

核融合の動向と日立技術の進歩

Current Status of Nuclear Fusion Development and Progress of Technology in Hitachi

最近、核融合炉実現のための技術開発は、臨界プラズマ試験装置の建設をはじめとして、著しい進歩を遂げている。1980年ごろから数年間の、日立製作所による各実験装置製作・建設と主要要素技術開発を概観することにより、最近の開発動向について論じる。

核融合の開発は、科学的実証段階から工学的実証段階へ移行するにつれて、産業界の果たすべき役割が増大する。将来の核融合炉のためには広範囲な工学研究が必要であり、その設計研究を通じて、開発課題が明確になりつつある。高周波加熱技術を応用した定常トカマク炉の試み、超電導マグネット、プラズマ第二段加熱の技術進歩のほか、装置をコンパクトにするための改良トカマク方式など、新しい動きも見られる。

1 緒言

日立評論で全冊特集「核融合」¹⁾を発行してから4年余の年月が過ぎ、この間米国の“TFTR”(Tokamak Fusion Test Reactor), EC(欧州共同体)の“JET”(Joint European Torus)など臨界プラズマを目指すトカマク型実験装置が稼動を開始した。日本原子力研究所が建設中の“JT-60”もプラズマ点火を約半年後に控え、現地工事は最終段階にある。

我が国の核融合技術が世界の先端グループに属し、今後産業界の役割がますます増大するであろうとの共通認識が、この数年国際的に強まってきている。4半世紀に及ぶ歴史をもつ日立製作所の核融合開発の内から、1980年以降の新技术の成果を幾つか選択し、再び全冊特集「核融合新技術」を編集したが、本論文ではそれらの概要を紹介しながら、核融合の最近の動向と日立の取組みについて述べる。

2 核融合装置開発の進歩

核融合の科学的実証を目指す臨界プラズマ実験装置を建設する段階になると、装置が大型化するとともに、本体だけでなく、電源、制御、その他付帯設備を含む総合的なシステム・エンジニアリングの重要性が増大した。これまでは自ら中枢装置部分を設計・製作していた欧米の研究所でも、民間企業の積極的な参画を計画・設計の段階から求めるようになってきた。それとともに、我が国の核融合開発での官民協力のあり方が注目されるようになった²⁾。図1に、3大トカマクのJT-60, TFTR, JETでの研究機関と産業界の役割の比較を示す。今後、工学的実証を目指す実験炉段階になると、より日本型に近づくと予想される^{3),4)}。

装置の大型化は、図2に示すように、例えば主コイルの磁気エネルギーでみると、最近15年間に約1,000倍に増大していることが納入実績から分かる。最近の製品で最大のものがJT-60であり、本特集でもかなりの部分を占めている。こうした大型装置とは別に中・小型装置における特徴ある研究の重要性も、将来の経済競争力のある核融合炉の開発にとって、忘れてはならない点である。まず最近の納入実績や建設中の主な装置について、その概要を述べる。

2.1 JT-60(臨界プラズマ試験装置)⁵⁾

各種のプラズマ閉じ込め方式の中で現在最も研究開発が先行しているトカマク型の大型核融合装置“JT-60”は、米国の

寺沢昌一* Shōichi Terasawa

森野信幸** Nobuyuki Morino

装置名	物理設計	システム設計		製作・設計	製作
		全体的	部分的	R&D(Research and Development)	
JT-60(日本)	日本原子力研究所				製作受注者 (日立製作所ほか)
TFTR(米国)	プリンストンプラズマ物理研究所		エンジニアリング会社		製作受注者
JET(欧州連合)	JET 共同体				製作受注者

図1 核融合装置の設計・製作業務分担での日本と欧米の比較 JT-60では、システム設計のかなりの部分を製作受注者が分担するなど、TFTR, JETに比べて産業界が積極的に参画している。

