

最近の核融合装置技術の展望

Engineering Aspects and Problems of Nuclear Fusion Facilities

本稿は、核融合装置の高級化、大型化に伴う最近の装置技術の課題、問題点及びその動向について概説する。特に、磁気閉じ込め方式の主流である低 β トーラスについて、最近、日立製作所で製作したトカマク、ステラレータ、ヘリオトロンなどの設計・製作経験をベースに論じ、主要機器のうち、真空容器と排気系、トロイダルコイル、ポロイダルコイル、ヘリカルコイルなどについては、具体的な課題にも触れる。

現状は、大型化、高磁界化及び高真空化の技術開発が進み、臨界炉心プラズマを実現させるための大型実験装置を建設できる程度の技術水準に達しているが、将来は、超電導技術や炉工学技術のいっそうの発展が必要である。

加沢義彰* Kazawa Yoshiaki
笠原達雄* Kasahara Tatsuo
寺沢昌一** Terasawa Shōichi

1 緒言

ここ数年間に、世界の核融合研究の進歩は著しく、核融合炉実用化への一里塚となる炉心プラズマの生成は、実現できる公算が大きい。資源小国の我が国にとって、偏在性がなく、クリーンかつ豊富な核融合エネルギーは特に重要な意味をもっている。

日立製作所では、既に昭和30年代前半から核融合装置技術の重要性を認識し、技術開発を強力に推進し、技術の蓄積とレベルアップに努力してきた^{1),2)}。本稿では、最近の我々の経験をベースに核融合装置技術の課題と動向について概説し、併せて、将来の展望を述べる。

2 核融合に関する技術開発の動向

核融合の技術は、多くの極限技術を組み合わせ駆使しなければならないシステム技術、総合技術である。早くからこれに従事する技術者により、実験装置を大きな電気・物理・機械の総合システムとしてとらえ、これを探求し、科学的可能性を具体的に実現する工学として、核融合「装置学」とでも呼ぶべき分野が形成されてきており、最近までは、プラズマの閉じ込めと加熱を研究する科学者にその実験手段を提供することを主要な目的としてきたが、それに加えて、核融合エネルギーを取り出し利用する技術を探求する核融合「炉工学」の必要性が認識されてきている。

炉工学の現状については、良くまとまった報告³⁾があるので、ここでは緊急に解決を迫られている装置技術、特に本体を中心に設計・製作技術について述べる。これらの技術は、その大部分が将来の炉心技術でも根幹となることが期待される。

核融合装置には、プラズマ閉じ込め方式に応じた幾つかの形式がある。これらは、磁力線で容器を形成する「磁気閉じ込め方式」と、レーザや電子ビームで瞬間的に高温プラズマを作り、高密度に爆縮し、短時間であるがその慣性で閉じ込める「慣性閉じ込め方式」の二つに大別され、装置技術面でも、それぞれの閉じ込め方式に特有な異質のものがあ、共通には論じられない。ここでは、現在研究の主流を占める磁気閉じ込め方式に的を絞る。

3 磁場閉じ込め方式における技術的課題と動向

3.1 閉じ込め方式の動向

この方式では、依然として低 β トーラスが主流であり、中でもトカマクが先行し、各国が臨界炉心プラズマを実現させるため、大型装置の建設を競っている⁴⁾。また、非円形断面プラズマにより β ($\equiv$ プラズマ圧力/磁気圧力)値を増大させる可能性の追求や、プラズマ中の不純物低減をねらったダイバータ実験^{5),6)}などが、活発に行なわれるようになった。

これに数年遅れて、ステラレータやヘリオトロンなどヘリカル・コイルをもつ非軸対称系トーラスが続いている。ミラーやカスプなどの直線型装置も、プラズマを高温に加熱するNBI(中性粒子入射)技術が最近急速に進歩したことなどもあり、プラズマ・パラメータを着実に上げている。高 β 系も、プラズマの理解が進むにつれて徐々に進歩しており、地道な研究が続けられている。

核融合開発の重要性とリスク軽減のため、現段階では複数の方式を研究するマルチパス方式により方式相互間の重点度を段階的に評価しつつ開発を進めるべきだとする専門家が多い⁷⁾。

3.2 真空容器と排気装置

プラズマの温度、密度、閉じ込め時間などの性能は、容器の到達真空度と真空の質(きれいさ)に大きく依存する。真空容器の構成要素の(1)材料の選定、(2)溶接、表面処理を含む加工法及び(3)高温ベーキング、放電洗浄などによるアウトガスの軽減が特に重要である。従来広く使用されていたバイトンなどの有機物ガスケットでは、高温ベーキングが不可能であるばかりでなく、アウトガスが多いことや分子間を貫通するいわゆるスローリーク⁸⁾が不可避であり、金属ガスケット化、溶接構造などを採用して、有機物ガスケットを必要最小限に減らす装置が増えている。完成後ベーキングが不可能な物は、製作過程で事前にプレベーキング処理を行なうと、ある一定期間大気に放置してもアウトガス減少効果があるとの報告もあり、設計製作に際して細かい配慮が必要になっている。

