

日立トカマク型非円形プラズマ実験装置

Hitachi Non-circular Tokamak Device

日立製作所は、核融合技術の研究のため、小形のトカマク型プラズマ実験装置を製作し、日立製作所の研究所内で、昭和55年1月から運転を開始した。

本装置は、本体、電源及び周辺装置から成る。本体の特長は、(1) 縦長非円形断面プラズマを発生させることができること、(2) プラズマの位置、断面形状の制御実験が可能なこと、である。

以上の特長をもたすため、装置の構造に次に述べるような工夫を施した。(1) 真空容器の断面を長方形としたこと、(2) ポロイダル磁場コイルをプラズマ平衡磁場発生用と制御用磁場発生用とに分離し、後者をトロイダル磁場コイルの内側に設置したこと、(3) 2分割D形トロイダル磁場コイルを採用したこと、である。

また、電源のシーケンス制御及びプラズマ計測データの収集、処理系には、マイクロコンピュータなどの計算機を活用して自動化を図った。

西 政嗣* Masatsugu Nishi
大塚道夫** Michio Ôtsuka
小林朋文** Tomofumi Kobayashi
斉藤龍生*** Ryûsei Saitô

1 緒言

トカマク型装置による核融合研究の著しい進展により、核融合炉の実現が一段と有望になってきている。現在我が国では、日本原子力研究所で核融合の科学的実証を得る目的のため、「臨界プラズマ試験装置“JT-60”」¹⁾の建設が、昭和59年ごろ完成を目指して進められている。更に、IAEA（国際原子力機構）を中心に、INTOR（国際トカマク炉）の設計検討も昭和53年から開始されている²⁾。

日立製作所は、これまで、日本原子力研究所の“JFT-2”³⁾、名古屋大学の“JIPP T-2”⁴⁾、京都大学の「ヘリオトロン型装置」⁵⁾、九州大学の“TRIAM-1”⁶⁾などの核融合実験装置を製作し、現在、“JT-60”本体などの製作を進めている。今後更に、大型の核融合装置の設計、建設に対処できるよう技術力の向上を図るため、このほど、小形のトカマク型プラズマ実験装置を製作した。

本装置の特長は、縦長の非円形断面プラズマを発生できることである。装置の設計では、以下に述べる点に重点を置いた。

- (1) プラズマの位置と断面形状の制御実験が可能なこと。
- (2) プラズマ計測が行ないやすい構造であること。
- (3) 真空容器内が清浄で、高真空度を達成できること。
- (4) 大量のプラズマ計測データの収集・処理が可能なこと。

本装置は既に完成し、昭和55年1月から運転を開始している。この論文では、装置本体、電源及びデータ収集・処理系について述べる。

2 本体

2.1 本体の概要

本体部の外観を図1に、鳥観図を図2に、また、主要諸元を表1に示す。本体は、プラズマ閉じ込め用空間を提供する真空容器、プラズマ閉じ込め用の主磁場を発生させるトロイダル磁場コイル、プラズマ電流を流すための変流器並びにプラズマの平衡保持及びその位置と断面形状の制御用の磁場を発生させるポロイダル磁場コイルから成る。