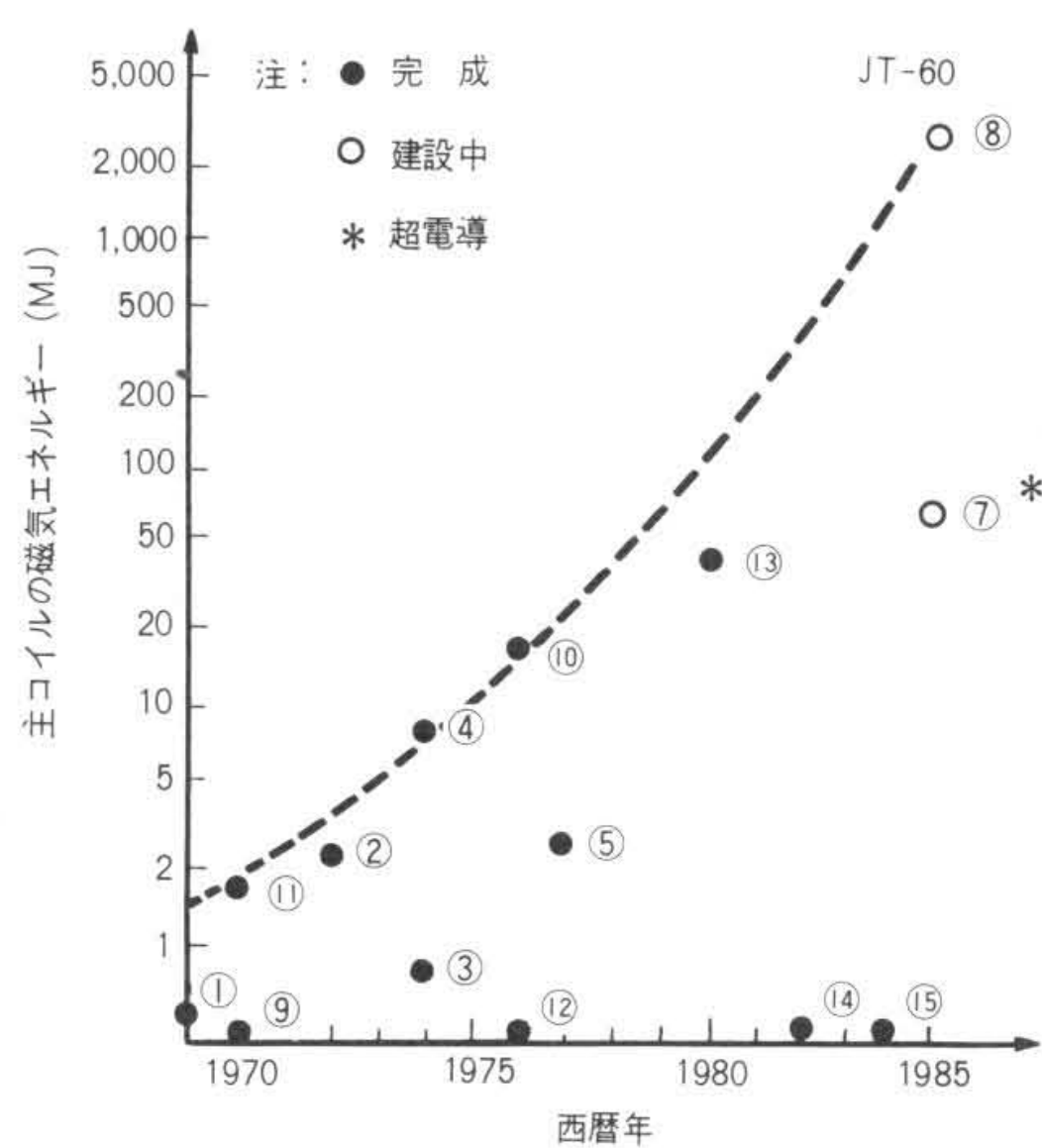
TFTR, ECのJET及びソ連のT-15と並んで世界の4大トカマクの一つであり、共に臨界プラズマ条件*の達成を目指して激しい国際レースを演じている。これらは、ほぼ同時期(1987年ごろ)に臨界プラズマ条件を達成すると期待されている。日立製作所は、昭和48年ごろの計画段階から参画して、本体、全系制御設備、プラズマ加熱装置などの主要機器のほかに、JT-60の製作に関連した業務の円滑な推進を目的とした「総合調整業務」を受注しており、いよいよ1985年春に予定されるプラズマ点火を目指して、現地作業は最終段階にある。図3に、据付作業の最終段階にあるJT-60本体の状況を示す。

