

核融合炉の研究

Research of Controlled Thermonuclear Fusion Reactor

臨界プラズマ試験装置“JT-60”の次の段階である日本原子力研究所の核融合実験炉“FER”の概念設計に関し、トカマク型核融合炉の設計研究を行なった。この装置は、自己点火という目標と、将来の炉との相関性、信頼性など具体的な条件を満たすことが求められる。本研究は、プラズマ電流を変流器で駆動する通常のパルス型から高周波電流で駆動する定常型へと進展し、炉工学上の問題を主体に検討した。この結果、(1)不純物制御としてダブルヌルダイバータを採用し、遠隔操作で保持が可能、(2)CAW(圧縮アルペン波)高周波によりプラズマ電流を駆動し定常運転を行なう、(3)高いトリチウム増殖率が期待でき、(4)定常炉の利点を取り入れて構造を単純化する、などの特徴をもち、次期装置の諸条件との適合が図られた炉構造概念を得た。

東稔達三* *Tatsuzo Tone*
 藤沢 登* *Noboru Fujisawa*
 飯田浩正* *Hiromasa Iida*
 笠原達雄** *Tatsuo Kasahara*
 加沢義彰*** *Yoshiaki Kazawa*
 佐藤 弘*** *Hiroshi Satô*
 伊東新一*** *Shin'ichi Itô*
 小林朋文**** *Tomofumi Kobayashi*
 溝口忠憲***** *Tadanori Mizoguchi*

1 緒 言

完成近い我が国の臨界プラズマ試験装置“JT-60”をはじめとする世界の幾つかの大型装置による研究で、臨界プラズマの実現は間近に期待されるに至った。臨界プラズマ試験装置の次の世代は「次期装置」と通称され、更に自己点火の段階を目指して、その開発が世界的に検討されている。次期装置の検討は我が国では日本原子力研究所により行なわれており、自己点火条件の達成を目指す実験炉(FER: Fusion Experimental Reactor)の検討が国際協同作業の“INTOR”と並んで進められている^{1)~4)}。日立製作所はこの次期装置の検討に設計研究を通じて参加しており、その一端は先の特集号⁵⁾で述べたが、本論文ではその後の研究の進展について概説する。

2 開発の動向

磁気閉じ込め核融合には各種の方式があるが、引き続きトカマクの実用化が早期に実現すると期待されている。図1にトカマク方式に代表されるトーラス形状の核融合炉システム

の概念図を示す。核融合炉の設計は現在まで多数の発表があるが、これを次期装置の技術という点から見ると、(1)将来の核融合炉との技術的相関性、(2)実現可能性、(3)信頼性、(4)保守容易性、(5)安全性、(6)経済性(低い建設費)など多くの要求を満足することが求められる。最近の核融合研究の進歩は著しいが、次期装置の技術の展望につながる若干の事柄を求めると、次のようなことが考えられる。第一に、大型装置の建設が進行したことである。特に“JT-60”は磁気リミタコイルを備え、磁力線によりプラズマ中の不純物を誘導制御するもので、世界の他の大型装置に例がない。不純物の制御が重要な課題である次期装置に対し、その成果は大きな影響を与えるものと注目される。第二に、中性粒子入射及び高周波の両者によるプラズマ加熱技術の進歩が挙げられる。特に、高周波による加熱及び電流駆動の研究の進展は著しい。第三に、超電導技術の進歩があり国際協力による日本原子力研究所のLCTコイルが完成した¹⁾。またNb₃Snによる高磁界マグネッ

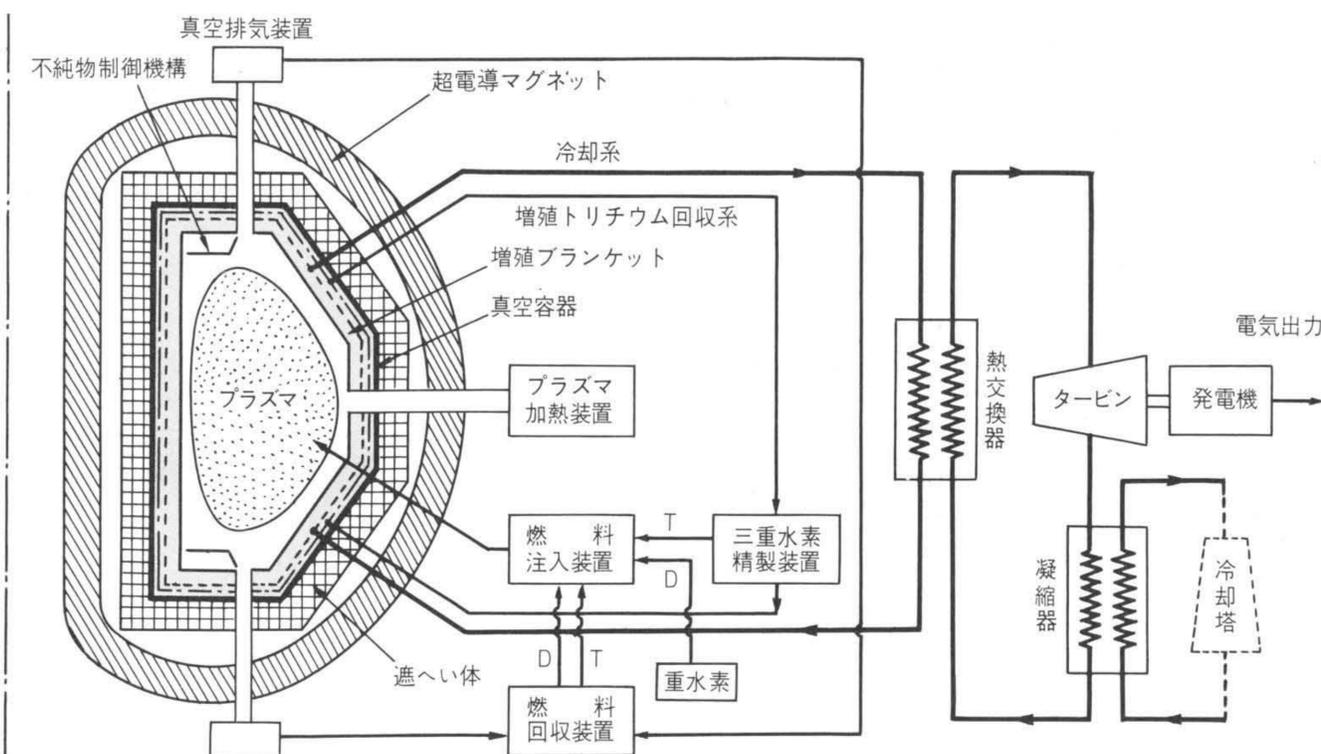


図1 核融合炉システム概念図
 トカマク型核融合炉の炉心及び個別のシステム(燃料系、冷却系、発電系など)から全体のシステムが構成されている。

* 日本原子力研究所大型トカマク開発部 工学博士 ** 日立製作所日立工場 工学博士 *** 日立製作所日立工場
 **** 日立製作所エネルギー研究所 工学博士 ***** 日立エンジニアリング株式会社電機工場 工学博士

