

# 核融合の最近の動向と日立の役割

## Current Status of Fusion Reactor and Hitachi's Role

核融合研究開発は、最近急速に進展し、特に、トカマク型核融合実験装置では、数年以内に臨界プラズマを実現する段階にあり、更に、同型による将来のエネルギー取出しを目指した核融合炉の検討も始まっている。他方、優れた特徴をもつ非トカマク型などの研究開発も並行して精力的に進められ、目覚ましい成果を挙げている。

日立製作所は、核融合実験装置の技術開発を始めて既に約20年を経過し、我が国の核融合研究開発の進展とともに歩んできたが、この間に、我が国の代表的核融合実験装置の大部分を納入してきた。これらの経験を通して、核融合の最近の動向を概観するとともに、日立の役割について述べる。

岸野龍夫\* *Tatsuo Kishino*  
 笠原達雄\*\* *Tatsuo Kasahara*  
 加沢義彰\*\* *Yoshiaki Kazawa*  
 庄山悦彦\*\* *Etsuhiko Syôyama*

### 1 緒言

核融合が、人類に役立つエネルギー資源となり得ることを科学的に実証するため、種々の核融合制御方式が研究開発されている。これらは、21世紀初頭の実用化を目指して、政府関係の多数の機関により、長期的展望のもとに推進されている。現在は、臨界プラズマの状態を物理的に実証する最終段階にあり、並行して、将来のエネルギー取出しを目指して、核融合炉の工学的検討も始まっている。

本論文では、日立製作所に関連深いものを中心に、核融合研究の最近の動向を概観するとともに、その中での日立の主要な役割について紹介する。

### 2 核融合研究の動向

核融合反応の制御方式には多くの種類があり、各々特徴をもっている。これらの分類については、幾つかの解説がなされているが、表1に原理と形状からみた分類例を示す。制御核融合は、磁場閉込めと慣性閉込めの2方式に大別される。

磁場閉込め方式は、高温、高密度のプラズマを磁力線で形成される磁気容器内に閉じ込める方式であり、開放端系（オープン系）と閉端系（トーラス系）とに分けられる。開放端系は、磁気容器を形成する磁力線が閉じず端が開いており、ミラー、カスプなどがある。閉端系は、磁力線で形成される磁気容器がドーナツ状に閉じた形になっている。この閉端系には、軸対称系のトカマク、非軸対称系のステラレータ、ヘリオトロン、立体磁気軸トーラスなどがある。また、ミラーをドーナツ状に連結したバンピートーラスなどがある。

慣性閉込めは、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、ごく短時間の慣性でプラズマを閉じ込める方式である。

以下、現在多くの研究が推進されている磁場閉込め方式のそれぞれの特徴について簡単に触れる。

#### (1) 開放端系

磁場閉込め方式のうち、開放端系は工学的構造が簡単であるため、初期の段階では、この開放端系の装置が多くつくられた。しかし、開放端系には端からの粒子損失の問題があり、研究の主流は閉端系に移った。最近になって、複合ミラーや開放磁気端に高周波電場を印加して、プラズマを封じ込める方式などの研究が進み、注目されている。

#### (2) 閉端系

軸対称系のトカマク型トーラス装置が、現在、実用的な核融合炉への最短距離にあることは、世界各国共通の認識となっている。非軸対称系のステラレータ、ヘリオトロン、立体磁気軸トーラスなどは、トカマクにない特徴をもっており、その特徴の確認と、それを活用した実用上の利点を求めて、多くの研究が進められている。

#### (3) バンピートーラスなど

バンピートーラスは、開放端系のミラーをドーナツ状に連結した構造となっており、ミラーの問題点である端からの粒子損失を回避できる可能性をもつ装置として注目されている。

### 3 核融合実験装置の動向

図1は、世界の代表的な閉端系トーラス装置の規模の推移を表わしたものである。同図から分かるように、核融合実験装置の規模は年々大形化している。現在、トカマクでは臨界プラズマの実現を目指した大型装置として、我が国では“JT-60”（臨界プラズマ試験装置）、米国では“TFTR”（Tokamak Fusion Test Reactor）、EC（ヨーロッパ共同体）では“JET”（Joint European Torus）などを建設中である。

