

# 臨界プラズマ試験装置(JT-60)電源の試作開発

## Development of Power Supply for "JT-60"

現在、日本原子力研究所で建設計画が進められているトカマク型の臨界プラズマ試験装置(JT-60)では、プラズマの発生、閉込め、制御などのための多数のコイルに対して電力を供給する、大容量かつ高性能の電源が必要である。特にプラズマ発生用には、大容量、多頻度の直流しゃ断器を用いた高電圧発生回路が必要で、サイリスタしゃ断器を用いる方式の電源の試作開発を行なった。

サイリスタしゃ断器の一部分を試作して行なったしゃ断試験では、当初予想性能を上回るしゃ断能力が示され、これを基に実機構成の設計を試みた。回路方式についても、縮小モデルで試験を行ない、その結果、プラズマ電流の立上り特性や回路の動作特性が良好であることを確かめ、この方式を実機に適用可能という見通しを得た。

田村 早苗\* Tamura Sanae  
 植田 明照\*\* Ueda Akiteru  
 藪野 光平\*\* Yabuno Kōhei  
 古関庄一郎\*\*\* Koseki Shōichirō  
 古山 昌之\*\*\*\* Furuyama Masayuki

### 1 緒言

臨界プラズマ試験装置(以下、JT-60と称する)は、核融合炉と同じ程度の超高温プラズマを長時間閉じ込める装置である。このため、装置は将来の核融合炉に匹敵するくらい巨大なものとなる<sup>1)</sup>。また、電源としても、プラズマ発生、プラズマ閉込め、あるいはプラズマ制御のための各種電源は、大容量かつ高性能のものが必要である。すなわち、容量の点に関しては、各電源を合わせると瞬時容量 1,000 MVA に相当する大きさを必要とする。また性能の点でも、このような大容量電源のパルス状運転あるいは高速・高精度の制御といった高度なものが要求される。このような電源を実現するために、数々の工夫を凝らし、また特に重要な要素については試作開発が行なわれた。

本稿では、JT-60電源の全体構成に触れた後、プラズマ発生用電源を中心に行なった試作開発について述べる。なお、JT-60の電源構成としては、この試作開発と並行して行なわれた詳細設計のものをベースに以下に記述する。

### 2 JT-60電源の概要

JT-60の電源系のブロック図を図1に、各コイル電流とプラズマの時間変化を図2に示す。

トロイダル磁場コイルは、トーラス状のプラズマに並行する磁場を発生し、プラズマ電流による磁場との合成磁場でプラズマを閉じ込めることを目的とするコイルで、その励磁に必要なエネルギーは巨大であるため、電力系統からばかりでなく、フライホイール付発電機からも供給して、系統に擾乱を与えることが少ないようにしている。

ポロイダル磁場コイルは、トロイダル磁場コイルと直交して配置され、プラズマを発生させるためや、プラズマの位置形状を制御するための各種コイルから成る。各コイルの電源は、急速な制御やパルス状運転が必要で、別のフライホイール付発電機から電力を供給する。各制御磁場コイル電流は、サイリスタの整流装置で制御する。

