

臨界プラズマ試験装置“JT-60” 加熱用発電設備の製作

Manufacturing of Power Supply System for Plasma Heating System of “JT-60”, a Plasma Feasibility Experiment Device

臨界プラズマ試験装置“JT-60”加熱用発電設備は、プラズマ第2段加熱装置に電力を供給する設備で、定格出力400MVAの電動発電機と設備を円滑に運転する制御装置とで構成される。

電動発電機は最高回転速度582rpmの高速機で、フライホイールをもつ新構造が折り込まれており、この種の発電機としては世界最大容量機である。制御装置は、“JT-60”の制御システムの一部を担うもので、CAMACシステム、デジタル制御など新技術を採用している。

本論文では、本設備の概要と特徴について述べる。

嶋田隆一* Ryûichi Shimada
水野 誠** Makoto Mizuno
青柳哲雄** Tetsuo Aoyagi
丹羽貞彦*** Sadahiko Niwa
遠藤政市*** Masaichi Endô
廣瀬昭廣**** Akihiro Hirose
松木 勉**** Tsutomu Matsuki
萬城 実**** Minoru Banjô

1 緒 言

日本原子力研究所で現在建設中の臨界プラズマ試験装置“JT-60”は、核融合炉実現の前提となる臨界プラズマ条件の達成を目指したものである。

臨界プラズマ条件を達成するためには、イオン温度を数千万～1億度にする必要があり、“JT-60”では第2段加熱装置としてNBI加熱装置(粒子入射加熱装置)及びRF加熱装置(高周波加熱装置)を建設中である。

本設備は、加熱装置が必要とするパルス状ピーク電力を供給するもので、電動発電機と制御装置とで構成される。電動発電機の定格は400MVAであり、フライホイールをもつ立軸構造で、2,650MJのエネルギーを供給する。

制御装置は、設備を円滑かつ安全に運転する機能をもち、全体運転制御方式、個別運転制御方式の制御モードでCAMAC(Computer Automated Measurement and Control)システム、デジタル制御の新技術が採用されている。

ここに設備の概要と機能について述べる。

2 設備の概要

加熱用発電設備の構成を図1に示す。

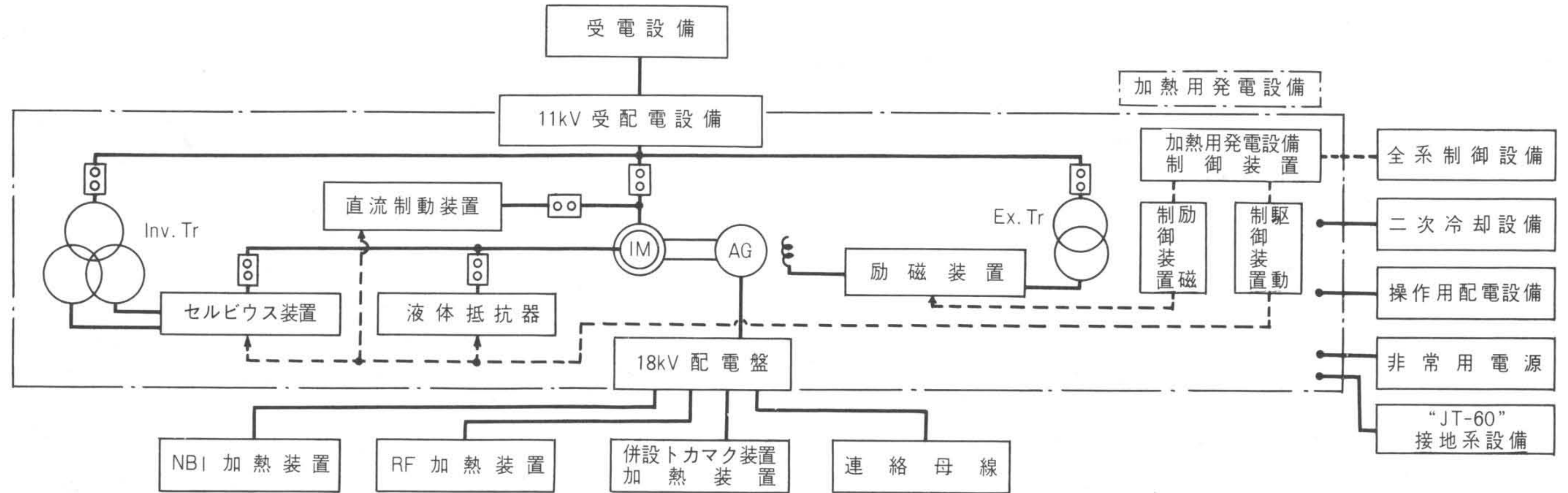
電動発電機は、誘導電動機と交流発電機とで構成される。交流発電機は立軸回転界磁形3相同期発電機で、電圧は速応性のあるサイリスタ他励式励磁装置で制御される。発電機の出力は18kV配電盤からNBI加熱装置、RF加熱装置などに給電される。

