

自然科学研究機構 核融合科学研究所
平成 24 年度外部評価報告書
NIFS Peer Review Reports in FY2012

2013 年 3 月

March, 2013



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	14
[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	25
[4]	国際連携・共同研究の推進	31
[5]	人材育成	35
[6]	将来計画	38
第3章	評価のまとめと提言	43
1.	評価のまとめ	43
2.	提言	47
第4章	おわりに	48
参考資料 評価結果一覧		
添付資料1	平成24年度 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会委員及び専門部会構成名簿	
添付資料2	核融合科学研究所運営会議外部評価委員会規則	
添付資料3	平成24年度 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会日程	
添付資料4	外国人委員評価書	
資料編		

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共に、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諮問し、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としての求心力を一層強化するため、LHD、シミュレーション、核融合工学の3分野で研究プロジェクトを構成し、核融合炉実現に向け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・理論シミュレーション・核融合工学の3つのプロジェクト間の連携がこれまで以上に容易となり、新しい課題に対して臨機応変に対応出来るようになった。

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プロジェクトの外部評価を実施した。次いで、本年度においてはシミュレーション分野の「数値実験研究プロジェクト」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9名と外国人委員5名に更に5名の専門委員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24年10月4日に開催した第1回外部評価委員会において、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 24 年 12 月 2 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などの資料（資料編参照）を用いての詳しい説明を受け、質疑応答が行われた。その後、平成 25 年 1 月 11 日に第 3 回の専門部会を開催し、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。専門部会での評価案が出揃った段階で平成 25 年 1 月 31 日に第 3 回外部評価委員会を開催し、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添付資料 3 に示した。

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。なお、外国人評価委員からの評価については、許諾を得て、そのままの形で添付資料 4 に掲載した。

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「自然科学研究機構年度計画（平成 25 年度）」及び「平成 24 事業年度に係る業務の実績に関する報告書」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。

「数値実験研究プロジェクト」の評価の観点は、以下のとおりである。

下記の評価の観点は、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 19 年度に実施された「シミュレーション研究に関する外部評価」での「提言」に基づき、次の点も今回の評価の参考とする。

1. 統合輸送コードの開発など大規模・長期的研究において、全国の大学等が有する高い潜在能力を活かすために核融合科学研究所 (NIFS) が先導的な役割を果たしているか。
2. 核融合科学研究所が国際的に開かれた研究の場を創造し、核融合研究の長期的な発展を支える若手研究者の人材育成に貢献しているか。
3. 国際熱核融合実験炉 (ITER) 計画 や幅広いアプローチ (Broader Approach: BA) 活動への貢献も含め、核融合科学の全般分野に展開できる研究組織、共同研究体制となっているか。

記

[1] 研究体制・環境の整備

- (1) 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。

- (2) 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。
- (3) 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。

- (1) 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。）
- (2) 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

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) 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

- (1) 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。
- (2) 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。

第2章 項目別の評価

第2章では数値実験研究プロジェクト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) 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。

Are the objectives of the Numerical Simulation Research Project (NSRP), which was introduced in 2010, appropriate?

- 数値実験研究プロジェクトは、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、炉心プラズマ物理の基本原理を解明し、それを統合することを目標に掲げている。核融合プラズマの要素研究から物理の統合化と数値試験炉の開発へと、戦略的な目標設定がなされている。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。
(13名)
- 数値実験炉がどのような内容を有するものかの具体的なイメージが明確になっていない。途中のマイルストーンを明示し、今後さらにシミュレーション技法の開発を進めるとともに、実験グループとの密接な研究議論と共同作業により実験との対比を進め、さらに議論を活発化させ、数値実験炉に至る具体的なイメージと定量的な達成目標を明示してほしい。(7名)
- 炉心プラズマ物理の探究を通して、プラズマ物理学を学術として普遍化・一般化し、広く学術分野へ発信してゆくことを強く期待する。(1名)
- 一般的な課題を解決するのみではなく、核融合炉の実現上の問題点に真摯に目を向けて進むべき。そうすれば、既存概念を乗り越えたイノベーションが必要であることがわかり、数値実験研究プロジェクト推進の大きな原動力になる。(1名)
- 様々な階層に対応するコード開発を統合していくという方向性が出されたものの、そこへ至る戦略は明らかにされなかった。磁場核融合のように非線形性が強く、階層間でも結合が強い場合に、そもそも統合コードや数値実験という概念が成立しうるものなのか疑問である。(1名)
- 実験炉では目標とする出力を得るために、燃料注入、加熱手法とパワー、自己点火、

灰排気（排気量）等々の過程を定量的に予測して実施するが、実際には、燃料粒子は壁に吸蔵され、自己点火後は炉壁温度を急激に上昇させ、新たな環境が設定される。数値実験炉もこうした外部環境の変化を含めた実践的なものを目指すのか？ 等々最終目標とするものがどのようなものかをなるべく具体的に示し、それに向けて 3 つの課題に取り組むことが大切と思われる。（1名）

- Along these lines, LHD in its capacity of the masterpiece of fusion engineering offers a broad range of discoveries to be addressed by the NSRP project. A success in assessing and enhancing the LHD performance provides basic science knowledge for the next step devices ITER and FFHR aimed at addressing physics of burning plasmas. Given the limitations of financial and human resources, the objectives of the Numerical Simulation Research Project appear appropriate. The roadmap contains many critical highlights for the construction of a numerical reactor; yet, by no means exhaustive issues confronted by the project in future. Furthermore, milestones have to be clearly defined and described in detail. This will significantly amplify confidence in achieving objectives in the foreseeable future. Efforts must be focused on invoking a larger community of fusion scientists both in Japan and abroad into activities pursued within the framework of the Numerical Simulation Research Project. The Numerical Test Reactor development resulting from the NSRP project is very ambitious project and should be commended. The mutual collaborations and support with the ITER modeling group should be enhanced. The integration into the LHD interpretation and the decision making must continue and becomes more in depth. The broad range of issues addressed by the NSRP project has to be maintained at the profound level.

- There are two major objectives of the Numerical Simulation Research Project (NSRP) that was introduced in 2010 such as “1. Elucidation of physical mechanism of fusion plasmas and its systemization; 2. Construction of numerical test reactor for a helical fusion system”. After last peer review in 2007, the introduction of these two objectives served very well to guide the NSRP to be successful for understanding LHD experimental physics results, and for steady progress toward realization of the numerical test reactor system.

It is also worthwhile to note that the NSRP produced many high-level results and published papers so that two objectives are shown to be very much appropriate for success and advancement of project.

- The objectives of the NSRP are the elucidation of the physics elements governing helical fusion plasmas, the integration of these elements, and the construction of a

numerical test reactor with the aim of contributing to the design of a helical DEMO reactor. It aims to advance a variety of commendable goals such as greater coordination among theorist, experimentalists, and numerical scientists, focus on validation and verification of the codes, and an increased attention to the end-goal of reactor design.

The NSRP is similar to undertakings such as the “Integrated Tokamak Modeling Task Force” (ITM-TF) effort in Europe and the “Fusion Simulation Project” in the US, except that those efforts are focused on tokamak devices whereas NSRP is focused on helical devices. Like these other efforts, the NSRP is highly ambitious. Its ambition carries with it a substantial risk of falling short. Nevertheless, its goals are not merely appropriate; they are so compelling as to make the project unavoidable.

One of the risks of the “numerical reactor” goal however is that it will give rise to pressure for the premature integration of codes when efforts would be better spent on their separate development. The review of the NSRP shows no sign yet that this is happening, but it is reasonable to anticipate that such pressures will gain strength as the project nears its announced completion date of 2021. Specifying in more detail what will be delivered in 2021 could mitigate this risk, as well as the risk that the rhetoric of the NSRP is creating unrealistic expectations. Surely the 2021 numerical reactor will look a lot closer to the current TASK-3D code than to a fully integrated reactor simulator in which GKV, HINT2, MEGA and EMC3 are all running concurrently. Yet the latter picture, which is clearly unrealistic, is what statements promising the “complete integration” of all physics elements evoke.

- With the availability of high-performance computers, numerical simulation became a key instrument for any research in complex systems, notably in plasma physics and fusion research. It was the right move of NIFS to establish a dedicated project for code development, benchmarking, validation and – finally – integration. The ultimate goal is a suite of codes that serves as a “numerical fusion power reactor”. Such a project is surely extremely ambitious but is nevertheless the way to go. In that sense the NSRP objective is appropriate.

It is the overall strategy of the NSRP to develop by means of numerical simulation a sufficiently deep understanding of the various physics aspects of the Heliotron configuration, mainly to allow for a direct extrapolation from LHD to a power reactor called FFHR. The tokamak experiment ITER is expected to provide NSRP data on burning plasma physics, e.g. fast particle driven instabilities. A Heliotron-type burning plasma experiment is not foreseen in this strategy.

This is a valid approach but there are two major project risks: Firstly, ITER will deliver data on self-heated plasmas only about 5-6 years after start of operation. This will postpone the design of the FFHR significantly, since fast particle confinement is critical for a proper design of a power reactor. Secondly, the validation of fast-particle codes with ITER data is not unproblematic, since the physics in a Heliotron-type device is very much different: Helically trapped fast particles tend to get lost, the spectrum of Alfvén waves driven by fast particles is distinctively richer, and the wave-particle interaction is not well understood. A reasonable risk assessment should be conducted in the light of the chosen strategy. Nevertheless, it is the right approach to address within the NSRP project the key topics required for a credible design of a power reactor. The mid-term program of the NSRP should put emphasis on two key areas: (I) simulation of the closed helical divertor and plasma-wall interaction and (II) integrated high-performance discharge scenarios with fusion-relevant parameters. Both areas have the advantage that the developed numerical codes can be immediately validated with experimental data obtained from LHD. This should be vigorously done and the LHD experimental program should be well coordinated with the activities within the NSRP.

More generally, the development of a Heliotron-based reactor design should be deeply integrated into the design activities of the engineering department. It is crucial to avoid a physics-driven reactor design that imposes unnecessary or even troublesome engineering problems. Hence, a strong input of experienced engineers is needed. For that it is recommended to establish a reactor development project that integrates numerical simulation, fusion engineering, and device operation.

- The NSRP objectives of (1) Elucidation of the physical mechanisms of fusion plasmas using numerical simulation and (2) Construction of a numerical Test Reactor (NTR) are both entirely appropriate for a major fusion program such as NIFS. Indeed, a program with these objectives is crucial for carrying out the overall NIFS program, including understanding present experiments, such as LHD, and building the understanding needed for future experiments (e.g. ITER) and for predicting behavior of future fusion energy facilities.

以上より、この数値実験研究プロジェクトの目標設定に対して、極めて高く評価するが4名、高く評価するが12名、評価するが1名、妥当であるが1名であった。

(2) 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。

Is the research system for promoting the NSRP suitable for its objectives? Does it function appropriately?

- 研究推進の基礎母体として、要素研究ごとに必要な9つのタスクグループが組織され、プロジェクトを管理し推進する推進会議と全体会議それに加えて重要なプロジェクト連携担当者の設置は、目標達成のために必要な機構でありその設置は合理的である。各タスクグループでは、研究者が所属にとらわれずタスクごとに活動できる体制を構築した点は、実験系や炉工学系の研究者も含め多様な研究者が参画でき、研究の自由度と機動性が上がり、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進むなど、活性化につながっている。(13名)
- 一方、プロジェクトを推進する取り組みは十分ではなく、国際的にはどのような位置を目指すのか等の戦略目標を明確にし、核融合炉の問題点を把握し、炉設計グループとの連携を強化するなど、より具体性を持たせた推進体制への柔軟な見直しを図るべきと思われる。(3名)
- 各タスクグループに属する人数にばらつきがあるものの、実験系からの研究者も参加している点は大変好ましい。数値実験炉に向けた取り組みや状況を外部研究者へ発信することや、共同研究者の構成内容(所内、所外など)には一層の充実があってもよいかと考える。(3名)
- 各タスクを取りまとめる体制や成果に対する評価と再構築、各成果をどう炉設計に結びつけるかなど、全体を取りまとめ、各要素研究を機能的に結び付け体系化を図ってほしい。(1名)
- 数値実験研究プロジェクトに参加するメンバーが推進体制やその中で自分のなすべきことをどうとらえておられるのか直接お聞きできれば評価がより具体的にできたと思う。(1名)
- 所内のプロジェクト構成員がすべてヘリカル研究部に属することが、目標達成に向けた研究の幅を制約することにならないことが望ましい。(1名)
- グループ間連携やその責任体制が不明確である。また現グルーピングが適切かどうか検討を要する。プラズマ流体平衡安定性グループや統合輸送シミュレーショングループの中には数値試験炉開発へ貢献する研究者とLHD実験データ解析へ貢献する研究者が含まれており、グループとしてのミッションが見えにくい。またプラズマ流体平衡安定性グループに関して言えば、各研究者が独自に開発・導入したMHDコードを用いて物理研究している感が否めない。例えば、MIPSコードを標準コードとし、それに物理モジュールを連結し、それぞれの物理課題に取り組む戦略を推進すれば、将来的に数値実験炉へのコードの統合化がスムーズに行えるのではないだろうか？また、流体乱流輸送シミュレーショングループと運動論的輸送シミュレーショングループを

2つに分けておく必要はあるのか？ 統合輸送モデリング・シミュレーショングループと第1原理に基づく輸送シミュレーショングループのような分類をするなら一つにまとめても特に支障をきたさないのではないか？ (1名)

- The research system is adopted in order to fulfill ambitious objectives pursued by the NSRP project. The infrastructure is very complex involving many major players and contributing in their field of competence. Responsibilities and deliveries are clearly defined and monitored regularly by different bodies. Project cooperation with LHD and Fusion Engineering are controlled by Executive Director and Steering Committee via the NSRP Council consisting of leaders of subject groups. Some of them appear to be in a sub-critical state and should try to increase manpower by attracting young researchers into their teams. Rotation system adopted for chairing the NSRP Council is beneficial for promoting fair distribution of resources among research groups and achieving objectives of the project as a whole.
- The NSRP research system is well organized through cross-cutting task groups with members from simulation, experimental staffs as well as collaborators. Also, the NSRP task group members are assigned by overlapping related subjects, so that the internal communication seems working well. Therefore, the collaboration studies with LHD Project produced very good technical results for elucidating physics issues. It is however, recommended to look further into integration of all physics elements to support numerical test reactor with technological issues as well as engineering issues so that the final goal of NTR to be achievable.
- The current research system is organized according to a matrix management structure with eight divisions, four projects and nine task groups. This system appears to achieve some degree of decentralization that is conducive to the formation of the necessary collaborations between scientists in different divisions. The NSRP aims to increase research mobility and flexibility by introducing new motivations and new goals. There are promising indications that it is succeeding in the task of bringing about the interactions between scientists that will be necessary in order to achieve the needed integration. The possibility that the increased management cost of such an organizational scheme could prove burdensome calls for vigilance.

The manpower allocations for the nine task groups are fairly well balanced. The importance played by plasma-wall interactions and transport in the periphery in fusion experiments in general (and in LHD in particular) suggests that increasing

the amount of in-house manpower devoted to these two tasks, at the expense of either the kinetic or fluid transport groups would probably be beneficial. The relative under-emphasis on edge, SOL, and plasma-surface interaction is also perceptible in the publication record.

The year of creation of the NSRP, 2010, coincides with a peak in the productivity of the theory and simulation groups as measured by the list of “published papers related to the NSRP” that was distributed with the review material. This peak is consistent but more pronounced than that for the number of NIFS theory and simulation papers listed by “web of science” for the same period. The magnitude of the annual decrease in productivity after 2010 varies between these two sources of data, ranging from 30% for the NSRP list of publications to an amount in excess of 10% for the web of science data on theory and simulation. This may be due to the management burden associated with the NSRP or to other causes independent of NSRP, such as budget reductions.

- The research in the NSRP is organized via a quite complex matrix-type organization. This is meant to integrate NIFS and university researchers and also to involve experimental researchers in a suitable way. While NIFS in its role as a COE for numerous Japanese universities requires flexible and open organization structures, the chosen approach leads to a rather fractionized task structure (nine task groups) with a lot of overlap. This might well lead to double work and lack of efficiency. In addition, there is a co-existence with the matrix organization in NIFS (projects and departments), which makes the management role of the task group leaders probably quite difficult. In total there are four different bodies to coordinate the work.

It is beyond the scope of the present review to make an assessment of the day-by-day efficiency of the organization of the NSRP. If the experience is such that all project members are satisfied, it may well be the right approach. If the NSRP has – despite its name – rather the character of a research program than a project, it is not worthwhile to ask for milestones, resource-loaded work packages etc. If NIFS chooses to have here a strict project-oriented work, it is recommended to analyze work flows and project structure, to make both as simple as possible, and to agree on a limited number of major milestones that mark the end of well defined work packages, which are equipped with sufficient man power.

- The NSRP is organized internally like a project, with a Director, Steering Committee, Council, and nine task groups (each with a leader). However, the NSRP staff volunteer their effort and are managed from divisions of the NIFS Dept. of

Helical Plasma Research. This allows a fluid, flexible structure and facilitates collaboration with the Helical Plasma Research Dept. However, it may complicate management of manpower and alignment of resources with NSRP needs. In this sense, NSRP seems to be more like a research program rather than a project. But, achieving the NSRP goals requires developing specific capabilities, which will require project-like planning and focus on milestones.

From the presentations, it was not clear how the NSRP task groups are organized and operate. For the long term success, they should each have clear goals, plans for achieving their goals, and milestones for assessing progress. In the organization presented, there did not appear to be a specific plan or activity for validation and verification of the numerical models. The NSRP should consider adding this either as a separate activity, or as a standard activity and requirement for all the task groups. Progress in validating the models against experiments should be tracked and used as a metric of the suitability of the models for incorporation in the eventual NTR.

Due to the long-term nature of the NSRP and the eventual complexity of the NTR, I would recommend the addition of a Technical Advisory Committee to the project. This should consist of outside experts and would meet approximately yearly to advise on the plans, approaches, and accomplishments of the project.

以上より、このプロジェクトの推進体制に対して、極めて高く評価するが 3 名、高く評価するが 13 名、評価するが 2 名であった。

(3) 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。

In the NSRP, is the environment on the “Plasma Simulator” system and its related researches appropriate?

- 本プロジェクトの根幹であるプラズマシミュレータとして、大規模並列計算機が 2 段階で性能増強が行われ、国内的にも高い性能のシステムが導入されている。共同研究者にとっては非常に有益なコンピュータ資源であり、全国の大学研究者がそれを使用して研究成果をあげている。また、計算機資源だけでなく、障害復旧時間が短い点や支援員が利用者のところに出張訪問し問題解決につとめる点など、これまで研究所で培われてきたノウハウを生かしたシミュレータの運用体制の整備も進められている。さらに、講習会やプログラム開発のための支援体制も含めたユーザー対応も計画的に整備している。(13 名)
- 計算機の進歩は、日進月歩で、不断の努力が必要であり、大型計算機技術の進展に遅

れないように、増強計画では暫時見直しを図り、より高い性能を持つシステム導入に努力してほしい。(2名)

- 高速コンピュータの導入には相当の経費が必要となるので、計算資源そのものの発達速度を見越した将来計画を立案し、将来的には、このような高速コンピュータをNIFSが自前でそろえるのか、他機関の高速コンピュータとの連携を強化するのかの判断が必要となろう。(2名)
- 日本国内を見ても、六ヶ所のヘリオスや神戸の「京」などが運用されているので、これらをより有効に活用する手段を考える必要がある。(1名)
- ソフトの充実に関しては、実験家が簡単に利用できる形で提供し、ソフトの検証の精度向上と要求される新たなソフトの課題を提供してフィードバックしていくことが大切。(1名)
- 核融合研究では計算機の速度が速くなっただけでは解決できない問題があることを認識しておく必要がある。コンセプトの飛躍を要求する課題がたくさん存在していることを認識しておくことが重要である。(1名)
- 大規模計算により得られた膨大なデータの有効利用と実験研究者との連携において可視化は重要である。可視化装置とソフトウェアの充実も順調に進展している。外部の計算機コンソーシアムとの連携や外部研究者にとっての利用においては大容量高速ネットワークの充実も重要となろう。(1名)
- 計算機性能に関して、非定常計算で時間あたりの粒子数もしくは格子・ステップ数のような値で実効的計算能力を移行前後で比較する等の性能比較も有用である。(1名)
- The environment of the “Plasma Simulator“ and its related researches has been developed and periodically upgraded for many multi-purposes within the NSRP project. Computer system Working Group manages and operates Plasma Simulator and LHD Numerical Analysis Server in collaboration with HITACHI system engineers to make the research environment function properly. Plasma Simulator system is the unique tool for addressing vast and complex issues of plasma physics, material science and radiation studies required for the success of the project NSRP. To this end, Computer system Working Group manages and operates effectively Plasma Simulator and LHD Numerical Analysis Server in collaboration with HITACHI system engineers. Extensive education and research assistance system has been developed for numerical support and collaboration studies carried out by the Plasma Simulator and the LHD numerical analysis. The impact on fundamental scientific issues is very valuable.
- The planned upgrade of “Plasma Simulator” during Phase-2 period seems very well implemented for effective utilization of supercomputer resources for the NSRP as

well as collaborators in many universities. System support and research assistance program also seems working well to serve users of “Plasma Simulator”. It is recommended to consider joint planning of “Broader Approach IFERC Helios Computer” utilization with “Plasma Simulator” if it is agreeable between two programs. This will enhance effectiveness and efficiently implement supercomputer resources for fusion simulation research.

- The Plasma Simulator provides 322 Nodes with 40 TB of memory and an impressive peak performance of 315 Tflops. This is significantly more computing capacity than the 100 TFlops and 24 TB of the HPC-FF computer that serves the needs of the European fusion program and of the ITM-TF.. The need for an advanced computer is compelling: it is difficult to see how the NSRP could have credibility without a dedicated high-power computer. The justification for the scale of the Plasma simulator is provided by its utilization rate of 90% as well as by the large number of users and jobs processed by the machine. The numbers of projects it supports is comparable to the number of projects that Lonestar, one of the two machines of the Texas Advanced Computer Center, supports. The Plasma Simulator is backed by a strong support system including training opportunities and program development support. The under-representation of universities in program development support is presumably due to geographical factors, but should be addressed by developing the means of delivering this service remotely.
- The plasma simulator is a powerful Hitachi 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 Hitachi computer has 77 TFlops in its phase 1, 315 TFlops in its phase 2, which is an appropriate performance (<100 in world-wide ranking). The management of the “plasma simulator” and research assistance in numerics and computer science are given by NIFS and Hitachi.

It is the right approach to integrate the wide research knowledge available in the Japanese universities in the NSRP. Here, the “plasma simulator” is the key element. In this sense it appears to me fully appropriate.

- The capabilities of the “Plasma Simulator” and environment appear to be appropriate and adequate for the NSRP at this time. It has been periodically upgraded, and will be upgraded again in approximately 2.5 years. This upgrading process is crucial for the NSRP success, as the capabilities of the NSRP grow, requiring stronger computer support.

The “Plasma Simulator” is also used as a collaboration facility, with many users

from Universities. This is healthy and appropriate.

以上より、このプロジェクトの研究環境の整備に対して、極めて高く評価するが10名、高く評価するが7名、評価するが1名であった。

[2] 研究成果

Research achievements

プラズマシミュレータを活用した理論シミュレーション研究を進めることにより、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 researches utilizing the Plasma Simulator?

- (1) 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。)

Construction of Numerical Test Reactor for a helical fusion system (including contribution to the development of high-performance LHD plasma, to the design of a helical demo reactor, and to the sophistication of computational science)

- ジャイロ運動論シミュレーションや高エネルギー粒子シミュレーション等、主要な計算コードが高度に並列化され、高い計算機性能を効率的に利用し世界的にも評価される研究成果を創出していることは大いに評価できる。LHD 実験データ解析へも貢献しており LHD プラズマの理解と高性能化に向けた研究へ大きく寄与している。また共同研究による新しい数値スキームの開発も進め、原型炉設計への貢献も認められる。
(13名)
- 原型炉設計への貢献はまだ始まったばかりでスロースタートであり、ヘリカル型核融合炉 (FFHR) に対する数値実験研究プロジェクトからの寄与が必ずしも大きくない。今後は、LHD プラズマの理解をさらに発展させて、炉設計の物理的問題点を認識して、炉設計に対してもより一層の貢献を期待する。(3名)
- 年間 100 報程度の論文を輩出し、数値炉関連のレベルの高いジャーナルに多数掲載されており、高く評価できる。しかし国際的な引用件数、投稿雑誌のインパクトファクター等国際的な基準が明確でなく所内報や会議報等も含まれた数であり、今後はトムソン・ロイター社等の学術文献引用データベースに掲載されている論文誌に限るなど掲載論文のレベルが明示されることも必要であろう。(3名)
- 複雑な大規模データを解析する理論構築や全体を俯瞰する説明が不足している感があり、各成果をどう数値実験炉構築に生かしていくのか、戦略的な視点が足りないと感じ

じられる。今後さらに各要素研究を進め、体系化を図り、数値実験炉の目標と到達段階を適宜発信する努力をお願いしたい。(2名)

- 3次元シミュレーションコードに代表されるオリジナルで多様なコード群が開発され、また、プロジェクト制による実験屋と理論屋の相互交流の活発化で、LHD 実験結果について世界的に高く評価できる解析が効果的に行われている。原型炉設計においても、効果が大きい期待でき、極めて高く評価する。(1名)
- 数値実験炉の構築に向けて平衡計算、高エネルギー粒子と MHD 流体との相互作用、ジャイロ運動論、輸送計算等の計算機コードの整備と統合輸送解析コードの構築が進められており、高く評価できる。(1名)
- ジャイロ運動論シミュレーションコードおよび電磁的ジャイロ運動論シミュレーションコードの開発によって、イオン温度勾配不安定性や帯状流応答へのヘリカル磁場の幾何学的効果について解析し、LHD 実験への適用によって、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、高い国際的な研究レベルと顕著な研究成果をあげている。(1名)
- 3次元 MHD 平衡計算コード (HINT2) や、MHD 共通基盤コードなど、それぞれ優れた特徴をもつコードを整備し、数値実験炉構築へ向けた努力が続けられていることに敬意を表す。極めて高く評価する。(1名)
- 特に 3次元平衡・安定性、高ベータプラズマ挙動などの結果はインパクトがある。その他多彩な研究が蓄積されており、LHD の高性能化に大きく貢献している。原型炉設計に高ベータ平衡、3次元輸送などの計算コードが利用されている。また垂直磁場を調節した熱拡散ロスが小さな平衡配位なども提案されている。これらから、原型炉設計に大きく貢献しているといえる。さらに、電磁流体挙動、トロイダルアルフェンモード、境界プラズマ輸送、壁での分子・原子挙動等の計算科学において、高度化している。(1名)
- 高エネルギー粒子と MHD 流体の相互作用を計算できる MEGA コードは大変興味深く、これは特に核融合炉になった場合の予測計算に大いに役に立つであろうし、磁束バンドルジャイロ運動論的シミュレーションによって、電場ドリフトによる帯状流、乱流の相互作用を扱えるなど、その他 MIPS コード、高エネルギー粒子のハイブリッドシミュレーションコード開発など計算科学の高度化をはかっているため、極めて高く評価する。(1名)
- 特にマクロスケールからミクロスケールに渡る現象である磁場リコネクションを MHD から粒子に至るまでの多階層現象を、流域分割法や不等間隔格子を用いて、世界で初めてシミュレーションを行い、また、適合格子細分化法を用いたマルチスケールシミュレーションも行い、宇宙プラズマや他の分野にも役立つ計算科学の深化をはかっていること等、計算科学の高度化を図っており、極めて高く評価する。(1名)
- ベータ値が高いほどバルーニングモードの線形成長率が減少し、MHD 不安定性が抑制

される傾向を示すなど、きわめておもしろい結果を出しているし、ジャイロ運動論的シミュレーションでは、実験で観測されている高イオン温度領域での ITG モードによる密度揺動を再現でき、また、イオン熱伝導率が実験と定量的に合うなど、さらに研究が前進している。(1名)

- 新古典論による熱拡散の予測ができるようになったのであれば、それを炉に適用して温度がどこまで上昇するかの評価ができると思うが、それがまだなされていない。(1名)
- HINT2 コードで高ベータの場合の 3 次元平衡を解いているが、ベータ値が 3% までであり、現実には 5% 程度が達成されていることを素直に認め、前に進むべきであろう。(1名)
- 原型炉への貢献を行う前に、物理要素の研究の成果を実際の放電に当てはめて、現実の放電が再現できるかどうかを確認する必要がある。現実の放電が再現できなければ、将来の炉のシミュレーションは不可能である。物理要素の研究と同時に、たとえそれがまだ不完全であっても、全体的な放電がシミュレートできるかどうかの研究を行うべきであろう。再現ができなければ、そのときにどのような研究が足りないかもまた見いだすことができる。この放電シミュレーション、いわゆる統合シミュレーションが他の外国の研究所に比して大きく遅れていることに大きな危惧を感じる。(1名)
- 統合輸送解析コードの構築は大きく進展している。特に、実験データ解析型のほうは、ごく短時間で実験データを計算機システムに取り込む自動化が進み、海外を含む多くの研究者により共有されている。これにより LHD におけるプラズマ挙動の解析が進んでいる。同時に到達パラメータ予測型コードへのフィードバックも進みつつあり、LHD 最高性能化へ大変寄与している。原型炉設計へ向けての努力は、多くのコード群の開発に現れており、複雑な核融合プラズマ現象の理解に向けてシミュレーションコードの整備は順調に行われている。しかし、多くのコード群の一元的管理あるいは有機的連携や有効活用がさらに望まれる。非線形・非平衡プラズマ物理現象解明のために必要となる大規模並列計算機を用いた計算科学の高度化が幅広い分野にわたって進んでいる。(1名)
- 3 次元 MHD 平衡系の解析のための計算コードの解析、MHD 計算による実験研究の進んでいない高いベータ値での解析、ジャイロ運動論的シミュレーションコードの開発による乱流輸送の解析の進展、ジャイロ運動論的解析によるイオン熱輸送を始め、成果が上がっている。(1名)
- ヘリカル系プラズマを中心に、平衡、MHD 安定性、新古典輸送、乱流輸送、高エネルギー粒子、周辺プラズマ、プラズマ壁相互作用等の幅広い分野をカバーする数値計算コードが開発され、その成果が発表されていることは高く評価する。また、統合輸送解析コードが実験データ解析に向けて拡張され、予測シミュレーションが原型炉設計にも適用され始めていることも高く評価する。今後、LHD 等の実験データとの比較に

よるコードの妥当性検証がさらに進展することが望まれる。(1名)

- プラズマの様な複雑多様な計算科学の高度化には多くの時間と人が必要であるとするならば、核融合炉の研究までは手が回らないのは自然であり、さらに人員を増やす必要が出てくる。(1名)
- プラズマ・壁相互作用や原子・分子素過程などが複雑に関与するダイバータ物理に関する研究へのより一層の貢献が求められよう。(1名)
- 開発された並列処理ルーチンを、幅広く容易に利用できる汎用ライブラリ等の形で公開することが望まれる。(1名)
- Construction of Numerical Test Reactor for a helical fusion system including contribution to the development of high-performance LHD plasma and to the design of a helical demo reactor, and to the sophistication of computational science appears as a highly warranted and smart approach for upgrading the LHD performance and addressing issues pertinent to a Helical Demo Reactor. Progress has been made in many areas such as 3D MHD equilibrium / stability and nonlinear simulation codes, drift kinetic and gyro-kinetic simulations, hybrid simulation code and integrated transport code for fast analysis and prediction of dynamic and steady-state transport in the LHD plasma. Research achievements in simulations of peripheral plasmas and plasma-wall interactions encompass a wide range of issues .including 3 D fluid code for peripheral plasma, 3 D kinetic code for neutrals applied broadly in LHD, transport and re-deposition of carbon on first wall near divertor tiles and molecular dynamics simulation for hydrogen irradiation on carbon. Contribution to the design of helical demo reactor includes programmatic collaborations with Fusion Engineering Research Project aimed at FFHR-d1 design, integrated transport code TSK3D, 3D high β equilibrium with chaotic field lines in FFHR-d1 and global particle simulation code FORTEC 3D evaluating neoclassical thermal transport in FFHR-d1. Contributions to the sophistication of computational science are offered by the gyro-kinetic ion/fluid electron hybrid simulation code enabling efficient fast calculation of electromagnetic turbulent transport in helical plasmas; particle-MHD hybrid simulation code parallelized with 3-dimensional domain decomposition; novel simulation method for molecular dynamics adopted for extensive study of fusion materials and the flux-tube bundle model; PIC -MHD interlocked model and multi-scale AMR module; thereby in summary enhancing predictive potential of simulation studies for designing the helical fusion reactor. The synergy of codes and methods remains a very important issue.

- With introduction of two major objectives of NSRP, the extensive simulation code developments and numerical studies have been performed and made comparison with LHD experimental results contributed to guide and help development of high-performance LHD plasma as well as enhancing physics understanding, greatly.

There are many high-level outputs in the numerous areas such as MHD Equilibrium/Stability, Drift-kinetic/Gyro-kinetic Simulations, Hybrid Simulation, Fluid/MD Code, Integrated Transport Codes etc.

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 (TASK3D-a and TASK3D-p), 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.

Along with extensive simulation code development effort, NSRP puts a lot of effort to make contribution to the sophistication of computational science such as Gyro-kinetic ion/Fluid-electron Hybrid method, Particle-MHD Hybrid scheme, Molecular Dynamics method, etc. It is commended to these efforts and recommends further investigations.

- The presentations exhibited significant progress for each of a comprehensive suite of codes including MHD equilibrium, core kinetic transport, neoclassical transport, fast-particle driven modes and edge transport codes. Particularly impressive and interesting were the comparisons of simulations with experimental results from LHD. In some cases these point to possible shortcomings in the models and suggest avenues for improving them.

One such comparison was between the HINT2 code and the measurements of the electric field in the edge region. The experiment-simulation comparisons may shed light on the disagreements between HINT2 and PIES, the principal other 3D equilibrium code. Further comparisons with experiment also extend the prospect of clarifying the role of rotation on island size, a phenomenon that is not described by either PIES or HINT2.

Gyro-kinetic simulations of turbulent transport have enabled equally impressive comparisons with experiment at the level of the fluctuation spectrum. The good agreement between measured and calculated values of the flux has led to the formulation of a useful heuristic model for the flux. The extension of the arsenal of

codes to include electromagnetic physics is making good progress and shows great promise.

Other areas of where the numerical research is carried out at an international level include the wave particle interaction theory showing the formation of hole-clump pairs, and the study of edge transport using the EMC3-EIRENE code.

Only two PFR papers could be found for the MIPS code, and no publications for the MINOS code, both of which were presented in several places in the presentations as having reached a mature level, including nonlinear capabilities in plasma with chaotic fields. It is unfortunate that the MIPS papers lack information concerning the numerical scheme.

- The NSRP has produced quite a number of highly ranked papers and some awards. An impressive suite of numerical codes has been developed. In particular, the gyro-kinetic code developments are among the best in the world.

Especially with regard to the long-term goal of developing a “numerical test reactor”, careful code validation is of utmost importance. Only after validation, the codes can be integrated and allow one to make concrete forecasts on performance parameters, stability, divertor loads etc. LHD must be the chief instrument for the validation of the various codes. A good example is the “super dense core” regime, more recently discovered on LHD, which is not yet well understood. Here, a systematic analysis with numerical codes would be of great value. In addition to the validation aspects, a close linkage between the experimental program of LHD and the NSRP could well pave the way to improved performance of the device (e.g. HINT2 equilibrium calculations w.r.t. divertor compatible discharge scenarios). A suitable organizational structure should be able to foster such a close collaboration. In addition, 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. If stellarator geometry imposes a problem, simplified geometries could be chosen.

- The NSRP is in its first phase, which is preparation of numerical models of separate physical mechanisms. Integration of these models into multi-physics models is not planned to occur until later in this decade, and construction of an NTR is planned for start at the end of the decade. This late start of development of the integrated NTR is concerning, since it may then be challenging for it to be completed and validated in time to contribute to the helical-DEMO decisions planned for ~2022. Regarding contributions to LHD, the design of a helical DEMO reactor, and to computational science, see the next section (2.2).

以上より、この数値実験炉の構築に対して、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 3 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

- 非線形電磁流体挙動、乱流や帯状流、磁気島、周辺プラズマ挙動など、核融合プラズマの物理機構の解明につながる高いレベルの大規模シミュレーションが進展し国際的に高く評価される成果を挙げている。核融合プラズマの物理機構の解明に対するシミュレーションによる寄与は大きなものがある。(13名)
- 個々の核融合プラズマ物理現象のシミュレーションによる物理機構の解明は進んでいるものの、各要素研究を有機的に結び付け、それぞれの要素研究で得られた成果を俯瞰的に説明する全体としての理論的体系化は今後の課題である。これを進め、プロジェクトにフィードバックすることが必要である。(6名)
- まずは理論的視点からのアプローチが重要であるが、今後は将来計画も含めてヘリカル系の最適化、LHD 型核融合炉の信頼性のある設計に向けて理論・シミュレーション分野が牽引してゆくことを期待する。(3名)
- 単に理論体系化をはかるのではなく、強い意志をもって、核融合炉実現のための新しい理論を生み出し、体系化をしてほしい。(1名)
- 環状プラズマの統合的理解に向けた努力は評価できる。トカマクプラズマでも 3 次元効果が発現しており、ヘリカル系で開発されてきた 3 次元プラズマを対象とした解析ツールを活用している点は評価できる。(1名)
- 物理機構が解明されても、その結果を生かす手法がわからなければ核融合炉の実現は難しい。従って、物理機構の解明に満足せず、それを活用する手法を考え、強い意志をもって、核融合炉実現のための新しい理論を生み出してほしい。(1名)
- 核融合プラズマは非線形・非平衡科学などの現代物理学の最先端領域を牽引している。ヘリカルプラズマ研究からも理論的な体系化および一般学術分野への発信を期待する。(1名)
- 「LHD 実験データ解析型」および「到達パラメータ予測型」の統合輸送解析コードの開発が進められているが、これは実験家にとっても、実験検証を経たモデルの創出、予測性能の向上を図るために、極めて大事なプロジェクトである。(1名)
- NORM コードを活用したベータ上昇による非線形ダイナミックスの結果(局所平坦構造形成という自己組織化)は、LHD プラズマの安定化メカニズムとして興味深い。高く評価する。(1名)
- LHD における高密度プラズマ崩壊シミュレーション、圧力駆動型不安定性と二流体効

果、高エネルギー粒子の物理、周辺プラズマ輸送などなど、多くのシミュレーション研究で、核融合プラズマの物理機構解明につながる成果をあげている。高く評価する。

(1名)

- 核融合プラズマ体系を、炉壁を含む全系が多階層・非線形・非平衡・開放系としてとらえ、各要素の物理解明が全体系の理解と制御につながるという戦略で体系化を進めているように思われる。こうした要素還元論的戦略はそれなりに成功を収めてきた。各要素の計算コードを連結して全体像を得る（数値計算炉）という基本戦略はそれなりの正当性があり、高く評価する。部分系はある意味で独立・隣接した部分系として全系を構成しているわけではなく、お互い複雑に関連し合って相互作用している。理論体系化としてはこのような複雑系の理解につながるアプローチにも取り組みれば他分野への発信力が増すと思われる。(1名)
- LHD 実験では高ベータ値が得られているにもかかわらず、理論的にはなめらかな圧力分布では不安定であると考えられていた。しかしながらマルチスケールシミュレーションによって、ベータ値が上昇する際には、共鳴近傍に形成される圧力の局所的平坦構造が平坦なまま上昇するので不安定が抑えられ、全体のベータ値が上昇するというメカニズムを明らかにしたことは極めて高く評価する。(1名)
- LHD ではトーラス内側からのペレット入射はトカマクに比して入りにくい傾向にあるが、ペレットプラズモイドの運動を詳しく調べた結果、結合長の違いにより説明できることがわかったことは極めて高く評価する。(1名)
- LHD 実験の打ち寄せ配位において、ヘリカルリップルが少ないためにおこる帯状流がイオンの乱流熱輸送を抑えていることをジャイロ運動論的シミュレーションによって示したこと、新古典輸送によって起こる半径方向電場によっても帯状流がさらに増大すること、そのポロイダル回転マッハ数に応じて帯状流が増えることから、大きな同位体である重水素プラズマではより強い帯状流となり、重水素実験での閉じ込め増倍が期待できる等、また、イオン温度勾配による乱流のつくる帯状流はより小さな乱流渦に変化していくことをジャイロ運動論によって定量的に評価できるようになったこと、その他、運動論的流体シミュレーションによってトカマクでの帯状流を研究するなど、トーラス系の閉じ込めに重要な乱流理論体系化を着々と進めている。(1名)
- 特に、今までの事例は実験の後解釈に重点が置かれていたが、この問題は実験に先立つ予測であり、実験を進める原動力になっていることは注目に値する。(1名)
- 磁気島ができると熱輸送が増大、またその領域が広がり、帯状流も変化するなど、また、共鳴摂動磁場を印加するとイオン熱拡散係数が大きくなるなど磁気島の研究が大きく進展している。(1名)
- 多くのシミュレーションコードと実験による検証を踏まえながら、3次元 MHD 平衡解析、特に高ベータにおける炉心および周辺プラズマの不安定性物理機構の解明が進んでいる。帯状流や乱流現象における輸送現象においては、運動論的流体シミュレーシ

オンや 2 流体シミュレーションなどによる計算結果が乱流理論と比較しながら解析されている。また、高エネルギー粒子とプラズマとの相互作用、プラズマと壁相互作用など核融合プラズマ物理の素過程の解明が進んでいる。(1名)

- 高エネルギー粒子と MHD に関するハイブリッド計算コードの開発により、非線形 MHD 効果を考慮した解析が可能となったこと、分子シミュレーションとに体衝突近似を考慮したハイブリッド計算コード開発し核融合炉での反応の開発を推進したこと、LHD プラズマについて磁気軸大半径が 3.6m の完全 3 次元 MHD シミュレーションによるプラズマの安定性の解明など、成果が得られている。(1名)
- 理論体系化に向けて、レビュー論文や教科書の執筆を一層進めることが望まれる。(1名)
- 運動論的輸送シミュレーショングループは理論・シミュレーションの連携がうまく機能しており、レビュー論文を出版している点も評価できる。またプラズマ壁相互作用グループは斬新的な研究を進めており、今後に期待できる。(1名)
- Physics mechanisms of fusion plasmas addressed within the framework of the project are vast and novel and their theoretical systemization appears to be profound. They range from energetic particles issues, magnetic reconnections, zonal flows, E_r impact on edge transport to nuclear fusion material development. Interaction of turbulence and zonal flows is analyzed quantitatively by means of entropy transfer function. Turbulence, structures and transport in the core and edge regions are addressed by means of complex analysis. Turbulence diagnostic simulator is developed for numerical diagnostics of turbulent structures. Collisionless kinetic-fluid simulation clarifies the impact of magnetic configuration in LHD and a micro-instability in tokamaks on the zonal flow generation. Particle simulation must bring to light the propagation and inherent currents generated by lobes within the SOL plasmas. Simulation methods applied to the toroidal neoclassical viscosity enable qualitative analysis of the bias experiment carried out in LHD. The emergence of hole and clump pairs is ascribed to nonlinear frequency chirping of energetic particle driven by GAM's. In summary, the list of achievements in understanding of physics mechanisms is quite long. Yet, more focus on the near-term LHD related issues is highly desirable.
- In addition to contribution to the development of high-performance LHD plasma, to the design of a helical demo reactor, the NSRP has produced high-level results in the areas of Nonlinear MHD, Turbulence, Zonal Flow, Peripheral Plasma for elucidation of physics mechanism. It is however, to recommend considering how these efforts could become 'project' rather than 'program' in nature.

- Considerable progress has been achieved in the elucidation of the basic physics mechanisms for the confinement of fusion plasmas. The high level of the fusion science performed as part of the NSRP is reflected in the metrics presented during the review describing the number of high-profile publications of various types.

Of particular note is the novel moment-equation method for calculating neoclassical transport fluxes, which has served as a foundation for the ORNL PENTA code.

The NSRP is continuing the international leadership of NIFS in the simulation of the interaction of long wavelength MHD modes with turbulence using reduced two-fluid models. Particularly interesting are the simulations of the interaction of magnetic islands with drift wave turbulence as well as those investigating the interaction of Resonant Magnetic Perturbations (RMP) with resistive ballooning turbulence. The addition of neoclassical effects to these models sounds very promising but has not yet yielded clearly novel results.

The NSRP has been playing a key role in connecting the helical confinement community to the tokamak community by showing how insight gained through research on helical devices can contribute to our understanding of tokamak physics. The research on RMP and that on the quasi-single helicity (QSH) state in the RFP provide two good example of this.

The NSRP has also developed a strong program in plasma-material interface including codes describing dust dynamics and molecular dynamics codes using the binary collision approximation and density functional theory to evaluate the effect of the irradiation of plasma-facing components.

In summary, the NSRP does produce high-level results in accordance with international standards for research in fusion science.

- I'm afraid that I do not quite understand what is meant with "theoretical systematization". Within the NSRP, quite a number of new and timely physics issues are addressed in the fields nonlinear MHD, turbulence, elementary processes. An example for cross-transfer of knowledge is the work on the helical state in reversed field pinches. As above, it is recommended to make systematic comparisons to LHD experiments wherever possible. An example is the turbulent peel-off of blobs: The concrete observation of blobs on LHD would be an important complement to the numerically obtained results.

We also note that there is a significant outreach to other fields in NINS, for example to inertial confinement fusion.

- The NSRP has made substantial progress and advances in the modeling of individual physical mechanisms. The NSRP has world-leading models in many

areas, including:

- 3D-toroidal magnetic equilibria, including islands and stochastic field regions
- 3D transport simulation
- 3D non-linear MHD stability

A large number of impressive new modeling results have been obtained for specific phenomena in 3D-helical configurations, showing advanced capabilities, including

- gyro-kinetic simulations of turbulence and turbulent transport, including electromagnetic terms and non-linear flow effects
- 3D neoclassical effects on flows
- non-linear MHD simulation of core-collapse of pellet-peaked high pressure plasmas
- Energetic particle-driven instabilities
- Edge plasma characteristics and divertor plasma-wall interaction
- Materials properties for the walls of a fusion system

These new models have been applied to interpreting LHD data and experiments, and used for simulating the expected plasma phenomena in a future helical DEMO system such as FFHR-d1, and are clearly providing world-class capabilities. A number of these simulation codes have developed very sophisticated numerical techniques, including 3D domain decomposition, multi-scale and linked multi-physics capabilities (e.g. MHD stability and kinetic effects).

While comparisons between many of these simulations and LHD were shown, systematic validation of the simulations was not discussed. Conducting a rigorous validation and verification of the simulations is important to provide the basis for using them to accurately predict the behavior of future fusion energy systems, such as a DEMO.

The TASK3D integrated transport code suite has been developed and released for wide use. It builds upon a number of reduced models (e.g. VMEC instead of HINT2), and can be used for either analysis of experiments or prediction for new conditions. The predictive form is being used to investigate ways to extend the performance of LHD plasmas and for predicting FFHR-d1 performance and characteristics.

The plans for future integration and the approach for developing the integrated NTR were not discussed, but need to be planned carefully. Will the models in TASK3D be upgraded to include the sophisticated simulations of detailed physics, such as magnetic islands, turbulent transport, or non-linear MHD evolution? Will the NTR build upon TASK3D or use a separate framework? The coupling of the many separate physics models must be planned carefully to preserve accuracy and

computational efficiency.

以上より、この核融合プラズマの物理機構解明とその理論体系化に対して、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2名であった。

[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

Promotion of collaboration regarding to the NSRP

(1) 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。

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

- 毎年100件以上の共同研究がNIFSを中心として実施され、計算機資源とシミュレーションに関する知見を有効に活用していることや、毎年100名を超える研究者が参加するプラズマシミュレータシンポジウムを開催し研究討論している。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。(13名)
- スパコンの高速化は今後も益々進んでゆくと思われる。一方、それを使うだけの高度なプログラムの開発や計算スキルの促進が、今後さらに強く求められよう。核融合研の数値実験研究プロジェクトでも、このような計算科学に関する研究基盤の充実と人材育成を視野に入れた活動を期待する。(1名)
- プラズマ分野・プラズマ分野以外の応募状況を常に把握して、他分野からの参入、他分野との交流による新しいアイデアと方法論の発見にも努力することが期待される。(1名)
- 各研究で得られた資源を広く周知し、使いやすい形で共同研究者に広げる努力を今後進めてほしい。(1名)
- 数値実験研究プロジェクトの導入によって、共同研究がさらに推進され研究内容が向上しているのか導入前との比較が明示できればよかった。(1名)
- Theory and plasma simulator collaboration research scheme provides for feedback by incorporating both programs proposed by NIFS and many domestic collaborators. It utilizes also the LHD Numerical Analysis Server. Number of accepted collaboration subjects is more than 120 and the number of people involved exceeds 1,000. Plasma Simulator Symposium provides collaborators with exchange of ideas, results and most importantly recent findings obtained during the LHD campaigns. Many collaborators from universities and institutes join the NSRP task groups in different capacities ranging from leaders to computational supporters. The NSRP

has produced impressive amount of high ranking publications employing many domestic and international collaborations. The NSRP is playing an important role in disseminating advantages and achievements of fusion research in Japan, promoting collaborations with NINS and the outreach to the general public. Many specific programs of general physics interest are launched due to NSRP activities. University programs benefit greatly from collaborations under the framework of the NSRP.

- By integrating capabilities of domestic universities and institutions, the NSRP effectively promotes collaboration in the area of fusion numerical simulation. The strong evidence is continuing steady stream of 1,000+ collaborators with more than 120 collaborative works each year for 5 years. It is also well noted that the NSRP has included collaborators in all nine Task Groups, and performed information dissemination through “Plasma Simulator Symposium”.
- The NSRP is effective in its promotion of collaborative research and in the integration of the skills of universities and institutes. The 458 papers produced by the Theory and Simulation Department and the NSRP from 2008 to 2012 demonstrate the effectiveness of the NIFS collaboration network in this domain of research. The proportion of 3 collaborators for 2 NIFS researchers seems well suited to allow NIFS to impart programmatic directions and maintain critical mass in priority areas. The backbone of the NSRP is clearly provided by the NIFS researchers who constitute 76 (55 sim. and 21 exp.) of the 103 participants in the task groups. External collaborators nevertheless provide key capabilities such as in the area of plasma-wall interaction where they also provide the bulk of the manpower. The overall project would benefit from increasing the in-house manpower for this task group along with that for the peripheral plasma transport task group (presumably edge/SOL/divertor). Strengthening the peripheral plasma transport task group can probably be achieved with existing resources through internal reallocations.
- The publication record of the NSRP is good 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 is 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, which makes the management challenging. There are three areas of work: (a) general theory, (b) plasma simulator, (c) numerical methods. My recommendation is

to perform a systematic assessment of each single collaboration subject to make sure that it actually contributes to the research goals of the NSRP.

- Yes, the NSRP is functioning well as a collaborative center of excellence. Many of the simulation codes and models discussed are collaborations between NIFS and University based researchers. NSRP is receiving ~50 proposals for collaborative research from outside NIFS, and ~600 university researchers are participating. These are very strong numbers, indicating a healthy, fully functioning center.

以上より、この COE としての共同研究推進に対して、極めて高く評価するが 13 名、高く評価するが 5 名であった。

(2) 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。

Is the Plasma Simulator effectively utilized for collaboration research?

- プラズマシミュレータを用いたプロジェクトが毎年 50 件以上実施され、所内外の研究者 150 名以上が利用し、年間 1 万件以上のジョブが実行されているなど、共同利用資源としてプラズマシミュレータは有効に利用されている。さらに 5 年間で 450 本以上の論文を書いていることは特筆に値する。(13 名)
- 最近では国際共同研究関連の論文がやや減少傾向と見て取れるので、今後の充実を期待する。(1 名)
- プラズマシミュレータは多くの計算ノードを持つので、計算時間とともに計算効率のさらなる向上も目指されたい。(1 名)
- 国内の理論・シミュレーションの人材（院生・教員・研究者）に比べて NIFS の研究者数は格段に多いと思うので、所内の活用がむしろ少ないのか、他分野からの活用が多いのか、を分析しつつ有効利用の目標を定めていくのが望ましい。(1 名)
- The NSRP offers a wide range of options to enhance progress in fusion science. More than 50 projects per annum were performed within the framework of the Plasma Simulator Collaboration research program. 150 users including 50 from NIFS and 100 from universities utilize Plasma Simulator per year. 458 papers are published by domestic and international authors deriving from the NSRP program. More than 10,000 jobs are run on Plasma Simulator every year. It demonstrates high level of numerical efficiency. The average operating rate amounts to 90 % to be considered high according to international gauges. In summary, the efficiency of the Plasma Simulator group is excellent.
- By effective utilization of “Plasma Simulator”, the NSRP provides a great

opportunity for fusion numerical simulation studies in many collaborators. More than 150 “Plasma Simulator” users collaborated in more than 50 projects every year in 5 year period. This collaboration produced high-level output by 100 or so papers published per year.

- The plasma simulator is well utilized in the context of collaborative research. Specifically, it supports 50 users from NIFS and 100 from universities. The Plasma Simulator Symposium brings together approximately 80% of the 150 or so users, demonstrating a committed user community. It is interesting that the 150 Plasma Simulator users constitute a rather small fraction of the thousand or so NSRP collaborators from NIFS and universities. The remainder of the collaborators presumably relies on smaller clusters and workstations for their computational needs.
- It is difficult for me to judge how efficient the use of the Plasma Simulator is. This depends on the code efficiency (e.g. efficient use of modern numerical methods) and on the choice of subjects addressed within the various different collaborations. As already mentioned in [3](1) above, the introduction of a systematic assessment would be useful. Here, also the (numerical) cost and the scientific value for the NSRP should be evaluated.
- Yes, the Plasma Simulator supports ~50 proposed projects per year, most of which are collaborations between multiple institutions. Roughly 24 of these projects per year are proposed by external collaborators. There are more than 100 external users of the Plasma Simulator. Over the last 5 years, these collaborations have produced approximately 90 publications per year.

以上より、このプラズマシミュレータの活用に対して、極めて高く評価するが 9 名、高く評価するが 8 名であった。

(3) 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。

Does the NSRP function as a research hub for the dissemination of academic information to other fields, by promoting the NINS (National Institutes of National Sciences) interdisciplinary cooperation research and so on?

- 自然科学における階層と全体、非平衡物理学の新展開、ナノ光学イメージング分光、非平衡を制御する科学、大規模データの効率的圧縮、磁気リコネクションの運動論的シミュレーション等、6つの機構内連携研究等を積極的に推進し、他分野へ発信できる学術拠点となっている。(13名)

- 他分野へ発信する努力は不足している感があり、今後さらに努力が必要である。(2名)
 - 数値シミュレーション科学の大きな特徴の一つは、様々な物理現象の背後に潜む数理構造がそのまま数理モデルの構築に反映され、数理構造が同等ならば同様の計算手法が分野を問わず応用可能であるというところにある。この特性を生かして天文科学、物質科学そして核融合科学に関する大規模シミュレーション研究を主軸に据えた分野間連携研究が進んでいる。個々の物理現象だけでなく、現象を多くの階層からなる物理現象としてとらえ、階層間の連結を通じた全体像を解明するという考えのもとに、共同研究や国内外のシンポジウムを開催してきている。これらの活動により、シミュレーション科学の重要性と向かうべき方向性を先導的に発信してきていることは極めて高く評価できる。(1名)
 - まだまだ機構内連携に留まっており、それをベースとして学術分野への発信は弱いと言わざるを得ない。今後のさらなる一層の努力を期待する。(1名)
 - 今後は他分野との共通点をもとに進めている連携研究から、プラズマ固有の手法、固有の理解が他分野へ発信できるような戦略的な目標をもって進めることが望ましい。(1名)
-
- Following programs such as Hierarchy and Holism in Natural Sciences, Near-field Optical Imaging of Enhanced Electric Fields and Plasmon Waves in gold Nano-rods, magnetic reconnection studies at the kinetic level are pursued rigorously reaching the level of studies at high level and in detail. Project “ Science for Controlling Temperature in Non-equilibrium State ” should be acclaimed due to invoking of joint forces of NIFS and IMS and involving 5 Japanese leading universities. In summary, the NSRP is very instrumental maintaining NINS umbrella infrastructure within the framework of NIFS activities.
 - The NSRP also played significant role to promote new interdisciplinary fields under NINS cooperation program by organizing symposia and promoting collaborations.
 - The NSRP plays a central role in disseminating results and methods from fusion research to other fields through the organization of symposia and the promotion of collaboration under the umbrella of the NINS interdisciplinary cooperation framework.
 - It appears that the NSRP fulfills its role as a “research hub”, since it coordinates and conducts a large variety of numerical simulation works, thereby covering a large spectrum of topics.
 - Yes. The NSRP and NIFS participate in at least six of the NINS cooperation programs and projects, which are organized to promote interdisciplinary cooperation. These activities also have collaborators from Universities, domestic

institutes, and foreign universities and institutes.

以上より、この機構内分野間連携研究の推進と他分野への発信に対して、極めて高く評価するが7名、高く評価するが6名、評価するが5名であった。

(4) 大学の研究発展に寄与しているか

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

- 理論の各分野において、多くの大学と共同研究を実施し、大学の特徴ある研究を進展させ、レベルの高い多くの成果が生み出されている。また、統合輸送コードの開発、大規模可視化ツールの開発、様々な数値シミュレーションコードを開発するなど、多くの大学の研究発展に寄与していると思われる。(13名)
- 今後も、大学の研究者の利用機会を、維持・拡大させてほしい。(1名)
- 今後はもう少し数値実験炉の構築に向けて、個別の共同研究ベースから、大学の基礎実験も含めた総合的な実験・シミュレーション・理論・炉設計の軸を打ち立ててそこに共同研究を集約することも大切であろう。(1名)
- Japanese universities are active participants in the NSRP activities. Their contributions are valuable elements complementing NSRP in a broad range of issues. The NSRP infrastructure provides universities with access to the cutting edge of fusion research. To name some current topical and timely issues; erosion of graphite as demonstrated by experiments at Nagoya University borne out theoretical prediction obtained by molecular dynamics model developed at NIFS. Collaboration with Nagoya Institute of Technology contributes to the development of advanced simulation methods. Studies on helical structure formation at Kyoto Institute of Technology in collaboration with NIFS shed light on a single helicity state highly beneficial for magnetic confinement in Reversed Field Pinches. This subject is the unique contribution to the international RFP program.
- As NIFS plays a central role of fusion collaboration among universities in Japan, the NSRP is also plays very important role of fusion numerical simulation collaboration among universities with more than 13 universities with significant collaboration topics. It is worthwhile to note that the NSRP organized five and more collaboration workshops every year for promoting collaboration among universities.
- The NSRP contributes to the development of research in 13 universities. Much of the more aggressively exploratory work is done in collaboration with universities. The collaborations are fostered by over five workshops per year, an amount that

seems abundant. The relationship with universities is important for the exchange of knowledge acquired as part of the NSRP.

- NIFS has developed an impressively dense network of collaborating universities. The NSRP is benefiting from this network and the development of research in the universities is clearly fostered by its activities. Besides the mere access to supercomputing facilities, the NSRP is providing support in computer science and numerical mathematics. The exchange of physics know-how seems to work very well. A useful instrument for the exchange of know-how is to organize dedicated joint workshops; these should be conducted on a regular basis with a small, focused group of participants.
- Clearly yes. See (3.1) and (3.2) above for details on University involvement. Some 13 Japanese Universities participate in collaborations with NIFS and the NSRP.

以上より、この大学の研究発展への寄与に対して、極めて高く評価するが 8 名、高く評価するが 10 名であった。

[4] 国際連携・共同研究の推進

Promotion of international cooperation and collaborations

- (1) 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。

Does the NSRP play a role as an international COE through international collaboration research?

- 核融合科学研究所は、日米共同研究である日米核融合理論共同研究 (Joint Institute for Fusion Theory: JIFT) の日本側ホスト研究機関としてその推進に大きな貢献をしており、核融合研のみならず、多くの大学研究者も大変恩恵を受けている。また、欧州地域でも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、テキサトール協定、磁場核融合に関する国際連携研究所 (LIA) などでも大きな役割を果たしている。
(13 名)
- 日中協力事業によるダストの共同研究が中国の核工業西南物理学研究院 (SWIP)、中国科学院等離子体物理研究所 (CASIPP) と行われている。日米、日欧、日中の共同研究の対象課題を戦略的に構築し、人的交流を積極的に図る事が望まれる。(3 名)
- 日韓協力事業においても、共同研究を推進することが望まれる。(1 名)
- ヘリカル系の最適化を国際的な舞台で議論しており、3次元効果を中心としてトカマクへの幅広い貢献を果たすなどして、今後も国際的な COE としての役割を期待する。
(1 名)

- The NSRP plays a central role in promoting US-Japan collaboration program, wide range of collaborations with the EU fusion program takes place. Japan- China cooperation is pursued successfully in the field of MHD stability and dust particles in fusion plasmas. The NSRP carries out collaborations with US through Joint Institute for Fusion Theory employing leading scientists from both countries. NSRP organizes JIFT workshops and provides funding for exchange of scientists from both sides. In summary, international collaboration program is an excellent achievement.
- As NIFS played a central role in promoting US-Japan Joint Institute for Fusion Theory for long years, NSRP continued playing major role in collaboration with US through JIFT activities. Also, NSRP promoted wide-range of collaborations with European institutions, ITER/ITPA and IEA activities. Collaboration with Chinese institutions such as ASIPP and SWIP is also progressing. It is however, recommended to broaden international collaboration opportunities with other ITER partners
- NIFS has long had a strong program of collaboration with the US, managed through the Joint Institute for Fusion Theory (JIFT). Its collaborations with other countries appears to be less formally structured but of comparable effectiveness. Collaborations with Europe have led to several important benchmarking exercises such as GKV with GENE and MINOS and MIPS with CAS3D. There have also been important applications of NSRP codes to foreign experiments such as the study of RMP response with HINT2 and the calculation of the quasi-helical states in RFX. Nevertheless, the proportion of papers published with foreign-based collaborators is very modest and it is difficult to think of any other aspect of the NSRP that is more amenable to improvement without requiring significant new resources. A great deal of the results of NSRP research is published in “Plasma and Fusion Research” (PFR) which has very little visibility, so that much of the NSRP achievements are quite unknown outside of Japan. This could be remedied by establishing the practice of regularly publishing review papers in international journals that would point the interested non-Japanese readers to the original PFR papers.
- To play the role of a international COE, the international collaboration partners should be carefully selected. A systematic approach is recommended to assess (a) the quality of the collaboration partner and (b) the value of the collaboration. With regard to (b), a gap analysis in know-how and man power of the NSRP would be useful.

It seems like the JIFT (JA-US collaboration) is well established and works perfectly

since many years. Joint workshops and papers are speaking a clear language. The systematic in the collaboration with EU institutions is not as obvious. As an example, it is not clear why for the collaboration on plasma turbulence a Serbian institute with a relatively weak standing was chosen. It is recommended to conduct an internal review of existing collaborations with the goal to identify first-class collaborations and areas, where the NSRP would benefit most.

- Yes. The NSRP has a number of international collaborators participating in its projects. In addition, the NSRP has strong collaboration and personnel exchanges programs with the US, EU, and China. This includes JIFT, the joint institute for Fusion Theory, and a large number of topical collaborations with individual institutes on specific topics and codes.

以上より、この国際的な COE としての役割に対して、極めて高く評価するが 9 名、高く評価するが 8 名、評価するが 1 名であった。

(2) ITER 計画・BA 活動との連携、貢献を図っているか。

Does the NSRP promote cooperation with and contribution to ITER and BA activities?

- 核融合科学研究所の六ヶ所研究センターが国際核融合エネルギー研究センター (IFERC) のプロジェクトリーダーを務めていること、IFERC のコンピュータシミュレーションセンターの研究課題の遂行、JT-60SA の共同研究の推進、国際トカマク物理活動 (ITPA) の会合へ参加していることに加え、ITER と核融合研との間の高速データ転送のテストなどにも貢献しており、ITER 計画や BA 活動にも積極的に参加・貢献している。(13 名)
- ITPA には、数値実験研究グループのメンバーが高エネルギー粒子グループと周辺・ペDESTALグループの国内委員としてそれぞれ 1 名参加し、年 2 回開催されるトピカルグループ会合に参加している。これは NIFS のレベルとしては十分とは言えず、今後 ITER への貢献を戦略的に位置づけ、統合コードの世界標準化に貢献する必要がある。(2 名)
- さらに LHD のために開発された 3 次元コード群が、ITER をはじめとしたトカマクでも広く使われるようになってきており、国際的にも多大な貢献をしている点は高く評価できる。(1 名)
- 今後さらに多くのグループメンバーが参加し、ITER 計画・BA 活動との連携を進めていくことが期待される。(1 名)
- 六ヶ所研究センターの所長が IFERC 事業長を兼任することは理解できるが、ITER に

おける NIFS としての存在をより確かなものにするには今少しの人的貢献が必要かもしれない。(1名)

- LHD からの貢献、理論体系化への貢献など、何をどのように貢献するかまたそれによってどのような地位を得るか、などの戦略を確立することが大切と考える。基本的には数値実験炉の統合コードのベンチマークとして ITER 予測、ITER 実験をシミュレートして、それが世界標準になることを目指していると思うが、戦略的に高める必要がある。(1名)
- 今後も ITPA 活動などをはじめとして、トカマクやヘリカルを包含した環状プラズマの総合的理解のために大いに貢献することを期待する。(1名)
- ITPA への参加人数は必ずしも多くはないが、それはヘリカル研究を優先しているからであり、必ずしも無理をする必要はない。(1名)
- 今後の課題としては、六ヶ所研究センターを理論・シミュレーション研究者が訪れ、訪問実績や研究実績を積み重ねることである。また、共同研究枠に新規で BA 活動支援に関わるプロジェクト項目を作り、六ヶ所研究センターを拠点とした連携、貢献を陽に示していくことも検討すべきではなかろうか？(1名)
- NIFS Rokkasho Research Centre facilitates NIFS and associated universities participation in BA activities thereby creating a roadmap for collaborative research between BA and NIFS with universities. In a broader perspective International Fusion Research Center IFERC project is implemented in Rokkasho in order to contribute significantly to ITER construction and operation and to the long term realization of DEMO. To this end, the leader of the IFERC project combines his duties as the head of the RRC activity with headquarters at the Aomori Research and Development Centre fully operational already in 2012/2014. Major tasks for this position are very broad and include coordinating with the EFDA and the F4E European bodies of the similar function and assisting in implementation of Procurement Arrangements from Japan to ITER and BA. DEMO design and safety issues have also high priority on the agenda. The most important task is to design and operate the high speed data transfer experiment between NIFS and ITER achieving as high efficiency of the throughput as possible with the present day technology. In summary, it appears mandatory to amplify efforts to contribute to ITER design, construction and operation in the coming years in spite of given limitations of budget constraints.
- For contribution to ITER and BA activities, the NSRP engaged very actively in many areas of ITPA, and BA IFERC Computer Simulation Center activities. It is highly recommended to explore further collaboration opportunities in 3D physics

area such as RMP studies.

- The NSRP is participating in quite a few cooperative research projects for the benefit of ITER. In particular, it has two representatives in topical groups of the International Tokamak Physics Activity, or ITPA, and regularly sends additional participants to ITPA meetings. NSRP scientists additionally participated in a benchmark on Toroidal Alfvén Eigen-mode codes.

It is worthwhile to examine why the NSRP should participate in ITER and ITPA cooperative activities given that these activities do not directly contribute to progress towards the primary goal of the NSRP, which is the construction of a numerical test reactor with the aim of contributing to the design of a helical DEMO reactor. First, the cooperation enriches the NSRP by stimulating new ideas through the confrontation of helical and axisymmetric plasma physics. Second, it broadens the horizon of the NSRP community. Last but not least, it builds broad support for its activities by advertising its capabilities.

Participation in the IFERC, of course, is completely congruent with the goals of NSRP and it is gratifying to see that NIFS scientists are strongly engaged in this center and in the broader approach (BA) more generally.

- Recently, the NIFS Rokkasho Center Director was appointed as the IFERC Project Leader. This can be taken as a recognition of the NIFS activities in the framework of the ITER BA. In addition there are various committee memberships. Two members of NSRP are active contributors in the ITPA.
- Yes. NSRP personnel are collaborating in use and management of the IFERC computer center, part of BA and ITER. Several NSRP staffs are participating in the ITPA topical groups, working on ITER high priority issues and joint experiments. It is intended that the NSRP and NIFS provide a “bridge” to make it easier for Universities to participate in ITER and BA activities. At this time, ten Universities are making use of the NSRP and NIFS program to collaborate in the ITER and BA.

以上より、この ITER 計画・BA 活動との連携と貢献に対して、極めて高く評価するが 3 名、高く評価するが 14 名であった。

[5] 人材育成

Human resources development

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 human resources development of the international scientific workforce required for long-term fusion studies through simulation research?

- 平成 22 年度以降、総研大、名古屋大、京大、東工大などから大学院生を毎年平均 10 名程度、ポスドクを 3 名程度受け入れ研究指導を行い博士学位論文も提出されている。また、研究成果が主要な専門雑誌に掲載され、国際会議での発表も積極的に行われており学会賞を授与されるなど、若手研究者の育成がはかられていることは好ましい。また、学部学生向けに「夏の体験入学」や「アジア冬の学校」が開催され、核融合プラズマに関連する基礎的な理論・数値シミュレーションの手ほどきやバーチャルリアリティ装置によるプラズマ挙動を文字通り体験するプログラムが組まれている。特に、「アジア冬の学校」では海外からの参加者が年々増加傾向にあることは好ましい。学生が若いうちから、国際的な雰囲気の中で研究活動に触れる機会が設けられていることは、国際的に活躍できる人材育成に貢献しており、また、高校生に対してはスーパー・サイエンス・ハイスクール (SSH) やサイエンス・パートナーシップ・プロジェクト (SPP) を通じて理科教育に大きな貢献をしている。(13 名)
- 3次元コード群の開発を中心として、核融合プラズマのみならず計算科学分野での優秀な若手の育成には多大な貢献をしており、極めて高く評価できる。(1 名)
- 今後も継続してシミュレーション研究や計算科学分野を担う人材育成に努力してほしい。(1 名)
- 今後、さらに、人材育成の基盤を拡充し、発展させるために、大学と連携して、大学院生の教育をダブルディグリーなども視野に入れて、推進することが望まれる。(1 名)
- しかし逆に言えば、核融合分野の人材育成は大学を窓口としており、そこが枯渇すると直ちに先細りとなる。他分野との交流、他分野学生との交流を戦略的に位置づける必要があるが、そのためには広範囲な課題に対応する必要がある。(1 名)
- 長期的発展を考えるとという点で、このプロジェクトと言うことではなく、分野全体として何らかの対策が必要になってくるのではないかと思われる。(1 名)
- 在籍する研究スタッフの人数を考えれば量的にもさらに大きな貢献が期待されるのではなかろうか。(1 名)
- The NSRP contributes significantly to human resource development of international scientific workforce development for short-term and long-term supply of highly qualified specialists. Indeed, education programs are carried out at the Sokendai research center of advanced studies. There are education activities at the leading Japanese universities at Nagoya, Kyoto, Tokyo and Yokohama cities. The NSRP pursues rigorously training and education programs at all levels master,

graduate and postgraduate studies. Results are very impressive. 39 graduate students and 7 post-docs have successfully completed the program resulting in 10 dissertations, 46 published papers and 52 international presentations at the first rank international conferences. Furthermore, 13 research works were awarded to young researchers including highly distinguished Incentive Award of Japan Society for Simulation Sciences. The record of the alumni of these programs is impressive including many cutting edge contributions to international fusion research. The outreach to high schools is carried out by organizing study tours of NIFS facilities, demonstrations of modern hardware and tutorial lectures by the senior staff. A large reservoir of the theoretical knowledge and skills at many universities associated with NIFS can be used to enhance the NSRP impact. Scenarios focusing on the advantages of the D operation of LHD have to be worked out. Important subjects for general science such as self-organization, reconnection and holism project are addressed properly involving a small workforce. The progress in this area is important for the integration into the NINS infrastructure employing as large number of researchers from as many NINS institutes as possible.

