

核融合装置「ヘリオトロンE」の技術開発

Engineering Aspects of "Heliotron E" Facility

京都大学で提案されたヘリオトロン型核融合装置は、先行しているトカマク型に比べて、幾つかの特長をもっている。日立製作所はこの京都大学のヘリオトロン型核融合炉開発プロジェクトに約10年前から参加し、「ヘリオトロンD」⁴⁾、「ヘリオトロンDM」⁶⁾の各本体を相次いで製作してきたが、今回非軸対称系トーラスとして世界最大級の「ヘリオトロンE」装置の設計を京都大学に協力して実施し、そのプラントを構成する主要機器の製作を完了した。

この装置の建設に際して、ヘリカル溝付真空容器、世界最大で高精度のヘリカルコイル、サイリスタスイッチ式ジュール加熱用高電圧発生電源、エネルギー蓄積用330MVA、650rpm電動発電設備など多くの新技術が開発され、核融合装置技術の分野に画期的な進歩をもたらした。本論文では、その技術的問題の概要について述べる。

1 緒言

京都大学により昭和30年代初期から提案され、実験装置が建設され、研究が進められているヘリオトロン型核融合装置は、研究開発が先行しているトカマクに比べて、次に述べるようないろいろな特徴と可能性をもっている^{1)~3)}。(1) トカマクはプラズマの閉じ込めのために、直流(1方向)のプラズマ電流を流すことによって生成される磁界が必要不可欠であるが、この電流は原理的に間欠的にしか流せないのがパルス炉である。これに対して、ヘリオトロンはプラズマ閉じ込め磁場を外部のコイルで作るので定常炉となり得る。(2) ヘリオトロンは大きな回転変換とシェアをもっているため、高いベータ値(≡プラズマの圧力/磁場の圧力)のプラズマを閉じ込め得る可能性がある。このため、ヘリカルコイルが複雑になるという欠点をカバーでき、経済的な炉となる可能性も大きい。(3) ヘリオトロンは、アスペクト比(≡大半径/小半径)を大きくとることができ、ブランケット、超電導マグネットなどの設置が簡単で、分解、修理などの保守作業が容易である。(4) ヘリオトロン磁場固有のセパトトリクスを利用した磁気リミッタ及びダイバータを設置することが可能である。

ヘリオトロンはこのように大きな可能性を秘めているが、まだ中・大形装置による実験データが少なく、プラズマ性能の比例側も確立されていない。このために京都大学では、現在稼動している第一線のトカマクと同規模の大形装置である「ヘリオトロンE」の建設に昭和51年に着手し、現在ほぼ完成し間もなく実験が開始される。この装置は、比較的類似した特徴をもつステラレータやトルサトロンを含めた非軸対称系トーラスの中でも世界最大級のものであり、非トカマク型トーラスの代表機種の一つとして、その成果が世界的に注目されている。

この京都大学の開発プロジェクトに、実験装置のメーカーとして日立製作所は約10年前から、技術開発と装置の設計製作を通じて全面的に協力してきた。すなわち、先に「ヘリオトロンD」⁴⁾、⁵⁾及び「ヘリオトロンDM」⁶⁾、⁷⁾本体の製作を担当し完成した⁸⁾、⁹⁾。これらの技術をベースに、大幅な新技術を開

宇尾光治*	Kôji Uo
飯吉厚夫*	Atsuo Iiyoshi
加沢義彰**	Yoshiaki Kazawa
鈴木昌平**	Shôhei Suzuki
橋本 宏**	Hiroshi Hashimoto
尾形文夫**	Fumio Ogata
村井勝治***	Katsuji Murai
磯部昭二****	Shôji Isobe
谷口 昭*****	Akira Taniguchi

発しながら「ヘリオトロンE」を製作した。「ヘリオトロンE」では、本体、電源、制御、真空排気設備、冷却系、NBI(中性粒子入射加熱装置)などを含むほとんど全プラントの製作設計及び製作、据付を担当し、一貫したシステムとしてまとめた。本論文では「ヘリオトロンE」の技術的概要と、真空容器、ヘリカルコイル、電源制御設備など、核融合装置の技術分野で画期的な進歩をもたらした新技術の内容について述べる。

