

理論シミュレーション共同研究の進展
Progress of collaborative research on theory and simulation

相羽 信行
Nobuyuki Aiba

量研那珂
QST Naka

現在の日本における核融合原型炉研究開発は、2015年6月に設置された原型炉設計合同特別チーム（以下、「特別チーム」という）を主体として進められている。この特別チームは、QST/NIFS/大学/産業界からのメンバーによって構成され、2016年2月に策定された「原型炉開発に向けたアクションプラン」[1]に基づいて原型炉設計・研究開発を推進している。このアクションプランには理論・シミュレーション研究に関する項目が設けられており、この内容と整合を図りつつ原型炉開発に必要な理論・シミュレーション研究やシミュレーションコード開発計画をオールジャパンで進めるための議論を「特別チーム理論・シミュレーションワーキンググループ」にて行った[2]。ここで検討された計画を推進することを主な目的として、原型炉研究開発理論シミュレーション共同研究（QST担当）が進められており、令和2年度は8件のテーマが採択されている。以下では、各テーマの目的と現状について簡単に紹介する。

「プラズマ輸送・電流駆動を考慮した原型炉における定常高ベータプラズマの実現に向けた数値解析」は鳥取大学との共同研究である。特別チームが現在の原型炉設計を進める基準としているJA DEMO 2014[3]では、定常運転時のプラズマの規格化ベータ値が3.4、閉じ込め改善度が1.3と設定されているが、このベータ値は真空容器による安定化効果を考慮しなければ達成できないと考えられる上、1以上の閉じ込め改善度を実現するには内部輸送障壁が必要となる。そのため、加熱・電流駆動を考慮した輸送シミュレーションおよびMHD安定性解析を行い、JA DEMO 2014のパラメータを満たしつつロバストにMHD安定なプラズマ圧力・電流分布を明らかにすることを目的としている。現状では、プラズマ輸送は考慮せずにプラズマ分布を人為的に変化させたときの電流分布・MHD安定性への影響の解析を進め、安定化に望ましい分布形状を調べている。

「原型炉に向けた3次元平衡解析」は京都大学との共同研究である。原型炉において燃焼効率を高めるためにはアルファ粒子の閉じ込め特性を

正確に理解する必要があるが、トロイダルリップルや真空容器の非軸対称性から生じる3次元磁場はアルファ粒子を損失させる要因であるため、そのため、燃焼のための閉じ込めとヘリウム灰の排気を両立するための磁場配位の最適化を、3次元MHD平衡コードおよび高エネルギー粒子閉じ込め解析コードを用いて進めることを目的としている。現状では、JA DEMO 2014のコイル配置・真空容器形状を基にして3次元MHD平衡の計算が可能となったため、この結果を用いたアルファ粒子の粒子軌道計算の準備を進めている。

「核燃焼効率評価のための統合輸送コード開発」は京都大学との共同研究である。原型炉において核燃焼による高温プラズマ維持には熱的不安定性の回避などの燃焼制御が必要となる。核燃焼効率の正確な評価は適切な制御を行うために不可欠であるが、追加熱・電流駆動のために入射される中性粒子ビームなどによって生じる高エネルギーイオンの輸送解析では運動論効果を考慮することが重要である。そのため、正確な核燃焼効率評価を行うための運動論的統合輸送シミュレーションコードの開発を進めることを目的としている。現状では、有限軌道幅効果の導入などのコードの改良を進めるとともに、高エネルギーイオンの径方向拡散に対する運動量依存性の解析を進めて正確な核燃焼効率評価に適したモデル検証を行っている。

「選択的加熱による粒子・熱輸送制御に関するグローバルジャイロ運動論シミュレーション研究」は京都大学との共同研究である。原型炉において、燃料粒子の補給とヘリウム（He）灰の吐き出しの両立する制御手法の開発は不可欠である。上記の制御を実現しうる手法の1つとして、電子・燃料イオン・He灰の選択的加熱が検討されているが、乱流輸送に基づく粒子閉じ込め特性・密度分布変化と選択的加熱の影響を自己無撞着に取り扱うにはジャイロ運動論モデルに基づく大域的なシミュレーションが不可欠である。そのため、上記シミュレーションを実現するためのグローバルジャイロ運動論シミュレーションコード

の改良, および同コードを用いた選択的加熱による熱・粒子閉じ込め特性への影響の解明を目的としている。現状では, 原型炉などを想定した実磁場平衡や多粒子種衝突オペレータを導入するためのコード開発を進めている。