2.2 ヘリオトロンE(ヘリオトロン方式)⁶⁾

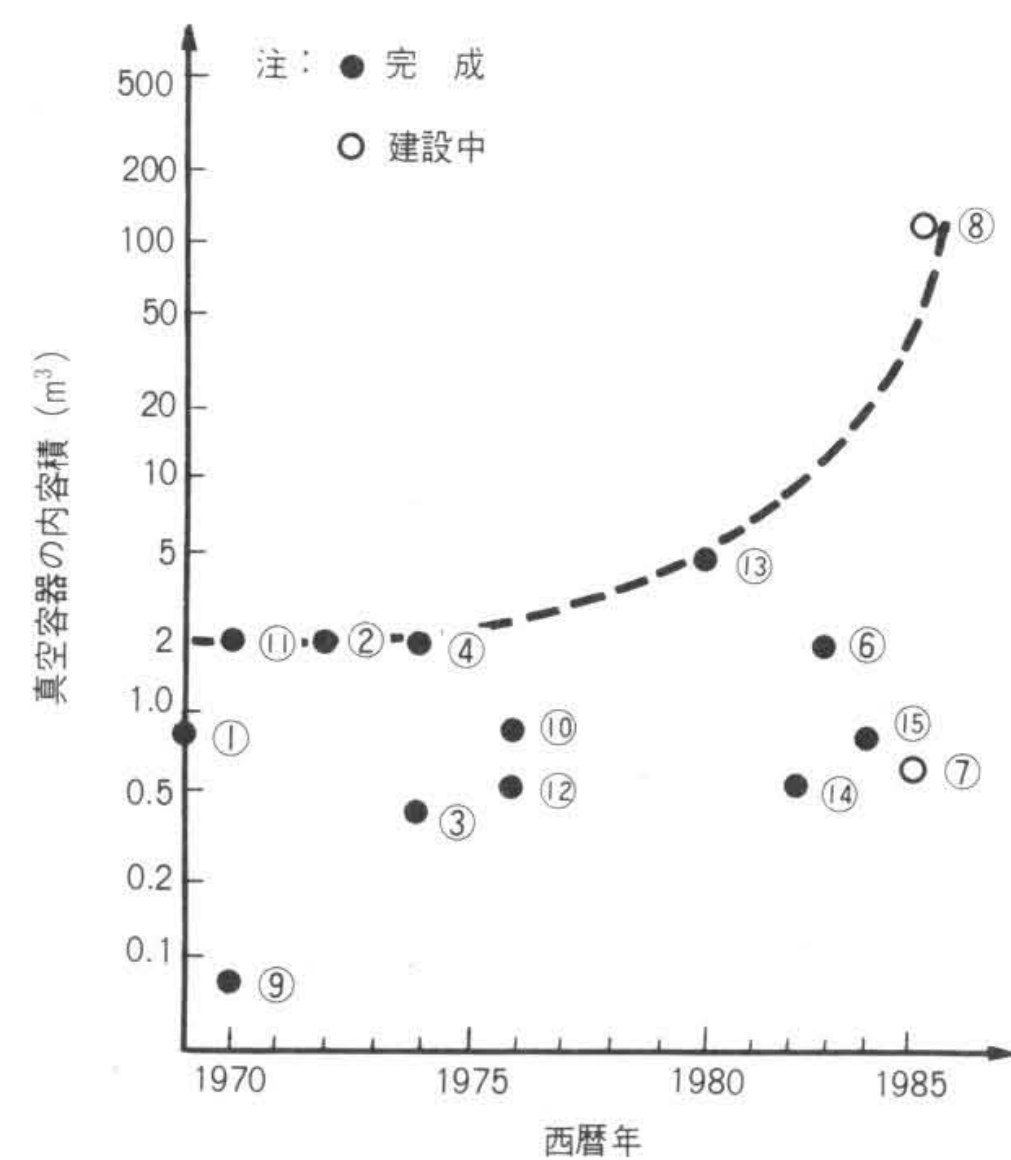
ヘリオトロンEの技術開発の概要については先に報告¹⁾したが、その後京都大学での一連の実験により、予想を上回る閉じ込め性能が確認され、研究が著しく進展した⁷⁾。装置技術面でも、1ターン絶縁カット部に新たに開発した非円形特殊ベローズを追加することによる真空容器の全金属壁化、実験の効率化を図るためのプラズマ電流制御システムの開発、NC(数値制御)加工技術を駆使した高性能ICRF(イオンサイクロト

※) 高過プラズマを発生するのに必要な加熱入力と、そのプラズマ中での核融合反応により発生する出力が等しくなる条件を、「臨界プラズマ条件」という。

* 日立製作所原子力事業部 理学博士 ** 日立製作所核融合推進本部



(a) 主磁場コイルの磁気エネルギーの推移



(b) 真空容器の内容積の推移

番号	区分	装置の名称	納入先	型式	建設年 (西暦)
①	ト カ マ ク	JFT-1	日本原子力研究所	内部導体(ヘキサポール)型	1969
②		JFT-2	"	トカマク型	1972
③		JFT-2a	"	非円形断面トカマク型 (ダイバータ付)	1974
④		JFT-2増力	"	トカマク型	"
⑤		JFT-2a増力	"	非円形断面トカマク型 (ダイバータ付)	1977
⑥		JIPP T-IIU	名古屋大学プラズマ研究所	トカマク型	1983
⑦		TRIAM-1M	九州大学応用力学研究所	非円形断面超電導トカマク型	製作中
⑧		JT-60	日本原子力研究所	トカマク型	"
⑨	ステ ラ レー タ	JIPP T-I	名古屋大学プラズマ研究所	ステラレータ型	1970
⑩		JIPP T-II	"	ステラレータ・トカマク型(ハイブリッド)	1976
⑪	ヘリ オ ト ロ ン	ヘリオトロンD	京都大学ヘリオトロン核融合 研究センター	ヘリオトロン型	1970
⑫		ヘリオトロンDM	"	"	1976
⑬		ヘリオトロンE	"	"	1980
⑭	バン ビ ー ト ー ラ ス	NBT-1M	名古屋大学プラズマ研究所	バンビートーラス型	1982
⑮	RFP	REPUTE-I	東京大学工学部	逆転磁場ピンチトーラス型	1984

