

■ 展 望 ■

核融合の現状と展望

山 中 千 代 衛*
Chiyoë Yamanaka



1. はじめに

核融合開発研究はエネルギー資源の極めてとばしい日本にとっては、エネルギー資源の豊富な米、ソ連などは大きく異なる意義、背景をもつものである。最近エネルギー問題は以前のような緊迫性が唱えられない時期を迎えるようになったが、我が国としてはその永久解決という長期的観点から、あるいはエネルギー科学技術のバーゲニング・パワーとして、また先進国の責務またはスティタス・シンボルとして、その重要性の意義づけは依然として不変である。さらに軍事研究のないわが国では、核融合は高度技術の開発・推進の絶好の場であって、科学技術立国としての重要な役目を演じている。

研究のはじめられた1957年頃より今日まで核融合に必要な高温プラズマの発生・制御に関する理論的考察と実験が繰返しが続けられ、その集積としてプラズマ物理学という新学問分野が生れてプラズマの理解は大いに深められた。また実験のアイデアを具現するため実験装置の新しい技術の開発が要請され、それに応じるように新技術が創り出された。この研究成果は技術の進歩なしでは生まれなかったのであって、まさに物理と技術が両輪となって核融合を推進してきた。

最近ようやく核融合の科学的実証が達成される直前に至っており、約30年間の研究経緯を経た現在は、これまでの積み重ねから将来への考察ができる時期になったといえる。とくに核融合はプラズマ物理を中心とした総合科学であり広汎な専門分野を動員し、巨費を投入する段階に至ったので、学術研究の要素をもち独創性による飛躍を求める努力を払いつつも、全体としては研究戦略を策定して効率よく進められるような整合性が必要である。

米国ではエネルギー行政上の必要から、これまでに

幾次かの諮問委員会が設けられ、優れた研究指導者・開発経験者から現状の評価・計画の進め方についての意見が聴取されてきた。その活動はいわゆる Foster リポート(1978年)、Buchbaum リポート(1980年)、Magnetic Fusion Advisory Committee リポート、ERAB 報告(1984年)¹⁾などに公表されている。

欧州でもEC中に同様な性格をもつパネル(ヨーロッパ核融合評価委員会)が設けられいわゆる Beckurts リポート I, II²⁾ がまとめられており、これらの報告においてECの基本的計画が記述されている。

我が国は研究体制の基本的考え方は原子力委員会「原子力開発長期利用計画」の大綱に示されており、欧米とはほぼ同様である。

ここでは日本原子力学会「核融合研究開発の動向」と題する調査³⁾に従って講演を組立てることとした。

2. 炉心プラズマ

(1) トカマク⁴⁾: 大型トカマク(TFTR, JET)が稼働し、新しいデータが得られた。JETではプラズマ電流 $I_p = 3.4 \text{ MA}$, エネルギー閉込め時間 $\tau_E \sim 0.6 \text{ sec}$. Alcator C では $n(0) \cdot \tau_E = 8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$ ($n(0)$: 中心密度), ダブルット III ではイオン温度 $T_i = 6 \text{ keV}$ (約 7,000 万度), $n \cdot \tau_E = 5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$ (n : 平均密度) が同時達成された。諸データによく適合する比例則(オーム加熱時) $\tau_E \approx n R^2 a q$ (R : 大半径, a : 小半径, q : 安全係数) が新たに提案された。核融合研究の一つの目標である臨界プラズマ条件の達成(科学的実証)はまず可能であると見られる。しかし追加熱による閉込め特性への影響は未解明のところが残されている。

磁気閉込め核融合の場合、同一規模の炉で出力を大きくするには磁場の強さに限度があるので、ベータ値を高める必要がある(出力 $\propto \beta^2$, また将来のD-

* 大阪大学レーザー核融合研究センター所長・教授

〒565 吹田市山田丘 2-6

(註) 昭和61年4月23日(水) 大阪科学技術センターにて開催の第7回定時総会で特別講演

D炉の実現の為には一層高いベータ値での閉込めが
目指される). トカマク炉実用化の可能性を高める為
に特に高ベータ化の研究が新たな課題として注目さ
れるようになった.

断面形状効果による高ベータ化の試みとして楕円
形のダブレットⅢ, ビーンズ形のPBXの実験で,
それぞれベータ値 $\beta \approx 4.6\%$, $\geq 5\%$ が得られ, 炉
としての経済性のための目標値 $\beta \approx 5\%$ はほとんど
満されている. しかし炉の改善をめざし今後さらに
高い β 値が追求されることになる. トカマクの限
界ベータ値比例則 $\beta_c \propto I_p / a B_T$ (B_T : トロイダル磁
場の強さ)が提案され検証された.

加熱は中性粒子入射(NBI), イオンサイクロトロン
共鳴(ICRF), 低域混成波共鳴(LHRF), 電子サイ
クロトン共鳴(ECRF)による方法がしらべられたが,
まだどれという条件で最適であるかは定められない.
その他ディスラプション現象, ポンプリミター, ダ
イバータ, ベレット入射について進歩があった.

低域混成波による電流駆動に基づく運転の定常化,
長パルス化の研究が進み, 駆動電流 $I_{pD} = \eta P_{rf} /$
 nR , ここで $\eta = f(T_e, B_T, V_{ph})$, 但し(P_{rf} :
高周波入力パワー, η : 効果を示す係数, T_e : 電子
温度, V_{ph} : 位相速度), の関係が判った. どの程
度まで高密度で電流駆動が効率よく行われるかが今
後の課題である.

次期装置(ないしは実験炉)においては長パルス運
転及びD-T燃焼時の物理が新しい課題になるであ
らう.

他のトラス系のステラレータ/ヘリオトロン, バ

ンビートラス, スクリューピンチ, 逆転磁場ピン
チ, あるいはオープン系タンデムミラーなどはそれ
ぞれトカマクプラズマ閉込めの安定性, 高ベータ化
などに関連する現象をもつので, これらのトカマク
以外の方式の研究は, トカマクプラズマの理解を深
めるにも有用であろう.

- (2) 他のトラス系: ヘリオトロンEではICRF加熱
が行われた. またベレット入射で $n \approx 1.5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$
がえられた. ヘリオトロンE, 西独のステラレー
タWVII-Aで無電流プラズマ実験が深められ, また
後者ではNBI実験で径方向電場1KVが観測され
た. これまでの諸データを総合するとステラレータ
方式は同程度規模のトカマクとほぼ類似のパラメ
ータ, 即ち現在の規模で温度 $T \approx 1 \text{keV}$ (約1,200万
度), $n \approx 2 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$, $\tau_E \approx 10 \text{ms}$, $\beta \approx 2\%$
がえられている. しかし, 不純物による放射損失量
が大きい. 米国で建設中のATF-1では第2安定
領域の検証が期待でき, トカマク閉込めに有用な知
識を提供することになる.