真空排気系は液体窒素トラップ、軸流分子ポンプ、ゲッタポンプなどを高真空側に配置する、完全ドライシステムが一般的になっている^{8),9)}。

また、NBI加熱系や高速ダイバータなどでは格段とクリーンかつ大きな排気速度をもつ排気システムが要求され、クライ

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所電力事業本部 理学博士

オ・ポンプ⁹⁾やチタン・ゲッタ・ポンプ¹⁰⁾、非蒸発型ゲッタ・ポンプ¹¹⁾などの新しい真空ポンプの開発が進んでいる。この分野では、全金属ガasket・ゲート弁の進歩も見逃せない¹²⁾。

3.3 磁場コイル

磁場コイルに関する最近の傾向は、(1)大型化、(2)高磁界化、(3)高精度化の三つに集約される。「スケーリング則」が、すべて「装置の大きさ(プラズマの半径や容積)や磁束密度 B を増やすと、着実にプラズマパラメータを改善し得る」ことを示しているためである。特に、核融合炉の出力密度は磁場の強さ B の四乗に比例することが期待される¹³⁾ので、高磁界化の要求が強い。

このために、磁界や電磁力の計算精度向上、大電磁力に抗し得る合理的な支持構造系の構成と強度解析の精度向上、新しい構造材料(非磁性、高耐力、高疲労強度)の開発、リード線や給電部の同軸化¹⁴⁾の技術開発などが必要となっている。また、大型化、高磁界化に伴う技術的経済的必然性として、将来、超電導コイルの導入が早晚不可欠であることは明らかであり、我が国でも世界の大勢に遅れないよう、大規模な開発が進められようとしている^{13), 15)}。

3.4 プラズマの加熱技術

プラズマの加熱方法としては、高速イオンの注入やジュール加熱が古くから行なわれていた。最近、イオンをあらかじめ

め加速し磁界の影響を避けるため、これを中性化してプラズマに注入する大容量NBI技術の開発が進み、プラズマ温度を数億度に高める高温加熱手段として目覚ましい成功を得ている。NBIは、20~200kV数十アンペアのイオン源、高効率中性化シェル、クリーンで強力な真空ポンプなどの技術の中核として日進月歩を続けており、最も確実な加熱法としての地位を固めつつある。

大電力高周波発振器による電磁波を導入し、その波動エネルギーの吸収によってプラズマを加熱するRF(高周波)加熱法も最近の実験で成功例が多く報告されており、有望な加熱手段と見られる。

また、磁界やその分布の時間的変化により、プラズマを断熱的に圧縮して加熱する方法も試みられていたが¹⁶⁾、最近これを低 β トーラスに適用して成功した例¹⁷⁾もあり注目すべき加熱法である。

4 低 β トーラス装置の技術動向

4.1 概 観

日立製作所は、我が国の代表的な核融合装置の大部分を製作してきたが、我が国と諸外国の研究開発体制の違いもあるが、メーカーとしては、現在世界で最も多くの製作実績をもつといえよう。その幾つかについては、個別報告があり^{5), 8), 14), 18)}、

