

自然科学研究機構 核融合科学研究所
令和元年度外部評価報告書
NIFS Peer Review Reports in FY2019

2020年3月

March 2020



核融合科学研究所 運営会議外部評価委員会

NIFS Advisory Committee External Peer Review Committee

目 次

第1章	これまでの経緯	1
第2章	項目別の評価	4
第3章	評価のまとめと提言	37
	[1] 評価のまとめ	37
	[2] 提言	42
第4章	おわりに	44

資料編

- 1 令和元年度 数値実験炉研究プロジェクト報告書

参考資料

- 1 令和元年度 外部評価「数値実験炉研究プロジェクト」の評価結果一覧
- 2 令和元年度 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会及び専門部会
構成名簿
- 3 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会規則
- 4 令和元年度 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会日程

第1章 これまでの経緯

核融合科学研究所（以下、「核融合研」とする。）は、大学共同利用機関として大学における核融合研究を推進するため、大型ヘリカル装置（Large Helical Device、以下、「LHD」とする。）を主装置として、1989（平成元）年に設立された。核融合コミュニティの総意と期待を背負って計画された LHD は、我が国独自のアイデアであるヘリオトロン型磁場を超伝導で発生することを特長とし、高出力の加熱によりヘリカル方式による高性能プラズマを生成させるとともに、環状型磁場閉じ込め核融合炉の実現を見据えた物理的・工学的課題を解明することを目指して実験研究を進めている。一方、これと並行して、本質的に複雑性を持つ核融合プラズマの解析には、大規模シミュレーションを用いた理論的研究が必須である。そのため、核融合研では専用のスーパーコンピュータを導入し、これを全国の核融合理論研究者に対して共同利用を通じて提供することで、先導的な研究を進めてきた。そして、2010（平成22）年度からは、プラズマ・核融合研究分野での COE（Center Of Excellence、以下、「COE」とする。）としての求心力を一層強化するため、LHD、理論シミュレーション、核融合工学の3分野で研究プロジェクトを構成し、核融合炉実現に向けてこれらの成果を統合していく研究計画をスタートさせた。核融合研の研究組織を改編し、全研究教育職員を一つの研究部にまとめた上で、研究プロジェクトへ自由に参画する体制とすることで、LHD・理論シミュレーション・核融合工学の三つのプロジェクト間の連携がこれまで以上に容易となり、新しい課題に対して臨機応変に対応できるようになっている。

この間において、国内学術研究体制の変化があり、核融合研は、2004（平成16）年度から大学共同利用機関法人自然科学研究機構（以下、「機構」とする。）の一機関として全国共同利用・共同研究をより一層推進することになった。法人化にあたっては、6年間の中期目標・中期計画を掲げ、その進捗状況について毎年度評価を受けるという制度が導入された。この毎年度の評価は主として管理運営面のものであるが、核融合研においては研究成果についても外部の有識者による評価を受けることが重要と判断し、核融合研の運営会議の下に外部評価委員会を組織して研究面の評価を毎年度実施している。評価項目は運営会議で決定し、評価は運営会議所外委員及び評価項目に対応した専門家で構成された外部評価委員会で行っている。外部評価委員会は評価結果を運営会議に報告し、核融合研は、その結果を Web ページ等で公開するとともに、次年度以降の研究活動の改善に役立っている。

外部評価委員会の評価項目は運営会議で審議・決定され、年度毎に異なる。直近では、2016（平成28）年度に共同研究、2017（平成29）年度に核融合工学研究プロジェクト、2018（平成30）年度に LHD 計画プロジェクトの外部評価を実施した。そして、本年度においては「数値実験炉研究プロジェクト」を対象として、外部評価を実施することとした。そこで、外部評価委員として運営会議の所外委員10名と外国人委員3名、さらに所外の専門部会国内委員2名と専門部会外国人委員1名を加えて外部評価委員

会を構成し、評価を行った。

まず、2019（令和元）年10月23日に第1回外部評価委員会及び専門部会を開催し、本年度の外部評価の進め方について審議を行い、評価の観点を設定した。続いて、2019（令和元）年11月23日に第2回外部評価委員会及び専門部会を開催し、核融合研から、評価の観点を踏まえたビューグラフや活動報告書等の資料（資料編参照）を用いた詳しい説明を受け、質疑応答を行った。その後、2020（令和2）年1月28日に第3回外部評価委員会及び専門部会を開催し、核融合研と更なる質疑応答を行うとともに、評価の観点に沿った評価作業とその取りまとめ等を行った。ここでの議論を踏まえて外部評価報告書（案）を作成し、メールによる持ち回り審議により検討・確認の上、報告書として取りまとめた。本年度の外部評価委員会及び専門部会の日程は参考資料4のとおりである。

なお、本年度に実施した「数値実験炉研究プロジェクト」に関する外部評価では、その評価の観点を以下のように定めて実施した。評価の観点の各項目は、大学共同利用機関自然科学研究機構の定める第3期中期目標・中期計画において、核融合研が推進する「数値実験炉研究プロジェクト」の評価に必要不可欠なものから成っており、達成度評価及び研究水準の評価を基本としている。

また、2015（平成27）年度に実施された「数値実験炉研究プロジェクト」の外部評価において、報告書に「提言」として示された次の点も今回の評価の参考とした。

【平成27年度外部評価における提言】

- (1) 「数値実験炉研究プロジェクト」全体の最終目標をより明確に示し、各研究グループで共有するとともに、研究グループの目標に対する進捗度等のチェック体制強化、並びに、研究グループ間の連携によるシナジー効果を生むためのマネジメントに留意する必要がある。
- (2) 最終的に統合化が完結するロードマップを視野に入れつつ、各開発要素の組み合わせ統合化を常に意識した研究計画の整備や体制の強化を速やかに図るべきである。
- (3) プラズマシミュレータ及び関連研究環境の整備に関しては、全体計画の中での各グループの進捗状況を精査し、それを加味した段階的な達成目標に見合った整備計画がたてられることを期待する。特に統合化に不可欠なスーパーコンピュータについては、プラズマ・核融合研究の更なる発展に貢献できるよう、より高性能なスーパーコンピュータの導入を今後も積極的に推進することを希望する。
- (4) プロジェクトの推進と学術の発展を縦糸と横糸として、関連研究者が両者に貢献する研究体制を維持・発展すること、並びに他分野に発信できる競争力を向上させて学際的活動を通じた新学問領域の創出を進めていくことを希望する。
- (5) 将来にわたり高い水準で、核融合炉開発にとって重要なシミュレーション研究活

動を維持するためにも、大学等とともに人材育成に組織的に取り組み、質及び量ともに一層の充実を図ることを期待する。

【令和元年度外部評価における評価の観点】

[1] 研究計画・体制・環境の整備

- (1) 数値実験炉の構築に向けたロードマップを含めた研究プロジェクトの目標設定と研究計画は、適切に策定されているか。また、第3期中期目標・中期計画を遂行する上で、適切に検討されたものとなっているか。
- (2) 段階的な進捗度管理や研究連携・統合化に向けたマネジメント等を含め、研究推進体制は、プロジェクトを遂行する上で、有効に機能しているか。
- (3) より高性能なスーパーコンピュータの導入を含め、プラズマシミュレータ及び関連研究環境は、研究計画に沿って適切に整備され、有効に活用されているか。

[2] 研究成果

プラズマシミュレータを活用した理論シミュレーション研究を進めることにより、第3期中期目標・中期計画で掲げた以下の項目において、国際的に高いレベルで成果を上げているか。

- (1) 数値実験炉の構築、実験結果との比較によるコードの検証と高度化
- (2) 核融合科学及び関連理工学の学術的体系化

さらに、

- (3) 数値実験炉研究プロジェクトの計画に沿って、着実に研究成果を上げているか。

[3] 共同利用・共同研究の推進

- (1) 理論シミュレーション研究を基盤とした大学等との共同研究が適切に進められ、プロジェクト研究の推進に貢献するものとなっているか。
- (2) 核融合プラズマシミュレーションの中核的研究拠点として、大学等の機能強化に貢献するとともに、分野間連携、異分野融合研究の推進に取り組んでいるか。
- (3) 国際的な連携活動を通じて、ITER計画・BA活動等を含めた国際協力へ貢献しているか。

[4] 人材育成

将来にわたり高い水準でシミュレーション研究活動を維持するために必要な人材の育成に貢献しているか。

[5] 将来計画

研究の将来計画は、数値実験炉研究の目標を見据えた適切なものとなっているか。また、核融合科学研究所の将来計画の策定に貢献するものとなっているか。

第2章 項目別の評価

本章では数値実験炉研究プロジェクトの活動実績について、第1章に示した評価の観点に従って、各委員から示された評価を項目別に集約して記述する。括弧内の数字は意見がほぼ同じであった委員の人数である。外国人委員からの意見については、原文のまま英文で記している。

[1] 研究計画・体制・環境の整備

[Development of research plan, system, and environment]

- (1) 数値実験炉の構築に向けたロードマップを含めた研究プロジェクトの目標設定と研究計画は、適切に策定されているか。また、第3期中期目標・中期計画を遂行する上で、適切に検討されたものとなっているか。

Does the Numerical Simulation Reactor Research Project (NSRP) appropriately set the goal and plan including the roadmap for construction of the Numerical Simulation Reactor? Are they properly discussed for accomplishing the third midterm target and plan?

- ・ 数値実験炉研究プロジェクトは核融合研の主要な研究プロジェクトとして、第3期中期目標・中期計画中に適切に位置付けられ、推進されている。(8名)
- ・ 目標設定及び研究計画は適切に策定されている。(7名)
- ・ タスクグループを設置してプロジェクトを進めており、各グループが目標を設定して、適切に協力し合っている。(2名)
- ・ 長期にわたる計画であり、国内外の情勢に応じた修正がなされる可能性もある。LHDの今後の研究計画の進展状況を考慮に入れ、ロードマップを柔軟に再検討、必要に応じて変更していくことが望まれる。(2名)
- ・ 個々のコード高度化と多階層の統合化が必要であり、最終目標達成に向けては複数のロードマップが必要。設定されたマイルストーンに縛られ、研究停滞が生じることを回避するよう留意されたい。(2名)
- ・ 核融合研が掲げる重水素プラズマ実験研究や国際熱核融合実験炉 (ITER) で行われる核燃焼実験への貢献を意識したプロジェクトとなっており、評価できる。
- ・ 本プロジェクトは、核融合研の中核を担うプロジェクトとして、トカマク装置路線と双方向的・相乗的な観点から核融合研究全体にとって重要な役割を担っており、実験データに基づいてモデルの高精度・高精緻化を図る特色ある卓越した運営が行われている。

- プラズマの自己組織化などのプラズマの基礎学理や画像処理なども含む幅広いシミュレーション学の進展に深く貢献してきた核融合研の歴史を継承・発展させつつ、プロジェクトの推進と学術の発展を縦糸と横糸として、研究を推進している点が評価できる。
- シミュレーション研究の最大の目的は、実験研究との協力によって物理の解明に貢献すること。核融合研究に関わる問題群を具体的な研究課題に還元し、それぞれの成果を個別に評価できる研究体制を構築することが望ましい。
- 全体としての課題や目標、プライオリティをより見やすくすることで、計画全体のより効率的な推進が期待できる。
- テーマを特定した個別的現象の「説明」にのみ終始すると、核融合研究がシミュレーション研究の学際的な広がりや推進するリーダーシップをとることができなくなる。シミュレーション研究としてのイノベーションを追求する横断型のタスクが設定され、学際的なリーダーシップを目指す意欲的な研究が望まれる。
- 「各物理要素に対するシミュレーションコードの高度化」と「核融合プラズマにおける多階層物理シミュレーションの統合化」が掲げられ、適切な目標策定がなされている。具体的な課題として、複数イオン種を含む乱流輸送シミュレーションやタングステン材料の分子動力学シミュレーションを計画通りに推進している。
- 個々の研究タスクや課題における具体的なサブジェクトが挙げられているが、「高度化」と「統合化」というプロジェクトの全体計画の流れとの関連において、これらの個別課題の「目標設定」がより具体化されるとよいのではないか。
- 「多階層複合物理」と「シミュレーション科学基盤」に関連したタスクグループ研究をロードマップ上でより明確にするべき。各タスクグループの活動と、プロジェクトの全体計画の関連も、より明確にされることが好ましい。
- マイルストーンの設定と達成状況の確認はプロジェクトである以上不可避であるが、マイルストーンに縛られて、進展している研究が滞ることも避けるべき。現象の理解のためにシミュレーションは有効な知見を提供できる利点を鑑みれば、開発されたコードを使いながら高度化していく過程が必須である。
- 実験との比較によるモデリングに重点が置かれるのはやむを得ない面もあるが、第一原理計算とその高度化、実験との比較によるモデリング、多階層の統合化を並行して進めるには、開発されているコード群についてそれぞれの段階にあるのかを分類し、どのコード群をどの段階で統合していくのかの手順を決める必要がある。個々のコード開発はその間も進むが、逐次その内容を統合コードに反映させる必要はなく、その意味で統合化と高度化を並行させながら統合化のタイミングに関するロードマップを作成する必要がある。
- 核融合研の中核を担うプロジェクトとして、ITER 計画に代表されるトカマク装置路線と双方向的・相乗的な観点から核融合研究を成功に導く重要な役割を担っている。広範

囲に及ぶ核融合研究の要素を統合・統括しながら、理論・シミュレーションで裏打ちされた予測・評価に基づいて LHD 実験研究を牽引するとともに、得られた実験データに基づいてモデルの高精度・高精緻化を図る特色ある卓越した運営が行われている。

- ・ 第3期中期目標・中期計画ではコードの拡張・統合化による核融合プラズマの多階層物理シミュレーションがロードマップに挙げられているが、多階層の連結に関する取組みがやや弱く、強化することが望まれる。
- ・ The goal of NSRP is ambitious and the roadmap seems to include all necessary elements to work towards the final goal. However, the activities that were reported are very much driven bottom-up by the scientists. Much effort has been devoted into logically presenting all these activities as a roadmap. I could recommend to perform a top-down analysis by reviewing the program to judge whether there are any gaps and also whether certain activities need to be prioritized and strengthened such that the overall goal of NSRP will be achieved.
- ・ The National Simulation Reactor Project is comprised of a well integrated set of research codes going from first principle simulation codes to reduced models incorporated in the integration code (TASK3D). These codes enable validation by comparison with experiment and provide the physics input to the design of a high-performance helical reactor. This is a state-of-the-art suite of codes and is targeted to address the goal of predicting behaviors of fusion plasmas. What this does not incorporate is integration into engineering analysis codes to enable the design of the next generation of machines.
- ・ The answer to both questions is definitely “Yes.”

以上、評価項目「数値実験炉の構築に向けたロードマップを含めた研究プロジェクトの目標設定と研究計画は、適切に策定されているか。また、第3期中期目標・中期計画を遂行する上で、適切に検討されたものとなっているか」に対して、極めて高く評価するが4名、高く評価するが10名、評価するが2名であった。

- (2) 段階的な進捗度管理や研究連携・統合化に向けたマネジメント等を含め、研究推進体制は、プロジェクトを遂行する上で、有効に機能しているか。

Does the research system function appropriately in accomplishing the objectives of the NSRP with attention to the management of step-by-step progress, research collaboration, and integration?

- ・ 八つのタスクグループを設置し、責任者を設定して所外研究者を含めた共同研究体制

を構築して統括するマネジメント会議を開催するなど、組織化を行った上でプロジェクトを推進しており、評価できる。(7名)

- LHD 計画プロジェクトや核融合工学研究プロジェクトとの連携もうまく進められている。(3名)
- ボトムアップ的な体制では統合化の実現は難しいと考えられ、統合化をプロジェクトとして責務を持って行う体制の構築が望まれる。(3名)
- 研究者が複数のタスクグループに参加し、タスクグループ間や実験グループとの研究連携が推奨されて、スムーズな情報交換が行われている点は評価できる。(2名)
- 八つのタスクグループ間の研究連携のための情報交換が行われている研究体制は、高く評価することができる。
- 八つのタスクグループを統括する部分を、ミーティングだけで済ませるのではなく、統合を専門に考える組織・グループを置いてもいいのではないか。
- 全体会議を通してメンバー全員がプロジェクト遂行に対する共通意識を持つような体制となっている。ただ、タスクグループ同士の有機的な連携については見えづらい。
- 同位体効果、MHD、周辺プラズマ等に関連した LHD 計画プロジェクト、ヘリカル型核融合炉 FFHR-c1 に関連した核融合工学研究プロジェクトとも連携がなされていると評価できる。
- 現第3期中期目標・中期計画の中心課題である LHD の重水素実験に対して、第2期中期目標・中期計画期間において当該プロジェクトで開発してきた要素研究を統合化することにより、多様な角度からヘリカル系プラズマの同位体効果の理論基盤を与えた点が高く評価できる。これらは、数値実験炉研究プロジェクトの運営と研究体制が適切に機能していることを示している。
- 第2期中期目標・中期計画期間で開発してきた各階層における要素研究を統合化する研究が本研究期間内に進展し、多階層複雑系としてのヘリカル系プラズマの理解が着実に進展している点も高く評価できる。
- 段階的な進捗管理については明確な指示態勢の構築が不十分である。シミュレーションコードの統合化や汎用化への今後の取組に期待したい。
- 研究グループの構成とそれぞれのロードマップはできているが、統合化に向けたロードマップとその達成度に関して、今回は明確ではなかった。世界最高峰のコード群が存在している現状を考えると、統合化して見せることもプロジェクトとしては重要なことであり、かつ学術的に価値の高い挑戦的な課題である。全てのコードを統合化する必要はなく、統合化するコード群をあらかじめ決めて、統合化に向けてどのような課題が存在し、どのように解決していこうとしているかを明確にし、それを研究体制に反映させる必要がある。
- 個別のタスクグループを横断し、技法のイノベーションや学際的な活動を支援するマネジメントが弱いように思われる。

- 流体平衡・安定性と高エネルギー粒子の両タスクグループの連携、及び、周辺プラズマ輸送とプラズマ壁相互作用の両タスクグループの連携が進められた点については、プロジェクト推進の観点から評価できる。
- これまでの研究成果や進捗状況を自己分析し、プロジェクトの将来計画へとフィードバックするとともに、プロジェクト全体を俯瞰するマネジメントの視点が必要ではないか。特に、各タスクグループへの人的資源の有効な配分バランスなど、プロジェクトの強みや、課題推進の緊急性や必要性に合わせた研究推進体制の構築が望まれる。
- 国内外で高く評価されている研究成果を創出しているのは8グループ中の数グループであり、貢献度が見えてこないグループも存在する。また、グループ間連携も弱い印象を受ける。個人の研究テーマが固定化してしまい、プロジェクトとして優先すべき課題へ有効に人材を投入できているかどうか検証する必要があるのではないか。グループリーダーもサブジェクトによっては、外部から迎え、強いリーダーシップを付与してプロジェクトとして研究開発を加速する必要があるのではないか。
- The number of collaborations is impressive (bit nationally and internationally). However, as stated in the previous point I have the impression that any good scientific proposal is embedded in the overall NSRP program without a very detailed and careful thinking what such a proposal adds to the overall goal of the program. Also the roadmap is mainly a collection of objectives in the different field. It would be good to set specific deliverables and milestones to be able to keep track of the progress. Deliverables should be defined in a SMART way (Specific, Measurable, Achievable, Realistic, Time-Bound).
- They have a well defined roadmap to develop the Numerical Simulation Reactor and include multi-scale and multi-physics phenomena. Most of the validation of their codes has been done on LHD, which is understandable. Some examples of validation on DIII-D and JT60U were presented and plans for validation on JET and EAST were also given.

In support of supporting the NSRP, they have implemented a management structure to incorporate both international and domestic collaborators and promote inter-project collaboration. This appears to be sufficient to manage this activity.
- As far as fusion applications are concerned, the NSRP has set up a very good plan. Nearly all the research topics of relevance to toroidal fusion plasmas have been covered. The integration of “first-principles” codes and “reduced” models (e.g., TASK-3D), valuable for validation studies, has been thought through well. The collaboration with other institutions appears to be quite fruitful.

以上、評価項目「段階的な進捗度管理や研究連携・統合化に向けたマネジメント等を

含め、研究推進体制は、プロジェクトを遂行する上で、有効に機能しているか」に対して、極めて高く評価するが2名、高く評価するが11名、評価するが3名であった。

(3) より高性能なスーパーコンピュータの導入を含め、プラズマシミュレータ及び関連研究環境は、研究計画に沿って適切に整備され、有効に活用されているか。

Is the environment of the “Plasma Simulator” system and its related research appropriately developed and effectively utilized accordingly to the research plan?

Is the installation of a higher performance supercomputer properly planned?

- ・ プラズマシミュレータ及び関連研究環境は適切に整備されている。並列計算機の利用率が安定して高く、有効に活用されていると判断される。(8名)
- ・ 研究計画に沿ってスーパーコンピュータが順次更新され、2020年6月には現状の4倍以上の性能を有するスーパーコンピュータの導入を進められており、高く評価できる。(3名)
- ・ 装置の性能を発揮し有効に活用するためのユーザー講習会等の支援活動も実施しており、研究環境整備に寄与している。(2名)
- ・ VR可視化研究がCAD空間内でシミュレーション結果を可視化し、物理理解の促進や炉設計に活用する手法の今後の展開を期待したい。
- ・ 2020年には、10ペタフロップス以上のプラズマシミュレータの導入が着実に進められており、非常に高く評価することができる。また、70件程度の共同研究、200人程度の利用者があり、核融合研の研究者よりも多くの共同利用研究者がリソースを活用している点や、9割近い稼働率なども非常に高く評価することができる。
- ・ 核融合プラズマ特有の取組みがもう少しあっても良いように思う。
- ・ プラズマ・核融合コミュニティの重要な計算資源としての役割を果たしている。
- ・ 世界レベルの計算機資源が国内研究者コミュニティに開放されており、毎年50以上のプラズマシミュレータ共同研究が実施されて、その件数も増加傾向にある。また、若手研究者の活用を促すためのユーザー支援もなされており、更に一層の有効活用が期待される。
- ・ 他の研究機関との性能比較、研究戦略(特長は何か)、また、新しい施設の導入によって到達可能となる目標を明確化する必要がある。一般にプロジェクト等の評価においては、プロジェクト実施の前後について、その効果を数値的に比較する評価指標を自ら設定し、成果報告に盛り込むことが求められている。そのような準備(理論武装)が求められる。
- ・ 新プラズマシミュレータについては、市場調査の結果、「平成31年度中に... 現行機の4倍以上」という中期計画より遅れての更新となりながら、理論性能比で4.008倍に留まっている点には留意すべきであろう。

- バーチャルリアリティーシステム（計算機とプロジェクタ）についても更新が行われたが、少なくない予算措置に鑑みて、数値実験炉研究プロジェクトや共同研究におけるより有効な活用法を見出すか、今後の位置付けを含めて検討が必要な段階ではないか。
- 計算機の高性能化の状況に合わせて、プラズマシミュレータの高性能化を1年遅らせてより性能の高い計算機導入に、戦略的に繋げた点は評価できる。
- 次期スパコンはベクトル型計算機であり、若手研究者には未経験のアーキテクチャーであることから、今後、コードのチューニングに多くの時間を割くことになるのではないかと懸念される。ベンダーによる講習会やユーザープログラム支援はもとより、核融合研として運用開始前からチューニング情報等の情報発信を行っていくことが重要ではないか。
- 核融合研は、その時代の最先端のスーパーコンピュータを継続的に導入するとともに、共同研究を通して幅広いプラズマ・核融合コミュニティを長期に渡って支えてきた実績がある。これらの長年の努力がシミュレーション分野における日本の高い競争力を維持してきた大きな要因となっている。これは、数値モデルや数値コードの学術研究とともに、高度なデータ処理技術や画像処理なども含むシミュレーションを支える計算機科学にも注力してきた賜物であり、高く評価できる。
- 大規模シミュレータ実現のための並列化を中心としたサポート体制を充実させ、ユーザーのレベル向上と利便性向上に対する努力を継続的に行っている。これらの運営方針は、ペタフロップス級のシミュレーション研究を推進する上で必要不可欠であり、評価できる。
- The HPC as well as the full program of analytical and numerical simulation codes that is running on the HPC is impressive. The work is in general of outstanding quality and the HPC resources are used adequately. The planned extension of the HPC to about 10 PFlops is a very wise decision. I have the impression (also mentioned in the previous points) that the HPC is hitherto used by anyone who comes with a good proposal. I would recommend some top-down steering in case you really want to construct a numerical reactor. This involves a thorough gap analysis, setting priorities and using these priorities in the allocation of node-hours on the HPC.
- The upgrade of the “Plasma Simulator” is very well justified. The current system is operating at close to full capacity. After five years of operation, the upgrade is necessary due to inevitable obsolescence of computer hardware and increased need for computer cycles. My only concern is whether a larger increase in computer performance is warranted at this time especially in light of the requirement to validate the codes, which can consume a large amount of computer time.

- The computer hardware environment facilitated by the “Plasma Simulator” system is excellent, one of the best in the world. The installation plan of a high-performance computer, with experts from the vendor(s) on site, is a great plan for collaboration between NIFS and the computer industry in Japan.

以上、評価項目「より高性能なスーパーコンピュータの導入を含め、プラズマシミュレータ及び関連研究環境は、研究計画に沿って適切に整備され、有効に活用されているか」に対して、極めて高く評価するが10名、高く評価するが5名、評価するが1名であった。

[2] 研究成果

[Research achievements]

プラズマシミュレータを活用した理論シミュレーション研究を進めることにより、第3期中期目標・中期計画で掲げた以下の項目において、国際的に高いレベルで成果を上げているか。

Does the NSRP produce high-level achievements in accordance with international standards for the following research areas described in the third midterm goal and plan by promoting theory and computer simulation research utilizing the Plasma Simulator?

(1) 数値実験炉の構築、実験結果との比較によるコードの検証と高度化

Construction of the Numerical Simulation Reactor, Validation and improvement of simulation codes through comparison to experimental results

- 多くの研究成果が創出されており、進展は顕著である。(11名)
- 実験結果との比較によるコードの検証も進展しており、非常に高く評価することができる。(5名)
- 3次元空間構造を持つヘリカルプラズマにおけるMHD平衡や安定性、MHDと高温粒子との統合コード、新古典と乱流輸送、周辺プラズマとプラズマ壁相互作用など各分野において、精度の高いシミュレーションコード開発が行われている。
- 熱的イオンに対する運動論コードをMHDコードへ統合し、LHDにおける抵抗性バルーニングモードに対する熱的イオンの安定化効果を明らかにしたことや、大域的ジャイロ運動論コードの開発など、注目に値する成果が得られている。
- 数値実験炉研究プロジェクトで開発・改良されたコード群が、LHDはもとより、JT-60U、DIII-D、W7-X、TJ-II、RFP(RELAX)、Heliotron-J、NAGDIS-D、GAMMA-10、EASTなどの実験結果の理解に貢献するとともに、コード検証と高度化が進められている。特に多

くのコードにおいて、複数イオン種効果を取り込んでいることは、LHD 計画プロジェクトの進展に即した適切な対応と評価できる。

- MHD コードと高エネルギー粒子輸送コードの統合や新古典拡散・乱流輸送コードの開発と TASK3D への組み込み、さらに、周辺プラズマコードと PWI コードの連携など数値実験炉構築に向けてコードの高度化が着実に進められている。
- 大きく三つカテゴリーに分けてそれらを統合する取組みはシステムティックであり、また、各部での成果も高く評価できる。一方で、三つの理解の熟度の違いがある状況において、これらを統合する試みは大変チャレンジングであるが、単に各論を結び付けるだけでなく、できる点できない点、熟度の違いや課題に関して明確にすることも必要と思われる。
- プラズマ・流体平衡・安定性タスクグループと高エネルギー粒子タスクグループの連携によって MEGA コードが拡張され、運動論的解析を取り入れることによって LHD 実験で観測されている内寄せ配位における MHD 安定性に関して、熱イオンの安定性効果を明らかにしたことは高く評価できる。
- タングステン表面にヘリウムプラズマが照射されることで誘起される FUZZ の形成過程について、BCA コード、KMC コード、MD コードを組み合わせた 3 連ハイブリッド法を開発して解析し、FUZZ 形成の初期過程から成長過程までを再現した点は高く評価できる。
- 大域的 full-f ジャイロ運動論シミュレーションコードを 3 次元のヘリオトロン/ステラレータ平衡に拡張して高度化している取組みは高く評価できる。
- プラズマフロー効果を考慮することにより、交換型不安定性の安定化、MHD と EP シミュレーションの統合、新古典輸送と乱流輸送シミュレーション、周辺プラズマ、統合コード開発等において大きな成果が上がっている。特に、GKV シミュレーションによる LHD 実験での同位体効果の理解は評価に値する。
- 開発されたコードから得られた結果を基に新たな実験提案を行うなど、新たな研究テーマを展開することが望まれる。
- コード同士での統合化も進み、より実験に近い計算が可能となっている。これらのコード群が将来の統合コードの一部として統合化が進捗しているとすると、その進展は高く評価できる。
- 核融合研究の現状を正しく認識するならば、シミュレーションに求められる役割は、実験研究との「協力」によって物理の解明に貢献することであり、そのための方法論としてモデリングやアルゴリズムの面でのイノベーションによって前線を切り開くことである。「実験結果との比較によるコードの検証」という目標設定は研究戦略を正しく認識したものと思えない。モデリングやアルゴリズムの高度化（願わくはイノベーション）が、どれだけ物理現象の解明に貢献したのか、その延長として、どれだけ核融合炉の「成立条件の予測」に貢献したのか、という説明が求められる。例えば、同位体効果について実験結果との比較に取り組むべきである。

- 数値実験炉研究プロジェクトでは、MEGA コードを用いた高エネルギー粒子駆動モードの解析、GKV コードを用いた乱流輸送解析、FORTEC-3D コードによる新古典輸送解析などで国際的に高いレベルの研究成果を上げるとともに、LHD 実験にとどまらず、JT-60U 実験とも比較研究を行い、コードの検証と高度化において優れた研究成果を上げている。特に最近の例では、MEGA コードにおいて背景イオンも運動論的に扱うことが可能となっており、今後、更に高精度化を含めた検証が行われれば、第一原理に基づいたシミュレーションコードの統合化に向けた基盤となることが期待され、その成果は極めて高く評価される。
- 核融合研の強みは、大型実験装置を有し、国際的な実験データセンターCOE であるとともに、本数値実験炉研究プロジェクトを走らせている点であり、個別コードに対して対応する実験データとの比較に基づく優れた成果が定常的に生み出されている。今後は統合化により得られた成果であることが分かり易くなるテーマについて、更に議論を進め、階層間接続などの本質的な物理学の解明に向け、研究を継続いただきたい。
- MEGA コードは実験との比較による評価やモデルの高度化が進んでおり、世界的に評価できる研究成果も創出しており、評価できる。世界的競争力を維持するためにも重点的に人を充てるべきである。GKV コードは実験との比較による評価は進んでおり、世界的競争力を有するコードである。モデルの高度化に関して言えば、コード開発がやや遅れているように見受けられる。重点的に人を充てて、コード開発を推進すべきである。BCA-MD-KMC コードは日本独自のユニークなコードであり、世界的競争力を有するコードである。実験との比較による評価も着実に進んでおり、重点的に人を充ててモデルの高度化を推進すべきである。
- 多くのコードが開発されているが、研究者の数も限られていることから、世界的に競争力のあるコード、又はその潜在能力を有するコードに重点的に人材を投資すべきであろう。
- 第2期中期目標・中期計画期間において開発してきた平衡・MHD、新古典・乱流輸送、高エネルギー粒子 MHD、ダイバータ・周辺プラズマ/プラズマ・壁相互作用などの時空間スケールを限定して開発してきたコード群に対して、本第3期中期目標・中期計画期間では、それらのモデルの高度化・精緻化を図りつつ対象とする時空間スケールを拡張する一方、複数のコードを統合化することにより、より大域的かつ多階層の複雑現象を扱うことができるコードに発展させ、LHD 実験における鍵となる現象の解明に貢献している点が高く評価できる。
- The work is of outstanding and of high international quality as is also demonstrated by the high number of publications in journals with a high impact factor, awards, number of downloads of papers, etc. I was really impressed by the many beautiful results.
- The presentations made clear the on-going work to improve the simulation codes

for example by extension of the EP - MHD hybrid code MEGA towards the integration of MHD, energetic particle (EP) simulations and extension of the global full - f gyro - kinetic simulation code GT5D for investigating turbulent and neoclassical transport in helical plasmas. Significant scientific work such as the simulation of the nonlinear evolution of resistive ballooning modes in high beta LHD plasmas has been investigated by the MIPS code and the effect of the thermal ions on the resistive ballooning modes in the LHD plasmas has been investigated by MEGA code based on the kinetic MHD model. The sudden increase in Alfvén-eigenmode-induced fast-ion transport with increasing beam power observed in DIII-D experiments was reproduced by comprehensive kinetic-MHD hybrid simulations. In general, simulations of energetic particle instabilities are a notable strength of this group and highly regarded internationally. The comparison of experimental results with turbulent transport is extremely important since both neoclassical transport as well as turbulent transport can be important. This group is leading the world in the validation of turbulent transport models. A highlight in the area of plasma material interactions was the simulation of tungsten fuzzy nanostructure. This is very interesting work and I encourage that a detailed comparison with experiment be performed due to its ramifications for future use on tungsten on ITER and other machines. TASK3D-a is the primary code for analyzing LHD experiments and has been used in the recent deuterium campaign. This code along with FORTEC-3D is also used for collaborations on the Fusion Engineering Project.

- The construction of the Numerical Simulation Reactor is very well thought through, and is a great asset to the Japanese fusion program. Validation exercises have been carried out and are planned for both tokamaks and stellarators. As mentioned above, there exists a strong bridge between “first-principles” codes and a reduced-model code such as TASK3D. This type of bridge is among the best in the fusion programs in the world. One of the distinguishing features of the NIFS program is that a strong effort appears to be in place to maintain TASK3D as a highly performant code on modern computing platforms.

以上、評価項目「数値実験炉の構築、実験結果との比較によるコードの検証と高度化」に対して、極めて高く評価するが10名、高く評価するが5名、評価するが1名であった。

(2) 核融合科学及び関連理工学の学術的体系化

Academic systematization of fusion science and related science and engineering

- 第3期中期目標・中期計画に掲げた数値実験炉の構築と核融合科学・関連理工学の学術的体系化に寄与している。(7名)
- 成果について、書籍化や学会誌へのレビュー論文掲載などを行い、学術の発展に寄与している。(7名)
- 特に磁気リコネクション、磁気音波、不純物イオン輸送、ICF 高速点火など諸現象の理解に粒子シミュレーションを適用し成果を上げている。その他、2流体不安定などの不安定性や MHD 乱流の理解、また、これらを支援するバーチャルリアリティ技術の進展に寄与する成果が得られている。
- 運動論的電子応答簡易モデルを付加した TASK3D、巨視的輸送効果を取り入れた TRESS-GKV、複数イオン化したジャイロキネティック運動シミュレーション、同位体効果が解析できる GKV、多種イオン化にトルク入力を加えた DKES/PENTA、多種イオン化した FORTEC-3D、熱イオン運動論モデルを組み込んだ MEGA、EMC3-EIRENE による実験の再現、ペレットモデルを装荷した MIPS、中性粒子輸送コードと EMC3-EIRENE の結合など、核融合科学などの学術的体系化に向けたコード群の改良・統合化が着実に進められている。
- 3次元粒子コードを用いた、磁気リコネクション時のイオン加熱効果やフィラメント状プラズマ輸送が不純物挙動に及ぼす解析、流体コードを用いた様々な不安定性の素過程の解析が着実に進められていることは高く評価できる。
- 核融合科学の学術的体系化は他のグループの成果を含めて行われるべき課題であり、学術的体系化という観点で、上記の学術成果との関連が非常に分かり難い。
- 学術的な取組みがなされ、成果が出ている一方で、全体の学術的な体系化や全体での戦略性がもう少し見えるようにすることも必要かと思われる。
- 学術的体系化への取組みについて、「プラズマシミュレーション」の発刊、多くの review paper の執筆は評価できるが、体系化という観点では弱く、今後、更なる検討が必要であると思われる。
- 磁気リコネクションの PIC シミュレーション、磁気音波、不純物イオン輸送、ICF プラズマに関するシミュレーション等、個々の研究テーマの成果は上がっている。一方、全体的な視野から核融合科学及び関連理工学を見た時の各研究テーマの位置付けをどう考えているのかがやや見えづらい。また、runaway electron に関する研究等といったトカマクにおいて重要と思われる研究の遂行も今後検討することで、トーラスプラズマに共通する学術的研究の体系化を進めて欲しい。
- 学術的体系化については何をもって体系化したのかについて定義が曖昧で、評価が難しいが、多階層シミュレーションは多くの学問分野共通の課題であり、統合化そのもの

のが学術的価値の高い研究成果であると考え、プロジェクトのゴールが学術的体系化であるとも言える。現状では進捗はしているが、多階層シミュレーションを完成したとは言える段階ではない。

- 教科書やレビュー論文を出版するなど啓蒙的な活動は高く評価できる。他方、研究活動に関しては、学際的な研究フロンティアとの乖離が懸念される。階層性に関する理論研究との連携が弱い。工学分野ではデータ駆動科学の大きな潮流がある。それとの連携も十分ではない。孤立化（コミュニティの縮み志向）を避け、真に革新的で活発な領域との連携構築に注力すべきである。
- 最先端の核融合プラズマのシミュレーション研究を体系的に発展させるために、その礎となる基礎理論と基盤技術の充実は欠かせない要素である。レビュー論文・教科書の出版、変分原理を用いた基礎方程式の定式化、拡張 MHD 効果を含めた平衡解析、拡張 MHD に向けた渦粘性 (LES) モデルの確立などは耳目を集めることは少ないが、評価されてよい。他方で、数値シミュレーション基盤技術（計算スキーム、可視化技術など）の開発とその応用や、他のプラズマ関連分野との連携については、国際的により高いレベルでの研究展開に期待したい。
- 開発されたコードの中に、似た機能を持つコードや既にメンテナンスされていないものも見受けられ、体系化という視点から、開発コードの整理や重点化も必要と思われる。
- 数値実験炉研究プロジェクトを、核融合プラズマの包括的なシミュレーション研究を進めるという視点から見る時、コアの外側（規格化小半径 0.8 より外側）から最外殻磁気面近傍領域での磁気流体シミュレーションや乱流輸送シミュレーションに関する研究開発が立ち遅れている印象を受ける。この領域における物理は、トカマクの H モードに代表されるように、トラスプラズマ全体の閉じ込めにも影響すると考えられ、ITER などのトカマク研究では最先端のシミュレーション・実験研究が展開されている分野でもあることから、より重点的な取組みが望まれる。
- ヘリカル系とトカマク系の差異や共通部分に着目して解析するなど、実際的な応用研究が活発になされており、工学的応用研究について、今後、更なる成果が期待される。また、レーザー生成プラズマなど、様々なプラズマへの応用を視野に入れた研究開発がなされており、「プラズマ工学共通部分」の数値計算研究の体系化が進みつつある印象を受ける。
- 成果発表については、外部からの期待が大きいのでインパクトとともに有効利用を考慮すべきであろうが、一般からの理解を得るにはジャーナル論文での発表のみならず、Web を利用した子供にも理解可能な発信を期待したい。
- 様々な研究課題に取り組んでいる点は評価できるが、学術的体系化へ向かっているようには見えない印象を受ける。核となるのは、これまで核融合研で開発されてきた PIC コードであり、これを発展させ、新しい物理課題に取り組むことが重要と考えられる。

天体、核融合プラズマに共通の研究課題（例えば、リコネクションや関連したバース現象や崩壊現象等）に人材を投入し、プラズマ科学として総合理解を推進するなど。計算科学の観点からは、マルチスケール、マルチフィジックスの問題を解くための数値スキームの研究開発等、重要課題が存在する。プロジェクトにおいてもそれらの課題の重要性は認識されているものの、プロジェクトに貢献可能な成果が限定的である。

- VR は原型炉の遠隔保守や廃炉の技術開発に応用可能なので、そのような分野を更に推進すべきであろう。
- LHD の重水素実験の結果を説明する帯状流効果や衝突効果に支配された乱流輸送特性やそれらに起因した同位体効果の説明に、本数値実験炉研究プロジェクトが果たした役割は高く評価できる。
- 実績を有する 1 流体 MHD モデルや粒子モデルによる磁気リコネクションや自己組織化などから、2 流体モデルに取り入れたシミュレーションや電磁効果を取り入れた運動論シミュレーションへと進展し、研究が深化している。また、コードの統合化も進展している。これらは ITER やトカマク型原型炉を含む普遍性を持つ基礎研究としても位置付けられ、核融合・プラズマ研究の学術的基礎を与えるものである。
- I maybe don't fully understand what is asked here, but the NSRP Program involves a very high number of academic collaborators from many universities throughout Japan, involving also many PhD students and post-docs. I have the impression that the program is well embedded in the Japanese academic environment.
- Examples cited are the contributions to a textbook on fusion plasma physics that was published in Dec. 2018, publication of a project review including seven articles in Japanese, three articles in English, two of which were published in the Rev. Mod. Plasma Phys. and another series of five review articles in J. Plasma Fusion Res. (in Japanese). The publication of some of the results in Japanese journals undoubtedly is helpful for university graduate students. It has the disadvantage of being published in journals with a smaller impact rating and thus, this work is not as widely cited. Increased emphasis on publication in journals with a higher impact factor would increase the international impact of the NSRP.

The NSRP taskforce structure and the topics being addressed address the breadth of the field of plasma physics and contribute to the development of the field and support fusion science and engineering.

- The academic basis of the NSRP is sound in both fusion science and related science and engineering disciplines (such as applied mathematics, computer science, nuclear engineering, and plasma science). The program appears to have been a natural attractor for students and early-career researchers, which is a very good sign for the future of this research program.

The NSRP research personnel are highly accomplished and publish well, but they should be encouraged to submit more of their work to very high-profile journals such as the Physical Review Letters, Nature/Nature Communications, Science or Proceedings of the National Academy of Sciences/Royal Society to increase world impact even more.

以上、評価項目「核融合科学及び関連理工学の学術的体系化」に対して、高く評価するが14名、評価するが1名、妥当（適切）であるが1名であった。

(3) 数値実験炉研究プロジェクトの計画に沿って、着実に研究成果を上げているか。

Are research achievements steadily made according to the plan of the NSRP?

- ・ プラズマシミュレータを有効活用し、数値実験炉研究プロジェクトを推進するために必要な数多くのシミュレーションコードの整備と拡張を進めるとともに、理論シミュレーション研究において数多くの成果を上げている。(11名)
- ・ 核融合プラズマの研究領域だけでなく、関連する基礎物理や可視化等のシミュレーション科学基盤研究の分野での成果を多く上げている。
- ・ GKV での同位体効果の検証、イオン運動論モデルを組み込んだ MEGA による実験結果の再現や α 加熱によるイオン加熱予測、EMC3-EIRENE の実験結果再現など、改良・統合化されたコード群によるコードの検証、理論予測や実験結果との比較・再現が多くなされ、成果が着実に上げられている。
- ・ コード開発とそれを用いた成果という点では、高レベルの研究成果が上げられていると評価することができる。他方、統合化という観点では、一部のコード間の連携は見られるが、数値実験炉研究プロジェクトの「計画」に沿って得られた成果は、不十分であると思われる。
- ・ 全体では、成果が上がっているように見える反面、今後の課題提案が見えず、プロジェクトの更なる発展性や計画の挑戦性が見えない。
- ・ タスクグループ間の連携、実験グループとの連携、他大学・他機関との連携を通して着実に成果を上げており高く評価できる。
- ・ コアプラズマの乱流輸送のモデル化と統合輸送コードへの展開、MHD シミュレーションの改善において、実験結果との比較からシミュレーションコードの妥当性を確認しており、数値実験炉研究プロジェクトの計画に沿って着実に成果を上げている。
- ・ プラズマシミュレータが共同利用率 100% で稼働していることは評価に値する。
- ・ MEGA code 等は世界的に利用されているが、今後、開発したコードがより多くのユーザーによって利用してもらうような環境作りをすることによって、数値実験炉研究プロ

プロジェクトが世界的に認知される取組みをすることが望まれる。

- 多くの論文発表や招待講演を行っており、成果は高く評価されている。プロジェクトの進捗への貢献については、やはりマイルストーン設定と達成度による評価が必要であろう。
- 多くの研究成果が論文化されている点は評価できる。
- 大規模プロジェクトの「常」であるが、計画は expectable な（やればできる）目標を設定して予算化され実施される。そういう意味では「着実に」成果を上げている。しかし、研究がその範囲にとどまるならば、真に新しい発見や発明が生まれたとは言えない。個々の研究者は、プロジェクトに参加する中で、本当に難しい問題に取り組み、失敗を発見とし、予定調和ではない成果を目指すべきである。組織としては、そのような活動を支援しなくてはならない。
- プラズマ物理にとって核心的な課題は「多階層性」である。いわゆる「ハイブリッド」は multi-physics を扱うには効果的なアプローチであろうが、multi-scale の問題はハイブリッドとは根本的になじまない（そうならないことが階層連結の本質である）。この問題に真剣に取り組む研究が必要である。
- MEGA コードを用いた高エネルギー粒子駆動モードに関するシミュレーションでは、LHD はもとよりトカマク実験についても多くの成果を上げている。また、GKV を用いた乱流輸送シミュレーションでは、LHD 重水素実験に先立って乱流輸送における同位体効果の理解につながる研究成果が得られており、注目に値する。それと並行して、核融合研の次期計画を主導する貢献がなされており、数値実験炉研究プロジェクトの重要性を裏付ける成果を着実に上げている。その他、EMC3-EIRENE を用いた周辺プラズマ分布の解析や、タングステン表面でのファズ構造形成の研究などにおいて着実な成果が上げられている。全体として、学術論文出版数や国際原子力機関（IAEA）投稿数などは十分な件数が挙げられているが、（結論には何らかの統計指標が必要であるが）Top ジャーナルへの掲載比率は低い印象がある。
- 成果発表を American Association for the Advancement of Science を通じて発信するなど、成果の発信に柔軟で積極的な姿勢は評価される。
- MEGA、GKV コードによる実験との比較は着実に進んでおり評価できる。統合輸送シミュレーションも実験に寄与しており、多くのモジュールの整備が着実に進展している。
- インパクトの高い雑誌 Physical Review Letters、Nature Communications、Scientific Reports 等への掲載は、高エネルギー粒子グループ、新古典・乱流輸送シミュレーショングループ等、一部のグループに限定されているが、それ以外の研究分野においても実験データ解析等を通じて新しい物理発見の可能性があるのでないか。そのような可能性や萌芽性のある研究課題を常に探索し、そこに人材を投資する必要があるのではないか。
- 平衡コードと MHD コードや高エネルギー粒子コードと MHD コード、新古典解析コード

と乱流輸送コード、2流体コードによる多階層化や運動論的な効果の導入、原子・分子過程を考慮したダイバータコードなど、要素コードの統合化の研究が大幅に進展し、コードの体系化が着実に進展している。本数値実験炉研究プロジェクトで開発した複数のコード群を使用して、次期計画における装置設計研究を積極的に推進しており、高く評価できる。

- Yes. I already have given the arguments above. The output of the program is impressive. However, as said already, I have the impression that this is largely self-organized as all scientists involved in the program have the urge to perform high-level scientific research and to publish the results in papers and present them at conferences. I failed to see a master plan for NSRP with clear deliverables and milestones that need to be achieved at a certain time. So in this sense it is difficult/impossible to judge whether the achievements are according to the plan.
- NSRP has produced high - level achievements in accordance with their third midterm plan. These include:
 - Developing and integrating simulation codes
 - Model core turbulent transport and apply it into integrated transport code
 - Incorporate multiple ion species effects into transport codes
 - Improve molecular dynamic simulation for plasma facing material
 - Validate simulation codes by comparison with experimental results
 - Conduct simulation researches on related basic physics
 - Promote domestic and international collaborations including ITER

For more details on these accomplishments see item (1) in this section. While a detailed comparison of progress with previous plans is not possible, the impact of the work is significant. This is illustrated by the large number of talk and presentations at major conferences.
- Research achievements are steady and appear to be systematically built up according to plan. However, the rate of progress can perhaps be speeded up perhaps by the addition of personnel.

以上、評価項目「数値実験炉研究プロジェクトの計画に沿って、着実に研究成果を上げているか」に対して、極めて高く評価するが6名、高く評価するが9名、評価するが1名であった。

[3] 共同利用・共同研究の推進

[Promotion of cooperation and collaboration]

(1) 理論シミュレーション研究を基盤とした大学等との共同研究が適切に進められ、プロジェクト研究の推進に貢献するものとなっているか。

Is collaboration research with universities based on theory and simulation research appropriately promoted? Does it contribute to the progress of the NSRP?

- 全国の大学との共同研究を進め、大学から数多くの共同研究者と共同研究を受け入れるとともに、プラズマシミュレータシンポジウムを開催して内外の研究者との活発な議論・情報交換を行い、理論・シミュレーション分野の活性化に貢献するなど、理論シミュレーション研究を基盤とした大学との共同研究が適切に進められていると評価できる。(13名)
- プロジェクト研究を八つのタスクグループで構成し、各タスクグループに大学の共同研究者が参加して、中性粒子コード、周辺プラズマコード、PWI コードの統合化や統合輸送シミュレーションコード開発に貢献するなど、適切な共同研究がプロジェクト研究の推進に寄与していると評価できる。(7名)
- 共同研究拠点としての核融合研の役割は重要であり、プロジェクトの推進に加えて、他機関、多分野に対して積極的かつ主導的な役割を期待する。(3名)
- 毎年、計算機関係の共同研究として、所内外から70件程度の共同研究を受け入れ、200名近い所内外の研究者及び学生との共同研究を推進していることは評価できる。プラズマシミュレータ関係の研究会の開催を通じた情報交流も行われ、核融合関係研究の進展に寄与するところは大きい。
- 各年度を通じて、所内外からの数多くの共同研究を安定的に受け入れ、着実に継続してレベルが高い共同研究が進められている。
- プラズマシミュレータシンポジウムを通して内外の研究者と活発な議論を行い、コミュニティの活性化のために貢献しており、高く評価できる。
- 180名の共同研究者と70件の課題を受け入れており、大学等との共同研究が適切に進められている。研究者の人数から考えると、課題数はこの程度が適切と考えられる。プラズマシミュレータシンポジウムの開催、JT-60SA での RMP 印加時でのダイバータプラズマ構造など、共同研究が進んでいる。
- ジャイロ運動論シミュレーションをはじめ、核融合プラズマ研究分野のシミュレーション研究は国際的なレベルを持っている。核融合研を中核とした研究協力が、この分野の活性化に大きな貢献をしている。
- 大学等との共同研究として、プラズマシミュレータ共同研究は順調に進んでおり、また、大学発の共同研究の成果も上がり、プロジェクト研究の推進に貢献するものとな

っている。

- ・ 潤沢な計算資源もあり、多くの参加者と研究グループが参加する共同研究センターとしての機能を果たしている。特に「プラズマシミュレータシンポジウム」はトピック間の相互交流の場として機能し、プラズマ・核融合分野の新たな学術領域創成が期待される。大学との共同研究にタスクグループが積極的に関わり、大学との共同研究推進に貢献している。
- ・ 全国の大学と共同研究を行っており、評価できる。プラズマシミュレータ共同研究の採択件数もほぼ130～150件で推移しており、有効利用されている。大学との共同研究は、学生の修論等の研究課題ともリンクするため、インパクトのある論文出版には結びつきにくい側面もあるが、プロジェクトの将来を担う人材育成の観点からは評価に値する。
- ・ 核融合研の理論・シミュレーション関連グループは、プラズマ・核融合研究を中心に、長期に渡る共同利用・共同研究の実績と成果を持っている。大学との研究協力も精力的に進めており、COEとしての役割を十分に果たしている。
- ・ 数値実験炉研究プロジェクトに密接するダイバータモデリング、ジャイロ運動論的乱流輸送などの課題について、共同研究を通じた成果がプロジェクト推進に大きく貢献している。
- ・ レベルが高い共同研究が進められている。その中では、中性粒子コード、周辺プラズマコード、PWIコードの統合化などの研究が進められており、プロジェクト研究の推進にも大きな貢献を果たしており、極めて高く評価できる。
- ・ プロジェクトに設定された八つの研究グループには共同研究者も参画しており、プロジェクトの進展に貢献している。一方、参画共同研究者の実数については資料がなく、プロジェクトの推進にどのくらい貢献しているのかについての定量的な判断は難しい。
- ・ 大学等との共同研究として、プラズマシミュレータ共同研究は順調に進んでおり、また、大学発の共同研究成果も上がり、プロジェクト研究の推進に貢献するものとなっている。
- ・ 統合輸送シミュレーションコード開発に関しては、京都大学と密接に連携しており、共同研究がプロジェクト推進に貢献する一例である。
- ・ 核融合研が主導するプロジェクトへ他機関・他分野の研究者を勧誘するように、一層努力して欲しい。
- ・ 昨今の大学等の状況を鑑みた時、我が国のプラズマ・核融合分野における共同利用・共同研究拠点としての核融合研の位置付けは、より一層重要性を増すことから、プロジェクト研究として中に閉じるのではなく、より外に開かれたCOEとしての役割に今後も期待したい。
- ・ NSRP is well promoted within Japanese academia and many collaborators are from the large group of Japanese universities. So in this sense NSRP fulfils a very

important binding and integrating role. Many of the projects with the universities are on topics that are only slightly related to the main aim of the Numerical Simulation Reactor (eg. basic plasma physics studies, ICF simulations, astrophysical simulations) and I wonder whether also here some guidance can be given to universities to focus their work on the main goal of the NSRP project.

- The NSRP involves about 180 collaborators each year, including about 50 from NIFS. This is very impressive and indicates a broad impact. The Plasma Simulator Symposium enables users to report recent results and exchange information. In addition, the NSRP organizes about 8 workshops every year, which appear to be very valuable. The NSRP task groups have many of the collaborators as members to enhance cooperative studies. A significant number of examples of collaborations especially with universities were given in the presentation.
- The outreach to the Universities seems to be a strong component of the research program, but is a little scatter-shot and needs to be coordinated better. There is good research being done, but the connections to the NSRP needs to be planned better. One possibility might be to plan a Workshop in which one invites the various participants from the Universities and seeks to define focused science topics that help realize better synergisms.

以上、評価項目「理論シミュレーション研究を基盤とした大学等との共同研究が適切に進められ、プロジェクト研究の推進に貢献するものとなっているか」に対して、極めて高く評価するが8名、高く評価するが8名であった。

- (2) 核融合プラズマシミュレーションの中核的研究拠点として、大学等の機能強化に貢献するとともに、分野間連携、異分野融合研究の推進に取り組んでいるか。

Does the NSRP contribute to enhancing functions of universities and institutes as the center of excellence for fusion plasma simulation? Does the NSRP commit to the promotion of interdisciplinary collaboration and research?

- 多くの大学・研究機関と幅広い研究分野において共同研究を実施して成果を上げている。また、核融合研で開発されたシミュレーションコードを用いて大学で行われている実験研究を積極的に支援するとともに、毎年多くのワークショップを開催して大学の関係研究者間の情報交流の中心的役割を果たしており、核融合プラズマシミュレーションの中核的拠点として大学等の機能強化に貢献していると高く評価できる。(12名)

- ・ 分野間連携、異分野融合研究の推進に取り組んでいると評価できる。(7名)
- ・ プラズマにおける非線形現象や壁との相互作用、MHD、高ベータプラズマなど毎年数多くのワークショップを開催し、大学の関係研究者間の情報交流の中心としての役割を果たしている点は評価できる。LHD プラズマで得られたデータだけでなく、各大学が持つ研究実験装置における観測データをシミュレートする基盤を構築し、機能強化に寄与している点や、機構内の異分野領域とも連携した研究を進めている点は高く評価できる。
- ・ 各実験装置 (RFP、球状トカマク、NAGDIS-II、Heliotron-J)、ダイバータ・周辺プラズマ (タングステンファズ・バブル、タングステン輸送、周辺プラズマ)、モデル (LES 用 CGS、パッシブベクター直接数値モデル、ジャイロキネティック、超並列粒子、マルチスケール+マルチ物理)、可視化 (VR 可視化、その場可視化ライブラリ、GKV、磁力線) など、広範囲な分野で多くの大学と連携し、各大学の研究成果の増進に貢献している。また、トリチウム β 崩壊による DNA 応答など、社会的にも注目される課題に取り組んでいる。
- ・ 核融合研で開発されたシミュレーションコードを用いて、大学で行われている実験研究を支援する活動が積極的に行われており、大学の機能強化に著しく貢献している。
- ・ 幅広い分野で核融合プラズマシミュレーションの中核拠点として共同研究を実施するとともに、更なる推進を目的にワークショップを実施していることは高く評価できる。
- ・ 多くの大学 (研究機関) と様々な研究テーマで共同研究を実施して成果を上げており、高く評価できる。
- ・ Heliotron-Jにおける EMC3-EIRENE コードの適用によるダイバータプラズマモデリングなど、核融合プラズマシミュレーションの中核的研究拠点として、大学等の機能強化に貢献している。
- ・ 核融合プラズマシミュレーションの中核的研究拠点として、プラズマシミュレータの運用にあたっている。また、複数の教員が連携大学院などの形で大学での教育・研究にも貢献している点は高く評価される。
- ・ 共同研究を通じて大学とのネットワークを形成し、数値実験炉研究プロジェクトが実質的な「核融合プラズマシミュレーション研究の中核拠点」として機能しており、大学の機能強化に貢献している。プロジェクトに参加する大学は卓越したプロジェクトメンバー教員との共同研究の場を与えられ、研究成果を上げる上で貢献を受けている。
- ・ 大学の小型実験装置のシミュレーション解析にも貢献しており評価に値する。
- ・ 本プロジェクトで開発された乱流輸送コードや高エネルギー粒子・MHD コードが大学や関連研究所の研究・教育活動に使用されているなど、協力・共同研究が着実に進展している。
- ・ 機構内の異分野領域とも連携した研究を進めている点は高く評価できる。
- ・ 機構全体で進めている「自然科学における階層と全体」プロジェクトを推進し、分野

間連携の裾野の広いシミュレーション拠点として活動している。

- 機構内での天文分野などとの連携研究も着実に進められており、非常に高く評価することができる。
- DNA 損傷に関する分子動力学シミュレーションといった異分野融合研究も興味深い。
- 分野間連携、異分野融合研究の推進にも取り組んでおり、研究会などの開催が多く、そこからの成果も生まれている。
- 若手研究者が異分野融合研究に積極的に取り組んでおり評価できる。MD をトリチウムのベータ崩壊による DNA 損傷に応用した共同研究は、放射線生態学への貢献であり、評価できる。核融合炉の安全性とも密接に関連しており、今後とも推進すべき研究課題である。
- 連携活動を積極的に実施している研究者は必然的に多忙化する傾向があるが、人事・待遇面でこのような研究者に対する適切な評価がなされることを希望する。
- 研究者レベルでの国際的な共同研究があまり多くは見受けられない。日本の大学の機能強化に貢献する見地から、国際的な分野連携、異分野連携が今後一層期待されるものと思われる。
- 共同研究の相手とテーマの設定に関して、核融合研主導で大学を巻き込んだ共同研究（プロジェクト）を実施することを検討するとよいと思われる。
- 多くの優れた核融合関連コード群を有しているので、プロジェクトで得られた成果である開発されたコードの利用を積極的に進めるべきである。単なる計算機利用ではなく、大学の研究者や学生がコード群の使い方や計算結果の意味等について相談できるようにすることで、プロジェクトの波及効果が見込める。特に、プラズマ用に開発されたコードは商用にも少なく、計算機を専門とする研究者がいない研究室に現象の理解を得るための重要な知見を提供することとなり、大学の機能強化に大きく貢献できる。一方、大学には核融合以外の課題に取り組む研究者が数多く在籍しているため、議論を通じてプロジェクトの機能強化につながる可能性もある。
- 分野間連携は、太陽プラズマ、宇宙プラズマのような分野で行われているが、古典的で限定的である。かつて PIC が他分野へ波及したり、安定性解析（スペクトル解析）の技術的洗練が他分野を凌駕したりしたような、真に学術的価値のある連携が行われることに期待する。
- プラズマ関連分野の学際的なテーマとして進められている課題については、国際的な visibility の観点から今後の発展に期待したい。
- モデルの統合や階層性の向上に伴って現象が複雑化することから、数値実験炉の構築を縦糸、そこで得られた成果を普遍性のある学理を構築する基礎研究を横糸として、それらが連携して他分野に発信できる競争力を向上させる努力が望まれる。
- The NSRP fulfils a very important role here and can indeed be regarded as a Centre of Excellence for numerical simulations; not only in fusion science but also in

related areas as basic plasma physics, astrophysics, etc. I wonder whether it would make sense to devote the majority of HPC resources to the main NSRP program, and a certain percentage to blue skies research. In the NSRP program priorities are given to those topics that are most important to achieve the goals, while in the remaining program resources are given to the most interesting scientific proposals.

- The NSRP has strong collaborations with universities and institutes as the center of excellence for fusion plasma simulation. These collaborations cover a broad range of topics ranging from gyrokinetic simulations to visualization and some outside of fusion science, such as using molecular dynamic simulations to study DNA damage by tritium beta-decay, PIC simulations of relativistic jets launched by black holes and plasma-wall simulations applied to semi-conductor plasma processing. The collaboration with university comes across as opportunistic in the sense that the collaborations of mutual interest are pursued rather than a more structured approach as occurs in the fusion science area. The NSRP also organizes about eight workshops per year in support of these collaborations.
- Yes, in some respects, especially in areas that are directly fusion-related. However, it was unclear to this reviewer whether the Universities have enough support to be truly centers of excellence, even though there are scientists at these places who are highly talented.

The NSRP does seem to commit to the promotion of interdisciplinary collaboration and research, but better coordination might lead to even greater impact.

以上、評価項目「核融合プラズマシミュレーションの中核的研究拠点として、大学等の機能強化に貢献するとともに、分野間連携、異分野融合研究の推進に取り組んでいるか」に対して、極めて高く評価するが6名、高く評価するが9名、妥当であるが1名であった。

(3) 国際的な連携活動を通じて、ITER計画・BA活動等を含めた国際協力へ貢献しているか。

Does the NSRP contribute to international cooperation including ITER, BA activities, and others through international collaboration activities?

- 国際的な連携活動を通じて、ITER計画・BA活動等を含めた国際協力に大いに貢献しており、評価できる。(12名)
- 青森県の核融合研六カ所研究センターでは、IFERC(International Fusion Energy Research Centre)が遂行しているITERやBA関係の支援活動を担っており、シミュレ

ーショングループからも IFERC CSC 及び REC への参画を含め、国際的な研究協力を進めている。また、国際トカマク物理活動(International Tokamak Physics Activity (ITPA))にも積極的に参画し、ITER だけでなく、JT-60SA や欧米、アジア (中国、韓国) の核融合研究やプラズマ研究へ数多く貢献している点は評価できる。

- JIFT 日米協力、不純物新古典シミュレーションや輸送現象などの日欧協力、日中韓フオーサイト事業 (A3) や中国科学院等離子体物理研究所 (ASIPP) 等との日中韓協力を着実に進めている。ITER 計画・BA 活動においては、量子科学技術研究開発機構 (QST) 六ヶ所研究所で進められている IFERC 事業全体に中心的な役割を果たすとともに、計算機シミュレーションセンター及び ITER 遠隔実験センターの運営及び技術課題の解決に大きく貢献し、円滑な運営を支えている。さらに、ITPA や統合モデリング専門家会合に主体的に取り組み、ITER 計画・BA 活動に貢献している。
- 六ヶ所研究センターのセンター長が IFERC 事業長を担当するなど、国際的な連携活動を通して、ITER 計画・BA 活動に関して積極的な貢献がなされており、非常に高く評価することができる。また、プリンストンプラズマ物理研究所やマックスプランクプラズマ物理研究所などとの国際協力をはじめ、Japan-US、Japan-EU、核融合理論分野における日米協力 (JIFT) 事業等の国際共同研究も積極的に実施されており、幅広く国際協力に貢献していることは高く評価できる。
- 六ヶ所研究センターでの活動、ITPA、IMEG への参加等を通して国際協力に貢献していると評価できる。JT-60SA への連携活動も行っており、評価できる。
- ITER 計画・BA 活動や Japan-US、A3 や post-CUP 等の国際共同研究を実施しており、大きな貢献をしている。一方、優れたコードを有しながら、国際標準のコードとなっているものがあまりないのは問題である。組織的な普及活動を通じて多くの優れたコードの活用の促進を積極的に進めるべきである。
- IFERC 事業を核融合研として支援している点は評価に値する。ITER 計画・BA 活動にも高エネルギー粒子グループ、新古典・乱流輸送シミュレーショングループ、プラズマ流体平衡・安定性グループ等、貢献が見られ評価できる。マックスプランクプラズマ物理研究所との協力等、日欧協力も着実に進めており評価できる。
- 本プロジェクトで開発された高エネルギー粒子・MHD コードは、世界の主要研究機関においても使用されるようになり、活発な国際連携活動を進めている。また、ITER 計画や BA 活動に対しても、普遍性・共通性の高い理論・シミュレーションモデルの構築などを通じた学術的貢献を果たしている。
- 活発な国際連携研究活動の見える化を進めることが望まれる。
- 中国との共同研究も進んでおり、今後、準軸対称ヘリカル実験装置 (CFQS) といった新装置における国際協力を理論解析の観点からも進めて欲しい。
- 国際連携の成果として核融合研に蓄積された知的資産を評価できるように明示してほしい。

- JIFT の拠点として、長年に渡る貢献を行っている点は高く評価される。ITER 計画・BA 活動においても、乱流輸送や高エネルギー粒子輸送、ダイバータプラズマモデリングなどで具体的な成果が得られている点は評価される。こうした活動は未だ一部に限られており、今後の ITER 計画・BA 活動についてどのような方針・計画で取り組むか、全体的な検討がなされるべき段階ではないだろうか。
- JIFT 協力に関しては、米国で開発したコードの導入等、プロジェクト推進に貢献している点は評価できるが、一方でテーマが固定化している傾向が見られる。新しい研究テーマや若手研究者の発掘等を検討すべき時期にきているのではないか。
- Yes, various of the activities within the NSRP program are focused on ITER, ITPA and BA activities.
- The following were noted:
 - Director of the NIFS Rokkasho Research Center is serving concurrently as IFERC Project Leader.
 - NSRP members are undertaking collaborative research projects for JT-60SA.
 - NSRP members are participating in the ITER/BA activities.
 - NSRP contributes to international collaborations with US, EU, China, and Korea.
 More specifically, the following are some highlights from this effort:
 - Five NSRP members are involved in ITPA topical groups.
 - Ion and electron turbulent transport was simulated using GKV of a JT60U equilibrium.
 - MEGA code was used to simulate multiple energetic particle driven MHD instabilities. This code was also applied to JT60-SA.
 - Used EMC3-EIRENE and MIPS to study the divertor footprint in JT-60SA with RMP field.
 - NSRP plays a major role in collaborations with the United States through Joint Institute for Fusion Theory (JIFT) activities: workshops and exchange of scientists.
 - Magnetic reconnection studies have been conducted as part of MRX at PPPL.
 - Collaboration on XGS for helical devices. This is a major extension of XGC.
 - NSRP promotes collaborations with European institutions on W7-X and TJ-II. Divertor modeling with Max-Planck and FZ Julich using EMC3-EIRENE is performed.
 - Collaborations with China and Korea are progressing under the A3 Foresight Program (EAST energetic particles and divertor modeling, RMP modeling with Y. Liang has been performed.
- There are undoubtedly activities that contribute to ITER and other international collaboration, but this is one area where greater commitment and financial

investment will yield greater dividends. The NSRP project seems to benefit by including codes from other institutions (such as the XGC code from PPPL), but some sophisticated codes (such as MEGA) could be shared with other institutions for even greater visibility and impact.

以上、評価項目「国際的な連携活動を通じて、ITER計画・BA活動等を含めた国際協力へ貢献しているか」に対して、極めて高く評価するが4名、高く評価するが10名、評価するが2名であった。

[4] 人材育成

[Human resources development]

将来にわたり高い水準でシミュレーション研究活動を維持するために必要な人材の育成に貢献しているか。

Does the NSRP contribute to the development of human resources required for maintaining high-level simulation research activities toward the future?

- ・ 総合研究大学院大学（以下、「総研大」とする。）、名古屋大学等の大学からの大学院生の受け入れやアジア冬の学校、スーパーサイエンスハイスクール（SSH）指定校との連携を通じて若手人材育成に貢献している。（13名）
- ・ キャリアパス形成を含めた人材育成に関する組織的な戦略の構築が望まれる。（2名）
- ・ 核融合研では総研大や名古屋大学等の大学院学生を受け入れ、博士教育活動に貢献している。ここ数年は徐々に受入数が増えているが、更に努力をお願いしたい。また、毎年開催する夏の体験入学やタイで実施するアジア冬の学校は、若い大学院生にとっても核融合研究に触れる良い機会ともなっており、継続的な開催を期待する。SSH 高校生の受け入れも継続的に行われている点も評価できる。
- ・ 過去5年の大学院生・博士研究員の在席者数が総計で70名、国際会議での発表件数が28件、学生・博士研究員の筆頭著者論文数が37編あり、若手人材育成に大きく貢献している。また、総研大の体験入学、冬の学校、SSH活動なども積極的に努めている。
- ・ 総研大を中心に、他大学の学生・ポスドクに対する人材育成への貢献（人数）も順調に伸びている。また、高校生などへのアウトリーチ活動も行われており、将来にわたりシミュレーション活動を維持するために必要な人材育成に貢献していることは、高く評価できる。
- ・ 総研大、特別共同利用研究員、COE研究員の教育及び夏の体験入学、アジア冬の学校の

活動を通して人材育成にあたっていることは評価できる。

- 国内では、総研大、名古屋大学、名古屋工業大学等の大学から大学院生を受け入れるとともに、共同研究を通じて大学院教育を推進していることが評価できる。国外では、プラズマ物理、核融合科学、シミュレーション、実験という課題について総研大アジア冬の学校を開催する等、学生教育を通してアジアの核融合プラズマ研究の発展に貢献している。高校との連携も積極的に行っている。
- 複数の教員が、連携大学院などの形で大学での教育・研究にも貢献している点は高く評価される。大学院生の育成については、国内の大学と同様に、博士課程進学者数の伸び悩みの問題を共有している。研究スタッフである複数の若手教員については、多数の学会賞も受賞しており、今後、更なる活躍が期待される。
- 貢献している。研究会・発表会を開催し、夏の体験入学、アジア冬の学校を開くなど、若手研究者や研究者予備軍の学生に発表と研鑽の機会を与え、さらに、実際のソフトウェア開発や計算機利用についての現場での支援を行うなど、プロジェクト構成メンバーの指導が認められる。
- ここ数年は総研大、名古屋大学等の大学院生が増加傾向にあり、SSH 指定校との協力も着実に進めており評価できる。
- 当該研究プロジェクトは、異なった階層のシミュレーションコードを系統的・計画的に開発してきた実績を有する。また、数値手法や可視化、データ処理など、計算科学の観点から研究を長期に渡って展開し、その過程で多くの国内外の若手研究者の育成に貢献してきた。特に、核融合研で開発したコードが国内外の大学・研究機関で使用されるなどの実績も積み上げてきており、本研究プロジェクトの人材育成は高く評価できる。
- 総研大における教育、SSH 指定校との連携、冬の学校の開催など、着実な取組みがなされていることは評価する。しかし、以上の取組みが、キャリアパス形成を含め人材育成にどのように寄与するのかが明確でなく、組織的かつ長期的な展望に立った戦略の構築が望まれる。特に、AI の進展により、計算機科学を学びたいという中・高校生は激増しており、ビッグデータや計算機駆動科学等の観点でこれらの学生へプラズマ・核融合分野の魅力をアピールする取組みが必要である。
- 総研大学生や SSH 等の学生の教育を通じて人材育成を行っている。ただ、数値実験炉研究プロジェクトの完成に要する期間とその成果であるコードの活用を考えると、組織的な人材育成が必要である。大学との共同研究を通じてコードを使った学生が、コードの開発者になる例は多いが、大学ではシミュレーション研究で職を得ることが難しくなっているため、キャリアパスを含めた人材育成プランの設定が期待される。
- AI 人材育成が大きく取り扱われている状況もあり、計算機シミュレーションやデータサイエンス関係の人材育成活動へ更に貢献することを期待したい。
- 国立研究所としてトップアスリートを育成するプログラムを積極的に行うなどの活動

が目に見える形で表れるとよいと思われる。

- 学術的なアクティビティーは長期的な衰退傾向にある。これは他分野への関心の減退が原因である。与えられた課題を解くだけでなく、自ら課題を発見する能力が必要であり、そのためには科学一般について広い関心を持つような研究環境が必要である。数値実験炉研究プロジェクトが他分野から関心を集め（プレゼンスを高め）、いろいろなサイエンスと交流するようなアクティビティーをホストする工夫が欲しい。
- 総研大アジア冬の学校をタイで開催しているのも新しい試みであり、今後、ASEAN 地域をターゲットに留学生を増やし、核融合研究の裾野を拡げていくことが重要である。
- 研究スタッフの平均年齢が上昇傾向にあるのではないかと懸念される。当該研究分野の今後の継続的な発展を図るには、中核的研究機関である核融合研が大学等との人事交流の駆動力となることが期待され、将来を見据えた人事計画の立案や人事交流を進める必要があるのではないか。
- Many PhD students and post-docs are involved in the simulation projects and since many projects are carried out in close cooperation with universities, the work is well embedded in the academia. It is therefore an ideal training ground for young scientists to get involved in the world of numerical simulations.
- The NSRP contributes to the development of human resources required for maintaining high - level simulation research activities toward the future:
 - (1) Education programs of Sokendai and of the other graduate schools at Nagoya, Nagoya Inst. Tech., etc.
 - (2) Cooperation programs with high schools in science education (Super Science High School program)
 - (3) Sokendai Summer School provides graduate students with opportunities to experience the most up - to - date research at NIFS
 - (4) Sokendai Asian Winter School on Simulation Science provides student from overseas with an opportunity to study leading edge fusion.
- The number of students and postdocs is 16. In light of the breadth and potential impact of this program, this could be increased.
- Yes. This seems to be done better in the NSRP than most world programs. Over the years, NIFS has produced some of the most talented computational physicists in the world.

以上、評価項目「将来にわたり高い水準でシミュレーション研究活動を維持するために必要な人材の育成に貢献しているか」に対して、極めて高く評価するが3名、高く評価するが10名、評価するが2名、妥当であるが1名であった。

[5] 将来計画

[Future plan]

研究の将来計画は、数値実験炉研究の目標を見据えた適切なものとなっているか。

また、核融合科学研究所の将来計画の策定に貢献するものとなっているか。

Is the future research plan suitable for progressing toward the goal of the NSRP?

Does it also contribute to establishing the future plan of the National Institute for Fusion Science?

- ・ これまで理論モデルや数値モデルの妥当性・適用性に関する研究を着実に進め、数値実験炉研究の目標を見据えて八つのグループごとのロードマップを策定し、研究を進展させていることは評価できる。(4名)
- ・ 数値実験炉実現のための開発課題や各タスクグループのロードマップと数値実験炉実現への統合化の取組みに関する明確化など、将来計画策定及び研究目標の設定に関して課題がある。(4名)
- ・ 核融合研の将来計画策定に向けて、数値実験炉研究プロジェクトが大きな役割を果たし、また、次期計画策定に不可欠な状況となっており、高く評価できる。(10名)
- ・ タスクグループの連携や有機的結合などの積極的な検討を進めていくことが望まれる。(4名)
- ・ 数値実験炉実現を目指し、八つのグループごとのロードマップを策定して実施している点は評価できる。
- ・ 提示されている各タスクグループのロードマップは明確であり、評価することができる。
- ・ これまで、非線形 MHD コードや大域的効果も含めた新古典輸送コードや乱流輸送コード、周辺・多様なコードの開発を中心に、LHD 実験との比較や要素的な検証を基本に、理論モデルや数値手法の妥当性や適用性に関する研究を着実に進めてきた。さらに、階層の異なるコードの結合・統合化を通して、システム全体を総合的に評価する研究を進展させ、数値実験炉としての目標を見据えた研究を着実に蓄積・進展させている。その試金石として、LHD の重水素実験における同位体効果の解明に本数値実験炉研究プロジェクトが積極的な貢献を果たすとともに、当該実験に対してシミュレーションが指標を示す役割を果たしてきたことは高く評価できる。
- ・ 各グループで開発したコード群の統合化を含め、数値実験炉実現にとって何をいつまでに開発しなければならないか、課題点は何かなどが明示されておらず、全体計画策定に課題が残る。
- ・ タスクグループのロードマップと数値実験炉実現への統合化の取組みが明示されておらず、不十分であると思われる。
- ・ 数値実験炉の最終目標を、核融合炉の設計に応用することとしていることは適切とは

いえない。設計に応用された「結果」を科学的に評価することが難しいからである。目標は、その達成度が客観的に評価できるものとすべきである。核融合研究におけるシミュレーションの位置付けを合理的に判断すると、まず、「核融合炉における現象」というものを、いくつかの要素（テーマ）に還元し、それぞれに関して目標レベルを設定すべきである。理想的には、質的（理論的）に正しく、定量的な予測性を持つレベルにまでシミュレーションの性能を向上させることを目標としたいが、まだその水準から遠い問題も多々ある。また、設計に用いるという目的には応えたとしても、学問的にはもっと掘り下げるべき課題も多い（例えば、流体力学の諸分野でも、応用上使われているスキームが学術的に完全とは言えない場合が多い）。学術研究としての核融合科学においては、核融合炉という複雑系を、どのような現象（科学的記述という意味で）として理解するのかは多くのパースペクティブがある。その多様性の上で多角的な研究目標を掲げるべきである。

- ・ トカマクでは ITER の核燃焼実験の成功が原型炉へ進む上でクリティカルポイントであるが、将来計画において、ヘリカル炉へ至る道筋が見えない。数値実験炉研究プロジェクトの向こうにヘリカル炉があるが、ロードマップに脆弱性が存在する。例えば、JET における D-T 実験（2021年）や ITER の核燃焼実験（2035年）をより意識した将来計画、その実験結果を基にヘリカル炉の燃焼プラズマの確立を目指すための方策や核燃焼プラズマ解析に必要なコード群開発を見据えた将来計画を描くべきではないか。また、次期装置は高性能閉じ込め配位を目指しているが、W7-X との補完関係やヘリカル炉において核燃焼プラズマをどのように実現し、制御維持するか、次期装置がそのための技術開発にどう貢献していくのかが不明である。
- ・ 将来計画に関しては、ヘリカル磁場形状の最適化に向けた検討を進めており、ダイバータなど工学系課題に対する貢献もみられ、今後ますますシミュレーション研究の成果を実機に反映する機会が増えることが期待できる。
- ・ 提示されている各タスクグループのロードマップは明確であり、評価できる。
- ・ 現状に関して様々な取組みがなされ、ほとんどの項目に関しては、成果も出ており、高く評価できる。
- ・ プロジェクトの第3段階に向けた将来計画が検討されていると評価できる。
- ・ プラズマシミュレータのアップグレードを行うなど、研究の将来計画として、核融合研の将来計画の策定に貢献していると思われる。
- ・ 本プロジェクトで開発されたコードの活用が次期計画の策定には不可欠な状況となっており、次期計画への貢献は計り知れない。
- ・ 核融合研の将来計画の策定に向けて、シミュレーションを基軸とした数値実験炉研究プロジェクトが大きな役割を果たしている点は高く評価される。
- ・ 適切なものとなっている。長期間にわたり、形骸化しないようバランスよく要素開発と統合化の研究を、核融合研全体の将来計画を見据えつつ継続している。具体的な研

究推進とグランドビジョン的計画の整合性は、特に後者が周囲環境に左右されるところが大きいので、今後とも難しい課題となりうるだろうが、適切に修正を加えつつ研究計画が推進されており、将来にも確固としたプロジェクト推進が行われるものと期待される。PDCAサイクルに基づく長期計画原案から適切に修正し、よりよき数値実験炉研究の成果を上げられることを期待したい。

- LHDの重水素実験における同位体効果の解明に本数値実験炉研究プロジェクトが積極的な貢献を果たすとともに、当該実験に対してシミュレーションが指標を示す役割を果たしてきたことは高く評価できる。
- 将来を見据えたグループの在り方（研究の進展により最適なグループ構成に再編するなど）など、より戦略的な計画を期待する。
- 各グループの活動については詳細な検討がなされていると評価できるが、各グループ間の連携について積極的な検討があるとよいと思われる。
- 流体平衡安定性グループ、高エネルギー粒子物理グループ、新古典輸送・乱流輸送グループ、周辺プラズマ輸送グループ、PSIグループなど、それぞれのグループの将来計画はよく検討されているものと思われるが、各研究グループ間の有機的結合をどのように進め、新たな研究分野を創出していくのかが、今後の課題と考えられる。LHD装置は、後継計画、そして、磁場配位最適化や高温超伝導装置の開発といった次期計画の策定が進められており、今後、実験プロジェクトとの密接な連携が望まれる。
- 報告書第6章や第2回外部評価委員会での資料を見ると、多くの研究課題が並列して進行し、各タスクグループの縦割りのプロジェクトのように受け取られる。第3期中期計画にある「高度化」と「統合化」というプロジェクトの方向性の中で、プロジェクト全体と各タスクの関連を意識しつつ将来計画をより明確化するとよい。
- ここで言う将来計画が次期計画と限定すれば、核融合研の将来計画の策定に貢献するものと言えるが、次期計画の前に6年にわたる後継計画があり、それも含めた核融合研の将来計画と考えれば、必ずしも十分な計画になっていないのではないかと思われる。後継計画では、LHD、JT-60SAで密接に連携して研究を加速し、高性能定常プラズマを実現し、高性能プラズマの定常維持に必要な学理の確立を目指すとして理解している。個々のコード開発、研究分野の一部には、トカマク実験結果との比較によるコードの検証などが示されているが、後継計画の大きな目標である高性能プラズマの定常維持に必要な学理の確立に必要な、例えば、シミュレーションコードの共同開発・挙動検証などといった具体的な言及や、後継計画にどう数値実験炉研究プロジェクトが貢献していくのか、といった記述を含めた方が良いのではないか。
- 最適化配位の探索など、核融合研の将来計画の策定に非常に大きな貢献があると思料されるが、今後、工学的な要素を考慮したシミュレーションコードの開発と統合化が望まれる。
- コードの統合化によってシミュレーションの複雑性は一段と高くなる。このため、数

値実験炉研究プロジェクトを支える超並列計算手法やデータ処理、画像処理などについても、ユーザーの利便性を図りながら、地道な研究開発を継続している点も評価できる。今後、ペタフロップスレベルのシミュレーションなど、超並列計算機の発展に伴い、それを使いこなすには高度な専門知識を必要とする。これらを支える適切な運営体制と資源配分が期待される。核融合研はLHDの後継に対応する次期計画を策定する時期にきている。この間、数値実験炉研究プロジェクトが主導し、次期装置の検討に着手している。次期装置は、核融合研の将来にも影響を与える重要課題であることから、今後、数値実験炉研究プロジェクトが主導的な役割を果たすとともに、それを円滑に進める研究体制の構築に尽力いただきたい。特に、統合化を含むコードの整備とともに、概念を異にする世界のヘリカル装置の性能を評価するなどのグループを形成し、広い観点から核融合炉に適したヘリカル装置の将来像を描くとともに、そのような情報発信のCOEとして数値実験炉研究プロジェクトを位置付けていただきたい。

- In principle yes. The plan is great and the objective is commendable, but following what I wrote earlier, I would recommend to add a top down approach with the following steps:
 1. A gap analysis: is everything done what needs to be done to achieve the overall objective of NSRP?
 2. Give priority to those topics that are most important ion the achievement of the overall objectives
 3. Define within each subproject clear deliverables (SMART) and milestones, such that progress can be tracked and remedial actions can be taken in case progress is too slow in certain fields.
 4. Use the bulk of the resources for prioritised work that contributes to the main goal of the NSRP program and use the rest (eg 20-30% of the resources) for blue skies projects in related fields.

The main objective of the NSRP program is very closely aligned with the future plan of NIFS as a whole.

- The NSRP plans to further advance the field by improving, integrating, and validating simulation codes with the upgraded Plasma Simulator toward construction of the Numerical Simulation Reactor which will contribute to designing a high - performance helical fusion reactor. In support of this plan each of eight task groups has a roadmap which shows specific tasks to be solved through domestic, international, and interproject collaborations. This is very detailed and appears to be a coherent plan. The NSRP directly contributes to optimized configuration study for the Next Generation System (NGS).

Highlights of more specific major contributions are given below:

- Optimization of equilibrium for reducing neoclassical and turbulent transport. The achievement of this would be a major development in our field.
- Turbulence & Zonal flow modeling based on gyro-kinetic simulation
- Comparative study of modular - coils and helical - winding coils type optimization is important to determine the engineering approach for the next generation facility.
- Investigation of flexible divertor structures, which is an outstanding issue for helical systems
- Trial-model-case engineering design will be pursued. Whether or not engineering constraints will be explicitly incorporated in the optimization was not addressed but this is a potentially important development. Identification of engineering limits and boundary conditions.
- Based on the gyrokinetic simulation & modeling studies in NSRP, a new turbulence optimization model (proxy approach) was constructed. Extended turbulence proxy includes nonlinearity and ZF effects, which is beyond the conventional linear proxy approaches.
- This proxy approach is now being implementing to the optimizer code (e.g., STELLOPT). This is a major development.
- Further improvement and integration of codes by collaboration among task groups and collaborators from other universities and institutes
- Validations of codes by comparison with experimental results of LHD and other devices by collaboration with the LHD Project and other institutes.
- The progress towards the ambitious goals of the NSRP is very good, and the future research plan is excellent. Both the NSRP in particular, and NIFS in general are world-class assets. They should be strongly supported.

以上、評価項目「研究の将来計画は、数値実験炉研究の目標を見据えた適切なものとなっているか。また、核融合科学研究所の将来計画の策定に貢献するものとなっているか」に対して、極めて高く評価するが4名、高く評価するが7名、評価するが4名、妥当であるが1名であった。

第3章 評価のまとめと提言

第2章に示した意見及び外部評価委員会での論議を基に、評価の要点をまとめ、今後の数値実験炉研究プロジェクトの推進に関する提言を記述する。

[1] 評価のまとめ

[1] 研究計画・体制・環境の整備

[Development of research plan, system, and environment]

- (1) 数値実験炉の構築に向けたロードマップを含めた研究プロジェクトの目標設定と研究計画は、適切に策定されているか。また、第3期中期目標・中期計画を遂行する上で、適切に検討されたものとなっているか。

Does the Numerical Simulation Reactor Research Project (NSRP) appropriately set the goal and plan including the roadmap for construction of the Numerical Simulation Reactor? Are they properly discussed for accomplishing the third midterm target and plan?

数値実験炉研究プロジェクトは核融合研の主要研究プロジェクトとして、第3期中期目標・中期計画の中で適切に位置付けられ、推進されている。LHDに代表されるヘリカル型装置研究だけでなく、トカマク型装置研究と双方向的・相乗的な観点から、核融合研究全体において重要な役割を担っており、実験データに基づいたモデルの高精度・高精緻化を図る特色ある研究プロジェクトである。幅広いシミュレーション学の進展に深く貢献してきた核融合研の歴史を継承・発展させつつ、研究プロジェクトの意義を再確認し、目的の推進と学術の発展に貢献することを期待したい。

なお、長期にわたる計画であり、実験研究の成果や学術の進展に合わせて数値実験炉の実現に向けたロードマップを再検討し、開発された計算機コードの統合化を見据えながら柔軟に研究計画を変更することも必要になろう。シミュレーション研究としてのイノベーションを追求し、学際的な研究リーダーシップを目指すことが望まれる。

- (2) 段階的な進捗度管理や研究連携・統合化に向けたマネジメント等を含め、研究推進体制は、プロジェクトを遂行する上で、有効に機能しているか。

Does the research system function appropriately in accomplishing the objectives of the NSRP with attention to the management of step-by-step progress, research collaboration, and integration?

適切なマイルストーンを設定して段階的な進捗度管理を行うとともに、八つのタスクグループを設置して研究連携・統合化に向けたマネジメントに取り組んでいる点は高く評価できる。所外の研究者を含めた共同研究体制を構築してタスクグループ横断的なマネジメント会議を開催することにより、スムーズな情報交換が促進されており、共通意識を持って研究を推進できる体制となっている。他のプロジェクトとの連携も適切に進められており、研究推進体制は概ね有効に機能している。

ただし、ボトムアップ的な研究推進体制は、統合化の面では有効に働かない点もあるため、研究計画全体を俯瞰しながら、適宜必要な措置を執ることも必要である。タスクグループ同士の有機的連携を促進し、人的資源を有効に活用して、学際的な研究がより一層高度化され、より優れた研究成果に繋がることを期待したい。

(3) より高性能なスーパーコンピュータの導入を含め、プラズマシミュレータ及び関連研究環境は、研究計画に沿って適切に整備され、有効に活用されているか。

Is the environment of the “Plasma Simulator” system and its related research appropriately developed and effectively utilized accordingly to the research plan?

Is the installation of a higher performance supercomputer properly planned?

プラズマシミュレータと関連する研究環境は、研究計画に沿って適切に導入・更新・整備され、高い利用率で有効に活用されている。ハードウェア環境のみでなく、ユーザー支援などのソフト面での支援活動も実施しており、核融合研究における理論シミュレーション分野を支える優れた研究環境が構築されているものと評価される。所外との共同研究を活性化する上での重要な資源となっており、日本のシミュレーション科学分野の競争力維持においても、一層の有効活用が期待される。

併せて、シミュレーション科学分野における数値実験炉研究プロジェクトの位置付けをより明確にし、研究計画の立案と遂行を戦略的に推進して行く必要がある。

[2] 研究成果

[Research achievements]

プラズマシミュレータを活用した理論シミュレーション研究を進めることにより、第3期中期目標・中期計画で掲げた以下の項目において、国際的に高いレベルで成果を上げているか。

Does the NSRP produce high-level achievements in accordance with international standards for the following research areas described in the third midterm goal and

plan by promoting theory and computer simulation research utilizing the Plasma Simulator?

(1) 数値実験炉の構築、実験結果との比較によるコードの検証と高度化

Construction of the Numerical Simulation Reactor, Validation and improvement of simulation codes through comparison to experimental results

数値実験炉研究プロジェクトで研究開発しているコード群を利用した研究、また、シミュレーション結果と実験結果との比較により多くの研究成果が創出されており、顕著な研究の進展が見られる。シミュレーションコードの高度化と、一部コード間の統合化も進められ、LHD 研究プロジェクトへの寄与も認められる。各階層レベルで独創的で優れた研究成果が上げられており、コードの高度化も順調に進められている。

ただ、幅広い展開が行われている部分は評価されるものの、十分な人的資源が全てのテーマに割り当てられない以上、重点化についても検討する必要もあろう。今後は、階層間接続などの本質的な物理学の解明に向けて研究を継続いただきたい。

(2) 核融合科学及び関連理工学の学術的体系化

Academic systematization of fusion science and related science and engineering

数値実験炉研究プロジェクトは、第3期中期目標・中期計画に適切に位置付けられ、核融合科学及び関連理工学の学術的体系化に寄与していると評価できる。特に、高いレベルの成果発表を通じて学会に情報発信を行い、教科書・レビュー論文を積極的に発刊し、啓発活動に努めている点は高く評価できる。全体として、研究は進んでいると評価される。

多階層シミュレーションなど、他分野とも共通する学術的価値が高い課題へも更に積極的に研究を展開することを期待する。統合化を目指した数値実験炉研究プロジェクトのゴールこそが学術体系化ともいえる。このゴール実現に向けて更なる努力を期待する。

(3) 数値実験炉研究プロジェクトの計画に沿って、着実に研究成果を上げているか。

Are research achievements steadily made according to the plan of the NSRP?

プラズマシミュレータなどの整備した資源を有効に活用し、数値実験炉研究プロジェクトを推進するために必要な数多くのシミュレーションコードの整備と拡張を計画的に進めるとともに、理論シミュレーション研究において数多くの成果を上げている。特に、プラズマシミュレータの共同研究での利用率が高く、研究者コミュニティの中核プロジェクト

としての機能を果たしている。研究成果についても、社会に見えやすい形で発表・発信しており、着実な研究の進展が見られる。将来計画に向けた装置設計に取り組むなど、コードの利用についても積極的な展開を図っており、これまでの研究成果が結実しつつあると評価される。

反面、研究グループごとに研究の進展や発表件数に差異も見られ、課題が限定されたミッション研究的な推進体制に陥ると新たな学術的挑戦課題が生まれなくなることが危惧される。他分野への展開も視野に入れ未踏課題への挑戦的精神を常に持ち、プロジェクトの更なる発展や新たな学術領域の開拓に繋げられたい。

[3] 共同利用・共同研究の推進

[Promotion of cooperation and collaboration]

- (1) 理論シミュレーション研究を基盤とした大学等との共同研究が適切に進められ、プロジェクト研究の推進に貢献するものとなっているか。

Is collaboration research with universities based on theory and simulation research appropriately promoted? Does it contribute to the progress of the NSRP?

全国の大学との共同研究を進め、研究所内外から200名近くの共同研究者と70件程度の共同研究を受け入れるとともに、プラズマシミュレータシンポジウムを開催して内外の研究者との活発な議論・情報交換を行い、理論・シミュレーション分野の活性化に貢献するなど、理論シミュレーション研究を基盤とした大学との共同研究が適切に進められていると評価できる。

共同研究拠点としての核融合研の役割は重要であり、プロジェクトの推進に加えて、他機関、多分野に対して積極的かつ主導的な役割を期待する。また、プロジェクトに設定された八つの研究グループへの共同研究者数などの定量的な評価も今後実施することが有用であろう。

- (2) 核融合プラズマシミュレーションの中核的研究拠点として、大学等の機能強化に貢献するとともに、分野間連携、異分野融合研究の推進に取り組んでいるか。

Does the NSRP contribute to enhancing functions of universities and institutes as the center of excellence for fusion plasma simulation? Does the NSRP commit to the promotion of interdisciplinary collaboration and research?

多くの大学・研究機関と幅広い研究分野において共同研究を実施して成果を上げている。また、核融合研で開発されたシミュレーションコードを用いて大学で行われている実験研究を積極的に支援するとともに、毎年多くのワークショップを開催して大学の関係研究者間の研究情報交流の中心的役割を果たしており、核融合プラズマシミュレーションの中核的拠点として大学等の機能強化に貢献していると高く評価できる。さらに、機構内での天文分野などとの連携や DNA 損傷に関する分子動力学シミュレーションなどの分野間連携、異分野融合研究の推進に取り組んでいると評価できる。

数値実験炉の構築から得られた成果を普遍性のある学理を構築するための基盤として、他分野への競争力を高めるとともに国際的な連携や学術的価値の高い連携が更に進められることを期待する。

(3) 国際的な連携活動を通じて、ITER 計画・BA 活動等を含めた国際協力へ貢献しているか。

Does the NSRP contribute to international cooperation including ITER, BA activities, and others through international collaboration activities?

日米協力、日欧協力、日中韓フォーサイト事業等の国際協力事業や国際トカマク物理活動(ITPA)、統合モデリング専門家会合への主体的な取組み及び IFERC 事業の遂行を通して、ITER 計画・BA 活動のみならず、幅広い国際協力に貢献していると高く評価できる。

一方、核融合研で開発された優れたコード群を国際標準とするため、国際連携活動を更に活発にして、組織的に普及活動を行うことが必要と考えられる。また、今後の ITER 計画・BA 活動においての全体的な方針・計画への積極的な貢献を期待する。

[4] 人材育成

[Human resources development]

将来にわたり高い水準でシミュレーション研究活動を維持するために必要な人材の育成に貢献しているか。

Does the NSRP contribute to the development of human resources required for maintaining high-level simulation research activities toward the future?