逆転磁場ピンチはかつてのゼータ装置のQモード
の再検討から高ベータトラス閉込めをめざして最
近活発になった. 安定な逆転磁場配位の長時間保持
($\sim 27 \text{ms}$), 高電流(500kA)の実験へと進歩し, パ
ラメータは現在 $T \approx 1 \text{keV}$ (約1,200万度), $n \cdot \tau_E \approx$
 $10^{11} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}$ に達した. 安定性・閉込めの諸課題
についてはトカマクとの共通性がある.

スクリューピンチも高ベータトカマクで問題とな
る第2安定領域の実験として意味がある.

バンビートラスは, ミラーの環状直結により端
損失を防止できる定常運転装置として提案され, 一
時は米国では有力な alternatives の一つであった.

強力なマイクロ波による電子リング形成, 加熱,
安定化をめざすものであるが, 科学的データは充分
でなく, 米国の国内事情でEBT-Sは研究が中止さ
れ, わが国のNBTが唯一の稼働装置となった.

コンパクトトラスはスフュロマック型とFRC
(Field Reversed Configuration)などの総称で,
プラズマが自らの電流とそれによる磁場により維持さ
れるトラスプラズマである. 構造が単純で, 小型で原理
的に高ベータ値(実験値で β 値がそれぞれ3~8%,
70~90%)が得られるという特徴がある. 不安定性の
抑制, 追加熱, 定常化が研究されている. 最近研究
は活発であるが, まだ基礎的段階である.

- (3) オープン系: 欧州では本格的に研究されていない

脚注

- (1) 米国エネルギー エネルギー開発諮問委員会 (Energy Research Advisory Board)の "Technical Panel on Magnetic Fusion" (Chairman: L.H. Roddis, Jr.)の報告書
- (2) 「Report of the European Fusion Review Panel-I, II」: Commission of the European Communities (それぞれ1981年-通称"BeckurtsレポートI, II")
- (3) 日本原子力学会, 核融合研究開発の動向に関する調査(1985年, 3月)
- (4) 米国では最近, 在来のトカマク(円形断面, 変流器電磁誘導方式による電流発生など)と区別して, 非円形断面, 高周波電力による電流駆動・発生, ダイバータ/ポンプリミターなどの新工夫(inovation)を施したトカマクを新型トラスと呼んでいる. この報告書では, 我が国の通例に従い, この新型トラス(いわゆる改良トカマク)も含めてトカマクとした.

が、米国ではタンデムミラー計画はトカマクに次ぐ重要な位置を占めている。その理由はミラー特有の軸方向損失がタンデム方式で抑えられる見込みができたからである。現在活動している主要な装置はガンマ10(日)とTMX-U(米)であって、サーマルバリア付プラグ電位の形成に成功し、それによってミラー端損失は1/30に減少できた。また共鳴拡散が原因とみられる半径方向のプラズマ損失は、ガンマ10で軸対象化することで抑制できるという研究が進められている。ベータ値は中心ミラー部で30%(TMX-U)、また現在閉込め性能は $n \cdot \tau_E \approx (1 \sim 2) \times 10^{11} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}$ である。

上記の装置ではタンデム方式によりミラーの性能は改善されてきたが、一方では装置と運転が複雑化しており、環流電力も大きくなったところに問題が生じている。

- (4) 慣性閉込め系：激光XIIガラスレーザー(日)が完成(現在世界最大出力30kJ/50TW)した。これにより創案されたキャンボールターゲットで高能率の爆縮が達成された。現在までの所10g/cm³までの圧縮と温度 $T \approx 6 \text{keV}$ (約6,000万度)が得られている。また高性能爆縮シュミレーションコードの開発、短波長レーザーの有効性の研究、レーザ不安定性限度の解明などがなされた。

最近大阪大学では大アスペクト比、薄肉ベレットターゲットを特殊の形状の短波長レーザーパルスで照射し、いわゆる多重衝撃波重畳を実現した圧縮により、核融合中性子10¹²を発生し、全世界的に注目をあびている。

また磁気慣性複合閉じ込め方式(MICF)が呈案され、その将来に期待が集っている。

100kJレーザーによるブレイク・イーブン実現への準備が米国で進められている。大型化とともに爆縮基礎過程の物理の研究及び関連計測法の開発が基本的な課題である。

3. 炉工学の現状

磁気核融合の場合、各閉込め方式に関連した工学技術の開発は基本的な部分は共通であって、個々の方式固有の技術は少ない。ただ慣性閉込め方式はかなり異質のものがあるが、それでも共通点がある。以下各項目の要点をのべる。

- (1) 炉構造：核融合炉体は放射化するので、分解・修理が遠隔操作で行えるような炉構造でなければなら

ない。その為の設計研究・製作技術の確立は重要な課題である。炉構造のうち第一壁、ダイバータ/リミターは、高熱負荷に対する熱応力、ディスラプション時の電磁力、プラズマによるスパッタリングエロージョン、中性子照射損傷をうける。その中でとくに炉心構造物の熱構造特性の研究は、米国にくらべてわが国は相当に遅れている。炉構造の分野は一般に産業界との関連を深くして開発されるのが得策であるが、高温、強磁場、中性子重照射という環境下での構造物の振舞の研究は国立機関で行われるのが適当である。

- (2) ブランケット：ブランケットに用いるトリチウム増殖材料として、種々の材料(Li₂O、液体Li、液体LiPb、Li₂SiO₂、Li₂AlO₂等)が候補に挙げられている。今後これら材料の開発状況を考えてつつ適当な増殖材の選定とブランケット構造の開発を進めて行くことになる。特に有力候補材であるLi₂Oについて、本格的な中性子照射試験が必要である。またモジュールの試作・試験は、ブランケット構造の開発上重要な課題である。
- (3) 材料：核融合材料では、中性子重照射、高熱負荷、放射化、プラズマ壁相互作用による不純物放出などに関する課題がある。重照射をうける構造材は第一壁・ブランケット部で、14MeV中性子による原子のはじき出しと核反応により生成するヘリウムが材料劣化をおこす。照射量1MWY/m²で11~13dpaの損傷に相当する。当面改良ステンレス鋼で実験炉用材料はまかなえそうであるが、その限度は中性子照射試験で明らかにされなければならない。将来の実用炉では100dpa以上となるので新材料の開発が必要である。例えばフェライト/マルテンサイト耐熱鋼はその有力候補の一つである。今後の研究開発には14MeV強力中性子源が是非必要である。

炉材料としての所要の性能を満たす低誘導放射材料を開発することは、困難ではあるが重要な課題である。少なくとも新材料の開発、合金設計に当たっては、低誘導放射性とその他の材料性能との最適性を図る必要があると考えられる。

