

中間ベータ値 トーラス装置“JFT-2”

Medium Beta Torus “JFT-2” for Nuclear Fusion Research

Recently, Hitachi completed TOKAMAK type medium beta torus “JFT-2” (JEARI Fusion Torus-2) and delivered to the Japan Nuclear Power Research Institute. The equipment will play a vital role in the research in nuclear fusion which is being pushed forward as one of the most important national projects.

The new equipment far excels the older types not only in capacity but in characteristics. The article introduces its outline and technical problems involved.

加沢義彰* Yoshiaki Kazawa

橋本 宏* Hiroshi Hashimoto

和世啓三* Keizô Wase

1 緒 言

世界における最近の核融合研究はソ連で開発されたトカマク型装置を中心に発展を遂げ、核融合炉の実現に一步一步近づきつつある。わが国でも大学における基礎研究を推進するとともに原子力委員会の開発計画に基づき日本原子力研究所が主体となり強力に開発研究を進めている。“JFT-2”(JAERI Fusion Torus 2)はこの国家プロジェクトの中心となるわが国初めての本格的なトカマク型核融合研究装置であり、その技術面、規模、研究領域(わが国初の中間ベータ値トーラス装置)において従来のわが国の実績を大きく越えている。また基本計画に際してはわが国のこの領域での貢献に対する国際的な期待にこたえて外国の装置にない多くの新しい試みがなされている^{(1)~(4)}。このために、われわれは日本原子力研究所の研究陣と協力し、綿密な調査と技術開発を先行し、問題点を把握(はあく)して部分試作を重ねながら設計、製作を行ない、短期間(外国の実績のほぼ半分)で完成できた。われわれは日本原子力研究所のヘキサポール形トーラス装置“JFT-1”⁽⁵⁾、名古屋大学プラズマ研究所のステラレータ“JIPP”⁽⁶⁾、京都大学の「ヘリオトロンD」⁽⁷⁾と日本の代表的なトーラス型核融合装置の建設を担当してこの分野での技術力を蓄積してきたが、“JFT-2”の完成により大型磁界装置、放電管、超高真空、電源制御装置など、核融合炉につながる基礎的な技術を把握開発し深め得たと確信している。“JFT-2”はこれらの技術面での進歩と今後の運転研究による成果で人類の手にする究極のエネルギーといわれている核融合研究に大きく貢献することが期待される。

2 装置の概要

“JFT-2”本体部を示す模式図は図1に、その外観は図2に示すとおりである。コンデンサ電源にたくわえられたエネルギーを変流器一次巻線を通じて放電させ1ターンの二次巻線に相当する真空容器中のプラズマに大電流を流しジュール加熱をする。プラズマの閉じ込めはトロイダルコイルが作るトロイダル磁界 B_t とプラズマ電流自体が作るポロイダル磁界 B_p を主体として行なわれる。しかし、これだけではトーラス効果のためにトーラスの内側の磁界が外側の磁界よりも強くなるために、トーラス径を大きくするようなフープ力が作用しプラズマは真空容器壁に接触してそのエネルギーを失う。これを避けるために垂直磁場コイルにより垂直磁界 B_v を加え、

プラズマ電流 I_p に作用するローレンツ力 $I_p \times B_v$ によってこのフープ力と釣り合うようにして閉じ込め性能を向上している。また、真空容器の外側にこれを包み込むようにシェルと称する導電性円環殻を配置してプラズマがなんらかの不安定化力で真空壁のほうへ移動してきたとき誘導で生ずる影像電流でこれを押し返す働きをさせる。

“JFT-2”の主要諸元は表1に示すとおりである。核融合装置の基本性能の目安としてはイオン温度 $T_i(\text{keV})$ 、エネルギー閉じ込め時間 $\tau_e(\text{ms})$ 、プラズマの密度 n などが重要であるが、トカマク型装置では前二者について実験と理論面の検討結果に基づき、次のような比例法則がソ連邦のArtsimovichにより提案されている⁽⁸⁾。

$$T_i \cong 1.26 \times 10 \times a^{4/3} \frac{a}{R} \cdot \frac{B_t}{q} (\text{keV}) \dots\dots\dots(1)$$

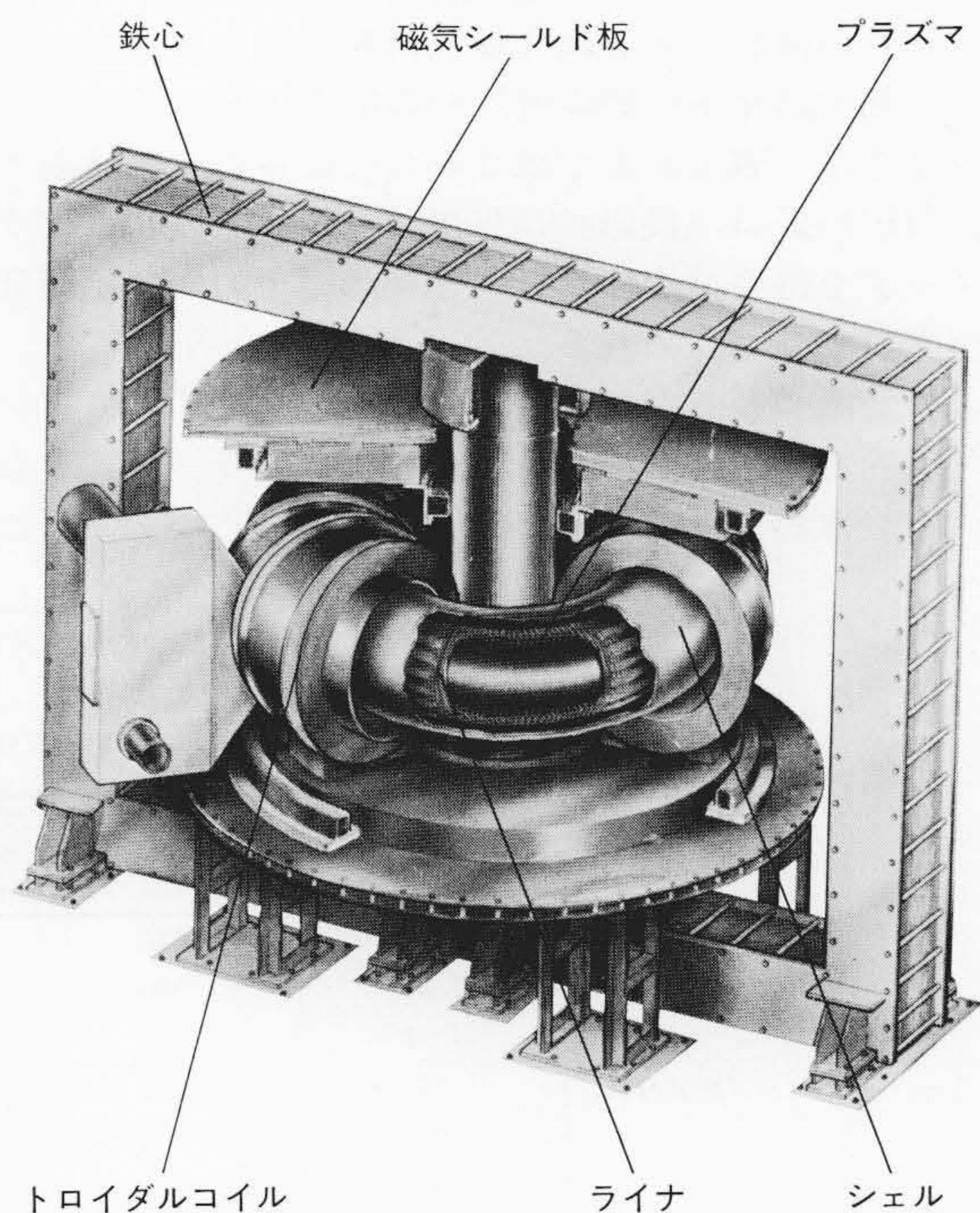


図1 “JFT-2”本体模式図 外国のトカマク型核融合装置とほぼ同様の構成部品から成るが、磁気シールド板が設けられていることなどが外観上の特徴である。

Fig. 1 Artist's View of JFT-2

* 日立製作所日立工場

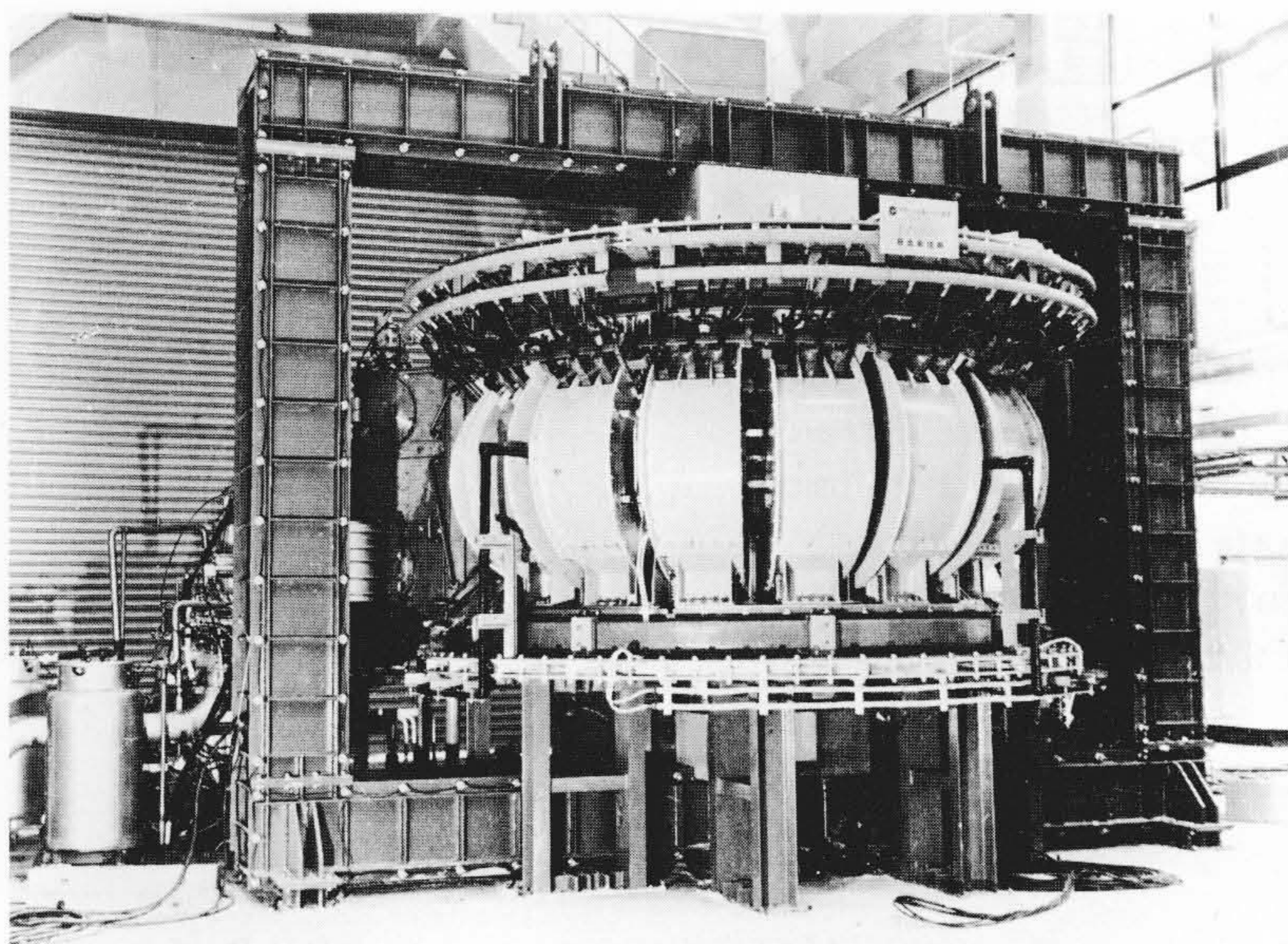


図2 装置の外観 JFT-2本体部分の全景であり、電源、制御装置類は別室に設置されている。

Fig. 2 View of Installed “JFT-2”