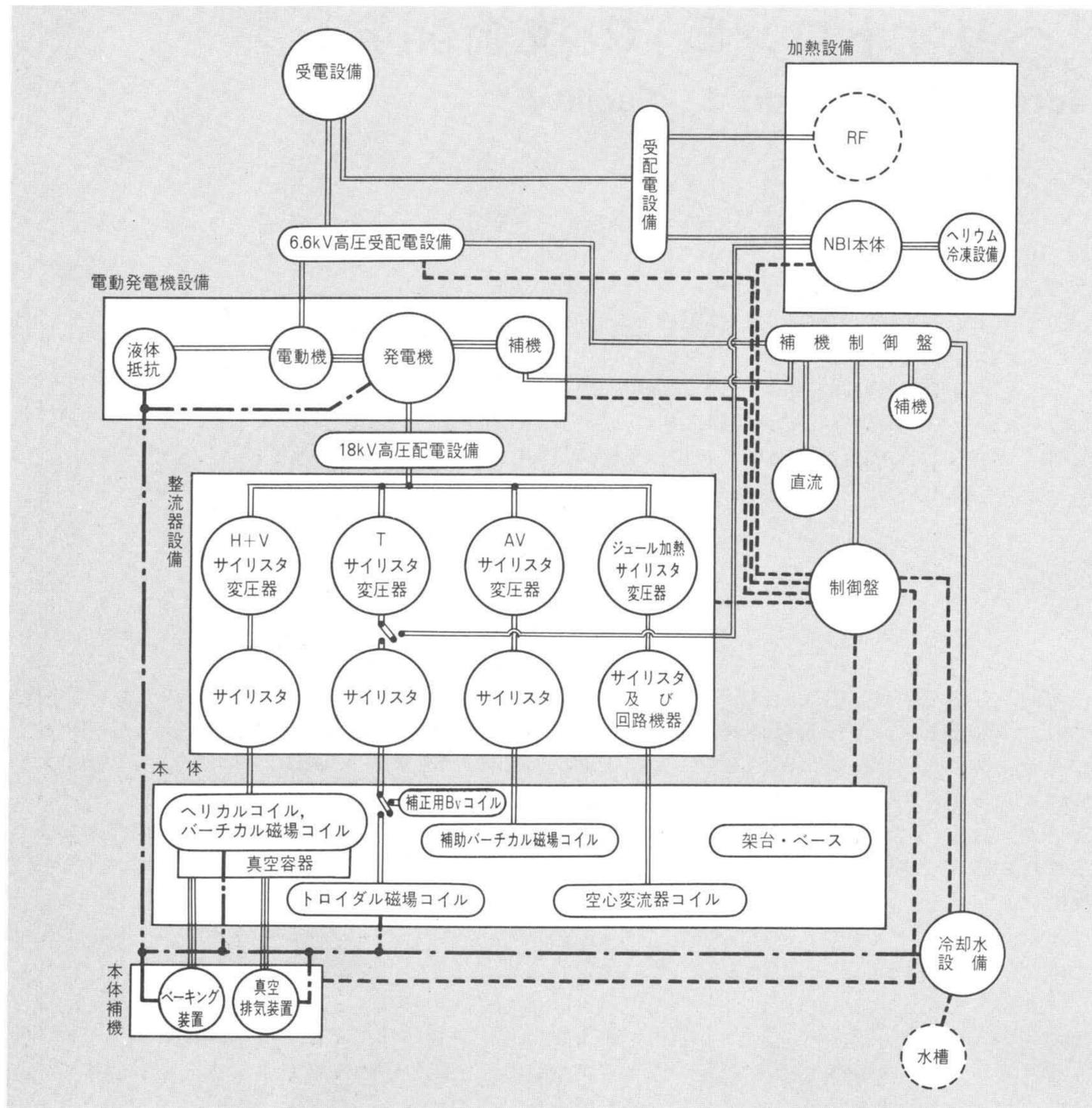
2 「ヘリオトロンE」の概要

「ヘリオトロンE」のプラント構成を図1に、主要パラメータを表1に示す。装置本体部は、プラズマ閉じ込め空間を形成する真空容器、主閉じ込め磁界を生成するヘリカルコイル、実験範囲を広げるために、条件によってはヘリカルコイルと併用して補助的に使用されるトロイダル磁場コイル、プラズマのジュール加熱用電流を流すための空心変流器コイル、ヘリカルコイルのトーラス効果のために生ずる垂直磁場を打ち消すことを主目的とするバーチカル磁場コイル、ベースなどの支持構造物などにより構成される。その外観を図2に示す。本体の周辺には2,400l/s×4台の分子ポンプを主ポンプとする真空排気装置、6MWのイオン源ビーム出力をもつプラズマ加熱用NBI(表2、図3参照)及びそのクライオポンプ用ヘリウム冷凍設備、真空容器ベーキング設備、冷却水設備などが配置されている。電源は、前述の本体各種コイルを直流励磁するための整流器設備、系統からほぼ定常的な電力を受電し、これらの負荷にパルスのピーク電力を供給する330MVA、650rpmの立て形交流発電機を含む電動発電機設備などから構成される。これらの全プラント機器は、大幅に自動化された制御装置により円滑かつ安全に運転される。

3 真空容器

図4に真空容器の外観を示す。大直径4.4m、小断面の長径0.82mの大形トーラス容器である。容器の外周にはヘリカル状の溝が設けられ、この溝の中にヘリカルコイルが巻回され

* 京都大学ヘリオトロン核融合研究センター 工学博士 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所大みか工場
**** 日立製作所国分工場 工学博士 ***** 日立製作所関西支店



注：略語説明など
 ——— 電気
 - - - 冷却水
 - - - 制御計測
 RF(高周波加熱装置)
 NBI(中性粒子入射加熱装置)
 H+V(ヘリカル磁場コイル+パッチカル磁場コイル)
 T(トロイダル磁場コイル)
 AV(補助パッチカル磁場コイル)
 Bv(パッチカル磁場)

図1 「ヘリオトロンE」のプラント構成 プラントシステムの概要を示す。NBIによるプラズマの加熱実験を行なう場合は、ヘリオトロンの特徴を活用してトロイダル磁場コイルを使用しない。したがってNBI用電源の一部は図示のようにトロイダル磁場コイル用電源を切り換えて使う。

表1 「ヘリオトロンE」のパラメータ 主なパラメータを示す。非磁対称トーラス型核融合装置の中で、世界で最大規模のものである。プラズマ閉じ込め用主磁場がヘリカルコイル磁場であり、補助的なトロイダルコイル磁場よりも強いことも特徴の一つである。

項	目	定 格 数 値	
プラズマ	大 半 径	2.2m	
	小 半 径	長 軸	0.3m
		短 軸	0.15m
	体 積	1.7m ³	
	ジ ュ ー ル 電 流	120kA	
真空容器	大 半 径	2.2m	
	小 半 径	0.21~0.4m	
	内 容 積	4.6m ³	
磁 場	ヘリカルコイル磁場	2 T	
	トロイダルコイル磁場	0.6T	
	パッチカルコイル磁場	-0.37T	
コヘリカル	ピ ッ チ 数	9.5k	
	トロイダル方向周回数	2l	
	コイル起磁力	1.16MAT	
	トロイダル磁場コイル数	38	
	空心変流器磁束変化	3 V·s	
	フ ラ ッ ト ト ッ プ	0.5s	
	運 転 周 期	10min	
	電 源	330MVA	

る。従来ステラレータなどでは円形断面の真空容器の外周にヘリカルコイルを巻回する方式が採用されていたが¹⁰⁾、種々検討の結果、このように真空容器にヘリカル溝を設ける構造とすることにより、性能と経済性の大幅な向上を図った。表3に従来形との比較例を示すが、核融合炉の性能指数¹¹⁾の一つを示す A_p/l_c (\equiv プラズマ断面積/コイル1ターン平均長)が40%以上改善されている。また将来、超電導コイルを使用する場合は、 B_0/B_m (\equiv プラズマ中心磁場/最大経験磁場)の因子も性能指数の重要なファクターとなるが、この値も1割以上改善され、全体として6割以上の性能指数の向上となる。このような構造で、しかも寸法公差数ミリメートルという高精度が要求されるので、設計、製作上の技術的困難は大きかった。しかし、NC(数値制御)工作機によって加工された曲面型による高精度プレス技術、110kWまでのビーム出力をもつ大形構造物、電子ビーム溶接技術の全面的採用による溶接ひずみの極小化など、最新の生産設備と多くの技術開発を実施して、予期以上の高精度容器を完成することができた^{12),13)}。