総合研究大学院大学、名古屋大学等の大学からの大学院生の受け入れやアジア冬の学校、SSH 指定校との連携を通じた若手人材育成とともに、異なった階層のシミュレーションコードを系統的・計画的に開発してきたこれまでの実績を通して、核融合研の若手スタッフのみならず、国内外の若手研究者の育成に貢献していることは高く評価できる。

一方、キャリアパス形成を含めた人材育成に関する組織的な戦略の構築及び今後の継続的な発展のための将来を見据えた人事計画や人事交流を進めることが望まれる。

[5] 将来計画

[Future plan]

研究の将来計画は、数値実験炉研究の目標を見据えた適切なものとなっているか。
また、核融合科学研究所の将来計画の策定に貢献するものとなっているか。

**Is the future research plan suitable for progressing toward the goal of the NSRP?
Does it also contribute to establishing the future plan of the National Institute
for Fusion Science?**

これまで理論モデルや数値モデルの妥当性・適用性に関する研究を着実に進め、数値実験炉研究の目標を見据えて八つの研究グループごとのロードマップを策定し、研究を進展させている。また、次世代の装置計画を含め核融合研の将来計画策定に向けて、数値実験炉研究プロジェクトが大きな役割を果たし、高く評価できる。

一方、数値実験炉実現のための開発課題や各タスクグループのロードマップと数値実験炉実現への統合化の取組みに関する明確化など、将来計画策定及び研究目標の設定を更に進める必要がある。また、各タスクグループの連携や実験プロジェクトとの連携などを積極的に検討することが望まれる。数値実験炉研究プロジェクトの目的を達成するために必要とされる課題については、トップダウンでの推進を検討する必要もある。

[2] 提言

今回の評価において、核融合研における数値実験炉研究プロジェクトについて議論した。その内容を踏まえて、同プロジェクトの今後の進め方に関する提言を、以下に記述する。

- (1) 数値実験炉研究は、核融合研の主要研究プロジェクトとして、核融合研究全体に対して重要な役割を担う特色ある研究として推進されている。幅広いシミュレーション科学の進展に深く貢献してきた研究路線を継承・発展させつつ、柔軟な発想に基づいた新たな研究テーマが常に創造されるよう、タスクグループ間の連携や所内外の共同研究者との連携を図り、数値実験炉構築に向けた不断の点検と評価に基づいた運営体制の充実と資源配分が望まれる。
- (2) 階層統合化など、シミュレーション科学領域全体に対してインパクトのあるイノベーションを追求し、数値実験炉研究を基盤として核融合研が学際的な研究リーダーシ

ップを目指すことが望まれる。

- (3) 核融合研に整備されているシミュレーション科学研究環境は、日本全体のプラズマ・核融合研究を推進する基盤の一つとなっている。今後とも共同研究者・連携機関の意見も取り入れ、適切な時期に装置導入・整備、支援体制の充実を計画し、実施する必要がある。
- (4) 共同研究拠点としての核融合研の役割は重要であり、プロジェクトの推進に加えて、大学の競争力強化に対しても積極的な貢献を今後も期待する。得られた成果の学術的体系化の観点から、数値実験炉の開発により得られた成果を普遍性のある学理の構築につなげるとともに、核融合研で開発された優れたコード群を国際標準とするために、国際連携活動を更に活発化して、組織的な普及活動に取り組むことが期待される。
- (5) 今後の継続的な領域の発展のため、数値実験炉研究の将来を見据えた人事計画や人事交流を積極的に進めるなど、キャリアパス形成を含めた理論シミュレーション分野における幅広い人材育成に関する組織的な取組みが望まれる。

第4章 おわりに

プラズマ・核融合分野での COE としての求心力を一層強化するため、核融合研では、2010（平成22）年度から LHD・理論シミュレーション・核融合工学の三つの研究プロジェクトを構成し、核融合炉実現に向けて、これらの成果を統合していく研究計画を開始した。併せて、核融合研の研究組織を改編し、全研究教育職員が一つの研究部にまとめられ、三つの研究プロジェクトへ自由に参画する体制とした。これにより、LHD・理論シミュレーション・核融合工学の連携が推進され、課題に対して臨機応変に対応できることが期待される。

核融合研の外部評価委員会では、2016（平成28）年度に共同研究、2017（平成29）年度に核融合工学研究プロジェクト、2018（平成30）年度に LHD 計画プロジェクトの評価を実施した。そして、本年度は運営会議において「数値実験炉研究プロジェクト」を対象として外部評価を実施することとした。外部評価委員会は運営会議の所外委員10名と外国人委員3名、さらに国内外の専門委員3名を加えて構成され、以下の観点で評価を行った。

【令和元年度外部評価における評価の観点】

[1] 研究計画・体制・環境の整備

- (1) 数値実験炉の構築に向けたロードマップを含めた研究プロジェクトの目標設定と研究計画は、適切に策定されているか。また、第3期中期目標・中期計画を遂行する上で、適切に検討されたものとなっているか。
- (2) 段階的な進捗度管理や研究連携・統合化に向けたマネジメント等を含め、研究推進体制は、プロジェクトを遂行する上で、有効に機能しているか。
- (3) より高性能なスーパーコンピュータの導入を含め、プラズマシミュレータ及び関連研究環境は、研究計画に沿って適切に整備され、有効に活用されているか。

[2] 研究成果

プラズマシミュレータを活用した理論シミュレーション研究を進めることにより、第3期中期目標・中期計画で掲げた以下の項目において、国際的に高いレベルで成果を上げているか。

- (1) 数値実験炉の構築、実験結果との比較によるコードの検証と高度化
- (2) 核融合科学及び関連理工学の学術的体系化

さらに、

- (3) 数値実験炉研究プロジェクトの計画に沿って、着実に研究成果を上げているか。

[3] 共同利用・共同研究の推進

- (1) 理論シミュレーション研究を基盤とした大学等との共同研究が適切に進められ、

プロジェクト研究の推進に貢献するものとなっているか。

(2) 核融合プラズマシミュレーションの中核的研究拠点として、大学等の機能強化に貢献するとともに、分野間連携、異分野融合研究の推進に取り組んでいるか。

(3) 国際的な連携活動を通じて、ITER 計画・BA 活動等を含めた国際協力へ貢献しているか。

[4]人材育成

将来にわたり高い水準でシミュレーション研究活動を維持するために必要な人材の育成に貢献しているか。

[5]将来計画

研究の将来計画は、数値実験炉研究の目標を見据えた適切なものとなっているか。また、核融合科学研究所の将来計画の策定に貢献するものとなっているか。

令和元年度の外部評価委員会は、2019（令和元）年10月から2020（令和2）年2月にかけてメールによる持ち回り審議を含めて4回開催され、核融合研からの評価項目に沿った詳しい説明及び質疑応答等が行われた。委員会での審議を踏まえ、外部評価委員の評価結果を取りまとめることで、本報告書を作成した。

本年度実施した「数値実験炉研究プロジェクト」に対する外部評価の結果としては、上記の評価項目に対して、全体として「高く評価する」との結論となった。特に、数値実験炉の構築に向けたコード開発と高度化に関しては、各タスクグループを構築して多くの特筆すべき研究成果が創出されるなど着実な進歩が見られ、研究成果が上がっていると評価できる。さらに、核融合科学研究所の全体計画の中での主要なプロジェクトの1つとして、プラズマシミュレータをはじめ数値実験環境の整備が適切に行なわれており、最大限の成果を上げるための努力が払われている。また、所内外での共同研究を積極的に進め、優れた支援体制の構築に努力するなど、大学共同利用機関として研究コミュニティ全体の学術進展に対して大きな貢献を果たしている。

一方で、長期にわたる研究プロジェクトであることから、研究成果や学術研究の進展に合わせて実験炉構築に向けたロードマップを適切に見直し、新たな学術的挑戦課題に挑戦し、研究プロジェクトの更なる発展や新たな学術領域の開拓に繋がりたい。さらに、共同研究拠点として、国際的な連携や他分野との連携を進めつつ、学術的価値の高い研究を積極的かつ主導的に推進し、学際的な研究リーダーシップを目指すことを期待する。

最後に、核融合研の数値実験炉研究プロジェクトの今後の進め方に関する提言を下記のようにまとめた。

- (1) 数値実験炉研究は、核融合研の主要研究プロジェクトとして、核融合研究全体に対して重要な役割を担う特色ある研究として推進されている。幅広いシミュレーション科学の進展に深く貢献してきた研究路線を継承・発展させつつ、柔軟な発想に基づいた新たな研究テーマが常に創造されるよう、タスクグループ間の連携や所内外の共同研究者との連携を図り、数値実験炉構築に向けた不断の点検と評価に基づいた運営体制の充実と資源配分が望まれる。
- (2) 階層統合化など、シミュレーション科学領域全体に対してインパクトのあるイノベーションを追求し、数値実験炉研究を基盤として核融合研が学際的な研究リーダーシップを目指すことが望まれる。
- (3) 核融合研に整備されているシミュレーション科学研究環境は、日本全体のプラズマ・核融合研究を推進する基盤の一つとなっている。今後とも共同研究者・連携機関の意見も取り入れ、適切な時期に装置導入・整備、支援体制の充実を計画し、実施する必要がある。
- (4) 共同研究拠点としての核融合研の役割は重要であり、プロジェクトの推進に加えて、大学の競争力強化に対しても積極的な貢献を今後も期待する。得られた成果の学術的体系化の観点から、数値実験炉の開発により得られた成果を普遍性のある学理の構築につなげるとともに、核融合研で開発された優れたコード群を国際標準とするために、国際連携活動を更に活発化して、組織的な普及活動に取り組むことが期待される。
- (5) 今後の継続的な領域の発展のため、数値実験炉研究の将来を見据えた人事計画や人事交流を積極的に進めるなど、キャリアパス形成を含めた理論シミュレーション分野における幅広い人材育成に関する組織的な取組みが望まれる。

資料編 1

令和元年度 数値実験炉研究プロジェクト報告書

令和元年度

数値実験炉研究プロジェクト 報告書

令和2年3月

自然科学研究機構 核融合科学研究所

目次

1	はじめに	1
1.1	核融合科学研究所におけるシミュレーション研究の経緯	1
1.2	自然科学研究機構の第2期中期目標・中期計画及びこれまでの数値実験炉研究プロジェクトに関する外部評価について	3
1.3	自然科学研究機構の第3期中期目標・中期計画から	6
2	数値実験炉研究プロジェクトの研究計画・体制・環境の整備	8
2.1	数値実験炉研究プロジェクトの目標と研究計画	8
2.2	数値実験炉研究プロジェクトの研究体制	13
2.2.1	全体体制と運営方針	13
2.2.2	他のプロジェクトとの連携	15
2.2.2.1	LHD計画プロジェクトとの連携	15
2.2.2.2	核融合工学研究プロジェクトとの連携	17
2.3	プラズマシミュレータ及び関連研究環境の整備	20
2.3.1	プラズマシミュレータの整備	20
2.3.2	バーチャルリアリティ装置の整備	22
3	数値実験炉研究プロジェクトの研究成果	30
3.1	数値実験炉研究プロジェクトの研究成果の概要	30
3.2	数値実験炉を構成するシミュレーションコードの研究開発	39
3.2.1	大規模シミュレーションコードの整備・拡張	39
3.2.1.1	シミュレーションコード群の全体像	39
3.2.1.2	コアプラズマコード	49
3.2.1.3	周辺プラズマ、プラズマ・壁相互作用コード	52
3.2.1.4	シミュレーション基盤、解析コード・汎用ツール開発	59
3.2.2	統合輸送解析スイートの構築	66
3.2.2.1	LHD実験データ解析型統合輸送解析スイート TASK3D-a の進展	66
3.2.2.2	到達パラメータ予測統合輸送解析スイート TASK3D の 進展	71
3.3	核融合科学及び関連理工学の学術的体系化	74
3.3.1	MHD 平衡と不安定性	74
3.3.1.1	MHD 平衡と不安定性の研究方針	74

3.3.1.2	HINTによる磁気島ダイバータ配位の考察	75
3.3.1.3	プラズマフローを含むLHDプラズマのMHD安定性解析	75
3.3.1.4	インターチェンジモードにおける非線形パリティ混合 .	78
3.3.1.5	MHDシミュレーションによる内寄せLHD配位での高 ベータプラズマのMHD特性の解析	81
3.3.1.6	バルーニングモードに対する熱イオンの運動論的效果 .	82
3.3.1.7	LHDのバルーニング不安定性についての3次元拡張MHD ラージ・エディ・シミュレーション	85
3.3.1.8	LHDプラズマにおけるMHD現象の因果律の検討	88
3.3.1.9	D型変形断面のヘリオトロン磁場の数値的検討	89
3.3.1.10	磁気島のあるLHDプラズマにおけるペレット入射 . . .	90
3.3.1.11	疑似アニーリングによる高ベータ簡約化MHDの軸対称 トロイダル平衡計算	93
3.3.2	コアプラズマの粒子・熱輸送	96
3.3.2.1	ジャイロ運動論的解析に基づいた、ヘリカルプラズマで の乱流粒子、熱輸送モデリングと輸送コードへの導入 .	98
3.3.2.2	ジャイロ運動論シミュレーションとの連成解析による大 域的輸送コード開発と拡張	101
3.3.2.3	乱流輸送のプラズマ分布依存性のシミュレーション研究	104
3.3.2.4	複数イオン種を含むヘリカルプラズマの微視的不安定性 研究	106
3.3.2.5	プラズマ乱流輸送における水素同位体質量効果のシミュ レーション研究及びLHD実験による検証	108
3.3.2.6	大域的full- f ジャイロ運動論シミュレーションコードの 開発	111
3.3.2.7	ドリフト・ジャイロ運動論に基づく衝突・乱流輸送理論 の定式化の進展	113
3.3.2.8	不純物輸送の運動論シミュレーション研究	115
3.3.2.9	新古典輸送現象への共鳴摂動磁場の影響	121
3.3.3	高エネルギー粒子・波動・加熱の物理	123
3.3.3.1	高エネルギー粒子駆動不安定性のハイブリッドシミュ レーション研究	123
3.3.3.2	高速イオンによる高周波不安定性の電磁粒子シミュレ ーション	133

3.3.3.3	LHDにおける加熱解析の進展	135
3.3.4	周辺プラズマの輸送とプラズマ・壁相互作用	138
3.3.5	基礎物理	151
3.3.5.1	3次元Hall MHD乱流のDNSに基づいたHall MHD方程式のLES研究	151
3.3.5.2	交換型不安定性・テアリング不安定性の遷移についての2次元MHDシミュレーション	154
3.3.5.3	有限アスペクト比を持つ円柱プラズマの二流体テアリング不安定性の解析	156
3.3.5.4	ヘリカル核融合炉全系解析に向けたジャイロ運動論シミュレーションコードの開発	160
3.3.5.5	磁場閉じ込め装置の境界層領域におけるプラズマフィラメントのダイナミクス	163
3.3.5.6	磁気リコネクションにおけるイオン加熱機構の解明	166
3.3.5.7	非線形磁気音波中の平行電場の理論解析	170
3.3.5.8	レーザープラズマ	172
3.3.5.9	PASMOの最適化	177
3.3.5.10	CADデータのVR可視化	181
3.3.5.11	In-situ可視化	182
3.3.5.12	Unityを用いた可視化	182
3.3.5.13	ヘッドマウントディスプレイを用いたVR可視化	185
3.3.5.14	磁力線データの可視化	186
3.3.5.15	FFHR CADデータの構造解析	187
3.3.5.16	可視化研究の応用	188
4	共同利用・共同研究の推進	190
4.1	プラズマシミュレータを活用した国内共同研究	191
4.1.1	プラズマシミュレータ共同研究	191
4.1.2	プラズマシミュレータシンポジウム開催	193
4.1.3	大学との共同研究	212
4.1.3.1	名古屋大学・九州工業大学・京都工芸繊維大学・物質材料研究機構・理化学研究所・同志社大学・富山大学・分子科学研究所との共同研究	212
4.1.3.2	名古屋大学・九州大学・九州工業大学との共同研究	214

4.1.3.3	信州大学・山形大学・京都大学との共同研究	215
4.1.3.4	京都工芸繊維大学との共同研究	215
4.1.3.5	大阪大学との共同研究	217
4.1.3.6	慶應義塾大学との共同研究	219
4.1.3.7	群馬大学との共同研究	220
4.1.3.8	東京大学・岡山理科大学との共同研究	221
4.1.3.9	名古屋工業大学との連携活動・共同研究	224
4.1.3.10	名古屋大学・筑波大学との共同研究	227
4.1.3.11	九州大学との共同研究	228
4.1.3.12	名古屋大学・愛知工業大学との共同研究	228
4.1.3.13	京都大学との共同研究	229
4.1.3.14	兵庫県立大学・神戸大学・情報通信研究機構・北里大学・ 京都大学・名古屋大学との共同研究	230
4.1.3.15	兵庫県立大学・神戸大学・甲南大学・名古屋大学・海洋 研究開発機構・防衛大学校との共同研究	231
4.1.3.16	兵庫県立大学・海洋研究開発機構との共同研究	232
4.1.3.17	名古屋大学との共同研究	232
4.1.3.18	京都大学・神戸大学との共同研究	232
4.1.3.19	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構との共同研究	233
4.1.4	研究会	235
4.2	分野間連携等の幅広いシミュレーション研究拠点形成	243
4.2.1	自然科学における階層と全体	243
4.2.2	プリンストン・プラズマ物理研究所、プリンストン大学と磁気リ コネクションに関わる共同研究	247
4.2.3	自然科学研究機構「若手研究者による分野間連携研究プロジェク ト」	247
4.3	国際的な COE としての活動	250
4.3.1	日米協力事業 JIFT による活動の推進	250
4.3.1.1	プラズマの不安定性に関わる米国テキサス大学オースチ ン校プラズマ研究所との共同研究	251
4.3.2	日欧協力	254
4.3.2.1	不純物粒子輸送の新古典シミュレーション研究における 日欧共同研究	254
4.3.2.2	新古典輸送現象に関する EU との共同研究	255

4.3.2.3	周辺輸送研究における日欧交流	256
4.3.3	日中韓協力	256
4.4	ITER 計画・BA との連携	260
4.4.1	六ヶ所研究センターにおける ITER-BA 活動	260
4.4.2	国際トカマク物理活動 (ITPA) と IMEG への参加	261
4.4.3	その他の ITER/BA 連携活動	264
4.5	産業界との共同研究	270
4.5.1	東芝メモリ株式会社との共同研究	270
5	人材育成	272
5.1	大学院生・博士研究員の教育・指導	272
5.2	その他の教育プログラム	273
5.2.1	SSH 活動	273
5.2.2	総研大 夏の体験入学	274
5.2.3	総研大アジア冬の学校	275
6	将来計画	277
6.1	各タスクグループの将来計画	278
6.1.1	平衡・安定性	278
6.1.2	高エネルギー粒子・波動・加熱の物理	280
6.1.3	新古典・乱流輸送	281
6.1.4	周辺プラズマ輸送	283
6.1.5	プラズマ壁相互作用	284
6.1.6	統合輸送コード	286
6.1.7	多階層複合物理	287
6.1.8	シミュレーション科学基盤	291
6.2	新配位創成を目指した磁場配位最適化研究	292
6.2.1	次期装置に関する研究活動	292
6.2.2	先進配位最適化に向けた物理検討・モデリング	293
6.2.3	多様なダイバータ構造を伴う配位研究	295
6.2.4	配位計算・コイル計算・工学検討のスキーム構築と模擬設計	297
6.2.5	今後の展開	298
7	まとめ	299

1 はじめに

平成元年（1989年）5月に核融合プラズマに関する学理及びその応用の研究を行うことを目的とする大学共同利用機関として核融合科学研究所は創設され、大型ヘリカル装置(LHD)計画の推進と大型計算機によるプラズマ物理・核融合に関する理論・シミュレーション研究を2つの柱として活動が開始された。以下では、先ず、核融合科学研究所におけるシミュレーション研究の経緯を述べた後に、自然科学研究機構の第2期及び第3期中期目標・中期計画と過去に実施された数値実験炉研究プロジェクトに関する外部評価の概略を記す。

1.1 核融合科学研究所におけるシミュレーション研究の経緯

平成元年（1989年）に創設された核融合科学研究所には、大型ヘリカル装置(LHD)による共同研究の推進とともに、核融合に関する理論・シミュレーション研究の中核的機能を果たすことが求められた。そこで、核融合プラズマについて理論解析的手法及びシミュレーションを用いた研究を行い、プラズマ諸現象の微視的・巨視的物理機構の解明と理論の体系化を行い、併せて国際理論共同研究の推進を図ることを目的とした理論・シミュレーション研究センター、大型計算機の運転管理を行い、大学等における核融合研究者が行う計算機を用いた共同研究を支援する計算機センターが設置されるとともに、大型ヘリカル研究部の中にも、LHD プラズマの物理検討や実験結果のデータ解析並びにトラスプラズマの理論・数値解析研究を行う理論・データ解析研究系が設置された。

平成16年度(2004年度)に核融合科学研究所は大学共同利用機関法人自然科学研究機構の一員となり、中期計画・中期目標を策定し、共同利用・共同研究の推進とそのための最適な研究環境と研究体制の構築に努めることを求められるようになった。同年度に実施された理論・シミュレーションセンターの外部評価の提言を受け、運営会議の下に組織検討委員会(委員長:三間圀興大阪大学レーザーエネルギー学研究センター長(当時)、委員数:20名)が設置され、「核融合科学研究所におけるシミュレーション研究を新分野として確立するための新組織創設」に関する検討が行われた。検討結果をまとめた報告書では、「長年培われてきた研究の結果、核融合プラズマを『多階層・複合物理過程が複雑に相互作用する非線形・非平衡・開放系』として捉え、この自然体系を大規模シミュレーションで解明する『シミュレーション科学』を構想するまで進んできたことを認識し、この構想を独立した新しい科学の分野として強力に推進するため、核融合研に新組織『シミュレーション科学センター』を創設するべきである」と結論した。この報告を受けて所内で組織再編に関する検討を行い、主としてシミュレー

シミュレーションの物理モデルやアルゴリズムを担当してきた「理論・シミュレーション研究センター」と、計算機やネットワーク技術を担当してきた「計算機・情報ネットワークセンター(平成16年(2004年)まで計算機センター)」の2センターを統合し、新たに「シミュレーション科学研究部」を設置するという構想に至り、この構想案は平成18年度(2006年度)に核融合科学研究所運営会議および自然科学研究機構教育研究評議会等での承認を受け、平成19年(2007年)4月に「シミュレーション科学研究部」が発足した。



図 1.1-1 研究部とプロジェクト体制

平成22年度(2010年度)から始まった第2期中期計画において、核融合研では、核融合原型炉に向けた学理の体系化を加速するために、単一研究部組織であるヘリカル研究部と、それぞれのタスクを持ったLHD計画、数値実験研究、核融合工学研究から成る3研究プロジェクト体制が発足した(図1.1-1)。そのうち、数値実験研究プロジェクトは、シミュレーション科学研究部と大型ヘリカル研究部の理論・データ解析研究系のメンバーを中心に組織され、核融合研創設時から進めてきた理論シミュレーション研究の成果を基に、炉心プラズマから周辺プラズマまでのプラズマの挙動を解明し、その理論体系化を進めるとともに、ヘリカル型磁場閉じ込め装置全体のプラズマ挙動を予測できる数値実験炉の構築を目指したシミュレーション研究を推進することをプロジェクトの目標に設定した。

平成26年(2014年)7月には、核融合原型炉の基本設計に数値シミュレーションの立場から貢献することを目的とした数値実験炉の研究をより一層加速するため、数値実

験研究プロジェクトの名称を「数値実験炉研究プロジェクト」と変更した。数値実験研究プロジェクト及び数値実験炉研究プロジェクトの活動に対して、それぞれ、平成24年度(2012年度)及び平成27年度(2015年度)に外部評価が実施され、そこで出された提言をその後の組織改編や研究体制の向上に役立ててきた。

1.2 自然科学研究機構の第2期中期目標・中期計画及びこれまでの数値実験炉研究プロジェクトに関する外部評価について

平成22年4月から平成28年3月までの第2期の6年間に自然科学研究機構・核融合科学研究所の達成すべき「研究水準及び研究の成果等に関する目標」(中期目標)は、

- 「核融合科学分野では、我が国における核融合科学研究の中核機関として、大学や研究機関と共に核融合科学及び関連理工学の学術的体系化と発展を図る。環境安全性に優れた制御熱核融合の実現に向けて、大型の実験装置や計算機を用いた共同研究から、国際協力による核融合燃焼実験への支援までを含む日本全体の当該研究を推進する。」

のように設定され、「研究水準及び研究の成果等に関する目標を達成するための措置」(中期計画)において、シミュレーション研究について以下のように述べられている。

- 「核融合プラズマ閉じ込めの物理機構解明、その体系化及び数値実験炉の構築を目指して、大型計算機システムを活用した磁場閉じ込めプラズマ及び複雑性プラズマのシミュレーション研究を推進する。」さらに、「共同利用・共同研究の内容・水準に関する目標を達成するための措置」の中においても、シミュレーション研究の役割を以下のように言及している。「LHDによる高性能プラズマ実験、大型計算機システムによる大規模シミュレーション及び炉工学研究の高度な共同利用・共同研究を推進する。」

このように、数値実験研究プロジェクトの目標として「核融合プラズマ閉じ込めの物理機構解明、その体系化及び数値実験炉の構築」を掲げ、プロジェクトとしての研究活動を開始した。平成24年度に行われた「数値実験研究プロジェクト」に関する外部評価では、この目標設定に対し次の評価を得ている。

- 「炉心プラズマの物理機構を解明し、それを統合することを目指した数値実験研究プロジェクトは、核融合プラズマの要素研究から物理の統合化と数値実験炉の開発へと、戦略的な目標設定がなされており、プロジェクトの目標設定は適切で

ある。LHD 実験の成果を元に、ヘリカル型原型炉設計に生かすためにも重要なタスクであり、着実な進展が期待される。数値実験研究プロジェクトの目標設定に関して、高く評価する。」

さらに第2期中期計画の最終年度にあたる平成27年度の6月に、従来機の8倍以上の演算性能を有する現在のプラズマシミュレータへの更新を行い、数値実験炉研究推進のための充実した研究環境の整備を実現した。そして同年度に、前回の数値実験研究プロジェクトに関する外部評価が自然科学研究機構の以下の5項目の評価の観点に基づいて行われた。

[1] 研究体制・環境の整備

- (1) 第2期中期計画・中期目標を遂行する上で、研究体制は適切に機能してきたか。
- (2) プラズマシミュレータ及び関連研究環境の整備は適切に進められているか。また、有効に利用されているか。

[2] 研究成果

プラズマシミュレータを活用した理論シミュレーション研究を進めることにより、第2期中期計画で掲げた以下の2つの分野において、国際的に高いレベルの成果を上げているか。

- (1) 数値実験炉の構築
- (2) 核融合プラズマの物理機構解明とその理論体系化

[3] 共同利用・共同研究の推進

- (1) 大学等有する高い研究能力を幅広く結集し、COEとして共同研究を適切に進めているか。
- (2) 大学の研究発展に寄与し、他分野に発信できる学術拠点として貢献しているか。
- (3) ITER計画・BA活動等との連携を通じて、国際協力への貢献を図っているか。

[4] 人材育成

シミュレーション研究を通じて、核融合研究の長期的な発展を支える国際的に活躍できる人材の育成に貢献しているか。

[5] 将来計画

目標に向けた今後の研究計画は適切か。特に、中長期的な展望を見据えたものとなっているか。

上記の各項目について、外部評価委員会より「高く評価する」あるいは「極めて高く評価する」との評価を得ている。あわせて、今後のプロジェクトの進め方に対する提言として以下の5項目が提示された。

- (1) 「数値実験炉研究プロジェクト」全体の最終目標をより明確に示し各研究グループで共有するとともに、研究グループの目標に対する進捗度等のチェック体制強化、並びに、研究グループ間の連携によるシナジー効果を生むためのマネジメントに留意する必要がある。
- (2) 最終的に統合化が完結するロードマップを視野に入れつつ、各開発要素の組み合わせ統合化を常に意識した研究計画の整備や体制の強化を速やかに図るべきである。
- (3) プラズマシミュレータ及び関連研究環境の整備に関しては、全体計画の中での各グループの進捗状況を精査し、それらを加味した段階的な達成目標に沿った整備計画の立案を期待する。特に統合化に不可欠なスーパーコンピュータについては、プラズマ・核融合研究の更なる発展に貢献できるよう、より高性能なスーパーコンピュータの導入を今後も積極的に推進することを希望する。
- (4) プロジェクトの推進を縦糸、学術の発展を横糸として、関連研究者が両者に貢献する研究体制を維持・発展すること、並びに国際共同研究も含めた国際貢献を推進するとともに、他分野に発信できる競争力を一層向上させて学際的活動を通じた新学問領域の創出を進めていくことを希望する。
- (5) 将来にわたり高い水準で、核融合炉開発にとって重要なシミュレーション研究活動を維持するためにも、大学等とともに人材育成に組織的に取り組み、質及び量ともに一層の充実を図ることを期待する。

これらの提言を受けた後、数値実験炉研究プロジェクトの更なる推進に向け、1.3節に示すような第3期中期目標・中期計画を設定し、プラズマシミュレータ及び関連研究環境を充実させ、各研究グループ間の連携を強化し、国内外の様々な共同研究・連携研究の推進によって多くの研究成果を創出するとともに人材育成に貢献している。

1.3 自然科学研究機構の第3期中期目標・中期計画から

平成28年4月から令和4年3月までの第3期の6年間に自然科学研究機構・核融合科学研究所の達成すべき「研究水準及び研究の成果等に関する目標」(中期目標)は、

- 「核融合科学分野では、我が国における核融合科学研究の中核的研究拠点として、大学や研究機関とともに核融合科学及び関連理工学の学術的体系化と発展を図る。環境安全性に優れた制御熱核融合の実現に向けて、大型の実験装置や計算機を用いた共同研究から、国際協力による核融合燃焼実験への支援までを含む日本全体の当該研究を推進する。」

のように設定されており、この中期目標を達成するための「中期計画」においては、核融合科学研究所の「共同利用・共同研究の内容・水準に関する目標を達成するための措置」として、

- 「LHDによる重水素プラズマ実験、プラズマシミュレータによる大規模シミュレーション及び大型試験設備を活用した炉工学研究を高度な共同利用・共同研究として国内外に展開する。国内においては、その質を上げること、国外については、その機会を増やすことを目標とする。自然科学大学間連携推進機構(仮称)の一環としての双方向型共同研究を始めとする大学間ネットワークを整備・活用した共同研究を先導することにより、大学からの研究成果創出に資する。2国間・多国間協定に基づく連携事業については限られた予算の中で研究計画を重点化し、より高い成果を目指す。国際熱核融合実験炉(ITER)等の国際事業に対しても、卓越した研究拠点として連携協定の下、大学とともに核融合科学研究所が知見を持つ分野で更なる連携協力を図る。また、共同利用機能を持続的かつ高いレベルで提供するため、大型ヘリカル装置及びプラズマシミュレータの共同利用率を100%に維持する。」

と述べられている。さらに、「中期計画」における「研究水準及び研究の成果等に関する目標を達成するための措置」の中で、数値実験プロジェクトについて、以下のように記されている。

- 「プラズマシミュレータ(スーパーコンピュータシステム)を有効活用して、数値実験炉の構築に向けたコアプラズマから周辺プラズマ・プラズマ対向壁までを含むシミュレーションコードの整備・拡張・高精度化及び統合化のための研究を進めるとともに、平成31年度中において、プラズマシミュレータの性能を現行

機種と比べて4倍以上に向上させ、それに対応した各種3次元コードの最適化を行う。また、平成31年度までに、コアプラズマにおける乱流輸送のモデル化と統合輸送コードへの組み込み、第3期中期目標期間終了時までには、各種輸送コードに複数イオン種効果を取り込む。さらに、第3期中期目標期間終了時までには、タングステンを中心とするプラズマ対向材の物性値評価に必要であるプログラミングの改善や新たなモデルの構築により分子動学的シミュレーション技法を開発する。並行して、上記目標を達成するための支援研究として、LHDプラズマを始めとする磁場閉じ込めプラズマの3次元平衡、輸送、不安定性、非線形発展についての実験結果との照合によりコードの完成度を高めるとともに、関連する基礎物理等に関するシミュレーション研究を行う。」

1.2節に示した前回の外部評価の提言の後、上記の第3期中期計画を掲げ、2章で述べるように数値実験炉研究プロジェクトのロードマップを含めた目標・研究計画の設定、研究体制の構築及び研究環境の整備を進め、各研究グループ間の連携や国内外の研究機関との共同研究の強化によって数値実験炉の構築に向けたシミュレーションコード開発を推進し、3章に記載される数多くの優れた研究成果を生み出している。プラズマシミュレータを活用した国内共同研究、分野間連携を含むシミュレーション研究拠点形成、国際的なCOEとしての活動やITER計画・BA活動との連携等が幅広く行われ(4章)、多くの若手研究者の育成にも貢献している(5章)。このような成果・実績を背景に、数値実験炉研究プロジェクトの将来計画の策定を進めている(6章)。

2 数値実験炉研究プロジェクトの研究計画・体制・環境の整備

2.1 数値実験炉研究プロジェクトの目標と研究計画

数値実験炉研究プロジェクトは、炉心プラズマから周辺プラズマまでのプラズマの挙動を解明し、その理論体系化を進めるとともに、ヘリカル型磁場閉じ込め装置全体のプラズマ挙動を予測できる数値実験炉の構築を目指したシミュレーション研究を推進することをプロジェクトの目標として設定している。

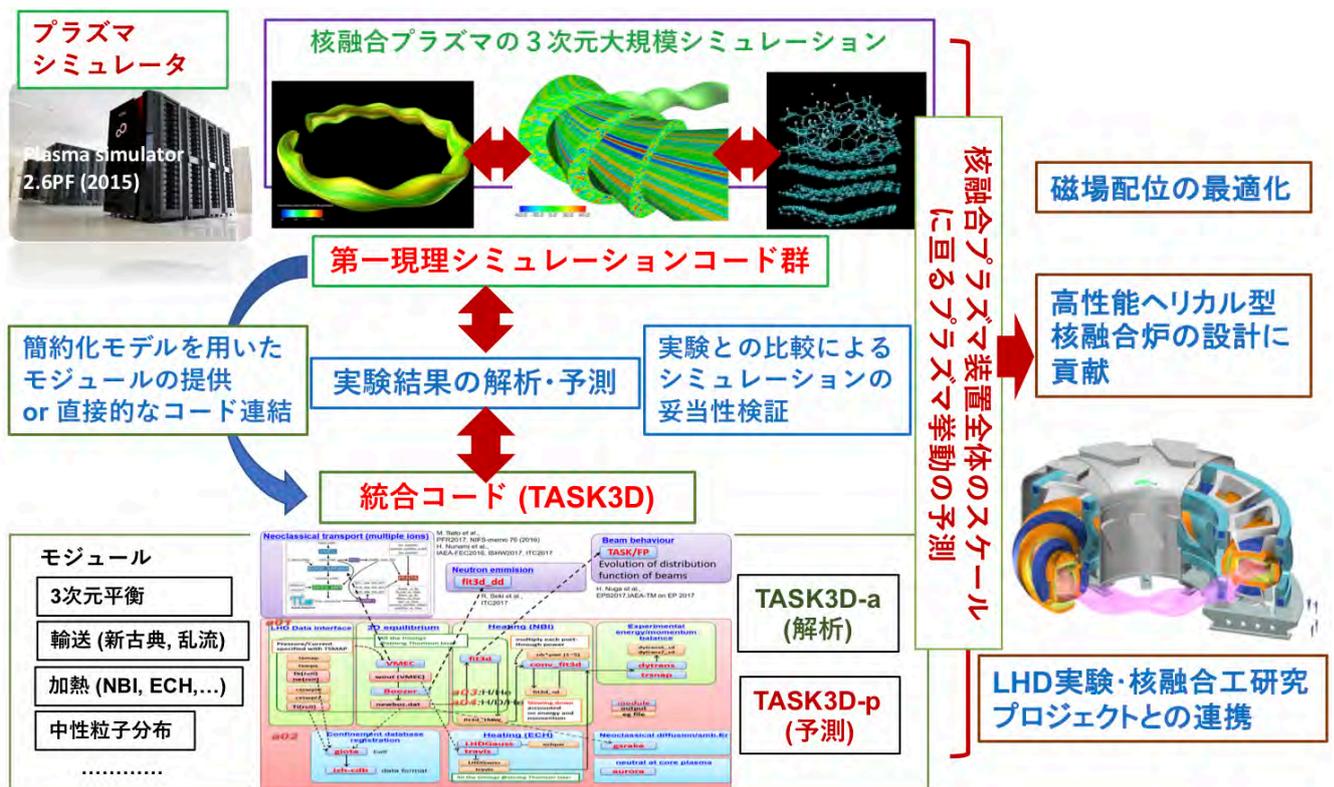


図 2.1-1 数値実験炉

数値実験炉(図 2.1-1)は、核融合プラズマに含まれる多様な物理要素、即ち、MHD 平衡・安定性、コアプラズマ輸送、乱流、高エネルギー粒子、加熱、周辺プラズマ輸送、プラズマ壁相互作用等それぞれの階層における物理機構を解明するためのシミュレーションコード群と、装置全体のプラズマ挙動を解析・予測する統合コードからなるシミュレーションコード体系であり、統合コードは各物理要素過程に対するモジュールから構成される。前者の各要素過程に対するコードはモジュールとして直接統合コードに組み込まれるか、または、各要素過程のシミュレーション結果から導出される物

理モデルがモジュールとして統合コードに提供される。また、MHD シミュレーションと高エネルギー粒子シミュレーションの連結等、統合コードとは別に、要素シミュレーションの幾つかを結合させた拡張型シミュレーションも行われる。それぞれのシミュレーション結果は、理論モデルの予測や実験結果との比較により、その精度や妥当性の検証がなされる。こうして、信頼性を向上させたシミュレーションコード体系は、実験・工学研究グループと連携しながら、実験結果の解析・予測や高性能ヘリカル型核融合炉の設計等に役立てられる。

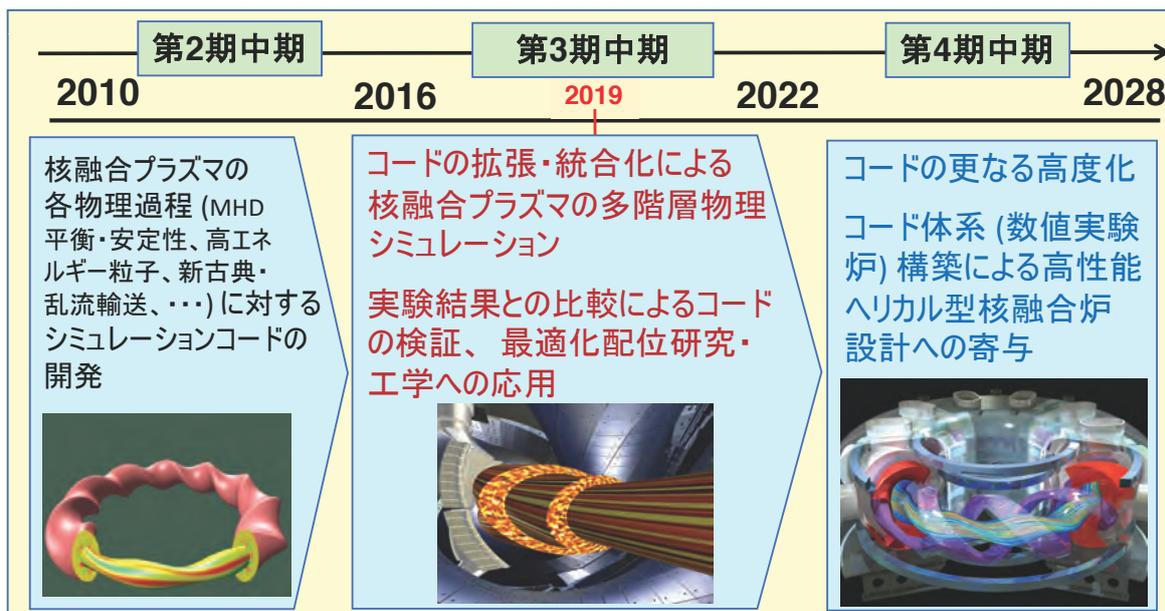


図 2.1-2 数値実験炉研究プロジェクトのロードマップ

数値実験炉研究プロジェクトでは、核融合プラズマを構成する第2期中期計画が始まった平成22年度(2010年度)に、数値実験炉の構築に向け、大きく分けて3段階のプロセスからなる研究目標を掲げた。図2.1-2は、第1～3段階からなる数値実験炉研究プロジェクトのロードマップを示す。第1段階(2010～2015年度)では、核融合プラズマを構成する多様な要素過程の物理機構を解明するためのシミュレーションコードの開発である。第3期中期計画(1.3章参照)に対応する第2段階(2016～2021年度)では、各物理要素に対するシミュレーションコードの高性能化とともに、核融合プラズマにおける多階層物理現象を扱うためシミュレーションの統合化を進める。第3段階(2022年度～)では、第1及び第2段階の成果に基づき、高精度・高信頼性を有する数値実験炉の構築を進め、ヘリカル型核融合炉の設計に大きく貢献することを目指している。

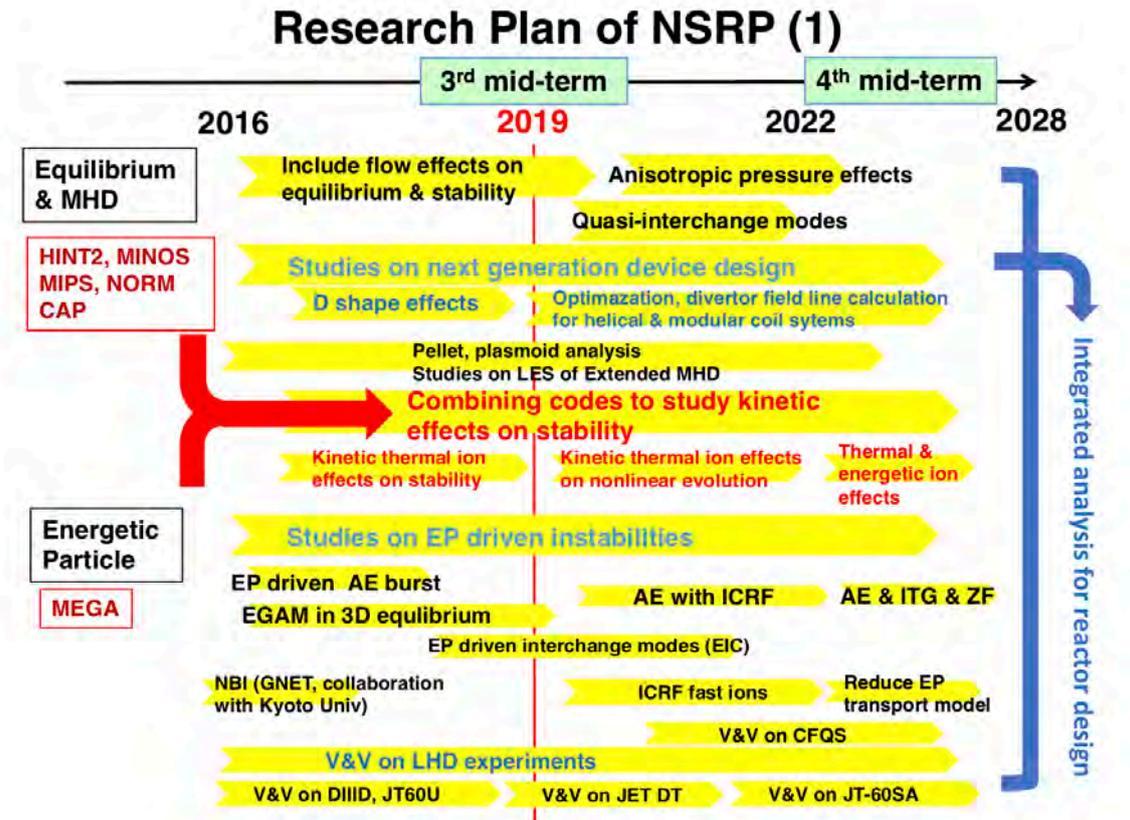


図 2.1-3 第 3～4 期中期 (2016～2028 年) の期間における数値実験炉研究プロジェクトの研究計画(1):MHD平衡・安定性及び高エネルギー粒子に関する研究課題、シミュレーションコード群の開発 (拡張・連結・統合)、検証や研究連携の過程

上記の目標を達成するため、現在 (第 2 段階) 及び将来 (第 3 段階) では、国内外の他の研究グループの類似コードとのベンチマークテストによる理論の検証 (verification) や、LHD 重水素実験をはじめとする様々な実験結果との比較による信頼性の検証 (validation) により、シミュレーションコードの高度化・統合化を更に進め、これらのコード体系 (=数値実験炉) を用いたシミュレーションを、LHD プラズマの高性能化やヘリカル型核融合炉の設計に活用することを計画している。図 2.1-3、図 2.1-4 及び図 2.1-5 は、第 3～4 期中期 (2016～2028 年) の期間における数値実験炉研究プロジェクトの研究計画を表し、数値実験炉の構築に向かって、MHD 平衡・安定性、高エネルギー粒子、コア輸送、周辺輸送、プラズマ壁相互作用、統合コードに関する研究課題、シミュレーションコードの開発 (拡張・連結・統合)、検証や研究連携の過程を示している。上記の研究計画に加えて、数値実験炉研究プロジェクトは、多階層からなる複



図 2.1-4 第 3～4 期中期 (2016～2028 年) の期間における数値実験炉研究プロジェクトの研究計画 (2): コア輸送及び統合輸送コードに関する研究課題、シミュレーションコードの開発 (拡張・連結・統合)、検証や研究連携の過程

雑なプラズマ現象を支配する基礎物理やスーパーコンピュータシステム・VR 技術等のシミュレーション科学基盤に関する共同研究の推進を計画することにより、1.3 章に書かれた第 3 期中期目標・中期計画に沿って、プラズマシミュレータの性能を最大限に活用し、シミュレーション技法の開発、シミュレーションコードの整備を進めるとともに、核融合科学や関連理工学の学術体系化へ貢献することを目指している。

特に、平成 29 年 (2017 年)3 月から開始された LHD 重水素実験のミッションの一つであるプラズマ閉じ込めの水素質量依存性 (同位体効果) の解明や LHD 実験で発見された不純物ホール現象の物理機構の解明等の極めて重要な研究課題 (図 2.1-4 参照) に対する理論シミュレーション解析に取り組み、LHD 実験グループと密接に連携し、これら課題の解決に貢献することを重要な目標の一つに含め、その目標達成のため、第 3 期中期計画の中に、複数イオン種効果を取り込んだ輸送シミュレーションコードの

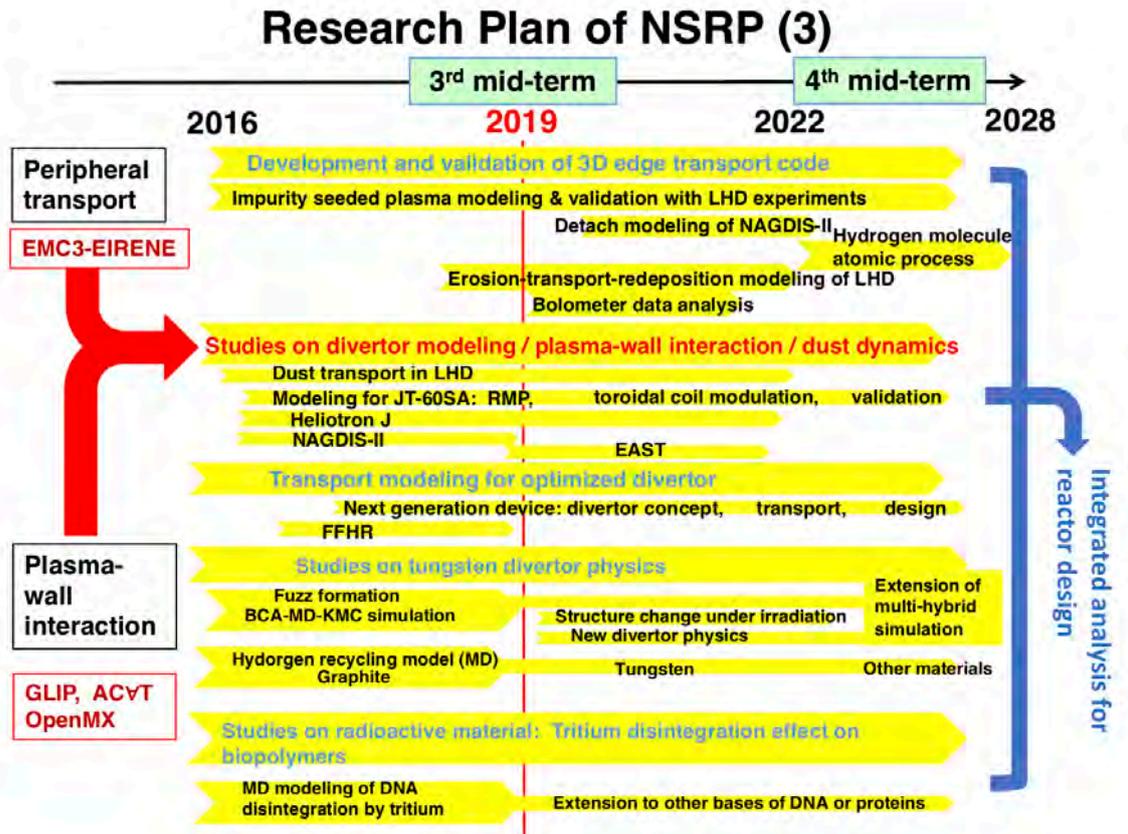


図 2.1-5 第 3~4 期中期 (2016~2028 年) の期間における数値実験炉研究プロジェクトの研究計画 (3): 周辺プラズマ輸送及びプラズマ壁相互作用に関する研究課題、シミュレーションコードの開発 (拡張・連結・統合)、検証や研究連携の過程

整備・拡張や LHD 実験結果との比較によるコードの検証・高度化等を掲げている。また、統合輸送シミュレーショングループで開発が進められてきた統合輸送コードに高精度の乱流輸送モデルを提供するため、乱流輸送シミュレーショングループでは、大規模ジャイロ運動論的乱流輸送シミュレーションから得られる乱流輸送係数及び乱流輸送フラックスを短時間で予測する簡約化輸送モデルの開発と応用が計画されている (図 2.1-4 参照)。他にも、研究グループ間連携の強化の好例として、高エネルギー粒子シミュレーショングループにより開発されたハイブリッドコードや運動論的コードを、LHD 実験における EGAM 振動の非線形発展・イオン加熱、アルフベン固有モードバースト現象の解析やプラズマ流体平衡・安定性グループの MHD コードの拡張 (図 2.1-4 参照) へ応用することが計画され、また、周辺プラズマ輸送シミュレーショングループとプラズマ壁相互作用シミュレーショングループの連携 (図 2.1-5 参照) が図ら

れた。さらに、数値実験炉研究プロジェクトでは、これまで開発してきた理論解析手法・シミュレーションコードを用いて、他のプロジェクトとの連携の下で、モジュラーコイル・連続巻線コイルそれぞれの場合のプラズマ閉じ込めを最適化する磁場配位の研究に積極的に関わり、核融合科学研究所の将来計画(6章参照)の策定や次期装置の設計に大きく貢献することを計画に加えている。

以上に述べた研究計画の遂行のため、数値実験炉研究プロジェクトでは、2.2～2.3章で示すような研究体制・環境の整備を行い、研究計画遂行に欠くことのできないプラズマシミュレータの高性能化に向けた活動を維持しながら、プラズマシミュレータを有効活用することにより、多くの優れた研究成果を創出する(3章参照)とともに、シミュレーション研究を基盤として、国内外の大学・研究機関間や研究分野間の連携(4章参照)を推進し、人材育成に貢献(5章参照)していく。

2.2 数値実験炉研究プロジェクトの研究体制

2.2.1 全体体制と運営方針

2.1章で述べた研究計画を遂行するための現時点における数値実験炉研究プロジェクトの研究体制を図2.2.1-1に示す。数値実験炉研究プロジェクトでは、研究総主幹が活動全体を統括し、全体会議や推進会議の運営、タスクグループ活動の推進、LHD実験計画プロジェクト・核融合工学研究プロジェクトや国内外の大学・研究機関との連携等を積極的に図っている。数値実験炉の構築を目指した大規模シミュレーション研究を推進する基礎母体として8つのタスクグループが組織され、各グループに中心となって組織・運営を行う幹事が配置されている。8つのタスクグループは、それぞれ、(1)プラズマ流体平衡・安定性(2)高エネルギー粒子(3)統合輸送シミュレーション(4)新古典・乱流輸送シミュレーション(5)周辺プラズマ輸送(6)プラズマ壁相互作用(7)多階層複合物理(8)シミュレーション科学基盤の研究課題に関わり、複数のタスクグループへの参加、タスクグループ間や実験グループとの研究連携が推奨されている。現在8つのタスクグループには、延べ138名が参加しており、この中に延べ31名の実験グループからの参加者と52名の所外からの参加者が含まれている(図2.2.1-2)。また、核融合研のシミュレーション研究者の中の多くが複数のタスクグループに参加しており、タスクグループ活動の連携の強化に貢献している。

推進会議は、議長としての研究総主幹、核融合理論シミュレーション・基礎物理シミュレーションの両研究系の2名の研究主幹、及びタスクグループの幹事で構成され、各タスクグループ及びプロジェクト全体の研究進捗状況の検証・調整や活動方

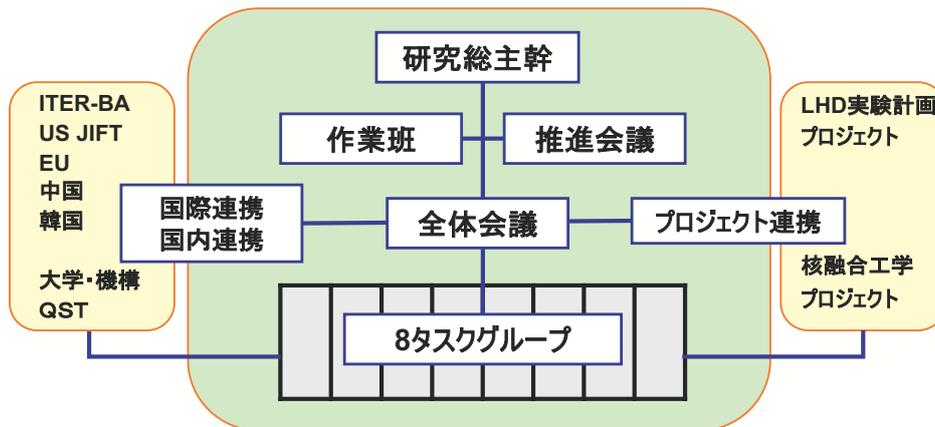


図 2.2.1-1 数値実験炉研究プロジェクトの研究体制

針に関する定期的な議論並びに決定を行う場として機能している。全体会議は、各タスクグループの研究活動状況、LHD 計画プロジェクト・核融合工学研究プロジェクトや国内外の大学・研究機関との共同研究について、プロジェクト全体で議論する場として定期的に関われ、そこでは、推進会議における議論内容の報告、プロジェクトに関連する国際会議やプラズマシミュレータの運用に関わる情報交換も行われる。また、核融合科学研究所内のファイル管理システム（サイボウズ）に数値実験炉研究プロジェクトの専用フォルダを設け、学術論文出版や国際会議等において発表されたプロジェクトの成果・マイルストーンズや関連資料をプロジェクト全体で保存・共有し、推進会議や全体会議において紹介し、各タスクグループの研究進捗状況の把握、計画立案、成果のプレスリリース等、プロジェクトの様々な活動に効率的に利用できるようにしている。

数値シミュレーションがその主たる研究手段である数値実験炉研究プロジェクトにとって、プロジェクト推進に最適なスーパーコンピュータの導入・更新と関連研究環境の整備が必須となる。これまで、共同研究用のマシンであるプラズマシミュレータの定期的な更新・性能向上を行うとともに、プラズマシミュレータが有効活用されるように計算機作業班を設けている。日常的なプラズマシミュレータの運用、関連研究環境の整備や共同研究者への様々なシステム利用支援は、計算機作業班等の活動やプログラム開発支援室の活用を通じて行われている（2.3 章を参照）。

ITER 計画・BA 活動を含めた多様な国際連携活動や国内外の大学・研究機関との共同研究に関しては、4章で示すように、担当者の配置や研究者の招聘・派遣を行うなど、COE として活動を積極的に推進している。また、実験結果との比較によるシミュ

グループ名	幹事	メンバー
プラズマ流体平衡・安定性	市口	14名(シミュ 9, 実験 3, 共同研究者 2)
高エネルギー粒子	藤堂	7名(シミュ 2, 実験 3, 共同研究者 2)
統合輸送シミュレーション	横山	28名(シミュ 4, 実験 13, 共同研究者 11)
新古典・乱流輸送シミュレーション	菅野	15名(シミュ 8, 実験 2, 共同研究者 5)
周辺プラズマ輸送	鈴木	20名(シミュ 4, 実験 5, 共同研究者 11)
プラズマ壁相互作用	中村	18名(シミュ 4, 実験 3, 共同研究者 11)
多階層複合物理	三浦	18名(シミュ 12, 共同研究者 6)
シミュレーション科学基盤	大谷	16名(シミュ 12, 実験 1, 共同研究者 3)

図 2.2.1-2 タスクグループ体制

レーション結果の検証やヘリカル型核融合炉の性能予測シミュレーション研究を行うため、LHD計画プロジェクト及び核融合工学研究プロジェクトとの研究連携も積極的に進められており、それぞれ、2.2.2.1 章及び 2.2.2.2 章で、その詳細を報告する。

全国の共同研究者との交流の場として、毎年6月に、核融合科学研究所において数値実験炉、LHD及び核融合工学の3つのプロジェクトに関する成果報告会が開催され、各プロジェクトやプロジェクト間連携の成果・進捗状況について、所外の共同研究者を含めて意見交換が行われている。さらに、毎年9月に所外からシミュレーション共同研究者を招いて、プラズマシミュレータシンポジウムを核融合科学研究所で開催し、数値実験炉研究プロジェクトの進捗状況やプラズマシミュレータを用いたシミュレーション共同研究の成果が報告・議論されるとともに、プラズマシミュレータの運用に関する意見交換・情報交換が行われる。

2.2.2 他のプロジェクトとの連携

2.2.2.1 LHD計画プロジェクトとの連携

多くの研究課題において、LHD計画プロジェクトとの連携が進展している。本章は連携の概説であり、個別のコードや具体的成果などは、次章以降を参照されたい。

LHD重水素実験の開始に伴い、同位体効果の考察が重要な課題の一つとなっている。名古屋大学、核融合科学研究所が中心になって開発が進められているブラゾフシミュレーションコードCKVを用いて、LHD実験の高 T_i プラズマ、高 T_e プラズマに対して

大規模シミュレーションを行った [2.2.2.1-1]。その結果、イオン温度勾配モードと捕捉電子モードの成長率が、重水素プラズマでは小さくなることが分かった。これは、温度プロファイルやイオン質量比の効果と考えられている。実際の実験でも、重水素プラズマの場合、軽水素プラズマに比べて熱拡散係数が小さくなることが分かっており、GKVコードの解析による同位体効果が実験結果によって確認されたと考えられる。

LHD周辺プラズマ中でのプラズマ、不純物等の輸送現象を解析するEMC3-EIRENEコードを用いた解析でも成果があった。LHD実験で行われた不純物パフによるデータメントを考察するために、ネオンパフ放電と窒素パフ放電それぞれを模擬したEMC3-EIRENE計算を行った。希ガスであるネオンは化学活性が低く、窒素は化学活性が高いことから、それぞれのリサイクリング係数を1と0、すなわち全て放出あるいは吸収として元素の特性を計算モデルに組み入れた。装置内に閉じ込められてネオン発光はトロイダルに広く分布する一方、窒素発光はガスパフ位置付近で電離した後、壁で失われるために局所性を持つ分布となった。また、不純物輸送及びプラズマ対向材料の損耗・再堆積を解析するために、ERO2コードの導入とEMC3-EIRENEとの統合についても開発が進められている。ERO2コードにより、LHDの特定の断面を切り出した2次元空間の不純物輸送解析を行うことが可能になり、プラズマ対向材料の損耗、発生する中性不純物原子、プラズマ内で電離したイオン、また、壁に到達した粒子の再堆積といった過程を含めた自己無同着な解析を目指して開発を進めた。

また、プラズマ中のダストの挙動も重要な課題である。そのため、DUSTTコードの導入を進め、EMC3-EIRENEと結合してプラズマ中のダストのふるまいを考察することが可能となった。ダストの混入位置と温度によってダストの侵入長が異なることが分かり、長時間放電時のダスト混入による放電終端現象などの解明が期待される。また、PPPLとの共同研究により、LHD装置へダストドロッパーを設置した。ドロッパーから放出されたダストがどのようにふるまうかをDUSTTコードの結果と比較した。今後、実験との比較が期待される。

MHD関連課題として、プラズマの回転が交換型不安定性の成長率と非線形過程に与える影響の考察が進んだ。実験データから再構築された2次元のプラズマの回転分布を磁気座標系上に3次元でマッピングすることにより、HINTコードで得られた3次元平衡を基にした解析が可能となった。その他、バーチャルリアリティ（VR）技術の実験解析への応用も進展している。

このように、LHD計画プロジェクトとの連携は、多岐にわたって進展しており、今後の更なる連携による成果の創出が期待できる。

[2.2.2.1-1] M. Nakata et al., Plasma Physics and Controlled Fusion Vol. 61 (2019) 014016.

2.2.2.2 核融合工学研究プロジェクトとの連携

核融合工学研究プロジェクトが主体となって設計活動が進められている LHD 型原型炉の設計や、定常運転における運転パラメータの定量的予測などに、統合輸送シミュレーショングループをはじめとする数値実験炉研究プロジェクトで開発・整備されたシミュレーションコード群が活用され、両プロジェクト間の連携が深化、多角化している。

LHD 型原型炉 FFHR-d1 [2.2.2.2-1] の定常運転シナリオの予測において、以前の研究はプラズマ中に流れる自発電流（ブートストラップ電流）の閉じ込め磁場への影響が考慮されていなかった。数値実験炉研究プロジェクトでは、オークリッジ国立研究所の D. A. Spong 博士らが開発した新古典輸送を計算する DKES/PENTA コード [2.2.2.2-2] を導入し、プラズマシミュレータで高速実行できるように整備を行ってきた。このコードを FFHR-d1 における核融合利得 $Q \sim 10$ の定常運転シナリオで想定されるプラズマに対して適用し、ブートストラップ電流と MHD 平衡計算を繰り返して自己無撞着な解を得た。その結果、約 0.55MA のプラズマ電流が流れることが分かったが、これによる磁場の回転変換の変化はわずかであり、無電流プラズマを想定して計算された FFHR-1 の定常運転シナリオの予測に対する影響は小さいことが分かった。この成果は、核融合研の後藤拓也助教筆頭の論文として 2017 年に Nuclear Fusion に掲載された [2.2.2.2-3]。

また、核融合工学研究プロジェクトではより小型な原型炉 FFHR-c1 の設計活動も進めており、広範囲の密度・温度パラメータ範囲を有する POPCON (Plasma Operation Contour) ダイアグラム上に、新古典エネルギー輸送と核融合出力の比、Mercier 安定性、 Q 値などを評価し、到達可能な運転領域の検討を行っている。さらに、ヘリカルコイルの巻き線則を変化させて閉じ込め性能と MHD 安定性の双方の最適化が行えないかの探索を行っている。これらの研究においても統合輸送解析スイート TASK3D-a など数値実験炉研究プロジェクトで整備してきたシミュレーションコード群が活用されている。FFHR-c1 の設計研究の成果は後藤拓也助教が 2018 年の IAEA-FEC において発表を行った [2.2.2.2-4]。

また、LHD 型原型炉を想定した液体金属ダイバータ概念 REVOLVER-D [2.2.2.2-5] が検討されている。そこではシャワー状に自由落下する溶融スズ (Sn) が想定されているが、そのプラズマへの影響を実際の核融合実験装置で検証することは難しく、数値モデリングが期待されている。そこで、プラズマへのリミター導入の影響に絞り、シャワーの複雑な構造を大幅に単純化した平面の固体リミターを仮定し、それを LHD に設置した場合の炉心プラズマへの影響を EMC3-EIRENE コードを用いて解析した。リ

ミターはポロイダル断面に平行な長方形平板とし、REVOLVER-Dと同様に横長断面のトラス内側の真空容器壁からプラズマに向かって挿入した。磁気軸は標準配位の $R_{ax} = 3.6$ mとし、プラズマパラメータはLHDに典型的な値とした。

閉じた磁気面に触れる位置以上にリミターをプラズマ側に近づけると、リミター位置以外も含めて、レグ領域に流れ出す熱・粒子束が顕著に減少し、ダイバータ配位からリミター配位へと連続的に移り変わることが示された。同時に、炉心電子温度がリミター配位へ変化後に減少を始め、その減少量はリミター位置に強く依存することが分かった。REVOLVER-Dで検討されているSnの電離・放射パワー等のデータベースが利用できなかったため、C/Si/Geという同族元素を用いたパラメータスキャンを行ってSnの特性を推測した。その結果、1%という実際よりも小さいスパッタリング収率を仮定した計算において、原子番号が増えるほど放射パワー損失が顕著に増え、Snでは炉心電子温度が大きく低下すると予想された。リミター位置への依存性も大きく、最外殻磁気面を切らない位置であれば、影響は軽微であったが、深い位置に設置することはできないことが示された。リミター位置や材料の選択に関して、定量的な評価の重要性を指摘した。この成果は論文 [2.2.2.2-6] に掲載されている。

ヘリカル型原型炉の設計では、建設時の組み立てや稼働開始後のメンテナンスなども考慮する必要がある。例えば、炉内の部品の取り付け・取り外しや移動を行う際の部品同士の干渉をあらかじめ検討して、部品の位置や組み立て工程・メンテナンス手順を決めなければならない。また、メンテナンスはロボットアームを利用して行うが、ロボットアームの設計とそれを動かす手順の検討も必要である。数値実験炉研究プロジェクトでは、これらの検討を効率よく進めるためのシステムとして、没入型バーチャルリアリティ装置 CompleXcope を使って、ロボットアームを含めた原型炉設計の設計データをバーチャルリアリティ空間に投影して、炉内部品の位置関係やロボットアームの動きを、正確に3次元で確認できるシステムを構築した(図 2.2.2.2-1)。このシステムを使うことで、自分自身が原型炉の中や傍らに立って、部品の取り付けや取り外し、ロボットアームの動きを、あらゆる方向から確認することができる。あるいは自分自身の「手」を仮想空間に投影することで、部品をつかんで動かしたりすることもできる。これにより、炉内部品の位置関係やロボットアームの動きを正確に把握し、部品同士がぶつからないかどうか、ロボットアームの動きやメンテナンス手順が適切かどうか等を効率よく検討できるようになった。

今後、両プロジェクトの連携研究を更に発展させ、FFHR 原型炉設計及び核融合研をはじめとした研究コミュニティの将来計画に関連して、最適化配位を持つ新規装置の設計や運転パラメータの予測等に取り組んでいく。

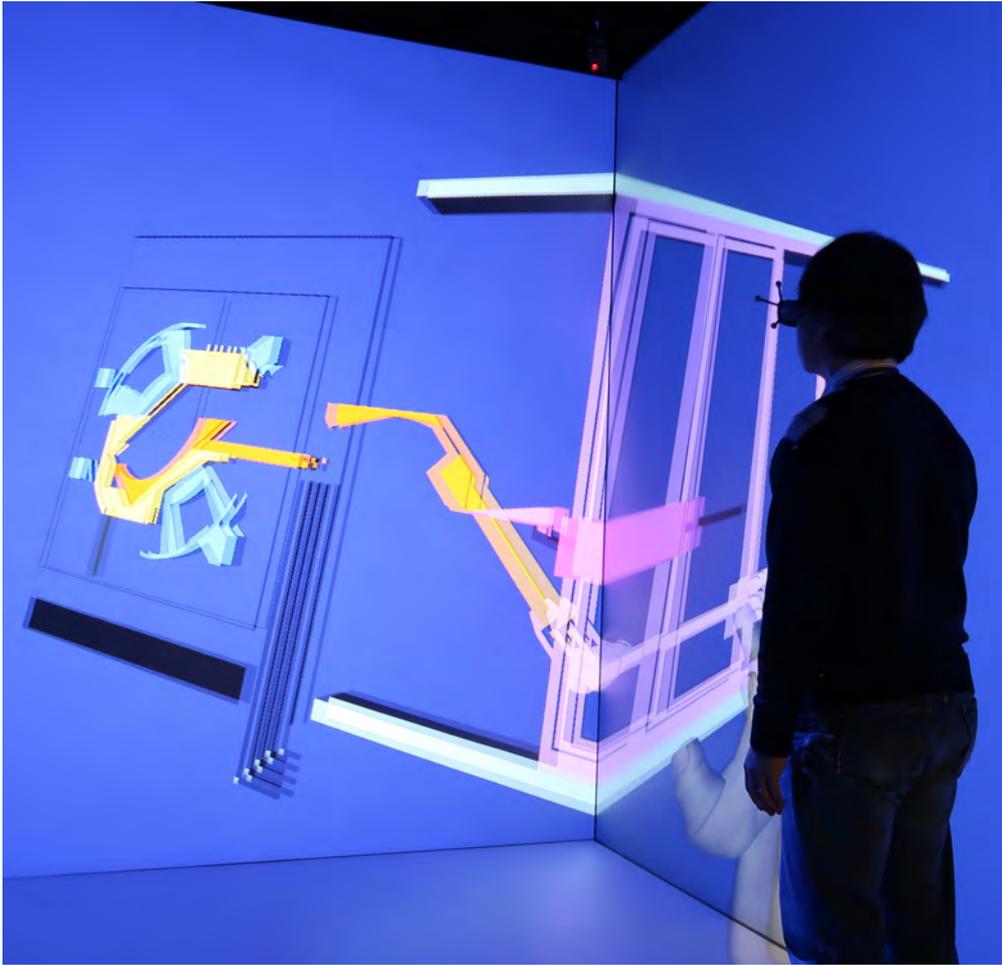


図 2.2.2.2-1 ヘリカル型原型炉の設計データをバーチャルリアリティ装置 CompleXcope に投影して、ロボットアームによる炉内部品の取り外しを確認している様子。

[2.2.2.2-1] A. Sagara et al., Fusion Eng. Des. Vol. 87 (2012) 594 ~ 602.

[2.2.2.2-2] D. A. Spong, Phys. Plasmas Vol. 12 (2005) 056114 (pp. 1 ~ 9).

[2.2.2.2-3] T. Goto et al, Nucl. Fusion Vol. 57, No. 6 (2017) 066011 (pp. 1 ~ 7).

[2.2.2.2-4] T. Goto et al., Nucl. Fusion Vol. 59, No. 7 (2019) 076030.

[2.2.2.2-5] J. Miyazawa et al., Fus. Eng. Des. Vol. 125, December (2017) pp. 227 ~ 238.

[2.2.2.2-6] G. Kawamura et al., Plasma Fusion Res. Vol. 13 (2018) 3403034 (pp. 1 ~ 5).

2.3 プラズマシミュレータ及び関連研究環境の整備

2.3.1 プラズマシミュレータの整備

核融合科学研究所では、数値実験炉研究プロジェクトの様々な研究課題に関する共同研究を推進するため、スーパーコンピュータ「プラズマシミュレータ」を中心とする大規模並列型計算サーバを運用している。これまでに、平成21年3月に日立製作所製SR16000モデルL2(128ノード)を、平成24年10月には中間レベルアップにより同社製SR16000モデルM1(322ノード構成)を、平成27年6月には富士通製PRIMEHPC FX100(2592ノード)を導入、運用してきた。これまで導入したいずれのスーパーコンピュータも高性能であり、プラズマ・核融合研究コミュニティの重要な計算資源として役割を果たしてきた。その中でもFX100は、平成27年7月(運用開始1か月後)の時点で、世界のスーパーコンピュータ性能の指標であるTop500リストにおいて世界27位、もう一つの指標であるHPCGベンチマークにおいて世界12位を記録し、極めて良好な性能を示した。

大規模並列型計算サーバ(FX100)の主な性能と利用状況を表2.3.1-1と表2.3.1-2にまとめた。大規模並列型計算サーバは、数値実験炉研究プロジェクトの大規模並列計算のための計算機”プラズマシミュレータ”(2448ノード)、LHDプラズマを中心に、関連する核融合プラズマや基礎プラズマの数値解析、中小規模のシミュレーション、装置設計やデータ処理に関する共同研究を支援することを目的として運用されるLHD数値解析サーバ(144ノード)と、これを支えるフロントシステム、データ解析を目的としたデータ解析サーバ、可視化処理サーバ等で構成されている。プラズマシミュレータとLHD数値解析サーバの管理・運用は、富士通株式会社(2015年3月までは日立製作所、以下同)の運用支援員の協力を得て計算機作業班が行っている。

管理・運用の具体的な作業は、利用者登録と計算機資源割当作業、ジョブクラス構成と運用スケジュールの決定、ハードウェア・ソフトウェア障害への対応、利用者向けWebページの開設等である。管理・運用に関する問題点を整理し改善策を検討するために、計算機作業班と富士通株式会社の関係者が出席して運用報告会を毎月1回開催している。Webページでは、利用の手引きの他、新着情報、オンラインマニュアル集、利用者からの質問とそれに対する回答をまとめたQ&A集、講習会資料、チューニングガイド等を掲載している。近年のインターネットセキュリティ環境を反映し、自然科学研究機構の情報セキュリティ監査室によるWebページ公開用サーバの脆弱性診断を受けるなど、セキュリティの確保に注意を払っている。さらに、年度初め(4月~7月)には利用者講習会を毎年度開催し、プラズマシミュレータ及びLHD数値解析サーバの利用方法、チューニング、OpenMPとMPI入門、AVS/Expressの利用方法等につい

て講習を行っている。上記のような管理運用に関わる様々な業務や、ユーザへの質問、開発支援等に対応するため、プラズマシミュレータの借入契約により、富士通株式会社運用支援員1名とプログラム開発支援員2名が核融合科学研究所プログラム開発支援室に常駐している。近年の大規模並列型計算サーバの大ノード化に伴い、プログラムの最適化、SMP並列化、MPI並列化、及び利用者が自身で行うそれらの作業への助言・提案が必要となった。例えば、プログラム開発支援員は、日立製作所製SR16000モデルM2運用期間(平成24年10月-平成27年3月)に158件のプログラム相談・最適化支援(所外利用者からの要望及び利用者に対する出張訪問を含む)を実施した。これに対し、平成27年6月以降の富士通株式会社製FX100運用期間(平成27年6月以降)は、プログラム相談件数221件(所外利用者からの要望及び利用者に対する出張訪問を含む)、プログラム最適化の実施22件、プログラム開発支援(プログラム開発支援員によるプログラムの改変を含む)は35件と、プログラム相談・最適化・開発支援の需要が大きく増大したことが分かる。

表2.3.1-1に大規模並列型計算サーバの主要性能を、表2.3.1-2にプラズマシミュレータ利用共同研究の課題等の状況を示す。近年の推移を見るため、今回の外部評価の対象期間外である、平成26年度以前もデータとして掲載した。

既に述べたように、大規模並列型計算サーバは、導入当初のTop500ランキングでの位置も高く、実性能に近いランキングであるHPCGランキングも、極めて高い高性能スーパーコンピュータであった。しかしながら、令和元年7月時点ではTop500において世界102位、HPCGにおいて38位と、その順位を大きく落としており、4年間の間に演算性能の相対的な陳腐化が進んでいることが分かる。現行の大規模並列型計算サーバは、当初予定では令和元年5月末に運用を終了する一方、平成30年度に更新のための入札を実施し、令和元年6月から次期プラズマシミュレータの運用を開始する計画であった。

次期プラズマシミュレータの更新計画に従い、スーパーコンピュータに関わる技術動向及び市場動向の調査のため、平成28年度から数次にわたり、代表的なスーパーコンピュータベンダー・CPUメーカー等の各社からのヒアリングを行うとともに、平成28年度、29年度のスーパーコンピュータ国際会議(Supercomputing, SC)への調査出張を行った。SCは単なる国際会議ではなく、会議場周辺のホテル等にスーパーコンピュータベンダーや各種関連企業が商談向けの会議場を展開する、巨大な商談の場でもある。各企業との個別の会合には、秘密保持契約を結んで参加し、これによって各社の最新の情報やロードマップが提示される。さらに、代表的なシミュレーションコード数本を用いて、スーパーコンピュータベンダー・CPUメーカー等各社に、機種更新後の性能の

推定を依頼した。(この性能推定が日本国外で行われる場合には、安全保障貿易管理の観点から、核融合科学研究所の該非判定を受けてから、性能推定依頼を行った。)このような技術・市場動向調査や性能推定の結果を踏まえ、次期プラズマシミュレータの入札を当初計画から一年延期し、平成31年度(令和元年度)に行うことになった。この後、平成30年度のSCへの調査出張や、スーパーコンピュータベンダー各社による再度の性能推定の結果を踏まえて、次期プラズマシミュレータについての要求要件を確定し、入札を実施した。この入札の結果、Type 10AEベクトル型演算装置(Vector Engine, VE)を搭載したシステム SX-Aurora TSUBASA A500-64 後継機(モデル名未定)を含むシステムを提案した日本電気株式会社が落札した。(性能は表 2.3.1-2 を参照。)

数値実験炉研究プロジェクトでは、5次元 Vlasov/Boltzmann シミュレーションや3次元流体シミュレーションコードによる大規模並列シミュレーション研究を推進している。今後もこの研究力を維持するためには、世界トップクラス的环境が必要である。今回の更新では、プラズマシミュレータの理論演算性能を現行機種と比べて4倍以上に向上させるという目標を達成した。(正式には、令和2年5月末日までに検収を終えた段階で、目標を達成したことになる。)他方、スーパーコンピュータを取り巻く環境は近年特に激しく変化しているため、次の更新を見通すことは容易ではない。CPUとメモリーについては、CPUあたりのコア数の増加が続き、メモリーバンド幅(B)に比べてCPUの演算速度(F)の向上の方が速い傾向が続いている。これは、この2つの比率(所謂B/F比)が低下し、理論演算性能に比べて実効演算性能が向上しにくいことを意味しているため、プラズマシミュレータの要求仕様を決定することが、今後さらに困難になると考えられる。また、有力なインターコネクトスイッチ InfiniBand を製造販売する Mellanox 社が NVIDIA 社の傘下に入る一方、Intel 社は Omnipath Architecture 後継スイッチの開発を取りやめる方針を表明するなど、企業の離合集散やロードマップの変化が極めて激しい。このような状況下で今後のプラズマシミュレータの更新に備えるため、SC 国際会議への調査出張など継続的な技術動向調査、市場動向調査を行う予定である。

2.3.2 バーチャルリアリティ装置の整備

時間的にも空間的にも複雑な形や動きを示すプラズマのシミュレーション結果を調べ、バーチャルリアリティ(VR)空間で再現した実験装置の中にシミュレーション結果を同時に映し出すことによって装置開発に寄与したり、また、実験観測データを3次元空間で解析を進めたり、将来の核融合炉の組み立て、メンテナンス作業をVR空間で検討して設計研究に寄与するため、CAVE型VR装置 CompleXcopeをはじめとする

表 2.3.1-1 大規模並列型計算サーバの主要性能

期間	機種	演算性能	主記憶容量	外部記憶装置容量
H21.3～H24.8	SR16000 モデル L2 128 ノード	77 TFlops	16 TB	0.5 PB
H24.10～H27.3	SR16000 モデル M1 322 ノード	315 TFlops	40 TB	2.0 PB
H.27.6～R2.2	PRIMEHPC FX100 2592 ノード	2.62 PFlops	81 TB	10.0 PB
R2.6～R7.5	NEC(モデル名未定) 4320VE	10.5PF	202TB	32.1PB

表 2.3.1-2 プラズマシミュレータ大規模並列計算サーバの利用状況。運用・使用時間は、ノード時間積×ノード当たりのコア数で計算。

年度	共同研究 課題数	利用者数 (所内/所外)	ジョブ本数 ジョブ本数	A:運用時間 (千 CPU 時間)	B:使用時間 (千 CPU 時間)	利用率 (B/A)
H24 (phase I)	56	169(60/109)	4,188	14,306	13,395	93.63%
H24 (phase II)	同上	同上	12,496	47,901	40,102	83.72%
H25	53	158(59/99)	19,548	87,457	75,770	86.64%
H26	59	162(62/100)	21,540	85,359	76,763	89.93%
H27	60	166(53/113)	46,078	564,836	355,032	62.9%
H28	65	184(50/134)	70,041	703,882	546,752	77.7%
H29	67	194(45/149)	90,730	698,944	574,329	82.2%
H30	68	194(50/144)	96,796	701,860	614,596	87.6%
H31.4～R01.9	68	183(54/129)	31,407	288,115	347,994	82.8%

VR装置の整備を進めた。

プラズマシミュレータの更新に伴う出力データ量の爆発的な増加が予想されたので、より大規模となるシミュレーションデータをバーチャルリアリティ空間に円滑に表示して3次元的に解析・研究するため、処理能力が高いハイスペックなCompleXscope用のコンピュータシステムを導入した(図 2.3.2-1)。CompleXscopeには分散メモリシステムとなるPCクラスターと大きな共有メモリをもつLinux機がある。PCクラスターはWindowsベースであるため、一般的なソフトウェアを活用した表示に優れているが、分散システムであるため、巨大なシミュレーションデータの表示には不向きである。他方、Linux機では大きな共有メモリを使って巨大なシミュレーションデータを表示することに優れている。VR可視化を行いたいデータの性質に合わせて、それぞれのコンピュータシステムの特色を生かした可視化を行っている。表 2.3.2-1 に現在、運用しているCompleXscopeのコンピュータシステムのスペックをまとめた。

CompleXscopeで利用してきたプロジェクタ Christie Mirage S+3Kは平成28年1月1日をもってサポートが終了したため、保守部品の確保保証が終了した。今後、故障した場合、保守部品の在庫があれば有償で修理ができるが、なければ修理ができなくなる。今後もVR可視化研究を推進するためには、安定してCompleXscopeを運用する必要がある。そこで、平成28年12月にプロジェクタを更新してChristie Mirage WU7KMを導入した(図 2.3.2-2)。表 2.3.2-2 にChristie Mirage WU7KMのスペックをまとめた。

平成28年にヘッドマウントディスプレイ(HMD)という頭にかぶるタイプのVR装置がメーカー各社から一斉に販売された。それらは高品質なVRを体験できる上、それまでと比べ格段に安価であったため、瞬く間に市場に出回った。核融合研においてもこの安価なHMD(Oculus Rift)を導入して、その利活用のための研究を推進している(図 2.3.2-3)。HMDとCompleXscopeとの違いは、HMDは基本的に一人用であるのに対し、CompleXscopeは立体映像が投影された大きなスクリーンで部屋を囲っているため、多人数で一緒にひとつのVR空間に入ることができるので、同時にひとつのモノを見ながら議論を行うことができる。大学共同利用機関として共同研究を進めるため、今後もCompleXscopeによるVR可視化研究を推進していきたいと考えている。

その一方で、HMDは広く社会に普及していることから、CompleXscopeとHMDの双方で研究成果を活用できるような環境整備も進めている。この環境整備における問題点は、異なる可視化デバイスには異なる可視化開発環境があり、デバイスに合わせてその都度、開発をやり直さねばならないことである。この点を解決する方法の一つとして、全ての場合に利用可能な汎用的開発環境を用意するため、ゲーム開発エンジンUnityを活用した可視化研究を進めている。Unityはスマートフォンなどで利用されているゲームの開発にも使われるエンジンで(図 2.3.2-4)、使いやすいユーザイン

ターフェースを備え、様々な実行ファイル出力にも対応している(例:Windows、Linux、Android、iOS、WebGLなど)。また、多様な出力装置にも対応しており(例:Oculus Rift, HTC VIVE, WindowsMR, zSpace)、豊富なアセットが公開されている。CAVE型VR装置であるCompleXcopeにUnityで開発した可視化ソフトウェアを表示するためのミドルウェアMiddleVRも導入した。Unityを中心とした可視化ソフトウェア開発環境を整えている。以上の環境を使って、共同研究の推進や社会への発信を進めていきたいと考える(詳細は3.3.5.12を参照)。

シミュレーションデータの解析でAVS/Expressがよく活用され、プラズマの3次元的な立体構造の解析やその時間変化が調べられている。このAVS/Expressで3次元的に表現されたプラズマをVR空間で立体的に解析するため、AVS/Express MPEを活用できる環境を整えている。

CADデータを基に作成された写実的な表現の実験装置内に、シミュレーションデータを同時にVR可視化をすることで、実験観測ポートからの視野の確認やプラズマと実験装置の空間的な相対関係の確認などを行うことは、炉設計支援において重要な役割を果たす。異なるソフトウェアで可視化された画像データを一つの画像データとしてVR空間で表示することができるソフトウェアEasyVR/FusionVRを活用できる環境を整えている。

将来のヘリカル型原型炉の設計研究へ貢献するため、旭エレクトロニクス社製の可視化ソフトウェアVirDSEを導入し、CADソフトウェアのデータを直接読み込んでCompleXcopeに投影する可視化環境を構築した。このソフトウェアはVR空間内で、部品の組付けや干渉判定、作業検証などを行うことができる(詳細は3.3.5.10を参照)。

表 2.3.2-1 CompleXcope用コンピュータシステム。

	Linux	PC クラスタ
導入年度	令和元年度	平成 28 年度
筐体	HP Z8 G4	HP Z840 ×2
OS	Red Hat Enterprise Linux 7.7	Windows10 Pro (64bit)
CPU	インテル Xeon(R) Gold 6128 プロセッサ (3.4GHz,6 コア)×2	インテル (R) Xeon(R) E5-2637v4 プロセッサ (3.50GHz, 4 コア)×2/ 筐体
メモリ	384GB	128GB/ 筐体
記憶媒体	1TB SSD×2	2TB HDD×2/ 筐体
グラフィックカード	NVIDIA RTX 6000×2	NVIDIA Quadro P6000×2/ 筐体



図 2.3.2-1 CompleXscope のコンピュータシステム。机の上に乗っている 3 台のマシンのうち、右 2 台が PC クラスタであり、左 1 台が旧 Linux マシンである。机の下の右が Linux マシンであり、左が UPS である。奥の機械が立体音響装置である。



図 2.3.2-2 CompleXcope のプロジェクタ Christie Mirage WU7KM。



図 2.3.2-3 ヘッドマウントディスプレイ Oculus Rift。



図 2.3.2-4 Unity のインターフェース。

表 2.3.2-2 CompleXcope用プロジェクタ。

	Christie Mirage WU7KM
投影方式	DLP方式
パネル解像度	WUXGA(1920×1200ピクセル)
光出力(最大)	センタールーメン：6,930(2灯時) / 3,465(1灯時) ANSIルーメン：6,300(2灯時) / 3,150(1灯時)
コントラスト比	最大10,000:1 / 650:1
対応走査周波数	(水平) 15.75kHz～120kHz (垂直) 23.97Hz～150Hz

3 数値実験炉研究プロジェクトの研究成果

3.1 数値実験炉研究プロジェクトの研究成果の概要

平成 27 年度 (2015 年度) に行われた前回の外部評価の提言の後、1.3 章で示した第 3 期中期計画に基づき、数値実験炉研究プロジェクトの目標 (2.1 章) の達成のため、プラズマシミュレータや関連する研究体制 (2.2 章)・研究環境 (2.3 章) の整備を進め、各研究グループ間の連携や国内外の研究機関との共同研究の強化によって数値実験炉の構築に向けたシミュレーションコードの開発・応用や関連する学術体系化を推進し、それによって生み出された研究成果の概要について以下に述べよう。

数値実験炉研究プロジェクトでは、第 3 期中期目標・中期計画 (1.3 章) に掲げた数値実験炉の構築と核融合科学・関連理工学の学術的体系化を目指し、各研究グループ・プロジェクト間の連携や国内外の研究機関との共同研究の強化によって、プラズマシミュレータを有効活用した理論シミュレーション研究を進め、数値実験炉を構成する様々なシミュレーションコードの整備・拡張を行い (3.2 章)、それらを用いることによって、核融合プラズマ、関連する基礎物理や可視化等のシミュレーション科学基盤研究の分野において多くの成果を上げている (3.3 章)。

Achievements during 2016-2019

Item	Number
Refereed Journal Papers	266
PRL / Nature Comm / Sci Rep	3 / 2 / 1
PoP / NF / PPCF	37 / 60 / 24
Invited presentations at international conferences except IAEA-FEC	44
Presentations at IAEA-FEC 2016 & 2018 (oral)	83 (18)
Invited presentations at domestic conferences	10
Awards to NSRP members of NIFS	10

Selected in Nucl. Fusion Highlights 2016
Y. Todo et al., Nucl. Fusion 56, 112008 (2016)
Fast ion profile stiffness due to the resonance overlap of multiple Alfvén eigenmodes

Selected as Editor's Pick of Phys. Plasmas
S. Matsuoka et al., Phys. Plasmas 25, 022510 (2018)
Neoclassical transport benchmark of global full-f gyrokinetic simulation in stellarator configurations

Ranked 12th of Top 15 Most Downloaded Articles in the past year from Phys. Plasmas
S. Toda et al., Phys. Plasmas 26, 012510 (2019)
Modeling of turbulent particle and heat transport in helical plasmas based on gyrokinetic analysis

図 3.1-1 (左) 平成 28 年 (2016 年) から令和元年 (2019 年) の期間における数値実験炉研究プロジェクト研究関連の査読付き学術論文の出版、国際会議・国内会議における招待講演、核融合エネルギー会議における論文発表や核融合科学研究所に属するプロジェクトメンバーの受賞の件数、(右)Nuclear Fusion 誌ハイライト論文、Physics of Plasmas 誌注目論文 (Editor's pick) 及び Physics of Plasmas 誌掲載論文年間ダウンロード数 12 位 論文

第 3 期中期目標・中期計画に掲げられた数値実験炉研究プロジェクトに関わる項目は、以下のように要約することができる。

- プラズマシミュレータを有効活用して、数値実験炉の構築に向けた 3 次元シミュレーションコードの整備・拡張・高精度化及び統合化のための研究を進める。
 - 平成 31 年度までに、コアプラズマにおける乱流輸送のモデル化と統合輸送コードへ組み込む。
 - 各種輸送コードに複数イオン種効果を取り込む。
 - タングステンを中心とするプラズマ対向材の物性値評価に必要であるプログラミングの改善や新たなモデルの構築により分子動力的シミュレーション技法を開発する。

– LHDプラズマを始めとする磁場閉じ込めプラズマの3次元平衡、輸送、不安定性、非線形発展についての実験結果との照合によりコードの完成度を高める。

- 関連する基礎物理シミュレーションを推進する。
- 国内連携やITERを含めた国際協力を促進する。
- 2019年度中に、プラズマシミュレータの性能を現行機種と比べて4倍以上に向上させる。プラズマシミュレータの共同利用率を100%に維持する。

ここでは、上記のそれぞれの項目に示された計画に沿って得られた成果の概略について述べよう。より詳細な説明は後続の3.2章・3.3章で行われる。

- 「プラズマシミュレータを有効活用して、数値実験炉の構築に向けた3次元シミュレーションコードの整備・拡張・高精度化及び統合化のための研究を進める」

上記の項目に沿って、3.2章・3.3章に示すように、複雑な3次元空間構造を持つヘリカルプラズマにおけるMHD平衡・安定性・非線形発展、高エネルギー粒子、新古典輸送・乱流輸送、周辺プラズマ・プラズマ壁相互作用をそれぞれ扱う高精度のシミュレーションコード及び統合輸送コードの整備・拡張が進められた。その中でも、特筆すべき3件の主要成果について以下に記す。プラズマ流体平衡・安定性及び高エネルギー粒子の両タスクグループ間の連携により、熱的イオンに対する運動論コード(MEGA)がMHDコード(MIPS)に統合され、LHDにおける抵抗性バルーニングモードに対する熱的イオンの安定化効果が明らかにされたことである(3.3.1.6章)。また、中性粒子輸送コード、周辺プラズマ・不純物イオン輸送コード及び分子動力学コードの統合化によりLHDの水素分子密度分布の計算が可能となった(3.3.4章)。さらに、ヘリカルプラズマにおける新古典輸送・乱流輸送を同時に計算することを目的とする非常に大規模な大域的ジャイロ運動論コード(3.3.2.6章)の拡張が進められたことは注目に値する。

– 「平成31年度までに、コアプラズマにおける乱流輸送のモデル化と統合輸送コードへ組み込む。」

LHDプラズマに対する大規模ジャイロ運動論的乱流シミュレーションで得られる乱流輸送フラックスを短時間で再現するために、イオン・電子に対する熱拡散係数モデル及び準線形フラックスモデルが構築され、統合輸送コードに組み込まれた(3.3.2.1章)。また、関連して、量子科学技術研究開発機構との共同研究により、局所乱流輸送シミュレーションモデルと巨視的輸送方程式と連成させた大域輸送シミュレーションコードの開発が進展し、トカマクプラズマにおける定常パワーバランス状態におけるイオン温度分布の計算が可能となった(3.3.2.2章)。

– 「各種輸送コードに複数イオン種効果を取り込む。」

新古典輸送シミュレーションを実行するドリフト運動論コード FORTEC-3D(3.3.2.8章)・GNET(3.3.3.3章)や微視的不安定性・乱流輸送シミュレーションを実行するためのジャイロ運動論コード GKV(3.3.2.4章)が複数イオン種効果を扱うことができるよう拡張された。また、統合輸送コード TASK3D-a(3.2.2.1章)・TASK3D-p(3.2.2.2章)にも複数イオン種効果を取り入れられた。これらのコード拡張により、不純物や軽水素・重水素が混在する LHD 重水素実験プラズマや重水素・三重水素が混合した ITER 燃焼プラズマ (4.4.3章参照) に対する輸送シミュレーションが可能となった。

– 「タングステンを中心とするプラズマ対向材の物性値評価に必要であるプログラミングの改善や新たなモデルの構築により分子動力学的シミュレーション技法を開発する。」

ヘリウムプラズマが照射されたタングステン・プラズマ対向材の物性の変化を扱うシミュレーションを実行するため、2衝突近似 (BCA)・運動論的モンテカルロ法 (KMC)・分子動力学 (MD) からなる新しいマルチ・ハイブリッド・シミュレーション技法を開発し、ヘリウムプラズマ照射により誘起されるタングステン・ファズ構造形成過程のシミュレーションによる再現に成功した。また、FDTD法を用いた電磁場シミュレーションによって、タングステン・ファズ構造における光学反射率低下の物理機構の解明を行った。

– 「LHDプラズマを始めとする磁場閉じ込めプラズマの3次元平衡、輸送、不安定性、非線形発展についての実験結果との照合によりコードの完成度を高める。」

MEGA コードを用いた高エネルギー粒子・MHD ハイブリッドシミュレーションにより、LHD 実験における高エネルギー粒子駆動測地的音響モード (EGAM) の非線形発展・イオン加熱やアルフベン固有モードバースト現象、DIII-D 実験における高速イオン分布硬直性が再現された (3.3.3.1章)。また、JT-60U 実験データに対して、ジャイロ運動論コード GKV による乱流輸送シミュレーションを実施し、コア領域におけるイオン・電子熱輸送フラックスの径方向分布の観測結果を、計測誤差程度の範囲内で再現することが確認された (4.4.3章)。複数イオン種 GKV コードによるプラズマ乱流輸送における水素同位体質量効果のシミュレーション及びLHD重水素実験による検証が行われた (3.3.2.5章)。その結果、高イオン温度及び高電子温度プラズマのそれぞれの場合に対して、LHD重水素実験における観測された閉じ込め改善は、シミュレーション結果と定性的に一致することが示された。複数イオン種効果を取り入れた

局所新古典輸送コード DKES/PENTA と乱流輸送コード GKV を用いた LHD プラズマにおける不純物輸送の総合的な運動論シミュレーション研究が進展した (3.3.2.8 章)。TASK3D-a(3.2.2.1 章) は LHD 重水素実験結果解析用に拡張され、上記のような輸送シミュレーションと実験結果の比較のためのベースとなるデータを供給している。他にも、FORTEC-3D コードによる両極性径電場のシミュレーション結果と W7-X や TJ-II 等のヘリカル装置における観測結果との比較 (4.3.2.2 章)、MIPS コードを用いた 3 次元 MHD 非線形シミュレーションによる RFP 装置 (RELAX) におけるヘリカル構造形成の再現 (4.1.3.4 章)、周辺プラズマ・不純物輸送コード EMC3-EIRENE の Heliotron J、NAGDIS-D、GAMMA10/PDX、EAST 装置の周辺プラズマモデリングへの適用 (3.3.4 章) 等、数値実験炉研究プロジェクトで開発されたコード群は、LHD を含めた国内外の様々な装置に対して適用され、実験結果との比較によるコードの検証や改良が進展している。

- 「関連する基礎物理シミュレーションを推進する。」

3.3.5 章に示されるように、核融合プラズマ研究に関連する基礎物理シミュレーションも多く成果を上げている。MHD や拡張された流体モデルに基づいて、3 次元 Hall MHD 乱流 (3.3.5.1 章)、交換型不安定性・テアリング不安定性の 2 次元 MHD シミュレーション (3.3.5.2 章) や円柱プラズマの二流体テアリング不安定性 (3.3.5.3 章) の研究が進められた。また、様々な粒子シミュレーション技法が開発され、磁気リコネクションにおけるイオン加熱機構の解明 (3.3.5.6 章)、非線形磁気音波中の平行電場の解析 (3.3.5.7 章)、境界層プラズマにおけるフィラメント構造形成の解析 (3.3.5.5 章) や高速点火レーザー核融合プラズマのシミュレーション (3.3.5.8 章) 等の研究が進展した。さらに、VR 可視化に関しても、共同研究によって多くの研究成果が生み出され、シミュレーション結果の解析や炉設計に役立てられた (3.3.5.10-16 章)。

- 「国内連携や ITER を含めた国際協力を促進する。」

核融合理論・シミュレーションを基盤として、国内外の多くの大学・研究機関との共同研究や ITER を含めた国際協力が促進された。詳細は 4 章に記す。

- 「平成 31 年度中に、プラズマシミュレータの性能を現行機種と比べて 4 倍以上に向上させる。プラズマシミュレータの共同利用率を 100 % に維持する。」

令和 2 年 (2020 年)6 月に、現行機種と比べて 4 倍以上の演算性能を有するプラズマシミュレータの運用を開始する予定である。2.3.1 章に述べたように、スーパーコンピュータに関わる技術・市場動向調査や性能推定の結果を踏まえ、目標とする演算性能を達

成するために、次期スーパーコンピュータの入札を当初計画から一年延期することになった。また、プラズマシミュレータの共同利用率は、100%に維持されている。

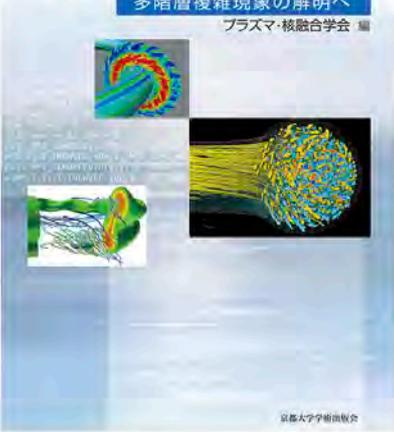
プラズマシミュレーション 多階層複雑現象の解明へ

京都大学学術出版会
プラズマ・核融合学会 編

Plasma simulation
プラズマシミュレーション

多階層複雑現象の解明へ

プラズマ・核融合学会 編



京都大学学術出版会

A5並製・400頁 ISBN: 9784814001835
発行年月: 2018/12 本体: 3,600円(税別)

監修 佐野史道(京大) 編集委員長 岸本泰明(京大)

執筆者

岸本泰明(京大)	堀内利得(核融合研)
今寺賢志(京大)	洲鎌英雄(核融合研)
長友英夫(阪大)	石黒静児(核融合研)
内藤裕志(山口大)	渡邊智彦(名大)
三浦英昭(核融合研)	矢木雅敏(量研機構)
藤堂泰(核融合研)	滝塚知典(阪大)
福山淳(京大)	長谷川裕記(核融合研)
伊藤篤史(核融合研)	

目次

- 第1章 プラズマの階層性・複合性とシミュレーションが果たす役割
- 第2章 プラズマの階層性と基礎方程式
- 第3章 数値シミュレーション法の基礎
- 第4章 単一階層モデルによるシミュレーション手法
- 第5章 並列化手法の基礎
- 第6章 多階層・複合系プラズマのシミュレーション手法
- 第7章 プラズマシミュレーションの最前線

図 3.1-2 教科書「プラズマシミュレーション：多階層複雑現象の解明へ」

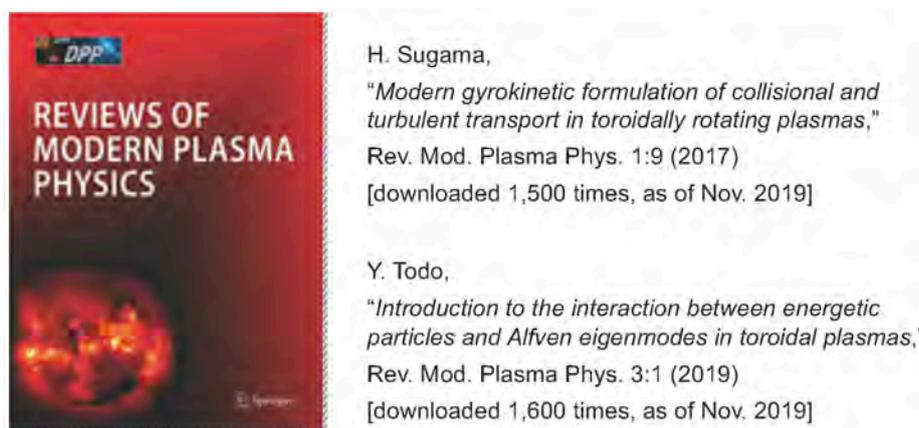


図 3.1-3 アジア太平洋物理学会連合プラズマ物理部門 (AAPPS-DPP) の総説論文誌 Review of Modern Plasma Physics に数値実験炉研究プロジェクトから 2 編の論文が出版され多数ダウンロードされている。

以上に述べたように、数値実験炉研究プロジェクトでは、第3 期中期目標・中期計画に沿って、着実に研究が進展し、多くの成果が上げられた。平成 28 年 (2016 年) から令和元年 (2019 年) の期間における数値実験炉研究プロジェクト関連の査読付き学術論文の出版、国際会議・国内会議における招待講演、核融合エネルギー会議における論文発表や核融合科学研究所に属するプロジェクトメンバーの受賞の件数を図 3.1-1 (左) に示す。過去 4 年弱で、総数 266 編の数値実験炉研究関連の査読付き学術論文が出版され、国際 (国内) 会議での招待講演が 44 (10) 件、Physical Review Letter、Nature Communications、Scientific Reports 等の高インパクト学術雑誌へ掲載論文が 6 編、核融合科学研究所に属するプロジェクトメンバーによる日本物理学会若手奨励賞 (3 件) ・プラズマ核融合学会学術奨励賞等の受賞が 10 件あり、研究成果に対する高い評価を得た。図 3.1-1 (右) に示されるように、上記の論文の中には、Nuclear Fusion 誌の 2016 年ハイライトに取り上げられたもの、Physics of Plasmas 誌において、編集者により注目論文 (Editor's pick) に選ばれたものや、同じく Physics of Plasmas 誌の膨大な掲載論文の中から年間ダウンロード数が 12 位にランクされたものがあり、数値実験炉研究プロジェクトから国際的に高いレベルの研究成果が上げられていることが分かる。

図 3.1-2 に示すように、数値実験炉研究プロジェクトは、教科書「プラズマシミュレーション：多階層複雑現象の解明へ」の出版に関与し、核融合科学研究所スタッフのプロジェクトメンバーが本教科書の執筆者のほぼ半数を占める。また、プロジェクトから、シュプリングァー・ネイチャーよりアジア太平洋物理学会連合プラズマ物理部門 (AAPPS-DPP) の総説論文誌として創刊された Review of Modern Plasma Physics に、

2 編の論文が出版され、多数ダウンロードされている(図 3.1-3)。上記の教科書・解説記事の出版の他にも、プラズマ・核融合学会誌からプロジェクトレビュー記事 [3.1-1]、オーバビュー論文 [3.1-2] や統合コードに関する特集記事 [3.1-3] を出版する等、核融合プラズマ研究の学術体系化に大きく貢献している。さらに、アメリカ科学振興協会(AAAS)が提供するオンラインニュースサービス EurekaAlert(図 3.1-4) や新聞(図 3.1-5)等を通じて、数値実験炉研究プロジェクトはその研究成果の情報発信にも努めている。

[3.1-1] 堀内利得, 「プロジェクトレビュー: 核融合科学研究所における数値実験炉研究プロジェクト」, プラズマ・核融合学会誌 第 92 巻, p.785 (2016).

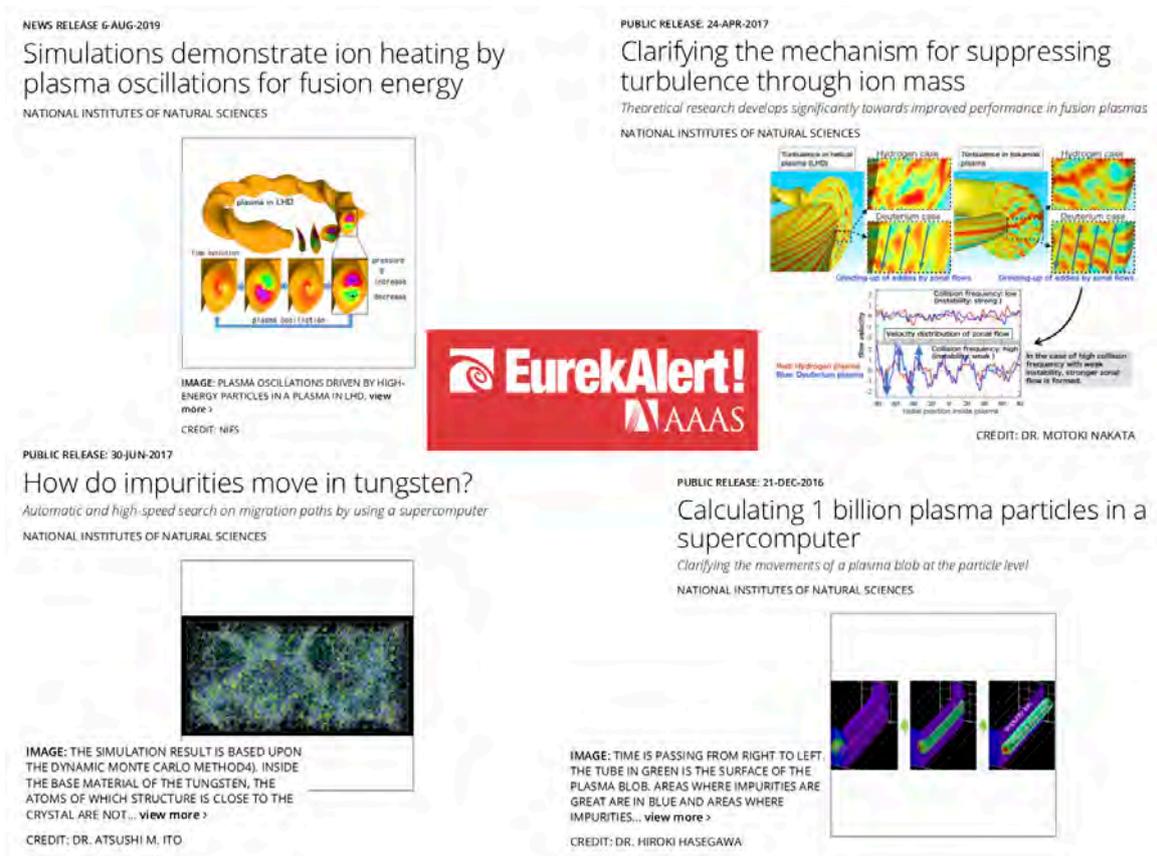


図 3.1-4 アメリカ科学振興協会(AAAS)が提供するオンラインニュースサービス EurekaAlert による研究成果の情報発信

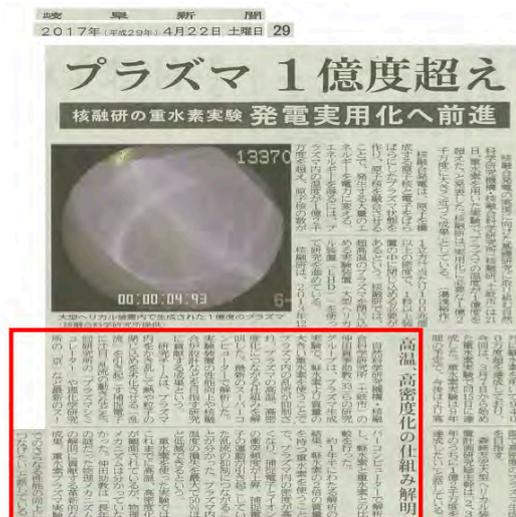


図 3.1-5 数値実験炉研究プロジェクト関連の新聞記事

- [3.1-2] H. Sugama and the Numerical Simulation Reactor Research Project Group, “Recent Progress in the Numerical Simulation Reactor Research Project,” Plasma Fusion Res. 14, 3503059 (2019).
- [3.1-3] 横山雅之, 佐竹真介, 本多充, 相羽信行, 林伸彦, 矢木雅敏, 藤田隆明, 村上定義, 關良輔, 山口裕之, 奴賀秀男, 「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 4. 統合コードを使った実験解析・物理的解析・運転シナリオ構築」, プラズマ・核融合学会誌 第95巻, p.444 (2019).