表1 “JFT-2”の主要諸元 JFT-2 のおもな仕様数値を示す。

Table 1 Principal Specification of “JFT-2” (寸法単位：mm)

	項 目	数 値
ラ イ ナ	平均主曲率半径	900R
	内 径	600φ
	外 径	630φ
	抵 抗	$1.5 \times 10^{-3} \Omega$ 以上
シ ェ ル	内 径	700φ
	厚 さ	30t
	材 質	アルミニウム
リ ミ タ	手動型リミタ	500, 400, 327φ
	ダイナミックリミタ	570, 400φ
変 流 器	鉄心断面	0.58V-S
	一次巻線巻数	200T(136, 68タップ)
	一次電流(最大値)	5,000A
	直流バイアス	16T×100A
	励磁コンデンサ	210kJ 20kV
トロイダルコイル	起磁力	$6.75 \times 10^6 AT$
	磁束密度	15kG
	内 径	1,020φ
	分割ブロック数	16
	励磁電源(10kG用)	6,030kWDCG
垂直磁場コイル	直流型	300G
	パルス型	300G
真 空 排 気 系	到達真空度	5×10^{-6} Torr
	方 式	オイルフリー

$$\tau_e \doteq 5.47 \times 10^3 \times a^2 \frac{a}{R} \cdot \frac{B_t}{q} \text{ (ms)} \dots\dots\dots (2)$$

$$q \equiv \frac{a}{R} \cdot \frac{B_t}{B_p} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 a ：プラズマ断面半径 (m) q ：安定係数
 R ：トーラス主半径 (m)
 B_t ：トロイダル磁束密度 (Wb/m²)
 B_p ：ポロイダル磁束密度 (Wb/m²)

この式の評価、確認は今後の研究に待たねばならないが、装置の基本諸元から到達可能な性能限界を推定する一つの目安にはなる。表1および表2からこれらの比例法則で推定すると“JFT-2”は現段階では世界のトップレベルのプラズマパラメータを得る可能性が見込まれ、原子力研究所研究陣のねらい^{(1)~(4)}がうかがわれる。

この装置のおもな技術的特徴は、

- (1) 電界を均一に保つためのライナをベローズ状として一重の真空容器の役割も兼ねさせる構造としてある。これによ

り経済的に太いプラズマとして性能向上と計測の便を図っている。

- (2) トロイダルコイルの幅を外側で大きく内側で小さくする独得なセクタ型とすることにより、プラズマ閉じ込め性能の重要な因子となるアスペクト比 ($\equiv \frac{R}{a}$) を3.2~3.6という現在の記録値とした。
- (3) 3種類のプラズマ径を決めるリミタを真空を破らずに外部からの操作で交換可能とした。
- (4) 精密な磁界分布を得るために変流器鉄心の漏れ磁束を遮蔽(しゃへい)する磁気シールド板を設けた。
- (5) 清浄な超高真空を得るために真空排気系はオイルフリーの分子ポンプ、イオンポンプなどで構成するわが国初めての完全ドライシステムとするとともに真空容器壁はジャケット内の加熱油と変流器一次巻線に通電して行なうジュール加熱を併用するベーキング方式である。

表2 おもなトカマク型装置の設計パラメータ 公表されている世界におけるおもなトカマクの表である。完成は当初の予定より遅れているものが多い。

Table 2 Design Parameters of Large TOKAMAK

国 名	装 置 名	主 半 径 R (mm)	プラズマ 半 径 a (mm)	アスペクト 比 R/a	トロイダル 磁 場 B_t (kG)	プラズマ 電 流 (kA)	完成予定
ソ 連 邦	T-3	1,000	170	~6	37	180	稼動中
	T-4	900	200	4.5	55	250	1971年春
	T-10	1,500	300	4.3	50		1955年
ア メ リ カ	ST	1,090	140	7.8	35	40	稼動中
	AT	900→380	170→110	5.3→3.4	20→48		稼動中
	PLT	1,350	450	3.0	50		1975年
	ORMAK I	800	230	3.5	25		1971年春
	ORMAK II	400	170	2.4	50	500	1971年夏予定
	ALCATOR	540	130	4.2	120		1971年予定
	Doub Let II	590	非円型		10	300	稼動中
フ ラ ン ス	TFR	980	200	4.9	60		1972年末
ド イ ツ	Pulsator	700	120	5.8	28	300	1972年春予定
日 本	“JFT-2”	900	285~250	3.2~3.6	15	200~300	稼動中