- The NSRP contributed to develop human resource in the area of fusion numerical simulation research through Sokendai Education Program as well as other graduate studies programs with universities. It is worthwhile to note that a few of graduate alumni from the NSRP are now actively involved in fusion simulation research in many institutions.
- As a component of NIFS and by virtue of the latter's close relationship to the University community, the NSRP is an active contributor to the development of the international scientific workforce for fusion research. In particular, it participates in graduate programs at several universities, in cooperation with high schools science education programs, and in the organization and operation of several summer and winter schools. The steady increase in applications and participation in the schools by foreign students bears vivid testimony to its success.
- It is positively noted that a large number of PhD students is directly involved in the NSRP. There is also a growing number of papers authored by PhD students. This is clearly due to the numerous PhD projects based on collaborative action with the use of NIFS supercomputers. As a consequence, your researchers come into close contact with the NSRP and NIFS, which is clearly an asset. In addition, the NSRP is conducting outreach events at high schools, which is also very positive.
- Yes. The NSRP and NIFS provide support to approximately 39 graduate students working on numerical simulation projects from a variety of Japanese Universities,

and support seven post-docs. In addition, NSRP and NIFS have an educational outreach program for high-schools, a summer school and a program of public lectures.

以上より、この人材育成に対して、極めて高く評価するが 5 名、高く評価するが 12 名、評価するが 1 名であった。

[6] 将来計画

Future plans

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 research plan of the NSRP appropriate for the realization of the objectives?

Is it suitable and realistic for the next decade?

- LHD 実験や大型装置の実験をもとに、シミュレーション科学を発展させて、LHD の高性能化に貢献すること、及び原型炉設計に反映させる計画となっている。要素研究をしっかりと行い、さらに統合化して、数値実験炉をつくる研究計画は適切である。
(13 名)
- 次のステップとしての統合化については、抽象的で、数値実験炉構築に向けての具体的な目標が見えにくい。今後、計算機の能力との兼ね合いも有り、どのような統合・集積化が、数値実験炉を構築する上で実現性を見通した目標を明確にしてほしい。特に、個々の要素研究から導き出した物理研究やシミュレーション技法をいかに組み合わせ、将来の数値試験炉を構築していくかの道のりを示してほしい。その際には今の要素研究中心のグルーピングとは異なった組織再編成も必要と考える。(3 名)
- 3次元コード群の高度化のためには、超高速コンピュータが必須である。そのような超高速コンピュータを核融合研に整備するのか、それとも BA 活動や「京」などの外部のコンピュータに求めるのかの戦略が必要となろう。(1 名)
- 学術としての計算科学をリードする役割も核融合研には期待されるので、「京」およびその将来計画を議論する HPCI (High performance Computing Infrastructure) コミュニティ、また BA 活動での将来計画などにも、核融合研は積極的に関与し、リードしてゆくことを期待する。(1 名)
- LHD 計画の根幹となるトーラスプラズマの総合的理解のためには、ヘリカルとトカマクの両方に精通した核融合研の役割は極めて重要であり、この所期の目的のために引き続き努力して頂きたい。(1 名)
- 核融合研には理論・計算機シミュレーション分野で優秀な人材が数多く集まっている。この点を強く認識し、日本のみならず世界での存在感を強く意識し、学術的な発信拠

点として頑張ってもらいたい。また同時に、核融合分野に留まることなく、他分野への多種多様な学術発信を期待する。(1名)

- 数値実験炉が真に役立つためには実際の実験を精度良く再現し、物理を明らかにし、制御の信頼性を検証することにより、新たな実験を提案することが大切であり、このサイクルが効率よく回っていくことが重要である。その意味で、LHDを3次元効果の検証、定常運転における壁を含めたシステム総合性能の評価と検証、ITERの予測などを戦略的に取り入れることが重要である。(1名)
- この研究が進められて2年間程度しか経ていないので、まだ数値炉の全景が具体化されていない。要素技術群やその統合化においても何が課題であるかを先ず抽出することが重要であろう。そして、如何に課題を克服するか、その道筋を明らかにする必要がある。最終的には、数値炉に対して予測可能な理論シミュレーションを構築しなければならない。それまで多くの難しい課題があり、ロードマップを描きにくいと思われるので、数年毎に将来計画を見直して進める必要がある。(1名)
- 最終的にはヘリカル型原型炉、FFHR炉の数値シミュレーションが目標なので、FFHR炉での2つの運転シナリオである、高温・低密度運転、低温・高密度運転と場合分けをして、シミュレーション研究の明確な位置づけをして前に進む方が最善だと思われる。これらは物理的にも異なるし、シミュレーションの技法も異なるかもしれないし、興味深い現象を多く含んでいるので、そのような視点で前に進む必要がある。即ち、もっと核融合炉の実現に向けて、一般的な課題を解決するのみではなく、問題点を明確にしている炉設計グループとの緊密な連携をとり進むべきであろう。(1名)
- 高温・低密度運転領域での燃料供給はDT核融合炉のアキレス腱であり、現在のシミュレーション結果はそれが困難であることを示している。この問題は従来の延長線上にはなく質的ジャンプが必要である。必要は発明の母であり、そのための解決法を理論・シミュレーションの立場から、炉設計グループとの連携を強め、さぐるべきである。体系化された知識の外に何らかの解決策があるかもしれない。(1名)
- 核融合プラズマ中における多くの物理素過程の解明とともに数値実験炉として全体を統合する際、計算機資源との関連を考える必要がある。どのスケールや範囲までの現象を取り込んだ数値実験炉が構成できるのか、それにはどれほどの規模の計算機資源が必要かなどについてある程度の数算的目標が必要と思われる。(1名)
- 実験データ解析に関わるコード整備やモデル開発も本プロジェクトの中に含まれているが、改組以前は理論・データ解析研究系のライン業務として行っていたものである。実験データ解析や実験シナリオの構築は平衡の構成やプラズマ制御等、計測器に直結した部分があり、実験家との連携が主となるので、このプロジェクトの中で平行して行うのが適当かどうか検討が必要であろう。関連するグループとしては、平衡・MHD安定性、統合輸送シミュレーション等、いくつかのグループにまたがる。現プロジェクト形態では、横系として各グループ内は実験家や共同研究者との連携は十分機能し

ているが、縦糸としてのグループ間の連携があまり機能していない。またこの体制だと責任の所在が見えない。誰がリーダーシップを発揮して実験データ解析をとりまとめ推進していくのか等、明確化された体制づくり（ソフトとして縦糸を有効的に機能させること）が必要であろう。（1名）

- ミッション達成型のプロジェクトの中に基礎研究を含めてしまうのはもともと無理がある。基礎研究は工程表に従って成果を出していく形態にはなじまないし、その応用としてすぐにプロジェクト研究の成果に直結するものでもない。また、プロジェクトの評価という観点から言えば、プロジェクトが核融合研究をミッションとしている以上、核融合研究以外の基礎研究や基盤研究に対する評価は、相対的に低くならざるを得ない。プロジェクトを如何に下支えしているかをわかりやすく見せることが必要である。（1名）
- 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。研究スタッフをそちらへ投入し、核融合研が主、京都大学が従という形態を作るべきであろう。もし、人材不足が当面の課題であるなら時限的なグループを作り、グループリーダーを外部の先生にお願いし、任期付きの COE 研究員等をあて統合輸送シミュレーション (TASK3D-p) 開発グループを構成し、予算をつけてテコ入れするような案も今後検討すべきではないだろうか？（1名）
- しかしながら数値実験炉の構築に向けては、原型炉における個々の現象を解析するだけでなく、それらの現象の間の相互作用を取り入れた統合シミュレーションが必要である。現在の将来計画では第3期中期計画に向けて物理要素の統合化を掲げているが、具体的な統合プロセスが示されていない。統合輸送コードとそれ以外のコードとの連携を含めた新しいフレームワークの構築が望まれる。（1名）
- これまでの研究の延長ではなく、統合シミュレーションに向けた道筋が明確であり、必要な計算資源が評価できるような将来計画が望まれる。（1名）
- 数値実験研究というからには、燃焼プラズマの定量的予測までできなければいけない。レーザー核融合プラズマのように非線形性が弱くかつ階層間での独立性が一定程度存在する場合には、統合コードによる数値実験という概念が成立し得るが、磁場核融合のように非線形性が強く、階層間でも結合が強い場合に、そもそも統合コードや数値実験という概念が成立しうるものなのか疑問である。数値実験研究プロジェクトの目標が、口頭報告においても直接には言及されず、報告書にもほとんど述べられていないのは、その困難性の表れではないかと思う。将来計画に関する質疑応答では様々な階層に対応するコード開発を統合していくという方向性が出されたものの、そこへ至る戦略は明らかにされなかった。（1名）
- Future plans address the most timely and topical issues of fusion research. They

are worked out in sufficient detail and include Numerical Test Reactor for a helical fusion system based upon LHD operational results and experience. The emphasis is on the realization of a reactor in virtual space of a supercomputer and its optimization from physical, engineering and economic viewpoints. Roadmap includes the most important achievements in physics. It integrates most of the physical elements in one device by developing and applying multi-scale, multi-physics and multi-layer models to burning plasmas. Finally, it addresses a construction phase thereby contributing to the design of a helical DEMO reactor. Future plans are adopted in a realistic manner because physics elements required for a complete integration into a reactor design and operation are available resulting from NSRP activities. Long-term goals are also within the reach of the program due to exploitation of LHD results and collaboration programs with both domestic universities and international centers.

- For the realization of two major objectives of the NSRP, the present research plan seems to appropriately address in road map, such as “elucidation of physics elements covering fusion plasma”, integration of all physics elements”, and “construction of numerical test reactor”. It is also drafted in “Future Plan” during “the second mid-term” and “the third mid-term” with 6 topical areas. However, the planned time-line seems to qualitative in project point of view, so that NSRP would try to develop more detailed plan for the future.
- The research plan of the NSRP is well suited to the vigorous and effective development of the simulation and modeling capabilities supporting the helical confinement concept. The plan allows for sufficient flexibility to adapt to discoveries regarding the basic physical mechanisms pertinent to helical confinement. The plan also provides flexibility with regard to variations in computational paradigms that may come about as considerations related to power consumption modify the architecture of advanced computers on the way to exa-scale computing. More importantly, the plan creates broad opportunities for contributions from universities and provides support as well as guidance for those contributions.

As stated in the answer to question 1, the objective of creating a “numerical test reactor” leaves considerable room for interpretation. This is appropriate for a project expected to last for longer than a decade. Nevertheless, the multiple references to the “integration of all physics elements” may give rise to unrealistic expectations. The simultaneous integration of all physics elements by 2021 would require a jump in hardware capabilities that would be in gross violation of Moore’s law. Fortunately, the need for integration varies from problem to problem. The goal

of contributing to the design of a helical DEMO reactor can clearly be achieved with limited integration of those physical processes whose dynamical coupling properties require it. More important than integration is the elucidation of fundamental questions regarding the physics of helical confinement, most of which can be answered by the continued development of existing codes and their confrontation with experimental observations. The NSRP research plan is very well suited for this goal.

- My comments on the road map shown during the meeting have already been made under 1. As stated above, it is very (maybe too) ambitious to come to valid power reactor concept (FFHR) within the next decade. ITER will not be able to deliver in time the data required for a proper code validation; in addition, it is questionable to what extent the ITER data can be transferred to the Heliotron concept. The research plan of the NSRP is based on the schedule/milestones of the task groups (document provided later). It is difficult, however, to assess the required resources (both human and computer power). The best, of course, would be a resource-loaded work breakdown structure (WBS), but – taking into account the many unknowns and uncertainties in the field – this may well be impossible to do. Hence, it is probably the best to focus on the development of a meaningful research program, that is openly discussed and carefully embedded in the world-wide fusion research activities. The IEA implementing agreements might be a good platform for that.
- The overall goals and general research plan are appropriate. The plans presented are very high level, and it is not clear whether detailed planning has occurred for the integration steps ahead. See (1.1) and (2.2). Also, plans are needed for how to handle multi-physics models that cross task-force boundaries. E.g. interaction between turbulence and 3D equilibria. This may require new simulation strategies and substantial development.

The reasonability of the proposed plans and whether they will achieve their long-term goals depends on aspects that were not presented, including whether adequate resources (people) are available and whether they can be managed effectively.

以上より、この将来計画に対して、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 4 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議論を基に、評価の要点をまとめ、数値実験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) 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。

Are the objectives of the Numerical Simulation Research Project (NSRP), which was introduced in 2010, appropriate?

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。**

今後、実験グループ及び炉設計グループと密接な共同作業を行い、各要素研究から数値実験炉に至る具体的なイメージと定量的な達成目標を明示することが望まれる。

(2) 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。

Is the research system for promoting the NSRP suitable for its objectives?

Does it function appropriately?

研究推進の基礎母体としてタスクグループとそれをまとめる推進会議を構成していることは適切である。タスクごとに活動できる体制が構築されており、研究の自由度と機動性が上がり、活性化につながっている。**推進体制は目標に合致し、適切に機能しており、高く評価する。**

今後は、より具体性を持たせた推進体制への柔軟な見直しを図ることが望まれる。

(3) 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。

In the NSRP, is the environment on the “Plasma Simulator” system and its related researches appropriate?

本プロジェクトの根幹であるプラズマシミュレータは研究目標を達成するために計画的に性能増強が行われ、国内的にも高い性能のシステムが導入されている。また、シミュレータの運用体制の整備も進められ適切な運用がなされているなど、推進体制と研究環境の整備が進められている。共同研究者にとっては非常に有益なコンピュータ資源であり、全国の大学研究者がそれを使用して研究成果をあげている。**プラズマシミュレータおよび関連研究環境の整備に関して、極めて高く評価する。**

日進月歩で進む大型計算機技術の進展も踏まえ、今後も増強計画を見直し、より高い性能を持つシステムを導入することが望まれる。また、国内の計算機資源を有効に活用することも有用である。

[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、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 researches utilizing the Plasma Simulator?

- (1) 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。)

Construction of Numerical Test Reactor for a helical fusion system (including contribution to the development of high-performance LHD plasma, to the design of a helical demo reactor, and to the sophistication of computational science)

主要な計算コードが高度に並列化され、高い計算機性能を効率的に利用し世界的にも評価される研究成果を創出していることや、LHD 実験データ解析へも貢献しており LHD プラズマの理解と高性能化に向けて大きく貢献している。計算コード開発により計算科学の高度化にも大きく寄与している。**数値実験炉の構築に関する成果に関して、高く評価する。**

今後は、要素コードを組み合わせた統合コードの開発を進め、ヘリカル型核融合炉などの炉設計に生かす数値実験炉構築に向けた戦略的な取り組みが必要である。

- (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

核融合プラズマの物理機構の解明につながる高いレベルの大規模シミュレーションが進展し、国際的に高く評価される成果を挙げている。**核融合プラズマの物理機構とその理論体**

系化について、高く評価する。

各要素研究を有機的に結び付け、得られた成果を俯瞰的に説明する理論的体系化を進めることが望まれる。

[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
Promotion of collaboration regarding to the NSRP

- (1) 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。

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

数多くの共同研究プロジェクトがNIFSを中心として行われ、また毎年多くの研究者が参加するプラズマシミュレータシンポジウムを開催し研究について討論している。さらに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。**COEとして適切に大学と共同研究を進めており、極めて高く評価する。**

スーパーコンピュータの高速化に対応する高度なプログラムの開発や計算スキルの向上を図り、研究基盤の充実と人材育成を視野に入れた活動を期待する。

- (2) 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。

Is the Plasma Simulator effectively utilized for collaboration research?

多数の共同研究を通して、所内外の多くの研究者が共同利用資源としてプラズマシミュレータを有効に利用している。**プラズマシミュレータの有効活用に関して、極めて高く評価する。**

- (3) 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。

Does the NSRP function as a research hub for the dissemination of academic information to other fields, by promoting the NINS (National Institutes of National Sciences) interdisciplinary cooperation research and so on?

機構内分野間連携研究の推進と他分野への発信について、高く評価する。

さらなる他分野への発信を期待する。

- (4) 大学の研究発展に寄与しているか。

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

多くの大学と共同研究を実施し、特徴ある研究を発展させ、レベルの高い多くの成果を生み出している。様々な数値シミュレーションコードを開発するなど、大学の研究に大きく寄与している。**大学の研究発展について、高く評価する。**

[4] 国際連携・共同研究の推進

Promotion of international cooperation and collaborations

(1) 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。

Does the NSRP play a role as an international COE through international collaboration research?

核融合科学研究所は日米核融合理論共同研究のホスト研究機関として大きな貢献をしており、多くの大学研究者も大変恩恵を受けている。また、日欧、日中、日韓でのいくつかの協定においても大きな役割を果たしている。**国際共同研究など大いに推進して国際的な COE としての役割を果たしており、高く評価する。**

今後もシミュレーション研究分野での国際共同研究を通して、世界の COE として核融合研究のさらなる発展に貢献することを期待する。

(2) ITER 計画・BA 活動との連携、貢献を図っているか。

Does the NSRP promote cooperation with and contribution to ITER and BA activities?

BA 活動に関して、核融合科学研究所の六ヶ所研究センター長は国際核融合エネルギー研究センターの事業長を兼任していることや、JT-60SA の共同研究の推進にも NIFS は大きく貢献し、BA 活動に関わる共同研究の環境を整備している。ITER 計画に関しては、ITPA 活動に多くの研究者が参加し、NIFS で開発された 3 次元シミュレーションコードが ITER でも活用されていることなど ITER 計画・BA 活動に積極的に参加・貢献している。**ITER 計画・BA 活動との連携、貢献に関して、高く評価する。**

今後も ITER 計画・BA 活動との連携と貢献に期待する。

[5] 人材育成

Human resources development

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 human resources development of the international scientific workforce required for long-term fusion studies through simulation research?

シミュレーション研究を通じて、学生を含めた若手研究者の育成がはかられている。さらに「アジア冬の学校」の開催など国際的に活躍できる人材育成に貢献している。また高校生に対する理科教育にも大きな貢献をしている。**人材育成について、高く評価する。**

今後も継続して、シミュレーション研究や計算科学分野を担う人材育成を期待する。

[6] 将来計画

Future plans

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 research plan of the NSRP appropriate for the realization of the objectives?

Is it suitable and realistic for the next decade?

LHD 実験や大型装置の実験をもとに、シミュレーション科学を発展させて、LHD の高性能化に貢献し、原型炉設計に反映させていく計画となっている。このように、要素研究を行い、統合化して、数値実験炉を作ろうとする研究計画である。**将来計画に関して、高く評価する。**

今後、より目標を具体化し、数値実験炉の構築に向けた道のりを明確にすることが望まれる。これに向けた計算機資源の整備も必要である。

2. 提言

今回の評価において数値実験研究プロジェクトについて議論し、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。

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、シミュレーション、核融合工学の3分野で研究プロジェクトを構成し、核融合炉実現に向けて、これらの成果を統合していく研究計画をスタートさせた。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画を自由にする体制を取っており、LHD、シミュレーション及び核融合工学との連携が推進され、課題に対して臨機応変に対応出来ることが期待される。

核融合科学研究所運営会議では、先ず平成23年度にLHDプロジェクトの外部評価を実施した。次いで、本年度においてはシミュレーション分野の「数値実験研究プロジェクト」を対象として外部評価を実施することとした。外部評価委員として運営会議の所外委員9名と外国人委員5名に更に5名の専門委員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24年10月4日に開催した第1回外部評価委員会において、本年度の外部評価の進め方について協議し、以下のように評価の観点及び具体的な評価項目を決定した。

[1] 研究体制・環境の整備

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) 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。

- (1) 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。）
- (2) 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

- (1) COEとして大学等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。
- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) 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

- (1) 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。
- (2) 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。

平成 24 年 12 月 2 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。その後、平成 25 年 1 月 11 日に第 3 回の専門部会を開催し、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。専門部会での評価案が出揃った段階で平成 25 年 1 月 31 日に第 3 回外部評価委員会を開催し、最終報告書を取りまとめた。

今回の外部評価に関して、評価結果の概要を項目ごとに以下に記す。

[1] 研究体制・環境の整備

(1) 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。

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。**

(2) 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。

研究推進の基礎母体としてタスクグループとそれをまとめる推進会議を構成していることは適切である。タスクごとに活動できる体制が構築されており、研究の自由度と機動性が上がり、活性化につながっている。**推進体制は目標に合致し、適切に機能しており、高く評価する。**

(3) 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

本プロジェクトの根幹であるプラズマシミュレータは研究目標を達成するために計画的に性能増強が行われ、国内的にも高い性能のシステムが導入されている。また、シミュレータの運用体制の整備も進められ適切な運用がなされているなど、推進体制と研究環境の整備が進められている。共同研究者にとっては非常に有益なコンピュータ資源であり、全国の大学研究者がそれを使用して研究成果をあげている。**プラズマシミュレータおよび関連研究環境の整備に関して、極めて高く評価する。**

[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。

- (1) **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。)**

主要な計算コードが高度に並列化され、高い計算機性能を効率的に利用し世界的にも評価される研究成果を創出していることや、LHD 実験データ解析へも貢献しており LHD プラズマの理解と高性能化に向けて大きく貢献している。計算コード開発により計算科学の高度化にも大きく寄与している。**数値実験炉の構築に関する成果に関して、高く評価する。**

- (2) **核融合プラズマの物理機構解明とその理論体系化**

核融合プラズマの物理機構の解明につながる高いレベルの大規模シミュレーションが進展し、国際的に高く評価される成果を挙げている。**核融合プラズマの物理機構とその理論体系化について、高く評価する。**

[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

- (1) **COE として大学等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。**

数多くの共同研究プロジェクトが NIFS を中心として行われ、また毎年多くの研究者が参加するプラズマシミュレータシンポジウムを開催し研究について討論している。さらに COE として大学等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。**COE として適切に大学と共同研究を進めており、極めて高く評価する。**

- (2) **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。**

多数の共同研究を通して、所内外の多くの研究者が共同利用資源としてプラズマシミュレータを有効に利用している。**プラズマシミュレータの有効活用に関して、極めて高く評価する。**

- (3) **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。機構内分野間連携研究の推進と他分野への発信について、高く評価する。**

- (4) **大学の研究発展に寄与しているか。**

多くの大学と共同研究を実施し、特徴ある研究を発展させ、レベルの高い多くの成果を生み出している。様々な数値シミュレーションコードを開発するなど、大学の研究に大きく寄与している。**大学の研究発展について、高く評価する。**

[4] 国際連携・共同研究の推進

- (1) **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。**

核融合科学研究所は日米核融合理論共同研究のホスト研究機関として大きな貢献をしており、多くの大学研究者も大変恩恵を受けている。また、日欧、日中、日韓でのいくつかの協定においても大きな役割を果たしている。**国際共同研究など大いに推進しており、国際的な COE としての役割を果たしており、高く評価する。**

(2) ITER 計画・BA 活動との連携、貢献を図っているか。

BA 活動に関して、核融合科学研究所の六ヶ所研究センター長は国際核融合エネルギー研究センターの事業長を兼任していることや、JT-60SA の共同研究の推進にも NIFS は大きく貢献し、BA 活動に関わる共同研究の環境を整備している。ITER 計画に関しては、ITPA 活動に多くの研究者が参加し、NIFS で開発された 3 次元シミュレーションコードが ITER でも活用されていることなど ITER 計画・BA 活動に積極的に参加・貢献している。**ITER 計画・BA 活動との連携、貢献に関して、高く評価する。**

[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。

シミュレーション研究を通じて、学生を含めた若手研究者の育成がはかられている。さらに「アジア冬の学校」の開催など国際的に活躍できる人材育成に貢献している。また高校生に対する理科教育にも大きな貢献をしている。**人材育成について、高く評価する。**

[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。

LHD 実験や大型装置の実験をもとに、シミュレーション科学を発展させて、LHD の高性能化に貢献し、原型炉設計に反映させていく計画となっている。このように、要素研究を行い、統合化して、数値実験炉を作ろうとする研究計画である。**将来計画に関して、高く評価する。**

今回の評価において数値実験研究プロジェクトについて議論し、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。

以上の評価結果は、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について核融合科学研究所の方針を高く評価しているものである。今後、核融合炉の早期実現のためには数値実験研究プロジェクトの推進が重要であり、達成目標と研究方法を具体化して更に尽力して頂きたい。

参考資料

平成24年度 外部評価「数値実験研究プロジェクト」の評価結果	1
評価項目別の平均点数	2
評価項目別の人数分布	3

平成24年度 外部評価「数値実験研究プロジェクト」の評価結果

単位：人

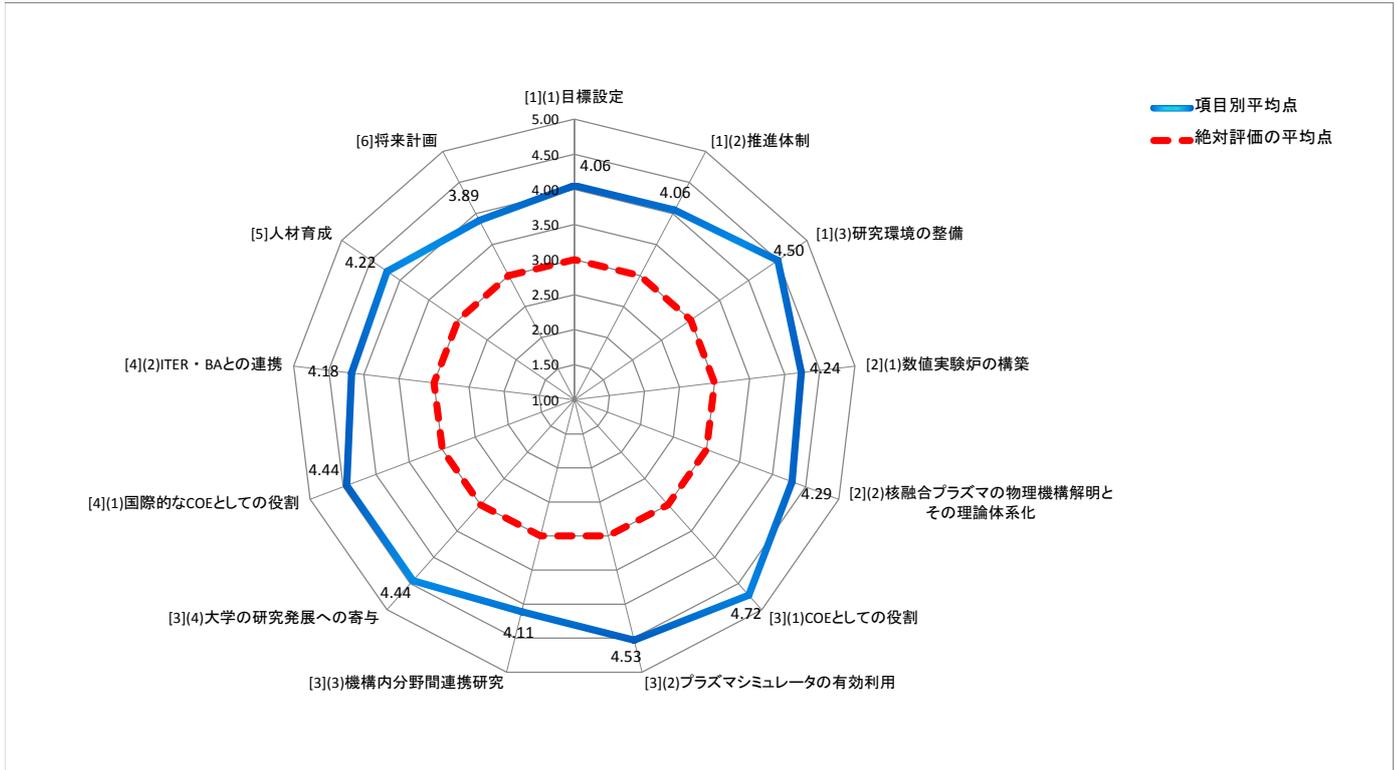
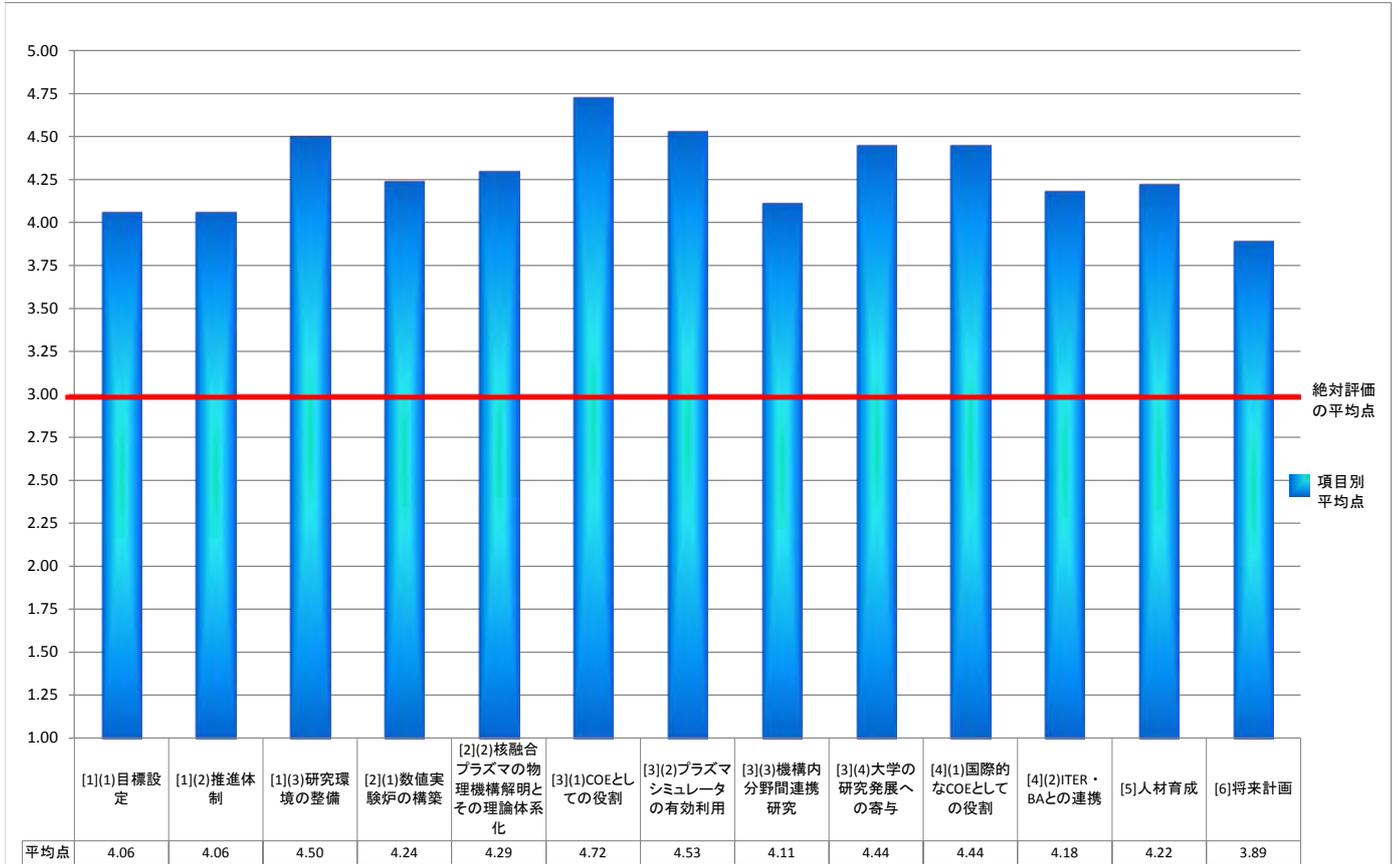
項目	1目標設定	[1](2)推進体制	[1](3)研究環境の整備	[2](1)数値実験炉の構築	2核融合プラズマの物理機構解明とその理論体系化	[3](1)COEとしての役割	[3](2)プラズマシミュレータの有効利用	3機構内分野間連携研究	[3](4)大学の研究発展への寄与	[4](1)国際的なCOEとしての役割	[4](2)ITER・BAとの連携	[5]人材育成	[6]将来計画
秀	4	3	10	7	7	13	9	7	8	9	3	5	2
優	12	13	7	7	8	5	8	6	10	8	14	12	12
良	1	2	1	3	2	0	0	5	0	1	0	1	4
可	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
平均点	4.06	4.06	4.50	4.24	4.29	4.72	4.53	4.11	4.44	4.44	4.18	4.22	3.89

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

※ 評価結果は、国内委員及び外国人委員の結果を合わせたものになっています。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。

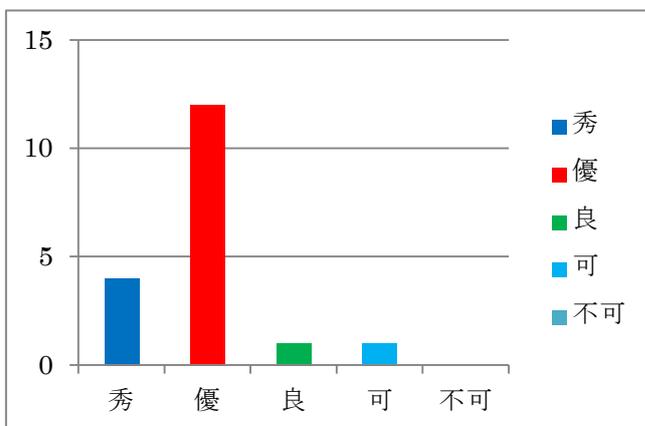
項目	評価の観点
[1]	(研究体制・環境の整備)
1	平成22年度から導入された数値実験研究プロジェクトの目標設定は適切か
[1](2)	推進体制は目標に合致したものであるか。また適切に機能しているか
[1](3)	プラズマシミュレータおよび関連研究環境の整備は適切に進められているか
[2]	(研究成果) プラズマシミュレータを活用した理論シミュレーション研究を進めることにより、以下の2つの分野において、国際的に高いレベルの成果を上げているか。
[2](1)	数値実験炉の構築(LHDの最高性能化と原型炉設計への貢献、計算科学の高度化を含む。)
2	核融合プラズマの物理機構解明とその理論体系化
[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)
[3](1)	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
[3](2)	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
3	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
[3](4)	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)
[4](1)	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
[4](2)	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

評価項目別の平均点数

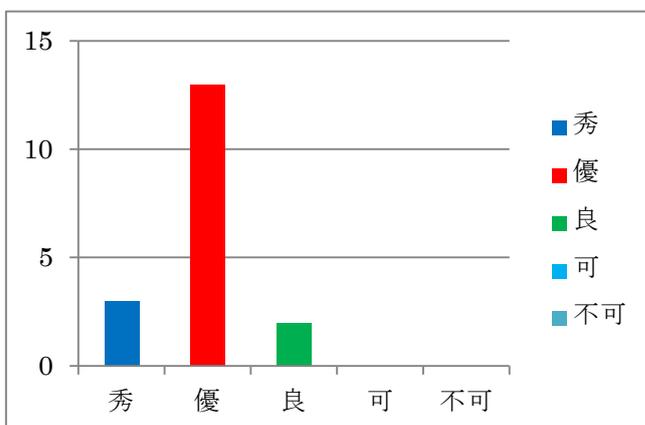


[1] 研究体制・環境の整備

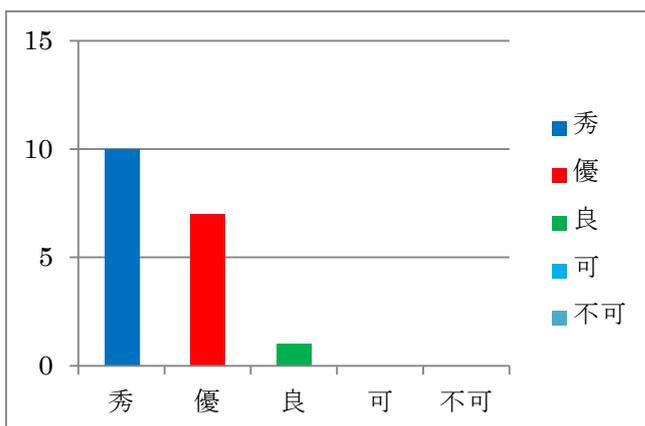
(1) 平成 22 年度から導入された数値実験研究プロジェクトの目標設定は適切か



(2) 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



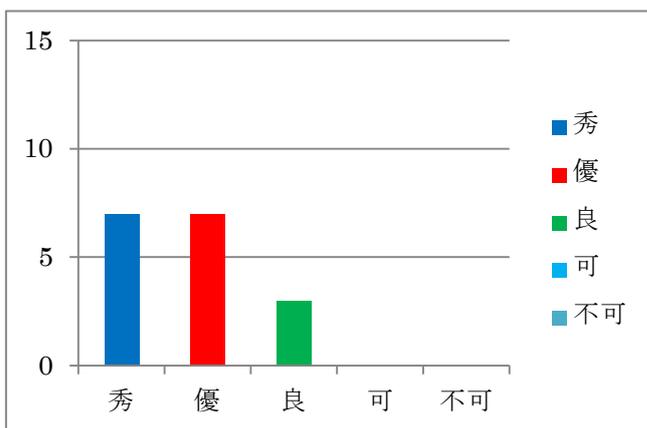
(3) プラズマシミュレータおよび関連研究環境の整備は適切に進められているか



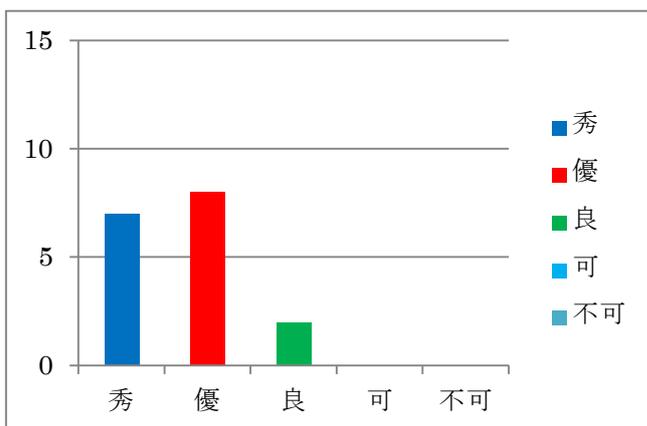
[2] 研究成果

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。

- (1) 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。)

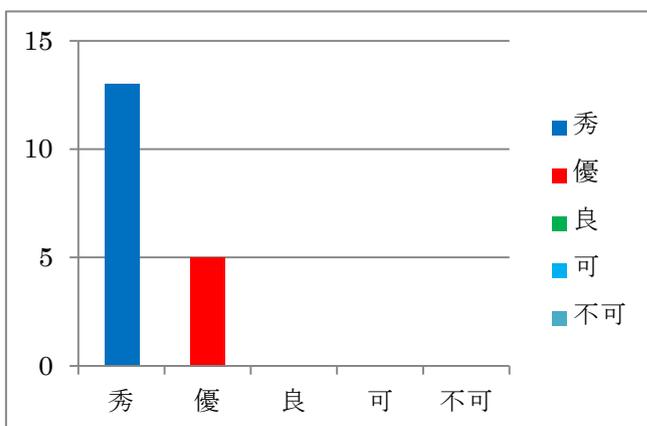


- (2) 核融合プラズマの物理機構解明とその理論体系化

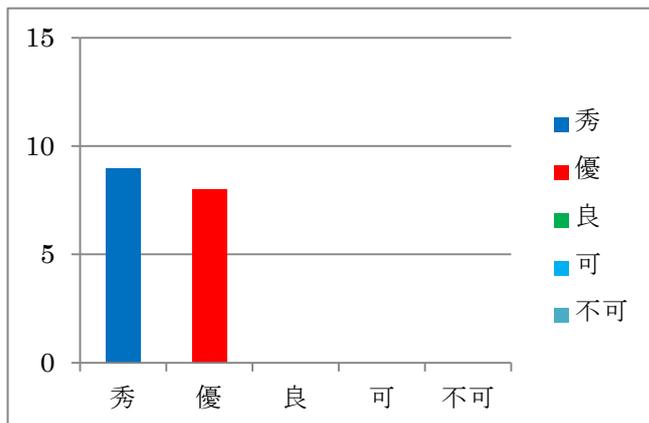


[3] 数値実験研究プロジェクトに関する共同利用・共同研究の推進

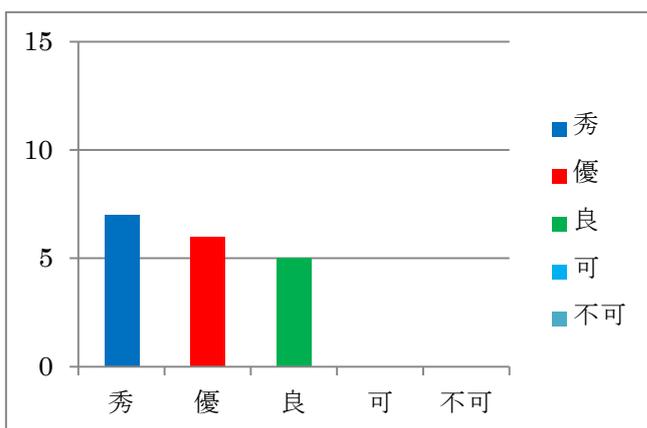
(1) COEとして大学等が有する高い研究能力を結集し、共同研究を適切に進めているか



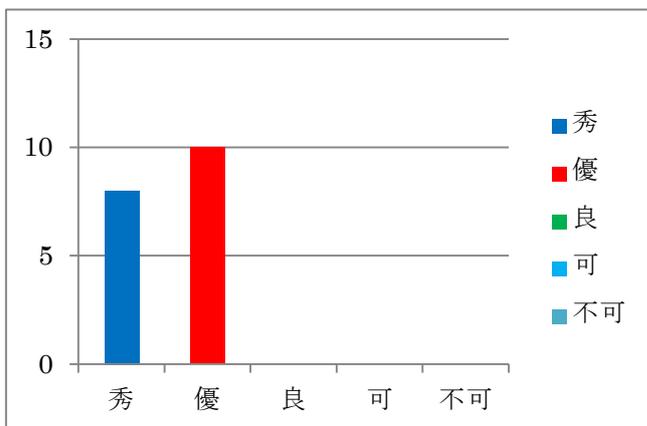
(2) 共同利用資源としてプラズマシミュレータは有効に活用されているか



(3) 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

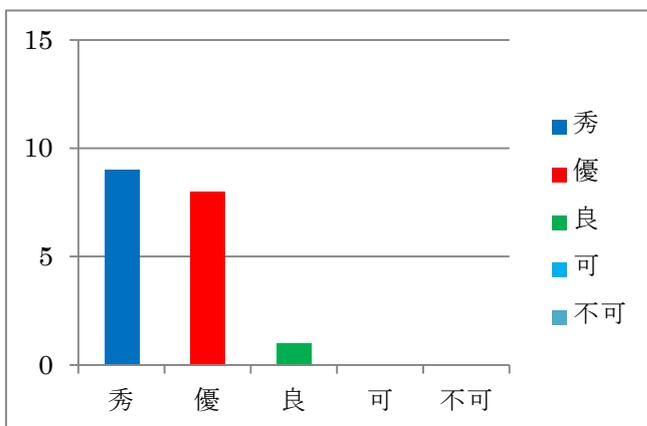


(4) 大学の研究発展に寄与しているか

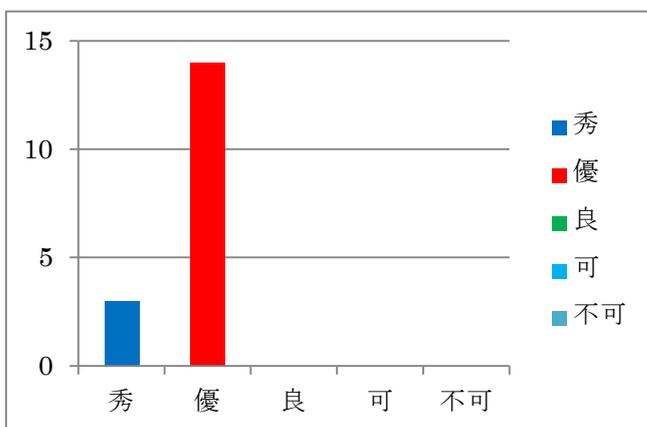


[4] 国際連携・共同研究の推進

(1) 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

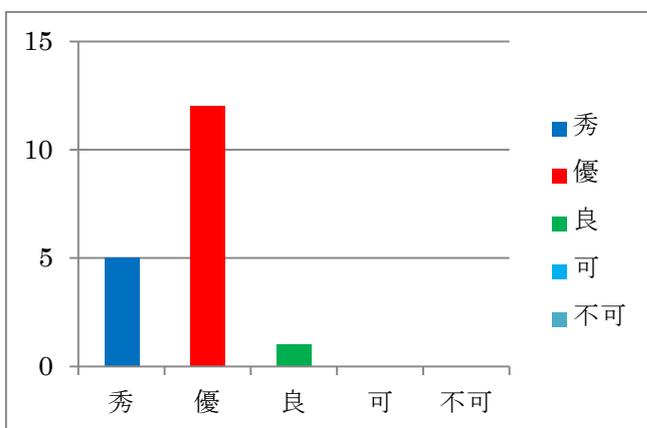


(2) ITER 計画・BA 活動との連携、貢献を図っているか



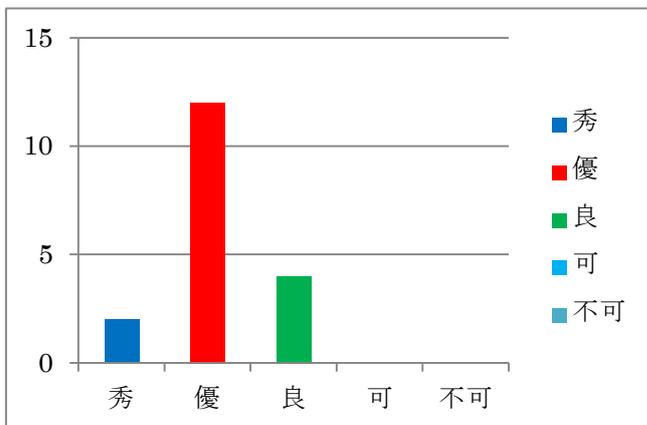
[5] 人材育成

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



添付資料

添付資料 1	平成 2 4 年度 外部評価委員会委員及び専門部会構成名簿	1
添付資料 2	核融合科学研究所運営会議外部評価委員会規則	2
添付資料 3	平成 2 4 年度 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会日程	3
添付資料 4	外国人委員評価書	4

平成24年度核融合科学研究所運営会議外部評価委員会委員及び専門部会構成名簿

【数値実験研究プロジェクト 専門部会】

[外部評価委員会 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 |
| | 今井 剛 | 筑波大学プラズマ研究センター長 |
| ○ | 大澤 幸治 | 名古屋大学大学院理学研究科教授 |
| | 小川 雄一 | 東京大学大学院新領域創成科学研究科教授 |
| | 佐野 史道 | 京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター長 |
| | 函子 秀樹 | 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 |
| ◎□ | 日野 友明 | 北海道大学大学院工学研究院特任教授 |
| △ | 御手洗 修 | 東海大学熊本教養教育センター教授 |

[外部評価委員会 外国人委員]

- | | | |
|--|---------------------|--|
| | François Waelbroeck | Director, Institute for Fusion Studies, The University of Texas at Austin, USA |
| | Gyung-Su Lee | Research Fellow, National Fusion Research Institute, Republic of Korea |
| | Michael Tendler | Professor, Alfvén Laboratory, Royal Institute of Technology, Sweden |
| | Michael Zarnstorff | Deputy Director for Research, Princeton Plasma Physics Laboratory, USA |
| | Thomas Klinger | Directorate, Max-Planck-Institute for Plasma Physics, Germany |

[外部評価委員会 委員以外（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 |
| | 斉藤 真司 | 自然科学研究機構分子科学研究所教授 |
| | 富阪 幸治 | 自然科学研究機構国立天文台教授 |
| | 福山 淳 | 京都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プラズマ理論シミュレーショングループ研究主幹 |

◎委員長、○副委員長、□専門部会長、△専門部会幹事

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24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24年10月4日(木) 13時40分～16時05分
 場 所 核融合科学研究所管理・福利棟4階第2会議室
 出席者 日野委員長, 大澤副委員長, 疇地, 安藤,
 今井, 佐野の各委員
 後藤, 斉藤, 福山, 矢木の各専門委員



○ 第2回委員会及び第2回専門部会

日 時 平成24年12月2日(日) 13時00分～16時40分
 場 所 名古屋ダイヤビルディング2号館4階242会議室
 出席者 日野委員長, 大澤副委員長, 疇地, 安藤 今井,
 小川, 佐野, 凶子, 御手洗, Waelbroeck, Lee,
 Tendler, Zarnstorff, Klinger の各委員
 後藤, 富阪, 福山, 矢木の各専門委員



○ 第3回専門部会

日 時 平成25年1月11日(金) 13時40分～16時50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 日野部会長, 大澤副部会長, 安藤幹事, 御手洗
 幹事, 小川の各委員
 後藤, 斉藤, 矢木の各専門委員



○ 第3回委員会

日 時 平成25年1月31日(木) 13時40分～16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 日野委員長, 大澤副委員長, 安藤, 今井,
 凶子の各委員
 後藤, 斉藤, 福山の各専門委員



外国人委員評価書

Review reports by foreign peer members

Review on Numerical Simulation Research Project

Reviewer: François Waelbroeck

[1] Development of research system and environment

- (1) Are the objectives of the Numerical Simulation Research Project (NSRP), which was introduced in 2010, appropriate?

The objectives of the NSRP are the elucidation of the physics elements governing helical fusion plasmas, the integration of these elements, and the construction of a numerical test reactor with the aim of contributing to the design of a helical DEMO reactor. It aims to advance a variety of commendable goals such as greater coordination among theorist, experimentalists, and numerical scientists, focus on validation and verification of the codes, and an increased attention to the end-goal of reactor design.

The NSRP is similar to undertakings such as the “Integrated Tokamak Modeling Task Force” (ITM-TF) effort in Europe and the “Fusion Simulation Project” in the US, except that those efforts are focused on tokamak devices whereas NSRP is focused on helical devices. Like these other efforts, the NSRP is highly ambitious. Its ambition carries with it a substantial risk of falling short. Nevertheless, its goals are not merely appropriate; they are so compelling as to make the project unavoidable.

One of the risks of the “numerical reactor” goal however is that it will give rise to pressure for the premature integration of codes when efforts would be better spent on their separate development. The review of the NSRP shows no sign yet that this is happening, but it is reasonable to anticipate that such pressures will gain strength as the project nears its announced completion date of 2021. Specifying in more detail what will be delivered in 2021 could mitigate this risk, as well as the risk that the rhetoric of the NSRP is creating unrealistic expectations. Surely the 2021 numerical reactor will look a lot closer to the current TASK-3D code than to a fully integrated reactor simulator in which GKV, HINT2, MEGA and EMC3 are all running concurrently. Yet the latter picture, which is clearly unrealistic, is what statements promising the “complete integration” of all physics elements evoke.

- (2) Is the research system for promoting the NSRP suitable for its objectives?
Does it function appropriately?

The current research system is organized according to a matrix management structure with eight divisions, four projects and nine task groups. This system appears to achieve some degree of decentralization that is conducive to the formation of the necessary collaborations between scientists in different divisions. The NSRP aims to increase research mobility and flexibility by introducing new motivations and new goals. There are promising indications that it is succeeding in the task of bringing about the interactions between scientists that will be necessary in order to achieve the needed integration. The possibility that the increased management cost of such an organizational scheme could prove burdensome calls for vigilance.

The manpower allocations for the nine task groups are fairly well balanced. The importance played by plasma-wall interactions and transport in the periphery in fusion experiments in general (and in LHD in particular) suggests that increasing the amount of in-house manpower devoted to these two tasks, at the expense of either the kinetic or fluid transport groups would probably be beneficial. The relative under-emphasis on edge, SOL, and plasma-surface interaction is also perceptible in the publication record.

The year of creation of the NSRP, 2010, coincides with a peak in the productivity of the theory and simulation groups as measured by the list of “published papers related to the NSRP” that was distributed with the review material. This peak is consistent but more pronounced than that for the number of NIFS theory and simulation papers listed by “web of science” for the same period. The magnitude of the annual decrease in productivity after 2010 varies between these two sources of data, ranging from 30% for the NSRP list of publications to an amount in excess of 10% for the web of science data on theory and simulation. This may be due to the management burden associated with the NSRP or to other causes independent of NSRP, such as budget reductions

- (3) In the NSRP, is the environment on the “Plasma Simulator” system and its related researches appropriate?

The Plasma Simulator provides 322 Nodes with 40 TB of memory and an impressive peak performance of 315 Tflops. This is significantly more computing capacity than the 100 TFlops and 24 TB of the HPC-FF computer that serves the needs of the European fusion program and of the ITM-TF... The need for an

advanced computer is compelling: it is difficult to see how the NSRP could have credibility without a dedicated high-power computer. The justification for the scale of the Plasma simulator is provided by its utilization rate of 90% as well as by the large number of users and jobs processed by the machine. The numbers of projects it supports is comparable to the number of projects that Lonestar, one of the two machines of the Texas Advanced Computer Center, supports. The Plasma Simulator is backed by a strong support system including training opportunities and program development support. The under-representation of universities in program development support is presumably due to geographical factors, but should be addressed by developing the means of delivering this service remotely.

[2] Research achievements

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

- (1) Construction of Numerical Test Reactor for a helical fusion system (including contribution to the development of high-performance LHD plasma, to the design of a helical demo reactor, and to the sophistication of computational science)

The presentations exhibited significant progress for each of a comprehensive suite of codes including MHD equilibrium, core kinetic transport, neoclassical transport, fast-particle driven modes and edge transport codes. Particularly impressive and interesting were the comparisons of simulations with experimental results from LHD. In some cases these point to possible shortcomings in the models and suggest avenues for improving them.

One such comparison was between the HINT2 code and the measurements of the electric field in the edge region. The experiment-simulation comparisons may shed light on the disagreements between HINT2 and PIES, the principal other 3D equilibrium code. Further comparisons with experiment also extend the prospect of clarifying the role of rotation on island size, a phenomenon that is not described by either PIES or HINT2.

Gyro-kinetic simulations of turbulent transport have enabled equally impressive comparisons with experiment at the level of the fluctuation spectrum. The good agreement between measured and calculated values of the flux has led to the formulation of a useful heuristic model for the flux. The extension of the arsenal of codes to include electromagnetic physics is making good progress and shows great promise.

Other areas of where the numerical research is carried out at an international level include the wave particle interaction theory showing the formation of hole-clump pairs, and the study of edge transport using the EMC3-EIRENE code.

Only two PFR papers could be found for the MIPS code, and no publications for the MINOS code, both of which were presented in several places in the presentations as having reached a mature level, including nonlinear capabilities in plasma with chaotic fields. It is unfortunate that the MIPS papers lack information concerning the numerical scheme.

(2) Physics mechanisms of fusion plasmas and their theoretical systemization

Considerable progress has been achieved in the elucidation of the basic physics mechanisms for the confinement of fusion plasmas. The high level of the fusion science performed as part of the NSRP is reflected in the metrics presented during the review describing the number of high-profile publications of various types.

Of particular note is the novel moment-equation method for calculating neoclassical transport fluxes, which has served as a foundation for the ORNL PENTA code.

The NSRP is continuing the international leadership of NIFS in the simulation of the interaction of long wavelength MHD modes with turbulence using reduced two-fluid models. Particularly interesting are the simulations of the interaction of magnetic islands with drift wave turbulence as well as those investigating the interaction of Resonant Magnetic Perturbations (RMP) with resistive ballooning turbulence. The addition of neoclassical effects to these models sounds very promising but has not yet yielded clearly novel results.

The NSRP has been playing a key role in connecting the helical confinement community to the tokamak community by showing how insight gained through research on helical devices can contribute to our understanding of tokamak physics. The research on RMP and that on the quasi-single helicity (QSH) state in the RFP provide two good example of this.

The NSRP has also developed a strong program in plasma-material interface including codes describing dust dynamics and molecular dynamics codes using the binary collision approximation and density functional theory to evaluate the effect of the irradiation of plasma-facing components.

In summary, the NSRP does produce high-level results in accordance with international standards for research in fusion science.

[3] Promotion of collaboration regarding to the NSRP

(1) Does the NSRP promote collaboration researches as the center of excellence, by integrating the high capabilities of the universities and institutes?

The NSRP is effective in its promotion of collaborative research and in the integration of the skills of universities and institutes. The 458 papers produced by the Theory and Simulation Department and the NSRP from 2008 to 2012 demonstrate the effectiveness of the NIFS collaboration network in this domain of research. The proportion of 3 collaborators for 2 NIFS researchers seems well suited to allow NIFS to impart programmatic directions and maintain critical mass in priority areas. The backbone of the NSRP is clearly provided by the NIFS researchers who constitute 76 (55 sim. and 21 exp.) of the 103 participants in the task groups. External collaborators nevertheless provide key capabilities such as in the area of plasma-wall interaction where they also provide the bulk of the manpower. The overall project would benefit from increasing the in-house manpower for this task group along with that for the peripheral plasma transport task group (presumably edge/SOL/divertor). Strengthening the peripheral plasma transport task group can probably be achieved with existing resources through internal reallocations.

(2) Is the Plasma Simulator effectively utilized for collaboration research?

The plasma simulator is well utilized in the context of collaborative research. Specifically, it supports 50 users from NIFS and 100 from universities. The Plasma Simulator Symposium brings together approximately 80% of the 150 or so users, demonstrating a committed user community. It is interesting that the 150 Plasma Simulator users constitute a rather small fraction of the thousand or so NSRP collaborators from NIFS and universities. The remainder of the collaborators presumably relies on smaller clusters and workstations for their computational needs.

(3) Does the NSRP function as a research hub for the dissemination of academic information to other fields, by promoting the NINS (National Institutes of National Sciences) interdisciplinary cooperation research and so on?

The NSRP plays a central role in disseminating results and methods from fusion research to other fields through the organization of symposia and the promotion of collaboration under the umbrella of the NINS interdisciplinary cooperation framework.

(4) Does the NSRP contribute to the development of research in the universities?

The NSRP contributes to the development of research in 13 Universities. Much of the more aggressively exploratory work is done in collaboration with universities. The collaborations are fostered by over five workshops per year, an amount that seems abundant. The relationship with universities is important for the exchange of knowledge acquired as part of the NSRP.

[4] Promotion of international cooperation and collaborations

(1) Does the NSRP play a role as an international COE through international collaboration research?

NIFS has long had a strong program of collaboration with the US, managed through the Joint Institute for Fusion Theory (JIFT). Its collaborations with other countries appears to be less formally structured but of comparable effectiveness. Collaborations with Europe have led to several important benchmarking exercises such as GKV with GENE and MINOS and MIPS with CAS3D. There have also been important applications of NSRP codes to foreign experiments such as the study of RMP response with HINT2 and the calculation of the quasi-helical states in RFX. Nevertheless, the proportion of papers published with foreign-based collaborators is very modest and it is difficult to think of any other aspect of the NSRP that is more amenable to improvement without requiring significant new resources. A great deal of the results of NSRP research is published in "Plasma and Fusion Research" (PFR) which has very little visibility, so that much of the NSRP achievements are quite unknown outside of Japan. This could be remedied by establishing the practice of regularly publishing review papers in international journals that would point the interested non-Japanese readers to the original PFR papers.

(2) Does the NSRP promote cooperation with and contribution to ITER and BA activities?

The NSRP is participating in quite a few cooperative research projects for the benefit of ITER. In particular, it has two representatives in topical groups of the International Tokamak Physics Activity, or ITPA, and regularly sends additional participants to ITPA meetings. NSRP scientists additionally participated in a benchmark on Toroidal Alfvén Eigen-mode codes.

It is worthwhile to examine why the NSRP should participate in ITER and ITPA

cooperative activities given that these activities do not directly contribute to progress towards the primary goal of the NSRP, which is the construction of a numerical test reactor with the aim of contributing to the design of a helical DEMO reactor. First, the cooperation enriches the NSRP by stimulating new ideas through the confrontation of helical and axisymmetric plasma physics. Second, it broadens the horizon of the NSRP community. Last but not least, it builds broad support for its activities by advertising its capabilities.

Participation in the IFERC, of course, is completely congruent with the goals of NSRP and it is gratifying to see that NIFS scientist are strongly engaged in this center and in the broader approach (BA) more generally.

[5] Human resources development

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

As a component of NIFS and by virtue of the latter's close relationship to the University community, the NSRP is an active contributor to the development of the international scientific workforce for fusion research. In particular, it participates in graduate programs at several universities, in cooperation with high schools science education programs, and in the organization and operation of several summer and winter schools. The steady increase in applications and participation in the schools by foreign students bears vivid testimony to its success.

[6] Future plans

Is the research plan of the NSRP appropriate for the realization of the objectives?
Is it suitable and realistic for the next decade?

The research plan of the NSRP is well suited to the vigorous and effective development of the simulation and modeling capabilities supporting the helical confinement concept. The plan allows for sufficient flexibility to adapt to discoveries regarding the basic physical mechanisms pertinent to helical confinement. The plan also provides flexibility with regard to variations in computational paradigms that may come about as considerations related to power consumption modify the architecture of advanced computers on the way to exa-scale computing. More importantly, the plan creates broad opportunities for contributions from universities and provides support as well as guidance for those contributions.

As stated in the answer to question 1, the objective of creating a “numerical test reactor” leaves considerable room for interpretation. This is appropriate for a project expected to last for longer than a decade. Nevertheless, the multiple references to the “integration of all physics elements” may give rise to unrealistic expectations. The simultaneous integration of all physics elements by 2021 would require a jump in hardware capabilities that would be in gross violation of Moore’s law. Fortunately, the need for integration varies from problem to problem. The goal of contributing to the design of a helical DEMO reactor can clearly be achieved with limited integration of those physical processes whose dynamical coupling properties require it. More important than integration is the elucidation of fundamental questions regarding the physics of helical confinement, most of which can be answered by the continued development of existing codes and their confrontation with experimental observations. The NSRP research plan is very well suited for this goal.

Review on Numerical Simulation Research Project

Reviewer: Gyung-Su Lee

[1] Development of research system and environment

(1) Are the objectives of the Numerical Simulation Research Project (NSRP), which was introduced in 2010, appropriate?

There are two major objectives of the Numerical Simulation Research Project (NSRP) that was introduced in 2010 such as “1. Elucidation of physical mechanism of fusion plasmas and its systemization; 2. Construction of numerical test reactor for a helical fusion system”. After last peer review in 2007, the introduction of these two objectives served very well to guide the NSRP to be successful for understanding LHD experimental physics results, and for steady progress toward realization of the numerical test reactor system.

It is also worthwhile to note that the NSRP produced many high-level results and published papers so that two objectives are shown to be very much appropriate for success and advancement of project.

(2) Is the research system for promoting the NSRP suitable for its objectives?
Does it function appropriately?

The NSRP research system is well organized through cross-cutting task groups with members from simulation, experimental staffs as well as collaborators. Also, the NSRP task group members are assigned by overlapping related subjects, so that the internal communication seems working well. Therefore, the collaboration studies with LHD Project produced very good technical results for elucidating physics issues. It is however, recommended to look further into integration of all physics elements to support numerical test reactor with technological issues as well as engineering issues so that the final goal of NTR to be achievable.

(3) In the NSRP, is the environment on the “Plasma Simulator” system and its related researches appropriate?

The planned upgrade of “Plasma Simulator” during Phase-2 period seems very well implemented for effective utilization of supercomputer resources for the NSRP as well as collaborators in many universities. System support and research assistance program also seems working well to serve users of “Plasma Simulator”. It is recommended to consider joint planning of “Broader Approach IFERC Helios Computer” utilization with “Plasma Simulator” if it is agreeable between two programs. This will enhance effectiveness and efficiently implement supercomputer resources for fusion simulation research.

[2] Research achievements

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

(1) Construction of Numerical Test Reactor for a helical fusion system (including contribution to the development of high-performance LHD plasma, to the design of a helical demo reactor, and to the sophistication of computational science)

With introduction of two major objectives of NSRP, the extensive simulation code developments and numerical studies have been performed and made comparison with LHD experimental results contributed to guide and help development of high-performance LHD plasma as well as enhancing physics understanding, greatly.

There are many high-level outputs in the numerous areas such as MHD Equilibrium/Stability, Drift-kinetic/Gyro-kinetic Simulations, Hybrid Simulation, Fluid/MD Code, Integrated Transport Codes etc.

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 (TASK3D-a and TASK3D-p), 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.

Along with extensive simulation code development effort, NSRP puts a lot of

effort to make contribution to the sophistication of computational science such as Gyro-kinetic ion/Fluid-electron Hybrid method, Particle-MHD Hybrid scheme, Molecular Dynamics method, etc. It is commended to these efforts and recommends further investigations.

(2) Physics mechanisms of fusion plasmas and their theoretical systemization

In addition to contribution to the development of high-performance LHD plasma, to the design of a helical demo reactor, the NSRP has produced high-level results in the areas of Nonlinear MHD, Turbulence, Zonal Flow, Peripheral Plasma for elucidation of physics mechanism. It is however, to recommend considering how these efforts could become 'project' rather than 'program' in nature.

[3] **Promotion of collaboration regarding to the NSRP**

(1) Does the NSRP promote collaboration researches as the center of excellence, by integrating the high capabilities of the universities and institutes?

By integrating capabilities of domestic universities and institutions, the NSRP effectively promotes collaboration in the area of fusion numerical simulation. The strong evidence is continuing steady stream of 1,000+ collaborators with more than 120 collaborative works each year for 5 years. It is also well noted that the NSRP has included collaborators in all nine Task Groups, and performed information dissemination through "Plasma Simulator Symposium".

(2) Is the Plasma Simulator effectively utilized for collaboration research?

By effective utilization of "Plasma Simulator", the NSRP provides a great opportunity for fusion numerical simulation studies in many collaborators. More than 150 "plasma Simulator" users collaborated in more than 50 projects every year in 5 year period. This collaboration produced high-level output by 100 or so papers published per year.

(3) Does the NSRP function as a research hub for the dissemination of academic information to other fields, by promoting the NINS (National Institutes of National Sciences) interdisciplinary cooperation research and so on?

The NSRP also played significant role to promote new interdisciplinary fields under NINS cooperation program by organizing symposia and promoting collaborations.

(4) Does the NSRP contribute to the development of research in the universities?

As NIFS plays a central role of fusion collaboration among universities in Japan, the NSRP is also playing a very important role of fusion numerical simulation collaboration among universities with more than 13 universities with significant collaboration topics. It is worthwhile to note that the NSRP organized 5+ Collaboration Workshops every year for promoting collaboration among universities.

[4] Promotion of international cooperation and collaborations

(1) Does the NSRP play a role as an international COE through international collaboration research?

As NIFS played a central role in promoting US-Japan Joint Institute for Fusion Theory for long years, NSRP continued playing a major role in collaboration with US through JIFT activities. Also, NSRP promoted a wide-range of collaborations with European institutions, ITER/ITPA and IEA activities. Collaboration with Chinese institutions such as ASIPP and SWIP is also progressing. It is however, recommended to broaden international collaboration opportunities with other ITER partners

(2) Does the NSRP promote cooperation with and contribution to ITER and BA activities?

For contribution to ITER and BA activities, NSRP engaged very actively in many areas of ITPA, and BA IFERC Computer Simulation Center activities. It is highly recommended to explore further collaboration opportunities in 3D physics area such as RMP studies.

[5] Human resources development

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

The NSRP contributed to develop human resource in the area of fusion numerical simulation research through Sokendai Education Program as well as other graduate studies programs with universities. It is worthwhile to note that a few of graduate alumni from the NSRP are now actively involved in fusion simulation research in many institutions.

[6] Future plans

Is the research plan of the NSRP appropriate for the realization of the objectives?
Is it suitable and realistic for the next decade?

For the realization of two major objectives of the NSRP, the present research plan seems to appropriately address in road map, such as “elucidation of physics elements covering fusion plasma”, integration of all physics elements”, and “construction of numerical test reactor”. It is also drafted in “Future Plan” during “the second mid-term” and “the third mid-term” with 6 topical areas. However, the planned time-line seems to qualitative in project point of view, so that NSRP would try to develop more detailed plan for the future.

Review on Numerical Simulation Research Project

Reviewer: Michael Tendler

[1] Development of research system and environment

- (1) Are the objectives of the Numerical Simulation Research Project (NSRP), which was introduced in 2010, appropriate?

Plasma Physics & Fusion Research remains primarily an experimental science. Along these lines, LHD in its capacity of the masterpiece of fusion engineering offers a broad range of discoveries to be addressed by the NSRP project. A success in assessing and enhancing the LHD performance provides basic science knowledge for the next step devices ITER and FFHR aimed at addressing physics of burning plasmas. Given the limitations of financial and human resources, the objectives of the Numerical Simulation Research Project appear appropriate. The roadmap contains many critical highlights for the construction of a numerical reactor; yet, by no means exhaustive issues confronted by the project in future. Furthermore, milestones have to be clearly defined and described in detail. This will significantly amplify confidence in achieving objectives in the foreseeable future. Efforts must be focused on invoking a larger community of fusion scientists both in Japan and abroad into activities pursued within the framework of the Numerical Simulation Research Project. The Numerical Test Reactor development resulting from the NSRP project is very ambitious project and should be commended. The mutual collaborations and support with the ITER modeling group should be enhanced. The integration into the LHD interpretation and the decision making must continue and becomes more in depth. The broad range of issues addressed by the NSRP project has to be maintained at the profound level.

(2) Is the research system for promoting the NSRP suitable for its objectives?
Does it function appropriately?

The research system is adopted in order to fulfill ambitious objectives pursued by the NSRP project. The infrastructure is very complex involving many major players and contributing in their field of competence. Responsibilities and deliveries are clearly defined and monitored regularly by different bodies. Project cooperation with LHD and Fusion Engineering are controlled by Executive Director and Steering Committee via the NSRP Council consisting of leaders of subject groups. Some of them appear to be in a sub-critical state and should try to increase manpower by attracting young researchers into their teams. Rotation system adopted for chairing the NSRP Council is beneficial for promoting fair distribution of resources among research groups and achieving objectives of the project as a whole.

(3) In the NSRP, is the environment on the “Plasma Simulator” system and its related researches appropriate?

The environment of the “Plasma Simulator” and its related researches has been developed and periodically upgraded for many multi-purposes within the NSRP project. Computer system Working Group manages and operates Plasma Simulator and LHD Numerical Analysis Server in collaboration with HITACHI system engineers to make the research environment function properly. Plasma Simulator system is the unique tool for addressing vast and complex issues of plasma physics, material science and radiation studies required for the success of the project NSRP. To this end, Computer system Working Group manages and operates effectively Plasma Simulator and LHD Numerical Analysis Server in collaboration with HITACHI system engineers. Extensive education and research assistance system has been developed for numerical support and collaboration studies carried out by the Plasma Simulator and the LHD numerical analysis. The impact on fundamental scientific issues is very valuable.

[2] Research achievements

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

- (1) Construction of Numerical Test Reactor for a helical fusion system (including contribution to the development of high-performance LHD plasma, to the design of a helical demo reactor, and to the sophistication of computational science)

Construction of Numerical Test Reactor for a helical fusion system including contribution to the development of high-performance LHD plasma and to the design of a helical demo reactor, and to the sophistication of computational science appears as a highly warranted and smart approach for upgrading the LHD performance and addressing issues pertinent to a Helical Demo Reactor. Progress has been made in many areas such as 3D MHD equilibrium / stability and nonlinear simulation codes, drift kinetic and gyro-kinetic simulations, hybrid simulation code and integrated transport code for fast analysis and prediction of dynamic and steady-state transport in the LHD plasma. Research achievements in simulations of peripheral plasmas and plasma-wall interactions encompass a wide range of issues including 3 D fluid code for peripheral plasma, 3 D kinetic code for neutrals applied broadly in LHD, transport and re-deposition of carbon on first wall near divertor tiles and molecular dynamics simulation for hydrogen irradiation on carbon. Contribution to the design of helical demo reactor includes programmatic collaborations with Fusion Engineering Research Project aimed at FFHR-d1 design, integrated transport code TSK3D, 3D high β -equilibrium with chaotic field lines in FFHR-d1 and global particle simulation code FORTEC 3D evaluating neoclassical thermal transport in FFHR-d1. Contributions to the sophistication of computational science are offered by the gyro-kinetic ion/fluid electron hybrid simulation code enabling efficient fast calculation of electromagnetic turbulent transport in helical plasmas; particle-MHD hybrid simulation code parallelized with 3-dimensional domain decomposition; novel simulation method for molecular dynamics adopted for extensive study of fusion materials and the flux-tube bundle model; PIC –MHD interlocked model and multi-scale AMR module; thereby in summary enhancing predictive potential of simulation studies for designing the helical fusion reactor. The synergy of codes and methods remains a very important issue.

(2) Physics mechanisms of fusion plasmas and their theoretical systemization

Physics mechanisms of fusion plasmas addressed within the framework of the project are vast and novel and their theoretical systemization appears to be profound. They range from energetic particles issues, magnetic reconnections, zonal flows, E_r impact on edge transport to nuclear fusion material development.

