

JAERI-M

7 2 9 6

垂直磁場コイル電流の立ち上げ方式に  
関する考察

(臨界プラズマ試験装置設計報告・47)

1977年9月

藪野 光平\*・谷 啓二・嶋田 隆一  
岸本 浩・吉田 英俊・田村 早苗

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.

垂直磁場コイル電流の立ち上げ方式に関する考察  
(臨界プラズマ試験装置設計報告・47)

日本原子力研究所東海研究所大型トカマク開発部  
\*  
藪野 光平・谷 啓二・嶋田 隆一  
岸本 浩・吉田 英俊・田村 早苗

(1977年8月26日受理)

垂直磁場コイル電流の立ち上げ回路ならびに垂直磁場コイルの電源制御に関する検討結果を報告する。

プラズマを平衡位置に保ちながらプラズマ電流を立ち上げる場合、垂直磁場コイルの電源としては、エネルギー蓄積コイルを使った高電圧発生電源と直流電源(サイリスタ変換装置)を併用する方式がよいことがわかった。

垂直磁場コイルに直接、直流電源を接続して制御する方式は、プラズマ電源の上昇率が大きくなると電源を高電圧大容量にしなければならない点が経済性の観点から問題となる。すなわち、プラズマ電流の上昇率が100MA/sec程度になると想定した場合、垂直磁場コイルに印加すべき最大電圧は約15kVとなり、サイリスタ変換装置の容量が極めて大きなものとなる。

これに比し、エネルギー蓄積コイルと直流電源を併用する方式では、直流電源の電圧を4kVにおさえて、所要の精度で垂直磁場を得る電源回路の設計が可能である。直流電源の電圧はプラズマの位置形状制御に必要な電圧として定めるのが一つの方法である。

---

\* 外来研究員日立製作所日立研究所

Design Study of the Vertical Field Power Supply  
for JT-60

Kohei YABUNO\*, Keiji TANI, Ryuichi SHIMADA,  
Hiroshi KISHIMOTO, Hidetoshi YOSHIDA and  
Sanae TAMURA

Division of Large Tokamak Development,  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received August 26, 1977)

The results of a basic design study of the vertical field power supply for JT-60 (JAERI large tokamak) are described. The objective of the study is to evaluate several types of power supply circuits for fast excitation and control of the vertical field.

A design requirement is to produce a rapidly increasing vertical field within accuracy of  $\pm 5\%$  around the proper field strength required to center the plasma in the vacuum vessel. The plasma current is assumed to increase at the rate of about 100 MA/sec. To meet the requirement, a maximum voltage of 15 kV is necessary in the current build-up time, while generally relatively low voltage is necessary after the current flat-top is reached.

A hybrid power supply which consists of a dc power source (a thyristor converter) and an inductive energy storage system is proposed. The maximum voltage of the dc power source is determined as 4 kV from the voltage required in the current flat-top time. This is sufficient also in the current build-up time if the dc power source is used together with the inductive energy storage system.

**Keywords:** Vertical Field Power Supply, Thyristor Converter,  
JT-60 Tokamak, Current Build-up Time, Inductive Energy  
Storage

---

\* Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 垂直磁場コイル電流立ち上げ方式 .....	3
2.1 非分離形 .....	3
2.2 分離形 .....	3
3. 計算方法 .....	9
3.1 計算条件 .....	9
3.2 回路計算の流れ図 .....	12
4. 計算結果 .....	17
4.1 制御系の1次遅れの影響 .....	17
4.2 A方式における垂直磁場コイル側IESコイル電流 .....	17
4.3 A方式における垂直磁場コイル側回路の動作開始時間 .....	18
4.4 B方式, C方式における垂直磁場コイル電源電圧 .....	20
5. 考察 .....	32
5.1 A方式 .....	32
5.2 B方式 .....	32
5.3 C方式 .....	33
5.4 分離形にした場合の投入のタイミング .....	34
5.5 フイッティング .....	34
5.6 垂直磁場コイルの印加電圧 .....	34
5.7 IESコイル2段構成の場合の垂直磁場コイル側IESコイル電流 .....	35
5.8 各方式の比較 .....	35
6. まとめ .....	40
7. 参考文献 .....	40
附 図 .....	42

## 1. はじめに

## &lt;目的&gt;

この研究の目的は、直流電源を使った各種垂直磁場コイル電流立ち上げ回路の比較検討を行なうことにある。

プラズマ発生後、プラズマ電流を急速に立ち上げる過程においては、プラズマ電流環を理想的な平衡位置に保持することが必要である。そのため、垂直磁場コイルの作る磁場によるプラズマの水平位置制御は、垂直磁場コイルの重要な責務の1つになっている。すなわち、垂直磁場コイル電流を如何に制御して、プラズマ電流の時間変化に応じた適切な値を得るかが問題になる。

## &lt;検討内容&gt;

垂直磁場コイル電流を立ち上げる方式としては、大別すると2つの方式が挙げられる。1つは、垂直磁場コイルを変流器コイルと並列に接続する構成、もう1つは、変流器コイルから分離し、別の電圧発生源と垂直磁場コイルを接続する構成で、本報告では前者を“非分離形”、後者を“分離形”と呼ぶことにする。

非分離形の場合、垂直磁場コイル電流は変流器コイル端子間に発生する高電圧が垂直磁場コイル端子間に直接印加されてコイルに電流が流れる。これは変流器コイル端子間に発生する高電圧を電圧源として使って垂直磁場コイル電流を立ち上げるため、プラズマ電流と同時に立ち上げられる利点がある。しかし、変流器コイルと垂直磁場コイルは並列接続されるので変流器コイル電流が大きくなり、コイル設計上の問題が生じ、また、今回の検討項目の1つになっている垂直磁場コイル電流の制御が自由に行なえないなどの欠点があり、必ずしも理想的な方式とは言えない。

分離形の場合、単純には、垂直磁場コイル固有の電源を使う方式であるが、その場合電源の制御、電源の容量などが検討課題になる。

まず、第1の問題は、垂直磁場コイルの端子間に高電圧を印加する電圧源の構成をどうするかで、方式は次のように色々考えられる。

- ① エネルギー蓄積コイル(以下“IESコイル”と略す)を使った、プラズマ発生のための空心変流器コイル電源回路と同一の回路を垂直磁場コイル端子間に接続する方式で、これを“IES方式”と呼ぶことにする。
- ② 上記①の方式において、垂直磁場コイルと直列に直流電源を接続し、IESコイルと電源を併用する方式。これを“A方式”とする。
- ③ 3段立ち上げの場合に、第1段のみA方式で構成し、第2段、第3段は垂直磁場コイル電源だけで立ち上げる方式。これを“B方式”とする。
- ④ 第1段から第3段まで、垂直磁場コイル電源だけで立ち上げる方式。これを“C方式”とする。

この報告では以上分離形の4方式の内、垂直磁場コイル電源を使用する方式に対策を限定し、

A方式，B方式，C方式について比較，検討した結果を述べる。なお，ここで垂直磁場コイル電源とは，コイル電流制御の観点からサイリスタ変換装置を指すものとする。

第2の問題は電源電圧をどう設定するかである。A方式の場合は，IESコイルの電流値および，垂直磁場コイル電源の電圧値をそれぞれどのくらいに設定するかを検討した。B方式の場合は，第1段目はA方式に準ずるので問題ないが，第2段，第3段では垂直磁場コイル電源だけを使うので必要な電源電圧を検討した。C方式の場合は，第1段から垂直磁場コイル電源だけで立ち上げるため，第1段目のプラズマ電流の急峻な立ち上がりに対して，良好な「フィッティング<sup>\*</sup>」をするに必要な垂直磁場コイル電源の電圧値を検討した。

以上から，プラズマ電流の立ち上げ時に，プラズマ電流と垂直磁場コイル電流のフィッティングを効果的に行なうには，どのような方式が適切であるかを考察した。

---

\* プラズマ電流の平衡位置を保持するために必要な垂直磁場コイル電流の理想値に対して，プラズマ電流の変化に追随しながら必要な精度でコイル電流値を設定することを指す。本報告では以下この意味で「フィッティング」という語を用いる。

## 2. 垂直磁場コイル電流立ち上げ方式

表1に垂直磁場コイル電流の立ち上げ方式の分類を示す。

### 2.1 非分離形

非分離形は変流器コイルと並列に垂直磁場コイルを接続し、変流器コイル端子間に発生する電圧により垂直磁場を励起する方式である。

この方式については、すでに“サイリスタしや断器に関する試作開発”の中間報告書<sup>(1)</sup>で具体的に報告されている。本方式ではプラズマ電流と垂直磁場コイル電流のフィッティングを良くするためには回路定数の選定によらざるを得ず、自由度が限られる。

### 2.2 分離形

#### (1) IES方式

変流器コイル側の回路と同一回路を垂直磁場コイルの電圧源として接続して構成するため、IESコイルの電流値、自己インダクタンス、時定数調整抵抗などを適切に選ばないとフィッティングはよくなる。しかし、回路構成が、変流器コイル側と垂直磁場コイル側が同じなため、2.1の非分離形より、フィッティングは良くなる。

この本式に関する回路解析など詳細設計、および、R&D総合報告書の中に報告されている。<sup>(2)</sup><sup>(3)</sup>

#### (2) A方式

図1に回路構成を示す。これは、直並列方式の高電圧発生回路で構成した場合の例である。

垂直磁場コイル側の回路動作によって、IESコイル $L_1'$ の端子間に発生した電圧 $E_{ies}$ と垂直磁場コイル電源電圧 $E_{vr}$ とを重畳した電圧 $E_v (=E_{ies} + E_{vr})$ が垂直磁場コイル端子間に印加される。第1段目の電圧 $E_{ies}$ は、IESコイル $L_1'$ の電流と時定数調整抵抗 $R'$ によって決まり、主に垂直磁場コイル電流はこの $E_{ies}$ によって立ち上げるが、垂直磁場コイル端子間電圧として必要な電圧は、垂直磁場コイル電源 $E_{vr}$ によって補正する。

これによって、プラズマ電流の立ち上がり過程においてフィッティングはより良好になり、垂直磁場コイル電源の制御が有効に行なえる。

#### (3) B方式

第1段のみA方式と同様の方式、すなわち、垂直磁場コイル側のIESコイルによって高電圧を発生させ、同時に垂直磁場コイル電源を併用する方式とし、第2段目、第3段目以後は垂直磁場コイル電源だけで立ち上げる方式である。回路構成を図2に示す。

このような方式にする理由は、第1段目の急速なプラズマ電流の上昇に対して、IESコイルと垂直磁場コイルの併用方式を使ひ、プラズマの低電流領域からフィッティングを良くするためである。



第2段目に入る時、スイッチ $S'$ を投入し、垂直磁場コイル電流はコイル $L_V \rightarrow$ スイッチ $S \rightarrow$ 電源 $E_{VR} \rightarrow$ コイル $L_V$ を流れるようにし、垂直磁場コイル電源 $E_{VR}$ だけで、垂直磁場コイル電流を立ち上げるように切換える。

なお、空心変流器コイル電源回路を並列方式で構成した場合の回路図を参考までに付図1、付図2、付図3に示した。

(4) C方式

これは、垂直磁場コイルに直接垂直磁場コイル電源を接続し、プラズマ発生と同時に電源を投入し垂直磁場コイル電源を立ち上げる方式である。回路構成を図3に示す。

プラズマ発生直後のプラズマ電流の上昇が急速な場合、それに追従して垂直磁場コイル電流も急速に立ち上げる必要があるために、高い電源電圧が必要になる。

すでに述べたように以上の各種方式の中から、垂直磁場コイル直流電源を使う方式だけを選び、A方式、B方式、C方式について検討した。

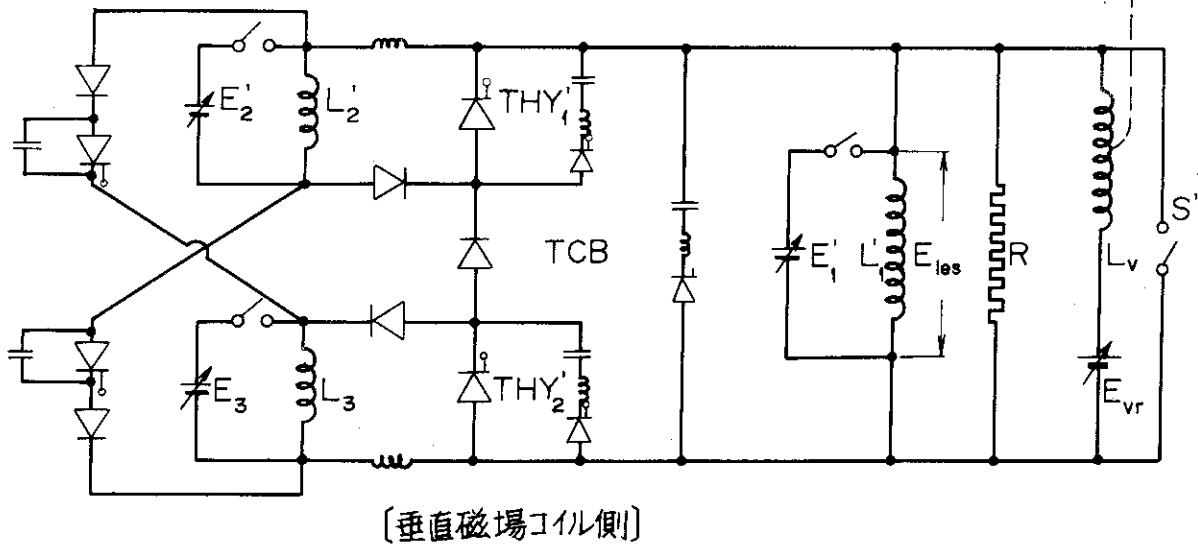
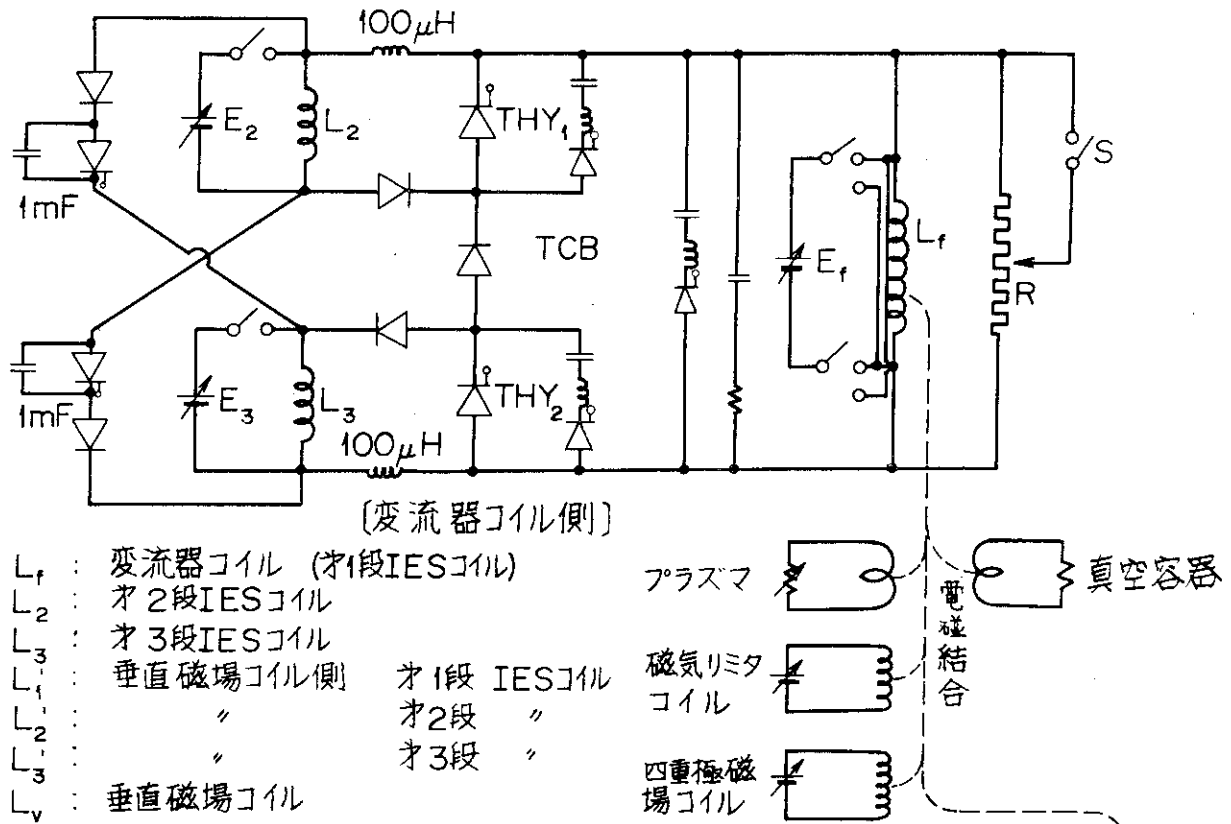
表1 垂直磁場コイル電流の立ち上げ方式の分類

No	分類	1段立ち上がり	2段立ち上がり	3段立ち上がり	回路構成の概略	検討の経緯	備考
1	非分離形				変流器コイルに垂直磁場コイルを並列接続	変流器コイル電流が大きい フラットインダクタンスが難しい (中間報告書)	
		IES <sup>(1)</sup>	IES	IES	3段ともIESコイルを使って立ち上げる	フラットインダクタンスが難しい (詳細設計報告書)	
2	分離形	IES+EV	IES+EV	IES+EV	3段ともIESコイルを使い、かつ垂直磁場コイル電源EVを補正して立ち上げる		A方式
		IES+EV	EV	EV	最終1段のみIESコイルの他にEV電源を併用し、2段、3段はEV電源で立ち上げる		B方式
		EV <sup>(2)</sup>	EV	EV	3段ともEV電源を使って立ち上げる	フラットインダクタンスは改善される (詳細設計報告書)	C方式

[註] (1) 図1 垂直磁場コイル側に IES コイル  $L_1'$ ,  $L_2'$ ,  $L_3'$  を使い、これと並列に垂直磁場コイル  $L_v$  と接続する。

(2) EV : 垂直磁場コイル電源

(3) □ : 本報告で検討する方式



$E_f, E_2, E_3, E_1', E_2', E_3'$  : IESコイル電源  
 $R, R'$  : 時定数調整抵抗  
 TCB : サイスタル断器