次に、プラズマ発生用電源であるが、プラズマ電流励起の方式としては、JT-60では従来のコンデンサ放電方式<sup>2)</sup>に代わ

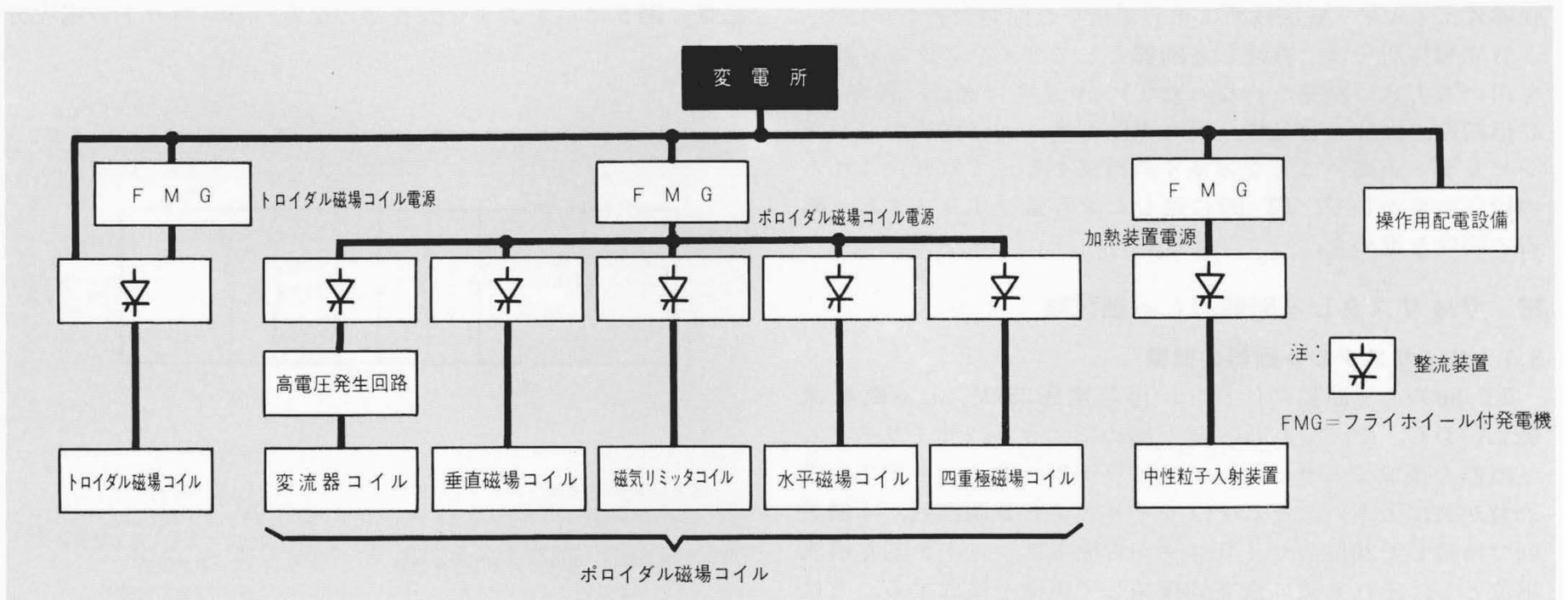


図1 JT-60電源ブロック図 各コイルの励磁エネルギーはフライホイール付電動発電機と電力系統から供給される。

\* 日本原子力研究所大型トカマク開発部 \*\* 日立製作所日立研究所 \*\*\* 日立製作所日立工場 工学博士 \*\*\*\* 日立製作所日立工場

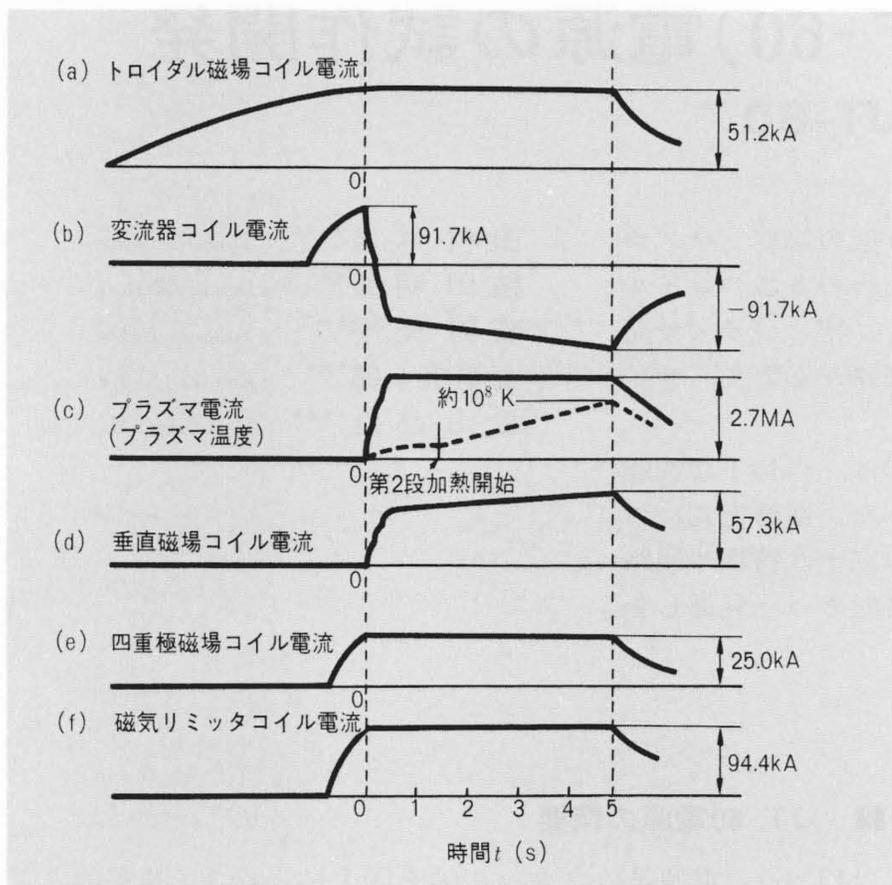


図2 JT-60のコイル電流とプラズマ電流の特性 プラズマ電流は3段階に0.1秒程度で立ち上げ、5秒間維持する。

って、変流器コイルを含むエネルギー蓄積コイル (Inductive Energy Storage Coil以下、IESコイルと略す)の電流しゃ断方式を採用する。このため、直流しゃ断器を用いた高電圧発生回路を用いるが、これに必要な直流しゃ断器は、従来の交流しゃ断器に比べて過酷なしゃ断責務を要求される。特に、JT-60の運転上、多頻度、連続しゃ断が繰り返され、これに耐えるものである必要がある。また、IESコイルを数個用いてこの電流を順次しゃ断する多段方式であるが、誘導性エネルギー蓄積回路間の急速なエネルギー転送技術についても、JT-60のような数十メガジュールに達するエネルギーの取扱いは、従来の大電流回路技術では未経験の領域に属する。