誘導電動機は巻線形で、10極、同期速度600rpmである。液体抵抗器で始動し、406.5rpmでセルビウス制御運転に切り換え、10分周期で運転する。セルビウス装置は12相インバータで、容量6,707kWは国内最大級である。

“JT-60”は制御用計算機を中心とした全系制御設備によって統轄制御される。本設備の制御装置は、全系制御設備の指令を受けて電動発電機全体を運転制御する全体制御システム、及び全体制御システムの指令に基づいて電動機、発電機を制御する駆動制御装置、励磁制御装置で構成される。

3 フライホイール付き電動発電機の製作

フライホイール付き電動発電機は定格出力400MVA、運転周期10分で回転速度が582～406.5rpmの間で変化し2,650MJのエネルギーを放出する。本機的主要仕様を表1に示す。



注：略語説明 AG(交流発電機)、IM(誘導電動機)、Inv.Tr(インバータ変圧器)、Ex.Tr(励磁変圧器)、NBI(粒子入射)、RF(高周波)

図1 加熱用発電設備の構成 加熱用発電設備は、受電設備、負荷のほかに“JT-60”の関連設備と取り合うシステムである。

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

本機は、起動停止回数3,000回、運転回数の合計が 5×10^5 回を超え、運転中の回転速度が変化するため、回転体の機械強度は材料の疲労を考慮したものとしている。また、ロータリム取付部、磁極取付部、フライホイールなどの回転体には過大な応力集中が生じないように考慮した設計としている。

立軸構造で揚水発電所の発電電動機と類似の構造であるが、以下に示す特徴をもっている。

第1は、本機は高速・大容量の機械として技術的に難度の高い機械である。一般的に技術的難度は、その指標として(出力)×(回転速度)の大小で分かり、本機のそれは 2.33×10^5 (MVA・rpm)、日立製作所の水力用発電電動機の最大は 1.44×10^5 である¹⁾。本機はパルス通電用であり、直接両者を比較できないが、これらを加味して評価しても水力用発電電動機と同等の難度をもっている。

第2はフライホイールをもつ構造である。本機クラスの発電機単体のGD²(はずみ車効果)は、回転子強度、経済性を考慮すると3,600～7,600t・m²程度である。本機に必要なGD²は11,600t・m²で、不足分はフライホイールで補っている。

フライホイールは直径6.1mの中実円板で、積厚1.35m、重量約330tf、GD²は5,900t・m²、周速は最高回転速度で186m/sにも達する。フライホイールは直結ボルトで、発電機主軸、下部軸とともに締め付ける構造である。電動発電機の鳥観図を図2に示す。

第3は、軸受の構造及び冷却方法である。推力軸受は、回

表1 フライホイール付き電動発電機仕様 放出エネルギー2,650MJは、0℃の水6.3tを100℃にするエネルギーに相当する。

項 目	仕 様
出 力	400,000kVA
電 圧	18,000V
電 流	12,830A
回 転 速 度	582～406.5rpm
極 数	16
周 波 数	77.6～54.2Hz
力 率	0.62
はずみ車効果	11,600t・m ² (フライホイール含む。)
放出エネルギー	2,650MJ
誘 導 電 動 機	15,000kW
励 磁 方 式	サイリスタ他励式

