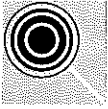




日本原子力研究開発機構機関リポジトリ
Japan Atomic Energy Agency Institutional Repository

Title	運転領域開発
Author(s)	鈴木 隆博, 長崎 百伸
Citation	プラズマ・核融合学会誌, 88(11), p.657-659
Text Version	出版社版
URL	https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?5037699
DOI	http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF/JSPF/jspf2012_11/jspf2012_11-657.pdf
Right	© 2014 The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research



研究最前線 JT-60SA リサーチプラン

3. 運転領域開発

鈴木隆博, 長崎百伸¹⁾

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門, ¹⁾京都大学 エネルギー理工学研究所

(原稿受付日: 2012年 8月27日)

真空容器内にプラズマを立ち上げ、核融合反応に適した高いプラズマ圧力での運転を行い、安全にプラズマを立ち下げるまでの一連の流れを運転シナリオと呼ぶ。核融合炉ではプラズマ外部からの磁場、加熱・電流駆動、燃料供給や排気等の制御により、安全かつ効率的な運転シナリオが必要とされる。JT-60SAはITERや原型炉に最適な運転シナリオを提供するとともに、広がりのある原型炉設計に対してどのような炉が実現可能であるかを明らかにする役割を担う。そのために、本研究領域では、他の研究領域において得られた物理的知見に基づく制御手法を活用して核融合炉に適した運転領域の開発に挑む。加えて、他の研究領域に対して魅力的な研究対象となるプラズマを提供することで、核融合プラズマの物理的理解の進展を根底で支えるのが本研究領域である。

Keywords:

ITER and DEMO contributions, integrated operation scenarios, magnetic and kinetic controls, heating and current drive, machine safety

3.1 ITER および原型炉での課題

大型トカマク装置 JT-60U を含む既存のトカマク実験に対して、ITER では核融合反応により生じたアルファ粒子による自己加熱が初めて外部加熱以上 ($Q \geq 5$) となる。このような核燃焼プラズマの物理は ITER で初めて研究できるようになる。ITER での核燃焼プラズマ研究を元に、原型炉では一定の経済性を有した発電の実証が求められ、出力密度や効率、稼働率で ITER より高い炉心プラズマ性能が必要とされる。

JT-60SA は ITER に最も近い大型超伝導トカマク装置として ITER に先立ち超伝導トカマク装置の安全な運転と制御手法を確立するとともに、JT-60SA で開発・実証した運転シナリオを ITER に提供して ITER での核燃焼プラズマ研究を支援する。また、原型炉に向けては ITER を補完すべく、高圧力プラズマを開発して出力密度を高め、高自発電流割合での長時間・定常運転手法を開発して効率と経済性を高める。そのためには安定かつ効率的な制御手法の開発が不可欠である。また、原型炉の小型化に適したプラズマ立ち上げ手法の開発は原型炉のあり得る姿を明確にする上で必須となる。

3.2 JT-60SA における研究項目

JT-60SA では第 2 章で述べた装置性能の段階的アップグレード (第 2 章表 2) に従って研究段階を設定し、上記の ITER および原型炉での課題に取り組む。本研究領域の研究開発項目の説明に移る前に、まず JT-60SA の各研究段階 (重水素実験を開始する初期研究段階 phase II 以降) で期待されるプラズマの性能に触れておくのがよいだろう

(図 1)。規格化したプラズマ性能 (規格化プラズマ圧力 β_N , 自発電流割合 f_{BS} , 規格化電子密度 f_{GW}) は初期研究段階 phase II から既に、それ以降の研究段階で実現可能な値と同レベルに達している (図 1 (b), (c))。重水素実験開始後すみやかに高い規格化性能のプラズマでの実験を開始できると期待している。ただし、主にダイバータ熱負荷の制限から維持時間が制限 (10 MW/m^2 の場合は 5 秒) を受けるが、放射ダイバータ研究を進めダイバータ熱負荷を低減させて年間中性子発生量の制限内で維持時間を伸張させることができる (図 1 (a))。統合研究段階では下ダイバータがフルモノブロック (15 MW/m^2 で 100 秒) になり、60 秒までの最大加熱パワー実験 ($33\text{--}37 \text{ MW}$) が可能になることに加え、年間中性子発生量の制限の緩和により、高圧力プラズマの長時間維持が行えるようになる。さらに密度分布の制御や金属壁への改造などにより高圧力プラズマの高密度化を進める。拡張研究段階ではさらに高いパワー (41 MW) で 100 秒間の加熱実験によりプラズマ性能を向上させる。まとめると、JT-60SA では初期研究段階から高い規格化性能のプラズマの研究開発を行い、統合研究段階以降はプラズマの高性能化に加え長時間化・定常化を行い、運転シナリオの統合を進める。以上で概観した装置性能とプラズマ性能の向上と整合するように、本研究領域では以下の研究開発を計画している。

