

小特集

統合コードによる磁場閉じ込め核融合 プラズマシミュレーションの現状と今後の展望

Simulation of Magnetically Confined Fusion Plasma
by Integrated Code and Its Prospect

1. 核融合プラズマシミュレーションに向けた統合コード開発

1. Development of Integrated Code for Fusion Plasma Simulation

林 伸彦, 福山 淳¹⁾, 村上定義¹⁾, 横山雅之²⁾, 藤田隆明³⁾

HAYASHI Nobuhiko, FUKUYAMA Atsushi¹⁾, MURAKAMI Sadayoshi¹⁾,

YOKOYAMA Masayuki²⁾ and FUJITA Takaaki³⁾

量子科学技術研究開発機構, ¹⁾京都大学大学院工学研究科, ²⁾自然科学研究機構核融合科学研究所,

³⁾名古屋大学大学院工学研究科

(原稿受付: 2019年5月20日)

核融合プラズマの様々な物理現象が連携する自律的、複雑な現象を扱う有効な手段の1つとして、統合コードが開発、利用されている。本小特集では、主に磁場閉じ込め核融合プラズマの統合コードとそれを構成する物理モデルの概要、国内外の開発状況、物理解明や実験解析、シナリオ構築への適用例、今後の展望、等について体系的にまとめる。その中で本章は、小特集の最初の章として、統合コードの必要性・構想・方向性について概略する。また、日本の原型炉開発に向けた統合コードの開発工程と各工程の目標、将来のJT-60SAと国際熱核融合実験炉ITERの実験に対する役割とそれぞれを利用したモデル検証のスケジュール、等について述べる。そして、本小特集で統合コードの詳細を説明するのに必要な第2章から第5章までの全体構成について述べ、次章に繋げる。

Keywords:

Integrated code, magnetic confinement, modeling, simulation

1.1 はじめに

核融合プラズマの物理解明や実験解析には、数値シミュレーションが重要な役割を果たす。核融合プラズマは、空間的にはプラズマ全体にわたって、時間的には放電時間にわたって、様々な時空間スケールの物理現象が相互に影響を与えて自律的、複雑な挙動を示す。単一の第一原理シミュレーションコードで異なった時空間スケールの多階層の現象を扱う試みが進みつつあるが、現在でも非常に挑戦的な課題である。一方、このようなプラズマを扱う有効な手段の1つとして、磁場閉じ込め核融合プラズマを対象に、プラズマの輸送コードを中心として、MHD (Magneto Hydrodynamics) 平衡コード、加熱・電流駆動コード、MHD 安定性解析コード、ダイバータコード等、時空間スケールの特定の階層を扱う各種コードを組み合わせる統合コードが開発・利用されている。このような統合

コードは、物理解明や実験解析だけでなく、運転シナリオ構築や炉設計にも活用されている。統合コードは、現在も日々、物理モデル等の改良・追加が進められていると共に、近年では用途に応じて、第一原理コードそのものや機械学習を用いたモデルも開発され組み合わせられる等、予測精度・信頼性の向上が図られ開発が進められている。

磁場閉じ込め核融合プラズマの統合コードに関する本学会誌記事としては、2005年の解説記事[1]で国内における核燃焼プラズマ統合コード構想 (BPSI: Burning Plasma Simulation Initiative) を中心に、京都大学で開発されている統合コード TASK のモデルや結果について紹介されている。また、小特集及びプロジェクトレビューの一部として、核融合科学研究所 (核融合研) で開発されている統合コード TASK3D について計画の概要や開発の進展、炉設計ツールとして見た場合の統合コードの役割が述べられて

National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, Naka, IBARAKI 311-0193, Japan

corresponding author's e-mail: hayashi.nobuhiko@qst.go.jp

いる[2,3].