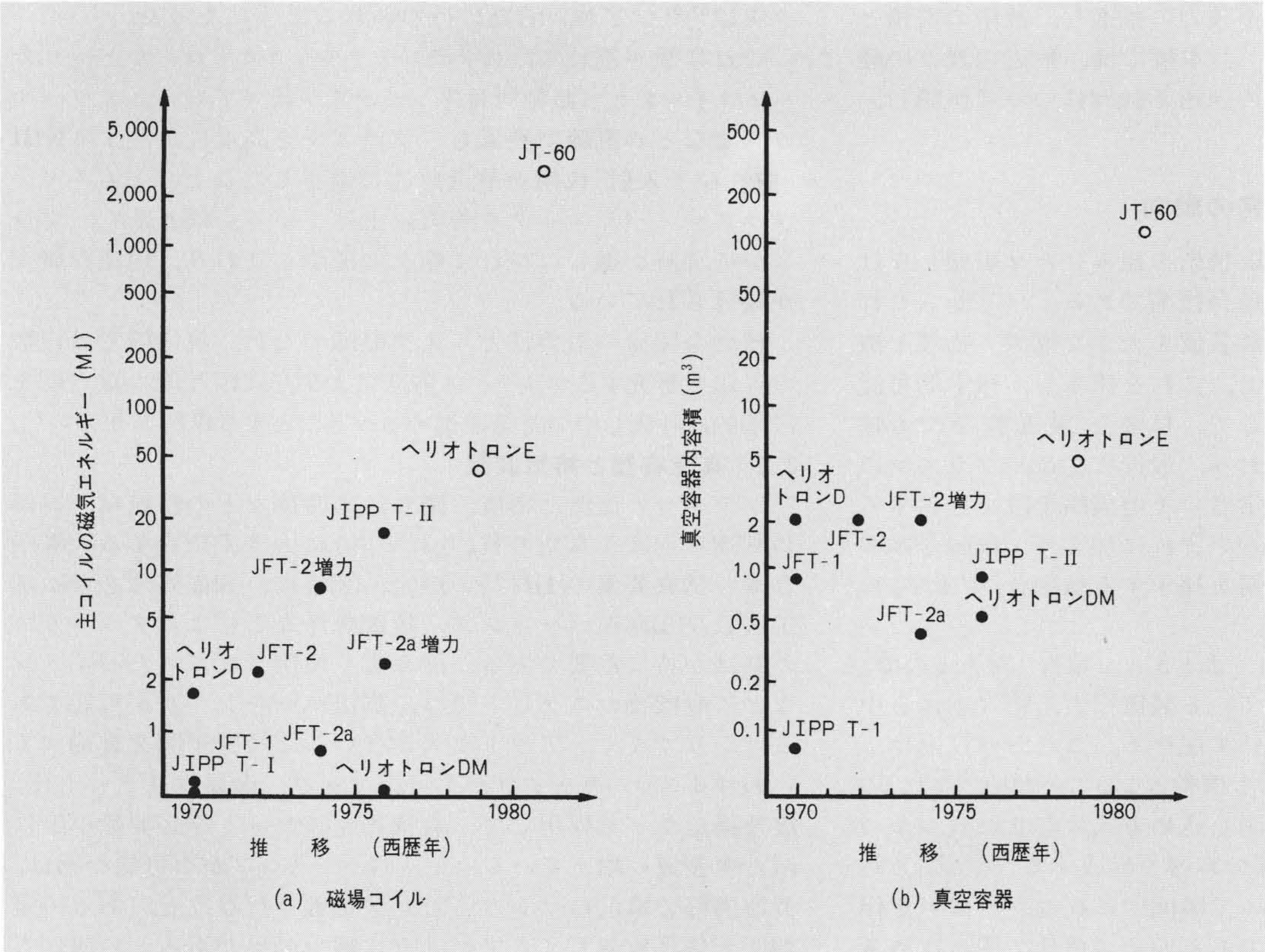


図1 トーラス型核融合装置の規模推移 主コイルの保有する磁気エネルギーも真空容器の内容積も年とともに大きくなっていくことが分かる。

表1 最近の低 β トーラス製作実績 1974年以降に日立製作所で製作された主な低 β トーラス装置の主要諸元を示す。

建設年 (西暦)	納入先	装置名	形式	主直径 (m)	真空容器内面寸法 高さ(m)×幅(m)	中心磁界 (kG)	主コイル磁気 エネルギー(MJ)
1974	日本原子力研究所	JFT-2a	非円形トカマク	1.2	0.3×0.4	10	0.63
1976	同上	同上増力	同上	同上	同上	20	2.5
1976	名古屋大学プラズマ研究所	JIPP T-II	ステラレータ・トカマク (ハイブリッド)	1.82	直径0.4 m	30	16
1976	京都大学ヘリオトロンセンター	ヘリオトロンDM	ヘリオトロン	0.9	0.3×0.3	10	0.045
製作中	同上	ヘリオトロンE	ヘリオトロン	4.4	0.4×0.8	26	28.5
試作開発	日本原子力研究所	JT-60	トカマク	6.0	2×2.9	45	2,850

先にまとめて発表した^{1),2)}ので、ここでは表1に示す1974年以降に設計、製作された装置について紹介する。全般を通じて特徴的な傾向は、大型化、高磁界化及び高真空化であり、図1はこれを明確に示している。

4.2 真空容器

ジュール加熱の効率や容器壁を流れる電流による誤差磁場を考慮して、(1)薄肉構造(ベローズなどの)とするか、(2)複数個に分割して電氣的に絶縁した真空シール構造とするなどの配慮が必要である。前者の例を図2に、後者の例を図3に示す。

真空容器には真空引口、加熱、計測用などに多数の窓が設けられるが、一般にフランジ構造としてガスケットでシールされる。円形フランジには、古くからコンフラット型などが用いられ一応の性能が得られているが、非円形フランジの高温、高真空メタル・ガスケットは難しく、最近まで実用に耐えるものはほとんどなかった。このため、図3に示すJIPP T-IIの例では、特殊な表面被覆をした金属Oリングを開発し、最新のフランジ加工技術による超仕上を施して350℃でも使用可能な長方形、菱形、その他の特殊形状のフランジ・シール技術を成功させ $1 \sim 2 \times 10^{-9}$ Torrの真空を得ている。最近開発されたばね入り金属Oリングもこの目的に沿うものである。