限られた空間内に多数のコイルを配置するとともに、プラズマ計測用空間とプラズマ制御性能を確保するため、

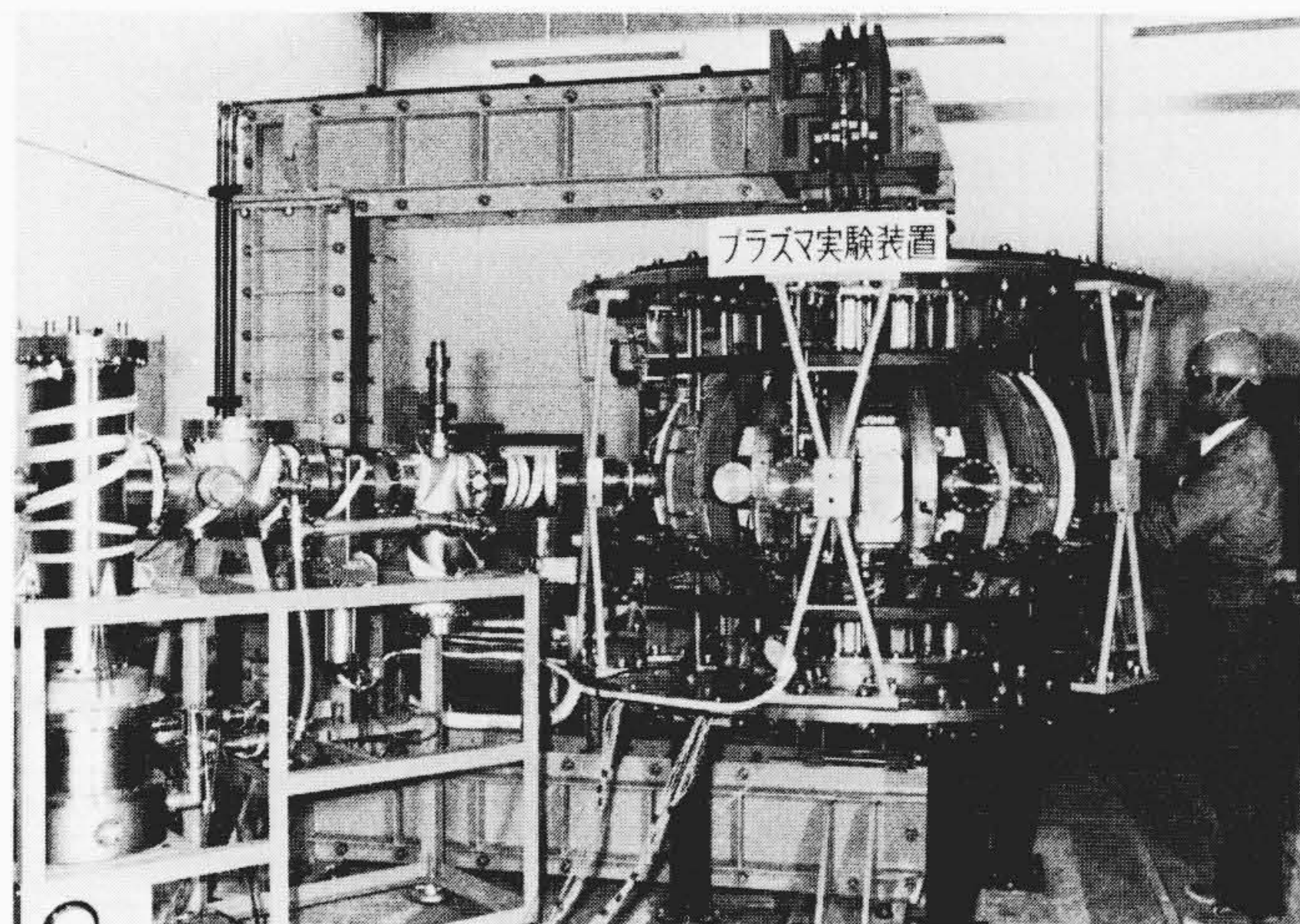


図1 実験装置本体部の外観 中央が実験装置本体、左側が真空排気系である。真空容器に計測用ポートを約50個設けている。

- (1) 長方形断面をもつ真空容器の採用
- (2) 2分割D形トロイダル磁場コイルの採用
- (3) トロイダル磁場コイル内に、一部のポロイダル磁場コイルを配置
- (4) 直接通電による真空容器のベーキング方式の採用などの工夫を施している。

2.2 真空容器

真空容器は非磁性ステンレス鋼製で、大周方向に1ターンを形成しないよう2分割されている。分割部の絶縁には、図3に示すようにセラミックを使用している。

真空容器の断面形状は長方形で、内寸法は縦308mm、横172mmである。真空容器には52箇所プラズマ計測用及び真空排気用ポートを設けている。ポートのフランジ部の真空封じには、メタルパッキングを使用している。真空容器の内面には、脱脂のため溶接後酸洗浄処理を施した。