トの開発が行なわれている。その他、現在の先端技術を支える基盤としてロボットやセラミック材料の進歩は著しく、核融合炉の開発への大きな寄与が期待される。

このような装置関係の技術の進歩と並んで、核融合炉の研究は行なわれている。1981年には東京で、IAEAの3rd Technical Committee and Workshop on Fusion Reactor Design and Technologyが開催され、多くの炉の設計に関する発表討論がなされた。特にこの会議で、トカマクについて次期装置(Near Term Tokamak)のセッションが設けられたことは、次期装置が現実的課題であることを物語っている。

3 トカマク型核融合炉の構造概念

3.1 パルス型(変流器駆動方式)

日立製作所が日本原子力研究所の仕様に基づいて昭和55年から行なったトカマク核融合実験炉の代表的設計の諸元を表1に、立体図を図2に示す。本設計のプラズマ電流の生成と駆動は通常的方式、すなわち変流器コイルの磁束変化による

表1 パルス型トカマク核融合実験炉主要諸元 プラズマ電流変流器駆動型(パルス型)の主要諸元を示す。燃焼時間は100秒である。

項 目	諸 元
燃 焼 時 間	100s
プ ラ ズ マ 主 半 径	5.5m
プ ラ ズ マ 小 半 径	1.1m
長 円 度	1.5
軸 上 磁 界	5.3T
プ ラ ズ マ 電 流	5.7MA
平均 プラズマ 温度	10keV
平均 プラズマ 密度	$1.36 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$
核 融 合 出 力	440MW

電磁誘導によっている。

本設計の大きな意義は、(1)不純物制御としてダブルヌルダイバータ方式を採る、(2)炉内構造物の保守として、現実性があると考えられる外部接近引出し(External Access)方式を採る、(3)従来の炉概念から構造寸法を小型とし、かつ高い遮へい性能を保持する、ような炉構造概念(Reactor Concept)を明らかにしたことである。核融合燃焼の結果生じた α 粒子(通常の燃焼灰に相当する。)及び炉壁からプラズマに混入した原子(以下、合わせて不純物と総称する。)は、放射エネルギー損失と加熱、安定性への悪影響をもたらすので、その効果的除去は非常に重要な課題である。プラズマの境界層(Scrape Off層)に存在するイオン化した不純物を、交差する磁力線(セパトリティクス)に沿ってプラズマとは分離されたダイバータプレートに誘導し中性化することにより除去する方式を、「磁気ダイバータ方式」と呼んでいる。ダイバータプレートを上下2箇所にて設ける方式を「ダブルヌルダイバータ方式」、片側だけ設ける方式を「シングルヌルダイバータ方式」と呼ぶ。ダブルヌルダイバータはプラズマの形状が対称で、また境界層の幅も小さくなり、炉心空間の有効利用が図れる利点をもっているが、限られた炉の構造寸法で上下に設けられたダイバータを、保守のため遠隔操作で炉外に引き出すことの可能性が問題となっていた。

本設計は、(1)ダイバータプレートをモジュールに分割して引き出す方法を考案し⁶⁾、図3に示すようにモデル実験で確認し、(2)遮へいを炉心遮へいと生体遮へいに分離し、後者をTFC(トロイダル磁場コイル)の間に挿入することにより、遮へい性能を保ちつつ小型なダブルヌルダイバータ方式の炉構造の実現性を明らかにした⁷⁾。このように、「JFT-2a」、「JT-60」と引き続けている日本原子力研究所のダイバータ方式不純物制御の研究が、次期装置の設計に適用されている。