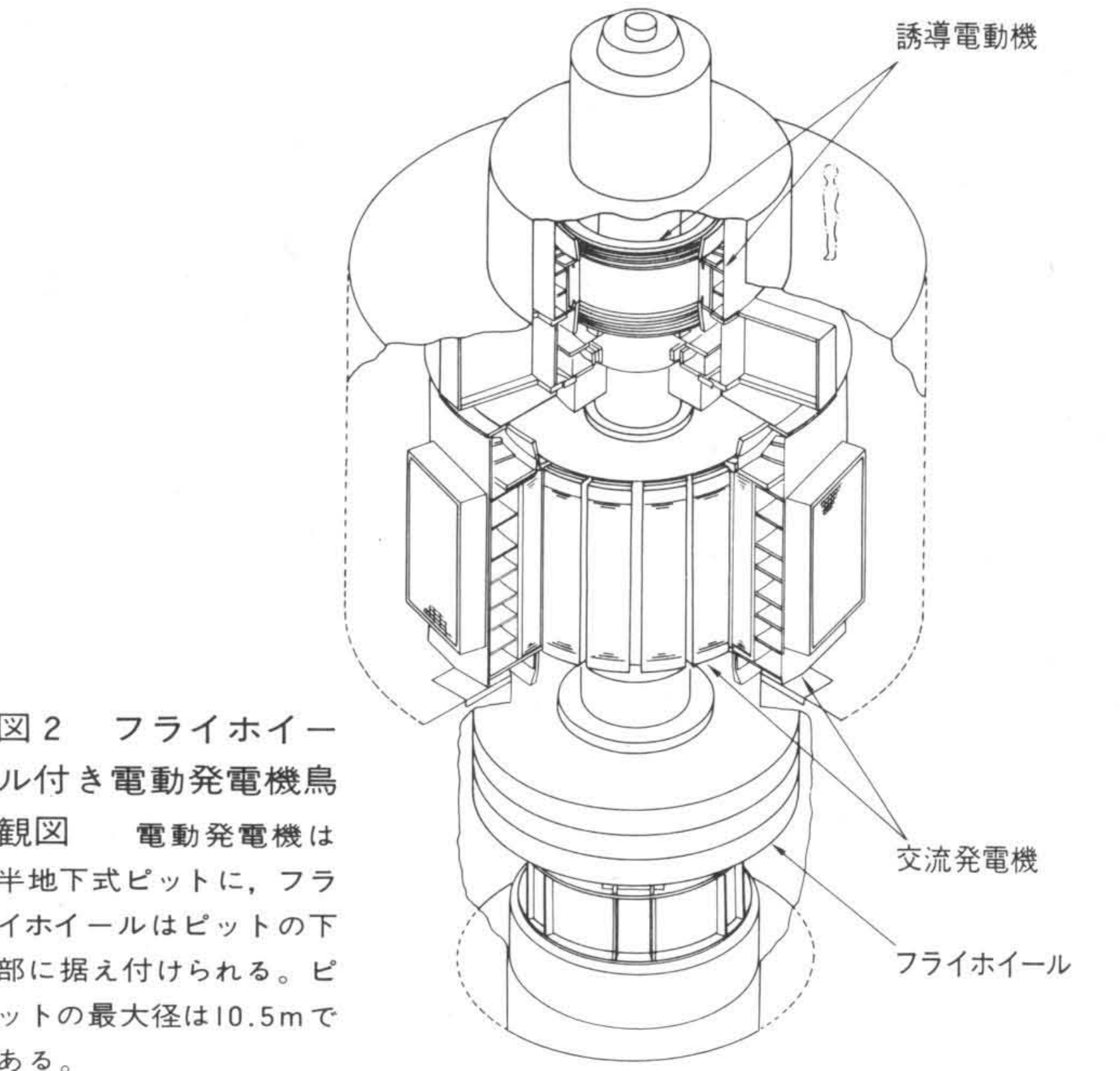


図2 フライホイール付き電動発電機鳥観図 電動発電機は半地下式ピットに、フライホイールはピットの下部に据え付けられる。ピットの最大径は10.5mである。

転子構造、基礎強度、点検などを考慮して最下部へ配した。推力軸受は高速機で実績のある二層軸受、日立ピボットスプリング支持とし、軸受間に給油する方式を採用して冷却効果を高めている。また、軸受内周に軸を通さない構造となるため、軸受径を小さく、したがって損失を小さくできる効果もある。

案内軸受は発電機軸系の危険速度を高くするため、上部、中間、下部の3系統とし、各案内軸受とピットの間に防振ステーを設けて軸受剛性を高めている。3系統の案内軸受の中で、中間案内軸受周速は実績を超える73m/sであるが、軸受へ冷油を強制給油する方式で、十分な冷却効果が得られることを工場試験で確認した。

