

逆転磁場ピンチトラス装置“REPUTE-I”の完成

Completion of Reversed Field Pinch Torus “REPUTE-I”

宮本健郎* Kenrô Miyamoto
 井上信幸** Nobuyuki Inoue
 伊藤 裕*** Yutaka Itô
 渡辺 隆*** Takashi Watanabe
 石垣幸雄*** Yukio Ishigaki
 椎名幸則**** Yukinori Shiina

東京大学では、逆転磁場ピンチトラス装置“REPUTE-I”を建設した。RFPは、その将来性を注目され、最近急激に研究が活発化している核融合の概念であり、REPUTE-Iは、主半径820mmの国内最大のRFP実験装置である。REPUTE-Iは、本体、電源、制御及び補機から構成される。本体は、磁場のしめ込み性に特に注意し、コンパクトに設計した。電源は、コンデンサとリアクトルの組み合わせで、各種電流波形を得る方式とした。制御では、ノイズ低減のため、制御室からの制御線を光ファイバとした。ガス供給装置はピエゾバルブを用い、予備電離装置は熱陰極方式の電子銃とした。

1 緒 言

RFP(逆転磁場ピンチ)は、現在最も研究の進んでいるトカマク型核融合装置と比較して、(1)コンパクトな核融合炉の実現、(2)ジュール加熱だけで臨界条件達成の可能性があり、最近研究が急速に活発化してきている^{1)~3)}。東京大学でもRFPの研究を進めることとなり、国内最大のRFP実験装置“REPUTE-I”(Reversed Field Pinch-University of Tokyo Experiment-No.1)を建設した⁴⁾。

REPUTE-Iの装置の特徴は、

- (1) 大プラズマ電流を得るために大型変流器鉄心をもっていること
- (2) シェルは抵抗性シェルとし、プラズマの平衡は平衡磁場のフィードバック制御により得ること
- (3) 準定常放電を得るため、コイル電源はPEN(Pulse Forming Network)付コンデンサ電源とすること
- (4) ステラレータ磁場の発生、回転変換角の時間制御を目的として、ヘリカルコイルを設けること

などであり、装置の主要パラメータを表1に、また、世界のRFP装置をまとめて図1に示す。同図からREPUTE-Iは世界的規模の装置であり、コンパクトでありながら高いプラズマ電流を目指していることが分かる。

日立製作所は、本体、電源、制御、補機を含むREPUTE-Iの全システムを製作した。本論文では、これらに含まれる新技術、新構造などについて述べる。

2 本 体

2.1 本体概要

完成した本体の外観を図2に、本体の断面図を図3に示す。各機器は変流器鉄心の周りにヘリカルコイルを除いて軸対称に設置され、プラズマ側から真空容器、シェル、トロイダルコイル、ヘリカルコイル、ポロイダルコイルの順に配置される。本体構成機器の主要諸元を表2に示す。各機器の特徴について以下に述べる。

2.2 真空容器

完成した真空容器の外観を図4に示す。真空容器は、磁場のしめ込み特性に特に留意して設計した。すなわち、材質は比抵抗が高く、高強度であるインコネル-625を使用し、板厚を極力薄くした。また、トロイダル磁場の急激な変化に対

しても磁場が不均一とならぬように、各18個設けられるポートセクション及びベローズで、トロイダル磁場に対するスキントimeを同一とするように設計した。

また、RFPの場合は真空容器が薄肉であるため、プラズマの不安定性により損傷する可能性が高い。REPUTE-Iでは、この点を考慮し、真空容器の保護のため、真空容器内面の各ポートセクションに多数(7個×18セクション)のリミッタを配置した。

表1 REPUTE-I装置パラメータ REPUTE-I装置の主要なパラメータを示す。

項 目	主要パラメータ	
プラズマ大半径	820mm	
プラズマ小半径	200mm	
プラズマ電流	最大値	400kA
	立上り時間	0.5, 1, 2, 4ms
	フラットトップ時間	40ms
トロイダル磁場	バイアス	0.25T
	逆転後	-0.10T
	逆転時間	0.5, 1, 2, 4ms