図1 直並列方式で構成した場合のA方式

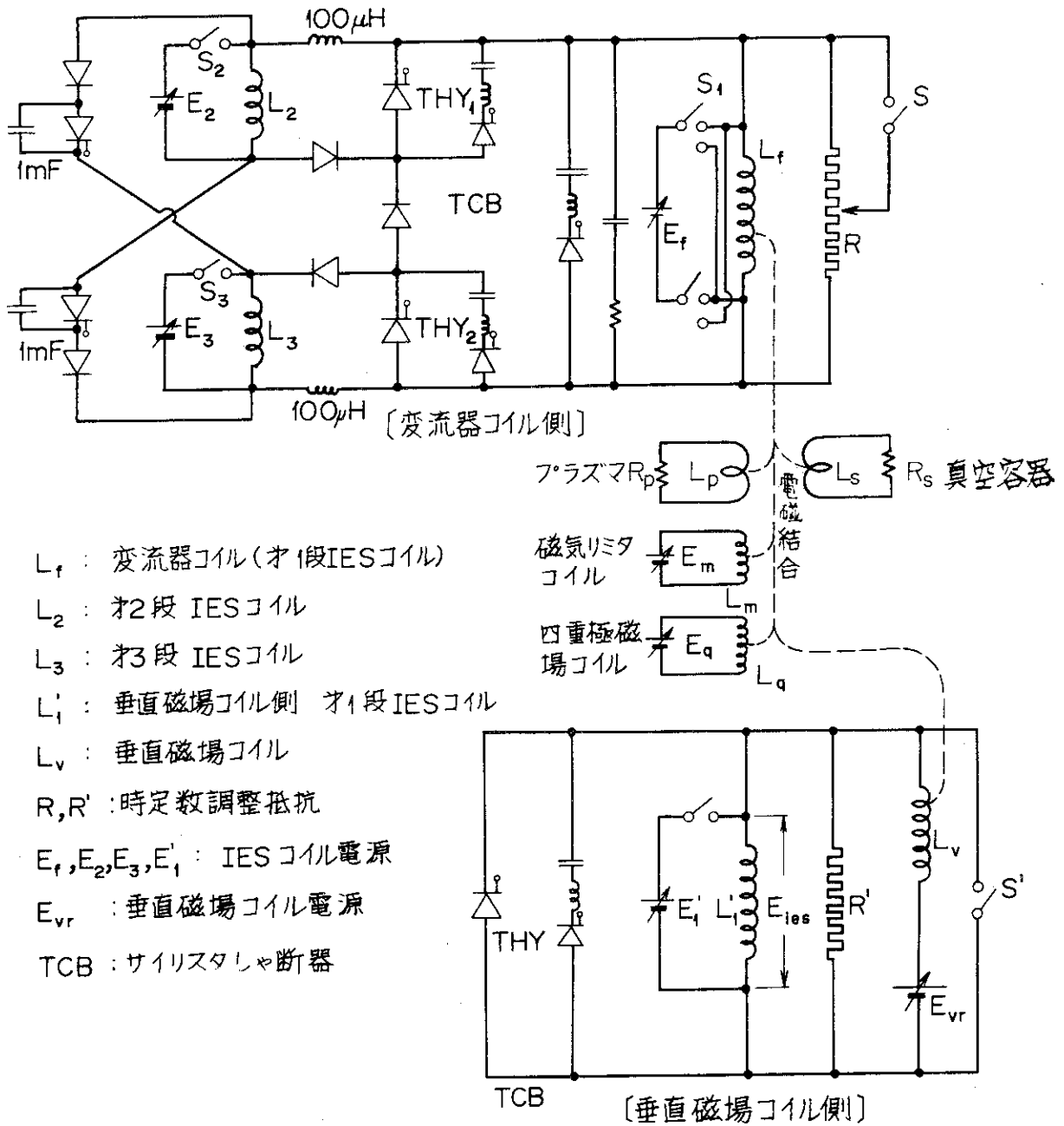
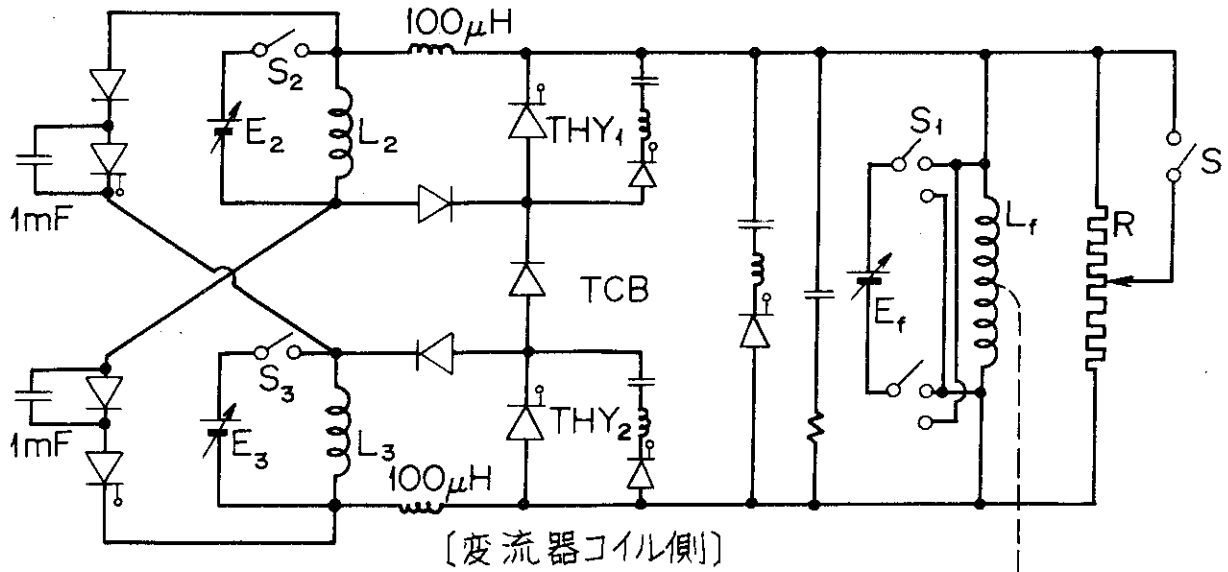


図2 直並列方式で構成した場合のB方式



- [変流器コイル側]
- $L_f$  : 変流器コイル (1段IESコイル)
  - $L_2$  : 1段IESコイル
  - $L_3$  : 2段IESコイル
  - $R$  : 時定数調整抵抗
  - $E_f, E_2, E_3$  : IESコイル電源
  - TCB : サイリスタシャ断器
  - プラズマ  $R_p$   $L_p$
  - 磁気リミタコイル  $E_m$   $L_m$
  - 四重極磁場コイル  $E_q$   $L_q$
  - 垂直磁場コイル  $E_{vr}$   $L_{vr}$
  - 真空容器  $R_s$   $L_s$
- 電磁結合

図3 直並列方式で構成した場合のC方式

## 3. 計 算 方 法

## 3.1 計算条件

## (1) サイリスタしゃ断器の転流回路

図1～図3に示すようなサイリスタしゃ断器(TCB)を含んだ直並列回路方式に基づいて計算を行なった。したがって、計算では各段切換時のサイリスタしゃ断器の動作も考慮した。ただし、A方式、B方式において、垂直磁場コイル側のサイリスタしゃ断器の動作は第1段のみ考慮し、第2段、第3段のは省略し時間で切換えるようにした。TCBの転流回路が計算プログラムに入っていない場合でも、今回の検討課題に与える影響はほとんどないと思われる。

## (2) 垂直磁場コイル電源のフィードバック制御

垂直磁場コイル電源のフィードバック制御はできるだけ実際の構成に近い状態にするために図4-(a)に示すフィードバック回路を想定した。制御系を簡素化するため、垂直磁場コイル電流  $i_v$  を電流検出回路によって検出(例えば、直流変流器、DC CTや分流器シャントなどが使われる)し、プラズマを平衡に保持するために必要な垂直磁場コイル電流(目標値  $I_v$ )と比較し、差分を制御系に入れ、増巾器(AMP)、自動パルス移相器(APPS)を通して、サイリスタ整流装置を位相制御し、垂直磁場コイル電源の直流電圧  $E_{vr}$  を制御するようにした。

これを、計算では、図4-(b)に示すように、入力電圧をとし、一次遅れ  $\tau$  を R, C回路

$$E_{vr} = G_v (I_v - i_v) \quad (3.1)$$

$G_v$ : ゲイン

でおきかえた回路を通して垂直磁場コイル電源電圧  $E_{vr}$  を計算するようにした。計算では電源の最大電圧  $E_{vr, max}$  (正, 負) を越えないよう、リミタをつけた。これは実機でも同じである。

また、垂直磁場コイル電流の検出遅れ ( $\tau_0$ ) も考慮し、垂直磁場コイル電流の値を計算する時、 $(t - \tau_0)$  時点の電流値  $i_v = i_v(t - \tau_0)$  を使用した。したがって、入力電圧を

$$E_{vr} = G_v (I_v - i_v') \quad (3.2)$$

とした。

プラズマを平衡に保持するために必要な垂直磁場コイル電流  $I_v$  は次式により与えられる。

$$I_v = I_{vm} \frac{\frac{\mu_0 i_p}{4\pi R} (\ell_n \frac{8R}{r_p} + \beta_p + \frac{\ell_i - 3}{2}) + 0.06 \frac{i_q}{I_{qm}} (R - R_0) + \frac{i_m}{I_{mm}} c_{10} (R - c_{20} R_0)}{R B_{v0} / (n_\nu (R - R_0) + R)} \quad (3.3)$$

$$I_{vm} = 67.2 \text{ (kA)}$$

$$I_{qm} = 17.6 \text{ (kA)}$$

$$I_{mm} = 141 \text{ (kA)}$$

$$R = R_0 \left( 1 + d_8 e^{-\frac{5}{\tau_p} t} \right) \quad (d_8 = 0, R_0 = 3.1, R \text{ はここでは不変であるとした})$$

$$n_{\nu} = 0.522$$

$$B_{\nu 0} = 0.257$$

$$c_{10} = -0.0281$$

$$c_{20} = 0.579$$

実機では、このような計算が制御系で出来るものと想定し、この計算を行なっている。

### (3) フィットティングの評価

プラズマを平衡に保持するために必要な垂直磁場コイル電流  $I_{\nu}$  (目標値) と実際の垂直磁場コイル電流  $i_{\nu}$  とのずれを評価する量として次式で示す  $\alpha$  を定義し、これをフィッティングの評価値とした。

$$\alpha = \frac{i_{\nu}}{I_{\nu}} \times 100 \quad (\%) \quad \text{-----}(3.4)$$

$\alpha$  は、 $100 \pm 5\%$  の範囲に入ることが条件とし、これを  $\alpha$  の第1の設定値条件とする。また、プラズマ電流の立ち上がり初期においては、プラズマがどのような状態になっているか不明確な面もあるため、理想的なフィッティング(プラズマ発生直後から  $\alpha = 100\%$  にする)を行なおうとすると電源も相当大きなものになりかねない。そこで、プラズマ発生直後については、この検討においてはプラズマ電流が  $100 \text{ kA}$  ないし  $200 \text{ kA}$  に達した時点から、前記の  $\alpha$  の設定値に入れることを第2の設定値条件とした。

したがって、プラズマ電流の立ち上がりフェイズでは以上の2つの条件を満足しなければならない。

### (4) 垂直磁場コイル電源の逆バイアス

運転モードによってはプラズマ着火時の不整磁場をなくすために、垂直磁場コイルにはプラズマ着火以前に適当な逆電流を流しておく必要がある。しかし、この検討では垂直磁場コイル電流の逆極性状態からの立ち上がりについては(3.2)式において  $I_{\nu}$  が負から正に変る所で  $\alpha = \infty$  になり、(3.2)式が使えないため省略した。計算は垂直磁場コイル電流零の状態から立ち上がるようにした。

### (5) 四重極磁場コイル電流の制御

四重極磁場コイル電流はプラズマ着火以前より、設定値 ( $I_{qm} = 17.6 \text{ kA}$ ) を保持するよう四重極磁場コイル電源をフィードバック制御するようにした。

計算では、四重極磁場コイル電源電圧  $E_q$  を

$$E_q = G_q (I_{qm} - i) \quad \text{-----}(3.5)$$

$$I_{qm} = 17.6 \text{ (kA)} \quad (\text{四重極磁場コイル電流の設定値})$$

$$G_q = 1.0 \text{ (kV/kA)}$$

とした。

### (6) 磁気リミタコイル電流の制御

磁気リミタコイル電流は、プラズマ着火と同時に電源を投入し、プラズマ電流とフィッティングするように、フィードバック制御を行ないながら立ち上げるようにした。

計算では、四重極磁場コイル電源電圧  $E_m$  は

$$E_m = G_m \left( 1 - \frac{\frac{i_m}{i_p}}{\frac{I_{mm}}{I_{pm}}} \right) \quad (3.6)$$

$I_{mm} = 141$  (kA) (磁気リミタコイル電流の設定値)

$I_{pm} = 3.3$  (MA) (プラズマ電流の設定値)

$i_p$  = プラズマ電流

$|E_m| \leq 0.5$  (kV)

とした。

#### (7) プラズマ・ブレイクダウン

ここでの回路解析では、サイリスタシャ断器 (TCB) の動作も考慮してあるので、第 1 段目の動作の時も、最初 TCB の動作を行ない、変流器コイル端子間に高電圧 (25 kV) を発生させ、同時にプラズマ回路にも電圧を誘起させる。

回路計算に当っては、計算開始 (TCB の補助サイリスタ点弧) 後、 $t=2$  ms でブレイクダウンするものとした。

#### (8) プラズマ抵抗 $R_p(t)$

プラズマ抵抗  $R_p(t)$  は、次式を使用した。

$$R_p(t) = 2 \times 259 \times 10^{-4} \times \{ 1.0 + 0.4 \log_{10} T_e(t) \} \cdot T_e(t)^{-\frac{3}{2}} \cdot R \cdot \frac{1}{a^2(t)} \quad (\Omega) \quad (3.7)$$

但し、(3.7) 式で、 $T_e(t)$ ,  $R$ ,  $a(t)$  は表 2 に示すような変化をするので、計算中にそれぞれの値を求め、プラズマ抵抗  $R_p(t)$  を求めるようにした。

なお、表 2 で示した式の中の係数は表 4 に示す値を使用した。

#### (9) 回路定数

図 1 ~ 図 3 に示す回路構成により、回路解析を行なう場合に使用する回路定数を表 3, 表 4, 表 5 に示す。

表 3 は、ポロイダル磁場コイルの各インダクタンスおよび各コイル間、各コイル-プラズマ間の相互インダクタンスを示す。また表 3 は IES コイルの自己インダクタンスを示す。これらの定数は、JT-60 の詳細設計当初の値を使用している。

なお、プラズマ大半径、ならびに相互インダクタンスは時間関数で与えられているが、今回の解析では定数としてあつかった。真空容器の定数は一様成分、ポロイダル成分、四重極成分まで考慮し、くら形成分は考慮しなかった。

#### (10) IES コイル段数

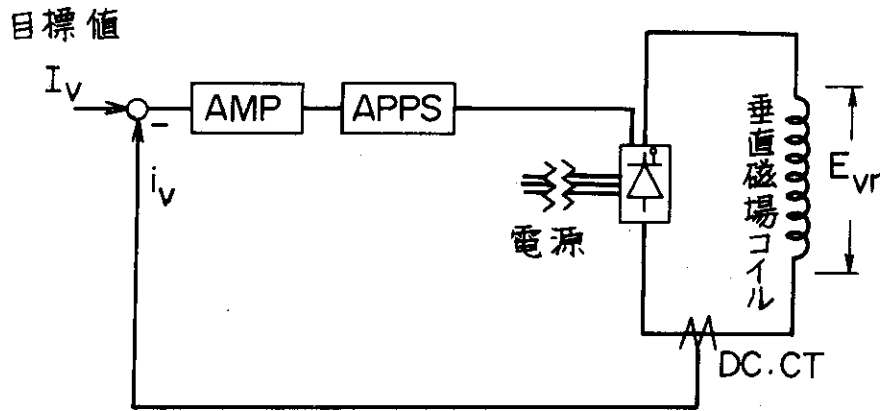
空心変流器コイル電源の IES コイル段数は 3 段として検討した。



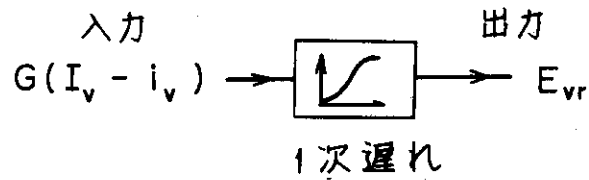
3.2 回路計算の流れ図

3.1 の計算条件をもとに，回路解析を行なうための流れ図を図5に示す。

回路は図1～図3の直並列方式の変流器電源回路をベースにした。個々の回路方程式については記述しないが，解法は，バック・オイラー法によった。



(a)



(b)

図4 計算で使したフィードバック制御系回路

表2 回路解析で使用したプラズマパラメータ

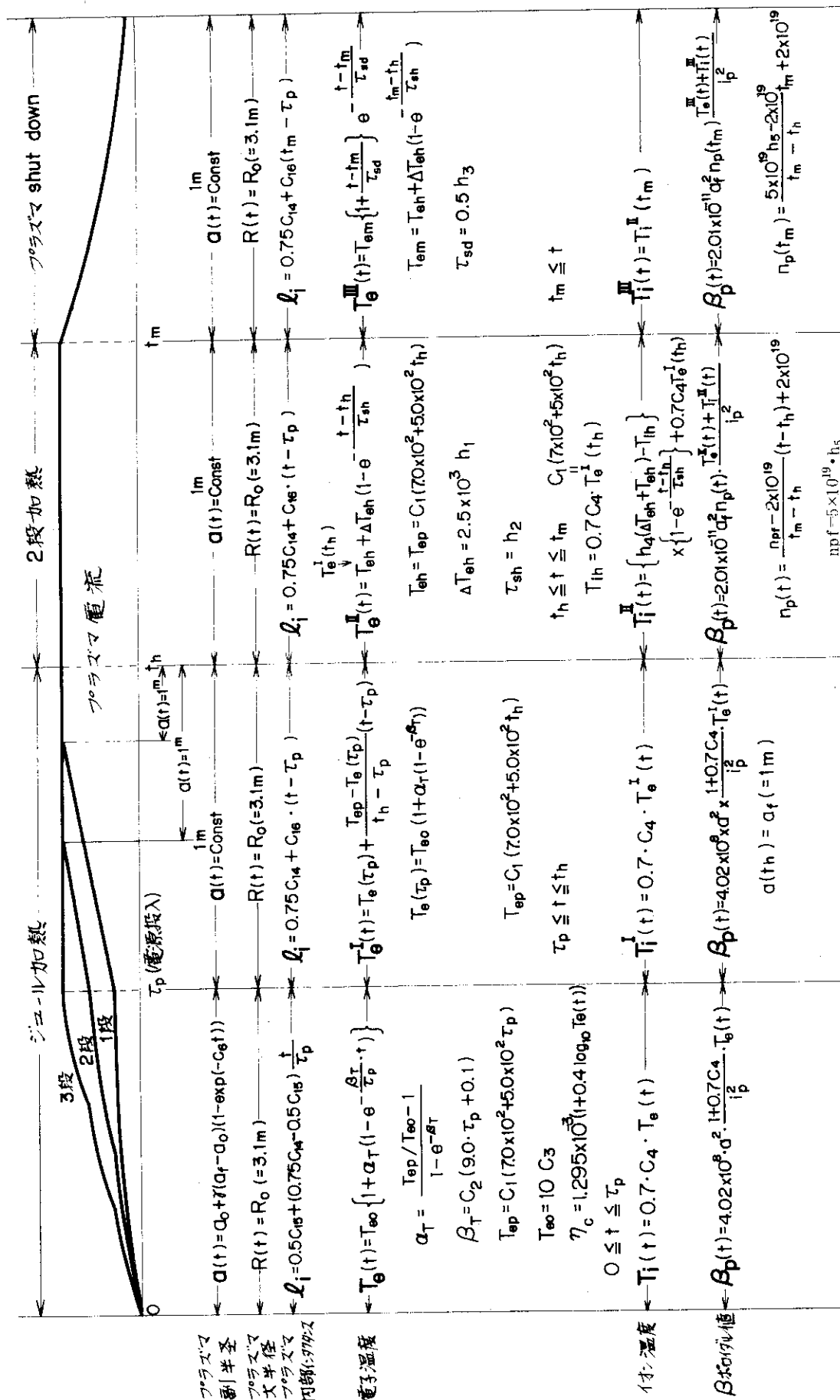


表3 回路定数表

	最大電流 (kA)	抵抗 (mΩ)	自己 相互インダクタンス (H)								
			プラズマ	F	VR	Q	M	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	
プラズマ	—	—	5.691 x 10 <sup>-6</sup>	1.385 x 10 <sup>-4</sup>	-5.729 x 10 <sup>-5</sup>	-2.442 x 10 <sup>-6</sup>	1.265 x 10 <sup>-6</sup>	3.670 x 10 <sup>-6</sup>	—	—	
変流器コイル F	145	2.6	8.189 x 10 <sup>-3</sup>	—	-5.927 x 10 <sup>-5</sup>	2.829 x 10 <sup>-5</sup>	-1.340 x 10 <sup>-6</sup>	1.380 x 10 <sup>-4</sup>	—	—	
垂直磁場コイル VR	67.2	8.8	—	—	1.09 x 10 <sup>-2</sup>	-3.450 x 10 <sup>-4</sup>	-7.850 x 10 <sup>-5</sup>	-0.57 x 10 <sup>-4</sup>	1.250 x 10 <sup>-4</sup>	—	
四重極磁場 コイル Q	17.64	46.0	—	—	—	8.445 x 10 <sup>-4</sup>	2.850 x 10 <sup>-5</sup>	-2.440 x 10 <sup>-6</sup>	—	0.190 x 10 <sup>-4</sup>	
磁気ミカド M	141.0	2.0	—	—	—	—	4.320 x 10 <sup>-5</sup>	—	—	—	
真空容器 グループ成分 M	—	1.5	—	—	—	—	—	3.840 x 10 <sup>-6</sup>	—	—	
ダイオード成分 V <sub>2</sub>	—	3.0	—	—	—	—	—	—	10.61 x 10 <sup>-6</sup>	—	
四重極成分 V <sub>3</sub>	—	6.0	—	—	—	—	—	—	—	10.60 x 10 <sup>-6</sup>	

自己インダクタンス  
相互インダクタンス

表4 係 数

係 数	計算で使した値	係数の変化範囲
$a_0$	$0.4 c_7 = 0.6 (m)$	0.3 ~ 1.0
$a_f$	$c_8$	0.5 ~ 1.0
$\gamma$	1.5	
$c_1$	0.5*	0.5 ~ 3.0
$c_2$	0.5	0.5 ~ 3.0
$c_3$	1.0	0.3 ~ 2.0
$c_4$	0.7	0.7 ~ 1.4
$c_6$	10.0	
$c_7$	1.5	0.8 ~ 2.5
$c_8$	1.0	0.5 ~ 1.0
$c_{14}$	1.0	0.6 ~ 1.5
$c_{15}$	1.0	0.8 ~ 2.0
$c_{16}$	1.0	1.0 ~ 1.5

(注) \* 特にことわりがない限り，本検討では0.5とした。

表5 IESコイル定数

IESコイル		自己インダクタンス (H)	抵 抗 ( $\Omega$ )
変コ 流 器側	$L_f$	$8.189 \times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$
	$L_2$	$10.0 \times 10^{-3}$	$10.0 \times 10^{-3}$
	$L_3$	$10.0 \times 10^{-3}$	$10.0 \times 10^{-3}$
垂コ 直イ 磁 場側	$L_1'$	$10.0 \times 10^{-3}$	$10.0 \times 10^{-3}$
	$L_2'$	$10.0 \times 10^{-3}$	$10.0 \times 10^{-3}$
	$L_3'$	$10.0 \times 10^{-3}$	$10.0 \times 10^{-3}$