「原型炉に向けたジャイロ運動論モデルによる電磁乱流シミュレーション解析」は名古屋大学との共同研究である。炉心プラズマの熱・粒子輸送特性はプラズマ分布を決定するものであり, その理解は原型炉プラズマの性能予測精度の向上に必要な不可欠である。この輸送特性の解明に向けてジャイロ運動論シミュレーション研究による解析が進展しているが, 多くの解析は静電乱流を対象としていた。原型炉で想定される高ベータ定常運転では, 電磁揺動効果が有意になると予測されるため, 同効果を考慮した輸送特性予測研究が必要となる。そのため, 電磁ジャイロ運動論コードを用いて既存装置の実験結果やJT-60SAで想定される高ベータ運転シナリオの電磁乱流解析を行い, 高ベータ運転時の輸送特性に対する電磁揺動効果を解明すると共に, 原型炉プラズマでの同効果の影響を予測することを目的としている。現状では, JT-60U等の既存装置における加熱による炉心輸送特性の変化や周辺ペデスタル領域におけるELM発生条件やinter ELM輸送に対する電磁揺動効果の解析を進めている。

「原型炉における不純物制御に向けた統合輸送シミュレーションモデルの高度化」は九州大学との共同研究である。JA DEMO 2014ではダイバータ板に重金属であるタングステン (W) を用いることを想定しているが, このW不純物が炉心領域に蓄積すると放射損失による炉心プラズマの冷却が生じ, 最悪の場合放射崩壊と呼ばれる急激な放電停止を誘発する。このW不純物が炉心に蓄積しないように排気するには, 電子やイオンの高周波加熱が有効であることが実験的に確認されている。そのため, 原型炉において高周波やアルファ粒子による電子加熱でW不純物排気を実現するために, 不純物の粒子輸送が計算できる統合輸送シミュレーションコードの開発, および同コードを用いた物理機構の解明や加熱手法の最適化検討を目的としている。現状では, W多価イオンのイオン化・再結合を考慮した拡散輸送を計算できるように統合輸送シミュレーションコードの改良を進めている。

「定常運転原型炉プラズマにおける不純物入射によるダイバータ熱負荷低減シナリオの検討」は名古屋大学との共同研究である。原型炉ではダイバータ熱負荷を制御するためにアルゴン (Ar) などの不純物を注入することを検討しているが, この不純物が炉心に蓄積することで燃料希釈や放

射損失による核融合出力の低下が懸念される。また, 定常運転のためには完全非誘導電流駆動状態での運転が必須であるが, 上記の不純物の輸送を考慮した非誘導電流駆動の計算は殆ど行われていない。そのため, 所定の核融合出力と完全非誘導電流駆動状態を維持する条件下でのダイバータ熱負荷低減シナリオを, 統合輸送シミュレーションによって検討することを目的としている。現状では, 核融合出力一定・完全非誘導電流駆動を実現する帰還制御をシミュレーションコードで実現するための改良を進めると共に, 不純物力と電流駆動に必要な中性粒子ビームのパワーの依存性を解析している。

「原型炉ダイバータシミュレーションの予測精度向上に向けた基礎的検討」は慶應大学との共同研究である。原型炉においてダイバータ板への熱負荷を低減する非接触ダイバータの実現は不可欠であり, そのための統合ダイバータシミュレーションコードによるダイバータプラズマ特性の予測が重要である。しかし, 現状のシミュレーションでは既存実験装置の非接触ダイバータを定量的に再現するまで至っておらず, 物理モデルの拡張などによるシミュレーションの信頼性向上が求められている。そのため, 非接触ダイバータに関連する基礎物理過程の解明を進め, その結果を統合ダイバータシミュレーションコードに取り入れるためのモデル開発を行うことを目的としている。現状では, JA DEMO 2014を基にした原型炉非接触ダイバータプラズマの特性についてエネルギーバランスに着目した解析を進めると共に, 同プラズマにおけるMARを含む原子分子過程を考慮するためのモデル構築・解析, さらにタングステン不純物の輸送解析を進めている。

[1] 「原型炉開発に向けたアクションプラン」, 文部科学省ホームページ (https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/houkoku/1412800.htm)

[2] 「理論・シミュレーションワーキンググループ報告書」, QST-M-19, Dec. 2018. (https://repo.qst.go.jp/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=74938&item_no=1&page_id=13&block_id=21)

[3] Y. Sakamoto et al., Proc. 25th IAEA FEC, FIP/3-4Rb, St. Petersburg, Russia, (2014)