#### (1) 軸対称系（トカマク）

“JT-60”は、臨界プラズマの状態を物理的に実証する最終段階の実験装置として、日本原子力研究所で建設中である。日立製作所は、“JT-60”の本体などを受注して既に2年を経過し、現在、そのすべての構成要素について製作が進行中である<sup>1)</sup>。規模、性能共に、従来と比べて大きく飛躍した装置となっている。

“JFT-2”は、日本原子力研究所で昭和47年4月に完成し、その後の核融合研究開発の基盤の一つとなった装置である。トロイダル磁場コイル増力による実験の終了後、最新の研究を行なうための改造がなされた<sup>2)</sup>。日立製作所は、当初より、本体、電源、制御系などを納入したが<sup>3)</sup>、昭和53年には、本体周り、電源、制御系の改造を受注した。特に、プラズマ制御性能の向上を図る、プラズマ位置制御装置の新設では最新の技術が採用され、所期の成果が得られた<sup>4)</sup>。

九州大学の“TRIAM-I”（強磁場トカマク型核融合装置）は小形ではあるが、現在運転中の装置では、国内唯一の強磁場（4 T）となっている。また、第2段加熱として乱流加熱ができるようになっており、高いプラズマ温度を得ることに成

\* 日立製作所 JT-60 推進本部 \*\* 日立製作所日立工場

表1 制御核融合の分類例 原理と形状からみた分類例を示す。

分類例	原理図	実験装置例
開放端系(オーブン系)	ミラー 磁力線 コイル	筑波大学 プラズマ研究センター 「ガンマ6」
磁場閉込め	軸対称系 トカマク コイル プラズマ 電流	日本原子力研究所 「JT-60」
	非軸対称系 ステラレータ ヘリカルコイル コイル プラズマ	名古屋大学 プラズマ研究所 「JIPPT-II」
	軸対称系 ヘリオトロン ヘリカルコイル プラズマ	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E」
	非軸対称系 立体磁気軸 プラズマ用真空容器 磁場トロイダルコイル A-A	東北大学 アスペレータ 「NP-3」
開放端系(オーブン系)	バンピートーラス コイル 磁力線 プラズマ	名古屋大学 プラズマ研究所 「NBT-I」
慣性閉込め	レーザー、電子ビーム レーザー ペレット(D,T) 注: D(二重水素) T(三重水素)	大阪大学 レーザー 核融合研究センター 「裂光V号」

功している。核融合炉の小形化の研究として、今後の成果が期待される。日立製作所は、本装置の本体を昭和53年に納入した<sup>5)</sup>。

(2) 非軸対称系

近年、トカマクは大きな進展をみているが、将来の実用炉を考えると、原理的に間欠運転であることが問題として挙げられる。これに対して、定常運転が期待されるものとして、ステラレータ、ヘリオトロン、立体磁気軸トーラスなどの非軸対称系トーラス装置の研究が進められている。ステラレー