図3に工場試験中の発電機外観を示す。工場試験では所定の性能を満足することを確認した。表2に工場試験の電動発電機の諸定数測定値を示す。

4 制御装置の製作

4.1 全体制御システム

図4に全体制御システムの構成を示す。本システムはCAMACシステムを中核に、操作デスク、CAMAC補助盤、保護インタロック盤、操作監視盤などの制御盤で構成され、制御棟と電源棟に分割設置されている。

制御棟と電源棟間の情報伝送には、ハードワイヤード方式を使用するインタロック信号を除き、CAMACハイウェイによる多重信号伝送方式を採用している。また光伝送方式として、強電磁場環境での耐ノイズ性能及び絶縁性能を確保している。

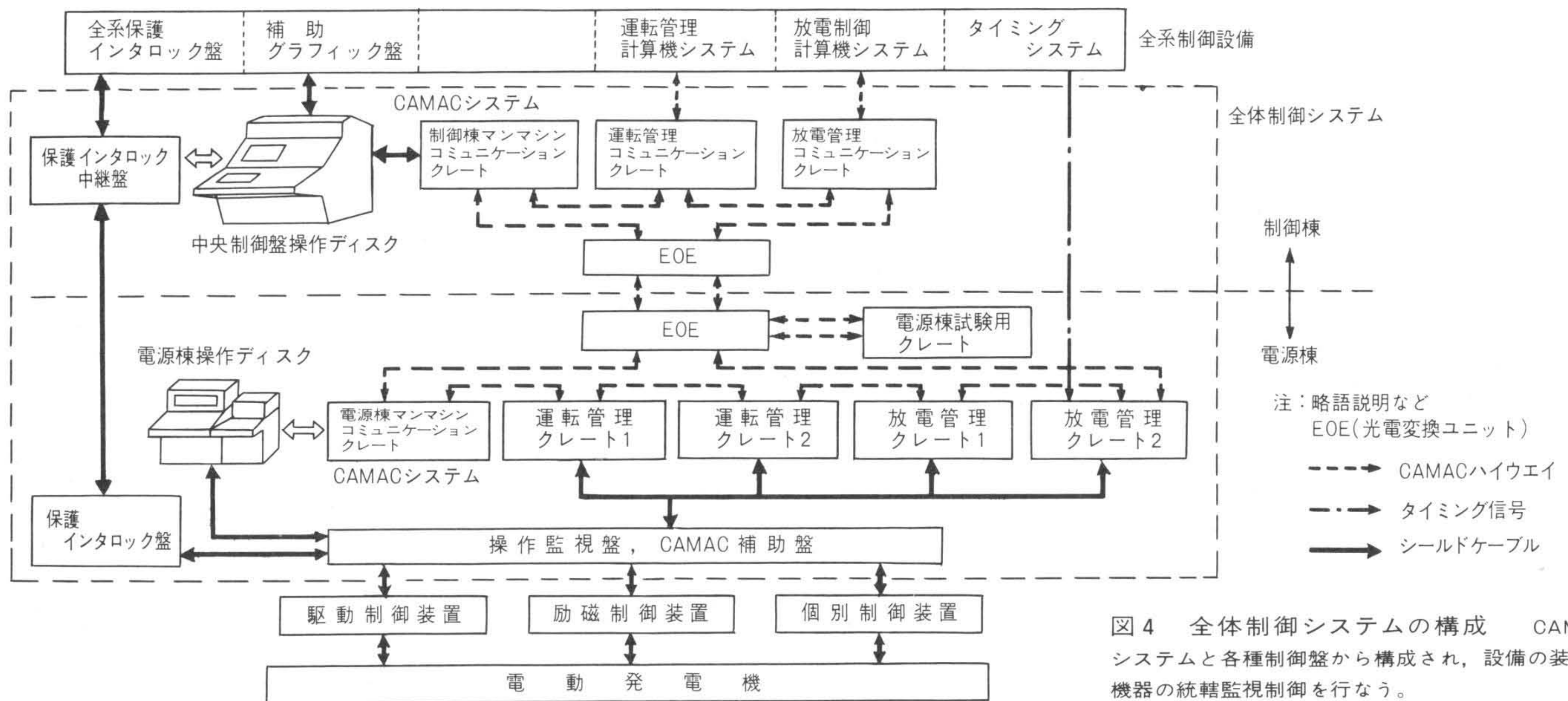
システムの中核となるCAMACシステムは、それぞれマイ

表2 電動発電機諸定数測定値 電動発電機の工場試験の測定結果を示す。最高回転速度582rpmでも軸受が所定の性能を満足することが確認できた。

No.	項 目	測 定 値	回 転 速 度
1	短 絡 比	0.757	406.5rpm
2	直軸同期リアクタンス(xd)	1.32PU	
3	直軸過渡リアクタンス(xd')	0.232PU	