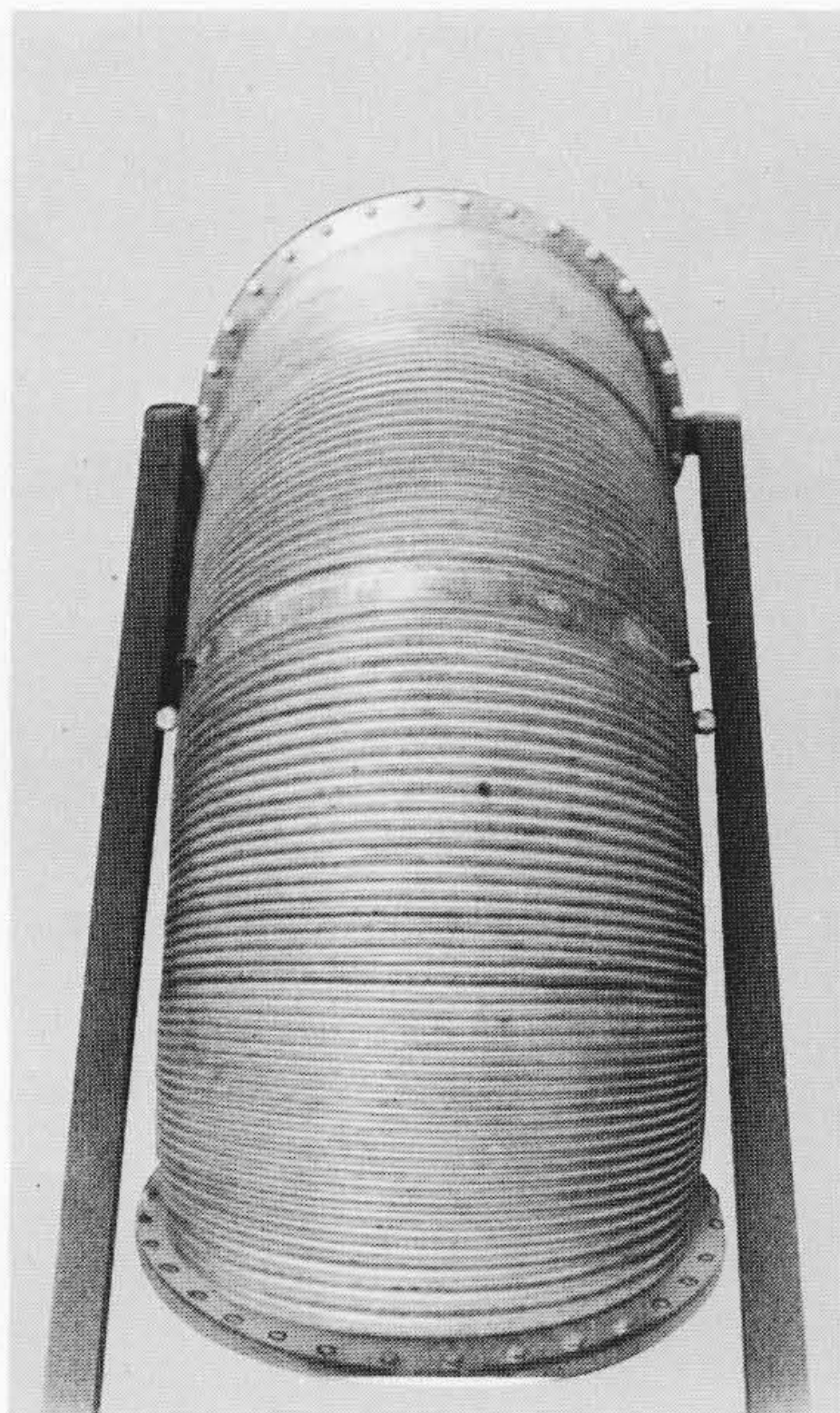


図3 ライナ ライナはベローズ状として抵抗の増加と外圧容器としての強度を確保し、一重の真空容器としてある。

Fig. 3 Liner

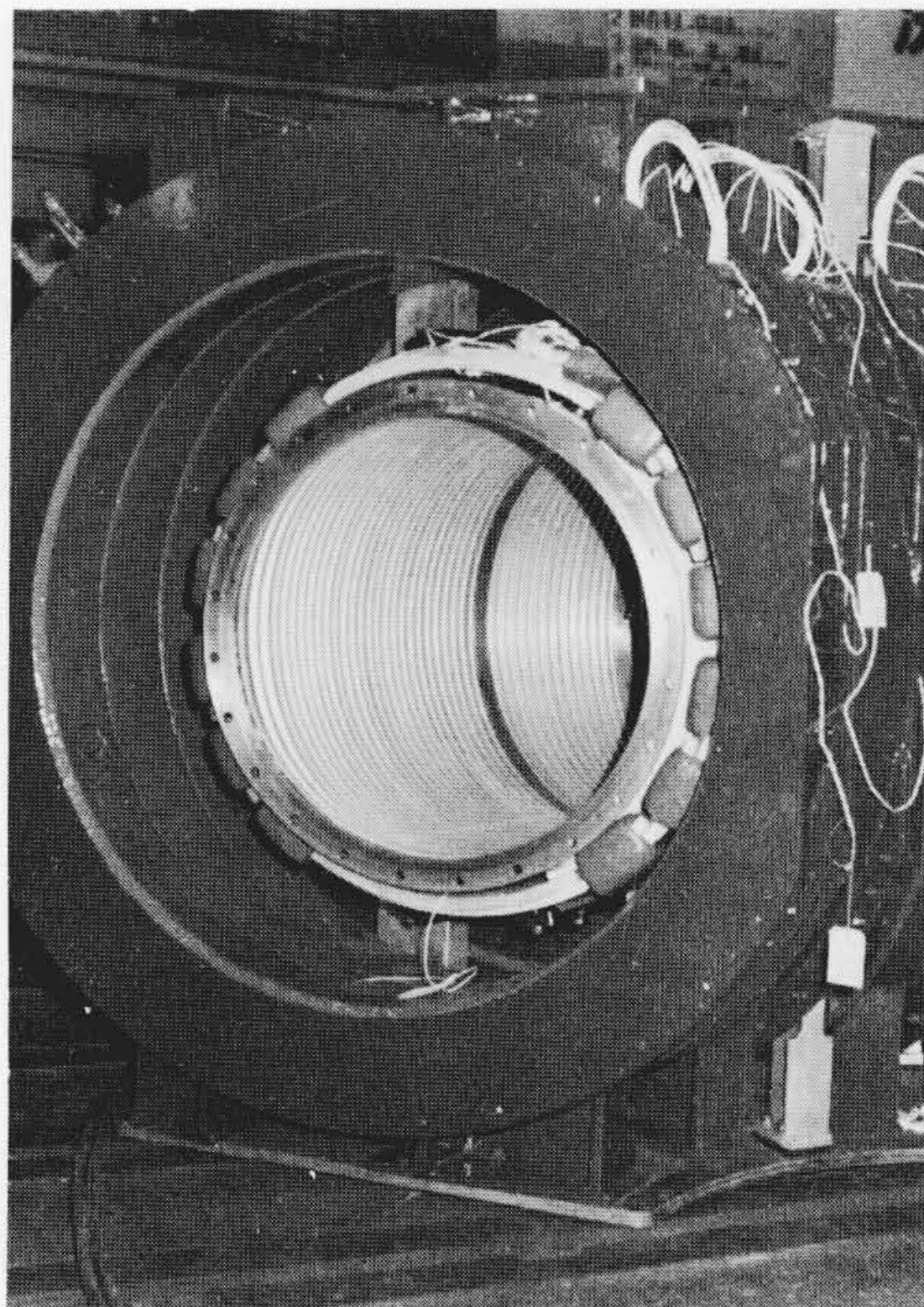


図4 ライナおよびトロイダルコイル プラズマの容器となるライナの内面とトロイダルコイルの一部を示す。

Fig. 4 Liner and Toroidal Coil

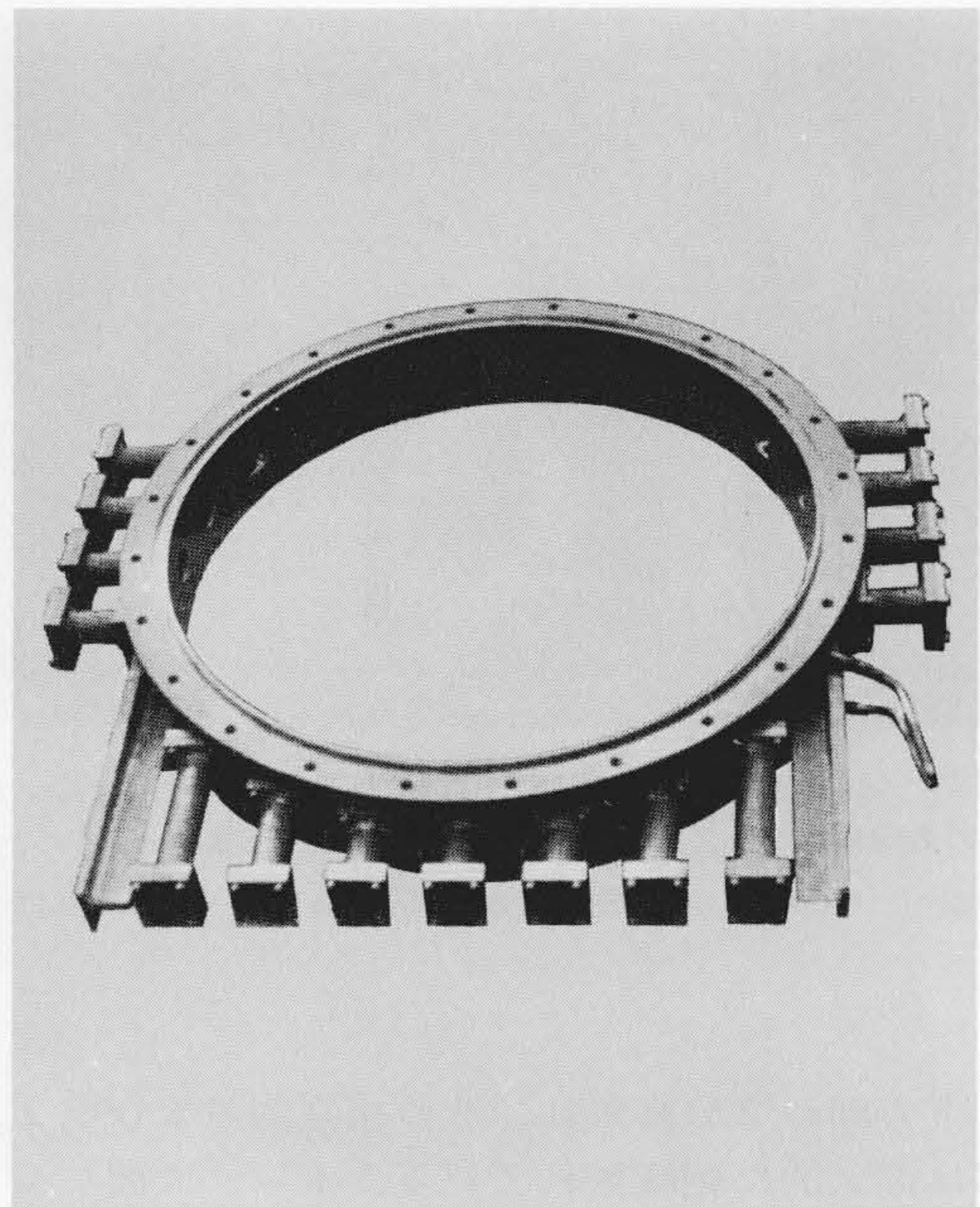


図5 ボックスB₃ 4個のプラズマ観測用ボックスの一つであり、垂直および水平方向に多くの観測窓を有し、プラズマの分光測定などに使用される。

Fig. 5 B₃ Box

3 真空容器と導電シェル

プラズマの閉じ込め空間を形成するトーラス状の真空容器は等分割された4個のライナ（図3～図4）と各ライナ間に設置される4個の観測用真空ボックス（図5）B₁～B₄から構成される。

ライナはボックスと組み合わされてプラズマと同様に変流器の二次1ターン回路を形成するが、この回路抵抗をプラズマの抵抗に比べてずっと大きくすることにより、わずかの電流を流してプラズマに加わる電界を均一にする役割も有する。このため厚み0.6mmのステンレス鋼でベローズ状に成形し抵抗の増加と外圧容器として、200°Cのベーキング時にも耐える強度を持たせた。しかし内径600mmφのトーラス状超薄肉ベローズであり、真空とした際の外圧と通電時の電磁力にトーラス効果に加わり複雑な応力分布となる。われわれはこの応力を許容値以下に押えるための支持構造の検討と詳細な応力計算を行なうとともにこれを確認するために実物大モデルを試作してひずみゲージによる応力分布の測定（図6）と通電ベーキング試験や「真空～大気開放」サイクルを1,000回以上繰り返した。さらに応力集中の大きいフランジ付近の等価モデルによる10⁷回以上の繰り返し荷重試験を行ない、その耐久性を確認して製作した。

ボックスはプラズマの測定ポート類や真空排気口を有する真空容器で、B₁～B₄の4個が四つのライナ間に1個ずつ設置される。このうちB₂ボックスはその側面に真空ポンプにつながるマニホールドが接続される。また、この内部には3種類の大きさのモリブデン板製リミタが配置されベローズでシールされたロッドを外部で操作することにより真空を破らないで交換できる。四つの観測用ボックスのほかに予備ボックスとしてダイナミックリミタ付きボックスやレーザ観測用ボックス等の専用ボックスがあり、観測用ボックスと交換して使用できる。ボックスおよびマニホールドは複雑な形状をしている