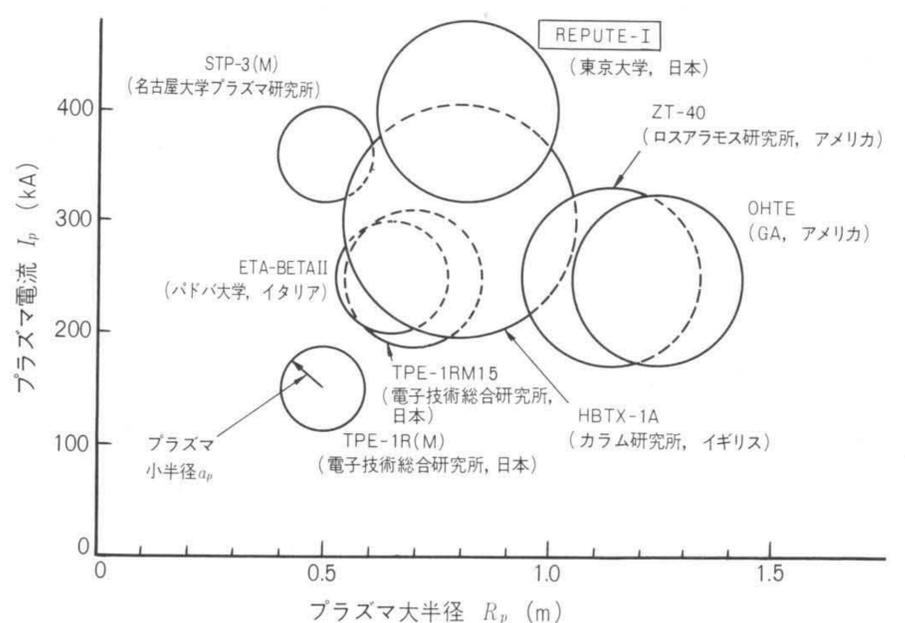


図1 世界のRFP装置 円の中心座標は(R_p, I_p)であり、円の半径は横軸と同じ縮尺で a_p を示すものである。REPUTE-Iは世界的規模の装置であり、コンパクトでありながら大プラズマ電流を目指している。