4	直軸初期過渡リアクタンス(xd'')	0.129PU	
5	はずみ車効果(GD ²)	11,929.6t・m ²	—
6	上部案内軸受温度上昇	44.5℃	582rpm
7	中間案内軸受温度上昇	38℃	
8	下部案内軸受温度上昇	38.5℃	
9	推力軸受温度上昇	37℃	

図3 工場試験中の電動発電機の外観 電動発電機は工場で回転試験を行ない、電気特性、機械特性を測定し、良好であることを確認した。





クロコンピュータを内蔵した9台のクレートから構成されており、CAMACハイウェイにより結合されて、全体で統一したシステムとして機能するマイクロコンピュータ分散システムを構成している。CAMACシステムは加熱用発電設備の統轄制御装置として、設備の運転監視制御を行なうとともに、CAMACハイウェイを介して全系制御設備とリンケージして情報交信を行ない、全系制御設備による統轄監視制御を可能にしている。

図 5 に加熱用発電設備の運転制御の概要を示す。

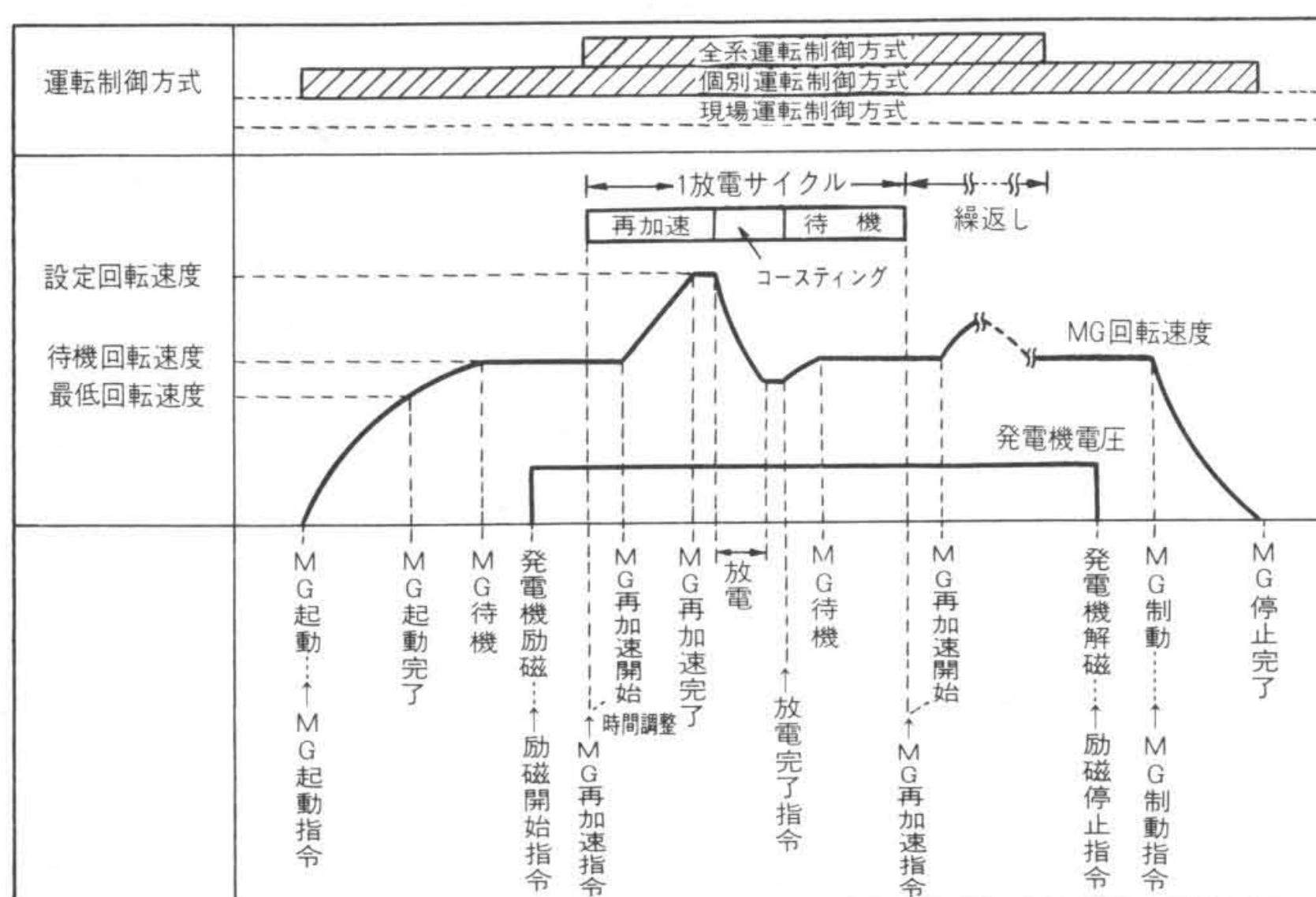
加熱用発電設備は、プラズマ加熱実験時、加熱装置にパルス状の電気エネルギーを供給するため、エネルギーを蓄積する再加速とエネルギーを放出するコースティングを繰り返す。

