

核融合実験装置 BSG

Thermonuclear Fusion Experiment Device "BSG"

斎藤 龍生* 笠原 達雄*
Ryûsei Saitô Tatsuo Kasahara

要 旨

名古屋大学プラズマ研究所に納入した核融合プラズマ実験装置「BSG 装置」について製作者の立場からその概要を報告する。

装置は BSG, S 部磁界コイル, 電源および制御装置, 放電管, 真空排気装置, ベーキング装置から構成されている。

装置の規模は全長約 8 m, 中央部 4 m にわたり内径 1 m のコイル 10 ブロックを配置し, その内部に直径 500 mm の放電管をそう入している。

完成後プラズマ研究所における運転では, 安定かつ高精度の磁束分布 (最高 2,000 ガウス) と, 高真空 (2×10^{-7} mmHg) が得られ, 期待どおりの性能を発揮した。

1. 緒 言

熱核融合反応を達成させるためにはプラズマの加熱と磁界による閉じ込めという二つの技術的目標を満足させることが必要である。われわれはさきに日立核融合実験装置 (IBIC)⁽¹⁾⁽²⁾ においてイオンサイクロトロン共鳴加熱による方法を試みたが, 今回 BSG 計画に参画の機会を得, 装置の製作を行なった。

BSG 計画は名古屋大学プラズマ研究所が高温発生部門の研究課題として昭和 39 年度より新しく取り上げたもので, 今回製作された装置は数次にわたる研究計画のうち, 最初の本格的な大形実験装置に相当するものである。

BSG 計画は最初に述べた二つの目標のうち, プラズマの加熱という面から考案され, 具体化された実験計画である。特に BSG 計画では断熱圧縮と非可逆等温膨張の二つの過程を組み合わせる熱核融合領域に到達しようとしている⁽³⁾⁻⁽⁷⁾ (図 1)。

BSG 装置では最初にコンデンサ放電による瞬間強磁界を用いてプラズマを発生させ (B 過程), あらかじめ形成されている弱い定常磁界中に膨張させる (S 過程)。さらに S 領域の全部, または一部の磁界を急激に強めることにより (G 過程), いっそう加熱されたプラズマを得ようとしている。

このうち S 過程の根本となる非可逆等温膨張の考え方は世界的にも新しいものであり, 今後の研究成果が期待されるところである。

以下今回製作された BSG 装置 S 部 (以下単に BSG と記す) について報告する。

2. BSG 装置の構成

BSG の概要と構成について述べる。図 2 は BSG の構成を示したものである。

S 部磁界コイルはコイルの軸上中心において軸方向に 2,000 ガウスの磁界を発生するもので 10 個のブロックから成り, 両端に設けられる予定の B および K コイルの磁界と重畳されて全長約 3 m にわたり均一磁界を形成する (両端にミラー磁界を有する均一磁界)。

ヨッフエバーは最近のプラズマ閉じ込めの技術として脚光を浴びてきたもので, コンデンサ放電による大電流を通じ一種のカスプ形磁場を形成し, これを上記のミラー形磁界に重畳することにより minimum B と呼ばれる磁界を作り出すものである。

S 部コイルの励磁電源には電動直流発電機方式を採用しており, 発電機出力は 200 kW, 定電流制御とフィルタにより安定化された電流を供給している。

放電管はプラズマが運動し反応するための真空容器で, 主軸にあたる主管部の内径は 500 mm, 角形大ポート 12, 丸形小ポート 24 個を備えており, 両端に大形ガラス容器を取り付けた構造となっている。

放電管の外部にはベーキング用のヒータが取り付けられており, 200°C までの加熱が可能である。

真空排気装置は 10 インチ油拡散ポンプ 3 台を主体に構成されており, 放電管の内部を 2×10^{-7} mmHg に排気する。操作は盤面一括操作方式とし起動停止操作以外は無人運転が可能である。