高熱流束用リミター、ダイバータ板はMo、C、セラミックなどが有力と考えられる。低Zコーティング材としてはTiC、SiC、TiNが開発されつつある。

- (4) 超電導マグネット：炉のエネルギー収支上コイル消費電力の低下を必要とし、また強磁場の発生、コイルの小型化を図るために超電導マグネットは必須

のものである。

実験炉用トロイダルコイルは9m×11m(外形寸法), 30GJ, 最大磁界 $B_m \approx 12T$ 程度であるが, 現在到達したものはLCTコイルで3.5m×4.5m(外形寸法), $B_m \approx 8T$ (NbTi), またTMC-Iで1.1m(外直径), $B_m \approx 11T$ (Nb₃Sn)が得られている。

また実験炉用のポロイダルコイルは最大30kA以上の導体で最大直径20m, 総容量GJ級となるが, わが国では30~50kAの導体が開発されており, 20MJ級のコイルからユニット大型化コイル(100MJ)の実証へと向うことになる。

超電導トカマク装置としては何れも製作中のソ連のT-15, 仏のTORE SUPRA, 日本のTRIAM-1Mがシステムとしての問題を提供することになる。またミラー装置MFTF-B(米)用の陰陽コイル及びAxicellコイル(12.5 T)は最大級の性能を持っている。

今後の要素技術開発としては強制冷凍システム技術の実証が必要となる。導体開発は金材研, 電総研, 大学, 産業界などで進められており, 最近稼働した東北大30Tハイブリッドコイル試験施設は有用である。

- (5) トリチウム: トリチウムに関しては, その生成・供給, 取扱技術(精製・分離など), 生物影響などの問題がある。わが国は元来トリチウム技術開発は後発であった。現在100Ci/回(近く1,000Ci/回)を分裂炉中でトリチウムを照射することにより製造している。再処理工場や重水炉からの回収も検討されている。将来大量に必要とするときに備え, ある程度の自給のできる方策を確立しておくべきである。燃料ガスの循環システム, それに必要な大量取扱い技術の確立も同様である。日本原子力研究所のプロセス研究棟が完成し, 10,000Ci(1g)程度のホット試験が開始され工学的評価ができる最大規模のシステム試験が行われることになる。今後は米国TSTA(トリチウムの使用量10gの試験, 全体では200g)クラスに進み大量トリチウムシステム実証試験を行う段階を踏むことになる。基礎研究用として富山大学などで小型施設が稼働している。大阪大学レーザー核融合研究センターは現在わが国で最大の規模の施設を三重水素封入燃料ペレット製造のため運用している。
- (6) 遠隔操作技術: 放射化した炉体の遠隔操作は炉本体構造設計との関連で進められている課題である。INTOR, BCX(またはTFCX), NET, FERにお

いて分解・修理などの各作業についての技術が検討されているが, 核分裂炉の保守・点検などの作業用にも盛んに開発が進められている。今後の課題としては炉心トラスモジュールなどの分解・移動再組立というような重量物についての操作技術及びここで使われる耐放射線検出素子(IC)などの材料・部品の研究・開発は極めて重要である。

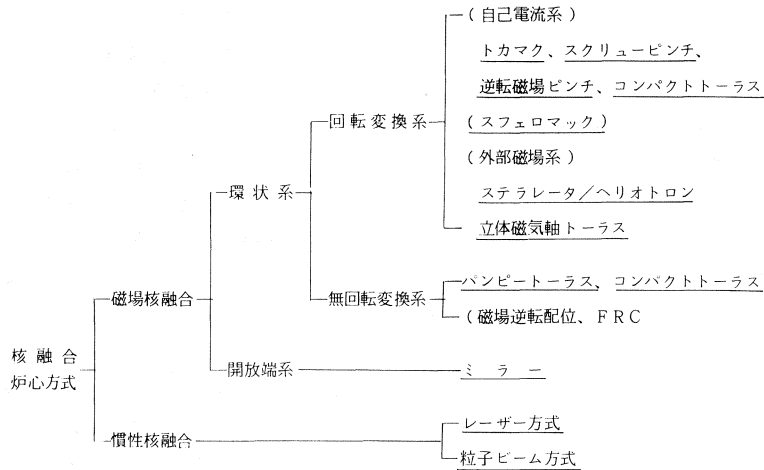
- (7) 加熱: トカマクやミラー実験などが大型化するにつれて加熱装置は急速に高出力化した。各種加熱方式は何れもプラズマ加熱に成功しているが, 今後は加熱効率を如何に高めるかにある。

NBI(中性粒子入射装置)方式はこれまでのプラズマ加熱で大いに実績をあげ高温プラズマについての進歩に寄与した。現在, 単機の性能は中性ビーム出力1~2MW, $\approx 100keV$, ≈ 10 秒であるが, TFTRでは120keV, INTORでは175keVのビームエネルギーが計画されている。100keVを越えると正イオンの中性効率が低下するので, 負イオンを使う方が有利である。これに関しては大電流の負イオン源が開発課題である。一方中性化しない荷電粒子ビームをエネルギー回収して中性化効率の低下を救済するのも一案と考えられている。

RF(高周波装置)方式は, 加熱用高周波装置を炉心装置から隔離し, その間を導波管で接続すればよいので便利な方式である。問題点は加熱効率, プラズマ制御性および加熱による閉込め劣化防止である。現在, 発信用単管出力はICRF(数10~100MHz), LHRF(数GHz)とも約1MW, ECRF(数10~100GHz)は約200KWで, 何れも熱効率はNBIと大差なく, 今後どの方式が主役となるかは未定である。今後プラズマとの結合系およびECRF用発管(ジャイロトロン)の高出力化($\geq 1MW$ 級, $>100GHz$)などが課題である。

高周波加熱技術は一面ではトカマクの電流駆動, 定常運転化, プラズマ分布制御などのトカマク性能の改善手段にもつかわれる。またミラー方式においても定常運転に必須の役割を演じている。

- (8) 電源・制御: 現在までのところ大型装置(JT-60)について閉込め磁場発生, プラズマ生成・加熱に何れも数100MW級, 5~10秒継続というような大電力施設がつくられ, それにサイリスターなどの制御が加わり, かつてない電源システムが出来上っている。トカマクの場合複雑化している制御用ポロイダルコイルの電源システムをハイブリッド方式で簡単化す



ることが試みられている。今後ディスラプション回復制御、プラズマ電流駆動に関する電源・制御方式の検討が続けられることが必要である。

(9) 慣性核融合：磁気閉込め方式とちがって、出力部分以外は高真空が不要であり、また大型磁界を必要としない。その代りドライバー系、特殊な液体壁、燃料ペレット製作、位置制御、繰返しインジェクションという部分が独自になる。これらはそれぞれ技術開発分野であって、開発の筋書きがつけられてい