本システムでは、設備の運用に対応して下記に示す 3 種類の運転制御方式を可能にしている。

(1) 全系運転制御方式

全系制御設備の指令、統轄のもとに、“JT-60”の他設備と協調して集中運転管理方式により運転制御を行なう方式である。プラズマ加熱実験時には、本方式により放電シーケンスに沿った電動発電機の再加速制御を行なう。

再加速制御では、CAMACシステムに内蔵されているマイ



注：略語説明 MG(電動発電機)

クロコンピュータで、加速トルク及び消費トルクから加速予想曲線を求め、放電開始直前に設定回転速度に到達するように、再加速を開始するタイミングを決定して再加速制御を行ない、電動発電機の消費エネルギーが最小となるようにしている。

(2) 個別運転制御方式

“JT-60”の他設備の運転とは独立に、加熱用発電設備単独で運転制御を行なう方式である。本方式によりプラズマ加熱実験準備のための電動発電機の起動・制動、負荷出力遮断器の投入・遮断、発電機の励磁開始・停止などの制御を行なう。本方式では操作デスクからの制御指令に基づきCAMACシステムにより運転制御を行なう。操作デスクは制御棟と電源棟にそれぞれ設置し、いずれかを切り替えて使用するようになっている。これにより制御棟からの遠隔自動運転を可能としている。

(3) 現場運転制御方式

CAMACシステムを使用せず、電源棟制御盤で手動操作により個別に運転制御を行なう方式である。本方式は設備機器の試験運転時に使用する。

4.2 励磁控制装置

励磁制御装置は図 6 に示すように、D-AVR(デジタル式自動電圧調整装置盤)、界磁遮断器盤、サイリスタ変換器盤及び励磁用変圧器盤で構成される。電動発電機は急激な負荷変動を伴うサイリスタ負荷をもっているため、電動発電機の端子電圧が大きく変動するが、これを規定値以内に抑えるために、本励磁装置は下記構成としている。