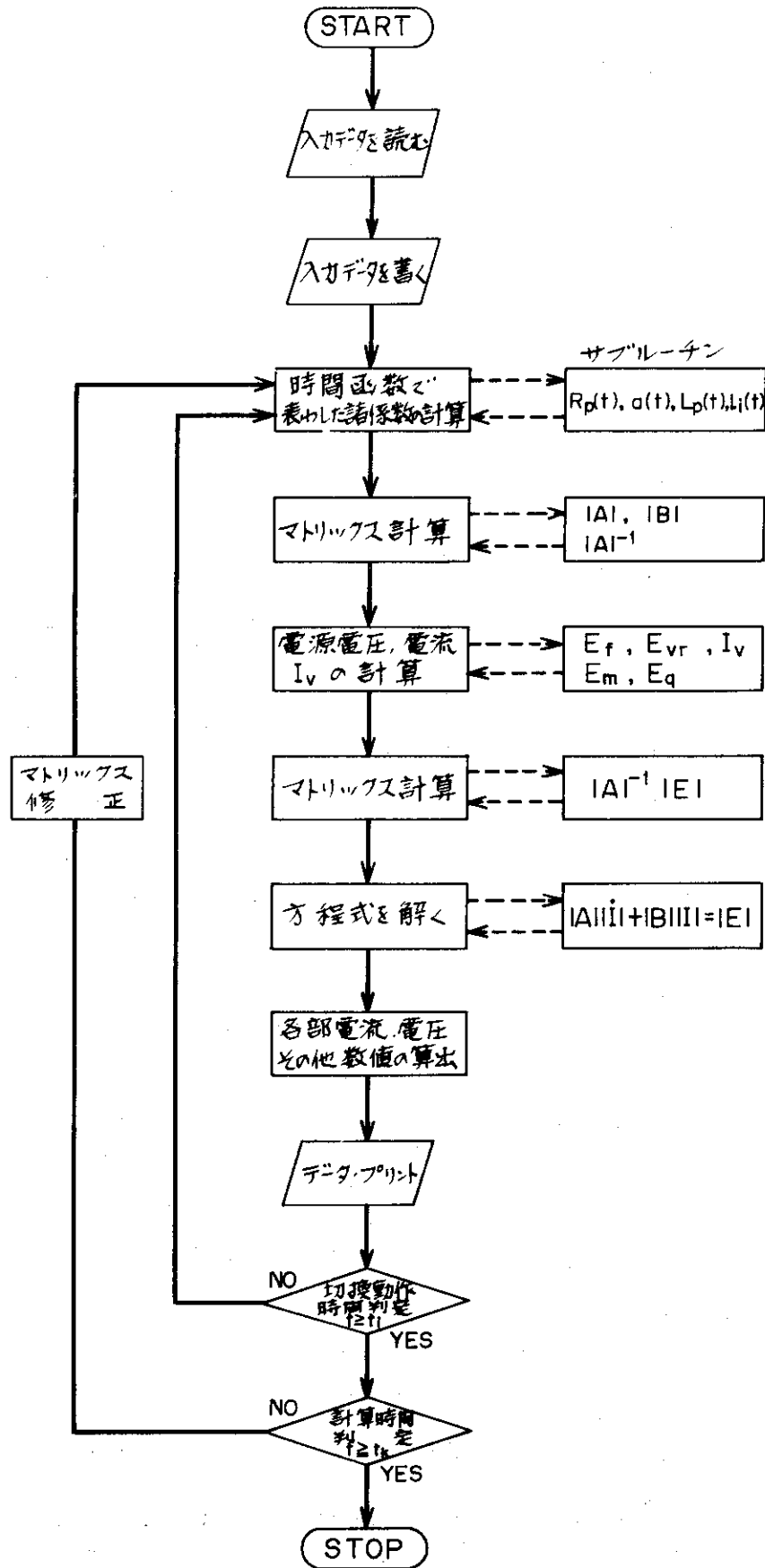


図5 回路解析のための流れ図

## 4. 計算結果

### 4.1 制御系の1次遅れの影響

3.2で述べたように制御系の1次遅れは、計算上R、Cの積分回路を通して計算している。実機における制御系は図4に示すような単純なものではないので、一次遅れを等価的にどう評価するか難かしい。

ここでは、 $\tau=2.5\text{ms}$ 、 $5.0\text{ms}$ 、 $10\text{ms}$ として、フィッティング $\alpha$ がどう変わるかを計算し検討を進める上での $\tau$ を決めるようにした。なお計算では垂直磁場コイル電流の検出遅れとして $\tau_0=0.1\text{ms}$ を考慮した。

図6は、A方式の場合の計算結果である。図6-(a)の $\tau=2.5\text{ms}$ の場合、 $\alpha$ の振巾も小さく、垂直磁場コイル電源の制御がうまく行なわれていることを示す。図6-(b)の $\tau=5.0\text{ms}$ の場合には、 $\alpha$ の振巾も図6-(a)よりやや大きくなる。さらに図6-(c)の $\tau=10.0\text{ms}$ の場合には、 $\alpha$ の振巾はさらに大きくなり、プラズマ電流の立ち上がり初期において、一部で $\alpha$ が設定値の条件を満足しない所がある。この時点( $t>4\text{ms}$ )ではすでにプラズマ電流も相当大きくなるので、5%以上の誤差が発生するのは、プラズマを平衡位置に保持する面からいって、好ましくない。

次に図7はC方式の場合の計算結果である。(a)は $\tau=2.5\text{ms}$ の場合、(b)は $\tau=5.0\text{ms}$ の場合、(c)は $\tau=10.0\text{ms}$ の場合の $\alpha$ と垂直磁場コイル電源電圧を示す。この場合も、一次遅れが大きくなるにつれて $\alpha$ の変動も大きくなり、それを制御する垂直磁場コイル電源電圧の変動も大きくなる。

図6、図7より、一次遅れ $\tau=10\text{ms}$ では $\alpha$ の変動巾が少々大きくなる。実機の機器設計上からは、 $\tau=2.5\text{ms}$ では困難でありさらに長くなることも考えられるのでここでは1次遅れは $5\text{ms}$ で検討した。

### 4.2 A方式における垂直磁場コイル側IESコイル電流

変流器コイル側と垂直磁場コイル側の動作開始時間の関係は図8に示す。

まず変流器コイル側の第1段TCBの補助サイリスタを点弧し( $t=0$ )、先に述べたようにしゃ断動作を行ってからプラズマは $t=2\text{ms}$ 時点で着火するとした。一方、垂直磁場コイル側の第1段TCBの動作開始時刻を $t=T_0$ とする。ここでは $T_0=2\text{ms}$ とし、プラズマ着火と同時に垂直磁場コイル側の第1段TCBの補助サイリスタを点弧するとした。したがって、プラズマ着火時刻と補助サイリスタ点弧時刻の遅れ時間( $T_{d0}$ )は零である。また、垂直磁場コイル電源電圧は図8の⑤に示すように垂直磁場コイル側TCBの補助サイリスタの転流電流が流れ始めると同時に、電源電圧の全電圧 $E_{vr.\max}$ が印加するものとした。

A方式の場合、垂直磁場コイル電源電圧は、フラット・トップ時の制御フェイズにおいて必

(4)

要な電圧が4kVであるとして決めた。したがって、このような、電源の条件で図1のA方式の垂直磁場コイル電流の立ち上げ回路において、垂直磁場コイル側のIESコイル $L_1'$ ,  $L_2'$ ,  $L_3'$ の電流をどの程度に設定するかを検討した。

図9は、変流器コイル側のIESコイル電流 $I_{ies}$ を変えた場合のプラズマ電流と垂直磁場コイル電流の立ち上がり特性を示す。

図10は、変流器コイル側のIESコイル電流 $I_{ies}$ が、第1段目=100kA, 第2段目=15kA, 第3段目=15kAとした時の $\alpha$ , 垂直磁場コイル側IESコイル $L_1'$ の端子間電圧 $E_{ies}$ , 垂直磁場コイル電源電圧 $E_{vr}$ , そして、実際に垂直磁場コイル端子間に印加する電圧 $E_v (= E_{ies} + E_{vr})$ を示す。垂直磁場コイル側のIESコイル電流は各段50kAとし、時定数調整抵抗 $R'$ は $0.25\Omega$ とした。

図9の③よりプラズマ電流の上昇率 $\dot{I}_p$ は、第1段目, 第2段目, 第3段目それぞれ116MA/sec, 68MA/sec, 42MA/secで第1段目の $\dot{I}_p$ が相当早いにもかかわらず、 $\alpha$ は充分設定値条件内に入れられる。プラズマ電流は4MA以上に達するがこれは、 $\dot{I}_p$ を大きくとるために、プラズマ抵抗のパラメータ $C_1$ を3.0としたためである。

しかも、垂直磁場コイル電源電圧の最大値は4kVで、電源電圧としては低いにもかかわらず図10は、4kVの範囲内で充分制御できることを示している。

図11は、変流器コイル側のIESコイル電流を第1段目80kA, 第2段目15kAとした時の $\alpha$ ,  $E_{ies}$ ,  $E_{vr}$ ,  $E_v$ 等の特性を示す。また、垂直磁場コイル側のIESコイル電流は、第1段目50kA, 第2段目, 第3段目を30kA, 時定数調整抵抗は $0.25\Omega$ とした。この場合のプラズマ電流の上昇率 $\dot{I}_p$ は第1段目, 第2段目, 第3段目それぞれ, 108MA/sec, 58MA/sec, 42MA/secで、 $\dot{I}_p$ が100MA/sec程度に対しては垂直磁場コイル側のIESコイル電流は50kAで充分だと言える。

図12は、変流器コイル側のIESコイル電流を第1段目60kA, 第2段目15kAとした時の $\alpha$ ,  $E_{ies}$ ,  $E_{vr}$ ,  $E_v$ 等の特性を示す。また、垂直磁場コイル側のIESコイル電流は第1段目40kA, 第2段目, 第3段目を30kA, 時定数調整抵抗は $0.25\Omega$ とした。

この場合のプラズマ電流の上昇率 $\dot{I}_p$ は第1段目, 第2段目, 第3段目それぞれ, 94MA/sec, 62MA/sec, 56MA/secで、 $\dot{I}_p$ が90MA/sec程度に対しては垂直磁場コイル側のIESコイル電流は40kAで充分だと言える。

#### 4.3 A方式における垂直磁場コイル側回路の動作開始時間

これまでの計算は、垂直磁場コイル側の動作開始時間が、プラズマ発生と同時刻(図8より $t=2ms$ ,  $T_{d0}=0$ )であったが、ここでは、動作開始時間が検出遅れなどのためにずれた場合について検討した。

図13は、 $T_{d0}=0ms, 0.5ms, 1ms$ と変え変流器コイル側のIESコイル電流 $I_{ies}$ を第1段80kA, 第2段10kA, 第3段10kAとし、垂直磁場コイル側IESコイル電流 $I'_{ies}$ を第1段50kA, 第2段30kA, 第3段30kA, とした時の $\alpha$ を示す。垂直磁場コイル電源電圧 $E_{vr}$ や垂直磁場コイル側IESコイル $L_1'$ の端子間電圧 $E_{ies}$ 等の記載はここでは省略した。

図14は、図13の初期の部分拡大し、 $T_{d0}=0.0, 0.5, 1.0\text{ms}$ の場合の $\alpha$ をまとめて示したものである。

これによると、垂直磁場コイル側の動作開始時間を遅らせると、プラズマ電流が立ち上がった後、 $\alpha$ が設定値の条件を満足する時点のプラズマ電流が次第に高くなる。本来、プラズマ電流が100kAないし200kA程度になったところから $\alpha$ を $100\pm 5\%$ の範囲に入れる(第2の設定値条件)ことを想定しているため、検出遅れ時間 $T_{d0}$ は可能なかぎり短縮する必要がある。

図に示すプラズマ電流の上昇率はほぼ $110\text{MA}/\text{sec}$ で相当大きくなるため、 $T_{d0}=1.0\text{ms}$ とすると、プラズマ電流が400kA程度にならないと $\alpha$ の設定値条件を満足しない。したがって、プラズマ電流の上昇率が小さくなれば、もう少し低いプラズマ電流値から $\alpha$ を設定値内に入れられるのでプラズマ着火の検出遅れはできる限り短縮する必要がある。

#### 4.4 B方式, C方式における垂直磁場コイル電源電圧

##### 4.4.1 B方式の場合

B方式(図2)の場合、第1段だけIESコイルと垂直磁場コイル電源を併用する方式であるが、2段目の立ち上がりから、垂直磁場コイル電源だけで立ち上げた場合、垂直磁場コイル電源電圧は最大どの程度必要になるかを検討した。

図15は変流器コイル側のIESコイル電流を第1段65kA, 第2段, 第3段が35kA, 垂直磁場コイル側のIESコイル電流を20kAとした時の $\alpha$ , 垂直磁場コイル電源電圧 $E_{vr}$ , 垂直磁場コイル側IESコイル端子間電圧 $E_{ies}$ , プラズマ電流 $i_p$ 等を示す。

ここでは、第2段, 第3段のプラズマ電流の上昇率 $\dot{I}_p(2)$ ,  $\dot{I}_p(3)$ が $90\text{MA}/\text{sec}$ 程度になるようにし、かつプラズマ電流が0.1secでほぼ3.3MAに達するよう、変流器コイル側のIESコイル電流 $I_{ies}$ を決めた。

また、垂直磁場コイル電源電圧の最大値は7kVとした。その結果、第2段以後の $\alpha$ はほぼ設定値条件を満足すると見てよい。これは、第2段, 第3段目のプラズマ電流の上昇率が $90\text{MA}/\text{sec}$ 程度までしかならないと想定すると、垂直磁場コイル電源電圧は最大7kVでもほぼ $\alpha$ は設定値条件を満足できるであろう。

次に、垂直磁場コイル電源電圧の最大値を8kVとした場合の計算結果を図16に示す。プラズマ電流の $\dot{I}_p$ の条件は図15の場合とほぼ同一にするために、変流器コイル側の第1段, 第2段, 第3段IESコイル電流をそれぞれ、65kA, 35kA, 35kAとした。また、垂直磁場コイル側のIESコイル電流 $I'_{ies}$ は17.5kAとした。

その結果、垂直磁場コイル電源電圧の最大値を8kVとすると、 $\alpha$ はさらに改善されることがわかる。これより2段目の $\dot{I}_p(2)$ が約 $95\text{MA}/\text{sec}$ 程度の場合、垂直磁場コイル電源はほぼ8kVあればよいことが結論されよう。

さらに、垂直磁場コイル電源電圧の最大値を9kVとした場合の計算結果を図17に示す。プラズマ電流の $\dot{I}_p$ の条件を図15, 図16の場合とほぼ同一にするために、変流器コイル側の第1段, 第2段, 第3段IESコイル電流 $I_{ies}$ をそれぞれ65kA, 35kA, 35kAとした。垂直磁場コイル電源の最大値を変えると、垂直磁場コイル電源電圧 $E_{vr}$ の変化の仕方が多少変っ



て来て、そのために垂直磁場コイル電流も変り、垂直磁場コイルと電磁結合したプラズマの電流変化も影響を受け、 $\dot{I}_p$  が多少変るが大きな差はないので IES コイル電流は同じ値にした。

垂直磁場コイル側の IES コイル電流  $I'_{ies}$  は 10kA とした。その結果、垂直磁場コイル電源の最大電圧を、さらに高く (9kA) したため  $\alpha$  は、さらに改善されていることがわかる。これより、垂直磁場コイル電源電圧は最大 9kA あれば充分と言えよう。

次に、第 2 段目のプラズマ電流の上昇率  $\dot{I}_p(2)$  が約 70MA/sec の時には、垂直磁場コイル電源電圧はどの程度必要かを検討した。垂直磁場コイル電源の最大電圧  $E_{vr, max}$  を 4kV, 5kV, 6kV とした場合について検討した。変流器コイル側の第 1 段, 第 2 段, 第 3 段 IES コイル電流  $I_{ies}$  は、それぞれ 65kA, 35kA, 35kA とした。垂直磁場コイル側の IES コイル電流  $I'_{ies}$  は 20kA とした。また、第 2 段目の  $\dot{I}_p(2)$  を下げるために、プラズマ発生直後 ( $t = 2.5ms$ ) に時定数調整抵抗  $R$  を 1/2 に切換えた。その結果  $\dot{I}_p(2)$  は 70MA/sec に、また  $\dot{I}_p(3)$  は約 65MA/sec になる。

図 18 は  $E_{vr, max} = 4kV$  の場合の計算結果を示す。垂直磁場コイル側の IES コイル電流  $I'_{ies}$  は 20kA とした。その結果、第 2 段目の立ち上がり時に  $\alpha$  は、93% 程度まで低下するので、4kV の垂直磁場コイル電源では不足であることがわかる。

図 19 は、 $E_{vr, max} = 5kA$  の場合の計算結果を示す。垂直磁場コイル側の IES コイル電流  $I'_{ies}$  は、 $E_{vr, max}$  が大きくなったので、15kA に下げた。その結果、第 2 段目の立ち上がり時に、 $\alpha$  は 95% 程度になるが、ほぼ設定値条件を満足できると言える。

図 20 は、 $E_{vr, max} = 6kA$  の場合の計算結果を示す。 $E_{vr, max}$  がさらに大きくなるので、プラズマ電流立ち上がり初期において  $\alpha$  が設定値条件を満足するために、垂直磁場コイル側の IES コイル電流  $I'_{ies}$  は 10kA に下げた。その結果、第 2 段目における  $\alpha$  は 96% 程度となり設定値条件を満足する。

#### 4.4.2 C 方式の場合

C 方式 (図 3) では、プラズマ発生と同時に、垂直磁場コイル電源を投入し、電源の最大電圧を印加するとして計算した。プラズマ電流と垂直磁場コイル電流が立ち上がって、 $\alpha$  が 100% になった時点から、3.1 の (2) で述べたような、垂直磁場コイル電源のフィードバック制御を行なうようにした。

C 方式の場合も、プラズマ電流の上昇率に応じて、垂直磁場コイル電流がプラズマ電流に追従するに要する電源電圧を求めた。

図 21 は第 1 段目のプラズマ電流の上昇率  $\dot{I}_p(1)$  が約 90MA/sec の時の  $\alpha$ 、垂直磁場コイル電源電圧  $E_{vr}$ 、プラズマ電流  $i_p$  等の特性を示す。 $\dot{I}_p(1) = 90MA/sec$  とするために、第 1 段, 第 2 段, 第 3 段 IES コイル電流  $I_{ies}$  をそれぞれ 95kA, 10kA, 10kA とし、第 2 段以後、時定数調整抵抗  $R$  は 1/2 に切換えた。

プラズマ発生と同時に、垂直磁場コイル電源を投入し電源の全電圧 (9kV) を印加すると、プラズマ電流が 0.2MA 程度になって  $\alpha$  は 95% になる。このことから、垂直磁場コイル電源電圧は少なくとも 9kV は必要である。

次に図 22 は第 2 段目のプラズマ電流の上昇率  $\dot{I}_p(2)$  を 90MA/sec 程度になる時の  $\alpha$ ,  $E_{vr}$ ,

$i_p$  等の特性を示す。第1段、第2段、第3段の IES コイル電流  $I_{ies}$  はそれぞれ 60 kA, 30 kA, 30 kA で、垂直磁場コイル電源の最大電圧を 7 kV とした。また、時定数調整抵抗  $R$  は 0.5  $\Omega$  とし、立ち上がり途中で切換えない。

図 2 2 より第2段立ち上げ時の  $\alpha$  は約 93% 程度まで低下するので、垂直磁場コイル電源電圧として 7 kV は不足とみるべきである。また、第1段立ち上げ時の  $\alpha$  は、 $\dot{I}_p(1)$  が 7 MA/sec で低いが、プラズマ電流が 400 kA 程度にならないと、 $\alpha$  が 95% にならないことから 7 kV の垂直磁場コイル電源では、不足とみるべきである。

次に、垂直磁場コイル電源電圧を 8 kV とした場合の計算結果を図 2 3 に示す。図 2 3 より、第2段目の立ち上げ時の  $\alpha$  は、図 2 2 よりよくなる。しかし第1段目の立ち上げの  $\alpha$  が 94% まで低下する所があるが、これは、計算上プラズマ発生と同時に垂直磁場コイル電源の全電圧(最大値  $E_{vr, max}$ ) を  $\alpha = 100\%$  になるまで印加するという条件で計算しているため、最大値が高ければ高い程、早く  $\alpha$  が 100% になり、その後電源制御を行なっても、まだプラズマ電流の上昇が早いため制御が追いつかないことを示している。そのため図 2 2 のように相当長い時間全電圧 7 kV が印加される時は、 $\alpha = 100\%$  に達した後のプラズマ電流の上昇がすでにゆるやかになっているので電源制御も良好になる。

図 2 4 は、垂直磁場コイル電源電圧の最大値を 9 kV とした場合の計算結果を示す。第2段目の立ち上げ時の  $\alpha$  はさらによくなる。一方、第1段目の立ち上げ時の  $\alpha$  は、垂直磁場コイル電源の最大値が、さらに高くなるので、先に述べた理由により、 $\alpha$  が 93% まで低下する。