真空容器には $10^{-8} \sim 10^{-9}$ Torrの高真空度が要求されるので、各種のポートなどはほとんど金属Oリングガスケットを使用し、トーラスの1ターン絶縁のための分割部は、真空シールの信頼性を考慮して、バイトンガスケットとしている。ベーキング温度はコイルの絶縁物の耐熱性を配慮し、130°C以下に抑えている。このため、耐熱性加熱油を容器外周に循

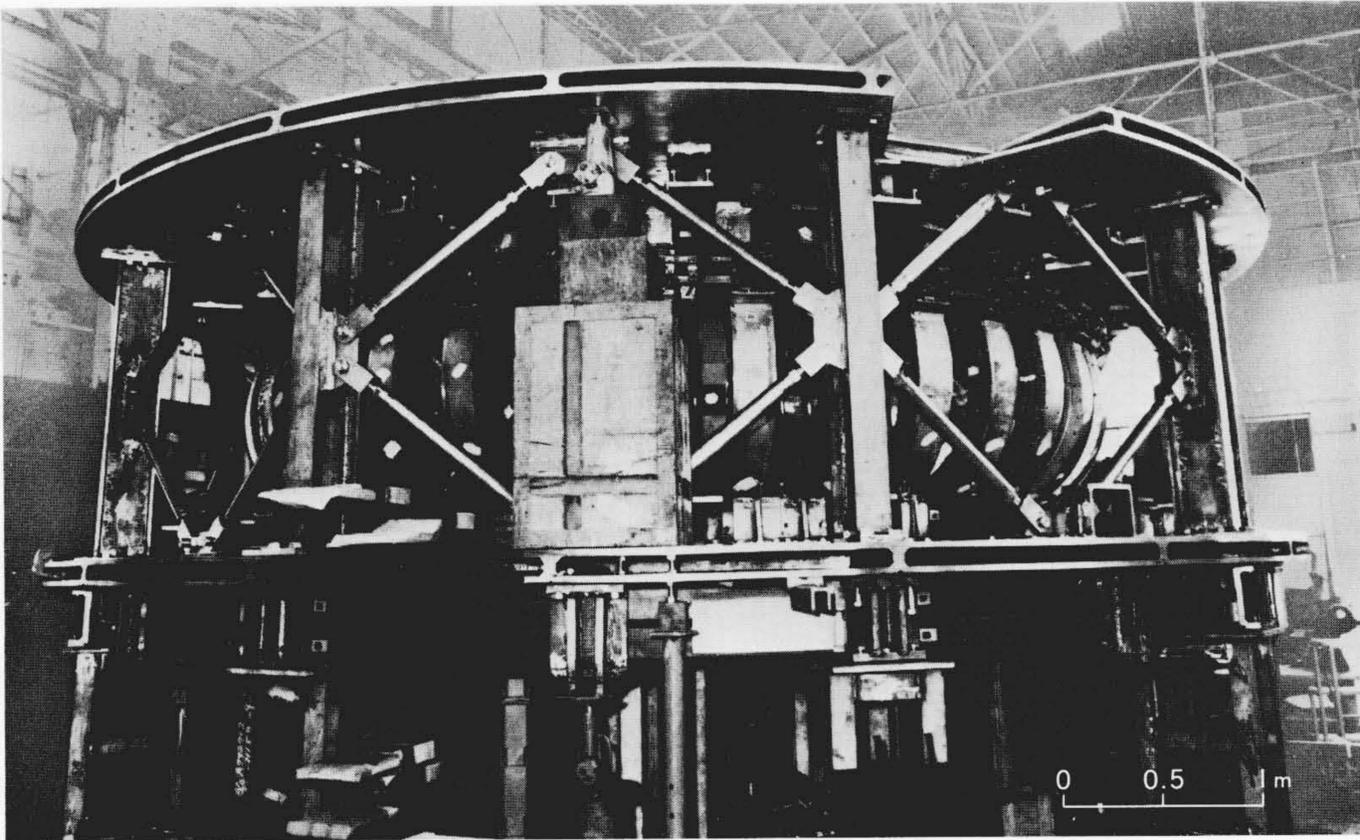


図2 「ヘリオトロンE」本体部の外観 工場組立中の本体部外観を示す。我が国で完成した核融合装置のなかで最大規模のものである。

表2 NBI(中性粒子入射装置)のパラメータ 「ヘリオトロンE」用NBIの主要諸元を示す。真空排気用クライオパネルは、30Wの日立製作所製ヘリウム冷凍機により冷却される。

項	目	数	値
総	加熱パワー		>1MW
	ビームエネルギー		20~30keV
	ビームライン数		3
	イオンビーム出力(イオン源1台)		1.05MW
イオン源	加速電圧		30kV
	引出し電流		35A
	ビーム発散		<1°
	ビームパルス幅		200ms
	イオン源台数		6台
	真空排気系クライオポンプ		2×10^5 l/s

環させて加熱する方式とした。容器には、真空力のほか、ヘリカルコイルから伝達される大きな電磁力も作用するので、耐力 $40\text{kg}/\text{mm}^2$ 以上の新材料YUS-170(25Cr-12Ni-0.3N鋼)が、各種スクリーニング試験を実施して採用された。

4 ヘリカルコイル

ヘリオトロン型核融合装置のヘリカルコイルは、真空容器との位置関係により、二つの種類に分けられる。一つは、放電管の内部にヘリカルコイルが設置される内部導体型であり、他方は真空容器の外側にヘリカルコイルが巻き付けられる外部導体型である⁹⁾。

「ヘリオトロンE」では、プラズマ中心磁束密度2Tという強磁場を発生するため、ヘリカルコイルをマルチターンで構成する必要から、有機絶縁物を使用して外部導体型とした。ヘリカルコイルは、コイル平均の電流密度が $100\text{A}/\text{mm}^2$ と高い