上記のトカマク型核融合実験炉は幾多の特長をもっている

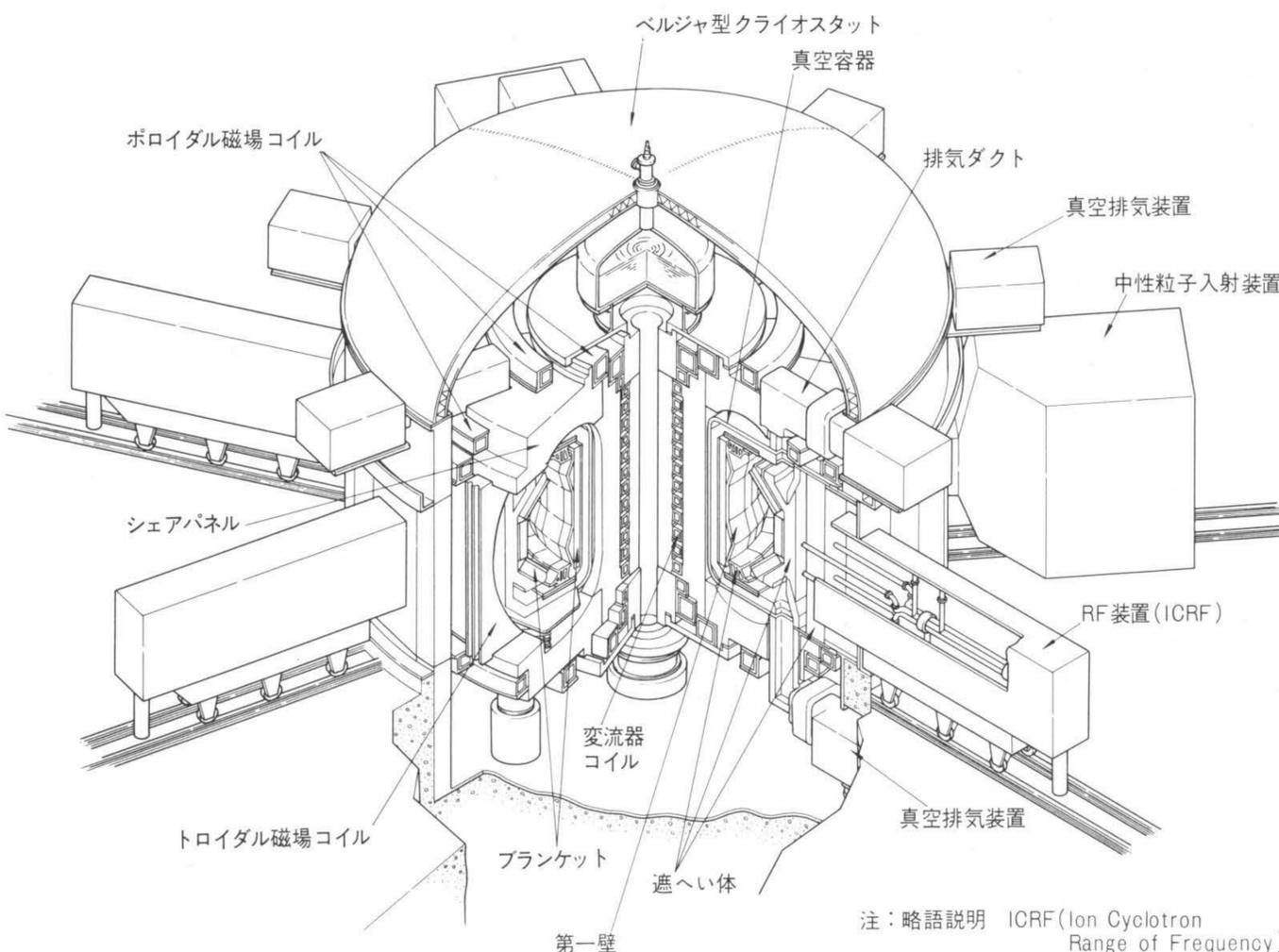


図2 パルス型トカマク核融合実験炉の構造 プラズマ電流生成・駆動用の変流器コイルを備えている。真空容器は炉心遮へい体の外側にある。

注：略語説明 ICRF(Ion Cyclotron Range of Frequency)

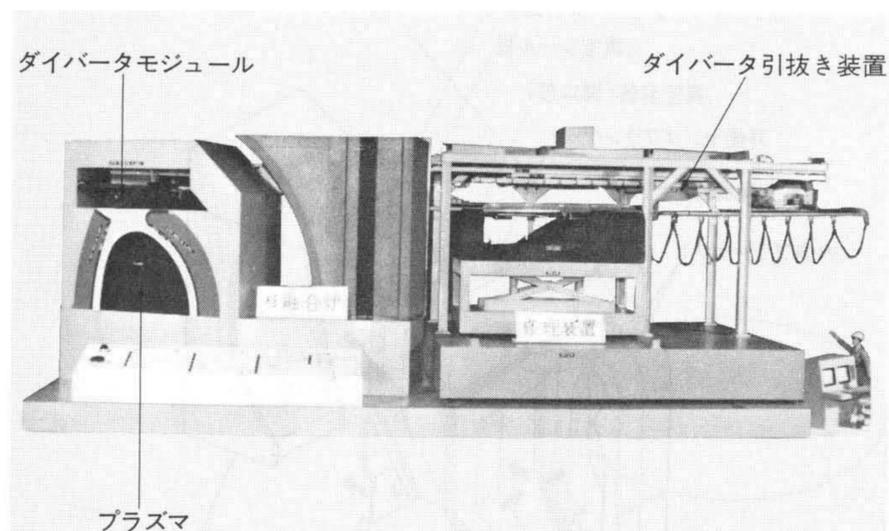


図3 遠隔操作による「ダイバータ」引抜きモデル実験装置 本実験装置は遠隔操作によるダイバータモジュールの引抜き作業の検討をするためのモデル装置である。本装置の左側は核融合炉、右側はダイバータ引抜き装置を含む修理装置である。

が、運転は通常のパルス型の方式である。したがって、変流器コイルの磁束(起磁力)の限界からプラズマ電流の持続時間に限度があり、炉の運転はパルス運転となる。パルス運転の炉は、(1)装置材料の繰返し熱疲労が大きい、(2)電源設備容量が大きい、(3)電気出力を定常化するための蓄熱器を必要とする、などの欠点がある。また、電磁誘導による渦電流の発生を抑止するため、真空容器などのトロイダル構造体のトロイダル方向1ターン電気抵抗を大きくするように、ベローズを挿入するか、絶縁する必要がある、これが核融合炉の構造上の弱点となる。なお上記の設計では、このようにベローズをもつ真空容器を図2に示すように遮へい体の外に置き、信頼性の保持を図った。

3.2 定常型(高周波駆動方式)

トカマクの運転をパルス運転の代わりに準定常運転(長時間パルス運転)、更に定常運転とすることが可能になれば、

パルス運転方式の炉がもつ前述の欠点を除くことができ核融合炉はよりいっそう現実的なものとなる。トカマクの(準)定常運転の方法として、高周波によるプラズマ電流の生成・駆動が期待される。高周波は最初プラズマの加熱に使用されたが、近時、プラズマ電流の生成・駆動方法として注目されてきた。代表的な例としては、PLT(プリンストン大学装置)での実験があり、800MHzのLHRF(低域混成波)によって165 kAのプラズマ電流が3.5秒間駆動された⁸⁾。

トカマクの定常運転の場合、電流の駆動効率 $[J/P]$ (J :プラズマ電流密度、 P :高周波パワー密度)が問題となる。高周波の種類と電流駆動効率の関係の理論的な検討の結果^{9), 14)}によれば、数種の高周波のうちCAW(Compressional Alfvén Wave: 圧縮アルベン波)が高い効率を示す。この点から、CAWは定常型炉の電流駆動に適していると考えられる。

