

原子力委員会
核融合研究開発基本問題検討会

トカマク型装置による炉心プラズマ研究開発の進捗

日本原子力研究所

菊池 満

1. 第三段階核融合研究開発基本計画の進捗状況

トカマク型装置による炉心プラズマ技術の研究開発

第三段階基本計画の策定以降の約10年間に於いて、トカマク装置による研究開発は大きな進歩を遂げた(図1)。我が国では、JT-60(図2)、JFT-2M、TRIAM-1M等による研究によって発電実証プラントを見通したトカマクの改良研究を行うとともに、JT-60における等価エネルギー増倍率 $Q=1.25$ (図3)、プラズマ温度5.2億度(図4)、TRIAM-1Mにおける3時間を上回る長時間放電(図5)などプラズマパラメータにおいて多くの世界記録を達成、更新した。

また、実験炉ITERの建設に必要な閉じ込め、ダイバータ、安定性と運転限界、電流駆動、高エネルギー粒子挙動に関する炉心プラズマデータをJT-60、JFT-2Mを中心として取得し、ITERの物理設計に反映した。特に、JT-60による定常運転に関わる研究成果は、世界のトカマク研究の潮流をパルス運転方式から定常運転方式へと変革し、ITERの技術目標の変更に至った。

更に、諸外国に目を向けるとTFTRとJETにおいては、重水素と三重水素を用いた燃焼実験が行われそれぞれ、10メガワット、16メガワットの核融合エネルギーの発生に成功した(戦略報告書図3.1.1-3)。

(1) 実験炉の建設・運転のための研究開発

トカマク型実験炉では、主として誘導運転によるプラズマ電流で高温プラズマを閉じ込め、自己点火に近い領域($Q \geq 20$)を達成するとともに、非誘導電流駆動装置により1000秒程度の長時間運転を実現する。このような性能を持つものとしてITERを設計するために、ITER物理R&Dとして世界各国のトカマク装置を用いてプラズマ閉じ込めに関するデータが集められ、ITERの物理設計が行われた。我が国では、JT-60、JFT-2Mを中心としてデータベースの提供を行うとともにITER物理R&D活動を主導的に実施した。

1) プラズマ閉じ込め

ITER物理R&Dの一環として、世界各国のトカマク装置を用いて取得されたプラズマ閉じ込めに関するデータを用いてエネルギー閉じ込め時間(我が国からはJT-60とJFT-2Mが寄与：戦略報告書図3.1.4-2)や低閉じ込め(L)モード

から高 (H) モードへ遷移するために必要なパワーの比例則 (同 JT-60 が寄与 : 戦略報告書図 3.1.4-4) を確立、改良を進めた。さらに、 α 粒子を代表とする高エネルギー粒子の閉じ込めについては、リップル損失 (同 JT-60、JFT-2M が寄与)、アルフベン固有 (AE) モードに関する研究を実施し、リップル損失の抑制に目処を得るとともに、JT-60 における新しい AE モードの発見等を通じて高エネルギー粒子と AE モードの相互作用の理解を深めた。

2) ダイバータによる熱・粒子制御

ITER での DT 燃焼灰となるヘリウムや不純物の排気については、JT-60 において排気実験を行い、ELMy H モードで優れた排気性能を実証した (図 6)。一方、負磁気シアーでのヘリウムや不純物の排気については課題を残している。また、ELMy H モードについては ITER に要求される総合性能 (閉じ込め改善度 ~ 2 、全放射損失 $\sim 80\%$ 、電子密度 $\sim 0.8x$ グリーンワルド密度) を達成できる目処がつきダイバータ熱流束の低減が見込まれる。一方、負磁気シアー運転においては、JT-60 で高放射率 (80%) との共存は実証されたものの、その際の不純物制御が今後の課題である。