このため、JT-60計画では昭和50~51年度にかけて、変流器電源回路の試作開発が実施され、直流しゃ断器の技術及び誘導性エネルギー転送技術に重点を置いた開発が行なわれた。

日立製作所では、直流しゃ断器としてサイリスタしゃ断器を用いる方式の開発を行なった<sup>3),4)</sup>。サイリスタは、長寿命、高信頼性、保守の容易性、優れた制御性、回路構成のフレキシビリティが高いことなど多くの長長をもっており、これらの長長を生かして、JT-60に適した大容量サイリスタしゃ断器の開発を進めた。

### 3 サイリスタしゃ断器のしゃ断試験

#### 3.1 サイリスタしゃ断器の概要

JT-60のしゃ断器の仕様は、再起電圧25kV、しゃ断電流92kA(DC)で、しゃ断容量が極めて大きく、サイリスタしゃ断器を構成するサイリスタスイッチは、サイリスタの直並列数が共に大きい。そこで、サイリスタを5個直列、4個並列で接続した20個のサイリスタから成るユニットを基本構成単位とし、それを更に直並列接続して実機を構成することにした。4個の並列素子は、電流バランス用の特殊な要素を用いしないで直接並列接続<sup>5)</sup>としている。サイリスタは、現時点での最大級容量のもの、すなわち主サイリスタ用としては高速サイリスタCF05V(2,000V, 500A)、補助サイリスタ用と

してはCA02(4,000V, 800A)を使用した。

#### 3.2 しゃ断試験

サイリスタしゃ断器は、電流、電圧容量の増大に対して、素子の直並列数を増すことにより容易に対応できるという長長がある。このことは、直流送電などの他の大容量装置での実績から十分実証されている。

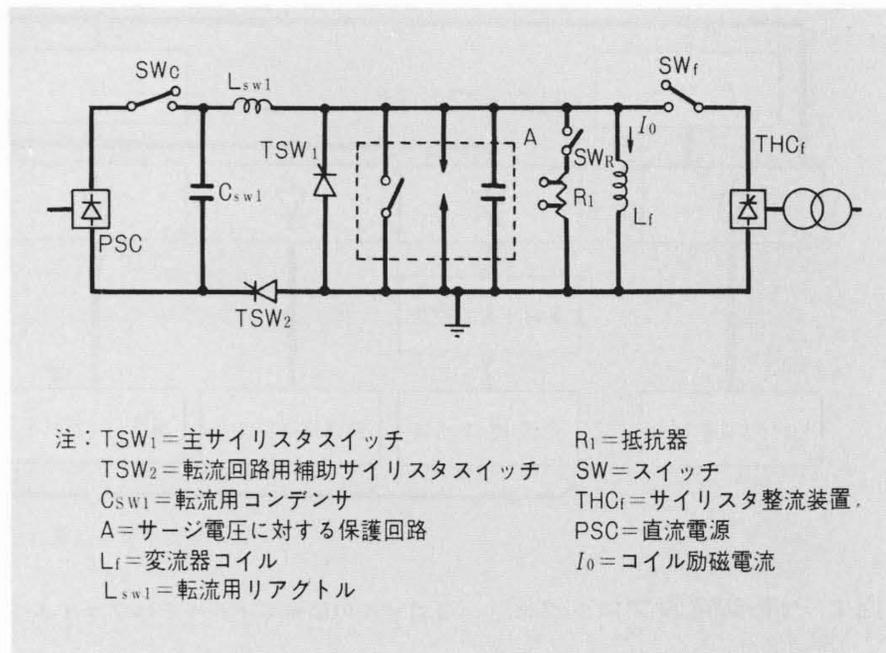
そこで、主サイリスタ用及び補助サイリスタ用のスイッチを各2ユニットずつ試作し、しゃ断試験を行なった。試験回路を図3に示す。この回路は、変流器コイル1段だけとしたサイリスタ方式の原理回路でもある。ただし、プラズマは模擬していない。この動作は、最初、空心変流器コイル用サイリスタ電源THCfにより開閉器SWfを通して変流器コイルLfを励磁する。次に、THCfの電圧極性を反転すると同時に、主サイリスタスイッチTSW<sub>1</sub>を点弧する。THCfの電流はTSW<sub>1</sub>に転流し0となるので、SWfを開きTHCfを切り離す。次に、転流回路用補助サイリスタスイッチTSW<sub>2</sub>を点弧し、あらかじめ充電しておいた転流用コンデンサC<sub>sw1</sub>を放電して、TSW<sub>1</sub>の電流をしゃ断する。Lfの電流はR<sub>1</sub>に転流し、Lfに高電圧が発生する。実機では変流器コイルLfと電磁結合したプラズマループへの誘起電圧を得、プラズマ電流を励起する。