3.2.1 超伝導トカマク装置での安全な運転と制御手法の確立

JT-60SA では外部磁場コイルにかけられる電圧が比較的小さいため急激な磁場制御を行えない。このため、小さな誘導電場で安定にプラズマを着火させ立ち上げるとも

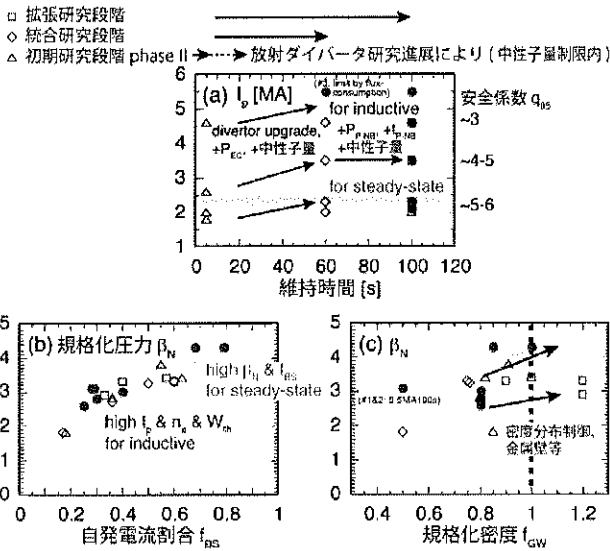


図1 研究段階の進展に沿った主要運転領域の進展（重水素実験を開始する初期研究段階 phase II 以降）。(a) プラズマ電流および安全係数と維持時間、(b) 規格化プラズマ圧力と自発電流割合、(c) 規格化プラズマ圧力と Greenwald 密度限界に対する規格化密度。最大装置性能での典型的な運転シナリオの例(○)および、初期研究段階 phase II(△)、統合研究段階(◇)、拡張研究段階(□)それぞれの研究段階での装置性能で可能な運転シナリオの例を挙げてある。なお、初期研究段階 phase II では $I_p = 4.6$ MA までしかプロットしていないが、最大値 5.5 MA での実験は初期研究段階 phase I (軽水素プラズマ) から可能である。

に、限られたコイル電圧で高い非円形度のプラズマの位置形状を追加熱の変化や Hモード遷移・逆遷移等の圧力・電流分布の変化に対して安定に制御する手法を確立する必要がある。通常運転時のプラズマ立ち下げ手法に加え、不安定性発生時や超伝導コイルのクエンチ時などでもディスプレイに至る前に安定にプラズマを立ち下げの手法の確立も必須となる。さらに、トロイダル磁場印加中に可能な壁洗浄手法の確立も必要とされる。以上は装置の安全と実験の効率的な実施に関わるため初期研究段階 phase I (軽水素実験) での確立をめざし、ITER の運転・制御手法の開発と原型炉の設計に貢献する。

3.2.2 高圧力プラズマの安定で効率的な制御手法の開発

高圧力プラズマの安定な維持には、そのプラズマの状態を計測またはシミュレーション等の予測により把握して適切な制御を行うことが不可欠になる。その制御手法は原型炉へ適用可能であるとともに、コストの観点から効率的である必要がある。初期研究段階 phase I では計測データの検証と実時間制御系への導入を行うとともに、制御機器の実時間制御機能試験やプラズマの応答特性を取得する。高性能プラズマが期待される初期研究段階 phase II からは、JT-60U で得られた知見をもとに先進的な実時間制御手法の開発を本格的に進める。例えば次のような制御およびそれらの複合制御により、閉じ込めや MHD 安定性の制御を検討している。(1) 2つの 500 keV 負イオン源中性粒子ビーム (N-NB) 電流駆動による電流分布制御、(2) 85 keV 正イオン源 NB 加熱等による圧力分布制御、(3) 電子サイクロトロン波を用いた局所電流駆動による新古典テアリング

モード抑制と安定化、(4) 真空容器内コイルによる抵抗性壁モード安定化、等。また ITER における核燃焼制御実験に先立ち、一部の加熱装置で模擬した核燃焼状態を制御する手法の開発を進め、ITER 標準運転 ($Q = 10$) での核燃焼制御に最適な制御手法を提供する。