3) 運転領域、ディスラプション制御

MHD 安定限界については、電流分布、圧力分布、プラズマ断面形状の効果について系統的な理解を進め (戦略報告書図 3.1.4-9)、JT-60 においてプラズマ断面の三角度が周辺 MHD 安定性の改善を通じて密度限界や閉じ込め改善に有効であることを明らかにするとともに、安定化導体によるベータ限界の向上 (戦略報告書図 3.1.4-11) の長時間維持のためには抵抗性壁モードの安定化が必要であること、自発電流が多いプラズマで発生する新古典テアリングモードの安定化に電子サイクロトロン波による局所電流駆動が有効であること (JT-60 において帰還制御による抑制を実証、JFT-2M は EC 波の印加によるテアリングモードの安定化で先駆的貢献 (図 11))、ITER のダイバータ熱流束を軽減するためには周辺部から大きなエネルギー吐き出しを伴うタイプ I ELM (周辺局在モード) の発生を回避することが望ましく、JT-60 においてプラズマ三角度とポロイダルベータ値が高い運転において ELM によるエネルギー吐き出しが抑制されることを見出した (戦略報告書図 3.1.4-15)。

また、密度限界については、従来様々なモデルが提案されていたが、グリー

ンワルドによって整理された密度限界式 ($I_p / \pi a^2$) (グリーンワルド密度) に概ね従うことが実験的に確認された。グリーンワルド密度以下での運転では、当初 ITER 工学設計の装置パラメータでは自己点火領域の達成が困難であることも明確になり、最終的な ITER 設計への変更の一因となった。

ディスラプション緩和研究としては、JT-60 において世界に先駆けてキラーペレットによる熱消滅緩和、垂直位置移動現象 (VDE) の中性点による回避、ハロー電流データベースの確立と抑制法、逃走電子の磁場揺動による抑制法の研究開発を進め、ITER 設計に反映した。またプラズマ電流消滅時定数のデータベース化による最小時定数 (ITER で 50 ミリ秒) の評価を通じて ITER 設計に貢献した。

4) 電流駆動

実験炉における長時間運転の実現に期待されている非誘導電流駆動法については、JT-60 で最大エネルギー 50 万電子ボルトの中性粒子入射加熱・電流駆動装置を世界で始めて導入し電流駆動効率として世界最高値 ($1.55 \times 10^{19} \text{A/m}^2/\text{W}$) を実現した (図 7)。また JT-60 において 110GHz 帯電子サイクロトロン波電流駆動により駆動電流として世界最高値 (0.74MA) を得た (これらはほぼ理論的予測値と一致し、ITER におけるビーム電流駆動や電子サイクロトロン波電流駆動性能の予測が高い精度で可能となった。また、TRIAM-1M では、3 時間を超える長時間トカマク放電を低域混成波電流駆動により実現した。

(2) トカマクの改良研究

トカマク方式で定常運転を実現するためには電磁誘導以外の方法でプラズマ電流を駆動する必要がある。また、経済的な核融合炉を実現するためには高いベータ値を安定に保持できる技術を開発し核融合出力密度を高めコンパクトな核融合炉を実現する必要がある。このような定常高ベータ化研究はトカマク方式の改良研究として重要な課題である。

1) 定常運転モードの開発

トカマク方式においては、循環電力の少ない高効率の定常運転を実現するためには、プラズマ中に自然に流れる自発電流 (ブートストラップ電流 $\sim \epsilon^{0.5} \beta_p I_p$: β_p はポロイダルベータ値) を利用する必要がある。このような運転モードとし

て JT-60 において内部輸送障壁（図 8）を伴う弱磁気シアーマード、負磁気シアーマード（図 9）、さらには、電流ホールモード（図 10）の開発を行った。弱磁気シアーマードと負磁気シアーマード（図 13）は定常トカマク炉の概念検討において理論的に構想されたものであり、電流ホールモードは JT-60 において実験的に見い出された。JT-60 ではそれぞれのモードで、自発電流割合が 70—80% の高性能完全非誘導電流駆動プラズマの生成に成功しており、一層の高性能化と長時間維持を実現する必要がある。

