

理論・シミュレーション ワーキンググループ報告書

Working group report on the theory and simulation researches

原型炉設計合同特別チーム

Joint Special Design Team for Fusion DEMO

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

**National Institutes for
Quantum and Radiological Science and Technology**

**理論・シミュレーション
ワーキンググループ報告書**

原型炉設計合同特別チーム

平成30年12月

目次

はじめに.....	1
全体概要.....	2
炉心プラズマ統合シミュレーション研究開発.....	6
ダイバータシミュレーション研究開発.....	14
ジャイロ運動論的乱流輸送シミュレーション研究開発.....	18
高エネルギー粒子輸送シミュレーション研究開発.....	25
MHD・ディスラプションシミュレーション研究開発.....	30
核燃焼制御シミュレーション研究開発.....	37
材料照射効果シミュレーション研究開発.....	42
まとめ.....	47

はじめに

原型炉設計合同特別チーム(以降、特別チーム)に設置した理論・シミュレーションワーキンググループ(以降、理論・シミュレーション WG)の活動目的は、原型炉開発に必要な理論・シミュレーション研究やコード開発計画を、文部科学省の原型炉開発総合戦略タスクフォースが策定したアクションプランと整合を図りつつ、オールジャパンでプロジェクト化する方策を検討することにある。活動内容としては、1) アクションプランの具体化、2) 研究開発計画の策定、3) 全日本的な取組を推進するための体制構築等があげられる。

構成メンバーは、矢木雅敏(量研・主査)、坂本宜照(量研・世話人・特別チームリーダー補佐)、相羽信行(量研・幹事)、石井康友(量研・タスクフォースメンバー)、井手俊介(量研)、林伸彦(量研)、星野一生(量研、(現)慶応大)、渡辺淑之(量研)、松山顕之(量研・事務局)、岸本泰明(京大)、中村祐司(京大)、村上定義(京大)、石澤明宏(京大)、森下和功(京大)、今寺賢志(京大)、福山淳(京大名誉教授、アドバイザー)、藤田隆明(名大)、渡邊智彦(名大)、前山伸也(名大)、藤堂泰(核融合研)、沼波政倫(核融合研)、河村学思(核融合研)、糟谷直宏(九大)、古川勝(鳥取大)、伊庭野健造(阪大)、畑山明聖(慶応大・アドバイザー)、井戸村泰宏(原子力機構)、松岡清吉(原子力機構、(現)核融合研)、計 28 名からなる。

これまでに 6 回の会合(平成 28 年 12 月 20 日、平成 29 年 6 月 9 日、平成 29 年 8 月 30 日、平成 29 年 10 月 23 日、平成 30 年 2 月 1 日、平成 30 年 5 月 30 日)を開催し、アクションプランの具体化に向け、現状分析や解決すべき課題抽出、研究開発計画の策定等に関して議論を行ってきた。今回、その議論を踏まえ理論・シミュレーション WG 報告書として取りまとめた。なお、策定した研究開発計画は、研究の進捗状況やアクションプランの見直し等を反映し、随時更新されるべきものである。

全体概要

理論・シミュレーション研究、特に第1 原理系シミュレーションコード(SMC : Simulation Code)、ダイバータSMC、統合SMC、核融合炉材料SMC の開発、利用には大型計算機が必要となる。2018年現在、量子科学技術研究開発機構(量研)で平成30年7月から運用されている原型炉研究開発に資する大型計算機 JFRS-1 (Japan Fusion Reactor Simulator 1、理論性能4.2PF、2018年6月現在スパコンランキングTOP 500の61位に位置し、Linpack 性能2.787PF)が、主な計算機資源として国内の磁気閉じ込め核融合(MCF: Magnetic Confinement Fusion)コミュニティーに利用可能である。原型炉研究開発の各段階において必要となる計算機資源量の現時点での予測を表1に示す。調達可能と見込まれる計算機資源は、現行予算を基に、4年で計算機の性能が4倍向上すると仮定した場合の予測値である。

表1 調達可能と見込まれる計算機資源量の推移

設計活動	FDA (2015-2019)	CDA(2020-2026)		EDA(2027-2035)
AP C&R	▲(2020)		▲(2025)	
計算機世代	2018-2021	2022-2025	2026-2029	2030-2033
調達可能と見込まれる計算資源	4.2PF	10~20PF	50~100PF	500PF~1EF

大型計算機を構成するハード、ソフトの技術開発速度は非常に速く、物理、工学分野等の研究者、技術者が最新の大型計算機を効率的に利用するために要求される数値計算技術の水準が非常に高くなっているのが現状である。この状況を改善し、多くの核融合研究者がより効率的に大型計算機を利用し、研究開発を効率的に推進するためには計算科学の専門家からの支援が得られる体制の構築が必要である。また、大型計算機は実験データ解析にも必要な研究インフラである。現在、量研 六ヶ所核融合研究所では、幅広いアプローチ活動(BA活動)の一環としてITER 遠隔実験センター(REC: Remote Experimentation Centre)を構築している。REC では、六ヶ所サイトからITER の遠隔実験だけでなく、ITER等の実験データを集積し、核融合研究のためのデータセンターとして機能することも想定している。上記の大型計算機はREC と連動し、核融合実験データの解析とその解析データを利用した原型炉研究開発にも利用する予定である。

核融合計算科学と理論シミュレーション研究が協調して原型炉開発を支援し、原型炉研究開発を加速するために核融合計算科学技術研究開発の推進が必要である。尚、今回の理論シミュレーションWG活動においては、アクションプランに挙げられてい

る「原型炉システム統合SMC」および「原型炉制御シミュレータ」に関する研究開発は具体化の対象に含めていない。また、材料照射シミュレーションに関してはブランケット構造材を対象としており、ダイバータ材料は検討していない。このため、これらの項目の具体化は別途行う必要がある。また、計算機の第二世代までを今回の具体化のターゲットに設定しており、研究開発期間が概念設計の終了期間と一致しておらず、むしろ2025年頃に想定される第2回チェックアンドレビューを意識した計画になっている点は注意すべきである。

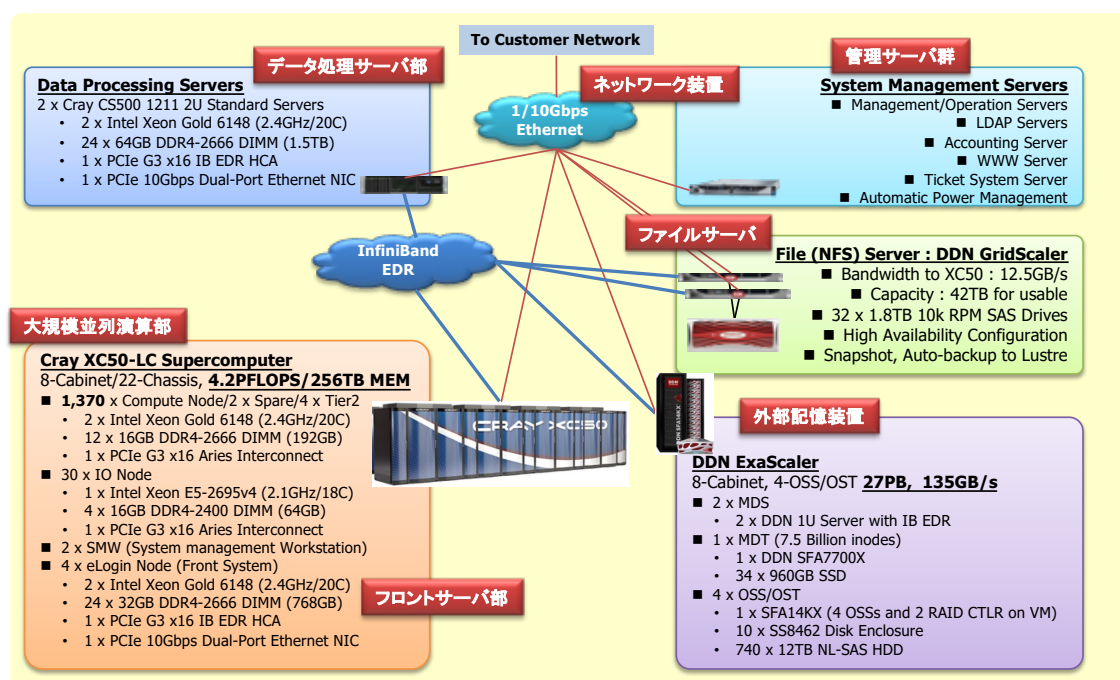


図1 JFRS-1の構成図

以下の各項目では、多くの研究者が利用可能な SMC の開発やその利用が目標とされているが、SMC の開発には基となる物理モデル、工学モデル、計算技法の開発が必要であり、基礎的な研究活動として各項目に含まれる。

●プラズマエッジ第1原理系 SMC

炉心プラズマの端領域(プラズマエッジ)で発生する ELM 現象などを解明し、制御するための第1原理系 SMC の開発、利用を行う。炉心プラズマと原型炉機器のインターフェイス領域であり、ダイバータシミュレーションに大きな影響を与える領域であるため、基本設計段階で重点的なコード開発を行い、その後、概念設計及び工学設計段階で、継続的な改良を行う。

● ディスラプション・核燃焼プラズマ・乱流輸送第1原理系 SMC

ディスラプション現象を解明するための第1原理系 SMC のコード開発、利用を行う。電磁流体モデル、粒子運動論モデル等に基づくコードの開発の他に、逃走電子発生機構のモデリング、機器との相互作用に関するモデリング等が必要になる。

核燃焼プラズマの挙動を解明するための第1原理系 SMC の開発、利用を行う。電磁流体モデルと粒子運動論モデルを組み合わせたコードの開発が主になると考えられる。また、 α 粒子の輸送に関しては、乱流輸送第1原理系 SMC でも取り扱われる。

炉心プラズマの輸送現象を解明し、閉じ込め状態の制御方法を研究するための第1原理系 SMC の開発、利用を行う。乱流プラズマの第1原理系シミュレーションは、最も計算機資源を必要とするため、その開発速度は利用可能な計算機資源に律速される側面がある。

これらの3タイプの第1原理系 SMC を統合した第1原理系 SMC の開発を目標として、逐次、各 SMC の相互利用、部分的利用を実施する。

● ダイバータ SMC

ダイバータ領域のシミュレーション研究、設計に利用される。原型炉開発における重要性を考慮し、継続的な開発、利用を行う必要がある。早い段階でダイバータ SMC を利用したダイバータ設計を行う必要があるため、基本設計段階において重点的なコード開発とダイバータコードの利用環境の整備が必要。

概念設計段階、工学設計段階では、炉心プラズマ統合コード、第1原理系 SMC 群との結合を検討し、炉心プラズマダイバータをより高度に結合したダイバータ SMC の開発、利用及び SA, ITER 実験への適用と検証を行う。

● 炉心プラズマ統合 SMC

炉心プラズマの予測、設計等に利用される。輸送コードを基幹とし、加熱・電流駆動、ダイバータ/SOL 等に関する SMC、第1原理 SMC 群との可能な結合を行う。乱流輸送現象、MHD 現象、プラズマエッジでの現象、高エネルギー粒子に関する現象、原子分子過程、壁相互作用などのモデル化やモデルの高度化が必要。

JT-60SA、ITER の実験開始後は、実験との比較、検証を行い、炉心プラズマ統合 SMC の改良、高度化を行う。

● 核融合炉材料 SMC

核融合炉を構成する様々な機器、構造材等の開発、製造を促進するための核融合炉材料に関する SMC 群の開発及び利用を行う。照射下材料挙動における原子レベルの現象を明らかにする微視的なスケールを対象とするコードから、材料の特性変化を明らかにする巨視的なスケールを対象とするコードまで、いくつかのスケールに対

応したコードの開発及びそれらのコードを結合したコードの開発、利用が必要となる。

●原型炉システム統合 SMC

原型炉全体の挙動をシミュレーションするための統合 SMC。基本設計段階では、熱解析コード、電磁力解析コード、応力解析コード、中性子解析コードなどの工学基礎コード群の開発及びインターフェイスの整備を実施し、概念設計及び工学設計段階では、ブランケットなどのトリチウムシステム系 SMC、発電システム系 SMC、アクチュエーター SMC などの原型炉を構成する各システム系 SMC の開発、原型炉プラズマ統合 SMC、各原型炉基盤コードの統合、制御ロジックの組み込み、ITER、JT-60SA 等の実験との比較・検証を行う。

●原型炉制御シミュレータ

原型炉システム統合 SMC を基とし、実時間制御を目指した高速化改良などを行う。基本設計段階では、制御用シミュレータの構築に必要な炉心プラズマ応答特性のモデル、制御系モデルの構築を行う。概念設計及び工学設計段階では、炉心プラズマ統合 SMC、原型炉システム統合 SMC の活用により、制御用シミュレータの開発、利用を行う。

炉心プラズマ統合シミュレーション研究開発

林伸彦(量子科学技術研究開発機構)

1. 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、高ベータ・高自発電流割合の燃焼プラズマで現れる様々な相互結合現象を理解し、ITER や原型炉のプラズマ挙動の予測に有効である。特に原型炉では利用できる計測が限られることから、燃焼プラズマの動的挙動を确实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、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。そのために、既存の実験データを用いて検証するか、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。

ITER と原型炉におけるプラズマの予測・制御や運転シナリオの設計を目指したモデル・コードの検証は、JT-60SA 計画 [1] の主要な目的の1つである。JT-60SA 実験で、高ベータ・高自発電流割合プラズマの検証を行う。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 実験の燃焼プラズマで検証し、JT-60SA と ITER の両方の検証で、原型炉の予測・シミュレータの信頼性向上を図る。

国内の統合コードには、量研が中心に開発している TOPICS [2]、京大と核融合科学研究所と九大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] がある。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。統合コード TOPICS は、JT-60SA、ITER、原型炉のプラズマの物理解明、予測、制御手法開発、運転シナリオ構築のため開発しており、現状 1.5 次元輸送ソルバーを中心に各物理/制御モデルのモジュールを結合し、PC クラスタからスーパーコンピューターを含めたクロスプラットフォームで連携したシミュレーションを行っている。この TOPICS を含めた統合コードは、国内的にも世界的にも今までに様々な物理要素が連携した複雑現象の解明や予測、制御手法開発に活用されてきた[2]。

2. 解決すべき研究課題、具体的方法

原型炉に向けて統合コードに求められる役割は、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のモデルの詳細化を行って物理解明する役割だけでなく、運転シナリオの作成や制御手法の検討等に使うシミュレータとしての役割がある。今後は、これらの役割を担うための改良・開発をする必要があり、特に 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は、実験家を含めてより広いユーザーが運転シナリオ検討に使う等の実験との連携を考えた開発・整備が、まず JT-60SA 実験に向けて必要である。一方、文部科学省の核融合技術委員会の報告書「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」のチェック・アンド・レビュー項目(案)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、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。以下に述べることは、統合コード TOPICS を基準に作成しているが、他の統合コードと共通する課題が多くあり、できるだけ特定のコードに依らないものになっている。

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う詳細化は、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。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、概して低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。従って、これからは、モデル詳細化による物理解明と簡易化によるシミュレータプロトタイプ構築の2つの要求に適応した統合コード開発が必要となる。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。

TOPICS とその他の各々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 BPSD 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、ITER 機構には IMAS というフレームワークがあり、それらを活用した協力が、統合コードの効率的な開発に求められる。

以下、統合コードで重要な6つの分野、「運転シナリオ、実験との連携」、「輸送」、「不純物、ダイバータとの結合」、「MHD」、「高エネルギー粒子」、「ペDESTAL」につい

て、各々の分野毎に課題とそれを解決する計画を述べる。ダイバータに関する研究そのものに関しては、第2回中間 C&R にも記述される重要な分野であり、次章で独立に記述する。本章では、そのダイバータとの連携に関して、「不純物、ダイバータとの結合」で記述する。また、「ペDESTAL」は、ダイバータと炉心を繋ぎ両者の相互作用を起こす領域のため、ダイバータに次ぐ重要分野である。計画に関しては、まず、第2回中間 C&R をクリアすることを考え、2025 年頃までの計画を述べる。また、その中で JT-60SA が増強された後に実験を再開する 2023 年も1つの区切りと考え、実験を有効活用する事前準備のために 2022 年までに行う計画を分けて述べる。2025 年頃までの計画が完了すれば、ITER 実験が本格化する 2028 年から開発した統合コードを適用でき、2035 年からの DT 燃焼実験を通して移行判断のクリアを図る。記述した計画を要約したものを表として添付する。