プラズマが真空容器内壁に衝突することと防ぐためのリミッタとして、固定リミッタと可動リミッタの2種類を設けた。

* 日立製作所エネルギー研究所 工学博士 ** 日立製作所エネルギー研究所 *** 日立製作所日立工場

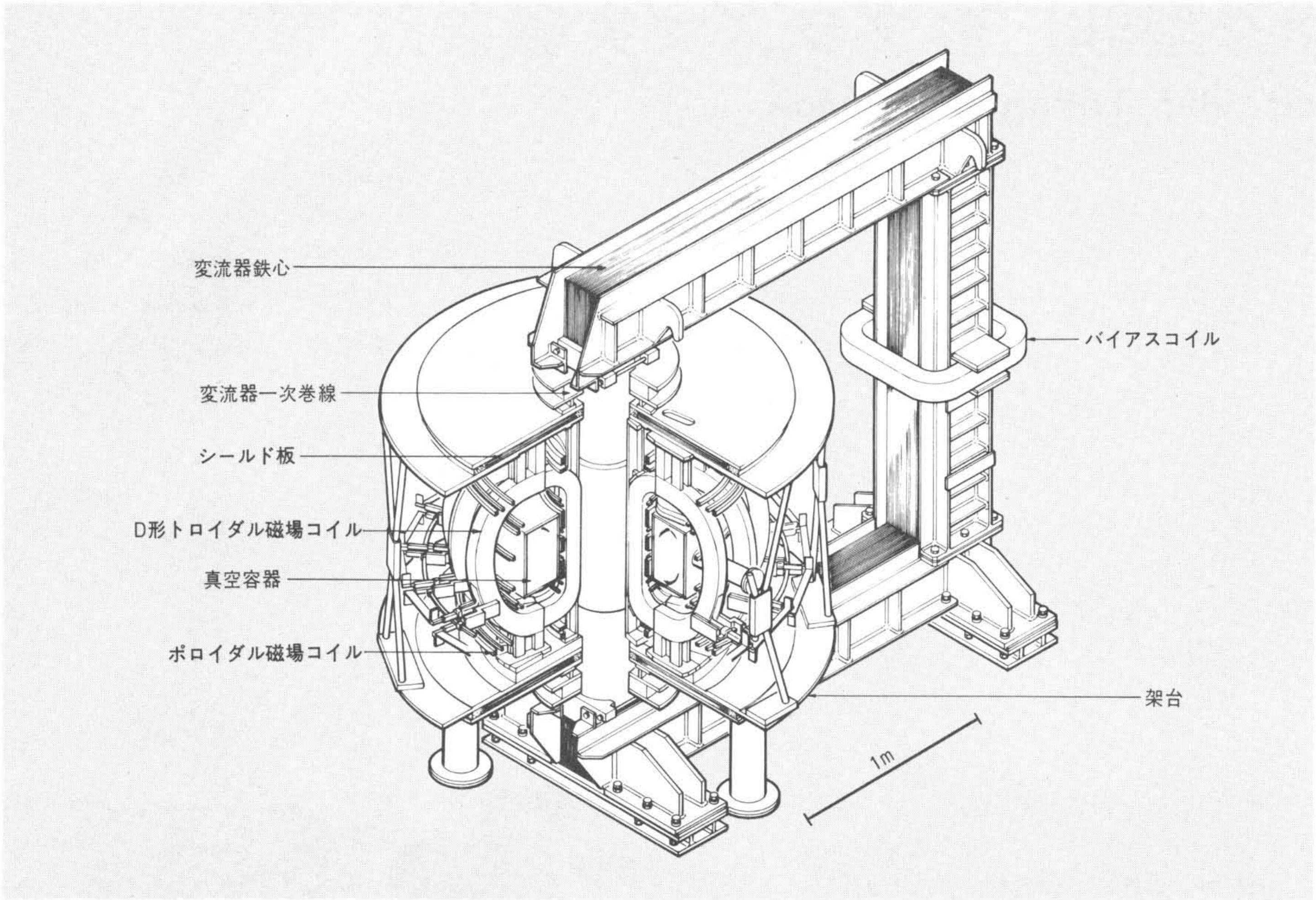


図2 本体部の鳥観図
長方形断面の真空容器とD形トロイダル磁場コイルをもっている。

表1 本体の主要諸元 プラズマ断面は、縦横比が約2：1の長円形であるのが特長である。

項 目	仕 様
主 半 径	0.35m
プラズマ断面寸法	縦0.27m×横0.14m
トロイダル磁場	1.5T
変流器磁束変化量	0.123V・s
プラズマ電流	約80kA(目標値)
プラズマ電流維持時間	約20ms