Interaction of turbulence and zonal flows is analyzed quantitatively by means of entropy transfer function. Turbulence, structures and transport in the core and edge regions are addressed by means of complex analysis. Turbulence diagnostic simulator is developed for numerical diagnostics of turbulent structures. Collisionless kinetic-fluid simulation clarifies the impact of magnetic configuration in LHD and a micro-instability in tokamaks on the zonal flow generation. Particle simulation must bring to light the propagation and inherent currents generated by lobes within the SOL plasmas. Simulation methods applied to the toroidal neoclassical viscosity enable qualitative analysis of the bias experiment carried out in LHD. The emergence of hole and clump pairs is ascribed to nonlinear frequency chirping of energetic particle driven by GAM's. In summary, the list of achievements in understanding of physics mechanisms is quite long. Yet, more focus on the near-term LHD related issues is highly desirable.

[3] Promotion of collaboration regarding to the NSRP

(1) Does the NSRP promote collaboration researches as the center of excellence, by integrating the high capabilities of the universities and institutes?

Theory and plasma simulator collaboration research scheme provides for feedback by incorporating both programs proposed by NIFS and many domestic collaborators. It utilizes also the LHD Numerical Analysis Server. Number of accepted collaboration subjects is more than 120 and the number of people involved exceeds 1,000. Plasma Simulator Symposium provides collaborators with exchange of ideas, results and most importantly recent findings obtained during the LHD campaigns. Many collaborators from universities and institutes join the NSRP task groups in different capacities ranging from leaders to computational supporters. The NSRP has produced impressive amount of high ranking publications employing many domestic and international collaborations. The NSRP is playing an important role in disseminating advantages and

achievements of fusion research in Japan, promoting collaborations with NINS and the outreach to the general public. Many specific programs of general physics interest are launched due to NSRP activities. University programs benefit greatly from collaborations under the framework of the NSRP.

(2) Is the Plasma Simulator effectively utilized for collaboration research?

The NSRP offers a wide range of options to enhance progress in fusion science. More than 50 projects per annum were performed within the framework of the Plasma Simulator Collaboration research program. 150 users including 50 from NIFS and 100 from universities utilize Plasma Simulator per year. 458 papers are published by domestic and international authors deriving from the NSRP program. More than 10,000 jobs are run on Plasma Simulator every year. It demonstrates high level of numerical efficiency. The average operating rate amounts to 90 % to be considered high according to international gauges. In summary, the efficiency of the Plasma Simulator group is excellent.

(3) Does the NSRP function as a research hub for the dissemination of academic information to other fields, by promoting the NINS (National Institutes of National Sciences) interdisciplinary cooperation research and so on?

Following programs such as Hierarchy and Holism in Natural Sciences, Near-field Optical Imaging of Enhanced Electric Fields and Plasmon Waves in gold Nano-rods, magnetic reconnection studies at the kinetic level are pursued rigorously reaching the level of studies at high level and in detail. Project “ Science for Controlling Temperature in Non-equilibrium state ” should be acclaimed due to invoking of joint forces of NIFS and IMS and involving 5 Japanese leading universities. In summary, the NSRP is very instrumental maintaining NINS umbrella infrastructure within the framework of NIFS activities.

(4) Does the NSRP contribute to the development of research in the universities?

Japanese Universities are active participants in the NSRP activities. Their contributions are valuable elements complementing NSRP in a broad range of issues. The NSRP infrastructure provides universities with access to the cutting edge of fusion research. To name some current topical and timely issues; erosion of graphite as demonstrated by experiments at Nagoya University borne out theoretical prediction obtained by molecular dynamics model developed at NIFS.

Collaboration with Nagoya Institute of Technology contributes to the development of advanced simulation methods. Studies on helical structure formation at Nagoya Institute of Technology in collaboration with NIFS shed light on a single helicity state highly beneficial for magnetic confinement in Reversed Field Pinches. This subject is the unique contribution to the international RFP program.

[4] Promotion of international cooperation and collaborations

(1) Does the NSRP play a role as an international COE through international collaboration research?

The NSRP plays a central role in promoting US-Japan collaboration program, wide range of collaborations with the EU fusion program takes place. Japan-China cooperation is pursued successfully in the field of MHD stability and dust particles in fusion plasmas. The NSRP carries out collaborations with US through Joint Institute for Fusion Theory employing leading scientists from both countries. NSRP organizes JIFT workshops and provides funding for exchange of scientists from both sides. In summary, international collaboration program is an excellent achievement.

(2) Does the NSRP promote cooperation with and contribution to ITER and BA activities?

NIFS Rokkasho Research Centre facilitates NIFS and associated universities participation in BA activities thereby creating a roadmap for collaborative research between BA and NIFS with universities. In a broader perspective International Fusion Research Center IFERC project is implemented in Rokkasho in order to contribute significantly to ITER construction and operation and to the long term realization of DEMO. To this end, the leader of the IFERC project combines his duties as the head of the RRC activity with headquarters at the Aomori Research and Development Centre fully operational already in 2012/2014. Major tasks for this position are very broad and include coordinating with the EFDA and the F4E European bodies of the similar function and assisting in implementation of Procurement Arrangements from Japan to ITER and BA. DEMO design and safety issues have also high priority on the agenda. The most important task is to design and operate the high speed data transfer experiment between NIFS and ITER achieving as high efficiency of the throughput as possible with the present day technology. In summary, it appears

mandatory to amplify efforts to contribute to ITER design, construction and operation in the coming years in spite of given limitations of budget constraints.

[5] Human resources development

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

The NSRP contributes significantly to human resource development of international scientific workforce development for short-term and long-term supply of highly qualified specialists. Indeed, education programs are carried out at the Sokendai research center of advanced studies. There are education activities at the leading Japanese universities at Nagoya, Kyoto, Tokyo and Yokohama cities. The NSRP pursues rigorously training and education programs at all levels master, graduate and postgraduate studies. Results are very impressive. 39 graduate students and 7 post-docs have successfully completed the program resulting in 10 dissertation, 46 published papers and 52 international presentations at the first rank international conferences. Furthermore, 13 research works were awarded to young researches including highly distinguished Incentive Award of Japan Society for Simulation Sciences. The record of the alumni of these programs is impressive including many cutting edge contributions to international fusion research. The outreach to high schools is carried out by organizing study tours of NIFS facilities, demonstrations of modern hardware and tutorial lectures by the senior staff. A large reservoir of the theoretical knowledge and skills at many universities associated with NIFS can be used to enhance the NSRP impact. Scenarios focusing on the advantages of the D operation of LHD have to be worked out. Important subjects for general science such as self-organization, reconnection and holism project are addressed properly involving a small workforce. The progress in this area is important for the integration into the NINS infrastructure employing as large number of researchers from as many NINS institutes as possible.

[6] Future plans

Is the research plan of the NSRP appropriate for the realization of the objectives?
Is it suitable and realistic for the next decade?

Future plans address the most timely and topical issues of fusion research. They are worked out in sufficient detail and include Numerical Test Reactor for a helical fusion system based upon LHD operational results and experience. The emphasis is on the realization of a reactor in virtual space of a supercomputer and its optimization from physical, engineering and economic viewpoints. Roadmap includes the most important achievements in physics. It integrates most of the physical elements in one device by developing and applying multi-scale, multi-physics and multi-layer models to burning plasmas. Finally, it addresses a construction phase thereby contributing to the design of a helical DEMO reactor. Future plans are adopted in a realistic manner because physics elements required for a complete integration into a reactor design and operation are available resulting from NSRP activities. Long-term goals are also within the reach of the program due to exploitation of LHD results and collaboration programs with both domestic universities and international centers.

Review on Numerical Simulation Research Project

Reviewer: M.C. Zarnstorff

[1] Development of research system and environment

- (1) Are the objectives of the Numerical Simulation Research Project (NSRP), which was introduced in 2010, appropriate?

The NSRP objectives of (1) Elucidation of the physical mechanisms of fusion plasmas using numerical simulation and (2) Construction of a numerical Test Reactor (NTR) are both entirely appropriate for a major fusion program such as NIFS. Indeed, a program with these objectives is crucial for carrying out the overall NIFS program, including understanding present experiments, such as LHD, and building the understanding needed for future experiments (e.g. ITER) and for predicting behavior of future fusion energy facilities.

- (2) Is the research system for promoting the NSRP suitable for its objectives?
Does it function appropriately?

The NSRP is organized internally like a project, with a Director, Steering Committee, Council, and nine task groups (each with a leader). However, the NSRP staff volunteer their effort and are managed from divisions of the NIFS Dept. of Helical Plasma Research. This allows a fluid, flexible structure and facilitates collaboration with the Helical Plasma Research Dept. However, it may complicate management of manpower and alignment of resources with NSRP needs. In this sense, NSRP seems to be more like a research program rather than a project. But, achieving the NSRP goals requires developing specific capabilities, which will require project-like planning and focus on milestones.

From the presentations, it was not clear how the NSRP task groups are organized and operate. For the long term success, they should each have clear goals, plans for achieving their goals, and milestones for assessing progress. In the organization presented, there did not appear to be a specific plan or activity for validation and verification of the numerical models. The NSRP should consider adding this either as a separate activity, or as a standard activity and

requirement for all the task groups. Progress in validating the models against experiments should be tracked and used as a metric of the suitability of the models for incorporation in the eventual NTR.

Due to the long-term nature of the NSRP and the eventual complexity of the NTR, I would recommend the addition of a Technical Advisory Committee to the project. This should consist of outside experts and would meet approximately yearly to advise on the plans, approaches, and accomplishments of the project.

(3) In the NSRP, is the environment on the “Plasma Simulator” system and its related researches appropriate?

The capabilities of the “Plasma Simulator” and environment appear to be appropriate and adequate for the NSRP at this time. It has been periodically upgraded, and will be upgraded again in approximately 2.5 years. This upgrading process is crucial for the NSRP success, as the capabilities of the NSRP grow, requiring stronger computer support.

The “Plasma Simulator” is also used as a collaboration facility, with many users from Universities. This is healthy and appropriate.

[2] **Research achievements**

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

(1) Construction of Numerical Test Reactor for a helical fusion system (including contribution to the development of high-performance LHD plasma, to the design of a helical demo reactor, and to the sophistication of computational science)

The NSRP is in its first phase, which is preparation of numerical models of separate physical mechanisms. Integration of these models into multi-physics models is not planned to occur until later in this decade, and construction of an NTR is planned for start at the end of the decade. This late start of development of the integrated NTR is concerning, since it may then be challenging for it to be completed and validated in time to contribute to the helical-DEMO decisions planned for ~2022.

Regarding contributions to LHD, the design of a helical DEMO reactor, and to computational science, see the next section (2.2).

(2) Physics mechanisms of fusion plasmas and their theoretical systemization

The NSRP has made substantial progress and advances in the modeling of individual physical mechanisms. The NSRP has world-leading models in many areas, including:

- 3D-toroidal magnetic equilibria, including islands and stochastic field regions
- 3D transport simulation
- 3D non-linear MHD stability

A large number of impressive new modeling results have been obtained for specific phenomena in 3D-helical configurations, showing advanced capabilities, including

- gyro-kinetic simulations of turbulence and turbulent transport, including electromagnetic terms and non-linear flow effects
- 3D neoclassical effects on flows
- non-linear MHD simulation of core-collapse of pellet-peaked high pressure plasmas
- Energetic particle-driven instabilities
- Edge plasma characteristics and divertor plasma-wall interaction
- Materials properties for the walls of a fusion system

These new models have been applied to interpreting LHD data and experiments, and used for simulating the expected plasma phenomena in a future helical DEMO system such as FFHR-d1, and are clearly providing world-class capabilities. A number of these simulation codes have developed very sophisticated numerical techniques, including 3D domain decomposition, multi-scale and linked multi-physics capabilities (e.g. MHD stability and kinetic effects).

While comparisons between many of these simulations and LHD were shown, systematic validation of the simulations was not discussed. Conducting a rigorous validation and verification of the simulations is important to provide the basis for using them to accurately predict the behavior of future fusion energy systems, such as a DEMO.

The TASK3D integrated transport code suite has been developed and released for wide use. It builds upon a number of reduced models (e.g. VMEC instead of HINT2), and can be used for either analysis of experiments or prediction for new conditions. The predictive form is being used to investigate ways to extend the performance of LHD plasmas and for predicting FFHR-d1 performance and characteristics.

The plans for future integration and the approach for developing the integrated

NTR were not discussed, but need to be planned carefully. Will the models in TASK3D be upgraded to include the sophisticated simulations of detailed physics, such as magnetic islands, turbulent transport, or non-linear MHD evolution? Will the NTR build upon TASK3D or use a separate framework? The coupling of the many separate physics models must be planned carefully to preserve accuracy and computational efficiency.

[3] Promotion of collaboration regarding to the NSRP

(1) Does the NSRP promote collaboration researches as the center of excellence, by integrating the high capabilities of the universities and institutes?

Yes, the NSRP is functioning well as a collaborative center of excellence. Many of the simulation codes and models discussed are collaborations between NIFS and University based researchers. NSRP is receiving ~50 proposals for collaborative research from outside NIFS, and ~600 university researchers are participating. These are very strong numbers, indicating a healthy, fully functioning center.

(2) Is the Plasma Simulator effectively utilized for collaboration research?

Yes, the Plasma Simulator supports ~50 proposed projects per year, most of which are collaborations between multiple institutions. Roughly 24 of these projects per year are proposed by external collaborators. There are more than 100 external users of the Plasma Simulator. Over the last 5 years, these collaborations have produced approximately 90 publications per year.

(3) Does the NSRP function as a research hub for the dissemination of academic information to other fields, by promoting the NINS (National Institutes of National Sciences) interdisciplinary cooperation research and so on?

Yes. The NSRP and NIFS participate in at least six of the NINS cooperation programs and projects, which are organized to promote interdisciplinary cooperation. These activities also have collaborators from Universities, domestic institutes, and foreign universities and institutes.

(4) Does the NSRP contribute to the development of research in the universities?

Clearly yes. See (3.1) and (3.2) above for details on University involvement. Some 13 Japanese Universities participate in collaborations with NIFS and the NSRP.

[4] Promotion of international cooperation and collaborations

(1) Does the NSRP play a role as an international COE through international collaboration research?

Yes. The NSRP has a number of international collaborators participating in its projects. In addition, the NSRP has strong collaboration and personnel exchanges programs with the US, EU, and China. This includes JIFT, the joint institute for Fusion Theory, and a large number of topical collaborations with individual institutes on specific topics and codes.

(2) Does the NSRP promote cooperation with and contribution to ITER and BA activities?

Yes. NSRP personnel are collaborating in use and management of the IFERC computer center, part of BA and ITER. Several NSRP staffs are participating in the ITPA topical groups, working on ITER high priority issues and joint experiments. It is intended that the NSRP and NIFS provide a “bridge” to make it easier for Universities to participate in ITER and BA activities. At this time, ten Universities are making use of the NSRP and NIFS program to collaborate in the ITER and BA.

[5] Human resources development

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

Yes. The NSRP and NIFS provide support to approximately 39 graduate students working on numerical simulation projects from a variety of Japanese Universities, and support seven post-docs. In addition, NSRP and NIFS have an educational outreach program for high-schools, a summer school and a program of public lectures.

[6] Future plans

Is the research plan of the NSRP appropriate for the realization of the objectives?
Is it suitable and realistic for the next decade?

The overall goals and general research plan are appropriate. The plans presented are very high level, and it is not clear whether detailed planning has occurred for the integration steps ahead. See (1.1) and (2.2). Also, plans are needed for how to handle multi-physics models that cross task-force boundaries. E.g. interaction between turbulence and 3D equilibria. This may require new simulation strategies and substantial development.

The reasonability of the proposed plans and whether they will achieve their long-term goals depends on aspects that were not presented, including whether adequate resources (people) are available and whether they can be managed effectively.

Review on Numerical Simulation Research Project

Reviewer: Thomas Klinger

[1] Development of research system and environment

- (1) Are the objectives of the Numerical Simulation Research Project (NSRP), which was introduced in 2010, appropriate?

With the availability of high-performance computers, numerical simulation became a key instrument for any research in complex systems, notably in plasma physics and fusion research. It was the right move of NIFS to establish a dedicated project for code development, benchmarking, validation and – finally – integration. The ultimate goal is a suite of codes that serves as a “numerical fusion power reactor”. Such a project is surely extremely ambitious but is nevertheless the way to go. In that sense the NSRP objective is appropriate.

It is the overall strategy of the NSRP to develop by means of numerical simulation a sufficiently deep understanding of the various physics aspects of the Heliotron configuration, mainly to allow for a direct extrapolation from LHD to a power reactor called FFHR. The tokamak experiment ITER is expected to provide NSRP data on burning plasma physics, e.g. fast particle driven instabilities. A Heliotron-type burning plasma experiment is not foreseen in this strategy.

This is a valid approach but there are two major project risks: Firstly, ITER will deliver data on self-heated plasmas only about 5-6 years after start of operation. This will postpone the design of the FFHR significantly, since fast particle confinement is critical for a proper design of a power reactor. Secondly, the validation of fast-particle codes with ITER data is not unproblematic, since the physics in a Heliotron-type device is very much different: Helically trapped fast particles tend to get lost, the spectrum of Alfvén waves driven by fast particles is distinctively richer, and the wave-particle interaction is not well understood. A reasonable risk assessment should be conducted in the light of the chosen strategy.

Nevertheless, it is the right approach to address within the NSRP project the key topics required for a credible design of a power reactor. The mid-term program of the NSRP should put emphasis on two key areas: (I) simulation of the closed

helical divertor and plasma-wall interaction and (II) integrated high-performance discharge scenarios with fusion-relevant parameters. Both areas have the advantage that the developed numerical codes can be immediately validated with experimental data obtained from LHD. This should be vigorously done and the LHD experimental program should be well coordinated with the activities within the NSRP.

More generally, the development of a Heliotron-based reactor design should be deeply integrated into the design activities of the engineering department. It is crucial to avoid a physics-driven reactor design that imposes unnecessary or even troublesome engineering problems. Hence, a strong input of experienced engineers is needed. For that it is recommended to establish a reactor development project that integrates numerical simulation, fusion engineering, and device operation.

(2) Is the research system for promoting the NSRP suitable for its objectives?

Does it function appropriately?

The research in the NSRP is organized via a quite complex matrix-type organization. This is meant to integrate NIFS and university researchers and also to involve experimental researchers in a suitable way. While NIFS in its role as a COE for numerous Japanese universities requires flexible and open organization structures, the chosen approach leads to a rather fractionized task structure (nine task groups) with a lot of overlap. This might well lead to double work and lack of efficiency. In addition, there is a co-existence with the matrix organization in NIFS (projects and departments), which makes the management role of the task group leaders probably quite difficult. In total there are four different bodies to coordinate the work.

It is beyond the scope of the present review to make an assessment of the day-by-day efficiency of the organization of the NSRP. If the experience is such that all project members are satisfied, it may well be the right approach. If the NSRP has – despite its name – rather the character of a research program than a project, it is not worthwhile to ask for milestones, resource-loaded work packages etc. If NIFS chooses to have here a strict project-oriented work, it is recommended to analyze work flows and project structure, to make both as simple as possible, and to agree on a limited number of major milestones that mark the end of well defined work packages, which are equipped with sufficient man power.

(3) In the NSRP, is the environment on the “Plasma Simulator” system and its related researches appropriate?

The plasma simulator is a powerful Hitachi 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 Hitachi computer has 77 TFlops in its phase 1, 315 TFlops in its phase 2, which is an appropriate performance (<100 in world-wide ranking). The management of the “plasma simulator” and research assistance in numerics and computer science are given by NIFS and Hitachi.

It is the right approach to integrate the wide research knowledge available in the Japanese universities in the NSRP. Here, the “plasma simulator” is the key element. In this sense it appears to me fully appropriate.

[2] Research achievements

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

(1) Construction of Numerical Test Reactor for a helical fusion system (including contribution to the development of high-performance LHD plasma, to the design of a helical demo reactor, and to the sophistication of computational science)

The NSRP has produced quite a number of highly ranked papers and some awards. An impressive suite of numerical codes has been developed. In particular, the gyro-kinetic code developments are among the best in the world. Especially with regard to the long-term goal of developing a “numerical test reactor”, careful code validation is of utmost importance. Only after validation, the codes can be integrated and allow one to make concrete forecasts on performance parameters, stability, divertor loads etc. LHD must be the chief instrument for the validation of the various codes. A good example is the “super dense core” regime, more recently discovered on LHD, which is not yet well understood. Here, a systematic analysis with numerical codes would be of great value. In addition to the validation aspects, a close linkage between the experimental program of LHD and the NSRP could well pave the way to improved performance of the device (e.g. HINT2 equilibrium calculations w.r.t. divertor compatible discharge scenarios). A suitable organizational structure should be able to foster such a close collaboration.

In addition, 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. If stellarator geometry imposes a problem, simplified geometries could be chosen.

(2) Physics mechanisms of fusion plasmas and their theoretical systemization

I'm afraid that I do not quite understand what is meant with "theoretical systematization". Within the NSRP, quite a number of new and timely physics issues are addressed in the fields nonlinear MHD, turbulence, elementary processes. An example for cross-transfer of knowledge is the work on the helical state in reversed field pinches. As above, it is recommended to make systematic comparisons to LHD experiments wherever possible. An example is the turbulent peel-off of blobs: The concrete observation of blobs on LHD would be an important complement to the numerically obtained results.

We also note that there is a significant outreach to other fields in NINS, for example to inertial confinement fusion.

[3] Promotion of collaboration regarding to the NSRP

(1) Does the NSRP promote collaboration researches as the center of excellence, by integrating the high capabilities of the universities and institutes?

The publication record of the NSRP is good 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 is 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, which makes the management challenging. There are three areas of work: (a) general theory, (b) plasma simulator, (c) numerical methods. My recommendation is to perform a systematic assessment of each single collaboration subject to make sure that it actually contributes to the research goals of the NSRP.

(2) Is the Plasma Simulator effectively utilized for collaboration research?

It is difficult for me to judge how efficient the use of the plasma simulator is. This depends on the code efficiency (e.g. efficient use of modern numerical methods) and on the choice of subjects addressed within the various different collaborations. As already mentioned in [3](1) above, the introduction of a systematic assessment would be useful. Here, also the (numerical) cost and the scientific value for the NSRP should be evaluated.

(3) Does the NSRP function as a research hub for the dissemination of academic information to other fields, by promoting the NINS (National Institutes of National Sciences) interdisciplinary cooperation research and so on?

It appears that the NSRP fulfills its role as a “research hub”, since it coordinates and conducts a large variety of numerical simulation works, thereby covering a large spectrum of topics.

(4) Does the NSRP contribute to the development of research in the universities?

NIFS has developed an impressively dense network of collaborating universities. The NSRP is benefiting from this network and the development of research in the universities is clearly fostered by its activities. Besides the mere access to supercomputing facilities, the NSRP is providing support in computer science and numerical mathematics. The exchange of physics know-how seems to work very well. A useful instrument for the exchange of know-how is to organize dedicated joint workshops; these should be conducted on a regular basis with a small, focused group of participants.

[4] Promotion of international cooperation and collaborations

(1) Does the NSRP play a role as an international COE through international collaboration research?

To play the role of a international COE, the international collaboration partners should be carefully selected. A systematic approach is recommended to assess (a) the quality of the collaboration partner and (b) the value of the collaboration. With regard to (b), a gap analysis in know-how and man power of the NSRP would be useful.

It seems like the JIFT (JA-US collaboration) is well established and works perfectly since many years. Joint workshops and papers are speaking a clear

language. The systematic in the collaboration with EU institutions is not as obvious. As an example, it is not clear why for the collaboration on plasma turbulence a Serbian institute with a relatively weak standing was chosen. It is recommended to conduct an internal review of existing collaborations with the goal to identify first-class collaborations and areas, where the NSRP would benefit most.

(2) Does the NSRP promote cooperation with and contribution to ITER and BA activities?

Recently, the NIFS Rokkasho Center Director was appointed as the IFERC Project Leader. This can be taken as a recognition of the NIFS activities in the framework of the ITER BA. In addition there are various committee memberships. Two members of NSRP are active contributors in the ITPA.

[5] Human resources development

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

It is positively noted that a large number of PhD students is directly involved in the NSRP. There is also a growing number of papers authored by PhD students. This is clearly due to the numerous PhD projects based on collaborative action with the use of NIFS supercomputers. As a consequence, your researchers come into close contact with the NSRP and NIFS, which is clearly an asset. In addition, the NSRP is conducting outreach events at high schools, which is also very positive.

[6] Future plans

Is the research plan of the NSRP appropriate for the realization of the objectives?
Is it suitable and realistic for the next decade?

My comments on the road map shown during the meeting have already been made under 1. As stated above, it is very (maybe too) ambitious to come to valid power reactor concept (FFHR) within the next decade. ITER will not be able to deliver in time the data required for a proper code validation; in addition, it is questionable to what extent the ITER data can be transferred to the Heliotron concept. The research plan of the NSRP is based on the schedule/milestones of the task groups (document provided later). It is difficult, however, to assess the required resources (both human and computer power). The best, of course, would

be a resource-loaded work breakdown structure (WBS), but – taking into account the many unknowns and uncertainties in the field – this may well be impossible to do. Hence, it is probably the best to focus on the development of a meaningful research program, that is openly discussed and carefully embedded in the world-wide fusion research activities. The IEA implementing agreements might be a good platform for that.

「数値実験研究プロジェクト」に関する評価

評価者： François Waelbroeck

[1] (研究体制・環境の整備)

(1) 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。

数値実験研究プロジェクトの目標は、ヘリカルプラズマを支配する要素物理を解明・統合し、ヘリカル DEMO 炉建設に向けて、数値実験炉を構築することである。そのために、理論、実験、数値の専門家をひとつに団結し、彼らの意識をコードの検証および炉設計という最終目標へ向けることといった、称賛に値すべきゴールを目指している。

数値実験研究プロジェクトは、トカマクとヘリカルという対象の違いを除けば、欧州の ITM-TF や米国の FPS に類似している。これらの活動と同様、数値実験研究プロジェクトも、非常に野心的であり、野心的であるがために未達成で終わってしまう危険性も秘めている。各種のゴール設定については、適切であるばかりか、それ以外の選択肢はないというような設定になっており、このプロジェクトを不可欠なものにしている。

「数値炉」を目標とすることへのリスクとして、個々の研究に尽力を注ぐべき時期に、強引に統合を進めてしまう可能性が考えられる。今回の外部評価を行う現段階ではまだその兆候は見られないが、自ら設定した達成時期（2021 年）が近づくにつれ、そうした動きへのプレッシャーが高まることは大いに考えられる。2021 年に到達予定となっている成果についてももう少し詳細に設定するとよいだろう。このリスクが軽減し、数値実験研究プロジェクトの主張が、単なる理想に終わってしまうこともなくなるだろう。おそらく、2021 年には、GKV や HINT2、MEGA、EMC3 が理想的に統合され、一斉に稼働するシミュレータ（そしてこれこそが、ここでいうすべての物理要素を組み込んだ「完全なる統合」と指しているのだと思われるが、非現実的である）が完成する、というよりは、現在の TASK-3D コードをさらに追及したものが出来上がっているだろうと予測する。

(2) 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。

現在、8つの研究系、4つのプロジェクト、そして9つのタスクグループの、マトリックス型推進体制が取られ、この体制の導入により組織の分権化が進み、異なる研究系との協力体制が必要に応じて取りやすくなった。数値実験研究プロジェクトの狙いは、新たな動機づけとゴールを与えることで、研究の機動性および柔軟性を高めようというものである。統合が必要な分野で研究者交流を促進する、という意味では、成果を上げることができるだろうと思われる。しかし、こうした体制は管理が大変で、負担が大きくなりやすいという点を、常に念頭に置かなければならない。

9つのタスクグループの人員配置は十分にバランスが取れている。一般的に、核融合実験装置（特に LHD）における、周辺輸送やプラズマ壁相互作用などの研究の重要性が高まってきていることから、他の、運動論的輸送や流体乱流輸送を多少犠牲にしても、先の2つのタスクへの増員を行ったほうが、有益ではないかと思われる。出版実績を見ると、周辺輸送、SOL、プラズマ対向壁相互作用への比重が、やや低いように見受けられる。

外部評価委員会で配付された数値実験研究プロジェクトに関する論文リストによれば、数値実験研究プロジェクトが設置された2010年は、理論シミュレーショングループの生産性が一番高かった年である。学術文献データベース「ウェブオブサイエンス」が示す、NIFSの理論シミュレーション論文リスト数の同時期の記録よりは、こちらの方が明白にピークを示している。2010年以降の年単位の減少については、上記2つのデータベースではばらつきが見られる。外部評価の配付リストでは30%、ウェブオブサイエンスでは10%強とある。この減少は、数値実験研究プロジェクトの管理上の問題か、プロジェクト外の要因、例えば予算削除などによるものであるかと思われる。

(3) 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。

プラズマシミュレータの機能は、40TB メモリーで322 ノード、ピーク時には315TFlopsのパフォーマンスを見せる。この数値は、欧州の核融合研究やITM-TFを支えるHPC-FFコンピュータの持つ100TFlops、24TBを上回る計算処理能力である。高性能のコンピュータは必要不可欠で、専用の高性能コンピュータ無しでは、数値実験研究プロジェクトの成果は信頼性を得られない。90%を誇る利用率、利用者数およびプラズマシミュレータが処理する業務量を考えると、プラズマシミュレータがここまで大型である理由が伺える。プラズマシミュレータを活用した研究数は、テキサス先進計算センターの2つのコンピュータのひとつLonestarが支える研究数に匹敵する。プラズマシミュレータは、トレーニングやプログラム開発サ

ポートなどを含む、強力な支援体制に恵まれている。プログラム開発サポートについては、大学からの利用が少ないのは地理的な理由が大きいのだろう。これについては、サービスの提供を遠隔的に行えるようにするなど、提供方法を工夫していくことが必要である。

[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。

(1) 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。)

一連のコード、例えば MHD 平衡、中心部の運動論的輸送、新古典的輸送、高速粒子による各種モードや周辺プラズマ輸送など、一連のコード開発が大きく前進したことが伺えた。中でも、シミュレーション結果をそれぞれ、LHD 実験データと比較検討していることは、評価できるし、大変興味深い。これにより、モデルの弱点が示され、改善へのヒントを与えてくれるだろう。

例えば、HINT2 コードと、周辺部の電場領域の測定結果の比較分析がそのひとつである。この比較により、同じ三次元平衡コードである HINT2 と PIES の間でも生じてしまう相違を明らかにしてくれるかもしれないし、さらに比較研究を進めていくことで、PIES でも HINT2 で扱えない、磁気島サイズに対するプラズマ回転の役割が、明らかになるかもしれない。

ジャイロ運動論的乱流輸送シミュレーションは、ゆらぎスペクトルレベルで実験結果との比較分析を可能にした。輸送フラックス値が、計算上も実験上も一致したため、輸送フラックスに対する有効なモデルが構築された。電磁的効果を含めたコードの拡張が進み、見通しが非常に明るくなった。

ホール・クランプ対の生成を示す波動・粒子相互作用の理論研究や EMC3-EIRENE コードを用いた周辺輸送研究などは、国際的な取り組みとして行われている。

成果報告において、MIPS および MINOS コードは、カオス領域を有するプラズマでの非線形シミュレーションが可能になるなど、十分なレベルに達したものであると紹介されたが、MIPS コードについて触れている PFR 論文は2本であり、MINOS コードに関する論文発表は見あたらなかった。MIPS 論文に、数値手法に関する情報が記されていないのは、残念なことである。

(2) 核融合プラズマの物理機構解明とその理論体系化

核融合プラズマの閉じ込めに関する、基礎的な物理機構の解明については、大きな進展が見られた。数値実験研究プロジェクトの核融合科学のレベルの高さは、外部評価委員会で提供されたリストにある、著名な雑誌への論文出版数から伺える。

特に、新古典的輸送フラックスを計算する、新型のモーメント式については、ORNL の PENTA コードの基礎となっているなど、素晴らしい成果を上げた。

数値実験研究プロジェクトは、長パルス MHD モードと乱流の相互作用を、二流体モデルを用いて解明しようとしており、この分野では、世界の研究を先導し続けている。中でも興味深いのが、磁気島とドリフト波乱流の相互作用シミュレーション、共鳴磁場摂動 (RMP) と抵抗性バルーニング乱流との相互作用の解明などといった取組みである。これらのモデルに新古典的理論を加味しようという取組みは、今後の成果が大いに期待されるが、今のところは斬新的な発見には至っていない。

ヘリカル閉じ込め研究者とトカマク研究者との架け橋という意味では、数値実験研究プロジェクトは、主要な働きをしている。ヘリカル装置から得た洞察から、いかにしてトカマク物理を理解できるかを実践している。RMP 研究や RFP の準シングル・ヘリシティー状態の研究などは、その良い例である。

また、プラズマ・壁の境界分野においても、ダストプラズマのシミュレーション研究やまた二対衝突近似を用いた分子動力学シミュレーションおよび密度汎関数理論によるプラズマ対向面への照射効果を評価するため研究を強力に進めている。

結論として、数値実験研究プロジェクトは、国際的な基準から見ても高いレベルでの成果をあげている。

[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)

(1) 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。

共同研究を推進し、大学等の研究能力を結集するという点において、数値実験研究プロジェクトは効果的である。2008 年から 2012 年において、理論シミュレーション研究系及び数値実験プロジェクトから発表された論文数は 458 本に上り、ここから、この分野での NIFS が持つ共同研究のネットワークが高い効果をもたらしていることが伺える。3 名の共同研究者に対し、2 名の比率で所内研究者を充てることにより、NIFS が適切にプログラムの方向性を示し、優先順位の高い領域での影響力を維持している。タスクグループのメンバー103 名の内 76 名が所内の研究者（理論系 55 名と実験系 21 名）で占められており、彼らが数値実験研究プロジェクトの基幹を成す。一方、所外研究者も主要な役割を担っている分野もあり、例えば、プラズマ壁相互作用グループを支える主要メンバーとなっている。このプラズマ壁相互作

用グループおよび周辺プラズマ輸送グループへ、所内のメンバーを増員すること（エッジ・SOL・ダイバータを優先に）が、プロジェクト全体の利益につながるだろう。周辺プラズマ輸送グループは、現在の所内研究者を再度配分しなおすことで、強化されるだろう。

(2) 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。

プラズマシミュレータは、共同研究で非常に有効に活用されている。所内からは50名、所外からは100名の利用者がおり、彼らの研究をサポートしている。

プラズマシミュレーションシンポジウムには、利用者の80%が参加したということで、利用者への貢献が出来ている。150名の利用者という、共同研究の参加者が所内所外合わせて1,000名程度いることを考えると、割合としてはかなり小さいのではないか。シンポジウムに参加していない共同研究者が利用に困ったときには、その少数派のシンポジウム参加者を頼ったり、ワークステーションを活用したりして解決しているのだろうか。

(3) 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。

機構内分野間連携事業の枠組みのもと、シンポジウムを開催したり機構内分野間での共同事業を推進したりと、核融合研究で得た成果や手法を、広く発信するにあたり、中心的な役割を果たしている。

(4) 大学の研究発展に寄与しているか。

数値実験研究プロジェクトは、13校の大学の研究発展に貢献している。より挑戦的な課題の大半は、共同研究として大学とともに進めている。年間5件以上のワークショップが開催され（十分な件数だと思われる）、大学との共同研究は活発化している。数値実験研究プロジェクトで得た知識についての情報交流を促進するためにも、大学との関係維持は重要である。

[4] (国際連携・共同研究の推進)

(1) 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。

NIFSは、長年にわたり米国との協力事業を、JIFTを通じて果敢に実行してきた。他国との協力事業も、制度としてはやや不明瞭なところはあるが、効果をあげている。欧州との事業では、GENEとのGKVや、CAS3DとのMINOSやMIPSなど、ベンチマーク作業において重要な成果をあげている。HINT2をRMP装置で検証したりRFXのヘリカル条件の計算を行ったり等、数値実験研究プロジェクトで開発された

コードを、海外の実験装置で応用するという試みもみられた。しかしながら、海外の研究者との協力で作成された論文の割合は、それほど大きくない。新規の資源を開拓せずして、プロジェクトの改善は難しい。プロジェクトの成果の多くが「プラズマ核融合学会誌」で発表されているが、知名度が低く、せっかくの成果のほとんどが、残念ながら海外では知られていない。海外の研究者に、プラズマ核融合学会誌への興味を持ってもらうために、国外のジャーナルでのレビュー論文の定期的な発行を行うと良い。

(2) ITER 計画・BA 活動との連携、貢献を図っているか。

ITER 計画発展のための事業に、数値実験研究プロジェクトはいくつか参加している。特に、ITPA 活動のトピカルグループへは代表者を 2 名送り、さらに研究者を派遣し、会合に定期的に参加している。トロイダルアルヴェン固有モードコードのベンチマーク構築にも貢献している。

ITER や ITPA への協力を行うにあたり、たとえその活動が、数値実験研究プロジェクトの目的—ヘリカル DEMO 炉設計へ向けた、数値実験炉の構築—に、直接的な利益をもたらさない場合でも、敢えてそれらの活動に参加する意義について考察してみる。まず、これらに参加することで刺激を受け、プロジェクトが強化され、ヘリカルプラズマと軸対象プラズマの物理を比較することで、新たな着想を得ることができる。また、数値実験研究プロジェクトのコミュニティーが広がる。そして忘れてはならないのが、数値実験研究プロジェクトが持つ能力をそこで発揮することで、当プロジェクトへのサポートを幅広く獲得できるということである。

国際核融合エネルギー研究センターへの参加は、言うまでもなく、数値実験研究プロジェクトの歩みに完全に一致する。当センターや BA 活動に、NIFS 研究者が積極的に関わっているのは、非常に喜ばしいことである。

[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。

核融合科学研究所の一つのプロジェクトとして、また、核融合科学研究所が持つ各大学との密接な関係のおかげで、数値実験研究プロジェクトは、国際的に活躍できる人材の発展に積極的に貢献している。貢献としては、特に、各大学の大学院教育プログラムへの参加や、高校のサイエンス教育への協力、また、サマースクールやウィンタースクールの実施などがあげられる。サマースクールやウィンタースクールへの、外国人学生の参加が着実に増加しており、その企画が成果をあげていることが伺える。

[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。

数値実験研究プロジェクトの研究計画は、ヘリカル型の閉じ込めコンセプトを支えるシミュレーション及びモデリング研究を、効果的で強力なものに発展させるのにふさわしい。基礎物理機構の研究で今後得られる様々な発見内容に対し、十分な対応ができるような柔軟性を持っている。エクサスケール計算機に至る道のりにおいて、消費電力の検討から設計が変更されるなど、計算機のパラダイムに変化が生じても、これに対応できる計画となっている。さらに重要なことは、このプランでは、大学側が貢献できるような機会を豊富に設け、またそれが実現できるよう、そのためのサポートおよびガイダンスを提供しているということである。

最初の項目でお答えした通り、数値実験炉の構築という目標設定は、いくらか解釈の余地がある。これは、10年以上継続されるプロジェクトとして適切なものである。「すべての要素物理の統合」への言及は随所に見られるが、非現実的すぎるかもしれない。2021年までに全ての要素物理を完全統合しようとするなら、ムーアの法則を打ち破るほどのレベルで、ハードウェアの性能を劇的に向上させなければ難しいだろう。幸いなことに、統合の必要性の度合いは問題による。ヘリカル DEMO 炉の設計は、全ての要素を統合しなければならないというわけではなく、統合を必要とする動的特性を有する物理過程の間での部分的な統合によって達成できるであろう。統合そのものよりも、ヘリカル型の閉じ込め物理の根本的な謎を解明することの方が重要なのであり、その多くは、現在のコードの開発を進め、実験の解析を進めていくことで、達成されるだろうと思われる。このゴールであれば、研究計画は非常に適切であると言える。

「数値実験研究プロジェクト」に関する評価

評価者：Gyung-Su Lee

[1] (研究体制・環境の整備)

(1) 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。

数値実験研究プロジェクトは、2つの目標「(1)核融合プラズマの物理機構解明とその体系化及び(2)ヘリカル型核融合数値実験炉の構築」を掲げている。前回の外部評価(2007年)ののち、この2つの目標を設定したことにより、数値実験研究プロジェクトの方向性が定まり、LHD 実験データの物理的理解および数値実験炉のシステム構築に向かって着実に前進している。このプロジェクトから、質の高い成果や論文が多数生まれていることから、十分に適切な目標設定であるといえ、プロジェクトの成功・進展が期待できる。

(2) 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。

推進体制は十分に整っている。組織を横断するタスクグループは、理論系・実験系を問わず、また所外の共同研究者も、メンバーとして受け入れることができる。さらに、関連する複数のタスクグループへの参加も可能であるため、研究者間での活発な交流が行われるだろうと思われる。事実、LHD プロジェクトとの連携では、高度な技法を用いた非常に優れた成果が挙げられ、物理的諸問題の解明に役立った。数値実験炉の構築という最終目標の達成のため、技術的および工学的な各課題について、それぞれの物理要素研究の統合がなされるよう、一層の工夫を求めたい。

(3) 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。

フェーズ2のプラズマシミュレータの機能拡張計画は順調に実施され、数値実験プロジェクトや各大学の共同研究者により、高度計算機資源が有効に活用されている。利用者のために提供された、システムサポートや研究支援プログラムも有効に活用されている。もし、双方の同意がえられるならば、「国際核融合エネルギー研究センターの高性能計算機システム Helios」と「プラズマシミュレータ」の共同利用計画が検討されることを提案したい。これにより、核融合シミュレーション研究に必要な計算機資源の活用が、より効果的かつ効率的に行われることが期待できる。

[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。

(1) 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。)

数値実験研究プロジェクトの2つの目標のもと、非常に多くのシミュレーションコードが開発され、数値研究が進められた。これらは、LHD 実験データと比較検討され、LHD プラズマの性能をさらに高めるとともに、物理的な機構の解明に大きく貢献している。MHD 平衡・安定性や、ドリフト運動論・ジャイロ運動論シミュレーション、ハイブリッドシミュレーション、流体・MD コードや、統合輸送コードなど、非常に広い範囲において、優れた成果を上げることができた。

一方、核融合工学研究プロジェクトとの間で行われた計画的な研究連携により、ヘリカル DEMO 炉 FFHR-d1 の設計に向け、大きな進展が見られた。TASK3D-a や TASK3D-p 統合輸送コード、HINT2 やグローバル粒子シミュレーションコード FORTEC-3Dなどを適用することにより、数値実験プロジェクトは FFHR-d1 の設計に貢献している。数値実験炉構築への道のりをより現実的なものにしていくために、数値実験研究プロジェクトと核融合工学プロジェクトが組織的に連携できるよう、体制を整備していくことが望まれる。

数値実験研究プロジェクトは、多数のコード開発だけでなく、計算科学の高度化についても懸命に取り組んでいる。例えばジャイロ運動イオン・流体電子ハイブリッド計算、粒子・MHD ハイブリッド計算法や分子動力学計算法の開発などが、計算科学の高度化に貢献するものである。今後も、これらの活動に対し、一層の努力を望みたい。

(2) 核融合プラズマの物理機構解明とその理論体系化

数値実験研究プロジェクトは、LHD プラズマの高性能化やヘリカル実証炉の設計への貢献に加え、非線形 MHD、乱流、ゾーナルフローや周辺プラズマなどの研究を通して、核融合プラズマの物理機構解明においてもハイレベルの成果をあげている。しかし、これらの取組みは本来、「プログラム」と呼ばれるべきものであるため、今後いかにしてそれらを「プロジェクト」と呼ぶにふさわしい内容に高めていくかを考慮しながら、進めていくことが望まれる。

[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)

(1) COE として大学等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。

全国の大学等研究機関が持つ高い研究能力を結集することにより、核融合シミュレーション分野の共同研究が、効果的に進められている。ここ5年間で、毎年参加者は1,000名を越え、120を越える研究が実施されていることから、それが伺える。プロジェクトの9つすべてのタスクグループに所外研究者を参加させたり、プラズマシミュレータシンポジウムを開催して情報を広く提供したりするなど、配慮や工夫もよくされている。

(2) 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。

プラズマシミュレータが有効に活用され、数値実験研究プロジェクトは、素晴らしい研究環境を、より多くの共同研究者たちに提供している。過去5年間で、150名を越えるプラズマシミュレータの利用者たちが、毎年50件以上のプロジェクトの課題に参加している。この共同研究から、年間約100本の論文が公表され、高いレベルの成果をもたらしている。

(3) 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。

機構内の分野間連携事業のもと、シンポジウムを開催したり共同研究を推進したりする等、学際的で新しい取り組みにおいて、数値実験研究プロジェクトは重要な役割を果たしている。

(4) 大学の研究発展に寄与しているか。

核融合科学研究所が、国内の大学間の共同研究の中心となっているように、数値実験研究プロジェクトもまた、大学間のシミュレーション共同研究において、非常に重要な役割を果たしている。13校以上の大学と、重要な研究課題に取り組んでいるだけでなく、大学間連携を推進するため、数値実験研究プロジェクトが、ワークショップを年間5件以上開催しているというのは、注目に値する。

[4] (国際連携・共同研究の推進)

(1) 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。

核融合科学研究所が長年、日米事業である JIFT の中心的機関として役割を果たしている中、数値実験研究プロジェクトは、その JIFT を通じ、日米の共同事業の主要な実施者として、活動を行っている。数値実験研究プロジェクトは、欧州の研究機関や ITER・ITPA、さらに IEA 協定ともつながりを持ち、幅広く共同研究を行っている。ASIPP や AWIP など中国の機関とも共同研究事業が進んでいる。他の ITER 加盟国とも、協力活動を広げていくことを望みたい。

(2) ITER 計画・BA 活動との連携、貢献を図っているか。

数値実験研究プロジェクトは、多数の ITPA 活動や国際核融合エネルギー研究センター・計算機シミュレーションセンターの事業などに非常に積極的に関わることにより、ITER・BA 活動へ貢献している。RMP 研究など 3 次元物理の分野において、共同活動の機会を広げていくことが望まれる。

[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。

数値実験研究プロジェクトは、総研大の教育課程や他大学との間で実施する大学院生研究プログラムなどを通じ、核融合シミュレーション研究の人材育成に貢献している。卒業生の中から、すでに、多くの機関でのシミュレーション研究に積極的に参加している者がいるというのは、素晴らしいことである。

[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。

数値実験研究プロジェクトが掲げる 2 大目標の達成に向け、現行の研究計画は適切だと思われる。ロードマップには、「核融合プラズマについてのあらゆる要素物理の解明」、「すべての物理的要素の統合」および「数値実験炉の構築」が適切に記されている。このことは、第 2 期中期計画や第 3 期中期目標・中期計画の将来計画においても、6 つの課題分野について、計画案として記載されている。しかし、計画の中のタイムラインについては、プロジェクトとしては内容が漠然としたものにとどまっているので、今後は、より細かいところまで掘り下げて計画を練る必要がある。

「数値実験研究プロジェクト」に関する評価

評価者： Michael Tendler

[1] (研究体制・環境の整備)

(1) 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。

プラズマ物理および核融合研究は、基本的には実験科学である。核融合工学の傑作 LHD には、数値実験研究プロジェクトが取り組むべき広範囲にわたる実験的発見が豊富であり、LHD の性能評価及び性能強化に貢献することで、次のステップである燃焼プラズマの研究装置 ITER や FFHR の基礎科学的知見を得ることができる。予算や人材が限られていることを考慮すれば、数値実験研究プロジェクトの目標設定は適切といえる。ロードマップには、数値炉実現に不可欠な項目が多く含まれているものの、将来のすべての課題を網羅しているとは言えない。先を見通して確実に研究を進めていくために、マイルストーンを明確に設定し、詳細に記述するべきである。これまで以上に広範囲の国内外の核融合研究コミュニティから、数値実験研究プロジェクトへの参加を求める取り組みが必要である。数値実験炉の開発という目標は、非常に意欲的で、評価すべき試みである。ITER モデリングチームとの相互協力をさらに積極的に推進すべきである。LHD データ解析や意思決定の統合へ向けた活動は今後も継続し、さらに掘り下げていかななくてはならない。当プロジェクトで取り組んでいる広範囲な課題を、その範囲を狭めることなく深く追求していくことが求められる。

(2) 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。

この推進体制は野心的な試みを達成するべく組織されている。多くの主要研究者を含み、彼らが得意分野で貢献できるような非常に複雑な基本構造となっている。責任や担当が明確に区分され、異なる組織が活動状況を注視している。LHD および核融合工学とのプロジェクト間連携は、全体会議（タスクグループのリーダーたちで構成される）を通じ、総主幹および推進会議により運営されている。タスクグループのいくつかは、活動が不活発になってしまっているため、グループに若い人材を呼び込んで、人手を増やすべきである。全体会議の議長を交代制で行うことにより、タスクグループ間での負担が公平となり、全体としてプロジェクトの任務遂行にも、有益なものとなっている。

(3) 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。

プラズマシミュレータおよび関連研究環境は、数値実験研究プロジェクトでの多様な用途に応えるために整備がすすめられ、定期的にアップグレードされてきている。研究環境を整えるため、プラズマシミュレータおよび LHD 数値解析サーバの保守管理を NIFS の計算機作業班と日立製作所からの運用支援員が担当している。プラズマシミュレータシステムは、プラズマ物理や材料研究、放射線研究など、当プロジェクトの推進に不可欠な、多岐に渡る複雑な課題に対応するための特別な道具である。この研究環境を提供するために、計算機作業班と日立製作所運用支援員は LHD 数値解析サーバやプラズマシミュレータを適切に運用しているといえる。様々な教育プログラムや研究支援活動を行い、プラズマシミュレータや LHD 数値解析サーバを用いた共同研究を促進するとともに、数値プログラムに対するサポートを提供している。基礎研究課題の解明という取組みにとって、非常に価値の高い環境である。

[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。

(1) 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。)

ヘリカル型数値実験炉の構築 (LHD の最高性能化および原型炉設計、計算科学高度化への貢献を含む) は、LHD の高性能化やヘリカル DEMO 炉を目指すにあたって、可能性の高い、非常に賢明なアプローチであるといえる。3次元 MHD 平衡/安定性や非線形シミュレーションのためのコード、ドリフト運動論・ジャイロ運動論シミュレーションコード、LHD プラズマの非定常及び定常輸送の高速解析・予測のために開発された、ハイブリッドシミュレーションコードや統合輸送解析コードなど、多くの進展がみられた。周辺プラズマやプラズマ壁相互作用については、周辺プラズマ3次元流体コードや3次元中性粒子追跡コード、ダイバータタイル付近の第一壁の炭素の移動や再配置、カーボンへの水素照射の MD シミュレーション法などで、成果が見られた。また、FFHR-d1 設計を目指す核融合工学プロジェクトとの連携、統合輸送コード TASK3D、FFHR-d1 におけるカオス領域を伴う3次元高ベータ平衡、FFHR-d1 の新古典熱輸送を評価する FORTEC-3D などは、ヘリカル DEMO 炉の設計に貢献している。ジャイロ運動論イオン/流体電子のハイブリッドシミュレーションコード (ヘリカルプラズマの電磁的乱流輸送の高速計算を可能にした) や、3次元領域分割を伴う粒子-MHD によるハイブリッドシミュレーションコード、核融合材料研究に広く活用される分子動力学や磁束管フラックスチューブモデルなど

の新たな手法、PIC-MHD インターロックモデルおよびマルチスケール AMR モジュールなどが、計算機科学の高度化に貢献している。これらの進展により、シミュレーション研究の、ヘリカル型核融合炉設計に向けた将来性が増した。各種手法とコードとの間でいかに相乗効果を得るかが、引き続き重要な課題である。

(2) 核融合プラズマの物理機構解明とその理論体系化

当プロジェクトが扱う核融合プラズマの物理機構は、高エネルギー粒子や磁気リコネクション、ゾーナルフロー、周辺輸送への Er 影響や材料開発などを含む、広範囲かつ新しい分野であるが、それらの理論体系化は、かなり深いレベルで行われていると思われる。乱流とゾーナルフローの相互作用については、エントロピー輸送を用いて定量的に解析し、プラズマの中心および周辺部の構造、乱流、輸送については、複合的な解析手法で取り組んでいる。乱流の構造を定量的に計測するため、専用のシミュレータを開発した。無衝突モデルによる運動論 - 流体シミュレーションは、LHD の磁気配位やトカマクの微視的不安定性がゾーナルフローに与える影響を明らかにしている。粒子シミュレーションは、SOL プラズマ内部のブロブにより発生する、伝搬や電流のしくみを解明する手掛かりとなるはずである。新古典輸送に伴うトロイダル粘性に応用された手法は、LHD のバイアス実験の定量的解析を可能にする。速度空間における粒子分布の凹凸ペアは、GAM のエネルギー粒子が非線形的に周波数チャージングすることにより発生することが分かった。以上から、物理機構解明についての成果は非常に多く得られた。しかし、ここでさらに重点を置いて取り組んでもらいたいのは、LHD 関連の、目前の課題の研究である。

[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)

(1) COE として大学等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。

理論共同研究及びプラズマシミュレータ共同研究のプログラムは、所内外からの提案を組み込むことで、フィードバックを提供している。LHD 数値解析サーバも活用している。採択された課題は 120 を越え、参加人数は 1,000 を上回る。プラズマシミュレータシンポジウムでは、共同研究者は、アイデアや結果についての意見交換ができるばかりでなく、最も重要なこととして LHD 実験の最新の結果を知ることができる。外部から多くの研究者が、先導から支援まで様々な役割をもって、NIFS の数値実験研究プロジェクトに参加している。国内外の共同研究の成果として、プロジェクトからは、非常に多数の、質の高い成果が公表された。この他、機構との連携を促進し、また一般へのアウトリーチ活動を行うなど、核融合研究を国内に広く知らしめるにあたり、数値実験研究プロジェクトは重要な役割を果たしている。大学側も当プロジェクトの共同研究に参加することで、自らの研究活動に役

立て、恩恵を受けている。

(2) 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。

数値実験研究プロジェクトは様々なオプションを用意している。プラズマシミュレータ共同研究では、年間 50 を超える事業が実施され、150 名（NIFS 50 名、外部 100 名）がプラズマシミュレータを利用している。当プロジェクトからは、458 本の論文が国内外の著者により発表されている。毎年 10,000 以上の計算ジョブがプラズマシミュレータで処理されている。これらの数字から、高い効率を示しているといえる。また稼働率 90%は、国際的に見ても高い数値である。以上より、プラズマシミュレータは極めて効率的に活用されているといえる。

(3) 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。

「自然科学における階層と全体」、「近接場光を使った金ナノロッドの電場およびプラズマ波のイメージング」、磁気リコネクションの運動論シミュレーション研究などの分野間連携の取組みは、活発に行われ、詳細に掘り下げた高いレベルの成果を出している。なかでも「非平衡を制御する科学」プロジェクトは、NIFS および IMS の連帯を生み、主要大学 5 校の協力を得るに至ったことから、高く評価できる。数値実験研究プロジェクトは、機構傘下のインフラを NIFS の活動に有効に活用しているといえる。

(4) 大学の研究発展に寄与しているか。

国内の大学は、数値実験研究プロジェクトに積極的に参加し、多岐に渡る分野でプロジェクトに貢献できる、非常に価値ある要素となっている。一方大学側としては、当プロジェクトに参加することで最先端の核融合研究に触れることができる。旬のテーマとしては、名古屋大学との協力で行われた、グラフェンシート of 損耗についての研究、NIFS が開発した分子動力学モデルを用いたシミュレーションを、名古屋大学が実験・立証した。名工大との共同研究では、シミュレーションの高精度技法の開発を進めている。京都工芸繊維大との共同研究は、逆転磁場ピンチでのヘリカル磁場の自発的形成過程の解明に光を当てた。この研究は、国際的な RFP 事業への独自の貢献が期待できる。

[4] (国際連携・共同研究の推進)

(1) 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。

日米協力事業では、数値実験研究プロジェクトはその中心となっている。欧州との間でも、多岐に渡って共同研究事業が行われている。中国との協力事業では、MHD 安定性やダスト粒子挙動などの分野で成果をあげている。当プロジェクトの日米共同研究は、JIFT 事業を通じ、両国からリーダー的存在の研究者を派遣して実施されている。JIFT ワークショップを開催し、また日米両国の研究者交流のための資金を提供している。以上のことから、国際協力事業は極めて優れた成果を出しているといえる。

(2) ITER 計画・BA 活動との連携、貢献を図っているか。

六ヶ所研究センターは、NIFS および大学等に対し、共同研究へ向けたロードマップを作成し、BA 活動への参加を促している。長期的な展望から、国際核融合エネルギー研究センター「IFERC」が六ヶ所に設置され、ITER の建設・運転へ大きく貢献すべく、また DEMO の実現を目指すべく、始動した。IFERC の事業長は、六ヶ所研究センター長が兼任、同センターの本格的活動のため 2012 年 4 月に JAEA 青森研究開発センターの本部建屋内へ移転した。事業長の役割は広く、EFDA や F4E (欧州機関) との調整や、日本から ITER および BA への調達の実現などが含まれる。DEMO 設計や安全性への取組みも、優先すべき業務である。中でも最も重要なのが、NIFS と ITER 間で、最新の技術を駆使した最も高速・大量のレベルでのデータ転送実験を設計・実施することである。予算は限られているが、それでも、ITER 設計、建設、運転に向けた貢献努力を、より一層強めていくことが求められる。

[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。

数値実験研究プロジェクトは、短期・長期を問わず、高い能力を有した専門家の輩出に向けて、国際的に活躍できる人材の育成におおいに貢献している。総研大には、各種教育コースが用意されており、また名古屋や京都、東京や横浜など、主要な大学でも教育活動が盛んである。当プロジェクトは、修士、博士、ポスドクなどあらゆるレベルに対応したトレーニングコースや養成講座などを設置している。その成果は目覚ましく、39 名の院生および 7 名のポスドク生がコースを修了し、10 本の学位論文を作成。その他 46 本の論文が発表され、また第一線の国際会議での発表が 52 件に上った。また、13 件の研究において、若手研究者が、日本シミュレーション奨励賞などの賞を獲得した。これらの講座の卒業生のその後の軌跡も素晴らしく、彼らの多くが、国際的な核融合研究に、最先端の研究で貢献している。高校を

対象にした教育活動についても、施設見学や、ハードウェアの実演、上級研究者による講義などといった、様々な方法で実施されている。NIFS とつながる各大学の知識技術が集結され、その豊富な知識の蓄積が出来ている。この巨大な知識の蓄積を活用して、当プロジェクトの存在感を高めることが出来る。LHD が重水素実験を行うにあたってのメリットについて、シナリオ作りを進めていかななくてはならない。自己形成、リコネクションおよび全体論など、一般科学につながる重要な課題については、少人数で適切に取り組んでいる。機構内連携体制のもと、機構内研究機関からできる限り多くの人材を呼びこみ、統合させていくためには、この分野を発展させることが重要である。

[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。

将来計画には、現在最もタイムリーで関心の高い核融合研究課題が含まれている。それぞれが綿密な計画となっており、LHD の成果や経験を生かしたヘリカル型の数値実験炉についても触れている。中でも力点が置かれているのが、スーパーコンピュータによるバーチャル空間で核融合炉を具現化し、物理的・工学的・経済的な見地から最適化を行うことである。ロードマップには重要な物理学上の成果が含まれ、マルチスケール、マルチ物理、マルチレイヤーモデルを燃焼プラズマ用に適用させ、要素物理のほとんどをひとつの仕組みへ統合しようと試みている。今回の計画は、ついに建設フェーズを取り入れ、ヘリカル DEMO 炉設計への貢献を目指す。ひとつの炉の設計・運転への完全統合に必要な物理学的要素はすべて、数値実験研究プロジェクトから取得できることから、将来計画は十分現実的に作成されている。国内外の機関との共同研究や LHD データを大いに活用すれば、長期的な目標は、十分当プロジェクトの射程範囲内である。

「数値実験研究プロジェクト」に関する評価

評価者： M. C. Zarnstorff

[1] (研究成果)

(1) 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。

数値実験研究プロジェクトの2つの目標、「(1) シミュレーションによる核融合プラズマの物理機構の解明」と「(2) 数値実験炉の構築」は、NIFS などが実施する、大型研究プログラムの目標として非の打ちどころがない。LHD など現存の実験研究への理解を深め、次世代の実験研究 (ITER など) へつながる知識を蓄積し、将来の核融合原型炉の振る舞いの予測しようという、NIFS 全体の試みを実施するにあたり、こうした目標を持ったプログラムの存在は重要である。

(2) 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。

数値実験研究プロジェクト内部は、主幹、推進会議、全体会議および9つのタスクグループ (それぞれに幹事配置) で構成される、プロジェクト体制を取っている。NIFS のヘリカル研究部に所属する研究者が、各自プロジェクトの役割を果たすことで、プロジェクトが動く仕組みである。流動的で柔軟性に富んだ体制であり、ヘリカル研究部との連携も高まるだろう。しかし一方で、プロジェクト用に人員を管理したり資源を配分したりする業務が煩雑化してしまうかもしれない。この意味で、数値実験研究プロジェクトは、「プロジェクト」というよりも、「研究プログラム」に近いように思われる。数値実験研究プロジェクトの目標を達成するためには、特定の研究能力強化が必要であり、そしてその強化の為には、プロジェクトとしてのプランニングおよびマイルストーンへの注力が望まれる。

外部評価委員会での報告からは、タスクグループがどのように構成され活動していくのがはっきり見えなかった。長期的な取組みで成果をあげるためには、各グループが明確なゴールを持ち、ゴールへ向けた計画を立て、達成度評価を行うためのマイルストーンを明確にしておかなければならない。報告では、数値モデルの検証・妥当性評価について特別なプランや活動を用意しているようにも見えなかった。これを、独自の活動、もしくはすべてのグループに共通の標準課題として、プロジェクトに追加するとよいのではないか。実験によるモデル検証については、その進捗状況を記録し、数値実験炉用の要素モデルとしての適合性を測る判断基準とするとよいだろう。

数値実験研究プロジェクトが長期的運営で行われること、数値実験炉そのものが高度に複雑な性質を持たざるを得ないことから、外部から専門家を委員として招き、技術諮問委員会（仮）を設置することを提案する。数値実験研究プロジェクトの計画、アプローチおよび成果について、年度ごとに助言を与える機関として上記委員会を設置するべきだと思われる。

(3) 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。

数値実験研究プロジェクトの実施にあたり、「プラズマシミュレータ」および関連の研究環境は、現時点では適切であるように思われる。プラズマシミュレータは定期的にアップグレードされ、今後2年半以内にも機能拡張が予定されている。数値実験研究プロジェクトを成功させるには、このアップグレードは重要である。数値実験プロジェクトの研究能力の発展は、強力な処理能力を持つコンピュータのサポート無くしては成り立たない。

プラズマシミュレータは共同利用の対象にもなっており、所外からの利用者も多い。非常に健全で、適切な利用状況である。

[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。

(1) 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。）

数値実験研究プロジェクトは現在、個々の物理メカニズムについて数値モデル化を進めている段階（第1フェーズ）にある。これらモデルの統合は、今後10年間のうち後半に予定されており、この10年が終わる頃に数値実験炉の構築を開始するという計画になっている。数値実験炉開発の開始時期がやや遅いのではないだろうか。2022年までにはDEMO計画を立てたいとしているが、これを支える数値実験炉の構築・検証が、期限内に完了できないのではないかと懸念される。

LHDへの貢献、DEMO設計への貢献、および計算科学への貢献については、次項(2.2)を参照されたい。

(2) 核融合プラズマの物理機構解明とその理論体系化

数値実験研究プロジェクトは、個々の物理機構についてのモデリングを大きく進展させその高度化に成功している。多くの分野で、世界トップクラスのモデルを開発してきた。例えば、

- 3D トロイダル磁場平衡（磁気島やストカスティック領域などを含む）
- 3D 輸送シミュレーション
- 3D 非線形 MHD 安定

3D ヘリカル配位特有の現象についても、高度な性能を兼ね添えた、新しいモデリング成果が多数得られた。例えば、

- 電磁効果や非線形フロー効果等を含む、乱流や乱流輸送のジャイロ運動論的シミュレーション
- フローに関する 3D 新古典的効果
- ペレット入射による高圧プラズマの中心部崩壊についての非線形 MHD シミュレーション
- 高エネルギー粒子起因の不安定性
- エッジプラズマ特性とダイバータにおけるプラズマ壁相互作用
- 壁材料特性

これらの新しいモデルは、LHD データおよび実験の解析に用いられ、また FFHR-d1 等の将来の DEMO 装置でのプラズマの振る舞いを予測するために用いられるなど、世界レベルの性能を示している。これらのモデル開発において、MHD 安定性や運動論的効果等に見られるように、3次元領域分割法、マルチスケール法、あるいはマルチ物理モデル等の、高機能な数値技術を発展させた。

シミュレーションの多くが LHD で比較検討されている一方で、モデル検証を体系的に行おうという点については、議論が見られなかった。DEMO など次世代のシステムでのプラズマの振る舞いを正確に予測しようとするなら、その道具となるシミュレーションモデルを徹底的に検証し妥当性の確認を行うことが重要である。

一連の統合輸送コードパッケージ TASK3D が開発され、公開された。多数の簡約化コード（HINT2 に代わる VMEC 等）から構成されており、実験解析用にも予測用にも使用可能である。予測型としては、LHD プラズマの性能を拡張する方法を探ったり、FFHR-d1 のパフォーマンスや特長を予測したりするのに用いられている。

今後の統合や数値実験炉へのアプローチなどについての計画は、議論されなかったが、入念に取り掛かる必要がある。TASK3D の構成モデルは、今後、磁気島や乱流輸送、あるいは非線形 MHD 変形など、複雑な物理現象を詳細にシミュレートすることを視野に入れて、改良される予定なのか？数値実験炉は TASK3D をベースに構築されるのか、それともまったく別の枠組みを採用するのか？個々のモデルを組み合わせる場合、精度を保ち計算処理能力を確保するためにも、綿密な計画が必要である。

[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)

(1) 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。

答えは Yes である。数値実験研究プロジェクトは、共同研究の COE としての機能を十分に果たしている。取り上げられているシミュレーションの多くが、NIFS 研究者と大学研究者による共同研究で取り組まれている。数値実験研究プロジェクトは、所外から 50 件にのぼる共同研究への応募を受け付けており、大学研究者の参加人数は 600 名に達する。大変力強い数字であり、COE として健全で正しく機能していることを示している。

(2) 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。

答えは Yes である。プラズマシミュレータは、年間 50 件近くの研究計画を支えている。多くが、複数機関による共同研究である。これらの研究計画のうち、およそ 24 件が所外の研究者からの応募である。プラズマシミュレータの所外からの利用者は 100 名を越える。過去 5 年間でこうした共同研究者たちが発表した論文数は、年間 90 本にのぼる。

(3) 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。

答えは Yes である。数値実験研究プロジェクトも NIFS も、機構の各種分野間連携事業に（少なくとも 6 件は）参加している。この活動には、国内外の大学や研究機関の研究者も参加している。

(4) 大学の研究発展に寄与しているか。

明らかに Yes である。大学の参加についての詳細は、上記 3.1 や 3.2 を参照されたい。国内の 13 大学が、NIFS や数値実験研究プロジェクトとの共同研究に参加している。

[4] (国際連携・共同研究の推進)

(1) 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。

答えは Yes である。数値実験研究プロジェクトには、多数の外国人研究者が参加している。加えて、米国や欧州、中国との間で積極的に協力事業をすすめ、人事交流を行っている。JIFT もその一つである。この他にも個々の研究機関との協力で、特定のトピックやコードに焦点を置いたトピカルな共同活動を多数実施している。

(2) ITER 計画・BA 活動との連携、貢献を図っているか。

答えはYesである。数値実験研究プロジェクトのメンバーが、BAやITER計画の一部である、IFERC計算センターの利用および運営を共同で行っている。プロジェクトから数名が、ITPAのトピカルグループに参加し、ITER計画の優先度の高い課題や共同実験に取り組んでいる。NIFSや数値実験研究プロジェクトは、意図的に「橋渡し役」を引き受け、大学がITER・BA事業に参加しやすいようにしている。現在のところ、大学側は、主として、NIFSの研究事業や数値実験研究プロジェクトに参加することを通じて、ITERやBAへ貢献している。

[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。

答えは Yes である。NIFS および数値実験研究プロジェクトは、国内の様々な大学から学生を受け入れサポートしている。その数は、大学院生が 39 名、ポスドク研究生が 7 名である。また、高校生を対象としたアウトリーチ的な教育プログラムやサマースクール、公開講座を実施するなど、様々な活動を行っている。

[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。

各種ゴールや研究計画については総合的には適切である。提示された研究計画はレベルが非常に高いが、モデル統合に向けたプランニングが詳細に掘り下げて行われたかどうかは、不明である。(1.1 および 2.2 を参照されたい。) 複数のタスクグループが関わるべき現象(例えば、乱流・3D 平衡間の相互作用等)を計算する多層的物理モデルについて、この設計にいかに取り組んでいくかについても計画を立てなくてはならない。このためには新たな戦略を立てて、開発を相当に進めていかなくてはならないだろう。

提示された研究計画の妥当性および、長期計画の達成の可能性については、現時点では判断材料が足りない。適切な人材を用意できるか、彼らを効果的に動かせるか、などの要因により、答えが変わってくるだろう。

「数値実験研究プロジェクト」に関する評価

評価者：Thomas Klinger

[1] (研究体制・環境の整備)

(1) 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。

高性能コンピュータの出現により、プラズマ物理や核融合研究といった、複雑なシステムを必要とする研究を行う者にとって、数値シミュレーションは、答えを導くための主要な手段となった。コード開発、ベンチマーク作り、検証、そして最終的にコードの統合を目指したプロジェクトを立ち上げたことは、核融合科学研究所にとって正しい選択である。このプロジェクトは、数値核融合実験炉の構築を最終目標としている。非常に野心的な課題ではあるが、方向性は正しい。したがって、数値実験研究プロジェクトの目標設定は適切である。

数値実験研究プログラムの全体的な戦略は、数値シミュレーションを用いて、ヘリオトロン配位に関する様々な物理的性質の理解を十分に深め、LHD から実証炉 FFHR への外挿ができるようにすることを目指すものである。トカマク装置 ITER からは、燃焼プラズマ物理（高速粒子による不安定性など）に関するデータが得られることが期待されるが、この戦略において、ヘリオトロン型燃焼プラズマ実験を行うことは想定されていない。

この戦略は効果的なアプローチであるが、問題もある。主に 2 つのリスクが考えられる。第 1 のリスクとしては、ITER の自己燃焼プラズマデータは、提供期間開始から 5~6 年間経過してからでないと得られない。発電炉設計には、高速粒子の閉じ込めの理解は不可欠であることを考えれば、FFHR 設計は予定よりずっと遅れるだろう。第 2 のリスクは、ITER を用いて高速粒子コードを検証しても十分とはいえない。というのは、ヘリオトロン型装置の物理は、ITER と大きく異なるからである。ヘリカルプラズマでは、トラップされた高速粒子は損失されてしまう傾向にあり、高速粒子が引き起こすアルヴェン波のスペクトルはかなり幅広くなり、粒子と波動の相互作用については、まだ十分に理解できていない。従って、この戦略で進めるならば、相応のリスク評価を行う必要がある。

しかしながら、数値実験研究プロジェクトによって、信頼性の高い核融合炉設計のために必要とされる重要な課題を扱うことは、正しい戦略である。数値実験研究プロジェクトの中間計画で、重点を置かれる必要があるのは、(1) 閉ヘリカルダイバータおよびプラズマ壁の相互作用についてのシミュレーション、(2) 核融合条件

に関わるパラメータを用いた、統合的な高性能プラズマ放電シナリオの作成、である。どちらの場合も、開発されたシミュレーションコードを LHD 実験のデータによって直ちに検証できるという利点がある。この試みがぜひとも進められるよう、LHD 実験計画と数値実験研究プロジェクトが上手く連携していくことが望まれる。

さらに、ヘリオトロン炉の設計開発は、工学研究系との協力のもとで進めなくてはならない。物理的要求事項を優先したあまり、工学的な課題を増やしてしまうような設計になってはならない。それゆえ、経験豊かなエンジニアをどんどん取り込むべきである。このためにも、数値シミュレーション、核融合工学、そして装置運転の分野が密接に連携をとれるような、核融合炉開発プロジェクトを設定することを奨める。

