

自然科学研究機構 核融合科学研究所
平成 27 年度外部評価報告書
NIFS Peer Review Reports in FY2015

2016 年 3 月

March, 2016



核融合科学研究所 運営会議外部評価委員会

NIFS Administrative Council 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
	[1] 研究体制・環境の整備	4
	[2] 研究成果	9
	[3] 共同利用・共同研究の推進	16
	[4] 人材育成	22
	[5] 将来計画	25
第3章	評価のまとめと提言	29
	1. 評価のまとめ	29
	2. 提言	35
第4章	おわりに	36
資料編		
	1 平成27年度 数値実験炉研究プロジェクト報告書	
	2 List of published papers related to NSRP in 2010-2015	
	3 List of published papers by students in 2010-2015	
参考資料		
	1 平成27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 平成27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 平成27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（LHD）を主装置として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り、核融合科学研究所では専用の最新鋭スーパーコンピュータ（プラズマシミュレータ）を導入してこれを全国の核融合理論研究者に対し共同利用を通じて提供し、先導的な研究を進めてきた。

この間において、国内学術研究体制の変化があり、核融合科学研究所は平成16年度より大学共同利用機関法人自然科学研究機構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。法人化に当たっては、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評価を受けるという制度が導入された。この年度評価は主として管理運営面のものであるが、核融合科学研究所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、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実施している。評価項目は運営会議で決定し、運営会議所外委員に加えて評価項目に対応した専門家を委員として構成した外部評価委員会で評価を行うものである。評価委員会は評価結果を運営会議に報告し、核融合科学研究所はその結果を尊重して次年度以降の研究活動の改善に役立てている。

核融合科学研究所では平成22年度からの第2期中期目標期間の開始に当たり、プラズマ・核融合研究分野での COE（Center Of Excellence 以下、「COE」という。）としての求心力を一層強化するため、LHD 計画、数値実験炉研究、核融合工学研究の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。このために平成22年度には所内研究組織の改編を行い、全研究教育職員を一つの研究部にまとめた上で、プロジェクトへの参画を自由とする体制を取った。これにより、LHD 計画・数値実験炉研究・核融合工学研究の3つのプロジェクト間の連携がこれまで以上に緊密となり、新しい課題に対して臨機応変に対応できるようになった。

運営会議では、プロジェクト制度の成果を確かめるため、先ず平成23年度に LHD 計画プロジェクト、平成24年度に数値実験炉研究プロジェクト、平成25年度に核融合工学研究プロジェクト、平成26年度に重水素実験実施計画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名に、さ

らに所外の国内専門委員5名と外国人専門委員2名を加えて外部評価委員会を構成し、評価作業を行った。

平成27年10月21日に開催した第1回外部評価委員会及び専門部会において、本年度の外部評価の進め方について協議し、評価の観点及び具体的な評価項目を決定した。その内容を章末に示す。平成27年11月28日に開催した第2回外部評価委員会及び専門部会では、核融合科学研究所の担当者から、この評価の観点及び評価項目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）を用いて詳しい説明を受け、質疑応答が行われた。その後、平成28年1月20日に第3回外部評価委員会及び専門部会を開催し、研究所との更なる質疑応答も含め外部評価委員会及び専門部会で定めた評価の観点と項目に沿った評価作業とその取りまとめを行った。その結果、外部評価結果の基本的な結論に関して大筋合意が得られたので、その後はメール審議により、最終報告書を取りまとめた。外部評価委員会及び専門部会の日程を参考資料4に示す。

本報告書は、「第1章 これまでの経緯」、「第2章 項目別の評価」、「第3章 評価のまとめと提言」、「第4章 おわりに」の4章で構成されている。

核融合科学研究所運営会議に提出され承認された後、核融合科学研究所長から自然科学研究機構長に提出されることになる。その後、機構の教育研究評議会及び経営協議会に提出され、承認を受けた後、文部科学省に提出する「平成27事業年度に係る業務の実績に関する報告書」及び「自然科学研究機構年度計画（平成28年度）」の参考資料となる予定である。本報告書は印刷物やWEBホームページを通じて公開される。

「数値実験炉研究プロジェクト」の評価の観点は、大学共同利用機関法人自然科学研究機構の定める中期計画において、大学共同利用機関核融合科学研究所が推進する「数値実験炉研究プロジェクト」の評価に必要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する。

なお、平成24年度に実施された「数値実験炉研究プロジェクトに関する外部評価」での「提言」に基づき、次の点も今回の評価の参考とする。

1. 核融合プラズマ閉じ込め物理機構の解明とその体系化、及び数値実験炉の構築のための研究は進展しているか。
2. 大型ヘリカル装置計画プロジェクト及び核融合工学研究プロジェクトと密接に共同作業を進めているか。数値実験炉を構築するロードマップを作成するなど、アプローチの具体化を進めているか。
3. プラズマシミュレータ等の性能増強を行い、研究基盤の充実と計算科学の高度化を進めているか。
4. シミュレーション研究や計算科学分野を担う人材を育成しているか。また、引き続きITER計画・BA活動にも積極的に貢献しているか。

本年度実施した「数値実験炉研究プロジェクト」の評価項目は、以下のとおりである。

[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。

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計画における研究成果と関連した共同研究活動について、第1章で掲げられた具体的な評価項目に従って、各委員から示された評価を集約して記述する。括弧内の数字は意見の内容がほぼ同じであった件数である。外国人からの意見については原文のまま英文で記してある。

[1] 研究体制・環境の整備

Development of research system and environment

(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。

Does the research system function appropriately in accomplishing the objectives of the Numerical Simulation Reactor Research Project (NSRP)?

- 本数値実験炉研究プロジェクトが 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有機的連携を行う体制は適切であり、ヘリカル系プラズマでの多岐にわたる物理課題に対して、世界をリードする計算機コード群を開発・整備する研究体制が構築され、有機的に機能している点を高く評価する。(6名)
- 研究プロジェクトのロードマップの設定、ヘリカルプラズマ研究部との連携体制、本プロジェクト研究母体としての8タスクグループ体制、タスクグループ間の連携並びに他のプロジェクト研究との連携を推進する様々な施策等、研究活動を柔軟かつ機動的に推進してきた点は高く評価できる。(7名)
- 第2期中期計画を遂行するためのグルーピングとしては概ね良好と思われ、要素開発グループごとには高い成果が得られている。しかしながら、現状、「各グループの達成すべき目標や達成度評価を十分に実施してきたか」と言う観点では必ずしも明確ではなく、全体的開発目標に対する進捗度等をチェックする体制の強化、研究グループを組織化してシナジー効果を生むためのマネジメントを行う研究者の確保、研究者数のバランス等、プロジェクトマネジメントの点からの留意が必要であろう。(8名)
- 同時に、各研究グループに「プロジェクトとしてのゴール」を意識させる必要があるのではないかと。時間のかかるプロジェクトであるだけに、「統合を目指している」と言う意識を常に持っていないと、個別の分野で完結しようとする可能性がある。数値実験炉に向けたシミュレーション統合化を視野に入れたタスクグループ間の連携を目に見える形で実現することが望まれる。(11名)
- 分野間連携及び大学共同利用機関の観点から、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・発展することを希望する。(1名)

- The research in the NSRP is organized via a quite complex matrix-type organization. This is to integrate NIFS simulation scientists, experimental scientists and university researchers in a suitable manner. The advantage is a flexible and fairly open organizational structure. The disadvantage is the need for a lot of coordination. The task structure is rather fractionized (eight task groups) with a lot of overlap - double work and lack of efficiency are difficult to avoid. There is also a co-existence with the matrix organization in NIFS (projects and departments). Consequently the coordination requirements are high which is reflected in four different steering committees. After having collected more experience with the present research system of the NSRP, it is recommended to conduct an internal review with all partners with the objective to streamline and to optimize the organizational structure.
- The NSRP is one of three crosscutting projects (LHD, NSRP and FERP) that engage the eight divisions forming the department of helical research. The NSRP is itself divided into eight task groups that are organized principally along lines dictated by fusion physics, with a couple of groups focused on mathematical and computational enabling research. Its objectives are to clarify the physics elements contributing to fusion plasma confinement, to integrate the mechanisms individually elucidated and to construct the Numerical Test Reactor (NTR). The NSRP is overseen by a steering committee that meets regularly. It is organized in such a way as to foster collaboration with scientists outside of NIFS, and this has enabled it to build within Japan as well as internationally an impressive and effective research web that leverages the capabilities of NIFS and promotes the advancement of the project. The capabilities of the project have significantly grown through the replacement of the plasma simulator with a 2.6 petaflops, 81 TB Fujitsu machine. The research system is thus well organized and maintains the necessary environment to sustain a thriving research project.
- The National Simulation Research Project (NSRP) has three main goals:
 - (a) To clarify physics elements contributing to fusion plasma confinement,
 - (b) To integrate the mechanisms individually elucidated,
 - (c) to set the basis for the construction of the Numerical Test Reactor (NTR).

In order to achieve these goals, it is important to note that the NSRP research system appears to be well organized. Important synergies with other projects

under the framework of the NIFS research system are active. The scientific, organizational and managerial structure appears to be solid and definitely fit to cope with the challenges of the project and to ensure success. NSRP research system will easily allow collaborations both from other projects inside NIFS and from outside NIFS, indicating a truly cooperative nature of the project.

- The principal objectives of the NSRP, which was established in 2010, are: (1) to clarify physics elements contributing to fusion plasma confinement, (2) to integrate the mechanisms individually elucidated, and (3) to construct the Numerical Test Reactor (NTR). These are indeed appropriate and worthy objectives for the project, and the NSRP research system is appropriately organized to make the projection function seamlessly as a whole. The eight task groups cover well the scope of fusion plasma science, and the overall organization of the research system is appropriate for a project of this magnitude.

The Timeline for the project seems to indicate that we are now at the end of the “second mid-term” of the project, when step 1 is expected to be complete. While much good and relevant work that contribute towards this end was presented, it was not clear what the specific milestones and metrics were for this part of the project so that one could evaluate the accomplishments against those standards. In this sense, the NSRP seems to function more as a research program rather than a project.

We suggest that the NSRP appoint an Program Advisory Committee (PAC), consisting of external experts with some international members, which will meet once a year to monitor more closely established milestones and metrics, and to give advice, if needed, to the Steering Committee. This will enable a more timely adjustment by the NSRP, if and when needed, before it enters its new phase in 2021.

以上より、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4名であった。

- (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。

Is the environment of the “Plasma Simulator” system and its related research developed appropriately?

Is the “Plasma Simulator” effectively utilized for collaboration research?

- プラズマシミュレータ及びバーチャルリアリティー装置等の関連研究環境の整備は適切に進められ、かつ質的に異なる新たな研究成果を生み出していることは極めて高く評価することができる。特に、我が国第3位のスーパーコンピュータの導入など、計算機能力のスペックも世界的にも高いレベルにあり、今後の研究進展が大いに見込める。環境の整備・管理が適切で、十分有効に機能していると言えよう。(12名)
- スーパーコンピュータの管理・運用だけでなく、新規マシンの導入にあたり、本プロジェクトで開発されてきた各種コードの並列化・高速化のチューニング支援を行っており、講習会の開催や、WEB ページ上での各種サービスなど利用者の利便性にも努力がなされている。これらを高く評価する。(4名)
- 数値実験炉計画の実施において、整備される計算機能力を用いることでどの程度の進展が見込めるかという指標が定まっていないなど、段階的な達成目標に見合った整備計画が立てられているかは不明である。さらに、限られた資源の中での最適化を目指す場合、開発が遅れている要素開発に対して計算機時間や優先度を高めるなどの環境整備も必要であり、全体計画の中での各グループの進捗状況についての精査ができていない点については不十分な点がみられる。(2名)
- シミュレーション成果の可視化に向けた仮想現実関係ツール等の開発を評価するが、研究成果を上げる上で、必ずしも有効に活用されているとは思えないので、今後の改善を期待する。同時に、その成果を数値実験炉研究プロジェクトにとどめることなく、広く一般に公開して社会的に貢献すべきである。(2名)
- 毎年50件以上のプロジェクトの遂行など、有効に利用されてきた。毎年15,000件以上のジョブをこなし、平均稼働率も90%を維持するなど、利用率についても高く評価できる。(2名)
- 2012年度のハードウェアの更新によっても、新たなユーザの増加にはつながっておらず、改善の余地を残している。(1名)
- 2015年6月の機種更新以降、大規模ジョブの運用に生じている制限が早急に改善されることを期待する。(1名)
- The plasma simulator is a powerful Fujitsu computer available to all members of the NSRP. In particular, the Japanese universities get in this way easy access to supercomputers to solve challenging plasma physics problems. The new Fujitsu computer has in its phase 2.62 PFlops with 2592 nodes, which means very good performance (top league in the world-wide ranking). The management of the "plasma simulator" is shared between NIFS (the "Computer System Working Group") and Fujitsu system engineers.
To integrate the wide simulation research knowledge available in the Japanese

universities into the NSRP, the powerful “plasma simulator” is the key element. In this sense it appears to me fully appropriate. I do not feel able to judge the efficiency of the use of the “plasma simulator”. However, a “research assistance system” has been provided to support collaborators, which is clearly a good step. Furthermore, a number of visualization packages, a novel random generator, and a data compressor have been developed and are available for the collaborators. This all indicates that the plasma simulator is effectively utilized.

- The plasma simulator is accompanied by very comprehensive support in the form of a computer system working group that manages and operates the simulator and a program development support office that assists scientists to port, optimize or parallelize their programs. Almost 20% of that development support goes to Universities. The Virtual Reality system has also been upgraded. Other support efforts have led to the development of an adaptive mesh refinement framework, a visualization library, a random number generator and a data compression tool.

A significant consideration in evaluating the effectiveness of the plasma simulator is the fraction of its load devoted to simulations that use more than 50% of available nodes. Absent this number, we note that the usage is very high and the scientific output excellent.

- Since 2009 the “Plasma Simulator” hardware system was upgraded in two phases (03/2009-08/2012) and (10/2012-03/2015), with a third upgrade project started in June 2015 and expected to be completed in May 2019. Hardware used for Plasma Simulator is ranked very high in the world in its category. Since 2010 more than 50 projects per year were realized under the framework of the Plasma Simulator Collaboration Research, and a very useful research assistance system has been developed to support collaborative efforts. 158 research cases found assistance since 2009, including 28 from universities. A number of crucial sub-systems has been successfully developed and tested. I can therefore conclude that the environment of the “Plasma Simulator” system and its related research has been developed appropriately and that the “Plasma Simulator” appears to be effectively utilized for collaboration research.
- The Plasma Simulator is an impressive facility, and has been an indispensable resource for the NSRP. This is especially so after the upgrade to Fujitsu FX-100 in 2015. The users (~160) of this facility show a healthy mix of NIFS (~60) and Universities (~100). The Working Group, which manages and operates the Plasma Simulator appears to provide strong support to users through a User

course at the beginning of each fiscal year and extensive program development support, which involves three Fujitsu engineers. In these respects, the Plasma Simulator is an excellent model for the rest of the fusion community.

以上より、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おり、有効に利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9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。

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

(1) 数値実験炉の構築

Construction of the Numerical Test Reactor for a helical fusion system

- 所内・所外メンバーにより、核融合プラズマの閉じ込めに必須となるプラズマの安定性を決める重要な物理機構、高エネルギー粒子との相互作用、周辺プラズマの挙動解析と壁面との相互作用、LHD 等におけるジャイロ運動論乱流輸送の検証、統合解析コードの更なる高度化等々、個別の課題に関して着実な進展がなされおり、第2期数値実験炉の目標を概ね達成していると評価できる。国際的な共同研究も進み、国際的に高いレベルの研究が遂行されており、極めて高く評価する。若手研究者の活躍も評価する。(12名)
- 実験解析への応用を念頭においた様々な物理条件への対応を容易にするモジュール化や使いやすさを意識したコード開発、実験との比較・検証、国際的な共同研究活動を通じてのベンチマーク等は、今後、更に重要になると思われるので、さらなる進展を期待する。(3名)
- 日本の乱流輸送研究において、これまでのイオン系・静電モードから、電子系・電磁モードを取り入れた運動論シミュレーションが実現したことは、核融合シミュレーション研究が新しい段階に入ったことを示す重要な成果であり、高く評価する。(1名)

- コード間の連結、境界条件の設定など、数値実験炉を構築するための基本的な方針が明確ではなく、開発された多様なコードがどのように有機的に結合し、数値実験炉に貢献するのかが不明である。(2名)
- 統合輸送シミュレーションでは task3d-a の整備に進展があった点は評価できるが、task3d-p を研究所内で推進できる体制が構築されておらず、研究の進展が遅い点は懸念材料である。(1名)
- 各開発要素間の連携がどのように取られているかが明確になっていない。全ての要素開発ができ上がった段階で統合化を進める現在のロードマップのあり方ではなく、暫定的でも良いので各開発要素を組み合わせ統合化に向けた体制を早々に強化すべきである。開発すべきコード群の中で足りない点を明確にしつつ、各要素開発グループの新たな目標を暫時見直すなど、数値実験炉の構築に向けては再度研究計画と体制を見直すべきである。(1名)
- 「数値実験炉の構築」の定義自体が、必ずしも明確ではないまま、第2中期期間が終わろうとしているように思われる。一般的に、数値実験炉というからには、燃焼プラズマの定量的予測までを期待するが、非線形性が強く、階層間でも結合が強い磁場核融合プラズマの場合に、そもそも統合コードや数値実験炉という概念が成立しうるものだろうか。(2名)
- これまでのところ、要素については着実な進歩が認められるが、現時点では本研究プロジェクトに対して統合的な評価を行うことが難しい。「数値実験炉の構築」と言ってしまうと、かなりの技術的統合化を期待してしまうため、ベンチマークが行える実験条件の設定も難しい現在、「必ず上手く行くように運営されているか」と言う質問に対して答えることは不可能に近いと思われる。「実験炉の構築」を標榜することは、良い意味で野心的だと思うが、評価軸としては達成度評価の際に審査員からの厳しい評価が成されるのではないかと危惧する。「実験炉の成果」と言えば何を期待するか。それはプロジェクトの完結であろう。(1名)
- 最終的には個々の物理課題を数値実験炉としてインテグレートする必要があるが、非常に複雑な核融合炉を数値実験炉のみで設計・建設することは必ずしも容易ではないので、あまりインテグレートに拘る必要はない。(1名)
- 計画に従えば、より結合型のシミュレーションに進むこととされているが、統合予測ツールの開発については、研究所としての寄与が小さいように思われる。今後の充実と進展を期待する。また、核融合炉を構築する上で重要な基幹的装置であるダイバータの設計に対する更なる貢献も今後期待する。(1名)
- Major issues of helical reactors that must be addressed by numerical simulation are (1) MHD stability limits, (2) neoclassical and turbulent transport, (3) confinement of energetic particles, (4) edge plasma transport and interaction with the wall, (5) integrated discharge modeling. The NSRP is strongly

contributing to all fields with a variety of simulation codes. Impressive are the developments in gyrokinetic simulation (GKV) and integrated modeling (TASK3D). International collaboration on edge plasma simulation has been extended (EMC3-IRENE) and – where possible – benchmarking with experimental LHD results has been conducted. In that sense, the NSRP is working on the level of high international standards.

A true “numerical test reactor”, however, must integrate all scenarios. This is clearly a long-term task but a suitable approach should be soon developed. This should include all relevant engineering aspects on feasibility, constructability and maintenance.

In addition, the development of a code benchmarking strategy is recommended. This can only be done on an international scale with code packages developed by other laboratories.

- Despite much more modest resources, the progress towards the construction of the numerical test reactor has been comparable to that for similar projects focused on tokamaks. By any standards, the NSRP has produced impressive achievement in all areas of plasma science relevant to its mission. In particular, it has led to successful modeling of the partial collapse observed on LHD during magnetic axis swing operation; the fruitful validation and verification of neoclassical electric field profile calculations on LHD; the discovery of a new mechanism for saturation of kinetic ballooning mode turbulence at high normalized pressure; the integration of the gyrokinetic code GKV into TASK3D and the validation of the resulting predictions for the ion temperature; the simulation of experimentally-observed Energetic-particle driven Geodesic Acoustic Mode (EGAM) in LHD and the resulting clarification of its properties; and the validated simulation of the transport of neutral particles and impurities in LHD peripheral regions. All of the achievements highlighted above and many others relied on qualitative computational advances that have taken place since the last review in 2012, either in the form of new functionality or of new codes and frameworks. The codes being developed under the NSRP have also been applied with success to several problems in tokamak physics, including applications to JT-60U and DIII-D. This is important to building confidence in these codes and in the physical models on which they are based. It is also important in advancing the broader fusion effort and supporting ITER.

The progress in the development of the TASK3D-A and -P is particularly impressive and significant. The capability of the analysis version has greatly

increased, enabling it to play an important role in the analysis of LHD experiments. Collaborative work with Univ. of Kyoto has also resulted in significant strides for the predictive version. This version has proven its capabilities in the reproduction of the time evolution of LHD high-Ti plasmas and the prediction of start-up scenarios of FFHR-d1.

- The NSRP has produced a large number of high-quality results exploiting theory and numerical simulations and finalized to the construction of the numerical test reactor for a helical fusion system. In particular extensive developments on simulation codes and accurate benchmarking of code results against experimental data have been performed.

Among the results, it is important to note:

- The effects of important quantities like applied magnetic perturbation, viscosity, heat conductivity, and diamagnetic rotation on the global stability in LHD and FFHR have been studied with the help of MHD simulations.
 - Turbulent transport in LHD and other devices has been studied with the development of kinetic simulation codes
 - The MEGA hybrid simulation code has been successfully applied to investigate energetic-particle driven instabilities and resultant transport of energetic particles in LHD, DIII-D, and ITER.
 - Simulation codes to investigate peripheral plasma transport and plasma-wall interactions are developed and benchmarked against experimental results.
 - Integrated simulation suites for analysis and prediction, like TASK3D-a (analysis) and TASK3D-p (prediction), have been further advanced. They have contributed to physics interpretations of LHD plasmas and the quantitative assessment of FFHR-d1 design.
- The NSRP has comprehensive coverage of the various aspects impacting the performance of the Numerical Test Reactor for a helical fusion system, including macroscopic equilibrium and stability, turbulent transport, energetic particle-driven instabilities, edge turbulence and plasma material interactions, and as well as an integrated simulation suite (TASK-3D). The latter is a relatively new effort, and is in the process of further development. In each of the areas mentioned above, the research achievements have been laudable. However, there are some overall concerns:
 - The integration of all physics elements by the end of 2021 and application to burning plasmas (at the end of the third mid-term of the NTR) is an ambitious goal. It is not clear what the framework of the integration will be.

If TASK-3D is to play a role in this framework, then its development should be speeded up, and a detailed plan developed for the framework.

- Integration of the multiple codes may require the active involvement of applied mathematicians and computer scientists in order to make the best use of algorithms and high-performance computing practices that are suitable for contemporary computing architecture.
- While there has been significant progress in the validation area, the number and breadth of validation exercises need to be enhanced in keeping with the large number of theoretical applications of the various codes.

以上より、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、数値実験炉の構築において、国際的に高いレベルの成果を上げているかに対して、極めて高く評価するが7名、高く評価するが7名、評価するが4名、妥当（適切）であるが1名であった。

(2) 核融合プラズマの物理機構解明とその理論体系化

Physics mechanisms of fusion plasmas and their theoretical systemization

- 開発された多様なコードを用いた解析により、炉心プラズマから炉壁にわたる重要な物理現象の機構解明に大きく貢献しており、個々のタスクで展開された「核融合プラズマの物理機構解明」の成果は、極めて高く評価できる。また、理論体系化にも進展が見られ、インパクトのある研究成果もいくつか創出されている点は評価に価する。(12名)
- 数値実験炉構築に向けたコード開発において実際のLHD実験成果の解析やFFHR設計に繋がる成果が得られている点は高く評価できる。理論的な予想との整合性や実験で得られた結果に対しての物理機構解明にシミュレーション計算は大いに寄与している。(1名)
- プロジェクトを支える基礎科学部分を適切に支え、プラズマ科学への貢献を充分に行っていることが高く評価できる。特に磁気再結合やRayleigh-Taylor不安定性の解析といったプラズマの基礎学理の理解に貢献する成果をあげていることは特筆すべきである。(1名)
- 得られた科学的成果をレビュー誌に発表しており、また、その科学的知見だけでなく、可視化装置を駆使したインパクトのある画像として専門ジャーナル表紙を飾るなど、本プロジェクトの存在感を内外に示していることは評価できる。ただし、今少し、国際的レビュー誌を通じた貢献に期待したい。(1名)
- 研究者同士がお互いを刺激しあって活発な研究が行われていることが具体的な形と

して現れており、正のフィードバックがかかって更なる研究成果が創出されることが期待される。(1名)

- 粒子加速、電磁波（レーザー）とプラズマ相互作用等の基礎研究も、核融合研究と他分野との連携を含め、数値実験炉研究プロジェクトの基礎を支えるものであり、評価できるものである。共同研究をベースに、大学の基礎研究と数値実験炉研究の橋渡しとしての積極的な活動を期待する。(1名)
- 「体系化」と言う観点では、若干物足りなさを感じる。より一層の進展を期待する。また、「理論体系化」に加えて、「数値実験炉の構築」へ向けた体系化こそが、本プロジェクトでは重要であると思われる。(2名)
- コンピュータシミュレーションでは、その数値計算手法の開発も重要であり、過去においては核融合分野からも新たな数値計算手法の提案が多数あったが、最近は必ずしも顕著ではないと思われる。今後は是非とも数値計算手法の分野にも精力を注入するとともに、核融合界からの新たな手法の発信に期待する。(1名)

- Within the NSRP, quite a number of timely physics issues are addressed in the fields nonlinear MHD, turbulence, and elementary processes. Examples for cross-transfer of knowledge are (1) simulations of the helical state in reversed field pinches, (2) MHD simulations of magnetic reconnection, (3) particle simulations of collisionless shocks.

Most of the mentioned review papers have been published in Japanese language. This publication policy makes the dissemination of know-how and results difficult. It is recommended to publish in international journals using the English language.

- This part of the project explores fundamental questions in plasma science and also provides theoretical support for alternative concept research such as the Field-Reversed Configuration and the Reversed Field Pinch. An important function of this type of activity is to serve as a catalyst for progress by providing intellectual stimulus and challenging the groupthink that is prone to grow among more development-driven teams. The work of this group seems to do that well, evidently helped by its close interaction with other groups. Highlights include exploring the boundary between macroscopic dynamics and turbulent transport through its investigations of the role of two-fluid effects and gyro-viscosity in pressure-driven instability. We note that the investigations of extended-MHD descriptions of the Rayleigh Taylor instability and of the structure transition induced by the Hall effect in turbulence address related issues. It would be interesting to explore their connection. The results on kinetic blob dynamics, shocks, and gyrofluid models for turbulence are also noteworthy.

- The NSRP has produced high-quality and broadly recognized achievements in theory and computer simulation research. These achievements contribute to clarify and understand the physics of fusion plasmas in particular in the following areas:
 - Nonlinear MHD and extended MHD physics
 - Micro-Physics and Modeling

For Nonlinear MHD and extended MHD physics important results have been achieved in the field of 3D simulations, resistive MHD, two fluids and finite Larmor radius effects, Rayleigh-Taylor instability and Hall MHD turbulence.

It is important to note the very important and cross-disciplinary activity aiming at the simulation with the MIPS code of the helical states in RFP. MIPS results were successfully compared with the experimental data coming from the RELAX RFP experiment at the University of Kyoto and from and NIMROD code. This is a very positive example of the ample and successful collaborative effort between helical configurations. Many important results have been obtained also via gyrokinetic and gyrofluid simulations.

Overall I can conclude that the NSRP is producing high-level achievements in accordance with international standards and is promoting theory and computer simulation research using the Plasma Simulator.

- The investigation of physical mechanisms of fusion plasmas and their theoretical systemization has many points of excellence. At a technical level, the research is first-rate, often distinguished by state-of-the-art simulations, and disseminated through multiple publications in leading archival journals. Several good review papers, which enhance NSRP visibility and are a service to the international community, have been published as well.

The group has the talent as well as the theoretical and computational capability to make potential breakthroughs in the area of fundamental plasma science, with applications that transcend fusion science. Whenever possible, the group should be encouraged to pursue such opportunities. Areas such as magnetic reconnection and anisotropic turbulence are ripe for discovery, and judging by the quality of work in these areas, much is to be gained by exploring further these opportunities.

以上より、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、核融合プラズマの物理機構解明とその理論体系化において、国際的に高

いレベルの成果を上げているかに対して、極めて高く評価するが7名、高く評価するが8名、評価するが4名であった。

[3] 共同利用・共同研究の推進

Promotion of cooperation and collaboration

(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。

Does the NSRP promote collaboration research as the center of excellence by integrating the high capabilities of universities and institutes?

- 研究会等を頻繁に開催して、研究交流の活性化を図っている点を高く評価する。(3名)
- 理論共同研究やプラズマシミュレータ共同研究等を通して、大学における核融合プラズマの物理機構解明に向けた理論・シミュレーション研究に貢献し、多くの成果を上げていることを高く評価する。COEとしてふさわしい研究の展開を進めていると評価できる。(13名)
- 核融合科学研究所が主導的・主体的に活動し、当該分野をリードしているとは言い難く、今後の更なる努力を期待する。(1名)
- 核融合プラズマの研究は広範囲にわたるが、シミュレーションにおける数理的構造と数値計算手法には共通するものが多い。プラズマシミュレータシンポジウムは研究者間でこの知見や経験を共有する場としてふさわしい。(1名)
- 研究が進展しても共同研究数がほぼ一定であるのは、共同研究を進めている研究者層が固定化している懸念があり、当該分野に参画する研究者の育成や活動の宣伝等にも更に力を入れていただきたい。(1名)
- 本プロジェクトに対する合目的な共同研究と、研究施設・環境を活用する一般共同研究とは区別されるべきではないだろうか。他の枠で、核融合・プラズマ関連の自由な提案に基づく計算に対し、核融合科学研究所の計算環境を提供している共同研究枠はないのか。(1名)
- 大学の基礎数理研究者との連携は十分とは言えない状況にあるため、今後の進展が期待される。(1名)
- 大学で開発した輸送コードをベースに本プロジェクトの統合化研究が行われたり、研究所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ITERやJT60-SA等の研究に使用されたり、研究協力が着実に進展している。(1名)
- 数値実験炉研究プロジェクトに参加する研究者の数は核融合科学研究所84名、他機関31名であるのに対し、出版論文数は研究所から225本(学生が筆頭著者を含

む)、大学等他機関研究者によるものが274本のほり、大学における研究に重要な役割を果たしていると思なせる。(1名)

- 数值実験炉研究プロジェクトのタスクグループにも多くの大学研究者が参加しているが、共同研究の成果とタスクグループとの関係をより明確に示すことが望まれる。(1名)
- Yes, over 50 projects were performed each year and 100 people (out of total 160) from universities work closely with NIFS colleagues.
- The publication record of the NSRP is very good (480 in the period 2010-2015) and there are many joint publications with collaborators. The key element of the integration of universities and other research institutes into the NSRP is the access to high performance computing facilities. The number of research subjects addressed within the collaboration and the number of collaborators involved are vast; this is imaging the broad spectrum of expertise and research topics of the involved university partners. All collaborators are members of the task groups, distributed over three areas of work: (a) general theory, (b) plasma simulator, (c) numerical methods.

This is all very good and meaningful. It is recommended, however, to evaluate on a regular basis all collaboration subjects in order to guarantee that they actually contribute to the research strategy of the NSRP.

- This is a difficult question to answer for a foreign reviewer but the evidence supports the conclusion that the NSRP management is committed to collaboration and is diligent in its promotion of this goal. The excellence of the collaboration program is attested to by how many of the achievements highlighted above involved university collaborators.

We note the unfortunate decrease (~20%) in the number of outside collaborators between the period 2008-2012 and 2013-2015, perhaps caused by budget cuts. This decrease is similar in magnitude to that in the number of published research papers and is clearly detrimental to the goals of the NSRP.

- As a Center of Excellence NSRP promotes high-level collaboration research with universities and institutes. The NSRP cooperation program has accepted more than 100 research subjects. The Plasma Simulator Symposium, which is the venue where Plasma Simulator users report recent results and propose and introduce new research topics provides collaborators with opportunities for the exchange of research information. Many collaborators from universities and institutes have joined the eight NSRP task groups.

120 is approximately the number of accepted collaboration subjects. The total

number of collaborators is approximately 1000 each year, including 400 from NIFS and 500 from universities. From 2010 to 2015 480 research papers concerning NSRP have been published thanks to domestic and international collaborations. 83 of those 480 are international collaboration papers and 397 domestic. It is therefore clear that the NSRP promotes collaboration research as a center of excellence and integrates the high-level capabilities of universities and institutes.

- The NSRP is very supportive of universities and institutes. It has accepted more than 100 research projects, and as mentioned above, the Plasma Simulator supports extensively the work of a large number of non-NIFS users as well as a Symposium for exchange of information between collaborators. The total number of collaborators in the accepted projects is ~1000 per year, with ~400 from NIFS, and ~600 from universities. This is a very strong profile of collaborative research, one the NSRP deserves high marks for.

以上より、大学等が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に対して、極めて高く評価するが7名、高く評価するが12名であった。

(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。

Does the NSRP contribute to the development of research in universities?

Does the NSRP function as a research hub for the dissemination of academic information to other fields?

- 高専から大学まで研究室レベルで実施されている様々な研究に対して、高専・大学研究者と連携して、新しいシミュレーションコードを開発し解析を行うなど、高専・大学の研究発展に大きく寄与しており、極めて高く評価できる。(9名)
- 自然科学研究機構内の連携研究等、他分野に発信できる成果が得られていることは高く評価できる。(11名)
- 核融合科学研究所が主催する研究会は、共同研究の連絡・管理・運営のみでなく、研究成果の発信の場としても利用されている。(1名)
- 二流体 MHD シミュレーション研究、電子系ダイナミクスや電磁モードを含む乱流シミュレーション研究など、微小散逸プラズマ中での様々な構造形成やダイナミクスに対する理解が進み、他分野に対して競争力のある学術成果を生み出している。(1名)
- 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、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。例として、当グループは、磁気リコネクションにおける二流体効果が果たす役割等について成果を上げてきているが、乱流現象や高エネルギー粒子現象など、多様なプラズマ現象を内包する数値実験炉シミュレーションから新しいリコネクションの概念が創出されることなどの波及効果を期待したい。(1名)

- 研究施設・環境を活用する一般共同研究は、本プロジェクトに含める必要は無いのではないか。ハード面や利用環境の観点は別として、本プロジェクトから切り離れた共同利用とした方が、より共同利用を申請しやすくなるのではないか。(1名)
- 他分野に発信できる学術拠点としては、新聞発表やインパクトの高い雑誌へ出版数を鑑みて弱い印象を受ける。(1名)
- シミュレーション科学の大きな特徴は、現象を支配する数理的構造に相似性がある場合には、そのシミュレーション手法や解析に多くの共通点が見いだされる点にある。この認識のもと、研究所は「自然科学における階層と全体」をはじめとする様々な学際的シンポジウムを毎年開催し、核融合シミュレーション分野にとどまらず、広範な基礎科学研究者の交流を促進し新たな学問分野の創出に貢献しており、その活動は高く評価できる。ただ、このような活動と学問分野の認知が今少し物足りない印象がある。この様な学際的活動を通じた新学問領域の創出に向けて、より広範で力強い周知・広報活動を行い、更に多くの研究者や学生の理解を進めたい。(1名)
- 今後、産学官連携研究に資する取組みの強化と、その取組みに対する所内の評価体制の構築を進める必要がある。(1名)
- ヘリカルプラズマとしての学術拠点であることは認められるが、より広く他分野に発信できる学術拠点としては、より一層の努力を要する。(1名)
- 自然科学研究機構等とのクロスディシプリンでの頑張りを期待する。(1名)
- 本プロジェクトは、国内の数多くの大学との共同研究を精力的に進め、毎年5件以上のワークショップを開催するなど、中心的な役割を果たしている。また、「自然科学における階層と全体論」プログラムをはじめ、ナノ構造形成、等の新学際的分野においても中心的な役割を果たしている。(1名)
- NIFS has developed an impressive network of collaborating Japanese universities. The NSRP is benefiting from this network and the development of research in the universities is clearly fostered by its activities. Besides the access to supercomputing facilities, the NSRP provides support in computer science and numerical mathematics. The exchange of physics know-how seems to work very well. In that sense the NSRP functions well as a research hub.

It is very positively noted that a number of NSRP symposia/workshops and NIFS-NIT joint seminars have been conducted in the period 2010-2015. This is

clearly the best approach to disseminate know-how available at universities and NIFS.

- The NSRP provides unique opportunities for University collaborators to engage in activities normally inaccessible to them. It facilitates and enables collaboration through several workshops each year, the plasma simulator symposium, and other means. Reciprocally, the NSRP benefits from NINS activities through participation in cross-disciplinary programs on multi-hierarchy simulation, on nano-structure formation, and other topics.
- The NSRP plays a key role in the collaboration with universities. It has been reported that a net of 10 Japanese universities is presently collaborating with NSRP, which qualifies the NSRP as a research hub for the dissemination of science to other fields.

NSRP organizes regularly several workshops per year dedicated to collaborations (35 workshops from 2010 to 2015) and it plays a crucial role in exploring new interdisciplinary fields, in particular within the framework of the National Institutes of Natural Sciences (NINS). It is worth noting, as a successful example, the program "Hierarchy and Holism in natural sciences" contributes to establishing a research hub for multi-hierarchy simulations in natural sciences. One more good example is the NINS cooperation program "Study of the relation between a high dimensional neuronal activity and connections of local neural circuits in an active brain", which contributes to find new methods for investigating into global dynamics on a cerebral cortex. NIFS is participating to this program.

Overall, I can conclude that the NSRP contributes to the development of research in universities and acts as a research hub for the dissemination of academic information to other fields.

- The answer to the first question is definitely yes.
The answer to the second question is also yes, but this function can be enhanced further emphasizing the broad impact of NSRP science, as discussed in Section 2.2. The NSRP deserves to be commended organizing the large number of Workshops and Symposia where ideas and developments in interdisciplinary fields are exchanged.

以上より、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に対して、極めて高く評価するが6名、高く評価するが10名、高く評価するが2名、妥当（適切）であるが1名であった。

(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。

Does the NSRP promote international cooperation through contributions to ITER, BA activities, and other international collaborations?

- IFERC 事業を中心とする BA 活動への貢献、ITPA への参加を通しての ITER 計画への貢献に加えて、従来からの JIFT を中心とする日米協力、日欧・日中韓・日韓等の国際協力を通して、幅広く国際協力に貢献していることを高く評価する。(10名)
- 六ヶ所研究センター長は IFERC の事業長を兼任し、日欧実施機関間の円滑な事業活動の推進を精力的に行っており、評価できる。(3名)
- ITPA へのより一層の貢献、更には六ヶ所サイトの活性化を期待する。(1名)
- IFERC CSC のスーパーコンピュータの計算機資源配分を決定する常設委員会には、数値実験炉研究プロジェクトメンバーが参画しており、重要な任務を果たしている。(1名)
- 国際貢献活動から本プロジェクトへのフィードバックも意識し、共同研究活動の中で数値実験炉に貢献する仕組みを工夫されるとよい。(1名)
- 国際貢献活動をなぜ本プロジェクト下で行わなければならないのか、若干不思議に感ずる。(1名)
- 研究所の限られた資源と時間で LHD の重水素実験研究やヘリカル型核融合炉研究をリードしていく必要があることから、ITER 計画・BA 活動への貢献は、本プロジェクトで開発したコード群を大学研究者等が積極的に使用できる環境を提供することにより、共同研究として進めていくのが望ましい。(1名)
- ITER、BA との直接的な連携（例えば明確な契約を結ぶなど）が少し見えづらいかもしれないが、現在の一部を含めて将来的に目指した研究成果は必ず ITER、BA に寄与するものであり、より広い意味での国際協力の貢献は大きい。ただ、もう少し関連付けについて発信力を強化しても良いかも知れない。(1名)
- ヘリカル型装置である W7-X や TJ-II 等に対するシミュレーション研究も行われているが、より積極的に貢献することを期待する。(1名)
- Compare with very productive domestic activities, wide international cooperation is needed in future. (1名)
- Via the Japan-US collaboration (JIFT) and wide-ranging collaboration with the EU, the NSRP promotes international collaboration, including the exchange of young scientists. The NIFS Rokkasho Research Center organizes the substantial NSRP contributions to ITER and BA. Also the involvement of members of the NSRP in the ITPA topical groups is noteworthy.
- The NSRP is extremely well connected to other international programs. It plays

a major role in collaboration with the US through the Joint Institute for Fusion Theory activities and also enjoys wide ranging collaborations with European institutions, China and Korea. This is reflected in the publication record. The collaboration with the US, for example, has led to important results on neoclassical toroidal viscosity (of interest to tokamaks as well as heliotrons), the interaction of magnetic islands with turbulence, and the verification of gyrokinetic turbulence codes. Collaboration with European institutions has led to the update of NBI modules in TASK-3D for the upcoming LHD deuterium campaigns and to the determination of the impact of the 3D equilibrium response on the edge topology and divertor heat loads in W7-X.

The NSRP also contributes to ITER and BA activities by promoting scientific collaborations in fusion simulation and in particular through its participation in IFERC and in ITPA topical groups.

- The NSRP plays a key role in promoting US-Japan collaboration, a wide-range of collaborations with European institutions, joint program in the A3 scheme (Japan, China, Korea), and several other international collaborations dedicated fusion plasma simulation.

The NSRP contributes to ITER and to the Broader Approach activities by promoting scientific collaborations in fusion simulation and by contributing to international committee members.

Collaborations at the forefront of research in theory and simulations have progressed thanks to bilateral agreements and to the International Energy Agency implementing agreements.

- The NSRP has a large number of international collaborators from Europe, USA, Japan, China and Korea. In particular, the NSRP leads by its contributions to the Joint Institute for Fusion Theory (JIFT), which provides an important mechanism for collaboration with US scientists. The same type of mechanisms is in place for ITER and BA activities, which appear to be well supported.

以上より、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に対して、極めて高く評価するが 5 名、高く評価するが 11 名、評価するが 2 名であった。

[4] 人材育成

Human resources development

- (1) 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。

Does the NSRP contribute to the development of human resources for the international scientific workforce required for long-term fusion science through simulation research?

- 毎年総研大学生を受け入れて教育し、人材育成に貢献している点や SSH 活動など広く理数系人材育成活動への貢献もあり、評価できる。(9名)
- 国内学生に対するサマースクールやアジアの大学院生に対する冬の学校を通じて大学院生に対する教育活動を行っている点が評価される。(5名)
- 本プロジェクトでは、数多くの大学院生、ポスドクをサポートしており、結果として彼らが数多くの論文や国際会議等において、研究成果の発信に貢献しており、適切に若手研究者の育成が図られている。(6名)
- 原型炉設計においてシミュレーション研究の重要性は今後益々高まる一方、それを支える人材の不足が懸念されている。原型炉設計として重要なシミュレーション分野に対する議論を行い、それらのシミュレーション研究を推進する人材の育成に組織的に取り組むことが、今後最も重要な課題であると考えられる。(1名)
- 将来の核融合科学研究を担う人材の養成については、多くはないが毎年博士学位取得者を輩出している。地理的な困難があるが、核融合科学分野の研究者養成には今後の拡充を求めたい。(1名)
- 大学院生の人数を増やすことができれば、より良いであろう。(1名)
- 核融合研究の長期的な発展を支える人材、特に国際的に主要な役割を担い活躍できる人材を育成できているかについては長期的な視点で更に育成を図っていただきたい。(1名)
- 若手研究者の流動性の向上に関しては、核融合科学研究所だけの問題ではないとは言え、継続的な検討が必要であろう。(1名)
- 大学院生は、平均して1年あたり0.63編/年の第1著者レフェリー付き論文を出版しており、平均としての水準は十分高いとみなせた。(1名)
- 大学院生(含む研究受託院生)は、当該研究グループの教育力(人員)を考慮すれば、もう少し多くいてよいと考えられる。(1名)
- COE 研究員として博士研究員を採用して研究の指導を行っているが、人数が限られ、外国人留学生が多くなってきている。今後の充実が望まれる。(1名)
- Yes, NSRP supports 22 graduate students in simulation research which is wonderful achievements compare with EU and US simulation research.
- The number of PhD students and Postdocs involved in the NSRP is kept at a stable level. Young researchers from universities are coming into close contact with the NSRP and NIFS, which is certainly beneficial for their career

development. In fact, a number of alumni from the NSRP have successfully developed their academic career at various universities and institutions.

The human resource development is further complemented by summer schools, winter schools and lectures for students at all levels. In addition, NIFS with the strong involvement of the NSRP is conducting outreach events at high schools, which is also very positive.

- The NSRP contributes to human resources development through education programs, cooperation programs with high schools, and through summer and winter schools. It also supports 4 postdocs and 22 graduate students who made 48 presentations at international conferences and garnered 6 awards in the period covered by this review. Last but not least, the recent move to Universities of senior scientists Drs. Watanabe-san (Nagoya) and Ishizawa-san (Kyoto) provides a prime example of high-level human resources development.
- The NSRP contributes to human resources development in an international framework, finalized to the long-term development of fusion studies. This happens through the following activities:
 - Education programs of Sokendai and of the other graduate schools at Nagoya, Tokyo Inst. Tech., Nagoya Inst. Tech.
 - Cooperation programs with high schools in science education
 - Sokendai Summer School
 - Sokendai Asian Winter School and Toki Lectures on Simulation Science

NSRP also supports 22 graduate students on fusion simulation research (from Sokendai, Nagoya Univ., Tokyo Inst. Tech., Nagoya Inst. Tech., etc.) and 4 postdocs (COE, JSPS) in 2012-2015. The NSRP graduate students made 48 presentations at international conferences in 2012-2015 and received 6 awards in 2012-2015.

NSRP members are active participants in ITPA Topical Groups.

- The NSRP makes a strong contribution to the development of human resources by supporting 22 graduate students from various academic institutions in Japan. These students have made 48 presentations at international conferences in 2012-15, and have received 6 awards. Furthermore, the NSRP has organized summer and winter schools for the benefit of Japanese as well as international students.

以上より、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に対して、極めて高く評価するが6名、高く評

価するが13名であった。

[5] 将来計画

Future plans

(1) 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。

Is the NSRP research plan for progressing toward the realization of the objectives appropriate? Is the research plan suitable for the next decade?

- 個別の課題でシミュレーションを核融合実験の有効なツール化することに見るべき進歩があった。第3期中期計画では、より結合型のシミュレーションに進むこととされているが、適切な発展方向であり、進展が期待される。(11名)
- 統合化の具体性については、数値実験炉の定義が明確ではなく、また統合化の手順も明確には示されていない点で現段階の計画は不十分であり、組織や体制の変更まで視野に入れた抜本的な対処が必要であろう。(11名)
- 今後も引き続き高性能のスーパーコンピュータ導入を推進すべきであるが、高性能のスーパーコンピュータ導入を実施する場合、ヘリカルプラズマのための拠点として発展するのか、我が国の核融合プラズマ分野の計算機資源の拠点として発展するのかは、核融合コミュニティとよく議論して判断して行くべき。またポスト「京」や HPCI コンソーシアムでの核融合科学研究所の計算機の役割についても十分配慮して行くべき。(1名)
- プラズマシミュレータの次期更新を考えると、電源容量の問題で加速演算器を用いたスーパーコンピュータへ移行せざるを得ないと思われるが、そのためのチューニング技術開発を行う研究開発体制が整っていない。(1名)
- 統合化では、取り入れる要素物理の増加については語られるが、それを統合した際に計算できる現象の時間・空間スケールの見積りも行っておく必要がある。これは、最新のスーパーコンピュータ設備の更新にあたってはより重要になる。(1名)
- 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。今後、大規模シミュレーションにおいてプラズマ・核融合研究が他分野と伍して成果を上げていくためには、若手研究者が所定の教育と訓練を受けることが不可欠になる。核融合科学研究所の計算科学に関わる様々な成果や知見が、所内に止まることなく、大学を含めた研究者に広く共有される体制のもと、国内を一層リードしていただきたい。(1名)
- 学術論文は、個別の研究成果、個別のシミュレーションで出版されるので、結合型のシミュレーションの成果を適切に具体化する工夫が必要かもしれない。(1名)

- 物理モデルの妥当性を確認するためには実験データとの比較による検証が重要であり、いくつかの分野では比較が行なわれている。しかしながら、単一の実験ショットとの比較にとどまっており、系統的な比較は行われていない。TASK3D-a によって蓄積された実験データ等との系統的な比較により、物理モデルの検証を実現することが望まれる。(1名)
- 数値実験炉としては、精密で大規模なシミュレーションから、実験解析に用いられる中規模シミュレーション、炉設計に用いる小規模シミュレーション等、いくつかの解析レベルのシミュレーションが必要とされると考えられる。より精度の高い大規模なシミュレーションだけでなく、対象を明確にした戦略的なシミュレーション研究が望まれる。(1名)
- 燃焼プラズマ中の輸送等の予測が困難と思われる物理について ITER の結果でベンチマークする等の方策、また、数値実験炉の予測も原型炉の提案を目的とするからには、妥当な精度が必要であろう。この指摘に対する研究所の答えは、基本的にボトムアップで進めるということであったが、評価者としては満足できるものではなかった。(1名)
- LHD 研究の懸案でもあるプラズマの高ベータ化や質量効果等の具体的な物理課題の解明を第3期の共通目標として、それを実現するためにコードやモデルの結合・統合を優先的に行うなど、一定のプライオリティー付けをしてプロジェクトを推進することなども一案と思われる。(1名)
- The NSRP addresses a wide range of timely research subjects. Most of them are critical for the development of a fusion reactor and the know-how to be gained during the coming 10 years will be of great value for the fusion community. It will be a great challenge, however, to integrate all codes in a consistent way, which would be an ultimate requirement for a "numerical test reactor". The LHD experiments (in particular the experiments with Deuterium plasma) are crucial for the benchmarking of the codes. All eight task groups have developed a – fairly coarse - research plan (including benchmarks) for the next 10 years. It is beyond the present review to judge the feasibility of each work package but the topics are well chosen and sensible.

In summary, the research plan looks reasonable and forms a good basis for the years to come.

- The plan is very appropriate and contains a great deal more detail than it did in 2012. We note that the objectives of the 2012 plan have been met, in particular as relates to the validation of the TASK-3D framework and its application to scenario development for FFHR-d1. The future plans include several exciting new projects, such as the validation of the several codes on LHD deuterium

experiments; their porting and optimization to GPU and many-core architectures; and the validations and comparisons with the recently commissioned W7-X heliotron. The NSRP is also preparing for an upgrade to a 10 PFlops machine planned for 2019.

A missing element in the future plans is uncertainty quantification (UQ), the estimation of error bars for numerical predictions. This is a necessary part of a numerical reactor project and it requires the acquisition of specialized statistical expertise by scientists knowledgeable about the physics. We note however, that the NSRP's cultivation of reduced model expertise makes it well equipped for UQ.

While the plan for the next four years is well defined and eminently suitable, it is more difficult to evaluate the plan on a ten-year timeframe. This is due in part to the uncertainties connected to the ITER schedule but also to uncertainties over the direction of future computer architectures and their effect on code maintenance and refactoring, and uncertainties connected with the relative rates of progress of the various components to the NTR. In conclusion, the plan is suitable but subject to a very high degree of uncertainty beyond 2019, and course-corrections will certainly be required.

- The NSRP future plan is based on the following four research activities:
 - (1) Development of research systems and numerical techniques supporting large-scale simulations
 - (2) Validation studies using experimental plasmas
 - (3) Improvement of codes toward burning plasmas, and simulation benchmarking against other codes
 - (4) Research toward physics integration and design study of DEMO/FFHR.

The NSRP research plan appears completely appropriate for progressing toward the realization of the project objectives and the proposed research plan appears well-designed to guarantee success for the next decade.

- Given the high ambition of the NSRP, the future plans for the project are spelled out quite broadly, including milestones. Given the tight schedule in the third mid-term, it is very important that milestones be met and their attainment closely monitored. The Program Advisory Committee (PAC), discussed in Section 1.1, might help by providing perspectives and possible course-corrections, if needed. On the whole, the various task groups seem to be fully staffed. Given the long life of the project, we urge the NSRP group to make careful succession plans for the leaders who might retire, giving them an opportunity to mentor young

leaders who might eventually take their place.

以上より、目標に向けた今後の研究計画は中長期的な展望を見据えた適切なものとなっているかに対して、極めて高く評価するが2名、高く評価するが12名、評価するが3名、妥当（適切）であるが2名であった。

第3章 評価のまとめと提言

第2章で記載され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、数値実験炉研究プロジェクトの推進に重要ないくつかの提言をする。

1. 評価のまとめ

[1] 研究体制・環境の整備

Development of research system and environment

(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。

Does the research system function appropriately in accomplishing the objectives of the Numerical Simulation Reactor Research Project (NSRP)?

本数値実験炉研究プロジェクトが 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有機的連携を行う体制は適切であり、ヘリカル系プラズマでの多岐にわたる物理課題に対して、本プロジェクト研究母体としての8タスクグループ体制やタスクグループ間連携など、様々な施策により研究活動を柔軟かつ機動的に推進しているとともに、世界をリードする計算機コード群を開発・整備する研究体制が構築され、有機的に機能している点を高く評価する。

しかしながら、「各グループの達成すべき目標設定や達成度評価を十分に実施してきたか」という視点からすると、全体的な開発目標に対する進捗度などをチェックする体制の強化、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を行う研究者の確保、研究者数のバランス等、プロジェクトマネジメントの点からの留意が必要であろう。同時に、各研究グループにプロジェクトとしてのゴールを意識させる必要があるのではないか。

分野間連携及び大学共同利用機関の観点から、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・発展することを希望する。

(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。

Is the environment of the "Plasma Simulator" system and its related research developed appropriately?

Is the "Plasma Simulator" effectively utilized for collaboration research?

我が国第3位のスーパーコンピュータの導入など、関連研究環境の整備は適切に進められ、かつ質的に異なる新たな研究成果を生み出していることは極めて高く評価することができ、今後の研究進展が大いに見込める。従って、現在の研究の進め方、環境の整備・管理は適切で、十分有効に機能していると評価する。また、スーパーコンピュータの管理・運用だけでなく、新規マシン導入に際しては、本プロジェクトで開発されてきた各種コードの並列化・高速化支援を行っていること、講習会の開催や、WEB ページ上での各種サービスなど利用者の利便性にも努力がなされており、これらを高く評価する。

本プロジェクトの下で整備された環境を活用し、毎年50件以上のプロジェクトの遂行など有効に利用されてきた。毎年15,000件以上のジョブをこなし、平均稼働率も90%を維持するなど、利用率についても高く評価できる。なお、シミュレーション結果の可視化に向けた仮想現実関係ツール等の開発も評価するが、今後は、研究の成果をより一層高めるために有効活用することを期待するとともに、広く一般にも公開することを期待する。

一方、数値実験炉計画の実施において整備される計算機能力を用いることでどの程度の進展が見込めるかという指標をより明確にすると共に、段階的な達成目標に見合った整備計画を構築しながら推進していただきたい。限られた資源の中での最適化を目指す場合、開発が遅れている要素開発に対して計算機時間や優先度を高めるなどの環境整備も必要であり、全体計画の中での各グループの進捗状況についての精査が必要である。

[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。

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

(1) 数値実験炉の構築

Construction of the Numerical Test Reactor for a helical fusion system

核融合プラズマの閉じ込めに必須となるプラズマの安定性を決める重要な物理機構、高エネルギー粒子との相互作用、周辺プラズマの挙動解析と壁面との相互作用、LHD 等における

るジャイロ運動論乱流輸送の検証、統合解析コードの更なる高度化など、個別の課題に関して着実な進展がなされており、第2期数値実験炉の目標を概ね達成していると評価する。同時に国際的な共同研究も進み、国際的に高いレベルの研究が遂行されている点を、極めて高く評価する。若手研究者の育成及び活躍も高く評価できる。

実験解析への応用を念頭においた各種コードのモジュール化や、使いやすさを意識したコード開発、実験との比較・検証、国際的な共同研究活動を通じたベンチマーク等は、今後更に重要になると思われるので、更なる進展を期待する。

一方、数値実験炉構築のための基本的な方針が明確ではないように思われる。次項に代表されるプラズマ物理からの視点並びに炉心設計からの視点双方に留意し、開発された多様なコード群を一層有機的に結合することによる本プロジェクトの目指す数値実験炉構築への道筋をより明確に示していただきたい。その際、全ての要素開発が完成した段階で統合化が完結するロードマップを視野に入れつつ、現在もすでに一部着手されているように、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ろう。

(2) 核融合プラズマの物理機構解明とその理論体系化

Physics mechanisms of fusion plasmas and their theoretical systemization

開発された多種多様なコードを用いた解析により、炉心プラズマから壁にわたる重要な物理現象の機構解明に大きく貢献しており、実際の LHD 実験結果の解析や FFHR 設計に繋がる成果も得られているなど、個々のタスクで展開された「核融合プラズマの物理機構解明」の成果は、各々、極めて高く評価できる。同時に、理論的な予想との整合性や実験で得られた結果に対しての物理機構解明にシミュレーション計算は大いに寄与している。また、理論体系化にも進展が見られ、インパクトのある研究成果もいくつか創出されている点は評価に価する。本プロジェクトを通じ、研究者同士がお互いを刺激しあって活発な研究が行われていることが具体的な形として現れており、正のフィードバックがかかって更なる研究成果の創出が期待される。

本プロジェクトを支える基礎研究部分を適切に支援しつつ、プラズマ科学への貢献を十分に果たしていることも高く評価できる。特に磁気再結合や Rayleigh-Taylor 不安定性の解析といったプラズマの基礎学理の理解に貢献する成果を上げていることは特筆すべきである。

また、得られた科学的成果は、その科学的知見だけでなく、可視化装置を駆使したインパクトのある画像として専門ジャーナル表紙を飾るなど、本プロジェクトの存在感を内外に示していることは評価できる。今後もより一層、国際的レビュー誌を通じた貢献に期待したい。

一方、コンピュータシミュレーションでは、その数値計算手法の開発も重要であり、過去においては核融合分野からも新たな数値計算手法の提案が多数あったことを鑑み、今後は是非とも数値計算手法の分野にも精力を注入するとともに、核融合界からの新たな手法の発信を期待する。

[3] 共同利用・共同研究の推進

Promotion of cooperation and collaboration

- (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。

Does the NSRP promote collaboration research as the center of excellence by integrating the high capabilities of universities and institutes?

プラズマ・核融合分野におけるシミュレーションの数理的構造や数値計算手法には共通するものが多く、研究者間でこの知見や経験を共有する場を提供し、研究交流の活性化を図っている点を高く評価する。また、理論共同研究やプラズマシミュレータ共同研究等を通して、大学における核融合プラズマの物理機構解明に向けた理論・シミュレーション研究に貢献し、多くの成果を上げていることから COE としてふさわしい研究の展開を進めていると評価する。さらに、大学で開発した輸送コードをベースに本プロジェクトの統合化研究が行われていること、研究所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 ITER や JT60SA 等の研究に活用されていることなど、大学や独立行政法人との研究協力が着実に進展していることも評価に値する。

一方、研究が進展しているにも拘らず共同研究数がほぼ一定であるのは、共同研究を進めている研究者層が固定化している懸念があり、参画する研究者の育成や活動の宣伝等にも力を入れていくことを期待したい。

- (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。

Does the NSRP contribute to the development of research in universities?

Does the NSRP function as a research hub for the dissemination of academic information to other fields?

核融合シミュレーション分野に留まらず、広範な基礎科学研究者の交流を促進し新たな学問分野の創出に貢献しており、高専・大学研究者と連携して、新しいシミュレーションコードを開発し解析を行うなど、高専・大学の研究発展に大きく寄与している点を高く評価する。二流体 MHD シミュレーション研究、電子系ダイナミクスや電磁モードを含む乱

流シミュレーション研究など、微小散逸プラズマ中での様々な構造形成やダイナミクスに対する理解が進み、他分野に対して競争力のある学術成果を生み出し、自然科学研究機構内の連携研究等、他分野に発信できる成果が得られていることは高く評価できる。

一方、他の学術分野や産業界等も含めた更に広範囲な領域への発信力をより一層高める必要がある。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、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とともに、学際的活動を通じた新学問領域の創出に向けて、より広範で力強い周知・広報活動を行い、更に多くの研究者や学生の理解を深めていくことを期待したい。

(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。

Does the NSRP promote international cooperation through contributions to ITER, BA activities, and other international collaborations?

IFERC 事業を中心とする BA 活動への貢献、ITPA への参加を通しての ITER 計画への貢献に加えて、従来からの JIFT を中心とする日米協力、日欧・日中韓・日韓等の国際協力を通して、幅広く国際協力に貢献していることを高く評価する。また、六ヶ所研究センター長は IFERC の事業長を兼任し、日欧実施機関の間の円滑な事業活動の推進を精力的に行っていることを評価する。

国際協力の拡充は本プロジェクトの推進に大きく寄与するので、LHD の重水素実験研究やヘリカル型核融合炉研究への主体的な貢献を果たすとともに、ITER 計画・BA 活動への貢献を含めた国際協力を更に一層推進していただきたい。

[4] 人材育成

Human resources development

(1) 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。

Does the NSRP contribute to the development of human resources for the international scientific workforce required for long-term fusion science through simulation research?

毎年総研大学生を受け入れて教育し、人材育成に貢献している点や SSH 活動など広く理数系人材育成活動へ貢献し、かつ国内学生に対するサマースクールやアジアの大学院生に対する冬の学校を通じて大学院生に対する教育活動を行っている点が評価される。また、

本プロジェクトでは、数多くの大学院生、ポスドクをサポートしており、結果として彼らが数多くの論文や国際会議等において、研究成果の発信に貢献しており、適切に若手研究者の育成が図られていることを高く評価する。

一方、大学院生、若手研究者の人材育成は、シミュレーション分野の今後の重要性を鑑みるに、質としては十分であるが数的にはやや不十分である。原型炉設計においてシミュレーション研究の重要性は今後益々高まる一方、それを支える人材の不足が懸念されている。原型炉設計として重要なシミュレーション分野に対する位置づけを明確にし、それらのシミュレーション研究を推進する人材の育成に組織的に取り組むことを期待する。

さらに、今後開発されるであろうペタフロップスレベルのシミュレーションでは、超並列計算機の発展に伴い、それを使いこなす高度な専門知識を必要とする。今後、大規模シミュレーションにおいてプラズマ・核融合研究が他分野と伍して成果を上げていくためには、若手研究者が所定の教育と訓練を受けることが不可欠であり、そのための組織的な対応を期待する。

[5] 将来計画

Future plans

(1) 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。

Is the NSRP research plan for progressing toward the realization of the objectives appropriate? Is the research plan suitable for the next decade?

幾つかの課題では、LHD プラズマ実験結果の解析や解釈のためにシミュレーションを有効なツールとして活用している点に見るべき進歩があった。第3期中期計画では、より結合型のシミュレーションに進むこととされている点は適切な発展方向であり、今後の更なる進展が期待できる。

一方、数値実験炉の定義が必ずしも明確ではなく、また統合化の手順も明確には示されているとは言えず、現段階の計画の精査が必要であろう。数値実験炉としては、精密で大規模なシミュレーションから、実験解析に用いられる中規模シミュレーション、炉設計に用いる小規模シミュレーション等、いくつかの解析レベルのシミュレーションが必要とされるため、対象を明確にした戦略的なシミュレーション研究を展開する必要がある。

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されることを希望する。

2. 提言

今回の評価において、数値実験炉研究プロジェクトについて議論した結果、今後の進め方に関して、提言を以下にまとめた。

- (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。

第4章 おわりに

核融合科学研究所では平成22年度からの第2期中期目標期間の開始に当たり、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、LHD計画、数値実験炉研究、核融合工学研究の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。このために平成22年度には所内研究組織の改編も行った。全研究職員が一つの研究部にまとめられ、3つのプロジェクトへの参加を自由にする体制を取っており、LHD計画、数値実験炉研究及び核融合工学研究との連携が推進され、課題に対して臨機応変に対応できることが期待される。

核融合科学研究所運営会議では、まず平成23年度にLHD計画プロジェクト、平成24年度に数値実験研究プロジェクト、平成25年度に核融合工学研究プロジェクト、平成26年度に重水素実験実施計画の外部評価を実施した。そして、本年度においては「数値実験研究炉プロジェクト」を対象として外部評価を実施することとした。外部評価委員として運営会議の所外委員10名と外国人委員3名に、さらに所外の国内専門委員5名と外国人専門委員2名を加えて外部評価委員会を構成し、評価作業を行った。

平成27年10月21日に開催した第1回外部評価委員会及び専門部会において、本年度の外部評価の進め方について協議し、以下の視点に関して評価することとした。

[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) 大学等が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。

その後、平成27年11月28日に開催した第2回外部評価委員会及び専門部会では、核融合科学研究所の担当者から、評価の観点及び評価項目に沿って詳しい説明を受け、質疑応答が行われた。さらに、平成28年1月20日に第3回外部評価委員会及び専門部会を開催し、研究所との更なる質疑応答も含め外部評価委員会で定めた評価の観点と項目に沿った評価作業とその取りまとめを行った。その結果、外部評価結果の基本的な結論に関して大筋合意が得られたので、その後はメール審議により、最終報告書を取りまとめた。

今回の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、上記の項目に対して、概ね高く評価できるとの結論となった。特に、プラズマシミュレータに関しては我が国第3位のスーパーコンピュータを導入し核融合コミュニティのシミュレーション研究に広く供している点は極めて高く評価できる。また、大学等有する高い研究能力を幅広く結集し COE としての共同研究を精力的に推進するとともに、核融合分野で国際的に活躍できる人材の育成に貢献している点も高く評価できる。さらに、数値実験炉の構築に向けた高度なシミュレーション研究や核融合プラズマの物理機構の解明に関しても、世界的に優れた成果を数多く上げており高く評価できる。他分野に発信できる成果や ITER 計画・BA 活動への積極的な参加・貢献に関しても高く評価でき、今後も学術発信や ITER 等の国際協力を更に一層推進していただきたい。数値実験炉研究プロジェクトについては、世界をリードする計算機コード群を開発・整備する研究体制となっている点は高く評価できる。ただし、目標設定や達成度の評価、さらには研究グループ間の連携によるシナジー効果を生むようなマネジメントの点からはより一層の工夫が求められよう。なお、プラズマ・核融合研究の更なる発展のためにも、より高性能なスーパーコンピュータの導入に向けた継続的な努力を期待する。

最後に、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ー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。

資料編 1

平成27年度 数値実験炉研究プロジェクト報告書

平成27年度

数値実験炉研究プロジェクト 報告書

平成28年1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・中期計画から	3
1.3	前回の数値実験研究プロジェクトに関する外部評価について	4
2	研究体制・環境の整備	7
2.1	ヘリカル研究部と数値実験炉研究プロジェクト体制について	7
2.2	数値実験炉研究プロジェクト体制について	8
2.2.1	全体体制と運用方針	8
2.2.2	他のプロジェクトとの連携	11
2.2.2.1	LHD計画プロジェクトとの連携	11
2.2.2.2	核融合工学研究プロジェクトとの連携	12
2.3	プラズマシミュレータおよび関連研究環境の整備	13
2.3.1	プラズマシミュレータの整備	13
2.3.2	統合輸送コード利用環境の整備	15
2.3.3	バーチャルリアリティ装置の整備	16
3	数値実験炉研究プロジェクトの研究成果	18
3.1	プロジェクトの概要	18
3.2	数値実験炉構築へ向けた研究	21
3.2.1	シミュレーションコードの整備・拡張	21
3.2.1.1	シミュレーションコード群の全体像	21
3.2.1.2	コアプラズマコード	29
3.2.1.3	周辺プラズマ、プラズマ・壁相互作用コード	39
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	44
3.2.2	統合輸送解析コードの構築	56
3.2.2.1	統合輸送解析コードの概略(過去3年間の進捗)	56
3.2.2.2	LHD実験データ解析型 TASK3D-a の進展	58
3.2.2.3	到達パラメータ予測型 TASK3D-p の進展	66
3.3	核融合プラズマの物理機構解明	70
3.3.1	MHD平衡と安定性	70
3.3.2	コアプラズマの粒子・熱輸送	86
3.3.2.1	新古典輸送計算における磁気ドリフト項の重要性	86

3.3.2.2	新古典粘性がプラズマ回転分布に与える影響	88
3.3.2.3	新古典輸送計算の装置間・コード間国際比較検証研究	90
3.3.2.4	新古典輸送現象への共鳴摂動磁場の影響	93
3.3.2.5	LHD 有限ベータプラズマの乱流輸送の理解と予測	94
3.3.2.6	JT-60U トカマク実平衡における ITG-TEM 乱流輸送解析	98
3.3.2.7	ジャイロ運動論解析に基づく乱流輸送モデルの輸送シ ミュレーションへの適用方法	99
3.3.2.8	フラックス・チューブ連結モデルの開発	101
3.3.2.9	高精度多粒子種衝突モデルの開発と乱流シミュレーショ ンコード GKV への実装	103
3.3.2.10	国際ベンチマークの推進	104
3.3.2.11	乱流計測シミュレータによる数値乱流計測	106
3.3.2.12	ジャイロ運動論モデルの拡張	106
3.3.2.13	ゾナルフローに対する新しいクロージャーモデルを用 いたジャイロ流体 ITG 乱流シミュレーション	107
3.3.3	高エネルギー粒子・波動・加熱の物理	110
3.3.4	周辺プラズマの輸送とプラズマ・壁相互作用	119
3.3.5	基礎物理	128
3.3.5.1	LHD の Hall MHD シミュレーション	128
3.3.5.2	磁場閉じ込め装置の周辺領域におけるプラズマコヒーレ ント構造のダイナミクス	130
3.3.5.3	無衝突磁気リコネクションに関する多階層シミュレー ション研究	131
3.3.5.4	MHD 平衡・安定性理論の拡張	133
3.3.5.5	2次元 RT 不安定性の拡張 MHD シミュレーション	135
3.3.5.6	一様等方 MHD 乱流	139
3.3.5.7	衝撃波と粒子加速	143
3.3.5.8	レーザープラズマ	146
4	共同利用・共同研究の推進	150
4.1	プラズマシミュレータを活用した国内共同研究	150
4.1.1	プラズマシミュレータ共同研究	150
4.1.2	プラズマシミュレータシンポジウム	151
4.1.3	大学との共同研究	153

4.1.3.1	名古屋大学	153
4.1.3.2	名古屋工業大学	155
4.1.3.3	京都大学	158
4.1.3.4	京都工芸繊維大学	158
4.1.3.5	九州大学	160
4.1.3.6	群馬大学	161
4.1.3.7	埼玉大学	166
4.1.3.8	山形大学	168
4.1.3.9	東京工科大学	169
4.1.3.10	釧路高等専門学校	171
4.1.3.11	兵庫県立大学、神戸大学、甲南大学	173
4.1.3.12	兵庫県立大学	174
4.1.3.13	防衛大学、国立天文台、広島大学、東京工業大学	174
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	174
4.1.4	研究会	174
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	179
4.2.1	自然科学における階層と全体	179
4.2.2	非平衡を制御する科学: プラズマ応用ナノサイエンスの理論シミュ レーション展開	182
4.2.3	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	186
4.2.4	プラズマの3D可視化	187
4.2.5	戦略的国際研究交流加速事業「核融合及び宇宙プラズマ物理研究 の融合的展開」	189
4.3	国際的なCOEとしての活動	190
4.4	ITER計画・BAとの連携	198
5	人材育成	204
5.1	大学院教育	204
5.2	その他の教育プログラム	205
5.2.1	SSH・SSP活動	205
5.2.2	総研大 夏の体験入学	206
5.2.3	総研大アジア冬の学校・シミュレーション科学教育講座	208

6	将来計画	210
6.1	平衡・安定性	211
6.2	高エネルギー粒子・波動	212
6.3	新古典・乱流輸送	213
6.4	周辺プラズマ輸送	216
6.5	プラズマ壁相互作用	217
6.6	多階層複合物理グループ	219
6.7	統合輸送コード	221
6.8	研究環境の整備	221
6.8.1	プラズマシミュレータ将来計画	221
6.8.2	シミュレーション研究基盤	222
7	まとめ	224

1 はじめに

平成元年(1989年)5月29日核融合科学研究所の創設に際し、その研究推進の母体となる内部組織として研究所設立の主目的である大型ヘリカル装置を建設し、その装置を用いて実験的に核融合プラズマの学理の構築に貢献する「大型ヘリカル研究部」と並立して、特定の閉じこめ概念にとらわれず広い視野に立って核融合プラズマの理論体系化を目指す「理論・シミュレーション研究センター」が設立された。

この設立理念を基調としながらも、その後のシミュレーション研究を取り巻く環境の変化や要請にこたえる最適の研究環境と研究体制を構築しつつ、シミュレーション研究を推進してきた。平成16年度の法人化では、大学共同利用機関法人自然科学研究機構の一員として、中期計画・中期目標を策定し、共同利用・共同研究の推進に努めることを求められるようになった。さらに、平成22年度から始まった第2期中期計画では、核融合原型炉に向けた学理の体系化を加速するために、研究者のライン組織として単一研究部のヘリカル研究部に一本化し、それぞれのタスクを持った大型ヘリカル装置計画、数値実験研究、核融合工学研究からなる3研究プロジェクト体制を導入した。さらに、平成26年7月1日には、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活加速するため、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。

以下では、まず、数値実験研究プロジェクトがスタートするまでの核融合科学研究所におけるシミュレーション研究の概略を記す。

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

「理論・シミュレーション研究センター」は広島大学の「核融合理論研究センター」を廃止転換し、それを研究母体として、名古屋大学プラズマ研究所が担っていた日米科学技術協力事業(核融合分野)の一環としての日米理論共同研究(Joint Institute for Fusion Theory)など国際的な理論研究推進のための機能を包含し、我が国における核融合プラズマの理論・シミュレーション研究の中心拠点として発足したものである。理論・シミュレーション研究センターでは、非線形・非平衡・開放系で特徴づけられる核融合プラズマの多重時空間スケールにわたる複雑現象の物理機構の解明を、シミュレーション研究を通じて行うことをその主目標とした。この目標の実現には、専用のスーパーコンピュータとその能力を最大限に活用できる研究環境の整備・拡張が重要であると位置付け、研究戦略の設定、物理モデル・数値モデルの構築から、コーディング、ジョブ投入、得られた膨大なデータの保存、シミュレーションデータの3次元可視化をはじめとする様々な解析等の、スーパーコンピュータを用いた大規模シミュレーション研究に必

要な一連の研究活動が研究者と一体となって実現できる環境、MISSION(Man-Machine Interactive System for Simulation)システムの構築と整備を進めた。この研究環境の中心に位置する、スーパーコンピュータは、その目的をより鮮明にするために「大型シミュレーション研究用解析装置」と命名され、常にシミュレーション研究に最適な最先端のマシンが調達・整備された。

大学同利用機関法人の発足となった平成16年には、理論・シミュレーションセンターの外部評価が実施された。外部評価報告書の「3.1 総評」の中の「理論・シミュレーション研究センターの役割」において「核融合科学研究所理論・シミュレーション研究センターは、日本におけるシミュレーション研究の拠点として重要な役割を果たしている。所内においては、理論・データ解析研究系、計算機情報ネットワークセンターの研究者と密接に連携して研究をおこなっている。また、国内はもとより海外の研究者と活発な共同研究がおこなわれている。中枢となる研究所に全国の研究者が共同利用できる最新鋭の計算機が設置されることが必要であり、核融合科学研究所はその役割を十分果たしてきた。計算機の性能向上は著しく、今後世界のプラズマシミュレーション研究をリードし続ける上でスーパーコンピュータなど研究施設を継続的に更新してゆく必要がある。」(抜粋)「また、複雑現象を可視化するヴァーチャルリアリティーも核融合科学研究所がいち早く着目して開発してきたものであり、この方面をリードする成果が広く波及することが待たれる。」(抜粋)「自然科学研究機構の中での連携や、レーザー研究との連携などが発展しようとしており、今後具体的な成果が得られることが期待される。また、大学で行われている様々な基礎研究との連携が一層活発化することが望まれる。」(抜粋)と述べられている。

この外部評価報告書を受け、平成17年度において、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して所長から核融合科学研究所運営会議に対して諮問が行われ、運営会議のもとに組織検討委員会(委員長:三間園興大阪大学レーザーエネルギー学研究センター長、委員数:20名)が設置され、検討結果が「組織検討委員会報告書」(2006年3月10日)としてまとめられた。運営会議報告書では、「審議の結果、当委員会は、核融合科学研究所におけるシミュレーション研究は、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科学研究所に新組織『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。また、当委員会は、この新センターを効率的に運用するため、理論・シミュレーション研究センターと計算機・情報ネットワークセンターを一体化し、シミュレーション環

境（ソフト）と計算機環境（スーパーコンピュータ、ネットワーク）を融合させることが適切であると判断した。」と述べられている。この報告を受けて所内で組織再編に関する検討を行った結果、主として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」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った。さらに、この研究部のもとにLHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系と新領域シミュレーション研究系の2研究系、及び六ヶ所研究センターをおくこととした。この構想案は平成18年度核融合科学研究所運営会議による承認を受け、自然科学研究機構教育研究評議会等による承認を受け、平成19年4月1日に「シミュレーション科学研究部」が発足した。

平成22年度から始まった第2期中期計画では、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3研究プロジェクト体制が発足した。これを受け、これまでのシミュレーション研究成果を受け継ぎつつ、数値実験研究へと発展すべく、その研究計画においても、これまでの「核融合プラズマ閉じ込めの物理機構解明とその体系化」に加え、「数値実験炉の構築」を掲げた。

1.2 自然科学研究機構の第2期中期目標・中期計画から

平成22年4月から平成28年3月までの第2期中期計画の6年間に達成すべき「研究水準及び研究の成果等に関する目標」（中期目標）としては、特に、シミュレーション研究に関する具体的な記述はないが、「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。」と設定されており、この目標を達成するための中核としての活動が期待されている。

この中期目標を達成するための「中期計画」においては、「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」として、以下のシミュレーション研究を掲げている。

- 「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。」

1.3 前回の数値実験研究プロジェクトに関する外部評価について

第2期中期計画の中間に当たる平成24年度において、以下の6項目の評価の観点にも基づき、「数値実験研究プロジェクト」に関する外部評価が行われた。

1. 研究体制・環境の整備

- (a) 平成22年度から導入された数値実験研究プロジェクトの目標設定は適切か。
- (b) 推進体制は目標に合致したものであるか。また適切に機能しているか。
- (c) プラズマシミュレータおよび関連研究環境の整備は適切に進められているか。

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、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。

- (a) 数値実験炉の構築（LHDの最高性能化と原型炉設計への貢献、計算科学の高度化を含む。）
- (b) 核融合プラズマの物理機構解明とその理論体系化

3. 数値実験研究プロジェクトに関する共同利用・共同研究の推進

- (a) COEとして大学等が有する高い研究能力を結集し、共同研究を適切に進めているか。
- (b) 共同利用資源としてプラズマシミュレータは有効に活用されているか。
- (c) 機構内分野間連携研究等を推進し、他分野へ発信できる学術拠点となっているか。
- (d) 大学の研究発展に寄与しているか。

4. 国際連携・共同研究の推進

- (a) 国際共同研究などにより、国際的なCOEとしての役割を果たしているか。
- (b) ITER 計画・BA 活動との連携、貢献を図っているか。

5. 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。

6. 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4項目が提示された。

1. 数値実験研究は、核融合プラズマ閉じ込め物理機構の解明とその体系化、及び数値実験炉の構築のため、極めて重要であり今後の進展を期待する。
2. 数値実験研究グループは、実験グループ及び炉設計グループと密接に共同作業を進めることが重要である。数値実験炉を構築するロードマップを作成するなど、アプローチの具体化を期待する。
3. プラズマシミュレータ等の性能増強を行い、研究基盤の充実と計算科学の高度化を期待する。
4. 今後も、シミュレーション研究や計算科学分野を担う人材の育成を期待する。また、引き続きITER 計画・BA 活動にも積極的に貢献することを期待する。

これらの提言を受けた後の第2期中期計画の後半3年間で、核融合プラズマ閉じ込め物理機構の解明とその体系化及び数値実験炉の構築に向けたシミュレーション研究を更に推進し、3章の研究成果の所に記載してあるような、優れた研究成果を多数生み出している。この成果の中には、ITER計画やBA活動に関連したものも多数含まれており、国内外の共同研究や様々な連携研究の基にして得られたものとなっている(4章)。さらにこの間この分野を担う多くの若手研究者の育成にも貢献してきている(5章)。また、平成27年6月には従来機の8倍以上の演算性能を有する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(2章)。これらの成果・実績を背景に、実験グループや炉設計グループとの連携をより密接にし(2章)、数値実験炉構築に向けたローマップの作成やアプローチの具体化を含む将来計画の策定を進めてきている(6章)。

2 研究体制・環境の整備

2.1 ヘリカル研究部と数値実験炉研究プロジェクト体制について

第2期中期計画のスタートを機に、平成22年4月、これまでの複数の研究部とセンターに分かれていた組織を、7つの研究系と六ヶ所研究センターから成るヘリカル研究部に統合し、今後のLHD計画の飛躍的展開、数値実験炉や原型炉設計に向けた学術研究を機動的に行うための組織体制へと再編した(図2.1-1)。同時に、この組織体制とは別に、それぞれのタスクを持った、LHD実験計画、数値実験研究、核融合工学研究の3つのプロジェクト体制を発足させた。この組織体制の再編により、各研究系に所属する研究者は、同時に、複数のプロジェクトに参加することが可能となるなど、研究の進展に柔軟かつ機敏に対応できる研究体制となった。研究系を縦系に例えると、プロジェクトが横系になり、ソフトとハードから成る研究環境の整備と物理課題に対する研究活動の推進という次元の異なる活動を機能的に行うことができる。平成26年7月1日には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、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活性化することとした。



図 2.1-1 研究部とプロジェクト体制

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、他のプロジェクトとの連携等を積極的に図っている。新体制の下、LHD実験計画プロジェクトと核融合工学研究プロジェクト

に連携の担当者を配置し、プロジェクト間での研究交流や情報交換、タスクグループへの相互参加等が機能的かつ円滑に行われるようになった。

2.2 数値実験炉研究プロジェクト体制について

2.2.1 全体体制と運用方針

数値実験炉研究プロジェクトでは、これまでの炉心プラズマから周辺プラズマまでの研究を、実験や理論と連携しながらさらに発展させ、核融合磁場閉じ込め装置全体のプラズマ挙動を予測することのできるヘリカル型核融合装置に対す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している。

このプロジェクトの推進に当たっては、大きな課題が3つある。まず、(1) MHD 平衡・安定性から、ミクロ不安定性とプラズマ乱流、コアおよびエッジでのプラズマ・熱輸送、核燃焼プラズマ、高エネルギー粒子物理、燃料補給、波動加熱、周辺プラズマ輸送、プラズマ対向壁でのプラズマ物質相互作用に至るまでの構成物理要素の導入とその物理の解明である。次に、(2) 数値実験炉を構成する各要素物理の数値モデルの高精度化と要素物理を組み上げて数値実験炉の構築へ向けたコード体系化に向けた研究が必要となる。例えば、関連分野・グループとの連携を通じて、ミクロとマクロを結合する階層結合モデル、コア周辺結合モデル、物理要素間結合モデルの構築である。これにより、第1原理シミュレーションと半経験的な統合コードのギャップを軽減し、より信頼性のあるコード体系へと昇華できる。(3) この開発研究において、他の研究グループで開発されている同種のシミュレーションコードとのベンチマークテストを通じての理論検証、および、具体的な実験データとの比較による数値モデルの正当性・適応性の検証が重要となる。

これらの課題の解決に向けた研究活動を柔軟にかつ機能的に遂行できる体制として、図 2.2.1-1 に示した研究体制を設定した。まず、研究推進の基礎母体として機動性と柔軟性を持ち合わせた8つのタスクグループを組織し、このグループを中心となって組織・運営を行う幹事を配置した。特に、これらのグループ活動では、複数のグループへの参加、グループ間の研究交流、実験グループとの研究交流が推奨されている。現在グループには、延べ115名が参加しており、この中に28名の実験グループからの参加者と31名の所外からの参加者が含まれている(図 2.2.1-2)。また、32名のNIFSシミュレーション研究者の内、24名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。次に、プロジェクト活動の全体の検証・調整、各タスクグループの進捗状態のモニタリングと必要に応じた目標設定や研究体

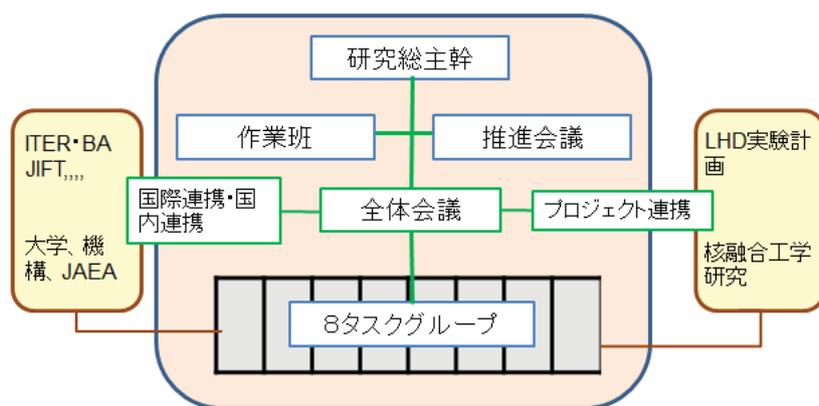


図 2.2.1-1 数値実験炉研究プロジェクトの研究体制

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	5名(シミュ2、実験2、共同研究者1)
統合輸送シミュレーション	横山	21名(シミュ4、実験13、共同研究者4)
新古典・乱流輸送シミュレーション	菅野	14名(シミュ9、実験1、共同研究者4)
周辺プラズマ輸送	鈴木	9名(シミュ4、実験5)
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

制の修正等を行う場として推進会議を設け、定期的に必要な議論・決定を行っている。推進会議は、議長としての研究総主幹、シミュレーション研究系の二人の研究主幹、およびタスクグループの幹事で構成され、必要に応じて他のメンバーの参加も要請している。上でも述べているように、プロジェクトの推進には、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が重要となる。この2つのプロジェクトとの連

携の窓口として、担当者を配置し、研究交流や連携研究の推進を図っている。また、プロジェクト全体での意見交換・情報交換、グループ研究活動報告、推進会議報告、出張報告や国際会議の報告、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研究交流の場として、全体会議を設定している。さらには、3章で報告しているように、国際連携・国内連携活動においても担当者の配置や国際委員等の派遣を行うなど、COEとして活動を積極的に推進している。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・性能向上を行ってきており、平成27年6月には、2.62Pflopsの演算性能と81TBの主記憶を持ったシステムへと性能向上させた。また、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、プログラム開発支援室の活用や計算機作業班等の活動を通じて行っている(2.3章を参照)。その結果、プラズマシミュレータを用いた共同研究に参加する共同研究者の人数は常に150名余となっている(図2.2.1-3)。特に、毎年、所外からの100名を超える利用者がプラズマシミュレータを利用した共同研究を実施していることは特筆すべき事項である。

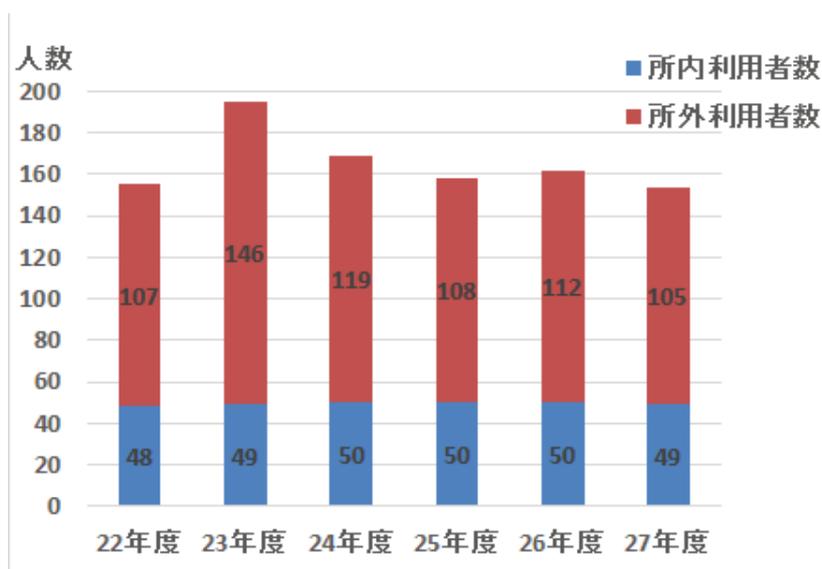


図 2.2.1-3 プラズマシミュレータを用いた共同研究の利用者数

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 実験データが集約的に管理されている LHD 解析データサーバと強く連携した TASK3D-a の開発と運用の実績は、「実験データと理論計算データを融合した統合輸送解析システムの開発と LHD 実験での運用実証」という業績で、平成 27 年度プラズマ・核融合学会賞技術進歩賞（核融合研：江本雅彦、鈴木千尋、關良輔、佐藤雅彦、鈴木康浩、横山雅之、居田克巳）を受賞するなど高く評価されている。本賞対象者が、数値実験炉プロジェクト（統合輸送シミュレーショングループ）と LHD 計画プロジェクトとの緊密な連携の証左である。

LHD の具体的放電を対象とした大規模シミュレーション研究にも大きな進展があった。

グローバルな新古典輸送計算法（FORTEC-3D コード）と従来の新古典計算法とを、LHD をはじめとした国内外のヘリカル装置（TJ-II、W7-AS、HSX 等）の多様な磁場配位において比較するとともに、その計算結果を実験のエネルギーバランスと比較する検証研究（Verification & Validation）を、CIEMAT, Max-Planck, Wisconsin 大等の研究者との共同研究が、数値実験炉プロジェクトの新古典・乱流シミュレーショングループ：佐竹真介准教授の先導によって進んできており、その成果は 2015 年の第 20 回国際ステラレータヘリオトロンワークショップにおいて、招待講演として発表された。LHD における検証実験の実施、HIBP や荷電交換分光による径電場計測データとの比較など、両プロジェクト間の緊密な連携による成果である。

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 コードの計算領域を、ダイバータ板、および、第一壁まで拡張する改良に成功した。これにより、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が可能となり、すでに数々の知見を創出している。不純物輸送およびプラズマ対向材料の損耗・再堆積を解析する ERO コードについても、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であり、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の理解の進展を目指した解析が行われている。

MHD 関連課題として、LHD 磁気軸スイング実験（磁気軸位置 $R_{ax} = 3.54\text{m}$ まで内寄せした場合の急激なコア崩壊現象のメカニズム解明のための NORM コードによる非

線形 MHD シミュレーション)、LHD プラズマの圧力駆動型モードに対する誤差磁場の影響 (HINT2 コードによる磁気島内部の局所的平坦構造を有する圧力分布を持つ平衡解、MIPS コードによるこの平衡解の 3 次元安定性解析)、熱拡散による交換型不安定性の成長率及び実周波数の分岐、磁気島の成長とヒーリング (閉じ込め劣化への影響の評価)、ペレット入射シミュレーションなど多様な課題での連携が進展した。

また、電子サイクロトロン加熱 (ECH) のコルゲート導波管の形状やピッチが伝送損失に与える影響は理論的、数値的には解明されていないため、その解明に向けた連携も、プラズマ加熱物理研究系との連携で進められている。3 次元時間領域差分法による電磁波伝播解析を行い、金属に浸透する電磁波の影響、金属表面に誘起される表面電流などが伝送効率に及ぼす影響を検証した。

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た。LHD 長時間放電実験でのダスト粒子の生成・輸送機構を調べるため、2 台の高速カメラで取得されたダスト粒子の 3 次元座標の時系列データをスムーズに VR 空間に表示するためのインターフェイスや可視化機能の開発を行うとともに、ダスト粒子の輸送方向を把握するための工夫も行った。

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、今後のさらなる連携による成果の創出が期待できる。

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 FFHR-d1 設計グループと統合輸送シミュレーショングループとの連携によって、FFHR-d1 立ち上げシナリオの定量解析が、数値試験炉の基盤整備の観点から進展している。

FFHR-d1 の立ち上げシナリオ検討を行うに当たり、新古典エネルギー輸送フラックスがプラズマのエネルギーバランスを満たしているかどうかを定量的に評価するために、TASK3D-a のモジュールを移植した。これにより、密度・温度の時間発展に伴う新古典エネルギーフラックスの逐次計算が可能となり、エネルギーバランス成立性を探る複数のシナリオ比較が容易に行えるようになった。このプロジェクト間連携の成果は、2014 年の IAEA 核融合エネルギー会議における核融合研：後藤拓也助教筆頭のポスター発表、さらには 2015 年の NUCLEAR FUSION 論文として発表された。

さらに、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、新古典エネルギーフラックスがエネルギーバランスを満たしうる境界線を明示するなど、単体の新古典輸送計算では困難である検討も行われ、その成果も含む FFHR-d1 コアプラズマ設計の最新の知見が、2015 年の第 20 回国際ス

テラレータ-ヘリオトロンワークショップにて、招待講演として後藤拓也助教によって発表された。その発表の中でも、数値実験炉プロジェクトとの連携の成果であることが強調された。

このプロジェクト間連携をさらに進め、核融合研における予測型統合輸送コード(数値試験炉の基盤)として整備・拡張していく共同検討を行っている。

2.3 プラズマシミュレータおよ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

数値実験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、大規模並列型計算サーバを運用している。平成 21 年 3 月に導入した日立製作所製 SR16000 モデル L2 128 ノードを、平成 24 年 10 月に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)に更新した。さらに、平成 27 年 6 月には、富士通製 PRIMEHPC FX100 2592 ノードに更新を行った。この更新により、世界のスーパーコンピュータ性能の指標である Top500 において世界 27 位、もう一つの指標である HPCG において世界 12 位を記録した。(いずれも平成 27 年 7 月時点。)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利用課題状況を示す。平成 27 年度のデータは平成 27 年 4 月～8 月のものである。大規模並列型計算サーバは、数値実験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)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

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
H27.6 ~ H31.5	PRIMEHPC FX100 2592 ノード	2.62 PFlops	81 TB	10.0 PB

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

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%
H27.4 ~ H27.8	58	154(57/97)	16,209	169,541	86,328	50.9%

ングガイド等を掲載している。さらに年度初め(4月~6月)には利用者講習会を毎年開催し、プラズマシミュレータおよび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の利用方法について講習を行っている。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。大規模並列型計算サーバが日立製作所製から富士通株式会社製に更新されたこと、また、計算ノード数が322ノードから2564ノードに大きく増加したことから、プログラムの最適化、SMP並列化、MPI並列化、およ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。プログラム開発支援員はそのような利用者からの要望・質問に対応して、平成24年10月から平成27年3月までに158件のプログラム開発支援を実施した。この内の28件は所外利用者からの要望・質問に対応したものであり、7件についてはプログラム開発支援員が利用者を出張訪問して作業打ち合わせを行った。また、平成27年6月から平成27年10月までの間に、プログラム開発支援員による11件のプログラム最適化を含め、71件のプログラム相談(所内39件、所外32件)を行った。

このプラズマシミュレータは、平成31年度途中に機種更新を行う予定である。数値実験炉研究プロジェクトの各種3次元シミュレーションコードによる並列計算を推進

するためには、世界トップクラス的环境が必要であり、この更新では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予定である。

2.3.2 統合輸送コード利用環境の整備

LHD 実験解析型統合輸送コード TASK3D-a は、平成 24 年 9 月にその第一版となる TASK3D-a01 をリリースした後、種々の物理解析モジュールの導入による機能拡張を継続的に進めて、現在は、第二版 TASK3D-a02 として運用している。また、機能拡張に伴い、解析可能となった物理課題に関連する LHD 実験研究者による利用・議論促進を目的として、ユーザーの拡大を継続的に進めてきた。現在、TASK3D-UD (Users and Developers) メーリングリストへの登録者数は 24 名となっている。また、平成 25～27 年度の 3 年間で、海外共同研究者 3 名による利用もあった。プリンストンプラズマ物理研究所 (米)、Tech-X Cooperation (米)、RFX コンソーシアム (伊) の研究者 (いずれも来所) によるものである。NIFS-Memo 61 (2012 年 11 月) として発刊した英文マニュアルも、機能拡張、入出力仕様変更などの都度に更新し、最新版が計算実行のゲートウェイとなる PC に保存され、ユーザーが自由に閲覧できるようになっている。もちろん、メーリングリストでの質問や要望などにも迅速に応えるべく、開発側も尽力している。

多数ショットの多数タイミングでの解析を円滑に進めるために、サーバの新規購入による演算力増強 (新古典輸送コード GSRAKE 計算専用マシンの導入など) や、保存データ量の増大に伴う NAS の増設など、数値実験炉プロジェクト経費によって計算機環境の整備を図ってきている。

また、ゲートウェイとなる PC は、LHD 実験データサーバとのデータやり取りの観点から、LHD 実験 LAN 内に設置されている。しかし、セキュリティポリシーにより、この PC へは海外から接続することができない状況である。海外からの LHD 実験 LAN への接続は、いわゆる DMZ ゾーンに設置されているサーバ egcalc-vpn のみ許されている状況であるため、ゲートウェイ機能をそこに移す作業にも着手している。この作業進行によって、海外共同研究者による TASK3D-a 利用・開発協力の利便性が格段に向上することが期待できる。

予測型統合輸送コード TASK3D(-p) については、京都大学：村上定義准教授を中心として、核融合研との共同研究を通じた開発・運用 (主に、プラズマシミュレータやヘリオス利用) が進められるとともに、核融合工学プロジェクトの核融合研：後藤拓也助教授らを中心として、LHD 型核融合原型炉 FFHR のプラズマ立ち上げシナリオ検討のためのコード体系づくりが進んでいる。プロジェクト間連携によって、TASK3D-a の 3 次

元平衡、新古典輸送解析モジュールを提供するとともに、TASK3D-pとして組み上げていくための足掛かりとして、専用サーバの導入も行った。これにより、従前よりも計算を迅速に行うことが可能となり、平成26年度のIAEA核融合エネルギー会議での後藤拓也氏によるポスター発表（統合輸送コードグループメンバーとの共著）、さらにその後の発表等に様々なシナリオに基づく計算結果を盛り込むことができた（2.2.2.2節参照）。

2.3.3 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たり、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、実験観測データを3次元空間で解析を進めたりするため、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バーチャルリアリティ実現用のコンピュータシステムを導入した。

炉の組み立てにおいて部品をどのように組み立てるか、また、メンテナンスにおいて部品をどのように取り外すかは、設計の段階から考慮しておくことは重要である。とりわけ、小さな穴から部品を取り出す必要がある場合、その部品を回転させながら引き抜くことなどを考える必要がある。この作業シミュレーションを2次元ディスプレイ上で行うことは、奥行き情報を消失しているため、困難である。そこで、この困難を解決するための方法として、デスクトップ型VR装置（図2.3.3-1）を導入した。この装置では、設計で使われているCADデータをそのまま読み込むことが可能で、VR空間の中で部品をつかんだり、回したりすることが可能である。また、干渉判定も備えているので、部品組み立ての確認もできる。