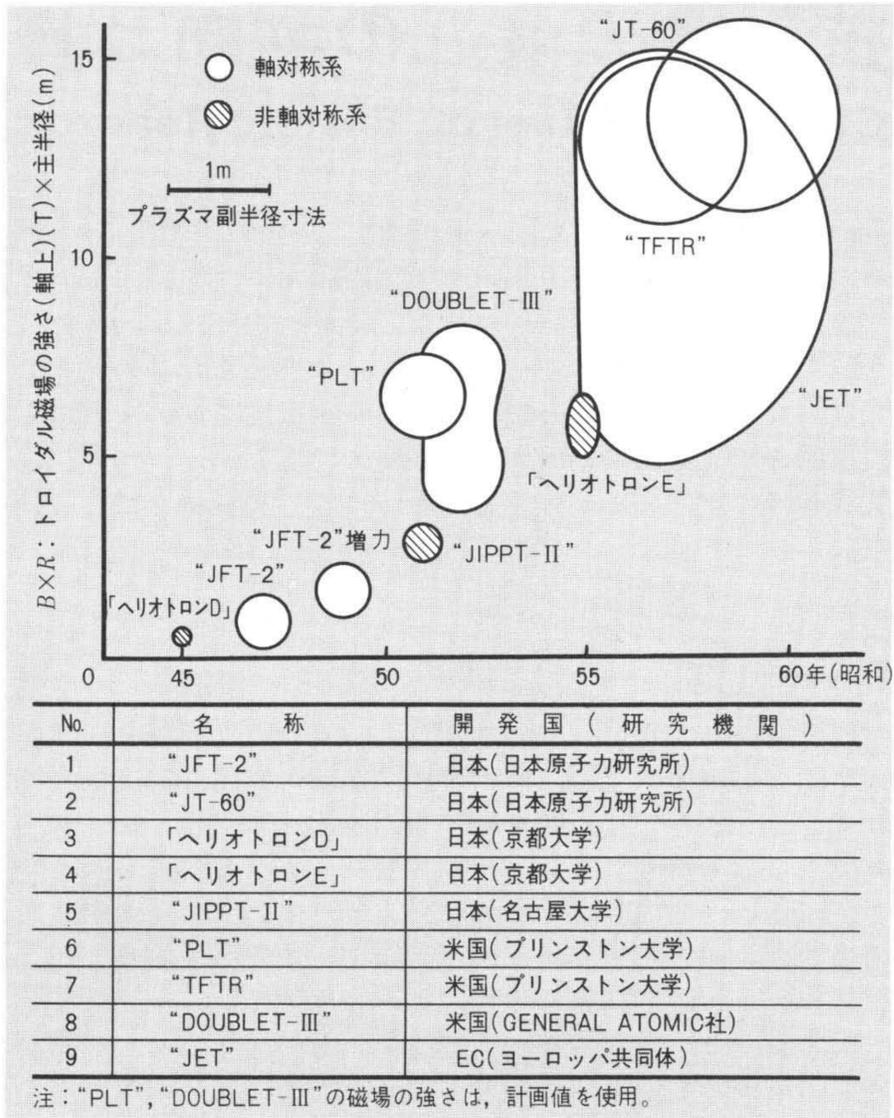


図1 トーラス系核融合実験装置規模の推移 (1)各装置はプラズマ断面形状をもって示す。(2)各装置のプラズマ断面形状の中心点に対して、横軸に年(昭和)、縦軸にB x Rを示す。(3)B x Rはトロイダル磁場の起磁力に比例する数値であり、装置規模の指標の一つである。

タ、ヘリオトロンなどは、トーラス容器にらせん状に巻き付くヘリカルコイルをもっており、これに流れる電流がトカマクの場合のプラズマ電流を置換するもので、このため、定常運転の可能性をもつことが大きな特徴である。立体磁気軸トーラスは、トーラス容器をらせん状にして磁気容器を形成し、同様の特徴を期待している。以下にこれらの代表的な装置を紹介する。

(a) ステラレータ

本装置は、非軸対称系として早くから研究が進められていたものである。「JIPPT-II」は、名古屋大学プラズマ研究所に「JIPP I<sup>6)</sup>」に引き続いて建設されたステラレータ型トーラス装置であるが、トカマクとしても運転できるようになっている。これに採用されたプラズマ位置制御は、世界で初めての高速のデジタルフィードバック制御であり、プラズマ電流及び放電時間の改善に成功するなどの、目覚ましい成果を得ている。日立製作所は、本装置の本体、制御系などを昭和51年に納入した<sup>7)</sup>。

(b) ヘリオトロン

ステラレータでは、隣り合うヘリカルコイルの電流の向きが交互に逆になるのに対し、ヘリオトロンでは、電流の向きが同じである。したがって、ヘリオトロンではヘリカルコイル電流によるトーラス方向磁場成分が発生するため、ステラレータでは不可欠であるトロイダル磁場コイルが不要となり、ヘリカルコイルだけで閉込め磁気容器を作る。

「ヘリオトロンE」は、「ヘリオトロンD」、「ヘリオトロンDM」に引き続いて京都大学に建設されたヘリオトロン型トーラス装置であり、非軸対称系トーラス装置として世界最大級の装置である。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の高速電動発電設備など、多くの新技術が採用された。日立製作所は本装置の本体、電源、制御系、中性粒子入射加熱装置など、装置のほとんどを昭和55年に納入し、近く運転に入る予定である<sup>8)</sup>。

#### (c) 立体磁気軸トラス

アスペレータ“NP-3”は、東北大学に建設された立体磁気軸トラス装置である。らせん状の真空容器をもつ、世界でも極めてユニークな構造のトラス装置で、新しい試みとしてその成果が注目される。日立製作所は、本装置の本体、コンデンサ電源などを、昭和52年に納入した<sup>9)</sup>。