3.2.3 原型炉に適用可能な定常運転シナリオの開発

原型炉には誘導運転から定常運転まで広いスペクトルの概念設計があり得る。そのスペクトルの中から、どの設計が経済的かつ合理的に現実可能かを明らかにするのが JT-60SA の重要課題である。そのスペクトルの中でも炉心プラズマにとって最も挑戦的な設計は定常運転をするコンパクトな炉心を有する原型炉になろう。JT-60SA では JT-60U の研究開発の成果に基づき、定常高圧力プラズマの開発を推進する。JT-60SA では、高い形状ファクター ($S \sim 7$) で高圧力化を狙うのみでなく、プラズマ近傍に設置された導体壁、導体壁前面に設置されたサドルコイル (RWM コイル)、小さなトロイダル磁場リップルとプラズマ電流に対して順・逆両方向にプラズマ回転を駆動できる 4 ユニットの接線 NB (8 MW)、分布を含む実時間制御 (上記 3.2.2 節) などを駆使して自由境界理想 MHD 安定限界を超える $\beta_N = 3.5 \sim 5.5$ を狙う。加えて、炉の稼働率を高めプラント内電力を低減する観点から、高い自発電流割合 ($f_{BS} \geq 0.7$; ITER 定常運転シナリオでは 0.5) での完全非誘導電流駆動を定常電流分布で実現することが重要である。高い閉じ込め性能と自発電流割合を有する負磁気シアプラズマの生成にも役立つよう 10 MW の N-NB は周辺部電流駆動として用い完全非誘導電流駆動を実現する。電流拡散時間は 10 秒程度と予想されるため (第 2 章の表 1 のシナリオ #5-2)、統合研究段階ではその 6 倍 (拡張研究段階では 10 倍) 近い時間にわたりプラズマを維持し電流分布の緩和した状態を調べることができる。また、多くの原型炉概念において必須とされる Greenwald 密度限界近くの高密度を達成するために、JT-60SA には 3 つのペレット入射装置を主体としてガスパフや NB と組み合わせた燃料供給と、排気速度 0-100 m^3/s で 10 段階可変のダイバータ排気を活用する。さらに周辺部密度の制御には、真空容器内に設置した誤差磁場補正コイルを摂動磁場の印加に使う。以上の要件を損なわずに、ダイバータ板の熱負荷限度を超えないよう高い放射損失割合を安定に制御し維持する放射ダイバータの研究開発も欠かせない。炉心プラズマ周辺部からの放射損失増加も視野に入れて、ダイバータ板の熱負荷低減に最適な手法を開発する必要がある。

JT-60SA でめざす代表的な運転シナリオとして第 2 章の表 1 に挙げたシナリオ #5-2 が原型炉に向けた炉心プラズマ性能の目標になる。一方で炉自体をコンパクトにするためにはプラズマ電流の生成維持に用いる中心ソレノイド (CS) を小さくする必要もある。CS の大きさは電磁誘導で立ち上げられるプラズマ電流の最大値に比例するため、CS を小さくするためにはプラズマ電流を電磁誘導以外で定格値まで立ち上げる手法が不可欠になる。逆に、プラズマ電流の非誘導立ち上げが可能かどうかで炉のサイズや原型炉設計の方向性は大きく変わることになる。自発電流と外部

電流駆動によるプラズマ電流の非誘導立ち上げは JT-60U 等で実証されているが、定常運転シナリオに接続できるかについては明らかになっていない。JT-60SA ではプラズマ電流の非誘導立ち上げを含む定常運転シナリオの開発を行い、原型炉のあり得る姿を明確にする。

3.2.4 ITER へ提供する運転シナリオの開発と実証

ITER ではプラズマ電流 15 MA で $Q = 10$ の核燃焼制御を行う標準運転に加え、9 MA の $Q = 5$ の定常運転と 12.5 MA のハイブリッド運転に対するシナリオを必要としている。ITER ハイブリッド運転は材料照射試験等の目的で中性子フルエンスを最大化するよう設計された運転である。JT-60SA は ITER に先駆けてこれらのシナリオを開発し、ITER に対して提供する。ITER 定常運転シナリオ ($\beta_N \sim 3$, $f_{BS} \sim 0.5$) に対しては 3.2.3 節で述べた原型炉の定常運転シナリオ開発の過程で開発する。ITER 標準運転と ITER ハイブリッド運転については、JT-60SA では第 2 章の表 1 に挙げたシナリオ #4-1 (表面安全係数 $q_{95} \sim 3$) および #4-2 ($q_{95} \sim 4$) の開発をベースに ITER の装置性能と規格化プラズマパラメータに整合したシナリオを提示する。いずれの ITER 運転シナリオでも 3.2.2 節で述べた模擬

核燃焼の制御とシナリオの整合性は重要になる。また、ヘリウム灰の排気特性についても、ヘリウム NB 入射などによって調べる必要がある。

3.3 研究計画・提案から実験に向けて

JT-60SA での実験に向けた研究計画の策定と実験提案の検討にあたっては、シミュレーション研究が重要な役割を占める。JT-60U をはじめとした既存の実験結果によりシミュレーションコードを検証し、信頼性の高い予測に基づいた研究計画が必要とされる。これにより ITER に十分先立って JT-60SA の実験を円滑に遂行し、ITER を支援するとともに原型炉設計活動に貢献して核融合炉を早期に実現する。現在の研究計画段階から実験と理論・シミュレーションを両輪とした検討を尽くして実験に臨むことが肝要である。

国内の研究者のみならず、特に若手研究者と学生のみさんの積極的な参加と貢献を歓迎します。

参考文献

- [1] 鈴木隆博：プラズマ・核融合学会誌 86, 530 (2010).