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。

ペタスケールのスーパーコンピュータが稼働を始め、粒子数が1億個を超えるプラズマ粒子シミュレーションが実行されている。粒子の運動論的な効果が重要な役割を果たすプラズマ現象において粒子運動の可視化・解析は必須である。そこで、天文学におけるN体計算などで大規模な粒子シミュレーションデータを可視化することに成功している Zindaiji3 を活用し、プラズマの超多粒子系の粒子運動の可視化・解析に役立てるため、Zindaiji3 の機能追加を行った。



図 2.3.3-1 更新されたバーチャルリアリティ実現用のコンピュータシステム。手前から Linux システム、PC クラスタシステム (2 台) である。奥のラックは 3 次元音響システムである。

3 数値実験炉研究プロジェクトの研究成果

3.1 プロジェクトの概要

数値実験炉研究プロジェクトの研究対象となっている核融合プラズマ系の特徴としては、まず(1)ミクロからマクロまでの様々な物理が包含された系である。特に、閉じ込め中心領域から、磁気セパトリックス近傍やSOL領域などの閉じ込め周辺領域、プラズマ対向壁領域へと移動するにつれ物理パラメータが何桁も大きく変化するため、プラズマの挙動を支配する物理過程も領域ごとに変化していく。(2)これらの物理は非線形的に相互作用しながら、かつ、時間的にも変化をしている。即ち、非線形・非平衡系の物理に支配されている。また、(3)プラズマ閉じ込めのための複雑な磁場形状、閉じ込め容器、ダイバータ板やブランケット等の構造体が存在し、取り扱いをより複雑にしている。さらに、(4)高温高密度プラズマの生成・維持には、中性ビーム入射やECHなどによる波動加熱、燃料ペレット入射等のエネルギー注入が必要となる。一方、様々な拡散過程や輻射過程を通じてエネルギーが排出される物理過程が存在する。即ち、開放系におけるプラズマ挙動を解明する必要がある。さらに、(5)プラズマ対向壁では、プラズマと対向壁物質との相互作用が存在するため、量子化学を含む物質科学の導入が必要となる。このような非線形・非平衡・多階層・開放系・複合物理系としての特徴持つ核融合装置内のプラズマの挙動を解明し、原型炉設計に貢献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進めている。それには、必要となる多くの要素物理の解明と、実験と理論で検証された高精度で信頼性のあるシミュレーションコードの開発、これらの研究を支えるシミュレーション研究環境の構築・整備、様々なシミュレーション基盤技術の開発が必要となる(第2章)。これらの一連の研究活動を全体として効率よく機能するように数値実験炉研究プロジェクトの研究体制と研究目標が設定されている(第2章)。また、プロジェクトを推進する上で、国際共同研究・国内共同研究を通じて、多くの共同研究者の参加が1つの大きな鍵となっている(第4章)。即ち、この分野のCOEとして機能することが求められている。このプロジェクトを通じて得られた成果として、第2期中期期間の6年間で出版された数値実験炉研究関連の論文数を図3.1-1に示されている。過去5年半で、総数480編の数値実験研究関連の論文が出版され、その内、国際共同論文が83編、国内共同論文が397編となっている。また、この中には、代表的な国際会議での招待講演論文61編、著名な国際学術論文等へ掲載論文5編、各種受賞論文が23編が含まれており(図3.1-2)、このプロジェクト体制の下、優れた研究が進められていることがわかる。図3.1-3は、その1例で、Physics of Plasmas 第22巻3月号の表紙を飾った後藤涼輔氏の論文の図である。この章では、数値実験炉に向けた研究として必要となる様々なシミュレ-

シオンコードの開発・整備状況、および核融合プラズマの物理機構解明に関する研究成果の概要を示す。

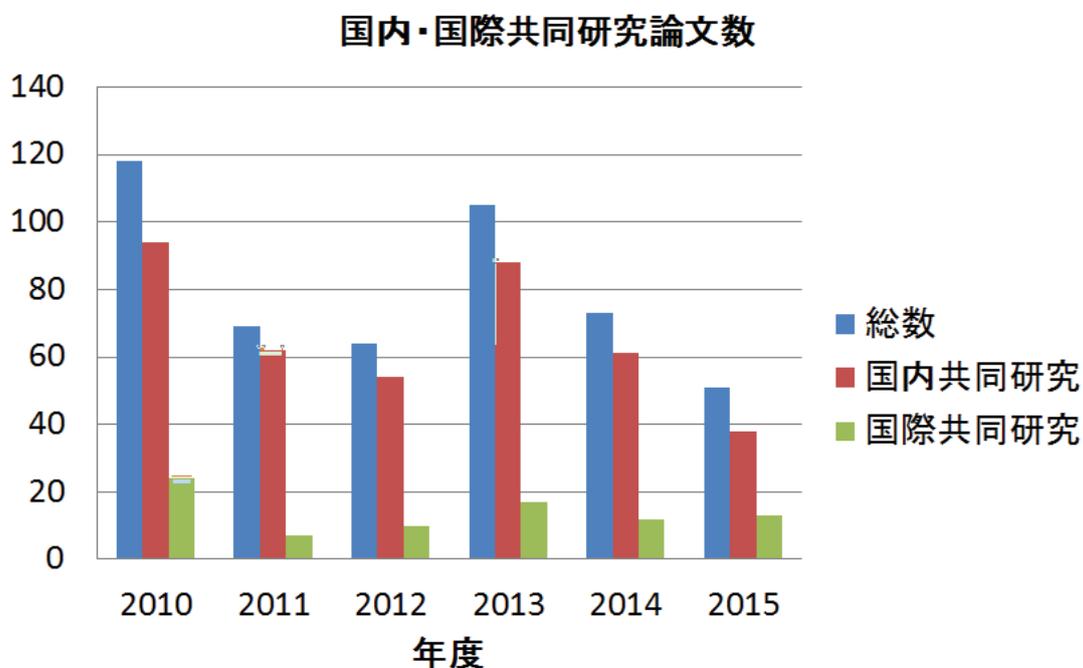


図 3.1-1 数値実験炉研究プロジェクト関連の発表論文数。

項目	論文件数
著名雑誌掲載論文	5
代表的な国際会議での招待講演論文数 (IAEA-FECを除く)	40
IAEA-FEC での発表論文数(口頭発表)	73(21)
論文賞、受賞発表等	23
合計	141

図 3.1-2 平成 22 年から平成 27 年までに公表された優れた論文数。

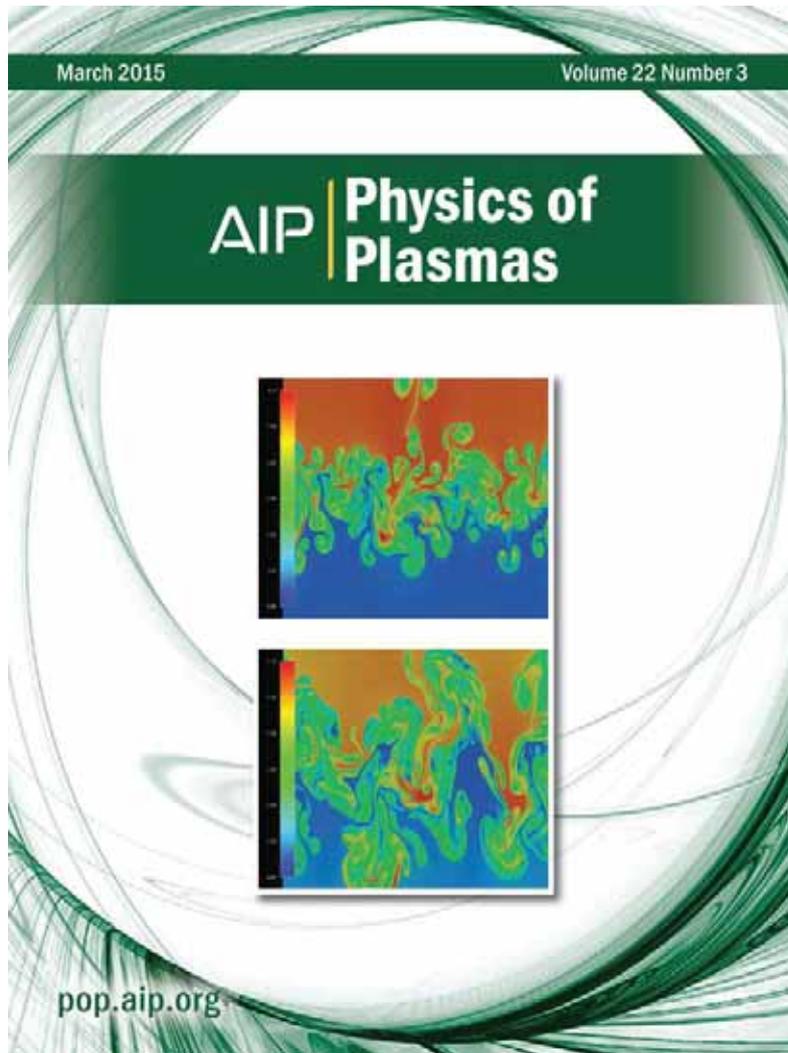


図 3.1-3 Physics of Plasmas 第 22 卷 3 月号の表紙を飾った後藤涼輔氏の論文の図。

3.2 数値実験炉構築へ向けた研究

3.2.1 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およびツールを独自開発並びに他機関との協力によって整備している。

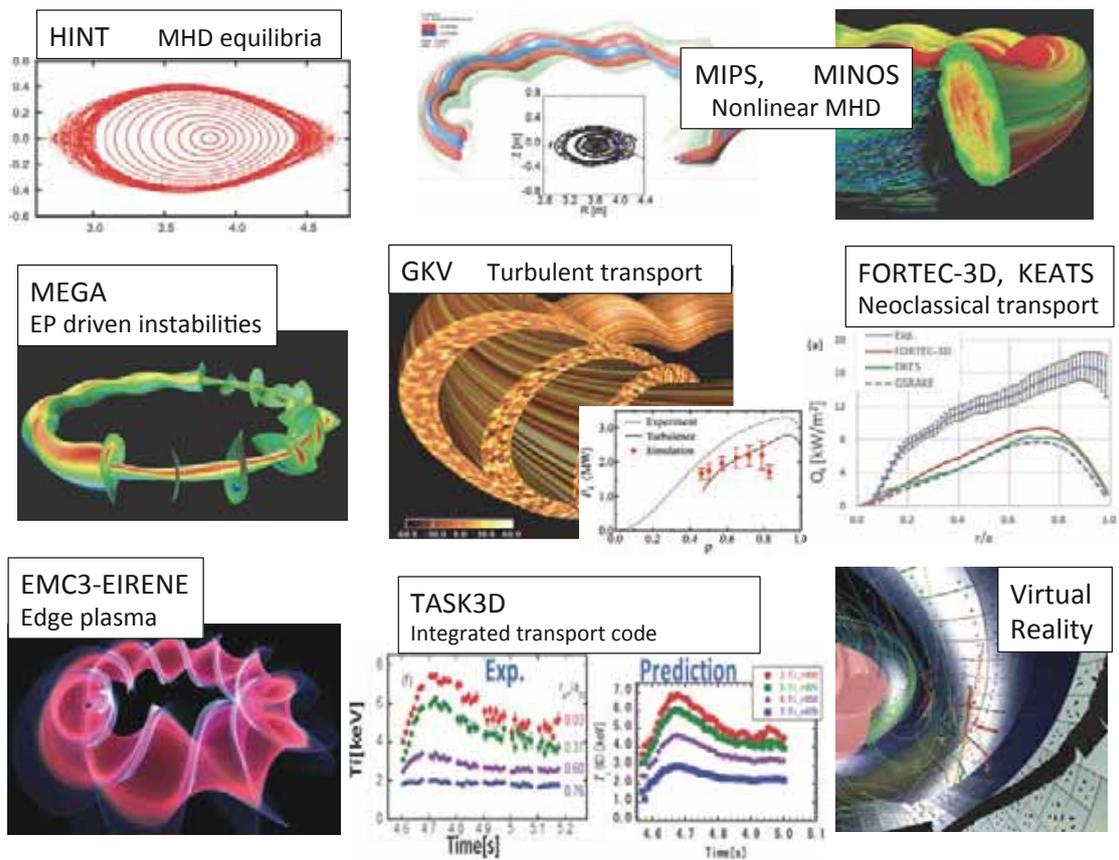


図 3.2.1.1-1 LHD プラズマに解析に用いられるシミュレーションコード群

図 3.2.1.1-1 にシミュレーションコード群を LHD プラズマの解析に用いられる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、Full3D の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 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、KEATS コード、ジャイロ運動論モデルにより乱流輸送現象を解明する GKV コード、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。

また、基礎的なプラズマ物理現象解明のためのコード、炉材料研究に寄与するプラズマ物質相互作用解明のためのコード、複数階層に関与する物理過程を簡約化することなく直接結びつけてシミュレーションする多階層シミュレーションコードの整備やバーチャルリアリティ等の可視化、表現法などのためのツールの研究など将来に向けた整備・拡張を推進している。

表 3.2.1.1-1 および 3.2.1.1-2 は、それぞれ、現所内メンバーが中心に開発したコードおよび現所外メンバーが中心に開発したコードの一覧をアルファベット順に示している。

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およびスパッタリング率、ならびに、入射粒子の侵入分布およ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を連続照射した場合の反射やスパッタリング現象および材料の構造変化を解明する	二体衝突近似法および分子動力学法によるハイブリッドシミュレーション
AIScope	分子動力学およ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
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。
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、およ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
DIPS	磁場閉じ込めトーラスプラズマの周辺領域における輸送現象の解析	流体輸送方程式に基づくモンテカルロ・シミュレーション
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
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)	ドリフト運動論方程式に基づく、2-weight f モンテカルロ法
GKV	3次元磁場閉じ込めトーラスプラズマにおける、ITG、TEM、ETG、KBMなどの微視的乱流による輸送を理解する。	ジャイロ運動論的方程式に基づき、局所フラックス・チューブ上での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および材料の構造変化を解明する	分子動力学法
HINT	入れ子状の磁気面を仮定しない3次元平衡計算コード	緩和法。散逸 MHD 方程式の時間発展から定常解を求める。
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。
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 f モンテカルロ法
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めざす。	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	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および材料の構造変化を解明する	分子動力学法および動的モンテカルロ法によるハイブリッドシミュレーション
MEGA	環状プラズマにおいて高エネルギー粒子が駆動する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 f 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
MEGA-D	磁場閉じ込めトラスプラズマにおける磁気流体力学的挙動の非線形時間発展	圧縮性抵抗性非線形磁気流体力学方程式に基づく、有限差分陽解法
MINOS	磁場閉じ込めト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を目的とする。	8次精度コンパクト差分法、ルンゲ・クッタ・ジル法。
MIPS	MHD不安定の非線形シミュレーション	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	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用入れた、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
PICS1/PICS2	シース領域のプラズマモデリング研究およびプラズマ-壁相互作用研究。	プラズマ入射端とプラズマ対向壁を持つ Particle-in-Cell モデルに基づく粒子シミュレーションコード。1次元版の PICS1 とタイルギャップ等のステップ状表面形状を扱える2次元版 PICS2 がある。
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
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。

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
DKES	単一エネルギー粒子の局所的拡散係数を求める。	線形化されたフォッカー・プランク方程式を、フーリエ・ルジャンドル展開法により解く。
EMC3-EIRENE	エルゴディック領域およびダイバータ領域のプラズマ、中性ガス、不純物の輸送モデリング研究と輸送物理解析。	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次元形状およびエルゴディック領域を扱うことができる。EIRENE: 中性の水素分子および原子の定常分布をモンテカルロ法で求める。
ERO	プラズマ対抗壁周辺の不純物輸送および表面の損耗/再堆積分布の解析。	中性およ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。表面での材料混合および堆積や反射等のモデルを含む。
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
OpenMX	電子物性計算。MD用ポテンシャルモデルの構成および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。

PENTA	DKESにより作成された拡散係数のデータベースを用いて、新古典輸送粒子、熱フラックス、フローの計電場依存性を計算し、両極性条件を求める。	スプライン補間により拡散係数を補間してエネルギー積分を行う。
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いかしつつ、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。
Virtual LHD	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.
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.
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。
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

- HINT コード

入れ子の磁気面を仮定しない3次元MHD平衡計算コードHINTの開発

大型ヘリカル装置(LHD)をはじめとするヘリオトロン・ステラレータ磁場配位では真空で周辺部にストカスティックな磁力線構造が存在する。3次元MHD平衡を自由境界条件で矛盾なく求めるためには、ストカスティックな磁力線構造を含む計算を行う必要がある。また、LHD実験では、磁場構造の3次元性により磁気島構造の自発的生成・消滅が観測されており、入れ子の磁気面構造を仮定しない3次元MHD平衡計算コードの研究・開発はきわめて重要である。一方、トカマクの場合は軸対称性を仮定することにより、通常、2次元でMHD平衡計算が行われる。しかし、閉じ込め改善モード(Hモード)に発生する周辺局在化モード(ELM)を低減・抑制するために共鳴磁場摂動(RMP)をプラズマに重畳する実験が盛んに行われている。このことは、これまで2次元で解析が行われてきたトカマクでの3次元MHD平衡解析の必要性を意味しており、ヘリカル系プラズマ用の3次元MHD平衡計算コードを用いた研究の新しい展開として注目されている。

これまで、ヘリカル系プラズマのMHD平衡解析はVMECコードを用いて行われてきた。VMECコードは、磁気座標と呼ばれる入れ子状の磁気面を仮定した座標系を用いるので、入れ子状の磁気面構造が破れる磁気島やストカスティックになった磁場構造は扱えなかった。一方、磁気島やストカスティックな磁場構造の3次元MHD平衡への影響を考察するためにHINTコードやPIESコードが核融合科学研究所やプリンストンプラズマ物理研究所で開発されてきた。しかし、開発初期のHINTコードやPIESはコードが複雑で巨大なために、実験プロファイルによるMHD平衡の再構築や実験結果の解釈にはそのまま適用することは難しかった。そこで、(1)コードのさらなる高精度化、(2)3次元MHD平衡物理のさらなる理解、(3)実験解析への適用、を念頭にHINTコードの改良を進めている。改良版は、最新の計算機科学の成果を反映し、使いやすくまた高速にMHD平衡計算ができるよう設計されている。改良版HINTコードの特徴の一つが、モジュール型のコード構造である。HINTコードは、一つの機能をパッケージ化した複数のモジュールとそれらのモジュールを呼び出すドライバールーチンから構成されており、考察したい物理ごとにモジュールを作成・入れ替えることで新しい物理を考察できるように設計されている。新しい物理の一つとして、トロイダル回転を含む3次元MHD平衡があげられる。プラズマのトロイダル回転は、プラ

ズマ中の共鳴磁場と相互作用し磁気島幅などを変化させると考えられる。図 3.2.1.2-1 に、トロイダル回転が (a) ゼロの場合と (b) トロイダルマッハ数が 0.1 の場合の 3 次元 MHD 平衡計算の結果を示す。これらの計算は $n=2$ の RMP を重畳した場合の結果である。トロイダルマッハ数が 0.1 の場合、 $m=2$ の磁気島の位相がトロイダル方向に変化していることがわかる。

MHD 平衡解析により得られる幾何情報は、MHD 安定性解析や輸送解析に必要な基本情報である。HINT コードの平衡計算結果を用いて MHD 安定性解析や輸送解析を行うには、従来、VMEC コードを用いて磁気面構造をマッピングする必要があった。しかし、前述のよう、VMEC コードは本来、磁気島やストカスティックな磁力線構造を取り扱えないコードである。そこで、HINT コードにより求められた磁場構造を、より正確に MHD 安定性解析や輸送解析に用いるためにカオス座標系と呼ばれる新しい座標系の開発を行っている。カオス座標系を用いることにより、従来 VMEC コードにより構築されてきた磁気面データを用いるより、より HINT コードの結果と矛盾のない解析が可能になった。

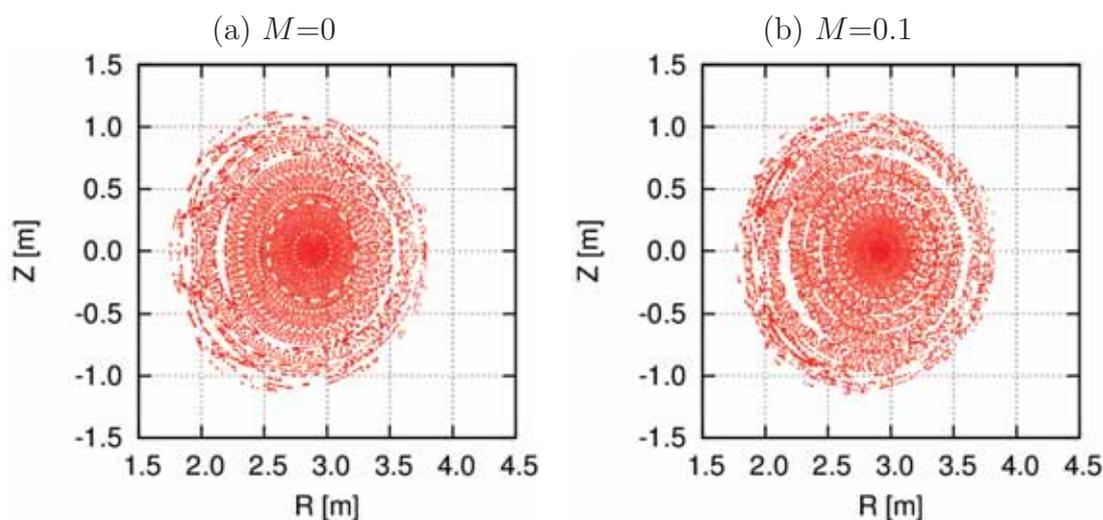


図 3.2.1.2-1 HINT コードにより計算されたトロイダル回転を含む 3 次元 MHD 平衡計算の例。トロイダルマッハ数が (a) $M=0$ の場合と (b) $M=0.1$ の場合を比較した。

- MINOS コード

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の研究を目的として MHD In Non-Orthogonal System (MINOS) を開発した。MINOS コードは、ヘリカル-トロイダル座標系を採用した非直交一般座標系コードであり、空間近似に 8 次精度のコンパクト差分法、時間積分にルンゲ・クッタ・ジル法を使用している。このコードの最大の特徴はコンパクト差分による高精度・高解像度表現が可能なことである。通常を中心差分法に比べて数値粘性が小さいため、数値粘性に影響されない波数領域は 4 次精度差分法に比べて 2 倍以上、2 次精度差分法に比べれば 3 倍以上の波数帯に及ぶため、短波長の不安定性が小振幅状態から成長する状態を的確にシミュレーション可能である。他方、計算精度が本質的に重要でない場合にも対応するため、オプションスイッチで空間微分を 4 次精度中心差分で表現する事も可能となっている。また、2 流体効果への対応として Hall 効果を取り入れられた。2012 年度以降、計算コア数の増加に対応するために MPI による並列化が図られるとともに、Braginskii 流のジャイロ粘性項も実装されている。(一部機能は実証試験中である。) より広範な問題に対応するため、ヘリカル-トロイダル座標系のみならず一般化座標全般に使用可能とする機能拡張が行われ、この機能全体の名称を MUlti Theoretical Subject Utility(MUTSU)、そのトールバージョンを MINOS と呼称している。

- 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非一様性も小さいため、比較的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、圧力方程式に項 $\kappa_{\parallel} \mathbf{B} \cdot \nabla (\mathbf{B} \cdot \nabla P / B^2)$ を加えることにより、磁力線方向の熱拡散項の導入が行われている。

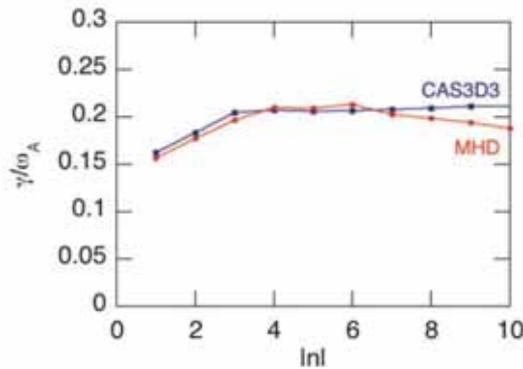


図 3.2.1.2-2 LHD プラズマにおけるバルーニングモードの成長率に関する MIPS コードと CAS3D コードの結果の比較。横軸はトロイダルモード数である。

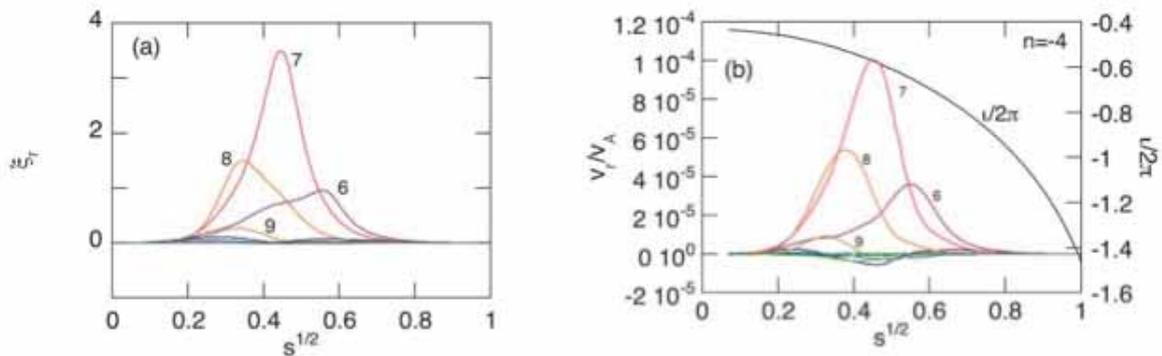


図 3.2.1.2-3 LHD プラズマにおけるバルーニングモードの空間分布に関する (a)CAS3D コードと (b)MIPS コードの結果の比較。

- 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 並列化および 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 および 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 およ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の研究を推進している。「高エネルギー粒子・MHD 連結シミュレーションコード MEGA の開発」に対してプラズマ・核融合学会より平成 27 年度第 20 回技術進歩賞を受賞した。

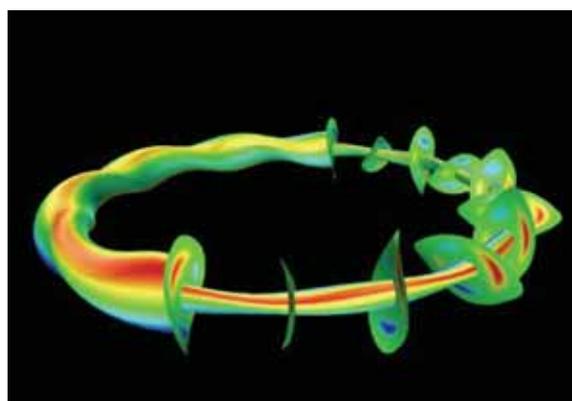


図 3.2.1.2-4 MEGA コードを用いて計算した LHD におけるトロイダルアルフベン固有モードの空間分布。プラズマ半径方向の MHD 速度揺動にプラズマ半径を乗じた量の分布が表示されている。

● GKV コード

ヘリカル系プラズマにおける微視的乱流輸送やゾーナルフローの振る舞いを予測するジャイロ運動論的シミュレーションコード GKV コードの開発および拡張を行った。GKV コードの主要部分では、ジャイロ運動論的方程式にしたがって、5次元位相空間上で定義されたイオンまたは電子の揺動分布関数の時間発展を求める。巨視的平衡スケールに比べ揺動スケールは十分小さいと仮定した局所フラックスチューブモデルを用いており、密度・温度勾配、磁気シア、安全係数などは局所的な定数として扱われる。このモデルにより、磁力線方向にはトーラス大半径で、磁力線垂直方向にはジャイロ半径でそれぞれのスケールが特徴付けられ、強い非等方性をもった乱流揺動を高精度で取り扱うことが可能となる。また、2次元速度空間に生ずる分布関数の微細構造を高解像度で扱い、揺動エントロピーを精度良く保ったシミュレーションを可能とし

ている。数値解法としては、磁力線を横切る方向にスペクトル法、磁力線方向と2次元速度方向には差分法を用い、時間積分は4次のルンゲ・クッタ・ギル法を採用している。コードはMPIによって並列化され、複数の計算機上でその並列実行性能効率を確認している。このコードを用いて、これまで、トカマクおよびヘリカル型配位におけるゾナルフロー応答特性の解析、イオン温度勾配乱流輸送、電子温度勾配乱流輸送などのシミュレーション研究を行ってきた。中でも、LHD磁気軸内寄せ配位では、標準配位に比べてゾナルフローが強く励起され、乱流輸送レベルを低減させることが明らかになった。本コードは、GKV-X、GKV-bundle、GKV+/EM、GKV+と派生バージョンが開発されたが、コードの統一が試みられ、GKVコードとしてまとめられた。以下で、GKVコードの各機能について説明する。



図 3.2.1.2-5 GKVコードで得られたLHDにおける静電ポテンシャル。

3次元実配位の組み込み

トロイダルプラズマ(特にLHDなどの非軸対称プラズマ)装置でのプラズマ実験で用いられる実際の磁場配位における異常輸送の評価・予測を行えるように開発された機能である。開発当初はGKV-Xコードと呼ばれていた。本機能の特徴は、LHD等の複雑な3次元磁場配位を扱えるようにするために、3次元MHD平衡から得られる磁気面幾何に関する形状効果(計量テンソル、ヤコビアン)や磁場のフーリエ成分といった、磁場配位に関する様々な情報を正確に取り込める点である。これにより、実際に実験で観測された温度・密度分布を反映した現実的な磁場配位における微視的乱流輸送シミュレーションが可能になる。なお、3次元平衡計算には広く利用されているVMECコードを用いている。これまでに、本機能を利用して、イオン温度勾配(ITG)不安定

性やゾーナルフロー応答へのヘリカル磁場の幾何形状効果について解析した。特に、LHD 高イオン温度放電における平衡配位での ITG 乱流輸送シミュレーションを行った結果、乱流輸送レベルや揺動のスペクトル構造を定量的に再現することに成功した。この結果を含む研究成果に対して、第 10 回 (2016 年) 日本物理学会若手奨励賞 (沼波政倫) が授賞された。

電磁揺動効果の組み込み

GKV を電磁的なジャイロ運動論シミュレーションコードに拡張し、初めて大型ヘリカル装置 (LHD) の有限ベータプラズマにおける乱流輸送の評価を行った。これまでの GKV コードは電子の断熱応答 (プラズマベータ (無次元化した圧力) が 0 の場合成立する) を仮定してイオンの運動を解いていたが、有限ベータプラズマにおける乱流輸送を評価するために、このコードを拡張し、有限ベータプラズマの解析に必要な電子の運動および磁場揺動を導入した。その結果、有限ベータなど非常に広いパラメータ領域および種々の乱流輸送の解析、具体的には、LHD の粒子・熱輸送における有限ベータ、粒子輸送、電子熱輸送、磁場揺動の評価が可能になった。本拡張により、プラズマベータが有限な場合、ITG 乱流は安定化される傾向があり、ベータ値が 1% を超えると ITG 乱流は安定になり粒子・熱輸送に寄与しなくなることが分かった。一方、ベータ値が 1% を超えると捕獲電子モードまたは運動論的パルーニングモードが不安定になり、これらの不安定性に駆動された乱流が粒子・熱輸送を引き起こす。

多粒子種間衝突効果の導入

これまでの GKV コードでは、モデル化された簡便な衝突項を用いて計算されていた。本拡張では、複数粒子種に対応し、粒子数や粒子種間での運動量、エネルギーの各保存則、および自己随伴性を満たす精密な衝突オペレータを開発し、導入した。この拡張により、プラズマ乱流輸送における、電子や水素同位体、不純物イオンを含む現実的なプラズマに対する衝突効果を正確に取り扱うことが、可能になった。

● FORTEC-3D コード

非軸対称なヘリオトロン型磁場配位を持つ LHD 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、また、新古典輸送の径電場への依存性が大きく、特に正の径電場（電子ルート）が形成されることによって径方向輸送が大きく改善されるためである。さらに、新古典輸送の両極性条件によって決まる大域的な径電場による $E \times B$ 回転やそのシアーが、乱流輸送の大きさにも影響を与えることが理論的に予想されている。これまでのシミュレーション研究から LHD プラズマ中の新古典輸送と、ジャイロ運動論で扱われるドリフト波不安定性による微視的乱流による径方向フラックスは同程度の大きさに成り得ることが示されており、両極性径電場形成と新古典輸送とを自己無撞着に扱える高精度なシミュレーションコードが、非軸対称プラズマの新古典輸送研究には必要不可欠である。

従来の新古典輸送計算法では、ガイディングセンター軌道の小半径方向ドリフトを高次の微小量として無視する局所近似、またリップルに捕捉された軌道をバウンス周期で平均化して扱う近似などが簡略化のために用いられている。また、局所近似に加え、ポロイダル方向のドリフト運動を $E \times B$ ドリフトが支配的であるとして、磁場の勾配ドリフト・曲率ドリフトの項（磁場ドリフト項）を落とす近似や、ガイディングセンター運動に沿っての運動エネルギーの変化やクーロン衝突項におけるエネルギー散乱を無視した mono-energy 近似もよく使われる。しかし、最近の LHD 実験で達成されている高温・低衝突プラズマにおいて、上に述べた様々な近似は新古典輸送の定量的予測精度の観点からは必ずしも妥当とは言えず、有限な磁場ドリフト運動の影響を含む非局所的な新古典輸送計算法が必要とされる。そのため、 f モンテカルロ法を用いたグローバル新古典輸送シミュレーションコード FORTEC-3D が開発された。このコードではヘリカル磁場配位におけるプラズマ分布関数の時間発展を記述するドリフト運動論方程式を、多数のシミュレーションマーカーを使い、荷電粒子の有限軌道幅効果を含めた 5 次元位相空間中の軌道（特性曲線）を追跡することで計算する。また、衝突項をピッチ角散乱で近似する従来の手法に対し、エネルギー散乱項も含み、かつクーロン衝突項が満たすべき運動モーメントとエネルギーの保存則を満たす衝突項を採用した。このようにして、新古典輸送現象を記述するドリフト運動論方程式を、従来の手法で用いられてきた近似を用いずに解くことが可能となった。また、このコードはプラズマシミュレータのアーキテクチャの変遷に応じて、大規模並列実行のためのノード間通信の最適化、並列疑似乱数の採用、ノード内スレッド並列のチューニングなど、様々な数値技法を用いた高速化が随時取り入れられてきた。FORTEC-3D コー

ドは開発以来LHD プラズマ中の新古典輸送の予測や実験解析等に幅広く応用されてきているが、この数年の進展として以下の3点が挙げられる。

まず、FORTEC-3D コードを用いて新古典ポロイダル・トロイダル粘性を評価できるようにコードの拡張が行われた。新古典粘性は圧力テンソルの磁力線平行・垂直方向成分の非等方性によって生じるので、ドリフト運動論に従って分布関数を計算するFORTEC-3D コードにおいて、これを直接的に数値的に評価する手法を開発した。それを応用した研究として、LHD におけるバイアス実験において、バイアス電場によって $E \times B$ 回転を外部から駆動した場合の、新古典粘性のポロイダルフロー速度に対する非線形な応答に関する数値シミュレーションと実験観測の比較研究が行われた。また、新古典粘性は近年のトカマクにおいても注目されている物理の一つであり、実際のトカマク装置に存在する微弱な非軸対称磁場摂動による新古典トロイダル粘性が、プラズマのトロイダル回転分布に与える影響を予測するために高精度な新古典トロイダル粘性の計算法が必要とされる。FORTEC-3D コードをトロイダルリップルが作る新古典トロイダル粘性の評価に応用し、JT-60U で観測されたトロイダル回転分布をシミュレーションによって再現する研究などが行われた [3.3.2.2]。

2つ目の進展は、FORTEC-3D のような大域的新古典輸送計算と、DKES や GSRAKE のような従来の局所近似・mono-energy 近似の新古典輸送計算との計算結果の差が、具体的にどのような機構によって生じているのかに関する理解が大きく進んだことである。FORTEC-3D コードは5次元位相空間中のドリフト運動論方程式をそのまま解いているが、局所近似・mono-energy 近似の計算法は、小半径方向座標と運動エネルギーの2つの次元をパラメータ化することで3次元に簡約化している。そのため、両者によって求められる新古典粒子・熱フラックスには様々な要因に基づく差が混在しており、どのような機構が最も両者の差に寄与しているのかが特定しづらかった。そこで、両モデル間をつなぐものとして、磁場ドリフト項の磁気面垂直成分だけを高次の微小量として無視し、磁気面接線成分を残し、かつ運動エネルギーの次元を残すことで結果的にDKES で用いられているような非圧縮 $E \times B$ フローの近似を使わなくてよい、新しい4次元簡約化ドリフト運動論方程式と、それをFORTEC-3D コードをベースとした f モンテカルロ法で解く数値手法を開発した。この、磁気面垂直成分のドリフト項のみを落としたモデルを Zero-Orbit-Width(ZOW) 近似と呼び、接線成分も含めすべての磁場ドリフト項を落としてしまう従来の Zero-Magnetic-Drift(ZMD) 近似と区別する。こうして、FORTEC-3D コードは5次元のグローバルモデルから、4次元のZOW または ZMD 近似、さらに mono-energy 近似と非圧縮 $E \times B$ フローの近似まで取り入れた3次元のDKES 極限と、様々な段階の近似を用いた新古典輸送計算を1つのコードで行うことが可能となり、それらの比較も統一的に行うことができるようになった。そ

の結果、3.3.2.1で解説するように、磁気面接線成分の磁気ドリフト項の有無が、特に $E \times B$ フローが大きくない場合の径方向粒子・熱フラックスの計算精度に大きく影響し、これがヘリカル系の新古典輸送計算における従来の局所近似と5次元グローバル計算の差の主な要因であることが明らかとなった。この成果は、最新のスパコンを用いてもまだ長い計算時間がかかるグローバル版 FORTEC-3D コードに代わって、ZOW 近似の4次元簡約化ドリフト運動論シミュレーションによって計算を簡略化・並列化し、かつある程度の定量的な精度を保った新古典輸送シミュレーションが可能となったことを意味する。この ZOW モデルによる新古典輸送シミュレーションを統合輸送コード TASK3D のモジュールとして結合するなど、数値実験炉構築に向けた研究への応用も今後行っていく予定である。

3つ目に、FORTEC-3D コードの開発計画として多イオン種プラズマの取り扱いができるように拡張することも目標の一つとして掲げられていた。これに関しては、2014年度から f モンテカルロ法における複数イオン種用線形化衝突項の実装法の開発を進め、衝突項が満たすべき保存則などの性質がよく保たれることの確認や、エネルギー・パラレルフローの異イオン種間衝突による緩和過程が正しく再現されているかの検証が他の数値手法を用いたコードとのクロスベンチマークによって進められ、本年度ほぼ完成に至った。次年度以降、この衝突項を FORTEC-3D コードに実装して多イオン種版 FORTEC-3D の開発に取りかかり、不純物イオンの輸送現象や DT プラズマの新古典輸送における同位体効果などの研究に役立てる予定である。

FORTEC-3D コードは LHD だけでなく、様々な磁場配位にも適用可能な高い汎用性を持つコードとなることを目指して開発を進めてきた。この数年間、海外の様々な研究機関との共同研究を進め、新古典輸送シミュレーションコードの Verification & Validation を TJ-II, W7-AS, W7-X, HSX 等様々なヘリカル装置を対象に行ってきた。そして、上で述べた局所・非局所新古典計算の差が実際の実験解析においてどの程度のインパクトを持つかについての知見が得られた。この成果については 3.3.2.3 で解説する。

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およ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 für Plasmaphysik 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）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 次元磁場および壁形状を使うことができる。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。図 3.2.1.3-1 に不純物イオンおよび原子からの発光分布の解析例を示す。

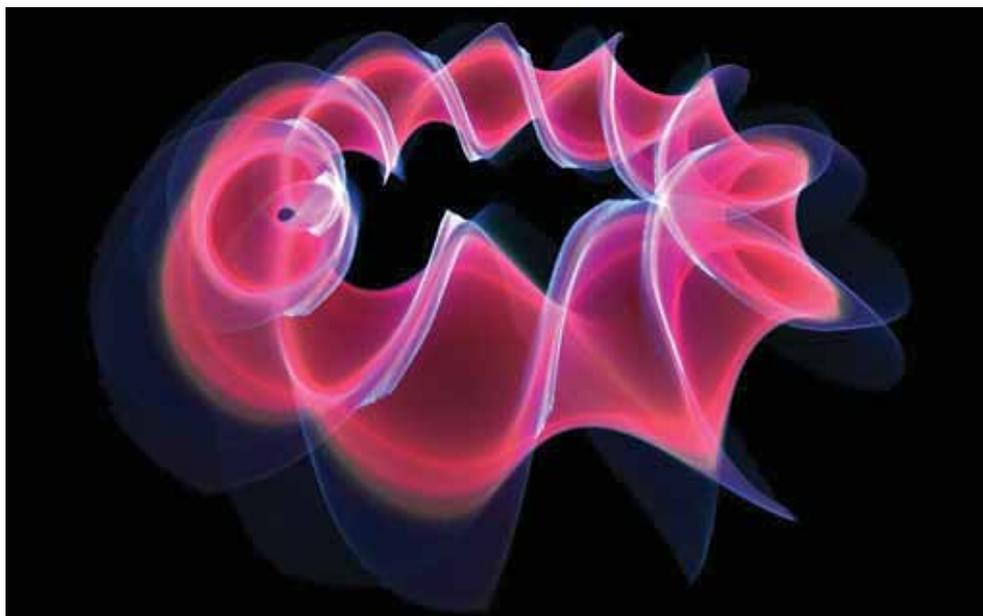


図 3.2.1.3-1 EMC3-EIRENE で得られたネオン、炭素、水素の発光をそれぞれ赤、緑、青として合成したもの。この図から、元素によって異なる発光分布となることが見て取れる。その理由となる物理過程については 3.3.4 節で触れる。ポロメータおよび分光計測との直接的な比較が可能である。

- 不純物輸送コード ERO

ERO コードはドイツ Forschungszentrum Jülich GmbH で開発された不純物輸送およ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。現在は、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。将来的には LHD の 3 次元プラズマおよび壁形状を扱うためのコードの大幅な拡張を含めた開発を検討している。これまでの実績としては、別途開発した 1 次元のダイバータプラズマモデルから得られるプラズマ分布をレグ領域に用いて、ダイバータ領域の 2 次元輸送解析を行い、物理スパッタリングと化学スパッタリングの物理機構の違いに起因する再堆積分布の特性や、壁へ到達不純物粒子の方向分布の解析などを行った。

- シース領域 Particle-in-Cell コード PICS1/PICS2

PICS1/PICS2 コードは、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あり、シース領域の解析を目的とした開発を行っている。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およ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 がある。物理スパッタリングに対する磁力線角度の影響評価や、タイルギャップ周囲のプラズマ分布計算および粒子束分布計算などを行った。

- 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為に、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 および 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う問題があった。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およ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、および、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、ならびに、初期構造の生成や解析に必要となる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 REBO ポテンシャルのほかに、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と、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

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およ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。

- 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、と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。

- 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。

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

- 3次元静電粒子コード p3bd

磁場閉じ込め核融合装置の周辺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用している。計算システムは、図 3.2.1.4-1 のように直交座標系を用いており、 z 方向に外部磁場を設定している。 $-x$ 方向が動径方向、 y 方向がポロイダル方向に対応する。磁力線方向の両端、及び、動径方向の片方の端では、金属板（すなわち、ダイバータ板と第一壁）を再現するため、荷電粒子が吸収される境界条件を設定している。プ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、その後のプロブ伝播のダイナミクスを計算する。本コードにより、プロブ内部に自己無撞着に形成される電流系や電位構造の再現に成功し、電位構造に起因する温度構造が明らかにされた [3.2.1.4-1]。

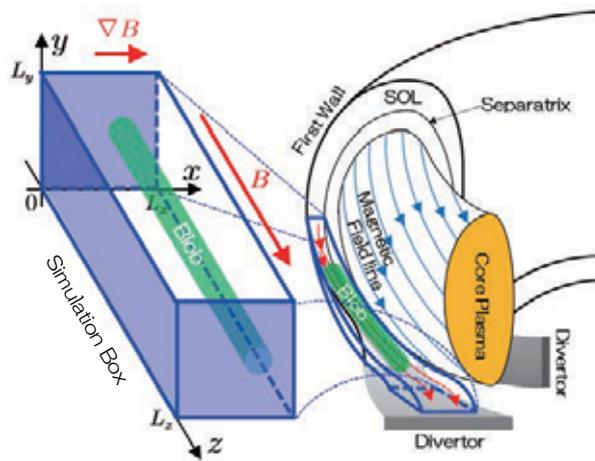


図 3.2.1.4-1 p3bd コードの模式図。SOL 領域を模擬した計算システムとなっている。

- 開放系電磁粒子シミュレーションコード 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を調べるため、プラズマが外部と自由に入出入りする開放系モデルを用いた3次元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。計算

モデルは、3次元電磁粒子シミュレーション手法を用い、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、開放系の境界条件を用いる。プラズマ・シミュレータの能力をフルに活用するため、分散並列化手法として分散並列MPIとスレッド並列を採用している。3次元領域分割による分散並列化のPASMOについて、大規模分散並列マシンで計算をする場合のネックは、全通信が必要となるFFTを使ったポアソンソルバーである。ポアソンソルバーを解く代わりに、連続の式を満たすように電流密度を計算するExact Charge Conservation法(Esirkepov 2001)を採用することでこの問題を解決した。この手法はエネルギー保存やガウスの法則の破れも従来の方法に比べて抑える効果があることが確認できた。この方法によって、よいStrong Scalingも確認され、今後、より大規模な分散並列化に対応できることが期待される。

- 原子過程・クーロン衝突過程を含む静電粒子コード 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採り入れた静電粒子コードPAMCADE(PArticle-in-cell simulation code with Monte Carlo collision for DEtachment 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採り入れている。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。本コードによる予備的な計算では、非接触ダイバータプラズマの再現に成功している。

- 多階層シミュレーションコード MARIS

磁気リコネクションは核融合から宇宙プラズマまで普遍的に見られるエネルギー解放過程であり、さらに、階層横断現象という興味深い側面を持っている。磁気リコネクションが発生すると、磁力線のトポロジーが系全体にわたるマクロなスケールで変化し、大規模な輸送も生じる。その一方、リコネクションを駆動する電気抵抗は、ミクロスケールの運動論的效果が基となって生成される。このマクロとミクロの過程はそれぞれ独立しているのではなく、複雑に絡み合っていると考えられているが、その全体像は未だ解明されていない。そこで、我々はマクロな物理とミクロな物理を同時にかつ自己無撞着に扱うことのできる多階層シミュレーションモデルを開発している。

我々の多階層モデルでは実空間を分割してマクロ階層のダイナミクスはMHDシミュレーション手法で、ミクロ階層の物理はPICシミュレーション手法を用いて解く。

図 3.2.1.4-2 に、上流方向を分割した多階層シミュレーションの模式図を示す。リコネクション点近傍は、PIC手法で解く領域（PIC領域）である。MHD近似が十分に成り立つPIC領域の外側は、MHD手法で解く領域（MHD領域）である。2つの領域の間には、有限の幅を持つインターフェイス領域を挿入し、ここでデータのやりとりを行う。この多階層モデルにおいて、MHD領域に内向きのプラズマフローを発生させることにより、PIC領域で磁気リコネクションが駆動される多階層シミュレーションに成功している。

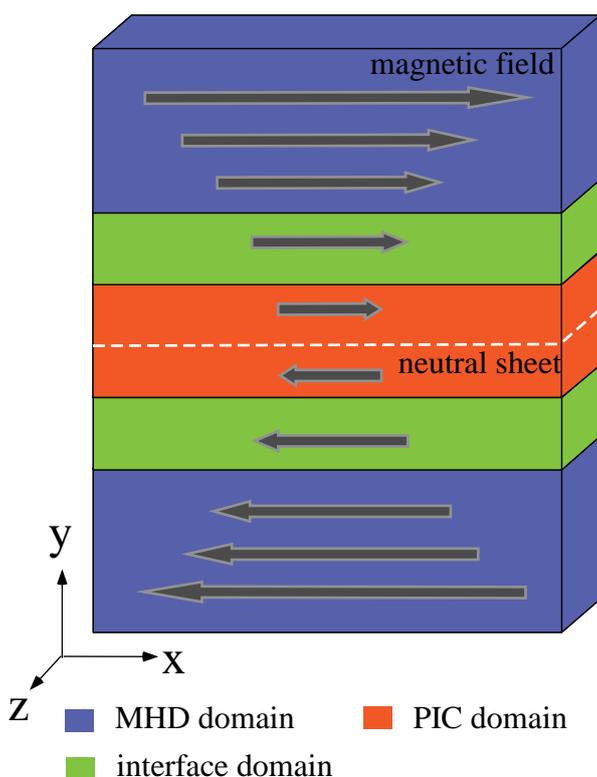


図 3.2.1.4-2 磁気リコネクションの上流方向を分割した多階層モデルの模式図。

図 3.2.1.4-2 では、上流方向のみが階層連結されているが、磁場閉じ込め装置などの実際の系に適用するためにはリコネクションの上流・下流とも階層連結したモデルが必要不可欠である。そのようなモデルの構築に向けて、様々な拡張・改良を行ったので紹介する。まず、図 3.2.1.4-3 のように1次元的にリコネクションの下流方向を模擬して、PIC領域 - 粒子衝突ありPIC領域 - MHD領域の3階層連結に基づく多階層モデルを開発した。Maxwell速度分布を満たさない右向きプラズマフローをPIC領域左端に

発生させたところ、粒子衝突ありPIC領域を経由することにより速度分布はMaxwell分布へと緩和し、プラズマフローはスムーズにMHD領域へと流出することを確認した。一方、図 3.2.1.4-4 のように、階層を2次的に連結させる多階層モデルを作成した。周囲のMHD領域から中央のPIC領域へとプラズマを流入させる多階層シミュレーションを行い、2次的階層連結が物理的に正しいことを確かめた。

このMARISコードによる成果は、「核融合プラズマ理論」に関する Varenna-Lausanne 国際ワークショップ、アジア太平洋プラズマ理論会議 (APPTC)、計算物理国際会議 (CCP)、「宇宙空間シミュレーション」に関する国際シンポジウム (ISSS) といった国際会議における招待講演として選ばれた。

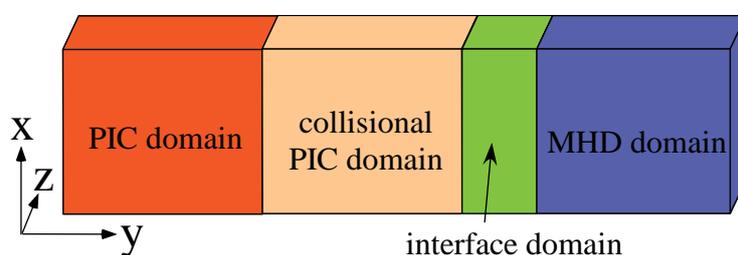


図 3.2.1.4-3 PIC領域 - 粒子衝突有りPIC領域 - MHD領域の3階層連結による多階層モデルの模式図。

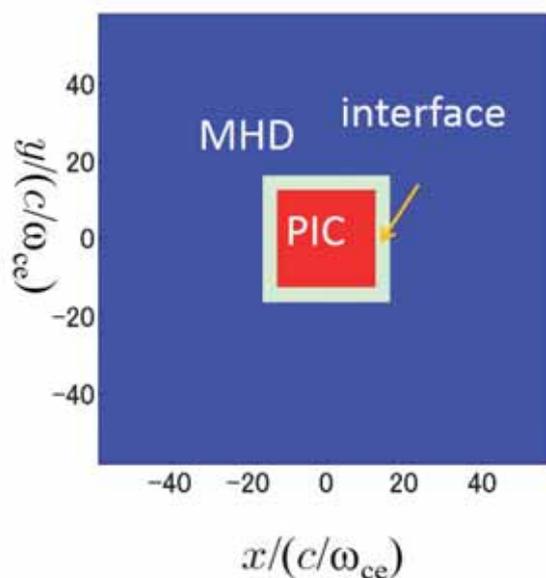


図 3.2.1.4-4 2次的に階層を連結させた多階層モデルの模式図。

● 擬スペクトル法とコンパクト差分法のハイブリッド手法 SP-CCD hybrid code

MHD、2流体方程式など場の方程式を高精度・高解像度で数値的に解くためのシミュレーション手法の一つとして、擬スペクトル法とコンパクト差分法のハイブリッド手法を開発した。フーリエ係数展開による擬スペクトル法はFFTによるグローバル計算(これはMPIノード間通信を伴う)を頻繁に行い [3.2.1.4-2]、コストが高いため、計算の一部を高精度コンパクト差分法と組み合わせたハイブリッド手法である [3.2.1.4-3,4]。この手法を使い、Schmidt数1000までの高Schmidt数パッシブスカラー乱流におけるパッシブスカラー場のスペクトルを計算し、このハイブリッドコードがスペクトル法と比べて十分な精度を有する事を確認した。図3.2.1.4-5は論文 [3.2.1.4-4] に示した、パッシブスカラー場の可視化である。このパッシブスカラースペクトルは、粘性・対流領域において k^{-1} 則に従う事、遠散逸領域では指数関数的に減衰する事がわかった。この指数関数的減衰は、速度場の間欠性に起因することなどが議論された。

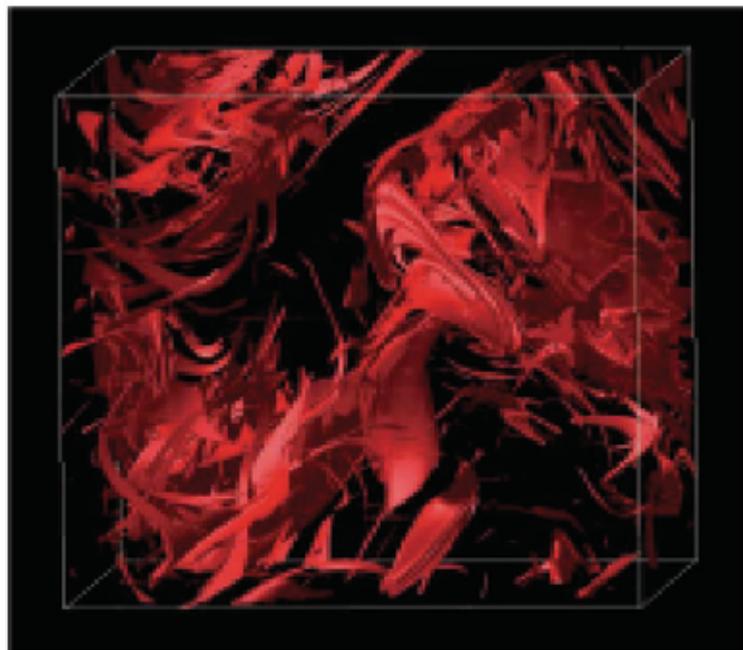


図 3.2.1.4-5 Schmidt数1000におけるスカラー場の可視化 [3.2.1.4-4]。

- AMRフレームワークの開発 PAVANE

適合格子細分化法 (AMR) 法を用いたマルチスケール・シミュレーションを簡便に実現するフレームワークの開発を進めた。核融合プラズマは、広範な多階層プラズマ現象であり、すべてを無矛盾に扱うためには、微視的スケールをベースにした解像度を保ちながら巨視的スケールまでをシミュレーションすることが要求される。しかし、計算機の資源的制約でそれが不可能であることは明白である。このような中、AMR法は、高解像度を必要とする空間領域のみに細分化された格子を動的に生成させ、不必要な箇所は格子を粗視化していくことで、計算機資源や計算実行時間の大幅な低減を狙った手法である。AMR法は、これまでに中性流体コードやプラズマ粒子コードへの適用が試みられてきたが、それぞれのアルゴリズムに応じた専用のコーディングを要し、AMR法の普及が遅れる原因になっていた。

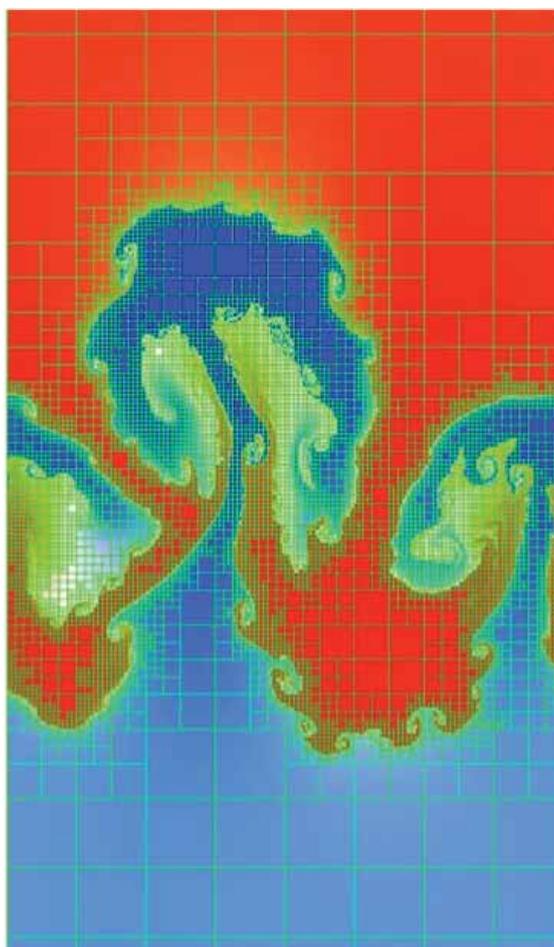


図 3.2.1.4-6 拡張MHDにおけるレイリーテイラー不安定性のAMRフレームワークを用いたシミュレーション結果。

ここでは、流体コードやMHDコード、プラゾフコードのAMR化も目指した汎用型AMRフレームワークの開発が進められた。本フレームワークでは、汎用性を高めるために、格子が直方型に集合したブロックを基本要素とし、各々のブロックの内部では、従来の整合格子系コードを動作させられるように設計してある。AMRによって生成される細分化ブロックは、それを構成する格子数が元のブロックと等しくなる自己相似型を採用することで、従来コードの組み込み時の簡便性に努めてある。本フレームワークは、プラゾフコード、MHDコードや拡張MHDコードへの適用 [3.2.1.4-5] に成功している (図 3.2.1.4-6 参照)。さらには、本フレームワークを利用したシミュレーション結果を対話的に可視化することが出来るツール (図 3.2.1.4-7) の開発も進め、データ構造が複雑化する中、直感的に数値解析結果を把握することが可能になった。

本成果は 24th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (IC-NSP2015) においての招待講演で発表された (T. Hatori, et al.)。

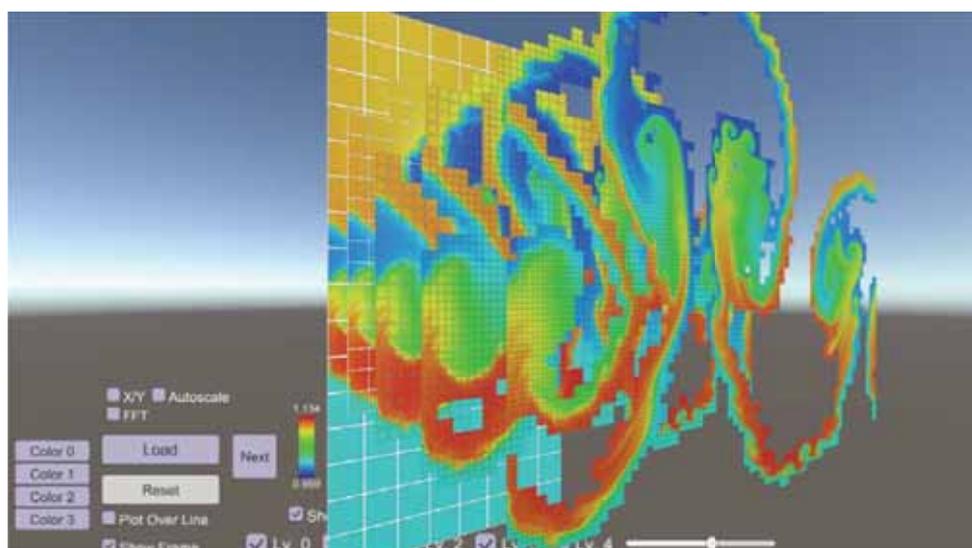


図 3.2.1.4-7 AMR フレームワークを用いたシミュレーション結果の対話的可視化ツールの実行例。

- バーチャルリアリティ空間における同時可視化

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」することで、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装置の特徴を生かして、シミュレーションデータと実験装置データをVR空間で同時に可視化する手法を活用してきた。

この可視化手法の研究をさらに発展させて実験観測データを同時に可視化する手法を開発した [3.2.1.4-6]。

LHDの長時間放電実験では炭素放射の急増とともにプラズマの閉じ込めが壊れることが観測されている。この急増はダイバータ領域から大量のダストが放出される時点と同期しており、ダスト粒子が閉じ込めを崩壊させていると考えられている。そのため、ダスト粒子の生成・輸送機構を調べるため、LHD実験では高速カメラを2台取り付けて立体画像を撮影することで、ダスト粒子の3次元座標の時系列データ取得に成功した。このダスト粒子軌道と磁力線の解析を2次元平面で行う場合、奥行き情報が失われているため、その立体的構造を把握することが困難である。そこで、VR空間でこれらの立体構造を調べるため、本手法の開発に着手した。実験観測データをデータ変換を経ずに読み込むためのインターフェースの開発、大量のダスト粒子をスムーズにVR空間に表示するための可視化機能の開発を行った。また、その軌道の観測からダスト粒子の輸送方向を把握するための工夫も行った。そのVR可視化の例を図3.2.1.4-8に示す。ダスト粒子の分布する領域や軌道と磁力線の比較を容易に行うことができる。

本研究は、兵庫県立大学：大野暢亮教授、神戸大学：陰山聡教授、甲南大学：田村祐一教授との共同研究である。

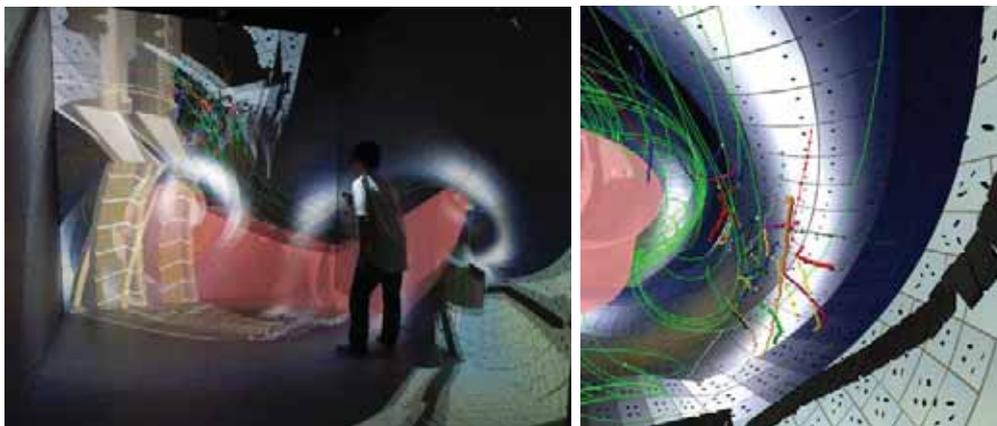


図 3.2.1.4-8 ダスト粒子データとシミュレーション、実験装置データの同時VR可視化。左図は観察している様子を表し、右図は3-Oポートから観測されたダスト粒子データをトロイダル方向から見た図。緑線は磁力線、マゼンタ色はプラズマ圧力の等値面を表している。

● 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。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とし、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・等値面・スライス・流線・矢印の実装を進めた [3.2.1.4-7]。PASMCO コードに実装して Plasma Simulator で実行して

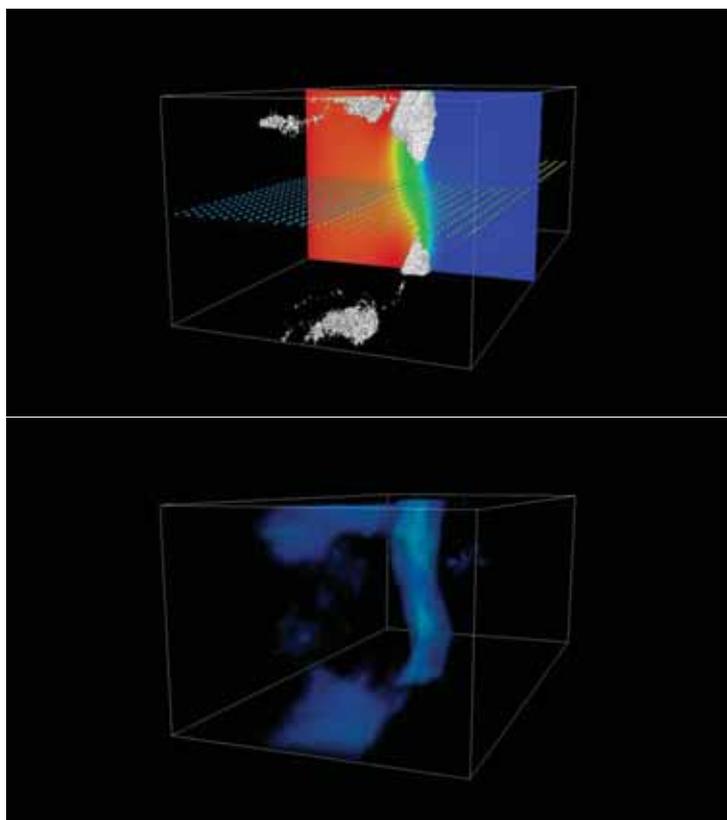


図 3.2.1.4-9 VISMO による可視化例。上図は磁力線 (矢印)、磁場の大きさ (カラーコンター図)、粒子密度 (等値面) を表し、下図は粒子密度 (ボリュームレンダリング) を示す。

VISMOで描いたIn-situ可視化の例が図 3.2.1.4-9 である。粒子の密度分布(等密度面)、磁場 B_x のカラーマップ、磁力線の矢印表示、粒子密度のボリュームレンダリング表示が示されている。また、MPI分散並列化されたコードでは、それぞれのプロセスで画像を作成してからプロセス間通信を用いて画像重畳を行う。この画像重畳に $n \times \log 2(n)$ のオーダーの通信コストで画像重畳を行う Binary Swap 法を実装した。今後 VISMO の高速化が期待される。

● その他

物理乱数の活用検討

乱数はプラズマシミュレーション(ドリフト運動論的モンテ・カルロシミュレーションコードや3次元モンテ・カルロエッジプラズマ輸送コードなど)で頻繁に利用されている。乱数の品質は直接シミュレーション結果に影響を与えるため、小型レーザー発振器を用いた物理乱数発生器(quantum random number generator: QRNG)の活用を検討した。この研究はスペイン Institute of Photonics Science(ICFO)との国際共同研究である。QRNGは従来の物理乱数発生器と比べ10倍の生成速度を示している。また、QRNGは量子力学的な不確定性に基づいて乱数を生成するため、本質的に乱数としての統計的性質に優れている。LinuxワークステーションにQRNGのプロトタイプを組み込み(図 3.2.1.4-10)、いくつかのFortranコードを使ってベンチマークテストを実行した。FortranコードからのQRNGの呼び出しに関しては、大規模シミュレーション



図 3.2.1.4-10 Linuxワークステーションに組み込まれたQRNG。

コードからの利用を想定してプログラマーが利用しやすい形態にするよう ICFO のエンジニアに助言し、また QRNG のドライバプログラム本体に対する高速化も共同で行った。

一般に、物理乱数生成器は、擬似乱数生成器と比べて乱数生成スピードが遅いが、シミュレーションコードの多くでは、乱数生成の他に種々の物理計算を行うため、全計算に対する乱数生成の頻度によっては総計算時間に与える影響は小さくなり得る。例えば、 δf 法に基づくドリフト運動論的モンテ・カルロシミュレーションコード「KEATS」の場合、全計算における乱数生成部分の割合は無視できるほど小さいため、物理乱数生成器を利用しても、総計算時間は、擬似乱数の場合とほぼ変わらないという結果を得た。また、発生させた乱数に対して、その品質に関する統計的検定を行い、乱数として良好な性質を持っていることを確認した。

データ圧縮 TOKI

大規模シミュレーション研究を実施する上で大規模データの保存や解析・可視化は分野を超えた緊急の課題である。数値的な精度を保証しつつデータ量を大幅に削減する、効率のよいデータ保存の新しい方法論として TOKI を提案した。

これは、大規模粒子シミュレーションで生成されるデータを圧縮して、大規模な粒子系の可視化を可能とするような提案で、粒子シミュレーションによる粒子軌道データを時間方向について補間関数で記述して圧縮する方法 (encoder) と、圧縮したデータをどのような形式で復元ソフト (decoder) に受け渡すかの提案である [3.2.1.4-8]。本 encoder で採用したデータ圧縮法は次のような特徴を有している。(i) シミュレーションデータの値と圧縮したデータから再現した値との差が入力した定数 (許容誤差) 以下となるように制御する。(ii) シミュレーションにおける粒子を独立した粒子として扱い、各粒子の独立した時間刻みで、各粒子の時系列データを圧縮する。(iii) 粒子の軌道を粒子の特徴的な運動に基づいた多項式関数で近似する。即ち、シミュレーションによる粒子軌道データを保存する代わりに、多項式の係数を保存する。サンプルされたデータの中間の値に対しては、多項式の値から連続曲線として再構築する。これらの特徴によって、少数のパラメータによって記述される連続曲線がオリジナルの粒子軌道を近似して、保存すべきデータの量を削減することができる。作成した encoder を使ってプラズマ粒子シミュレーションデータを圧縮した。オリジナルのデータの 5.3% の大きさまでデータを圧縮することができ、許容誤差範囲内でデータを復元することができることを確認した。このように、encoder では多項式を用いた時間方向での圧縮の意義を明らかにして、decoder では復元の確認と優位性を確認することができた。さらに、多項式の代わりにチェビシェフ多項式を利用することも検討した [3.2.1.4-9]。また、今回圧縮

されたデータからの解凍用プログラムを試作し、それを用いて解凍済みの時系列データファイルの再作成を行い、可視化映像の作成を行った。また、他のデータ圧縮形式の比較を行い、多項式を用いた圧縮以外の工夫との複合的な対応の結果として、圧縮率を評価した。許容誤差を満たす補間関数の係数表現の任意性から、アスキーでの文字数を減らす要素技術の検討を行った。本研究は、広島大学：加藤恒彦特任助教、東京工業大学：斎藤貴之特任准教授、国立天文台：武田隆顕特任助教、防衛大学校：萩田克美講師との共同研究である。

- [3.2.1.4-1] H. Hasegawa and S. Ishiguro, Phys. Plasmas, Vol.22 (2015) pp.102113 (1-8).
- [3.2.1.4-2] 三浦英昭、藤堂泰、後藤俊幸、「核融合プラズマシミュレーションの技法 大規模並列計算環境の活用 3.MHDシミュレーションのコーディング技法」プラズマ・核融合学会誌. Vol.89 (2013) pp.119-127.
- [3.2.1.4-3] T. Gotoh, S. Hatanaka, and H. Miura, “Spectral compact difference hybrid computation of passive scalar in isotropic turbulence”, J. Comp. Phys. Vol.231 (2012) pp.7398-7414.
- [3.2.1.4-4] T. Gotoh, T. Watanabe, and H. Miura “Spectrum of Passive Scalar at Very High Schmidt Number in Turbulence”, Plasma Fus. Res. Vol.9 (2014) pp.3401019 (4p).
- [3.2.1.4-5] T. Hatori, *et al.*, “Hierarchical simulation of Rayleigh-Taylor instability on extended MHD with AMR framework and visualization”, ICNSP2015, (2015).
- [3.2.1.4-6] H. Ohtani, *et al.*, “Visualization of dust particle data with plasma simulation results using virtual-reality system”, submitted to Contrib. Plasma Phys. (2015).
- [3.2.1.4-7] N. Ohno and H. Ohtani, “Development of In-Situ Visualization Tool for PIC Simulation”, Plasma Fus. Res. Vol.9 (2014) pp.3401071 (4p).
- [3.2.1.4-8] H. Ohtani, *et al.*, “Irreversible data compression concepts with polynomial fitting in time-order of particle trajectory for visualization of huge particle system”, J. Phys.: Conf. Ser. Vol.454 (2013) pp.012078 (11p).
- [3.2.1.4-9] K. Hagita, H. Ohtani, T. Kato and S. Ishiguro, “TOKI Compression for Plasma Particle Simulations”, Plasma Fus. Res. Vol.9 (2014) pp.3401083 (6p).

3.2.2 統合輸送解析コードの構築

LHDをはじめとした環状磁場閉じ込めプラズマの物理機構解明と体系化に資するため、統合輸送解析コード TASK3D の開発と運用を行っている。TASK3D は、トカマクを対象とした統合解析コード（京都大学：福山淳教授）を基盤として、ヘリカルプラズマにおける 3 次元磁場配位に起因する特有の物理機構や、各種物理要素モジュールの 3 次元平衡データとの連携機能などを追加する形で開発を進めてきている。

3.2.2.1 統合輸送解析コードの概略（過去 3 年間の進捗）

前回の外部評価（平成 24 年度）において、TASK3D に関して下記のような指摘をいただいた。

1. There are also good progresses toward the advancement of design of helical demo reactor, FFHR-d1, with programmatic collaboration with Fusion Engineering Research Project. NSRP contributed FFHR-d1 design effort through Integrated Transport Codes, HINT2 Code, and FORTEC-3D Global Particle Simulation Code. It is however, to recommend building systematic approach toward collaboration between NSRP and Fusion Engineering Research Project for realistic way to construct Numerical Test Reactor.
2. The development of a rigorous benchmarking strategy is recommended (e.g. TASK3D). This can only be done on an international scale with code packages developed by other laboratories.
3. 次期中期計画では数値試験炉の構築をミッションに掲げているが、その核となるべき統合輸送シミュレーション（TASK3D-p）の研究開発が京都大学で行われている現状は改善すべきである。

これらのご指摘を念頭に置きつつ、この 3 年間の開発・運用を行ってきた。前回の外部評価（平成 24 年度）以降、「放電の全（多数）時間解析・予測」、「時間変化追従解析・予測」へと着実な進展を遂げている。これは、数値試験炉構築の基盤形成となる進展である。また、比較的簡便かつ短時間の要素コード（モジュール）統合の段階から、「プロセスされた実験データ提供を通じての大規模シミュレーションとの連携、および、それらのVerification & Validation支援」の側面での位置づけも国内外において確立している。

前回の外部評価におけるご指摘への対応事項も含めて、以下の節に、LHD 実験解析型、および、到達パラメータ予測型の開発・運用状況について報告する。取り組み全体の概要を図 3.2.2.1-1 に示す。

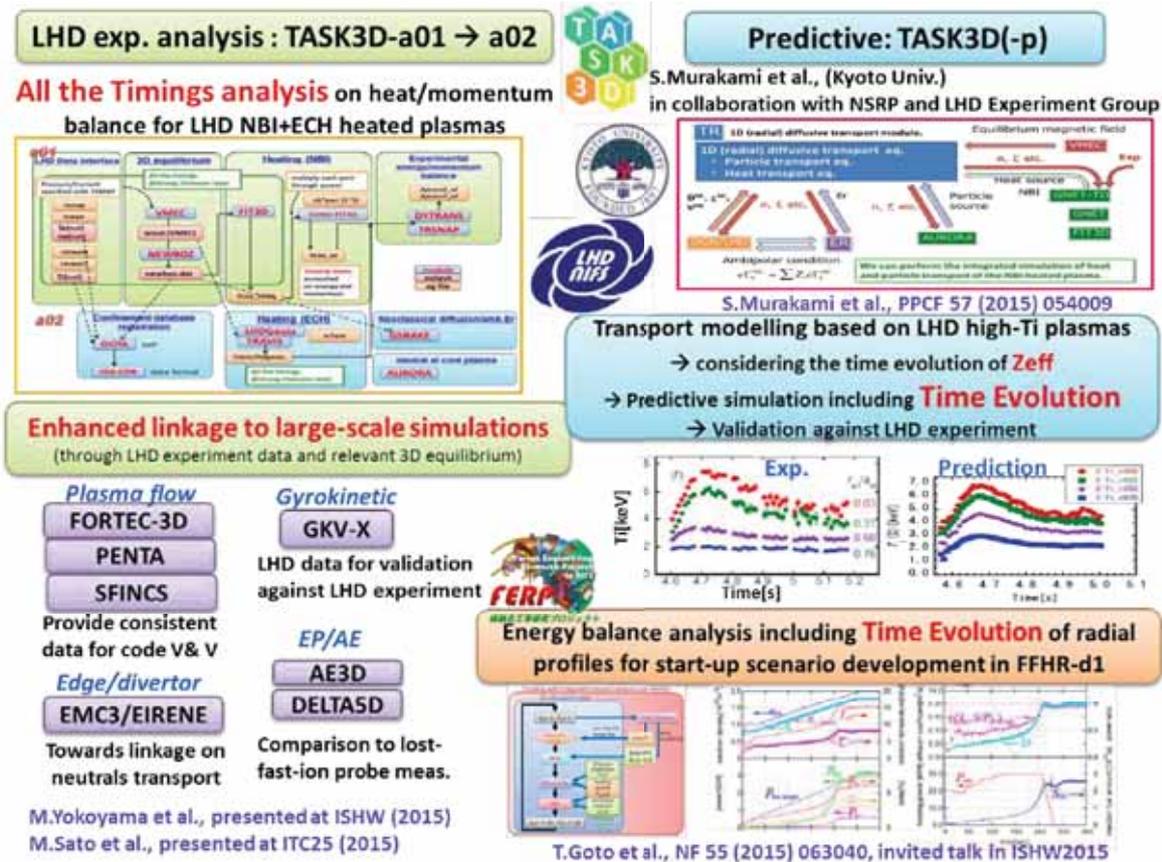


図 3.2.2.1-1 統合輸送解析コード TASK3D 構築に関する取り組み全体の概要。LHD プロジェクト、核融合工学研究プロジェクト、および、京都大学との強力な連携によって大きな進展を遂げている。

3.2.2.2 LHD 実験データ解析型 TASK3D-a の進展

LHD 実験適用型の Analysis Version TASK3D-a は、第一版 a01 のリリース（平成 24 年 9 月）から、第二版 a02 へと機能拡張を進めてきている。a01 と a02 を比較する形で、図 3.2.2.2-1 に TASK3D-a02 のモジュール構成を示す。

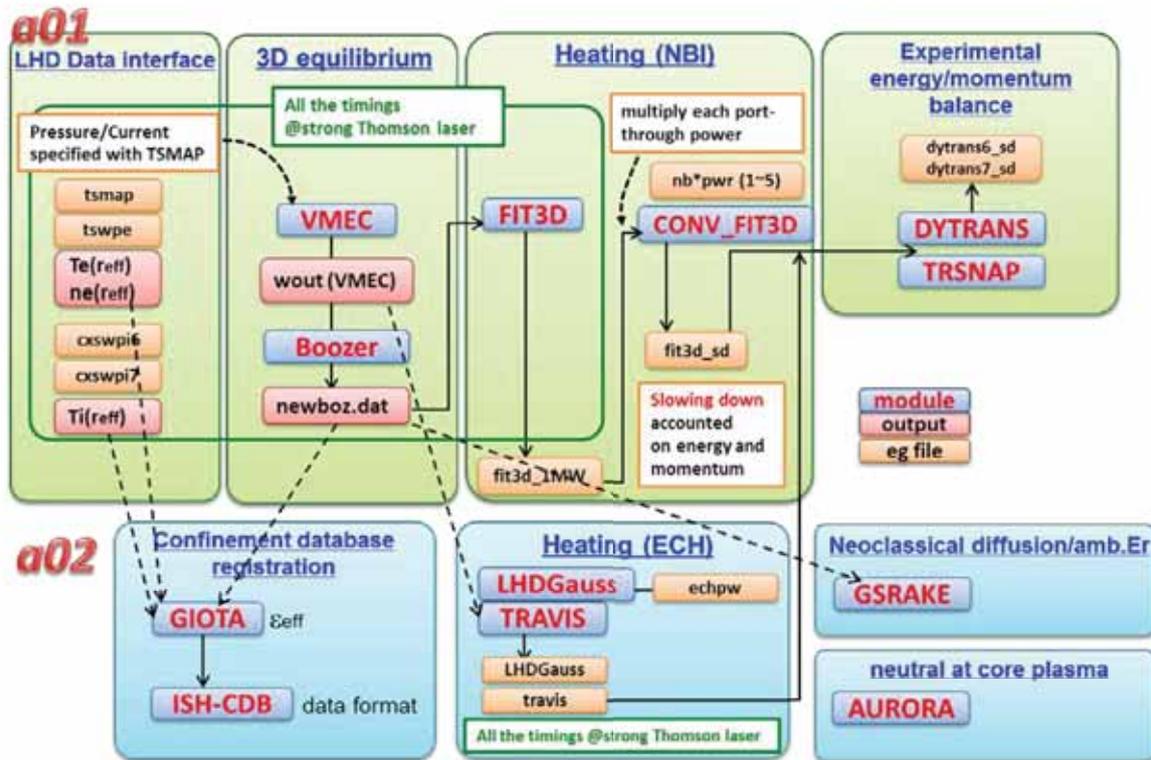


図 3.2.2.2-1 TASK3D-a01（上部）と a02 での機能拡張。

TASK3D-a02 における新機能を以下に概略する。

新古典熱・粒子拡散フラックスを評価する GSRAKE コードの導入作業が完了した。GSRAKE コード（C D Beidler and W D D’haeseleer, Plasma Phys. Contr. Fusion 37 (1995) 463）はバウンス平均化法に基づく新古典輸送解析コードであり、LHD のように比較的単純な磁場リップル構造を有する磁場配位に対しては、短時間に新古典拡散フラックス評価を行うことができる。GSRAKE コードは、従来、単体で LHD 実験解析に用いられていたが、新古典・乱流輸送グループ：佐竹真介准教授によって並列化されていたものを、入出力の整備を行った上で TASK3D-a02 に組み込んだ。新古典粒子フラックスの両極性条件から、径電場の評価も行うことができる。TASK3D-a01 段階

から可能であった実験的なエネルギーバランス評価と、この新古典エネルギーフラックス評価が同時に行われることになった。(実験的なエネルギーフラックス) – (新古典エネルギーフラックス)を「乱流輸送による寄与」と考えると、TASK3D-a02の実行によって、新古典輸送と乱流輸送が径方向エネルギー輸送に占める割合のデータセットを蓄積でき、その系統的理解にもつながる機能拡張である。

ECH加熱分布を評価するLHDGaussコードおよびTRAVISコードの導入作業が完了した。LHDGaussコードは核融合研オリジナルのコードであり、最近、LHD解析データサーバとの連携確立(ジャイロトロン情報:入射パワー、アンテナの向き、偏波の情報などを、実験データベースから自動的に入手)によって、ほぼショット間でのECH加熱解析が可能となり、ECH加熱の最適化に活用されている(核融合研:辻村亨助教、久保伸教授ら:2015年の第20回国際ステラレータ-ヘリオトロンワークショップにおける口頭発表)。一方、TRAVISコードは、マックスプランクプラズマ物理研究所:N.Marushchenko博士によって開発され、核融合研:吉村泰夫准教授によって、単体としてLHD実験解析に用いられてきていた。TASK3D-a02では、LHD解析データサーバに登録されているLHDGaussの解析結果の参照、および、TRAVISのその場実行を行い、電子温度分布計測がある全時間タイミングでのECH吸収パワー(TRAVISではECCD電流評価も)計算結果を取り込んだエネルギーバランス解析が行えるように組み上げられている。これにより、これまで、NBI加熱プラズマに限定されてきたTASK3D-aの適用範囲が格段に広がった。高イオン温度プラズマへのECH重畳による電子・イオン同時高温化プラズマの輸送解析(核融合研:高橋裕己助教ら:第20回国際ステラレータ-ヘリオトロンワークショップ招待講演の内容の一部)などへの適用がすでに始まっている。3次元平衡、計測温度・密度分布などを揃えた形でのLHDGauss、TRAVIS間の系統的なベンチマーク作業も格段の進展が期待できる。

また、国際的なヘリカル系実験の共同作業である、プラズマ閉じ込め時間や分布計測結果のデータベースに対して、フォーマットを合わせた形でデータ提供する数値解析プログラムの組み込みを完了した(図3.2.2.2-1の左下部)。これにより、LHDからのデータ供給がルーチン化することとなり、LHDの高性能プラズマのデータや、平成27年11月から実験開始予定のWendelstein 7-X装置(ドイツ:マックスプランクプラズマ物理研究所)の実験データなどを含んだ形で、ヘリカル系プラズマ閉じ込めに関する新たなスケーリング則の導出や、分布を用いたコードのベンチマーク作業などの国際協力研究を活発に展開することができる。

コアプラズマにおける中性粒子径方向分布を評価するAURORAコードも導入した。NBI加熱評価の高精度化、リサイクリング低減による高イオン温度プラズマ生成シナリオの解析、周辺輸送グループにおけるEMC3-EIRENEコードと、「中性粒子輸送」を

キーワードとして連携を図る、などの目的での機能拡張である。高ダイナミックレンジバルマー分光計測(京都大学:蓮尾昌裕教授、藤井恵介助教)によるプラズマ中の中性水素原子分布計測が可能となっており、それら計測結果との比較を通じて実験検証を進めるとともに、LHD重水素実験に向けて、中性粒子の挙動をも加味したTASK3D-aの高精度化を図る基盤となっている。

TASK3D-a02における機能拡張を活きたものにするためには、上記のような、新古典両極性径電場、径方向エネルギー輸送に対する乱流輸送寄与の系統データ、プラズマコアにおける中性粒子分布など、実験計測との比較や多数データの取り扱いによる系統理解を進めることが必要である。このため、それぞれの課題の理論・実験関係者を巻き込みながら、蓄積されたデータを活用する方策を検討している。

さらに様々な物理課題に関して、「LHD平衡・分布データ提供」という役割を通じて、大規模シミュレーションコードと連携を進めるフェイズに到達している。アルフベン固有モードの解析や、それに伴う高エネルギー粒子の挙動解析、新古典プラズマ流の解析など、現在、個別に計算や実験解析が行われている物理課題についても、TASK3D-aからプラズマの平衡や、プラズマの温度・密度分布などを提供することで、連携を拡張させている。これらの解析コードはコンピュータ資源を多く必要とするものが多く、現時点では、そのままの形態でTASK3D-aに取り込むことは現実的ではないが、実験データの提供という「ゆるい連携」から今後の展望を拓いていくことを検討している。

この3年間でTASK3D-aからLHD平衡、計測分布データを提供した大規模シミュレーションコードの例を、以下にいくつか挙げる。

- FORTEC-3Dコードによる国内外ヘリカル実験装置での新古典熱フラックス評価の実験検証共同研究、
- GKV-XコードによるLHD高イオン温度放電のイオン温度勾配駆動微視的不安定性が引き起こすエネルギーフラックスの評価、
- 米国MITのM.Landremann氏によって開発が進んでいる新古典輸送解析コードSFINCSによるLHDプラズマの具体的計算(新古典輸送解析コードのVerification国際共同研究展開へのテストケース:TASK3D-aから供給したデータで計算が可能であることを確認)
- これまで、核融合研:小川国大助教が単体で計算を行っていたアルフベン固有モード解析のためのAE3Dコード・アルフベン固有モード存在下での粒子軌道追跡計算も可能であるDELTA5D(いずれも、米国オークリッジ国立研究所:D.A.Spong博士との共同研究でLHD解析が行われていたもの)。小川氏本人が、TASK3D-a

で生成される結果などを用いて、AE3D、DELTA5D コードへの入力を自動的に生成するルーチンを作成した。両コードとも TASK3D-a のサーバー群では計算が非常に困難であるが、計算実行のための入力ファイルを自動的に生成できるようになったことは、損失高速プローブ計測との比較に関して、解析数の増加による系統的知見の導出にも役立つ成果である。

また、D.A.Spong 氏からは、新古典プラズマ流解析コードである PENTA コード一式の提供を受けた。これもサーバー群では計算が非常に困難であるため、プラズマシミュレータで計算実行することになる予定であるが、TASK3D-a の実行で、必要な平衡や入力ファイルが自動的に準備できるようになり、それらを用いて、LHD プラズマにおける新古典プラズマ流の磁気面平均諸量を求めることができる段階となっている。さらに、磁気面上での分布を評価するルーチンを組み込むことで、荷電交換分光計測の視線に沿った計測結果との比較を行うべく、作業を進めている。

新古典プラズマ流の解析に関して、FORTEC-3D、PENTA、SFINCS コードの 3 者に、TASK3D-a によって、同じ平衡、同じ計測分布データが円滑に供給されることとなり、Verification & Validation 国際共同研究の加速に貢献できる。(平成 24 年度外部評価指摘事項 2) への対応)。

国際学会やワークショップ、CWGM (ヘリカル系調整作業会合) などでの継続的な研究発表を通じて、TASK3D-a の国際的認知度も着実に高まっている。

N.Pablant 氏 (米国: プリンストンプラズマ物理研究所) は、X 線イメージング結晶分光器 (XICS) を LHD に設置し、NBI 入射のない状況でのイオン温度やフロー計測を可能とした。特に、ECH 入射による LHD の高電子温度プラズマのエネルギー輸送特性評価のため、TASK3D-a01 を用いた輸送解析を行った。イオン温度分布計測データも取得できるため、そのようなプラズマにおけるイオンのエネルギー輸送評価も行える特長があり、2013 年度、2015 年度の国際ステラレータ-ヘリオトロンワークショップいずれにおいても本人が招待講演を行うなど、TASK3D-a も含めた国際的評価の高い国際共同研究となっている。

P.Vincenzi 氏 (イタリア: RFX コンソーシアム博士課程学生) が、ヨーロッパの EUROfusion 経費にて核融合科学研究所に滞在 (2014 年、2015 年) した。LHD の NBI グループと RFX コンソーシアムの共同研究の一環として、「NBI 加熱モジュールの高精度化と実験データによる検証」に取り組むことが先方の指導教官と合意された。その合意を受けて、TASK3D-a における NBI 加熱評価の高精度化 (ターゲットプラズマに複数のイオン種が存在する場合へのルーチンの適用) および、核融合反応による中性子発生量評価のためのコード開発 (反応断面積の最新の知見への更新) を行った。LHD 第 18 サイクル実験において、水素、ヘリウム比を系統的に変えた高イオン温度プラズ

マの生成が行われたが、それらを題材として、開発したコードの適用を行い、その成果について、2015年6月のヨーロッパ物理会議、同11月の第25回国際土岐コンファレンスにおいて本人が発表を行った。さらにそれらの内容は、本人の博士学位論文にも盛り込まれる予定である。コード改良の詳細に関して、「Modification of fit3d code for the analyses of LHD deuterium experiments」としてまとめ、NIFS-Memoとして発刊する作業を進めている。

平成26年度には、米国Tech-X社のA.Y.Pankin博士が、核融合研客員教授（JIFT客員）として、3か月滞在された。TASK3D-a開発・運用の状況を、平成25年度のJIFT-WS（ウイスコンシン大学：C.C.Hegna教授と核融合研：横山）において発表したことがきっかけでTASK3D-a開発に関心を持っていただいた結果の来訪であった。この滞在によって、実験観測分布の誤差範囲を考慮した熱輸送係数の値（計算結果）の幅をルーチン的に計算するツール（Uncertainty Quantification：UQ）がTASK3D-aに導入されたことが大きな成果である。そのコード間連携の概念図と分布の誤差範囲評価の例を図3.2.2.2-2に示す。この成果により、LHDプラズマの熱輸送係数の多数ケース解析において、温度・密度分布のフィッティング形状などに結果がどのように依存するかについて、系統的な知見を簡便に得ることができるようになった。実験解析と理論モデルとの比較などを行っていく際に、双方の不確定性（データの幅）を意識しておくことが必要であり、それを可能とする機能をTASK3D-aが有するようになったことは、今後の比較研究にも大いに役立つものと期待されている。この成果は、2014年のアメリカ物理学会において、A.Y.Pankin氏によって「Use of Uncertainty Quantification Techniques for Interpretive and Predictive Transport Analysis of Burning Plasmas」として口頭発表された。

統合解析コードとしては、米国・プリンストンプラズマ物理研究所（PPPL）を中心としてトカマク方式を対象とした「TRANSP」が、長年にわたって開発・運用がなされている。TRANSPは、世界的に最も認知度が高く、最も広く用いられている統合コード体系であると言える。そのTRANSPのユーザー会合が2015年3月23、24日にPPPLで開催され、その場でTASK3D-aの開発・運用状況を報告する機会を得た。その会合での議論をさらに深める目的で、平成27年度の日米科学技術協力事業（JIFT）にて2015年の10月27日から11月4日までPPPLを訪問し、TRANSPの開発・ユーザーグループとの包括的議論、さらにはTRANSPモジュールの開発状況などについて個別議論を行った。これらのTRANSPグループとの議論を通じて、TASK3D-aの国際認知度を高めることができた。また、TRANSPのNBI・高速イオン解析モジュールNUBEAM開発の最近の進展（原子分子データベースであるADASとの連携による複数イオン種存在下での加熱計算、高速イオンの異常拡散のフィードバック計算によるNSTX放電にお

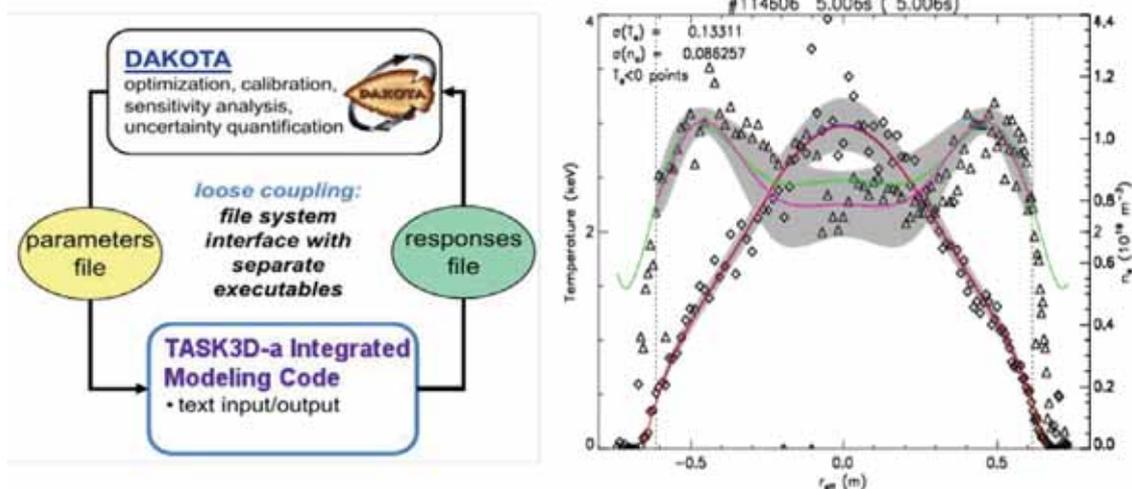


図 3.2.2.2-2 (左) TASK3D-a と DAKOTA スイート連携の概念図。(右) この連携によって可能となった、LHD 計測分布データの信頼幅の表示例。

ける発生中性子量の再現計算など) や、予測型 TRANSP に関して、NSTX における完全非誘導電流立ち上げシナリオ構築に対する検討、ITPA 統合運転シナリオグループへの継続的参加と寄与、計測データ較正へのフィードバックといった研究動向を知ることができた。今後、各モジュールの専門家同士の派遣・招聘交流によって TRANSP との連携を深めていく契機となった。

TASK3D-a の適用によって、複数の LHD 高イオン温度放電の複数タイミング (合計およそ 200 タイミング) の解析データベースを作成することができた。このデータベースを“ビッグデータ”の視点で捉えることで、新古典輸送/乱流輸送の区分や、乱流輸送の原因となる揺動の種類などを全く意識することなく、径方向分布も含めたイオン熱輸送係数の簡便な回帰式の導出に成功した。2014 年の IAEA 核融合エネルギー会議におけるポスター発表などで成果発表を行った。LHD 実験データベースと統合輸送解析スイートとの連携によって初めて可能となった成果であり、将来の核融合炉におけるコアプラズマ制御における到達温度予測の一手法として有望なものであるとして、平成 26 年度の原型炉運転制御シンポジウム (核融合研共同研究研究会: 代表: 東京工業大学: 松田慎三郎氏) においても話題提供を行った。

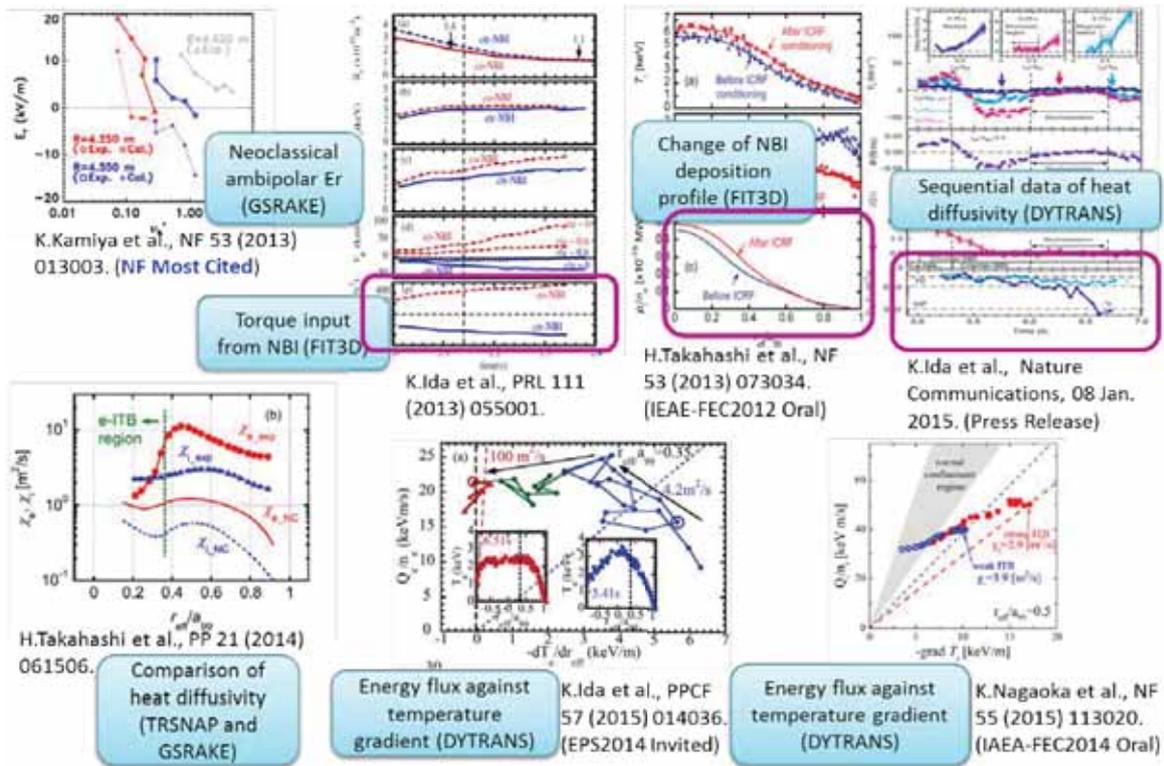


図 3.2.2.2-3 TASK3D-a の解析結果を含む主な LHD 論文の図の一覧。TASK3D-a のどのモジュールの結果が用いられているかを示している。図の解釈等の詳細は各文献を参照されたい。

TASK3D-a による LHD プラズマ解析の主な具体例を紹介する。個別の解析に関する詳細や物理的知見についての説明は各文献に譲り、ここでは、TASK3D-a がどのように使われ、図が作成されているかについて概説する。下記に紹介する図の一覧を図 3.2.2.2-3 に示す。箇条書きの番号は、図中の左上から右下への図の配置に対応している。