3.2 数値実験炉を構成するシミュレーションコードの研究開発

3.2.1 大規模シミュレーションコードの整備・拡張

3.2.1.1 シミュレーションコード群の全体像

数値実験炉研究プロジェクトでは、(1) 数値実験炉の構築、(2) 核融合プラズマの物理機構解明とその理論体系化を推進するために必要なシミュレーションコード及びツールを、独自開発や他機関との協力によって整備している。表 3.2.1.1-1 にシミュレーションコード群を LHD プラズマ実験と関連の深いコードを中心に抜粋して示している。LHD プラズマのシミュレーションのために、3次元実形状コードが多数整備されている。LHD 実験に直接適用された代表的なコードとして、3次元MHD平衡を求める HINT コード、平衡解を基に3次元MHD非線形時間発展を追跡する MUTSU/MINOS コード、MIPS コード、粒子運動とMHDを結合して時間発展を追跡する MEGA コード、3次元空間での新古典輸送を解明する FORTEC-3D、ジャイロ運動論モデルにより運動論的輸送現象を解明する GKV 及び GKV-X、周辺プラズマ解析の EMC3-EIRENE、さらに様々な3次元物理過程をモジュールとして取り込み統合した輸送コード TASK3D などが所内外の共同研究により整備され、LHD 実験との比較、検証が行われている。

表 3.2.1.1-1 シミュレーションコード一覧1（現所内メンバーが中心に開発したコード（アルファベット順））

名称	目的	手法
ACVT	固体材料へ粒子を照射した場合の反射率及びスパッタリング率、並びに、入射粒子の侵入分布及び材料の構造変化の評価	二体衝突近似法
ACVT-MD	固体材料へプラズマ粒子が連続照射した場合の反射やスパッタリング現象及び材料の構造変化を解明する	分子動力学法及び二体衝突近似法によるハイブリッドシミュレーション
AIScope	分子動力学及び二体散乱近似で計算した粒子の軌跡を可視化する。また、密度汎関数法で得られた電子密度分布を可視化する。	ポリゴンによるレンダリング、ポイントスプライトによる高速レンダリング、3D テクスチャによる疑似レイキャスティング。3D printing 向けのデータ出力機能の実装。
AURORA	電磁流体コードと弱電離プラズマを記述する流体コードに電流不安定性による微視的挙動を計算するための開放系粒子コードを連結させ、さらに、同不安定性によって加速された粒子による電離効果を取り入れた連結階層シミュレーションコード。	有限差分法による MHD コードと Particle in Cell 法による開放系静電粒子コードを、連結階層アルゴリズムにより連結。粒子コードでは、改良型定電流モデルを用いている。
AutoKMC	材料中の拡散経路自動探索	粒界構造やアモルファス構造など、非結晶部分における不純物拡散の経路を自動的に算出するコード。GLIPS コードによる局所 MD において Nudged Elastic Band(NEB) 計算を行う。
BCA-MD-KMC	ヘリウムプラズマ照射によるタングステン表面のファズ構造形成過程を再現し、そのメカニズムを解明するためのコード。MD-MC の発展形。	ヘリウム原子のタングステン材料内部拡散をランダムウォーク（動的モンテカルロ法）で、ヘリウムの凝集（バブル）によるタングステン材料の歪みを分子動力学（GLIPS コード）で、ヘリウムの入射過程を二体衝突近似（BDOG コード）で解く三連ハイブリッド手法。

BDOG	エネルギー粒子の材料への入射現象に関して、反射や弾き出し、スパッタリング等を計算する。	二体衝突近似法に領域分割法による並列化を施したもの。
CAP	トーラスプラズマにおける燃料補給用ペレットの溶発過程及びそれにより生じる高密度プラズモイドの振る舞いの解析	CIP法を用いた固体の溶発過程を含むMHDコード
DAMA	分子動力学に必要な原子間相互作用ポテンシャルモデルに関して、ポテンシャル関数の数式をLATEX様のテキスト手入力するだけで、解析的な微分操作を自動的に行い、かつ、計算コードを自動生成するコード。メタコンパイラと呼んでいる。	これまでの分子動力学コード開発で得たノウハウを使い、人間がやる作業を、全てコンピュータにやらせたもの。基本的にはチェーンルールによる微分を文字列処理で行い、ループ入れ替え・ループ融合等を行う。出力されたコードは分子動力学フレームワークコードであるGLIPSと組み合わせ実行される。
EMGK-3D	電磁的ジャイロ運動論方程式を位相空間3次元で解くことにより、磁場閉じ込めプラズマ乱流の基礎物理を理解する。	4次のルンゲ・クッタ
fiscof1	高強度レーザーと高密度プラズマの相互作用	重み付き粒子を用いた相対論的電磁粒子コード
fiscof2	高強度レーザーと高密度プラズマの相互作用	重み付き粒子を用いた相対論的電磁粒子コード
flowvm	VMECの三次元平衡と1次元実験データから、プラズマフローのトロイダル成分とポロイダル成分の三次元分布を計算する	HAMADA座標構築による座標変換を用いて、フローの非圧縮性及び垂直成分のポテンシャル表現を仮定した式から計算する。MIPSコードに接続。

FORTEC-3D	磁場閉じ込めトーラスプラズマにおける荷電粒子（イオン、電子）のガイディングセンター運動とクーロン衝突によって生じるプラズマの輸送（新古典輸送）。プラズマ全領域を有限軌道幅効果を含めて解くグローバルコード。	ドリフト運動論方程式に基づく、2-weight δf モンテカルロ法
FORTEC-MPS	FORTEC-3Dを多粒子種プラズマに適用可能にした拡張版。	ドリフト運動論方程式に基づく、 δf モンテカルロ法
GKMC	固体材料へプラズマ粒子を連続照射した場合の材料の構造変化を解明する	動的モンテカルロ法
GKV+	磁場閉じ込めトーラスプラズマにおける乱流輸送のシミュレーション（多種粒子、VMEC平衡、エントロピー伝達解析を含む）	ジャイロ運動論的方程式に基づく δf フラックス・チューブ・シミュレーション
GKV+/EM	電磁的ジャイロ運動論方程式を位相空間5次元で解くことにより、磁場閉じ込めトーラスプラズマにおける、電磁的ITG、TEM、KBMなどの微視的乱流による輸送を理解する。	4次のルンゲ・クッタ・ジル
GKV+/EMH	電磁的ジャイロ運動論方程式（ただし電子は流体方程式）を位相空間5次元で解くことにより、磁場閉じ込めトーラスプラズマにおける、電磁的ITG、KBMなどの微視的乱流による輸送を理解する。	4次のルンゲ・クッタ・ジル
GKV-bundle	磁場閉じ込めトーラスプラズマにおける乱流輸送のシミュレーション（非軸対称配位における巨視的径電場効果を含む）	ジャイロ運動論的方程式に基づく δf フラックス・チューブ・シミュレーションを複数連結

GKV-X	トロイダルプラズマ（特にLHDなどの非軸対称プラズマ）装置で用いられる実際の磁場配位における異常輸送の評価・予測を行う。	ジャイロ運動論的方程式に基づき、5次元位相空間上の分布関数の時間発展を、スペクトル法、有限差分法、ルンゲ・クッタ・ギル法を用いて解く。
GLIPS	固体材料へプラズマ粒子を連続照射した場合の反射やスパッタリング現象及び材料の構造変化を解明する	分子動力学法
impact-3d	レーザー核融合における爆縮の流体シミュレーション	圧縮性非粘性の流体方程式を TVD スキームで計算する。境界条件として Immersed Boundary Method を使っている。
KARABA	BCA-KMC ハイブリッド法	プラズマイオン照射を二体衝突近似 (BCA) で解き、材料中の拡散は動的モンテカルロ (KMC) で解く。BCA 部分の計算では BDOG コードを組み合わせている。
KEATS	磁場閉じ込めトーラスプラズマにおける荷電粒子（イオン、電子）のガイディングセンター運動とクーロン衝突によって生じるプラズマの輸送（新古典輸送）	ドリフト運動論方程式に基づく、2-weight δf モンテカルロ法
LOF3D	FORTEC-3D から径方向ドリフト効果を除いた radially-local 近似の新古典輸送を計算する。ドリフト運動論方程式に基づく、 δf モンテカルロ法。	磁気ドリフト項の接線成分の有無を切り替え、異なる local 近似モデルでの新古典計算が可能。
kMC	固体材料へプラズマ粒子を連続照射した場合の材料の構造変化を解明する。	動的モンテカルロ法
MARIS	磁気リコネクション過程をマクロな物理とミクロな物理が複雑に絡み合った階層横断現象として完全に理解することを目指す。	シミュレーションの実空間をマクロ階層とミクロ階層に分割して、同時にかつ自己無撞着に解く。

MD-MC	ヘリウムプラズマ照射によるタングステン表面のファズ構造形成過程を再現し、そのメカニズムを解明するためのコード。	ヘリウム原子のタングステン材料内部拡散をランダムウォーク(モンテカルロ法)で解き、ヘリウムの凝集(バブル)によるタングステン材料の歪みを分子動力学(GLIPSコード)で解くハイブリッド手法。
MEGA	高エネルギー粒子と熱イオンの運動論的效果を考慮した環状プラズマにおける運動論的MHD不安定性とそれによる高エネルギー粒子輸送。	ジャイロ運動論方程式に基づく粒子シミュレーションとMHDシミュレーションを連結、4次精度有限差分と4次Runge-Kutta時間積分
MUTSU/MINOS (MINOS から名称変更)	磁場閉じ込めトーラスプラズマにおけるMHD不安定性の成長と飽和を高精度で数値シミュレーションすること(この基礎研究のための矩形領域でのシミュレーションを含む)を目的とする。	ジャイロ粘性項、Hall項を含む拡張MHD方程式を8次精度コンパクト差分法もしくは4次精度中心差分法とルンゲ・クッタ・ジル法で解く。Large Eddy SimulationのためのSGS項を含む。非直交曲線座標でトーラスプラズマを解く場合(MUTSU/MINOS)の他に、直角座標でMHD、圧縮性Navier-Stokes方程式を解く場合などがあり、それぞれMUTSU/cMHD3D、MUTSU-cNS3Dなどと呼称している。
MUTSU-T3	磁化されたプラズマの不安定性や乱流問題について、周期境界条件化で高精度のシミュレーションを行い、様々な物理的な機構の解明や、LESに必要とされるモデル作成の基礎データの取得することを目的とする。	3次元高速フーリエ変換に基づく擬スペクトル法とルンゲ・クッタ・ジル法を使用する。シミュレーション対象とする方程式(拡張MHD=cXMHD、圧縮性Navier-Stokes=cNS3D)等に応じてMUTSU-T3/cXMHD、MUTSU-T3/cNS3Dなどと呼称する。
MIPS	環状プラズマにおけるMHD不安定性の非線形シミュレーション	圧縮性抵抗性非線形磁気流体力学方程式、4次精度有限差分と4次Runge-Kutta時間積分
NORM	ヘリオトロンプラズマにおけるMHD線型安定性及び非線型ダイナミクス解析	簡約化MHD方程式に基づいてプラズマの時間発展を追跡する。

p3bd/up3bd	磁場閉じ込めプラズマの周辺領域 (SOL など) 等におけるプラズマの挙動を、荷電粒子の運動とそれらが作る電場の時間発展を自己無撞着に解くことにより、第一原理的にシミュレートする。	Particle in Cell 法による静電粒子シミュレーション
PAMCADE	非接触ダイバータプラズマの形成過程や挙動を、荷電粒子の運動とそれらが作る電場の時間発展、さらに、中性粒子と荷電粒子の衝突 (原子分子過程) や荷電粒子同士のクーロン衝突を自己無撞着に解くことにより、第一原理的にシミュレートする。	モンテカルロ衝突法を採り入れた、Particle in Cell 法に基づく静電粒子シミュレーション
PASMO	開放系境界条件における磁気リコネクション現象のシミュレーション	陽解法に基づく電磁粒子シミュレーション法。3次元版 (3DPASMO) と空間2次元速度3成分版 (2DPASMO) がある。どちらのコードも MPI を用いて領域分割による分散並列化とスレッド並列 (OpenMP もしくは自動並列) を行っている。3DPASMO では動的負荷分散ライブラリ OhHelp と In-situ 可視化ライブラリ VISMO を導入している。
PICS1/PICS2	磁場を伴う壁近傍の無衝突シースプラズマの解析を目的とした1次元及び2次元の静電粒子コード。2次元版の PICS2 は折れ線近似による任意壁形状を扱うことができる。	4次のルンゲ・クッタ法による粒子追跡と、Red-Black SOR 法による Poisson ソルバーを用い、OpenMP による並列化を行っている。

PoissonFFT2	2次元/3次元矩形領域分割型のParticle-in-Cellプログラムや2流体シミュレーションプログラムにおいて電場の静電成分（静電位）を計算するために、Poisson方程式を解く。	並列高速フーリエ変換（FFT）ライブラリを利用して、微分型/差分型のPoisson方程式を解く。各種境界条件に対応可能であり、緩和関数機能も有する。
R2FLUID-2D	二次元二流体方程式を解くことにより、磁場閉じ込めプラズマにおける、微視的乱流と巨視的MHD不安定性の多階層相互作用基礎物理を理解する。	4次のルンゲ・クッタ
R2FLUID-3D	簡約化二流体方程式を解くことにより、磁場閉じ込めトーラスプラズマにおける、ITG、KBMなどの微視的乱流と、巨視的MHD不安定性を同時に計算し、その多階層相互作用の結果生じる輸送を理解する。	2次の予測子修正子法
REFES	ヘリカルトロイダルプラズマにおける、背景プラズマと電場ダイナミクスの解析	拡散方程式を空間差分を用いて解析し、空間発展は予測子修正子法により行う。
TOKI	大規模粒子シミュレーションで生成される粒子データを圧縮するライブラリ。	粒子の軌道データを時間方向について補間関数で記述して、粒子軌道データそのものを保存する代わりに補間関数の係数を保存することで、データを圧縮する。
Virtual LHD (vlhd)	MHDシミュレーションによる平衡プラズマのバーチャルリアリティ装置による可視化	4次Runge-Kutta-Huta法による磁力線及びドリフト粒子軌道の追跡、Marching cubes法によるプラズマ圧力の等値面計算、磁力線のPoincare Mapの表示、ダスト粒子の実験観測データの表示。LHD CADデータと統合VR可視化も可能。CAVE型VR装置CompleXcopeやヘッドマウントディスプレイ(HMD)での表示が可能。

表 3.2.1.1-2 シミュレーションコード一覧2（現所外メンバーが中心に開発したコード（アルファベット順））

名称	目的	手法
EMC3-EIRENE	エルゴディック領域及び SOL/ダイバータ領域におけるプラズマ、中性ガス (H/D/T)、不純物の輸送解析と定常分布解析。	EMC3: プラズマ（電離不純物含む）の Braginskii 方程式をフォッカー・プランク方程式に読み替え、定常解をモンテカルロ法で求める。3次元形状及びエルゴディック領域を扱うことができる。EIRENE: 中性の水素分子及び原子の定常分布をモンテカルロ法で求める。
ERO/ERO2.0	プラズマ対抗壁周辺の不純物輸送及び表面への堆積分布の解析。ERO2.0は ERO の後継に位置付けられ、壁形状等に高い自由度を持つ。	中性及びイオン化した不純物粒子を運動方程式にしたがって追跡し、定常分布をモンテカルロ法で求める。表面での材料混合及び堆積や反射等のモデルを含む。
FLARE	EMC3-EIRENE の計算グリッド構築を目的としたツール群。トカマク及びステラレータに対応する。EFIT の出力する G-file や HINT の磁場データ等を読むことができる。	ポアンカレプロットを利用して基準ポロイダル断面のグリッドを作り、磁力線追跡によって必要なトロイダル範囲の空間グリッドを作成する。トカマクに特化した作成アルゴリズムを含む。
GSRAKE	ヘリカルプラズマ中の新古典粒子、熱フラックスの径電場依存性を計算し、両極性条件を求める。	リップル平均化した局所近似・モノエネルギー近似の簡約化ドリフト運動論方程式をもとに導出された、定常解の分布関数のフーリエ展開係数を求める式を数値的に解く。
Hybrid_scalar	乱流によるパッシブスカラー輸送解析のための大規模直接数値計算を高効率に行うプログラム。	非圧縮流体場にはスペクトル法を用い、スカラー場には結合コンパクト差分を用いる
KNOSOS	バウンス平均法に基づく局所近似ドリフト運動論方程式を解き、低衝突領域におけるヘリカル系プラズマの新古典径方向輸送を高速に解く。	磁力線に沿ったバウンス平均を数値積分で評価。磁気面上のポテンシャル非一様性と磁気ドリフトの接線成分、磁気シアの効果を取り入れた計算が可能。

OpenMX	電子物性計算。MD用ポテンシャルモデルの構成、及び kMC 用確率モデルの構成のためのエネルギー計算。	密度汎関数法
PAVANE	従来のプラズマシミュレーション・コードの高解像度化を、計算資源を節約しながら簡便に実現できるように設計された汎用フレームワーク	適合格子細分化法 (AMR 法) に基づき、高い解像度を必要もしくは不要とする空間領域を、複数の計算格子の集合 (ブロック) を自己相似的に細分化もしくは粗視化する。
SP-CCD hybrid code	大規模の乱流シミュレーションにおいて、スペクトル法の高精度を活かしつつ、並列化効率を高め、通信負荷を減らすことを目的として開発を行った。	ポアソン方程式を解かなければならない変数については擬スペクトル法を、ポアソン方程式が不要の変数については結合コンパクト差分法を利用するハイブリッド手法を採用した。
transfer-fourierShell.f	擬スペクトル法を用いて、非線形相互作用によるエネルギー伝達の大きさを、シェルごとに分けて見る。	擬スペクトル法、すなわち FFT を用いて物理空間で関数の積の計算を、波数空間で擬微分演算を行う。
VISMO	In-situ 可視化ライブラリ	シミュレーションの実行とともにデータの可視化を行うライブラリ。開発言語は Fortran90。可視化手法として、粒子・等値面・スライス・流線・矢印を実装。領域分割で MPI 分散並列化したコードに対応。可視化オブジェクトの点群データを生成する。専用ビューワで点群データを表示して、視点移動や可視化オブジェクトの拡大・縮小表示ができる。
VFIVE	シミュレーションデータのバーチャルリアリティ装置による可視化	4 次 Runge-Kutta-Huta 法による流線追跡、Marching cubes 法による等値面計算、Volume Rendering 法によるスカラー場の表示。
VMEC	三次元静的 MHD 平衡を計算する。	MHD 平衡を逆問題として解く。スペクトル法を用い、2 階リチャードソン法に基づいた繰り返し計算を行って、楕円型変微分方程式の収束解を求める。

3.2.1.2 コアプラズマコード

- flowvm

コードflowvmは、LHDプラズマ中のフローを計算する。まず、フローが非圧縮であることと磁気面上を流れること、及び磁場に垂直な成分が、ある磁気面量のポテンシャル Φ を用いて、

$$\mathbf{V}_{\perp} = \frac{-\nabla\Phi(s) \times \mathbf{B}}{B^2}.$$

で与えられると仮定する。この場合、三次元形状におけるフローを下のように定式化を行うことができる。

$$\mathbf{V} = \hat{V}(s)\mathbf{B} + \hat{\Phi}'(s)\nabla\zeta \times \nabla s.$$

ここで、 (s, θ, ζ) は、Hamada座標であり、プラズマ体積 $V_P(s)$ を用いてヤコビアンが

$$\sqrt{g_H} = \frac{1}{4\pi^2} \frac{dV_P}{ds},$$

で与えられる。この式を用いてフローを計算するためには、磁場 \mathbf{B} 、Hamada座標における $\nabla\zeta \times \nabla s$ 、2つの磁気面量の $\hat{V}(s)$ 及び $\hat{\Phi}'(s)$ が必要となる。磁場 \mathbf{B} は、VMECコードの三次元平衡計算結果を用いる。 $\nabla\zeta \times \nabla s$ は、VMEC座標からHamada座標変換を行うことによって求める。残りの2つの磁気面量の決定には、実験データを利用する。LHDでは、動径方向にフローのポロイダル成分とトロイダル成分が計測されている。そこで、この実験での計測量をそれぞれの磁気面上の値であると仮定することによって、残りの2つの磁気面量を計算する。これにより、三次元フローのプロファイルを一意的に決定することができる。すなわち、この計算が一次元の実験データを三次元に拡張するマッピングを与えることになる。図3.3.1.3-1は、LHDの実験データを用い、このコードを用いて計算した三次元フローの流線図である。非圧縮性から、流線が連続していること、またトロイダル効果によって、トーラス内側の方が、外側に比べて流速が早くなることが分かる。なお、このコードは、MIPSコードのsubroutineとして利用する。

- FORTEC-3Dコード

LHDのような非軸対称な磁場配位のコアプラズマでは、その磁場中の荷電粒子ガイディングセンター軌道とクーロン散乱によって引き起こされるプラズマの小半径方向への粒子・熱輸送を取り扱う新古典輸送理論も乱流輸送と同様にコアプラズマの閉じ込め性能を評価する上で重要な役割を果たす。これは、ヘリカル磁

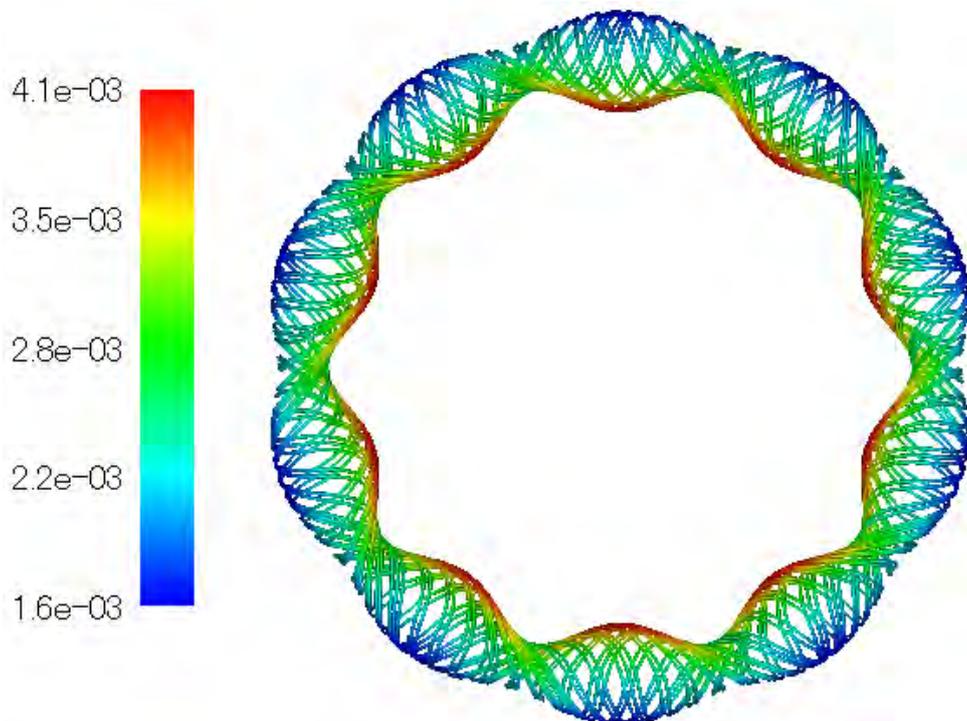


図 3.2.1.2-1 実験データに基づいて計算した三次元フローの流線図

場リップルに捕捉される粒子によって生じる、軸対称トカマクに比べて大きく、かつイオンと電子とで径電場に対する依存性の異なる径方向粒子束によって、プラズマ中の径電場が自発的に両極性条件を満たすように成長すること、さらに、新古典輸送の径電場への依存性が大きいためである。

FORTEC-3D コードは、従来の新古典輸送計算法で使われてきた、ガイディングセンター軌道の磁気ドリフトを無視した局所近似や、クーロン衝突項をピッチ角散乱で近似するなどの簡約化を排し、磁気面に対して垂直及び接線方向の磁場ドリフト項を完全に取り入れたグローバルなドリフト運動論方程式を 2-weight δf 法を用いて解く PIC コードとして開発された。衝突項としては粒子数・モーメント・エネルギーを保存する他、Landau の線形化衝突項が持つ adjointness や H-定理などの性質を満たすモデルを実装している。一方で、従来の局所近似を用いた計算法との違いを調べられるように、FORTEC-3D から磁気ドリフトの径方向成分のみを除いた Zero-Orbit-Width (ZOW) 近似及び、磁気ドリフト全体を無視した Zero-Magnetic-Drift (ZMD) 近似の計算が行える局所近似版のコード (LOF3D) も開発された。グローバル計算と局所近似計算の詳細な比較から、非軸

対称プラズマ中において、特に磁気ドリフトの接線成分が、径電場の絶対値が小さくなるイオンルートまわりの新古典輸送の評価に大きな影響を与えることが明らかになった。

最近の研究の進展としては、不純物の新古典輸送研究に向けたコードの拡張が挙げられる。将来の核融合炉ではほぼ $T_i = T_e$ での定常運転が想定されるが、ヘリカルプラズマの場合この条件では通常イオンルート（負の径電場）が新古典理論から予測される。この時、不純物イオンは負電場に駆動される内向きの新古典フラックスによってコアプラズマに蓄積することが予測され、定常運転の実現において問題視されているが、一方で、LHDの高 T_i 実験では不純物のコアからの吐き出し、いわゆる不純物ホール現象が観測されることがある。この現象の解明のために多イオン種プラズマに微視的乱流による粒子フラックスのシミュレーション研究がGKVコードを用いて進められているが、不純物の新古典輸送の計算にFORTEC-3Dを多粒子種化する取り組みを進めてきた。新たに考案された、イオン種の温度が異なる場合も adjointness を満たす異種粒子種間線形化衝突項を実装し、3次元磁場配位中の多イオン種プラズマの新古典輸送をグローバルコードで解くコードが最近完成した。さらに、不純物イオンの新古典輸送計算において近年重要視され始めている、バルクイオンの磁気面上での不均一性に起因する磁気面上のポテンシャル分布、いわゆる Φ_1 -ポテンシャルをドリフト運動論方程式に取り入れたシミュレーションにも着手し始めた。局所近似の新古典コードを用いた先行研究では、 Φ_1 -ポテンシャルを考慮すると不純物の新古典フラックスは確かに変化することが示されたが、その変化は必ずしも不純物ホールを説明する方向にはなっていない。我々がFORTEC-3DとLOF3Dで Φ_1 -ポテンシャルを評価したところ、グローバル計算と局所近似計算では径電場に対する Φ_1 -ポテンシャル分布の応答の仕方が異なることが明らかになった。2つのモデル間では両極性径電場の値も異なることから、新古典輸送をグローバルコードで、かつ Φ_1 -ポテンシャルを考慮することで、より定量的に正確な不純物イオンの新古典輸送が評価できるようになると期待される。今後、不純物ホール現象を理論的に説明するためのシミュレーション研究を乱流輸送の研究と協力しながら進めていく予定である。

- MIPS コード

環状プラズマにおけるMHD現象の研究を目的としてMHD共通基盤コードMIPSを開発した。MIPSコードは円柱座標系を採用することによりさまざまな環状プラズマに対応している。MIPSコードの数値解法は4次精度有限差分と4次のル

ルンゲ・クッタ法による時間積分である。円柱座標系は直交性を有し、環状プラズマに適用した場合にはヤコビアンの非一様性も小さいため、比較的に平易な数値解法を用いて高い信頼性と数値的安定性が実現されている。3次元領域分割によるMPI並列化が施されており、大規模並列計算にも対応している。MIPSコードを基盤とした拡張MHDコードの開発も行われており、LHDにおけるバルーニング不安定性に対するイオン反磁性ドリフトによる安定化効果が実証された。また、熱拡散の非等方性を考慮して磁力線方向の熱拡散項の導入が行われている。

- MEGAコード

環状プラズマにおける高エネルギー粒子とMHD流体の相互作用の研究を目的としてMEGAコードを開発した。MEGAコードではプラズマは高エネルギー粒子とMHD流体に分けられ、前者には δf またはtotal- f 粒子法(PIC法)、後者には4次の有限差分が適用されている。時間積分には4次のルンゲ・クッタ法が採用され、座標系は円柱座標系である。高エネルギー粒子はMHDモデルによって与えられる電磁場中を運動する。MHD流体の電流と高エネルギー粒子の電流の合計がプラズマ全体の電流であることをMHD運動方程式において考慮することにより、高エネルギー粒子とMHD流体が連結されている。MEGAコードは3次元領域分割によるMPI並列化及びOpenMPを用いた並列化が施されており、大規模並列計算が可能である。MEGAコードはHINT, EFIT, MEUDASコードによる実形状平衡データに対応するとともに、TRANSP及びOFMCコードによるNBI高速イオン分布を使用することもできる。これらの特徴により実験と直接比較できる現実的な計算が可能となっており、MEGAコードを用いてLHD及びトカマクにおけるアルフベン固有モードや高エネルギー粒子駆動測地的音響モードに関する実証研究を推進している。最近では高エネルギー粒子に加えて熱イオンもPIC法の適用により運動論的に取り扱うことが可能な新しい物理モデルを開発し、このモデルをMEGAに実装して運動論的MHD現象のシミュレーションをさらに進展させている。

3.2.1.3 周辺プラズマ、プラズマ・壁相互作用コード

- 周辺プラズマ輸送コード EMC3-EIRENE

閉じた磁気面を持たないエルゴディック領域及びダイバータ領域のプラズマ・不純物の輸送を解くEMC3と中性ガスの輸送を解くEIRENEコードを結合したコードパッケージであり、EMC3とEIRENEはそれぞれドイツMax-Planck-Institut

fürPlasmaphysik とドイツ Forschungszentrum Jülich GmbH で開発されている。LHD へ適用するため、計算メッシュは核融合科学研究所で開発し、実験計測とのバリデーションを経て様々な解析に利用されている。MPI を用いて並列化されており、炉心を除く LHD 全体（計算領域としては対称性を利用した 1/20 セクション、あるいはトーラス全体）の輸送を解くことができる。EMC3 は磁力線に沿った方向の 1 次元 Braginskii 方程式に磁場を横切る輸送を輸送係数 D_{\perp} , $\chi_{e\perp}$, $\chi_{i\perp}$ としてソース項の形で含んでいる。実際の装置に即した 3 次元磁場及び壁形状を使うことができる。国内では名古屋大学の NAGDIS-II 装置、量研機構の JT-60SA、京都大学の Heliotron J への適用、国外では ASIPP の EAST 等への適用が共同研究として進んでいる。輸送解析以外にも、EMC3-EIRENE コードで求めたプラズマ分布等を他のコードに提供するなど、共同研究の基盤としての利用も進んでいる。

- 不純物輸送コード ERO/ERO2.0

ERO コードはドイツ Forschungszentrum Jülich GmbH で開発された、不純物輸送及びプラズマ対向材料の損耗・再堆積を解析するコードである。あらかじめ与えられた定常の電磁場に対して、プラズマ対向材料の損耗、発生する中性不純物原子、プラズマ内で電離したイオン、また壁に到達した粒子の再堆積といった過程をモンテカルロ法に基づく粒子追跡によって定常解を得る。LHD の特定の断面を切り出した 2 次元空間の不純物輸送解析が可能である。ERO の後継として位置付けられている ERO2.0 では、自由度の高い壁形状が扱え、LHD 全体の不純物輸送解析が可能になっている。それぞれ、MPI/MPI-OpenMP による並列計算が可能。

- シース領域静電粒子コード PICS1/PICS2

PICS1/PICS2 コードは、核融合研で開発された Particle-in-Cell モデルに基づく静電的な粒子シミュレーションコードで、磁場を伴うシース領域の解析を目的としている。プラズマ-壁相互作用研究に用いることを想定して、SOL 領域は計算領域に含めず、プラズマ流入境界と壁境界を両端に持っている。ミリメートルからセンチメートルと薄いデバイシース及び磁気プレシース領域のみを解くために無衝突プラズマを仮定している。1 次元版の PICS1 と 2 次元版の PICS2 があり、PICS2 は折れ線近似で任意形状の壁を扱うことができる。4 次のルンゲ・クッタによる粒子追跡と Red-Black SOR 法による Poisson ソルバーを用い、OpenMP による並列計算が可能。

- 核融合炉材料シミュレーションコード群の構成

磁場閉じ込め核融合炉の炉壁材料の研究のために、密度汎関数 (DFT) 法、分子動力学 (MD) 法、二体散乱近似 (BCA) 法、(動的) モンテカルロ (kMC) 法、の四種類の技法に基づく数値シミュレーションコード群を整備している。これらは、適応する時空間スケールやエネルギー領域がそれぞれで異なっており、シミュレーション対象とする現象に合わせて単独もしくは複数を組み合わせて用いられる。また、これらのコードにより得られた結果を容易に可視化するための可視化コードも整備している。

- 密度汎関数 (DFT) コード OpenMX

OpenMX (Open source package for Material eXplorer) コードは、東京大学を中心に開発が行われている、密度汎関数法に基づいた量子化学計算を行うためのオープンソースなコードである。OpenMP 及び MPI によるハイブリッド並列化がなされているが、OpenMP による並列性能があまり良くなく、MPI による並列化では、コンピューターノードあたりのメモリーリソースが大きくなりすぎるといった問題があった。核融合研においてボトルネックになっている箇所の改良を行うことにより、10 倍程度の高速化が実現している。

本コードを用いて各種金属中での希ガス及び水素原子の空孔捕獲エネルギーや格子間捕捉エネルギーを高精度に計算することにより、タングステンに起こるヘリウムバブルやファズ構造の形成メカニズムの解明のための基礎データを得た。さまざまな原子配置に対するポテンシャルエネルギーを本コードにより評価し、それらをダウンフォールディング法 [3.2.1.3-1] に適用することにより、タングステン系をはじめとする各種 MD 計算のためのポテンシャルモデル開発を進めている。また、本コードを用いて NEB (Nudged Elastic Band) 法による準安定な原子配置間の障壁エネルギーを評価することで、kMC 法で必要となる各状態間の遷移確率を定めている。

- 分子動力学 (MD) コード GLIPS

GLIPS (G Library for Interatomic Potential and Symplectic Integrator) コードは、核融合研で開発された分子動力学シミュレーションを行うためのコードである。原子間の相互作用を記述するポテンシャルモデル、及び、数値時間積分のためのシンプレクティック差分法のコアモジュール、並びに、初期構造の生成や解析に必要なサブモジュールから構成される。プラズマ粒子負荷に対するダイバータ表面の物理化学的現象を取り扱うために開発されたコードであり、ダイ

バータ表面の化学損耗や不純物再堆積のシミュレーションが可能である。炭素系ポテンシャルモデルとして、著名な Brenner の REBO ポテンシャル [3.2.1.3-2] のほかに、sp³ リッチな構造でも精度の良く扱えるポテンシャルモデル[3.2.1.3-3]、ダイバータ材である黒煙やCFC（カーボンファイバーコンポジット）で重要となるグラファイトの層間の相互作用のポテンシャルモデル [3.2.1.3-4] が利用可能である。一方、タングステン系ポテンシャルモデルとして、核融合研で開発したポテンシャルモデル [3.2.1.3-5] が利用可能である。また、より精巧なポテンシャルモデルの構築を容易にするための改良が進められている。

- 二体散乱近似（BCA）コード ACVT

二体散乱近似（BCA; binary collision approximation）は、MD では扱えないような 100eV 以上の高エネルギー入射による材料の損傷を計算する手法である。シンプルなモデルであることから古くより研究されており、国内では ACAT（Atomic Collisions in an Amorphous Target）コードや EDDY（Erosion and Deposition based on a DYnamic model）コード、海外では TRIM（TRansport of Ions in Matter）コードといった著名なシミュレーションコードが存在する。しかし、これらのコードでは、計算資源の乏しい時代の制約を引きずっており、材料中の原子配置としてランダム構造もしくは完全結晶構造が仮定されている。そこで核融合研では、ACAT コードを拡張し、任意の原子配置による材料の扱いを可能にした ACVT（Atomic Collisions in Any Targets）コードを開発した。任意の原子配置を扱える特徴を生かして、プラズマ粒子の連続照射によって材料の構造が時間と共に変わっていく時間変化過程も扱える。DFT コードや MD コードと比べて計算負荷が小さく高速なため多数のサンプリングが取れ、精度の高い統計量の評価が可能である。

- 動的モンテカルロ（KMC）コード GKMC

動的モンテカルロ法は、発生頻度の低い（長時間スケールの）現象を扱うことのできる手法で、ある状態からある状態への遷移が両者間の障壁エネルギー及び系の温度から決まる確率に従って起こるというモデルに基づいている。核融合研で開発した kMC コードにより、タングステン中のヘリウムバブル形成シミュレーションを行った。また、平成28年度から平成30年度にかけて行った大阪大学上田研究室との共同研究により、タングステンだけでなく、モリブデン、ニオブ、タンタル中のヘリウムバブル形成シミュレーションも行えるように拡張された。

- BCA-MD ハイブリッドコード ACVT-MD

1keV 程度のエネルギーによるプラズマ粒子の材料への入射過程において、入射粒子の運動エネルギーがエネルギー閾値に落ちるまでの間は BCA により粒子を追跡し、それ以後は MD で軌跡を計算するというものである。エネルギー閾値は材料と入射粒子の元素の組み合わせごとに異なるが、100eV のオーダーである。MD フェイズでは、材料全体を扱うのではなく、入射粒子もしくは散乱により弾き出された粒子の周辺の小領域を切り出して計算対象にすることで、計算負荷を大幅に減らしている。高速に入射された粒子は材料中でカスケードし、複数の粒子の弾き出しを引き起こす。これにより、一回の入射において発生する MD 小領域は数 10 のオーダーである。BCA コードと MD コードとは、MPI 通信による Multiple Program Multiple Data モデル [3.2.1.3-6] によって連結・並列化され、個々の CPU で一つの MD 小領域が順次計算される。MD 小領域の計算開始と終了以外に通信は発生せず、計算終了後にはすぐに次の MD 小領域の計算が割り当てられる。これによって通信ロスの非常に少ない並列計算が行われる。

- MD-MC ハイブリッドコード

タングステンへのヘリウム照射による繊維状ナノ構造成長過程のシミュレーションでは、MD の時間スケール、タングステン中でのヘリウム拡散の時間スケール、フラックスから決まるヘリウム照射の時間スケール、が大きく異なることから MD 単独でのシミュレーションは困難である。MD で扱うために人工的に高フラックス状態を仮定すると、非現実的な破壊が発生し、繊維状ナノ構造は見られない。そこで、MD と kMC を組み合わせた MD-MC ハイブリッドコードを開発し、ヘリウムバブルからの圧力によるタングステンの変形を MD で記述する一方、ヘリウム原子の拡散をランダムウォークとして表現した。本コードにより、繊維状ナノ構造の成長過程を再現することに成功した [3.2.1.3-7]。

- 可視化コード AIScope

核融合炉材料シミュレーションコード群により計算した粒子の軌跡や密度汎関数法で得られた電子密度分布を容易に可視化するためのコードである。ポリゴンによるレンダリング、ポイントスプライトによる高速レンダリング、3D テクスチャによる疑似レイキャスティングを用いており、汎用の可視化ツールでは困難な多数粒子からなる系の可視化を高速に行うことができる。タブレット端末上でのインタラクティブな操作にも対応するよう機能拡張がなされた。本期間中には 3D プリンティングに対応した。

- 二体衝突近似 (BCA) コード BDOG

二体衝突近似にプラズマ粒子の材料への照射によるカスケード散乱を解くコード。上述の ACAT、EDDY、海外の TRIM、MARROW は、コンピューター資源が乏しかった時代に作られたこともあり、限られた材料構造しか扱えないが、上述の ACVT 同様に、最新のコンピューターリソースを使って任意の構造を扱えるコードとなっている。当時のメモリ制限から精度の出ていなかった衝突角度等を決める数値積分部分の見直しや、ポロノイ分割を用いた当たり判定法の実装などを行っている。加えて、後述の BCA と KMC のハイブリッドコード (KARABA) や、BCA - MD - KMC 三連ハイブリッドコードにおいて他のコードと連携できるように各種の通信機能や並列化を実装したもの。特に、MD とターゲット粒子の位置情報に関するリソースを共有できるように、空間領域分割による並列計算に対応している点が新しい[3.2.1.3-8]。これらの機能の実現のため、既存の BCA コードは利用せずに、当時の文献を基にフルスクラッチで組み上げた C++ コードである。

- BCA-KMC ハイブリッドコード KARABA

プラズマ照射下の材料中における不純物原子の拡散と、照射頻度の競争を調べるためのコード。ここで、不純物とは、プラズマイオン粒子が照射されて材料内にとどまったものを指す。プラズマイオン照射を二体衝突近似 (BCA) で解き、材料中の拡散は動的モンテカルロ (KMC) で解く。BCA 部分の計算では BDOG コードを用いる。KMC は拡散現象だけでなく、任意の「イベント」の起こるタイミングを確率モデルに沿って決める方法であり、KMC のイベント選択アルゴリズムに従って、一粒子の飛来 (照射) か、不純物拡散の一回のジャンプ (移動) かどちらが起こるかが自動的に決まる。照射が選ばれた場合は BCA で 1 粒子の照射を計算する。

- BCA-MD-KMC 三連ハイブリッドコード

ヘリウム照射で誘起されるタングステン表面の繊維状ナノ構造 (ファズ) 形成を再現することを目指したコード。MD-MC ハイブリッドコードと、BCA-KMC ハイブリッドコード (KARABA) を発展させて、BCA、MD、KMC の三つのハイブリッド接続を行ったもの。BCA 部分には BDOG コードを、MD 部分には GLIPS コードを組み合わせている。ヘリウムイオン照射を二体衝突近似 (BCA) で、材料中の拡散は動的モンテカルロ (KMC) で、さらにヘリウムバブルの圧力による母材金属の変形を MD で解く。基本的には照射と拡散部分を BCA-KMC 同様のアルゴリズムで計算し、一定期間ごとに MD を行って変形 (ループパンチングや表面の破裂) を再現する。特徴的な部分は、40 日間の計算で 100 秒相当の照射時間

を実現できる点である。すなわち、実験と同様の $10^{22} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ のフラックスを用いて、ファズ構造の発現に必要とされる 10^{22} m^{-2} のフルーエンス (総照射量) をシミュレーション上で達成できる。結果として 25 nm のファズ構造が形成されるところまで再現できた。

- 材料中の拡散経路自動探索コード AutoKMC

粒界構造やアモルファス構造など、非結晶部分における不純物拡散の経路を自動的に算出するコード。経路の探索には、小領域を切り出してその中だけで分子動力学 (MD) ポテンシャルを利用した Nudged Elastic Band (NEB) 計算を行う。空間全体から満遍なく小領域を切り出すことで、全ての経路の探索が可能となる。各小領域での計算は独立した CPU コアで行い、Multi-Program Multi-Data (MPMD) 型の並列化を行う。プラズマシミュレータでは数百万経路が数分で算出可能である。MD 部分には GLIPS コードを用いる。算出した経路と移動障壁エネルギーバリアを用いて不純物拡散の KMC 計算が可能となる。本期間中では粒界のあるタングステン材料中のヘリウム拡散経路の探索を試した [3.2.1.3-9]。このシミュレーション中にリアルタイムで経路探索させることで、プラズマ照射下での表面構造変化 (特に熱構造緩和) を扱えるようにする予定。

[3.2.1.3-1] Y. Yoshimoto, J. Chem. Phys., 125 (2006), 184103.

[3.2.1.3-2] D. W. Brenner, O. A. Shenderova, J. A. Harrison, S. J. Stuart, B. Ni, and S. B. Sinnott, J. Phys.: Condens. Matter, 14 (2002), 783.

[3.2.1.3-3] A. M. Ito, A. Takayama, S. Saito, and H. Nakamura, Jpn. J. Appl. Phys., 52 (2013), 01AL04.

[3.2.1.3-4] A. Ito and H. Nakamura, Commun. in Comput. Phys., Vol. 4, No. 3, (2008), 592.

[3.2.1.3-5] A. M. Ito, international conference Plasma Surface Interaction (PSI) 2012, P2-66.

[3.2.1.3-6] A. Takayama, K. Shimizu, Y. Tomita, and T. Takizuka, J. Plasma Fusion Res. SERIES, 9 (2010), 604.

[3.2.1.3-7] A. M. Ito, A. Takayama, Y. Oda, T. Tamura, R. Kobayashi, T. Hattori, S. Ogata, N. Ohno, S. Kajita, M. Yajima, Y. Noiri, Y. Yoshimoto, S. Saito, S. Takamura, T. Murashima, M. Miyamoto and H. Nakamura, Nucl. Fusion, 55 (2015), 073013.

[3.2.1.3-8] A. M. I., et al., Plasma and Fusion Research, 13 (2018) 3403061.

[3.2.1.3-9] A. M. Ito, et al., Nuclear Materials And Energy, 12 (2017) 353-360.

3.2.1.4 シミュレーション基盤、解析コード・汎用ツール開発

- 拡張MHD擬スペクトル法シミュレーションコード”MUTSU-T3”の開発

MHD、2流体方程式など場の方程式を高精度・高解像度かつ高速で数値的に解くために、擬スペクトル法シミュレーションコードMUTSU-T3を開発している。フーリエ係数展開による擬スペクトル法は3次元FFTによるMPI alltoall通信を頻繁に行い、コストが高い(スーパーコンピュータのピーク性能よりも、インターコネクタの性能が重要となるため)が、磁場の非発散条件を確実に満たすなどの優位性もある。このため、高性能な3次元FFTを使用しつつ、計算時間の隠蔽等の技術を駆使することで、擬スペクトル法シミュレーションコードの性能を可能な限り高めることを目指している。なお、シミュレーションコードの名称は、コアプラズマコード用の”MUTSUMINOS”コードと同様に、物理モデルを名前の後に付加することにしていく(非圧縮性拡張MHDであればMUTSU-T3/iXMHD3Dなど)。たとえばMHD、拡張MHD、非圧縮性Navier-Stokes方程式についてシミュレーションを行うコードであれば、MUTSU-T3MHD、MUTSU-T3XMHD、MUTSU-T3iNS3Dといった要領である。図3.2.1.4-1は、文献[3.2.1.4-1]で、Hall項とジャイロ粘性項を伴う拡張MHD乱流における渦度場(緑色)及び電流密度場(灰色)を可視化したものである。(可視化には、In-situ可視化ライブラリVISMO[3.2.1.4-2]を使用した。)

- 3次元静電粒子コード p3bd / up3bd

磁場閉じ込め核融合装置の境界層領域で見られる非拡散的プラズマ輸送(プロブ現象)をはじめとする周辺プラズマ現象における微視的ダイナミクスを調べるための3次元静電粒子コード p3bd (particle-in-cell 3 dimensional simulation code for boundary layer plasma dynamics)の開発を進めている。計算モデルは、Particle-in-Cell法による3次元静電粒子シミュレーション手法を用いており、時間発展には陽解法スキームを採り入れている。計算システムは、 $-x$ 方向を径方向、 y 方向を

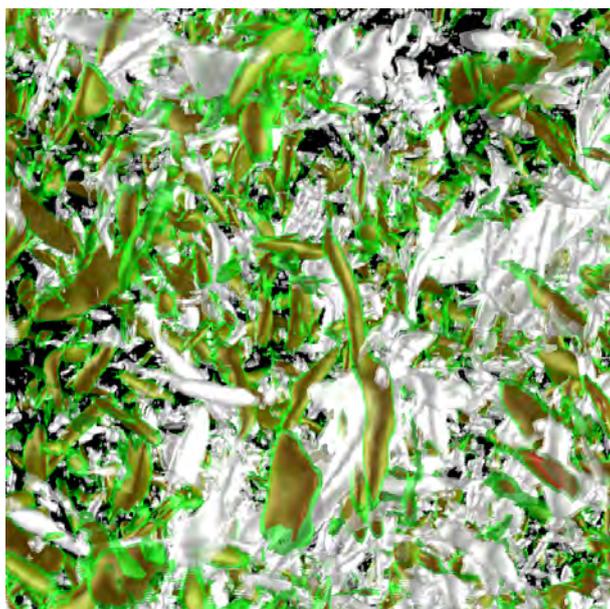


図 3.2.1.4-1 Hall 項とジャイロ粘性項を伴う拡張 MHD 乱流における渦度場 (緑色) 及び電流密度場 (灰色) の可視化 (文献 [3.2.1.4-1] より)。

ポロイダル方向、 z 方向を磁力線 (トロイダル) 方向とした直交座標系を用いている。磁力線方向の両端、及び、径方向の片方の端では、電位をゼロ、かつ、荷電粒子が吸収される境界条件とすることにより金属板 (すなわち、ダイバータ板と第一壁) を再現し、境界層領域を模擬している。ブロブ現象を調べる場合には、磁力線に平行な円柱状の高密度領域を設定 (その領域に多くの粒子を初期に配置) することにより、その後のブロブ伝播のダイナミクスを計算する。そして、平成 27~28 年度には、ブロブとは逆に周囲よりも密度の低いフィラメント状構造であるホールについても計算が可能となるように、初期設定部分の改良を行っている [3.2.1.4-3]。なお、本成果については、その論文 [3.2.1.4-3] の図がプラズマ・核融合学会誌 93 巻 12 号の表紙、並びに、Plasma and Fusion Research 誌ウェブサイトのトップページを飾った。

p3bd コードでは粒子分割型分散並列化手法 (粒子データのみを分散並列化する手法) を用いているため超大規模計算が難しかったが、平成 30 年度に、p3bd コードを基にした領域分割型分散並列化コードである upgraded-p3bd (up3bd) コードを開発した。p3bd コードでは差分型 Poisson 方程式を高速フーリエ変換 (FFT) を用いて解くことにより電位を求めているが、up3bd コードでは領域分割に対応した FFT が必要となる。そこで、領域分割に対応した Poisson ソルバーである

PoissonFFT2 ライブラリ（後述）を実装した。up3bd コードの実行性能は従来の p3bd コードに比して 2 倍強となり、実効並列化率は 99.959%、並列化効率が 50% となる際のノード数は 2439 ノードとなった（プラズマシミュレータにて計測した弱スケールリングから算出）。また、バケットソートの導入により、性能が更に 1.4 倍向上した。令和元年度からは、In-situ 可視化ライブラリ VISMO の実装も進めている。

- 1 次元 PIC-MCC コード PAMCADE

ダイバータ板への熱流を逡減するための手法として、中性ガスの導入などにより形成される非接触ダイバータプラズマが提案されているが、その形成過程や非接触時における微視的ダイナミクスを調べるために、中性粒子とプラズマ粒子の衝突過程（原子分子過程）やプラズマ粒子同士のクーロン衝突過程を取り入れた静電粒子コード PAMCADE（**p**article-in-cell simulation code with **M**onte **C**arlo collision for **d**etachment dynamics）の開発を進めている。計算モデルは、Particle-in-Cell 法による空間 1 次元速度 3 次元の静電粒子シミュレーション手法を用いており、時間発展には陽解法スキームを取り入れている。また、原子過程やクーロン衝突過程は、モンテカルロ手法（ヌル衝突法、南部法）を用いている。計算システムの片方の端は、ダイバータ板を模擬した粒子吸収境界とし、その近傍に中性粒子が存在する領域を置いている。もう一方の端近傍には、粒子ソース領域を置いている。本コードによる計算では、ダイバータ板近傍の中性粒子による電子温度低下、イオン温度低下、そして、熱流逡減効果を確認している [3.2.1.4-4]。

- 3 次元並列 Poisson ソルバーライブラリ PoissonFFT2

本ライブラリは、核融合科学研究所と富士通（株）の共同で開発された、高速フーリエ変換（FFT）を用いた 2 次元/3 次元矩形領域分割データに対応した Poisson ソルバーである。本ライブラリでは、内部的に、並列 FFT ライブラリである FFTW ライブラリ [3.2.1.4-5]、P3DFFT ライブラリ [3.2.1.4-6]、及び、2DECOMP&FFT ライブラリ [3.2.1.4-7] を使用している。これらの FFT ライブラリは 2 次元矩形領域分割には対応しているが、3 次元分割には対応していないため、本ライブラリは、3 次元分割データを 2 次元/1 次元分割に変換し、これら FFT ライブラリにデータを引き渡す機能を有している。また、微分型、差分型の双方の Poisson 方程式を解くことが可能であり、緩和関数の機能も有するとともに、各種境界条件にも対応している。これらは全て、ユーザースイッチによる指定で切り替えることができ、配列の引渡しも含め、非常にシンプルなインターフェースにより

呼び出すことができる。本ライブラリは、すでに、粒子コード（PASMO コード、up3bd コード）や拡張 MHD コードへの実装が行われており、また、広くプラズマシミュレータユーザーの利用に供するため、数年以内に公開される予定である。

- PASMO

無衝突磁気リコネクションにおける粒子運動論効果と様々なプラズマ不安定性による電流層の力学発展や、リコネクション面内で起こっている、プラズマの加速、加熱を調べるため、プラズマが外部と自由に出入りする開放系モデルを用いた電磁粒子シミュレーションコード PASMO の開発を進めている。PASMO には、リコネクションにおける 3 次元ダイナミクスを調べることができる 3 次元バージョン (3DPASMO) と、空間 2 次元・速度 3 成分バージョン (2DPASMO) がある。どちらも、計算モデルには、電磁粒子シミュレーション手法 (PIC) を使い、時間発展には、標準的な陽解法スキームを採用する。直交座標系を採用し、リコネクション面内ではプラズマが境界から自由に出入りする開放系境界条件を用いる (3DPASMO ではリコネクション面に垂直な方向では周期境界条件を課している)。

3DPASMO は一様な大きさを領域を分割して分散並列化している。しかし、この場合にリコネクションのシミュレーションを行うと、粒子の分布が非一様になるため、ロードバランスが悪くなる。そこで、プラズマ粒子シミュレーション用に開発された、動的負荷分散ライブラリである OhHelp ライブラリ [3.2.1.4-8] を 2018 年に導入した。また、Gather・Pusher プロセスにおけるキャッシュメモリ利用を効率化するため、粒子データをアサインする配列構造を変更したり、ソーティングプロセスを導入するなどして、更なる最適化を進めた。

2DPASMO ではリコネクション面内の物理現象にフォーカスして解析することが可能である。2019 年には、プラズマシミュレータの性能をフルに活用するため、分散並列 MPI とスレッド並列を行い、シミュレーション領域を並列計算する PASMO コードを開発した。現在、磁気リコネクションの大規模なシミュレーションに取り組みつつある。

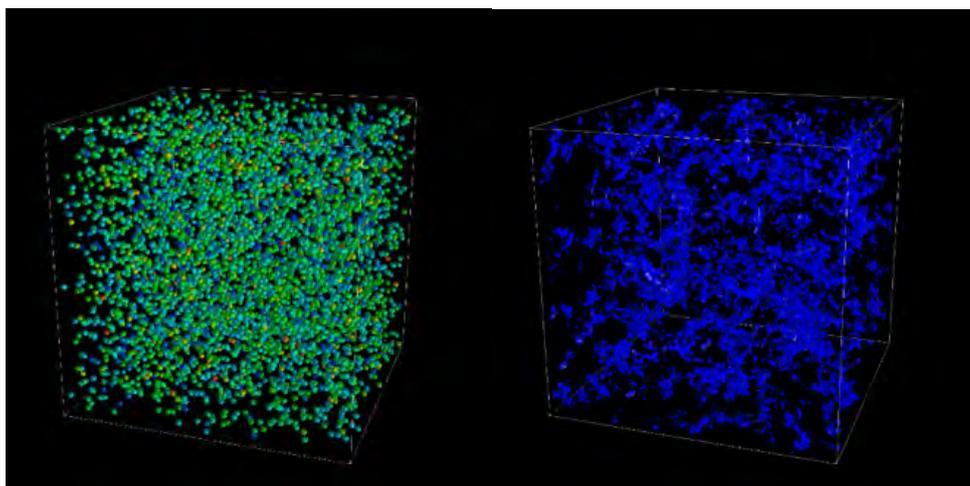
- In-situ 可視化ライブラリ VISMO

In-situ 可視化を行うための可視化ライブラリ VISMO の開発を兵庫県立大学：大野暢亮教授との共同研究で進めている [3.2.1.4-2]。スーパーコンピュータの発達に伴いシミュレーション規模の著しい増大が進んでいる。しかし、ハードディスク使用量制限のため全てのシミュレーションデータを保存することはできず、また、ローカルの可視化解析マシンでの解析もローカルマシンのスペックの制限が

あるためデータを間引くといったことが行われている。そこで、シミュレーションの生データを保存する代わりに、可視化データを保存するという In-situ 可視化の研究が進んでいる。In-situ 可視化はシミュレーションの実行とともにデータの可視化を行う方法である。VISMO の可視化手法はソフトウェアレンダリングであり、開発言語はシミュレーション研究者になじみの深い Fortran90 を使用している。可視化手法として、粒子（色や半径の変更が可能）・等値面・スライス・流線・矢印がある（図 3.2.1.4-2）。PASMO コード以外のコード、MHD シミュレーションコード [3.2.1.4-1] や量子乱流シミュレーションコード [3.2.1.4-9] への実装が行われた。また、粒子の色や半径を物理量に合わせて変更できることから、雲形成シミュレーションコードへの実装が名古屋工業大学との共同研究で進められている。

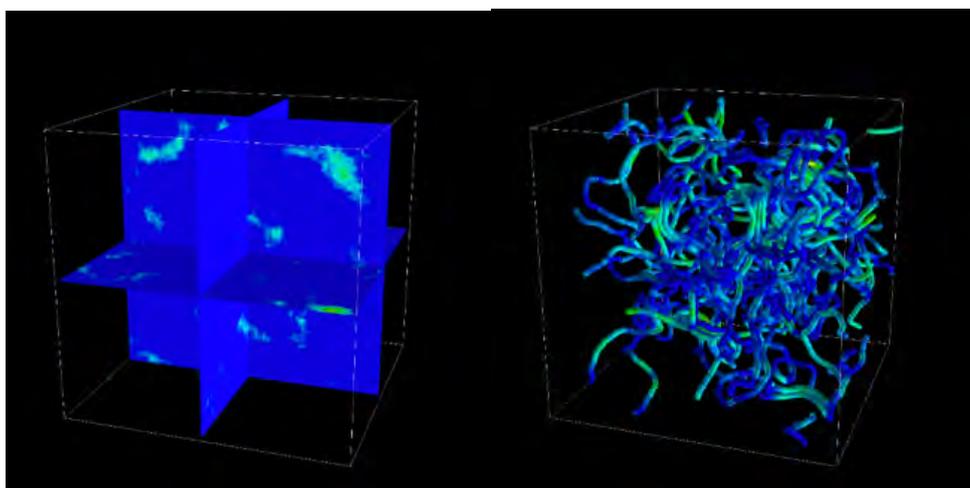
さて、In-situ 可視化の最大の欠点は、シミュレーションの生データを保存しないため、可視化の視点変更や可視化パラメータ（例：等値面の値）の変更のためにシミュレーションを再実行する必要があることである。この欠点を克服するため、VISMO では可視化した図を保存するとともに可視化オブジェクトの点群データを保存可能である。可視化オブジェクトの点群データとは、例えば、等値面やスライス面上に配分した点の情報である。この点群データを専用ビューワに読み込ませることで、等値面やスライス面などを立体映像として再構成して、視点移動や拡大・縮小を行うことができる。現在、専用ビューワは PC、CAVE、HMD(CAVE 用のビューワにラッパーライブラリ CLCL [3.2.1.4-10] を組み込む) で実行することができる（図 3.2.1.4-3）。

- [3.2.1.4-1] H. Miura, “Extended Magnetohydrodynamic Simulations of Decaying, Homogeneous, Approximately-Isotropic and Incompressible Turbulence”, fluids. Vol.4 (2019) 4010046.
- [3.2.1.4-2] N.Ohno and H.Ohtani, “Development of In-Situ Visualization Tool for PIC Simulation”, Plasma Fusion Res. Vol.9 (2015) 3401071.
- [3.2.1.4-3] H. Hasegawa and S. Ishiguro, “Development and Verification of the Three-dimensional Electrostatic Particle Simulation Code for the Study of Blob and Hole Propagation Dynamics”, Plasma and Fusion Research, Vol. 12 (2017) pp. 1401044 (1 ~ 9).



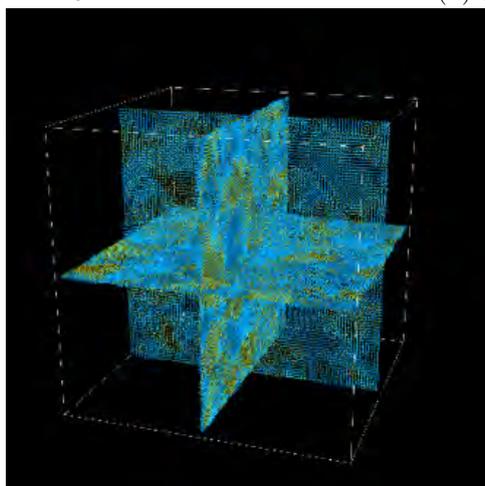
(a) 粒子。色は粒子速度を表す。半径を物理量に合わせて変更も可能。

(b) 等値面。



(c) スライス。

(d) 流線。



(e) 矢印。

図 3.2.1.4-2 VISMO による可視化。



図 3.2.1.4-3 VISMO 専用ビューワによる CompleXcope での可視化。

- [3.2.1.4-4] T. Pianpanit, S. Ishiguro and H. Hasegawa, “Observation of the Strong Temperature Gradient in Detached Plasma by PIC Simulation with Monte Carlo Collision”, Plasma and Fusion Research, Vol. 11 (2016) pp. 2403040 (1 ~ 5).
- [3.2.1.4-5] “FFTW”, <http://www.fftw.org/>
- [3.2.1.4-6] “P3DFFT: Scalable Framework for Three-Dimensional Fourier Transforms”, <https://www.p3dfft.net/>
- [3.2.1.4-7] “2Decomp&FFT: Library for 2D pencil decomposition and distributed Fast Fourier Transform”, <http://www.2decomp.org/>
- [3.2.1.4-8] H. Nakashima, Y. Miyake, H. Usui and Y. Omura. OhHelp: A Scalable Domain- Decomposing Dynamic Load Balancing for Particle-in-Cell Simulations. In Proc. Intl. Conf. Supercomputing, pp. 90?99, June 2009.
- [3.2.1.4-9] K.Yoshida, H.Miura, Y.Tsuji, “Spectrum in the Strong Turbulence Region of Gross-Pitaevskii Turbulence”, Journal of Low Temperature Physics, Vol.196 (2019) pp.211-217.
- [3.2.1.4-10] S.Kawahara and A.Kageyama, “Development of CAVELib Compatible Library for HMD-type VR Devices”, Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering, Vol.6 (2019), pp.234-248.

3.2.2 統合輸送解析スイートの構築

本節の末尾以外の文章と、用いている図は、統合輸送解析スイートの構築に係る文章（核融合科学研究所 30 年史（2019 年） [3.2.2-1] や、プラズマ・核融合学会誌小特集「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」（2019 年 9 月号） [3.2.2-2] ）からの転載・改筆である。

LHD をはじめとしたヘリカル系プラズマを主な対象とした統合輸送解析スイート TASK3D の開発・運用が更に進展した。TASK3D の開発戦略は以下の 2 通りである。LHD 実験データに基づいた【LHD 実験データ解析型 (TASK3D-Analysis, TASK3D-a シリーズ)】は、輸送現象に関する LHD 実験解析の基盤となっており、各種モジュールの実験検証や高精度化などが行われている。一方、【到達パラメータ予測型】は、輸送モデルを導入して到達パラメータ（温度など）を予測するものである。

[3.2.2-1] 核融合科学研究所三十年史 (2019)

[3.2.2-2] 横山雅之, 佐竹真介ほか, プラズマ・核融合学会誌 95, 444 (2019).

3.2.2.1 LHD 実験データ解析型統合輸送解析スイート TASK3D-a の進展

本節では、TASK3D-a のこれまでの開発経緯を簡単に振り返りつつ、ここ 3 年間の進展について特筆する。

3 次元平衡、NBI 加熱、熱輸送過程といった各種要素解析コード（モジュール）の統合作業を経て、2012 年 9 月に、初版である TASK3D-a01 をリリースした [3.2.2.1-1]。TASK3D-a01 の構築によって、熱輸送解析の自動化が大きく進展した。温度分布や密度分布の時間変化も考慮したダイナミック輸送解析の結果も提供することができるようになった。

より広範な LHD 実験条件への適用を図るため、モジュールの追加や高精度化を行い、TASK3D-a02 としてリリースした。a02 では、新古典熱・粒子拡散フラックスを評価する GSRAKE コード [3.2.2.1-2] を組み込んだ。これにより、a01 での実験的なエネルギーバランス解析とともに、新古典エネルギーフラックス解析が同時に行われることになった。また、ECH 加熱分布を評価する LHDGauss コード [3.2.2.1-3] 及び TRAVIS コード [3.2.2.1-4] も導入したことで、ECH 吸収パワーを取り込んだエネルギー balan

ス解析が行えるようになり、a01 段階での NBI プラズマ解析から解析対象の格段の拡張が実現した [3.2.2.1-5]。

計算規模や必要資源の違いから統合が困難である大規模シミュレーションコードについても、TASK3D-a から LHD プラズマの平衡や温度・密度分布などを提供するという連携を確立した。その一例として、GNET [3.2.2.1-6] による NBI 加熱計算への必要データ提供を挙げることができる。これにより、大規模シミュレーションによる LHD プラズマ解析の実施や国際コードベンチマーク活動 [3.2.2.1-7] が円滑にできるようになったことも TASK3D-a の成果である。

複数イオン種から成る LHD プラズマや LHD 重水素実験への対応をさらに進めて、軽水素、重水素、ヘリウム存在下での NBI 加熱計算 [3.2.2.1-8] に対応した第 3 版 a03、第 4 版 a04 へと次々と機能拡張を行った (図 3.2.2.1-1) [3.2.2.1-9]。この機能拡張により、同位体効果研究の基盤となる解析データベースの作成に大きく貢献している [3.2.2.1-10,11]。また、LHD 重水素実験における中性子計測、高エネルギー粒子挙動の定量評価の基盤としての役割も果たしている。

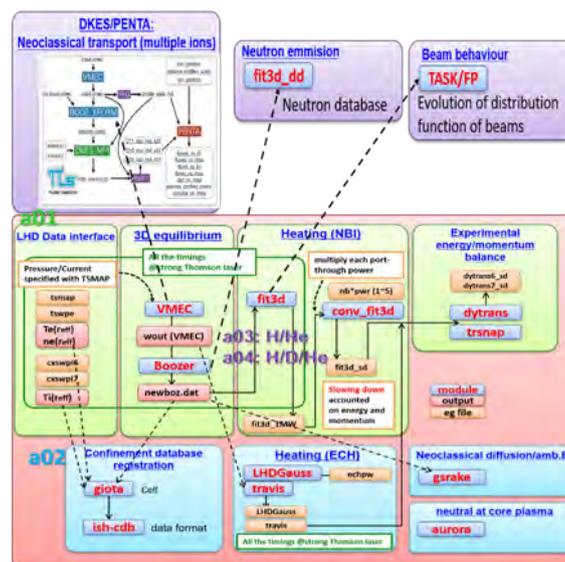


図 3.2.2.1-1 LHD 実験データ解析型 (TASK3D-a シリーズ) の機能拡張の進展。中央部横一列で示された a01 版から、下段に記された機能拡張 (a02 版)、NBI 加熱モジュールを中心とした複数イオン種 (軽水素、ヘリウム、重水素) 対応 (a03、a04)、さらに、複数イオン種の新古典輸送解析に関する大規模シミュレーションコードとの連携や高エネルギー粒子挙動に関する機能拡張 (上段部) などの進展を遂げている。(参考文献 [3.2.2.1-2] より転載)

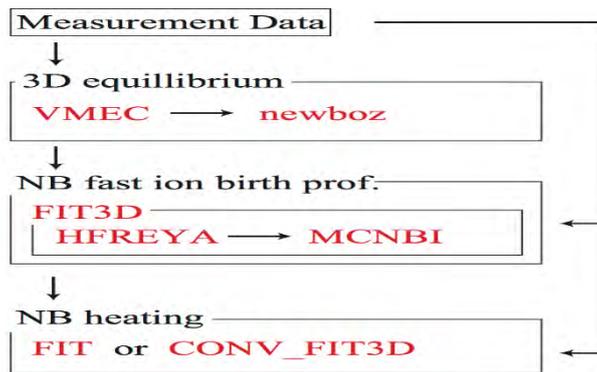


図 3.2.2.1-2 TASK3D-a における中性粒子ビーム入射加熱モジュールの計算フロー。
(参考文献 [3.2.2.1-2] より転載)

特に、中性粒子ビーム入射加熱モジュールは、LHD 重水素実験によって定量的な評価が可能となったことから、その実験検証が精力的に進められている。図 3.2.2.1-2 に TASK3D-a における中性粒子ビーム入射加熱モジュールの計算フローを示す。LHD 重水素実験では、プラズマの温度に対して中性粒子ビームのエネルギーが高く、かつ高電力であるため、核融合反応によって生じる中性子線計測を用いたプラズマ内部の高速イオン密度の推定が可能である。TASK3D-a における中性粒子ビーム入射加熱モジュールの一つである FIT3D コード [3.2.2.1-12,13] においても、計測結果との比較を通じたコードの検証が行われている。FIT3D は、高速中性粒子のプラズマ中でのイオン化位置の評価 (HFREYA)、短時間の軌道追跡による初期イオン損失評価 (MCNBI) と、定常的な高速イオン密度及び加熱パワーの評価を行う解析的なフォッカープランク計算 (FIT) を連結したコードである。この連結によって、一般にフォッカープランク解析に取り入れることが難しい高速イオンの軌道幅効果を中性粒子ビーム加熱解析に取り入れることができ、かつ、フォッカープランクによる高速な加熱解析が可能となっている。FIT3D は高速イオンの減速過程における粒子損失をほとんど考慮していないため、加熱パワーを過大評価していることが想定されている。これまでに、不純物を考慮しない場合、LHD の標準的な磁場配位における FIT3D の計算結果は中性子発生率の計測結果と比べて 2 倍程度の過大評価をしていることが分かっている [3.2.2.1-13]。

ペレット入射のように密度が大幅に変化する場合などの、フォッカープランクの定常解を使用する FIT3D では加熱パワーが評価できない場合に対応して、TASK3D-a では加熱の時間発展を求めることのできる CONV_FIT3D コード [3.2.2.1-14] の実装や検証も行われている。CONV_FIT3D は FIT3D のフォッカープランク部分を置き換えることを目的としたコードであり、高速イオンの減速方程式を解くことによって、中性

粒子ビームによる高速イオン密度及び加熱パワーの時間発展を得ることができる。CONV_FIT3Dは、高速イオンの減速過程を評価することが可能であり、HFREYAやMCNBIと連結することで、中性子発生率の減衰時間をLHD実験と検証することが可能になっている。図3.2.2.1-3は、短パルスの中性粒子ビーム入射時における中性子発生率の計測結果とCONV_FIT3Dによる計算結果を比較したものである。ここでは、プラズマ中の不純物の存在を考慮していないこと、高速イオン減速過程における粒子損失を考慮していないことなどの要因によって、計算結果は過大評価になっている。この計測結果と計算結果との差から、高速イオンの実効的な粒子閉じ込め時間とプラズマの有効電荷数を推定することが可能であり、この推定値を用いて中性子発生率の再評価を行った結果が図3.2.2.1-4である。その結果、計測結果と近い計算結果が得られたことから、もっともらしい計算結果が得られていると考えられる。CONV_FIT3Dでは、このような高速イオンの減速過程の検証を通して、実効的な高速イオン閉じ込め時間のモデルの開発も行われており、開発されたモデルはCONV_FIT3Dに取り入れられる予定である。

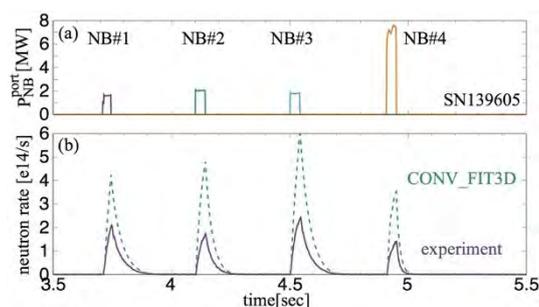


図 3.2.2.1-3 中性粒子ビームの入射パワー（上図）と中性子発生率（下図）の時間変化。下図の実線が計測結果で点線がCONV_FIT3Dによる計算結果である。（参考文献[3.2.2.1-2]より転載）

また、3次元フォッカープランクコードであるTASK/FP[3.2.2.1-15]は、実空間1次元、速度空間2次元空間において、中性粒子ビーム由来の高速イオン速度分布の時間発展を計算することが可能であり、TASK3D-aでの実装が進められている。TASK/FPでは、CONV_FIT3DやFIT3Dと異なり、高速イオン速度のピッチ角を考慮していることにより、高速イオンの衝突による核融合反応を評価することができる。TASK/FPでは速度空間2次元での高速イオン速度分布を評価できるため、荷電交換分光などの高速イオンの速度空間の情報も含めた計測との比較検証が可能である。TASK/FPにおいても、FIT3Dと同様にHFREYAやMCNBIと連結し、高速イオンの軌道幅効果を取り入れた実験との比較検証が可能になっている。

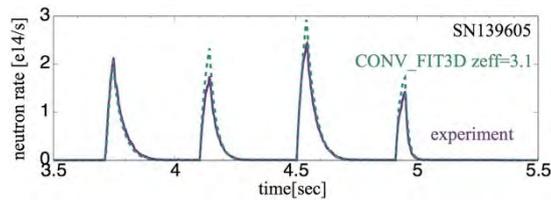


図 3.2.2.1-4 中性子発生率の時間変化。実線が計測結果、点線が計算結果である。計算には、図 3.2.2.1-3 に示した計測結果と計算結果の差から推定される実効的な高速イオン閉じ込め時間と有効電荷数を用いた。(参考文献3.2.2.1-2] より転載)

このように TASK3D-a は、要素モジュールの追加や高精度化が次々と進められ、LHD 実験、特に重水素実験における多様な研究課題や系統的検証研究のための統合解析基盤として運用がされている。今後の課題は枚挙に暇がないが、喫緊のものとしては、ICH モジュールの導入、モジュールとしての導入が可能な不純物輸送コードの検討と導入、周辺プラズマ解析との連携などが挙げられる。ITER 統合モデリング専門家会合において、大型実験において実験データと密に連携して運用されている統合解析スイートとして TASK3D-a が認知されていることを最後に述べておきたい。

[3.2.2.1-1] M. Yokoyama et al., Plasma Fusion Res., Special Issue 7 (2012) 2403011.

[3.2.2.1-2] C. D. Beidler and W. D. D'haeseleer, Plasma Phys. Contr. Fusion 37, 463 (1995).

[3.2.2.1-3] T. Ii, Tsujimura et al., Nucl. Fusion 55, 123019 (2015).

[3.2.2.1-4] N. Marushchenko et al., Plasma Fusion Res. 2, S1129 (2007).

[3.2.2.1-5] M. Yokoyama et al., Nucl. Fusion 57, 126016 (7pp) (2017).

[3.2.2.1-6] H. Yamaguchi et al., Nucl. Fusion 56, 026003 (2016).

[3.2.2.1-7] 佐藤雅彦, 佐竹真介, 横山雅之, プラズマ・核融合学会誌 93, 67 (2017).

[3.2.2.1-8] P. Vincenzi et al., Plasma Phys. Control. Fusion 58, 125008 (2016).

[3.2.2.1-9] M. Yokoyama et al., Nucl. Fusion 57, 126016 (2017).

- [3.2.2.1-10] H. Yamada et al., 27th IAEA Fusion Energy Conference, EX/P3-5 (Ahmedabad, Oct. 2018), submitted to Phys. Rev. Lett. (2019).
- [3.2.2.1-11] K. Tanaka et al., submitted to Nucl. Fusion (2019).
- [3.2.2.1-12] S. Murakami, et al., Trans. Fusion Technol. 27, 256 (1995).
- [3.2.2.1-13] R. Seki et al, Plasma Fusion Res. 14 (2019) 3402126.
- [3.2.2.1-14] H. Nuga et al, Plasma Fusion Res. 14 (2019) 3402075.
- [3.2.2.1-15] H. Nuga et al, Nucl. Fusion, 59, 016007 (2019).

3.2.2.2 到達パラメータ予測統合輸送解析スイート **TASK3D** の進展

到達パラメータ予測型については、主に京都大学（村上定義教授研究室）との共同研究によってその開発を進めている。径方向の熱・粒子の拡散方程式を解く TASK/TR モジュールに、3次元平衡VMECコード、新古典拡散係数データベースである DGN/LHD、両極性径電場を求めるモジュール ER、さらに、ジャイロ平均されたドリフト運動論方程式を解く GNET（時間発展解析版 GNET-TD [3.2.2.2-1]）コードを統合した体系（図 3.2.2.2-1）である。熱輸送係数（DGN/LHD からの新古典熱輸送係数+各種異常輸送モデルに基づく異常熱輸送係数）を与えて、温度の時間発展方程式を解くことで、到達温度分布を予測する。輸送モデルの差異による温度の変化と、予測に用いた密度や NBI 条件に対応した検証実験や既存の実験データとの比較を行い、LHD プラズマを記述するのに適した輸送モデルを模索する研究が行われている。予測-検証実験比較のデータベース蓄積によって、LHD プラズマの熱輸送特性に関して実験検証を経たモデルの創出、予測性能の向上がもたらされることが期待される。

特に、LHD の高イオン温度放電の熱輸送モデリング、時間変化を含めた予測シミュレーションやその実験検証が進んでいる [3.2.2.2-2]。複数の LHD 高イオン温度放電から、熱拡散係数として、電子はジャイロボーム、イオンはジャイロボームに規格化イオン温度勾配をかけた形式（係数は、計測温度分布を最も再現するように決定されている）のものを利用している。加熱計算には、複数イオン種、時間発展を考慮した GNET-TD コードを適用している。実効電荷数 Z_{eff} に依存してイオン熱拡散係数が低減するモデルを模索したところ、イオン温度の時間変化を比較的精度よく再現することができた。この輸送モデルの理論的根拠を探ると同時に、未踏イオン温度領域への予測計算への進展が期待されている。

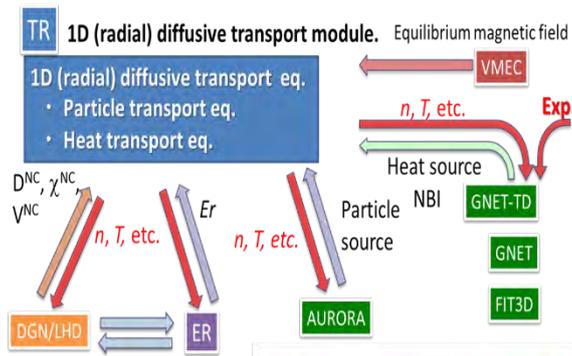


図 3.2.2.2-1 到達パラメータ予測型 TASK3D のモジュールと計算体系概観図。(参考文献 [3.2.2.2-1] より転載)

TASK3DのNBI加熱評価に用いられているGNETは、LHD重水素実験へ向けて、複数イオン種やプラズマ時間発展に対応する拡張と、統合輸送コードTASK3Dとの連結も進められてきた。LHD実験における特定の放電・タイミングに合わせたシミュレーションを行うためには、対応する3次元平衡、不純物イオンを含む各粒子種の温度・密度分布といったデータが必要となる。TASK3D-aの整備により、これらの解析・実験データはシミュレーション実行者がすぐに利用できる形式で自動的に準備されている。前節で記したように、NBI加熱に関しては、FIT3Dモジュールによる自動解析が可能となっている。FIT3Dは案内中心軌道の取り扱いが簡略化された簡易的なモジュールであるが、その主要な入力データは、完全な案内中心軌道を取り扱うGNETと共通している。このため、FIT3Dによる簡易的な解析の後、重要な放電・タイミングのデータを個別に取り出し、GNETを用いてより正確な加熱解析を個別に行うという一連のプロセスが比較的スムーズに実行できるようになった。

軽水素実験と重水素実験で得られた高イオン温度プラズマのイオン熱輸送の比較において、TASK3D-aが可能としたこのプロセスを活用した。実験データに基づき、GNETを用いて複数イオン種を考慮した加熱解析を行った。その結果、軽水素で8 keV、重水素で10 keVを達成したそれぞれのプラズマにおいて、NBI加熱によるイオンへの加熱吸収量は大きな差異がないことが分かった。この結果から、重水素プラズマでは、イオンの熱輸送が小さくなっていることが示唆され、LHD重水素実験の論文 [3.2.2.2-3] にデータを提供した。

上述のように、GNETによる加熱解析に必要な入力データ群の多くはTASK3D-aによって準備されるようになっている。一方で、計算実行自体は、大型並列計算機等において担当者が手動で行っている。今後は、GNETを解析システムに組み込み、その

実行まで含めて自動化することで、ヘリカル系における輸送物理の解明をさらに加速することが期待されている。

予測型に関して、統計数理研究所、京都大学、核融合科学研究所間で共同研究を立ち上げて、データ同化 (data assimilation) の手法導入を図っていることを特筆したい。シミュレーションと計測データを融合させて、シミュレーションモデルの最適化を図る手法であり、気象や海洋では広く実用的に用いられている。論文発表前であるので詳細は割愛するが、すでに、LHD 放電に対して、イオン・電子温度の時空間計測データを用いたデータ同化計算が行われ、その成果は、プラズマ・核融合学会やプラズマシミュレータシンポジウムなどの機会に発表されている。

[3.2.2.2-1] H. Yamaguchi et al., Plasma Fusion Res. 9 (2014) 3403127.

[3.2.2.2-2] S. Murakami et al., Plasma Phys. Control. Fusion 57(2015) 054009.

[3.2.2.2-3] H. Takahashi et al., Nucl. Fusion 58 (2018) 106028.

3.3 核融合科学及び関連理工学の学術的体系化

3.3.1 MHD 平衡と不安定性

3.3.1.1 MHD 平衡と不安定性の研究方針

MHD平衡及び巨視的不安定性の研究は、プラズマ流体平衡安定性グループが中心となって研究を進めている。数値実験炉においては、閉じ込めに優れた長時間放電の輸送経路を提示して、将来の炉設計に結び付けることが重要である。このとき、放電途中において巨視的な不安定性によって急激な閉じ込め崩壊を避けるようにしなければならない。従って、本研究の究極的目的は、ヘリオトロンプラズマにおいて安定限界を定量的に決定できるためのメカニズムを解明し、その手法を確立することにある。

現在、LHD 実験においては良好な放電が得られており、最大平均ベータ値として、5.1%が達成されている [3.3.1.1-1]。しかし、この最大値は、LHD 設計時において理想交換型モードが極めて不安定であると考えられていた磁場配位で達成されている。設計時においては、真空磁気軸位置に対して $R_{ax} = 3.75\text{m}$ が安定限界であり、それより小さな値（内寄せシフト）では、プラズマは不安定になると予測されていた。これに対して、最大ベータ値は $R_{ax} = 3.6\text{m}$ で達成されているのである。一方、磁気軸位置を $R_{ax} = 3.54\text{m}$ まで内寄せすると、崩壊現象が生じてしまうことも観測されている [3.3.1.1-2]。すなわち、崩壊現象が生じる磁場配位と、最大値を与える磁場配位との差はごくわずかでしかない。したがって、なぜこのように LHD プラズマが理論予測よりも安定であるのか、また、崩壊現象が生じる安定限界はどのようにすれば定量的に予測できるのか、ということが最も重要な課題となる。この安定限界予測ができなければ、将来の炉設計を確証をもって行うことができない。現在に至るまで、この点に関して鋭意研究を継続してきているが、この課題を統一的に矛盾なく説明するメカニズムはまだ解明されていない。実際、解決の糸口はどこにあるか分からない。場合によっては、大きなパラダイムシフトが要求されるかもしれない。そこで、本研究においては、様々な知見の集積と組み合わせを求めて、多様な観点から MHD 平衡及び安定性の研究を進めている。この課題解明のために、他のグループとの連携も重要視している。特に、多階層グループでの MHD 関連作業との連携、高エネルギー粒子グループで開発されたイオン粒子効果の導入を推進している。

一方、現在、核融合科学研究所での次期計画の検討に対しても参画しており、現段階で得られている知見を基に、ヘリオトロンプラズマ配位の更なる最適化を模索している。この検討作業においては、新古典・乱流輸送シミュレーショングループとの連携、及び核融合工学研究プロジェクトとの共同作業も推進している。

[3.3.1.1-1] A. Komori et al., 2010 *Fusion Sci. Tech.* **58** 1.

[3.3.1.1-2] S. Sakakibara et al. Proc. 23rd Fusion Energy Conf. Oct.11-16, 2010, Daejeon, EXS/P5-13.

3.3.1.2 HINT による磁気島ダイバータ配位の考察

ドイツ・Wendelstein-7X (W7-X) をはじめとする磁気島ダイバータ配位は、低磁気シアであることを利用し、プラズマ周辺部に大きな磁気島構造を作り出すことにより実現している。磁気島上は非常に長い磁力線の結合長が期待でき、かつ、磁気島による垂直方向の輸送が効率の良いダイバータ運転を可能にすると考えられている。しかし、低磁気シア配位は、ベータ効果やトロイダル電流に敏感であることが指摘されており、実際、これまで3次元平衡解析でも磁気島のヒーリングが存在することが指摘されてきた。そこで、入れ子の磁気面を仮定しない3次元平衡コード HINT を用いて、W7-X 磁気島ダイバータ配位に対する考察を行った。

図 3.3.1.2-1 に、W7-X の低 i 配位の解析を行った結果を示す。左から、(a) 真空磁場、(b) トロイダル電流なしの有限ベータ平衡、(c) トロイダル電流ありの有限ベータ平衡を示した。(a) の真空磁場では $m=6$ の磁気島構造が表れており、これらの磁気島構造をダイバータに応用できることが分かる。しかし、ベータ値が約 3.3% になると、 $m=6$ の磁気島構造が消失することが分かる。この時、磁場配位としてはダイバータ配位ではなく、リミター配位になり、定常運転のためには非常に大きな問題となる。一方、ブートストラップ電流が流れた場合、磁気島構造は消失しないものの、磁気島幅は減少し磁気島の位置も周辺部へ移動している。このことも、ダイバータ配位による定常運転に大きな問題を生じさせる可能性がある。

これらの結果を受けて、電子サイクロトロン電流駆動 (ECCD) や、スweepコイルと呼ばれる外部磁場接道コイルを用いて、ダイバータ部の磁気島構造を安定に維持するための対策が講じられている。

3.3.1.3 プラズマフローを含む LHD プラズマの MHD 安定性解析

LHD では、交換型モードによる局所的な崩壊現象も報告されているが、いくつかの場合においては、崩壊現象を生じさせる不安定モードの発現と、モードの回転の停止とが、ほぼ同期して生じることが分かってきた。この場合、モードの回転周波数が小さく

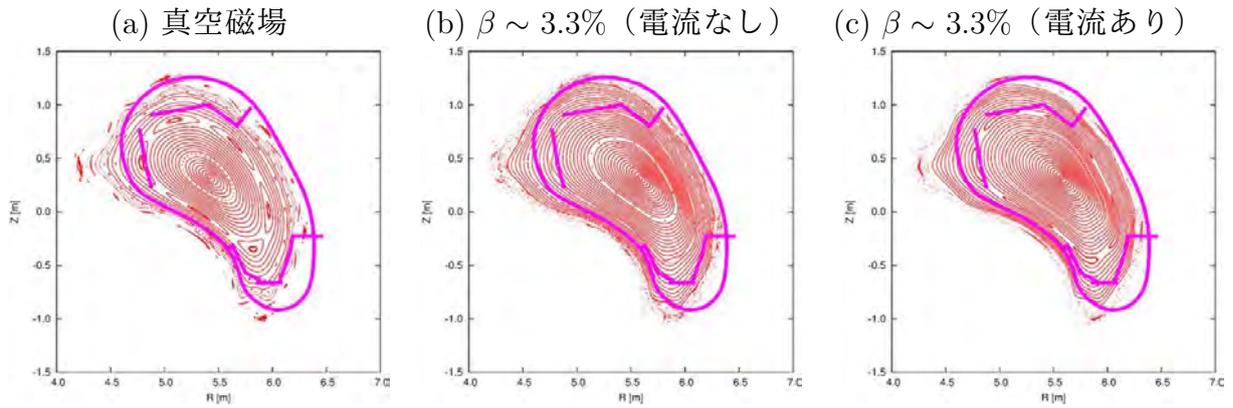


図 3.3.1.2-1 HINT コードにより解析された磁気島ダイバータ配位の平衡解析結果。

なってくるにつれて前駆振動が緩やかに成長し、周波数がゼロとなった時点で非常に大きな成長率を持って成長することが観測されている [3.3.1.3-1]。そこで、モードの回転が、交換型モードの安定性に対して大きく寄与しているのではないかと考え、3次元 MHD 安定性シミュレーションにおいて、このプラズマフローを取り入れた研究を進めた [3.3.1.3-2-4]。このシミュレーションを行うには、プラズマ全域にわたってのフローの分布が必要となる。定常非圧縮のポテンシャルフローに対しては、Hamada 座標を用いて比較的簡便な表式が得られる。そこで、3次元平衡を VMEC コードを用いて計算し、VMCEC 座標を仲介としてこのフローを計算する手法を新たに開発し、FLOWVM コードを作成した。この計算においては、LHD でのフローの計測データを用いている。この計測では、横長断面の水平面上での磁気軸よりも外側領域で、フロー速度のポロイダル及びトロイダル成分の一次元動径方向分布が得られている。図 3.3.1.3-1 に示すように、本研究で開発した手法を用いることによって、このデータをもとに、プラズマ全体にわたって3次元のフローの分布が計算できるようになった。また、この図から分かるように、計測データのない磁気軸よりもトラス内側の領域の方が、外側領域よりも大きなフロー速度があることが分かった。

プラズマフローの3次元分布が計算できるようになったので、3次元 MHD 安定性シミュレーションにおいて、このプラズマフローを取り入れた研究を行った。

本来、安定性に対するフローの効果を調べるためには、フローを含めた平衡を計算し、その安定性を調べる必要がある。しかし、現時点においては、フローを含めたヘリオトロンプラズマの3次元平衡を矛盾なく計算する手法は確立されていない。そこで、本研究では、まず、静止平衡を計算し、安定性ダイナミクスを計算する際に、フローの効果を初期摂動に加えて時間発展を追跡することで、その効果を調べるこ

とした。この手法において、平衡計算には HINT コード [3.3.1.3-5] を用い、安定性ダイナミクス計算には MIPS コード [3.3.1.3-6] を用いた。本研究では、交換型モードの不安定性とそれに対するフローによる影響を効果的に調べるために、フローを計測した平衡よりも不安定な平衡を採用した。この場合、フローが流れないことを仮定すると、図 3.3.1.3-2 (a) に示すように、交換型モードが成長し非線型状態において圧力分布に変形が生じる。これに対し、下図のフローを加え、その大きさを大きくしていくと、実験データの 10 倍程度までは、フローによって安定化効果が見られ変形が抑制された。ところが、30 倍の大きさにすると、逆に不安定化の効果が表れ変形が大きくなった。この原因を探るために、圧力摂動の Boozer 座標での Fourier モード成分のプロファイルを比べてみた。図 3.3.1.3-2 に示すように、フロー無しの場合には、交換型モードの典型的な形状である偶関数のプロファイルが得られたのに対し、30 倍のフローの場合には、プロファイルは奇関数となりプロファイルに零点が現れた。これまでの研究から、このプロファイルは、交換型モードではなく、Kelvin-Helmholtz 不安定性に特有のものであることが分かった [3.3.1.3-7]。このことから、LHD の安定性においてフローの値を変化させた場合、交換型不安定な領域と Kelvin-Helmholtz 不安定な間に安定化領域が存在し得ることが分かった。この結果は、これまでの抵抗性 g モードの研究とよく一致したものとなっている [3.3.1.3-7, 8]。

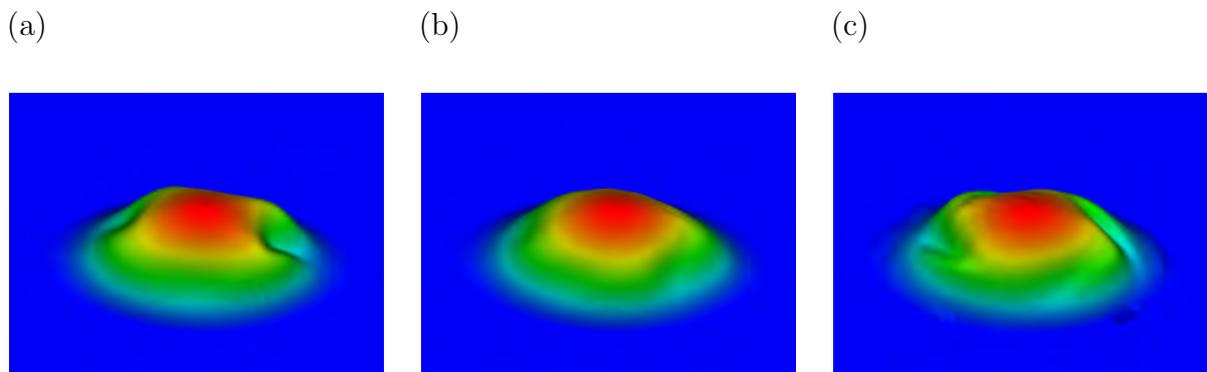


図 3.3.1.3-1 交換型モードによって変形した圧力分布の鳥観図。(a) フローなしの場合、(b) 実験値の 10 倍のフローが存在する場合、(c) 実験値の 30 倍のフローが存在する場合。

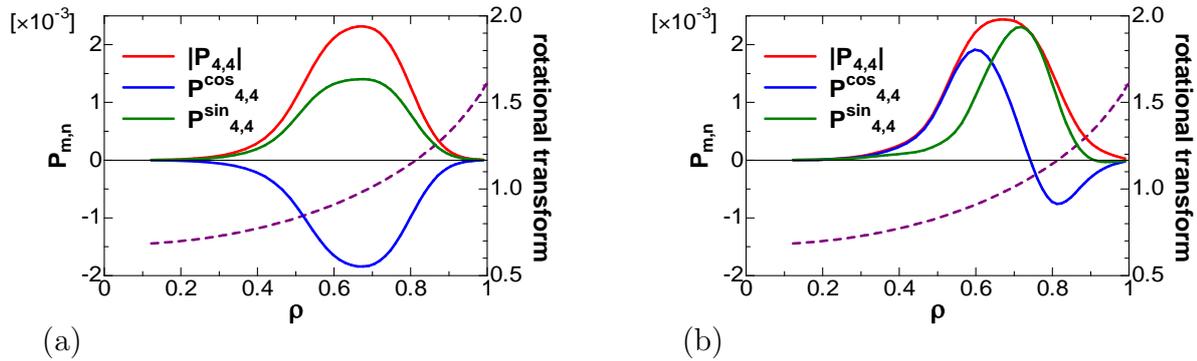


図 3.3.1.3-2 Boozer 座標上での摂動圧力の支配的成分のモード構造。(a) フローなしの場合、(b) 実験値の 30 倍のフローが存在する場合、

[3.3.1.3-1] S. Sakakibara, et al., . Nucl. Fusion, **53**, (2013) 043010.

[3.3.1.3-2] K. Ichiguchi, et al., Plasma and Fusion Res. **11**, 2403035 (2016).

[3.3.1.3-3] K. Ichiguchi, et al., Proc. 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, (2016).

[3.3.1.3-4] K. Ichiguchi, et al., Proc. 44th EPS Conference on Plasma Physics, Vol. 41F, P2-133 (2017).

[3.3.1.3-5] Y. Suzuki, et al., Nucl. Fusion **46** L19 (2006).

[3.3.1.3-6] Y. Todo, et al., Plasma and Fusion Res. **5** S2062 (2010).

[3.3.1.3-7] H. Sugama and M. Wakatani, Phys. Fluids, B3 (1991) 1110.

[3.3.1.3-8] B. A. Carreras et al., Phys. Fluids, B5 (1993) 1491

3.3.1.4 インターチェンジモードにおける非線形パリティ混合

LHD プラズマで問題となる圧力勾配駆動型 MHD 不安定性の線形固有モードの磁気フラックスは、奇関数構造を持ち磁気島を形成しない。しかしながら、簡約化一流体モデルによるシミュレーションによれば、非線形的に磁気島が形成されることがこれまでに示されており、また、LHD 実験においても磁気島の存在を示唆する結果が得られ

ている。本研究では、抵抗性インターチェンジモードによる磁気島形成のメカニズムについて、簡約化二流体モデルによるシミュレーションにより詳細に調べた。

このシミュレーション解析では、簡単のために、スラブプラズマを考え、 x 軸方向には固定境界条件、 y 軸方向には周期境界条件を考え、 z 軸方向には一様であると仮定した。計算の結果、磁気島形成の要因となるテアリングパリティの生成は、線形不安定モードなモード同士のモードカップリングによる生成の他、変調不安定性による生成があることを新たに見出した。この変調不安定性によるテアリングパリティ生成は、最も長波長のインターチェンジモードが不安定な場合に見られる。この場合に対応した各モードごとの磁気エネルギーの時間発展を図 3.3.1.4-1 (a) に示す。 $t \sim 2 \times 10^4$ にて一度飽和状態が得られているが、 $t > 5 \times 10^4$ になると振動現象が現れていることが分かる。図 3.3.1.4-1 (b) では、 $n = 0, 1, 2$ のモードの磁気フラックスを、インターチェンジパリティ成分（奇関数成分）とテアリングパリティ成分（偶関数成分）に分離し、それぞれのエネルギーの時間発展を示したものである。 $n = 1$ のインターチェンジパリティモードが線形不安定であり、 $t \sim 2 \times 10^4$ にて $n = 1$ のインターチェンジパリティモードの振幅が最も大きい状態で飽和する。この最初の飽和状態における磁気面の様子を図 3.3.1.4-2 (a) に示す。磁気島が 2 個形成されているが、これは、 $n = 1$ のインターチェンジパリティモード自身のモードカップリングにより、 $n = 2$ のテアリングパリティ成分が生成されたことによる。2 個の磁気島の形成後、図 3.3.1.4-1 に示すように、 $n = 1$ のテアリングパリティモードと $n = 0$ のインターチェンジパリティモードが成長してくることが分かる。解析の結果、これは、 $n = 1$ のインターチェンジパリティモードをエネルギー源として成長する変調不安定性によるものであることが分かった。最終的には $n = 1$ のテアリングパリティの振幅は $n = 1$ のインターチェンジパリティの振幅と同程度になって飽和し、図 3.3.1.4-2 (b) に示すように磁気島は 1 個だけが形成されるようになる。エネルギーの振動現象は、 $n = 1$ のインターチェンジパリティモードと、 $n = 1$ のテアリングパリティモードの実周波数が異なることに由来する。このシミュレーションで示した非線形的な磁気島形成は、LHD 実験で見られるロックドモード様不安定性に大きな影響を与えている可能性があり、実験との比較・検証は今後の課題である。

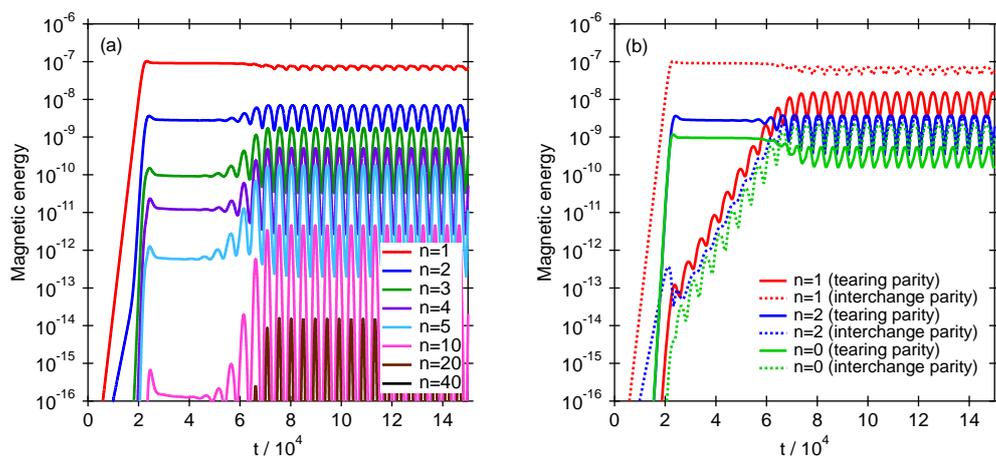


図 3.3.1.4-1 (a) モード毎の磁気エネルギーの時間発展。(b) $n = 0, 1, 2$ のパリティ毎の磁気エネルギーの時間発展。

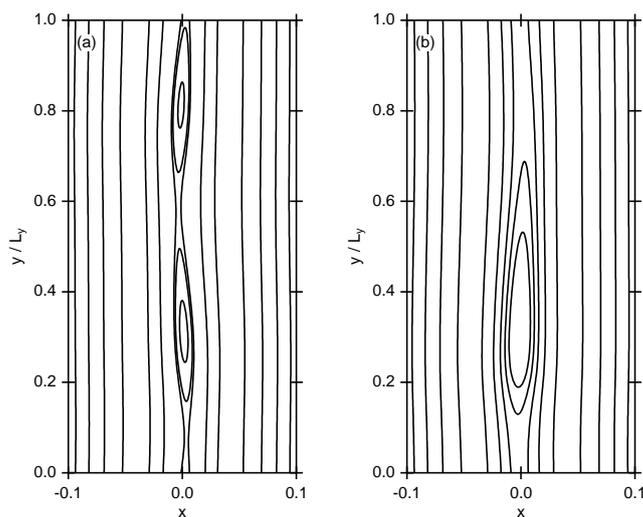


図 3.3.1.4-2 (a) インターチェンジパリティモードの振幅が最も大きい初期の飽和状態 ($t = 40000$) における磁気面と、(b) 変調不安定性により成長したテアリングパリティモードが飽和状態 ($t = 150000$) にある時の磁気面。

3.3.1.5 MHDシミュレーションによる内寄せLHD配位での高ベータプラズマのMHD特性の解析

LHD実験では内寄せ配位にて、体積平均ベータ値が約5%の安定な高ベータプラズマを準定常的に得られている。理論的には内寄せ配位は常に磁気丘が存在するためMHD不安定であるが、実験ではMHD不安定性は閉じ込め性能に大きな影響を与えておらず、内寄せ配位でのMHD安定性の理解は重要な課題の一つとなっている。本研究では、MHDシミュレーションコードであるMIPSコードを用いて、内寄せLHD配位の高ベータプラズマにおけるMHD不安定性の特性について調べた。

シミュレーションでは、HINTコードにより構築された中心ベータ値が7.5%と9.2%のMHD平衡に対して行った。これらのMHD平衡は、大きなシャフラノフシフトによりコア領域に磁気井戸が形成されメルシエ安定であるが、周辺部は磁気丘でありメルシエ不安定領域となっている。これらの平衡に対して線形計算を行ったところ、トロイダルモード数 n が $n \sim 10$ の抵抗性バルーニングモードが最も不安定であることが分かった。図3.3.1.5-1に中心ベータ値が9.2%の場合の非線形シミュレーションから得られた、縦長ポロイダル断面における圧力分布の時間発展の様子を示す。非線形の初期段階では、不安定な抵抗性バルーニングモードによる圧力分布の変形がプラズマ周辺部において見られる。この不安定性の影響はコア領域まで広がり、最終的にはコア領域の圧力を大幅に低下させる。圧力崩壊現象のメカニズムについて解析を行ったところ、線形不安定なバルーニングモード間のモードカップリングにより生成された、 $n=1$ で代表される低次のモードが、中心領域まで及ぶグローバルなモード構造を持つに至り、最終的には、低次モード自身のモードカップリングにより、中心圧力の大幅な低下を引き起こしていることが分かった。中心ベータ値が7.5%の平衡に対して得られた非線形シミュレーションも、同様の結果が得られている。このように、MHDモデルに基づく非線形シミュレーションでは、高ベータプラズマを維持できておらず、実験結果を再現するには至っていない。しかしながら、非線形発展は抵抗性モードにより支配されているため、実験で見られる高磁気レイノルズ数領域では、ここで示した計算結果よりも飽和レベルは低下し、コア崩壊は抑制される可能性はある。ここで示した非線形発展は、外寄せ配位で観測されるCDC現象と類似性がある。高磁気レイノルズ数での計算、及び、実験結果との詳細な比較は今後の課題である。

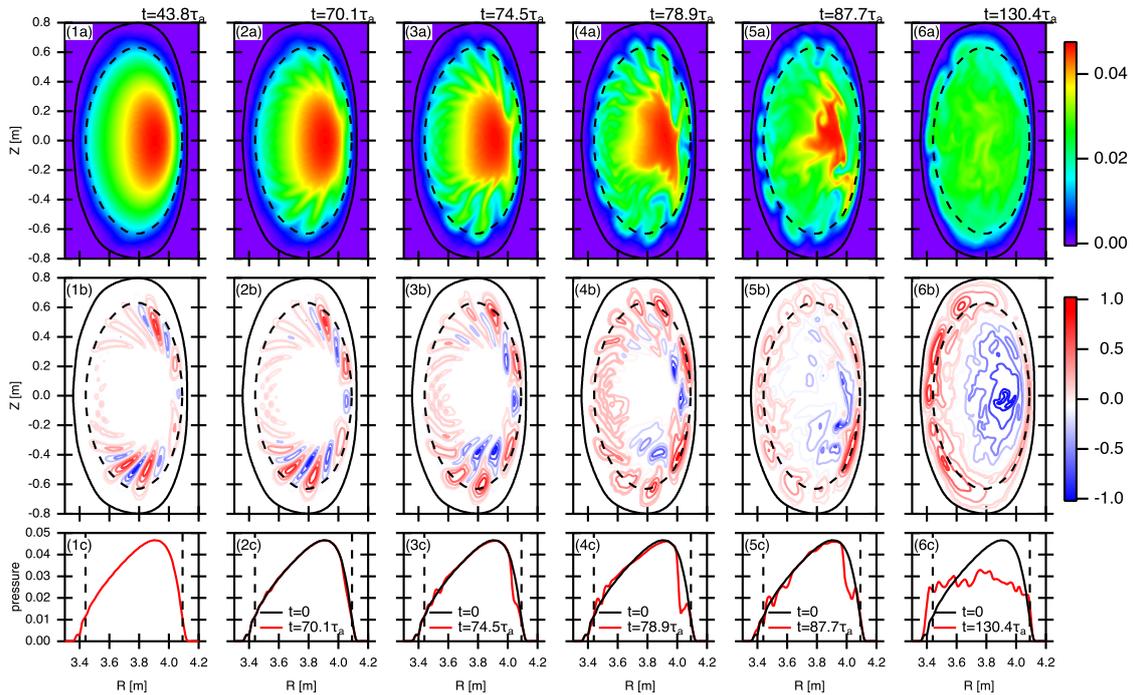


図 3.3.1.5-1 ポロイダル断面における（上段）全圧力分布と（中段）圧力の揺動成分の時間発展の様子。下段は、同断面における $Z = 0$ 上での全圧力分布の時間発展を示している。

3.3.1.6 バルーニングモードに対する熱イオンの運動論的効果

LHD 内寄せ配位における MHD 安定性の理解のため、MHD モデルに基づく解析がこれまでに多く行われてきた。しかしながら、MHD モデルに基づく結果は実験よりも不安定であり、実験結果を完全に再現するに至っていない。このような理論予測と実験結果との間の矛盾を解決するための一つの方法は計算モデルの拡張が挙げられる。本研究では熱イオンの運動論的効果を取り入れた運動論的 MHD モデルに基づく計算を行い、圧力勾配駆動型 MHD 不安定性である抵抗性バルーニングモードに対する熱イオンの運動論的効果について調べた [3.3.1.6-3]。

この解析では MEGA コードを使用した。MEGA コードは高エネルギーイオンと熱イオンの両方をドリフト運動論により取り扱うことができるが、ここでの解析では、熱イオンのみを考えた。電子は断熱則により流体で扱う。平衡は [3.3.1.6-2] の解析で使った、中心ベータ値が 7.5% の平衡を使用した。平衡においては、イオン圧力と電子

圧力は等しいとし、また、イオンの分布関数はマクスエル分布を仮定した。簡単のために、トロイダル角 ϕ が $\phi = 0$ と $\phi = 2\pi/10$ に周期境界条件を課し、トロイダルモード数が $n = 10$ とその高調波のみが成長する状況で解析を行った。イオンは、曲率ドリフトと磁場勾配ドリフトにより、磁力線からずれた運動を行う。この効果を調べるために、曲率ドリフトと磁場勾配ドリフトを考慮した場合と、無視した場合に対して計算を行い、両者の比較を行った。曲率ドリフトと磁場勾配ドリフトを考慮した場合の線形成長率は、両ドリフトを考慮しない場合の線形成長率の約 75% であり、線形成長率が低下することが分かった。図 3.3.1.6-1 に、曲率ドリフトと磁場勾配ドリフトを考慮しない場合と考慮した場合の、磁場に対して垂直方向のイオン圧力の揺動成分の径分布を示す。この図では、捕捉イオンからの寄与分と、通過イオンの寄与分についても示している。各モードの振幅は、電子圧力揺動の $(m,n)=(13,10)$ の最大振幅で規格化している。曲率ドリフトと磁場勾配ドリフトを考慮することにより、イオン圧力の振幅は減少している。これは、不安定性に対するイオンの応答が弱まっていることを示し、線形成長率の低下をもたらす。捕捉イオンからの寄与と通過イオンからの寄与を比較すると、捕捉イオンの寄与分が著しく減少していることが分かる。図 3.3.1.6-2 では、LHD における典型的な捕捉イオンの軌道と、抗性バレーニングモードによる電子圧力の揺動分布を示している。ここで、赤及び青の領域は、それぞれ、揺動振幅が正及び負に対応している。この捕捉イオンはヘリカルリップルに捕捉されており、トロイダル方向だけでなく、ポロイダル方向にも歳差ドリフト運動を行う性質がある。このポロイダル方向の歳差ドリフト運動により、モード構造に対する捕捉イオンの歳差ドリフト周波数は、不安定性の成長率と同程度、または、小さくなりうる。この時、捕捉イオンは不安定性の振幅が正及び負の両方の領域を通過することで、不安定性に対する応答が弱まることで、イオン圧力の揺動振幅は減少する。この歳差ドリフト運動による MHD 不安定性の抑制メカニズムは、高磁気レイノルズ数における抵抗性モード、及び、臨界安定付近の理想モードのように、線形成長率が小さい不安定性に有効であると考えられる。

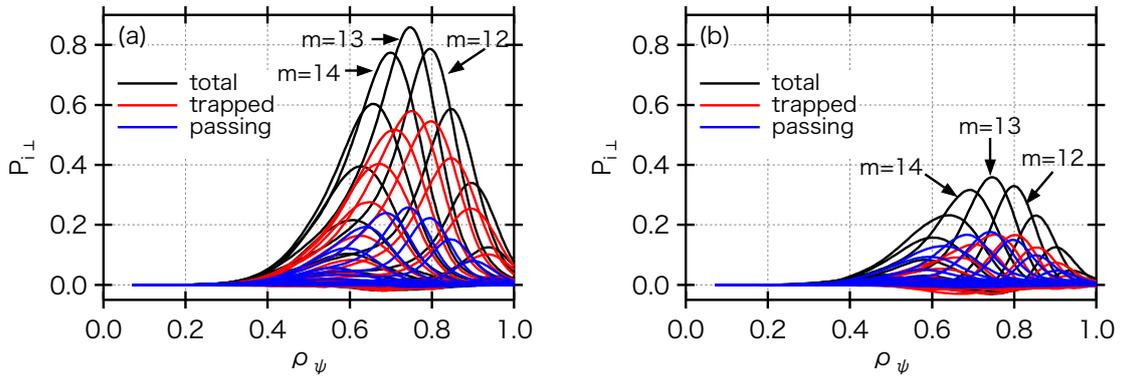


図 3.3.1.6-1 (a) 曲率ドリフトと磁場勾配ドリフトを無視した場合と (b) 両ドリフトを考慮した場合の磁場に垂直方向のイオン圧力の揺動成分の径分布。赤線は補足イオンからの寄与分、青線は通過イオンからの寄与分、黒は両方の寄与を合わせた分布である。各モードの振幅は、電子圧力揺動の $(m,n)=(13,10)$ の最大振幅で規格化している。

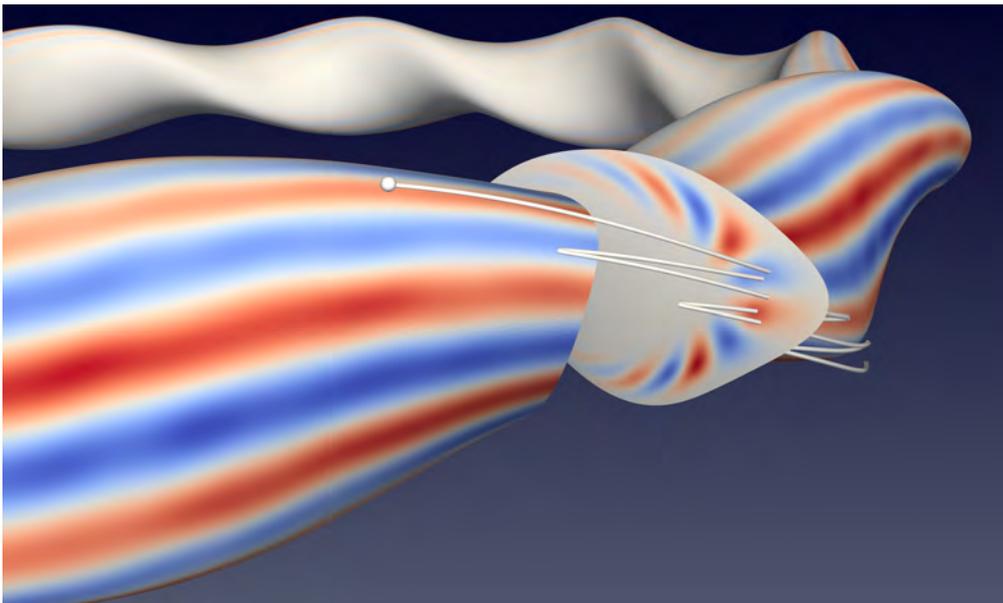


図 3.3.1.6-2 LHD における典型的な捕捉イオンの軌道と、抗性バレーニングモードによる電子圧力の揺動分布。ここで、赤及び青の領域は、それぞれ、揺動振幅が正及び負に対応している。

- [3.3.1.6-1] M. Sato and A. Ishizawa, “Nonlinear parity mixtures controlling the propagation of interchange modes resistive ballooning modes”, *Physics of Plasmas*, Vol.24 (2017) pp. 082501 (1 ~ 12).
- [3.3.1.6-2] M. Sato *et al*, “Characteristics of MHD instabilities for high beta plasmas in inward shifted LHD configurations Influences of ballooning modes with moderate wave number on MHD equilibrium in LHD”, *Nuclear Fusion*, Vol.57 (2017) pp. 126023(1 ~ 17).
- [3.3.1.6-3] M. Sato and Y. Todo, “Effect of precession drift motion of trapped thermal ions on ballooning modes in helical plasmas”, *Nuclear Fusion*, Vol.59 (2019) pp. 094003(1 ~ 5).

3.3.1.7 LHDのバルーニング不安定性についての3次元拡張MHDラージ・エディ・シミュレーション

LHDにおける短波長圧力駆動型（交換型、バルーニング）不安定性の飽和に関して、3次元拡張MHDのラージ・エディ・シミュレーション(LES)研究を進めている。LESは、数値的に解くべき方程式にローパスフィルターを作用させ、そのフィルターよりも長波長成分側（グリッドスケール, GS)のみを数値的に解く手法である。この際、数値シミュレーションで解像度以下となる短波長成分（サブグリッドスケール, SGS)が長波長成分に及ぼす影響は、SGSモデルと呼ばれる現象論的モデルで代替されることになる。

LES手法導入までの完全3次元圧縮性MHDシミュレーション及び2次元Rayleigh-Taylor不安定性の拡張MHD研究から、以下のことが分かっている。

- 短波長バルーニングモードの成長について、一流体圧縮性MHDモデルに基づく安定化効果はいくつか分かっているが、それらの効果は十分ではない。また、短波長バルーニングモードの特徴的なスケールはイオン表皮長よりも短いため、2流体効果などが重要になり、一流体モデルは破綻していると考えられる (Miura & Nakajima, 2010)。
- 2流体効果としてHall項及びジャイロ粘性項を考慮する場合、Hall項などの短波長成分と長波長成分の非線形結合が強く、単純に超粘性で数値シミュレーション

ンを安定化させた場合、非線形項の打ち切り効果が長波長成分に悪影響を及ぼし、プラズマのコアは大きく崩壊する傾向がみられる (Miura, 2014)。

- Hall 項及びジャイロ粘性項を取り入れた 2 次元 Rayleigh-Taylor 不安定性の拡張 MHD シミュレーションでは、短波長成分が著しく励起され (これは、ジャイロ粘性が入っていても変わらない)、何らかの数値的な安定化を図らない場合、電子スケールまでシミュレーションの解像度が要求される場合がある (Goto, Miura et al., 2015)。

以上の経緯から、LHD の短波長圧力駆動型不安定性についてシミュレーション研究を行う場合にはイオン表皮長よりも短い微視的效果を取り入れた拡張 MHD モデルを使用すべきこと、他方で、Hall 効果やジャイロ粘性項を陽に取り扱う場合には、強い非線形結合に起因する数値不安定性が障害となることが明確であった。このため、数値不安定性をもたらす短波長成分については SGS モデルで代替する LES を導入することで、シミュレーションに必要な解像度などを軽減することを方針として定めた。LES 手法のために必要な SGS モデルの開発については、基礎物理研究の項で報告するので、そちらを参照されたい。以下では、LES 手法を用いて LHD におけるバルーニングモードの成長の 3 次元拡張 MHD シミュレーションを行った結果について述べる [3.3.1.7-1,2]。

LHD の磁気軸位置 $R_{ax} = 3.6m$ 、 β 値 3.6% の平衡状態から成長するバルーニングモードについて、LES を実施した。LES 手法の導入により、従来の圧縮性一流体 MHD モデルのシミュレーションと同程度あるいはそれ以下の格子点数を用いて、ジャイロ粘性、Hall 高を陽的に扱うシミュレーションを安定に行うことが可能になった。SGS モデルを使用した 2 流体 MHD 方程式の LES は、GS のバルーニングモードの線形成長と非線形飽和を正常に再現することを確認した。図 3.3.1.7-1 (a) は、バルーニングモードの線形成長段階終盤における、圧力の等値面との流線である。ポロイダル方向への反磁性流れと、不安定性の成長に伴って生じるポロイダル方向流れが、流線に複雑な構造を与えている。図 3.3.1.7-1 (b) は、不安定性が完全に飽和した状態での圧力の等値面、磁力線 (太い管)、及び流線 (細い管) である。

シミュレーション結果から、非線形飽和過程において、長波長成分 (GS 成分) に対して SGS 成分が有意な役割を果たしている (乱流化した短波長成分の揺動が低波数モードに有意な影響を与えている) ことが明らかになった。このことは、有限の解像度でシミュレーションを実施する際、解像度以下の数値シミュレーションの格子幅よりも短い波長の成分が、常に低波数成分に影響を与える可能性を示唆しており、SGS 効果を常に意識することが重要である。SGS モデルには、調整可能なパラメータが複数含まれており、このパラメータについての調査を通じて、実験における短波長の乱流化した成分が、不安定性の温和な飽和に寄与することが示された。

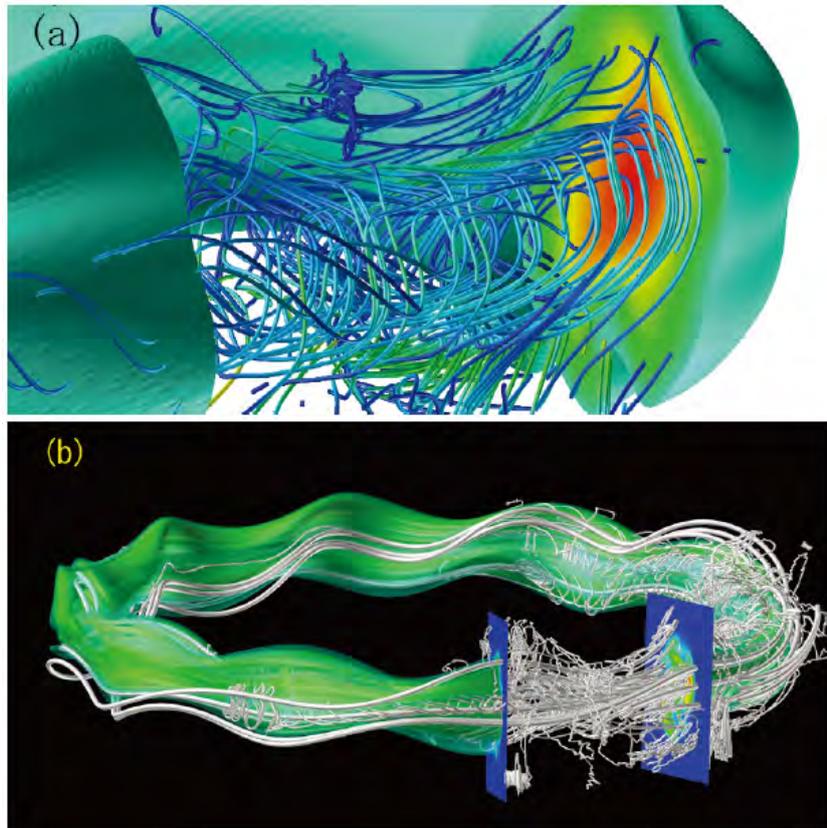


図 3.3.1.7-1 (a) LES の不安定性の線形段階終盤における、圧力の等値面との流線。
 (b) 不安定性が完全に飽和した状態での圧力の等値面、磁力線（太い管）、及び流線
 （細い管）。流線のサンプリングポイントを (a) の場合よりも $1/2 = 0.5$ の有理面の近
 くに局在化させて描いた。（文献 [3.3.1.7-2] 図 4 より。）

[3.3.1.7-1] H. Miura, F. Hamba, and A. Ito, “Two-fluid sub-grid-scale viscosity in non-linear simulation of ballooning modes in a heliotron device”, The 26th IAEA Fusion Energy Conference TH/P1-5 (October 17-22, 2016, Kyoto, Japan).

[3.3.1.7-2] H. Miura, F. Hamba, and A. Ito, “Two-fluid sub-grid-scale viscosity in non-linear simulation of ballooning modes in a heliotron device”, Nuclear Fusion Vol.57 (2017) 076034..

3.3.1.8 LHD プラズマにおける MHD 現象の因果律の検討

大型ヘリカル装置 (LHD) の高ベータ実験においては、トロイダル電流駆動放電と磁気軸スイング放電において崩壊現象が観測されている [3.3.1.8-1]。この場合、交換型モードによって、電子温度分布の崩壊が見られる。このいくつかの場合においては、モード回転周波数が減衰してゼロになることとモードの急激な成長の間に、非常に明確な相関がみられている。また、このモード周波数は、バルクプラズマの ExB 回転周波数に近い値となっている。従って、プラズマの回転が、モードの安定性に大きく関与していることが分かる。しかし、この両者の因果関係は明確にはなっていない。すなわち、回転が止まったことによってモードが成長したのか、モードが成長したために回転が止まったのか、ということは明らかになっていない。そこで、本研究では、この因果関係を解明するために、transfer entropy [3.3.1.8-2,3] の手法を用いることにした [3.3.1.8-4]。X の事象が Y の事象に与える transfer entropy は次式で与えられる。

$$T_{X \rightarrow Y} = \sum p(x_{n+1}, x_{n-k}, y_{n-k}) \log_2 \frac{p(x_{n+1}|x_{n-k}, y_{n-k})}{p(x_{n+1}|x_{n-k})}.$$

ここで、 x, y はそれぞれ事象 X 及び事象 Y の時系列データであり、 k は両事象の時間差を示す指標である。また、 $P(a)$ はデータ a が生じる確率分布関数であり、 $p(a|b) = p(a, b)/p(b)$ は、 b の条件の下での a の条件付確率を示している。完全に事象 X が原因で事象 Y が結果である場合には、この値は有意に大きくなるが、逆の場合には、ゼロとなる。

この手法を、トロイダル電流駆動放電で得られているモード周波数と磁場摂動の時系列データに適用した。図 3.3.1.8-1 に示すように、この放電での崩壊現象では、「モード回転の停止→モードの成長」の transfer entropy は、時間差 0.06 秒付近において大きな値を持ち、一方で、「モードの成長→モード回転の停止」の transfer entropy は、全域にわたってゼロとなっている。このことから、この崩壊現象では、モードの回転が原因となって、モードの成長を引き起こしたと考えられる。磁気軸スイング実験に対しても同様の解析を行い、やはり、モード回転の停止が原因でモードの成長が結果となる因果関係が得られている。

[3.3.1.8-1] S. Sakakibara, et al., . Nucl. Fusion, **53**, (2013) 043010.

