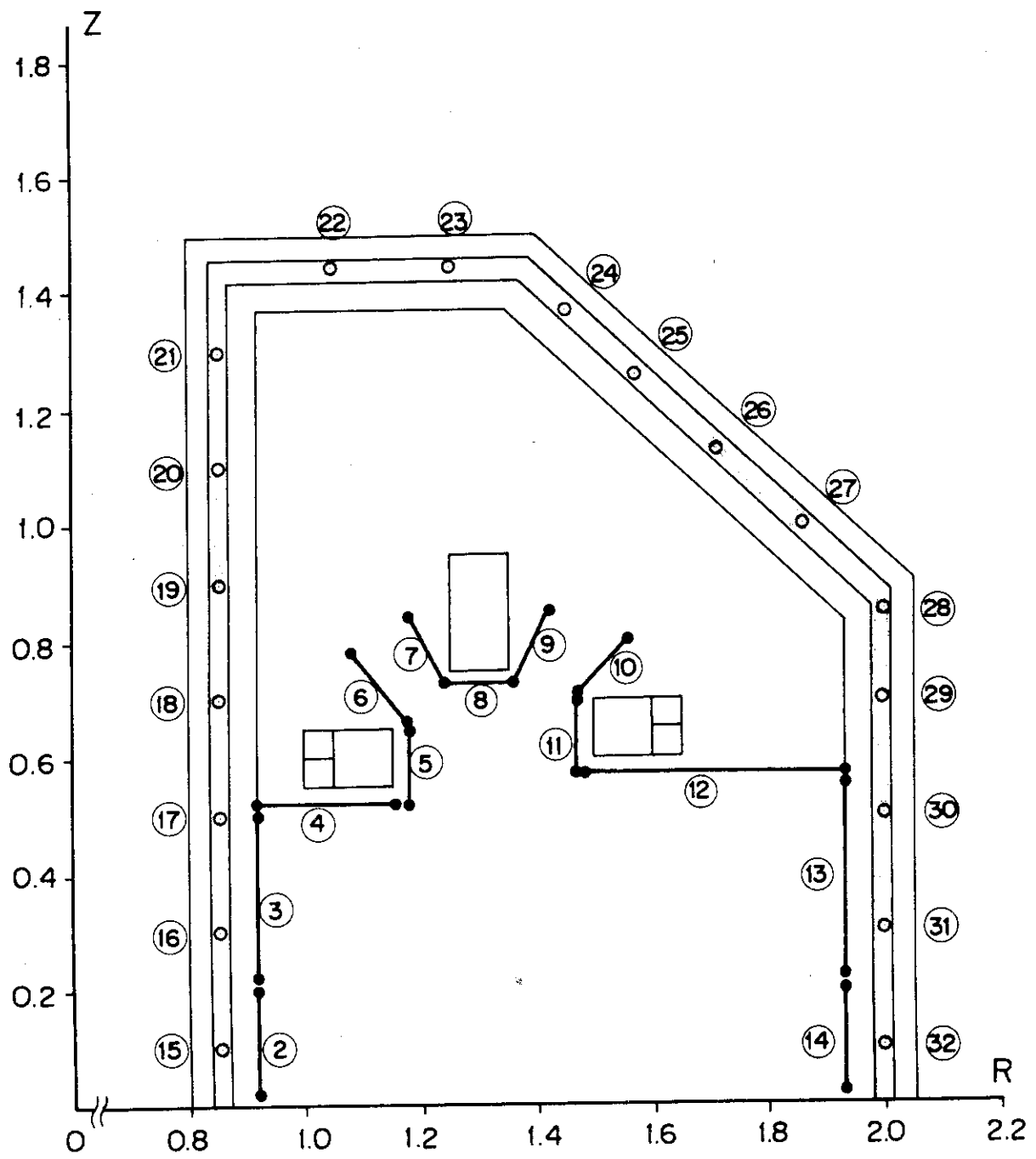
この結果により、厚さ5 mmのM。ライナでは、最大誘起電流が8 kA(④)となる。ただし、ライナは大周方向に一様ではない。長方形の板で構成されているとすれば、誘導電界の加わらない辺(子午面内の辺)の電気抵抗分だけ誘起電流が減少し、長方形板のトロイダル方向の辺の長さをa、他辺をbとすれば、誘起電流は第付7.1表の値のa/(a+b)に減少する。正方形の板を仮定すると、誘起電流は、8 × 1/2 = 4 kA、したがって、子午面内の辺に加わる電磁力は、