高周波によるプラズマ電流駆動・定常型トカマク核融合炉は、次のような特長をもつことが可能となる。

- (1) プラズマ電流の生成・駆動は高周波(本論文の場合、CAW)によるので、変流器を必要とせず構造が簡単となる。またその結果、電源容量が大幅に低減される。

表2 定常型核融合実験炉主要諸元 プラズマ電流高周波駆動型の主要諸元を示す。燃焼時間は限定されず、連続運転が可能である。

項 目	諸 元
燃 焼 時 間	連 続
プ ラ ズ マ 主 半 径	4.0m
プ ラ ズ マ 小 半 径	1.1m
長 円 度	1.5
軸 上 磁 界	4.5T
プ ラ ズ マ 電 流	6.4MA
平均プラズマ温度	13keV
平均プラズマ密度	$9 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$
核 融 合 出 力	250MW

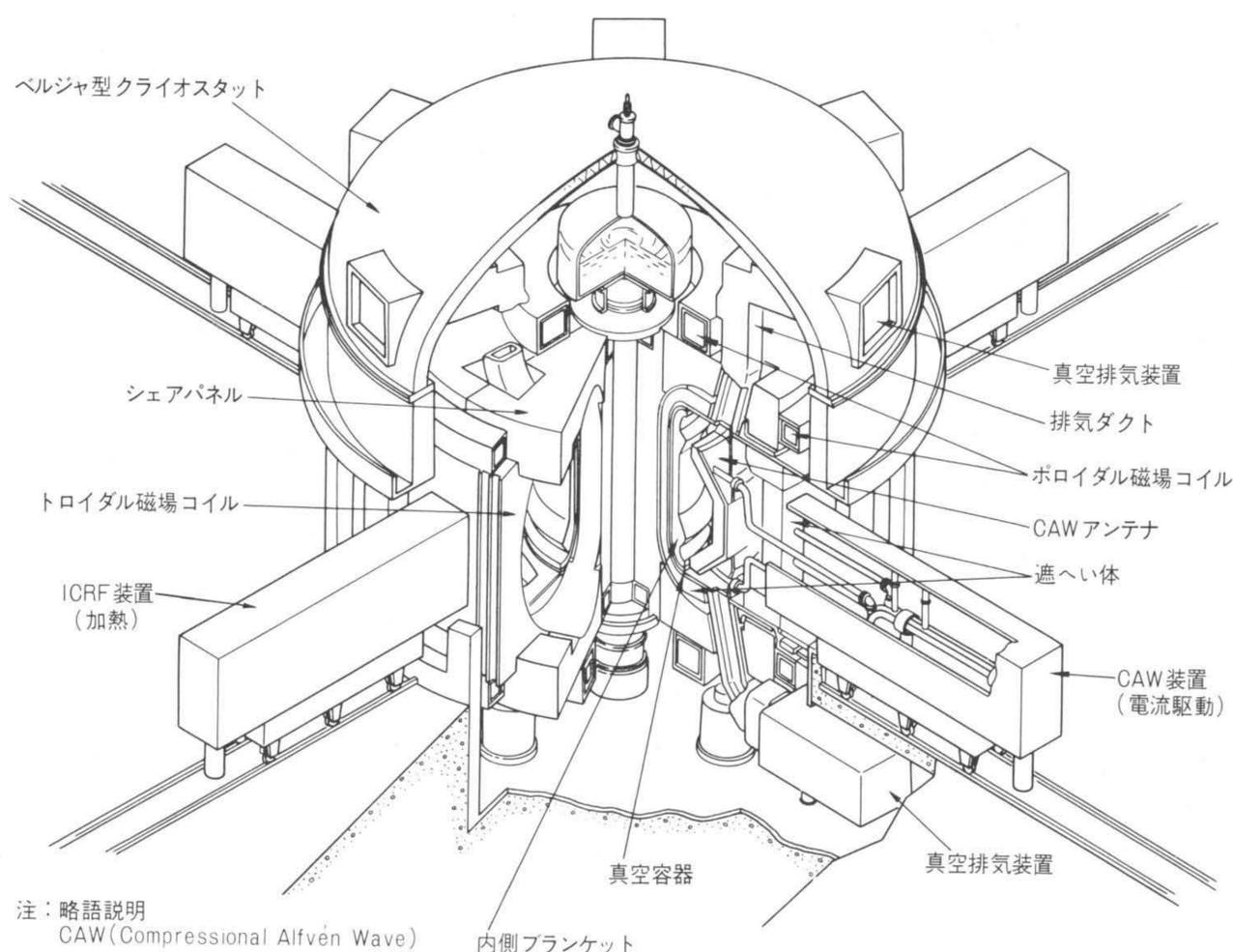


図4 定常型核融合実験炉の構造 高周波によるプラズマ電流駆動方式に基づく定常炉の構造を示す。変流器コイルが必要なくなり、炉心構造が小型化される。

注: 略語説明

CAW(Compressional Alfvén Wave)

(2) 真空容器(Vacuum Boundary Vessel)は、トーラス方向高電気抵抗用のベローズを必要とせず、厚板構造とすることにより信頼性を高めることができる。

(3) 前項に示す真空容器の信頼性の向上により、これを遮へい体の内側に置くことが可能となる。これにより炉心内の保守遠隔操作の取扱い対象はブランケットだけとなり、パルス型に比較して取扱い重量が低減される。

(4) 真空容器を前2項に述べた構造と配位することにより、非円形プラズマ不安定性(Vertical Positional Instability)に対するシェル効果を真空容器にもたせることにより、複雑なシェル構造体を省くことができる。

日立製作所は、日本原子力研究所の仕様に基づいて昭和57年から定常型トカマク核融合実験炉の設計をパルス型と並行して行なった。その代表的設計について諸元を表2に、立体図を図4に、炉構造の概念説明図を図5に、炉心トーラスの分解の立体図を図6に示す。実験炉はその使命と性格から、科学技術上の目標(自己点火条件など)を目指すとともに経済的であることが望まれる。表2とパルス型炉(表1)の比較から分かるように、定常型では変流器コイルを必要としないので、それに応じて大半径の値を小さく選び装置の小型化を図ることが可能である。

4 炉本体構成要素

核融合炉開発上の課題については既に優れた報告¹⁰⁾があり、問題点について記されている。また、本特集号の他の論文^{11)~14)}でも個々の課題について述べているので、ここでは前記定常炉について、その要点を述べる。