[3.3.1.8-2] B. Ph. van Milligan, et al., Nucl. Fusion **54**, 023011 (2014).

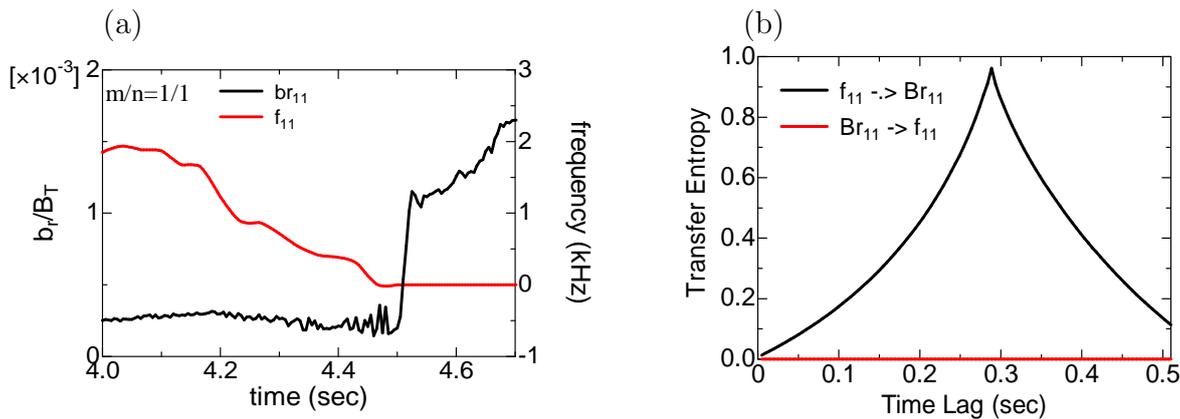


図 3.3.1.8-1 (a) 電流駆動放電における、 $m = 1/n = 1$ 成分の摂動磁場 br_{11} (黒) と、その回転周波数 f_{11} (赤) の観測データ。(b) br_{11} と f_{11} との間の transfer entropy。

[3.3.1.8-3] T. Schreiber, Phys. Rev. Letters, **85**, 461 (2000).

[3.3.1.8-4] K. Ichiguchi, et al., Proc. 45th EPS Conference on Plasma Physics, Vol. 42A, P1-1046 (2018).

3.3.1.9 D型変形断面のヘリオトロン磁場の数値的検討

核融合科学研究所の次期計画装置の検討として、連続巻きヘリオトロン配位の最適化を、主として核融合工学研究プロジェクトと共同で行っている。その一環として、ヘリオトロンプラズマ断面のD型変形を検討した [3.3.1.9-1]。

ステラレータ配位は、トカマクと異なり、閉じ込め磁場を生成するためにプラズマ中に大電流を流す必要がないという、大きな利点を持っている。さらにその中でも、連続巻きコイルを採用しているヘリオトロン配位では、ダイバータ磁力線が自動的に存在するという優れた性質がある。しかし、ダイバータ磁力線は、プラズマの最外郭磁気面とヘリカルコイルの間を通過するため、この性質を活用するためには、最外郭磁気面とヘリカルコイルの間隔、すなわち、ダイバータクリアランスを十分広く確保しておくことが必須となる。一方、将来の炉設計を検討した場合、システムの小型化は魅力的である。ところが、ヘリカルコイルの電流密度が一定にして磁場強度を保つ場合、大半径を小さくするにつれてダイバータクリアランスが狭くなる。そこで本研究では、十分なダイバータクリアランスを確保するために、プラズマ断面をD型に変形することを検討した。このために、図 3.3.1.9-1 に示すように、ヘリカルコイルの内側にポロイダルコイル (D shape coil) を1本設置することとし、このコイルに流れる

電流による真空磁場の变化について解析した。

図3.3.1.9-2に縦長断面の磁気面の形状を示す。この図から、D shape coil 電流を流した場合には、トーラス内側の領域が削減されプラズマ断面の形状がD型に変形していることが分かる。従って、D shape coil 電流はダイバータクリアランスを確保するうえで十分機能することが分かった。一方、この内側領域削減のため、コイル電流を増加させるにつれて閉じ込め領域が小さくなる傾向がある。また、平均的に断面が縦長となるため、上下方向の領域の粒子の軌道損失が生じるという欠点もある。これを回避するために、断面を平均的に横長にするようにポロイダル磁場を制御する等の検討が今後必要があると考えられる。

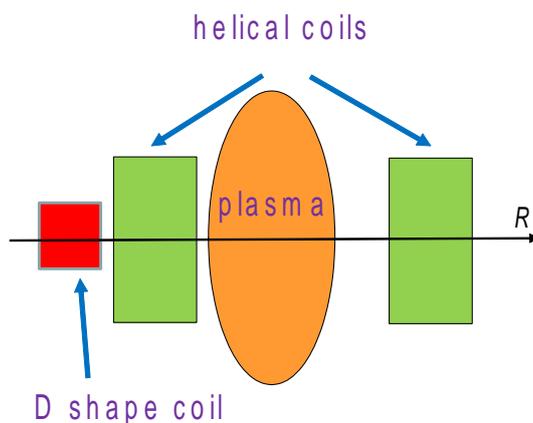


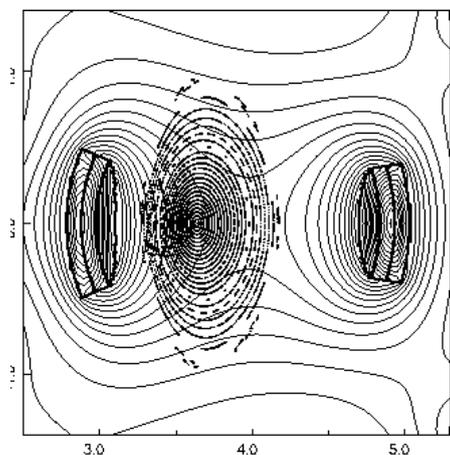
図 3.3.1.9-1 D shape coil とヘリカルコイルの模式図

[3.3.1.9-1] K. Ichiguchi and Y. Suzuki., Plasma and Fusion Res. **14**, 3403100 (2019).

3.3.1.10 磁気島のある LHD プラズマにおけるペレット入射

LHD の磁気島がない磁場配位と磁気島がある磁場配位における水素ペレット入射実験において密度変化を比較したところ、磁気島内では、非常に短時間に密度が大きく上昇していることが明らかになった [3.3.1.10-1]。このような現象を明らかにするために、ペレット溶発 MHD コード (CAP コード) を用いたシミュレーションを行った [3.3.1.10-2]。このコードにおいては、ペレット溶発モデルを粒子源として用いており、これが一定の速度でプラズマ内に侵入することを仮定している。ペレット溶発モデル

(a)



(b)

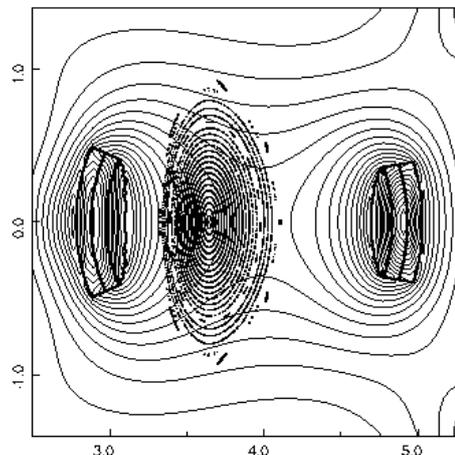


図 3.3.1.9-2 真空磁気軸位置 $R_{ax}=3.6\text{m}$, $\gamma_c=1.254$ での LHD 真空磁場のポアンカレプロット。D shape coil 電流が (a) 無しと (b) 有りの場合、

とは、球状ペレットが電子等の熱源により動径方向に溶発することを仮定した 1 次元モデルであり、ペレットの半径、及び背景プラズマの温度、密度から溶発率を求めることができる簡易モデルである。

図 3.3.1.10-1 (a) に示す磁気島がない配位に、半径 0.15mm の水素ペレットを 10^4m/s の速度で低磁場側から磁気軸に向かって入射した時のペレット溶発率 G_p を図 3.3.1.10-1 (b) に青線で示す。赤線は初期電子温度 T_e を示している。大半径 $R = 4.44\text{m}$ がペレットの入射位置であり、そこから $R = 4.19\text{m}$ まで G_p は上昇し、その後減少して $R = 4.12\text{m}$ でゼロ、つまりペレットが消滅している。赤破線は、ペレット消滅後の電子温度を示している。図 3.3.1.10-2 (a) に示す $m/n = 1/1$ の磁気島がある配位に同条件でペレットを入射した時の G_p と T_e を図 3.3.1.10-2 (b) に示す。磁気島は $4.3\text{m} < R < 4.45\text{m}$ に位置しており、 T_e が平坦になっている。磁気島があるために、ペレットの初期位置 $R = 4.56\text{m}$ における T_e の立ち上がりは大きいので G_p の増加も大きく最大値は $R = 4.43\text{m}$ に、つまり磁気島がない配位よりも周辺側に位置している。また、 T_e が平坦であるのでペレット入射位置から消滅までの距離は長い。図 3.3.1.10-3 (a)、(b) はそれぞれプラズモイドの密度と圧力を示す。赤線と緑線はそれぞれ磁気島がない配位と磁気島がある配位における値を示しており、実線と破線はそれぞれ $t = 15\mu\text{s}$ と $35\mu\text{s}$ における値を示して

いる。磁気島がある配位は、周辺における温度の立ち上がりが大きく溶発量が大きいため、 $t = 15\mu\text{s}$ では密度の最大値が大きい。その後、磁気島内では温度が平坦であるのに対して、磁気島がない配位では温度の立ち上がりが大きくなるので、 $t = 35\mu\text{s}$ では磁気島がない方が密度が大きくなる。青線と水色線はそれぞれ熱伝導がないことを仮定した場合の磁気島がない配位とある配位の結果であり、いずれも密度が小さくなっている。熱伝導がないと熱拡散がないため局所的な圧力は図 3.3.1.10-3 (b) に示されるように大きくなる。そのため、大きな圧力勾配によって磁力線方向に膨張が起こり、密度が小さくなる。

このシミュレーション結果によりペレット入射直後の磁気島内の密度上昇の実験結果は説明できるが、その後の密度減少は極めて速く、実験結果とは異なる。今後はこれらも含めて説明できるよう研究を進めていく。

[3.3.1.10-1] T. E. Evans, *et al.*, “Comparative Studies of Static Edge Magnetic Islands in DIII-D and LHD”, EX/1-3, 25th IAEA Fusion Energy Conference (2014).

[3.3.1.10-2] R. Ishizaki and N. Nakajima, “Magnetohydrodynamic simulation on pellet plasmoid in torus plasmas”, Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol.53, (2011) pp.054009(1~14).

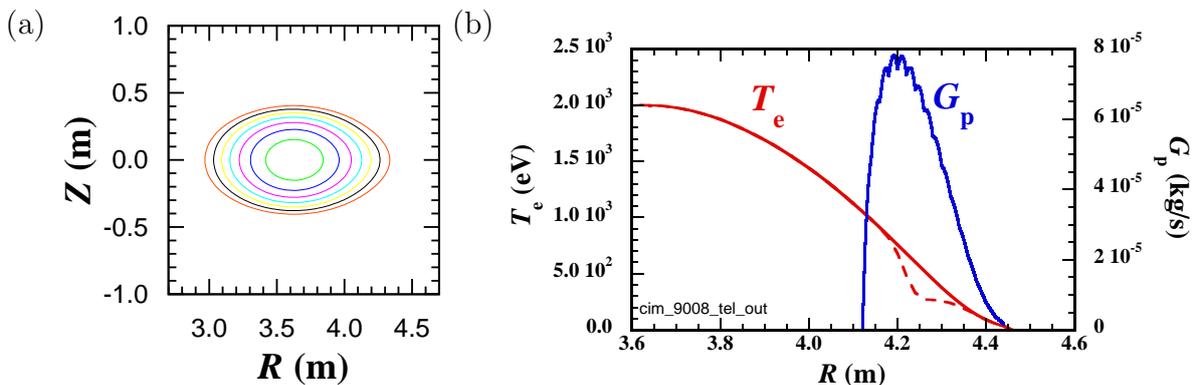


図 3.3.1.10-1 (a) 磁気島がない配位における横長ポロイダル断面。(b) ペレット溶発率 G_p (青線) と電子温度 T_e (赤線)。実線は初期温度、破線はペレット消滅後の温度を示す。

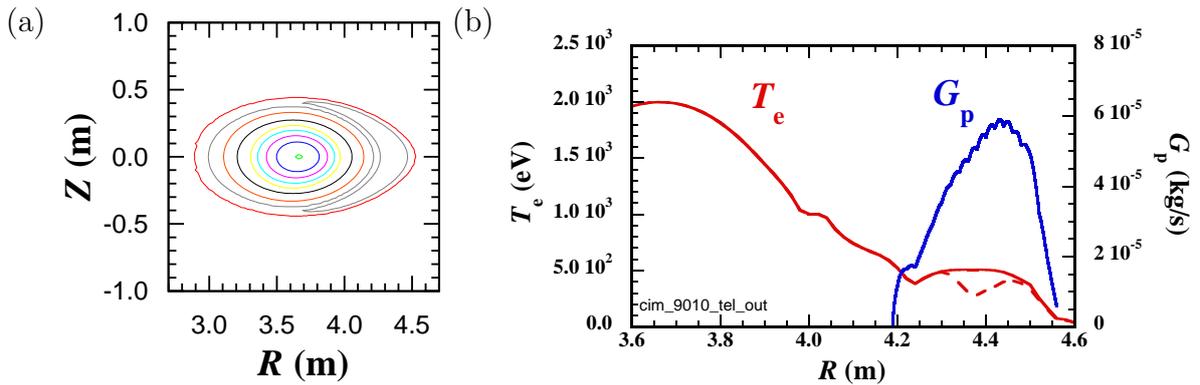


図 3.3.1.10-2 (a) $m/n = 1/1$ の磁気島がある配位における横長ポロイダル断面。(b) ペレット溶発率 G_p (青線) と電子温度 T_e (赤線)。実線は初期温度、破線はペレット消滅後の温度を示す。

3.3.1.11 疑似アニーリングによる高ベータ簡約化 MHD の軸対称トロイダル平衡計算

疑似アニーリングは、理想流体の支配方程式が Hamilton 系であることに基づいて導く人工的な発展方程式を解くことにより、定常解を求める方法である。そのアイデアは有限自由度の Hamilton 系でも同様に説明できる。まず、1次元調和振動子を例にアイデアを説明する。正準座標と正準運動量をそれぞれ q と p とすると、ハミルトニアンは $H := (q^2 + p^2)/2$ 、Poisson 括弧は関数 $f(q, p)$ と $g(q, p)$ に対して $\{f, g\} := (\partial f/\partial q)(\partial g/\partial p) - (\partial f/\partial p)(\partial g/\partial q)$ である。 $z = (z^1, z^2) := (q, p)$ とすれば、 $J^{ij} := \{z^i, z^j\}$ ($i, j = 1, 2$) を用い、 z^i の時間発展方程式は $\dot{z}^i = J^{ij} \partial H / \partial z^j$ となる。ここで、負定値の K_{ij} ($i, j = 1, 2$) を導入して $\dot{z}^i = J^{ij} K_{jk} J^{kl} \partial H / \partial z^l$ という人工的な発展方程式を考えると、系のエネルギー $(q^2 + p^2)/2$ は単調減少し、定常解 $q = p = 0$ に漸近する。非正準変数を用いてハミルトニアンと Poisson 括弧を書くと、Poisson テンソル (先の例で言うと J の部分) のランクが落ちる場合があり、それに対応する不変量が顕になる。上記の人工的な発展方程式は、この Casimir 不変量を保持したまま、系のエネルギーを極小化して定常解に導く。これが疑似アニーリングのアイデアであり、理想 MHD 方程式を含め、無限自由度の流体方程式にも同様に適用できる。先行研究の紹介も含めたレビューが [3.3.1.11-1] にある。

本研究では、高ベータ簡約化 MHD に対して疑似アニーリングを適用し、大アスペクト比・円形断面の軸対称トカマク平衡、並びにトロイダル方向に平均化されたステラレータ平衡の計算に成功した [3.3.1.11-2]。図 3.3.1.11-1 (a) は、文献 [3.3.1.11-3]

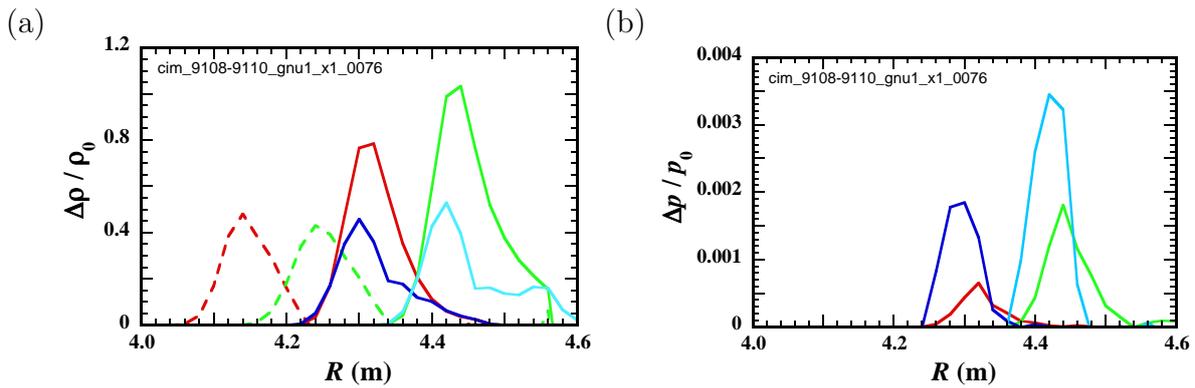


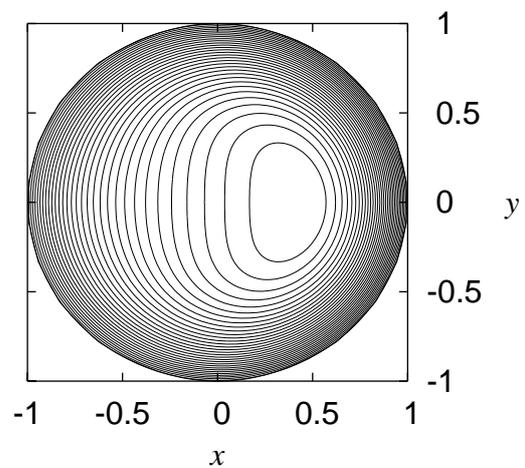
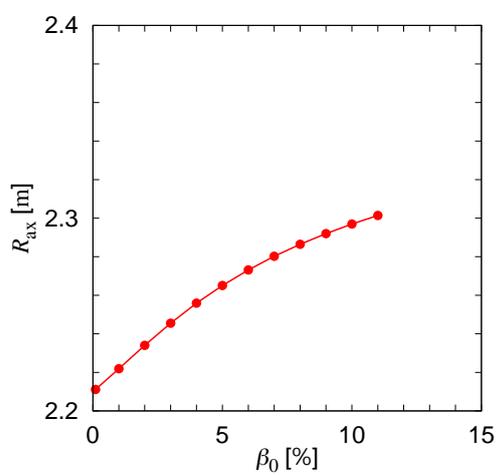
図 3.3.1.10-3 磁気島がない配位とある配位における (a) 密度分布と (b) 圧力分布。赤線、緑線はそれぞれ磁気島がない配位とある配位の値を示し、実線と破線はそれぞれ $t = 15\mu\text{s}$ と $35\mu\text{s}$ における値を示す。また、青線と水色線はそれぞれ、赤線、緑線の熱伝導のない場合に対応する。

で示されているヘリオトロン E 平衡を再現するべく疑似アニーリングによって計算した平衡の、磁気軸上のベータ値 β_0 と磁気軸位置 R_{ax} の関係を示している。疑似アニーリングでは各磁気面上で正味電流量ゼロの条件を課せなかったため、完全な再現には至っていないが、程良く一致はしている。また、 $\beta_0 = 11\%$ の時の磁気面の様子を図 3.3.1.11-1(b) に示す。磁気軸に近い磁気面は Shafranov シフトするとともに D 型に変形している。こちらも、文献 [3.3.1.11-3] で示されている平衡と程良く一致している。

[3.3.1.11-1] 古川勝, “流れや磁気島のある MHD 平衡の疑似アニーリング”, プラズマ・核融合学会誌, Vol. 94, (2018) pp. 341-348.

[3.3.1.11-2] M.Furukawa, Takahiro Watanabe, P. J. Morrison, and K. Ichiguchi, “Calculation of large-aspect-ratio tokamak and toroidally-averaged stellarator equilibria of high-beta reduced magnetohydrodynamics via simulated annealing”, Physics of Plasmas, Vol. 25, (2018) 082506 (8pp).

[3.3.1.11-3] Yuji Nakamura, Masahiro Wakatani and Katsuji Ichiguchi, “Low- n Mode Stability Analysis for $\ell = 2$ Heliotron/Torsatron by VMEC-STEP Code”, Journal of Plasma and Fusion Research, Vol. 69, (1993) pp. 41 ~ 52.



(a) 磁気軸上のベータ値 β_0 と磁気軸位置 R_{ax} の関係。

(b) 磁気軸上のベータ値が $\beta_0 = 11\%$ の平衡の磁気面の様子。

図 3.3.1.11-1 トロイダル方向の平均化されたステラレータ平衡。文献 [3.3.1.11-3] のヘリオトロン E 平衡の結果を模擬している。疑似アニーリングでは完全に同じ条件で計算できなかったが、程良く一致している。

3.3.2 コアプラズマの粒子・熱輸送

コアプラズマの粒子・熱輸送に関しては、第3期中期計画に従い、乱流輸送のモデル化と統合輸送コードへの組み込み、新古典及び乱流輸送コードへの複数イオン効果の取り込みを行っている。また、LHDプラズマ等における運動論的輸送の特性を評価し、実験結果との比較、実験結果の理解及びその予測へとつながる研究、それに必要とされるシミュレーションコードの開発・整備をしている。主要な成果は、以下の通りである。

乱流輸送のモデル化においては、運動論的電子応答を考慮した非線形ジャイロ運動論的シミュレーションの結果における電子・イオン熱拡散、及び粒子輸送を再現する簡約化モデルの構築を行った。この成果により、統合輸送シミュレーショングループと協力して、数値実験炉の構築の一環として、これらの簡約化モデルを統合輸送コード TASK3D に組み込む準備が整った。TASK3D による動的輸送シミュレーションにより求めた定常状態における電子・イオン温度分布は、実験結果と矛盾しないことが確認できた。簡約化モデルの適合性をさらに高めるため、準線形流束モデルを動的輸送シミュレーションに導入する研究を引き続き行う予定である。また、この他に、磁場揺動や温度・密度分布の時間発展と整合するよう動的に MHD 平衡を取り扱い、局所乱流輸送シミュレーションモデルを巨視的輸送方程式と連成させる大域輸送シミュレーション (TRESS+GKVコード) のための数値的手法の開発を量子科学技術研究開発機構との共同研究として行っている。

複数イオン効果を取り込んだドリフト運動論及びジャイロ運動論シミュレーションコードを用いた研究として、LHD実験で発見された不純物ホール現象の解析などを行っている。不純物ホール現象については、LHDに代表されるヘリカル/ステラレータ型の装置では、新古典輸送の効果がトカマクと比較して非常に大きいため、乱流輸送のみならず新古典輸送も考慮した解析を行っている。局所ドリフト運動論に基づく解析では、不純物粒子束が内向きとなるイオンルート電場のみが得られたが、中性粒子ビーム入射 (NBI) 加熱によって生じる外部トルクの影響を考慮すると、不純物粒子が外向きになる電子ルート電場も存在することが確認された。この他にも、磁気面上でのイオン密度の僅かな非一様性に起因するポテンシャル分布、いわゆる ϕ_1 ポテンシャルが、グローバルな新古典輸送解析と局所解析では異なることが分かり、現在、 ϕ_1 ポテンシャルの不純物輸送への影響について研究を進めているところである。

乱流輸送シミュレーションと実験結果との比較、実験結果の理解に関しては、LHDにおける軽水素及び重水素プラズマに対する微視的不安定性解析及び乱流輸送解析などを行っている。線形ジャイロ運動論解析によって、高電子温度放電においては

捕捉電子モード (TEM) 不安定性が支配的に、また、高イオン温度放電においてはイオン温度勾配 (ITG) 不安定性が支配的になり得ることを予測し、TEM 乱流に対しては、衝突度領域に応じて、ゾーナルフロー増大を伴う顕著な水素同位体質量効果が発現することを第一原理的なジャイロ運動論的乱流シミュレーション (GKV コード) によって明らかにした。このような理論予測に基づき、LHD 重水素実験における閉じ込め改善の検証と乱流揺動の同定に関する連携研究が進展している。

3.3.2.1 ジャイロ運動論的解析に基づいた、ヘリカルプラズマでの乱流粒子、熱輸送モデリングと輸送コードへの導入

ヘリカルプラズマにおいて、動的輸送解析の時間ステップごとに、非線形ジャイロ運動論的シミュレーションを行うことは非常にコストがかかる。計算コストを削減するために、電子運動に断熱近似を行った線形ジャイロ運動論的解析結果で、非線形ジャイロ運動論的結果を再現する簡約化モデルが提唱されている。この研究を更に進めて、本研究では、ヘリカルプラズマのイオン温度勾配不安定性によって駆動される粒子と熱輸送について運動論的電子応答を考慮に入れたジャイロ運動解析により、簡約化モデルを提唱した。大型ヘリカル装置（LHD）でのイオン温度勾配不安定性が励起している代表的なプラズマを調べた。許容誤差内で非線形ジャイロ運動論的シミュレーション結果を再現するための計算コストの低い2種類の輸送モデルを輸送解析での適用のために示した。はじめに非線形計算結果を再現する電子、イオンの熱拡散係数モデルを示した(図3.3.2.1-1)。電子及びイオン熱拡散係数モデルは、線形成長率と帯状流の線形応答に対する特徴的な量について与えられる。さらに、LHDプラズマの輸送解析に適用できる準線形流束モデルを構築した(図 3.3.2.1-2)。ここでは、粒子輸送に関する簡約化モデルを新たに示した。電子、イオン熱輸送の準線形流束モデルは、熱拡散係数モデルと同様の精度で非線形シミュレーション結果を再現している。これらの簡約化モデルにより、輸送シミュレーションへの結合が可能になる[3.3.2.1-1,2]。イオン及び電子温度分布の輸送シミュレーションは、熱拡散係数モデルと準線形流束モデルを用い、TASK3Dを使用して、実行される。非線形シミュレーション結果の乱流輸送は、これらのモデルで評価する。新古典輸送については DGN/LHD モデルを用いる。動的輸送シミュレーション結果の電子及びイオン温度分布(図3.3.2.1-3)は、LHDの実験結果の分布と矛盾しない[3.3.2.1-3]。図3.3.2.1-3(a)では、電子運動に断熱近似を行った場合と、運動論的応答を考えた場合のイオン温度分布に関する比較をした。イオン温度分布に関しては大きな違いはなかった。図3.3.2.1-3(b)では、熱拡散係数モデルと準線形流束モデルを用い、電子温度分布の定常状態を示した。双方のモデルを用いた場合で、電子温度分布に大きな違いは見られなかった。プラズマの中心付近で、実験結果との差が見られる。これは電子温度勾配上昇による輸送増加が、モデル化の際に取り入れられていないからである。

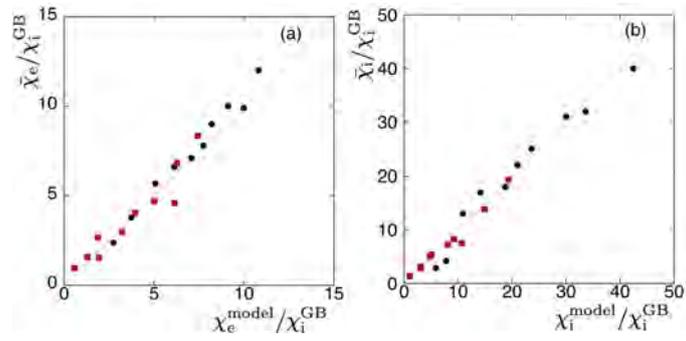


図 3.3.2.1-1 (a) 電子熱拡散係数モデル、(b) イオン熱拡散係数モデルと非線形計算結果の比較

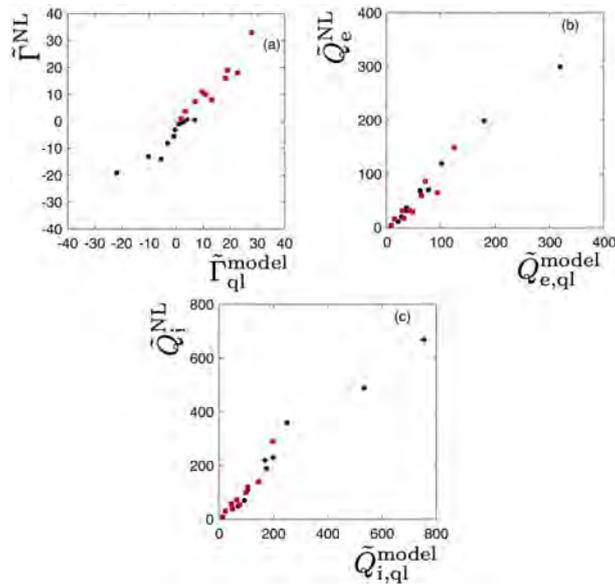


図 3.3.2.1-2 (a) 粒子、(b) 電子熱輸送、(c) イオン熱輸送に関する準線形流束モデルと非線形計算結果の比較

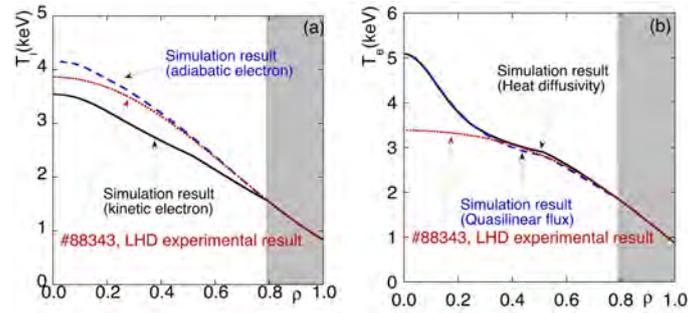


図 3.3.2.1-3 (a) イオン温度分布、(b) 電子温度分布と LHD 実験結果の比較

[3.3.2.1-1] S. Toda, et al., “A Reduced Transport Model for Ion Heat Diffusivity by Gyro-Kinetic Analysis with Kinetic Electrons in Helical Plasmas”, Plasma and Fusion Research Vol. 12 1303035 (2017)

[3.3.2.1-2] S. Toda, et al., “Modeling of turbulent particle and heat transport in helical plasmas based on gyrokinetic analysis”, Phys. Plasmas Vol. 26 012510 (2019), 「Phys. Plasmas」で過去1年間で最もダウンロードされたトップ15論文の一つ(12位)にランク、Invited talk: AAPPs-DPP B-I46 (2018)

[3.3.2.1-3] S. Toda, et al., “Transport Simulation for Helical Plasmas by use of Gyrokinetic Transport Model”, Plasma and Fusion Research Vol. 14 3403061 (2019)

3.3.2.2 ジャイロ運動論シミュレーションとの連成解析による大域的輸送コード開発と拡張

磁場閉じ込めプラズマ中において外部加熱と釣り合う乱流・新古典輸送の定量的評価や準定常状態における温度・密度分布の予測には、外部加熱の下で駆動される乱流場と輸送流束、大域的な分布の自己無撞着な計算が不可欠となる。これまでもジャイロ運動論に基づく乱流輸送シミュレーション研究が広く展開され、局所モデルによる輸送機構やゾナルフロー形成過程の詳細解析に加え、大域モデルによる分布形成過程や閉じ込めスケールリングなどが調べられている。

量子科学技術研究開発機構との共同研究において、従来の局所乱流輸送シミュレーションモデルを巨視的輸送方程式と連成させた大域輸送シミュレーションコード TRESS+GKV [3.3.2.2-1, 2] のフレームワークの開発を推進している。TRESS+GKV の開発目的の一つはフラックスマッチングと呼ばれる輸送レベル予測精度の定量検証手法を巨視的輸送方程式に基づいて系統的に行うことであり、加えて、輸送と加熱入力釣り合う定常状態の高速探索や外部加熱に対する非定常な乱流輸送の応答の解析も可能となる。大域的乱流輸送シミュレーションには full-f モデルと呼ばれる平衡と摂動のスケール分離を仮定しない計算モデルが開発されているが、磁場揺動や温度・密度分布の時間発展と整合する動的な MHD 平衡の取り扱い、数値的な手法の開発も含めて多くの課題があり、未だ確立されていない。TRESS+GKV は局所的乱流シミュレーションモデルと大域的乱流シミュレーションモデルの橋渡しを成すとともに、本質的に大域性が重要となる物理過程の抽出・モデリングにも役立つことが期待される。

これまでの共同研究により、トカマクプラズマにおける外部加熱ソースや周辺シンクを含む現実的な加熱・吸熱条件の下で、新古典及び ITG 駆動準線形輸送、並びにイオン温度分布の時間発展が自己無撞着に計算され、パワーバランスを満たす定常分布へ至る健全な動作が確認されている (図 3.3.2.2-1)。また、定常分布をより高速に計算するため、適合型加熱ソースや遺伝的アルゴリズム [3.3.2.2-3] などの大域的最適化手法を用いた計算加速手法も考案・実装され、その有効性の実証が進展している。さらに、電子温度分布や密度分布の時間発展なども同時に扱う多粒子種化の拡張や深層学習を応用した簡約化乱流輸送モデル [3.3.2.2-4, 5] との結合、動的な MHD 平衡計算との結合に関する拡張も進められている。

[3.3.2.2-1] M. Nakata, M. Honda et al., Plasma Conference 2017, Himeji (2017).

- [3.3.2.2-2] M. Nakata, M. Honda et al., 7th Asia-Pacific Transport Working Group International Conference, Nagoya (2017).
- [3.3.2.2-3] M. Honda, *Comput. Phys. Commun.* 231, 94 (2018).
- [3.3.2.2-4] E. Narita, M. Honda et al., *Plasma Phys. Control. Fusion* 60, 025067 (2018).
- [3.3.2.2-5] E. Narita, M. Honda et al., *Nucl. Fusion* 59, 106018 (2019).

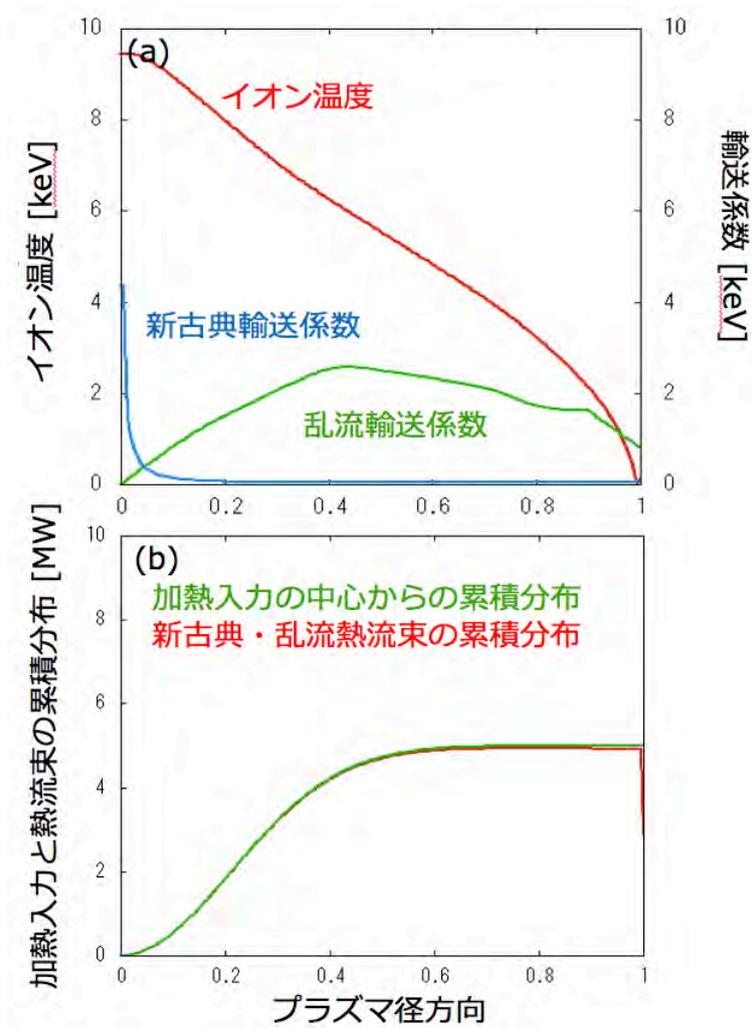


図 3.3.2.2-1 (a) 定常パワーバランス状態におけるイオン温度分布 (赤線)、新古典輸送係数(青線)、及びGKVが予測した乱流輸送係数 (緑線)。(b)最終時刻における加熱入力とプラズマ自身が駆動する熱流束の累積分布の比較。

3.3.2.3 乱流輸送のプラズマ分布依存性のシミュレーション研究

磁場閉じ込めプラズマの乱流輸送機構を解明するため、ヘリカル・トカマクの別なくこれまで多く大規模乱流シミュレーションが実施されてきた。数値実験炉研究プロジェクトにおいても、LHD プラズマを中心にして局所乱流計算が進められ、熱輸送係数など実験結果を定量的に再現することも可能になってきている。加えて、大規模乱流シミュレーション研究で明らかになった重要な結論の一つとして、乱流輸送におけるプラズマ分布の硬直性が挙げられる。これは、僅かなプラズマ分布（の勾配）の変化に対して、乱流輸送フラックスが極めて敏感に応答する性質である。言い換えると、乱流輸送フラックスが如何に変化しても、プラズマ分布は硬直してしまって殆ど変化しない。これは、特に実験で観測されるプラズマ温度及び密度分布では、多くの装置でのシミュレーション研究で明らかになっている。この特徴的な性質のため、局所シミュレーションにより乱流輸送レベルを定量評価するには、入力値であるプラズマ勾配分布にある程度の幅を持たせた有限のパラメータ領域における解析が必須となっている。特に、実験結果と比較するためには、この幅は実験観測データの測定誤差の範囲内であるべきものである。ここでは、LHD 高イオン温度プラズマを対象にして、許容されるパラメータ領域とその範囲内での乱流輸送フラックスについて評価した。これまでのプラズマ温度や密度分布の評価は、実験データからの関数フィッティングによって求められていたため、乱流輸送計算で特に重要となるプラズマ勾配分布については、その誤差に関する正確な評価が殆ど実施されてこなかった。そこで、本研究では赤池情報量基準 (AIC) に基づいて最尤のフィッティング関数をランダム抽出されたプラズマ温度の実験データの組み合わせから求め、その確率分布から温度勾配の誤差分布を定量的に求めた。この範囲内でジャイロ運動論的シミュレーションを実施し、乱流熱輸送係数の変化を解析した結果、断熱応答近似された電子を用いた計算では、実験で観測された輸送フラックスを満たす時の温度勾配は上で求めた誤差範囲内に留まっていることを確認した [3.3.2.3-1]。一方で、運動論的電子を用いた計算では、上述の誤差範囲外に温度勾配値が決定され、今後のシミュレーションモデルの改良の必要性が明らかになった。

[3.3.2.3-1] M. Nunami, *et al.*, “Simulation studies on temperature profile stiffness in ITG turbulent transport of helical plasmas for flux-matching technique”, *Physics of Plasmas* **25** (2018) 082504.

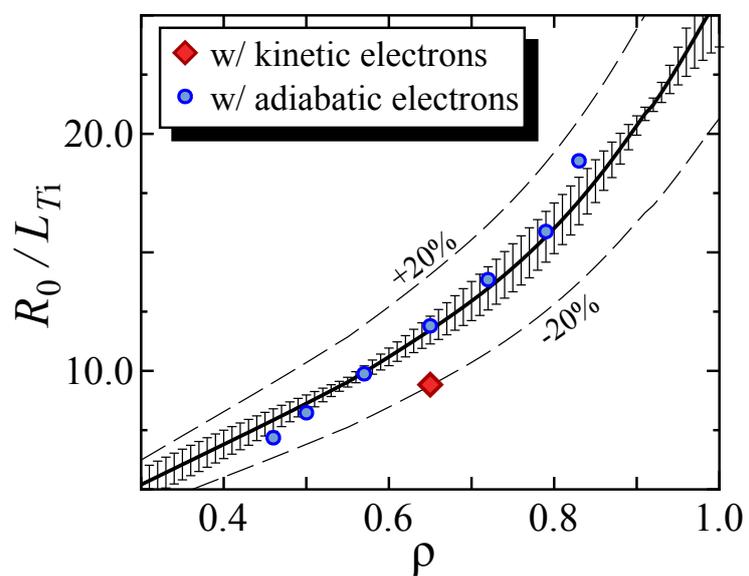


図 3.3.2.3-1 AICによるイオン温度勾配の誤差分布とジャイロ運動論シミュレーションから決定したイオン温度勾配の比較。

3.3.2.4 複数イオン種を含むヘリカルプラズマの微視的不安定性研究

ITERにおける燃焼プラズマや多くの現実的な実験室プラズマは、複数のイオン種を含む多成分プラズマで構成されている。特に、LHDでの重水素実験などいくつかの粒子種が混合したプラズマの輸送現象を理解することは将来の核融合炉実現に向けて欠くことができない重要な課題である。ここでは、バルクイオンとして水素イオン、またはヘリウムイオンの密度が支配的となる二種類のLHDプラズマにおける微視的不安定性について、ジャイロ運動論シミュレーションによって解析した [3.3.2.4-1]。LHD実験では、水素とヘリウムの密度比の変化に対して中心イオン温度が変化することが確かめられており、パワーバランス解析から、ヘリウム過多の場合のイオン熱輸送が水素過多の場合に比べて現象することが確認されている。このプラズマに対して線形ジャイロ運動論シミュレーションに基づいた混合長解析の結果、ヘリウム過多の場合、確かに不安定性が抑制されていることが分かった。一方で、この不安定性の抑制効果は、単純に構成プラズマの有効質量や有効電荷の効果だけでなく、電子及びイオンの温度比にも強く依存することが明らかになった (図 3.3.2.4-1)。ここでの成果は論文発表だけでなく、プラズマ理論物理学における国際会議で招待講演を行った [3.3.2.4-2]。

[3.3.2.4-1] M. Nunami, *et al.*, “Microinstabilities in hydrogen- and heliumdominated multi-ion-species plasmas in LHD”, *Plasma Phys. Control. Fusion* **59** (2017) 044013.

[3.3.2.4-2] M. Nunami, “Simulation studies on turbulent transport of multi-ion-species plasmas in helical systems”, *Theory of Fusion Plasma JOINT VARENNA - LAUSANNE INTERNATIONAL WORKSHOP*, Aug. 29 - Sep. 2 (2016), Varenna, Italy.

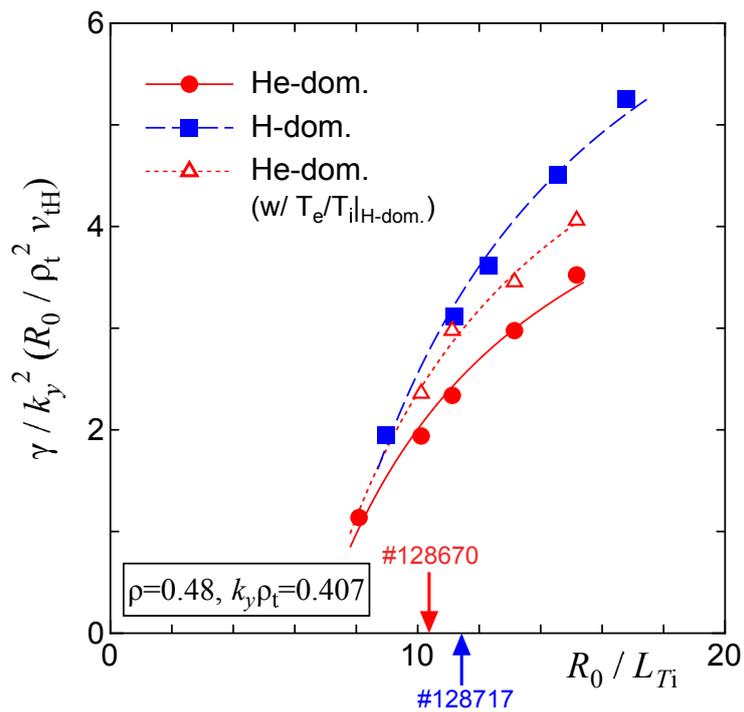


図 3.3.2.4-1 LHD プラズマにおける熱輸送係数の混合長解析。赤実線がヘリウムイオン過多、青破線が水素イオン過多の場合を示し、赤点線は、水素イオン過多での電子・イオン温度比をヘリウム過多プラズマに適用した結果。

3.3.2.5 プラズマ乱流輸送における水素同位体質量効果のシミュレーション研究及びLHD実験による検証

複数イオン種及び実質量電子の運動を同時に取り扱うことが可能なジャイロ運動論コードGKVを用いて、LHDにおける軽水素及び重水素プラズマに対する微視的不安定性解析及び乱流輸送解析が進展した。はじめに、線形ジャイロ運動論解析によって、電子サイクロトロン共鳴加熱(ECH)を用いた高電子温度放電においては捕捉電子モード(TEM)不安定性が支配的に、また、中性粒子入射(NBI)加熱を用いた高イオン温度放電においてはイオン温度勾配(ITG)不安定性が支配的になり得ることが予測された[3.3.2.5-1]。そして、TEM乱流に対しては、衝突度領域に応じて、ゾーナルフロー増大を伴う顕著な水素同位体質量効果が発現することが大規模な乱流計算によって明らかとなった(図3.3.2.5-1)。これは、第一原理的なジャイロ運動論的乱流シミュレーションによって従来のGyro-Bohm則とは逆の質量依存性の発現を示した初めての例であり、一連の成果をまとめた論文はPhysical Review Lettersに掲載された[3.3.2.5-2]。

上記の理論予測に基づき、LHD重水素実験における閉じ込め改善の検証とPCI揺動計測等による乱流揺動の同定に関する連携研究が進展している[3.3.2.5-3-5]。NBI及びECHによって生成された高イオン並びに高電子温度プラズマに対して軽水素と重水素のケースの比較を行った結果、重水素プラズマにおいてエネルギー閉じ込めの有意な改善現象が確認された。同時に、TEMの不安定化を示唆する乱流揺動特性や異なる密度分布形状特性も観測され、重水素プラズマでは軽水素プラズマに比べてよりホローな密度分布が形成され、閉じ込め特性に影響を与えているということが系統的に示されている[3.3.2.5-3,4]。実験計測分布を用いたGKVコードでの非線形シミュレーションによって乱流輸送レベルの定量比較が推進され、絶対値に関しては幾分の過大評価の傾向が見られるものの、重水素プラズマにおける閉じ込め改善率を再現することに成功している[3.3.2.5-5]。

一連の成果は国際ステラレータ-ヘリオトロン会議や欧州物理学会などにおける招待講演[3.3.2.5-6,7]として報告されるとともに、複数の学術表彰[3.3.2.5-8,9]の受賞などを通して高い評価を受けた。現在、平衡径電場効果や同位体混合効果[3.3.2.5-10]に関する実験・シミュレーション解析を進めており、今後の更なるLHD実験指針の提案にも貢献していく予定である。

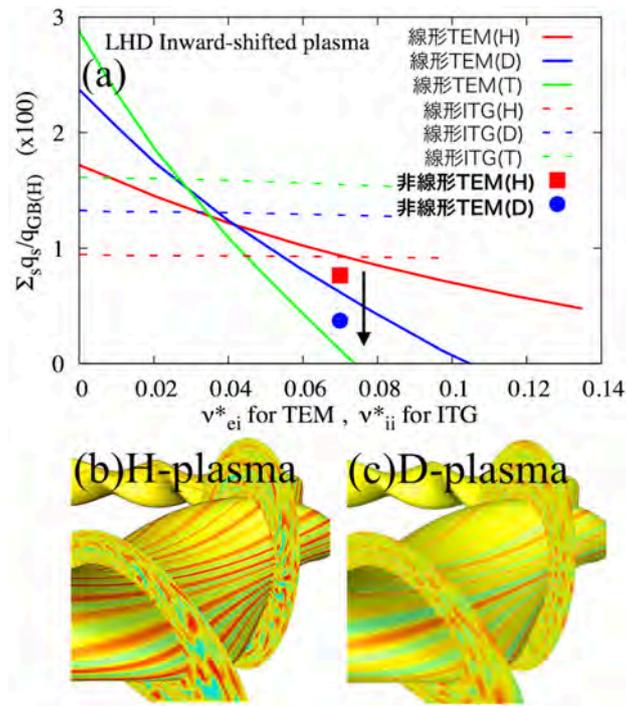


図 3.3.2.5-1 (a)LHD における乱流熱輸送の同位体質量及び衝突度依存性。(b)及び (c) 乱流場構造の比較

- [3.3.2.5-1] M. Nakata, M. Nunami et al., Plasma Phys. Control. Fusion 58, 074008 (2016).
- [3.3.2.5-2] M. Nakata, M. Nunami et al., Phys. Rev. Lett. 118, 165002 (2017).
- [3.3.2.5-3] M. Nakata, K. Nagaoka et al., Plasma Phys. Control. Fusion 61, 014016 (2019).
- [3.3.2.5-4] K. Tanaka, Y. Ohtani et al., Ncul. Fusion, in press.
- [3.3.2.5-5] K. Nagaoka, H. Takahashi et al., Ncul. Fusion 59, 106002 (2019).
- [3.3.2.5-6] M. Nakata, 21th International Stellarator and Heliotron Workshop, Kyoto, invited talk (2017).
- [3.3.2.5-7] M. Nakata, 45th European Physical Society Conference on Plasma Physics, Prague, invited talk (2018).
- [3.3.2.5-8] 仲田資季, 第 22 回プラズマ・核融合学会学術奨励賞 (2017)

[3.3.2.5-9] 仲田資季, 第7回自然科学研究機構若手研究者賞(2018)

[3.3.2.5-10] K. Ida, M. Nakata et al., Phys. Rev. Lett., submitted.

3.3.2.6 大域的 full- f ジャイロ運動論シミュレーションコードの開発

近年、パワーバランスに基づいた輸送解析を行うための手法として、大域的 full- f ジャイロ運動論シミュレーションと呼ばれる第一原理的シミュレーションモデルが開発され、2次元磁場構造を持つトカマクプラズマへの適用により大域的輸送機構を明らかにするなど大きな成果を上げている。一方で、LHDのような3次元磁場構造を持つヘリカル磁場配位に対しては、その複雑な磁場構造の取り扱いの難しさから大域的 full- f モデルの適用がなされておらず、新古典輸送と乱流輸送を分離した解析がなされるに留まっている。しかし、3次元磁場プラズマでは、低衝突周波数領域において新古典輸送が乱流輸送と同程度に大きくなりうること、また輸送の抑制機構として働く径電場が新古典輸送によって決まることから、3次元磁場プラズマを対象とした大域的 full- f ジャイロ運動論シミュレーション手法の確立は、LHDや数値実験炉における新古典・乱流輸送を結合した輸送解析・定常分布予測を行う上で重要な課題である。

2017年度より、日本原子力研究開発機構との共同研究に基づき、同機構内で開発された大域的 full- f ジャイロ運動論シミュレーションコードである GT5Dコードをベースとして3次元磁場平衡拡張版を開発してきた。GT5Dコードでは、空間4次精度の無散逸保存型差分スキーム、時間2次精度の半陰的ルンゲクッタ法を用いて粒子分布関数の時間発展を追跡する。3次元平衡版 GT5Dコードでは、3次元磁場平衡構築を行うVMECコードにより計算された一般曲線座標系で記述された平衡磁場に対して上記の無散逸保存型差分を適用する必要があるが、この時、粒子・エネルギー保存則を数値的に満たすためには磁気軸上での境界条件を適切に設定する必要がある。ここでは無散逸保存型差分手法に適した新たな磁気面座標系を構築し、保存則を破らない軸側境界条件を見出すことで磁気軸近傍での数値的問題を回避することに成功した。なお、簡単化のために現状の3次元平衡版GT5Dコードでは乱流場は取り扱わず、各時間ステップにおける径電場のみを粒子フラックスの両極性条件から求めている。

開発したコードのベンチマークとして、ヘリカルプラズマの基礎的な輸送過程である新古典輸送に適用し、大域的新古典輸送シミュレーションコードである FORTEC-3Dコードと比較した。その結果、両コードによって得られる新古典輸送フラックス（粒子・熱）、及び新古典輸送の両極性から決まる径電場の時間発展やその（準）定常分布がよく一致することを確認した（図3.3.2.6-1）。また、無衝突極限におけるベンチマークとしてゾーナルフロー減衰過程についても解析を行い、GT5Dコードによって得られる残留ゾーナルフローレベルやその波数依存性が理論予測をよく再現することを示した [3.3.2.6-1]。なお、ここまでの研究成果は国際会議である第2回アジア太平洋プラズマ物理学国際会議において招待講演として発表された [3.3.2.6-2]。

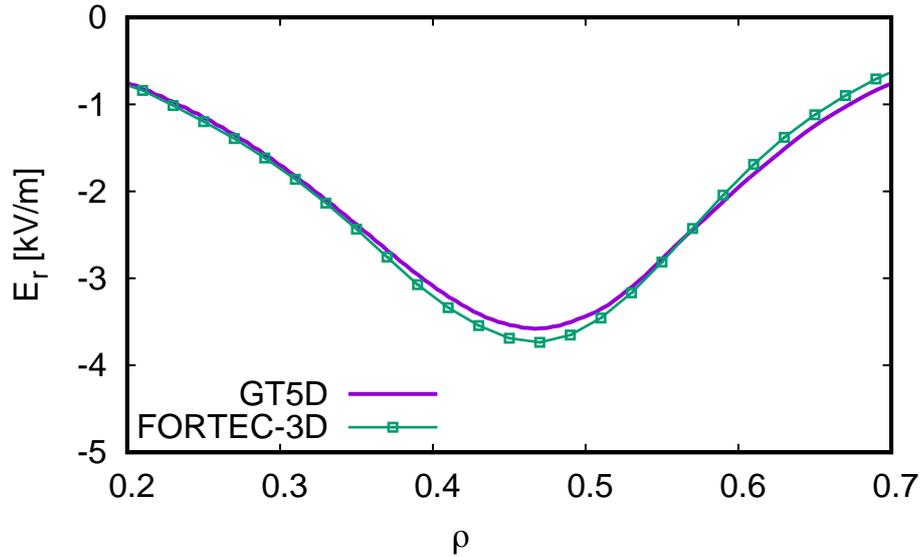


図 3.3.2.6-1 GT5D 及び FORTEC-3D コードで得られた（準）定常径電場分布。新古典輸送の両極性条件から得られた径電場がよく一致している。

現在、3次元平衡版 GT5D コードによる新古典輸送モデルを更に高度化するため、陰解法に基づいた多粒子種衝突オペレータの実装・整備を進めている。この拡張により、多粒子種からなるプラズマの新古典輸送評価が可能になったため、電子・イオン系プラズマの新古典輸送・両極性径電場や、LHD における不純物輸送解析において重要な炭素プラズマの新古典輸送についてベンチマークを進めている。

[3.3.2.6-1] S. Matsuoka, Y. Idomura, and S. Satake, “Neoclassical transport benchmark of global full- f gyrokinetic simulation in stellarator configurations”, Physics of Plasmas, Vol.25, (2018)pp.0225101~10

[3.3.2.6-2] S. Matsuoka, Y. Idomura, and S. Satake, “Global full- f kinetic simulation of neoclassical transport in stellarator/heliotron plasmas”, 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, B-I7, (November, 2018) Kanazawa, JAPAN

3.3.2.7 ドリフト・ジャイロ運動論に基づく衝突・乱流輸送理論の定式化の進展

以下に示すように、ドリフト・ジャイロ運動論に基づく衝突・乱流輸送理論の定式化が進展し、運動論的シミュレーションに役立つ近似手法の構築、保存則の導出や衝突演算子の改良が進められた。

論文 [3.3.2.7-1] では、ヘリカル系プラズマにおける新古典輸送において重要となる $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト、及び ∇B -曲率ドリフトの磁気面接線方向成分を含む局所近似ドリフト運動論モデルが導出された。導かれた局所ドリフト運動論的方程式は保存形をしており、人為的なソース・シンク項を加えることなく定常解を得ることができ、局所新古典輸送シミュレーションに便利な性質を持つ。

トーラス磁場配位によるプラズマ閉じ込めに影響を及ぼす小半径方向電場の形成には、磁気面接線方向の運動量の輸送過程が深く関係している。論文 [3.3.2.7-2] では、Boltzmann の運動論的方程式と Maxwell 方程式に基づき、規格化ジャイロ半径オーダーリングを用いて、平衡磁場配位の持つ幾何学的対称性が電場分布や運動量輸送にもたらす影響が明らかにされた。特に、新たに定義されたパリティ変換に対する Boltzmann の運動論的方程式と Maxwell 方程式の不変性により、上下対称性を持つ軸対称トーラス配位やステラレーター対称性を持つ準対称ヘリカル系トーラス配位における両極性条件や運動量輸送の特性が導かれた。

論文 [3.3.2.7-3, 4] では、拡張されたジャイロ運動論的場の理論に基づき、衝突効果を取り入れながら、高速トロイダルフローが存在する場合に、粒子分布関数、揺動電磁場、並びに背景電磁場の時空間分布を記述するジャイロ運動論的方程式系が導出された。この理論定式化では、ラグランジアン変分原理から導出されたジャイロ中心運動方程式、ポアソン・アンペール方程式に加えて、ポアソン括弧を用いた衝突演算子の表式が用いられ、保存形の粒子・熱・トロイダル運動量バランス方程式が導かれた。このような保存則を有するジャイロ運動論的方程式系は、密度・温度・トロイダル流分布の時間発展を長時間にわたり計算するグローバルジャイロ運動論的シミュレーションの基礎方程式に適している。

論文 [3.3.2.7-5] では、一般化空間座標を用いたオイラー的変分原理に基づき、運動論的プラズマの支配方程式系 (Vlasov-Poisson-Ampère system) の導出を行い、空間座標変換に対する作用積分の不変性から、従来の方法よりも直接的に、対称圧力テンソルを含んだ運動量保存則が導かれた。同様の定式化を Littlejohn の案内中心方程式に従う無衝突ドリフト運動論系に適用し、対称圧力テンソル・ローレンツ力・磁化電流を含む運動量バランスを 3次元ベクトル方程式の形で導くことに成功した。さらに、ド

ドリフト運動論的方程式に準中性条件とアンペール則を加え拡張されたドリフト運動論系に対する全運動量保存則も同様にして導かれた。また、ドリフト運動論的方程式に衝突項や外部ソース項が含まれた場合の運動量バランス方程式も示された。

従来の線形衝突演算子モデルは、低衝突周波数領域では、その妥当性が新古典輸送シミュレーションにより確認されていたが、高衝突周波数領域での妥当性には疑問の余地が残されていた。論文 [3.3.2.7-5] では、高衝突周波数領域でも正確な新古典輸送フラックスを再現できるよう、線形衝突演算子モデルの改良がなされ、ジャイロ運動論にも適用できるジャイロ位相平均された改良線形衝突演算子も導出された。改良された線形衝突演算子モデルは、LHD 後継計画や ITER プラズマにおけるタングステン等の高 Z 不純物イオンの輸送過程を扱う運動論的シミュレーションに役立つことが期待される。

[3.3.2.7-1] H Sugama, S Matsuoka, S Satake, and R Kanno, “Radially local approximation of the drift kinetic equation”, *Phy. Plasmas* **23**, 042502 (2016).

[3.3.2.7-2] H Sugama, “Momentum transport, electric field formation, and symmetry under parity transformation in torus plasmas”, *J. Plasma Fusion Res.* **92**, 539 (2016).

[3.3.2.7-3] H Sugama, M Nunami, M Nakata, and T.-H. Watanabe, “Conservation laws for collisional and turbulent transport processes in toroidal plasmas with large mean flows”, *Phys. Plasmas* **24**, 020701 (2017).

[3.3.2.7-4] H. Sugama, “Modern gyrokinetic formulation of collisional and turbulent transport in toroidally rotating plasmas”, *Rev. Mod. Plasma Phys.* 1:9 (2017).

[3.3.2.7-5] H. Sugama, M. Nunami, S. Satake, and T.-H. Watanabe, “Eulerian variational formulations and momentum conservation laws for kinetic plasma systems”, *Phys. Plasmas* **25**, 102506 (2018).

[3.3.2.7-6] H. Sugama, S. Matsuoka, S. Satake, M. Nunami, and T.-H. Watanabe, “Improved linearized model collision operator for the highly collisional regime”, to be published in (2019).

3.3.2.8 不純物輸送の運動論シミュレーション研究

(1) 局所シミュレーション

LHD では、プラズマの中心領域で不純物が外部へ吐き出される不純物ホールと呼ばれる現象が見ついている。この現象は、核融合反応を阻害する不純物粒子を自発的に取り除くことができるため、核融合炉として大きな利点をもっている一方、なぜ不純物が排出されるのか、そのメカニズムは未だ解明できていない。プラズマの粒子輸送は、微視的不安定性が引き起こす乱流輸送と、粒子の衝突や軌道効果による新古典輸送が担っているが、LHD に代表されるヘリカル/ステラレータ型の装置では、トカマクと比較して、後者の効果が非常に大きい。そこで、ここでは、局所ドリフト運動論に基づく DKES/PENTA コードを多粒子種に対応できるように拡張し、これを用いて、不純物ホールが形成される LHD プラズマの粒子輸送現象を解析した [3.3.2.8-1]。これまでの新古典輸送解析では、不純物ホール構造のようなホローな密度分布を持つプラズマでは、両極性条件を満たす解は、負の径電場を伴うイオンルートと呼ばれる解だけが存在すると指摘されてきた。さらに、この場合は不純物粒子は内向きに輸送される。実際、上述のプラズマで DKES/PENTA を用いた解析を行った結果、イオンルートの存在と内向きの不純物粒子輸送が確認された。しかし、このプラズマは中性粒子ビーム入射 (NBI) によって高イオン温度が達成されているプラズマである。従って、NBI 加熱によって生じる外部トルクの効果は、新古典輸送に大きく影響する可能性がある。そこで、このトルク効果を導入した解析を更に進めた結果、磁力線に沿った方向の外部トルクを考慮した場合は、先述のイオンルートだけでなく、正の径電場を伴う電子ルートも存在し得る結果を得た (図 3.3.2.8-1)。さらに、この電子ルートの場合、不純物粒子は外向きに輸送されることも確認された。一方、乱流輸送については、GKV を用いた複数粒子種プラズマの非線形シミュレーションの結果、不純物粒子は内向きに輸送されることが明らかになった。この結果は、上記の電子ルートでの新古典輸送と釣り合うことができるため、定常的な不純物ホール形成に整合し得る結果である。ここで得られた結果は、不純物の外部への吐き出しによって生じる不純物ホール生成を説明し得る意義あるものである。今後は、シミュレーションと実験による詳細な解析を進め、電子ルートの径電場と不純物粒子輸送の関係について明らかにしていく予定である。ここでの成果は論文発表の他、国際会議での招待講演で発表された [3.3.2.8-2-4]。また、第2回 Asia-Pacific Conference on Plasma Physics でも発表され、Akira Hasegawa Poster Prize を受賞した [3.3.2.8-5]。

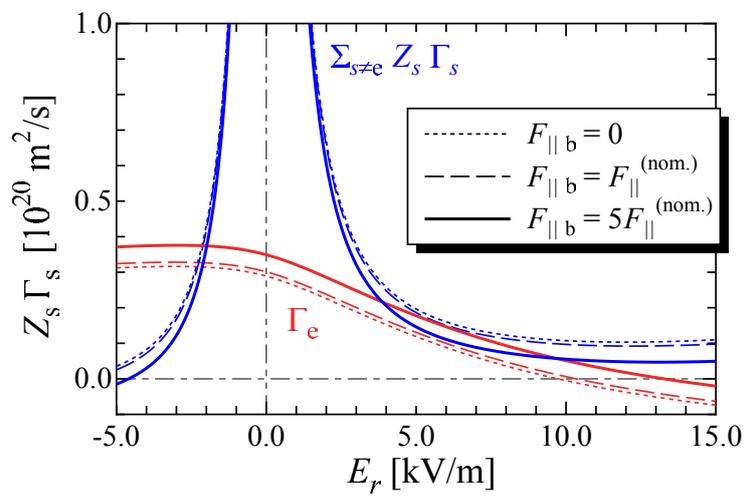


図 3.3.2.8-1 新古典粒子フラックスと径電場の関係。線種は外部トルクの強さを表す。

(2) 大域的新古典シミュレーションの不純物輸送研究への応用

新古典輸送現象は、LHDのようなヘリカル装置においては微視的乱流による粒子・熱輸送と同程度にプラズマ閉じ込め性能に影響するため、その正確な予測に向けたシミュレーションコードの開発が数値実験炉研究プロジェクトにおいて進められ、それを利用した実験解析や将来の核融合炉の閉じ込め性能予測などに応用されてきた。そこで重視してきた点は、従来からのヘリカルプラズマの新古典輸送計算に使われてきた近似モデル計算に代わり、配位空間3次元+速度空間2次元の5次元位相空間におけるドリフト運動論方程式を、極力近似を用いずに解く大域的新古典シミュレーションを実現することであり、その成果として磁気座標を用いる FORTEC-3D コードが開発された。このコードは、磁力線を横切るドリフト運動のうち、磁気ドリフト項を無視する局所近似を用いず、また、衝突項についても保存則や随伴性を保持するモデルを採用した δf -PIC コードである。ただし、これまでのコードでは1種類の粒子種しか同時に計算できず、粒子種間の衝突については、同種粒子種間衝突のみ厳密な線形化衝突項を用い、異種粒子種間衝突には近似的な衝突項を使っていた。これは、水素のみの理想的なプラズマに対しては十分な精度が得られる計算法ではあるが、水素同位体を含む LHD の重水素実験や、不純物イオンを含む多粒子種プラズマへの適用ができないという問題点があった。

LHD実験における不純物ホール現象の発見以来、微視的乱流による不純物輸送の研究が数値実験炉研究プロジェクトにおいて精力的に進められている。ここでは、異種粒子種間衝突の効果を取り入れた局所近似計算法を用いた新古典輸送と乱流輸送の双方を定量的に評価し、不純物ホール現象の解明を目指した研究が行われている。一方、海外では不純物の新古典輸送の評価法に対する修正が議論され始め、その一つとして、磁気面上での僅かなポテンシャル非一様性、いわゆる Φ_1 ポテンシャルの新古典輸送への影響が研究され始めた。 Φ_1 ポテンシャルのガイディングセンター運動への影響は高Zイオンほど相対的に大きくなり、新古典輸送の評価に与えることが明らかになった。しかし、 Φ_1 ポテンシャルを含めた先行研究は局所近似に基づいており、また、これまで Φ_1 ポテンシャルを入れたことによって不純物ホール現象が説明できるようになった訳ではない。水素プラズマに対する FORTEC-3D による以前の研究で、特に負電場（イオンルート）まわりの新古典輸送計算において磁気ドリフト項を無視する近似は正しくないことが分かっており [3.3.2.8-6]、不純物ホール現象の理解には、FORTEC-3D のようなグローバルコードを多粒子種化し、更に Φ_1 ポテンシャルの効果を取り入れた計算が必要であると考えられる。

そこで、FORTEC-3Dの内部でイオン密度分布から Φ_1 ポテンシャルを計算し、かつ求められた Φ_1 ポテンシャルによるドリフト運動の修正項を反映させたプラズマ分布関数の計算を行えるようにコードの拡張が進められた。並行して、異種粒子種間衝突に拡張された、保存則や随伴性を満たす線形化衝突項を δf -PICコードに組み込む手法を開発した[3.3.2.8-7]。こうして、多イオン種プラズマにおける新古典輸送と Φ_1 ポテンシャルの影響が、我々の把握している限り世界で初めて、局所近似を用いないグローバルシミュレーションで計算が可能となった。このシミュレーションコード(FORTEC-3D MPS (Multi Particle Species の略))は完成したばかりでベンチマークの途上にあるが、その初期結果について以下に報告する。

Φ_1 ポテンシャルの計算における局所近似の影響を見るため、FORTEC-3Dとその局所近似版であるLOF3Dを用いて、LHDの水素プラズマにおける Φ_1 ポテンシャル分布の比較を行った[3.3.2.8-8]。LOF3Dでは、磁気ドリフト項を全て無視する近似(DKESモデルと呼ばれる)と、磁気ドリフトの磁気面垂直成分のみを落として接線成分を残したZero-Orbit-Width(ZOW)モデルの2通りの局所近似計算が可能である。FORTEC-3DとLOF3Dで先行研究と同じ条件で Φ_1 ポテンシャル分布を評価したものが図3.3.2.8-2である。LOF3DによるDKESモデルの結果は、先行研究の計算とよく一致したが、ZOWモデル、そしてグローバル計算における Φ_1 ポテンシャルの分布は大きく異なることが発見された。径電場の値を振って調べた結果、この差は、主に磁気ドリフトの接線成分と径電場による $E \times B$ ドリフトの大小関係に対する Φ_1 ポテンシャルの応答の差として現れることが分かった。そのため、ZOWモデルはグローバルモデルと径電場に対する Φ_1 ポテンシャルの変化の仕方は似た傾向を示すが、DKESモデルとは特に径電場がゼロ付近で大きく異なることが分かった。このことから、以前の研究で発見された新古典輸送への磁気ドリフト項の影響が、 Φ_1 ポテンシャルの評価にも大きく影響を与えることが示された。これは、不純物輸送の研究において従来の局所近似では不十分であるということを初めて示した重要な成果である。2019年9月から、多粒子種化したFORTEC-3Dを使った Φ_1 ポテンシャル分布の計算と、 Φ_1 ポテンシャルの効果を入れた不純物イオンの新古典輸送計算を開始しており、LHDの不純物ホールプラズマにおいて磁気ドリフト項や Φ_1 ポテンシャル効果が不純物の新古典輸送の評価にどのように影響し、局所近似モデルによる先行研究の結果とどのような差が現れるかを明らかにしていく予定である。

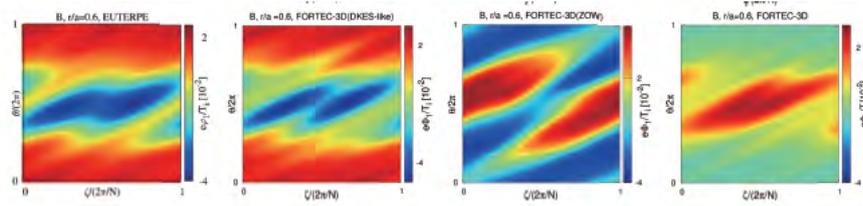


図 3.3.2.8-2 局所近似及びグローバル計算による Φ_1 ポテンシャル分布の比較。左 から DKES モデルを使った先行研究 [3.3.2.8-9] の結果、LOF3D による DKES モデルと ZOW モデルの結果、FORTEC-3D によるグローバル計算の結果である。径電場としてはローカル近似で求めた両極性電場（負電場）を用いている。

- [3.3.2.8-1] M. Nunami, *et al.*, “Impacts of External Momentum Torque on Impurity Particle Transport in LHD”, Plasma Fusion Res. **12** (2017) 1203039.
- [3.3.2.8-2] Nunami M., “Kinetic simulation studies for impurity transport in stellarator plasmas”, 8th IAEA Technical Meeting on “Theory of Plasma Instabilities”, June 12 - 14 (2017), Vienna, Austria, I-7.
- [3.3.2.8-3] M. Nunami, “Neoclassical and turbulent transport of impurities in multi-species plasmas”, 19th International Congress on Plasma Physics, June 4 - 8 (2018), Vancouver, Canada.
- [3.3.2.8-4] M. Nunami, “Simulation studies on particle transport of multi-species plasma in stellarator systems”, MAX PLANCK PRINCETON CENTER WORKSHOP 2019, Feb. 18 - 21, Tokyo, Japan.
- [3.3.2.8-5] M. Nunami, *et al.*, “Kinetic simulation studies on particle transport in multi-species plasma”, 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2018), Nov. 12 - 17 (2018), Kanazawa, Japan, MFP-35.
- [3.3.2.8-6] H. Botsz, S. Satake, R. Kanno et al., “Benchmark of the local drift-kinetic models for neoclassical transport simulation in helical plasmas”, Phys. Plasmas Vol. 24 (2017), 022503.
- [3.3.2.8-7] S. Satake, M. Nakata, T. Pianpanit et al., “Benchmark of a new multi-ion-species collision operator for delta-f Monte Carlo neoclassical simulation”, submitted to Computer Physics Communications (<https://arxiv.org/abs/1605.02465v2>)

[3.3.2.8-8] K. Fujita, S. Satake, R. Kanno et al., “Global Effects on the Variation of Ion Density and Electrostatic Potential on the Flux Surface in Helical Plasmas”, *Plasma and Fusion Research* Volume 14 (2019), 3403102.

[3.3.2.8-9] J. L. Velasco et al., *Plasma Phys. Control. Fusion* Vol. 60 (2018), 074004.

3.3.2.9 新古典輸送現象への共鳴摂動磁場の影響

プラズマのエッジにおけるストカスティックな磁力線領域での粒子・熱輸送の物理的理解は、ダイバータ板への負荷を低減するため ITER などでは計画されている共鳴摂動磁場 (RMP) による Edge-Localized Mode (ELM) 抑制の際のプラズマ閉じ込め性能の評価や、LHD プラズマのエッジにおける粒子・熱閉じ込めの理解に不可欠である。近年の実験研究、例えば、DIII-D トカマクにおける RMP を用いた ELM 抑制実験により、低衝突なエッジ (衝突頻度 $\nu^* \lesssim 0.1$) における熱輸送は、従来の標準的な理論モデルである Rechester-Rosenbluth の磁力線拡散理論 (以下、R-R 理論と呼ぶ) による磁力線に沿った粒子運動に基づいた予想とは、かけ離れて小さいことが明らかになっている。この実験事実により、局所的な領域がストカスティックになったエッジにおける輸送の基本的性質に対する物理的理解の見直しが行われている。R-R 理論と同様に電場を無視する仮定の下で実行した δf ドリフト運動論的シミュレーション (KEATS コード) によって、(1) 案内中心分布の準定常状態における径方向の電子熱拡散係数は、新古典熱拡散係数と比べると大きな値になるが、R-R 理論値と比べるとかなり小さいことを確認し (図 3.3.2.9-1)、(2) R-R 理論値と比べて小さくなる理由として、磁力線に沿った粒子運動から生じる強い熱輸送を捕捉粒子が弱めていることを見出した。詳細は、文献 [3.3.2.9-1] を参照。

[3.3.2.9-1] R. Kanno *et al.*, “Electron heat diffusivity in radially-bounded ergodic region of toroidal plasma”, Nucl. Fusion Vol.58, (2018) 016033 (7pp).

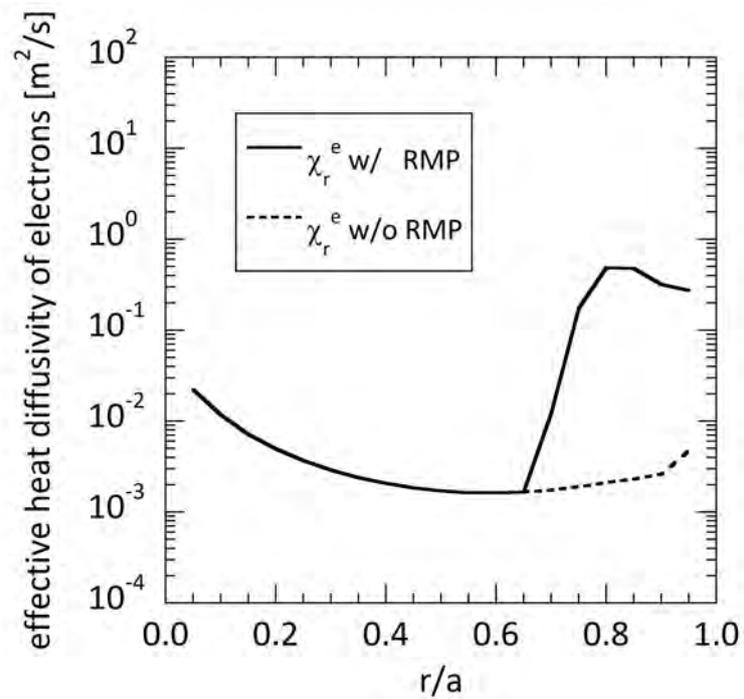


図 3.3.2.9-1 円形トカマク磁場の $0.6 < r/a < 1.0$ の領域に RMP を加え、その領域のみ磁力線構造をストカスティックにした場合、径方向の電子熱拡散係数 χ_r^e (実線) は、 $0.6 < r/a < 1.0$ において新古典熱拡散係数 (破線) と比べ大きな値になるが、R-R 理論値 χ_r^{RR} と比べるとかけ離れて小さい [3.3.2.9-1]。ここで、 $r/a = 0.8$ において、 $\chi_r^e / \chi_r^{\text{RR}} \lesssim 10^{-6}$ であった。また、 $r/a = 0.8$ における衝突頻度は、 $\nu^* \approx 0.1$ である。

3.3.3 高エネルギー粒子・波動・加熱の物理

ここでは、「高エネルギー粒子駆動不安定性のハイブリッドシミュレーション研究」、「高速イオンによる高周波不安定性の電磁粒子シミュレーション」、「LHDにおける加熱解析の進展」について報告する。

3.3.3.1 高エネルギー粒子駆動不安定性のハイブリッドシミュレーション研究

数値実験炉研究プロジェクトでは、高エネルギー粒子・MHDハイブリッドシミュレーションコードMEGAを用いて、環状プラズマにおける高エネルギー粒子駆動型不安定性のシミュレーション研究を推進している。ここではその成果の中から、(1) 熱イオンの運動論的効果を考慮したモデル拡張、(2) 高速イオン分布硬直性のシミュレーション研究、(3) アルフベン固有モードバーストに関する高速イオン臨界分布、(4) LHDにおけるアルフベン固有モードバースト、(5) LHDにおける高エネルギー粒子駆動測地的音響モードの非線形発展、(6) 高エネルギー粒子駆動測地的音響モードによる熱イオンの加熱について報告する。

(1) 熱イオンの運動論的効果を考慮したモデル拡張

高エネルギー粒子による不安定性の駆動は高エネルギーイオンの軌道半径効果を含めてMEGAで精度よく計算できており、このことは国際トカマク物理活動(ITPA)における多コード間ベンチマークでも確認されている。一方で、高エネルギー粒子以外のバルクプラズマ(熱イオンと電子)の運動論的効果は高エネルギー粒子駆動MHD現象に対して安定化に働くが、この効果がMEGAには含まれていなかった。核燃焼プラズマにおける高エネルギー粒子駆動MHD現象の予測精度を向上するためには、バルクプラズマの運動論的効果を取り扱えるように物理モデルを拡張することが必要である。

最も重要なバルクプラズマの運動論的効果は熱イオンによるランダウ減衰である。そこで、高エネルギー粒子に加えて熱イオンにも5次元ジャイロ運動論方程式に基づく粒子法を適用してシミュレーションモデルを拡張した。これによりMHD方程式で計算している質量密度、磁場に対して平行な運動量、及び、圧力の一部(熱イオン圧力)を粒子法で計算することができる。磁場、及び、磁場に対して垂直な運動量に関してはMHDモデルからの変更はない。ただし、垂直運動量の時間発展については、Hazeltine-Meissによる拡張MHD方程式[3.3.3.1-1]を採用し、熱イオンの反磁性ドリフトを考慮する。電子密度は準中性条件により与えられ、電子圧力は等温モデルを仮定

して計算する。電場は理想 MHD のオーム則に電気抵抗と電子圧力勾配の磁場平行成分の寄与を考慮して与えた。

この熱イオン運動論モデルを MEGA コードに実装し、トカマクプラズマにおけるアルフベン固有モードの時間発展を調べた。図 3.3.3.1-1 は MHD 運動エネルギーと磁場エネルギー、高エネルギー粒子、熱イオン、電子の各エネルギー、及び電気抵抗によるエネルギー散逸の時間発展をバルクプラズマベータ値 (a)1%と (b)4%の間で比較している。アルフベン固有モードのエネルギーは MHD 運動エネルギーによって代表されている。高エネルギー粒子のエネルギーが時間とともに減少しており、これは高エネルギー粒子がアルフベン固有モードを不安定化したことを示している。一方で、熱イオンのエネルギーは増加しており、熱イオンが電磁場のエネルギーを吸収し、アルフベン固有モードの安定化に寄与することが実証された。また、バルクプラズマベータ値 (a)1%と (b)4%を比較すると、4%の方が熱イオンのエネルギー増加が大きい。バルクプラズマベータ値4%の場合は1%の場合と比較して熱イオンの温度が 2倍なので、熱イオンランダウ減衰が強く発生したと考えられる。

(2) 高速イオン分布硬直性のシミュレーション研究

DIII-D トカマクでは中性粒子ビーム入射 (NBI) パワーを上昇させると、ある閾値を境にアルフベン固有モード (AE) に起因した高速イオン輸送束が急激に増加する現象が観測されており、この性質は「高速イオン分布硬直性」と呼ばれている。DIII-D 実験を対象として MEGA コードの実証研究を実施し、定常的に小振幅を保つ多数の AE とそれらによる高速イオン分布の顕著な平坦化を再現することに成功した [3.3.3.1-2,3]。この実証研究では、マルチフェーズシミュレーション手法を独自に開発し、高速イオンの衝突緩和時間スケールの計算を可能とした。高速イオン分布硬直性を調べるために、実証研究と同じ DIII-D の実験データを用いて、ビーム吸収パワーのみが 1.56MW から 15.6MW の範囲で異なる八つの場合のシミュレーションを実行し、高速イオン分布と高速イオン輸送束を比較した。その結果、多数の AE との相互作用によって決定される高速イオン分布について以下の結論を得た [3.3.3.1-4]。

1. ビームパワーの上昇とともに高速イオン閉じ込めが劣化する。
2. 高速イオン圧力勾配が臨界勾配を超えると輸送束が急激に増加し、高速イオン圧力分布の硬直性をもたらす。臨界勾配は場所に依存する。
3. 高速イオン圧力分布は、臨界勾配付近の勾配を保ちながらビームが入射されているプラズマ中心付近から外側へ向かって広がっていく。

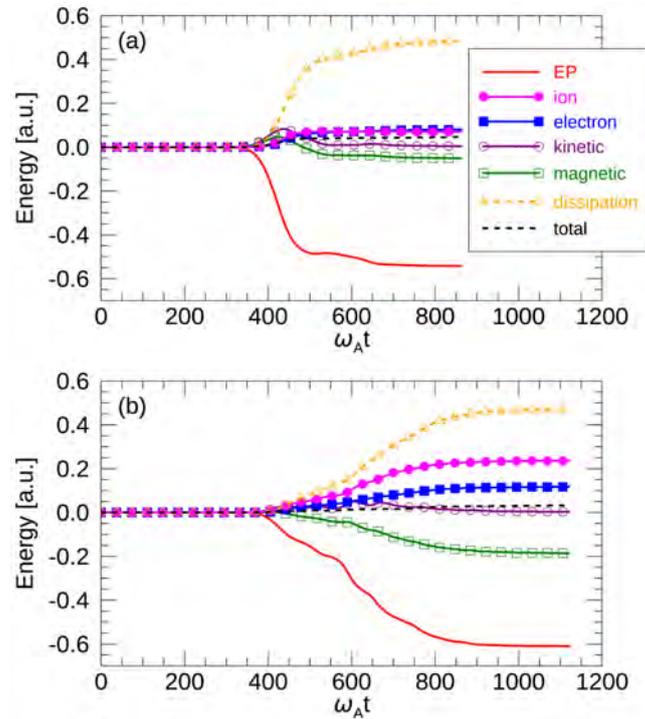


図 3.3.3.1-1 バルクプラズマベータ値が (a)1%と (b)4%の場合の、高エネルギー粒子、熱イオン、電子、MHD 運動エネルギー、磁場、散逸の各エネルギーの時間発展。全エネルギーの時間発展も示されている。

4. 運動論的ポアンカレ断面図解析により、輸送束の急激な増加の原因は複数の AE の共鳴の重なり (Resonance Overlap) であることが分かった (図 3.3.3.1-2)。

(3) アルフベン固有モードバーストに関する高速イオン臨界分布

トカマクプラズマにおける AE バーストの大規模シミュレーションを実施し、複数 AE の共鳴の重なりによる高速イオン輸送束と高速イオン分布関数の時間発展を詳細に解析した [3.3.3.1-5]。この研究では TFTR 実験に基づいた物理条件を使用した。実験と同様の NBI パワー 10MW、減速時間 100ms の場合の結果を図 3.3.3.1-3 に示す。複数 AE のバースト的な成長と減衰が 2ms の時間間隔で繰り返し発生し、アルフベン速度で規格化した MHD 速度揺動の最大振幅は 3×10^{-3} であった。これらは実験結果とよく一致している。AE バーストの物理過程を解明するために、高速イオン分布関数を解析した。AE バーストの発生直前には、複数の AE が不安定化して小振幅に成長し

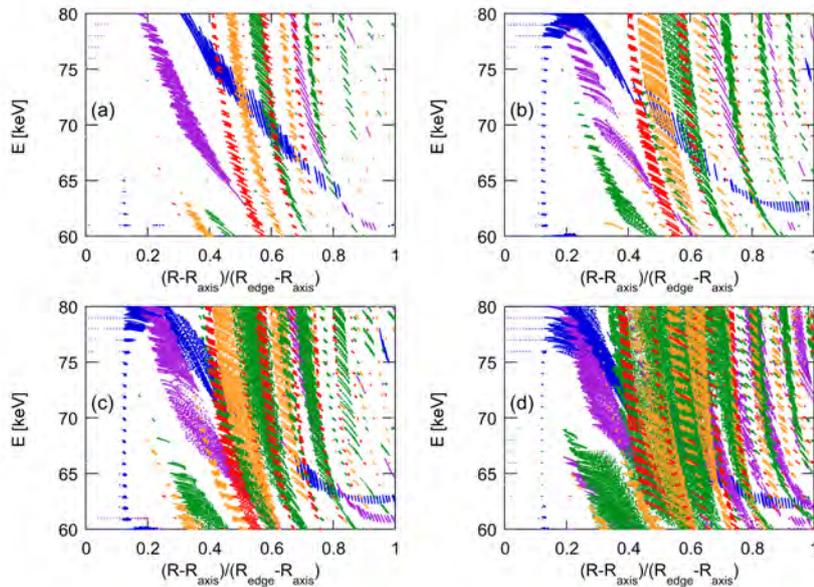


図 3.3.3.1-2 NBI 吸収パワーが (a) 1.56MW, (b) 3.13MW, (c) 6.25MW, (d) 15.6MW の場合の、高速イオン位相空間構造。五つのアルフベン固有モード (AE) を考慮し、単独の AE が存在する状況で高速イオン軌道を追跡した。AE によって捕捉された粒子が赤道面を通過する際の規格化大半径 (横軸) と運動エネルギー (縦軸) を記録した。色は AE を表している。NBI 吸収パワーが上昇するとともに、AE の振幅が大きくなるので共鳴領域が拡大する。複数の共鳴領域が重なった場所では粒子軌道が統計的になり、輸送が急激に増加する。 [3.3.3.1-4]

ている。これらの小振幅 AE は徐々に高速イオン分布関数を局所的に平坦化し、位相空間において階段状の分布関数を形成する。この階段状分布は、更にビーム入射を行うと、AE の振幅が増大して分布平坦化領域が重なり、複数の AE が同期して突然成長する AE バーストをもたらす臨界分布である。AE バーストは、大域的な高速イオン輸送と高速イオン分布の飽和をもたらす。AE バーストが発生する場合において、NBI パワーや減速時間を増加しても高速イオン圧力分布が変化しない「分布復元性 (profile resiliency)」を見出した。さらに、バースト直前の高速イオン分布関数を NBI パワーが異なる場合について比較したところ、高速イオン分布関数は NBI パワーが異なってもほぼ同じであり、分布関数にも復元性があることを発見した。

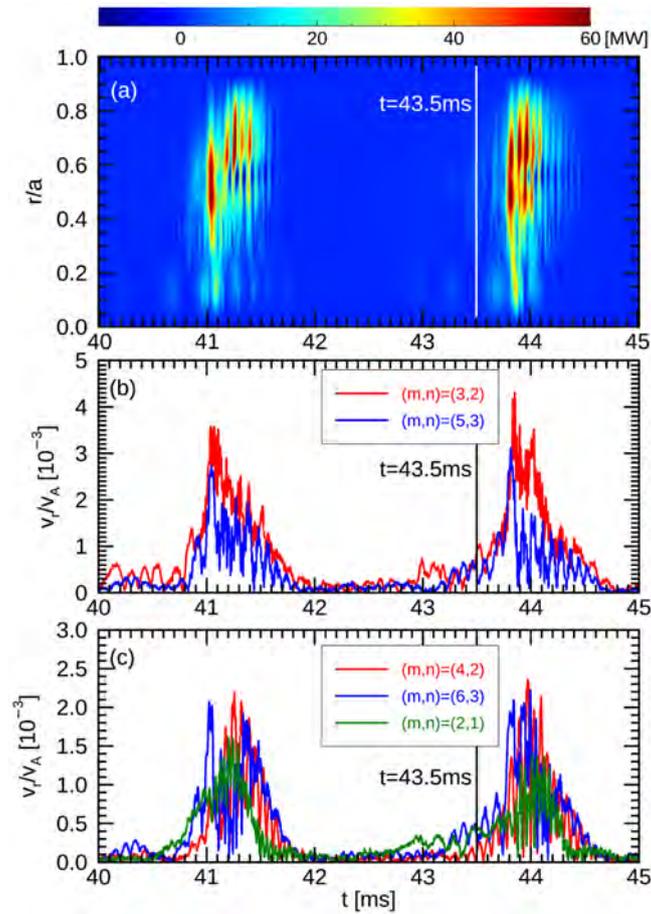


図 3.3.3.1-3 (a) AEによる高速イオン輸送束分布、(b) 主要な二つのAEのMHD速度揺動、(c) (b)以外のAEのMHD速度揺動のそれぞれの時間発展。 [3.3.3.1-5]

(4) LHDにおけるアルフベン固有モードバースト

主にトカマク型装置のNBI加熱実験を対象として進めてきた実証研究をLHDの実験に対しても実施できるようにMEGAを拡張した。2次元トーラス形状磁場のトカマク型装置に比べて3次元トーラス形状磁場のLHDの実形状磁場を用いる場合にはMHDモードのスペクトル構造が複雑化するため、高い計算精度が求められる。このため、3次元トーラス形状磁場に特有の粒子軌道に着目して、LHD実験におけるMHD現象の実証研究を進めている。

これまでに開発したマルチフェーズ計算法 [3.3.3.1-2-4] をLHDに適用し、不安定なアルフベン固有モード(AE)とその時間発展を研究した。MHD平衡計算コードHINTを用いて構築したLHD実験(ショット番号47645)の平衡データとNBI吸収分布解析コードHFREYAを用いて計算したNBI吸収分布を使用している。MHD揺動を含まない平衡磁場中において、NBIとバルクプラズマとの衝突によって形成される高速イオンの速度空間分布と圧力分布をMEGAと高速イオン解析コードMORHを用いてそれぞれ計算し、両者の結果がよく一致することを確認した [3.3.3.1-6]。これにより、LHDの3次元磁場中における高エネルギー粒子の軌道、及び、バルクプラズマとの衝突相互作用についてMEGAの計算精度を確認することができた。長時間の高速イオン分布形成とAEの時間発展を調べるマルチフェーズシミュレーションでは、MHD揺動を含まない古典計算とMHD揺動を含むハイブリッド計算を交互にそれぞれ4msと2msずつ実行した [3.3.3.1-7]。各ハイブリッド計算においてトロイダルモード数 $n=1$ の複数のAEが突発的に現れることを見出した。複数のAEは振動周波数が約50kHzと約70kHzのグループに分かれており、それぞれプラズマ中心付近に存在するグローバルアルフベン固有モード(GAE)と規格化プラズマ半径0.7付近に存在する2つのトロイダルアルフベン固有モード(TAE)であることが分かった。これらのAEの周波数は実験での観測値とよく対応している。シミュレーション結果におけるAEの時間発展では、図3.3.3.1-4に示すように、TAEが先に成長し、TAEが減衰し始める頃にGAEが成長した。このような2つの周波数帯のAEが交互に成長する時間発展も研究対象のLHD実験の結果をよく再現している。

(5) LHDにおける高エネルギー粒子駆動測地的音響モードの非線形発展

高エネルギー粒子駆動測地的音響モード(EGAM)はトカマク型装置やヘリカル型装置の環状プラズマにおいて高速イオンが引き起こす不安定性の一種である。LHD実験(ショット番号109031)に基づいた3次元実形状平衡とプラズマ分布を用いて、LHDにおけるEGAMのシミュレーションを実行した [3.3.3.1-8]。EGAMのポロイダル流の空間分布はポロイダルモード数 $m=0$ 、トロイダルモード数 $n=0$ を主成分として、 $m/n=1/0$ 及び $2/10$ 成分を含んでいることが分かった。トロイダルモード数 $n=10$ の

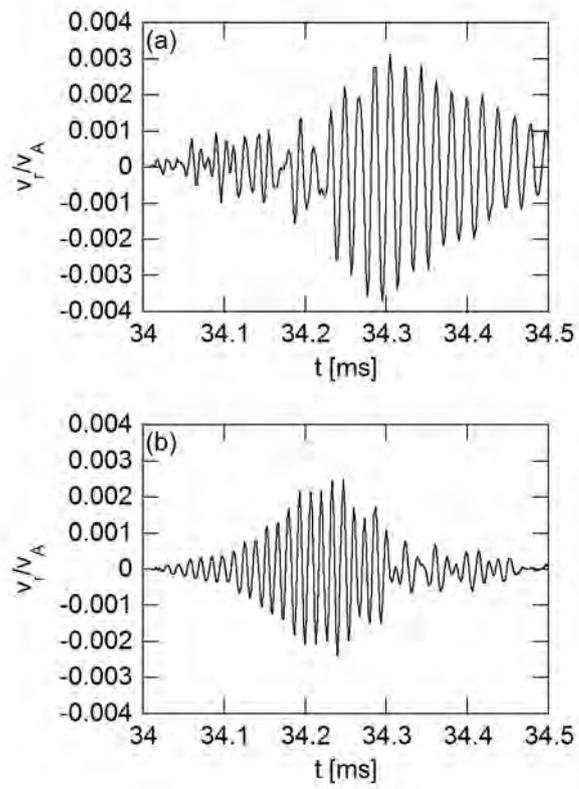


図 3.3.3.1-4 (a) GAE と (b) TAE のピーク位置での MHD 速度揺動の時間発展。 [3.3.3.1-7]

成分はLHDの平衡磁場に含まれる $n=10$ 成分に起因して現れる。一方で、バルク圧力揺動は $m/n=1/0$ が主成分であり、トカマクにおけるEGAMの空間分布と同様である。

LHD実験(ショット番号109031)では1次モード(primary mode)であるEGAMの周波数が上方に変調した後に、その周波数の半分の周波数の2次モード(secondary mode)が突然励起されるという興味深い現象が観測されている。本研究ではMEGAを用いたシミュレーションによってこの現象を再現することに成功した。図3.3.3.1-5にトロイダル流の周波数スペクトルと振動の時間発展を示す。シミュレーションでは実験と同様に1次モードの周波数が100kHz付近まで変調した時点で、50kHz程度の2次モードが突発的に現れている。2次モードの励起機構を調べるために、EGAMにエネルギーを与えている高エネルギー粒子を解析したところ、エネルギーを与えている粒子の周回周波数は100kHz程度であることが分かった。この結果から周回周波数100kHzの粒子と周波数100kHzの1次モードとの通常の共鳴に加えて、周回周波数100kHzの粒子と周波数50kHzの2次モードとの非線形共鳴が同時に発生することにより、共鳴粒子を介して1次モードから2次モードへエネルギーが伝達されていることが明らかになった。また、1次モードと2次モードにおけるバルクプラズマの圧力振動と高エネルギー粒子の圧力振動を解析した結果、1次モードでは両者が同位相で振動しているのに対して、2次モードでは両者が逆位相で振動していることが分かった。両者が同位相で振動している1次モードでは振動の復元力である圧力が強められて周波数が高いのに対して、2次モードでは両者の効果が相殺して復元力が弱められることに起因して周波数が低いと理解できる。

(6) 高エネルギー粒子駆動測地的音響モードによる熱イオンの加熱

高エネルギー粒子駆動測地的音響モード(EGAM)はトカマク型装置やヘリカル型装置の環状プラズマにおいて高速イオンが引き起こす不安定性の一種である。EGAMはトロイダル方向に対称な空間構造を持つので粒子の半径方向輸送に寄与しない。EGAMとの相互作用によってエネルギーを与える粒子種とエネルギーを受け取る粒子種が存在するとき、粒子の半径方向分布を乱すことなくEGAMを媒介とする粒子種間のエネルギー移送が可能となる。高エネルギー粒子がEGAMを不安定化する際に、EGAMから熱イオンにエネルギーが受け渡されれば、EGAMを媒介として高エネルギー粒子から熱イオンへのエネルギー移送が可能となる。この機構はGAMチャネリングと呼ばれ、核融合反応によって生じる高エネルギーアルファ粒子がプラズマ加熱の役割を担う核燃焼プラズマでの実現が期待されている。現在の核燃焼プラズマの想定では、アルファ粒子は粒子間衝突によって熱イオンと電子を加熱するが、特に高エネルギーのアルファ粒子の衝突は電子との衝突が支配的であり、核融合反応の燃料である熱イオ

ンの加熱効率は低い。GAMチャネリングは高エネルギーアルファ粒子による熱イオンの効率的な加熱を可能とするため、核融合エネルギーの実現に向けて大きな貢献が期待される物理機構である。

高エネルギー粒子と熱イオンの双方を運動論的に取り扱うシミュレーションを適用し、LHD実験に基づいた3次元実形状平衡とプラズマ分布を用いて、LHDにおけるEGAMのシミュレーションを実行した [3.3.3.1-9]。図 3.3.3.1-6 はEGAMと各粒子種エネルギーの時間発展を示している。EGAMの振幅は成長後に飽和し、周波数変調を伴ってほぼ一定レベルに保たれている。各粒子種エネルギーの時間発展を見ると、高エネルギー粒子のエネルギーが減少して熱イオンのエネルギーが増加しており、GAMチャネリングが実現していることが分かる。興味深い点は、EGAMの飽和後の周波数変調の期間にもエネルギー移送が続いていることである。周波数変調は、高エネルギー粒子と熱イオンの位相空間分布においてEGAMの静電ポテンシャルに捕捉された粒子群によって構成される島状構造が自発的に形成されて、EGAMのエネルギー散逸と釣り合うように島状構造の軌道周回周波数が変化することにより実現することが理論的に提案されている。高エネルギー粒子と熱イオンの位相空間分布関数を解析したところ、分布関数揺動の周回周波数がEGAMの周波数に同調して時間変化していることを確認し、周波数変調に関する理論との整合性を確認した。

- [3.3.3.1-1] R. D. Hazeltine and J.D. Meiss, “Plasma Confinement”, Addison-Wesley (1992).
- [3.3.3.1-2] Y. Todo *et al.*, Nucl. Fusion, Vol. 54 (2014) pp. 104012 (1~13).
- [3.3.3.1-3] Y. Todo *et al.*, Nucl. Fusion, Vol. 55 (2015) pp. 073020 (1~8).
- [3.3.3.1-4] Y. Todo *et al.*, Nucl. Fusion, Vol. 56 (2016) pp. 112008 (1~11).
- [3.3.3.1-5] Y. Todo *et al.*, Nucl. Fusion, Vol. 59 (2019) pp. 096048 (1~8).
- [3.3.3.1-6] R. Seki *et al.*, Nucl. Fusion, Vol. 59 (2019) pp. 096018 (1~11).
- [3.3.3.1-7] Y. Todo *et al.*, Phys. Plasmas, Vol. 24 (2017) pp. 081203 (1~8).
- [3.3.3.1-8] H. Wang *et al.*, Phys. Rev. Lett., Vol. 120 (2018) pp. 175001 (1~5).
- [3.3.3.1-9] H. Wang *et al.*, Nucl. Fusion, Vol. 59 (2019) pp. 096041 (1~7).

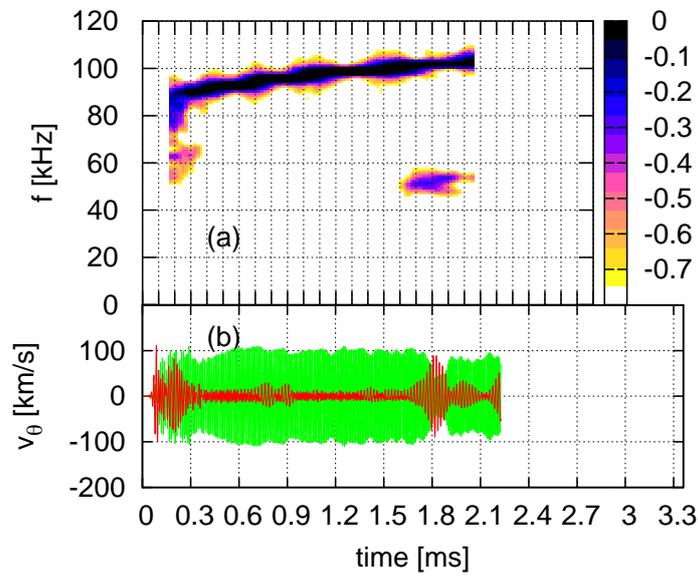


図 3.3.3.1-5 (a) ポロイダル流の周波数スペクトルの時間発展と (b) ポロイダル流の時間発展。パネル (b) では 50kHz の振動が赤、100kHz の振動が緑でそれぞれ示されている。 [3.3.3.1-8]

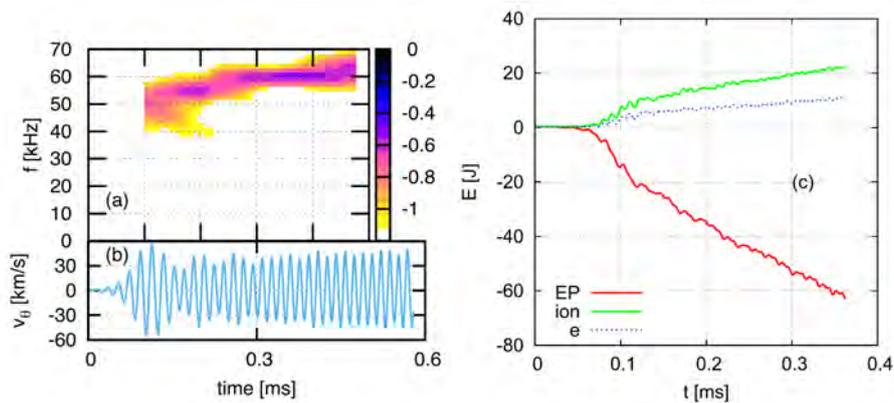


図 3.3.3.1-6 (a) ポロイダル流の周波数スペクトルの時間発展、(b) ポロイダル流の時間発展、(c) 高エネルギー粒子 (赤)、熱イオン (緑)、電子 (青) のエネルギーの時間発展。 [3.3.3.1-9]

3.3.3.2 高速イオンによる高周波不安定性の電磁粒子シミュレーション

大型ヘリカル装置 (LHD) では、近年、中性粒子入射 (NBI) に伴う Radio Frequency (RF) 帯の様々な放射が観測されている [3.3.3.2-1]。それらは高速イオンによる不安定性に起因すると考えられるが、その周波数はイオンサイクロトロン周波数 Ω_i から低域混成共鳴周波数 ω_{LH} に及ぶ。ここで、 ω_{LH} は次のように定義される。

$$\omega_{LH} = \sqrt{\Omega_i \Omega_e} [(1 + \Omega_i^2 / \omega_{pi}^2) / (1 + \Omega_e^2 / \omega_{pe}^2)]^{1/2}$$

Ω_e は電子のサイクロトロン周波数、 ω_{pi} 、 ω_{pe} は、それぞれイオンと電子のプラズマ振動数である。本研究は、NBIに伴う RF 放射の励起機構を総合的に理解することを目指し、イオンと電子を全て粒子として扱う電磁粒子モデルを用いてシミュレーションを行っている。

垂直 NBI によってつくられる高速イオンは、磁場に垂直方向の速度空間でリング状の分布を形成すると考えられる。そこで、そのような速度分布を持つ高速イオンによる不安定性を、空間 1 次元速度 3 次元の電磁粒子コードを用いて調べた [3.3.3.2-2]。図 3.3.3.2-1 は、重水素プラズマ中を磁場に対してほぼ垂直方向に伝播する磁場揺動のスペクトルである。高速イオンによって、 $\omega \simeq l\Omega_D$ (l は整数) のイオンサイクロトロン波に加えて、 ω_{LH} 付近の低域混成波が励起されている。このような広い周波数帯の波の同時励起は、LHD で垂直 NBI に伴って観測されている RF 放射と同様である。さらに、プラズマ密度を変えてシミュレーションを行ったところ、プラズマ密度が大きくなると、最大振幅となる低域混成波の周波数が増加するという結果を得た。この密度依存性も、LHD 実験の結果と良く一致している。

次に、接線 NBI と電子加熱用の電力入射を同時に行ってプラズマを立ち上げている時に、RF 放射の周波数が階段状に増加するという実験結果に注目した。この放射は、密度が徐々に増加するプラズマ中で、接線 NBI によって持続的に作られる高速イオンが引き起こしていると考えられる。そこで、プラズマ密度を増やし続け、そこに接線 NBI によって作られるような、ピッチ角が小さい高速イオンを注入し続けるシミュレーションを行った。波の伝播方向は磁場にほぼ垂直としたが、これは、階段状の周波数変化が計測されたアンテナが、高速イオンの生成場所から磁場に垂直方向の位置に設置されているからである。図 3.3.3.2-2 に、高速イオンによって励起された磁場揺動の周波数の時間変化を示す。カラーコンターが磁場揺動の振幅を表すが、振幅が大きいことを示す赤色の部分に注目すると、 $\omega > 4\Omega_i$ の領域では階段状に周波数が増加している。また、段差が Ω_i であること、黄色の線で示す ω_{LH} が $l\Omega_i$ に等しくなる頃に、 $\omega \simeq l\Omega_i$

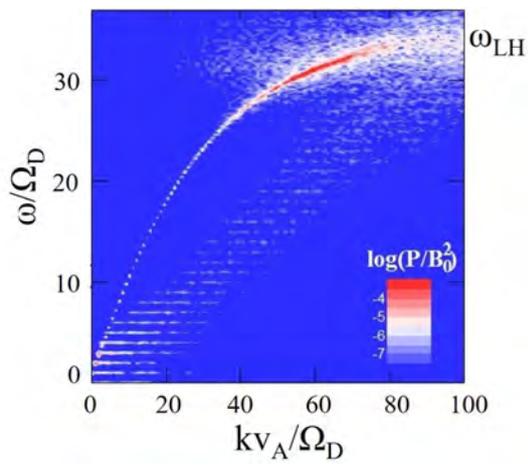


図 3.3.3.2-1 リング状の速度分布を持つ高速イオンによる不安定性に起因する磁場揺動のスペクトル [3.3.3.2-2]

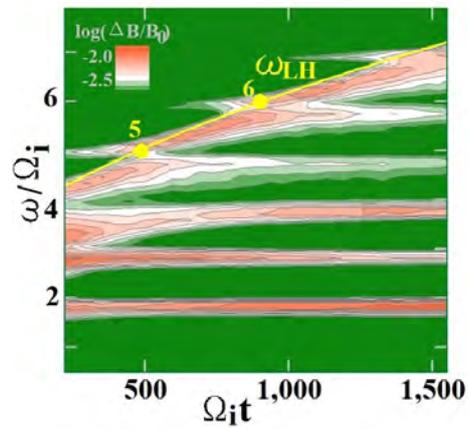


図 3.3.3.2-2 密度が増加しているプラズマ中にピッチ角の小さい高速イオンを注入し続けた場合の、磁場揺動の周波数の時間変化 [3.3.3.2-3]

の波が成長を始めていることが分かる。これらはLHD実験の結果と一致しており、本研究によって ω_{LH} の時間変化が、階段状の周波数変化に大きく関与していることを明らかにした。

[3.3.3.2-1] K. Saito, H. Igami, M. Toida, T. Akiyama, S. Kamio, and R. Seki, “RF Wave Detection with High-Frequency Magnetic Probe in LHD”, Plasma Fusion. Res., Vol. 13 (2018) 3402043 (1~5).

[3.3.3.2-2] M. Toida, K. Saito, H. Igami, T. Akiyama, S. Kamio, and R. Seki, “Simulation Study of High-frequency Magnetosonic Waves Excited by Energetic Ions in Association with Ion Cyclotron Emission”, Plasma Fusion. Res., Vol. 13 (2018) 3403015 (1~5).

[3.3.3.2-3] M. Toida, H. Igami, K. Saito, T. Akiyama, S. Kamio, and R. Seki, “Simulation Study of Energetic Ion Driven Instabilities near the Lower Hybrid Resonance Frequency in a Plasma with Increasing Density”, Plasma Fusion. Res., Vol. 14 (2019) 3401112 (1~7).