* 東京大学理学部 理学博士 ** 東京大学工学部 理学博士 *** 日立製作所日立工場 **** 日立製作所核融合推進本部

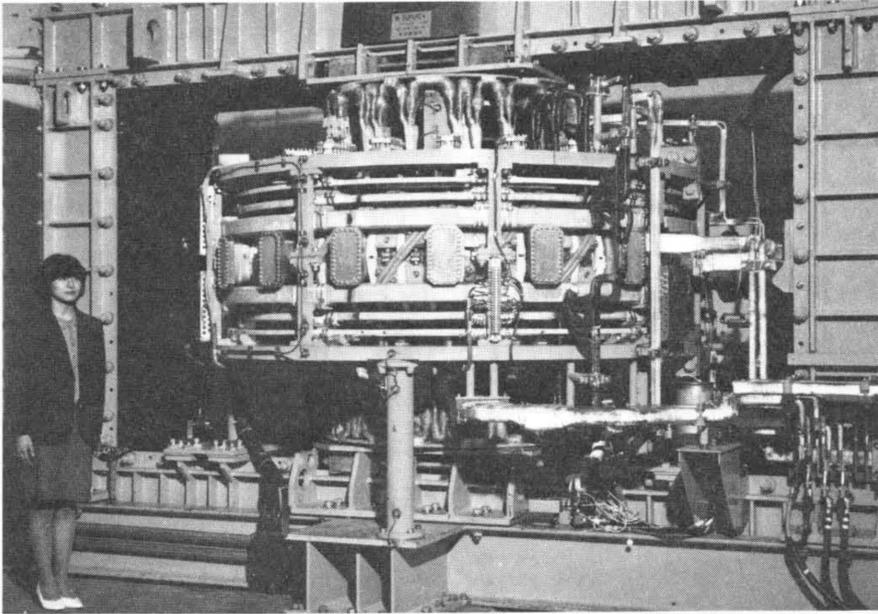


図2 本体外観 完成した本体の外観を示す。

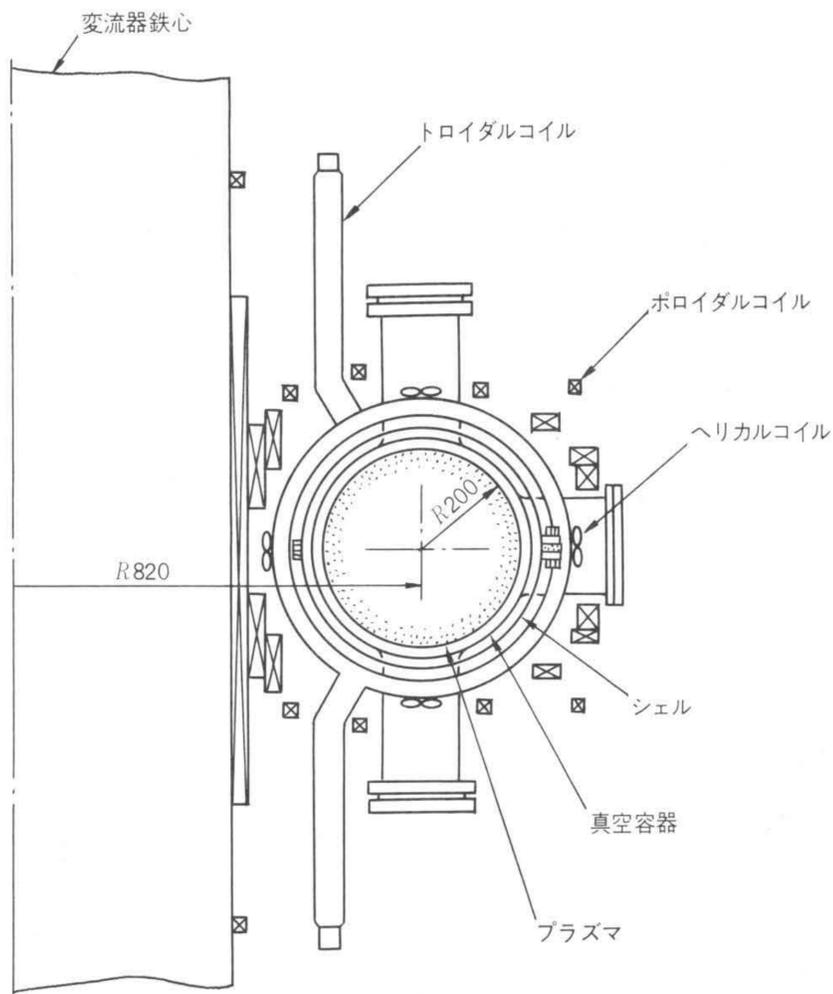


図3 本体断面図 本体は鉄心の周りにヘリカルコイルを除いて軸対称に配置される。

2.3 シェル

シェルは時定数 1 ms とするように、材質を SUS316 とし、板厚を 5 mm とした。電気的絶縁はトロイダル方向に 2 箇所、ポロイダル方向に 1 箇所設けた。トロイダル方向分割部は少ないスペースで電気的絶縁を行ない、かつ強度を確保するため、はめ合い方式とした。

2.4 トロイダルコイル

トロイダルコイルは、磁気エネルギーを極小とし、磁場のリップルを低く抑え、かつ組立のため 2 分割するという 3 条件を満足させる必要があり、2 分割された 1 ターンコイルを、シェル外周に沿って 54 個均等に配置する設計とした。2 分割されたコイルは、信頼性を重視し、ろう付により接続した。