真空壁の材料としては、SUS-304、304L、316などが多く使用されているが、アウトガスの低減、高温化、大型化、構造の複雑化に伴う動作応力の増大などに対処するため、オーステナイト鋼に窒素を添加したものやインコネルなどの高合金を使用する例も増えている。「JT-60」はこの例である。²¹⁾

容器の内蔵物としては、プラズマに直接面し第1壁となるライナやプラズマの形状、大きさを規制するリミタなどがある。これらは、熱、各種粒子衝撃などにより損耗しプラズマ中の不純物となる悪影響が大きいので、その材質の選定が重要である。現在、モリブデンが最も多く使用されているが、シリコン・カーバイドやパイロ・グラファイトなども検討され開発が進められている。また、ライナの構造をハニカム状にして構造面からスパッタリングを減らす試みもあり、その効果は基礎的実験で実証されている^{19),20)}。

4.3 トロイダル磁場コイル

このコイルは、トカマクやステラレータでは主コイルとも呼ばれ、大型化、高磁界化により性能がきわだって向上するので、磁気エネルギーも巨大なものが多く、例えば、JT-60の例では約3 GJ (30億ジュール)に達する²¹⁾。このため、大きな電磁力が作用する。また数分間隔でパルス的に運転され

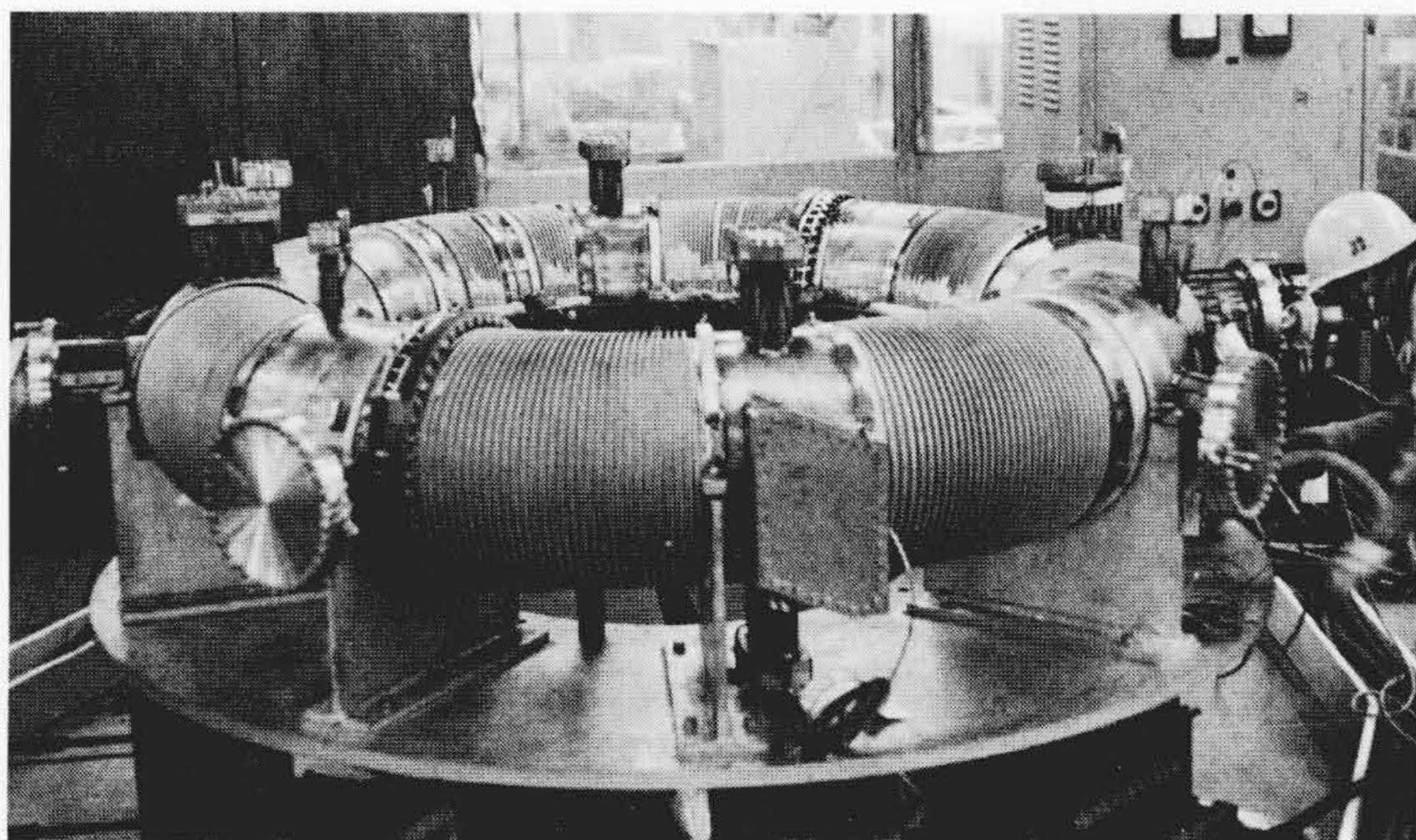


図2 薄肉構造の真空容器 JIPP T-IIの真空容器であり、ベローズと厚肉部を交互に配置した複合構造となっている。

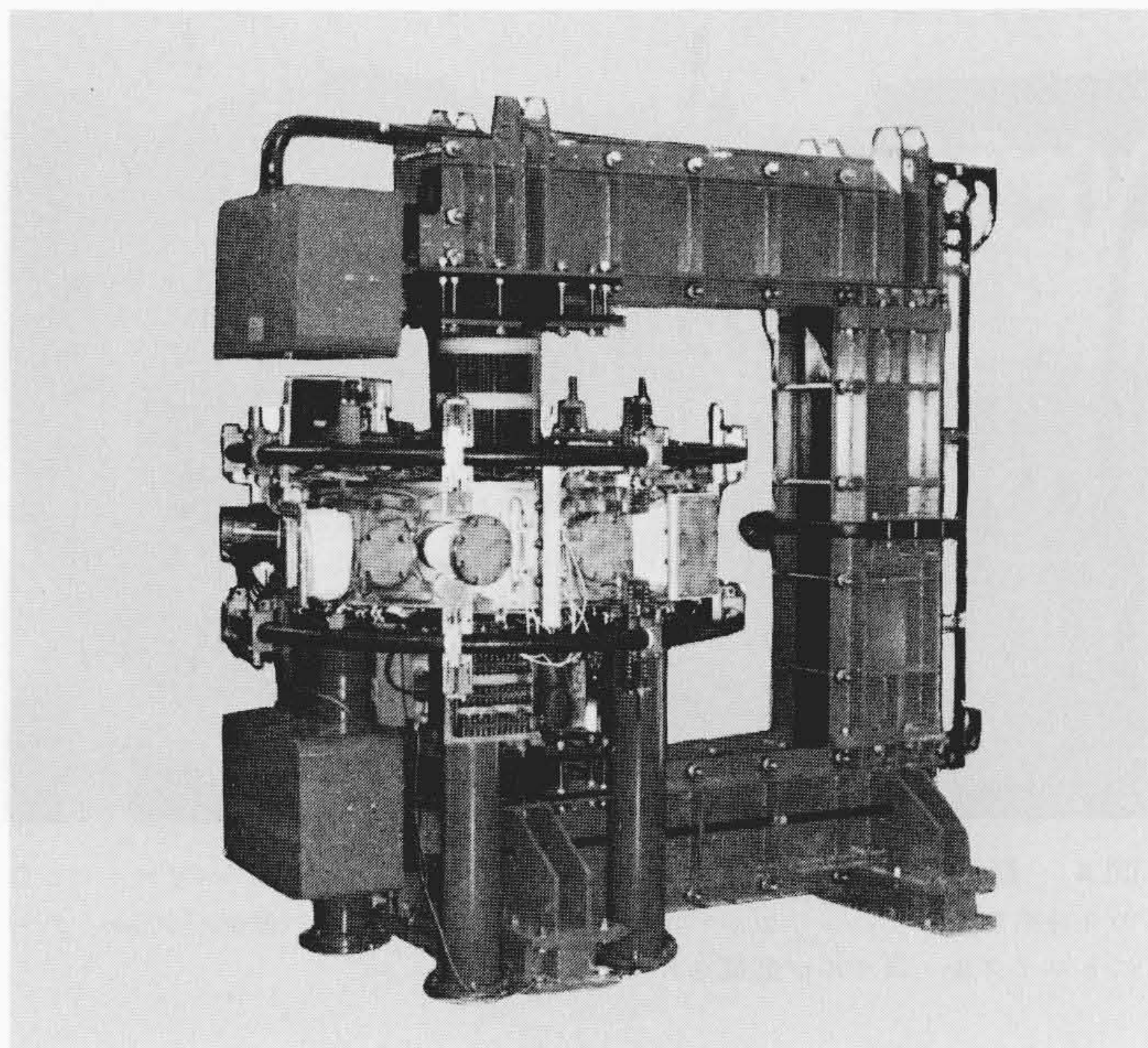


図3 ヘリオトロンDM 厚肉真空容器はトラス方向に2分割され、フランジ部で電氣的に絶縁されている。

ることが多く、これに応じてコイルの応力や温度も周期的に変化する。これらの電磁力や熱サイクルに対して、限定された空間内でコイル及びその支持構造物の応力や変位を許容限度以内に抑える構造設計が、技術的な大きな課題となっている²¹⁾。