る。今後は各課題を具体的につめて行く過程でそれぞれの技術分野で更に詳しい開発課題が検討される必要がある。磁気核融合炉とは方式が異なり炉設計は材料的にはるかに容易となる。

4. 炉心プラズマの評定

代表的な核融合の閉込め方式は、物理的観点から次のように分類される。

ここでは核融合炉心方式の中、主だった形式である

(1) トカマク

I) 閉込め	スケーリング	電子成分の輸送機構は未解明。一方実験では $n_{eE} \sim 3 \times 10^{13} \text{ s/cm}^2$ 。実験による Alcator-C 則 (ジュール加熱)、また NBI 加熱実験の結果を外挿すると INTOR 規模で自己点火が可能。
	今後の課題	炉領域のプラズマに対する比例則の検証およびその理解。
II) ベータ値	スケーリング	$\beta \approx 4.6\%$ (タブレット III)、 $\geq 5\%$ (PBX)。プラズマ断面三角形度、局所シャ等の安定化効果が顕著、ベータ値比例則の検証が進行中。
	今後の課題	高ベータ化(とくに強磁場で)。高ベータプラズマにおける閉込め特性。
III) 加熱	スケーリング	$T_i(0) \sim 7 \text{ keV}$ $\Delta T_i(0) \sim (1-10) \text{ eV/KW}$
	方式	NBI について各種 RF 加熱に実績。
	今後の課題	閉込め、その他の特性を考慮した最適加熱法の探究。断熱圧縮等の研究
IV) 不純物制御	現状	低 Z 材、ダイバータにより不純物は低減。
	今後の課題	炉領域のプラズマに対する。ダイバータ機能の検証と境界プラズマ特性の解明、ボンプリミターその他の研究。
V) 問題となる不安定性		MHD モード、とくに抵抗性バルーニングモード等、またディスラプティブ不安定。
VI) 方式固有の課題 (プラズマ生成、計測、定常化、炉構成など)		定常化あるいは準定常化。(→高周波による電流駆動の比例則の検証が進んでいる) 炉構成の簡素化等による低コスト化。
VII) 磁場配位の最適化		電流分布等の制御。最適配位の形成と長時間維持。
VIII) 鍵となる技術開発 (炉心プラズマに限る)		不純物制御(境界プラズマ制御)。安定性制御(電流分布制御等)。

Ⅴ) 世界の主要研究装置 (稼働中) の現状	装置名称 (国、所属)	規模、R、a、B _T など	同時達成の注) n(0), T _i (0), τ _E	特 徴																					
(注) 記号表示とする <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">$n(0)$</td> <td style="text-align: center;">eV</td> <td style="text-align: center;">ms</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">cm^{-3}</td> <td style="text-align: center;">$T_i(0)$</td> <td style="text-align: center;">τ_E</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$\geq 10^{14}(a_1)$</td> <td style="text-align: center;">$\geq 5000(b_0)$</td> <td style="text-align: center;">$\geq 100(c_0)$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$\geq 10^{13}(a_2)$</td> <td style="text-align: center;">$\geq 1000(b_1)$</td> <td style="text-align: center;">$\geq 10(c_1)$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$\geq 10^{12}(a_3)$</td> <td style="text-align: center;">$\geq 100(b_2)$</td> <td style="text-align: center;">$\geq 5(c_2)$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$\geq 10^{11}(a_4)$</td> <td style="text-align: center;">$\geq 10(b_3)$</td> <td style="text-align: center;">$\geq 1(c_3)$</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">$\geq 1(b_4)$</td> <td style="text-align: center;">$< 1(c_4)$</td> </tr> </table> (記入例) Xという装置に対し $n(0) = 10^{13} cm^{-3}$, $T_i(0) = 200 eV$, $\tau_E = 3 ms$ の時 $a_2 \cdot b_2 \cdot c_3$ と 記入。	$n(0)$	eV	ms	cm^{-3}	$T_i(0)$	τ_E	$\geq 10^{14}(a_1)$	$\geq 5000(b_0)$	$\geq 100(c_0)$	$\geq 10^{13}(a_2)$	$\geq 1000(b_1)$	$\geq 10(c_1)$	$\geq 10^{12}(a_3)$	$\geq 100(b_2)$	$\geq 5(c_2)$	$\geq 10^{11}(a_4)$	$\geq 10(b_3)$	$\geq 1(c_3)$		$\geq 1(b_4)$	$< 1(c_4)$	TFTR 米、プリンストン大学	2.48m, 0.85m, 5T	$a_2 \cdot b_1 \cdot c_0$	断熱圧縮 高加熱入力 (NBI加熱開始)
	$n(0)$	eV	ms																						
	cm^{-3}	$T_i(0)$	τ_E																						
	$\geq 10^{14}(a_1)$	$\geq 5000(b_0)$	$\geq 100(c_0)$																						
	$\geq 10^{13}(a_2)$	$\geq 1000(b_1)$	$\geq 10(c_1)$																						
	$\geq 10^{12}(a_3)$	$\geq 100(b_2)$	$\geq 5(c_2)$																						
$\geq 10^{11}(a_4)$	$\geq 10(b_3)$	$\geq 1(c_3)$																							
	$\geq 1(b_4)$	$< 1(c_4)$																							
JET EC、JETサイト	2.96, 1.25×2.1, 3.5	$a_2 \cdot b_1 \cdot c_0$	大型D型断面																						
PLT 米、プリンストン大学	1.3, 0.45, 3.5	$a_1 \cdot b_1 \cdot c_1$	ICRF加熱、LH電流 立上げ維持																						
Doublet-III 米 (日米協力)、 GAT社	1.5, 0.45×1.5, 2.6	$a_1 \cdot b_0 \cdot c_1$	D型断面 ダイバータ配位 大電力NBI、ECH																						
T-10 ソ連、クルチャトフ研	1.5, 0.36, 4.5	$a_1 \cdot b_1 \cdot c_1$	ECH																						
ASDEX 西独、マックスプランク ・プラズマ研	1.65, 0.4, 2.8	$a_1 \cdot b_1 \cdot c_1$	NBI加熱 ダイバータ配位																						