(1) 励磁電源は、所内11kV電圧を励磁用変圧器で降圧し、これをサイリスタで直接整流制御する高頂上電圧(直流1,000V)の他励式超速応励磁装置である。

(2) 電動発電機出力に応じたD-AVRの設定値の適用制御、更に上位計算機からの電圧設定値を変更可能なようにマイクロコントローラを用いたデジタル式制御とした。

次に、デジタル自動電圧調整装置について述べる。

(1) 電圧制御系

デジタル制御演算は一次遅れ，進み回路で，ゲイン，時定数を直接数値で設定することができる。

(2) 電圧設定回路

AVR盤及び上位計算機の2モードで電圧設定変更を行なうことができる。

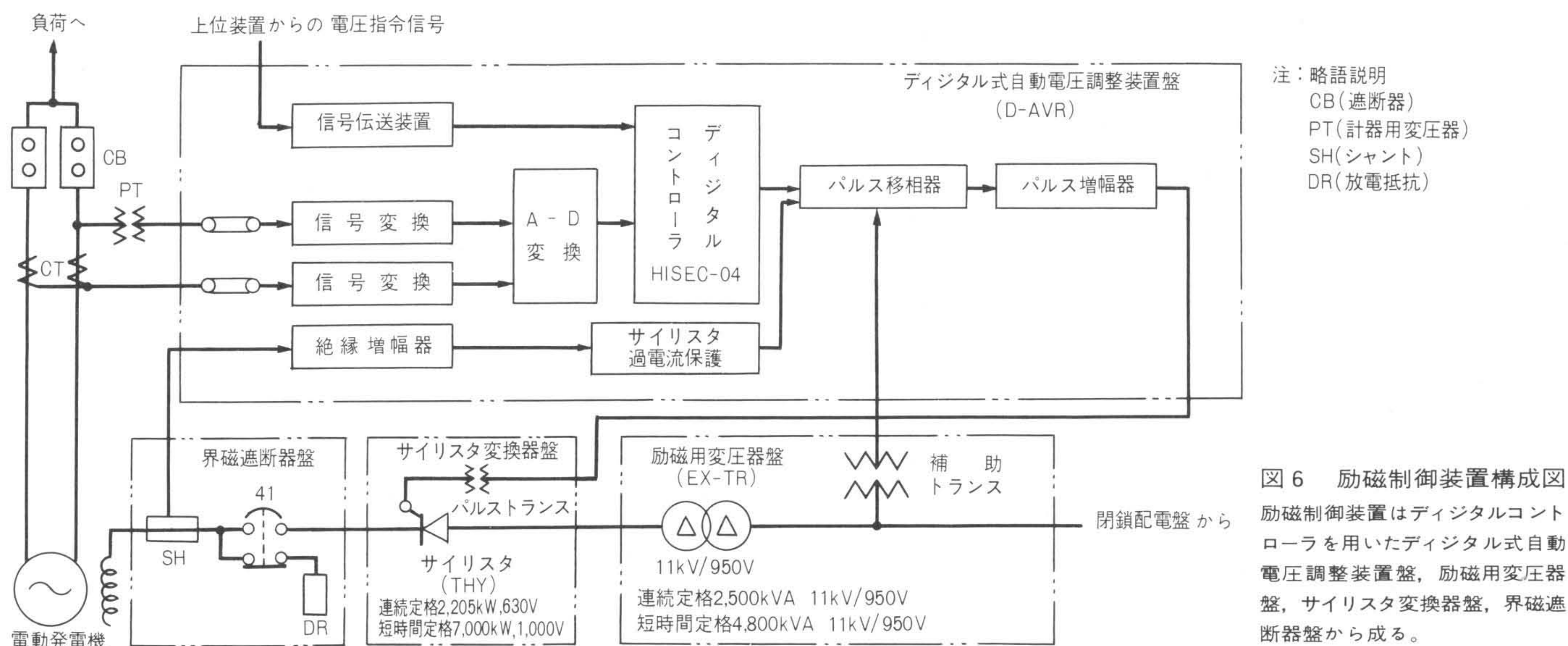


図6 励磁制御装置構成図
励磁制御装置はデジタルコンローラを用いたデジタル式自動電圧調整装置盤、励磁用変圧器盤、サイリスタ変換器盤、界磁遮断器盤から成る。

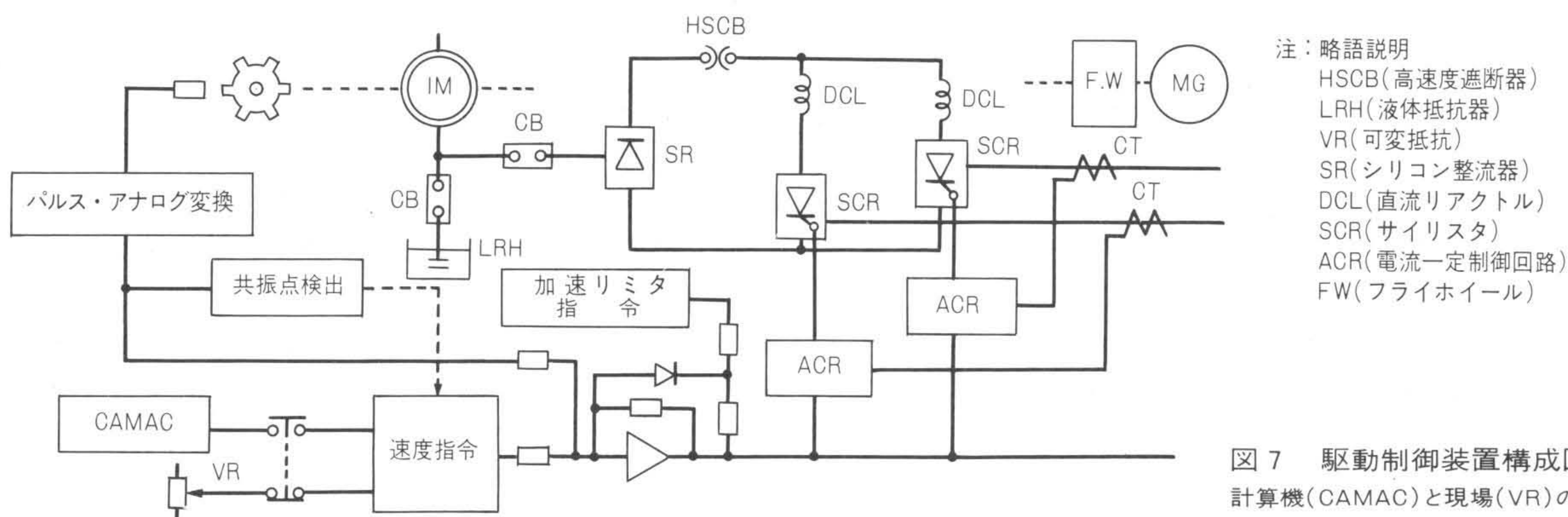


図7 駆動制御装置構成図
速度指令は制御用計算機(CAMAC)と現場(VR)のモードに切り換えられる。

電圧設定範囲：約0～110%，分解能：0.1%

(3) 励磁補正回路

発電機負荷の急変時、電動発電機端子電圧の変動が許容値内となるように、あらかじめ電動発電機出力電流の大きさに応じて自動的に電圧設定値を変化させる設定値の補正機能をもっている。

(4) サイリスタ過電流保護回路

電動発電機のスリップリングと界磁遮断器盤の間で直流側短絡事故が起こり過電流が発生した場合は、事故電流を最小とするようにサイリスタのゲートシフトを行なって事故電流を遮断する。

(5) 制御電源

信頼性向上のため制御電源は、直流又は交流のいずれかが正常であれば、正規の電圧を出すことができるようになっている。

4.3 駆動制御装置