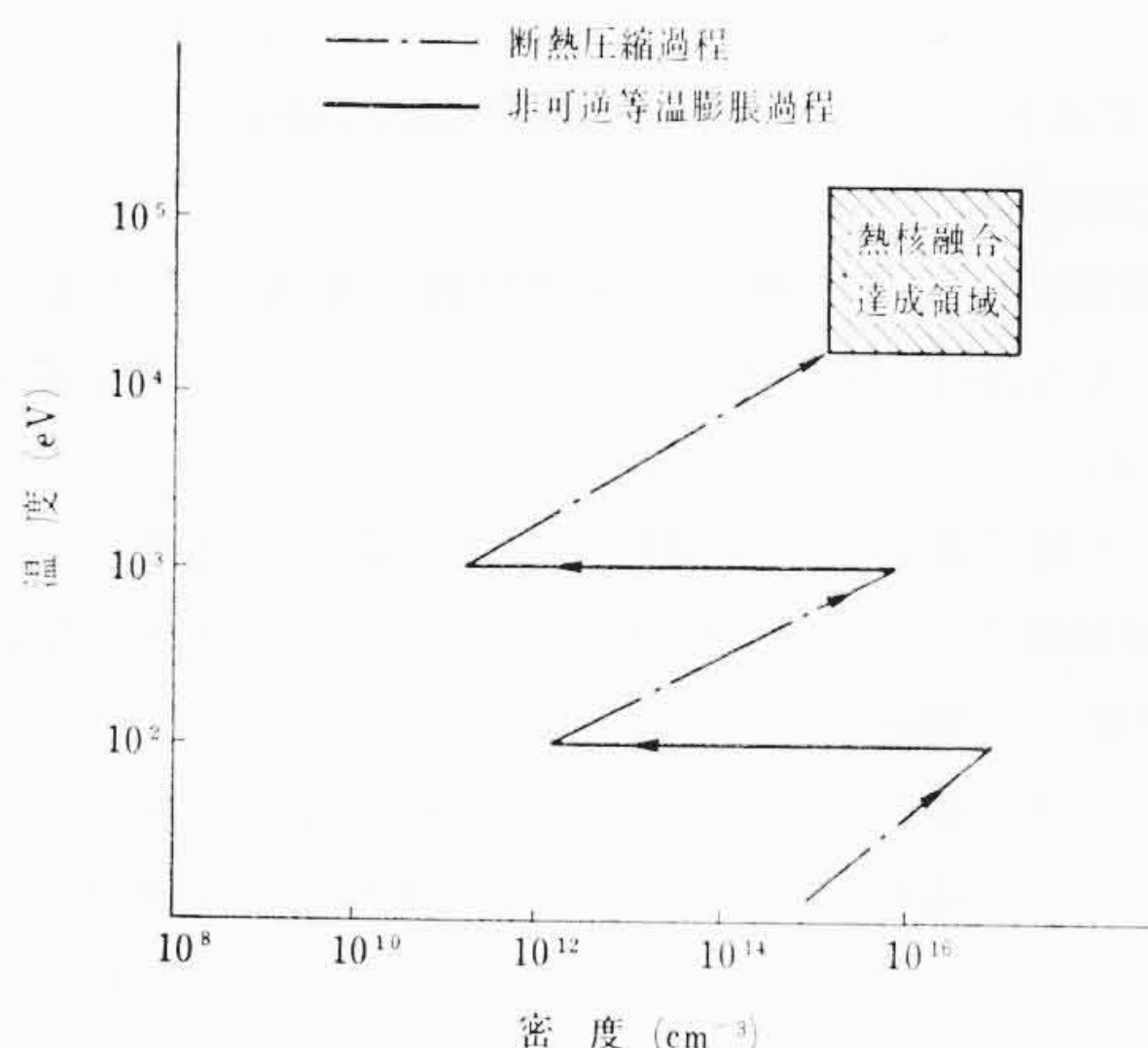


図 1 BSG 過程概念図

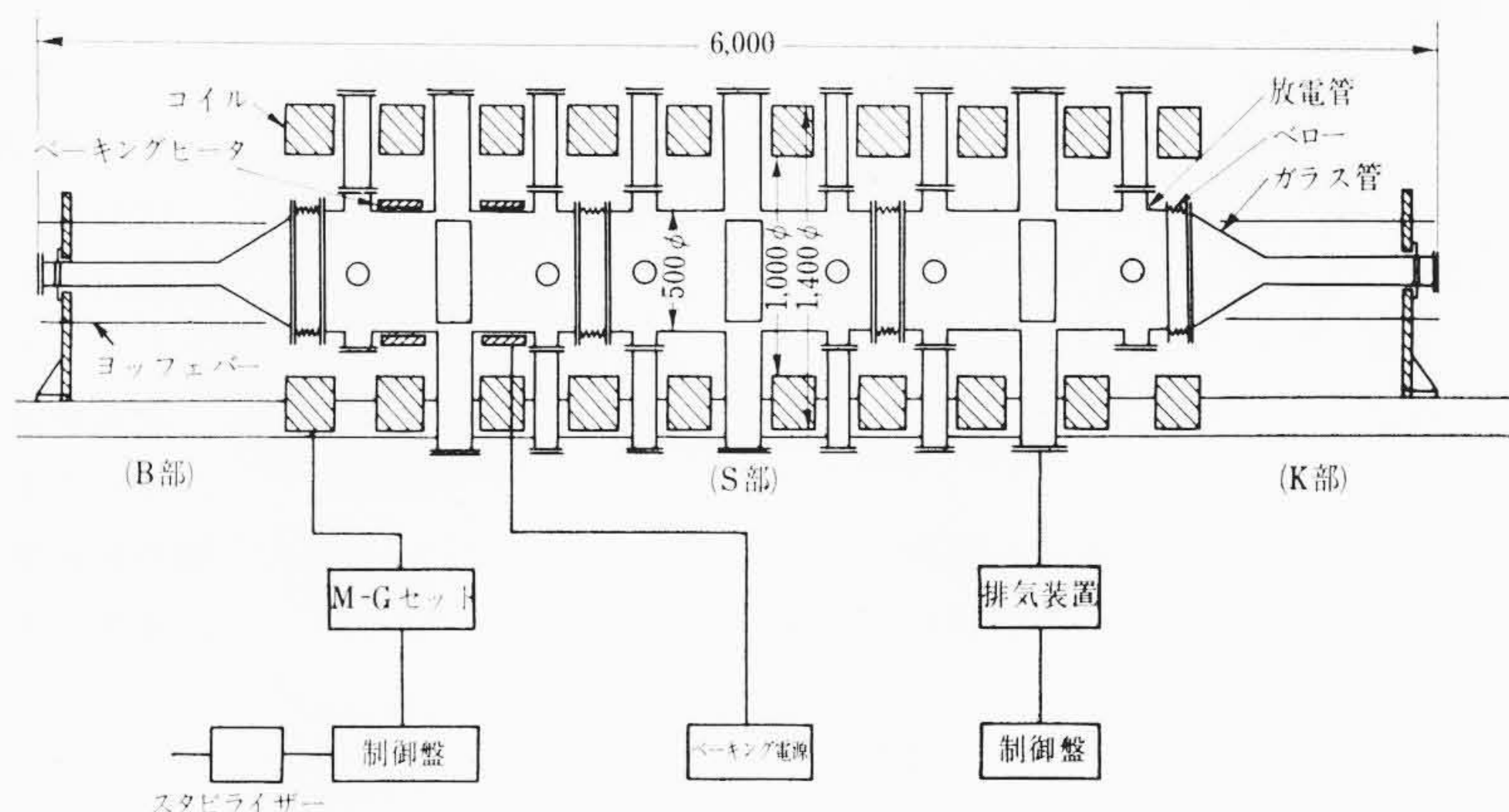


図 2 BSG 装置の構成

* 日立製作所日立工場

3. 装置の設計と製作

3.1 磁界 コイル

3.1.1 磁束密度分布の計算

BSG コイルに要求された磁束密度分布の仕様は下記であった。

- (1) 最大磁束密度 2,000 ガウス。
- (2) 所定のコイル配置において磁束密度分布の計算値と実測値が ±10 ガウスの精度で一致すること。

上記の仕様を満足するためには磁界の詳細な分布を知ること、およびコイルの製作にあたってどの程度の寸法精度を必要とするかをあらかじめは握しておく必要がある。

磁束密度分布の計算はコイルが円形、同軸、空心である場合には種々の計算式があり、比較的容易に行なわれる。今回用いた計算方法は BSG コイルを n 個の同軸ワンターンコイルに見たてたもので、これらワンターンコイルが考察点に形成する磁界の代数和として各点の磁束密度を求めた。すなわち、コイルの軸方向座標を z 、半径方向座標を r とし、ワンターンの数を n 、 i 番目のワンターンの半径、 z 座標、および電流をそれぞれ a_i 、 z_i 、 I_i 、また透磁率を μ 、磁束密度を B で表わせば、磁束密度の各点における軸方向成分 B_z および半径方向成分 B_r は下記となる (MKS 単位)。

$$B_z(z, r) = \frac{\mu}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{[(a_i + r)^2 + (z - z_i)^2]^{\frac{1}{2}}} \times \left[K(k_i) + \frac{a_i^2 - r^2 - (z - z_i)^2}{(a_i - r)^2 + (z - z_i)^2} E(k_i) \right]$$