図 2 5 は、プラズマ電流の上昇率が第1段、第2段、第3段それぞれ 74.5 MA/sec, 69 MA/sec, 69 MA/sec の場合の  $\alpha$ ,  $E_{vr}$  等を示す。垂直磁場コイル電源電圧の最大値  $E_{vr, max}$  は 8 kV とした。また、第2段、第3段目の  $\dot{I}_p$  を 70 MA/sec 程度にするために、第2段の立ち上がり時に時定数調整抵抗  $R$  を 1/2 に切換えた。しかも、プラズマ電流が 3.3 MA 程度まで立ち上がるようにするため、第1段、第2段、第3段の IES コイル電流  $I_{ies}$  はそれぞれ 60 kA, 35 kA, 35 kA とした。

この結果より、 $\dot{I}_p$  が 70 MA/sec 程度なら、垂直磁場コイル電源電圧の最大値は 8 kV で、 $\alpha$  はほぼ設定値条件を満足する。

変流器コイル側 IESコイル電流	80/10/10(kA)
垂直磁場コイル側	50/30/30(kA)
垂直磁場コイル電圧最大値	4(kV)
垂直磁場コイル側 IESコイル電圧最大値	40(mH)
時定数調整抵抗	0.25(Ω)
フラスマ抵抗のパラメータ C <sub>1</sub>	3.0

τ : 1 次遅れ  
τ<sub>0</sub> : 電流検出遅れ

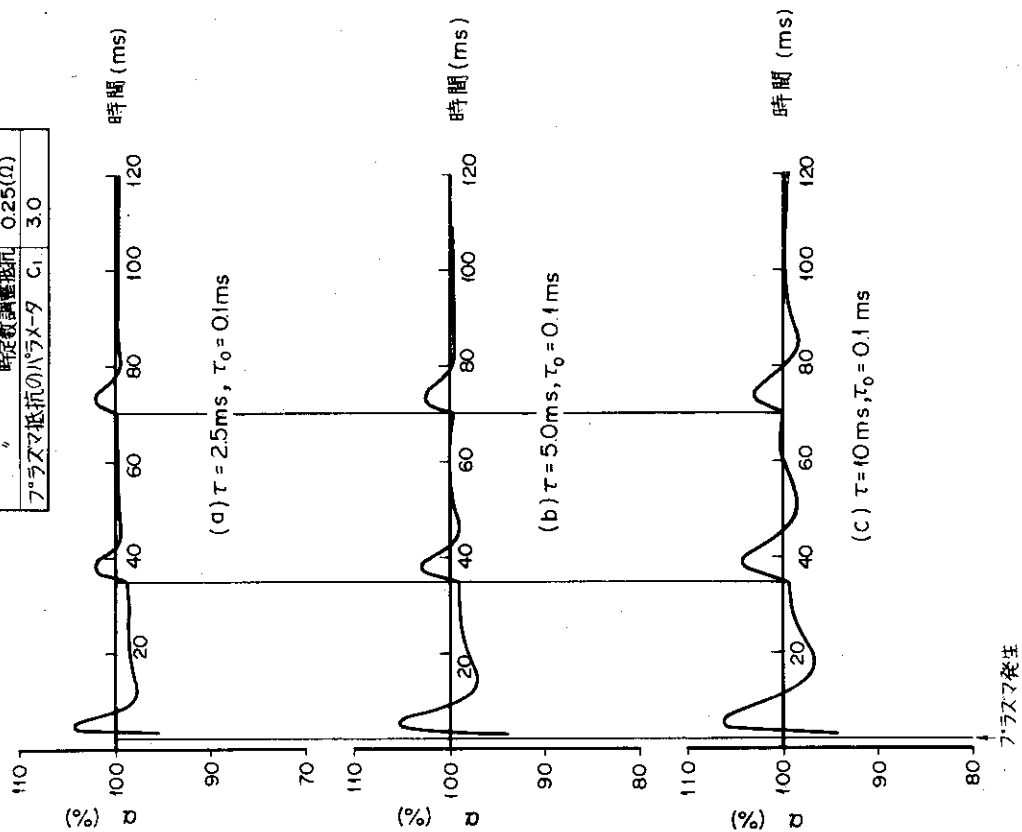


図 6 制御系の 1 次遅れを変えた場合の α (A 方式)

実線 : α  
点線 : E<sub>vr</sub>

IESコイル電流	60/30/30kA
時定数調整抵抗	0.5(Ω)
垂直磁場コイル電圧最大値	9(kV)
フラスマ抵抗のパラメータ C <sub>1</sub>	0.5

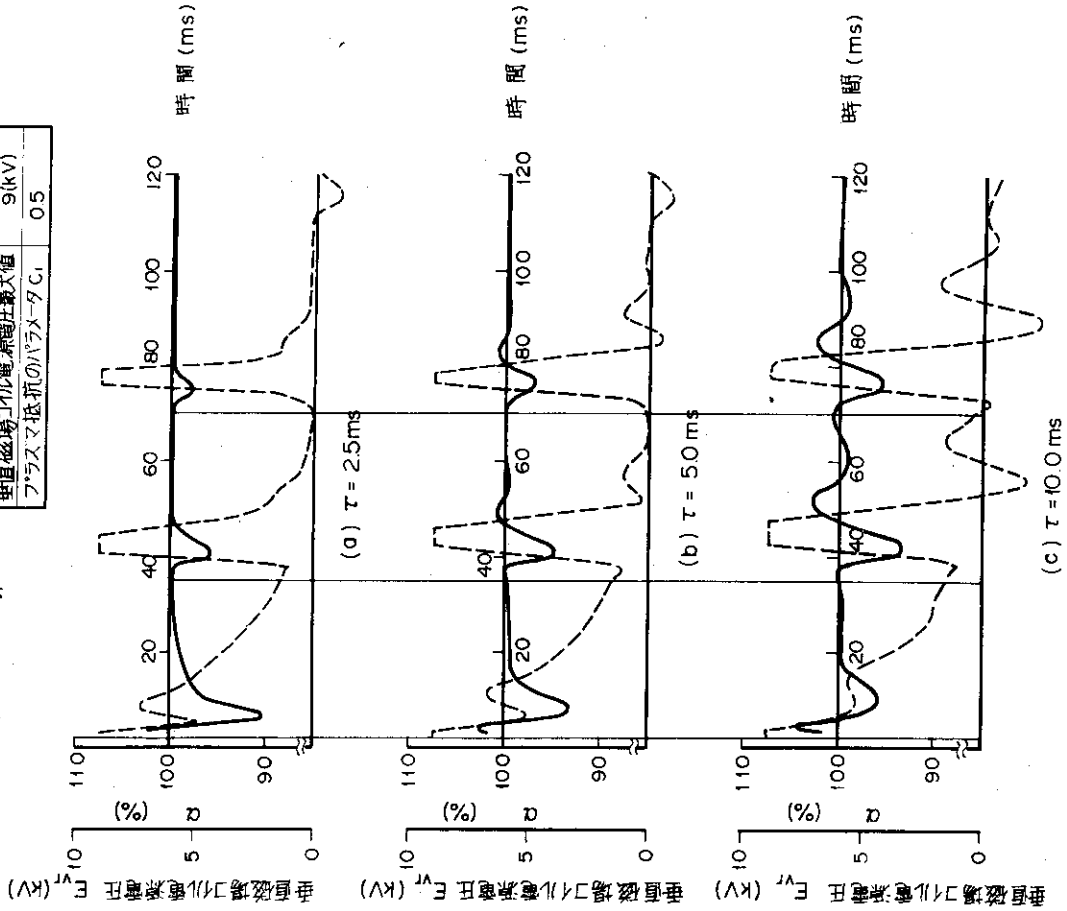


図 7 制御系の 1 次遅れを変えた場合の α (C 方式)

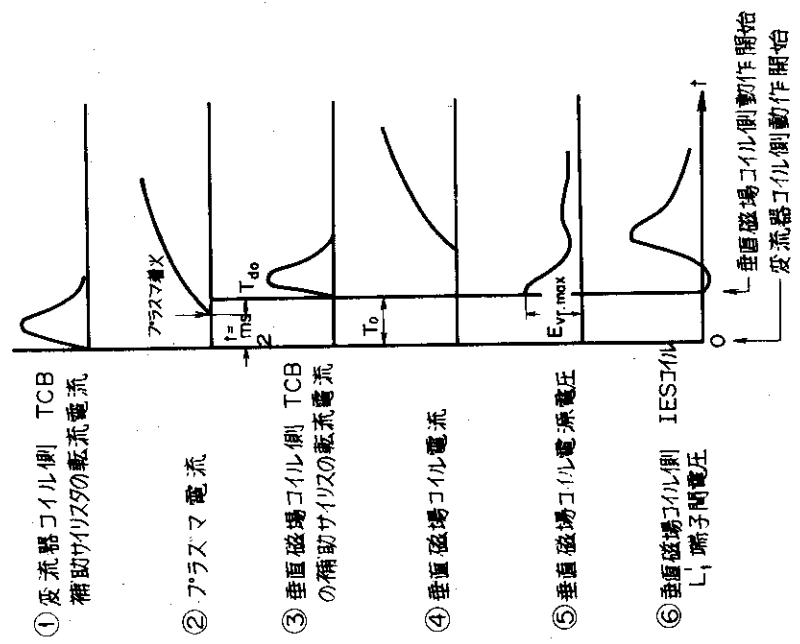
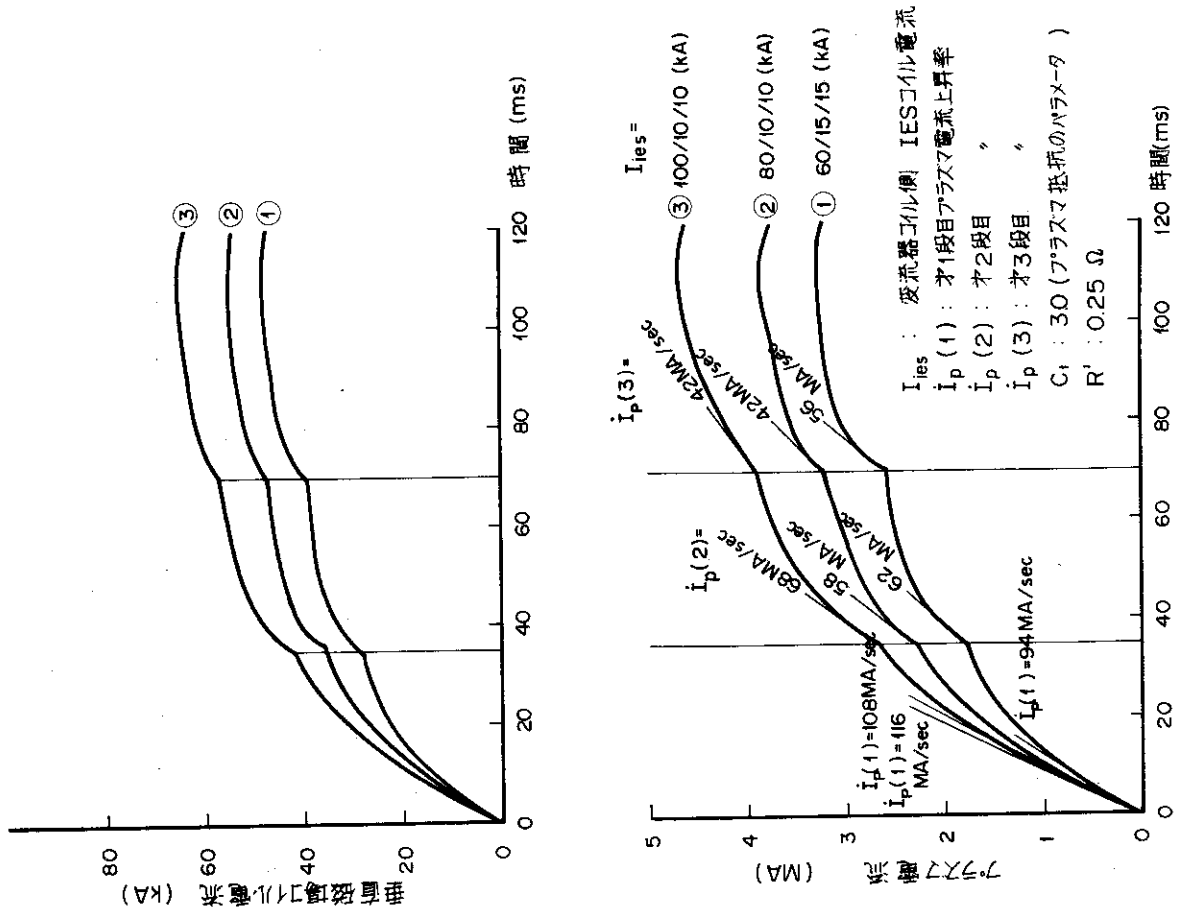


図8 A方式における変流器コイル側と垂直磁場コイル側の動作開始時の関係性 (A方式)

図9 プラズマ電流, 垂直磁場コイル電流の立ち上がり特性 (A方式)

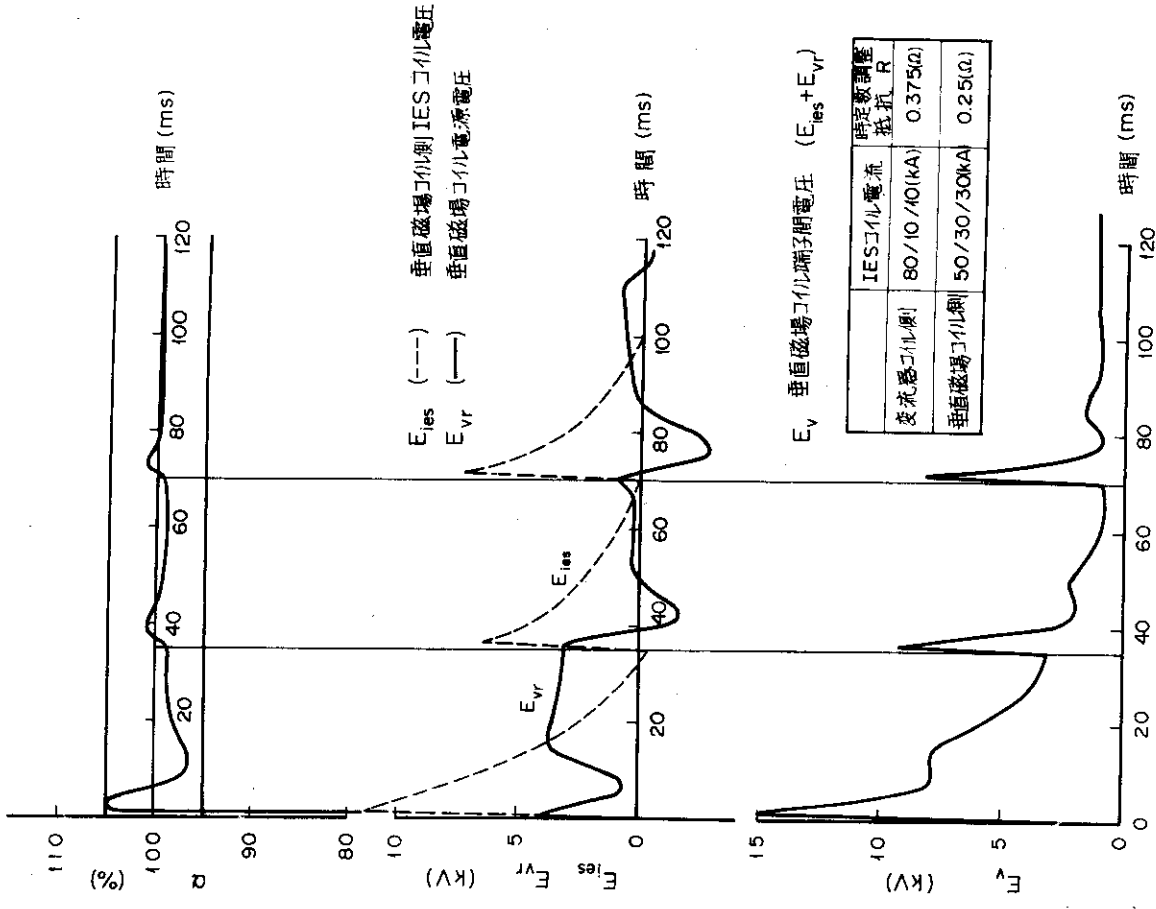


図 11 A方式の特性  
 ( $I_{ies} = 80/10/10$  kA,  $I'_{ies} = 50/30/30$  kA)

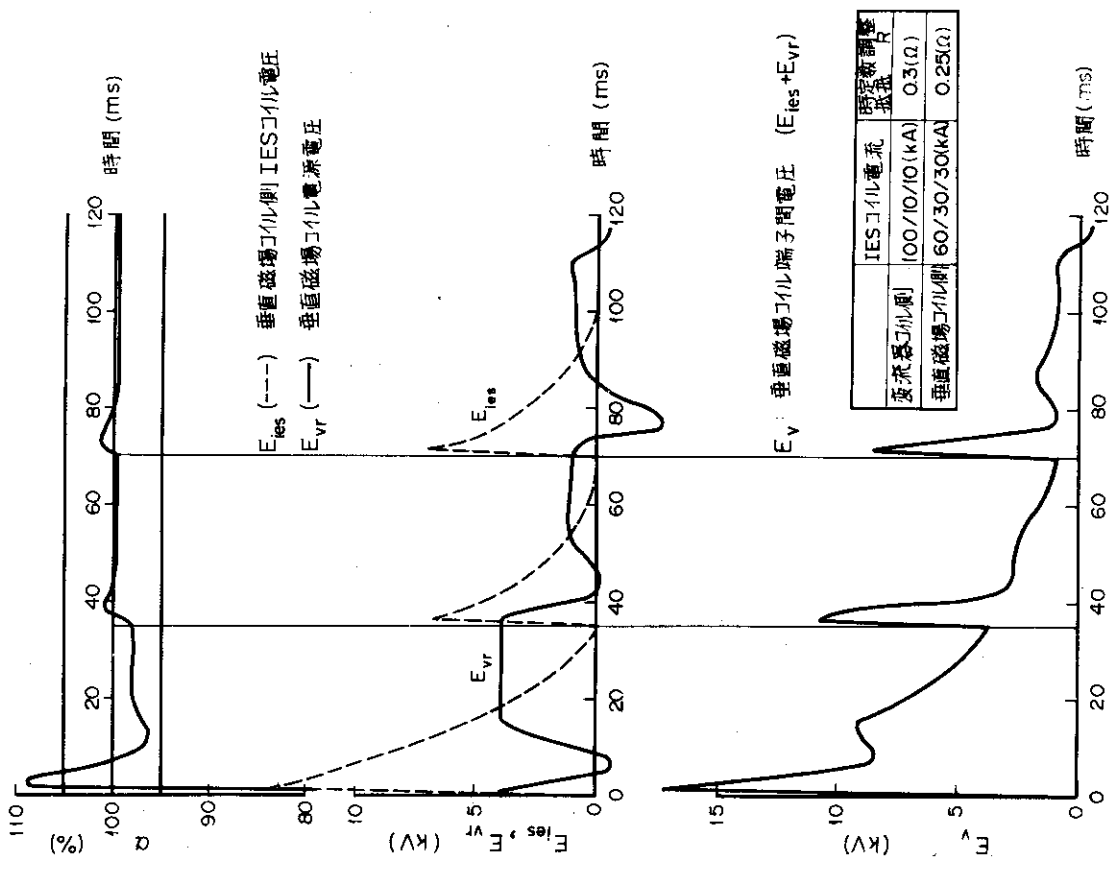


図 10 A方式の特性  
 ( $I_{ies} = 100/10/10$  kA,  $I'_{ies} = 60/30/30$  kA)