図7に駆動制御装置の電源構成を示す。加熱用発電設備は短時間に大電流を必要とするため、電力消費の点から巻線形誘導電動機の二次滑り電力を電源に返還して、省エネルギー化を図ることを目的とした静止セルビウス方式とし、効率の良い運転を目的としている。そのうち、巻線形誘導電動機は速度制御に重要な役割を果たす制御装置の特徴は、次のとおりである。

- (1) 速度制御範囲内に、二次電流のビート周波数と機械側固有振動数の共振点があるため、共振回避を行なう必要があり、
 - (a) 速度検出方式をパルスピックアップ方式とし、高精度検出方式とする。
 - (b) 共振点ではインバータ電流にリミタをかけ、電動機ト

ルクを抑制する。

- (c) 共振点では連続運転しないように、速度指令を強制的に昇速側へシフトする。

- (2) ショット時は、交流発電機励磁電力とセルビウス装置側電力消費及び高調波電流の重複を避けるため、速度指令により直流電流を絞りインバータ最小制御角 β_{min} まで制御する。
- (3) 機械的慣性モーメントが大きいための速度のオーバーシュート防止のため、制御系は高利得の比例制御とする。
- (4) 制御指令モードとして、制御用計算機からの指令のほか、現場制御盤指令など、二つのモード選択方式とする。

5 結 言

以上、加熱用発電設備の構成、概要について述べた。

これらについて特徴をまとめると、電動発電機はフライホイールをもつ新構造であること、記録的な高速・大容量機であること、高い周速でも十分な冷却能力をもつ軸受装置であること、また制御装置は、CAMACシステムによる運転監視制御を行なっていること、電動発電機の励磁制御はデジタル方式を採用し速応性が高いこと、駆動制御はパルスピックアップ方式の速度検出方法とし高精度としたことなどが挙げられる。

将来、核融合実験装置も大型化し、電動発電機による電力供給設備が必要となることが予想される。本論文がその際の一助ともなれば幸いである。

参考文献

- 1) 鈴木、外：発電機及び発電電動機に関する最近の技術進歩、日立評論、64、11、795～800(昭57-11)