Ⅵ) 第10回IAEA会議などの最新成果
1) プラズマパラメータの進展 $\tau_E = 0.6 s$, $I_p = 3.4 MA$, $T_i(0) = 6 keV$, $\bar{n} \tau_E = 5 \times 10^{12} s/cm^3$ の同時達成、閉込め時間比例則の提案と検証: $\tau_E \propto nR^2 a q$ (n :密度、 R :大半径、 a :小半径、 q :安定係数) 2) 高ベータ化 (1) 限界ベータ値比例則 $\beta_c = C I_p / a B_T$ (C :常数)の提案と検証 (2) Hモードの詳細とZモード(不純物)、Pモード(ヘレット入射)の発見 (3) ビーンズ形配位の実験開始、 $\beta > 5\%$ 3) 電流駆動 変流器リチャージングの実験、駆動電流の比例則 $I_{pl} = \eta P_{rf} / nR$, $\eta = f(T_e, B_T, V_{ph})$: 効率を示す係数、 P_{rf} : 高周波入力パワー、 V_{ph} : 位相速度 4) 加熱 (1) ICRF $\Delta(T_i + T_e) = 3 keV$ 、不純物低減の試み (2) ECH カットオフ密度以上での有効加熱 5) 不純物 ホンプリミター実験
Ⅶ) 理論・シミュレーション計算からの貢献度
1) トカマクの磁気流体的特性に関する理論、とくに平衡、線形安定性の理論は確立され、実験計画の指針となりうる状態にきた。例えば、限界ベータ値比例則。 2) 輸送過程の理論は確立されていないが、トカマク輸送コード等実験計画に不可欠のものである。また、ダイバータ等の解析も同様である。 3) 加熱については、NBI関連は確立され、高周波関連の進展も著しく実験計画に貢献している。
Ⅷ) 他の閉込め方式との開わり合い (共通性と相補性など)
1) トーラス系としてステラレータ/ヘリオトロン、逆磁場ピンチなどと関係が深い。トカマクに関する研究で開発されたものが広く他に応用されている。 2) 境界プラズマに関してサーマルバリアが話題となっている。磁力線に沿う電界形成などオープン系との関係もある。
Ⅸ) その他特記事項
次期装置の計画は各国とも検討中であり本決りでないが、いわゆる実験炉 (日、EC、ソ連)、DT燃焼、長パルスの炉心プラズマを中心とする装置 (米) が考えられている。

(2) ステラレータ/ヘリオトロン

I) 閉込め スケール 今後の課題	イオン：新古典理論的。 電子：新古典理論の数倍以内（プラズマ中心付近） 新古典理論の十～数十倍又はイントールスケールの1/2～数分の1（プラズマ周辺）。
	更にイオン温度を高めてバナナ領域（無衝突領域）でのスケールを明らかにする。
II) ベータ値 スケール 今後の課題	ステラレータ（W VII-A） 実験値 $\beta(0) \sim 1\%$ 、理論的限界に近い。 ヘリオトロン（ヘリオトロンE） ベータ限界値が圧力分布に依存する。 (圧力分布をフラットに制御することによって) $\beta(0) \lesssim 4\%$ （実験）が得られている。
	ヘリオトロン：圧力分布を最適化して $\beta(0) > 5\%$ が実験可能かの検討。 ATF-1：第2安定化領域の検証。
III) 加熱 スケール 今後の課題	<ul style="list-style-type: none"> ECHプラズマ $\Delta T_e(0) = 5 \text{ eV} \cdot P_{\text{ECH}}(\text{KW}) / \bar{n}_e (10^{13} \text{ cm}^{-3})$ ヘリオトロンEにおいて、NB1プラズマ $\Delta T_i(0) = 2 \text{ eV} \cdot P_{\text{abs}}(\text{KW}) / \bar{n}_e (10^{13} \text{ cm}^{-3})$ $\Delta T_e(0) \approx \Delta T_i(0)$ ICHプラズマ (preliminary) $\Delta T_i(0) = 1 \sim 2 \text{ eV} \cdot P_{\text{ICH}}(\text{KW}) / \bar{n}_e (10^{13} \text{ cm}^{-3})$
	方程式 ECH, NB1, ICH
	パワーが上昇して行くと、上記スケールより効率が落ちる (T_e, T_i 上昇等により) ことも考えられ、パワーを増加させた時の加熱効率を求めること。
IV) 不純物制御 現状 今後の課題	放電洗浄+チタンゲッタによる壁の清浄化が中心であり、ダイバータの設置は行われていない。
	壁の低Z材コーティング及びダイバータの設置による本格的な不純物制御。
V) 問題となる不安定性	高ベータプラズマの圧力駆動型不安定の可能性。
VI) 方式固有の課題 (プラズマ生成、計測、定常化、炉構成など)	長時間無電流プラズマ生成における不純物制御、プラズマ中の電場測定と閉じ込めとの相関。
VII) 磁場配置の最適化	ステラレータ/ヘリオトロン/立体磁気軸系の高ベータ、低アスペクト磁場配位の最適化 (W VII-A-S, ヘリオトロンE, ATF-1の比較検討)。
VIII) 鍵となる技術開発 (炉心プラズマに限る)	ダイバーステムの開発。

IX) 世界主要研究装置（稼働中）の現状。	装置名称(国、所属)	規模、R、a、Bなど	同時達成の注 $n(0), T_i(0), \tau_E$	特徴
(注) 記号表示とする cm^{-3} eV ms $n(0)$ $T_i(0)$ τ_E	ヘリオトロンE (日本、京都大学)	R = 220 (cm) $\bar{a} = 20$ (cm) B = 2 (T)	$a_2 \cdot b_1 \cdot c_1$ $a_2 \cdot b_2 \cdot c_1$ (ECH+NB1) (ECH) Current-less	$\ell = 2$ $t(0) = 0.55$ $t(a) = 2.5$ 強いシア
$\geq 10^{14} (a_1)$ $\geq 500 (c_0)$ $\geq 100 (c_0)$	W VII-A (西独, Max-Planck-Institut für Plasma Physik)	R = 200 (cm) $\bar{a} = 10$ (cm) B = 3.5 (T)	$a_1 \cdot b_1 \cdot c_1$ (OH+NB1) less	$\ell = 2$ $t \sim 0.2$ シア無し
$\geq 10^{13} (a_2)$ $\geq 100 (c_2)$ $\geq 5 (c_2)$	Uragan 2 (ソ連, Institute of Physics and Technology)	R = 100 (cm) a = 11 (cm) B = 2 (T)	$a_2 \cdot b_2 \cdot c_2$ (OH)	$\ell = 2$ $t(0) = 0$ $t(a) \sim 1$
$\geq 10^{12} (a_3)$ $\geq 10 (c_3)$ $\geq 1 (c_3)$				
$\geq 10^{11} (a_4)$ $\geq 1 (c_4)$ $< 1 (c_4)$				
(記入例) Xという装置に対し、 $n(0) 10^{13} \text{ cm}^{-3}$; $T_i(0) = 200 \text{ eV}$; $\tau_E = 3 \text{ ms}$ の時、 $a_2 \cdot b_2 \cdot c_3$ と記入。				