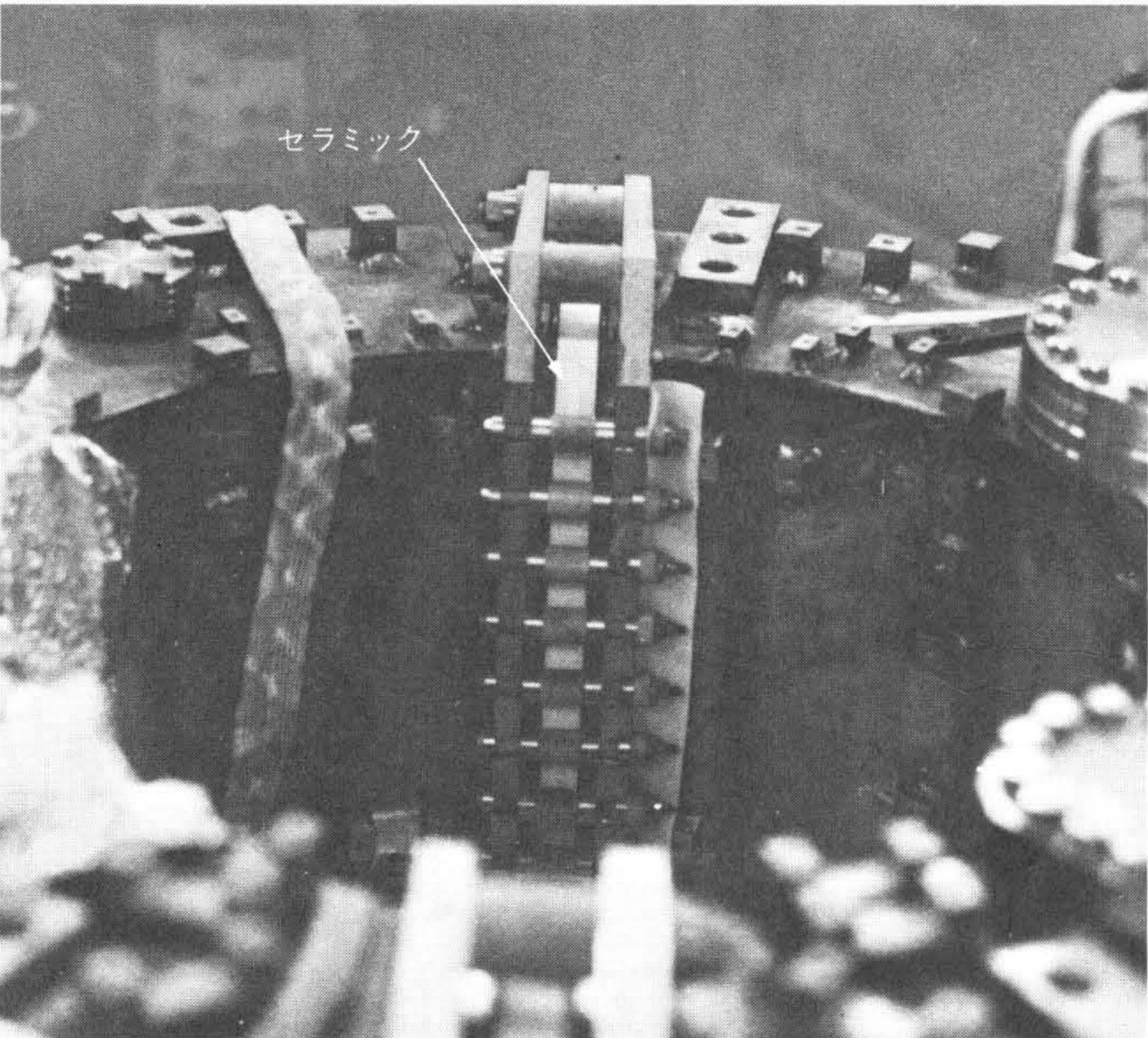


図3 真空容器の接続部 接続部の絶縁のため、セラミック(矢印で示す。)を使用している。

リミッタ材にはモリブデンを使用した。固定リミッタの配置を図4に示す。可動リミッタは直線導入機を使用した手動式で、真空容器の上下及び外周部に装着される。大周方向の取付位置は固定リミッタ取付位置と同位置で、同図に示した固定リミッタの間に、開いた間隙部に取り付けられる。手動リミッタの形状を図5に示す。

真空容器の内壁表面の浄化のため、それ自体に電流を流して抵抗加熱する方式でベーキングする。この場合、真空容器の絶縁部を短絡し、真空容器を二次巻線とし、変流器のバイアスコイルに交流電流を通電する。ベーキング温度は、真空容器内壁表面に吸着しているH₂Oを除去できるように、110℃前後に設定している。

真空容器に生ずるうず電流の時定数は約1msであるため、シェル効果によるプラズマ安定化効果は期待できない。一般には、小形装置ではプラズマを囲む良導体の金属製の円環(シェル)を設置するが、本装置では、その代わりに外部で接続の切替え可能なくら形コイルを設け、シェル効果によるプラズマの安定化作用と、プラズマの状態変化が構造物に及ぼす電磁力をそれぞれ検討できるようにしている。

真空排気系は、軸流分子ポンプと直結形ロータリポンプから成り、実効排気速度は0.04m³/sである。真空容器の到達真空度は2.6×10⁻⁶Pa(2×10⁻⁸Torr)である。

2.3 トロイダル磁場コイル

トロイダル磁場コイルの総数は18個で、各コイルは12ターンの平角導体から成る。導体の冷却は自然冷却である。

トロイダル磁場コイルの形状はD形で、ポロイダル磁場コイルの一部をトロイダル磁場コイル内に配置するため、2分割型とした。接続部をコイルの上下に設け、この部分は直線としたため、コイルは理想的なD形状から多少ずれている。