$$I \times B_T = 4 \times 3 = 1.2 \text{ ton/m}$$

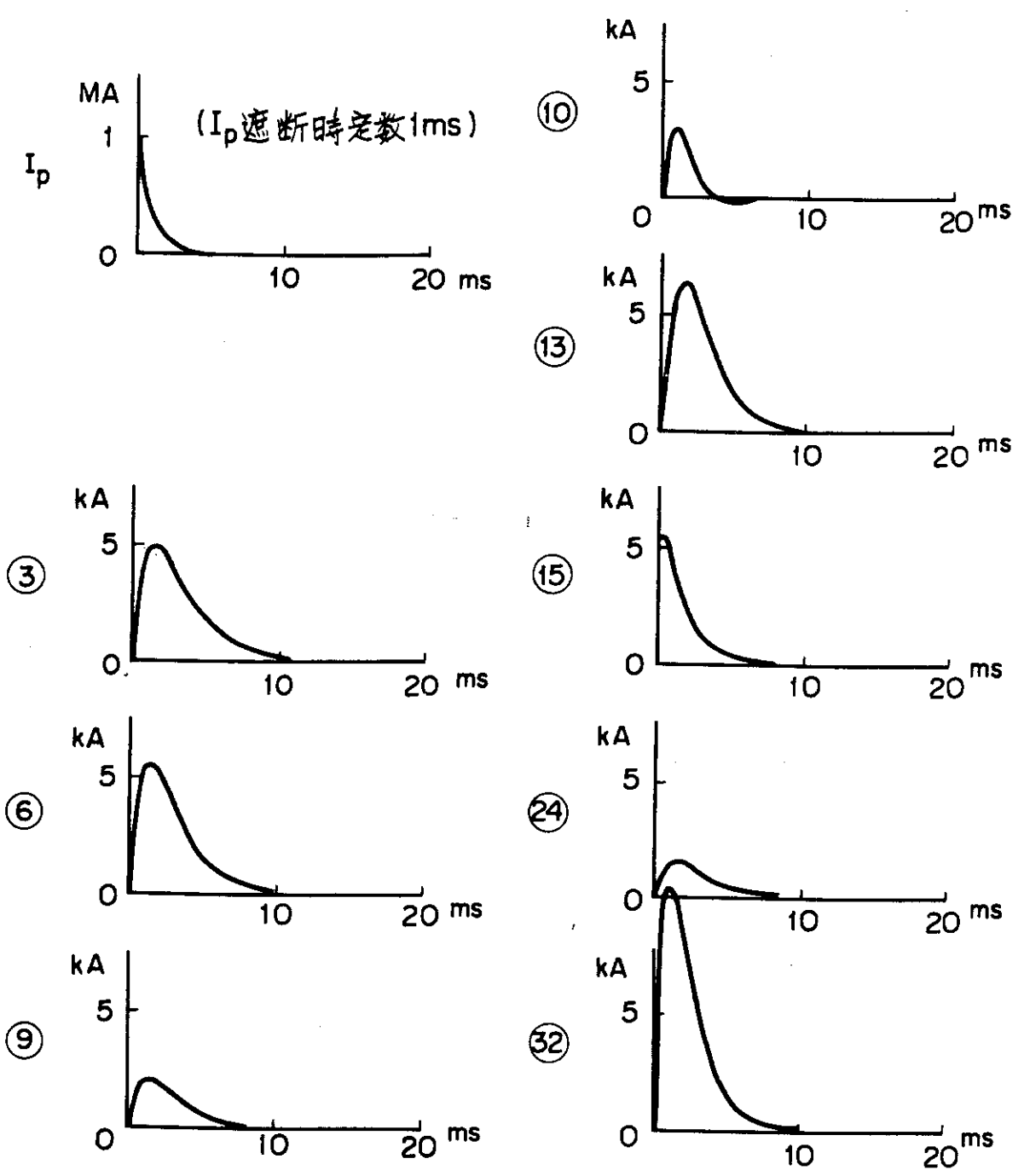
である。

また、第付7.1表より、ライナをSUSとすれば、電磁力は1/5程度に低減されることが分る。

1) 嶋田隆一 他 JAERI-M 6469 (1976)