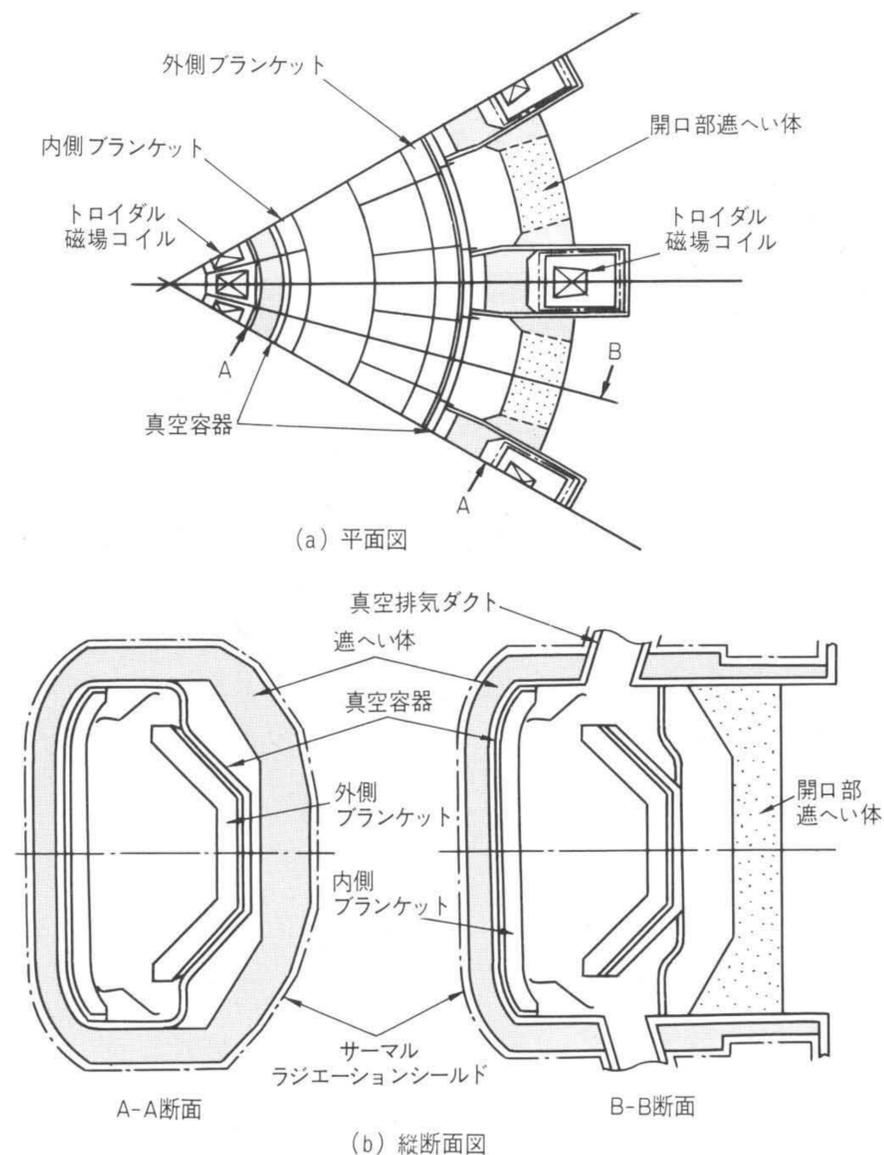


図5 炉心トーラス構造の概念説明図 定常型核融合実験炉の炉心トーラス構造の構成概念を示す。真空容器(Vacuum Boundary Vessel)は遮へい体の内側にある。

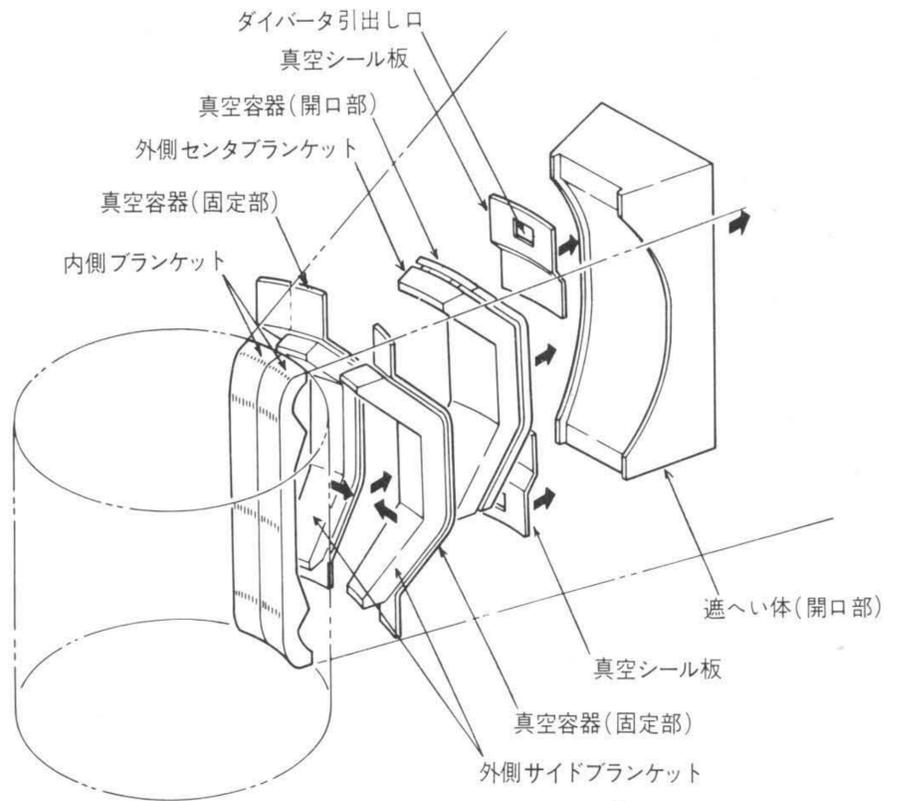


図6 炉心トーラス構造の分解構成 定常型核融合実験炉の炉心トーラス構造の分解構成(1セクタ)は、開口部遮へい体、外側ブランケット(3モジュール構成)、内側ブランケット(2モジュール構成)及びダイバータモジュールから成る。