のでベーキングはジャケットに加熱油を流して過大な熱応力が生じないように、100°C前後に加熱する方式としている。

導電シェルはアルミニウム製としトロイダル方向に4分割、

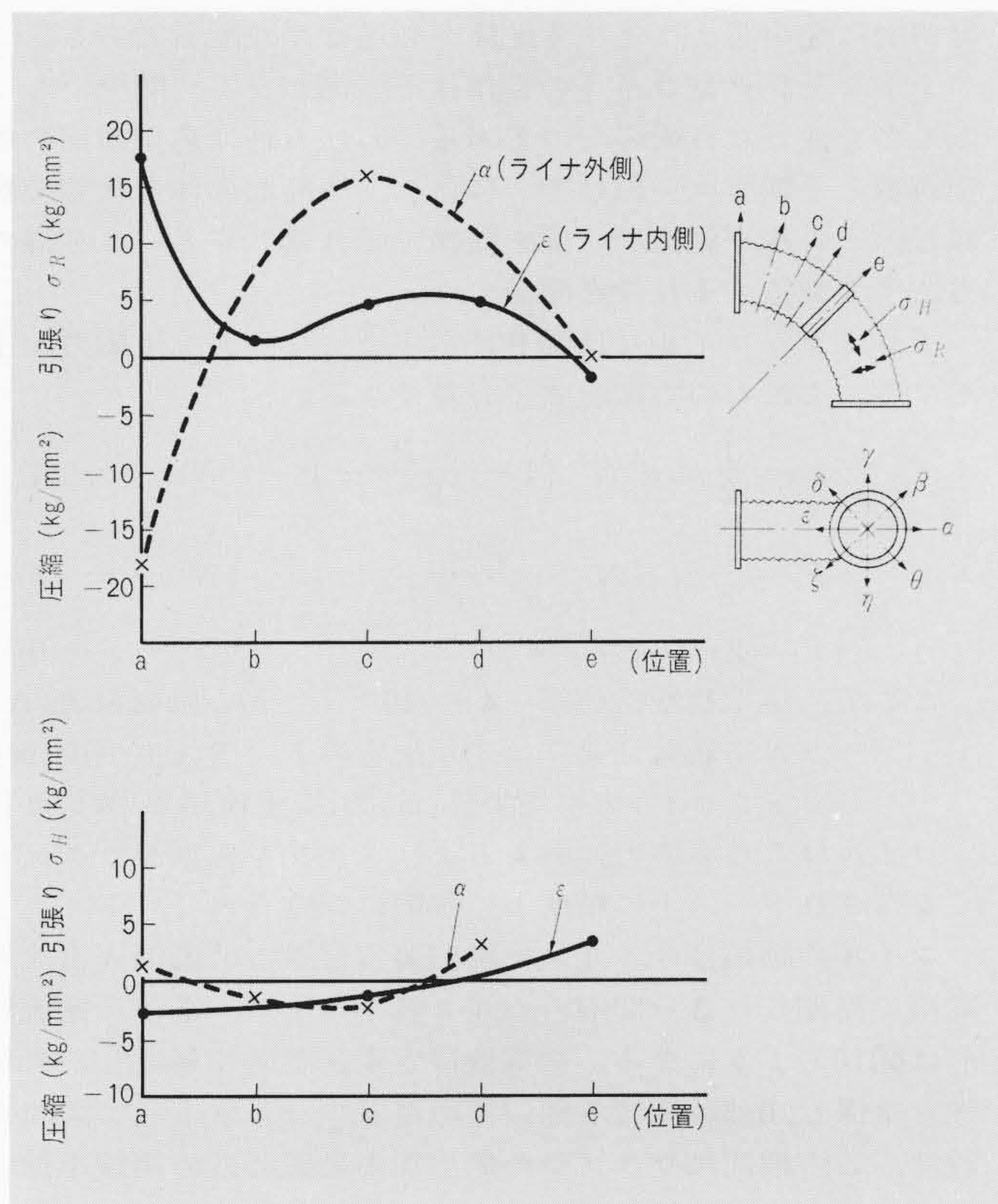


図6 真空時のライナ応力分布 ライナはトーラス効果のため、真空にしたときの外圧で複雑な応力分布を示す。図は、実物大モデルによる測定値である。

Fig. 6 Measured Stress Distribution of Evacuated Liner

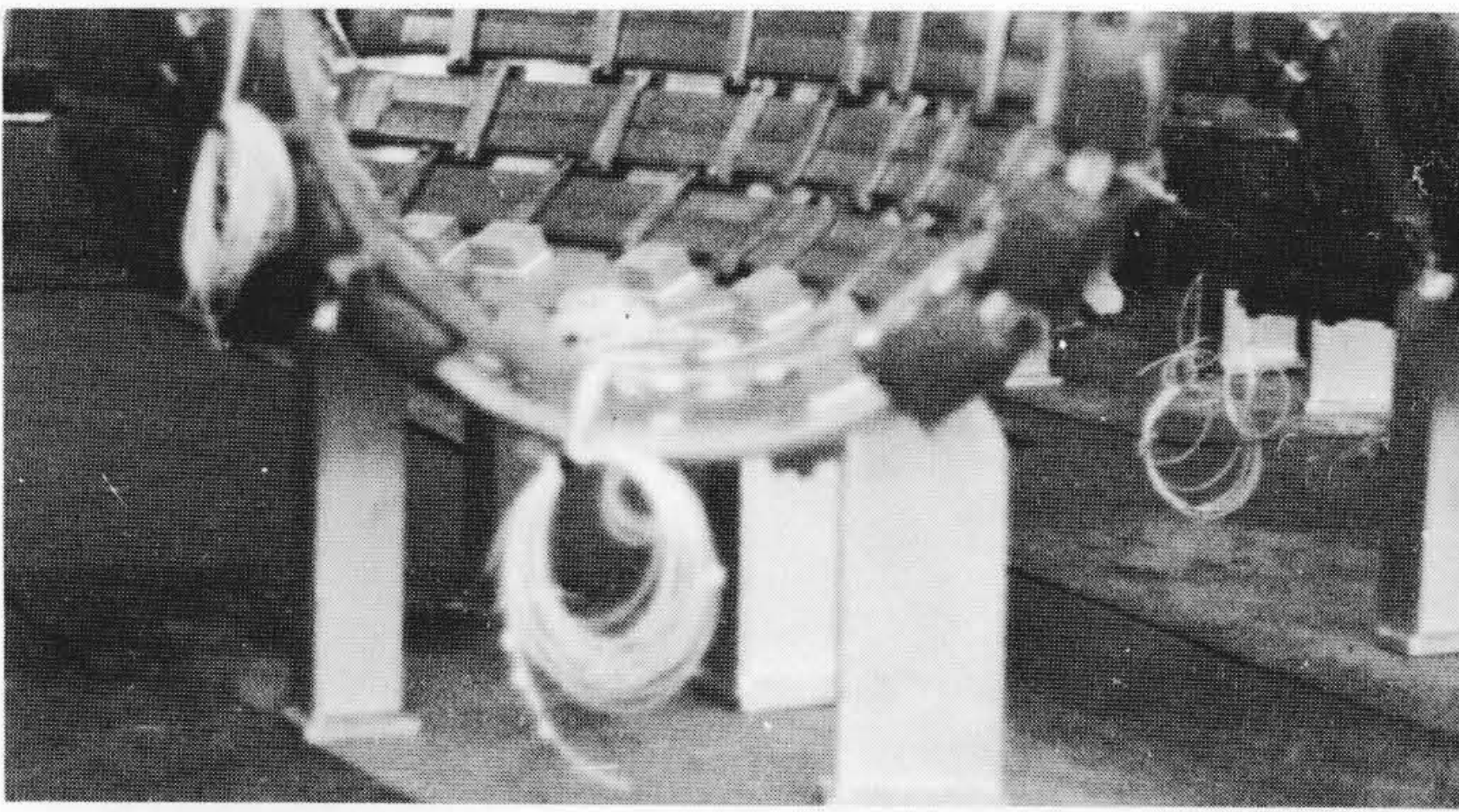


図7 シェルとパルス型垂直磁場コイル アルミニウム製シェルとこの内側に巻かれ、固定されたパルス型垂直磁場コイルの1/4セクションを示す
Fig. 7 Conducting Shell and Pulse Vertical Field Coil

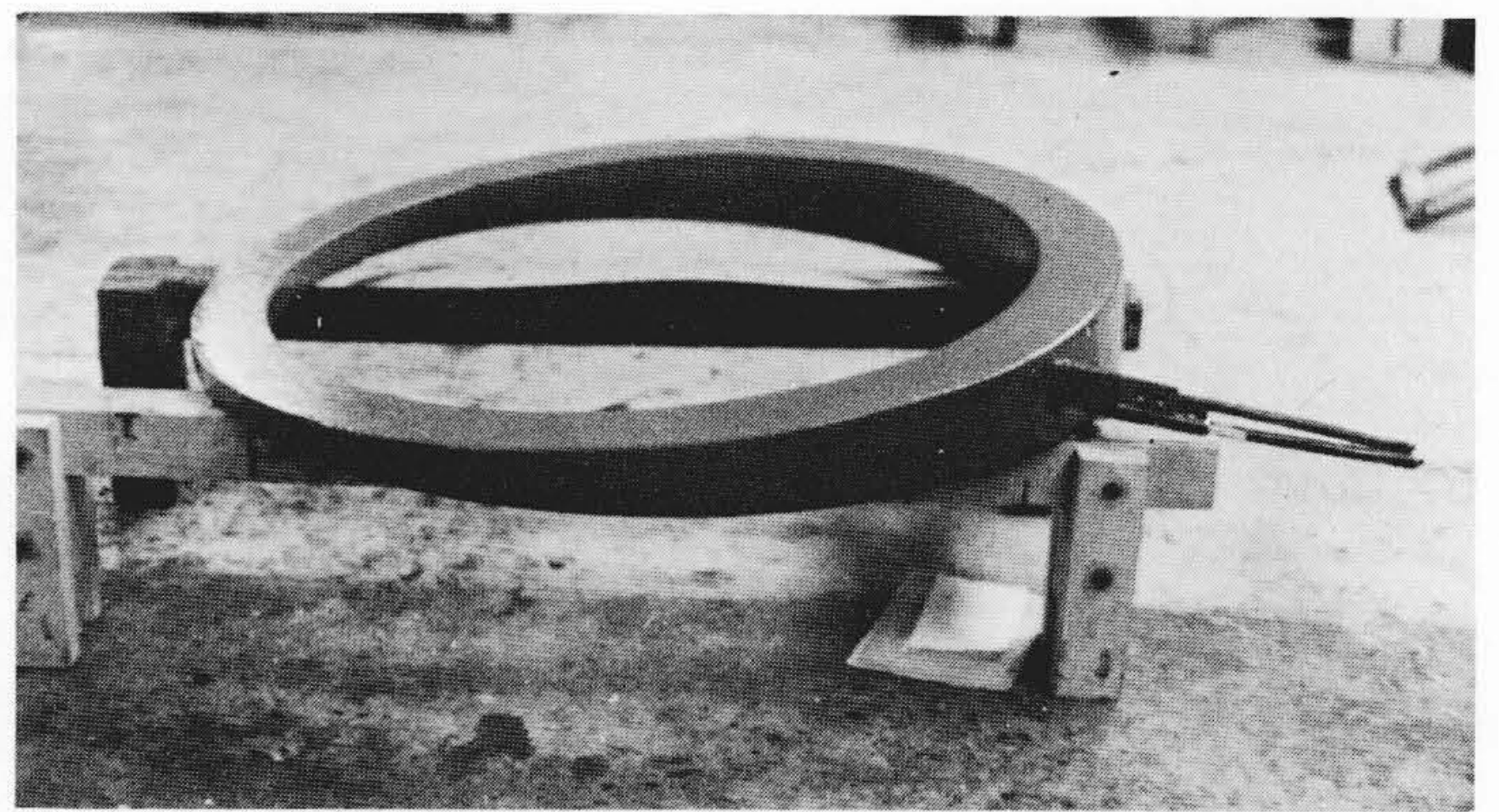


図8 トロイダルコイルユニット トロイダルコイルは導体断面がトラスの内側で小さくなるセクター形となっている。
Fig. 8 One Unit of Toroidal Coil

上下方向に2分割され、その相互間およびシェルとボックス間は電氣的に絶縁されている。ボックス間のシェル間ギャップを可能な限り小さくするためにシェルキャップをかぶせる構造としてある。また、シェルの内側にはコンデンサ電源で励磁するパルス型垂直磁場コイルが固定されている(図7)。

4 トロイダルコイル

トロイダルコイルは16ブロックに分割され、1ブロックはさらに3個のコイルユニットから成っている。コイルおよび導体は図8および図4に示すように幅がトラスの外側で大きく、内側で小さくしたセクター形となっている。したがって電流密度は内側で最大となる。これはアスペクト比を小さくするとともにスペースを十分利用して強磁界を電源も含めて経済的に発生しようとする配慮から選ばれた配置である。このようなセクター型コイルの製作はその例がなく、開発にもっとも力を注いだ技術の一つである。われわれは角型断面の中空導線と平銅をロー付けで一体化し、等断面導体の状態で巻線し、その後平銅部の一部を機械で削り落とすという独得の方法⁽⁹⁾で製造する技術を開発した。

トロイダルコイルには図9に示すような強大な電磁力が作用する。これらの力は次式で計算できる。

$$F_R = \frac{1}{2} \mu_0 i_T^2 N^2 \left(1 - \frac{R}{\sqrt{R^2 - r^2}} \right) \quad (\text{N}) \quad \dots\dots(4)$$

$$F_r = \frac{1}{2} \mu_0 i_T^2 N^2 \frac{r}{\sqrt{R^2 - r^2}} \quad (\text{N}) \quad \dots\dots(5)$$

$$F_\theta = 2rNi_TB_V \quad (\text{N}) \quad \dots\dots(6)$$

ここで、 μ_0 : 真空透磁率 $4\pi \times 10^{-7}$ i_T : 励磁電流(A)

N : 巻数 R : コイル配置のトラス主半径(m)

r : コイルの平均半径(m) B_V : 垂直磁界(Wb/m²)

コイルはこれらの力に耐えるようステンレス鋼製サポートで支持されベース上に精度よく強固に固定されている。

コイルの励磁はサイリスタ励磁装置付きの6,030kW直流発電機で周期5～3分間隔のパルス状に行ない、電圧、電流波形は図10のようになる。発電機は定電圧制御で繰返しの再現性を確保し、0.5秒間で5%以下の電流フラットトップ区間を設け、この期間にプラズマの発生加熱と閉じ込め実験を行なう。この方式では電流波形は次式で与えられる。

$t = 0 \sim a$ 間

$$i_{T1} = \frac{E\tau^2}{hL} \left\{ \left(\frac{t}{\tau} - 1 \right) + e^{-t/\tau} \right\} \quad (\text{A}) \quad \dots\dots(7)$$