I. 運転シナリオ、実験との連携

プラズマ生成からプラズマ電流立ち上げ、電流フラットトップ、電流立ち下げ、プラズマ消滅までの一連の運転シナリオの過程を模擬できるシミュレータの開発に向けて、一通りシミュレーションできる最低限の物理・制御モデルを 2022 年までに整備する。現状 TOPICS はシナリオ開発に用いているが、LH 遷移や制御等のモデルが足りない。まず一通りできることを目標に、実験の比例則も含めた簡易的なモデルの開発や既存のモデルを導入し、一通りできるようにして、その後、モデルの高精度化のための改良を図る。JT-60SA や ITER の初期運転では、D と T 以外に H や He プラズマ使うので、様々な粒子種を扱えるようにする。また、電流立ち上げ／下げ時のオーミック、L モードプラズマにも適用できるモデルが要る。制御に関しては、JT-60SA 実験検討に既に使われている MHD 平衡制御コードと結合して計算時間がかかってもよいので短時間の連携計算を行えるようにした(2022 年)後、運転シナリオレベルの長時間の連携計算を目指す(2025 年)。また、プラズマの各種制御量の各種制御器を用いた統合制御のため多入力多出力の PID 制御モデルを整備するとともに、モデル予測制御、データ同化等の先進制御を検討(2022 年)、拡張する(2025 年)。コードの高速化や知的制御のために、機械学習の利用を検討し適用する(2022 年)。JT-60SA の 2020 年からの初期実験、2023 年からの増強後実験でのモデル検証に向けて、開発が進められている JT-60SA の実験解析ツールと連携できるようにして、モデルによる予測結果を実験結果と比較して検証する作業をシームレスにできるように整備する(2022 年)。また、ITER 実験およびそれに関わる ITPA 等の共同活動(実験およびコード間のモデル検証、ITER 運転シナリオ作成等)のために、ITER で開発している統合コードのためのフレームワーク IMAS との連携を検討(2022 年)し機能を開発する(2025 年)。実験の計測器の検討や計装制御検討に統合コードを用いるため、実験の各種計測装置のモデリングを容易に行えるように、任意の位置の物理量や視野の積分量の評価機能、それ

らを制御入力にする機能等を整備する。

II. 輸送

輸送は、DとT以外にHやHe等の様々な粒子種の炉心からペDESTAL、スクレイプオフ層・ダイバータの広い範囲にわたったモデルを考えねばならない。この後、他の分野でも輸送モデルについて述べるが、輸送物理としては共通して、ここで述べるものが基本であり、他の分野では重複した記述にその分野特有の項目を述べる。まず、前に述べたように、DとT以外にHやHe等の様々な粒子種を考慮して、水素同位体の質量比効果や、DとT等を別々の粒子供給と輸送に基づいて燃焼プラズマを扱えるように統合コードを拡張する必要がある(2022年)。プラズマ回転に重要な新古典トロイダル粘性等の新古典効果を考慮するために、既存の新古典トロイダル粘性の計算評価機能を自動的に行えるようにする(2022年)とともに、既存の流体モデルで扱えなかった有限軌道幅効果等を考慮できるドリフト運動論コードを開発、結合する(2025年)。乱流輸送に関しては、第一原理シミュレーションの知見に基づいて粒子も含めた半経験的/準線形モデルを開発し、機械学習の利用も検討して輸送計算の高速化を図る(2022年)。ペDESTALおよびスクレイプオフ層・ダイバータ領域の第1原理シミュレーション結果等の知見に基づき周辺乱流輸送モデルを開発し、統合コードに結合する(2025年)。現在の統合コードは主に1次元拡散型輸送ソルバーを基盤としているが、分布勾配に極端に敏感な輸送やプラズマの流れ等のより高度な輸送物理を考慮するために新たな基盤が必要である。局所ジャイロ運動論コードに基づく大域的輸送コードの物理拡張を行い、一方、流体型輸送コードの物理拡張を行う(2022年)。これらをプラットフォーム化して、新たな統合基盤とする(2027年)。

III. 不純物、ダイバータとの結合

水素とヘリウム以外の不純物は、放射損失を増加させてダイバータ板の熱負荷を許容値以下に低減するのに必要である。しかし、不純物が炉心に蓄積すると放射損失と燃料希釈により炉心プラズマの性能を低下させてしまう。特に金属壁となるITERや原型炉では、外部から入射する不純物が必須である。スクレイプオフ層・ダイバータ領域の不純物発生・輸送は、次章の「ダイバータ」に記述するので、ここでは炉心の不純物とその蓄積評価に必要なダイバータとの結合について述べる。ダイバータとの結合は、次章の「ダイバータ」と並んで第2回C&Rをクリアするための最重要項目である。核融合反応で生じた α 粒子は、プラズマを加熱して減速しヘリウム灰となり、炉心に蓄積し燃料希釈を起こす。 α 粒子に関しては「高エネルギー粒子」で扱い、ヘリウム灰は発生過程が違うだけで蓄積のモデリング手法は共通である。まず、炉心の不純物とその輸送を扱う既存の輸送コードを整備し、運転シナリオの電流立上げ/下げ時のプラズマの体積拡大/縮小や、ELMによる不純物の吐出しを考慮できるように改良し、ダ

ダイバータの不純物輸送コードと連携させるインターフェースを開発して結合する(2022年)。不純物を除いた炉心の統合コードとダイバータの統合コードとの結合は行われたがまだテストランをした段階なので、パラメータランを行えるようにインターフェースを改良して再結合を行い、短時間の自動連携計算で動作を確認して長時間計算のための改良を行い(2022年)、運転シナリオレベルの長時間連携計算を目指す(2025年)。ダイバータ統合コード以外にダイバータの簡易的なモデルを開発改良し炉心統合コードと結合するのも、特に炉心・ペDESTALとダイバータが相互作用する物理解明や予測に役立つので、ダイバータ簡易モデルの開発改良を行い炉心統合コードに結合し、(2022年)、ダイバータ統合コードと炉心統合コードとの連携シミュレーション結果と比較して改良する(2025年)。炉心不純物の蓄積評価・制御のため、新古典輸送や粒子ピンチのモデルの整備開発および、第一原理コードによる乱流輸送解析とその知見に基づいた乱流輸送モデルの検討を行い、それらの輸送にプラズマ回転に伴う遠心力やRF等による効果の導入を検討する(2022年)。

IV. MHD

統合コードでは、MHD 平衡からプラズマの各種 MHD 不安定性を評価する必要がある。上記で述べた新古典トロイダル粘性のように3次元効果を考慮する必要があり、そのために3次元平衡コードや摂動平衡コードの整備、開発を行う(2022年)。高ベータで問題となる RWM に関しては評価できる安定性解析コードの開発が進められており、プラズマ回転や高エネルギー粒子、非理想効果等を考慮できる拡張を行い統合コードと連携できるようにし(2022年)、外部コイルや3次元渦電流を考慮できるように拡張を継続する(2025年)。テアリングモードに関しては、安定性指標評価方法を検討して改良し、磁気島時間発展モデルの検証を行って、改良する(2022年)。ディスラプションに関しては、回避することを第1に考え、発生後は運転シナリオシミュレーションを行う統合コードとしてどこまで扱うか検討の余地がある。まず、第一原理コードか実験の結果に基づき機械学習の利用も検討してディスラプション発生を予測して回避するための簡易モデル開発し(2022年)、回避制御ロジックの構築を図る(2025年)。一方、ディスラプション発生後は別コードと接続するのか統合コード内で発生後のシミュレーションまで行うのか手法を検討する(2025年)。実験の実時間 MHD 安定性解析への適用を考え、シミュレーションの分布時間発展の各時刻の高速な安定性解析ができるように機械学習の利用も検討して開発する(2022年)。また、統合シミュレーションの分布時間発展中の安定性をシミュレーション事後に評価できるように整備する(2025年)。

V. 高エネルギー粒子

統合コードにおいて α 粒子、ビーム粒子、RF 加速粒子等の高エネルギー粒子によるプラズマの加熱、電流駆動、プラズマ回転のトルク生成の評価には、フォッカーブ

ランクコードと粒子モンテカルロコードが用いられている。前者は計算機負荷が低いがある有限軌道幅や径方向拡散を考慮していない等の課題がある一方、後者は計算機負荷が高く非定常計算が難しい。しかし、近年の計算機性能の向上により後者の非定常計算が現実的になってきた。そのため、フォッカープランクコードを改良し、モンテカルロコードの非定常計算機能と統合コードとの連携機能を整備する(2022年)。高エネルギー粒子が駆動するアルヴェン固有モードは、高エネルギー粒子の輸送を誘起して加熱等の効率を下げってしまう。このアルヴェン固有モードの線形安定性解析コードを統合コードに結合し、分布時間発展における安定性を評価できるようにする(2022年)。アルヴェン固有モードで誘起される輸送のモデルを検討開発し統合コードに実装(2022年)し、JT-60SA等の実験で検証して改良する(2025年)。高エネルギー粒子は、sawtoothやNTM等のMHD不安定性やRMP等の外部からの摂動磁場に影響されるので、それらの影響を考慮できるモデルを検討する(2022年)。 α 粒子加熱による燃焼を制御するモデルをITER実験へ向けて開発し、シナリオ検討に用いる(2025年)。燃焼制御に関する詳細は、別章で述べる。

VI. ペDESTAL

ペDESTALは、炉心とダイバータを結び相互作用を起こす領域であり、第2回中間C&Rにも記述されるダイバータに次いで重要な分野である。運転シナリオにおけるL-H遷移、遷移後のHモードペDESTAL分布、ELMの発生/緩和/抑制、H-L遷移を模擬できるモデルが必要である。まず、L-H遷移パワーおよびペDESTAL蓄積エネルギーと分布幅は実験の比例則があり、それらに基づくモデルを2022年までに開発する。ペDESTALの比例則モデルはELMを考慮しない準定常状態の分布の模擬には使えるが、ELM緩和/抑制時にどう分布が変化するか検討してモデルを改良する必要がある。ペDESTAL分布幅の比例則はELM直前に到達する分布で評価したもので、ELM間の時間発展中に適用できるか不明である。もし適用できれば、詳細な乱流輸送モデルなしでELM間の分布を模擬するモデルを作れるので、幅の比例則をELM間の時間発展中の実験データで検証して改良を検討する(2022年)。一方、上記比例則モデルに代わる、L-H/H-L遷移タイミングとペDESTAL分布を模擬できる乱流輸送モデルがいくつか提案されており、それらのモデルの検証と改良を行う(2022年)。現状、ELMは、統合コードに結合した線形MHD安定性解析コードで安定性を評価して、不安定時に不安定モード分布に基づいて輸送を増幅させて熱・粒子の吐出しを模擬している。しかし、現状のモデルには経験的なパラメータがあり、非線形MHD等の第一原理シミュレーションと実験と比較検証して改良する(2022年)。現状ELM発生評価で用いている線形MHD安定性解析コードにはプラズマ回転の効果は考慮されていない。考慮できるコードは開発されているが計算機負荷が大きいので、まず、統合シミュレーションの分布時間発展中の安定性をシミュレーション事後に評価できる

ように整備(2022年)した後、自動連携によって上記に述べたようなELMシミュレーションができるようにする(2025年)。ELM緩和/抑制のためQHモード等の運転モードやRMPと固体燃料ペレットによる制御が検討されている。QHモードやRMP印加時の熱・粒子輸送を模擬するモデルを検討し開発する(2025年)。ペレットは燃料供給による密度分布制御だけでなくELM緩和制御にも使われ、ペレットから溶発したプラズマは低磁場側へドリフトした後、背景プラズマに同化する。このドリフトモデルとELMを誘起するモデルが提案されているが、非線形MHD等の第一原理シミュレーションと実験と比較検証して改良する(2022年)。

3. ロードマップ

炉心プラズマ統合シミュレーション研究開発計画に関しては表2を参照のこと。

4. 人的資源

記述した統合コードの開発を進める上で、最低限、記述した6分野毎に第一原理シミュレーションや実験解析から統合コード向けにモデリングをする専任研究者2名、統合コード全体の連携機能等を開発する専任研究者2名、6分野と連携のコードを整備する技術者7名の合計21名が必要である。ただし、ダイバータに関しては次章に譲る。

5. 計算機資源

統合コードのモデルの詳細化には、極端には統合コードに第一原理シミュレーションコードを結合することを考え、第一原理シミュレーションを現実的な計算時間で行える計算機の能力が必要であり、また、その繰り返し計算か、第一原理シミュレーションの結果を模擬するモデルを作るために物理条件を様々に変えた計算をできる資源が必要になる。前者に関しては、各々の第一原理シミュレーション計画の要求能力と同じで、後者に関しては少なくとも数百以上の回数を計算できる資源が必要である。また、シミュレータに向けたモデルの簡易化や制御には機械学習が利用でき、その学習計算には別途GPGPU等の計算が必要になる可能性がある。

参考文献

- [1] JT-60SA Research Plan – Research Objectives and Strategy Version 3.3 2016, March, http://www.jt60sa.org/pdfs/JT-60SA_Res_Plan.pdf
- [2] Hayashi N. *et al* 2010 *Phys. Plasmas* **17** 056112, Hayashi N. *et al* 2015 Advance in integrated modelling towards prediction and control of JT-60SA plasmas *42nd EPS Conf. on Plasma Physics (Lisbon, Portugal, 22-26 June)* P5.145 <http://ocs.ciemat.es/EPS2015PAP/pdf/P5.145.pdf>
- [3] A. Fukuyama *et al.*, *Proc. of 20th IAEA Fusion Energy Conf.* (2004) IAEA-CSP-25/TH/P2-3
- [4] K. Yamazaki and T. Amano, *Nucl. Fusion* **32** 633 (1992)

表 2 炉心プラズマ統合シミュレーション研究開発計画

		2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	
運転シナリオ、実験との連携	シナリオ開発	シナリオ開発に最低限必要な物理・制御モデル開発								
	制御	MHD平衡制御コードとの短時間自動連携 PID制御、先進制御開発					運転シナリオレベルの長時間連携 先進制御拡張			
	コード高速化、先進制御	機械学習利用検討、コードの高速化や知的制御への適用								
	JT-60SA実験との連携	JT-60SA実験解析ツールとの連携					JT-60SA実験によるモデル検証			
	ITERとの連携	ITERの統合モデリングツールIMASとの連携検討					ITER実験開始に向けて連携機能開発			
	計測	計測モデリングのための整備								
輸送	質量比効果、燃焼プラズマ	扱える粒子種の拡張								
	新古典、3次元効果	新古典トロイダル粘性の計算自動化					ドリフト運動論コード開発・導入			
	乱流輸送、シナリオ開発・制御、コード高速化	粒子も含めた半経験的/準線形モデル開発、輸送計算の高速化								
	周辺輸送、シナリオ開発	周辺乱流輸送モデル開発、統合コードとの結合								
	高度な物理に基づく新統合基盤	局所ジャイロ運動論コードに基づく大域的輸送コードの物理拡張 流体型輸送コードの物理拡張					プラットフォーム化			
不純物、ダイバータとの結合	蓄積評価	炉心不純物輸送コードの整備、改良 炉心不純物輸送コードとダイバータ不純物輸送コードとの結合								
	シナリオ成立性	ダイバータ統合コードとの結合、短時間自動連携 ダイバータ簡易モデルの開発改良、結合					運転シナリオレベルの長時間連携 改良継続			
	蓄積評価・制御	新古典輸送や粒子ピンチのモデル整備、改良検討 乱流コードによる解析、輸送モデルの開発								
		平衡	3次元、摂動平衡コードの整備、開発							
MHD	RWM	安定性解析コードの拡張と統合コードとの連携					安定性解析コードの拡張を継続			
	テアリングモード、制御	安定性指標評価検討・改良、磁気島時間発展モデルの検証・改良								
	ディスラプション回避	ディスラプション予測回避の簡易モデル開発(機械学習も検討)					回避ロジックの構築			
	ディスラプション緩和	ディスラプション発生後のシミュレーション方法検討(他コードとの接続が統合コード内)、開発整備								
	シナリオ開発、制御	実時間安定性解析検討(機械学習も含めて)、開発					非線形MHDコードによる統合シミュレーション事後評価機能			
高エネルギー粒子	加熱、電流駆動、トルク	フォッカープランクコードの改良 粒子モンテカルロコードの非定常化と連携								
	アルヴェン固有モード評価	評価コード整備、開発								
	アルヴェン固有モード影響評価	輸送モデル検討、開発、実装					輸送モデルの検証、改良			
	MHD、摂動磁場の影響	sawtooth, NTM等のMHD不安定性、摂動磁場の影響のモデル検討								
	燃焼制御	燃焼制御モデル開発、シナリオ検討								
ベDESTAL	LH遷移、ベDESTAL分布	LH遷移、ベDESTALの比例則モデル開発 ベDESTAL幅時間発展モデル検証、改良 ベDESTAL輸送モデル検証、改良								
	ELM、ベDESTAL圧力限界	ELM輸送モデル改良 プラズマ回転を考慮した安定性解析コードによる統合シミュレーション事後評価					自動連携によるELMシミュレーション			
	ELM緩和/抑制、分布制御	RMPやQHモード時の輸送モデル検討、開発								
		ペレットのドリフト、ELM誘起モデル検証、改良								