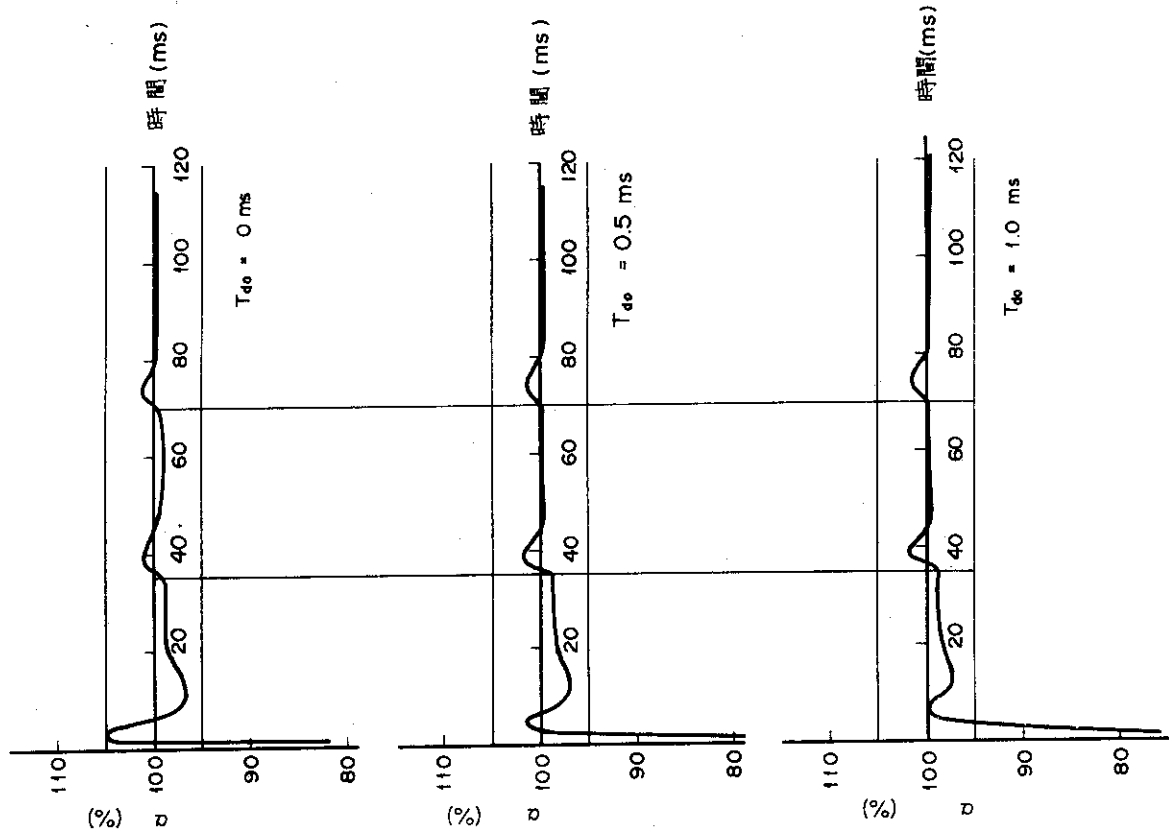


図13  $T_{de} = 0/0.5/1.0$ ms の場合の  $\alpha$  (A方式)

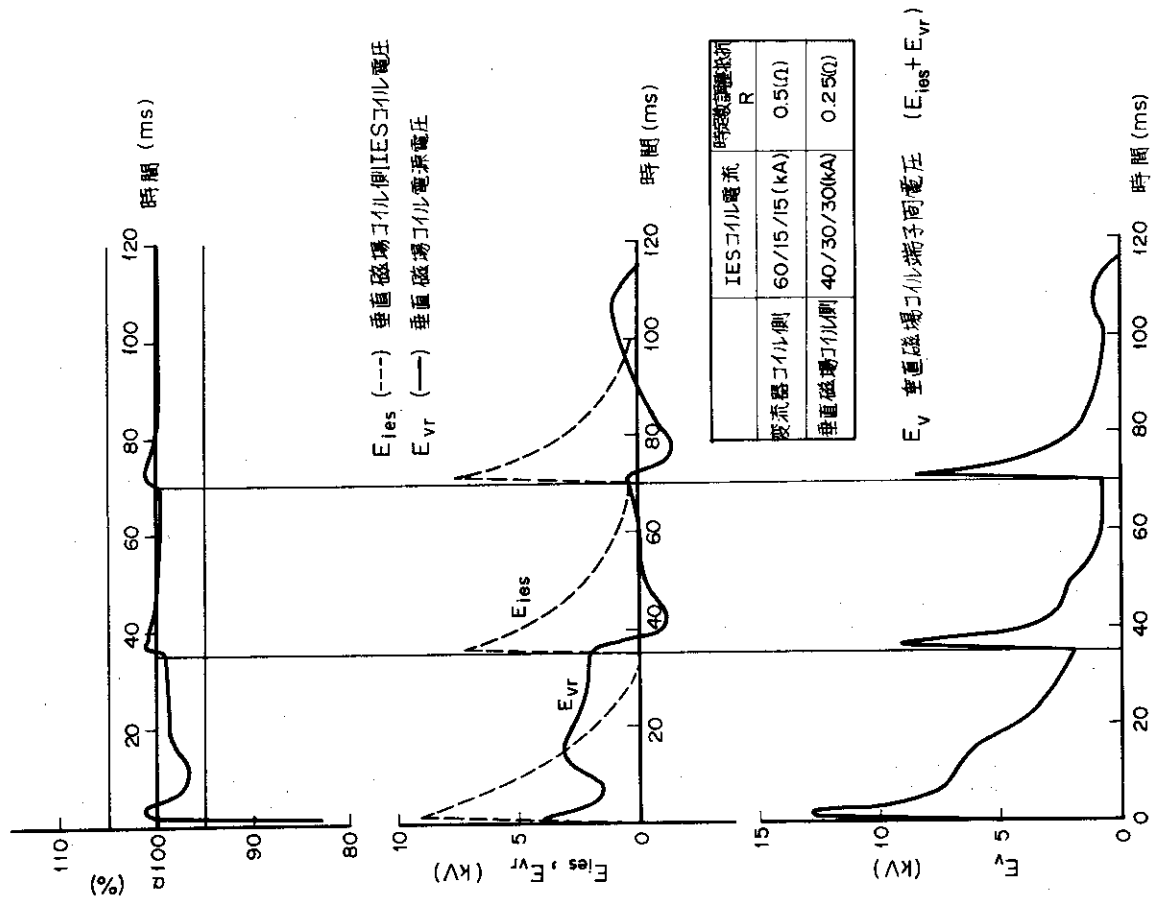


図12 A方式の特性  
( $I_{ies} = 60/15/15$ kA,  $I'_{ies} = 40/30/30$ kA)

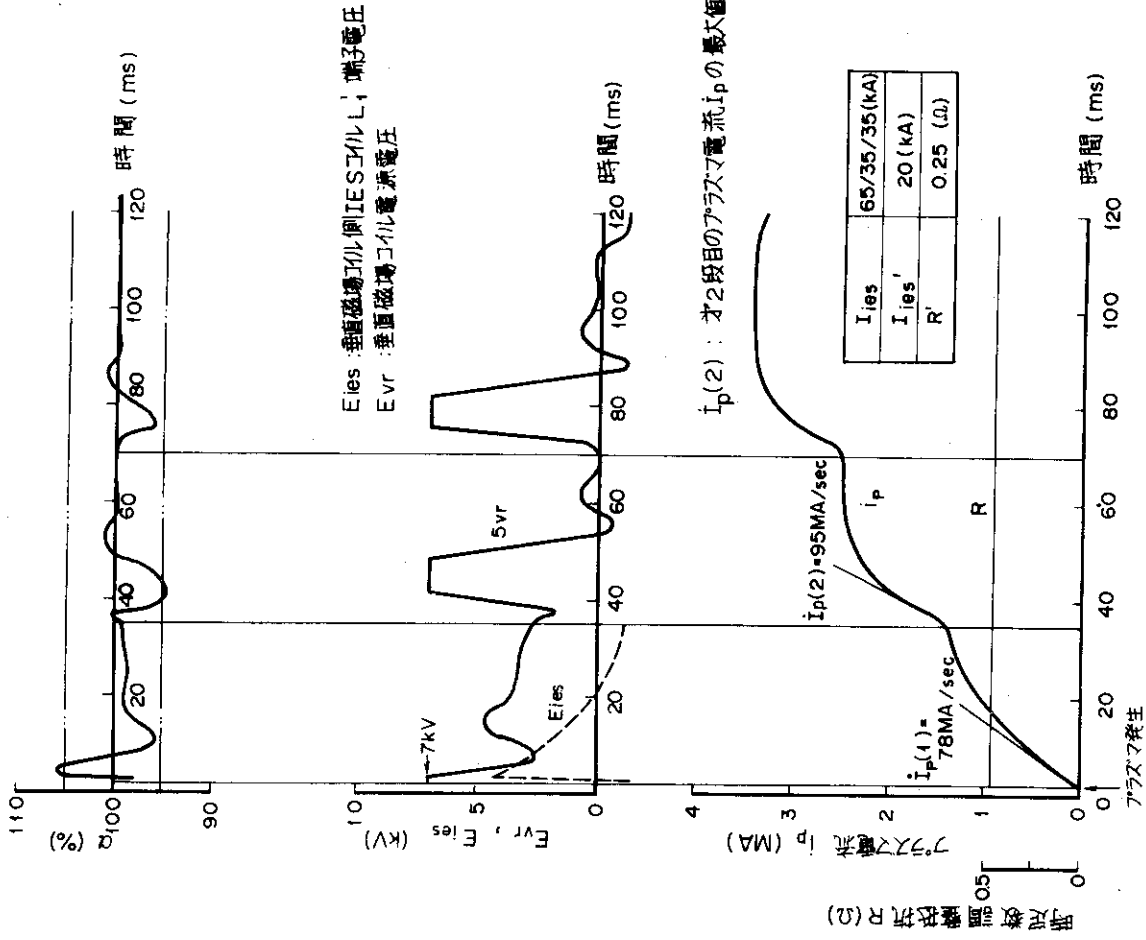


図15 B方式の特性  
( $i_p(2) = 95 \text{ MA/sec}$ ,  $E_{vr, max} = 7 \text{ kV}$ )

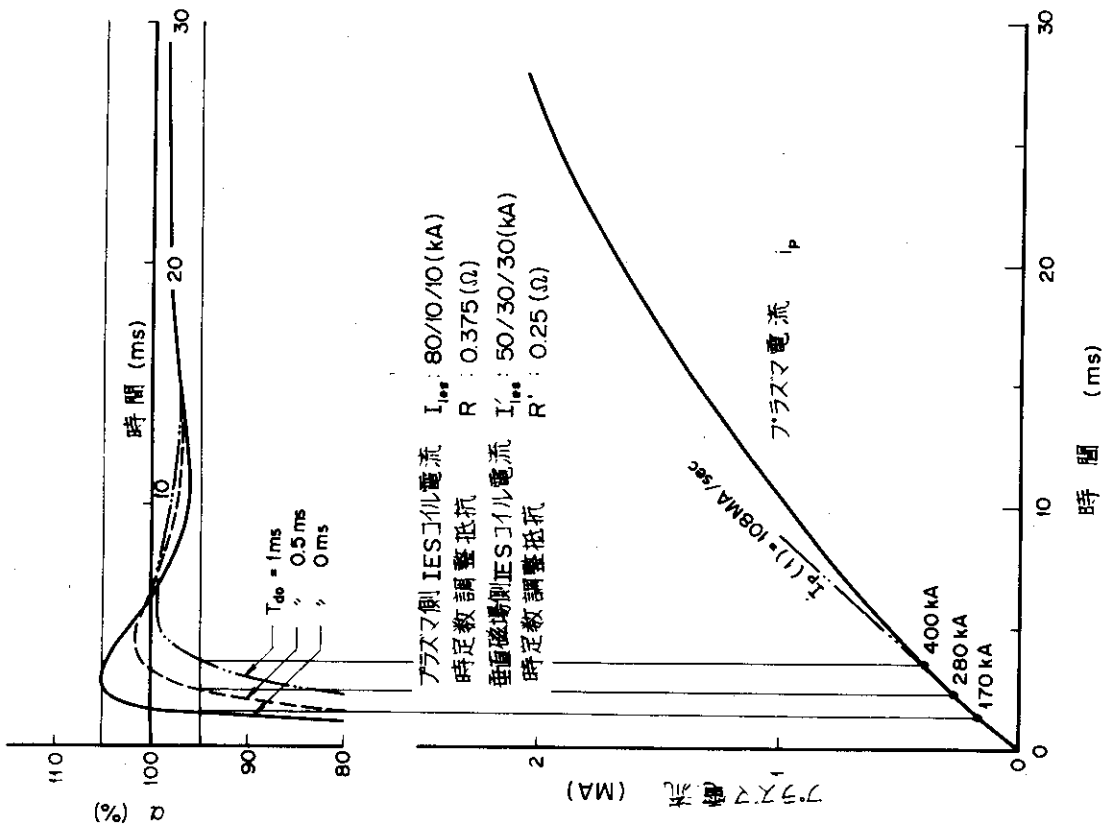


図14 プラズマ電流の立ち上がりと  $\alpha$  の関係 (A方式)

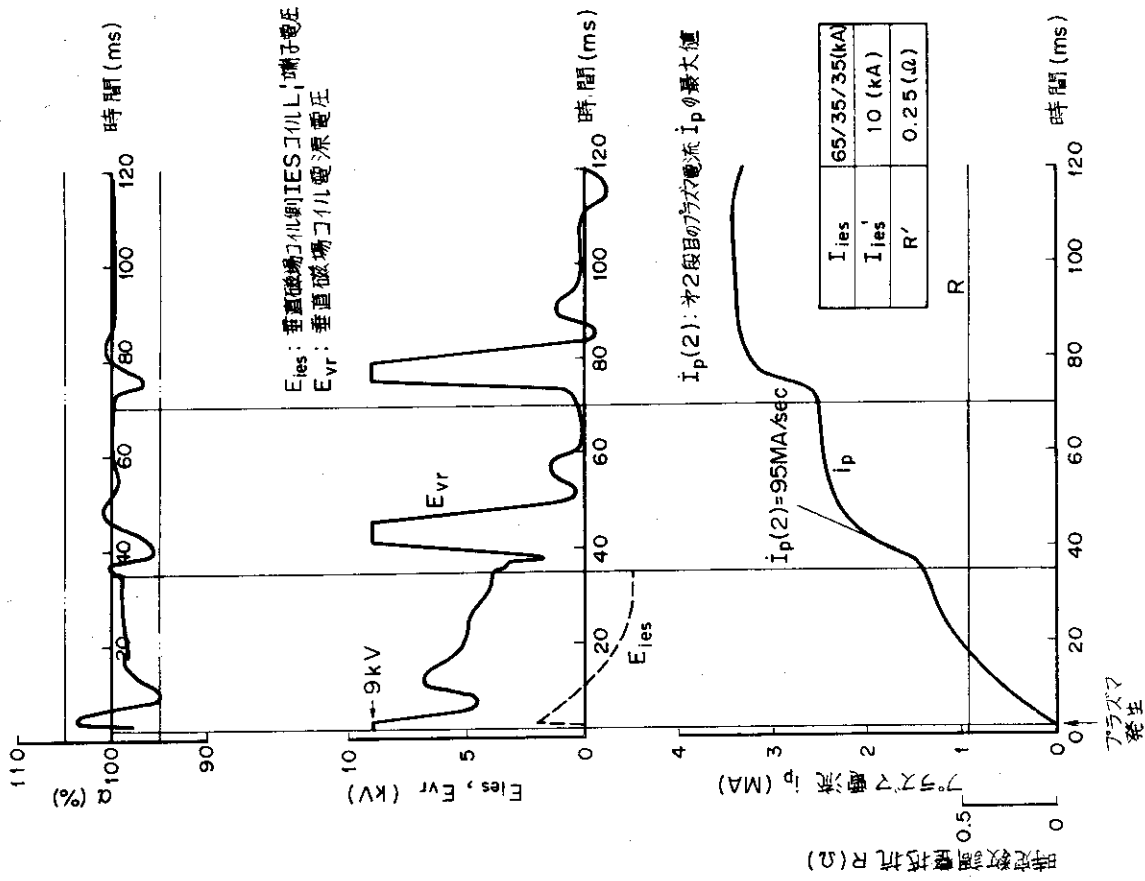


図16 B方式の特性  
 ( $i_p(2) = 96 \text{ MA/sec}$ ,  $E_{vr, \max} = 8 \text{ kV}$ )

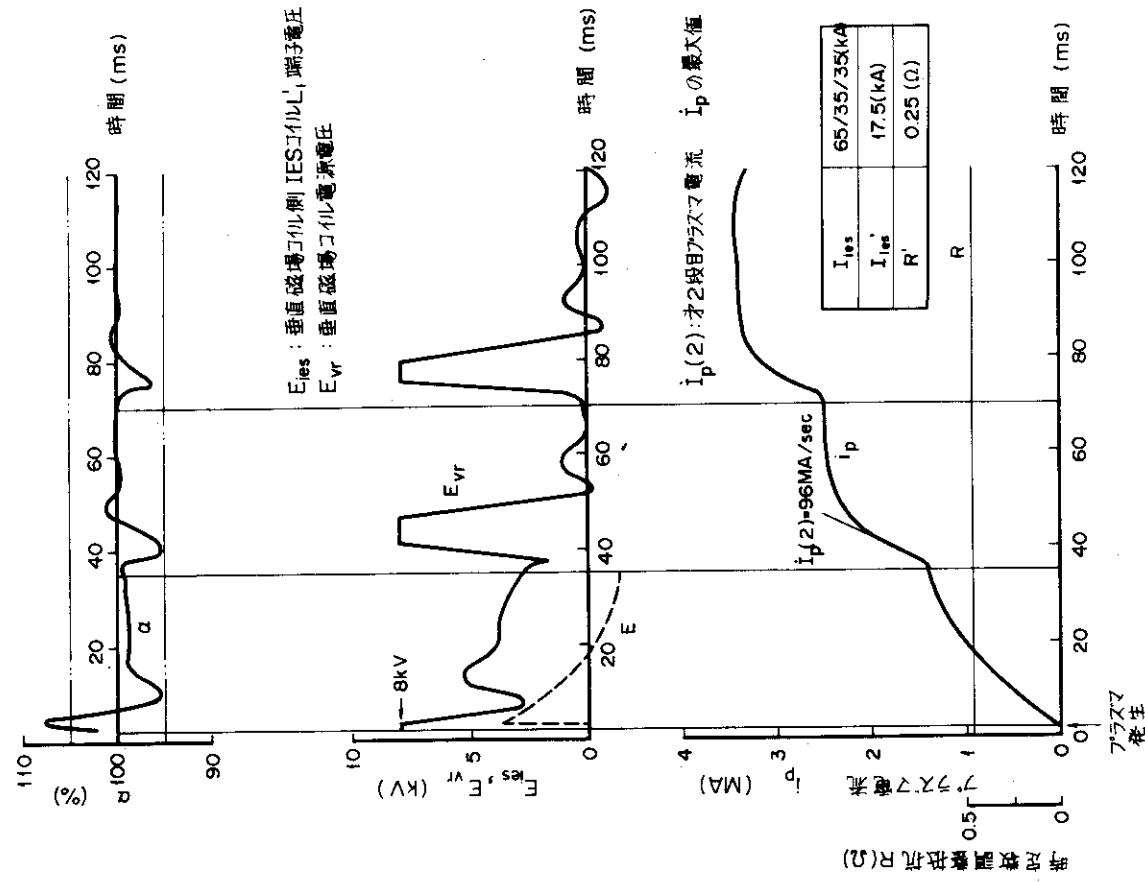


図17 B方式の特性  
 ( $i_p(2) = 95 \text{ MA/sec}$ ,  $E_{vr, \max} = 9 \text{ kV}$ )



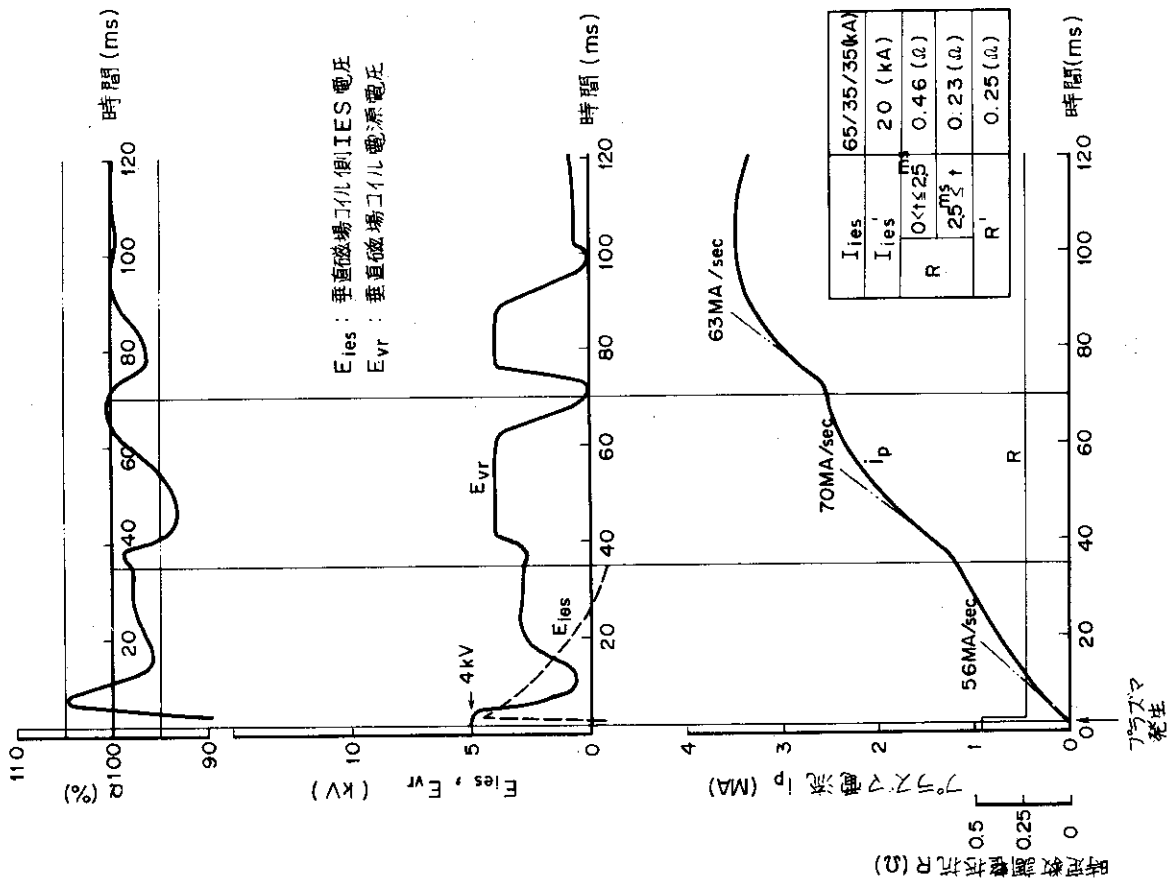


図18 B方式の特性 ( $E_{vr, max} = 4$  kV)