X) 第10回IAEA会議などの最新成果

- ヘリオトロンE(日)に於いて、ICRF加熱が行われ、ヘリカル系にFast modeを用いた初めての加熱実験に成功した。ペレット入射によりプラズマ密度 $\bar{n}_e = 1.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ が得られた。
- W VII-A (西独)に於いてECH無電流プラズマ実験が開始された。NB1実験に於いてプラズマ半径方向の電場 (~1KV) が観測され、効果的なイオン加熱の原因が、この電場によるヘリカルリップルの捕捉粒子の閉じ込めが改善されることによると結論された。
- Uragan-3 (ソ連)装置の初期実験が開始された。

<p>Ⅺ) 理論・シミュレーション計算からの貢献度</p> <p>1) 三次元MHD平衡コードを用いて、ヘリアック配位で $\beta > 10\%$ が見い出された。</p> <p>2) 無電流プラズマによる圧力駆動型MHD不安定の機構が解析され、ヘリオトロンE実験結果との対応が見られた。</p> <p>3) プラズマ半径方向の高極性電場を考慮した輸送過程の解析が行われ、実験との比較検討が行われるようになった。</p>	
<p>Ⅻ) 他の閉込め方式との関わり合い(共通性と相補性など)</p> <p>ヘリカル系に於ける本格的高温、高密度プラズマの生成に伴いプラズマ壁相互作用、及び不純物制御の問題が重要な研究課題として認識されるようになってきた。</p>	
<p>XIII) その他特記事項</p>	

(3) ミ ラ ー

I) 閉込めスケーリング	<p>軸方向閉じ込めに関しては Pastukov の式: $\pi_i = \pi_{i1} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{R+1}{R} \ln(2R+2) - \frac{\phi_c}{T_{ic}} \exp\left(\frac{\phi_c}{T_{ic}}\right) \cdot \tau_{ii}$: イオン-イオン衝突時間、$R$: ミラー比、$T_{ic}$: セントラルイオン温度、が実証されている。</p> <p>閉じ込め電位 ϕ_c はサーマルバリアが形成された場合、$\phi_c = T_{ep} \ln\left[\frac{n_p}{n_b} \left(\frac{T_{ec}}{T_{ep}}\right)^\nu\right] - T_{ec} \ln \frac{n_c}{n_b}$; n_c: セントラル密度、n_b: バリアー密度、n_p: フラグ密度、T_{ec}: セントラル電子温度、T_{ep}: フラグ電子温度、$\nu = 0.5 \sim 1.5$ が予測されており実証の段階にある。</p>	
	今後の課題	半径方向の拡散を抑制するために軸対称化磁場が必要で、実験の結果プラズマの安定性、半径方向への拡散と関連して半径方向電位分布を制御することが有効であり、更に検討を行う。
II) ベータ値スケーリング	<p>タンデムミラーは平均極小磁場による安定化を設計のガイドラインとしている。極小磁場による安定化効果は最も有効な場合でアンカー部のベータ値が中央ソレノイド部のベータ値と同等またはそれ以下となることが必要。セントラル部平均ベータ値 15% が実験的に得られており、理論的には 30% 以上が予想される。</p>	
	今後の課題	高ベータ化に伴い極小磁場磁力線の測地線曲率に帰因する磁力線方向のプラズマ電流が大きくなる。この電流が軸対称部まで流れ込むと低ベータ平衡時の軸対称性が破壊され、プラズマの半径方向拡散が大きくなる可能性があり、今後の検討事項である。
III) 加熱スケーリング	<p>中性粒子ビーム加熱についてはモンテカルロ法及び Fokker Plank Code による計算機シミュレーションと、既存の実験データの比較による経験式であり、良い一致を示す。波動加熱についてはアンテナによる波動励起コード Ray Trace Code、Fokker Plank Code 及びモンテカルロ法による理論解析があるが、実験との比較は充分できていない。</p>	
	方 式	タンデムミラーにおいては中性粒子ビームで生成された高温イオンを基本として密度分布を制御し、マイクロ波の ECRH によって閉じ込め電位とサーマルバリアを形成する。中央ソレノイド部へのベータ値制御を主たる目的として高周波による ICRF を用いる。電子ビームによる電子加熱も ECRH の代替として考えられる。
	今後の課題	高温イオンの荷電交換損失を抑制するために NBI のガス効率を上げると、捕足粒子の RF-pumping 法の確立。
IV) 不純物制御現 状	<p>壁の放電洗浄による不純物放出抑制と、チタンゲッターまたはクライオパネルによる不純物除去。不純物の半径方向閉込め時間は水素プラズマの閉込め時間より短いため不純物の蓄積は少ない。</p>	
	今後の課題	定常時に不純物を除去する方法として、RF 等による共鳴拡散が有効と考えられ、実験的に確認が必要。
V) 問題となる不安定性	<p>現在までのデータはイオンの微視的不安定性は安定化の方法が確立。高温電子についても安定である。また捕捉粒子不安定性、パルニング不安定性、回転不安定性は更に高ベータになったとき検証される。</p>	
VI) 方式固有の課題 (プラズマ生成、計測、定常化、炉構成など)	<p>プラズマ計測においては他の磁場閉込め方式の場合に比べてプラズマ電位分布の計測の重要性が高い。周辺プラズマは端部へ流れるから大容量の真空排気が必要。閉込め電位形成はプラズマ加熱によって行われるから加熱のシーケンスを巧妙に組立てる必要がある。</p>	
VII) 磁場配置の最適化	<p>1. 共鳴拡散を抑制するための実効的軸対称化と高ベータにおける巨視的安定化のための極小磁場的配位の両立乃至はバランスを定めることが必要。 2. その一助として中央ソレノイド部の両端に強磁場のチョークを設置する。 3. 不純物除去に好都合な磁場配位。 4. 加熱アクセスの確保。 5. クラフ位置の最適化考慮。</p>	
VIII) 鍵となる技術開発 (炉心プラズマに限る)	<p>1. 直接エネルギー変換 2. 高エネルギー・大電流負イオン源 (400 KV, 10 A) 3. 1.00 GHz 1 MW 出力級のジャイロトロンと伝送回路 4. ICRF アンテナ構造</p>	