以上、磁場閉込め方式について概説したが、表2<sup>10)</sup>に、開放端系及び閉端系核融合実験装置に関する日立の納入実績を示す。これには、我が国の代表的核融合実験装置の大部分を含んでいることが分かる。

### 4 核融合炉の研究の動向

臨界プラズマ試験装置の次の世代の装置は、プラズマの研究から進んで、更に、核融合炉の炉心工学を研究するもので、主要各国でそれぞれ検討されている。我が国では、日本原子力研究所で「炉心工学試験装置“PETF”(Plasma Engineering Test Facility)」<sup>2)</sup>が検討された。一方、国際協力による装置“INTOR”(International Tokamak Reactor)構想も検討され、我が国からは、日本原子力研究所により“INTOR-J”<sup>11)</sup>が提案されている。

日立製作所は、前述したように多くの核融合実験装置の製作により、核融合の研究開発に貢献してきたが、核融合炉開発に関する次期装置についても、設計、研究を通じて研究開

発に参画している<sup>12)</sup>。目下のところ炉本体の検討が主であるが、将来の核融合炉発電プラントは、高速増殖炉プラント、高温ガス炉プラントなどの炉本体部を核融合炉本体部に置き換えることにより、発電プラントとしての概念をおおよそ把握できる。日立製作所は原子力プラント総合メーカーの経験を生かしてシステム全般について貢献したいと考えている。

### 5 要素技術の開発

核融合の研究開発は、膨大な工学技術の基盤の上に成り立つビッグプロジェクトであり、複雑多岐にわたる要素技術の開発が急がれる。ここでは、日立製作所が進めている要素技術の一端について紹介する。

#### (1) 真空容器と排気装置

プラズマの温度、密度、閉込め時間などの性能は、容器の到達真空度と真空の質(不純物)に大きく依存する。容器の大形化に伴い真空境界が膨大になるので、高性能、高真空のシール構造が重要課題の一つである。また、プラズマの高温化に伴い、プラズマとプラズマに直接面する第一壁との間の種類の相互作用による不純物の放出を抑制する方法も重要な課題である。これらの諸課題に対し、理論と実験の両面から追究している。

溶接構造では、電子ビーム溶接法の開発適用により溶接部の品質が著しく向上し、真空に対する信頼性が大幅に改善された<sup>1),8)</sup>。シール構造では、銀めっきした金属中空Oリングの開発により、 $10^{-10}$ Torr台の超高真空が達成された<sup>7)</sup>。

不純物放出の抑制法として、(1)材料の選定、(2)表面処理の検討、(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などは重要な課題である。これらは、各種材料につ

表2 核融合実験装置製作実績(日立製作所) 我が国の代表的核融合実験装置の大部分を含んでいる。

系	建設年 (昭和)	納入先	装置名	型式	開放端系		閉端系		中心 磁場 (kG)
					軸長 (m)	真空容器小直径 (コイル小直径) (m)	主半径 (m)	副半径 (m)	
開放 端 系	35	大阪大学	“DCX”	直線型	0.36×2	— (0.26)	—	—	4
	37	日立製作所 中央研究所	“IBIC”	”	中央 0.32×4 ミラー0.41×2	0.35 (0.58 0.32)	—	—	15 30
	39	名古屋大学 プラズマ研究所	“TPD-1”	”	0.7-2.0	— (0.2)	—	—	9
	40	”	“BSG”	”	4	0.5 (1.0)	—	—	2
	41	九州大学 応用力学研究所	ソレノイドコイル	”	1-2	— (0.065)	—	—	10
	43	名古屋大学 プラズマ研究所	“TPD-2”	”	2	0.1 (0.2)	—	—	カスプ
	44	京都大学	ソレノイドコイル	”	1-2	— (0.2)	—	—	15
閉 端 系	47	日本原子力研究所	“JFT-2”	トカマク型	—	—	0.9	0.25	15
	49	”	“JFT-2a”	非円形断面 トカマク型ダイバータ付	—	—	0.6	0.14×0.10	10
	49	”	“JFT-2”増力	トカマク型	—	—	0.9	0.25	18
	52	”	“JFT-2a”増力	非円形断面 トカマク型ダイバータ付	—	—	0.6	0.14×0.10	20
	53	九州大学 応用力学研究所	“TRIAM-1”	強磁場トカマク型	—	—	0.254	0.040	40
	55	日立製作所 エネルギー研究所	日立トカマク型 非円形プラズマ実験装置	非円形断面トカマク型	—	—	0.35	0.27×0.14	15
	59ごろ (製作中)	日本原子力研究所	“JT-60”	トカマク型	—	—	3	0.95	45
レ ス テ ラ 系	35	名古屋大学 プラズマ研究所	“JIPP I”	ステラレータ型	—	—	0.5	0.07	4
	51	”	“JIPPT-II”	ステラレータ・トカマク型 (ハイブリッド)	—	—	0.91	0.17	30
	35	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D」	ヘリオトロン型	—	—	1.085	短軸 0.10	5
	51	”	「ヘリオトロンDM」	”	—	—	0.45	短軸 0.044	10
	55	”	「ヘリオトロンE」	”	—	—	2.2	長軸 0.3 短軸 0.15	26
磁 立 体 軸	52	東北大学	アスペレータ“NP-3”	立体磁気軸トラス型	—	—	0.8	0.03	3.5