本小特集では、より広く、統合コードとそれを構成する物理モデルの概要、国内外の開発状況、物理解明や実験解析、シナリオ構築への適用例、今後の展望、等について体系的にまとめる。その中で本章は、小特集の最初の章として、統合コードの必要性・構想・方向性について概略する。また、関連した日本の原型炉開発に向けた統合コードの開発工程と各工程の目標、将来のJT-60SAや国際熱核融合実験炉ITER等の実験に対する役割とそれぞれを利用したモデル検証のスケジュールについて述べる。そして、本小特集で統合コードの詳細を説明するのに必要な第2章から第5章までの全体構成について述べ、次章に繋げる。

1.2 統合コード開発の現状

様々な物理・工学モデルを統合したシミュレーションコードは、核融合プラズマ実験の解析ツールとして役立つだけでなく、核融合プラズマで現れる様々な相互結合現象の理解、核融合プラズマ挙動の予測にも有効である。

統合コードに必要なモデルは、以下に例として挙げるように物理課題だけでなく工学課題も包含しなければならない。

－物理課題：

- ・熱／粒子／運動量それぞれの輸送と閉じ込め
- ・新古典輸送物理
- ・乱流物理
- ・MHD不安定性
- ・高エネルギー粒子物理
- ・粒子補給／加熱・電流駆動
- ・スクレイプオフ層(SOL)／ダイバータ、プラズマ－壁相互相互作用
- ・運転シナリオ（着火からシャットダウンまで）

－工学課題：

- ・外部コイル電流／電圧
- ・電磁力・熱負荷
- ・計測モデリング
- ・モデルに基づいた実時間制御
- ・統合制御システム（プラズマ位置・形状、温度・密度等の分布、MHD不安定等の同時制御）

上記の課題の各々を取り扱えるコードをまず開発・改良して、各々の課題に関連する物理機構を理解し予測する必要がある。世界には既に理論モデルから第一原理コードまで様々なレベルのモデル・コードがあり、それらを活用できる。そして、複数の物理機構が結合した現象を理解してプラズマの自律的、複雑な挙動を予測するためには、上記課題を記述するモデル・コードをモジュール化し、それらを統合したコードを開発する必要がある。ただし、各モジュールには扱える時空間スケールに限りがある等、利用に制限があることが考えられるので、モジュールの統合にあたっては第一原理シミュレーションと実験と比較して注意深く検証する必要がある。従来の統合コードは基本的には、MHD平衡における磁気面を横切る1次元のプラズマの輸送を解く輸送コードを中心に、各種物理・工学モ

ジュールを結合したものである。統合コードを構成する物理モジュール群の詳細については、第2章で述べる。工学モジュールについては、紙面の都合上割愛するが、物理モジュールに並び重要である。特に、核融合プラズマでは、外部からの加熱に比べ核融合反応による自己加熱が支配的であり、プラズマの自律性が強い状況で制御する必要がある。従来のPID制御以上の先進制御が必要になることが予想される。また、核融合プラズマを確実に制御するための計測器や制御コントローラの選定を行う計装制御の検討にも、統合コードの果たす役割は重要である。

上記の統合コードの構想は国内ではBPSIでまとめられ、現状主に3つの統合コードの開発が進められている。量子科学技術研究開発機構が中心に開発しているTOPICS[2]、京都大学と核融合研と九州大学が中心に開発しているTASK[3]、名古屋大学が中心に開発しているTOTAL[4]である。各々の統合コードには他にはないモデルがあり、必要に応じて他の統合コードがもつモデルを導入して協力した研究を行っている。これらの国内の統合コードの詳細と国外の開発状況は第3章で述べる。さらに、これらの統合コードを用いた物理解明の実例を第4章で紹介する。