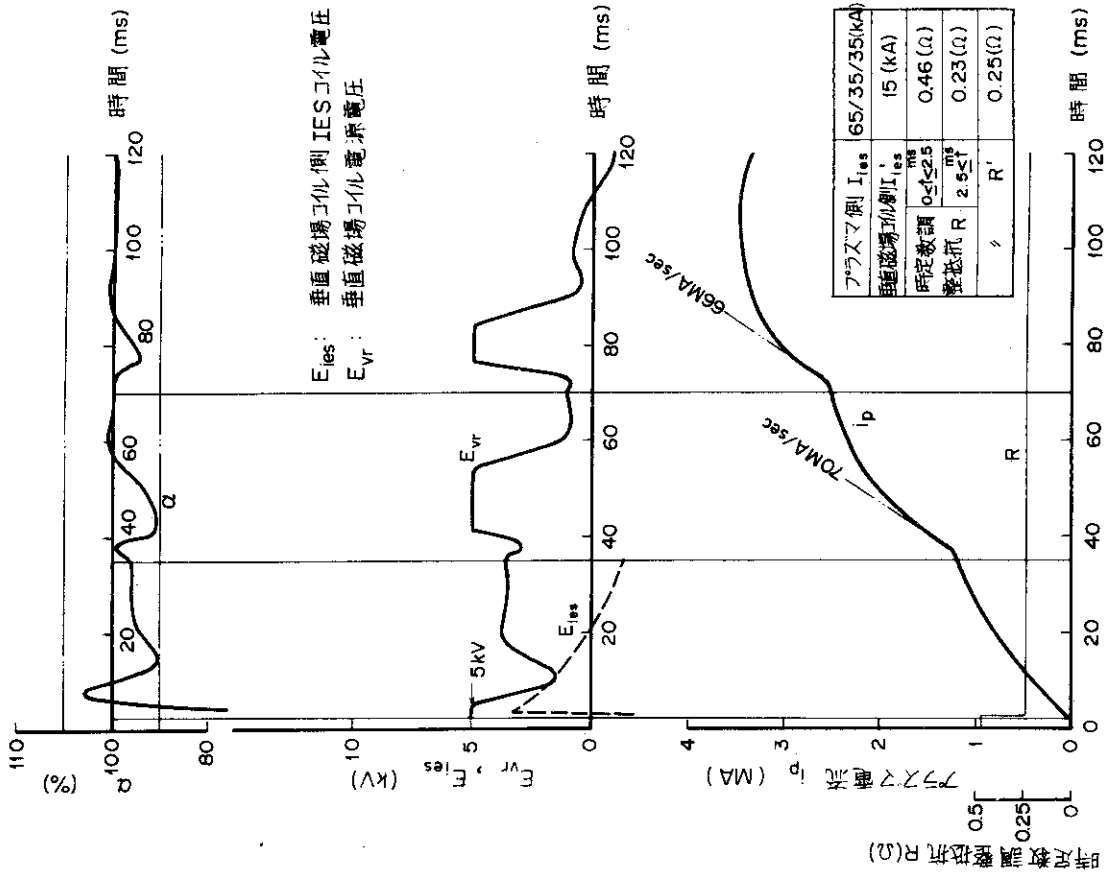


図19 B方式の特性 ( $E_{vr, max} = 5$  kV)

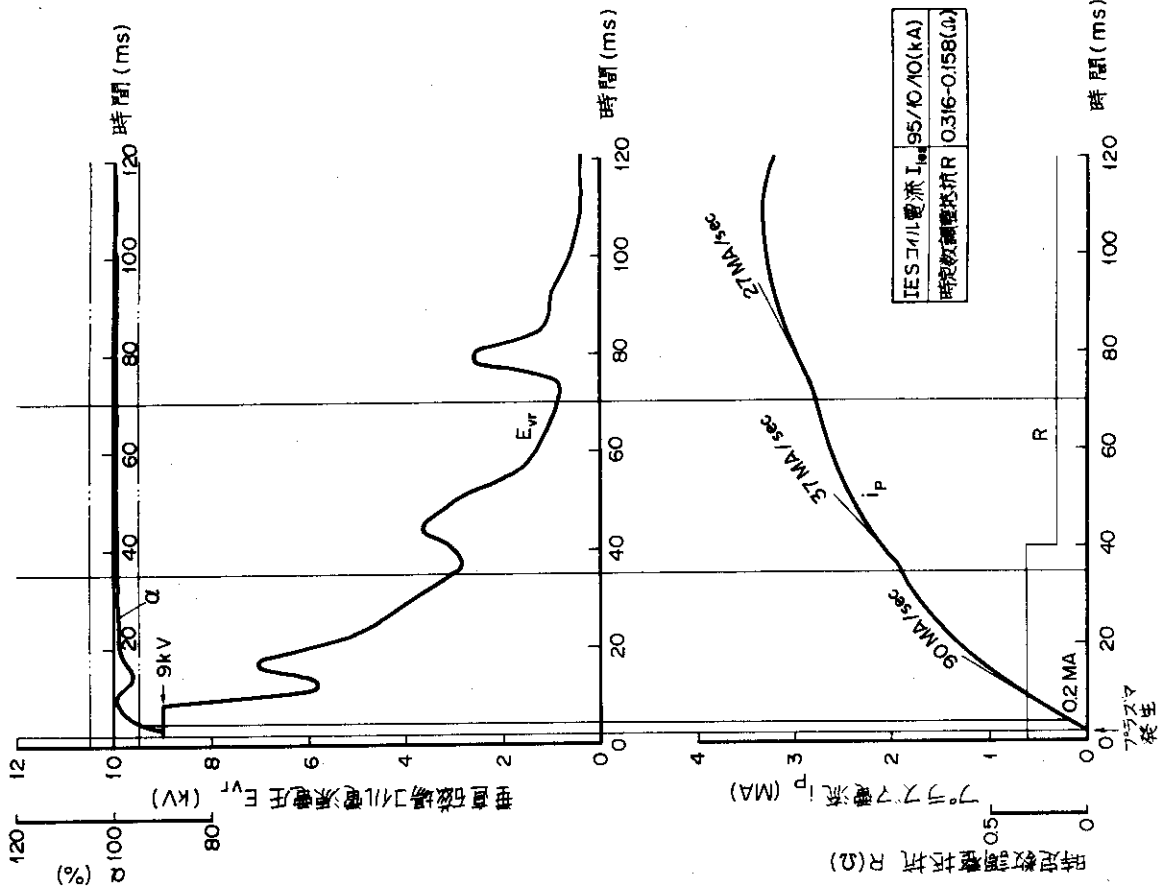


図21 C方式の特性

(  $i_p = 90/37/27$  MA/sec,  $E_{vr, max} = 9$  kA )

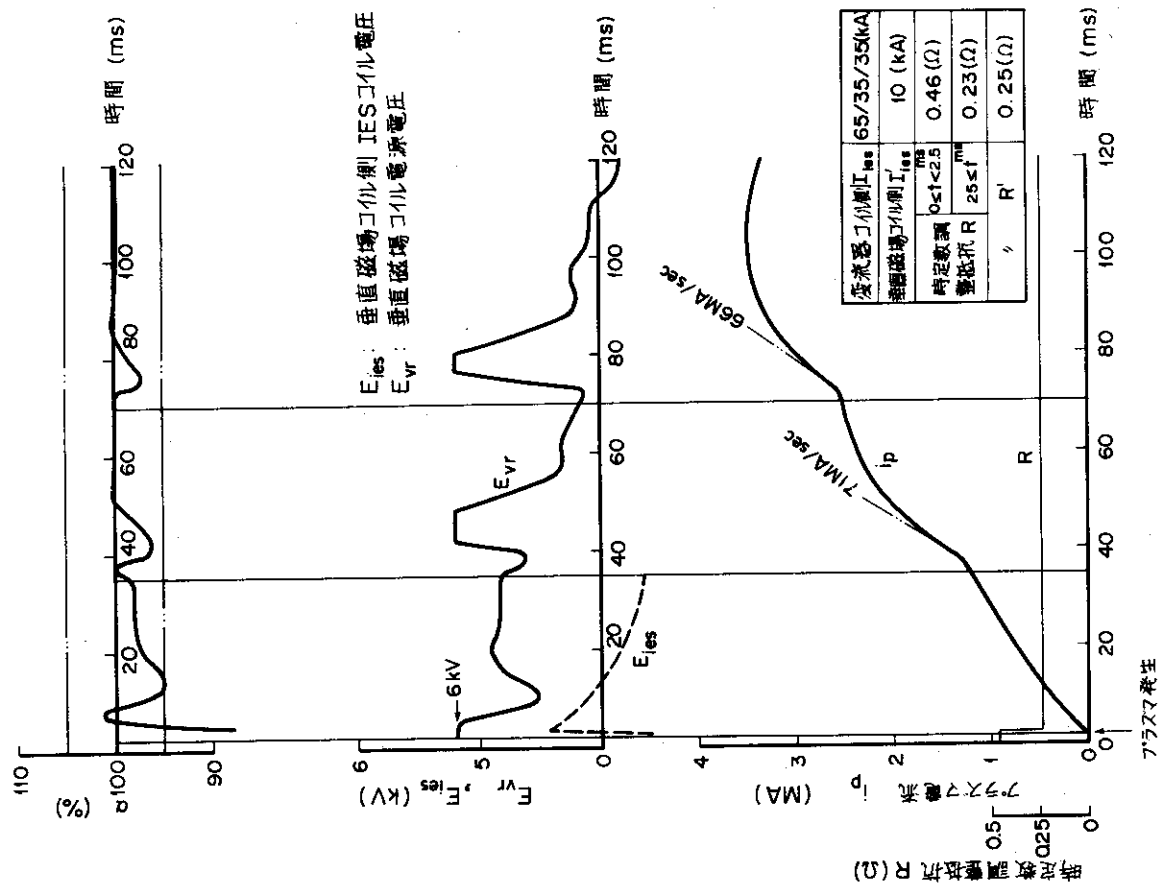


図20 B方式の特性 (  $E_{vr, max} = 6$  kV )

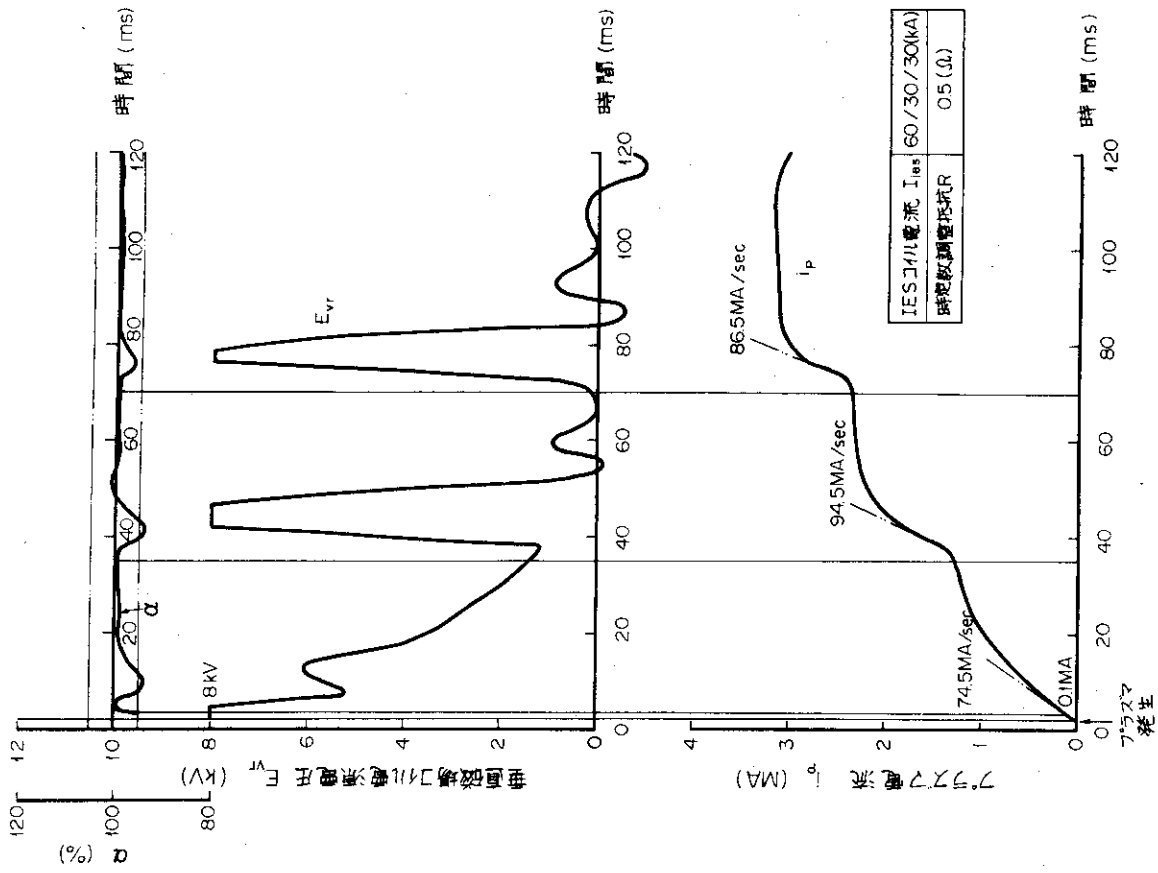


図22 C方式の特性 ( $E_{vr \cdot max} = 7 \text{ kV}$ )

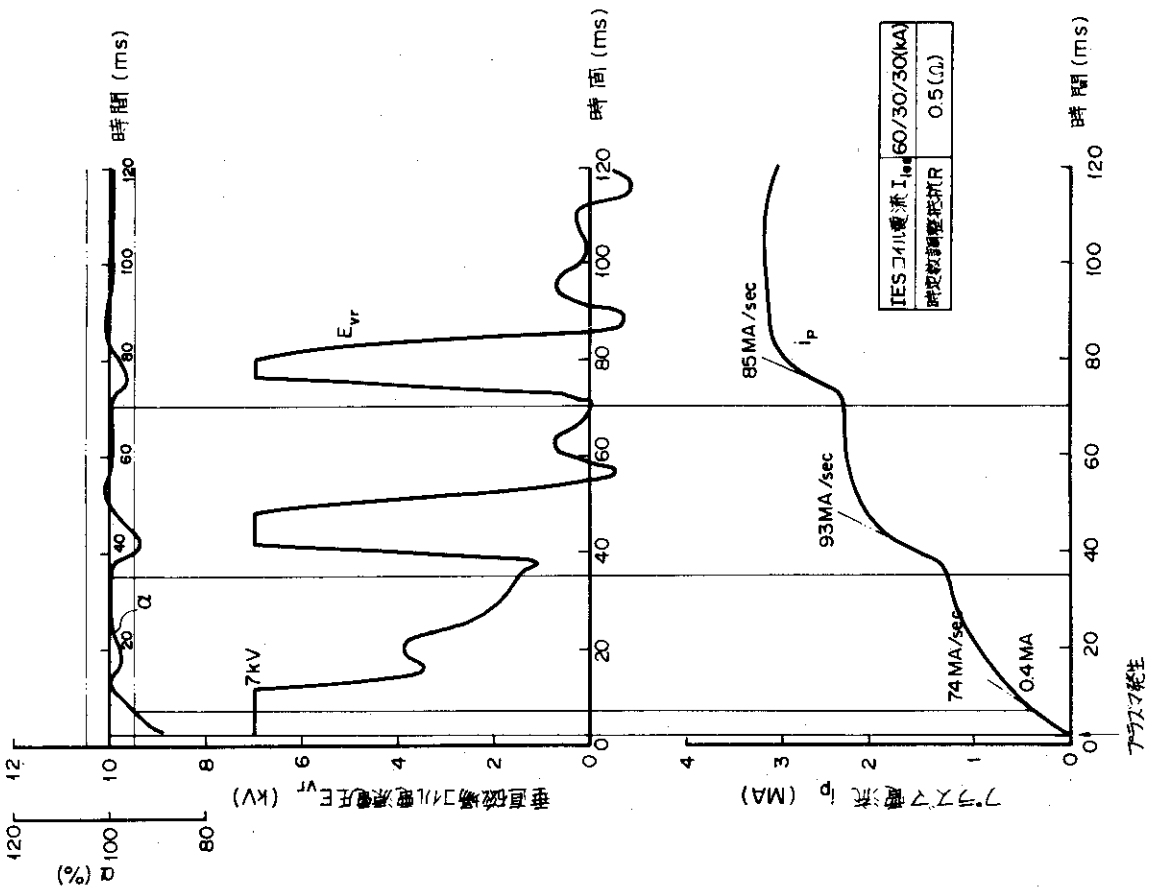


図23 C方式の特性 ( $E_{vr \cdot max} = 8 \text{ kV}$ )

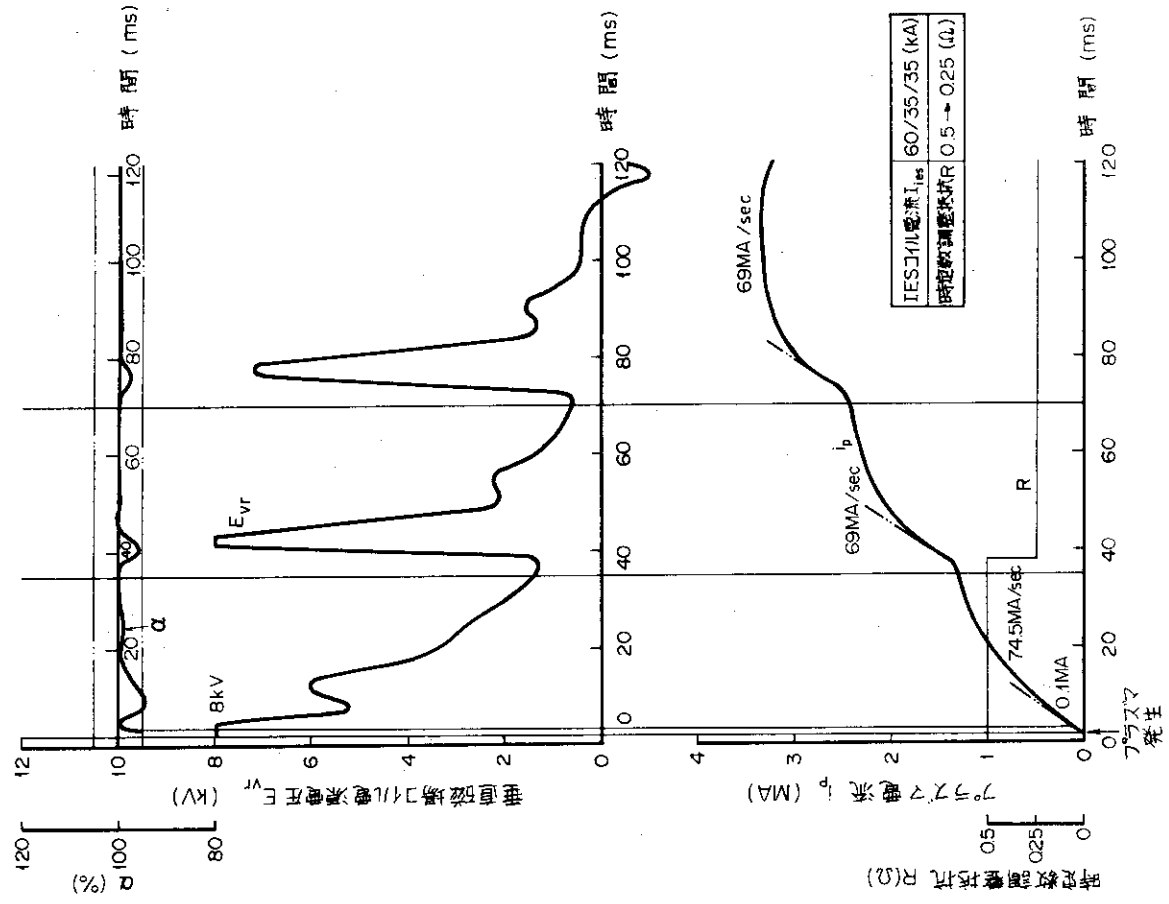


図25 O方式の特性

(  $i_p = 7.45/69/69$  MA/sec,  $E_{vr \cdot max} = 8$  kV )