4.1 プラズマ平衡配位

炉構造の簡単化を目的とし、プラズマ平衡のためのPFC(ポロイダル磁場コイル)の数の減少を検討した。上下各3本でプラズマ電流立上り及び定常時のどちらでも平衡が成り立つことが分かった。図7は定常時でのプラズマの平衡配位を示すものである。

4.2 ダイバータプレート

ダイバータプレートは、磁力線に誘導された不純物及びHeイオンの衝突により熱負荷を集中的に受ける。最近の研究では、ダイバータ室の排気口の面積を調整すると、ダイバータ室内の中性粒子ガスにより入射イオンのエネルギーは減衰し、その結果受熱面材料のスパッタリングによる損耗は大幅に低減することが明らかにされている⁸⁾。ダイバータプレートの受熱面の材質は、タングステン、高熱伝導性セラミック(SiC)

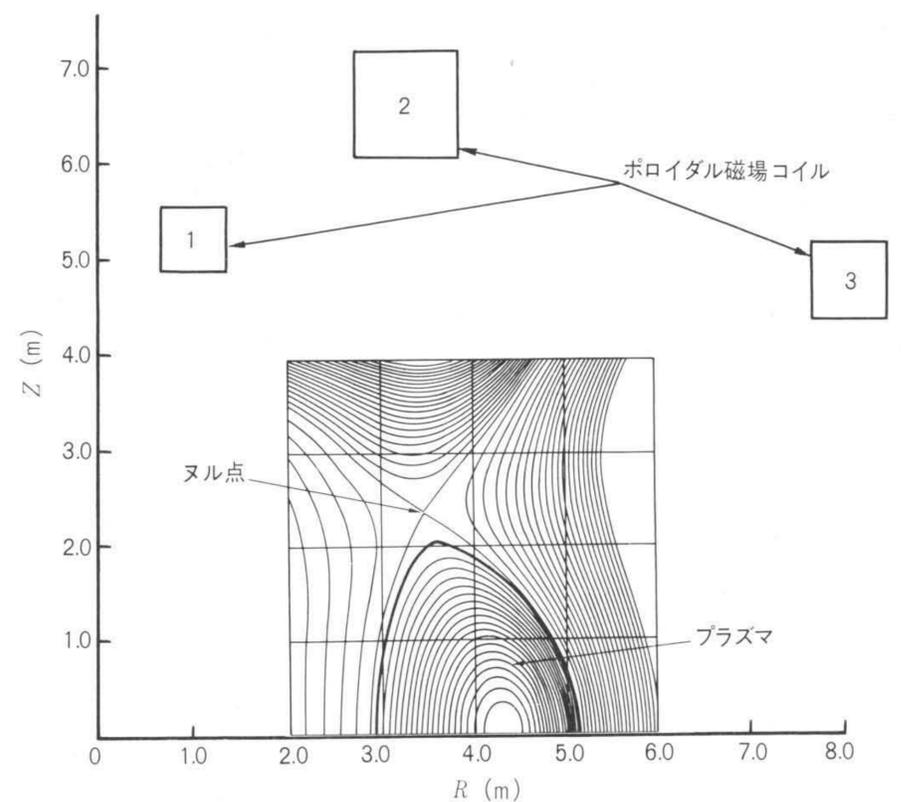


図7 プラズマ平衡配位(定常時) 上側及び下側の各々3個だけのポロイダルコイルにより、ダブルヌルダイバータ方式を可能とするプラズマ平衡配位が実現できることを示している。

などが候補に挙げられる。

4.3 ブランケット

ブランケットは核熱変換(核融合反応により生じた高速中性子エネルギーの熱への変換)とトリチウムの増殖機能(トリチウム増殖を目指す場合)が要求される。

ブランケットのプラズマに面する部分(第一壁)はプラズマ及び中性子の直接作用により厳しい使用条件におかれ、更にプラズマディスラプション時にはプラズマの熱放出によって、大きな局所的熱負荷を受ける。このため、第一壁は熱工学的検討と併せ保守の容易性を考慮する必要があり、ブランケットとの一体型と別置き分離型の2種が考えられる。本定常炉では、ディスラプションの回数が少ないことを考慮して構造の簡単な一体型とした。

トリチウム増殖率が1以上のブランケットの開発はD-T反応核融合炉の開発に欠くことのできないものである。図8は高いトリチウム増殖率を得ることを目的とした二層構造ブランケット¹²⁾の構造図である。トリチウム増殖材にLi₂Oを使用し中性子増倍材にベリリウムを使用している。図9に本ブランケットの増殖率の計算を示す。

4.4 超電導マグネット

磁界用マグネットはすべて超電導¹³⁾でクライオスタット内に置かれる。TFCの冷却は本設計では実績の多い浸せき型(プールボイル冷却)による。表3にTFCの諸元を示す。