コイル電流は最大12.5kAで、これにより真空容器の中心に1.5Tの磁場を発生させることができる。真空容器の中心での不整磁場の大きさは、0.002T以下である。

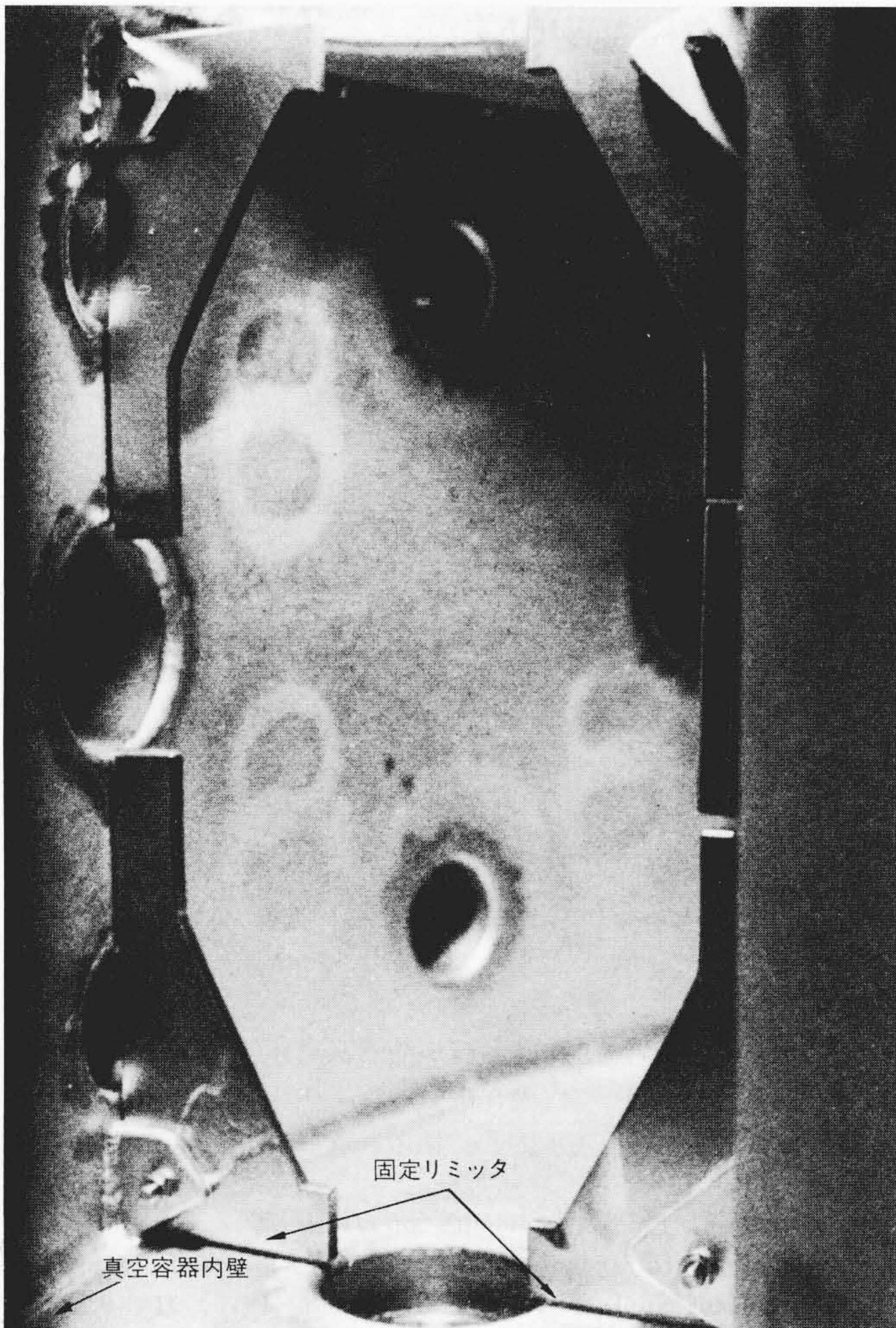


図4 固定リミッタ 真空容器内の固定リミッタの配置を示す。可動リミッタは上下及び左横にある固定リミッタの間隙部から挿入される。

コイルに発生する向心力は、全体で最大221tになる。この力を支えるため、トロイダル磁場コイルの内側サポートの背面を変流器の脚鉄部と密着させる構造としている。

トロイダル磁場コイルの仕様をまとめて表2に示す。

2.4 ポロイダル磁場コイル

プラズマ環の位置及び断面形状制御の役割を担うポロイダル磁場コイルは、5種類のコイルから成る。その機能分担と各々の起磁力を表3に示す。

制御用コイルは、プラズマの急速な状態変化に対応して磁場を発生できることが要求される。そこで、これらのコイルは、トロイダル磁場コイルの内側に設置している。

2.5 変流器

プラズマ電流を流すために用いる変流器には、鉄心形を採

表2 トロイダル磁場コイルの仕様 トロイダル磁場コイルはD形状であり、ポロイダル磁場コイルを中に入れるため、上下で2分割している。

項 目	仕 様
磁 場 強 度	1.5 T ($R=0.35\text{m}$)
ユ ニ ッ ト 数	18
総 タ ー ン 数	216
最 大 電 流	12.5 kA
蓄積エネルギー	504 kJ