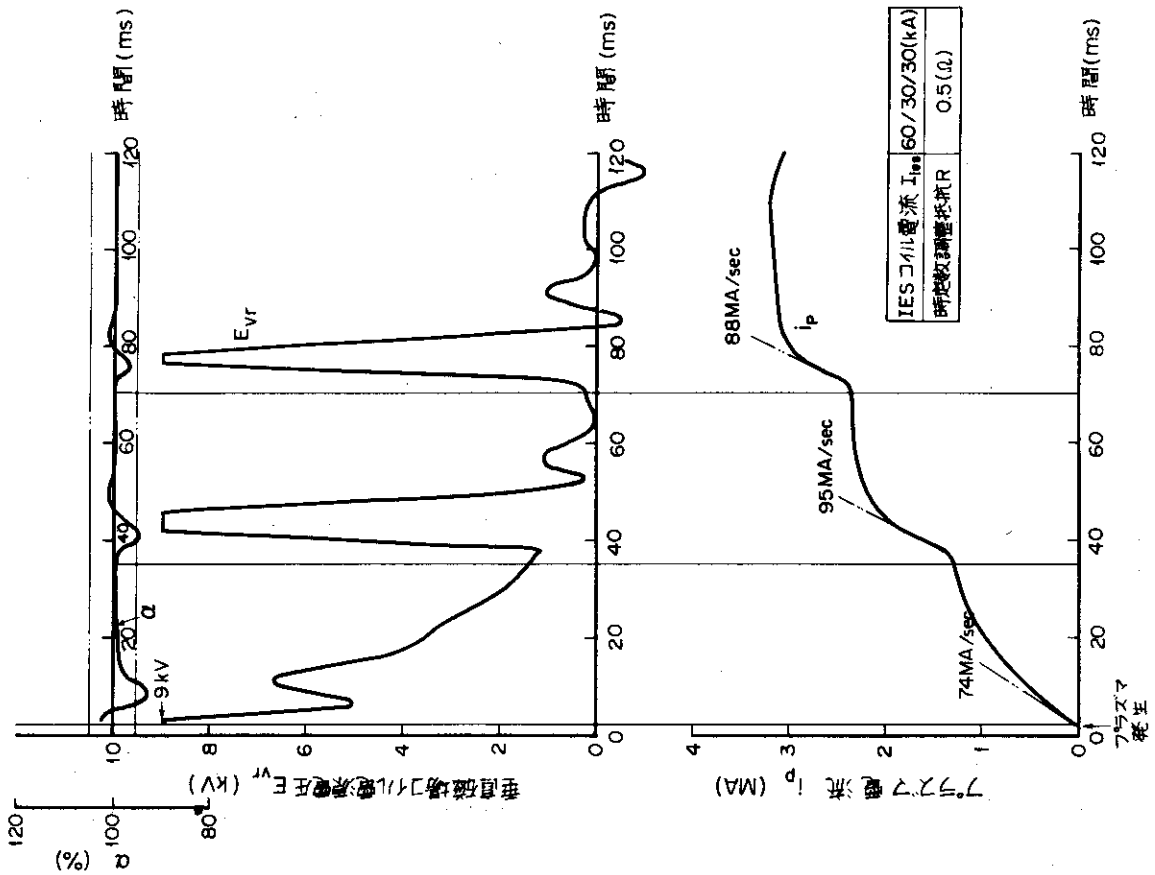


図24 O方式の特性 (  $E_{vr \cdot max} = 9$  kV )

## 5. 考 察

## 5.1 A方式

A方式における垂直磁場コイル電源の最大電圧は、フラット・トップ時の制御電圧 ( $E_{vr, max} = 4 \text{ kV}$ ) から決めた。一方、この電源電圧の範囲で、プラズマ電流の立ち上がりフェイズで  $\alpha$  を  $100 \pm 5\%$  の範囲に入れようとすると、電源電圧の他に垂直磁場コイル側の第1段 IES コイル端子間電圧を適切に決めなければならない。そのために、垂直磁場コイル側の IES コイル電流と時定数調整抵抗  $R'$  を求める必要があるがこの検討は、 $R' = 0.25 \Omega$  に固定した。

図26は、図9～図12の結果より、プラズマ電流の上昇率  $\dot{I}_p(1)$  と垂直磁場コイル側の IES コイル電流  $I'_{ies}$  の関係を示したものである。プラズマ電流の上昇率は実際には実験によって明らかになる物理量であるが、現段階では電源回路を設計する上から与えられたプラズマパラメータの範囲内で大体の上昇率を想定せざるを得ない。そうした意味から、例えばプラズマ電流の上昇率  $\dot{I}_p$  が  $70 \text{ MA/sec}$  以上にはなり得ないとすると、垂直磁場コイル側の IES コイル電流  $I'_{ies}$  は  $30 \text{ kA}$  程度でよいことになる。また、 $\dot{I}_p = 100 \text{ MA/sec}$  以上にはなり得ないとすると、 $I'_{ies}$  は  $50 \text{ kA}$  程度必要になると言える。

ここでは、IES コイル  $L'_1, L'_2, L'_3$  はそれぞれ  $10 \text{ mH}$  として検討したが、コイルの自己インダクタンスを変えるとコイル電流も変えなければならない。しかし回路の時定数を変流器コイル側と合わせるために、 $10 \text{ mH}$  とした。コイル製作上からいっても、自己インダクタンス、電流値の違ったコイルを何種類か作るより、できるだけ種類を少なくすることも、装置全体の経済性を考えた場合、必要である。

A方式では、 $\dot{I}_p$  が相当大きくなっても垂直磁場コイル側の IES コイル電流の値だけ変えることにより  $4 \text{ kV}$  の垂直磁場コイル電源電圧で、 $\alpha$  を  $100 \pm 5\%$  の範囲内に入れ、充分制御できると言える。

しかも、図9～図12を見ると垂直磁場コイル電源の電圧変化  $E_{vr}$  も極端に大きくなく、垂直磁場コイル側 IES コイル  $L'_1$  端子間電圧を効果的に補正していると言える。

参考例として、垂直磁場コイル電源を使用しないで、IES コイルだけ使用して垂直磁場コイル電流を立ち上げた場合 (IES 方式、表2または2.2, (1)参照) の計算結果を図27に示す。この図より、電源制御がないために、 $\alpha$  の変動が大きくなる (上下10%程度) ことがわかる。これからみても、電源併用方式において、電源が有効に作用していることがわかる。

## 5.2 B方式

B方式では、第1段のみA方式で動作し、第2段以後はC方式で動作する回路なので、第1段の動作は5.1で述べた通り、問題はない。しかし、第2段以後は垂直磁場コイル電源だけで立ち上げるため、垂直磁場コイル電源電圧を決める必要がある。

図28は、図15～図20の計算結果をもとに、第2段目のプラズマ電流上昇率 $\dot{I}_p(2)$ に対する垂直磁場コイル電源電圧の関係を示したものである。○印は電源制御によって $\alpha$ を設定値の範囲に入れられる垂直磁場コイル電源電圧 $E_{vr, max}$ （最大電圧値）を示す。一方、×印は、電源制御を行なっても $\alpha$ が設定値の条件を満足しない場合の垂直磁場コイル電源の最大電圧を示す。

この結果、プラズマ電流の上昇率が $\dot{I}_p(2)=70\text{MA}/\text{sec}$ 以上にはならないと想定すると、垂直磁場コイル電源の最大電圧は6kV程度あれば充分と言えよう。また $\dot{I}_p(2)=100\text{MA}/\text{sec}$ 以上にはならないと想定すると、 $E_{vr, max}$ は9kV程度あれば充分と言えよう。なお、図28で、実際に適用する電圧としては余裕をみて限界値より、約20%程度高い電圧値（点線）を使うようにした。

また、第1段目の立ち上がりでは、IESコイルと垂直磁場コイル電源の併用方式なので、上記の電源電圧で充分制御できる。

### 5.3 C方式

C方式では、第1段目から垂直磁場コイル電源を投入するので、第1段目のプラズマ電流の上昇率と、 $\alpha$ の関係より、必要な垂直磁場コイル電源電圧 $E_{vr, max}$ を求めればよい。

図29は、図21～図25の結果をもとに、プラズマ電流の $\dot{I}_p$ と垂直磁場コイル電源電圧 $E_{vr, max}$ の關係にまとめたものである。本検討ではプラズマ電流が約100～200kAに達した時点から、プラズマを平衡位置に保持するものと計算上想定しているため、プラズマ電流が100ない至200kAに達するまでに $\alpha$ は100%程度になるよう垂直磁場コイル電流を立ち上げておかなければならない。そのために、プラズマ発生直後垂直磁場コイル端子間に印加する全電圧（電源電圧の最大値）の値を求めた。

プラズマ電流の上昇率を70MA/sec以上は考えないとすると、垂直磁場コイル電源の最大電圧は8.5kV程度あれば充分だと言える。また、プラズマ電流の上昇率を90MA/sec程度まで考えるとすると、垂直磁場コイル電源電圧としては最大電圧9.5kVでほぼ $\alpha$ は設定値の条件を満足するので、これを限界値とした。実際に適用する電圧としては余裕をみて限界値より、約20%程度高い電圧値（点線）を使うようにした。

ただ、図24に示すように、最大電圧9kVにしても、4.4.2で述べた理由により、 $\alpha$ が93%まで低下するので実機の運転ではむしろプレプログラム制御の方がうまくいくとも考えられる。

しかし、実際にはプラズマ電流がどう立ち上がりをするのか予測できないため、プレプログラム制御で電圧を設定するのもかなり難かしい。したがって、図24に示すような、 $\alpha$ の落ち込みをなくするには、制御系の応答速度を早くしなければならない。この計算では制御系の一次遅れ $\tau$ は5msとしたが、さらに、 $\tau$ を小さくするのは制御系の設計の上からも限界がある。したがって、垂直磁場コイル電源だけでフィードバック制御する方式は、A方式に比べプラズマ電流の初期立ち上がりにおけるフットイングにかなり無理が生じると考えるべきである。

#### 5.4 分離形にした場合の投入のタイミング

第1段で、変流器コイル側と垂直磁場コイル側の回路の動作開始時間の遅れがあった場合について考察する。A方式とB方式は、ここでは、プラズマ発生を検出してから、垂直磁場コイル側の第1段TCBの補助サイリスタを点弧する考え方(図8)で進めて来たが、図14より検出遅れ $T_{d0}$ が0.5ms程度なら特に問題はない。ただ、補助サイリスタ点弧と同時に、垂直磁場コイル電源の全電圧(4kV)を印加するため、最初垂直磁場コイル電源によって、垂直磁場コイル電流が立ち上げられるので、電源の影響で多少垂直磁場コイル電流が立ち上がっている。

一方、C方式の場合は、プラズマ発生と同時に、垂直磁場コイル電源の全電圧が垂直磁場コイル端子間に印加されるとして計算した。しかし実際には、プラズマ発生と同時に、電源の全電圧を発生する技術は、整流装置設計の観点から難しい面もあるので、簡単な運転方式としてはプレプログラム制御によってプラズマ発生時点をねらい電圧を発生させた方がよい。

これは、A方式でも、B方式でも同じことが言えるわけであるが、両方式ともIESコイルに高電圧を瞬間的に発生できるのが、C方式と異なる所である。

次に、第2段、第3段の切換えでは、変流器コイル側も垂直磁場コイル側もサイリスタシャ断器を使って考えているため、両側の補助サイリスタの点弧の時間遅れはほぼ零と考えてよいだろう。

また、両側のTCB回路の定数の違いによる、シャ断時間(補助サイリスタが点弧してから、転流電流が零になって補助サイリスタがOFF状態になるまでの時間とする)の違いがあっても、それは短い時間内での問題なので、 $\alpha$ に与える影響は少ないだろう。

さらにA方式の利点は、垂直磁場コイル電源電圧が低く(4kV)でよいので、電源制御による電圧の変動が大きくなり制御性からみても楽な面がある。

#### 5.5 フィットティング

A、B、Cいずれの方式でも、垂直磁場コイル電源容量が充分であれば、フィッティングについては優劣はない。しかし、電源を制御する場合、C方式は、電源電圧も高くなり、電圧変動が大きくなるので応答を早くするなど制御上で問題がある。A方式のように、電源電圧が低く、フィッティングを良くするために補正する程度の電圧変動であれば、制御性についてはC方式程問題は起らない。

なお、プレプログラム制御については検討しなかったが、C方式の制御電圧波形(図21～図25)を見ると、プレプログラム制御でも、一応フィッティングは可能と思われる。

#### 5.6 垂直磁場コイルの印加電圧

プラズマが発生した後、プラズマ電流が上昇率約100MA/secで立ち上がり、さらに、100kA～200kAになった時点から $\alpha$ が設定値の条件を満足するようにするには、図14(図9と図11から拡大した)、図11からも明らかのように(実際には $\dot{I}_p$ は約110MA/sec

だが), 第1段目で垂直磁場コイル端子間に約15kVの電圧を印加する必要がある。

C方式では, 図29より,  $\dot{i}_p = 110 \text{ MA/sec}$  の場合,  $E_{vr, \max} = 12 \text{ kV}$  程度必要なことを示している。A方式と多少電圧が違うのは, C方式ではプラズマ発生と同時に, 電源の全電圧がコイル端子間に印加させるのに対し, A方式では瞬時的に15kVの電圧が印加されないためである。

したがって, 電源として, 実機では15kV程度は考えておかなければならない。

### 5.7 IESコイル2段構成の場合の垂直磁場コイル側のIESコイル電流

これまでの検討は, IESコイル3段構成の空心変流器コイル電源回路で行ったおり2段立ち上げについては検討していない。2段構成にした場合, プラズマ電流の上昇率  $\dot{i}_p$  を大きくしないと0.1secで, プラズマ電流を3.3MAまで立ち上げることができない。そのため,  $\dot{i}_p$  は100MA/sec程度まで考えておく必要があると思われる。その場合, A方式なら垂直磁場コイル側のIESコイル電流  $I'_{ies}$  は, 50kAあれば充分である(図26参照)。

### 5.8 各方式の比較

与えられプラズマパラメータを全範囲にわたって検討すると, プラズマ電流の上昇率  $\dot{i}_p$  が200MA/sec以上になるケースもあり, その全部を満足するような垂直磁場コイル電源は電圧も高くなってポロイダル磁場コイル電源システムとして, 不経済になるだろう。

これまでの検討で, プラズマ電流の上昇率をベースに, 垂直磁場コイル電流の立ち上げ方式が, ほぼ決められることがわかった。 $\dot{i}_p$  が70MA/secの場合と100MA/secの場合について, これまでの検討結果をまとめると表6のようになる。

$\dot{i}_p = 70 \text{ MA/sec}$  の場合, A方式では, 垂直磁場コイル側の各IESコイル電流が30kAあれば, 垂直磁場コイル電源電圧は4kVで充分である。この電圧は, プラズマ制御フェイズにおいて電源電圧が4kVあればプラズマの位置制御ができるという検討結果をもとにしているが, プラズマ立ち上げフェイズにおけるフィッティングもIESコイルと電源との併用方式で, 充分満足できることが示された。

$\dot{i}_p = 100 \text{ MA/sec}$  の場合, プラズマ電流の上昇率がさらに厳しくなっても, 垂直磁場コイル側のIESコイル電流を50kA程度にするだけで, 垂直磁場コイル電源電圧は4kVでも, まだ充分制御ができる。

このように, A方式では, 垂直磁場コイル側のIESコイル電流を大きくするだけで, 垂直磁場コイル電源電圧は最大4kVのままで, フィッティングは充分可能だと考えてよい。そのため, 電源を併用する方式はフィッティングをよくするうえで効果があると言えよう。

B方式の場合, 第2段, 第3段の垂直磁場コイル電流の立ち上げを, 垂直磁場コイル電源だけで行なうので, 第2段, 第3段目のプラズマ電流の上昇率によって電源電圧を決めた。図28によると,  $\dot{i}_p$  が70MA/secの場合は, 電源電圧は6.0kV, 100MA/secの場合は, 電源電圧は8.5kVでよいだろう。



C方式の場合、第1段の垂直磁場コイル電流の立ち上げから、垂直磁場コイル電源を使用するため、垂直磁場コイル電源電圧は第1段目の立ち上がりのフィッティングを考慮して決めた。図29によると、 $\dot{I}_p$ が70MA/secの場合は電源電圧は8.5kV、100MA/secの場合は、電源電圧は12kVでよいだろう。

垂直磁場コイル電源だけで立ち上げる場合、フィッティングを理想的に行なうには、 $\dot{I}_p$ が大きくなると電源電圧を相当高くする必要があり、また電源電圧の変化が早くなり、制御も難かしくなる。

以上から、JT-60に適用する垂直磁場コイル電流立ち上げ回路としては、電源の制御性からみてIESコイルと垂直磁場コイル電源を併用するA方式がよいと思われる。

また、各方式の経済性の評価に関しては、R&D総合報告書<sup>(5)</sup>によると、A方式(ただし、垂直磁場コイル電源電圧=4kVとした場合)とB方式(ただし、垂直磁場コイル電源電圧=6kVとした場合)がC方式(ただし、垂直磁場コイル電源電圧=10kV以上とした場合)より有利になる。

なお、くら型電流の影響を考慮すると、さらに高い電源電圧が必要になると思われるが、この問題は、今後検討を進める。

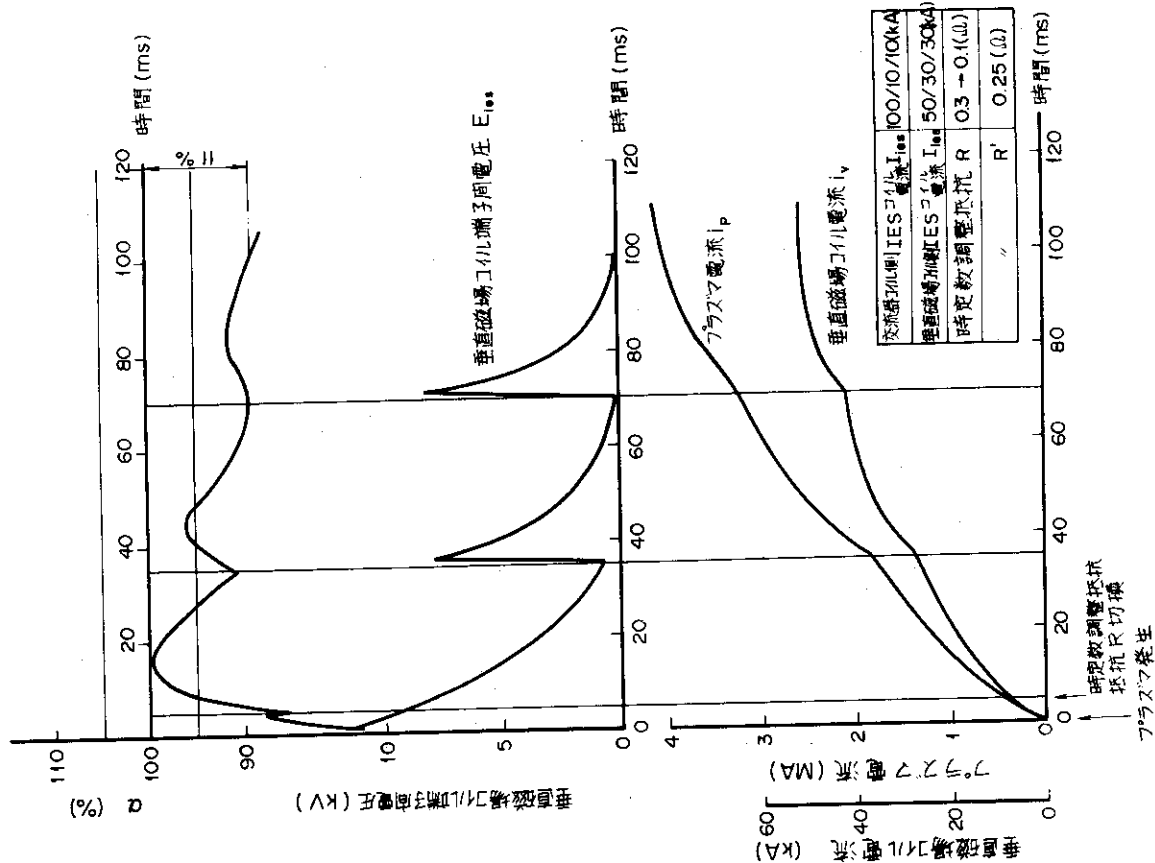


図27 IES方式による垂直磁場コイル電流立ち上げ

- (註) ▲ ○印：垂直磁場コイル電源電圧の最大値を4KVとして、 $\alpha$ を100±5%の範囲に入れるに必要な垂直磁場コイル側のIESコイル電流
- ▶  $i_p(1)$ ：第1段目のプラズマ電流上昇率 (MA/sec)
  - ▶ 垂直磁場コイル電源の最大電圧  $E_{vr. max}$  : 4 (KV)
  - ▶ 垂直磁場コイル側時定数調整抵抗  $R'$  : 0.25(Ω)
  - ▶ 垂直磁場コイル側IESコイル記号が  $L_1, L_2, L_3$  : 10(mH)