$$B_r(z, r) = \frac{\mu}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{I_i (z - z_i)}{[(a_i + r)^2 + (z - z_i)^2]^{\frac{1}{2}}} \times \left[-K(k_i) + \frac{a_i^2 + r^2 + (z - z_i)^2}{(a_i - r)^2 + (z - z_i)^2} E(k_i) \right]$$

$$k_i^2 = \frac{4 a_i r}{(a_i + r)^2 + (z - z_i)^2}$$

K, E はそれぞれ第一種、第二種完全だ円積分

BSG の密束磁度分布計算ではコイルを 160 個のワンターンに分割し、電子計算機 (IBM 7074) を用いて計算した。計算の結果を図 3 に示す。

コイルの製作精度についても慎重に検討を行なった。その結果所定の磁界精度を得るためのコイルの製作は十分可能なことがわかった。

3.1.2 コイル方式の選択

プラズマ閉じ込め装置のコイル方式の決定は装置の構成に大きな影響をおよぼす。

最近のコイルの技術からすれば

- (1) 一般の平角線、丸線を用いて間接的に冷却を施す方式
- (2) 中空導体を用いてその中に直接冷媒を通す方式
- (3) 超伝導材を用いる方式

などが考えられる。

これに対し装置のほうから考慮すべき事項は下記の諸点である。

- (1) 磁界の強さと形成の範囲
- (2) コイルの配置と許容される空間
- (3) 使用 定 格
- (4) 磁界の精度とコイルの精度
- (5) 電流値の最適値の選定
- (6) 各種導体の占積率と可能な電流密度
- (7) 製作技術上の諸制限