4.4 ポロイダル磁場コイル

ポロイダル・コイルは、トロイダル・コイルと鎖交する配置にすることが多い。この場合、いずれかを1ターンごとに2箇所以上で分割接続する。一般には、これをポロイダル・コイルで行なう。この接続は狭い空間で実施するため、組立、解体作業が複雑で接続部の高温、高応力化などの技術的困難を招く²¹⁾。また、ポロイダル・コイルは他のコイルやプラズマと電磁的に結合されており、ジュール加熱のために変流器コイルを介してプラズマ回路に誘起される数百ボルト/ターンの電圧はもとより、プラズマの電流、位置及び形状の急激な変動に基づいて誘起される数千ボルト/ターンにも及ぶスパイク電圧にも耐える必要がある。このため高耐電圧、特に層間電圧も異常に高いことが特徴であり、高度の絶縁技術が要求される。

4.5 ヘリカル・コイル

ステラレータやヘリオトロンのヘリカル・コイルも、一種のポロイダル・コイルといえるが、これらの装置にとっては異質の重要性をもつ。ヘリカル・コイルは、構造や作用する力が複雑で設計製作が極めて難しかったが最近では大型、高精度の信頼性の高いコイルが作られるようになった。ヘリオトロンDやヘリオトロンDM(図4)のように、(1)コイルを真空容器の内に配置して磁場空間を有効に利用しようとするものと、JIPP T-II(図5)やヘリオトロンEのように、(2)ヘリカル・コイルを真空容器の外に巻き回す2種類の配置方式が開発されているが、大型化しプラズマの性能が向上するに伴い後者が大勢を占めるようになってきた。

4.6 電源制御システム

プラズマの閉じ込めに使うコイルの励磁電力は極めて大きいため、温度の上昇、電源容量の増大など技術的にも経済的にも困難が伴う。超電導コイルの開発が進みその技術と経済性が確立されるまでは、これらを勘案して1～数十分周期の