第付 7.1 図 真空容器，ライナの等価コイル



第付 7.2 図 誘起電流波形

第付7.1表 誘起電流のピーク値 (kA)

付7.1図 の番号		ラ イ ナ 材		
		M ₀ 2 mm	M ₀ 5 mm	SUS 5 mm
2	ラ	1.3	2.3	0.3
3		3.2	5.1	1.0
4		4.8	8.2	1.5
5		2.7	4.7	0.8
6		3.1	5.6	0.9
7		イ	2.1	3.8
8	0.9		2.0	0.2
9	1.5		2.2	0.5
10	ナ	1.7	3.1	0.5
11		2.8	5.1	0.8
12		2.5	2.7	1.2
13		3.5	6.2	0.9
14		1.2	2.2	0.3
15	真空容器	6.9	6.7	7.2
16		6.1	6.0	6.3
17		5.2	5.3	5.0
18		3.9	3.9	3.8
19		2.8	2.9	2.8
20		2.1	2.1	2.0
21		1.6	1.6	1.5
22		1.8	1.8	1.8
23		2.3	2.3	2.3
24		3.0	3.0	3.0
25		3.6	3.6	3.6
26		4.4	4.4	4.4
27		5.2	5.3	5.2
28		6.1	6.1	6.1
29		7.0	7.1	7.0
30		8.6	8.7	8.6
31		10.3	10.0	10.5
32		11.5	11.1	11.8

付録8 Tコイル接続部構造案

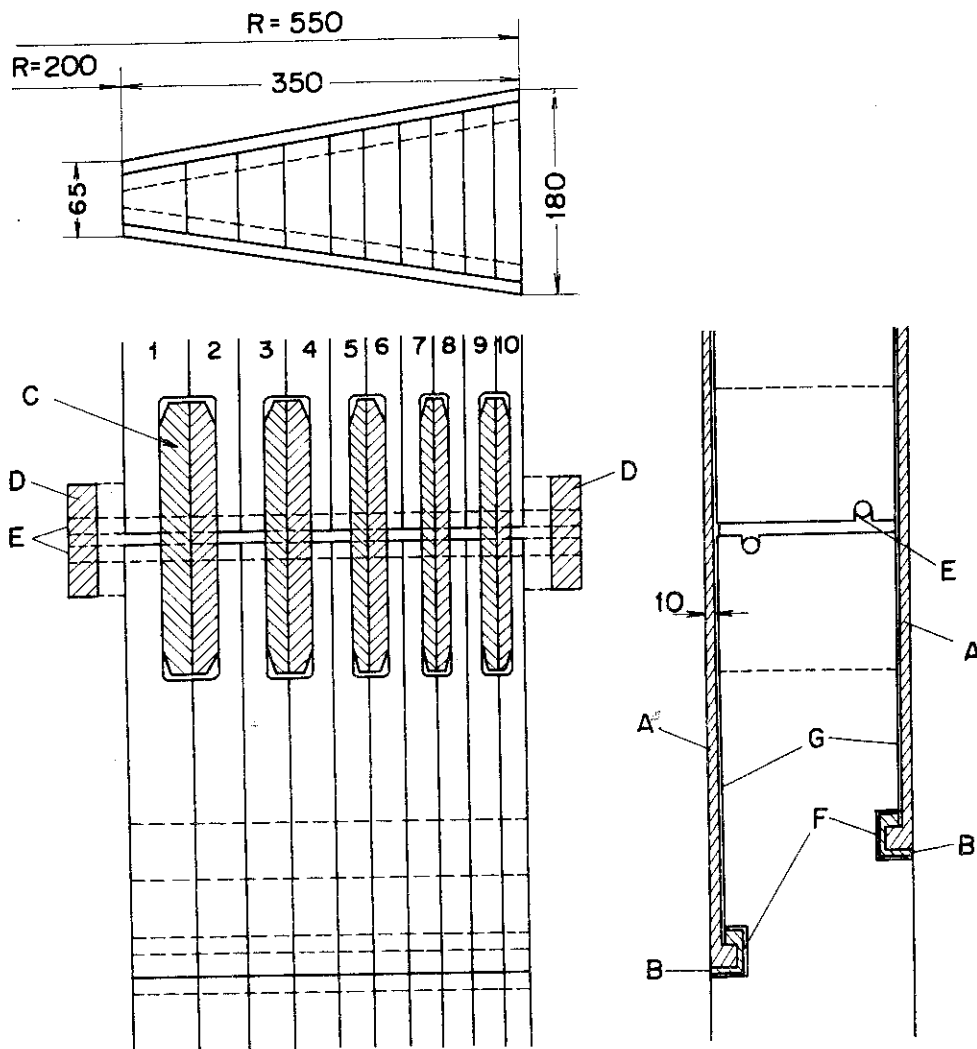
予備設計において各社によりTコイル接続部の設計が行われたが、いずれも満足できるものではない。各社の案の長所を集め、改良を加えた案をここに示して今後の検討の材料としたい。考慮した点は次の通りである。