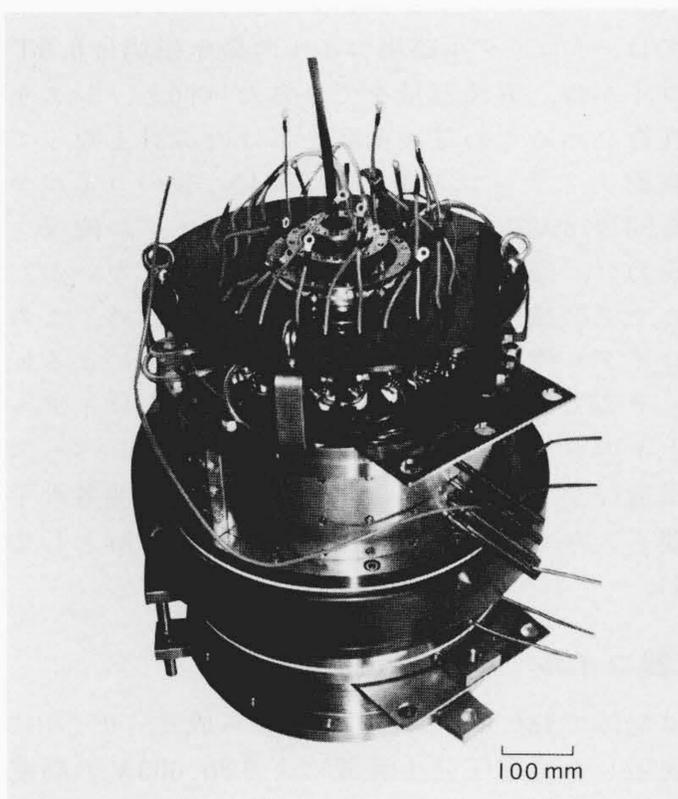


図3 NBI用イオン源 NBI用イオン源の外観を示す。加速電圧30kV、引出電流35Aであり、「ヘリオトロンE」にはこれが6台使用される。

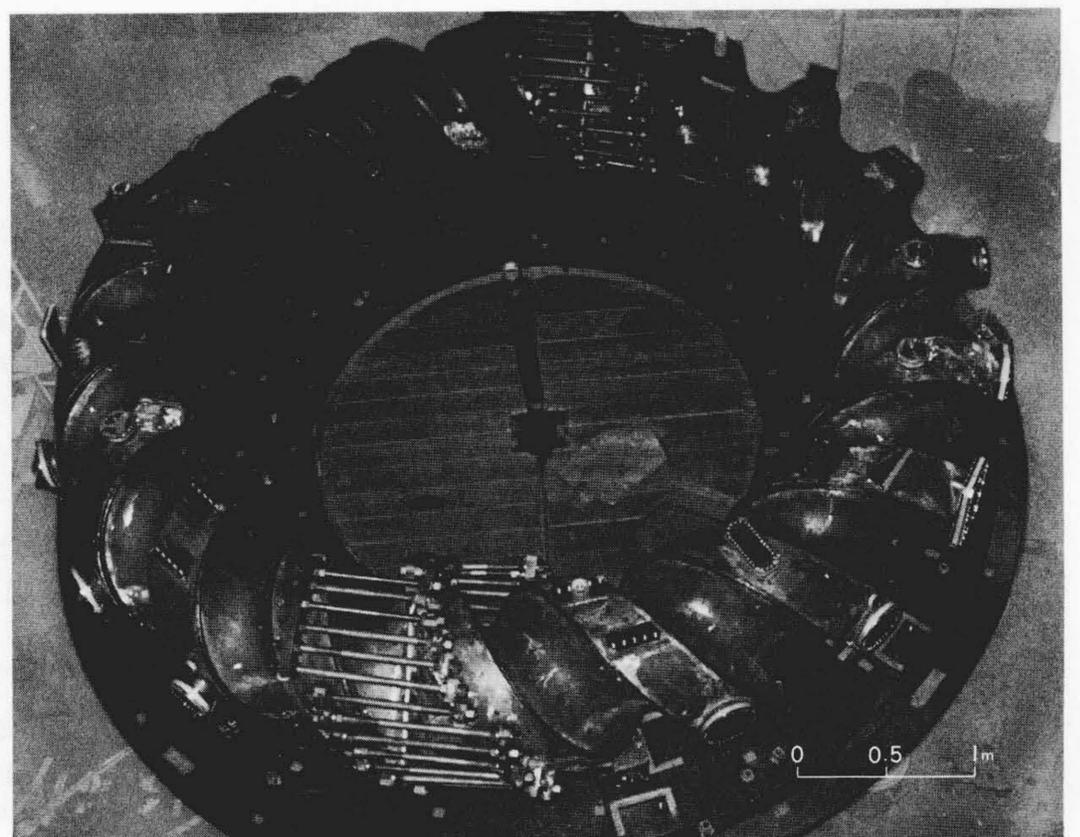
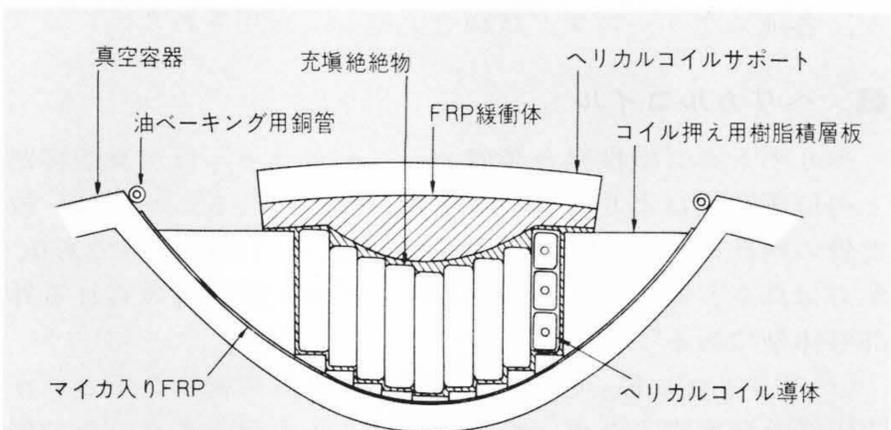