3.3.3.3 LHDにおける加熱解析の進展

3次元磁場配位を有するヘリカル型装置におけるNBI加熱解析を正確に行うために、5次元位相空間におけるドリフト運動論方程式をモンテカルロ法によって解くことのできるGNETを用いて、詳細解析を行ってきた。ここでは、GNETコードの拡張による加熱解析の進展について報告する。

従来のGNETコードは、グリーン関数法に基づき、プラズマの定常状態を仮定して高エネルギー粒子分布関数と加熱分布を求めていた。炭素不純物ペレット入射を行うLHD高イオン温度実験では、高速イオンの減速時間よりもずっと短い時間スケールでプラズマ密度が急激に変化する。そこで、プラズマと高速イオン発生分布の時間発展を取り扱うことのできるGNET-TD [3.3.3.3-1]が開発された。基本的なアルゴリズムはGNETと同様であるが、多数のグリーン関数を導入し、衝突計算の間にプラズマ密度・温度を時間変化させることで、プラズマの定常状態を仮定することなく、高速イオン分布関数と加熱分布の時間発展を求めることが可能である。さらに、Boozer、Kuo-Petavicにより導出されたモンテカルロ衝突演算子において、ピッチ角散乱項については全粒子種を考慮した衝突周波数により計算し、エネルギー拡散項については複数イオン種を

含む各粒子種ごとに個別に計算するという方法により、複数イオン種への対応を行った。高速イオン発生点解析コードである HFREYA に対しても、Suzuki らによる改良されたイオン化断面積モデルを導入し、比較的低エネルギーの垂直ビームに対する計算精度を向上させた。図 3.3.3.3-1 は改良した GNET を用いて計算した高速イオン分布関数である。電子密度は $2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 、電子温度は 3keV とし、不純物イオンとしてはヘリウムと炭素を仮定し、水素イオンとヘリウムイオンの密度比を 2:1 に固定した上で、炭素密度を変化させている。実効電荷が増加することで、ピッチ角散乱が増加する様子を示している。この結果、高速イオンの輸送が増大することが明らかとなった。

この複数イオン種に対応した GNET により、LHD 重水素実験の NBI 加熱解析を行った。最高イオン温度を達成した放電に加え、不純物の少ない放電の解析にも適用し、主イオンの重水素化による閉じ込め改善の解明に貢献した [3.3.3.3-2]。この系統的な実験解析には、統合輸送スイート TASK3D-a との連携が大きく寄与している。重水素実験における中性子発生量の評価としては、京都大学村上定義教授（当時准教授）らにより、GNET を用いた予測評価が初めてなされた [3.3.3.3-3]。重水素垂直入射ビームを用いた blip 実験で得られた中性子発生率と、GNET-TD を用いて評価された計算結果との比較を図 3.3.3.3-2 に示す [3.3.3.3-4]。中性子発生率の減衰時間が実験結果に良好に一致しており、高速イオン閉じ込めが新古典的であることが示された。中性子発生率の比較による CONV_FIT3D、TASK/FP コードのベンチマークも進展しており、高速で簡易な加熱及び中性子発生率の評価が可能になってきている。詳細については、3.2.2 の統合コードに関する報告を参照されたい。

[3.3.3.3-1] H. Yamaguchi and S. Murakami, “Simulation study of NBI heating in the time-evolving and multi-ion-species plasmas of LHD”, Nuclear Fusion Vol. 56 (2016) 026003

[3.3.3.3-2] H. Takahashi *et al.*, “Realization of high Ti plasmas and confinement characteristics of ITB plasmas in the LHD deuterium experiments”, Nuclear Fusion Vol. 58 (2018) 106028

[3.3.3.3-3] M. Homma *et al.*, “Estimations of Beam-Beam Fusion Reaction Rates in the Deuterium Plasma Experiment on LHD”, Plasma and Fusion Research Vol. 11 (2016) 2403109

[3.3.3.3-4] K. Ogawa *et al.*, “Energetic ion confinement studies using comprehensive neutron diagnostics in the Large Helical Device”, Nuclear Fusion Vol. 59 (2019) pp. 076017

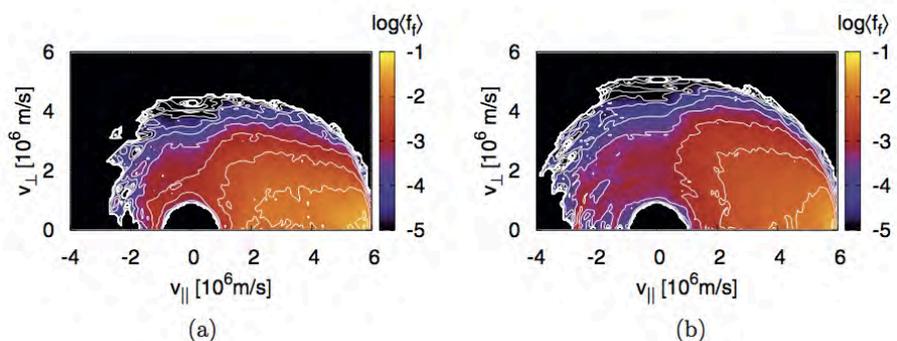


図 3.3.3.3-1 LHD における接線 NBI 高速イオンの規格化小半径 $\rho = 0.2$ における 2 次元速度空間分布関数。(a) 実効電荷 1.5 (b) 実効電荷 3.36 の場合。実効電荷が増加とともに、エネルギーの高いイオンのピッチ角散乱が増加している ([3.3.3.3-1] より転載)。

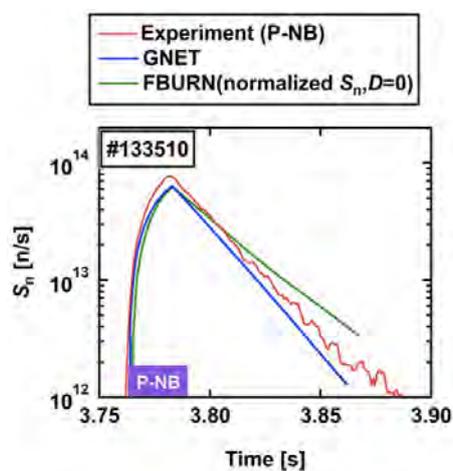


図 3.3.3.3-2 中性子発生率の時間発展。([3.3.3.3-4] より転載)

3.3.4 周辺プラズマの輸送とプラズマ・壁相互作用

・LHD 周辺プラズマにおける不純物輸送モデリング研究

閉じた磁力線を持つ炉心領域を覆う、開いた磁力線で特徴付けられる周辺プラズマは、壁との接触、燃料ガスである中性水素分子及びそれが解離した原子、装置壁やガスパフに由来する不純物など、多数の物理要素を含む。このことは、揺動・輸送・平衡分布等の研究において炉心とは異なる数値モデルや解析手法の必要性を意味する。また、大型装置における熱負荷予測やその低減手法、炉材料の損耗や再堆積など、工学要素と関わりが深く、基礎的な物理要素の研究に基づいた統合的な輸送モデル研究の重要性が増している。このような状況から、EMC3-EIRENE コード (3.2.1.3 節参照) を基盤とした周辺輸送モデル開発を進めてきている。

本コードは Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (ドイツ) で開発されているプラズマ流体輸送コード EMC3 と Forschungszentrum Jülich (ドイツ) で開発されている中性粒子輸送コード EIRENE を結合したものであり、装置やプラズマの実三次元形状を取り扱うことができ、世界的に多数の装置において実績のあるコードである。国内の核融合プラズマ実験装置の周辺プラズマモデリングにおいては、LHD (核融合研) を含め、Heliotron J (京大)、JT-60SA (量研機構)、NAGDIS-II (名大)、GAMMA 10/PDX (筑波) の 5 装置に導入されており、いずれも本数値実験炉研究プロジェクトが中核として共同研究を推進してきた成果である (4.1、4.4 節参照)。また、国外でも EAST (ASIPP 中国) に関して大連理工大学と同コードを用いた共同研究 (4.3 節参照) を実施するとともに、同コードの開発やモデル拡張に関して開発者と密に連携しており、国際的な研究ネットワークの構築に貢献している。共同研究により、TOP10%論文 2 編、TOP20%論文 1 編を含む、17 編の論文が出版された。

LHD におけるモデリング研究の進展として、不純物ガスパフ放電における不純物輸送研究の成果について述べる。ネオンパフ放電と窒素パフ放電それぞれを模擬した EMC3-EIRENE 計算を行った。一般に、気体原子のイオンが物質表面に到達すると、電子を得る表面再結合によって中性気体として空間に放出される。この過程をリサイクリングと呼び、その放出割合をリサイクリング率と呼ぶ。希ガスであるネオンは化学活性が低く、窒素は化学活性が高いことから、それぞれのリサイクリング係数を 1 と 0、すなわち全て放出あるいは吸収として元素の特性を計算モデルに組み入れた。図 3.3.4-1 にネオンパフ放電と窒素パフ放電それぞれを模擬した EMC3-EIRENE 計算で得られたプラズマ発光分布を示す。装置内に閉じ込められてネオン発光はトロイダルに広く分布する一方、窒素発光はガスパフ位置付近で電離した後、壁で失われるために局所性を持つ分布となった。

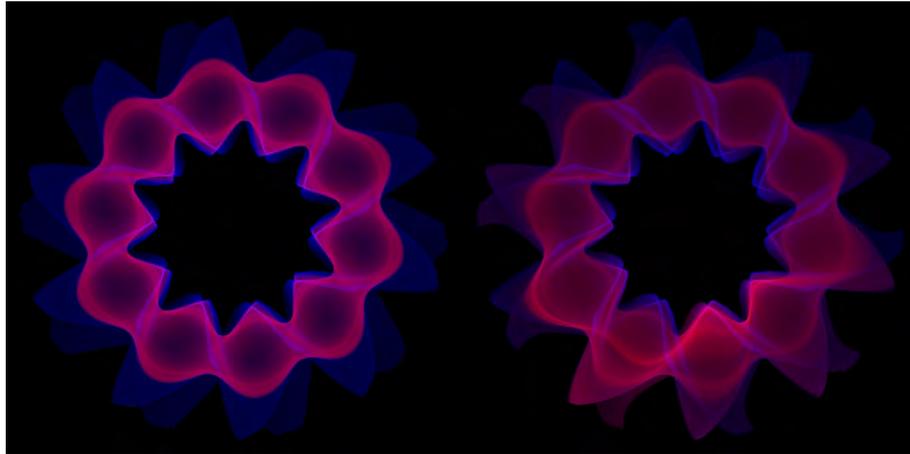


図 3.3.4-1 装置上部から見たプラズマの発光分布。左右はそれぞれネオン及び窒素ガス放電であり、不純物発光を赤、水素発光を青で可視化している。

実験においても、ネオンと窒素の局所性の違いが得られている。図 3.3.4-2 に、横長断面の内側ダイバータにおける粒子束の各ヘリカルセクションごとの分布を示す。図に示した量は、静電プローブで計測されたダイバータ粒子束であり、ガスパフ前から後への相対値である。実験においては一部変動はあるが、基本的にはパフ後に粒子束が減少している。また、ネオンについては概ねトロイダルに一様に減少するの比べ、窒素についてはガスパフ位置の前後で局所的な変化が見られる。さらに、左右のダイバータについて異なる分布となっている。これらの特徴が数値モデルにおいても定積的によく再現されており、リサイクリング係数の違いによって、トロイダルー様性・非一様性の違いが説明された。このように素過程に基づく輸送機構の違いと結果をモデルと実験の両面から結び付けた研究は他になく、不純物輸送モデリング研究において重要な成果である。

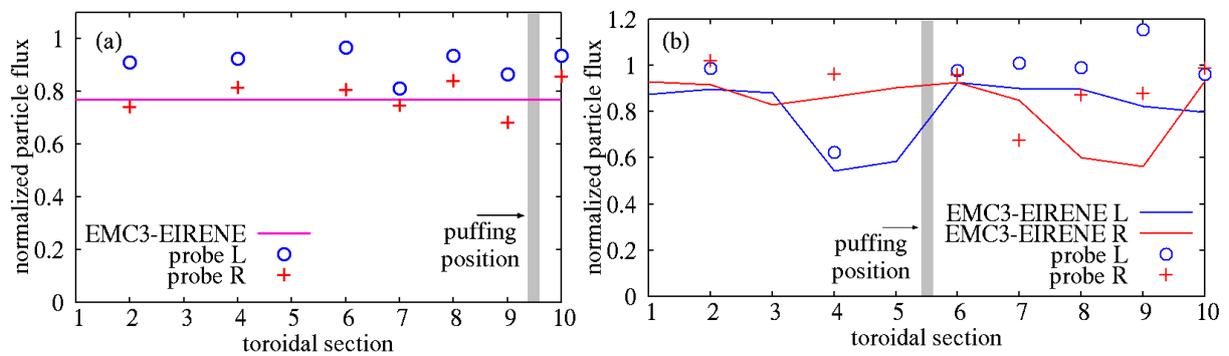


図 3.3.4-2 (a) ネオンパフ放電及び (b) 窒素パフ放電におけるダイバータ粒子束のトロイダル分布の実験と数値モデルの比較。+及び○はプローブで計測された粒子束、実線は数値モデル。赤と青はそれぞれ右側ダイバータと左側ダイバータに相当し、ネオンパフの数値モデルについては、モデルの原理的に左右が同一の値を持つため、区別せず紫で示す。

・ペレットによる周辺 MHD 不安定性制御 – ス페인・カタルーニャ工科大学との共同研究–

ダイバータ部に流入する熱・粒子束は、コアプラズマから輸送される定常的なもののほかに、プラズマ周辺部で駆動される MHD 不安定性によってももたらされる。トカマクの場合、周辺局在化モード (Edge Localize Mode) の存在が大きな問題となっている。周辺輸送障壁の形成と主に高い圧力勾配を持つペDESTAL部が形成され、そこで駆動される非定常な熱・粒子束がダイバータ材料に大きな損傷を与えることが危惧されている。ELM の存在は H モードにとっては必然であるために、外部からの制御ノブを用いて ELM を抑制・提言するための試みが行われている。ELM 抑制のための方法としては、外部共鳴磁場摂動の応用が考えられており、大きな成果を上げている。しかし、共鳴磁場接道を効率よくプラズマに印可するためには、真空容器内にコイルを設置する必要がある、将来の核融合炉では使えない可能性が指摘されている。そこで、将来の核融合炉での周辺 MHD 不安定性抑制の制御ノブとして、アイスペレットを短い周期で連続して入射し、ELM と異なる周波数の密度揺動を人為的に引き起こすことで、ELM の周波数を高めに持っていき、つまり、ペーシングすることで熱・粒子束を低減する試みが行われている。このことは、トカマクだけでなく、LHD をはじめとするステラレータにとっても重要な課題である。

そこで、核融合科学研究所で開発されている非線形拡張 MHD コード MIPS にペレットの溶発モデルを導入し、ペレット入射によりステラレータでも不安定性の駆動が可能かを数値シミュレーションした。ペレットの溶発モデルとしては、トカマクの ELM ペーシングで実績のある NGS モデルを導入した。図 3.3.4-3 に、水素ペレット入射により形成されたペレットの溶発クラウドを示す。 $m/n = 2/1$ の構造を持ったクラウドが形成されていることが分かる。

この密度揺動により、周辺 MHD 不安定性が駆動されるかどうかを調べた結果を図 3.3.4-4 に示す。ペレットサイズを変えた場合の磁気エネルギーの発展を示した。ペレット入射がない場合、磁気エネルギーは成長せず、安定なプラズマであることが分かる。しかし、ペレットサイズを増加させるとともに、磁気エネルギーの成長が大きくなる。このことは、ペレット入射による密度揺動が確かに MHD 不安定性を駆動していることを示している。

今後は、MHD 不安定なプラズマに対し、周期的な密度揺動を加えることでペーシング化可能かどうか調べる予定である。



図 3.3.4-3 水素ペレット入射の溶発により形成されたペレットクラウド。 $m/n = 2/1$ の構造を持ってプラズマ中に現れる。

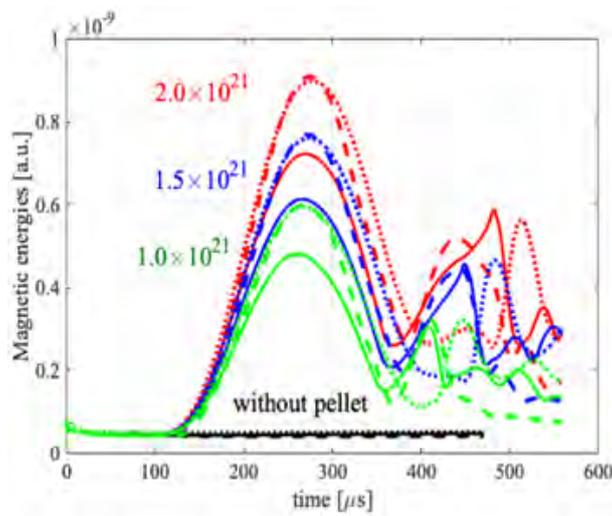


図 3.3.4-4 水素ペレットサイズを変えた場合の磁気エネルギーの非線形発展。

・ヘリウムプラズマで誘起されるファズ構造形成過程の解明

ヘリウムプラズマ照射をタングステン表面に照射すると、金属固体中にスケールのヘリウム気泡(ヘリウムバブル)が発生する。さらに照射を続け、総照射量が 10^{24}m^{-2} 程度に達すると、表面から繊維状のナノ構造(ファズ構造)が生えてくる。本現象において、ヘリウムバブルが凝集するメカニズムや表面でバブルが割れる過程は、密度汎関数理論(DFT)計算や、分子動力学(MD)を利用して調べ、平成27年度の外部評価においても報告した。また、MD-MCハイブリッド法(コードについての記述参照)を利用した計算によって、表面でバブルが割れることで、タングステンが一部めくれ上がり、表面の凹凸が形成される様子を再現した。当時はこれがファズ構造の形成を再現したものだと考えたが、その後の追加計算により、これだけでは表面に凹凸が出た後のファズの成長が見られず、シミュレーションに取り入れたメカニズムが不足していると考えざるを得なかった。つまり、MD-MCハイブリッド法は、ファズ形成のための初期過程である表面の凹凸の形成までしか扱えない。

そこで、ファズ構造がより長く成長していく機構を解明すべく、平成28年度以降はハイブリッド法の更なる拡張に取り組んだ。幾つかの試みの中で、上手くいったものはBCA-MD-KMC三連ハイブリッド法(コードについての記述参照)によるものであった。先のMD-MCハイブリッド法では、照射されたヘリウムバブルの拡散過程をランダムウォーク様のモンテカルロ(MC)計算で解き、ヘリウムバブルが形成されることによる圧力で材料が変形する過程をMDで解いた。これにより、表面の破裂やループパンチングが再現できる。一方で、ヘリウムプラズマの入射エネルギーは数十 eV であり、スパッタリング閾値を遥かに下回ることから、ヘリウムの照射・散乱過程は計算では解いておらず、入射エネルギーに応じた飛程(侵入深さの)の材料中の個所にランダムにヘリウム原子を追加するだけであった。一般的に入射に関しては他のグループの大規模MD等でも同様の扱いがされている。しかし、本BCA-MD-KMC三連ハイブリッド研究では、あえて照射・散乱過程を二体衝突近似(BCA)で解くこととした。MDではなくBCAを使った理由は、MDでは計算時間が掛かり過ぎて必要なフルーエンスに達しないためである。この結果、図3.3.4-5のとおりファズ構造のようなファイバーが成長する様子をシミュレーションで見ることができた。条件として、入射エネルギーは100eV、入射フラックスは $1.4 \times 10^{22} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、材料温度は1100 K、ヘリウムの拡散係数は $1.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ 、ターゲット材料の初期表面積は $20.3 \times 20.4 \text{ nm}^2$ 、深さは33.3 nmとした。この条件で、照射時間で100秒、フルーエンスで $1.4 \times 10^{22} \text{ m}^{-2}$ 相当の計算を実行し、ファイバーの長さは25nmに達した。この長さは過去に例がなく、初期過程を超えて成長過程まで踏み込めたといえる。

解析の結果、今回のシミュレーションでファイバーの成長に至ったメカニズムは照射過程にあった。表面に構造が無いバルクの状態の時点では、BCAによる入射においてスパッタリングは起こらない。これはバルクにおける弾き出し閾値エネルギーが、入射粒子との衝突によるエネルギートランスファーよりも大きいためである。一方で、MD-MCと同じようにバブルは形成され、やがて表面でバブルが破裂する。すると、破裂した凹凸表面では、タングステン原子の結合数がバルクに比べて小さくなり、同時に弾き出し閾値エネルギーが低くなる。そのため、凹凸表面ではスパッタリングが起こる。さらに、スパッタされたタングステン粒子は、その一部が凹凸部分に再堆積し、一部が真空中へ放出される。このスパッタリングと再堆積によってタングステンが(マクロな)表面垂直方向に輸送され、ファイバーの成長が起こることが分かった。

因みに、伝統的なBCAコードでは表面の凹凸があっても弾き出し閾値エネルギーはバルクと同じである。その設定でBCA-MD-KMCを計算しても、ファイバーの成長は起こらなかった。今回独自に開発したBCAのBDOGコード(コードについての記述参照)では、個々のタングステンごとに結合数 n を求め、弾き出しエネルギーが \sqrt{n} に比例するようにした。これは、結合エネルギーが結合数の平方根に比例するという、タイトバインディングモデルからの導出[S. Khakshouri, et al. Phys.Rev.B 78,224304, (2008)] や、Embedded Atom Method[M. W. Finnis, and J. E. Sinclair, Phil. Mag. A 50 45-55(1984), G. J. Ackland and R. Thetford, Phil. Mag. A 56 15-30(1987), S. M. Daw and M. I. Baskes, Phys. Rev. Lett. 59 1285(1983), S. M. Daw and M. I. Baskes, Phys. Rev. B 29 6443(1984), S. M. Foiles, M. I. Baskes and S. M. Daw, Phys. Rev. B33, 7983(1986)] といった伝統的なモデルに従ったものであり、物質科学分野において妥当なモデルといえる。この改良の結果、上述のようにファイバーの成長が確認された。

ところで、本コードの特徴は計算速度の速さにもある。ハイブリッド化することで、MDだけでは到底到達できない照射時間を達成できる。実際に40日間程度の計算時間で、100秒間相当の照射時間に到達している。特に、実験同様の照射頻度(フラックス)で計算できるため、照射によるヘリウムの増加と、材料中の拡散を経た放出による現象、バブルの形成頻度など、プラズマ側で駆動される現象の速度と、材料固有の内部の現象の速度の正しい競争が再現できる。今後はこれをファズ構造以外のプラズマ-物質相互作用現象へ広く展開していくことを目指す。

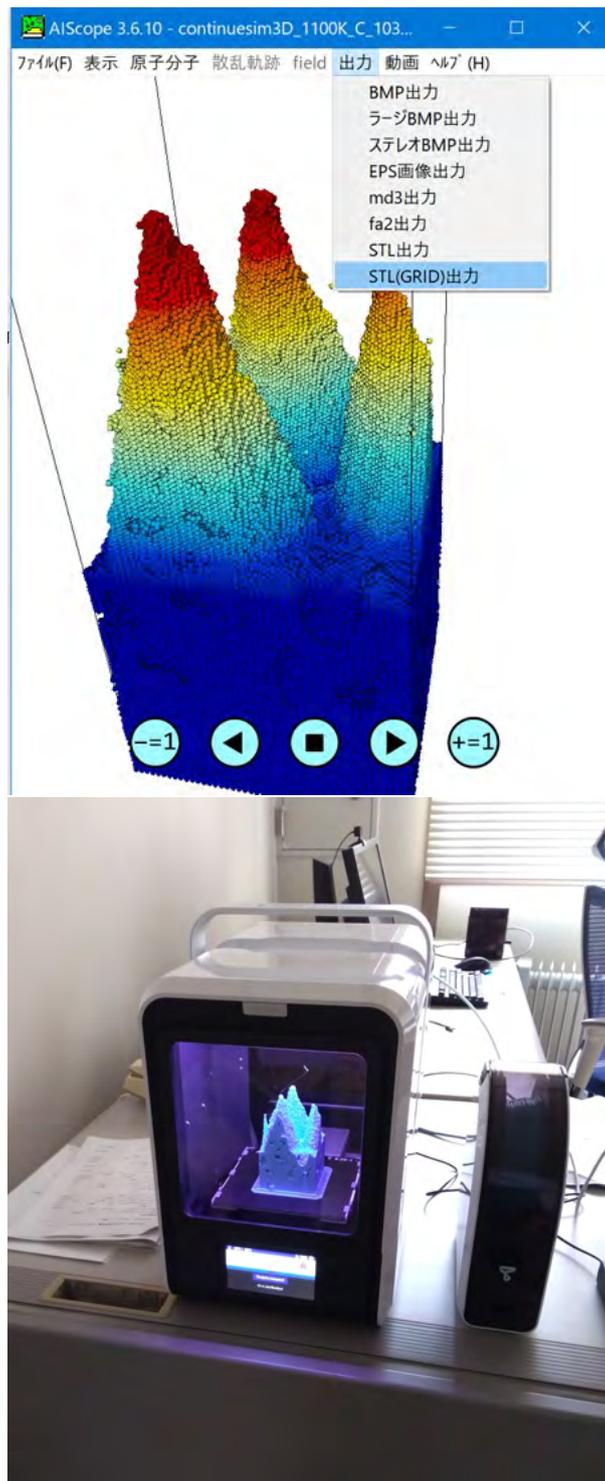


図 3.3.4-5 BCA-MD-KMC 三連ハイブリッド計算によって生えてきたタングステン表面のファズ構造。(a) 本プロジェクトで開発している可視化ソフト AIScope で可視化し、(b) 本ソフトを通して 3D プリンティングしている様子。

・分子動力学に基づく水素プラズマ対向壁リサイクリングモデルの構築による中性粒子輸送コードの精密化と LHD 発光線解析 – 信州大学・山形大学・京都大学との共同研究–

エルゴディック領域・ダイバータ領域等の周辺領域での水素原子分子の輸送や反応は、コアプラズマへの燃料補給やプラズマの閉じ込めに大きな影響を与えると考えられ、それらは炉壁の熱負荷軽減の役割を担うことも期待される。しかし、プラズマ対向壁において反射・放出されるのは原子か分子か（もしくはその比率はいくらか）、それらの運動量・運動エネルギー分布はどうか、さらに分子であれば振動・回転状態はどうなっているのかが、その後の粒子の輸送や反応に重要であるにもかかわらず、情報は乏しい。そこで本研究は、澤田(信州大)、齋藤(山形大)、蓮尾(京都大)、小林・河村・中村(NIFS)により、これらの情報を分子動力学に基づいて計算する水素プラズマ対向壁リサイクリングモデル構築を進めた。さらに、これらの情報を取り入れた衝突輻射モデルを開発し、中性粒子輸送コードと統合することで、LHDで観測される水素発光線の解析を可能とし、周辺領域での水素原子分子の挙動理解に資することを目的とした。本共同研究に参加する研究者が各々の機関で独自に取り組んできた研究を発展させ、かつ有機的な連携を図ることで、近い将来のLHD実験に貢献を目指した。具体的な実施内容としては、(1)炭素壁水素リサイクリングモデルを開発し、壁からの放出水素分子・原子の情報を計算し、水素分子の振動・回転状態を考慮した中性粒子輸送コードへの提供を行う。(2)EMC3-EIRENEを用いてLHDにおける電子・イオンの温度・密度分布を計算し、中性粒子輸送コードと連携する。(3)LHDで観測される水素発光線を計算し分光計測結果と比較することで周辺領域での水素原子分子の挙動を求める。

(1)炭素壁水素リサイクリングモデルの開発: 分子動力学(MD)法を用いて炭素壁への水素入射を計算するコードを開発した。原子間相互作用は、炭素水素系の共有結合モデルとして広く使われる Brenner ポテンシャルを用いた。図 3.3.4-6 に示すように、炭素原子 3872 個、水素原子 2080 個からなるアモルファス炭素を用意し、Langevin 熱浴(NVT アンサンブル)を用いて 300 K まで昇温する。その後、熱浴を外し(NVE アンサンブル)、アモルファス炭素に水素を 1 原子入射させる。水素原子入射後 50 ps の間に放出される水素原子・分子・炭化水素等の放出粒子の放出角、並進エネルギー、振動準位、回転準位等を調べる。古典 MD 法を用いたリサイクリングモデルから得た放出水素分子の角運動量とエネルギー固有値から、対応する振動・回転状態を算出する方法を確立した。図 3.3.4-7 に、本計算モデルから得られた回転準位 J の分布を示す。

(2)中性粒子輸送コードとプラズマ流体コード EMC3 との連携: 中性粒子輸送コードでは、電子温度・密度・イオン流などのプラズマ(荷電粒子)の情報を要する。EMC3-

EIRENE の出力を上記の中性粒子輸送コードで利用するため、コードの入出力を整備した。さらに、中性粒子輸送コードに、精密な LHD 閉・開ダイバータ形状を組み込んだ。

(3) 中性粒子輸送コードとリサイクリングモデルの連携: リサイクリングモデルの出力を中性粒子輸送コードの水素原子・分子粒子源として利用するために、コード入出力を整備した。図 3.3.4-8 に、本課題で開発した炭素壁水素リサイクリングモデルから得た放出粒子の振動状態・回転状態等の情報、及び、プラズマ流体コード EMC3 により得られた LHD の電子温度・密度・イオン流などのプラズマ (荷電粒子) の情報を取り入れた中性粒子輸送計算の結果を示す。

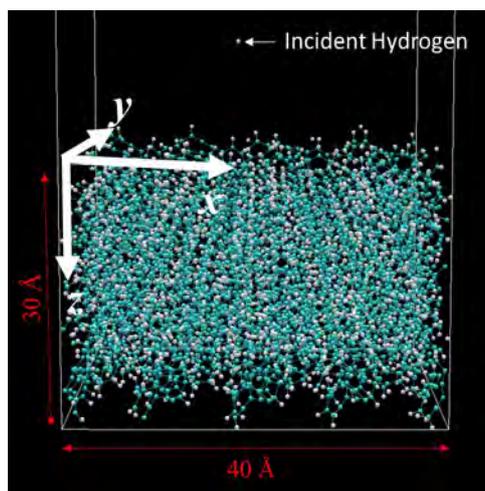


図 3.3.4-6 炭素壁水素リサイクリングモデルとして計算した分子動力学計算の系

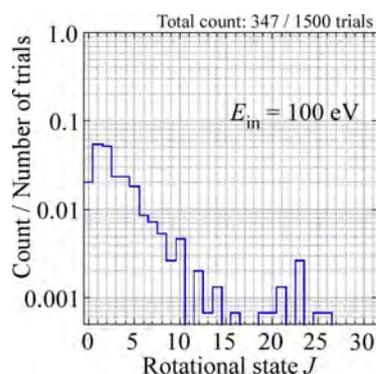


図 3.3.4-7 放出された水素分子の回転準位 J の分布

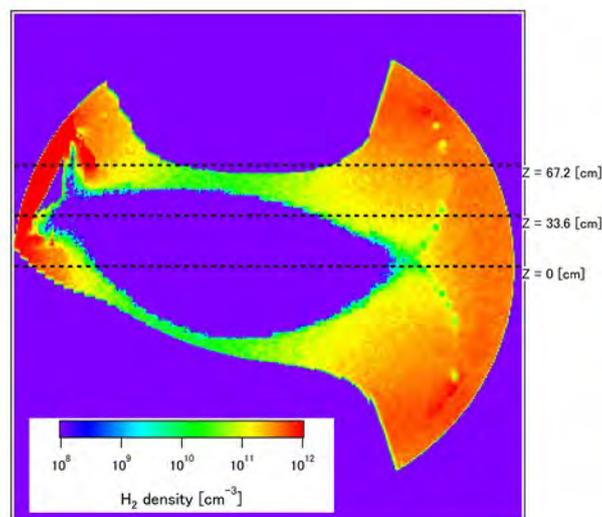


図 3.3.4-8 素分子の振動・回転状態を区別した中性粒子輸送コードにより計算したLHD内の水素分子分布。壁でのソースとして、本課題で開発した炭素壁水素リサイクリングモデルから得た放出粒子の振動状態・回転状態等の情報を取り入れた。また、プラズマ流体コードEMC3により得られたLHDの電子温度・密度・イオン流などのプラズマ（荷電粒子）の情報も組み込んでいる。

・ヘリウムプラズマで誘起されるファズ構造光学応答の解明 – 名古屋大学・九州大学・九州工業大学との共同研究–

タングステンにヘリウムプラズマをある条件下で照射すると、タングステン表面にファズ構造が生成することが実験で分かっている。このような構造変化により、タングステンの光学的特性が変化することが、大野研（名大）より報告された。例えば、入射波の波長が 633nm の時、タングステン平板の反射率が 51% であるのに対して、ナノ構造タングステンは 1% に減少する。

前述大野研究室（名大）では、このファズ構造の光学特性を生かして、産業応用として光触媒としての応用が期待されている。光触媒とは、光が当たると、その表面で強力な酸化力が生まれ、接触してくる有機化合物や細菌などの有害物質を除去することができる環境浄化材料である。ファズ構造の光吸収率がほぼ 100 % であることから、光触媒としての効果を最大限引き出す可能性がある。

しかしながら、なぜ表面構造がファズ構造化することで光学反射率が低下するのかの原因は未だ解明されていない。そこで、大野研究室（名大）と共同研究を行い、FDTD 法 (Finite Difference Time Domain method) による電磁場シミュレーションによって、タングステンファズ構造の光学反射率低下のメカニズム解明を行った。

FDTD シミュレーションでは、ファズ構造を単純化した凸凹モデルを用いた構造により、ナノ構造による局所的な電磁波強度の閉じ込め現象を見いだすことができた。これは、フォトニック結晶の研究で広く知られることになった電磁場の閉じ込め現象と同じ機構で発生するもので、ファズ構造が、フォトニックフラクタルとして振る舞うことを発見することができた。

さらに、名大・九大・九工大・NIFS の共同研究の成果として、タングステンファズ構造の三次元構造の正確な空間情報を、電子顕微鏡を用いて得ることもできた (図 3.3.4-9)。この手法は、たんぱく質の 3 次元構造を得るために用いられる手法を利用したものである。この実際のファズ構造をコンピュータ上に再現し、FDTD シミュレーションを行い、図 3.3.4-10 のように電磁波特性の計算も行うことができた。その結果、300nm の平面波を照射した際に、99.24 % で電磁波が吸収されることを求めることができた。

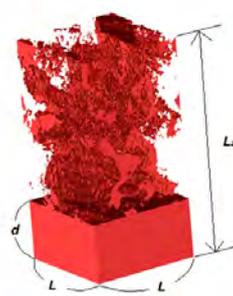


図 3.3.4-9 タングステンファズの実際の構造。ファズは、大野研究室(名大)、吉田氏(名大)、矢嶋氏(NIFS)に作成いただいた。三次元構造は安永氏(九工大)により測定された。サイズは $L = 202 \text{ nm}$, $d = 110 \text{ nm}$, $L_z = 530 \text{ nm}$ である。

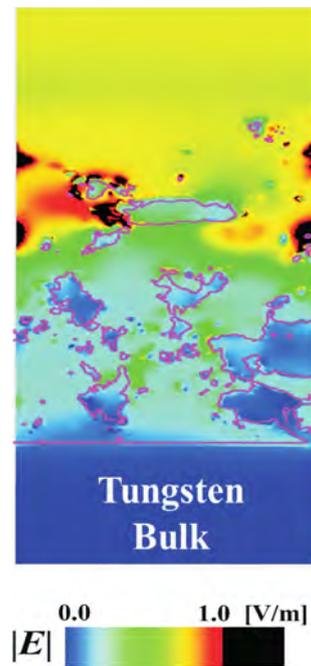


図 3.3.4-10 タングステンファズ構造に照射した際の電場 \mathbf{E} の空間分布

3.3.5 基礎物理

3.3.5.1 3次元 Hall MHD 乱流の DNS に基づいた Hall MHD 方程式の LES 研究

LHD など で 発 生 す る 短 波 長 不 安 定 性 に つ い て 、 ド リ フ ト オ ー ダ リ ン グ な ど の 追 加 的 な 近 似 を 排 し て 拡 張 MHD シ ミ ュ レ ー シ ョ ン を 行 う 場 合 、 Hall 項 や ジ ャ イ ロ 粘 性 項 に 起 因 す る 数 値 不 安 定 性 を 取 り 除 く 必 要 が あ る 。 我 々 は 、 拡 張 MHD シ ミ ュ レ ー シ ョ ン に お い て 反 磁 性 ド リ フ ト な ど の 流 れ の 効 果 に 起 因 す る 乱 流 の 発 生 に 着 目 し 、 格 子 解 像 度 以 下 の ス ケ ー ル (Sub-grid-scale, SGS) の 揺 動 が 長 波 長 成 分 に 与 え る 影 響 を 現 象 論 的 モ デ ル (SGS モ デ ル) で 代 替 す る 、 LES 研 究 を 進 め て い る 。 こ の 項 で は 、 Hall 項 の SGS モ デ ル 開 発 の た め の 一 様 等 方 Hall MHD 乱 流 シ ミ ュ レ ー シ ョ ン に よ る 基 礎 研 究 に つ い て 述 べ る 。

Hall MHD 方程式の LES を 可能にするため、Hamba and Tsuchiya(2010) によって開 発された MHD 方程式用の SGS モデルを元に、Hall MHD モデル用 SGS モデルを開 発した。Hall MHD 方程式は以下のように書ける。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[(u_i u_j - B_i B_j) + \left(p + \frac{1}{2} B_k B_k \delta_{ij} \right) \right] + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} S_{ij}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0, \quad (2)$$

$$S_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial B_i}{\partial t} = -\epsilon_{ijk} \frac{\partial E_k}{\partial x_j}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial B_k}{\partial x_k} = 0, \quad (5)$$

$$E_i = -\epsilon_{ijk} (u_j - \epsilon_H J_j) B_k + \eta J_i. \quad (6)$$

こ こ で 、 記 号 B_i 、 J_i 、 u_i 、 p 、 S_{ij} 、 δ_{ij} 、 ϵ_{ijk} は それ ぞ れ 、 磁 場 の 第 i 成 分 、 電 流 密 度 の 第 i 成 分 、 速 度 場 の 第 i 成 分 、 圧 力 、 ひ ず み 速 度 テ ン ソ ル の 第 (i, j) 成 分 、 Cronecker の デ ル タ 記 号 、 Levi-Civita の 反 対 称 テ ン ソ ル 記 号 で あ る 。

こ れ に 対 し 、 長 波 長 成 分 の 運 動 を 記 述 す る 方 程 式 (GS 方 程 式) は 上 の 方 程 式 系 に 対

してローパスフィルターを施すことで得られ、以下のように表現される。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{B}_i \bar{B}_j) + \left(\bar{p} + \frac{1}{2} \bar{B}_k \bar{B}_k \delta_{ij} \right) \right] + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{S}_{ij} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j}, \quad (7)$$

$$\bar{\tau}_{ij} = \left[(\bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{B}_i \bar{B}_j) + \frac{1}{2} \bar{B}_k \bar{B}_k \delta_{ij} \right] - \left[(\bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{B}_i \bar{B}_j) + \frac{1}{2} \bar{B}_k \bar{B}_k \delta_{ij} \right], \quad (8)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \bar{B}_i}{\partial t} = -\epsilon_{ijk} \frac{\partial \bar{E}_k}{\partial x_j}, \quad (11)$$

$$\bar{E}_i = -\epsilon_{ijk} (\bar{u}_j - \epsilon_H \bar{J}_j) \bar{B}_k + \eta \bar{J}_i - \bar{E}_i^M - \bar{E}_i^H, \quad (12)$$

$$\bar{E}_i^M = -\epsilon_{ijk} (\bar{u}_j \bar{B}_k - \bar{u}_j \bar{B}_k), \quad (13)$$

$$\bar{E}_i^H = -\epsilon_{ijk} (-\bar{J}_j \bar{B}_k + \bar{J}_j \bar{B}_k), \quad (14)$$

$$\frac{\partial \bar{B}_k}{\partial x_k} = 0. \quad (15)$$

但し、記号 $\bar{\cdot}$ は、ローパスフィルターを表す。この方程式系は基本変数にフィルターを施した変数 \bar{B}_i, \bar{u}_i について閉じていない。これは、 $\bar{\tau}_{ij}$ や \bar{E}^M, \bar{E}^H に、基本変数の積が含まれるためである。

GS方程式を閉じるために必要なSGSモデルとして、我々は以下のようなモデルを提案した。

$$\bar{\tau}_{ij} = -\nu_{SGS} \bar{S}_{ij}, \quad (16)$$

$$\bar{E}_i^M = -\eta_{SGS} \bar{J}_i, \quad (17)$$

$$\nu_{SGS} = C_\nu \Delta^2 \left(\frac{1}{2} C_\nu \bar{S}_{ij}^2 + C_\eta \bar{J}_i^2 \right)^{1/2}, \quad (18)$$

$$\eta_{SGS} = C_\eta \Delta^2 \left(\frac{1}{2} C_\nu \bar{S}_{ij}^2 + C_\eta \bar{J}_i^2 \right)^{1/2}. \quad (19)$$

ここで、 $\Delta = (\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3)^{1/3}$ である。

このモデルの妥当性を検証するため、3方向が周期的な一様Hall MHD乱流のLESを実施し、SGSモデルを用いない直接数値シミュレーション(DNS)との比較を行った。SGSモデルには任意性のあるパラメータが含まれるため、いくつかのパラメータセットについてLESを実施し、その結果をDNSと比較した。図3.3.5.1-1は、SGSのいくつかのパラメータを組み合わせたセット(pset000, pset002, pset004)を用いたLESとDNS

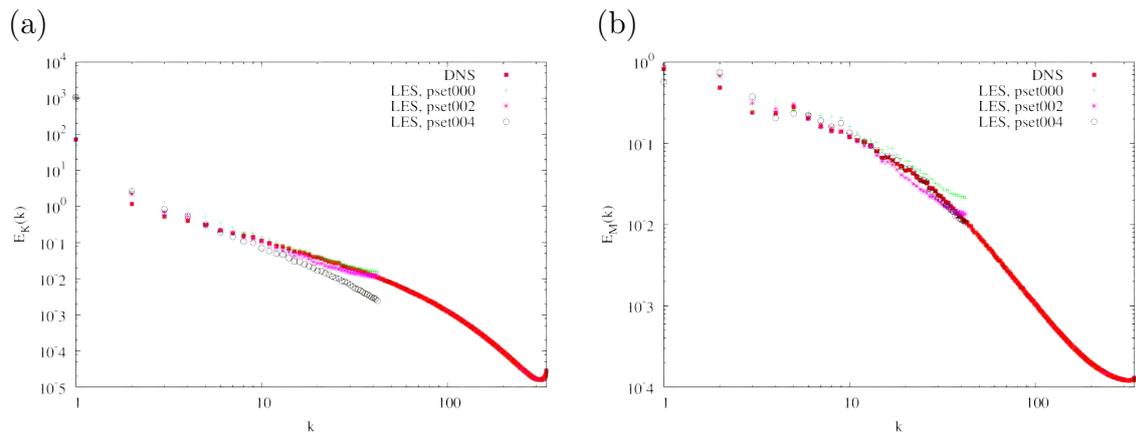


図 3.3.5.1-1 一様磁場 $B_0 = 5$ が印加された一様 Hall MHD 乱流の DNS 及び LES における (a) 運動エネルギーースペクトル $E_K(k)$ 及び (b) 磁気エネルギーースペクトル $E_M(k)$ 。

において、(a) 運動エネルギーースペクトル $E_M(k)$ 、(b) 磁気エネルギーースペクトル $E_M(k)$ を比較したものである。(いずれも、文献 [3.3.5.1-1] から引用。) パラメータセットによって高波数部の振る舞いは異なるが、低波数部の振る舞いは LES と DNS との間で似通っていることが分かる。このことから、我々の開発した SGS モデルは、Hall MHD 乱流の LES に適用可能であることが分かる。これらの研究は東京大学及び岡山理科大学との共同研究として行われた。

なお、我々は上述のSGSモデルを圧縮性モデルに拡張した上で、LHDのバルーニング不安定性の拡張 MHD モデル LES に応用し、不安定性の飽和シミュレーションにおいて所期の成果を上げることができた。この成果は 2016 年に京都で開催された IAEA 核融合会議 (IAEA FEC) で発表され [3.3.5.1-2]、その後 Nuclear Fusion に掲載された [3.3.5.1-3]。これらの成果については、MHD 平衡と不安定性の項を参照されたい。

[3.3.5.1-1] H. Miura, K. Araki, and F. Hamba, "Hall effects and sub-grid-scale modeling in Hall Magnetohydrodynamic turbulence simulations", J. Comput. Phys. Vol.316 (2016) 385-395.

[3.3.5.1-2] H. Miura, K. Araki, and F. Hamba, "Two-fluid Subgrid-Scale Viscosity in Nonlinear Simulation of Ballooning Modes in a Heliotron Device", 26th IAEA Fusion Energy Conference (Kyoto, Japan, October 17-22, 2016)

[3.3.5.1-3] H. Miura, K. Araki, and F. Hamba, “Two-fluid sub-grid-scale viscosity in nonlinear simulation of ballooning modes in a heliotron device”, Nuclear Fusion, Vol.57 (2017) 076034.

3.3.5.2 交換型不安定性・テアリング不安定性の遷移についての2次元MHDシミュレーション

エッジプラズマ抵抗率の数値モデルを使用して、2D スラブ中の交換型不安定性・テアリング不安定性の遷移の2次元数値シミュレーション研究を行った。この結果、Zheng and Furukawa(2010)において提唱された、Current Interchange Tearing Mode (CITM) が成長することを、数値シミュレーションによって確認した。

最外殻磁気面 (Last-Closed-Flux-Surface, LCFS) またはスクレイプオフ層 (Scrape-Off-Layer, SOL) より外側のプラズマの挙動は、ダイバータプレートに向かって磁場が開かれることによって特徴付けられる。環状型装置、特にトカマク型装置の SOL 領域において、飽和電流が低レベルであること、LCFS を横切るプロファイルに鋭いジャンプが生じることを模擬するため、磁気拡散についての数値モデルを開発した。この磁気拡散モデルを用いて、圧力勾配及び磁気シアアが印可されたプラズマのMHDシミュレーションを行ったところ、初期に交換型モードが成長し、その後、テアリングモード遷移することが示された。これは、Zheng and Furukawa (2010) によって示された、Current Interchange Tearing Mode (CITM)(図 3.3.5.2-1 (a) 参照) に対応するものである。図 3.3.5.2-1 (b) は、数値シミュレーションによって生じる磁気島やプラズマ変位 (図では模式的に示されている) が、CITM の模式図 (3.3.5.2-1 (a)) と対応することを示している。CITM の発生は、圧力勾配が急峻なエッジ領域における磁気リコネクションの発生を意味する。CITM が環状型装置の実形状において間欠的に発生した場合、トカマク型装置で報告された、電流の間欠的放出 (K.H.Burrell, 2005) を説明可能であると考えられる。他方、エッジ領域では2流体効果などの影響も考慮しなければいけないため、拡張MHDモデルによるシミュレーションも進めつつ [3.3.5.2-2]、フルトラスシミュレーションの準備を進めているところである。

この研究は、JIFT 研究者派遣プログラムに基づき、テキサス大学オースチン校核融合研究所との共同研究によって行われた。

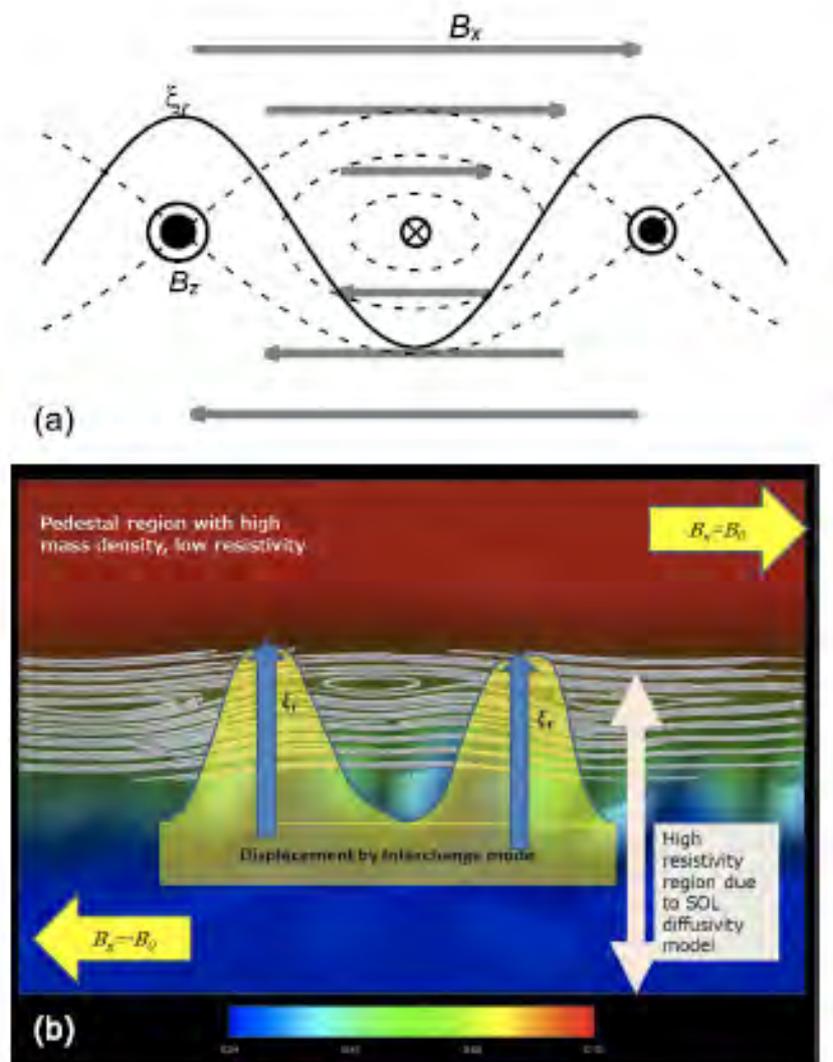


図 3.3.5.2-1 Fig: (a) CITM の模式図。(b) 磁力線 (太い白線) 及び模式的に描かれたプラズマ変位、並びにプラズマの等高線 (カラーマップ)。(文献[3.3.5.2-1] 図5より。)

- [3.3.5.2-1] H.Miura, L.Zheng, and W.Horton, "Numerical simulations of interchange/tearing instabilities in 2D slab with a numerical model for edge plasma", Physics of Plasmas 24, 092111 (2017).
- [3.3.5.2-2] H.Miura, W.Horton, and L.Zheng,, "Ambient-field-dependence of diamagnetic flow interacting with CITM", Sherwood Fusion Theory Conference 2019 (April 15-17, 2019, Princeton, U.S.A.) .

3.3.5.3 有限アスペクト比を持つ円柱プラズマの二流体テアリング不安定性の解析

有限アスペクト比を持つ円柱プラズマの二流体テアリング不安定性の数値解析を行い、抵抗性テアリングモードに対する二流体効果と円柱の曲率の効果との組み合わせによる影響を明らかにした [3.3.5.3-1,2]。固有モード方程式に対する境界層理論による解析解と、微分方程式を差分化して固有値と固有関数を求める行列計算コードによる数値解により解析を行った。曲率の効果を表すパラメータ ρ は平衡磁場によって決まり、0の極限がスラブ平衡に対応し、この値が有限である平衡に対して、二流体効果を表すパラメータであるイオンスキン長 d_i を変化させて、二つのパラメータに対する依存性を調べた。この研究は、マサチューセッツ工科大学との共同研究により行われた。

図 3.3.5.3-1 は ρ が 1 程度の場合にシステム長 a で規格化されたイオンスキン長 \bar{d}_i に対する成長率と実周波数の依存性を表しており、広範囲のパラメータ領域で数値解と解析解とが良い一致を示している。解析解から \bar{d}_i が小さい場合と大きい場合の極限で、成長率と実周波数の ρ と \bar{d}_i に対する代数的な依存性が得られた。曲率と二流体効果の両方が有限であるときにのみ実周波数が生じ、 ρ が 1 程度の場合には \bar{d}_i が 1 程度以上で成長率と実周波数が同程度となることを解析的数値的に明らかにした。図 3.3.5.3-2、3.3.5.3-3 は、異なる d_i に対する固有関数の数値解を表している。 d_i が小さい場合（図 3.3.5.3-2）には MHD の場合に近い特徴を示し、径方向の速度揺動 ξ の実部が支配的となり、この揺動による抵抗拡散が不安定性を駆動している。 d_i が大きい場合（図 3.3.5.3-3）には二流体的な特徴が強く表れ、磁場揺動 Q が支配的となることで、この揺動による抵抗拡散が不安定性を駆動しており、この揺動の幅が狭まることで不安定性が強まっている。この特徴はスラブ平衡の場合と同じだが、曲率の効果により揺動の虚部が有限となる。

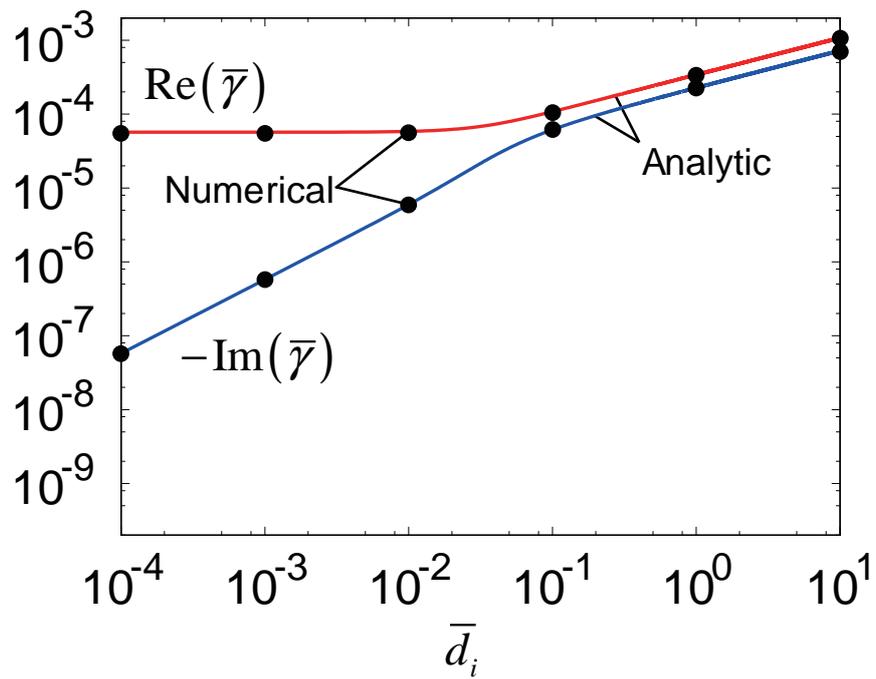


図 3.3.5.3-1 円柱プラズマにおける二流体テアリングモードの成長率と実周波数のイオンスキン長依存性（線は解析解、点は数値解）

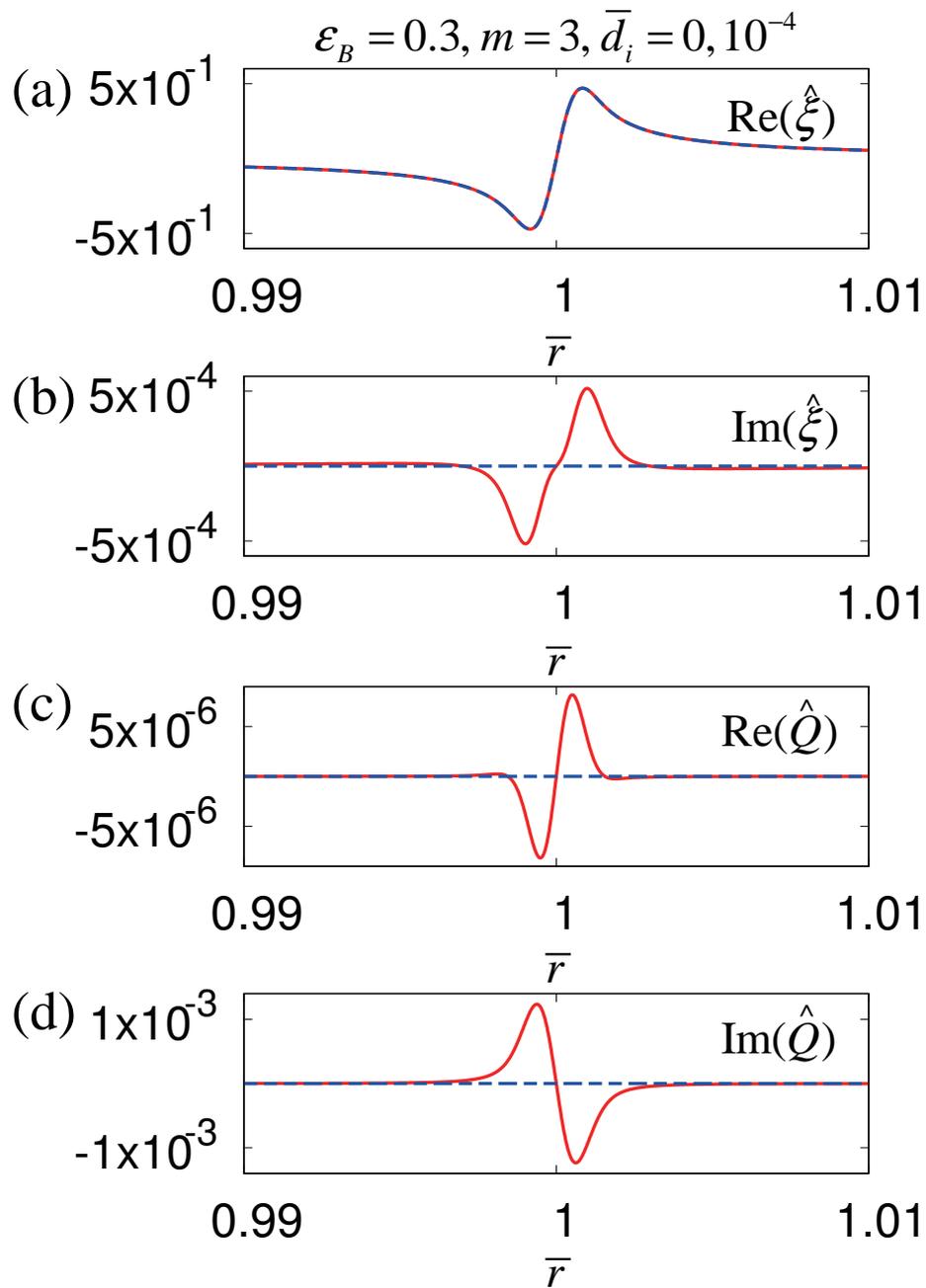


図 3.3.5.3-2 円柱プラズマにおける二流体テアリングモードの固有関数 (点線は $\bar{d}_i = 0$ 、実線は $\bar{d}_i = 10^{-4}$)

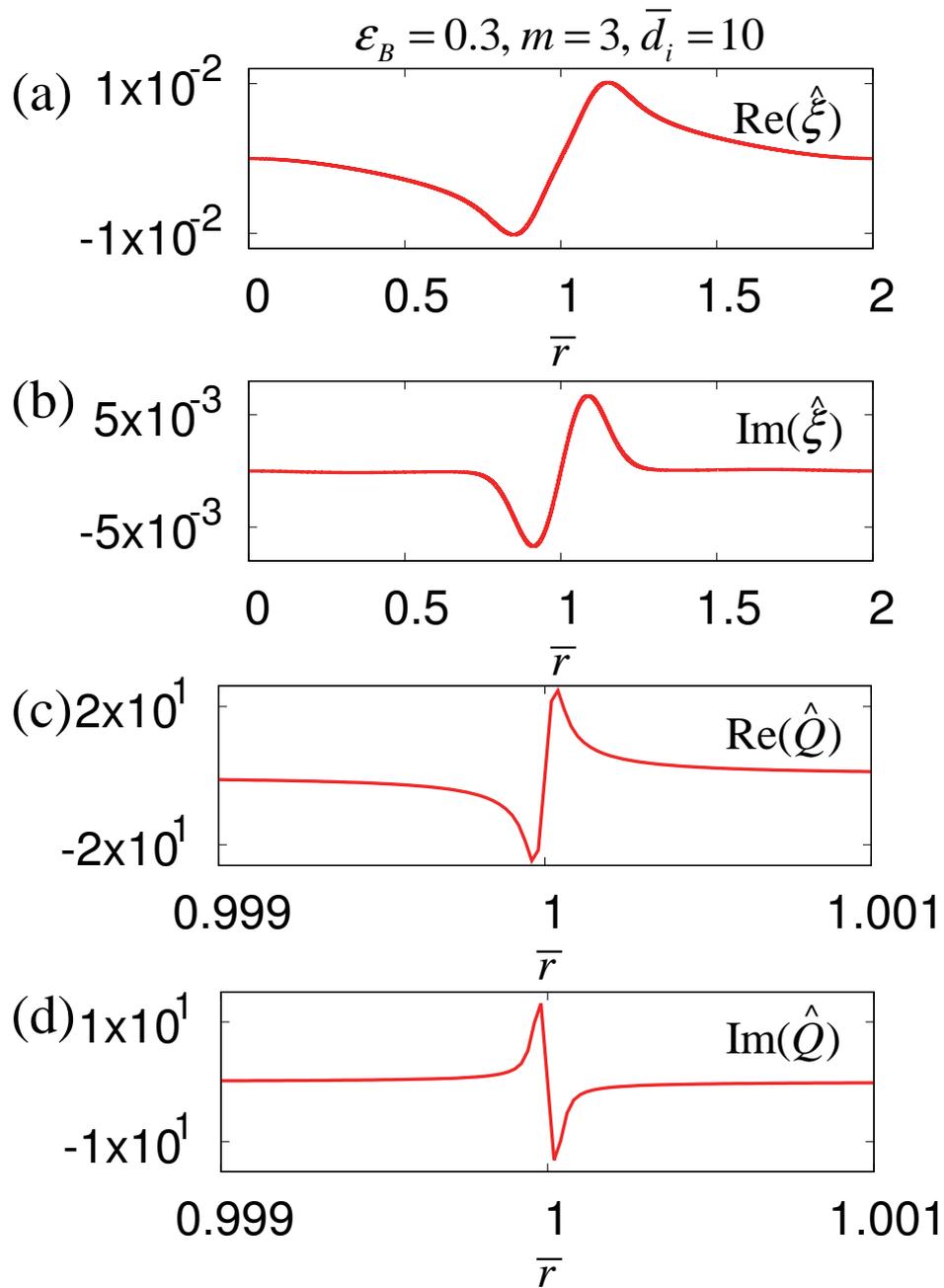


図 3.3.5.3-3 円柱プラズマにおける二流体テアリングモードの固有関数 ($\bar{d}_i = 10$)

[3.3.5.3-1] A. Ito and J. J. Ramos, “Two-fluid tearing mode instability in cylindrical geometry”, *Physics of Plasmas*, Vol.24, No.7 (2017) pp.072102 (1 ~ 12).

[3.3.5.3-2] A. Ito and J. J. Ramos, “Numerical analysis of two-fluid tearing mode instability in a finite aspect ratio cylinder”, *Physics of Plasmas*, Vol.25, No.1 (2018) pp.012117 (1 ~ 10).

3.3.5.4 ヘリカル核融合炉全系解析に向けたジャイロ運動論シミュレーションコードの開発

ジャイロ運動論モデルは様々な磁気ドリフト運動や微視的乱流との相互作用を含む運動論的なプラズマダイナミクスを核融合炉装置サイズで扱うことができ、核融合プラズマにおける輸送現象の解析に広く用いられてきた。これまでに開発されてきたジャイロ運動論コードは炉心プラズマのみを対象としてきたが、周辺プラズマに対するジャイロ運動論モデルの適用は、周辺乱流の生成や X 点近傍の粒子損失といった運動論的現象、あるいは L-H モード遷移など炉心・周辺プラズマが密接に結び付いた現象について、より原理的な理解を可能にすると考えられる。トカマク核融合炉全系（炉心+周辺領域）に対するジャイロ運動論シミュレーションを目的として、プリンストンプラズマ物理研究所（PPPL）を中心に X-point Gyrokinetic Code (XGC) が開発されてきた。XGC は Particle-in-cell (PIC) 法に基づくジャイロ運動論コードで、平衡磁場や装置形状に適合した非構造格子を円柱座標系で用いる点に特徴がある。我々はこの XGC を非軸対象系に一般化し、これまでに例がなかったヘリカル核融合炉全系シミュレーションに向けたコード（XGC-stellarator、XGC-S）開発を PPPL と共同して進めてきた。

XGC-S では 3 次元 VMEC 平衡とのインターフェースを新たに導入し、粒子軌道計算や粒子-格子間の補間などの各計算プロセスと関連したデータ構造をトーラス方向の依存性を含むように 3 次元化した。周辺部の平衡磁場は、virtual casing method を用いて VMEC 平衡を拡張したものをを用いた。3 次元磁場における粒子軌道計算について、大型ヘリカル装置（LHD）の平衡を用いてベンチマークを行った。炉心領域については粒子法を用いた新古典輸送コード Fortec-3D、周辺領域を含んだものについては HINT 平衡を使って行われた高速粒子損失の研究と比較し、いずれの場合もよく一致する結果が得られた。

さらに、揺動電磁場を表すための非構造格子生成スキームをヘリカル系を対象に開発した。炉心領域については、直線磁気座標系を回転変換を考慮しながら離散化するこ

とで、トーラス方向に磁力線を追従するような格子点を定めた（図3.3.5.4-1 (a)）。磁力線を横切る数値拡散を抑えることができるとともに、磁気座標系を用いる他のコードとの比較も容易になる。LHDにおける新古典輸送及びイオン温度勾配不安定性 (ITG) の静電シミュレーションを行い、前者についてはFortec-3D及びGT5D、後者についてはジャイロ運動論コードEUTERPEと、よく一致する結果が得られた（図3.3.5.4-1 (b)）。これらのベンチマークは新古典・乱流輸送グループと共同して実施し、同グループが開発してきたジャイロ運動論コード GKV との比較も進めている。

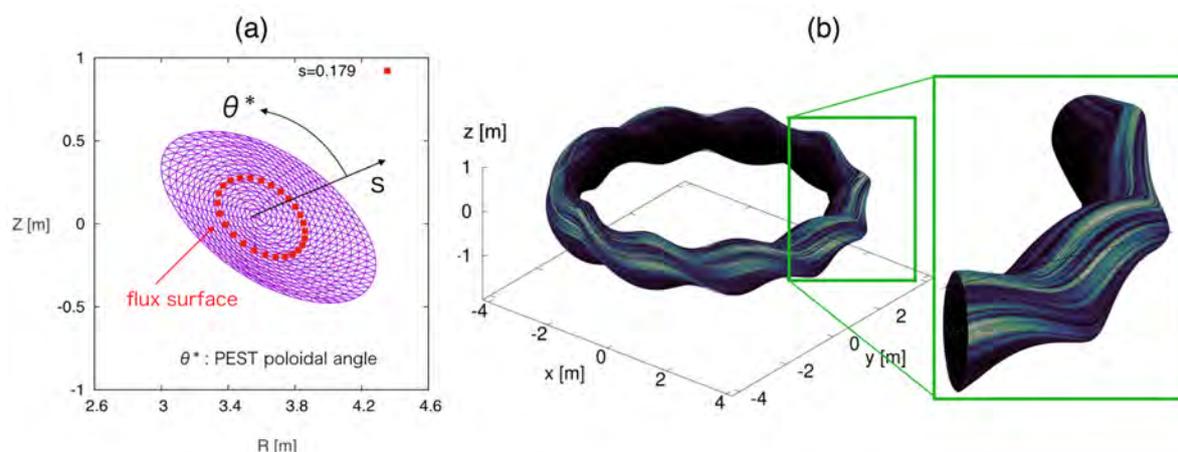


図 3.3.5.4-1 (a) : 直線磁気座標に基づいて生成した LHD 炉心領域の非構造格子の例。 s はフラックスラベル、 θ^* はポロイダル角を表す。(b) : LHD 炉心領域におけるイオン温度勾配不安定性の線形成長に関するシミュレーション例。カラーマップは静電ポテンシャルの大きさを表す。

周辺領域への拡張部分（図3.3.5.4-2 (a)）では、数値的な磁力線トレースによって非構造格子を生成した（図3.3.5.4-2 (b)）。この格子系では各頂点が磁力線に追従するとともに、ダイバータレグやエルゴディック領域で格子が細分化されること、磁力線に沿った物理量の平均操作を容易に行うことができるといった特徴を持つ。炉心領域と統合した格子系に対する初歩的な検証として、周辺部を含むLHD 平衡磁場に対して生成した格子系に対し、有限要素法によるポアソンソルバーが滑らかな解に収束することを確認し（図3.3.5.4-2(c)）、また、ITER の磁場平衡に対して、トカマク核融合炉の解析で用いられている既存の格子系と同様の解が得られることを確認した。

これまでの開発で、炉心領域については非構造格子を用いたグローバルな静電ジャイロ運動論コードとしての基礎部分が完成し、周辺領域に対しても周辺磁場構造や非構造格子系の導入などの準備が進んできている。ヘリカル核融合炉の周辺部に対する

ジャイロ運動論シミュレーションはまだ例がないため、コードの妥当性の検証には実験との比較が重要となる。核融合研の実験研究者と議論を始め、LHD周辺部及びダイバータ板上での粒子束や不純物分布の計測結果から、コードの検証や今後の課題設定につながるものを検討している。

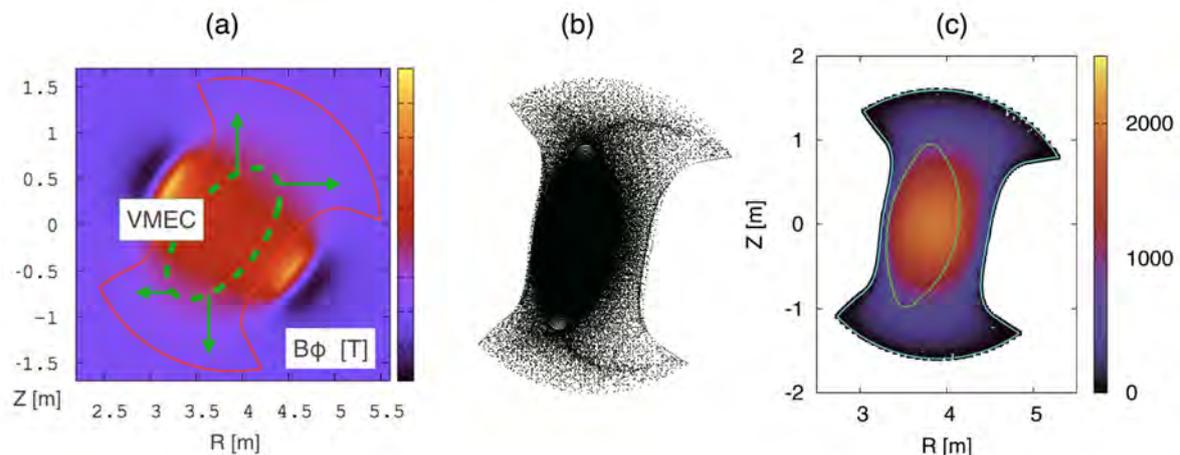


図 3.3.5.4-2 (a) : 周辺領域へ拡張された LHD 平衡の磁場分布。点線内が VMEC 平衡部分。(b) : コア及び周辺領域を統合した非構造三角形格子 (格子点を表示)。(c) : 非構造格子への有限要素法の適用例。接続面 (緑線) によらない滑らかなポテンシャル分布が解として得られている。

PPPLとの共同研究に関連して、日米科学技術協力事業 (JIFT) の下での人材交流を進めてきた。これまでに、核融合研からPPPL及びテキサス大学への派遣 (計 8 ヶ月程度)、並びにPPPLから核融合研への研究者受け入れ (計 3 ヶ月程度) を実施した。開発した計算コードはPPPL側研究者の計算にも用いられ、Wendelstein7-X (W7-X) など世界各国のステラレータの解析に応用されている。コード開発、LHD及びW7-Xへの応用についての成果は、核融合研とPPPLの共著として 3 件の査読付き論文で発表され [3.3.5.4-1-3]、2018 年の IAEA-FEC で 2 件報告された [3.3.5.4-4, 5]。

コード開発は主にプラズマシミュレータ (PS) を用いて行われた。FX100 に対するコード最適化の結果、コードの主要部分 (時間発展サイクル) で理論ピーク比 20% 程度の単体実効性能が得られ、並列性能については、PS 全系規模 (2048 ノード/65536 プロセス) で 99.999% 以上の実効並列化率と 70~90% 程度の並列化効率を確認した。周辺プラズマ解析では非平衡なプラズマを扱う必要があり、線形 ITG シミュレーションのような炉心プラズマ解析よりも多くの計算資源が必要となる。ポスト「京」重点課題

6 (サブ課題 D 「核融合炉の炉心設計」) に参画し、富岳を用いた XGC-S シミュレーションに向けた性能評価と最適化を、理化学研究所のポスト「京」シミュレータ環境で行った。性能評価ツールではカーネル部分 (電子軌道追跡部分) で理論ピーク比 20% 程度の単体性能が得られている。PPPL では ITER の全系解析をアメリカの大型 GPU 計算機 TITAN や Summit を使って行っている。これに関連して、国内の GPU 計算機 (TSUBAME3.0) を共有プラットフォームとして、ヘテロジニアスなファイルシステムの活用や GPU 最適化に関する国際共同研究を「学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点」(JHPCN) の枠組みで進めている (jh190004-MDJ 「Whole-volume gyrokinetic simulation of magnetic fusion plasmas with in-situ data processing」)。

[3.3.5.4-1] T. Moritaka, R. Hager, M. Cole *et al*, Plasma, Vol. 2, (2019) pp. 179 ~ 200.

[3.3.5.4-2] M. Cole, R. Hager, T. Moritaka *et al*, Physics of Plasmas, Vol. 26, (2019) pp. 032506.

[3.3.5.4-3] M. Cole, R. Hager, T. Moritaka *et al*, Physics of Plasmas, Vol. 26, (2019) pp. 082501.

[3.3.5.4-4] T. Moritaka, R. Hager, M. Cole *et al*, the 27th IAEA Fusion Energy Conference, TH/P5-5, Gandhinagar, India, 22 October 2018.

[3.3.5.4-5] M. Cole, T. Moritaka, R. Hager *et al*, the 27th IAEA Fusion Energy Conference, TH/P6-21, Gandhinagar, India, 22 October 2018.

3.3.5.5 磁場閉じ込め装置の境界層領域におけるプラズマフィラメントのダイナミクス

近年、磁場閉じ込めプラズマ装置の実験において、その装置形状によらず、境界層領域で間歇的に発生するフィラメント状のプラズマコヒーレント構造が観測されている。この構造は、プラズマブロブ、ホールとも呼ばれ、従来の拡散的描像では説明できない径方向のプラズマ輸送を担っていると考えられている。このフィラメント現象に関するこれまでの理論的・数値的研究では、その多くで、流体的な描像に基づく 2 次元簡約化モデルを用いた議論がなされてきたが、そのような巨視的モデルでは、磁力線方向の電流を評価する際、固体壁とプラズマとの間の電位構造やイオンと電子の速

度差の効果などを簡易的なモデルで仮定するなどしており、また、同構造の断面サイズがイオン音速での旋回半径の数倍～数十倍程度とメゾスケールであることから、微視的（すなわち、運動論的、粒子的）効果がフィラメントダイナミクスに与える影響を明らかにする必要がある。そこで、今後のより精緻な多階層連結型シミュレーションの開発、そして、周辺プラズマ輸送の予測に資することを目指し、3次元静電粒子コード（p3bdコード、up3bdコード）によるプラズマフィラメントダイナミクスの研究を進めており、平成27年から令和元年までの間に、主に、次の3点について明らかにした。

まず、プラズマフィラメントダイナミクスにおける粒子運動の効果について、イオン温度が高い（イオンの旋回半径が大きい）場合には伝播のポロイダル対称性が崩れることが見出され [3.3.5.5-1]、さらに、その効果が3次的に現れることを明らかにした [3.3.5.5-2]（図 3.3.5.5-1 参照）。フィラメント断面ではダイポール型の電位構造が形成されるが、イオン温度が高くなると、低電位側の電位勾配が急峻になり、一方、高電位側は勾配が緩やかになることにより、電位形状の対称性が崩れ、 $E \times B$ ドリフトによる伝播の対称性が崩れる。さらに、高イオン温度の場合には、高電位側におけるプレシースの電位差が大きくなることにより、図 3.3.5.5-1（f）に示したような電場の顕著な3次元構造が形成され、粒子運動による3次的な効果が現れる。

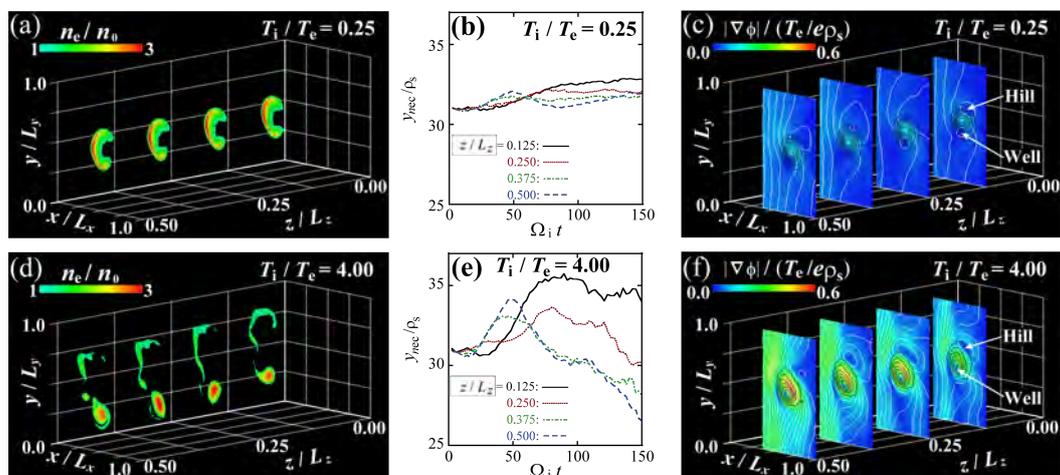


図 3.3.5.5-1 異なる4つの断面における電子の密度分布 [(a)、(d)]、各断面における電子重心位置の y （ポロイダル）方向の時間変化 [(b)、(e)]、各断面における磁場と垂直方向の電場の強度分布 [(c)、(f)]。上段 [(a) - (c)] が低イオン温度の時、下段 [(d) - (f)] が高イオン温度の時を、それぞれ示している。各図から、高イオン温度の場合には、強い z （磁力線）方向依存性があることが分かる。

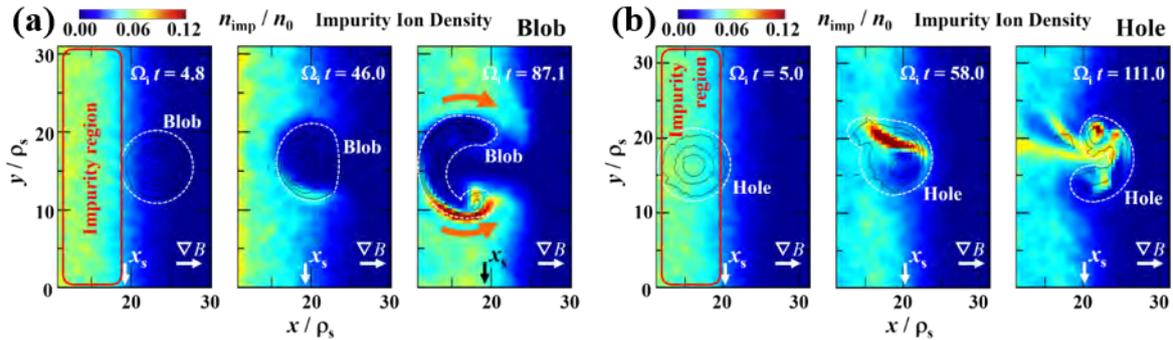


図 3.3.5.5-2 不純物イオン密度分布の時間変化。(a)、(b)は、それぞれ、ブロブが不純物イオン領域に入っていく場合、初期にホールが不純物イオン領域にあった場合を示している。

次に、本研究では、図 3.3.5.5-2 に示したように、プラズマフィラメントが不純物イオンを輸送する現象を世界で初めて数値的に示した [3.3.5.5-3]。図 3.3.5.5-2 (a)からは、ブロブが不純物イオン領域に入っていくにつれ、不純物イオンが掃き出されてブロブの伝播方向とは逆の方向に輸送される様子が、そして、図 3.3.5.5-2 (b)からは、初期に不純物イオン領域にいたホール（周囲のプラズマよりも密度の低いフィラメント構造）が、不純物イオンと一緒に輸送する様子が分かる。この成果については、プレスリリース（平成 28 年 12 月）されるとともに、ITER Newline 2017 年 1 月 9 日号に掲載された [3.3.5.5-4]。

また、このフィラメントによる不純物イオン輸送の様々な物理パラメータに対する依存性を調べたところ、1) 同輸送がフィラメント断面サイズに対して正の相関を持つこと、2) 同輸送が背景イオン温度に対して弱い負の相関を持つこと、3) 不純物イオン質量がある閾値を超えると急激に輸送が少なくなることが分かった [3.3.5.5-5]。

本研究では、フィラメントダイナミクスにおける同位体効果についても調べている。その結果、イオン質量増加によるシース効果（フィラメント伝播速度の増加）と分極ドリフト効果（同速度の減少）は打ち消し合うが、粒子旋回運動効果が加わることにより、全体としてはフィラメント伝播速度が減少することを明らかにした [3.3.5.5-6]。

[3.3.5.5-1] Hiroki Hasegawa and Seiji Ishiguro, “Microscopic Effect on Filamentary Coherent Structure Dynamics in Boundary Layer Plasmas”, Plasma, Vol. 1 (2018) pp. 61 ~ 67.

- [3.3.5.5-2] Hiroki Hasegawa and Seiji Ishiguro, “Three-dimensional effect of particle motion on plasma filament dynamics”, *Physics of Plasmas*, Vol. 26, No. 6 (2019) pp. 062104 (1 ~ 5).
- [3.3.5.5-3] Hiroki Hasegawa and Seiji Ishiguro, “Impurity Transport Caused by Blob and Hole Propagations”, *Nuclear Fusion*, Vol. 57, No. 11 (2017) pp. 116008 (1 ~ 8).
- [3.3.5.5-4] “Supercomputer in Japan used for plasma edge simulation”, *ITER Newslines*, 9 January 2019, <https://www.iter.org/whatsnew/134> or <https://www.iter.org/of-interest/680>
- [3.3.5.5-5] Hiroki Hasegawa and Seiji Ishiguro, “Impurity ion transport by filamentary plasma structures”, *Nuclear Materials and Energy*, Vol. 19, No. 11 (2019) pp. 473 ~ 478.
- [3.3.5.5-6] Hiroki Hasegawa and Seiji Ishiguro, “Ion Inertial Effects on Three-dimensional Filament Dynamics”, *Preprints of 27th IAEA Fusion Energy Conference (2018)* TH/P7-12.

3.3.5.6 磁気リコネクションにおけるイオン加熱機構の解明

磁気リコネクションは、様々なプラズマで見られるエネルギー解放過程の一つであり、太陽フレアや磁気圏サブストーム、また、トカマクにおけるディスラプションなどの爆発的過程において、重要な役割を果たしていると考えられている。さらに、磁気リコネクションが起こると、磁気エネルギーが解放されて、プラズマが過熱されることが知られている。磁気リコネクションの室内実験からは、主に、電子はリコネクション点近傍で、イオンは下流で加熱されることが報告されているが、加熱の機構については、よく分かっていなかった。

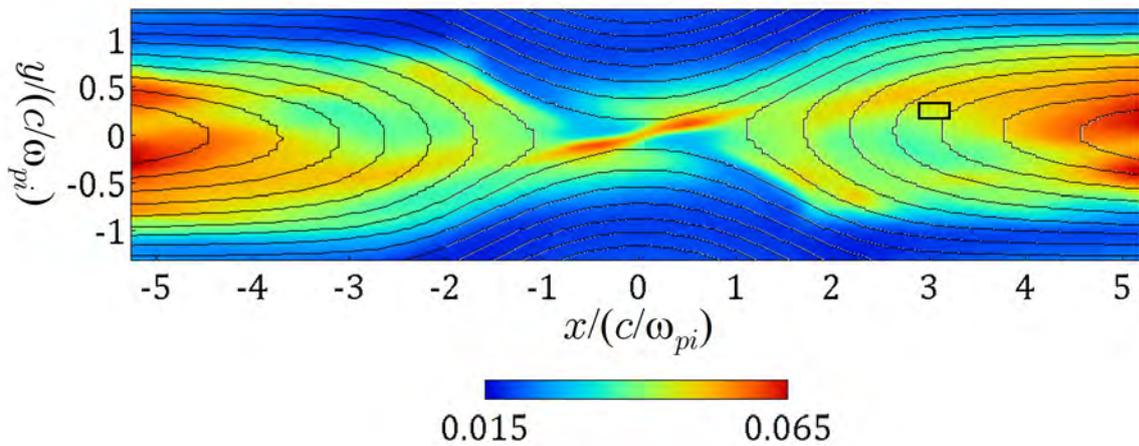


図 3.3.5.6-1 PASMO コードによる磁気リコネクションのシミュレーション結果。カラーコンターは磁場に垂直なイオン温度、線は磁力線を表している。

本研究では、粒子シミュレーションコードPASMOにより、ガイド磁場がある磁気リコネクションのシミュレーションを行って、イオンの加熱機構を調べた。図 3.3.5.6-1 は、磁気リコネクションが駆動されている時の磁力線と磁場に垂直なイオン温度（カラーコンター）を表している。磁場が繋ぎ変わる点、リコネクション点は、シミュレーション領域のほぼ中央に位置している。イオンの温度は、主に下流で上昇していることが分かる。小さな領域（実線で囲まれた部分）における、イオン速度分布を図 3.3.5.6-2 (a)に示す。円環状の特徴的な構造が形成されており、このことから、イオンはセパトトリクスを通過する際に非断熱的な振る舞いをし、その結果、下流で実効的に加熱されていることが分かった。 [3.3.5.6-1-3]。

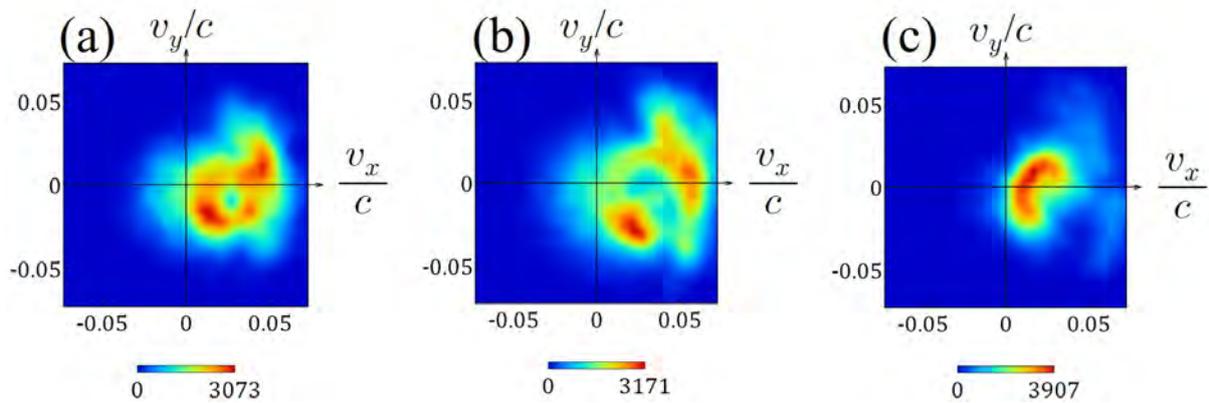


図 3.3.5.6-2 リコネクション下流において形成されているイオンの速度分布関数。(a) 円環状の構造が見え、イオンは実効的に加熱されていることが分かる。(b) リコネクション磁場を強くした場合、半径が大きい円環状構造が形成された。(c) ガイド磁場を強くすると、円の一部が欠けている、円弧状の構造が形成された。

また、リコネクション磁場(実験では、ポロイダル磁場に相当)が強い場合、図 3.3.5.6-2 (b) のような半径が大きい円環の速度分布が見られ、一方でガイド磁場(実験では、トロイダル磁場に相当)が強いと、図 3.3.5.6-2 (c) のように、円の一部が欠けた円弧状の速度分布が見られることが分かった [3.3.5.6-4]。

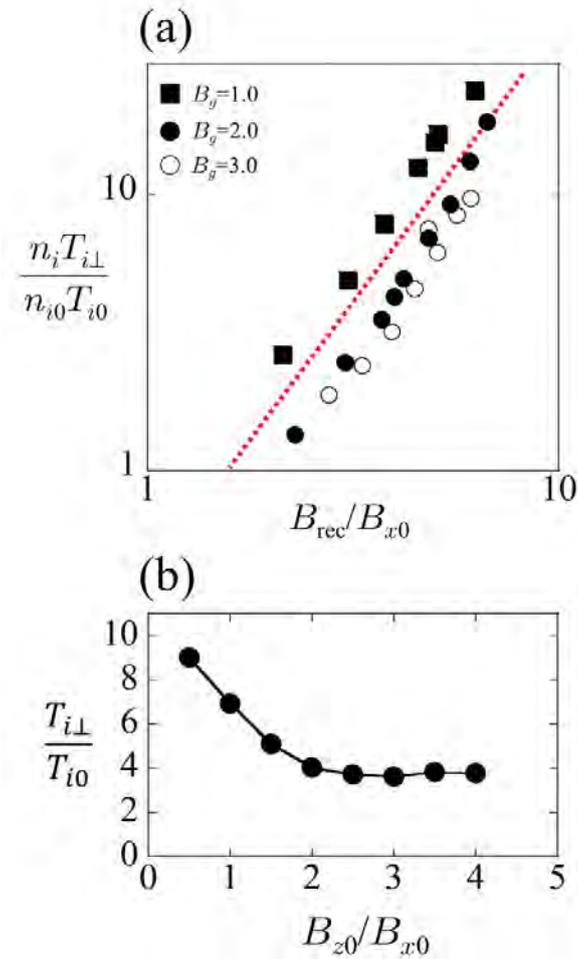


図 3.3.5.6-3 イオン加熱に対する、(a)リコネクション磁場、(b)ガイド磁場、それぞれの依存性。イオン加熱のエネルギーはリコネクション磁場の2乗に比例し、ガイド磁場が強くなるとイオン温度は下がる傾向がある。

そこで、リコネクション磁場、ガイド磁場を変えた様々な条件でシミュレーションを行い、イオン加熱の磁場依存性を調べた。図 3.3.5.6-3 (a) は、イオン加熱エネルギー（密度 × 温度）のリコネクション磁場依存性を示したグラフである。イオン加熱エネルギーは、リコネクション磁場の2乗に比例することが分かる。これはリングの半径が大きくなっていくことに対応する。図 3.3.5.6-3 (b) は、ガイド磁場強度とイオン温度の関係性を表す。ガイド磁場が大きくなるにつれてイオン温度は下がる傾向があることが分かった。これは円の欠け具合が大きくなる、すなわち、円弧の中心角が小さくなることに対応する [3.3.5.6-4]。

このシミュレーション結果を、球状トカマク実験の結果と比較した。球状トカマク装置におけるプラズマ合体実験では、磁気リコネクションを通じてプラズマが加熱されている。我々のシミュレーションで見出されたイオン加熱のリコネクション磁場（ポロイダル磁場）、ガイド磁場（トロイダル磁場）依存性は、実験結果の傾向とよく一致している。

この成果は、7th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space and Astrophysical Plasmas (EASW-7)、2018 US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection (MR2018)、2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2018)、13th symposium of the Hinode mission と the 15th symposium of IPELS (Interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and in Space) の合同会議 (Hinode-13/IPELS2019) において招待講演に選ばれた。また、27th IAEA Fusion Energy Conference (IAEA-FEC2018) の発表に採択された。

- [3.3.5.6-1] S. Usami, R. Horiuchi, and H. Ohtani, “Effective heating of nonadiabatic protons in magnetic reconnection with a guide field”, *Physics of Plasmas*, Vol. 24 (2017) pp. 092101 (1 ~ 8).
- [3.3.5.6-2] S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, Y. Ono, and H. Tanabe, “Effective Proton Heating through Collisionless Driven Reconnection in the Presence of Guide Field”, *Plasma and Fusion Research*, Vol. 13 (2018) pp. 3401025 (1 ~ 5).
- [3.3.5.6-3] S. Usami, R. Horiuchi, and H. Ohtani, “Horn-Shaped Structure Attached to the Ring-Shaped Ion Velocity Distribution during Magnetic Reconnection with a Guide Field”, *Plasma and Fusion Research*, Vol. 14 (2019) pp. 3401137 (1 ~ 6).
- [3.3.5.6-4] S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, Y. Ono, M. Inomoto, and H. Tanabe, “Dependence of the Pickup-Like Ion Effective Heating on the Poloidal and Toroidal Magnetic Fields during Magnetic Reconnection”, *Physics of Plasmas*, Vol. 26 (2019), pp.102103 (1 ~ 11).

3.3.5.7 非線形磁気音波中の平行電場の理論解析

宇宙プラズマでは至る所で高エネルギー粒子が作られており、それらは無衝突衝撃波によって加速されたと考えられている。そのため、無衝突衝撃波による粒子加速に

ついて、多くの理論・シミュレーション研究が行われているが、その全容の解明には未だ至っていない。

これまでの研究によって、無衝突衝撃波の波面（遷移領域）には強い電磁場が形成されること、粒子はその電磁場を介してエネルギーを獲得するが、その具体的な機構は、粒子の種類、波の伝播方向、磁場の強さによって異なる様々なものがあることが分かってきた。その中には磁場に平行方向の電場（以降、平行電場と記す）が重要な役割を果たすものがある。例えば、磁場に対して斜め方向に伝播する磁気音波の衝撃波では、波面付近に形成される平行電場によって捕捉された電子が、超相対論的エネルギーに加速される場合がある。また、イオンと電子に加えて、少量の陽電子を含むプラズマでは、平行電場によって陽電子が強く加速される。いずれも、衝撃波面に強い平行電場が形成されることが電磁粒子シミュレーションによって示されており、平行電場に関する理論解析も行われているが、宇宙のプラズマを考える上で重要な要素である、多種イオンの効果については十分な議論がなされていない。

そこで本研究では、3成分プラズマ中の非線形磁気音波の平行電場について、理論解析を行った [3.3.5.7-1]。まず、宇宙プラズマを構成するイオンは主に水素とヘリウムであることを考慮して、2種のイオンと電子からなるプラズマ中の非線形磁気音波を考察した。2種イオンプラズマ中の磁気音波は、周波数が $\omega < \Omega_i$ の低周波モードと $\Omega_i < \omega < \sqrt{\Omega_i \Omega_e}$ の高周波モードの2つに分裂する。ここで、 Ω_i はイオンサイクロロン周波数、 Ω_e は電子サイクロロン周波数である。高周波と低周波の2つのモードの非線形パルスは、幅が大きく異なる等の性質を持つ [3.3.5.7-2-4]。これらの非線形パルスの平行電場 E_{\parallel} とその磁力線に沿った積分値 $F = -\int E_{\parallel} ds$ を解析し、 F の最大値が、次のように表されることを明らかにした。

$$\text{低周波モード } eF_M \sim \varepsilon^2 m_e v_A^2$$

$$\text{高周波モード } eF_M \sim \varepsilon^2 m_i v_A^2$$

ここで、 ε は波の振幅、 m_i 、 m_e はそれぞれイオンと電子の質量である。上の式は、低周波モードの平行電場に比べて、高周波モードの平行電場は (m_i/m_e) 倍の大きさであることを示している。これまでの研究で、高周波モードは、横電場によって重イオンを加速することが分かっていたが [3.3.5.7-5]、本結果は平行電場の効果も重要であることを示唆している。

次に、電子とイオンと陽電子からなる3成分プラズマ中の非線形磁気音波を解析した。陽電子を含むプラズマはパルサー磁気圏などに存在すると考えられている。これまで、 $\omega < \Omega_i$ の振動数領域についての E_{\parallel} の理論式は得られていたが、より高周波の $\Omega_i < \omega < \sqrt{\Omega_i \Omega_e}$ の領域の E_{\parallel} は調べられていなかった。そこで、高周波領域について

解析を行い、 F の最大値を以下のように求めた。

$$eF_M \sim \varepsilon^2 \frac{n_{i0}/n_{e0}}{(1 + n_{p0}/n_{e0})^2} m_i v_A^2$$

ここで、 n_{i0} , n_{e0} , n_{p0} は、それぞれイオン、電子、陽電子の密度である。上式の F_M は、 $\omega < \Omega_i$ の領域の F_M に比べて、大きな値となっている。

このように、3成分プラズマ中の非線形磁気音波の E_{\parallel} について理論解析を行い、低周波領域 $\omega < \Omega_i$ の E_{\parallel} に比べて、高周波領域 $\Omega_i < \omega < \sqrt{\Omega_i \Omega_e}$ の E_{\parallel} は、はるかに大きくなることを明らかにした。

[3.3.5.7-1] M. Toida, “A theoretical study for parallel electric field in nonlinear magnetosonic waves in three-component plasmas”, Phys. Plasmas, Vol. 23, No. 7 (2016) pp.072115 (1~13).

[3.3.5.7-2] M. Toida and Y. Ohsawa, “KdV Equations for High- and Low- Frequency Magnetosonic Waves in a Multi-Ion Plasma”, J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 63, No. 2 (1994) pp.573~582.

[3.3.5.7-3] M. Toida and Y. Kondo, “Parametric studies of nonlinear oblique magnetosonic waves in two-ion-species plasmas,” Phys. Plasmas, Vol. 18, No. 6 (2011) pp.062303 (1~13).

[3.3.5.7-4] M. Toida and Y. Aota, “Finite beta effects on low- and high-frequency magnetosonic waves in a two-ion-species plasma”, Phys. Plasmas, Vol. 20, No. 8 (2013) pp. 082301 (1~17).,

[3.3.5.7-5] M. Toida, H. Higashino and Y. Ohsawa, “Effect of ion composition on ion acceleration by magnetosonic shock waves”, Phys. Plasmas, Vol. 15, No. 9 (2008) pp.092305 (1~10).

3.3.5.8 レーザープラズマ

コーン付きターゲットを用いた高速点火レーザー核融合では、加熱用レーザーで生成された高速電子により燃料コアを加熱するが、高速電子の持つ大きな発散角と高すぎるエネルギーが、効率の良い加熱を妨げている。それらに対して、外部印加磁場によるガ

イデイングや加熱用レーザーのコントラスト比の改善により対処しているが[3.3.5.8-1]、CHフォームをイオン源として光圧により加速された高エネルギーのイオンビームを燃料コアの補助加熱源として用いる手法も考えられている。この手法について、2次元相対論的粒子コード (fiscof2 コード) と2次元コア加熱コード (fibmet2 コード) を用いた統合シミュレーション [3.3.5.8-2,3] により詳細な解析を行っている。

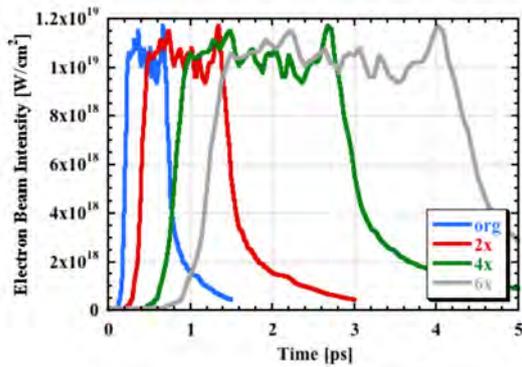
一方、今後の高速点火レーザー核融合実験では、加熱の全エネルギーを増やすことが考えられており、その方法としては、(1) レーザー強度の増加、(2) 照射スポット径の拡大、(3) パルス長の伸長がある。(1) については高速電子の高温化による加熱効率の低下が懸念され、(2) については高速電子を燃料コアまでガイディングするだけでなく、更に集束させるための新たな手法が必要である。このため、まずは(3) が現実的な方法と考えられる。

そこで、fiscof2コードで観測された高速電子及び高エネルギーイオンをfibmet2コードに取り込んで、統合シミュレーションにより、燃料コアの加熱特性におけるパルス長伸長の効果を評価した。

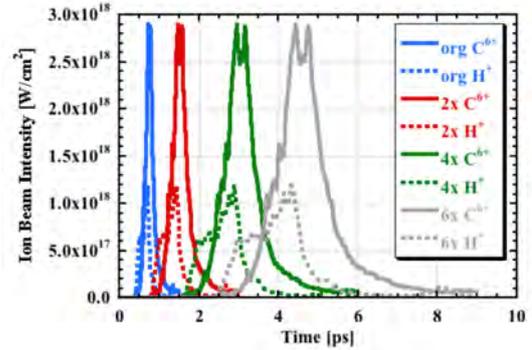
なお、レーザー媒質のダメージ閾値の特性により、パルス長に比例してエネルギーを増やすことはできず、パルス長の平方根かそれ以下である [3.3.5.8-4]。このため、パルス長を10倍伸張しても、せいぜい3倍程度のエネルギー増強しか得られない。

● 統合シミュレーション

10ps程度の長時間加熱用レーザーを用いた粒子シミュレーションは、境界条件や生成された高速電子の扱いについて未解決な課題も多く、計算機資源的にも現実的ではない。そこで、高速点火レーザー核融合実験で用いる加熱用レーザーの典型的なパラメータを考慮して、まずは、fiscof2コードのシミュレーションで得られた典型的な粒子ビームのデータを半径方向に2倍引き延ばし、時間軸方向にも1, 2, 4, 6倍と引き延ばして、粒子ビームの全エネルギーを増やすことで模擬した。図3.3.5.8-1 (a) に高速電子の、図3.3.5.8-1 (b) に高エネルギーイオンのビーム強度の時間発展をそれぞれ示す。なお、変換後の粒子データは、加熱用レーザーとして、半値全幅 $60\mu\text{m}$ は同一で、それぞれパルス長が0.5, 1, 2, 3 ps及び全レーザーエネルギーが160, 320, 640, 960Jに対応すると考えられる。



(a) 高速電子ビーム



(b) 高エネルギーイオンビーム

図 3.3.5.8-1 粒子ビーム強度の時間発展。青色は元データを半径方向に 2 倍引き延ばしたデータ。赤、緑、灰色は、それぞれ更にそのデータを時間軸方向に 2、4、6 倍引き延ばしたデータ。イオンの実線は C^{6+} 、破線は H^+ 。

統合シミュレーションでは、最近の高速点火レーザー核融合実験で用いられているターゲットを考慮してコーン付きチップなしの中実 CD ターゲットを想定し、背景密度は固体の $1g/cm^3$ 、爆縮により圧縮された燃料コアは、半径 $25\mu m$ 、最大圧縮密度 $10g/cm^3$ とした。fibmet2コードで用いた金コーンと爆縮コアのプロファイル及び粒子ビームの入射地点を図 3.3.5.8-2 に示す。

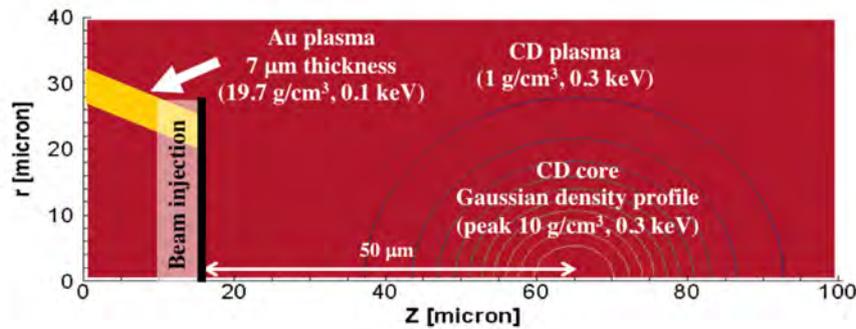


図 3.3.5.8-2 2次元コア加熱 fibmet2 コードで用いた金コーンと爆縮コアのプロファイル及び粒子ビームの入射地点。

fibmet2 コードでシミュレーションした結果から得られた密度で平均した電子（実線）及びイオン（破線）コア温度の時間発展を図 3.3.5.8-3 に示す。粒子ビームの全エネルギーは、それぞれ 2、4、6 倍と増加しているが、図 3.3.5.8-3 における電子温度の上昇

率は、その割合より高くなっていることが分かり、長パルス実験にとっては肯定的である。逆に、4、6 倍のシミュレーションでは、燃料コアの密度が比較的 low 緩和速度が遅いため、イオンの温度上昇は電子の温度上昇に追いついておらず、イオン温度が最大電子温度に達する前に加熱が終わってしまい、パルスを長くしてもイオン温度に強く依存する中性子発生数は増えないことが懸念される。

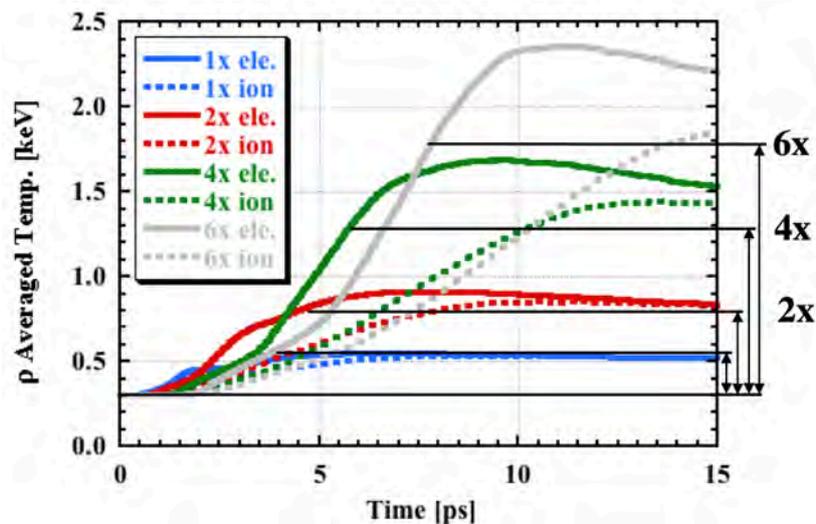


図 3.3.5.8-3 密度で平均したコア温度の時間発展点。

図 3.3.5.8-4 に 10 ps における電子温度分布を示す。6 倍ケースについて、密度で平均したコア電子温度は、10 ps で 2.3 keV であるが、電子温度分布を見ると最大で 6 keV 程度に達していることが分かる。しかし、温度が高い領域は、図 3.3.5.8-4 より、圧縮された燃料コアの領域ではなく、粒子ビームが入射される領域近傍であり、燃料の主要部が加熱されているわけではない。これは、温度という単一の指標で、加熱特性や加熱効率を評価できないことを意味しており、注意を要する。

- エネルギー変換効率

粒子ビームの全エネルギーとデポジットされたエネルギーを時間軸方向に引き延ばさない場合と比較して表 3.3.5.8-1 に示す。

Exp. Factor	Beam Energy			Total Deposit Energy			Deposit Energy in Core		
	ele.	C^{6+}	H^+	ele.	C^{6+}	H^+	ele.	C^{6+}	H^+
2x	2.00	2.00	2.00	1.95	1.86	1.59	2.59	2.50	1.56
4x	4.01	4.01	4.01	3.77	2.96	2.23	6.23	5.21	2.40
6x	6.01	6.02	6.02	5.49	4.75	3.27	9.40	7.34	2.84

表 3.3.5.8-1 エネルギー変換効率

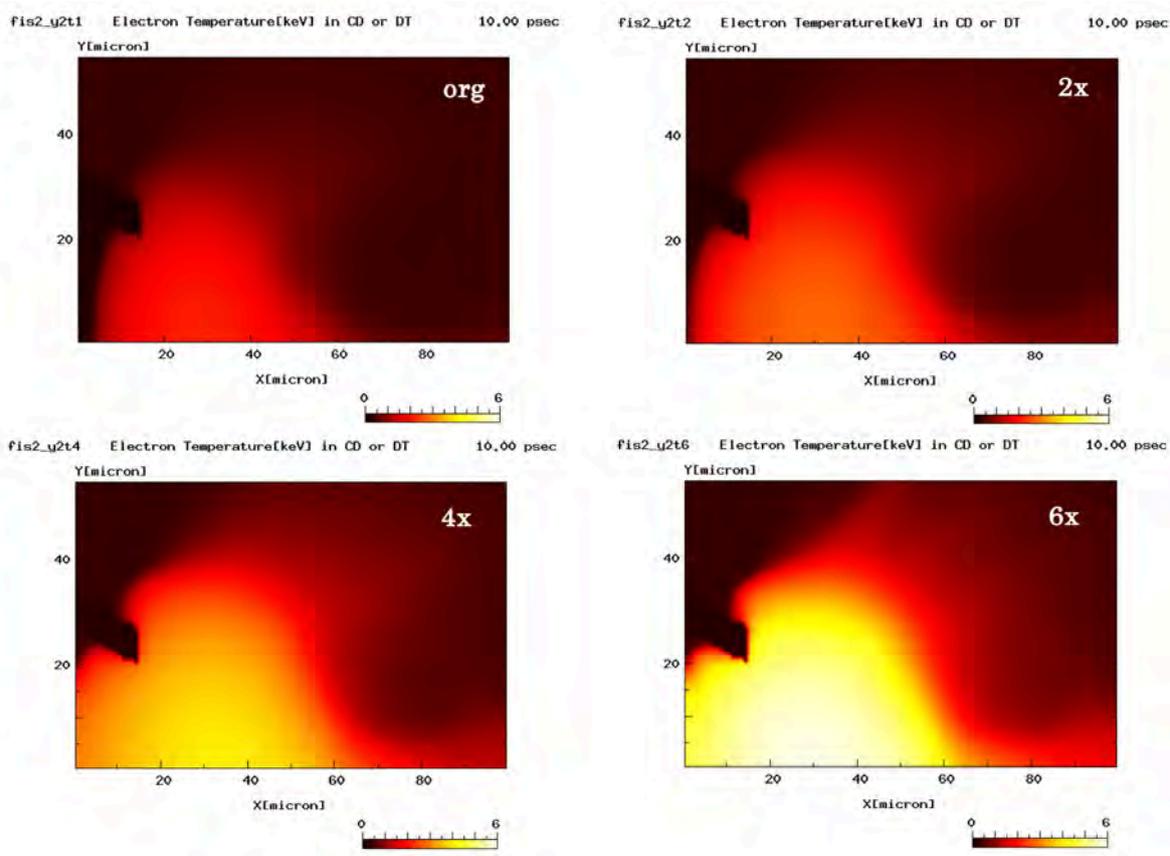


図 3.3.5.8-4 $t=10\text{ps}$ における 4 つのケースの電子温度分布。単位は keV 。

粒子の全ビームエネルギーは、時間軸方向の引き延ばし率 2、4、6 倍にそれぞれ比例していることが分かり、時間軸方向の伸長変換が正しいことを確認できる。しかし、粒子ビームがデポジットするエネルギーの割合は、粒子ビームエネルギーが増加する割合より悪くなっており、パルス長の伸長効果について否定的な結果である。これは、コア温度の上昇に伴って粒子間の衝突周波数が低下し、エネルギーのデポジットが小さ

くなるためだと考えられる。また、電子よりイオンの方が、デポジットエネルギーの割合が低下している。一方、密度が $5g/cm^3$ 以上のコア部でデポジットされるエネルギーだけで評価すると、その割合が良くなっており、密度で平均したコア温度の傾向の理由でもある。これは、高密度になるほど同じエネルギーがデポジットされても温度上昇は小さいので、衝突周波数の低下も小さいためだと考えられる。また、この割合は、電子の方が高いため、相対的にイオン補助加熱の効果は小さくなることが分かった。

[3.3.5.8-1] S. Sakata, K. Matsuo, S. Kojima, S. Lee, H. Morita, T. Johzaki, H. Sawada, K. F. F. Law, A. Yao, M. Hata, A. Sunahara, Y. Abe, H. Kishimoto, A. Syuhada, T. Shiroto, Y. Iwasa, A. Morace, A. Yogo, N. Iwata, M. Nakai, H. Sakagami, T. Ozaki, K. Yamanoi, T. Norimatsu, Y. Nakata, S. Tokita, N. Miyanaga, J. Kawanaka, H. Shiraga, K. Mima, H. Nishimura, M. Bailly-Grandvaux, J. J. Santos, H. Nagatomo, H. Azechi, R. Kodama, Y. Arikawa, Y. Sentoku, and S. Fujioka, “Magnetized fast isochoric laser heating for efficient creation of ultra-high-energy-density states”, *Nature Communications*, Vol. 9 (2018) pp. 3937 (1 ~ 25).