PFCは、4.1節で述べたようにTFCの外側に置かれ、上・下3本ずつの円形コイルから成る。その最大のものは直径約16mである。表4にPFCの諸元を示す。

4.5 高周波アンテナ

表5に本定常型炉で使用する3種類の高周波の諸元を示す。このうち波長の長いCAWとICRF(Ion Cyclotron Range of

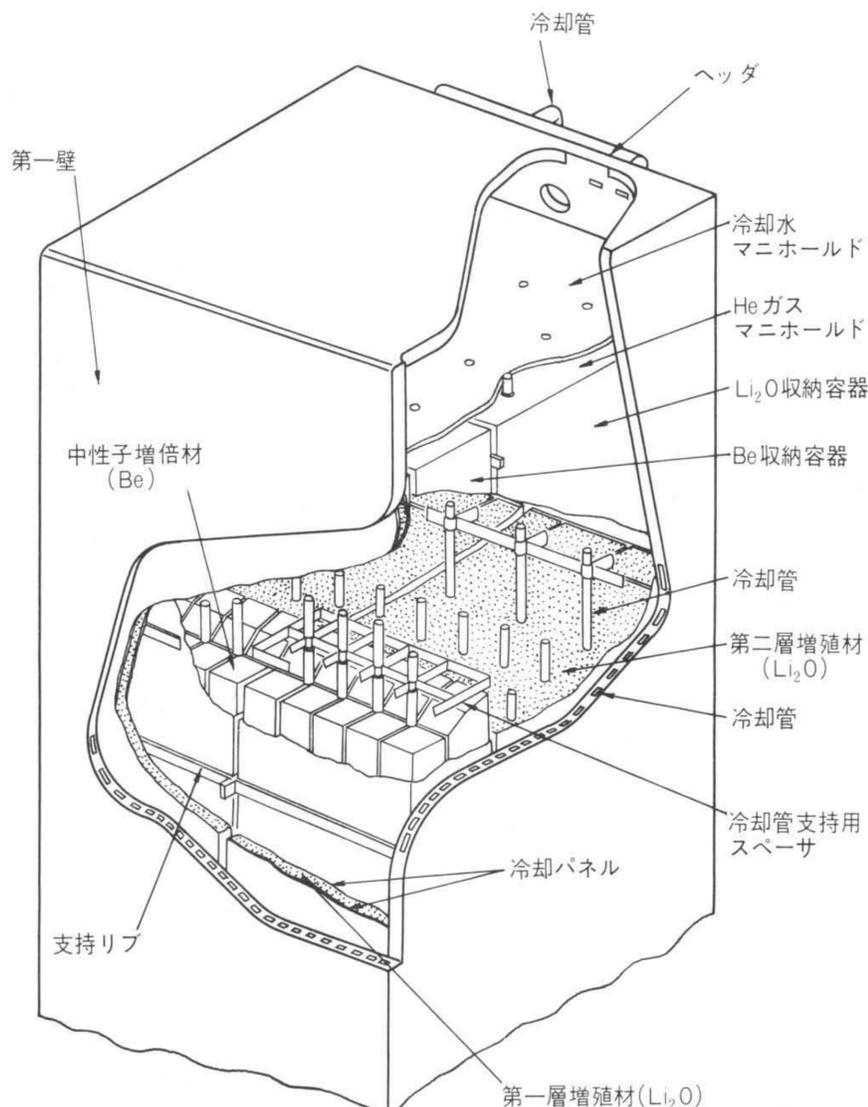


図8 ブランケット構造の概念図 トリチウムの高増殖率を実現するために、中性子増倍材(ベリリウム)の第一壁側に約10mm程度のLi₂Oの第一層を設置する。第二層はその反対側に設ける。

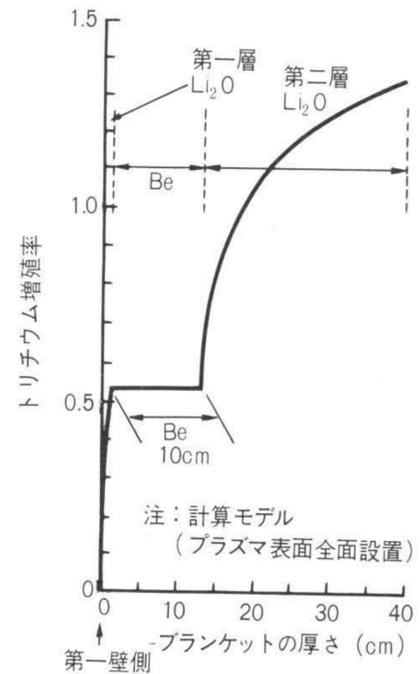


図9 ブランケット増殖率 ブランケットを2層にすることにより、高い増殖率が得られる。特に第一層Li₂Oの寄与が大きい。計算は、プラズマ表面全面設置であるため、RFポートなどによるブランケット除外を考慮すると、実効的なトリチウム増殖率は1.15前後になる。

Frequency)のループアンテナは、プラズマに面して設ける¹⁴⁾ので第一壁と同じ厳しい条件に直面する。ループアンテナの諸元を表6に、またこのような条件で使用されるCAW用ループアンテナの構造を図10に示す。

4.6 遮へい

遮へいについての代表的な条件は、超電導コイルに対して十分な遮へい性能をもっていること、及び運転停止日後炉室内に入ることができるように放射線量が減衰することであり、

表3 トロイダル磁場コイル主要諸元 定常型核融合実験炉のトロイダルコイル主要諸元を示す。導体はNb₃SnとNbTiを磁界によって使い分ける。

項目	諸元
形状	D形
コイル数	12
ポア径	9.0/5.7m
中心磁界	4.5T
最大磁界	12T
蓄積磁気エネルギー	12GJ
導体	Nb ₃ Sn, NbTi

表4 ポロイダル磁場コイル主要諸元 定常型核融合実験炉のポロイダルコイルの配置、断面形状などの主要なパラメータを示す。上側及び下側に設置する合計6個のコイルだけでプラズマの制御が可能である。

コイル No.	コイル配置 (m)		最大アンペアターン (MAT)	断面形状 (mm)	冷却方法
	主半径方向	垂直方向			
1	1.0	5.3	12.0	780×780	強制冷却
2	3.3	6.7	34.0	1,320×1,320	強制冷却
3	8.1	4.8	13.0	820×820	強制冷却

表5 高周波諸元 定常型核融合実験炉の高周波は3種類あり、用途によって使い分ける。

高周波の種類	使用目的	出力 (MW)	周波数 (MHz)	占有ポート数
CAW	電流駆動	20	8	2
ICRF	主加熱	30	69	2
ECRF	予備電離	10	126×10 ³	1

注: 略語説明

ECRF (Electron Cyclotron Range of Frequency)