2.5 サポート方式

真空容器、シェル、トロイダルコイル及びヘリカルコイル

表2 本体構成機器主要諸元 各機器は、不整磁場を極小にするように設計した。

機 器	項 目	諸 元	
真 空 容 器	材 質	インコネル625	
	ポートセクション板厚	2.4mm	
	磁場スキントイム	トロイダル磁場	0.3ms
		ポロイダル磁場	0.2ms
		垂直磁場	0.1ms
	ポート員数	54	
リミッタ員数	123		
シ ェ ル	垂直磁場スキントイム	1 ms	
	材 質	SUS316	
	材 厚	5 mm	
トロイダルコイル	起 磁 力	1,025kAT	
	員 数	54	
ヘリカルコイル	結 線	$l=2, m=9$ ステラレータ型	
	起 磁 力	$\pm 40kAT$	
ポロイダルコイル	垂直磁場コイル中心磁場	0.18T	
	水平磁場コイル中心磁場	$\pm 0.002T$	
変 流 器	変流器コイル起磁力	500kAT	
	バイアスコイル起磁力	5 kAT	
	鉄心磁束変化量	1.6V·s	

のサポート方式について述べる。これらの機器はプラズマに近接して配置する必要があるため、各機器ごとに単独のサポートを設けることはスペース上好ましくない。このため、上記機器中最も剛性の高いシェルに他の機器をサポートし、架台からはシェルだけをサポートする方式とした。トロイダルコイルの転倒力は、シェル上にボルトで固定したFRP(ガラス繊維強化プラスチック)を介してシェルに伝達する構造とした。

2.6 変流器

変流器コイルは、鉄心からの漏れ磁場を極小とするため、中央水平面にもコイルを配置させるような幅の狭い円筒状とした。また、鉄心はトロイダル磁場逆転時の誘起電圧により鉄心内磁力線方向に渦電流が流れるのを防ぐためバット接合とし、接合面に絶縁シートを挟み 1 ターン絶縁を行なう構造とした。

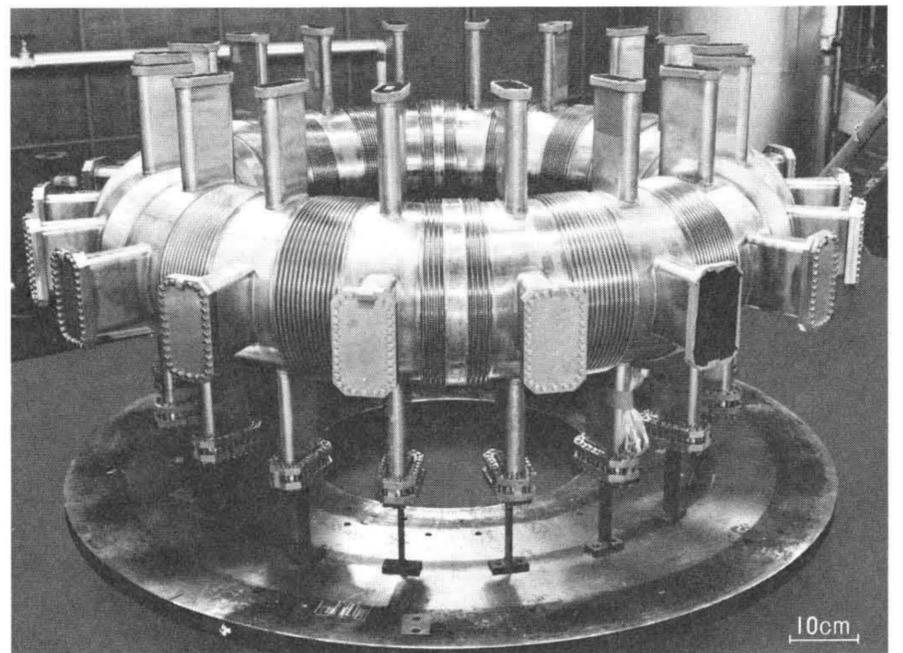


図4 真空容器の外観 全周に多数のポートを配している。

3 電 源

電源装置を表3に示す。各電源は、それぞれ目的の異なる複数のコンデンサ電源から成り、リアクトルとコンデンサの縦続接続によるPFNを基本に構成した(図5参照)。各電源の通電パターンを図6に示す。