図2 核融合装置の規模の推移 最近、日立製作所が納入した主な核融合装置を示す。1970年から15年の間に、主コイルの磁気エネルギーは約1,000倍に、また真空容器の内容積は約50倍にそれぞれ増大している。

ロン共鳴加熱)用アンテナの開発などがある。原理的に定常運転が可能なたためトカマクの有力な代替概念の一つとして、今後の成果が注目されている。

2.3 TRIAM-1M(強磁場超電導トカマク型核融合装置)⁸⁾

TRIAM-1Mは九州大学応用力学研究所の実験装置である。我が国で初めて超電導トロイダル磁場コイルを用い、第二段加熱として乱流加熱法を採用するなどの特長をもつ。本体を1978年に受注し、1985年の完成を目指して製作は順調に進んでいる。

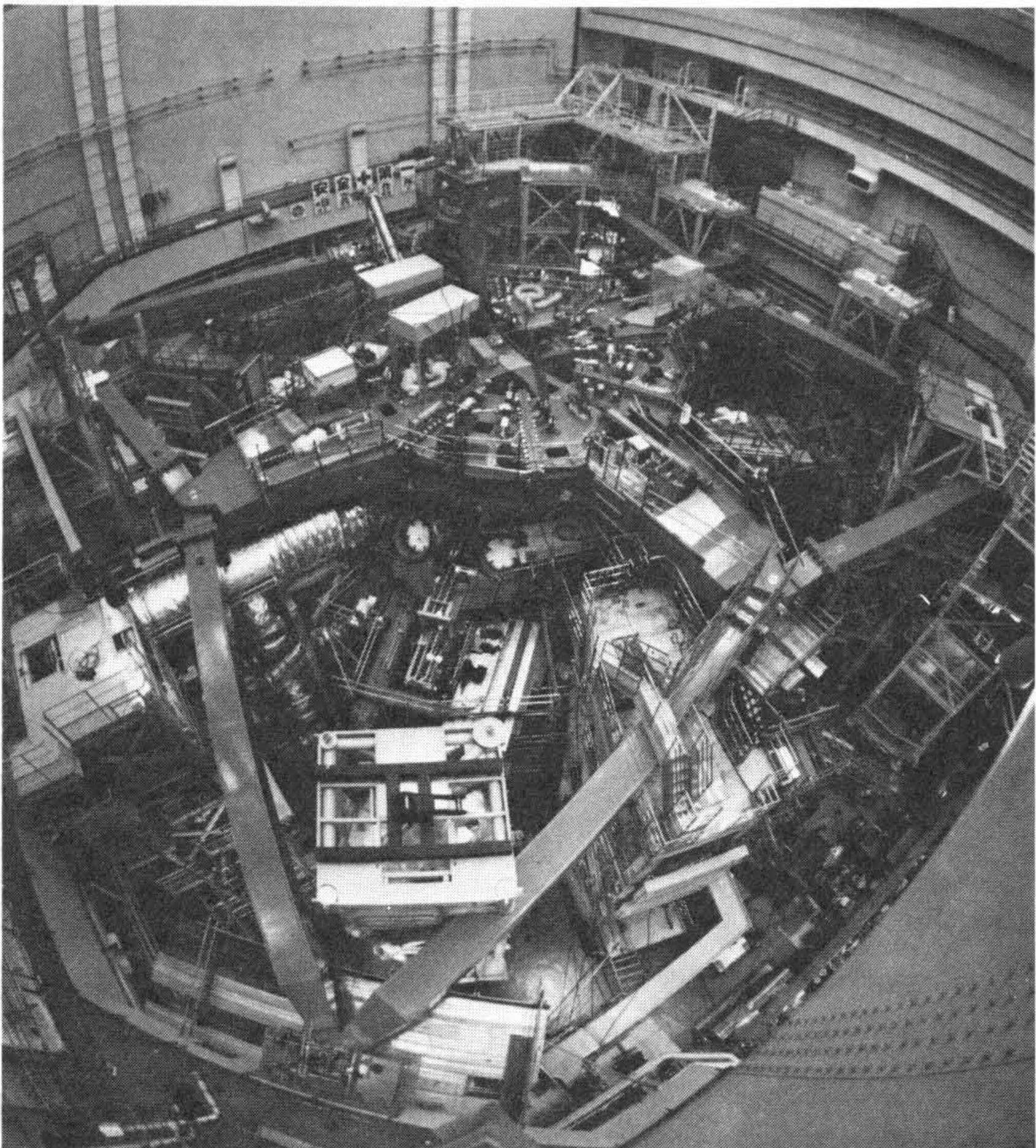


図3 据付作業の最終段階にあるJT-60本体 昭和58年2月に据付を開始したJT-60本体は、8月末現在各種コイルの耐電圧試験を完了した。これとは別に各種の総合機能試験が並行して実施されている。