[3.3.5.8-2] H. Sakagami, T. Johzaki, A. Sunahara, and H. Nagatomo, “Integrated simulations for ion beam assisted fast ignition”, *Journal of Physics.: Conference Series*, Vol. 688 (2016) pp. 012096(1 ~ 4).

[3.3.5.8-3] H. Sakagami, T. Johzaki, A. Sunahara, and H. Nagatomo, “Simulation analysis for ion assisted fast ignition using structured targets”, *Journal of Physics.: Conference Series*, Vol. 717 (2016) pp. 012046(1 ~ 4).

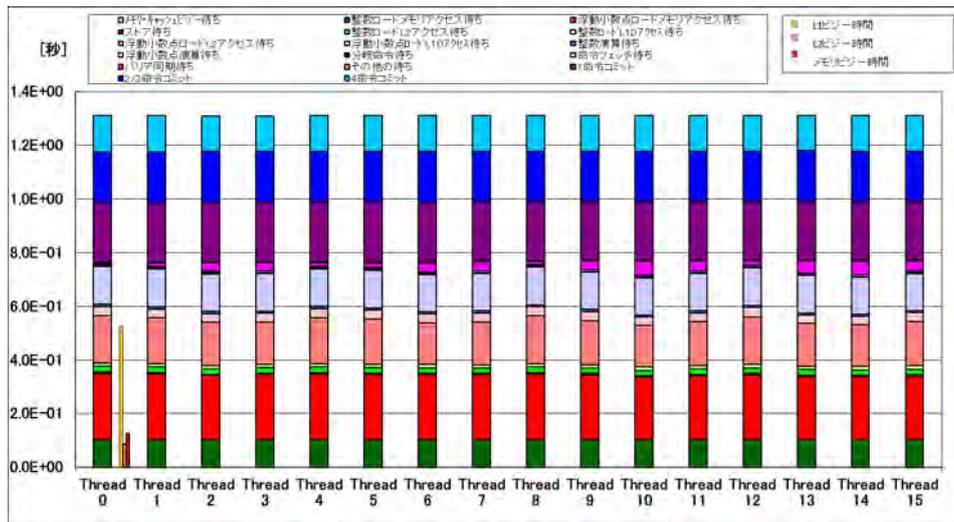
[3.3.5.8-4] B. C. Stuart, M. D. Feit, A. M. Rubenchik, B. W. Shore, and M. D. Perry, “Laser-Induced Damage in Dielectrics with Nanosecond to Subpicosecond Pulses”, *Physical Review Letters*, Vol. 74 (1995) pp. 2248(1 ~ 4).

3.3.5.9 PASMO の最適化

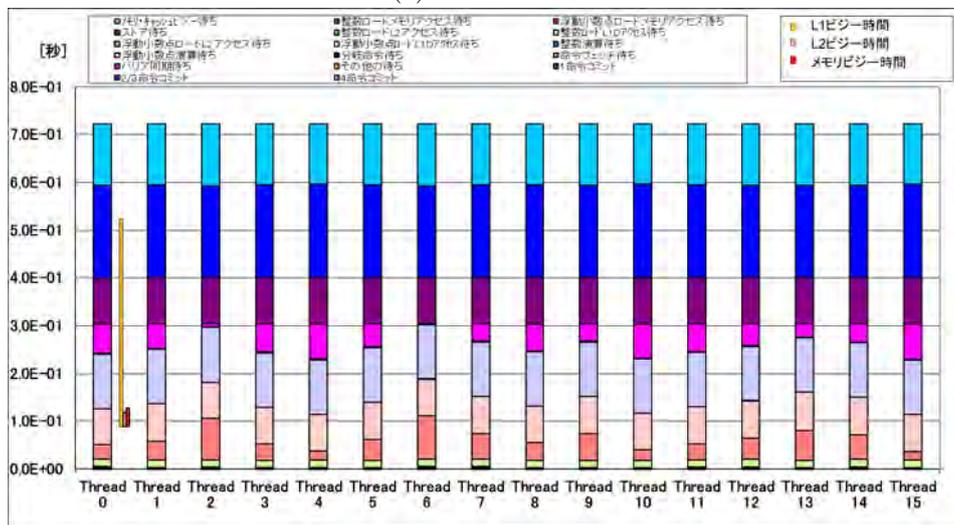
PIC 法によるプラズマ粒子シミュレーションコードでは、ラグランジアンで表現される粒子系とオイリアンで表現される電磁場とを連成させるため、粒子に働く電磁場の計算及び粒子の位置と速度からの電流密度の計算でメモリへのアクセスがランダムになったり、粒子分布の不均一性に伴い計算負荷の不均一が発生したりなど、計算

効率を悪化させる要因が多々ある。そこで本研究では、粒子位置・速度の更新／電流密度計算のルーチンについての最適化や、ロードバランスをよくするためのアルゴリズムの導入を進めた。

電磁粒子コード PASMO における粒子位置・速度の更新／電流密度計算のルーチンについての最適化では、粒子配列の構造を $A(M,N,L)$ から $A(M,N*L)$ へとスレッド並列用に設けていた次元 L を廃止し、バケットソーティングとともに粒子配列内でのソーティングを行うようにプログラムの改良を進めた。ここで、 M は粒子の物理量（座標や速度、電荷、質量など）を示す次元、 N はスレッド並列の次元を設けた場合の粒子番号を示す次元を表す（スレッド並列の次元を廃した場合は $N*L$ が粒子番号を表す）。これにより、粒子配列の第2次元に対して連続にメモリアクセスすること及び場のデータとのランダムアクセスが抑止されることが期待される。図 3.3.5.9-1 は Gather プロセスにおける詳細プロファイルを採取した結果である。オリジナルではスレッド間のバランスが良いが、演算を行っている時間は半分以下という状況であった（図 3.3.5.9-1 上図）。それに対して、次元の削減、`schedule(dynamic)` の導入、粒子配列内でのソーティングの導入、スレッド並列間のインバランス解消のためのループ構造変更を行うことにより、実行時間がオリジナルに比べ 53.9%まで改善することができた（図 3.3.5.9-1 下図）。この際、L2 キャッシュミスが改善されたことも確認できた。



(a) オリジナル。



(b) 最適化後。

図 3.3.5.9-1 Gather ルーチンにおける詳細プロファイル。横軸はスレッド並列の番号であり、縦軸は計算時間(秒)である。棒グラフの色はそれぞれ、その計算に実行された命令の種類を表す。

開発を進めている電磁粒子コード PASMO では、均等にシミュレーションボックスを領域分割して分散並列をしている。しかし、粒子分布が不均一になる場合、均等に分割した領域内に含まれる粒子数が領域によって異なるため、粒子に関する計算（運動方程式を解くルーチンと電流密度を計算するルーチン）で最も計算コストがかかる粒子シミュレーションでは、分散並列におけるロードバランスが悪くなる。そこで京都大学の中島浩教授がプラズマ粒子シミュレーション用に開発した OhHelp ライブラ

りの導入を行った。OhHelpライブラリは計算を担当する粒子数が多いプロセスの計算負荷を粒子数が少ないプロセスに肩代わりさせる動的負荷分散アルゴリズムを適用している。OhHelpライブラリの導入には、

- OhHelp用2重化配列の洗い出し
- PASMOとOhHelpの粒子のデータ構造の修正
- OhHelpの初期化・2重化配列のアロケート
- 粒子の初期条件の読み込みから構造体へのコピー
- 粒子のトランスバウンドを行うルーチン開発
- 粒子計算で使用する格子データのallreduce、bcastの追加・修正
- 入出力ファイルの変更

を行った。また、OhHelp導入で自動並列化がされなくなったDO文のOpenMPによるスレッド並列化、粒子がどの領域に存在するかを記録するOhHelpで必要な表の書き出しの最適化を進めた。

磁気再結合を想定した粒子分布での動作検証を行った。グリッド数は $128 \times 512 \times 32$ (Case1)と $128 \times 512 \times 64$ (Case2)の2通りで、MPIプロセス数はそれぞれ $8 \times 8 \times 4$ 、 $8 \times 8 \times 8$ であり、スレッド数はともに16とした。周期境界条件下で2枚の電流層をx方向に並べ、粒子数はそれぞれ1.26億、2.52億として、粒子数密度の粗密差はともに31.8倍とした。計算ステップ数は10,000である。OhHelpライブラリを組み込む前のコードと比較した結果、下記の表3.3.5.9-1のような結果が得られた。Case2ではOhHelpを組み込んだ効果が得られなかったのに対し、Case1では得られた。

OhHelpの効果は動的負荷分散によるメリットと追加コストによるオーバーヘッドの兼ね合いで決まる。磁気再結合のシミュレーションでは、電流層が維持されて構造が変化しない場合や、磁気再結合の結果、構造のトポロジーそのものが変化した後にその構造が準安定的に維持される場合、また、粒子が集合する磁気島が発生して移動する場合など、構造が物理条件や時間経過とともに変化する。今回の動作検証ではそのような大きな構造変化が起こっていないので、OhHelpの効果が得られづらい場合であったと考えられる。今後は、In-Situ可視化と組み合わせてシミュレーション結果を確認しながら、オリジナルとOhHelpを組み込んだコードとを使い分けて運用したいと考える。また、粒子が集中する領域が発生してその領域を担当するノードのメモリ容量を超えるような場合、通常はその時点で計算不能となるが、OhHelpの負荷分散機能を

使えばメモリ容量を超える粒子情報を他のノードに自動的に割り付けてくれる。これは、オリジナルコードでは実行できなかった条件でのシミュレーションが可能になることを示しており、核融合プラズマの粒子シミュレーションの可能性が大きく拡大されることが期待される。

表 3.3.5.9-1 PASMO コードの OhHelp ライブラリ導入前と後の計算速度の比較。

	オリジナル	OhHelp
Case1	359.78 秒	341.36 秒
Case2	366.38 秒	400.74 秒

3.3.5.10 CAD データの VR 可視化

研究所では、将来の核融合発電炉を実現するために、その原型となる「ヘリカル型原型炉」の設計研究を進めている。原型炉では多くの機器が取り付けられ、とても複雑な構造になる見込みである。そのため、原型炉設計では建設時の組み立て工程や稼働開始後のメンテナンス手順などを考慮する必要がある。この時、部品の取り付けや取り外し、移動に利用するロボットアームの設計、また、それを動かす手順も検討する必要がある。これら原型炉そのものとロボットアーム、そのまわりのメンテナンス作業を行う場所をまとめた総合的な設計研究が進められている。このような検討では、これまで設計用のソフトウェアを使って、通常のパソコンのディスプレイのような 2 次元ディスプレイに表示された情報を基に行ってきた。しかし、この方法では、本来 3 次元の情報を 2 次元に投影するために奥行き情報が失われてしまい、部品の立体構造や 3 次元的な位置関係の把握は難しくなる。そのため、部品やロボットアームの動きを検討しながら検討結果を設計に反映することは大変難しく、この問題を解決できる新たなシステムの開発が求められていた。そこで、本研究では、CompleXcope を使ってロボットアームを含めたヘリカル型原型炉の設計データを 3 次元 VR 空間に投影して、炉内部品の位置関係やロボットアームの動きについて、3 次元で確認できるシステムを新たに構築した [3.3.5.10-1]。このシステムでは、まず、原型炉の設計データを VR 空間に投影し、自分自身が原型炉の中に立ったり、歩いて視点を変えたりするなどして、部品の位置関係をあらゆる方向から確認できるようにした (図 2.2.2.2-1)。次に、ロボットアームを含めたデータを投影し、ロボットアームによる部品の取り付け・取り外しや移動を確認できるようにし (図 2.2.2.2-1)、さらに、自分自身の「手」を VR

空間の中に投影することで、VR空間内の「手」で部品をつかんで動かしたりすることもできるようにした（図 3.3.5.10-1）。

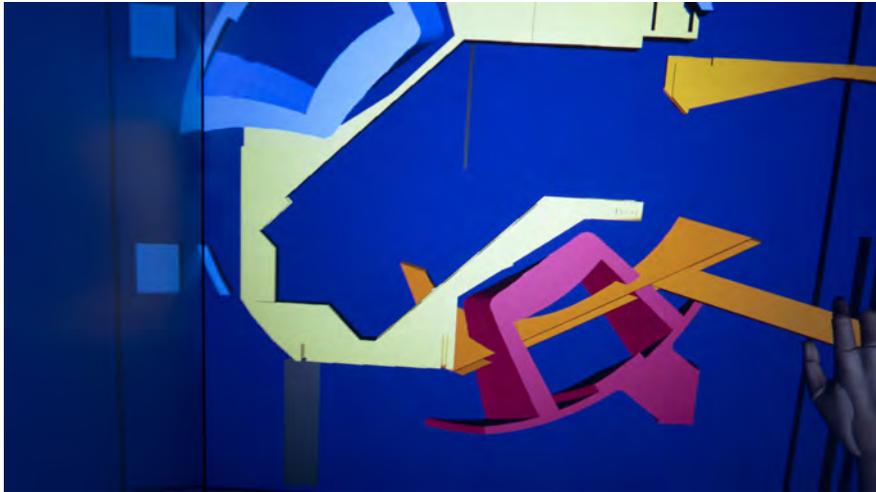


図 3.3.5.10-1 ヘリカル型原型炉のVR可視化。パーツを仮想的な「手」でつかみ、つかんだパーツが別のパーツと接触したため赤く表示されている。

[3.3.5.10-1] H.Ohtani and S.Ishiguro: Proceedig of the 36th JSST Annual International Conference on Simulation Technology, (2017) 194.

3.3.5.11 In-situ 可視化

In-situ 可視化を行うための可視化ライブラリ VISMO の開発を兵庫県立大学の大野暢亮教授との共同研究で進めている。詳細は 3.2.1.4 を参照。

3.3.5.12 Unity を用いた可視化

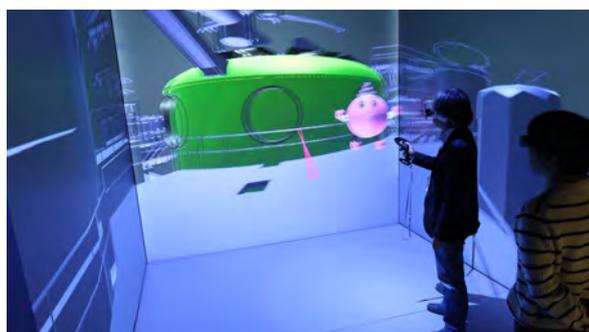
Unityは汎用ゲーム開発エンジンの一つで、Androidなどで動作するゲームの開発で幅広く使われている。使いやすいインターフェース（図 2.3.2-4）や C#による開発環境を備え、Windows、Mac、iOS、Android、WebGLなどで実行可能な実行ファイルを出力することができる。また、PCの画面上だけでなく、ヘッドマウントディスプレイ（HMD。Oculus Rift、HTC VIVE、WindowsMR など）や zSpace といった VR 装置に出

力することも可能である。CAVEを採用している CompleXcope においても MiddleVR というミドルウェアを介することで、Unity で作成したアプリケーションを表示することができる。CAD データの obj ファイル、fbx ファイルなどを Unity は直接インポートできるので、これまでより容易に CAD データから VR コンテンツを作成することができるようになった。図 2.3.2-4 は、LHD 周りの NBI 装置や真空排気装置、ベルジャー、ヘリカルコイルやポロイダルコイル (図には表示されていない) を Unity に取り込んだ様子を表している。これまでに開発してきた真空容器内部の VR コンテンツを組み合わせることも行い、LHD 周りの装置から真空容器内まで (ヘリカルコイルやポロイダルコイルも含む) を表示する VR コンテンツを作成することができた (図 3.3.5.12-1)。さらに、Virtual LHD を FusionVR を介して表示することも可能であり、HINT による平衡プラズマデータ (磁力線、等圧面、ドリフト粒子軌道) を表示することもできる。

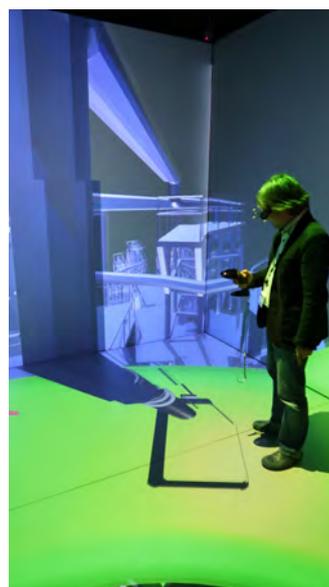
この他にも、甲南大学の田村祐一教授との共同研究で、LHD 実験で得られた不純物放射光の強度データを Unity を使って iPad などのデバイスで可視化するシステムが開発された [3.3.5.12-1]。実験で得られている発光分布強度のデータは構造化されていないため、直交格子に再構成することで高速に可視化をすることが可能となり、リアルタイムでの視点変更などが可能となった。システムではハンドヘルドデバイスで強度分布データを表示して、スライドボタンを使って描画パラメータを変更することができる。

また、GKV シミュレーションによるプラズマ乱流シミュレーションデータを HMD で VR 可視化する研究を名古屋大学の片桐孝洋教授及び大学院生の北澤修太君と共同で進めている。シミュレーションで得られたフィールドデータから AVS で描画して ply ファイルを出力して、Blender を使って Unity に対応した fbx ファイルへデータ変換を行う。Unity を使って、WindowsMR のモーションコントローラによるモデル操作を実装して、両手の相対的な動きによって対象の移動、回転、拡大縮小や片手の操作によって VR 空間内を移動することができる。

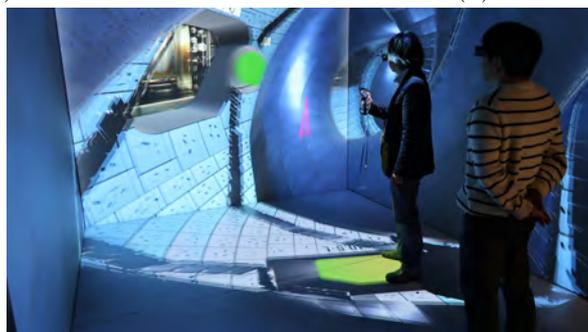
可視化のプロセスでは、可視化の目的によって利用する可視化デバイスやプログラムが異なることが多い。全ての場合において汎用的に利用可能な環境の一つとして、Unity のような汎用ゲームエンジンが挙げられる。このような可視化開発環境を使って、共同研究や社会への発信をこれまで以上に強力に推し進めていきたいと考える。



(a) LHD 真空容器の外。



(b) LHD 真空容器の上部。



(c) LHD 真空容器内部。

図 3.3.5.12-1 LHD 周りから真空容器内の VR 可視化。写真には表示されないが、ヘリカルコイルやポロイダルコイルも設置されている。

[3.3.5.12-1] Y. TAMURA, M. KOBAYASHI, T. KOBAYASHI, W. OMORI, H. NAKAMURA, H. OHTANI, S. FUJIWARA and the LHD Experimental Group: Plasma Fusion Res. Vol.14 (2019) 3406084.

3.3.5.13 ヘッドマウントディスプレイを用いたVR可視化

3.3.5.12で述べたように、Unityを導入することでヘッドマウントディスプレイ (HMD) でのVR表示を容易に導入することができるようになった。兵庫県立大学の¹⁾大野暢亮教授と大学院生の名倉成輝君との共同研究で、Unityで開発してMiddleVRを介してCompleXscopeで実行していたLHD真空容器のコンテンツをHMDのOculus Riftで実行できるように移植を行った。Oculus Touchによるフリスルーも導入することができた。

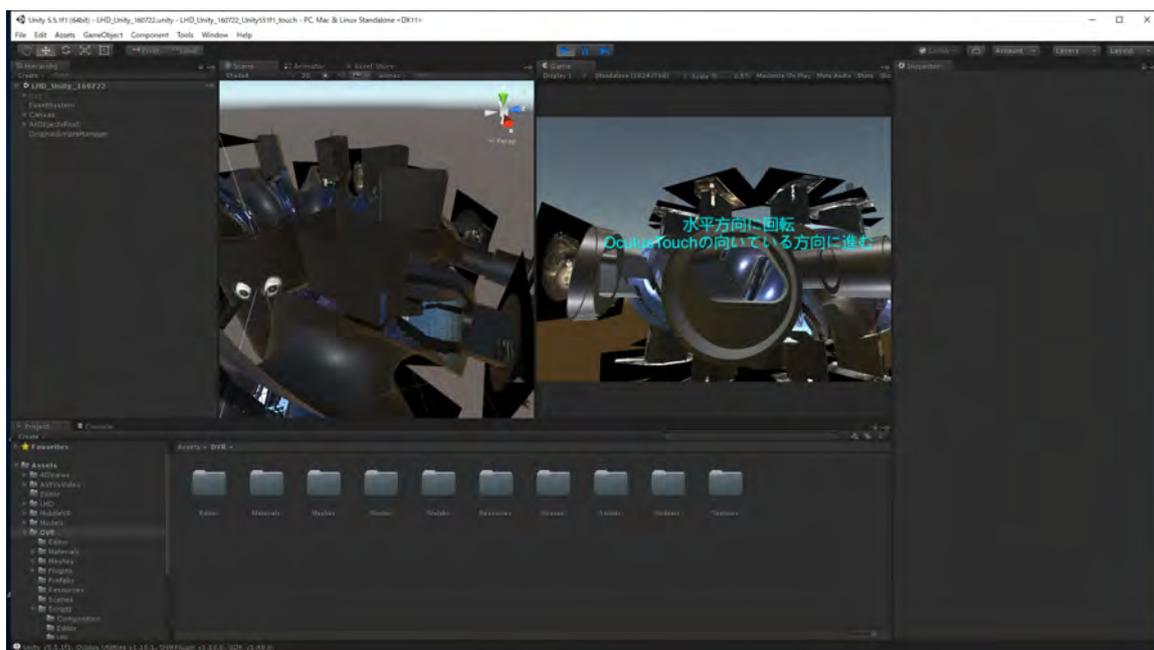


図 3.3.5.13-1 LHD真空容器コンテンツのHMDへの移植。

その一方で、これまでに開発されてきたCAVE用の可視化アプリケーションをHMDでも活用したいと考えた場合、各HMD用の開発キットSDKで再開発する必要がある。そこで、JAMSTECの川原慎太郎博士はCAVELibのラッパーライブラリとしてCLCLを開発した。川原博士との共同研究により、Virtual LHDの移植に成功した。図3.3.5.13-2はCLCLを使って移植されたVirtual LHDがPC上で実行されている様子を示す。Oculus Touchを使ってCAVEと同じ操作性で操作ができる。

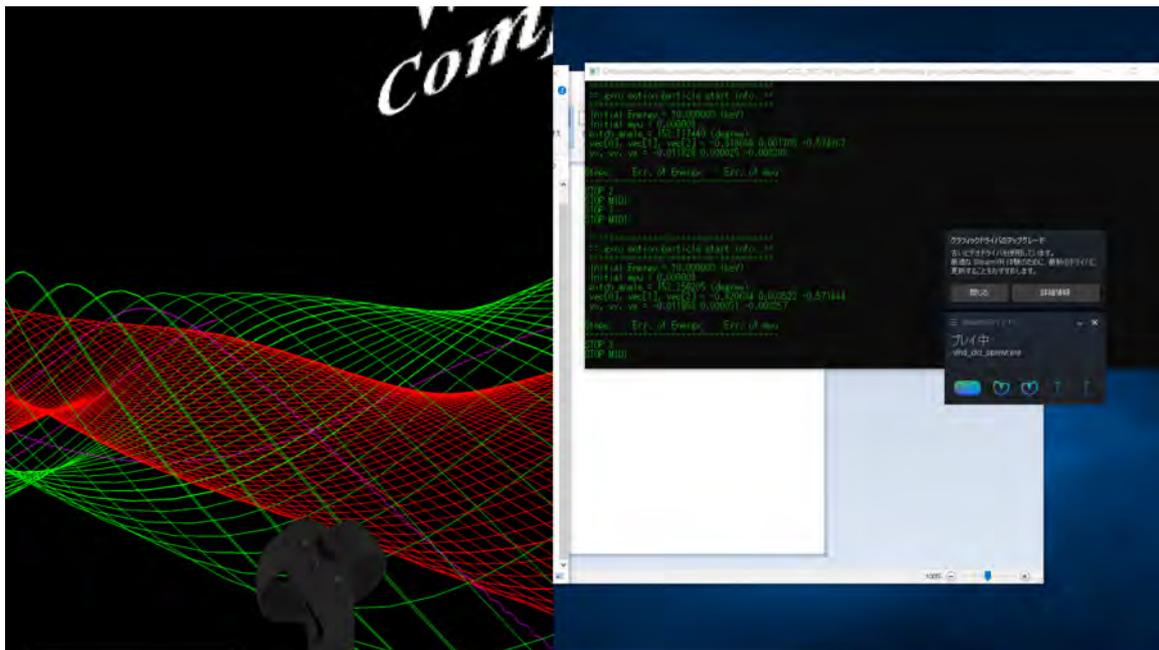


図 3.3.5.13-2 Virtual LHD の HMD への移植。PC 画面左側に Virtual LHD が実行されている。また、その画面内には Oculus Touch も表示されている。

3.3.5.14 磁力線データの可視化

核融合炉の設計研究では、3次元CADを使って設計を行っている。その設計の過程で、VMECで計算された平衡プラズマでのMGTRCによる磁力線追跡データからポアンカレ断面を求めて、炉構造体の断面図に重ねながら炉構造体とプラズマとの接触判定を行っている。この際、断面図を1度ずつ区切りながら行っているが、接触判定において1度ずつ区切ることで十分なのか明確ではないし、炉構造体の構造を変更するたびにこの作業を進めるのは大変効率が悪い。そこで、粒子のラーマー半径を考慮しながら、追跡された磁力線データからそれらを包む包絡面を求め、磁力線が存在する最外面を3次元で求める研究を、京都大学の小山田耕二教授及び大学院生の胡昆祁君と共同研究で進めている。この3次元最外面が求めれば、3次元CADデータと直接に接触判定を行うことができ、炉設計の効率が上がることが期待される。

3.3.5.15 FFHR CAD データの構造解析

核融合科学研究所核融合工学研究プロジェクトで進められている将来のヘリカル型核融合発電所の設計研究で、新型ヘリカルブランケット CARDISTRY-B が提案された。これはユニットが基本的に板で構成され、垂直もしくは大半径外側方向への移送のみで各ユニットを取り外すことができる画期的な構造となっている。この提案とともに、ロボットを使ったユニットの脱着・交換・輸送作業が CAD ソフトウェアを使ったアニメーション機能で検討されている。しかし、この検討ではユニットの構造解析や機構解析はなされていない。そこで、中部大学の高丸尚教教授及び大学院生の嘉無木昇君との共同研究で、CAD ソフトウェア CATIA を使った構造解析や機構解析を進めている。当初、SketchUP を使って設計が行われていたため、CATIA で読み込みができなかった。現在、Fusion360 を使って設計が行われ（図 3.3.5.15-1）、CATIA による構造解析が行われた。その結果、自重のみの負荷で完全に変形するユニットや、構造的に耐えられる限界のユニット、十分に耐えられるユニットがあり、また、設計データの問題でメッシュ分割できず、解析不能なユニットがあることが分かった。これらの結果は炉設計にフィードバックされた。

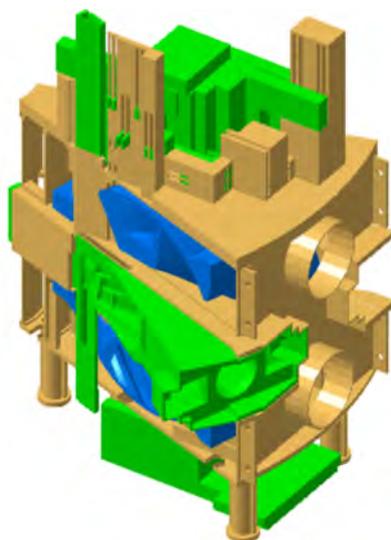


図 3.3.5.15-1 FFHR の CAD データ。

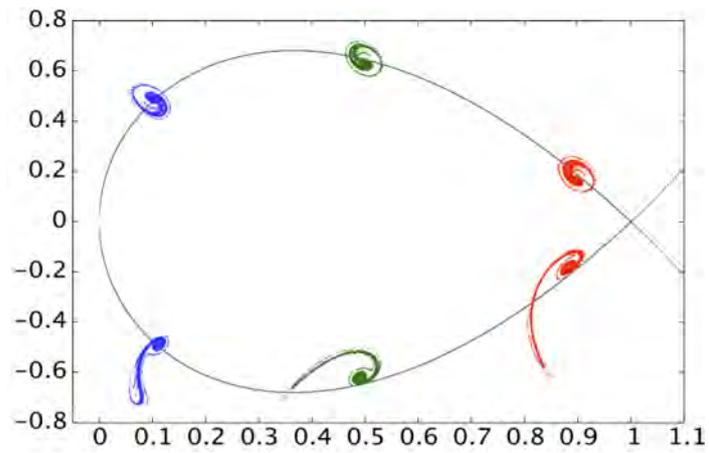
3.3.5.16 可視化研究の応用

可視化研究の応用として、アインシュタイン方程式の解析をテキサス大学オースティン校の Tomio Petrosky 博士及び大阪府立大学の田中智教授、大学院生の竹内雄哉君との共同研究で進めた。

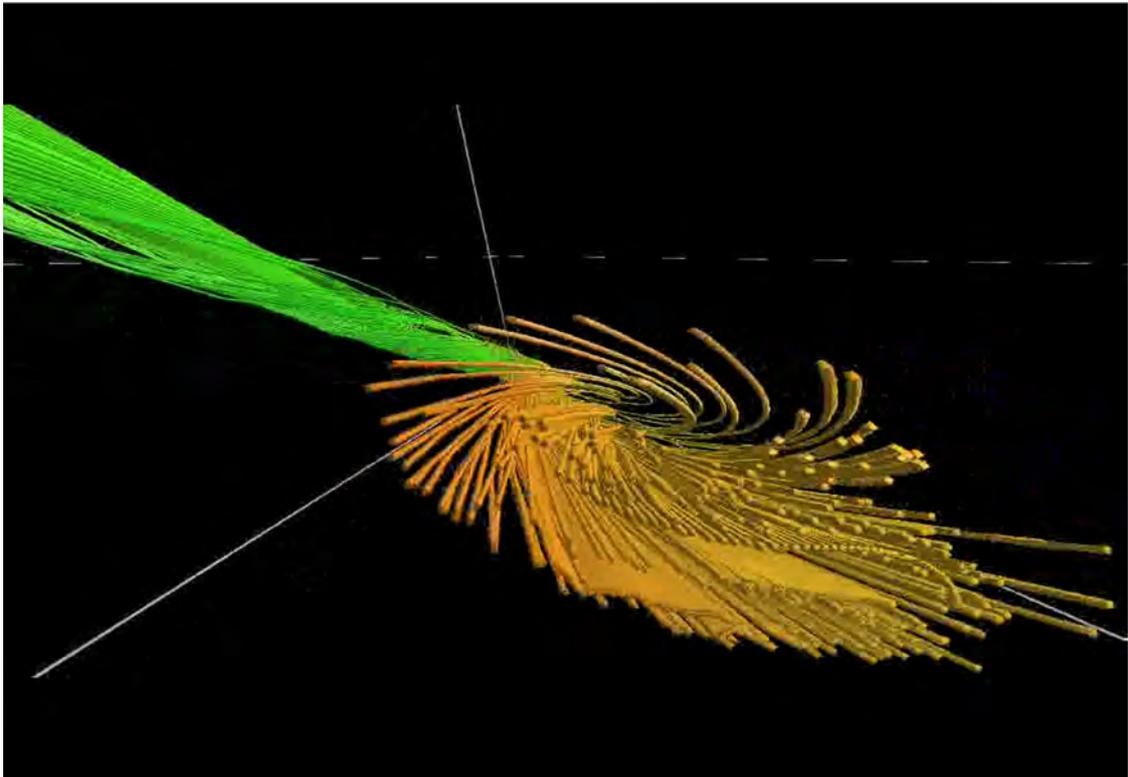
一般相対論に基づく宇宙モデルにはいくつかのモデルがあるが、そのうちの一つである空間一様・非等方宇宙モデルについて解析を行ったところ、これまでに研究されてきた力学系のカオスとは全く異なる特異な構造を持つカオスが発生することを竹内君らは見出した。図 3.3.5.16-1 は、4次元位相空間から選んだ2次元面に対するポアンカレ断面を示す。膨張-収縮を繰り返している間は、適当に用意した断面に運動が繰り返し戻ってくるのでポアンカレマップが定義でき、そのマップが作る構造からカオスの判定が可能である。実際に、そのような膨張-収縮を繰り返す軌跡の集団（分布）はポアンカレマップで引き伸ばしと折りたたみを繰り返し、カオス系特有の構造を成す。

このように、多くのカオス研究ではそのカオス性を調べる手段として軌道のポアンカレマップを作成して議論する。しかし、この方法では軌道が作る構造の断面のみが解析可能であり、構造の全体像を把握することは困難であった。また、より観測事実に近い、膨張を続ける進化だけを集めた状態分布の発展では、上記の描像による繰り返し運動が存在しないので、ポアンカレマップを定義できない。そこで、アインシュタイン方程式で得られた軌道データについて4次元位相空間から3次元位相空間への射影を行い、3次元空間での軌道の可視化を行ったところ、集団を成す個々の軌跡が螺旋状に、回転しながら発展していることが分かった。従って、この回転を繰り返し運動とみなすことで、ポアンカレマップのようなもの（正確にはバーコフ座標を用いたマップで、ビリヤード問題などに使われる）を考えることができ、この場合にもカオスを可視化できる可能性がでてきた。

この可視化研究による螺旋構造の発見は、当該研究分野に対して新たな研究の視点を与え、更なる研究の進展をもたらした。



(a) ポアンカレ断面。縦軸と横軸は4次元位相空間から選んだ2次元方向を表す。



(b) 4次元位相空間から空間2次元・速度1次元の3次元位相空間への射影を行い、軌道を流線で表現したアニメーションの一画面。

図 3.3.5.16-1 アインシュタイン方程式から得られた軌道の解析結果。

4 共同利用・共同研究の推進

本章(第4章)では、数値実験炉研究プロジェクトが推進している共同利用・共同研究について報告する。4.1章で述べるように、数値実験炉研究プロジェクトは、シミュレーション研究の中核的研究拠点として、プラズマシミュレータを活用した多様な共同研究を全国の大学・研究機関に展開しており、プラズマシミュレータ共同研究の成果発表と、プラズマ・核融合分野及びその関連分野でのシミュレーション科学に関する議論を行うため、プラズマシミュレータシンポジウム(4.1.2章参照)を毎年開催している。

全国の多数の大学・研究機関との共同研究の詳細は、4.1.3章において示されるが、その中には、タスクグループと密接な連携の下、周辺プラズマ輸送コード・中性粒子輸送コード・分子動力学コードの統合化による LHD 周辺における水素原子分子の計算、LHD ダイバータ中のタングステン輸送モデリング、LHD や Heliotron J 等のヘリカル系プラズマに対するジャイロ運動論的乱流輸送シミュレーション、ヘリカル磁場配位における乱流揺動スペクトルの数値診断や、統合コードへのデータ同化 (data assimilation) 手法導入 (3.2.2.2 章参照) 等の数値実験炉研究プロジェクトに深く関わる課題に関する共同研究としてプロジェクトの推進に大きく貢献するもの、また、RFP や ST プラズマの非線形 MHDシミュレーション、乱流物理、電磁粒子シミュレーションやバーチャルリアリティ可視化技術の応用等の課題において、プロジェクトが大学の研究遂行機能の強化に貢献するものが含まれる。また、量子科学技術研究開発機構と、トカマクにおける共鳴摂動磁場による ELM 制御等の課題に関する共同研究が行われている。

4.2章で示されるように、数値実験炉研究プロジェクトは、巨大ブラックホールにおける相対論的ジェットシミュレーション、地球磁気圏・室内実験装置における磁気リコネクションの粒子シミュレーション、脳神経集団ネットワークのシミュレーション手法等に関する共同研究や、また、実験室・天体プラズマにおける加熱・輸送・乱流ダイナミクスの研究を通して、分野間連携・異分野融合研究の推進にも取り組んでいる。さらに、数値実験炉研究プロジェクトは、米国、欧州、中国、韓国等との国際連携活動(4.3章)を推進し、ITER 計画・BA 活動(4.4章)等を含めた国際協力に大きく貢献しており、分子シミュレーションに関する産業界との共同研究(4.5章)も行っている。

4.1 プラズマシミュレータを活用した国内共同研究

4.1.1 プラズマシミュレータ共同研究

数値実験炉研究プロジェクトは大型シミュレーションを基盤として、所内外の研究者による共同研究によって遂行されている。数値実験炉研究プロジェクトの推進に当たっては、核融合科学研究所一般共同研究・プラズマシミュレータ共同研究を通じて、共同研究課題を公募している。また、より広範な分野を含むLHD数値解析サーバー利用共同研究についても公募が行われ、これらの一般共同研究には、毎年度、所内外の多くの研究者・学生が参加している。

プラズマシミュレータ共同研究では、数値実験炉研究プロジェクトがテーマを設定するA.研究所提案型共同研究と、幅広い意味での数値実験炉研究の目的に添ったテーマを受け入れるB.応募者提案型共同研究から構成されている。前者(A)については、数値実験炉研究プロジェクトの8つのタスクグループの活動内容に概ね対応したテーマが設定されている。後者(B)については、核融合プラズマをその中心としつつも、自然科学の様々な研究分野で行われている数値実験炉関連の研究課題や新しい学問領域としてのシミュレーション科学の発展に貢献し得る課題や、更には計算科学の観点から、新しいアルゴリズムの開発や新しい並列化技法などに関する研究課題を所内外の研究者が提案するものなど、核融合に関係する広範な領域から応募されている。

図4.1.1-1は、過去8年間のプラズマシミュレータ共同研究採択件数の推移である。変動の推移を比較するため、過去の外部評価の対象であった平成24年度から平成27年度のデータも使用した。A.研究所提案型、B.応募者提案型別に表示した。採択件数の総数は年度ごとに緩やかな増減を示すものの、全体に増加基調にある。特に、B.応募者提案型共同研究の採択件数は、平成24年度の24件から令和元年の32件へ、約33%増加していることが分かる。図4.1.1-2はプラズマシミュレータ共同研究の利用者数である。所内利用者の55名前後に対して、所外利用者は105-149名の幅の中で緩やかに変化している。令和元年のプラズマシミュレータ共同研究利用者数は昨年度に比べると少ないが、令和元年のデータだけは年度途中であることが影響している。本稿のとりまとめ中も利用者数は増加していることから、年度末までにさらに増加し、昨年度との利用者数の差は更に縮小するものと考えられる。

これらのデータから、プラズマシミュレータは、核融合科学研究所だけではなく、多数の大学・研究機関の研究者にも利用されており、核融合・プラズマとこれに関わる学術研究等に貢献していることが分かる。

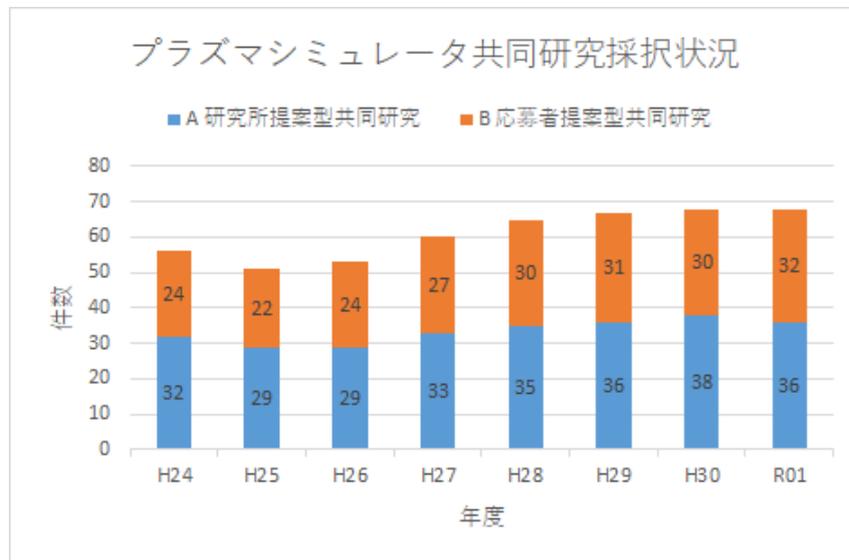


図 4.1.1-1 平成 24 年度以降のプラズマシミュレータ共同研究採択件数。

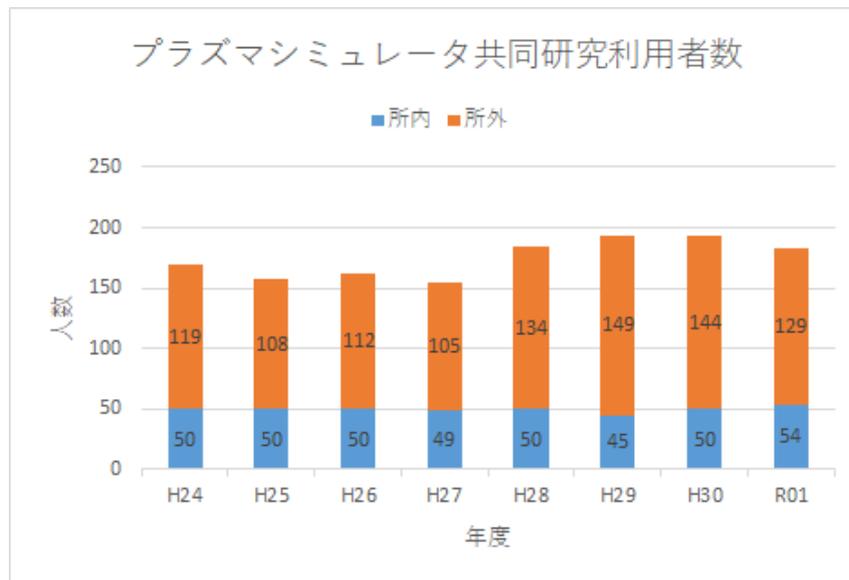


図 4.1.1-2 平成 24 年度以降のプラズマシミュレータ共同研究の利用者数。

4.1.2 プラズマシミュレータシンポジウム開催

数値実験炉研究プロジェクトでは、プラズマシミュレータ（スーパーコンピュータ）を用いた共同研究の成果発表と、国内におけるプラズマ・核融合分野及びその関連分野でのシミュレーション科学に関する議論を行うためのシンポジウム「プラズマシミュレータシンポジウム」を開催してきた。このシンポジウムは、主にプラズマシミュレータを利用する共同研究者が最新の研究成果を報告及び議論することを目的としている。

「数値実験炉研究プロジェクト共同研究」の報告会として、プラズマシミュレータを利用して得られた最新の研究成果の報告とその議論を行い、併せて、関連分野の研究者を招待講演者として招き、最新の研究トピックスについても紹介いただいた。シンポジウムにおいては、プラズマシミュレータを利用して、よりすぐれた研究成果を生み出すための運用についても意見をいただいた。

会議の参加人数は、表 4.1.2-1 にまとめ、当日の様子の写真を、図 4.1.2-1 と 4.1.2-2 に掲げた。さらに、プログラムを、図4.1.2-3、図4.1.2-4、図4.1.2-5、図4.1.2-6に掲げた。

表 4.1.2-1 プラズマシミュレータシンポジウムへの参加人数

年度	参加人数
平成 28 年度	135 名
平成 29 年度	137 名
平成 30 年度	133 名
令和元年度	130 名



図 4.1.2-1 プラズマシミュレータシンポジウムの口頭発表

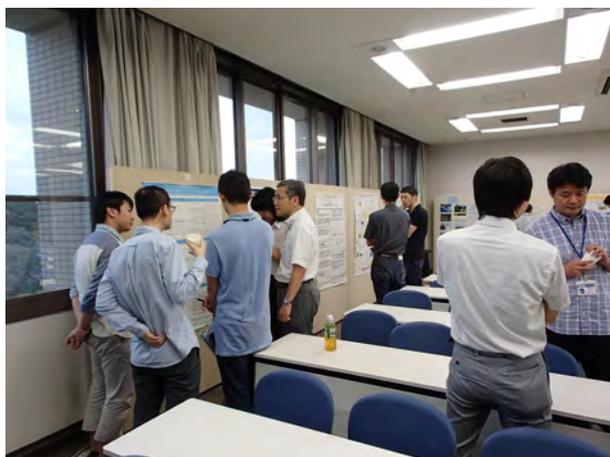


図 4.1.2-2 プラズマシミュレータシンポジウムのポスター発表

プラズマシミュレータシンポジウム2016 プログラム

日時:平成28年9月7日(水)~9月8日(木)

会場:管理棟4F第1会議室(口頭発表)、第2会議室(ポスター)

平成28年9月7日(水) バス到着時刻 8:27、8:55

司会:鈴木康浩

9:10-09:15 挨拶(竹入所長)
9:15-09:30 総主幹報告(堀内総主幹)

セッション1 (座長:)

9:30-10:00 藤堂 泰 核融合科学研究所 高エネルギー粒子・MHD連結シミュレーションの最近の進展
10:00-10:30 鈴木知明 日本原子力研究開発機構 原子力材料劣化研究のためのモデリング手法

10:30-10:45 休憩

セッション2 (座長:)

10:45-11:15 堀田英之 千葉大学 太陽ダイナモにおけるスケール間結合
11:15-11:35 山口裕之 京都大学 トロイダルプラズマにおける高速イオン実空間非一様性による電位形成と輸送への影響
11:35-11:55 Shuyu Dai 核融合科学研究所 EMC3-EIRENE modelling of edge impurity transport in the stochastic layer of the LHD compared with EUV measurements
11:55-12:15 佐藤雅彦 核融合科学研究所 高ベータLHDプラズマにおける抵抗性MHD不安定性のシミュレーション研究

12:15-13:30 昼食

セッション3 (座長:)

13:30-14:00 田中今日子 北海道大学 大規模分子動力学シミュレーションによる気泡の核生成過程および古典的理論の改良
14:00-14:30 瀬尾 拓史 株式会社サイアメント 「楽しい」可視化を行うために
14:30-15:00 陰山 聡 神戸大学 単位球内部のMHDシミュレーション

15:00-15:15 休憩

ポスターセッション

15:15-17:15

懇親会(土岐っ子)

17:45-19:00

多治見駅行きバス 19:20

平成28年9月8日(木) バス到着時刻 8:27、8:55

セッション4 (座長:)

9:10-09:40 小野謙二 九州大学 サイエンスを加速する大規模データの可視化分析技術
9:40-10:10 福山 淳 京都大学 統合モデリングに基づくトカマク炉心プラズマシミュレーションの現状と展望
10:10-10:30 Hao Wang 核融合科学研究所 Nonlinear simulations of energetic particle driven geodesic acoustic mode in 3-dimensional LHD equilibrium

10:30-10:45 休憩

セッション5 (座長:)

10:45-11:15 東郷 訓 筑波大学 非等方イオン温度を導入したスクレイブオフ層-ダイバータプラズマ-次元流体シミュレーション
11:15-11:45 高本 亮 東京大学 Large-Scale Structure of Collisionless Reconnection Exhaust Region and Effects of Scatterings
11:45-12:05 Botz Huang 総合研究大学院大学 Benchmark of the Local Drift-kinetic Models for Neoclassical Transport Simulation in Helical Plasmas

12:05-13:20 昼食

セッション6 (座長:)

13:20-13:50 石澤明宏 京都大学 ヘリカルプラズマにおける乱流輸送のジャイロ運動論シミュレーション
13:50-14:10 樋田美栄子 核融合科学研究所 強磁場中の無衝突衝撃波による粒子加速についてのシミュレーション

報告と議論 (司会: 鈴木康浩・核融合科学研究所)

14:10-15:10 堀内利得 核融合科学研究所 HPCI関連報告
洲鎌英雄 核融合科学研究所 IFT関連報告
石井康友 量子科学技術研究開発機構 IFERC-CSC関連報告
三浦英昭 核融合科学研究所 プラズマシミュレータ関連報告

15:10 閉会

多治見駅行きバス 15:26、16:46、17:25

図 4.1.2-3 平成28年度プラズマシミュレータシンポジウムのプログラム

プラズマシミュレータシンポジウム 2017 プログラム 2017. 9.7 現在

日時： 2017年9月7日(木) 9:10-17:15 および 9月8日(金) 9:10-15:00

場所： 岐阜県土岐市下石町 322-6

自然科学研究機構核融合科学研究所 管理棟 4階第1, 第2会議室

9月7日(木) (*バス：研究学園都市センター着 8:27、8:55着)

9:10-9:15 挨拶(室賀副所長)

9:15-9:30 総主幹報告(洲鎌研究総主幹)

・セッション1(座長：中村浩章)

9:30-10:00 斎藤 誠紀(釧路工業高等専門学校)

「ヘリウムバブル形成下におけるタングステン材のプラズマ-材料相互作用」

10:00-10:30 伊庭野健造(大阪大学)

「PIC法による蒸気遮蔽効果シミュレーション」

10:30-10:45 休憩

・セッション2(座長：市口勝治)

10:45-11:15 白石 淳也(量子科学技術研究開発機構)

「回転プラズマにおける抵抗性壁モードの理論・シミュレーション研究」

11:15-11:35 陰山 聡(神戸大学)

「MHDシミュレーションの4次元ストリートビュー」

11:35-11:55 井戸村 泰宏(日本原子力研究開発機構)

「ジャイロ運動論的 full-f オイラーコード GT5D におけるエクサスケール計算技術開発」

11:55-13:30 昼食

・セッション3(座長：菅野 龍太郎)

13:30-14:00 Xuehan Guo(郭 学瀚)(東京大学)

「ガイド磁場リコネクション時のエネルギー変換機構」

14:00-14:30 本多 充(量子科学技術研究開発機構)

「連成大域輸送計算コード TRESS+GKV の開発と展望」

14:30-15:00 山本 義暢(山梨大学)

「大規模直接数値計算による MHD 乱流熱伝達機構の解明とモデリング」

15:00-15:15 休憩

15:15-17:15 ポスターセッション

17:45-19:00 懇親会(会場 管理棟 1F 土岐っ子) *バス：多治見行きバス 19:20 発

p. 1

9月8日(金) (*バス: 研究学園都市センター着 8:27、8:55着)

・セッション4 (座長: 佐竹真介)

9:10-9:40 前田 渉吾 (京都大学)

「LHDにおける重水素プラズマの統合輸送シミュレーション」

9:40-10:00 佐々木 真 (九州大学)

「プラズマ乱流における流れ場トポロジーの分岐シミュレーション」

10:00-10:20 松岡 清吉 (日本原子力研究開発機構)

「3次元磁場配位における大域的 full-f ジャイロ運動論シミュレーションの新古典輸送ベンチマーク」

10:20-10:35 休憩

・セッション5 (座長: 大谷寛明)

10:35-11:05 加藤 雄人 (東北大学)

「惑星磁気圏におけるホイッスラーモード・コーラス放射発生過程についての計算機実験」

11:05-11:35 登田 慎一郎 (核融合科学研究所)

「運動論的電子を用いたジャイロ運動論解析結果による簡約化輸送モデル」

11:35-11:55 柳生 光義 (兵庫県立大学 M2)

「ジャイロ運動論シミュレーションコード AstroGK によるマイクロテアリング不安定性解析」

11:55-13:20 昼食

・セッション6 (座長: 三浦英昭)

13:20-13:50 佐竹信一 (東京理科大学)

「高レイノルズ数乱流の直接数値計算」

13:50-14:10 清水 雅樹 (大阪大学大学院基礎工学研究科)

「壁面流における持続乱流の発生過程」

14:10-15:10 報告と議論 (司会: 中村浩章・核融合科学研究所)

石黒静児 (核融合科学研究所) 「HPCI 関連報告」

洲鎌英雄 (核融合科学研究所) 「JIFT 関連報告」

宮戸直亮 (量子科学技術研究開発機構) 「IFERC-CSC 関連報告」

三浦英昭 (核融合科学研究所) 「プラズマシミュレータ関連報告」

15:10 閉会

*多治見行きバス 15:26、16:46、17:25 発

p. 2

【招待講演者一覧】

番号	氏名(敬称略)	所属	ご講演題目
1	白石 淳也	量子科学技術研究開発機構	回転プラズマにおける抵抗性壁モードの理論・シミュレーション研究
2	本多 充	量子科学技術研究開発機構	連成大域輸送計算コード TRESS+GKV の開発と展望
3	佐竹 信一	東京理科大学 基礎工学部	高レイノルズ数乱流の直接数値計算
4	伊庭野 健造	大阪大学 工学研究科	PIC 法による蒸気遮蔽効果シミュレーション
5	加藤 雄人	東北大学 理学研究科	惑星磁気圏におけるホイッスラーモード・コーラス放射発生過程についての計算機実験
6	斎藤 誠紀	釧路工業高等専門学校	ヘリウムバブル形成下におけるタンゲステン材のプラズマ - 材料相互作用
7	山本 義暢	山梨大学 大学院医学工学総合研究部	大規模直接数値計算による MHD 乱流熱伝達機構の解明とモデリング
8	登田 慎一郎	核融合科学研究所	運動論的電子を用いたジャイロ運動論解析結果による簡約化輸送モデル
9	Xuehan Guo (郭 学瀚)	東京大学 大学院新領域創成科学研究科	ガイド磁場リコネクション時のエネルギー変換機構
10	前田 涉吾	京都大学 大学院工学研究科	LHD における重水素プラズマの統合輸送シミュレーション

【ポスター発表一覧】

番号	氏名(敬称略)	所属	発表題目
P-1	中村 浩章	核融合科学研究所	タングステンへの希ガス照射の表面構造依存性
P-2	大谷 寛明	核融合科学研究所	開放系電磁粒子コード PASMO の開発
P-3	山本 泰弘	京都大学 大学院工学研究科	ヘリカルプラズマにおける電子サイクロトロン加熱によるトロイダル流駆動機構の解明
P-4	前山 伸也	名古屋大学 大学院理学研究科	Suppression of micro-tearing modes by electron temperature gradient modes
P-5	伊藤 篤史	核融合科学研究所	機械学習を利用したタンタル-ヘリウム系のポテンシャルモデル開発
P-6	山口 敬済	山形大学	高温超伝導リニアカタパルトを用いた超高速ペレット入射シミュレーション：等価回路モデルと FEM モデル
P-7	市口 勝治	核融合科学研究所	Numerical simulation for interaction between global flow and interchange mode in heliotron plasma
P-8	三浦 英昭	核融合科学研究所	LHD の 2 流体シミュレーションの LES 研究
P-9	平吹 勇司	山形大学 大学院理工学研究科	2D TE 波散乱問題の数値シミュレーション：領域型及び境界型メッシュレス法の適用
P-10	宇佐見 俊介	核融合科学研究所	駆動型磁気リコネクションにおける水素イオン実効的加熱機構の探求
P-11	菅野 龍太郎	核融合科学研究所	ドリフト運動論方程式に基づく不純物輸送シミュレーションコード開発
P-12	沼田 龍介	兵庫県立大学 大学院シミュレーション学研究科	2 次元ジャイロ運動論シミュレーションにおける一様乱流駆動手法の開発
P-13	佐竹 真介	核融合科学研究所	FORTEC-3D コードの FX100 における高速化
P-14	樋田 美栄子	核融合科学研究所	高速イオンによる磁気音波不安定性とイオンサイクロトロン放射
P-15	糟谷 直宏	九州大学 応用力学研究所	直線装置における中性粒子分布を考慮したドリフト波乱流シミュレーション
P-16	高山 有道	核融合科学研究所	タングステン自己照射過程の分子動力学シミュレーション
P-17	大野 友嗣	九州大学 総合理工学府	直線装置におけるジャイロ流体モデルを用いたイオン温度勾配不安定性のグローバルモード解析
P-18	伊藤 淳	核融合科学研究所	有限アスペクト比円柱プラズマにおける二流体テアリング不安定性の数値解析

P-19	三浦 辰典	名古屋大学 大学院理学研究科	イオン温度勾配乱流におけるエントロピー伝達過程と帯状流シアリング過程
P-20	三好 隆博	広島大学 大学院理学研究科	磁気静水圧平衡問題に対する新しい磁気流体力学的緩和法の開発
P-21	沼波 政倫	核融合科学研究所	運動論的シミュレーションによるヘリカルプラズマの不純物輸送解析
P-22	山口 裕之	核融合科学研究所	トカマクおよびヘリカルプラズマにおける高速イオンによる平衡電位形成
P-23	長谷川 裕記	核融合科学研究所	不純物を含む非拡散的動径方向プラズマ輸送の粒子シミュレーション
P-24	浦野 貴弘	群馬大学大学院	フルパーティクルモデルによる FRC 中の電磁揺動場シミュレーション
P-25	藤原 進	京都工芸繊維大学 材料化学系	両親媒性溶液中におけるミセル形成の分子動力学シミュレーション：ミセル形状の分類
P-26	大野 暢亮	兵庫県立大学	In-Situ 可視化へ向けた開発
P-27	川島 朋尚	国立天文台 理論研究部	相対論的な速度シアを伴うプラズマ流の PIC シミュレーション
P-28	齋藤 泰之	京都大学 大学院工学研究科	LHD 重水素実験における核融合反応の時間発展シミュレーション
P-29	松井 鷹也	群馬大学大学院	静電 DD ビーム閉じ込めシステムに関するフルパーティクルシミュレーション
P-30	西岡 賢二	名古屋大学 大学院理学研究科	モーメント分離法のトロイダルジャイロ運動論的シミュレーションへの適用
P-31	後藤 晋	大阪大学 大学院基礎工学研究科	空間周期的な外力に駆動される過渡的乱流
P-32	後藤 俊幸	名古屋工業大学	高レイノルズ数乱流における間欠性と高シュミット数スカラーのスペクトル
P-33	吉田 恭 (代理：辻 義之)	筑波大学 数理物質系 (名古屋大学)	量子流体乱流のシミュレーションにおけるスペクトル
P-34	河村 学思	核融合科学研究所	EMC3-EIRENE による LHD 不純物ガスパフ放電における不純物輸送解析
P-35	下村 和也	名古屋大学 大学院理学研究科	無衝突リコネクションの分布関数構造解析とガイド磁場方向の運動論的不安定性
P-36	Pianpanit Theerasarn	総合研究大学院大学	Particle simulation study on the formation of the detached plasma
P-37	畑 昌育	大阪大学 レーザー科学研究所	強磁場中の高強度レーザープラズマ相互作用

p. 5

図 4.1.2-4 平成 29 年度プラズマシミュレータシンポジウムのプログラム (5/6)

P-38	荒木 圭典	岡山理科大学 工学部	MHD、HMHD プラズマにおけるラベル貼り替え対称性と一般化渦度とヘリシティ保存の関係
P-39	小川 智也	北里大学 一般教育部	正十二面体分割格子上の定常解を境界条件とした解適合格子 MHD 惑星間空間シミュレーション
P-40	佐藤 雅彦	核融合科学研究所	インターチェンジモードにおける非線形パリティ混合
P-41	石崎 龍一	核融合科学研究所	ペレット入射における磁気島の影響
P-42	中山 颯	京都大学 大学院工学研究科	トカマク型核融合装置における ICRF 加熱時のトロイダル流駆動について

プラズマシミュレータシンポジウム 2018 (PSS2018) プログラム

日時： 2018年9月13日(木) 9:10-17:15 および 9月14日(金) 9:10-15:00

場所： 岐阜県土岐市下石町 322-6

自然科学研究機構 核融合科学研究所 管理棟 4階第1, 第2会議室

9月13日(木) (*バス：研究学園都市センター着 8:27、8:55着)

9:10-9:15 挨拶(室賀副所長)

9:15-9:30 総主幹報告(洲鎌研究総主幹)

・セッション1(座長：藤堂 泰)

9:30-10:00(招待) 松山 顕之(量子科学技術研究開発機構)

「トカマクディスラプションの理論・シミュレーション研究の進展」

10:00-10:30(招待) 關 良輔(核融合科学研究所)

「大型ヘリカル装置におけるMEGAコードを使用したAEバースト時における損失高速イオンの研究」

10:30-10:45 休憩

・セッション2(座長：石黒 静児)

10:45-11:15(招待) 畑 昌育(大阪大学)

「強磁場下における超高強度レーザーとプラズマとの相互作用の物理」

11:15-11:35 藤田 宜久(函館工業高等専門学校)

「FDTD法を用いたマイターバンド内の大規模電磁場シミュレーション」

11:35-11:55 河村 学思(核融合科学研究所)

「ネオンガスバフ放電におけるLHD周辺不純物輸送モデリング」

11:55-13:30 昼食

・セッション3(座長：中村 浩章)

13:40-14:10(招待) 大野 暢亮(兵庫県立大学)

「ベクトル計算機上でのIn-Situ可視化の試み」

14:10-14:40(招待) 澤田 圭司(信州大学)

「水素原子・分子の衝突輻射モデルおよび中性粒子輸送コードの構築」

14:40-15:10(招待) 川島 朋尚(国立天文台)

「相対的ジェットにおけるマッシュルーム不安定性のPICシミュレーション」

15:10-15:25 休憩

15:25-17:25 ポスターセッション

17:45-19:00 懇親会(会場 管理棟1F土岐っ子) *バス：多治見行きバス 19:20発

9月14日(金) (*バス: 研究学園都市センター着 8:27、8:55着)

・セッション4 (座長: 三浦 英昭)

- 9:10- 9:40 (招待) 伊藤 篤史 (核融合科学研究所)
「マルチハイブリッドシミュレーションから見えてきたファズ成長における弾き出し過程の重要性」
- 9:40-10:00 吉田 恭 (筑波大学)
「量子流体乱流の強乱流領域における粒子数カスケード」
- 10:00-10:20 後藤 晋 (大阪大学)
「乱流境界層中の渦の階層」

10:20-10:35 休憩

・セッション5 (座長: 菅野 龍太郎)

- 10:35-11:05 (招待) 森高 外征雄 (核融合科学研究所)
「大域的ジャイロ運動論粒子コード XGC の非軸対称系への拡張」
- 11:05-11:35 (招待) 糟谷 直宏 (九州大学)
「磁場閉じ込めプラズマ乱流シミュレーションと乱流計測」
- 11:35-11:55 Kevin Obrejan (Japan Atomic Energy Agency)
「Numerical study of impurity transport using the code GT5D」

11:55-13:20 昼食

・セッション6 (座長: 市口 勝治)

- 13:20-13:50 (招待) 山口 裕之 (核融合科学研究所)
「GNET コードによる NBI 高速イオン解析の進展」
- 13:50-14:10 井上 静雄 (量子科学技術研究開発機構)
「ロックトモード制御の非線形 MHD シミュレーション」
- 14:10-15:15 報告と議論 (司会: 横山 雅之・核融合科学研究所)
石黒静児 (核融合科学研究所) 「HPCI 関連報告」
洲鎌英雄 (核融合科学研究所) 「JIFT 関連報告」
宮戸直亮 (量子科学技術研究開発機構) 「IFERC-CSC 関連報告」
三浦英昭 (核融合科学研究所) 「プラズマシミュレータ関連報告」
藤堂 泰 (核融合科学研究所) 「large ジョブ利用審査の導入について」

15:15 閉会

(*多治見駅行きバス 15:26、16:46、17:25 発)

【ポスター発表一覧】

番号	氏名	所属	発表題目
P-1	三浦 英昭	核融合科学研究所	エッジプラズマの交換型・テアリング不安定性の遷移についての拡張 MHD シミュレーション
P-2	中村 浩章	核融合科学研究所	ファズ構造タングステンへの電磁波応答の FDTD シミュレーション
P-3	藤原 進 (代理：中村浩章)	京都工芸繊維大学	ヘリウム3への壊変による高分子材料および DNA の構造変化
P-4	市口 勝治	核融合科学研究所	ヘリオトロンプラズマでの交換型モードと巨視的フローの相互作用に対する3次元数値解析
P-5	菅野 龍太郎	核融合科学研究所	ドリフト運動論方程式に基づく不純物輸送シミュレーションコード開発
P-6	陰山 聡	神戸大学	球内部の MHD 緩和シミュレーションとその in-situ 可視化
P-7	佐竹 信一	東京理科大学	高レイノルズ数乱流の直接数値計算
P-8	山口 敬済	山形大学	等価回路モデルによる HTS 内の遮蔽電流密度解析
P-9	清水 雅樹	大阪大学	チャンネル流における2方向乱流の開始
P-10	斎藤 誠紀	鋼路工業高等専門学校	炭素壁水素リサイクリングの分子動力学計算
P-11	横山 雅之	核融合科学研究所	統計手法に基づく核融合プラズマ熱輸送モデリングの試み
P-12	佐々木 真	九州大学	プラズマ回転駆動不安定性におけるスパイラス構造の形成
P-13	金子 貢士	兵庫県立大学	VR 装置による In-Situ 可視化結果の表示
P-14	Yang Jingyuan	名古屋工業大学	パッシブベクター乱流の大規模シミュレーションと統計解析
P-15	樋田 美栄子	核融合科学研究所	高速イオンが励起するイオンサイクロトロン波と低域混成波の粒子シミュレーション
P-16	Amany Moustafa Gouda	Nagoya University	Plasma Simulation Analysis for Formation Mechanism of Periodic Nanograting structure by Laser pulses
P-17	福山 淳	京都大学	積分形誘電率テンソルによる不均一プラズマ中の運動論的波動伝播解析
P-18	宇佐見 俊介	核融合科学研究所	磁気リコネクションにおけるイオン加熱のポロイダル・トロイダル磁場依存性
P-19	前山 伸也	名古屋大学	プラズマ乱流マルチスケール相互作用の抽出とモデル化
P-20	石黒 静児	核融合科学研究所	非接触プラズマ生成の PIC シミュレーション
P-21	凌 大河	京都大学	LHD 型核融合炉の統合シミュレーションコード TASK3D による検証
P-22	登田 慎一郎	核融合科学研究所	ヘリカルプラズマにおけるジャイロ運動論解析を用いた輸送モデリング
P-23	藤田 慶二	総合研究大学院大学	Global effect on the variation of ion density and electrostatic potential
P-24	佐竹 真介	核融合科学研究所	Magnetic shear and finite-orbit-width effects on the neoclassical toroidal viscosity
P-25	日下 星野	名古屋大学	電子温度勾配乱流に対するイオンの非断熱効果
P-26	森本 純毅	総合研究大学院大学	LHD における高速イオン損失による壁熱負荷の定量的評価

図 4.1.2-5 平成 30 年度プラズマシミュレータシンポジウムのプログラム (3/4)

P-27	Wang Hao	核融合科学研究所	Simulation of energetic particle driven geodesic acoustic mode channeling in the Large Helical Device
P-28	Wang Jialei	Dalian University of Technology	Linear and nonlinear simulations of Alfvén eigenmodes destabilized by energetic ions and electrons
P-29	藤堂 泰	核融合科学研究所	アルフベン固有モードバーストを発生させる高速イオン臨界分布
P-30	沼波 政倫	核融合科学研究所	運動論に基づくヘリカルプラズマの粒子輸送シミュレーション研究
P-31	三好 隆博	広島大学大学院	フォースフリー磁場に対する高速磁気リコネクション
P-32	水口 直紀	核融合科学研究所	低アスペクト比逆磁場ピンチにおけるヘリカル構造形成過程のMHDシミュレーション
P-33	Adulsiriswad Panith	Kyoto University	Study of Energetic Particle-driven Magnetohydrodynamic (MHD) Instabilities in Heliotron J Plasmas by MEGA, a full-MHD-particle hybrid simulation code
P-34	石澤 明宏	京都大学	大域的電磁ジャイロ運動論シミュレーションコード開発
P-35	森下 侑哉	京都大学	データ同化手法による LHD プラズマ解析
P-36	長谷川 裕記	核融合科学研究所	プラズマファイラメントによる径方向不純物イオン輸送の粒子シミュレーション
P-37	伊藤 淳	核融合科学研究所	MHD 平衡・安定性理論の拡張に関する数値解析
P-38	前田 涉吾	京都大学	無次元量入力ニューラルネットワークを用いた LHD プラズマの熱輸送モデリング
P-39	佐藤 雅彦	核融合科学研究所	LHD プラズマにおけるバレーニングモードの運動論的 MHD シミュレーション
P-40	平吹 勇司	山形大学	断層画像データから 3D ボリュームトリックモデルの再構成
P-41	西岡 賢二	名古屋大学	プラズマシミュレータにおける、モーメント分離法を用いたジャイロ運動論的シミュレーションの高効率化
P-42	LYU JING	東北大学	プラズマ気液界面における構造形成機構のシミュレーション
P-43	岩田 宗也	群馬大学	シミュレーションによるホロー陰極と非断熱性トラップを応用したイオン源の開発
P-44	浦野 貴弘	群馬大学	外部磁場によって制御された磁場反転配位プラズマのハイブリッドシミュレーション
P-45	小寺 隆聖	京都大学	トカマクにおける高エネルギービームの局所分布とその D-D 核融合反応率への影響
P-46	田 光江	情報通信研究機構 電磁波研究所	高速太陽風予測のためのシミュレーションシステムの開発
P-47	福田 琢也	宇都宮大学	高強度超短パルスレーザーを用いた高出力テラヘルツ波発生
P-48	文 一樹	大阪大学	ヘリウム拡散および凝集過程の金属比較シミュレーション
P-49	城崎 知至	広島大学	相対論レーザープラズマ相互作用による高速点火駆動用ビーム生成とその輸送
P-50	沼田 龍介	兵庫県立大学	2次元乱流磁気リコネクションのジャイロ運動論シミュレーション
P-51	西田 圭佑	京都大学	太陽フレアの 3次元 MHD シミュレーション
P-52	大石 輝希	東京大学	Reduced simulation model を用いた bump-on-tail problem のシミュレーション研究

図 4.1.2-5 平成 30 年度プラズマシミュレータシンポジウムのプログラム (4/4)

プラズマシミュレータシンポジウム 2019 (PSS2019)

日時： 2019年9月19日(木) 9:10-17:15 および 9月20日(金) 9:10-15:00

場所： 岐阜県土岐市下石町 322-6

自然科学研究機構 核融合科学研究所 管理棟 4階第1, 第2会議室

9月19日(木) (*バス：研究学園都市センター着 8:27、8:55着)

9:10-9:15 所長挨拶

9:15-9:30 総主幹報告(洲鎌研究総主幹)

・セッション1(座長：佐竹) [マイク：石崎、山口]

9:30-10:00 (招待) 相羽信行(QST) 「エッジローカライズモード発生条件に関する近年の研究の進展」

10:00-10:30 (招待) 佐藤雅彦(核融合研) 「ヘリカルプラズマにおける圧力駆動型 MHD 不安定性の運動論的 MHD シミュレーション」

10:30-10:45 休憩

・セッション2(座長：菅野) [マイク：登田、松岡]

10:45-11:15 (招待) 成田絵美(QST) 「機械学習を活用したジャイロ運動論解析に基づく輸送モデリング」

11:15-11:35 (口頭) 沼波政倫(核融合研) 「多成分ヘリカルプラズマの輸送現象に対する大規模シミュレーション研究」

11:35-11:55 (口頭) 今寺賢志(京大) 「熱源駆動型乱流における内部輸送障壁形成に対する運動論的電子効果」

11:55-13:20 昼食

・セッション3(座長：宇佐見) [マイク：森高、長谷川]

13:20-13:50 (招待) 沼田龍介(兵庫県立大) 「乱流磁気リコネクションにおける位相混合とプラズマ加熱」

13:50-14:20 (招待) 小野寺直幸(JAEA) 「GPU スーパーコンピュータを用いた格子ボルツマン法によるリアルタイム風況解析」

14:20-14:40 (口頭) 佐竹真介(核融合研) 「多粒子種新古典輸送コードの開発」

14:40-16:10 ポスターセッション

16:10-17:30 ポスター会場(主に第二会議室) 撤収作業

17:45-19:00 懇親会(会場 管理棟 1F 土岐っ子) *バス：多治見行きバス 19:20 発

p. 1

9月20日(金) (*バス: 研究学園都市センター着 8:27、8:55着)

・セッション4 (座長: 鈴木) [マイク: 伊藤篤史、高山]

9:10-9:40 (招待) 星野一生(慶応大) 「原型炉ダイバータプラズマのシミュレーション研究」

9:40-10:00 (口頭) 前山伸也(名大) 「射影演算子法によるプラズマ乱流マルチスケール相互作用の抽出」

10:00-10:20 (口頭) Obrejan Kevin (JAEA) 「Influence of the normalised ion gyroradius on collisional transport of impurities in GT5D simulations」

10:20-10:35 休憩

・セッション5 (座長: 中村) [マイク: 河村、王]

10:35-11:05 (招待) 藤原進(京都工芸繊維大学) 「高分子・生体分子への置換トリチウムの壊変効果に関する分子シミュレーション」

11:05-11:35 (招待) 山口敬済(総研大) 「等価回路モデルを用いた軸対称高温超伝導膜中の遮蔽電流密度解析: 超伝導リニア加速システムへの応用」

11:35-13:20 昼食

・セッション6 (座長: 大谷) [水口、伊藤淳]

13:20-13:40 (口頭) 渡邊威(名工大) 「固体粒子群による乱流変調の大規模数値解析」

13:40-14:00 (口頭) 陰山聡(神戸大) 「全方位動画に基づく新しい可視化手法」

14:00-15:00 報告と議論(司会: 藤堂) [水口、伊藤淳]

石黒静児(核融合科学研究所) 「HPCI 関連報告」

洲鎌英雄(核融合科学研究所) 「JIFT 関連報告」

宮戸直亮(量子科学技術研究開発機構) 「IFERC-CSC 関連報告」

三浦英昭(核融合科学研究所) 「プラズマシミュレータ関連報告」

15:10 閉会

*多治見行きバス 15:26、16:46、17:25 発

【ポスター発表一覧】

番号	氏名(敬称略)	所属	発表題目
P-1	三浦 英昭	核融合科学研究所	エッジプラズマの交換型・テアリング不安定性の成長と構造形成についての拡張MHDシミュレーション
P-2	後藤 晋	大阪大学	乱流中の秩序渦の階層とその維持機構
P-3	佐々木 真	九州大学応用力学研究所	ケルビンヘルムホルツ乱流におけるリミットサイクル振動
P-4	高橋 弘通	山形大学大学院理工学研究科	大規模高速多重極境界要素法の精度劣化の原因とその改善法
P-5	前田 隼人	山形大学大学院理工学研究科	プラズマ加熱用電磁波のFDTDシミュレーション：縮小モデルの妥当性
P-6	堀内 利得	核融合科学研究所	球形トカマク型プラズモイドの合体に関する粒子シミュレーション
P-7	菅野 龍太郎	核融合科学研究所	不純物輸送のグローバルモデリング
P-8	石黒 静児	核融合科学研究所	非接触プラズマへの熱パルス流入に伴う電位構造形成
P-9	長谷川 裕記	核融合科学研究所	プラズマプロブダイナミクスにおける粒子運動の3次元効果
P-10	大谷 寛明	核融合科学研究所	PASMOコードの最適化
P-11	藤田 慶二	総研大	Global effects on the variation of ion density and electrostatic potential on the flux surface
P-12	宇佐見 俊介	核融合科学研究所	駆動型磁気リコネクション下流で形成されるイオンの異常速度分布関数

p. 3

図 4.1.2-6 令和元年度プラズマシミュレータシンポジウムのプログラム (3/6)

P-13	登田 慎一郎	核融合科学研究所	ヘリカルプラズマにおける簡約化モデルを用いた乱流輸送に対する帯状流や捕捉電子の影響に関する研究
P-14	大野 暢亮	兵庫県立大学社会情報科学部	In-site 可視化のためのツール開発
P-15	ISLAM MD SHAHINUL	核融合科学研究所	Numerical simulation study of hydrogen gas puffing on the divertor plasma parameters by the LINDA and the PIC code
P-16	樋田 美栄子	核融合科学研究所	斜め衝撃波による陽電子加速における捕捉電子の効果
P-17	小谷 翼	京都大学大学院理学研究科	高速イオンによる低域混成波不安定性とその非線形発展に関する粒子シミュレーション
P-18	中村 浩章	核融合科学研究所	壁材での水素原子分子のリサイクリング
P-19	齋藤 誠紀	山形大学	置換トリチウムの β ; beta ; 壊変が引き起こすDNA 損傷の分子素過程の解明
P-20	山口 裕之	核融合科学研究所	ヘリカルおよびトカマクプラズマにおける非一様高速イオン分布による空間電位の形成
P-21	糟谷 直宏	九州大学応用力学研究所	トラスプラズマにおける揺動数値診断
P-22	WANG Jialei	Dalian University of Technology	Simulations of Alfvén Eigenmode Destabilized by Energetic Electrons and Energetic Electron Effects on Energetic-Ion Driven Alfvén Eigenmode
P-23	吉田 恭	筑波大学数理物質系	量子流体乱流の中間波数領域におけるスペクトル
P-24	石田 祐太郎	京都大学大学院エネルギー科学研究科	負磁気シアトカマクにおける運動論的MHD不安定性の非線形飽和機構
P-25	大石 輝希	東京大学新領域創成科学研究科	Effects of beam injection energy on interchange modes in the Large Helical Device plasmas

p. 4

図 4.1.2-6 令和元年度プラズマシミュレータシンポジウムのプログラム (4/6)

P-26	水口 朋子	京都工芸繊維大学	メソポーラスシリカ中の水に関する反応分子動力学計算
P-27	前島 優貴	名古屋大学大学院理学研究科	トカマクプラズマのベデスタル領域で発生する不安定モードについての解析
P-28	水口 直紀	核融合科学研究所	高ベータトラス中の3次元構造の形成過程
P-29	渡邊 智彦	名古屋大学大学院理学研究科	電子温度勾配乱流の飽和状態とイオンの運動論的効果
P-30	藤田 宜久	立命館大学	FDTD法を用いた凹凸面モデルにおける光学特性の調査
P-31	LI HAOLUN	京都工芸繊維大学工学科学研究科	置換トリチウムのベータ崩壊によるポリエチレン構造変化に関する粗視化分子動力学シミュレーション
P-32	三好 隆博	広島大学大学院理学研究科	相対論的流体力学方程式に対する高次精度衝撃波捕獲法の開発
P-33	WANG Hao	核融合科学研究所	The systematic investigation of energetic particle driven geodesic acoustic mode channeling in LHD
P-34	清水 雅樹	大阪大学大学院基礎工学研究科	チャンネル流における持続乱流開始と空間1次元のdirected percolationとの関連
P-35	富松 修平	九州大学大学院総合理工学府	PLATO トカマクにおける抵抗性バルーニング不安定性のシミュレーション
P-36	市口 勝治	核融合科学研究所	LHD プラズマの安定性に対する正味電流の影響
P-37	小川 智也	北里大学一般教育部	解適合格子 MHD コードの3次元領域分割による並列化とパフォーマンス
P-38	佐竹 信一	東京理科大学基礎工学部電子応用工学科	高レイノルズ数 MHD 壁面剪断乱流に関する研究

p. 5

図 4.1.2-6 令和元年度プラズマシミュレータシンポジウムのプログラム (5/6)

P-39	荒木 圭典	岡山理科大学工学部	HMHD 乱流の正準モード展開でのエネルギー輸送
P-40	藤堂 泰	核融合科学研究所	磁場閉じ込めプラズマの運動論的 MHD シミュレーション
P-41	伊藤 淳	核融合科学研究所	流れをもつ平衡の MHD モデル間比較
P-42	Idouakass Malik	核融合科学研究所	Numerical investigation of energetic particle driven interchange mode in LHD
P-43	下村 一哉	九州大学大学院総合理工学 学府	統合輸送コード TASK における不純物解析モジュールの開発
P-44	森高 外征雄	核融合科学研究所	大域的ジャイロ運動論粒子コード XGC-S を用いた大型ヘリカル装置における線形 ITG シミュレーション
P-45	森下 侑哉	京都大学大学院工学研究 科	データ同化を用いた統合輸送シミュレーション
P-46	小寺 隆聖	京都大学工学研究科	トカマクにおける高エネルギービームの局所分布の D-D 核融合反応率への影響
P-47	前田 涉吾	京都大学大学院工学研究 科	ニューラルネットワークを用いた LHD プラズマの熱輸送モデリング
P-48	井戸村 泰宏	日本原子力研究開発機構	ITG 乱流における水素同位体効果の full-f ジャイロ運動論シミュレーション
P-49	松岡 清吉	核融合科学研究所	大域的 Full-f ジャイロ運動論コードを用いた多粒子新古典輸送シミュレーション
P-50	伊藤 篤史	核融合科学研究所	二原子衝突向けのポテンシャルモデルの再考

p. 6

図 4.1.2-6 令和元年度プラズマシミュレータシンポジウムのプログラム (6/6)

4.1.3 大学との共同研究

4.1.3.1 名古屋大学・九州工業大学・京都工芸繊維大学・物質材料研究機構・理化学研究所・同志社大学・富山大学・分子科学研究所との共同研究

・トリチウムのヘリウム 3 への壊変による DNA 構造変化のシミュレーション

本研究は、蛍光顕微鏡及び電子顕微鏡を用いた DNA 一分子観察法により、トリチウム（三重水素、 ^3H ）による DNA 二本鎖切断の機構（切断の速度論、トリチウム濃度依存性、直接作用と間接作用の割合等）を定量的に明らかにすることを旨とし、平成 29 年度及び 30 年度には自然科学研究機構分野間連携事業のサポートを受け、富山大波多野教授を代表に、NIFS、九工大、同志社大、静岡大、京都工織大、山形大、分子研の共同研究として進めている。

さて、トリチウムに特有の壊変効果として、DNA 分子中の軽水素に置換したトリチウムが ^3He に β 壊変することによる化学結合の切断がある。本研究では、この化学結合の切断に伴う DNA 部分構造の変化を、分子動力学（MD）法を中心とする計算機シミュレーションにより明らかにし、壊変の二本鎖切断への寄与を評価する。福島第一原子力発電所廃炉作業においてトリチウムを含む大量の汚染水の処理が問題となっており、希釈海洋放出等の処理が現実味を帯びつつある。汚染水中のトリチウムが大きな社会的問題となれば、トリチウムを燃料とする核融合炉の研究推進に致命的な悪影響を及ぼす恐れがある。一般市民が不安視するのは、癌の発生や遺伝的影響等の確率的影響である。これらは、放射線による DNA 損傷、主には二本鎖切断に起因する。すなわち、低線量放射線による DNA 二本鎖切断が定量的に解明され、他のリスクと容易に比較できるようになれば、市民の不安を和らげ、トリチウムの社会問題化を防ぐことにつながる。DNA 一分子観察法による DNA 二本鎖切断の評価は、放射線のみならず、超音波や光など、他の刺激による DNA 切断 [4.1.3.1-1] にも容易に適応でき、放射線と、一般市民にとってより身近な刺激とのリスクを比較するのに適している。

具体的な DNA 構造変化をシミュレーションするための準備として、まずは 3,000 個のメチレン（ $-\text{CH}_2-$ ）基からなる鎖状分子の united atom モデルを取り上げ、汎用ソフト LAMMPS を使って分子動力学（MD）計算を行うことにより、構造変化過程の解析を行った [4.1.3.1-2, 3]。具体的には、まず、一本の鎖状分子を 800 K から 300 K まで冷却し、配向秩序構造の形成を確認した。次に、この配向秩序構造から、一定の比率でランダムに水素を取り除いた。全炭素数に対する取り除いた水素数の比は 0.001, 0.01, 0.1, 0.5 とした（取り除いた水素数はそれぞれ 3, 30, 300, 1500）。その後、300 K におい

て MD シミュレーションを 1,000,000 ステップ (1ns) 実行した。続いて、300 K から 800 K まで、500 K/10 ns の加熱速度で MD シミュレーションを 10,000,000 ステップ (10ns) 実行し、構造変化過程を解析した。その結果、300 K において、水素数の比が大きいほど配向秩序パラメータが小さくなることが分かった。また、温度の上昇とともに、高分子が配向秩序構造から糸まり状の無配向構造へと変化した。さらに、水素数の比が大きいほど、無配向構造への転移温度が下がることも明らかになった。

次に、DNA の局所的な構造変化については、DNA の特徴的な繰り返し構造 (TTAGGG、ただし T はチミン、A はアデニン、G はグアニン) とそこに局在するタンパク質からなるテロメアを取り上げ、汎用ソフト USCF Chimera を使って DNA のみを抽出した [4.1.3.1-4]。取り出した DNA 中のグアニンが有する水素の一部を He に置換した際の DNA 構造変化を NAMD (Nanoscale Molecular Dynamics) を使って分子動力学計算した。具体的には、34 個の塩基分子 (グアニンは 8 分子) と水分子からなる体系 ($8 \times 8 \times 12$ nm) を構築し、水素を He に置換したグアニン (図 4.1.3.1-1) を 0 から 8 個の置換し、DNA の構造変化を MD シミュレーションした。置換 He 数の増大に伴い、DNA 水素結合が弱まることが分かった (図 4.1.3.1-2)。また、このような構造変化を原子位置の平均二乗偏差 (Root Mean Square Deviation, RMSD) で定性的に追跡できることを見出した。

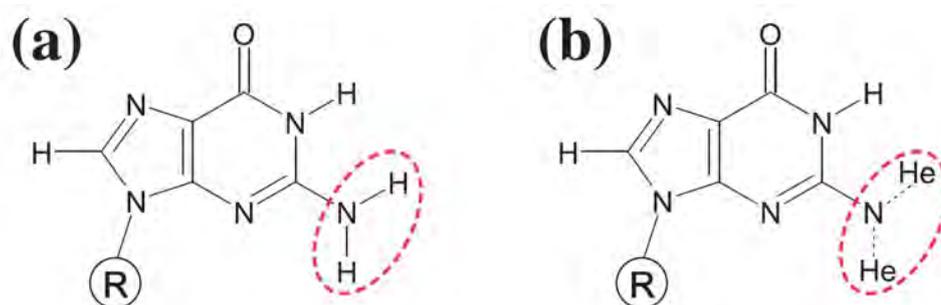


図 4.1.3.1-1 (a) もともとのグアニンの構造。(b) 水素結合をつかさどる 2 つの水素原子が、 ^3He に置き換えられた構造。

[4.1.3.1-1] Y. Hatano, Y. Konaka, H. Shimoyachi, T. Kenmotsu, Y. Oya, H. Nakamura, Fusion Eng. Des., (2018) (accepted).

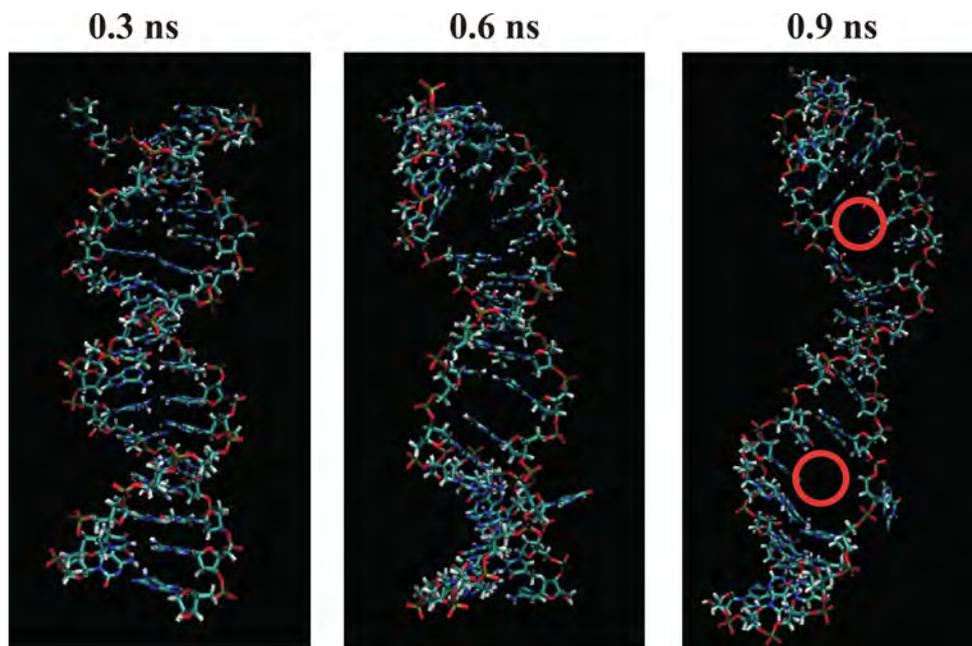


図 4.1.3.1-2 分子動力学法を用いて計算した DNA テロメア構造の時間発展。グアニン中の16個の H 原子が、 ^3He に置き換えられている。系の温度は310 Kに設定されている。

[4.1.3.1-2] S. Fujiwara, H. Nakamura, H. Li, H. Miyanishi, T. Mizuguchi, T. Yasunaga, T. Otsuka, Y. Hatano and S. Saito, *J. Adv. Simulat. Sci. Eng.*, **6(1)** (2019) 94.

[4.1.3.1-3] H. Li, S. Fujiwara, H. Nakamura, T. Mizuguchi, T. Yasunaga, T. Otsuka, T. Kenmotsu, Y. Hatano, S. Saito, *Plasma Fus. Res.*, **14** (2019) 3401106.

[4.1.3.1-4] H. Nakamura, H. Miyanishi, T. Yasunaga, S. Fujiwara, T. Mizuguchi, A. Nakata, T. Miyazaki, T. Otsuka, T. Kenmotsu, Y. Hatano and S. Saito, *Jpn J. Appl. Phys.*, (2019) (accepted).

4.1.3.2 名古屋大学・九州大学・九州工業大学との共同研究

・ヘリウムプラズマで誘起されるフェーズ構造光学応答の解明

名古屋大学大野研究室では、梶田准教授を中心に、タングステンフェーズ構造の産業利用を想定し、光学特性の測定を行い、同構造の可視光領域での光学吸収率がほぼ 100% になるという報告を行っていた。このフェーズ構造化による吸収率増加のメカニズムを解明するため、数値実験炉研究プロジェクト PWI グループでは、FDTD シミュレーションを用いた。この際に、フェーズ構造の実際の空間構造情報を得るために、九州大学吉田名

誉教授のご主導で、名古屋大学大野研究室とNIFS 矢嶋助教らの協力でタングステンファズ構造を作成してもらった。そして、でき上がったファズ構造を、九州工業大学安永教授により電子顕微鏡を用いて3次元構造の測定し、世界初でファズ構造の3次元空間構造データを得ることができた。でき上がった構造をコンピュータ上に取り込み、FDTDシミュレーションを行い、電磁波伝搬の詳細な振る舞いを定量的に得ることができた。詳細は、本報告書 3.3.4 節を参照のこと。

4.1.3.3 信州大学・山形大学・京都大学との共同研究

・分子動力学に基づく水素プラズマ対向壁リサイクリングモデルの構築による中性粒子輸送コードの精密化と LHD 発光線解析

デタッチプラズマの機構解明には、中性粒子の輸送の解明が必要となる。信州大澤田教授は周辺での水素分子などの中性粒子輸送解析コードの開発を行ってきた。一方、周辺部でのプラズマ情報は、数値実験炉研究プロジェクト周辺プラズマグループにより、EIRENE を計算できる段階にあった。

また、これらのコードと衝突輻射モデルを組み合わせて、分光情報まで求め、更に、得られた分光情報を、LHDでNIFS小林准教授・京大蓮尾教授らの測定との比較まで構想を練っていた。

しかし、この一連の研究の中で、壁から発生する中性粒子の情報が著しく不足していた。そこで、数値実験炉研究プロジェクト PWI グループと山形大斎藤准教授で協力し、壁から発生する水素原子分子の情報を分子動力学法を用いて求めることを目指し、現時点で、試行回数は未だ不十分であるが、データ収集の目的を立てることができた。

このデータを用いて、一連のシミュレーションを組み合わせて、中性粒子として水素原子分子の LHD 周辺部での分布を求めることができた。

詳細は、本報告書 3.3.4 節を参照のこと。

4.1.3.4 京都工芸繊維大学との共同研究

・逆磁場ピンチ (RFP) におけるヘリカル構造形成の機構解明

複数の逆磁場ピンチ (Reversed-Field Pinch; RFP) 実験装置において、揺動成分が一つのモードに集中し、全体として比較的閉じ込めの良いヘリカル構造が遷移的に現れる現象が観測されており、また、理論的にもそういった配位の存在は予測されており、準単一ヘリシティ (Quasi-Single Helicity; QSH) 状態と呼ばれている。このQSH状態への自発的な遷移過程について、MIPS コードによる非線形 MHD シミュレーションを行

い、機構解明を目指した。初期的なシミュレーション結果 [4.1.3.4-1] から、ヘリカル構造の形成段階において、そら豆型かつホローである特徴的なポロイダル圧力分布が出現することが予測されていたが、近年になって京都工芸繊維大学の低アスペクト比 RFP 実験装置 RELAX において、軟 X 線画像等で、同様の圧力分布が観測されるようになった。

そこで本研究では、京都工芸繊維大学の実験グループと連携し、実験との詳細な比較を行いつつ、モデリングを深化させた。MIPS コードは、対象となる現象の大規模な電流分布の変化に対応し、正味の電流の時間変化を計算するようにし、また境界条件は、実験装置に合わせて、プラズマ-真空境界の近傍に設置された導体シェルを模擬した固定境界を置いた。計算の初期値は、RELAX 実験観測結果から再構成された数値平衡配位及び、それを基にしたモデル数値配位を用い、種々の条件に合わせて広くパラメータ依存性を調べた。

計算は装置を模擬した全トーラス体系を設定し、計算の全域にわたり一様の抵抗及び粘性による散逸項 ($Re = 10^4 \sim 10^6$) を仮定し、数百 Alfvén 時間の発展を解いた。RELAX 装置 (アスペクト比: $A \sim 2$) の実験条件においては、 $n = 4 \sim 5$ (n はトロイダルモード数) の、また RFX 装置 ($A \sim 4$) の条件では、 $n = 4 \sim 5$ のモードが支配的となり、複数の電流駆動モードが成長し、トーラス全体をヘリカル状に変形させた。これらの主モード数は既存の理論モデルとも、観測結果とも一致する。不安定性の変位が大きくなると、非線形的ふるまいが顕著となる。複数のモードの同時成長により流れは均一とはならず、トーラス状で流れの集中する有理面の近傍において、有限の幅を持って乱れた磁気面が存在し、それを介して磁気再結合が起きる様子が明らかにされた。再結合の結果、コア領域の高い圧力が有理面に沿ってそら豆状に流出し、結果的に圧力分布はホローなものとなり、これが実験でも観測されている、特徴的な圧力分布を形成することが明らかになった (図 4.1.3.4-1) [4.1.3.4-2]。RFX の体系においても、若干の機序の差異はあるものの、同様の圧力分布が生成することから、これについても実験との比較が待たれる。また、QSH 状態については、MHD 緩和の観点からも、種々のモデルが提唱されており、これらとの比較も進めている。

[4.1.3.4-1] N. Mizuguchi, A. Sanpei, S. Fujita, K. Oki, H. Himura, S. Masamune and K. Ichiguchi, "Modeling of Formation of Helical Structures in Reversed-Field Pinch", Plasma and Fusion Research, Vol.7, 2403117 (2012).

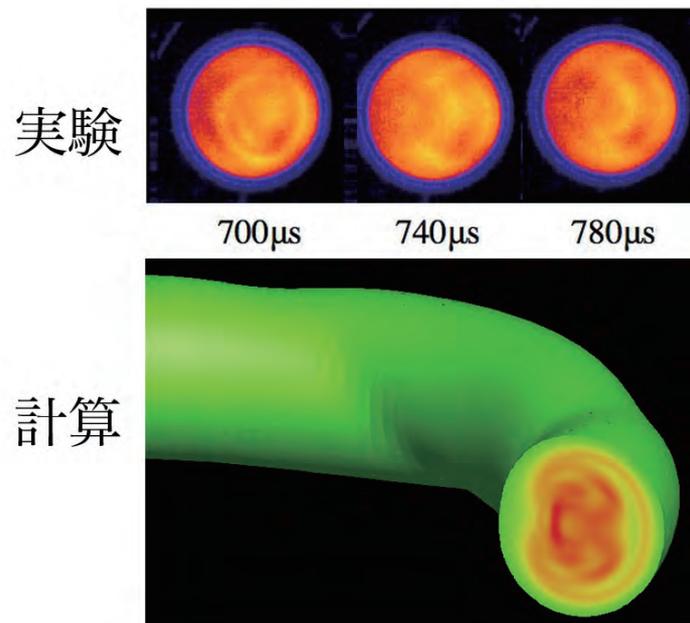


図 4.1.3.4-1 RFP の QSH 状態形成時に現れる特徴的な圧力分布（上:RELAX 装置における SXR 計測結果、下:MIPS によるシミュレーション結果）

[4.1.3.4-2] N. Mizuguchi, A. Sanpei, T. Okamoto, S. Masamune, K. Ichiguchi and Y. Todo, “Numerical Modeling of Pressure Redistribution in the Single Helicity States of Reversed-Field Pinch”, The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Nov. 19-22, 2018, Toki, P2-06.

4.1.3.5 大阪大学との共同研究

・ヘリウムプラズマ照射下のバブル形成に関する金属比較シミュレーション研究

ヘリウムプラズマ照射によってタングステン表面ではヘリウムバブルやファズ構造が形成されることが分かっているが、タングステン以外の金属についてもヘリウムバブルやナノ構造が掲載されることが実験的に確かめられてきた。これを理論的に解明すべく、第一原理計算(密度汎関数理論)及び動的モンテカルロ (KMC) 法を利用したシミュレーション研究を、大阪大学上田研究室との共同研究として実施した。期間は平成28年度から平成30年度までの3年間で、大学院博士前期課程の大森晃平氏、文一樹氏の2名の修士の学位論文の研究となった。

まず OpenMX コードを用いて、タングステン、タンタル、ニオブ、モリブデン中で

のヘリウム原子の結合エネルギーをDFTに基づいて精密に算出した。この結果、どの金属でも凝集エネルギーが正となり、すなわちヘリウムは自己凝集する傾向にあることが分かった。しかし、タングステンとモリブデンに比べ、タンタルとニオブでは凝集エネルギーが相対的に低いことも分かった。これは高温で凝集しにくいことを示唆している。

次に、OpenMXで算出した結合エネルギーから、KMCの拡散と凝集のモデルを作成した。それを用いて照射下の環境を模擬したシミュレーションを行った。設定された照射フラックスに合わせた頻度で表面から一定の深さに定期的にヘリウム原子をドーピングする。一方で、ヘリウム原子が拡散の末に表面までたどり着いたら、真空に抜けたものとして系から削除する。照射頻度は実験の入射フラックスと同じ桁の程度に合わせて、温度も300Kから2500K程度まで色々と変えて凝集傾向を調べた。その結果、タングステン及びモリブデンでは、高温でもヘリウムバブルが形成される。一方、ニオブ及びタンタルでは、高温になるとヘリウム原子がバブルからバルクへ脱出し易く、バブルができなくなることが分かってきた。これは、結合エネルギーが低いために、高温時にバブルから脱出する確率が無視できないところまで上がることが原因と考えられる。同理由で、タングステン、モリブデンでも、温度を2500Kまで上げるとバブルはできにくくなる。このように、バブルの形成にも温度上限があることがシミュレーションから示唆された。DFT及びKMCの計算は、ともにPlasma Simulatorによって高速に実行することができた。

本研究成果は以下の論文3篇として出版された [4.1.3.5-1-3]。

- [4.1.3.5-1] Y. Ueda, N. Yamashita, K. Omori, H. T. Lee, K. Imano, A. M. Ito, "Systematic study of He induced nano-fiber formation of W and other period 6 transition metals", *Journal of Nuclear Materials* **511**(2018) pp. 605-609.
- [4.1.3.5-2] K. Omori, A. M. Ito, I. Mun, N. Yamashita, K. Imano, H. T. Lee, and Y. Ueda, "First principle calculations of energy of agglomerated helium in the period 6 elements", *Nuclear Material and Energy*, **16**(2018) pp. 226-229.
- [4.1.3.5-3] K. Omori, A. M. Ito, K. Shiga, N. Yamashita, K. Imano, H. T. Lee, and Y. Ueda, "Comparison between helium plasma induced surface structures in group 5(Nb, Ta) and group 6 elements (Mo, W)", *Journal of Applied Physics*, **121**(2017) 155301.

4.1.3.6 慶應義塾大学との共同研究

・不純物を考慮した核融合周辺プラズマの数値モデリング

平成28年度より、核融合周辺プラズマ（コア周辺部、スクレープオフ層（SOL）、ダイバータ）を研究対象とし、1）その数値モデリング及びシミュレーションコードの高度化・統合化、2）不純物を含むプラズマ輸送（新古典及び乱流）過程の理解、3）1）、2）に基づくダイバータ板への熱及び粒子負荷の低減法の検討を目的として、共同研究を行っている。この共同研究により、慶應大及び核融合研で独立に行われてきた数値モデリング及び数値シミュレーションコードの開発について、頻繁な情報交換、研究作業会を行い、研究推進を加速させている。

共同研究成果の一つとして、例えば、周辺領域に発生するプラズマブロップによる不純物イオンの径方向輸送に対して2次元乱流モデルによる解析及び3次元PICシミュレーションを行い、不純物輸送の非拡散的特徴を明らかにした [4.1.3.6-1, 2]。

[4.1.3.6-1] T. Maeda, K. Tominaga, S. Yamoto, A. Hatayama, H. Hasegawa, and S. Ishiguro, “Analysis of the plasma blob formation/transport and its effects on impurity transport in the scrape-off layer regions”, *Contrib. Plasma Phys.* **58** (2018) 505

[4.1.3.6-2] T. Maeda, H. Hasegawa, S. Ishiguro, K. Hoshino, and A. Hatayama, “Effects of the Plasma Blob Nonlinear Formation/Transport on Impurity Transport in the SOL Regions”, *Plasma Fusion Res.* **14** (2019) 3403133

・ **IMPGYRO** コードによる **LHD** ダイバータ中のタングステン輸送モデリング

ITERのダイバータ材料が炭素からタングステンに変更されたことを契機に、金属不純物の挙動理解の必要性が高まっている。特にタングステンのような重金属は軌道幅が大きく、流体でなく運動論的な扱いが必要と考えられている一方、グローバルな不純物輸送コードは流体方程式によるものが主流である。本研究は不純物粒子を追跡する運動論的な輸送コードであるIMPGYROをLHDに適用し、3次元空間における輸送解析を可能にするものである。畑山（慶応）・星野（慶応）・田中（慶応学生）・森（慶応学生）・矢本（慶応学生・現量研機構）がIMPGYROの3次元空間への拡張、河村（核融合研）がEMC3-EIRENEによる背景プラズマ分布や壁形状の提供を行った。スパッタ

されたタングステン原子の直接再堆積過程が個々のダイバータ板の設置角度に強く依存する、局所的な堆積分布と、電離後にプラズマを通して再堆積する、よりグローバルな堆積分布の二つが得られた。それらの特徴を物理的に考察した成果について、17th Plasma Edge Theory 国際ワークショップ（アメリカ・UCSD）でポスター発表（星野）を行った。

4.1.3.7 群馬大学との共同研究

・球状トカマクへの小型トーラスプラズマ移送合体による燃料供給法の MHD シミュレーション

核融合発電の実現に向けて国際熱核融合実験炉 ITER の建設が進む中、核融合燃焼する高温プラズマの中心部へ燃料粒子を供給する新たな方法が求められている。従来のペレット入射や高速ガスジェットによる燃料供給では、プラズマの周辺部に燃料粒子が付与され燃焼プラズマの中心部へ到達できないためである。

本研究では、従来法と異なる新規な燃料供給法について、その実現可能性を検証する目的で電磁流体力学（MHD）シミュレーションを実行した。特に、外部磁気圧に対してプラズマ圧が1割程度と比較的高く、かつ輸送特性の良好な球状トカマクプラズマへの「合体燃料供給法」を検討した。小型トーラスプラズマを移送・衝突・合体させ、小型プラズマが有する燃料粒子を球状トカマクプラズマ中心部へ供給する新提案の方式である。

ST プラズマ（以下、主プラズマ）への小型トーラスプラズマ（以下、副プラズマ）移送合体過程の3次元 MHD シミュレーションを実施し、粒子供給効率を調べた。本シミュレーションにおけるプラズマの初期分布は、Grad-Shafranov 方程式の解を二つ軸方向に並べて配置し、初期加速用の外部コイル磁場を重畳することで副プラズマの移送をモデル化した。

シミュレーションの結果、図 4.1.3.7-1 に示すように、副プラズマが移送され主プラズマと衝突した後、吸収される合体過程が再現された。移送合体過程について以下の3点について知見が得られた。1) 主と副プラズマ間に働く力の体積平均を調べた結果、合体時の加速はプラズマ電流による引力が支配的であることが確認された。2) 移送過程において、主と副双方のプラズマ内部にポロイダル方向の回転流速が発生していることが明らかにされた。3) 移送の初期段階で、不安定性の発生が確認された。図 4.1.3.7-2 のように、磁力線を追跡しポアンカレマッピングによって磁気面構造を観測したところ、不安定性の発生と同時に磁気面構造が崩壊していることが判明した。主と副プラズマの磁力線が結合していることも確認された [4.1.3.7-1]。

不安定性の発生は、閉じた磁気面に捕捉されていたプラズマ粒子が磁気面構造の崩壊とともに損失し、開いた磁力線領域へ排出されるため、粒子供給の観点から好ましくない。不安定性の発生が合体现象を駆動しているかを確認するため、3次元的不安定性の発生がない2次元MHDシミュレーションを実行し、3次元シミュレーションとの比較を行った。この結果、2次元シミュレーションでも合体は確認できるため、必ずしも不安定性の発生が合体现象を駆動している訳ではないことが明らかになった。また、プラズマの電気抵抗率をパラメータとする複数の計算結果より、抵抗性バルーニング不安定性であることが示された。

以上の結果より、本研究のケースでは、抵抗性バルーニング不安定性の発生による磁気面構造の崩壊が起きているものの、再結合過程やローレンツ力による合体の促進といった合体燃料供給法で期待される現象の確認はなされた。バルーニング不安定性に対する安定平衡の研究を進めつつ、燃料供給効果の評価を行う意義は十分存在すると考えられる。

MHDシミュレーションでは、副プラズマに保持される粒子を主プラズマに供給する際の粒子供給効率を定量的に評価できない。主と副のどちらのプラズマに含まれる粒子であるかを、MHDモデルではラベリングできないからである。そこで、磁場の時間変化を逐次反映した粒子軌道計算を行うことで粒子供給効率を定量化したところ、本研究のケースでは最大で、副プラズマが初期に保持する30.5%に相当することが明らかにされた [4.1.3.7-2]。

[4.1.3.7-1] S. Koike, T. Takahashi, N. Mizuguchi, O. Mitarai, “MHD Simulation of Merging Fueling Method Used for ST Plasma”, Plasma and Fusion Research, Vol. 13, 1203008 (2018).

[4.1.3.7-2] S. Koike, T. Takahashi, N. Mizuguchi, O. Mitarai, “Simulation study on a merging core fueling technique for an advanced fuel fusion spherical tokamak reactor”, Fusion Engineering and Design, Vol. 136, 111 (2018).