ダイバータシミュレーション研究開発

星野一生(慶応大学)

1. 現状

量研では、原型炉や JT-60SA、ITER に向けて、ダイバータシミュレーションコード SONIC が開発されており、特別チームでの原型炉ダイバータの検討や JT-60SA のシナリオ解析等に適用されている。SONIC コードは、プラズマ流体コード SOLDOR、中性粒子モンテカルロコード NEUT2D、不純物モンテカルロコード IMPMC からなる統合ダイバータコードである。これまで、3 つのコードが強結合していたが、近年、MPMD (Multiple-Program Multiple-Data) に基づく統合モデリング基盤上で再構築が行われ、複数種不純物の同時解析が可能になるとともに、炉心プラズマ輸送コードとの統合化を含む今後の開発基盤が構築された。

核融合研では、3 次元空間でプラズマ・中性粒子の輸送解析が可能な EMC3-EIRENE コード(独)を用いて、LHD のダイバータ解析が進められている。また、ITER や JT-60SA では ELM 抑制のために RMP を行うことが計画されており、この場合、トカマク系においても 3 次元磁場構造が重要となる。このため、JT-60SA に対して EMC3-EIRENE コードを適用することで 3 次元のダイバータ解析が他大学を含む共同研究として進められている。

また、直線型装置をもつ大学では、装置の特色を生かし、磁場構造によるダイバータプラズマ特性への影響や、詳細な原子分子過程の解析等が進められ、モデル開発・高精度化も進められている。

2. 解決すべき研究課題、具体的方法

原型炉ダイバータの信頼性の高い予測解析には、非常に多くの課題を解決する必要がある。その中でも最も重要なものとして、非接触ダイバータの再現があげられる。非接触ダイバータは、ダイバータへの熱負荷を低減させるために最も有効な運転として考えられている。シミュレーションにおいては、赤道面密度の増加に伴い、ダイバータへのイオン粒子束が一旦増加し、その後減少に転じる非接触ダイバータの傾向を再現できている。しかし、実験に比べて粒子束の減少度が相対的に小さく、非接触ダイバータ発生内外ダイバータ非対称性も小さい等、定量的な予測には課題が残る。海外のダイバータコード(SOLPS、EDGE2D 等)でも同様な結果が報告されており、非接触ダイバータ、特に粒子束減少の再現は、世界的な課題となっている。

原型炉設計に向けて、このような非接触ダイバータの課題を最優先で解決する必要がある。しかし、現状では実験的にも非接触ダイバータの発生、制御には未解明な部分が多い。そのため、次のような方策をとる必要があると考えられる。まずは、重要と考えられる未実装の物理モデル開発・実装を進める。短期間でのモデル開発が困難

な場合には、調整パラメータ等を用いた簡易モデルを実装し、物理機構を模擬する。また、現在のダイバータモデルでは、磁力線を横切る拡散係数など、様々な調整パラメータを用いている。このような、簡易モデルと調整パラメータを用いて、実験で観測される非接触ダイバータを再現し、ダイバータプラズマ物理の理解を深めるとともに、原型炉へ向けた外挿性について検討を進める。これと並行して、各モデルの高精度化を進め、原型炉に向けた外挿性を向上させていく。改良されたモデルは、既存実験データによる検証だけでなく、JT-60SA や ITER を用いて、その外挿性の検証を進めていく。

ダイバータコード開発における大部分の課題は、上記の非接触ダイバータモデリングの課題と関連していると考えられるが、これ以外にも多くの課題が考えられる。例としていくつか代表的な課題を以下に示す。

- 実験に比べて小さい SOL のプラズマ流
- 運動論的効果 (heat flux limiter, 有限軌道効果、シース条件、等)
- ダイバータ密度が高くなる原型炉で特に重要となる中性粒子間衝突や輻射輸送と、低温高密度状態における原子分子過程の検証
- 壁との相互作用 (壁表面状態の影響、中性子照射影響、壁から発生する中性粒子の励起状態、等)
- 3次元効果 (ガスパフ位置や RMP 等によるトロイダル非対称性)
- 不純物を含む炉心プラズマ輸送コードとの統合
- ELM やダイバータプラズマの制御手法検討に向けた非定常解析

ここであげた課題はあくまで一例であり、この他にも多くの課題が考えられる。全ての課題に取り組むには、人的資源に加え、開発期間も十分ではない。そのため、簡易モデルもしくは感度解析等により各課題の影響度を評価し、その優先度を検討する必要がある。また、ダイバータ物理ではまだ未解明の物理機構があることも考えられる。そのため、次に説明するような実験解析に基づき、不足物理を特定し、影響度評価を経て、モデル開発・実装を進めていく必要もある。

開発したモデル、コードの妥当性検討には、実験及びコード間ベンチマークが必須である。しかし、ダイバータプラズマは様々な物理過程が入り組んでおり、実機実験だけで、モデル・コードの妥当性を検証することは難しい。そこで、原子分子の素過程等の基本モデルについては、測定面で優位性のある直線装置で進めることが望ましい。直線装置では、豊富な計測環境に加えて、プラズマパラメータが設定しやすく、また、磁場やターゲットの形状も検証に合わせて調節しやすい優位性がある。ただし、直線装置においてもプラズマ・中性粒子・不純物・壁の相互作用は起こっており、それらの複合的な効果に留意する必要がある。実機実験では、検証された基本モデルを

統合したコード全体の検証と、より高密度・高温のプラズマ条件、磁場及び幾何形状効果、等について検証が進むことが期待される。

先に述べたように、ダイバータプラズマでは様々な非線形相互作用が起こっているため、実験との比較だけでは、十分な妥当性検証は難しいと考えられる。そのため、実験と並行して様々なダイバータコードとのベンチマークを行い、個別の物理モデル及びコード全体の検証を進めていく必要がある。

このような実験及びコード間ベンチマークの過程で、これまで考慮されていなかったような物理過程が見つかることが想定される。このような場合は、前項と同様に、簡易モデルもしくは調整パラメータにより物理過程を模擬し、その影響を評価して優先度をつけ、モデル開発を進めていく必要がある。

3. ロードマップ

表3にダイバータシミュレーション研究開発計画を示す。

非接触ダイバータモデリングについては、簡易モデル・調整パラメータによる再現を第1回中間 C&R 後までをめどに進める必要がある。並行して、モデル高精度化は優先度を考慮しながら随時開発を続けていく必要がある。また、2020年から始まる JT-60SA 実験、及び 2025年から始まる ITER 実験で得られるデータを用いて、随時モデル検証を進めていく必要がある。

コード開発・モデル拡張は、まず感度解析に基づく優先度の検討を第1回中間 C&R までに行う必要がある。一部は先行して開発を進めるが、この優先度に基づいて、物理モデルの追加・改良、統合化、等を進めていく。

実験との比較は、直線装置や、JT-60U、LHD、海外装置を対象として第2回中間 C&R を目標に進められることが期待される。各実験装置のデータを用いてモデル・コードの妥当性検証を進めるとともに、クロスチェックや特定の物理モデルの検証のため、他のダイバータコードとのベンチマークも進める必要がある。海外実験装置のデータやコードの利用には、ITPA や BA 活動のフレームワークを利用していくことが考えられる。JT-60SA や ITER 等の建設中の装置については、予測解析等の事前準備を進めていくとともに、実験開始後に随時比較を行っていく必要がある。

4. 必要な予算・資源

上記のようなロードマップに沿ってコード開発を進めるためには、コード開発、シミュレーション解析を滞りなく進めていくために、核融合コミュニティーとして優先的に利用できる大型計算機資源を維持していく必要がある。

また、人的資源としては、各輸送モデル(プラズマ、中性粒子、不純物、壁)へ実装する物理モデルの開発・実装作業に専任研究者 3-6 名、ダイバータコード全体の調整や総合的解析に専任研究者 1-3 名、これらのコード開発・解析を支える任期付き研究

員4-9名、技術支援要員が3-5名は、統合ダイバータコード開発として最低限必要と考える。

各物理モデルの開発は、より詳細にその分野に精通した専門家による実験やそれに基づくモデリング研究が必要となるため、各種共同研究等を活用した活動が必要である。また、JT-60SA や ITER の実験が開始されれば、開発した統合ダイバータコードを用いた実験解析を進める必要があり、実験とシミュレーション解析の両方を進めていく人材が必要となる。しかし、これらはアクションプラン 3. ダイバータに含まれる部分であり、統合ダイバータコード開発とは別に考慮されるとしてここでは含めない。

表3 ダイバータシミュレーション研究開発計画

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
非接触ダイバータモデリング	簡易モデルと調整パラメータによる再現							
	モデル高精度化による予測精度の向上							
			JT-60SA/ITERによる非接触ダイバータモデルの検証					
コード開発・モデル拡張	感度解析による優先度検討							
	不足物理モデルの開発、既存モデルの改良 例)ドリフト、径方向輸送モデル、SOL流モデル、運動論的效果、 原子分子モデル高精度化、同位体効果、輻射輸送、3次元効果、等							
	モデル統合化による炉心・壁条件との整合性向上 例) 炉心不純物輸送コードとの結合ー炉心プラズマ輸送コードとの結合、 壁モデルの高度化(BCAモデル結合、MDによるデータベース作成、等)、等							
	その他コード改良: 非定常化、高速化、等							
実験及びコード間ベンチマークによるモデル妥当性検証・不足物理の特定	直線装置							
	JT-60U、LHDや海外装置							
			JT-60SA					
							ITER	

ジャイロ運動論的乱流輸送シミュレーション研究開発

渡邊智彦(名古屋大学)、今寺賢志(京都大学)

1. はじめに

プラズマ物理学の第一原理にもとづいて乱流輸送の力学過程を計算し、発生する粒子・運動量・熱輸送フラックスを求めることのできるジャイロ運動論的シミュレーションは、磁場閉じ込め核融合プラズマにおける異常輸送の評価と予測のための有用な手段となった。将来の核融合装置の性能予測にあたっては信頼のおける輸送モデルの確立が不可欠であり、そこでジャイロ運動論的乱流輸送シミュレーションの果たすべき役割は大きい。

核融合プラズマ乱流輸送のジャイロ運動論的シミュレーションは、固定された平衡分布において、ある磁力線近傍領域での乱流を扱う局所モデルと、平衡分布の空間変化を取り入れた大域的モデルの二つに大別される。以下では、それぞれの現状と課題をまとめる。

2. ジャイロ運動論的乱流輸送シミュレーションの現状

局所ジャイロ運動論的シミュレーションコードは、海外では gs2 [1]、GENE [2]、GKW [3]、国内では GKV[4] が開発され、理論研究だけでなく、実験解析にも幅広く利用されている。局所コードでは摂動分布関数を扱うため、新古典輸送の効果を除いて乱流輸送の評価のみを行うことができる。以前は粒子モデルを用いたコードも開発されていたが、上記のコードはスペクトル法と差分法を組み合わせる 5 次元位相空間上での摂動分布関数の時間発展を追跡する Euler (または Vlasov)型コードである。いずれも、多種粒子種、電磁揺動、実形状(軸対称および非軸対称)、プラズマ回転、衝突項、が導入されている。適用対象は、トカマクおよびヘリカル型装置における種々の不安定性が駆動する乱流輸送であり、与えられた密度・温度勾配、磁場形状などのもので定常乱流輸送フラックスを評価することができる。最近では、同位体効果の解析[5]やイオンジャイロ半径スケールの乱流だけでなく、電子ジャイロ半径スケールの揺らぎを同時に含めたマルチスケール乱流の研究[6-7]も開始され、プラズマ乱流輸送の多様な性質を明らかにしつつある。また、実験結果とシミュレーション結果の定量的な比較も進められている。

大域的ジャイロ運動論コードには、全分布関数を扱うものと、摂動分布関数を扱うものがある。ここでは、国内での研究開発実績のある前者についてまとめる。現在開発されている全分布関数を扱う大域的ジャイロ運動論コードは局所コードと比較すると世界的に希少であり、二種に大別される。一つは位相空間を格子点などで離散化することで分布関数の時間発展を追跡する Euler (Vlasov)コードであり、もう一つは Particle-In-Cell(PIC)法に準拠した Lagrange コードである。前者の代表的なコードとしては、

GYSELA(CEA, フランス)[8]、GT5D(JAEA, 日本)[9]、GKNET(京都大学, 日本)[10]などが挙げられ、コア領域のイオン温度勾配(ITG)乱流輸送や新古典輸送を主な解析対象としている。一方、後者の代表的なコードとしては、XGC(PPPL, アメリカ)[11]、ELMFIRE(Aalto 大学, フィンランド)[12]などが挙げられ、周辺プラズマを対象とした解析や物理モデルの拡張(リミター/スクレイプ層の導入や、不純物、輻射損失効果の考慮)が精力的に行われている。具体的な研究課題としては、

- A. 輸送障壁に代表される分布形成と乱流輸送の結合 [13]
- B. 新古典輸送と乱流輸送の結合
- C. 境界層における新古典/乱流輸送
- D. サイズ/パワースケーリング [14]

などが現在までに行われており、局所ジャイロ運動論的シミュレーションでは解析が難しい複合的な物理現象を取り扱うことができる一方で、計算量は膨大な計算資源が必要となる。

国内の活動に目を向けると、上述のように2つの Euler コードが国内で開発されており、それぞれのグループでコア領域の輸送現象の解析が精力的に行われているが、Lagrange コードについては国内では開発されておらず、海外のコードを用いた解析研究もまだ発展途上の段階である。

3. 解決すべき研究課題

局所ジャイロ運動論的シミュレーションにおける解決すべき課題として、以下の6点があげられる。

I. 実験結果との検証

前項で述べたように、局所ジャイロ運動論的シミュレーションは、国内外のトカマクおよびヘリカル型装置での実験で得られた熱輸送フラックスや揺動計測結果と直接比較可能なレベルにある。しかし、燃焼プラズマで重要となる粒子や不純物輸送、運動量輸送については、まだ十分な検証が行われていない。さらにこれらに対する同位体効果の検証も原型炉設計に向けて重要な課題として残されている。また、実験との比較・検証においては、プラズマ分布の硬直性(stiffness)や、亜臨界勾配下での乱流輸送への理解も重要となる。

II. 高圧力領域での輸送機構

従来の多くのジャイロ運動論的シミュレーションは、局所的なプラズマ圧力と磁気圧の比(β 値)が1%程度以下の場合に多く行なわれている。一方、プラズマ圧力のより高い領域では、ITG モードや運動論的バルーニングモード(KBM)の成長が飽和しない場合が見られ、輸送レベルの定量的評価に課題を残している。高 β 領域での熱および粒子輸送のジャイロ運動論的シミュレーションを確立することは喫緊の課題である。