IX) 世界の主要研究装置（稼働中）の現状		装置名称（国、所属）	規模、R、a、Bなど	同時達成の（注） $n_e(0), T_e(0), \tau_E$	特 徴					
(注) 記号表示とする。		$\begin{matrix} \text{cm}^{-3} \\ n_e(0) \end{matrix}$	$\begin{matrix} \text{eV} \\ T_e(0) \end{matrix}$	$\begin{matrix} \text{ms} \\ \tau_E \end{matrix}$	ガンマ 10 （日本、筑波大） RFC-XX （日本、名大プラ研） TMX-U （米国、LLNL） PHAEDRUS （米国、ウィスコンシン） TARA （米国、MIT）	$\begin{matrix} \geq 5000(b_0) & < 100(c_0) \\ \geq 1000(b_1) & < 10(c_1) \\ \geq 100(b_2) & < 5(c_2) \\ \geq 10(b_3) & < 1(c_3) \\ \geq 1(b_4) & < 1(c_4) \end{matrix}$	$a_2 \cdot b_2 \cdot c_1$ $a_2 \cdot b_2 \cdot c_1$ $a_2 \cdot b_1 \cdot c_2$ $a_3 \cdot b_2 \cdot c_3$	サーマルバリアー付軸対称化タンデムミラー カスプ安定化、RF閉込め（RFプラグ）軸対称ミラー サーマルバリアー付タンデムミラー（非軸対称） RFプラズマ生成タンデムミラー サーマルバリアー付軸対称タンデムミラー		
$\approx 10^{14}(a_1)$	$\approx 10^{13}(a_2)$								$\approx 10^{12}(a_3)$	$\approx 10^{11}(a_4)$
$\geq 5000(b_0)$	$\geq 1000(b_1)$								$\geq 100(b_2)$	$\geq 10(b_3)$
$< 100(c_0)$	$< 10(c_1)$								$< 5(c_2)$	$< 1(c_3)$
$< 1(c_4)$										
(記入例) Xという装置に対し、 $n_e(0) = 10^{18} \text{cm}^{-3}$ $T_e(0) = 200 \text{eV}$ 、 $\tau_E = 3 \text{ms}$ の時、 $a_2 \cdot b_2 \cdot c_3$ と記入。										
				(1984年9月現在)						

X) 第10回 IAEA会議などの最新成果 i) タンデムミラーにおいてサーマルバリアー付プラグ電位の形成に成功した。(ガンマ10, TMX-U) ii) 上記結果によりミラー端損失を30分の1に減少させた。(ガンマ10, TMX-U) iii) 軸対称化により、共鳴拡散が原因とみられる半径方向プラズマ損失を抑制する研究を進めている。(ガンマ10) iv) タンデムミラーセントラルミラー部での β 値は中心で30%に達した。(TMX-U)
XI) 理論・シミュレーション計算からの貢献度 i) 有限ベータ、有限ラーモア効果を入れた平衡安定性理論の確立 ii) 強力ECRHによるプラグ電位形成の比例則とFokker-Planckシミュレーションの発展 iii) タンデムミラー中プラズマの径方向輸送理論 iv) 超高温電子プラズマ中の微視的不安定性理論
XII) 他の閉込め方式との関わり合い（共通性と相補性など） 共通性：バンビートーラスにおけるECRH高温電子生成と電位形成 相補性：トーラス系核融合炉に対する相補性（Simple, High β , Steady operation等）
XIII) その他特記事項 タンデムミラー型核融合炉の設計に関してサーマルバリアー/プラグ電位が実証された現在、将来のより軸対称な、より小型化したタンデムミラープラズマ閉じ込め配位を探索する動きが出ている。例えば、オクタポールアンカーやカスプアンカー、高温電子リングアンカーなど。

(4) 慣性核融合

I) ベレット構造	特徴	エキスプローシブ、アブレイティブ、キャノンボール型などのベレット構造がある。キャノンボール型ベレットは内外2重殻構造の間にエネルギーを注入し、均一、高効率圧縮を高める方式。
	今後の課題	キャノンボールターゲットは大キャビティを持つ輻射キャノンと小キャビティを持つプラズマキャノンに大別される。最も少ないエネルギー注入で最大の効果を求める設計が追求されている。イオンビームでは、ブラックピークによるエネルギー注入が考えられる。
II) ρR 値	スケールリング	エネルギー注入のレーザー波長スケール則により爆縮圧のスケール則が導かれ、 ρR に対するシミュレーションが行われている。 $\rho R = 0.1 \text{ g/cm}^2$ が臨界条件。 中性子生成量、 $\rho \cdot \rho R$ のシミュレーション値と実験値は概略よい一致を示す。
	今後の課題	キャノンボールターゲットと激光Ⅻ号ガラスレーザー(12ビーム40 TW、20 kJ)の短波長化をすすめ高圧縮の実験を展開し、爆縮のメカニズムを解明する。ついで、短波長100kJのレーザーを建設し、点火を実現する。
III) ドライバー入力	スケールリング	激光Ⅻ号ガラスレーザーでは100kJから1MJまでの出力増強スケールリングは一応出来上っている。炭酸ガスレーザーでは烈光ⅩIII号とLANLのHeliosが10kJ、10TWの出力を持っている。LIBでは助電Ⅳ号が50kJ、PBFAIが100kJである。
	方式	ガラスレーザーとその高周波(波長0.5 μ 、0.3 μ)レーザーが完成している。炭酸ガスレーザーは波長10 μ で大出力、krFレーザーは波長0.3 μ で小出力が現状。LIBは出力がずばぬけて大であるが、ビーム輝度の改良が必要。現在 10^{18} W/cm^2 に達した。
	今後の課題	アルファ粒子加熱を伴う点火の確認。ドライバーの短波長化と高効率化(krFレーザーやガーネット固体新レーザー)。
IV) システム	現状	ベレット設計、爆縮シミュレーションに対して計測と総合システムが弱体。実験ショット数は1日当たり、準備ショット20回、高出力ショット4回(DT燃料使用)。
	今後の課題	瞬間計測法の開発、燃料ベレット入射法の開発。
V) 問題となる不安定性		ベレットの均一圧縮を妨げる要因として照射ビームの不均一性、それに起因するレーリー-テラー不安定性。
VI) 方式固有の課題 (プラズマ生成、計測、定常化、炉構成など)		炉内壁にLi流体ブランケットを導入することにより第一壁の防禦が容易。炉方式としてはパルス運転となるが10~20Hzの運転モードで出力の定常化が可能。
VII) ドライバー/ベレットの最適化		レーザーでは短波長による爆縮能力の向上が必要。ベレットとしてはキャノンボールターゲットの詳細設計をすすめ、最適化を追求。
VIII) 鍵となる技術開発 (炉心プラズマに限る)		ドライバーの性能向上、パワーアップ、ベレット開発と共にホット電子の制御、均一照射などを確立。実験計測手段の向上。爆縮コードの開発、ベレット入射法の確立、スピン偏極燃料の採用。