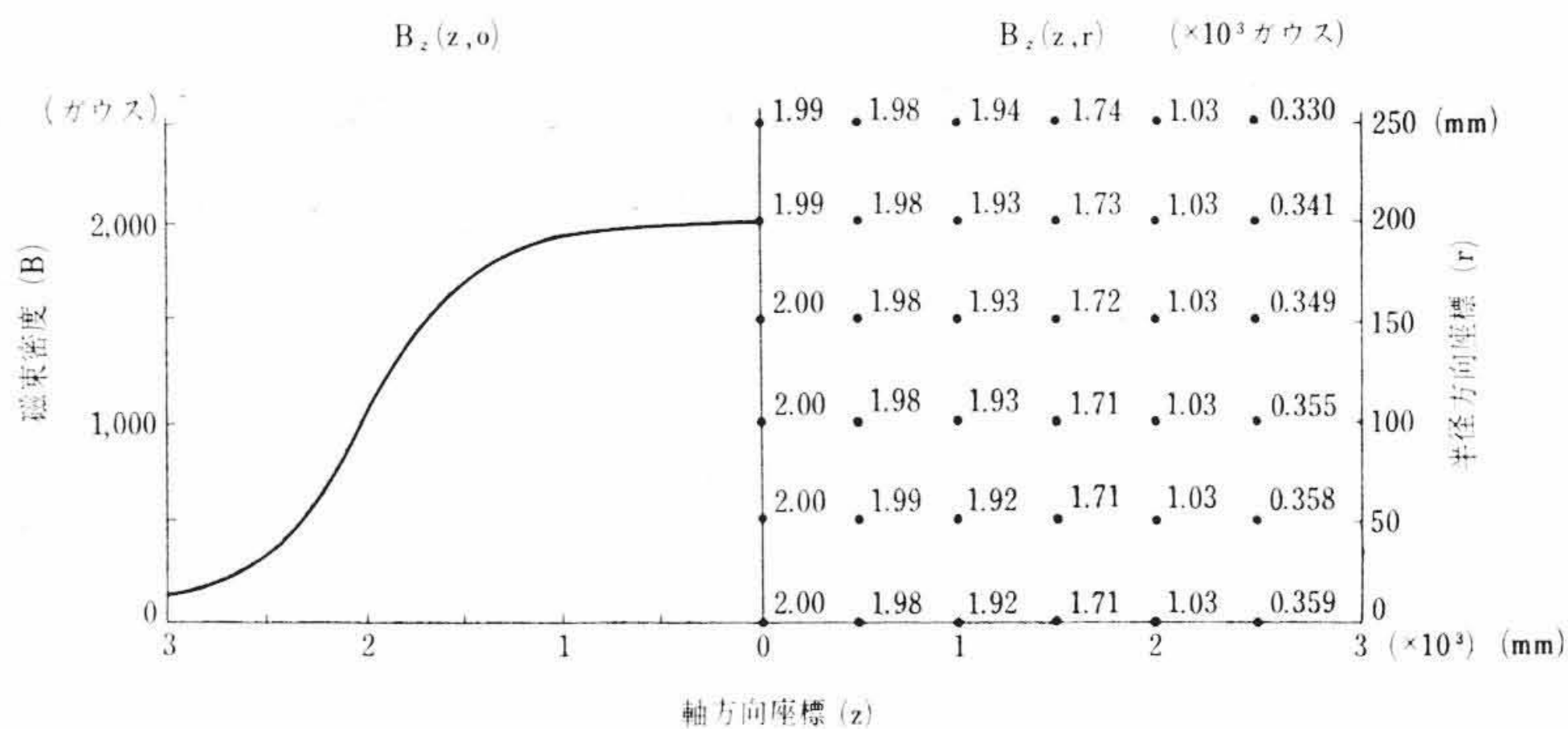


図 3 磁 束 密 度 分 布

表 1 BSG S 部コイル仕様

項 目	仕 様
ブ ロ ッ ク 数	10
総 起 磁 力	6.72×10^5 AT
巻 数	$(48T \times 4) \times 10 = 1920T$
定 格 電 流	350 A
定 方 寸	連 続
	間 接 水 冷
	内 径 1,000 mmφ
	外 径 1,420 mmφ
	ブロック長 200 mm
	配置範囲 3,600 mm

- (8) コイルの製作費
- (9) 電源所要容量
- (10) 冷却系の所要仕様
- (11) 運転性、信頼性
- (12) 総 建 設 費
- (13) 運 転 維 持 費

BSG ではこれらの点を総合的に検討した結果、平角銅線を用いた間接水冷方式を採用した。決定したコイルの仕様を表 1 に示す。コイルは 4 個のコイルユニットと 5 枚の冷却板を交互にアルミニウム製のボビンに組み込んだものをコイルブロックとし、10 個のブロックで BSG コイルを構成している。

定格電流を通じたときコイルブロック間には最高 1.5 t の電磁力が作用する。

3.2 ヨ ッ フ ェ バ ー (loffe bar)

ヨ ッ フ ェ バ ー は 150 kA、10 ms の電流を通じることが予定されている。バーは直径 30 mm の電気硬銅棒 4 本から成り、BSG コイルのボビンの内側に固定されている。バーの全長は 6 m あり、電流回路は隣接するバーには互いに反対方向の電流となるよう直列接続されている。対角線位置に相当するバーの中心間距離は 700 mm である。

3.3 電源および制御装置

BSG コイルの電源は直流発電機を誘導電動機で駆動する電動発電方式である。直流出力は定電流制御とフィルタにより安定な電流としてコイルに供給している。

定電流制御は検出抵抗器からの帰還信号を基準電圧と比較し、その差分を PID 制御装置を介して磁気増幅器の入力としており、励磁機の界磁電流を自動的に制御する方式である。

基準電源としては商用電源を自動電圧安定装置を介したあとツェナーダイオードによって高安定度の基準電圧を得てこれを使用している。また電圧設定回路にはデジタル方式を採用し設定の精度を高めている。