1. K.Kamiya et al., Nuclear Fusion 53 (2013) 013003 (NUCLEAR FUSION 誌 Most Cited (from 2011) 論文) の Fig.2: プラズマ周辺部の径電場計測と新古典両極性径電場を、衝突周波数に対してプロットした図 (Cal が計算値)。複数のケースに対して、TASK3D-a を実行し、GSRAKE コードの結果を用いて作成された図である。
2. K.Ida et al., Physics Review Letters 111 (2013) 055001 の Fig.1: Co-, Ctr-NBI 入射プラズマにおけるトロイダル回転計測結果を、その他のプラズマパラメータと共に示した図。NBI によって持ち込まれる外部トルクの図 (最下枠) は、NBI 加

熱計算の時系列データ (FIT3D モジュールの結果) から作成された図である。

3. H.Takahashi et al., Nuclear Fusion 53 (2013) 073034 の Fig.3 : ICRF 放電を用いた壁コンディショニングによる到達イオン温度伸長に関する図。NBI加熱計算により、コンディショニング後により中心ピークした加熱分布になっていることが示された (最下枠)。NBI加熱計算 (FIT3D モジュールの結果) によって作成された図である。
4. K.Ida et al., Nature Communications, 08 January, 2015 (九州大学との共同プレスリリース論文) の Fig.1 : プラズマ回転減速過程におけるイオン・電子熱輸送係数の時間変化を示す図 (最下枠)。ビーム減衰も考慮したNBI吸収分布と、密度・温度の時間変化をも加味した熱フラックスから求めた熱輸送係数の時系列データ (dytrans モジュールの結果) から作成された図である。
5. H.Takahashi et al., Physics of Plasmas 21 (2014) 061506 (2012年IAEA核融合エネルギー会議の口頭発表) の Fig.8 : 高電子温度プラズマにおけるイオン、電子熱拡散係数を新古典の値と比較した図。過渡的振る舞いがほとんどない状態であるので、trnsnap モジュールと GSRAKE モジュールの結果から作成された図である。
6. K.Ida et al., Plasma Physics and Controlled Fusion 57 (2015) 014036 (2014年のEPS招待講演) の Fig.10 : (a) 電子、(b) イオン温度勾配に対する、電子密度で規格化された (a) 電子、(b) イオン熱フラックスの時間変化を示す図。ビーム減衰も考慮したNBI吸収分布と、密度・温度の時間変化をも加味した熱フラックスの時系列データ (dytrans モジュールの結果) から作成された図である。
7. K.Nagaoka et al., Nuclear Fusion 55 (2015) 113020 (2014年IAEA核融合エネルギー会議の口頭発表) の Fig.4 : 高イオン温度プラズマのイオン温度勾配増進とイオン密度で規格化されたイオン熱フラックスの増え方 (weak ITB と strong ITB の比較) の時系列データを示した図。ビーム減衰も考慮したNBI吸収分布と、密度・温度の時間変化をも加味した熱フラックスの時系列データ (dytrans モジュールの結果) から作成された図である。

3.2.2.3 到達パラメータ予測型 TASK3D-p の進展

予測版については、京都大学：村上定義准教授らによって、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、さらには、その実験検証が進んでいる。粒子輸送や、水素ヘリウム比の変化に伴う達成イオン温度の変化（LHD 第 18 サイクルで得られた系統的实验結果）に関する輸送モデリング、重水素プラズマの到達温度予測などにも大きな進展があるが、ここでは、現在の LHD 高イオン温度放電を対象とした輸送モデリングに関して概説する。

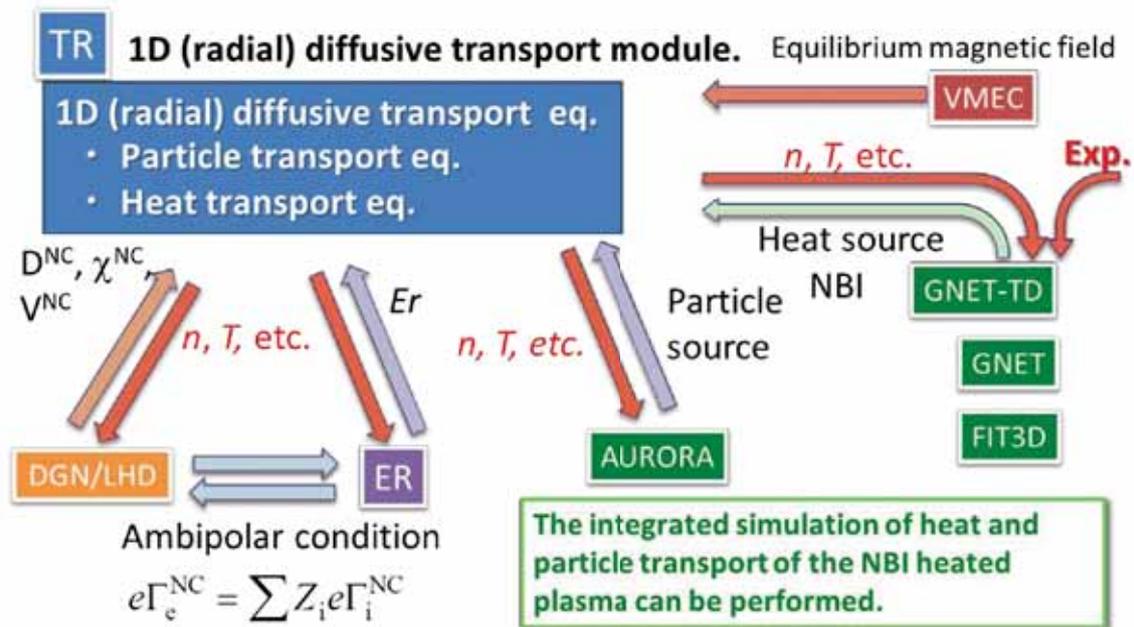


図 3.2.2.3-1 京都大学で開発が進んでいる予測型統合輸送コードの計算フロー図。GNET(-TD) が組み込まれている。輸送モデルを用いて、到達パラメータ予測を行うように組み上げられている。

径方向の熱・粒子輸送拡散方程式を解く 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、ジャイロ平均化されたドリフト運動論方程式を解く GNET（さらに、その時間発展解析版 GNET-TD）コードを統合した体系での解析である（図 3.2.2.3-1）。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。LHD プラズマの高イオン温度状態は、炭素ペレット入射後の密度減衰フェイズで実現されており、この状

況に対応するため、複数イオン種、時間発展を加味した加熱分布計算を行う GNET-TD コード (H.Yamaguchi et al., Plasma and Fusion Research 9 (2014) 3403127.) を適用している。しかし、上記のイオン熱拡散係数での計算では、イオン温度の時間変化を全く再現することができなかった。そこで、炭素ペレット入射 (4.75s) 後に実効電荷数 Z_{eff} が図 3.2.2.3-2 (右上図) のように時間変化することに着目して、 Z_{eff} に依存してイオン熱拡散係数が低減 (乱流輸送の抑制に対応) するモデル (図 3.2.2.3-2 中に記されている Z_{eff} 依存モデル) 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。この熱輸送モデルを、図 3.2.2.3-2 の例よりは低いイオン温度 (4keV 程度) のプラズマ (炭素ペレット入射) に適用したところ、イオン温度分布の時間変化を再現できた。このように、この輸送モデルを導出したプラズマ以外への適用性も確認が進んでいる。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。

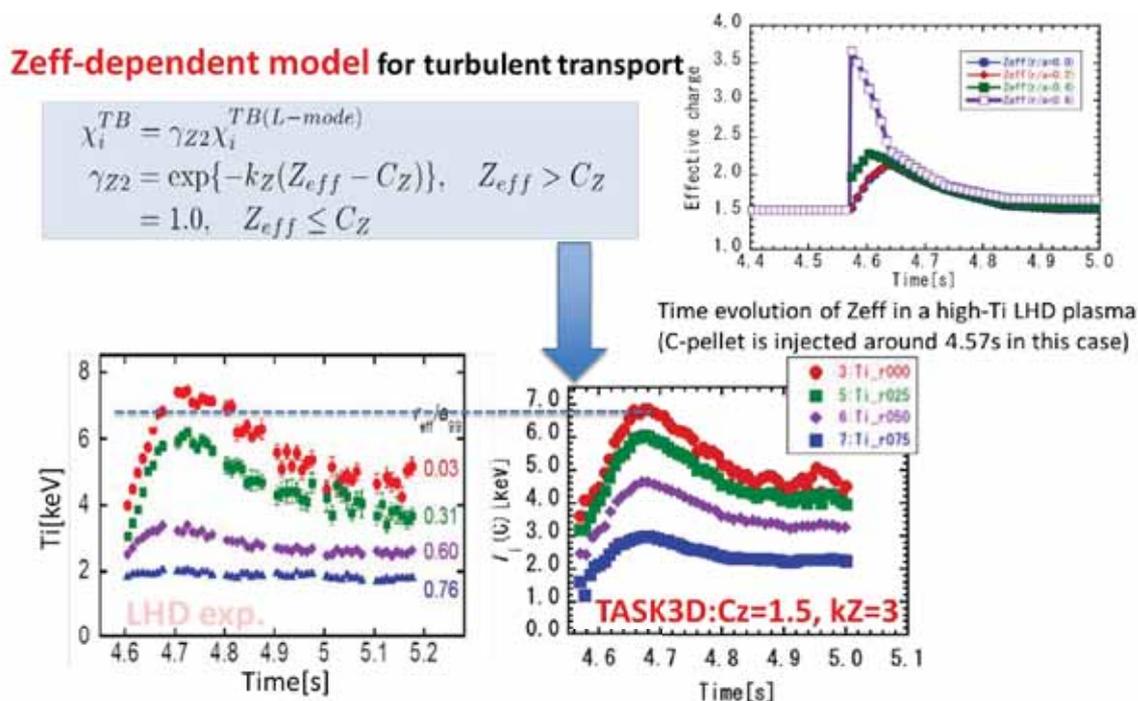


図 3.2.2.3-2 LHD 高イオン温度プラズマにおけるイオン温度変化を再現するイオン熱輸送モデリングの概要。(右上)炭素ペレット入射による高イオン温度放電でのペレット入射後の Z_{eff} の時間変化。左上に記載されているイオン熱輸送係数を用いた計算を行ったところ、イオン温度の時間変化 (左下: 実験計測) をほぼ再現する結果 (右下) を得ることができた。

また、核融合研における到達パラメータ予測型統合計算システムの構築も大きな進展をみせている。核融合工学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 FFHR-d1 設計グループと統合輸送シミュレーショングループとの連携による、FFHR-d1 立ち上げシナリオの定量解析である。まさに、数値試験炉としての基盤整備の観点からの研究連携である（平成 24 年度外部評価指摘事項 1）、3）への対応）。

核融合工学プロジェクトでは、LHD での密度・温度分布を直接外挿する手法（Direct Profile Extrapolation：DPE、J.Miyazawa et al., Fusion Engineering and Design, 86 (2011) 2879.）によって、径方向の熱・粒子輸送拡散方程式を解くコード体系の構築を開始していた。ペレット入射による粒子供給に関して NGS モデルを適用して、ペレット入射 LHD プラズマの密度・電子温度の時間変化を再現するなど、実験検証を行いながらの構築が進んでいた。このコード体系を FFHR-d1 の立ち上げシナリオ検討に適用するに当たり、新古典エネルギー輸送フラックスがプラズマのエネルギーバランスを満たしているかどうかを定量的に評価するために、TASK3D-a のモジュール（VMEC コード、Boozer 座標への変換コード、さらに GSRAKE コード）を移植した。これにより、密度・温度の時間発展に伴う新古典エネルギーフラックスの逐次計算が可能となり、エネルギーバランス成立性を探る複数のシナリオ比較が容易に行えるようになった。このプロジェクト間連携の成果は、2014 年の IAEA 核融合エネルギー会議における核融合研：後藤拓也助教筆頭のポスター発表、さらには 2015 年の NUCLEAR FUSION 論文として発表された。図 3.2.2.3-3 にこのプロジェクト間連携の概要を示す。

さらに、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、新古典エネルギーフラックスがエネルギーバランスを満たしうる境界線を明示するなど、単体の新古典輸送計算では困難である検討も行われ、その成果も含む FFHR-d1 コアプラズマ設計の最新の知見が、2015 年の第 20 回国際ステラレータ-ヘリオトロンワークショップにて、招待講演として後藤拓也助教によって発表された。発表の中でも、数値実験炉プロジェクトとの連携の成果であることが強調された。本プロジェクト間連携をさらに進め、核融合研における予測型統合輸送コード（数値試験炉の基盤）として整備・拡張していく検討を行っている。（平成 24 年度外部評価指摘事項 3）への対応）。

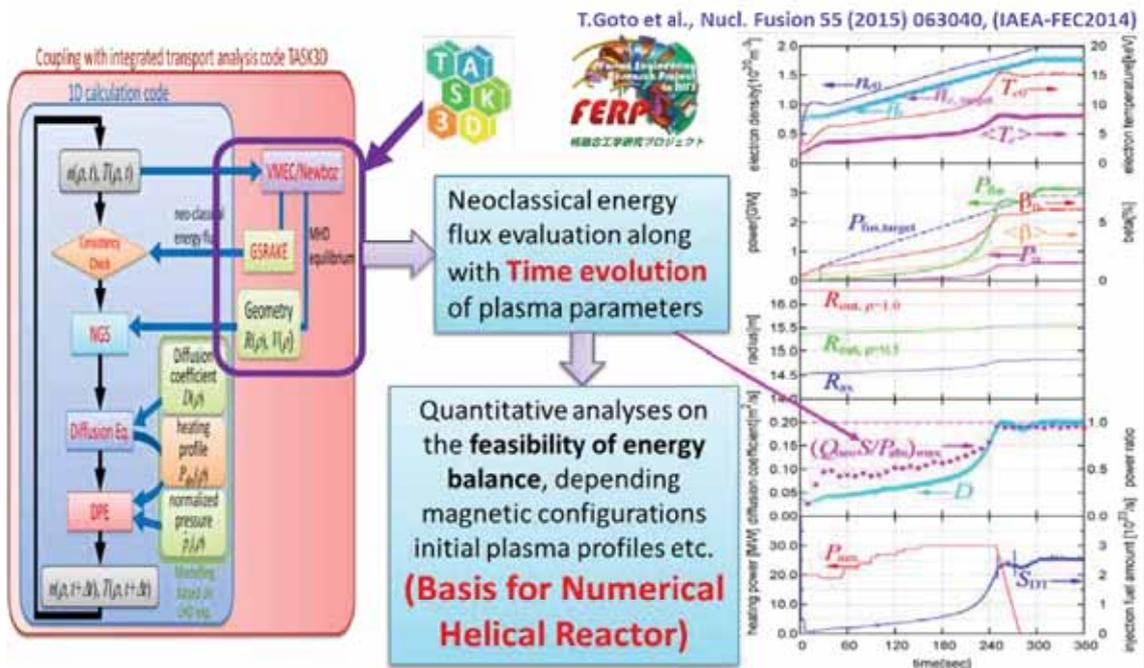


図 3.2.2.3-3 FFHR-d1 立ち上げシナリオ検討に当たり、TASK3D-a のモジュールを移植し、逐次、新古典エネルギーフラックスの計算が行える環境を整備した。このことにより、時間発展を伴う立ち上げ時のエネルギーバランス成立性のシナリオ比較などが容易に行えるようになった。

3.3 核融合プラズマの物理機構解明

3.3.1 MHD 平衡と安定性

・LHD 磁気軸スイング実験のシミュレーション

LHD 実験では、真空磁気軸位置 (R_{vax}) に対する安定限界を調べるために、磁気軸スイング放電が行われた [3.3.1-1]。この実験では、放電中に垂直磁場を実時間制御して、対応する真空磁気軸位置を $R_{vax} = 3.6\text{m}$ から 3.5m まで磁気軸を内側へスイングさせている。このとき、 $R_{vax} = 3.54\text{m}$ 付近において、急激な中心領域でのコア崩壊現象が観測された。また同時に、 $m = 2/n = 1$ の磁場揺動が顕著に観測されている。そこで、このコア崩壊現象のメカニズムを解明するために、簡約化 MHD 方程式に基づく NORM コード [3.3.1-2] を用いた非線型 MHD シミュレーションを行った。このシミュレーションにおいては、磁気軸スイングに対応する背景磁場の変化を取り入れることが本質的となる。ところが、この背景磁場はプラズマのダイナミクスに比べてはるかに長い時間スケールで変化している。そこで、この変化を取り入れるために、これまで開発してきた平衡磁場計算と非線型ダイナミクス計算を交互に繰り返すマルチスケール手法を、さらに拡張した [3.3.1-3]。今回拡張した点は、平衡計算の際にダイナミクス計算による回転変換の変化分を取り入れたこと、及び初期条件として圧力分布には実験に対応し分布を利用し回転変換分布には交換型モードが非線型飽和したときにえられる分布を採用したことが挙げられる。

このシミュレーションの結果、図 3.3.1-1 に示すように、磁気軸スイングのない場合にはプラズマは安定であるが、磁気軸スイングを行った場合には崩壊現象が生じるという、実験結果を再現する結果が得られた。磁気軸スイングを行った場合では、コア領域の圧力崩壊により、中心ベータ値が大きく低下するが、シミュレーションでも $R_{vax} \simeq 3.55\text{m}$ で中心ベータの急激な低下が得られており、少し不安定な結果となっているが、実験とよく一致していると言える。また、図 3.3.1-2 に示すように、この崩壊現象前後での圧力分布の変化においては、定性的には一致しているが、実験に比べ中心圧力低下がやや小さい結果が得られた。さらに、実験では、加熱効果によってベータ値は再度上昇し崩壊が繰り返されることが得られており、この現象も今回定性的に再現できた。ただし、崩壊の繰り返しの周期は一致させることはできなかった。

この崩壊を引き起こした摂動が $m = 2/n = 1$ 成分が支配的なインファナルモードであることも得られている。このモード数は観測された磁場揺動モード数に対応している。このインファナルモードは圧力駆動型モードであり、磁気丘の影響を強く受ける。このような内寄せ磁気軸スイングの場合には磁気丘が強くなるため、この磁気

丘の変化がインファナルモードを不安定化したと考えられる [3.3.1-3]。

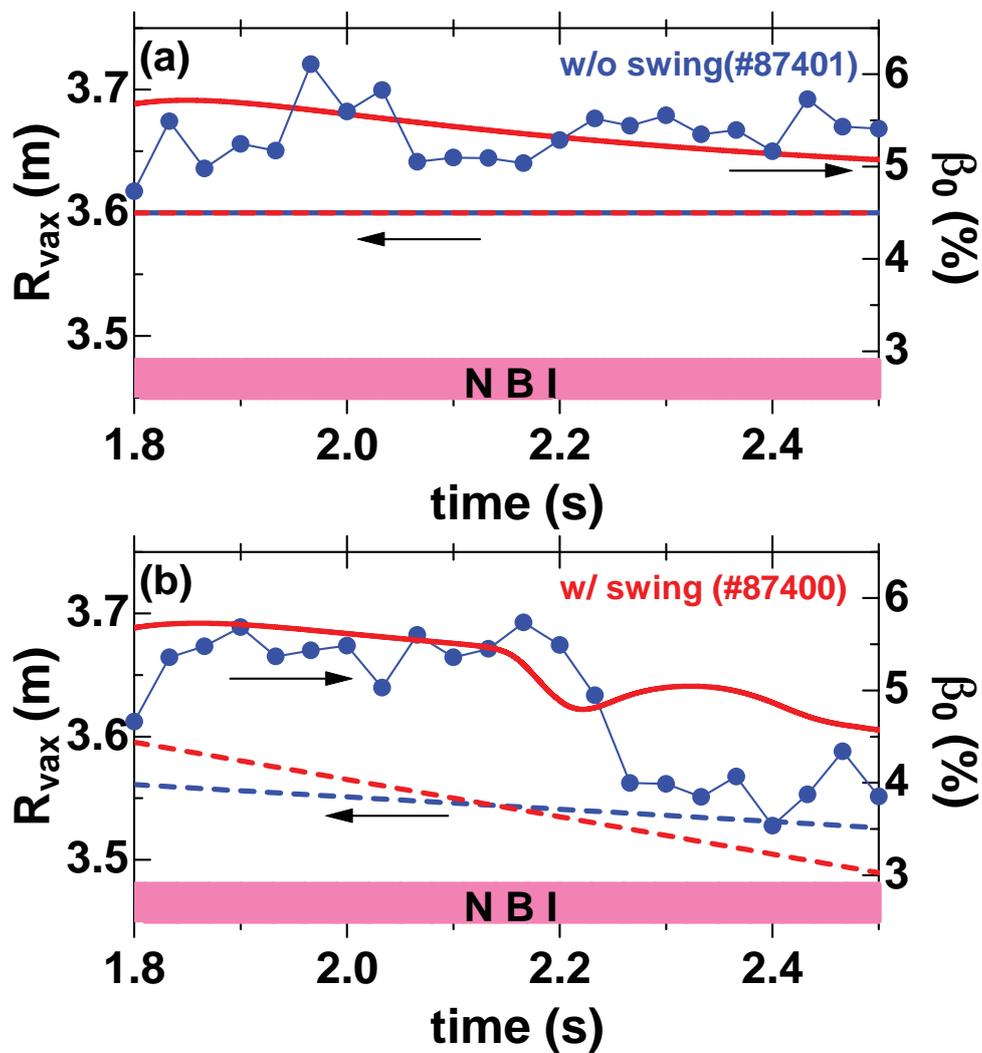


図 3.3.1-1 磁気軸スイングなし (a) とあり (b) での中心ベータ値 (実線) 及び対応する真空磁気軸位置 (破線) の時間発展。青線は実験値、赤線はシミュレーション結果を示す。

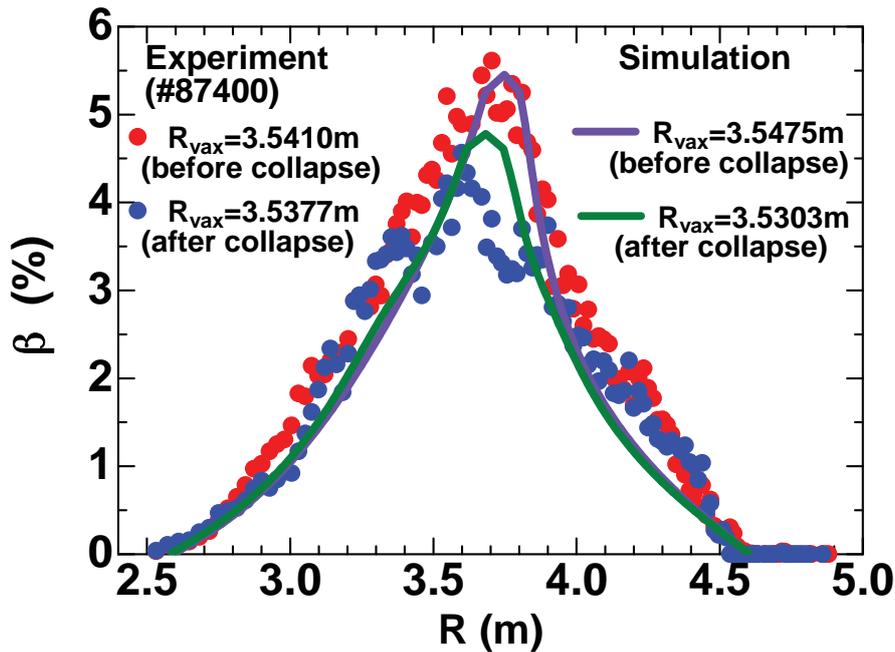


図 3.3.1-2 磁気軸スイング時の崩壊前と崩壊後の圧力分布。

・LHD プラズマの圧力駆動型モードに対する誤差磁場の影響

LHD では、誤差磁場の存在が実験的に確認されており、 $m = 1/n = 1$ の成分が支配的となっている。そこで本研究では、 $R_{ax} = 3.6\text{m}$, $\gamma_c = 1.13$ の磁場配位において、共鳴摂動磁場を含む LHD プラズマの MHD 特性を三次元コードを用いて解析した。誤差磁場が存在する場合には、それによって磁気面形状に擾乱が生じる。従って、VMEC のような入れ子状の磁気面を仮定した平衡計算コードは適用できない。また、この磁気島構造と矛盾のない圧力分布を持つ平衡解を得なければならない。一方、HINT コードでは、入れ子状の磁気面の存在を仮定していないため磁気島を含む平衡解を計算でき、同時にこの磁場構造に対応する圧力分布が自動的に決まる。そこで、本研究では、HINT コードを用いて平衡計算を行った。水平方向に一律な誤差磁場を仮定して平衡計算を行った結果、図 3.3.1-3 に示すように、 $m = 1/n = 1$ の構造を持つ磁気島が存在する平衡が得られた。このとき、圧力分布は磁気島内部で局所的な平坦構造を持っている。

この平衡解における三次元安定性を MIPS コードを用いて解析した。MIPS コードでは、HINT コードと同じ円柱座標を用いているため、HINT コードによる平衡解の安定

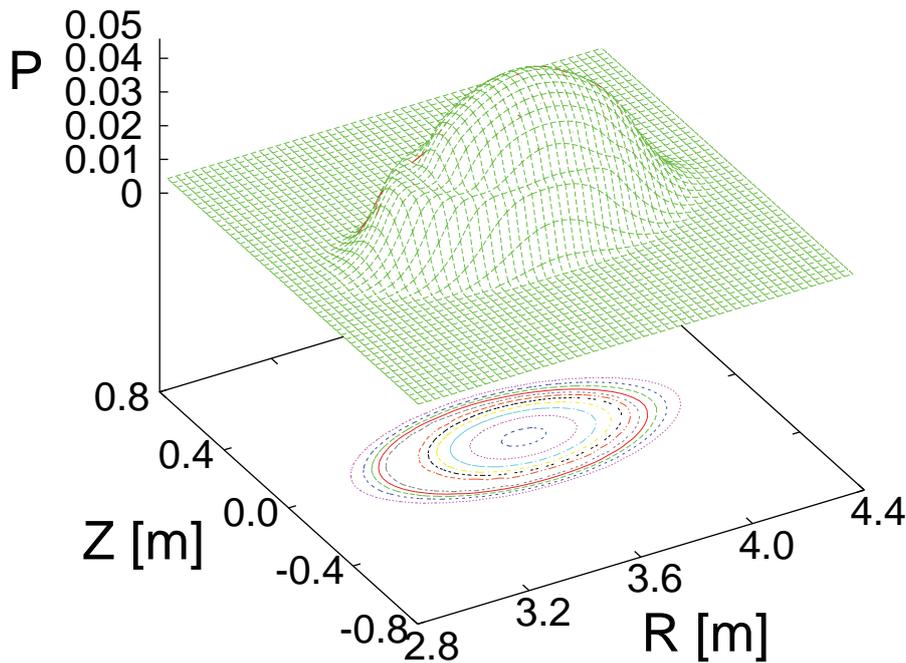


図 3.3.1-3 RMP 印加時の平衡圧力分布の鳥瞰図と等高線。

性をそのまま計算できるという利点がある。今回用いた磁場配位は、誤差磁場が無い平衡では、交換型モードに対して不安定になる事が得られている。この場合、ポロイダル断面において、摂動圧力のモードパターンはポロイダル方向にほぼ一様に分布する。これに対し、誤差磁場が存在する平衡においては、図 3.3.1-4 に示すように、摂動が磁気島の X-点近傍に局在するようなモード構造を持つモードが最も線型不安定になることを見出した。磁気島形状において、O-点近傍では圧力勾配が小さいのに対し、X-点近傍では圧力勾配が大きい。従って、この構造を持つことによって、最も効率よく不安定エネルギーを利用することができる。

さらに非線型ダイナミクスにおいては、線型モード構造から予想されるように、摂動磁場によって形成される磁気島の X 点近傍から崩壊が生じて全体に広がっていく結果が得られている。従って、モード構造のトロイダル及びポロイダル方向の空間的位相は、磁気島の幾何学的形状によって固定される。一方、誤差磁場が無い場合でも交換型モードが崩壊現象を引き起こすが、その場合にはそのような特別な位相は存在しない。LHD 実験においては、誤差磁場がキャンセルされる場合とそのまま残っている場合についてプラズマ圧力の崩壊現象が比較されている [3.3.1-4]。誤差磁場がキャンセルされている場合には、崩壊時のモード構造がトロイダル方向に散乱して分布しているのに対し、誤差磁場が存在する場合には、トロイダル方向において局在すること

が観測されている。従って、このモードの局在は、本研究で見出されたメカニズムによるものと考えられる [3.3.1-5]。ただし、誤差磁場が無い場合の不安定モードのモード数が、実験では $m = 1/n = 1$ であるのに対し本研究では、 $m = 2/n = 2$ であり、必ずしも一致していない。この差異は、数値的な困難によるものであり、今後、数値計算手法のさらなる改善を行うことにより、より実験に即した解析を進める予定である。

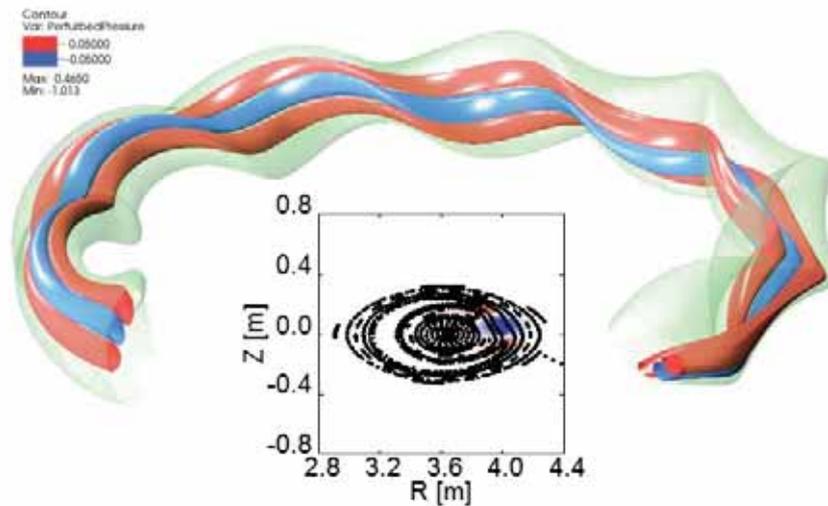


図 3.3.1-4 RMP 印加時の摂動圧力の線型モードパターン (赤及び青の領域) の三次元図と、横長ポロイダル断面でのモードパターン及び磁力線ポアンカレプロット。モードパターンにおいて赤及び青は符号が異なることを示す。

・ FFHR における三次元 MHD 安定性解析

ヘリオトロン型 DEMO 炉として設計が進められている FFHR-d1 の三次元線型安定性の解析を行った。今回は、文献 [3.3.1-6] に示されている、FIS-HA-MPD の平衡の安定性を調べた。三次元平衡計算には HINT コードを用い、安定性解析には MIPS コードを用いた。この安定性解析では、電気抵抗、粘性、熱伝導の効果を検討した。電気抵抗には、主半径 $R_{c,reactor} = 15.6\text{m}$ 、磁場強度 $B_{c,reactor} = 4.7\text{T}$ 、及び文献 [3.3.1-6] の Figure 2 に示されている電子密度 $n_e = 2.5 \times 10^{20}\text{m}^{-3}$ 、電子温度 $T_e = 11\text{keV}$ に対応する値を用いた。また、磁場に垂直方向の熱伝導係数は、 $\kappa_{\perp} = 1\text{m}^2/\text{sec}$ を仮定し、磁場に平衡方向の熱伝導係数 κ_{\parallel} に対しては、数値安定性が確保できる大きな値として、 $\kappa_{\parallel} = 2.58 \times 10^4 \kappa_{\perp}$ を用いた。このときの MHD 不安定性の成長率の粘性 ν に対する依存性を図 3.3.1-5 に示す。ここで、成長率及び粘性は、それぞれ、アルベン速度 V_A を用

いて、 $V_A/R_{c,reactor}$ 及び $R_{c,reactor}V_A$ で規格化されている。また、 $\nu = 10^{-6}$ 及び 3×10^{-4} での、摂動圧力のモードパターンも示している。この図より、 $\nu \leq 3 \times 10^{-4}$ で、交換型モードが不安定である結果が得られている。スラブ配位での流体乱流解析では、異常粘性として $\nu \sim 10^{-5}$ であることが示唆されている。しかし、トロイダル配位での異常粘性の評価手法はまだ確立されておらず、これよりも大きい可能性がある。その場合、成長率を低減する可能性がある。また、プラズマ中には、径電場による $E \times B$ フローや反磁性フローが存在し得るが、本解析では、これらのシアフローの効果が含まれていない。以下の解析結果にも示されているように、反磁性フローが存在すると、交換型モードに対して安定化の寄与を持つ可能性がある。 $E \times B$ フローにも同様の安定化寄与が期待される。従って、今後は、粘性及びシアフローの効果を適切に取り入れる手法を確立し、FFHR-d1 に対して精度の高い予測を行うことが必要であると考えている。

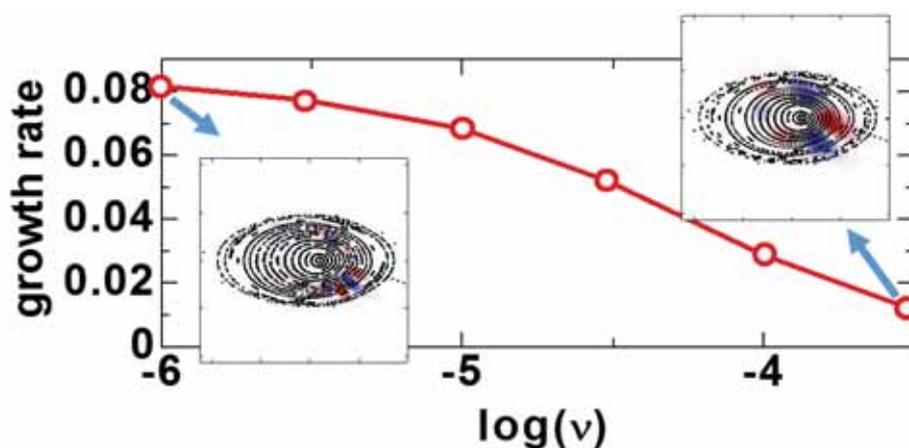


図 3.3.1-5 FFHR-d1(FIS-HA-MPD) の線型成長率の粘性依存性、及び、 $\nu = 10^{-6}$ 及び 3×10^{-4} での摂動圧力のモードパターン。

・LHD における理想交換型モードの電子反磁性方向回転メカニズムの解明

本研究では、LHD における交換型不安定性の成長率と実周波数に対する反磁性効果や熱拡散の効果を解析した。その結果、これまでになかった新しい性質を見出した。LHD における交換型モードの安定性は完全には解明がなされていない。特に、モードの反磁性回転による影響はその中の一つである。LHD 実験においては、モードの回転が無くなると同時にモードが急激に成長する現象が観測されている。その現象はモードロッ

キングと呼ばれて、圧力崩壊を引き起こす。また、これまで知られている理論によると、反磁性回転方向はイオン方向になるはずであるのが、実験では、電子反磁性方向に回転していることが報告されている。従って、反磁性回転による安定性への寄与とモードの回転方向の解明は重要な課題である。本研究では反磁性効果を含む安定性解析を行い、交換型不安定性の成長率及び実周波数が熱拡散係数によって変化することを明らかにした。

ここでは、線型簡約化MHDコードを用いて、理想交換型モードが不安定な平衡での線型固有値解析を行った。特に、磁力線に垂直方向の熱拡散、粘性、反磁性効果が固有値に与える影響について注目した。まず、熱拡散が与える影響について調べた。一般に、熱拡散は安定化の寄与を持ち、その係数が大きくなるにつれて第1固有値の成長率は小さくなることが知られている。今回、第2固有値も同時に調べることで、もっと複雑な振舞いがあることがわかった。図 3.3.1-6 に示すように、熱拡散係数を大きくすると、第1固有値の成長率は減少するが、同時に第2固有値の成長率は増加する。そして、熱拡散係数 χ_{\perp} がある限界値、 χ_c 、以上になると、両者の成長率は融合することが得られた。一方、モードの回転周波数に対応する固有値の実周波数は、 $\chi_{\perp} < \chi_c$ では、第1固有値と第2固有値は理想モードのようにどちらもゼロである。しかし、 $\chi_{\perp} = \chi_c$ で成長率の融合が生じると同時に実周波数の分岐が生じ、絶対値は同

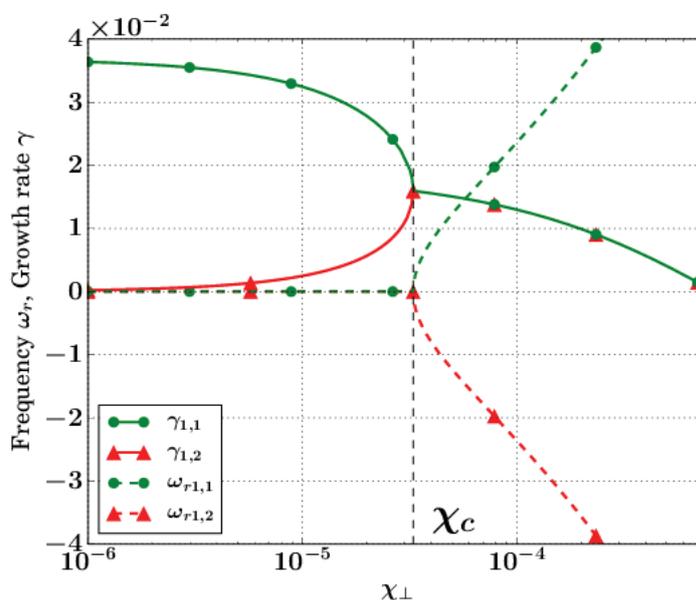


図 3.3.1-6 交換型不安定性の第1固有値(緑)と第2固有値(赤)の成長率(γ 、実線)及び実周波数(ω_r 、破線)の熱拡散係数 χ_{\perp} に対する依存性。

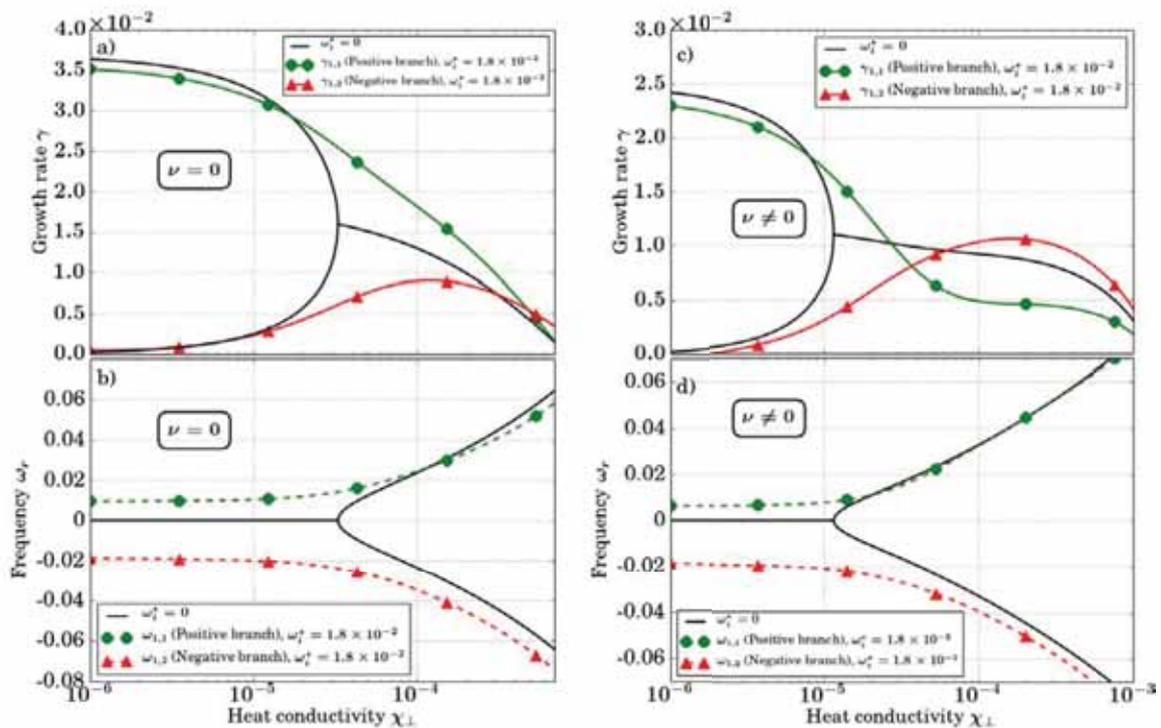


図 3.3.1-7 成長率や実周波数に対する反磁性効果の影響。粘性 ν が無い場合の成長率 (a) と実周波数 (b)、十分大きな粘性が有る場合の成長率 (c) と実周波数 (d)。粘性が無い場合は、イオン反磁性方向に回転するモードが支配的であるが、十分大きな粘性が有る場合、成長率は逆転し電子反磁性方向に回転するモードが支配的になりうる。

じで符号が異なる値を持つ。ここで、正及び負の値は、それぞれ、イオン反磁性方向及び電子反磁性方向に対応する。 $\chi_{\perp} > \chi_c$ では、成長率が等しく反対方向の回転周波数を持つ2つのモードが共存するため、モードの回転方向は決まらない。

この状況において、反磁性効果を導入した。この場合、図 3.3.1-7 (a) に示すように、 $\chi_{\perp} > \chi_c$ において2つの固有値の成長率の融合が外れて両者は分離する。また、図 3.3.1-7 (b) に示すように、実周波数も $\chi_{\perp} < \chi_c$ においても分離している。この場合、第1固有値の実周波数は常に正の値を持ち、第2固有値の実周波数は常に負の値を持つ。即ち、最大成長率を持つモードはイオン反磁性方向に回転することになる。

さらに、十分大きな粘性を加えると、この状況は変化する。図 3.3.1-7 (d) に示すように、実周波数の傾向は粘性が無い場合と同じである。しかし、図 3.3.1-7 (c) に示すように、熱拡散係数がある値より大きくなると、2つのモードの成長率は、大小関係が逆転する。従って、この大きな熱拡散係数の領域では、電子反磁性方向に回転するモード

が支配的となる。このように、熱拡散と粘性とが同時に加わることによって、実験において電子反磁性方向に回転するモードが観測されていると考えられる。full-MHD方程式を解く MIPS コードを用いた計算結果でも、同様の結果が得られている [3.3.1-7]。

・抵抗性インターチェンジモードの伝播のシミュレーション研究

二流体効果は MHD 不安定性の安定性に影響を及ぼす他、モードの回転を引き起こしうる。線形解析によれば、抵抗性インターチェンジモードは電子の反磁性ドリフト方向に回転し、その速度は電子の流体速度よりも小さいことがわかっている。一方、LHD 実験によれば抵抗性インターチェンジモードは電子の流体速度と同じ速度で回転していることが観測されている。したがって、実験で観測されるモードの回転速度は線形解析だけで説明することはできず、非線形的に決定されるものであることを示唆していると考えられる。実際、二流体効果を含まない 3 場モデルによる抵抗性インターチェンジモードのシミュレーションでは、非線形的に磁気島が発生する結果が得られており、このような磁気島の形成はモードの回転に強く影響を及ぼしていると考えられる。そこで本研究では、LHD 実験で観測されているモードの回転メカニズムを明らかにするために、二流体効果を含んだ 4 場モデルを用いて抵抗性インターチェンジモードの非線形シミュレーションを行った。

(x, y) 平面でのスラブプラズマを考え、 $x = 0$ および $x = 1$ に固定境界を課し、 y 方向は周期境界条件を課した。初期平衡状態においては、 $x = 0.5$ で磁場強度が 0 となるような tanh 型の磁場強度分布を仮定した。ただし、電流勾配は 0 とすることにより、テアリングモードに対しては安定な系を考えている。圧力分布に対しても tanh 型の分布を仮定し、 $x = 0$ にて圧力がもっとも高く、 x が増加するにつれて単調減少するような分布を仮定した。また、磁場の曲率に由来する実効的な重力が x 方向に存在すると仮定した。 $x = 0.5$ でのベータ値を 0.5% とし、抵抗性インターチェンジモードが線形不安定である場合を考えた。このとき、線形シミュレーション解析から抵抗性インターチェンジモードの実周波数が、電子の流体速度の約 60% であることがわかった。また、高次モードは二流体効果と有限の散逸の効果により安定化されることがわかった。

線形段階においては、磁気中性面 ($x = 0.5$) での磁気フラックスの摂動成分は 0 であり、磁気島は生じない。しかしながら、非線形段階においてモードカップリングにより低次モードの磁気島が生ずる。図 3.3.1-8 では、 $\delta = 0.08$ および $\delta = 0.02$ の場合に対する非線形飽和状態での磁気面の様子を表したものである。ここで δ は装置のスケール長に対するイオンのスキン長の比である。 $\delta = 0.08$ では 2 つの磁気島が、 $\delta = 0.02$ では 1 つの磁気島が形成されていることがわかる。

非線形状態においては、磁気島内部の圧力分布が平坦化されるため、磁気中性面での電子の反磁性ドリフト速度は減少する。一方、イオンの反磁性ドリフト方向に $E \times B$ フローが形成されるようになり、電子の流体速度はこれらの速度の和となる。飽和状態での磁気島の幅は、二流体効果のパラメータ δ に依存する。 δ の値を変えた非線形シミュレーションを行い、得られた飽和状態での磁気島の幅と磁気島の伝播速度の関係を図 3.3.1-9 に示す。磁気島の幅が小さいときは、磁気島の伝播速度は電子の流体速度（電子の反磁性ドリフト速度と $E \times B$ フローの和）よりも小さいままである。しかしながら、磁気島の幅が大きくなるにつれて、伝播速度は電子の流体速度に近くなる。このように、LHD 実験でみられる抵抗性インターチェンジモードの回転速度は、非線形的に磁気島が形成されモード構造が変化することで説明できることを明らかにした。

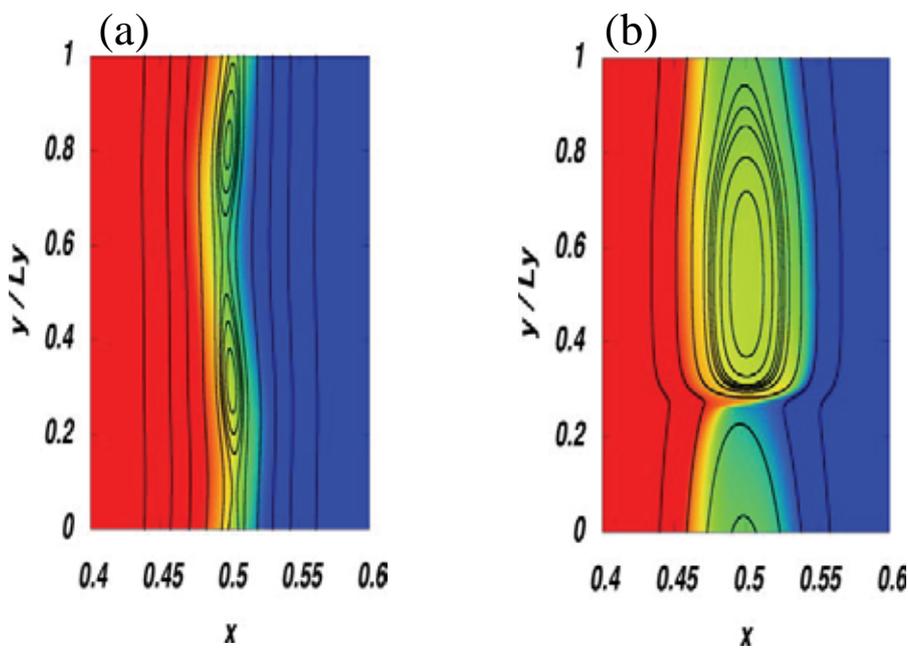


図 3.3.1-8 (a) $\delta = 0.08$ と (b) $\delta = 0.02$ における飽和状態での磁気面と圧力分布。赤い領域（青い領域）は高圧力（低圧力）の領域に対応する。

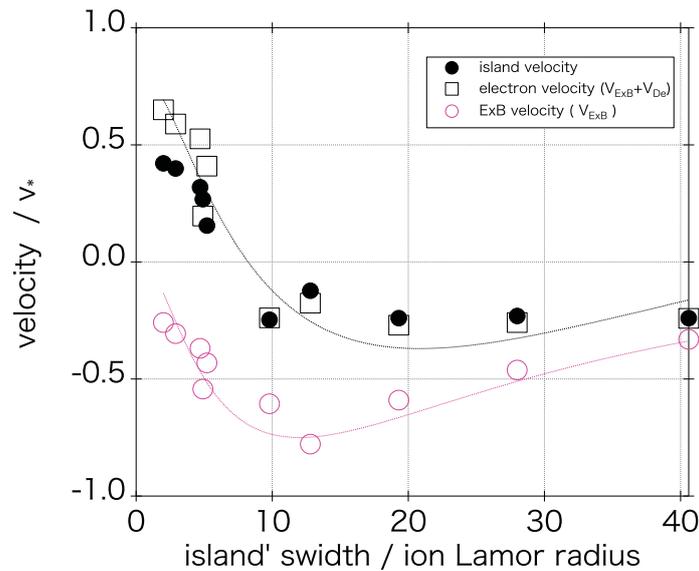


図 3.3.1-9 磁気島の幅に対する磁気島の伝播速度の依存性。電子の流体速度及びE×Bフロー速度もプロットしている。正(負)の速度は電子(イオン)の反磁性ドリフトの方向に流れていることに対応する。

・磁気島の成長とヒーリングの数値シミュレーション

LHDにおける $n = 1$ 磁気島の成長及びヒーリングの機構とともに磁気島の閉じ込め悪化への影響を、数値シミュレーションおよび理論により理解および予測する事を目指して研究を進めている。特に、磁気島周辺の径電場、温度および密度分布に着目し、従来の理論モデルでは難しかった磁気島成長およびヒーリングの理解を行った。

第一に、従来はイオン温度が0であったことを仮定せずに数値シミュレーションを行い、有限イオン温度に起因する新たな磁気島成長の機構を明らかにした。この新たな成長機構は分極電流による磁気島駆動効果である。分極電流は磁気島の成長またはヒーリングを決定する中心的役割を果たす。分極電流を評価するためには磁気島と流れとの相互作用を理解しなければならない。このときに有限イオン温度による反磁性流が決定的な役割を果たす。JIFT研究者派遣に基づいてテキサス大学と共同研究を行い、磁気島成長に重要な分極電流による磁気島成長効果を明らかにした(図 3.3.1-10) [3.3.1-8]。さらに、分極電流効果がヒーリングに寄与する場合であっても、磁気島の背景にイオン温度勾配不安定性駆動乱流がある場合、乱流は分極電流効果を通じて磁気

島を成長させることが新たに明らかにした(図 3.3.1-11) [3.3.1-9]。そして、イオン温度勾配不安定性乱流により巨視的な MHD 現象に対する乱流粘性の値を新たに評価することに成功した(図 3.3.1-12) [3.3.1-9]。乱流粘性はジャイロボームで 0.2 (MHD 規格で 10^{-5}) 程度である。この乱流粘性値は今後の MHD シミュレーションにおける粘性の一つの参照値として非常に有用である。また、高温プラズマにおける磁気島生成に重要となる電子慣性効果による磁気リコネクションの運動論シミュレーションを行い、新たなエネルギー変換過程を明らかにした [3.3.1-10]。

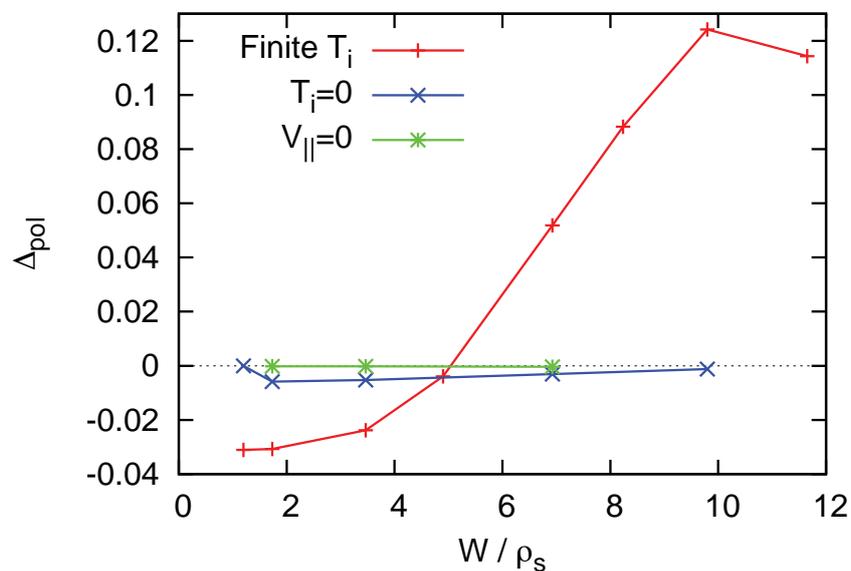


図 3.3.1-10 磁気島の成長およびヒーリングにおける分極電流効果が重要性を示唆。冷たいイオン近似を用いない場合、磁気島幅がラーマー半径の 5 倍以上であると磁気島が不安定になる。

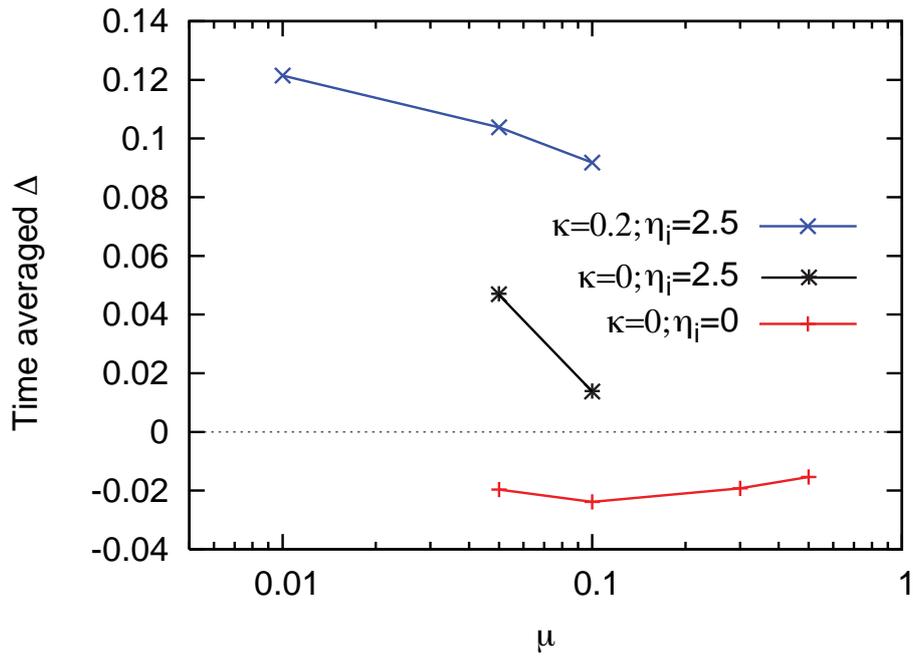


図 3.3.1-11 イオン温度勾配乱流に影響された磁気島の成長を調べた。乱流は分極電流効果により磁気島を駆動する。

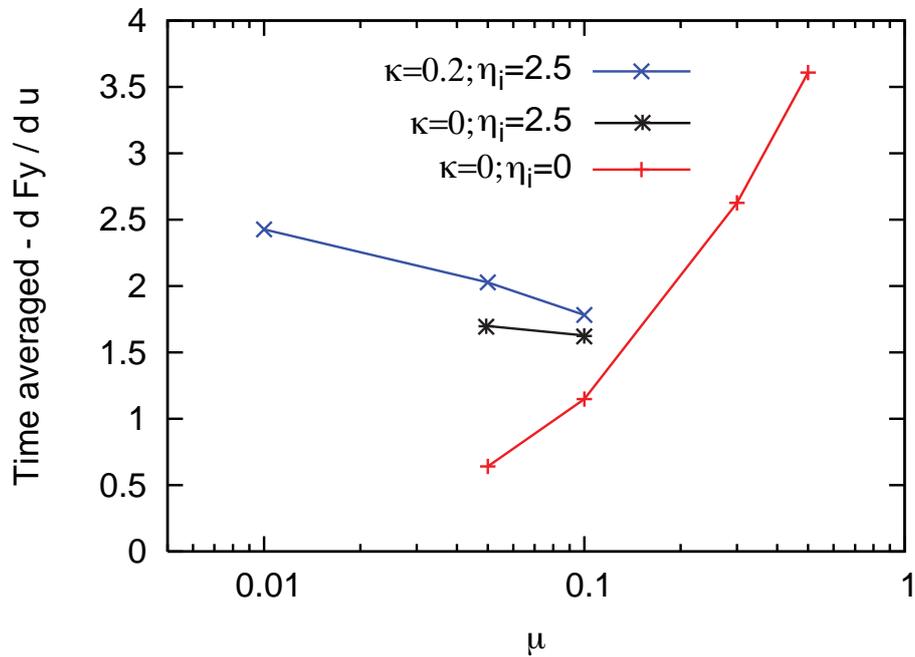


図 3.3.1-12 イオン温度勾配不安定性乱流による乱流粘性の値を評価した。乱流粘性はジャイロボームで 0.2 (MHD 規格で 10^{-5}) 程度である。

・LHDにおけるペレット入射シミュレーション

ペレット入射により生成される低温高密度のプラズモイドの挙動はトカマクとLHDでは異なる。これは磁場の結合長が異なるためであることがこれまでの研究で明らかになった。トカマクではプラズモイドが低磁場方向にドリフトすることが明らかになっているが、LHDにおいては、プラズモイドの位置によっては低磁場方向にドリフトしない場合もある [3.3.1-11]。このメカニズムについて解明した [3.3.1-12]。

LHDにはトロイディシティによる磁場強度とヘリシティによる磁場強度がある。図 3.3.1-13 (a) と (b) は横長ポロイダル断面と縦長ポロイダル断面を示しており、それぞれにプラズモイド1、2が位置している。プラズモイド1はトロイディシティ高磁場側、かつヘリシティ低磁場側に位置しており、プラズモイド2はトロイディシティ高磁場側、かつヘリシティ高磁場側に位置している。これらのプラズモイドの磁気面平均密度の時間発展を図 3.3.1-14 (a) と (b) に示す。横軸は規格化小半径である。プラズモイド1は小半径方向(大半径負方向)、つまり低磁場方向にドリフトしているが、プラズモイド2は小半径負方向にドリフトした後、正方向(大半径負方向)、つまり高

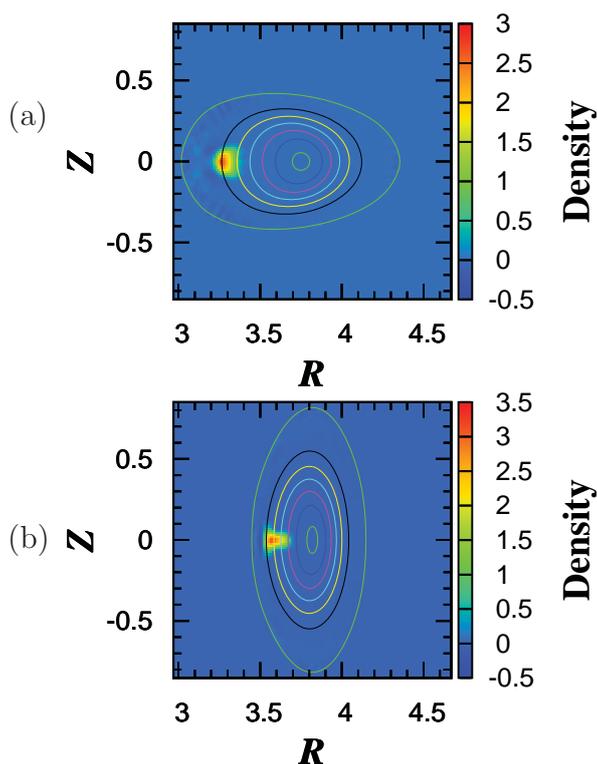


図 3.3.1-13 (a) 横長ポロイダル断面における $t = 20\mu s$ のプラズモイド1の密度分布。(b) 縦長ポロイダル断面における $t = 20\mu s$ のプラズモイド2の密度分布。

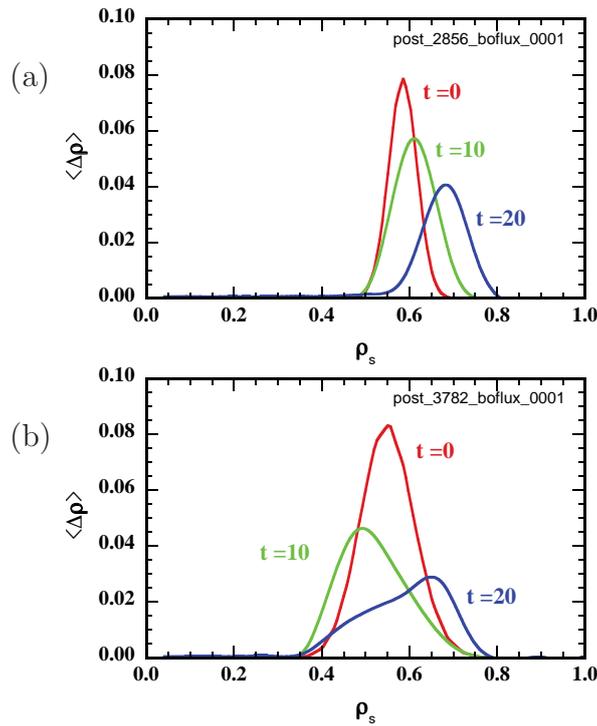


図 3.3.1-14 (a) Boozer 座標におけるプラズモイドの磁気面平均密度の時間発展。横軸は規格化小半径、(a)(b)はそれぞれプラズモイド 1, 2 を示す。

磁場方向にドリフトしている。このことは、プラズモイドの挙動は初期位置によって異なることを意味する。プラズモイドには、主に $1/R$ による力と磁場の復元力による力が働く。結合長が長いトカマクにおいては前者が相対的に大きくなり、常に大半径方向へドリフトする。一方で、プラズモイド 1, 2 においては結合長が短く、後者がプラズモイドの運動を支配する。後者、つまりこの磁場の復元力は、プラズモイドの位置における低磁場方向の向きに加えて、磁力線に沿った磁場強度分布によって決まる。プラズモイド 1 においては、低磁場方向は大半径負方向であり、磁力線に沿った磁場強度は極小になっている。溶発により磁力線方向に膨張するプラズモイドは、磁力線に沿って磁場強度が大きくなるため、その運動が妨げられる。これが結果として大半径負方向へのドリフトを生じさせる。一方で、プラズモイド 2 においては、低磁場方向は大半径正方向であり、磁力線に沿った磁場強度は極大になっている。つまりドリフト方向を決定する磁場の二つの効果がプラズモイド 1 とは全く逆であるため、逆の逆は同じとなりプラズモイド 1 と同じ大半径負方向にドリフトする。これが高磁場方向にドリフトするメカニズムである。今後は、実験でのペレット入射に対応したモデルに拡張し、RMP の影響などを評価していく。

- [3.3.1-1] S. Sakakibara., et al., Proc. 23rd Fusion Energy Conf. Oct.11-16, 2010, Daejeon, EXS/P5-13.
- [3.3.1-2] K. Ichiguchi, et al., Nucl. Fusion 43 (2003) 1101.
- [3.3.1-3] K. Ichiguchi, et al., Nucl. Fusion, 55, (2015) 043019.
- [3.3.1-4] S. Sakakibara, et al., Nucl. Fusion, 53, (2013) 043010.
- [3.3.1-5] K. Ichiguchi, et al., Nucl. Fusion, 55, (2015) 073023.
- [3.3.1-6] J. Miyazawa, et al., Nucl. Fusion, 54, (2014) 043010.
- [3.3.1-7] T.Nicolas, et al., Plasma and Fusion Research, 10, 3403018 (2015).
- [3.3.1-8] A. Ishizawa, F. L. Waelbroeck, R. Fitzpatrick, W. Horton, and N. Nakajima, Phys. Plasmas, 072312 (2012)
- [3.3.1-9] A. Ishizawa and F. L. Waelbroeck, Physics of Plasmas, 20, 122301 (2013)
- [3.3.1-10] A. Ishizawa and T.-H. Watanabe, Physics of Plasmas, 20, 102116 (2013)
- [3.3.1-11] R. Sakamoto et al, “Observation of pellet ablation behavior on the Large Helical Device”, Nucl. Fusion Vol.44 (2004) pp.624~630.
- [3.3.1-12] R. Ishizaki and N. Nakajima, “MHD simulation of pellet injection in the LHD”, Plasma Fusion Res. Vol.9 (2014) pp.3403130(1~5).

3.3.2 コアプラズマの粒子・熱輸送

3.3.2.1 新古典輸送計算における磁気ドリフト項の重要性

ヘリカルプラズマにおける新古典輸送は、3次元磁場配位中における荷電粒子のガイディングセンタードリフト運動と、特にヘリカル磁場リップルに捕捉された粒子のクーロン散乱によって決まるが、ヘリカル装置が作る磁場配位の特徴や、衝突周波数領域、両極性径電場による $E \times B$ ドリフト速度の大小など、様々な因子に強く依存する。そのため、ガイディングセンター運動に対して様々な近似を行ってこれを解く従来の数値解法には近似に起因する誤差が含まれるが、それがどの程度定量的な精度に影響するかについては、これまでほとんど議論されてこなかった。そうした近似法として広く用いられているものには、ガイディングセンター軌道の小半径方向ドリフトを高次の微小量として無視する局所近似、荷電粒子の運動エネルギーの変化を無視した mono-energy 近似もよく使われる。特に従来の局所近似では、磁場の勾配ドリフト及び曲率ドリフト(磁場ドリフト項)を小半径方向だけでなく磁気面接線成分も含め全部落とす近似が一般的に使われてきた。このように、本来5次元位相空間におけるドリフト運動論方程式によって扱われる新古典輸送現象を、小半径方向座標と運動エネルギーの2つの次元をパラメータ化することで3次元に簡約化した局所近似・mono-energy 近似の新古典輸送計算法(例えばDKESコード、GSRACEコードなど)と、そのような近似を用いず5次元ドリフト運動論方程式を直接解くグローバル新古典輸送計算コード(FORTEC-3D)の計算結果には、特に低衝突領域で $E \times B$ ドリフト速度が大きくない場合に大きな差が生じることがこれまでの研究でわかってきた。しかしながら、両者によって求められる新古典粒子・熱フラックスには様々な近似に基づく差が混在化しており、具体的にどのような因子が最も大きく差異を生じさせているのか特定しづらかった。

そこで、両モデルの間をつなぐモデルとして、磁場ドリフト項の磁気面垂直成分だけを高次の微小量として無視し、磁気面接線成分を残し、かつ運動エネルギーの次元を残すことで結果的にDKESで用いられているような非圧縮 $E \times B$ フローの近似を使わなくてよい、新しい4次元簡約化ドリフト運動論方程式と、それをFORTEC-3Dをベースとした f モンテカルロ法で解く数値手法を開発した [3.3.2.1-1]。この、磁気面垂直成分のドリフト項のみを落としたモデルを Zero-Orbit-Width(ZOW) 近似と呼び、接線成分も含めすべての磁場ドリフト項を落としてしまう従来の Zero-Magnetic-Drift(ZMD) 近似と区別する。こうして、FORTEC-3D コードは5次元のグローバルモデルから、4次元のZOWまたはZMD近似、さらに mono-energy 近似と非圧縮 $E \times B$ フローの近似まで取り入れた3次元のDKES極限と、様々な段階の近似を用いた新古典輸送計算を

1つのコードで行うことが可能となり、それらの比較も統一的行うことができるようになった。

様々なドリフト運動論モデルに基づいてLHD配位におけるイオンの新古典粒子フラックスの径電場依存性を比較したものが図3.3.2.1-1である。ZMDやDKESモデルに見られる、 $E_r = 0$ における粒子フラックスの極端なピークが5次元グローバル計算においては抑制され、またピークの幅が広がって全体に $E_r < 0$ 側にシフトしていることがわかる。また、磁場ドリフトの磁気面接線成分を残したZOWモデルだけが、グ

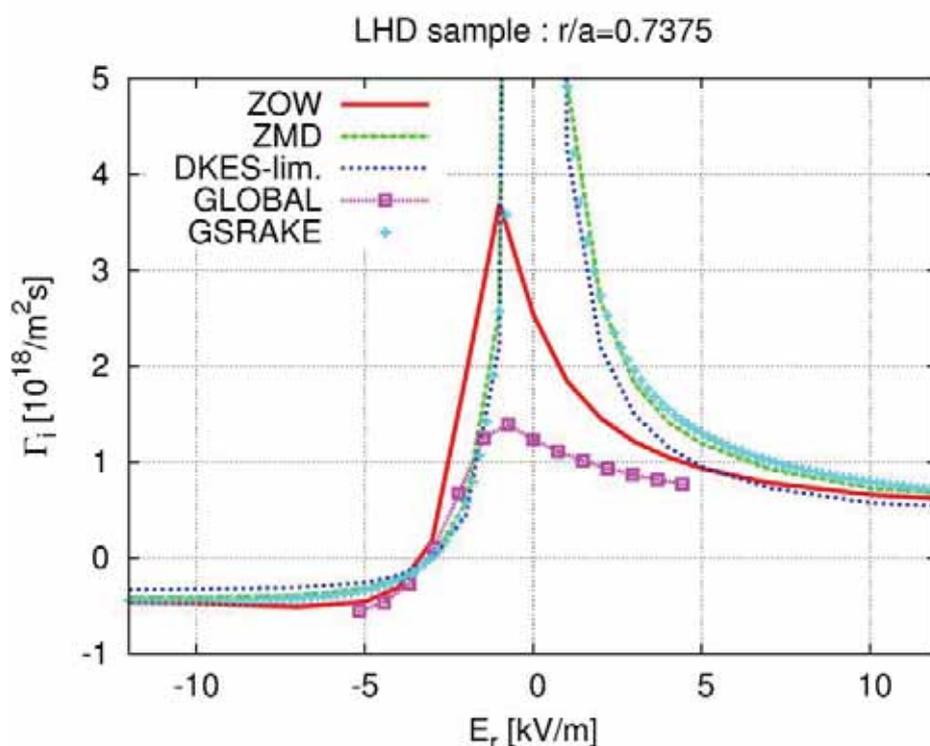


図 3.3.2.1-1 様々な近似モデルのドリフト運動論方程式による新古典径方向粒子束の径電場依存性の比較。ZOW、ZMD、DKES-lim. はそれぞれZero-orbit-width, Zero-magnetic-drift, DKES 極限 (ZMD+非圧縮 $E \times B$ フロー) の局所近似計算法を表す。GLOBAL は5次元FORTEC-3Dコードの結果、GSRAKEは局所近似+バウンス平均の計算法である。磁場ドリフト項を考慮しているGLOBALとZOWモデルだけが、 $E_r = 0$ における極端な Γ_i のピークが緩和されており、磁場ドリフト項の有無が新古典輸送計算に大きく影響することが示されている。

ローバル計算に見られるこの傾向をよく再現することが判った。ヘリカル磁場リップルに捕捉された捕捉粒子のポロイダル方向の歳差ドリフトが、磁場ドリフト項を完全に無視してしまうと $E_r = 0$ において完全にゼロとなり（ポロイダル共鳴）、全ての粒子が大きな径方向輸送に寄与することになってしまう。一方、磁場ドリフトの磁気面接線方向成分の有限性を残すと、このポロイダル共鳴は $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトと磁場ドリフトのポロイダル成分の釣り合いによって決まるため、イオンの場合 $E_r < 0$ 側にシフトし、かつ個々の粒子の速度によって釣り合いの条件が変わるために、共鳴による径方向フラックスが低く抑えられるのである。こうして、ヘリカル系の新古典輸送計算において磁場ドリフト項の磁気面接線方向成分が従来の局所近似とグローバル計算の差の主な要因であることが明らかとなった。

3.3.2.2 新古典粘性がプラズマ回転分布に与える影響

新古典輸送理論は径方向輸送やブートストラップ電流を扱うだけではなく、トーラス磁場の磁気面上での磁場強度の不均一性に起因する新古典粘性の評価にも用いられる。新古典粘性はプラズマのトロイダル・ポロイダル回転分布の決定に重要な役割を果たすもので、最近のトカマク研究においても注目されている物理の一つである。共鳴摂動磁場 (RMP) 印加実験やトロイダルコイルが作るリップル磁場成分など、実際のトカマク磁場に存在する微弱な非軸対称磁場摂動による新古典トロイダル粘性が、プラズマのトロイダル回転分布に与える影響を予測するためには高精度な新古典トロイダル粘性の計算法が必要とされる。

そこで、FORTEC-3D コードを用いて新古典ポロイダル・トロイダル粘性を評価できるようにコードの拡張が行われた。新古典粘性は圧力テンソルの磁力線平行・垂直方向成分の非等方性によって生じるので、ドリフト運動論に従って分布関数を計算する FORTEC-3D コードにおいて、これを直接的に数値的に評価する手法を開発した。そして、そのシミュレーションの応用研究として、原子力研究開発機構（原研機構）との共同研究において、JT-60U 装置のトロイダル磁場コイルが作るリップル磁場成分による新古典トロイダル粘性を FORTEC-3D コードで計算し、その結果を原研機構で開発された統合輸送コード TOPICS に渡すことで、従来の輸送シミュレーションで無視されていた新古典トロイダル粘性を含むプラズマ回転分布の予測計算を行うことを可能とした。その結果、図 3.3.2.2-1 に示すように新古典トロイダル粘性の影響を含めた計算結果が、それ以前に行われていた NBI トルク入力と高速イオンの軌道損失による $J \times B$ トルクのみを考慮していた TOPICS コードによるシミュレーション結果に比べ、観測結果により近い回転分布を再現できることを示した [3.3.2.2-2]。今後、さらにト

カマクやLHDにおけるRMP印加実験での新古典粘性計算と、プラズマ回転分布への影響に関する研究を進める予定である。

その他の新古典粘性計算の応用例として、LHDにおけるバイアス実験において、バイアス電場によって $E \times B$ 回転を外部から駆動した場合の、新古典粘性のポロイダルフロー速度に対する非線形な応答に関する数値シミュレーションと実験観測の比較研究が行われた [3.3.2.2-3]。FORTEC-3Dコードによる新古典粘性のシミュレーション結果と、バイアス電圧-バイアス電流関係の観測から推定された新古典ポロイダル粘性がピーク値をとるバイアス電圧の値の間に有意な一致を示すことに成功した。

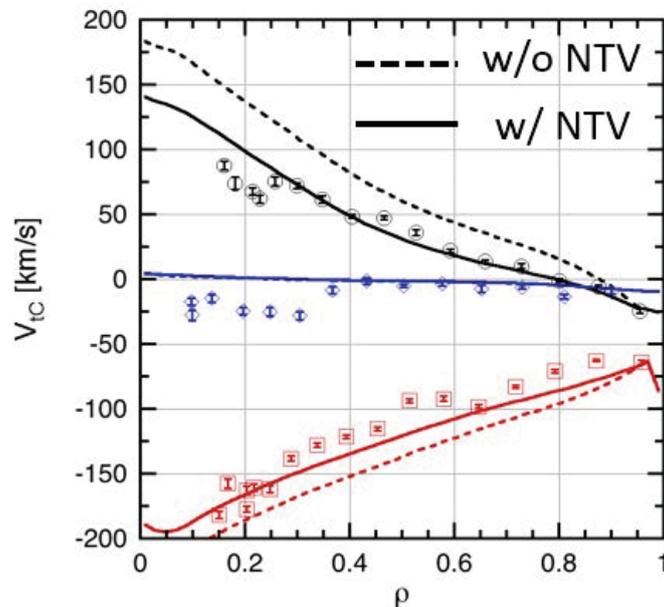


図 3.3.2.2-1 JT-60U の NBI Co, Counter, Balance 入射実験のそれぞれにおいて、FORTEC-3D で計算した新古典トロイダル粘性 (NTV) の影響を含める・含めないでトロイダル回転分布の計算を TOPICS コードで行った結果 (実線及び破線) と、トロイダルフローの計測結果 (点) の比較。NTV を考慮した計算の方がトロイダル回転の観測結果をよく再現している。

3.3.2.3 新古典輸送計算の装置間・コード間国際比較検証研究

3.3.2.1 節で述べたように、新古典輸送計算法における近似、特に従来の局所近似ドリフト運動論方程式モデルにおける磁場ドリフト項の磁気面接線成分を無視することが、新古典径方向粒子・熱輸送評価の定量的信頼性に対する影響が大きいことが分かってきた。こうした局所近似計算と、FORTEC-3D コードのように近似を用いないグローバルコードとの計算結果の差が、実際のヘリカル装置における両極性径電場の予測や、両極性条件における粒子・熱フラックスの計算結果にどの程度見られ、それが乱流輸送レベルと比べて無視できるのか否か、という問いへ答えるためにまず、新古典輸送コード間のベンチマークによる各コードの実装が正しいかの検証 (Verification) と、新古典輸送計算が現実のプラズマの輸送現象をどの程度再現できているかの検証 (Validation) を様々なヘリカル装置で行うことでシミュレーション自体の信頼性を証明する必要があると考えられた。

そこで核融合科学研究所の新古典輸送の研究グループが主導して、欧米のヘリカル装置を持つ研究機関の研究者に呼びかけて新古典輸送計算の装置間・コード間国際比較検証研究をこの数年間精力的に進めてきた。この共同研究には、スペイン CIEAMT、ドイツ Max-Planck 研、米国 Wisconsin 大からの協力が得られた。そして、LHD や TJ-II、W7-AS、HSX 装置において、新古典輸送シミュレーションの検証が行えるように、電子・イオン温度分布、密度分布、並びに HIBP や CXRS などによる $E \times B$ 回転計測を揃えた実験データを取得し、FORTEC-3D や GSRAKE, DKES コードで新古典輸送計算を行った。またそのシミュレーション結果を、加熱分布と温度分布の時間変化から評価したパワーバランス解析による熱輸送と比較した。新古典輸送シミュレーションから得られた両極性径電場とプラズマ回転観測の比較も行った。

新古典輸送計算の Validation の難しさの一つは、実際のプラズマ中の粒子・熱輸送が新古典輸送のみで決まっているわけではない点が挙げられる。ただし、乱流輸送はヘリカルプラズマの両極性径電場の決定にはあまり関与していないとみなされており、まず径電場分布を実験とシミュレーションで比較することが Validation の一つとなる。LHD における、 $T_i \simeq T_e$ のイオンルート及び $T_i < T_e$ の電子ルートが想定される実験の解析例を図 3.3.2.3-1 に示す。3つのシミュレーションで求めた両極性径電場分布は観測結果とある程度よい傾向の一致を見た。ただし、FORTEC-3D コードと GSRAKE, DKES コードでは E_r 分布に無視しえない差が出ている。これは、3.3.2.1 節で見た磁場ドリフト項の有限性による新古典粒子フラックスの径電場依存性によるものである。また、図 3.3.2.3-1 (a) のショットでの電子・イオン熱フラックスの計算結果とパワーバランス解析の比較結果を図 3.3.2.3-2 に示す。このショットではイオン新古典熱フラックス Q_i

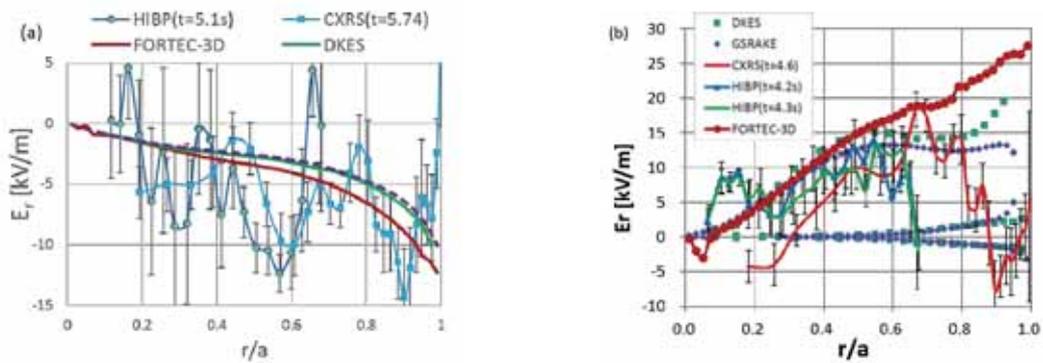


図 3.3.2.3-1 LHD 実験における、(a) $T_i \approx T_e$ 、(b) $T_i < T_e$ のプラズマにおける両極性径電場のシミュレーション結果と観測結果の比較。なお、(b)において局所近似コード(DKES,GSRAKE)は3根の両極性解を示しているが、グローバルFORTEC-3Dは径電場分布を時間発展で解くため、電子ルート($E_r > 0$)のみが解として得られている。HIBPはコア側、CXRSはエッジ側において観測精度が高い。

がトータルの約半分ほどを占めているが、電子熱フラックスにおける新古典輸送の割合は低かった。乱流熱輸送レベルは $Q(\text{Exp})-Q(\text{Neoclassical})$ によって評価されるが、新古典輸送の占める割合が大きい場合、新古典輸送計算自体の近似による誤差が乱流輸送の評価にも影響を与えることになる。この例では3つの新古典コードの計算結果には大きな差がなかったが、図 3.3.2.3-3 に示した TJ-II のイオンルートプラズマの実験解析結果を見ると、FORTEC-3D と DKES コードでは約 2 倍の差が Q_i 、 Q_e に生じており、また新古典輸送がトータルの熱輸送に占める割合もかなり高い。このような状況は LHD でも特にイオンルートプラズマにおいて見られる傾向であり、高い新古典輸送計算の精度が要求される。実際、図 3.3.2.3-3 (b) において DKES コードの Q_e はパワーバランスによるトータル熱輸送の評価値を超えてしまっており、この結果を信じるなら、パワーバランス解析による熱輸送が過少評価されたか、乱流熱輸送が内向きになっていると解釈することになってしまう。新古典輸送計算を近似の少ない FORTEC-3D コードに置き換えることによって、様々な誤差が入りやすいコアプラズマの輸送解析において少しでも不確定要因を減らすことが、特に新古典輸送が全体に占める割合が大きいケースになるほど重要となる。

このように、高精度化した新古典輸送計算による径電場や新古典フラックスの計算結果と、ジャイロ運動論による乱流輸送計算結果を合わせて、コアプラズマ中のトータルの熱輸送レベルを数値シミュレーションで評価し、それと実験観測結果とを比較するという、数値実験炉の実現に向けさらに踏み込んだシミュレーション研究も 2014

年から取り組み始めた。その詳細については3.3.2.5で述べる。

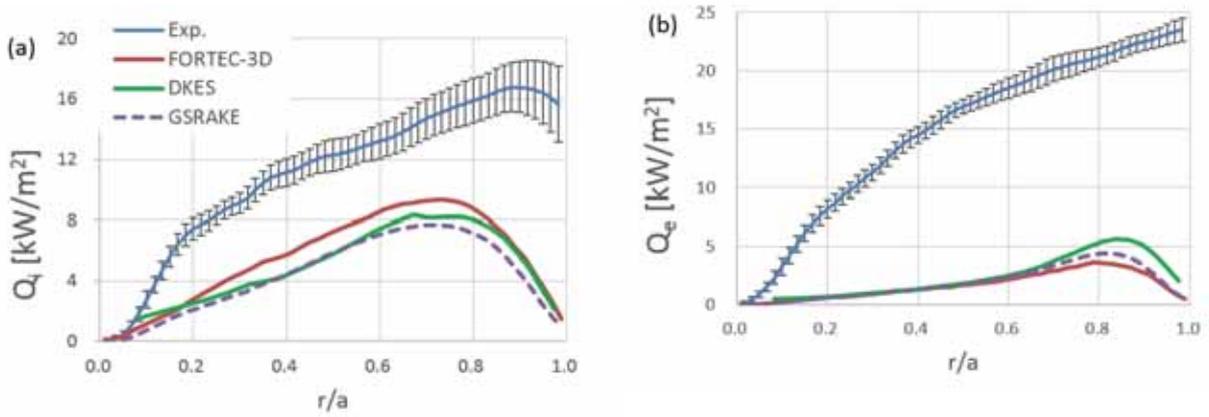


図 3.3.2.3-2 LHD 実験の $T_i \simeq T_e$ プラズマにおける 3 つの新古典シミュレーションによる新古典イオン・電子熱フラックスとパワーバランス解析によるトータル熱フラックスの予測値 (Exp.) の比較。

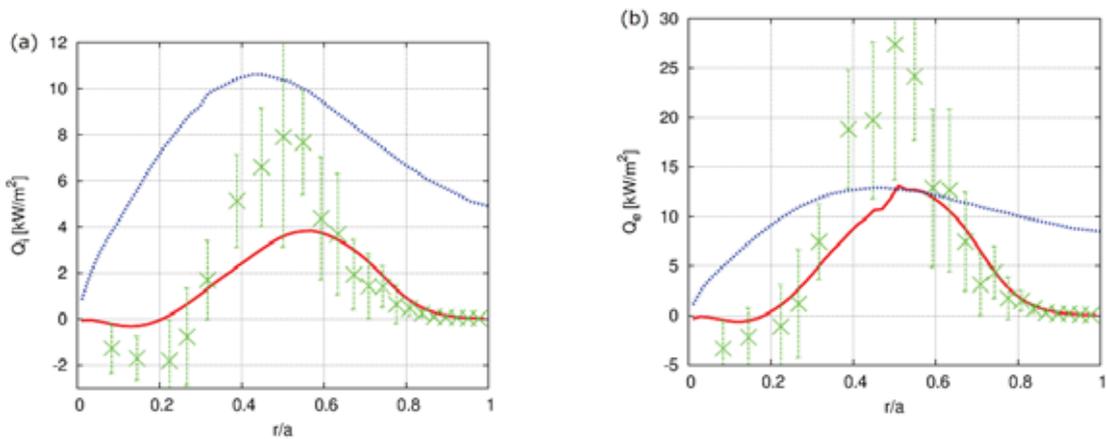


図 3.3.2.3-3 TJ-II プラズマにおける新古典イオン・電子熱フラックスとパワーバランス解析によるトータル熱フラックスの予測値 (Exp.) の比較。FORTEC-3D の計算結果が赤線。DKES の結果 (緑) には温度密度分布計測の誤差伝搬によるエラーバーが評価されている。

[3.3.2.3-1] S. Matsuoka, S. Satake, R. Kanno, and H. Sugama, “Effects of magnetic drift tangential to magnetic surfaces on neoclassical transport in non-axisymmetric plasmas”, *Physics of Plasmas*, Vol. 22, 072511 (2015).

[3.3.2.3-2] M. Honda, S. Satake, Y. Suzuki et al., “Integrated modelling of toroidal rotation with the 3D non-local drift-kinetic code and boundary models for JT-60U analyses and predictive simulations”, *Nuclear Fusion* Vol. 55, 073033 (2015).

[3.3.2.3-3] S. Kitajima, H. Takahashi, K. Ishii et al., “Transition of poloidal viscosity by electrode biasing in the Large Helical Device”, *Nuclear Fusion* Vol. 53, 073014 (2013).

3.3.2.4 新古典輸送現象への共鳴摂動磁場の影響

共鳴摂動磁場 (RMP) を静的に加えた領域 (例えば、プラズマエッジのエルゴディックな磁力線領域) におけるプラズマの輸送現象の物理的理解は、LHD プラズマのエッジにおける粒子・熱閉じ込めや、ダイバータへの熱負荷を制御するため ITER などでは計画されているような RMP を用いた Edge-Localized Mode (ELM) の抑制を行った際の閉じ込めの性能評価に重要である。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 抑制実験の結果、低衝突なプラズマエッジ (衝突頻度 $\nu^* \lesssim 0.1$) における粒子・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) に基づいた予想とは、かけ離れていることが明らかになった。ここで、ELM 抑制実験については、文献 [T.E. Evans *et al.*, *Nature Physics* Vol.2, No.6 (2006) pp.419] を参照。この実験事実により、このようなプラズマ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早急に必要となっている。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イオン熱拡散係数は、クーロン散乱効果によって R-R 理論値と比べて極めて小さくなることを確認し、(2) その物理パラメータ依存性については、R-R 理論モデルとほぼ同じであることが分かった。また、(3) RMP の効果は、衝突頻度が大きくなるに従い弱められることが明らかになった。図 3.3.2.4-1 は、イオン熱拡散係数に対する RMP の影響について、まとめたものである。詳細は、文献 [3.3.2.4-1] を参照。実験と定性的に矛盾しない結果が得られたため、定量的な解析ができるよう、電子およびイオンの粒子フラックスに対する両極性条件から決まる径電場の効果も含めて輸送解析ができるようにコード開発を行った。初期的な計算結果として、正の径電場に

よって電子の粒子フラックスは抑制されるということを見出した。以上の初期成果により、両極性条件を満たす径電場を考慮して衝突輸送に対するRMPの影響を解析する準備が整った。

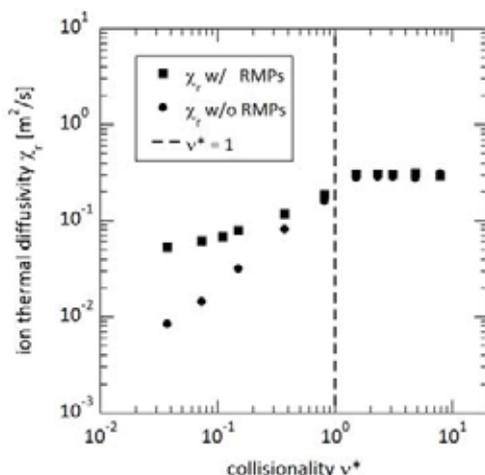


図 3.3.2.4-1 円形トカマク磁場にRMPを加え、磁力線構造がエルゴダイズした領域において、径方向のイオン熱拡散係数 χ_r は、衝突頻度 ν^* が大きくなるに従い弱められる。図中の χ_r は新古典熱拡散係数、 χ_r はRMPを加えた場合の熱拡散係数である。この計算例では、低衝突領域においても ($\nu^* \approx 0.04$ であっても) RMPを加えた場合の熱拡散係数は、新古典熱拡散係数に対しておよそ10倍大きくなる程度であった。

[3.3.2.4-1] R. Kanno *et al.*, “Dependence of radial thermal diffusivity on parameters of toroidal plasma affected by resonant magnetic perturbations”, Plasma Physics and Controlled Fusion Vol.55, No.6 (2013) 065005 (13pp).

3.3.2.5 LHD 有限ベータプラズマの乱流輸送の理解と予測

ヘリカルプラズマのジャイロ運動論シミュレーション研究は磁場配位が複雑な3次元構造をもつために計算科学の観点からも挑戦的な課題である。そして核融合炉を目指す上で有限ベータ乱流輸送の理解および予測は不可欠であるにも関わらず、これを解析できるジャイロ運動論シミュレーションコードは開発されていなかった。我々は有限ベータプラズマに適用可能な電磁的ジャイロ運動論シミュレーションコードを開発した [3.3.2.5-1]。その結果、これまでプラズマベータが0の極限に限られていたヘリカルプラズマのジャイロ運動論シミュレーションの適用範囲が有限ベータ領域へと広がると共に電子・イオンの粒子・熱輸送がすべて定量評価可能となった。また、磁

場揺動の導入により MHD 不安定性に対する最適化と乱流輸送に対する最適化の関係も理解できる展望が開けた。従って、ヘリカルプラズマにおける乱流輸送の理解と予測に対する非常に大きな進展が期待される。ヘリカル・ステラレータ系の有限ベータ乱流輸送に対する非線形ジャイロ運動論シミュレーションは他に例がないほど困難である。またトカマクに対して行われたシミュレーションでは、ゾーナル流が弱くなり、その結果、飽和が得られない又は輸送レベルが極めて高くなることが指摘されている。このように、ほとんど未知の、有限ベータ乱流輸送に対する非線形ジャイロ運動論シミュレーションを進め、乱流の飽和機構を調べた。その結果、ヘリカルプラズマ特有の乱流抑制機構を明らかにした(図 3.3.2.5-1)。この抑制機構は非軸対称性磁場に捕捉された粒子に起因し、高ベータで不安定になる運動論的バルーニングモードの空間構造がトカマクと比較して大きく異なる点にある [3.3.2.5-1]。ヘリカルプラズマの場合、ゾーナル流が弱くとも、不安定なバルーニングモード同士がこのモード構造を持つがゆえにお互いに引きちぎりあって飽和する [3.3.2.5-2] (図 3.3.2.5-1)。この飽和機構は、 f ジャイロ運動論方程式が持つ 2 次の保存量 [3.3.2.5-3] を利用して、エントロピー密度が不安定モードから高波数へ非線形効果によって移送されることを示すことによって明らかになった。この新たな乱流飽和機構を含めトカマクおよびヘリカルプラズマにおける電磁的乱流のジャイロ運動論シミュレーション研究をレビュー論文としてまとめた [3.3.2.5-4]。

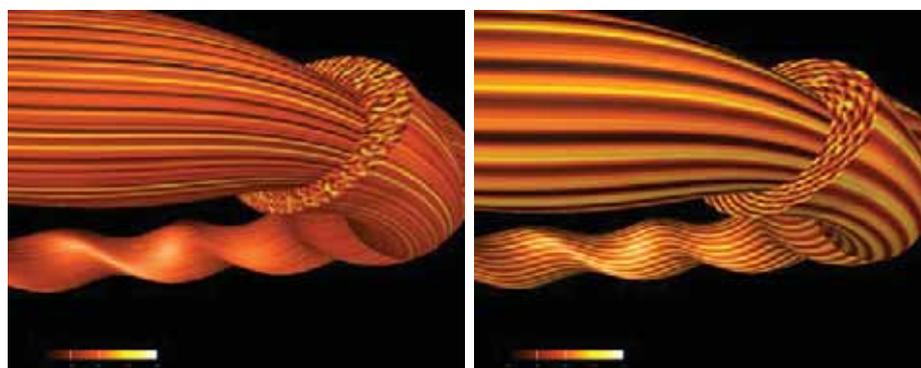


図 3.3.2.5-1 大型ヘリカル装置における非軸対称トーラスプラズマ内の乱流の静電ポテンシャル揺動分布を示す。左図は低ベータで乱流輸送を支配するイオン温度勾配不安定性乱流を示す ($\beta = 0.3\%$)。右図は高ベータで乱流輸送を支配する運動論的バルーニングモード乱流を示す ($\beta = 1.7\%$)。高ベータでは乱流の空間構造が低ベータと異なり、この構造がヘリカルプラズマ特有の乱流の飽和機構を生み出す。

LHD 実験で得られた磁場形状やプラズマ密度と温度を計算モデルに忠実に反映して乱流輸送のシミュレーションを行う場合、有限ベータ効果よりも運動論的電子効果が大きな影響を与える。運動論電子効果導入はイオン温度勾配不安定性の成長率を増大させるだけでなく従来の電子の断熱応答を仮定した解析ではできなかった乱流による粒子輸送および電子熱輸送の評価を可能にする。今回の計算対象はLHDにおける高イオン温度放電と呼ばれ将来の実験炉において有望視されている高性能なヘリカル型プラズマの一つで、この放電におけるプラズマはイオン温度勾配不安定性に駆動される乱流が輸送を引き起こすことが知られている。運動論電子効果を含んだ計算結果を図 3.3.2.5-2 に示す。図中で Time=40 以降は乱れを含んだ準定常状態が得られており、この状態が実験で観測される状態に対応する。図 3.3.2.5-2 (a) は粒子がトラス中心方向に輸送されていることを示す。図 3.3.2.5-2 (b) は電子のエネルギー輸送の時間発展(赤線)を示す。黒色実線は実験観測値を示し、両者はよく一致していることが分かる。図 3.3.2.5-2 (c) はイオン熱輸送の時間発展を示す。赤線がシミュレーション結果、黒線が実験観測値を示す。シミュレーションによるイオンの熱流束は、このケースでは

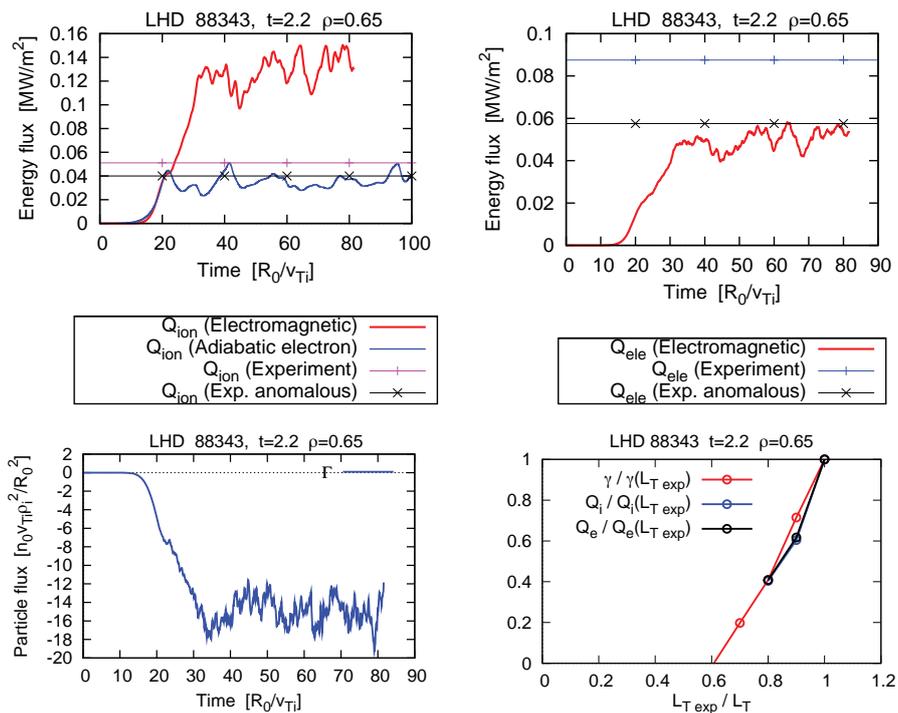


図 3.3.2.5-2 LHD 実験解析結果：(a) 粒子流束、(b) 電子エネルギー流束、(c) イオンエネルギー流束、(d) エネルギー流束と温度勾配長の関係図。

実験観測値のおよそ3倍の値を与えている。一方、図 3.3.2.5-2 (d) に示すように、縦軸に示した温度勾配が 20 % 程度下がるだけで、横軸にある熱輸送（計算結果を実験値で規格化したもの）は 0.4 倍にも低下することが、同時に明らかとなった。すなわち、熱輸送はイオン温度勾配の値に非常に敏感であり、実験における熱輸送を再現する温度勾配の評価は 20 % 程度の誤差であることが定量的に示された。実験で観測されるプラズマは、上述のイオン温度勾配による不安定性を引き起こす臨界勾配状態に近い密度及び温度分布を持つと考えられる。さらにプラズマが乱流に遷移すると、不安定性理論の予測を超えて、輸送が生じる臨界状態は変化することがある。特に、プラズマ乱流が作り出すゾーナル流と乱流渦の非線形相互作用に大きく影響されることが、これまでの理論・数値シミュレーションによって指摘されてきた。しかし、今回のシミュレーションが示すところは、この従来のパラダイムからの帰結とは必ずしも一致せず、結果として、LHD プラズマにおいて乱流輸送を駆動する臨界温度勾配は、線形理論が与える評価に近いことが分かった。これは LHD プラズマではトカマク型プラズマと比較して、乱流による流れの自己組織化効果が弱いことを示唆しており、高性能ヘリカル型プラズマの乱流輸送モデル構築に向けた重要な結果である [3.3.2.5-5]。

[3.3.2.5-1] A. Ishizawa, S. Maeyama, T.-H. Watanabe, H. Sugama and N. Nakajima, Nuclear Fusion, Vol. 53, 053007 (2013)

[3.3.2.5-2] A. Ishizawa, T.-H. Watanabe, H. Sugama, S. Maeyama and N. Nakajima, Physics of Plasmas, Vol. 21, 055905 (2014) アメリカ物理学会の招待講演論文、Physics of Plasmas 誌の Editor's Choice に選ばれた。

[3.3.2.5-3] H. Sugama, T.-H. Watanabe, M. Nunami, Phys. Plasmas 16 (2009) 112503.