サイリスタしゃ断器方式では、TSW<sub>1</sub>の通電時間が短く、サイリスタの並列数を減少できるとともに、THCfがしゃ断時には切り離されているため、しゃ断時の影響を受けないという長長がある。

試作した二つのユニットを用いて、ユニット単独、2ユニット直列接続、2ユニット並列接続した場合、また、並列素子数を減らした場合などについて試験を行なった結果、電圧、電流分担とも良好であり、当初の予想以上の電流しゃ断性能をもつことが分かった。図4にこれらの試験結果の代表例として12.3kV, 6.17kAのしゃ断試験の結果を示す。

#### 3.3 サイリスタスイッチの実機構成

試作開発の結果及びその他の諸検討の結果(マイクロ波を用いた導通領域の広がり<sup>6)</sup>の検討など)から各ユニットの定格を決定し、その結果からTSW<sub>1</sub>はユニットを6個直列、9個並列に、また、TSW<sub>2</sub>はユニットを4個直列、6個並列にすることにした。また、これに基づいて実機的设计を行なった結果、図5に示すような大きさとなる。各ユニットの電流分



注: TSW<sub>1</sub>=主サイリスタスイッチ  
TSW<sub>2</sub>=転流回路用補助サイリスタスイッチ  
C<sub>sw1</sub>=転流用コンデンサ  
A=サージ電圧に対する保護回路  
L<sub>f</sub>=変流器コイル  
L<sub>sw1</sub>=転流用リアクトル  
R<sub>1</sub>=抵抗器  
SW=スイッチ  
THCf=サイリスタ整流装置  
PSC=直流電源  
I<sub>0</sub>=コイル励磁電流

図3 しゃ断試験回路 サイリスタしゃ断器の部分試作品を用いたしゃ断試験回路を示す。これは、サイリスタしゃ断器方式の原理回路でもある。

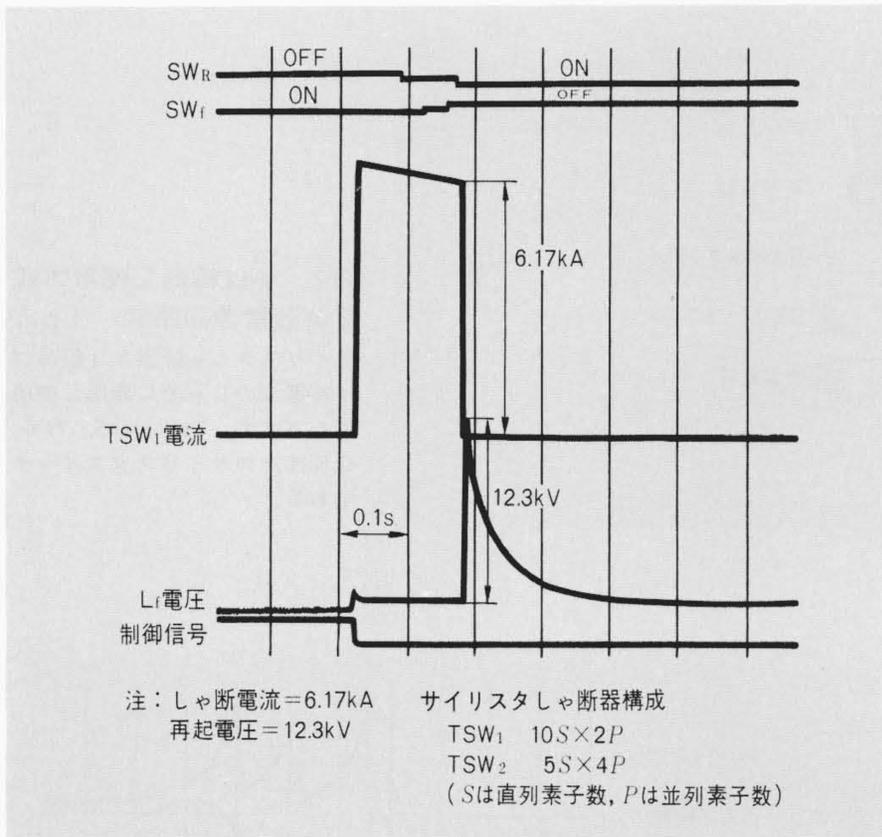


図4 しゃ断試験結果 図3の回路による試験結果の代表例である。しゃ断電流6.17kA, 再起電圧12.3kVでしゃ断が成功したことを示している。

担を良くするため円筒形にするとともに, TSW<sub>1</sub>, TSW<sub>2</sub>を一体化してコンパクト化を図り, 更に, 配線のインダクタンスを小さくしている。