このほか磁気増幅器をプッシュプル式に用いた極性反転方式により +100% から -100% の出力を連続的に取り出せること、また検

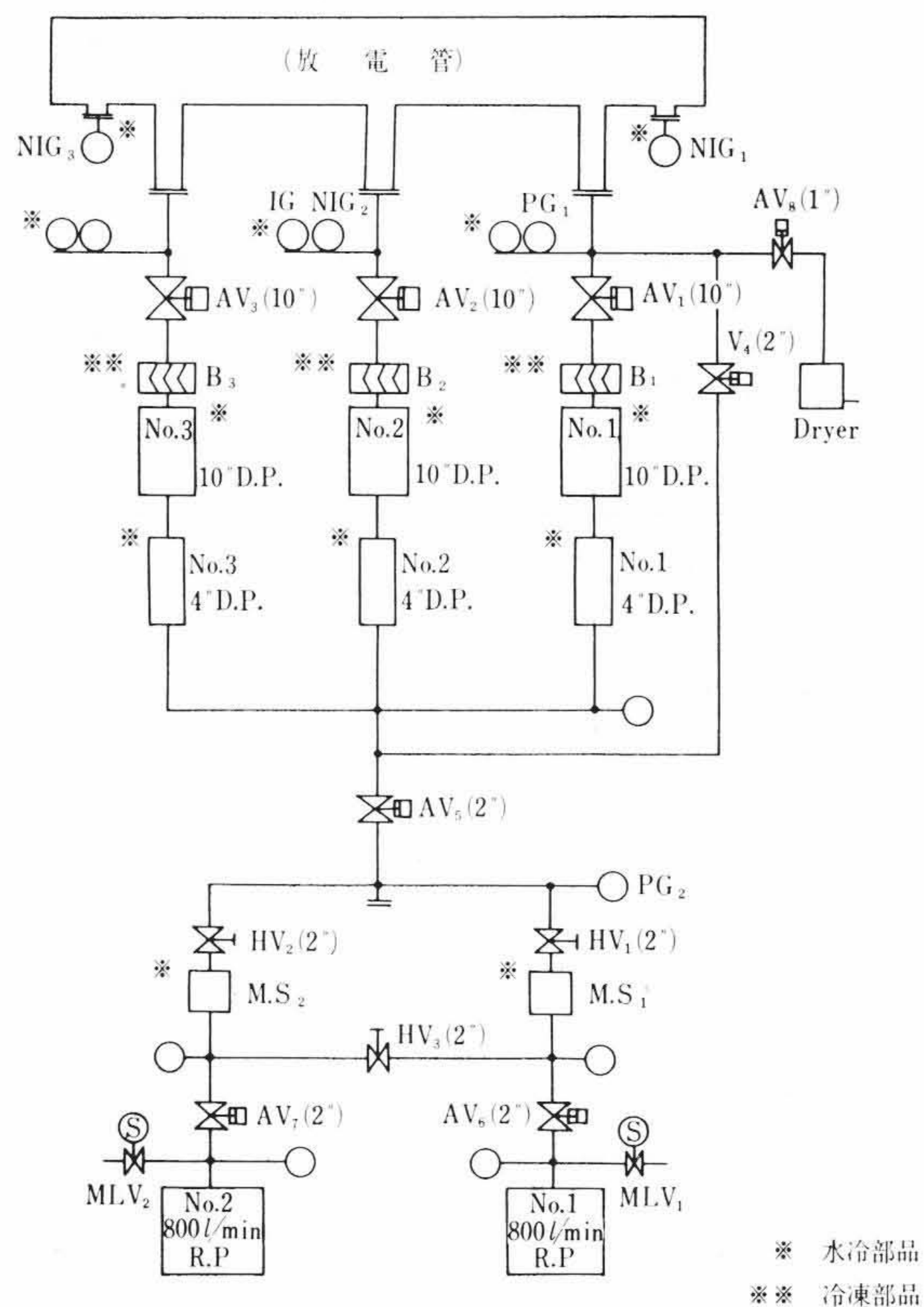


図5 真空排気装置系統図

3.6 真空排気装置

BSGの真空排気装置は油拡散ポンプを主体として構成されている。プラズマ装置においては不活性ガスの排気、大気から高真空までの繰返し排気などが予想されるので、吸着、あるいはスパッターポンプよりも拡散ポンプのほうが適している。

油拡散ポンプを高真空領域に使用する場合重要なことは、優秀な作動油の選定とこれを常に純化して使用すること、および作動油の逆流を防止し被排気系を清浄に保つためのトラップ、またはバッフルの設計に十分留意することである。また高真空度の正確な測定も重要な問題である。

BSGの排気系では油拡散ポンプを直列2段に配列したものと、シェブロン冷凍バッフルとを組み合わせた方式を採用している。高真空度測定にはノッチング形電離真空計を用いている。排気系の系統図を図5に示す。

排気装置の運転制御は操作盤上で一括操作できるように設計されており、グラフィックパネルを用いて運転状況を明示するよう考慮されている。運転は起動停止に伴う諸操作のほかは無人運転が可能のように各種の事故発生を想定してインターロックされ、警報設備を完備して装置の安全がはかられている。

この排気装置に要求される性能は到達真空度 1×10^{-8} mmHg、排気速度 2,000 l/s (1×10^{-7} mmHg) である。

使用した拡散ポンプの作動油はDC-705、バッフル冷凍温度は -20°C である。

4. 完成装置と試験結果

名古屋大学プラズマ研究所内に据付けられたBSG装置の完成写真を図6から図9までに示してある。BSG本体、真空排気装置、および制御装置はBSG装置室内に、電動発電機は別室に設置されて