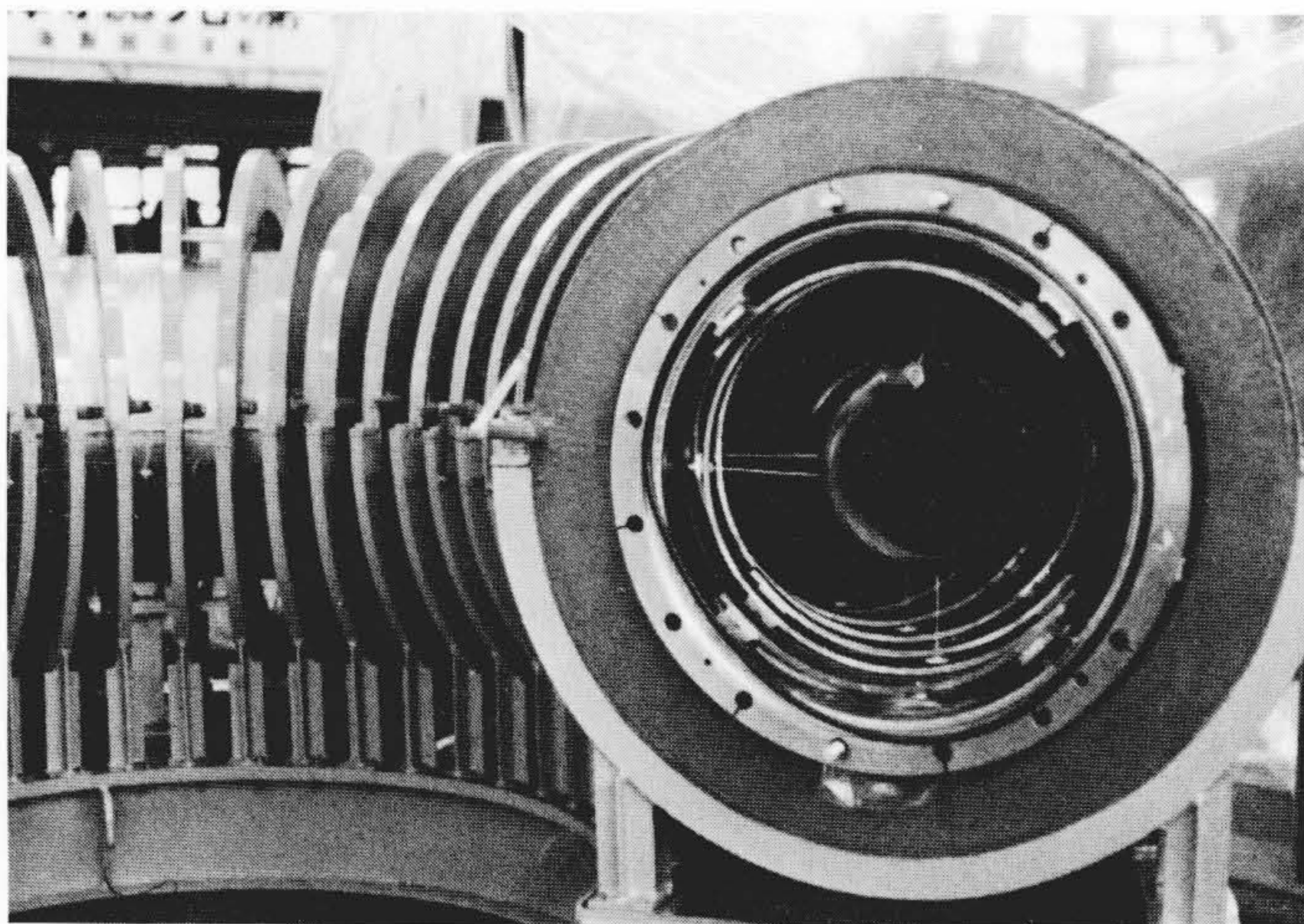


図4 真空容器内に配置されたヘリカル・コイル ヘリオトロンドの2分割部を示す。ヘリカル・コイルを収納した真空容器(断面径600mm)の外にトロイダル・コイルが配置されている。

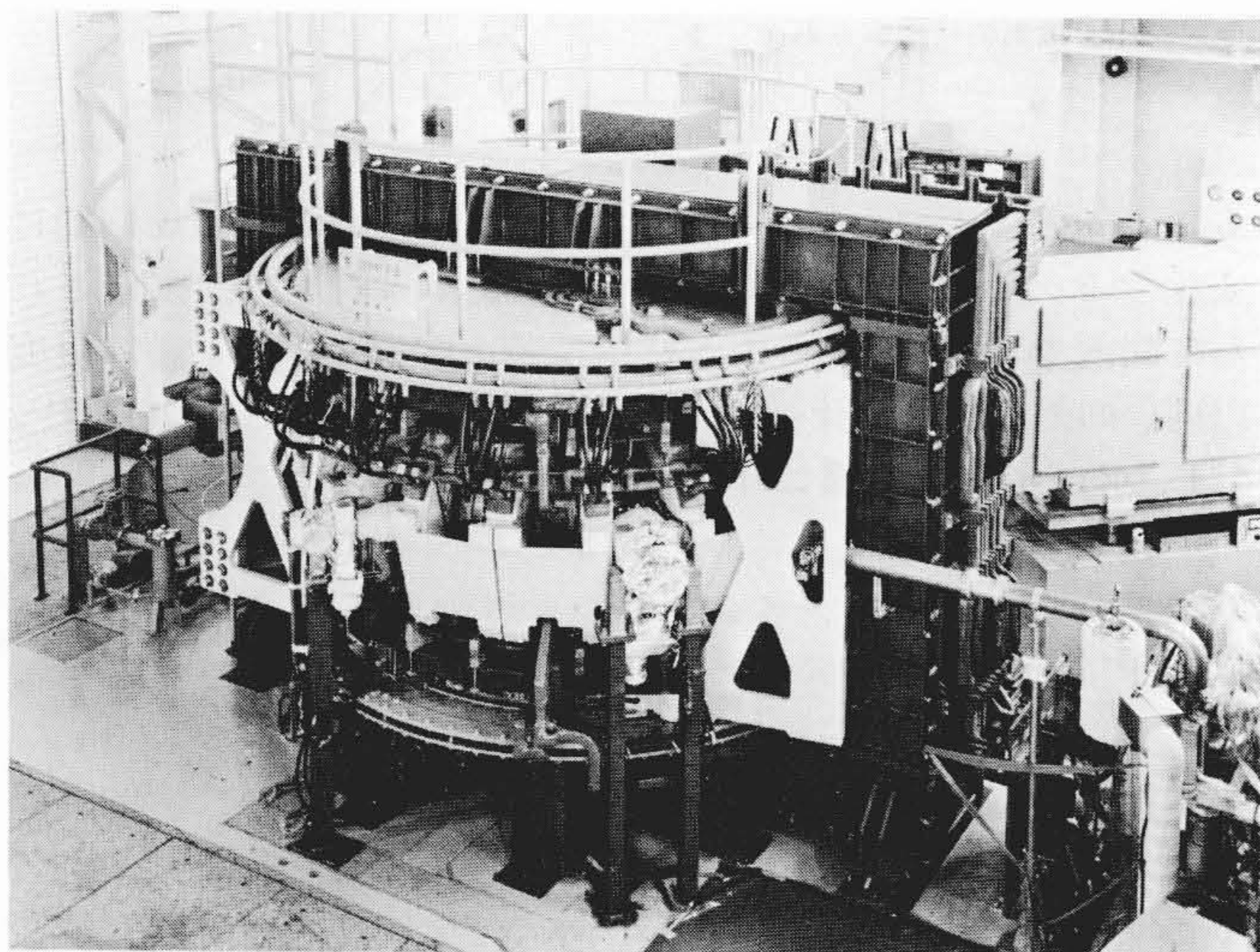


図5 JIPP T-IIの外観 ステラレータ・トカマクハイブリッド形装置で、ヘリカル・コイルは真空容器の外側に配置されている。

パルス運転が行なわれる。このパルス状尖頭負荷用電源として、一般に特別のエネルギー蓄積システムを設ける。プラズマ電流立上り期間などに対応する数ミリ秒〜数百ミリ秒程度の尖頭負荷に対しては将来共パルス運転が必要であるが、これにはコンデンサ方式のほか、インダクタ方式も多く使用されるようになった。