#### 4 変流器電源回路のモデルによる試験

##### 4.1 変流器電源回路方式

変流器電源回路は, 多段のIESコイルと直流しゃ断器を主要な構成要素とし, プラズマを発生, 成長させるための高電圧を発生させる回路である。

サイリスタしゃ断器方式の変流器電源回路は, 回路方式をいろいろ工夫することによって, 制御性を高めたり, 使用するサイリスタ素子の個数を減らして経済性を高め得る可能性がある。そこで, この回路方式として数種類の方式を考案し, それらを比較検討してこのうちから代表的な回路方式として, 並列方式と多段繰返し使用方式の2種類を選定した。両方式の回路を図6, 7に示す。

並列方式は, サイリスタしゃ断器方式の基本的な回路で, 変流器コイルを含む3段のIESコイルのそれぞれに, 別個に専用のサイリスタしゃ断器を備えている。最初に, サイリス

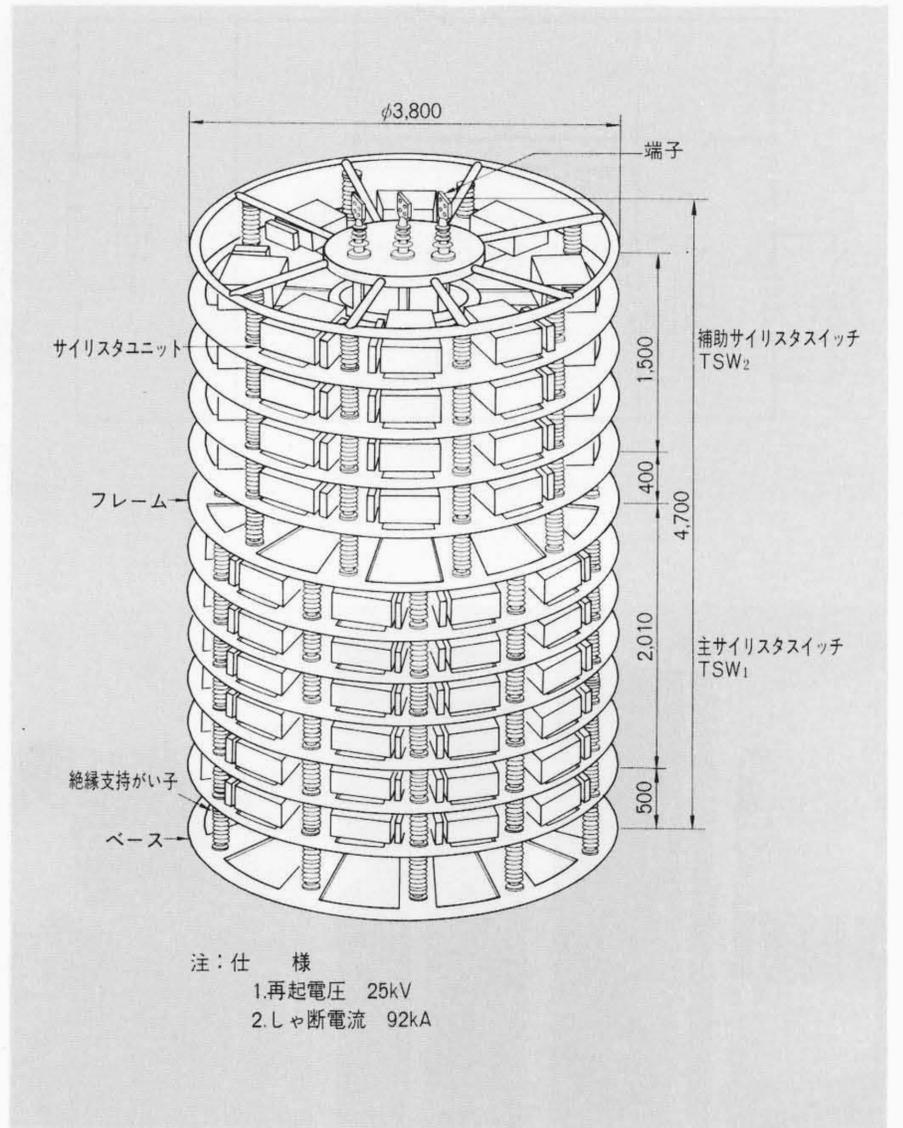


図5 サイリスタスイッチ実機完成予想図 しゃ断試験の結果に基づいて設計した実機のサイリスタしゃ断器の大きさを示す。

タしゃ断器TCB<sub>1</sub>で変流器コイル電流をしゃ断し, 引き続いて各IESコイルの電流をTCB<sub>2</sub>, TCB<sub>3</sub>で順次しゃ断することにより, プラズマ電流を3段階に立ち上げるものである。この方式は各段ほとんど独立に動作することが可能で, 実験の自由度が大きいなどの特長がある。