[3.3.2.5-4] A. Ishizawa, S. Maeyama, T.-H. Watanabe, H. Sugama and N. Nakajima, Journal of Plasma Physics, Vol. 81, 435810203 (41 pages) (2015) レビュー論文、おすすめ論文に選ばれ Free download 可能。

[3.3.2.5-5] A. Ishizawa, T.-H. Watanabe, H. Sugama, M. Nunami, K. Tanaka, S. Maeyama, and N. Nakajima, Nuclear Fusion, Vol. 55, 043024 (2015)

3.3.2.6 JT-60U トカマク実平衡における ITG-TEM 乱流輸送解析

ITER や DEMO といった次期核融合実験炉における乱流輸送特性の定量評価及び予測には、ジャイロ運動論に基づいた第一原理乱流シミュレーション解析・予測が有効であり、燃焼プラズマ中の乱流輸送解析に向けてコード開発や V & V が進められている。本研究では、ジャイロ運動論的乱流シミュレーションコード GKV に実プラズマ形状と平衡分布データを導入するインターフェースを新たに構築した [3.3.2.6-1]。これにより、JT-60U 実験プラズマに対する初めての第一原理乱流シミュレーション解析が実現され、微視的不安定性特性や乱流スペクトル構造の同定に加え、イオン及び電子に関する熱輸送レベルの比較が行われ、GKV による乱流輸送シミュレーションの定量予測性能の検証が成された。ITER や DEMO における規格化プラズマサイズは $a/\rho_i \geq 500$ (a : プラズマ半径、 ρ_i : イオンジャイロ半径) を示すため、そのような将来の大型装置に対する予測性能を評価する観点から、JT-60U L-mode 放電 ($a/\rho_i \sim 500$) を対象に乱流シミュレーション解析を行った。イオン種に加え、通過/捕捉電子もジャイロ運動論に従う無撞着な取り扱いを実現することにより、半径位置に応じた異なる微視的不安定性特性を同定し、プラズマ内側領域ではイオン温度勾配 (ITG) 不安定性が支配的となり、外側領域に向かって捕捉電子不安定性 (TEM) へと遷移していく様相を明らかにした [3.3.2.6-2]。さらに、それらの微視的不安定性から駆動されるイオンスケール乱流中の熱・粒子輸送レベルを評価し、実験計測結果と比較を行った [3.3.2.6-3]。GKV による乱流輸送シミュレーションは、従来 of 準線形流体輸送モデル (TGLF) では定量性を欠く領域に対しても、イオン及び電子熱輸送レベルに関する実験結果を比較的良く再現することに成功している (図 3.3.2.6-1)。これらの知見はシミュレーションモデルのさらなる高度化や、建設中の次期実験装置に対する予測研究の基盤構築に資する研究成果となっている。

[3.3.2.6-1] M. Nakata, A. Matsuyama, et al., Plasma Fusion Res. 9, 1403029 (2014)

[3.3.2.6-2] M. Nakata, M. Honda, et al., Proceedings in IEAE-FEC2014, TH/P7-38 (2014)

[3.3.2.6-3] M. Nakata, M. Honda, et al., Nucl. Fusion., to be submitted.

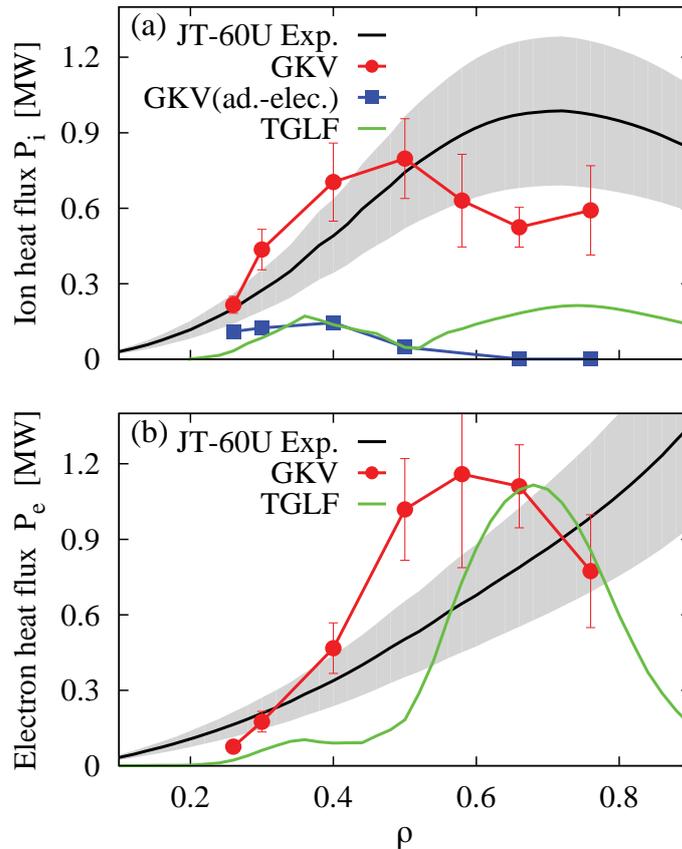


図 3.3.2.6-1 (a) イオン及び (b) 電子熱輸送レベルに関する実験—乱流シミュレーション比較

3.3.2.7 ジャイロ運動論解析に基づく乱流輸送モデルの輸送シミュレーションへの適用方法

ジャイロ運動論方程式を解く GKV コードを用いて、ヘリカルプラズマにおける乱流輸送について、大型ヘリカル装置 (LHD) でのイオン温度勾配不安定性 (ITG) モードや帯状流について研究する。イオン熱拡散係数はジャイロボーム熱拡散係数とある関数の積とする。ある関数は ITG 成長率の混合長概算、磁気シアパラメータ、帯状流の崩壊時間 (the decay time) に依存する。イオンの熱拡散係数について、線形ジャイロ運動論解析から計算される混合長概算と帯状流崩壊時間の関数が簡約化モデルとして導出されている。統合コード TASK3D では、熱乱流拡散係数についてはジャイロボームスケールリングが用いられ、LHD における実験結果と解析結果との比較が行われている。

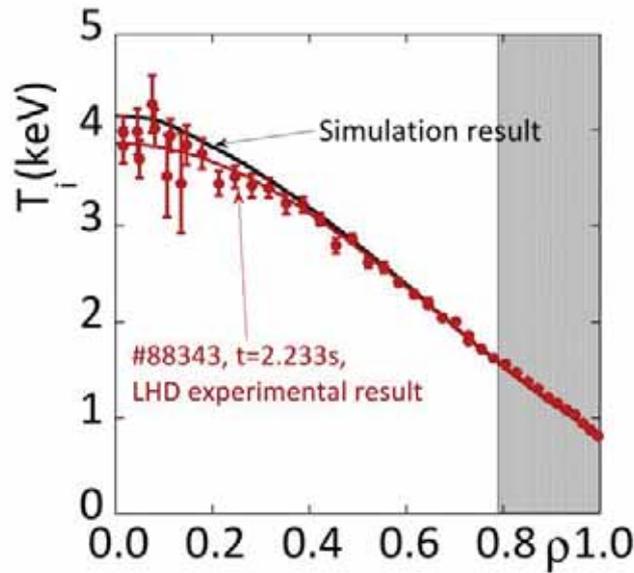


図 3.3.2.7-1 LHD 実験結果とジャイロ運動論解析に基づく乱流輸送モデルを用いた輸送シミュレーション結果との比較

しかしながら輸送コードの中で時間ステップごとに、ジャイロ運動論線形解析を行うことは非常に計算コストがかかる。輸送障壁のような改善モードを得ることができる実験シナリオを提案するには、ある程度の領域でのプラズマパラメータサーベイが必要である。輸送コードで乱流輸送係数にどのモデルを選ぶべきか決めるために、多くの微視的不安定性からどのモードが不安定化しているか、そしてその乱流レベルを評価する必要がある。最初のステップとして、LHDでの高イオン温度放電(ショットナンバー 88343)における ITG モードについて研究を行った。混合長概算の値を大半径のイオン温度勾配長に対する比に比例する形でモデル化する。径方向に安全係数、密度、温度が変わる。従って、径方向に比例係数や、ITG が不安定化するイオン温度勾配長を求める。また帯状流崩壊時間の径方向依存性を調べる。このとき、磁場配位を時間的に固定する。さらなるモデル化によって、高速に簡約化モデルの値を十分な精度で再現することができた。さらなるモデル化したイオン乱流輸送係数を用いて、イオン温度のダイナミクスを輸送コード TASK3D-p により解析する。イオンの加熱入力分布は、TASK3D-p から求める。初期条件として、LHDでの高イオン温度放電(ショットナンバー 88343)で定常と考えられるイオン温度分布を用いる。解析の結果、多重解から正の電場を選んだ時に、実験結果と矛盾のない結果が得ることができた。(図 3.3.2.7-1) このときの計算コストは、輸送コードの時間ステップごとにジャイロ運動論線形解析を行う場合と比べ、非常に少ない。 [3.3.2.7-1]

[3.3.2.7-1] S. Toda, M. Nunami, A. Ishizawa, T. -H. Watanabe and H. Sugama, "How to apply a turbulent transport model based on a gyrokinetic simulation for the ion temperature gradient mode in helical plasma", J. Phys.: Conf. Ser., Vol. 561 p. 012020 (2014)

3.3.2.8 フラックス・チューブ連結モデルの開発

磁場閉じ込めプラズマにおける乱流輸送過程を解析する有用な手法として、ジャイロ運動論的シミュレーションが行われてきた。プラズマサイズに比べ十分小さなジャイロ半径で特徴付けられる乱流揺動のシミュレーションには、磁力線に沿った微小領域を扱うフラックス・チューブ・モデル [3.3.2.8-1] が有効であり、これを用いてジャイロ運動論的シミュレーション・コード GKV が開発された [3.3.2.8-2]。本研究では、従来のフラックス・チューブ・モデルを拡張した新しいモデル、フラックス・チューブ連結 (flux tube train) モデル、を開発した [3.3.2.8-3]。新しいモデルは、磁力線方向に長い相関長 (ポロイダル角 θ で 2π 以上) をもつ乱流揺動を扱う場合に有効であり、時間ステップ幅の節約およびバルーニング表示に関連した対称性の保存において優位性をもつ。

フラックス・チューブ・モデルでは、磁力線に沿って座標の一つ (これをポロイダル角 θ で測る) を取り、磁力線を横切る方向 (トーラス小半径方向および磁力線ラベル方向) には Fourier モード展開を行う。これはいわゆるバルーニング表示

$$A_n(\psi, \theta) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \hat{A}_{n,\theta_0}(\psi, \theta + 2\pi p) \exp[-inq(\psi)(\theta - \theta_0 + 2\pi p)] \quad (1)$$

と密接に関連している。従来のモデルでは、 θ 方向のシミュレーション領域を、 $-N_\theta\pi \leq \theta \leq N_\theta\pi$ (N_θ は正の整数) とし、磁力線平行方向への相関長が長い場合には N_θ を大きくしてシミュレーション領域を拡大し、計算結果の収束性が検証される [3.3.2.8-1]。このとき、磁束関数 ψ でラベル付けされる同心円磁気面上において、乱流揺動 A は、

$$A_n(\psi, \theta) = \sum_{j=0}^{\delta j-1} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \bar{A}_{j,n}(\theta + 2\pi p N_\theta) \exp\{-inq(\psi)[\theta - \theta_0(j, n) + 2\pi p N_\theta]\} \quad (2)$$

として表される。ここで、 n はトロイダルモード数、 $q(\psi)$ は安全係数であり、 $\theta_0(j, n) = j\pi/n\Delta q$ 、 $\delta j = 2nN_\theta\Delta q$ 、 Δq は動径方向のシミュレーション領域にわたる q の変化量として定義されている。この方法では、バルーニング構造をもつ乱流揺動を良く表現で

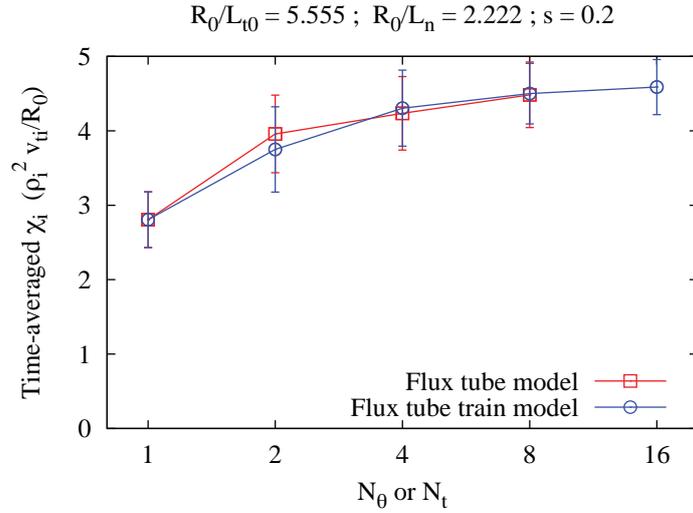


図 3.3.2.8-1 従来のフラックス・チューブ・モデルと新しいフラックス・チューブ連結モデルを用いたイオン温度勾配乱流のシミュレーションによって得られたイオン熱輸送係数の比較。

きるが、有限磁気シアのもとでは、 $|\theta|$ の増加とともに磁力線垂直方向の波数 k_\perp が大きくなるという性質をもつ。このことは、時間ステップ幅へより厳しい制限を課すとともに、バルーニング表示がもつ (整数 p についての) 対称性を破るという数値的な困難を引き起こす。この問題を解決するために、 $N_\theta = 1$ としたまま、複数 (N_t 個) のフラックス・チューブを磁力線方向に連結するという新しい数値モデルを考案した。そこでは、乱流揺動は次式のように表される (以下で l は整数)。

$$\begin{aligned}
 A_n(\psi, \theta) &= \sum_{j=-\infty}^{\infty} \bar{A}_{j+l\delta j/N_t, n}(\theta) \exp \{-inq(\psi)[\theta - \theta_0(j + l\delta j/N_t, n)]\} \\
 &= \sum_{j=-\infty}^{\infty} \bar{A}_{j, n}^l(\theta - 2\pi l) \exp \{-inq(\psi)[\theta - \theta_0(j, n) - 2\pi l]\} .
 \end{aligned} \tag{3}$$

ここで $\bar{A}_{j, n}^l(\theta - 2\pi l) = \bar{A}_{j+l\delta j/N_t, n}(\theta)$ であり、またポロイダル角は $2\pi l \leq \theta \leq 2\pi(l+1)$ の範囲に制限される。こうして構築されたモデルを用いることで、 θ の増加による時間ステップ幅の制限が緩和され、またバルーニング表示が持つ対称性も厳密に保たれる。

このフラックス・チューブ連結 (flux tube train) モデルを用いて、低磁気シアトカマク配位でのイオン温度勾配乱流シミュレーションを行った。異なる N_θ および N_t に対して、定常状態で得られた輸送係数を比較すると $N_\theta, N_t \leq 8$ において、従来の flux tube

モデルの値と良く一致する結果が得られた (図 3.3.2.8-1)。一方、 $N_\theta = 16$ の場合、従来のモデルでは解を得ることができなかったが、新しい手法では特段の困難なく輸送係数の N_t に対する収束性が確認できた。この結果は、flux tube train モデルの優位性を示しており、他の乱流輸送問題においてもその有効性の検証を進めている。

[3.3.2.8-1] M. A. Beer, S. C. Cowley, and G. W. Hammett, Phys. Plasmas 2, 2687 (1995).

[3.3.2.8-2] T.-H. Watanabe and H. Sugama, Nucl. Fusion 46, 24 (2006).

[3.3.2.8-3] T.-H. Watanabe, H. Sugama, A. Ishizawa, and M. Nunami, Phys. Plasmas 22, 022507 (2015).

3.3.2.9 高精度多粒子種衝突モデルの開発と乱流シミュレーションコード GKV への実装

水素同位体と電子が混合されたプラズマや不純物を含むプラズマに対する乱流輸送シミュレーションへ拡張するために、任意の異種粒子種間衝突の取り扱いを実現する多粒子種衝突モデルを新たに開発し、ジャイロ運動論的シミュレーションコード GKV へ実装した。異なる平衡温度や平均流を持つ粒子種に対しても粒子数保存、運動量保存、エネルギー保存を満足し、かつ、H 定理と呼ばれる衝突緩和現象に関する物理的要請も満足する衝突モデル [Sugama et al., Phys. plasmas 16, 112503 (2009)] に基づき、GKV に従来実装されていた簡約化された同種粒子種衝突モデルを高精度の多粒子種衝突モデルへと拡張した [3.3.2.9-1]。平衡分布への線形緩和に関するシミュレーションにより、粒子速度に依存した衝突周波数を含む多粒子種衝突モデルの数値的健全性が確認された。また、線形ゾーナルフロー減衰シミュレーションにより、残留ゾーナルフローレベルに対する衝突モデルの影響を検証した (図 3.3.2.9-1)。その結果、従来の簡約化モデルではゾーナルフローに対する衝突減衰効果が過剰に評価されるという問題点が明らかとなった。

電子-イオン、あるいはイオン-電子間の衝突に代表されるような質量比が著しく異なる粒子間衝突においては、速度空間上の衝突周波数が急峻化し、数値微積分に関する誤差が増大する。このような問題を解決するため、数値誤差を打ち消すよう修正された衝突演算子を考案することにより GKV における多粒子種衝突モデルをさらに拡張した [3.3.2.9-2]。修正されたモデルは電子を含む多種イオンプラズマに対する熱緩和シミュレーションに適用され、衝突計算に関する数値誤差が丸め誤差程度の極めて小さいレベルに抑制され、粒子種間の温度緩和が正確に再現されていることが確認

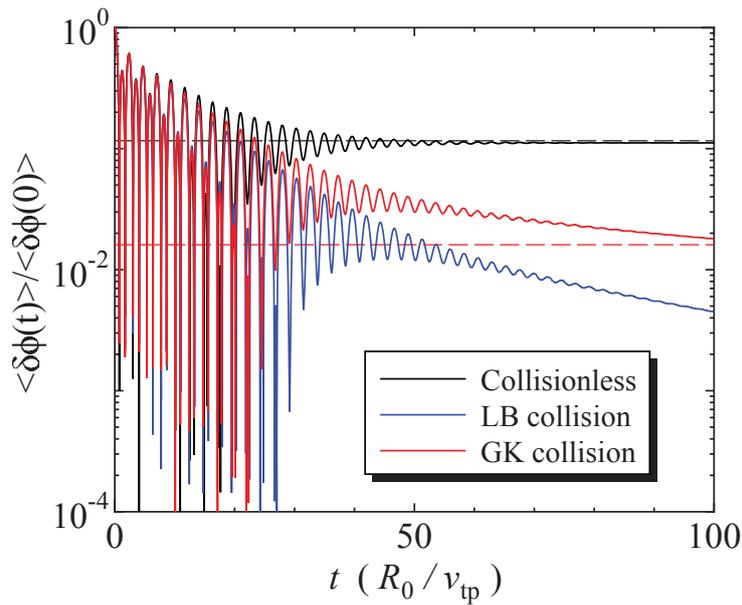


図 3.3.2.9-1 従来の簡約化衝突モデル (LB) および新たに開発した多粒子種衝突モデル (GK) を用いたゾーナルフロー減衰シミュレーション

された。開発された多粒子種衝突モデルは、今後の水素同位体やヘリウム灰などの多
種イオンで構成される燃焼プラズマ中の乱流輸送解析に適用される。

[3.3.2.9-1] M. Nunami, M. Nakata, T. -H. Watanabe and H. Sugama, Plasma Fusion
Res. 10, 1403058 (2015)

[3.3.2.9-2] M. Nakata, M. Nunami, T. -H. Watanabe and H. Sugama, Comput. Phys.
Commun., in press (2015)

3.3.2.10 国際ベンチマークの推進

ジャイロ運動論的乱流シミュレーション・コードGKVの信頼性のさらなる向上を
目指し、非軸対象系配位における乱流輸送シミュレーションのベンチマーク試験をプリ
ンストン・プラズマ物理研究所 (PPPL) と共同で進めた。運動論的手法に基づくプラ
ズマ乱流シミュレーションは、様々なコードによる研究が世界で行われているが、コ
ード間のベンチマーク試験が、特にステラレータでは遅れている。これまでに、PPPL
やマックスプランク研究所 (ドイツ) のグループと、NSCX のモデル配位におけるベン
チマークを行っていたが、今回は、LHD の実験配位を対象に PPPL の GS2 コードと線

形イオン温度勾配 (ITG) 不安定性の定量比較を進めた。ベンチマークでは、不安定性の線形成長率や実周波数の波数スペクトルの比較に加え、固有関数の詳細比較も実施した [3.3.2.10-1]。図 3.3.2.10-1 は、GKV コードおよび GS2 コードの双方から得られた ITG 不安定性の固有関数をプロットしたものである。双方が、定性的な関数構造だけでなく定量的にも非常に一致していることが分かる。ベンチマーク解析では、GS2 コードにおける時間積分法 (陽的解法または陰的解法) の違いにより、結果にわずかな差異が生じ得ることも指摘され、今後のより詳細なベンチマーク研究への具体的な指針を得た。

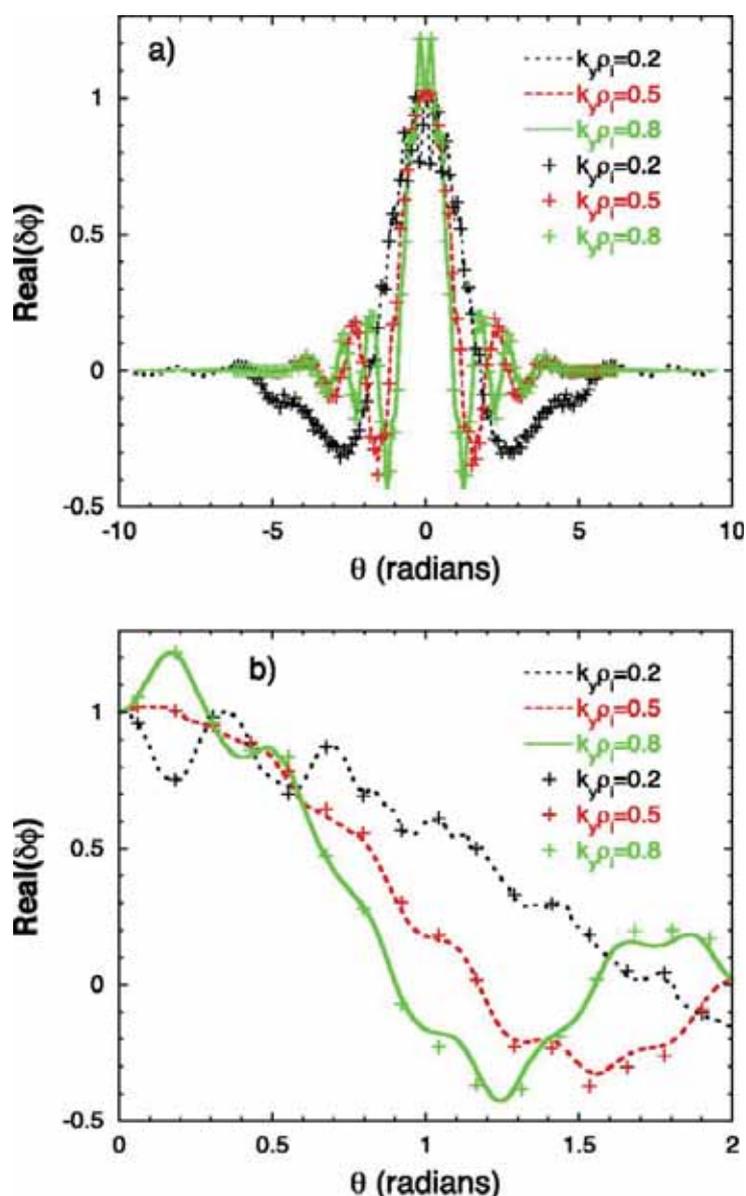


図 3.3.2.10-1 LHD 高イオン温度放電配位における線形イオン温度勾配不安定性における固有関数の比較 (a) とその拡大図 (b)。実線が GS2 の結果、点が GKV の結果を示す。

3.3.2.11 乱流計測シミュレータによる数値乱流計測

磁場閉じ込めプラズマ研究において、乱流輸送機構の定量予測は重要な課題の一つである。ジャイロ運動論的シミュレーションによる数値解析は、物理の理解に向けた強力な手法の一つである一方、計算結果に対する Validation 解析も定量的な輸送評価には必須である。プラズマ乱流シミュレーション研究では、数例のみであるが、LHD プラズマにおける熱輸送係数などの実験結果を定量的に再現出来ている中、このような数値解析結果について、実際の実験で行われるような手法による乱流模擬計測法を確立しておくことは、非局所的な効果等、更なるモデル改良の指針を与えることが可能になる。ここでは、LHD 配位において GKV コードを用いて実施した多くのジャイロ運動論的乱流シミュレーションの計算データに対して、NIFS で開発が開始され、現在は九州大学・応用力学研究所で開発が進められている乱流計測シミュレータ [3.3.2.11-2] を適用し、実験での乱流揺動計測を模擬することで、シミュレーションの Validation 解析を試みた。これまでに、GKV コード独自の座標系から実空間へのマッピング処理が完成し、乱流揺動分布の計測に威力を発揮する 2 次元位相コントラスト・イメージング (2D-PCI) による数値計測を開始した。本手法により、乱流揺動のスペクトル構造や空間分布を実験と同様に調べることが可能となり、ジャイロ運動論的シミュレーションにおける定量的な乱流解析の手法開発が推進された。本手法の基本部分は、現在、九州大学にて継続開発されており、今後は、共同研究等を通じて、数値実験炉研究プロジェクトにおいて、本手法の利用推進を図っていく。

[3.3.2.11-1] D. R. Mikkelsen, *et al.*, “Verification of gyrokinetic microstability codes with an LHD configuration”, *Physics of Plasmas*, Vol.21, (2014) pp.112305-1~8.

[3.3.2.11-2] N. Kasuya, *et al.*, “Development of Turbulence Diagnostics on Three-Dimensional Fields Obtained by Numerical Simulations in Magnetically Confined Plasmas”, IAEA FEC 2010, THC/P4-15 (2010).

3.3.2.12 ジャイロ運動論モデルの拡張

微視的不安定性や乱流輸送を記述するジャイロ運動論的方程式は、元々は、規格化ジャイロ半径を微小パラメータとして用いた再帰的摂動法により導出されたが、現代的なジャイロ運動論の定式化は、ラグランジアン・ハミルトニアンとリー変換摂動法を用いて行われる。ジャイロ運動論的場の理論 [3.3.2.12-1, 2] では、プラズマを構成する荷電粒子と電磁場の両方の振る舞いを記述するラグランジアンを用いた変分原理によ

り、ジャイロ中心分布関数と乱流電磁場それぞれに対する支配方程式が導かれ、ジャイロ中心軌道に沿った位相空間の不変性が保証されるとともに、ネーターの定理により、定常背景磁場における系全体のエネルギーや運動量の保存則が証明される。参考文献 [3.3.2.12-3,4] では、エネルギー・運動量保存則を正確に扱いながら、ゆっくりと変化する背景磁場や粒子間のクーロン衝突の効果を取り入れることができるように、ジャイロ運動論的場の理論が拡張された。その結果得られたジャイロ運動論的方程式は、古典輸送、新古典輸送および乱流輸送の全ての輸送過程を記述できることが示され、将来の長時間グローバル・ジャイロ運動論的シミュレーションを実行する場合の基本モデルとして有望である。これらの研究成果は、二つの国際会議 [International Conference on Geometric Algorithms and Methods for Plasma Physics (13–15 May 2014, University of Science and Technology of China, Hefei, China); 9th International West Lake Symposium on Plasma Simulation (18–21 May 2015, Hangzhou, China)] において招待講演として発表された。

[3.3.2.12-1] H. Sugama, “Gyrokinetic Field Theory”, *Physics of Plasmas*, 7, 466 (2000).

[3.3.2.12-2] H. Sugama, “Conservation of energy and momentum in nonrelativistic plasmas”, *Physics of Plasmas*, 20, 024503 (2013).

[3.3.2.12-3] H. Sugama, T.-H. Watanabe, and M. Nunami, “Extended gyrokinetic field theory for time-dependent magnetic confinement fields”, *Physics of Plasmas*, 21, 012515 (2014).

[3.3.2.12-4] H. Sugama, T.-H. Watanabe, and M. Nunami, “Effects of collisions on conservation laws in gyrokinetic field theory”, *Physics of Plasmas*, 22, 082306 (2015).

3.3.2.13 ゾーナルフローに対する新しいクロージャーモデルを用いたジャイロ流体 ITG 乱流シミュレーション

5次元位相空間上の粒子分布関数を直接計算するジャイロ運動論的シミュレーションに比べ、3次元実空間上の流体変数を求めるジャイロ流体シミュレーションは、計算容量・計算時間が遙かに少ない点で魅力的であるが、その妥当性は、ランダウ減衰・有限ジャイロ半径・ジャイロ中心軌道等の運動論的效果を記述するために用いられる流体変数のクロージャーモデルに大きく依存する。Dimits 等 [A.M. Dimits, *et al.* *Phys. Plasmas* 7, 969 (2000)] によって示されているように、イオン温度勾配 (ITG) 乱流の

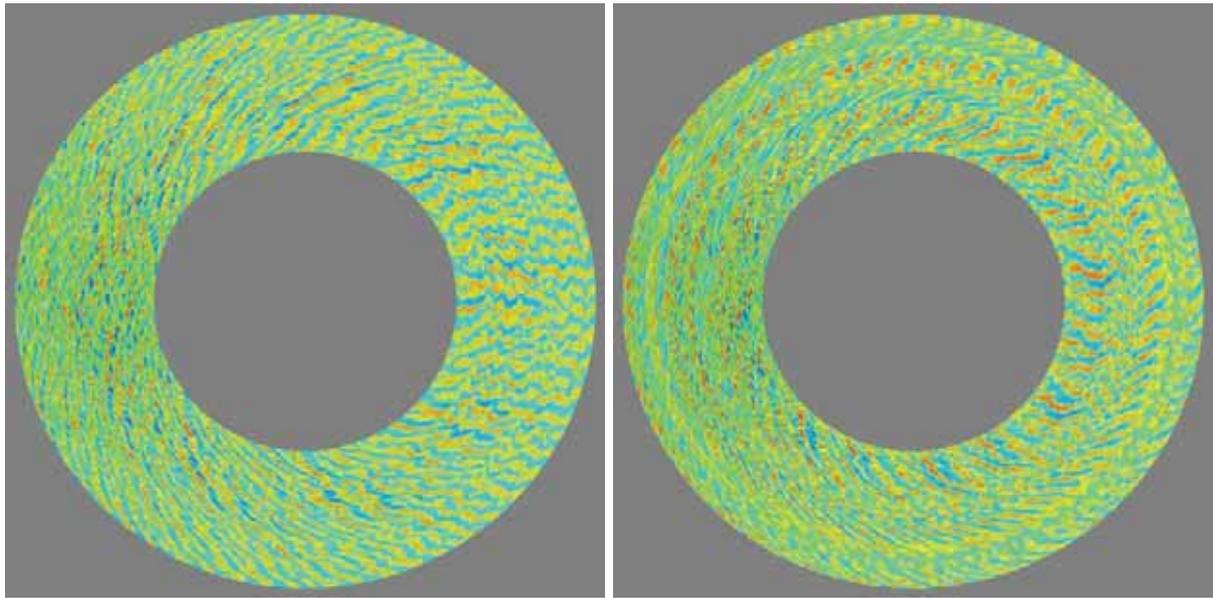


図 3.3.2.13-1 Cyclone DIII-D base case parameter set を用いたジャイロ流体 ITG 乱流シミュレーション [3.3.2.13-3] から得られた静電ポテンシャルのポロイダル断面における分布構造。ゾーナルフローに対するクロージャーモデル [3.3.2.13-1] を用いていない場合（左）と用いた場合（右）。

ジャイロ運動論的シミュレーションの結果に比べ、従来のジャイロ流体シミュレーションは、ITG 乱流により生成されるゾーナルフローの大きさを過小評価し、ITG 乱流によるイオンの乱流熱輸送を過大評価する傾向にある。ゾーナルフローの生成過程を正確に記述するため、洲鎌等により新しいゾーナルフロークロージャーモデルが導出され [3.3.2.13-1, 2]、それを用いたジャイロ流体 ITG 乱流シミュレーションが行われた [3.3.2.13-3]。

図 3.3.2.13-1 は、Cyclone DIII-D base case parameter set [A.M. Dimits, *et al.* Phys. Plasmas 7, 969 (2000)] に対応するトカマクプラズマにおけるジャイロ流体 ITG 乱流シミュレーションから得られた静電ポテンシャルのポロイダル断面上の分布構造を表す。図 3.3.2.13-1（左）および（右）は、それぞれ、ゾーナルフローに対するクロージャーモデルを用いていない場合と用いた場合を示している。ゾーナルフロークロージャーモデルを用いた場合の方が、大きなゾーナルフローが生成されることがわかる。

図 3.3.2.13-2（左）は、図 3.3.2.13-1 の場合に対応するジャイロ流体 ITG 乱流シミュレーションから得られたイオン熱拡散係数の時間発展を表す。また、図 3.3.2.13-2（右）は、ジャイロ流体 ITG 乱流シミュレーションから得られたイオン熱拡散係数のイオン温度勾配依存性を表す。ゾーナルフロークロージャーモデル [3.3.2.13-1] を用いていな

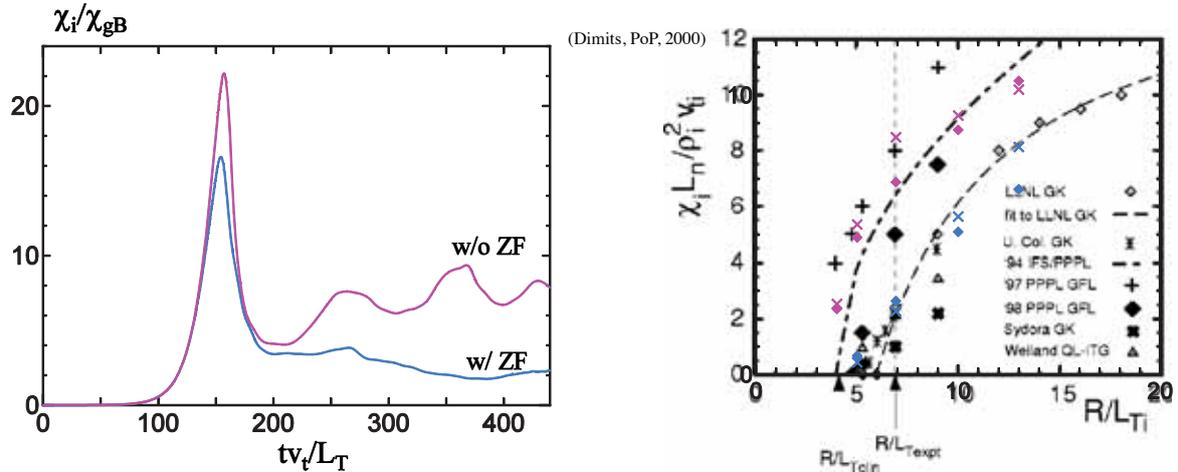


図 3.3.2.13-2 Cyclone DIII-D base case parameter set を用いたジャイロ流体 ITG 乱流シミュレーション [3.3.2.13-3] から得られたイオン熱拡散係数の時間発展 (左) とイオン温度勾配依存性 (右)。薄紫色と青色は、それぞれ、ゾーナルフローに対するクロージャーモデル [3.3.2.13-1] を用いていない場合と用いた場合に対応する。右図の他のデータは、文献 [A.M. Dimits, *et al.* Phys. Plasmas 7, 969 (2000)] からの抜粋。

い場合 (薄紫色) に比べ、用いた場合 (青色) の方が、イオン熱拡散係数が少なくなり、ジャイロ運動論的シミュレーションの結果とよく一致している。また、図 3.3.2.13-2 (右) より、ITG 乱流輸送が現れてくるイオン温度勾配の値が ITG モードが線形不安定となるイオン温度勾配の値よりも上方にずれるという Dimits シフトの様子が、ゾーナルフロークロージャーモデルを用いることによりよく再現されていることがわかる。

[3.3.2.13-1] H. Sugama, T.-H. Watanabe, and W. Horton, “Collisionless kinetic-fluid model of zonal flows in toroidal plasmas”, *Physics of Plasmas*, 14, 022502 (2007).

[3.3.2.13-2] O. Yamagishi and H. Sugama, “Collisionless kinetic-fluid simulation of zonal flows in non-circular tokamaks”, *Physics of Plasmas*, 19, 092504 (2012).

[3.3.2.13-3] 山岸統, 洲鎌英雄, 「ゾーナル流クロージャーを用いたトカマク ITG 乱流の流体シミュレーション」, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月 16 日, 関西大学千里山キャンパス) 16pCN-4.

3.3.3 高エネルギー粒子・波動・加熱の物理

・高エネルギー粒子の物理

高エネルギー粒子・MHD 連結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) LHD におけるアルフベン固有モードによる高速イオン輸送と高エネルギー粒子駆動測地的音響モード、(2) 高エネルギー粒子・MHD 連結マルチフェーズシミュレーションの開発と検証、(3) ITER における高エネルギー粒子駆動不安定性と高エネルギー粒子輸送について報告する。

(1) LHD におけるアルフベン固有モードによる高速イオン輸送と高エネルギー粒子駆動測地的音響モード

LHD においてバースト的に繰り返し発生するアルフベン固有モードによって高速イオンが規格化小半径の 10% 程度輸送されたことが中性粒子解析器 (NPA) の計測により示唆されている [3.3.3-1]。この実験における 2 つのアルフベン固有モードを AE3D コードを用いて解析し、それらのアルフベン固有モードを一定振幅で振動する擾乱とした際の高速イオン軌道のポアンカレ断面図解析を行った [3.3.3-2]。ここでは HINT2 コードで解析した 3 次元平衡データを使用した。図 3.3.3-1 は LHD の横長断面における高速イオン軌道ポアンカレ断面図を示しており、アルフベン固有モードの振幅が増大すると軌道の乱れた領域が拡大することがわかる。図 3.3.3-2 は、この乱れた領域の半径方向の幅をアルフベン固有モードの振幅に対して示している。実験結果から示唆された規格化小半径の 10% 程度の輸送が発生するのは、アルフベン固有モードの振幅が平衡磁場に対して $O(10^{-3})$ の場合であることがわかった。この結論は、LHD と同様の回転変換分布を持つ軸対称トカマク型平衡を用いた解析 [3.3.3-3] と整合している。

LHD では高エネルギー粒子駆動測地的音響モード (EGAM) も観測されている。MEGA コードを用いて、LHD と同等の物理条件をもつ軸対称トカマク平衡での EGAM の線形特性や非線形時間発展における周波数変調を研究してきた [3.3.3-4, 5]。最近では中性粒子との荷電交換を考慮した高速イオン分布関数を用いてシミュレーションを実行し、LHD で観測された周波数がバルク温度に依存しない EGAM を再現することができた [3.3.3-6]。さまざまな初期条件を調べた結果、バルクプラズマの密度が低く、高速イオン減速時間に対して荷電交換時間が十分に短い場合に、EGAM の周波数がバルク温度に依存しないことがわかった。また、HINT2 コードによる LHD の 3 次元平衡データを使用した EGAM のシミュレーションを開始した。このシミュレーションで得られた EGAM の周波数は実験とほぼ等しい 61kHz であった。この EGAM の空間分布を図 3.3.3-3 に示す。

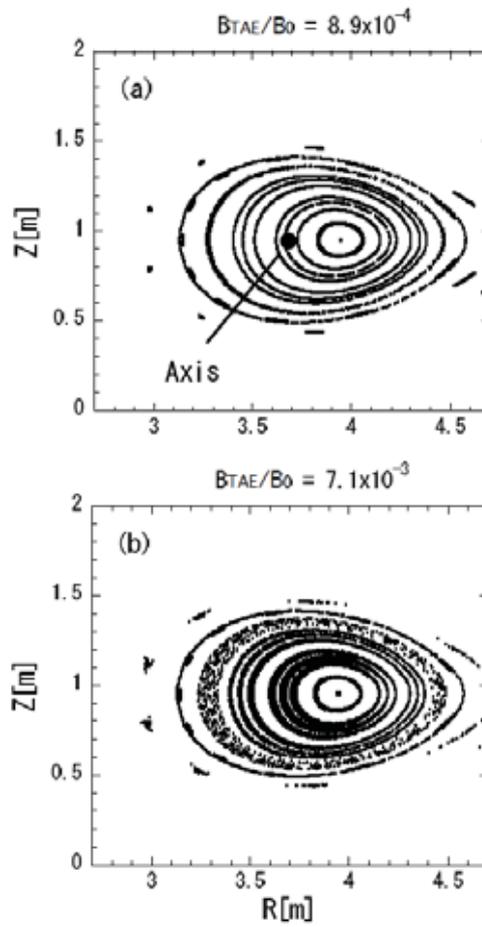


図 3.3.3-1 アルフベン固有モードが存在する条件下での高速イオン軌道ポアンカレ断面図; (a) トロイダル磁場で規格化した磁場揺動振幅 8.9×10^{-4} , (b) 7.1×10^{-3} 。

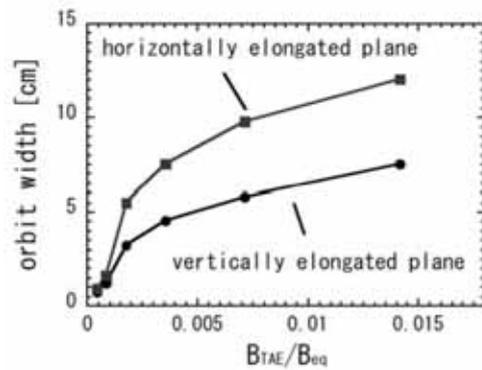


図 3.3.3-2 アルフベン固有モード振幅に対する乱れた軌道領域幅。

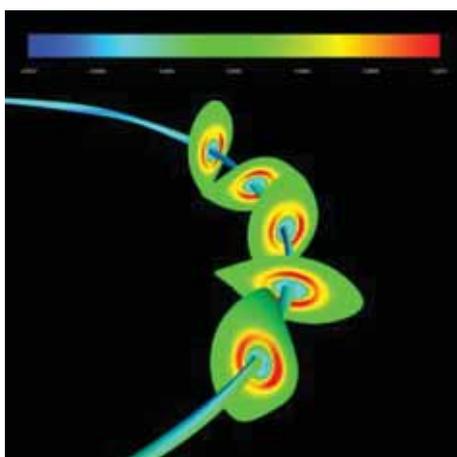


図 3.3.3-3 LHD の 3 次元実形状平衡における高エネルギー粒子駆動測地的音響モードのポロイダル流分布。

(2) 高エネルギー粒子・MHD 連結マルチフェーズシミュレーションの開発と検証

ITER などの核燃焼プラズマにおいて、 α 粒子をはじめとする高速イオンがアルフベン固有 (AE) モードを共鳴相互作用によって不安定化する可能性がある。核燃焼プラズマにおいて高速イオンは粒子衝突を通して燃料プラズマを加熱する役割があり、高速イオンの分布変化と損失をもたらす AE モードは核燃焼プラズマに関する重要な研究課題の一つである。現在のトカマク、ヘリカルおよび球状トカマク装置においても、高速 α 粒子の代わりに中性粒子ビーム入射 (NBI) 加熱や波動 (ICRF) 加熱による高速イオンを用いた AE モードに関する実験が活発に行われている。

米国の DIII-D トカマクでは、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が観測されている。DIII-D においては電子サイクロトロン放射 (ECE) 計測により AE による電子温度揺動が詳細に測定されるとともに、高速イオンの空間分布も測定されている。このような実験においては、高速イオン分布が AE によって強く影響されていることに注意しなければならない。実験で計測される高速イオン分布は、AE によって速度空間と実空間の双方において緩和されたものである。したがって AE と高速イオンの両者の時間発展を高速イオンの衝突減速時間程度の長時間追跡するシミュレーションが必要である。

このために、高速イオンと MHD を連結して両者の時間発展を自己整合的に追跡するハイブリッドシミュレーションコード MEGA に現実的なビームイオン入射分布および粒子衝突と損失を導入した。さらに MHD 揺動を含む計算と含まない計算を交互に行うマルチフェーズ計算により、高速イオン減速時間程度の長時間の計算を可能にし

た [3.3.3-7]。さらに、実験との詳細な比較のため、熱イオン反磁性ドリフトとプラズマのトロイダル回転を取り入れてMHDモデルを拡張した [3.3.3-8]。図 3.3.3-4 にシミュレーションにおいて多数のアルフベン固有モードと相互作用して形成された高速イオン圧力分布を実験と比較する。両者が実験の誤差程度で一致していることと、MHD 揺動を含まずビームイオン入射と粒子衝突だけの古典計算結果と比較すると両者が強く平坦化していることがわかる。図 3.3.3-5 はシミュレーションにおいてトロイダルモード数 $n = 3 - 5$ のアルフベン固有モードがもたらす電子温度揺動のポロイダル面分布を示している。図 3.3.3-5 の電子温度揺動は捻れた構造を示している。この揺動は時計回りに回転しているので、プラズマ外縁部は振動を先導していることになる。図 3.3.3-6 はこの電子温度揺動の振幅と位相の分布を実験と比較したものである。図 3.3.3-6 では、振幅分布が絶対値を含めてよく一致していることに加えて、位相分布についてもよい一致が得られた。このように高速イオン分布とアルフベン固有モード分布について、実験結果の再現に成功したのは世界初の成果である。

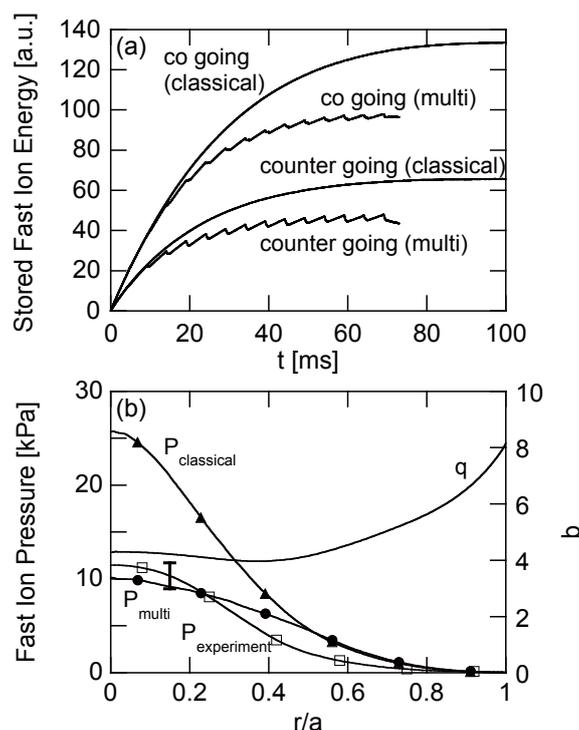


図 3.3.3-4 (a) 高速イオン蓄積エネルギー時間発展と (b) 高速イオン圧力分布に関する高エネルギー粒子・MHD 連結マルチフェーズシミュレーションとMHD 揺動を含まない古典計算および実験計測の比較。(b) ではマルチフェーズシミュレーションが実験の高速イオン圧力分布をよく再現している。

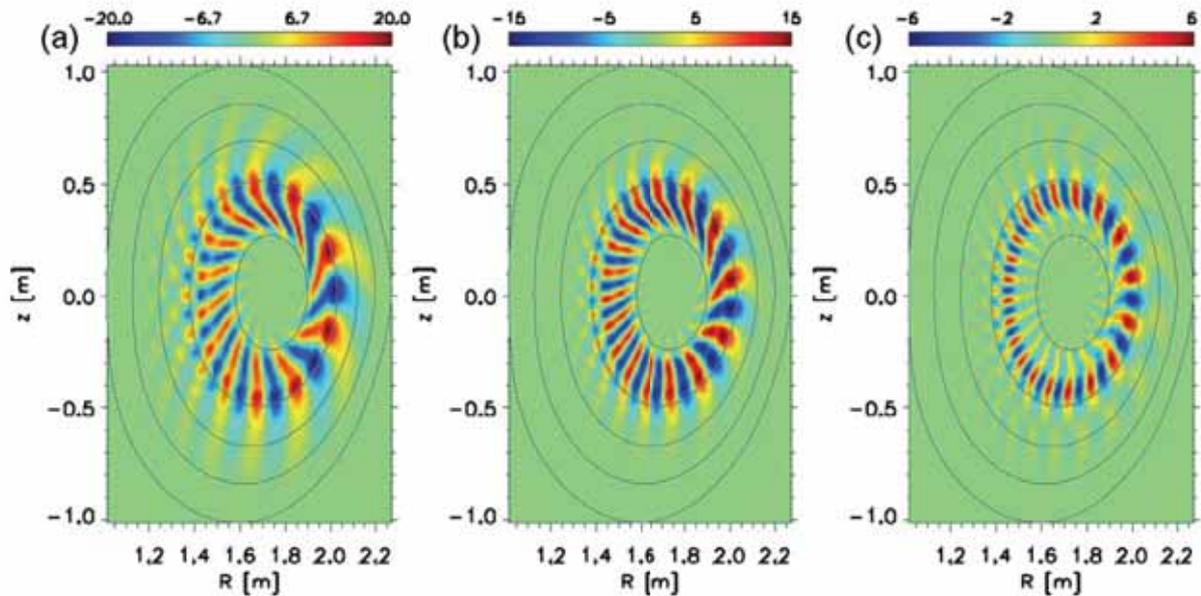


図 3.3.3-5 マルチフェーズシミュレーションにおける電子温度揺動のポロイダル面分布。各パネルはそれぞれ (a) $n=3$, (b) $n=4$, (c) $n=5$ のアルフベン固有モードによる揺動を示している。

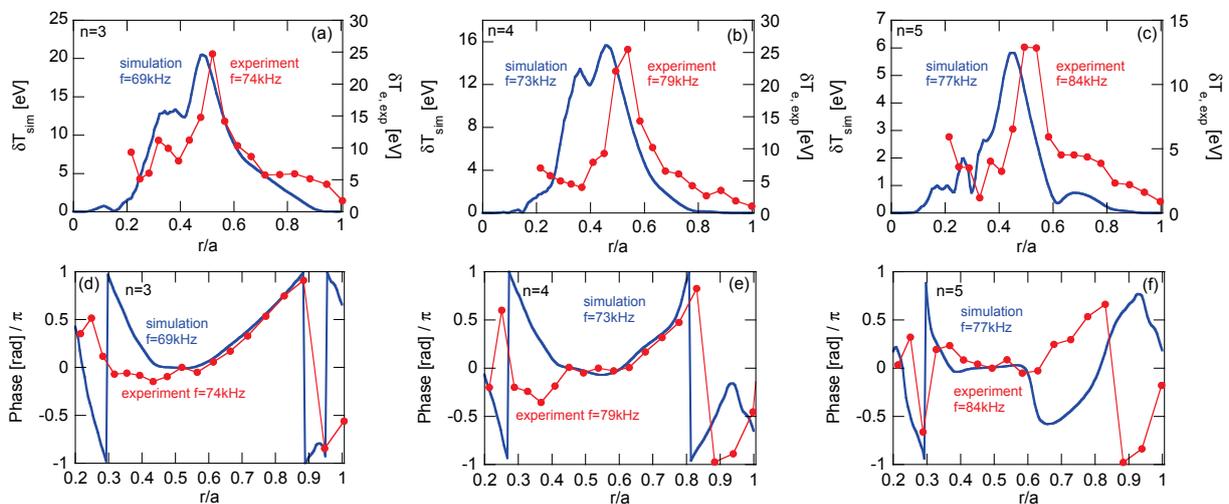


図 3.3.3-6 電子温度揺動分布に関するマルチフェーズシミュレーションと実験データの比較。上段 (a)-(c) は振幅分布、下段 (d)-(f) は揺動の位相分布を示している。最も振幅の大きい $n=3$ モードは振幅 (a) と位相 (d) がともに実験とよく一致している。その他の $n=4$ (b および e), 5 (c および f) モードについてもよい一致が見られる。

(3) ITERにおける高エネルギー粒子駆動不安定性と高エネルギー粒子輸送

ASTRA コードとEFIT コードによって計算されたプラズマ電流 9MA の定常運転シナリオと 15MA の標準運転シナリオについて、高エネルギー粒子駆動不安定性と高エネルギーアルファ粒子輸送を調べた [3.3.3-9]。高エネルギー粒子としてはアルファ粒子だけでなく、入射エネルギー 1MeV の重水素ビームイオンを考慮した。高エネルギーアルファ粒子の速度空間分布は等方的であるが、NBI による高エネルギーイオンは非等方的である。円柱座標系 (R, φ, z) に対してそれぞれ $(256, 256, 512)$ 個の格子点を使用し、アルファ粒子とビームイオンにそれぞれ 8.4×10^6 個の粒子を適用した。有限ラモア半径効果がアルファ粒子とビームイオンの双方について考慮されている。定常運転シナリオのシミュレーションの結果、トロイダルモード数 $n = 13 \sim 17$ のトロイダルアルフベン固有モードの線形成長率が最も高いが、非線形局面では $n = 3$ のベータアルフベン固有モードが支配的となることがわかった。図 3.3.3-7 に線形局面と非線形局面でのプラズマ半径方向の MHD 速度揺動分布を示す。これらのアルフベン固有モードの磁場揺動飽和振幅はトロイダル磁場で規格化して 0.4% であった。図 3.3.3-8 に示すように、アルフベン固有モードがもたらすアルファ粒子と重水素ビームイオンの圧力変化は、それぞれのプラズマ中心値と比較して 6% および 8% にとどまった。

プラズマ電流 15MA の標準運転シナリオについても MEGA コードを用いたシミュレーションを実行した。ここで用いた ASTRA コードと EFIT コードによる平衡では、

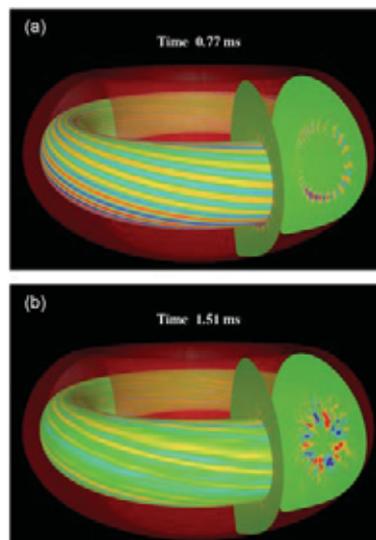


図 3.3.3-7 ITER 定常運転シナリオにおける (a) 線形局面および (b) 非線形局面でのアルフベン固有モードの半径方向速度揺動分布。

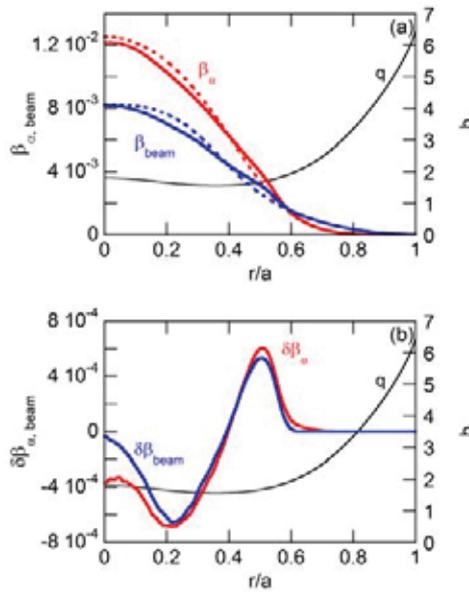


図 3.3.3-8 ITER 定常運転シナリオにおける (a) 高エネルギー α 粒子とビーム重水素イオンの初期圧力分布 (破線) と最終圧力分布 (実線) の比較、および (b) 圧力変化の分布。

安全係数 $q = 1$ の磁気面が 3 箇所が存在している。シミュレーションの結果、プラズマ電流とバルクプラズマ圧力が駆動するトロイダルモード数 $n = 3$ の MHD 不安定性が発生し、アルファ粒子の強い分布変化が発生した。アルファ粒子圧力の減少は最大でプラズマ中心値の 25% 程度に達した。安全係数を一様に 0.1 引き上げて $q = 1$ の磁気面を除去した平衡を初期条件としてシミュレーションを実行したところ、発生したのは弱い MHD 不安定性のみであり、高エネルギー粒子の分布変化は無視できるほど小さいことがわかった。従ってこれらのシミュレーションからは、 $q = 1$ の磁気面が存在しなければ、標準運転シナリオでは高エネルギー粒子駆動不安定性および高エネルギー粒子輸送の問題はないと判断できる。

・ LHD における加熱解析の進展

ECH 加熱分布を評価する LHDGauss コードおよび TRAVIS コードの統合輸送解析スイート TASK3D-a02 への導入作業が完了した (3.2.2.1 節参照)。LHDGauss コードは核融合研オリジナルのコードであり、最近、ほぼショット間での ECH 加熱解析が可能となり、ECH 加熱の最適化に活用されている。一方、TRAVIS コードは、マックスプランクプラズマ物理研究所：N.Marushchenko 博士によって開発され、核融合研：吉村泰夫

氏によって、単体としてLHD実験解析に用いられてきていた。TASK3D-a02は、LHD解析データサーバに登録されているLHDGaussの解析結果の参照、および、TRAVISのその場実行を行い、電子温度分布計測がある全時間タイミングでのECH吸収パワー計算結果を取り込んだエネルギーバランス解析が行えるように組み上げられている。TASK3D-a01では、NBI加熱プラズマの解析に限定されていたが、TASK3D-a02によって、ECH単独、あるいは、重畳プラズマにも適用範囲が格段に広がった。

ICRF加熱に関しては、TASK3D-a開発の一環として、京都大学：福山淳教授との共同研究によって、波動伝搬解析コードTASK/WMの誘電テンソルの改良、吸収計算の高精度化のための電場成分記述法の変更、径方向の有限差分法への変更などの改良を行っている。核融合研：關良輔助教によって、2015年の土岐コンファレンスにおいてその初期成果について報告が行われた。LHD実験への適用を目指して、コード改良を加速する。

- [3.3.3-1] M. Osakabe *et al.*, “Experimental observations of enhanced radial transport of energetic particles with Alfvén eigenmode on the LHD”, Nuclear Fusion, Vol. 46, No. 10 (2006) pp. S911.
- [3.3.3-2] S. Nishimura *et al.*, “Simulation Study of Alfvén-Eigenmode-Induced Energetic Ion Transport in LHD”, Plasma and Fusion Research, Vol. 8 (2013) pp. 2403090-1~2403090-6.
- [3.3.3-3] Y. Todo *et al.*, “Simulation Study of Energetic Ion Transport due to Alfvén Eigenmodes in LHD Plasma”, Plasma and Fusion Research, Vol. 3 (2008) pp. S1074-1~S1074-4.
- [3.3.3-4] H. Wang and Y. Todo, “Linear properties of energetic particle driven geodesic acoustic mode”, Physics of Plasmas, Vol. 20 (2013) pp. 012506-1~012506-8.
- [3.3.3-5] H. Wang, Y. Todo, and C. C. Kim, “Hole-Clump Pair Creation in the Evolution of Energetic-Particle-Driven Geodesic Acoustic Modes”, Physical Review Letters, Vol. 110 (2013) pp. 155006-1~155006-5.
- [3.3.3-6] H. Wang *et al.*, “Simulation study of high-frequency energetic particle driven geodesic acoustic mode”, Physics of Plasmas, Vol. 22 (2015) pp. 092507-1~092507-7.

- [3.3.3-7] Y. Todo *et al.*, “Multi-phase simulation of fast ion profile flattening due to Alfvén eigenmodes in a DIII-D experiment”, *Nuclear Fusion*, Vol. 54 (2014) pp. 104012-1~104012-13.
- [3.3.3-8] Y. Todo *et al.*, “Validation of comprehensive magnetohydrodynamic hybrid simulations for Alfvén eigenmode induced energetic particle transport in DIII-D plasmas”, *Nuclear Fusion*, Vol. 55 (2015) pp. 073020-1~073020-8.
- [3.3.3-9] Y. Todo and A. Bierwage, “Large-Scale Simulation of Energetic Particle Driven Magnetohydrodynamic Instabilities in ITER Plasmas”, *Plasma and Fusion Research*, Vol. 9 (2014) pp. 3403068-1~3403068-7.

3.3.4 周辺プラズマの輸送とプラズマ・壁相互作用

周辺プラズマは、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、重要度が増している。不純物を含めたプラズマおよび中性粒子の輸送モデリングが必要とされているが、十分に解析手法や計算モデルが確立されていないため、そのモデリングは喫緊の課題である。このような状況から、周辺輸送モデリングの基盤として、3.2.1.3節で述べた EMC3-EIRENE コードを中心にモデル開発とそれを用いた解析を進めてきた。進展のあった代表的な成果について以下に述べる。

・ダイバータ配位の中性粒子輸送への影響解析

LHD の開ダイバータから閉ダイバータへの変更の影響を予測・説明する輸送計算を行った。この目的のため、エルゴディック領域とダイバータレグ領域を覆う計算メッシュを EMC3-EIRENE コード専用開発した。図 3.3.4-1 に中性ガス圧の比較を示す。閉ダイバータのドーム構造下部で 10 倍程度のガス圧上昇が見られ、実験で測定されたガス圧上昇と 2 倍以内の範囲で一致した。さらに、加熱入力を一定に保って電子密度スキャンを行ったところ、図 3.3.4-2 に示すように、計測とほぼ同じ依存性が得られた。圧力の絶対値については複数の要因で変化しうるため、物理的に妥当な範囲内で合わせているのが現状だが、依存性（スケーリング）の一致は物理機構を含めたモデルの妥当性を示すものであり、粒子のリサイクリングを含めた解析へのバリデーションの一つと位置づけられる結果である。この成果は第 14 回 Plasma Edge Theory 国際ワークショップで報告を行った。

・ガス排気と燃料供給を含めた粒子輸送解析

粒子輸送は、能動的な排気と供給以外にダイバータ板での表面再結合過程があるため、自己無撞着な取り扱いが必要である。解析のため、EMC3-EIRENE に粒子ポンプと 2 種類の供給源を組み込みを行った。ポンプはドーム構造裏側に粒子吸収条件を設定し、その排気と釣り合う供給として、ガスパフを模擬するためにダイバータ板でのリサイクリングを強める方法と、炉心へのペレット供給や NBI の粒子デポジションを模擬するために炉心側境界面からイオンとして供給する方法を用いた。ガスの排気も供給も無い場合は、前項の図 3.3.4-1 (b) が相当する。一方、排気と 2 種類の供給を行った場合は図 3.3.4-3 の結果となった。ガス供給の場合、ポンプのあるドーム下部を除き、

排気無しとほぼ同じ結果となる一方、炉心供給を行った場合、全体的にガス圧が減少する結果となった。これは、炉心密度を一定に保つ条件のためにリサイクリングが減少し、ダイバータでの電子プラズマ密度の減少とガス圧の減少が起きたためである。周辺の粒子輸送には粒子供給方法を含めたモデリングが重要であることが示された。この成果は第24回IAEA核融合エネルギー会議で報告を行った。

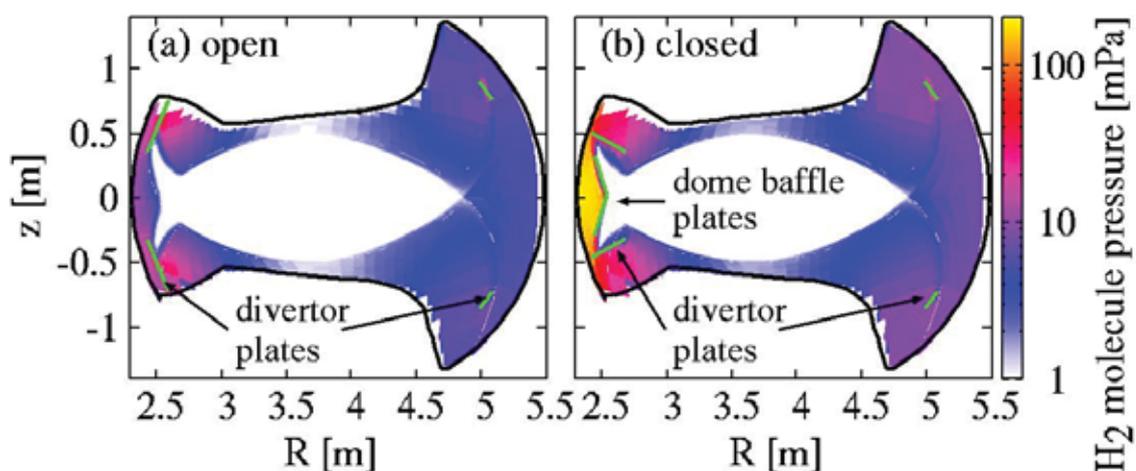


図 3.3.4-1 水素分子の圧力比較。(a) 開ダイバータ、(b) 閉ダイバータ。気体温度は室温を仮定した。

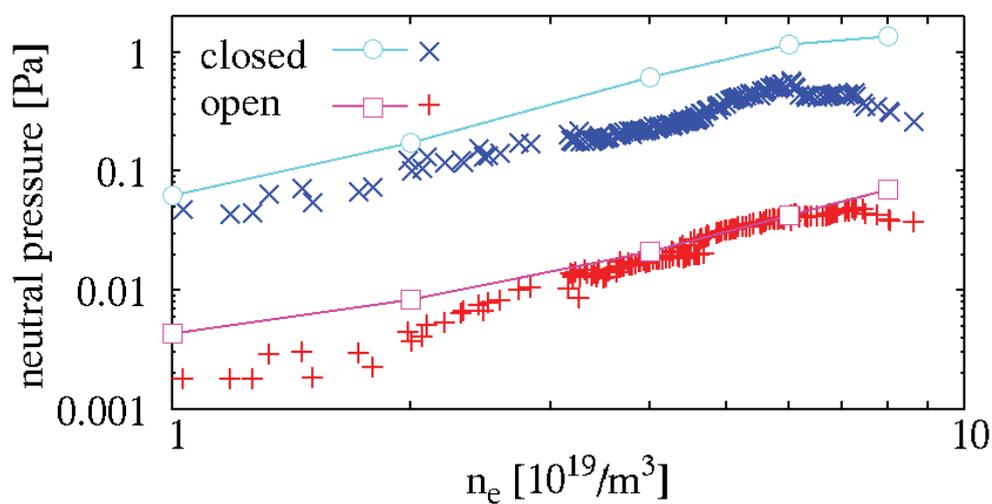


図 3.3.4-2 水素分子圧力の計測との比較。赤：開ダイバータ、青：閉ダイバータ。

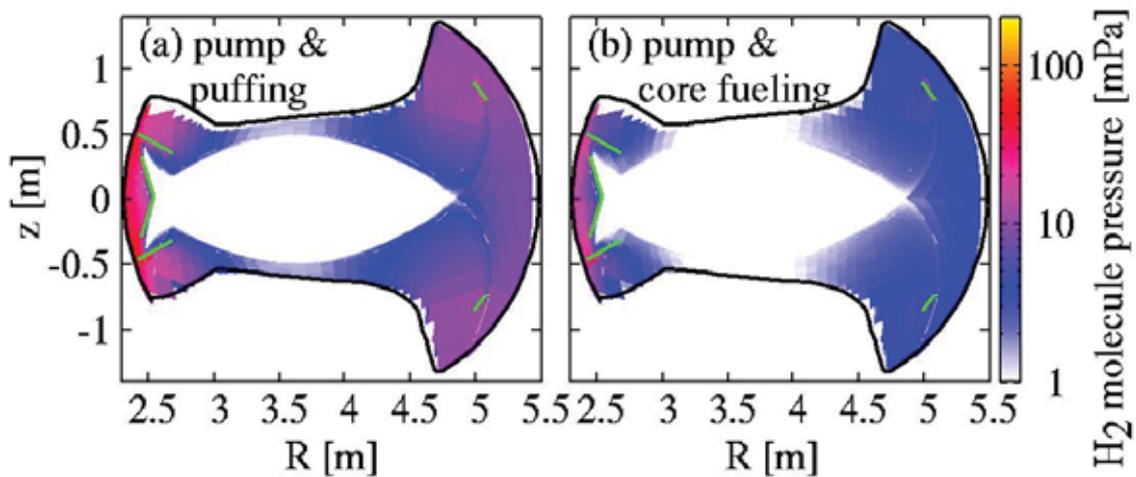


図 3.3.4-3 水素分子の圧力比較。(a) ガス供給、(b) 炉心供給。配位はともに閉ダイバータ。

・不純物ガスパフ時の不純物輸送解析

第17サイクルで行われたネオンガスパフ実験(#117478)を対象に、トムソン散乱計測で得られたプラズマ分布を再現するように輸送係数等の入力パラメータの決定を行い、それにスパッタリングで生じる炭素と、ガスパフで導入するネオンの2成分不純物の輸送を水素プラズマと同時に解いた。図 3.3.4-4 に計測との比較を示す。縦長断面を上部の6.5Uポートから少しトロイダル方向に傾く視線で観測したものである。加熱入力11.6MWに対して、水素・炭素・ネオンの合計放射パワーが計測値の2.5MWと一致するようにネオンの導入量を調整した。発光分布の広がり異なるが、ひととき強

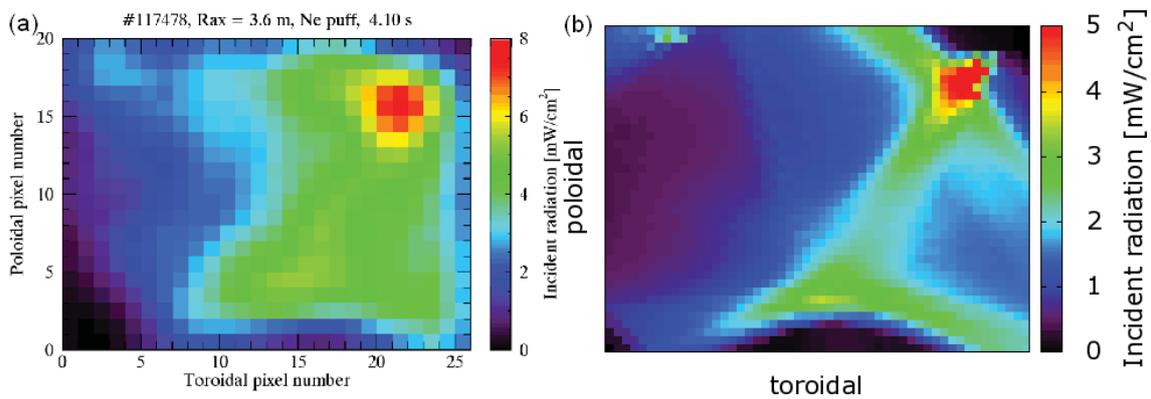


図 3.3.4-4 発光強度の比較。(a) ポロメータ計測、(b) EMC3-EIRENE 結果。

いピーク位置および線状の構造は非常によく一致している。解析から、強いピークはX点近くにある比較的低価数のネオンイオン密度のピークの寄与であることが分かった。さらに、このピークを持つ領域は最も粒子束の大きいトーラス内側のダイバータ板と磁力線でつながっており、磁場に平行な輸送で直接もたらされたものであることが分かった。また、他の線状のピークについては、カメラから遠い位置にある同様のネオン密度ピークの寄与、およびプラズマの縁に沿った視線積分の寄与によって生じていることが分かった。ネオンは炭素に比べてイオン化エネルギーが高いため、より深くプラズマに進入する事が確認された。その結果として、プラズマの流れによる摩擦力よりも温度勾配による熱力の影響を強く受け、ネオンは炭素に比べてエルゴディック領域に蓄積しやすく、より広い発光分布を持つことが分かった。(3.2.1.3節の図3.2.1.3-1参照)第15回 Plasma Edge Theory 国際ワークショップで、この成果について招待講演を行い、またプラズマ・核融合学会第32回年会での発表が若手学会発表賞に選ばれた。

・ 乱れた磁力線領域での熱輸送に関する理論研究

大型ヘリカル装置(LHD)をはじめとするヘリオトロン・ステラレータ磁場配位では周辺部にストカスティックな磁力線構造が存在する。このストカスティックな磁力線構造はプラズマ応答により増幅するものと考えられており、プラズマ周辺部の輸送解析を行うためにはストカスティックな磁力線構造を含む解析を行う必要がある。一方、トカマクの場合は軸対称性を仮定することにより、通常、2次元で周辺輸送の解析が行われる。しかし、閉じ込め改善モード(Hモード)に発生する周辺局在化モード(ELM)を低減・抑制するために共鳴磁場摂動(RMP)をプラズマに重畳する実験が盛んに行われている。このことは、これまで2次元で解析が行われてきたトカマクにおいても3次元の輸送解析が必要であることを意味しており、研究の新しい展開として注目されている。

これまで、無衝突の極限ではストカスティックな磁力線領域ではプラズマの閉じ込め性能はゼロとされてきた。これは、ストカスティックな磁力線領域では磁力線に沿った熱輸送が、温度を直ちに拡散させるためである。しかし、衝突プラズマでは有限な磁力線平行方向の熱拡散係数によりある程度の閉じ込め性能を有するが、それでも十分引くと考えられてきた。一方、LHD実験やトカマクのRMP実験では、磁力線構造がストカスティックと考えられるプラズマ周辺領域で有限な温度勾配が観測されている。このことは、ストカスティックな磁力線構造が有限な温度勾配を維持できる可能性を示している。このことを理論的に考察するためにカオス座標と呼ばれる、ストカスティックな磁力線構造領域で構築可能な新しい座標系の研究を、プリンストンプラ

ズマ物理研究所と共同で行っている。この座標系を用いて、磁力線の統計的性質を考察すると共に、ストカスティックな磁力線構造中の熱輸送の解析を行った。

カオス座標系とは、これまで一般に用いられてきた磁気座標系と異なり、磁気島やストカスティックな磁力線構造中から周期的な磁力線軌道を探し出して、座標系として利用するものである。このことにより、磁気島のセパトリックス中やストカスティックな磁力線構造中から KAM 面やカントール面をロバストに探索することが可能になった。このカオス座標系を用いて磁力線構造の詳細な解析を行うと、ストカスティックな磁力線構造中に KAM 面やカントール面が存在する場合にはプラズマ小半径方向に変位するストカスティックな磁力線に対してバリアーとして作用することが明らかになった。このことは、たとえ磁力線構造がストカスティックになったとしても、KAM 面のバリアーが存在すれば、そこで有限な温度勾配が維持できる可能性を示すものである。このことを確認するために現実的な値を持つ磁力線に平行方向と垂直方向の熱拡散係数を仮定した熱輸送解析を、RMP を重畳したトカマク配位に対して行った。磁力線に平行方向と垂直方向の比を $\kappa_{\parallel}\kappa_{\perp} \sim 10^{10}$ に設定し、以下の非等方熱輸送方程式の定常解を数値シミュレーションにより計算した。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\kappa_{\parallel} \nabla_{\parallel} T + \kappa_{\perp} \nabla_{\perp} T) + S$$

図 3.3.4-5 に結果を示す。図中には磁力線のポワンカレ図、セパトリックス上の安定・不安定多様体 (stable/unstable manifolds) を赤と青の太線、実線で温度の等高線を示した。ポワンカレ図から見ると磁力線構造がストカスティックになっているにもかかわらず、有限な温度勾配が存在することがわかる。このことは、ストカスティックな磁力線構造中に KAM 面から構成されるバリアーが存在し、有限な温度勾配を維持していると推測される。このことは、プラズマ周辺部の輸送を理解する上で、重要な知見であると考えられる。この結果は ISHW2015 で報告された。

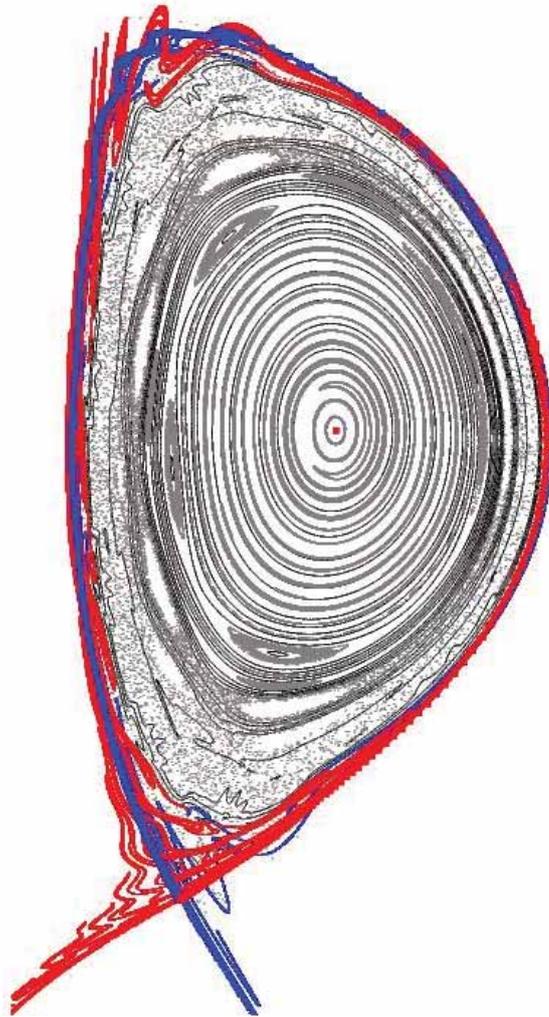


図 3.3.4-5 乱れた磁力線領域をもつトカマク配位での熱輸送解析結果。実線は温度の等高線を表す。

・数値シミュレーションを用いたタングステン挙動の解析

数値実験炉プロジェクトのプラズマ・壁相互作用研究グループでは、磁場閉じ込め型核融合装置のダイバーターならびに第一壁におけるプラズマ - 壁相互作用 (PWI) 現象を理解する為、分子動力学 (MD) を中心としたシミュレーション研究を行ってきた。特に、タングステンがヘリウムプラズマ照射を受けた場合に発現するヘリウムバブルおよび繊維状ナノ構造の形成過程の解明に取り組んだ。

ダイバーター材料であるタングステンにヘリウムの照射を続けると数十ナノメートルスケールのヘリウムバブルがタングステン内部に発生する。照射量がさらに上がりフルーエンスが 10^{25}m^{-2} 以上に達すると繊維状ナノ構造が形成される。これらのナノ構造が形成されたタングステン表面は熱耐久性等の性能劣化や、表面でのアークの発生などが危惧される。また別の視点から、ヘリウムバブルは固体金属中での気泡の形成現象という点で、繊維状ナノ構造はスパッタリングでも堆積でもない新しいナノ物質形成現象という点で科学的にも未知の現象であった。このことから、ヘリウムとタングステンの相互作用問題は、プラズマ - 壁相互作用研究においても重要課題と認識されている。

シミュレーションでヘリウムバブルと繊維状ナノ構造の問題を取り扱うにあたり我々が直面した問題は、これらの構造の発現は異なる物理階層の現象が複合的組み合わせで起こるものであり、何か単一のシミュレーション手法で計算できるものではないということであった。そこで、まずは現象を分類することから検討を始めた。幸い国内には繊維状ナノ構造を発見した愛知工業大学：高村秀一教授を始めとして、実験室プラズマ実験から顕微鏡による観察まで、繊維状ナノ構造に纏わる実験研究者が揃っている。これらの実験研究者との議論を経て、ヘリウムバブルと繊維状ナノ構造の形成現象は、(1)ヘリウムプラズマの入射過程、(2)タングステン内部のヘリウムの拡散・凝集過程、(3)ナノバブルの成長過程、(4)繊維状構造の成長過程の四段階の過程に分類した。

第一段階となるヘリウムプラズマの入射過程では、ヘリウムの侵入とスパッタリングによる金属表面損耗の競争が問題となる。二体衝突近似法 (BCA) を用いた解析の結果、ヘリウムの場合には 100eV 以下の入射エネルギーではスパッタリングが殆ど起きずに侵入だけが起こることが解った。一方で 100eV 以下の入射エネルギーで侵入できる深さは 10nm 以下であり、ヘリウムバブルの分布に比べてもかなり浅いことが解った。

第二段階となるタングステン内部のヘリウムの拡散・凝集過程では、ヘリウムの凝集可能性について調べた。ヘリウム原子がタングステン中でバラバラに孤立している状態と、一か所に凝集している状態のエネルギーを比較することで、どちらがエネルギー

ギー的に安定で存在しやすい状態であるかを見出す。エネルギーの算出には金属内の電子状態を量子力学的に求める必要があり、密度汎関数法 (DFT) に基づいた計算を OpenMX コードを用いて行った。その結果、水素原子はタングステン中の空孔においても 6 個程度までしか凝集しないが、ヘリウムだけでなくネオン、アルゴンといった希ガス原子はタングステン中で際限なく凝集できる可能性が示された。希ガス原子は閉殻電子構造の為に金属中の自由電子からは斥力のみを受ける為、凝集してタングステン原子を押し広げた方がエネルギー的に安定になると考えられる。

第三段階となるナノバブルの成長過程では、扱うべき空間スケールが数ナノメートル以上に及ぶため DFT による計算は難しく、精度は落ちるが MD による古典力学計算を行う必要がある。しかし、プロジェクト発足時の段階ではタングステンとヘリウムの相互作用を精度良く扱えるポテンシャルモデルが存在せず、MD 計算を実行できる状況ではなかった。そこで、Downfolding 法を用いた MD 用のポテンシャルモデルの開発を行った。100 原子程度からなるサンプル構造を数百種類用意し、その構造に対するエネルギーを DFT と暫定ポテンシャルモデルで算出する。それらの差の二乗平均が最小になるように暫定ポテンシャルモデルのパラメータを修正していくことで、精度の良いポテンシャルモデルを得ることができる。これにより、DFT との差が $0.01\text{eV}/\text{atom}$ 以下となる高精度なタングステン - ヘリウム系のポテンシャルモデルを得た。本ポテンシャルモデルを用いてヘリウムバブルの表面付近での破裂を調べた。また名古屋工業大学：小林亮助教らは本研究で開発したポテンシャルを用いた MD シミュレーションにより、バブル成長に伴うループパンチング機構を明らかにした。

第四段階となる繊維状ナノ構造の成長過程は、空間スケールで言えば MD の適用範囲内であるが、MD シミュレーションで扱える時間スケールはせいぜい 100 ナノ秒程度である。その為、長時間スケールに及ぶタングステン内部のヘリウム拡散を MD では再現できず、浅い領域のヘリウム濃度が上昇しすぎて非現実的な破壊が起こってしまう。そこで、MD と動的モンテカルロ法 (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 で表現し、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 (図 3.3.4-6 参照)。これにより、繊維状ナノ構造の成長過程を再現することに成功した。繊維状ナノ構造の成長速度を見ると、高さがヘリウム照射時間の平方根に比例することが知られているが、この点についても MD-MC ハイブリッドシミュレーションと実験で一致した。

以上のように、材料の数値計算による評価としてヘリウムバブルと繊維状ナノ構造の形成過程を中心課題に据えたが、この課題を進めることで、複数の計算手法の利用ならびにそれらのハイブリッド手法の開発によるマルチスケール解析を、PWI 現象においても実用レベルで導入することができた。これらの計算手法を、さらに発展させ、

PWI 課題の解決の為に有効に活用できることが期待できる。特に MD-MC ハイブリッド手法は繊維状ナノ構造の形成だけでなく、従来の MD では計算時間の制限により実験に比べて 10^6 倍以上の照射フラックスを設定せざるを得ないという問題点を解決し、実験同等の照射フラックスを扱えるように工夫している。この手法は、この現象以外にも適応できることが期待できる。

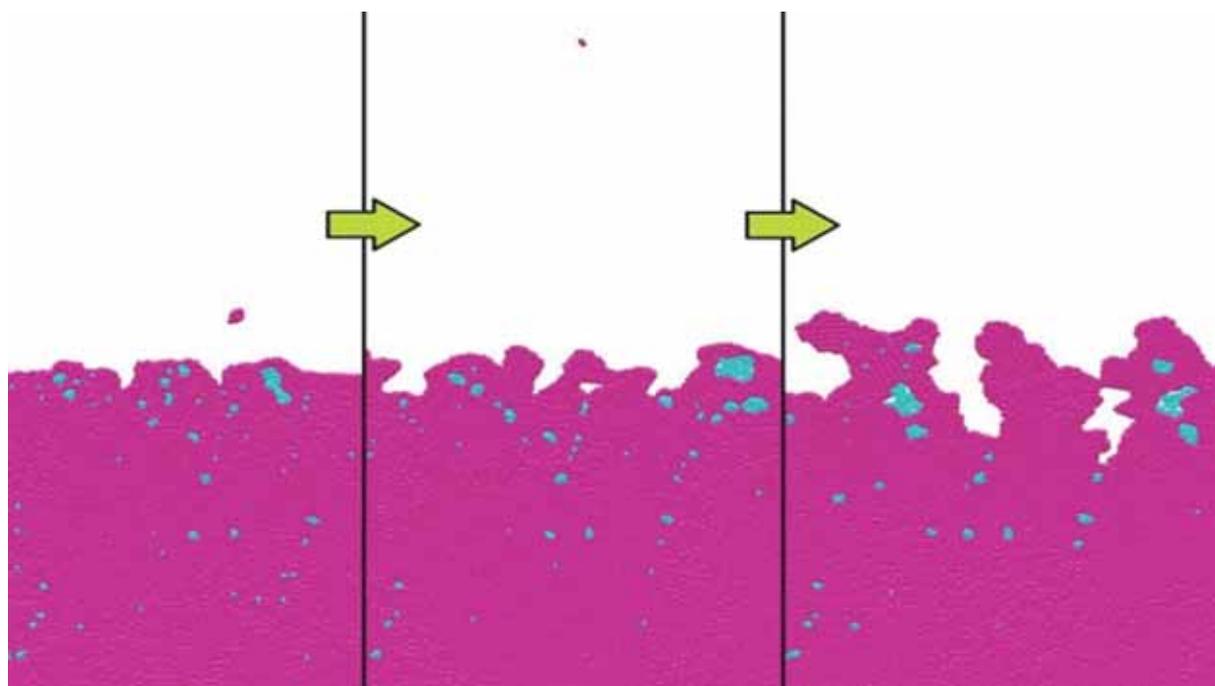


図 3.3.4-6 タングステンにヘリウムを照射した時の時間発展。紫がタングステン、水色がヘリウムを表す。タングステン表面に繊維状ナノ構造が生成される様子を、MD-MC ハイブリッドシミュレーションを使って再現することができた。

3.3.5 基礎物理

3.3.5.1 LHD の Hall MHD 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するシミュレーション研究を行っている。バルーニングモードに関するこれまでの完全 3 次元圧縮性 MHD シミュレーション研究から、以下の点がわかっている。

1. 粘性が十分に大きい場合にはバルーニングモードの成長は飽和し、かつ、良好な磁気面をもつ状態に自律的に回復する (Miura et al., 2006)。
2. 粘性を、実験で想定されるような小さな値にするほどにバルーニングモードの成長は増大し、プラズマコアを大きく壊すまで、その成長は飽和しない。飽和した段階では、密度分布が往々にして初期の圧力勾配とは逆方向に勾配をもつホロー分布になるなど、通常想定されるような飽和状態とはまったく異なった状態（崩壊状態）となる。また、良好な磁気面への自律的な回復は今のところ見られない。
3. この崩壊過程において、圧力分布の平坦化、圧縮性による成長率の低下などは発生している（あるいは考慮されている）が、飽和に対して十分な影響を及ぼしているようには見られない。
4. 3 次元シミュレーションにおいて、磁力線平行方向への熱伝導効果を高精度で実装することにより、この崩壊をある程度緩和することがわかった。また、平行方向熱伝導の影響により、平行方向に対して熱エネルギーが運動エネルギーに変換され、結果として運動エネルギーは大きくなりえることがわかった (Miura & Nakajima, 2010)。

以上の研究を踏まえて、LHD の短波長圧力駆動型不安定性について、Hall 効果などを取り入れた拡張 MHD シミュレーション研究をはじめた。この研究は、LHD での 3 次元シミュレーションだけでは困難が予想されるため、2 次元矩形形状での Rayleigh-Taylor 型不安定性の拡張 MHD シミュレーションによる短波長成分生成の基礎研究、Hall 効果が短波長成分の励起と空間構造の変化に及ぼす影響についての大規模一様 Hall MHD 乱流シミュレーションを平行して行っている。これら 2 件の研究については他の節を参照されたい。

LHD での 3 次元シミュレーションに Hall 効果を入れたシミュレーションを行った [3.3.5.1-1]。Hall 項はその性質から、きわめて短波長の分散性波動を生成し、時間および空間について高い数値解像度を要求する。このため、比較的 low wave number のモードに焦点

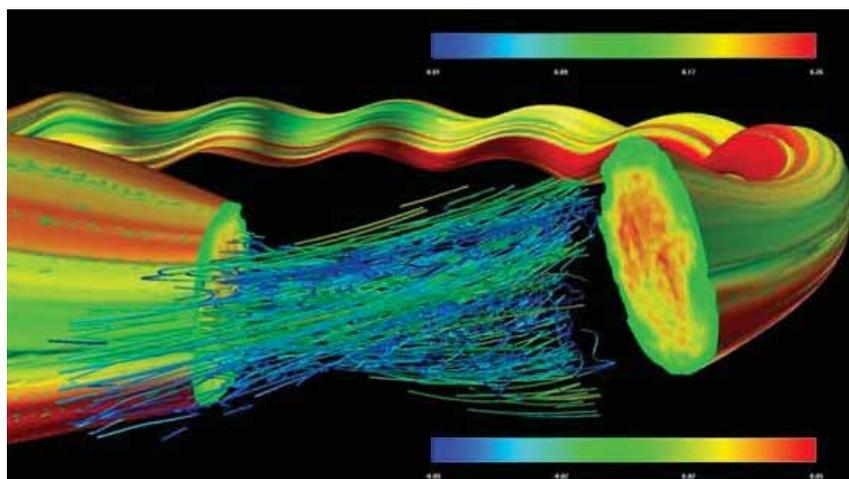


図 3.3.5.1-1 LHD 中のバルーニングモードの 3 次元シミュレーションによる、圧力分布。

を当てることを念頭に、中程度 (トロイダル波数 $n = 10$ 程度) 以上の波数の不安定モードを打ち切るような数値フィルターを作用させた。この結果、数値シミュレーションはバルーニングモードの飽和にいたったが、その飽和プロファイルにおける値は、Hall 効果なしで磁力線平行方向熱伝導効果を入れた場合よりも低く、また、密度分布もホロー分布になるなど、むしろ不安定効果に作用する結果になった。このシミュレーションからわかったことは以下の点である。

1. 短波長成分の打ち切りは、飽和プロファイルに対して悪影響を与える。これは、短波長成分の打ち切りが超波長成分との相互作用を失わせ、結果として長波長成分の線形成長段階を延長させる作用を及ぼすためである。
2. Hall 効果は不安定性を強化しえる。これは、Rayleigh-Taylor 型不安定性の 2 次元拡張 MHD シミュレーションで得られた結果と同様に、2 流体効果が平衡プロファイルの性質によって、不安定性の強化にも抑制にも作用し得ることと関連していると考えられる。

2 次元 Rayleigh-Taylor 不安定性のシミュレーションからも、LHD の 3 次元短波長不安定性の抑制には、2 流体効果だけでなく有限ラーマー半径効果も同時に必要であると考えられる。また、2 流体効果も有限ラーマー半径効果は短波長成分も、磁場および速度場の短波長成分を著しく励起することがわかっているため、適度にこれらを打ち切りつつ、非線形段階においては、短波長成分が非線形項を通じて長波長成分に及ぼす影響を適宜代替し得るようなモデルの開発を行う必要がある。このような考え方は、流

体工学において Large Eddy Simulation(LES) と呼ばれる。Hall 効果による LES の最初の取り組みは、国際会議において発表され [3.3.5.1-2] (招待講演)、現在雑誌への投稿準備中である。

[3.3.5.1-1] H. Miura, R. Goto, A. Ito, M. Sato, T. Hatori, “Two-fluid effects on pressure-driven modes in a heliotron device”, The 25th IAEA Fusion Energy Conference TH/P5-17 (October 13-18, 2014, St. Petersburg, Russia).

[3.3.5.1-2] H. Miura, K. Araki, A. Ito, “Investigation of short-wave Hall and gyro-viscous effects in instability and turbulence”, 24th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (August 12-14, 2015, Golden, Colorado, U.S.A.).

3.3.5.2 磁場閉じ込め装置の周辺領域におけるプラズマコヒーレント構造のダイナミクス

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、周辺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、プラズマプロブとも呼ばれ、従来の拡散的描像では説明できない動径方向のプラズマ輸送を担っていると考えられている。このプロブ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、その妥当性の評価が問題となっている。そこで、上記のような粒子的效果がプラズマコヒーレント構造の挙動に与える影響を明らかにし、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) によるプラズマコヒーレント構造ダイナミクスの研究をおこなっている。これまでの p3bd コードによる計算では、図 3.3.5.2-1 (a) のように、構造内に自己無撞着に形成されるらせん状の電流系が観測された [3.3.5.2-1]。このことは、粒子シミュレーションを用いることにより、プロブ構造における電流クロージャの問題を解決できる可能性を示している。また、プロブ内部に形成される温度構造も明らかにされた [3.3.5.2-1]。プロブの内部には、その断面において、ダイポール状の電位構造が形成されるが、その高ポテンシャル側、および、低ポテンシャル側における磁力線方向の電子速度分布を調べたところ、高ポテンシャル側の電子温度のほうが高いことがわかった (図 3.3.5.2-1 (b))

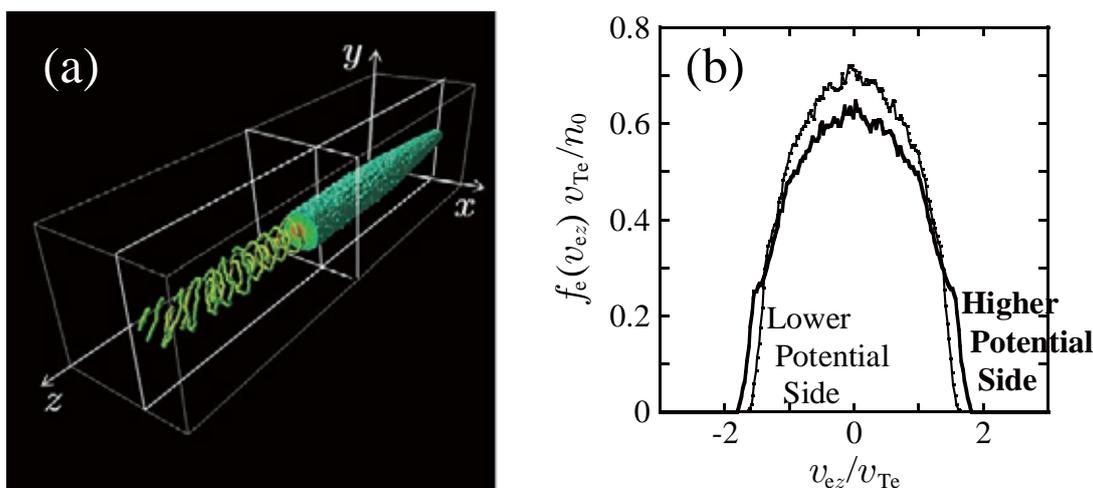


図 3.3.5.2-1 (a) プロブ構造内部に自己無撞着に形成される電流系(左手前側の流線。右奥側の等値面は電子密度分布を示している。)と(b) プロブ内部の高ポテンシャル側、および、低ポテンシャル側における磁力線方向の電子速度分布(太線が高ポテンシャル側、細線が低ポテンシャル側を示している)。

参照)。さらに、イオン温度が高い(イオンのラーマー半径が大きい)場合には伝播の対称性が崩れることが見出され、磁場勾配が磁力線方向に非一様な場合では、その磁場形状やプロブの初期位置によって異なる伝播や内部構造の特性が観測されている。

[3.3.5.2-1] H. Hasegawa and S. Ishiguro, “Study of self-consistent particle flows in a plasma blob with particle-in-cell simulations”, Physics of Plasmas, Vol. 22, No. 10 (2015) pp. 102113 (1 ~ 8).

3.3.5.3 無衝突磁気リコネクションに関する多階層シミュレーション研究

磁気リコネクションは、核融合をはじめとした様々なプラズマで見られる普遍的なエネルギー解放過程であり、また典型的な階層横断現象でもある。リコネクションが起ると磁場のトポロジーが系全体に及ぶスケールで変化し、大規模な輸送も発生する。その一方、リコネクションが駆動されるために必要な電気抵抗は、運動論的な過程が基になって生成される。このマクロとミクロの過程は独立しているのではなく、複雑に絡み合って発展している。磁気リコネクションを階層横断現象として全体像をつか

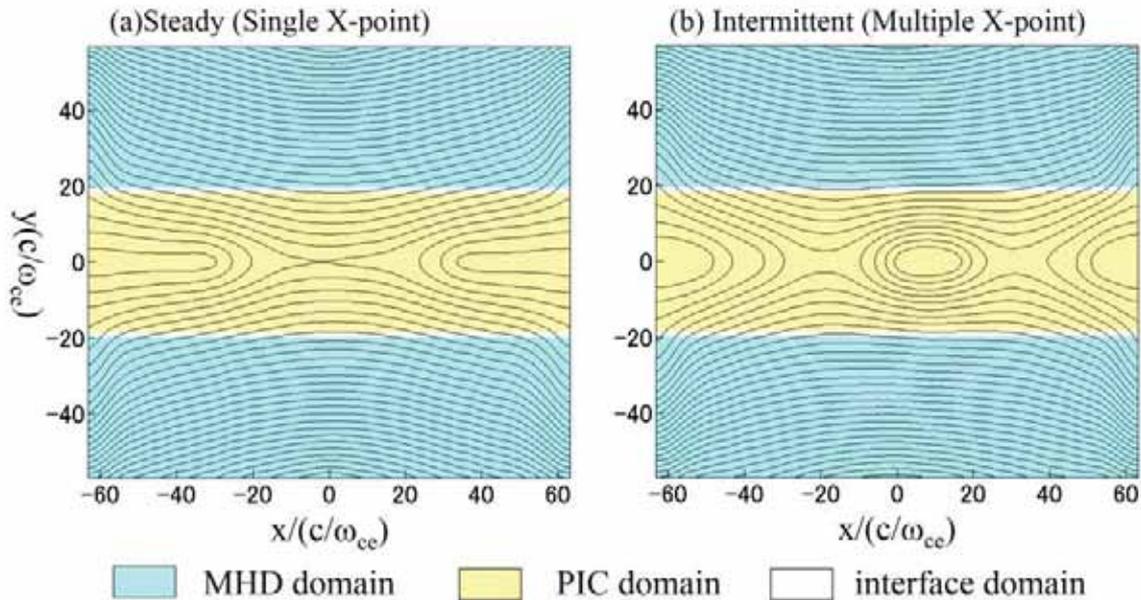


図 3.3.5.3-1 多階層モデルによる磁気リコネクション結果。(a)では単一のX点、(b)では複数のX点を持つ磁気リコネクションが駆動されている。

むことを目指し、マクロとミクロの物理を同時にかつ自己無撞着に解く多階層シミュレーションモデルの開発を行っている。我々の多階層モデルでは、シミュレーションの実空間を分割するという大きな特色がある。すなわち、領域をマクロ階層とミクロ階層に分け、マクロ階層の物理は磁気流体 (MHD)、ミクロ階層は粒子 (PIC) シミュレーションにより計算する。また、2つの階層間には互いのデータをスムーズに交換するため、有限の幅を持ったインターフェイス領域を挿入する。この手法により、物理的根拠が曖昧な仮定・モデルを用いず、第一原理計算に基づいたミクロの物理をマクロ階層に取り入れることができる。

この多階層モデルを用いて、マクロのダイナミクスが磁気リコネクションのミクロな物理に及ぼす影響について初の解析を行った [3.3.5.3-1]。我々は、MHD領域から流入させるプラズマインフローのパターンが異なるシミュレーションを実行した。インフローははじめ上流境界の中央 ($x = 0$) から流入し始め、流入する領域は速度 v_w で x 方向に広がっていくものとした。図 3.3.5.3-1 は時刻 $\omega_{ce}t = 1980$ における磁力線を示しており、(a) は $v_w = 0.6v_A$ 、(b) は $v_w = 4.0v_A$ (v_A は Alfvén 速度) の場合の結果である。(a) においては、PIC 領域で駆動されたりコネクションは単一の X 点を持っており、定常なりコネクションに緩和していくと見られる。一方 (b) では、複数の X 点を持ち、間

欠的なリコネクションが継続する。多階層シミュレーションにより詳しく調べた結果、 $v_w < v_A$ の場合は単一の X 点、 $v_w > 2.0v_A$ では複数の X 点を持つリコネクションが駆動される傾向があることが分かった。

この多階層シミュレーションによる成果は、「核融合プラズマ理論」に関する Varenna-Lausanne 国際ワークショップ、アジア太平洋プラズマ理論会議 (APPTC)、計算物理国際会議 (CCP)、「宇宙空間シミュレーション」に関する国際シンポジウム (ISSS) といった国際会議における招待講演として選ばれた。

[3.3.5.3-1] S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, and M. Den, “Multi-Hierarchy Simulation of Collisionless Driven Reconnection by Real-Space Decomposition”, Journal of Physics: Conference Series, Vol.561 (2014) pp.012021 (1 ~ 10).