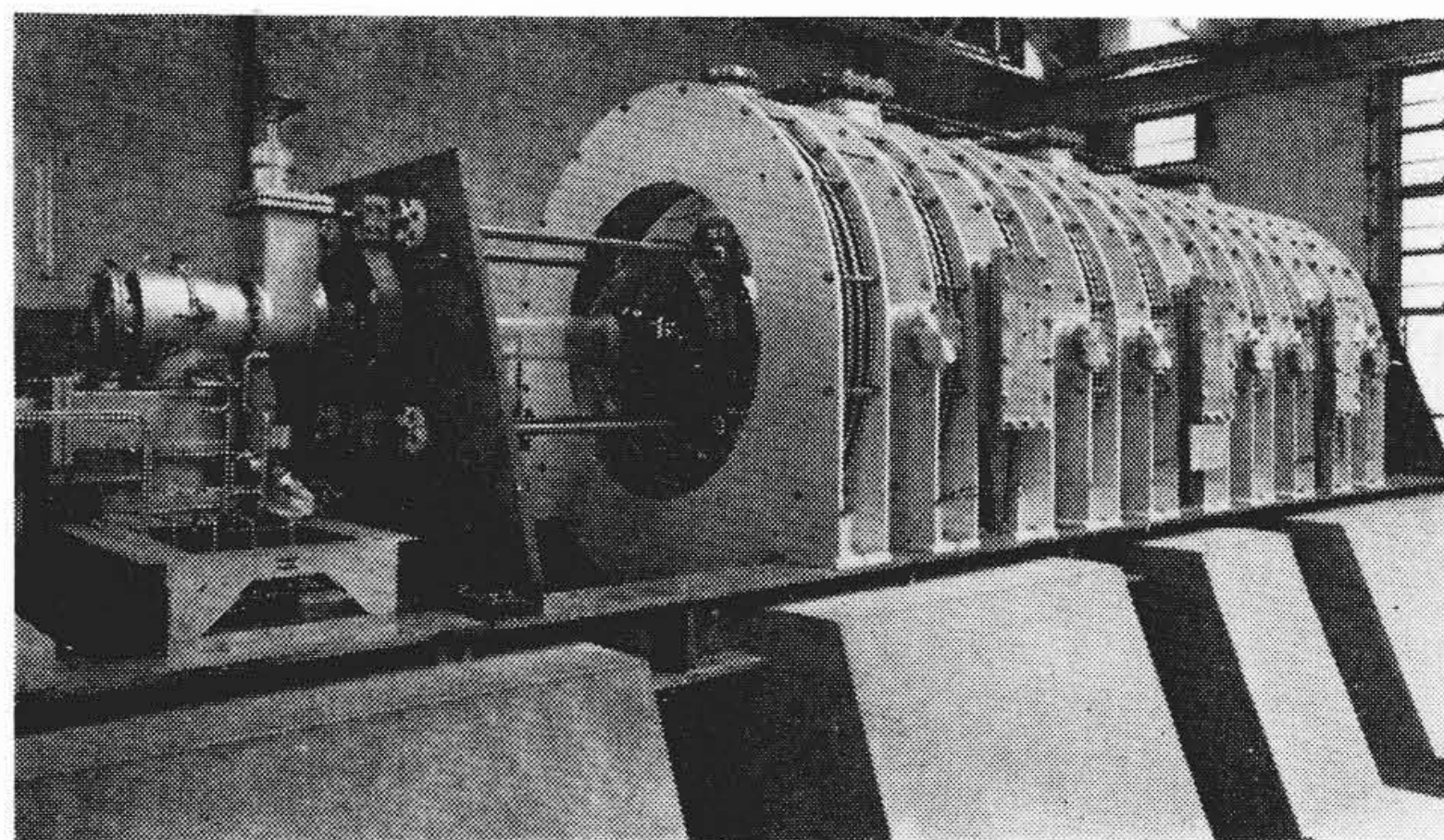


図6 BSG装置本体部

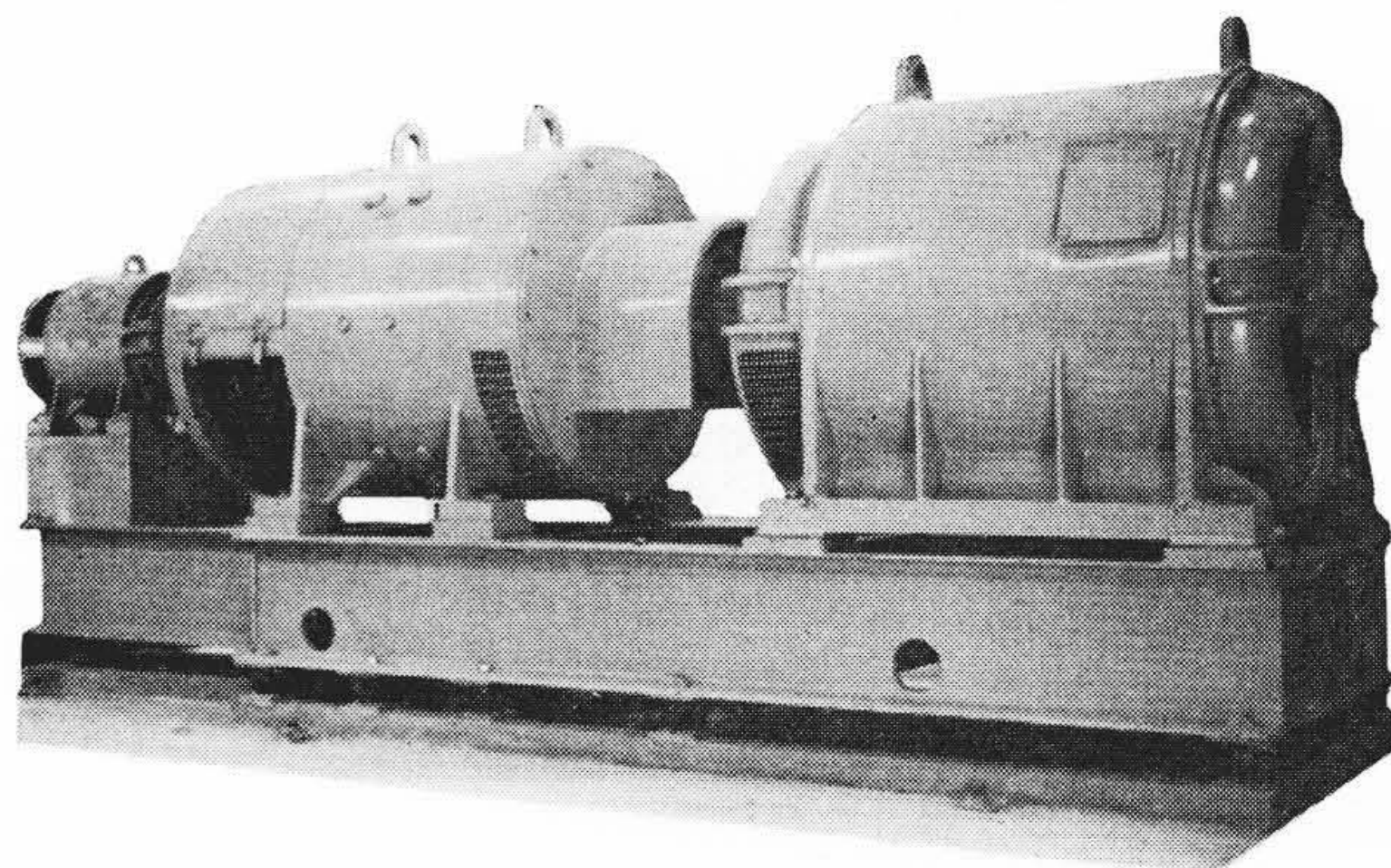


図7 電動発電機セット

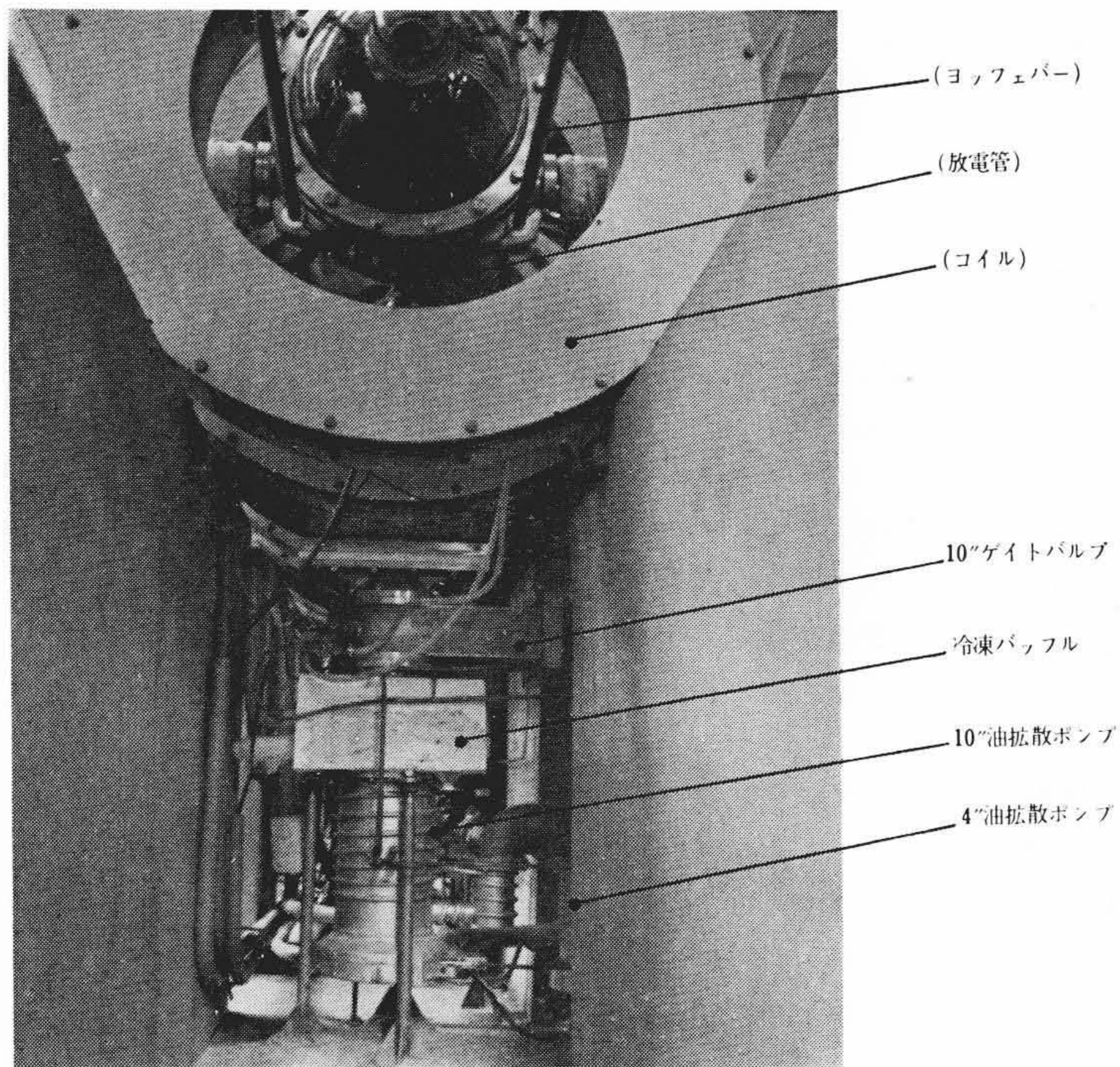


図8 真空排気装置

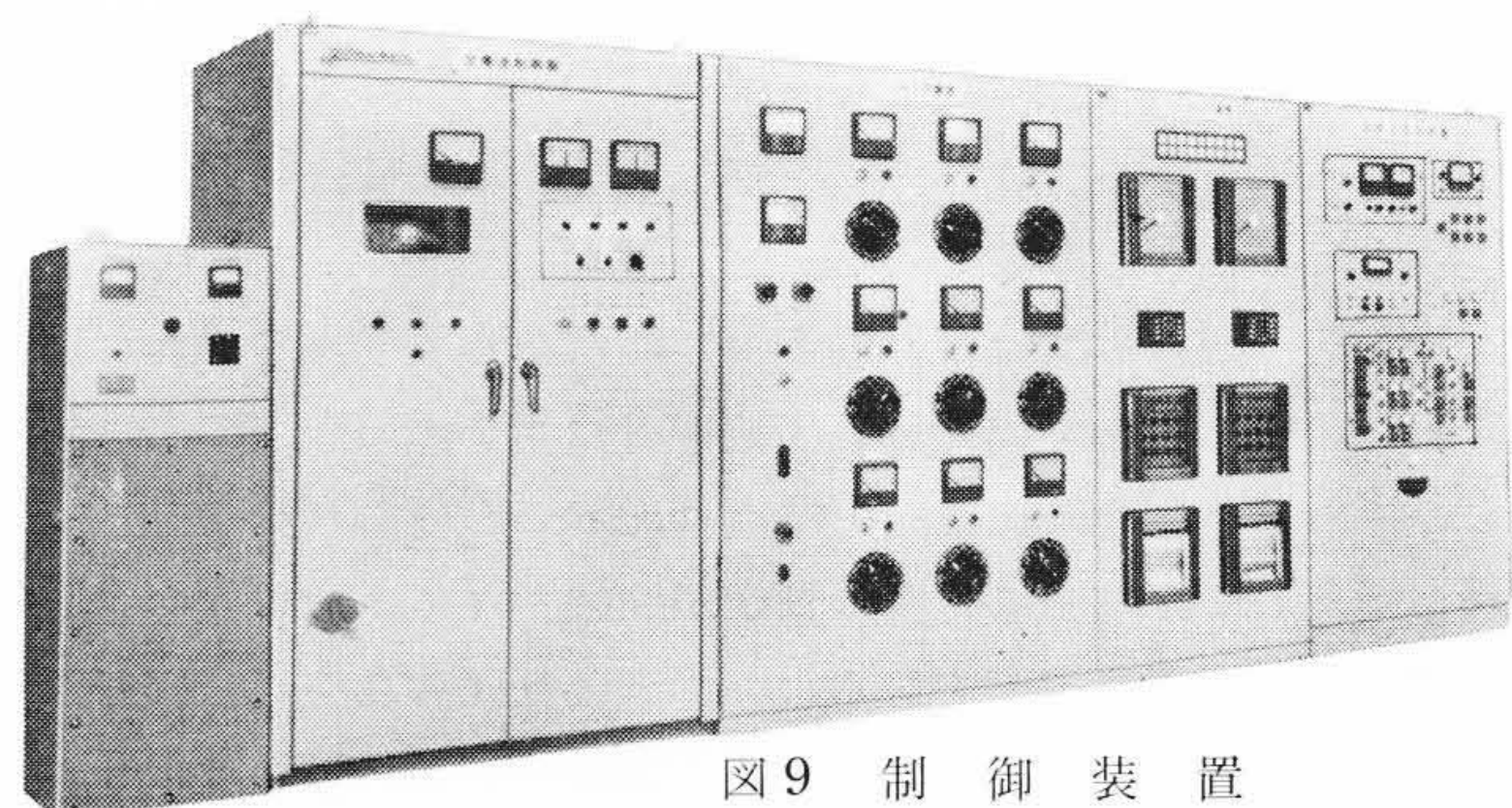


図9 制御装置

いる。

4.1 磁束分布の測定とコイル試験

磁束分布の測定は放電管内部に設置できる専用位置決め装置と、ホール素子を用いた差動式磁束計を用いて行なわれた。ただしこの測定は名大側で行なわれた。その結果磁束分布は計算値と1%以内の精度で一致し、特に軸に関する対称性では2,000 ガウスに対し ± 1 ガウスという高い精度が得られ、コイルの精度、接続線による磁界の攪乱など設計段階における検討が適切であったことが実証された。

また時間的安定度についても所期の性能を満足した。

発生する電磁力に対しコイルは十分堅ろうかつ安定であった。

温度上昇についてみるなら、BSG コイルは大形の間接水冷連続定格のコイルとしては高い電流密度で設計されており、コイルの軽量化が図られている。

4.2 放電管の真空排気試験

真空排気に関する試験は排気装置単体試験と放電管と組み合わせた総合試験とを行なった。

排気装置単体の試験においては装置の放電管との接続口において到達真空度 7×10^{-9} mmHg, 総合排気速度は 1×10^{-7} mmHg において 2,000 l/s 以上が得られた。測定は標準計器で較正された測定球を用い、排気速度測定は差圧法によった。