- (1) コイルをキャンで固定する場合、導体の熱膨張がキャンで抑えられるため、通電後の発熱による熱応力（圧縮）が大きい。
- (2) 電氣的接続を行う接触面はすべると考えるべきである。銀メッキがあるとなおすべり易い。
- (3) (1), (2)より、コイルをキャンで固定する場合には、通電時の張力と通電後にピークのある熱応力（圧縮）を受けるため、接触面は往復運動をくり返すことになる。
- (4) コイルとキャンを固定する絶縁材の変形、歪がある場合には、(3)の往復運動（のストローク）は、さらに激しくなる。絶縁材の性質、特に経年変化には不明確な点があり、絶縁材を介した固定に頼る方法は避けた方が良くであろう。
- (5) 接続部以外では（導体断面積をフルに使えば）電磁力（フープカ）による張力は、導体自身で充分耐えることができる。
- (6) 接続部では、導体の有効断面積が半分となり、如何なる構造でも応力が 10 kg/mm^2 を越えるため、導体自身で張力に耐えることは避ける方が良く。（高耐力銅は電気抵抗が高い）
- (7) 第4.5.4図D, Eのように、導電率の低い材料に電流を流し、かつ大きな応力を加えることは好ましくない。（材料の使用実績などの点で不安。）
- (8) (1)~(5)の点より、接続部以外はできる限り無拘束として、キャンなどで固定しない方が良くであろう。
- (9) 絶縁層をはさんだ多層の導体に貫通穴をあけることは、工作時の変形（びれ）、切り粉などによる絶縁破壊の心配があり、避けるべきである。

以上の考察から、接続部では電氣的接続と機械的接続を分離して、機械的接続には導体以外の接続用部材を使用し、また接続部以外では無拘束として導体自身でフープカに耐える案を第付8.1図に示す。電氣的接触は接続用挿入板Cによって行い、機械的接続はインコネル板Aによって行う。導体の溝加工の工作誤差は、接続用挿入板Cを上下の溝に合わせて加工することで解決できる。接触面はボルトEによって締め付ける。Dはボルトのためのタップ板（インコネル）である。インコネルの溝板Bは、絶縁物Fを介して導体の中に埋め込まれる。接続用部材Aは、溝板Bの中にはめ込まれて、上下の導体を機械的に接続する。この構造によって、接続時に導体ターン間絶縁を心配することなしに、接続用部材Aをはめ込むことができる。溝板Bの位置、およびボルトEの位置は、導体断面積の狭い部分（溝板Bの部分）では、1ターンBの位置、およびボルトEの位置は、導体断面積の極小部分を作らないように、上下にずらす。最も導体断面積の狭い部分（溝板Bの部分）では、1ターン当りの断面積は 290 mm^2 であり、電流密度は 41 A/mm^2 に達する。溝板Bがなく、接続板Aのある部分での平均電流密度は 33 A/mm^2 である。予備設計の中には、電流密度が 33 A/mm^2 の案もあり、ここに示した構造案の電流密度は過大とは言えない。必要な場合には、通電時間を1秒短くする程度で熱的