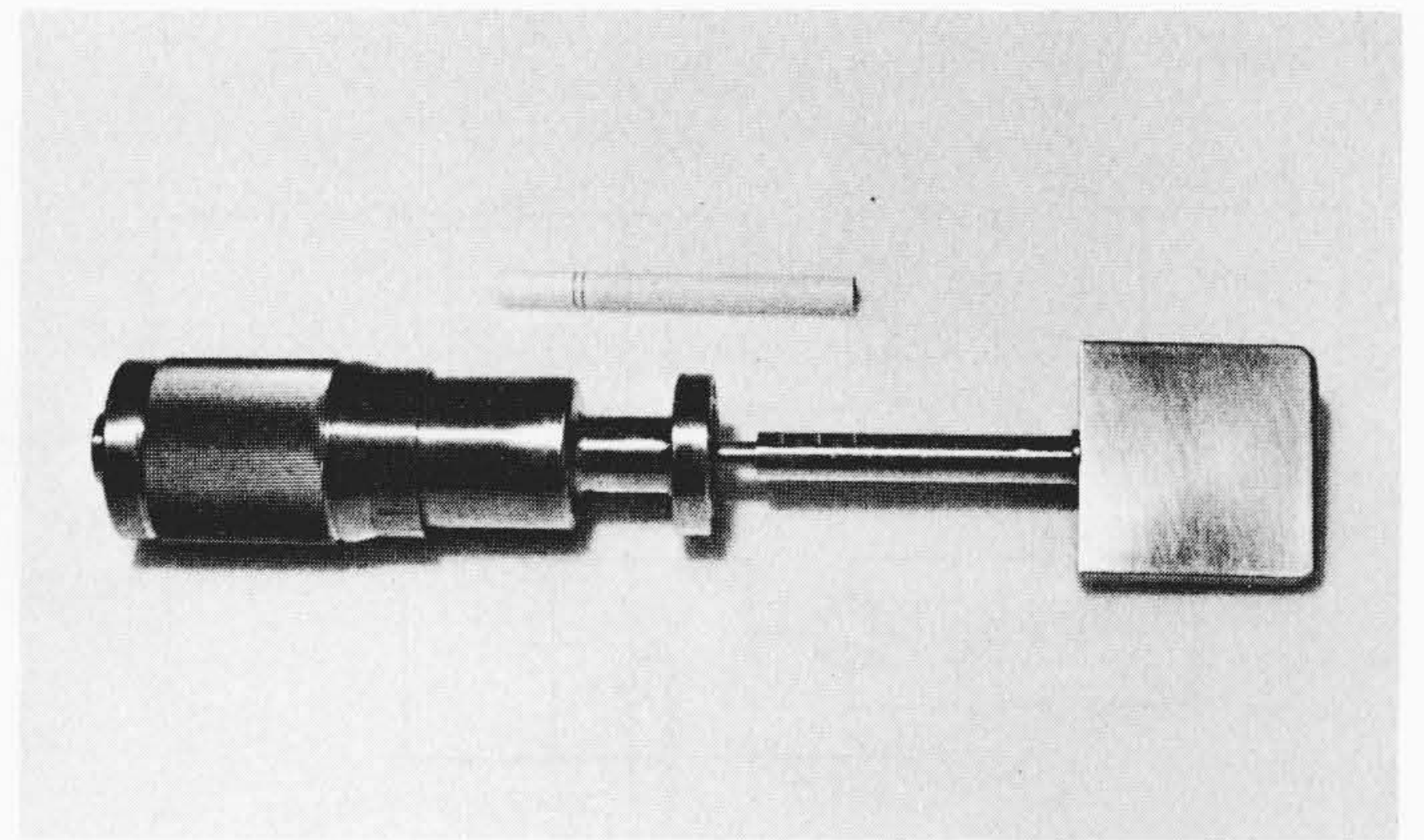


図5 可動リミッタ 真空容器の上部から挿入する手動式リミッタを示す。リミッタの材料はモリブデンである。

表3 ポロイダル磁場コイルの種類と機能 制御用コイルは制御の応答速度を速くするため、トロイダル磁場コイルの内側に配置している。

コ イ ル 名 称	機 能	起磁力 (kAT)
平衡用垂直磁場コイル	平衡磁場配位の形成	± 96
平衡用水平磁場コイル	不整磁場の消去	± 21
平衡用四重極磁場コイル	長円形断面プラズマの生成	± 120
制御用垂直磁場コイル	プラズマの水平方向位置制御	± 7.2
制御用水平磁場コイル	プラズマの垂直方向位置制御	± 7.5

用している。変流器は鉄心、一次巻線、バイアスコイルから成り、プラズマを二次巻線として、図6に示すような回路を構成する。変流器の基本性能は、鉄心で得られる有効磁束変化量で決まる。本装置では、脚鉄部は0.35mm厚の方向性けい素鋼板の積層構造とし、その直径は240mmである。最大磁束変化量は、 $0.123\text{V}\cdot\text{s}$ である。

鉄心の接続には、装置の分解・再組立の作業性を考慮し、衝頭接合方式を採っている。

バイアスコイルは、鉄心内の磁束変化量を有効に利用するために用いる。すなわち、プラズマの放電前にバイアスコイルにより鉄心を逆励磁しておき、その後一次巻線に通電する。

一次巻線は2分割し、水平面に対し対称に脚鉄に巻いている。一次巻線による漏れ磁束がプラズマに及ぼす影響を小さくするため、一次巻線と真空容器の間にけい素鋼板製の磁気しゃへい板を配置している。