トロイダルコイル電源は、図5(a)の左半分のバンク(バイアスバンク)で5msの正のフラットトップを作り出し、次に右半分の電解コンデンサバンク(メインバンク)で電流極性を急速反転させ、その後40msの負のフラットトップを形成するためのものである。デカップリングコイルは、電流極性反転時以降メインバンクからバイアスバンクへ電流が流れ込むのを抑制することができる。

垂直磁場コイル電源は、プラズマの水平方向の位置を維持させるための電源である。したがって、本電源には電力用トランジスタで構成したベース電流直接制御方式によるフィードバック回路を付加し、プラズマ電流の変化にほぼ連続的に追従できる方式とした。

同様に、水平磁場コイル電源は、プラズマの垂直方向変位をフィードバック制御するための電源で、大容量電解コンデンサを水平磁場コイルに対して逆並列に接続し、プラズマの変位に追従して、電力用トランジスタをチョップ動作させる方式とした。

変流器電源は、プラズマ電流を発生、維持させるための電源である。ただし、プラズマ電流の立上げ時定数を調整可能なようにし、かつ異なるプラズマ抵抗値に整合するよう、同

表3 電源装置の主要諸元 トロイダルコイル電源、垂直磁場コイル電源及び変流器電源はPFN付である。

No.	電源名称	最大電圧	最大電流(kA)	容量(kJ)	備考
1	トロイダルコイル電源	16.8kV	19	742	-
2	ヘリカルコイル電源	2.0kV	20	21	-
3	垂直磁場コイル電源	10.0kV	7.2	458	フィードバック回路付
4	水平磁場コイル電源	50V	0.9	19	同上
5	変流器電源	20kV	41.7	1,326	-
6	バイアス電源	63V	1.25	-	-

図(d)に示すようにPFN回路を切り換えて使用できる構成とし、更に中間タップ付のステップダウントランスを使用している。

4 制 御

制御装置のシステム構成を図7に示す。すなわち主制御盤は、マイクロコンピュータとのGP-IBインタフェースによってシステム全体を統括し、副制御盤、遅延パルサへデータを伝送する。副制御盤は電源の制御、充電電圧の表示などを行なう。遅延パルサは電源、ガス供給装置などの動作タイミングを制御するトリガパルスを出力する。制御室、電源室間のこれらの信号は、すべて光ファイバを介して伝送されており、この種の装置としては新しい試みである。