放電管の熱時定数は約1時間、したがって2ないし3時間のベーキングで所定の 200°C に加熱することができる。温度分布は各ポートの付け根の部分を 200°C とした場合端末部で $50 \sim 80^{\circ}\text{C}$ であり平均して 150°C 程度である。

組合せ試験の結果では前記のベーキングを約50時間行なったのちの放電管からの放出ガス量は放置試験で約 2×10^{-4} mmHg l/s, 最終的には 1.2×10^{-4} mmHg であった。この最終値は単位面積当たり平均 4×10^{-10} mmHg l/s cm^2 に相当し、 200°C のベーキングを行なったステンレス鋼として妥当な値と考えられる。

工場試験においては大気状態からベーキング時間を含めて約80時間で放電管内を 2×10^{-7} mmHg に排気することに成功した。放電管の組立に際してはメタルパッキン封止部の締付方法に一定の基準をもうけたこと、内部をアセトンで清浄したことのみで特別の処理

は行なっていない。つまりBSGでは冷凍バップル使用の油拡散ポンプ系の採用と、ベーキングの併用により、所定の高真空を比較的容易に達成することができた。

排気、ベーキングに伴う放電管の変位、伸縮についての測定も慎重に行なったが、複雑な形状をした大形真空容器では本件は構造設計、製作上の重要な問題である。設計された各構造、および製作上の諸対策はこれらの問題を巧みに解決している。

5. 結 言

BSG 装置において間接水冷方式のコイルと電動発電機方式による定電流電源により高精度かつ安定な磁界を形成した。