1.3 核融合原型炉に向けた統合コード開発の課題

原型炉では燃料増倍率を確保するために計測や加熱装置用のポートの数が制限されると考えられることから、核融合プラズマの動的挙動を確かかつ正確に予測できるシミュレータ開発が必要になる。全ての重要な物理・工学課題を網羅した統合コードはシミュレータになりえる。しかし、統合コードによる予測の信頼性を向上させるためには、用いているモデル・コードの実験による検証が必須である。大型ヘリカル装置(LHD)等の既存装置の実験および将来のJT-60SAやITERの実験を用いたモデル検証を効率良く行うために、実験家を含めてより多くのユーザーが容易に運転シナリオ検討に利用できる等の実験との連携を考えた開発・整備が必要である。未だ実験が行われていないプラズマの挙動を予測し、その予測を確認するための実験(運転シナリオ)を策定・提案し、データを取得して検証するということを、統合コードの開発プロセスの1つとして行う必要がある。

日本の核融合原型炉開発に向けたアクションプランのチェックアンドレビュー(C&R)[4]には、「原型炉を見据えた高ベータ定常プラズマ運転技術の確立」の項目に統合コードに関する記述があり、図1に示す様に、2025年から数年以内の第2回中間C&Rに「ダイバータを含む統合シミュレーションのJT-60SA等による検証」、2030年代の原型炉段階への移行判断で「ITER燃焼制御の知見を踏まえた統合シミュレーションにより、非誘導定常運転の見通しを得る」となっている。このC&Rと移行判断をクリアできるように統合コードの開発を進めねばならない。そのため、原型炉設計合同特別チームの理論・シミュレーションワーキンググループのもとで、統合コードや第一原理コードを含めた開発計画が議論され、まとめられた[5]。

ITERと原型炉におけるプラズマの予測・制御や運転



図1 統合コードに関わる核融合炉原型炉開発に向けたアクションプランのチェックアンドレビュー (C&R) の達成目標と、原型炉段階への移行判断、JT-60SAとITERの実験スケジュール。

シナリオの設計をめざしたモデル・コードの検証は、JT-60SA計画[6,7]の主要な目的の1つである。図2に示す様に、JT-60SA実験で、高ベータ・高自発電流割合のプラズマでの検証を行う。一連の予測・実験策定・検証方法のサイクルを構築・確立してITERを用いた研究の効率化、原型炉の予測と運転シナリオ策定に活用する。そして、ITER実験が開始されれば、燃焼プラズマでモデル・コードの検証を行い、JT-60SAとITERの両方の検証から、原型炉の予測・シミュレータの信頼性向上を図ることが考えられている。

原型炉に向けて統合コードに求められる役割を担うため、現状不足している物理・工学モデルの開発や既存モデルの改良等を行い、その統合コードを基に運転シナリオの作成や制御検討等に使うシミュレータを開発する必要がある。物理解明のためにモデルを追加することやモデル自体の改良を行って、統合コードのモデルを高度化することは、高い計算機資源を要求し長時間の計算を要するおそれがある。モジュールによっては、スーパーコンピュータの大規模並列計算やGPGPU等をもつ特定の計算機での実行を必要とする場合もある。そのために、統合コードの全てのモジュールを同一計算機で動かすことを想定するだけでなく、ネットワーク上にある複数の計算機を使って計算資源の有効利用と分散並列処理による高速化を図る。これには、最新の計算科学の知見の導入が必要であろう。一方、シミュレータには、運転シナリオ作成や計装制御検討、実時間制御等、様々なレベルのものがあるが、概して少ない計算機資源で短時間の計算を求められる。そのため、データベースや機械学習等も用いたモデルの簡易化が求められる。したがって、これからはモデル高度化による物理解明