(2) 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。

プロジェクトの推進体制は、非常に複雑なマトリックス構造を持っており、所内だけでなく所外の研究者や、実験系の研究者も、適切な形で一体化して参加できるようになっている。大学を繋ぐ COE として、核融合科学研究所は、柔軟かつオープンな体制が求められる一方で、プロジェクトは組織を 9 つのタスクグループに分けており、タスクグループの間に重複する部分も多い。このため、作業の重複や効率の低下がもたらされるかもしれない。研究所全体としてのマトリックスもあり（プロジェクトと研究部）、マトリックスが 2 つ存在することにより、タスクグループリーダーのマネジメント業務がやりにくくしてしまうのではないか。結果、全体としてみれば、4 つの集団を形成してプロジェクト遂行に取り組んでいる。

数値実験研究プロジェクト推進体制の日々の効率性を評価することは、今回の範疇を越えているので、もしすべてのプロジェクトメンバーが満足していればそれが正しいやり方であろう。プロジェクトそのものが、その名前とは裏腹に、研究プログラムとしての性格を帯びてしまうようであれば、マイルストーンや資源配分作業計画等を求めることは不要である。逆に、真の意味でのプロジェクトを望むのであれば、ワークフローや体制を吟味して可能な限りシンプルにし、作業計画の明確な目標としてのマイルストーンを、数を絞って設定し、十分な人員を確保する必要がある。

(3) 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。

日立の強力なコンピュータであるプラズマシミュレータは、数値実験研究プロジェクトの参加者すべてに使用可能としている。特に、国内の大学研究者にとっては、このプロジェクトのおかげで、スーパーコンピュータへのアクセスが容易になり、プラズマ物理の解明に取り組むことができる。プラズマシミュレータの機能は、フェーズ1で177TF、フェーズ2で315TFまで拡張されている（世界で100位以内に入るレベル）。核融合研究所および日立より、プラズマシミュレータの保守管理が行われ、また計算法やコンピュータサイエンスに関する研究支援が提供されている。

数値実験研究プロジェクトによる適切な取り組みにより、幅広い研究情報が、国内の大学で共有され、統合されている。その中で、プラズマシミュレータが主要な役割を果たしている。このことから、研究環境整備は十分適切に進められていると思われる。

[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。

(1) 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。)

数値実験研究プロジェクトから、高評価の論文が多数発表され、またいくつかの分野で受賞されている。シミュレーションコードが多数開発されたが、中でも、ジャイロ運動論コードの開発は、世界一のレベルである。

「数値実験炉」を構築するには、綿密なコード検証が何よりも重要である。この検証の後に初めて、コードの統合が可能となり、プラズマ性能のパラメータ、安定性やダイバータ負荷などの具体的な予測を行うことができる。また、LHD がコード検証のための主たる装置にならなくてはならない。例えば、最近 LHD で発見された「超高密度コア」領域は未だ理解が不十分であるが、数値コードを用いて体系的に解析していくと、理解の大きな助けとなるだろう。さらに、LHD 実験計画と数値実験研究プロジェクトが密接に連携すれば、LHD の性能強化にも役に立つ（ダイバータに合わせた放電シナリオを平衡計算 HINT2 で作成する等）。組織体制を整えれば、こうした連携がより密接になるはずである。

加えて、ベンチマーク構築への綿密な戦略 (TASK3d 等) が欲しいところである。これには、他の研究所で開発されたコード群と連携して、国際的な規模で取り組むことが必要であろう。ベンチマークの際にステラレータ形状が問題になるというのであれば、その形状を簡素化するのも、一案である。

(2) 核融合プラズマの物理機構解明とその理論体系化

「理論の体系化 (theoretical systemization)」が何を意味するのか、残念ながら分かりかねている。数値実験研究プロジェクトは、非線形 MHD や乱流、基礎プロセスの分野で、かなりの数の、時代に即した新しい課題に取り組んでいる。枠を越えた知識の応用の例としては、逆磁場ピンチのヘリカル状態遷移についての研究がある。LHD との体系的な比較研究をできる限り実施することが望ましい。例えば、乱流による塊(blob)の剥離現象について、LHD でこの塊(blob)を観察して得たデータは、数値計算の補強材料となってくれるだろう。

また、機構内で行われている、他の分野への発信（例えば慣性閉じ込め型核融合への発展）にも注目している。

[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)

(1) COE として大学等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。

数値実験研究プロジェクトの公表結果は優秀で、共同研究者との共同発表も多い。大学等研究能力のプロジェクトの結集という点では、高性能計算機資源の利用を可能にした事が、大きな役割を果たしている。プロジェクトのもとで実施されている研究課題は広範囲に及び、参加する大学等の専門分野および研究トピックスも広大なものである。そんな中で共同研究者は全員、タスクグループに所属している。タスクグループの管理が大変である。分野としては(a)一般理論、(b)プラズマシミュレータ、(c)計算方法の3つに分かれる。ここで、1件1件の共同研究が、プロジェクトの目標に対し実際に貢献しているかを確認できるような、体系だった評価体制を整えるとよいと思う。

(2) 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。

プラズマシミュレータが有効に活用されているかどうかについては、私には判断しかねる。コード効率（例えば、最新の計算方式を活用しているかどうか等）や、共同研究で取り組まれている課題の選択にもよるだろう。[3]の(1)でも述べた通り、評価制度を導入するのも判断の助けとなる。数値実験研究プロジェクトの（数値的）コストおよび科学的価値を、評価することも必要である。

(3) 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。

様々な数値シミュレーション研究活動を取りまとめたり、開催したりしていることから、「学術拠点」としての役割は果たしているように思う。結果、広大な範囲の研究トピックスを包括している。

(4) 大学の研究発展に寄与しているか。

核融合科学研究所は、共同研究に参加する大学との間に、非常に密接なネットワークを構築してきた。このネットワークの恩恵を受け、数値実験研究プロジェクトは、その活動を通じて、大学側の研究発展に貢献した。スーパーコンピュータへの共同利用に加え、コンピュータ科学や計算方式についてもサポートを行っている。研究ノウハウについても、情報交換がスムーズに行われている。こうした交流は、そのためのワークショップを開催することで活発化する。ワークショップは、少人数の担当者を決めて、定期的に行うのがよい。

[4] (国際連携・共同研究の推進)

(1) 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。

国際的な COE としての役割を果たすためには、パートナー選びを慎重に行う必要がある。制度を整えて、(a)相手側の研究機関としての質および(b)実施する共同研究事業の価値、の2点を吟味することが望まれる。(b)については、数値実験研究プロジェクトのノウハウや人員について、不足しているところを分析するところから始めるとよいだろう。

JIFT (日米協力) については、制度が十分に整っており、ここまで非常に順調に進められてきている。合同ワークショップや論文の成果も明確である。一方、EUの研究機関との事業については、そこまで明らかではない。例えば、プラズマの乱流についての協力事業において、何故、やや評価の低いセルビアの研究機関を選んだのか、その意図がはっきりしない。数値実験研究プロジェクトにとって最も利益となる活動や研究分野とは何かを明らかにし、現行の協力事業について所内での見直しを検討してみたい。

(2) ITER 計画・BA 活動との連携、貢献を図っているか。

核融合科学研究所の六ヶ所研究センター長が、このたび、国際核融合エネルギー研究センターのプロジェクトリーダーに任命された。これは、核融合科学研究所の活動が、ITER-BAの枠組みの中に位置づけられたと考えることもできる。他にも、様々なところで委員として活動しており、数値実験研究プロジェクトからは2名、ITPA委員として積極的な貢献を果たしている。

[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。

多数の PhD の学生が、数値実験研究プロジェクトに直接参加しているということが、評価できる。また PhD の学生による論文数も増加している。これは紛れもなく、核融合科学研究所のスーパーコンピュータを活用した、PhD 学生用に提供された共同研究プロジェクトのおかげである。結果、数値実験研究プロジェクトや核融合科学研究所と研究者たちの交流が、より活発になり、それが資産となる。加えて、数値実験研究プロジェクトは高校へもアウトリーチ活動を行っており、こうした取り組みは非常に評価できる。

[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。

外部評価委員会で示されたロードマップについては、先述1で私の見解を述べた。そこにもある通り、次の10年で、有効な実証炉コンセプト (FFHR) に到達しようというのは、かなり野心的な (あるいは野心的すぎる) 目標である。ITER は、コード検証に必要なデータを期間内に提供することは、まず不可能であるし、ITER のデータがどの程度ヘリオトロン概念に有効なのかも、疑問である。数値実験プロジェクトの研究計画は、タスクグループの予定・見通しを基に作成されている (後に提供される文書) が、必要となる資源 (人員およびコンピュータの性能ともに) についての評価は難しい。勿論、資源に重点をおいて作業分解して体制を整えることが最良ではあるが、この分野はまだ未確定要素が多く、それはほぼ不可能であろう。従って、今できる最善の策としては、意義ある研究「プログラム」を立てその発展に力を注ぐことである。オープンに議論し、国際的な核融合研究活動へ入念に調和させていく。IEA 実施協定などは、そのための優れたプラットフォームになるかもしれない。

資 料 編

平成24年度

数値実験研究プロジェクト 報告書

平成25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中期目標・中期計画から	3
1.3	前回のシミュレーション研究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研究プロジェクト体制について	7
2.2	数値実験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	15
3	数値実験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	28
3.2.1.3	周辺プラズマ、プラズマ・壁相互作用コード	41
3.2.1.4	シミュレーション基盤技術開発	48
3.2.1.5	解析コード・汎用ツール開発	52
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	56
3.2.2.2	LHD 実験データ解析型統合輸送解析コード	57
3.2.2.3	到達パラメータ予測型統合輸送解析コード	59

3.3	核融合プラズマの物理機構解明	61
3.3.1	MHD 平衡と不安定性	61
3.3.2	コアプラズマの粒子・熱輸送	71
3.3.3	高エネルギー粒子・波動・加熱の物理	82
3.3.4	周辺プラズマの輸送とプラズマ・壁相互作用	89
3.3.5	基礎物理	96
4	共同利用・共同研究の推進	115
4.1	プラズマシミュレータを活用した共同研究	115
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	136
5	国際的 COE としての国際連携・共同研究の推進	144
5.1	国際的な COE としての活動	144
5.2	ITER 計画・BA との連携	152
6	人材育成	160
6.1	人材育成の概要	160
6.2	その他の教育プログラム	162
7	将来計画	166
8	まとめ	175
参考資料：		
	論文リスト	176
	指導学生の論文リスト	217

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。

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バーチャルリアリティ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 圀興 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。報告書の 2 章以降に記載されているように、この目標設定により、

- 核融合プラズマ全体を構成する要素物理の整理検討を行い、目標の実現に向けた研究タスクを明確化にすることができた。この成果を基に、9つのタスクグループを立ち上げ、プロジェクト研究活動をスタートすることができた。
- 次に、各要素物理の解明から、要素物理の成果とその解析のために開発したシミュレーションコード群を統合化し、数値実験炉の構築へとつながる系統的な研究戦略を明らかにした。
- 国内外の共同研究者はもとより、NIFS の LHD 実験グループや炉工学研究グループとの連携を強めることにより、目標の実現に向けた共同研究活動をより活性化した。
- その結果、3 章で報告しているように、目標の実現に向けた研究活動を着実に前進させ、国際的にレベルの高い成果を多数生み出した。

このように、数値実験研究プロジェクトの目標設定が適切であったことがわかる。

1.3 前回のシミュレーション研究に関する外部評価について

シミュレーション科学研究部時代の平成 19 年度に受けた、シミュレーション研究に関する外部評価では、NIFS で推進してきたシミュレーション研究の実績に関して高い評価を得た。また組織運営のあり方や研究計画の学術的価値も高く評価された。その上で、NIFS のシミュレーション研究が一層発展し、国内外の核融合科学研究者コミュニティ及び関連分野の研究者と一層強い連携を形作るために、以下の点についての提言が示された。

- (1) 統合輸送コードの開発など大規模・長期的研究において、全国の大学等が有する高い潜在能力を活かすために NIFS が先導的な役割を果たすことが望まれる。また、複雑性シミュレーション、レーザー核融合や周辺プラズマ、プラズマ—物質相互作用といった研究は、他分野に広がる学際性を

有しており、分野間の連携を一層強めるために組織・体制を充実させることが望まれる。また、研究環境をサポートする人員と体制を整備することが求められる。

- (2) 国内の核融合シミュレーション分野における若手研究者の多くが NIFS に所属しており、PD や若手研究者が育成される場として NIFS の役割は極めて重要である。今後も国際的に開かれた研究の場を創造し、核融合研究の長期的な発展を支える人材育成に貢献することが望まれる。また、PD や特任研究員等を含む若手研究者組織のさらなる充実計画を示し、それをコミュニティに提示することで、優秀な研究者をこの分野に呼び込む必要がある。また、流動性を高めるなどして、若手研究者のキャリアパスを確保する必要がある。
- (3) 我が国のシミュレーション研究者が、ITER や BA への参加を通じて、核融合科学の全般分野に展開できるよう、研究組織、共同研究体制を早急に整備する必要がある。

これらの提言は、シミュレーション科学研究部時代に展開されていたシミュレーション研究に関するものであり、その後の取り巻く環境の変化や様々な形での要請により発足した「数値実験研究プロジェクト」に対する直接の提言とはなっていないが、その多くは基本的理念を共通する数値実験研究プロジェクトに、その発展形として受け継がれている。以下にその概要を示しておく。

提言(1):「統合輸送コードの開発など大規模・長期的研究」に関しては、数値実験研究プロジェクトを立ち上げ、その主課題として設定することにより効率的な展開を図っている。さらに、核融合科学研究所の一般共同研究のカテゴリーに、共同研究「数値実験研究プロジェクト」を設け、全国の大学等がこの分野で有する高い潜在能力を活かすための体制作りを行った。その結果、数値実験研究プロジェクトのタスクグループに大学等の多くの研究者が参加し、共同研究を進めている。また、提言(1)内の「分野間の連携を一層強めるための組織・体制」に関しては、数値実験研究プロジェクトを支える幅広い裾野の研究として、自然科学研究機構全体で推進している「分野間連携研究プロジェクト」にいくつかの提案を行い、その中心母体として、プラズマ・核融合の関連分野や計算科学の分野との連携研究を進めるための組織基盤づくりを進めている。

提言(2):「核融合研究の長期的な発展を支える人材育成」に関しては、この報告書に詳細に記載されているように、総研大をはじめとする様々な大学院教育、アジア冬の学校や夏の体験入学等の大学院生や大学生を対象とした短期集中型の教育プロ

グラム、さらに共同研究等を通じての若手人材育成を進めている。また、COE 研究員制度による若手研究者の受け入れ、日本学術振興会等の公的研究支援制度を利用した若手研究者の受け入れも積極的に進めている。

提言（3）：「核融合科学の全般分野に展開するための研究組織、共同研究体制」に関しては、これまでの「日米科学技術協力」、「日韓核融合協力」、「日中拠点大学交流」、「国際エネルギー機関ステラレータ協定」、「国際エネルギー機関テキサトル協定」に基づく活動支援のほかに、核融合エネルギーセンター（IFERC）活動や国際トカマク物理活動（ITPA）等をはじめとする ITER 連携活動、幅広いアプローチ（BA）活動に対する支援体制や研究者の派遣を通じて ITER・BA に関する共同研究・連携研究にも積極的に関与してきた。

2 研究体制・環境の整備

2.1 ヘリカル研究部と数値実験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、連携研究の4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動的に行うことができる。

数値実験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。



図 2.1-1 研究部とプロジェクト体制

2.2 数値実験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、マイ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、マイ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 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9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103名が参加しており、この中に21名の実験グループからの参加者と27名の所外からの参加者が含まれている(図 2.2-2)。また、32名のNIFSシミュレーション研究者の内、15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ーリングと必要に応じた目標設定や研究体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、5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 24 年 10 月には、315Tflops の演算性能と 40TB 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が着実に増えている (図 2.2-3)。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。

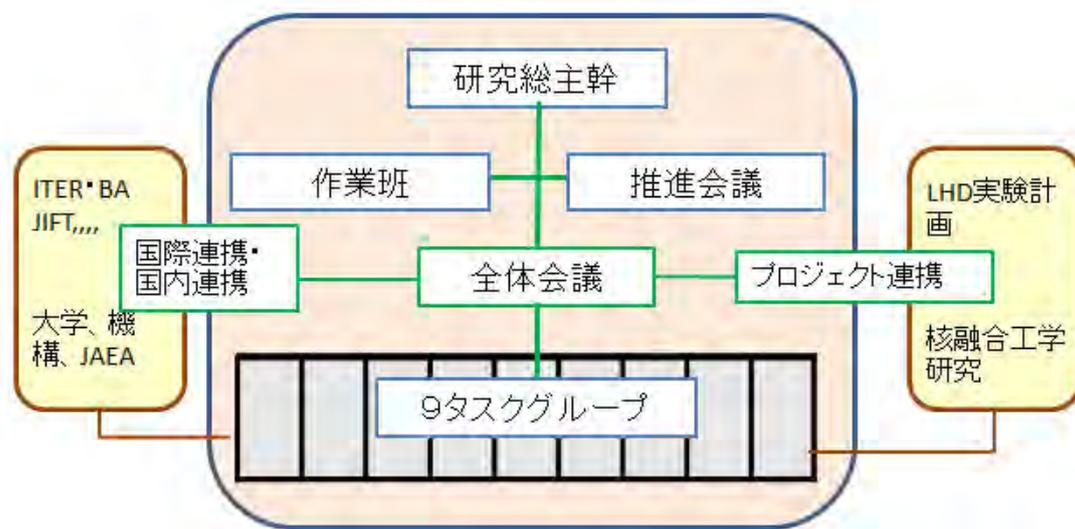


図 2.2-1 数値実験プロジェクトの組織体制

グループ名	幹事	メンバー
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)
プラズマ流体平衡・安定性	市口	13名(シミュ9, 実験3, 共同研究者1)
統合輸送シミュレーション	横山	9名(シミュ2, 実験3, 共同研究者4)
流体乱流輸送シミュレーション	登田	4名(シミュ3, 共同研究者1)
運動論的輸送シミュレーション	渡邊智	10名(シミュ8, 実験1, 共同研究者1)
周辺プラズマ輸送	富田	9名(シミュ4, 実験5)
プラズマ壁相互作用	中村	19名(シミュ3, 実験6, 共同研究者10)
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 2.2-2 タスクグループ体制

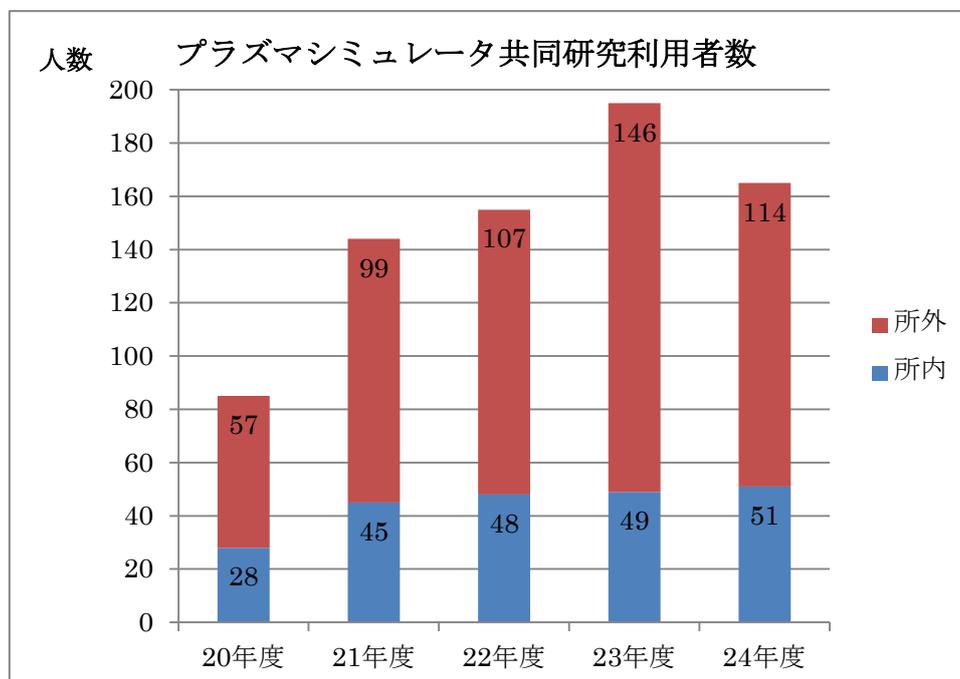


図 2.2-3 プラズマシミュレータを用いた共同研究の利用者数

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

LHD 計画プロジェクトとの連携が具体的に進展しつつある。

ヘリカルプラズマ閉じ込め物理の理解の深化と、それに基づく高精度の予測性を実現するために、統合輸送コード TASK3D の開発、および、その LHD 実験への適用による検証を、LHD 計画プロジェクトとの緊密な連携によって進めている。エネルギー輸送解析に関する実験解析型 TASK3D-a01(Analysis)のリリースと、主に京都大学との共同研究を通じた予測型 TASK3D-p(Prediction)シリーズの開発を進めている。a01については、統合パッケージの構築によって、NBI加熱解析の加速を実現し、格段に多くのショット、タイミングでの解析が可能となった。これにより、高エネルギー粒子の時間減衰をも考慮した NBI 加熱パワーの時間変化の解析、温度・密度の急激な時間変化をもたらすエネルギー移送をも考慮した動的エネルギーバランス解析などが可能となり、LHD プラズマのエネルギー閉じ込め特性に関する解析の深化を促している。NBI 加熱グループが有していた時間減衰考慮に関する数値解析コードを、数値実験プロジェクトの研究者が高速化を図った上で、TASK3D-a01 に組み込んだことも、具体的かつ緊密な連携の一例として述べておく。

LHD 装置の設計用の CAD データをバーチャルリアリティ空間で可視化することで、加熱用アンテナ装置の位置や方向の検討、閉ダイバータ装置の設置の確認、観測装置の設置の位置・方向、観測ポートからの視野の確認・検討を行うことができるようになり、実験を担当する研究者が利用している。また、異なる可視化ソフトウェアによって作られたシミュレーションデータと装置データの可視化データを、一つの可視化データとしてバーチャルリアリティ空間に投影することができるソフトウェア EasyVR/FusionVR を導入して、シミュレーションで得られた平衡プラズマと実験装置の位置関係の検討などを行うことができるようになった。

LHD プラズマ周辺部の中性粒子輸送シミュレーションに EMC3-EIRINE コードが応用されている。EMC3-EIRINE コードによるストカスティック層の粒子輸送のシミュレーションはマックスプランク・プラズマ物理研究所との共同研究で行われており、共鳴摂動磁場の重畳による安定なデタッチプラズマの生成・維持、不純物ホール物理機構解明など大きな成果を上げてきた。最近、EMC3-EIRINE コードの拡張として、計算領域をダイバータ磁力線領域に拡張することが試みられている。従来の計算領域はストカスティック層を含む SOL 領域に限られていたが、ダイバータ板まで達するダイバータ領域まで拡張することで、ダイバータ材との化学的相互作用までも包括す

るプラズマ周辺部の中性粒子輸送の解析が可能となる。現在は、コードの拡張と検証を行っている段階であるが、LHD 計画プロジェクトと連携し、具体的なターゲットを念頭に置き開発が進められている状況である。

MHD 平衡・安定性解析では、3次元 MHD 平衡計算コード HINT2 の LHD 実験解析への適用がさらに進みつつある。実験結果を基にした数値モデルの validation が進み、より実験結果を再現できる平衡を短時間で解析できるようになった。また、HINT2 の平衡を基にした非線形 MHD シミュレーションコード MIPS も LHD 実験解析に適用され、高ベータプラズマの MHD 特性の理解が進んでいる。また、最近は磁気島とプラズマ回転の相互作用に関する理論解析の共同研究が進展しつつある。

異常輸送、新古典輸送の数値シミュレーションについては、GKV-X コード、FORTEC-3D コードが LHD 実験の解析に応用され、実験結果をうまく再現できる結果が得られつつある。

2.2.2.2 核融合工学研究プロジェクトとの連携

核融合工学研究プロジェクトとの連携も、組織的かつ具体的な進展がみられる。LHD 型核融合原型炉の設計検討は、FFHR シリーズの展開を基盤として、核融合工学研究プロジェクトにおける FFHR-d1 概念検討作業に至っている。従来、炉システムサイズを決定する上で、巨視的エネルギー閉じ込め時間のスケーリング則と必要な閉じ込め改善度も重要な因子として考慮がなされていた。この、いわゆる「零次元」の検討から、炉心プラズマの3次元平衡と径方向分布（「一次元」）を考慮に入れた炉心プラズマの物理特性評価、そしてその炉システム設計への統合の展開を図る上で、数値実験研究プロジェクトは本質的な貢献を行っている。LHD で得られた密度・温度分布を炉心級プラズマに外挿する手法で生成された複数の分布形状や、垂直磁場コイルによる磁場配位調整に対応した複数の3次元平衡を HINT2 コードによって生成した。この3次元平衡を、数値実験研究プロジェクト及びその共同研究を通じて開発や高度化が進められている種々の数値シミュレーションコードに取り込んで、炉心プラズマの物理特性を評価するという組織的な取り組みに着手した。すでに、新古典エネルギー拡散(FORTEC-3D、GSRACE)、核融合反応生成アルファ粒子の閉じ込め(GNET(京都大学・政岡氏)、MORH)や損失アルファ粒子の損失位置評価(MORH)、イオン温度勾配不安定性の評価(GKV-X)、想定される加熱入力に対する到達温度の予測(TASK3D)などの評価が行われ、2012年のIAEA核融合エネルギー会議での発表(核融合科学研究所、宮澤氏)の根幹を成す成果を挙げている。

また、核融合工学研究プロジェクト全体会議において、数値実験研究プロジェクト

からの話題提供として、「ネオンガスパフの周辺プラズマおよびダイバータ板損耗への影響評価」や、「タングステンダイバータ研究のための密度汎関数法の利用」「二体衝突近似モデルによるタングステン材へのヘリウム照射の研究」などの発表も行った。これらの発表を契機として、核融合工学プロジェクトで展開されているダイバータ設計・解析研究と、数値実験プロジェクトが有する高度な数値手法に関する情報交換が進み、それらを相乗させる具体的な連携が進展を見せている。FFHR-d1 設計におけるダイバータ・材料・周辺プラズマ解析への大きな貢献が期待できる基盤を形成しつつある。

今後も、核融合工学研究プロジェクトとの連携を、数値実験研究プロジェクトが有する高度な数値シミュレーションコードや数値手法を基盤として、炉心プラズマ性能予測や、ダイバータ・材料・周辺プラズマ研究を展開するとともに、今後さらに連携を密にして、LHD 型核融合炉の“数値試験炉”的役割を担っていく。

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に大規模並列型スーパーコンピュータであるプラズマシミュレータを運用している。平成 21 年 3 月に日立製作所製 SR16000 モデル L2 128 ノードで構成される大規模並列型計算サーバを中心としたプラズマシミュレータシステムを導入した。平成 24 年 10 月には中間レベルアップにより大規模並列型計算サーバを日立製作所製 SR16000 モデル M1 (322 ノード構成) に更新した。大規模並列型計算サーバの主な性能と利用状況を表 2.3.1-1 と表 2.3.1-2 にまとめる。プラズマシミュレータは、大規模並列型計算サーバに加えて、プログラム開発と中小規模ジョブの実行を目的としたプログラム開発支援サーバ、フロントシステム、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が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であるのに対して、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LHD数値解析サーバを運用している。LHD数値解析サーバは平成23年2月に運用を開始し、同年10月に実施した機能拡張により、日立製作所製SR16000モデルXM1 4ノードで構成されるシステムとなった。

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、日立製作所運用支

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、計算機作業班と日立製作所の関係者が出席して運用連絡会議を定期的に毎月 1 回開催している。Web ページでは、利用の手引きの他、新着情報、オンラインマニュアル集、利用者からの質問とそれに対する回答をまとめた Q&A 集、講習会資料、チューニングガイド、旧プラズマシミュレータ NEC 製 SX-7 からのコード移植事例集等を掲載している。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、日立製作所運用支援員 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。平成 20 年 12 月まで運用していたプラズマシミュレータはベクトル型スーパーコンピュータの NEC 製 SX-7 であり、スカラー型である SR16000 への移行に伴い利用者プログラムの移植、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、現行プラズマシミュレータ導入時から平成 24 年 10 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。

表 2.3.1-1 プラズマシミュレータ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 (フェーズ 1)	SR16000 モデル L2 128 ノード	77 TFlops	16 TB	0.5 PB
H24.10 ～ H27.3 (フェーズ 2)	SR16000 モデル M1 322 ノード	315 TFlops	40 TB	2.0 PB

表 2.3.1-2 プラズマシミュレータ大規模並列型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	A:運用時 間(千CPU 時間)	B:使用時 間(千CPU 時間)	利用率 (B/A)
H21	56	144 (45/99)	11,332	34,156	29,569	86.57%
H22	52	155 (48/107)	10,828	35,151	32,462	92.35%
H23	58	195 (49/146)	10,815	35,377	31,927	90.25%
H24*	56	165 (51/114)	4,188	14,306	13,395	93.63%

*平成 24 年度はフェーズ 1（4 月～8 月）の利用状況。

2.3.2 統合輸送コード利用環境の整備

統合輸送コード TASK3D による LHD 実験解析に関して、LHD 実験のリアルタイム座標マッピングシステムである TSMAP に基づく平衡同定、その平衡に基づく NBI 加熱評価、エネルギーバランス解析に至る一連の解析作業をパッケージとして整備した。標準仕様としては、「go, ショット番号」と入力するだけで、当該放電の電子温度分布計測（トムソン散乱法）のレーザー強度が強いタイミングを選び出し（典型的には 100ms おき）、上記の一連の計算を行うものである。解析結果は、LHD の解析データサーバに登録され、共同研究者に公開されている。

実験データとの連携促進と、開発者・利用者双方の利便性の観点から、LHD 制御室に共用 PC を立ち上げた。この共有 PC の立ち上げによって、統合輸送コードを構成する多様な数値解析コード（モジュール）の集中管理と、利用者からの要望とそれに対する開発者のアクションが双方に見える形態を実現できたことが、統合輸送コードの LHD 実験適用の進展を促している。さらにユーザーの拡大を図ることによって、利便性、解析精度の向上を図っている。

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るため、また、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するため、VR 装置

の整備を進めた。

コンピュータの処理能力が向上し、より精細な画像を高速に処理できるようになった。このため、実験装置の細かい部品や複雑なシミュレーション結果をより精細に表現できるようになった。しかし、立体映像の明るさが十分ではなかったため、実験装置の細部等に対して、現実感や没入感を持たせる表現力に問題があった。コンピュータの処理能力向上に合わせて、プロジェクターの輝度を向上させ、以上のような問題に対処する必要があった。そこで、映像表示部をコントラスト比最大 800:1 かつ 2000ANSI ルーメンのプロジェクターからコントラスト比最大 2000:1 かつ 3000ANSI ルーメンのプロジェクターに変更することにより、細部の表現力を向上させ、複雑な現象や細かな実験装置等に対し、より直感的な解析・解釈を可能となった。

プラズマシミュレータの更新に伴い出力データ量の爆発的な増加が予想される。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、より大きな共有メモリを搭載し、かつ、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。

VR 空間内に投影した実験装置内でプラズマの位置を計測したり、観測装置の設置の位置・方向を検討したりする際に、位置や方向計測の精度を高めるため、光学式のトラッキングセンサーを導入した。これにより、位置検出の精度が±間内に投影まで高めることができた。

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のソフトウェアとして、AVS/Express MPE を導入した。

可視化ソフトウェアは従来、その目的に特化した開発が進められる。シミュレーション解析用のソフトウェアであれば、流線や等値面の表現にすぐれているが、装置データの表現は簡単ではない。他方、ゲームの開発などで用いられているソフトウェアは、写実的なCGを用いてリアリティのある実験装置を表現できるが、解析結果の表示は容易ではない。そのため、これまで開発されたソフトウェアでは、シミュレーションデータを表現しつつ、実験装置データも同時に表現することが困難であった。しかし、近年、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 が開発され、このソフトを導入することによりシミュレーションデータを実験装置内で検討することが可能となった。即ち、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可視化ができるようになり、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が行えるようになった。



図 2.3.3-1 シミュレーションデータと装置データの同時 VR 可視化。

3 数値実験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）マイ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。

このような磁場閉じ込め方式による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。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。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。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、2008 年以降の数値実験研究関連の出版された論文数を図 3.1-1 に示されている。過去 4 年半で、総数 458 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 328 編となっている。また、この中には、重要な国際会議での招待講演論文、著名な国際学術論文等へ掲載論文、各種受賞論文が 61 編含まれており（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 19 巻 4 月号の表紙を飾った沼波政倫助教の論文の図で、この論文により吉川允二核融合エネルギー奨励賞を受賞している。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ーションコードの開発・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。

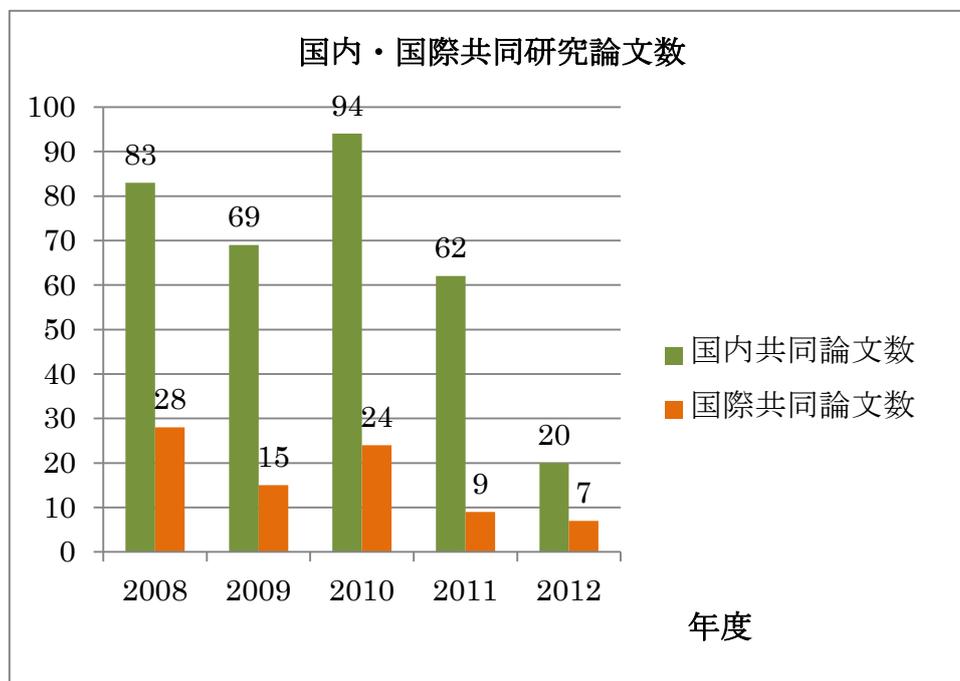


図 3.1-1 数値実験研究プロジェクト関連の発表論文数

項目	論文件数
著名論文掲載論文	12
著名国際会議での招待講演論文 (IAEA-FEC を除く)	6
IAEA-FEC での発表論文 (口頭発表)	29(6)
論文賞、受賞発表等	14
合計	61

図 3.1-2 平成 20 年から平成 24 年までに公表された優れた論文数

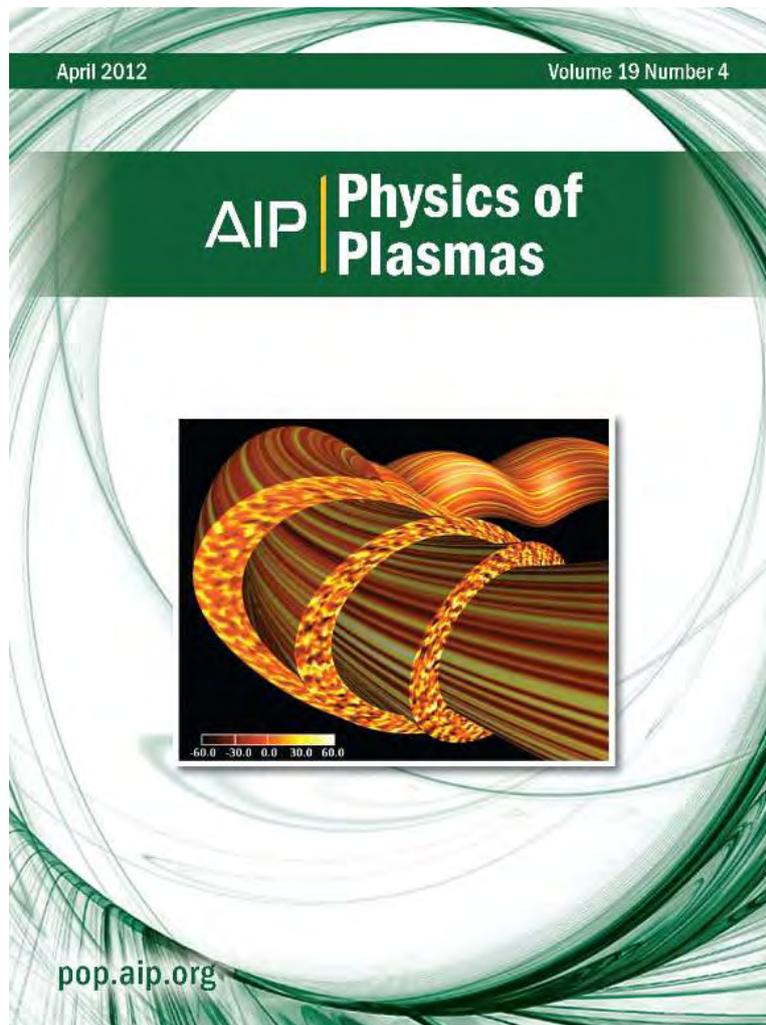


図 3.1-3 Physics of Plasmas 第 19 卷 4 月号の表紙を飾った沼波政倫助教の論文の図。吉川允二核融合エネルギー奨励賞の受賞論文である。

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 にシミュレーションコード群を LHD プラズマ実験と関連の深いコードを中心に抜粋して示している。LHD プラズマのシミュレーションのために、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、Gyro 運動論モデルにより運動論的輸送現象を解明する GKV 及び GKV-X、周辺プラズマ解析の EMC3-EIRENE、さらに様々な 3次元物理過程をモジュールとして取り込み統合した輸送コード TASK3D などが所内外の共同研究により整備され、LHD 実験との比較、検証が行われている。

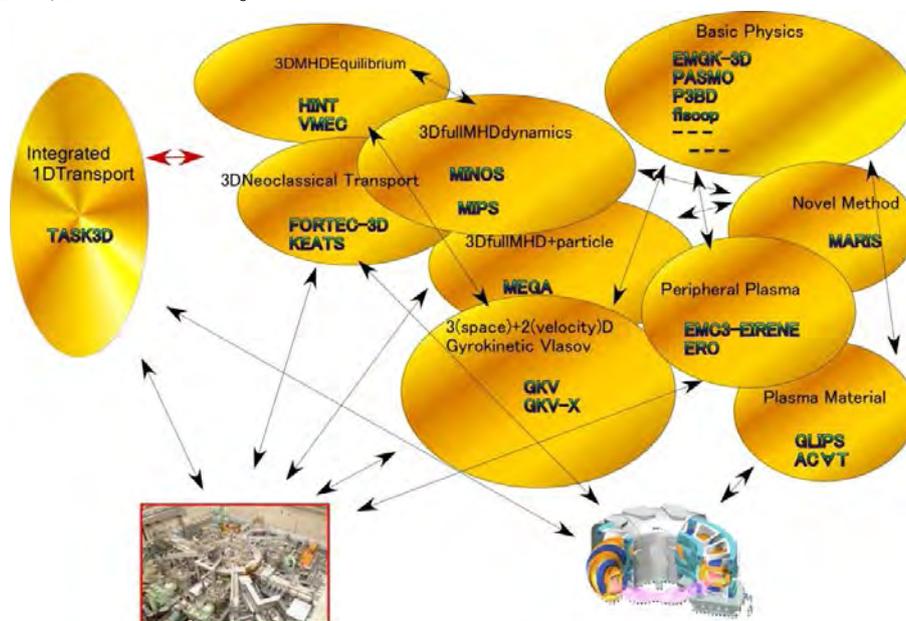


図 3.2.1.1-1 シミュレーションコード

図 3.2.1.1-2 にこのような連携を模式的に示している。さらに、より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、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。

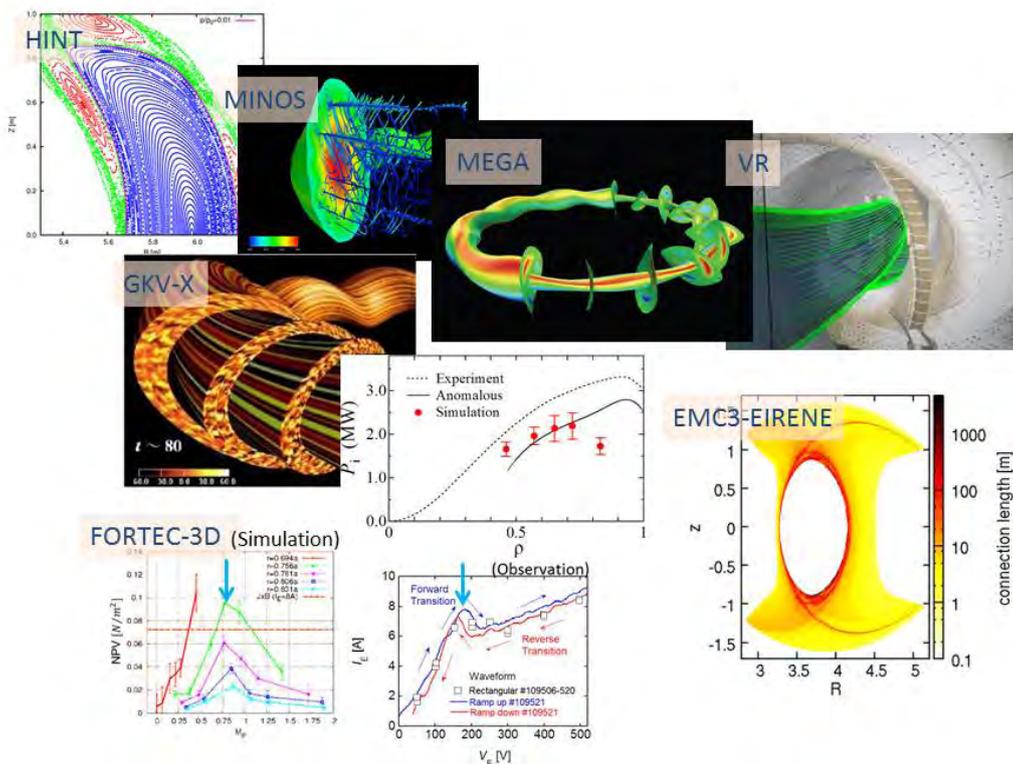


図 3.2.1.1-2 LHD 実験とシミュレーションおよびツールの連携例。

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
ACPAS	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が連即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二体衝突近似法によるハイブリッドシミュレーション
AIScope	分子動力学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、第一原理計算で得られた電子密度を可視化する。	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、 δ リモンテカルロ法
GKV+	磁場閉じ込めトラスプラズマにおける乱流輸送のシミュレーション(多種粒子、VMEC 平衡、エントロピー伝達解析を含む)	ジャイロ運動論的方程式に基づく δ ヲフラックス・チューブ・シミュレーション
GKV+/EM	電磁的ジャイロ運動論方程式を位相空間5次元で解くことにより、磁場閉じ込めトラスプラズマにおける、電磁的 ITG、TEM、KBM などの微視的乱流による輸送を理解する。	4次のルンゲ・クッタ・ギル
GKV+/EMH	電磁的ジャイロ運動論方程式(ただし電子は流体方程式)を位相空間5次元で解くことにより、磁場閉じ込めトラスプラズマにおける、電磁的 ITG、KBM などの微視的乱流による輸送を理解する。	4次のルンゲ・クッタ・ギル
GKV-bundle	磁場閉じ込めトラスプラズマにおける乱流輸送のシミュレーション(非軸対称配位における巨視的径電場効果を含む)	ジャイロ運動論的方程式に基づく δ ヲフラックス・チューブ・シミュレーションを複数連結
GKV-X	トロイダルプラズマ(特にLHDなどの非軸対称プラズマ)装置で用いられる実際の磁場配位における異常輸送の評価・予測を行う。	ジャイロ運動論的方程式に基づき、5次元位相空間上の分布関数の時間発展を、スペクトル法、有限差分法、ルンゲ・クッタ・ギル法を用いて解く。

GLIPS	固体材料へプラズマ粒子が連即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
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)	ドリフト運動論的方程式に基づく、 δf 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。	領域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
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 δf 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形ダイナミクス解析	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。

<p>p3bd</p>	<p>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。</p>	<p>Particle in Cell 法による静電粒子シミュレーション</p>
<p>PASMO</p>	<p>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</p>	<p>陽解法に基づく電磁粒子シミュレーション法</p>
<p>R2FLUID-2D</p>	<p>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。</p>	<p>4次のルンゲ・クッタ</p>
<p>R2FLUID-3D</p>	<p>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。</p>	<p>2次の予測子修正子法</p>
<p>REFES</p>	<p>ヘリカルトロイダルプラズマにおける、背景プラズマと電場ダイナミクスの解析</p>	<p>拡散方程式で、空間差分を用いて解析、空間発展は予測子修正子法により行う。</p>

シミュレーションコードおよびツール一覧 2

(現所外メンバーが中心に開発したコード(アルファベット順))

名称	目的	手法
EMC3-EIRENE	SOL およびダイバータ領域でのプラズマ、中性ガス、不純物の輸送解析と定常分布解析。	EIRENE: 中性の水素および不純物の定常分布を運動論的なモンテカルロ法で求める。EMC3: プラズマ(電離不純物含む)の二流体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。
ERO	プラズマ対抗壁周辺の不純物輸送および表面への堆積分布の解析。	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のモデルを含む。
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
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
VFIVE	シミュレーションデータのバーチャルリアリティ装置による可視化	4次 Runge-Kutta-Huta 法による流線追跡, Marching cubes 法による等値面計算, Volume Rendering 法によるスカラー場の表示.
VMEC	3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

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磁場配位では真空ではプラズマ周辺にストカスティックな磁力線構造が存在する。従って、3次元 MHD 平衡を自由境界計算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、ヘリカル系プラズマでは、磁場構造の3次元性により磁気島構造の自発的生成・消滅が実験で観測されており、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、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) の周辺局在化モード (ELM) の低減・抑制の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、LHD 実験の MHD 平衡解析は VMEC コードを用いて行われてきた。VMEC コードはヘリカル系プラズマの MHD 平衡解析に最も用いられているコードである。しかし、磁気座標系と呼ばれる入れ子状の磁気面を仮定した座標形状で構築されているので、入れ子状の構造が破れる磁気島やストカスティックになった磁気面形状は扱えなかった。一方、磁気島やストカスティックな磁気面形状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。HINT 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、MHD 平衡の物理のさらなる理解を深めるため、実験データ解釈に応用し、コードの精度を高めるために HINT コードの改良版である HINT2 コードを開発してきた。HINT2 は HINT コードの利点はそのままに将来の拡張を念頭に新しく開発した。また、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。

MHD 平衡解析により得られる幾何情報は MHD 不安定性解析や輸送解析に必要な不可欠な基本情報である。HINT2 の平衡計算結果を用いて磁気面構造の座標データを構築し、実験データ解析に応用されている。このことにより、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、より実験結果と矛盾のない解析が可能になった。また、HINT2 による乱れた磁力線領域を含む MHD 平衡を、HINT2 と同じく実座標系で構築された MHD 不安定性解析コードに提供している。

• MINOS

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。また、2 流体効果への対応として Hall 効果を取り入れられ、長波長帯域において Hall 効果による不安定化が確認されている。

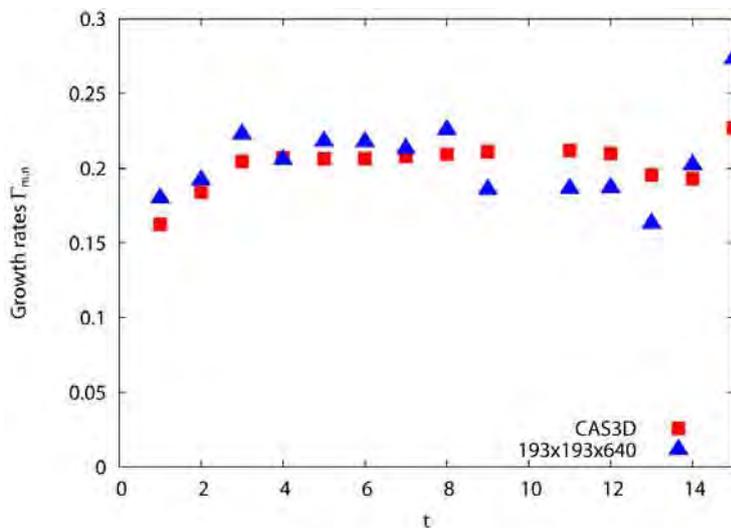


図 3.2.1.2-1 LHD プラズマにおけるバルーニングモードの成長率に関する MINOS コードと CAS3D コードの結果の比較。横軸はトロイダルモード数。

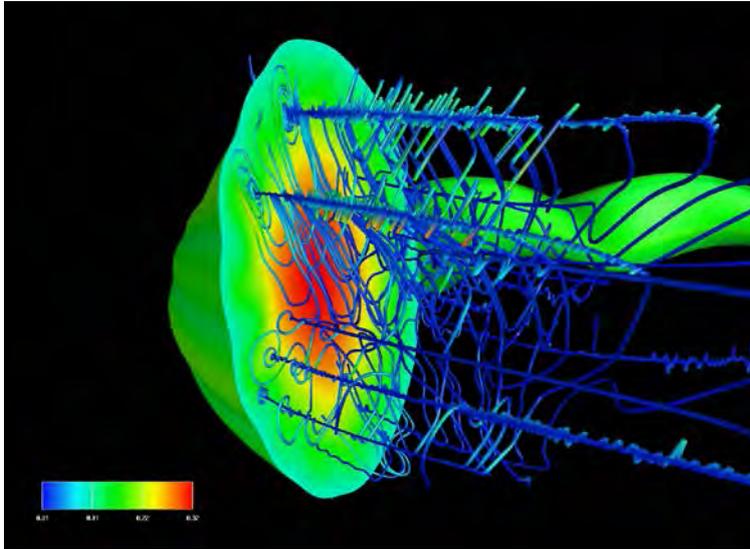


図 3.2.1.2-2 LHD プラズマにおけるバルーニングモードの成長と磁力線平行方向流れの発生。この流れの発生は圧縮性効果によって生成される。

• MIPS

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 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の非一様性も小さいため、比較的に平易な数値解法を用いて高い信頼性と数値的安定性が実現されている。3 次元領域分割による MPI 並列化が施されており、大規模並列計算にも対応している。MIPS 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。

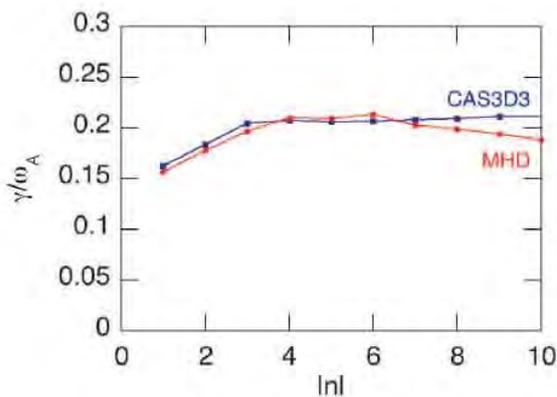


図 3.2.1.2-3 LHD プラズマにおけるバルーニングモードの成長率に関する MIPS コードと CAS3D コードの結果の比較。横軸はトロイダルモード数である。

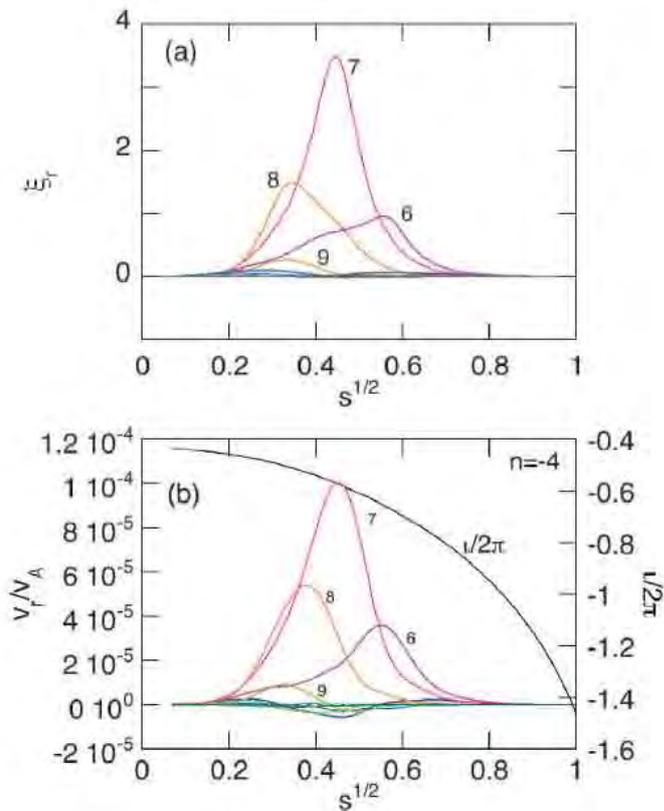


図 3.2.1.2-4 LHD プラズマにおけるバルーニングモードの空間分布に関する(a)CAS3D コードと(b)MIPS コードの結果の比較。

• MEGA

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、前者にはデルタ・エフ粒子法(δf 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。3次元領域分割による MPI 並列化が施されており、MEGA コードを用いた大規模並列計算が可能である。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型測地的音響モードの研究が推進されている。

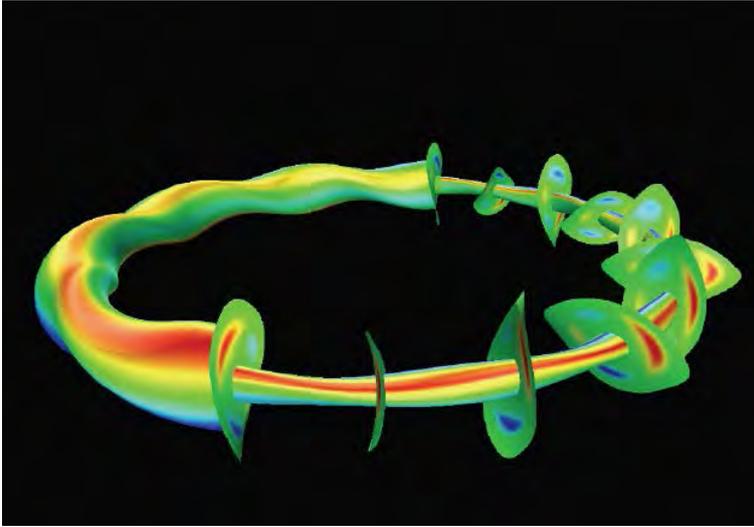


図 3.2.1.2-5 MEGA コードを用いて計算した LHD におけるトロイダルアルフベン固有モードの空間分布。プラズマ半径方向の MHD 速度揺動にプラズマ半径を乗じた量の分布が表示されている。

・ GKV

ヘリカル系プラズマにおける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 及び GK-X コードの開発

ヘリカルおよびトカマク系プラズマにおける微視的乱流輸送現象を詳細に解析するためのコード整備が行われた。まず開発された GKV コードは、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った。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、他の3次元方向に差分法を用い、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ー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ー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。現在は、巨視的平衡径電場の影響や電子の非断熱応答効果などをとりいれるようにコードの拡張を行っている。

・ GKV-X

上記の GKV コードをベースとして、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新たに開発されたのが本コードである。この微視的乱流輸送シミュレーションコードの数値技法に関する基本的な特徴は、GKV コードのものと同様であり、速度空間に非常に高い解像度を保ちながら、ジャイロ運動論的方程式に基づいて、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、及びルンゲ・クッタ・ギル法を用いて解き進めていく。配位空間座標系として、ある磁力線に沿ったフラックス・チューブ配位を用いている。本コードの特徴は、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んでいる。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、本コードを用いて、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。現在は、高精度な衝突効果の導入などのコードのさらなる拡張を進めている。

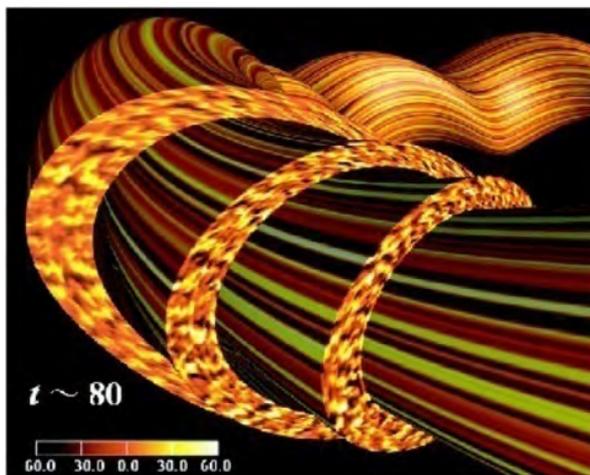


図 3.2.1.2-6 GKV-X を用いた大規模 ITG 乱流シミュレーションで得られた LHD 高イオン温度プラズマのポテンシャル揺動の様子。成長した ITG 不安定性が非線形発展の中でゾーナルフローを生成し、それらの相互作用により乱流状態を作り出している。

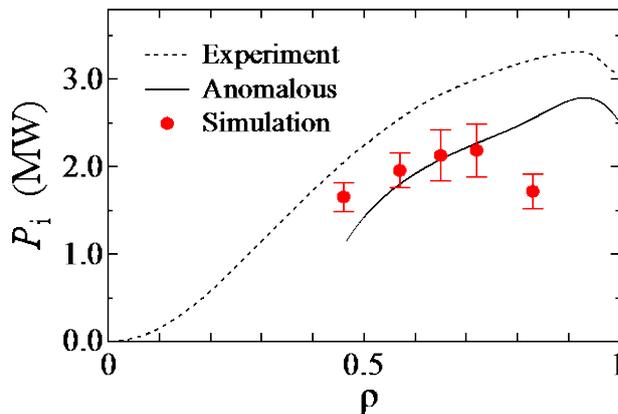


図 3.2.1.2-7 LHD 高イオン温度プラズマのイオン熱流束の実験とシミュレーションとの比較。実線が実験観測から得られる異常輸送寄与分、赤点が GKV-X 大規模乱流シミュレーションの結果を表す。

• GKV+/EM

ヘリカル系・トカマク系プラズマの電磁的ジャイロ運動論シミュレーションコード GKV+/EM を開発し、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。

核融合科学研究所における従来のジャイロ運動論シミュレーションコード GKV 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。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、従来の解析にあった制約が取り除かれ、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が可能になった。以下に具体的に書く。

1. LHD における有限ベータプラズマの粒子・熱輸送の評価が可能になった。
2. 熱輸送のみならず粒子輸送の評価が可能になった。
3. 電子の熱輸送の評価も可能になった。
4. 粒子・熱輸送に対する磁場揺動の寄与の理解が可能になった。

プラズマベータが有限な場合、イオン温度勾配不安定性が駆動する乱流 (ITG 乱流) は安定化される傾向がある。典型的な計算では、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。その一方、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バ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。この有限ベータプラズマにおける乱流輸送のジャイロ運動論シミュレーションが可能になった。

• FORTEC-3D

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輸送現象を解明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。

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 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトが支配的であるとして、磁場の勾配ドリフト・曲率ドリフトの項を落とす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は、上に書いたようなドリフト運動に対する近似はあまり妥当とは言えず、小半径方向の有限なドリフト運動の影響（有限軌道幅効果）を含む非局所的な新古典輸送計算法が必要となる。この目的のために、 δf モンテカルロ法を用いた大規模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、近似を用いずに正確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での大規模並列実行のために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取り入れられている。

FORTEC-3D コードを用いた両極性径電場・新古典輸送計算は LHD の高電子温度プラズマ実験の解析に応用された。その計算例を下図に示す。LHD では ECH で加熱されたプラズマにおいて、コアに急峻な電子温度勾配（内部輸送障壁）が形成され、同時に HIBP によってコアに正の大きな電場が加速される、コア電子ルート閉じ込め

(CERC)が実現されている。CERC 形成過程における温度密度観測値をもとに、新古典輸送計算から両極性径電場を求めたものが図 3.2.1.2-8 である。ここで、コアの電子温度は $t=0.8, 0.9, 1.1$ s の時刻においてそれぞれ約 3 keV、5 keV、8 keV であった。この計算からも、コアの電子温度の上昇に伴い大きな正電場が形成されることが確認できる。また、この3つの時間帯における、小半径方向の新古典熱流束を図 3.2.1.2-9 に示す。これらの図中、比較のために従来の有限軌道幅効果を見捨てた計算法による結果も破線で示してある。両極性径電場に比べ、熱流束において $\rho < 0.2$ の磁気軸付近の計算手法による差が大きい。これは、両極性条件は粒子束のバランスから決まる一方、熱流束は粒子束に v^2 をかけたモーメント量であるため、速度の大きい粒子の有限軌道幅効果の有無の違いがより見えやすいためである。このように、CERC プラズマにおける熱輸送解析には有限軌道幅効果が影響を与えることが示された。また、この計算結果から熱拡散係数 $\chi_e = -Q_e / (nVT_e)$ を評価すると、電子温度の上昇に関わらず CERC 形成の前後で χ_e はほぼ一定であることがわかった。これは、径電場の成長に伴う $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 回転速度の上昇によってリップル捕捉粒子の輸送が良く抑えられていることを示している。このように、FORTEC-3D によるシミュレーションによって、LHD プラズマにおける新古典輸送や両極性径電場、径電場による輸送の抑制効果などを詳細かつ定量的に解析・議論することが可能となった。

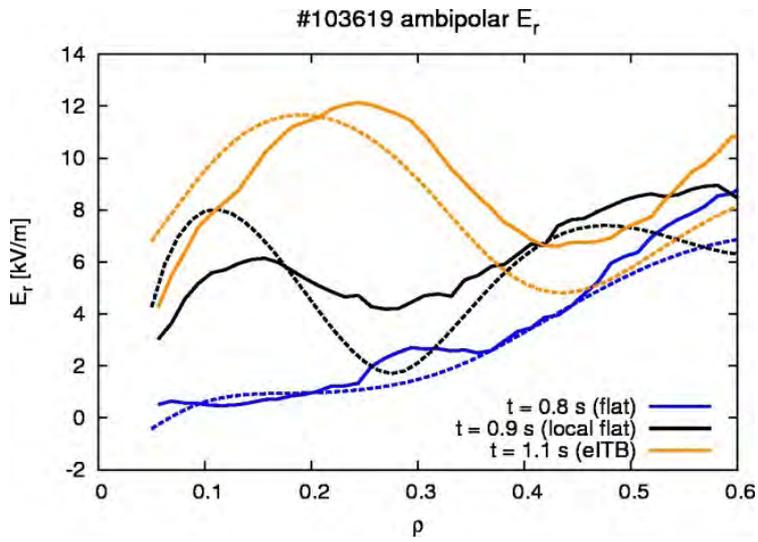


図3.2.1.2-8 LHDのCERC放電における、シミュレーションにより計算された両極性径電場分布。実線がFORTEC-3D,破線は有限軌道幅効果が無視された計算法による結果を表す。

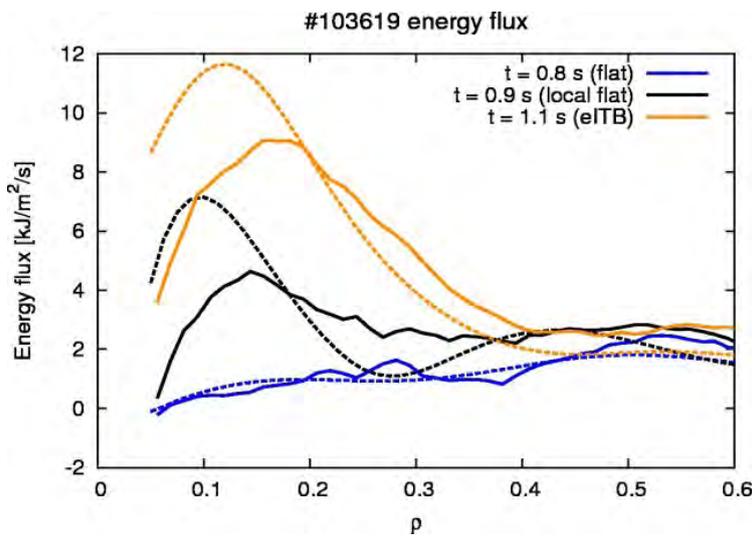


図 3.2.1.2-9 それぞれの時刻における、新古典径方向熱流束の分布。

・乱流計測シミュレータ

乱流計測シミュレータの開発とトロイダルプラズマにおける乱流構造の数値診断

トロイダルプラズマの乱流輸送現象ではマイクロモードが形成するメゾスケール構造の形成機構が重要な役割を果たす。その物理機構の理解を進めるためには、用いる計測器それぞれが測定する時間的、空間的領域を正確に理解して、乱流プラズマの揺動構造の精密な計測をすることが必要となる。乱流計測シミュレータは、シミュレーションにより乱流場の時系列データを生成し、その上で実験計測を模擬することで乱流構造形成の数値診断を行い、物理機構を解明するために開発したコード群である。磁化プラズマにおけるグローバル乱流シミュレーションコードと様々な実験計測を模擬する計測モジュールおよびデータ解析ルーチンから構成される。

開発したヘリカルプラズマにおける乱流コードではドリフト交換型不安定モードを記述する3場簡約MHD方程式系に、ドリフト波不安定性を考慮するため磁力線方向の電子のダイナミクスを加えたモデルを用いている。MPI・SMPハイブリット並列実行により、1,000コアクラスの並列計算が可能である。そして輸送と揺動の時間スケールを同時に解くマルチスケールの計算を行っている。圧力ソース項を与えて維持した飽和状態において、ポロイダルモード数の小さいモードが不安定化し、モード間の非線形結合が飽和状態をもたらしている。小モード数モードは小半径方向に広がっており、中間的なモード数モードは有理面に局在している。

乱流コードで得られた揺動の3次元時系列データ群に対して実験計測を模擬したデータ抽出を行う。重イオンビームプローブ数値診断では、図3.2.1.2-10のような揺動場中での重イオン粒子の運動、およびその軌道に沿ってのビーム減衰を計算し、さらに有限ビーム幅内での平均として得られる電位、密度信号を算出する。このような計測模擬により各計測器の分解能を考慮した揺動解析が行える。

多点におけるデータ抽出とそれらの相関解析からメゾスケール構造の様相がわかる。シミュレーションの非線形飽和状態では、帯状流成分が形成される。その形成機構を調べるために、エネルギー発展に寄与する要素の大きさを評価した。非線形的な寄与がどのポロイダルモード成分からもたらされるか分解し、空間分布をプロットしたのが図3.2.1.2-11である。点線で示された領域で、結合が強く、高ポロイダルモード数成分からの寄与も大きい。この領域で分布変形が起り、その変形が他の領域へ伝播している。このような結合機構を実験で同定するには、高波数成分からの寄与も大きい点線部領域を見込む広い帯域を持つ測定器、および大域的構造の分布を測定可能な帯域は狭くとも広い空間領域を見込む測定器の組み合わせが必要である。

本研究で示された流れ生成機構の定量化の手法は、その物理機構を具体的に検証するための検出方法の策定に生かすことができる。数値実験炉の開発を進めていくにあたって、シミュレーション結果を実験結果と比較検証していくことが必要であるが、乱流計測シミュレータをその実験との相互検証の場として活用していく。

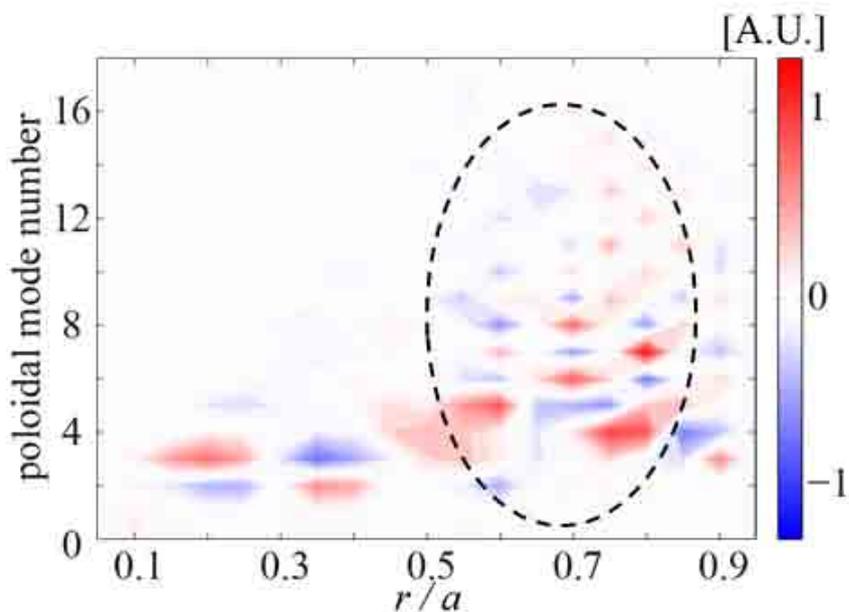


図 3.2.1.2-10 電位揺動のポロイダル断面分布。重イオンビームプローブ計測のビーム軌道およびイオン化領域の例が示されている。

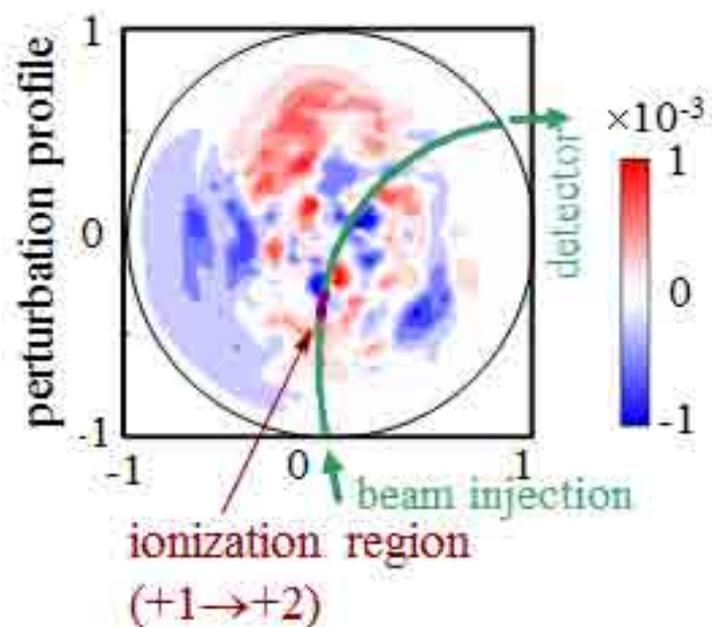


図 3.2.1.2-11 帯状流成分と各ポロイダルモード数モードの非線形結合強度の径方向分布。赤色領域でエネルギーを受け取り、青色領域でエネルギーを与えている。点線で示された部分で高ポロイダルモード数成分も寄与した強い結合が存在する。

3.2.1.3 周辺プラズマ、プラズマ・壁相互作用コード

・周辺プラズマコード EMC3-EIRINE

LHD 周辺プラズマは大きく分けて、ダイバータ板へ直接つながるダイバータレグと磁気面のないエルゴディック層に分かれる。前者は一次元流体方程式によるモデリング (3.3.4 節) があり、局所的な不純物輸送シミュレーション (ERO コード: 3.3.4 節) に用いられている。このプラズマモデルはまた、ネオン不純物による放射冷却を解析するためにも用いられている (2.2.2.2 節)。後者の定常分布を解析するコードとして、EMC3-EIRENE (ドイツ Max-Planck IPP で開発) がこれまで用いられ、分光計測やプローブ計測と組み合わせてプラズマおよび不純物の輸送解析に用いられてきた。

EMC3-EIRENE は 3 次元の流体コード (EMC3) と 3 次元の中性粒子追跡コード (EIRINE) からなり、ともにモンテカルロ手法を用いて空間分布の定常解を求めるものである。EMC3 は明確な磁気面をもたないプラズマの定常解を求めることに特化したコードであり、磁場に垂直および平行な輸送を扱うことができる。エルゴディック層の解析に適しており、LHD における不純物の吐き出し/蓄積機構の定性的理解などの輸送解析に用いられてきたが、ダイバータレグをシミュレーション領域に持たないために、水素リサイクリング等を含めた輸送を正しく解くことができない。LHD のダイバータ部の閉構造化にともなって、水素や不純物の輸送に形状効果が強く現れると考えられることから、計算領域のダイバータレグへの拡張を行っている。計算グリッドのひとつの次元方向は磁力線に沿って作られており、LHD 磁力線追跡コード (KMAG) を用いてレグ部分のグリッドを作成し、4 本のレグをエルゴディック層のグリッドに接続し、全体を解くようにコードの拡張を行った (図 3.2.1.3-1 参照)。計算グリッドを半自動的に作成するため、KMAG を取り込んだ生成ツール、磁場と無関係な真空グリッドを作成するためのポアソン方程式を応用した生成ツールなどを開発した。試験計算 (図 3.2.1.3-2) とグリッドの最適化を進めている。