な問題は解決できる。電流密度の過大な部分をつくらないために、溝板 B の部分で各ターンの断面積が等しくなるように各ターンの導体厚みを決定すること、なども考えられる。

機械的接続板 A の平均引張り応力は 34 kg/mm^2 であり、充分耐えることができる。強度の点では、絶縁層 F が問題であり、ここには平均 30 kg/mm^2 程度の圧縮応力が加わる。溝板 B への接続板 A の挿入は、金属面同志のすべりであり、問題はない。溝板 B と挿入板 A との接触面、および B と導体との接触面は、僅かな傾斜をつけて外れることを防ぐ。A と B の間のあそびは、第 1 回目の通電で接続部が僅か移動して固定され、その後くり返して移動することは避けられる。



第付 8.1 図 T コイル接続部構造案

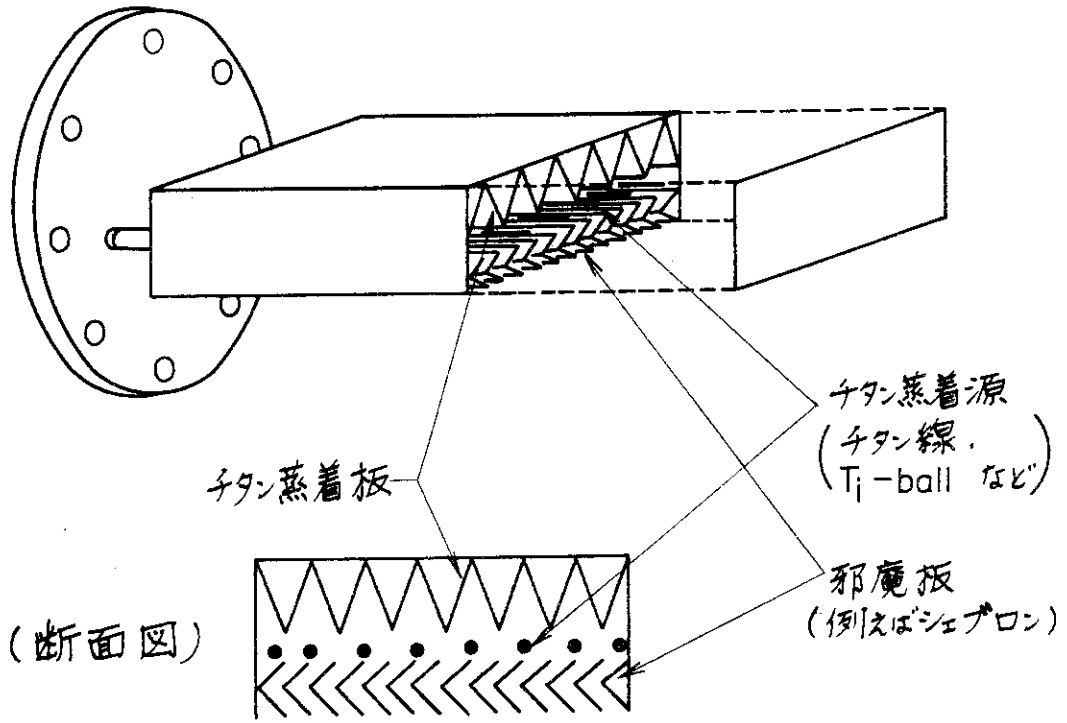
付録9 アイデア

9.1 カートリッジ型チタンゲッター・ポンプ

予備設計では、ダイバータ用の高速排気装置として、装置内面を汚さず、変換可能な SORBA C を候補とした。しかし、SORBA C は、温度によってガスの吸収あるいは放出（再活性化）を制御する装置であり、ベーキングなど他の目的で温度が決められる場合には、制御が困難となる可能性がある。また、SORBA C の吸着面の表面付近がガスで飽和した場合には、短時間でも高いガスロードを吸収することができない。さらに、多数の SORBA C を同時に使用する場合、一部はガスを放出し、他はガスを吸収する、というような複雑な現象が起る可能性がある。これらの点では、チタンゲッター・ポンプの方が制御が容易であり、また新しいチタン面を蒸着するので表面層の飽和の問題も少なく、SORBA C よりも優れている面がある。ただし、従来のチタンゲッター・ポンプでは、チタンを器壁に付着させるので、一度チタンを蒸着したらその後はチタンをとり除くことが困難であり、また厚く付着させた場合にはチタンの薄膜がはがれてプラズマ中に混入する恐れもある。そこで、第付 9.1 図に示すように、任意形状の邪魔板で囲まれた容器の中でチタンを蒸発させ、装置の内壁をチタンで汚すことを避け、また取り出しあるいは変換を容易にすることが考えられる。邪魔板としては、シェブロンなど、トラップに使用される形状など、コンダクタンスの高いものを使用する。チタン蒸発源としては、チタン線、T₁ ボールなど、市販されているものがある。排気速度はほとんど邪魔板のコンダクタンスで決まり、大きな値を得ることができる。全体の形状は自由に製作することができる。チタン面の吸着率を 0.4 (H)、0.14 (H₂) とすると、約 30°C のときに、H に対して 70 l/s・cm²、H₂ に対して 3 l/s・cm² の排気速度を得られるが、同図のように、「ひだ」によってチタン面積を大きくすれば、排気速度は邪魔板のみによって決る。同図の場合、シェブロンの透過率は 1/4 であり、30°C のときに H₂ に対して 25 l/s・cm² まで得ることができる。この装置で、10⁶ l/s (30°C, H₂) を得るためには 20 cm×100 cm の目隠板面積が 20 個必要である。

9.2 電源装置用 L および空心変圧器