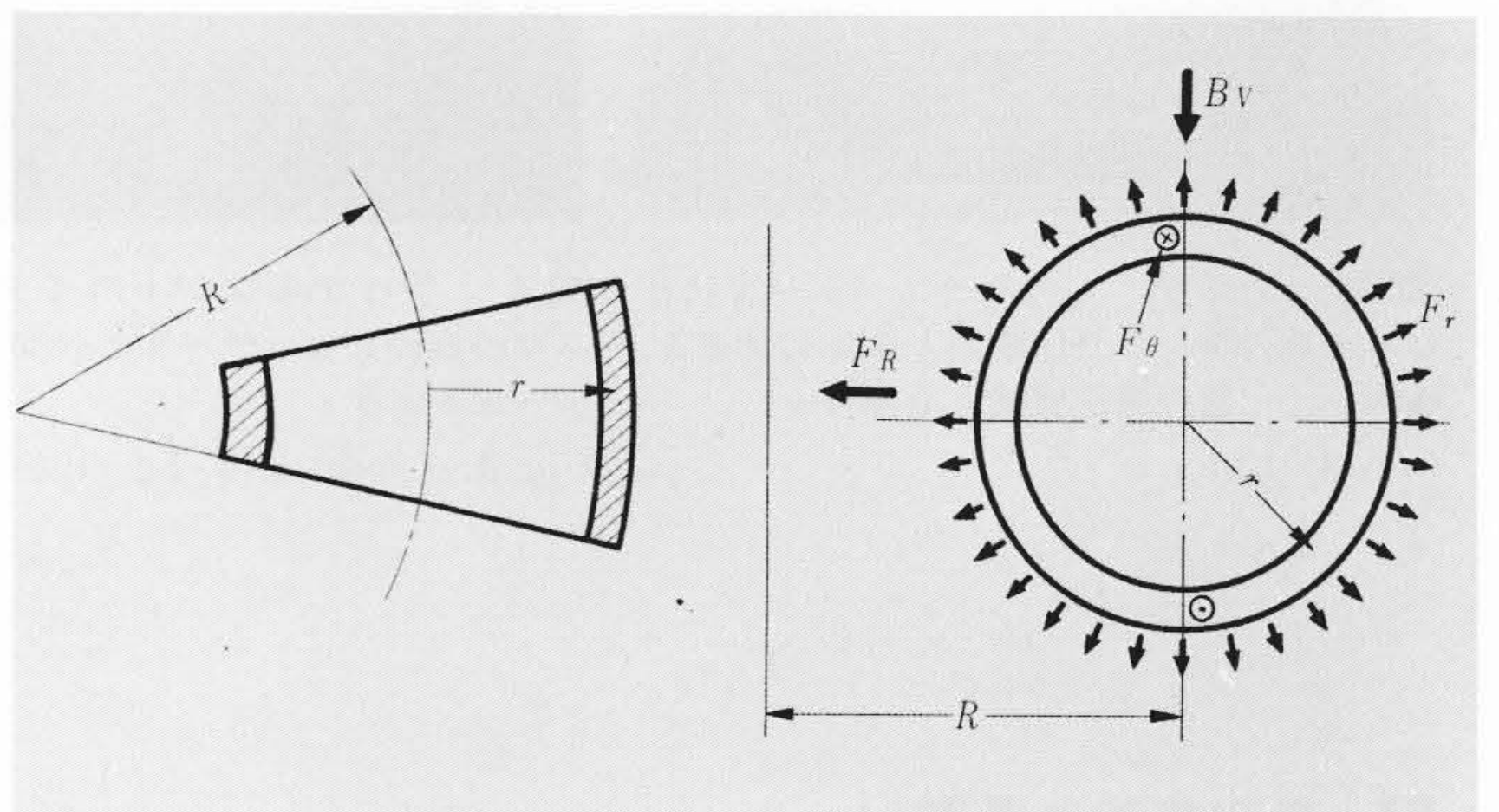


図9 トロイダルコイルに作用する力 トロイダルコイルには強大な電磁力 F_r , F_R , F_θ が作用する。
Fig. 9 Electro Magnetic Force of Toroidal Coil

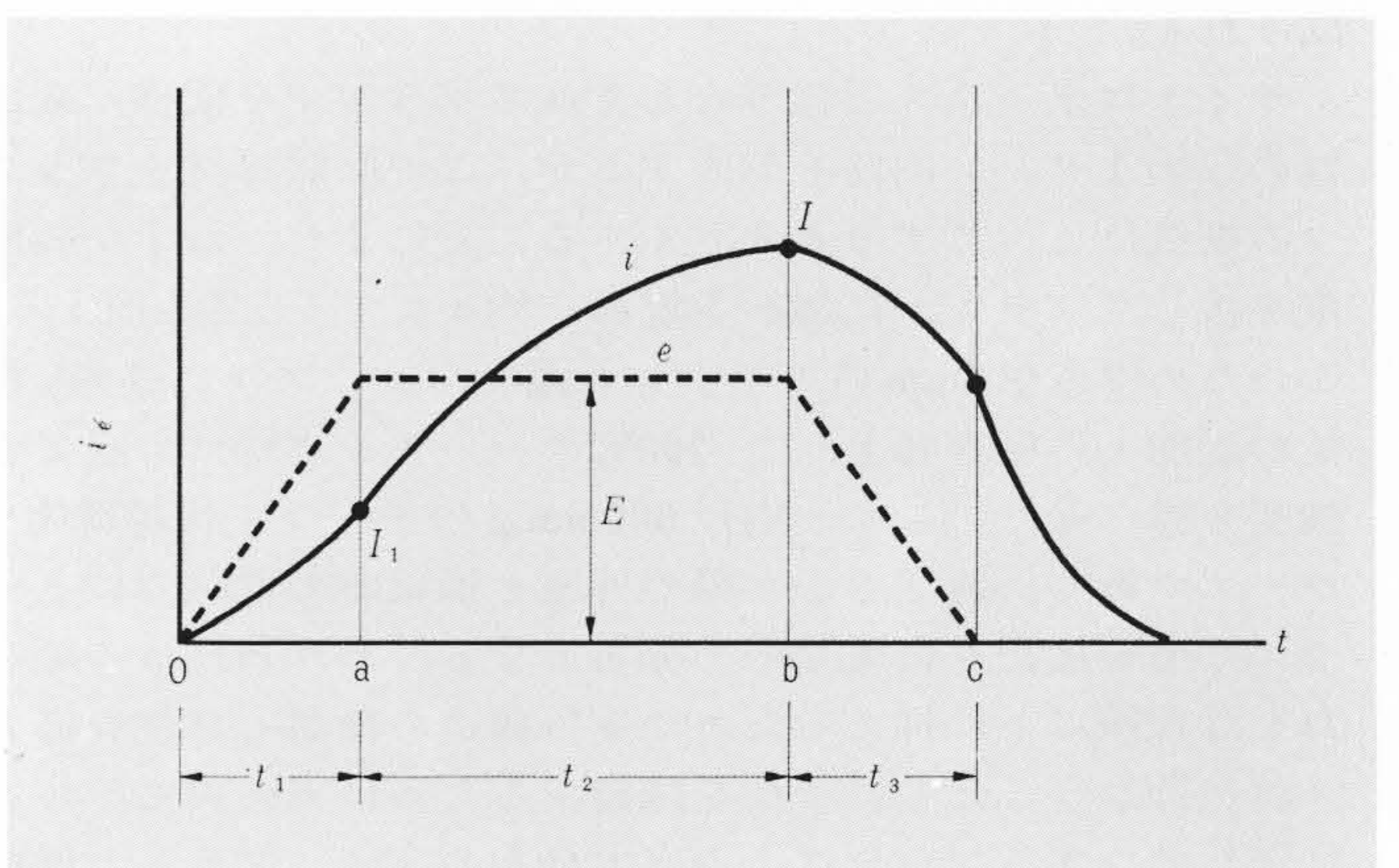


図10 トロイダルコイル電圧電流波形 トロイダルコイルは周期3～5分でパルス励磁される。
Fig. 10 Terminal Voltage and Exciting Current of Toroidal Coil

$t = a \sim b$ 間

$$i_{T2} = I \{ 1 - (1 - I_1/I) e^{-t/\tau} \} \quad (\text{A}) \quad \dots\dots(8)$$

$t = b \sim c$ 間

$$i_{T3} = I - \frac{E\tau^2}{t_3 L} \left\{ \left(\frac{t}{\tau} - 1 \right) + e^{-t/\tau} \right\} \quad (\text{A}) \quad \dots\dots(9)$$

$t = c \sim \infty$ 間

$$i_{T4} = \left\{ I - \frac{E\tau^2}{t_3 L} \left[\left(\frac{t_3}{\tau} - 1 \right) + e^{-t_3/\tau} \right] \right\} e^{-t/\tau} \quad (\text{A}) \quad \dots\dots(10)$$

ここで、 τ ：時定数 L/R (S) L ：インダクタンス (H)
 R ：抵抗 (Ω)
 $I = E/R$ (A) E ：端子電圧 (V)
 セクタ型コイルの抵抗は次式で計算される。

$$R = \frac{S_1 + S_2}{2\sqrt{S_1 S_2}} R_0 \quad (\Omega) \dots\dots\dots(11)$$

ここで、 S_1 ：導体の最小断面積 (cm^2)
 S_2 ：導体の最大断面積 (cm^2)

表3 トロイダルコイル要目表 トロイダルコイルのおもな設計要目である。

Table 3 Principal Items of Toroidal Coil

項 目		計 算 結 果	
コンダクタ断面積 (mm^2)	最 大	913	
	最 小	164.5	
	等 価	410	
抵 抗 値	(75°Cにて)	0.121 Ω	
イ ン ダ ク タ ン ス		0.0978H	
最 大 起 磁 力		$6.75 \times 10^6 AT$	
全 巻 数		672	
		Peak	r.m.s
電 流		10,030	1,090
電 流 密 度 (A/ mm^2)	最 大	61	6.63
	最 小	11	1.20
	等 価	24.5	2.66
電 圧	(V)	1,220	—
電 力 $I^2 R$	(kW)	12,250	144.5
短型波換算通電時間	(s)	≈ 3.5	
温 度 上 昇 (deg)	水温上昇	19	
	パルス温度上昇	81 (最小断面積部)	
電 磁 力 (t/lコイル)	F_R	40	
	F_r	124	
	F_Q	0.96	
冷 却 水	流 量	110 l/min	
	圧 力 損 失	約4.0kg/cm ²	