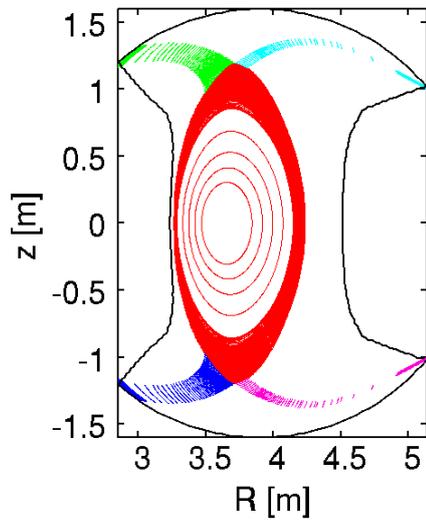


図 3.2.1.3-1 計算グリッド。各領域が接続される。真空部分は図では省略。

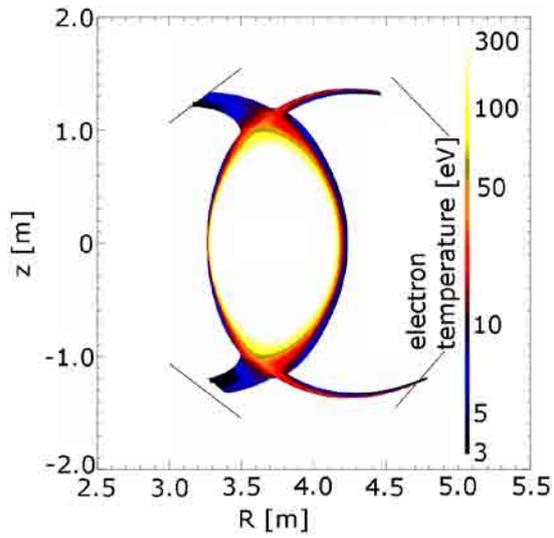


図 3.2.1.3-2 計算された電子温度分布。接続長を反映した分布を確認。

・ 計算科学の高度化 DIPS

大型ヘリカル装置などのトーラスプラズマのエッジ領域におけるプラズマ輸送解析のため、物理乱数発生器を利用したモンテカルロコード(DIPS)を開発した。周辺プラズマの輸送解析においてモンテカルロ法が近年よく使われているが、この手法では用いる乱数列の統計的品質が計算結果に直接的な影響を与えるため、具体的な計算を実行する前に乱数の品質確認が必須となる。大規模並列型計算機におけるモンテカルロ計算には、並列乱数の開発が不可欠であるが、疑似乱数列を用いて開発した場合はその統計的品質の確認に膨大な時間が必要となり、今日のように計算の並列度が飛躍的に増大している情勢においては、その確認は極めて困難な作業になりつつある。この状況を打開する方策の一つとして、物理乱数発生器の利用が考えられる。本コード開発は、物理乱数を用いた新たなモンテカルロ法を模索する共同研究の一環として行った。

周辺輸送が以下のように流体的に表現されるとする：

$$\frac{\partial u(t, \mathbf{x})}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{V}u) - \frac{1}{2} \nabla \cdot (\mathbf{D} \cdot \nabla u) + \eta u = h(t, \mathbf{x}).$$

ここで、 u は密度/パラレル運動量/内部エネルギーとし、 \mathbf{V} は流速、 \mathbf{D} は拡散係数テンソル、 η は消滅率、 h はソース/シンクである。また、 $t = 0$ における初期値を $u(0, \mathbf{x}) = \Phi(\mathbf{x})$ 、境界において $u(t, \mathbf{x}) = G(t, \mathbf{x})$ であるとする。このとき、定常解は、以下のように与えられる：

$$u(\mathbf{x}) = E_{\mathbf{x}} \left[G(\tau, \mathbf{X}(\tau)) \exp \left\{ \int_0^{\tau} -\eta_*(s, \mathbf{X}(s)) ds \right\} \right] \\ + E_{\mathbf{x}} \left[\int_0^{\tau} h(s, \mathbf{X}(s)) \exp \left\{ \int_0^s -\eta_*(\vartheta, \mathbf{X}(\vartheta)) d\vartheta \right\} ds \right].$$

ここで、 $\mathbf{X}(s)$ は $d\mathbf{X}^i(s) = V_*^i(s, \mathbf{X}(s)) ds + \sigma_j^i(s, \mathbf{X}(s)) dW^j$ で与えられるランダムウォーカーの経路、 τ はそのランダムウォーカーが境界に初めて達した時刻、 $E_{\mathbf{x}}$ は位置 \mathbf{x} から出発したランダムウォーカーによる平均、 $\eta_* = \eta + \nabla \cdot \mathbf{V}$ 、 $V_*^i = -V^i + (1/2) \partial D_j^i / \partial x^j$ 、 $D_j^i = \sigma_k^i g_l^k \sigma_j^l$ 、 g_l^k は計量テンソル、 $\mathbf{W}(s)$ はウィーナー過程である。数値的に定常解を求めるために、適当な初期値の下で得られた数値解 $u(\mathbf{x})$ を初期値 $\Phi(\mathbf{x})$ と置き直して、 $\Phi(\mathbf{x})$ と $u(\mathbf{x})$ の差が無視できるほど小さくなるまで繰り返し計算を行う。数値解は、各メッシュ点 \mathbf{x} を出発点としたランダムウォーカーによって与えられた数値データを基に赤池情報量基準を利用した回帰分析によって求める。ここで、情報量基準とは、統計データを回帰分析する際に、より尤もらしい統計モデルを選択する基準を与えるものである。

以上のシミュレーション手法を用いて、例えば、以下のような動径方向のエネルギー輸送方程式を解いてみる：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \kappa^{\text{GB}} \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \frac{3}{2} \langle \sigma v \rangle_{\text{rre}} n^2 T + S = 0.$$

ここで、境界条件は

$$G(t, r_0) = T(t, r_0) = T(t, r_0 + \delta r) - \delta r \frac{\partial T}{\partial r}(t, r_0) \text{ および } G(t, a) = T(t, a) = 200 \text{ eV}, \\ \frac{\partial T}{\partial r}(t, r_0) = -1.8 \text{ keV/m}$$

密度は $n = 1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $\langle \sigma v \rangle_{\text{rre}} = 1.27 \times 10^{-19} (I/T)^{3/2} / \{(I/T) + 0.59\} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $I = 1.36 \text{ eV}$ 、 $S = (5/2)\{1 - 4(r/a - 1/2)\} \text{ kW/m}$ 、ジャイロ・ボーム熱伝導率 κ^{GB} を仮定した。ただし、 $\delta r/a$ および r_0/a は微小量 ($0 < \delta r/a, r_0/a \ll 1$) とする。このとき、定常解として、図 3.2.1.3-3 のような温度分布が得られた。この分布は、計算で用いるランダムウォーカーの数を増やしてもほとんど変化せず、情報量基準によって適切に求められていることが確認できた。また、図 3.2.1.3-4 のように、計算の最初に与えた $r/a = 0$ における初期値と計算に利用する乱数列を変更しても最終的に得られる分布が変わらないことから、この数値解は、定常解として適切であると強く期待できることが分かった。この他にも定常解が既知である例題を解くテスト計算を行うなどして、物理乱数と情報量基準を用いるモンテカルロ手法の計算原理の妥当性を確認した。現在、現実的な周辺輸送問題に対応するよう、さらなるコード開発を進めている。

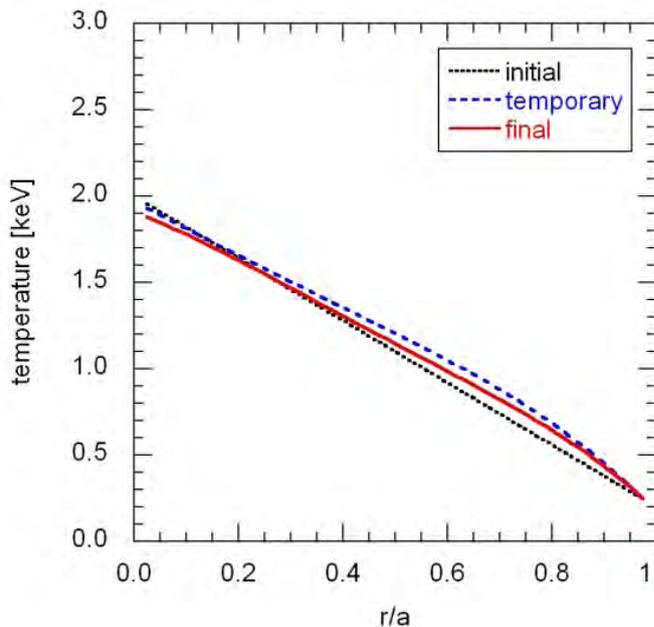


図 3.2.1.3-3 繰り返し計算によって得られた定常解。計算の最初に仮定した初期分布を initial、計算の途中で得られた近似解を temporary、最終的に得られた数値解を final と記した線で描いた。この計算で用いたランダムウォーカーの数は、100 分割したメッシュ 1 つ当たり 1,000 個である。

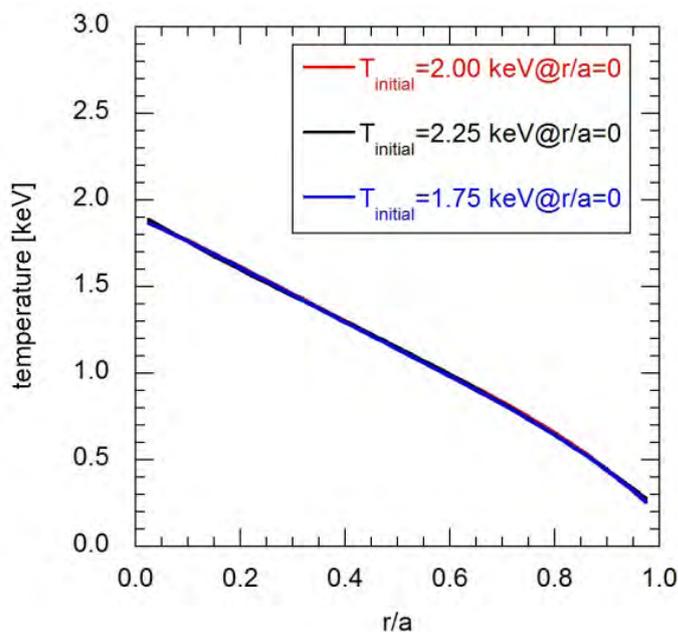


図 3.2.1.3-4 物理乱数を用いることで、数値解の妥当性を確認する。図中の T_{initial} は、計算の最初に仮定した $r/a = 0$ における初期値である。 T_{initial} の値や乱数列を変更しても数値解がほとんど変わらないことが分かる。

・核融合材料シミュレーションコードの開発

磁場閉じ込め核融合炉の炉壁材料の研究の為に、分子動力学 (MD) 法、二体散乱近似 (BCA) 法、密度汎関数 (DFT) 法の三種類の数値シミュレーションを実施している。大まかに言えば、DFT、MD、BCA の順に従って扱う現象のエネルギー領域が、 $0.01\text{eV} \sim 1\text{eV}$ 、 $1 \sim 100\text{eV}$ 、 $100 \sim 10\text{keV}$ と対応している。これに伴い、コードも大きく分けて三種類の開発・拡張を行った。

まず、MD 法のためのコードとして “G Library for Interatomic Potential and Symplectic Integrator (GLIPS)” の開発を行った。これは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、全く新規に作ったコードである。これによって、ダイバータ表面の化学損耗や不純物再堆積を数値計算によって再現することが可能となる。コードの構成としては、原子間の相互作用をモデル化したポテンシャル部分と、数値時間積分のためのシンプレクティック差分法の部分が中心となり、その他初期構造の生成や解析に必要な小モジュールからなる。ポテンシャル部分には、炭素系で最も有名な Brenner の REBO ポテンシャル[D. W. Brenner, O. A. Shenderova, J. A. Harrison, S. J. Stuart, B. Ni, and S. B. Sinnott, J. Phys.: Condens. Matter 14 (2002) 783.]のみを当初は採用していたが、このモデルでは sp^3 リッチな構造を再現できないことが明らかになった。そこで、ダウンフォールディング法[Y. Yoshimoto, J. Chem. Phys., 125,

(2006) 184103]を用いて、sp³ リッチな構造でも精度の良い炭素系のポテンシャルモデルを新規に開発した[A. M. Ito, A. Takayama, S. Saito, and H. Nakamura, Jpn. J. Appl. Phys., accepted.]. また、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も新規に開発した[Atsushi ITO and Hiroaki NAKAMURA, "Molecular Dynamics Simulation of Bombardment of Hydrogen Atoms on Graphite Surface", Commun. in Comput. Phys., Vol. 4, No. 3, (2008), pp 592-610]. また、ダイバータ材のタングステン材料への転換に合わせて、タングステン系のポテンシャルモデルも新規に開発した[Atsushi M. ITO, international conference Plasma Surface Interaction (PSI) 2012, P2-66].

BCA 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。この手法は古くから研究されている方法で、国内では Atomic Collisions in an Amorphous Target (ACAT) と Erosion and Deposition based on a Dynamic model (EDDY)、海外では TRansport of Ions in Matter (TRIM) という有名コードが存在する。しかしながらこれらのコードでは、材料中の原子配置としてランダム構造に限られた結晶構造しか取り扱うことができない。これは方法論として原理的にはその他の構造を扱えるにもかかわらず、コードの設計が古いためにそのような制限が掛かっていた。そこで、我々は、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 “Atomic Collisions in Any Targets (AC ∇ T)” コードを開発した。さらにこのコードでは、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うことができる。

さらに、BCA と MD を組み合わせてハイブリッドシミュレーションを行う BCA-MD コードの開発にも取り組んだ。これは、1 keV 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、開始から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 である AC ∇ T コードで軌跡を計算し、それ以後は MD である GLIPS コード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に異なるが、だいたい 100eV 程度である。これによって、高エネルギーでは計算負荷の軽い BCA によって計算し、詳細な原子挙動が重要となる低エネルギー時にだけ、正確なポテンシャルによる MD 計算を行う。ただし、MD 計算の対象となるのは材料全体ではなく、入射粒子もしくは弾き出された粒子の様に良く動く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 10~50 程度である。これらのコード間の結合は、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、さらに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。

最後に、DFT による計算は、北陸先端大において開発されている “Open sourcepackage for Material eXplorer (OpenMX)” を用いて行った。これは配布されているコードであり、OpenMP ならびに MPI による並列化が行われたものである。しかしながら、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。そこで、コードを解析し、ボトルネックになっている箇所の改良を行うことで、OpenMP 並列性能を改善した。これにより、10 倍程度の高速化が実現した。本コードを用いて、タングステン中のヘリウム空孔捕獲エネルギーを高精度に計算することで、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に取り組んだ (Arimichi Takayama, Atsushi M. Ito, Seiki Saito, Noriyasu Ohno, and Hiroaki Nakamura, *Jpn. J. Appl. Phys.*, accepted)。また、本コードを用いた DFT 計算を、先のダウンフォールディング法に適應することで、DFT で得られるエネルギーと無矛盾な MD 用のポテンシャルモデルの開発を行える。実際にそれを行ったものが、先に述べた炭素系とタングステン系の新開発したポテンシャルモデルである。

3.2.1.4 シミュレーション基盤技術開発

・多階層シミュレーション

磁気リコネクションは、プラズマにおける基礎的なエネルギー解放過程の1つであり、磁場閉じ込め装置におけるプラズマ崩壊現象から太陽フレアのような天体现象など、さまざまなプラズマ領域で普遍的にみられる。さらに、磁気リコネクションは階層横断現象という興味深い側面を持つ。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、大規模な輸送が生じる。その一方、リコネクションのトリガーとして、ミクروسケールの運動論的効果が本質的な役割を果たす。マクロとミクロの物理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。磁気リコネクションを階層横断現象として完全に解明することは、様々な領域、物理、スケールを組み合わせる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をめざす数値実験研究プロジェクトの発展につながる。このような目標のため、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解く多階層シミュレーションモデルを開発している。マクロの物理は MHD シミュレーション手法で、ミクロの物理は PIC シミュレーション手法を用いて解く。

この多階層モデルでは、上流方向について領域分割法を用いている。図 3.2.1.4-1 に、多階層シミュレーションボックスの模式図を示す。粒子のミクロな運動が物理を決めている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。1 流体近似が十分に成り立つ PIC 領域外側は、MHD 手法で解く領域(MHD 領域)である。2つの領域の間には、スムーズに連結するため有限の幅を持つインターフェイス領域を挿入する。

開発したモデルの連結アルゴリズム検証として、線形 Alfvén 波やプラズマフロー流入の多階層シミュレーションを実施し、MHD と PIC が物理的に正しく連結されていることを確認した。2009 年には、この多階層モデルを用いて、磁気リコネクションの多階層シミュレーションを行うことに世界で初めて成功した。さらに近い将来、より大きな系に適用することをめざして、不等間隔格子を用いたモデルへと改良を行った。図 3.2.1.4-1 はその改良モデルにおけるシミュレーション結果であり、磁力線と流体速度ベクトルを示している。MHD 領域からプラズマを流入させることにより PIC 領域において無衝突リコネクションが駆動されている。インターフェイス領域を通して磁力線、流体速度ともにスムーズにつながっていることが分かる。

また、自然界ではリコネクション点時間が時間と共に変動するので、運動論的効果が効く領域の大きさ・位置も変化すると考えられる。そこでシミュレーションを行いなが

ら自動的に PIC 領域を検出するモデルの開発を開始した。その第一歩として、全領域を MHD 領域として解いていき、ある時刻に MHD 領域の一部を PIC 領域（およびインターフェイス領域）へと切り替える手法を構築した。この領域動的切り替えモデルにおいても、磁気コネクションが駆動されるシミュレーションを行うことに成功している。

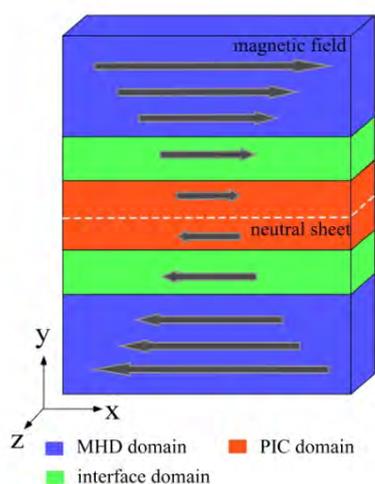


図 3.2.1.4-1 多階層シミュレーションボックスの模式図。上流方向についてMHDとPICが連結されている。

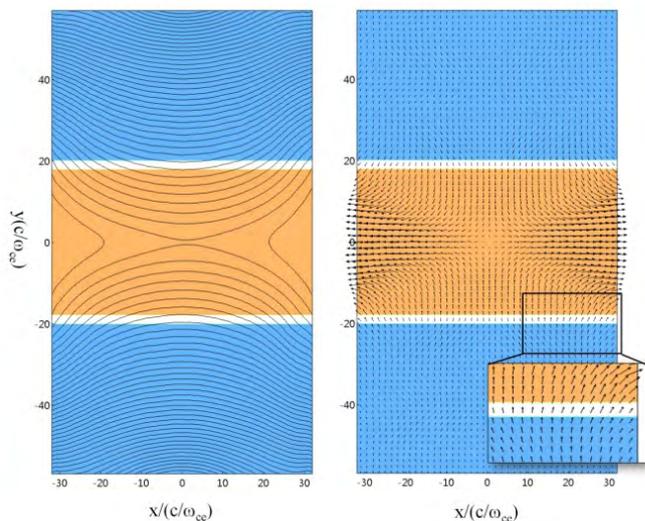


図 3.2.1.4-2 多階層シミュレーションにおける磁力線(左)と流体速度ベクトル(右)青色はMHD領域、白色はインターフェイス領域、茶色はPIC領域である。

・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

MHD、二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。

擬スペクトル法は周期境界条件下にある場の量をフーリエ係数に展開し、そのフーリエ係数の時間発展によるシミュレーションを行う手法である。通常の差分法と異なり数値粘性はフーリエ係数の打ち切りを通じてのみ現れ、低波数領域に影響を与えないことから、高精度手法としての信頼を確立した手法である。他方、フーリエ変換は領域全体についての情報を必要とするグローバル計算であるため、近年の大規模並列計算システムには不向きである。このため、スペクトル法なみの高精度を維持しつつ高効率で並列化可能なシミュレーション手法としてコンパクト差分法を採用し、問題の特性に応じてスペクトル法とコンパクト差分法を使い分けつつシミュレーションを行うハイブリッド手法の開発を行った。（この研究は、名古屋工業大学後藤教授との共同研究の元で行われた。）

この開発研究では、テスト問題として非圧縮性流体方程式とパッシブスカラー方程式が連立した乱流シミュレーションを行った。非圧縮性流体方程式はポアソン方程式を解く必要上、擬スペクトル法による計算を行った。他方、ポアソン方程式を解く必要のないパッシブスカラー方程式は8次精度結合コンパクト差分法による計算を行ったところ、図 3.2.1.4-3、図 3.2.1.4-4 に示すように、全計算を擬スペクトル法で行った場合に比べて8次精度コンパクト差分法で行った計算は計算精度において遜色がないうえ、計算速度で26%~77%の加速が得られることが分かった。

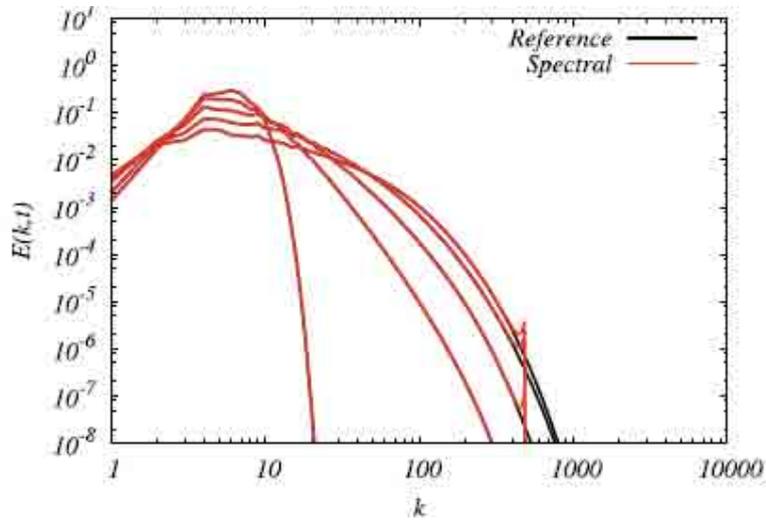


図 3.2.1.4-3 擬スペクトル法とコンパクト差分法によるパッシブスカラーのスペクトルの比較。時間が経過するにつれてスペクトルは高い波数(k)側にのびるが、2つのスキームの差はほとんど見られない。

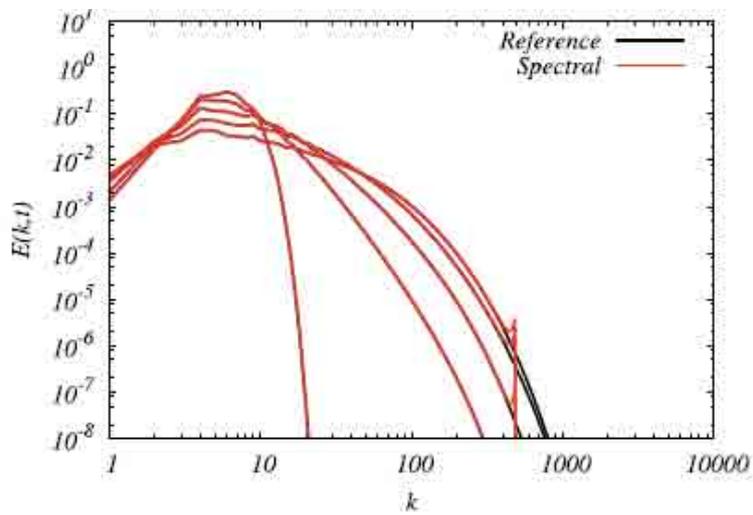


図 3.2.1.4-4 パッシブスカラー場の勾配の確率密度関数の計算スキームによる比較。4次精度中心差分法、6次精度コンパクト差分法がやや異なる結果を与えるが、8次精度コンパクト差分法と擬スペクトル法に明確な差はない。

3.2.1.5 解析コード・汎用ツール開発

・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」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、シミュレーション結果を観測する新たな手法として、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導入した。

可視化ソフトウェアは従来、その目的に特化した開発が進められる。シミュレーション解析用のソフトウェアであれば、流線や等値面の表現にすぐれているが、装置データの表現は簡単になる。他方、ゲーム開発などで用いられているソフトウェアは、写実的なCGを用いてリアリティのある実験装置を表現できるが、シミュレーションデータの解析には不向きである。そのため、シミュレーションデータを表現しつつ、実験装置データも同時に表現できる単一のソフトウェアの開発は困難である。しかし、シミュレーションデータを実験装置内で検討することができれば、シミュレーション結果の直観的な理解や装置開発への貢献が期待できる。そこで、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を導入して、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空間内で可視化することに成功した。図3.2.1.5-1はLHD真空容器内にHINT2コードで求められた平衡プラズマの圧力等値面と磁力線を表示した図である。真空容器内の壁や加熱用アンテナとの空間的な位置関係を即座に把握することができる。また、図3.2.1.5-2はLHDの外側観測ポートから真空容器内を見た図である。観測ポートから真空容器内を見たときにどのようにプラズマを観測することができるかを把握することができ、観測装置の取り付け角度や、既にある観測データの視野の理解などができる。実験を担当するいくつかのグループがこの新しい結果を利用して、先述のような視野の確認などを行い、実験観測データの理解の促進に役立っている。

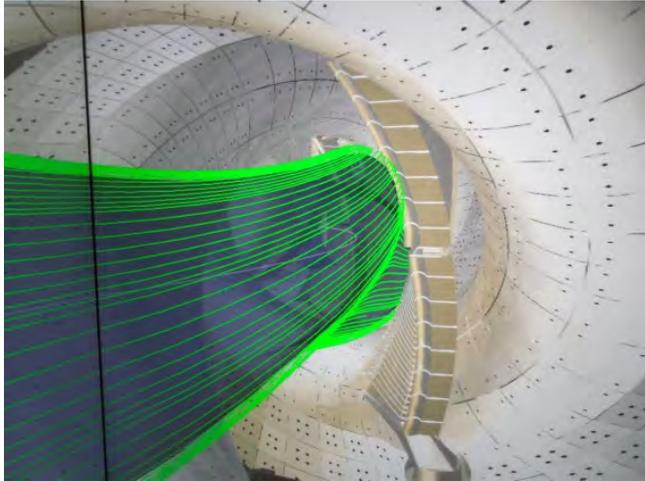


図 3.2.1.5-1 LHD 真空容器内における平衡プラズマシミュレーション結果の可視化。プラズマ圧力等値面を青で磁力線を緑で表している。

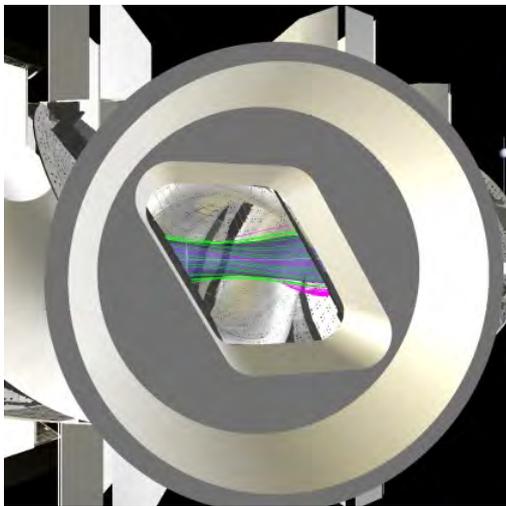


図 3.2.1.5-2 LHD の外側観測ポートからの視野。

・ AMR モジュール・コードの基盤開発

適合格子細分化法 (AMR) 法を用いたプラズマ粒子コード「PARMER」、AMR 法によるコードを従来の流体コードや粒子コードに簡便に適用するための AMR モジュール・コードの基盤開発を行った。

核融合プラズマに代表される、広範な多スケール現象であるプラズマの諸現象を運動論的に取り扱うことができるマルチスケール・プラズマ・シミュレーション手法の開発が行われた。具体的にまず取り組まれたのは、数値流体分野で広く認知されている適合格子細分化 (AMR) 法を粒子法 (PIC 法) による電磁粒子シミュレーションに取り入れ、マルチスケール解析に対応したプラズマ粒子コードの開発である。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。「PARMER」コードは、従来の粒子コードには用いられていない Fully Threaded Tree 構造 (FTT 構造) と呼ばれるデータ構造を採用し、電磁場の格子一つ一つを基本構成要素とする構造型変数をベースとした AMR プラズマ粒子コードとなっている。全ての格子は、AMR により生成・消滅される階層情報を、ポインター変数を用いて再現することで、頻繁に変化する AMR シミュレーション特有の複雑な階層格子システムに柔軟に対応できている。本コードは、宇宙プラズマ現象等の計算に応用されており、従来法よりも大幅に少ない計算機資源で高解像度を維持した粒子計算が実行できることを確認している。さらには、理化学研究所・次世代スーパーコンピュータ開発実施本部の協力を得て PARMER コードの単体性能向上およびスレッド並列化を「京コンピュータ」上で進めており、ピーク性能比 14% 以上という、粒子コードでは極めて高い性能結果を出している。

また、粒子コードのみならず、流体コードや MHD コード、ブラゾフコードの AMR 化も目指した汎用型 AMR モジュール・コードの基盤開発も進められた。このコードでは、格子を基本構成要素としていた PARMER コードとは異なり、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”を基本要素としており、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いる。本モジュールは、流体コードへの適用に成功しており、大規模並列計算機環境におけるテストでは、数千並列まで高効率並列計算が可能であることが確かめられた。

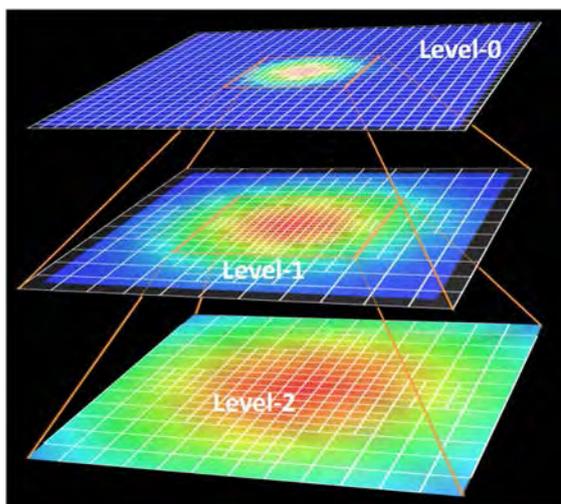


図 3.2.1.5-3 AMR 法による階層構造。高解像度を必要とする空間領域にのみ、次々と細分化格子が生成されていく。

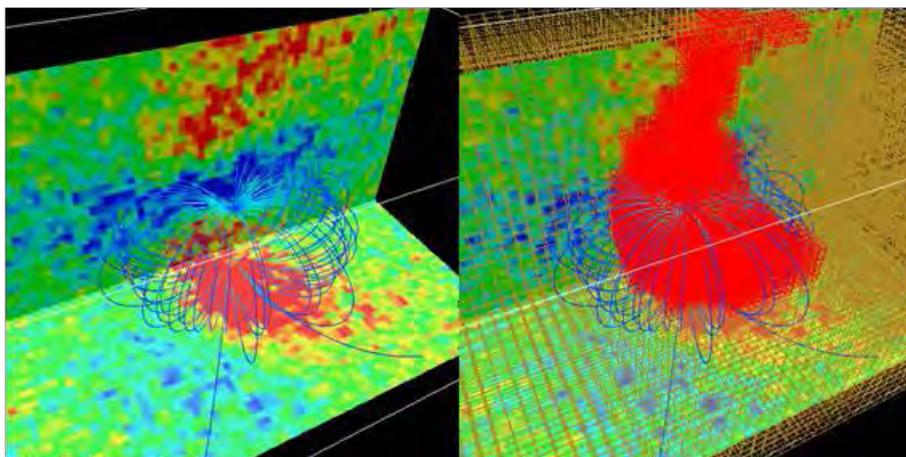


図 3.2.1.5-4 双極子磁場での PARMER コードによる AMR 粒子シミュレーションで得られた密度分布(左)と細分化格子の動的な生成・消滅(右)。

3.2.2 統合輸送解析コードの構築

3.2.2.1 統合輸送解析コードの概略

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いる。数値実験プロジェクト創設以前のシミュレーション科学研究部においても、要素モジュールの開発とその統合作業が進められていた。数値実験プロジェクト創設を好機として、他プロジェクトや国内共同研究との連携を強めてきている。解析コードの開発とともに、LHD 実験への適用を通じた検証【LHD 実験データ解析型】、および、その知見に基づいて、LHD プラズマのさらなる高性能化、炉心プラズマ設計などの新たなパラメータ領域に向けた予測精度の向上を図るための統合【到達パラメータ予測型】を、相互連携をとりつつ展開している。

TASK3D の開発戦略を、図 3.2.2.1-1 に示す。LHD 実験の計測データに基づいて、【LHD 実験データ解析型(TASK3D-Analysis, TASK3D-a シリーズ)】統合を進め、これによって輸送現象に関する系統的な知見の獲得や精密な議論を可能とする研究を展開している。実験適用によって、各種モジュールの妥当性検証(Model Validation)、また、理論モデルやデータベースの高精度化などを行う。一方、【到達パラメータ予測型(TASK3D-Prediction, TASK3D-p シリーズ)】統合は、プラズマへの入力（加熱、粒子など）の情報を初期条件として与え、仮定した輸送モデルに従って、到達パラメータ（温度など）を予測するものである。両統合ともに、基本的な解析モジュールとしては同様のものを使用しているため、TASK3D-a シリーズの実験適用によって検証作業を進めることで、p シリーズによる予測の高精度化を図ることが出来る。a シリーズは、LHD 実験データを活用するため、LHD 実験データが格納されている解析データサーバ(KAISEKI Data Server)とのデータ交換（"eg ファイル"形式）が基盤となっており、大型ヘリカル装置計画プロジェクトとの緊密な連携に基づいて開発を進めている。一方、p シリーズは、種々の輸送モデルの適用など理論・シミュレーションベースでの統合を進めており、TASK 開発環境を有する京都大学（京都大学：若狭有光特定研究員ら）との共同研究を基盤として進めている。

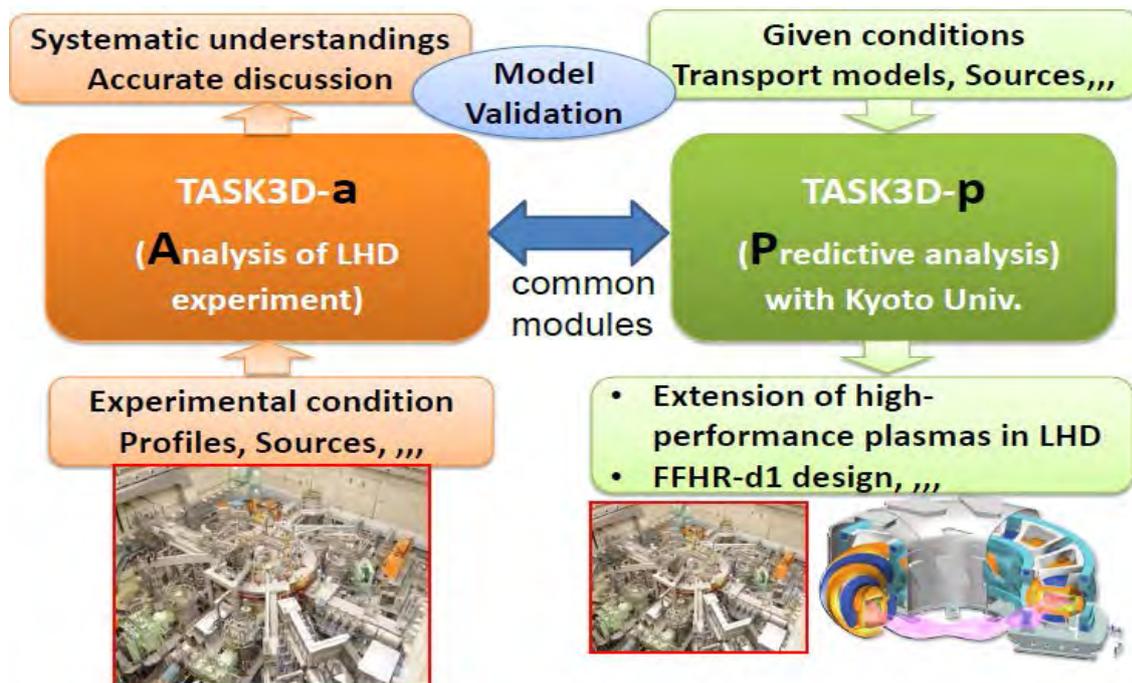


図 3.2.2.1-1 統合輸送解析コード TASK3D 構築の戦略と、大型ヘリカル装置計画および核融合工学研究プロジェクトとの連携に関する概観図

以下に、両シリーズの研究展開について記す。

3.2.2.2 LHD 実験データ解析型統合輸送解析コード(a シリーズ)

a シリーズについては、2012 年 9 月に、その初版となる TASK3D-a01(LHD プラズマの熱輸送解析が主眼)をリリースした。LHD 実験 LAN 内(LHD 制御室)に共通使用のパーソナルコンピュータを設置し、LHD 実験データとの強い連携に基づく開発を効率的に行った。また、a01 構成要素である、3次元平衡、加熱(現状 NBI のみ)、輸送過程(エネルギーバランス)といった各種解析コード(モジュール)も、それぞれの使用者から提供を受けて集中管理し、統合作業を集約的に進めた。図 3.2.2.2-1 に、TASK3D-a01 の計算フローを図示する。LHD 実験のリアルタイム座標マッピングシステムである TSMAP に基づく平衡同定、その平衡に基づく NBI 加熱評価、エネルギーバランス解析に至る一連の解析作業を一つのパッケージとしてリリースした。「go, ショット番号」と入力するだけで、当該放電の電子温度分布計測(トムソン散乱法)のレーザー強度が強いタイミングを選び出し(典型的には 100ms おき)、上記の一連の計算を行うものである。解析結果は、LHD 解析データサーバに登録され、共同研究

者に公開されている。従前は、各モジュールの担当者に計算を依頼して解析を行っていたため、時間を要する場合があったが、TASK3D-a01の構築によって解析の自動化が大きく進展し、一タイミング 15 分程度で、エネルギーバランス、運動量バランスの評価が可能となっている。計算機環境の増強でさらに時間短縮を図る計画である。多数タイミングでの解析が可能となった状況を受けて、定常エネルギーバランス解析 (A.Dinklage、横山ら：第 24 回 IAEA 核融合エネルギー会議ポスター発表) だけでなく、遷移的振る舞いを示すプラズマに対して、温度の時間変化も考慮したダイナミック輸送解析 (居田、J.Lee ら：第 18 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、高橋ら：第 24 回 IAEA 核融合エネルギー会議口頭発表)、運動量輸送解析 (永岡ら：第 54 回アメリカ物理学会プラズマ物理分科会招待講演) など、すでに多くの成果発表にその基盤となる計算結果を提供している。また、実験適用を進める過程で、解析の高精度化を追求する動きも出ている。例えば、低密度プラズマでの周辺部中性粒子と入射中性粒子ビームとの衝突による荷電交換損失考慮の必要性に起因した新たなモジュールの追加および単体での検証作業も喚起しており、a01 に続く a02 版として開発が進んでいる。TASK3D-a01 については、海外の LHD 共同研究者からの使用希望もあり、すでに使用が開始されている。海外の研究者の利便性も考慮し、TASK3D-a01 のマニュアルを英語で作成し、NIFS-Memo として発刊した。今後の後続版についても、このマニュアルに追記する形でマニュアルの整備を図っていく。

現状では、3次元平衡 (図 3.2.2.2-1 で wout と書かれている部分) は、TSMAP に基づいたものを使用しているが、LHD プラズマを活用した国際共同研究として平衡再構築研究も進展している。wout ファイルをそれら平衡再構築で得られたものと替えることで、一連の計算への 3次元平衡同定方法の影響も容易に検討することが出来る。このように、TASK3D-a01 の高い融通性を活用した波及研究の展開も期待される。新古典拡散フラックス、両極性径電場や、他の加熱 (ECH, ICH)、上述した周辺部中性粒子分布の評価などを行うモジュールを順次導入し、より高機能な LHD 実験データ解析型統合輸送コードを構築する基盤の形成に成功していると言える。数値実験プロジェクト内の様々なシミュレーション、理論モデリングの成果も、解析コードを直接、あるいはデータベースの形式で取り込んで、より高度な統合を行うことが出来る段階に至っている。

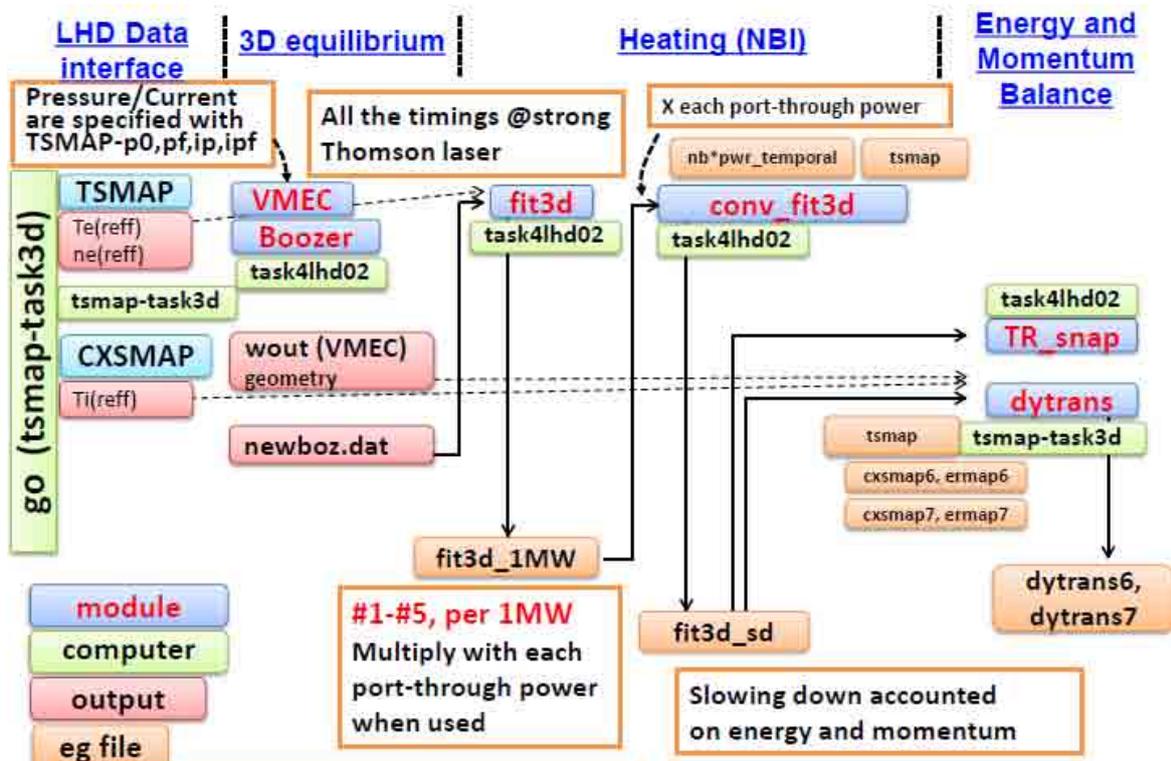


図 3.2.2.2-1 LHD 実験データ解析型統合輸送解析コード TASK3D-a01 の計算フロー概観図。赤字が個別解析コード名、緑帯に黒字が動作コンピュータ名、オレンジに黒字が LHD 解析データサーバとのデータ交換（入力/出力）。左端にある tsmap-task3d(lhd.nifs.ac.jp)が、LHD 制御室に設置した共有 PC である。そこでの、” go, #shot”でこれら一連の計算が自動的に実行され、計算結果の一部が解析データサーバに自動登録される。

3.2.2.3 到達パラメータ予測型統合輸送解析コード(p シリーズ)

一方、p シリーズについては、主に京都大学との共同研究によってその開発を進めている。密度固定の条件下ではあるが、NBI 加熱パワーを仮定し、熱輸送係数を与えて（すでに整備が行われた新古典拡散係数データベース DGN/LHD からの新古典熱輸送係数+各種異常輸送モデルに基づく異常熱輸送係数）、温度の時間発展方程式を解くことで、到達可能温度分布を予測することを可能とした。輸送モデルの差異による到達温度の変化と、予測に用いた密度や NBI 条件に対応した検証実験やこれまでの実験データとの比較を行い、LHD プラズマを記述するに適した輸送モデルを模索する研

究が展開されている（京都大学 若狭有光ら：第 23 回 IAEA 核融合エネルギー会議ポスター発表など）。これまでのところ、予測 - 検証実験のケースは少数にとどまっているが、今後のデータベースの蓄積によって、LHD プラズマの熱輸送特性に関して実験検証を経たモデルの創出、予測性能の向上がもたらされることが期待される。その研究展開を加速するために、核融合科学研究所と京都大学福山淳教授研究室との間に敷設されている専用線を用いて LHD 実験データを取得できる体制を確立した。

また、2.2.2.2 節で記したように、組織的な FFHR 炉心プラズマ解析が進行している。この過程で得られている 3 次元平衡、アルファ粒子による加熱分布、想定される NBI 加熱分布、新古典熱拡散フラックスの評価値に基づいて、逆に到達温度を予測するシミュレーションにも着手している。現状、FFHR に適用すべき妥当な異常輸送モデルなど、不明確な点が多いため、予測精度は低い状態であるが、図 3.2.2.1-1 の開発戦略概略図や 3.3.3.2 節に記したように、LHD での検証を通じた輸送モデルの妥当化、高精度化研究との連携を通じて、より精度の高い予測を可能とすることで、LHD 型核融合炉の”数値試験炉”としての役割を果たしていく基盤を形成していく。

3.3 核融合プラズマの物理機構解明

3.3.1 MHD 平衡と不安定性

・ 乱れた磁力線構造を持つ 3 次元 MHD 平衡の考察

入れ子状の磁気面構造を仮定しない 3 次元 MHD 平衡計算コード HINT2 の開発と、LHD 磁場配位についての 3 次元 MHD 平衡解析が進展した。HINT2 コードの計算結果から、ベータ値の上昇と共にプラズマ周辺部の磁力線構造がプラズマ応答により変化し、磁気島構造やストカスティックな乱れた磁力線構造が作り出されることがわかった。この、磁力線構造の変化は入れ子状の磁気面領域をベータ値の上昇と共に減少させ、平衡ベータ限界をもたらす可能性があることがわかった。

一方、HINT2 コードによる 3 次元 MHD 平衡解析の妥当性を評価するためには実験的に磁場構造を同定し、平衡解析結果と比較することが重要である。実験的に磁場構造を同定するために、プラズマ周辺部の電場構造を計測した。もし、磁力線が開いていれば、磁力線に沿って損失する電子が増加することで大きな正電場が形成されることが予想される。この作業仮説に基づき、異なるベータ値での周辺電場構造を計測し、HINT2 による 3 次元 MHD 平衡解析結果と比較した。その結果、周辺電場構造と HINT2 により予測された磁力線構造が定性的に一致した。これらの実験と数値モデリングとの比較により、3 次元 MHD モデリングの検証 (validation) が着実に進展しつつある。

この HINT2 コードによる平衡解析は低次の外部共鳴摂動 (RMP) 磁場が重畳された LHD プラズマの平衡解析にも応用されている。 $n/m=1/1$ の磁気島を持つ LHD プラズマの平衡解析を行った結果、ベータ値の上昇と共に $n/m=1/1$ の磁気島が拡大し、磁気島のセパトリックスがストカスティックになることが得られている。

HINT2 コードはヘリカルプラズマだけでなく、トカマクの MHD 平衡解析にも応用することができ、トロイダル磁場リップルや RMP 磁場を含むトカマクプラズマの 3 次元 MHD 平衡解析を行っている。

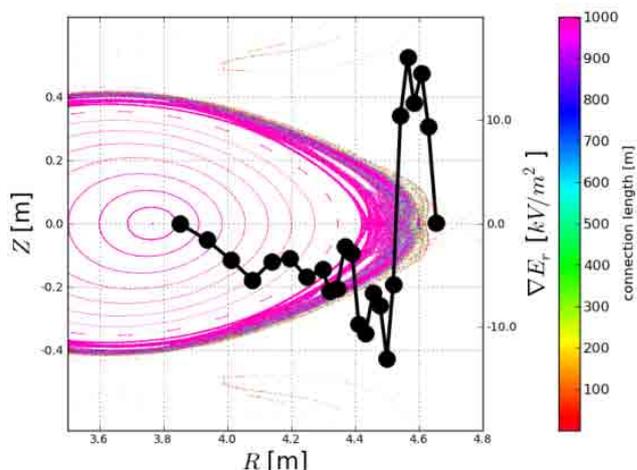


図 3.3.1-1 HINT2 コードによる平衡解析結果と電場計測結果の比較。

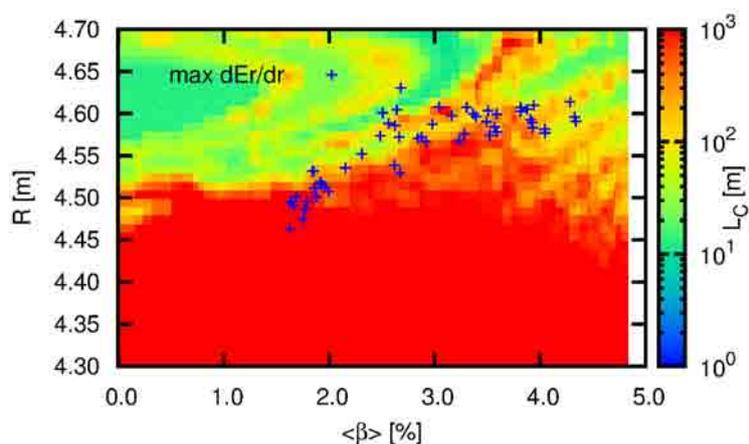


図 3.3.1-2 HINT2 コードの磁力線構造と電場計測結果の比較。

・ LHD ベータ上昇プラズマのマルチスケールシミュレーション

LHD では、真空磁気軸位置 $R_{ax}=3.6\text{m}$ の配位において、最高ベータ値が達成される良好な閉じ込めが得られている。しかし、この配位では、滑らかな圧力分布に対しては理想交換型モードに対して線型不安定であることが得られている。そこで、この安定化メカニズムを調べるために、簡約化 MHD 方程式に基づく NORM コードを用いて非線型シミュレーションを行った。この場合、どのように高ベータへ達したかが重要であるので、ベータ上昇による MHD 平衡の変化を含めた解析が必要となる。ところが、この平衡変化と摂動ダイナミクスの時間スケールの間には、 10 の 5 乗以上の差が存在する。そこで、NORM コードによる非線型ダイナミクス計算と VMEC コードによる 3 次元平衡計算を組み合わせたマルチスケール計算手法を開発し、異なる時間スケールを持つ平衡量と摂動量の時間発展を同時に取り扱うことができるようにし

た。この手法を $Rax=3.6m$ 配位の LHD プラズマに適用し、ベータ上昇効果を含む時間発展を追跡した。その結果、図 3.3.1-3 に示すように、まず、低ベータでは、摂動は生じるが駆動力が弱いため低いレベルで飽和する。このとき、共鳴面近傍では圧力分布に局所的な平坦構造が形成される。ベータ値が上昇する際には、この平坦構造も保持されるため、その共鳴面での駆動力は抑えられ、大規模な崩壊現象は回避される。図 3.3.1-4 に示すようにベータ上昇とともに、複数の共鳴面で同様の状況が生じる。このような局所平坦構造形成という自己組織化が高ベータへの安定経路を作り出していると考えられる。

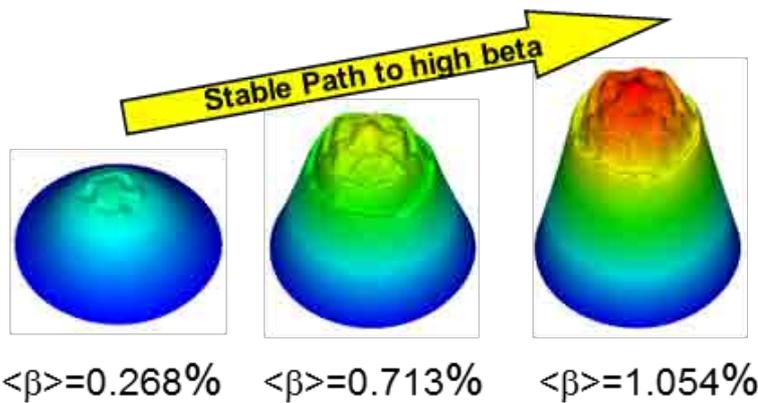


図 3.3.1-3 ベータ上昇時の全圧力分布の変化

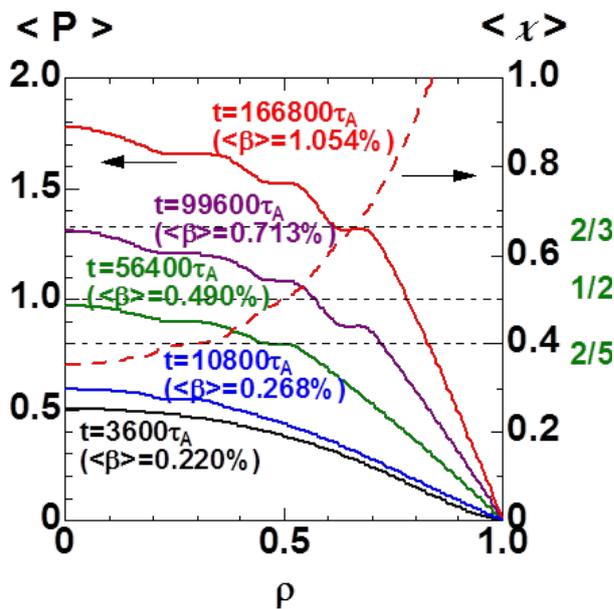


図 3.3.1-4 平均圧力分布の変化と回転変換分布。

・LHD における CDC シミュレーション

LHD の高密度コア (SDC) 配位に相当する大きな圧力勾配をもったヘリカル配位に対して非線形 MHD シミュレーションを行ない、実験でもしばしば観測される中心密度崩壊現象 (CDC) の発生ダイナミクスを探る。初期値は HINT2 コードを用いて解かれた数値平衡解により与える。MEGA-D コードにより非線形 MHD 方程式系を時空間 4 次の中心差分陽解法にて解く。MEGA-D コードは、核融合科学研究所において開発された MEGA コードの MHD ソルバー部分を HINT 系コードに対応した回転ヘリカル座標系を用いてヘリカル体系化したものである。

約 600 アルヴェン時間 (τ_A) に及ぶ長時間発展を追跡した。結果は、系全体の運動エネルギーが数度の増減を繰り返した後にエネルギー緩和している時間経過を示した。この間の横長ポロイダル断面内の圧力分布の変化を示したものが図 3.3.1-5 (a)-(c)である。はじめにトーラス外側の圧力勾配の急な部分 (バリア領域) においてバルーニングモード様の中間波数のモードが支配的となって不安定性が成長し、やがてプラズマ塊が細かく崩れて表面から剥離し、周辺部へと掃き出されている。このとき、バリア領域の構造が崩壊することにより、より急峻化された圧力分布が過渡的に形成される。それとともに、やがて中心部の圧力が初期値の 30~40%程度にまで減少し、系は緩和する。このように、原因となる不安定性がバリア領域で発生しても、その非線形成長過程において、中心圧力の減少が引き起こされることを示している。

中心圧力が減少する機構としては、磁気面の乱れにより外部領域と直結した磁力線に沿うフローが引き起こす対流損失が示される。すなわち、図 3.3.1-5(d)-(e)に示される磁力線のポアンカレ図を見たとき、 $t=300\tau_A$ 前後では、中心部まで磁気面が乱されており、この時間帯が最も中心圧力の下げ幅大きくなっていることから、中心部の磁力線が、圧力の低い周辺領域にまで直結されることにより、生じる磁力線方向の圧力勾配が圧力損失の原因となる平行流を引き起こすと考えられる。

計算結果を LHD における実験結果と比較する。時間スケールは、CDC の崩壊相のそれ (~数百 μ 壊相のそ数百 τ_A) と概ね一致している。空間構造については、周辺部からコア部に向かって密度 (圧力) 揺動が伝播する様子が計算結果とよく一致している。このように、不安定性を原因として演繹的に CDC 崩壊相の機構が説明できる。

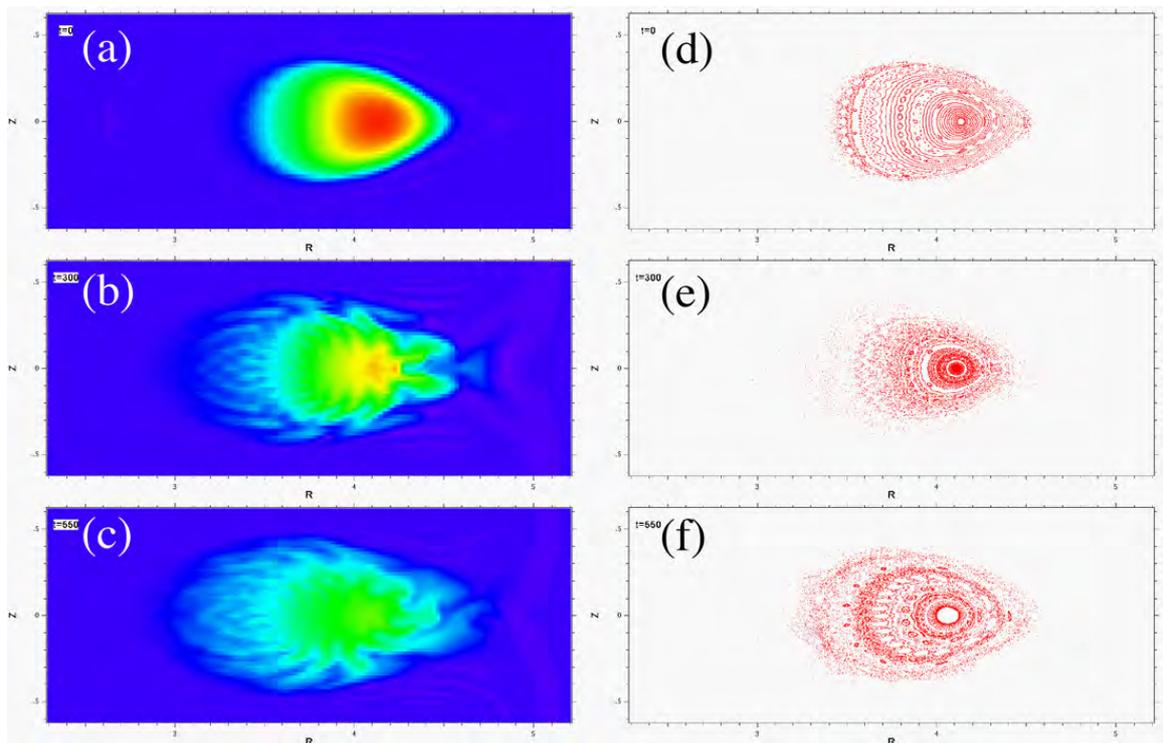


図 3.3.1-5 (a)-(c)圧力分布および(d)-(f)磁場の時間発展。

・ 圧力駆動型不安定性と二流体効果

MHD 不安定性の中でも圧力駆動型不安定性は、短波長モードほど成長率が高いため、その成長と非線形飽和は重要かつシミュレーションが困難な課題である。LHD に関する線形解析では磁気軸位置が 3.75m より内側にある程に不安定とされていたのに反して実験では高ベータ値が達成され、このために圧力駆動型モードの安定化（あるいは不安定モードの影響の低減）機構の解明は重要課題である。そこで高精度の 3 次元 MHD シミュレーションにより、磁気軸位置 3.6m、中心 β 値 4% の場合について短波長モードの飽和メカニズムを調べた。

シミュレーションでは図に示すようなバルーニング的な構造が現れ、中程度の波数（トロイダル波数 $n=15$ 程度）まで、線形安定性解析の結果と良く合致する事が示された。さらに、短波長モードの安定化には、圧力分布の平坦化や圧縮性の効果よりもむしろ、磁力線に平行方向の熱伝導（これには線形効果、非線形効果の両者が含まれる）が最も効果的であることが明らかになった。他方、このようなバルーニング不安定性では長波長から短波長までの多数の不安定モードが成長するため、これら全ての効果を組み合わせてもコア中心部で相当程度の圧力低下が発生し得ること、したがっ

て、既存の MHD の枠組みでは不安定性の温和な非線形飽和の説明が困難であることが明らかになった。

十分な安定化が得られたとされるシミュレーションには比較的大きな磁力線垂直方向への熱伝導が用いられている事が多いが、他方で大きな垂直方向熱伝導は Braginskii による衝突性の流体方程式の理論でも正当化できない。これに代わって、十分な安定化を物理的に妥当な形でもたらし得る機構としては二流体効果による安定化（線形成長率の低減と乱流化による熱輸送）が考えられる。二流体効果による安定化の研究の第一歩としてイオンスキン長効果を取り入れた拡張 MHD 方程式によるシミュレーションを実施した。この結果は、長波長モードの成長率を増加させる点で既存の 2 次元拡張 MHD シミュレーションの結果と首尾一貫した結果が得られており、2 次元シミュレーションの知見を基にした 3 次元シミュレーションの展望に目処をつけた。

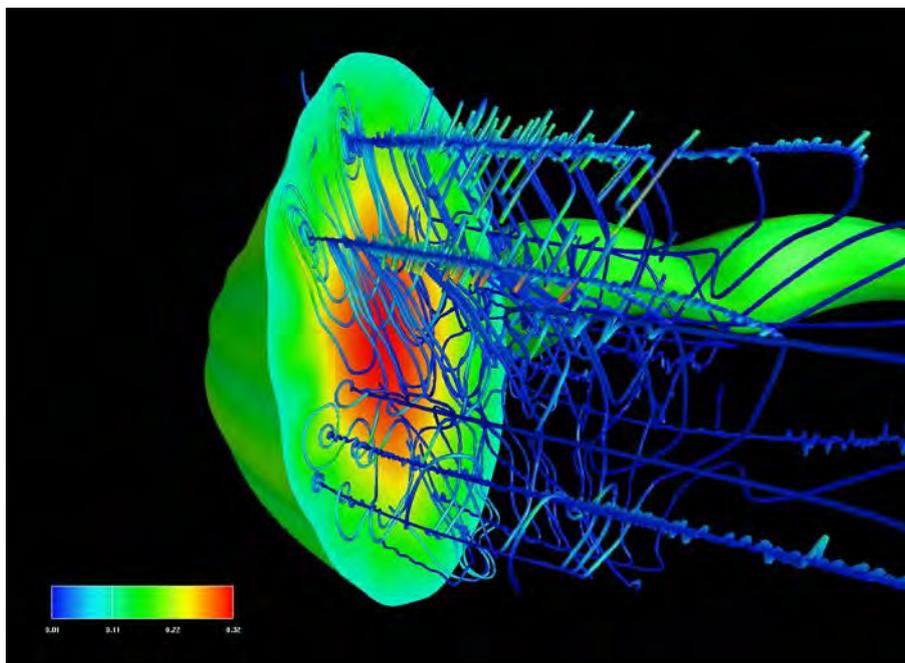


図 3.3.1-6 LHD プラズマにおけるバルーニングモード。カラーマップの赤は高い圧力、緑は低い圧力を示す。青の線はプラズマの流線を示し、螺旋状の形状がバルーニングモードによる渦を示している。

・高 β LHD プラズマに対する非線形 MHD シミュレーション

高ベータ LHD プラズマにおいては、プラズマ周辺部が磁気丘のためメルシエ不安定であるが、近年の LHD 実験にて約 5% の体積平均ベータ値を持つ安定な高ベータプラズマが得られている。そこで本研究では、LHD にて安定な高ベータプラズマが得られるメカニズムの解明のため、MIPS コードを用いて高ベータ LHD プラズマに対する非線形 MHD シミュレーションを実施した。これまでに行われてきた LHD に対する非線形 MHD シミュレーションは低ベータ領域に限られており、高ベータ領域に対するシミュレーションは本研究が初めてである。LHD プラズマでは、ベータ値が上昇するにつれて最外殻磁気面の外側に存在する磁力線がカオス的な領域が拡大するため、最外殻磁気面を固定境界として計算することは不適切である。そのため、本計算では磁力線がカオス的な領域も含めてシミュレーションを行っている。本研究では中心ベータ値が 7.4%, 9.4%, 11% の 3 種類の MHD 平衡に対して解析を行った。線形成長率を比較すると、中心ベータ値が 11% の場合に線形成長率をもっとも小さくなった。中心ベータ値が 9.4%, 磁気レイノルズ数が $S=10^6$ のときのポロイダル断面における圧力分布の時間変化の様子を図 3.3.1-7 に示す。非線形の初期段階まではプラズマ周辺部にて MHD 不安定性が発生し、周辺部にて圧力分布の平坦化が生ずる。しかしながら、最終的にはプラズマ中心部まで不安定性の影響がおよび、プラズマ中心の圧力が低下することがわかった。図 3.3.1-8 では Boozer 座標系にてスペクトル展開して得られた $(m,n)=(0,0)$ 成分の圧力分布を初期状態及び飽和状態に対して示している。飽和状態ではプラズマ中心の圧力が低下しているものの、初期ベータ値が高いほど飽和状態においても高ベータを維持していることがわかる。これらのシミュレーション結果から、高ベータ LHD プラズマにおいては、ベータ値が高いほど MHD 不安定性が抑制される傾向にあることがわかった。

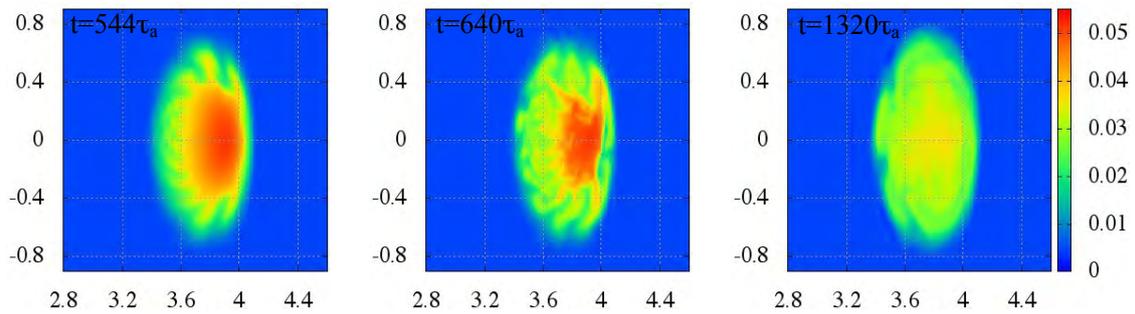


図 3.3.1-7 ポロイダル断面における圧力分布の時間発展の様子。初期の中心ベータ値が 9.4% の MHD 平衡を用い、 $S=10^6$ を仮定した。

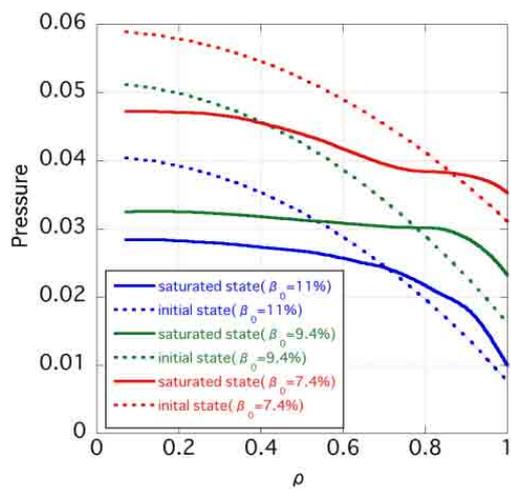


図 3.3.1-8 $S=10^7$ での、初期状態と飽和状態における圧力分布の $(m,n)=(0,0)$ 成分。初期の中心ベータ値 β_0 が 7.4%, 9.4%, 11% の 3 つの平衡に対して示している。

・LHD 磁気軸スイング実験のマルチスケールシミュレーション

LHD 実験では、真空磁気軸位置 (R_{ax}) 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。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 $R_{ax}=3.6\text{m}$ から 3.5m まで内側へスイングさせている。このとき、 $R_{ax}=3.55\text{m}$ 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、NORM コードを用いた非線型 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、平衡磁場計算と非線型ダイナミクス計算を組み合わせたマルチスケール手法を用いた。

このシミュレーションによって、実験結果に対応した結果が得られている。すなわち、磁気軸スイングを行った場合では、摂動の非線型飽和時に図 3.3.1-9 に示すようなコア領域の圧力崩壊が生じることが再現された。また、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わかった。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、磁気井戸/磁気丘の影響を受ける。一方、内寄せ磁気軸スイングを行うと、図 3.3.1-10 に示すように磁気丘が強くなる。従って、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。

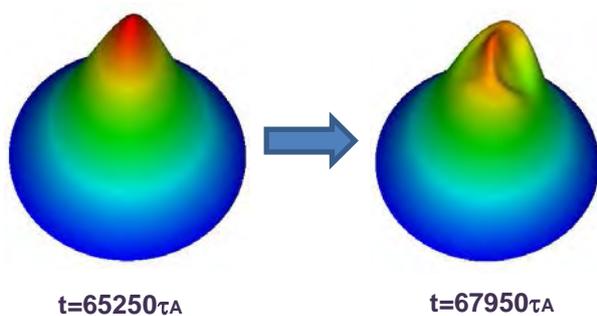


図 3.3.1-9 磁気軸スイングによる圧力分布の鳥瞰図の変化。

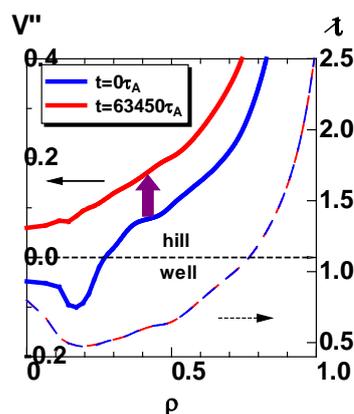


図 3.3.1-10 磁気軸スイング時の磁気井戸の変化と回転変換分布。

・ペレット溶発により生じるプラズモイドの挙動解析

LHD プラズマにおけるペレット入射による効率的粒子補給手法の探究を目的として、MHD シミュレーションによるプラズモイドの挙動の解析を行った。図 3.3.1-11 に示すように外側入射によってプラズモイドがトーラス外側に形成された場合には、プラズモイドは大半径外向きにドリフトする。これに対し、内側入射によってプラズモイドがトーラス内側に形成された場合には、非常に短い変位で大半径方向に振動する結果が得られた。形成される場所によるプラズモイドの挙動の違いは、磁力線の結合長の違いに起因していることを示した。また、プラズモイドの反磁性効果により発生する磁場揺動のダイポール磁場が、上述のプラズモイドの振動を引き起こすことも明らかになった。LHD とトカマクにおけるプラズモイドの挙動との違いは結合長の違いにより説明できる。さらに真空磁場、および RFP におけるプラズモイドの挙動も結合長により説明できることを示した。つまり様々な磁場配位においてプラズモイドの挙動を統一的に理解することができた。

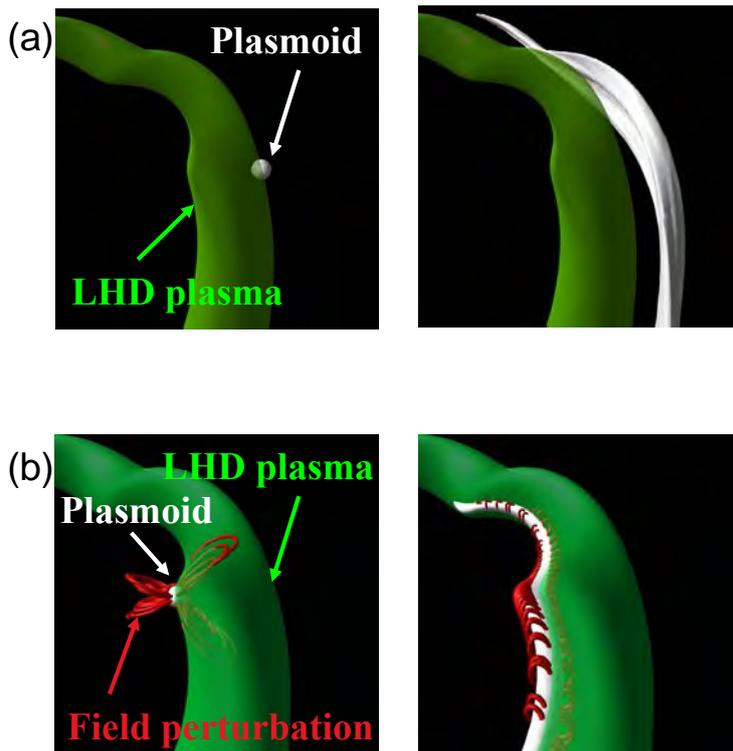


図3.3.1-11 LHDプラズマにおけるプラズモイドの挙動。(a)及び(b)はそれぞれプラズモイドの初期位置がトーラス外側及び内側に位置している場合を示す。左図は初期状態、右図は時間発展後の状態を表す。

3.3.2 コアプラズマの粒子・熱輸送

・ヘリカル系プラズマにおけるゾーナルフローと乱流輸送

LHD に代表されるヘリカル系プラズマにおいては、その非軸対称性により、トカマクには見られない効果が乱流輸送においても発現する。特に、ゾーナルフローの振る舞いは、ヘリカル捕捉粒子の影響を強く受ける。これまでに Sugama、Watanabe らは、解析理論およびジャイロ運動論的シミュレーションによって、ヘリカル系プラズマにおけるゾーナルフロー応答関数を詳細に調べた[1-8]。その結果、まず、実効的なヘリカル・リップル成分の小さな LHD 内寄せ配位において、ゾーナルフロー応答関数の振幅は、標準配位に比べより高くなり、強いゾーナルフローが作られ得ることが明らかになった[1-3]。これを受けて、イオン温度勾配(ITG)乱流のジャイロ運動論的シミュレーションを行った結果、内寄せ配位において強いゾーナルフローが生成され(図 3.3.2-1)、乱流輸送が抑制されることが示された[4,5]。

一方、LHD などのヘリカル配位では、新古典輸送によって形成される巨視的径電場がプラズマの自発的なポロイダル回転を引き起こす。この径電場により、捕捉粒子軌道が改善され、ゾーナルフロー応答関数がさらに増大することがより最近の研究で示された[5-8]。図 3.3.2-2 に、ジャイロ運動論的シミュレーションで得られた測地的音響モード(GAM)減衰後の残存ゾーナルフロー振幅のポロイダル・マッハ数依存性を示す。マッハ数に応じてゾーナルフロー応答が増大することが確認された[8]。これはまた、イオン温度が同じ場合、質量数の大きな同位体プラズマにおいて実効的なマッハ数が増大し、その結果、より強いゾーナルフローが生成されることを示唆している。この研究は、さらにフラックス・チューブ・バンドルを用いた径電場-ゾーナルフロー-ITG 乱流のマルチスケール・シミュレーションへと発展している[9]。

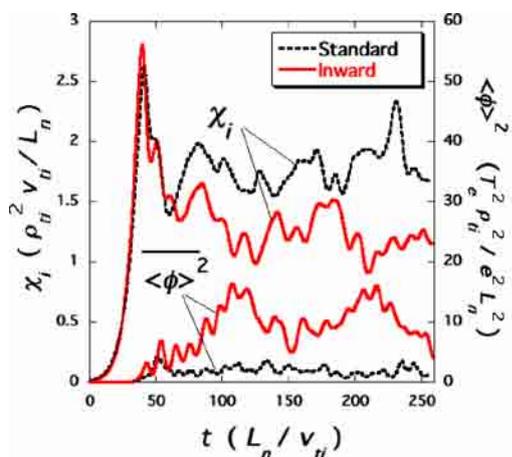


図 3.3.2-1 LHD の内寄せ (赤) および標準 (黒) 配位を対象とした ITG 乱流輸送シミュレーション結果。イオン熱輸送係数とゾーナルフロー・ポテンシャルの時間発展を示す。内寄せ配位においてより強いゾーナルフローが生成され、乱流熱輸送が低下していることが分かる(文献 [4,5])。

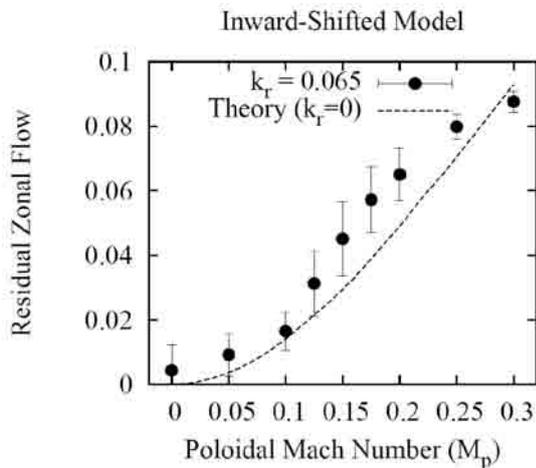


図 3.3.2-2 径電場がある場合のゾーナルフロー応答関数のポロイダル・マッハ数依存性。GAM 振動減衰後、径電場効果によりゾーナルフロー応答関数が増大することが、理論（破線）とシミュレーション（黒丸）により確かめられた[8]。

- [1] Sugama H and Watanabe T H 2005 Phys. Rev. Lett. **94** 115001
- [2] Sugama H and Watanabe T H 2006 Phys. Plasmas **13** 012501
- [3] Ferrando-Margalet S, Sugama H and Watanabe T H 2007 Phys. Plasmas **14** 122505
- [4] Watanabe T H, Sugama H and Ferrando-Margalet S 2008 Phys. Rev. Lett. **100** 195002
- [5] Sugama H, Watanabe T H and Ferrando-Margalet S 2008 Plasma Fus. Res. **3** 041
- [6] Sugama H and Watanabe T H 2009 Phys. Plasmas **16** 056101
- [7] Sugama H, Watanabe T H and Nunami M 2010 Contrib. Plasma Phys. **50**, 571-575
- [8] Watanabe T H, Sugama H and Nunami M. 2011 Nucl. Fusion **51** 123003
- [9] T.-H. Watanabe et al., 24th IAEA Fusion Energy Conference, TH/8-1.