III. マルチスケール乱流問題

従来のジャイロ運動論的シミュレーションは、イオンジャイロ半径スケールまたは電子ジャイロ半径スケールそれぞれを個別に扱う場合がほとんどであり、異なるスケールで発生した乱流同士の相互作用問題には未解明の点が数多く残されている。マルチスケール乱流問題への理解を深化させることは、原型炉設計に向けた輸送モデル構築の信頼性向上に有用な知見を与える。

IV. 高速プラズマ流・高エネルギー粒子の導入とその影響評価

これまでのジャイロ運動論的シミュレーションのほとんどは、熱速度に比べて十分遅いプラズマ流を仮定したモデルを用いている。また、局所モデルで仮定する背景成分は、Maxwell 分布を仮定している。輸送モデルの高度化に向け、高速プラズマ流や、核燃焼で発生した非 Maxwell 分布を示す α 粒子、などの導入、ならびに、それらの輸送への影響の評価が必要となる。

V. 内部輸送障壁・ペDESTAL領域への適用性検証

閉じ込め改善をもたらす内部輸送障壁やペDESTAL領域では、急峻な密度・温度勾配とともにシアを持ったプラズマ流をつくる径電場が観測されている。こうした輸送障壁への局所コードの適用可能性または適用限界を検証し、閉じ込め改善モードに対する予測性能を確認する必要がある。

VI. 輸送モデル構築への寄与

輸送コードを用いて放電シナリオの検証や原型炉設計を行うには、信頼性の高い輸送係数モデルが必要となる。局所ジャイロ運動論的シミュレーションは、与えられたパラメータに対して輸送係数を一意的に決定できるため、輸送モデル構築に必要なデータを提供することが可能である。輸送コードの研究者と連携し、第一原理シミュレーション結果にもとづいた簡便な輸送モデル構築に必要なデータの作成が求められている。

次に、大域的ジャイロ運動論的シミュレーションに関して解決すべき研究課題としては、以下の4つが挙げられる。

VII. 多粒子/電磁/運動論的電子モデルへの拡張

Euler コードを用いたこれまでの多くの研究は単一種粒子/静電/断熱電子モデルに関するものであり、近年、GT5D が多粒子/静電/ハイブリッド電子モデルを導入した解析[15]を、GKNET が電磁/運動論的電子モデルを導入した解析(主に線形)を開始している。こうしたモデル拡張は、世界における大域的ジャイロ運動論的シミュレーション研究を牽引する先端的研究課題である。

VIII. ITER/DEMO プラズマまでのサイズ/パワースケーリング

現在、 $\rho_*^{-1} = 600$ スケールまでの熱源駆動型 ITG 乱流に対するサイズ/パワースケーリングが行われているが[14]、ITER/DEMO プラズマでの乱流輸送の正確な評価を行う上で、今後は熱源駆動型 ITG/TEM 乱流に対するスケーリングを同サイズ程度ま

で伸張させることが望ましい。そのためには、物理モデルの改良に加え、コードの高効率並列化と大規模計算資源は必要不可欠である。

IX. 周辺プラズマを対象とした大域的乱流輸送コードの開発

上述のように、周辺プラズマを対象とした大域的乱流輸送コードは国内で開発されていないが、将来的にコアプラズマと周辺プラズマの連結シミュレーションを行う上で、そのようなコードを開発することは中長期的な計画の中で重要である。

X. 非軸対称磁場効果の導入

大域的ジャイロ運動論的シミュレーションにおいても、3次元磁場配位への適用に向けた GT5D や XGC1 コードの改良が進められている。これは、ヘリカル型装置などの非軸対称閉じ込め配位はもとより、トカマク周辺部でのリップル磁場成分を考慮した解析においても重要となる。今後、中長期的には、運動論的電子の効果を入れた ITG/TEM 乱流や不純物を含む多イオン粒子種の場合への適用に向けてコード開発を進める必要がある。

4 具体的方法

局所シミュレーションでの解決すべき研究課題に対し、具体的な研究手段としては以下の方法があげられる。

I. 実験結果との検証

実験結果との検証には、 ρ_*^{-1} の十分大きなプラズマが望ましく、国内で稼働中の大型ヘリカル装置(LHD)実験を対象に、GKV コードの検証が進められている。また、JT60U 装置実験の結果との比較も実施され、これらにもとづいて JT60-SA で想定されるパラメータを用いた解析も着手されている。今後 NIFS や IFERC-CSC の計算機を活用して、多粒子種を取り入れた局所乱流輸送解析の検証を着実に進めることとなる。さらに将来的には、実験誤差やモデルの不十分さを考慮した信頼性評価が必要となる。

II. 高圧力領域での輸送機構

高圧力領域での乱流輸送シミュレーションでは、圧力上昇にともなう平衡の変化を考慮にいた解析を行うとともに、大域的シミュレーションや流体シミュレーションとの比較を通じ、ゾーナル流生成や乱流との相互作用を精査しつつ高 β 領域での乱流輸送機構を明らかにすることが求められる。これにより、輸送レベルの定量的な評価手法を確立する必要がある。

III. マルチスケール乱流問題

イオンスケールと電子スケール乱流の相互作用に関して、より広いクラスの不安定性に着目して解析を進めるとともに、マルチスケールの取り扱いが必要となる場合を明らかにし、単一スケール輸送モデルの有効範囲を確立することが求められる。局所シミュレーションとはいえ、マルチスケール乱流シミュレーションには、非常に多くの計算機

資源が必要となる。

IV. 高速プラズマ流・高エネルギー粒子の導入とその影響評価

高速プラズマ流を考慮したオーダリングにもとづいた方程式への拡張、Maxwell 分布から外れた高エネルギー粒子成分の導入をそれぞれ行い、乱流との相互作用や輸送に与える影響を評価することが必要である。GKV をはじめとした多くの局所乱流シミュレーションのソースコードは公開されており、自由にコード拡張に取り組むことが可能である。

V. 内部輸送障壁・ペDESTAL領域への適用性検証

輸送障壁近傍でのジャイロ半径に対する密度・温度勾配やプラズマ流の特性長を評価し、局所モデルでの近似精度を確認した上で、実験計測結果はもとより、大域的コードを用いた輸送障壁形成シミュレーションとの比較を通じて、輸送障壁にともなう輸送特性を評価する必要がある。

VI. 輸送モデル構築への寄与

局所モデルとはいえ、パラメータ空間を網羅するようにジャイロ運動論的シミュレーションを多数実行するためには膨大な計算機資源が必要となる。そのために NIFS や IFERC-CSC の計算機を活用すると同時に、シミュレーション手法の改良やコードの最適化・高速化も行いつつ、運動論的電子のより効率的な取り扱いなどのモデルの改良や計算コストの削減も検討する必要がある。

大域的シミュレーションでの解決すべき研究課題に対し、具体的な研究手段としては以下の方法があげられる。

VII. 多粒子/電磁/運動論的電子モデルへの拡張

現在、GT5D が多粒子/静電/ハイブリッド電子モデルの導入を、GKNET が電磁/運動論的電子モデルの導入を既に行っていることから、それらを推進することで達成を目指す。特に後者については、まず ITG モードや KBM、高速粒子不安定性を対象とした大域的電磁 δf コードの開発を行った後、大域的電磁 full-f コードへの拡張を目指す予定である。

VIII. ITER/DEMO プラズマまでのサイズ/パワースケーリング

$\rho_*^{-1} = 150$ の ITG/TEM (捕捉電子モード) 乱流を 10[ms]まで解くのに要する計算時間がおおよそ $1[\text{PFlops}] \times 10[\text{日}]$ 程度かかることから、ITER/DEMO サイズまでスケールアップを伸張させるためには、大規模計算が必要となる。したがって、中期的にはコードの高効率並列化(数値積分法/行列ソルバーの改良、通信隠蔽等)を行う一方、ペタスケールの大型計算機(IFERC-CSC 新スーパーコンピュータシステム、プラズマシミュレータ等)へのチューニングを進めることで、長期的に高効率な大規模計算を行うことを目指す。

IX. 周辺プラズマを対象とした大域的乱流輸送コードの開発

現存する Euler コードと加熱/ダイバータコードを連結する、あるいは周辺プラズマを対象としたコードを導入することで、周辺プラズマを対象とした大域的乱流輸送コードの開発を目指す。

X. 非軸対称磁場効果の導入

3次元磁場配位における大域的新古典輸送については既にベンチマークが行なわれている。一方、非軸対称磁場効果を導入した大域的乱流輸送シミュレーションについては、特定の磁気面近傍に領域を制限した場合や、断熱電子近似を用いた ITG 乱流に対して、局所シミュレーションとのベンチマークを経た後に、密度・温度・電場等の大域的分布の乱流輸送に対する効果を明らかにするフルトラスシミュレーションへの発展を目指す。

5 ロードマップ

上記の課題について表4のようなロードマップを検討した。

表4 ジャイロ運動論的乱流輸送シミュレーション研究開発計画

		2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	
局所乱流シミュレーション	乱流シミュレーション	粒子輸送に関する validation			同位体・不純物を含む粒子輸送に関する validation					
		運動量輸送に関する validation								
		イオン・電子熱輸送に関する validation								
		高ベータ領域での乱流輸送評価				高ベータ領域での乱流輸送に関する validation				
		スケール間相互作用の条件明確化				マルチスケール乱流輸送に関する validation				
		内部輸送障壁・ペDESTAL領域への適用性検証								
	乱流コード開発・モデル拡張	高速フロー効果(不純物含む)の導入とその影響評価								
		非 Maxwell 分布(ビーム成分含む)の導入とその影響評価								
		輸送コードとの連成計算に向けた手法開発								
		シミュレーション結果の信頼性評価								
大域的乱流シミュレーション	シミュレーション	ITG/TEM 乱流輸送のサイズ/パワースケーリング (JT-60SA サイズ程度までを想定)								
		3次元磁場配位での新古典シミュレーション 平衡磁場の実装				3次元平衡磁場配位での新古典および乱流輸送シミュレーション				
	コード開発・モデル拡張	電磁的グローバル δf コード開発 (ITG/KBM 乱流、高速粒子導入)				電磁的グローバル full f コード開発 (運動論的 MHD 平衡、field equation の取扱)				
		加熱・ダイバータコードとの結合 分布関数の結合方法検討 境界条件の取扱								

6 必要な予算・資源

単一スケールの乱流をあつかう局所ジャイロ運動論的シミュレーションは、現在のペタスケール計算機を用いて実行可能であるが、輸送モデル構築のためには複数のパラメータ依存性を系統的にサーベイする必要がある。そのためには、ペタスケール計算機の相当部分を恒常的に利用できるだけの資源が必要となる(具体的な資源量は

validation 対象課題の設定による)。マルチスケール乱流相互作用の解明には、さらに大規模な解析が要求される。従来の例では、京コンピュータ(10PFlops)を用いても一つの run に数ヶ月を要した。大域的ジャイロ運動論的シミュレーションを ITER や DEMO スケールにまで拡張するには、さらに大規模な計算が必要となるため、こうした解析を進めるにはより長期的な取り組みが必要である。一方、軸対称性を有するトカマク配位の場合に比べて、3 次元ヘリカル磁場配位のジャイロ運動論的シミュレーションでは、リップル磁場に捕捉された粒子の複雑な軌道の効果を解析するため、実空間・速度空間ともに、より多くの格子点が必要となり、GKV や GENE 等の局所シミュレーションコードでも膨大な計算時間が要求される点にも留意が必要である。

ロードマップに掲げた課題を実行するためには人的資源の充実も欠かせない。そのために必要な研究者数を見積もると以下ようになる。局所ジャイロ運動論的シミュレーションを用いた乱流輸送研究 5 名、局所乱流シミュレーションのコード開発・モデル拡張 4 名、大域的ジャイロ運動論的コードを用いた乱流輸送シミュレーション研究 4 名、大域的乱流シミュレーションコード開発・モデル拡張 4 名となり、大規模シミュレーションのための計算技術開発 3 名、合計で 20 人規模の研究・開発体制が必要と見込まれる。一方、国内で核融合プラズマのジャイロ運動論的シミュレーション研究に携わる常勤の若手研究者は 5 名程度であり、ポスドクなどの非常勤を含めても 10 名には満たない。そのため、今後、当該分野の研究者層を拡充させるとともに、そのための人材育成を行う大学院教育の充実をはかる予算措置が必要不可欠である。

参考文献

- [1] http://gyrokinetics.sourceforge.net/Gyrokinetics_Home_Page/Welcome.html
- [2] <http://genecode.org>
- [3] <https://bitbucket.org/gkw/gkw/wiki/Home>
- [4] <http://www.p.phys.nagoya-u.ac.jp/gkv/index.html>
- [5] M. Nakata et al., Phys. Rev. Lett. **118**, 165002 (2017).
- [6] S. Maeyama et al., Phys. Rev. Lett. **114**, 255002 (2015).
- [7] S. Maeyama, et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 195002 (2017).
- [8] V. Grandgirard *et al.*, Comput. Phys. Comm. **207**, 35 (2016).
- [9] Y. Idomura *et al.*, Comput. Phys. Comm. **179**, 391 (2008).
- [10] K. Obrejan *et al.*, Comput. Phys. Comm. **216**, 8 (2017).
- [11] S. Ku, *et al.*, Nuclear Fusion **49**, 115021 (2009).
- [12] J. A. Heikkinen, *et al.*, J. Comput. Phys. **227**, 5582 (2008).
- [13] K. Imadera *et al.*, 25th Fusion Energy Conference TH/P3-3 (2016).
- [14] Y. Idomura *et al.*, Phys. Plasmas **21**, 020706 (2014).
- [15] Y. Idomura *et al.*, J. Comput. Phys. **313**, 511 (2016).