以上のデータ類は、制御室内のプリンタへ出力される外、放電ごとにフロッピーディスクへ磁氣的に記録される。

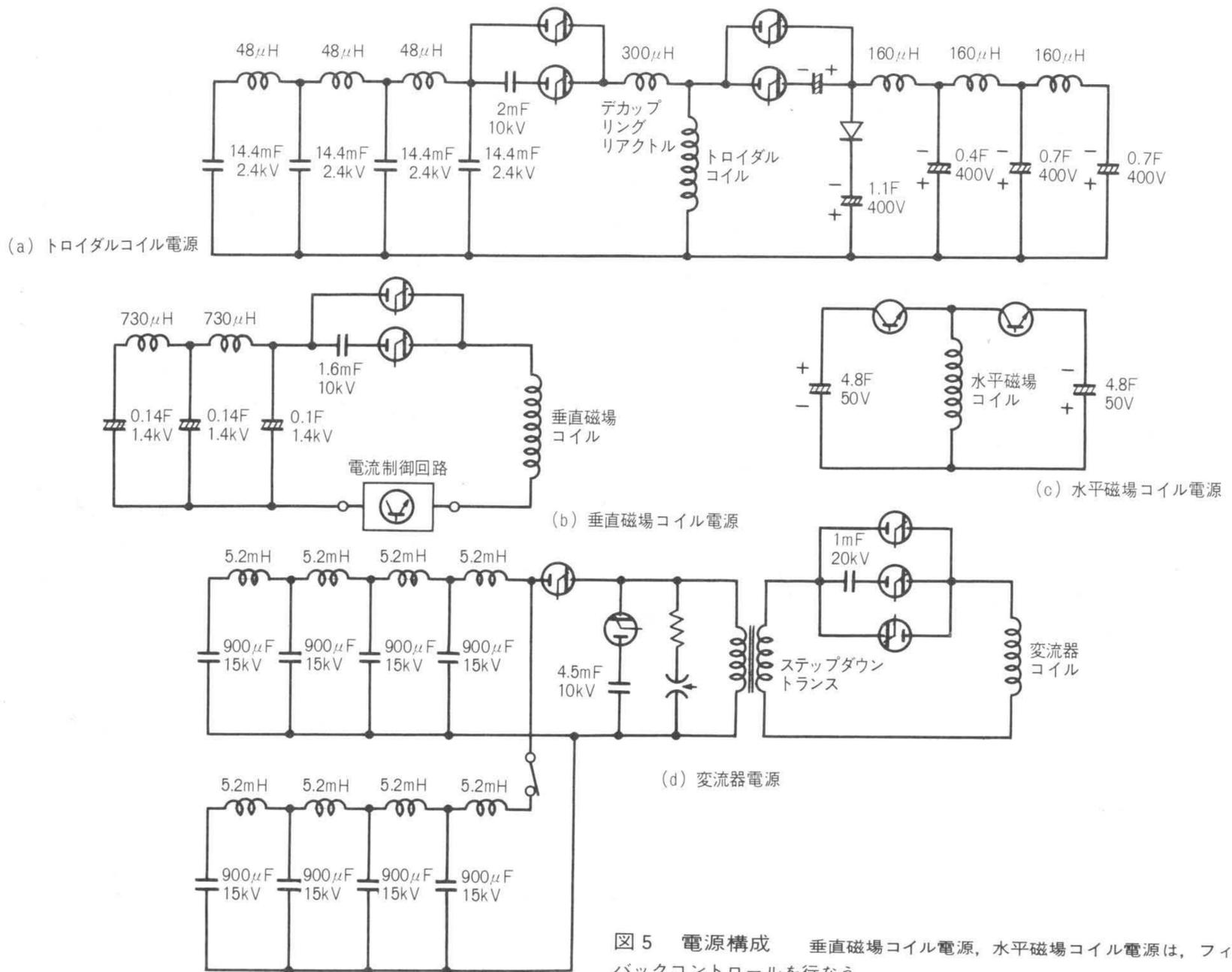


図5 電源構成 垂直磁場コイル電源、水平磁場コイル電源は、フィードバックコントロールを行なう。

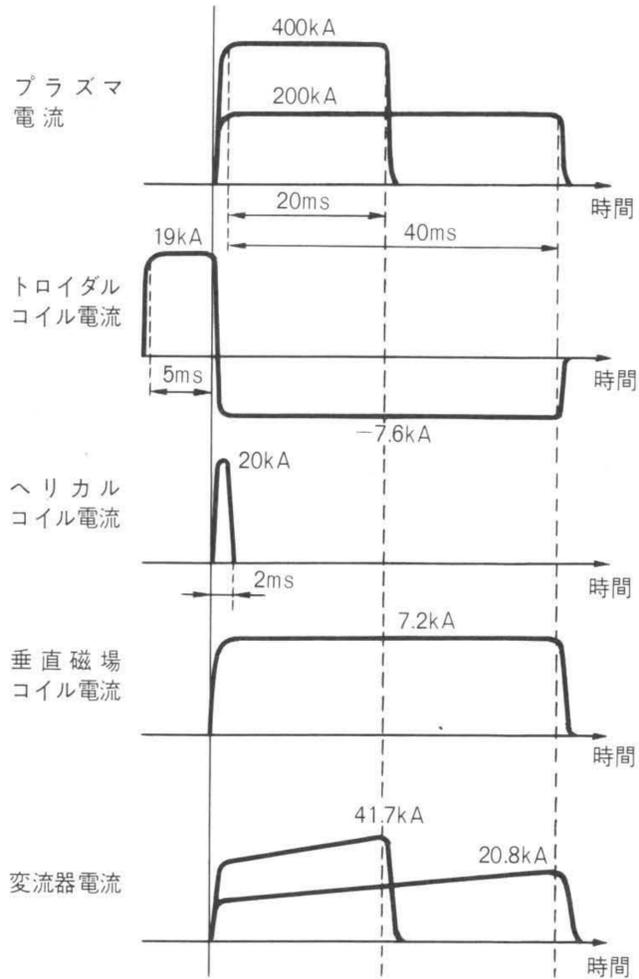


図6 通電パターン 変流器コイル立上り時間及びトロイダルコイル電流の逆転時間は、4種類の値が設定できる。

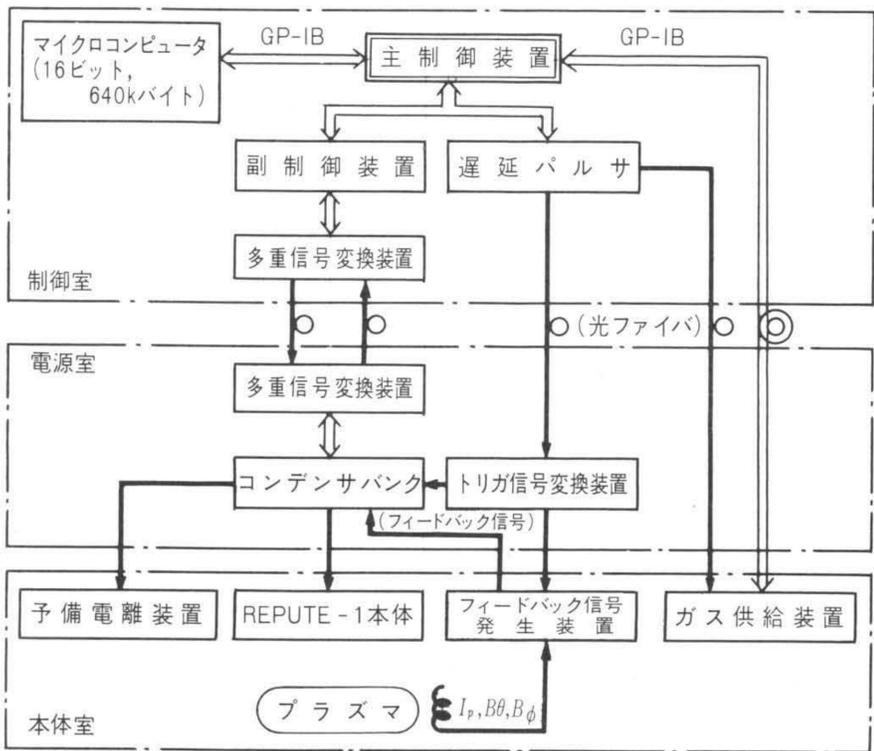


図7 制御装置システム構成 制御室と電源室の間のケーブルは、ノイズ対策のため光ファイバとしている。

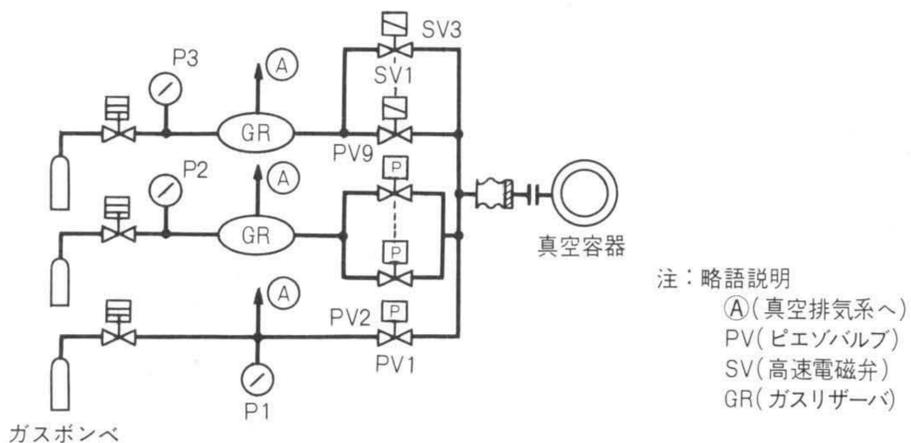


図8 ガス供給装置ブロック図 ピエゾバルブ、高速電磁弁合計で500 Torr·l/sのガス量を供給できる。

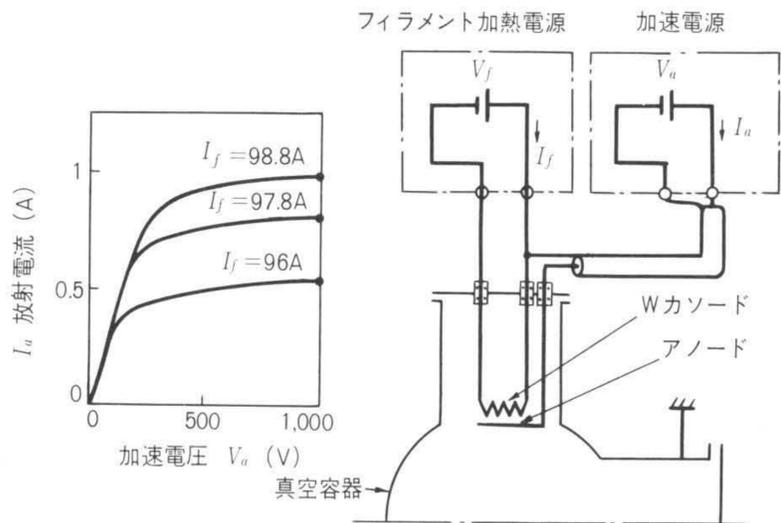


図9 予備電離装置ブロック図 図中に試験により得られた、加速電圧-放射電流の特性を、フィラメント電流を、パラメータにして示す。