・ゾーナルフローと乱流の相互作用過程の解析

乱流により生成されたゾーナルフローが、特にイオン温度勾配(ITG)乱流による熱輸送の抑制に重要であることがトカマクおよびヘリカルプラズマのジャイロ運動論的シミュレーションで指摘されてきた。ゾーナルフローがもつシアによる乱流渦の変形・伸張が輸送抑制に有効に働くと考えているが、ジャイロ運動論に基づいたその定量的評価はこれまでに十分なされてこなかった。Nakataらは、エントロピー伝達関数を用いて、ITG乱流やETG（電子温度勾配）乱流とゾーナルフローの相互作用を解析することに成功した[1]。その結果、ITG乱流により生成された強いゾーナルフローは、波数空間において乱流揺動との相互作用を連鎖的に引き起こし、動径方向波数空間に広がった乱流スペクトル分布を作り出すことが明らかになった。図 3.3.2-3 は、ある特定の波数をもつ乱流揺動に対するエントロピー伝達関数を示している。この乱流成分に関わるエントロピー揺動は、ゾーナルフローおよび他の乱流成分と3成分相互作用

用を介して、動径方向波数のより高い領域へと運ばれる。また、同様の現象は LHD の内寄せ配位においても現れ、標準配位よりも動径方向波数空間にやや広いスペクトル分布を示すことが確かめられた[2]。さらに、LHD 実験配位を用いたシミュレーションにおいても同様の ITG 乱流スペクトルが見出され、ゾーナルフローと乱流との相互作用の強さを表す指標として注目されている[3]。

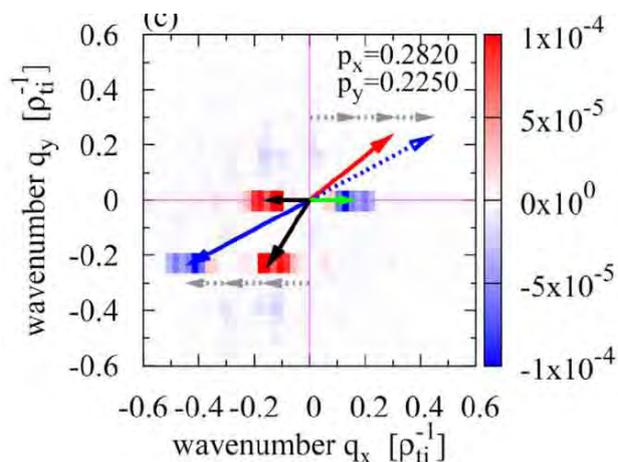


図 3.3.2-3 ITG 乱流におけるエン트로ピー伝達関数の一例。ゾーナルフロー ($q_y=0$) と乱流揺動が 3 成分相互作用を形成し、より動径方向波数(q_x)の高い成分へとエン트로ピー揺らぎが運ばれる様子が初めて明らかとなった[1]。

[1] M. Nakata, T.-H. Watanabe, and H. Sugama, Phys. Plasmas **19**, 022303 (2012).

[2] T.-H. Watanabe, H. Sugama, M. Nunami, K. Tanaka, and M. Nakata, Plasma Phys. Control. Fusion (in press).

[3] M. Nunami, T.-H. Watanabe, H. Sugama, K. Tanaka, Phys. Plasmas **19**, 042504 (2012).

・運動論的流体シミュレーションによるゾーナルフローの研究

流体シミュレーションは、運動論的シミュレーションに比べて、計算容量・計算時間が少なくすむため、パラメーターサーベイやまた階層連結シミュレーション等への応用に適しているが、流体シミュレーションにより運動論に基づく乱流輸送シミュレーションの結果を定量的に正しく再現するためには、運動論的効果を正確に取り入れたクロージャーモデルを用いる必要がある。乱流輸送に大きな影響を与えるゾーナルフローの時間発展を正確に記述するためのクロージャーモデル[Sugama, Watanabe & Horton, Phys. Plasmas **14**, 022502 (2007)]が、ジャイロ運動論的方程式の解析解から導かれ、Rosenbluth & Hinton [Phys. Rev. Lett. **80**, 724 (1998)]によって予測された残留ゾーナルフローレベルが、このモデルによって再現されることが示された。さらに、このクロージャーモデルを用いた運動論的シミュレーションを実行することにより[Yamagishi & Sugama, Phys. Plasmas **19**, 092504 (2012)]、非円形断面トカマクの楕円度・

三角度が残留ゾーナルフローに与える影響やイオン温度勾配(ITG)モード・捕捉電子モード(TEM)・電子温度勾配(ETG)モードそれぞれの作り出すゾーナルフローの残留レベルの違いを明らかにした(下図参照)。

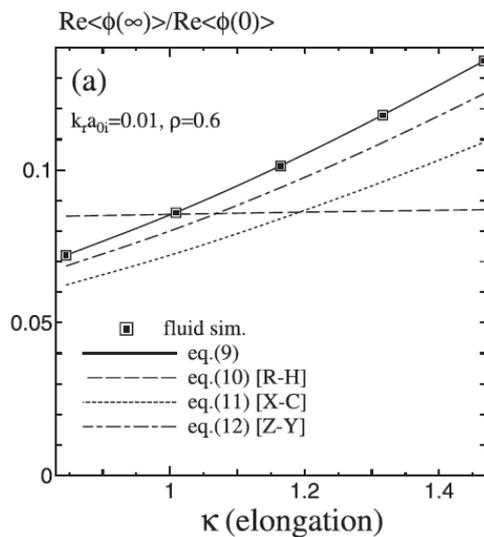


図 3.3.2-4 残留ゾーナルフローレベルのトカマク楕円度に対する依存性 [Yamagishi & Sugama, Phys. Plasmas **19**, 092504 (2012)].

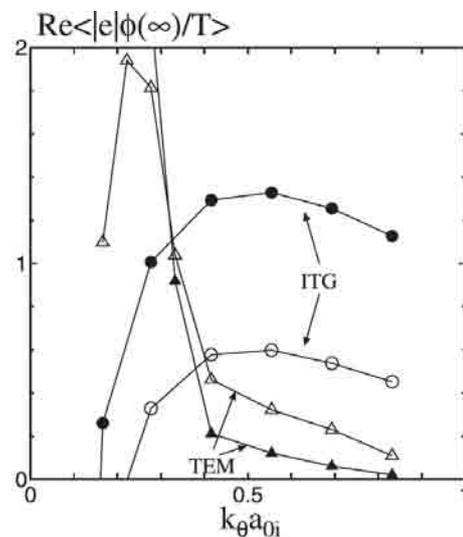


図 3.3.2-5 ITGモードとTEMをソース不安定性として駆動されたゾーナルフローの残留レベル。横軸はソース不安定性のポロイダル波数 [Yamagishi & Sugama, Phys. Plasmas **19**, 092504 (2012)].

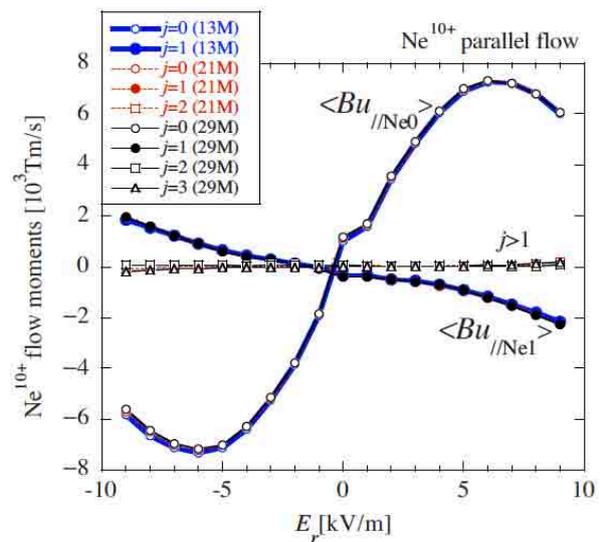
・新古典輸送係数を与えるモーメント法の定式化

モーメント法に基づき、非軸対称系を含むトーラスプラズマにおける粒子・熱輸送・ブートストラップ電流・プラズマ流速に対する新古典輸送係数を与える新しい計算方法[Sugama-Nishimura Method (2002,2008)]を構築した。DKESに代表される従来の新古典輸送計算コードでは、衝突項としてピッチ拡散散乱項だけを用い、運動量保存を満足せず、軸対称性や準対称性をもつ系での新古典粒子拡散が有する本質的な両極性を再現できず、またイオン温度勾配と電子熱輸送のような異種粒子間の熱力学的力と新古典輸送フラックスを関係づける非対角成分の輸送係数を計算できない等の欠点があった。Sugama-Nishimura Methodは、DKES等での計算結果に、厳密なLandau

衝突項を含むドリフト運動論的方程式から得られるモーメント方程式の結果を組み合わせるにより、一般的なトーラス磁場配位における多種粒子からなるプラズマに対して、オンサーガー対称性を満たす完全な新古典輸送係数行列を与え、また別のモーメント法(Taguchi 1992)との違いを明らかにし、モーメント次数を増やすことにより精度を高める方法も示した。

図 3.3.2-6 に、Sugama-Nishimura Method を用いた計算例を示す。この計算例では、水素とネオンのイオンおよび電子からなる LHD プラズマを扱い、図には、磁力線方向の Ne^{10+} の粒子および熱の流れの小半径方向電場に対する依存性が示されているが、他にもブーツトラップ電流、全粒子種の磁気面に沿った流速や磁気面垂直方向の粒子・熱輸送フラックスを計算することができる。Sugama-Nishimura Method は、ヘリカル系プラズマの一般的な新古典輸送計算方法として注目され、その定式化を行った 2 つの論文 Phys. Plasmas (2002,2008) は合計 65 回引用(2012 年 10 月 Scopus 調べ)されている。また、Sugama-Nishimura Method は、オークリッジ国立研究所の新古典輸送計算コード PENTA(D.Spong, Nucl.Fusion 2007)の基本原則として採用され、HSX、TJ-II 等の様々なヘリカル型装置の新古典輸送計算に応用されている。

図 3.3.2-6 LHD プラズマにおける磁力線方向の Ne^{10+} の粒子流 $\langle Bu_{\parallel \text{Ne}0} \rangle$ と熱流 $\langle Bu_{\parallel \text{Ne}1} \rangle$ の小半径方向電場 E_r に対する依存性の計算例[S. Nishimura *et al.*, Phys. Plasmas **17**, 082510 (2010)]



[1] H. Sugama and S. Nishimura, Phys. Plasmas **9**, 4637 (2002).

[2] H. Sugama and S. Nishimura, Phys. Plasmas **15**, 042502 (2008).

[3] S. Nishimura *et al.*, Phys. Plasmas **17**, 082510 (2010).

・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）を用いてELM制御を行う場合において、RMPによって生じたエルゴディック領域におけるプラズマ輸送の基本的な性質を理解することは、プラズマの閉じ込め性能の改善に重要である。低衝突領域におけるトロイダルプラズマの衝突輸送現象に対するRMPが与える影響について、核融合科学研究所プラズマシミュレータを用いて δf 法に基づくドリフト運動論的シミュレーションコード（KEATS）による研究を行った。背景プラズマの密度・温度分布を固定、電場・平均速度は無視する仮定の下でRMPを印加した場合、動径方向のイオン熱拡散係数 χ_r は、図3.3.2-7のように、新古典熱拡散係数 χ_r^{NC} より大きな値になった。そこで、RMPの強度に対する依存性を調べたところ、図3.3.2-8のように、RMPの強度の自乗に比例し、 $\chi_r = \chi_r^{NC} \{1 + c \langle \|\delta B_r\|^2 \rangle / |B_{t0}|^2\}$ のようにモデル化できることが分かった。ここに、 $\langle \|\delta B_r\|^2 \rangle^{1/2}$ はRMPの強度、 $|B_{t0}|$ は磁気軸における磁場強度、 c は係数である。

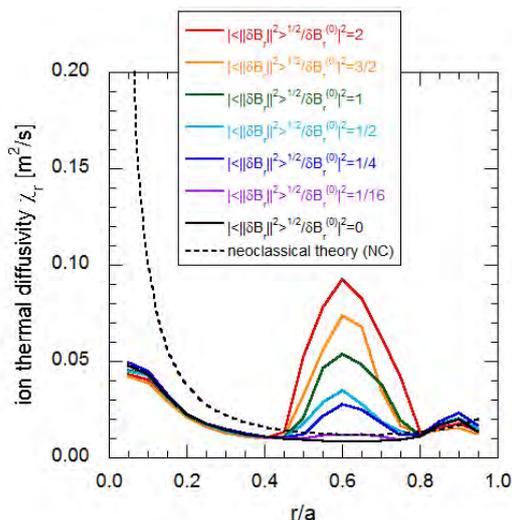


図 3.3.2-7 円形トカマクプラズマにおける熱拡散係数。RMP を $r/a=0.5\sim 0.75$ を中心に印加している。ここで、 $|\delta B_r(0)| \sim |B_{t0}|/100$ であり、破線は新古典熱拡散係数(理論値)である。磁気軸周辺では、輸送に寄与する粒子軌道が新古典理論の想定とは異なるため、シミュレーション結果と理論値とにずれが生じる。

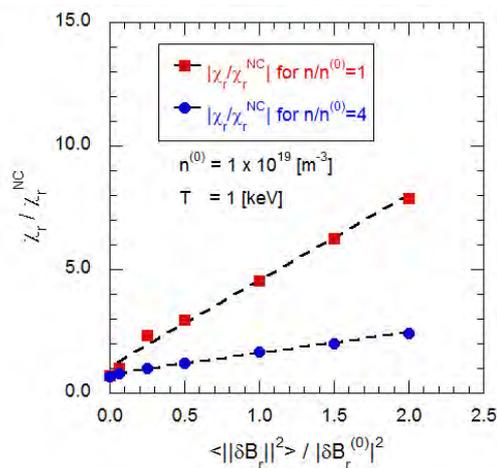


図 3.3.2-8 RMP を印加した円形トカマクプラズマにおける熱拡散係数 χ_r と新古典熱拡散係数 χ_r^{NC} の比。衝突周波数の違いから、グラフの傾きは異なるが、両ケースとも RMP の強度の自乗に比例することが分かる。

・超高密度コアプラズマに関する輸送モデリング、ヘリカルプラズマにおける帯状流による輸送障壁形成機構

輸送モデル方程式の理論解析を内部拡散障壁について行う。異常輸送について、電場の勾配によってその値が低減する。実験におけるペレット入射と対応させて、数値計算において付加的な粒子源をプラズマに与えている。この付加的な粒子源を過渡的に与えることにより、解析結果として密度分布の中で急峻な勾配を得ることができている。(図3.3.2-9) つまりこの解析結果はLHDで観測されている高密度プラズマ(SDC)での内部拡散障壁(IDB)を理論予測するものである。本解析では付加的な粒子源を入れた領域で温度分布が正の勾配を持つ。高密度で電子温度とイオン温度がほぼ等しいプラズマパラメータ領域でも、正の電場を得ることができる。従って電場の勾配を得ることができ異常輸送の低減を理論解析結果から予測でき、密度勾配に急激な変化を得ることができた。その解析結果によって密度分布に急峻な勾配が得られる付加的な粒子源の値やその分布の閾値を求める。時刻 $t=10\text{ms}$ で密度勾配の急激な変化が $\rho=\rho_T$ で見られる。

また乱流抑制機構の一つとして帯状流の衝突減衰効果を一次元輸送方程式に取り入れて数値解析を行った。実験で観測されているような内部輸送障壁に対応するようなプラズマ内部での広い領域での熱伝導係数の低減を理論解析結果で示す(図3.3.2-10)。実線が電子の熱拡散係数の新古典輸送と異常輸送部分を足したもので、波線は異常輸送部分のみの径方向分布を表している($\rho=r/a$)。 ρ_T は電場の遷移が起こる径方向の点を表している。電場の急峻な勾配により熱伝導係数はその狭い領域で低減する。さらに、その内部でも強い正電場により帯状流が励起され異常輸送係数が低減することを示すことができた。新古典輸送を足した全体の熱伝導係数で電場の遷移点よりも内側で顕著な低減を見ることができ、温度分布にも急峻な勾配を得ることができ、この解析結果が、実験で観測されている電子内部輸送障壁(ITB)の理論的予測になっている。

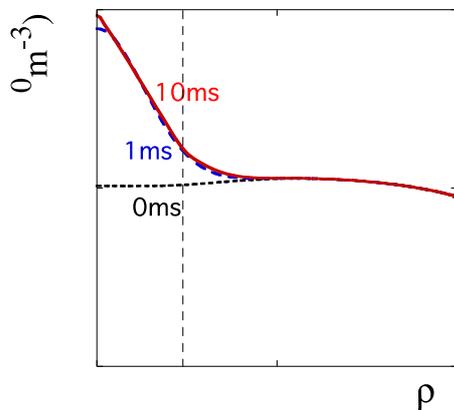


図 3.3.2-9 付加的な粒子源を入れた際の密度分布の時間発展

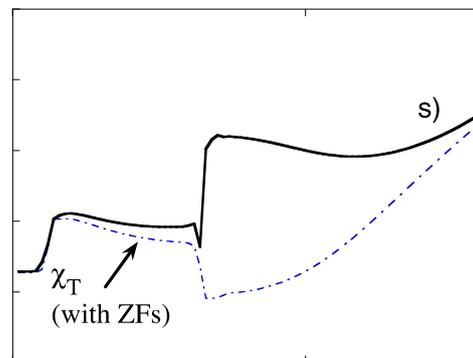


図 3.3.2-10 帯状流の効果を入れた輸送解析の結果

・有限ベータプラズマにおける乱流輸送

プラズマベータが有限な場合、イオン温度勾配不安定性が駆動する乱流 (ITG 乱流) は安定化される傾向がある。典型的な計算では、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。その一方、ベータ値が 1% を超えると補足電子モードまたは運動論的バ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。この有限ベータプラズマにおける乱流輸送をジャイロ運動論シミュレーションおよび二流体シミュレーションで解析した。

・ジャイロ運動論シミュレーション

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、核融合科学研究所における従来のジャイロ運動論シミュレーションコードを拡張し、電子の運動および磁場揺動を導入した。その結果、電子の運動を取り入れることにより熱輸送のみならず粒子輸送の評価が可能になった。また、粒子・熱輸送に対する磁場揺動の寄与も評価可能になった。図 3.3.2-11 は LHD の有限ベータプラズマにおける乱流輸送を初めて示したものである[1]。LHD 標準配位の計算では乱流の初期飽和状態が得られており、粒子・熱輸送はジャイロボーム単位で約 1.5 である。そしてこれらの輸送は主に静電揺

動によって生じる。磁場揺動による粒子・熱輸送はすべて負であり、磁場揺動のピンチ効果が明らかになった。典型的なトカマクの場合も同様に静電揺動による粒子・熱輸送が大きく、ジャイロボーム単位で約 0.6 である。また、磁場揺動はピンチ効果を持つ。

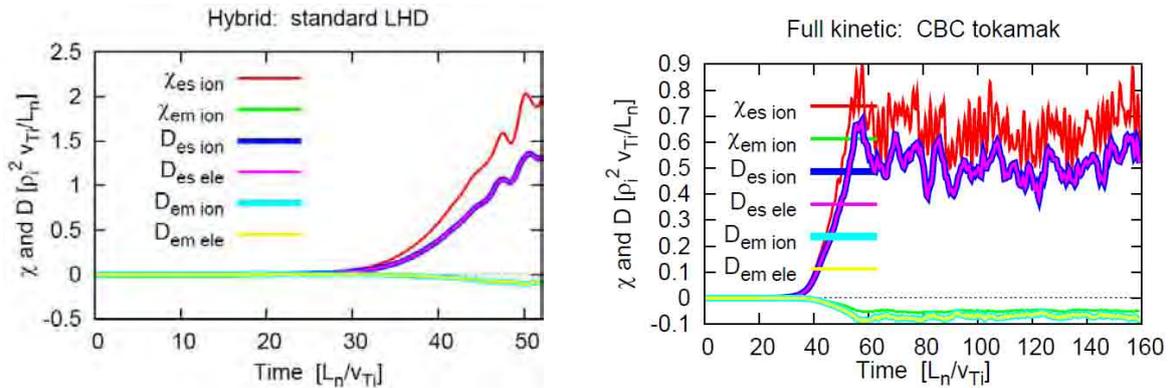


図 3.3.2-11 LHD 標準配位 (左図) と典型的なトカマク (右図) のプラズマベータ 2% における乱流による粒子・熱輸送。 χ : 熱輸送係数、 D : 粒子輸送係数、添え字 es: 静電揺動による輸送係数、添え字 em:磁場揺動による輸送係数、添え字 ion:イオンの輸送、添え字 ele:電子の輸送。

二流体シミュレーション

プラズマベータが 1% 以上の高ベータトーラスプラズマでは、通常、乱流は電磁的不安定性によって駆動される。また、乱流と巨視的 MHD 不安定性との相互作用は非局所的輸送を引き起こす可能性がある。外部加熱によって生じる電磁的乱流および巨視的 MHD 不安定性による電磁揺動を自己矛盾無く解く乱流熱輸送の 3 次元二流体シミュレーションを行った。二つの状況を考えた。一つは磁気島が現れない場合、もう一つは磁気島が現れる場合である。第一の場合、加熱に対する分布の硬直性を示すとともに、加熱が非常に強い場合は硬直性が破れることを示した。第二の場合、磁気島が現れた後に磁気島近傍で熱輸送が増大することおよび高熱輸送領域が広がることを明らかにした。また、磁気島近傍でゾーナル流の分布が変化することを示した (図 3.3.2-12) [2]。

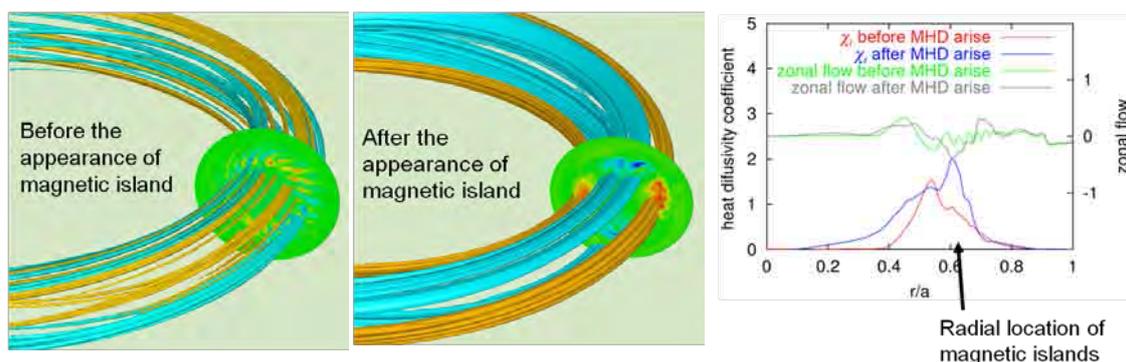


図 3.3.2-12 電磁的乱流（運動論的バルーニングモード）による乱流熱輸送。磁気島が現れた後、乱流と磁気島の相互作用により磁気島近傍で熱輸送係数が大きくなるとともにその分布も広がった。

[1] A. Ishizawa, et al., 24th IAEA Fusion Energy Conference, TH/P2-23.

[2] A. Ishizawa and N. Nakajima, Nuclear Fusion 49, (2009) 055015.

・新古典プラズマ流による磁気島のセルフヒーリング

LHD において、共鳴磁場摂動(RMP)によって印可される磁気島が自発的に消滅するセルフヒーリングと呼ばれる現象が観測されている。この現象は学術的に興味深い対象であると同時に、RMP を重畳したダイバータ配位を実現する上で理解すべき課題となっている。実験計測においては、セルフヒーリングの際に磁場揺動位相やプラズマ流分布が時間的に急峻に変化する様子が観測されている。LHD における磁気島を記述するためには、ヘリカル新古典拡散、MHD 平衡、背景乱流などの効果を考慮する必要がある。また、低い電気抵抗における長時間放電など、3次元シミュレーションでは困難な条件を取り扱う必要がある。

これらの問題を克服するために少数自由度モデルが構築され、シミュレーションコードが開発された[1]。少数自由度モデルは、磁気島幅に対する修正ラザフォード方程式、磁気島の回転周波数に関する式、ExB ドリフト速度の径分布の発展方程式により構成される。このモデルを LHD のパラメータ領域で解いた結果を図 3.3.2-13 に示す。新古典プラズマ流が存在する場合、RMP にロックされた磁気島に粘性トルクがかかり、磁気島の位相が RMP の位相からずれ、位相差が臨界値に達した時にセルフヒーリングが発現する。このように、新古典プラズマ流による磁気島の回転を考慮した場合、磁気島の飽和状態は非線形分岐を伴うことが明らかになった。また、新古典粘性

およびステラレータ平均曲率を含む簡約化流体シミュレーションを実施した結果、セルフヒーリングが発現することが再確認された[2]。少数自由度モデルと流体シミュレーションとの比較から、曲率効果がセルフヒーリングの発現条件に影響を与えることが示された[3]。

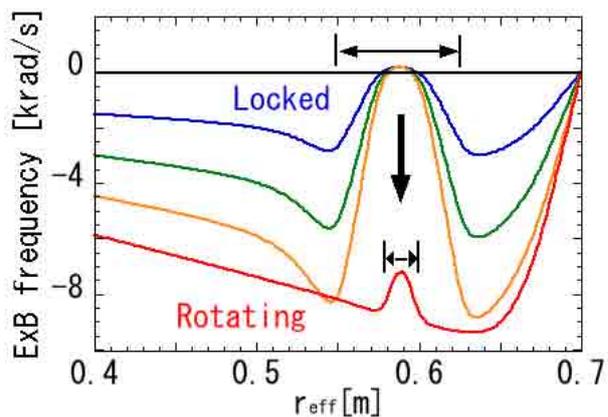


図 3.3.2-13 LHD における ExB ドリフト回転周波数の実効的小半径方向分布。RMP の強度を固定し、ExB ドリフト速度を増加した場合のシミュレーション結果を示す。磁気島の最大幅を両矢印で示す。

- [1] S. Nishimura et al., Plasma and Fusion Res. **5**,040 (2010).
- [2] S. Nishimura, S. Toda et al., Plasma and Fusion Res. **5**,040 (2012).
- [3] S. Nishimura, S. Toda et al., to appear in Plasma Phys. Controlled Fusion.

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。本節ではその成果の中から、(1) アルフベン固有モード時間発展と帯状流形成に対する非線形 MHD 効果、(2) 非線形 MHD 効果を考慮したアルフベン固有モードバーストのシミュレーション、(3) 高エネルギー粒子駆動型測地的音響モードと非線形周波数変調について報告する。

(1) アルフベン固有モード時間発展と帯状流形成に対する非線形 MHD 効果

トロイダルモード数 $n=4$ のトロイダルアルフベン固有モード(TAE)を対象として高エネルギー粒子-MHD連結シミュレーションを実行した。非線形MHD効果を明らかにするために、MHD方程式を非線形のまま解く通常のシミュレーションに加えて、線形MHD方程式を用いたシミュレーションを実行し、TAEの時間発展を比較した。その結果、飽和レベルが $\delta B/B \sim 10^{-2}$ に達すると、非線形MHDシミュレーションではTAEの飽和レベルが線形MHDシミュレーションの約1/2に抑制されることがわかった[図3.3.3-1]。一方で、飽和レベルが $\delta B/B \sim 10^{-3}$ の場合には、線形MHDシミュレーションと非線形MHDシミュレーションの結果はほぼ同じである。TAE不安定性の飽和後に測地的音響モードが励起されることを見出した[図3.3.3-2]。

この飽和レベル低減の物理機構を理解するため、各トロイダルモード数(n)から生じる散逸の時間発展を解析した。その結果、帯状流を含む $n=0$ モードおよび $n=8, 12, 16, \dots$ の非線形高調波から生じる散逸が増大し、TAE モードの飽和レベルを低減することがわかった。MHD モデルにおける散逸は粘性係数および電気抵抗に依存するので、これらの散逸係数の値が小さい場合について数値解像度を向上させたシミュレーションを実行した。散逸係数の大きい場合と同様に非線形モードによる散逸が増大し TAE モードの飽和レベルが低減したので、散逸係数が小さい現実の核融合プラズマにおいても MHD 非線形性による飽和レベルの低減が期待される。 $n=0$ の帯状流と帯状磁場の分布を図 3.3.3-3 に示す。 $n=4$ アルフベン連続スペクトルの TAE ギャップに局在する帯状流が形成されていることがわかる。さらに、 $n=8$ の非線形高調波の散逸機構を理解するために、その空間分布をポロイダルモードごとに解析した。 $n=8$ の非線形高調波の空間分布を図 3.3.3-4 に、各ポロイダルモード数の最大振幅位置を $n=4, 8$ のアルフベン連続スペクトルとともに図 3.3.3-5(a)にそれぞれ示す。図 3.3.3-5(a)では、非線形高調波の最大振幅が $n=8$ 連続スペクトル上にあることがわかる。こ

の結果は、非線形高調波の散逸機構が連続スペクトル減衰であることを示している。図 3.3.3-5(b)は、 $n=4$ の TAE ギャップで非線形結合により生成した $n=8$, $\omega=2\omega_{TAE}$ の高調波が連続スペクトル減衰を受けることを模式的に示している。

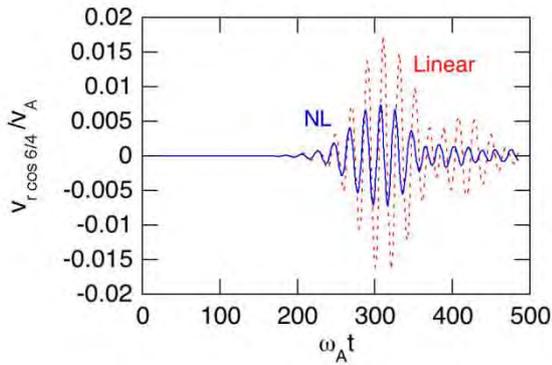
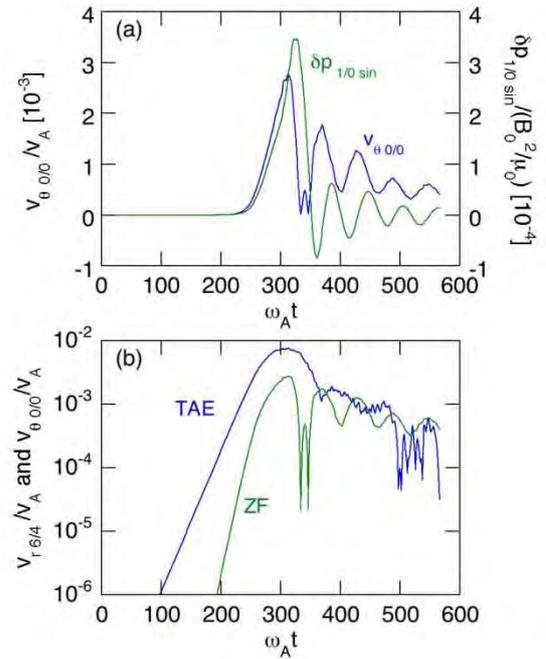


図 3.3.3-1(上) アルフベン固有モード振幅時間発展に関する線形 MHD シミュレーションと非線形 MHD シミュレーションの比較。

図 3.3.3-2(右) (a) 圧力揺動の $m/n=1/0$ 正弦成分と帯状流の時間発展、(b) TAE モードと帯状流の振幅の時間発展。



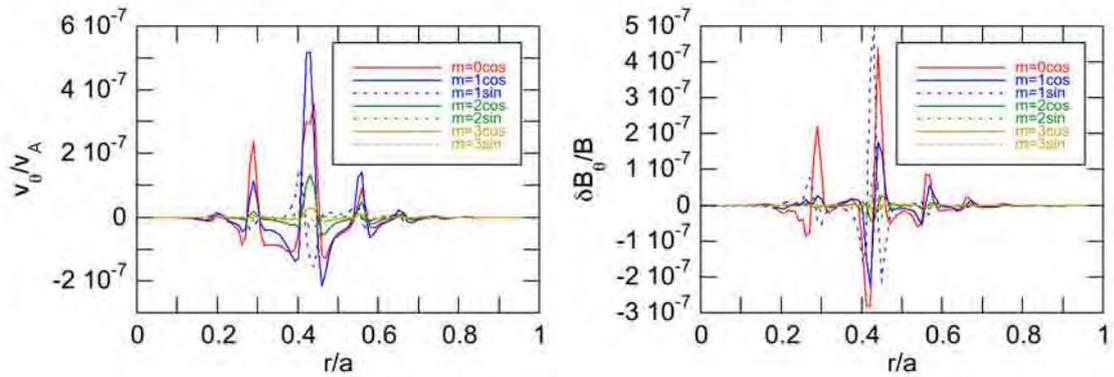


図 3.3.3 トロイダルモード数 $n=0$ のポロイダル流(左)とポロイダル磁場揺動(右)。

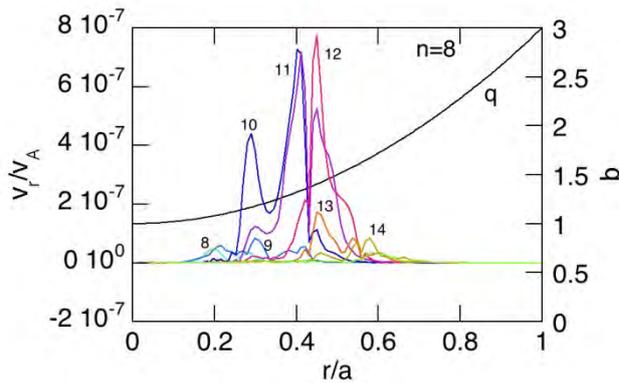


図 3.3.3-4(上) アルフベン固有モード($n=4$)の2次高調波($n=8$)の半径方向分布。

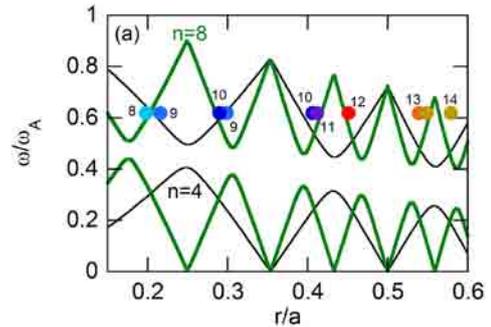
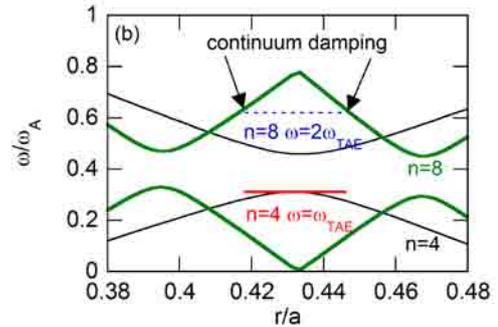


図 3.3.3-5(右) (a) 非線形高調波($n=8$)の最大振幅位置とアルフベン連続スペクトル、(b) 非線形高調波の生成と連続スペクトル減衰の模式図。



(2) 非線形 MHD 効果を考慮したアルフベン固有モードバーストのシミュレーション

高エネルギー粒子-MHD 連結シミュレーションコード MEGA を NBI, 高速イオン減速過程、高速イオン損失を取り扱えるように拡張し、TFTR におけるアルフベン固有

モードバーストのシミュレーションを行った。このシミュレーションでは実験に近いパラメータを使用し、 $a=0.75\text{m}$, $R_0=2.4\text{m}$, $B=1\text{T}$, ビーム入射エネルギー 110keV , NBI 加熱パワー 10MW である。熱イオンとビームイオンは重水素であり、以前行った摂動論的シミュレーションと同様に安全係数分布 $q(r)=1.2+1.8(r/a)^2$ 、高速イオン減速時間 100ms と仮定した。ビーム速度は平行入射を考慮して磁場に完全に平行とし、高速イオンのピッチ角散乱は無視した。

MHD 散逸係数（粘性、電気抵抗、拡散）が異なる場合について、トロイダルアルフベン固有モード(TAE モード)の磁場揺動時間発展を図 3.3.3-6 に比較する。散逸係数が小さい場合には、TAE モードの振幅はほぼ一定となるが、散逸係数が比較的大きい場合にはバースト的な時間発展となった。TAE バーストの振幅はプラズマ内部のピーク位置において $\delta B/B \sim 5 \times 10^{-3}$ であり、バーストごとに 10% 程度の高速イオンが損失する。このときの高速イオン損失率と磁場揺動振幅の関係を図 3.3.3-7 に示す。図に示した 2 乗の回帰曲線がよく一致するので、粒子損失率は磁場揺動振幅の 2 乗に比例すると言える。定常的な時間発展の場合も TAE モードによる粒子損失が定常的に発生している。散逸係数が異なる 3 つの場合について、高速イオン圧力分布を図 3.3.3-8 に比較する。分布形は似通っており、臨界安定に近い分布であると考えられる。散逸係数が大きく TAE モードの減衰率が大きい場合は高速イオン圧力分布が高く保たれることがわかった。

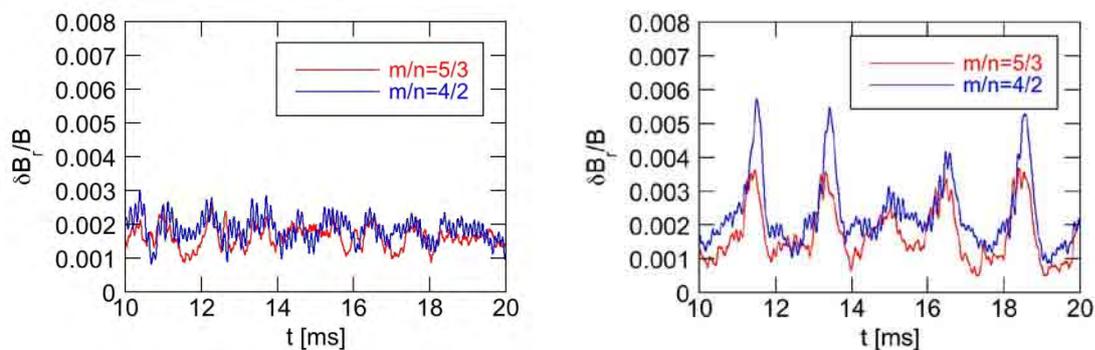


図 3.3.3-6 散逸係数が小さい場合(左)と大きい場合(右)の TAE モード振幅の時間発展。

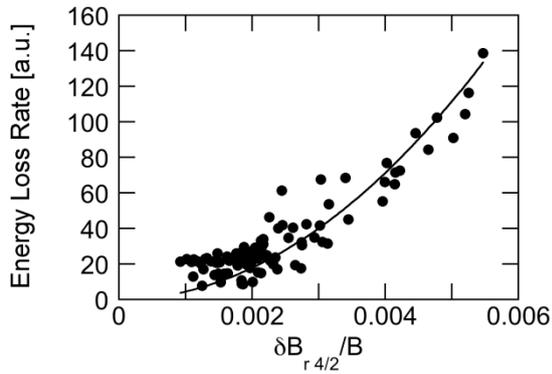


図 3.3.3-7 磁場揺動振幅に対する高速イオン損失率。

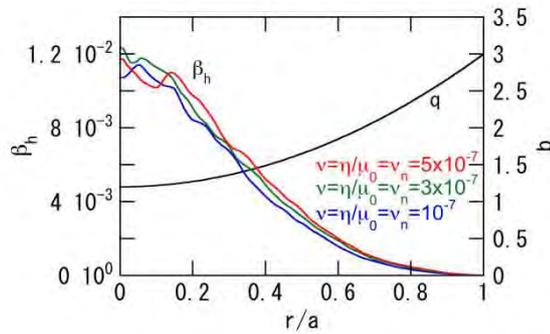


図 3.3.3-8 散逸係数が異なる場合の高速イオン圧力分布の比較。

(3) 高エネルギー粒子駆動型測地的音響モードと非線形周波数変調

LHD における高エネルギー粒子駆動型測地音響モード(EGAM)の線形成長局面での性質と非線形周波数変調を高エネルギー粒子・MHD 連結シミュレーションを実行して調べた。線形成長局面の性質としては、EGAM が空間的に一定の周波数を有する大域的モードであることを確認した。EGAM の各揺動成分のポロイダルモード数は、ポロイダル流が $m=0$ 、密度と圧力揺動が $m=1$ 、磁場揺動が $m=2$ であることがわかった(図 3.3.3-9)。EGAM の周波数は高エネルギー粒子圧力が高いほど低い。EGAM の空間分布幅は、高エネルギー粒子分布幅が広いほど広く、通常の磁気シアよりも反転磁気シアの場合の方が広い。線形成長局面では EGAM は半径方向外側に向かって伝播することがわかった。

シミュレーション結果において、実験で観測されているものと同様の EGAM の非線形周波数変調が起こることを実証した(図 3.3.3-10)。周波数は上方と下方の両側に変調する。高エネルギー粒子の速度空間分布の解析により、2組の hole-clump 対が形成されることが明らかになった。1組は EGAM を不安定化する速度空間領域に形成され、もう1組は安定化領域に形成される(図 3.3.3-11)。不安定化領域では hole の周回周波数が上昇し clump の周回周波数が下降するのに対して、安定化領域では振る舞いが逆となる。hole と clump を構成する粒子の周回周波数は EGAM の周波数とよく一致しており、周波数変調の期間でもこれらの粒子が EGAM と共鳴し続けることを示している。これらの結果は、波動の自発的周波数変調において、位相空間の不安定化領域から安定化領域へ連続的にエネルギーが伝達されることを示している。

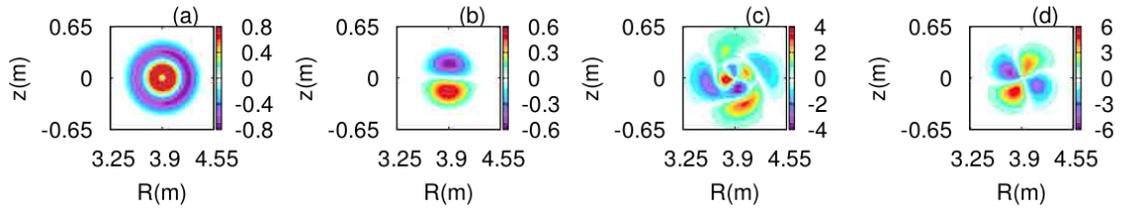


図 3.3.3-9 ポロイダル断面における(a)ポロイダル流、(b)密度揺動、(c)ポロイダル磁場揺動、(d)半径方向磁場揺動の分布。

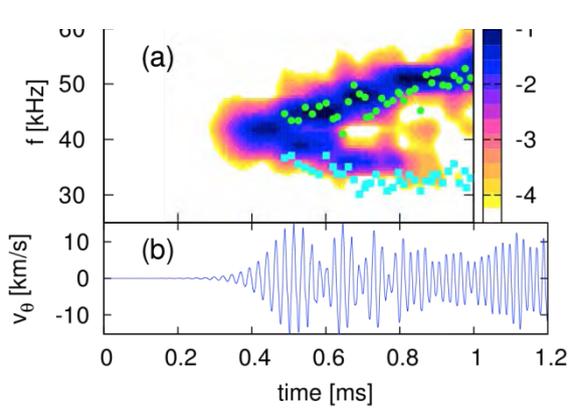


図 3.3.3-10(上) (a)ポロイダル流周波数スペクトル時間発展と(b)ポロイダル流時間発展。

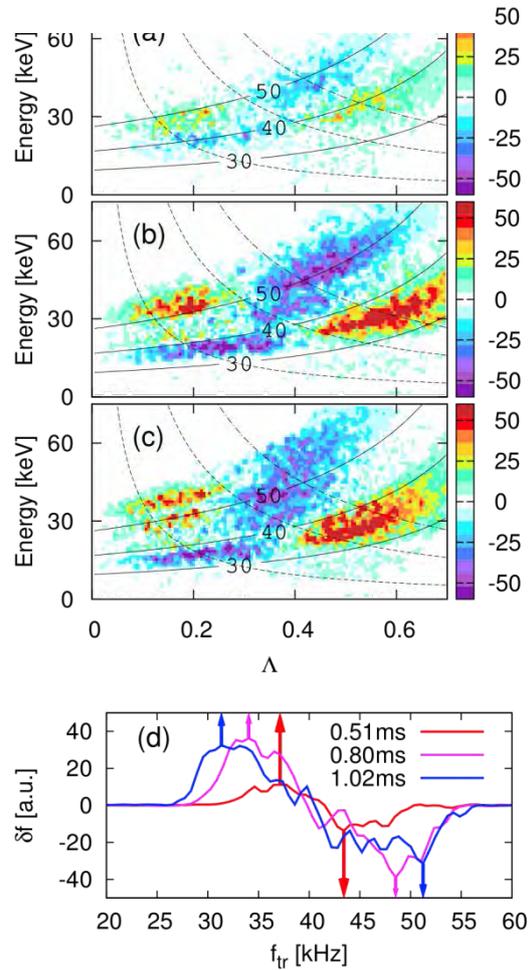


図 3.3.3-11(右) (a) $t=0.54\text{ms}$, (b) $t=0.80\text{ms}$, (c) $t=1.25\text{ms}$ における(Λ , E)速度空間における高エネルギー粒子分布揺動。(d) 磁気モーメント一定の曲線[(a)-(c)の破点線]に沿った高エネルギー粒子分布揺動。横軸は粒子周回周波数。

・ LHD における加熱解析の進展

LHD における加熱解析に関して、数値実験プロジェクト主導での大きな進展について、その代表例である NBI 吸収パワーにおけるビーム減衰効果の考慮 (吸収パワー

評価の高精度化について本節で述べる。

LHD における NBI 加熱解析には、FIT3D（京都大学：村上定義准教授）が広く活用されてきたが、FIT3D では簡便かつ迅速な評価を第一義に考慮したため、荷電交換した高エネルギービーム粒子の減速過程の効果が十分に反映されていない、いわゆる定常解析となっていた。ペレット入射など、密度や温度が短時間に大きく変化するような実験条件下では、定常解析の妥当性は低くなってしまふ。一方、FIT3D への簡易化前の解析コードである GNET（京都大学：村上定義准教授）では、5次元位相空間でのビーム粒子の挙動が解析され、非定常解析も可能であるが、長時間計算が必要であることから、LHD 実験へのルーチン的な適用はなされていない。

この両者のギャップを埋めるべく、LHD 実験データ解析型統合輸送コード(3.2.2.2 節参照：TASK3D-a シリーズ)において、多数タイミングでの FIT3D 計算結果（図 3.2.2.2-1 の fit3d モジュール）に基づいて、それぞれのタイミングからの減速過程を逐次評価して重ね合わせることで、減速過程を考慮した加熱パワー、運動量入力を評価する手法を実現した。減速過程を考慮する解析コード（図 3.2.2.2-1 の conv_fit3d モジュール）は、LHD の NBI グループ：長壁氏によって開発されたものであり、統合輸送コードグループメンバーの協力によってその高速化を実現し、ルーチン解析に供されている。これにより、ペレット入射直後の急激な密度上昇、その後の減衰時間帯での NBI 加熱パワーや運動量入力の高精度評価が可能となり、プラズマの動的輸送解析（国際会議での招待講演や IAEA 口頭発表など、すでに多くの LHD 実験成果論文へのデータ提供）の根幹を築く成果となっている。

本節で個別には記載しなかった ECH に関しては、大型ヘリカル装置計画プロジェクトにおいて開発・運用がなされている光線追跡コード LHDgauss を、ショットごとのアンテナ情報、入射パワーなどの情報を自動的に取り込めるようにした上で、TASK3D-a に導入する作業が進展しており、試験運用を行う段階に至っている。また、ICH 加熱解析に関しては、GNET（京都大学：村上定義准教授）による高精度解析がなされ、国際的にも高い評価を得ている。また、波動伝搬解析コード TASK/WM（京都大学：福山淳教授）の LHD への適用作業も進めており、計算結果の妥当性について、ICH グループとの議論が進行中である。

すでに TASK3D-a に取り込まれている NBI 加熱に加えて、ECH、ICH の要素モジュール整備、TASK3D-a への導入作業を行い、LHD における様々な加熱シナリオに対応した統合輸送解析を展開することで、LHD プラズマの最高性能化を目指した予測研究の確度を高めていく。

3.3.4 周辺プラズマの輸送とプラズマ・壁相互作用

・周辺プラズマ輸送

炭素に代表される不純物の挙動は、ダイバータ等の周辺領域で工学的観点から非常に重要視されている。また、不純物輸送をシミュレートするにはプラズマの輸送と分布を知る必要があり、プラズマおよび不純物の物理、そして境界条件やソースとしてのプラズマ・壁相互作用までを俯瞰した研究が必要とされる。個々のモデル開発を進めるとともに、複数の物理モデルを用いたシミュレーションコードの開発を進めている。

LHD ダイバータレグのプラズマ分布モデルについて述べる。この領域は磁力線の長さにして数メートルと短いが、中性水素との相互作用（リサイクリング）や壁の存在があり、複数の物理を扱う必要がある。不純物輸送シミュレーションに用いることを目的として、上流側のプラズマ密度と熱流束を境界条件に、一次元の2流体方程式によるモデル化を行った。中性水素分子および原子によるプラズマソースと運動量損失、熱伝導等の衝突による輸送をあわせ、磁力線に平行方向の輸送方程式を定常状態として解くコードを開発した。

このコードの解を背景プラズマ分布として ERO コードに組み込み、炭素分子・原子・イオンの輸送シミュレーションを行った。ERO コードは不純物粒子を発生から堆積まで追跡して空間分布や堆積分布を求めるコードであり、ドイツのユーリッヒ総合研究機構から導入した(5.1 節参照)。プラズマによる不純物のスパッタリング、電離、摩擦力、電磁気力等を計算して輸送を解いて定常分布を得る。プラズマの水素イオンによるスパッタリングで生じた炭素はレグで容易に電離し、高速のプラズマフローに押し流されて大部分はダイバータ板へ再度戻ることが示された(図 3.3.4-1)。また、第一壁の再堆積分布を解析し、化学スパッタリングで発生した炭素がよりストライク点近くに局在すること、また対向側よりも隣接した場所のダイバータ板からより多く第一壁へ炭素が輸送されていることが示された。

大型装置の高性能プラズマから炉壁を守る有力な方法のひとつとして、不純物のガスパフによる冷却が検討されており、実験と理論およびシミュレーションによる物理機構の理

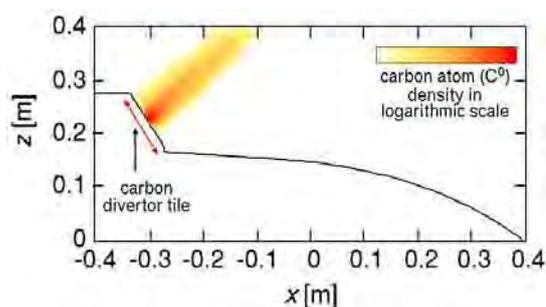


図 3.3.4-1 ダイバータレグの炭素イオン分布（対数スケール）。

解が求められている。ネオンガスパフを対象に、放射冷却効果を流体モデルを用いて解析した。すでに述べたレグプラズマモデルをベースに、100m 程度の磁力線領域に拡大し、垂直輸送によるプラズマソースと、一定密度と仮定したネオンイオンによる熱シンクを取り入れた。異なったプラズマパラメータやネオン密度に対してプラズマ分布の数値解を求めた。ネオン密度の増加にともなって壁への電子温度が減少することが確認され、最大でプラズマの持つエネルギーの半分程度が放射によって冷却された。また、ネオン密度には上限があり、エネルギーを奪いすぎると定常解が得られないことが示された。この上限は高密度低温プラズマよりも低密度高温プラズマのほうが高く、この傾向は実験観測と一致する。

また、不純物ガスパフをレグに行った場合に引き起こされるダイバータ板の損耗シミュレーションを ERO コードで行った。ヘリウム・ネオン・アルゴンと比較すると、アルゴンは直ちに電離する一方、ヘリウムはレグを突き抜ける割合が多く、ネオンはそれらの中間であるがほぼ電離する。電離したイオンはフローに押されてダイバータ板へ達する。スパッタされたタングステン原子は直ちに電離し、プラズマフローとタングステンの大きな旋回半径のため、損耗量の 2/3 程度の再堆積を引き起こす結果を得た。不純物ガスの比較では、ヘリウムはほとんど損耗を起こさない一方、アルゴンはネオンの 2 倍程度の損耗量となった (図 3.3.4-2)。

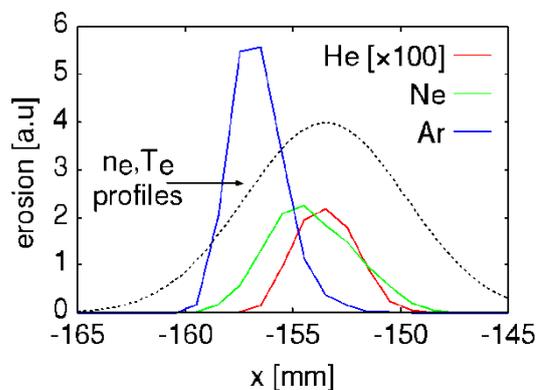


図 3.3.4-2 不純物ガスによるタングステン損耗の比較。

以下にプラズマとプラズマの接する壁 (PFW: Plasma-Facing Wall) との相互作用によって生成された微粒子の PFW 近傍の振る舞いに関する研究成果を述べる。微粒子の成分は PFW 壁構造材料やそれらの水素化合物で大きさは数ナノメートルからミリメートルに達している。最初に微粒子の壁からの離脱条件を明らかにした。ここで微粒子は球形をした大きさがデバイ長 (数ミクロンメートル) より十分小さいものを考え、壁は浮遊電位 (通常は負に帯電) にあるものとした。プラズマ電子はマックスウエル速度分布を、プラズマイオンはイオン音速だけシフトしたマックスウエル速度分布を考えた。以下に結果を示す。

1) 垂直壁上の微粒子の離脱条件はプラズマ温度比 T_i/T_e のみで決まり、微粒子の特性には依存しないことがわかった。ここで、 T_i , T_e はそれぞれイオン温度、電子温度である。水素プラズマの場合が T_i/T_e が 0.09 以下の場合に離脱する。これは、イ

オン温度が高いほど摩擦力が静電反発力より大きくなるためである。

2) 水平壁上の微粒子の離脱条件は、プラズマ温度比 T_i/T_e と $R_d/n_{se}T_e$ に依って決まることがわかった。ここで、 R_d, n_{se} はそれぞれ微粒子半径、シース入口での電子密度である。離脱パラメータ $\rho_{d,g/cc}R_{d,\mu m}/n_{se,18}T_{e,eV}$ のイオン温度依存性を図 3.3.4-3 に示す。

次にダイバータ板から生成された微粒子の挙動を ITER の SOL ダイバータプラズマを用いて求めた。球形微粒子のプラズマ中での輸送理論モデルを構築し、ITER のダイバータ板ストライク点から放出された微粒子の挙動を調べた。放出されたダスト粒子はドームに達するもの、ダイバータ板に戻るもの、高温になり昇華(炭素)あるいは溶融温度に達して蒸発するものに分けられる。結果を以下に示す。

1) コアプラズマに向かって放出された微粒子は ITER プラズマの高熱負荷のためにコア領域に達する前に溶融(昇華)することがわかった。

2) 内側ダイバータ板から放出した場合、放出速度が小さいものは内側ダイバータ板に戻る。これはダイバータ板に向かうプラズマポロイダル流によって押し戻されるためである。速度の大きいものでドーム方向に放出したものは運動エネルギーが大きいためにドームに達する。(図 3.3.4-4)

3) 外側ダイバータ板から放出したタングステンの小さくて速度の遅いものは内側ダイバータと異なり、ドームに達するものがない。これはトロイダル方向のプラズマ流によってトロイダル方向に加速され、遠心力によって外側に運動するためである。

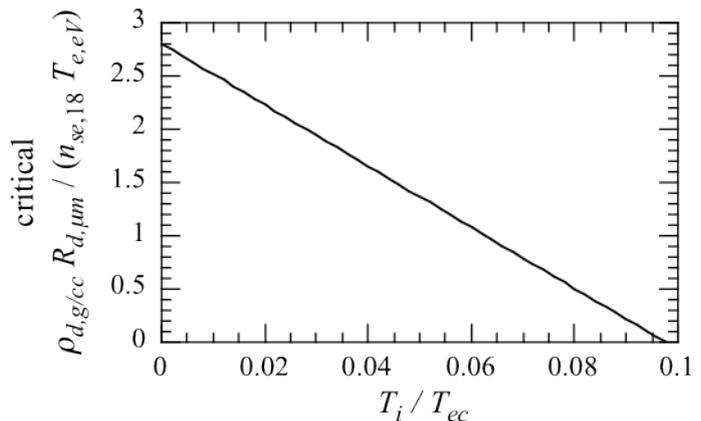


図 3.3.4-3 水平壁に乗った微粒子の離脱パラメータの温度比依存性。高イオン温度になると離脱しにくくなる。

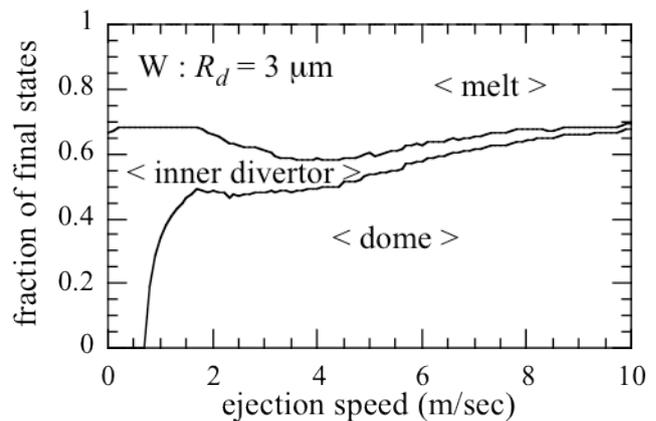


図 3.3.4-4 内側ダイバータ板のストライク点から放出された大きさ $3 \mu m$ のタングステン微粒子の最終状態の割合。

・プラズマ・壁相互作用シミュレーション

(1) 炭素同素体への水素照射現象解明のための分子動力学法

数値実験プロジェクトのプラズマ壁相互作用研究の成果として、炭素材料中の水素同位体の挙動をミクロな観点から調べるため、分子動力学(MD)シミュレーションを開発し、定量的な損耗の解析を行うことができたことがあげられる。

MD法の特徴は原子間の化学結合(共有結合など)を考慮して原子のダイナミクスを追えることにある。これにより、化学スパッタリングに代表されるような100eV以下の低エネルギーでの反応や、材料中の結晶構造の違いや欠陥によるトリチウム挙動の変化などを調べることが可能である。このMDでは、モデル化された原子間相互作用ポテンシャルが必要となる。そこで、我々は、1990年代にフラーレンやカーボンナノチューブの研究の為にBrennerが開発した炭素材料と水素の共有結合のポテンシャルの不連続性を解消し、さらに、グラファイト層間に働く分子間力相互作用を組み込んだ。これにより、炭素材料のシミュレーションを可能にした。このMDを用いて、我々は、炭素同素体(グラフェン・グラファイト・ダイヤモンドなど)を対象とし、損耗・堆積などの反応を原子レベルで調べてきた。

具体的な成果として、グラファイト材料の表面結晶構造の違いによって水素入射による化学スパッタリングのメカニズムが大きく変わることを明らかにした。グラファイトは結晶軸の向きにより典型的に三種類の表面構造が考えられる。まず、層を構成する平面状のグラフェン分子の表面がそのまま材料表面になっている(0001)表面を考える。15eV以下のエネルギーで入射された水素原子は表面から第一層目のグラフェンを貫通することが出来ず、全ての水素は第一層目のグラフェンに化学吸着するか反射されるかのどちらかとなる。これにより第一層のグラフェンの温度が4,000K程度に達すると、第一層目のグラフェンは表面から剥がれさして鎖状の炭化水素へと分解される。この繰り返しで一枚ずつ順に表層が剥がれていく現象(graphite peelingと名付けた)が起こることを発見した。

さらに、グラフェン層の配列が表面に垂直になっている場合も調べた。この場合にはグラフェン層が剥がれることは構造上不可能である。水素に曝されるグラファイトの端部は、アームチェア構造もしくはジグザグ構造と呼ばれる二種類の表面が考えられる。それぞれの系でMDを行った結果、アームチェア構造の(11 $\bar{2}$ 0)表面では水素同位体吸着によってC₂H₂分子が生成され易いのに対し、ジグザグ構造の(10 $\bar{1}$ 0)表面に吸着した水素はH₂分子となって脱離することがわかった(図3.3.4-5参照)。このように、表面の結晶構造は化学スパッタリング生成物に強く影響を与えることを示した。

さらに、炭素同素体であるダイヤモンド結晶への水素原子照射によるスパッタリン

グの原子レベルでの機構解明も行った。水素原子の挙動を詳しく調べ、スパッタリングが吸着サイト近辺で生じることが分かった。さらに、水素がダイヤモンドに吸着されてできた C-H 結合により、ダイヤモンドの C-C 結合が切られて化学スパッタリングが起こることを発見した。

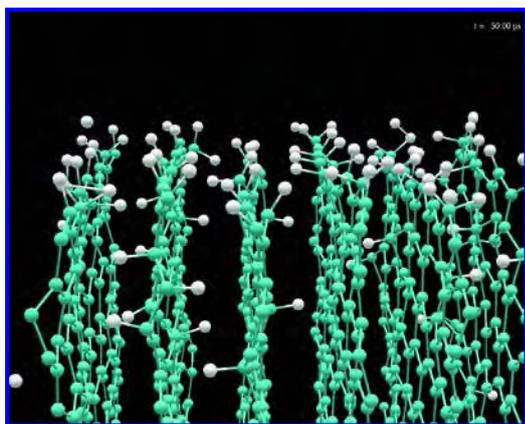


図 3.3.4-5 グラファイトの(1120)表面に水素を照射した際のスナップショット。グラファイトの端部より炭化水素が発生することを発見した。

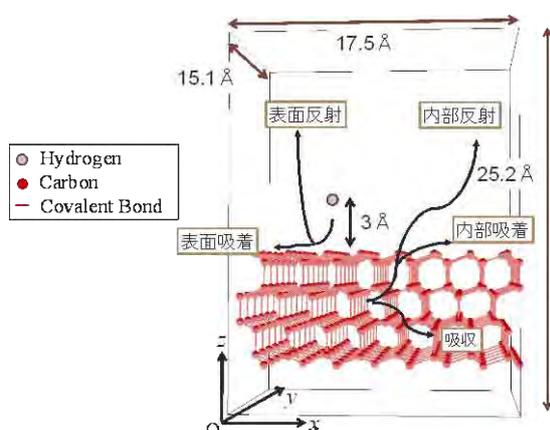


図 3.3.4-6 ダイヤモンドへの水素照射のシミュレーションモデルと5種類の反応。矢印は水素原子の軌跡を示す。

(2) 二体衝突近似-分子動力学ハイブリッドモデル

我々の開発した MD コードは、ポテンシャルの妥当性から数百 eV 以下の低エネルギー領域に制限される。しかし、ダイバータ近傍では、高エネルギー粒子がマイクロスケールの大きな材料へ入射する系を扱う方法が望まれた。

そこで、二体衝突近似(BCA)法を開発した。BCA 法では、追跡対象粒子と単一標的粒子との二体問題であり解析的に扱うことができるため、MD 法と比べて計算時間が格段に短い利点がある。BCA 法の適応できるエネルギー領域は MD 法と比べて高く、BCA 法と MD 法を結合し相補的に用いることで、高エネルギー粒子がマイクロスケールの大きな材料へ入射する系を取り扱うことが可能にした。

まず、アモルファス構造をもつ標的材料の解析に国内で BCA 法として開発された ACAT(Atomic Collisions in Amorphous Target)コードを基に、任意の原子配置をもつ標的材料を取り扱えるように改良し、ACVT(Atomic Collision in Any Target) コードと名付けた。さらに、追跡対象粒子の運動エネルギーが高い間は ACVT 法を用いて粒子追跡を行い、衝突によって運動エネルギーを失って閾値以下になったところで MD 法に

切り替える BCA-MD ハイブリッドシミュレーションコードも開発した。このハイブリッドコードを用いた研究成果として、一辺がサブマイクロメートル程度の大きさの単結晶グラファイトへの水素原子照射（入射エネルギー 1 keV）反応の解析があげられる(図 3.3.4-7)。なお、このシミュレーションでは、MD 法単独で扱える系に比べて千倍以上の粒子数を扱うことが可能になった。

ACVT 法単独でシミュレーションした場合(図 3.3.4-7 (a))には、グラファイトの層構造が残り、さらに五つ以上の共有結合をもつ炭素原子が比較的多く存在する。これに対して BCA-MD ハイブリッドシミュレーション(図 3.3.4-7 (b))では、層構造が崩れアモルファス化していることが分かる。これは、化学的安定性の観点から現実的な材料構造となっており、より妥当な手法であるといえる。

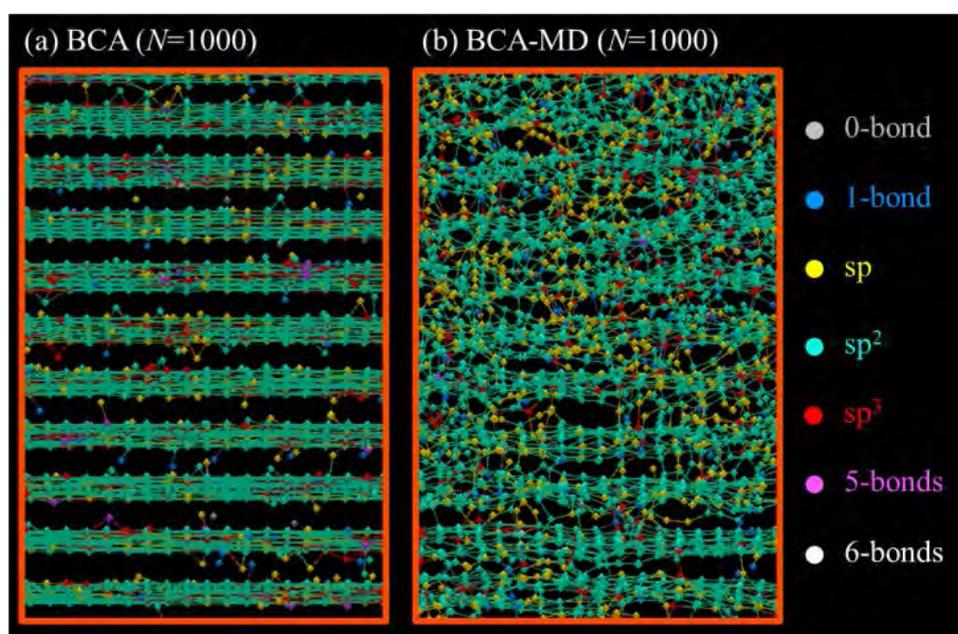


図 3.3.4-7 (a)二体衝突近似、(b)二体衝突近似—分子動力学ハイブリッドシミュレーションを用いて、単結晶グラファイトに対し 1keV の水素原子を照射したときの標的材料構造。