多段繰返し使用方式は, サイリスタしゃ断器の利用効率を向上するために, 3段のIESコイルの電流のしゃ断に1台のしゃ断器を繰返し使用する方式である。この方式では, サイリスタしゃ断器の価格が低減できるのが特長であるが, 一方, 各段のしゃ断の間に所定の間隔が必要であること, また, 転流コンデンサも繰返し使用するため, しゃ断能力が前段のしゃ断条件の影響を受けて変動することなどの制約が生ずる。

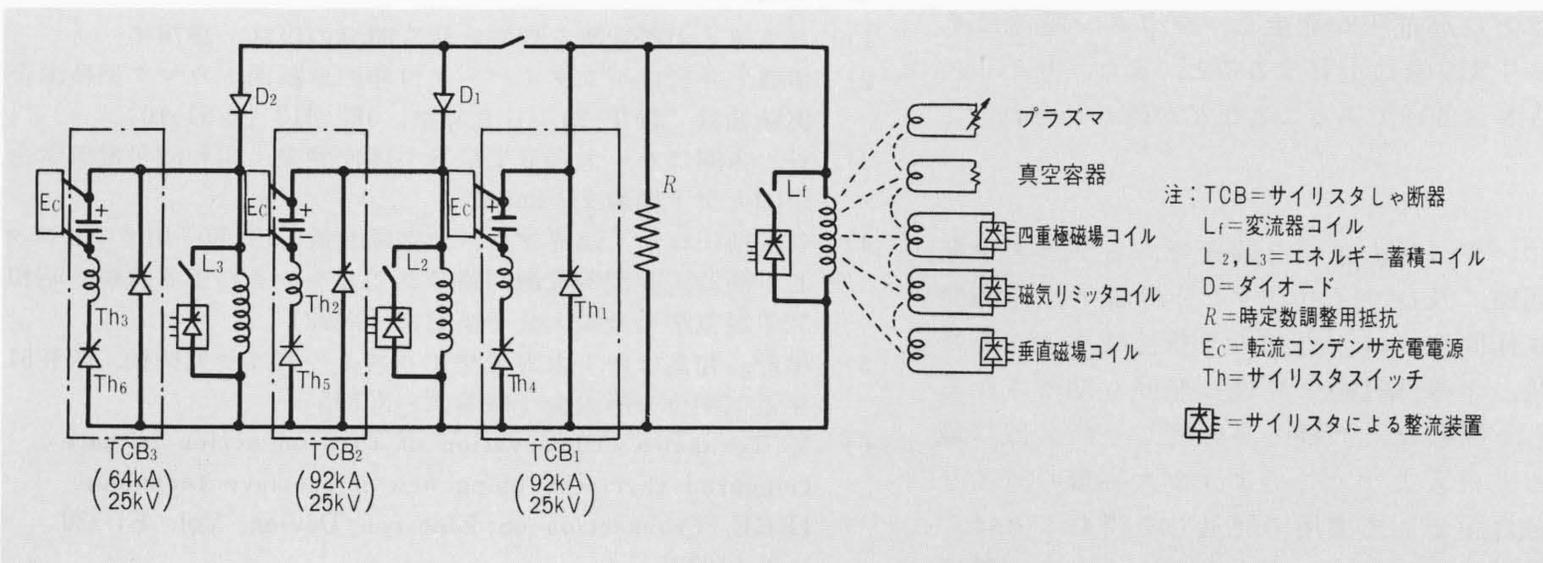


図6 並列方式変流器電源回路図 各コイルごとに専用のサイリスタしゃ断器を用いて, 順次コイル電流をしゃ断する方式である。

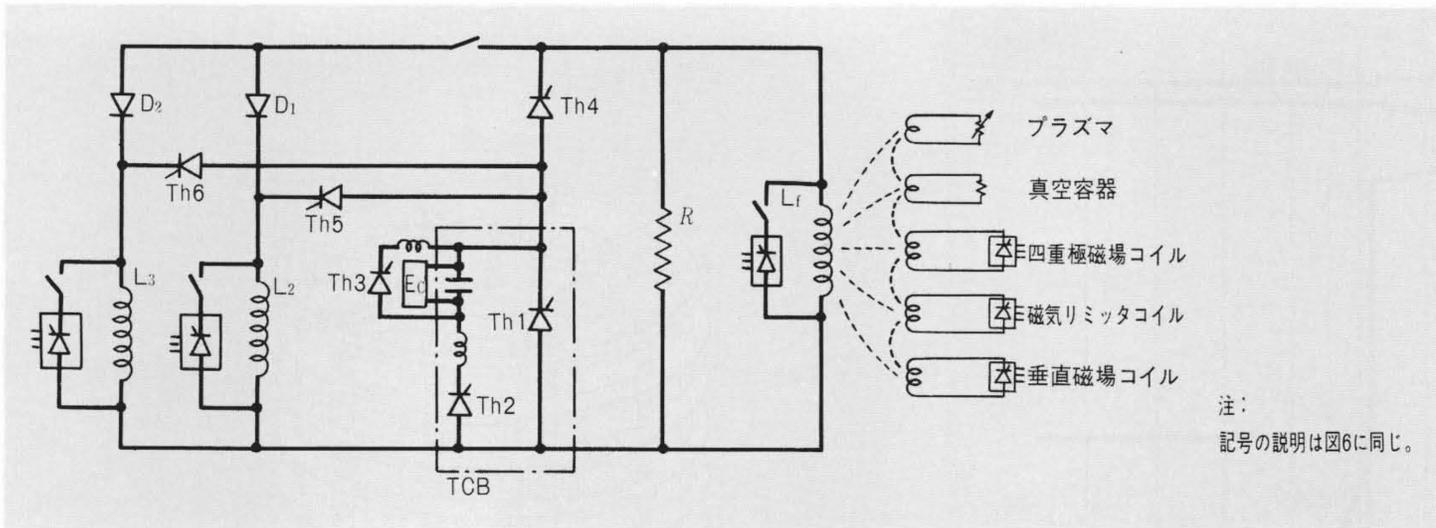


図7 多段繰返し使用方式  