2.4 JIPP T-IIU(トカマク型プラズマ実験装置)⁹⁾

名古屋大学プラズマ研究所のJIPP T-II(トカマク・ステラレータ ハイブリッド トーラス装置)を、R計画準備研究の一環として、トカマク専用装置に改造・増力したものである。1983年に運転を開始した。

2.5 REPUTE-I(逆転磁場ピンチトーラス装置)¹⁰⁾

東京大学に納入した我が国最大の逆転磁場ピンチトーラス装置である。プラズマの閉じ込め原理はトカマクと似ているが、トロイダル磁場をプラズマ断面内の周辺部と中心部とで逆転させることにより、磁力線のシア(ねじれ)を増大させて閉じ込め性能を上げることをねらっている。全システムを1984年春に納入した。ジュール加熱だけで自己点火状態を実現できる可能性があること、閉じ込めに必要な外部磁場が小さくて済むことなど、コンパクトで経済性の良い核融合炉を実現できる可能性があり¹¹⁾、今後の実験成果が待たれる。

3 核融合炉研究開発の動向

JT-60の次期装置として、日本原子力研究所では、核融合実験炉“FER”(Fusion Experimental Reactor)の設計・研究を進めている。また、IAEA(国際原子力機関)のもとで、INTOR(International Tokamak Reactor)の国際共同設計も続いている。米国では、次期トカマク装置TFCX(Tokamak Fusion Core Experiment)ないしBCX(Burning Core Experiment)が、ECではNET(Next European Torus)が、ソ連ではOTR(Experimental Power Tokamak Reactor)など各国で独自の設計研究に着手している。

日立製作所は、JT-60ほか数多くの核融合装置製作実績や、超電導技術、プラズマ加熱技術などの先端技術、原子力発電プラント、回転電機、ロボット、コンピュータなど総合電機メーカーの技術を駆使して、FER及びINTORの概念設計に参画している¹²⁾。

最近の成果として、高周波駆動方式による定常炉の設計研究がある。これは高い電流駆動効率をもつCAW(Compressional Alfvén Wave)によりプラズマ電流を生成・駆動¹³⁾して、変流器コイルやベローズを省略して本体構造を単純化し、総体的にコンパクトにした設計である。トカマク型の実用化を目指すうえで今後の進展が期待される。

また、ヘリオトロン実験炉へのステップとして、ヘリオトロンEの最近の実験成果を踏まえて、ヘリオトロンESの設計研究を進めている⁶⁾。

4 要素技術の開発

核融合炉の実用化には、工学の広い分野にわたる高度な要素技術が要求される。日立製作所での最近の要素技術開発の一端を以下に紹介する。

4.1 炉心構造物

110kW 大出力電子ビーム溶接や金属ガasketシールなど、JT-60⁵⁾、ヘリオトロンEで開発された真空容器製作技術は、今後の大型装置開発に活用できる。

核融合炉のブランケット構成につき、トリチウムの増殖比の観点から検討を加えたほか、高伝熱性SiCを含む複合第一壁の製作と耐久試験を進めている¹⁴⁾。

一方、プラズマと第一壁との相互作用につき検討するとともに、各種材料のイオンビーム照射試験を進めている。また、ダイバータ形状及び運転パラメータの最適化による熱負荷条件の緩和法を、プラズマシミュレーション解析を中心に検討し、次期装置に対する提案をしている¹⁵⁾。

4.2 磁場コイル

JT-60 用トロイダル磁場コイルの製作に当たっては、10～30万tfの電磁力に関する解析技術や、大容量高周波ろう付け、自動超音波探傷などの最新の技術が投入された⁵⁾。

次期装置以降の大規模装置では、超電導技術は不可欠である。日立製作所では、化合物系線材を用いた高磁界マグネットの実用化、強制冷却や超流動ヘリウム冷却などの新冷却法の開発などを推進中である。