電源装置には、L あるいは変圧器が必要となる場合が多いが、核融合装置では大電流大電力を扱い、空心の巻線を使うことが多く、しかも給電線での電力損を減らすため、装置本体の近くに設置することがある。この場合、空心の巻線によって発生する磁束がプラズマあるいは計測器に影響を及ぼす危険がある。この対策としては、トロイダル型コイルを使用することが考えられる。トロイダル型コイルはエネルギー密度が高く、小型で所要の容量を得ることができ、しかも洩れ磁場が少なく、空心の L あるいは変圧器として適している。



第付 9.1 図 カートリッジ型チタンゲッター・ポンプ

付録10 レーザ散乱計測の検討

J T - 4 における T_e , n_e の測定は、空間分解能のよいレーザ散乱計測を中心にしたと考えている。

ポートの配置を第5章の図に示したように、R方向分布は、プラズマ中心面に接線入射するレーザ・ビームからの散乱、Z方向分布は、3本の垂直ポートのいずれかを通すレーザ・ビームからの散乱を測定する。散乱光測定の見込み角は $f = 9$ 以上と予想される。散乱角は $45^\circ \sim 135^\circ$ の範囲内である。

JAERI-M 5515 (以下、文献①) に従って散乱光の検討を行う。

(1) a , β パラメータ

$$n_e = 10^{12} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

$$T_e = 100 \sim 2000 \text{ eV}$$

$$\frac{n_e}{T_e} = 1 \sim 2.5 \times 10^{12} \text{ m}^{-3} / ^\circ\text{K}$$

①の第1図(a)より、 $\theta > 15^\circ$ ならば $a \ll 1$ となり、トムソン散乱である。

また、 $B = 3 \text{ T}$, $T_e = 100 \sim 2000 \text{ eV}$

$$\frac{B^2}{T} = 10^{-5} \sim 10^{-6}$$

①の第2図(a)より、 $\beta = 2 \sim 8 \times 10^{-3}$

したがって、第付10.1図において、 $\phi < 0$, $1 \sim 0.5^\circ$ のとき、 ω_{ce} のスペクトルが第付10.2図のように出る。しかし、実際には、レンズの見込み角で平均化され、測定には現れない。

第付10.1図で、 K_i は入射光、 K_s は散乱光の波数ベクトルである。

(2) 所要レーザ光強度

散乱光強度 $>$ 散乱光測定体積での制動放射光強度 $\times 100$

として、所要強度を求める。倍率100は、ライン発光、光電管のショット雑音などを含めた安全率である。

すると、上記のプラズマでは、①の第14図(a)より、ビーム径3.6 cmのとき、 $P > 500 \text{ MW}$ となる。ビーム径はもう少し絞れる。1 cm $^\phi$ とすれば、40 MWで足りる計算となるが、プリズムなど光学系の損失、プラズマ発光の強度など、十分に余裕をとって、やはり500 MW程度準備しておく方が良いであろう。