いての試験など広範囲な研究が必要であるが、日立製作所では、関連した各種の実験を行なっている<sup>13)</sup>。

真空排気系としては、従来の油拡散ポンプ系に代わってターボモレキュラポンプ系が使われており<sup>1)</sup>、また、大きな排気速度を必要とする場合は、クライオポンプ系が使用されるので<sup>14)</sup>、関連技術の開発が進められている。

## (2) 磁場コイル

図1から明らかなように、核融合実験装置の磁場コイルは高磁場化、大形化を指向している。“JT-60”では、トロイダル磁場コイルの磁場の強さは4.5T、外径は約6m、全エネルギーは約2.8GJに達している<sup>1)</sup>。“JT-60”の次の装置は、磁場コイルに超電導線を用いると予想されている<sup>12)</sup>日立製作所は、先に世界有数の規模のMHD (Magnetohydrodynamics) 用大形超電導磁石を開発したが<sup>15)</sup>その後、大電流、高磁場超電導線材の開発をはじめとする超電導の研究を行なっている<sup>16)</sup>

磁場コイルの超電導化とあいまって、大容量のヘリウム液化システムの開発は重要な課題である。日立製作所は、早くからこれの国産化を進め、開発に成功している<sup>17)</sup>

## (3) 電磁解析

複雑な構造の真空容器、ライナ、架台などの金属性構造体に誘起されるうず電流は、(1) 不整磁場の発生、(2) プラズマ制御への影響、(3) 強大な電磁力の発生、(4) ジュール損失による効率の低下などの問題を発生するので、装置設計の段階でうず電流を精度よく算定することは重要である。このため、電流ベクトルポテンシャルを用いた過渡うず電流計算法を、日本原子力研究所の指導を得て開発し、金属構造物を模擬したモデルによる確認を行なった<sup>18)</sup>。

また、複雑なプラズマ挙動と装置間の電磁相互作用は、電磁力の評価はもとより、コイル電源容量の評価、制御技術の開発のため厳密に解析する必要がある。このため、プラズマの立上げ過程、ガス注入時などの領域での相互作用を解析するプラズマ制御動特性シミュレーションプログラムを開発した<sup>19)</sup>

## (4) プラズマの加熱

プラズマの加熱方法としての、NBI (中性粒子入射加熱装置) は、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。

日立製作所は、日本原子力研究所“JT-60”用NBI原型ユニットの詳細設計と各種委託研究、京都大学「ヘリオトロンE」用NBI並びに筑波大学“GAMMA-6”用NBIイオン源、及び電源を受注し、この分野の研究開発を進めている<sup>14)</sup>。

## (5) 電源制御システム

電源制御システムとしては、プラズマに平行な磁場を発生するトロイダル磁場コイル電源、プラズマ電流を立上げ、プラズマの位置形状を制御するための各種のポロイダル磁場コイル電源、プラズマを追加加熱するための第2段加熱装置用の電源などがある。これらは、核融合実験装置の大形化に伴い著しく大容量となり、また、パルス状運転、高速・高精度の制御などが要求される<sup>4), 7), 8)</sup>ので、電源制御システムを総合的に検討することは重要な課題である。このため、電源システムシミュレーションプログラム、プラズマ位置・形状制御シミュレーションプログラム、各種の計算、制御方式の検討用電源制御シミュレータなどを開発した<sup>20)</sup>。