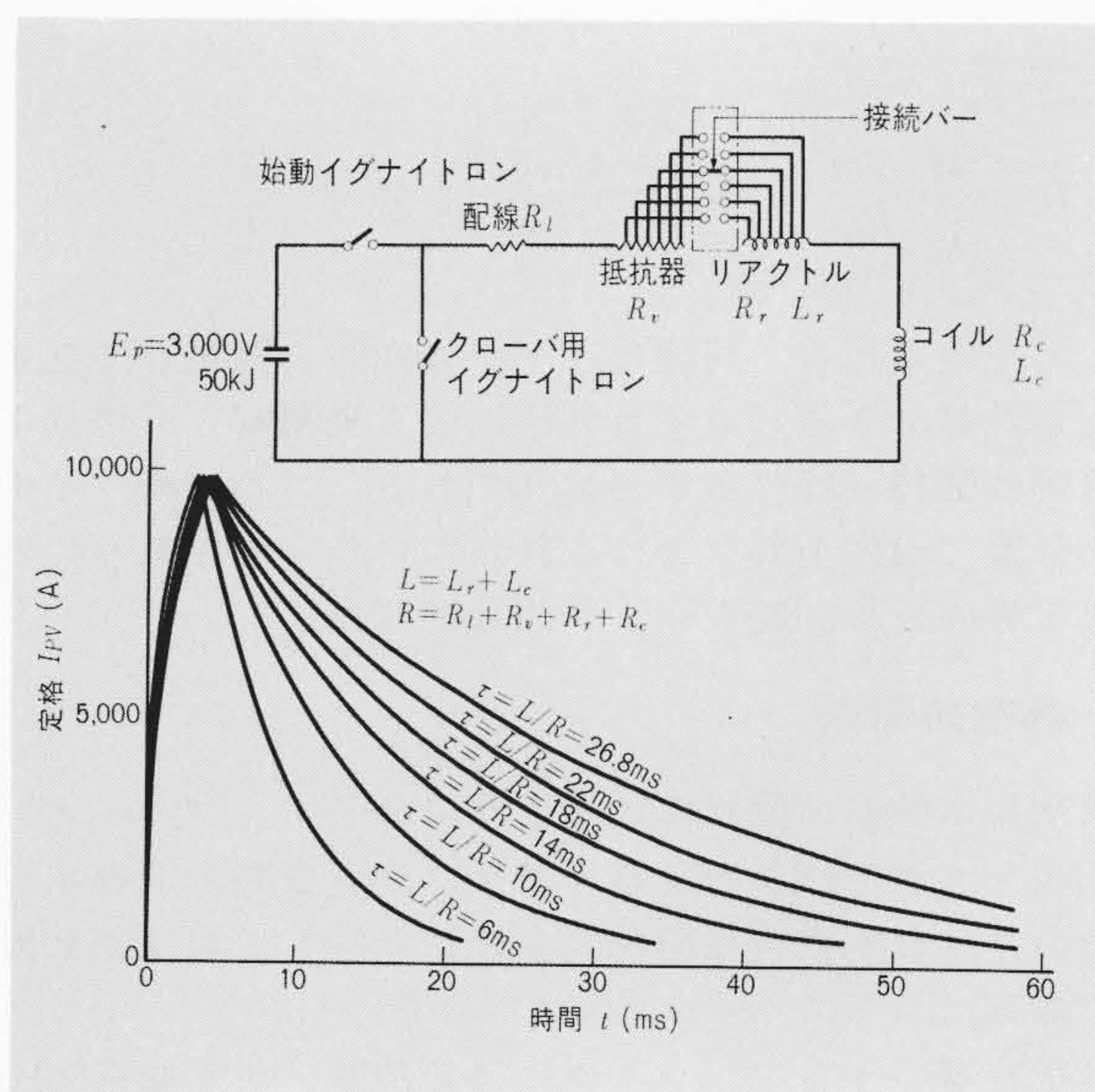


図11 パルス型垂直磁場コイルの励磁回路と電流 抵抗器とリアクトルのタップ切換により電流波形を6段に調整できる。

Fig. 11 Power Supply and Exciting Current of Pulse Vertical Field Coil

R_0 ：平均断面積の一定断面導体と仮定したときの抵抗(Ω)
 これらの式から、ピーク電流に換算した熱的に等価な「長方形波換算通電時間 t_L 」を計算し、温度上昇とそれによる抵抗変化が許容値内にはいるよう設計された。

これらの設計計算結果は表3に示すとおりである。

5 垂直磁場コイル

垂直磁場コイルは直流型およびパルス型の二組が設けられている。直流垂直磁場コイルはトロイダルコイルの外側に配置され、励磁は57kW直流発電機によりフラットトップ3秒のゆっくりしたパルス運転が行なわれる。したがって電流波形はトロイダルコイルと同様の型となる。

パルス型垂直磁場コイルはプラズマの発生初期に直流磁場コイルによる垂直磁場 B_{VD} を打ち消し、時間の経過とともに B_{VD} に戻す役割を有するため、その電流(磁場)波形が急速に変化する。このため導電シェルの内側に配置されてその遮蔽効果が少なくなるようにしてある。励磁は図12のようにコンデンサ放電による。電流立ち上がり波形を相当広範囲に可変とするために図のように励磁回路にタップ付きリアクトルをそう入し、時定数を6段に切り換えられるようにしてある。波形の計算結果は図11に示すとおりである。

6 変流器

コンデンサにたくわえられたエネルギーは変流器一次巻線を含む負荷回路に放電され、鉄心を介して二次巻線に相当するプラズマに供給され、加熱とポロイダル磁界の発生に寄与する。鉄心(図2)は高磁束密度まで使用できる新日本製鉄株式会社製H1-B (Z_{9H})が使用され、重ね接合となっている。またプラズマ領域での漏れ磁場を小さくするために巻線と真空容器間に一對のけい素鋼板製磁気シールド板(図1)を配置している。

鉄心の脚鉄には一次巻線のほか、鉄心を飽和まで有効に使うための直流バイアス巻線と鉄心磁束が鎖交する直流垂直磁場コイルの誘起電圧を打ち消すための巻戻しコイルなどが巻かれている。これら変流器やプラズマを含む等価回路は図12に示すとおりである。この回路の基本方程式は、

$$\begin{aligned} C \frac{dV}{dt} + i_1 &= 0 \\ V &= R_1 i_1 + (L_1 + L_{1l}) \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} + M_{14} \frac{di_4}{dt} \\ 0 &= R_2 i_2 + M_{21} \frac{di_1}{dt} + (L_2 + L_{2l}) \frac{di_2}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} + M_{24} \frac{di_4}{dt} \\ 0 &= R_3 i_3 + M_{31} \frac{di_1}{dt} + M_{32} \frac{di_2}{dt} + (L_3 + L_{3l}) \frac{di_3}{dt} + M_{34} \frac{di_4}{dt} \\ 0 &= R_4 i_4 + M_{41} \frac{di_1}{dt} + M_{42} \frac{di_2}{dt} + M_{43} \frac{di_3}{dt} + (L_4 + L_c) \frac{di_4}{dt} \end{aligned} \dots\dots(12)$$

で与えられる。ここで、 $L_1, L_{1l}, L_2, L_{2l}, L_3, L_{3l}, L_4, L_c$,

$$\begin{aligned} M_{12} &= \sqrt{L_1 L_2} (= M_{21}), \quad M_{13} = \sqrt{L_1 L_3} (= M_{31}), \\ M_{14} &= \sqrt{L_1 L_4} (= M_{41}), \quad M_{23} = \sqrt{L_2 L_3} (= M_{32}), \\ M_{24} &= \sqrt{L_2 L_4} (= M_{42}), \quad M_{34} = \sqrt{L_3 L_4} (= M_{43}), \end{aligned}$$

および R_1, R_2, R_3, R_4 が与えられた場合、一次電流 i_1 、プラズマ電流 i_2 、ライナ電流 i_3 、バイアス電流 i_4 、コンデンサ端子電圧 V の数値解を電子計算機で求めた。