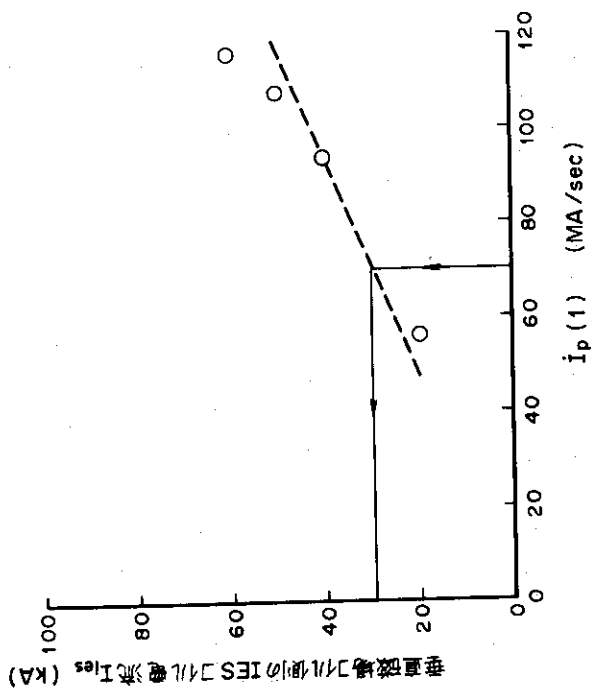


図26 A方式における  $i_p(1)$  -  $I_{ies}$  の関係

- (註) ▶  $i_p$  : 1段~3段目のプラズマ電流上昇率 (MA/sec)  
 ▶ 垂直磁場コイル電源 電流検出遅れ時間 : 0 ms  
     一次遅れ : 5 ms  
     G : 1.78E<sub>vr,max</sub> (KV/KA)  
 ▶ ○印 : プラズマ電流が約 200kAに達するまでにαを 100±5%  
     の範囲に入れるケース  
 ▶ ×印 : プラズマ電流が約200kAに達するまでにαを 100±5%  
     の範囲に入れないケース

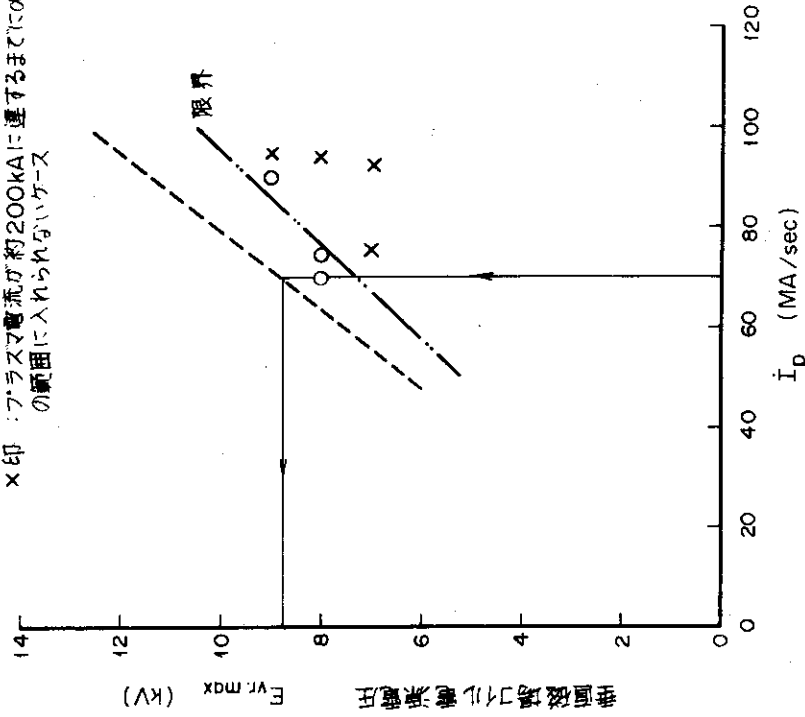


図29 C方式における  $i_p - E_{vr,max}$  の関係

- (註) ▶  $i_p$  : 2段, 3段目の切換え後のプラズマ電流上昇率 (MA/sec)  
 ▶ 垂直磁場コイル側時定数 調整抵抗 R' : 0.25Ω  
 ▶ 垂直磁場コイル側 IESコイル記号 L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub> : 10mH  
 ▶ ○印 : 制御によるα=100±5%の範囲に入れる場合  
     ×印 : " 入れられない場合

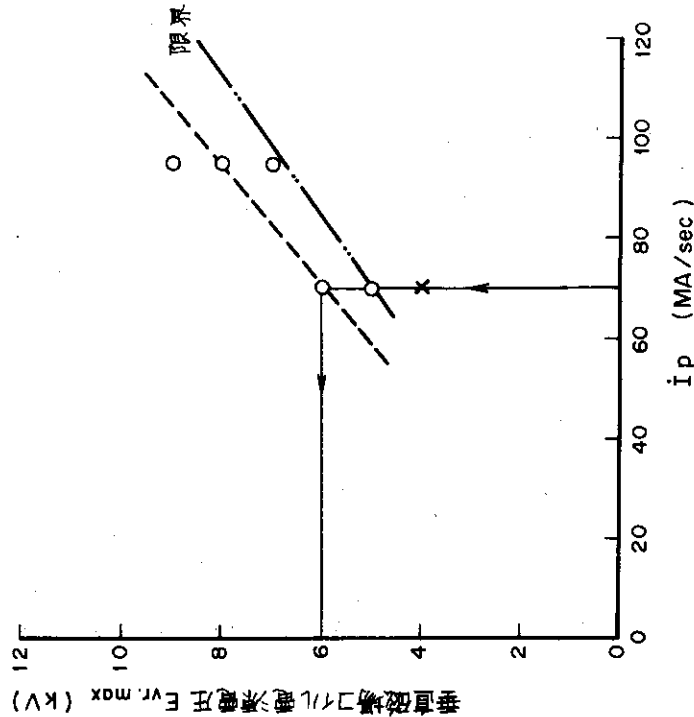


図28 B方式における  $i_p - E_{vr,max}$  の関係

表 6 垂直磁場コイル電流立ち上げ方式の比較

垂直磁場コイル電流の立ち方式	オ1段	オ2段	オ3段	*1 $L_1, L_2, L_3$	$I_p = 70 \text{ MA/s}$		$I_p = 100 \text{ MA/s}$	
					$I_1, I_2, I_3$	$I_1, I_2, I_3$	$I_1, I_2, I_3$	$I_1, I_2, I_3$
A方式 オ1段からオ3段まで IES形とEV形の併用	IES+EV	IES+EV	IES+EV	10mH	30kA	4kV	50kA	4kV
B方式 オ1段のみIES形とEV形 の併用. オ2段はEV形	IES+EV	EV	EV	10mH	30kA	6kV	50kA	8.5kV
C方式 オ1段のオ3段までEV形	EV	EV	EV	—	—	9kV	—	12kV

(註) \*1  $L_1, L_2, L_3$  : 垂直磁場コイル側 IESコイル自己インダクタンス

\*2  $I_1, I_2, I_3$  : 電流

\*3  $E_{vr, max}$  : 垂直磁場コイル電流電圧最大値

## 6. ま と め

プラズマ電流の立ち上げ時に、プラズマを平衡位置に保持するための垂直磁場コイル電流の立ち上げ方式に関して次のような結論を得た。

- (1) 垂直磁場コイル電流の立ち上げ方式の選定は、プラズマ電流の上昇率によって、ほぼ決められる。
- (2) 実機のプラズマ電流の上昇率を $100\text{MA}/\text{sec}$ 程度まで想定した場合、IESコイルと垂直磁場コイル電源とを併用した方式(A方式)がよい。この場合、垂直磁場コイル電源電圧は $4\text{kV}$ で充分である。
- (3) 実機のプラズマ電流の上昇率を $70\text{MA}/\text{sec}$ 程度まで想定した場合、第1段のみA方式にし、第2段以後は垂直磁場コイル電源だけで立ち上げる方式(B方式)がよい。この場合、垂直磁場コイル電源電圧は $6\text{kV}$ でよい。
- (4) 第1段から垂直磁場コイル電源だけで立ち上げる方式(C方式)は、プラズマ電流の上昇率を $100\text{MA}/\text{sec}$ 程度まで想定すると、電源容量を大きく(電圧 $12\text{kV}$ 以上)しなければならず、不経済である。
- (5) プラズマ電流の上昇率を $100\text{MA}/\text{sec}$ 程度まで想定した場合、プラズマを平衡位置に保持して立ち上げるには、垂直磁場コイルに印加する最大電圧は約 $15\text{kV}$ 必要である。

最後に、本研究に当たり、有益な助言をいただいた、JT-60第1開発室 吉川室長をはじめ、各グループの諸氏に深甚の謝意を表します。

## 7. 参 考 文 献

- (1) 臨界プラズマ試験装置用サイリスタ遮断器型変流器電源回路の試作開発 中間報告書 昭51年1月 p. 203
- (2) 臨界プラズマ試験装置 詳細設計報告書 昭51年11月, 分冊№⑤-2-5/8-373
- (3) 臨界プラズマ試験装置用サイリスタ遮断器型変流器電流回路の試作開発 B & D総合報告書(試験結果報告書, 最終報告書) 昭52年2月, 第2分冊, p. 1-652
- (4) 同上 第2分冊, p. 1-778
- (5) 同上 第2分冊, p. 2-437

## 6. ま と め

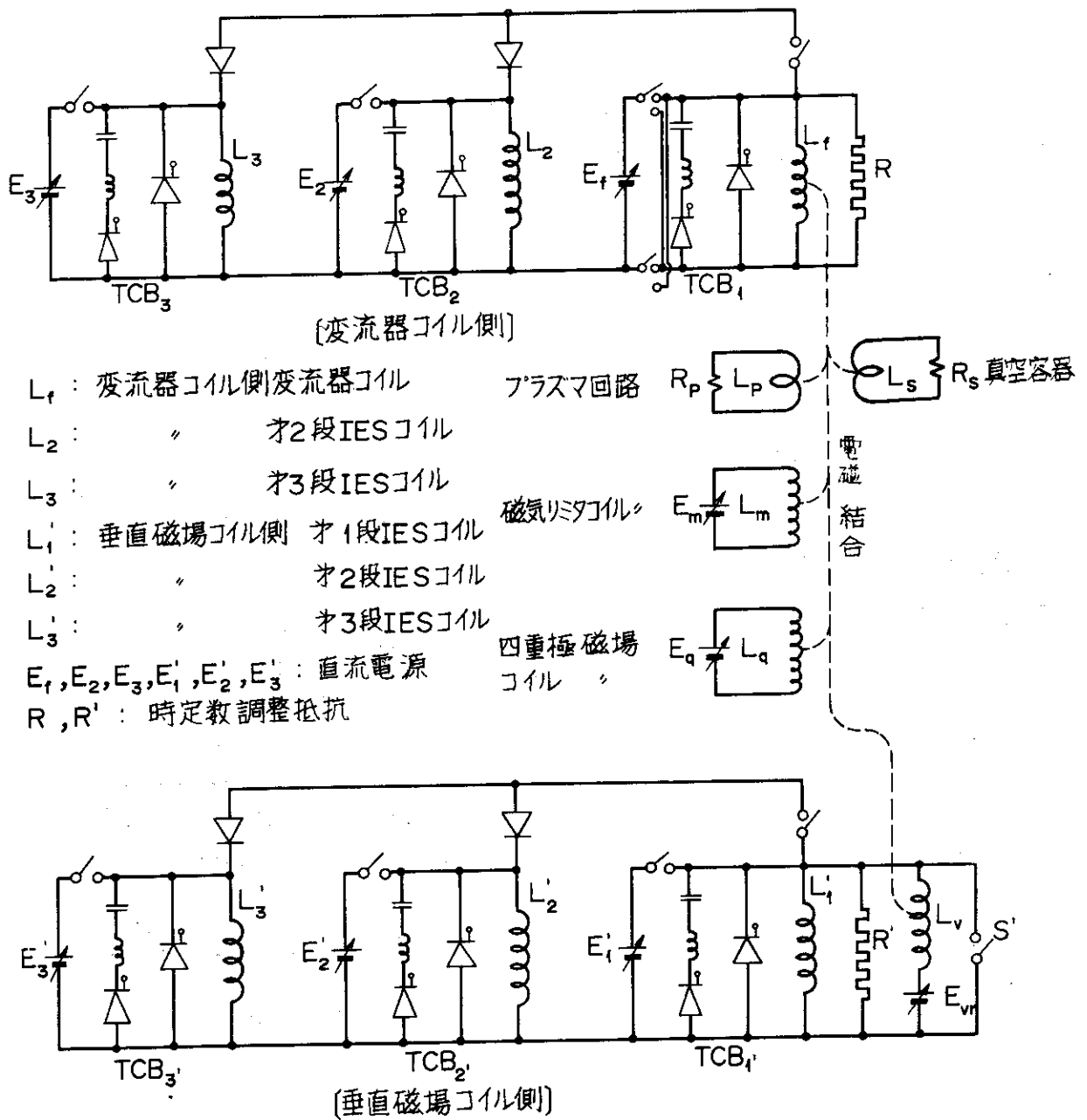
プラズマ電流の立ち上げ時に、プラズマを平衡位置に保持するための垂直磁場コイル電流の立ち上げ方式に関して次のような結論を得た。

- (1) 垂直磁場コイル電流の立ち上げ方式の選定は、プラズマ電流の上昇率によって、ほぼ決められる。
- (2) 実機のプラズマ電流の上昇率を $100\text{MA}/\text{sec}$ 程度まで想定した場合、IESコイルと垂直磁場コイル電源とを併用した方式(A方式)がよい。この場合、垂直磁場コイル電源電圧は $4\text{kV}$ で充分である。
- (3) 実機のプラズマ電流の上昇率を $70\text{MA}/\text{sec}$ 程度まで想定した場合、第1段のみA方式にし、第2段以後は垂直磁場コイル電源だけで立ち上げる方式(B方式)がよい。この場合、垂直磁場コイル電源電圧は $6\text{kV}$ でよい。
- (4) 第1段から垂直磁場コイル電源だけで立ち上げる方式(C方式)は、プラズマ電流の上昇率を $100\text{MA}/\text{sec}$ 程度まで想定すると、電源容量を大きく(電圧 $12\text{kV}$ 以上)しなければならず、不経済である。
- (5) プラズマ電流の上昇率を $100\text{MA}/\text{sec}$ 程度まで想定した場合、プラズマを平衡位置に保持して立ち上げるには、垂直磁場コイルに印加する最大電圧は約 $15\text{kV}$ 必要である。

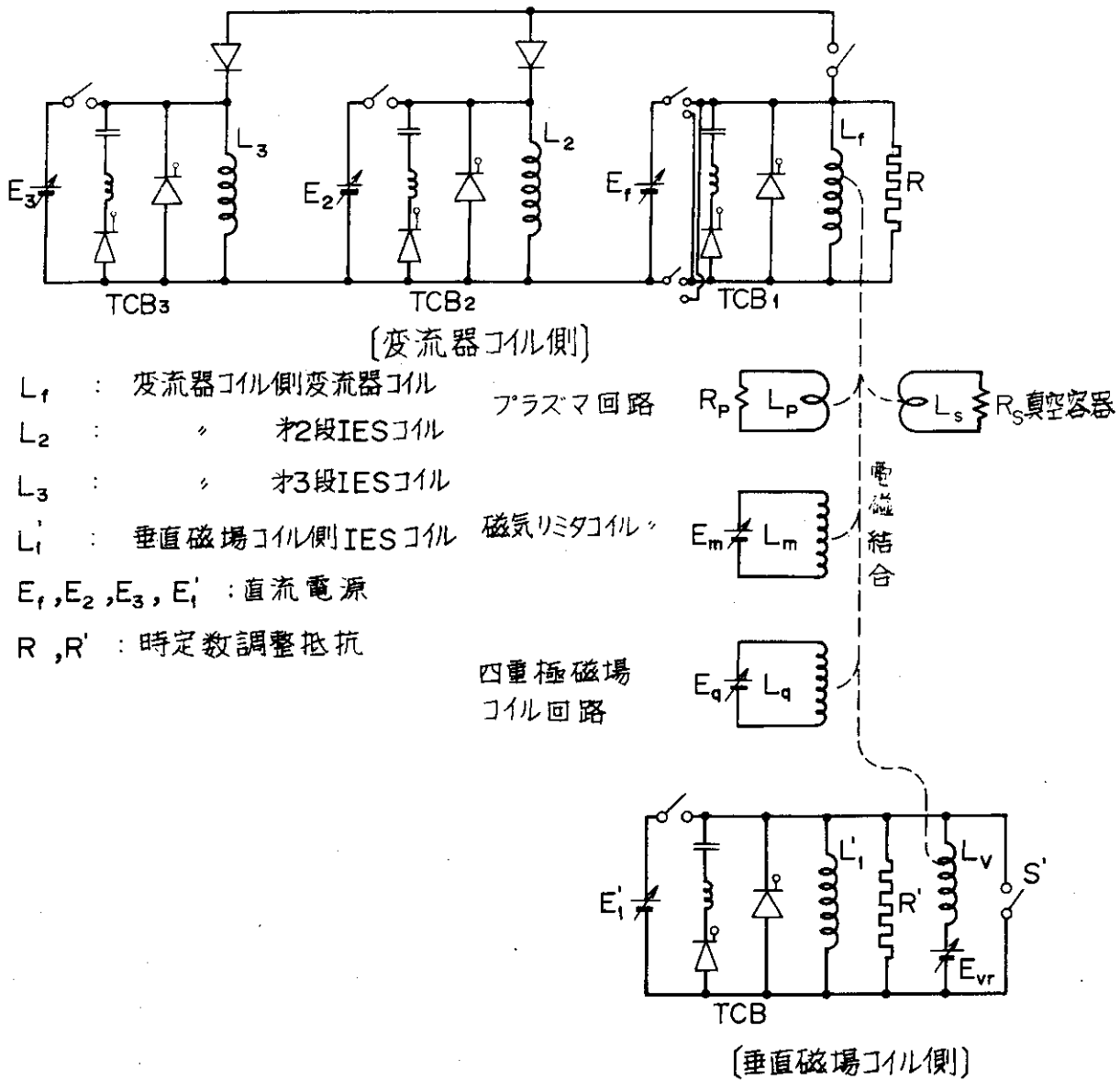
最後に、本研究に当たり、有益な助言をいただいた、JT-60第1開発室 吉川室長をはじめ、各グループの諸氏に深甚の謝意を表します。

## 7. 参 考 文 献

- (1) 臨界プラズマ試験装置用サイリスタ遮断器型変流器電源回路の試作開発 中間報告書 昭51年1月 p. 203
- (2) 臨界プラズマ試験装置 詳細設計報告書 昭51年11月, 分冊No⑤-2-5/8-373
- (3) 臨界プラズマ試験装置用サイリスタ遮断器型変流器電流回路の試作開発 R & D総合報告書(試験結果報告書, 最終報告書) 昭52年2月, 第2分冊, p. 1-652
- (4) 同上 第2分冊, p. 1-778
- (5) 同上 第2分冊, p. 2-437

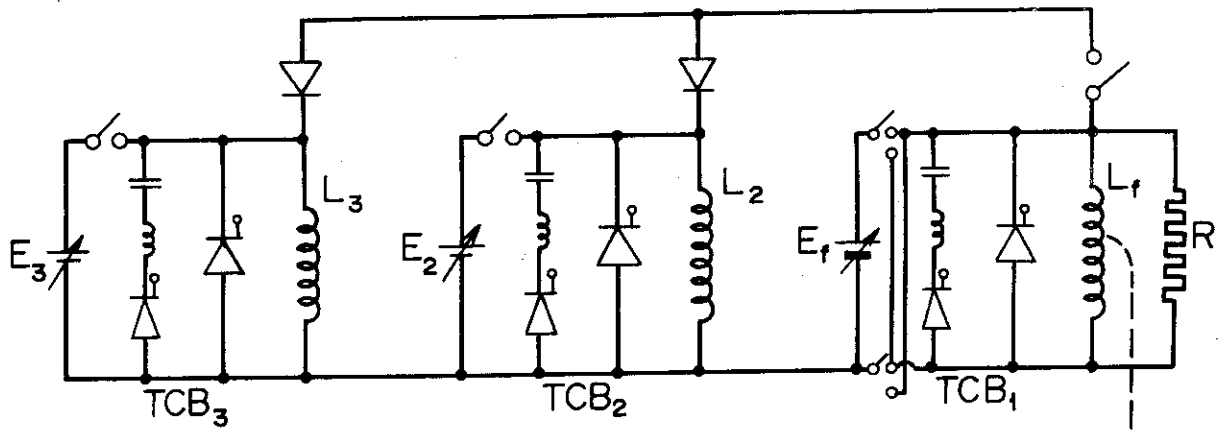


付図1 並列方式で構成した場合のA方式



付図2 並列方式で構成した場合のB方式



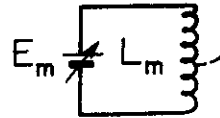


- $L_1$  : 変流器コイル
- $L_2$  : オ2段 IESコイル
- $L_3$  : オ3段 "
- $E_1, E_2, E_3$  : 直流電源
- $R$  : 時定数調整抵抗

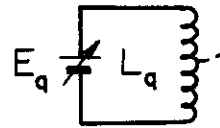
プラズマ回路



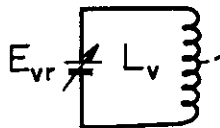
磁気リミタコイル



四重極磁場  
コイル



垂直磁場コイル



真空容器



電磁結合

付図 3 並列方式で構成した場合の O 方式