(3) タングステン系の密度汎関数計算

ITER のダイバータ材として有望視されるタングステン (W) 系に対するシミュレーションの重要性が高まった。そこで、ダウンフォールディング法を用いて分子動力学を行うためのポテンシャル開発を行った。図 3.3.4-8 はタングステン+ヘリウム系でのポテンシャルモデルの妥当性を示したものである。図中青線がダウンフォールデ

イング法により最適化を行ったポテンシャルモデルであり、この値は、赤線で示す密度汎関数計算による値とよく一致している。このポテンシャルは、今後の分子動力学法の基礎データとして用いることができる。

タングステン材料にヘリウムプラズマを照射すると、一定の条件下でバブルを形成したりナノ構造を形成したりすることが実験的に報告されている。その物理機構を明らかにするべく、密度汎関数計算に基づくエネルギー評価を行った。その過程において、タングステン結晶中の単一空孔に6つのヘリウムが捕捉される場合に図 3.3.4-9 に示すような八面体構造をとることが分かった。

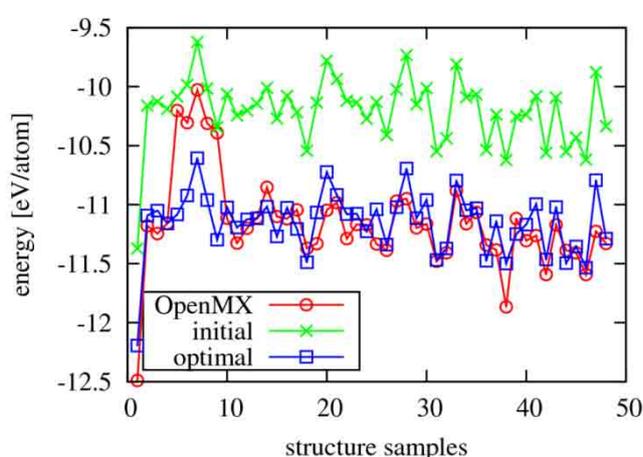


図 3.3.4-8 ダウンフォールディング法による W-He 系ポテンシャルの最適化。各種構造サンプルに対するポテンシャルエネルギー値をプロットしている。最適化を行ったポテンシャルモデル(青線)は密度汎関数計算による値(赤線)とよく合っている。

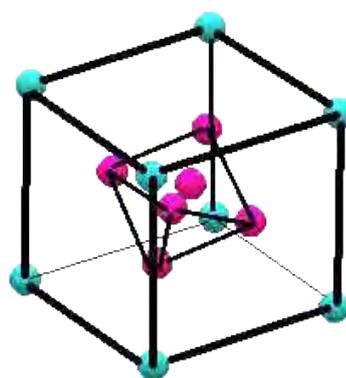


図 3.3.4-9 タングステン体心立方結晶中の単一空孔にヘリウム原子6個が捕捉される場合の安定構造。青はタングステン原子、赤はヘリウム原子を表している。

3.3.5 基礎物理

・ ナノ炭素薄膜形成過程の分子動力学による解明

核融合研究で培われたプラズマ技術は、産業応用としても強く期待されている。その一つが小型のプラズマ実験機を用いた Plasma Chemical Vapor Deposition (PCVD) による機能性ナノ構造物質の形成である。実際に、次世代電子デバイスと期待される Caron Nano Tube (CNT)や Carbon Nano Wall (CNW)が実際に PCVD 実験によって作られているし、低摩擦コーティング材として Diamond Like Carbon (DLC)と呼ばれるアモルファス薄膜が産業レベルまで普及している。ところで、これらの形成過程は、ナノスケールで見ると核融合炉壁の炭素ダイバータがプラズマと相互作用した結果起こる損耗や再堆積過程と非常に酷似している。すなわち、核融合におけるプラズマ壁相互作用研究の為に開発した我々の分子動力学シミュレーションコード (GLIPS) を応用することで、PCVD によるナノ炭素材料形成のシミュレーションを行うことが可能である。また、ナノ材料のシミュレーションで得られた炭素材料に関する知見は、核融合におけるダイバータ材料のナノスケールの理解の助けとしてフィードバックが期待できる。

実際に我々は、プラズマ壁相互作用用の分子動力学コードを利用して、DLC に相当するアモルファス炭素薄膜の堆積シミュレーションを行った。図 3.3.5-1 は我々の分子動力学によって作られたアモルファス薄膜の様子である。アモルファス炭素の研究分野においては、“非晶質”とされてきたアモルファスにも実は構造的にさらに分類できると考えられており、その構造分類のための良いパラメータとなる物理量の探索が重要だと考えられている。現在よく唱えられる構造分類方法は、Robertson らによる、 sp^2/sp^3 比と水素含有率という二つのパラメータによる分類である。例えば前者に関しては、図 3.3.5-1 において、グラファイト構造の構成要素である sp^2 炭素原子 (3本の共有結合を持つもの) と、ダイヤモンド構造の構成要素である sp^3 炭素原子 (4本の共有結合をもつもの) を色の違いとして表しているが、この様に分子動力学シミュレーションを使えば、アモルファス炭素の構造分類に関して原子レベルで解析することができる。この方法によって、我々は、Robertson らの提唱した二つのパラメータが同じでも、構造的にことなるアモルファス物質が存在することを示し、それらを分類するための第三の分類パラメータとして、共有結合の異方性を用いる方法を提案した。これによって、アモルファス炭素の分類が進み、より機能的な特性を持つアモルファス炭素薄膜の形成が期待できる。

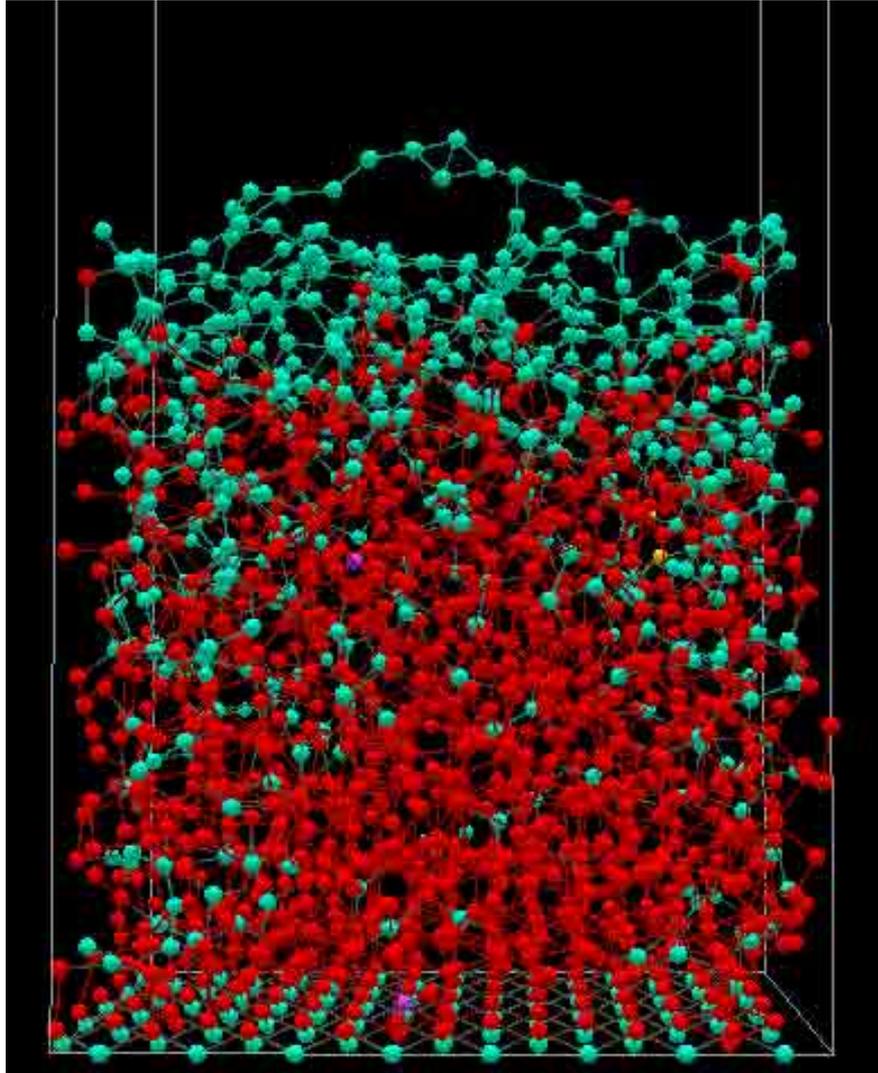


図 3.3.5-1 分子動力学シミュレーションによって得られたアモルファス薄膜堆積物。緑色の粒子は結合数が3本の sp^2 炭素原子、赤色の粒子は結合数が4本の sp^3 炭素原子。それぞれ前者がグラファイト成分、後者がダイヤモンド成分として解釈される。

・無衝突リコネクションに関する粒子シミュレーション

磁気リコネクションは、プラズマにおける基礎的なエネルギー解放過程の1つであり、核融合プラズマおよび宇宙プラズマにおける突發現象に深く関わっていると考えられている。しかし、このような高温希薄環境ではプラズマは無衝突と考えられるため、巨視的には磁気凍結が成り立っている。そのため、磁気流体のような巨視的な描像の範囲で考えている限り、磁力線が繋ぎ変わることを説明することはできない。リコネクションの物理を解明するためには、磁気凍結を破る微視的な運動論的機構を考える必要がある。そこで、粒子シミュレーション手法を用いて、磁気リコネクションの物理を解析した。

磁気凍結を破る機構として、電流層で励起するプラズマ不安定性による異常抵抗に着目して、リコネクション磁場に垂直な面において2次元の粒子シミュレーションを行った。その結果、初期段階では電流層周辺に低域混成ドリフト不安定性(LHDI)が成長することが分かった。しかし、LHDIは異常抵抗を生み出さない。LHDIの飽和後、磁気中性面近傍で反対称な磁場のドリフトキンク不安定性(DKI)が成長する。DKIは電流層を大きく変形し、この過程で異常抵抗が発生し、リコネクション電場が生み出されることが明らかになった。

また、DKIは、イオンの物理のみに支配される長波長モードと電子のダイナミクスにのみ支配される短波長モードに、明確に分離されることが分かった。イオンと電子、それぞれの質量を変化させた粒子シミュレーションを行ったところ、図 3.3.5-2 のように、長波長モードの成長率はイオンの質量のみに依存するのに対して、短波長モードの成長率は電子の質量のみに依存することが分かった。この長波長モードは、LHDIが発達した周辺領域と電流層中心領域の間を周回するイオンがLHDIと相互作用した結果、電流層中央におけるイオンの分布関数が2成分に分かれることに起因して生まれる。また、この長波長モードは実質量比においても有限の成長率を持つため、電流層における異常抵抗の原因として非常に有望視されている。磁気リコネクションは電子運動のスケール、イオン運動のスケール、さらに系全体にまたがるようなスケールまでが複雑に絡み合った階層横断現象である。これらのモード分離の知見は、電子とイオンそれぞれの役割を明確にして、電子スケールとイオンスケール間の結合へとつながる成果と言える。

一方、3次元の粒子シミュレーションを用いて、電子散逸領域の力学構造を明らかにした。初期のHarris平衡においては、圧力勾配力とLorentz力が釣り合うことにより力学的平衡が成り立っている。図 3.3.5-3 に、定常状態のリコネクションにおける上流方向(y方向)の力の釣り合いを示す。静電場力とLorentz力が釣り合った新たな力

学的平衡が出現していることが分かる。静電場は以下のようなメカニズムにより生み出されることが解明された。イオン散逸領域内では、駆動電場による磁気圧はイオンよりも磁化されている電子に強く作用する。そのため電子散逸領域内は電子過剰となり電荷分離が発生し、静電場（ホール電場）が作られる。

続いて、電子散逸領域内におけるエネルギー変換プロセスを調べた。電子散逸領域内では、電子はリコネクション電場によって電流層方向(z 方向)に強く加速される。リコネクション点から下流方向に離れるに従って、電子運動エネルギーの z 成分は減少し、アウトフロー方向(x 方向)成分が増大していく。電子散逸領域内では、電子の全運動エネルギーはほぼ保存されていることから、z 成分から x 成分への変換は Lorentz 力によるものと解明された。

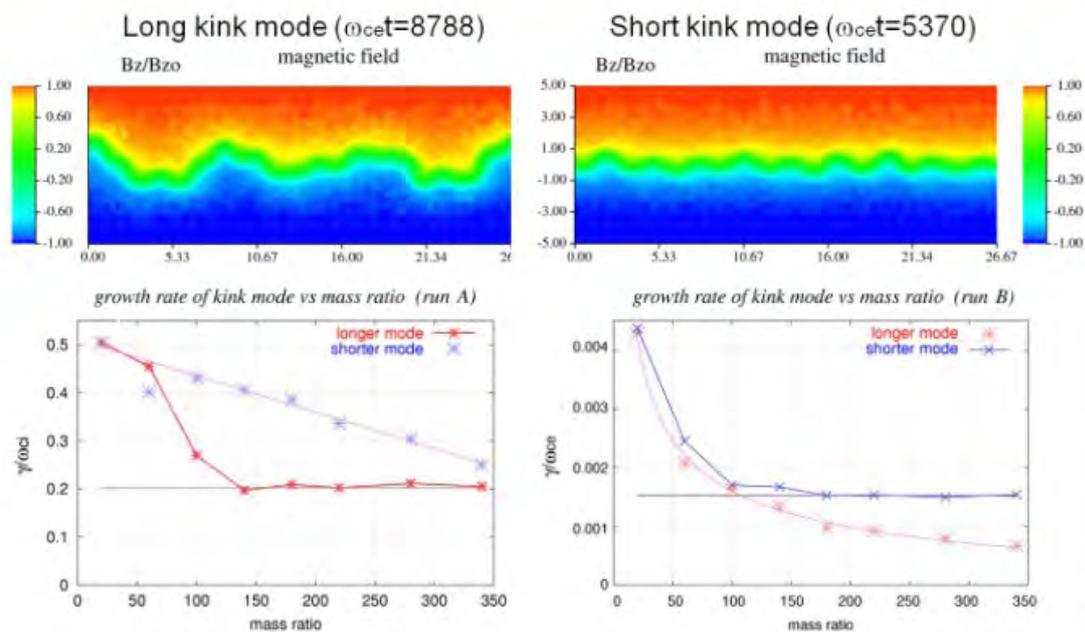


図 3.3.5-2 磁場 $B_z(x,y)$ の分布（上段）とキンクモードの成長率（下段）。左は長波長モード、右は短波長モードを表す。

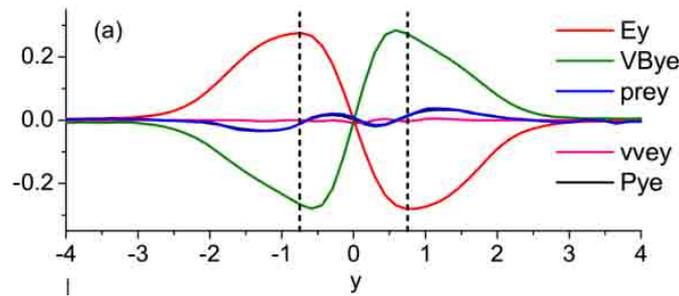


図 3.3.5-3 電子運動方程式の様々な項のプロファイル。点線内が電子散逸領域である。静電場と圧力勾配力が釣り合っていることが分かる。

他に、スフェロマク合体による磁気リコネクション実験を説明するため、リコネクション領域では通常の PIC モデルを使い、リコネクション領域の外のスフェロマクが入射される部分は MHD 状態に従う PIC モデルで記述するような円柱座標系コードを開発した。予備的な結果として、スフェロマク合体を再現することに成功した。

また、運動論的效果を考慮した磁気リコネクションのモデル化を MHD の枠内で行う手法を考案した。まず、粒子シミュレーションで得られた定常状態における無衝突磁気リコネクションの解析結果を基に実効的な電気抵抗モデルを構築し、その電気抵抗モデルを取り込んだ MHD 方程式を用いて MHD シミュレーションを実行した。その結果、地球磁気圏におけるサブストームで観測されている MHD 現象を再現することに成功した。

ここまで述べたように、磁気リコネクションでは、ねじれた磁力線構造が乱流的に生成される、キンク的な不安定性などにより電流層が歪むなど、複雑な 3 次元構造が形成される場合がある。そこで、時間と共に変化するプラズマの振る舞いを 3 次元空間で可視化するシステムを没入型バーチャルリアリティ装置 **ComplexCope** に構築した。2 次元描像では捉えにくかった複雑な磁力線構造や粒子の軌道を直感的に理解できるようになった。

・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周辺領域において、間歇的に発生するフィラメント状のプラズマコヒーレント構造が観測されている。この構造は、プラズマブロブとも呼ばれ、従来の拡散的描像では説明できないプラズマ輸送を担っていると考えら

れている。このブロボ現象については、流体的な描像に基づく2次元簡約化モデルを用いた研究が盛んになされてきたが、簡約化モデルによる研究では、磁力線方向の電流を評価する際、固体壁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パラメータとして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、これらの粒子的効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などに資することを旨とし、3次元静電粒子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進めている。粒子コードによる計算では、図 3.3.5-4 のように、コヒーレント構造が第一壁方向（図中左側）に伝播し、マッシュルーム状に崩壊する様子が見られた。この傾向は、従前の2次元簡約化モデルによる研究結果と一致する。また、スクレイプ・オフ・レイヤー（SOL）領域を想定した計算では、図 3.3.5-5 に示すように、粒子シミュレーションを用いることにより、プラズマコヒーレント構造の内部に自発的に電流系が形成されることが示された。

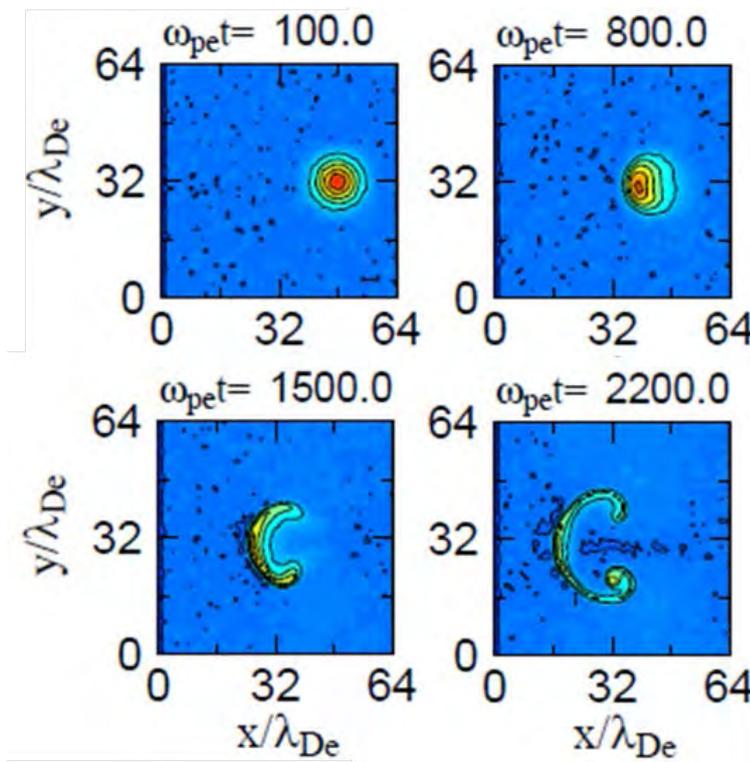


図 3.3.5-4 磁力線方向（トロイダル方向）を周期境界とした場合の粒子シミュレーションの結果。磁力線に垂直な断面（ポロイダル断面）における電子密度分布の時間変化を示している。

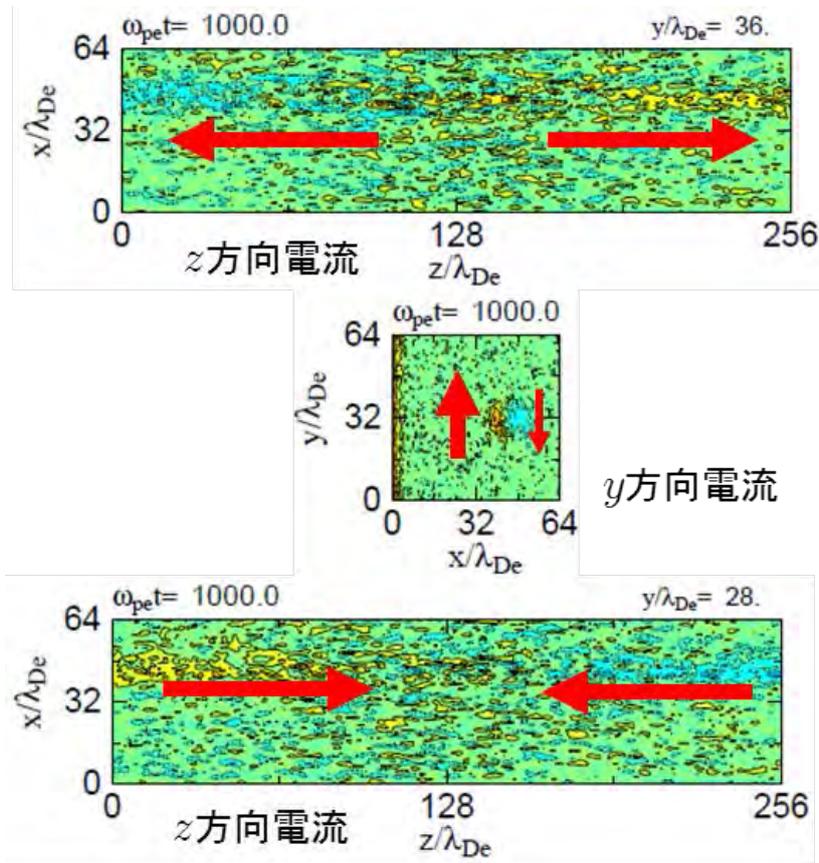


図 3.3.5-5 磁力線方向（トロイダル方向）の両端に粒子吸収境界（ダイバータ板に相当）を置いた場合の粒子シミュレーションの結果。磁力線方向電流の分布（上図、下図）、および、ポロイダル方向電流の分布（中図）を示している。

• Complexity in Magnetically Confined and Relativistic Plasmas

Multi-scale interactions in fusion plasmas are studied, in particular, for turbulence and nonlinear structure formation in relation to transport properties and magnetic confinement in LHD and tokamak fusion plasmas. Characterization of turbulence and transport in edge and core plasma in magnetic confinement fusion devices is studied based on nonlinear dynamic and complex system methods. In particular, intermittency in SOL plasmas of the MAST (UK) device is analyzed for local and global multi-fractal properties. A more complete insight into core transport processes, zonal flow (ZF) dynamics and the nature of a stochasticity in toroidal systems (helical and tokamak) is pursued by means of nonlinear gyrokinetic Vlasov simulations (GKV) for a tokamak and the LHD helical configuration. For an inward

shifted case, it is revealed that ZF potential exhibits suppressed chaotic fluctuations, as compared to a standard LHD configuration, which is consistent with an improved transport.

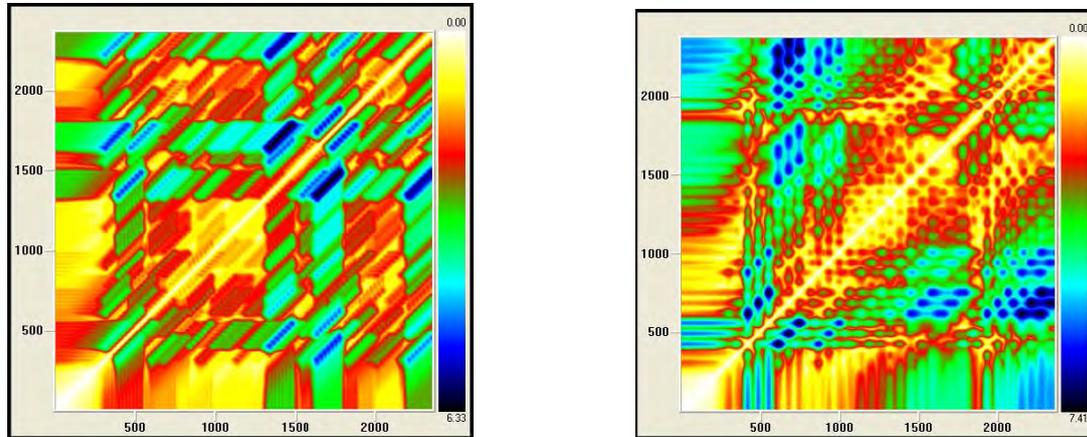


Figure 3.3.5-6 Recurrence plots of ZF potential for *Standard* (left) and *Inward-shifted* (right) helical LHD configuration from GKV simulations, indicate chaotic versus intermittent dynamics.

Different schemes for generation of intense ultra-fast, attosecond (AS) range photon and electron bunches in relativistic laser interaction with plasma targets are studied. In relativistic plasmas it is often found that sub-femtosecond (FS) optical pulses are accompanied by intense sub-FS relativistic electron bunches. We explore a new concept for AS photon pulse generation by a reflection of a FS laser pulse from a relativistic electron beam plasma which operates in a linear regime, by using analytical theory and 2D relativistic particle-in-cell (PIC) simulations. Hollow cone-shaped solid plasma targets are investigated by relativistic PIC simulations, which for optimized parameters, with an open cone target, can efficiently generate a train of ultra-short, AS relativistic electron bunches (sheets) with high energy ($E > 10$ MeV), separated by a half of the laser wavelength.

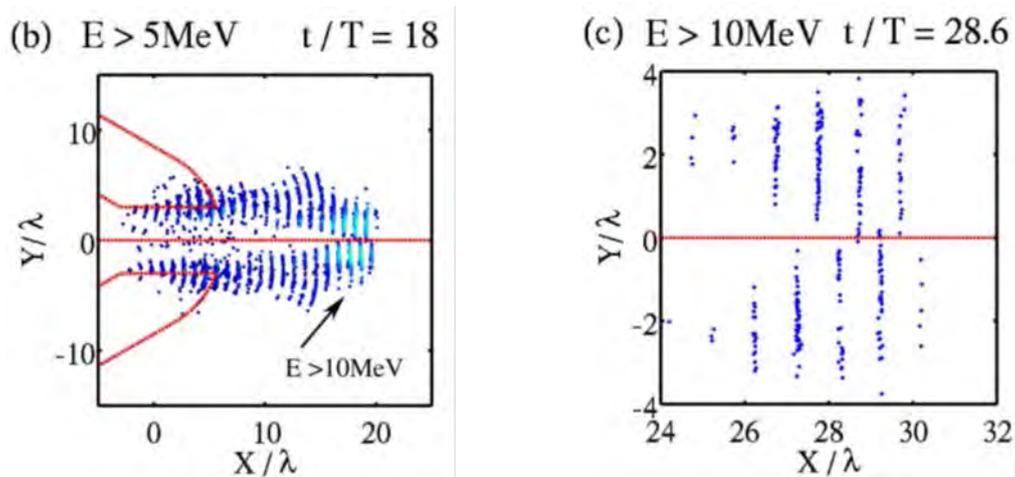


Figure 3.3.5-7 Relativistic electron bunches (b) and close view of train of electrons (c).

Properties of stimulated Raman backscattering (BRS) are critically revisited; in particular, related to a proposed scheme for FS ultra-intense pulse amplification to multi-exawatt regime and beyond, in order to probe a novel nuclear and high-energy physics. It is pointed that even weak pump over a long under-dense plasma can drive large absolute BRS signal from a background noise, and so impede with amplification of a resonant FS seed.

・ 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においては、加熱用レーザーによりコーン内で生成された高速電子が、高密度に圧縮された燃料コアまで伝搬しエネルギーを付与することが重要である。このため、加熱用レーザーにより生成された高速電子の大きな発散角が大きな問題となっている。

その原因の一つとして、高速電子電流とそれを打ち消すために流れる背景電子電流に起因するワイベル不安定性により誘起される準静的磁場の存在が考えられている。そこで、Au コーンプラズマ ($Z=30, A=197$) を厚さ $10\mu\text{m}$ 、幅 $6\mu\text{m}$ 、電子密度 $20n_{\text{cr}}$ 、電子温度 1keV の一様プラズマとし、その前面に密度スケール長 $0.5\mu\text{m}$ のプリプラズマを置いた2次元粒子シミュレーションにより、ワイベル不安定性により誘起される準静的磁場を観測した。なお、加熱用レーザーは、波長 $1\mu\text{m}$ 、強度 $10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ 、立ち上がり 5fs のフラット平面パルスとし、Y 方向には周期的境界条件を適用した。その結果、 50fs 程度の時間で $\pm 10\text{kT}$ に達する準静的磁場が、レーザー照射面近傍に誘起されることが確認された。この磁場強度では、 3MeV 程度のエネルギーを持つ高速

電子の Larmor 半径は、レーザー波長程度となってしまう、大きな発散角に繋がる。そこで、ワイベル不安定の性質を調べるため、その線形成長率を解析した。 $n_{fast}:n_{back}=1:9$ 、 $T_{fast}=100\text{keV}$ 、 $\gamma_{fast}=9.5$ として電流中性を仮定し、背景電子温度を $1\sim 100\text{keV}$ としたときのワイベル不安定の線形成長率を計算した。その結果、背景電子温度が高くなると、成長率は急激に小さくなり、最大成長を与える波長は長くなることがわかった。このため、何らかの理由により背景電子温度が上昇すると、ワイベル不安定性が抑制されて磁場が成長せず、高速電子の発散角が小さくなることを期待できる。

高速電子が伝播するプラズマの密度が低い場合、高速電子電流を中性化するために流れる背景電子の速度は速くなり、流体力学的な不安定性を引き起こすことが知られている。背景電子は、この不安定性によって加熱され、背景電子温度が上昇する。そこで、図 3.3.5-8(a)に示すように、ターゲットに低密度のくぼみ（幅 $0.5\mu\text{m}$ 、電子密度 $10n_{cr}$ ）を設けて、流体力学的不安定性により背景電子を加熱することを試みた。この結果、 50fs において背景電子温度は 100keV 以上に達したが、背景電子の速い流れにより、ワイベル磁場はより大きい強度まで成長し、高速電子の発散はかえって悪化した。このワイベル磁場の特性に着目すると、同じ場所で定常的に成長してはならず、非定常的であることがわかった。この非定常性は、高速電子の発散を強めると考えられるため、磁場が誘起される場所を固定することが、発散の抑制に寄与すると考えられる。また、単純に散乱するのではなく、ジグザグ運動により高速電子をガイディングする効果も期待できるため、図 3.3.5-8(b)に示すような穴あきターゲットを考案した。この結果、図 3.3.5-9 に示すように、 3MeV 以下のエネルギーの高速電子については、発散角を改善できることがわかった。しかし、穴の存在により高速電子が流れにくくなるため、ビーム強度は低下しており、最終的な加熱効率の評価は今後の課題である。

一方、プラズマ抵抗率の空間勾配に起因して生成される自己生成磁場を利用して高速電子をコアまでガイディングするとんがりチップコーンが提案されており、大阪大学および広島大学との共同研究により、その特性を調べた。その結果、とんがりチップ表面近傍に高速電子ビームを閉じ込める磁場が誘起され、強度は $\sim 500\text{T}$ にも達することが観測された。そして、この磁場により、比較的低エネルギーの高速電子がチップ内に閉じ込められてコアへとガイディングされ、コア領域での高速電子密度が高くなることがわかった。また、チップ内での衝突効果の小さい中程度の Z を持つ DLC や Al が、とんがりチップコーンの方法として適していることもわかった。

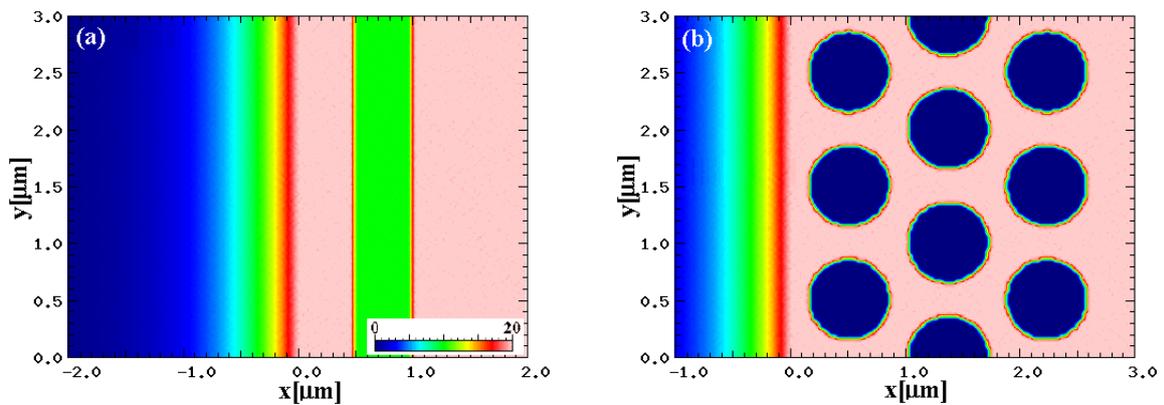


図 3.3.5-8 電子密度分布。(a)くぼみ付きターゲット、(b)穴あきターゲット。

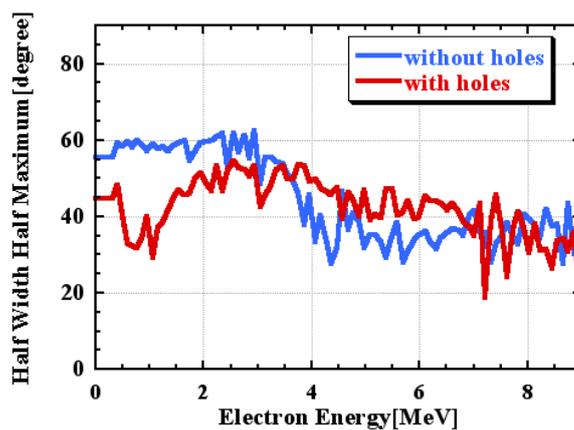


図 3.3.5-9 高速電子の発散角

・ 逆磁場ピンチプラズマにおけるヘリカル構造の自発的形成

逆磁場ピンチ(RFP)は、プラズマの元来もつ自律的性質を利用し、ベータ値の高い核融合炉心プラズマを、比較的コンパクトな機器構成で実現できる可能性がある配位として、核融合研究の黎明期から ITER 時代の現在に至るまで、注目されているユニークな配位である。プラズマ中には、Taylor 的緩和状態の形成に伴う間欠的な揺動が内在するとともに、本質的に強いトロイダル電流が流れており、炉心プラズマとしての観点からは、安定かつ効果的なオーム加熱が期待できる一方で、それが故に中心付近でのテアリングモードに対して不安定となりやすく、複数の有理面が近接する為に、

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、最近注目されているのは、単一のモードに揺動を集中させ、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考え方である。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(SHax)状態が、国内外の RFP 実験装置で実験的に確認されており、シミュレーション解析も進んできている。我が国でも京都工繊大の低アスペクト比 RFP 装置 RELAX において、ヘリカル構造が回転している様子が観測されるなど、この方面での研究が進んでいる。

本研究は、過去十数年来、核融合科学研究所においてヘリカルおよびトカマクを対象として開発されてきた 3次元非線形 MHD シミュレーションの手法を RFP プラズマに適用したものであり、核融合科学研究所と京都工繊大との共同研究として進められた。シミュレーションは、ヘリカル構造の特性と形成ダイナミクスを明らかにすることを目的とし、核融合科学研究所で開発された汎用非線形 MHD コード「MIPS」を用い、RELAX の実験体系を境界条件とし、RELAXFit コードにより再構成された実験平衡配位を初期値として、長時間に及ぶ振る舞いを追跡した。

計算結果は、 $m/n=1/4$ (m, n はそれぞれポロイダルおよびトロイダルモード数) の抵抗性モードの支配的成長を示し、その飽和にともなってトーラス全体、とくにコア領域において $n=4$ の変形を伴った緩和状態に達した。またポロイダル断面は、ホローで、且つそら豆型の特徴的な圧力分布を示した(図 3.3.5-10)。これらの時間発展は、原因となる初期線形不安定モードが、安全係数が $1/4$ の有理磁気面が存在する場合の共鳴モードの場合でも、また存在しない非共鳴モードの場合でも、広く同様に見られ、これらの徴候は実験観測事実とも一致する。

本研究は、大学研究室における小～中規模の実験と、核融合科学研究所の数値実験研究プロジェクトが、核融合科学研究所の一般共同研究、とくにネットワーク型共同研究の枠組みを活用して遂行されたものであり、大学・核融合科学研究所のもつ資源を有機的に活用した例となっている。また本研究課題の着想は、RFP およびコンパクトトーラスの高ベータ環状閉じ込め概念の総理解を目的とし、学生を含む若手研究者を中心とした大学コミュニティが核融合科学研究所において重ねてきた議論から立ち上がっており、核融合科学研究所の共同研究および人材育成システムによる成功例の一つとして挙げられる。

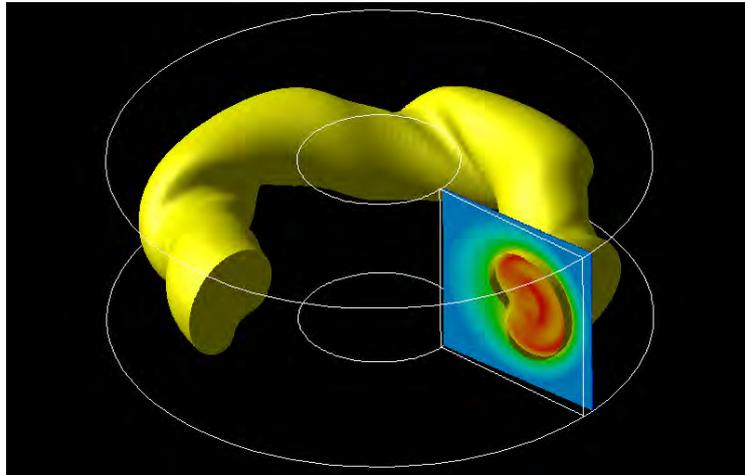


図 3.3.5-10 RFP におけるヘリカル構造の発現の様子（非線形 MHD シミュレーションによる結果の等圧面表現）。

・磁気島と交換型不安定性

LHD プラズマの磁気島

LHD のように磁気島がポロイダル方向に固定されその周りに流れがある場合、分極電流は従来の評価値（冷たいイオン近似を用いた場合）の数十倍に大きくなることが明らかになった（図 3.3.5-11）。そして、磁気島周りの流れの方向が電子の反磁性方向の場合、磁気島はヒーリングされ、流れの方向がイオン反磁性方向の場合磁気島を駆動することが明らかになった。

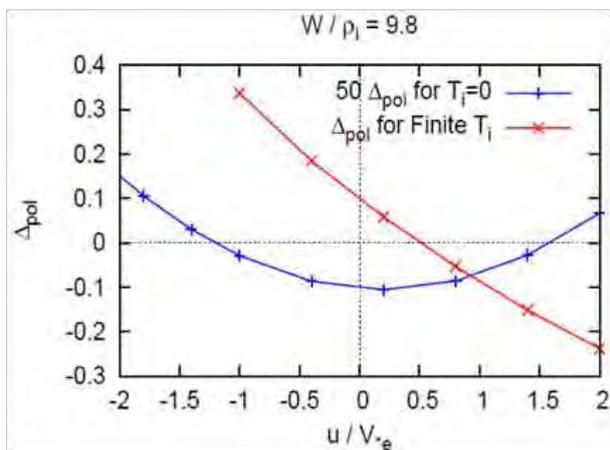


図 3.3.5-11 赤線：分極電流による磁気島の駆動の評価、青線：従来の分極電流を 50 倍した線。正が磁気島を駆動、負が磁気島をヒーリング。 u は流れ速度。

インターチェンジモードの非線形発展

LHD プラズマでは回転変換が 1 の面でインターチェンジ不安定性が現れる。MHD 理論によるとインターチェンジ不安定性は短波長の方が不安定であるが、一方、実験では最も長い波長 $(m, n)=(1, 1)$ モードの成長が観測される。この食い違いを理解するためにインターチェンジ不安定性の非線形シミュレーションを行った。その結果、初期に短波長のモードが成長するもののその揺動レベルは低く、その乱雑な揺動の中から長波長モードが成長することが明らかになった (図 3.3.5-12)。LHD 実験で観測される $(m, n)=(1, 1)$ モードはこの長波長のモードであると理解できる。

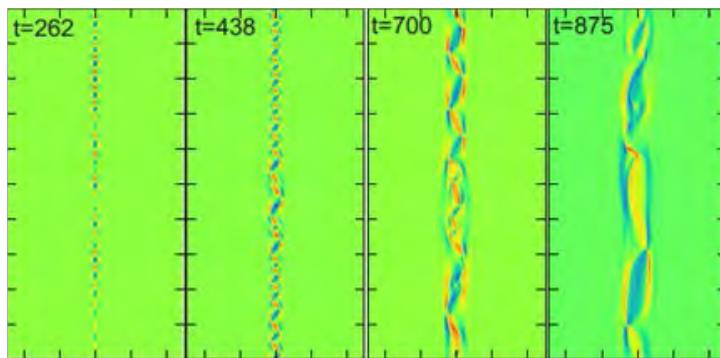


図 3.3.5-12 インターチェンジモードによる揺動。初期に短波長モードが成長し、その揺動の中から長波長モードが成長する。

トカマクプラズマの磁気島

新古典テアリングモード (NTM) は ITER などの大型トカマク装置のプラズマベータ限界を制限するとともにディスラプションの原因になる。NTM は非線形の不安定性であり、有限振幅の磁気島 (種磁気島) が外部から与えられることにより成長すると考えられている。二流体方程式のシミュレーションにより、運動論的バルーニングモードによる乱流が種磁気島を作り得ることを示した。また、磁気島の幅が Larmor 半径の 5 倍程度以上であると、分極電流が磁気島成長を駆動することを明らかにするとともに、磁気島は微小な速度でポロイダル方向に回転することを明らかにした。さらに、磁気島による磁場揺動が微視的不安定性 (イオン温度勾配不安定性) に与える影響を調べた。その結果、磁気島の O 点を実効的に悪い曲率領域になり磁気島の幅が ITG の幅より大きい場合 ITG の成長率は磁気島がない場合より大きくなることが明らかになった。乱流と磁気島の相互作用は複雑である。その相互作用中で、微視的乱流 (運動論的バルーニングモード) が巨視的 MHD 不安定性に与える影響を 3 次元トラスシミュレーションで調べた。その結果、乱流によって生じたゾーナル流が巨視的

MHD 不安定性を抑えることを明らかにした。磁気島はしばしば爆発的に成長する。磁気リコネクションを伴った力バランスの崩れによりダブルテアリングモードの爆発的成長を理解した。

・ 拡張 MHD モデルを用いた平衡状態の解析

磁場閉じ込め核融合プラズマにおいては、燃料注入や加熱のために中性ビームが入射されることによって駆動される流れや、乱流状態から自発的に励起する帯状流などが存在し、これらの流れが不安定性の安定化や乱流抑制などの閉じ込め改善に重要な役割を果たすことが近年明らかになってきた。そのような改善された閉じ込め状態において高温・高密度な中心部とその周辺部を隔てる境界において急峻な温度や密度の変化がみられる。巨視的なプラズマの振る舞いを記述する磁気流体 (magnetohydrodynamics, MHD) モデルでは表すことのできない微視的な効果はそのスケール長がプラズマの物理量の勾配のスケール長に近づくときに顕著となる。磁気流体方程式に微視的な効果を導入した拡張磁気流体方程式を用いて、そのような平衡状態を表わすモデルの構築を行った。このような平衡モデルは、拡張磁気流体シミュレーションの初期状態としての応用が期待できる。

電磁流体力学モデルを用いたプラズマの軸対称静止平衡状態は、磁束関数に対する Grad-Shafranov (GS) 方程式から得られる。拡張磁気流体モデルにおける GS 型の平衡方程式の導出には、高ベータトカマクプラズマに対する簡約化 MHD の手法を用いて問題を単純化した。流速が遅い磁気音波の位相速度に相当するポロイダル音速程度の流れと微視的な効果は、平衡方程式において高次の効果となる。このような高次の効果を含む簡約化 GS 方程式の解の性質を理解するため、まず一流体 MHD におけるポロイダル音速程度の流れを含む平衡方程式に対し、解析解を求めた。ポロイダル音速で特徴付けられる磁気音波の機構による圧力分布と磁場構造の変形を伴う流れをもつ高ベータトロイダル平衡に対する解析解はこれまでにない新しいものである。この解を用いて、ポロイダル流速に対する磁気軸のプラズマ中心からのずれや、圧力の最大値を与える点の磁気軸からのずれ、および高ベータによる平衡限界の変化に関する解析的な表式を示した。

次に、ポロイダル音速程度の流れがあるときの有限イオン温度効果をもつ二流体モデルにおける平衡方程式を導出し、数値解析を行った。核融合プラズマのようにイオン温度が高温であるときに顕著となる有限 Larmor 半径効果を平衡方程式に導入した。得られた流れの効果が含まれる 2 次の磁束関数に対する GS 方程式にイオンの反磁性ドリフトと、有限 Larmor 半径効果であるジャイロ粘性による反磁性ドリフトの相殺

効果が現れた。有限イオン温度効果がない場合の二流体平衡において、イオンの磁場への凍りつきが破れるためイオンの流れ関数の等高面が磁気面からずれることが知られているが、この効果にイオン温度効果が加わった表式が、2次のイオンの流れ関数に対して得られた。この方程式を有限要素法によるコードを用いて数値解析を行い、磁気面と等圧力面そしてイオンの流れ関数の等値面が一致しない [図 3.3.5-13] という事実と、電場の符号に対して非対称であるという流れをもつ二流体平衡の特徴とイオン反磁性ドリフトの大きさとの関係を明らかにした。この研究において導出した二流体方程式を用いたトカマク平衡の数値解析が京都大学のグループでなされ、その成果に関する論文[D. Raburn and A. Fukuyama, Phys. Plasmas 17, 122504 (2010)] において、“Ito-GS equations” として引用された。

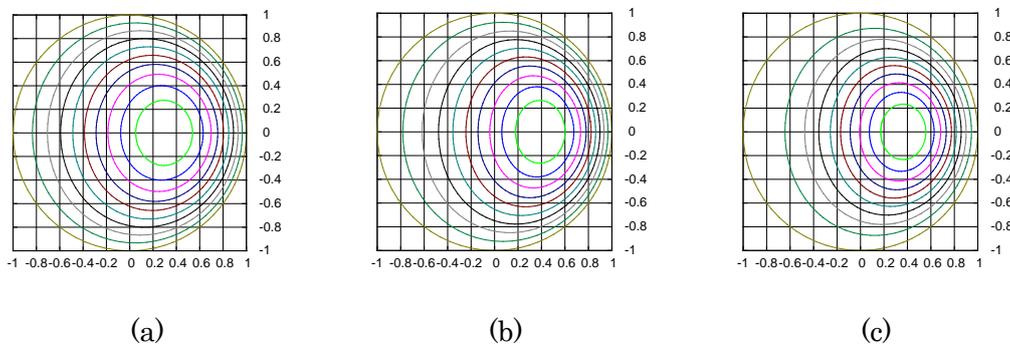


図 3.3.5-13 トーラスのポロイダル断面における(a)磁気面、(b)圧力の等値面、(c)イオン流れ関数の等値面

核融合プラズマ中の流れが中性ビーム入射によって駆動される場合などにおいて、プラズマは磁場に平行な方向と垂直な方向とで強い圧力の非等方性を示すため、上で述べた有限 Larmor 半径効果を含む流れをもつ二流体平衡方程式をさらに拡張し、圧力の非等方性とそれに伴う熱流束の効果を導入した。得られた2次の磁束関数に対する Grad-Shafranov 型の平衡方程式には、流れと微視的效果に加え非等方圧力の効果が含まれているが、線形の2階偏微分方程式となっており、比較的簡単に解くことができる。一流体 MHD 極限では解析解が得られ、一流体 MHD 平衡におけるポロイダル音速程度の流れの効果や、非等方圧力と熱流束を導入することで流れの効果が断熱圧力の場合とは定性的に異なる平衡解が解析的に得られた。次に、流れと二流体及び有限 Larmor 半径効果、そして熱流束を伴う非等方圧力を導入した平衡方程式に対し、有限要素法で解く数値計算コードにより数値解を求めた。磁場構造、イオンの流れ関数に加え、イオンと電子のそれぞれに対する圧力の磁力線に対して非等方な分布なども求めることができ、理想 MHD 静止平衡とは大きく異なる平衡状態が得られた。

・ 拡張磁気流体モデルによる不安定性解析

バルーニング不安定性、交換型不安定性などの巨視的不安定性の非線形飽和は現実的な散逸パラメータを用いた一流体 MHD シミュレーションで説明する事が困難である。このため、二流体効果による飽和を検討している。この一環として、2次元ポロイダル面の一部を切り出し、2.5次元拡張 MHD 不安定性シミュレーションにより、Rayleigh-Taylor 不安定性、Kelvin-Helmholtz 不安定性の線形成長及び非線形飽和について研究を行った。

ポロイダル断面を模した2次元平面において速度場を2成分、磁場を3成分とする2.5次元シミュレーションコードを用い、トラスプラズマに適したパラメータで Rayleigh-Taylor 不安定性に関するシミュレーションを行った。図 3.3.5-14 はこの不安定性による典型的なマッシュルーム構造を密度の等高線として表示したものである。パラメータサーベイの結果、イオンスキン長効果による不安定モードの成長率(図 3.3.5-15)の低減など、宇宙プラズマなどを念頭においた高 β プラズマの G モードシミュレーションと同様の傾向が得られた。また、イオンスキン長効果、有限ラーモア半径の導入によりドリフト運動が発生し、レイリー・テイラー型不安定性で形成されるマッシュルーム構造が変形する等の成果を得られた。Kelvin-Helmholtz 不安定性によるシミュレーションについても同様の研究が進行している。

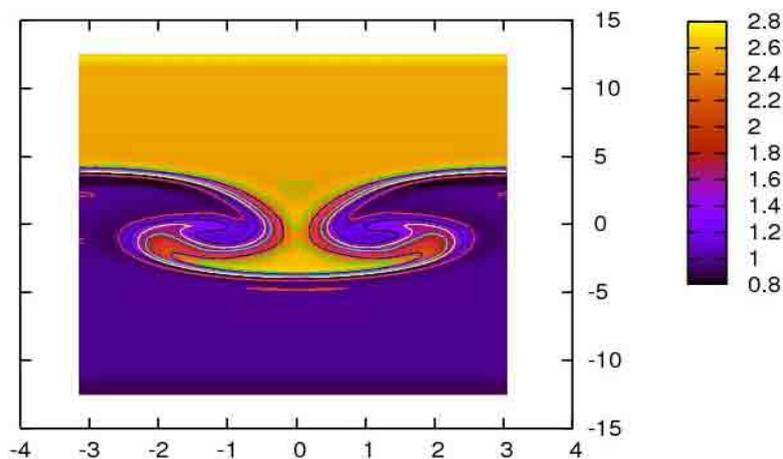


図 3.3.5-14 2.5次元拡張 MHD 方程式による Rayleigh-Taylor 不安定性シミュレーション。カラーマップの赤は高い密度、青は低い密度を示す。イオンスキン長が大きくなると、このマッシュルーム構造が左右方向に崩れる。

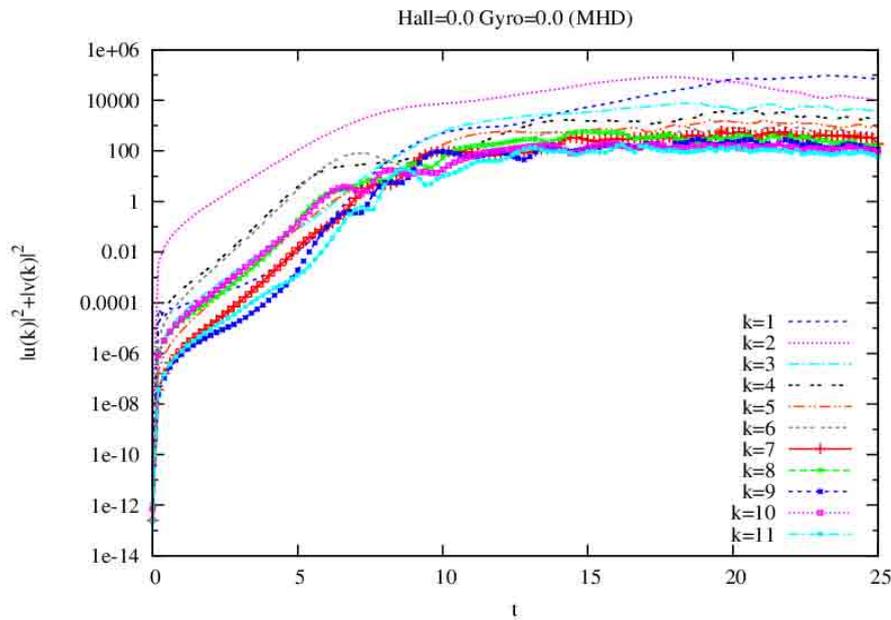


図 3.3.5-15 フーリエ分解による固有モードの波数ごとの成長率の評価。

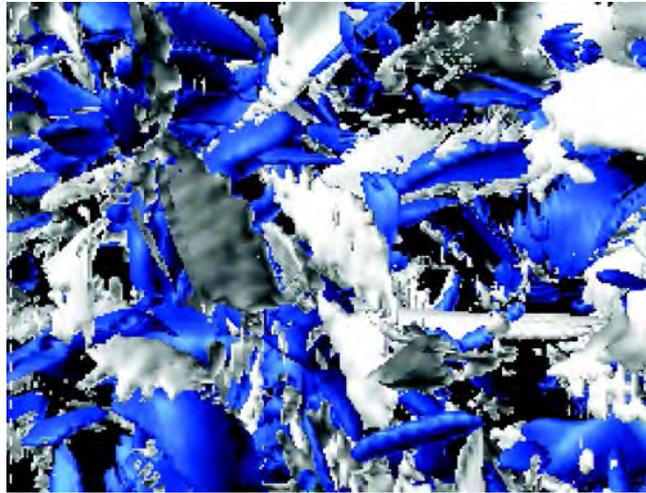
・ 拡張 MHD 乱流における非線形相互作用

トーラスプラズマについてイオンスキン長、イオンラーモア半径を十分に解像する高解像度拡張 MHD 方程式による不安定性シミュレーションを目指した研究を行っている。このようなシミュレーションでは乱流化した流れによる微小尺度の運動や、高周波波動を発生するホイッスラー波の扱いが重要である。シミュレーションをより簡便にしつつ、重要な物理要素のみを取り入れる手法として、ラージエディシミュレーションに取り組んでいる。このための基礎調査として、拡張 MHD 乱流のシミュレーションを行った。

図 3.3.5-16(a)は一様 Hall MHD 乱流シミュレーションにおけるエンストロフィー密度及び電流密度の等値面である。イオンスキン長に由来する Hall 効果が存在する場合、Hall 効果がない場合に比べてエンストロフィー密度の等値面が細分化されることがわかった。Hall 効果が直接影響を及ぼすのが磁場であることから、速度場・磁場間のエネルギー交換がこの構造変化の本質である事がわかる。図 3.3.5-16(b)は、Hall 項による磁場のスケール間エネルギー伝達関数を、横軸をコルモゴロフ長で規格化した波数で表示したもの(記号■)である。ラージエディシミュレーションを想定したローパスフィルターを用いて乱流場を粗視化し、同様の関数を表示したところ(記号*、△)、低波数部において元の関数と著しく異なる振る舞いが見られた。このように、Hall 項が存在する場合、乱流磁場の大規模スケールと小規模スケール成分が密接に相関を持ち、単純な粗視化は

大規模な磁場の変化を導くこと、したがって、単純な数値粘性等の導入は不適當である事が明らかになった。

(a)



(b)

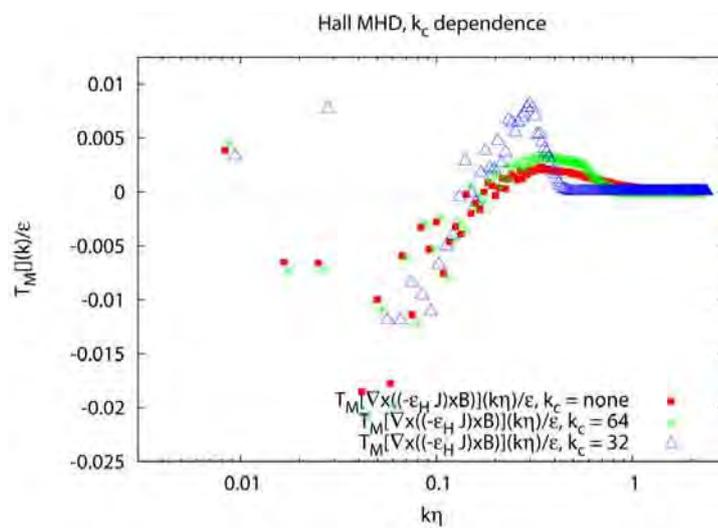


図 3.3.5-16 (a) Hall MHD 乱流におけるエンストロフィー密度(青)及び電流密度 (灰色) の等値面。(b)Hall MHD 乱流における電磁場のスケール間エネルギー伝達関数 (■) 及びこれに対するローパスフィルターの影響(*, Δ)。

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共同研究

(1) プラズマシミュレータ共同研究

数値実験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。一般共同研究の公募では平成 23 年度より数値実験研究プロジェクトのプラズマシミュレータ共同研究として分類されている。このプラズマシミュレータ共同研究ではプロジェクトの骨格となるテーマを設定している A.研究所提案型共同研究と、幅広い意味での数値実験研究の目的に添ったもので、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 B.応募者提案型共同研究から構成されている。図 4.1-1 は平成 20 年度から 24 年度の数値実験プロジェクト共同研究採択数で、期間中 120 件前後でほぼ一定で推移していることを示している。図 4.1-2 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。

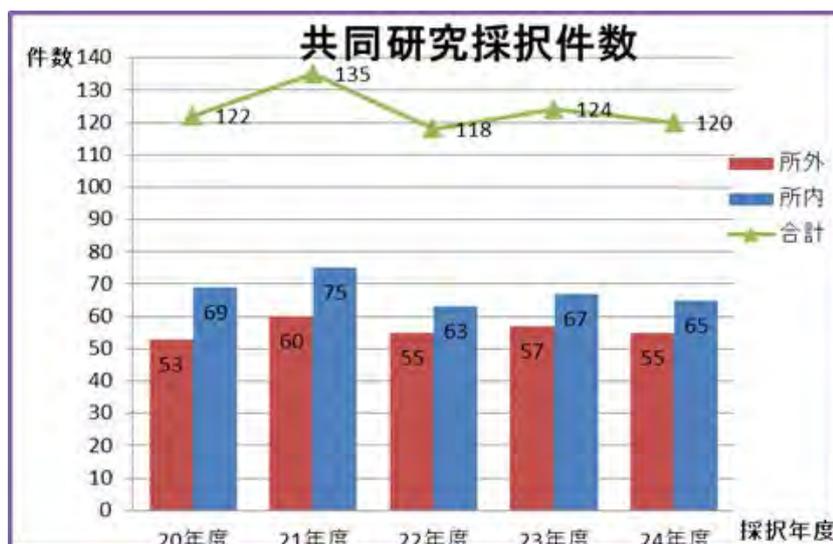


図 4.1-1 理論・シミュレーション関連共同研究採択件数

図 4.1-3 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 50 名に対して、所外利用者が 100 名をこえ、所内利用者のほぼ 2 倍となっており、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。

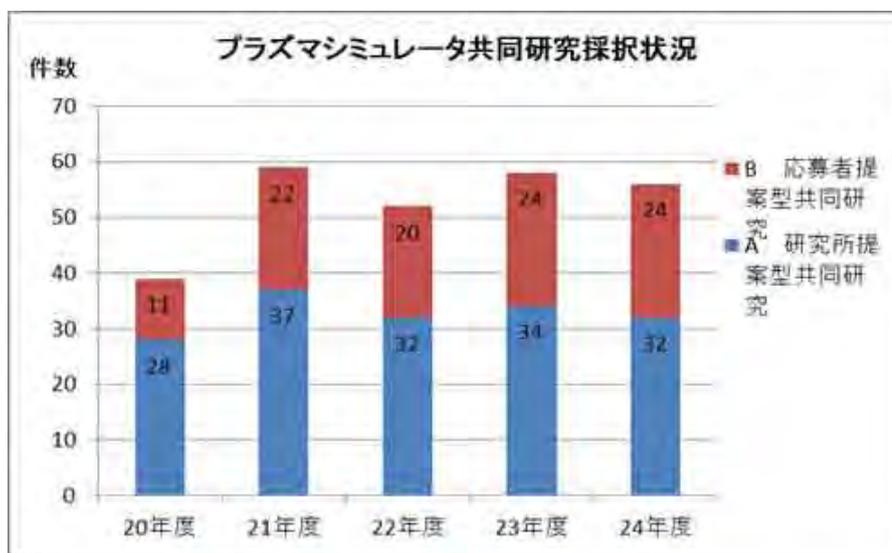


図 4.1-2 プラズマシミュレータ共同研究採択状況。

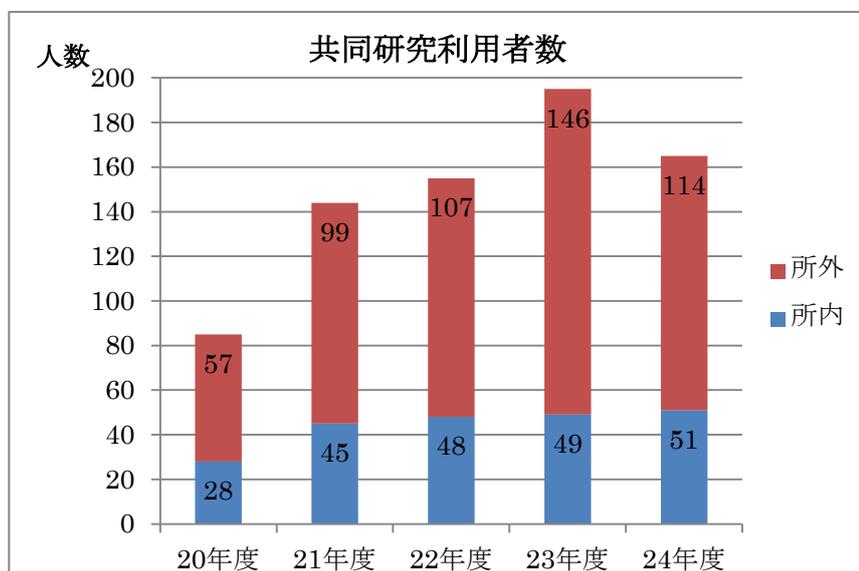


図 4.1-3 プラズマシミュレータ共同研究利用者数。

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。

(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20年以降の開催状況は以下のとおりである。

平成20年(2008年) 9月24日～25日 参加者 180名 (延べ人数)

*海外からの招待講演2名、市民学術講演会を合わせて開催

平成21年(2009年) 9月17日～18日 参加者 120名 (延べ人数)

平成22年(2010年) 9月14日～15日 参加者 160名 (延べ人数)

平成23年(2011年) 9月13日～14日 参加者 108名 (延べ人数)

平成24年(2012年) 9月11日～12日 参加者 115名 (延べ人数)

このシンポジウムではプラズマシミュレータによる研究報告、プラズマシミュレータの運用に関する報告及び議論の他、HPCI、ITER-BA(IFERC-CSC)、JIFT等、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。



図 4.1-4 プラズマシンポジウムの会議風景

(3) 大学との共同研究

・名古屋大学

非接触プラズマ中の炭素損耗・堆積過程の実験研究

磁場閉じ込め方式熱核融合装置のダイバータ領域では、ダイバータ板が高熱流プラズマに曝されることにより材料が損耗することが重大な問題となっている。名古屋大学・大野教授を中心に、トロイダルダイバータ模擬試験装置 NAGDIS-T を用いて非接触プラズマを生成し、炭素材の損耗過程を評価する実験が実施された。非接触重水素プラズマ中での炭素材損耗の詳細を明らかにするため、炭素材としてグラフェンシートが多層構造をもつ高配向熱分解黒鉛(HOPG)を用いた(図 4.1-5)。

数値実験プロジェクトプラズマ・壁相互作用グループにより実行された HOPG に対する分子動力学シミュレーションの結果との対比を行い、定性的に一致していることを確認した。グラフェンシート端部のほうがより損耗を受けやすい構造になっていると考えられることが結論された。

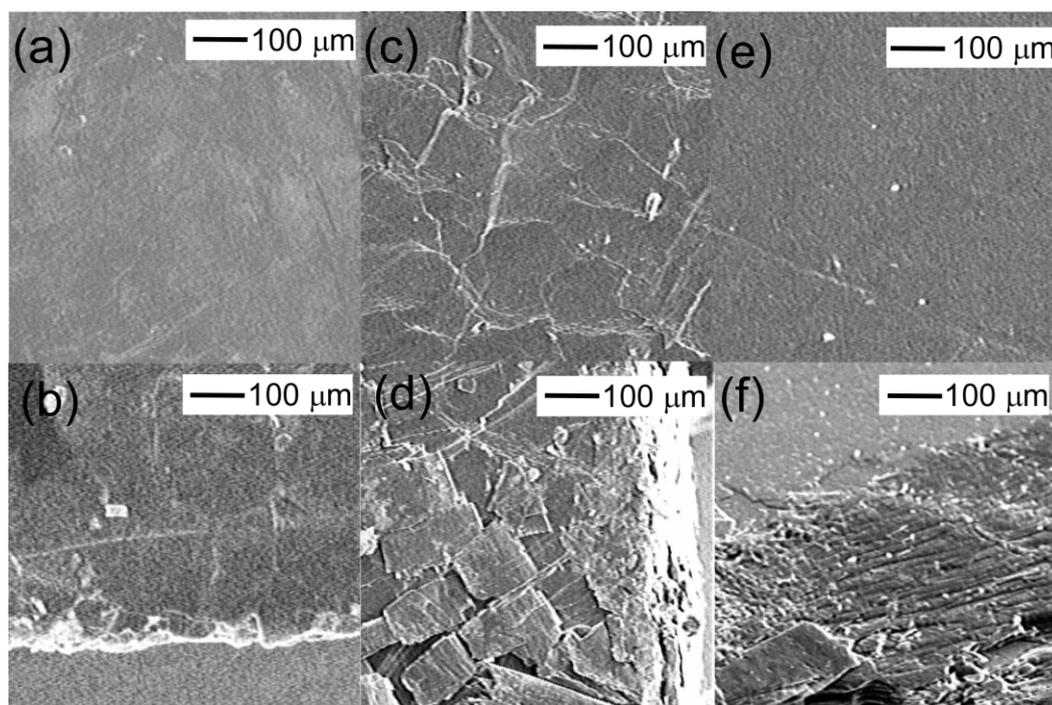


図 4.1-5 HOPG 試料の表面 SEM 画像. (a), (b)未照射試料, (c), (d)接触プラズマ照射後, (e), (f)非接触プラズマ照射後の試料中央部と端部

・名古屋工業大学

平成 21 年 7 月 8 日に締結された、名古屋工業大学との「連携・協力の推進に関する基本協定」に基づき、共同研究および共同セミナーを開催している。

数値スキーム開発と乱流に関する共同研究

乱流シミュレーションの高精度技法の開発を進め、擬スペクトル法・コンパクト法ハイブリッド・シミュレーション手法の開発に成功、*J. Comput. Phys.* 誌に出版した。また、圧縮性乱流研究について共同研究を進め、日本流体力学会等で発表（投稿論文準備中）等の成果を挙げている。これらの連携を推進するため、名古屋工業大学多治見駅前施設（クリスタルプラザ内）会議室を、研究打ち合わせに利用可能とした。

T. Gotoh et al. / *Journal of Computational Physics* 231 (2012) 7398–7414

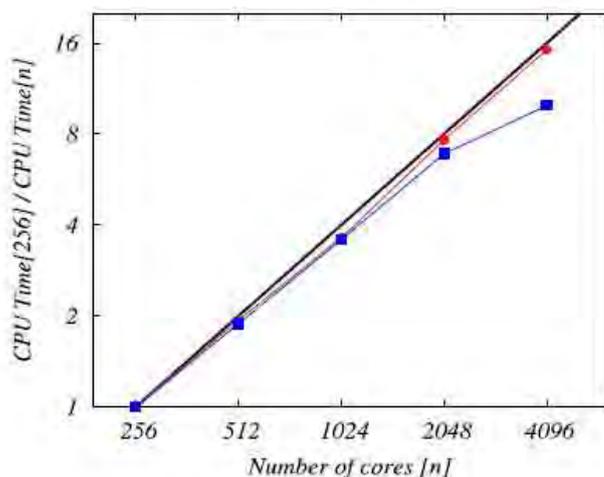


図 4.1-6 開発した新スキームのスケールビリティ。3次元 FFT(■)に比べて新スキーム (●) はコア数に対して綺麗なスケールリングを示す。

共同セミナーの開催

共同セミナーは合計 6 回に及び、そのうち直近 3 回の記録は下記のとおりである。

1. 第 4 回 NIFS-NIT 共同セミナー 「粒子系から連続系へ」
2011 年 7 月 29 日、シミュレーション科学研究棟 1F 会議室
参加者：外部講師 2 名、NIFS・総研大 12 名、NIT 22 名、その他 1 名
2. 第 5 回 NIFS-NIT 共同セミナー「乱流のシミュレーションの新たな展開」
2012 年 2 月 13 日、シミュレーション科学研究棟 1F 会議室
参加者：外部講師 2 名、NIFS・総研大 4 名、NIT 8 名、その他 1 名

3. 第6回 NIFS-NIT 共同セミナー「粒子系から連続系へ」
2012年9月24日、シミュレーション科学研究棟 1F 会議室
参加者：外部講師2名、NIFS・総研大 8名、名工大 20名。

・同志社大学

赤外線吸収分光法を用いた炭素ダスト生成過程に関する研究

核融合炉内に炭素ダストが生成し、そこにトリチウムが蓄積するという問題が指摘されており、核融合炉開発における重要課題の一つとなっている。しかし、炭素ダストの生成・成長過程の詳細は明らかになっていない。そこで、数値実験プロジェクトプラズマ・壁相互作用グループでは、分子動力学シミュレーションを実行し、原子や二原子分子状態から自己集積によりグラフェン状炭化水素分子が形成される過程を示した。

一方、炭化水素分子形成過程をプラズマ実験において実証することを目指し、同志社大学・和田教授を中心に新しい実験装置（図 4.1-7）の設計・製作を行っている。本研究では、小型ダスト生成装置内で生成される炭素ダストに対し、十分な時間分解能をもつ赤外線吸収分光の時系列的観測により分子構造の経時変化を捉えることを企図している。

小型ダスト実験装置の動作確認として円筒炭素壁内側で Ar プラズマ放電を行った結果、図 4.1-8 のように μm オーダーの炭素ダストが生成されることが確認されており、準備が着実に進んでいることが示された。今後、赤外線吸収分光測定系を設置し、円筒炭素内壁表面に水素プラズマ放電を接触させ、炭素ダスト生成過程の赤外線吸収分光の時系列観測を行うことで、本研究の目的である炭化水素分子形成過程のプラズマ実験における実証を目指す。



図 4.1-7 小型ダスト生成装置

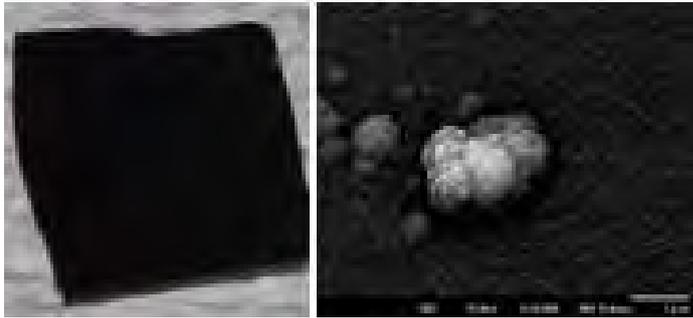


図 4.1-8 生成した炭素ダスト

・信州大学

LHD 中性粒子輸送コードの構築

核融合周辺プラズマの水素分子は、炉心プラズマの電子やイオンの供給源になり、また、炉心の高温高密度のプラズマによる炉壁の損耗を低減させることが期待されている。周辺プラズマの水素分子の反応や流れの詳細を理解するために、水素分子の反応や移動を追跡する中性粒子輸送コード、および水素分子の各励起準位ポピュレーションを算出する衝突輻射モデルの開発を進めてきた。