3.3.5.4 MHD 平衡・安定性理論の拡張

・強いポロイダル流をもつ平衡に対する磁気座標

強いポロイダル流をもつ有限ベータトロイダル平衡の安定性解析に必要な磁気座標系を構築した結果を報告する。流れをもつ軸対称平衡を表す一般化された Grad-Shafranov 方程式を逆アスペクト比で展開することで、ポロイダル音速程度の流れをもつ高ベータトカマク平衡に対する方程式系が得られ [3.3.5.4-1]、円形断面の固定境界と線形の磁気面量を仮定することで磁束関数の解析解が得られる [3.3.5.4-2]。1 次の磁束関数の解は流れのない場合と等しく、2 次の解に流れの効果が含まれる。この解析解から磁気座標を求めた。軸対称平衡に対しては、ポロイダル断面を磁気面量と任意のポロイダル角で 2 次元平面を構成する。円筒座標系におけるポロイダル断面から磁気座標系への変換式には 1 次の磁束関数の解析解に対する式を拡張したものである。流れがある場合の 2 次の磁束関数を含む場合の解を数値的に求めた。図 3.3.5.4-1 は各磁気面における圧力のポロイダル分布を示したもので、亜音速流の場合 (a) にはトーラス外側 ($\theta = 0$ 付近) で圧力が高くなり、超音速流 (b) の場合にはトーラス内側で ($\theta = \pm\pi$ 付近) で圧力が高くなる。この座標系を用いることで、次の圧力の磁気面平均が数値的に求まる。この量の径方向分布のポロイダルマッハ数に対する依存性を調べた結果、亜音速領域では超音速領域に比べ、より中心にピークした分布になることが明らかとなった。また、変換式を逆アスペクト比で展開することで解析解が得られ、ポロイダル流速が小さい場合に数値解と良い一致を示した。

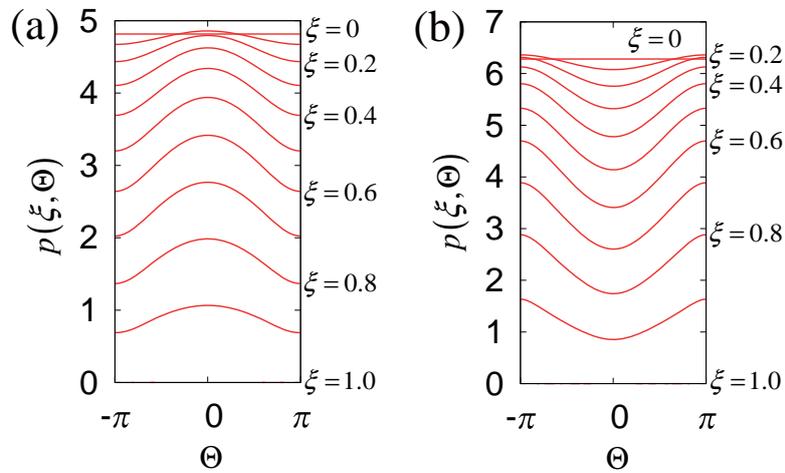


図 3.3.5.4-1 各磁気面における圧力のポロイダル分布

・有限ベータプラズマにおける Rayleigh-Taylor 不安定性に対する二流体及び有限ラーマー半径効果のパラメータ依存性

非一様な磁場をもつ有限ベータプラズマ平衡における Rayleigh-Taylor (RT) 不安定性に対する二流体及び有限ラーマー半径効果のパラメータ依存性を、拡張 MHD モデルを用いた線形解析により調べた。短波長モードに対する局所解析では、有限ラーマー半径効果により臨界波数以上で完全に安定化する現象が、非一様な磁場で実現する圧力勾配の小さい平衡では、低ベータでは見られなくなることを明らかにした。二流体効果と有限ラーマー半径効果のどちらか一方を含む場合と両方含む場合とで成長率を異なるベータ値において比較し、両方を含む場合においては有限ラーマー半径効果のみの場合とは異なるベータ値で完全安定化の消失が現れ、最も強い安定化を示さない場合が存在することを明らかにした(図 3.3.5.4-2)。また、固有モード解析を行い、局所解析における成長率の空間依存性と比較し、拡張 MHD シミュレーションで見られた、有限ラーマー半径効果のみを含む場合に短波長で成長率が局所解析に漸近しない現象 [3.3.5.4-3] が、有限ラーマー半径効果による固有関数の非局在化と、局所成長率が周辺領域で中心よりも大きくなっていることの組み合わせに起因していることを示した。

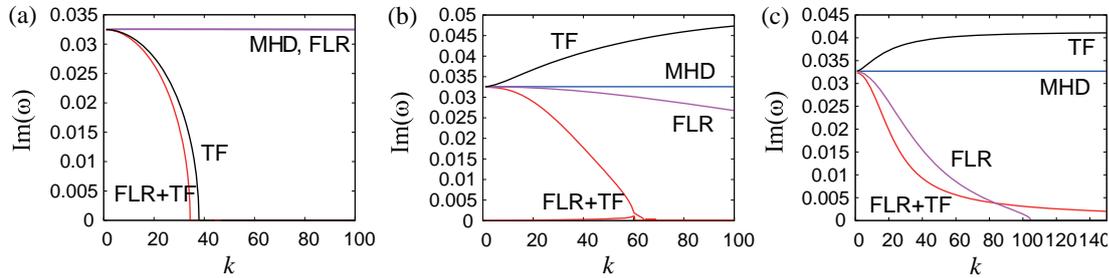


図 3.3.5.4-2 成長率の波数依存性のモデル比較 (a) $\beta = 0.01$ (b) $\beta = 0.1$ (c) $\beta = 0.3$

[3.3.5.4-1] A. Ito, J. J. Ramos and N. Nakajima, “High-Beta Axisymmetric Equilibria with Flow in Reduced Single-Fluid and Two-Fluid Models”, Plasma Fusion Research Vol.3 (2008) 034 (7 pages).

[3.3.5.4-2] A. Ito and N. Nakajima, “Analytic high-beta tokamak equilibria with poloidal-sonic flow”, Plasma Physics and Controlled Fusion Vol.51 (2009) 035007 (18 pages).

[3.3.5.4-3] R. Goto, H. Miura, A. Ito, M. Sato, and T. Hatori, “Formation of large-scale structures with sharp density gradient through Rayleigh-Taylor growth in a two-dimensional slab under the two-fluid and finite Larmor radius effects”, Physics of Plasmas Vol. 22 (2015) 032115 (10 pages).

3.3.5.5 2次元RT不安定性の拡張MHDシミュレーション

2次元矩形領域中のRayleigh-Taylor不安定性の線形・非線形不安定性に対する2流体および有限Larmor半径 (FLR) 効果を数値シミュレーションによって調べた。この際の注目点は、低領域における、高波数成分のダイナミクスおよびこれに伴う空間構造形成である。本研究では、RobertsとTaylor(1962)、P. Zhu(2008)らによって用いられたものと同様の、2流体効果およびジャイロ粘性項 (FLR項) を含む拡張MHD方程式を数値的に解くことで、上記の問題に取り組んだ。この方程式は以下のような形

をしている。

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \rho}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i), \\
\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) &= -\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho u_j u_i - b_j b_i + \left(p + \frac{b_k b_k}{2} \right) \delta_{ij} + \delta \Pi_{ij}^{gv} \right] - \rho g \delta_{j,2}, \\
\frac{\partial E_T}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x_i} \left[(E_T + p) u_j + u_k \delta \Pi_{kj}^{gv} \right] + u_k \epsilon_{kmn} J_m b_n - \rho g u_2, \\
E_T &= \frac{1}{2} \rho u_i u_i + \frac{p}{\gamma - 1}, \\
\frac{\partial b_i}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x_i} \left[(u_j b_i - b_j u_i) - \epsilon_{ijk} \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\epsilon}{\rho} \left(\epsilon_{kmn} J_m b_n - \frac{\partial p_e}{\partial x_k} \right) \right].
\end{aligned}$$

ここで b_i 、 $J_i = \epsilon_{ijk} \partial b_k / \partial x_j$ および u_i はそれぞれ磁場ベクトル、電流密度ベクトル、速度ベクトルの第 i 成分である。記号 δ_{ij} 、 ϵ_{ijk} 、 γ 、 ρ および p はそれぞれ Kronecker のデルタ、Levi-Civita の反対称テンソル、比熱比、質量密度、および圧力である。記号 Π_{ij}^{gv} はジャイロ粘性テンソルの第 i, j 成分である。式中で繰り返される添え字については 1 および 2 の和をとる。数値シミュレーションは 2 次元矩形領域を直交格子上的 4 次精度中心差分法と 4 次精度の Runge-Kutta-Gill 法を用いて行った。

この研究については、2 本の論文が発表された [3.3.5.5-1, 2]。最初の論文 [3.3.5.5-1] では、2 流体効果、FLR 効果を独立したパラメータと見なし、それぞれの効果の有無に応じて不安定性の成長がどのように変化するかを調べたものである。いくつかのパラメータの組み合わせから、1 流体効果、FLR 効果はそれぞれ単独では線形成長に与える影響が小さいのに対して、両者が加わった場合には、線形成長率を著しく低減する効果を発揮することがわかった。また、この両者が加わることで線形段階の成長率は低下するものの、非線形成長段階における飽和レベルには大きな影響を与えないことが示された。さらに、混合層幅の成長（これは非線形成長の指標の一つでもある）においても、2 流体効果と FLR 効果の組み合わせは初期成長を抑止するものの、最終的には 1 流体 MHD の場合と同程度の大きさまで成長する事が示された。

第二の論文 [3.3.5.5-2] は、第一の論文とは異なる平衡についての研究が行われた。

値 1% 程度の領域において、2 流体効果および FLR 効果の 2 つの効果が、高波数の Rayleigh-Taylor 不安定モードを安定化することが、数値シミュレーションおよび線形 (WKB) 解析によって示された。2 流体効果、FLR 効果はそれぞれ単独では十分な安定化効果を発揮しないが、両者が加わった場合の線形解析では、有限波数において成長率がゼロとなる。非線形シミュレーションでは、線形段階における成長率が WKB 解析と良好な一致を見せた。また、2 流体効果と FLR 効果の両方を取り入れられたシミュレーションでは、線形段階において低波数モードのみが有限の成長率をもつため、Rayleigh-

Taylor 不安定性特有のマッシュルーム構造が大規模に成長する一方、FLR 効果のために密度界面が急峻化し、これに合わせて密度界面に沿って急峻な速度剪断層が形成される。この結果、密度剪断層に沿った Kelvin-Helmholtz 的二次不安定性が発生し、短波長成分は 2 流体効果、FLR 効果のない MHD モデルによる Rayleigh-Taylor 不安定性に比べて高波数成分が卓越する事がわかった。図 3.3.5.5-1 は論文 [3.3.5.5-1] より、一流体 MHD シミュレーションにおける密度場の時間変化 (a) 線形段階初期、(b) 十分に発達した段階を、図 3.3.5.5-2 には、拡張 MHD シミュレーションにおける密度場と、なお、この論文は Phys. Plasmas 第 22 巻 3 号において”Featured article” に選ばれるとともに、論文中の図が表紙を飾った。

[3.3.5.5-1] R. Goto, H. Miura, A. Ito, M. Sato, T. Hatori, “Hall and Gyro-Viscosity Effects on the Rayleigh-Taylor Instability in a 2D Rectangular Slab”, Plasma Fus. Res. Vol. 9 (2014) 1403076 (7p).

[3.3.5.5-2] R. Goto, H. Miura, A. Ito, M. Sato, T. Hatori, “Formation of large-scale structures with sharp density gradient through Rayleigh-Taylor growth in a two-dimensional slab under the two-fluid and finite Larmor radius effects”, Phys. Plasmas Vol.22 (2015) 032115 (11p).

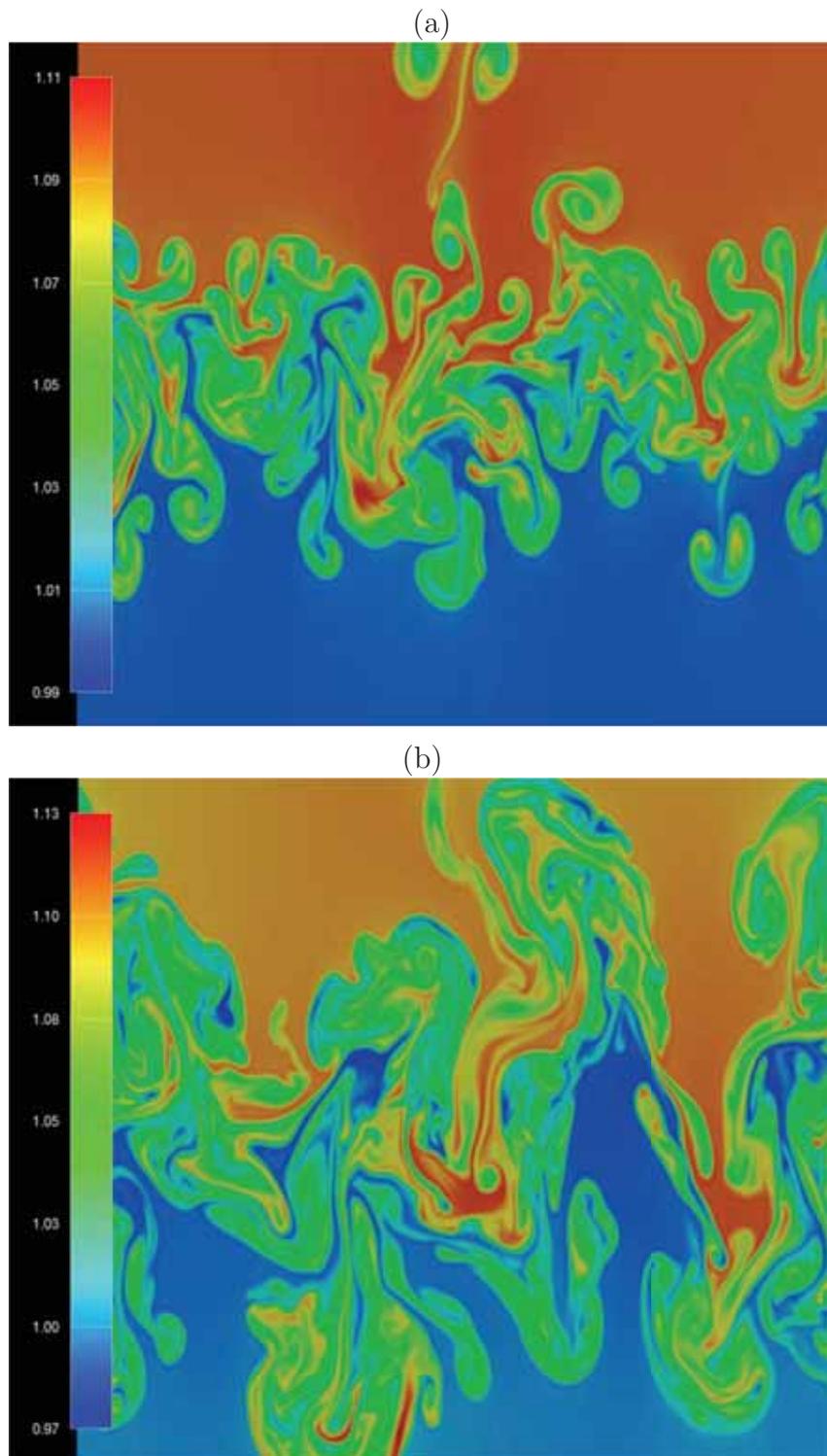


図 3.3.5.5-1 Rayleigh-Taylor 不安定性の 2 次元拡張 MHD シミュレーション。(a) 線形段階初期、(b) 十分に発達した段階。

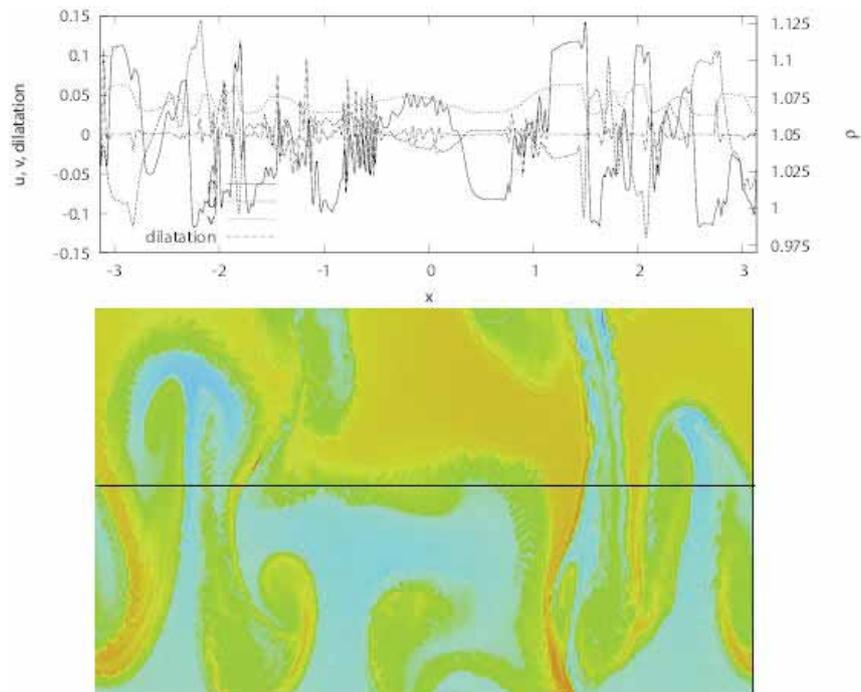


図 3.3.5.5-2 Rayleigh-Taylor 不安定性の 2 次元拡張 MHD シミュレーション。2 流体項および FLR 項を伴う拡張 MHD シミュレーションによって得られた密度等高線 (下段)。上段のパネルは水平 (x) 方向の密度、速度場の変化を表す。

3.3.5.6 一様等方 MHD 乱流

MHD 乱流は、宇宙プラズマ、太陽風や液体金属の流れなどの様々な流れに見られる。LHD のバルーニングモードシミュレーションにおいても、不安定モードの非線形飽和段階においては、乱流と言ってよい状態が見られる。この中で特に一様等方乱流は、流体力学の乱流との対比も念頭に調べられてきた、古典的な乱流の一つである。近年では、微視的效果が乱流に与える影響が重要視されるようになっており、特にイオン表皮長 (Hall) 効果を取り入れた Hall MHD モデルは、太陽風における磁気エネルギースペクトルの屈曲や乱流磁気リコネクション、乱流ダイナモの影響が広く調べられている。ここでは、Hall 効果が乱流に与える影響を調べた 2 編の論文 [3.3.5.6-1,2] について報告する。

第一の論文では、一様等方 MHD 乱流におけるスケール間エネルギー伝達について、直接数値シミュレーションによって調べた。この直接数値シミュレーションでは、非

圧縮性 Hall MHD 方程式 The incompressible Hall MHD equations are described as

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[(u_i u_j - b_i b_j) + \left(p + \frac{1}{2} b_k b_k \delta_{ij} \right) \right] + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} S_{ij}, \quad (4)$$

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

$$S_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial B_i}{\partial t} = -\epsilon_{ijk} \frac{\partial E_k}{\partial x_j}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial B_k}{\partial x_k} = 0, \quad (8)$$

$$E_i = -\epsilon_{ijk} (u_j - \epsilon_H J_j) B_k + \eta J_i. \quad (9)$$

を、擬スペクトル法と Runge-Kutta-Gill 法で数値的に解いた。ここで記号 B_i および u_i はそれぞれ、磁場ベクトルおよび速度場ベクトルの第 i 成分を、記号 μ, η, ϵ_H は粘性率、電気抵抗率、Hall パラメータである。記号 δ_{ij} および ϵ_{ijk} は Kronecker のデルタ記号と Levi-Civita の反対称テンソルであり、添え字が繰り返されたものについては和をとる。

まず、格子点数 $N^3 = 512^3$ で外力を課さない減衰性乱流のシミュレーションを、同一の初期条件、同一の粘性率、電気抵抗率、時間刻みで行う事により、Hall MHD 乱流 ($\epsilon_H = 0.05$) および MHD 乱流 ($\epsilon_H = 0$) の 2 つの場合を初期値問題として厳密な比較対象可能な形で計算し、エネルギースペクトル及びスケール間のエネルギー伝達を調べた [3.3.5.6-1]。この論文では、一様等方性 Hall MHD 乱流の磁気スペクトルが波数 k について $k^{-7/3}$ となる傾向を確認した。また、ローパスフィルターを用いて高波数成分を除去したエネルギー伝達関数（これは各 k でのエネルギーの増減を表す）構築したところ、カットオフ波数が高波数である場合には磁気エネルギー伝達関数の低波数成分側にはあまり影響がない一方、カットオフ波数が低くなり過ぎると最低波数（最も大きなスケール）のエネルギーの増減まで著しく影響が及ぶことを明らかにした。図 3.3.5.6-1 は、(a) 運動エネルギー伝達関数および (b) 磁気エネルギー伝達関数のそれぞれについて、カットオフ波数を $k_c = 64$ および $k_c = 32$ とした場合の結果である。この図及び他の解析から、カットオフ波数にある閾値があり、この閾値より低いカットオフ波数のローパスフィルターを作用させることは低波数側のエネルギー増減を（したがってプラズマの運動そのものも）著しく変化させる可能性がある事がわかった。このような閾値の存在は、場の方程式を粗視化して、微細構造を現象論的モデルで置き換えるラージ・エディ・シミュレーションなどを考える際に重要な指標となる。

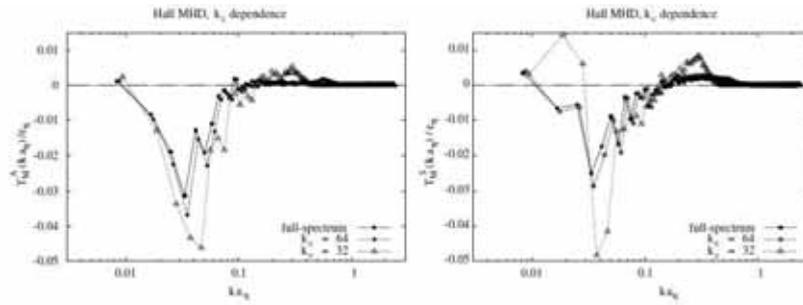


図 3.3.5.6-1 ローパスフィルターを作用させた磁場および速度場から構築した (a) 運動エネルギー伝達関数および (b) 磁気エネルギー伝達関数。

次に、大規模な数値シミュレーション ($N^3 = 1024^3$) の直接数値シミュレーションにより、Hall 効果がもたらす空間構造の変化について研究を行った [3.3.5.6-2]。Hall パラメータ以外のパラメータを上記と同様に固定し、初期値問題として相互対象比較が可能なシミュレーションをいくつかのパラメータについて実施した。この中には、一流体 MHD ($\epsilon_H = 0$) シミュレーションも含まれる。このシミュレーションにおいて、Hall パラメータが大きいほど磁気エネルギースペクトルの高波数部が励起されるものの、運動エネルギースペクトルについては明確な変化がなく、Hall パラメータが違っていても相互に区別が付きにくいものであった。他方、空間構造を渦度 (速度場の回転) の強さ (エンストロフィー密度) 及び電流密度 (磁場の回転) の等値面で可視化したところ、電流密度よりも寧ろエンストロフィー密度に明確な違いが発見された。図 3.3.5.6-2 (a) および (b) はそれぞれ、MHD 乱流および Hall MHD 乱流におけるエンストロフィー密度 (色付きの等値面) および電流密度 (灰色の等値面) を、格子点数 512^3 の領域について描画したものである。図 3.3.5.6-2 (b) を、全格子点数 1024^3 を使用し、拡大表示したものが図 3.3.5.6-2 (c) である。MHD 乱流においては、磁場と速度場の凍り付きの条件から、エンストロフィー密度と電流密度の等値面はそれぞれほぼ一体化し、層状構造を形成している。他方、Hall MHD 乱流の場合、エンストロフィー密度の等値面は電流密度の等値面との一体化を失い、流体乱流によく見られる管状渦構造となる。また、電流密度は電流層の名残はあるものの、高波数の励起にともなって、短冊状の小片となって等値面が描かれている。これは、Hall 項の導入によって凍り付き条件が変わり、エンストロフィー密度と電流密度の等値面が単純に重なり合う理由がない事に加えて、磁場の高波数成分が Hall 効果によって励起されるため、磁場の散逸効果と、これに付随して発生し得る磁気リコネクションによる磁場のトポロジー変化が顕著に現れる一報、渦度場 (速度場の主に高波数成分) は磁場との凍り付きから解放され、Kelvin-Helmholtz 不安定性などのプロセスを経て管状渦構造が形成されるためと考え



図 3.3.5.6-2 エンストロフィー密度（色付きの等値面）および電流密度（灰色の等値面）。(a)MHD 乱流（格子点数 512^3 ）、(b)Hall MHD 乱流（格子点数 512^3 ）、(c)Hall MHD 乱流（全格子点数 1024^3 ）。

られる。更に、ローパスフィルターを使った解析から、この構造変化は Hall パラメータが指定するイオン表皮長スケールよりも高波数の領域 ($k > 1/\epsilon_H$) にのみ発生するわけではなく、より低波数領域にまで変化が発生している事が確かめられた。これは、高波数部における Hall 効果が、低波数領域まで含めた大規模な構造遷移を引き起こしている証左である。

更に、これらの構造変化が高波数成分の性質に及ぼす影響の一端を、高波数成分が作る場を Smagorinsky 型のサブグリッドスケール (SGS) モデル (Hamba and Tsuchiya, 2010) に射影する事で評価した [3.3.5.6-2]。この解析から、Hall MHD 方程式 (4)-(9) の右辺に現れる非線形項の高波数成分は、Smagorinsky 型 SGS モデルで効率よく表現可能であるものの、Hall 項についてはカットオフ周波数が比較的高波数の場合にのみ有効であるという結果が得られた。

これらの一様等方性 Hall MHD 乱流の性質、特に Hall 項が引き起こす構造遷移などは、LHD などトラスプラズマの短波長不安定性の飽和などにも深く関係していると考えられる。一様等方性はトラスプラズマとの比較の上で条件が異なりすぎるため、強い背景磁場を課した一様非等方 Hall MHD 乱流の研究を行い、上記と同様の結果を得た [3.3.5.6-3]。また、拡張 MHD モデルによる Rayleigh-Taylor 型の不安定性成長と飽和のシミュレーション研究への応用も進行中である。

[3.3.5.6-1] H. Miura and K. Araki, Plasma Phys. Contrl. Fus. 55 014012 (2013).

[3.3.5.6-2] H. Miura and K. Araki, Phys. Plasmas 21 072313 (2014).

[3.3.5.6-3] H. Miura, K. Araki and A. Ito, The 24th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (September 12-14 2015, Golden, Colorado, U.S.A.) ; to be submitted to Journal of Computational Physics.

3.3.5.7 衝撃波と粒子加速

太陽フレアや超新星爆発など、宇宙では様々な場所で無衝突衝撃波による粒子加速が起こっていると考えられている。しかし、無衝突衝撃波の形成過程や粒子加速の機構は、未だ完全な解明には至っていない。一方、相対論的電磁粒子コードを用いたシミュレーションによって、磁気音波衝撃波は、衝撃波中に形成される強い電磁場を介した様々な機構で粒子を強く加速できることが明らかにされてきた [3.3.5.7-1]。例えば、イオンは衝撃波面での電磁場の急激な立ち上がりにより、一部が反射され加速される。加速イオンは、電子のジャイロ周波数 Ω_e がプラズマ周波数 ω_{pe} が大きいとき、

相対論的エネルギーになり得る。そして、この機構によって、太陽フレアにおけるイオンの急激な加速を説明できると提案された。

一方、電子は磁場に対して斜めに伝播する衝撃波によって、一部が捕捉され加速される。 $\Omega_e/\omega_{pe} > 1$ で、衝撃波の伝播速度 v_{sh} が $c \cos \theta$ (ここで、 c は光速、 θ は伝播角) に近いとき、加速電子のエネルギーは超相対論的となる。また、捕捉電子は、衝撃波の主パルス付近の電磁場に大きな影響を与える。空間1次元の場合は、磁場に平行方向の電場が強くなり、電子の捕捉が安定化する。それに対し、空間2次元のシミュレーションでは、捕捉電子はホイッスラー波を励起し、その非線形発展によって主パルス中の多次元電磁擾乱が大振幅となる [3.3.5.7-2]。そして、この多次元電磁擾乱により、捕捉電子は主パルスから解放される [3.3.5.7-3]。

このように、捕捉電子が引き起こす電磁場の変化は、電子の運動に重要な影響を及ぼすことが明らかにされてきたが、捕捉電子がイオンに及ぼす効果は未解明であった。そこで、本研究では、イオンの衝撃波面での反射による加速が、捕捉電子によってどのような影響を受けるかを調べた [3.3.5.7-3]。まず、物理的考察を行い、イオンの反射が多次元電磁擾乱によって促進されることを示した。次に、空間2次元・速度3次元の相対論的電磁粒子シミュレーションを用いて、斜め衝撃波中の電子の運動と電磁場の発展、イオンの運動を詳細に調べた。また、イオン反射における2次元電磁擾乱の効果を明確にするため、1次元的に平均化した電磁場中のテストイオンの軌道を計算した(テストイオンは2次元電磁擾乱を感じない)。図 3.3.5.7-1 は、2次元電磁粒子シミュレーションのイオン(2Ds イオン)とテストイオン(1Dt イオン)の速度分布を表す。 $v_x/v_{sh} > 1$ のイオンが反射されたイオンであるが、2Ds イオンの反射粒子が1Dt イオンのそれよりも多いことを示している。すなわち、反射イオンの数が、2次元電磁擾乱によって増加することが確認できた。また、捕捉電子が増えると主パルス中の2次元電磁擾乱は大振幅となり、2Ds イオンと1Dt イオンの差が増加することも示した。

[3.3.5.7-1] Y. Ohsawa, "Ultrarelativistic particle acceleration in collisionless shock waves", Physics Reports, Vol.536, (2014) pp.147-254.

[3.3.5.7-2] K. Shikii and M. Toida, "Multi-dimensional effects on ultrarelativistic electrons in an oblique shock wave", Physics of Plasmas, Vol.17, No.8 (2010) 082316 (7pages).

[3.3.5.7-3] M. Toida and J. Joho, "Effects of electromagnetic fluctuations along shock front on electron motion in an oblique shock wave", J. Phys. Soc. Jpn., Vol.81, No.8 (2012) 084502 (8pages).

[3.3.5.7-4] M. Toida and J. Inagaki, "Effects of trapped electrons on ion reflection in an oblique shock wave", Physics of Plasmas, Vol.22, No.6 (2015) 062305 (12pages).

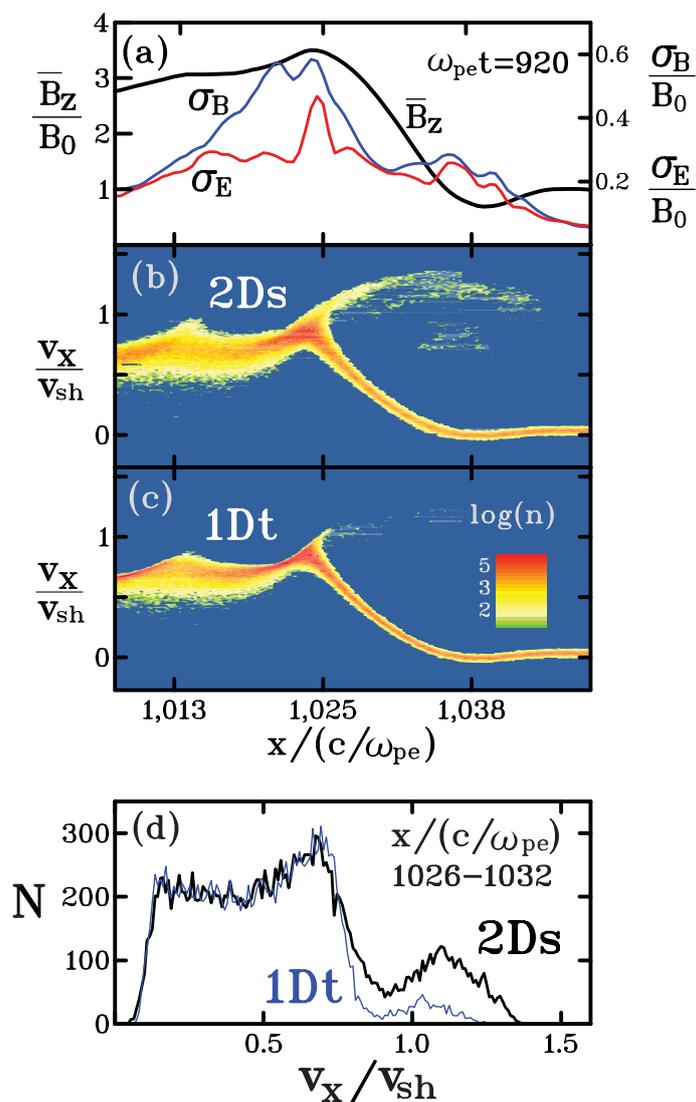


図 3.3.5.7-1 衝撃波中の電磁場のプロファイルとイオンの速度分布。2次元電磁擾乱を感じている2Dsイオンの方が、感じていない1Dtイオンに比べて、より多くの粒子が衝撃波面で反射され加速されている。

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重要な役割を果たす高速電子は、大きな発散角を持っており、かつエネルギーが高すぎるためコア加熱効率の著しい低下が懸念されている。そこで、高エネルギーイオンを用いて追加熱を行う手法について統合シミュレーションを行い、イオンの寄与および加熱効率を評価した。イオン加速の機構は、主に二つある。ターゲット裏面におけるシース電場によるイオン加速では、コーンチップの前方に薄膜を置きイオン源とする。また、ターゲット表面におけるポンドラモーティブ力を使うイオン加速では、コーンチップ前面に低密度のフォームを置きイオン源とする。この両機構を用いたイオン加速について、2次元粒子コードを用いたシミュレーションによりイオンビームの特性を明らかにすると共に、イオン源ターゲットの構造を工夫して、加熱効率の向上を目指した。

・シース電場によるイオン加速

イオンを超高強度短パルスレーザーで加速する機構には、先行する高速電子によって生成されるイオン源となるターゲット裏面に垂直なシース電場を用いるものがある。イオン源として不純物から生成される H^+ イオンを用いると、加速されるイオン量等を制御できないので、イオン源のターゲット材を CH とした。このため、 H^+ イオンだけではなく C^{6+} イオンも補助加熱に利用できる。また、イオンエネルギーの違いによるコア到達時刻の差を小さくするため、そのイオン源ターゲットをコーン内のできるだけコア近傍に設置することを考えた。そこで、チップ幅 $10\mu m$ 、開口角 60 度のコーンを Au プラズマ ($20n_{cr}$ 、 $A = 197$ 、 $Z = 30$) とし、チップの $5\mu m$ 手前に $4.5\mu m$ の CH 薄膜 ($17.14n_{cr}$ 、 $A = 12$ 、 $Z = 6$ と $2.86n_{cr}$ 、 $A = 1$ 、 $Z = 1$) を置いた。つまり、コーンチップと CH 薄膜の間に $5\mu m$ の真空領域があり、ここにシース電場が生成される。このターゲットの電子密度を図 3.3.5.8-1 (a) に示す。そして、加熱レーザーとして強度 $10^{20}W/cm^2$ 、波長 $1.06\mu m$ 、半値全幅 $10\mu m$ のスーパーガウシアンビーム ($\alpha = 5$ 、 $\tau_{rise} = \tau_{fall} = 50fs$ 、 $\tau_{flat} = 400fs$) を照射し、コーンチップの後方 $1\mu m$ において高速電子および加速されたイオンを観測した。

イオンビーム強度の時間発展を図 3.3.5.8-1 (b) に、時間平均したイオンエネルギー分布を図 3.3.5.8-1 (c) に青色で示す。ここで、実線は H^+ 、破線は C^{6+} である。最大イオンビーム強度は、 H^+ で $4 \times 10^{17}W/cm^2$ 程度、 C^{6+} で $10^{18}W/cm^2$ 程度であり、加熱用レーザーの強度が $10^{20}W/cm^2$ であることから、レーザーからイオンビームへの変換効率は、1%以下と低いことがわかる。また、 H^+ は 10MeV 程度、 C^{6+} は 50MeV 程度のエネルギーまで加速されたこともわかる。低い変換効率の原因を調べると、Au コーン

の側壁とCH薄膜が接地しているため、シース電場が生成されるとAuコーンからCH薄膜に背景電子が流れ込み、シース電場を弱めるためであることがわかった。そこで、AuコーンとCH薄膜の間に $0.5\mu\text{m}$ の真空ギャップを設けて、同様のシミュレーションを行った。その結果を図3.3.5.8-1に赤色で示す。イオンエネルギーには大きな差はないが、 C^{6+} の最大イオンビーム強度は2倍となり、変換効率も2%になった。

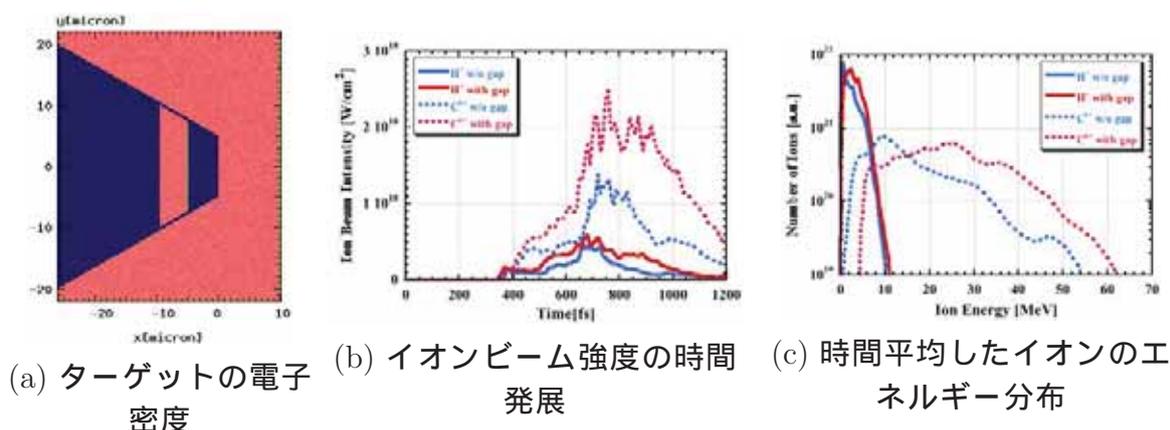


図 3.3.5.8-1 シース電場によるイオン加速

・ポンドラモーティブ力によるイオン加速

イオンを超高強度短パルスレーザーで加速する別の機構として、ポンドラモーティブ力による直接加速がある。この機構でも、シース電場による加速機構と同様にイオン源のターゲット材をCHとし、コーンチップを低密度CHフォームで $8\mu\text{m}$ コーティングした。このターゲットの電子密度を図3.3.5.8-2(a)に示す。ポンドラモーティブ力により加速されるイオンのエネルギーは、レーザー強度と平均電離度に比例し、フォームの電子密度に反比例する。レーザー強度は外部要因として一定であると考え、平均電離度も完全電離を仮定すると一定となるので、イオンエネルギーを大きくするためには、フォームの電子密度を小さくしなければならない。しかし、フォームの電子密度を相対論的な臨界密度以下にすると、レーザーはフォーム中に異常侵入するため、ポンドラモーティブ力によるイオン加速は抑制されてしまう。このため、ポンドラモーティブ力による最大イオンエネルギーは、フォームの電子密度を相対論的な臨界密度にしたときに得られる。相対論的な臨界密度は、レーザー強度の $1/2$ 乗に比例するので、結局、イオンの最大エネルギーは、レーザー強度の $1/2$ 乗と平均電離度に比例してスケールされることになる。そこで、加熱レーザーの強度を 5×10^{19} 、 1×10^{20} 、 $5 \times 10^{20} \text{W/cm}^2$ とし、それぞれのレーザー強度のときのCHフォームの電子密度が相対論的な臨界密度、

つまり 6.12 、 8.60 、 $19.13n_{cr}$ になるよう H^+ と C^{6+} の密度を決定した。そして、加熱用レーザーを照射し、同様に高速電子および加速されたイオンを観測し、前述のスケーリングについて調べた。なお、レーザーのパラメータは、強度以外はすべて同じである。

イオンビーム強度の時間発展を図 3.3.5.8-2 (b) に、時間平均したイオンエネルギー分布を図 3.3.5.8-2 (c) に示す。ここで、赤色、青色、緑色は、それぞれレーザー強度が 5×10^{19} 、 1×10^{20} 、 $5 \times 10^{20} W/cm^2$ であり、実線は H^+ 、破線は C^{6+} である。イオンの最大エネルギーは、概ねスケーリング通りになっており、イオンビーム強度はレーザー強度に、ほぼ比例している。

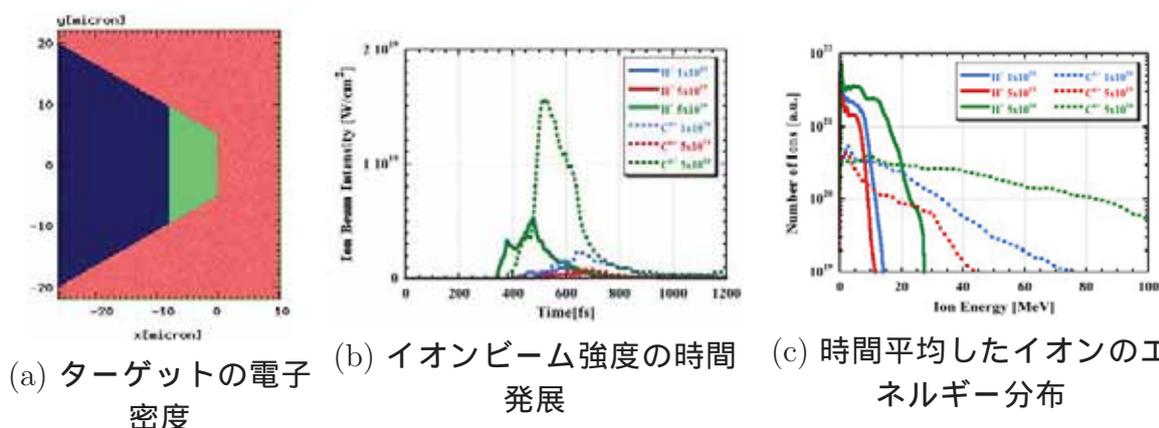


図 3.3.5.8-2 ポンドラモーティブ力によるイオン加速

・統合シミュレーションによる加熱評価

2次元粒子コードのシミュレーションで得られた高速電子および高エネルギーイオンを1次元フォッカープランクコードに対する時間依存性がある粒子源のデータとして、統合シミュレーションを行った。その結果を表 3.3.5.8-1 に示す。

シース電場によるイオン加速の場合、真空ギャップがないとイオンによる補助加熱の平均コア電子温度の上昇率は27%に留まったが、真空ギャップがあると100%、つまり、平均コア電子温度は高速電子だけの場合に比べて2倍となった。しかし、イオンを加速するシース電場は高速電子流を阻害するため、真空ギャップがある場合の高速電子ビーム強度は低下し、平均コア電子温度の最大温度は逆に悪くなった。このため、高速電子と高エネルギーイオンはトレードオフの関係にあり、イオン源の構造や素材について、最適設計する必要がある。

一方、ポンドラモーティブ力によるイオン加速の場合、レーザー強度が大きくなる程、高速電子のエネルギーが高くなりすぎてコア加熱には適さなくなるため、イオン

表 3.3.5.8-1 統合シミュレーションによるコア加熱の評価

		シース電場		ポンドラモーティブカ		
		gap なし	gap 有り	5×10^{19}	1×10^{20}	5×10^{20}
温度上昇 keV	電子のみ	0.15	0.08	0.05	0.11	0.35
	電子+イオン	0.19	0.16	0.06	0.15	0.48
イオン向上率%		27	100	20	36	37

による補助加熱の割合が大きくなることがわかった。しかし、平均コア電子温度の最大温度は、投入したレーザーエネルギーには比例しておらず、この場合も、レーザー強度と生成される高速電子および高エネルギーイオンの特性を勘案しつつ、コア加熱を最適化するターゲット設計が必要である。

4 共同利用・共同研究の推進

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は大型シミュレーションを基盤としていることから、プラズマシミュレータやLHD数値解析サーバーなど大型並列計算サーバをを活用する共同研究には所内外の多くの研究者・学生が参加している。一般共同研究では、平成23年度より数値実験炉研究プロジェクトのプラズマシミュレータ共同研究および、より広範な分野を含むLHD数値解析サーバ利用共同研究として分類、公募が行われている。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その骨格となるテーマを設定する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。後者については、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、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はプラズマシミュレータ共同研究採択件数であり、A.研究所提案型、B.応募者提案型別に表示しており、平成21年度以降、研究所提案に匹敵する件数の応募者提案共同研究が採択されている。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60名前後に対して、所外利用者がおおむね100名であり、所内利用者の2倍近である。これは、プラズマシミュレータが大学などの機関の研究に貢献していることがわかる。

これらの共同研究の成果の内、核融合科学研究所が主体となっているものは主に第3章に掲載されているので、以下ではそれ以外のいくつかの共同研究成果について記述する。

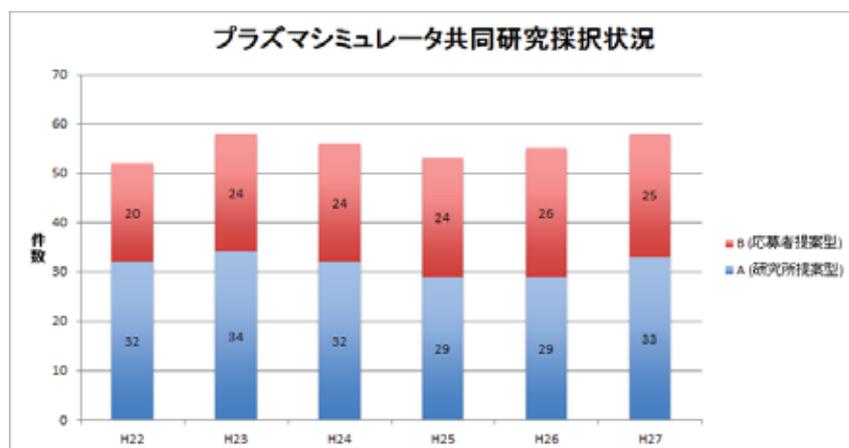


図 4.1.1-1 平成 24 年度から 27 年度のプラズマシミュレータ共同研究採択件数。

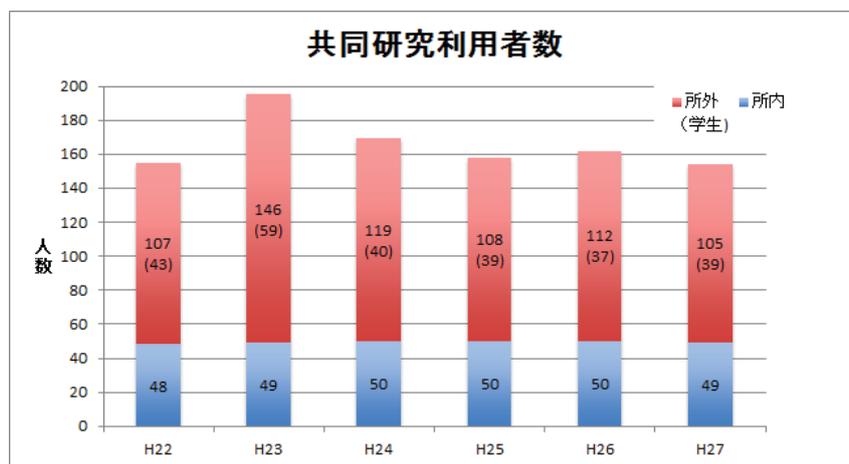


図 4.1.1-2 プラズマシミュレータ共同研究の利用者数。

4.1.2 プラズマシミュレータシンポジウム

プラズマシミュレータシンポジウムでは「数値実験炉研究プロジェクト共同研究」の報告会として、スーパーコンピュータ「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う一方、プラズマ・核融合分野はもとより関連分野の最前線で活躍する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紹介してきた。平成 18 年以前はシミュレーションサイエンスシンポジウム、平成 19 年からはシミュレーション科学シンポジウムとして開催してきたが、平成 23 年よりプラ

ズマシミュレータシンポジウムと改称した。平成 22 年以降の開催状況は表 4.1.2-1 のとおりである。例年 2 日間開催で 110 名前後(3 日開催の平成 26 年は 141 名)であり、一日あたり 50 名から 60 名前後が参加している。図 4.1.2-1 に、2015 年度プラズマシミュレータシンポジウム招待講演風景を示す。

このシンポジウムでは外部講演者による招待講演、プラズマシミュレータによる研究報告などの研究に関する講演、プラズマシミュレータの運用に関する報告及び議論に加えて、HPCI コンソーシアム、ITER-BA(IFERC-CSC)、日米協力科学技術事業核融合理論共同研究組織 (Joint Institute for Fusion Theory, JIFT) 等、プラズマシミュレータおよびこれによる研究に関連する諸活動についての報告及び議論が行われている。

表 4.1.2-1 プラズマシミュレータシンポジウム開催履歴

開催年月日	参加者数(延べ)
平成 22 年 9 月 14 日 ~ 15 日	160
平成 23 年 9 月 13 日 ~ 14 日	108
平成 24 年 9 月 11 日 ~ 12 日	115
平成 25 年 9 月 11 日 ~ 12 日	116
平成 26 年 9 月 10 日 ~ 12 日	141
平成 27 年 9 月 3 日 ~ 4 日	109



図 4.1.2-1 プラズマシミュレータシンポジウム講演。

4.1.3 大学との共同研究

4.1.3.1 名古屋大学

・希ガスプラズマ照射によるタングステン表面構造変化とガス吸蔵特性に関する研究

将来の核融合炉材料において、炉内のトリチウム (T 量の制約から T 吸蔵量の低い高融点金属材料の使用が必要不可欠である。高融点金属材料、特に国際熱核融合実験炉) (ITER) でダイバータに使用されるタングステン (W) の T 保持特性の理解と制御は重要な課題となる。しかし、近年の研究により核融合による反応生成物であるヘリウム (He) が W に照射されると、樹枝状構造を有する繊維状ナノ構造や He バブル・ホールといった照射損傷が表面に形成されることが明らかになった。He バブルが形成された W に対してはすでに水素同位体相互作用の研究が進められており、水素同位体である重水素の保持量およびプリスタリング形成が He 予照射によって抑制されることが報告されている。しかし、水素のエネルギーが高い場合には He バブルが拡散バリアとなり逆に水素吸蔵量およびプリスタリングが著しく増加することが報告されている。一方、ナノ構造を有する W 試料に関しては水素同位体保持に関する報告例はない。

既にトカマク型環境下でナノ構造が形成されることがトカマク型プラズマ実験装置 Alcator C-Mod で報告されている。同現象が T を取り扱う予定の ITER や次世代核融合実験炉で生じた場合、形成されたナノ構造により比表面積が増大し、ダイバータ表面で多量の T を吸着・吸蔵する危険性がある。従って、ナノ構造 W に対する T 保持特性の調査は重要な課題となっている。また、ITER ではダイバータ板への熱負荷低減のために、放射冷却用のガスとしてアルゴン (Ar) やネオン (Ne) 等の希ガスの導入が計画されているが、Ar や Ne も He 同様 W 中の熱空孔に捕捉され、ナノ構造等の照射損傷を形成する可能性がある。しかし、それらの W への照射効果は十分に分かっていない。そしてナノ構造が実機環境下において形成された場合、その温度環境は定常プラズマ照射環境下においても常に変化する可能性が考えられる。近年の研究によって、ナノ構造が形成された試料に対して、He プラズマ照射を止め加熱 (アニーリング) を行うと表面回復現象が生じることが明らかとなっている。しかし、ナノ構造の表面回復現象が生じる温度および繊維状ナノ構造内部変化に関する詳細は未だ明らかになっていない。これらの点を明らかにすることは、適切な W 使用温度環境の同定につながる。上記の課題を明らかにするために、本研究では、Ar および Ne プラズマ照射による W 表面構造変化、ナノ構造 W の表面積変化に対する T 保持特性、アニーリング時のナノ構造内部変化を明らかにすることを目的とし、名古屋大学グループで実験を行い (図 4.1.3.1-1) 同実験に必要な W の原子の振る舞いなどのシミュレーションを数値実験

炉プロジェクトPWIグループで行った。

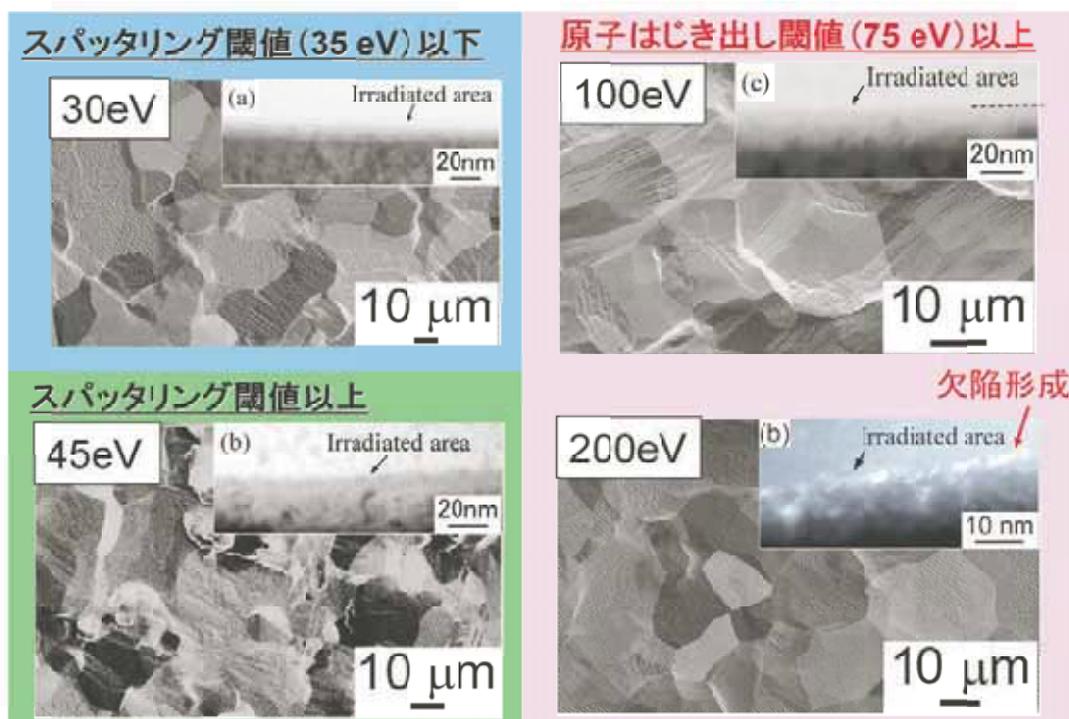


図 4.1.3.1-1 ヘリウムプラズマ照射した際のタングステン表面の電子顕微鏡拡大写真

・ EMC3-EIRENE コードを用いた NAGDIS-II プラズマのモデリング

名古屋大学大野教授グループとの共同研究により、同大学の直線装置 NAGDIS-II のプラズマモデリングを行った。3次元形状を扱える周辺プラズマ輸送コードである EMC3-EIRENE コードを用い、軸対称を仮定せず平面・斜め・V字等のターゲット板を模擬したプラズマ輸送計算を行った。プラズマ加熱を模擬した体積熱ソースと電離粒子ソースを仮定し、典型的な放電と同程度のパラメータのプラズマを得た。ターゲット形状間の比較の結果、V字ターゲット及び閉斜めターゲットにおいて中性ガス密度が上昇し、3次元ターゲット形状の効果が確認された。計算例を図 4.1.3.1-2 に示す。この成果は第 15 回 Plasma Edge Theory 国際ワークショップ (2015 年 9 月 9 日 ~ 11 日・奈良・P2-01) で発表された。

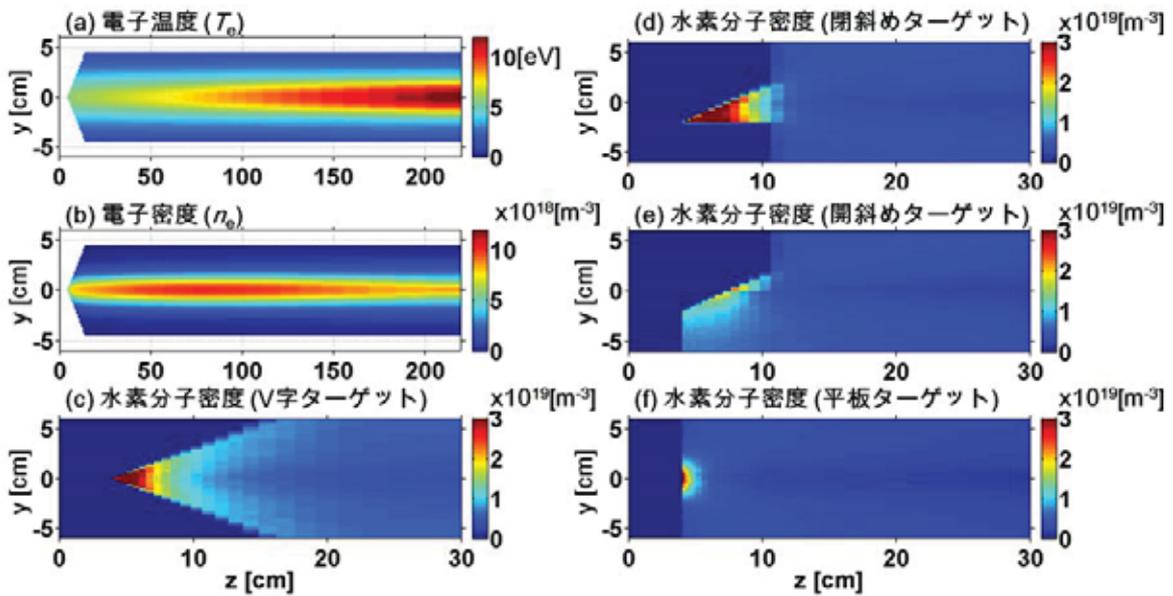


図 4.1.3.1-2 V字ターゲットにおける電子温度 (a)、電子密度 (b)、水素分子密度 (c) の計算結果。閉斜めターゲット (d)、開斜めターゲット (e)、平板ターゲット (f) の水素分子密度分布をそれぞれ示す。

4.1.3.2 名古屋工業大学

名古屋工業大学との連携協定に基づき、プラズマシミュレータの利用を含めて広範な共同研究および研究協力を行っている。その主な内容は、MHD および中性流体乱流に関する共同研究、核融合科学研究所・名古屋工業大学共同セミナー、インターンシップ・集中講義・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、渡邊威准教授との共同研究により、擬スペクトル法・高精度コンパクト法ハイブリッド・シミュレーション法によるパッシブスカラー乱流の数値計算手法を開発した [4.1.3.2-1,2]。この手法を使い、Schmidt 数 1000 までの高 Schmidt 数パッシブスカラー乱流におけるパッシブスカラー場のスペクトルを計算し、このハイブリッドコードがスペクトル法と比べて十分な精度を有する事を確認した。このパッシブスカラースペクトルは、粘性・対流領域において k^{-1} 則に従う事、遠散逸領域では指数関数的に減衰する事がわかった。この指数関数的減衰は、速度場の間欠性に起因することなどが議論された。

- 共同セミナー

核融合科学研究所および名古屋工業大学の両機関に所属する研究者の研究テーマ、関心事のすり合わせおよび共通関心事に関する知見の広がりを目指し、連携協定締結以来毎年度1回もしくは2回、共同セミナーを開催してきた。表4.1.3.2-1は、平成24年度以降の開催実績である。ただし、平成26年度は、プラズマシミュレータに関する研究以外のテーマについて開催された。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。平成27年度は、名古屋工業大学で12月10日に開催を予定している。

- 学生教育

学生教育の観点から、インターンシップによる学生の短期間受け入れ、名古屋工業大学における集中講義、特別共同利用研究員制度を利用した学生の受け入れを行っている。

インターンシップは、平成22年度以降昨年度まで、毎年夏季に1週間核融合研に学生を合宿形式で受け入れるものである。(表4.1.3.2-2参照。)核融合研側担当者から数値シミュレーションコードの一部の開発を課題として課し、これに必要な教育を施す。学生は合宿の最終段階において、成果物としてシミュレーションコードを核融合研側担当者に収める。学生は、シミュレーションコード開発に必要な知識の習得、短期間集中型プログラム開発の体験、数人でチームを作り、相談しながら開発を行うチームワークについての経験を積むことになる。名古屋工業大学側ではこのインターンシップを修了した学生に対して、1単位を与える。平成27年度は、次に述べる集中講義との日程調整のため、受け入れを行わなかった。今後の課題として、学生の企業インターンシップとの日程調整が挙げられる。

集中講義は大学院生を対象に、平成27年度7月に、プラズマ数値シミュレーションをテーマとして3日間にわたって行った。内容は、一様磁場中のプラズマ粒子の運動から説き起し、Vlasov/Boltzmann方程式の導出、流体方程式の導出とクロージャーの問題、拡張MHD方程式、MHD乱流シミュレーション、トーラスプラズマシミュレーションなどである。この集中講義は、来年度以降も継続する方向で名古屋工業大学と調整が行われている。

特別共同利用研究員制度を利用した学生については、平成27年度に博士後期課程1年の学生を1名受け入れた。研究テーマは先述のとおりMHD乱流である。基礎物理研究の項で記載したとおり、核融合科学研究所においてもMHD乱流の研究を行っており、また、これまで名古屋工業大学とは乱流の数値シミュレーシ

ンのシミュレーションコード開発、乱流シミュレーション研究など共同研究の蓄積があり、これらの蓄積を生かした学生教育の協力を行っている。

表 4.1.3.2-1 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 24 年度以降）。

開催年月日	開催場所
平成 24 年 9 月 24 日	核融合科学研究所
平成 25 年 10 月 11 日	名古屋工業大学
平成 26 年 12 月 15 日	名古屋工業大学多治見駅前施設
平成 27 年 12 月 10 日	名古屋工業大学（開催予定）

表 4.1.3.2-2 核融合科学研究所への名古屋工業大学大学院生短期インターンシップ受け入れ実績（平成 24 年度以降）。

開催年月日	参加人数
平成 24 年 8 月 22 日-24 日	4 名
平成 25 年 8 月 21 日-23 日	6 名
平成 26 年 8 月 11 日-13 日	8 名

[4.1.3.2-1] T. Gotoh, S. Hatanaka, and H. Miura, “Spectral compact difference hybrid computation of passive scalar in isotropic turbulence”, J. Comp. Phys. Vol.231 (2012) pp.7398-7414.

[4.1.3.2-2] T. Gotoh, T. Watanabe, and H. Miura “Spectrum of Passive Scalar at Very High Schmidt Number in Turbulence”, Plasma Fus. Res. Vo.9 (2014) 3401019 (4p).

4.1.3.3 京都大学

・予測型統合輸送コードの整備とLHD実験への適用(工学研究科原子核工学専攻)
統合輸送コード TASK3D は、京都大学：福山淳教授の先導によって開発が進められている統合輸送コード TASK のモジュールを拡充することで開発を進めている。

福山淳教授の指導の下、波動伝搬解析コード TASK/WM の誘電テンソルの改良、吸収計算の高精度化のための電場成分記述法の変更、径方向の有限差分法への変更などの改良を行っている。

また、予測型統合輸送コードの整備と、その LHD 実験による検証作業を行っている。村上定義准教授らにより、高速エネルギー粒子の5次元位相空間における分布関数の時間発展を求める GNET-TD コードとの連携により、炭素ペレット入射を伴う LHD 高イオン温度放電におけるイオン温度時間発展の追跡計算から、プラズマの実効電荷数 Z_{eff} を考慮したイオン熱輸送係数モデルが導出された。LHD 実験グループの高性能化テーマグループとの継続的な議論や検証実験を通じて、モデルを導出した放電とは異なったイオン温度領域における本モデルの妥当性検証も進むなど、イオン温度の時間発展をも再現するモデルとしての確立が進んだ。

・外部運動量入力をも考慮した新古典プラズマフロー解析コードのLHD実験への適用(エネルギー科学研究科エネルギー基礎科学専攻)

中村祐司教授、大学院生・西岡賢二氏らによって、洲鎌・西村モーメント法に外部運動量入力項を加えることで、外部運動量による輸送行列の変化を考慮しつつ、ヘリカル系プラズマにおいて複数イオン種のフロー速度を同時に得られるシミュレーション手法が確立されてきた。西岡氏によって、ヘリオトロンJにおける炭素イオンのフロー速度計測との比較が進められ、NBI駆動のフロー成分に関して、温度・密度分布の計測精度や高速イオンのモデリングの範囲内で実験値と一致する結果が得られてきている。統合輸送コード TASK3D-a との連携を視野に入れて、TASK3D-a が準備できる3次元平衡、密度・温度分布などの共有によって、LHD プラズマへの適用を開始した。すでに、バルクイオンと不純物イオンのフロー分布の差を定量的に予測し、衝突周波数の違いに基づいて、LHD とヘリオトロンJにおけるフロー分布の差異の理論的説明を行うなどの成果が挙げられている。

4.1.3.4 京都工芸繊維大学

・逆磁場ピンチにおけるヘリカル構造形成の非線形 MHD 解析

逆地場ピンチ(RFP)では、プラズマ中に強いトロイダル電流が流れ、中心付近で

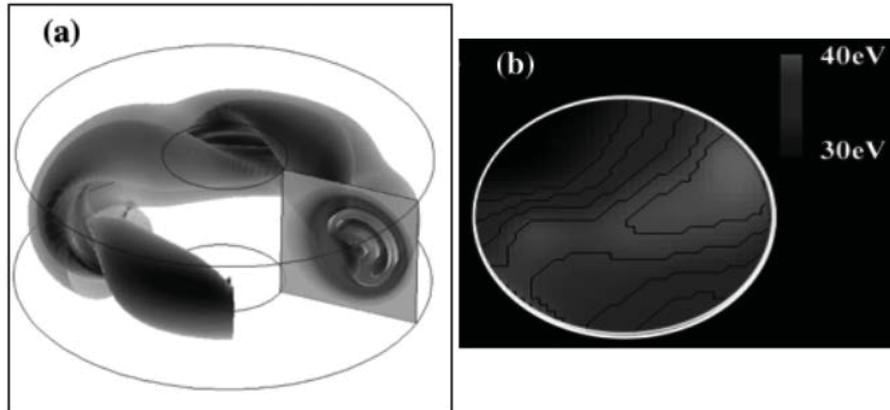


図 4.1.3.4-1 逆磁場ピンチにおけるヘリカル構造形成の (a) シミュレーション結果 (圧力等値面および断面) および (b) 実験結果 (垂直ポートから見た電子温度分布)

テアリングモードに対して不安定となりやすい。そして複数の有理面が近接するため、複数モード間の相互作用による磁力線のカオス化が閉じ込めの劣化を招く要因ともなっている。これを回避する取り組みとして、変位を単一のモードに集中させることにより、中心付近に単一の磁気島を形成し、その内部で閉じ込めを改善するアプローチがある。準単一ヘリシティ (QSH) と名付けられた、単一のモードに集中した緩和状態や、さらに磁気島の O 点が新たな立体磁気軸を形成した単一ヘリカル軸 (SHA_x) 状態が、複数の実験装置において観測されている。京都工芸繊維大学の低アスペクト比 RFP 装置実験装置「RELAX」においても、そのようなヘリカル構造の形成が実験的に観測されており、ここでは、実験データから得られた平衡配位を初期配位とした 3 次元非線形 MHD シミュレーションを行った。

計算には MIPS コードを用い、初期値は RELAXFit コードにより再構成した RELAX 配位を用いた。計算結果は、実験結果に対応した、トロイダルモード数 $n = 4 - 5$ のヘリカル構造をもつ緩和状態の形成を再現した (Fig. 4.1.3.4-1 (a))。初期条件のちがいにより、トリガーモードが共鳴モードの場合と、非共鳴モードの場合のそれぞれについて解析したところ、いずれの場合も、そら豆型で極端にホローなポロイダル圧力分布をもつ、特徴的なヘリカル構造を形成した。

シミュレーション結果は、RELAX 装置における実験結果をよく説明する。即ち、

RELAX 実験における軟 X 線計測から得られた電子温度の 2 次元分布 (Fig. 4.1.3.4-1 (b)) は、垂直ポートから見ると斜めに傾斜しており、シミュレーション結果で予測される $m = 1/n = 4$ の変形構造に対応している。

また、米国ウィスコンシン大との協力により、NIMROD コードにより同一の平衡配位を初期配位としたシミュレーションを行った。その結果、NIMROD では $m = 1/n = 5-8$ の比較的高モードが支配的となる結果となった。これは初期配位における電流密度分布の勾配に起因するものであり、今後、コード間での比較を進める必要がある。

4.1.3.5 九州大学

・大域的シミュレーションと乱流構造診断に関する研究

高温磁化不均一プラズマにおいて乱流と構造形成の機構を解明することは輸送現象の定量的理解のために必要である。計算機性能の向上によりトラス中心から端部までを含む大域的 (グローバル) なシミュレーションが可能となったので、それらを利用して磁場の 3 次元的な構造に依存した構造形成機構の診断研究を行っている。実験と比較可能な乱流場を生成するために簡約 MHD コードやフル MHD コードを用いて、ヘリカルプラズマ乱流の数値シミュレーションを行った。そしてシミュレーションで得られた乱流の 3 次元構造に対して数値診断を行うためのモジュールを整備し、構造形成機構の数値診断法の深化を図った。さらには、詳細化した実験データとの比較手法や、単純磁場配位における乱流の素過程や運動論的效果を合わせて研究することで乱流輸送の統合的理解を進めている。

・プラズマ乱流と流れ場の非線形相互作用の研究

高温不均一プラズマにおける乱流及び流れ場の重要性が認識されている。近年、乱流輸送の制御法の 1 つとしてプラズマに外部からバイアス印加することで流れを駆動し、流れのシアにより乱流を抑制する試みがある。実際に輸送を増大させるストリーマ構造がバイアス印加中に消失し、背景密度勾配が増加する現象も実験で観測されている。一方で、流れシアはケルビンヘルムホルツ型の揺動を駆動する自由エネルギー源ともなり得るので、流れとドリフト波乱流、流れが駆動する揺動間の関係を理解することが重要となる。本研究では、これら 3 者間の非線形相互作用の基礎過程の理解を目指し、円筒プラズマにおける乱流シミュレーションを行っている。外部バイアス印加の模擬としてソース項を導入し、ドリフト波、メソスケール乱流構造及び背景プラズマの応答を研究する。外部駆動流れを用いた高温不均一プラズマの乱流輸送制御の指針を提示する。

4.1.3.6 群馬大学

・高ベータFRCのシミュレーション-FRCの自発的トロイダル回転現象のハイブリッドシミュレーション

FRCプラズマの配位が崩壊する主因として、トロイダルモード数 $n = 2$ の回転不安定性の発生が挙げられる。これは、FRCがトロイダル方向に回転することで遠心力が起これ、それによりFRC形状変化を増幅し崩壊するというものである。FRCの回転メカニズムは粒子損失による回転説、電場短絡による回転説、磁束減衰による回転説の3つが考えられているが、3つの中でどれが最も支配的であるかは、明らかにされていない。本研究では、プラズマ中のイオンを粒子、電子を流体とみなすハイブリッドシミュレーションにより、どの回転説がFRC回転を定量的によく説明できるかを明らかにすることを目的としている。

ハイブリッドシミュレーションの結果として、トロイダル流速の中央面分布の時間変化を図 4.1.3.6-1 に示す。図 4.1.3.6-1 より、セパラトリクス内のトロイダル流速が時間的に増大することがわかり、ピークがセパラトリクス付近にある。図の流速が正の方向がイオン反磁性方向であり、FRCが反磁性方向に回転することがわかる。回転に対するトロイダル電場の影響について調べてみる。先の計算で考慮していた磁束減衰に伴うトロイダル電場を無視した場合、トロイダル流速の中央面分布の時間変化を図 4.1.3.6-2 に示す。図 4.1.3.6-1 と異なり、常磁性方向に加速していることがわかる。この結果、回転方向にはトロイダル電場が大きく影響していると言える。

トロイダル流速の増加に電場の影響が大きい理由についてFRCの粒子軌道から考える。FRCには3つの粒子軌道がある。その中で、トロイダル電場や電子流体との摩擦によって加速される可能性がある粒子は装置軸を旋回中心とする Betatron 粒子である。通常、磁場に垂直な方向の力(ここではトロイダル方向)は、磁場に垂直なもう一つの方向(ここでは径方向)のドリフト運動に寄与する。このため、トロイダル電場や電子流体との摩擦力は、トロイダル方向の回転現象とは無関係であるとされているのが現状である。しかし、Betatron 粒子は、運動方向が力の方向を常に向いているため、加減速が可能なのである。さらに、装置軸付近やセパラトリクス付近では Figure-8 粒子もトロイダル方向に加速される可能性がある。FRC内でこれらの粒子がどの程度存在しているのか調べた。平衡状態における中央面での粒子軌道ごとの割合を図 4.1.3.6-3 に示す。図 4.1.3.6-3 より、Field-null 付近では、Betatron が約 50% を占めている。そのため、Field-null 付近において、トロイダル電場や電子流体との摩擦によってトロイダル方向に加速されることがわかる。また、セパラトリクス付近では Betatron と Figure-8 がそれぞれ約 25% 存在しているため、セパラトリクス付近でも Field-null と同様にト

ロイダル方向に加速される。このことから、トロイダル電場や電子流体との摩擦がトロイダル流速を増加させたと考える。

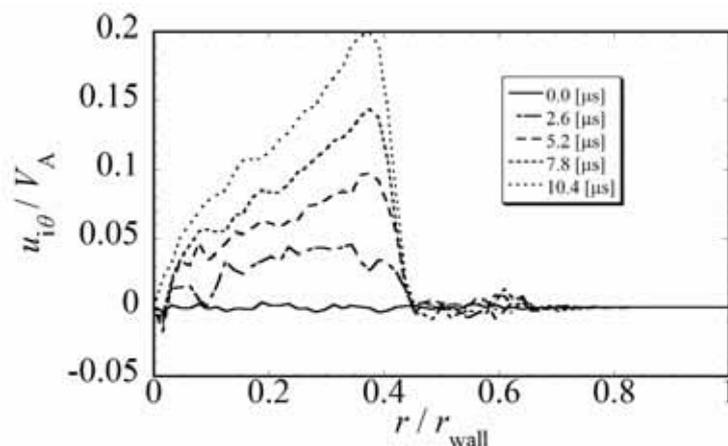


図 4.1.3.6-1 中央面のトロイダル流束分布の時間発展。

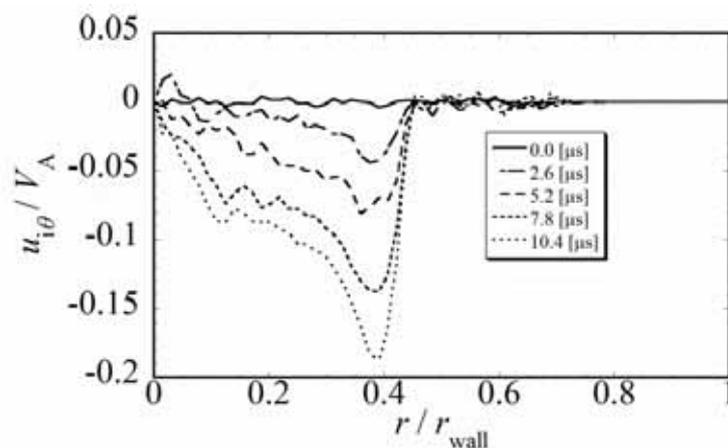


図 4.1.3.6-2 中央面のトロイダル流束分布の時間発展。ただし、磁束減衰によるトロイダル電場を無視している。

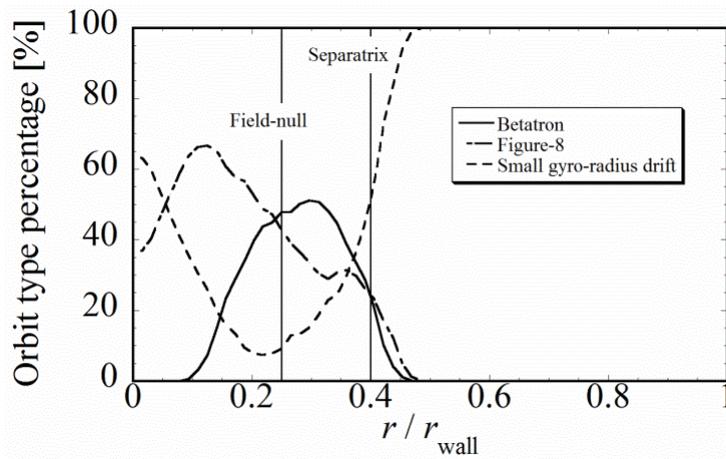


図 4.1.3.6-3 中央面における FRC 固有の 3 粒子軌道の割合

・高ベータ FRC のシミュレーション-磁気圧差による FRC 加速及び 2 つの FRC 衝突シミュレーション

FRC プラズマは単連結構造の高ベータプラズマであり、核融合炉心プラズマとして魅力的であるが、その反面、輸送特性がトカマクやヘリカルと比較して劣り、配位維持時間はこれまで数百 μ 秒程度であった。近年、米国 Tri-Alpha Energy (TAE) 社による FRC 実験、いわゆる C-2 実験では、2 つの FRC を加速衝突させ、NBI や軸方向からのプラズマモイド入射によって、配位維持時間の大幅伸長を実現した。現在、後継の C-2U では、10m 秒を超える配位維持に成功している。加速衝突の結果、2 つの FRC が合体することで、高圧・高捕捉磁束の FRC を生成でき、ハイパワー NBI のターゲットを得られたことが大きい。しかしながら、FRC の合体生成過程の詳細は理解されていない。本研究は、プラズマ加速を人工的に行うことなく、外部磁気圧制御による FRC 移送を再現し、その移送速度での FRC 合体を再現することが目的である。また、高ベータ FRC における磁気再結合過程では、圧力勾配による力が大きく影響すると考えられる。そこで、本研究では外部磁場制御による移送と 2 つの FRC 衝突過程について、抵抗性 MHD モデルを用いてシミュレーションした。

図 4.1.3.6-4 は、単一の FRC を平衡状態から、徐々に図左方向へ加速する様子を示している。ここで、FRC の右側ミラー磁場を時間とともに弱め、また左側（上流側）ミラー磁場領域を外部コイル制御によって徐々に右側（下流側）へ移動させている。このときの体積平均軸方向流速の時間変化を図 4.1.3.6-5 に示す。体積平均はセパラトリク

ス内部で行っている。この計算では、FRC 上流側のミラー磁場による磁気アシストを約 22μ 秒で終了しているため、FRC コアプラズマは 100km/s までの加速終了後、徐々に減速していることが分かる。本研究における別のシミュレーションから、FRC 両端の磁気圧を時間とともに変化させるだけでは十分な加速が得られなかったため、今回のケースのような制御が必要である、という結論が得られた。次に、2つの FRC をお互い軸方向に加速し衝突した様子を図 4.1.3.6-6 と図 4.1.3.6-7 に示す。外部磁場制御開始から約 10μ 秒後に FRC はダブルピーク（ダブルレット）構造になり、衝突後は抵抗性減衰している。2つの FRC のセパトリクスは一体化し、一部合体の傾向が見られるが、o-point 付近にまで磁場の拡散は進んでいない。本研究では、抵抗率一定モデルを採用しているため、合体領域での異常抵抗モデルを導入する必要性が示唆される。

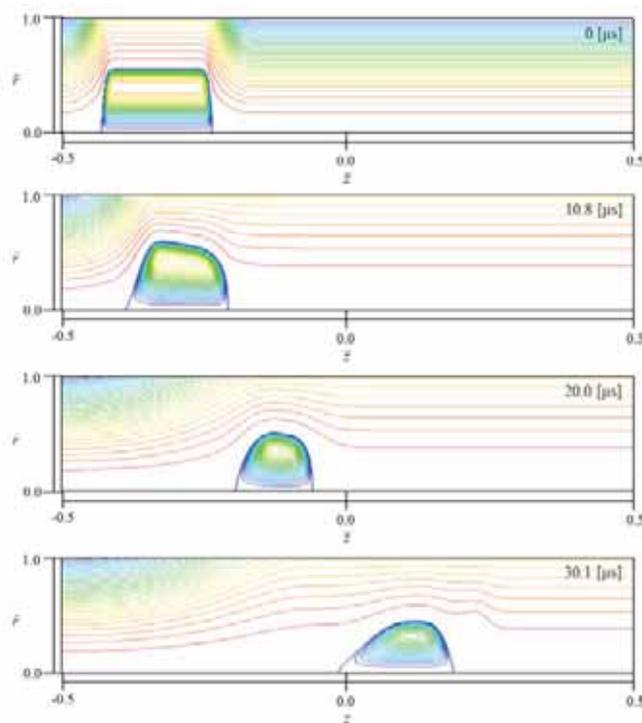


図 4.1.3.6-4 FRC 移送の様子。(ポロイダル磁束の等値線図。)

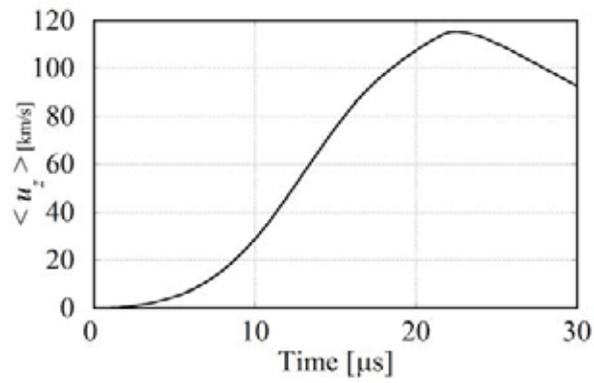


図 4.1.3.6-5 セパラトリクス内体積平均軸方向流速の時間発展。

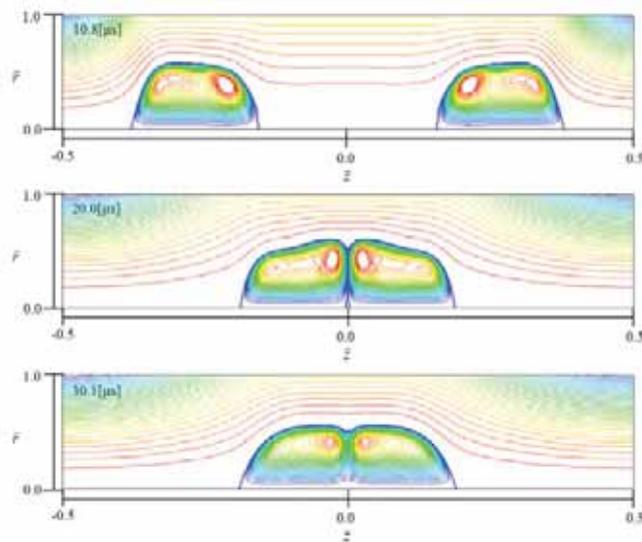


図 4.1.3.6-6 2つのFRCの軸方向衝突の様子。(外部磁場制御開始から約30μ秒まで。)

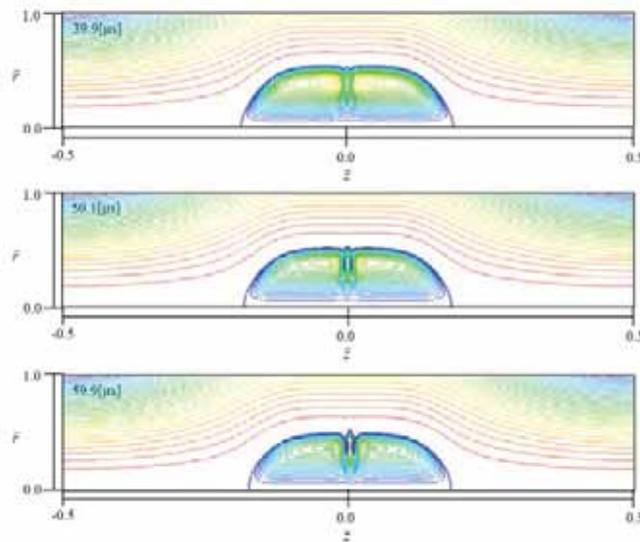


図 4.1.3.6-7 2つのFRCの軸方向衝突の様子。(約 30μ 秒から約 60μ 秒まで。)

4.1.3.7 埼玉大学

・ナノ構造を有するタングステン材の表面物性評価の実験

核融合プラズマ装置のプラズマ対向材料において、イオン照射損耗などの観点から高原子番号のタングステンが多用されるようになってきている。特に高熱流束・高粒子束プラズマに照射されるダイバータ部のタングステン表面状態の理解は、高温プラズマへの不純物制御だけでなく、プラズマの安定性を考える上で非常に重要となる。一方、タングステンの超伝導転移温度は 0.01K 程度であるのに対して、水素など不純物を含むタングステン薄膜の超伝導転移温度は、数 K と著しく高くなることが明らかになっている。この現象を利用し、タングステン表面の電気物性測定から、タングステンの表面物性評価ができないかの検討を行った。

外径 30mm 、厚さ 0.2mm の多結晶タングステン板を用いて、30分、もしくは、60分間のヘリウムプラズマ照射を行った。その表面電子顕微鏡写真を図4.1.3.7-1に示す。既に報告があるようなファズ構造が確認され、30分照射の方が構造が微細で、60分照射は表面構造が粗いことが確認される。これは単純にヘリウムプラズマ照射によって結晶構造が時間と共に破壊されていくことを示している。

次に、この表面に4つの測定用プローブを設置し、その電気物性測定を行った。室温領域で $60\mu\Omega$ と小さな値を示し、低温になると共に抵抗値は小さくなっていく(図 4.1.3.7-2)。しかし、測定抵抗が小さすぎるため、ロックインアンプを用いたとしても十分な S/N 比が得られないなどの問題点が挙げられた。これは利用したタングステン板上に厚さ数 $\mu\Omega$ のファズ構造ができていた材料を用いたことが問題であり、数 K で期待される超伝導遷移を実験的に確認するためには、タングステン基板の影響を無くすことが求められている。このため、今後、石英ならびにアルミナ基板の上にスパッタリング法を用いて厚さ 100nm 程度のタングステン薄膜を蒸着し、この材料をプラズマ照射し、表面物性測定を行うことを計画している。さらに、このように基板に石英ガラスを用いることにより、X 線回折など、他の表面分析を利用できるなどの利点もあるため、改良された測定が期待できる。

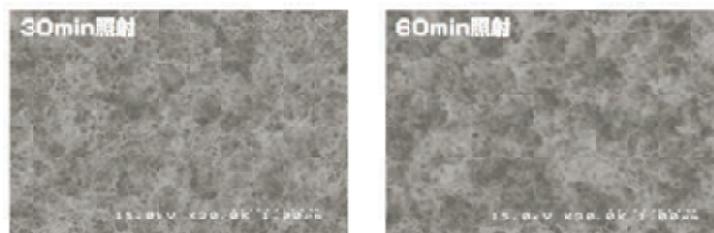


図 4.1.3.7-1 ヘリウムプラズマ照射後のタングステン表面の電子顕微鏡写真

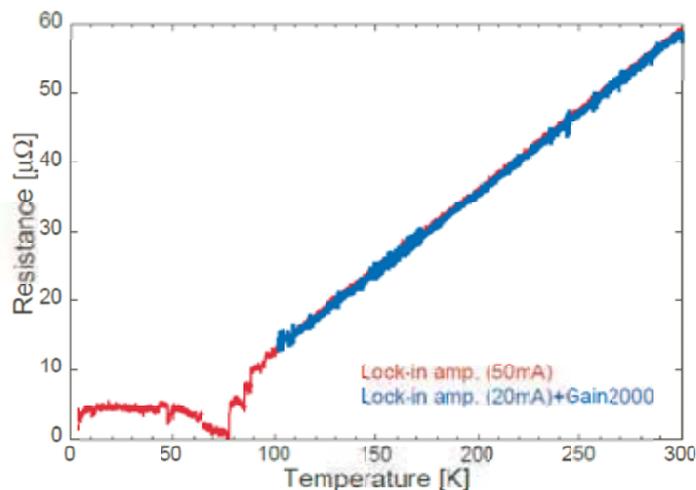


図 4.1.3.7-2 タングステン材料の抵抗温度依存

4.1.3.8 山形大学

- ・高温超伝導薄膜内を流れる遮蔽電流密度の高性能解析

有限要素法 (FEM) と陰的スキームで離散化すると蔽電流密度の初期値・境界値問題は各時間ステップで非線形代数方程式を解く問題に帰着する。この方法は仮想電圧法と呼ばれ、クラックを含む高温超伝導 (HTS) 薄膜にも適用できる。しかし仮想電圧法は CPU 時間を極端に浪費する。

本研究の目的は、クラックを含む HTS 薄膜中の遮蔽電流密度を解析するための高速かつ安定な方法を開発し、同法を用いて走査型永久磁石法 (SPM) の性能を数値的に調べることである。薄板近似のもとでは、遮蔽電流密度は $j = (2/b) [\nabla \times (T e_z)]$ とスカラー関数 T で書き表せ、その時間発展は次式に支配される：

$$\mu_0 \partial_t (\hat{W} T) = - (\nabla \times E) \cdot e_z - \partial_t \langle B \cdot e_z \rangle.$$

但し、 \hat{W} は HTS 薄膜系でのスカラー関数 T に作用する“ある演算子”で、 B/μ_0 は薄膜への印加磁場を示し、 b と E はそれぞれ膜厚と電場を表す。さらに、 $\langle \rangle$ は厚み方向の平均化演算子である。また、電流 J と磁場 E の関係式である J - E 構成方程式には、冪乗則を採用する。

FEM によって空間的に離散化すると、上記の式の初期値・境界値問題は準陽的微分代数方程式 (DAE) に帰着する。この DAE は標準的な常微分方程式 (ODE) ソルバーで解くこともできるが、その解法には多大な CPU 時間が必要となる。計算量を減少させる目的で、本研究では、ブロック LU 分解を ODE ソルバーの関数評価部分に実装することを提唱した。

提案法と仮想電圧法のスピードを比較するために、両法に要する CPU 時間の節点数への依存性を図 4.1.3.8-1 に示す。同図より分かるように、節点数 n が 103 以上では、提案法は仮想電圧法よりも高速である。特に、 $n = 3007$ では、提案法は仮想電圧法の 5.3 倍以上のスピードを示す。これらの結果から、提案法はクラックを含む HTS 薄膜中の大規模遮蔽電流密度解析に特に有効であると結論付けることができる。

本提案法を用いて遮蔽電流密度を解析する高速シミュレーション・コードを開発し、複数クラックを SPM で区別できるか否かを数値的に調べた。欠陥パラメタ d の走査位置 x_A への依存性を $a = 10\text{mm}$ 、 $a = 20\text{mm}$ の場合に対して数値的に決定し、図 4.1.3.8-2 に図示した。ここで、 a はクラック間距離を示す。 $a = 10\text{mm}$ の場合、2 つのクラックは単一クラックと見做されるのに対し、 $a = 20\text{mm}$ の場合、2 つのクラックは完全に区別できる。換言すれば、複数クラックは SPM の解像度を著しく劣化させるということが分かった。

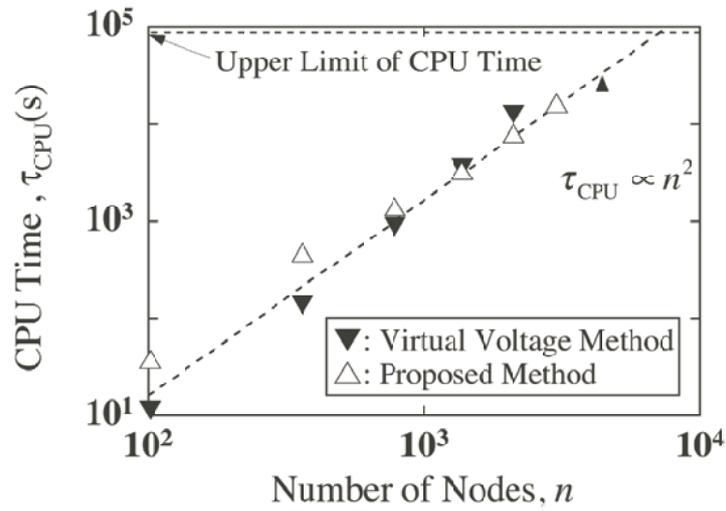


図 4.1.3.8-1 CPU 時間の節点数 n への依存性。但し、 $m = 1$ 。

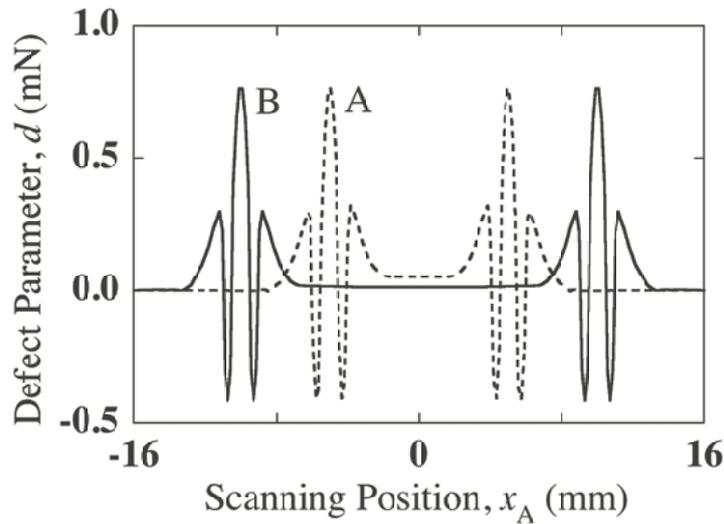


図 4.1.3.8-2 欠陥パラメタ d の走査位置 x_A への依存性。但し、A: $a = 10\text{mm}$ 、B: $a = 20\text{mm}$ 。

4.1.3.9 東京工科大学

・3D-FDTD 法を用いたコルゲート導波路内電磁界解析

大型ヘリカル装置 (LHD) では、プラズマの平衡配位を安定的に保つため、電子サイクロトロン加熱 (ECH) を用いており、ミリ波の伝播に伴う、導波管壁に誘起され

る表面電流による伝送損失を抑えるため、伝送素子にはコルゲート導波管を用いている。しかしながら、コルゲートの形状やピッチが伝送損失に与える影響は理論的・数値的には解明されていない。本研究の目的は、導波管壁金属をより厳密に表現するため、古典物理モデルである Drude モデルを用いて金属に浸透する電磁波の影響、金属表面に誘起される表面電流の効果を考慮した 3 次元 FDTD による電磁波伝播解析を行い、伝送効率にこれらの現象が及ぼす影響を検証することである。

成果として、導波管壁金属をより厳密に表現するため、古典物理モデルである Drude モデルを用いて金属に浸透する電磁波の影響・金属表面に誘起される表面電流の効果を考慮した 3 次元 FDTD による電磁波伝播解析を行い、伝送効率にこれらの現象が及ぼす影響を検証することができた(図 4.1.3.9-1)。さらに、偏波器により、入射波の偏光面が変化する様子をシミュレーションで再現することができた(図 4.1.3.9-2)。

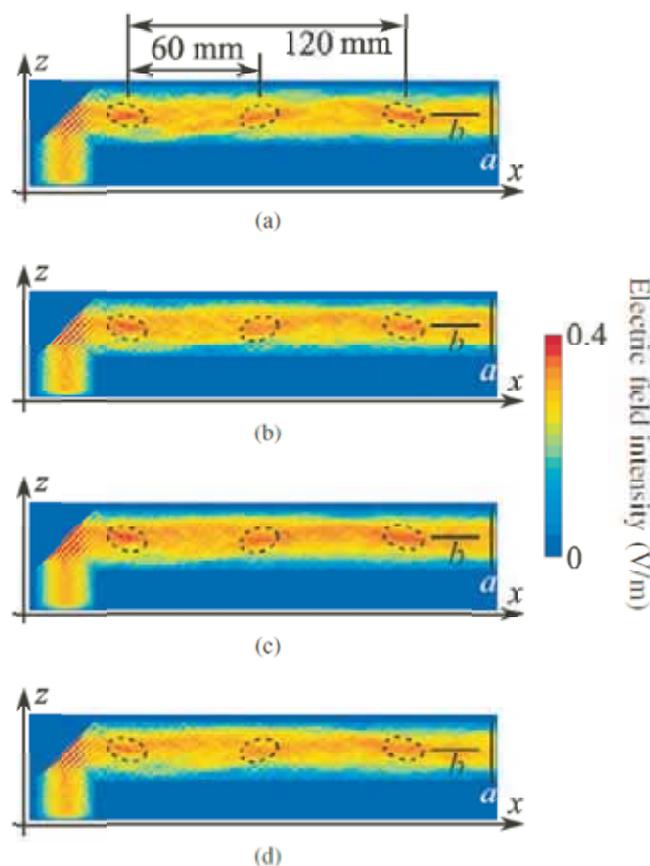


図 4.1.3.9-1 時間平均をした電場の強度分布。(a) マイターバンド、(b) マイターバンド偏波器で、角度 $\theta = 0$ 度、(c) マイターバンド偏波器で、角度 $\theta = 45$ 度、(d) マイターバンド偏波器で、角度 $\theta = 90$ 度。