2) 高ベータ化研究

トカマクにおいて安定に保持し得るベータ値は、トロヨン則 ($\beta_t = \beta_N (I_p / a_p B_t)$: β_N ; 規格化ベータ値) により制限されており、高い自発電流割合の下で高ベータ化を図るためにはプラズマ電流の大きさに制限が生まれることから、規格化ベータ値 β_N を大きく取ることが必要となる。これまでの定常トカマク炉の設計では、規格化ベータ値として $\beta_N = 3.5—5.5$ 程度の範囲にあることから、この領域を実現することを当面の目標として研究開発を行う必要がある。

JT-60 での研究により、瞬時値として $\beta_N = 4.8$ （世界的には DIII-D の $\beta_N = 6$ が最高）、準定常値としては $\beta_N = 3.05$ を得ている。今後、一層高いベータ値の準定常維持を進める必要がある。高ベータ化準定常維持における重要な課題は、プラズマ形状・アスペクト比の最適化、電流分布の最適化、新古典テアリングモードの安定化、抵抗性壁モードの安定化等である。また、このような高ベータ定常運転におけるディスラプション回避技術の確立に向けて運転限界の拡大を図るとともに、JT-60 のディスラプション現象に対して適用が進められているニューラルネットワーク等によるディスラプション予測技術の体系化を進める必要がある。

3) プラズマ壁相互作用の研究

トカマク型実験炉においても、第一壁構造材料やプラズマ対向材料としては当面ステンレス鋼や耐熱性に優れた炭素系材料やが用いられている。一方で、発電プラントにおいては、第一壁構造材料としては低放射化フェライト鋼が、プラズマ対向材料としては高融点金属材料等が候補とされている。また、それらの使用温度条件も実験炉と発電プラントでは異なることから、発電プラント条件下でのプラズマ壁相互作用の研究とそれを踏まえた運転方式の確立が必要

となる。

低放射化フェライト鋼のプラズマ適合性試験については、JFT-2M において実験研究が進められ、適切な設計と壁調整によってプラズマ性能に及ぼす悪影響を抑えることの目処が得られつつある（図 1 2）。また、プラズマ対向材料としてモリブデン合金を用いた試験は初期の JT-60 と ALCATOR C-Mod において行われた。また、タングステン皮膜を用いた研究が ASDEX-U で実施中であり、JT-60 でも一部に導入を進めている。さらに、TRIAM-1M では、3 時間を超える放電を利用して壁の改質の影響の研究が進められており長時間放電におけるプラズマ壁相互作用の研究は、発電プラントにおけるプラズマ対向壁の成立性の目処を得る上で重要な研究課題である。

（3）トカマクプラズマの理論的研究

核融合プラズマの理論研究は、超並列計算機を中心とした計算科学技術手法やシミュレーション手法の進展を背景に、内部輸送障壁に代表される様々な構造形成を伴う閉じ込め改善の物理機構の解明や輸送制御、安定性に関する物理機構の解明が格段の進展を見せた。

特に、ジャイロ運動論やジャイロ流体モデルの進展によりトーラスプラズマにおけるグローバルな乱流輸送シミュレーションが可能となり、異常輸送の起源をもたらす 3 次元の乱流構造が明らかになった（図 1 4）。またそれら乱流構造に関する知見に基づき、プラズマ中に発生する径電場とそれに伴うプラズマのシア流や、乱流自身の非線形相互作用の結果プラズマ中に自発的に生成される層流による乱流の抑制機構やそれに基づく閉じ込め改善に関する理解が進展した。特に負磁気シアや弱磁気シアに代表されるグローバルな磁場構造の制御と乱流や層流等の揺らぎの構造の相関が明らかとなり、揺らぎの制御による閉じ込め改善や高性能プラズマ実現の理論的指針が進展した（図 1 5）。

また、これまでの古典的な理論モデルでは説明できない特異な構造を伴った磁気リコネクション過程（図 1 6）等、高性能プラズマを制限する様々のプラズマの電磁流体力学的な非線形ダイナミックスが明らかとなり、内部輸送障壁等の顕著な構造を有する高性能プラズマの制御・保持に関する理解が格段に進展した。