4.1.3.8 東京大学・岡山理科大学との共同研究

・拡張MHDのLESのためのSGSモデル開発共同研究

LHDにおける短波長圧力駆動型（交換型、バルーニング）不安定性の飽和に関するシミュレーション研究の一環として、Large Eddy Simulation (LES) と呼ばれる手法の開

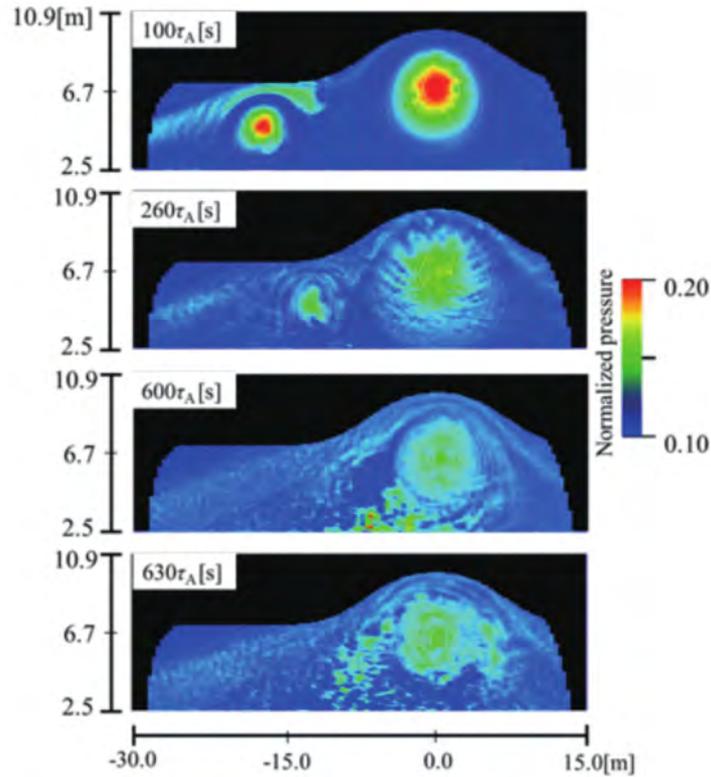


図 4.1.3.7-1 ST プラズマへの小型トーラスプラズマ移送合体の 3次元 MHD シミュレーションにおける、外部コイル立ち上げ完了 ($100 \tau_A$)、プラズマの衝突 ($260 \tau_A$)、プラズマの合体直前 ($600 \tau_A$)、プラズマの合体直後 ($630 \tau_A$) の各時点の $\theta = 0$ ポロイダル面の圧力及びポロイダル磁束の等値線分布。

発を進めている。この手法には、数値シミュレーションの空間解像度では表現しきれない、揺動の短波長成分が長波長成分に及ぼす影響をモデル化する必要がある。このモデルは、sub-grid-scale (SGS) モデルと呼ばれる。

拡張 MHD の LES はこれまでに試みられたことのないアプローチであり、LES に必要とされる SGS モデルも開発されていなかったため、MHD 乱流の LES について知見を持つ、東京大学生産技術研究所の半場教授と共同研究を行い、SGS モデルの開発を進めた。この共同研究によって開発された SGS モデルは、一様等方 Hall MHD 乱流の LES [4.1.3.8-1] によるモデル検証 (内容については基礎物理研究の項を参照) を経て、LHD の短波長圧力駆動型不安定性に関する LES に応用され (内容については、MHD 平衡と不安定性の項を参照)、所期の目標を達成することができた [4.1.3.8-2,3]。この研究は現在、磁力線によるプラズマの非等方性を反映した改良などを進め、より正確

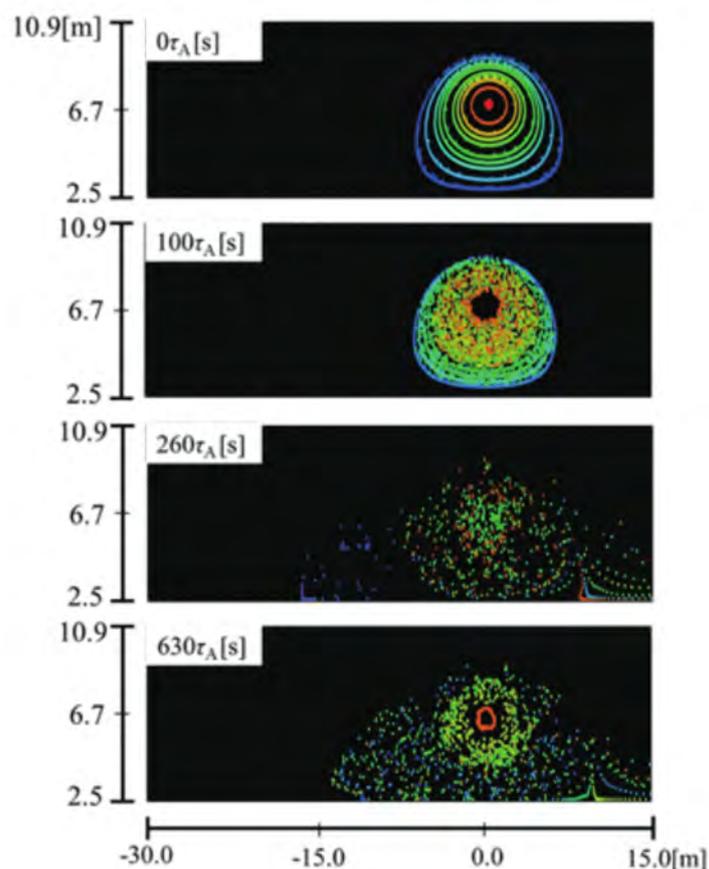


図 4.1.3.7-2 ST プラズマへの小型トーラスプラズマ移送合体の3次元MHDシミュレーションにおける、初期分布 ($0 \tau_A$)、外部コイル立ち上げ完了 ($100 \tau_A$)、プラズマの衝突 ($260 \tau_A$)、プラズマの合体直後 ($630 \tau_A$) でのポアンカレマッピング。色が赤に近いほど開始点がプラズマ中心に近い。

に短波長圧力駆動型不安定性が長波長成分に及ぼす影響を、従来モデルよりも精度よく反映することを目指して進められている [4.1.3.8-4]。

この研究は、核融合科学研究所一般共同研究（理論共同研究、プラズマシミュレータ共同研究）に加え、科学研究費補助金・基盤研究(C)「超大レイノルズ数MHD不安定性・乱流シミュレーションのための微視的数値モデル開発」（課題番号：17K05734）、及び学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点（JHPCN）共同研究などの支援に基づいて行われている。

- [4.1.3.8-1] H. Miura, K. Araki, and F. Hamba, “Hall effects and sub-grid-scale modeling in magnetohydrodynamic turbulence simulations”, J. Comput. Phys. Vol.316 (2016) 385-395.
- [4.1.3.8-2] H. Miura, K. Araki, and F. Hamba, “Two-fluid Subgrid-Scale Viscosity in Nonlinear Simulation of Ballooning Modes in a Heliotron Device”, 26th IAEA Fusion Energy Conference (Kyoto, Japan, October 17-22, 2016)
- [4.1.3.8-3] H. Miura, K. Araki, and F. Hamba, “Two-fluid sub-grid-scale viscosity in nonlinear simulation of ballooning modes in a heliotron device”, Nuclear Fusion, Vol.57 (2017) 076034.
- [4.1.3.8-4] H. Miura, and F. Hamba, “Anisotropic SGS modeling for large eddy simulation of magnetized plasma”, the 27th International Toki Conference (November 19-22, 2018, Toki, Japan).

4.1.3.9 名古屋工業大学との連携活動・共同研究

名古屋工業大学とは、平成 21 年 7 月 8 日に、連携・協力の推進に関する基本協定が提携されている。この協定に基づき、いくつかの連携活動を行っている。その主な内容は、プラズマシミュレータを利用した共同研究、核融合科学研究所・名古屋工業大学共同セミナー、講義・特別共同利用研究員制度等による学生教育である。

- 共同研究/ 名古屋工業大学・後藤俊幸教授、渡邊威教授、名古屋工業大学大学院生らとの共同研究により、高精度パッシブベクター乱流の直接数値シミュレーションを実施した [4.1.3.9-1, 2]。(詳細は基礎物理の項目参照) プラズマシミュレータ他を利用したこの数値シミュレーションにより、パッシブベクター乱流が $k^{-5/3}$ 則に従う乱流スペクトルを有すること、そのコルモゴロフ定数が速度場について 1.57、パッシブベクター場について 0.99 であることが分かった。この他、パッシブスカラー乱流に比べてスペクトルバンプの位置が、速度場及びパッシブスカラー場のバンプの中間に来るなどの特徴が明らかになった。
- 共同セミナー/ 核融合科学研究所及び名古屋工業大学の両機関に所属する研究者が関心を持つ研究テーマのすり合わせと、すり合わせたテーマに関する知見の広がりを目指し、両機関による共同セミナーを連携協定締結以来、毎年度 1 回もし

くは2回開催してきた。特に近年は、プラズマシミュレータ利用を念頭においた、数値シミュレーションに関わるテーマが多くなっている。表 4.1.3.9-1 は、平成27年度以降の開催実績である。ほぼ毎回、両機関外から講師を招聘し、最新の研究成果についての情報を得るとともに、両機関からも講演者を出すことで、交流を深めている。令和元年度は、名古屋工業大学で7月18日に開催した。テーマを「流体シミュレーションとディープラーニング」に設定したところ、核融合科学研究所一般共同研究に参画している他の大学からも出席者が出るなど、好評を博した。

- 学生教育/ 学生教育の観点から、特別共同利用研究員制度を利用した学生の受け入れ、名古屋工業大学における講義等を行っている。(表4.1.3.9-2 参照。) 特別共同利用研究員制度による学生の受け入れは、学生の核融合科学研究所への訪問、及び、受け入れ教員の名古屋工業大学訪問により、学生の研究教育に協力する形で行われている。平成27、28年度に受け入れた学生は、博士後期課程で今年度学位取得を目指して論文を執筆中である [4.1.3.9-1,2]。また、平成30年、令和元年に受け入れの学生については、in-situ 可視化ライブラリ”VISMO”(これは、数値実験炉研究プロジェクトの成果物である) によるシミュレーション結果の可視化の指導を行うなど、学生教育とプロジェクト活動の連携が陽に現れつつある。
- 外部資金調達/ 科学研究費補助金申請等の協力を進め、名古屋工業大学から、科学研究費補助金・基盤研究(A)の研究分担金を核融合研に受け入れている。(これ以前には、科学研究費補助金・基盤研究(B)の研究分担金を受け入れていた。) また、令和2年度の科学研究費補助金申請においては、核融合科学研究所側が研究代表者となり、新たな課題を申請する準備を進めている。

[4.1.3.9-1] J. Yang, T. Gotoh, H. Miura, T. Watanabe, “Statistical properties of an incompressible passive vector convected by isotropic turbulence”, Phys. Rev. Fluids Vol.4 (2019) 064601.

[4.1.3.9-2] J. Yang, T. Gotoh, H. Miura, T. Watanabe, “Intermittency of passive vector convected by isotropic turbulence”, submitted to Phys. Rev. Fluids.

表 4.1.3.9-1 核融合科学研究所・名古屋工業大学共同セミナー実施履歴（平成27年度以降）。

開催年月日	開催場所
平成27年12月10日	名古屋工業大学
平成28年2月12日	核融合科学研究所
平成28年8月8日	核融合科学研究所
平成29年9月11日	名古屋工業大学
平成30年7月26日	名古屋工業大学
令和1年7月18日	名古屋工業大学

表 4.1.3.9-2 平成27年度以降の核融合科学研究所への特別共同利用研究員受け入れ実績。

開催年月日	参加人数
平成27年	1名
平成28年	1名
平成29年	0名
平成30年	1名
令和1年	3名

4.1.3.10 名古屋大学・筑波大学との共同研究

・量子乱流に関する研究

超流動ヘリウム乱流研究の一環として、量子乱流の一様等方性乱流のシミュレーション研究（筑波大学、名古屋大学との研究）を、プラズマシミュレータ利用共同研究を通じて行った [4.1.3.10-1]。量子乱流は、シュレーディンガー方程式とよく似た形式を有する、Gross-Pitaevskii(GP) 方程式で記述される。この方程式を、フーリエ擬スペクトル法を用いて直接数値シミュレーション (DNS) を行った。この数値シミュレーション研究では、粒子数密度のスペクトルについて、低波数から高波数へのカスケードが発生すること、粒子数密度のフラックスがほぼ一定になることなどが示された（図 4.1.3.10-1 (a)）。また、クロージャーモデルによる先行研究で予想されていたエネルギースペクトル (k^{-1} 及び k^{-2} に比例する領域を伴う) の形成が、本研究による DNS で確認された（図 4.1.3.10-1 (b)）。

この数値シミュレーションの実行にあたっては、プラズマシミュレータ向けプログラム最適化及びプログラム開発支援によるシミュレーションコードの性能向上が行われた。

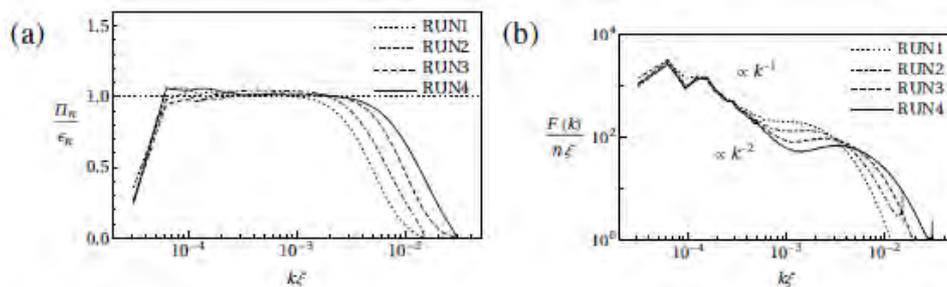


図 4.1.3.10-1 Gros-Pitaevskii 方程式による量子乱流 DNS における、(a) 粒子数密度散逸率 ϵ 、及び粒子数散逸係数 ν を用いて規格化された粒子数密度フラックス $\Pi_n(k)/\epsilon$ と、(b) エネルギースペクトル $F(k)$ ([4.1.3.10-1] Fig.2)。エネルギースペクトルの傾きを示す線は、 k^{-1} 及び k^{-2} に比例。ただし、記号 k は波数。

[4.1.3.10-1] K.Yoshida, H.Miura, and Y.Tsuji, “Spectrum in the Strong Turbulence Region of Gross-Pitaevskii Turbulence”, J. Low Temp. Phys. 2019, DOI:10.1007/s10909-019-02197-4.

4.1.3.11 九州大学との共同研究

- ・ 3次元磁場配位における揺動スペクトルの数値診断

ヘリカルプラズマにおける揺動特性を研究するために、3次元シミュレーションデータを用いた数値診断を行っている。ここで、実磁場配位を用いたジャイロ運動論コードGKV-Xによって得られたイオン温度勾配 (ITG) 乱流データを解析対象とする。揺動は磁気座標上で計算され、磁力線方向には長い波長を持つ。また、半径方向及びポロイダル方向には異方性がある。これらの特徴が、実験における観測座標上でいかに計測されるかを評価する。実験結果との比較のために、位相コントラストイメージング信号を模擬する。視線に沿って積分された密度揺動スペクトルが観測される。その積分された信号から、磁力線の方向が空間的に変化するというヘリカルプラズマの特徴を利用して、垂直方向のスペクトル分布を再構築することができる。通常、実験では、有限の観測領域と有限の空間分解能の下、観測を行うことになるので、観測スペクトルと実際のスペクトルの違いを数値シミュレーションによって確認した。ITGモードは特徴的な波長と周波数を持つので、その識別に十分な空間分解能の下、異なる半径位置における波数スペクトルの比較を行った。複数のフラックスチューブデータを組み合わせることで、より広い半径方向範囲に分布した揺動を対象とした計算も行った。実験観測の統合的な理解のための試みである。

4.1.3.12 名古屋大学・愛知工業大学との共同研究

- ・ EMC3-EIRENE コードによる NAGDIS-II 直線装置のプラズマモデリング

直線装置は安定した放電やパラメータの再現性などから、材料照射や非接触プラズマの実験研究に広く用いられている一方、プラズマの予測を与える数値モデリング研究はトカマク装置やヘリカル装置とは異なるコードが用いられている。しかし、ダイバータプラズマの模擬を目的とした直線装置実験が行われるようになった現在、核融合プラズマと同じコードを用いたモデリング研究の必要性が高まった。そこで、本研究は桑原 (愛工大)・田中 (名大)・林 (名大学生・現核融合研)・河村 (核融合研) が EMC3-EIRENE の計算グリッド開発から実際の計算に基づく解析まで含めたモデリング研究を行った。グリッド開発及び複数のターゲット板形状に対する輸送解析結果を 15th Plasma Edge Theory 国際ワークショップ (奈良) でポスター発表 (桑原 P2-01) を行い、論文が掲載された (T. Kuwabara et al., Contrib. Plasma Phys 56 (2016) 598)。また、中性ガスの排気供給やガス温度のプラズマ温度への影響を解析した成果を 16th Plasma Edge Theory 国際ワークショップ (フランス Aix-Marseille Univ.) でポスター発表 (林 P1-11) した。

4.1.3.13 京都大学との共同研究

・ EMC3-EIRENE コードによる Heliotron J の周辺プラズマモデリング

ダイバータ特性は磁場構造に大きく影響を受けることが実験的にも知られており、トカマクにおいては、熱負荷低減のための最適化ダイバータの検討が重要視されている。ヘリカル装置においてもダイバータ設計の研究のため、既存の装置の周辺プラズマ研究が近年数多く行われている。磁場配位の自由度が比較的大きい Heliotron J 装置のダイバータ研究は実験的には行われているものの、数値モデリングは未着手であり、LHD や W7-X などの装置との類似性や相違点を明らかにする意味でも EMC3-EIRENE によるモデリング研究の重要性は大きい。本研究では、的池（京大学生）・河村（核融合研）・大島（京大）が EMC3-EIRENE の計算グリッド開発を含めたモデリング研究を行った。パンピネスの異なる 3 配位についてグリッドを開発し、磁場配位に依存したプラズマ分布とフットプリントをそれぞれ得ることができた。プラズマが壁に触れるレグを横切る直線上で熱フラックス分布を評価し、電子密度の増加に伴って熱負荷分布が変化するなど、輸送に関連する特徴の解析を行った。この成果について、17th Plasma Edge Theory 国際ワークショップ（アメリカ・UCSD）、及び 22nd International Stellarator-Heliotron Workshop（アメリカ・Wisconsin 大学）でポスター発表（的池）を行った。

・ヘリカル系プラズマにおける乱流輸送のジャイロ運動論的シミュレーション

京都大学との共同研究の一例として、ジャイロ運動論的シミュレーションによる LHD と Heliotron J 装置における乱流輸送の比較（図 4.1.3.13-1）が行われた[4.1.3.13-1]。このシミュレーションにより、新古典輸送を低減させる磁場配位は、両装置において乱流輸送を減少させる効果を持つことが確認された。他に、京都大学との共同研究の成果として、トーラスプラズマにおけるパリティと不安定性・輸送の関係に関する小特集記事をプラズマ・核融合学会誌に出版した [4.1.3.13-2]。

[4.1.3.13-1] A. Ishizawa, Y. Kishimoto, T.-H. Watanabe, H. Sugama, K. Tanaka, S. Satake, S. Kobayashi, K. Nagasaki, and Y. Nakamura, “Multi-machine analysis of turbulent transport in helical systems via gyrokinetic simulation,” *Nucl. Fusion* **57**, 066010 (2017).

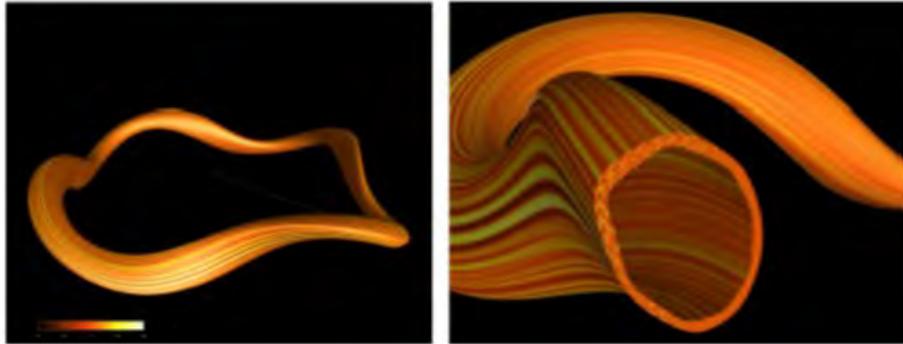


図 4.1.3.13-1 Heliotron J 装置における ITG 乱流 (静電ポテンシャルを表示)

[4.1.3.13-2] A. Ishizawa, Y. Kishimoto, and H. Sugama, Parity in Torus Plasmas: 5. Summary and Discussion, *J. Plasma Fusion Res.* **92**, 564 (2016).

- ・ 磁力線データの可視化

VMEC で計算された平衡プラズマでの MGTRC による磁力線追跡データを可視化し、炉設計に寄与するための可視化手法の研究を京都大学と行っている (詳細は 3.3.5.14 を参照)。

4.1.3.14 兵庫県立大学・神戸大学・情報通信研究機構・北里大学・京都大学・名古屋大学との共同研究

- ・ 核融合プラズマ研究のための超並列粒子シミュレーションコード開発とその可視化

核融合プラズマのシミュレーション研究で用いられる粒子モデルは、荷電粒子の運動方程式と Maxwell 方程式を自己無撞着に直接解くため、磁気流体力学 (MHD) モデルやジャイロ運動論モデルでは取り扱えない微視的物理を解くことができる。しかし、膨大な粒子を計算する必要があるため、巨視的な時空間スケールを扱うことが困難である。さらに、ラグランジアンで表現される粒子系とオイリアンで表現される電磁場とを連成させるため、粒子に働く電磁場の計算及び粒子の位置と速度からの電流密度の計算でメモリへのアクセスがランダムになったり、粒子分布の不均一性に伴い計算負荷の不均一が発生するなど、計算効率を悪化させる要因も多々ある。一方、核融合発電の実現には、コアプラズマの高性能化やその制御とともに、プラズマ中の高速粒子が及ぼす影響の理解や周辺領域プラズマの挙動理解とその制御も必要である。し

かし、磁気再結合が引き金となってプラズマ全体が崩壊するディスラプション現象や、高速粒子が励起する波動、ブロボ現象のような周辺領域における動径方向のプラズマ輸送、ダイバータ板への熱流逶減のための非接触プラズマ過程、不純物輸送などの正確な予測には、粒子運動のような微視的な物理を正しく解きながら、粒子と波の相互作用やシース電位と自己無撞着な電流系の計算を行い、さらに、装置全体にわたる巨視的現象を調べる大規模シミュレーションが必要である。他方、大規模シミュレーションではストレージの制限などから計算した全データを保存することは不可能であり、また、解析用マシンのメモリ不足から全データを可視化解析するなどのポストプロセスも困難である。今後ますます規模が大きくなることが予想されるシミュレーションに対して、その結果の可視化解析をどのように行うかも喫緊の課題である。学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) の枠組みの下で、ディスラプションや高速粒子による波動励起、ブロボ現象のように微視的物理が装置スケールのダイナミクスに影響を与えるような現象に対して、第一原理からその発生機構の解明や挙動の正確な予測を行い、核融合プラズマの閉じ込め性能改善等へ寄与することを目的とした共同研究を進めている。

4.1.3.15 兵庫県立大学・神戸大学・甲南大学・名古屋大学・海洋研究開発機構・防衛大学校との共同研究

・バーチャルリアリティ装置による VR 可視化研究

バーチャルリアリティ (VR) 装置 'CompleXcope' は、観測者を VR 空間に投入させ、あたかも目の前に物体が存在しているかのように感じさせることができる装置である。また、観測者の動きに合わせてその物体が動いたり、コントローラーで動かしたりすることができるので、プラズマ現象を中から見たり外から見たり、いろいろな角度から観測することができる。まさに、コンピュータが作る様々な VR の世界に観測者を入り込ませ、物理現象を「目の当りに」観測させることによって、人間の空間を認識する能力を総動員して観測することができる。このような VR 装置の特徴を生かすための VR 可視化研究を進めている。可視化のプロセスでは、可視化の目的によって利用する可視化デバイスやプログラムが異なることが多い。自らの計算・実験結果を 3 次元 CG などで確認をする場合、手元の PC 等で汎用可視化プログラムを使用することが多い。また、多人数での結果共有や議論、一般の方への説明をする場合、CompleXcope などの専用・大規模可視化装置で各 VR・可視化装置専用の可視化プログラムを使用することが多い。学会等での発表時や可視化結果共有の場合、ハンドヘルドデバイスで Android や iOS 用のプログラムと PC 用プログラムが別々の場合が多い。それぞれ

の状況に合わせた可視化開発環境を用いては大変な手間となるため、全ての場合において汎用的に利用可能な環境の構築が必要である。そのような開発環境の候補の一つがUnityのような汎用ゲームエンジンの活用である。汎用ゲームエンジンは様々なOS上で、Windows、Mac、iOS、Androidなどで実行可能な実行ファイルを出力可能である。また、PCの画面上だけでなく、ヘッドマウントディスプレイやzSpace、CAVE (MiddleVRというミドルウェアを介して)など様々なVR装置に出力することも可能である。このような可視化開発環境を使えば、共同研究や社会への発信をこれまで以上に強力に推し進めていけることが期待できる。本共同研究を通じて、汎用ゲームエンジンの活用の利点や課題の洗い出しや具体的な可視化プログラムの開発などを進めている(詳細は2.3.2及び3.3.5.12を参照)。

4.1.3.16 兵庫県立大学・海洋研究開発機構との共同研究

・その場可視化ライブラリ **VISMO**

In-situ可視化はシミュレーションの実行とともにデータの可視化を行う方法であり、シミュレーションの生データを保存する代わりに、可視化データを保存するという手法である。兵庫県立大学との共同研究で開発している In-situ 可視化ライブラリ VISMO は、粒子(色や半径の変更が可能)・等値面・スライス・流線・矢印を可視化手法として備え、また、対話的可視化に対応するため、可視化オブジェクトの点群データを出力して専用ビューワで見ることができる(詳細は3.3.5.11を参照)。

4.1.3.17 名古屋大学との共同研究

・GKVデータのVR可視化

5次元シミュレーションであるGKVのデータをVR空間で観察するための可視化研究を名古屋大学との共同研究で進めている(詳細は3.3.5.12及び3.3.5.13を参照)。

4.1.3.18 京都大学・神戸大学との共同研究

・電磁粒子コード **PASMO** の最適化

電磁粒子コードPASMOは磁気リコネクション現象をターゲットとしたシミュレーションコードである。リコネクション現象では電流層と呼ばれる領域に多数の粒子が存在している。均等に領域を分割する分散並列の場合、プロセス毎の取り扱う粒子数が異なることとなり、ロードアンバランスを招く。プラズマ粒子シミュレーション用に開発

された動的負荷分散ライブラリ OhHelp の PASMO への導入を、京都大学及び神戸大学と進めた (詳細は 3.3.5.9 を参照)。

4.1.3.19 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構との共同研究

本共同研究は、矢木雅敏部長を中心とする量子科学技術研究開発機構 (量研機構) 核融合エネルギー研究開発部門六ヶ所核融合研究所核融合炉システム研究開発部における核燃焼プラズマ予測精度の向上を目指す総合的研究である。本共同研究では、内部輸送障壁や周辺輸送障壁のダイナミクスを解明するとともに、その制御可能性を検討する。そのため、量研機構の計算機 JFRS-1 を有効利用して、MHD やプラズマ乱流を内在した統合シミュレーションコードの開発に関して、量研機構と大学及び核融合研の知見・技術を相互に補完し、共同研究を行っている。核融合研では、下記に示す通り、主としてヘリカル系での研究を担当し、圧力勾配による MHD 不安定性について参画してきた。

○ 平成 27 年度 (2015 年)

研究題目：ディスラプション物理の総合的研究

共鳴摂動磁場 (RMP) は、トカマクにおける ELM 制御の一つの手法として注目を集めているが、LHD においても RMP 印加実験が行われている。そこで、MHD 的な圧力の崩壊現象との関連について、3 次元数値シミュレーションを推進した。その結果、圧力勾配の大きい磁気島の X 点近傍から崩壊が生じることが得られ、実験結果との対応を議論した [4.1.3.19-1]。

○ 平成 28 年度 (2016 年)

研究題目：炉心プラズマのマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション研究

LHD をはじめ、多くの装置で、巨視的フローが消滅すると不安定性による局所的なフローが成長しプラズマが不安定になる。そこで、LHD プラズマを対象として、この両者を同時に扱うマルチスケール数値シミュレーションを行い、巨視的フローが安定化に寄与するかどうかについて、解析を進めた。LHD 実験の計測では、プラズマの巨視的フローは一次元的にしか得られない。そこで今回は、この一次元データに基づいて、プラズマ全体での 3 次元巨視的フローを計算する手法を新たに開発した。この手法で計算した巨視的フローを用いたマルチスケールシミュレーションにより、安定化に対する新しい結果が得られた [4.1.3.19-2, 3]。

○ 平成 29 年度 (2017 年)

研究題目：炉心プラズマのマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション研究

本研究では、背景フローと不安定モードによる渦の相互作用について、前年の研究

を発展させた。まず、背景フローの計算手法を改良し、さらにダイナミクス計算での巨視的フローの粘性減衰の抑制に成功した。その結果、背景フローには、その大きさによって、安定化の寄与がある場合とケルビン-ヘルムホルツ不安定性によって不安定化の寄与があることが得られた。以上の結果は、19th International Congress on Plasma Physics, June 4-8 2018, Vancouver において、口頭発表した。

○ 平成 30 年度 (2018 年)

研究題目：炉心プラズマのマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション研究
LHDプラズマでは、崩壊現象はそれまでのプラズマ回転が停止した直後に生じている。そこで、この流れの停止と摂動磁場の成長の因果律を、Transfer Entropy を用いて解析を行った。その結果、回転の停止が原因となり、その結果として摂動が成長することが得られた [4.1.3.19-4]。

[4.1.3.19-1] K. Ichiguchi, et al., Nucl. Fusion, **55**, 073023 (2015).

[4.1.3.19-2] K. Ichiguchi, et al., Proc. 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, (2016).

[4.1.3.19-3] K. Ichiguchi, et al., Proc. 44th EPS Conference on Plasma Physics, Vol. 41F, P2-133 (2017).

[4.1.3.19-4] K. Ichiguchi, et al., Proc. 45th EPS Conference on Plasma Physics, Vol. 42A, P1-1046 (2018).

4.1.4 研究会

核融合科学研究所では、共同研究の枠組みなどを用いて、研究会を開催してきた。想定していた共同研究の推進にとどまらず、新しい研究テーマの掘り起こし、新しい研究グループの創設、他分野とのシナジー効果など、国内外の大学を中心とする研究者の方々のみならず、学生の諸君をも含めて、核融合研がコアとなり研究推進の役割を担ってきた。そのリストを次の表 4.1.4-1、4.1.4-3、4.1.4-5、4.1.4-7 に掲載する。

表 4.1.4-1 平成 28 年度

発表 件数	参加 人数	参加者所属	内容
非線形問題の解法と可視化に関する研究会			
25	30	NIFS、山形大、福島大、日大、筑波大、兵庫県立大、北大、東京工科大、京都工繊大	非線形シミュレーション、電磁場解析、超伝導薄膜解析等研究交流
核融合炉開発に向けた PWI マルチスケールモデリングに関する研究会			
8	15	NIFS、同志社大、大阪大、名大、愛工大、京大	PWI シミュレーション、実験の情報交流
過渡現象を含んだ壁面-周辺・炉心プラズマ相互作用モデリング			
9	11	NIFS、QST、阪大、岐阜工業高専、筑波大、バルセロナスーパーコンピュータセンター	周辺プラズマモデリング及び関連研究の議論
第 11 回名工大・核融合研 共同セミナー			
4	15	NIFS、名工大、東北大、東京大、東工大	流体と粒子集団のシミュレーション
高ベータトーラスプラズマの自律的構造形成と維持			
20	30	NIFS、東大、新潟大、早大、日大、京都工繊大、群馬大、兵庫県大、海保大、阪大	高ベータトーラス（コンパクトトーラス、逆磁場ピンチ等）に関する実験・理論・シミュレーション
高ベータトーラスプラズマの自律的構造形成と維持			
20	30	NIFS、東大、新潟大、早大、日大、京都工繊大、群馬大、兵庫県大、海保大、阪大	高ベータトーラス（コンパクトトーラス、逆磁場ピンチ等）に関する実験・理論・シミュレーション
アルヴェン固有モードに関連した MHD 現象の研究			
20	20	NIFS、QST、鳥取大、名大、兵庫県立大、京都大、東京大、電気通信大	アルヴェン固有モードの理論・シミュレーション、アルヴェン固有モードと高速イオンの相互作用に関する実験研究の進展、MHD and resonant instabilities during JT-60SA ramp-up with N-NB injection、アルヴェン固有モードと相互作用する高速イオンの位相空間構造の実験観測、Simulations of chirping geodesic acoustic mode and the associated half-frequency mode、MEGA code を用いた大型ヘリカル装置での高速イオン圧力分布の解析

表 4.1.4-2 平成 28 年度 (続き)

発表 件数	参加 人数	参加者所属	内容
先進的描画技術を用いた可視化表現法の研究会			
20	26	NIFS、阪大、京大、天文台、JAM-STECC、九大、神戸大、原研、兵庫	可視化とアウトリーチ、ヘッドマウントディスプレイの活用、In-situ 可視化の研究、可視化手法の開発、VR 装置の社会への応用、VR 可視化の有効性、因果関係の探索、人工知能やディープラーニングの活用

表 4.1.4-3 平成 29 年度

発表 件数	参加 人数	参加者所属	内容
非線形問題の解法と可視化に関する研究会			
26	30	NIFS、山形大、福島大、日大、筑波大、兵庫県立大、北大、東京工科大、京都工繊大、釧路高専、九大、九産大、函館高専、東大、立命館	非線形シミュレーション、電磁場解析、超伝導薄膜解析等研究交流
核融合炉開発に向けた PWI マルチスケールモデリングに関する研究会			
10	13	NIFS、同志社大、大阪大、名大、愛工大、名工大	PWIシミュレーション・実験についての研究情報交流
過渡現象を含んだ壁面-周辺・炉心プラズマ相互作用モデリング			
8	12	NIFS、QST、阪大、京大、東大、名大、筑波大、岐阜工業高専	周辺プラズマモデリング及び関連研究の議論
第 12 回名工大・核融合研 共同セミナー			
4	15	NIFS、名工大、筑波大、東工大	多相系の乱流シミュレーション
高ベータトーラスプラズマの自律的構造形成・維持とその応用			
25	35	NIFS、東大、新潟大、産総研、日大、京都工繊大、群馬大、兵庫県大、海保大、阪大、九大	高ベータトーラス（コンパクトトーラス、逆磁場ピンチ等）に関する実験・理論・シミュレーション
MHD シミュレーションのための先進的数値計算手法			
20	24	NIFS、電通大、東京大、海洋研、広島大、東北大、神戸大、海上保安大、量研機構、鳥取大、京都大	ヘリオトロンプラズマにおける交換型モードと巨視的フローの相互作用、高ベータ LHD プラズマに対する MHD 安定性解析、線形化 MHD スペクトルの数理解析と数値解析、物理系のシミュレーションにおける構造保存数値解法について、Global strong solutions to the 3D nonhomogeneous incompressible MHD equations、捕食・被食モデルにおける正不変集合の構築、CIP-MOCCT 型 MHD コード改善、抵抗性 MHD プラズマに対する AC 磁気ヘリシティ入射効率、圧縮性 MHD の高精度数値計算手法、球内部の MHD 緩和、太陽大気における磁気静水圧平衡磁場の再構成手法の開発、Multi-Grid Method による軸対称 2 流体平衡方程式の数値解法、摂動 3 次元理想 MHD 平衡コード MASPEQ 開発、流体及び電磁流体シミュレーションへの仮想吸収層実装

表 4.1.4-4 平成 29 年度 (続き)

発表 件数	参加 人数	参加者所属	内容
先進的描画装置を用いた可視化情報の研究会			
12	27	NIFS、防衛大、兵庫県大、JAMSTEC、 九大、天文台、原研、京大、理研、 神戸大、ヴェイサエンターテイメ ント、富士通	深層学習と可視化、可視化とアウトリーチ、 ヘッドマウントディスプレイの活用、In-situ 可視化、可視化手法の開発、VR 装置の社会 への応用、因果関係の探索

表 4.1.4-5 平成30年度

発表 件数	参加 人数	参加者所属	内容
非線形問題の解法と可視化に関する研究会			
16	20	NIFS、山形大、福島大、日大、筑波大、兵庫県立大、北大、東京工科大、京都工繊大	非線形シミュレーション、分子シミュレーション、校正の解析などの研究発表と情報交流
核融合炉開発に向けた PWI マルチスケールモデリングに関する研究会			
8	13	NIFS、大阪大、名大、愛工大、九工大、信州大、京大、兵庫県立大、金沢大、KEK、同志社大	PWIシミュレーション・実験の情報交流
周辺プラズマモデリングの高度化とコードカップリングに関する検討			
9	17	NIFS、QST、名大、信州大、東工大、筑波大、釧路工業高専	周辺プラズマモデリング及び関連研究の議論
第13回名工大・核融合研 共同セミナー			
4	24	NIFS、名工大、筑波大、東工大、JAXA	計算科学におけるシミュレーションの新展開
自己組織化系高ベータプラズマの理解と応用			
20	30	NIFS、東大、新潟大、日大、京都工繊大、群馬大、兵庫県大、海保大、阪大、先進物理研、電磁応用研	高ベータトーラス（コンパクトトーラス、逆磁場ピンチ等）に関する実験・理論・シミュレーション
MHD シミュレーションにおける精度保証の可能性について			
17	24	NIFS、電気通信大、九州大、兵庫県立大、鳥取大、量研機構、京都大、	精度保証付き数値計算入門、逆磁場ピンチにおけるヘリカル構造形成、ドリフト波乱流と帯状流の相互作用の解析、Plasma sheet thinning due to loss of the near-Earth magnetotail plasma、疑似アニーリングによるポロイダル回転トカマク平衡計算と磁気軸シフトの流速依存性、振動する共鳴磁場摂動による磁気島成長の抑制、円柱プラズマにおける外部装置と回転する磁気島の相互作用、周辺局在電流駆動不安定性に対するプラズマ回転・イオン反磁性ドリフトの影響、低ベータ簡約化MHD方程式と疑似アニーリングにおける人工的な発展方程式の線形安定性の対応関係、LHDプラズマにおける抵抗性バルーニングモードの運動論的MHDシミュレーション

表 4.1.4-6 平成 30 年度 (続き)

発表 件数	参加 人数	参加者所属	内容
先進的可視化デバイスを用いた可視化情報の研究会			
23	15	NIFS、JAMSTEC、京大、九大、天文台、中部大、兵庫県大、防衛大、名大、ヴェイサエンターテイメント、富士通	より効果的な可視化表現法、CAVE 装置からヘッドマウントディスプレイへの移行、より簡便な VR 可視化ソフトウェア開発環境の構築、In-situ 可視化、VR 装置の工学への応用、磁力線データの可視化、VR 装置の社会への応用、3D 立体視 (VR 表示) と 2D 表示の印象比較調査、可視化とアウトリーチ、科学技術文書の可視化、機械学習と可視化
「人工知能技術およびシミュレーションを用いた基礎学理構築の探求」ワークショップ			
14	14	慶應大 (代表者所属)、NIFS (世話人所属)、生理研、UCSB、JAIST、基生研、楽天技術研、理研、統数研、早大、産総研、玉川大	人工知能 (AI) 技術、シミュレーション技術、両技術の発展を受けた基礎科学研究の今後のあり方などについて議論。NINS 分野融合型共同研究事業 (分野融合型共同研究の準備のためのワークショップ等) の助成を受けて実施。

表 4.1.4-7 平成31年度以降（予定を含む）

発表件数	参加人数	参加者所属	内容
非線形問題の解法と可視化に関する研究会			
10(予定)	15(予定)	NIFS、山形大、福島大、日大、筑波大、兵庫県立大、北大、東京工科大、京都工繊大(予定)	非線形シミュレーション、分子シミュレーション、解析などの研究発表と情報交流
PWI実時間実空間シミュレーション手法創出に関する研究会			
10(予定)	15(予定)	NIFS、同志社大、大阪大、名大、愛工大、京大(予定)	PWIシミュレーション・実験の情報交流
置換トリチウムのヘリウム3への壊変によるDNA構造変化に関する研究会			
10(予定)	15(予定)	NIFS、同志社大、京都工繊大、富大、分子研、山形大、理研、九工大、物材機構、QST(予定)	分子動力学シミュレーション・DNAの実験などの研究情報交流
周辺プラズマモデリングの高度化とコードカップリングに関する検討			
9(予定)	11(予定)	NIFS、QST、名大、信州大、東工大、筑波大、山形大(予定)	周辺プラズマモデリング及び関連研究の議論
第14回名工大・核融合研 共同セミナー			
4(キャンセル1)	28	NIFS、名工大、東北大、理研、京大、名大、三重大、JAEA	流体シミュレーションとディープラーニング
高ベータトラスプラズマにおける外部制御による安定化と性能改善			
20(予定)	30(予定)	NIFS、東大、新潟大、日大、京都工繊大、群馬大、兵庫県大、海保大、阪大(予定)	高ベータトラス(コンパクトトラス、逆磁場ピンチ等)に関する実験・理論・シミュレーション
プラズマの複雑現象を対象としたデータマイニングの活用			
20(予定)	20(予定)	NIFS、量研機構、鳥取大、兵庫県立大、京都大、電通大(予定)	データマイニング、ビッグデータ、統計処理、数値シミュレーション
先進的可視化環境を用いた可視化情報の研究会			
25(予定)	15(予定)	NIFS、JAMSTEC、京大、九大、天文台、中部大、兵県大、防衛大、名大、ヴェイサエンターテイメント、富士通(予定)	効果的な可視化表現法、簡便なVR可視化ソフトウェア開発環境の構築、In-situ可視化、VR装置の工学への応用、磁力線データの可視化、VR装置の社会への応用、可視化とアウトリーチ、機械学習と可視化

4.2 分野間連携等の幅広いシミュレーション研究拠点形成

数値実験炉研究プロジェクトの基盤であるシミュレーション科学は、学問分野の境界を越えた学際性を備えた研究分野であり、その発展のために同じシミュレーション科学を基盤とする幅広い研究分野との研究連携は欠かせない。近年、スーパーコンピュータの飛躍的進歩を背景に、系の様々な要素を取り込んだシミュレーションにより、対象を全体としてとらえる研究が幅広い学問分野で進められている。数値実験炉研究プロジェクトでは、国内外の大学や研究機関等との連携の下、幅広い分野間連携研究をその研究拠点として進めてきた。そこでの活動は、様々な核融合プラズマのシミュレーション研究の進展に寄与すると同時に、関連分野との連携を通じてその成果を広く学術発信する役割も担ってきた。

4.2.1 自然科学における階層と全体

私たちの目にする自然現象は、複数の階層における要素過程で構成され、それらが階層を越えて相互作用しながら時間発展するため、複雑な様相を示す。自然科学研究機構の第2期中期計画において、自然科学研究機構に属する国立天文台、核融合科学研究所、分子科学研究所の3研究所を中核として、シミュレーションによる「自然科学における階層と全体」プロジェクトを開始し、第3期中期計画に引き継がれてきた。本プロジェクトでは、複数の階層にまたがる現象を総合的に取り扱うシミュレーション手法の開発とその応用を天文科学、核融合科学、分子科学を中心とする自然科学分野において展開することにより、自然科学における階層性、構造形成等の階層横断現象を解明するとともに、関連研究機関との連携を推進することにより、学際領域としてのシミュレーション科学の発展に寄与することが重要課題となっている。本プロジェクトは、自然科学研究機構の関連機関との連携の下、シンポジウム、スクール等の研究交流事業、分野を超えた連携研究を活動の柱としている。研究交流事業としては、国立天文台、核融合科学研究所、分子科学研究所の3研究所の共催で、「自然科学における階層と全体」シンポジウムを毎年度開催してきている。例えば、平成28年度は名古屋市において、プラズマ物質相互作用や物質創成過程などを対象とした「分子シミュレーションとその応用」、超新星残骸における部分電離プラズマのダイナミクスや核融合周辺プラズマの制御などで見られる「プラズマと中性ガスの相互作用」、微惑星形成や核融合プラズマの長時間放電などに関連した「ダスト成長」等の学際的な研究テーマを対象に3機関から、15名、大学等から14名（当日登録者を除く）の29名の参加者を得て開催された。研究連携としては、平成28年度より、国立天文台と核融合科学研究所が協力して、相対論的ジェットのパラメトリックシミュレーション研究、さらに、令和元年

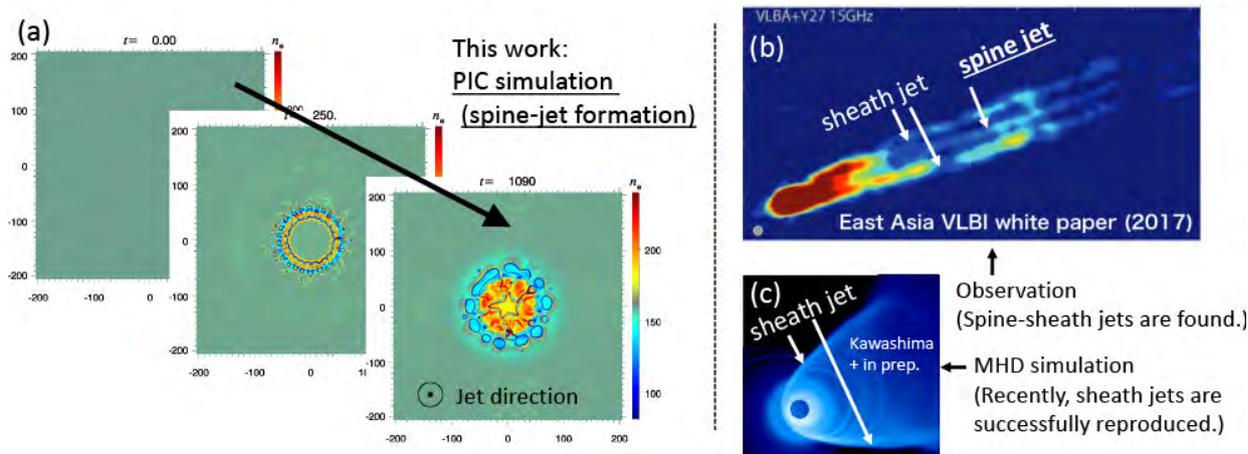


図 4.2.1-1 (a) 本研究 (PIC シミュレーション) による電子密度の時間発展結果。相対論的ジェットの伝播方向に垂直方向の断面図を示している。速度シア面でのマッシュルーム不安定性が引き金となり、初期に一樣密度だった相対論的ジェットにおいて、時間発展とともに芯の領域 (spine jet) に電子が集中していく様子が分かる。(b)M87 における相対論的ジェットの電波観測図 (East Asia VLBI white paper, 2017)。ジェットに内部構造 (spine-sheath 構造) が現れていることが確認できる。(c) 一般相対論的 MHD シミュレーションの観測的可視化 (Kawashima et al. in prep.)。ジェットの両サイドで輝く sheath-jet の再現に初めて成功した一方で、spine-jet の形成が課題となっていた。

度より、星間ダストに関する分子シミュレーション研究を連携して進めている。以下に巨大ブラックホールにおける相対論的ジェットのPICシミュレーションに関する成果を紹介する。

2019年4月10日、楕円銀河M87の中心部において史上初めてブラックホール・シャドウが観測され、太陽質量のおよそ65億倍の質量の巨大ブラックホールの存在が明らかになったことが発表された。この銀河からは、およそ100年前から相対論的ジェットと呼ばれる、バルク速度が光速の90%以上にも達する高速かつ細く絞られたプラズマ噴出流が観測されてきた。近年、観測における空間分解能の向上により、M87の相対論的ジェットにおいて奇妙な3本の線状の構造が存在することが示された。これは、他の天体の多波長観測においてその理論的解釈から存在が示唆されていたジェットの内部構造 (高速な芯部分である spine-jet とそれを取り囲む比較的低速な sheath-jet で構成される spine-sheath 構造) を初めて空間分解したものだと考えられる。この spine-sheath 構造のうち、sheath-jet は最近のMHDシミュレーションでも再現されてきているが、spine-jet については再現されておらず、なぜジェットの芯の部分が明るく輝くのか大きな謎となっている。

そこで、「シミュレーションによる『自然科学における階層と全体』」では、2016年度10月より国立天文台と核融合科学研究所メンバーの共同研究により、従来の相対論的ジェットシミュレーションの多くにおいて用いられているMHD近似を仮定せずに、プラズマの微視的過程に注目して相対論的ジェットのプラズマ粒子シミュレーションを実施している。シミュレーションには核融合科学研究所の森高外征雄助教によって開発されたPICコードを用いている。

M87の観測からはジェットのspine部分はsheath部分に比べ速度が速いことが示唆されているため、本研究ではジェットにおける速度シアに注目し、相対論的ジェットの伝播方向に垂直な面における空間2次元運動量3次元のPICシミュレーションを実施した。質量比1836の電子・陽子プラズマを仮定し、初期に粒子密度及び電子・陽子温度は空間一様を仮定し、背景磁場及び電流はゼロとした。円筒状の高速ジェット領域（半径50電子慣性長）において、光速の80%のバルク速度を持たせ、その外側の領域の速度は簡単のためにゼロとした。計算ボックスは、電子慣性長ユニットで 400×400 の大きさのものを設置し、 8192×8192 メッシュで分割した。各メッシュには初期に各々160個の電子・陽子を分布させた。電子及び陽子の熱的速度は、それぞれ光速の10%及び2.5%とした。

シミュレーションの結果、マッシュルーム不安定性及びそれに起因し繰り返し引き起こされる磁気リコネクションによって、ジェットの芯の領域に電子が集中することが明らかになった(図4.2.1-1)。マッシュルーム不安定性とは、相対論的な速度を持つシア面に垂直方向の波が成長する不安定性であり、陽子に比べ質量の軽い電子がシア面を横切ることで電流が発生し、その結果生じる磁場を介したローレンツ力により、更なる数の電子がシア面を横切る不安定性である(Alves et al. 2015)。先行研究では、計算コストを抑えるために粒子数や計算ボックスの大きさ及び空間分解能が不十分な計算が行われていたため、マッシュルーム不安定性に付随する磁気リコネクションを捉えることができていなかった。本研究では十分な計算資源を費やすことで初めてこのマッシュルーム不安定性がトリガーする磁気リコネクションと、その結果現れる電子のジェット芯領域への集中、すなわちspine-jetの形成を示すことができた[4.2.1-1]。

また、磁気リコネクションにより、熱的な電子が加速され非熱的なべき型スペクトルが形成されることも確認された(図4.2.1-2)。ジェットの電波スペクトル観測からは非熱的電子スペクトルが要求されるが、その加速メカニズムは依然として謎である。本計算結果は、マッシュルーム不安定性がspine-jetの形成と同時にジェットにおける非熱的電子スペクトルの形成にも関わっていることを示唆している。

本研究成果は、国際研究会2件([4.2.1-2,3])、国内研究会1件([4.2.1-4])招待講演での発表を行った。

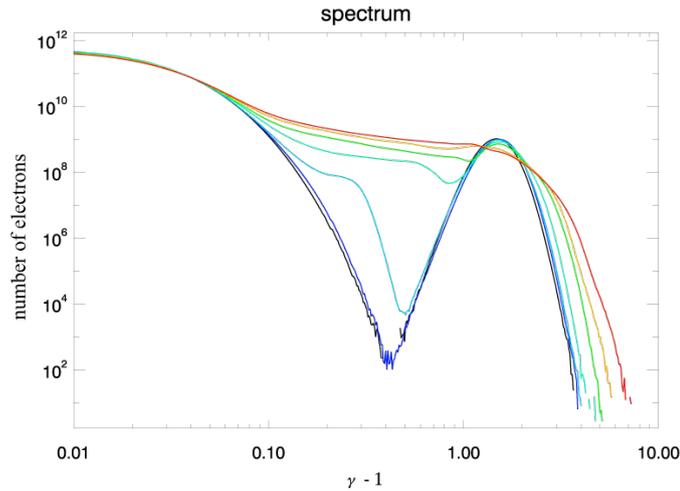


図 4.2.1-2 電子スペクトルの時間発展。初期 (黒線) には Maxwell 分布及び、バルク速度による shifted-Maxwell 分布を示しているが、時間が経過するとマッシュルーム不安定性の成長に伴い磁気リコネクションが発生し、電子が加速されている様子が分かる (時刻 $t = 12.5$ (青色)、20 (水色)、125 (青緑)、250 (緑)、500 (オレンジ)、750 (赤) [$1/\omega_{pe}$])。ここで ω_{pe} は電子のプラズマ振動数で、マッシュルーム不安定性の線形成長時間は $1/\omega_{pe}$ である。

[4.2.1-1] Tomohisa Kawashima, Seiji Ishiguro, Toseo Moritaka, Ritoku Horiuchi, and Kohji Tomisaka, “Formation of spine-structured relativistic jet with accelerated electrons via electron-scale shear instability (tentative title)” to be submitted to Nature.

[4.2.1-2] Tomohisa Kawashima, Seiji Ishiguro, Toseo Moritaka, Ritoku Horiuchi, and Kohji Tomisaka, “PIC simulations of Mushroom instability in relativistic jets”, US-Japan JIFT workshop on multiscale simulations in plasma physics, Inuyama, Japan, January, 2019 (Invited Talk)

[4.2.1-3] Tomohisa Kawashima, Seiji Ishiguro, Toseo Moritaka, Ritoku Horiuchi, and Kohji Tomisaka, “PIC simulations of Mushroom instability inducing magnetic reconnection in relativistic jets”, MR2018, Princeton, USA, September, 2018 (Invited Talk)

[4.2.1-4] Tomohisa Kawashima, Seiji Ishiguro, Toseo Moritaka, Ritoku Horiuchi, and Kohji Tomisaka, “相対論的ジェットにおけるマッシュルーム不安定性の PIC シミュレーション”, プラズマシミュレータシンポジウム 2018, 核融合科学研究所, 9月, 2018 (招待講演)

4.2.2 プリンストン・プラズマ物理研究所、プリンストン大学と磁気リコネクションに関わる共同研究

2017年度から2018年度にかけて、研究者がプリンストン・プラズマ物理研究所(PPPL)に長期滞在することによって、PPPL、プリンストン大学と、主に磁気リコネクションに関わる共同研究を推進した。

磁気リコネクションは、核融合にからむ室内実験、地球磁気圏など、様々なプラズマで見られる普遍的なエネルギー開放現象である。この共同研究では、PASMOコードを用いて磁気リコネクションの粒子シミュレーションを行い、その結果を、室内実験装置 Magnetic Reconnection eXperiment (MRX)、Magnetospheric Multiple-Scale(MMS) ミッションの地球磁気圏観測衛星などのデータと比較した。それによって、室内実験において見られている電子エネルギー分配のガイド磁場依存性を再現し、また電子が加熱される機構を解明した。一方では、地球磁気圏において人工衛星が観測している電子のカウンターストリーミングを再現することに成功した。

この成果は論文としてとりまとめて、Physics of Plasmas 誌で出版されている [4.2.2-1]。

[4.2.2-1] F. Pucci, S. Usami, H. Ji, X. Guo, R. Horiuchi, S. Okamura, W. Fox, J. Jara-Almonte, M. Yamada, and J. Yoo, “Energy transfer and electron energization in collisionless magnetic reconnection for different guide-field intensities”, Physics of Plasmas Vol. 25 (2018), pp. 122111 (1 ~ 10).

4.2.3 自然科学研究機構「若手研究者による分野間連携研究プロジェクト」

- 覚醒脳の時空間神経活動ダイナミクスと局所神経結合の関係性における法則の解明
本プロジェクトは、自然科学研究機構「若手研究者による分野間連携研究プロジェクト」の一つとして、平成26年度から平成28年度までの3年間、実施された課題であり、基礎生物学研究所（平成26～27年度）・生理学研究所・分子科学研究所・核融合科学研究所・北陸先端科学技術大学院大学・信州大学・ノースカロライナ大学（平成28

表 4.2.3-1 研究プロジェクト「覚醒脳の時空間神経活動ダイナミクスと局所神経結合の関係性における法則の解明」の参画者数内訳

	所内	所外（機構内）	機構外（国内）	機構外（海外）
平成 28 年度	1	2（生理研、分子研）	2（JAIST、信州大）	2（UNC、ボストン大）

年度)・ボストン大学(平成 27~28 年度)の共同研究として進められた(表 4.2.3-1 参照)。大脳皮質においては、それぞれの機能に応じて構成された多様な局所回路が、大域的レベルにおいて適切に情報のやり取りをし、高度な認知機能を実現していると考えられている。局所回路を司る法則については、解剖学的な面で、構成要素、及び、その結合パターンの研究がかなり進展しているが、一方、局所神経結合がどのような神経集団の時空間ダイナミクスを生み出すのかは、全く解明されていない。そこで、本課題では、局所神経結合と局所的・大域的神経集団活動の時空間ダイナミクスの関係を明らかにする実験的・数的手法を開発し、その法則性を見出すことを目指して、様々な研究が展開された。また、そのような法則性が見出されることで、それに基づいた局所的(ミクロ)・大域的(マクロ)ダイナミクスを同時にモデル化することが可能な大規模ネットワークシミュレーションを構築することも可能となる。このような着想から、本課題における研究の一つとして、プラズマ・核融合シミュレーション分野においても培われてきた連結階層シミュレーション手法を導入した、脳神経集団ネットワークの大規模シミュレーションの実現に向けた研究も、核融合研を中心に進められた。そして、簡約化された神経回路モデル(Izhikevich モデル [4.2.3-1])に基づく 100 万ニューロン規模(シナプス結合数は 1 兆)の神経回路の計算(1 秒以上の時間発展計算)を実現した(図 4.2.3-1 参照)。この計算コードでは、多様なネットワーク構造におけるダイナミクスの計算を容易に実行できるコーディングを行っており、多細胞活動の時空間ダイナミクスにおける局所神経回路の性質を、多くのシミュレーション実行により見出すことが可能になると考えられる。本課題を端緒とした諸研究の進展は、神経科学分野のみならず、数理解析分野、そして、シミュレーション科学分野の発展に大きく貢献するものである。

[4.2.3-1] Eugene M. Izhikevich, “Simple Model of Spiking Neurons”, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 14, No. 6 (2003) pp. 1569 ~ 1572.

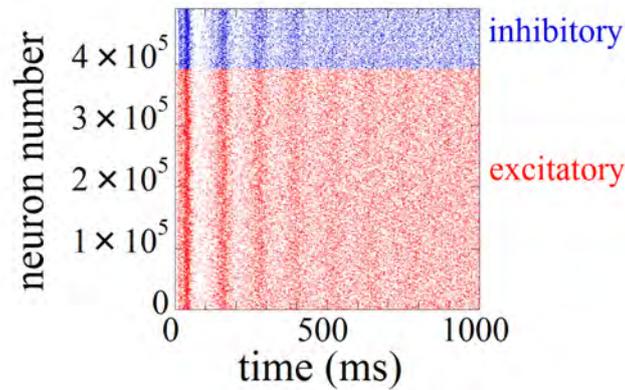


図 4.2.3-1 約 49 万個のニューロンから成る神経回路のシミュレーション。各点は、その番号のニューロンが当該時刻に発火したことを示している。10Hz程度の波状構造が現れていることが分かる。

- 高次相関解析とインフォマティクスが拓く実験室・天体プラズマにおける加熱・輸送・乱流ダイナミクスの研究

自然科学研究機構における「若手研究者による分野間連携研究プロジェクト」の支援の下、実験室及び宇宙・天体プラズマ分野の連携によって新たな研究展開と知見の創出を目指した共同研究が推進されている。特に、太陽プラズマ分野と磁場閉じ込めプラズマ分野の双方において重要となる「加熱・輸送・乱流現象」をキーワードとした研究課題を策定したプロジェクト「高次相関解析とインフォマティクスが拓く実験室・天体プラズマにおける加熱・輸送・乱流ダイナミクスの研究」が2019年度から本格的な活動を開始しており、核融合科学研究所と国立天文台を基盤拠点として、宇宙科学研究所や名古屋大学宇宙地球環境研究所、九州大学などの複数の機関に所属する若手研究者が参画している。これまでの活動によって、太陽内部乱対流シミュレーションと核融合プラズマ乱流シミュレーションの比較研究や、太陽表面を模擬した乱流可視化実験研究、機械学習を援用した先進的観測データ解析フレームワークの構築などが進展している。

4.3 国際的な COE としての活動

4.3.1 日米協力事業 JIFT による活動の推進

核融合分野の日米科学技術協力事業の一つである Joint Institute for Fusion Theory (JIFT) は、理論解析や数値シミュレーションの手法を発展させ、核融合プラズマの平衡、安定性、加熱及び輸送過程等の物理機構を解明するとともに、非線形プラズマ現象の理解を深めることを目的とし、日米間における研究者の相互派遣やワークショップの共同開催を促進している。平成 29 年度 (2017 年度) に、数値実験炉研究プロジェクトの堀内前総主幹から洲鎌現総主幹が JIFT の日本側議長を引き継ぎ、現在、JIFT の秘書を務める石黒基礎物理シミュレーション研究系主幹とともに、JIFT の運営に携わっている。また、藤堂核融合理論シミュレーション研究系主幹も他の大学・研究機関のメンバーとともに、日本側の JIFT 諮問委員として JIFT 事業計画に助言し、核融合科学研究所は、JIFT プログラムにおける数多くの研究者の派遣、受け入れやワークショップの開催に寄与し、核融合理論シミュレーションに関する日米共同研究の推進に貢献している。

本プロジェクトに関する前回の外部評価が行われた平成 27 年度 (2015 年度) 以降、第 3 期中期計画が開始された平成 28 年度 (2016 年度) から令和元年度 (2019 年度) までの期間における数値実験炉研究プロジェクトに関連した JIFT ワークショップと研究者派遣・受け入れの状況を図 4.3.1-1 に示す。核融合科学研究所は、JIFT を通じて米国へ延べ 9 名の研究者を派遣し、米国から延べ 14 名の研究者を受け入れ、10 件 (日本開催 6 件・米国開催 4 件) のワークショップの開催に貢献した。研究者の派遣や受け入れによって、テキサス大学オースチン校核融合理論研究所との MHD 平衡・不安定性のシミュレーション、高エネルギー粒子駆動不安定性やジャイロ運動論的乱流輸送シミュレーションに関する共同研究、PPPL とのヘリカル磁場配位最適化、グローバル運動論的輸送シミュレーション、プラズマ中の波動伝播理論の拡張や周辺プラズマ輸送のジャイロ運動論的シミュレーションコードの開発に関する共同研究、オークリッジ国立研究所との LHD における非局所輸送モデリングや高エネルギー粒子駆動アルフヴェン固有モードのシミュレーションに関する共同研究が進展した。また、ウィスコンシン大学とのヘリカルプラズマの 3 次元 MHD シミュレーションやカオス磁場中の輸送に関する共同研究、マサチューセッツ工科大学との拡張 MHD モデルに関する共同研究やネバダ大学とのレーザー核融合における非対称爆縮に関する共同研究が進められた (図 4.3.1-2 参照)。また、3 次元プラズマ物理に関する理論シミュレーション、拡張 MHD シミュレーション、多階層シミュレーション手法、ヘリカル磁場配位の最適化やエクサスケール計算に向けた核融合シミュレーションのデザイン等のテーマに関するワーク

Year	Workshops	Exchange visitors	
		From NIFS	To NIFS
2016	3D Physics by Y. Suzuki (NIFS) and E.J. Strait (GA) at Kyoto Extended MHD by H. Miura (NIFS) and L.E. Sugiyama (MIT) at Kyoto Exascale Computing by T.-H.Watanabe (Nagoya) and C.S.Chang (PPPL) at Oak Ridge	Y. Suzuki / PPPL H. Sakagami / Nevada H. Miura / IFS	D. del-Castillo (ORNL) D.A. Spong (ORNL)
2017	Stellarator/Heliotron by S. Murakami (Kyoto) and J. Talmadge (Wisconsin) at Kyoto Multiscale methods by S. Ishiguro (NIFS) and S. Parker (Colorado) at Boulder Exascale Computing by T.-H.Watanabe (Nagoya) and C.S.Chang (PPPL) at Kashiwa	Y. Suzuki / PPPL Y. Todo / IFS T. Moritaka / PPPL & IFS	I. Dodin (PPPL) J. Varela (ORNL) D. Hatch (IFS) K. McCollam (Wisconsin)
2018	Multiscale methods by S. Ishiguro (NIFS) and S. Parker (Colorado) at Nagoya Exascale Computing by T.-H.Watanabe (Nagoya) and C.S.Chang (PPPL) at PPPL	H. Miura / IFS	D. Spong (ORNL) M. Cole (PPPL) W. Wang (PPPL) A. Bader (Wisconsin)
2019	Stellarator/Heliotron by S. Murakami (Kyoto) and D. Anderson (Wisconsin) at Madison Exascale Computing by M. Nunami (Nagoya) and C.S.Chang (PPPL) at Kobe	H. Sakagami / Nevada T. Moritaka / PPPL	D.A. Spong (ORNL) B. Breizman (IFS) L. Zheng (IFS) L.E. Sugiyama (MIT)

図 4.3.1-1 平成 28 年度 (2016) から令和元年度 (2019) の期間における数値実験炉研究プロジェクトに関連した JIFT ワークショップ及び研究者の派遣と受け入れ

ショップを米国側研究者と主催し、最新の研究情報を交換し、日米間の研究者交流を促進した。

上記の日米共同研究による成果は、Physics of Plasmas, Nuclear Fusion, Plasma Physics and Controlled Fusion, 等の主要学術雑誌に掲載され、また、IAEA 核融合エネルギー会議、国際ステラレーターヘリオトロンワークショップ、APS-DPP 会議、EPS-DPP 会議、シャーウッド国際核融合理論会議、等の国際会議において発表されている。

4.3.1.1 プラズマの不安定性に関わる米国テキサス大学オースチン校プラズマ研究所との共同研究

日米共同事業・JIFT プログラムを利用して、プラズマの不安定性に関わる米国テキサス大学オースチン校プラズマ研究所との共同研究を行ってきた。2016年度、2018年度の JIFT 研究者派遣で日本から米国へ、2019 年度は米国から日本へ研究者が派遣さ

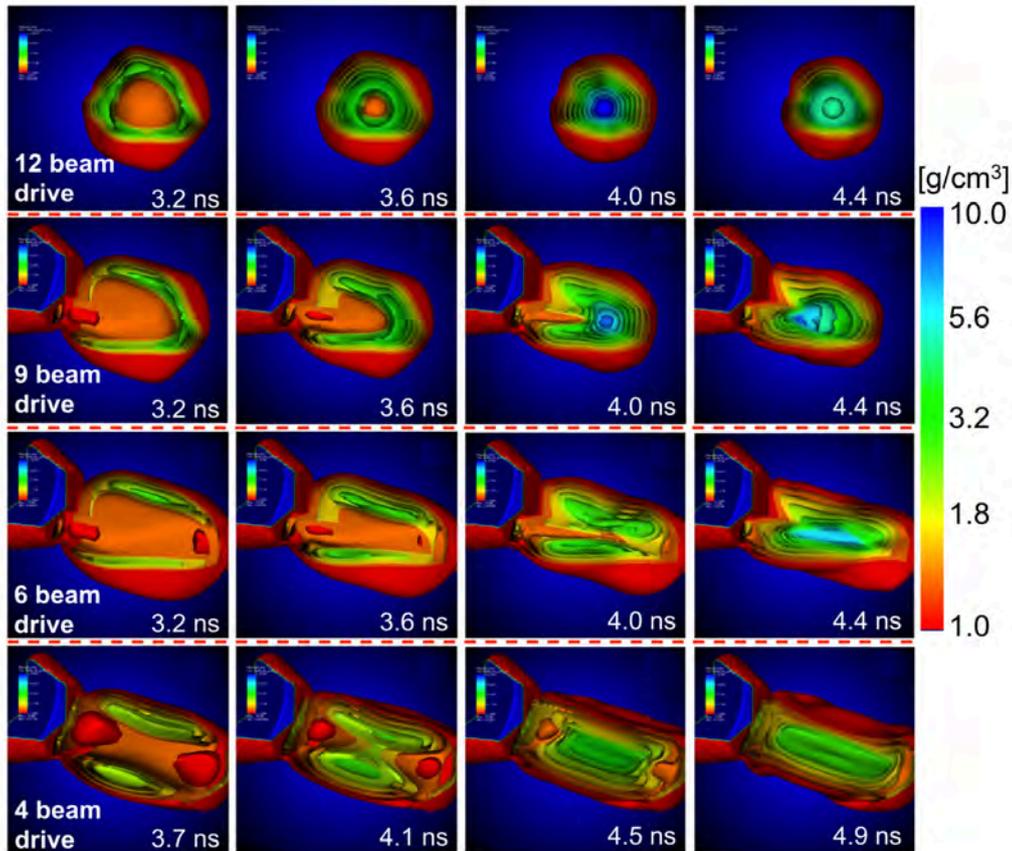


図 4.3.1-2 3次元流体シミュレーションコード IMPACT-3D によって計算された非対称爆縮によるコア形成の比較 [参考文献: H. Sawada and H. Sakagami, “Numerical study of core formation of asymmetrically driven cone-guided targets”, Physics of Plasma, Vol. 24 (2017) pp. 100703(1 ~ 6).]

れた。

2016年度以降のこの共同研究で、3本の査読付き論文が国際共著論文として出版されている。2016年度には、トカマクのエッジプラズマにおいて発生するプラズマの非中性効果について、Chew-Goldburger-Low(CGL)条件を加味して考察した論文が出版された[4.3.1.1-1]。この論文では、プラズマの圧縮をもたらす応力が磁気井戸の性質を変え、結果として、ペDESTアル近傍での不安定モードの安定化に関わる条件が変更されることが示された。また、同年度には、プラズマの不安定性に関わる理論を大気現象に応用した、塵旋風に関わる論文が出版された。

2018年度には、交換型不安定性・テアリング不安定性の遷移についての2次元MHDシミュレーションの研究を行い、論文が出版された。この研究は、最外殻磁気面外側

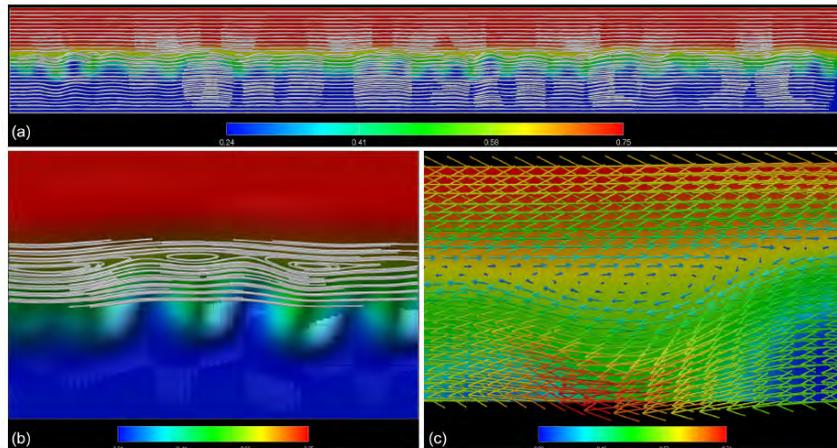


図 4.3.1.1-1 Fig: (a) 全計算領域における磁力線及び密度等高線。(b) は (a) の部分拡大図。(c) 磁器再結合によって形成された磁力線の O 点付近における全計算領域における磁力線及び密度等高線。(文献 [4.3.1.1-3] 図 4 より。)

でプラズマの抵抗率が高くなる効果を取り入れた数値モデルを開発し、これを使用して、2D スラブ中の交換型不安定性・テアリング不安定性の遷移の2次元数値シミュレーション研究を行ったものである。このシミュレーションにおいて、初期には交換型不安定性が発生するが、エッジプラズマ抵抗率の数値モデルを取り入れたところ、交換型不安定性からテアリング不安定性に遷移が生じ、不安定性が抑制されることが分かった。図 4.3.1.1-1 は、このシミュレーションにおける磁力線や密度等高線を描画したものである。この研究の結果、Zheng and Furukawa (2010) において提唱された、Current Interchange Tearing Mode (CITM) が成長することを、数値シミュレーションによって確認した。

2019 年秋の時点で、2018 年度の共同研究（これは 2019 年 1 月-2 月に実施された）である、CITM に関する 2 流体効果の影響などについて、論文を取りまとめているところである。

[4.3.1.1-1] L.Zheng, and W.Horton, H.Miura, et al., "Nonneutralized charge effects on tokamak edge magnetohydrodynamic stability", Physics Letters A 380, 2654-2657 (2016).

[4.3.1.1-2] W.Horton, H.Miura, et al., "Dust devil dynamics", Journal of Geophysical Research, 10:1002/2016.DD024832 (2016).

[4.3.1.1-3] H.Miura, L.Zheng, and W.Horton, "Numerical simulations of interchange/tearing instabilities in 2D slab with a numerical model for edge plasma", Physics of Plasmas 24, 092111 (2017).

4.3.2 日欧協力

4.3.2.1 不純物粒子輸送の新古典シミュレーション研究における日欧共同研究

プラズマの中心領域で不純物が外部へ吐き出される不純物ホールと呼ばれる LHD で観測された現象は、核融合プラズマの高性能化に向けて非常に興味深い現象である。しかし、これまでの運動論に基づく第一原理シミュレーションからは、実験結果に反する結果しか得られていなかった。そこで、近年注目されている磁気面上での静電ポテンシャルの不均一性について、この性質の新古典輸送への影響について、ドイツ IPP グライフスバルトの A. Mollen 博士らと共同で詳細に調べた。LHD 不純物ホールプラズマにおいて、SFINCS コードを用いて解析した結果、このポテンシャル不均一性を考慮すると、不純物粒子は、よりプラズマ内部に輸送されることが分かった [4.3.2.1-1]。これは、外部への粒子輸送によって実現される不純物ホールの実験結果にはそぐわない結果である。従って、ポテンシャル不均一性の他に、輸送の大域性やプラズマ加熱による輸送の効果、さらには乱流輸送の効果について、より詳細な解析が必要であることが明らかになったと言える。乱流輸送の評価には、かなりの計算資源を要するため、簡約輸送モデルの構築も必要となる。LHD のみならず、W7-X をはじめとする様々な 3 次元配位に対応できる輸送モデル構築にむけて、IPP のほかにオランダ・アイントホーフェン工科大学の J. Proll 氏らと共同研究を開始している。

[4.3.2.1-1] A. Mollen, *et al.*, "Flux-surface variations of the electrostatic potential in stellarators: impact on the radial electric field and neoclassical impurity transport", Plasma Phys. Control. Fusion **60** (2018) 084001.

4.3.2.2 新古典輸送現象に関する EU との共同研究

欧州にはドイツ Max-Planck 研の W7-X、スペイン CIEMAT の TJ-II というステラレータ装置があり、3次元閉じ込め磁場中のプラズマの輸送・閉じ込めに関する実験的及び理論シミュレーション研究が精力的に進められている。核融合研及び数値実験炉研究プロジェクトとも、長年に渡り共同研究を行っている関係にあり、Coordinate Working Group Meeting (CWGM) などの枠組みを通じた国際共同研究が進められてきた。特に、新古典輸送現象についてはステラレータ・ヘリオトロン配位においてコアプラズマ閉じ込め性能の評価に重要であり、日欧の各装置間での磁場配位依存性や相互のシミュレーションコードを用いた実験解析、コードの検証、最適化配位の研究など、様々な共同研究が行われている。

2016年には、LHD実験で観測された不純物ホール現象に関連して、新古典輸送理論から負電場となり、高Z不純物が内向きにピンチされることが予測されるプラズマ（これは不純物ホールプラズマにも当てはまる条件）においても、十分に高 T_i で衝突周波数が低くなる場合には両極性電場による内向きピンチと、温度勾配によるスクリーニング項が同程度になり不純物のコアへの蓄積が緩和されるパラメータ領域があることを、解析的に示す論文が共同研究の成果として出版された [4.3.2.2-1]。また、2018年には、稼働したばかりのW7-X装置に付けられたイオン温度と流速を計測する装置XICSによる径電場分布の推定を、日欧で開発された三つの新古典輸送コード (DKES, SFINCS, FORTEC-3D) の計算と比較検証を行い、非常によい一致が得られた [4.3.2.2-2]。これは、観測装置の検証という意味にとどまらず、W7-Xのように新古典輸送を低減するように最適化された装置の設計計算に使われた新古典輸送計算法自体の妥当性の検証にもなっており、ヘリカル核融合炉の最適化設計・運転予測という数値実験炉研究プロジェクトの目的に対しても重要な共同研究の成果となった。

[4.3.2.2-1] J.L. Velasco, I. Calvo, S. Satake, et al., “Moderation of neoclassical impurity accumulation in high temperature plasmas of helical devices”, Nuclear Fusion Vol.57, 016016 (2016).

[4.3.2.2-2] N. A. Pablant, A. Langenberg, A. Alonso, “Core radial electric field and transport in Wendelstein 7-X plasmas” Physics of Plasmas Vol.25, 022508

4.3.2.3 周辺輸送研究における日欧交流

Max-Planck IPP との間で周辺輸送コード EMC3-EIRENE に関する共同研究を引き続いて行い、不純物パフ放電におけるネオンガスと窒素ガスの輸送特性の違いに起因するトロイダル均一性／不均一性を説明するなど、大きな成果を上げた。この成果について、2017年のステラレータヘリオトロン国際ワークショップ (ISHW) で口頭発表を行った。他にも、タングステン被覆ダイバータタイトルの導入に関する検討や、ダスト粒子輸送コード DUSTT と結合したダスト輸送解析など、様々な研究へと適用が広がった。また、同コードに関して Heliotron J や JT-60SA 等の他の国内装置に関する国内共同研究を開始し、国際会議での発表につながった。モデリングの高精度化及び広範な適用へ、今後も多くの成果が期待される。また、同コードの国際的な開発者グループへ参加し、モデル拡張等の貢献を行った。

Forschungszentrum Jülich (HZJ) との間で不純物輸送・プラズマ壁相互作用コード ERO2.0 に関する共同研究を開始し、LHD への同コードの導入、及びそれに必要なコード開発などを行った。同コードはここ数年で世界中の装置への適用が開始されているが、共同研究としては LHD が他の装置に先駆けての適用例となった。2019年のプラズマ周辺理論に関する国際ワークショップ (PET) において、初の適用結果をポスター発表した。LHD 実験で得られる不純物堆積分布の解析などへの適用を予定している。

4.3.3 日中韓協力

日中韓フォーサイト事業「高性能プラズマの定常保持に必要な物理基盤の形成」により日中韓三国間の共同研究が平成24年8月1日から平成29年7月31日まで5年間実施された。本事業の拠点機関は核融合科学研究所 (NIFS、日本)、等離子体物理研究所 (ASIPP、中国)、国立核融合研究所 (NFRI、韓国) であった。研究協力体制は五つのカテゴリー、カテゴリー I 「磁場閉じ込め配位の定常保持」、カテゴリー IIa 「プラズマエッジ及びダイバータプラズマ輸送」、カテゴリー IIb 「エッジプラズマの安定性」、カテゴリー III 「高エネルギー粒子とバルクプラズマの相互作用」、カテゴリー IV 「理論・シミュレーション」で構成された。数値実験炉研究プロジェクトからはカテゴリー IV のキーパーソンを担当するとともにカテゴリー IIb にも参加した。

カテゴリー IV は NIFS と京都大学が協力して推進し、NIFS は高エネルギー粒子駆動不安定性のシミュレーションとダイバータプラズマモデリングの共同研究を担当した。高エネルギー粒子駆動不安定性に関する活動では、MEGA コードを用いた共同研究を ASIPP 及び NFRI と進めた。ASIPP では Youjun Hu 研究員、大学院生の Youbin Pei 氏、及び Nong Xiang 教授と協力し、EAST トカマクにおけるアルフベン固有モード及び

フィッシュボーン不安定性に関するシミュレーション研究を実施した。その成果は、Physics of Plasmas 誌に3編の学術論文として発表された [4.3.3-1-3]。図 4.3.3-1 は EAST トカマクにおけるトロイダルアルファ固有モードのトロイダル電場について (a) M3D-K コードと (b) MEGA コードの結果を比較している [4.3.3-3]。トロイダルモード数は $n=1$ である。両者がよく一致していることが確認できる。NFRI では Tong-nyeol Rhee 研究員 及び Jin-Yong Kim 理論グループ長と協力し、NFRI トカマクにおけるアルファ固有モードのシミュレーション研究を実施した。

ダイバータプラズマモデリングに関連した活動では、ASIPP の G. N. Luo 教授のグループの Z. S. Yang 氏、Q. Xu 氏、G. J. Niu 氏等と EAST 装置に関連した共同研究を行った。不純物ガスパフ輸送解析に向けた EMC3-EIRENE による EAST 周辺プラズマの計算、ダイバータタイル間隙を含めた壁近傍領域の静電粒子シミュレーションを行った。また、大連理工大学 (DLUT) の S. Dai 氏等との EMC3-EIRENE コードに関する共同研究を開始し、EASTのネオンガスパフ放電で生じる熱負荷の非軸対称性に関する解析を行い、パフ位置による非対称性の現れ方の違いを明らかにした。

カテゴリ-IIbでは、ASIPP (Y. Liang 教授ら) と EASTトカマクにRMPを重畳した場合の磁力線構造のモデル化に取り組んだ。プラズマ応答を考慮した磁力線応答を考察するためには非線形 MHD 計算が必要であるが、より簡便に高速での磁力線構造のモデル化を行うために、有理面上での表面電流をモデル化することによりプラズマ応答をモデル化する手法を開発した。図4.3.3-2に有理面上での表面電流でプラズマ応答をモデル化した結果と、参考として真空近似の場合の磁力線構造を示す。図中上段 (a)及び(b)はRMPとプラズマ応答を合わせた場合、プラズマ応答のみを考慮した場合のトロイダルハーモニクスを示す。プラズマ応答の影響により、本来、対称であるはずのトロイダルハーモニクスが非対称に変化していることが分かる。一方、図中下段 (c)と(d)は、プラズマ応答を考慮しない場合とした場合の磁力線構造を、それぞれ示す。プラズマ応答を考慮した場合、有理面上の磁気島が消失していることが分かる。

[4.3.3-1] Youjun Hu *et al.*, Physics of Plasmas, Vol.23, No.2 (2016) pp.022505 (1~8).

[4.3.3-2] YoubinPei *et al.*, Physics of Plasmas, Vol.24, No.3 (2017) pp.032507 (1~9).

[4.3.3-3] YoubinPei *et al.*, Physics of Plasmas, Vol.25, No.5 (2018) pp.052503 (1~8).

[4.3.3-4] Jie Huang *et al.*, Plasma Science and Technology, Vol.21, No.6 (2019) 065105.

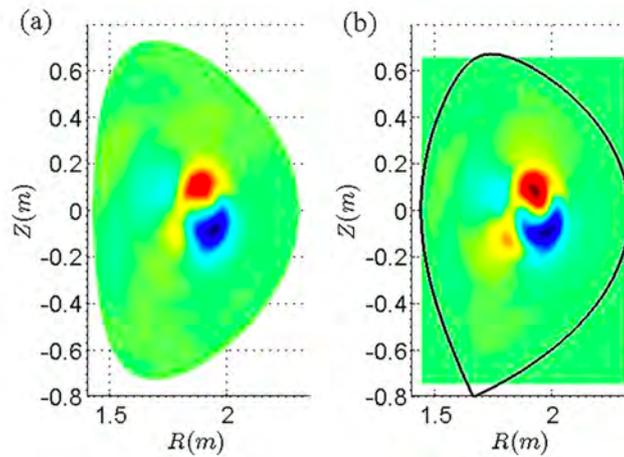


図 4.3.3-1 EAST トカマクにおけるトロイダルアルフベン固有モードのトロイダル電場に関する (a) M3D-K コードと (b) MEGA コードの比較。トロイダルモード数は $n=1$ である。両者がよく一致していることが確認できる [4.3.3-3]。

- 周辺輸送研究における日中交流

ASIPP との間で、周辺プラズマモデリングの共同研究を引き続き行い、不純物ガスパフ輸送解析に向けた EMC3-EIRENE による EAST 周辺プラズマの計算、ダイバータタイル間隙を含めた壁近傍領域の静電粒子シミュレーションを行った。また、DLUT との EMC3-EIRENE コードに関する共同研究を開始し、EAST のネオンガスパフ放電で生じる熱負荷の非軸対称性に関する解析を行い、パフ位置による非対称性の現れ方の違いを明らかにした。

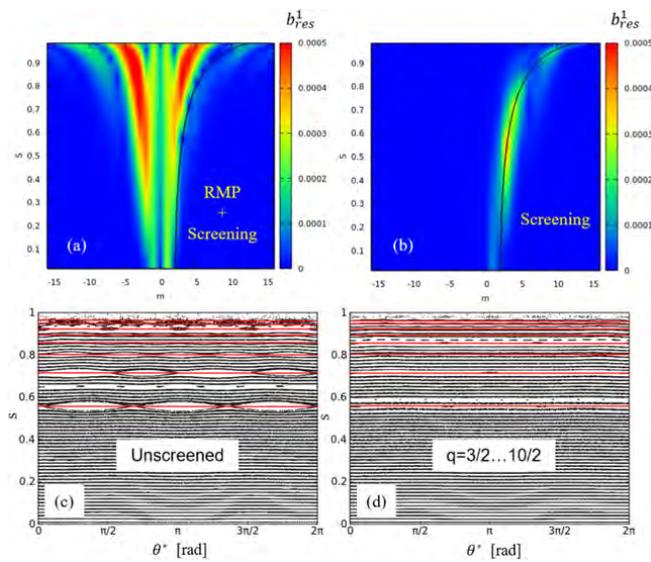


図 4.3.3-2 EAST トカマクにおける磁力線構造。図はそれぞれ、(a) プラズマ応答を含んだ RMP のポロイダルハーモニクス、(b) プラズマ応答のみのポロイダルハーモニクス、(c) プラズマ応答を含まない場合の磁力線構造、(d) プラズマ応答を含んだ場合の磁力線構造、を示す。 [4.3.3-4]。

4.4 ITER 計画・BA との連携

4.4.1 六ヶ所研究センターにおける ITER-BA 活動

青森県六ヶ所村には、2007年6月に開始された国際熱核融合実験炉 [ITER] に関する幅広いアプローチ (Broader Approach:[BA]) 活動を対象とした国際共同研究の推進拠点として、国際核融合材料照射施設工学実証設計活動 [IFMIF/EVEDA] 事業とともに、国際核融合エネルギー研究センター (International Fusion Energy Research Centre:[IFERC]) 事業の研究拠点が設置された。BA 活動は当初 2017年5月までとされていたが、2020年3月までの延長が決定されている。IFERC 事業は、原型炉設計・R&D 調整センター (DEMO Design and R&D Coordination Centre)、計算機シミュレーションセンター (Computational Simulation Centre:[CSC])、及び ITER 遠隔実験センター (ITER Remote Experimentation Centre:[REC]) からなる 3 副事業を推進しており、主として日欧両実施機関 (欧州は Fusion for Energy:[F4E]、日本は JAEA) と IFERC 事業チームの各ユニットから構成される統合事業チームが中心となって活動を進めている。NIFS 六ヶ所研究センターの役割は、IFERC 事業をはじめとする BA 活動と NIFS・大学等との連携を支援し、BA 活動と NIFS・大学等との共同研究を進める上での環境を整えることである。この一環として、六ヶ所研究センター長が 2010年9月から IFERC 事業長を兼任し、2012年4月に六ヶ所研究センターを JAEA 青森研究開発センター内に移設した。

IFERC 事業長の主たる役割は、事業チーム員の支援の下に 3 副事業及び関連活動を円滑に実施するために日欧実施機関間の調整業務を行う事であり、事業活動に必要な資料を事業委員会 (Project Committee:[PC]) に提案し、PC の勧告の下で運営委員会 (Steering Committee:[SC]) の承認を求め、事業推進を調整している。春の PC では前年の活動の年次報告及び事業計画の改訂、秋の PC では翌年の作業計画の提案等が中心的課題である。この他にも、状況に応じて両実施機関の価格見積もりと貢献分担の配分の改定を SC の承認を得るために PC へ提案している。日欧実施機関間の円滑な調整業務を行うために、F4E の IFERC 事業責任者等との隔週 TV 会合を開催するとともに各副事業の管理・技術会合へも参加している。各事業は日欧専門家のレビューと事業長の承認に基づく調達取り決め (Procurement Arrangement:[PA]) に基づいて遂行されるため、PA の締結及び遂行支援も大切な役割である。

IFERC 事業は極めて順調に遂行されており、2020年3月末の事業の円滑な終了に向けた最終段階にある。特に、原型炉設計活動及び REC 活動の最終報告書の編纂、両実施機関の貢献価格の収支報告等の業務が重要な課題となっている。さらに、2020年4月から 2025年3月の期間において BA Phase II が予定されており、BA Phase II にお

る IFERC 事業計画の作成支援も事業長の重要な役割である。また、IFERC のウェブサイト (<https://www.iferc.org>) を適宜更新し、内外への情報発信にも務めている。

・ IFERC CSC を利用したシミュレーション研究

IFERC 計算機シミュレーションセンター (CSC) のスーパーコンピュータ (Helios/六ちゃん) の計算機資源配分を決定する常設委員会などの重要な委員会に数値実験炉研究プロジェクトのメンバーが貢献した。各委員会への参加状況を表 4.4.1-1 にまとめる。Helios の計算機資源の 80% は国際選考枠として日欧から選出された委員で構成される常設委員会での評価に基づき各研究課題に計算機資源が配分された。残りの 20% は、各 10% を日本枠、EU 枠とし両極が独自にその利用方法を決定した。2012 年 1 月の Helios 稼働開始から同年 3 月には、調達時の性能評価に使用された 4 本 (日欧各 2 本) のシミュレーションコードを用いたライトハウスプロジェクトが実施された。その中には核融合研で開発された高エネルギー粒子・MHD ハイブリッドシミュレーションコード MEGA が含まれており、核融合研と原子力機構の研究者が協力してライトハウスプロジェクトを実施した。表 4.4.1-2 は 2012 年 4 月以降の通常運用期において数値実験炉研究プロジェクトメンバーが代表者を務める研究課題数を国際選考枠と日本枠のそれぞれについて示している。毎年合計 10 件以上の研究課題が実施されており、これらの研究分野は、乱流輸送、新古典輸送、高エネルギー粒子、MHD、炉材料であった。

2016 年末の Helios 運用終了後、量研機構がスーパーコンピュータシステム Japan Fusion Reactor Simulator 1 (JFRS-1、愛称：六ちゃん-II) を導入し、2018 年 6 月より IFERC CSC において運用している。JFRS-1 は原型炉、ITER、JT-60SA、中性子源開発などの核融合研究開発を効率的に推進することを目的としている。JFRS-1 の計算機資源配分などを決定する大型計算機委員会に数値実験炉研究プロジェクトのメンバーが委員として貢献している。JFRS-1 の応募枠には、計算資源の 80% を割り当てるプロジェクト枠と年間 10,000 ノード時間の計算資源が一律に配分される一般枠がある。数値実験炉研究プロジェクトメンバーが代表者を務める研究課題数を表 4.4.1-3 にまとめる。この他に、日欧共同のシミュレーション研究課題が JFRS-1 と欧州の Marconi を利用して 2019 年 4 月から 2020 年 3 月まで実施されており、数値実験炉研究プロジェクトのメンバーも参加している。

4.4.2 国際トカマク物理活動 (ITPA) と IMEG への参加

ITPA の「高エネルギー粒子」、「ペDESTAL と周辺物理」、「統合運転シナリオ」の課題グループに数値実験炉研究プロジェクトからそれぞれ 1 名が国内委員として参加して

表 4.4.1-1 IFERC CSC 委員会への参加状況

委員会	役割	議長	委員
SWG-1	スーパーコンピュータの仕様策定		1名
SWG-2	常設委員会の実施要領策定	1名	1名
常設委員会	計算機資源配分		1名

表 4.4.1-2 IFERC CSC 研究課題実施状況

利用期間	国際選考枠	日本枠
第1サイクル	9 (2012.4.1-2012.11.14)	2 (2012.4.1-2013.3.31)
第2サイクル	10 (2012.11.15-2013.11.14)	1 (2013.4.1-2014.3.31)
第3サイクル	10 (2013.11.15-2014.11.14)	3 (2014.4.1-2015.3.31)
第4サイクル	10 (2014.12.1-2015.11.14)	6 (2015.4.1-2016.3.31)
第5サイクル	8 (2015.11.15-2016.12.27)	4 (2016.4.1-2016.12.27)

表 4.4.1-3 JFRS-1 (IFERC CSC) 研究課題実施状況

利用期間	プロジェクト枠	一般枠
2018年度 (2018.6.1-2019.3.31)	10	0
2019年度 (2019.4.1-2020.3.31)	6	1

いる。各課題グループは定期会合を毎年2回開催している。数値実験炉研究プロジェクトから ITPA 課題グループ会合への参加状況は下記の表 4.4.2-1 の通りである。

表 4.4.2-1 数値実験炉研究プロジェクトから
ITPA 課題グループ会合への参加状況

	ペDESTALと 周辺物理	高エネルギー 粒子	MHD	統合運転 シナリオ	輸送と 閉じ込め	合計
2013 春	1	1				2
2013 秋		1				1
2014 春	1					1
2014 秋	1					1
2015 春		1				1
2015 秋		1			1	2
2016 春		1				1
2016 秋		1			1	2
2017 春		1				1
2017 秋				1		1
2018 春		1				1
2018 秋				1		1
2019 春		1		1		2
2019 秋		3				3

「統合運転シナリオ」課題グループでは、統合運転シナリオの検討に必要な統合輸送解析スイートの構築について、TASK3D-a を例にとった話題提供や、ITER プラズマの ECH スタートアップ検討や IMAS との連携を図る上で重要と考えた、LHD 実験に向けて開発されたレイトレーシングコード LHDGauss [4.4.2-1] の LHD 実験適用状況に関する話題提供（核融合研：辻村亨氏）などのアレンジを行ってきている。また、「統合運転シナリオ」課題グループと「ペDESTALと周辺物理」、「輸送と閉じ込め」グループとの合同の取り組みとして立ち上がった同位体効果研究について、LHD 重水素実験の関与・主導を担保するため、LHD 実験関係者への情報展開と参画呼びかけを行った。また、それぞれの会合での議論概要などを、核融合エネルギーフォーラムのプラズマ物理クラスター定常運転・制御サブクラスター会合やプラズマ・核融合学会誌の会議報告などを通じて日本の関連研究者に情報展開を行った。

ITER プラズマの統合解析ツール IMAS (Integrated Modelling and Analysis Suite) の

整備状況や運用に向けた取り組みに関する評価・諮問を行う統合モデリング専門家会合 (IMEG: Integrated Modelling Expert Group) の委員として活動されていた京都大学福山淳教授 (現在、同名誉教授) の後任として、2017年度の会合から数値実験炉研究プロジェクトの研究者が参画している。LHD 実験を対象として開発・運用を進めている統合輸送コード TASK3D-a (3.2.2節参照) や、実験・解析データについて統一フォーマットを採用している LHD解析サーバーの状況などについて情報提供を行い、大型実験での統合解析ツールの円滑な運用の例として高い評価を受けた。2017、2018、2019年度の IMEG 会合に参加し、IMAS の整備状況の進展、ITER 参加各極の IMAS導入状況、ITERデータモデルへの整合性担保などについての議論内容や日本の取り組みへの期待などを、量子科学技術研究開発機構からの参画委員とともに、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心プラズマモデリングサブクラスター会合などの機会を活用して、日本の関連研究者へ情報展開を行っている。

[4.4.2-1] T. Ii, Tsujimura et al., Nucl. Fusion Vol. 55, No. 12 (2019) 123019 (pp.1 ~ 12).

4.4.3 その他の ITER/BA 連携活動

・ITER 遠隔実験センターの大規模データに関する共同研究

2018年度より、数値実験炉研究プロジェクトの研究者が、IFERC 事業 ITER 遠隔実験センター (REC: Remote Experiment Center) 共同研究「大規模ストレージデータの統計学的解析手法の研究」の研究代表者を務めている。ITER などから送られてくる大量のデータを保管・利用することが RECの重要な機能であるが、蓄積される大規模データの取り扱いでは、統計学などの専門的な技術・知識を有する専門家との連携による新たな展開が期待できる。このような取り組みを組織的に実施するために、量子科学技術研究開発機構、統計数理研究所、京都大学、そして核融合科学研究所の4機関からの研究者の参画を得て共同研究を立ち上げて主導している。TASK3D-a の運用で蓄積した熱輸送解析データベースを用いた統計的手法による熱輸送モデリングや、京都大学の大学院生や若手研究者を中心とした、LHD 実験・解析データを活用したデータ駆動の取り組みを ITER という国際舞台につなげるハブとしての役割を果たしており、若手研究者の実践的育成にも大きく貢献している。

・乱流輸送に関する **JT-60U** の実証研究と **ITER** の予測研究

燃焼プラズマの閉じ込め性能予測を見据え、ITERと同規模の規格化ジャイロ半径パラメータ(イオンジャイロ半径/プラズマサイズ)を示すJT-60U実験データに対して、ジャイロ運動論コードGKVによる乱流輸送計算を実施した[4.4.3-1]。シミュレーション結果と実験計測との定量比較の結果、コア領域におけるイオン・電子熱輸送フラックスの径方向分布を分布計測の誤差程度以内で再現することが確認された。さらに、燃料イオン(D、T)とヘリウム灰(He)を含む多種イオン乱流シミュレーションがITER-like配位に対して実施された[4.4.3-2]。その結果、DとTの燃料密度比が50%:50%の均一混合の場合においても、それぞれのイオンの乱流粒子フラックスが同一ではなく、インバランスを生じることが明らかとなった。

・ **JT-60U** における突発的高速イオン駆動不安定性のシミュレーション

JT-60U実験において大振幅のアルフベン固有モード(AE)が繰り返し発生する現象(Abrupt Large-amplitude Event, ALE)が観測されている。量研機構との共同研究により、ALEをシミュレーションで再現することに成功した[4.4.3-3]。このシミュレーションではMEGAコードを使用し、マルチフェーズ計算法を採用した。マルチフェーズ計算法は粒子衝突時間スケールの長時間計算を可能とする計算法であり、JT-60Uだけでなく米国のトカマク型装置DIII-DとLHDの実証研究でも成果を上げている。このシミュレーションでは中性粒子ビーム入射(NBI)による高速イオン生成を考慮している。シミュレーション結果では、蓄積した高速イオンが40-60ms間隔でALEを引き起こし、ALEに伴って高速イオンが大きく損失した。これらの結果は実験結果をよく再現しており、マルチフェーズ計算法の有効性を実証している。さらに、シミュレーションでは複数のトロイダルモード数のAEが観測されたので、実験データを再解析したところ、実験においても複数のAEが励起されていることが確認できた。複数のAEの存在は、不規則な高速イオン軌道を発生させるので、高速イオン損失に対して本質的な役割を担っていると考えられる。この成果は、シミュレーションが過去の実験結果を正しく「予測」した成果といえる。

[4.4.3-1] M. Nakata *et al.*, Nucl. Fusion, Vol. 56 (2016) pp. 086010 (1~11).

[4.4.3-2] M. Nakata *et al.*, “Multi-species ITG-TEM driven turbulent transport of D-T ions and He-ash in ITER burning plasmas”, 26th IAEA Fusion Energy Conference (2016, Kyoto) TH/P2-2.

[4.4.3-3] A. Bierwage *et al.*, Nature Comm., Vol. 9 (2018) pp. 3282 (1~11).

・ **JT-60SA** のダイバータプラズマモデリングに関する共同研究

量研機構の共同研究「三次元磁場構造を考慮した JT-60SA の SOL・ダイバータプラズマの定量的評価」（代表者：核融合研・小林政弘）に基づき、3次元輸送コード EMC3-EIRENE による RMP 印加時の JT-60SA ダイバータプラズマモデリングを行った。RMP は ELM による突発的熱負荷を低減する方法として重要視されている一方、ダイバータフットプリントに特徴的なパターンが生じることが知られていながら、その定量的な解析モデルの開発は不十分であり、実験との不一致も多く報告されており、JT-60SA のダイバータ輸送、及びフットプリントの解析が可能な数値モデルの開発が必要である。主要メンバーは、代表者の小林（核融合研）、田中（名大）、河村（核融合研）、松永（量研機構）、星野（慶応）であり、グリッド開発及び計算実施を田中と河村が、JT-60SA の磁場を含む装置情報の提供を松永が、RMP 非印加時の SONIC による計算結果の提供を星野が分担した。段階的な計算モデル開発として、RMP 非印加時の EMC3-EIRENE のフットプリント分布と SONIC の分布の比較を行い、ダイバータ板上の粒子・熱流束分布について定性的な一致が確認された。この成果について、Plasma Conference 2017 でポスター発表（田中：22P-90）を行った。続いて RMP 印加時の計算を行い、他のトカマク装置と同様にダイバータフットプリントに分岐が生じることが確認され、またその影響の現れる位置がストライク点よりも SOL 側に偏在する結果が得られた。この成果について、17th Plasma Edge Theory 国際ワークショップ（アメリカ・UCSD）でポスター発表（田中）を行った。JT-60SA については初の試みであると同時に、実験開始に先立って数値的検討が可能になったことの意義は大きい。

・ **JT-60SA** の非線形 MHD シミュレーション

ダイバータ部に流入する熱・粒子束は、コアプラズマから輸送される定常的なもののほかに、プラズマ周辺部で駆動される MHD 不安定性によってももたらされる。トカマクの場合、周辺局在化モード（Edge Localize Mode）の存在が大きな問題となっている。周辺輸送障壁の形成と主に高い圧力勾配を持つペデスタル部が形成され、そこで駆動される非定常な熱・粒子束がダイバータ材料に大きな損傷を与えることが危惧されている。ELM の存在は H モードにとっては必然であるために、外部からの制御ノブを用いて ELM を抑制・低減するための試みが行われている。ELM 抑制のための方法としては、外部共鳴磁場摂動の応用が考えられており、大きな成果を上げている。JT-60SA に上段 6 個、中段 6 個、下段 6 個の合計 18 個の誤差磁場補正コイルが設置

される予定である。これらの誤差磁場補正コイルは、もちろん誤差磁場の補正に使われるほか、余った容量はELMの低減に使われる予定である。そこで、核融合科学研究所で開発されている非線形拡張MHDコードMIPSを用いて、どの程度のRMPを重畳すればELMの抑制が可能になるかを考察した。考察の対象として、一番標準的なシナリオ、ITER相似シナリオを選択した。この時、プラズマ電流は4.6MAで誘導電流がメインの放電であり、安全係数分布は中心から一様に増加する。また、周辺部にはペDESTALが形成され、Type-I ELMが発現することが線形計算から予測されている。

図 4.4.3-1 に、MIPSでELMのシミュレーションを行った結果を示す。図中には、線形成長フェーズでの圧力摂動成分の等高線を示した。トーラス外側のペDESTALに局在化したモード構造が表れることが分かる。

図 4.4.3-2 に、誤差磁場補正コイルに $n=3$ の偶パリティで10kA、20kA、30kAの電流を流した場合、ELMによる損失エネルギーがどう変わるかの時間発展を示した。参考のためにRMPなしの場合も示す。誤差磁場補正コイルに20kA以上の電流を流した場合には、それ以下に比べELMによる損失エネルギーが低減していることが分かる。このことからRMPにより、ELMの低減が可能であることが明らかになった。一方、今回の考察からはELMの抑制が可能となったとの直接の証拠は得られていない。異なるシナリオでも同様の考察を行い、ELMの抑制が可能であるかどうか、考察を進める予定である。

- ・量子科学技術研究開発機構の公募共同研究への参加

国際核融合エネルギー研究センターとJT60-SAに関連して量子科学技術研究開発機構が公募している共同研究に数値実験炉研究プロジェクトメンバーが研究代表者の課題が4件採択されている（表 4.4.3-1、表 4.4.3-2、表 4.4.3-3）。

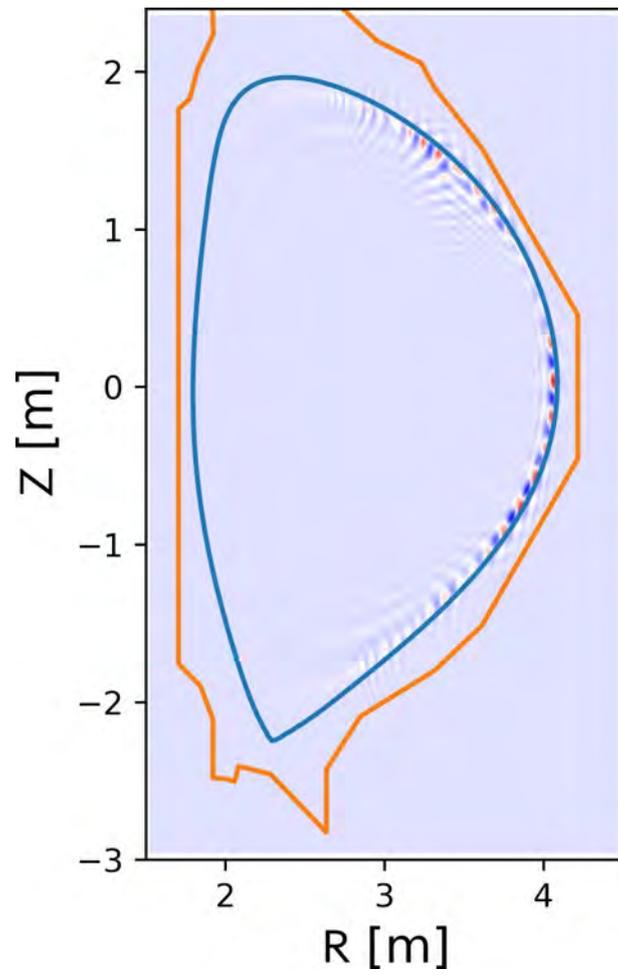


図 4.4.3-1 MIPSでELMのシミュレーションで得られた圧力摂動。プラズマ周辺部に局在化したモード構造が表れている。

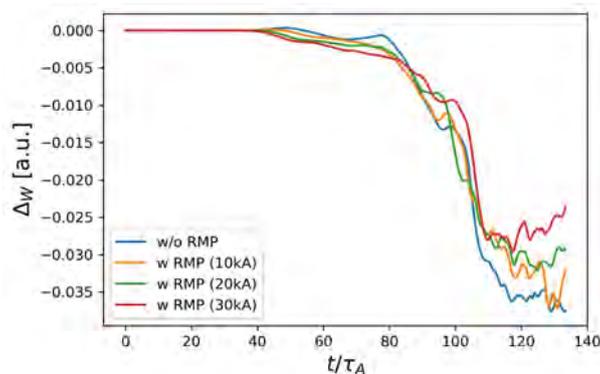


図 4.4.3-2 $n=3$ の偶パリティで誤差磁場補正コイルに電流を流した場合の損失エネルギーの時間発展。20kA 以上の場合で、ELM による損失エネルギーの低減がみられる。

表 4.4.3-1 IFERC 事業 ITER 遠隔実験センター共同研究

研究代表者	研究課題名	年度
横山雅之	大規模ストレージデータの統計学的解析手法の研究	H30-R1

表 4.4.3-2 トカマクに関する「国内重点化装置共同研究」

研究代表者	研究課題名	年度
鈴木康浩	ITER における共鳴摂動磁場の 3 次元モデリングと高エネルギー粒子閉じ込めに対する影響	H27-H29

表 4.4.3-3 トカマク炉心プラズマ共同研究

研究代表者	研究課題名	年度
仲田資季	ジャイロ運動論シミュレーションによる乱流輸送低減効果の研究	H27-H29
仲田資季	多種イオン混合プラズマの乱流輸送及び分布形成に関する研究	H30-R1

4.5 産業界との共同研究

4.5.1 東芝メモリ株式会社との共同研究

- ・半導体微細加工のための分子シミュレーション技術の研究

半導体加工プロセス、並びに、製造プロセスを進めるべく、TMCでは数値シミュレーションによる研究が行われてきたが、マクロな計算モデルに基づくシミュレーションが大半を占めるようである。一方、半導体のようにプラズマを利用したナノスケール材料の加工プロセスは、原子レベルの物理・化学法則に支配されている。そのため、シミュレーションにおいても原子スケールの扱を行うことが重要だと現在では認識されている。特に電子顕微鏡等を用いた観測実験では直接見られない原子分子の動的メカニズムを解明できることは原子レベルのシミュレーションを用いる最大の強みであるとともに、そこで得られたミクロスコピックなメカニズムをマクロな計算モデルへ反映させることで、既存のシミュレーションコードの信頼性・予測性能の向上に繋がるのが期待できる。核融合研究分野においては、核融合プラズマを閉じ込める真空容器の内側壁とプラズマの接触による損耗・堆積現象が古くから課題となっている。核融合分野ではプラズマ-壁相互作用現象と呼ばれる研究領域である。特に、真空排気ポート付近で磁力線に導かれたプラズマが直接材料に当たるダイバータと呼ばれる部分の損耗は、核融合炉成立を左右する重要な課題である。核融合科学研究所 (NIFS) ではこのようなプラズマ-壁相互作用現象の解明のために、分子シミュレーション研究を行っている。ここで、分子シミュレーションとは、分子動力学(MD)、モンテカルロ計算 (MC)、密度汎関数理論 (DFT)などに代表される原子スケールのシミュレーションの総称であり、同時に、どれか一つの手法にとらわれることなく、問題に合わせてそれらを使い分ける意味を含み、物理学・化学・材料工学の研究者が分野横断的に育んできた様々なノウハウがある。加えて、材料を扱う手法だけでなくプラズマと接触することによる独特の問題に対して、プラズマ-物質相互作用では計算条件の設定などに独特の注意や技術拡張が求められる。この点に関して、NIFSでは、プラズマ-物質相互作用に特化した独自のハイブリッド手法を精力的に開発している。NIFSにおいて培われたプラズマと物質の相互作用に関する分子シミュレーション技術を、半導体加工・製造プロセス分野へ応用するべく、東芝メモリ株式会社 (TMC) 社内において分子シミュレーション研究活動を立ち上げた。手始めに密度汎関数理論 (DFT) 並びに第一原理分子動力学 (FPMD) を用いた研究として、シリコン (Si) 表面に対するフッ化炭素ラジカル分子 (CF) 入射時の表面反応を対象としたシミュレーションを実施した。併せて、DFTの計算を実施するOpenMXコード及び機能拡張パッチをNIFSからTMCへ提供し、コード運用のノウハウに関しても技術提供を行った。本研究成果は、2018年11月に

開催された The 40th International Symposium on Dry Process (DPS2018) にて発表を行った [4.5.1-1]。また、2018年12月以降は、共同研究期間の延長を視野に、古典分子動力学(MD)コードの開発について技術提供を行った。単にNIFSで開発したコードの提供ではなく、TMCにてコード開発する技術を養いたいという希望に沿い、TMC加藤氏を中心にコード開発を行っていただき、基本的なコード開発の注意点から、MDの理論に関してノウハウを提供した。2019年3月からは、高エネルギーでのイオン入射過程を扱う手法として、分子動力学以外の手法を用いる必要性を検討し、二体衝突近似法のモダン化された手法と、そのコード開発について技術・情報提供を行った。

[4.5.1-1] T. YAGISAWA, S. KATO, A. TAKAYAMA, and A. M. ITO, “First Principle Molecular Dynamics of fluorocarbon molecule injection into Si surfaces”, The 40th International Symposium on Dry Process (DPS2018) (Nagoya, Japan, November 13-15, 2018).