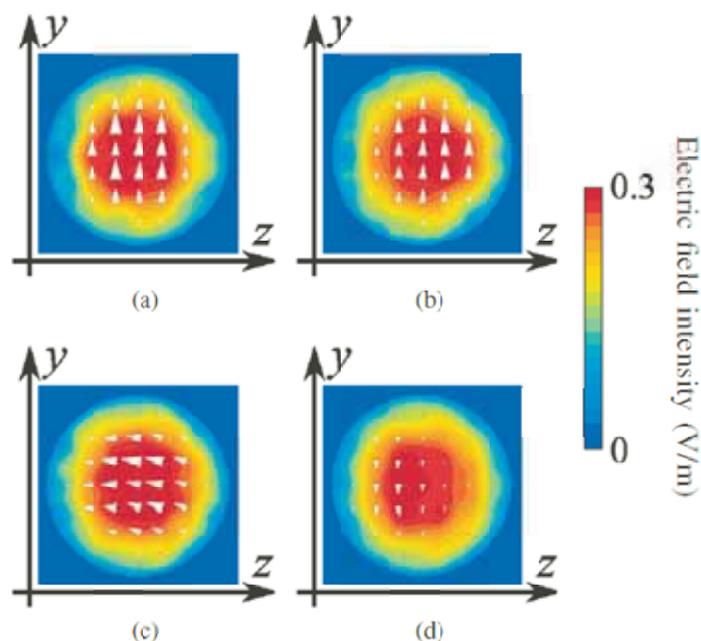


図 4.1.3.9-2 導波管の出口の部分での時間平均をした電場の強度分布の断面図。(a)マイターバンド、(b)マイターバンド偏波器で、角度 $\theta = 0$ 度、(c)マイターバンド偏波器で、角度 $\theta = 45$ 度、(d)マイターバンド偏波器で、角度 $\theta = 90$ 度。

4.1.3.10 釧路高等専門学校

・アモルファス炭素異方性制御技術開発を目指した分子シミュレーションおよび電磁界解析

炭素原子を堆積させてアモルファス炭素を製膜する場合、炭素原子と炭素原子が形成する共有結合(C-C結合)の方向が基板面に平行になりやすいことが、先行研究により示されている。この異方性を有効利用することで、電子部品やMEMS素子への応用、炭素被膜技術の向上などが見込める。異方性が生じるためには、堆積時のイオンエネルギーおよびフラックスが小さいことが重要であると予想される。そこで、大気圧下プラズマCVD法を用いたアモルファス炭素異方性制御技術の開発を目指す。この技術を実現するためには、メタンプラズマが基板上に堆積する過程を原子スケールで解明する必要がある。プラズマ-材料相互作用解明のための分子シミュレーションを用いて、炭素原子の堆積過程を原子スケールで解明する。今後、さらにマイクロ波大気圧プラズマジェットの導波管内およびノズル周辺の電磁界解析も行う予定である。

大気圧プラズマジェット発生装置を設計・制作し、メタンプラズマを用いたアモル

ファス炭素製膜実験環境を構築した(図 4.1.3.10-1)。さらに、静電探針法を用いてメタンプラズマの電子温度測定を行い、電子温度の空間分布依存性およびマイクロ波パワー依存性を詳細に調べた。しかしながら、静電探針計測システムの不備のため、予定していたイオン密度およびイオンエネルギーの測定が行えなかった。そのため、分子シミュレーションを行うための入射条件が不明であり、実環境に沿う分子動力学計算が行えなかった。以上の事情から、アモルファス炭素製膜計算のために分子動力学計算コードをセットアップするとともに、入射条件を仮定した条件でテストランを行った。入射エネルギー 1 eV でダイヤモンド基板に炭素原子を入射した場合の分子動力学計算の様子を図 4.1.3.10-2 に示す。この条件で、アモルファス炭素膜が形成されることを確かめた。



図 4.1.3.10-1 構築したプラズマジェット発生装置(写真はヘリウムプラズマ)

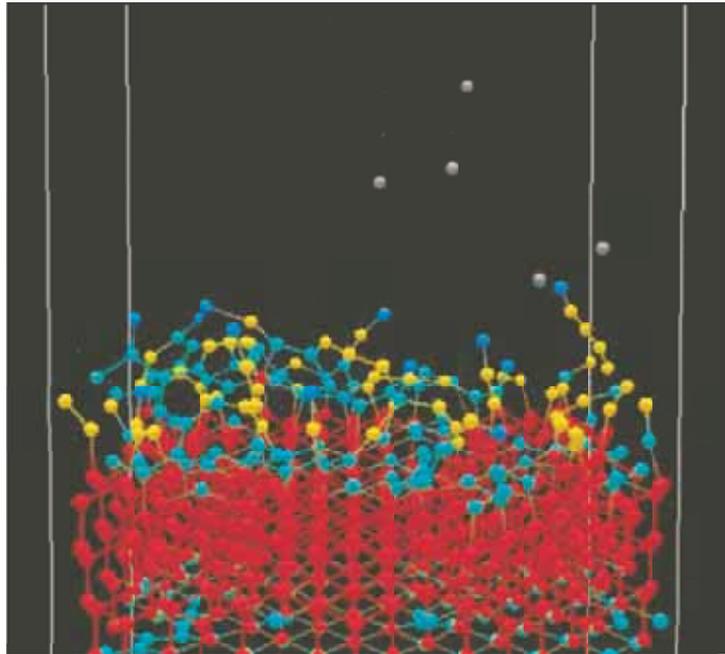


図 4.1.3.10-2 アモルファス炭素製膜の分子動力学計算

4.1.3.11 兵庫県立大学、神戸大学、甲南大学

・バーチャルリアリティ装置による同時VR可視化

バーチャルリアリティ (VR) 装置'CompleXscope' 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 装置の特徴を生かして、シミュレーションデータ、実験装置データ、実験観測データ (LHD で観測されたダスト粒子の時系列 3 次元位置データ) を VR 空間で同時に可視化して解析する手法の研究を進めた (詳細は 3.2.1.4 を参照)。解析ではステレオカメラで撮影されたダスト軌道が再現され、ダストの輸送方向と磁力線の空間的な関係が調べられ、磁力線に沿って移動するダストや磁力線に垂直方向に移動するダストが観測された。

4.1.3.12 兵庫県立大学

- ・ In-situ 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。開発を進めている In-situ 可視化ライブラリ VISMO の可視化手法はソフトウェアレンダリングを採用し、開発言語は Fortran90 である。可視化手法として、粒子・等値面・スライス・流線・矢印の実装している (詳細は 3.2.1.4 を参照)。

4.1.3.13 防衛大学、国立天文台、広島大学、東京工業大学

- ・ データ圧縮 TOKI

大規模シミュレーション研究を実施する上で大規模データの保存や解析・可視化は分野を超えた緊急の課題である。数値的な精度を保証しつつデータ量を大幅に削減する、効率のよいデータ保存の新しい方法論として TOKI を提案した (詳細は 3.2.1.4 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

- ・ 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

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、トーラス系プラズマにおけるディスラプション現象のように微視的物理が装置全体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をめざし核融合プラズマの閉じ込め性能改善への寄与を図るため、超並列に対応した粒子コードの開発、それに伴う大規模シミュレーションデータを解析するための「その場可視化」の研究開発、巨視的シミュレーションに活用するための、大規模粒子シミュレーションで得られた知見から第一原理に基づく微視的現象のモデル化の研究を進めている。

4.1.4 研究会

核融合科学研究所では、研究分野の現状分析や異なる分野の交流などによって新しい研究テーマを掘り起こしたり、研究方針を見いだしたりすることを目的とする研究

会や、理論、実験、設計、R&D 等にわたる広いテーマに関する研究会、ある研究テーマに関する成果をまとめるための討論集会、特定のテーマに関して集中的に討論する研究会を開催して、共同利用・共同研究を促進する場を提供している。理論・シミュレーション関連の研究会は毎年 5 ~ 8 件が企画されている。

表 4.1.4-1 平成 24 年度

発表件数	参加人数	参加者所属	内容
核融合科学研究所・名古屋工業大学共同セミナー：粒子から連続系へ 2			
4	34	核融合研、名工大、宇宙研 情報通信研究機構	様々な分野における粒子系と連続系のシミュレーションのモデリング、プログラム技術
「バーチャルリアリティ装置における可視化技法」研究会			
12	23	神戸大、兵庫県立大、海洋機構、 防衛大、国立天文台	可視化技法のノウハウの交換、可視化技法の発展
大規模多粒子シミュレーション研究のための基盤確立： 補間法を用いた大規模粒子データの効率的な圧縮法の開発			
6	6	核融合研、他	若手研究者による分野 間連携プロジェクト
原型炉に向けた周辺・炉心プラズマ統合モデリングによるダイバータ熱・粒子制御研究			
17	12	原子力機構、核融合研、慶応、 東大、京大、筑波	原型炉のダイバータシミュレーションを目指したモデリング研究
マルチスケール MHD 現象の理論・シミュレーション研究			
20	20	原子力機構、核融合研、鳥取大、他	マルチスケール MHD 現象の MHD 理論、シミュレーション
高ベータプラズマにおける自発的フローと 3 次元構造の形成			
26	45	日本大、京都工繊大、群馬大、 兵庫県立大、東京大、産総研、 海上保安大、早稲田大、新潟大	コンパクトトーラス、 逆磁場ピンチに関する 実験・理論

表 4.1.4-2 平成 25 年度

発表件数	参加人数	参加者所属	内容
核融合科学研究所・名古屋工業共同セミナー 数値流体力学の最前線「流体メガロシミュレーションの展望と野望」			
4	34	核融合研、名工大、JAXA、他	航空宇宙工学、都市工学、核融合等における CFD
バーチャルリアリティなどによる可視化表現法に関する研究会			
12	26	兵庫県立大、海洋機構、防衛大、広島大、RIST、東工大、釧路高専、名古屋大、東工大他	可視化表現法
「可視化駆動型解析」分野創成に向けた若手研究会			
9	23	核融合研、産総研、海洋機構、北海道大、東北大、名古屋大、他	新分野創成センターイメージングサイエンス研究分野研究会
原型炉に向けた周辺・炉心プラズマ統合モデリングによるダイバータ熱・粒子制御研究			
12	9	原子力機構、核融合研、慶応、東大、阪大	原型炉のダイバータシミュレーションを目指したモデリング研究
MHD および流体力学における流れの安定性に関する理論・シミュレーション研究			
20	20	原子力機構、核融合研、鳥取大、他	MHD 等での流れを含む現象の MHD 理論や関連するシミュレーション
革新的高ベータ閉じ込め配位の先進制御と高性能化			
22	43	日本大、京都工繊大、群馬大、兵庫県立大、東京大、産総研、海上保安大、早稲田大、新潟大	コンパクトトラス、逆磁場ピンチに関する実験・理論

表 4.1.4-3 平成 26 年度

発表件数	参加人数	参加者所属	内容
名古屋工業大学・核融合科学研究所共同セミナー			
5	30	核融合研、名工大、慶応大、中部大	メカノケミカル反応、 マイクロ波プロセス 非平衡反応場の 材料プロセス
先進的描画装置を用いた可視化表現法の研究会			
12	26	兵庫県立大、海洋機構、防衛大、 大手前大、神戸大学、九州大学、 京都大、国立天文台、富士通 他	VR 技術の科学探求への 応用
不純物を含めた周辺・炉心プラズマ統合モデリング			
12	9	原子力機構、核融合研、慶応、 東大、阪大	周辺と炉心にまたがる不 純物輸送モデリング研究
MHD と流体力学における共鳴・分岐・構造形成の理論・シミュレーション			
20	20	原子力機構、核融合研、鳥取大、他	MHD 等の共鳴・分岐・ 構造形成の MHD 理論・シミュレーション
革新的閉じ込め概念における高ベータ環状プラズマの先進制御			
18	33	日本大、京都工繊大、群馬大、 兵庫県立大、東京大、産総研、 海上保安大、早稲田大、新潟大	コンパクトトーラス、 逆磁場ピンチに関する 実験・理論

表 4.1.4-4 平成 27 年度

発表件数	参加人数	参加者所属	内容
「不純物・周辺プラズマの輸送モデリング」ワークショップ			
12	7	慶応大、核融合研	不純物・周辺プラズマ
高ベータトローラスプラズマ研究のスピンオフとその展開			
25	40	日本大、京都工繊大、群馬大、 兵庫県立大、東京大、産総研、 海上保安大、早稲田大、新潟大	コンパクトトローラス、 逆磁場ピンチに関する 実験・理論 (2015年12月開催予定)
名古屋工業大学・核融合科学研究所共同セミナー			
		核融合研、名工大、京都工繊大、 京都大、東工大	(2015年12月開催予定)
バーチャルリアリティ技術などを用いた可視化表現法の研究			
			(2016年1月開催予定)
不純物を含めた周辺・炉心プラズマ統合モデリング			
		原子力機構、核融合研、慶応、 東大、阪大	周辺と炉心にまたがる不 純物輸送モデリング研究 (平成27年度開催予定)

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となってい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、多くの共通する課題が存在する。そのため、プロジェクトの推進に当たっては、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が必要となる。特に、近年のスーパーコンピュータの飛躍的発達を背景に、すべての構成要素を取り込んだシミュレーションを実行することにより、物理現象を全体としてとらえる研究が広い学問分野で進められている。我々の目指す「数値実験炉」を目指した研究もその1つと考えられる。国内外の大学や研究機関等との連携の下、数値実験炉研究プロジェクトを支える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、数値実験炉の構築を目指した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貢献するばかりでなく、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ための役割も担ってきた。

4.2.1 自然科学における階層と全体

プラズマに限らず自然界における多くの現象は、複数の階層における物理（要素過程）で構成されている。そして、それらが階層を越えて相互作用をしながら力学発展するため、現象は大変複雑なものとなっている。そこで、第2期中期計画期間の初年度（平成22年度）より、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」プロジェクトを進めている。本プロジェクトでは、複数の階層にまたがる現象を、階層毎に独立して扱うのではなく同時にかつ自己無撞着に解析することができる先進的な多階層シミュレーション手法等の開発研究、および、その応用として、天文科学、核融合科学、分子科学を中心とする自然科学における階層性、構造形成等の階層横断現象の解明を目指している。さらに、これらの研究において、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新たな展開を通じて自然科学における新分野創成に貢献することも重要な課題となっている。

本プロジェクトの活動としては、自然科学研究機構の関連機関との連携の下、シンポジウム等の研究交流事業、シミュレーション手法等の技術開発研究およびその応用研究が3本柱となっている。

学術交流事業として、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開催してきている。たとえば、平成25年度および平成26年度においては、桑山ビル（名古屋市中村区）にて



図 4.2.1-1 「自然科学における階層と全体」シンポジウムのWEBページ。左図は平成26年2月20日-21日に、右図は平成27年1月19日-20日に開かれたシンポジウムである。

実施した。図 4.2.1-1 に、同シンポジウムWEBページを示す。シンポジウムでは、3つの学際テーマ「分子動力学シミュレーションとその応用」、「磁気リコネクション」、および「星間物質の化学」に焦点を当てて、招待講演および一般講演を基に活発な議論が行われた。図 4.2.1-2 は、平成22年度から平成26年度までのシンポジウム参加者を示したものである。所外からの研究者が多く参加しており、幅広い研究分野への貢献ができていることが分かる。

また、国立天文台、核融合科学研究所、および東京大学との共催で、分野間連携テーマとしての磁気リコネクションを中心とする研究会を開催している。たとえば、平成25年度は、「磁気リコネクションと太陽プラズマ研究会」を京都大学東京オフィス（東京都港区）で、平成26年度には、「磁気リコネクション研究の最前線 - 太陽・惑星・実験室 - 」を東京大学本郷キャンパス（東京都文京区）にて開催した。これらの研究会への参加者数を示した図 4.2.1-3 から分かるとおり機構内外の太陽プラズマ、実験室プラズマ、理論・シミュレーション研究者が多数参加し続けており、磁気リコネクションについての講演と関連した議論が行われている。

シミュレーション手法等の技術開発およびその応用として、階層横断現象である磁気リコネクションへの適応を目指した多階層シミュレーションモデルが挙げられる。開発した多階層モデルは用いたスキームの違いにより2種類に分けられ、一方はシミュレーションの実空間をマクロ階層とミクロ階層分割し、マクロ階層のダイナミクスは磁気流体 (MHD) シミュレーションで、ミクロ階層の物理は粒子シミュレーションで

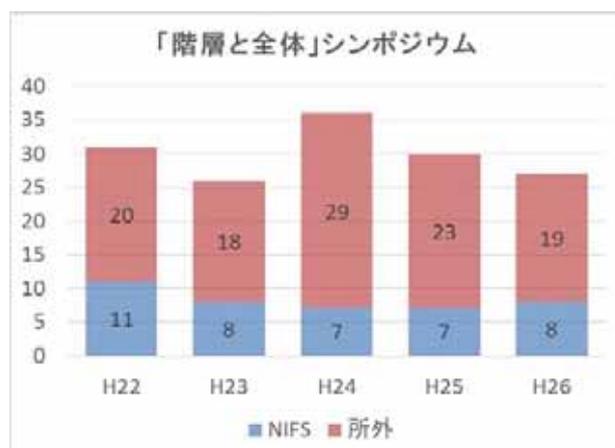


図 4.2.1-2 「自然科学における階層と全体」シンポジウムの参加者数。

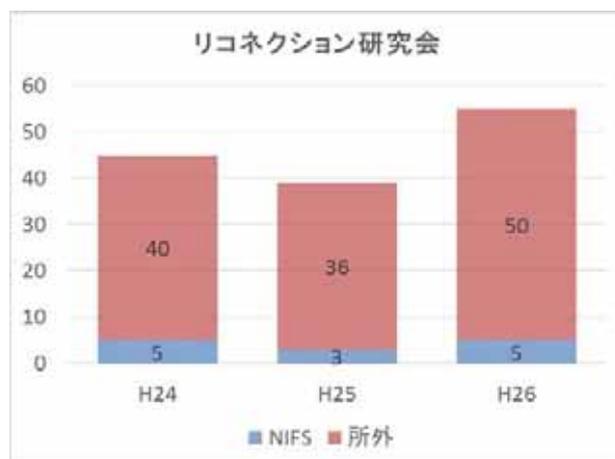


図 4.2.1-3 磁気リコネクションに関する研究会の参加者数。

解くスキーム、他方は粒子シミュレーションにより明らかにされた粒子の非ジャイロ的な運動による異常抵抗をモデリングしてMHDシミュレーションに組み込む手法である。前者の実空間分割型の多階層モデルを用いて、マクロのダイナミクスが磁気リコネクションのミクロな物理に及ぼす影響について初の解析を行った [4.2.1-1]。その結果、マクロのダイナミクスにおける時間スケールにより、ミクロ階層でのリコネクションの物理が定常的になる場合と間欠的になる場合の2つに分岐することを見出した。また、リコネクション上流・下流両方向における階層連結を行うことをめざし、階層を2次元的に正しくつなぐようにモデルを発展させている。一方、後者の異常抵抗モ

デリングによる多階層モデルは、地球磁気圏サブストームに適用された。サブストームオンセット後に形成されるフラックスロープに着目し解析を行ったところ、シミュレーションが人工衛星 GEOTAIL の観測データをよく再現しているという結果を得た [4.2.1-2]。また、これらの成果は、「核融合プラズマ理論」に関する Varenna-Lausanne 国際ワークショップ、アジア太平洋プラズマ理論会議 (APPTC)、計算物理国際会議 (CCP)、「宇宙空間シミュレーション」に関する国際シンポジウム (ISSS)、「実験室プラズマと宇宙プラズマの相互関係」に関する国際ワークショップ (IPELS) といった幅広いプラズマ研究者が集う国際会議における招待講演として選ばれている。

シミュレーション手法等の技術開発およびその応用として、さらに、プラズマ・壁相互作用のメカニズムを明らかにすることを目指した分子動力学法・二体衝突近似法・密度汎関数法・モンテカルロ法の開発・改良が挙げられる。分子動力学シミュレーションを用いた研究により、グラフェンへ窒素原子を打ち込んだ場合の反応の種類や反応率のエネルギー依存性について進展が見られた。また、分子動力学法・二体衝突近似法・密度汎関数法・モンテカルロ法すべてを組み合わせたシミュレーションを用いてプラズマ照射下のタングステンダイバータ板の耐久性に関する解析を行ったところ、ヘリウムをタングステンに照射した際に実験観測されているファズ構造の発生過程をシミュレーションにより再現することに成功した。これら一連の研究により、伊藤篤史氏が平成 26 年度自然科学研究機構若手研究者賞を受賞している。

[4.2.1-1] S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, and M. Den, “Multi-Hierarchy Simulation of Collisionless Driven Reconnection by Real-Space Decomposition”, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol.561 (2014) pp.012021 (1 ~ 10).

[4.2.1-2] R. Horiuchi, M. Den, T. Tanaka, H. Ohtani, and S. Usami: “Macro- and Microphysics of Magnetic Reconnection in a Multi-Hierarchy Open System”, *Plasma Physics and Controlled Fusion* Vol.55 (2013) pp.014008 (1 ~ 7).

4.2.2 非平衡を制御する科学：プラズマ応用ナノサイエンスの理論シミュレーション展開

プラズマ技術を応用したナノ物質形成の実験が開拓され、その大きな可能性に注目が集まっている。それに合わせて、より高度に制御されたナノスケールの物造りの為に、理論シミュレーションによるナノ物質形成メカニズムの解明に期待が高まっている。一般的にナノ物質とは数十～数百 nm の大きさを持ち、0.1nm スケールの原子から

見れば非常にマクロな現象となる。よって、ナノ物質の形成メカニズムの解明には、原子スケールの様々な基礎過程を一つずつ調べ、マクロな形成に対する複合的な影響を議論する必要がある。しかし、現存の理論手法は十分とは言えず、特にプラズマ環境下という強い非平衡条件が問題をより一層難しくしている。本プロジェクトでは、プラズマ応用によるナノ物質形成のうち、「金属系の表面ナノ構造形成現象」と、「炭素系物質のプラズマ中形成現象」を具体的な題材に取り上げ、必要な理論シミュレーション手法を開発・応用しながら現象の解明を目指す。本活動を通し、将来的なプラズマ応用ナノサイエンス全般に対する「メカニズム解明」を担う拠点となるべく、グループの連携を図った。

金属表面ナノ構造の形成は、プラズマによって自然界では起こり得ないような高濃度のHeが金属中に供給されることで、金属中にナノスケールのHeバブルが発生し、引き続いて繊維状の金属ナノ構造が生える現象を指す。この現象は、Heの入射過程、Heの拡散・凝集過程、Heバブル形成過程、繊維状ナノ構造成長過程の四段階の過程を経て成り立つものと考えられる。平成23年度から平成24年度までの活動ではナノ構造形成におけるHeの役割を調べることを目的とし、実験において他の希ガスであるNe、Ar照射との比較実験を行った。理論シミュレーションを用いた活動では、Heの入射過程に関しては二体散乱近似法(BCA)を用いて解明を行い、さらに拡散・凝集過程に関しても、密度汎関数理論(DFT)計算を用いて、タングステン中での希ガスの凝集可能性を検証した。また、残りの二つの過程の分子動力学(MD)シミュレーションを行う為に、ダウンフォールディング法と呼ばれる手法を用いて、DFTの計算結果を参照した高精度なMD用ポテンシャルモデルの開発に取り組んだ。最終年度となる平成25年度では、拡散・凝集過程のDFTを用いた研究を引き続き行い、(1)HeだけでなくNeやArといった希ガス原子はタングステン中で自己凝集することが可能なこと、(2)He、Ne、Ar共に金属中の空孔中だけでなく金属格子間サイトでも自己凝集可能であることを明らかにした。また、現在詳細な計算を行っているところだが、(3)He単原子での拡散に比べて二原子クラスターの拡散の方が障壁エネルギーが低くなり拡散しやすいことが解った。これは、水素の延長上で予想されていた金属中のHe拡散の考えを覆すものであり、物理的に非常に興味深い。

また、タングステン-ヘリウム系の高精度ポテンシャルモデルを今年度始めに完成させ、MDシミュレーションによるシミュレーションを本格的に開始した。まず、Heバブル形成過程の研究として、タングステン中に拡散する単原子のHeから1nm以上の大きさのHeバブルまでの成長をMDでシミュレートした。その結果、(4)初期のタングステン中に空孔が存在しない場合の方が存在する場合に比べて大きなHeバブルへ成長しやすいことが示された。これは先のDFT計算によって単空孔と格子間サイト

の両方で凝集可能であることと関連している。単空孔は一度捕獲されたら He が再び抜け出す障壁エネルギー 6eV 程度と高いことから、捕獲による拡散の障害が起こり、その結果 He バブル成長の妨げになっていると考えられる。一方で、格子間凝集では逆に拡散障壁エネルギーが下がり He バブルの成長が妨げられずに進むと理解できる。また、He バブル成長の過程で、(5) MD シミュレーションによって初めてループパンチング現象を観測した。ここでは、当初考えられていた様な He バブルから原子状のタングステンが放出されるものではなく、タングステン格子の歪みが転移ループの状態から放出されるということが明らかになった。He バブルが成長すると、繊維状ナノ構造が生える前に、バブルの表面破裂が起こり、金属表面にホットケーキ状の穴が開き始める。その表面破裂現象に関して、MD を用いたシミュレーションと、動的モンテカルロ法 (KMC) を用いたよりマクロなシミュレーションによって解析を行った。

続いて、第四段階の最後の過程となる繊維状ナノ構造成長過程の MD シミュレーションを行い、表面ナノ構造形成のメカニズムとして、(6) 下層に He バブルができることでそれに持ち上げられる表面ナノ構造が上方に成長していくことを世界で初めて示した。この成長過程は、これまでに Krashennnikov によって提唱されていた表面拡散と粘性でファイバーが自発的に伸びるモデル [4.2.2-1] とは全く異なる新しいものである。Krashennnikov のモデルだけでなく、海外のグループでは He プラズマによるナノ構造の上方への成長をシミュレーションでは表すことができておらず、現時点では我々の研究が一步進んでいる。さて、厳密に言えば現時点の本シミュレーション中で作られる表面ナノ構造は、「繊維構造」とはことなり、He バブルを隔てるナノウォールによる「発泡構造」をしている。我々の考えでは、He バブルが破裂して発泡構造のナノウォールに穴が開くことで「ポーラス構造」へと変化し、そこから 1200K 以上という高温環境での表面拡散によって表面エネルギーを下げるように形状変化した先が「繊維構造」であると考えている。本年度の実験により、(7) Fuzzy 構造形成の温度条件である 1200K においてタングステンが優位に形状変化を行えることは示されている。

本活動は平成 26 年度にも実質的に継続され、この発泡構造を再現するシミュレーションの弱点であった、材料内部での水素の拡散現象の再現を KMC によって実装した。MD と MC のハイブリッド手法となる本手法により、繊維状構造の再現を達成した。MD - MC ハイブリッド手法とそれによる繊維状ナノ構造の解析に関する詳細は、PWI グループ活動の項を参照されたし。これにより、世界に先駆けて形成メカニズムを解明することができた。分野間連携プロジェクトの支援のおかげで、当初の連携メンバーの枠を超えて、金属表面タングステンナノ構造に関わる国内研究者の協力体制を築くことができ、実質的なオールジャパン体制で研究に取り組むことができた。結果的に、本プロジェクトは平成 26 年 5 月の国際会議 Plasma Surface Interaction 2014 に

において招待講演、ならびに、同年10月のIAEA Fusion Energy Conferenceにおいて口頭講演に選出された。

さて一方で、応用物理の世界では、プラズマを用いたナノ物質形成の主流は未だに炭素系物質である。その理由は炭素それ自体が持つ豊富な形状のバリエーションに加えて、プラズマを利用した非平衡環境やエネルギー付与、ラジカルなどの要因が、炭素の構造形成率を上げるからである。本プロジェクトではH23年度よりプラズマ中での炭素分子合成の研究を進めてきた。初年度は実験機の設計及び施策を行い、二年目である昨年度に装置の完成と、アルゴンプラズマ環境下での炭素ダスト合成を行った。三年目の本年度は水素プラズマ環境下での炭化水素合成を行い、合成物質とその内部構造を電子顕微鏡観察にて同定した。また、平行してH23年度からの二年間でMDシミュレーションによる炭素分子合成の計算を行い原子状態から10nmスケールまでの成長過程を预言している。この成長過程は星間空間での炭化水素分子合成への関連や、今年度の議論により木星大気環境でのソリンとよばれる炭化水素合成への貢献が期待できる。これを実験室実験にて検証すべく、我々の開発した実験装置にて、プラズマ放電中にリアルタイム赤外分光を行い、その吸収スペクトルの変化から成長過程での炭化水素分子種の変化の同定を試みた。しかしながら、炭化水素濃度に対して、バックグラウンドノイズをうまく除去しきれず、優位な信号を得るに至らなかった。この点は、今年度の議論の末、今後ターゲットをより高濃度な環境へと移すことで信号の増強を図る。

本分野間連携活動を通じて、プラズマ核融合分野の外からも数値実験プロジェクトの主催するシンポジウムへ参加するなど、交流が生まれている(表 4.2.2-1)。また、本活動で開発および開発協力を行ったコードを、分野内外へ普及させるべく、H25年度より年一回のDFT講習会を催している(表 4.2.2-2)。そこでは、理論だけでなく実験研究室から学生が参加し、所内に1週間滞在しながらコードの使い方を覚える合宿形式の講習会を行っている。特に実験研究室から参加する学生は本来の研究室で行っている実験研究に対応した理論計算を自ら行えるようになるという点で、実験研究室に非常に好評である。この様な、今後も活動を継続し、プラズマ - 物質相互作用研究の発展と普及に努めていく。

[4.2.2-1] S. I. Krasheninnikov, Phys. Scr. T145 (2011) 014040.

表 4.2.2-1 本分野間連携を通じた数値実験プロジェクト関連研究会へ参加したプラズマ核融合以外の分野の研究者

年度	会議・研究会名称	人数
H25年度	プラズマシミュレーターシンポジウム	1(招待講演)

表 4.2.2-2 DFT(密度汎関数理論)講習会の参加者一覧

年度	期間	所属	学年	氏名
H25	11月25日～11月29日	九州大学	学部4年	山中祐希
		島根大学	学部4年	山田哲也
H26	8月18日～8月29日	一関工業高専	専攻科1年	佐々木和成
		釧路工業高等専門学校	5年	坂上了太
		釧路工業高等専門学校	5年	稲邊秀斗
H27	7月6日～7月10日	九州大学	修士2年	山中祐希
		大阪大学	学部4年	大森晃平
		同志社大学	博士後期課程3年	加藤周一
		総合研究大学院大学	博士課程5年	羽鳥智栄

4.2.3 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

シミュレーション科学が学際的研究分野であることは、ここまでも述べてきたが、プラズマシミュレーションの研究の進展が、シミュレーション科学における普遍的な基盤技術の発展などに与えてきた影響は計り知れない。特に、近年では、連結階層シミュレーションモデルを用いた手法開発において、重要な役割を果たしてきた。本課題は、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1つとして、平成26年度より研究を開始したものであり、基生研・生理研・分子研・核融合研・北陸先端科技大・信州大・ボストン大の共同研究として進められている(表4.2.3-1参照)が、その最終的な目標の1つに、プラズマ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モデルを用いて、脳神経集団のネットワークの大規模シミュレーションを実現することが挙げられている。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

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 26 年度	1	3	2	0
平成 27 年度	1	3	2	1

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・数理的手法を開発し、その法則性を見出すことを目的としている。そして、その法則に基づいて局所的（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、連結階層シミュレーションモデルの導入により構築することなどを目指している。本課題の進展は、神経学の分野のみならず、数理解析分野、そして、シミュレーション科学分野に大きく貢献するものである。

4.2.4 プラズマの3D可視化

自然科学研究機構の「自然科学研究における国際的学術拠点の形成」事業のプロジェクト「磁場閉じ込めプラズマ中の乱流、磁気島及び磁力線の研究」の活動の一つとして「プラズマの3D可視化」[4.2.4-1]を平成22年度より推進している。

(1) シミュレーション結果と実験装置データのバーチャルリアリティ (VR) 空間における同時可視化：核融合科学研究所大型ヘリカル装置 (LHD) の CAD データから没入型 VR 装置に生成した写實的真空容器内部にシミュレーションなどによる数値データを実際に可視化することによって複雑な磁力線構造や粒子軌道と実際の装置の幾何学的位置関係などを表示し実際に実験装置における複雑なプラズマの振る舞いの解明に役立てることを目標としている。平成 24 年度以降は LHD 内部の写實的表現と HINT2 コードの結果の同時可視化機能を拡張し、フラックス面のポアンカレマップを表示する機能を追加している。このことによって複雑な磁場構造を持つ周辺領域におけるプラズマ構造の理解が容易になった。さらに平成 25 年度には、LHD 実験で進められているステレオカメラによるダストの 3 次元軌道データを、バーチャルリアリティ装置でのプラズマ平衡解表示ソフトウェア vlhd で表示できるよう機能追加を行った。平成 26

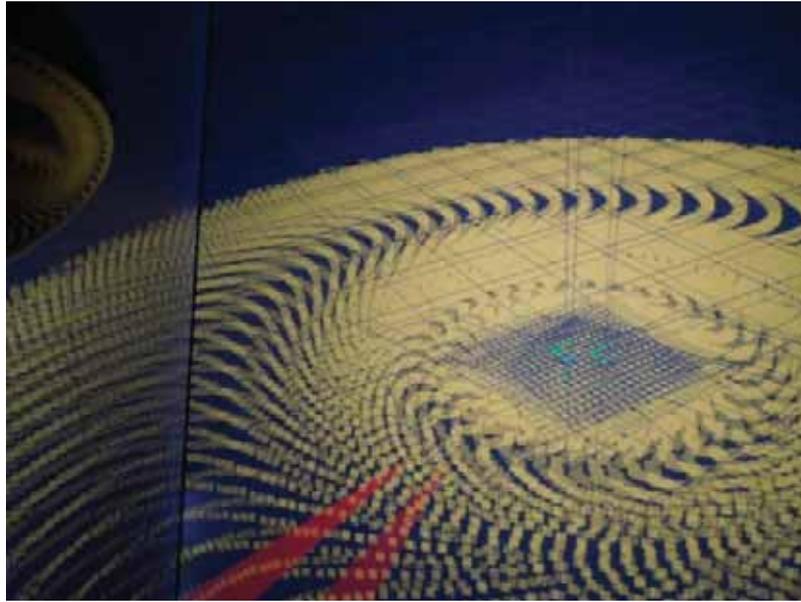


図 4.2.4-1 超多粒子の VR での可視化

年度にはこの機能に対して多数のダスト軌道データを表示可能とするため、粒子の表示方法の改良を行った(図 4.2.4-1)。

(2) 超多粒子系の汎用 3D 可視化 : スーパーコンピュータの進歩に伴い、現在では粒子数が 1 億個を超えるプラズマ粒子シミュレーションが実行されるに至っている。粒子の運動論的な効果が重要な役割を果たすプラズマ現象において粒子運動の可視化・解析は必須である。そこで、プラズマの超多粒子系の粒子運動の可視化・解析のため、天文学における N 体計算などで大規模な粒子シミュレーションデータの可視化ができる Zindaiji3 を活用し、その機能追加を進めた。Zindaiji3 は 2 億体までの大規模データを可視化することができるオープンソース・アプリケーションであり、その特徴は、大規模な時系列(連番)粒子データからの映像制作、OpenGL を用いた高速な表示、GUI を用いたタイムライン操作などができることである。超多粒子系データを取り扱うための I/O 改善のための方策として、HDF5 で圧縮されたデータを読み込むインターフェースを作成すると同時に粒子軌道の圧縮技法 TOKI [4.2.4-2] を使った HDF5 に対応するインターフェースを作成した。さらに VR 装置での表示を可能とする EasyVR への対応、NVIDIA 3D Vision での表示への対応を行った。

[4.2.4-1] 石黒静児、大谷寛明、「核融合プラズマを体感する 百見は一体感に如かず (Experience the Fusion Plasma -to Experience is to Believe)」, プラズマ・核融合学会

誌 (Journal of Plasma and Fusion Research Vol. 90 (2014) pp. 325~331.

[4.2.4-2] K. Hagita, H. Ohtani, T. Kato and S. Ishiguro: ‘TOKI Compression for Plasma Particle Simulations’, Plasma and Fusion Research Vol.9 (2014) 3401083 (6pages). DOI:10.1585/pfr.9.3401083.

4.2.5 戦略的国際研究交流加速事業「核融合及び宇宙プラズマ物理研究の融合的展開」

本事業では、これまでのプラズマ物理学研究において得られた方法論、解析手法、シミュレーション手法を宇宙プラズマの課題に適用し、また一方、宇宙プラズマ独自の研究課題に対する方法論を核融合プラズマに適用することにより、それぞれの分野における研究の新しい展開を実現することを目的とした戦略的国際研究交流加速事業として平成 27 年度より始められた。

平成 27 年度は、磁気リコネクションについての国際研究交流を推進する。近年、シミュレーション研究の発展により「3次元性」及び「プラズマ運動論」を考慮した研究が大きく進展しており、3次元構造をもつ乱流中で起こる磁気リコネクションの描像も明らかになりつつある。磁気リコネクションの素過程に関する実験と理論・シミュレーション研究において、世界的な拠点のひとつである Princeton 大学および Princeton Plasma Physics Laboratory (PPPL) に若手研究者を派遣することにより、日本で開発されているシミュレーション手法の検証を行う計画となっている。

平成 27 年度の派遣研究者として、宇佐見俊介准教授が選ばれた。平成 28 年 3 月頃に、PPPL の Hontao Ji 教授と磁気リコネクションの下流領域における階層構造について議論し、開発してきた多階層シミュレーションモデルによる計算結果と Ji 教授のモデルとの比較検討を行う予定である。

4.3 国際的な COE としての活動

・日米協力事業 JIFT による活動の推進

核融合科学研究所は、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) の日本側のホスト研究機関として、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。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、加熱およ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。JIFT の日本側議長と秘書は、それぞれ、堀内数値実験研究プロジェクト総主幹と洲鎌核融合理論シミュレーション研究系主幹が務め、JIFT の運営に携わっており、JIFT プログラムにおいて、核融合科学研究所は、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ている。

核融合科学研究所第 2 期中期計画(平成 22~27 年度)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orkshop と研究者派遣・受け入れの状況を図 4.3-1 に示す。本プロジェクトに関する前回の外部評価(平成 24 年度)以降、平成 25 年度から平成 27 年度の間、核融合科学研究所は、JIFT を通じて米国へ延べ 8 名の研究者を派遣し、米国から延べ 10 名の研究者を受け入れ、8 件(日本開催 3 件・米国開催 5 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磁気島、乱流不純物輸送や 3 次元非線形 MHD 安定性解析に関する共同研究、オークリッジ国立研究所との高エネルギー粒子駆動アルフヴェン固有モードや非局所輸送モデリングに関する共同研究、カルフォルニア大学アーバイン校とのアルフベン固有モードのジャイロ運動論的シミュレーションに関する共同研究、カルフォルニア大学サンディエゴ校との境界層プラズマシミュレーションに関する共同研究、マサチューセッツ工科大学との 2 流体モデルに基づくドリフト・テアリング不安定性解析に関する共同研究、PPPL との新古典トロイダル粘性、ジャイロ運動論的乱流輸送シミュレーション(図 4.3-2 参照)、カオス磁場構造や統合輸送シミュレーションに関する共同研究、ウィスコンシン大学とのヘリカル系プラズマにおける新古典輸送に関する共同研究、ジェネラル・アトムクス(GA)との 3 次元 MHD シミュレーションに基づく共鳴擾動磁場に関する共同研究、Tech-X Cooperation との LHD の統合輸送モデルに関する共同研究やまたネバダ大学とのレーザープラズマシミュレーションに関する共同研究が進められた。また、3 次元プラズマ物理、拡張 MHD、運動論的シミュレーション手法等のテーマに関するワーク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。

Year	Workshops	Exchange visitors	
		From NIFS	To NIFS
2010	Laser Plasmas by H. Sakagami (NIFS) and R. Town (LLNL) at Illinois Simulation Methods by A. Arefiev (IFS) and H. Ohtani (NIFS) at Chicago	T.-H.Watanabe / PPPL Y.TODO / IFS	C.Kim (Washington) B.Breizman (IFS)
2011	Simulation Methods by H. Ohtani (NIFS) and A. Arefiev (IFS) at NIFS Turbulent Transport by W.Wang (PPPL) and T.-H.Watanabe (NIFS) at Long Branch	A. Ishizawa / IFS S. Usami / IFS A. Ito / MIT	V. Decyk (UCLA) W. Horton (IFS) B. Breizman (IFS)
2012	Turbulent Transport by T.-H. Watanabe (NIFS) and W. Wang (PPPL) at Kyoto Simulation Methods by A. Arefiev (IFS) and H. Ohtani (NIFS) at Providence	H. Ohtani / IFS M. Nunam / PPPL	W. Horton (IFS) P. Zhu (Wisconsin) A. Kuley (UCI) D. Spong (ORNL) C.Hegna (Wisconsin)
2013	3D Physics in Plasmas by M.Yokoyama (NIFS) and C.Hegna (Wisconsin) at Madison Extended MHD by H. Miura (NIFS) and L.E. Sugiyama (MIT) at Denver Simulation Methods by H. Ohtani (NIFS) and A. Arefiev (IFS) at NIFS	M. Nunami / IFS S. Satake / PPPL & Wisconsin H.Hasegawa / UCSD A. Ito / MIT	F. Waelbroeck (IFS) D. Spong (ORNL) C.S. Chang (PPPL)
2014	3D Physics in Plasmas by M. Yokoyama (NIFS) and C. Hegna (Wisconsin) at Kyoto Extended MHD by H. Miura (NIFS) and L.E. Sugiyama (MIT) at Kyoto Simulation Methods by H. Ohtani (NIFS) and A. Arefiev (IFS) at New Orleans	H. Miura / IFS H.Sakagami / Nevada	A.Y.Pankin (Tech-X Corp) L. Zhen (IFS) D. Spong (ORNL)
2015	3D Physics by Y. Suzuki (NIFS) and E.J. Strait (GA) at San Diego Extended MHD by H. Miura (NIFS) and L.E. Sugiyama (MIT) at Golden	M.Yokoyama / PPPL M.Sato / IFS	S.R. Hudson (PPPL) D.del-Castillo (ORNL) Z. Lin (UCI) N. Ferraro (GA)

図 4.3-1 平成 22 年度 (2010) から平成 27 年度 (2015) 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 ワークショップおよび研究者の派遣と受け入れ

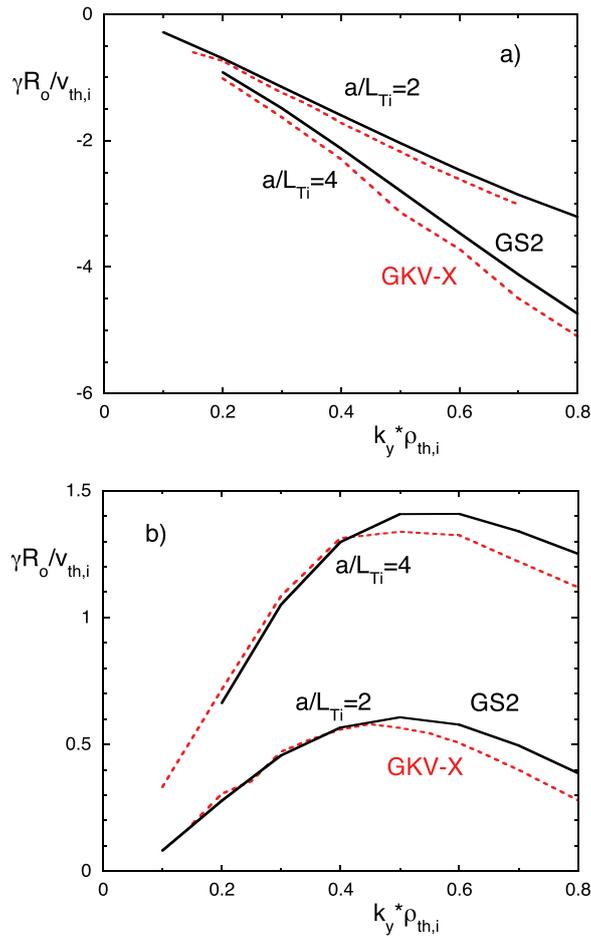


図 4.3-2 ジャイロ運動論的シミュレーションコード GKV-X と GS2 によるイオン温度勾配モードの周波数および成長率の計算結果の比較 [参考文献: D. R. Mikkelsen, M. Nunami, T.-H. Watanabe, H. Sugama, and K. Tanaka, “Verification of gyrokinetic microstability codes with an LHD configuration”, *Phys. Plasmas*, **21**, 112305 (2014)]

上記の日米共同研究による成果は、*Physics of Plasmas*, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, *Nuclear 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、シャーウッド国際核融合理論会議、APS-DPP 会議、国際ステラレータ-ヘリオトロンワークショップ等の国際会議において発表されている。

・日欧交流

核融合科学研究所が締結している学術交流協定を基盤として、多様な研究課題に関する日欧間の国際連携も活発に展開されている。欧州地域との多機関間協定として、国際エネルギー機関 (IEA) のステラレータ-ヘリオトロン協定 (欧ではドイツ・マッ

クスプランクプラズマ物理研究所 (IPP)、スペイン・CIEMAT が加盟)、同テキサトル (TEXTOR) 協定 (ドイツ・ユーリッヒ総合研究機構)、また、理論シミュレーション共同研究が主眼である LIA (磁場核融合に関する国際連携研究所: 日本側: 核融合科学研究所、九州大学、大阪大学、フランス側: CNRS、アクス-マルセイユ大学) などがある。

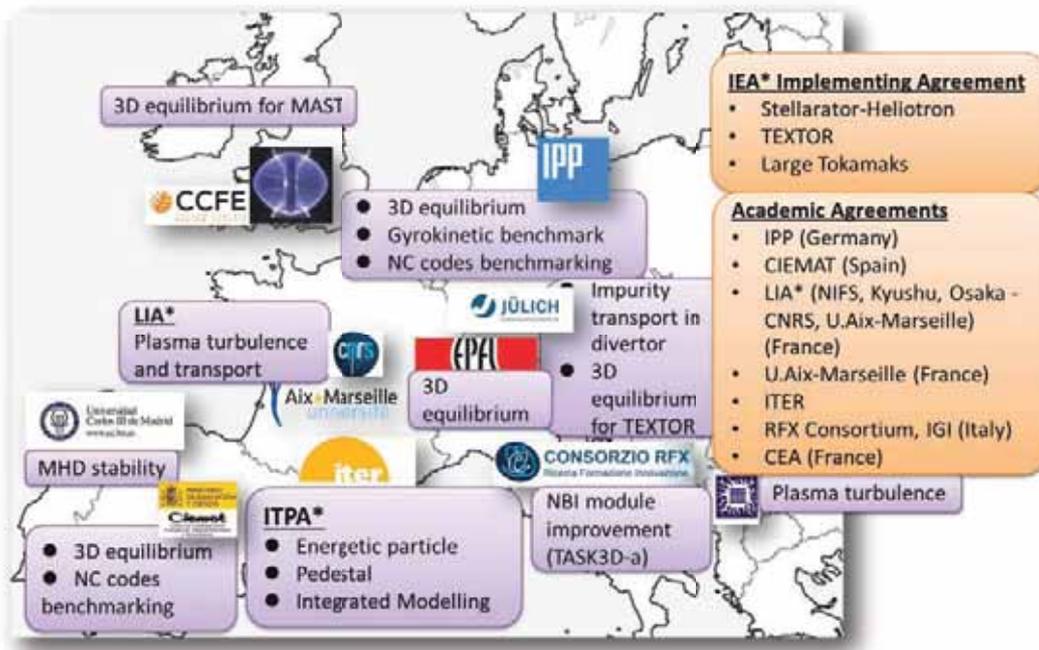


図 4.3-3 欧州の研究機関との研究連携。(IEA: International Energy Agency, ITPA: International Tokamak Physics Activity, LIA: Associated International Laboratory)

この3年間での主な日欧交流を以下に記す。

従来の局所近似を用いた新古典輸送計算法と、核融合科学研究所で開発してきた、より近似の少ないグローバル新古典輸送計算法 (FORTEC-3D コード) による計算法とを、LHD、TJ-II (CIEMAT)、W7-AS (IPP)、HSX (ウィスコンシン大学) 等様々な磁場配位において比較するとともに、その計算結果を実際の観測結果と比較する検証研究 (Verification & Validation) を国際共同研究で進めてきている。ジャイロ運動論による微視的乱流輸送のシミュレーションが、輸送の定量的評価に向かって高精度化している一方、新古典輸送計算に用いられている近似による誤差が大きく残ったままでは、コアプラズマ中のトータルの輸送レベルのシミュレーション予測精度にも影響が及んでしまうため、この共同研究による系統理解の進展は国際的にも注目されている。こ

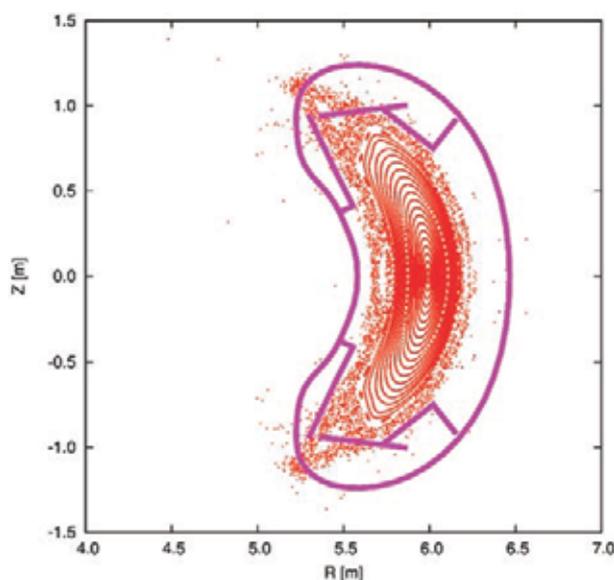


図 4.3-4 Wendelstein 7-X における、有限ベータが与える 3 次元平衡への影響に関する HINT2 コードを用いた共同研究成果の一例。

の検証研究によって、どのような磁場配位、どのようなプラズマの条件において従来の局所近似計算とグローバル計算の差がプラズマの閉じ込め性能を定量的に評価する上で無視しえないほど大きくなるかについての知見が蓄積してきた。この国際共同研究は核融合科学研究所が主導的な立場に立って推進してきたもので、その成果は 2015 年の国際ステラレータ-ヘリオトロンワークショップ (ISHW) において招待講演として発表されるなど、国内的評価も高い。

IPP との間で LHD 周辺プラズマモデリングに関する共同研究を行い、LHD における不純物ガスパフ実験における放射分布の EMC3-EIRENE コードによる解析とボロメータ計測の定性的一致を得るなどの成果が挙げられた。この共同研究の成果は、2015 年のプラズマ周辺理論に関する国際ワークショップ (PET) において招待講演として発表されるなど、大きな進展があった (3.3.4 節参照)。

カルロス三世大学 (スペイン) の B.A.Carreras 特任教授との MHD 安定性解析に関する共同研究も続けられている。共著の国際会議の発表や論文の内容について詳細な議論を継続的に行っており、特に、2014 年には、IAEA Fusion Energy Conference で、共著の論文が口頭発表に採択された。

また、3 次元平衡に関する欧州機関との共同研究も精力的に展開されている。スイス・ローザンヌのプラズマ物理センター (CRPP) との非等方圧力を考慮した 3 次元平衡計算 ANIMEC コードに関する共同研究、英国・カラム核融合エネルギーセンター

(CCFE) との HINT2 コードを用いた MAST 実験における 3 次元平衡計算、IPP との Wendelstein 7-X 実験初期フェイズ(OP1.1)における 3 次元平衡計算と周辺部ストキャスティック化の評価(2015 年の ISHW にて口頭発表)(図 4.3-4 参照)など、多岐にわたる共同研究が進展している。

このように、数値実験炉研究プロジェクトでは、様々な研究課題に関する理論モデル、シミュレーションコードを通じて、欧州地域の多くの機関との多角的共同研究を展開している。

・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を推進している。本事業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)が拠点機関となり、平成 24 年 8 月 1 日から平成 29 年 7 月 31 日まで 5 年間実施するものである。研究協力体制は 5 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」で構成されている。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 にも参加している。

カテゴリー IV は NIFS と京都大学が協力して推進しており、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ている。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 および NFRI と進めている。ASIPP では Youjun Hu 研究員および 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およ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。Hu 研究員はその研究成果を日中韓フォーサイト事業セミナー(2015 年)および中国の国内研究集会(2015 年)で発表した。EAST トカマクにおける高エネルギー粒子駆動不安定性の空間分布を図 4.3-5 に示す。NFRI では Tong-nyeol Rhee 研究員および 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ベン固有モードのシミュレーション研究を実施した。Rhee 研究員はその研究成果をアジア太平洋プラズマ理論会議(2014 年)で発表した。

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 G. J. Niu 氏, Q. Xu 氏, Z. S. Yang 氏等と EAST 装置に関連した共同研究を行ってきた。スタートアップリミター表面の熱流束分布計算モデルの開発とダイバー

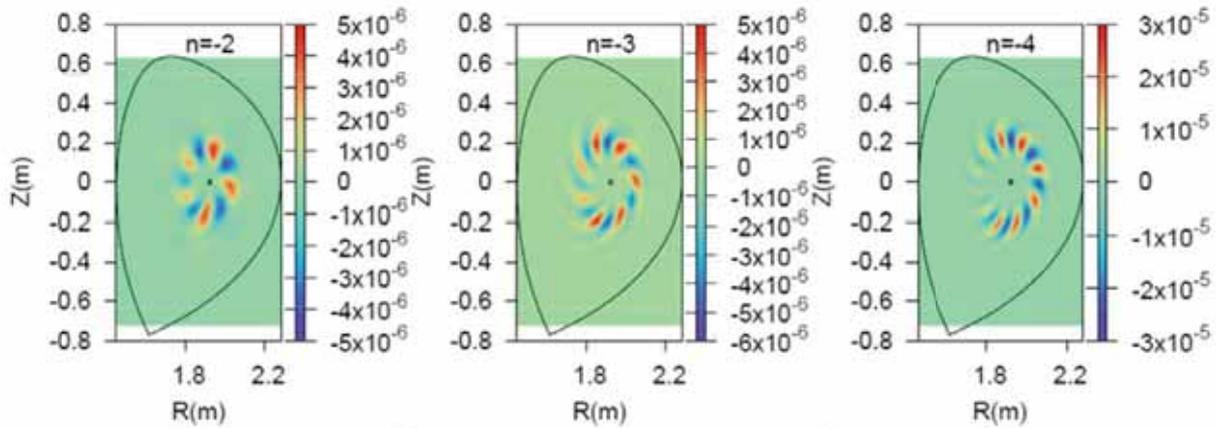


図 4.3-5 MEGA コードを用いて計算した EAST トカマクにおける高エネルギー粒子駆動不安定性による温度揺動のポロイダル面分布。左から順に、トロイダルモード数 $n=2$ の反転磁気シアアルフベン固有モード、 $n=3$ の高エネルギー粒子モード、 $n=4$ のトロイダルアルフベン固有モードをそれぞれ示している。

タイルギャップを対象とする 2 次元静電 PIC コード (3.2.1.3 節参照) の開発を行うとともに、不純物輸送やダストに関するモデリング、EMC3-EIRENE コードによる周辺プラズマ輸送モデリング等について議論を行った。

カテゴリー IIb では、ASIPP (G. S. Xu 教授) と EAST トカマクにおける RMP 重畳時の磁場構造のモデル化と軟 X 線計測との比較による、物理モデルの検証に関する共同研究を行った。日米協力にて、3 次元 MHD シミュレーションと軟 X 線計測による RMP 重畳時の磁場構造の同定を DIII-D 実験において実施中である。同様の検討を EAST トカマクについても行った。その結果、DIII-D 装置と同様に EAST トカマクでも実験可能とわかった。今後、3 次元 MHD シミュレーションを行うための準備作業を開始する予定である。

日中韓フォーサイト事業に加えて、核融合科学研究所は新日中協力事業も実施している。新日中協力事業では西南物理研究院 (Y. Liu 教授) と HL-2A トカマクの ELM 物理に関する共同研究を行った。HL-2A トカマクには $n=1$ の共鳴磁場摂動 (RMP) を生成する外部コイルが設置されており、RMP による ELM 抑制とプラズマ応答による RMP 遮蔽・増幅に関する物理研究が行われている。そこで、核融合科学研究所を中心に開発されている 3 次元非線形 MHD シミュレーションコード MIPS を用いて ELM の非線形シミュレーションを行った。図 4.3-6 に、MIPS コードにより計算された ELM

の圧力摂動を示す。この結果は、APFA2013にて発表された。

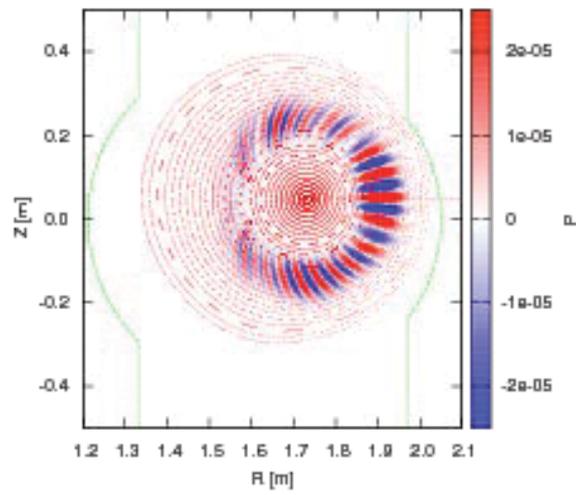


図 4.3-6 MIPS コードを用いて計算した HL-2A トカマクにおける ELM の圧力摂動分布。

4.4 ITER 計画・BA との連携

・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月からの10年計画で開始された国際熱核融合実験炉 [ITER] に関連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] と共に、国際核融合エネルギー研究センター (International Fusion Energy Research Centre:[IFERC]) の研究拠点が設置された。IFERC の活動は、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]) の3センターが推進する副事業から構成され、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・大学等との連携に協力し、BA 活動に関わる大学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、約20名の事業チーム員の支援の元に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 の勧告の元で運営委員会 (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 会合を開催すると共に各副事業の管理・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。

その他にも、2012年初頭から運用を開始した CSC 計算機を用いたシミュレーション研究を評価するための CSC レビュー会合を春の PC に合わせて2013年から開催するとともに、2012年に行った原型炉 R&D 活動の相互レビューの提言を受けて、一体化を促進するための原型炉設計と R&D の合同会合を2013年から開催している。また、2013年から本格化した REC 活動の技術調整会合を毎年2回主催し、REC 全体計画を

表 4.4-1 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

具体化するとともに、2014年からは秋のPCに合わせて原型炉設計とR&Dの双方の活動を評価する原型炉レビュー会合を開催している。更に、CSC計算機を用いたシミュレーションプロジェクトのデータベースの構築とその解析等、IFERC事業の最終段階へ向けて、事業成果の取りまとめにも助力している。また、IFERCのウェブサイト (<http://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ている。各委員会への参加状況を表 4.4-1 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る。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ている。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 連結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 4.4-2 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、炉材料である。

・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」課題グループと「ペDESTAL と周辺物理」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 4.4-3 の通りである。

表 4.4-2 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)	未定 (2016.4.1-2016.12.27)

表 4.4-3 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
2009 春		1				1
2009 秋		1				1
2010 春		1	3			4
2010 秋	1	1				2
2011 春		1				1
2011 秋	1	1		1		3
2012 春	1	1	2			4
2012 秋	1	1				2
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

「高エネルギー粒子」課題グループでは3.3.3節に述べたITERにおける高エネルギー粒子駆動不安定性と高エネルギー粒子輸送について、「ペDESTALと周辺物理」課題グループではDIII-D実験の3次元MHD平衡解析および非線形MHDシミュレーションについて、研究成果をそれぞれ報告した。ここでは「ペDESTALと周辺物理」課題グループでの発表について述べる。ITERの標準運転モードはELMy H-modeであり、必然的にType-I ELMを伴う。ELMによりはき出される高エネルギーの粒子束はダイバータ板に損傷を与えるため、ELMを抑制し高エネルギー粒子束を低減することはITERにおいて核燃焼を実証するにあたり緊急の課題である。ELMによる高エネルギー粒子束を低減するため、共鳴摂動磁場 (Resonant Magnetic Perturbation: RMP) を重畳し、ELMを低減、もしくは抑制する実験がDIII-D装置をはじめ各トカマク装置実験において精力的に行われている。

これまでのRMPをプラズマに重畳した場合の磁場構造のモデル化は、「真空近似」が用いられてきた。しかし、RMPの大きさは真空中で計算された値に固定され、プラズマ応答による遮蔽・増幅の効果は一切入らない。プラズマ応答によるRMPの変化は、3次元MHDコードでプラズマ応答を含んだ解析を行う必要がある。まず、最も低次のプラズマ応答を含んだMHDモデリングとして、3次元MHD平衡計算を行った。 $n=3$ のRMPを重畳したDIII-Dプラズマについて入れ子の磁気面を仮定しない3次元MHD平衡計算コードHINTにより計算した。真空近似と異なり、3次元MHD平衡ではセパラトリックス付近に結合長が長い磁力線と短い磁力線が混在し、それらが重なり合いながら周回していることがわかった。また、X点付近のストカスティック化が強く表れ、スプリッティングと呼ばれる磁束管の分岐構造が表れる。次に、HINTコードで計算された3次元MHD平衡を元に、3次元非線形MHDシミュレーションコードMIPSでELMのシミュレーションを行った。図4.4-1に、MIPSコードで計算されたELMの圧力摂動を示す。ペDESTAL部に高 n のELM構造が現れることがわかる。RMPを重畳しない場合、最終的にELMは非線形崩壊しペDESTALが破壊される。しかし、RMPを重畳した場合はELMの成長率が低下し、崩壊レベルが減少することがわかった。

ITERプラズマの統合解析ツールの整備・運用に関する議論を行う活動IMEG (Integrated Modelling Expert Group) の平成26年12月の会合において、日本委員である京都大学 福山淳教授を通じて、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の状況について情報提供を行った。LHD実験データサーバと強く連携した形で開発を進めているTASK3D-aは、IMEGで行われている実験データ収集システムとの連携などの検討に関して情報共有できる部分が多いため、今後とも情報交換を行っていく予定である。

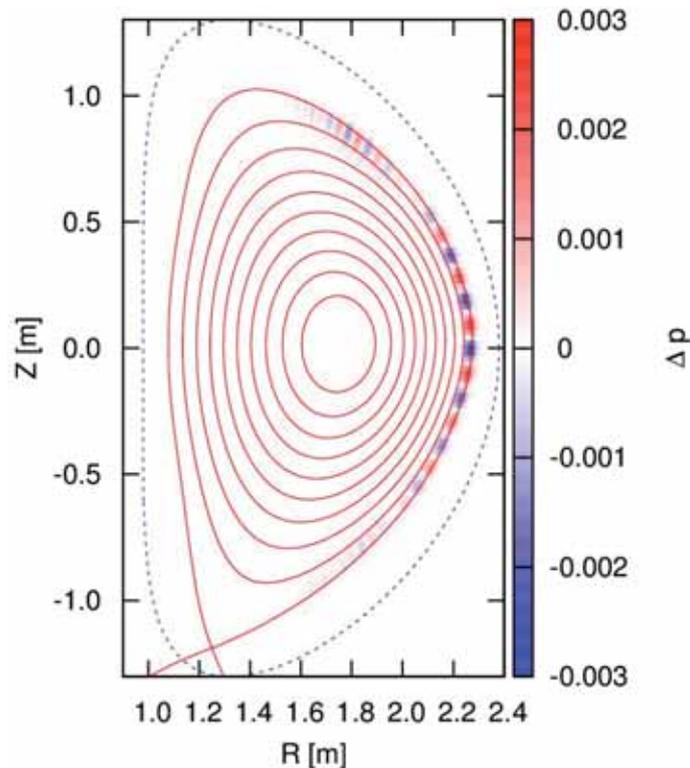


図 4.4-1 MIPS コードによる DIII-D プラズマの ELM シミュレーション

・ Meeting of experts to review the Physics Requirements of the ITER ELM Control Coils への参加

前述したように ITER の標準運転シナリオは ELM_y-H モードを前提としたものであるため、ELM による高エネルギー粒子束によるダイバータモジュールの損傷が重要な解決課題となっている。現在、RMP を用いた ELM 抑制が現実的なシナリオとして検討されているが、RMP による ELM 低減は未解決な物理が多く、トカマク実験装置ごとに抑制領域が異なるため、ITER に設置予定の RMP コイルに必要な工学パラメータが確定できていない。このことは、今後予定されている ITER の建設期間見直しに大きく影響するため、この問題を集中的に話し合う「Meeting of experts to review the Physics Requirements of the ITER ELM Control Coils」が ITER 機構にて開催され、参加した。この会合では、これまでの各トカマク実験で再現された RMP による ELM 抑制をレビューし、必要な工学パラメータを抽出した。一方、RMP による ELM 抑制を理解するには、RMP による磁場構造の変化と RMP に対するプラズマ応答を明らかにすることが重要と認識され、数値シミュレーション・モデリングを強力に推進するこ

とが確認された。この活動には、核融合科学研究所で培われた3次元シミュレーションの結果も、大いに貢献している。

・その他のITER/BA連携活動

JT60-SAに関連して日本原子力研究開発機構が実施している共同研究に3件(表4.4-4)および委託研究に1件(表4.4-5)が採択されている。あわせてITER国際サマースクールに参加した講師を表4.4-6にまとめる。

表 4.4-4 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	プラズマ応答が3次元外部磁場成分に与える影響	H22-H24
鈴木康浩	3次元コードを活用した外部磁場摂動のモデリングとJT-60SAへの応用	H25-H27
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 4.4-5 平成24年度JT-60SA装置設計に関する委託研究

受託側研究実施責任者	受託側研究実施者	受託研究題目
鈴木康浩	佐竹真介 菅野龍太郎	外部摂動磁場がJT-60SAの閉じ込め磁場配位に与える影響の評価

表 4.4-6 ITER国際サマースクール講師

	開催場所	開催期間	講師	講演題目
第4回	オースチン (米国)	2010.5.31-6.4	鈴木康浩	Effects of 3D magnetic field structure on MHD equilibrium and stability
第5回	エクサン プロバンス (フランス)	2011.6.20-24	藤堂 泰	Nonlinear simulations of Alfvén eigenmodes destabilized by energetic particles
第7回	エクサン プロバンス (フランス)	2014.8.25-29	石澤明宏	Electromagnetic gyrokinetic simulations of plasma turbulence

5 人材育成

5.1 大学院教育

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およ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、東京工業大学、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。

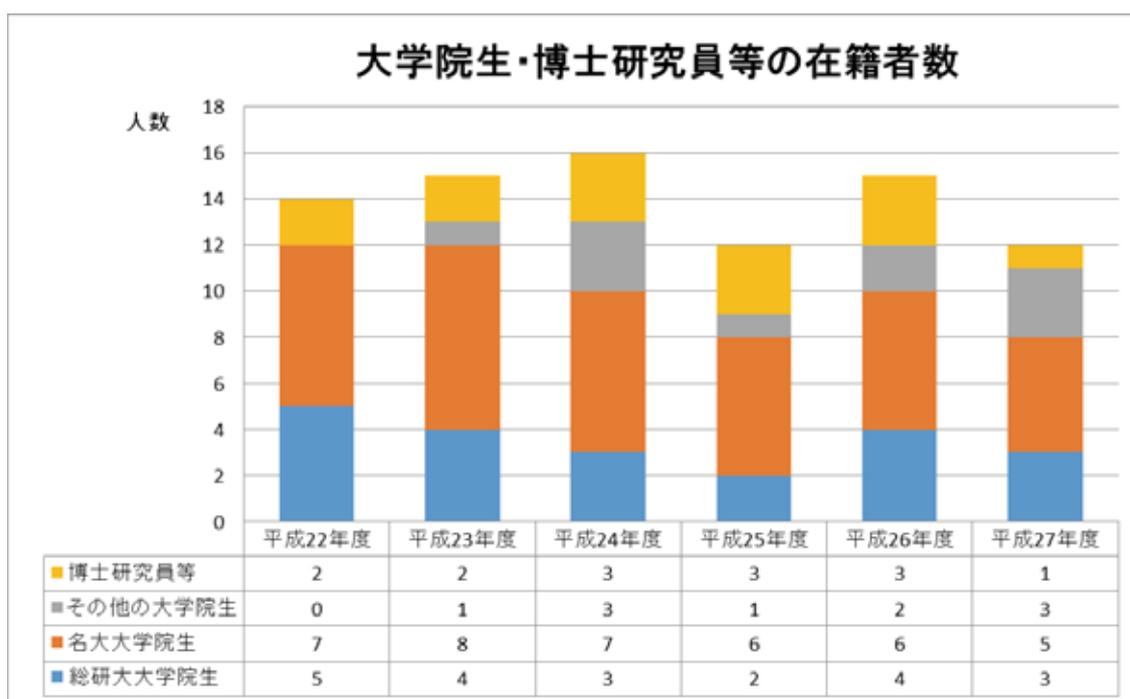


図 5.1-1 大学院生・博士研究員等の在籍者数

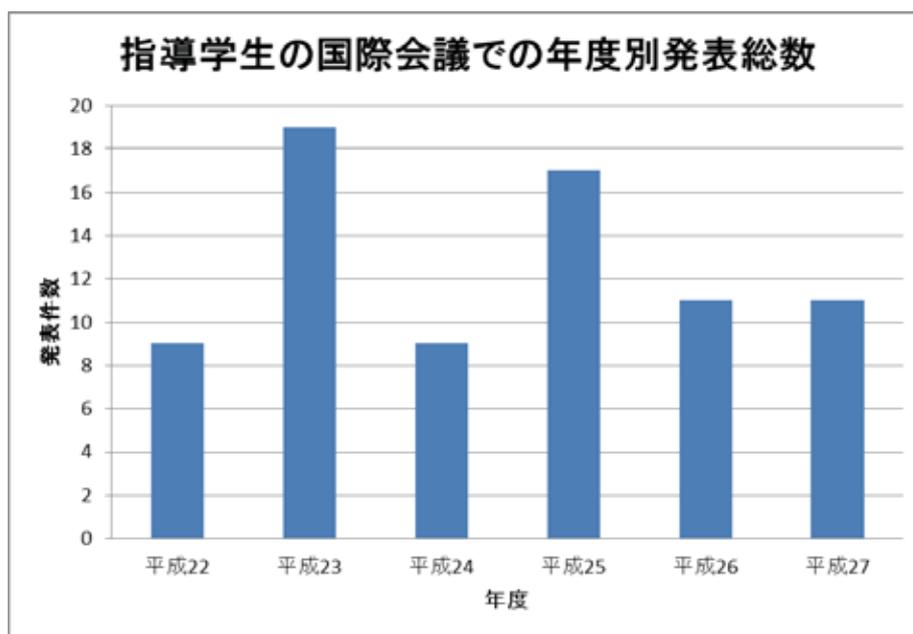


図 5.1-2 指導大学院生の国際会議発表件数

5.2 その他の教育プログラム

5.2.1 SSH・SSP 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、サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト (SPP) 活動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、および施設見学からなり、年間15~20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。

- 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。

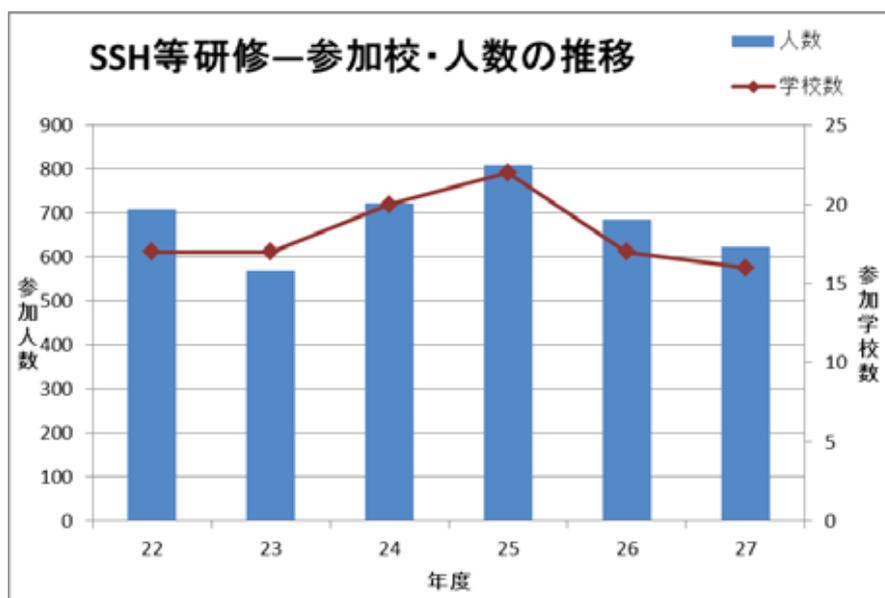


図 5.2.1-1 SSH 等研修の参加校及び参加者数

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24年度

- 核融合磁場閉じ込めプラズマの平衡・安定性解析入門
- モンテカルロ法によるプラズマ輸送シミュレーション
- 粒子シミュレーションで見るプラズマ現象

平成 25 年度

- モンテカルロ法によるプラズマ輸送シミュレーション
- 運動論的プラズマ現象の粒子シミュレーション
- 核融合磁場閉じ込めプラズマの平衡解析入門
- 磁化プラズマにおける磁気リコネクションのシミュレーション研究

平成 26 年度

- 核融合磁場閉じ込めプラズマの平衡解析入門
- モンテカルロ法による運動論的輸送シミュレーション
- 核融合炉材料シミュレーション
- Particle-in-Cell 法によるプラズマ粒子シミュレーション

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



図 5.2.2-1 夏の体験入学でのシミュレーション実習

5.2.3 総研大アジア冬の学校・シミュレーション科学教育講座

総合研究大学院大学(総研大)物理科学研究科の5専攻では、各専攻で行っている研究・教育活動を、日本国内を含むアジア諸国の大学生、大学院生および若手研究者の育成に広く供するべく、平成16年度よりアジア冬の学校を開催している。核融合科学専攻では、シミュレーション科学教育講座と共催して、プラズマ・核融合に関する、理論、シミュレーション、実験、工学などに関する講義、バーチャルリアリティ装置CompleXcopeの3次元VR体験、大型ヘリカル装置(LHD)見学に加えて、参加者およびNIFSで活動している学生や研究者のポスター発表会を行っている。参加希望者の数は年々増加しており平成26年度は海外から約90名の参加申し込みがあった。参加者は全員核融合科学研究所宿泊施設であるヘリコンクラブに宿泊し、各国の参加者と日本からの参加者の交流も図られている。また、参加者の中から総研大に進学する学生も現れている。

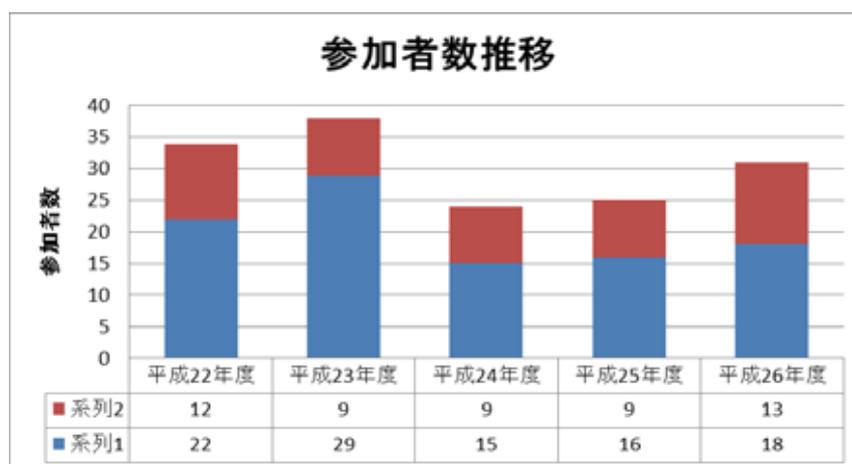


図 5.2.3-1 総研大アジア冬の学校・シミュレーション科学教育講座参加者



図 5.2.3-2 総研大アジア冬の学校・シミュレーション科学教育講座集合写真

6 将来計画

第2期中期計画が始まった平成22年に、数値実験炉研究プロジェクトの将来計画の研究目標として、大きな3つの柱を設け段階的に達成することを計画した(図6-1)。第1段階では、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の核融合プラズマを構成する要素物理の解明とそのためのシミュレーションコード整備である。この研究は、図6-1から分かるように、第2期中期計画の主目標となっている。第2段階としては、得られた物理要素の統合化に向けた研究と核燃焼プラズマへの応用である。この研究は、第3期中期計画期間における主目標となる。統合化に向けた研究は、これまでの章の中に記載したように、既に、第2期中期計画の中でも着実に進めてきている。

さらに、第3段階として、「高精度・高信頼化された数値実験炉の構築」に向けた研究をプロジェクト全体で強力に推し進めることにより、ヘリカル型核融合原型炉(以下では、「原型炉」と略記)の設計へ大きく貢献することを研究の柱として掲げている。既に、総合工学研究プロジェクトを中心として推進している原型炉設計の開発研究に対し、これまでに数値実験炉研究プロジェクトにおいて開発されてきた幾つかのシミュレーションコードを供与するなどの貢献をしている。第3期中期計画の終盤以降の主研究計画となっている。

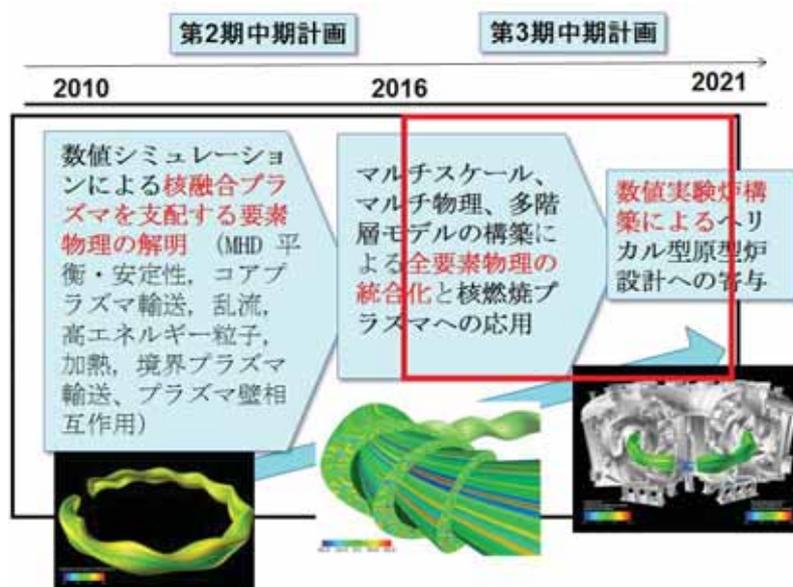


図 6-1 第3期中期計画のローマップにおける位置づけ

この研究計画を具体化するに当たっては、核融合プラズマを構成する多くの個別要素物理現象の解明を基本としながら、(1)世界各地で開発されている類似コードとのベンチマークテストによる理論検証 (verification) および (2) LHD プラズマ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) を通じて、より高精度で信頼性のあるシミュレーションコードへの開発と改良を進め、さらに (3) 開発検証されたコードや明らかにされた研究成果を数値実験炉に組み込み、LHD プラズマのさらなる最高性能化研究や現在進められている原型炉設計に精度の高い予測や重要な知見を与えるためのモデルやインターフェースの構築、あるいは必要とされる周辺基盤技術・研究環境の整備等を行うことを、その基本戦略とする。

以下では、プロジェクト課題を、「平衡・安定性」、「高エネルギー粒子・波動」、「新古典・乱流輸送」、「周辺プラズマ輸送」、「プラズマ壁相互作用」、「多階層物理」、「統合輸送」、および「研究環境の整備」に分け、課題別の将来計画に記述するとともに、数値実験炉の実現に向けた課題間の連携と成果の統合化を目指した活動を記す。

6.1 平衡・安定性

プラズマシミュレータを駆使した三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。そして、ヘリオトロンプラズマにおける安定性限界を決定する物理を解明し、それに基づく LHD プラズマの安定性の解明及び FFHR に対する予測を行うことを目指す。

MHD 平衡に関しては、HINT コードによる三次元静止平衡の計算手法はほぼ確立している。従って、今後もこのコードを LHD や FFHR 等に適用して平衡解を求め、三次元安定性解析に利用していく。また、このコードでは、入れ子状の磁気面を仮定しない計算手法を採用しているため、RMP を印加した平衡やストキャスティック領域を含む計算に適用していく。RMP に関しては、ヘリオトロンだけでなくトカマクに対しても応用範囲を拡張する。また、LHD では高ベータになると周辺領域がストキャスティックになるため、プラズマ端の位置決定が難しい。そこで、HINT コードを用いて周辺ストキャスティック層でのプラズマ端の位置決定手法の確立を目指す。さらに、フローを含む三次元平衡解法については、RMP を含むトカマクに対する磁気島の自発的拡大・縮小の考察を進める予定である。

安定性解析においては、HINT コードによって得られた三次元平衡に対して、三次元非線型 full-MHD コードである MIPS 及び MINOS コードが、MHD 解析の汎用ルーチンとして整備されてきた。そこで、HINT + MIPS/MINOS の組み合わせを用いる三次元シミュレーションをメインフレームとして、解析を進める。

現段階では、LHD 実験の安定性を精度よく再現できる安定性解析手法はまだ確立できていない。従って、安定性限界を規定する手法を確立し、それに基づいて FFHR 等のデモ炉予測を行うことが最大の課題である。理想モードに対しては、実験よりも不安定な結果となるため、電気抵抗、粘性、熱伝導の散逸効果を含めた安定性及び非線型ダイナミクスの広範なデータベースを作成し、LHD プラズマとの詳細な比較を行う。これまでの簡約化方程式を用いた解析結果からは、実験に対応する安定性を得るためには、実験で得られるものより大きな散逸係数が必要となることが予想される。そのため、安定性解析手法の確立のためには、散逸効果以外の安定化効果を持つ物理の導入も必要であると考えられる。

LHD 実験では、プラズマ回転と崩壊現象との関係が報告されており、モードの回転が止まると同時にモードが成長して崩壊現象が生じるロックトモードのような振舞いが報告されている。このことから、プラズマフローによるモードの回転が安定性に大きく寄与していることが示唆される。この場合、モード回転を駆動する物理としては、反磁性効果と径電場によるバルクプラズマの回転が考えられる。そこで、次のステップとして、この両者を組み込んだシミュレーションを行い、実験データの再現を目指す。反磁性回転に関しては、今回の成果として、安定化の寄与を持つことがスラブや円柱形状で確認されてきた。そこで、この効果を三次元シミュレーションに取り入れ、系統的なパラメタスキャンを行って、定量的な解析を推進する。径電場によるバルクプラズマ回転に関しては、径電場形状をダイナミクス計算に取り入れた解析を行う。また、回転停止のメカニズムとして、誤差磁場の影響を考え、誤差磁場によるロックトモード現象の再現を通じて、誤差磁場が安定性に与える影響についても解析を進める。なお、このようなコードの拡張においては、数値的に困難な状況が出現する可能性もあり、コード自身の数値安定性をより堅牢にしていく作業も必要である。

以上のような LHD 実験に対応する解析を進めることにより、安定性限界を決定する物理要素の特定を進め、その効果を含めたシミュレーションを行うことによって FFHR の安定性予測に貢献する。また、トロイダルプラズマの総合的理解に対する基礎的な物理の解明やトカマクでの安定性との関連についても、研究を進める予定である。

6.2 高エネルギー粒子・波動

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 連結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。この特長を活用してLHD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(EGAM)のシミュレーション研究を推進し、LHDの重水素実験結果と比較してコードの妥当性確認を行う。計算科学の面では、GPUや多数コアCPUを搭載したスーパーコンピュータがこれからの主流になっていくものと予想されているので、これらの機種に対してMEGAコードの移植・最適化を行う。

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：村上定義准教授との協力により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。また、現在のMEGAコードではバルクプラズマはMHD流体として近似されている。高速イオンに加えて熱イオンにも粒子法を適用して、熱イオンの運動論的效果を考慮したシミュレーションを可能にする。これにより、アルフベン固有モードやEGAMに対する熱イオンのランダウ減衰などの運動論的效果の解明が期待できる。これらの拡張を施したMEGAコードを用いて、ITERにおける高エネルギー粒子駆動不安定性と高エネルギー粒子輸送の予測シミュレーションを実施する。

6.3 新古典・乱流輸送

(1) 新古典輸送

数値実験炉の構築に向け、新古典輸送のモデル化と統合輸送コードへの組み込みや、輸送コードに複数イオン種効果を取り込む等の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を行うため、以下のような計画である。

- 新古典輸送シミュレーションコードの多イオン種化

LHD実験の高イオン温度プラズマで観測される、コア領域で炭素不純物密度が低くなる現象(不純物ホール)や、設計研究が進められているヘリカル型原型炉FFHRにおけるバルクDTプラズマの輸送現象における同位体効果、He灰や壁材量の不純物イオンのコアへの蓄積を研究するためには、新古典輸送コードも多イオン種プラズマに対応させる必要がある。現在、FORTEC-3Dコードを複数イオンの新古典輸送計算に対応させるために異種粒子種間線形化クーロン衝突項をfモンテカルロ法で実装する数値手法を開発中である。衝突項自体はほぼ完成しており、2016年度にまず局所近似版FORTEC-3Dコードを多イオン種対応(含む電子)させ、複数イオン種の計算に対応した他の局所近似新古典コード(DKES/PENTA)とのベンチマークによってコー

ドの検証を行う。その後、2017年度から多イオン種プラズマ中の新古典輸送現象の研究を開始する。また、グローバル版 FORTEC-3D コードの多イオン種対応も順次進める。

- 局所近似 FORTEC-3D コードと TASK3D コードの連結

3.3.2.1 節で解説した、小半径方向ドリフトのみ落としてドリフト運動論方程式を4次元に落とし、かつ新古典輸送の定量的評価に重要な磁気面接線方向成分の磁場ドリフト項を残した Zero-orbit-width(ZOW) 近似モデルの新しい局所近似版 FORTEC-3D コードは、元の5次元グローバル版に比べ計算が軽量で、単一磁気面ごとに計算できるためパラメータ並列計算にも適している。そこで、この ZOW 版 FORTEC-3D を比較的小規模な PC クラスタ上で高速実行できるようにコードのチューニングを行い、現在バウンズ平均の GSRAKE がそうなっているように、統合輸送コード TASK3D から半自動的に呼び出し・実行が行えるようなコードと計算環境の整備を今後3年間程度を目標に進める。可能であれば、今後の発展が期待される GPGPU や Xeon Phi のようなアクセラレータを備えた PC クラスタでの高速実行のためのコーディング法の研究なども行い、数値実験炉構築に向けたコア輸送コードの整備の一環として、高速で他のコード群との連結のしやすい新古典輸送計算法の開発を進める。

- ブートストラップ電流評価への新古典輸送コードの応用

これまで、FORTEC-3D コードを用いたシミュレーション研究は径方向粒子、熱輸送および新古典粘性の評価を中心に行ってきた。この理由の一つとして、5次元グローバル版 FORTEC-3D でパラレルフロー（ブートストラップ電流）の定常解を得るには最新のスーパーコンピュータを用いても、径方向フラックスや新古典粘性に比べてパラレルフローの緩和過程が遅い（ $>$ 数十 collision time）ために膨大な計算時間を要することがあった。最近開発した ZOW モデルの局所版 FORTEC-3D であれば、格段に少ない計算資源でパラレルフローの緩和までシミュレーションを行うことが可能であり、これに電子を含めたコードの多イオン種化を合わせれば、ブートストラップ電流のシミュレーション予測研究を進めることが可能となる。さらに将来的には、NBI や ECH によるモーメントム入力の効果も FORTEC-3D コードに含め、LHD だけでなく FFHR や W7-X、JT-60SA、ITER やトカマク DEMO 炉等、高ベータプラズマにおける高精度なブートストラップ電流のシミュレーション予測や、MHD 平衡へのブートストラップ電流の影響の研究などに役立てたい。

- プラズマエッジにおける輸送に対する共鳴摂動磁場 (RMP) の影響の定量的評価
 δf ドリフト運動論的シミュレーションコード (KEATS コード) を用いて、RMP によって生じたエルゴディック領域における電子およびイオン (同位体や不純物を含む) の衝突輸送 (粒子・熱輸送、ブートストラップ電流など) に対して、両極性条件を満たす径電場を考慮した定量的評価を行う。

(2) 乱流輸送

数値実験炉の構築に向け、乱流輸送のモデル化と統合輸送コードへの組み込みや、輸送コードに複数イオン種効果を取り込む等の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を行うため、以下のような計画である。

- 不純物を含む乱流輸送現象の解析

LHD 実験の高イオン温度プラズマのコア領域では閉じ込め改善に合わせて、炭素などの不純物密度が低くなる現象 (不純物ホール) が観測されている。しかしながら、新古典輸送理論に基づいた統合輸送シミュレーション解析では実験結果を十分には説明できず、乱流輸送の寄与も重要となることが示唆されている。そこで、多粒子種を含んだ乱流シミュレーションが可能となった GKV コードによるシミュレーション解析をさらに推し進め、主イオン及び不純物に関する乱流輸送機構の解析と輸送レベルの定量的評価を実現し、不純物ホール形成機構の解明を目指す。

- 水素同位体効果が乱流輸送へ与える影響の解析

水素同位体の乱流輸送・閉じ込め性能への影響は、LHD 重水素実験のみならず全ての核融合実験装置に共通する重要課題であるが、その詳細な物理機構に関しては理論的にも未だ完全には理解されていない。GKV を用いた多粒子種乱流シミュレーション解析を実施し、水素同位体が乱流輸送レベルに与える影響やその物理機構、また、同位体混合比に関する知見を蓄積し、LHD 重水素実験における閉じ込め性能向上に繋がる成果を創出する。

- 平衡電場及び平均流を組み入れた乱流シミュレーションモデルへの拡張

LHD をはじめ多くのヘリカル系プラズマの閉じ込め特性には、平衡電場の構造が強く影響する。乱流シミュレーションコード GKV では電場によるポロイダル流の効果が部分的に導入されているが、シミュレーションモデルの拡張・高度化をさらに進め、新古典輸送理論から無撞着に決定される電場や平均流の効果を組み入れた乱流輸

送シミュレーション解析の実現を目指す。

- ヘリカルおよびトカマク装置実験データに基づく定量予測性能検証

開発したジャイロ運動論的乱流シミュレーションコードの定量予測性能の検証とさらなる性能向上に資する指針を得ることを目的に、LHD 実験データを中心に比較検証に適したプラズマ分布条件を探索し、粒子や熱に関する乱流輸送レベルの定量比較を実施する。高イオン温度、高電子温度、高ベータ（密度）放電といった幅広い条件下での比較検証を展開するとともに、乱流計測シミュレーターを活用した乱流揺動特性の比較も合わせた多角的な V&V を展開する。

- 簡約化輸送モデルの構築、改良と統合コードへの適用

非線形ジャイロ運動論シミュレーションによる熱拡散係数の値を、線形計算により再現する簡約化輸送モデルの構築が行われている。運動論的電子効果、衝突効果などを取り込んだヘリカル配位における非線形ジャイロ運動論シミュレーションを基盤として、乱流に対する簡約化輸送モデルを構築、改良する。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。簡約化モデルを統合輸送コード 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。

- 国際共同ベンチマークのさらなる推進

プリンストンプラズマ物理研究所（米国）やマックスプランク研究所（ドイツ）のグループと共同で、ヘリカルプラズマに対するジャイロ運動論的シミュレーションのコード間ベンチマークを推進してきた。その中の解析で未実施であった、非線形シミュレーションのベンチマークおよび、粒子輸送や W7-X 配位等の他の非軸対象装置での解析に拡張し、コードの verification をさらに進展させる。

6.4 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 2 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、および第一壁まで拡張する改良に成功した。このことにより、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が可能になった。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を明らかにした。

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。

- LHD 実験との比較研究を通じた EMC3-EIRENE コードの検証
- グローバルな運動論的不純物輸送解析コードによる不純物輸送物理の考察、および EMC3-EIRENE との統合
- プラズマコア輸送コードおよびプラズマ・壁相互作用解析コードと連結またはそれらを取り入れた「周辺プラズマ輸送統合コード」の構築
- LHD 実験との比較から外挿された FFHR のダイバータ設計
- 炉設計に必要な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。そこで、これらの実験結果と詳細な比較を行うことにより EMC3-EIRENE コードの検証と改良を行う。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、EMC3-EIRENE コードの境界条件として、プラズマコアとプラズマ・壁相互作用のコード群と統合を進める。このことにより、FFHR 設計、数値実験炉の構築を目指す。また、大学や JAEA 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、数値試験炉構築に必要な要素研究を行う。

6.5 プラズマ壁相互作用

ここ数年、ITER の対向壁材であるタングステンを取り上げて、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開発に努めてきた。第 3 期中期目標期間終了までに、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なシミュレーション技法の開発を目指し、上記 5 つの数値計算手法に基づくシミュレーションコード群の整備・拡張・高精度化を行う。このシミュレーション

コード改良作業には、コードの妥当性を担保するためプラズマ壁相互作用の実験との綿密な比較が大切な過程である。そこで、引きつづき実験グループと連携して進める。今後は、これらのシミュレーションコードを用いて、高密度・高エネルギーのプラズマ照射下での材料の影響を調べていく。具体的には、以下の課題に取り組む。

- ・タングステン繊維状ナノ構造形成過程の解明

タングステンは、ある条件下でヘリウムを照射すると表面に繊維状ナノ構造と呼ばれる綿毛状の構造が形成されることが知られている。ITER や将来の DEMO 炉では、核融合反応により生じるヘリウム灰によりダイバータのタングステン表面にも繊維状ナノ構造が形成されることが懸念されている。この現象は固体原子や気体原子の相互作用や輸送の様々な物理現象が複雑に絡み合った複合過程であるため、上述した複数のシミュレーションコードを使い分け、多角的に解析する必要がある。現状では、繊維状ナノ構造形成の初期過程を再現することに成功している。今後は、より実験に近い空間スケールの構造形成の再現を目指す。

- ・希ガス照射下でのタングステンのスパッタリング収量の定量的な評価

材料研究のみならず、周辺プラズマのシミュレーション・実験研究においても壁からスパッタリングや反射する原子・分子の情報が必要である。特に非接触プラズマの利用によるダイバータの熱負荷低減を想定すると、希ガスとタングステンとの相互作用の情報が必要である。しかし、現状では、壁から放出される粒子の取り扱いが不十分である。そこで、本プロジェクトの周辺プラズマグループ、そして、LHD 計画プロジェクトの周辺プラズマの実験家とも連携し、壁から放出される粒子について BCA 法を使い定量的な情報の提供を行い、壁まで含めた合理的な周辺プラズマ挙動解析のための基礎データの構築による貢献を行う。

- ・タングステン結晶粒界の捕捉原子挙動に対する影響の評価

本プロジェクトではこれまで、材料表面は主に理想的な結晶、もしくは、アモルファス構造という両極端の状態を対象としてきた。しかし、現実には、単結晶やアモルファス構造という状況以外に、複数の小さな結晶が集まった多結晶構造になっている。水素及びその同位体や希ガスは、この結晶粒界に溜まったり、結晶粒界中を移動したりすることが考えられる。現状のシミュレーションコードでは、この粒界中での捕捉原子の振る舞いを扱えない。そこで、コードの拡張・改良を行い、4 倍程度の空間スケールを扱えるようにすることでタングステン結晶粒界の捕捉原子挙動に対する影響を評価する。

- ・高熱負荷によるタングステンの溶融挙動の解明

ITER のタングステンダイバータ板は $10\text{MW}/\text{m}^2$ 程度の高熱負荷に曝されると想定されている。現在、レーザー照射による高熱負荷実験が行われているが、原子レベル

での溶融過程を実験から明らかにすることは困難である。そこで、相補的な役割としてタングステンのレーザー照射に対するシミュレーションが必要になる。本プロジェクトでは、タングステンに電磁波を与えた場合の溶融現象を扱うために、固体原子の振る舞いはMD法で、電磁波と固体原子の相互作用はFDTD法を用いる手法の検討を行ってきた。これら2つの手法を組み合わせ、タングステンのレーザー照射に対する融点近傍での溶融を原子レベルで調べる。

- ・タングステン以外のプラズマ対向材料の検討

本プロジェクトでは、タングステンを当面の研究対象として、シミュレーション技法の開発を行ってきた。しかし、本シミュレーション技法は、“第一原理”とよばれる基礎物理方程式の上に立脚しているため、タングステンのみならず、他の材料も扱うことができる。そこで、このシミュレーション技法の汎用性を活かし、タングステン以外の材料に対して適用することで、将来の核融合炉材料選定に必要な基礎研究を行う。

6.6 多階層複合物理グループ

多階層複合物理グループでは、MHD、ジャイロ運動論など単一の運動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可能にすること、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を通じて、数値実験炉研究プロジェクトに寄与する。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

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モデルではトーラスプラズマの不安定性を十分に説明する事はできない。多階層複合物理では、広い意味での拡張MHDモデルを元に、圧力駆動型不安定性の成長、飽和などの機構の解明に必要な基礎研究を行うとともに、シミュレーション手法の高度化による計算の高効率化、軽量化を図る。具体的には以下の通りである。

- Braginskiiの方程式を元にした、2流体項、ジャイロ粘性などを含む拡張MHDモデルによる不安定性の成長と飽和機構の研究：矩形領域でのRayleigh-Taylor不安定性、交換型不安定性や3次元フルトラスシミュレーション(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、不安定性の成長と飽和機構を調べる。
- 拡張方程式の拡充：トーラスプラズマの無衝突プラズマに適した流体モデルの開発改良(特に熱流束の取り扱いなど)、シミュレーションの実施により、現在の

Braginskii 型モデルよりも正確な不安定性の理解を目指す。

- 平衡・不安定性解析：拡張 MHD の微視的效果や有限な流れの影響を取り入れた平衡の計算や、この平衡に対する安定性解析を可能にする。
- 拡張 MHD モデルの軽量化：拡張 MHD モデルによるシミュレーションでは、分散性波動により、時間、空間方向ともに高い解像度が要求される。長時間にわたる不安定性現象を解明するためには、シミュレーションの軽量化が必要である。このため、短波長成分が長波長成分に与える影響を現象論的モデルで置き換える、Large Eddy Simulation (LES) の考え方を採用し、長波長成分についての軽量のシミュレーションを実施する。LES に必要な現象論的モデルの開発のベンチマークに必要な種々の大規模シミュレーションを実施する。
- 他分野への波及：拡張 MHD モデルによる不安定性や非線形シミュレーションは、宇宙プラズマにおける不安定性や乱流など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。