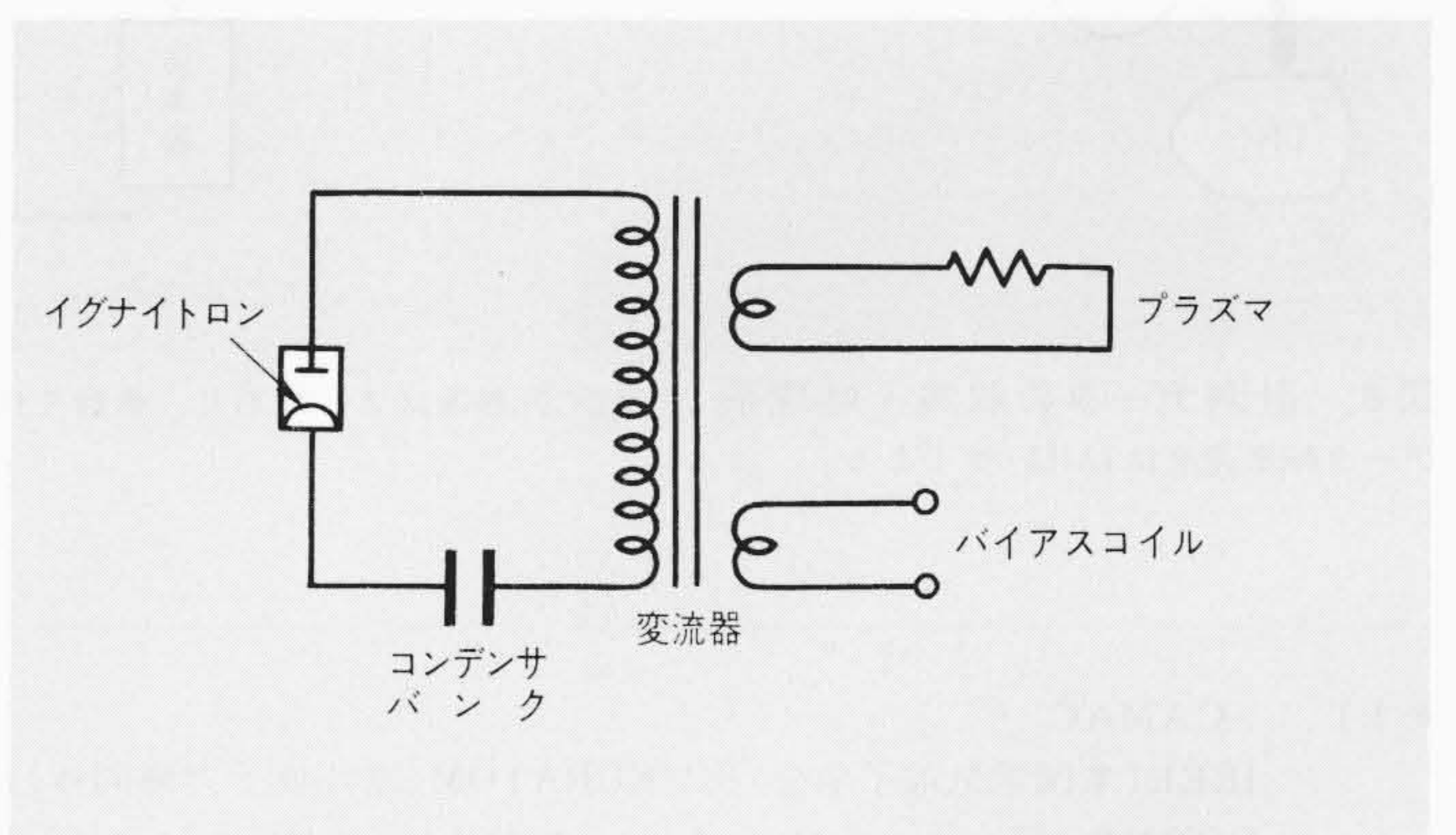


図6 変流器の等価回路 プラズマは変流器の二次巻線となる。

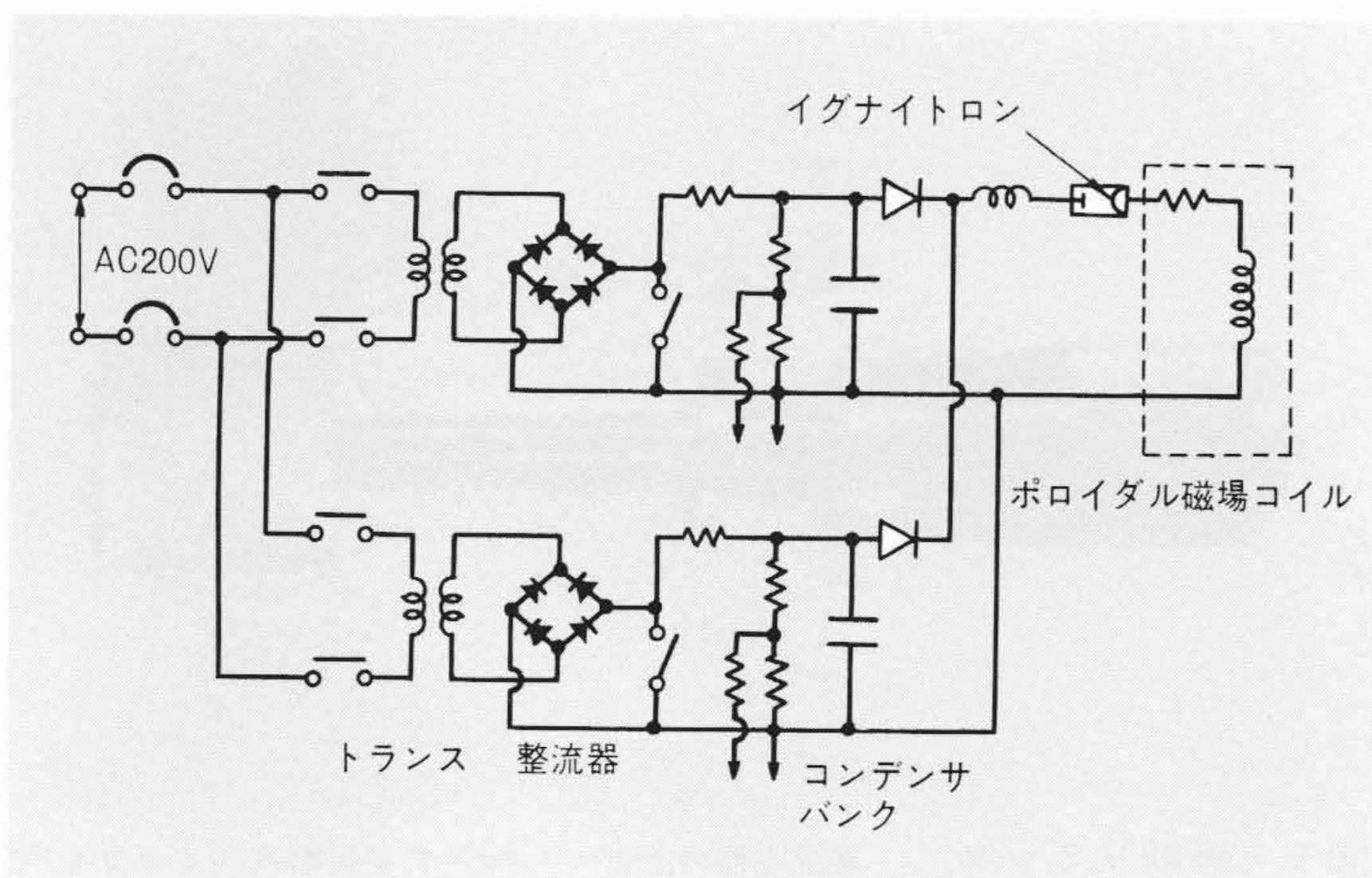


図7 ポロイダル磁場コイル用電源回路 ポロイダル磁場コイル用コンデンサ電源の回路を示す。トロイダル磁場コイル用電源も同様の構成であるが、1種類のコンデンサ(図の上半分)を使用している。

3 電 源

制御用ポロイダル磁場コイルを除く各コイルの電源には、コンデンサバンクを使用している。

変流器一次巻線及び平衡用ポロイダル磁場コイルの電源は、プラズマ電流の立上げ時及び電流維持時に対応して、2種類のコンデンサバンクを使用している。回路例を図7に示す。トロイダル磁場コイル用電源は、1種類のコンデンサバンクから成り、クローバ回路はない。