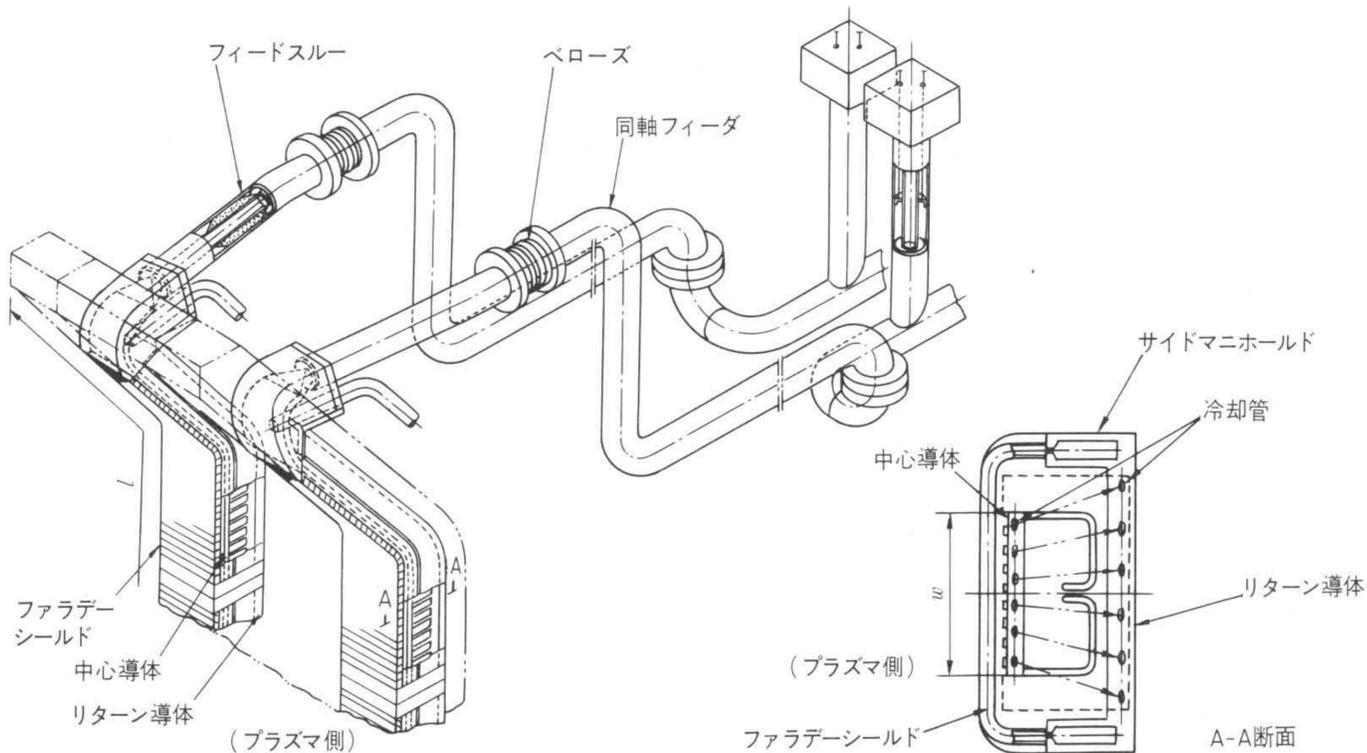


図10 CAWアンテナ構造概念図 図に示すようにループアンテナ構造である。プラズマに直面するので水で冷却する。

表6 ループアンテナ諸元 定常型核融合実験炉の高周波のうち、電流駆動用のCAWと主加熱用のICRFのループアンテナは、プラズマに直面するので熱工学的検討が必要である。

高周波の種類	アンテナ数	形状		出力/アンテナ (MW)	特性インピーダンス (Ω)
		長さ l^* (m)	幅 w^* (m)		
CAW	2×2/ポート	2.3	0.295	2.5	50
ICRF	4×2/ポート	1.09	0.400	1.88	50

注：*は、図10の図中 l 及び w に対応する。

本設計は十分この条件を満足している。

4.7 電磁現象

非円形プラズマをもつ核融合炉では、プラズマの上下不安定性 (Vertical Positional Instability) を抑えるために、シェル効果をもっていることが要求される。シェル効果の指標となる時定数は、制御の観点から数十ミリ秒以上であることが必要である。シェル効果を担うコンポーネントはプラズマに近いほど有効であるが、保守性やブランケットの増殖率、制御の応答に及ぼす影響を考慮すると、その構造は難しい問題である。先に述べたように本定常型炉の設計は、真空容器にシェル効果を分担させて十分な時定数をもっているとともに、その他の条件を満足している。

5 結 言

日立製作所でのトカマク核融合炉について概説した。

本研究ははじめパルス型(変流器駆動方式)を対象とし、次いで定常型(高周波駆動方式)に進展した。その結果、(1)不純物制御としてダブルヌルダイバータを採用し、かつ遠隔操作で保守が可能、(2)CAW(圧縮アルペン波)高周波によりプラズマ電流を駆動し定常運転を行なう、(3)高いトリチウム増殖率が期待でき、(4)定常型炉の利点を取り入れて簡単化する、ような幾多の特徴をもち、次期装置の諸条件と適合する新しい炉構造概念が得られた。

本研究が今後の次期装置(実験炉)開発の一助ともなり、いっそうの具体的展開がなされることを期待する。

終わりに、御指導をいただいた日本原子力研究所核融合研究センターの苫米地 顕工学博士、及び杉原正芳工学博士に対し、深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 日本原子力研究所：核融合研究開発の現状(1983)
- 2) T. Tome, et al.: Conceptual Design of Fusion Experimental Reactor (FER), Nuclear Technology/Fusion Vol. 4, No. 2, Part 2 (1983) 573.
- 3) T. Tone, et al.: Japanese Contributions to the Japan-US Workshop on FER/ETR Design, JAERI-M 84-107(1984)
- 4) T. Tone, et al.: Conceptual Design of the Fusion Experimental Reactor (FER) Based on an Advanced Scenario of Plasma Operation and Control, 10th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, London, September, 1984 IAEA-CN-44/H-I-2
- 5) 笠原, 外: 核融合炉の研究, 日立評論, 62, 5, 319~324 (昭55-5)
- 6) T. Iwamoto, et al.: Remote Maintenance of Tokamak Reactor with Double Null Poloidal Divertor, IAEA Fusion Reactor Technology IAEA-TC-392/12
- 7) K. Tomabechi, et al.: Concept of the Next Tokamak, IAEA Fusion Reactor Technology IAEA-392/48
- 8) W. Hooke, et al.: Conf. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research IAEA-CN-41/C-5(1982) Baltimore
- 9) 日本原子力研究所: JAERI-M83-213, 核融合実験炉(FER)の概念設計(オプションA)
- 10) 原子力学会: 「核融合炉物理・工学専門委」, 「核融合炉燃料・材料専門委」: 核融合炉設計及び研究開発の現状と課題
- 11) 藤沢, 齊藤, 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)
- 12) 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)
- 13) 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)
- 14) 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)