大規模粒子シミュレーション

- 階層連結モデル：流体モデルに運動論的效果を正確に取り入れることができる連結階層シミュレーションモデルの高度化を進める。このモデルでは、一流体 MHD もしくは拡張 MHD モデルで巨視的な運動を解き、運動論効果が本質的な役割を果たす一部領域については粒子シミュレーションで解く。最終的に、磁気リコネクションが深く関係しているトラスプラズマでの鋸歯状振動、テアリング不安定性などへの応用を念頭に置く。
- 磁気リコネクション研究：磁気リコネクションの詳細な物理については、電気抵抗の起源や二次的な不安定性との関連など未解明な部分が残っている。また、縦磁場（ガイド磁場とも呼ばれる）がある場合には、トラスプラズマにおけるディスラプション現象とも密接に結びついている。大規模粒子シミュレーション (PASMO コードを使用) 手法でリコネクションの物理を解き明かす事により、上記の階層連結モデル手法開発の加速を促すとともに、宇宙プラズマなど他分野への研究成果の波及を狙う。
- 周辺プラズマの素過程についてのシミュレーション：周辺プラズマにおけるプロブ現象のシミュレーションでは流体モデルが良く使われるが、壁近傍での取り扱い

いなど明らかに流体モデルが破たんする領域が含まれる。流体モデルの限界を乗り越えるための新手法として、静電的粒子シミュレーションを元にしたプロブシミュレーション手法の開発を行う。また、デタッチダイバータプラズマのダイナミクスを研究するための新手法として、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コードを開発する。

6.7 統合輸送コード

数値実験炉プロジェクトにおける他のタスクと、TASK3D-a を基盤として、連携強化を図る。例えば、周辺輸送グループとは、壁からのリサイクリング粒子をキーワードとした EMC3-EIRENE コードとの連携、新古典・乱流輸送グループとは、局所版 FORTEC-3D コードの導入・ルーチンの運用や、ITG 簡約モデルの予測版統合輸送コードへの導入を進める。また、高エネルギー粒子グループとは、MEGA コードへの LHD データ供給を通じた MEGA の実験検証解析の支援など、多様な連携を計画している。

LHD 重水素実験に向けては、中性子発生数評価のために、現状の NBI 加熱解析コードである FIT3D コードを、中性子発生量評価ルーチンが組み込まれた FIT3D_DD（京都大学：村上定義准教授より提供され、LHD 実験グループにてこれまでの評価に用いられてきたもの）に置換する。これにより、プラズマパラメータの時系列変化をも加味した放電 1 ショット全体を通じた総中性子発生量を簡便に評価するツールと組み上げ、実験グループに提供する。

一方、FFHR-d1 設計活動への貢献としては、2.2.2.2 節に記載したように、これまでに、TASK3D-a モジュール（3次元平衡、新古典拡散・両極性径電場評価）の導入によるプラズマ立ち上げ時のエネルギーバランス（径方向分布を含む）定量評価への貢献を行っている。TASK3D が有する様々な輸送モデルの導入、比較作業への貢献を通じて、時間発展を追跡する予測型統合輸送コード TASK3D-p 開発としての位置づけでプロジェクト間連携を強化する。

6.8 研究環境の整備

6.8.1 プラズマシミュレータ将来計画

プラズマシミュレータは、平成 27 年度に更新を行った。契約期間は平成 27 年 6 月から平成 31 年 5 月までであり、平成 31 年度途中に次の機種更新を行う予定である。数値実験炉研究プロジェクトでは、MHD、運動論など各種課題についての 3次元

(ジャイロ運動論の場合は5次元)シミュレーションコードによる大規模並列計算を推進している。現行のプラズマシミュレータは世界27位の高性能機ではあるが、これらの3次元シミュレーションを十分な精度と性能で遂行するためには世界トップクラス的环境が必要であり、一層の性能向上が求められる。このため、平成31年度の更新では、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予定である。

6.8.2 シミュレーション研究基盤

数値実験炉における装置設計やシミュレーションデータの3次元可視化解析のための研究環境の整備として、その時々ニーズとシーズをとらえながら、可視化手法研究や、バーチャルリアリティをはじめとする様々な描画装置を活用する可視化研究、数値実験の要素技術研究を推進する。

- プラズマシミュレータ更新によって膨大化するシミュレーションデータを可視化解析するための環境としてバーチャルリアリティシステムの更新・増強を進める。
- 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。実験観測データ解析ではプラズマの流れが重要な役割を果たしていることが指摘されており、流れのようなベクトル場の効果的な可視化手法の開発や粒子データの可視化手法の開発を進める。
- 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。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。
- 今後のスーパーコンピュータ開発において、アクセラレータの導入が進むことが予想されている。このようなアクセラレータや物理乱数発生器の活用検討を引き続き進める。プログラミング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かかわっていく予定である。

以上のように、第2期中期計画期間での研究成果を踏まえて、第3期中期計画期間での具合的な研究計画、及びそれ以後の研究目標を策定した。これらの研究計画は、文

部科学省へ提出した第3期中期計画の素案の中に以下のようにまとめられている。

- 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として、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、タンゲ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なプラズマ壁相互作用を含む一連のシミュレーション技法の開発と基礎データ収集を行う。並行して、中期目標期間中において、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、非線形発展及び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。

7 まとめ

第2期中期計画が始まった平成22年に、数値実験炉研究プロジェクトの将来計画の研究目標として、大きな3つの柱を設け段階的に達成することを計画した。第1段階では、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の核融合プラズマを構成する要素物理の解明とそのためのシミュレーションコード整備である。第2段階としては、得られた物理要素の統合化に向けた研究と核燃焼プラズマへの応用である。さらに、第3段階として、「高精度・高信頼化された数値実験炉の構築」に向けた研究をプロジェクト全体で強力に推し進めることにより、ヘリカル型核融合原型炉の設計へ大きく貢献することを研究の柱として掲げている。同時に、これらの研究目標を実現するための研究体制の構築・整備を進めてきた。

この間、国内外の研究者の英知を結集して数値実験炉研究プロジェクトに関する共同研究を推進することはもとより、シミュレーション研究者の複数のタスクグループへの参加、タスクグループ間の研究交流、LHD実験グループや炉工学研究グループとの研究交流を積極的に取り入れ、研究活動の活性化を図ることにより、研究目標の達成へ向けたプロジェクト研究を着実に進展させた。さらに、この進展を支えるものとして、プラズマシミュレータの性能向上をはじめとする研究環境の整備やプラズマシミュレータ等を共同研究で利用するための支援体制の整備・拡充を進めた。特に、共同利用施設であるプラズマシミュレータ(スーパーコンピュータ)は、平成24年度および平成27年度に、それまでのそれぞれ4倍及び8倍の性能を有するシステムへと性能向上し、常に最先端の利用環境を全国の共同研究者に提供してきた。

これらの研究活動の成果は、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。数値実験炉研究プロジェクト関連の論文の総数は、平成22年度から27年度までの第2期中期計画期間の6年間で480編に達しており、この中には、Physical Review Letters等の著名雑誌への掲載論文5編、IAEA核融合エネルギー会議の発表論文73編が含まれている。更に、これらの研究成果により、主たる国際会議での61件の招待講演(IAEA-FECでの口頭発表21件を含む)の推薦や23件の学会賞等の受賞を受けるなど、プロジェクト研究体制の下、国際的に高いレベルの研究をプロジェクト全体として進めてきた。第3期中期計画の6年間(平成28年度～33年度)では、引き続き、国内外の研究者の英知を結集し、LHD実験グループや炉工学研究グループとの連携の強化を図ることにより、「核融合プラズマ閉じ込めの物理機構解明とその体系化」および、ヘリカル型核融合原型炉の設計へ貢献する「高精度・高信頼化された数値実験炉の構築」に向けたプロジェクト研究を強力に推進する。

資 料 編 2

List of published papers related to NSRP in 2010–2015

論文リスト (2010 - 2015年) / Published Papers related to NSRP in 2010-2015

論文リスト 2010年 / Published Papers related to NSRP in 2010

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
1	H. Ohtani, N. Ohno, D. Matsuoka, R. Horiuchi, Y. Tamura, A. Kageyama, S. Ishiguro	Application of Virtual Reality Technology to Research of Plasma Physics and Fusion Plasmas	Bulletin of the American Physical Society	55	15		2010	unrefereed
2	S. Satake, Y. Idomura, H. Sugama, T. Watanabe	Benchmark test of drift-kinetic and gyrokinetic codes through neoclassical transport simulations	Computer Physics Communications	181	6	1069-1076	2010	refereed
3	T. Goto, Y. Suzuki, K. Watanabe, S. Imagawa, A. Sagara	Core Plasma Design of a Heliotron Reactor	Contributions to Plasma Physics	50	6-7	620-623	2010	refereed
4	M. Yokoyama, S. Matsuoka, H. Funaba, K. Ida, K. Nagaoka, M. Yoshinuma, Y. Takeiri, O. Kaneko	Considerations from the Viewpoint of Neoclassical Transport Towards Higher Ion Temperature Heliotron Plasmas	Contributions to Plasma Physics	50	6-7	586-589	2010	refereed
5	K. Toi, M. Isobe, M. Osakabe, K. Ogawa, D. Spong, Y. Todo	Overview of Studies on Energetic-Ion-Driven MHD Instabilities in Stellarator/Helical Plasmas and Comparison with Tokamaks	Contributions to Plasma Physics	50	6-7	493-500	2010	refereed
6	H. Sugama, T. Watanabe	Enhancement of Residual Zonal Flows in Helical Systems with Equilibrium Radial Electric Fields	Contributions to Plasma Physics	50	6-7	571-575	2010	refereed
7	H. Yamada, K. Watanabe, S. Sakakibara, Y. Suzuki, S. Ohdachi, M. Kobayashi, H. Funaba	Study of High-Beta Plasmas in a Helical System	Contributions to Plasma Physics	50	6-7	480-486	2010	refereed
8	Y. Narushima, F. Castejón, K. Watanabe, S. Sakakibara, T. Estrada, F. Medina, D. Lopez-Bruna, M. Yokoyama, K. Ida	Experimental Study of the Effect of Poloidal Flow on Stability of Magnetic Islands in LHD and TJ-II	Contributions to Plasma Physics	50	6-7	529-533	2010	refereed
9	S. Ohdachi, R. Sakamoto, J. Miyazawa, T. Morisaki, S. Masuzaki, H. Yamada, K. Watanabe, V. Jacobo, N. Nakajima, F. Watanabe, M. Takeuchi, K. Toi, S. Sakakibara, Y. Suzuki, Y. Narushima, I. Yamada, T. Minami, K. Narihara, K. Tanaka, T. Tokuzawa, K. Kawahata	Density Collapse Events Observed in the Large Helical Device	Contributions to Plasma Physics	50	6-7	552-557	2010	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
10	K. Ida, M. Yoshinuma, K. Nagaoka, M. Osakabe, S. Morita, M. Goto, H. Funaba, M. Yokoyama, K. Ikeda, H. Nakano, K. Tsumori, Y. Takeiri, O. Kaneko, Y. Sakamoto	Ion Internal Transport Barrier in the Large Helical Device	Contributions to Plasma Physics	50	6-7	558-561	2010	refereed
11	N. Tamura, K. Ida, S. Inagaki, K. Tanaka, T. Tokuzawa, K. Itoh, T. Shimozuma, S. Kubo, H. Tsuchiya, Y. Nagayama, K. Kawahata, S. Sudo, H. Yamada	Characteristics of nonlocally-coupled transition of the heat transport in LHD	Contributions to Plasma Physics	50	6-7	514-519	2010	refereed
12	K. Inai, K. Ohya, G. Kawamura, Y. Tomita	Electron Velocity Distributions at a Sheath Edge in the Presence of Secondary Electron Emission from a Metal Surface	Contributions to Plasma Physics	50	3-5	458-463	2010	refereed
13	G. Kawamura, Y. Tomita, M. Kobayashi, M. Tokitani, S. Masuzaki, A. Kirschner	Analysis of Carbon Deposition on the First Wall of LHD by Monte Carlo Simulation	Contributions to Plasma Physics	50	3-5	451-457	2010	refereed
14	A. Ito, K. Ohya, K. Inai, H. Nakamura	Dependency of Tritium Retention in Graphite on Temperature Control of Molecular Dynamics	Contributions to Plasma Physics	50	3-5	464-469	2010	refereed
15	Y. Tomita, G. Kawamura, Y. Pan, L. Yan	Acceleration and Redeposition of a Dust Particle in SOL/Divertor Plasma of HL-2A Tokamak	Contributions to Plasma Physics	50	3-5	426-431	2010	refereed
16	T. Yamamoto, Y. Nagayama, H. Nakanishi, S. Ishiguro, S. Takami, K. Tsuda, S. Okamura, Y. Nagayama, M. Emoto, Y. Kozaki, H. Nakanishi, S. Sudo, T. Yamamoto, K. Hiraki, S. Urushidani	Configuration of the Virtual Laboratory for Fusion Researches in Japan	Fusion Engineering and Design	85	3-4	637-640	2010	refereed
17	H. Yamada, K. Kawahata, T. Muto, N. Ohyabu, Y. Takeiri, S. Imagawa, K. Ida, T. Mito, Y. Nagayama, T. Shimozuma, K. Watanabe, M. Kobayashi, R. Kumazawa, S. Masuzaki, T. Morisaki, J. Miyazawa, K. Nagaoka, Y. Narushima, S. Sakakibara, R. Sakamoto, K. Toi, M. Yokoyama, O. Kaneko, A. Komori, O. Motojima	A proposal for the ITER remote participation system in Japan	Fusion Engineering and Design	85	3-4	535-539	2010	refereed
18		LHD: PROGRESS IN THE INTEGRATED DEVELOPMENT OF THE HELICAL SYSTEM	Fusion Science and Technology	58	1	12-28	2010	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
19	H. Funaba, K. Watanabe, S. Sakakibara, S. Murakami, I. Yamada, K. Narihara, K. Tanaka, T. Tokuzawa, M. Osakabe, Y. Narushima, M. Yokoyama, S. Ohdachi, Y. Takeiri, H. Yamada, K. Kawahata	LOCAL TRANSPORT PROPERTY OF HIGH-BETA PLASMAS ON LHD	Fusion Science and Technology	58	1	141-149	2010	refereed
20	K. Watanabe, Y. Suzuki, S. Sakakibara, T. Yamaguchi, Y. Narushima, Y. Nakamura, K. Ida, N. Nakajima, H. Yamada	Characteristics of MHD Equilibrium and Related Issues on LHD	Fusion Science and Technology	58	1	160-175	2010	refereed
21	N. Nakajima, M. Sato, Y. Nakamura, A. Fukuyama, S. Murakami, A. Wakasa, K. Watanabe, S. Toda, H. Yamada	ACTIVITIES ON INTEGRATED SIMULATIONS IN LHD	Fusion Science and Technology	58	1	289-296	2010	refereed
22	K. Ichiguchi, H. Miura, N. Mizuguchi, Y. Suzuki, N. Nakajima, Y. Nakamura	Theoretical MHD Analyses of LHD Plasmas	Fusion Science and Technology	58	1	242-255	2010	refereed
23	M. Yoshinuma, K. Ida, M. Yokoyama, M. Osakabe, K. Nagaoka, S. Morita, M. Goto, N. Tamura, C. Suzuki, S. Yoshimura, H. Funaba, Y. Takeiri, K. Ikeda, K. Tsumori, O. Kaneko	Spontaneous Toroidal Flow and Impurity Hole in the High Ion Temperature Plasma on LHD	Fusion Science and Technology	58	1	103-112	2010	refereed
24	K. Tanaka, K. Kawahata, T. Tokuzawa, T. Akiyama, M. Yokoyama, M. Shoji, C. Michael, L. Vyacheslavov, S. Murakami, A. Wakasa, A. Mishchenko, K. Muraoka, S. Okajima, H. Takenaga	PARTICLE TRANSPORT OF LHD	Fusion Science and Technology	58	1	70-90	2010	refereed
25	M. Yoshinuma, K. Ida, M. Yokoyama, M. Osakabe, K. Nagaoka	Charge-Exchange Spectroscopy with Pitch-Controlled Double-Slit Fiber Bundle on LHD	Fusion Science and Technology	58	1	375-382	2010	refereed
26	Y. Todo, S. Murakami, T. Yamamoto, A. Fukuyama, D. Spong, S. Yamamoto, M. Osakabe, N. Nakajima	NUMERICAL ANALYSES OF ENERGETIC PARTICLES IN LHD	Fusion Science and Technology	58	1	277-288	2010	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
27	K. Itoh, H. Sugama, T. Watanabe, O. Yamagishi, S. Toda, N. Kasuya, R. Kanno, M. Nunami	MICROINSTABILITIES, TURBULENT TRANSPORT, AND STRUCTURE FORMATION IN HELICAL PLASMAS	Fusion Science and Technology	58	1	256-268	2010	refereed
28	Y. Narushima, K. Watanabe, Y. Suzuki, S. Sakakibara, K. Ida, K. Narihara, N. Ohyabu	SPONTANEOUS DYNAMICS OF MAGNETIC ISLANDS DEPENDING ON PLASMA PARAMETERS IN LHD	Fusion Science and Technology	58	1	194-199	2010	refereed
29	T. Ido, A. Shimizu, M. Nishiura, S. Kato, H. Nakano, S. Ohshima, M. Yokoyama, S. Murakami, A. Wakasa, S. Nakamura, M. Yokota, K. Tsukada, H. Ogawa, T. Inoue	DEVELOPMENT OF 6-MeV HEAVY ION BEAM PROBE ON LHD	Fusion Science and Technology	58	1	436-444	2010	refereed
30	K. Toi, M. Isobe, M. Osakabe, F. Watanabe, K. Ogawa, S. Yamamoto, N. Nakajima, D. Spong, K. Ida, T. Ido, T. Ito, S. Morita, K. Nagaoka, K. Narihara, M. Nishiura, S. Ohdachi, S. Sakakibara, A. Shimizu, K. Tanaka, Y. Todo, T. Tokuzawa, A. Weller	MHD Modes Destabilized by Energetic Ions on LHD	Fusion Science and Technology	58	1	186-193	2010	refereed
31	M. Emoto, M. Yoshida, H. Nakanishi, T. Yamamoto, T. Watanabe, K. Watanabe, M. Shoji, Y. Nagayama	Remote Participation for the LHD Experiment	Fusion Science and Technology	58	1	458-464	2010	refereed
32	T. Shiozuma, M. Yokoyama, K. Ida, Y. Takeiri, S. Kubo, S. Murakami, A. Wakasa, H. Idei, Y. Yoshimura, T. Notake, S. Inagaki, N. Tamura, K. Toi, N. Ohyabu, M. Osakabe, K. Ikeda, K. Tsumori, Y. Oka, K. Nagaoka, O. Kaneko, I. Yamada, K. Narihara, Y. Nagayama, S. Muto, K. Tanaka, T. Tokuzawa, S. Morita, M. Goto, M. Yoshinuma, H. Funaba, T. Morisaki, K. Watanabe, J. Miyazawa, T. Muto, T. Watari, K. Ohkubo	Improvement of Plasma Core Confinement Via Electron-Root Realization by Strongly Focused ECRH in LHD: Core Electron-Root Confinement	Fusion Science and Technology	58	1	38-45	2010	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
33	M. Yokoyama, A. Wakasa, S. Murakami, K. Watanabe, S. Satake, S. Nishimura, H. Sugama, N. Nakajima, H. Funaba, Y. Nakamura	ROLE OF NEOCLASSICAL TRANSPORT AND RADIAL ELECTRIC FIELD IN LHD PLASMAS	Fusion Science and Technology	58	1	269-276	2010	refereed
34	S. Imagawa, A. Sagara, H. Yamada, N. Nakajima, A. Komori, O. Motojima	PROSPECTS TOWARD AN INTEGRATED HELIOTRON FUSION REACTOR	Fusion Science and Technology	58	1	593-598	2010	refereed
35	K. Nagaoka, Y. Takeiri, S. Morita, K. Ida, M. Yokoyama, M. Yoshinuma, H. Funaba, S. Murakami, T. Minami, K. Tanaka, T. Ido, A. Shimizu, K. Ikeda, M. Osakabe, K. Tsumori, O. Kaneko	ION HEATING EXPERIMENTS AND IMPROVEMENT OF ION HEAT TRANSPORT IN LHD	Fusion Science and Technology	58	1	46-52	2010	refereed
36	N. Tamura, S. Inagaki, T. Tokuzawa, C. Michael, K. Tanaka, K. Ida, T. Shimozuma, S. Kubo, K. Itoh, Y. Nagayama, K. Kawahata, S. Sudo, A. Komori	Experimental Study on Nonlocality of Heat Transport in LHD	Fusion Science and Technology	58	1	122-130	2010	refereed
37	H. Nakanishi, M. Ohsuna, M. Kojima, S. Imazu, M. Nonomura, M. Hasegawa, K. Nakamura, A. Higashijima, M. Yoshikawa, M. Emoto, T. Yamamoto, Y. Nagayama, K. Kawahata	DATA ACQUISITION AND MANAGEMENT SYSTEM OF LHD	Fusion Science and Technology	58	1	445-457	2010	refereed
38	Y. Tamura, H. Ohtani, T. Umetani, H. Nakamura	Haptization on Numerical Simulation of Plasma	IEEE Transactions on Plasma Science	38	10	2974-2979	2010	refereed
39	T. Moritaka, H. Usui, M. Nunami, Y. Kajimura, M. Nakamura, M. Matsumoto	Full Particle-in-Cell Simulation Study on Magnetic Inflation Around a Magneto Plasma Sail	IEEE Transactions on Plasma Science	38	9	2219-2228	2010	refereed
40	S. Ishiguro, S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, A. Maluckov, M. Skoric	Multi-scale simulation for plasma science	Journal of Physics: Conference Series	257	1	012026-1-9	2010	unrefereed
41	H. Nagatomo, T. Johzaki, A. Sunahara, H. Shiraga, H. Sakagami, H. Cai, K. Mima	Controlling dynamics of imploded core plasma for fast ignition	Journal of Physics: Conference Series	244	2	022050-1-4	2010	unrefereed
42	T. Johzaki, H. Nagatomo, A. Sunahara, H. Cai, H. Sakagami, K. Mima	Integrated simulations of core heating in cone-guiding fast ignition, FIREX-1	Journal of Physics: Conference Series	244	2	022040-1-4	2010	unrefereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
43	M. Hata, H. Sakagami, A. Sunahara, T. Johzaki, H. Nagatomo	Effects of preformed plasma of CH foam on fast electron generation	Journal of Physics: Conference Series	244	2	022037-1-4	2010	unrefereed
44	A. Iwamoto, T. Fujimura, M. Nakai, K. Nagai, T. Norimatsu, H. Azechi, R. Maekawa, H. Sakagami	Study on possible fuel layering sequence for FIREX target	Journal of Physics: Conference Series	244	3	032039-1-032039-4	2010	refereed
45	T. Ozaki, M. Koga, H. Shiraga, H. Azechi, H. Sakagami	Development of the compact electron spectrometer for the FIREX-I Project in Gekko XII	Journal of Physics: Conference Series	244	2	022056-1-022056-4	2010	refereed
46	H. Miura	Contributions of small scales to statistics of Hall MHD turbulence	Journal of Plasma and Fusion Research	9		535-540	2010	refereed
47	R. Ishizaki, N. Nakajima	Pellet Ablation in Helical Plasmas	Journal of Plasma and Fusion Research	9		471-478	2010	refereed
48	T. Voslon, O. Agullo, P. Beyer, M. Yagi, S. Benkaadda, X. Garbet, K. Itoh, S. Itoh	Shear flow effects on double tearing mode global magnetic reconnection	Journal of Plasma and Fusion Research SERIES	9		574-579	2010	refereed
49	N. Kasuya, S. Nishimura, M. Yagi, K. Itoh, S. Itoh, N. Ohvabu	Turbulence Diagnostic Simulator for Analyzing Structural Formation in Magnetically Confined Plasmas	Journal of Plasma and Fusion Research SERIES	9		523-528	2010	refereed
50	K. Araki, H. Miura	Visualization of energy transfer to magnetic energy by rolling-up vortices with uniform background magnetic field	Journal of Plasma and Fusion Research SERIES	9		446-451	2010	refereed
51	T. Moritaka, M. Nunami, H. Usui	Development of full particle-in-cell simulation code with adaptive mesh refinement technique	Journal of Plasma and Fusion Research	9		586-591	2010	refereed
52	Y. Nagayama, M. Ernoto, Y. Kozaki, H. Nakanishi, S. Sudo, T. Yamamoto, K. Hiraki, N. Tanida, M. Inaba, S. Urushidani	A Proposal for the Global Remote Participation System	Journal of Plasma and Fusion Research SERIES	9		147-151	2010	refereed
53	A. Takayama, K. Shimizu, Y. Tomita, T. Takizuka	A new framework for integrated simulation model using MPMD approach	Journal of Plasma and Fusion Research	9		604-609	2010	refereed
54	S. Itoh, K. Itoh	On Distance of Turbulent Plasma from Thermal Equilibrium	Journal of the Physical Society of Japan	79	12	124501-1-124501-5	2010	refereed
55	T. Yamada, S. Itoh, S. Inagaki, Y. Nagashima, K. Kamataki, H. Arakawa, M. Yagi, A. Fujisawa, K. Itoh	Study of Amplitude Correlation Technique in a Cylindrical Magnetized Plasma	Journal of the Physical Society of Japan	79	8	085001-1-085001-2	2010	refereed
56	S. Sugita, M. Yagi, S. Itoh, K. Itoh	Interchange Turbulence and Radial Transport in Tokamak Scrape-Off Layer Dominated by Meso-scale Structure	Journal of the Physical Society of Japan	79	4	044502-1-044502-8	2010	refereed
57	K. Kamataki, K. Itoh, S. Itoh, A. Fujisawa, S. Inagaki, Y. Nagashima, M. Yagi, T. Yamada	Statistical Analysis Technique for Estimation of Causal Relationship in Plasma Turbulence	Journal of the Physical Society of Japan	79	2	024501-1-024501-5	2010	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
58	K. Kamataki, K. Itoh, S. Itoh, A. Fujisawa, S. Inagaki, Y. Nagashima, M. Yagi, T.	Statistical Analysis Technique for Estimation of Causal Relationship in Plasma Turbulence	Journal of the Physical Society of Japan	79	2	024501-1-024501-5	2010	refereed
59	Y. Todo, H. Berk, B. Breizman	Nonlinear magnetohydrodynamic effects on Alfvén eigenmode evolution and zonal flow generation	Nuclear Fusion	50	8	084016-1-084016-9	2010	refereed
60	K. Ida, M. Yoshinuma, K. Nagaoka, M. Osakabe, S. Morita, M. Goto, M. Yokoyama, H. Funaba, S. Murakami, K. Ikeda, H. Nakano, K. Tsumori, Y. Takeiri, O. Kaneko	Spontaneous Toroidal Rotation Driven by the Off-diagonal Term of Momentum and Heat Transport in the Plasma with Ion Internal Transport Barrier in LHD	Nuclear Fusion	50	6	064007	2010	refereed
61	S. Inagaki, N. Tamura, K. Ida, S. Kubo, T. Shimoizuma, Y. Nagayama, K. Kawahata, S. Sudo, A. Fujisawa, K. Itoh, S. Itoh	Internal Transport Barrier Formation Induced by Edge Perturbation on LHD	Nuclear Fusion	50	6	064012-1-064012-5	2010	refereed
62	N. Kasuya, M. Yagi, K. Itoh, S. Itoh	Selective formation of streamers in magnetized cylindrical plasmas	Nuclear Fusion	50	5	054003-1-054003-8	2010	refereed
63	S. Nishimura, M. Yagi, K. Itoh, S. Itoh, S. Benkadda	Locking of magnetic island rotation by static error field	Nuclear Fusion	50	5	054007-1-054007-12	2010	refereed
64	K. Itoh	Summary of IAEA Technical Meeting on Theory of Plasma Instabilities	Nuclear Fusion	50	5	054001	2010	refereed
65	H. Miura, N. Nakajima	Influences of ballooning modes with moderate wave number on MHD equilibrium in LHD	Nuclear Fusion	50	5	054006-1-054006-13	2010	refereed
66	K. Nagasaki, G. Motojima, S. Kobayashi, S. Yamamoto, T. Mizuuchi, H. Okada, K. Hanatani, S. Konoshima, K. Masuda, Y. Nakamura, S. Watanabe, K. Mukai, K. Hosaka, K. Kowada, S. Mihara, Y. Yoshimura, Y. Suzuki, A. Fernández, A. Cappa, F. Sano	Effect of magnetic field ripple on electron cyclotron current drive in Heliotron J	Nuclear Fusion	50	2	025003-1-025003-7	2010	refereed
67	Y. Hamada, T. Watari, A. Nishizawa, O. Yamagishi, K. Narihara, Y. Kawasumi, T. Ido, M. Kojima, K. Toi	GAM generation by drift waves in JIPP T-IIU tokamak core plasmas	Nuclear Fusion	50	2	025001-1-025001-9	2010	refereed
68	K. Nishihara, J. Wouchuk, G. Matsuoka, R. Ishizaki, V. Zhakhovsky	Richtmyer-Meshkov instability: theory of linear and nonlinear evolution	Philosophical Transactions of The Royal Society A (Phil. Trans. R. Soc. A)	368	1916	1769-1807	2010	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
69	T. Yamada, S. Itoh, S. Inagaki, Y. Nagashima, N. Kasuya, K. Kamataki, H. Arakawa, T. Kobayashi, M. Yagi, A. Fujisawa, K. Itoh	Observation of Quasi-Two-Dimensional Nonlinear Interactions in a Drift-Wave Streamer	Physical Review Letters	105	22	225002-1-225002-4	2010	refereed
70	K. Toi, F. Watanabe, T. Tokuzawa, K. Ida, S. Morita, T. Ido, A. Shimizu, M. Isobe, K. Ogawa, D. Spong, Y. Todo, S. Ohdachi, S. Sakakibara, S. Yamamoto, S. Inagaki, K. Narihara, M. Osakabe, K. Nagaoka, Y. Narushima, K. Watanabe, H. Funaba, M. Goto, K. Ikeda, T. Ito, O. Kaneko, S. Kubo, S. Murakami, T. Minami, J. Miyazawa, Y. Nagayama, M. Nishiura, Y. Oka, R. Sakamoto, T. Shimozuma, Y. Takeiri, K. Tanaka, K. Tsumori, I. Yamada, M. Yoshinuma, K. Kawahata, A. Komori	Observation of Reversed-Shear Alfvén Eigenmodes Excited by Energetic Ions in a Helical Plasma	Physical Review Letters	105	14	145003-1-145003-4	2010	refereed
71	A. Fujisawa, A. Shimizu, K. Itoh, Y. Nagashima, T. Yamada, S. Inagaki, K. Matsuoka, S. Itoh	Wavelet analyses using parallel computing for plasma turbulence studies	Physics of Plasmas	17	10	104503-1-104503-3	2010	refereed
72	S. Nishimura, H. Sugama, H. Maaßberg, C. Beidler, S. Murakami, Y. Nakamura, S. Hirooka	A convergence study for the Laguerre expansion in the moment equation method for neoclassical transport in general toroidal plasmas	Physics of Plasmas	17	8	082510-1-082510-8	2010	refereed
73	A. Ishizawa, N. Nakajima	Turbulence driven magnetic reconnection causing long-wavelength magnetic islands	Physics of Plasmas	17	7	072308-1-072308-7	2010	refereed
74	A. Ishizawa, P. Diamond	Ion-temperature gradient modes affected by helical magnetic field of magnetic islands	Physics of Plasmas	17	7	074503-1-074503-3	2010	refereed
75	S. Maeyama, A. Ishizawa, T. Watanabe, M. Škorić, N. Nakajima, S. Tsuji-Iio, H. Tsutsui	Effects of time-varying $E \times B$ flow on slab ion-temperature-gradient turbulence	Physics of Plasmas	17	2010	062305-1-062305-9	2010	refereed
76	K. Saito, K. Ichiguchi, N. Ohyabu	Interaction between Static Magnetic Islands and Interchange modes in a Straight Heliotron Plasma with High Resistivity	Physics of Plasmas	17	6	062504-1-062504-14	2010	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
77	T. Yamada, S. Itoh, S. Inagaki, Y. Nagashima, S. Shinohara, N. Kasuya, K. Terasaka, K. Kamataki, H. Arakawa, M. Yagi, A. Fujisawa, K. Itoh	Two-dimensional bispectral analysis of drift wave turbulence in a cylindrical plasma	Physics of Plasmas	17	5	052313-1-052313-10	2010	refereed
78	K. Uzawa, A. Ishizawa, N. Nakajima	Propagation of magnetic island due to self-induced zonal flow	Physics of Plasmas	17	4	042508-1-042508-8	2010	refereed
79	M. Nakata, T. Watanabe, H. Sugama, W. Horton	Formation of coherent vortex streets and transport reduction in electron temperature gradient driven turbulence	Physics of Plasmas	17	4	042306-1-042306-13	2010	refereed
80	D. Spong, E. D'Azevedo, Y. Todo	Clustered frequency analysis of shear Alfvén modes in stellarators	Physics of Plasmas	17	2	022106-1-022106-12	2010	refereed
81	F. Sano, T. Mizuuchi, K. Nagasaki, K. Hanatani, H. Okada, Y. Nakamura, T. Minami, S. Kobayashi, S. Yamamoto, S. Konoshima, S. Ohshima, M. Takeuchi, Y. Ijiri, K. Yaguchi, T. Serju, M. Shibano, K. Tohshi, K. Sakamoto, A. Matsuyama, K. Mukai, K. Minami, S. Kishi, H. Lee, Y. Takabatake, H. Yashiro, K. Nomura, M. Suwa, H. Yoshino, S. Murakami, T. Muto, Y. Takeiri, K. Nagaoka, S. Okamura, K. Watanabe, M. Yokoyama, Y. Suzuki, Y. Yoshimura, S. Nishimura, N. Tamura, S. Sakakibara, G. Motojima, N. Nishino, T. Fukuda, Y. Nakashima, Z. Feng, Q. Yang, A. Fernández, A. Cappa, V. Tribaldos, B. Blackwell, V. Chechkin	Physics of Heliotron J Confinement	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue2	S2003-1-S2003-6	2010	refereed
82	R. Ishizaki, N. Nakajima	Plasmoid Motion in Helical Plasmas	Plasma and Fusion Research	5	2	S2060	2010	refereed
83	K. Kamataki, S. Itoh, S. Inagaki, H. Arakawa, Y. Nagashima, T. Yamada, M. Yagi, A. Fujisawa, K. Itoh	ECRH Superposition on Linear Cylindrical Helicon Plasma in the LMD-U	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue2	S2046-1-S2046-4	2010	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
84	H. Arakawa, S. Inagaki, Y. Nagashima, T. Yamada, K. Kamataki, T. Kobayashi, S. Sugita, M. Yagi, N. Kasuya, A. Fujisawa, S. Itoh, K. Itoh	Probability Density Function of Density Fluctuations in Cylindrical Helicon Plasmas	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue2	S2044-1- S2044-3	2010	refereed
85	T. Yamada, S. Itoh, S. Inagaki, Y. Nagashima, S. Shinohara, N. Kasuya, K. Terasaka, K. Kamataki, H. Arakawa, M. Yagi, A. Fujisawa, K. Itoh	Nonlinear Mode Couplings in a Cylindrical Magnetized Plasma	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue2	S2016-1- S2016-4	2010	refereed
86	K. Araki, H. Miura	Orthonormal Divergence-free Wavelet Analysis of Energy Transfer in Hall-MHD Turbulence	Plasma and Fusion Research	5	special issue 2	S2048	2010	refereed
87	Y. Tamura, S. Fujiwara, H. Nakamura	Haptization of Molecular Dynamics Simulation with Thermal Display	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue2	S2107-1- S2107-4	2010	refereed
88	A. Saitoh, T. Itoh, A. Kamitani, N. Matsui, H. Nakamura	Application of Two Dimensional Extended Boundary Node Method to Potential Problem	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue2	S2108-1- S2108-4	2010	refereed
89	T. Itoh, A. Saitoh, A. Kamitani, H. Nakamura	Three Dimensional Extended Boundary Node Method to Potential Problem	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue2	S2111-1- S2111-4	2010	refereed
90	A. Kamitani, T. Takayama, H. Nakamura	High Performance Analysis of Shielding Current Density in High Temperature Superconducting Thin	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue2	S2112-1- S2112-4	2010	refereed
91	T. Matsui, K. Tsurusaki, R. Shirasaki, H. Nakamura	Introduction of Adhesive Force to DEM Simulation and Application to Fracture of Fragile Powder	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue2	S2116-1- S2116-5	2010	refereed
92	K. Sawada, H. Nakamura, T. Maruoka, Y. Tamura, K. Imura, T. Saiki, H. Okamoto	FDTD simulated observation of a gold nanorod by scanning near-field optical microscopy	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue 2	S2110-1- S2110-4	2010	refereed
93	S. Fujiwara, T. Itoh, M. Hashimoto, H. Nakamura, Y. Tamura	Effect of Molecular Rigidity on Micelle Formation in Amphiphilic Solution	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue 2	S2114-1- S2114-4	2010	refereed
94	K. Itoh	Summary of the 19th International Toki Conference - Advanced Physics in Plasma and Fusion Research	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue 2	S2118-1- S2118-8	2010	refereed
95	S. Nishimura, N. Kasuya, M. Yagi, K. Itoh, S. Itoh, N. Ohyabu	Numerical Diagnostics of the Electrostatic Potential Perturbed by Magnetic Islands	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue 2	S2057-1- S2057-4	2010	refereed
96	S. Saito, A. Ito, H. Nakamura	Molecular Dynamics Simulation of the Incident Angle Dependence of Reactions between Graphene and Hydrogen Atom	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue 2	S2076-1- S2076-4	2010	refereed
97	H. Nakamura, A. Ito, S. Saito, Y. Tamura, S. Fujiwara, N. Ohno, S. Kajita	Comparison of Hydrogen Adsorption on Diamond and Graphite Surfaces	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue 2	S2072-1- S2072-4	2010	refereed
98	A. Ito, H. Okumura, S. Saito, H. Nakamura	Examination of Temperature Dependence of Chemical Sputtering on Graphite by Comparing the Langevin and Berendsen Thermostats	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue 2	S2020-1- S2020-4	2010	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
99	T. Ozaki, M. Koga, H. Shiraga, R. Kato, S. Kashiwagi, G. Isoyama, H. Sakagami	Calibration of Compact Electron Spectrometer for the FIREX-I Project in Gekko XII	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue 2	S2098-1- S2098-4	2010	refereed
100	S. Toda, K. Itoh	Study of the Effect of the Helical Ripple Transport on the Confinement via Zonal Flows in Helical Plasmas	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue 2	S2023-1- S2023-5	2010	refereed
101	K. Tanaka, C. Michael, L. Vyacheslavov, H. Funaba, M. Yokoyama, K. Ida, M. Yoshinuma, K. Nagaoka, S. Murakami, A. Wakasa, T. Ido, A. Shimizu, M. Nishiura, Y. Takeiri, O. Kaneko, K. Tsumori, K. Ikeda, M. Osakabe, K. Kawahata	Turbulence Response in the High Ti Discharge of the LHD	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue 2	S2053-1- S2053-5	2010	refereed
102	Y. Todo, N. Nakajima, M. Sato, H. Miura	Simulation Study of Ballooning Modes in the Large Helical Device	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue 2	S2062-1- S2062-4	2010	refereed
103	S. Morita, C. Dong, M. Goto, M. Kobayashi, S. Muto, K. Yamazaki, M. Yokoyama, H. Zhou, T. Akiyama, N. Ashikawa, Z. Cui, K. Fujii, X. Gao, M. Hasuo, K. Ida, K. Ikeda, A. Iwamae, O. Kaneko, S. Masuzaki, J. Miyazawa, T. Morisaki, K. Nagaoka, K. Narihara, S. Ohdachi, M. Osakabe, S. Sakakibara, R. Sakamoto, M. Shoji, Y. Takeiri, K. Tanaka, K. Toi, M. Tokitani, T. Tokuzawa, K. Tsumori, K. Watanabe, H. Yamada, I. Yamada, J. Yanagibayashi, M. Yoshinuma, A. Komori	Progress of Impurity-Related Physics Experiment in LHD	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue 2	S2004-1- S2004-11	2010	refereed
104	H. Ohtani, N. Ohno, N. Mizuguchi, M. Shoji, S. Ishiguro	Simulation Data Analysis by Virtual Reality System	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue 2	S2109-1- S2109-3	2010	refereed
105	H. Miura	Influences of Short-Wave Truncations to Spectral Energy Budget in Hall MHD Turbulence	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue 2	S2059-1- S2059-4	2010	refereed
106	R. Horiuchi, S. Usami, H. Ohtani, T. Moritaka	Magnetic Reconnection Controlled by Multi-Hierarchy Physics in an Open System	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue 2	S2006-1- S2006-7	2010	refereed
107	S. Nishimura, Y. Narushima, S. Toda, M. Yagi, K. Itoh, S. Itoh	Forced Magnetic Reconnection in Helical Plasmas	Plasma and Fusion Research	5		040-1-040- 3	2010	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
108	R. Seki, Y. Matsumoto, Y. Suzuki, K. Watanabe, K. Hamamatsu, M. Itagaki	Monte Carlo Study Based on a Real Coordinate System for Tangentially Injected High-Energy Particles in the Large Helical Device	Plasma and Fusion Research	5		027-1-027-9	2010	refereed
109	H. Hasegawa, T. Sato	Improved Open Boundary Model for Plasma Particle Simulations	Plasma and Fusion Research	5		020-1-020-7	2010	refereed
110	Y. Nagashima, K. Nagaoka, K. Itoh, A. Fujisawa, M. Isobe, T. Akiyama, C. Suzuki, S. Nishimura, Y. Yoshimura, K. Matsuoka, S. Okamura, Y. Takase, A. Ejiri, S. Itoh, M. Yagi	Observation of edge Reynolds stress increase preceding an L-H transition in Compact Helical System	Plasma and Fusion Research	5		022-1-022-3	2010	refereed
111	M. Nunami, T. Watanabe, H. Sugama	Gyrokinetic Vlasov Code Including Full Three-dimensional Geometry of Experiments	Plasma and Fusion Research	5		016-1-016-8	2010	refereed
112	R. Seki, Y. Matsumoto, Y. Suzuki, K. Watanabe, K. Hamamatsu, M. Itagaki	Monte-Carlo Study Based on Real Coordinates for Perpendicularly Injected High-Energy Ions in the LHD High-Beta Plasma	Plasma and Fusion Research	5		014-1-014-3	2010	refereed
113	T. Kobayashi, S. Inagaki, H. Arakawa, K. Kamataki, Y. Nagashima, T. Yamada, S. Sugita, M. Yagi, N. Kasuya, A. Fujisawa, S. Itoh, K. Itoh	Bispectral Analysis of Density and Potential Fluctuations in a High Neutral Density Cylindrical Plasma	Plasma and Fusion Research	5		S2047-1-S2047-4	2010	refereed
114	K. Uzawa, A. Ishizawa, N. Nakajima	Intrinsic Rotation of a Magnetic Island with Finite Width	Plasma and Fusion Research	5		S1016-1-S1016-6	2010	refereed
115	S. Toda, K. Itoh, N. Ohyabu	Theoretical Modeling of Transport Barriers in Helical Plasmas	Plasma and Fusion Research	5		011-1-011-9	2010	refereed
116	G. Kawamura, Y. Tomita, M. Kobayashi, D. Tsukakaya	1D modeling of LHD divertor plasma and hydrogen recycling	Plasma and Fusion Research	5		S1020-1-S1020-6	2010	refereed
117	A. Shimizu, T. Ido, M. Nishiura, S. Nakamura, H. Nakano, S. Ohshima, A. Nishizawa, M. Yokoyama, Y. Yoshimura, S. Kubo, T. Shimozuma, H. Igami, H. Takahashi, N. Tamura, I. Yamada, T. Minami, K. Narihara, T. Akiyama, T. Tokuzawa, K. Tanaka, K. Kawahata, K. Toi, M. Isobe, F. Watanabe, K. Ogawa, K. Nagaoka, K. Ikeda, M. Osakabe, K. Tsumori, Y. Takeiri, O. Kaneko, S. Kato, M. Yokota, Y. Hamada	Potential Measurement with the 6-MeV Heavy Ion Beam Probe of LHD	Plasma and Fusion Research	5		S1015-1-S1015-5	2010	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
118	H. Nakanishi, M. Kojima, M. Ohsuna, S. Imazu, M. Nonomura, T. Yamamoto, M. Emoto, Y. Nagayama, K. Kawahata, M. Hasegawa, A. Higashijima, K. Nakamura, M. Yoshikawa	Clustered Data Storage for Multi-site Fusion Experiments	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue	S1042-1- S1042-5	2010	refereed
119	S. Itoh, K. Itoh	A mini-max principle for drift waves and mesoscale fluctuations	Plasma Physics and Controlled Fusion	53	1	015008-1- 015008-8	2010	refereed
120	R. Kanno, M. Nunami, S. Satake, H. Takamaru, M. Okamoto, N. Ohyabu	Modelling of ion energy transport in perturbed magnetic field in collisionless toroidal plasma	Plasma Physics and Controlled Fusion	52	11	115004-1- 115004-26	2010	refereed
121	T. Ido, A. Shimizu, M. Nishiura, K. Nagaoka, M. Yokoyama, K. Ida, M. Yoshinuma, K. Toi, H. Nakano, S. Nakamura, F. Watanabe, S. Satake, Y. Yoshimura, M. Osakabe, K. Tanaka, T. Tokuzawa, Y. Takeiri, K. Tsumori, K. Ikeda, S. Kubo, T. Shimozuma, H. Igami, H. Takahashi, N. Tamura	Experimental study of radial electric field and electrostatic potential fluctuation in the Large Helical Device	Plasma Physics and Controlled Fusion	52	12	124025-1- 124025-14	2010	refereed
122	H. Arakawa, S. Inagaki, Y. Nagashima, T. Yamada, K. Kamataki, T. Kobayashi, S. Sugita, M. Yagi, N. Kasuya, A. Fujisawa, S. Itoh, K. Itoh	Bifurcation of the plasma turbulence on LMD-U	Plasma Physics and Controlled Fusion	52	10	105009-1- 105009-12	2010	refereed
123	A. Ito, N. Nakajima	Corrigendum of "Analytic high-beta tokamak equilibria with poloidal-sonic flow"	Plasma Physics and Controlled Fusion	52	7	079802-1- 079802-3	2010	refereed
124	S. Inagaki, N. Tamura, K. Ida, K. Tanaka, Y. Nagayama, K. Kawahata, S. Sudo, K. Itoh, S. Itoh, A. Komori	Characterization of bifurcation induced by long distance correlation between heat flux and temperature gradient in toroidal plasmas	Plasma Physics and Controlled Fusion	52	7	075002-1- 075002-8	2010	refereed
125	M. Kono, M. Skorik	Nonlinear Physics of Plasmas	Springer Series on Atomic, Optical and Plasma Physics	62		1-536	2010	refereed
126	A. Ito, N. Ohno	Special Topic Article:1. Introduction. Recent Progress of Simulation and Modeling in SOL/Divertor Plasma and Plasma Facing Material	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	86	12	679-680	2010	unrefereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
127	S. Saito, G. Kawamura, K. Inai	Special Topic Article: Recent Progress of Simulation and Modeling in SOL/Divertor Plasma and Plasma Facing Material 4. Simulation for Ion-Material Interaction by Binary Collision Approximation and Monte-Carlo Method(<Special Topic Article>Recent Progress of Simulation and Modeling in SOL/Divertor Plasma and Plasma Facing Material)	プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research)	86	12	690-693	2010	unrefereed
128	A. Ito	Special Topic Article: Recent Progress of Simulation and Modeling in SOL/Divertor Plasma and Plasma Facing Material 5. Molecular Dynamics for Plasma-Wall Interaction	プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research)	86	12	694-697	2010	unrefereed
129	K. Itoh, Y. Ogawa, K. Ida, H. Yamada, S. Itoh, Y. Kamada, H. Azechi, R. Kodama, K. Tanaka, A. Fukuyama, H. Fujiyama, R. Hatakeyama		プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research)	86	3	188-201	2010	unrefereed
130	K. Nagaoka, M. Yokoyama, M. Yoshinuma, K. Ida, Y. Takeiri	Recent progress of ion heat transport on LHD	プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research)	86	2	69-96	2010	unrefereed

論文リスト 2011年 / Published Papers related to NSRP in 2011

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
131	Y. Todo	Nonlinear simulations of Alfvén eigenmodes destabilized by energetic particles	AIP conference proceedings	1478		141-154	2011	unrefereed
132	N. Hirayama, A. Endo, K. Fujita, Y. Hasegawa, N. Hatano, H. Nakamura	Temperature distribution in nano-devices under a strong magnetic field	Computer Physics Communications	182	1	90-92	2011	refereed
133	T. Matsui, H. Usui, T. Moritaka, M. Nunami	MPI Parallelization of PIC Simulation with Adaptive Mesh Refinement	IEEE Conference Proceedings (by IEEE Xplore)			277-281	2011	refereed
134	H. Miura	Visualization of Three-Dimensional MHD Simulation Data to Study Fine Unstable Motions in a Helical Torus Device	IEEE Transactions on Plasma Science	39	11	3008-3009	2011	refereed
135	N. Ohno, H. Hasegawa, T. Sato	Images of Aurora Light Based on Macro-Micro-Interlocked Simulation	IEEE Transactions on Plasma Science	39	11	2708-2709	2011	refereed
136	H. Ohtani, Y. Tamura, A. Kageyama, S. Ishiguro	Scientific Visualization of Plasma Simulation Results and Device Data in Virtual-Reality Space	IEEE Transactions on Plasma Science	39	11	2472-2473	2011	refereed
137	A. Ito, A. Takayama, S. Saito, N. Ohno, S. Kajita, H. Nakamura	Molecular Dynamics Simulation of Chemical Vapor Deposition of Amorphous Carbon: Dependence on H/C Ratio of Source Gas	Japanese Journal of Applied Physics	50	1S1	01AB01-1-01AB01-6	2011	refereed
138	H. Nakamura, A. Ito, S. Saito, A. Takayama, Y. Tamura, N. Ohno, S. Kajita	Molecular Dynamics Simulation of Hydrogen Injection onto Diamond Surfaces	Japanese Journal of Applied Physics	50		01AB04-1-01AB04-4	2011	refereed
139	A. Takayama, S. Saito, A. Ito, T. Kenmotsu, H. Nakamura	Extension of Binary-Collision-Approximation-Based Simulation Applicable to Any Structured Target Material	Japanese Journal of Applied Physics	50	1	01AB03-1-01AB03-4	2011	refereed
140	S. Saito, A. Ito, H. Nakamura	Reaction between Graphene and Hydrogen under Oblique Injection	Journal of Applied Physics	110	8	084320-1-084320-9	2011	refereed
141	Y. Tamura, S. Fujiwara, T. Umetani, H. Nakamura	Bracelet-Shaped Thermal Display for Representing Numerical Data	Journal of Electronic Materials	40	5	823-829	2011	refereed
142	H. Nakamura, N. Hatano, R. Shirasaki, N. Hirayama, K. Yonemitsu	Quantum Oscillations of Thermoelectric Effects in a Pseudo-one-dimensional Electron Gas With a Spin-Orbit Interaction	Journal of Electronic Materials	40	5	601-605	2011	refereed
143	N. Hirayama, A. Endo, K. Fujita, Y. Hasegawa, N. Hatano, H. Nakamura, R. Shirasaki, K. Yonemitsu	Temperature Distribution in Two-Dimensional Electron Gases under a Strong Magnetic Field	Journal of Electronic Materials	40	5	529-532	2011	refereed
144	Y. Hiraki, T. Watanabe	Feedback instability analysis for dipole configuration with ionospheric and magnetospheric cavities	Journal of Geophysical Research - Space Physics	116	A11220	1-11	2011	refereed
145	G. Kawamura, Y. Tomita, A. Kirschner	PIC simulation of kinetic effects of plasma and consequences for physical sputtering	Journal of Nuclear Materials	415	1	S192-S195	2011	refereed
146	S. Saito, A. Ito, A. Takayama, T. Kenmotsu, H. Nakamura	Hybrid simulation between molecular dynamics and binary collision approximation codes for hydrogen injection into carbon materials	Journal of Nuclear Materials	415	1S	S208-S211	2011	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
147	H. Miura, K. Araki	Local structures of homogeneous Hall MHD turbulence	Journal of Physics: Conference Series	318	7	072032-1-7	2011	unrefereed
148	H. Wang, Y. Todo	Interaction between Energetic Particles and Alfvén Eigenmodes in Reversed Shear Plasmas	Journal of the Physical Society of Japan	80	9	094501-1-094501-7	2011	refereed
149	A. Ito, N. Nakajima	Equilibria of Toroidal Plasmas with Toroidal and Poloidal Flow in High-beta Reduced Magnetohydrodynamic Models	Nuclear Fusion	51	12	123006-1-123006-11	2011	refereed
150	T. Watanabe, H. Sugama, M. Nunami	Effects of Equilibrium-Scale Radial Electric Fields on Zonal Flows and Turbulence in Helical Configurations	Nuclear Fusion	51	12	123003-1-123003-10	2011	refereed
151	H. Nakanishi, M. Ohsuna, M. Kojima, S. Imazu, M. Nonomura, T. Yamamoto, M. Emoto, M. Yoshida, C. Iwata, M. Shoji, Y. Nagayama, K. Kawahata, M. Hasegawa, A. Higashijima, K. Nakamura, Y. Ono, M. Yoshikawa, S. Urushidani	Data acquisition system for steady-state experiments at multiple sites	Nuclear Fusion	51	11	113014-6	2011	refereed
152	N. Yanagi, A. Sagara, T. Goto, S. Masuzaki, T. Mito, G. Bansai, Y. Suzuki, Y. Nagayama, K. Nishimura, S. Imagawa, O. Mitarai	Heat flux reduction by helical divertor coils in the heliotron fusion energy reactor	Nuclear Fusion	51	10	103017-1-103017-6	2011	refereed
153	K. Nagaoka, K. Ida, M. Yoshinuma, Y. Takeiri, M. Yokoyama, S. Morita, K. Tanaka, T. Ido, A. Shimizu, N. Tamura, H. Funaba, S. Murakami, M. Goto, H. Takahashi, G. Suzuki, Y. Suzuki, K. Ikeda, M. Osakabe, K. Tsumori, H. Nakano, O. Kaneko, H. Yamada	Heat and Momentum Transport of Ion Internal Transport Barrier Plasmas on the Large Helical Device	Nuclear Fusion	51	8	083022-1-083022-7	2011	refereed
154	Y. Narushima, F. Gastejón, S. Sakakibara, K. Watanabe, S. Ohdachi, Y. Suzuki, T. Estrada, F. Medina, D. López-Bruna, M. Yokoyama, M. Yoshinuma, K. Ida, S. Nishimura	Experimental study of the poloidal flow effect on magnetic island dynamics in LHD and TJ-II	Nuclear Fusion	51	8	083030	2011	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
155	S. Kitajima, H. Takahashi, K. Ishii, J. Satoh, T. Ambo, M. Kanno, A. Okamoto, M. Sasao, S. Inagaki, M. Takayama, S. Masuzaki, M. Shoji, N. Ashikawa, M. Tokitani, M. Yokoyama, Y. Suzuki, T. Shimozuma, T. Ido, A. Shimizu, Y. Nagayama, T. Tokuzawa, K. Nishimura, T. Morisaki, S. Kubo, H. Kasahara, T. Muto, H. Yamada, Y. Tatematsu	Electrode Biasing Experiment in the Large Helical Device	Nuclear Fusion	51	8	083029-1-5	2011	refereed
156	T. Goto, Y. Suzuki, N. Yanagi, K. Watanabe, S. Imagawa, A. Sagara	Importance of helical pitch parameter in LHD-type heliotron reactor designs	Nuclear Fusion	51	8	083045-1-083045-6	2011	refereed
157	T. Johzaki, H. Nagatomo, A. Sunahara, H. Cai, H. Sakagami, Y. Nakao, K. Mima	Pre-plasma effects on core heating and enhancing heating efficiency by extended double cone for FIREX	Nuclear Fusion	51	7	073022-1-073022-9	2011	refereed
158	T. Ido, A. Shimizu, M. Nishiura, S. Nakamura, S. Kato, H. Nakano, Y. Yoshimura, K. Toi, K. Ida, M. Yoshinuma, S. Satake, F. Watanabe, S. Morita, M. Goto, K. Itoh, S. Kubo, T. Shimozuma, H. Igami, H. Takahashi, I. Yamada, K. Narihara	Potential fluctuation associated with the energetic-particle-induced geodesic acoustic mode in the Large Helical Device	Nuclear Fusion	51	7	073046-1-8	2011	refereed
159	K. Ichiguchi, B. Carreras	Multi-Scale MHD Analysis Incorporating Pressure Transport Equation for Beta-Increasing LHD Plasma	Nuclear Fusion	51	5	053021-1-053021-7	2011	refereed
160	Y. Hamada, T. Watari, A. Nishizawa, O. Yamagishi, K. Narihara, K. Ida, Y. Kawasumi, T. Ido, M. Kojima, K. Toi	Detection of the kinetic geodesic acoustic mode (KGAM) near the centre region of JIPPT-IIU tokamak plasmas	Nuclear Fusion	51	3	033005-1-033005-8	2011	refereed
161	P. Xanthopoulos, A. Mischchenko, P. Helander, H. Sugama, T. Watanabe	Zonal Flow Dynamics and Control of Turbulent Transport in Stellarators	Physical Review Letters	107	24	245002-1-245002-4	2011	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
162	S. Inagaki, T. Tokuzawa, K. Itoh, K. Ida, S. Itoh, N. Tamura, S. Sakakibara, N. Kasuya, A. Fujisawa, S. Kubo, T. Shimozuma, T. Ido, S. Nishimura, H. Arakawa, T. Kobayashi, K. Tanaka, Y. Nagayama, K. Kawahata, S. Sudo, H. Yamada, A. Komori	Observation of long-distance radial correlation in toroidal plasma turbulence	Physical Review Letters	107	11	115001	2011	refereed
163	S. Satake, J. Park, H. Sugama, R. Kanno	Neoclassical Toroidal Viscosity Calculations in Tokamaks Using a δf Monte Carlo Simulation and Their Verifications	Physical Review Letters	107	5	055001-1-4	2011	refereed
164	M. Janvier, A. Ishizawa, J. Li, Y. Kishimoto	Role of the pressure force in the explosive dynamics of magnetic islands in double tearing modes	Physics of Plasmas	18	10	102112-1-7	2011	refereed
165	H. Sugama, T. Watanabe, M. Nunami, S. Nishimura	Quasisymmetric toroidal plasmas with large mean flows	Physics of Plasmas	18	8	082505-1-8	2011	refereed
166	S. Nishimura, H. Sugama, H. Maaßberg, C. Beidler, S. Murakami, Y. Nakamura, S. Hirooka	Erratum: "A convergence study for the Laguerre expansion in the moment equation method for neoclassical transport in general toroidal plasmas" [Phys. Plasmas 17, 082510 (2010)]	Physics of Plasmas	18	6	069901-1-3	2011	refereed
167	S. Matsuoka, S. Satake, M. Yokoyama, A. Wakasa, S. Murakami	Neoclassical electron transport calculation by using δf Monte Carlo method	Physics of Plasmas	18	3	032511-1-3	2011	refereed
168	M. Nakata, T. Watanabe, H. Sugama, W. Horton	Effects of parallel dynamics on vortex structures in electron temperature gradient driven turbulence	Physics of Plasmas	18	1	012303-1-1	2011	refereed
169	A. Komori, S. Sakakibara, A. Sagara, R. Horiuchi, H. Yamada, Y. Takeiri	Recent Fusion Research in the National Institute for Fusion Science	Plasma and Fusion Research	6	Special Issue 1	2102149-1-8	2011	refereed
170	Y. Suzuki, S. Sakakibara, K. Watanabe, Y. Narushima, S. Ohdachi, S. Yamamoto, H. Okada	Study of Magnetic Island Using a 3D MHD Equilibrium Calculation Code	Plasma and Fusion Research	6		2402134-1-5	2011	refereed
171	R. Shirasaki, Y. YOSHIKAI, H. QIAN, S. Fujiwara, Y. Tamura, H. Nakamura	Dissipative Particle Dynamics Simulation of Phase Behavior in Bolaamphiphilic Solution	Plasma and Fusion Research	6		2401116-1-4	2011	refereed
172	T. Ming, S. Ohdachi, Y. Suzuki	Investigation of the Noise Effect on Tomographic Reconstructions for a Tangentially Viewing Vacuum Ultraviolet Imaging Diagnostic	Plasma and Fusion Research	6	Special Issue 1	2406120-1-5	2011	refereed
173	T. Moritaka, M. Nunami, H. Usui, T. Matsui	Full Particle-in-Cell Simulation on a Small-Scale Magnetosphere Using Uniform and Nested Grid Systems	Plasma and Fusion Research	6	Special Issue 1	2401101-1-4	2011	refereed
174	Y. Asahi, Y. Suzuki, K. Watanabe, W. Cooper	MHD equilibrium analysis with anisotropic pressure in LHD	Plasma and Fusion Research	6	Special Issue 1	2403123	2011	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
175	H. Hasegawa, N. Ohno, T. Sato	Response of the magnetosphere to microscopic effects in auroral arc formation	Plasma and Fusion Research	6	Special Issue 1	2401128-1-	2011	refereed
176	T. Kobayashi, S. Inagaki, H. Arakawa, S. Oldenburger, M. Sasaki, Y. Nagashima, T. Yamada, S. Sugita, M. Yagi, N. Kasuya, A. Fujisawa, S. Itoh, K. Itoh	Observation of Nonlinear Coupling between Low Frequency Coherent Modes and Background Turbulence in LMD-U	Plasma and Fusion Research	6	Special Issue 1	2401082-1- 2401082-4	2011	refereed
177	Y. Tamura, K. Ukita, N. Mizuguchi, S. Fujiwara	Design Support System with Haptic Feedback and Real-Time Interference Function	Plasma and Fusion Research	6	Special Issue 1	2406061-1-	2011	refereed
178	A. Bierwage, Y. Todo, N. Aiba, K. Shinohara, M. Ishikawa, M. Yagi	Nonlinear Hybrid Simulations of Energetic Particle Modes in Realistic Tokamak Flux Surface Geometry	Plasma and Fusion Research	6	Special Issue	2403109-1- 2403109-5	2011	refereed
179	K. Araki, H. Miura	Nonlocal Interaction of Inverse Magnetic Energy Transfer in Hall Magneto-hydrodynamic Turbulence	Plasma and Fusion Research	6	1	2401132-1- 01132-5	2011	refereed
180	A. Kamitani, T. Takayama, T. Itoh, H. Nakamura	Extension of Meshless Galerkin/Petrov-Galerkin Approach without Using Lagrange Multipliers	Plasma and Fusion Research	6		2401074-1-	2011	refereed
181	T. Takayama, A. Kamitani, T. Itoh, H. Nakamura	Numerical Investigation on Accuracy Improvement of Permanent Magnet Method for Measuring j_c in High-Temperature Superconducting Film	Plasma and Fusion Research	6	Special Issue 1	2401059-1- 2401059-4	2011	refereed
182	T. Itoh, A. Saitoh, A. Kamitani, H. Nakamura	Efficient Evaluation of Influence Coefficients in Three-Dimensional Extended Boundary-Node Method for Potential Problems	Plasma and Fusion Research	6	Special Issue 1	2401106-1- 2401106-4	2011	refereed
183	S. Fujiwara, T. Itoh, M. Hashimoto, Y. Tamura, H. Nakamura, R. Horiuchi	Molecular Dynamics Simulation of Micellar Shape Change in Amphiphilic Solution	Plasma and Fusion Research	6	Special	2401040-1- 2401040-4	2011	refereed
184	A. Saitoh, T. Itoh, N. Matsui, A. Kamitani, H. Nakamura	New Implementation Method for Essential Boundary Condition to Extended Element-Free Galerkin Method: Application to Nonlinear Problem	Plasma and Fusion Research	6	Special Issue 1	2401089-1- 2401089-4	2011	refereed
185	K. Saito, K. Ichiguchi, R. Ishizaki	Effect of Parallel Diffusion of Equilibrium Pressure on Interaction between Interchange Mode and Static Magnetic Island	Plasma and Fusion Research	6	Special Issue 1	2403072-1- 2403072-5	2011	refereed
186	R. Kanno, S. Satake, M. Nunami	Monte Carlo Simulation Code for Solving Radial Fluid Equations in Toroidal Plasmas	Plasma and Fusion Research	6	Special Issue 1	2403066-1-	2011	refereed
187	A. Iwamoto, T. Fujimura, A. Sunahara, H. Sakagami, T. Norimatsu	Mechanical issues of FIREX target under cryogenic environment	Plasma and Fusion Research	6	Special Issue 1	2404070-1- 2404070-4	2011	refereed
188	S. Maeyama, A. Ishizawa, T. Watanabe, N. Nakajima, S. Tsuji-Iio, H. Tsutsui	A Numerical Method for Parallel Particle Motions in Gyrokinetic Vlasov Simulations	Plasma and Fusion Research	6	Special Issue 1	2401028-1- 2401028-5	2011	refereed
189	A. Ishizawa, T. Watanabe, N. Nakajima	Gyrokinetic Simulations of Slab Ion Temperature Gradient Turbulence with Kinetic Electrons	Plasma and Fusion Research	6	Special Issue 1	2403087-1- 2403087	2011	refereed
190	H. Ohtani, A. Kageyama, Y. Tamura, S. Ishiguro, M. Shoji	Integrated Visualization of Simulation Results and Experimental Devices in Virtual-Reality Space	Plasma and Fusion Research	6	Special Issue 1	2406027-1-	2011	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
191	R. Horiuchi	Simulation science at the National Institute for Fusion Science	Plasma and Fusion Research	6	Special Issue 1	2101055-1-	2011	refereed
192	R. Seki, H. Funaba, K. Watanabe, S. Ondachi, Y. Suzuki, S. Sakakibara, M. Sato, M. Yokoyama, S. Murakami, A. Fukuyama, N. Nakajima	Transport Study of LHD High-beta Plasmas based on Power Balance Analysis with TASK3D Code Modules	Plasma and Fusion Research	6	Special Issue 1	2402081-1- 2402081-5	2011	refereed
193	T. Kobayashi, Y. Nagashima, S. Inagaki, H. Arakawa, M. Sasaki, T. Yamada, M. Yagi, N. Kasuya, A. Fujisawa, S. Itoh, K. Itoh	Method for Estimating the Wavenumber of Standing Waves Using Three Langmuir Probes	Plasma and Fusion Research	6		1401050-1- 1401050-5	2011	refereed
194	S. Inagaki, T. Tokuzawa, K. Itoh, K. Ida, S. Itoh, N. Tamura, S. Sakakibara, N. Kasuya, A. Fujisawa, S. Kubo, T. Shimozuma, T. Ido, S. Nishimura, H. Arakawa, T. Kobayashi, M. Yagi, K. Tanaka, Y. Nagayama, K. Kawahata, S. Sudo, H. Yamada, A. Komori	Long Range Temperature Fluctuation in LHD	Plasma and Fusion Research	6	Regular Issue	1402017-1- 1402017-9	2011	refereed
195	S. Matsuoka, S. Satake, M. Yokoyama, A. Wakasa	Radial Electric Field Formation Including Electron Radial Drift for a Core Electron-Root Confinement (CERC) Plasma in LHD	Plasma and Fusion Research	6		1203016-1- 1203016-3	2011	refereed
196	N. Kasuya, S. Nishimura, M. Yagi, K. Itoh, S. Itoh	On Detection of a Global Mode Structure in Experiments by Use of Turbulence Diagnostic Simulator	Plasma and Fusion Research	6		1403002-1- 1403002-5	2011	refereed
197	M. Nunami, T. Watanabe, H. Sugama, K. Tanaka	Linear Gyrokinetic Analyses of ITG Modes and Zonal Flows in LHD with High Ion Temperature	Plasma and Fusion Research	6		1403001-1-	2011	refereed
198	S. Toda, K. Itoh	Study of electric field pulsation in helical plasmas	Plasma Physics and Controlled Fusion	53	11	115011(1)-(14)	2011	refereed
199	M. Itagaki, T. MAEDA, T. ISHIMARU, G. Okubo, K. Watanabe, R. Seki, Y. Suzuki	Three-dimensional Cauchy-condition surface method to identify the shape of the last closed magnetic surface in the Large Helical Device	Plasma Physics and Controlled Fusion	53	105007	1-17	2011	refereed
200	T. Kobayashi, S. Inagaki, S. Itoh, K. Ida, S. Oldenbörger, H. Tsuchiya, Y. Nagayama, K. Kawahata, H. Yamada, M. Sasaki, A. Fujisawa, K. Itoh	Verification of wavelet analysis for a heat pulse propagation experiment	Plasma Physics and Controlled Fusion	53	9	095012-1-12	2011	refereed
201	R. Ishizaki, N. Nakajima	Magnetohydrodynamic simulation on pellet plasmoid in torus plasmas	Plasma Physics and Controlled Fusion	53	5	054009-1- 054009-14	2011	refereed
202	S. Satake, H. Sugama, R. Kanno, J. Park	Calculation of neoclassical toroidal viscosity in tokamaks with broken toroidal symmetry	Plasma Physics and Controlled Fusion	53	5	054018-1- 054018-21	2011	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
203	H. Sugama, T. Watanabe, M. Nunami, S. Nishimura	Momentum balance and radial electric fields in axisymmetric and nonaxisymmetric toroidal plasmas	Plasma Physics and Controlled Fusion	53	2	024004-1-024004-17	2011	refereed
204	K. Toi, K. Ogawa, M. Isobe, M. Osakabe, D. Spong, Y. Todo	Energetic-ion-driven global instabilities in stellarator/helical plasmas and comparison with tokamak plasmas	Plasma Physics and Controlled Fusion	53	2	024008	2011	refereed
205	N. Kasuya, S. Nishimura, M. Yagi, K. Itoh, S. Itoh	Heavy Ion Beam Probe Measurement in Turbulence Diagnostic Simulator	Plasma Science and Technology	13	3	326-331	2011	refereed
206	Y. Tomita, G. Kawamura, Z. Huang, Y. Pan, L. Yan	Dust Charging and Dynamics in Tokamaks	Plasma Science and Technology	13	1	11-14	2011	refereed
207	H. Usui, M. Nunami, T. Moritaka, T. Matsui, Y. Yagi	A Multi-Scale Electromagnetic Particle Code with Adaptive Mesh Refinement and Its Parallelization	Procedia Computer Science	4		2337-2343	2011	refereed
208	S. Saito, A. Takayama, A. Ito, T. Kenmotsu, H. Nakamura	How to Combine Binary Collision Approximation and Multi-body Potential for Molecular Dynamics	Progress in Nuclear Science and	2		44-50	2011	refereed
209	H. Hasegawa, N. Ohno, T.	Holistic Simulation of Auroral Arc Formation	ながれ	30	5	401-408	2011	unrefereed
210	H. Miura	Special Topic Article: Self-Organization Due to Long-Range Correlation 2.Self-Organization in Three-Dimensional Navier-Stokes System	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	87	7	430-435	2011	unrefereed
211	S. Itoh, R. Kodama, A. Fujisawa, M. Sato, K. Tanaka, R. Hatakeyama, K. Itoh		プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	87	6	371-381	2011	refereed
212	Y. Tomita, Y. Tanaka	Special Topic Article: Advances in Various Fields of "Plasma and Dust Particles" 5. Dust Research in Fusion Plasma 5.1 Modeling of Dust Charging and Dynamics in Fusion Plasma	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	87	3	149-152	2011	unrefereed
213	T. Katagiri, M. Sato	A Blocked BSS Implementation for Sparse Matrix-vector Multiplication and Its Performance Evaluation on a High Thread Parallel Environment	情報処理学会論文誌	4	3	1-8	2011	refereed
214	K. Itoh, S. Itoh	Memory of Prof. Shoichi Yoshikawa	日本物理学会誌 (BUTSURI)	66	2	144	2011	unrefereed

論文リスト 2012年 / Published Papers related to NSRP in 2012

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
215	M. Rajkovic, T. Watanabe, M. Skoric	Characterization of turbulence and transport in magnetic confinement devices	AIP conference proceedings	1445		15-33	2012	refereed
216	M. Skoric, L. Nikolic, S. Ishiguro	Attosecond Photon and Electron Pulses from Relativistic Laser Plasmas	AIP conference proceedings	1421		193-202	2012	refereed
217	M. Hashida, Y. Miyasaka, M. Shimizu, T. Ogata, H. Sakagami, S. Tokita, S. Sakabe	Mechanism of femtosecond laser nano-ablation for metals	ALT Proceedings	1		140-141	2012	unrefereed
218	S. Fujiwara, M. Hashimoto, T. Itoh, R. Horiuchi	Micellar Shape Change in Amphiphilic Solution: A Molecular Dynamics Study	Chemistry Letters	41	10	1038-1040	2012	refereed
219	S. Usami, H. Ohtani, R. Horiuchi, M. Den	Simulation of Plasma Flow Injection with Multi-Hierarchy Model Aiming Magnetic Reconnection Studies	Communications in Computational Physics	11	3	1006-1021	2012	refereed
220	S. Maeyama, A. Ishizawa, T. Watanabe, N. Nakajima, S. Tsuji-Iio, H. Tsutsui	A hybrid method of semi-Lagrangian and additive semi-implicit Runge-Kutta schemes for gyrokinetic Vlasov simulations	Computer Physics Communications	183	9	1986-1992	2012	refereed
221	Y. Tomita, G. Kawamura, M. Ueno, N. Ohno, Z. Huang, Y. Pan, L. Yan	Electric Field at a Plasma-Facing Wall for a Two-Temperature Electron Distribution	Contributions to Plasma Physics	52	5-6	484-489	2012	refereed
222	M. Ueno, N. Ohno, Y. Tomita, G. Kawamura	Conditions for the Release of a Metallic Dust Particle from a Plasma-Facing Wall	Contributions to Plasma Physics	52		478-483	2012	refereed
223	M. Emoto, M. Yoshida, C. Suzuki, Y. Suzuki, K. Ida, Y. Nagayama, T. Akiyama, K. Kawahata, K. Narihara, T. Tokuzawa, I. Yamada	Application of virtual machine technology to real-time mapping of Thomson scattering data to flux coordinates for the LHD	Fusion Engineering and Design	87	12	2076-2080	2012	refereed
224	S. Saito, A. Ito, A. Takayama, H. Nakamura	Anisotropic Bond Orientation of Amorphous Carbon by Deposition	Japanese Journal of Applied Physics	51		01AC05-1-01AC05-5	2012	refereed
225	T. Gotoh, S. Hatanaka, H. Miura	Spectral compact difference hybrid computation of passive scalar in isotropic turbulence	Journal of Computational Physics	231	21	7398-7414	2012	refereed
226	R. Shirasaki, A. Endo, N. Hatano, H. Nakamura	Thermomagnetic Effect in the Quantum Hall System	Journal of Electronic Materials	41	6	1540-1545	2012	refereed
227	N. Hirayama, A. Endo, K. Fujita, Y. Hasegawa, N. Hatano, H. Nakamura, R. Shirasaki, K. Yonemitsu	Transport-Coefficient Dependence of Current-Induced Cooling Effect in a Two-Dimensional Electron Gas	Journal of Electronic Materials	41	6	1535-1539	2012	refereed
228	T. Watanabe, H. Sugama, M. Nunami, M. Nakata	Gyrokinetic simulation studies for non-axisymmetric plasma con nement: turbulent transport and entropy transfer	Journal of Physics: Conference Series	399	1	012020-1-10	2012	refereed
229	K. Itoh, S. Itoh, S. Toda	Dual Maxwell Construction and Transport Barrier of Helical Plasmas	Journal of the Physical Society of Japan	81	12	124501-1-124501-8	2012	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
230	S. Inagaki, T. Kobayashi, K. Itoh, T. Tokuzawa, S. Itoh, K. Ida, N. Tamura, N. Kasuya, A. Fujisawa, S. Kubo, T. Shimozuma, M. Yagi, K. Tanaka, Y. Nagayama, K. Kawahata, H. Yamada	Bi-coherence Analysis of Fluctuations with Long Distance Correlation in Toroidal Plasmas	Journal of the Physical Society of Japan	81	3	03450-1-03450-5	2012	refereed
231	M. Hata, H. Sakagami, A. Sunahara, T. Johzaki, H. Nagatomo	Effects of CH foam preplasma on fast ignition	Laser and Particle Beams	30	2	189-197	2012	refereed
232	H. Sakagami, K. Okada, Y. Kasada, T. Taguchi, T.	Collisional Effects on Fast Electron Generation and Transport in Fast Ignition	Laser and Particle Beams	30	2	243-248	2012	refereed
233	H. Sakagami, A. Sunahara, T. Johzaki, H. Nagatomo	Effects of long rarefied plasma on fast electron generation for FIREX-I targets	Laser and Particle Beams	30	1	103-109	2012	refereed
234	J. Miyazawa, T. Goto, R. Sakamoto, G. Motojima, C. Suzuki, H. Funaba, T. Morisaki, S. Masuzaki, I. Yamada, S. Murakami, Y. Suzuki, M. Yokoyama, B. Peterson, H. Yamada, A. Sagara	Formularization of the confinement enhancement factor as a function of the heating profile for FFHR-d1 core plasma design	Nuclear Fusion	52	12	123007-1-10	2012	refereed
235	Y. Todo, H. Berk, B. Breizman	Saturation of a toroidal Alfvén eigenmode due to enhanced damping of nonlinear sidebands	Nuclear Fusion	52	9	094018-1-094018-8	2012	refereed
236	Y. Takemura, S. Sakakibara, Y. Narushima, M. Okamoto, K. Watanabe, Y. Suzuki, S. Ohdachi, K. Ida, M. Yoshinuma, K. Tanaka, T. Tokuzawa, K. Narihara, I. Yamada, H. Yamada	Mode locking phenomena observed near the stability boundary of the ideal interchange mode of LHD	Nuclear Fusion	52	10	102001	2012	refereed
237	Y. Hamada, T. Watari, A. Nishizawa, O. Yamagishi, K. Narihara, Y. Kawasumi, T. Ido, M. Kojima, K. Toi	Regions of kinetic geodesic acoustic modes and streamers in JPPT-IIU tokamak plasmas	Nuclear Fusion	52	6	063023-1-11	2012	refereed
238	Y. Todo, H. Berk, B. Breizman	Simulation of Alfvén eigenmode bursts using a hybrid code for nonlinear magnetohydrodynamics and energetic particles	Nuclear Fusion	52	3	033003-1-033003-10	2012	refereed
239	M. Sasaki, K. Itoh, S. Itoh, N. Kasuya	Zonal Flows Induced by Symmetry Breaking with Existence of Geodesic Acoustic Modes	Nuclear Fusion	52	2	23009-1-14	2012	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
240	S. Inagaki, N. Tamura, T. Tokuzawa, K. Ida, T. Kobayashi, T. Shimoizuma, S. Kubo, H. Tsuchiya, Y. Nagayama, K. Kawahata, S. Sudo, A. Fujisawa, K. Itoh, S. Itoh	Fluctuations with long-distance correlation in quasi-stationary and transient plasmas of LHD	Nuclear Fusion	52	2	023022-1-7	2012	refereed
241	M. Skoric, L. Nikolic, L. Hadzievski, S. Ishiguro, K. Mima	Ultra-short photon pulse generation in relativistic laser-plasmas	Physica Scripta	T149		14081	2012	refereed
242	M. Skoric, L. Nikolic, L. Hadzievski, S. Ishiguro, K. Mima	Ultra-short photon pulse generation in relativistic laser-plasmas	Physica Scripta	2012	T149	014081-1-014081-4	2012	refereed
243	S. Inoue, S. Tokita, K. Otani, M. Hashida, M. Hata, H. Sakagami, T. Taguchi, S. J. Baumgaertel, G. Hammett, D. Mikkelsen, M. Nunami, P. Xanthopoulos	Autocorrelation Measurement of Fast Electron Pulses Emitted through the Interaction of Femtosecond Laser Pulses with a Solid Target	Physical Review Letters	109	185001	1月5日	2012	refereed
244	J. Baumgaertel, G. Hammett, D. Mikkelsen, M. Nunami, P. Xanthopoulos	Gyrokinetic studies of the effect of β on drift-wave stability in the National Compact Stellarator Experiment	Physics of Plasmas	19	12	122306-1-122306-9	2012	refereed
245	S. Nishimura, S. Toda, M. Yagi, Y. Narushima	Nonlinear stability of magnetic islands in a rotating helical plasma	Physics of Plasmas	19	12	122510-1-122510-15	2012	refereed
246	Y. Hiraki, T. Watanabe	Hybrid Alfvén resonant mode generation in the magnetosphere-ionosphere coupling system	Physics of Plasmas	19	10	102904-1-102904-6	2012	refereed
247	O. Yamagishi, H. Sugama	Collisionless kinetic-fluid simulation of zonal flows in non-circular tokamaks	Physics of Plasmas	19	9	092504-1-092504-10	2012	refereed
248	A. Ishizawa, F. Waelbroeck, R. Fitzpatrick, W. Horton, N. Nakajima	Magnetic island evolution in hot ion plasmas	Physics of Plasmas	19	7	072312-1-072312-13	2012	refereed
249	M. Nunami, T. Watanabe, H. Sugama, K. Tanaka	Gyrokinetic turbulent transport simulation of a high ion temperature plasma in large helical device experiment	Physics of Plasmas	19	4	042504-1-042504-7	2012	refereed
250	M. Nakata, T. Watanabe, H. Sugama	Nonlinear entropy transfer via zonal flows in gyrokinetic plasma turbulence	Physics of Plasmas	19	2	022303-1-14	2012	refereed
251	K. Saito, K. Ichiguchi, R. Ishizaki	Numerical Analysis of Resistive Interchange Mode in Equilibria Consistent with Static Magnetic Islands in a Straight Heliotron Configuration	Plasma and Fusion Research	7	Regular Issue	1403156	2012	refereed
252	T. Itoh, A. Saitoh, A. Kamitani, H. Nakamura	Implicit Function with Natural Behavior over Entire Domain	Plasma and Fusion Research	7	Special Issue 1	2406068-1-	2012	refereed
253	G. Kawamura, I. Murakami, Y. Tomita, S. Masuzaki	1D Model Study on the Effect of Impurity Radiation Cooling in LHD SOL Plasma	Plasma and Fusion Research	7	Special Issue 1	2403129-1-	2012	refereed
254	N. Mizuguchi, A. Sanpei, S. Fujita, K. Oki, H. Himura, S. Masamune, K. Ichiguchi	Modeling of Formation of Helical Structures in Reversed-Field Pinch	Plasma and Fusion Research	7	Special Issue 1	2403117-1-2403117-4	2012	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
255	A. Saitoh, T. Itoh, N. Matsui, A. Kamitani, H. Nakamura	Application of Collocation Meshless Method to Eigenvalue Problem	Plasma and Fusion Research	7	Special Issue 1	2406096-1-	2012	refereed
256	S. Nishimura, S. Toda, M. Yagi, Y. Narushima	Stability of Externally Driven Magnetic Islands in a Helical Plasma	Plasma and Fusion Research	7	Special Issue 1	2403107-1-	2012	refereed
257	A. Bierwage, N. Aiba, Y. Todo, W. Deng, M. Ishikawa, G. Matsunaga, K. Shinohara, M. Yagi	Nonlinear Simulation of Energetic Particle Modes in High-Beta Tokamak Plasma	Plasma and Fusion Research	7	Special Issue 1	2403081-1- 2403081-4	2012	refereed
258	K. Saito, K. Ichiguchi, R. Ishizaki	Low Beta MHD Equilibrium Including a Static Magnetic Island for Reduced MHD Equations in a Straight Heliotron Configuration	Plasma and Fusion Research	7	Regular Issue	1403070-1- 1403070-	2012	refereed
259	H. Sugama, T. Watanabe, M. Nunami, S. Satake, S. Matsuoka, K. Tanaka	Kinetic Simulations of Neoclassical and Anomalous Transport Processes in Helical Systems	Plasma and Fusion Research	7	Special Issue 1	2403094-1- 2403094-9	2012	refereed
260	M. Emoto, M. Yoshida, C. Suzuki, Y. Suzuki, K. Ida, Y. Nagayama, T. Akiyama, K. Kawahata, K. Narihara, T. Tokuzawa, I. Yamada	Performance Improvement in Real-Time Mapping of Thomson Scattering Data to Flux Coordinates in LHD	Plasma and Fusion Research	7	Special Issue 1	2405058-1- 2405058-4	2012	refereed
261	T. Kobayashi, S. Inagaki, S. Oldenburger, K. Kawashima, N. Ohyama, Y. Tobimatsu, H. Arakawa, M. Sasaki, Y. Nagashima, T. Yamada, S. Sugita, M. Yagi, N. Kasuya, A. Fujisawa, S. Itoh, K. Itoh	Time Evolution of Power Spectrum Density in Spontaneous Transition in Cylindrical Magnetized Plasma	Plasma and Fusion Research	7	Special Issue 1	2401054-1- 2401054-5	2012	refereed
262	H. Hasegawa, S. Ishiguro	Particle Simulation of Plasma Blob Dynamics: Preliminary Results	Plasma and Fusion Research	7	Special Issue	2401060-1-	2012	refereed
263	S. Ikuno, Y. Fujita, T. Itoh, S. Nakata, H. Nakamura, A. Kamitani	Numerical Simulation of Electromagnetic Wave Propagation using Time Domain Meshless Method	Plasma and Fusion Research	7	Special Issue 1	2406044-1- 2406044-4	2012	refereed
264	K. Saito, K. Ichiguchi, R. Ishizaki	Numerical Calculation of MHD Equilibria Including Static Magnetic Islands in a Straight Heliotron Configuration by Means of a Field Line Tracing Method	Plasma and Fusion Research	7	Special Issue	2403032	2012	refereed
265	M. Isaev, K. Watanabe, S. Satake, Y. Nakamura, W. Cooper	Bootstrap Current Simulations with Experimental LHD Plasma Density and Temperature Profiles, Energy Scattering and Finite OrbitWidth	Plasma and Fusion Research	7	1403077	1403077-1- 1403077-7	2012	refereed
266	A. Kamitani, T. Takayama, A. Saitoh, H. Nakamura	Accurate and Stable Numerical Method for Analyzing Shielding Current Density in High-Temperature Superconducting Film Containing Cracks	Plasma and Fusion Research	7	Special Issue 1	2405024-1- 2405024-4	2012	refereed
267	T. Takayama, A. Kamitani, A. Saitoh, H. Nakamura	Numerical Investigation on Accuracy and Resolution of Contactless Methods for Measuring j_C in High-Temperature Superconducting Film: Inductive Method and Permanent Magnet Method	Plasma and Fusion Research	7	Special Issue 1	2405017	2012	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
268	M. Yokoyama, A. Wakasa, R. Seki, M. Sato, S. Murakami, G. Suzuki, Y. Nakamura, A. Fukuyama	Development of Integrated Transport Code, TASK3D, and Its Applications to LHD Experiment	Plasma and Fusion Research	7	Special Issue 1	2403011_1-2403011_4	2012	refereed
269	M. Yokoyama, A. Wakasa, R. Seki, M. Sato, S. Murakami, G. Suzuki, Y. Nakamura, A. Fukuyama	Development of Integrated Transport Code, TASK3D, and Its Applications to LHD Experiment	Plasma and Fusion Research	7	Special Issue 1	2403011-1-2403011-4	2012	refereed
270	N. Ohno, H. Ohtani, D. Matsuoka, R. Horiuchi	Visualization of Particle Trajectories in Time-Varying Electromagnetic Fields by CAVE-Type Virtual Reality System	Plasma and Fusion Research	7		1401001-1-6	2012	refereed
271	M. Itagaki, G. Okubo, M. Akazawa, Y. Matsumoto, K. Watanabe, R. Seki, Y. Suzuki, T. Kobayashi, S. Inagaki, S. Itoh, K. Itoh, S. Oldenburger, A. Fujisawa, Y. Nagashima, K. Ida, H. Tsuchiya, Y. Nagayama, K. Kawahata, H. Yamada	Use of a twisted 3D Cauchy condition surface to reconstruct the last closed magnetic surface in a non-axisymmetric fusion plasma	Plasma Physics and Controlled Fusion	54	12	125003-1-18	2012	refereed
272	K. Itoh, S. Itoh, S. Inagaki, T. Kobayashi, A. Fujisawa, Y. Nagashima, S. Oldenburger, K. Ida, T. Tokuzawa, Y. Nagayama, K. Kawahata, H. Yamada	Self-nonlinear coupling of long-range temperature fluctuation in Toroidal plasma	Plasma Physics and Controlled Fusion	54	11	115004-1-9	2012	refereed
273	T. Takahashi, T. Kanki, N. Mizuguchi	On influences of long-range fluctuations on transport in Large Helical Device plasmas	Plasma Physics and Controlled Fusion	54	9	95016	2012	refereed
274	Y. Torikai, G. Kawamura	Commentary: Progress of Theory and Simulation Research on High-Beta Self-Organized Plasmas	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	88	8	409-417	2012	unrefereed
275	N. Nakajima, K. Yamazaki	Report: 20th International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	88	8	462-462	2012	unrefereed
276		Special Topic Articles: Present Status of 3-Dimensional MHD Research in Tokamaks and Contribution from Other Confinement	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	88	3	153-157	2012	unrefereed

論文リスト 2013年 / Published Papers related to NSRP in 2013

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
277	M. Kobayashi, Y. Feng, I. Yamada, H. Hayashi, G. Kawamura	Benchmark of Monte Carlo scheme of EMC3 dealing with non-uniform cross-field transport coefficients and implementation in LHD	Contributions to Plasma Physics	54	4-6	383-387	2013	refereed
278	H. Nagatomo, T. Johzaki, A. Sunahara, H. Sakagami, T. Yanagawa, K. Mima	Optimum design of imploded core plasma for effective fast ignition at GXII	EPJ Web of Conferences	59	3007	1-4	2013	refereed
279	T. Johzaki, A. Sunahara, S. Fujioka, H. Nagatomo, H. Sakagami, K. Mima	Fast electron beam guiding for effective core heating	EPJ Web of Conferences	59		03010-p.1-03010-p.5	2013	refereed
280	T. Yanagawa, H. Sakagami, H. Nagatomo	Three-dimensional simulations of asymmetric implosion for cone-guided targets	EPJ Web of Conferences	59		03008-p.1-03008-p.4	2013	refereed
281	M. Hata, H. Sakagami, T. Johzaki, H. Nagatomo	EFFECTS OF LASER TEMPORAL PROFILE ON FAST ELECTRON CHARACTERISTICS	EPJ Web of Conferences	59	17004	17004-p.1-17004-p.4	2013	refereed
282	H. Sakagami, T. Johzaki, T. Taguchi, K. Mima	Suppression effects of Weibel instability for fast electron divergence	EPJ Web of Conferences	59	17016	1-4	2013	refereed
283	A. Kageyama, N. Ohno, S. Kawahara, K. Kashiwama, H. Ohtani	Immersive VR Visualizations by VFIVE Part 2: Applications	International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing	4	supp01	1340004-1-16	2013	refereed
284	T. Sugimura, H. Sakagami	Oscillationless Explicit Method on Overset Grid for Advective Equation	JAMSTEC Report of Research and Development	16		1-11	2013	refereed
285	N. Kashima, H. Nakamura, A. Takayama, Y. Tamura, S. Kubo	Finite-Difference Time-Domain Simulation on Transmission of Millimeter Waves through Miter Bends	Japanese Journal of Applied Physics	52	11	11ND02-1-11ND02-2	2013	refereed
286	A. Takayama, A. Ito, S. Saito, N. Ohno, H. Nakamura	First-Principles Investigation on Trapping of Multiple Helium Atoms within a Tungsten Monovacancy	Japanese Journal of Applied Physics	52	2	01AL03-1-01AL03-4	2013	refereed
287	A. Ito, A. Takayama, S. Saito, H. Nakamura	Formation and Classification of Amorphous Carbon by Molecular Dynamics Simulation	Japanese Journal of Applied Physics	52	1S	01AL04-1-01AL04-7	2013	refereed
288	S. Saito, A. Ito, A. Takayama, H. Nakamura	Structural Change of Single-Crystalline Graphite under Plasma Irradiation	Japanese Journal of Applied Physics	52	1	01AL02-1-01AL02-6	2013	refereed
289	N. Hirayama, A. Endo, K. Fujita, Y. Hasegawa, N. Hatano, H. Nakamura, R. Shirasaki, K. Yonemitsu	Current-induced cooling phenomenon in a two-dimensional electron gas under a magnetic field	Journal of Low Temperature Physics	172	1-2	132-153	2013	refereed
290	S. Masuzaki, M. Kobayashi, T. Akiyama, N. Ohno, T. Morisaki, M. Shoji, M. Tokitani, H. Tanaka, B. Peterson, S. Yoshimura, K. Narihara, R. Yasuhara, A. Murakami, J. Miyazawa, T. Murase, T. Kobuchi, H. Yonezu, G. Kawamura, I. Murakami, Y. Takeiri, H. Yamada, A. Komori	Divertor heat and particle control experiments on the large helical device	Journal of Nuclear Materials	438	Supplement	S133-S138	2013	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
291	S. Fujiwara, M. Hashimoto, T. Itoh, H. Nakamura, Y. Tamura	Shape transition of micelles in amphiphilic solution: A molecular dynamics study	Journal of Physics: Conference Series	454		012024-1-012024-4	2013	refereed
292	H. Ohtani, K. Hagita, A. Ito, T. Kato, T. Saitoh, T. Takeda	Irreversible data compression concepts with polynomial fitting in time-order of particle trajectory for visualization of huge particle system	Journal of Physics: Conference Series	454	1	012078-1-11	2013	refereed
293	M. Skoric, L. Nikolic, S. Ishiguro	Self-organization and control in stimulated Raman backscattering	Journal of Plasma Physics	79	6	1003-1006	2013	refereed
294	A. Ito, N. Nakajima	Analytic Equilibria of High-Beta Tokamaks with Toroidal and Poloidal Flows and Pressure Anisotropy Associated with Parallel Heat Flux	Journal of the Physical Society of Japan	82	6	064502-1-064502-13	2013	refereed
295	M. Hata, H. Sakagami, T. Johzaki, H. Nagatomo	Effects of laser profiles on fast electron generation under the same laser energy	Laser and Particle Beams	31		371-377	2013	refereed
296	K. Ida, S. Inagaki, Y. Suzuki, S. Sakakibara, T. Kobayashi, K. Itoh, H. Tsuchiya, C. Suzuki, M. Yoshinuma, Y. Narushima, M. Yokoyama, A. Shimizu, S. Itoh	Topology bifurcation of magnetic flux surface in plasmas	New Journal of Physics	15		13061	2013	refereed
297	T. Ozaki, M. Koga, H. Shiraga, H. Sakagami	Hot electron spectra in Gekko XII and LFEX laser	NIFS-PROC	94		38-42	2013	unrefereed
298	S. Inagaki, T. Tokuzawa, N. Tamura, S. Itoh, T. Kobayashi, K. Ida, T. Shimozuma, S. Kubo, K. Tanaka, T. Ido, A. Shimizu, H. Tsuchiya, N. Kasuya, Y. Nagayama, K. Kawahata, S. Sudo, H. Yamada, A. Fujisawa, K. Itoh	How is turbulence intensity determined by macroscopic variables in a toroidal plasma?	Nuclear Fusion	53	11	113006-1-113006-9	2013	refereed
299	S. Satake, J. Park, H. Sugama, R. Kanno	Simulation studies of the effect of E x B rotation on neoclassical toroidal viscosity in tokamaks with small magnetic perturbations	Nuclear Fusion	53	11	113033-1-10	2013	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
300	M. Jakubowski, P. Drewelow, S. Masuzaki, K. Tanaka, T. Pedersen, T. Akiyama, S. Bozhenkov, A. Dinklage, M. Kobayashi, Y. Narushima, S. Sakakibara, Y. Suzuki, R. Wolf, H. Yamada	Influence of the resonant magnetic perturbations on transport in the Large Helical Device	Nuclear Fusion	53	11	113012-1-9	2013	refereed
301	O. Kaneko, H. Yamada, S. Inagaki, M. Jakubowski, S. Kajita, S. Kitajima, M. Kobayashi, K. Koga, T. Morisaki, S. Morita, T. Muto, S. Sakakibara, Y. Suzuki, H. Takahashi, K. Tanaka, K. Toi, Y. Yoshimura, T. Akiyama, Y. Asahi, N. Ashikawa, H. Chikaraishi, W. Cooper, D. Darrow, E. Drapiko, P. Drewelow, X. Du, A. Ejiri, M. Emoto, T. Evans, N. Ezumi, K. Fujii, T. Fukuda, H. Funaba, M. Furukawa, D. Gates, M. Goto, T. Goto, W. Guttenfelder, S. Hamaguchi, M. Hasuo, T. Hino, Y. Hirooka, K. Ichiguchi, K. Ida, H. Idei, T. Ido, H. Igami, K. Ikeda, S. Imagawa, T. Imai, M. Isobe, M. Itagaki, T. Ito, K. Itoh, S. Itoh, A. Iwamoto, K. Kamiya, T. Kariya, H. Kasahara, N. Kasuya, D. Kato, T. Kato, K. Kawahata, F. Koike, S. Kubo, R. Kumazawa, D. Kuwahara, S. Lazerson, H. Lee, S. Masuzaki, S. Matsuoka, H. Matsuura, A. Matsuyama, C. Michael, D. Mikkelsen, O. Mitarai, T. Mito, J. Miyazawa, G. Motojima, K. Mukai, A. Murakami, I. Murakami, S. Murakami, T. Muroga, S. Muto, K. Nagaoka, K. Nagasaki, Y. Nagayama, N. Nakaiima, H. Nakamura, Y.	Extension of operation regimes and investigation of three-dimensional currentless plasmas in the Large Helical Device	Nuclear Fusion	53	10	104015-1-11	2013	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
	<p>Nakamura, H. Nakanishi, H. Nakano, T. Nakano, K. Narihara, Y. Narushima, K. Nishimura, S. Nishimura, M. Nishiura, M. Nunami, T. Obana, K. Ogawa, S. Ohdachi, N. Ohno, N. Ohyabu, T. Oishi, M. Okamoto, A. Okamoto, M. Osakabe, Y. Oya, T. Ozaki, N. Pablant, B. Peterson, A. Sagara, K. Saito, R. Sakamoto, H. Sakaue, M. Sasao, K. Sato, M. Sato, K. Sawada, R. Seki, T. Seki, V. Sergeev, S. Sharapov, I. Sharov, A. Shimizu, T. Shimosuma, M. Shiratani, M. Shoji, S. Sudo, H. Sugama, C. Suzuki, K. Takahata, Y. Takeiri, Y. Takemura, M. Takeuchi, H. Tamura, N. Tamura, H. Tanaka, T. Tanaka, M. Tingfeng, Y. Todo, M. Tokitani, K. Tokunaga, T. Tokuzawa, H. Tsuchiya, K. Tsumori, Y. Ueda, L. Vyacheslavov, K. Watanabe, T. Watanabe, T. Watanabe, B. Wieland, I. Yamada, S. Yamada, S. Yamamoto, N. Yanagi, R. Yasuhara, M. Yokoyama, N. Yoshida, S. Yoshimura, T. Yoshinaga, M. Yoshinuma, A. Komori</p>							

