IFERC-CSC 大型計算機利用報告書

2025 年度

研究課題名	*Modelling and Simulation for Fusion Experiments and Reactors*
上記の頭文字	*MSFER*

＊申請時のタイトル、略称を記載してください

研究代表者 (PI):

研究代表者名	相羽信行

１．成果の概要（２００字程度）

JT-60SA 初期研究フェーズ（OP2）におけるプラズマ運転シナリオ検討を、炉心統合コード GOTRESS+とダイバータ統合コード SONIC を結合した「コア－周辺結合シミュレーション」により実施した。OP2 標準運転シナリオ・ハイブリッド運転シナリオの双方において、目標のプラズマパラメータの達成とダイバータ熱負荷の十分な低減を両立できることを示した。その他、日本の原型炉（JA DEMO2014）におけるベータ限界や ELM 制御のための共鳴誤差磁場（RMP）印加に関する検討を行った。

２．成果の詳細（図、表等を含めて A4 で 2～3 ページ程度）

1. GOTRESS+/SONIC を用いたコア－ペデスタル－周辺結合シミュレーションによる JT-60SA 運転シナリオ検討

本研究ではまず、GOTRESS+/SONIC を用いたコア－ペデスタル－周辺（SOL／ダイバータ）結合シミュレーションにより、JT-60SA の運転シナリオ検討を行った結果を紹介する。

H モード運転の予測モデリングにおいては、炉心性能とパワー排出を自己無撞着に扱うことが不可欠であり、その中でも ペデスタル密度の高信頼度予測が中心的な役割を果たす。ペデスタル密度は、炉心閉じ込め性能およびブートストラップ電流に直接影響するだけでなく、統合輸送シミュレーションにおける境界条件を規定する重要なパラメータである。

本研究では、Saarelma−Connor ペデスタル密度モデル、統合ダイバータコード SONIC、および炉心輸送モデリングスイート GOTRESS+ を統合し、炉心－ペデスタル－SOL／ダイバータを自己無撞着に取り扱うシミュレーションフレームワークを開発した。本フレームワークでは、ペデスタル

の粒子輸送および電離物理を、パワー排出および中性粒子挙動によって決定されるセパラトリクス条件と結び付けることにより、定常 H モード条件下におけるペデスタル密度の自己無撞着な予測を可能としている。

本フレームワークを、JT-60SA 初期研究フェーズ（運転フェーズ 2：OP2）における定常運転シナリオの予測に適用した。OP2 の標準運転シナリオでは、ダイバータ熱フラックス$q_{\parallel} \leq 10\ \mathrm{MW\ m^{-2}}$を満たしつつ、規格化ベータ値$\beta_N \geq 1.8$および閉じ込め改善度$H_{98}(y,2) \simeq 1.0$を達成することが要求されている。一方、ハイブリッド運転シナリオでは、$q_{\parallel} \simeq 5\ \mathrm{MW\ m^{-2}}$を達成しつつ、$\beta_N \gtrsim 2, H_{98}(y,2) \gtrsim 1.1$を維持できることが求められている。

今回の数値計算により、炉心・周辺ペデスタル・SOL／ダイバータ領域を統一的に取り扱ったシミュレーション予測を行った結果、標準運転シナリオでは比較的多くの燃料供給を行うことにより、セパラトリクス電子密度が$n_{e,\mathrm{sep}} \simeq (3.8\text{–}3.9) \times 10^{19}\ \mathrm{m^{-3}}$となりつつ、$\beta_N \simeq 2.0\text{–}2.3$, $H_{98}(y,2) \simeq 1.0$および$q_{\parallel} \leq 10\ \mathrm{MW\ m^{-2}}$を同時に達成可能であることが示された。また、ハイブリッド運転シナリオにおいては、ネオン不純物を適切に用いることにより、ダイバータ熱フラックスを$q_{\parallel} \leq 5\ \mathrm{MW\ m^{-2}}$に抑えつつ、$\beta_N \sim 3.0, H_{98}(y,2) \sim 1.2$という高性能プラズマが実現可能であることが示された。