## (6) プラズマ計測

プラズマ計測に関する研究は広範囲にわたっており、政府関係機関が中心となつて行なわれている。日立製作所は、これらの中心機関や海外の核融合研究機関に研究者を派遣することによって研究を続けてきた。今回、社内に小形の核融合実験

装置を設置し、社内でも研究が行なえるようになった<sup>21)</sup>。

以上、日立が進めている要素技術について述べたが、紙面の都合により本特集号の各論文で取り上げた項目だけについて触れた。

## 6 結 言

核融合の最近の動向について、日立製作所に関連深いものを中心に概説した。核融合研究開発は、トカマク型の実験装置による臨界プラズマを数年以内に実現する段階にあり、更に、将来のエネルギー取出しを目指して、核融合炉の検討も始まっている。他方、優れた特徴をもつ他の核融合反応制御方式に関する種々の研究が精力的に進められ、目覚ましい成果を収めている。

日立製作所が、核融合実験装置の製作を始めて既に約20年が経過したが、この間の核融合の進展は著しいものがあり、今後共いっそうの発展が期待される。我が国の核融合エネルギー自主開発路線に沿い、産業界としての責任を果たすため、これからも最善の努力を傾注したいと考える。

## 参考文献

- 1) 齊藤, 外: 臨界プラズマ試験装置“JT-60”の設計・製作, 日立評論, 62, 349~354 (昭55-5)
- 2) 日本原子力研究所: 核融合研究開発の現状, 第5回核融合研究成果報告会資料 (1979)
- 3) Y. Kazawa et al.: Medium Beta Torus “JFT-2” for Nuclear Fusion Research, Hitachi Review, 22, 236 (1973)
- 4) 藤沢, 外: トカマク型核融合装置“JFT-2”プラズマ制御システムの開発, 日立評論, 62, 339~342 (昭55-5)
- 5) 伊藤, 外: 強磁場トカマク型核融合装置“TRIAM-1”の完成, 日立評論, 62, 331~334 (昭55-5)
- 6) 井村, 外: ステラレータ形核融合実験装置“JIPP-T-I”, 日立評論, 56, 965~970 (昭49-10)
- 7) 伊藤, 外: ステラレータ・トカマク型実験装置“JIPPT-II”, 日立評論, 62, 325~330 (昭55-5)
- 8) 宇尾, 外: 核融合装置「ヘリオトロンE」の技術開発, 日立評論, 62, 343~348 (昭55-5)
- 9) 長尾, 外: 立体磁気軸トラス「アスペレータNP-3」の建設, 日立評論, 62, 335~338 (昭55-5)
- 10) 百々, 外: 核融合技術の展望, 日立評論, 56, 957~963 (昭49-10)
- 11) Japan Atomic Energy Research Institute, Japanese Contribution to International Tokamak Reactor (1979), JAERI-M 8503, 8510, 8511, 8512, 8513, 8514, 8518, 8621, 8622, 8623, 8624, 8625, 8710, 8711
- 12) 笠原, 外: 核融合炉の研究, 日立評論, 62, 319~324 (昭55-5)
- 13) 後藤, 外: 核融合炉第一壁とプラズマの相互作用, 日立評論, 62, 371~374 (昭55-5)
- 14) 磯部, 外: プラズマ加熱用中性粒子入射装置の技術開発, 日立評論, 62, 375~380 (昭55-5)
- 15) 齊藤, 外: 大形超電導マグネットの開発, 日立評論, 56, 971~976 (昭49-10)
- 16) 木村, 外: 超電導マグネットの核融合への技術開発, 日立評論, 62, 381~386 (昭55-5)
- 17) 蜂谷, 外: 核融合用ヘリウム液化冷凍装置の開発, 日立評論, 62, 387~390 (昭55-5)
- 18) 高橋, 外: 核融合装置におけるうず電流現象の解析, 日立評論, 62, 367~370 (昭55-5)
- 19) 小林: プラズマ挙動と装置に及ぼす電磁相互作用の分析, 日立評論, 62, 359~362 (昭55-5)
- 20) 藪野, 外: 核融合電源制御システムの解析とシミュレーション, 日立評論, 62, 363~366 (昭55-5)
- 21) 西, 外: 日立トカマク型非円形プラズマ実験装置, 日立評論, 62, 355~358 (昭55-5)