高エネルギー粒子輸送シミュレーション研究開発

藤堂泰(核融合科学研究所)

ここでは核融合燃焼プラズマにおけるアルファ粒子および NBI や ICRF 加熱によって生成する高速イオンなどの高エネルギー粒子に関する理論シミュレーション研究について、「現状と解決すべき課題」、「課題を解決するための具体的方法」、「ロードマップと必要な予算・資源」を述べる。

1. 現状と解決すべき研究課題

高エネルギー粒子に関する理論シミュレーション研究の目的は核融合燃焼プラズマにおける高エネルギー粒子分布を予測し、その結果をプラズマの長時間挙動を予測する統合シミュレーションに提供することである。高エネルギー粒子分布は3つの物理過程、1) 粒子を生成する核融合反応、NBI、高周波波動との相互作用、2) バルクプラズマとの衝突による減速過程と新古典輸送、3) 磁場摂動や高エネルギー粒子駆動不安定性を含む MHD 不安定性による輸送によって決定される。物理過程 1 および 2 についてはコード開発が進展しており、実験との比較による実証研究が中心的な課題となっている。物理過程 3 についても、与えられた磁場摂動による高エネルギー粒子輸送の計算コードは開発・整備されている。

一方で、MHD 不安定性による高エネルギー粒子輸送は近年研究が大きく進展しているものの、依然として高エネルギー粒子に関する中心的な研究課題である。高エネルギー粒子駆動不安定性は高エネルギー粒子と MHD モードの整合的な取り扱いが必要な難易度の高い問題であり、さらに信頼性の高い予測を目指して高エネルギー粒子の衝突減速時間スケールの長時間シミュレーションを含むコード開発と実証研究をこれからも推進する必要がある。また、鋸歯状振動や新古典テアリングモードなどの MHD 不安定性や共鳴磁場摂動は MHD の重要な研究課題であるとともに、高エネルギー粒子との相互作用も含めて研究を進めるべきであろう。さらに、核融合プラズマの長期挙動を予測する統合シミュレーションではバルクプラズマを加熱する高エネルギー粒子の分布データが不可欠であり、MHD 不安定性による高エネルギー粒子輸送をどのように統合シミュレーションに提供するのか、その連結手法は重要な研究課題である。

以上をまとめると、高エネルギー粒子について推進すべき課題は、「I. 高エネルギー粒子駆動不安定性と高エネルギー粒子輸送」、「II. 高エネルギー粒子駆動不安定性の長時間シミュレーション」、「III. フィッシュボーン不安定性などの MHD モードと高エネルギー粒子の相互作用」、「IV. 統合シミュレーションとの連結」である。

2. 課題を解決するための具体的方法

I. 高エネルギー粒子駆動不安定性と高エネルギー粒子輸送

この課題の目的は統合コードが予測する原型炉プラズマにおける高エネルギー粒子駆動不安定性とそれによる高エネルギー粒子分布変化を予測することである。

高エネルギー粒子・MHD 連結シミュレーションコード MEGA[1-4]をこの課題に適用することができる。MEGA は ITER プラズマにおける同様の問題に適用された実績がある[5]。アルフベン固有モード(AE)の安定性の予測には高エネルギー粒子による駆動とさまざまな物理機構による減衰を正確に計算する必要がある。MEGA は高速アルファ粒子とビームイオンによる駆動、および熱イオンによるランダウ減衰と連続スペクトル減衰を計算することができる。高速イオンと熱イオンの有限ラーモア半径効果も MEGA に取り入れられている。一方で、現在の MEGA はこの他の重要な減衰機構である放射減衰と電子ランダウ減衰を取り扱うことができない。これらの機構を取り扱えるようにすることが MEGA に求められる課題である。一方で、MEGA は AE による高エネルギー粒子輸送も計算することが可能である。

この他の計算手法としては、ジャイロ運動論シミュレーションの発展が期待される。欧米ではジャイロ運動論シミュレーションが AE に適用されている[6,7]。電子とイオンを全て運動論的に取り扱う電磁的ジャイロ運動論シミュレーションが開発されれば、AE の予測に必要な物理過程を全て含んでおり、この課題の強力な研究手段となる。

また、AE の線形解析コードもこの課題の有効な手段である。国際的には MHD モデルに基づいた NOVA-K[8]やジャイロ運動論に基づいた LIGKA[9]が代表的なコードであり、国内では TASK/WM[10]が開発されている。これらのコードで得られた線形モードを使用する摂動論的シミュレーションコードは、AE による高速イオン輸送や高速イオンによって不安定化した AE の時間発展を計算することができる。このような高速イオン輸送解析コードとしては摂動論バージョンの MEGA が開発されている[11,12]。高速イオンによって不安定化した AE の時間発展を摂動論的シミュレーションで追跡する場合には、MHD 非線形性が AE の飽和振幅を抑制することが知られており[13]、MHD 非線形性を含む摂動論的物理モデルの開発が重要な課題となる。

II. 高エネルギー粒子駆動不安定性の長時間シミュレーション

この課題は衝突減速時間程度の長時間シミュレーションを実行して高エネルギー粒子分布とアルフベン固有モード(AE)などの高エネルギー粒子駆動不安定性の時間発展を予測するものであり、I のシミュレーションで高エネルギー粒子分布が大きく変化する場合に特に重要である。AE の時間発展は突発的な成長と減衰を繰り返す場合とプラズマ平衡分布の時間発展に従って振幅がゆっくりと変化する定常的な場合がある。

MEGA コードを用いた DIII-D 実験の長時間シミュレーションが実施され、AE による

高速イオン分布の強い平坦化および AE の空間分布と振幅がよく再現されている[2-4]。また、JT-60U の速周波数変調モードや ALE についても実験結果をよく再現することに成功している[14]。これらのシミュレーションでは NBI 吸収分布と高速イオンのバルクプラズマとの衝突が実装されている。このシミュレーションには I で述べた AE の運動論的減衰機構を含むことが理想であるが、衝突を含む長時間シミュレーションでは実績のある MEGA をこの課題に適用することが現実的な方法であると考えられる。この際に、流体粘性などの散逸係数を調整して AE の減衰率を適切な値に設定することが妥当である。

一方で、AE の時間発展は高エネルギー粒子の衝突周波数に依存して突発的または定常的となる。プラズマの微視的乱流や ICRF 波動が高エネルギー粒子の実効的な衝突の役割を担うことが指摘されており[15,16]、長時間シミュレーションにこれらの効果を取り入れるための物理モデルの導入やコード開発が必要である。

III. フィッシュボーン不安定性などの MHD モードと高エネルギー粒子の相互作用

フィッシュボーン不安定性は最初に観測された高エネルギー粒子 (EP) 駆動不安定性であり、原型炉においても重要な研究課題である。また、プラズマ中心から離れた領域で高速イオンとの相互作用によって発生する EP 駆動壁モード (EWM) や、鋸歯状振動などの MHD 現象に対する高速イオンの効果も重要な研究課題である。さらに、さまざまな MHD 不安定性や共鳴磁場摂動による高速イオン輸送も解明すべき課題である。

EP・MHD 連結シミュレーションコード MEGA はこの課題の有効な研究手段である。また、MHD 揺動が事前に与えられれば、OFMC などの古典的な高速イオン解析コードはこの問題の信頼できる解析手法である[17]。

IV. 統合シミュレーションとの連結

炉心プラズマの予測を目的とする統合シミュレーションは、プラズマ加熱の役割を担う高エネルギー粒子 (EP) 分布を必要としている。この課題では I~III のシミュレーションによる高エネルギー粒子分布予測と統合シミュレーションの連結手法を研究する。

シミュレーション結果における EP 駆動不安定性などによる EP 分布変化が小さい場合には、その EP 分布を統合シミュレーションに提供すれば十分であろう。II のシミュレーションにおいて EP 駆動不安定性が突発的な時間発展をする場合でも、EP 分布変化が小さい場合は時間平均した EP 分布を統合シミュレーションに提供すればよいと考えられる。

一方で不安定性による EP 分布変化がバルクプラズマの温度分布と核融合反応率に大きな影響を与える場合は、不安定性を考慮した EP 分布計算と統合シミュレーションを連結して同時に時間発展させる必要がある。一般には EP・MHD 連結シミュレーション

ンと統合シミュレーションの計算規模は大きく異なるので、規模の異なる計算をどのように効率的に連結するのが重要な研究課題となる。MEGA の長時間計算に統合シミュレーションが予測するプラズマ分布と MHD 平衡を反映させ、並行して MEGA の EP 分布予測を統合シミュレーションに取り込む連結計算がこの課題の有力な手段となり得る。この場合は MEGA の計算規模・時間がほぼ全体の計算規模・時間となる。

またアルフベン固有モード(AE)によって影響された EP 分布の計算方法として、AE の定常振幅と AE による EP 分布変化を両者が整合するように予測する理論モデルを開発できる可能性がある。米国のグループがこの EP 輸送モデルの開発に取り組んでいるが、AE による EP 分布変化は半径方向と速度空間の両方で発生するのに対して、現在の EP 輸送モデルは速度空間の分布変化を考慮しておらず不十分である[18]。しかし、このような EP 輸送モデルが構築できれば統合シミュレーションの規模と時間で計算できるので、日本でも取り組むべき研究課題であろう。

3. ロードマップと必要な予算・資源

高エネルギー粒子輸送シミュレーション研究開発計画を表5に示す。

表 5 高エネルギー粒子輸送シミュレーション研究開発計画

		2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	
高エネルギー粒子シミュレーション	I EP駆動不安定性とEP輸送	熱イオンの運動論的効果の評価			放射減衰の導入とその影響評価					
		連続スペクトル減衰の評価								
		EP駆動不安定性に関する実証研究								
	II EP駆動不安定性の長時間シミュレーション	アルファ粒子生成の導入とその影響評価			微視的乱流や高周波波動による実効的衝突周波数効果の導入とその影響評価					
		EP駆動不安定の長時間発展に関する実証研究								
	III フィッシュボーン不安定性などのMHDモードとEPの相互作用	MHDモードとEPの相互作用に関する実証研究								
	IV 統合シミュレーションとの連結	MHD平衡時間発展のEP-MHD連結シミュレーションへの導入			EP-MHD連結シミュレーションと統合シミュレーションの連結					
		EP駆動不安定性によるEP輸送モデルの構築								

以上のロードマップに沿って研究を推進するにあたって全体で合計 13 名(研究者 9 名、ポスドク 4 名)の人員が必要である。その構成は、全体統括研究者 1 名、課題 I 研究者 3 名 + ポスドク 1 名、課題 II 研究者 2 名 + ポスドク 1 名、課題 III 研究者 1 名 + ポスドク 1 名、課題 IV 研究者 2 名 + ポスドク 1 名である。

2018 年の時点で現在のトカマク実験を対象とした実証研究を中心に研究を進めるために必要な年間計算資源は、各課題について IFERC-CSC 計算機の 50 万ノード時間、全体で 200 万ノード時間程度である。ITER や原型炉の予測シミュレーションではより高い数値解像度が必要となり、さらに 10~100 倍大きな計算資源が必要となる。

参考文献

- [1] Y. Todo and T. Sato, Phys. Plasmas **5** (1998) 1321.
- [2] Y. Todo *et al.*, Nucl. Fusion **54** (2014) 104012.
- [3] Y. Todo *et al.*, Nucl. Fusion **55** (2015) 073020.
- [4] Y. Todo *et al.*, Nucl. Fusion **56** (2016) 112008.
- [5] Y. Todo and A. Bierwage, Plasma Fusion Res. **9** (2014) 3403068.
- [6] A. Mishchenko *et al.*, Phys. Plasmas **16** (2009) 082105.
- [7] H. S. Zhang *et al.*, Phys. Plasmas **17** (2010) 112505.
- [8] C. Z. Cheng, Phys. Report **211** (1992) 1.
- [9] Ph. Lauber *et al.*, Phys. Plasmas **12** (2005) 122501.
- [10] 福山淳, プラズマ・核融合学会誌 **83** (2007) 866.
- [11] Y. Todo *et al.*, Phys. Plasmas **10** (2003) 2888.
- [12] S. Nishimura *et al.*, Plasma Fusion Res. **8** (2013) 2403090.
- [13] Y. Todo *et al.*, Nucl. Fusion **50** (2010) 084016.
- [14] A. Bierwage *et al.*, Nucl. Fusion **57** (2017) 016036.
- [15] J. Lang and G.-Y. Fu, Phys. Plasmas **18** (2011) 055902
- [16] A. Fasoli, B. N. Breizman *et al.*, Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 5564.
- [17] K. Shinohara *et al.*, Nucl. Fusion **51** (2011) 063028.
- [18] K. Ghantous *et al.*, Phys. Plasmas **19** (2012) 092511.

MHD・ディスラプションシミュレーション研究開発

相羽信行(量子科学技術研究開発機構)

1. 現状

トカマク型原型炉を実現するために MHD 研究に求められる役割は、大きく分けて 2 つあると考えられる。一つは、MHD 現象に起因したディスラプションや ELM など炉内機器の重大な損傷をもたらし、運転上許容できない過渡現象の回避をロバストに実現することである。もう一つは、炉内機器を損傷するような大きな影響はないものの、炉心プラズマの性能を劣化させる不安定性を回避、あるいは発生した場合でもその影響を小さくすることである。このうち、前者については“MHD 現象自体の発生が許容できない”ということから、線形安定性解析などの手法によって安定な運転領域を事前に同定し、十分な裕度を持って安定な運転領域内でプラズマを維持する方法を考えることで多くの目的は達成される。幸い、トカマクプラズマの線形理想 MHD 安定性解析は古くから確立しており、日本国内でも量研において整備されている MARG2D[1,2]・MINERVA[3]・RWMaC[4,5]といった解析コードを用いて同運転領域の評価は既に可能である。

一方、ディスラプションや ELM をはじめとする MHD 現象が発生した場合の影響評価については、非線形シミュレーションによる数値実験を行うことが不可欠となる。国内においては、高エネルギー粒子に関するセクションで示されているとおり、核融合研(NIFS)において開発されているMEGAコード[6]を用いた高エネルギー粒子駆動モードの非線形シミュレーションが、国内外の実験装置における同モード由来の現象を再現するなどの成果が得られている。しかし、トカマクプラズマで問題となる純粋な MHD 現象に関する非線形シミュレーションコードの整備は欧米に対して大きく後れを取っているのが現状である。

また、ディスラプションに関連する物理課題は、発生回避に関しては MHD 研究と共通する点・課題もあるが、発生後の物理(垂直位置移動現象(VDE)や逃走電子発生)や工学的な熱・電磁力負荷評価など MHD 以外の物理研究、さらには工学・炉設計研究との密接な関わりを持つ課題も多い[7]。特に逃走電子や VDE、ディスラプション緩和手法(大量ガス入射(MGI)や粉碎ペレット入射(SPI)など)のシミュレーション研究は ITERでの重要性から急速に進歩しており、国内においても逃走電子計算コード ETC-Rel[8]や VDE 計算コード ETA[9]などのコード整備が進んだことで、簡易モデルにとどまらない研究成果を原型炉設計に適切に反映することが可能になってきている。特にディスラプションはトカマク原型炉の健全性を脅かす難題であり、理論シミュレーション研究と炉設計研究が協力して課題を解決していくことが不可欠であり、今後そのような研究開発体制を一層強化していく必要がある。

2. 解決すべき研究課題

MHD 研究に関連して解決すべき研究課題を、炉への影響の大きさから重要度順に並べるとすると、“ディスラプションを誘発する MHD モードの発生回避”、“ELM の原因となる MHD モードの発生回避”、“プラズマ性能を劣化させる MHD モードの発生回避、あるいは影響の低減”となると考えられる。

ディスラプションを誘発する MHD モードは多岐にわたり、大域的な理想 MHD モード、抵抗性壁モード(RWM)、ロケットモードが直接的に誘発する代表例と言えるが、その他にも鋸状振動の原因である内部キンクモードや新古典テアリングモード(NTM)の発生に伴うプラズマ分布の変化によってディスラプションが誘発されることも考えられる[10]。いずれにしても、ディスラプションの発生回避は最優先であり、その要因となる MHD モードは可能な限り線形安定であること、あるいは同モード発生後の非線形飽和状態が確実にディスラプションを誘発しないことを示す必要がある。

ELM については、ペDESTAL崩壊に与える影響が大きい(大振幅)ものは回避する必要がある一方で、影響が小さい(小振幅)ELM の場合は不純物やヘリウム灰の排気に利用できる可能性があることから、むしろ適切に制御できるのであれば利用することが望ましい、あるいは、別の方法で排気が可能であればELMは発生しないことが理想であるなど選択肢が多岐に渡る。少なくとも大振幅 ELM については、すでにその原因はペDESTAL部に局在した理想 MHD モードであるピーリング・バルーニングモードであることがほぼ同定されており[11,12]、これが線形安定であることが求められる。

一方、小振幅 ELM については複数種の ELM が存在しているが、2017 年度末時点ではいずれもその原因が完全に同定されているとは言えない。また、ELM が発生しない高閉じ込め運転モード(ELM フリーH モード、例えば QH-mode[13])の発生機構も原型炉での適用可能性を検討するに足りるほど理解されておらず、これを明らかにする定量的な物理研究が求められる状況にある。さらに、これらの小振幅 ELM や ELM フリーH モードは、ELM によって放出されるエネルギーが低いことや、状態が定常的に維持されることなどをシミュレーションで示さない限り、数値計算で小振幅 ELM や ELM フリーH モードの実現性を検証したとは言えない。

このような数値計算の実現には、MHD にとどまらず、輸送や不純物の影響、加熱や粒子補給の効果、さらには ITER のように3次元磁場を印加する場合にはその影響についてなど、非常に多岐にわたる物理効果を考慮したシミュレーションコードの開発が必要になる。このうち MHD 研究に関連したものに限れば、真空ないしこれに近い状態にある SOL 領域に囲まれたプラズマ中の MHD モードの長時間発展・飽和をシミュレーション可能な非線形 MHD シミュレーションコードの開発が不可欠である。プラズマの運転シナリオ作成で用いられる統合シミュレーションコードの核となるのが 1.5 次元輸送コードであるように、ペDESTAL物理(統合)シミュレーションを実現するには、この非線形 MHD コードが核となって様々な物理効果を取り込んでいくと考えられる。この