5 補機

補機としては真空排気装置、ガス供給装置及び予備電離装置を設けている。

真空排気装置は、排気速度1,500l/sのターボ分子ポンプを主ポンプとし、真空容器ポート部で470l/sの有効排気速度をもつ。

ガス供給装置は、最大流量は500Torr·l/sと大きく、また、任意の波形で供給できるシステムとした。系統図を図8に示す。ピエゾバルブと高速電磁弁を組み合わせたシステムであり、ピエゾバルブだけで100Torr·l/sのガス流量が供給できる。

予備電離装置のブロック図を図9に示す。予備電離装置は、直径1.5mmのW線を用いた熱陰極型の電子銃であり、1kV、1Aの電子ビームを放射する。W線を約2,300°Cに加熱するために流す電流は120Aと大電流であり、他の磁場により電磁力が印加されるのを防ぐため、磁場印加前に加熱電流を切り、予熱により電子を放射する方式とした。また実験の自由度を増すため、電源側では接地せず、アノード又はカソードの任意の一方を接地できる方式とした。

6 結言

REPUTE-Iは、国内最大のRFP装置であり、日立製作所の新製品である。このため、本体、電源装置、制御装置及び補機類を含め新方式、新構造の部分が少なくなく、優れたアイデアを数多く採り入れ、入念な検討を重ねた結果、所期の性能をもつ装置を完成することができた。

今後、本装置によりRFP装置の有益な成果が得られ、その研究がますます活発になることが期待される。

終わりに、本装置の設計製作に当たり、御指導、御協力をいただいた関係各位に対し深く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 逆磁場ピンチ(RFP)研究会報告：報告会全体を引用したもので特定の論文はない。
核融合研究, 48, 別冊その1 (1982年9月)
- 2) 長谷川：無為自然の核融合装置, 日本物理学会誌, 39, 19~23(昭和59年1月)
- 3) K. Ogawa, et al.: Proc. 9th Inter. Conf. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Res., Baltimore, USA, 1982, 575~584
- 4) 井上, 外：東京大学逆磁場ピンチ計画, REPUTE-I, 核融合研究, 50, (1983年10月)