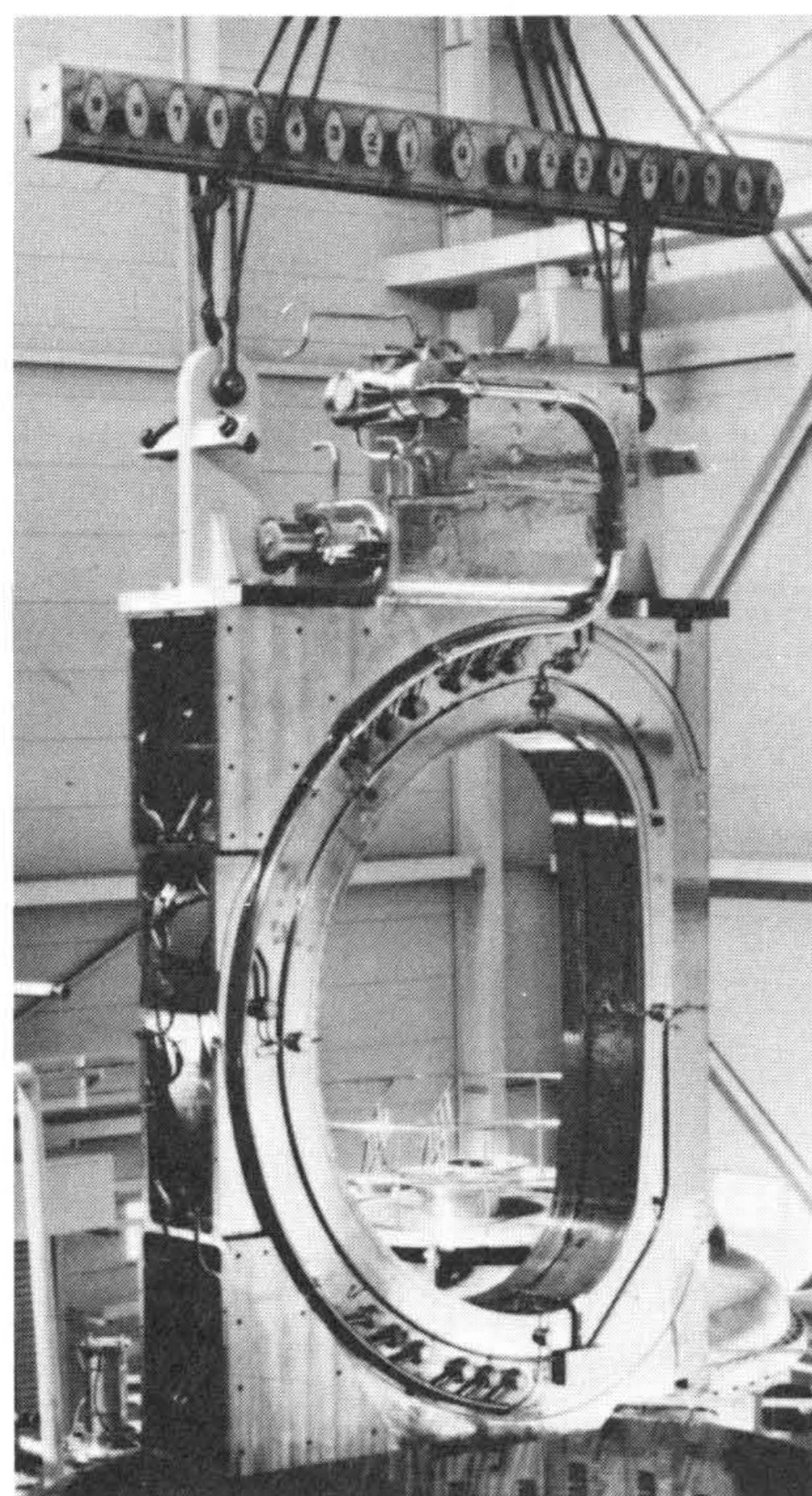


図4 完成したLCTコイル 国際エネルギー機関の超電導コイル国際協力プロジェクト大型コイル事業(LCT)で組合せ試験が行なわれる6個のコイルのうちの一つである。写真は日本原子力研究所提供による。

超電導での最近の特筆すべき成果として、15T級(NbTi)₃Snの極細多心線の開発を挙げることができる¹⁶⁾。また主な製作実績としては、日本原子力研究所の指導を得て製作・納入したLCTコイル(NbTi)、TMC-Iコイル(Nb₃Sn)がある。図4に、完成したLCTコイルの外観を示す。日立製作所での超電導技術の進歩は、日本原子力研究所の指導に負うところが多い。

超電導技術を支える重要な技術に、ヘリウム液化冷凍技術がある。1968年に、国内で初めて膨脹タービン式大形ヘリウム液化冷凍装置の開発に成功した実績の上に、現在トランスファチューブ、自動制御装置などを含めたシステム技術の開発を進めている¹⁷⁾。

4.3 プラズマの加熱

プラズマの第二段加熱法の代表的なものに、NBI(中性粒子入射)加熱法とRF(高周波)加熱法がある。

NBI加熱装置については、京都大学のヘリオトロンE用や、日本原子力研究所のJT-60原型ユニットのうち排気系を製作し納入した。後者では日本原子力研究所での総合試験で100keV、70A、10sの世界記録が達成されている¹⁸⁾。これらの成果を基にJT-60用NBI加熱装置の主要部をなす排気系全14基を現在製作中である。これは、プラズマに中性水素ビーム20MWを入射する機能をもち、クライオポンプ用で2,400Wの冷凍能力をもつ我が国最大のヘリウム冷凍機が含まれている。