5 人材育成

5.1 大学院生・博士研究員の教育・指導

核融合科学研究所は、総合研究大学院大学(総研大)物理科学研究科核融合科学専攻博士課程に在籍する大学院生を教育する基盤機関であり、また名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻及び名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻の大学院生を教育するとともに、名古屋工業大学等、他大学からも大学院生を特別共同利用研究員として受け入れ、その教育・指導を行っている。また、COE研究員や日本学術振興会特別研究員等の博士研究員を受け入れ、研究の指導を行い、核融合研究の将来を担う人材の育成に貢献している。図5.1-1に数値実験炉研究プロジェクト関係者の指導する学生数及び図5.1-2に学生の国際会議発表件数の推移を示している。なお、数値実験炉研究プロジェクトによる教育・指導の成果として、2016年から2019年の期間に、学生を筆頭著者とする27編の論文及び博士研究員を筆頭著者とする10編の論文が査読付き学術雑誌に出版されている。

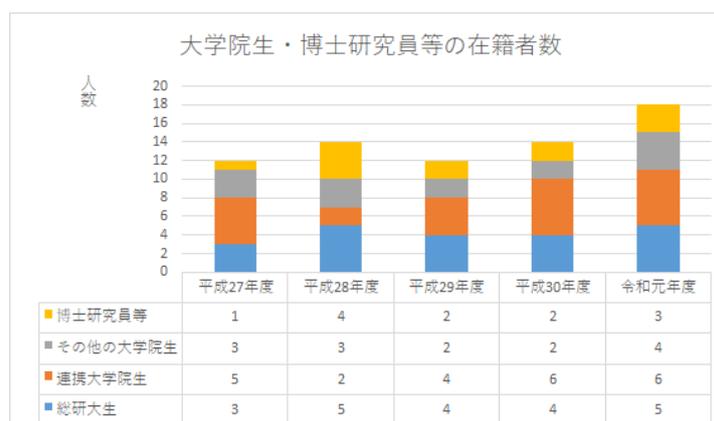


図 5.1-1 数値実験炉研究プロジェクト関係者の指導する大学院生・博士研究員等の在籍者数

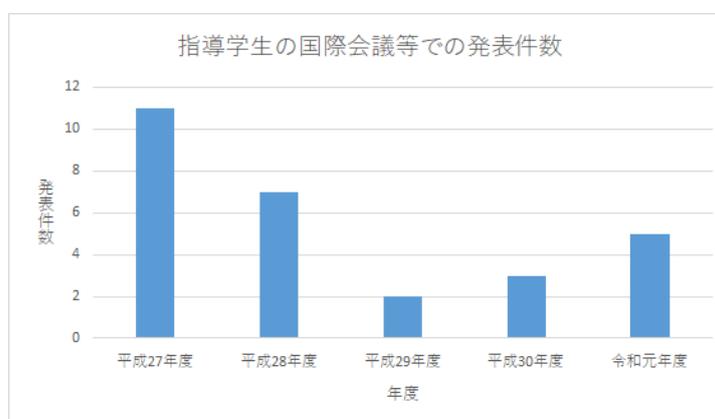


図 5.1-2 数値実験炉研究プロジェクト関係者の指導する大学院生の国際会議発表件数

5.2 その他の教育プログラム

5.2.1 SSH 活動

核融合科学研究所では、スーパー・サイエンス・ハイスクール (SSH) 事業を通じた高等学校との教育連携活動を積極的に進めており、理論・シミュレーション研究においてもこの活動に参加している。最先端科学の現場に触れ、現役の研究者から直接指導を受けることで、科学への興味を深める機会となることが期待される。研修活動は、多くの場合、それぞれ2時間弱程度の事前講義とコース別実習及び施設見学からなり、年間12～17校程度の受け入れを行っている。参加人数は、各校ごとに異なるが、40名前後の場合が多く、80名を超えることもある。理論・シミュレーション関連で担当した課題を以下にまとめる。

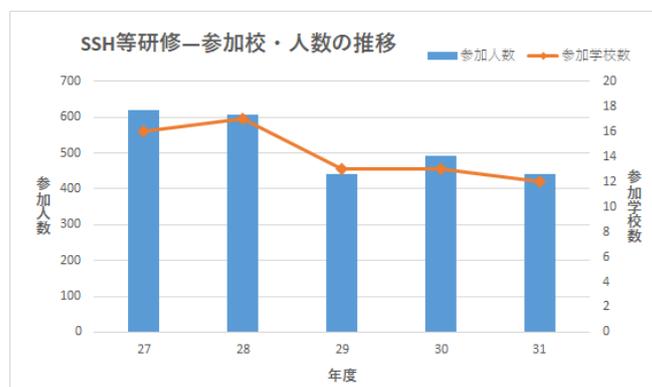


図 5.2.1-1 SSH 等研修の参加校及び参加者数

- コンピューターシミュレーション
- プログラミングと可視化
- バーチャルリアリティ

それぞれの課題を、年度ごとに3、4回実施している。

5.2.2 総研大 夏の体験入学

総合研究大学院大学 (総研大) 物理科学研究科核融合科学専攻では、毎年8月に、大学1~4年生、高専4、5年生・専攻科学生を対象に「夏の体験入学」を開催している。これは、核融合科学研究の研究内容を広く周知するとともに、将来の核融合科学分野の研究者を目指す学生の発掘を目的としている。プラズマ実験、超伝導などの先進工学実験や、理論・シミュレーションなど、核融合に関する幅広い分野から課題を学生が選択し、合宿形式で研究の最前線を体験する企画である。開校式、オリエンテーションの後、LHDやシミュレーション関連施設の見学、懇親会、特別講義が行われ、教員及び総研大在学生の指導による研究活動の体験をする。最終日には研究発表会が開催され、核融合研の教員や総研大等の在校生とともに、質疑応答が行われる。理論・シミュレーションからは以下のような課題が提案され、各課題で2~4名程度の学生を受け入れている。

平成27年度

- 第一原理的手法によるプラズマ複雑現象のシミュレーション
- 核融合磁場閉じ込めプラズマの平衡解析入門

平成28年度

- 粒子シミュレーションで調べる運動論的プラズマ現象
- プラズマの平衡・安定性解析入門

平成29年度

- 5次元シミュレーションによる粒子／反粒子プラズマの不安定性解析
- モンテカルロ法による運動論的輸送シミュレーション

平成30年度

- プラズマの平衡・安定性解析入門
- モンテカルロ法による運動論的輸送シミュレーション
- 粒子シミュレーションで調べるプラズマ複雑現象

令和元年度

- 粒子シミュレーションによるプラズマ複雑現象の研究
- 粒子軌道シミュレーションを用いた中性粒子ビーム加熱解析
- 5次元シミュレーションによる磁場閉じ込めプラズマの微視的不安定性解析



図 5.2.2-1 夏の体験入学の集合写真

5.2.3 総研大アジア冬の学校

総合研究大学院大学 (総研大) 物理科学研究科核融合科学専攻ではアジア諸国の大学生、大学院生及び若手研究者の育成に広く供するべく、アジア冬の学校を開催している。平成28年度からは東南アジアの多数の学生の参加を求めてタイで開催し、シミュレーション関連の講義を行っている。

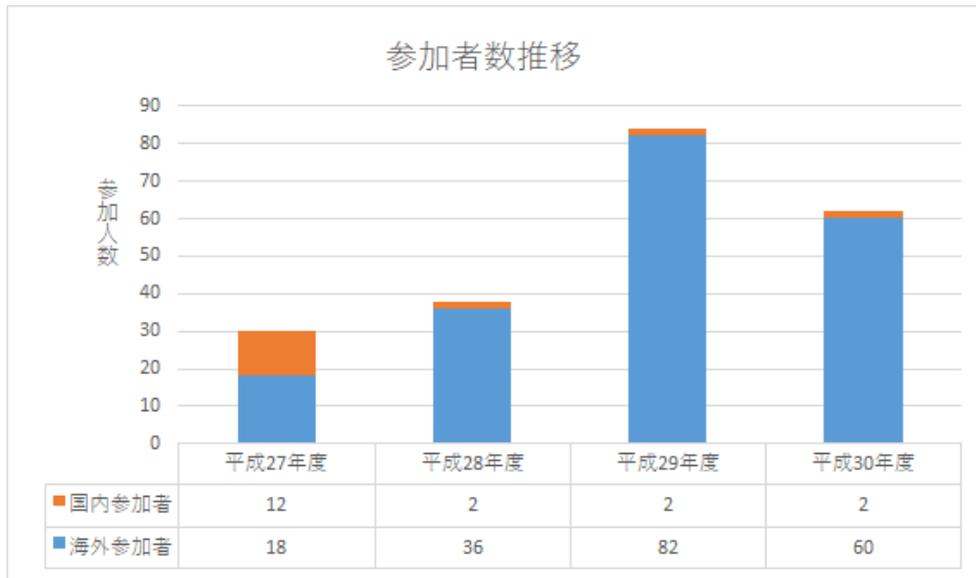


図 5.2.3-1 総研大アジア冬の学校参加者



図 5.2.3-2 総研大アジア冬の学校集合写真

6 将来計画

数値実験炉研究プロジェクトでは、2.1章の図2.1-2で示したように、数値実験炉の構築に向けて3段階のプロセスからなる研究目標を掲げている。これらの3段階は、それぞれ、自然科学研究機構の第2期、第3期及び第4期中期目標期間にほぼ対応しており、現在は、プロジェクトの第2段階（第3期中期）の後半にあたる。以下では、今後の第2段階後半と第3段階における数値実験炉研究プロジェクトの研究計画について述べる。

第2段階後半（～2021年）では、1.3節で示した第3期中期目標・中期計画に沿って、LHDプロジェクト、核融合工学プロジェクトや他の大学・研究機関との連携の下で、2020年6月に性能の向上が予定されているプラズマシミュレータを有効活用し、数値実験炉の構築に向けた各物理要素に対するシミュレーションコードの高性能化、核融合プラズマにおける多階層物理現象を扱うためシミュレーションの統合化、LHD重水素実験をはじめとする様々な実験結果との比較によるコードの信頼性の検証及び基礎物理シミュレーション研究を引き続き進展させ、核融合科学及び関連理工学の学術的体系化と発展を図る。さらに、第3段階（2022年～）では、第2段階の成果に基づき、高精度・高信頼性を有する数値実験炉の構築を進め、数値実験炉をヘリカル型核融合炉のプラズマ性能の予測に活用して、高性能の核融合炉の設計に大きく貢献することを目指している。また、現在、核融合科学研究において、LHD実験終了後の次期実験装置の基本概念設計に関する要素研究及び各種検討活動が、次期計画検討チーム / 新配位創成研究チームを中心に進められている。この活動に数値実験炉研究プロジェクトは深く関与し、これまでにプロジェクトで産み出された研究成果や開発されたシミュレーションコードが要素研究・検討に活用されている。今後も、数値実験炉研究プロジェクトは、磁場配位最適化等の次期実験装置に関わる研究活動を推進することにより、核融合科学研究所の将来計画の策定に貢献していく。

以上に述べた数値実験炉研究プロジェクトの将来計画における研究課題を、「平衡・安定性」、「高エネルギー粒子・波動・加熱」、「新古典・乱流輸送」、「周辺プラズマ輸送」、「プラズマ壁相互作用」、「統合輸送」、「多階層物理」、「シミュレーション科学基盤」及び「磁場配位最適化研究」の各グループに分類し、各グループの活動及び共同研究に関する具体的な将来計画を以下に示す。

6.1 各タスクグループの将来計画

6.1.1 平衡・安定性

今後も継続して、プラズマシミュレータを駆使した3次元シミュレーションによるヘリオトロンプラズマの解析を中心に、平衡及び安定性の研究を推進する。特に、ヘリオトロンプラズマにおける安定限界を決定する物理の解明を目指し、その結果を次期装置計画の検討に適用する。

MHD 平衡に関しては、これまで、HINT コードによる3次元静止平衡の計算手法を整備してきた。等方圧力分布を持つ平衡に関しては、ほぼ完成した状態となっている。一方、LHD の高ベータ実験においては、主力の加熱は中性粒子入射 (NBI) が担っている。この場合、多くの放電において圧力分布が非等方となることが実験的に観測されている。そこで、この平衡を精度よく計算するために、非等方圧力分布を持つヘリオトロンプラズマの平衡計算が可能となるように、HINT コードを拡張する。同時に、次期装置の設計においても活用する。

安定性解析においては、HINT コードによって得られた3次元平衡に対して、3次元非線型 full-MHD コードの利用を推進する。これまで、LHD プラズマの安定性のメカニズムを解明するために、主として MHD モデルに基づいて交換型モードの解析を中心に行ってきた。これによって、現象の様々な特徴に対して定性的に解明することができているが、全てを統一的に解明するモデルの構築には至っていない。そこで、安定限界を決定する統一的な物理の解明のために、以下の2通りの解析を推進する。

一つ目の解析として、MHD モデルにおいて、崩壊現象を引き起こす不安定性として、標準的な交換型モードだけではなく準交換型モードも対象とする。準交換型モードは、平坦な回転変換分布が生じたとき、その領域に局在する非共鳴の圧力駆動型モードである。非共鳴モードであるが、回転変化分布の平坦領域において、支配的成分のモード数 (m, n) に対して $|n/m - \ell| \ll 1$ となる必要がある。標準交換型モードの成長率がモード数が高い成分ほど大きいのに対し、準交換型モードではモード数が低い成分ほど大きいという特徴がある。崩壊現象が観測される実験では、回転変換分布が電流によって平坦化されている可能性があり、また、この崩壊現象を引き起こす不安定性のモード数は、 $n = 1$ という最も低いモード成分である。従って、準交換型モードは、観測結果を統一的に説明できる可能性があるため、正味トロイダル電流による回転変換分布の変化を基に、MIPS コードを用いてその駆動メカニズムを解析する。現時点でも、このような回転変換に平坦領域を持つ平衡において、非共鳴モードの計算例が予備的に求められており、これが準交換型モードであるという検証から研究を進めていく。また、実験では、ロックモードのように崩壊直前にモード回転が停止する

ことが観測されている。この現象の解明のために、これまで個別に解析を進めてきた背景フローの計算とRMP印加の計算を組み合わせ、モード回転の停止を再現し、安定限界に対する寄与を解明する。

二つ目の解析手法として、イオンの運動論的効果を調べるため、MEGAコードを用いたシミュレーションも同時に並行して進展させる。MEGAコードによるシミュレーションでは、高ベータLHDプラズマ中の圧力勾配駆動型MHD不安定性の非線形飽和状態に対して、熱イオンの運動論的効果が及ぼす影響について明らかにすることをやっていく。また、実際のLHDにおける高ベータ実験では、中性粒子ビームによる加熱があり、高速イオンの寄与も無視できない。そのため、高速イオン、熱イオンを同時に運動論的に取り扱うシミュレーションも実施し、先に行う熱イオンのみを考慮したシミュレーション結果と比較することにより、高速イオンの影響についても明らかにする。

上記の二つの解析は、当初、それぞれ独立して行うが、見通しが立った時点で、お互いに組み合わせることも検討する。さらに、これらで得られた知見を基に、次期計画での装置設計に応用していく。現時点では、MHD安定性に関する最適化作業では、実験での知見を考慮に入れて、共鳴面でのメルシエ条件に基づいて検討することを考えている。一方、上記の解析を早急に進めることにより、更に理論的な根拠に基づいた安定限界の決定手法を確定し、それに基づいて、装置設計をより精密なものとしていくこととする。また、設計においては、MHD安定性だけではなく、粒子輸送やダイバータ領域の確保等との間の最適化が必要となる。そこで、本プロジェクトの輸送グループや炉工プロジェクトの共同作業を進めていく予定である。

さらに、MHDモデルの拡張や2流体効果の導入も進めていく。特に、これまでも行ってきたLES手法による短波長不安定性現象のシミュレーション研究を推進する。対象としては、環状プラズマにおけるMHD現象、特に交換型モードやバルーニングモードなど短波長で微視的效果が大きな影響力を及ぼす不安定モードの非線形発展と長時間挙動の振る舞いのシミュレーション研究を行う。2018年度までは、核融合の短波長不安定性の成長・飽和シミュレーションに対して、LES手法が有効であることの実証に多くの時間を費やしてきた。2019年度以降、特に微視的效果が重要となる現象について、XMHDモデルのLESを行っていく。Current Interchange Tearing Mode (CITM) モードの成長と飽和に関する問題を題材に、ソースとシンクの物理モデルや、微視的效果に特に注目したSGSモデル (LESに必要な数値モデル) を導入し、不安定性の成長、乱流遷移と飽和の過程が繰り返し起き得る系機構やこの過程での熱輸送についての解明を目指す。

また、これまでも解析を進めてきたペレット入射におけるプラズモイドのシミュレーションを拡張し、実験結果の定量的な再現を目指す。磁気島のあるLHDプラズマにペ

レットを入射した時の密度変化は、実験ではミリ秒の時間変化に対して、シミュレーションでは数値的安定性の問題から数十マイクロ秒の時間変化しか得られていない。そこで、この問題を解消することを進め、磁気島の有無による密度変化の違いを明らかにする。さらに、LHD プラズマ中の様々な場所におけるペレットプラズモイドの運動予測モデルを構築し実験結果の理解に貢献する。

6.1.2 高エネルギー粒子・波動・加熱の物理

環状プラズマにおける高エネルギー粒子駆動不安定性を研究するために、高エネルギー粒子・MHDハイブリッドシミュレーションコードMEGAを開発してきた。MEGAコードはLHDの3次元実形状平衡に対応するとともに、中性粒子ビーム入射(NBI)と粒子間衝突を考慮した現実的な高速イオン分布を計算し、NBI高速イオンとアルフベン固有モードの相互作用を衝突時間スケールで追跡することも可能である。また、高速イオンに加えて熱イオンにも粒子法を適用したことにより、熱イオンの運動論的效果を考慮したシミュレーションも可能となっている。これらの特長を活用してLHD、CFQS、JT-60SA及びJETのD-T実験におけるアルフベン固有モードや高エネルギー粒子駆動測地的音響モードに関する実証研究を推進する。

MEGAコードはイオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)加熱による高速イオン生成に現時点では対応していない。京都大学：村上定義教授や量研機構：矢木雅敏部長との協力により、ICRFによる高速イオン生成を計算できるようにMEGAコードを拡張し、ICRF高速イオンによって駆動されるアルフベン固有モードの時間発展を研究する。ITERにおいて実現が期待される核融合燃焼プラズマでは、帯状流を介したアルフベン固有モードと微視的乱流の相互作用が重要な研究課題となる。この課題に取り組めるように、MEGAコードの物理モデルの拡張を検討する。MEGAコードでは対応できない場合は、ジャイロ運動論的シミュレーションコードを開発又は導入して、核融合燃焼プラズマの物理を開拓できるようにシミュレーションコードを整備する。さらに、アルフベン固有モードによる高エネルギー粒子輸送の効率的な予測のために、簡約化した高エネルギー粒子輸送モデルの構築に取り組む。

LHDやトカマク型装置において、NBIに伴ってイオンサイクロトロン周波数帯から低域混成共鳴周波数帯に及ぶ高周波波動が観測されている。これらの現象を解明するため、熱的プラズマと高速イオンの密度時間発展を取り入れた電磁粒子シミュレーションコードを開発してきた。空間1次元のコードを用いて、磁場に対してほぼ垂直方向に伝播する波について解析を進めてきたが、様々な方向に伝播する波を取り入れるために空間を多次元に拡張する。これにより、ホイッスラー波等の更に周波数の高い

波動との非線形結合の効果を研究する。

プラズマ実験の輸送解析では、NBIによる加熱を正確に評価することが必要である。京都大学：村上定義教授らにより、加熱解析コード GNET がプラズマと高速イオン発生分布の時間発展に対応できるように拡張されている。現在、実験解析に当たっては担当者自身が必要なデータを取得、整理してコードを実行している。統合輸送解析スイート TASK3D-a との連携等を深めることで、実験グループからも利用可能な、GNET による自動的な実験解析の環境を整備し、加熱・輸送研究の加速に貢献していく。

6.1.3 新古典・乱流輸送

数値実験炉の構築に向け、引き続き、乱流輸送の簡約化モデルの構築・統一化と統合コードへの適用、複数イオン種効果を取り込んだ大域的運動論シミュレーションコードの整備・拡張・高精度化を行うため、以下のような計画である。

簡約化モデルの構築、統一化と統合コードへの適用

非線形ジャイロ運動論解析による粒子輸送や熱輸送の値を、線形計算により再現する簡約化モデルの構築が行われている。電子運動に断熱近似をした場合や、運動論的電子効果を取り入れた場合の非線形ジャイロ運動論解析結果を基盤として、乱流輸送に対する簡約化モデルを統一化する。その際、これまで行ってきたイオン温度勾配不安定性に加えて、捕捉電子モードや電子温度勾配不安定性などについて、ジャイロ運動論解析を行う。線形成長率を時間ステップごとに直接計算することにより、簡約化モデルを統合コード TASK3D 等の輸送コードへ適用し、乱流輸送の定量的な評価を行う。

LHD 実験との連携による輸送・閉じ込めにおける水素同位体効果の解明

LHD 重水素プラズマ実験と連携した輸送・閉じ込めにおける水素同位体効果の研究が進展している。引き続き GKV を中心とした乱流輸送シミュレーション解析と LHD による検証実験の緊密な連携を図り、水素同位体を含む複数イオン種混合プラズマの乱流揺動・輸送特性を明らかにすることで、燃焼プラズマの閉じ込め性能予測に資する知見を蓄積する。さらに、乱流計算データや実験データを活用し、簡約乱流輸送モデルの高度化を行う。

先進的磁場配位最適化に向けた乱流モデリング

トカマク・ヘリカル系の両方において、乱流輸送がしばしば閉じ込め性能を支配する

ことが確認されており、3次元磁場構造による乱流の最適化の可能性に対する関心が高まっている。従来の線形計算に基づく最適化モデルでは、不安定性の飽和やゾーナルフロー生成などが考慮されておらず、最適配位の探索領域が限定されていた。GKVを中心とした乱流輸送シミュレーション解析と検証実験によって上記の非線形効果を含んだ最適化モデルを新たに構築し、ゾーナルフロー形成の促進によって乱流が抑制された3次元磁場配位の探索を推進する。

機械学習と大規模乱流シミュレーションの融合

計算機の性能に制限され易い大規模乱流シミュレーションに対して、機械学習の手法を融合することで、効率的かつ高精度にシミュレーションを実行できる手法を開発する。これにより、多粒子種や3次元磁場配位といった、より大きな計算資源を必要とする対象に対する定量的な乱流シミュレーションを実現する。

大域的乱流・新古典輸送シミュレーションモデルの開発

ヘリカルプラズマでは新古典輸送によって決まる径電場が存在し、その電場（電場シア）によって乱流・新古典輸送の双方が抑制されることから、数値実験炉によるプラズマ性能・定常分布予測を確たるものにするためには径電場を介した乱流・新古典輸送間の相互作用を明らかにすることが重要である。そのためには、乱流・新古典輸送の双方を第一原理的なジャイロ運動論方程式に基づいて取り扱う大域的full-fシミュレーション手法の開発が必須となる。現在、核融合研では、大域的full-fジャイロ運動論コードであるGT5Dコードの3次元磁場拡張に取り組み、既に新古典輸送に関する基礎的なベンチマークは完了している。今年度以降の計画では、磁気軸近傍における磁場構造の改良、多イオン種化、3次元ポアソンソルバの開発を実施する。これにより、磁気軸から最外殻磁気面までのプラズマ分布の時間発展・定常分布形成を入力した加熱源及び乱流・新古典輸送と矛盾なく決定するシミュレーション手法を確立する。

コアから周辺にわたる領域における不純物輸送の解析

δf ドリフト運動論的シミュレーションコード（FORTEC-3Dコード、KEATSコード）を多粒子種化し、不純物輸送現象の理解に向けたシミュレーション研究と実験解析への応用を進める。FORTEC-3Dコードは、コアプラズマにおける不純物輸送の評価において無視しえない影響を与える、磁気面上のイオン密度非一様性に起因するポテンシャル分布を考慮したドリフト運動論方程式を解けるように今年度拡張された。今後、これを用いてグローバル効果と磁気面上のポテンシャル揺らぎの両方を入れた

シミュレーションを行い、乱流輸送シミュレーションと協力しながら不純物ホール現象の解明を目指す。また、乱れた磁場領域に適用可能な KEATS コードを用い、3次元磁場配位のコアから周辺にわたる領域におけるタングステン不純物の衝突輸送に対して、電場を考慮した定量的評価を行う。

6.1.4 周辺プラズマ輸送

これまで LHD 周辺プラズマ中でのプラズマ、不純物等の輸送現象を解明するために、主に 3次元周辺プラズマ輸送コード EMC3-EIRENE を用いて SOL ダイバータプラズマ中でのプラズマ特性などの研究を行ってきた。第3期中期計画の成果として、EMC3-EIRENE コードの計算領域をダイバータ板及び第一壁まで拡張し、ダイバータ板や第一壁からの不純物生成、輸送やリサイクリングなどの燃料プラズマの振る舞いも含めた自己無撞着な解析を行い、実験結果と比較することが可能になった。定量的な問題が残るものの、定性的には実験結果をうまく再現できるようになった。また、LHD 実験やトカマクの RMP 実験で見られる、統計的に乱れた（ストカスティックな）磁力線領域の輸送現象の理論的解析を進め、磁力線構造の統計的性質と輸送の関係、水素ペレット入射による周辺 MHD 不安定性の制御を非線形シミュレーションで明らかにした。

これらの成果を踏まえ、数値実験炉構築のために将来計画として以下の課題を順次行う。

- EMC3-EIRENE コードによる不純物デタッチの考察と実験との比較による検証
- EMC3-EIRENE と DUSTT コードの統合による、ダストの振る舞いの考察
- トカマク・ヘリカル・直線装置実験結果との比較を通じたシミュレーションコードの検証と検討
- 次期計画を念頭に置いた、ダイバータ配位設計と周辺プラズマシミュレーション
- 周辺プラズマ輸送の理論的考察と数値モデリング

LHD 実験では計測の充実により、EMC3-EIRENE コードの計算結果と直接比較可能な電子温度・密度分布、中性粒子分布、不純物分布、輻射分布が得られるようになってきている。特に、イメージング IR カメラの結果との比較は EMC3-EIRENE コードの検証に重要であり、重点的に進める。その際、周辺プラズマ輸送の理論解析も並行して進め、EMC3-EIRENE コードのモデル改良に努める。一方、イオンのドリフトを自

己無撞着に含む運動論 (PIC) コードの開発を進め、EMC3-EIRENE コードと合わせ両輪として周辺プラズマ輸送の理解に努める。また、大学、JAEA、海外の研究機関との共同研究を通して、不純物のグローバルな輸送解析コード開発、ダスト輸送解析や高速イオン輸送解析等への応用、LHD 以外の装置を含めた輸送モデリング等を通し、数値実験炉構築に必要な要素研究を行う。

6.1.5 プラズマ壁相互作用

数値実験炉研究プロジェクト・プラズマ壁相互作用 (PWI) グループでは、二体衝突近似 (BCA) 法、分子動力学 (MD) 法、動的モンテカルロ (KMC) 法、密度汎関数 (DFT) 法、そして、時間領域差分 (FDTD) 法に基づくシミュレーションコードをオリジナルコードの開発もしくは国産コードの改良ということを基本姿勢において研究を進めてきた。そのため、これらのシミュレーションコードの“中身”が分かっており、シミュレーションモデル・条件を自由に行えることや、設定複数のコードのハイブリッド化なども比較的容易に行うことができるという利点があった。ゆえに、この利点を生かして他のグループにはない独自の壁材料の研究を進めることができたと考えている。

さて、このような PWI グループで開発・改良を行ってきた一連のシミュレーションコードを用いて、具体的な研究課題として、プラズマ対向材のプラズマ照射下での耐久性の検討に必要な基礎研究と、対向材の水素のリサイクリングモデルの構築を目指していく。同課題を進めるにあたり、これまでも数値実験炉研究プロジェクト・周辺プラズマシミュレーショングループ及び分光実験グループ、国内大学、さらに、企業との連携を深めて研究を進めてきた。これからも、PWI グループでは、核融合研究以外に共通する「物質」が主な研究課題であるため、当然核融合以外の分野の研究者との共同研究が必要不可欠である。それゆえ、いろいろな思わぬ研究の副産物も生まれることが期待できる。ゆえに、核融合発の研究成果の他分野への貢献も積極的に目指していきたい。

以上を踏まえ、以下に具体的な研究課題をまとめる。

- ・プラズマ照射下の長時間構造変化を扱うオンザフライ **KMC** 手法の開発

ヘリウムプラズマ照射で誘起されるタングステン表面の繊維状ナノ構造形成は、本年度までに開発した BCA-MD-KMC 3 連ハイブリッド手法によって、あるレベルまでの再現を達成したと考えている。シミュレーションから見出された重要な過程は局所的なスパッタリングと再堆積によるタングステン原子の輸送であった。一方で、実験からはタングステン原子の「表面拡散」が効いているとの提唱がある。しかし、表面拡散の影響を確かめるために、現在の BCA-MD-KMC 3 連ハイブリッド手法では母材

原子であるタングステンの表面拡散は扱えない。また、10年程度前の炭素ダイバータ研究時代の化学スパッタリングの MD 研究では、飛来したイオンと材料表面との瞬間的な化学反応が取り上げられていた。しかしながら、現実において重要なのは、反応の時間スケールに比べて長時間 (秒・分・時間) に及ぶプラズマ照射時間において、母材自体がアモルファス化していき、不安定な残基ができ上がる。これが熱脱離することでスパッタリングとして検出される。同時に表面温度の上昇によりアニーリングによる構造回復も起こるので、アモルファス化とアニーリングの競争が重要な現象となっていると考えられる。これら母材原子の拡散や、母材原子のアモルファス化・アニーリングなど、母材原子の長時間にわたる構造変化を扱う手法として、動的モンテカルロ (KMC) と分子動力学 (MD) を組み合わせたオンザフライ KMC 手法を2023年度を目途に新規開発する。2024 年後は先の BCA-MD-KMC と連結して 5 連ハイブリッド手法へと発展させていく計画である。

・プラズマ対向壁水素リサイクリングモデルの構築

非接触プラズマでは、プラズマと中性粒子の相互作用を用いて対向壁への熱・粒子負荷の低減を目指す。そのため国内でも中性粒子輸送コード開発が進められてきたが、水素原子・分子の主な発生源である対向壁 (ダイバータ板) からのプラズマへの水素原子・分子 (水素リサイクリング) の流入情報 (振動・回転励起分布) が不十分である。そこで、PWI グループで開発・改良を行ってきた MD コードなどを使い、水素リサイクリングに関して、(1) 対向壁から放出される水素原子・分子の量 (比率)、そして、(2) 放出される水素原子・分子の運動エネルギー分布と振動・回転励起分布の計算を行う。このデータを、共同研究を行う信州大澤田グループの中性粒子輸送コードに渡し、非接触プラズマ中の中性粒子輸送解明と、非接触プラズマ安定化への貢献を目指す。さらに、衝突輻射モデルを用いて発光スペクトルを求め、それらを、LHD で測定する分光実験と比較を行うことで、モデルの改良を行う。壁材料は、当初は LHD で測定データがあるため、炭素も想定するが、タングステンについても計算を行う。さらに、MD シミュレーション、そして、中性粒子輸送コードとも、原理的には重水素・三重水素も扱うことが可能であるため、水素同位体の挙動解析をも目指していく予定である。

・プラズマ物質相互作用に適したポテンシャルモデルの開発

これまでの研究の副産物として得た “ポテンシャル関数の数式から MD コードを自動生成する技術”【特許出願番号 2016-180966】を利用した、元素普遍 (Z ユニバーサル) ポテンシャルモデルを開発する。本研究で目指す Z ユニバーサルポテンシャル開発は、次の指針に沿って進める。(1) 研究期間内に、元素の種類として DF T 側の適用限界からランタノイドを除いたビスマスまでの 68 元素を最大とし、精度として 0.1eV/atom を満たすモデルとする。(2) 精度は多少低いですが、計算速度と物理的意味を優先したシンプ

ルな関数とする。(3) 関数中のパラメータの数が元素の種類数に1次で正比例するまで留める。既存モデルはパラメータの数が元素種の2次以上で増え、有限時間で最適解を得られない。現状の機械学習系モデル、特にニューラルネットや深層学習を利用したモデルは高精度を追い求めるがゆえに計算速度が30倍以上遅いものばかりで応用研究には実用的でない。また、物理的意味を見出すことはできずブラックボックスとなり易い。我々は開発したポテンシャルモデルを知的財産的価値の高い“数式”として公開する。これにより初学者や実験研究室の新規参入を促すとともに、プラズマ物質相互作用シミュレーションの普及へと繋げる。これから3年程度をかけて主要な数元素に関するモデル化と基本的なシステム構築を進め、その後3年から5年をかけて68元素の対応を目指す。

・放射性物質の生体分子に及ぼす影響のシミュレーションによる評価

核融合反応の実現後の検討として、放射性物質として三重水素を取り上げ、原子レベルでのコンピュータシミュレーションを行うことで、実験では測定が困難な、生体分子の損傷・劣化の評価を行う。巨大分子への放射線の影響は、以下の三つのカテゴリーに分類される。(1) 直接作用:放射線が巨大分子に直接ヒットし、分子構造を破壊する現象、(2) 間接作用:放射線誘起フリーラジカルや活性酸素が巨大分子を攻撃し破壊する現象、(3) 壊変効果:巨大分子中の軽水素に置き換わった三重水素が β 崩壊によりヘリウム3に壊変することで、化学結合が切断する現象。これらの効果のうち壊変効果の影響を、直接作用と間接作用の影響から分離して解析することは、現在の実験技術では不可能であるため、壊変効果についての知見はほとんど得られていない。また、計算機シミュレーションによるアプローチにおいても、直接作用と間接作用の効果のみを取り入れたシミュレーション手法による研究がほとんどである。そこで、PWIグループでは、壊変効果に着目し、高分生体分子における置換トリチウムの壊変効果を分子シミュレーションにより解明することを目指してきた。現時点では、あるDNAについて、構造変化をMDシミュレーションする一連の技法を開発してきたが、この手法では、共有結合の切断は原理的に扱えない。そこで、共有結合の切断・再結合を扱えるポテンシャル(ReaxFF)を用いてのMDシミュレーション技法を確立し、生体分子の壊変効果の影響の定量的な評価を目指す。さらに、間接効果についても同手法を用いて評価を目指す。

6.1.6 統合輸送コード

LHD重水素実験対応を進めてきたTASK3D-aについては、既に同位体効果研究や高エネルギー粒子挙動の解析にルーチ的に用いられ、データベースの構築、関連論文へ

の基盤データ供給などの貢献を行ってきたが、さらに、データベースの拡充や複数モジュールの比較検証に重点を置いた取り組みを行う。また、数値実験炉研究プロジェクトにおける他のタスクとの連携を更に進める。これまでに、GKVコードやFORTEC-3Dコードなど新古典・乱流輸送グループの大規模シミュレーションコードへのLHD実験データ供給を通じて、緩やかな統合を行ってきた。計算機資源の観点で、数値実験炉研究プロジェクトが有する大規模シミュレーションコード群をTASK3D-aにそのまま導入することは今後数年間でも困難であると考えられるが、緩やかな連携を通じて、TASK3D-aを基盤として多様なコード群が円滑に機能する体系（スイート）を構築する。また、LHDにおける定常プラズマ研究にも十分に対応するために、ICHモジュールの導入や周辺輸送グループとの連携強化を図る。シミュレーションコード群の結合という側面だけでなく、データ駆動アプローチを積極的に導入した簡約化モデルの整備やそれらの知見の導入を図る。

予測型 TASK3D(-p) に関しては、これまでに得られている多様な熱輸送モデルについて、LHD実験との比較検証の幅を広げながら、モデル選択や適用範囲、予測性能の確認を系統的に行う。また、統計数理研究所との共同研究立ち上げで大きな進展があったデータ同化手法の導入とLHDプラズマを用いた検証研究を更に進め、「核融合プラズマ予報」（天気予報やエルニーニョ予報になぞらえて）とも呼ぶべき研究動向を世界的視点で牽引する。これにより、データ同化を含む幅広いデータ駆動の研究コミュニティとの連携を図る基盤としてTASK3Dを活用しながら、プラズマ性能の制御やLHDの定常研究、FFHR設計活動への適用性を高めていく。

このように、TASK3D-aとTASK3D(-p)の開発と運用を相乗的に行うことにより、今後数年間で数値実験炉のひな形を具現化する。

6.1.7 多階層複合物理

MHD、ジャイロ運動論など単一のモデルでは解決できない、階層にまたがった現象をシミュレーションする手法開発に取り組み、その手段を用いて複雑なプラズマの運動の物理を理解することによって、数値実験炉研究プロジェクトに貢献する。複数の階層を取り込む手法として、(1) 拡張MHDとLarge Eddy Simulation (LES) 手法を組み合わせることで、微視的・運動論的效果を取り入れた拡張MHDモデルを開発する、(2) コアと周辺を結合した運動論シミュレーションモデルを開発する、の2種の多階層モデル開発に取り組む。また、それら二つの多階層モデルの基礎を支え、また、そのモデル開発推進を加速するための重要課題として、(3) 粒子シミュレーションによるプラズマ素過程の探求を実施する。一方で、これら多階層モデル開発過程で進展するシ

ミュレーション技術要素、プラズマ素過程における成果は、核融合だけにとどまらず他分野への波及も見据えたものである。今後の研究計画は以下の通りである。

拡張MHDシミュレーションへのLES組み込み

環状プラズマにおけるMHD現象、特に交換型モードやバルーニングモードなど短波長で微視的効果が大きな影響力を及ぼす不安定モードの非線形発展と長時間挙動の振る舞いのシミュレーション研究を、重要な物理機構は維持しつつ、可能な限り計算負荷を小さくし、多数のパラメータについて実施可能な手法の開発を行う。

LHDに関する近年の研究からも分かる通り、古典的な一流体MHDモデルではトラスプラズマの不安定性を十分に説明できないことは明らかである。他方、最近行われている運動論的MHDシミュレーションは、これまでのMHD、拡張MHDモデルに基づくシミュレーションでは説明できなかった不安定モードの安定化を説明できる可能性を示している。これは、これまでの拡張MHDモデルでは十分な物理機構が含まれていなかったことを示唆している。

他方で、運動論的MHDシミュレーションは計算負荷が大きいため、実施には相応の時間と計算資源が必要とされる。この問題を解決するため、拡張MHDモデルを元に、その物理機構を拡充しつつ、複数のシミュレーションが実用上問題にならない程度に軽快に行えるシミュレーションモデルの開発に取り組む。このため、拡張MHDシミュレーションにLarge Eddy Simulation (LES) 手法を組み合わせる(XMHD-LES)。LESとは、シミュレーションの格子サイズ(Grid-Scale)以下のスケール(Sub-Grid-Scale, SGS)の成分からGS成分への効果を、現象論的なモデルで代替することで、GSのみの(格子間隔が粗い)シミュレーションを可能にする手法である。

このグループにおけるXMHD-LES研究の具体的な内容は下記の通りである。

1. 拡張MHDモデルに基づく不安定性・乱流シミュレーション：SGSモデルを開発するための基礎データを取得するため、大規模シミュレーションを実施する。
2. 拡張MHD方程式のSGSモデルの開発・検証：矩形領域の交換型不安定性や、MUTSU/MINOSコードによる交換型不安定性、バルーニング不安定性のシミュレーションを通じて、SGSモデルの妥当性、有用性を検証するとともに、これらの不安定性の成長と飽和機構を調べる。
3. 階層拡張型SGSモデルの開発：PIC法による磁気リコネクションシミュレーションデータなどを元に、拡張MHDモデルでは取り入れられていない(あるいは正しく表現できていない)機構を、SGSモデルを通じて拡張MHDのLESに取り入れる研究を行う。

4. 他分野への波及：拡張 MHD モデルによるシミュレーション研究は、シアー流れ下での磁気再結合や太陽風などの事象と、問題を密に共有している。上記の研究を進める事で、他分野への成果の波及を狙う。

ヘリカル核融合炉の炉心-周辺領域を統合した運動論シミュレーション

ヘリカル核融合炉の周辺領域を含めたシミュレーションが可能なジャイロ運動論コードを開発し、大型ヘリカル装置に応用する。ジャイロ運動論モデルは主にコア領域の乱流輸送解析に用いられてきたが、現象論的な流体モデルで議論されてきた周辺プラズマ現象に対する物理的な理解を深める上でも重要である。例えば、エルゴディック層における不純物輸送や輸送障壁の形成メカニズムの全容解明には、磁力線をまたいだ輸送や急峻な静電場構造を自己無撞着に扱うジャイロ運動論モデルを用い、コアと周辺領域をシームレスに統合したシミュレーション研究が有効であると考えられる。

本研究では、トカマク核融合炉の統合シミュレーション向けに開発されてきた X-point Gyrokinetic Code(XGC1) のヘリカル核融合炉への拡張 (XGC-Stellarator, XGC-S) を進めてきた。これまでにコードの基礎部分を非軸対称系に対応させ、コア領域を対象としたグローバルジャイロ運動論コードとしては実用段階に到りつつある。一方、エルゴディック層などヘリカル周辺領域に特有な磁場構造への対応については課題として残されている。

今後、以下の内容を中心にコード開発と大型ヘリカル装置への応用を進めていく。本計画の範囲内では、低ベータプラズマを対象とした静電ジャイロ運動論シミュレーションを想定している。

1. 新古典・乱流輸送グループと連携しながら、大型ヘリカル装置のコア領域に開発したコードを応用する。具体的には、グローバルな径電場構造が乱流輸送にもたらす効果をイオン種ごとに調べ、プラズマ閉じ込めにおける同位体効果との関係を明らかにする。
2. XGC1 で導入されている多種イオンを対象とした衝突カーネルを開発中のコードにも実装する。新古典・乱流輸送グループで開発・実装されている衝突カーネルとのベンチマークを実施し、それぞれのモデルの妥当性及び適用範囲を検証する。
3. エルゴディック層を含むヘリカル周辺磁場に適合した非構造格子系の生成と、それを用いた揺動静電場の評価手法を確立する。最外殻磁気面-ダイバータ間のプラズマ・不純物輸送を調べ、大型ヘリカル装置における熱・粒子束計測や不純物計測、もしくは既存の周辺プラズマシミュレーションとの比較を試みる。

4. 固体材料とプラズマとの相互作用や固体壁近傍のプラズマダイナミクスに関する基礎研究と、装置サイズのプラズマ現象とを結び付けるプラットフォームとして、開発したシミュレーションモデルを活用することを目指し、当該研究グループと今後の連携について議論を進める。

粒子シミュレーションによる素過程探求

1. 境界領域プラズマの素過程についてのシミュレーション：

境界領域プラズマにおける非拡散的径方向輸送（プロブ、ホール）現象や非接触ダイバータプラズマのシミュレーションでは流体モデルがよく用いられるが、終端受熱板近傍での取り扱いや粒子間衝突など、明らかに流体モデルが破たんする領域、過程が含まれる。このような流体モデルの限界を乗り越えるための新手法として、静電粒子シミュレーションによる3次元径方向輸送コード（p3bd / up3bdコード）と、プラズマ粒子と中性粒子との衝突（原子分子過程）やプラズマ粒子同士のクーロン衝突の効果を取り入れた粒子シミュレーション手法による1次元非接触ダイナミクスコード（PAMCADEコード）の開発を進めてきた。2020年度以降は、up3bdコードによる超大規模シミュレーションにより非拡散的径方向輸送現象の未解明な点について研究を行うとともに、PAMCADEコードへの再結合過程の実装を進める。その後、PAMCADEコードによる非接触ダイナミクスをup3bdコードに取り入れた複合コードを開発し、非接触状態下のプラズマ輸送ダイナミクスの解明を目指す。さらに、up3bd-PAMCADE複合コードによる微視的ダイナミクスとグローバルコード（例えば、ジャイロ運動論コードXGC1など）との連結手法の開発を推進する予定である。なお、これらの研究、開発では、周辺プラズマ輸送グループとの協力を密にして、その展開を進める。

2. 磁気リコネクションの素過程についてのシミュレーション：

磁気リコネクションは、トカマク装置の鋸歯状振動あるいはディスラプションに深く関わっていると考えられており、これが発生するとコアに蓄えられたプラズマの熱が周辺に逃げてしまう。核融合のためには、鋸歯状振動・ディスラプションを抑制・制御する必要がある。一方で、磁気リコネクションは核融合にポジティブな面も持っている。球状トカマクにおけるプラズマ合体では、磁気リコネクションを通してプラズマを加熱させ、高ベータのプラズマを生成している。しかし、このプラズマ加熱の仕組みには、未解明な部分も多い。そのため、磁気リコネクションにおいてプラズマがどのような機構で加速・加熱されるのかという課題を、PASMOコードを用いた粒子シミュレーション手法で明らかにすることを

目指す。2020年には、PASMOコードによる磁気リコネクションの大規模3次元シミュレーションを実施し、加熱機構を詳しく調べる。一方で、現在のPASMOコードはプラズマ合体点付近のみを模擬しており、今後、模擬する範囲を合体プラズマ全体へと拡張し、境界条件を装置壁に適したものに改良することで、球状トカマク実験をより精度よく再現する粒子コードを開発する。さらに、明らかにした加熱機構をマクロな量を用いてモデル化し、上述のXMHD-LESモデル開発推進へ貢献する。また、磁気リコネクションは普遍的な現象であるので、太陽フレア、地球磁気圏サブストーム、さらには、パルサー、活動銀河核といった宇宙プラズマへの波及を目標とする。

6.1.8 シミュレーション科学基盤

プラズマシミュレータ更新をはじめ、計算機の発展に伴い、シミュレーションデータ膨大化するため、効率よくデータを解析する手法や計算機を効率よく活用するための計算技法が求められている。これらのニーズやその時々シーズをとらえながら、シミュレーション科学を支える可視化手法や計算技法の研究開発を進めていく。

- LHD 実験グループや炉設計グループとの連携を深めながら、実験観測データとシミュレーションデータ、実験装置データの同時バーチャルリアリティ (VR) 可視化や、原型炉設計データ・そのシミュレーションデータの可視化などに取り組む。また、シミュレーションで得られるデータを可視化する場合、全てのデータを同時に可視化することはできない。そこで、VR空間に表示したシミュレーションデータの任意の点をVRの指示棒などで指し示すことによってその点に付随するデータを表示する可視化手法（バーチャル計測装置）の研究を進める。原型炉設計データの構造解析や機構解析の結果を考慮したVR可視化を進める。これらの可視化を行うための可視化手法の開発に取り組む。
- ますます膨大化するシミュレーションデータの保存において In-situ 可視化は重要な役割を果たしていくことが予想される。ユーザからの要望に対応しながら、In-situ 可視化ライブラリ VISMO の開発を進め、その表示機能の強化や効果的な可視化手法の導入を進める。また、没入型バーチャルリアリティ装置 CompleXcope や HMD でも表示可能な点群データの表示の研究開発を進める。
- CompleXcope とヘッドマウントディスプレイ (HMD) の双方で稼働可能な VR 可視化アプリケーションの開発環境が整いつつある。大学や他研究機関との共同

研究の下で、可視化アプリケーション開発環境としてのゲーム開発エンジンや HMD の利活用法を研究していく。

- シミュレーションデータが膨大になるとともにその可視化データも膨大となっている。近年、急速に発達している深層学習や人工知能を導入して、より効果的にデータ解析を行うための研究を推進する。
- プログラミング開発を効率的に進めることは今後のシミュレーション研究の重要な課題の一つである。超並列プログラミング言語の開発にも関わっていく予定である。
- 将来の核融合炉ではダイバータのタングステンからヘリウム灰まで、幅広い電荷・質量数の不純物イオンの周辺・コアプラズマでの輸送現象を予測する必要がある。数値実験炉研究プロジェクトで開発されているコード群は多粒子種対応が進んでいるが、高衝突領域の重イオン不純物や、逆に、低衝突の trace impurity のクーロン衝突項は現在の数値モデルでは不十分である。より幅広い不純物イオンに対応し汎用性の高いクーロン衝突項モデルの導出と、その数値コードへの実装法の開発に取り組む。

研究環境の整備: シミュレーションデータの 3 次元可視化解析や将来の核融合炉設計研究のための研究環境整備として、また、大学共同利用機関としての役割を果たすため、複数人で一つのデータを一緒に解析することができる装置として、大型 VR 装置 CompleXcope の拡充を推進する。バーチャルリアリティをはじめとする可視化技術の開発環境や描画装置の拡充を進める。

6.2 新配位創成を目指した磁場配位最適化研究

6.2.1 次期装置に関する研究活動

大型ヘリカル装置 (LHD) の次期実験装置の基本概念設計に関する要素研究及び各種検討活動が、次期計画検討チーム/新配位創成研究チームを中心に進められている。現行の LHD 計画と次期装置計画に関する研究・検討活動スケジュールを図 6.2.1-1 に示す。数値実験炉研究プロジェクトの理論研究者も多く参画し、これまでのプロジェクトでの研究成果や開発されている計算コードなどが要素研究・検討に活用されている。次期実験装置は LHD 実験において優れた総合性能を示す内寄せ配位をベースに、線形及び非線形最適化の手法を活用しながら、乱流輸送をはじめ複数の物理過程を柔軟に制御

する新たな3次元磁場配位を探索することを目的とする。先進的な磁場配位的设计活動を進めるに当たり、物理検討と工学検討を互いにフィードバックしながら並行して進める連携体制を構成している。物理検討では理論及び実験研究者を中心に、新たな最適化概念・手法などの構築に関わる物理検討やモデリングに関する研究活動を推進している。工学検討では炉工学・炉設計の研究者及び技術部スタッフを中心に、既存概念で設計された最適化ヘリカルプラズマ装置の模擬工学設計を通じて、一連の設計スキームの確立や工学的境界条件を洗い出す検討活動を推進しており、その知見は物理検討にフィードバックされる。以下では、物理検討と工学検討活動の概況を報告する。

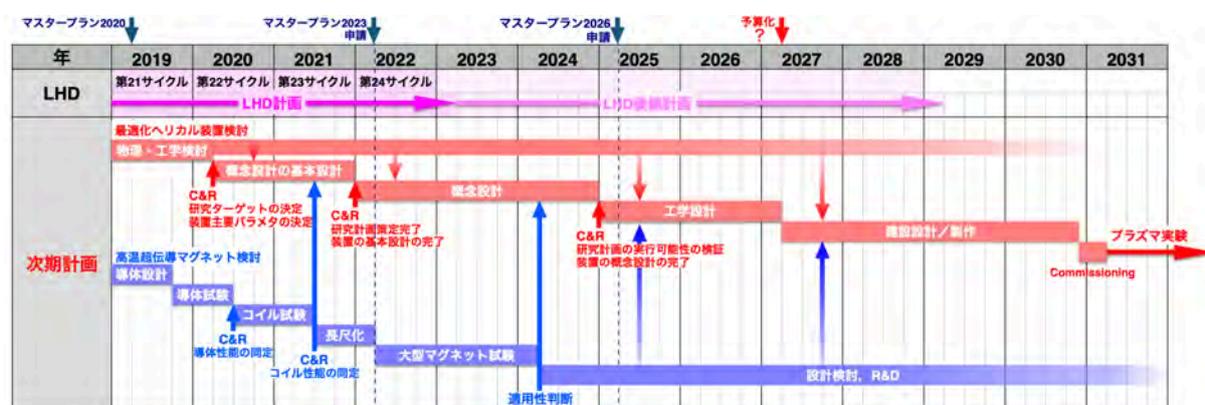


図 6.2.1-1 現行の LHD 計画と次期装置計画に関する研究・検討活動スケジュール

6.2.2 先進配位最適化に向けた物理検討・モデリング

W7-X や HSX、CFQS に代表されるような3次元磁場の準対称性等に基づく既存の最適化プラズマの設計手法は、主に線形理論に立脚した新古典輸送計算とMHD安定性計算で構成されている。しかしながら、静的な磁場の下で特定の β 領域に制限を置いた限定的な最適化となっており、プラズマをどのようにその最適状態まで導くか、あるいは逸脱させないかが重大な課題となっている。また、トカマク・ヘリカル系を問わず多くの閉じ込め方式で支配的となる乱流現象や高エネルギー粒子閉じ込め、安定なダイバータ構造が共存する最適化が組み入れられたプラズマは未だ実現されておらず、研究者の大きな関心の下で国際的にも関連研究が加速している。

新配位創成研究チームでは主に以下の研究トピックに取り組んでいる。

- 乱流・ゾーナルフローの最適化に向けたモデリング
- 多様なダイバータ構造を伴う配位研究
- 新古典フローに関するモデリング
- 連続巻線則の最適化
- 磁場構造の動的制御の検討
- 深層学習を援用した最適化計算フレームワーク

いずれのトピックにおいても、数値実験炉研究プロジェクトにおいて開発されている計算コードの活用、あるいは、拡張を行いながら研究が進められている。本節においては各々の詳細については割愛し、いくつかの主な研究の概要を紹介する。

従来の乱流の最適化研究は乱流の駆動源である線形微視的不安定性 (ITG、TEM、etc) を磁場構造によって抑制することを試みるものであった [e.g., Mynick et al., PRL2010, Xanthopoulos et al., PRL2014]。他方、これまでの LHD に対する理論研究及び実験研究によって、線形不安定性は増すもののゾーナルフローによる非線形の乱流抑制効果によって、より低い乱流輸送レベルの状態に達することが明らかにされた [e.g., Watanabe & Sugama, PRL2008]。

本研究は乱流の非線形相互作用やゾーナルフロー形成を組み入れたモデリングによって、従来の線形モデルに基づく乱流最適化スキームを拡張し、最適化の探索領域の拡大によって新たなプラズマ閉じ込め状態を見出すことを目的とする (図 6.2.2-1 (a))。特に、LHD と W7-X における複数の磁場配位を用いて、ゾーナルフローの磁場形状依存性のモデリングを行い (図 6.2.2-1 (b))、これまで数値実験炉研究プロジェクトにおいて構築されてきた非線形簡約輸送モデル [6.2.2-1-4] と組み合わせることで新たな非線形乱流最適化モデルを構成した [6.2.2-5-7]。現在、磁場配位計算コードへの組み込みを進めるとともに、LHD 実験グループと連携した理論モデル検証実験の準備を進めている。

[6.2.2-1] M. Nunami, T. -H. Watanabe et al., Phys. Plasmas 19, 042504 (2012).

[6.2.2-2] M. Nunami, T. -H. Watanabe et al., Phys. Plasmas 20, 092307 (2013).

[6.2.2-3] S. Toda, M. Nakata et al., Plasma Fusion Res. 12, 1303035 (2017).

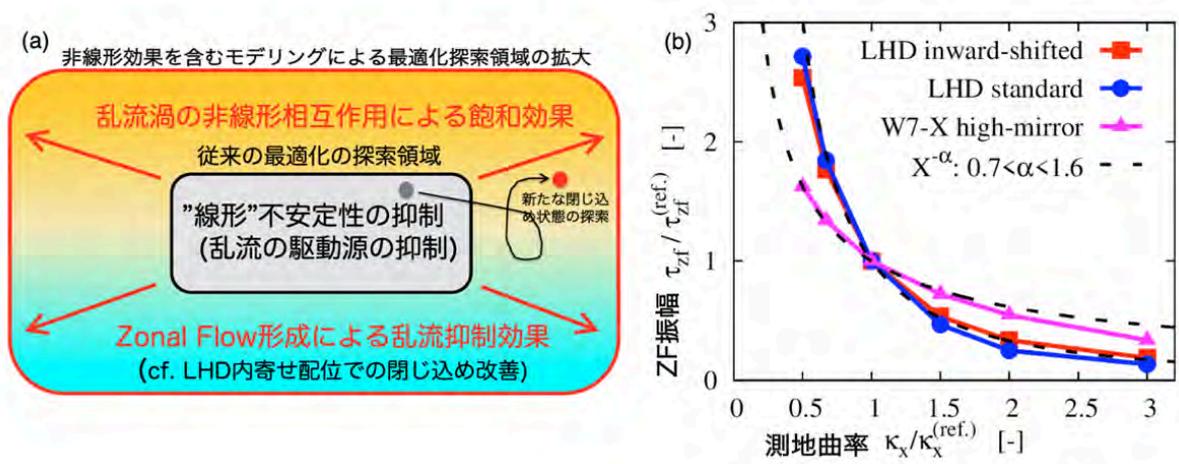


図 6.2.2-1 (a) 非線形効果を含むモデリングによる最適化領域拡大の概念図。(b) ゾーナルフロー強度の磁場形状依存性

[6.2.2-4] S. Toda, M. Nakata et al., Phys. Plasmas 26, 012510 (2019).

[6.2.2-5] M. Nakata, 2nd US/Japan Workshop on “Progress on Advanced Concept Optimization and Modeling in Stellarator-Heliotrons”, Madison, 2019.

[6.2.2-6] M. Nakata, 23rd International Stellarator and Heliotron Workshop, Madison, 2019.

[6.2.2-7] 仲田資季, 第36回プラズマ・核融合学会 年会, 中部大学, 2019.

6.2.3 多様なダイバータ構造を伴う配位研究

核融合炉の熱・粒子制御やプラズマ-物質相互作用の解明においてダイバータ構造を伴うプラズマ実験装置は重要な役割を担う。トカマク系ではレッグダイバータが標準的であり、LHDはそこに磁場のエルゴディック層を伴う形のダイバータ構造を有している。また、W7-Xといったコアプラズマが最適化されたプラズマでは一般にレッグダイバータが固有に備わるとは限らないため、磁気島ダイバータの研究が進められており、それぞれの配位の特性を生かしたダイバータ関連研究が展開されている。一方、コアプラズマとの結合や対抗機器の配置などの理由により、単一の装置で複数のダイバータ構造を探索できる実験装置はTCVなどを除いて一般に稀であり、ダイバータ構造を制御する手法の確立はダイバータ特性の詳細な定量比較を可能にする。

本研究では、最適化プラズマにおいてレッグダイバータ構造と磁気島ダイバータ構造を柔軟に形成制御することを目的に、外部コイル配位設計に取り組んでいる。ある与えられた最適化プラズマ（ここで準ヘリカル対称系）に対して、大域的なポロイダルコイル対や局所なサドルループコイル対など（図 6.2.3-1 (a)）のいくつかの方式で空間配置や電流配分などを検討し [6.2.3-1,2]、ダイバータレッグの引き出し特性や準対称性への影響、プラズマ体積圧縮などの効果について評価した（図 6.2.3-1 (b)）。また、周辺プラズマ輸送コードを用いたダイバータ特性の定量検証 [6.2.3-3] も併せて進めている。

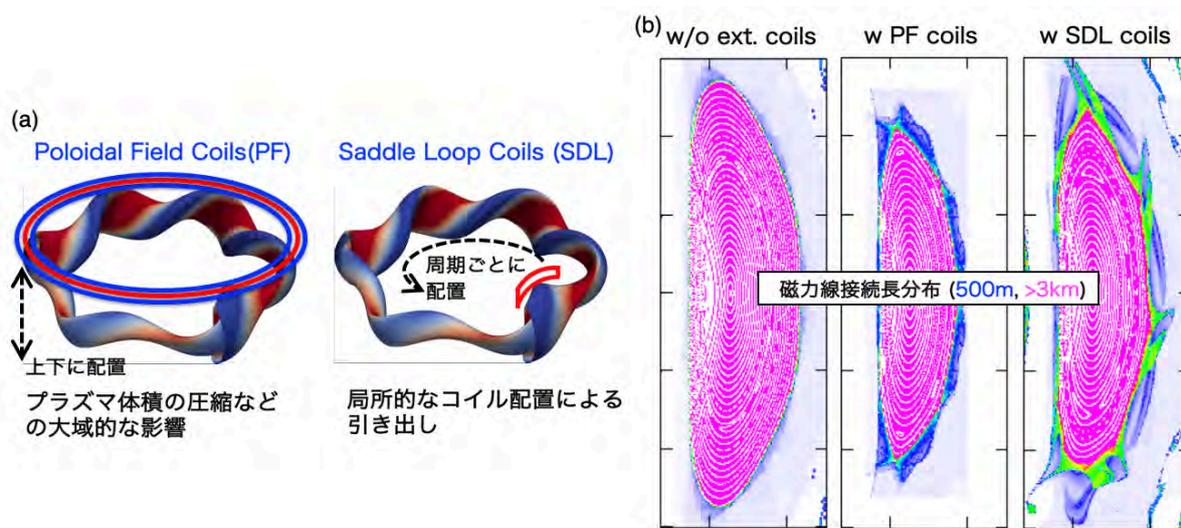


図 6.2.3-1 (a) ダイバータレッグ引き出しのための外部コイル配置。(b) 磁気線構造の比較

[6.2.3-1] Y. Suzuki, 2nd US/Japan Workshop on “Progress on Advanced Concept Optimization and Modeling in Stellarator-Heliotrons”, Madison, 2019.

[6.2.3-2] 鈴木康浩, 第 36 回プラズマ・核融合学会 年会, 中部大学, 2019.

[6.2.3-3] 河村学思, 第 36 回プラズマ・核融合学会 年会, 中部大学, 2019.

6.2.4 配位計算・コイル計算・工学検討のスキーム構築と模擬設計

一般にヘリカルプラズマの物理特性の最適化は、磁場コイルや真空容器の設計とは分離して行われる。そのため、工学的限界や実験施設と関連した境界条件との整合性を改めて検証する必要がある。本活動においては、理論・実験・工学の研究者及び技術者による物理検討と工学検討を並行させ、創案の初期段階から互いに緊密な連携とフィードバック体制をとることで、実験装置としての実現性や利便性を考慮した総合的な設計を進めることに重点を置いている。

本研究では、一連の配位計算・コイル計算・工学設計の解析コード群の整備とワークフローの確認・構築を目的とした、模擬工学設計を推進している。まず、既存の磁場配位最適化計算コード STELLOPT2 を用いて、工学設計に密接に関わるアスペクト比や磁場周期のスキャンを行い、GNET や GKV などの詳細な物理計算コードを用いて粒子軌道や新古典輸送、微視的不安定性、使用コイル数などに関する特性を定量化して、配位の模擬決定を行った。現在、そのトライアル配位を用いて、最適コイル配置や電磁力計算、加熱・計測ポートの配置検討、支持構造設計検討が進められている(図 6.2.4-1)。また、上記はモジュラーコイル方式での模擬設計であるが、連続巻線則の変調・スキャンなどによる連続巻線コイル方式の最適化も併せて検討が進められている [6.2.4-1-3]。

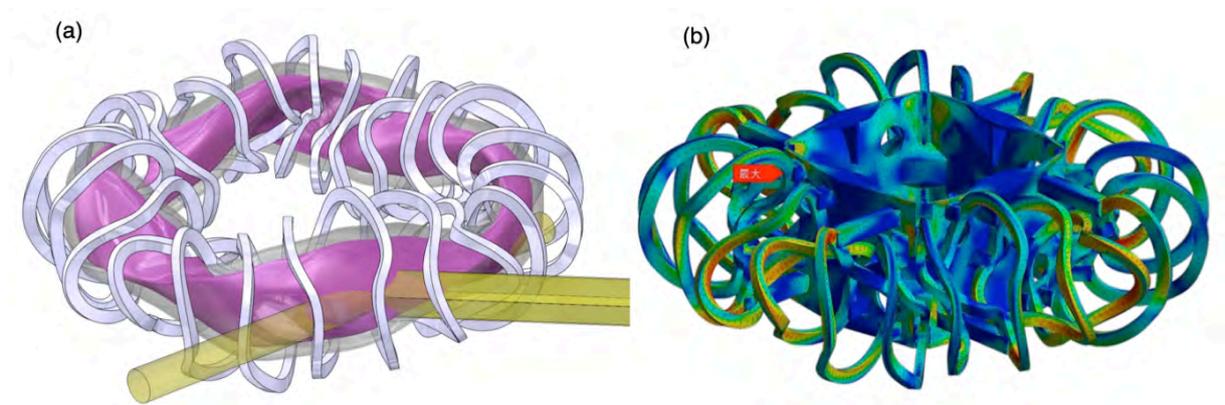


図 6.2.4-1 トライアル配位を用いた模擬工学設計: (a) 加熱・計測ポートの配置検討、(b) 支持構造設計と ANSYS-MAXWELL を用いた電磁応力解析

[6.2.4-1] H. Yamaguchi, S. Murakami et al., Ncul. Fusion, in press.

[6.2.4-2] 山口裕之, 第 36 回プラズマ・核融合学会 年会, 中部大学, 2019.

[6.2.4-3] 佐竹真介, 第 36 回プラズマ・核融合学会 年会, 中部大学, 2019.

6.2.5 今後の展開

数値実験炉研究における研究成果や計算コードは、次期計画検討活動における新配位創成を目指した磁場配位最適化研究にも大きく貢献している。物理・工学の共創連携で進められる配位最適化研究は、プラズマ実験との比較研究とは異なる観点から計算コードの予測性や有効性を評価する実証研究としての側面として重要であり、国内・国際共同研究の更なる展開・活性化が期待される。成果については学術論文や、学会・研究会の場において積極的に発信を行っていく。

7 まとめ

数値実験炉研究プロジェクトでは、平成27年度(2015年度)に行われた前回の外部評価の提言の後、平成27年度(2015年度)からこれまでの間、1章で示した第3期中期目標・計画に基づいて、プラズマシミュレータや関連する研究体制・研究環境の整備を進め、各研究グループ間の連携や国内外の研究機関との共同研究の強化によって、プロジェクトの目標である数値実験炉の構築に向けたシミュレーションコードの開発・応用や関連する基礎物理シミュレーション研究を推進し、核融合科学及び関連理工学の学術体系化に貢献してきた。

特に、第3期中期計画の中に、複数イオン種効果を取り込んだ輸送シミュレーションコードの整備・拡張やLHD実験結果との比較によるコードの検証・高度化等を掲げ、LHDプロジェクトとの密接な連携の下、平成29年(2017年)3月から開始されたLHD重水素実験のミッションの一つであるプラズマ閉じ込めの水素質量依存性(同位体効果)の解明やLHD実験で発見された不純物ホール現象の物理機構の解明等の極めて重要な研究課題に対する理論シミュレーション解析に取り組み、3章で示したような多くの注目すべき成果を上げた。各研究グループ間やプロジェクト間の連携が着実に進展することにより、統合輸送コードへ適用する高精度の乱流輸送モデルの開発、ハイブリッドコードや運動論的コードの実験解析やMHD拡張への応用、周辺プラズマ輸送とプラズマ壁相互作用の統合解析、統合輸送コードの拡張、多階層複合物理過程の粒子・流体シミュレーション技法の改良やVR可視化技術のシミュレーション解析や核融合炉設計への応用等に関する数多くの成果を上げることができた。また、数値実験炉研究プロジェクトは、シミュレーション研究拠点として、プラズマシミュレータを活用した国内共同研究、分野間連携研究や国際連携研究を大いに推進している。4章で示したように、核融合並びに宇宙プラズマの理論シミュレーション研究を通して、国内外の数多くの大学・研究機関と数値実験炉研究プロジェクトとの間で、分野間連携も含めた研究交流が活発に行われ、他分野や社会への学術成果の発信に貢献している。

以上に述べた研究成果は、多くの学術研究論文や国際会議での発表として報告されている。査読付き学術雑誌に掲載された数値実験炉研究プロジェクト関連の論文の総数は、平成28年(2016年)から令和元年(2019年)までの4年間で266編に達し、この中には、Physical Review Letters等の著名雑誌への掲載論文6編の他、Physics of Plasmas誌37編、Nuclear Fusion誌60編、Plasma Physics and Controlled Fusion誌24編等が含まれる。IAEA核融合エネルギー会議(2016年、2018年)における発表件数は、83(その中oralは18件)、それ以外の国際(国内)会議における招待講演は、44(10)件に上り、核融合科学研究所内の数値実験炉研究プロジェクトメンバーが、10件の学会賞等を受

賞するなど、国際的に高いレベルの研究成果が上がっている。

数値実験炉研究プロジェクトは、上述の研究の進展を支えるため、プラズマシミュレータ等の研究環境・関連設備を共同研究で利用するための支援体制の整備・拡充を進めるとともに、5章で示したように、将来のシミュレーション研究を担う人材の育成にも貢献している。また、最先端のシミュレーション研究環境を全国の共同研究者に提供するため、最新の計算機開発動向を綿密に調査する等、より高性能なスーパーコンピュータの導入に向けた活動を精力的に行い、令和2年度(2020年度)に、プラズマシミュレータの性能を現行機種の4倍以上に向上させる予定である。さらに、数値実験炉研究プロジェクトは、他のプロジェクトや大学・研究機関との連携の下、これまで開発を進めてきた理論解析手法・シミュレーションコードを磁場配位最適化研究等に活用し、核融合科学研究所の将来計画の策定や次期装置の設計に大きく貢献している。

以上のプロジェクト活動の成果・実績を背景に、数値実験炉研究プロジェクトの将来計画の策定を行っている。令和2年度(2020年度)以降、性能を向上させたプラズマシミュレータを最大限に活用し、国内外の大学・研究機関との共同研究やプロジェクト・研究グループ・分野間の連携を深め、数値実験炉を構成する各種3次元シミュレーションコードの完成度を高めるとともに、関連する学術研究を進展させるため、ロードマップの具体化を進めている。第4期中期計画が始まる令和4年度(2022年度)以降を睨み、LHD重水素実験等との比較・検証により、数値実験炉コード体系の予測性能を向上させるとともに、プラズマ閉じ込め物理機構の解明、磁場配位最適化や装置設計等へのコード体系の適用を進め、核融合科学研究所及びコミュニティ全体の更なる発展に貢献すべく、数値実験炉研究プロジェクトを引き続き強力に推進する。

参考資料

- 1 令和元年度外部評価「数値実験炉研究プロジェクト」の評価結果一覧
- 2 令和元年度核融合科学研究所運営会議外部評価委員会及び専門部会構成名簿
- 3 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会規則
- 4 令和元年度核融合科学研究所運営会議外部評価委員会日程

令和元年度 外部評価「数値実験炉研究プロジェクト」の評価結果

I. 評価の観点

[1] 研究計画・体制・環境の整備

- (1) 数値実験炉の構築に向けたロードマップを含めた研究プロジェクトの目標設定と研究計画は、適切に策定されているか。
また、第3期中期目標・中期計画を遂行する上で、適切に検討されたものとなっているか。
- (2) 段階的な進捗度管理や研究連携・統合化に向けたマネージメント等を含め、
研究推進体制は、プロジェクトを遂行する上で、有効に機能しているか。
- (3) より高性能なスーパーコンピュータの導入を含め、プラズマシミュレータ及び関連研究環境は、
研究計画に沿って適切に整備され、有効に活用されているか。

[2] 研究成果

- プラズマシミュレータを活用した理論シミュレーション研究を進めることにより、
第3期中期目標・中期計画で掲げた以下の項目において、国際的に高いレベルで成果を上げているか。
- (1) 数値実験炉の構築、実験結果との比較によるコードの検証と高度化
 - (2) 核融合科学及び関連理工学の学術的体系化
 - (3) 数値実験炉研究プロジェクトの計画に沿って、着実に研究成果を上げているか。

[3] 共同利用・共同研究の推進

- (1) 理論シミュレーション研究を基盤とした大学等との共同研究が適切に進められ、
プロジェクト研究の推進に貢献するものとなっているか。
- (2) 核融合プラズマシミュレーションの中核的研究拠点として、大学等の機能強化に貢献するとともに、
分野間連携、異分野融合研究の推進に取り組んでいるか。
- (3) 国際的な連携活動を通じて、ITER計画・BA活動等を含めた国際協力へ貢献しているか。

[4] 人材育成

将来にわたり高い水準でシミュレーション研究活動を維持するために必要な人材の育成に貢献しているか。

[5] 将来計画

研究の将来計画は、数値実験炉研究の目標を見据えた適切なものとなっているか。
また、核融合科学研究所の将来計画の策定に貢献するものとなっているか。

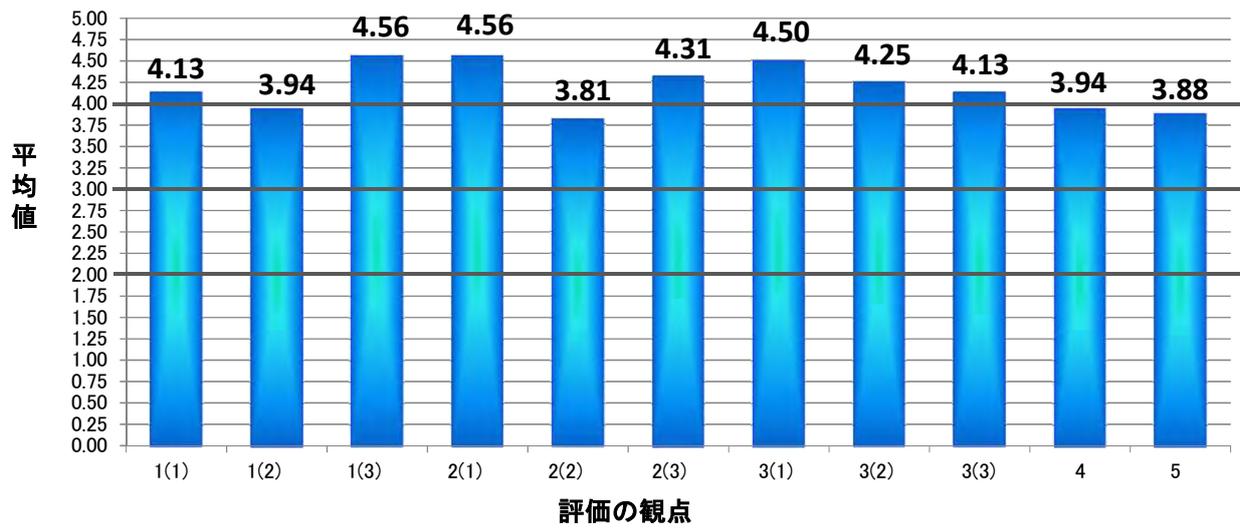
II. 評価結果

(単位:人)

評価項目 評価結果	[1] 研究計画・体制・環境の整備			[2] 研究成果			[3] 共同利用・共同研究の推進			[4] 人材 育成	[5] 将来 計画
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)		
5 (極めて高く評価する)	4	2	10	10	0	6	8	6	4	3	4
4 (高く評価する)	10	11	5	5	14	9	8	9	10	10	7
3 (評価する)	2	3	1	1	1	1	0	0	2	2	4
2 (妥当(適切)である)	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1
1 (妥当(適切)でない)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
平均点	4.13	3.94	4.56	4.56	3.81	4.31	4.50	4.25	4.13	3.94	3.88

※ 上記は、委員(13名)及び専門部会委員(2名)の評価結果を合わせたものです。

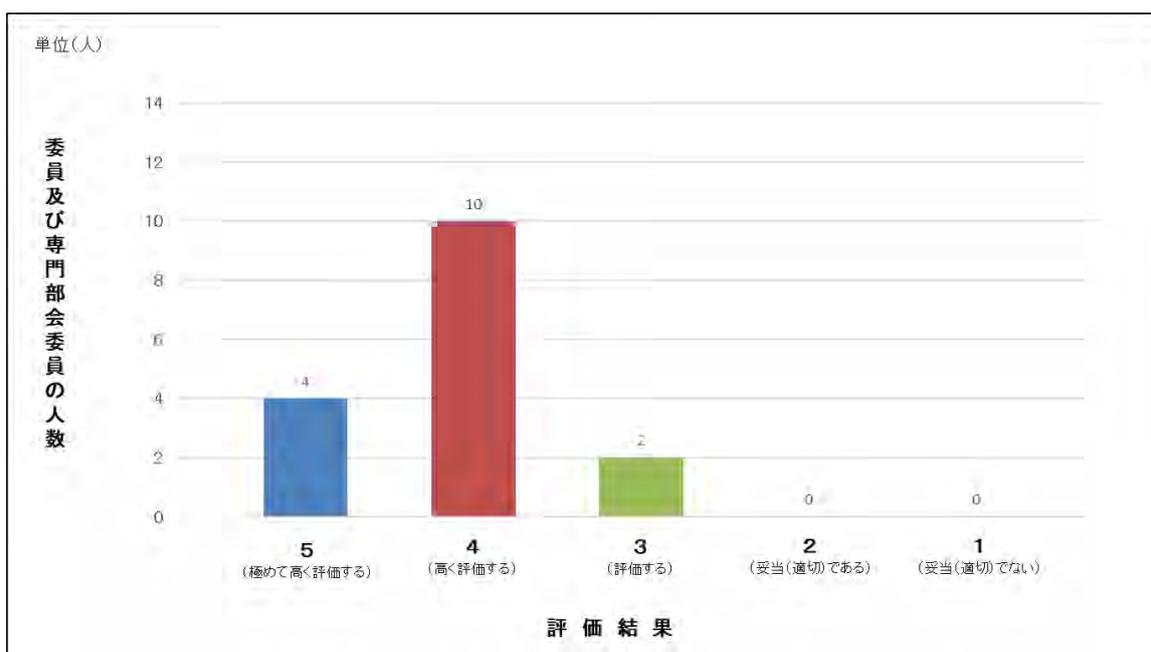
(参考)評価項目別の平均点



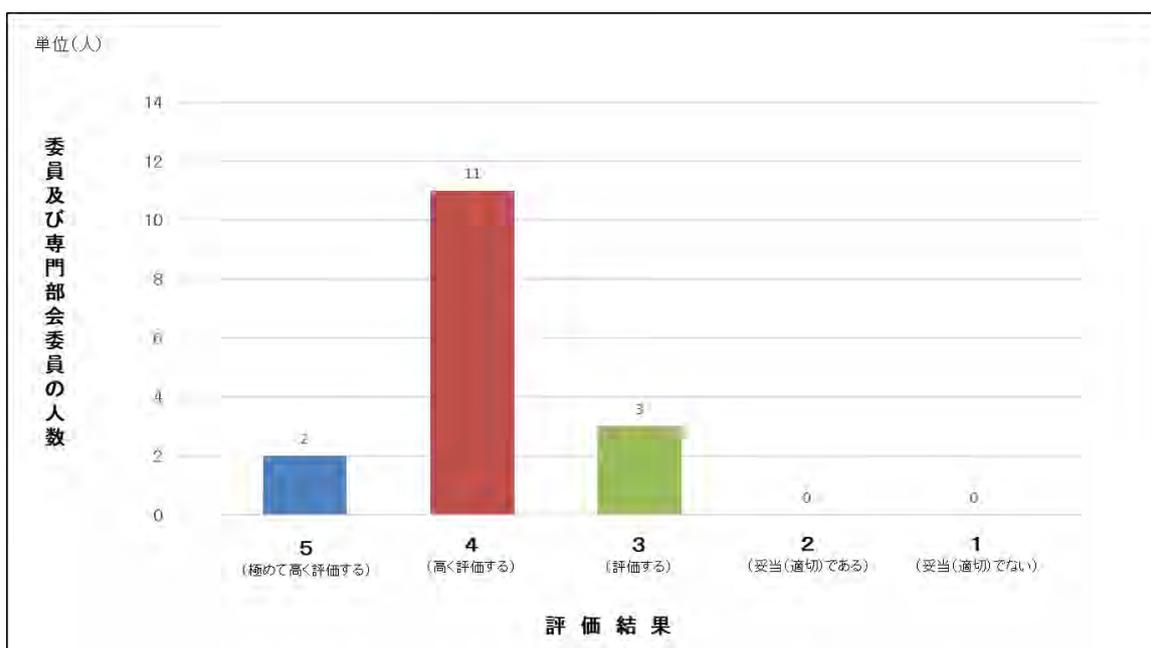
評価項目別の人数分布

[1] 研究計画・体制・環境の整備

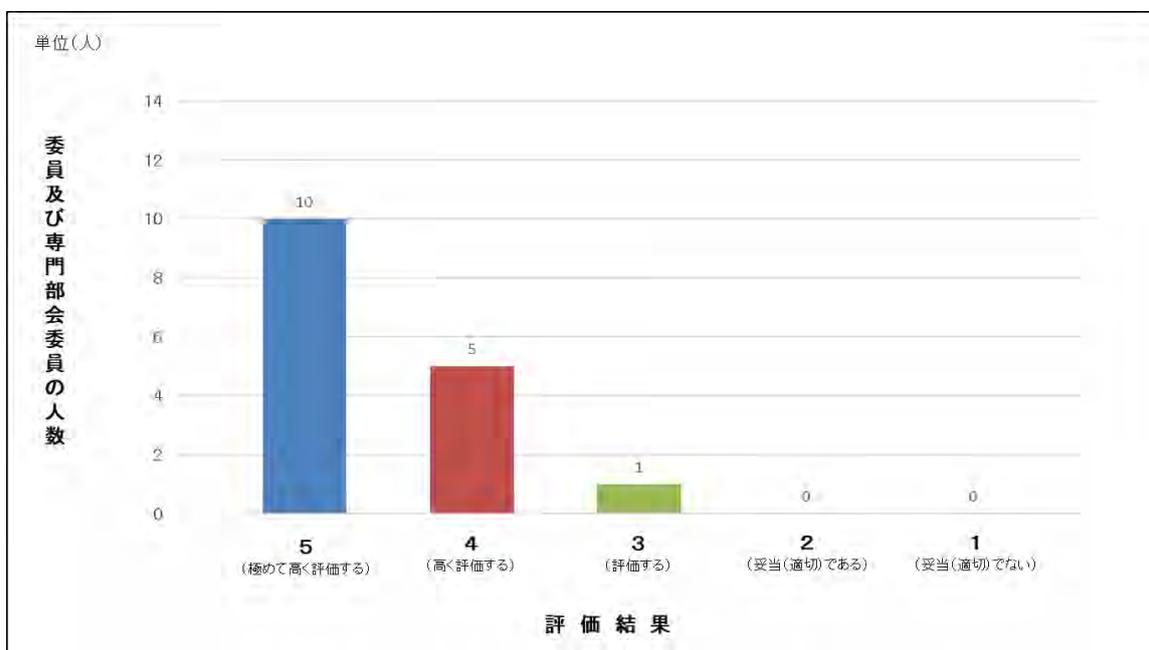
- (1) 数値実験炉の構築に向けたロードマップを含めた研究プロジェクトの目標設定と研究計画は、適切に策定されているか。また、第3期中期目標・中期計画を遂行する上で、適切に検討されたものとなっているか。



- (2) 段階的な進捗度管理や研究連携・統合化に向けたマネジメント等を含め、研究推進体制は、プロジェクトを遂行する上で、有効に機能しているか。



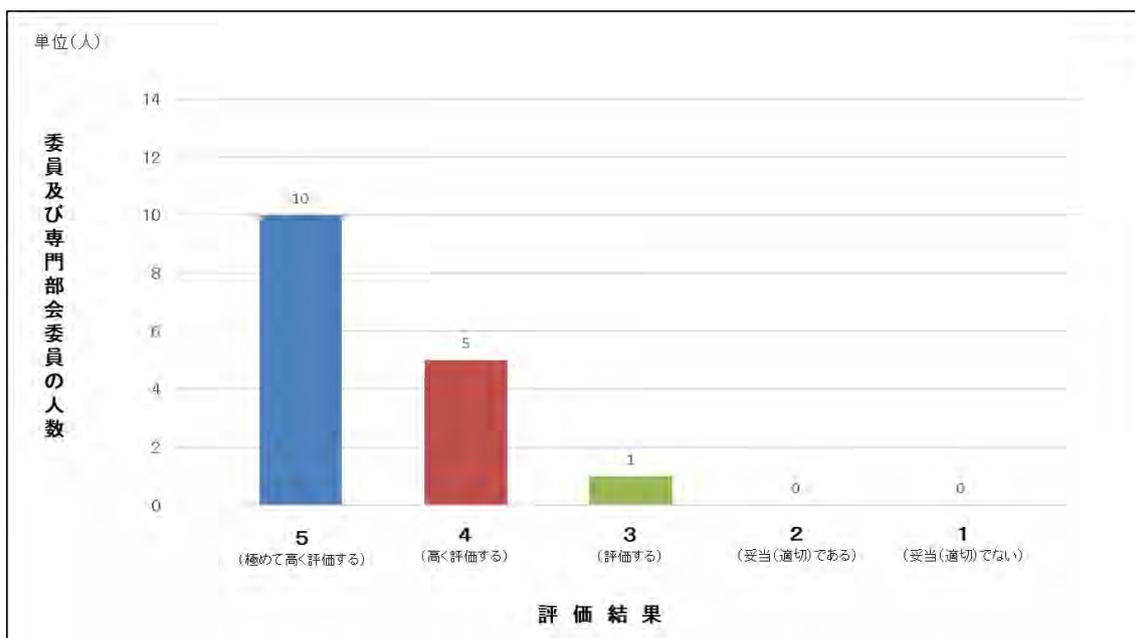
(3) より高性能なスーパーコンピュータの導入を含め、プラズマシミュレータ及び関連研究環境は、研究計画に沿って適切に整備され、有効に活用されているか。



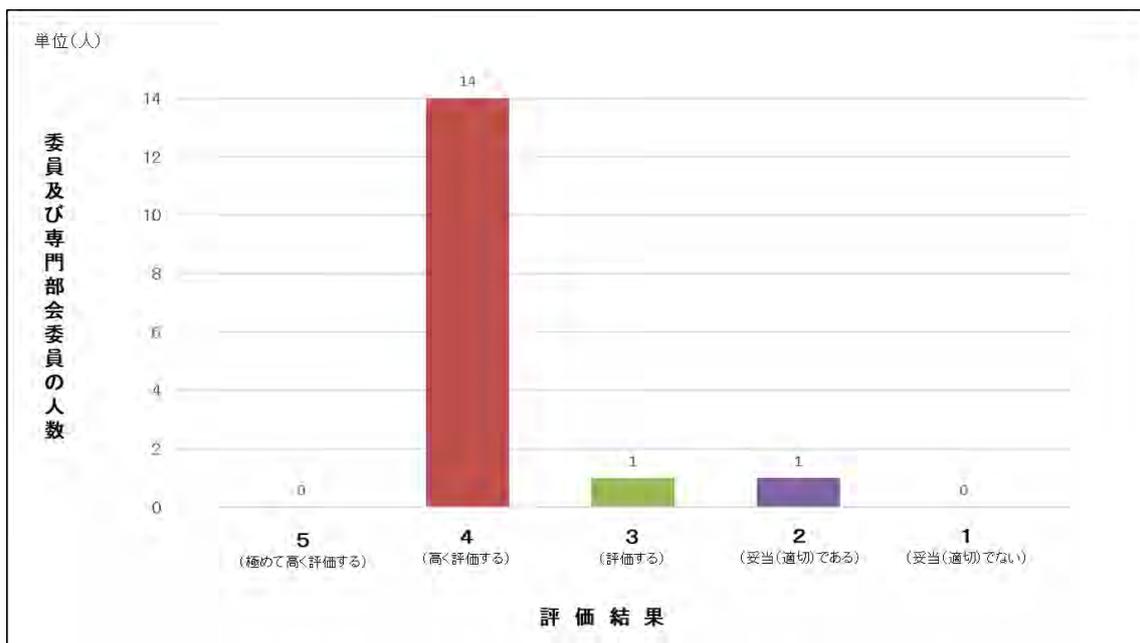
[2] 研究成果

プラズマシミュレータを活用した理論シミュレーション研究を進めることにより、第3期中期目標・中期計画で掲げた以下の項目において、国際的に高いレベルで成果を上げているか。

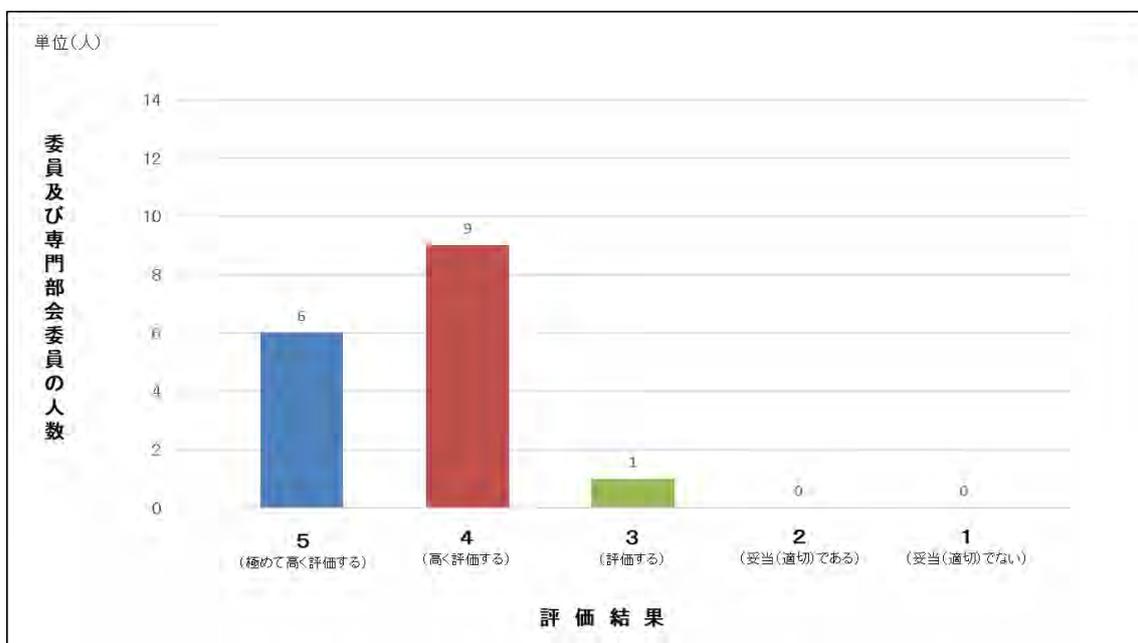
(1) 数値実験炉の構築、実験結果との比較によるコードの検証と高度化



(2) 核融合科学及び関連理工学の学術的体系化

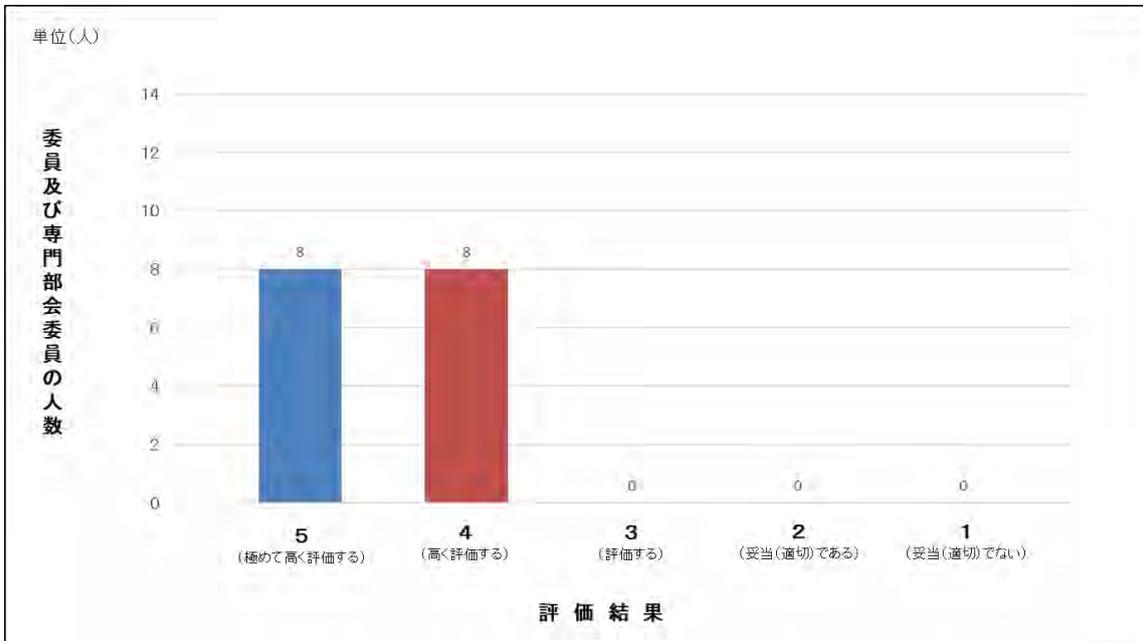


(3) 数値実験炉研究プロジェクトの計画に沿って、着実に研究成果を上げているか。

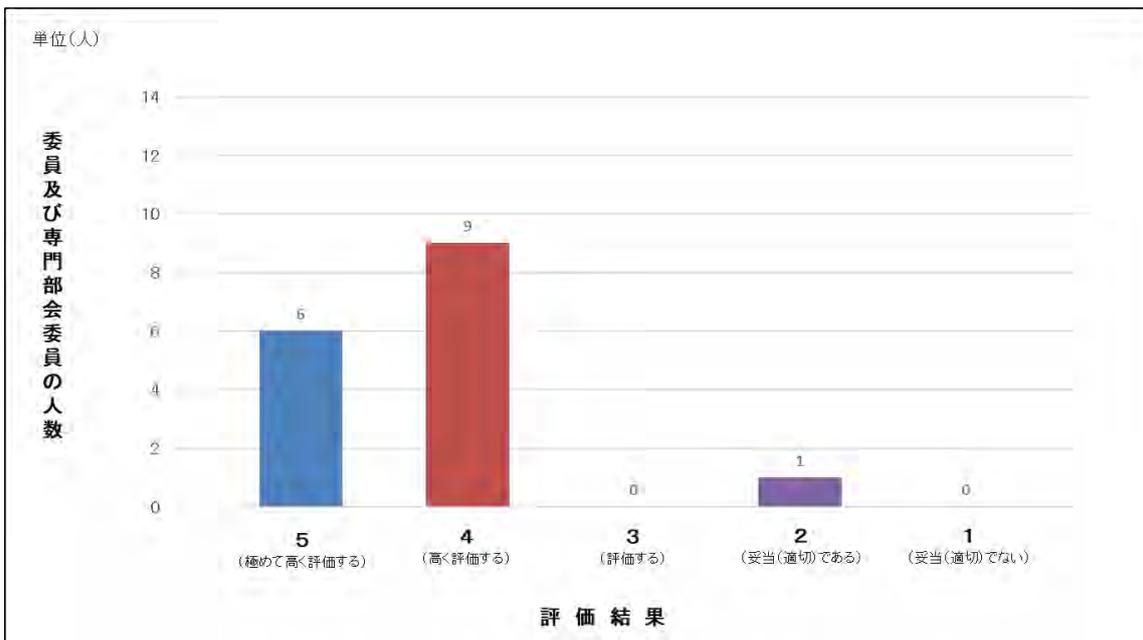


[3] 共同利用・共同研究の推進

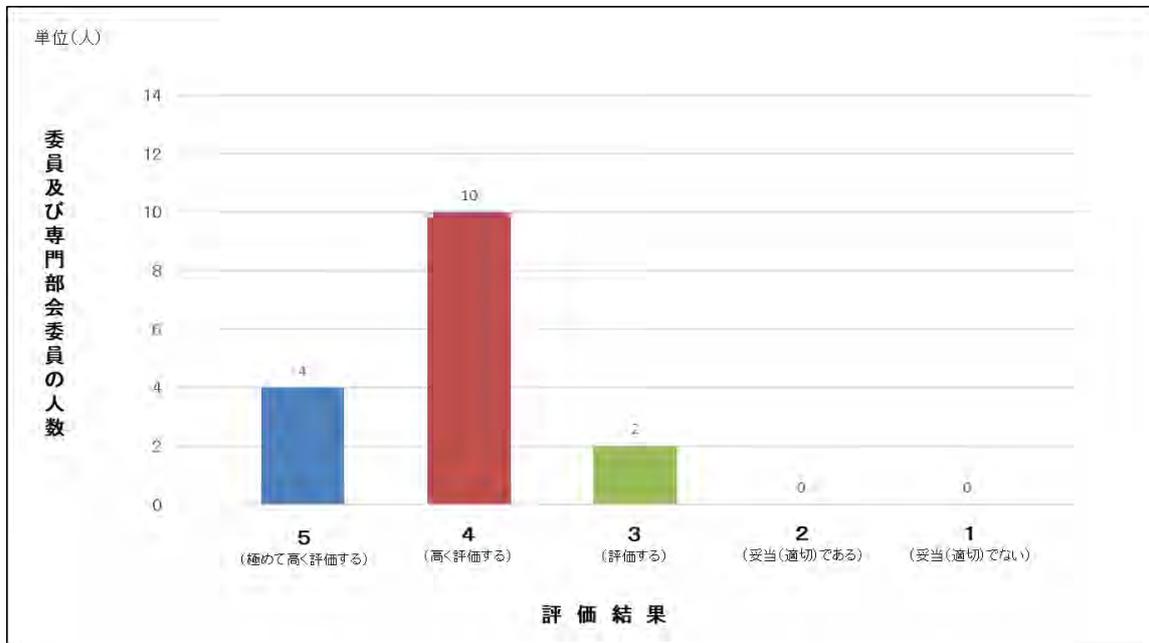
- (1) 理論シミュレーション研究を基盤とした大学等との共同研究が適切に進められ、プロジェクト研究の推進に貢献するものとなっているか。



- (2) 核融合プラズマシミュレーションの中核的研究拠点として、大学等の機能強化に貢献するとともに、分野間連携、異分野融合研究の推進に取り組んでいるか。

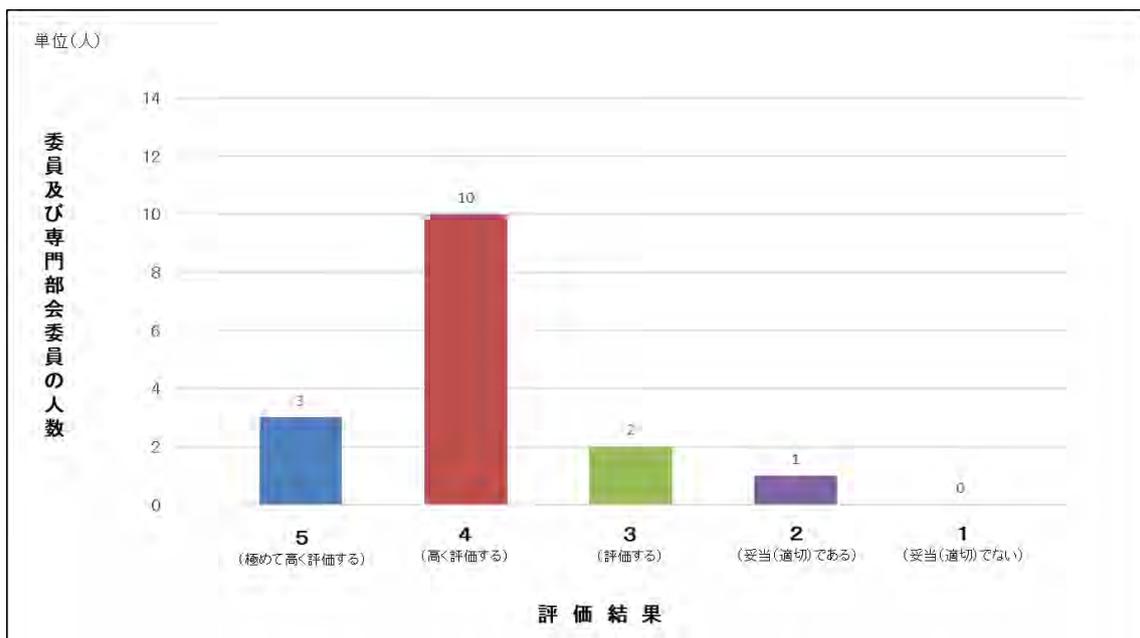


(3) 国際的な連携活動を通じて、ITER 計画・BA 活動等を含めた国際協力へ貢献しているか。



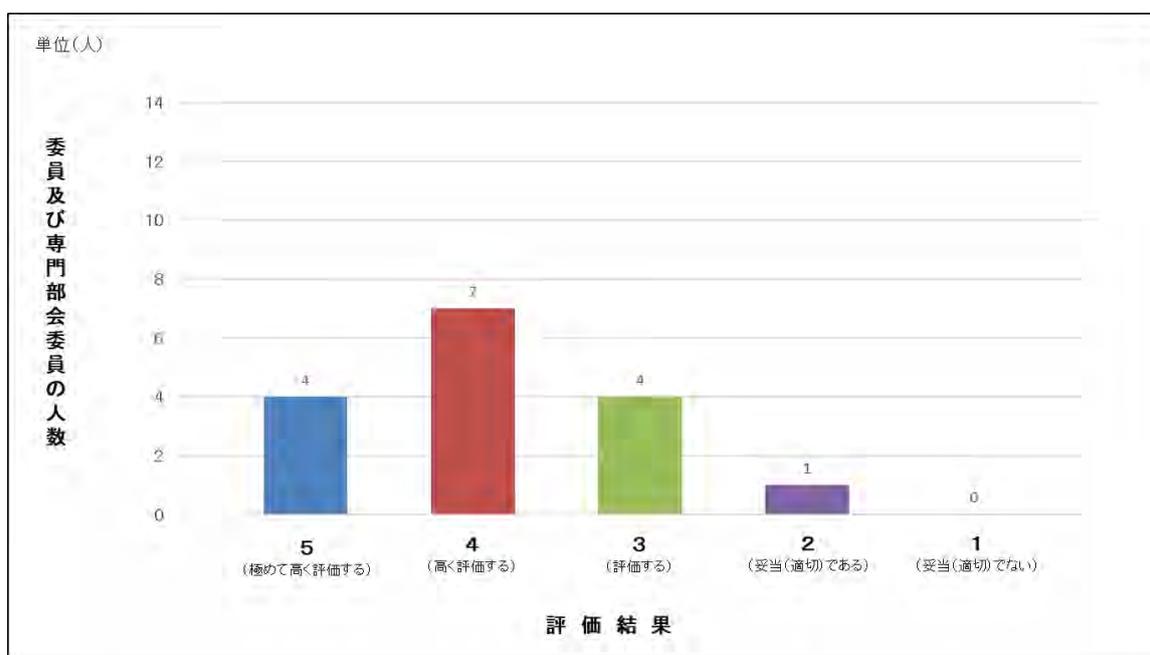
[4] 人材育成

将来にわたり高い水準でシミュレーション研究活動を維持するために必要な人材の育成に貢献しているか。



[5] 将来計画

研究の将来計画は、数値実験炉研究の目標を見据えた適切なものとなっているか。
また、核融合科学研究所の将来計画の策定に貢献するものとなっているか。



令和元年度核融合科学研究所運営会議外部評価委員会委員名簿及び
数値実験炉研究プロジェクト専門部会構成名簿

1. 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会 構成名簿

[外部評価委員会 国内委員]

- | | | |
|---|-------|-------------------------|
| ◎ | 安藤 晃 | 東北大学大学院工学研究科教授 |
| | 牛草 健吉 | 量子科学技術研究開発機構核融合エネルギー部門長 |
| | 大野 哲靖 | 名古屋大学大学院工学研究科教授 |
| | 兒玉 了祐 | 大阪大学レーザー科学研究所長 |
| ◇ | 坂本 瑞樹 | 筑波大学プラズマ研究センター長 |
| | 長崎 百伸 | 京都大学エネルギー理工学研究所教授 |
| | 花田 和明 | 九州大学応用力学研究所長 |
| | 吉田 善章 | 東京大学大学院新領域創成科学研究科教授 |
| ○ | 渡邊 智彦 | 名古屋大学大学院理学研究科教授 |
| ◇ | 和田 元 | 同志社大学理工学部教授 |

[外部評価委員会 外国人委員]

- | | |
|---------------------|---|
| A.J.H. (Tony) Donné | Programme Manager (CEO), Programme Management Unit, EUROfusion |
| Wan Baonian | Director-General, Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, China |
| Richard J Hawryluk | Associate Director for Fusion, Princeton Plasma Physics Laboratory, USA |

◎委員長、○副委員長、◇専門部会幹事

※ 外部評価委員会委員の任期は、2021年3月31日までとする。

2. 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会数値実験炉研究プロジェクト専門部会 構成名簿

[外部評価委員会 国内委員]

- ◎ 安藤 晃 東北大学大学院工学研究科教授
- 牛草 健吉 量子科学技術研究開発機構核融合エネルギー部門長
- 大野 哲靖 名古屋大学大学院工学研究科教授
- 兒玉 了祐 大阪大学レーザー科学研究所長
- ◇ 坂本 瑞樹 筑波大学プラズマ研究センター長
- 長崎 百伸 京都大学エネルギー理工学研究所教授
- 花田 和明 九州大学応用力学研究所長
- 吉田 善章 東京大学大学院新領域創成科学研究科教授
- 渡邊 智彦 名古屋大学大学院理学研究科教授
- ◇ 和田 元 同志社大学理工学部教授

[外部評価委員会 外国人委員]

- A.J.H. (Tony) Donné Programme Manager (CEO), Programme Management Unit, EUROfusion
- Wan Baonian Director-General, Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, China
- Richard J Hawryluk Associate Director for Fusion, Princeton Plasma Physics Laboratory, USA

[外部評価委員会 専門部会委員 (国内)]

- 矢木 雅敏 量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー部門
六カ所核融合研究所 核融合炉システム研究開発部長
- 岸本 泰明 京都大学エネルギー理工学研究所長

[外部評価委員会 専門部会委員 (外国人)]

- Amitava Bhattacharjee Head of the Theory Department, Princeton Plasma Physics Laboratory, USA

◎委員長、○副委員長、◇専門部会幹事

※ 外部評価委員会委員の任期は、2021年3月31日までとする。

専門部会委員の任期は、2020年3月31日までとする。

核融合科学研究所運営会議外部評価委員会規則

制 定 平成16年12月28日 規則第27号
最終改正 平成22年 7月30日

(設置)

第1条 核融合科学研究所の研究等の実績に関する評価を行うため、核融合科学研究所運営会議（以下「運営会議」という。）に核融合科学研究所運営会議外部評価委員会（以下「委員会」という。）を置く。

(組織)

第2条 委員会は、25名以内の委員をもって組織する。

2 委員は、核融合科学研究所の研究等に関し識見を有する者で構成し、運営会議の議を経て、所長が委嘱する。

(任期)

第3条 前条第2項の委員の任期は、2年とし、再任を妨げない。

2 前項の委員に欠員が生じたときは、その都度補充する。この場合における委員の任期は、前任者の残任期間とする。

(委員長)

第4条 委員会に委員長及び副委員長を置く。

2 委員長及び副委員長は、第2条第1項の委員のうちから運営会議で選出する。

3 委員長は、委員会を招集し、その議長となる。ただし、委員長に事故があるときは、副委員長が議長となる。

(意見の聴取)

第5条 委員会は、必要に応じて、次に掲げるものから意見を聴くことができる。

- (1) 核融合科学研究所運営会議共同研究委員会
- (2) 核融合ネットワーク
- (3) その他必要と認める者

(専門部会)

第6条 委員会は、必要に応じて、専門部会を置くことができる。

2 前項の専門部会には、委員以外の者を加えることができる。

(庶務)

第7条 委員会の庶務は、管理部総務企画課において処理する。

(雑則)

第8条 この規則の実施に関し必要な事項は、別に委員会が定める。

附 則

1 この規則は、平成16年12月28日から施行する。

2 この規則の施行後最初の委嘱に係る委員の任期は、第3条第1項の規定にかかわらず、平成18年3月31日までとする。

附 則

1 この規則は、平成18年9月15日から施行する。

2 この規則の施行後最初の委嘱に係る委員の任期は、第3条第1項の規定にかかわらず、平成20年3月31日までとする。

附 則

この規則は、平成18年12月22日から施行し、平成18年10月1日から適用する。

附 則
この規則は、平成22年8月1日から施行する。

令和元年度核融合科学研究所運営会議外部評価委員会日程

○ 第1回委員会及び第1回専門部会

日 時 令和元年10月23日(水) 13時40分～15時55分
場 所 核融合科学研究所 管理・福利棟4階 第3会議室
出席者 安藤委員長、牛草、兒玉、長崎、
花田、吉田、渡邊の各委員
矢木専門委員



○ 第2回委員会及び第2回専門部会

日 時 令和元年11月23日(土) 13時00分～16時50分
場 所 名古屋ダイヤビルディング 2号館 223会議室
出席者 安藤委員長、大野、兒玉、坂本、
長崎、花田、吉田、渡邊、和田、
Donné、Wan の各委員
矢木、岸本、Bhattacharjee
の各専門委員

※Hawryluk 委員については
12/5(木)にテレビ会議を実施



○ 第3回委員会及び第3回専門部会

日 時 令和2年1月28日(火) 13時40分～15時30分
場 所 核融合科学研究所 シミュレーション科学研究棟1階 会議室
出席者 安藤委員長、牛草、大野、坂本、
長崎、花田、吉田、渡邊、和田
の各委員
矢木専門委員





大学共同利用機関法人 自然科学研究機構

核融合科学研究所

〒 509-5292 岐阜県土岐市下石町 322-6

<http://www.nifs.ac.jp/>