図4 真空容器の外観 大半径2.2mの「ヘリオトロンE」真空容器には、その外周にヘリカルコイルを19回巻回するためのヘリカル状の溝が設けられている。

表3 真空容器の構造と A_p/l_c の比較例 真空容器の断面形状を従来方式とした設計例と「ヘリオトロンE」の最終設計とを、核融合炉性能指数に影響を与える因子 A_p/l_c により比較した例を示す。

	設計例1(「ヘリオトロンE」の最終設計)	設計例2(従来方式による検討例)
ポロイダル断面		
$\frac{A_p}{l_c}$	0.060	0.0417
$\frac{A_p}{l_c} / \left[\frac{A_p}{l_c} \right]_{例1}$	1	0.695

注：略語説明 A_p (プラズマ断面積), l_c (コイル1ターンの平均長)



注：略語説明 FRP(ガラス繊維強化プラスチック)

図5 ヘリカルコイルの構造断面図 ヘリカルコイルの進み方向直角断面を示す。コイルは放電管の溝の中に入り、外側からヘリカルコイルサポートにより支持されている。コイルとサポートとの間には、コイルの熱膨張吸収用のFRP緩衝体が入っている。

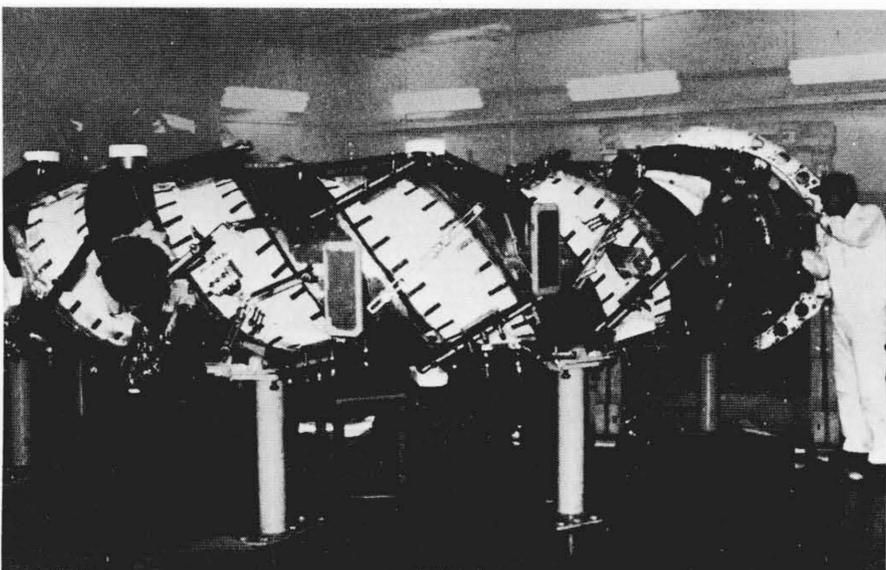


図6 ヘリカルコイルの巻線作業 「ヘリオトロンE」の真空容器に、ヘリカルコイルを巻き付ける作業を示す。白く带状に走っているのが絶縁されたヘリカルコイルである。この写真は一体注入前のものである。

ため熱的・機械的に従来のコイルに比べて条件の厳しいものになっている。1パルス(矩形波換算通電時間1.3秒)の温度上昇が90度に達するため、冷凍機を用いて10°Cに冷却した純水によりコイルを冷却している。なお、局部的に冷却水が沸騰することも考慮して、この冷却水の送水圧力は7 kg/cm²とし、この種の装置では比較的高い値となっている。

「ヘリオトロンE」のヘリカルコイルでは、コイル小半径を広げる方向の電磁力は全体で8,000tfと計算され、この力をいかに支持するかが設計上のポイントとなった。ヘリカルコイルの外側にヘリカル状のステンレス鋼製の板を当て、これを全周にわたってつないだ形のサポートを設けた。構造断面及び全体写真を図5, 6に示す。一方、コイルは通電時の温度上昇により膨張しようとするが、サポートの温度は通電中もほとんど変化しないため、コイルはサポートに押し込まれた形となり、コイル導体には圧縮応力が生ずる。このため、コイルとサポートとの間にFRP(ガラス繊維強化プラスチック)製の緩衝体を入れて熱膨張を吸収している。

ヘリカルコイルは主コイルであり、また、最もプラズマに近く配置されるため、不整磁場を極力少なくする必要から非常に厳しい寸法精度が要求される。これに対処するため、導体をNC工作機により加工した金型で成形し、専用の寸法測定装置を開発してこの要求にこたえた。コイル導体の設定精度は0.4%以内となっている。

ヘリカルコイルの給電部は、すべて同軸構造としている。9列のヘリカルコイル素線に、それぞれ1本ずつの同軸給電部が取り付けられ、この給電部をトラス全周に分散配置することにより磁場の対称性を配慮した。

保守と輸送上の制限から、ヘリカルコイルは2分割接続部をもっている。当初は導体をボルト締結する構造を検討したが、強大な電磁力に対する信頼性を高め、不整磁場を極力低減するために、ろう付接続構造を採用した。

5 トロイダル磁場コイル

ヘリオトロン型核融合装置では、トロイダル磁場コイルは専ら磁気面すなわちプラズマの断面形状を変化させるために用いられる。プラズマ閉じ込めに必要不可欠ではないので、「ヘリオトロンDM」のように省略することも可能である。「ヘリオトロンE」では、トロイダル磁場コイルの発生磁場は0.6Tである。このコイルは、電源容量をできるだけ抑え、システム全体の経済性を高めるため電流密度を下げた設計となっており、冷却も高耐カステンレス鋼(YUS304N)製のコイルケースを水冷する間接冷却方式としている。トロイダル磁場コイル自身の電磁力は、磁場が弱いためあまり大きくないが、垂直磁場がトカマク型核融合装置に比較して強いため、この垂直磁場とトロイダル磁場コイル電流との相互作用による転倒力が大きい。そこで、この力を支持するため、トロイダル磁場コイルを上下のベースにくさび状の板で固定し、ベース外周にトラス構造棒を設けた。このトラス構造は、装置水平中心面上の空間を大きくとって、計測などに便利な形としている(図2参照)。