測定できる光子数は、実効レーザ・パワーを300 MWとすると、

$$n_e P = 3 \times 10^{26} \text{ W/m}^3$$

$$dz = 1 \text{ cm}$$

$$d\Omega = \frac{\pi}{4f^2} = 10^{-2} \text{ (} f = 9 \text{)}$$

①の第13図(a)より、 $\frac{N_s}{\tau_s} = 5 \times 10^{12}$

レーザ光の時間巾 τ_s を 20 ns とすると、測定光子数 N_s は、

$$N_s = 10^5$$

となる。($N_e = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$)

(3) 散乱光の波長

散乱光波長の半値巾は、

$$\Delta \lambda_{\frac{1}{2}} = K \cdot T_e^{\frac{1}{2}}$$

Kは、①の第5図より $0.2 (\theta = 60^\circ) \sim 0.3 (90^\circ)$ である。 T_e は $^\circ\text{K}$ 単位。

したがって、

$$\Delta \lambda_{\frac{1}{2}} = 1340 \text{ \AA}$$

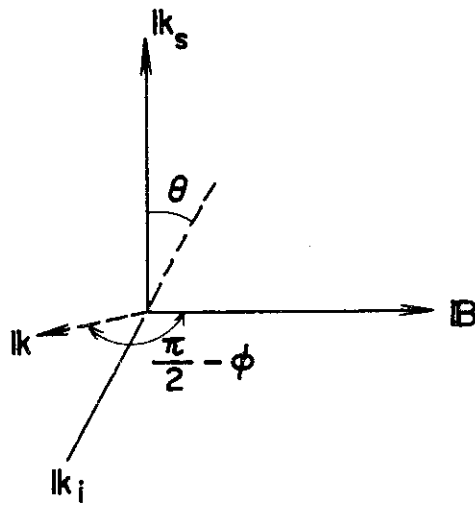
片側のみを分光するとすれば、 700 \AA である。

したがって、分光器は 700 \AA 以上の測定範囲をもつ必要があり、 1500 \AA 程度あることが望ましい。温度の低い方では、 100 eV のときに、 $\Delta \lambda_{\frac{1}{2}} = 300 \text{ \AA}$ となり、この場合にも分解能をもつ必要がある。

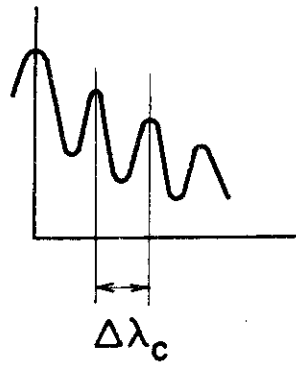
以上の検討により、分光器としては、 150 \AA の間に4点程度入り、 1500 \AA 程度の可測範囲をもつ、不均等波長区分をもつものがよいであろう。その例を第10.3図に示す。

(4) その他

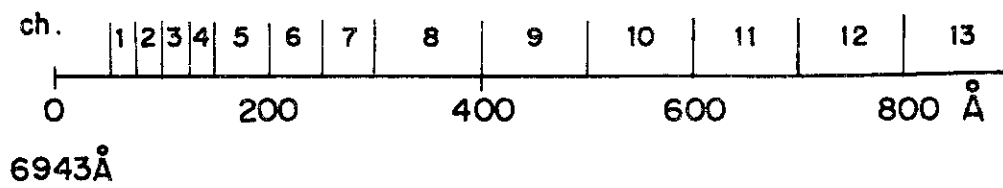
その他の検討事項としては、装置をできる限りコンパクトに設計すること、多くの測定例で有効性が示されているノッチフィルタ(レーザ光波長を除外するフィルタ)を設けること、あるいは、測定器感度の高い波長(ルビーまたはレーザの2倍高調波)を用いることなどの点が挙げられる。



第付 1 0.1 図 散乱光のベクトル関係



第付 1 0.2 図 散乱光スペクトルの微細構造



第付 1 0.3 図 分光器の波長帯分割案