蓄積装置から負荷へのエネルギー転送回路に使用する直流スイッチは、投入機能だけでなくしゃ断機能が要求されることが多くなり、古くから使われたイグナイトロンや機械的しゃ断器とともに、転流回路付の真空しゃ断器やサイリスタ・スイッチ²¹⁾も使われるようになっており、特にサイリスタ・スイッチは核融合炉を含む将来の主流に成長するものと期待されている。装置の通電パルス長さに対応する0.1〜100秒程度の尖頭負荷に対しては、回転機はずみ車方式が広く使われる。この発電機には直流機が使われていたが、電源容量の増大に伴い最近では交流機が採用されることが多い。この場合、直流出力はその制御性から、サイリスタによる例が増えている²¹⁾。

計算機を使用したプラズマのフィードバック制御による性能の向上も最近の話題の一つであり、その最も成功した例が

JIPP T-IIで報告されている²²⁾。

5 結 言

本稿は最近の核融合装置の技術的傾向、課題などについて概説したが、装置学、炉工学の進歩は加速度的であり、性能向上のために極限技術への挑戦が続いている。経験上、実際の装置を設計、製作、運転することによって得られたノウハウの積み重ねが大切であり、それによって大型化、高磁界化及び高真空化が進み、臨界プラズマ試験装置の製作へ進んでいる。約20年間にわたり開発、蓄積されてきた技術が十分に活用発展され、究極のエネルギー源といわれる核融合炉実用化が一日も早く到来することを期待する。

最後に、これらの技術開発に機会を与えられた上、更に御指導、御協力をいただいた多くの大学、研究所などの関係各位に対し、深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 百々, 笠原: 核融合技術の展望, 日立評論, **56**, 957(昭49-10)
- 2) T.Kasahara, T.Dodo: Engineering Problems of Controlled Thermonuclear Fusion Research, Hitachi Review, **24**, 1(1975)
- 3) 原学会核融合炉調査研究専門委: 核融合研究の進歩と動力炉開発への展望(1976-8)
- 4) たとえば原研: 核融合研究開発の現状, 96(昭51-10)
- 5) 伊藤ほか: ダイバータ付非円形断面トカマク型核融合実験装置“JFT-2a”, 日立評論, **58**, 813(昭51-10)
- 6) たとえばThe ASDEX Group: Diverter TOKAMAK ASDEX, IPP 111/27(July 1976)
- 7) 学術会議核融合研究連絡会: 核融合研究将来計画(案), 核融合研究, **38**, 別冊その1(1977-8) 又は名大プラ研専門委: 名古屋大学プラズマ研究所第3次計画, 同上
- 8) Y.Kazawa et al.: Medium Beta Torus “JFT-2” for Nuclear Fusion Research, Hitachi Review, **22**, 336(1973)
- 9) たとえばJ.C.Boissin et al.: Cryopumps for Tokamak Nuclear Fusion Reactors, ICEC 6 C 7 136(1976)
- 10) たとえば大迫ほか: チタンサブレーションポンプ, 真空, **20**, 268(1977)
- 11) たとえばM.Borghi et al.: Use of Nonevaporable Getter Pumps in Experimental Fusion Reactors, J.Vac.Sci. Technol. **14** 570(1977)
- 12) たとえばTORR VAC社カタログ: VACUUM GATE VALVES
- 13) 原子力局: 核融合会議超電導分科会中間報告書, 核融合研究, **37**, 213(1977)
- 14) 井村ほか: ステラレータ形核融合実験装置“JIPP-T-1”, 日立評論, **56**, 965(昭49-10)
- 15) S.Shimamoto et al.: A Design Study of Cluster Test Apparatus, 6th ICMT(1977)
- 16) 齊藤ほか: 核融合実験装置BSG, 日立評論, **48**, 583(昭41-5)
- 17) K.Bol et al.: Experiments on the Adiabatic Toroidal Compressor, IAEA-CN-33/A 4-2(1974)
- 18) 加沢ほか: トーラス形核融合実験装置“JFT-1” 日立評論, **53**, 333(昭46-4)
- 19) T.ABE et al.: Reduction of Effective Sputtering Yield by Honeycomb Structures JAERI 7215 August-1977
- 20) 吉川: 核融合装置における多孔構造容器壁のスプッター軽減効果 JAERI-M 5849(1974-9)
- 21) 吉川, 太田, 田村, 加沢, 宮原: 大型核融合装置(JT-60)における技術的問題点, 第15回原子力総合シンポジウム予稿集 **21**, (1977-3)
- 22) J.Fujita et al.: Experiments on JIPP T-II, A Hybrid System of Stellarator and Tokamak, IAEA CN-35/D-3(1976)