また現象の把握には便利なので次の解析解による近似計算も行なった。すなわち。

二次側のライナを無視して(ライナ抵抗 $R_3 \rightarrow \infty$)二次側をプラズマとバイアス回路とした場合のプラズマ電流とバイア

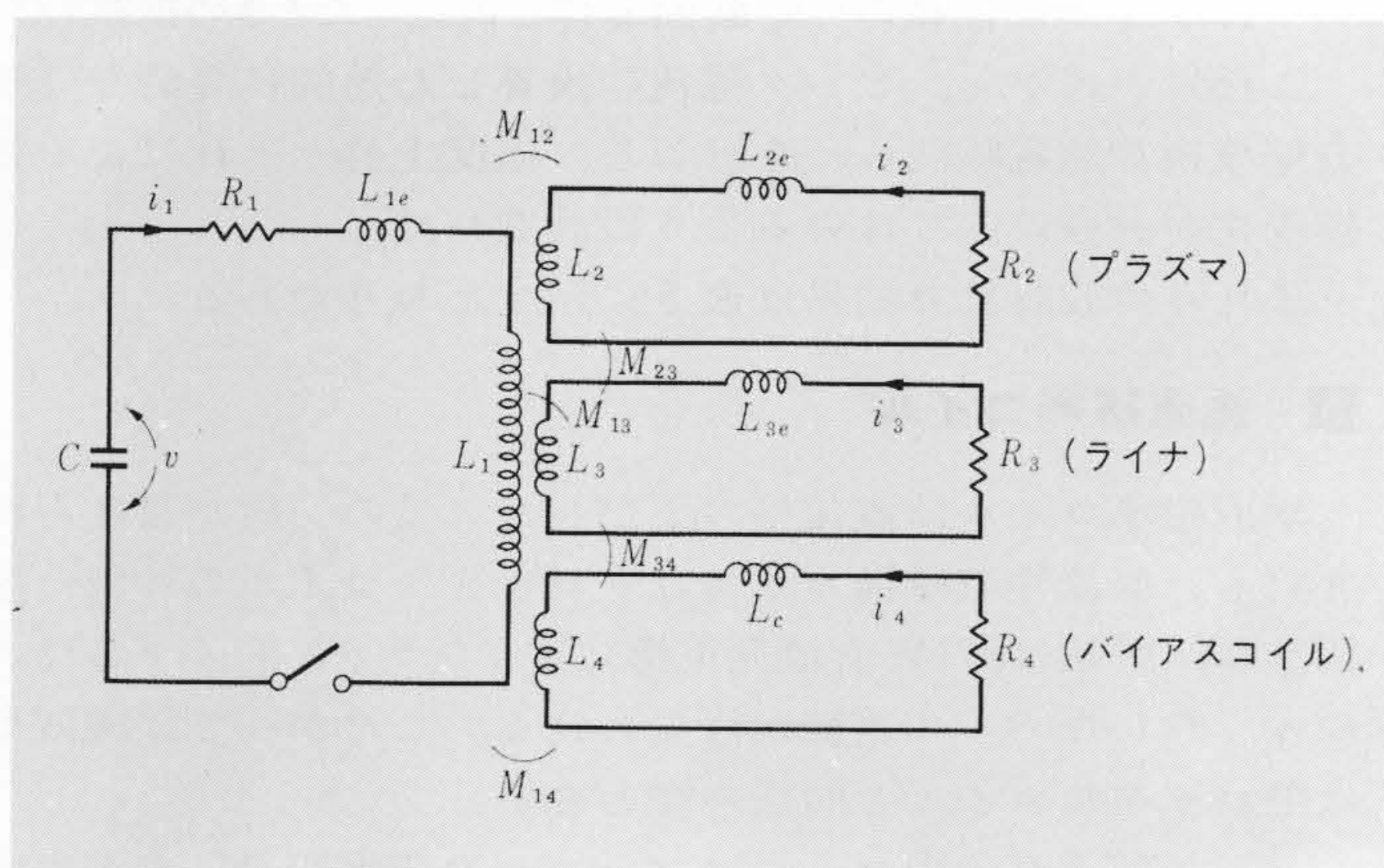


図12 変流器励磁の等価回路 変流器一次巻線にはプラズマ，ライナ，バイアスコイルの電流などが鎖交している。

Fig. 12 Equivalent Circuit of Current Transformer

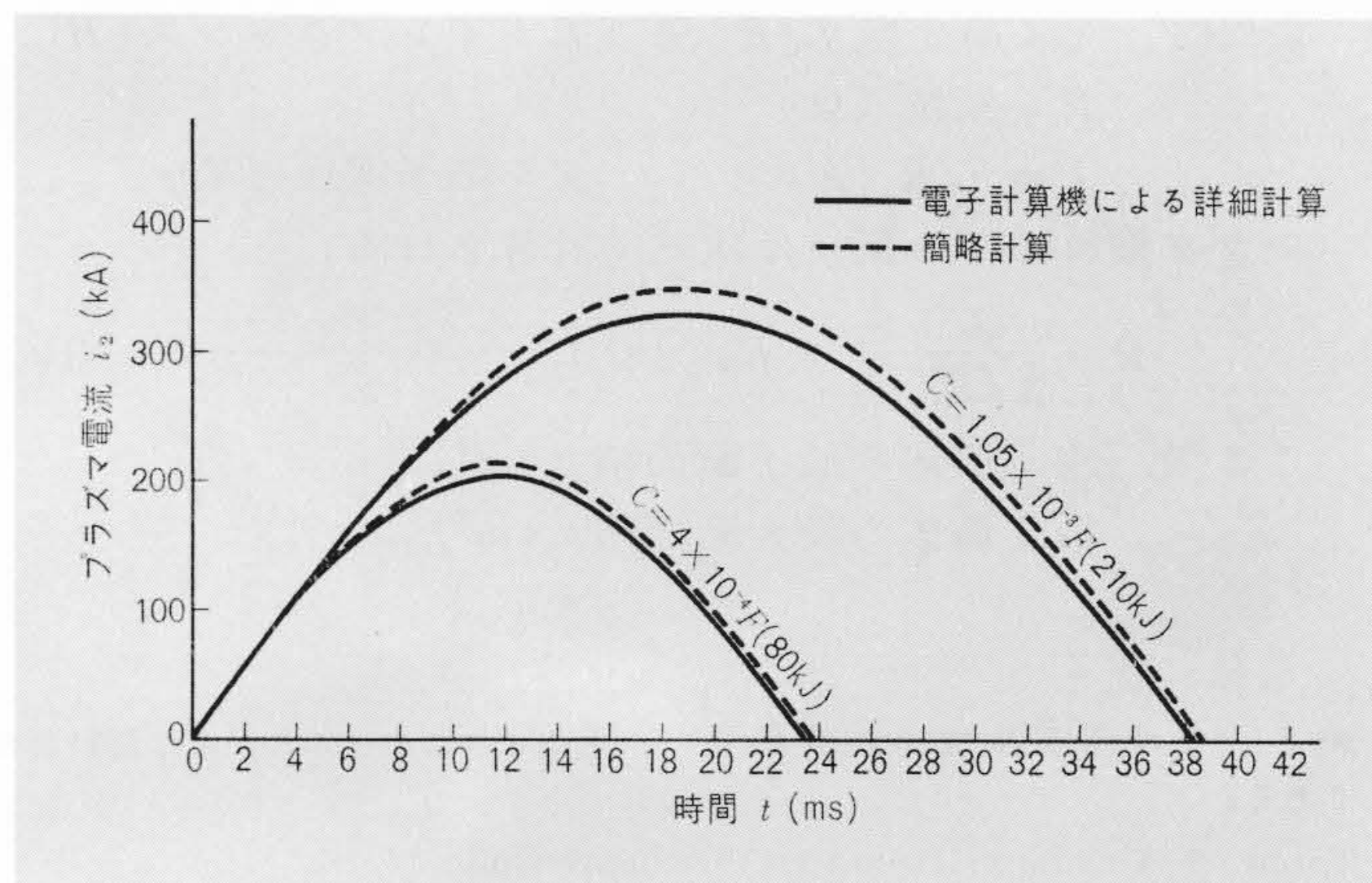


図14 プラズマ電流計算例 変流器励磁用コンデンサは数個のブロックに分割されイグナイトロンを適当な時間遅れで投入できるが，計算はイグナイトロン1個のみを使用した場合の例である。

Fig. 14 An Example of Calculated Plasma Current

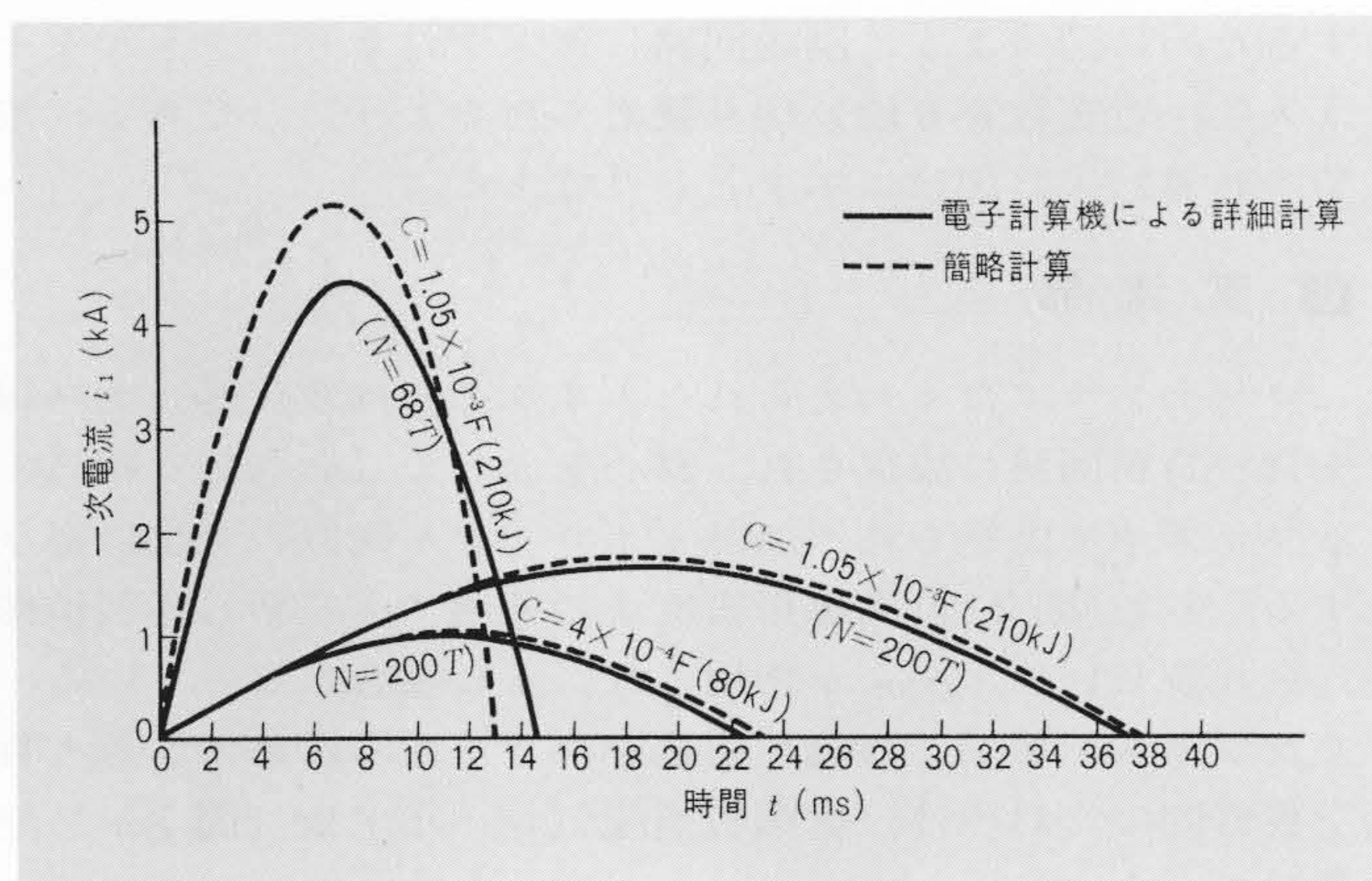


図13 変流器一次電流計算例 変流器一次巻線には数個の中間タップが設けられている。図は最小タップと全巻線を使用した場合の計算例である。

Fig. 13 An Example of Calculated Primary Current of Current Transformer

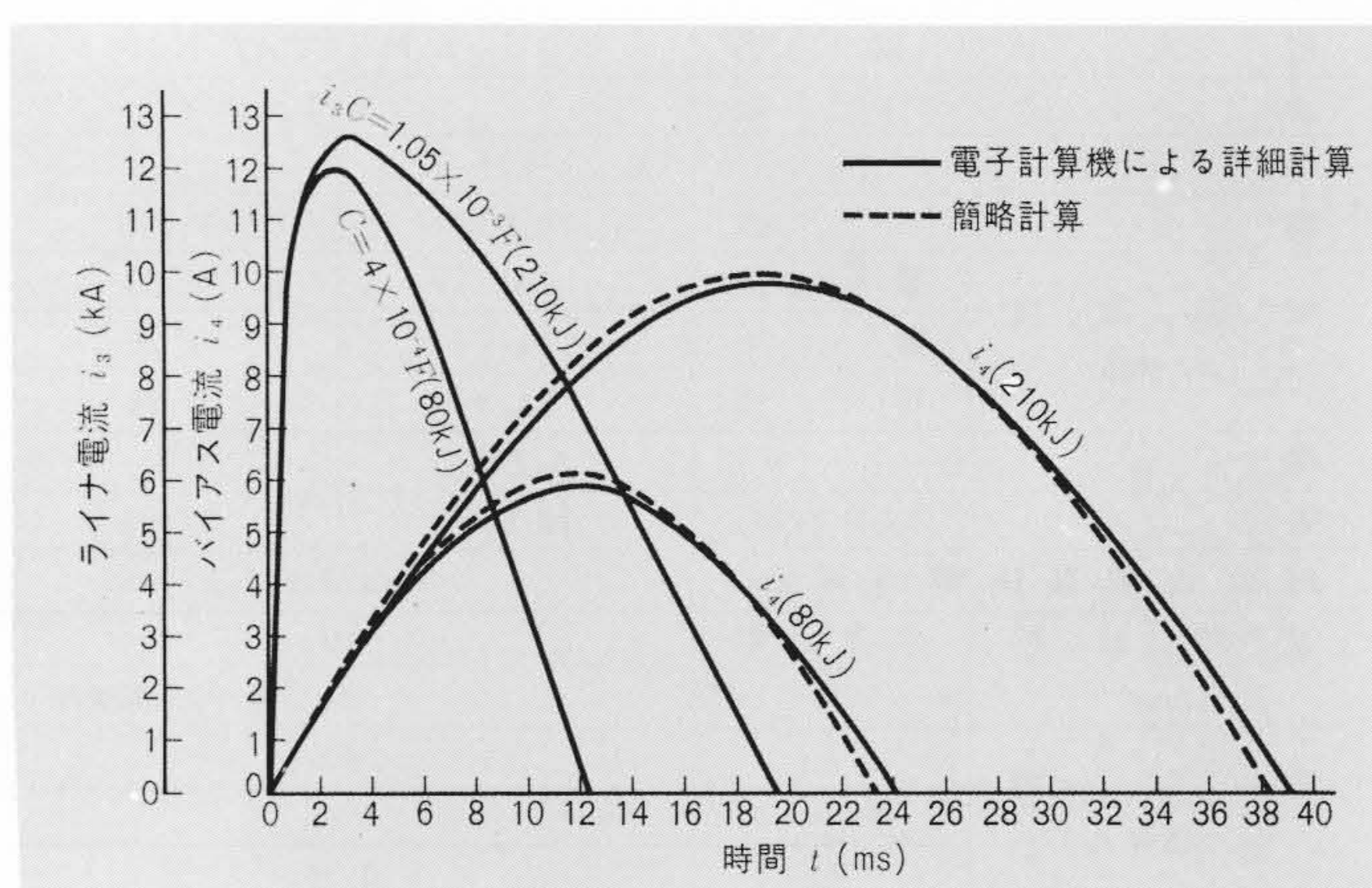


図15 ライナ電流，バイアス電流計算例 プラズマ電流が正常に確立される場合の計算例である。

Fig. 15 An Example of Calculated Liner Current and Calculated Bias Current

ス電流一次電流は $R_1 \div 0$, $R_2 \div 0$, $R_4 \div 0$ として，スイッチ投入後 t 秒後，

$$i_2 = \frac{M_{14} V_0 C}{b_2} \frac{1}{\sqrt{\frac{a_2}{b_2}}} \sin \sqrt{\frac{a_2}{b_2}} t \quad (\text{A}) \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで，

$$a_2 \equiv M_{24} + (L_c + L_4) \frac{M_{14} L_{2l}}{M_{12} L_c}$$

$$b_2 \equiv M_{24} L_{1l} C + [L_1 L_c + L_{1l} (L_c + L_4)] C \frac{M_{14} L_{2l}}{M_{12} L_c}$$