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
302	A. Iwamoto, T. Fujimura, M. Nakai, T. Norimatsu, H. Sakagami, H. Shiraga, H. Azechi	FIREX foam cryogenic target development: residual void reduction and estimation with solid hydrogen refractive index measurements -	Nuclear Fusion	53	8	083009-1-8	2013	refereed
303	A. Bierwage, K. Shinohara, N. Aiba, Y. Todo	Role of convective amplification of $n = 1$ energetic particle modes for N-NB ion dynamics in JT-60U	Nuclear Fusion	53	7	73007	2013	refereed
304	S. Kitajima, H. Takahashi, K. Ishii, Y. Sato, M. Kanno, J. Tachibana, A. Okamoto, M. Sasao, S. Inagaki, M. Takayama, S. Masuzaki, M. Shoji, N. Ashikawa, M. Tokitani, M. Yokoyama, Y. Suzuki, S. Satake, T. Ido, A. Shimizu, C. Suzuki, Y. Nagayama, T. Tokuzawa, K. Nishimura, T. Morisaki	Transition of Poloidal Viscosity by Electrode Biasing in the Large Helical Device	Nuclear Fusion	53	7	073014-1-6	2013	refereed
305	H. Takahashi, M. Osakabe, K. Nagaoka, S. Murakami, I. Yamada, Y. Takeiri, M. Yokoyama, H. Lee, K. Ida, R. Seki, C. Suzuki, M. Yoshinuma, T. Ido, A. Shimizu, M. Goto, S. Morita, T. Shimoizuma, S. Kubo, S. Satake, S. Matsuoka, N. Tamura, H. Tsuchiya, K. Tanaka, M. Nunami, A. Wakasa, K. Tsumori, K. Ikeda, H. Nakano, M. Kisaki, Y. Yoshimura, M. Nishiura, H. Igami, T. Seki, H. Kasahara, K. Saito, R. Kumazawa, S. Muto, K. Narihara, T. Muto, O. Kaneko, H. Yamada	Extension of the operational regime in high-temperature plasmas and the dynamic-transport characteristics in the LHD	Nuclear Fusion	53	7	073034-1-7	2013	refereed
306	Y. Suzuki, K. Ida, K. Kamiya, M. Yoshinuma, S. Sakakibara, K. Watanabe, H. Yamada	3D plasma response to magnetic field structure in the Large Helical Device	Nuclear Fusion	53	7	073045-1-073045-5	2013	refereed
307	H. Nagatomo, T. Johzaki, A. Sunahara, H. Sakagami, K. Mima, H. Shiraga, H. Azechi	Computational study of strong magnetic field generation in a nonspherical, cone-guided implosion	Nuclear Fusion	53	6	063018-1-4	2013	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
308	A. Dinklage, M. Yokoyama, K. Tanaka, J. Velasco, D. Lopez-Bruna, C. Beidler, S. Satake, E. Ascasibar, J. Arevalo, J. Balduhn, Y. Feng, D. Gates, J. Geiger, K. Ida, M. Jakubowski, A. Lopez-Fraguas, H. Maassberg, J. Miyazawa, T. Morisaki, S. Murakami, N. Pablant, M. Kobayashi, R. Seki, C. Suzuki, Y. Suzuki, Y. Turkin, A. Wakasa, R. Wolf, H. Yamada, M. Yoshinuma	Inter-machine validation study of neoclassical transport modelling in medium- to high-density stellarator-heliotron plasmas	Nuclear Fusion	53	6	063022-1-8	2013	refereed
309	R. Seki, K. Watanabe, H. Funaba, Y. Suzuki, Y. Matsumoto, K. Hamamatsu, S. Sakakibara, S. Ohdachi	Effect of re-entering fast ions on NBI heating power in high-beta plasmas of the Large Helical Device	Nuclear Fusion	53	6	063016-1-11	2013	refereed
310	A. Ishizawa, S. Maeyama, T. Watanabe, H. Sugama, N. Nakajima	Gyrokinetic turbulence simulations of high-beta tokamak and helical plasmas with full-kinetic and hybrid models	Nuclear Fusion	53	5	053007-1-13	2013	refereed
311	S. Sakakibara, Y. Narushima, Y. Takemura, M. Okamoto, K. Watanabe, Y. Suzuki, S. Ohdachi, K. Ida, M. Yoshinuma, K. Tanaka, T. Tokuzawa, K. Narihara, I. Yamada, H. Yamada	Response of MHD Stability to Resonant Magnetic Perturbation in the Large Helical Device	Nuclear Fusion	53	4	043010-1-7	2013	refereed
312	J. Dong, Y. Shi, N. Tamura, H. Jhang, T. Watanabe, X. Ding	APTWG: 2nd Asia-Pacific Transport Working Group Meeting	Nuclear Fusion	53	2	027001-1-027001-11	2013	refereed
313	K. Kamiya, K. Ida, M. Yoshinuma, C. Suzuki, Y. Suzuki, M. Yokoyama	Characterization of edge radial electric field structures in the Large Helical Device and their viability for determining the location of the plasma	Nuclear Fusion	53	1	013003-1-9	2013	refereed
314	M. Nakata, Y. Idomura	Plasma size and collisionality scaling of ion temperature gradient driven turbulence	Nuclear Fusion	53		113039	2013	refereed
315	T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida, K. Hoshino	Spatiotemporal Structures of Edge Limit-Cycle Oscillation before L-to-H Transition in the JFT-2M Tokamak	Physical Review Letters	111		35002-1-035002-5	2013	refereed
316	K. Ida, J. Lee, K. Nagaoka, M. Osakabe, C. Suzuki, M. Yoshinuma, R. Seki, M. Yokoyama, T. Akiyama	Reversal of Intrinsic Torque Associated with the Formation of an Internal Transport Barrier	Physical Review Letters	111	5	55001	2013	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
317	H. Wang, Y. Todo, C. Kim	Hole-clump pair creation in the evolution of energetic-particle-driven geodesic acoustic modes	Physical Review Letters	110	15	155006-1- 155006-5	2013	refereed
318	A. Ishizawa, F. Waelbroeck	Magnetic island evolution in the presence of ion-temperature gradient-driven turbulence	Physics of Plasmas	20	12	122301-1- 122301-12	2013	refereed
319	A. Ishizawa, T. Watanabe	Reversible collisionless magnetic reconnection	Physics of Plasmas	20	10	102116-1- 102116-10	2013	refereed
320	T. Yanagawa, H. Sakagami, H. Nagatomo	Simulation analysis of the effects of an initial cone position and opening angle on a cone-guided implosion	Physics of Plasmas	20	10	102703-1- 102703-7	2013	refereed
321	M. Nunami, T. Watanabe, H. Sugama	A reduced model for ion temperature gradient turbulent transport in helical plasmas	Physics of Plasmas	20	9	092307-1- 092307-6	2013	refereed
322	M. Toida, Y. Aota	Finite beta effects on low- and high-frequency magnetosonic waves in a two-ion-species plasma	Physics of Plasmas	20		82301	2013	refereed
323	S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, M. Den	Development of Multi-Hierarchy Simulation Model with Non-Uniform Space Grids for Collisionless Driven Reconnection	Physics of Plasmas	20	6	61208	2013	refereed
324	K. Nagaoka, K. Ida, M. Yoshinuma, Y. Suzuki, K. Kamiya, S. Satake, K. Tanaka, M. Yokoyama, S. Murakami, M. Osakabe, H. Takahashi, R. Seki, C. Suzuki, Y. Narushima, H. Nakano, M. Kisaki, K. Ikeda, K. Tsumori, Y. Takeiri, O. Kaneko, H. Yamada	3-D effects on viscosity and generation of toroidal and poloidal flows in LHD	Physics of Plasmas	20	5	056116-1- 056116-6	2013	refereed
325	M. Hata, H. Sakagami, A. Das	Kinetic effects on robustness of electron magnetohydrodynamic structures	Physics of Plasmas	20	4	042303-1- 042303-6	2013	refereed
326	H. Sugama, T. Watanabe, M. Nunami	Conservation of energy and momentum in nonrelativistic plasmas	Physics of Plasmas	20	2	024503-1- 024503-4	2013	refereed
327	Y. Asahi, Y. Suzuki, K. Watanabe, W. Cooper	Development of an Identification Method of Pressure Anisotropy Based on Equilibrium Analysis and Linear Properties of Energetic Particle Driven Geodesic Acoustic Mode	Physics of Plasmas	20	2	022503-1- 022503-7	2013	refereed
328	H. Wang, Y. Todo	An Assessment of Limit Cycle Oscillation Dynamics Prior to L-H Transition	Physics of Plasmas	20	1	012506-1- 012506-8	2013	refereed
329	K. Itoh, S. Itoh, A. Fujisawa	Measurement of Dynamical Density Profiles Using a Microwave Frequency Comb Reflectometer	Plasma and Fusion Research	8		1102168-1- 11	2013	refereed
330	S. Inagaki, K. Itoh, T. Yamada, S. Itoh, T. Tokuzawa, A. Fujisawa, N. Kasuya, M. Sasaki, Y. Nagashima, H. Arakawa	Measurement of Dynamical Density Profiles Using a Microwave Frequency Comb Reflectometer	Plasma and Fusion Research	8	Regular Issue	1201171-1- 1201171-2	2013	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
331	S. Inagaki, T. Tokuzawa, T. Kobayashi, S. Itoh, K. Itoh, K. Ida, S. Kubo, T. Shimozuma, N. Tamura, A. Fujisawa, N. Kasuya, H. Tsuchiya, Y. Nagayama, K. Kawahata, H. Yamada, A. Komori	New Method of Analysis for Dynamical Transport	Plasma and Fusion Research	8	Regular Issue	1202172-1-1202172-2	2013	refereed
332	S. Inagaki, S. Itoh, K. Itoh, N. Kasuya, T. Kobayashi, A. Fujisawa, T. Tokuzawa, K. Ida, S. Kubo, T. Shimozuma, N. Tamura, H. Tsuchiya, Y. Nagashima, K. Kawahata, H. Yamada, A. Komori	Higher Harmonics in a Perturbative Transport Experiment	Plasma and Fusion Research	8	Regular Issue	1202173	2013	refereed
333	H. Usui, Y. Yagi, M. Matsumoto, M. Nunami	Development of Parallelized AMR-PIC Plasma Simulation Code with Dynamic Domain Decomposition	Plasma and Fusion Research	8	Special Issue 1	2401149	2013	refereed
334	M. Itagaki, K. Ishimaru, Y. Matsumoto, K. Watanabe, R. Seki, Y. Suzuki	Improved three-dimensional CCS method analysis for the reconstruction of the peripheral magnetic field structure in a finite beta helical plasma	Plasma and Fusion Research	8	Regular Issue	1402134-1-1402134-14	2013	refereed
335	P. Drevelow, S. Masuzaki, S. Bozhenkov, Y. Feng, M. Jakubowski, Y. Suzuki, R. Wolf, H. Yamada	Comparison of Observed Divertor Heat Flux and Modeling Results at LHD	Plasma and Fusion Research	8	Special Issue 1	2402126-1-2402126-4	2013	refereed
336	K. Tanaka, M. Jakubowski, A. Dinklage, Y. Suzuki, M. Goto, T. Morisaki, S. Sakakibara, Y. Narushima, T. Akiyama, T. Tokuzawa, K. Kawahata, R. Yasuhara, I. Yamada, S. Masuzaki, M. Yoshinuma, K. Ida, L. Vyacheslavov, C. Michael, D. Mikkelsen, T. Evans	Effects of Resonant Magnetic Perturbation on Particle Transport in LHD	Plasma and Fusion Research	8	Special Issue 1	2402141-1-2402141-8	2013	refereed
337	Y. Takemura, S. Sakakibara, K. Watanabe, K. Ichiguchi, K. Ida, Y. Suzuki, S. Ohdachi, Y. Narushima, I. Yamada, K. Tanaka, H. Yamada	Rotation of Interchange Instability in the Large Helical Device	Plasma and Fusion Research	8	Regular Issue	1402123-1-1402123-6	2013	refereed
338	A. Shimizu, T. Ido, M. Nishiura, R. Makino, M. Yokoyama, H. Takahashi, H. Igami, Y. Yoshimura, S. Kubo, T. Shimozuma, N. Tamura	Bifurcation-like behavior of electrostatic potential in LHD	Plasma and Fusion Research	8	Special Issue 1	2402122-1-2402122-5	2013	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
339	T. Ozaki, H. Shiraga, Y. Arikawa, S. Fujioka, H. Sakagami, Z. Zhang, A. Sunahara, H. Nagatomo, T. Johzaki, T. Namimoto, M. Taga, S. Kojima, Y. Abe, K. Ishihara, T. Nagai, S. Sakata, S. Hattori, Y. Sakawa, H. Nishimura, H. Azechi	Hot Electron Spectra in Plain, Cone and Integrated Targets for FIREX-I using Electron Spectrometer	Plasma and Fusion Research	8	Special Issue 1	2404125-1-2404125-4	2013	refereed
340	T. Itoh, Y. Fujita, S. Ikuno, H. Nakamura	Investigation of Numerical Stability of Electromagnetic Wave Propagation Simulation using Meshless Time-Domain Method	Plasma and Fusion Research	8	Special Issue 1	2401101-1-2401101-5	2013	refereed
341	R. Seki, M. Sato, K. Watanabe, H. Funaba, Y. Suzuki, S. Sakakibara, A. Fukuyama, S. Murakami, N. Nakajima	Development of Transport Model in Reactor Plasmas based on LHD Experiment Scaling	Plasma and Fusion Research	8	Special Issue 1	2403089-1-2403089-5	2013	refereed
342	M. Sasaki, N. Kasuya, M. Yagi, K. Itoh, Y. Nagashima, S. Inagaki, S. Itoh	Statistical Analyses of Turbulent Particle and Momentum Fluxes in a Cylindrical Magnetized Plasma	Plasma and Fusion Research	8	Special Issue 1	2401113-1-2401113-5	2013	refereed
343	Y. Miwa, N. Kasuya, M. Sasaki, S. Inagaki, K. Itoh, M. Yagi, A. Fujisawa, Y. Nagashima, M. Lesur, T. Kobayashi, S. Yamada, T. Yamashita, S. Otsubo, S. Kakigawa, T. Mitsuzono, H. Fujino, S. Itoh	Evaluation of Excitation Conditions of ITG Modes in the PANTA	Plasma and Fusion Research	8	Special Issue 1	2403133-1-2403133-5	2013	refereed
344	N. Kasuya, S. Sugita, M. Sasaki, S. Inagaki, M. Yagi, K. Itoh, S. Itoh	Evaluation of Spatial Variation of Nonlinear Energy Transfer by Use of Turbulence Diagnostic Simulator	Plasma and Fusion Research	8	Special Issue 1	2403070-1-2403070-5	2013	refereed
345	S. Nishimura, Y. Todo, D. Spong, Y. Suzuki, N. Nakajima	Simulation Study of Alfvén-Eigenmode-Induced Energetic Ion Transport in LHD	Plasma and Fusion Research	8	Special Issue 1	2403090-1-2403090-6	2013	refereed
346	Y. Fujita, T. Itoh, H. Nakamura, S. Ikuno	Three-Dimensional Analysis of Electromagnetic Wave Propagation using Meshless Time Domain Method	Plasma and Fusion Research	8	Special Issue 1	2401061-1-2401061-4	2013	refereed
347	S. Matsuoka, S. Satake, H. Takahashi, A. Wakasa, M. Yokoyama, T. Ido, A. Shimizu, T. Shimozuma, S. Murakami	Formation of electron-root radial electric field and its effect on thermal transport in LHD high Te plasma	Plasma and Fusion Research	8	Regular Issue	1403039-1-1403039-7	2013	refereed
348	T. Takayama, A. Kamitani, H. Nakamura	Numerical Investigations on Detectability of Crack by Contactless jC-Measurement Method	Plasma and Fusion Research	8	Special Issue 1	2401025-1-2401025-4	2013	refereed
349	Y. Tomita, G. Kawamura, Z. Huang, Y. Pan, L. Yan	Secondary Electron Emission from a Negatively Charged Spherical Dust Particle by Electron	Plasma and Fusion Research	8	Special Issue 1	2401028-1-2401028-4	2013	refereed
350	M. Nunami, T. Watanabe, H. Sugama	Relation among ITG Turbulence, Zonal Flows and Transport in Helical Plasmas	Plasma and Fusion Research	8	Regular Issue	1203019-1-1203019-3	2013	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
351	M. Yokoyama, C. Suzuki, R. Seki, M. Osakabe, M. Yoshinuma, M. Sato, A. Wakasa, S. Murakami, A. Fukuyama, Y. Suzuki, K. Ida, H. Lee	Development of Integrated Transport Analysis Suite for LHD Plasmas Towards Transport Model Validation and Increased Predictability	Plasma and Fusion Research	8	Special Issue 1	2403016-1-2403016-4	2013	refereed
352	M. Sasaki, K. Itoh, N. Kasuya, K. Hallatschek, S. Itoh	On a Nonlinear Dispersion Effect of Geodesic Acoustic Modes	Plasma and Fusion Research	8	Regular Issue	1403010-1-1403010-6	2013	refereed
353	S. Nishimura, Y. Todo, D. Spong, Y. Suzuki, N. Nakajima	Simulation Study of Alfvén-Eigenmode-Induced Energetic Ion Transport in LHD	Plasma and Fusion Research	8		2403090	2013	refereed
354	S. Inagaki, T. Tokuzawa, T. Kobayashi, S. Itoh, K. Itoh, K. Ida, S. Kubo, T. Shimozuma, N. Tamura, A. Fujisawa, N. Kasuya, H. Tsuchiya, Y. Nagayama, K. Kawahata, H. Yamada, A. Komori	New Analysis Method of Dynamical Transport	Plasma and Fusion Research	8	Regular Issue		2013	refereed
355	Y. Suzuki, K. Ida, K. Kamiya, M. Yoshinuma, H. Tsuchiya, S. Inagaki, S. Sakakibara, K. Watanabe, Y. Narushima, S. Ohdachi, I. Yamada, R. Yasuhara, K. Tanaka, T. Akiyama, H. Yamada	Investigation of radial electric field in the edge region and magnetic field structure in the Large Helical Device	Plasma Physics and Controlled Fusion	55	12	124042-1-124042-8	2013	refereed
356	R. Kanno, M. Nunami, S. Satake, H. Takamaru, M. Okamoto	Dependence of radial thermal diffusivity on parameters of toroidal plasma affected by resonant magnetic perturbations	Plasma Physics and Controlled Fusion	55	6	65005	2013	refereed
357	S. Lazerson, S. Sakakibara, Y. Suzuki	A Magnetic Diagnostic Code for 3D Fusion Equilibria	Plasma Physics and Controlled Fusion	55	2	025014-1-025014-8	2013	refereed
358	H. Miura, K. Araki	Coarse-graining study of homogeneous and isotropic Hall magnetohydrodynamics turbulence	Plasma Physics and Controlled Fusion	55	1	014012-1-4	2013	refereed
359	T. Watanabe, H. Sugama, M. Nunami, K. Tanaka, M. Nakata	Gyrokinetic simulations of entropy transfer in high ion temperature LHD plasmas	Plasma Physics and Controlled Fusion	55	1	014017-1-6	2013	refereed
360	S. Sakakibara, Y. Suzuki, Y. Narushima, K. Watanabe, Y. Takemura, S. Ohdachi, K. Ida, M. Yoshinuma, K. Narihara, I. Yamada, K. Tanaka, T. Tokuzawa, H. Yamada	Modification of the magnetic field structure of high-beta plasmas with a perturbation field in the Large Helical Device	Plasma Physics and Controlled Fusion	55	1	014014-1-6	2013	refereed
361	H. Lee, K. Ida, M. Osakabe, M. Yokoyama, C. Suzuki, K. Nagaoka, R. Seki, M. Yoshinuma, N. Tamura	Dynamic transport study of heat and momentum transport in a plasma with improved ion confinement in the Large Helical Device	Plasma Physics and Controlled Fusion	55	1	014011-1-5	2013	refereed
362	K. Ichiguchi, S. Sakakibara, S. Ohdachi, B. Carreras	Numerical magnetohydrodynamic analysis of Large Helical Device plasmas with magnetic axis swing	Plasma Physics and Controlled Fusion	55	1	014009-1-4	2013	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
363	R. Horiuchi, M. Den, T. Tanaka, H. Ohtani, S. Usami, S. Nishimura, S. Toda, Y. Narushima, M. Yagi	Macro- and microphysics of magnetic reconnection in a multi-hierarchy open system Influence of resonant magnetic perturbation on a rotating helical plasma	Plasma Physics and Controlled Fusion Plasma Physics and Controlled Fusion	55	1	014008-1-7	2013	refereed
364	C. Suzuki, K. Ida, Y. Suzuki, M. Yoshida, M. Emoto, M. Yokoyama	Development and application of real-time magnetic coordinate mapping system in the Large Helical Device	Plasma Physics and Controlled Fusion	55	1	014013-1-5	2013	refereed
365	S. Usami, S. Zenitani	Special Topic Articles: Overview and Prospect - Frontier Researches in Magnetic Reconnection - 5. Problems and Future of Reconnection Research 5.1	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	89	12	861-863	2013	unrefereed
366	Y. Ono, R. Matsumoto, M. Hoshino, T. Shimizu, R. Horiuchi	Special Topic Articles: Overview and Prospect - Frontier Researches in Magnetic Reconnection - 6. Summary - Present and Future of Magnetic Reconnection Research -	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	89	12	880-884	2013	unrefereed
367	R. Horiuchi	Special Topic Articles: Overview and Prospect - Frontier Researches in Magnetic Reconnection - 2. Recent Researches on Fast Magnetic Reconnection Mechanism 2.1 Dissipation of Current Sheet	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	89	11	759-764	2013	unrefereed
368	Y. Ono, R. Matsumoto, M. Hoshino, T. Shimizu, R. Horiuchi	Special Topic Articles: Overview and Prospect - Frontier Researches in Magnetic Reconnection 1. Introduction - Rapid Progress in Interdisciplinary Research of Magnetic Reconnection	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	89	11	753-758	2013	unrefereed
369	A. Iwamoto, T. Fujimura, M. Nakai, T. Norimatsu, H. Sakagami, H. Shiraga, H. Azechi	Review Papers: Development of Cryogenic Targets for Fast Ignition Laser Fusion Experiment	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	89	8	517-528	2013	refereed
370	T. Johzaki, A. Sunahara, H. Nagatomo, H. Sakagami, S. Fujioke, H. Shiraga, K. Mima	Contributed Papers: Enhancement of Energy Coupling Efficiency in Fast-Ignition Laser Fusion by Electron Beam Guiding with Self-Generated Magnetic Field	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	89	7	456-461	2013	refereed
371	T. Yamamoto, M. Emoto, H. Nakanishi	Special Topic Articles: Status of Remote Experiments for ITER 3. Technologies for High-Speed Data Transfer and Remote Experiments' Data Analyses	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	89	7	474-478	2013	unrefereed
372	K. Ida, K. Kamiya, Y. Suzuki	Commentary: Plasma Boundary of 3D MHD Equilibrium Inferred from Flow Patterns	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	89	5	319-327	2013	unrefereed
373	H. Naitou, S. Satake	Lecture Note: Methods of Fusion Plasma Simulation - Utilizing Massively-Parallel Computation - 5. Coding Techniques of Particle Simulations	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	89	4	245-260	2013	unrefereed
374	T. Watanabe, Y. Idomura		プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	89	3	171-179	2013	unrefereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
376	H. Miura, Y. Todo, T. Gotoh	Methods of Fusion Plasma Simulation —Utilizing Massively-Parallel Computation— 3. Coding Techniques of MHD Simulations	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	89	2	119-127	2013	unrefereed
377	H. Sakagami		プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	89	1	49-56	2013	unrefereed
378	T. Watanabe	Lecture Note: Methods of Fusion Plasma Simulation – Utilizing Massively-Parallel Computation – 1. Introduction	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	89	1	45-48	2013	unrefereed
379	H. Sugama, T. Watanabe	Studies of Turbulence in Magnetized Plasmas Based on Gyrokinetic Theory: From Fusion to Space	日本物理学会誌(BUTSURI)	68	5	296-304	2013	unrefereed

論文リスト 2014年 / Published Papers related to NSRP in 2014

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
380	H. Takahashi, T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Igami, S. Ito, Y. Mizuno, K. Okada, T. Muto, K. Nagaoka, S. Murakami, M. Osakabe, I. Yamada, H. Nakano, M. Yokoyama, T. Ido, A. Shimizu, R. Seki, K. Ida, M. Yoshinuma, T. Kariya, R. Minami, T. Imai	Extension of High Te Regime with Upgraded ECRH System in the LHD	AIP conference proceedings	1580		145	2014	unrefereed
381	Y. Feng, H. Frerichs, M. Kobayashi, A. Bader, F. Effenberg, D. Harting, H. Hoelbe, J. Huang, G. Kawamura, J. Lore, T. Lunt, D. Reiter, O. Schmitz, D. Sharma	Recent Improvements in the EMC3-Eirene Code	Contributions to Plasma Physics	54	4-6	426-431	2014	refereed
382	K. Kamiya, G. Matsunaga, M. Honda, N. Miyato, H. Urano, Y. Kamada, K. Ida, K. Itoh	Edge Radial Electric Field Formation after the L-H Transition on JT-60U	Contributions to Plasma Physics	54	4-6	591-598	2014	refereed
383	G. Kawamura, Y. Feng, M. Kobayashi, M. Shoji, T. Morisaki, S. Masuzaki, Y. Tomita	First EMC3-EIRENE simulations with divertor legs of LHD in realistic device geometry	Contributions to Plasma Physics	54	4-6	437-441	2014	refereed
384	K. Yamanaka, S. Urushidani, H. Nakanishi, T. Yamamoto, Y. Nagayama	A TCP/IP-based constant-bit-rate file transfer protocol and its extension to multipoint data delivery	Fusion Engineering and Design	89	5	770-774	2014	refereed
385	H. Nakanishi, M. Ohsuna, M. Kojima, S. Imazu, M. Nonomura, M. Emoto, T. Yamamoto, Y. Nagayama, T. Ozeki, N. Nakajima, K. Ida, O. Kaneko	Revised cloud storage structure for light-weight data archiving in LHD	Fusion Engineering and Design	89	5	707-711	2014	refereed
386	S. Saito, A. Ito, A. Takayama, H. Nakamura	Grain size dependence of penetration depth of hydrogen injection into polycrystalline graphite by molecular simulation	Japanese Journal of Applied Physics	53	11S	11RF04	2014	refereed
387	M. Hashida, L. Gemini, T. Nishii, Y. Miyasaka, H. Sakagami, M. Shimizu, S. Inoue, J. Limpouch, T. Mocek, S. Sakabe	Periodic Grating Structures on Metal Self-organized by Double-pulse Irradiation	Journal of Laser Micro/Nanoengineering	9	3	234-237	2014	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
388	A. Takayama, A. Ito, Y. Oda, H. Nakamura	First principles investigation of cluster consisting of hydrogen-helium atoms interstitially-trapped in tungsten	Journal of Nuclear Materials	463		355-358	2014	refereed
389	S. Toda, M. Nunami, A. Ishizawa, T. Watanabe, H. Sugama	How to apply a turbulent transport model based on a gyrokinetic simulation for the ion temperature gradient mode in helical plasmas	Journal of Physics: Conference Series	561		12020	2014	refereed
390	S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, M. Den	Multi-Hierarchy Simulation of Collisionless Driven Reconnection by Real-Space Decomposition	Journal of Physics: Conference Series	561	1	012021-1-10	2014	refereed
391	T. Watanabe, Y. Idomura, S. Maeyama, M. Nakata, H. Sugama, M. Nunami, A. Ishizawa	Exploring phase space turbulence in magnetic fusion plasmas	Journal of Physics: Conference Series	510		12045	2014	refereed
392	A. Ishizawa	Commentary: Two- and Gyro-Fluid Models and their Application to MHD Instabilities	Journal of Plasma and Fusion Research	90	4	213-227	2014	refereed
393	A. Sanpei, K. Nishimura, S. Masamune, H. Tanaka, H. Himura, S. Ohdachi, N. Mizuguchi, T. Akiyama	Measurement and Evaluation of 3-D Structure in Low-Aspect-Ratio RFP RELAX with Dual SXR Imaging System	JPS Conference Proceedings	1	1	015027-1-015027-4	2014	refereed
394	M. Sasaki, N. Kasuya, K. Itoh, M. Yagi, S. Itoh	Dynamical response of turbulent structures in cylindrical magnetized plasmas	JPS Conference Proceedings	1		015011-1-015011-5	2014	refereed
395	A. Matsuyama, M. Yagi, Y. Kagei, N. Nakajima	Drift resonance effect on stochastic runaway electron orbit in the presence of low-order magnetic perturbations	Nuclear Fusion	54	12	123007	2014	refereed
396	M. Sasaki, N. Kasuya, K. Itoh, M. Yagi, S. Itoh	Nonlinear competition of turbulent structures and improved confinement in magnetized cylindrical plasmas	Nuclear Fusion	54	11	114009	2014	refereed
397	S. Itoh, K. Itoh	Zero-dimensional model for the critical condition for the L?H transition in the flux?gradient relation	Nuclear Fusion	54	11	114017	2014	refereed
398	M. Honda, S. Satake, Y. Suzuki, G. Matsunaga, K. Shinohara, M. Yoshida, A. Matsuyama, S. Ide, H. Urano	Experimental analyses and predictive simulations of toroidal rotation driven by the neoclassical toroidal viscosity in rippled tokamaks	Nuclear Fusion	54	11	114005	2014	refereed
399	S. Koike, S. Kitajima, A. Okamoto, K. Ishii, Y. Sato, J. Tachibana, T. Oku, K. Shimizu, S. Inagaki, Y. Suzuki, H. Takahashi, M. Takayama	Bursting high-frequency fluctuation observed in biased plasma in TU-Heliac	Nuclear Fusion	54	11	114013	2014	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
400	T. Yamada, S. Inagaki, T. Kobayashi, Y. Nagashima, T. Mitsuzono, Y. Miwa, K. Nakanishi, H. Fujino, M. Sasaki, N. Kasuya, M. Lesur, Y. Kosuga, A. Fujisawa, S. Itoh, K. Itoh	End plate biasing experiments in linear magnetized plasmas	Nuclear Fusion	54	11	114010	2014	refereed
401	J. Cheng, J. Dong, K. Itoh, L. Yan, W. Hong, K. Zhao, Z. Huang, X. Ji, W. Zhong, D. Yu, S. Itoh, L. Nie, X. Song, Q. Yang, X. Ding, X. Zou, X. Duan, Y. Liu	Low?intermediate?high confinement transition in HL-2A tokamak plasmas	Nuclear Fusion	54	11	114004	2014	refereed
402	S. Inagaki, T. Tokuzawa, T. Kobayashi, S. Itoh, K. Itoh, K. Ida, A. Fujisawa, S. Kubo, T. Shimozuma, N. Tamura, N. Kasuya, H. Tsuchiya, Y. Nagayama	Study of Non-linear Coupling of Fluctuations at Long Distance in LHD	Nuclear Fusion	54	11	114014	2014	refereed
403	A. Bierwage, Y. Todo, N. Aiba, K. Shinohara	Dynamics of low-n shear Alfvén modes driven by energetic N-NB ions in JT-60U	Nuclear Fusion	54	10	104001	2014	refereed
404	Y. Todo, M. Zeeland, A. Bierwage, W. Heidbrink	Multi-phase simulation of fast ion profile flattening due to Alfvén eigenmodes in a DIII-D experiment	Nuclear Fusion	54	10	104012-1-104012-13	2014	refereed
405	T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida, N. Kasuya, K. Hoshino	Dynamics of edge limit cycle oscillation in the JFT-2M Tokamak	Nuclear Fusion	54	7	073017-1-14	2014	refereed
406	J. Miyazawa, Y. Suzuki, S. Satake, R. Seki, Y. Masaoka, S. Murakami, M. Yokoyama, Y. Narushima, M. Nunami, T. Goto, C. Suzuki, I. Yamada, R. Sakamoto, H. Yamada, A. Sagara	Physics analyses on the core plasma properties in the helical fusion DEMO reactor FFHR-d1	Nuclear Fusion	54	4	43010	2014	refereed
407	J. Miyazawa, Y. Suzuki, S. Satake, R. Seki, Y. Masaoka, S. Murakami, M. Yokoyama, Y. Narushima, M. Nunami, T. Goto, C. Suzuki, I. Yamada, R. Sakamoto, H. Yamada, A. Sagara	Physics Analyses on the Core Plasma Properties in the Helical Fusion DEMO Reactor FFHR-d1	Nuclear Fusion	54	43010	1-9	2014	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
408	K. Toi, S. Ohdachi, Y. Suzuki, F. Watanabe, K. Tanaka, S. Sakakibara, K. Ogawa, M. Isobe, X. Du, T. Akiyama, M. Goto, K. Ida, S. Masuzaki, T. Morisaki, S. Morita, K. Narihara, Y. Narushima, T. Tokuzawa, I. Yamada, R. Yasuhara, M. Yoshinuma, K. Kawahata, H. Yamada	Mitigation of large amplitude edge-localized modes by resonant magnetic perturbations on LHD	Nuclear Fusion	54	3	33001	2014	refereed
409	T. Ozaki, A. Sunahara, H. Shiraga, Y. Arikawa, S. Fujioka, H. Sakagami, Z. Zhang, H. Nagatomo, T. Johzaki, T. Namimoto, M. Taga, S. Kojima, Y. Abe, K. Ishihara, T. Nagai, S. Sakata, S. Hattori, Y. Sakawa, H. Nishimura, H. Azechi	Hot electron spectra in hole-cone shell targets and a new proposal of the target for fast ignition in laser fusion	Physica Scripta	2014	T161	14025	2014	refereed
410	K. Kamiya, M. Honda, H. Urano, M. Yoshida, Y. Kamada, K. Itoh	Boundary condition for toroidal plasma flow imposed at the separatrix in high confinement JT-60U plasmas with edge localized modes and the physics process in pedestal structure formation	Physics of Plasmas	21	12	122517	2014	refereed
411	D. Mikkelsen, M. Nunami, T. Watanabe, H. Sugama, K. Tanaka	Verification of gyrokinetic microstability codes with an LHD configuration	Physics of Plasmas	21	11	112305	2014	refereed
412	N. Kasuya, S. Sugita, S. Inagaki, K. Itoh, M. Yagi, S.	On violation of local closure of transport relation in high-temperature magnetized plasmas	Physics of Plasmas	21	11	110701	2014	refereed
413	S. Hudson, Y. Suzuki	Chaotic coordinates for the Large Helical Device	Physics of Plasmas	21	10	102505-1-102505-14	2014	refereed
414	D. Mikkelsen, K. Tanaka, M. Nunami, T. Watanabe, H. Sugama, M. Yoshinuma, K. Ida, Y. Suzuki, M. Goto, B. Wieland, I. Yamada, R. Yasuhara, T. Tokuzawa, T. Akiyama, N. Pablant	Quasilinear Carbon Transport in an Impurity Hole Plasma in LHD	Physics of Plasmas	21	8	082302-1-082302-1	2014	refereed
415	H. Miura, K. Araki	Structure transitions induced by the Hall term in homogeneous and isotropic magnetohydrodynamic turbulence	Physics of Plasmas	21	7	072313-1-072313-10	2014	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
416	H. Zhu, S. Chapman, R. Dendy, K. Itoh	Transitions to improved confinement regimes induced by changes in heating in zero-dimensional models for tokamak plasmas	Physics of Plasmas	21	6	62307	2014	refereed
417	H. Takahashi, T. Shimoizuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Igami, S. Ito, S. Kobayashi, Y. Mizuno, K. Okada, T. Muto, K. Nagaoka, S. Murakami, M. Osakabe, I. Yamada, H. Nakano, M. Yokoyama, T. Ido, A. Shimizu, R. Seki, K. Ida, M. Yoshinuma, T. Kariya, R. Minami, T. Imai	Extension of high T_e regime with upgraded electron cyclotron resonance heating system in the Large Helical Device	Physics of Plasmas	21	6	061506-1-061506-8	2014	refereed
418	R. Ueda, K. Watanabe, Y. Matsumoto, M. Itagaki, M. Sato, S. Oikawa	Characteristics of magnetic island formation due to resistive interchange instability in helical plasma	Physics of Plasmas	21	5	52502	2014	refereed
419	T. Tokuzawa, S. Inagaki, K. Ida, K. Itoh, T. Ido, A. Shimizu, H. Takahashi, S. Kitajima, N. Tamura, M. Yoshinuma, H. Tsuchiya, I. Yamada, K. Tanaka, T. Akiyama, Y. Nagayama, K. Kawahata, K. Watanabe, H. Yamada	Observation of multi-scale turbulence and non-local transport in LHD plasmas	Physics of Plasmas	21	5	055904-1-055904-6	2014	refereed
420	A. Ishizawa, T. Watanabe, H. Sugama, S. Maeyama, N. Nakajima	Electromagnetic gyrokinetic turbulence in finite-beta helical plasmas	Physics of Plasmas	21	5	055905-1-055905-10	2014	refereed
421	Y. Asahi, A. Ishizawa, T. Watanabe, H. Tsutsui, S. Tsuji-Iio	Regulation of electron temperature gradient turbulence by zonal flows driven by trapped electron modes	Physics of Plasmas	21	5	052306-1-052306-10	2014	refereed
422	S. Maeyama, A. Ishizawa, T. Watanabe, M. Nakata, N. Miyato, M. Yagi, Y. Idomura	Comparison between kinetic-ballooning-mode-driven turbulence and ion-temperature-gradient-driven turbulence	Physics of Plasmas	21	5	052301-1-052301-12	2014	refereed
423	H. Sugama, T. Watanabe, M. Nunami	Extended gyrokinetic field theory for time-dependent magnetic confinement fields	Physics of Plasmas	21	1	012515-1-012515-15	2014	refereed
424	T. Tokuzawa, S. Inagaki, A. Ejiri, R. Soga, I. Yamada, S. Kubo, M. Yoshinuma, K. Ida, C. Suzuki, K. Tanaka, T. Akiyama, N. Kasuya, K. Itoh, K. Watanabe, H. Yamada, K. Kawahata	Ka-band Microwave Frequency Comb Doppler Reflectometer System for the Large Helical Device	Plasma and Fusion Research	9	Regular Issue	1402149-1-1402149-6	2014	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
425	M. Yokoyama	A statistical approach for predicting thermal diffusivity profiles in fusion plasmas as a transport model	Plasma and Fusion Research	9	Regular Issue	1302137	2014	refereed
426	K. Ichiguchi, Y. Suzuki, M. Sato, Y. Todo, S. Sakakibara, S. Ohdachi, Y. Narushima	Three-dimensional Numerical Analysis of Pressure Driven Mode in RMP-Imposed LHD Plasma	Plasma and Fusion Research	9	Special Issue 2	3403134-1-3403134-5	2014	refereed
427	M. Shoji, Y. Tanaka, A. Pigarov, R. Smirnov, S. Masuzaki, G. Kawamura, Y. Uesugi, H. Yamada	Simulation Analysis of Dust-Particle Transport in the Peripheral Plasma in the Large Helical Device	Plasma and Fusion Research	9	Special Issue 2	3403132-1-3403132-4	2014	refereed
428	Y. Oda, A. Ito, A. Takayama, H. Nakamura	First-Principles Study on Migration of Vacancy in Tungsten	Plasma and Fusion Research	9	Special Issue 2	3401117-1-	2014	refereed
429	R. Ishizaki, N. Nakajima	MHD Simulations of Pellet Injection in the LHD	Plasma and Fusion Research	9	Special Issue 2	33403130-1-3403130-5	2014	refereed
430	R. Goto, H. Miura, A. Ito, M. Sato, T. Hatori	Hall and gyro-viscosity effects on the Rayleigh-Taylor instability in a 2D rectangular slab	Plasma and Fusion Research	9	Regular Issue	1403076-1-	2014	refereed
431	R. Horiuchi, S. Usami, H. Ohtani	Influence of a Guide Field on Collisionless Driven Reconnection	Plasma and Fusion Research	9	Regular Issue	1401092-1-	2014	refereed
432	T. Yanagawa, H. Sakagami, A. Sunahara, H. Nagatomo	Implosion Simulation by Hydro Code Coupled with Laser Absorption using New Raytrace Algorithm	Plasma and Fusion Research	9	Special Issue 2	3404090-1-	2014	refereed
433	S. Fujiwara, M. Hashimoto, Y. Tamura, H. Nakamura, R. Horiuchi	Molecular Dynamics Simulation of Micellar Shape Transition in Amphiphilic Solutions	Plasma and Fusion Research	9	Special Issue 2	3401067-1-3401067-4	2014	refereed
434	Y. Narushima, S. Sakakibara, S. Ohdachi, K. Watanabe, S. Nishimura, Y. Suzuki, M. Furukawa, Y. Takemura, K. Ida, M. Yoshinuma, I. Yamada	Observation of hysteretic magnetic island response to Resonant Magnetic Perturbation in LHD	Plasma and Fusion Research	9	Regular Issue	1202066-1-1202066-2	2014	refereed
435	Y. Fujita, S. Ikuno, H. Nakamura	Transmission Efficiency in Complex-Shaped Waveguide using Real Metals	Plasma and Fusion Research	9	Special Issue 2	3401074-1-	2014	refereed
436	Y. Todo, A. Bierwage	Large-Scale Simulation of Energetic Particle Driven Magnetohydrodynamic Instabilities in ITER Plasmas	Plasma and Fusion Research	9	Special Issue 2	3403068-1-	2014	refereed
437	K. Hagita, H. Ohtani, T. Kato, S. Ishiguro	TOKI compression for plasma particle simulation	Plasma and Fusion Research	9	Special Issue 2	340340108-3-1-3401083-6	2014	refereed
438	N. Ohno, H. Ohtani	Development of in-situ visualization tool for PIC simulation	Plasma and Fusion Research	9	Special Issue 2	3401071-1-	2014	refereed
439	M. Nakata, A. Matsuyama, N. Aiba, S. Maeyama, M. Nunami, T. Watanabe	Local gyrokinetic Vlasov simulations with realistic tokamak MHD equilibrium	Plasma and Fusion Research	9	Regular Issue	1403029	2014	refereed
440	T. Gotoh, T. Watanabe, H. Miura	Spectrum of Passive Scalar at Very High Schmidt Number in Turbulence	Plasma and Fusion Research	9	Special Issue 2	3401019-1-	2014	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
441	M. Yokoyama, R. Seki, C. Suzuki, M. Emoto, K. Ida, M. Osakabe, S. Murakami, Y. Suzuki, S. Satake, M. Nunami, A. Fukuyama, H. Yamada	Integration of Large-Scale Simulations and Numerical Modelling Tools in Close Link with the LHD Experiment	Plasma and Fusion Research	9	Special Issue 2	3402017-1-3402017-5	2014	refereed
442	S. Morita, E. Wang, M. Kobayashi, C. Dong, T. Oishi, Y. Feng, M. Goto, X. Huang, S. Masuzaki, I. Murakami, Y. Suzuki, T. Watanabe	Two-dimensional study of edge impurity transport in the Large Helical Device	Plasma Physics and Controlled Fusion	56	9	094007-1-094007-10	2014	refereed
443	M. Osakabe, H. Takahashi, K. Nagaoka, S. Murakami, I. Yamada, M. Yoshinuma, K. Ida, M. Yokoyama, R. Seki, H. Lee, Y. Nakamura, N. Tamura, S. Sudo, K. Tanaka, T. Seki, Y. Takeiri, H. Yamada, O. Kaneko	Impact of carbon impurities on the confinement of high-ion-temperature discharges in the Large Helical Device	Plasma Physics and Controlled Fusion	56	9	095011-1-10	2014	refereed
444	H. Usui, A. Nagara, M. Nunami, M. Matsumoto	Development of a Computational Framework for Block-Based AMR Simulations	Procedia Computer Science	29		2351-2359	2014	refereed
445	T. Ozaki, S. Kojima, Y. Arikawa, H. Shiraga, H. Sakagami, S. Fujioka, R. Kato	An Electron/Ion Spectrometer with the Ability of Low Energy Electron Measurement for Fast Ignition Experiment	Review of Scientific Instruments	85	11	11E113	2014	refereed
446	T. Kobayashi, G. Birkenmeier, E. Wolfrum, F. Laggner, M. Willensdorfer, U. Stroth, S. Inagaki, S. Itoh, K. Itoh	Method for estimating the propagation direction of a coherent plasma structure using a one-dimensional diagnostic array	Review of Scientific Instruments	85	8	083507-1-083507-6	2014	refereed
447	K. Nishimura, A. Sanpei, H. Tanaka, G. Ishii, R. Koderu, R. Ueba, H. Himura, S. Masamune, S. Ohdachi, N. Mizuguchi	2D electron temperature diagnostic using soft x-ray imaging technique	Review of Scientific Instruments	85	3	33502	2014	refereed
448	S. Ishiguro, H. Ohtani	Commentary: Experience the Fusion Plasma -to Experience is to Believe-	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	90	6	325-331	2014	unrefereed
449	K. Kusano, H. Hasegawa	Chapter 1 "Preface", Special Topic Articles "Space Climatology"	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	90	2	105-106	2014	unrefereed
450	R. Horiuchi	Project Review: The Numerical Simulation Research Project at the National Institute for Fusion Science	プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research)	90	1	2-39	2014	unrefereed

論文リスト 2015年 / Published Papers related to NSRP in 2015

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
451	M. Nakata, M. Nunami, T. Watanabe, H. Sugama	Improved collision operator for plasma kinetic simulations with multi-species ions and electrons	Computer Physics Communications	inpress			2015	refereed
452	Y. Tomita, Z. Huang, Y. Pan, G. Kawamura, L. Yan	Secondary electron emission from a charged spherical dust particle due to electron incidence according to OML model	Journal of Nuclear Materials	463		881-884	2015	refereed
453	S. Dai, S. Liu, J. Sun, A. Kirschner, G. Kawamura, D. Tskhakaya, R. Ding, G. Luo, D. Wang	Modelling of surface evolution of rough surface on divertor target in fusion devices	Journal of Nuclear Materials	463		372-376	2015	refereed
454	A. 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, H. Nakamura	Hybrid simulation research on formation mechanism of tungsten nanostructure induced by helium plasma irradiation	Journal of Nuclear Materials	463		109-115	2015	refereed
455	M. Shoji, S. Masuzaki, Y. Tanaka, A. Pigarov, R. Smirnov, G. Kawamura, Y. Uesugi, H. Yamada	Analysis of the three-dimensional trajectories of dusts observed with a stereoscopic fast framing camera in the Large Helical Device	Journal of Nuclear Materials	463		861-864	2015	refereed
456	S. Morita, M. Kobayashi, T. Oishi, H. Zhang, M. Goto, Z. Cui, C. Dong, L. Hu, X. Huang, G. Kawamura, S. Masuzaki, I. Murakami, E. Wang	Effect of neutral hydrogen on edge impurity behavior in stochastic magnetic field layer of Large Helical Device	Journal of Nuclear Materials	463		644-648	2015	refereed
457	M. Kobayashi, Y. Feng, Y. Xu, F.L. Tabares, K. Ida, O. Schmitz, T.E. Evans, H. Frerichs, Y. Liang, A. Bader, K. Itoh, H. Yamada, Ph. Ghendrih, G. Ciruolo, D. Tafalla, A. Lopez-Fraguas, H.Y. Guo, Z.Y. Cui, D. Reiter, N. Asakura, U. Wenzel, S. Morita, N. Ohno, B.J. Peterson, S. Masuzaki	Impact of 3D magnetic field structure on boundary and divertor plasmas in stellarator/heliotron devices	Journal of Nuclear Materials	463		2-10	2015	refereed
458	A. Ishizawa, S. Maeyama, T. Watanabe, H. Sugama, N. Nakajima	Electromagnetic gyrokinetic simulation of turbulence in torus plasmas	Journal of Plasma Physics	81	2	435810203-1-435810203-41	2015	refereed
459	T. Yanagawa, H. Sakagami, A. Sunahara, H. Nagatomo	Asymmetric implosion of a cone-guided target irradiated by Gekko XII laser	Laser and Particle Beams	33	3	367-378	2015	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
460	K. Ida, M. Yoshinuma, H. Tsuchiya, T. Kobayashi, C. Suzuki, M. Yokoyama, A. Shimizu, K. Nagaoka, S. Inagaki, K. Itoh	Flow damping due to stochasticization of the magnetic field	Nature Communications	6		5816	2015	refereed
461	Y. Todo, M. Zeeland, A. Bierwage, W. Heidbrink, M. Austin	Validation of comprehensive magnetohydrodynamic hybrid simulations for Alfvén eigenmode induced energetic particle transport in DIII-D plasmas	Nuclear Fusion	55	7	73020	2015	refereed
462	S. Inoue, Y. Ono, H. Tanabe, R. Horiuchi, C. Cheng	Numerical study of energy conversion mechanism of magnetic reconnection in the presence of high guide field	Nuclear Fusion	55	8	83014	2015	refereed
463	T. Ido, M. Osakabe, A. Shimizu, T. Watari, M. Nishiura, K. Toi, K. Ogawa, K. Itoh, I. Yamada, R. Yasuhara, Y. Yoshimura, S. Kato	Identification of the energetic-particle driven GAM in the LHD	Nuclear Fusion	55	8	83024	2015	refereed
464	K. Ichiguchi, Y. Suzuki, M. Sato, Y. Todo, T. Nicolas, S. Sakakibara, S. Ohdachi, Y. Narushima, B. Carreras	Three-dimensional MHD analysis of heliotron plasma with RMP	Nuclear Fusion	55	7	73023	2015	refereed
465	Y. Narushima, S. Sakakibara, S. Ohdachi, Y. Suzuki, K. Watanabe, S. Nishimura, S. Satake, B. Huang, M. Furukawa, Y. Takemura, K. Ida, M. Yoshinuma, I. Yamada	Experimental observation of response to Resonant Magnetic Perturbation and its hysteresis in LHD	Nuclear Fusion	55	7	73004	2015	unrefereed
466	T. Goto, J. Miyazawa, R. Sakamoto, R. Seki, C. Suzuki, M. Yokoyama, S. Satake, A. Sagara, F. Group	Integrated physics analysis of plasma start-up scenario of helical reactor FFHR-d1	Nuclear Fusion	55	6	63040	2015	refereed
467	M. Shoji, H. Kasahara, M. Tokitani, T. Seki, K. Saito, S. Kamio, R. Seki, Y. Tanaka, A. Pigarov, R. Smirnov, G. Kawamura, S. Masuzaki, Y. Uesugi, T. Muto	Studies of dust transport in long pulse plasma discharges in the large helical device	Nuclear Fusion	55	5	53014	2015	refereed
468	Y. Hamada, T. Watari, A. Nishizawa, O. Yamagishi, K. Narihara, K. Ida, Y. Kawasumi, T. Ido, M. Kojima, K. Toi	Microtearing mode (MTM) turbulence in JIPPT-IIU tokamak plasmas	Nuclear Fusion	55	4	43008	2015	refereed
469	T. Jozaki, T. Taguchi, Y. Sentoku, A. Sunahara, H. Nagatomo, H. Sakagami, K. Mima, S. Fujioaka, H. Shiraga	Control of an electron beam using strong magnetic field for efficient core heating in fast ignition	Nuclear Fusion	55	53022	1-7	2015	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有 / 無
470	A. Ishizawa, T. Watanabe, H. Sugama, M. Nunami, K. Tanaka, S. Maeyama, N. Nakajima	Turbulent transport of heat and particles in a high ion temperature discharge of the Large Helical Device	Nuclear Fusion	55	4	043024-1-043024-8	2015	refereed
471	K. Ichiguchi, S. Sakakibara, S. Ohdachi, B. Carreras	Multi-Scale MHD Analysis of LHD Plasma with Background Field Changing	Nuclear Fusion	55	4	43019	2015	refereed
472	K. Ida, J. Kwon, M. Leconte, W. Ko, S. Inagaki, Y. Todo, Y. Kosuga	The 4th Asia-Pacific Transport Working Group (APTWG) Meeting	Nuclear Fusion	55	1	017001-1-10	2015	refereed
473	K. Ida, Z. Shi, H. Sun, S. Inagaki, K. Kamiya, J. Rice, N. Tamura, P. Diamond, G. Dif-Pradalier, X. Zou, K. Itoh, S. Sugita, O. Gurcan, T. Estrada, C. Hidalgo, T. Hahm, A. Field, X. Ding, Y. Sakamoto, S. Oldenburger, M. Yoshinuma, T. Kobayashi, M. Jiang, S. Hahn, Y. Jeon, S. Hong, Y. Kosuga, J. Dong, S. Itoh	Towards an Emerging Understanding of Non-locality Phenomena and Non-local Transport	Nuclear Fusion	55	1	13022	2015	refereed
474	S. Sakakibara, K. Watanabe, Y. Takemura, M. Okamoto, S. Ohdachi, Y. Suzuki, Y. Narushima, K. Ida, M. Yoshinuma, K. Tanaka, T. Tokuzawa, I. Yamada, H. Yamada, Y. Takeiri, LHD Experiment Group	Characteristics of MHD instabilities limiting the beta value in LHD	Nuclear Fusion	55	8	83020	2015	refereed
475	T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida, K. Hoshino	Edge plasma dynamics during L-H transition in the JFT-2M tokamak	Nuclear Fusion	55	6	63009	2015	refereed
476	A. 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. Miyamoto, H. Nakamura	Molecular dynamics and Monte Carlo hybrid simulation for fuzzy tungsten nanostructure formation	Nuclear Fusion	55	7	73013	2015	refereed
477	T. Iwawaki, H. Habara, T. Yabuuchi, M. Hata, H. Sakagami, K. Tanaka	Slowdown mechanisms of ultraintense laser propagation in critical density plasma	Physical Review E	92	1	13106	2015	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
478	S. Fujioka, T. Johzaki, Y. Arikawa, Z. Zhang, M. Alesio, T. Ikenouchi, T. Ozaki, T. Nagai, Y. Abe, S. Kojima, S. Sakata, H. Inoue, M. Utsugi, S. Hattori, T. Hosoda, S. Lee, K. Shigemori, Y. Hironaka, A. Sunahara, H. Sakagami, K. Mima, Y. Fujimoto, K. Yamanoi, T. Norimatsu, S. Tokita, Y. Nakata, J. Kawanaka, T. Jitsuno, N. Miyanaga, M. Nakai, H. Nishimura, H. Shiraga, H. Nagatomo, H. Azechi	Heating efficiency evaluation with mimicking plasma conditions of integrated fast-ignition experiment	Physical Review E	91	6	63102	2015	refereed
479	X. Du, K. Toi, M. Osakabe, S. Ohdachi, T. Ido, K. Ida, K. Tanaka, M. Yokoyama, M. Yoshinuma, K. Ogawa, M. Isobe, K. Nagaoka, T. Ozaki, S. Sakakibara, R. Seki, Y. Suzuki	Resistive Interchange Modes Destabilized by Helically Trapped Energetic Ions in a Helical Plasma	Physical Review Letters	114	15	155003	2015	refereed
480	C. Cheng, S. Inoue, Y. Ono, R. Horiuchi	Physical Processes of Driven Magnetic Reconnection in Collisionless Plasmas: Zero Guide Field Case	Physics of Plasmas	22	10	101205	2015	refereed
481	H. Wang, Y. Todo, T. Ido, M. Osakabe	Simulation Study of High-Frequency Energetic Particle Driven Geodesic Acoustic Mode	Physics of Plasmas	22	9	92507	2015	refereed
482	H. Sugama, T. Watanabe, M. Nunami	Effects of collisions on conservation laws in gyrokinetic field theory	Physics of Plasmas	22	8	82306	2015	refereed
483	S. Matsuoka, S. Satake, R. Kanno, H. Sugama	Effects of magnetic drift tangential to magnetic surfaces on neoclassical transport in non-axisymmetric plasma	Physics of Plasmas	22	7	72511	2015	refereed
484	M. Toida, J. Inagaki	Effects of trapped electrons on ion reflection in an oblique shock wave	Physics of Plasmas	22	6	062305 (12pages)	2015	refereed
485	C. Moon, T. Kobayashi, K. Itoh, R. Hatakeyama, T. Kaneko	Ion scale nonlinear interaction triggered by disparate scale electron temperature gradient mode	Physics of Plasmas	22	5	52301	2015	refereed
486	M. Sasaki, N. Kasuya, T. Kobayashi, H. Arakawa, K. Itoh, F. Kohei, T. Yamada, M. Yagi, S. Itoh	Formation mechanism of steep wave front in magnetized plasmas	Physics of Plasmas	22	3	32315	2015	refereed
487	R. Goto, H. Miura, A. Ito, M. Sato, T. Hatori	Formation of large-scale structures with sharp density gradient through Rayleigh-Taylor growth in a 2D slab under the two-fluid and FLR effects	Physics of Plasmas	22	3	32115	2015	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	Page	Year	査読有/無
488	T. Watanabe, H. Sugama, A. Ishizawa, M. Nunami	Flux tube train model for local turbulence simulation of toroidal plasmas	Physics of Plasmas	22	2	22507	2015	refereed
489	Y. Asahi, A. Ishizawa, T. Watanabe, H. Sugama	Nonlinear Entropy Transfer in ETG-TEM Turbulence via TEM Driven Zonal Flows	Plasma and Fusion Research	10	Regular Issue	1403047	2015	refereed
490	M. Nunami, M. Nakata, T. Watanabe, H. Sugama	Development of Linearized Collision Operator for Multiple Ion Species in Gyrokinetic Flux-tube Simulations	Plasma and Fusion Research	10	Regular Issue	1403058	2015	refereed
491	C. Moon, K. Ida, T. Tokuzawa, K. Tanaka, M. Yoshinuma, T. Kobayashi, S. Inagaki, K. Itoh, LHD Experiment Group	Study of Nonlinear Behavior of Low-Frequency MHD mode Caused by Transition of Radial Electric Field in LHD	Plasma and Fusion Research	10	3402053		2015	refereed
492	T. Nicolas, K. Ichiguchi, M. Sato, Y. Todo, Y. Suzuki, A. Ishizawa, S. Sakakibara	Three-dimensional numerical analysis of two-fluid effects on interchange mode in heliotron plasmas	Plasma and Fusion Research	10	3403018		2015	refereed
493	S. Fujiwara, T. Miyata, M. Hashimoto, Y. Tamura, H. Nakamura, R. Horiuchi	Molecular Dynamics Simulation of Phase Behavior in a Bolaamphiphilic Solution	Plasma and Fusion Research	10		3401029-1-3401029-4	2015	refereed
494	T. Nicolas, K. Ichiguchi, M. Sato, Y. Todo, Y. Suzuki, A. Ishizawa, S. Sakakibara	Three-Dimensional Numerical Analysis of Ion Diamagnetic Effects on Interchange Mode in Heliotron Plasmas	Plasma and Fusion Research	10		3403018-1-3403018-6	2015	refereed
495	N. Kasuya, S. Sugita, S. Inagaki, K. Itoh, M. Yagi, S. Itoh	Simulation study of hysteresis in the gradient-flux relation in toroidal plasma turbulence	Plasma Physics and Controlled Fusion	57	4	44010	2015	refereed
496	K. Ida, T. Kobayashi, S. Inagaki, Y. Suzuki, S. Sakakibara, K. Itoh, H. Tsuchiya, C. Suzuki, M. Yoshinuma, Y. Narushima, M. Yokoyama, S. Itoh	Topology bifurcation of a magnetic flux surface in toroidal plasmas	Plasma Physics and Controlled Fusion	57	1	14036	2015	refereed
497	K. Itoh, T. Kobayashi, T. Ido, S. Itoh, K. Kamiya	Contribution of Geodesic Acoustic Modes in the Limit Cycle Oscillation near H-mode Transition in JFT-2M Plasmas	Plasma Physics and Controlled Fusion	57	9	92001	2015	refereed
498	H. Miura, K. Araki	Commentary: Physics of Hall Effects on MHD Turbulence and Its Modelling	プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research)	91	7	411-448	2015	unrefereed
499	H. Sugama	Lecture Note: Particle Kinetics – from Planets to Charged Particles, 2. Lie Transform Perturbation Theory for Hamiltonian Systems and its Application to Guiding_Center Motion	プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research)	1	91	51-68	2015	unrefereed

資 料 編 3

List of published papers by students in 2010–2015

学生論文リスト (2010-2015年) / List of published papers by students in 2010-2015

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	page	Year	査読有/無
1	M. Nakata, T. Watanabe, H. Sugama, W. Horton	Formation of coherent vortex streets and transport reduction in electron temperature gradient driven turbulence	Physics of Plasmas	17	4	042306-1-042306-13	2010	refereed
2	S. Maeyama, A. Ishizawa, T. Watanabe, M. Škorić, N. Nakajima, S. Tsuji-ŋo, H. Tsutsui	Effects of time-varying $E \times B$ flow on slab ion-temperature-gradient turbulence	Physics of Plasmas	17	6	062305-1-062305-9	2010	refereed
3	K. Saito, K. Ichiguchi, N. Ohyabu	Interaction between Static Magnetic Islands and Interchange modes in a Straight Heliotron Plasma with High Resistivity	Physics of Plasmas	17	6	062504-1-062504-14	2010	refereed
4	M. Yokoyama, S. Matsuoka, H. Funaba, K. Ida, K. Nagaoka, M. Yoshinuma, Y. Takeiri, O. Kaneko	Considerations from the Viewpoint of Neoclassical Transport Towards Higher Ion Temperature Heliotron Plasmas	Contributions to Plasma Physics	50	6-7	586-589	2010	refereed
5	M. Nakata, T. Watanabe, H. Sugama, W. Horton	Effects of parallel dynamics on vortex structures in electron temperature gradient driven turbulence	Physics of Plasmas	18	1	012303-1-012303-11	2011	refereed
6	K. Kashimura, J. Fukushima, M. Sato	Oxygen Partial Pressure Change with Metal Titanium Powder Nitriding under Microwave Heating	ISIJ International	51	2	181-185	2011	refereed
7	S. Matsuoka, S. Satake, M. Yokoyama, A. Wakasa, S. Murakami	Neoclassical electron transport calculation by using δf Monte Carlo method	Physics of Plasmas	18	3	032511-1-032511-11	2011	refereed
8	S. Matsuoka, S. Satake, M. Yokoyama, A. Wakasa	Radial Electric Field Formation Including Electron Radial Drift for a Core Electron-Root Confinement (CERC) Plasma in LHD	Plasma and Fusion Research	6		1203016-1-1203016-3	2011	refereed
9	M. Hata, H. Sakagami, A. Sunahara, T. Johzaki, H. Nagatomo	Effects of preformed plasma of CH foam on fast electron generation	Journal of Physics: Conference Series	244	2	022037-1-4	2010	unrefereed
10	H. Nakamura, A. Ito, S. Saito, Y. Tamura, S. Fujiwara, N. Ohno, S. Kajita	Comparison of Hydrogen Adsorption on Diamond and Graphite Surfaces	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue 2	S2072-1-S2072-4	2010	refereed
11	A. Ito, H. Okumura, S. Saito, H. Nakamura	Examination of Temperature Dependence of Chemical Sputtering on Graphite by Comparing the Langevin and Berendsen Thermostats	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue 2	S2020-1-S2020-4	2010	refereed
12	S. Saito, A. Ito, H. Nakamura	Molecular Dynamics Simulation of the Incident Angle Dependence of Reactions between Graphene and Hydrogen Atom	Plasma and Fusion Research	5	Special Issue 2	S2076-1-S2076-4	2010	refereed
13	A. Takayama, S. Saito, A. Ito, T. Kenmotsu, H. Nakamura	Extension of Binary-Collision-Approximation-Based Simulation Applicable to Any Structured Target Material	Japanese Journal of Applied Physics	50	1	01AB03-1-01AB03-4	2011	refereed
14	A. Ito, A. Takayama, S. Saito, N. Ohno, S. Kajita, H. Nakamura	Molecular Dynamics Simulation of Chemical Vapor Deposition of Amorphous Carbon: Dependence on H/C Ratio of Source Gas	Japanese Journal of Applied Physics	50	1S1	01AB01-1-01AB01-6	2011	refereed
15	H. Nakamura, A. Ito, S. Saito, A. Takayama, Y. Tamura, N. Ohno, S. Kajita	Molecular Dynamics Simulation of Hydrogen Injection onto Diamond Surfaces	Japanese Journal of Applied Physics	50		01AB04-1-01AB04-4	2011	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	page	Year	査読有/無
16	K. Saito, K. Ichiguchi, R. Ishizaki	Effect of parallel diffusion of equilibrium pressure on interaction between interchange mode and static magnetic island	Plasma and Fusion Research	6	7	2403072	2011	refereed
17	S. Saito, A. Ito, A. Takayama, T. Kenmotsu, H. Nakamura	Hybrid simulation between molecular dynamics and binary collision approximation codes for hydrogen injection into carbon materials	Journal of Nuclear Materials	415	1S	S208-S211	2011	refereed
18	H. Wang, Y. Todo	Interaction between Energetic Particles and Alfvén Eigenmodes in Reversed Shear Plasmas	Journal of the Physical Society of Japan	80	9	094501-1-094501-7	2011	refereed
19	S. Saito, A. Takayama, A. Ito, T. Kenmotsu, H. Nakamura	How to Combine Binary Collision Approximation and Multi-body Potential for Molecular Dynamics	Progress in Nuclear Science and	2		44-50	2011	refereed
20	S. Saito, A. Ito, H. Nakamura	Reaction between Graphene and Hydrogen under Oblique Injection	Journal of Applied Physics	110	8	084320-1-084320-9	2011	refereed
21	S. Saito, A. Ito, A. Takayama, H. Nakamura	Anisotropic Bond Orientation of Amorphous Carbon by Deposition	Japanese Journal of Applied Physics	51		01AC05-1-01AC05-5	2012	refereed
22	K. Saito, K. Ichiguchi, R. Ishizaki	Numerical Calculation of MHD Equilibria including Static Magnetic Islands in a Straight Heliotron Configuration by Means of a Field Line Tracing Method	Plasma and Fusion Research	7	5	2403032	2012	refereed
23	M. Hata, H. Sakagami, A. Sunahara, T. Johzaki, H. Nagatomo	Effects of CH foam preplasma on fast ignition	Laser and Particle Beams	30	2	189-197	2012	refereed
24	K. Saito, K. Ichiguchi, R. Ishizaki	Low Beta MHD Equilibrium Including a Static Magnetic Island for Reduced MHD Equations in a Straight Heliotron Configuration	Plasma and Fusion Research	7	7	3403018	2012	refereed
25	M. Hashida, Y. Miyasaka, M. Shimizu, T. Ogata, H. Sakagami, S. Tokita, S. Sakabe	Mechanism of femtosecond laser nano-ablation for metals	ALT Proceedings	1		140-141	2012	unrefereed
26	S. Inoue, S. Tokita, K. Otani, M. Hashida, M. Hata, H. Sakagami, T. Taguchi, S. Sakabe	Autocorrelation Measurement of Fast Electron Pulses Emitted through the Interaction of Femtosecond Laser Pulses with a Solid Target	Physical Review Letters	109	185001	1-5	2012	refereed
27	K. Saito, K. Ichiguchi, R. Ishizaki	Numerical Analysis of Resistive Interchange Mode in Equilibria Consistent with Static Magnetic Islands in a Straight Heliotron Configuration	Plasma and Fusion Research	7	12	1403156	2012	refereed
28	A. Ito, A. Takayama, S. Saito, H. Nakamura	Formation and Classification of Amorphous Carbon by Molecular Dynamics Simulation	Japanese Journal of Applied Physics	52	1S	01AL04-1-01AL04-7	2013	refereed
29	H. Wang, Y. Todo	Linear Properties of Energetic Particle Driven Geodesic Acoustic Mode	Physics of Plasmas	20	1	012506-1-012506-8	2013	refereed
30	S. Saito, A. Ito, A. Takayama, H. Nakamura	Structural Change of Single-Crystalline Graphite under Plasma Irradiation	Japanese Journal of Applied Physics	52	1	01AL02-1-01AL02-6	2013	refereed
31	H. Wang, Y. Todo, C. Kim	Hole-clump pair creation in the evolution of energetic-particle-driven geodesic acoustic modes	Physical Review Letters	110	15	155006-1-155006-5	2013	refereed
32	M. Hata, H. Sakagami, A. Das	Kinetic effects on robustness of electron magnetohydrodynamic structures	Physics of Plasmas	20	4	042303-1-042303-6	2013	refereed
33	M. Hata, H. Sakagami, T. Johzaki, H. Nagatomo	Effects of laser profiles on fast electron generation under the same laser energy	Laser and Particle Beams	31		371-377	2013	refereed

No	著者 / Author	タイトル / Title	雑誌名 / Journal	Vol	Issue	page	Year	査読有/無
34	T. Yanagawa, H. Sakagami, H. Nagatomo	Simulation analysis of the effects of an initial cone position and opening angle on a cone-guided implosion	Physics of Plasmas	20	10	102703-1-102703-7	2013	refereed
35	M. Hata, H. Sakagami, T. Johzaki, H. Nagatomo	EFFECTS OF LASER TEMPORAL PROFILE ON FAST ELECTRON CHARACTERISTICS	EPJ Web of Conferences	59	17004	17004-p.1-17004-p.4	2013	refereed
36	N. Kashima, H. Nakamura, A. Takayama, Y. Tamura, S. Kubo	Finite-Difference Time-Domain Simulation on Transmission of Millimeter Waves through Miter Bends	Japanese Journal of Applied Physics	52	11	11ND02-1-11ND02-2	2013	refereed
37	H. Nagatomo, T. Johzaki, A. Sunahara, H. Sakagami, I. Yanagawa, K. Mima	Optimum design of imploded core plasma for effective fast ignition at GXII	EPJ Web of Conferences	59	3007	1-4	2013	refereed
38	T. Yanagawa, H. Sakagami, H. Nagatomo	Three-dimensional simulations of asymmetric implosion for cone-guided targets	EPJ Web of Conferences	59		03008-p.1-03008-p.4	2013	refereed
39	H. Nakamura, N. Kashima, A. Takayama, K. Sawada, Y. Tamura, S. Fujiwara, S. Kubo	Optimization of a corrugated millimeter-wave waveguide and a miter bend by FDTD simulation	Journal of Physics: Conference Series	410		12046	2013	refereed
40	Y. Asahi, A. Ishizawa, T. Watanabe, H. Tsutsui, S. Tsuji-lio	Regulation of electron temperature gradient turbulence by zonal flows driven by trapped electron modes	Physics of Plasmas	21	5	052306-1-052306-10	2014	refereed
41	Y. Fujita, S. Ikuno, H. Nakamura	Transmission Efficiency in Complex-Shaped Waveguide using Real Metals	Plasma and Fusion Research	9	Special Issue 2	3401074-1-	2014	refereed
42	R. Goto, H. Miura, A. Ito, M. Sato, I. Hatori	Hall and gyro-viscosity effects on the Rayleigh-Taylor instability in a 2D rectangular slab	Plasma and Fusion Research	9	Regular Issue	1403076-1-	2014	refereed
43	T. Yanagawa, H. Sakagami, A. Sunahara, H. Nagatomo	Implosion Simulation by Hydro Code Coupled with Laser Absorption using New Raytrace Algorithm	Plasma and Fusion Research	9	Special Issue 2	3404090-1-	2014	refereed
44	N. Kashima, H. Nakamura, Y. Tamura, A. Ito, S. Kubo	Interactive visualization system to analyze corrugated millimeter-waveguide component of ECH in nuclear fusion with FDTD simulation	Journal of Physics: Conference Series	490	1	12179	2014	refereed
45	R. Goto, H. Miura, A. Ito, M. Sato, I. Hatori	Formation of large-scale structures with sharp density gradient through Rayleigh-Taylor growth in a 2D slab under the two-fluid and FLR effects	Physics of Plasmas	22	3	32115	2015	refereed
46	Y. Asahi, A. Ishizawa, T. Watanabe, H. Sugama, H. Tsutsui, S. Tsuji-lio, Y. Narushima, S. Sakakibara, S. Ohdachi, Y. Suzuki, K. Watanabe, S. Nishimura, S. Satake, B. Huang, M. Furukawa, Y. Takemura, K. Ida, M. Yoshinuma, I. Yamada	Nonlinear Entropy Transfer in ETG-TEM Turbulence via TEM Driven Zonal Flows	Plasma and Fusion Research	10	Regular Issue	1403047	2015	refereed
47		Experimental observation of response to Resonant Magnetic Perturbation and its hysteresis in LHD	Nuclear Fusion	55	7	73004	2015	refereed
48	T. Iwawaki, H. Habara, T. Yabuuchi, M. Hata, H. Sakagami, K. Tanaka	Slowdown mechanisms of ultraintense laser propagation in critical density plasma	Physical Review E	92	1	13106	2015	refereed
49	T. Yanagawa, H. Sakagami, A. Sunahara, H. Nagatomo	Asymmetric implosion of a cone-guided target irradiated by Gekko XII laser	Laser and Particle Beams	33	3	367-378	2015	refereed
50	H. Wang, Y. Todo, T. Ido, M. Osakabe	Simulation Study of High-Frequency Energetic Particle Driven Geodesic Acoustic Mode	Physics of Plasmas	22	9	92507	2015	refereed

参考資料

- 1 平成27年度 外部評価「数値実験炉研究プロジェクト」の評価結果
- 2 平成27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 平成27年度 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会日程

平成27年度 外部評価「数値実験炉研究プロジェクト計画」の評価結果

単位:人

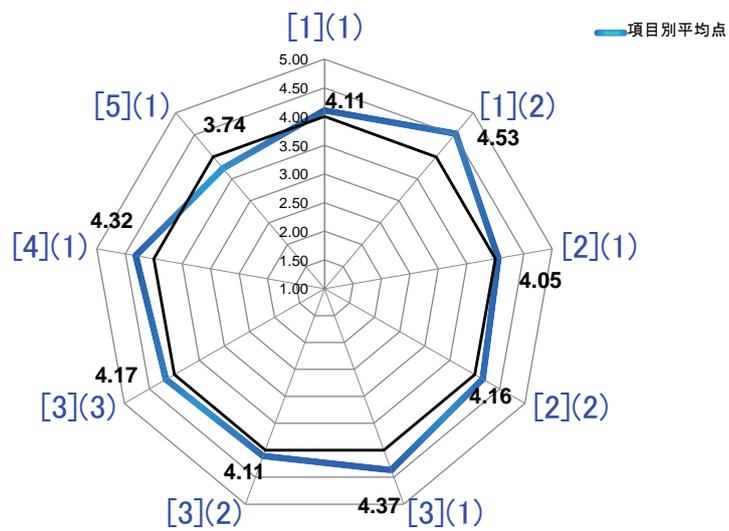
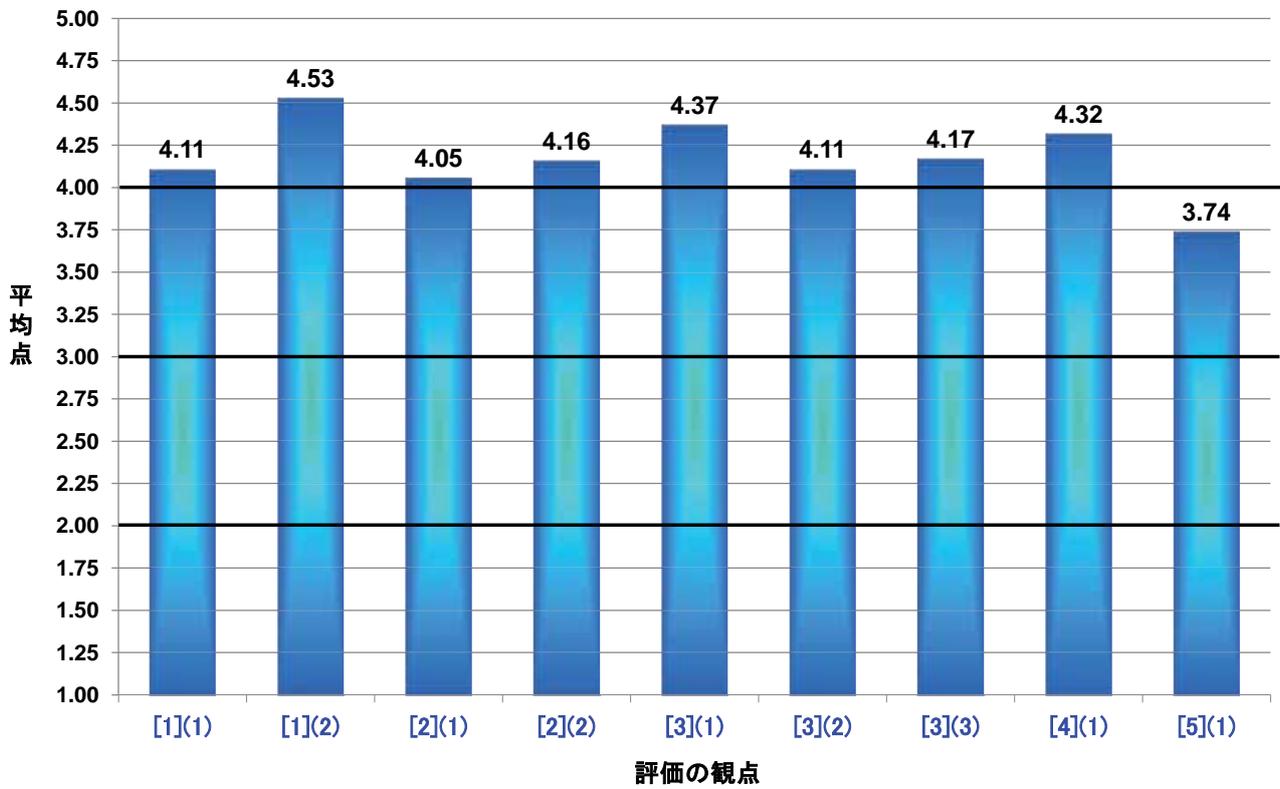
項目	1	[1](2)	[2](1)	2	[3](1)	[3](2)	3	[4](1)	[5](1)
秀	6	10	7	7	7	6	5	6	2
優	9	9	7	8	12	10	11	13	12
良	4	0	4	4	0	2	2	0	3
可	0	0	1	0	0	1	0	0	2
不可	0	0	0	0	0	0	0	0	0
平均点	4.11	4.53	4.05	4.16	4.37	4.11	4.17	4.32	3.74

評価の対応表		
秀	極めて高く評価する	5
優	高く評価する	4
良	評価する	3
可	妥当(適切)である	2
不可	妥当(適切)でない	1

※ 本資料は、国内委員及び外国人委員で提出のあった結果を合わせたものです。一部の評価項目において、無回答の委員がいるため、回答者数は、評価項目によって、異なります。

項目	評価の観点
[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。
[1](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。
[2](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)
[3](1)	大学等が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。
[3](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)
[4](1)	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)
[5](1)	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。

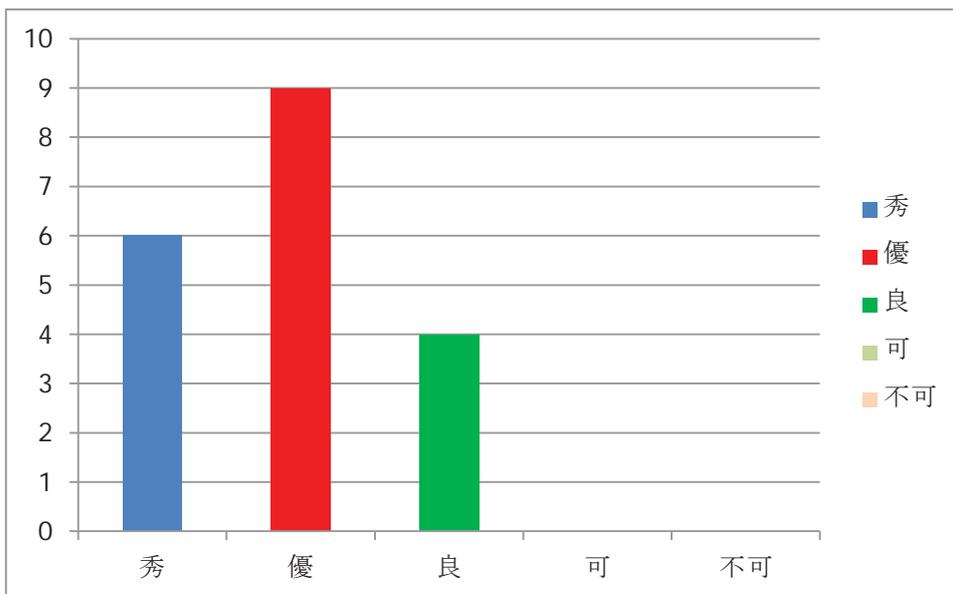
「評価の観点」別の平均点数



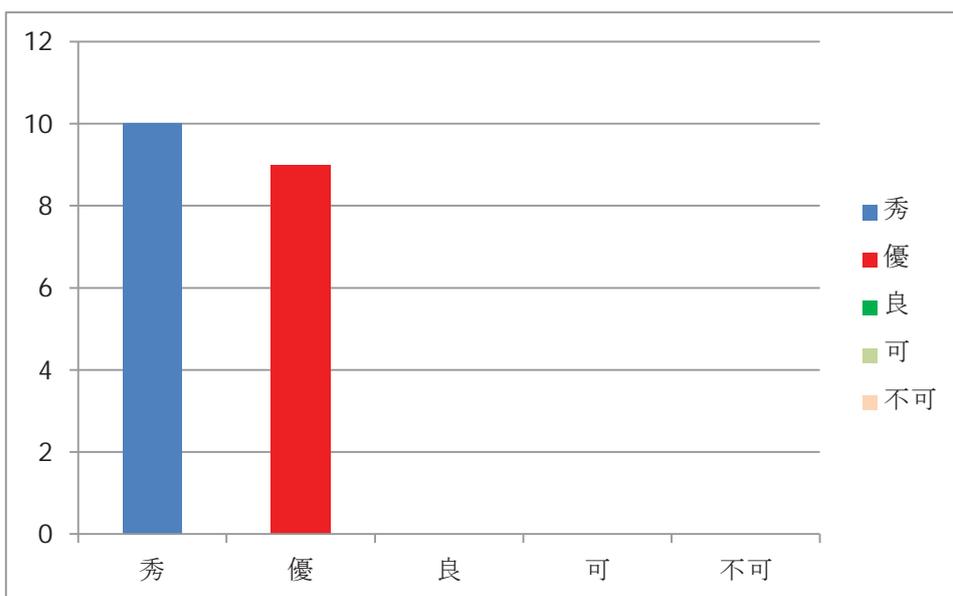
評価項目別の人数分布

[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。



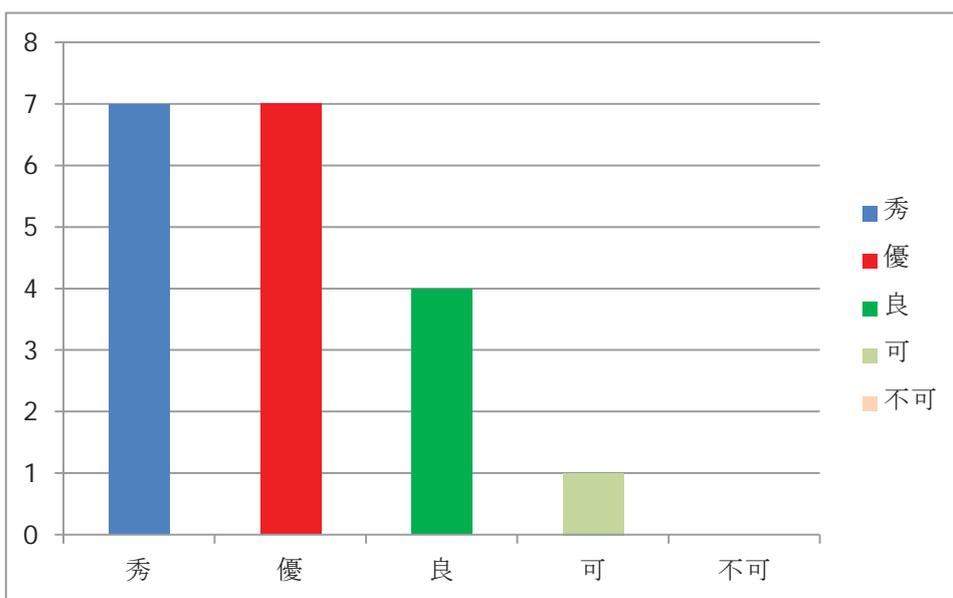
(2) プラズマシミュレータ及び関連研究環境の整備は適切に進められているか。
また、有効に利用されているか。



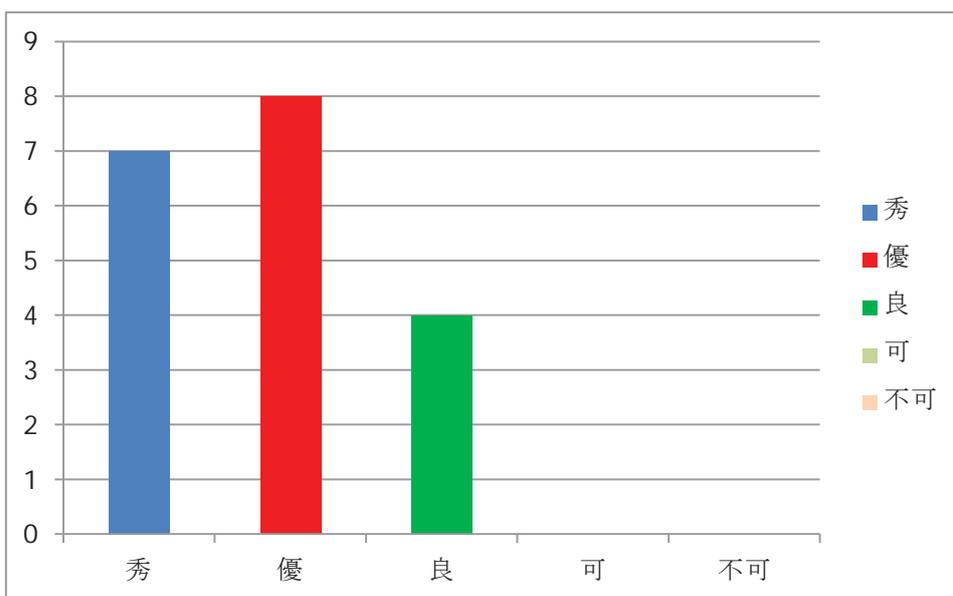
[2] 研究成果

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

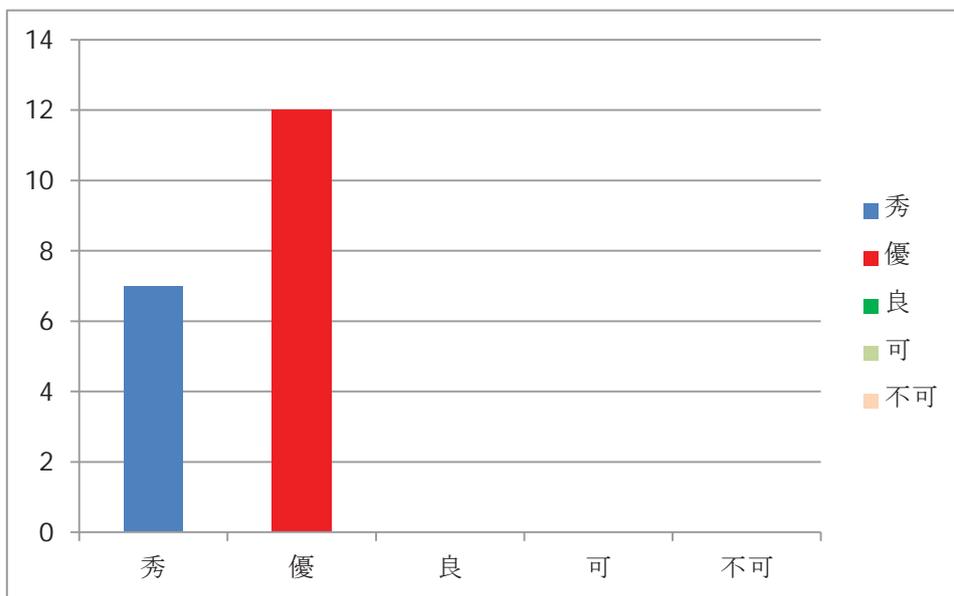


(2) 核融合プラズマの物理機構解明とその理論体系化

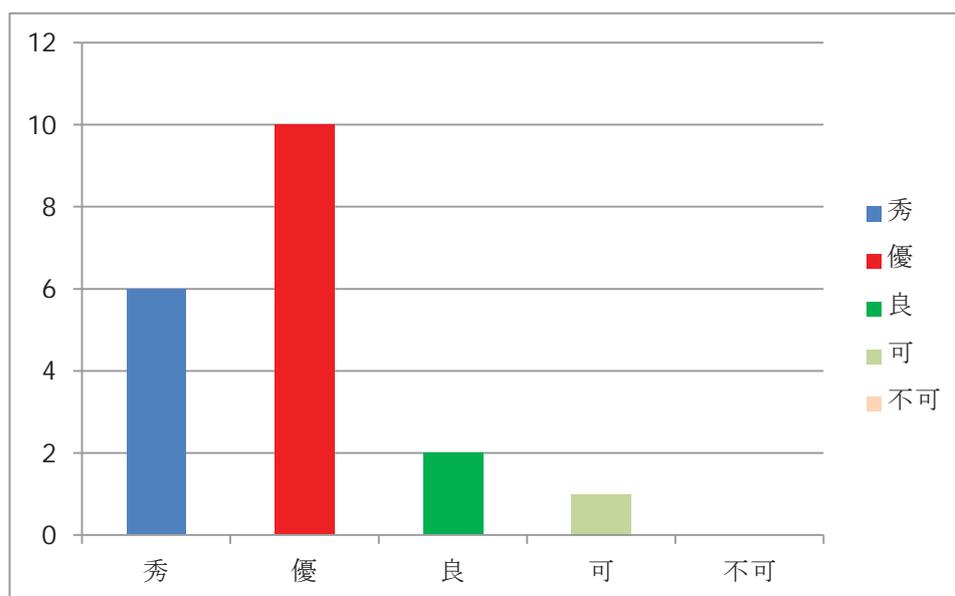


[3] 共同利用・共同研究の推進

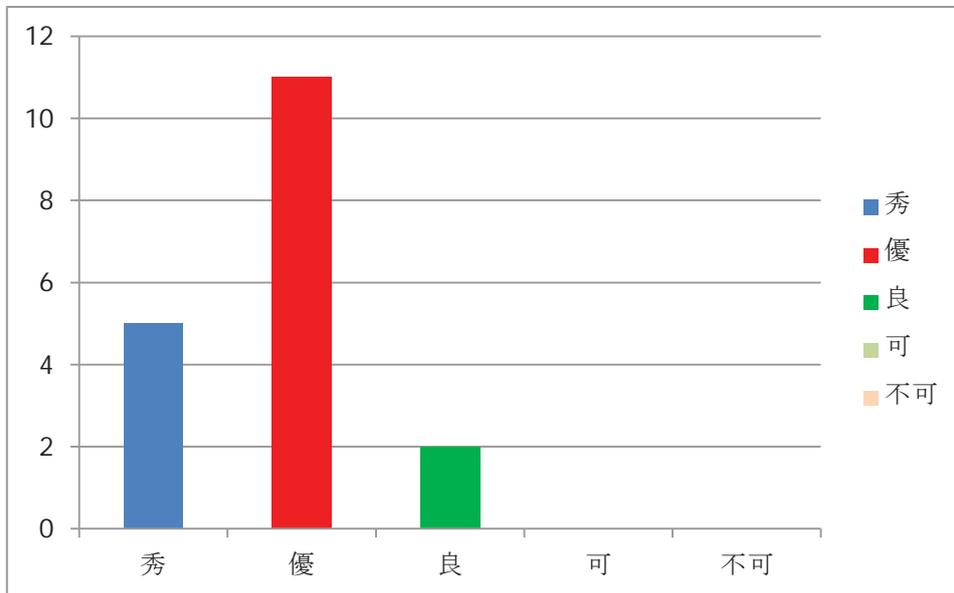
(1) 大学等有する高い研究能力を幅広く結集し、COEとして共同研究を適切に進めているか。



(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。

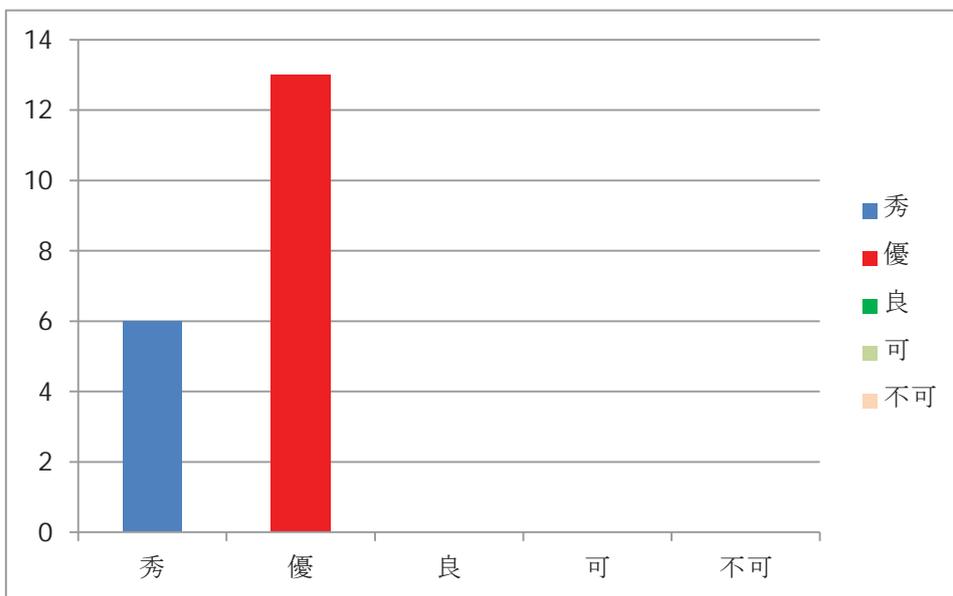


(3) ITER 計画・BA 活動等との連携を通じて、国際協力への貢献を図っているか。



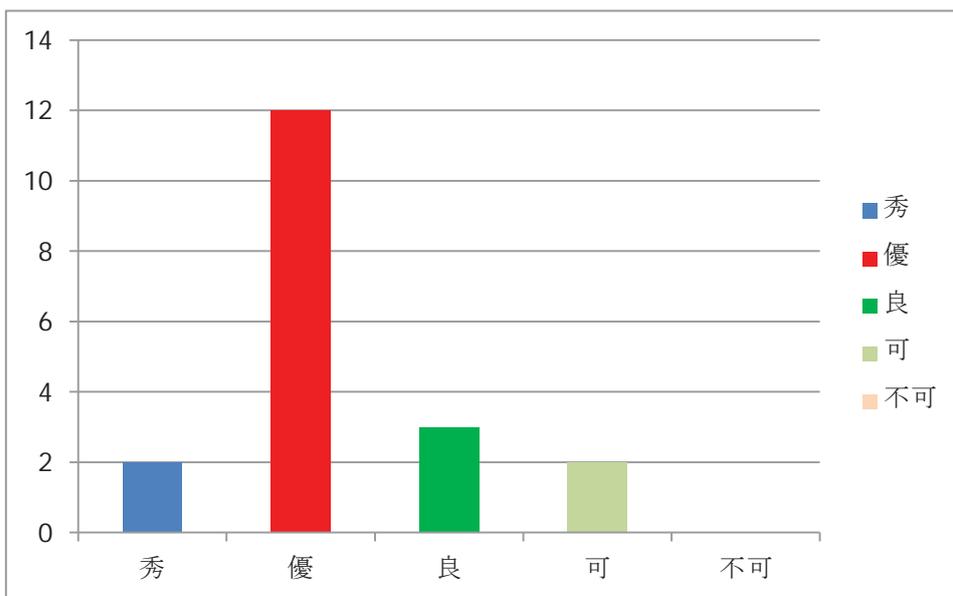
[4] 人材教育

- (1) 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

- (1) 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。



平成27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

1. 平成27年度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]

- | | | |
|---|-------|----------------------------|
| ■ | 疇地 宏 | 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター長 |
| | 安藤 晃 | 東北大学大学院工学研究科教授 |
| | 大野 哲靖 | 名古屋大学大学院工学研究科教授 |
| ◎ | 小川 雄一 | 東京大学大学院新領域創成科学研究科教授 |
| | 中嶋 洋輔 | 筑波大学プラズマ研究センター長 |
| □ | 花田 和明 | 九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センター長 |
| ○ | 福山 淳 | 京都大学大学院工学研究科教授 |
| □ | 水内 亨 | 京都大学エネルギー理工学研究所長 |
| | 森 雅博 | 日本原子力研究開発機構核融合研究開発副部門長 |
| | 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]

- | | |
|---------------------|---|
| François Waelbroeck | Director, The Institute for Fusion Studies, The University of Texas at Austin, USA |
| Jiangang Li | Professor, Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Sciences, Republic of China |
| Thomas Klinger | Directorate, Max-Planck-Institute for Plasma Physics, Germany |

◎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、平成29年3月31日までとする。

2. 平成27年度核融合科学研究所運営会議外部評価委員会専門部会 構成名簿

【数値実験炉研究プロジェクト 専門部会】

[外部評価委員会 国内委員]

	疇地 宏	大阪大学レーザーエネルギー学研究センター長
	安藤 晃	東北大学大学院工学研究科教授
	大野 哲靖	名古屋大学大学院工学研究科教授
◎	小川 雄一	東京大学大学院新領域創成科学研究科教授
	中嶋 洋輔	筑波大学プラズマ研究センター長
□	花田 和明	九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センター長
○	福山 淳	京都大学大学院工学研究科教授
□	水内 亨	京都大学エネルギー理工学研究所長
	森 雅博	日本原子力研究開発機構核融合研究開発副部門長
	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]

	François Waelbroeck	Director, Institute for Fusion Studies, University of Texas at Austin, USA
	Jiangang Li	Professor, Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Sciences, Republic of China
	Thomas Klinger	Directorate, Max-Planck-Institute for Plasma Physics, Germany

[外部評価委員会 委員以外（国内専門委員）]

	後藤俊幸	名古屋工業大学大学院工学研究科教授
	矢木雅敏	日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門 六ヶ所核融合研究所核融合炉システム研究開発部研究主席
	富阪幸治	自然科学研究機構国立天文台理論研究部教授
	斉藤真司	自然科学研究機構分子科学研究所理論・計算分子科学研究領域教授 計算科学研究センター長
	岸本泰明	京都大学大学院エネルギー科学研究科教授

[外部評価委員会 委員以外（外国人専門委員）]

	Amitava Bhattacharjee	Professor of Astrophysical Sciences Head, Theory Department Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton University, USA
	Piero Martin	Professor, Physics and Astronomy Department, University of Padova, Italian Republic

◎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、平成29年3月31日まで、
外部評価委員会委員以外（専門委員）の任期は、平成28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。

平成27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 平成27年10月21日(水) 13時40分～15時20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 小川委員長、大野、中嶋、花田、
福山、水内の各委員
後藤、矢木、岸本の各専門委員



○ 第2回委員会及び第2回専門部会

日 時 平成27年11月28日(土) 13時00分～17時00分
場 所 名古屋ダイヤビルディング2号館2階222会議室
出席者 小川委員長、疇地、安藤、大野、中嶋、花田、
福山、水内、Waelbroeck、Li、Klinger
の各委員
後藤、矢木、斉藤、岸本、Martin
の各専門委員



○ 第3回委員会及び第3回専門部会

日 時 平成28年1月20日(水) 13時40分～15時30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 小川委員長、大野、中嶋、花田、福山、水内、
森の各委員
後藤、矢木、岸本の各専門委員





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/>