IX) 正界の主要研究装置(稼働中)の現状	装置名称(国、所属)	規模 エネルギー、パルス巾など	同時達成の注 ρ 、 T_i など	特徴
(注) 記号表示とする。 $\rho(\text{gcm}^{-3})$ $T_i(\text{eV})$ ρR (eV) (mgcm ⁻²)				
	激光Ⅻ号ガラスレーザー (日本、阪大 ILE)	30kJ/1ns 50TW/100ps	$N_Y = 1.2 \times 10^{12}$ $T_i = 10 \text{ keV}$	$\rho = 100 \rho_L^*$ $A_1 B_1 C_1$ $T_i = 6 \text{ keV}$ 全自動アライメント機能付12ビーム、ガラスレーザー、ビーム径35cm、照射配位の異なる2基のターゲットチャンパー装置(0.5 μ)
$> 100(A_0)$ $\geq 5000(b_0)$ $\geq 100(c_0)$ $\geq 10(A_1)$ $\geq 1000(b_1)$ $\geq 10(c_1)$ $\geq 1(A_2)$ $\geq 100(b_2)$ $\geq 5(c_2)$ $\geq 0.1(A_3)$ $\geq 10(b_3)$ $\geq 1(c_3)$ $< 0.1(A_4)$ $< 1(b_4)$ $< 1(c_4)$	激光MⅡ号ガラスレーザー (日本 阪大 ILE)	3kJ/1ns 7TW/100ps	$N_Y \sim 10^9$ $T_i = 6 \text{ keV}$	$\rho = 20 \rho_L$ $A_1 B_1 C_1$ $T_i = 2 \text{ keV}$ 全自動アライメント機能付2ビーム、ガラスレーザー、ビーム径20cm(0.3 μ)
	NOVA ガラスレーザー (米国、LLNL)	18kJ/1ns	$N_Y = 10^{13}$ (未公認)	$\rho = 200 \rho_L$ $A_1 B_1 C_1$ $T_i = 2 \text{ keV}$ 10ビームガラスレーザー、ビーム径74cm 第2高調波化(波長0.5 μ) 第3高調波化(波長0.3 μ)
	OMEGAX ガラスレーザー (米国、Rochester大学)	28kJ/1ns 10TW/100ps	$N_Y = 4 \times 10^{11}$	$\rho = 30 \rho_L$ $A_2 B_1 C_3$ $T_i = 3 \text{ keV}$ 24ビーム、ガラスレーザー、ビーム径9cm、第3高調波
	ANTARES CO ₂ レーザー (米国、LANL)	40kJ/1ns		24ビーム、CO ₂ レーザー、ビーム径30cm 2モジュール構成
	烈光Ⅷ号CO ₂ レーザー (日本、阪大 ILE)	10kJ/1ns	$N_Y = 10^7$ $T_i = 1 \text{ keV}$	8ビームCO ₂ レーザー、ビーム径27cm 4モジュール構成 (右の値は2ビームでの実験値)
	HELIOS CO ₂ レーザー (米国、LANL)	10kJ/1ns	$N_Y = 10^9$ $T_i = 2 \text{ keV}$	$\rho = 10 \rho_L$ $A_2 B_2 C_3$ $T_i = 0.5 \text{ keV}$ 8ビームCO ₂ レーザー、ビーム径30cm 4モジュール構成

* $\rho_L = 0.2 \text{ g/cm}^3$ DTの液体密度

X) 第10回IAEA会議などの最新成果
(1) 出力30 kJ/50 TW 激光XII号ガラスレーザー(世界最大)が完成した。 (2) 短波長レーザーの効用が実験的に確立された。 (3) 直接駆動型爆縮でレーザー不安定の限度が明白になり高アスペクトターゲットの有用性が証明された。 (4) 間接駆動型爆縮(キャノンボールターゲット)で高効率均一圧縮が実現した。($\rho R \sim 0.01 \text{g/cm}^2$, 6 keV, 10g/cm^3) (5) 高性能爆縮シミュレーションコードが完結した。 (6) 大アスペクトターゲットを整形レーザーパルスで照射し、ショックマリチフレキシングの手法で、安全な爆縮を実現し、核融合中性子 10^{12} を観測した。 (7) レーザーにより磁場を発生させスフェロマック形の磁気慣性閉じ込め方式を開発した。
XI) 理論・シミュレーション計算からの貢献度
爆縮過程を記述する1次元、2次元流体コード、粒子コードが完成したため、爆縮コアの物理パラメーターが実験に先立って予想されるようになり、実験計画に多大の貢献を与えている。 これらのコードは2流体、多重温度、放射過程、平均イオン化モデルを内蔵し、リゾーニングの手法が採用されている。
XII) 他の閉込め方式との関わり合い(共通性と相補性など)
高バートプラズマの物性、計測診断の技術などにおいて磁気核融合方式と関連性があり、最近では磁気シールドを採用した燃料ターゲットの設計も用いられている。 逆転磁場ピンチ、コンパクトトラス、スフェロマックなどとの相似性が議論される。 MICFと称する新方式はエネルギーは磁場で、粒子は慣性で、とじ込められる新方式で、ブレークイーブンははるかに低いレーザーで実現しようと考えられている。
XIII) その他特記事項
炉第一壁に液体金属ブランケットが装着されるので炉設計の問題点が大幅に軽減されるので、炉工学者から注目されている。

トカマク、ステラレータ/ヘリオトロン、ミラー、慣性核融合について、原子力学会の調査結果を次に上げておくことにする。

5. 結 び

核融合研究は現在トカマクが最もデータ豊富であり、一步先行しているが、炉として非常に難しい問題点を含んでおり、レーザーで代表される慣性核融合が期待を集めている。トカマク方式では、大型トカマクのうちTFTRおよびJETのジュール加熱の実験が開始され、従来の比例則のパラメータ領域を格段に広げ、中型のAlcator Cで $10^{14} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}$ に近い $n\tau_E$ を達成した。これらの実験結果から、閉込め時間の比例則 $\tau_E \propto nR^2 a q$ (n : 密度, R : 大半径, a : 小半径, q : 安定係数) が新たに提示された。ベータ値については比例則が検証されるとともに、中型のPBXではそら豆(ビーンズ)形断面による高ベータ化の可能性が示唆された。また高周波による電流駆動の研究が更に深められ、駆動電流の比例則が精しく調べられた。ステラレータ/ヘリオトロン方式では中型のヘリオト

ロンEで、加熱パワーの注入によってプラズマ電流零の条件を実現し、 $10^{12} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}$ のオーダーの $n\tau_E$ を達した。ミラー方式では、中型のタンデムミラー装置のTMX-Uおよびガンマ10で、サーマルバリアーによる端部封込の有効性を確認し、 $10^{11} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}$ のオーダーの $n\tau_E$ を達成した。逆転磁場ピンチ方式では、中・小型装置による実験が、とくに日本で盛んになった。コンパクトトラス方式では、スフェロマックS-1が運転を開始し、安定保持の問題を解決しつつある。レーザーを用いる慣性核融合方式では、30kJの激光XII号で実験が開始され 10g/cm^3 の圧縮を達成した。また三重水素重水素の大アスペクトターゲットを用い、核融合中性子 10^{12} の世界記録を達成し、国際的にもわが国のレベルの高さが認識されている。磁気慣性複合閉じ込め方式(MICF)が呈案され、その発展も注目されている。