6 空心変流器コイル

空心変流器は全体で180ターンのコイルから成り、サイリスタシャ断器を使用した高電圧発生装置により36,000Vの高電圧を一次側コイル端子間に印加して、プラズマを点火する。このコイルは、対地試験電圧が商用周波64,000Vに達するため、絶縁法が重要なポイントとなった。このため、高性能の

マイカ絶縁テープを開発して電氣的・機械的要求を満足させた。コイルの配置は、プラズマ領域への漏れ磁場を極力少なくするように設計した。プラズマ中心での漏れ磁場は、約10Gと計算されている。このコイルの電流は、プラズマ点火時には10msの速さでしゃ断されるが、このときベースに発生するわずかな電流を軽減して不整磁場を抑えるためにベースを2分割したほか、磁場の強い部分に24分割のスリットを設けている。

7 電源制御システム

7.1 電源システム

図7に「ヘリオトロンE」の電源システム構成を、図8に各コイルの通電パターンを示す。

電源システム¹⁴⁾は、本体コイルに直流電流を通電するものであり、この通電に必要なエネルギーは受電系統容量が負荷の大きさに比べて小さいことを考慮して、すべて電動発電機から供給している。発電機は立て形とし、慣性が大きく十分なエネルギーをもっているため、フライホイールを付加する必要はない。発電機電圧は各コイル電流の大きさに応じて30~100%の間で設定し、高効率運転が行なえるようにしている。保守を簡便にし、制御性能を高めるため、各コイル電源はすべてサイリスタ方式としている。

ヘリカルコイル及びバーチカル磁場コイル電源は最大容量の電源であり、直流電流のリップルを小さくして発電機への影響を小さくするため、24相整流を採用した。これは、位相の15度ずつ異なる4群の3相ブリッジ整流器を直並列接続して構成している。

トロイダル磁場コイル電源は6相整流とし、必要に応じて誤差磁場補正用ローカルバーチカル磁場コイル電源としても使用する。補助バーチカル磁場コイルは、空心変流器コイルと磁氣的に密に結合しており、空心変流器コイル電流をしゃ断するとき電圧スパイクを受けて電流が変化する。そのため、電源容量はこれを配慮して決めた。ジュール加熱電源には、誘導性エネルギー蓄積方式を採用した。この場合、直流

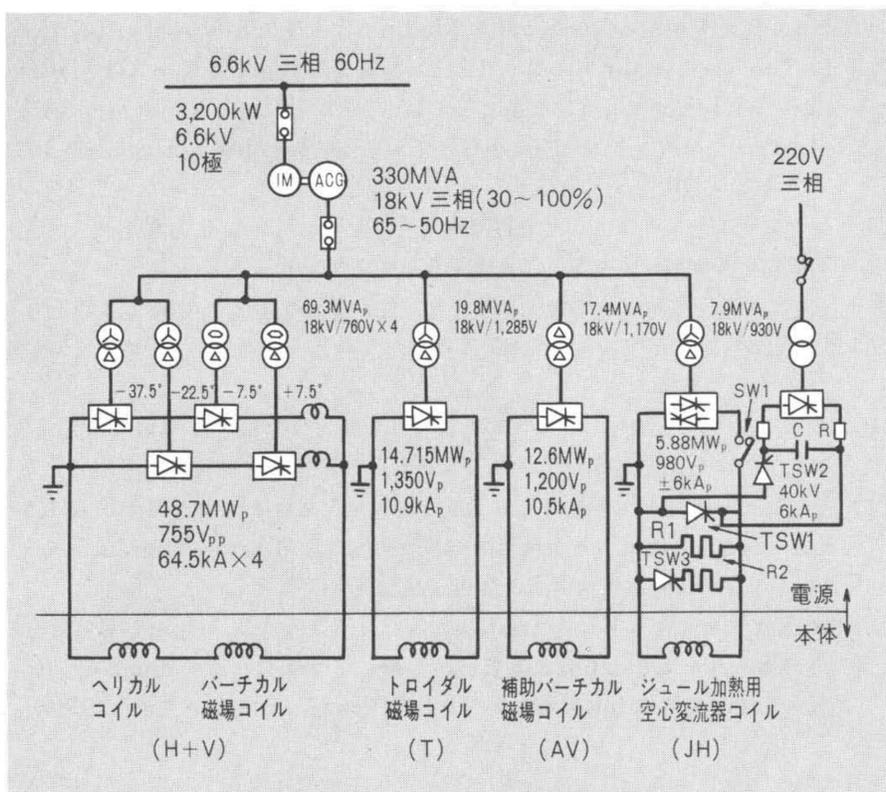


図7 電源システムの構成 「ヘリオトロンE」電源システムの単線結線図を示す。NBIによる加熱実験を行なう場合は、図1に示したようにトロイダル磁場コイル用電源の一部を切り換えて使用する。