これらの結果は、本フレームワークが JT-60SA OP2 シナリオの実現可能性および運転領域を評価するための堅牢な予測基盤を提供することを示しており、ITER や将来の核融合装置に対しても高い関連性を有する成果である。本研究成果は IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2025) において口頭発表に選出された。

2. JA DEMO 2014 を対象とした *RMP* による *ELM* 制御研究

次に、JA DEMO 2014 を対象とした、共鳴磁場摂動（RMP）による ELM 制御に関する研究成果を紹介する。本研究では、定常トカマク型核融合実証炉の設計概念である JA DEMO におけるエッジ局在化モード（ELM）抑制を目的として、真空磁場モデルに基づく RMP コイル概念の検討を行った。ELM 抑制に有効な RMP コイル配置および電流パターンの探索に加え、ペデスタル高さ依存性を考慮した ELM 抑制に必要なコイル電流の評価を行った。また、RMP が磁気流体力学（MHD）不安定性のトリガ、ダイバータフットプリント、ならびにアルファ粒子損失に及ぼす影響についても評価した。

トロイダル方向に配置された 1 列の RMP コイルに流す電流を、整数トロイダルモード数 nの波形ではなく、非整数 nの正弦波状波形とした場合、以下の点が示された。

1. *ELM* 抑制に必要なコイル電流が低減される
2. *ELM* 抑制が可能なプラズマ条件の範囲が拡大する
3. $m/n = 2/1$および $3/2$の摂動磁場振幅が、ロックドモードのスケーリングよりも小さい
   （ここで mはポロイダルモード数である）

4. アルファ粒子損失の増加は、加熱性能劣化およびダイバータ熱負荷の観点から許容可能な範囲にとどまる
5. ダイバータ・ストライクポイントおよび損失アルファ粒子の入射位置に顕著な局在化は見られない

以上より、非整数 nの電流波形を用いる手法は、DEMO における RMP による ELM 制御において有利であることが明らかとなった。本研究成果は Nuclear Fusion 誌に掲載された。

3. JA DEMO 2014 における壁無しベータ限界向上に向けたプラズマ分布最適化

最後に、JA DEMO 2014 を対象として、壁無しベータ限界の向上を目指したプラズマ分布調査の結果を紹介する。JA DEMO 2014 のパラメータ設定は、理想磁気流体力学（MHD）安定限界に近いことが知られている。そこで本研究では、H モードのペデスタルおよび内部輸送障壁（ITB）を有する平衡配位について、理想 MHD 安定性を向上させるために望ましい電流密度分布および圧力分布の傾向を調査した。

ペデスタル領域における最適な密度・温度分布は EPED1 モデルに基づいて決定し、これらの最適化プロファイルを用いて炉心領域における望ましい分布特性を検討した。MHD 平衡計算には、密度・温度分布と整合したブートストラップ電流を含めている。完全導体壁による安定化効果は考慮していないため、本研究で得られた安定平衡は、抵抗性壁モード（RWM）に対するフィードバック制御を必要としない。

さらに、アスペクト比の変化が理想 MHD 安定性特性に及ぼす影響についても検討した。その結果、ITB には好ましい半径位置が存在し、そこにおいて体積平均ベータの向上と、炉心領域とペデスタル領域に起因する不安定性の分離が同時に実現されることが示された。また、ITB 領域においてより大きな磁気シアを実現するよう電流密度分布を制御できれば、ベータ限界をさらに向上できることが明らかとなった。

一方、ペデスタル高さについては、炉心不安定性との結合を避ける観点から、限界安定状態から一定程度低減する方が望ましいことが示された。これらの特性は、検討したすべてのアスペクト比に共通して確認された。さらに、壁無し条件（no-wall 条件）における規格化ベータ限界は、検討したアスペクト比に対しておおよそ$\beta_N \simeq 3$であり、JA DEMO 2014 のパルス運転における目標値 $\beta_N = 2.6$を上回ることが示された。本研究成果は Fusion Engineering and Design 誌に掲載された。

３．研究のキーワード

1.トカマク	**2.原型炉**	**3 統合シミュレーション**	**4.炉心―周辺結合**	**5.ベータ限界**