ような非線形 MHD シミュレーションコードは前述のディスラプションに関連した MHD モードの非線形飽和状態を評価も可能にすることから、重要度の高い課題を解決する上で必要不可欠なものである。

プラズマ性能を劣化させる MHD モードに関する研究は、線形解析による発生回避の可能性検討と、非線形シミュレーション発生後の影響に関する調査・同影響を小さくする方法の検討などが求められる。これらについては、ディスラプションや ELM に関する研究を通して開発が進められる線形・非線形 MHD シミュレーションコードを用いることで実施可能と考えられる。

なお、MHD モデルを用いる際には、解析対象となるプラズマ、MHD モードに応じて、影響が小さいとして無視される物理効果が数多く存在する。これらの中には、MHD モードの線形安定性には影響を与えないもののその非線形飽和状態には影響を持つもの、さらには輸送レベルの長い時間スケールでの物理を考慮する上では不可欠なものがあるが、これらをすべて同時に考慮したシミュレーションは現実的ではない。そのため、理論研究や運動論的モデルに基づいたシミュレーションによって定性的な影響の検証を行った上で MHD モデルに組み込むこと(拡張 MHD モデルの考案)が必要となる。このようなモデル拡張を支える物理研究は、シミュレーション結果の信頼性を高める基盤となるものであり、継続的に進めることが求められる。

ディスラプションに関連する大きな課題は、プラズマの密度限界[14]を決定している物理機構の解明、および、VDE やその際に流れるハロー電流、さらにディスラプション緩和手法に関して3次元性、つまりこれらの発生後に生じる負荷の局在性の評価を可能にする、といったものである。これらの課題解決には、炉心プラズマを囲む SOL 領域および真空容器といった炉全体を考慮した非線形 MHD シミュレーションコードの開発が急務である。このコードは上記の MHD モード解析で求められるものを基盤として、各種モジュールを追加して対応できると考えられるが、例えば MGI や SPI の影響については不純物ガス入射やペレット溶発などの原子分子過程を考慮したアクチュエータモデルの考案、また、VDE などについては制御系を取り入れたシミュレーションの実現など、モジュール開発を行う上でも複数の挑戦的な課題が存在している。これらのモジュール開発は密度限界に密接に関連していると考えられる不純物の輸送過程やバルクプラズマへの影響を考慮したシミュレーションを実現するためにも必須である。

また、制御に関連して、原型炉でも ITER と同様に 3 次元摂動磁場コイルを用いたプラズマ分布制御を検討する場合、摂動磁場に対するプラズマ応答を理解する必要がある。ITER では同コイルを ELM 制御用に用いるため、その影響を評価する線形・非線形 MHD コード開発が国外で精力的に進められ[15]、近年、国内でも開発が行われている。原型炉では真空容器内にコイルを設置することは難しいため、このようなコード開発を速やかに進め、ITER や JT-60SA および既存の実験装置の結果を用いて

コードの妥当性を検証した上で、容器外に設置しても十分な効果が得られるかを検討することは重要である。

3. 具体的方法

上記のように、解決すべき課題に取り組むためには、線形・非線形シミュレーションコードの双方が不可欠であるが、幸い、線形解析コードの整備についてはすでに原型炉設計に利用するに十分な状態にあると言える。そのため、原型炉設計における線形 MHD 解析で必要とされることは、実際に原型炉で想定されるプラズマにおける MHD 安定性を数多く解析し、設計の妥当性を確認するとともに、原型炉プラズマ設計を担当するグループと共同で、設計の最適化を行うことであると考えられる。プラズマの線形応答評価については引き続きコード開発を進める必要があるが、基盤となる線形 MHD コードはすでにあることから、大きな困難はなく開発が進められると期待できる。

一方、トカマクプラズマの非線形 MHD シミュレーションコードの開発は、前述の通り国外に比べて遅れているのが実情である。トカマクプラズマの MHD 安定性で問題となるものはプラズマ表面を变形させる、あるいは、プラズマ中の有理面に局在するものがほとんどであり、線形解析コードで得られた知見から、数値計算時に利用するメッシュを磁気面に合わせる事が重要であるとされる。実形状トカマクプラズマに対してこのような計算メッシュを用いる非線形 MHD シミュレーションコードは欧米には複数存在しており[16-20]、空間・時間方向の離散化方法はすでに複数の論文などで示されている。このうち空間方向はほぼ有限要素法を採用している一方で、時間方向についてはコードごとに異なる特徴を持つ。国内において非線形 MHD シミュレーションコードを新規開発する場合、後発の利点を生かして欧米のコードの状況を踏まえることで、開発期間をある程度短くできると考えられる。

また、開発がある程度進んだ段階で、国外の非線形 MHD シミュレーションコードの計算結果との比較や、実験データを用いた計算結果の妥当性検証を進める必要がある。非線形計算は多くの計算リソースを必要とするとともに、コード間ベンチマークでは事前に計算条件を慎重に合わせる必要があること、実験解析では実験家と事前に打ち合わせて計測エラーバーを考慮して計算条件を設定する必要があること、といった点に注意して進める必要があるため、これを考慮した開発スケジュールを設定することが重要である。

ディスラプション研究については、3次元性を考慮した本格的なシミュレーション研究は非線形 MHD コードの開発を待つ必要があるが、制御系・ロジックの考案や原子分子過程を考慮した不純物入射に関するモデルの考案・モジュール開発は、既存の軸対称を仮定したコードを用いて検証を行うなど、MHD コード開発と並行して進めることが可能である。また、制御系や装置のデザイン、真空容器などの材料といった工学的な要求・制限はディスラプションの影響評価や緩和手法の考案などに直結するため、

早い段階で炉設計を担当している研究グループとの議論を開始する必要がある。一方、密度限界に関しては、新たに開発する非線形 MHD シミュレーションコードを利用する前に、既存の簡略化 MHD モデルに基づく非線形コードを用いて SOL の影響を加味したシミュレーションを行うなど、物理研究を進めていくことで理解を深め、将来、本格的な非線形 MHD シミュレーションコードを用いて検証や制御方法の考案をすることが重要であると考えられる。

また、特に炉設計の段階でディスラプションの緩和方法などを検討するには、比較的少ない計算リソースでシミュレーションが可能となる“ディスラプション統合コード”を開発しておくことも不可欠である。このコードは炉心プラズマにおける輸送コードを中心とした統合コードに相当し、物理理解の進展とともに統合されている物理モジュールを更新することで評価・予測精度を高められるようにしておくことが重要である。量研では特にディスラプション発生後の諸現象を総合的に解析するフレームワークとして統合ディスラプション数値実験コード INDEX の開発に着手している。

4. ロードマップ

MHD・ディスラプションシミュレーション研究開発計画を表6に示す。

表6 MHD・ディスラプションシミュレーション研究開発計画

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
コード開発・ モデル拡張	既存コードを原型炉設計に 利用できるように整備							
	定量解析に利用できる流体モデルの検討・拡張 (抵抗、不純物、etc.)							
	非線形 MHD シミュレーションコード開発							
	3次元性を考慮した平衡・MHD・VDE 解析に向けた周辺機器構造解析コード開発							
	(炉設計用) ディスラプション統合コード開発							
物理研究課題	RWM・ロケットモード等ディスラプションを誘発する MHD モードの回避に繋がる物理研究							
	ELM 抑制・小振幅化運転に繋がる物理解明 (with 輸送、統合)							
	密度限界を決めている物理 (不安定性) の解明(with ダイバータ)							
	NTM などソフトリミットを決める不安定性の影響評価 (with 統合)							
	逃走電子に関する物理解明、原型炉での影響の定量評価							

	(手持ちのツールでの) ディスラプション緩和手法の影響評価
	ディスラプション緩和手法の詳細な物理解明

5. 必要な予算・資源

前述の具体的方法で示した、“線形解析コードを用いた原型炉プラズマの線形 MHD 安定性評価・設計の最適化”については、研究分野の継続性を考慮すると、最低でも、既存のコードを用いて解析を行う専属の研究者 1 名を育てることが急務である。その後も継続的にこの分野の専門家を育成していく必要がある。線形安定性は MHD 平衡が求まった段階で決まっているため、この研究者に求められるのは原型炉として成立しうるプラズマパラメータを持つ MHD 安定な平衡を示すことである。そのためには、JT-60SA や既存の国内外の実験装置における様々な平衡と MHD 安定性、そしてその結果観測された実験結果との関係を理解し、これを基に原型炉で想定される状況を推測することが必要である。このような検討には非常に多くの経験が必要であり、これを可能にする研究者を育成することが急務である。

次に、非線形 MHD シミュレーションコードについて、その重要性は明らかであるにもかかわらず国内では開発が進んでいないため、多くの人的資源を優先的に割り当てて開発を推進していくことが不可欠である。具体的には、開発を統括する研究者、およびこれを補佐する研究者が各 1 名、さらに、実際に開発を行うポストクが 5 名、コード開発会社の SE が 3 名は必要である。また、コード開発がある程度進んだ際には、コード間ベンチマークや実験結果との比較による妥当性検証などを専属で行う研究者 1 名が必要となる。さらにその後、検証が進んだ段階で、RWM 等ディスラプションを誘発する MHD モードやソフトリミットを決める炉心 MHD モード、ELM、密度限界や VDE、さらにはディスラプション緩和といった各テーマに研究者あるいはポストク 1 名が専属で解析を行う必要があり、最低でも 6 名の研究者が必要であると考えられる。以上から、非線形 MHD シミュレーションコード開発に関連して、最低でも 14 名の研究者・ポストク、および 3 名の SE が必要である。

ディスラプション関連について、ディスラプション統合コードの開発に、ディスラプションに関連する課題全般に精通した研究者が統括した 6 名程度(研究者 2 名、ポストク 2 名、SE 2 名)の開発グループが必要になると考えられる。そのほか、前述の各課題を 1 名の研究者ないしポストクが担当することが必要となる。以上から、ディスラプション(MHD 関連を除く)研究では、8 人程度の研究者・ポストク、および 2 名の SE が求められる。合計 8 名(現 1 名)の研究者が必要である。

ディスラプション関連について、上記の非線形 MHD コード関連のテーマを除いた場合、必要となるのは逃走電子の影響に関する定量評価、不純物の原子分子過程を考

慮したディスラプション緩和モデルの考案、制御系を考慮したディスラプション回避・緩和手法の検討、そしてディスラプション統合コードの開発である。特にディスラプション統合コードの開発には、ディスラプションに関連する課題全般に精通した研究者 1 名が統括した 6 名程度(ポストク・SE を含む)の開発グループが必要となると考えられる。そのほか、前述の各課題を1名の研究者ないしポストクが担当することが必要となる。以上から、ディスラプション(MHD 関連を除く)研究では、10 人程度の研究者・ポストクが求められる。

計算資源については、非線形 MHD コードの開発が完了した場合、その実行に必要な資源が最も多くなると考えられる。既存の海外のコードが必要としている計算資源から推測すると、上記の 6 課題について 1 年当り IFERC-CSC 計算機の 100 万ノード時間、全体で 500~600 万ノード時間程度が必要となる。原型炉の予測シミュレーションを実行する場合には計算実行数が大幅に増えるため、さらに 10~100 倍程度大きな計算資源が必要となる。

参考文献

- [1] S. Tokuda, T. Watanabe, Phys. Plasmas 6 (1999) 3012.
- [2] N. Aiba et al., Comput. Phys. Commun. 175 (2006) 269.
- [3] N. Aiba et al., Comput. Phys. Commun. 180 (2009) 1282.
- [4] N. Aiba et al., Phys. Plasmas 18 (2011) 022503.
- [5] J. Shiraishi et al., Nucl. Fusion 54 (2014) 083008.
- [6] Y. Todo and T. Sato, Phys. Plasmas 5 (1998) 1321.
- [7] 河野康則, 杉原正芳, 飛田健次, プラズマ・核融合学会誌 86 (2010) 3.
- [8] A. Matsuyama, et al., Nucl. Fusion 54, 123007 (2014).
- [9] A. Matsuyama, et al., 28th DDA Task Meeting, Jun 20-22, 2017 IPP Garching.
- [10] 松永剛, 古川勝, プラズマ・核融合学会誌 88 (2012) 660.
- [11] P. B. Snyder et al., Phys. Plasmas 9 (2002) 2037.
- [12] N. Aiba et al., Nucl. Fusion 51 (2011) 073012.
- [13] C. M. Greenfield et al., Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 4544.
- [14] M. Greenwald, Plasma Phys. Control. Fusion 44 (2002) R27.
- [15] J. K. Park et al., Phys. Plasmas 14 (2007) 052110. 他
- [16] W. Park et al., Phys. Plasmas 6 (1999) 1796.
- [17] C. R. Sovinec et al., J. Comput. Phys. 195 (2004) 355.
- [18] S. C. Jardin et al., J. Comput Phys. 226 (2007) 2146.
- [19] G. T. A. Huysmans et al., Nucl. Fusion 47 (2007) 659.
- [20] H. Lutjens et al., J. Comput. Phys. 227 (2008) 6944.

核燃焼制御シミュレーション研究開発

矢木雅敏(量子科学技術研究開発機構)

福山淳(京都大学名誉教授)

ITER では $Q=10$ のプラズマを 300~500 秒程度持続することが求められており、原型炉ではさらに長時間の燃焼維持が不可欠となる。燃焼状態を維持するためにプラズマに求められる必要条件としては(1)MHD 的に安定、(2)持続的な核融合反応、(3)許容できるダイバータ熱流束、(4)容易なプラズマ制御等があげられる。(2)に注目すると、十分高いエネルギー閉じ込め性能、必要十分な粒子閉じ込め性能、効率的な電流駆動、燃料イオンの供給、高エネルギー燃料イオンの生成、アルファ粒子の閉じ込めと衝突緩和、ヘリウムイオンと不純物イオンの排出を同時に達成する必要がある。これまで、各課題に関しては研究がなされてきたが、総合的な観点からの研究は少ない。特に粒子輸送制御に関しては、プラズマ周辺部からの燃料粒子供給と炉心に蓄積した W 不純物やヘリウム灰の排気を同時に行う必要があり、選択的に粒子輸送制御が可能かどうかを実証する必要がある。多粒子輸送制御の研究はこれまでなく、核燃焼制御を行う上でこの課題の解決は急務と言える。

1. 現状

物理研究の現状

核燃焼プラズマの物理研究は TFTR 及び JET の D-T 実験を受け、1990 年代に精力的に研究されたが、同位体効果や粒子輸送をはじめとして未解決の問題も多い。当時の装置が H モードとの両立を考慮してカーボンダイバータを採用し、実験データベースが構築されてきたことも、タングステンダイバータを採用する ITER や原型炉への不純物制御や関連する閉じ込め性能の外挿を困難にしている。また ASDEX 装置において ECRH や ICRF の中心加熱により中心部から不純物の除去ができることが報告されており[1]、物理機構の解明と制御手法の確立が望まれている。ペレットによる燃料供給に関しても、粒子輸送モデルが完全に確立されているわけではなく、現象論的な粒子ピンチモデルを採用し輸送解析を行っている状況である。特に原型炉クラスの超高温プラズマでは高効率の強磁場側入射を用いても燃料イオンは小半径の 80~90% までの領域にしか達せず、中心密度ピーキングは粒子ピンチに依存するため、信頼性のある予測が困難になっている[2]。一方で計算機のめざましい発展にともない、ジャイロ運動論モデルによるプラズマ乱流研究が進展し、粒子ピンチが捕捉電子に起因する電子の非断熱応答(ITG/TEM)[3]や通過電子に起因する非断熱応答(Ion mixing mode)[4]により生成されることが定量的に解析された[5,6]。しかし、これらは局所モデルに基づくコアプラズマの定常解析であり、非定常解析を行うためにはシミュレーション結果に基づく輸送モデル構築と周縁輸送障壁を含めた SOL プラズマとの相互作用