また、GTO(ゲートターンオフ)サイリスタを用いたイオン源用加速電源、100万l/s級大容量クライオポンプ、イオン源用磁気シールドなどの新技術が開発されている¹⁹⁾。

RF加熱技術は、最近目覚ましい進歩を遂げつつある技術分野である。高周波は、目的に応じて1MHz～200GHzの周波数が用いられる¹³⁾。日立製作所の着手は早く、1962年に50kW、14MHz CWのICRF装置を、IBIC(ミラー型核融合実験装置)用に製作した。最近の納入実績は、JIPP T-IIU用1.5MW、ICRH装置、ヘリオトロンE用ICRFアンテナ、東北大学納め10kW ICRH装置などがある。

ECRH(電子サイクロトロン共鳴加熱)技術に関しては、HT-1(日立トカマク)に200kW、28GHz ジャイロトロンを適用してシステムをまとめ、プラズマ加熱実験を開始した。

4.4 電源・制御・計測

1979年に電源シミュレータを設置し、核融合装置用電源システムの最適化及びプラズマの計測・制御の研究を行ない¹⁾。EMTP(Electromagnetic Transient Program)などのデジタルシミュレーションプログラムを活用して、システム解析を継続的に実施している。これらの成果は、JT-60本体制御設備⁵⁾及び加熱用発電設備²⁰⁾に生かされている。

次期装置には、超電導ハイブリッドコイルシステムが適用されると予想されるので、大規模回路過渡解析用プログラムを用いて、システムの最適化や制御方式の検討を進めている²¹⁾。

プラズマフィードバック制御の分野では、JIPP T-II、JFT-2などの制御設備を納入したが、これらの実績は、JT-60 全系制御設備に反映されている²²⁾。

プラズマ計測及びデータ処理技術は、核融合研究に不可欠な要素技術である。このため、HT-1を対象としたプラズマ計測システム、データ処理システム及びこれらに基づいた大型核融合装置用実時間データ収集処理システムを開発した²³⁾。

5 核融合開発と国際協力

1980年ごろから顕著になった傾向の一つに、日立製作所の工場や研究所を訪れる海外からの核融合関係者が増えたことが挙げられる。特に、核融合の分野で著名有力者の来訪が目

立った（例えば、プリンストン大学プラズマ物理研究所のGottlieb所長、オクリッジ国立研究所のPostma所長、Rosenthal同副所長など）。このことは、海外関係者の関心が日本の産業界に強く注がれるようになったことを示しており、一企業が4半世紀にわたって種々の型式の核融合装置を製作・納入している例が他にないと評価されている。

技術者・科学者の相互訪問のほかに、具体的な国際協力の増加がその成果とともに目立ってきている。日本原子力研究所がGA Technology社のトカマク装置Doublet-IIIに、1979年から研究チームを派遣し、日米協力研究で β 値（プラズマの圧力/磁場の圧力）4.6%の世界記録を達成するなど優れた業績を挙げているが、日立製作所は最初からこのチームに研究員を派遣し続けている。また、LCTは、米国のオクリッジ国立研究所に、米国の3社、欧州の2社と日本からそれぞれ設計・製作の異なる6個の超電導コイルをもち寄り組み合わせで共同実験を行ない、その成果を参加各国が共有するIEA（国際エネルギー機関）の国際協力プロジェクトであるが、日本の超電導コイルが1982年に一番乗りしている。また、日、米、欧、ソによる核融合炉の共同設計INTORへの参画や、1983年からのユーリッヒ研究所のトカマク装置TEXTORによるプラズマと第一壁の相互作用研究（IEA国際協力）への研究者派遣などがある。その他プリンストン大学、マックスプランク研究所、カラム研究所などにも長期留学を送ってきた。これらは、かつて我が国から先進国に留学したところとは異なり、技術者や研究者は対等な立場であるいは主要な役目を担う形で参画している。

世界各国の核融合関連の年間予算をみると、我が国とECがほぼ同程度、米国がその2倍程度であるが、最近では各国共予算面での制約が厳しくなっている。次期装置の建設費は臨界プラズマ試験装置よりも更に増大するので、各国が個別に建設することは困難との見通しもあり、国際協力による研究効率の向上、リスクの分散、開発のスピードアップなどが今後ますます要望されるようになるであろう。

日立製作所が現在の核融合界で国際的評価を得るようになったのは、実際に装置を設計し、製作・建設した経験の蓄積に負うところが大きい。国際協力プロジェクトに参画するに当たって重要なことは、我が国の産業界が自らの手で設計・製作し我が国に装置を建設することによって、先端技術での我が国の優位性を維持できることである。