V_0 : コンデンサの $t=0$ の充電電圧 (V)

C : コンデンサのキャパシタンス (F)

$$i_4 = \frac{M_{14} V_0 C}{b} \frac{1}{\sqrt{\frac{a}{b}}} \sin \sqrt{\frac{a}{b}} t \quad (\text{A}) \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで，

$$a \equiv \frac{L_2 L_c}{L_{2l}} + L_c + L_4 \quad b \equiv L_1 L_c C + L_{1l} C \left(\frac{L_2 L_c}{L_{2l}} + L_c + L_4 \right)$$

$$i_1 = \frac{1}{M_{14}} (L_c I_4 + L_4 I_4 + M_{24} I_2) \sin wt \quad (\text{A}) \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで，

$$I_2 \equiv \frac{M_{14} V_0 C}{b_2 \sqrt{\frac{a_2}{b_2}}}, \quad I_4 \equiv \frac{M_{14} V_0 C}{b \sqrt{\frac{a}{b}}}, \quad W \equiv \sqrt{\frac{a}{b}}$$

として求められる。同様にバイアス回路を無視してライナ電流 i_3 を計算できる。電子計算機による厳密解と近似式による計算例は図13～15に示すとおりである。コイルやライナの機械的強度，温度上昇などはこれらのいろいろな条件での計算結果を考慮して問題ないよう設計された。

7 真空排気系

真空排気装置は図16に示すように分子ポンプ，イオンポンプ，ゲッターポンプからなるオイルフリーな完全ドライシステムであり，日本真空技術株式会社に発注して取りまとめたものである。

真空容器のうちで，ライナには変流器一次巻線を50Hzの商用電源で励磁して通電し，約200°Cにジュール加熱した。四つのボックスとマニホールドは複雑な構造をしているのでジャケットや蛇管(じゃかん)に電熱器で加熱した油を通じて100～120°C程度に加熱する方式で脱ガスし， 5×10^{-6} Torrの到達真空度を得るよう計画され， 5×10^{-7} Torrの性能を得ている。

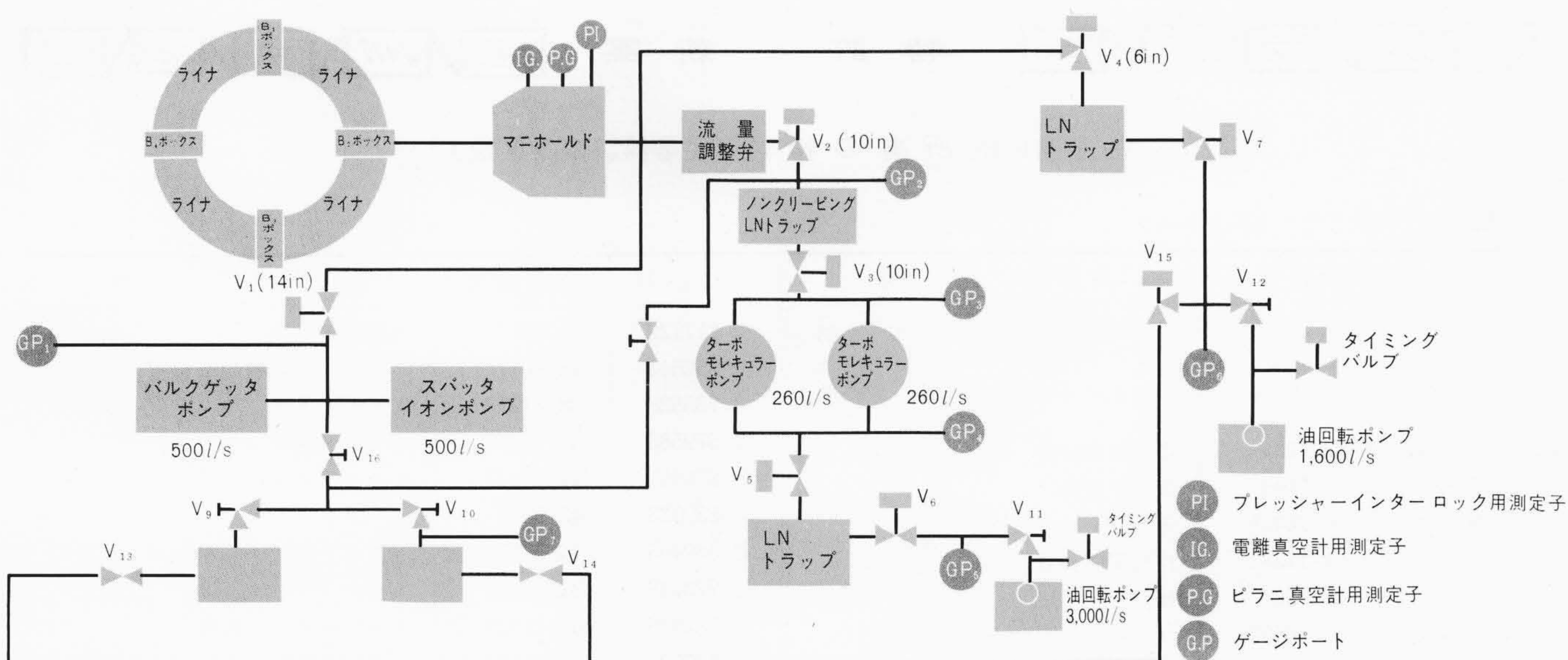


図16 真空排気装置系統図 分子ポンプ、イオンポンプ、ゲッタポンプなどからなるオイルフリーな超高真空排気系である。

Fig. 16 Flow Diagram of Vacuum System

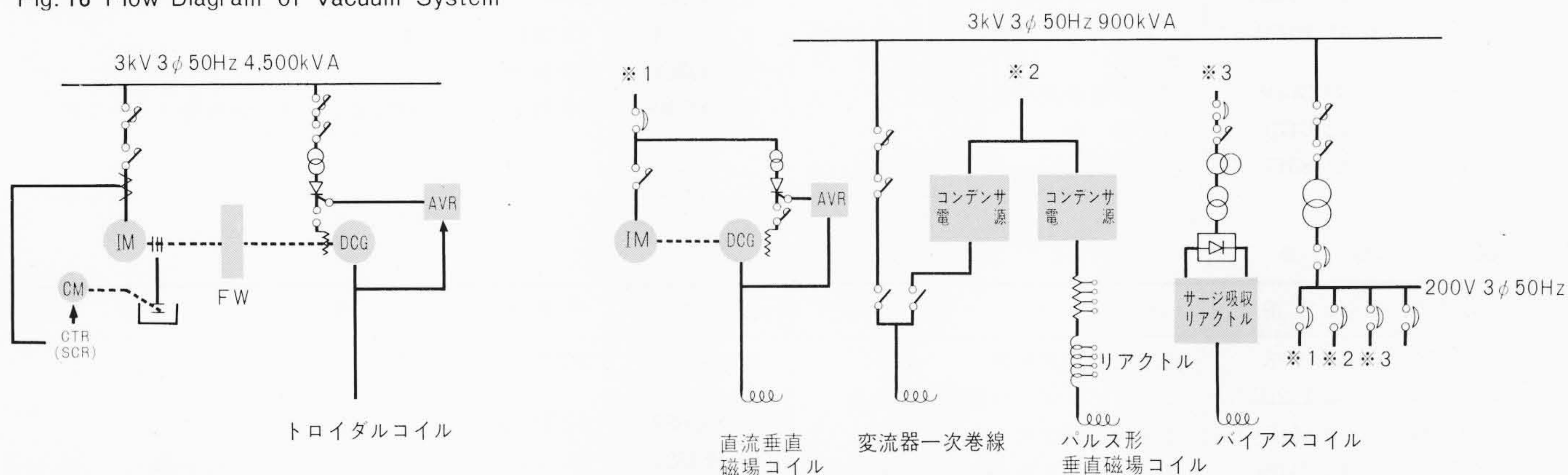


図17 “JFT-2”電源スケルトン はずみ車付きの6030kW直流発電機、コンデンサ電源などを主体とする電源システムである。

Fig. 17 Power Supply of “JFT-2”

8 電源、制御、計測系

おもな電源のスケルトンは図17に示すとおりである。

中央制御室での操作により運転され、全システムがあらかじめ設定されたタイムシーケンスに従い、ほぼ自動的に行なわれる。また、誤操作その他に対しても十分安全なよう各種のインターロック系が組み込まれている。

装置の運転に必要な各種計測器類は中央制御室の盤面に設置され監視されるが、このほかプラズマ診断に使用されるログスキーコイル、マグネティックプローブ、二次電圧測定用1ターンコイルなどの原子力研究所が準備した検出器類がシェルの内側に取り付けられている。4個のボックスやラインの一部にはマイクロ波干渉計、中性粒子分析器、分光測定などに利用される各種のポート類が設けられている。

9 結 言

“JFT-2”は所期の期限内に完成し予定どおり稼動している⁽¹⁰⁾。

この装置の完成により、わが国は先行していたソ連邦、アメリカに次いで本格的なトカマク型核融合実験装置を持つことになり、今後の運転研究による成果で世界における核融合研究に大きく貢献することが期待される。

核融合研究の進歩は、その装置技術の進歩と密接に結びついている。この装置も、本文で述べたような幾多の困難な技

術的課題を有したが、幸いにしてわれわれは原子力研究所関係者のご指導とご援助のもとで、その一つ一つを克服することができた。しかし、細部についてはまだ多くの改善の余地を残している。これらについてはこの経験を今後建設する同種装置に生かしてゆきたいと考えている。

終わりに本装置の設計、製作にあたり、貴重なご助言とご指導をいただいた日本原子力研究所東海研究所の山本所長および森次長、伊藤、太田、藤沢研究員ならびに日立製作所日立工場西副工場長、笠原副技師長に厚く謝意を表するとともに設計、製作、試験、そのほかにご協力いただいた関係者各位にもあわせ深謝する次第である。

参考文献

- (1) Satoshi Itoh et al : JAERI-memo 4084 (July 1970)
- (2) 伊藤智之 : 原学誌 13, 51 (昭46-1)
- (3) 伊藤、太田、船橋 : 原子力工業 18, 38 (昭47-5)
- (4) Satoshi Itoh et al : Atoms in Japan 16, 8 (Apr. 1972)
- (5) 加沢はか : 日立評論 53, 333 (昭46-4)
- (6) Kenro Miyamoto et al : IPPJ-102 (Nov. 1970)
- (7) 宇尾光治 : 学術月報 24, 322 (昭46-9)
- (8) たとえば文献(3)
- (9) 特許出願中
- (10) 伊藤智之ほか : 原学誌 14, 451 (昭47-8)