を含めた解析が必要である。以上のように個々の粒子輸送の物理機構は明らかになりつつあるが、同時制御を実現する手法の確立には至っていない。

コード開発の現状

原型炉炉心プラズマにおける核融合出力パワーは、燃料イオンの密度分布と速度分布関数に依存する。そのため、燃焼制御シミュレーションを実現するためには、燃料イオンの供給、反応生成ヘリウムイオンの排気、不純物イオンによる燃料希釈を記述する粒子輸送現象を解明するとともに、外部加熱や核融合反応による高速イオンの生成と緩和を記述する必要がある。バルクイオンの粒子輸送は熱輸送・電流拡散とともに通常の輸送コード(TOPICS, TASK/TR, TOTAL)で解析されるのに対して、不純物イオンについては多粒子種に対応した不純物コード(IMPACT, TASK/TI)で解析される場合が多い。また、電子輸送については電氣的準中性条件を仮定して電子密度を求める場合が多いが、電子とイオンの輸送を別々に解き、両極性条件より径方向電場を求める解析(TASK/TX)もある。一方、高速イオンの速度分布関数の解析には、粒子軌道を追跡する手法(OFMC, GNET)とフォッカープランク方程式を離散化して解く手法(BAFP, TASK/FP)がある。

燃焼制御を実現するためには、外部からの制御ノブであるアクチュエータおよび炉心プラズマの内部状態の情報を得る計測装置のモデル化が必要である。アクチュエータとしては、燃料供給のためのペレットや粒子ビームの入射とガスパフ、加熱・電流駆動のための中性粒子ビーム(NB)と電子サイクロトロン波(EC)の入射、さらに ITER プラズマにおいてはイオンサイクロトロン波入射(IC)を解析する必要があり、ペレット(APLEX)、NB(OFMC, FIT3D)、EC(EC-HAMAMATSU, TASK/WR)、IC(TASK/WM)等のコードが開発されている。また、外部からの粒子供給・排気については SOL・ダイバータプラズマとの相互作用を取り入れる必要があり、2次元モデル(SONIC)や簡易1次元モデル(D5PM)との結合が進められている。一方、計測装置のモデル化はまだほとんど着手されていない。

2. 解決すべき研究課題

燃焼プラズマ制御には、ディスラプションを含む MHD 安定性解析やダイバータ熱流束を含む周辺プラズマ解析を統合した炉心プラズマシミュレータ開発が必要である。このため、統合輸送シミュレーション MHD・ディスラプションシミュレーション研究等との密な連携が不可欠となる。当面、流体輸送モデルに基づく燃焼プラズマ輸送シミュレーションによる解析が中心となるが、信頼できる簡約乱流輸送モデル、多様なアクチュエータモデル、計測モデルの開発が必要である。

粒子輸送については、必要な輸送コードの開発は進んでいるが、輸送現象(粒子拡散、粒子ピンチ)を記述する信頼できる乱流輸送モデルの開発と検証が重要課題である。機械学習を含む経験的モデル、乱流理論に基づく解析モデル、乱流シミュレ

ーションに基づく直接モデル等を用いた輸送シミュレーション結果を実験データと比較し、系統的検証を行う必要がある。そして、周辺輸送障壁形成による LH 遷移、内部輸送障壁形成による閉じ込め改善、Greenwald 密度限界近傍での閉じ込め劣化、密度分布尖鋭化の衝突周波数依存性等を再現することも必要である。

また、新古典輸送と乱流輸送に対する径方向電場やプラズマ回転の影響を自己無撞着に取り入れた多流体型輸送シミュレーションと通常の拡散型輸送シミュレーションの定量的比較により、それらの妥当性検証も必要である。一方、不純物輸送の定量的解析のために必要となる多成分輸送シミュレーションの並列処理による高速化も実現する必要がある。

周辺プラズマとの相互作用は、燃料イオン供給、反応生成イオンの排気、輻射損失増大のための不純物イオン注入等の観点から重要である。周辺プラズマの解析には、ダイバータを含めた2次元構造のため2次元輸送モデルが主に用いられているが、多くの計算資源が必要となる。燃焼制御の観点からは、高速に処理が可能な簡易的1次元輸送モデルの発展が望まれる。

高速イオンの速度分布関数の時間発展を解析するために、粒子軌道追跡は厳密ではあるが精度向上には膨大な計算資源を必要とする。一方、現在のフォッカープランク解析コードには粒子軌道の有限幅効果が入っておらず、衝突緩和の空間的広がりや新古典効果の記述に問題がある。また、乱流揺動による準線形拡散の速度依存性を厳密に取り入れたモデル化や3次元磁場変動効果のモデル化も取り入れる必要がある。

アクチュエータのモデル化の課題は、NB, EC, IC 等による加熱と生成された高速粒子との相互作用を自己無撞着に解析することである。高速イオンの存在が NB の電離・荷電交換・緩和や IC の伝播・吸収に与える影響、高速電子の存在が EC による電流駆動に与える影響等を解析し、制御の最適化を図る必要がある。また、IC の励起については、アンテナとの結合や周辺プラズマとの相互作用を取り入れた解析が必要である。

原型炉プラズマにおける計測手法のモデル化は、限られた計測データから制御に必要なデータの抽出を検証することにより、計測データに基づいてアクチュエータを操作するプラズマ制御システム(PCS)の開発に不可欠である。原型炉の制御において利用可能な密度、温度、中性子等の計測結果を模擬する計測モジュールに加えて、乱流シミュレーション結果と実験計測結果を関連づけるための計測モデルが提案されているが[7]、これらを 1.5 次元輸送モデルおよび高速イオン速度分布解析へ実装するためのインタフェース開発が今後、必要である。

いずれにしても ITER 運転開始までにプロトタイプ炉心プラズマシミュレータを開発し、ITER の運転シナリオ開発及び実験結果との比較による妥当性検証に寄与することが望まれる。

3. 具体的方法

I. 粒子輸送コードの整備

燃料イオン密度分布の時間発展を正確に記述するため、不純物イオンを含めた多粒子種輸送コードの高速化を実現し、従来の拡散型輸送コードと径方向電場やプラズマ回転の効果を取り入れた多流体型輸送コードとの比較・検証を行う。

II. 乱流粒子輸送モデルの開発

燃料イオン密度分布の最適化を図るため、実験で観測される定常密度分布、ペレット入射や局所電子加熱に対する密度分布の時間応答、輸送障壁の形成、密度限界近傍における閉じ込め劣化等を再現できる乱流粒子輸送モデルを開発し、系統的検証を行う。

III. 周辺プラズマモデルとの結合

コアプラズマの境界条件として、燃料イオン、ヘリウムイオン、不純物イオンの粒子束と密度の関係を与える周辺プラズマモデルとの結合を実現する。現実的な2次元モデルに加えて、高速に処理できる簡易1次元モデルを開発し、粒子輸送コードと結合する。

IV. 速度分布解析コードの整備

燃料イオンの速度分布を記述し、核融合出力パワーを正確に評価するため、有限軌道幅効果を取り入れたフォッカープランク型速度分布解析コードを開発するとともに、乱流揺動による準線形拡散を取り入れて速度依存性をもつ空間拡散による分布関数の変形を定量的に記述する。

V. アクチュエータモデルの整備

従来のペレット、NB、EC、IC モデルの精度向上・高速化を図るとともに、高速粒子を含む非マクスウェル速度分布の効果を取り入れて、速度分布関数の時間発展を自己無撞着に解析する。IC の励起に関しては、アンテナとの結合や周辺プラズマとの相互作用を取り入れるため、有限要素法を用いた波動伝播解析コードを開発する。

VI. 燃焼制御シミュレーションコードの開発

粒子輸送コードと速度分布解析コードを結合して、燃焼制御シミュレーションを実現し、燃焼立ち上げシナリオの最適化を検討する。

VII. 計測モデルの開発

計測データを用いて燃焼制御を行うために、耐放射線能力に優れ、必要なポート面積が少ない計測手法をモデル化し、炉心プラズマの外形および内部状態の計測データをシミュレートするコードを開発する。

VIII. 炉心プラズマ統合コードとの連結

MHD 現象や熱輸送を含めた統合コードと連結し、プラズマ生成、電流立ち上げ、外乱応答、プラズマ終結を含めた燃焼プラズマ統合シミュレーションを実現する。プラ

ズマ制御システムの開発に貢献する。

4. ロードマップ

核燃焼制御シミュレーション研究開発計画を表7に示す。

表7 核燃焼制御シミュレーション研究開発計画

	2018-2020	2021-2025
粒子輸送解析	粒子輸送コードの整備	
	乱流粒子輸送モデルの開発	
	周辺プラズマモデルとの結合	
速度分布解析	速度分布解析コードの整備	
	アクチュエータモデルの整備	
燃焼制御	燃焼制御シミュレーションコードの開発	
	計測モデルの整備	
統合コードとの 連結		炉心プラズマ統合コードとの連結
	炉心プラズマ統合シミュレーションコードの開発	

5. 必要な予算と資源

コード開発および燃焼制御シミュレーションに必要な人員は5名程度。その内訳は、粒子輸送解析(2名)、速度分布解析(2名)、燃焼制御と統合コードとの結合(1名)。

また、当面のコード整備段階に必要な計算資源は、IFERC-CSC 計算機の利用において、粒子輸送解析(0.1 Mnh)、速度分布解析(0.5 Mnh)、燃焼制御(0.2 Mnh)であるが、コードが整備された段階では系統的サーベイのために 3Mnh 程度必要と考えられる。

参考文献

- [1] R. Neu et al., Plasma Phys. Control. Fusion 44 (2002) 811-826.
- [2] S. Tokunaga, A. Matsuyama et al., Proc. of SOFT 2016, Fusion Engineering and Design, 2017.
- [3] J. Wieland et al., Nucl. Fusion 29 (1989) 1810.
- [4] B. Coppi and C. Spight, Phys. Rev. Lett. 41 (1978) 551.
- [5] C. Angioni et al., Plasma Phys. Control. Fusion 51 (2009) 124017.
- [6] K. Miki et al., Proc of International Toki Conference 2017 (Dec. 5-8, 2017, Ceratopia Toki Gifu).
- [7] N. Kasuya et al., J. Plasma Fusion Res. 88 (2012) 322.

材料照射効果シミュレーション研究開発

渡辺淑之(量子科学技術研究開発機構)

1. はじめに(原型炉設計における材料照射効果シミュレーション研究の役割)

核融合炉内では炉の運転維持や安全において重要な役割を担うダイバータやブランケットなどの種々の機器が配置されている。これらの機器は高エネルギー放射線による過酷な照射環境下で使用されることになるため、構成材料の熱伝導性、機械的性質、寸法安定性などの低下(材料劣化)が懸念されている。従って、炉内機器の寿命評価やそれに基づいた原型炉設計を高精度に行うためには、高エネルギー照射による材料劣化を物理的に正しく予測しておく必要がある。ここでは、ブランケット機器内の構造材料に焦点を当てて話を進める。

低放射化フェライト/マルテンサイト系耐熱鋼である F82H 鋼は、核融合原型炉のブランケット構造材料としての使用が想定されている。同構造材料内では 14 MeV の核融合中性子照射に起因する原子はじき出し損傷や核変換損傷によって大量の照射欠陥が生成される。この照射欠陥の蓄積に伴い材料の微細組織が変化することで機械的性質の低下(脆化)や寸法安定性の低下(膨張化)などのいわゆる“照射効果”が発現し、材料の健全性に深刻な影響を及ぼす。従って、照射効果の影響を取り込んだ炉寿命評価は、原型炉ブランケット設計における工学的最重要課題である。しかしながら有効な核融合中性子照射施設が存在しない現時点での原型炉ブランケット設計は、既存の原子炉照射データの範囲内で行われることになる(図1)[1]。ここで、上述の核変換損傷においてヘリウムや水素などのガス原子は照射欠陥と強く結合することで照射効果を促進させることが想定されているが、原子炉に比べてヘリウム・水素生成量が1桁以上高い核融合炉においては、照射効果のさらなる促進化が懸念されている。従って、既存の材料照射データを原型炉設計に有効に活用するためには、原子炉照射データの傾向と核融合炉中性子照射データの傾向が有意な乖離を示す臨界条件(臨界点)の見極めが重要になる。以上により、原型炉設計における材料照射効果シミュレーション研究の役割は、照射材料挙動のメカニズムを明らかにし、それに基づいて核融合中性子照射の影響を予測する手法(方法論)を開発することである。

ここで既存の材料照射施設には、原子炉の他にイオンビーム加速器がある。イオンビーム照射は照射領域が非常に小さいため材料の特性評価試験が出来ない等のデメリットはあるものの、原子炉よりも大量のヘリウム・水素を材料内に導入することが可能であり、ガス原子による照射効果促進作用の評価に適している。しかしながら、原子炉やイオン加速器の照射能力は核融合炉のそれとは大きく異なっており(図2)、例えば照射場の指標である原子はじき出し損傷速度(dpa/s)や核変換 He 生成速度(appmHe/s)には数桁の差がある。従って、核融合中性子照射効果の予測手法開発においては、既存の代替照射場で取得された材料照射データを矛盾なく説明できる

機構論モデルを構築し、そのシミュレーション結果を取り込んで材料特性やスエリングの予測コードを開発する必要がある。以上を踏まえると、材料照射効果モデリング研究で推進すべき課題は、「マイクロ組織ベースでの照射場相関評価コード開発」、「スエリング評価コード開発」、「強度特性評価コード開発」、「材料健全性評価コード開発」の4つである。

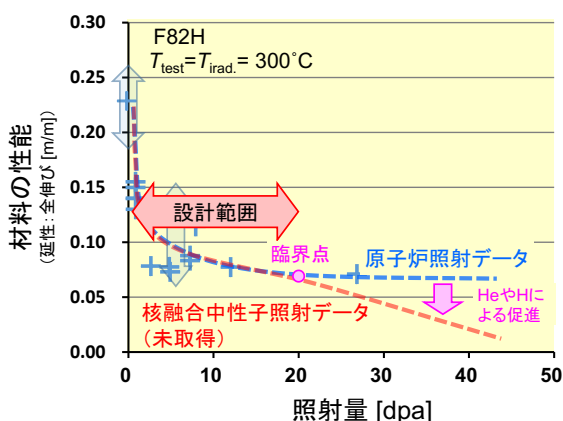


図1. 材料の性能（延性）の照射量依存性の概念図

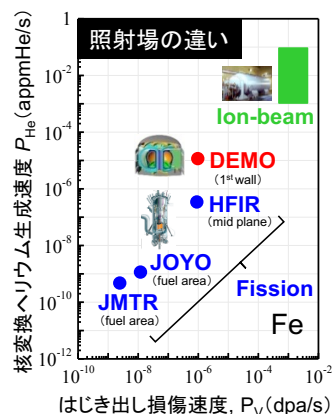


図2. 原子炉, イオン加速器, 核融合炉の照射能力の違い

2. 解決すべき研究課題・具体的方法

<課題1. マイクロ組織ベースでの照射場相関評価コード開発>

本課題の目的は、核融合中性子照射下での材料マイクロ組織変化をメカニズムの理解に基づいて予測する手法を開発することである。具体的には、マイクロ組織変化の主要因子である転位ループやキャビティ等の照射欠陥の形成挙動を機構論に基づいてモデル化し、dpa レート、He 生成レート、温度などの照射パラメータに対する照射欠陥の個数や大きさの時間発展を系統的に明らかにする。

照射欠陥形成のモデル化にあたっては、照射欠陥の核生成・成長現象の取り扱いが不可欠となるが、例えば He キャビティ形成に関する従来モデル[2]においては、同キャビティの熱的安定度の情報(キャビティを熱的に分解させるのに要するエネルギーであり、これはキャビティのサイズや内圧に強く依存する)が不足していたため、He キャビティの個数やサイズを大幅に過大評価していた。最近では、詳細な分子動力学計算による解析結果を反映した動的モンテカル計算により、He キャビティの核生成挙動の理解が大きく進展したが[3]、同キャビティの成長挙動や転位ループなどの他の照射欠陥との共存環境下での総合的な挙動については未解明である。従って、数種類の照射欠陥が共存する環境下での核生成・成長挙動を追跡可能な数理モデルを開発し、照射欠陥蓄積挙動の照射パラメータ依存性を解明する必要がある。また、He・H