変流器電源回路図 1台のサイリスタシャ断器を3段のコイル電流のシャ断に繰返し使用する方式で、Th4、Th5、Th6は切換用のサイリスタスイッチである。

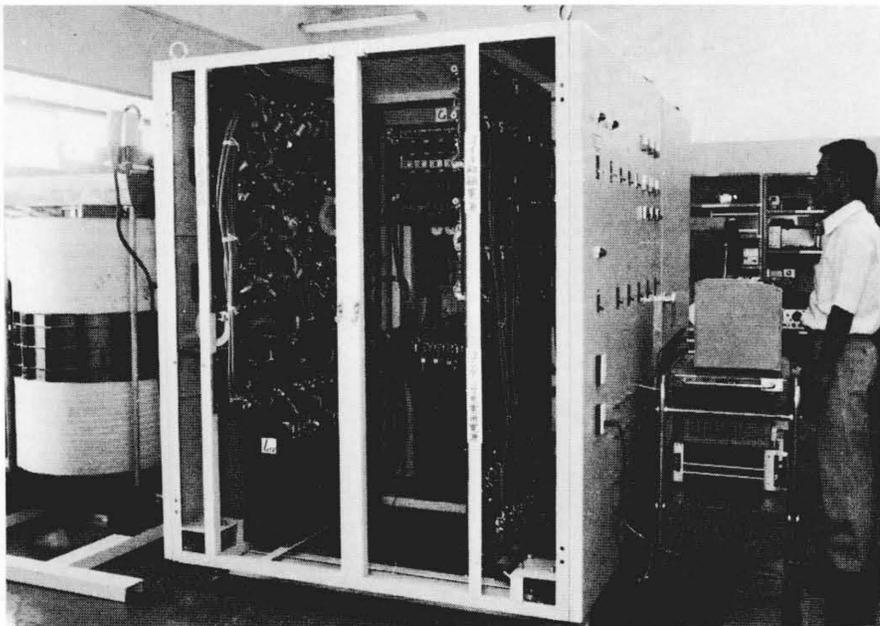


図8 シミュレータの外観 1/1000規模の縮小電磁モデルの外観を示す。

したがって、実機ではこれらの回路のうちから、実験条件、経済性の面から検討して最適な方式を選ばばよい。

#### 4.2 シミュレータによる試験

上述の各回路方式について、1/1000規模の縮小電磁モデルにより実験を行なった。図8にシミュレータの外観を示す。このシミュレータには、プラズマ、変流器コイル、垂直磁場コイル及び真空容器のそれぞれの間の電磁結合を実機と等しくしたコイル群モデルを備えている。また、プラズマ抵抗の時間変化は、サイリスタスイッチで抵抗を数段階に切り換えて模擬している。