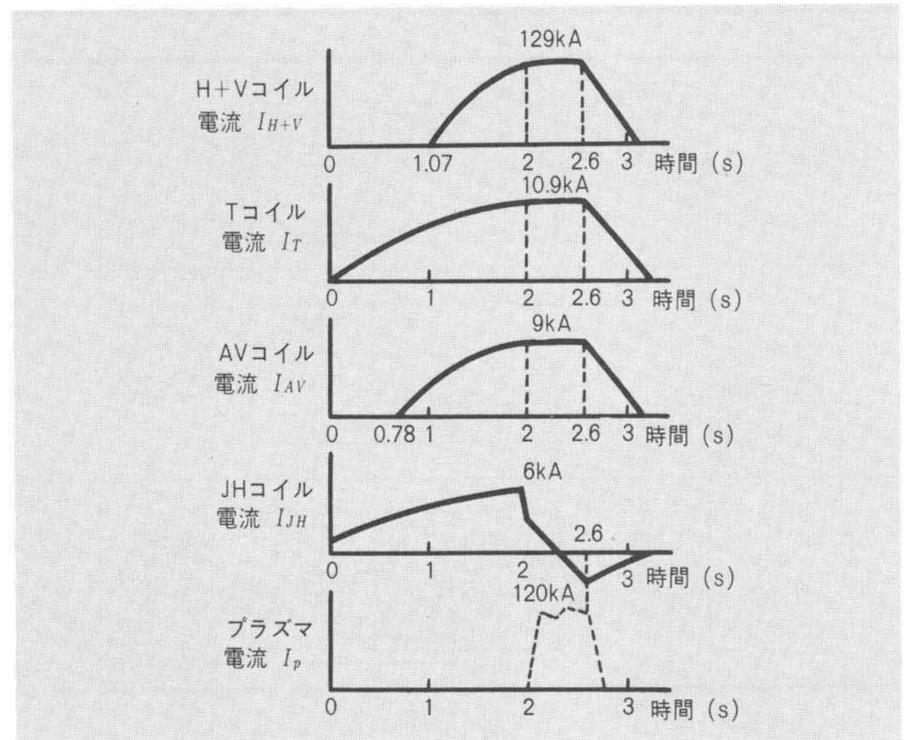


図8 コイル電流の通電パターン 各コイル電流の典型的な通電パターンを示す。

電流をしゃ断する必要がある。直流しゃ断器には機械的しゃ断器とサイリスタしゃ断器があるが、保守性を考慮した経済比較と性能比較を行なった結果、サイリスタしゃ断器を採用した。

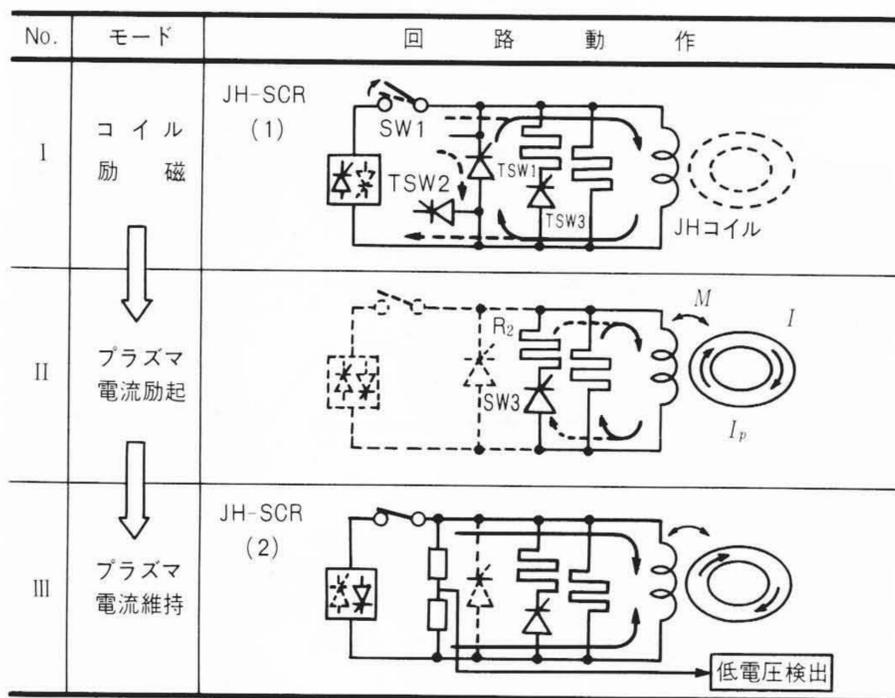
7.2 制御システム

「ヘリオトロンE」の制御としては、(1)本体、電源のシステム制御と(2)プラズマ励起、維持制御の両者を的確に行なう必要がある。

図8に示す電源システムの制御系では、誘導電動機が受電容量の許容範囲で発電機を最小時間で加速できるように、二次抵抗制御している。発電機は受電容量を最小限に抑えるため自動方式としている。また、サイリスタ電源の制御は、周波数変動や電源波形ひずみがあっても十分所期の機能を発揮できるように、フェイズロックループをもったデジタル式自動パルス移相器を用いて行なっている。

図9に、プラズマ電流励起、維持制御動作の要領を示す。プラズマ電流の励起と維持は、同図に示すジュール加熱電源を用いて行なう。コイル励磁モードでは、まずジュール加熱サイリスタJH-SCR(1)により、ジュール加熱用(JH)コイルにあらかじめ電流を流しておき、電源を切り離してサイリスタスイッチTSW₁を点弧して電流を還流させる。次に、プラズマ電流励起モードでサイリスタスイッチTSW₂を点弧してTSW₁をしゃ断すると電流は抵抗に移り、コイル電流は急速に減衰してコイル端子間に高電圧が発生し、プラズマ電流が励起される。一定時間後、時定数調整抵抗R₂を投入してプラズマ電流の立上りを制御する。最後のプラズマ電流維持モードでは、プラズマ電流が減衰を始める前に、ジュール加熱サイリスタJH-SCR(2)を接続してプラズマ電流を維持する。以上の3モードでのコイル電圧、コイル電流及びプラズマ電流の波形は、図9のタイムチャートに示している。この制御動作で、プラズマ励起モードでは抵抗R₂の投入タイミングが課題で、R₂投入が遅すぎるとプラズマ電流の立上りが大きく、また、投入が早すぎるとプラズマ電流が立ち上がらない。このR₂投入の投入タイミングについては、計算機シミュレーションにより検討し最適値を求めた。

また、プラズマ電流維持モードでは、電源再接続をできる



注：略語説明
 JH-SCR(ジュール加熱サイリスタ) M(相互インダクタンス)
 SW(スイッチ) I(プラズマ電流)
 TSW(サイリスタスイッチ)