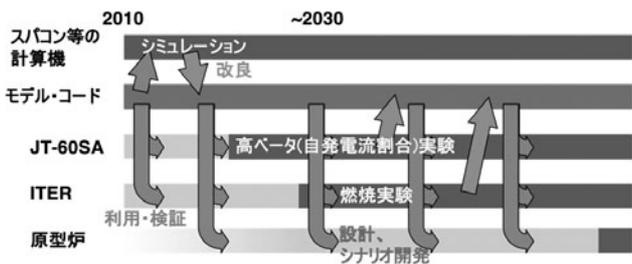


図2 理論モデルとシミュレーションコードによる予測と実験との比較による検証の計画。

と簡易化によるシミュレータ構築の2つの要求に適応した統合コード開発が必要であろう。統合コードで使用するモデル開発に関しては、当然、第一原理シミュレーションと実験の知見が必須である。そのため、アクションプランにある第一原理シミュレーションコード開発計画と連携して、第一原理コード自体を統合コードに結合するだけでなく、第一原理シミュレーションの結果を模擬できる簡易化したモデルの開発も欠かせない。また、実験データに基づく経験(比例)則も簡易化したモデルとして活用できるが、別途、物理解明が必要となる。物理解明やシミュレータの目的に応じて様々なレベルのモデルを開発し使えるようにすべきである。現状でモデルがないものに関しては、まず簡易的なもので良いので最低限のモデルを開発し、改良していくことを考える必要がある。上記で述べたモデルの高度化や簡易化の最近の進展は、第5章で紹介する。

特定の統合コードの枠にとらわれずに統合コードの開発を協力して進めるためには、モジュールの相互利用が容易にできるようにする必要があり、そのためにモジュール間のデータ交換等のインターフェースを定義する共通のフレームワークが欠かせない。このフレームワークは、モジュールの相互利用だけでなく、複数のモデル同士の比較検証や実験との比較検証にも役立つ。国内的にはBPSIの基に開発されたBPSD (Burning Plasma Simulation Data) というデータインターフェースに基づくフレームワークがあり、TASK系の統合コードを中心に活用されている。一方、ITER機構にはIMAS (Integrated Modelling and Analysis Suite) [8]というフレームワークの開発が進められており、各国のコードのモジュール化および統合、国際トカマク物理活動(ITPA: International Tokamak Physics Activity)におけるシミュレーション・実験データの交換に利用されている。これらのフレームワークを活用した協力が、統合コードの効率的な開発に求められる。上記のフレームワークに関しては、第3章で紹介する。

コードの検証には、精度確認(同じ現象を扱う複数のコード間ベンチマーク等)と妥当性検証(コードの結果と実験結果との比較)の2つがある。上で述べたフレームワークを用いることができれば確認・検証を効率的に行うことができ、コードの不確実性の特定とその定量化を容易に実現できる。そして、実験の測定データを活用してモデルとコードを改良することにより、予測の不確実性を最小化しつつ、その不確実性を定量化することで予測の信頼性を向上させることができる。

1.4 まとめ

本章は、小特集の最初の章として、統合コードの必要性・構想・方向性を概略し、関連した日本の原型炉開発に向けた統合コードの開発工程と目標、JT-60SAやITER等の実験に対する役割とそれぞれを利用したモデル検証のスケジュールについて述べた。第2章から第5章では、次の構成で統合コードの詳細を説明する。第2章で統合コードを構成する物理モジュール群について、第3章で国内外の統合コードの開発状況を紹介する。そして統合コードを

使った実験解析や物理解明，運転シナリオ構築の実例を第4章で示す．第5章で統合コード開発の今後の展望として，進展著しい情報科学等の最新の知見を取り入れ，従来の枠に囚われない開発について紹介する．最後の第6章でまとめる．

参考文献

- [1] 福山 淳, 矢木雅敏: プラズマ・核融合学会誌 **81**, 747 (2005).
- [2] 横山雅之: プラズマ・核融合学会誌 **92**, 601 (2016).
- [3] 横山雅之: プラズマ・核融合学会誌 **92**, 814 (2016).
- [4] 文部科学省核融合科学技術委員会:
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/index.htm
- [5] 原型炉設計合同特別チーム, 理論・シミュレーションワーキンググループ報告書: <http://id.nii.ac.jp/1657/00074926/>
- [6] JT-60SA Research Plan v4.0, http://www.jt60sa.org/pdfs/JT-60SA_Res_Plan.pdf
- [7] 林 伸彦, 福山 淳: プラズマ・核融合学会誌 **88**, 678 (2012).
- [8] F. Imbeaux *et al.*, Nucl. Fusion **55**, 123006 (2015).