我が国が独自の計画をもった上で国際協力に積極的に参画する、という国の長期的で確固たる方針を切望する。

6 結 言

日立製作所での核融合の最近の技術進歩の概要について述べた。その主なものは次のとおりである。

- (1) これまで我が国の主要な核融合装置の大部分を製作納入している。装置の規模は最近急速に巨大化し、例えば、主コイルの磁気エネルギーはこの15年間に約1,000倍になっている。
- (2) JT-60は1985年4月の完成を目指して、現地で総合機能試験を実施中である。
- (3) 核融合炉の研究開発としては、日本原子力研究所の核融合実験炉FERに、高周波駆動方式を全面的に採用した定常炉を提案して概念設計を行なった。また、京都大学のヘリオトロンES、名古屋大学のR装置の概念設計なども行なった。
- (4) 要素技術開発の主な成果として、トリチウム増殖比を最大にするブランケット構成の検討、15T級(NbTi)₃Sn超電導

マグネットの開発、JT-60NBI加熱装置原型ユニット排気系の完成と実機製作への適用、1.5MW ICRF装置の納入、CAWを主体とした高周波電力によるプラズマ電流駆動の定量的評価、大規模回路過渡解析用プログラムによる電源・制御システム解析技術の進歩、などを挙げることができる。

これらの成果を達成できたのも、各研究所や大学の諸先生の御指導、ごべんたつのたまものであり、核融合装置の設計・製作実績を蓄積できたことを深く感謝する。

核融合開発で工学的技術研究の重要性は増大しており、産業界の役割がますます重要となりつつある。しかし、実用化まで長期にわたる開発であり、国家的レベルでの計画の連続性が必要である³⁾。今後共、全社のあらゆる機能を發揮して核融合装置の設計・製作技術の向上に取り組み、核融合の発展に対する産業界としての責任を果たしたいと考えており、引き続き関係方面各位の御支援をお願いする次第である。

参考文献

- 1) 特集・核融合：日立評論，62，5（昭55-5）
- 2) S. Terasawa：The Industry's Role and Experience in Fusion, Fusion Technology 1982 SOFT Vol. 1, 75（1982）
- 3) National Research Council：Future Engineering Needs of Magnetic Fusion, 1982, NRC（1982）
- 4) 日本原子力産業会議：核融合技術調査団報告書（昭59-2）
- 5) 太田，古山，外：臨界プラズマ試験装置“JT-60”本体の建設，日立評論，66，9，645～650（昭59-9）
- 6) 宇尾，加沢，外：ヘリオトロンの開発状況と将来の展望，日立評論，66，9，641～644（昭59-9）
- 7) K. Uo, et al.：Heating Experiment on Heliotron Eplasma. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research（Baltimore, 1982）Paper CN-41/L-3
- 8) 伊藤，鈴木，外：強磁場超電導トカマク型核融合装置“TRIAM-1M”の開発，日立評論，66，9，671～674（昭59-9）
- 9) 石塚，外：トカマク型プラズマ実験装置“JIPP T-II U”の完成，日立評論，66，9，663～666（昭59-9）
- 10) 宮本，伊藤，外：逆転磁場ピンチトラス装置“REPUTE-I”の完成，日立評論，66，9，667～670（昭59-9）
- 11) 宮本：炉心技術の研究開発—磁気閉じ込め系，核融合研究開発の現状と将来展望，日本原子力情報センター（昭53）
- 12) 東稔，笠原，外：核融合炉の研究，日立評論，66，9，635～640（昭59-9）
- 13) 加沢，外：核融合用高周波技術の開発，日立評論，66，9，679～684（昭59-9）
- 14) 関，真木，外：核融合炉ブランケット構成のトリチウム増殖比への影響，日立評論，66，9，689～692（昭59-9）
- 15) 藤沢，斎藤，外：不純物低減に有効な低温高密度ダイバータプラズマの解析，日立評論，66，9，675～678（昭59-9）
- 16) 斎藤，外：核融合用超電導マグネットの技術進歩，日立評論，66，9，701～706（昭59-9）
- 17) 栗田，外：ヘリウム冷凍装置の新技术開発，日立評論，66，9，707～710（昭59-9）
- 18) 白形，岡，外：臨界プラズマ試験装置“JT-60”中性粒子入射加熱装置排気系の製作，日立評論，66，9，655～658（昭59-9）
- 19) 柴田，上出，外：最近のプラズマ加熱中性粒子入射の新技术，日立評論，66，9，685～688（昭59-9）
- 20) 嶋田，丹羽，外：臨界プラズマ試験装置“JT-60”加熱用発電設備の製作，日立評論，66，9，659～662（昭59-9）
- 21) 嶋田，鈴木，外：核融合電源・制御システム解析技術，日立評論，66，9，697～700（昭59-9）
- 22) 近藤，村井，外：臨界プラズマ試験装置“JT-60”全系制御設備の製作，日立評論，66，9，651～654（昭59-9）
- 23) 西，外：核融合プラズマの計測・データ処理技術，日立評論，66，9，693～696（昭59-9）