混合キャビティのモデル化も重要であるが、モデルの構築に必要な熱的安定度の情報が極めて不足している。従って、まずは第一原理電子状態計算やその結果を用いて古典分子動力学計算などの粒子シミュレーションを実施し、照射欠陥のエネルギーを欠陥サイズや組成について系統的に明らかにすることが肝要である。

<課題Ⅱ. スエリング評価コード開発>

本課題では、課題Ⅰのシミュレーション結果を用いて核融合中性子照射による材料の体積膨張現象であるスエリングを予測するための手法開発が目的である。具体的には、スエリングの主要因子であるキャビティや転位ループなどの照射欠陥を対象とし、課題Ⅰで算出した照射欠陥のサイズ分布から体積増加量を評価し、互いに異なる照射場でのスエリング量の相関を系統的に明らかにする。上述したように、従来の照射欠陥形成モデルでは照射欠陥の核生成・成長現象の取り扱いが不十分であったため、ボイドスエリングについても大幅に過大評価していることが問題であった。ここでは、そのような物理的な曖昧さを排除した照射欠陥形成シミュレーション結果に基づいて、実験で取得されたスエリング量の温度・照射量依存性を矛盾なく説明できるスエリング評価コードを開発する。

また、原型炉ブランケットの設計には確率論的設計法の適用が想定されているため、本課題では材料照射データの統計的性質を評価する。具体的には、材料の作成時の熱処理温度や不純物濃度に起因した転位密度や結晶粒径等の本質的なばらつきに加え、照射下での温度や照射欠陥生成量の違いによる影響を考慮してスエリング量の統計的性質がどのような確率密度関数(発生確率)で記述できるのか理論的に明らかにする。

<課題Ⅲ. 強度特性評価コード開発>

本課題の目的は、課題Ⅰのシミュレーション結果を導入して核融合中性子照射による材料の強度特性変化を予測する手法を開発することである。材料の硬化と強度にはある程度の相関があることから、硬化の主要因子である照射欠陥(転位ループ、キャビティ、MX析出物等)のサイズ分布から硬化量を算出し、照射パラメータに対する照射硬化量の時間発展を系統的に明らかにする。また、各種の照射欠陥について転位の抵抗因子である硬化因子 α のサイズ依存性を分子動力学計算等の原子シミュレーションにより評価し、照射硬化因子を理論的に定量化する。尚、比較的大きな(直径2 nm以上の)照射欠陥に関する硬化因子の定量化については実験的にも試みられているが[4]、それ以下の微小な照射欠陥については原子シミュレーションによって評価されている[5-6]。続いて、材料の塑性変形の初期過程に相当する降伏強度は、分散強化機構に基づいたオロワンモデルを適用して評価する。さらに、塑性変化の中期過程に相当する引張強度の評価については、塑性変形中に新たに生成する転位などを

反映した解析(例えば結晶塑性有限要素法など)を導入し、材料強度予測コードを構築することを試みる。

尚、本課題においても材料の不均質や照射条件のバラツキを考慮した解析を行い、性材料照射データの統計的性質を評価する。

<課題Ⅳ. 材料健全性評価コード開発>

本課題では、課題Ⅱ・Ⅲで取得した材料照射データの統計的性質を反映させ、核融合中性子照射効果発現臨界条件を理論的に提示する。これは、原型炉設計に対してだけでなく、将来建設予定である核融合中性子源施設(A-FNS)の経済的・高効率の運転シナリオの作成に貢献できる。

また、原型炉運転中のパルスオペレーションやシビアアクシデント(ディスラプション, ICE, PTS など)における材料の健全性についても評価し、炉構造設計技術の高度化に資する評価コードを開発する。

<他との連携>

上記の課題Ⅰ～Ⅳを遂行するにあたり、核融合エネルギーフォーラムのシミュレーションクラスター・炉工学炉材料モデリングサブクラスターや、炉工学クラスター・炉材料サブクラスターと連携し、議論を重ねながら実施する。

3. ロードマップと必要な予算・資源

<ロードマップ>

材料照射効果シミュレーション研究開発計画を表8に示す。

表8 材料照射効果シミュレーション研究開発計画

コード開発・利用課題	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Ⅰ.ミクロ組織ベースでの照射場相関評価	転位ループ形成挙動への照射場影響評価							
	He キャビティ形成挙動への照射場影響評価							
				He・H 混合キャビティ形成挙動への照射場影響評価(ア)				
	He・H-格子欠陥相互作用評価							
	照射欠陥挙動の物理的素過程評価							
照射場の定量化(カスケード損傷残存欠陥量に及ぼす照射場影響評価)								
Ⅱ.スエリング評価	He キャビティスエリングへの照射場影響評価							
						He・H 混合キャビティスエリングへの照射場影響評価(イ)		
						照射材料データの統計的性質評価(ウ)		
Ⅲ.強度特性評価			硬化因子の定量化(転位の動的挙動に対する欠陥影響評価)					

	照射下塑性変形初期過程の評価	
		照射下塑性変形中期過程の評価(エ)
		照射材料データの統計的性質評価(オ)
IV.材料健全性評価		核融合中性子照射効果発現臨界条件提示(カ)
※(ア)～(カ)については 2025 年以降も継続予定		
<pre> graph TD I[課題 I マイクロ組織ベースでの 照射場関連評価コード開発] --> II[課題 II スエリング評価コード開発] I --> III[課題 III 強度特性評価コード開発] II --> IV[課題 IV 材料健全性評価コード開発] III --> IV </pre>		

<必要な予算・資源>

上記ロードマップに沿って研究を推進するにあたり全体で計 14 名の人員が必要である。その構成は、全体統括:1 名、課題 I :6 名(研究者 1 名不足)、課題 II :2 名、課題 III :3 名(研究者 1 名不足)、課題 IV :3 名(研究者 1 名不足)である。

また、課題全体で年間あたりに必要な計算資源は、2018 年の時点では 50 万ノード時間程度であるが、2020 年以降は 1000 万ノード時間程度の計算資源が必要になる。

参考文献

- [1] T. Muroga and H. Tanigawa, Fusion. Sci. Technol. 72 (2017) 389.
- [2] L.K. Mansur, Nucl. Tech. 40 (1978) 5.
- [3] K. Morishita and R. Sugano, J. Nucl. Mater. 353 (2006) 52.
- [4] G.E. Lucas, J. Nucl. Mater. 206 (1993) 287.
- [5] Y.N. Osetsky and D.J. Bacon, Phil. Mag. 90 (2010) 945.
- [6] Y.N. Osetsky and R.E. Stoller, J. Nucl. Mater. 465 (2015) 448.

まとめ

平成28年12月より理論・シミュレーション WG 活動を開始し、アクションプランの具体化に向け、現状分析や解決すべき課題抽出、研究開発計画の策定等に関して議論を行ってきた。今回、その議論を踏まえ理論・シミュレーション WG 報告書として取りまとめた。

炉心プラズマ統合シミュレーション、ダイバータシミュレーション、ジャイロ運動論的乱流輸送シミュレーション、高エネルギー粒子輸送シミュレーション、MHD・ディスラプションシミュレーション、核燃焼制御シミュレーション、材料照射効果シミュレーションに対し、2025 年頃予定されているチェックアンドレビューに向けた研究開発計画を策定した。また、それを遂行するために必要とされる人的資源や計算資源を提示した。ここでは、研究者の-effortを考慮しないで、プロジェクトを遂行するために必要とされるのべ人数を試算した。必要とされる研究者・ポスドクと技術支援要員ののべ人数を以下に示す。また、必要とされる計算資源をまとめておく。

人的資源

炉心プラズマ統合シミュレーション研究開発

統合コードの開発を進める上で、記述した6分野毎に第一原理シミュレーションや実験解析から統合コード向けにモデリングをする専任研究者2名、統合コード全体の連携機能等を開発する専任研究者2名が必要である。そのためには新たに8名(現6名)の研究者が必要である。6分野と連携のコードを整備する技術者7名が必要である。

ダイバータシミュレーション研究開発

各輸送モデル(プラズマ、中性粒子、不純物、壁)へ実装する物理モデルの開発・実装作業に専門家5名程度、ダイバータコード全体の調整や総合的解析に専門家 2名程度、合計7名(現3名)の研究者が必要である。また、これらのコード開発・解析を支えるため、7名程度のポスドクが必要である。そのためには新たに 11 名(現 3 名)の研究者が必要である。さらに5名程度の技術支援要員が必要である。

ジャイロ運動論的乱流輸送シミュレーション研究開発

局所乱流シミュレーション研究8名、およびそのコード開発・モデル拡張5名、大域的乱流シミュレーション研究8名、およびそのコード開発・モデル拡張8名となり、合計で29人規模の体制が必要と見込まれる。そのためには新たに16名(現13名)のシミュレーション研究者が必要である。一方、国内で核融合プラズマのジャイロ運動論的シミュレーション研究に携わる常勤の若手研究者は5名程度であり、ポスドクなどの非常勤を含めても10名には満たない。そのため、今後、当該分野の研究者層を拡充させるとともに、そのための人材育成を行う大学院教育の充実をはかる予算措置が必要不可欠である。

高エネルギー粒子輸送シミュレーション研究開発

全体で 13 名(研究者 9 名、ポスドク 4 名)の人員が常時必要である。その構成は、全体統括研究者 1 名、課題 I 研究者 3 名+ポスドク 1 名、課題 II 研究者 2 名+ポスドク 1 名、課題 III 研究者 1 名+ポスドク 1 名、課題 IV 研究者 2 名+ポスドク 1 名、合計 13 名(現 4 名)の研究者が必要である。そのためには新たに 9 名(現 4 名)の研究者が必要である。

MHD・ディスラプションシミュレーション研究開発

線形 MHD 解析について、専属の研究者 1 名が必要である。また、非線形 MHD シミュレーションコードについて、開発を統括する研究者、およびこれを補佐する研究者が各 1 名、および、実際に開発を行うポスドクが 5 名、コード開発会社の SE が 3 名は必要である。コード間ベンチマークや実験結果との比較による妥当性検証などを専属で行う研究者 1 名が必要となる。テーマごとに、専属で解析を行う必要があり、最低でも 6 名の研究者あるいはポスドクが必要であると考えられる、以上から、非線形 MHD シミュレーションコード開発に関連して、最低でも 14 名の研究者・ポスドク、および 3 名の SE が必要である。そのためには新たに 7 名(現 8 名)の研究者・ポスドクおよび 3 名(現 0 名)の SE が必要である。

ディスラプション関連について、ディスラプション統合コードの開発に、ディスラプションに関連する課題全般に精通した研究者が統括した 6 名程度(研究者 2 名、ポスドク 2 名、SE 2 名)の開発グループが必要となると考えられる。そのほか、前述の各課題を 1 名の研究者ないしポスドクが担当することが必要となる。以上から、ディスラプション(MHD 関連を除く)研究では、8 人程度の研究者・ポスドク、および 2 名の SE が求められる。そのためには新たに 7 名(現 1 名)の研究者が必要である。

核燃焼制御シミュレーション研究開発

コード開発および燃焼制御シミュレーションに必要な人員は 5 名程度。その内訳は、粒子輸送解析(2 名)、速度分布解析(2 名)、燃焼制御と統合コードとの結合(1 名)である。そのためには新たに 2 名(現 3 名)の研究者が必要である。

材料照射効果シミュレーション研究開発

上記ロードマップに沿って研究を推進するにあたり全体で計 14 名の人員が必要である。その構成は、全体統括:1 名、課題 I :6 名(研究者 1 名不足)、課題 II :2 名、課題 III :3 名(研究者 1 名不足)、課題 IV :3 名(研究者 1 名不足)である。そのためには新たに 3 名(現 11 名)の研究者が必要である。

以上、研究者(ポスドクを含む)として新たに 63 名が必要である(現役の研究者を含めた研究体制の総数としては 112 名)。その他、サポート要員として 17 名の確保が望ましい。

計算資源

炉心プラズマ統合シミュレーション研究開発

統合コードのモデルを詳細化するには、各々の第一原理シミュレーション計画の要求能力と同じ計算資源が必要である。一方、各々の第一原理シミュレーション結果を模擬できるモデルを開発するためには、少なくとも数百以上の回数を計算できる資源が必要である。また、シミュレータに向けたモデルの簡易化や制御には機械学習が利用でき、その学習計算には別途 GPGPU 等の計算が必要になる可能性がある。

ダイバータシミュレーション研究開発

上記のようなロードマップに沿ってコード開発を進めるためには、コード開発、シミュレーション解析を滞りなく進めていくために、核融合コミュニティとして優先的に利用できる大型計算機資源を維持していく必要がある。

ジャイロ運動論的乱流輸送シミュレーション研究開発

ペタスケール計算機の相当部分を恒常的に利用できるだけの資源が必要となる(具体的な資源量は validation 対象課題の設定による)。マルチスケール乱流相互作用の解明には、さらに大規模な解析が要求される。従来例では、京コンピュータ(10PFlops)を用いても一つの run に数ヶ月を要した。大域的ジャイロ運動論的シミュレーションを ITER や DEMO スケールにまで拡張するには、さらに大規模な計算が必要となるため、こうした解析を進めるにはより長期的な取り組みが必要である。一方、軸対称性を有するトカマク配位の場合に比べて、3次元ヘリカル磁場配位のジャイロ運動論的シミュレーションでは、リップル磁場に捕捉された粒子の複雑な軌道の効果を解析するため、実空間・速度空間ともに、より多くの格子点が必要となり、GKV や GENE 等の局所シミュレーションコードでも膨大な計算時間が要求される点にも留意が必要である。

高エネルギー粒子輸送シミュレーション研究開発

2018年の時点で現在のトカマク実験を対象とした実証研究を中心に研究を進めるために必要な年間計算資源は、各課題について IFERC-CSC 計算機の 50 万ノード時間、全体で 200 万ノード時間程度である。ITER や原型炉の予測シミュレーションではより高い数値解像度が必要となり、さらに 10~100 倍大きな計算資源が必要となる。

MHD・ディスラプションシミュレーション研究開発

非線形 MHD コードの実行に必要な資源が最も多くなると考えられる。既存の海外のコードが必要としている計算資源から推測すると、上記の 6 課題について 1 年当り IFERC-CSC 計算機の 100 万ノード時間、全体で 500~600 万ノード時間程度が必要となる。原型炉の予測シミュレーションを実行する場合には計算実行数が大幅に増え

るため、さらに 10～100 倍程度大きな計算資源が必要となる。

核燃焼制御シミュレーション研究開発

当面のコード整備段階に必要な計算資源は、IFERC-CSC 計算機の利用において、粒子輸送解析（10 万ノード時間）、速度分布解析（50 万ノード時間）燃焼制御（20 万ノード時間）であるが、コードが整備された段階では系統的サーベイのために 300 万ノード時間程度必要と考えられる。

材料照射効果シミュレーション研究開発

課題全体で年間あたりに必要な計算資源は、2018 年の時点では 50 万ノード時間程度であるが、2020 年以降は 1000 万ノード時間程度の計算資源が必要になる。

以上まとめると、2020 年以降、ITER をターゲットとした大規模シミュレーションが計画されている。その中でもジャイロ運動論シミュレーションがもつとも計算機資源を必要とするが、10PF 級の計算資源を占有しようとする少なくともその 2～3 倍のスパコンが必要となる。30PF 級のスパコンは 2018 年 6 月のスパコンランキング TOP 500 の 5 位に相当する規模である。また電子の運動を考慮した ITER クラスのグローバルシミュレーションでは 200PF 級のスパコンが必要となり、これは第 1 位に相当する規模である。DEMO においては、1EF 級のスパコンが必要となる。いずれにしても、2020 年初頭に最低でも JFRS-1 の 4～5 倍程度の能力を有する大型計算機の導入が不可欠である。さらに、シミュレーション研究を加速するため、計算科学の研究者との連携によるコードの高速化や新しい数値アルゴリズムの研究開発が不可欠と考えられる。アクションプランを遂行する上で、量研においては、原型炉をめざしたシミュレーション研究を支援する計算科学グループの設置を将来的に検討していく必要がある。



<http://www.qst.go.jp>