図9にシミュレータによる並列方式の実験結果の一例を示す。これらの結果から、並列方式及び多段繰返し使用方式の両方式とも、IESコイルの電流がサイリスタシャ断器によりシャ断されるたびに高電圧が発生し、プラズマ電流はそれによって予定どおり3段階に上昇すること、また、サイリスタシャ断器回路の動作も良好であることなどが確かめられた。

### 5 結 言

JT-60の電源について、最も重要な要素であるプラズマ発生用の変流器電源回路、及びサイリスタシャ断器の試作開発を中心に述べた。試作開発では、当初の予想性能を上回る好結果が得られ、今後、半導体技術の急速な発展も期待されるので、サイリスタシャ断器はこの種の高頻度シャ断装置に最も適した方法であると言えよう。このような大容量のサイリスタシャ断器が核融合用として実用の見通しを得たことは、今後この面での技術進歩に対し大きな貢献をするものと確信

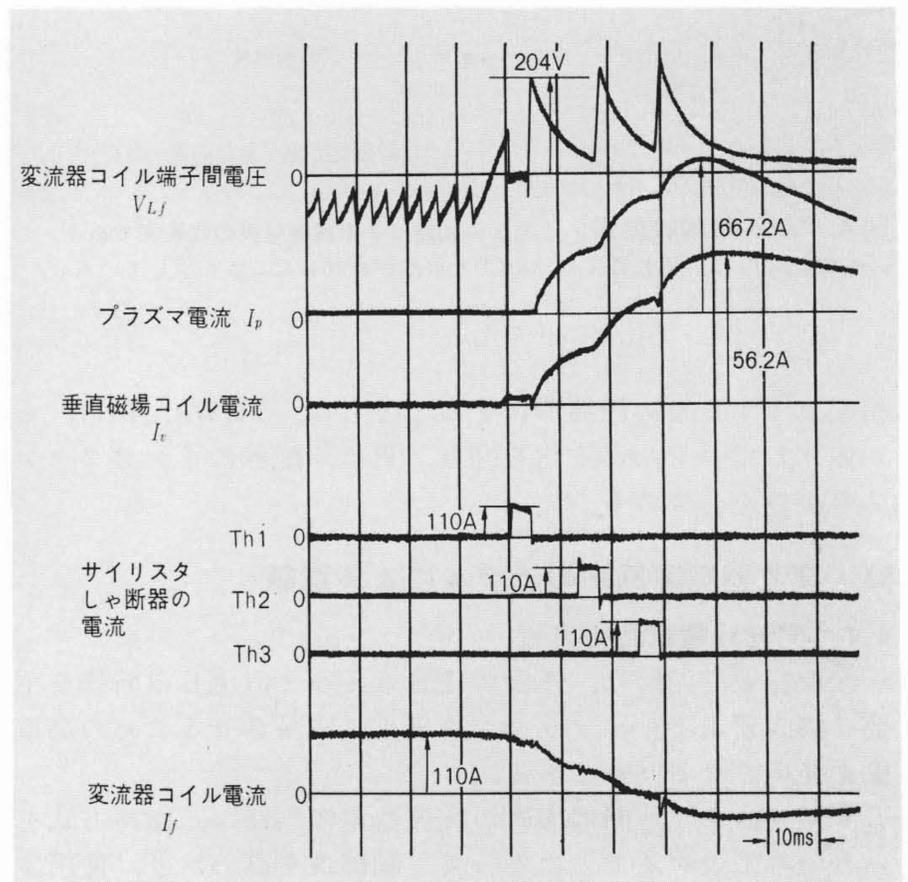


図9 シミュレータによる並列方式実験結果 サイリスタシャ断器で電流をシャ断するたびにプラズマ電流が3段階に立ち上がり、回路動作が良好であることを示している。

する。

なお、この開発の多くの部分は、日本原子力研究所のJT-60要素技術の試作開発(R&D)の一環として行なわれたもので、ここに関係各位に対し深謝の意を表わす次第である。

#### 参考文献

- 1) 日本原子力研究所：核融合研究開発の現状，1976年
- 2) 伊藤，井村ほか：ダイバータ付非円形断面トカマク型核融合実験装置“JFT-2a,”日立評論，58，813(昭51-10)
- 3) 谷，古関ほか：大容量TCBの試作開発，昭和52年電気学会全国大会予稿論文，No.922
- 4) 谷，植田ほか：臨界プラズマ試験装置(JT-60)用サイリスタシャ断器式変流器電源回路のシミュレータによる試験，昭和52年電気学会全国大会予稿論文，No.921
- 5) 尾形，和島ほか：大容量サイリスタの直接並列接続，昭和51年電気学会全国大会予稿論文 No.535
- 6) Y. Terasawa: Observation of turn-on action in gate triggered thyristor using new microwave technique, IEEE Transaction on Electron Device, Vol. ED-20, No. 8 (1973)