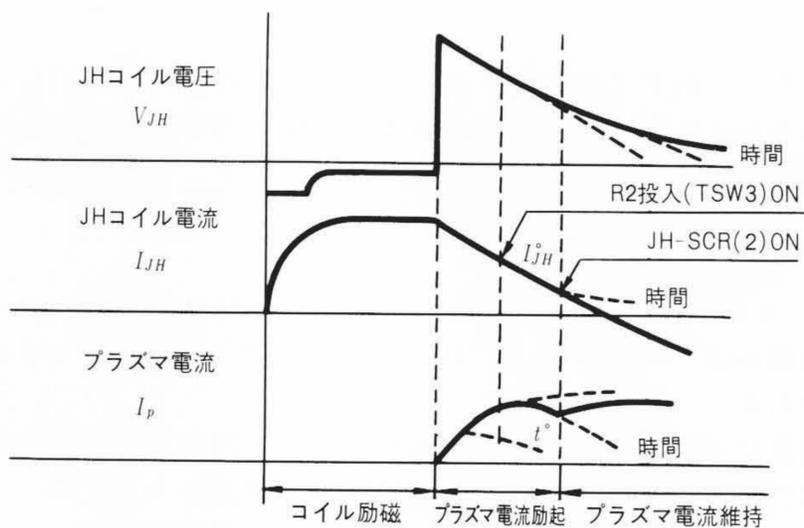


図9 プラズマ電流の励起，維持制御動作タイムチャート JHコイル電源を用いたプラズマ電流の励起，維持制御動作タイムチャートを示す。

だけ早く行なう必要があるが，コイル端子間電圧が高い間に行なうと，過電圧により電源が破壊するおそれがある。そのためコイル端子間の電圧低下を検出して，電源接続時にインタロックをとる方式とした。また，プラズマ電流の維持制御はJHコイルに流れる電流を制御することによって，間接的に行なう方式を採用した。プラズマの閉じ込め磁場制御については，電流フィードバック制御方式を採用した。また，電流制御回路の構成は二次系と位相進みの組合せとし，制御目標の電流ドリフト±2%を実現し，コイル間の相互干渉の影響を含めて検討するため，図8に示す各コイル電流の立上げから立下げまでのプラズマを含む全モードをシミュレーションして制御定数を確認した。図10にシミュレーション結果を示す。この結果から，各コイル電流は目標のドリフト内に入り，プラズマ電流は所定の範囲に維持されていることが分かる。

8 結 言

非軸対称形トラスの核融合実験装置の中で，現在世界最大級の装置「ヘリオトロンE」は，予定どおり間もなく稼働を開始する。これは科学的，物理的にも大きな可能性を秘めた注目すべき装置であり，その成果が期待される。本機は技術的にも画期的な新しい試みが多く採り入れられた装置であり，

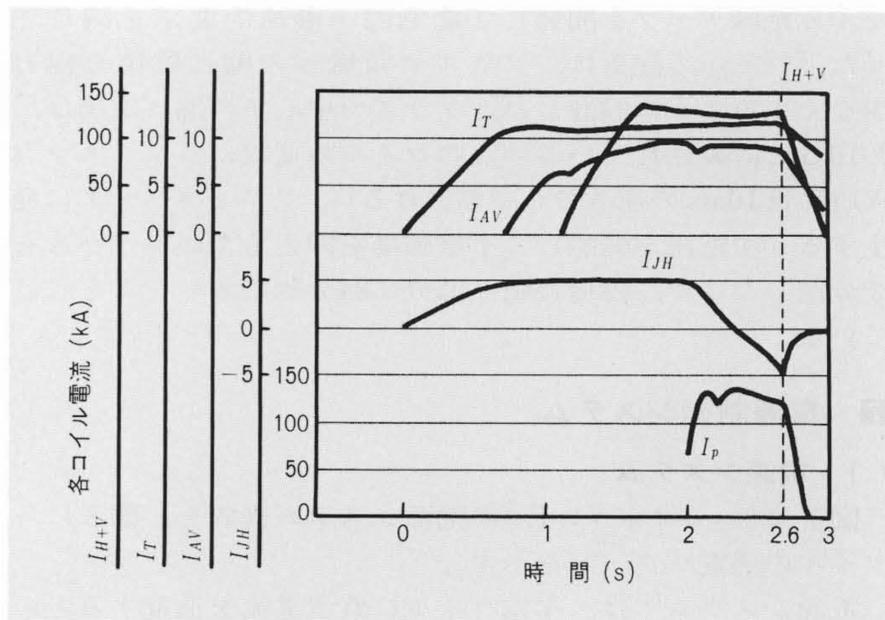


図10 制御システムの計算機シミュレーション結果 計算機を用いて行なった制御システムのデジタルシミュレーション結果を示す。

核融合装置技術の進歩に寄与するところが大きいと確信している。特に，日立製作所はこのプラントを構成するほとんどの機器の建設を，設計から据付，試運転に至るまで，京都大学の指導のもとに一貫して担当し，システムとしての統一性，整合性を追求し合理性と信頼性を確保している。これらの技術的経験を，今後建設される大形核融合装置に生かしてゆきたいと共に念願している。

参考文献

- 1) 宇尾, 外: 磁場による閉じ込め, 物理学会誌, 30, 810 (1975-11)
- 2) 宇尾, 外: ヘリオトロン型 核融合炉の開発現状, 原子力工業, 24, 3号, 17(1978-3)
- 3) 宇尾, 外: 非軸対称系の現状と動向, 核融合研究, 39/別冊その5, 7(昭54-6)
- 4) PPL KYOTO UNIV.: ANNUAL REVIEW(Dec. 1978)
- 5) K. Uo, A. Iiyoshi et al.: Plasma Confinement Experiment in the Heliotron D Machine, Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research(Madison, 1971), Vol.III, p.109
- 6) K. Uo, A. Iiyoshi et al.: Plasma Confinement and RF Heating on Heliotron DM and D Devices, Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research(Berchtesgarden, 1976), Vol.II, p.103
- 7) 鈴木, 外: ヘリオトロンDMヘリカルコイルの応力解析, 核融合連合講演会予稿集, 141(昭53-2)
- 8) 百々, 外: 核融合技術の展望, 日立評論, 56, 957~963(昭49-10)
- 9) 加沢, 外: 最近の核融合装置技術の展望, 日立評論, 60, 159~162(昭53-2)
- 10) たとえば井村, 外: ステラレータ形核融合実験装置「JIPP-T-1」, 日立評論, 56, 965~970(昭49-10)
- 11) Y. Kazawa: Engineering Aspects of Asperator, International Symposium on Stellarators with Three Dimensional Magnetic Axis(Sendai, Aug. 1979), C-1
- 12) H. Kita et al.: The Application of Electron Beam Welding to Vacuum Chamber of Heliotron E, 8th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research(San., Nov. 1979), 30-05
- 13) 宇尾, 外: ヘリオトロンE計画, 原子力学会誌, 21, 286(1979)
- 14) K. Uo et al.: Development of the Heliotron E Power and Supply System, 10th Symposium on Fusion Technology (Padova, Sept. 1978)