放電管の製作においては特にステンレス鋼の非磁性加工と高精度製作、および構造構成に留意した。

冷凍バップルと2段油拡散ポンプを組み合わせた排気装置およびベーキングの併用により所定の高真空を達成した。

今回のBSG計画はさきの予備実験の成果をもとに名古屋大学プラズマ研究所が本格的に取り上げたもので、計画、製作ともに国産ということが出来る。本装置により熱核融合を含むプラズマの研究に新しい成果が得られることを期待するものである。

本装置の製作に際しては、名古屋大学プラズマ研究所 MACETIE (BSG) グループのメンバーの方達に装置の設計、調整について種々ご指導を賜わった。

日立製作所田附部長には製作技術上のご教示を仰いだ。

なお排気装置は日本真空技術株式会社に製作をお願いした。

終わりにのぞみこれらのかたがたに対し厚く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) T. Dodo: J. Phys. Soc. Japan, 15, 906 (1960)
- (2) 只野ほか: 日立評論原子力論文集, 83 (1962)
- (3) 佐藤, 浜田: 核融合研究 13, 473 (1964)
- (4) 宮本ほか: 日本物理学会プラズマ物理他分科会講演 (1965)
- (5) 浜田ほか: 日本物理学会プラズマ物理他分科会講演 (1965)
- (6) 内田ほか: 日本物理学会第20年会講演 (1965)
- (7) T. Uchida et al: Nuclear Fusion, 5, 63 (1965)