電源の充電電圧制御とコイルの通電シーケンスの制御には、マイクロコンピュータを使用している。

4 データ処理系

計測器からの信号を、図8に示すCAMACシステム^{※1)}と日立制御用小形計算機HIDIC 80Eシステムで収集・処理する。

このシステムでは、最大16チャンネルの信号を最高 $2\mu\text{s}$ /チャンネルの速度でサンプリングできる。サンプリング周期は、サンプリング中に外部からの指令により3段階で切り替えられる。各チャンネルごとに4k語の容量をもつメモリを配置し、データをいったん格納しておき、1回の実験が終了した後、計算機からの指令により、計算機を経由して磁気テープにファイルする。計算機へのデータ転送にはDMA (Direct Memory Access) 方式を採用しており、転送速度は、1M語/秒である。

5 結 言

日立製作所では、核融合技術の研究設備として、小形のトカマク型プラズマ実験装置を製作し、このほど装置の運転を開始した。本装置は、(1) 主半径35cmの非円形断面プラズマを発生できること、(2) プラズマ制御実験用コイルをもっていること、(3) 2分割トロイダル磁場コイルをもっていること、などの特長をもつ。また、電源のシーケンス制御、プラズマ計測データの収集、処理系には計算機を活用して自動化を図っている。

最後に、本装置の計画遂行に当たり、御指導、御協力をいただいた関係各位に対し、心から感謝する次第である。

参考文献

- 1) 日本原子力研究所：核融合研究開発の現状 (昭50)
- 2) 日本原子力研究所：核融合研究開発の現状 (昭54)
- 3) 加沢，外：中間ベータ値トラス装置JFT-2，日立評論，55，107～113 (昭48-2)
- 4) J.Fujita et al: Experiments on JIPP T-2—A hybrid system of stellarator and Tokamak, Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, 1976, II, 95 (昭52)
- 5) 加沢，外：核融合装置「ヘリオトロンE」の技術開発，日立評論，62，343～348 (昭55-5)
- 6) 井村，外：強磁場トカマク型核融合装置“TRIAM-1”の完成，日立評論，62，331～334 (昭55-5)

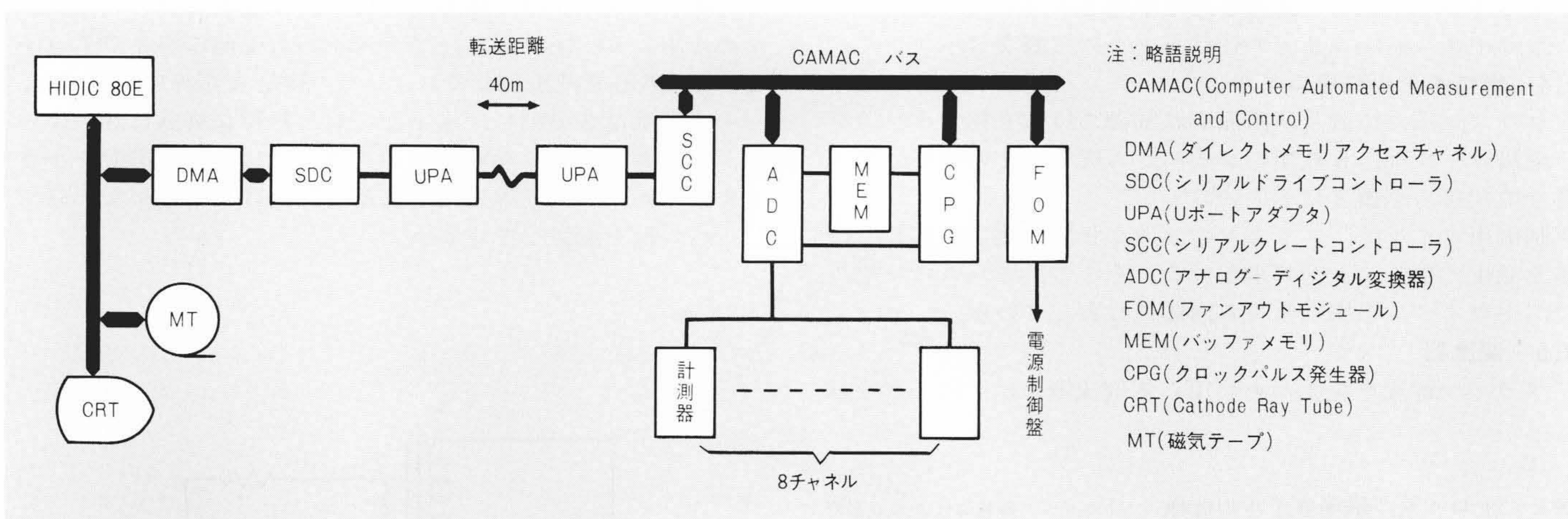


図8 計測データの収集・処理系 ADC回路系は2系統あり、合計で16チャンネルの計測器からの信号を収集できる。CAMACからHIDIC 80E計算機へのデータ転送速度は1M語/秒である。

※1) CAMAC
IEEE (米国電気電子学会) 及び EURATOM (欧州原子力協同体) の ESONE (European Standard of Nuclear Electronics) 委員会が定めた、計算機を利用した実験用計測システムのモジ

ュール形インタフェースに関する国際規格であり、Computer Automated Measurement and Control の略称である。