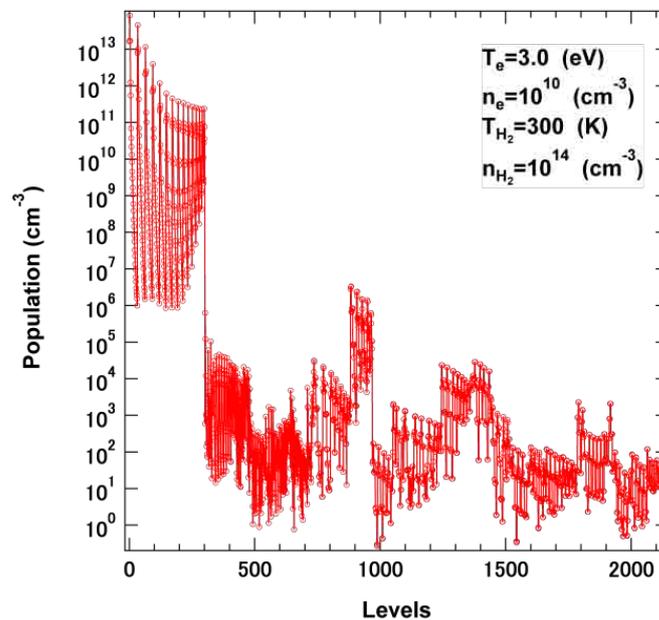


図 4.1-9 電子温度 3.0 eV、電子密度 10^{10}cm^{-3} 、水素分子温度 300K、水素分子密度 10^{14}cm^{-3} のときのポピュレーション分布

・山形大学

HTS 中を流れる遮蔽電流密度の3次元時間発展解析

高温超伝導体(HTS)は核融合マグネット, エネルギー貯蔵システム, 送電ケーブル, 磁気遮蔽装置等の様々な工学的応用に用いられている。超伝導マグネット設計には遮蔽電流密度の評価が必要不可欠であるため, 遮蔽電流密度を解析するための様々な手法がこれまで提唱されてきた。しかしながら, 殆ど全ての提案法は穴やクラックを含まない HTS 試料にだけ適用できるものであった。本研究の目的は, 穴やクラックを含む HTS 薄膜中を流れる遮蔽電流密度の時間発展を解析するための安定な高精度計算手法を開発し, 同法を用いてクラックが永久磁石法及ぼす影響を数値的に調べる。これにより, 核融合炉設計に必要な超伝導マグネットの遮蔽電流密度の基礎測定技術に数値計算により貢献することができた。

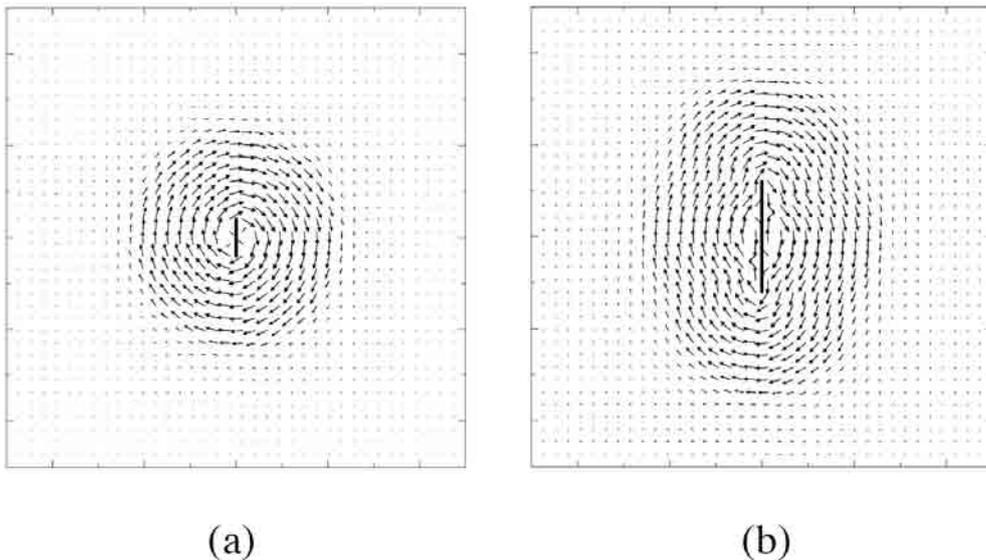


図 4.1-10 遮蔽電流密度の空間分布。クラック幅が 3.2 mm(a),9.6 mm(b)。

・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

逆磁場ピンチ (RFP) 装置において普遍的に観測されているヘリカル構造の自発的
形成過程について、3次元非線形 MHD シミュレーションにより発生物理機構を調べた。
シミュレーションは核融合科学研究所の MIPS コードを用い、初期値には、京都
工芸繊維大の RELAX 装置の実験配位を模擬した再構成平衡を RELAXFit コードによ

って計算して用いた。その結果、実験結果をよく再現する $n=4$ 成分の卓越したヘリカル構造が得られた。また極端にホローでそら豆型の特徴的なポロイダル圧力分布の形成を示唆した。

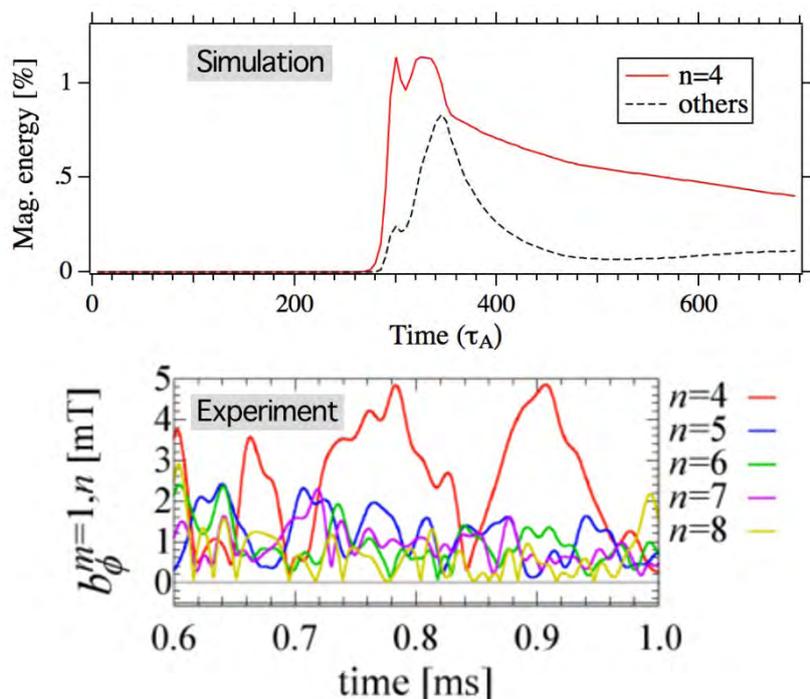


図 4.1-11 トロイダルモードごとの磁気エネルギー乃至磁場強度の揺動の時間発展。(上)MIPS シミュレーション結果[核融合科学研究所] (下) RELAX 実験結果[京都工織大学]

・群馬大学

加速 CT 再中性化による高速中性粒子フロー生成のハイブリッド・シミュレーション

核融合科学研究所-兵庫県立大の共同研究により、CT 入射技術を用いた燃料供給を可能とすべく SPICA 装置が開発中である。SPICA 先端部に中性化セルを装着し、通常のガスパフ方式よりも入射速度が一桁大きい高速中性粒子フロー生成法の開発が進められている。その加速 CT の中性化過程を、イオン粒子-電子流体ハイブリッド・シミュレーションにより再現した。完全な中性化に必要とされる中性化セル長やガス圧などの評価を行うことで効率的な設計条件を模索し、中性化による電流減衰や閉じ込め磁場の消失による熱拡散の問題などフィジビリティを検討した。図 4.1-12 では、CT 内の高速イオンはセル突入後にすぐ中性化され始めるが、荷電交換反応によって生じる室温程度の低速イオンが CT の磁場に捕捉され、中性粒子フロー変換率を低下

させていることがわかる。長さ 1m の中性化セルを通過して約 6 割の変換率となることが示された。

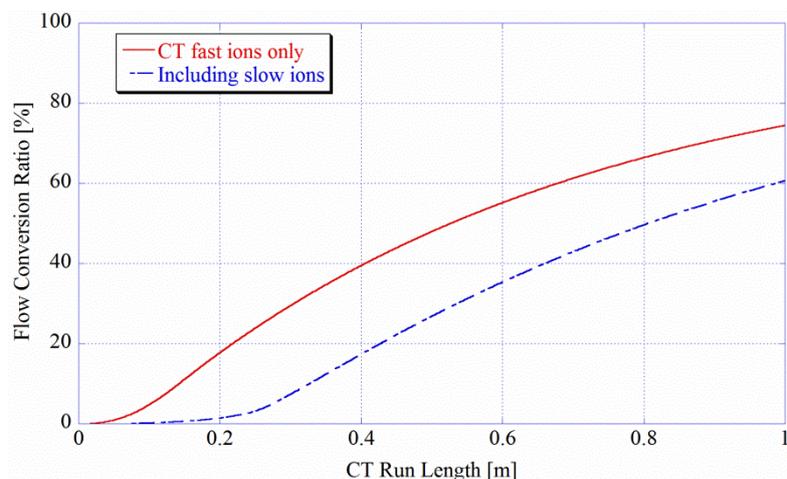


図 4.1-12 CT の中性化セル通過距離に対する中性粒子フローへの変換率時間推移。実線は CT 内の高速イオンのみ、一点鎖線は追従する低速イオンを考慮した場合を表す（最大密度 $9.9 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$, 最大温度 10 eV, 最大磁場 0.2 T, 射出速度 200 km/s）。

・ 京都大学

統合輸送コード TASK（主にトカマクプラズマ対象）のモジュールの拡充

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（主にトカマクプラズマ対象）のモジュールを拡充することで開発を進めている。核融合科学研究所においては、3次元平衡との連携、ヘリカルプラズマ特有の物理機構を記述する数値解析コード（モジュール）の追加・精度向上、LHD プラズマの加熱装置に則したモジュール整備、それらに基づく LHD 実験解析用統合が主な作業項目である。京都大学では、主に、予測型統合輸送コードの構築と、その LHD 実験による検証作業を行っている。例えば、新古典拡散の他に複数の異常輸送モデルを仮定して、LHD 実験に即した NBI 加熱、密度条件での到達温度を予測し、それと LHD 実験結果との比較を通じて、理論モデルの妥当化を図る、などである。用いているモジュールは共通のものであり、双方の研究進展を相乗的に進めている。京都大学からの LHD 実験データアクセスの利便性向上のために、既設の NIFS-京大間専用線に数値実験プロジェクト予算によって、PC を新設し、理論モデル妥当化研究の加速を図りつつある。

- 神戸大学

流れに凍りついた磁力線の VR 可視化

キネマティックダイナモの仮定に基づき、流れに凍りついた磁力線を対話的に可視化し、解析する VR 可視化ツールを開発した。初期条件は 3 次元マウス Wand を使って 3 次的に自由に指定できる。流れに凍りついた磁力線が、始めは短かったが、引き伸ばされる様子を 3 次的に観測することが可能となった。

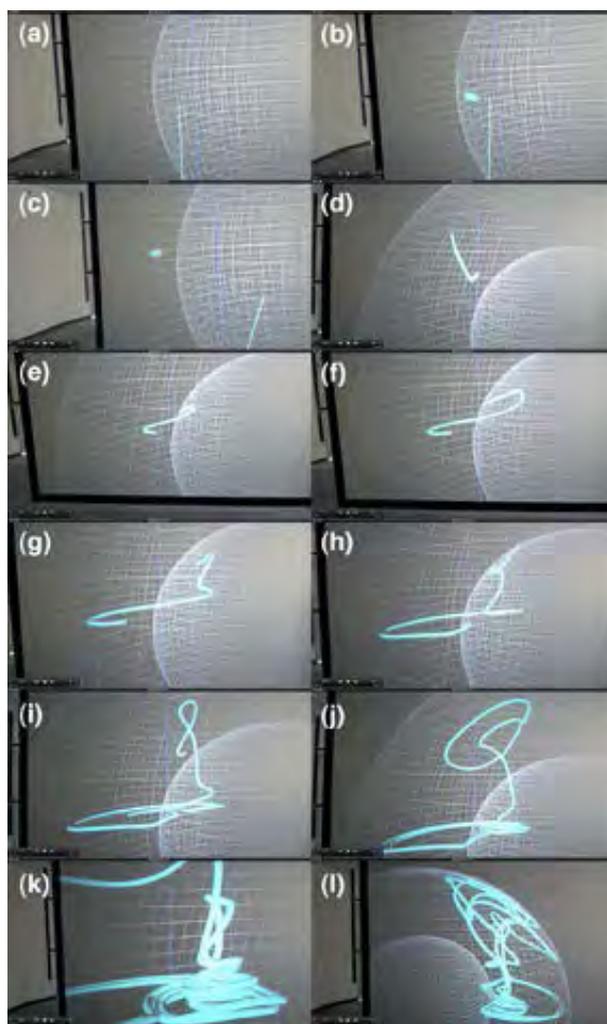


図 4.1-13 1 面スクリーン上に表示された VR time line 法による可視化。流れに凍り付いた（はじめは）短かった磁力線が、引き伸ばされる様子が 3 次的に観察される。

VR 可視化フレームワークの構築

インタラクティブなアプリケーション操作システム(Multiverse)や3次元音響システムの開発、3次元ベクトル場のリアルタイム流線可視化やVRタイムライン法、粒子シミュレーションの密度・速度分布可視化の手法開発、没入型VR装置のための新たな基本VRライブラリ(VR Juggler)の導入を行った。



図 4.1-14 VR 可視化フレームワーク。

・甲南大学

遠隔地共同作業の為の空間共有会議システムの構築

リアルな遠隔地コミュニケーションを実現するためのシステムとして、Kinect を利用した遠隔地共同作業のための空間共有会議システムの開発を進めた。このシステムでは、遠隔地にいる人間が同じ部屋にいるように感じさせるため、視覚と聴覚への働きかけや現実空間と仮想空間の合成を行っている。



図 4.1-15 空間共有会議システム。

・兵庫県立大学

PC 版 VFIVE の開発

デスクトップ PC 等で動作する VFIVE(Mobile-VFIVE)を開発した。GUI によって定量的なパラメータが設定可能である。可視化ソフトとして単独使用も可能であり、また、初期条件を記録したテキストファイルを通して、VR 装置で動作する VFIVE と連携が可能である。

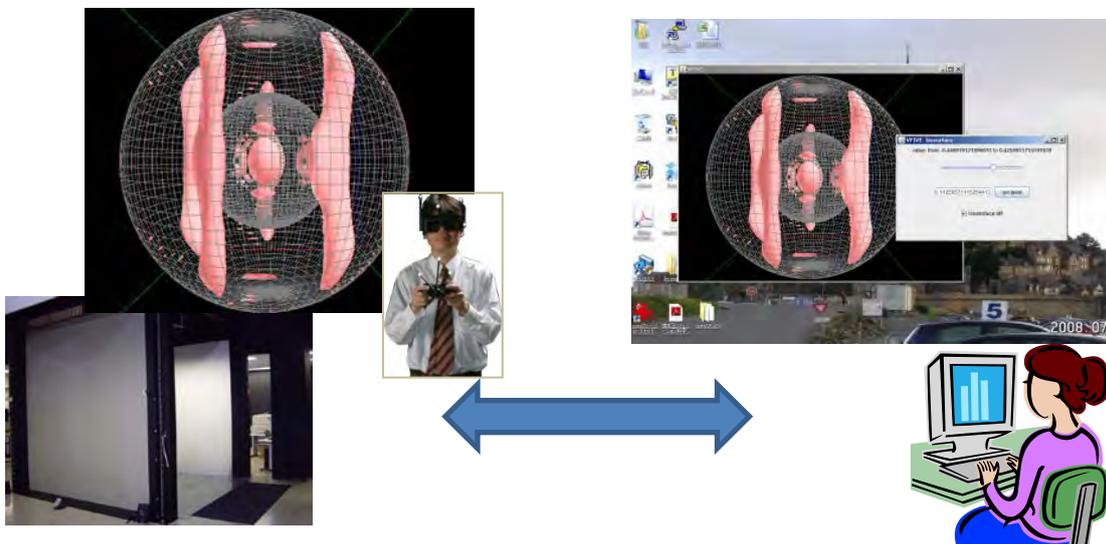


図 4.1-16 PC 版 VFIVE と CAVE 版 VFIVE の連携。

・兵庫県立大学と海洋研究開発機構

時系列シミュレーションデータの VR 可視化

シミュレーションの時系列データを順次読み込んで、VR 空間で時系列データを解析できる対話型可視化環境を開発した。離散的な時系列データは線形に補間される。また、この補間された電磁場データを使ってテスト粒子の軌道計算も行うことができる。

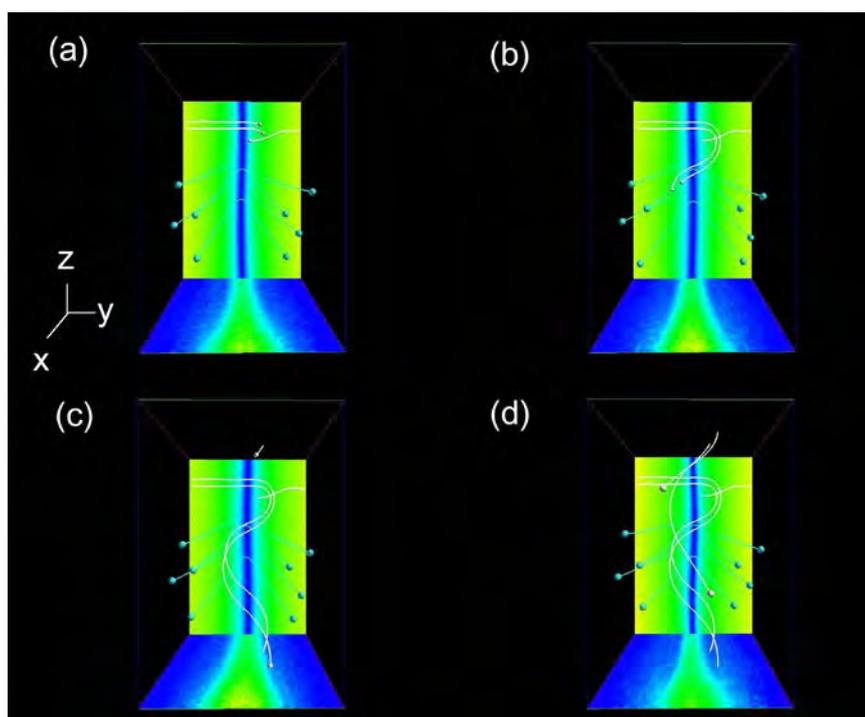


図 4.1-17 時系列シミュレーションデータの VR 可視化。

(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。

平成 19 年度（7 件）

研究会名			
発表件数	参加人数	参加者所属	内容
先進核融合炉における燃料と炉方式とに関する研究（富田）			
6 件	11 名	九州大, 九州東海大	先進核融合燃料の可能性とその先進核融合炉方式に関して議論.
能動的制御による高ベータプラズマの生成と維持（水口）			
22 件	28 名	日大、京都工繊大、群馬大、東大、兵庫県大、海上保安大、阪大、筑波大、早稲田大	中～小規模の実験装置と関連する理論研究との情報交換、個別トピックスについての議論
核燃焼プラズマのダイバータによる熱・粒子制御の理解を目的としたモデル開発とシミュレーション研究（富田）			
15 件	12 名	京大、徳島大、九州大、原子力機構、	ダイバータ特性解析に関する理論、シミュレーションのモデル化の成果報告と議論.
MHD 理論の進展とその周辺（市口）			
15 件	17 名	原子力機構、東大、京大、九大、広大	MHD 理論に関する種々の議論
SNET を用いた共同研究の進展（堀内）			
15 件	25 名	東工大、名大、京大、阪大、広島大、九大	遠隔共同研究 SNET に関する成果報告ならびに議論
微粒子プラズマ研究会（富田）			
41 件	49 名	名古屋大、九州共立大、東北大、大阪大、京都工繊大、横浜国立大、九州大、名城大、静岡大、岡山大、愛媛大、京都大、Joint Inst. for High Tem. Russia, Kurchatov Inst.,	核融合プラズマ中での微粒子の振る舞い、壁との相互作用の成果報告と議論.

		Russia, Max Planck Inst., Germany, Univ. of Sydney, Austraria	
プラズマ周辺の運動論シミュレーション (富田)			
5件	10名	京都大, 名古屋大, 原子力機構	核融合プラズマの境界層プラズマの構造とシミュレーションモデルの議論.

平成 20 年度 (5 件)

研究会名			
発表件数	参加人数	参加者所属	内容
微粒子プラズマ研究会 (富田)			
38 件	45 名	名古屋大, 東北大, 京都工繊大, 横浜国立大, 九州大, 名城大, 静岡大, 岡山大, 愛媛大, 京都大, Joint Inst. for High Tem. Russia, Kurchatov Inst., Russia, Max Planck Inst., Germany	核融合プラズマ中、宇宙プラズマ中での微粒子の振る舞いの成果報告と議論.
SNET を用いた共同研究の進展 (山本)			
6 件	28 名	JAEA、筑波大、情報学研、東大、東工大、名大、京大、広島大、九大	遠隔共同研究 SNET に関する成果報告ならびに議論
核融合実験に関するバーチャル・ラボラトリ研究会 (山本)			
6 件	28 名	JAEA、筑波大、情報学研、東大、東工大、名大、京大、広島大、九大	遠隔地の実験装置を用いる双方向の遠隔実験参加を可能とする仮想実験サイトに必要となる技術等の議論

先進核融合炉の高性能化と燃料とに関する研究（富田）			
5件	10名	九州大, 東海大	先進核融合燃料の可能性とその先進核融合炉方式に関する議論.
自己組織化系高ベータプラズマの外部MHD制御と粒子制御技術への応用（水口）			
22件	42名	日大、京都工繊大、群馬大、東大、兵庫県大、海上保安大、産総研、阪大	中～小規模の実験装置と関連する理論研究との情報交換、個別トピックスについての議論

平成21年度（5件）

研究会名			
発表件数	参加人数	参加者所属	内容
微粒子プラズマ研究会（富田）			
40件	40名	名古屋大, 東北大, 京都工繊大, 横浜国立大, 九州大, 名城大, 静岡大, 岡山大, 愛媛大, 京都大, Russia, Max Planck Inst., Germany	核融合プラズマ中、宇宙プラズマ、実験室プラズマ中での微粒子の振る舞いの成果報告と議論.
SNETを用いた共同研究の進展（山本）			
3件	22名	原研、国立情報学研、東大、東工大、名大、九大	遠隔共同研究SNETに関する成果報告ならびに議論
核融合実験に関するバーチャル・ラボラトリ研究会（山本）			
5件	22名	原研、国立情報学研、東大、東工大、名大、九大	遠隔地の実験装置を用いる双方向の遠隔実験参加を可能とする仮想実験サイトに必要となる技術等の議論
先進燃料核融合炉の核燃焼特性と高性能化に関する研究（富田）			
5件	8名	九州大, 九州東海大	先進核融合燃料の可能性とその先進核融合炉方式に関する議論.

能動的制御による自己組織化高ベータプラズマの性能改善（水口）			
24 件	32 名	日大、京都工繊大、群馬大、東大、兵庫県大、海上保安大、産総研、阪大	中～小規模の実験装置と関連する理論研究との情報交換、個別トピックスについての議論

平成 22 年度（8 件）

研究会名			
発表件数	参加人数	参加者所属	内容
SNET を用いた共同研究の進展（山本）			
5 件	19 名	筑波大、情報学研、東大、東工大、京大、九大	遠隔共同研究 SNET に関する成果報告ならびに議論
核融合実験に関するバーチャル・ラボラトリ研究会（山本）			
4 件	19 名	筑波大、情報学研、東大、東工大、京大、九大	遠隔地の実験装置を用いる双方向の遠隔実験参加を可能とする仮想実験サイトに必要となる技術等の議論
先進燃料核融合炉の核燃焼特性と高性能化に関する研究（冨田）			
5 件	12 名	九州大、東海大、群馬大	先進核融合燃料の可能性とその先進核融合炉方式に関する議論.
非線形問題の解法と可視化に関する研究会（中村）			
1 回目 10 件	1 回目 14 名	山形大、兵庫県立大、成蹊大、東京工科大、立命館大、甲南大、京都工繊大、名古屋大、テキサス大	分子動力学法および、非線形偏微分方程式の数値解法、コンピュータ・グラフィックス、並列処理技術に関する研究会を 2 回開催
2 回目 9 件	2 回目 12 名		
一般共同研究、研究会「MHD 理論研究の進展と課題」（市口）			
19 件	19 名	原子力機構、東大、京大、京都工繊大、総研大	核融合プラズマにおける MHD 理論に関する議論
共同利用機関におけるセキュリティワークショップ（山本）			
14 件	29 名	KEK、理化学研、	共同利用機関におけるセキュリテ

		天文台、極地研、国文学研、総研大、静岡大、岡崎三機関、阪大	ィ問題などを中心とした情報ネットワークの運用に関する議論
高ベータ自己組織化プラズマの閉じ込めと輸送現象（水口）			
14 件	33 名	日大、京都工繊大、群馬大、東大、兵庫県大、海上保安大、産総研、新潟大	中～小規模の実験装置と関連する理論研究との情報交換、個別トピックスについての議論
物理シミュレーションにおける数理モデルと数値解析法の研究会（三浦）			
6 件	37 名	NIFS、名工大、京大、理化学研	「粒子から連続系へ」をテーマに、2つの物理系の相互作用を記述する物理モデルについて議論。

平成 23 年度（5 件）

研究会名			
発表件数	参加人数	参加者所属	内容
バーチャルリアリティ装置による表現法の追及（大谷）			
10 件	21 名	東大、JAMSTEC、防衛大学校、中部大学、甲南大学、神戸大学	可視化技法や表現法などの研究成果を報告し、VR 装置の活用について議論。
プラズマ-壁相互作用シミュレーション解析に関する研究会（中村）			
1 回目 17 件	1 回目 21 名	同志社大、横浜国立大、京都工繊大、名工大、分子研、名大、東京工科大、兵庫県立大、成蹊大、テキサス大、筑波大、原子力機構、愛工大、阪大、九州大	プラズマ-壁相互作用に関するシミュレーション研究者と、数値計算の高速化、高精度化、および可視化を行っている研究者が参加し、プラズマ-壁相互作用に関するシミュレーション研究について議論
2 回目 18 件	2 回目 36 名		

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(水口)			
32件	58名	日大、京都工繊大、群馬大、東大、兵庫県大、海上保安大、産総研、新潟大、阪大	中～小規模の実験装置と関連する理論研究との情報交換、個別トピックスについての議論
MHD理論研究の広がり(市口)			
19件	21名	原子力機構、東大、京大、京都工繊大、総研大、神戸大、海上保安大	核融合プラズマにおけるMHD理論やそれに関連する流体力学におけるフローに関する議論
物理シミュレーションにおける数理モデルと数値解析法の研究会(三浦)			
6件	15名	NIFS、名工大、筑波大、京大	密度成層、量子効果、ホール効果、粒子効果などの多様な効果を取り入れた乱流のシミュレーションにおける特徴的な数値計算手法や物理特性について最近の研究成果を紹介。

平成24年度(4件、1件予定)

研究会名			
発表件数	参加人数	参加者所属	内容
プラズマ-壁相互作用シミュレーション解析に関する研究会(中村)			
1) 12/21 9件	16名程度	同志社大、山形大、名大、東京工科大、	1) プラズマ-壁相互作用に関するシミュレーションについて議論
2) 3/14&15 15件 (予定)	15名程度	阪大、埼玉大、立命館、小野田病院、福島大、横国大、電通大	2) 非線形・可視化についての議論
マルチスケール数理モデリングと大規模シミュレーション研究会(三浦)			
4件	30名	NIFS、名工大、宇宙研、情報通信研	「粒子から連続系へ」をテーマに、2つの物理系の相互作用を記述する物理モデルについて議論。

バーチャルリアリティ装置における可視化技法(大谷)			
12 件	23 名	NIFS、神戸大、兵庫県立大、JAMSTEC、国立天文台、防衛大	各研究分野で推進されている科学研究のための可視化技術の開発及び応用, VR 技術の科学探求への応用を議論。CAVE システムを使ったデモも行った。
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(水口)			
26 件	43 名	日大、京都工繊大、群馬大、東大、兵庫県大、海上保安大、産総研、新潟大	中～小規模の実験装置と関連する理論研究との情報交換、個別トピックスについての議論
マルチスケール MHD 現象の理論・シミュレーション研究(市口)			
21 件	22 名	NIFS、JAEA、JAXA、鳥取大、海上保安大、千葉大、京大、総研大	12 月 13, 14 日に開催。核融合プラズマや宇宙プラズマにおける MHD 現象や流体现象に関する理論、シミュレーション研究をマルチスケールの観点から議論。

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。

・自然科学における階層と全体

第1期中期計画では、分野間連携を推進するために、3つの新分野創成型プロジェクト、「自然科学における階層と全体」（平成17年～21年）、「生物系における情報統合と階層連結」（平成18年～19年）、および「重力多体系・プラズマ系における連結階層シミュレーション研究拠点形成」（平成18年～平成21年、図4.2-1を参照）が推進されてきた。平成22年度から始まった第2期中期計画では、これらのプロジェクトの成果・経緯を踏まえ、天文科学、核融合科学、および物質科学に関する大規模シミュレーション研究を推進している自然科学研究機構の3研究所（国立天文台、核融合科学研究所、分子科学研究所）をその中核として、“シミュレーションによる「自然科学における階層と全体」”（「階層と全体」）に関する連携研究プロジェクトとして展開することになった。

この「階層と全体」プロジェクトでは、これら研究分野に共通する3つの研究課題を当面の重要研究テーマとして取り上げ、連携研究を進めることとした。（1）「磁気リコネクションと構造形成」：このテーマは、マイクロとマクロの両者の物理に支配されたプラズマにおける典型的な階層横断現象であり、核融合科学と天文科学に共通する研究課題の1つでもある。特に、この連携研究で構築を目指している「連結階層シミュレーションモデル」は、数値実験研究プロジェクトで目指している「数値実験炉」と多くの共通するシミュレーション基盤技術に立脚している。（2）「プラズマと物質の相互作用」：これは、磁場核融合閉じ込め装置の周辺で発生する、高温プラズマとダイバータ板と呼ばれるプラズマ対向壁との間の相互作用の解明を目指した研究で、核融合科学と物質科学の連携により可能となる課題である。（3）「物質の

表面現象」：宇宙空間には、宇宙や惑星系の歴史を閉じ込めた微惑星、彗星、ダスト等が飛び回っており、宇宙科学と物質科学の連携によりこの物質に閉じ込められた様々な謎の解明を目指した連携研究を進めてきている。具体的な活動としては、(A) 自然科学における階層と全体に関する学術交流事業として国内シンポジウムあるいは国際シンポジウムの開催(図 4.2-2 を参照)、(B) 複雑な階層横断現象のダイナミクスを解析するための先進的な連結階層シミュレーション手法等の開発研究、および、(C) その応用として、プラズマ分野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た研究活動を進めてきている。

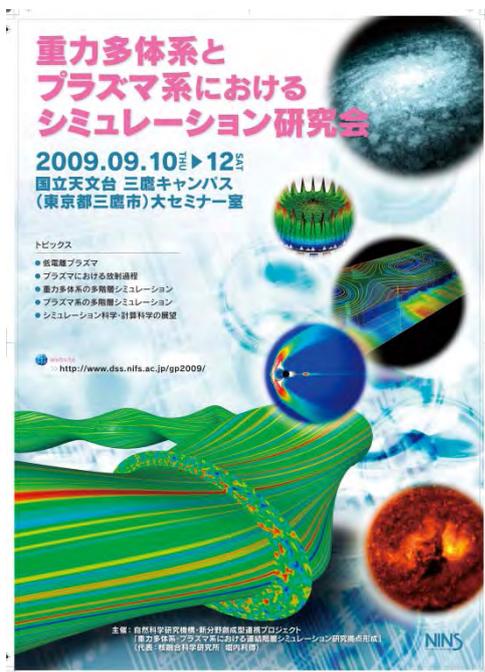


図 4.2-1 分野間連携研究による「重力多体系とプラズマ系におけるシミュレーション研究会」のポスター。



図 4.2-2 第 2 回「自然科学における階層と全体」国際シンポジウムのポスター

・非平衡物理学の新展開

核融合発電システムの直接発電の基礎研究として、固体を使ったエネルギー変換(熱電変換)を核融合科学研究所では進めてきた。このような系を理論・シミュレーションで取り扱うためには、温度勾配がある非平衡系での理論体系化が必要となる。この理論体系は、プラズマ壁相互作用シミュレーションで扱うプラズマに曝された

固体材料中での物性を扱う際の基盤となることが期待できる。このような背景のもと、非平衡下での固体中での輸送現象に興味を持つ分子研および国内外の大学（東大、横国大、埼玉大、テキサス大、大阪府大、甲南大など）の理論・実験の研究者が参加し、基礎理論構築を行った。

具体的な研究目的としては、「温度勾配が引き起こす熱流による新しい子輸送現象（量子熱電効果）を探索し、それらを系統的に記述できる非平衡理論実験を構築」を目指した。本研究活動として、(1)新奇な熱量子効果を示す物理現象の提案、(2)統計的な性質をあらわす記述する基礎方程式(Liouville 方程式)からの理論構築、さらに、(3)提案した熱量子効果現象の実証実験(図 4.2-3 参照)および応用研究を行うことができた。これらの理論は、プラズマ固体相互作用で扱うタングステンなどの物質の輸送係数を、密度汎関数法を用いて求める際の知見を与えるものとなる。

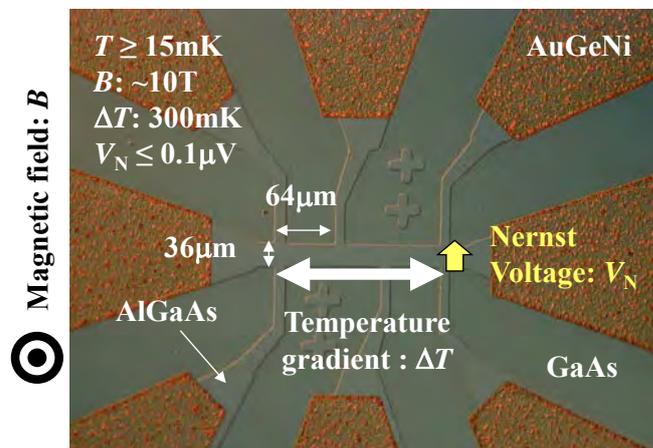


図 4.2-3 磁場中での熱電効果検証実験のため半導体基板に加工された二次元電子ガス系

・ナノ光学イメージング/分光と生命科学への展開：理論と実験のインタープレイ

プラズマの電子加熱を効率よく行うためには、電磁波発生源であるジャイロトロンからプラズマ実験装置への電磁波伝送系の効率化が必要となる。この効率化のために、電磁波伝搬シミュレーションの利用検討を始めている。この際に、真空中での電磁波の伝搬のみならず、導波管材料(主にアルミニウム)中での電磁波応答をも扱う必要がある。このような固体中での電磁波応答のシミュレーションモデル確立は、ナノ光学

イメージング研究でも興味を持たれていた。

本研究では、理論シミュレーションを用いて新たな光学設計を目指し、研究目的を「電磁気学シミュレーション技法によるナノスケールの光と物質の相互作用の解明、またその結果の実験へのフィードバックを通じた新たな物質機能の開拓」とし、分子研のナノ光学研究グループと核融合科学研究所のシミュレーションとの連携研究を進めた。

具体的な研究活動として、近接場イメージングの基礎、特に近接場プローブがナノ物質の光学イメージに及ぼす効果の定量的理論解析(図 4.2-4 参照)と新たな実験方法の提案、及びナノ微粒子の形状制御と光子場の設計に関する理論的検討を行った。同時にそれらに対応する近接場光学顕微鏡及び通常の光学顕微鏡による測定、新イメージング手法の開発、またバイオイメージングに適用可能な物質開発も行った。さらに、本研究で開発した電磁波伝搬シミュレーション技法を、現在、ECH で用いられるコルゲート導波管・マイターベンドなどに適応すべく研究を進めている。

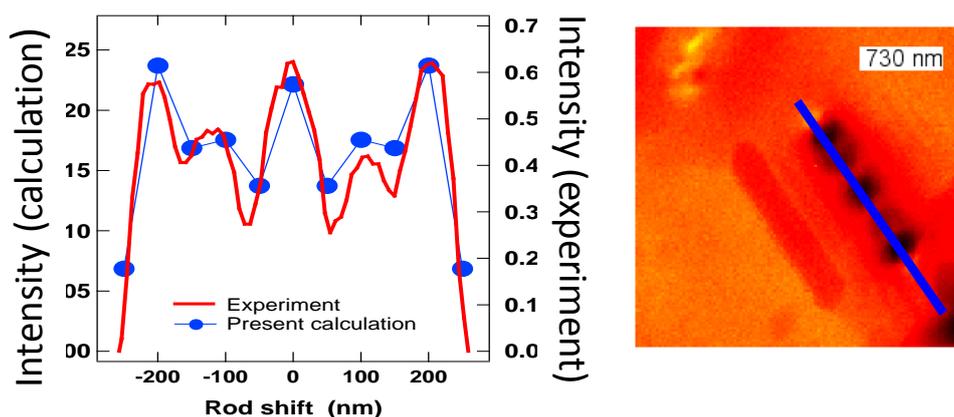


図 4.2-4 近接場光を使った金ナノロッドのイメージ (右図)。電磁シミュレーションを使い実験で得られた信号を再現することができた(左図)。

・非平衡を制御する科学

核融合研究におけるプラズマによる壁材料(固体)損耗の原子レベルからのメカニズム解明のための分子動力学(MD)シミュレーション研究、および、分子研・大学で行われている温度勾配下での固体中の電子の輸送現象・分子やたんぱく質の研究において、調べたい現象の“主人公”である多体粒子系に、温度を制御するための“脇役”である熱浴を如何にカップルさせるかにより、本来の自然現象を正しく記述できるか否かが大きく左右される。本プロジェクトでは、平衡状態を対象に開発されてき

た種々の熱浴モデルの非平衡系への拡張を行っている。その結果、核融合・分子科学・宇宙天文学に共通な多粒子系（原子分子・天体運動）の非平衡状態を制御する為の理論的手法として Affine Coupling 法(図 4.2-5)を提唱することができた。

さらに、プラズマ物質相互作用で扱う金属材料表面および炭化水素気相成長などを MD で扱う際に必要となる原子間のポテンシャルモデルの開発もダウンフォールディング法を用いて行っている。このような活動には、本プロジェクトメンバーである核融合研・分子研・東大・鳥取大・名大・名工大などの共同研究体制がうまく機能し進めることが可能となっている。

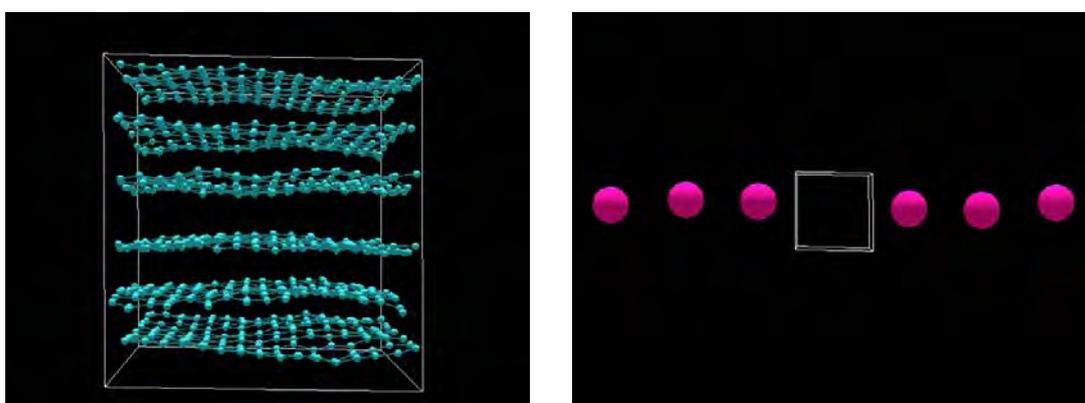


図 4.2-5 Affine Coupling 法を用いたグラファイトの炭素原子の動的振る舞いのシミュレーションの例。部分系（左図）では従来の分子動力学法を用いて扱い、粗視化された他の部分系との相互作用は「弾性体」のように扱う（右図）。

・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

この連携研究は、核融合プラズマ研究をはじめとする大規模シミュレーションをその主たる研究手法として用いている分野で直面する共通課題である膨大な出力データの処理に関する基盤技術の確立を目指したものである。現在、「京」コンピュータをはじめ、ペタスケールのコンピュータが稼働を開始し、大規模なシミュレーションが可能となっている。例えば、銀河形成シミュレーションでは1,500億粒子を、プラズマ粒子シミュレーションでは1,000億粒子を計算している。この超多粒子系のデータを解析するため、通常はある程度の時間ステップ間隔でデータをストレージに保存する。しかし、特徴的な現象が発生する領域が予測不能な場合や（例：銀河が形成される位置など）、短い時間スケールの現象の場合（例：銀河中の高速に回転する粒子

や、プラズマの衝撃波面やリコネクション近傍での粒子の加速・加熱)、全粒子の情報を短いステップ間隔で保存するため、そのデータ量は膨大となる。また、膨大なデータを一度に解析・可視化するのは困難であるため、粒子描像を連続体描像へ変換して情報を集約したりするが、高速で回転する粒子や加速された粒子など、粒子の運動そのものが重要となる場合、このような方法をとることはできない。限られた容量のストレージにいかにか効率よくデータを保存するか、膨大な粒子シミュレーションデータをいかにか解析・可視化するかは、大規模シミュレーション研究である数値実験研究プロジェクト推進のための課題であり、分野を超えた共通の緊急の課題である。本プロジェクトでは、機構連携研究として、天文・プラズマ・分子科学の各分野で粒子シミュレーションを実行し、また、可視化を行っている若手エキスパートが集まって、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を構築することを目的として研究を進めている。

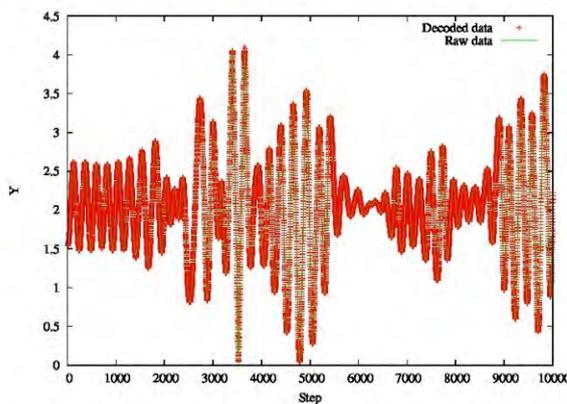


図 4.2-6 圧縮したデータから再現した粒子座標の時間変化(赤十字)とシミュレーションの結果(緑線)の比較。

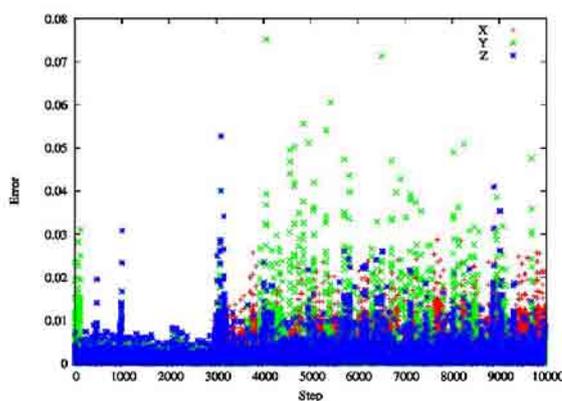


図 4.2-7 圧縮したデータから再現した粒子座標とシミュレーションとの差の時間変化。

・磁気リコネクションの運動論シミュレーション研究

磁気リコネクションは、太陽フレアのような天体现象から磁場閉じ込め装置におけ

るプラズマ崩壊現象など、さまざまなプラズマ領域で普遍的に起きる現象であり、背景の物理には共通するものが多く見られる。例えば、高エネルギー天体分野における特殊相対論リコネクション研究の一環として、リコネクション点近くの重要領域（電子拡散領域）の新しい定義、およびその物理的な意味が提案され、分野をまたいで磁気圏物理分野でも注目を集めている。本研究課題においても、様々な研究分野の磁気リコネクション研究者が分野を越えて連携をすることにより、それぞれのリコネクション物理の知識を異分野に転用し、共通の普遍的な知見に昇華することが期待できる。その1つとして、磁場閉じ込め装置における磁気リコネクションへ適用して、数値実験プロジェクトへ貢献することが考えられる。

トカマクの鋸歯状現象や球状トカマクの合体実験等の核融合・実験室プラズマでのリコネクション現象では、ガイド磁場（リコネクション面に垂直な磁場成分）や粒子衝突の効果が重要であることが予期されているが、その詳細は不明のままである。そこで、まずガイド磁場存在下のリコネクションの研究を行うこととした。国立天文台および核融合科学研究所で開発されている運動論（粒子）シミュレーションコードを相補的に用いて、以下のようにガイド磁場がある磁気リコネクションの解析を行う。(1)磁気リコネクション下流における、リコネクションアウトフローの振る舞いを詳しく調べ、磁場のエネルギーがどのようにしてプラズマ粒子のエネルギーへ変換されるのか、また、エネルギー変換が起こる領域の位置・大きさを探る。(2)ガイド磁場なしリコネクションの構造については、磁力線に沿った面（Local Hall plane）への座標変換を考えると本質的な物理が理解しやすいので、同じような考えをガイド磁場リコネクションにも応用できないか議論する。(3)さらに、「自然科学における階層と全体」および「数値実験プロジェクト」へ貢献することをめざす。これらのプロジェクトでは、様々なスケールの物理が絡み合っている階層横断現象を解明することを目指して、マクロ物理を記述する磁気流体コードとマイクロ物理を記述する粒子コードを連結した多階層モデルの開発が進められている。ターゲットとなる階層横断現象の1つに磁気リコネクションが挙げられており、最新の多階層モデルでは、リコネクションの上流（インフロー）方向で粒子-磁気流体コードを連結することに成功した。本研究課題で目指している磁気リコネクションのエネルギー変換機構解明は、リコネクション多階層モデルの一般化（アウトフロー方向への拡張）に大きく貢献する。

・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」を以下の 2 つの研究課題を中心として平成 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：これは、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。(2) 超多粒子系の汎用 3D 可視化：これは、プラズマ粒子シミュレーションや分子動力学シミュレーションで生成される非常に多くの粒子をバーチャルリアリティ装置や PC で 3D 可視化するための汎用ツールを新たに開発し、超多粒子系の可視化解析に革新をもたらすことを目指している。

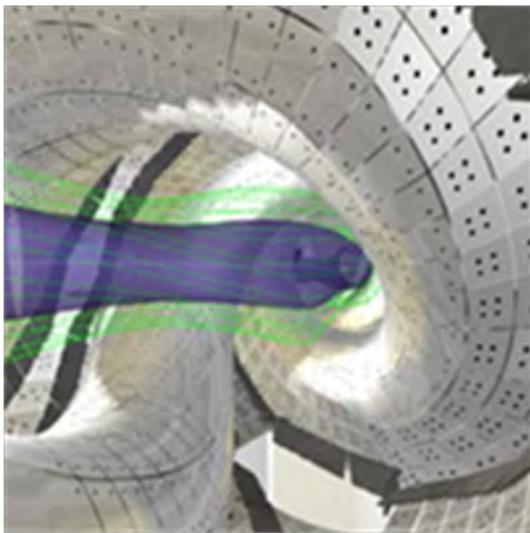


図 4.2-8 LHD 真空容器とプラズマのバーチャルリアリティ同時可視化。

5 国際的 COE としての国際連携・共同研究の推進

5.1 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。

平成 21 年度から平成 25 年度の間、核融合科学研究所は、JIFT を通じて米国へ 11 名の研究者を派遣し、米国から延べ 15 名の研究者を受け入れ、9 件（日本開催 4 件・米国開催 5 件）のワークショップの開催に貢献した(図 5.1-1 参照)。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・オークリッジ国立研究所・ワシントン大学プラズマ科学・技術革新センターとの高エネルギー粒子駆動アルフヴェン固有モードの共同研究(図 5.1-2 参照)、カルフォルニア大学サンディエゴ校とのプラズマ乱流に関する共同研究、テキサス大学との不純物輸送・多階層モデル・磁気リコネク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拡張 MHD に基づく安定性解析に関する共同研究、米国 BACV Solutions Inc.とのヘリオトロンプラズマにおける圧力駆動型不安定性の非線形 MHD 解析に関する共同研究、PPPL とのヘリカル系プラズマのジャイロ運動論的シミュレーションや新古典トロイダル粘性に関する共同研究(図 5.1-2 参照)、ワシントン大学とのスペクトル有限要素法コードの共同研究やまたウィスコンシン大学との ELM に関するシミュレーション共同研究が進められた。また、乱流輸送、高エネルギー粒子駆動不安定性、レーザープラズマや多階層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。

上述の共同研究による成果は、平成 21 年度から平成 25 年度にかけて、Physical

Review Letters, Nuclear Fusion, Physics of Plasmas 等の主要学術雑誌に 23 件の論文として掲載され、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 会議等の国際会議において 14 件の発表がなされている。また、JIFT プログラムによる研究者交流は、日米両国の博士課程大学院生の教育にも役立ち、日本側 1 名・米国側 1 名の最近の博士論文の作成にも貢献した。因みに、平成 25 年度に出版されたテキサス大学 Horton 教授の学術図書“Turbulent Transport in Magnetized Plasmas” (図 5.1-3 参照)には、その表紙を飾るジャイロ運動論的シミュレーションの結果を含め、これまでの JIFT による核融合科学研究所との共同研究の成果が数多く紹介されている。

Year	Workshops	Exchange visitors	
		From NIFS	To NIFS
2008	Multi-scale Simulation by A. Arefiev (IFS) and H. Ohtani (NIFS) at Texas Energetic Particle Physics by Y. Todo (NIFS) and G. Y. Fu (PPPL) at NIFS	S. Satake / PPPL	W. Horton (IFS) G. Y. Fu (PPPL) J. W. Van Dam (IFS)
2009	Simulation Methods by H. Ohtani (NIFS) and A. Arefiev (IFS) at NIFS	H. Miura / IFS O. Yamagishi / IFS	S. R. Hudson (PPPL) A. Arefiev (IFS)
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. Watanabe / PPPL Y. Todo / IFS K. Ichiguchi / BACV	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. Itoh / 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, RI	H. Ohtani / IFS M. Nunami / PPPL	W. Horton (IFS) P. Zhu (Wisconsin) A. Kuley (UCI) D. Spong (ORNL) C. Hegna (Wisconsin)

図 5.1-1 平成 20 年(2008)から平成 24 年(2012)の期間における数値実験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。

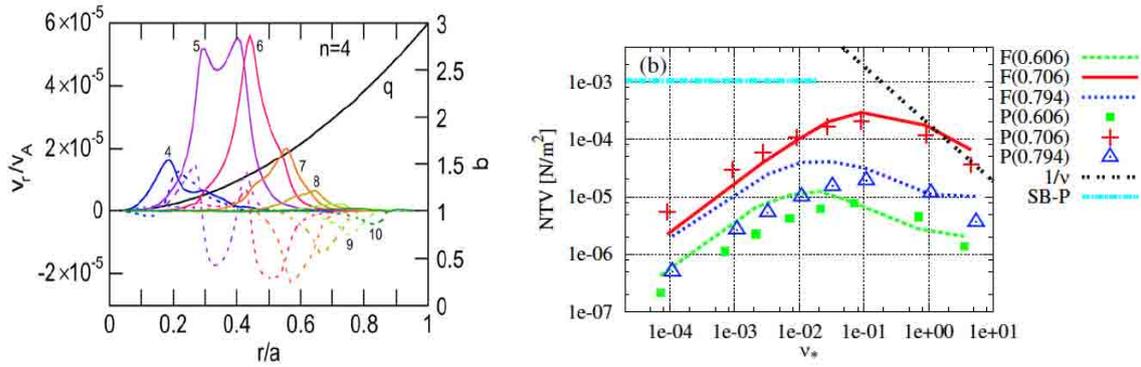
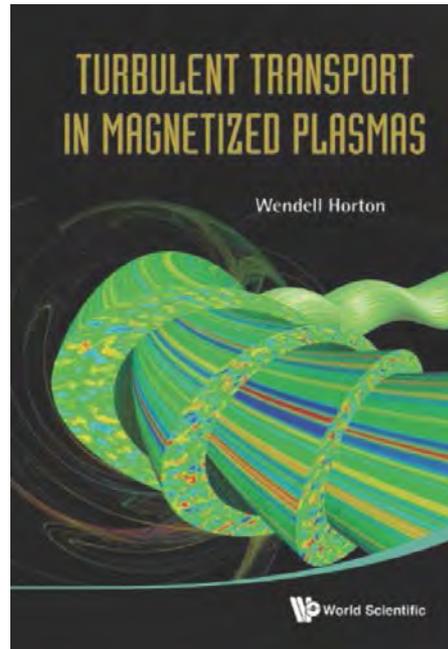


図 5.1-2 JIFT 共同研究の成果: (左) トロイダルアルフヴェン固有モード(TAE)の小半径方向分布[Todo,Berk & Breizman: Nucl.Fusion (2010,2012), IAEA-FEC2010 にて論文発表] (右)新古典トロイダル粘性(NTV)の理論とシミュレーション結果の比較 [Satake, Park et al.: Phys. Rev. Lett. (2011)にて論文発表]。

図 5.1-3 W.Horton 教授著書 “Turublent Transport in Magnetized Plasmas” (2012). 表紙の図はジャイロ運動論的シミュレーションコード GKV-X を用いて得られた LHD プラズマにおけるイオン温度勾配(ITG)乱流の静電ポテンシャル揺動の分布を表す。



・日欧交流活動

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。

欧州地域との他機関間協定として、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）、同テキサトール（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(磁場核融合研究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)がある(図 5.1-4 参照)。

LHD はもちろんのこと、IPP の W7-X 装置(2015 年から実験開始予定)や CIEMAT の TJ-II 装置における 3次元平衡解析と、他コードとのベンチマーク研究がステラレータ-ヘリオトロン装置横断型の共同研究として展開されている。また、周辺部局在モード抑制のための非軸対称成分印可によるトカマク周辺部磁場構造を評価するために HINT2 を応用する共同研究が、核融合科学研究所の主導で、TEXTOR や EURATOM の JET、さらには米国の DIII-D (IEA 大型トカマク協定)において行われている。3次元平衡を、磁気面の存在を仮定することなく取り扱うことができる HINT2 の国際的優位性を活用した展開である。

高温プラズマの乱流理論やシミュレーションに関しても、多角的な共同研究が展開されている。LIA における共同研究の成果として、長距離相関を持つ弾道的な乱流ダイナミクス理解に大きな進展をもたらした。

核融合科学研究所で開発され、LHD の 3次元平衡を取り込んだ実験解析に取り組んでいるジャイロ運動論シミュレーションコード GKV-X と、IPP で開発され W7-X への適用が行われようとしている GENE コードとの間では、3次元平衡を共有する形態での詳細なベンチマーク研究が進展している(図 5.1-5 参照)。

プラズマ中の流れや粘性における新古典輸送の役割を、装置間比較を通じて行う共同研究 (FORTEC-3D) も、LHD と TJ-II との間で着手されている。この取り組みは、この課題に対して多くの実験成果を挙げている米国の HSX 装置の研究者の関心も呼び、HSX も参画する形で発展しようとしている。粒子軌道の磁気面からの逸脱、任意磁場構造を正確に取り扱うことができる FORTEC-3D の国際的優位性が認知された結果の展開である。

壁の損耗・不純物再堆積に関する研究課題においても、テキサトール協定に基づいた共同研究を通じて、ERO コードの導入を開始し、LHD ダイバータ領域のプラズマモデルや形状をコードに組み込み、不純物輸送研究を開始している。LHD 実験によ

るモデルの妥当性検討、高精度化を進めていく計画である。

このように、数値実験プロジェクトでは、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。

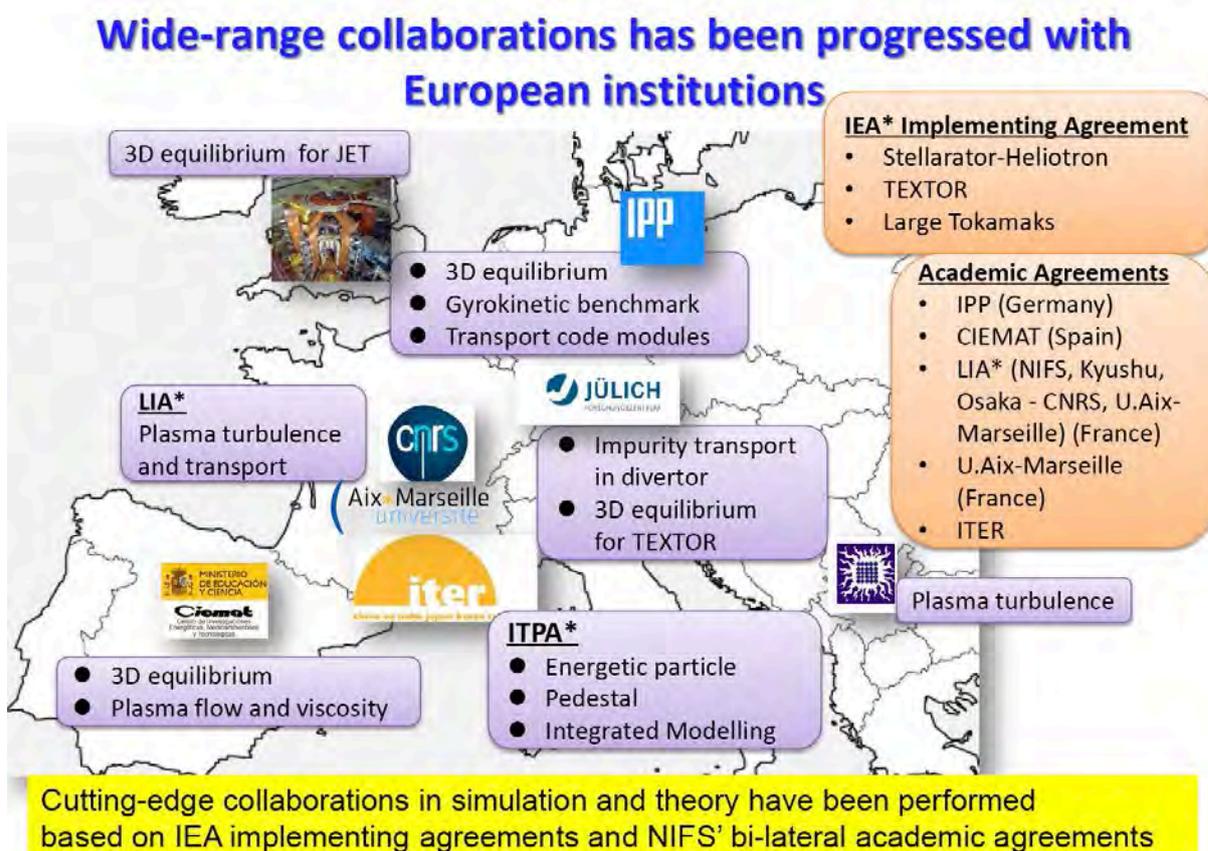


図 5.1-4 欧州の研究機関との研究連携。 (*IEA: International Energy Agency, ITPA: International Tokamak Physics Activity, LIA: Associated International Laboratory)

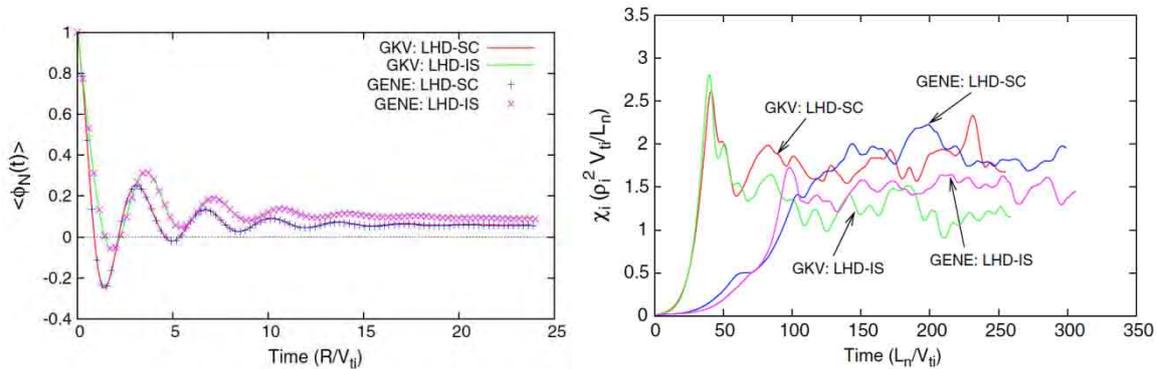


図 5.1-5 ジャイロ運動論的シミュレーションコード GKV(核融合科学研究所)と GENE(ドイツ IPP)の計算結果の比較[Xanthopoulos et al.: PRL(2011)にて論文発表]。(左)ゾーナルフローの線形応答。(右)イオン温度勾配(ITG)乱流におけるイオン熱拡散係数の時間発展。

・ 日中協力事業

日中核融合協力事業(新日中事業)の平成22年度の研究課題「Toroidal equilibria with flow and their stability in extended MHD models (JC044)」及び平成23年度の研究課題「Stability of toroidal equilibria with flow in high-beta reduced MHD model (JC064)」において、核工業西南物理研究院(成都)の X. Peng(彭 晓东)教授と流れをもつ平衡とその安定性に関する共同研究のための議論を行った。簡約化 MHD モデルにおける流れをもつ平衡に対するこれまでの研究に基づいて、FLR 効果を含んだ二流体平衡モデルのより実験に近い自由境界およびダイバータ配位や H モードへの拡張の可能性や、安定性解析のために必要な磁気座標の解析的表現のポロイダル音速程度の流れをもつ一流体トロイダル平衡の解析解からの導出について議論を行った。

これまで中国科学院等离子体物理研究所(ASIPP)および核工業西南物理研究院(SWIP)と核融合プラズマ中で生成される微粒子の特性に関する共同研究を遂行してきた。ASIPP (Prof. G.N. Luo 罗 广南, G.J. Niu 牛 国鉴ら)とは同研究所で行われて

いる MD (Molecular Dynamics : 分子動力学) を用いた微粒子と壁との相互作用を調べてきた。そこでは中国側の MD simulation に対して NIFS は PIC simulation によるプラズマの効果を導入するものである。プラズマの効果を含まない MD シミュレーションの一例を図 5.1-6 に示す。これはタングステン壁に 3 nm のタングステン微粒子を壁と垂直方向に 1 km/sec で入射し、微粒子が壁に接触して 3.0 ps 後の相互作用の結果である。色は粒子速度を示し、赤色が 1 km/sec に相当している。今後、この系に PIC シミュレーションから得られた表面電荷と電界分布を取り入れてプラズマの効果を考慮する計画である。

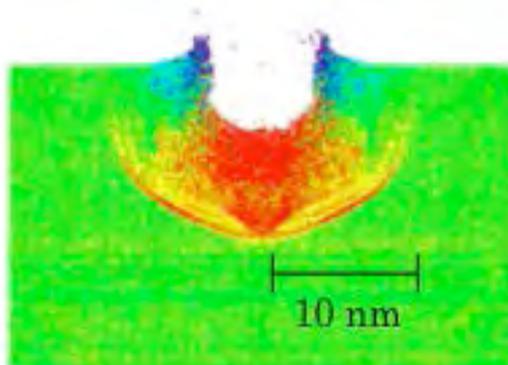


図 5.1-6 MD シミュレーションによるタングステン壁とタングステン微粒子の相互作用.

SWIP (Prof. L.W.Yan 严 龙文, Y.D. Pan 潘 宇东, Z.H. Huang 黄治辉ら)とは同研究院の HL-2A トカマク中で観測された炭素微粒子の挙動解析の共同研究を行った。HL-2A 中で観測された微粒子の振る舞いに対して NIFS が開発した挙動解析コードを用いて共同研究を行っている。HL-2A プラズマ中で高速カメラを用いて観測された炭素微粒子の挙動を図 5.1-7 に示す。挙動解析コードを用いた解析の結果、大きさ 1 μm の微粒子が第一壁から約 10 m/sec で移動していることが明らかになった。

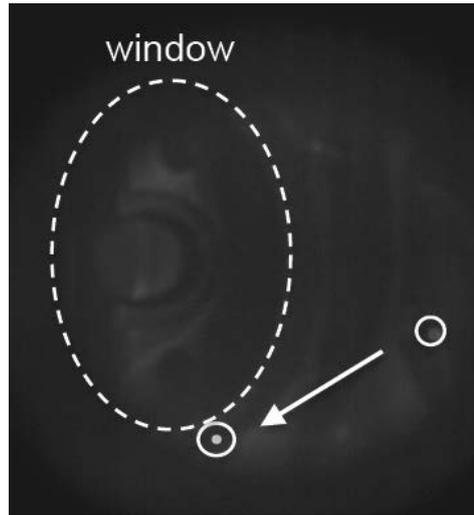


図 5.1-7 HL-2A 周辺プラズマ中での炭素微粒子の挙動.

以上の成果は、Plasma Science and Technology, Contribution to Plasma Physics 等の国際雑誌に 6 編の論文として発表された。

・その他

ヴァインチャ研究所（セルビア共和国）の M. Rajkovic 博士と乱流の非線形データ解析に関する共同研究を行ってきた。この共同研究では、まず、MAST 装置で観測されたイオン飽和電流のデータから、ゼロ・クロス解析で与えられる揺動の確率密度関数が L-H モード遷移にともなって異なるピークを示すことを示した[1]。次に、LHD 配位に対して行ったイオン温度勾配乱流の GKV コードによるシミュレーション結果の解析に着手した。ITG 乱流により生成されたゾーナルフローのデータから、その時空間構造がカオスの振る舞いを示すこと、さらに、内寄せ配位で強く励起されたゾーナルフローにおいては、そのカオス的性質が弱まることを明らかにした[2]。

[1] M. Rajkovic, T.-H. Watanabe, and M. Skoric, Nuclear Fusion **49** (2009) 095016

[2] M. Rajkovic, T.-H. Watanabe, and M. Skoric, Phys. Plasmas **16** (2009) 092306

5.2 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])、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 (Integrated Project Team) が中心となって活動を進めている。IFERC 事業は本格的な研究段階に進みつつあり、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。このため、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 (Annual Report) 及び事業計画 (Project Plan) の改訂、秋の PC では翌年の作業計画 (Work Programme) の提案等が中心的課題である。日欧実施機関間の円滑な調整を行うために、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。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]) に基づいて事業は遂行されるため、PA の締結及び遂行促進も大切な役割である。最近の活動としては、第 24 回 IAEA 核融合エネルギー会議での EU 口頭発表で紹介された様に CSC 計算機の運用開始に伴って磁場閉じ込めシミュレーションの新研究分野の開拓可能性を示す Light House Project を実施した。また、福島原発事故を受けた原型炉安全性研究、相互レビューの依頼とそれを受けた原型炉 R&D 活動の改訂を提案している。事業長業務以外にも、CSC の資源分配等を担当する常設委員会の実施要領を策定する特別作業班-2 (SWG-2) 議長を担当し、最近では REC の準備作業グループ議長を担当している。

・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(六ちゃん/Helios)では、数値実験研究プロジェクトメンバーが代表者をつとめる研究課題が第1期(2012年4月1日~11月14日)では9件、第2期(2012年11月15日~2013年11月14日)では10件実施される。これらの課題の研究分野は、乱流輸送、新古典輸送、高エネルギー粒子、MHD、炉材料である。2012年1月の六ちゃん/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。その中には核融合科学研究所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、核融合科学研究所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。

MEGAを用いたライトハウスプロジェクトでは、ITERの定常運転シナリオにおけるアルフベン固有モードの安定性と高エネルギーアルファ粒子輸送が調べられた。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が含まれている。シミュレーションの結果、トロイダルモード数 $n=12\sim 22$ のトロイダルアルフベン固有モードが不安定であることがわかった。最も不安定なモード数は $n=19$ であり、この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0.2%であった。図5.2-1に不安定飽和時のアルフベン固有モード速度揺動分布を示す。高エネルギー粒子圧力分布の変化は小さく、中心部分のアルファ粒子ベータ値1.5%、重水素ビームイオンベータ値1%に対して、ベータ値の変化は図5.2-2に示すようにそれぞれ0.03%と0.01%にとどまった。

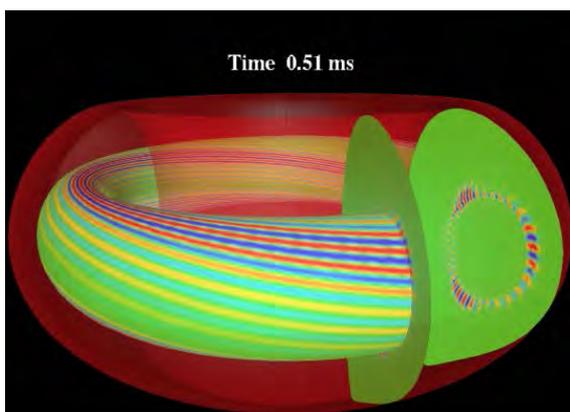


図 5.2-1 ITER 定常運転シナリオにおけるアルフベン固有モードの速度揺動分布。非線形段階で複数のモードが成長した状態を示している。

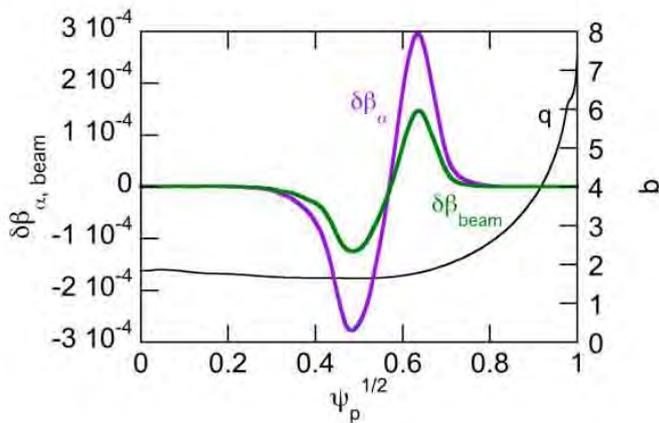


図 5.2-2 高エネルギー粒子ベータ値変化の半径方向分布。

IFERC CSC の重要な委員会にも数値実験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 5.2-1 にまとめる。

表 5.2-1

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	計算資源分配		1 名

・国際トカマク物理活動(ITPA)と IMEG への参加

ITPA のトピカルグループには、数値実験研究グループのメンバーが高エネルギー粒子グループと周辺・ペDESTアルグループの国内委員としてそれぞれ1名参加し、年2回開催されるトピカルグループ会合に参加している。ITPA トピカルグループ会合への参加状況は下記の表 5.2-2 の通りである。

高エネルギー粒子グループはアルフベン固有モードの成長率に関するコードベンチマークを実施し、その成果を 2012 年の IAEA 核融合エネルギー会議で報告した。図 5.2-3 に示すように、参加したほぼ全てのコードの結果が±15%または±20%の範囲に収まったが、ここに到達するまでには各コードの計算条件を詳細に比較し、同一の条件で計算を行う必要があった。核融合科学研究所のシミュレーションコード MEGA の結果は他コードの結果とよく一致しており、コードの信頼性を確認することができた。またこのベンチマーク活動において高エネルギー粒子の有限ラーモア半径効果を

取り扱えるように MEGA コードを拡張した。ベンチマーク活動への参加はコード開発を促進する点においても有益であると言える。

表 5.2-2 数値実験研究プロジェクトからの ITPA トピカルグループ会合参加状況

	ペDESTアル と周辺物理	高エネルギー 粒子	MHD	統合運転シ ナリオ	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

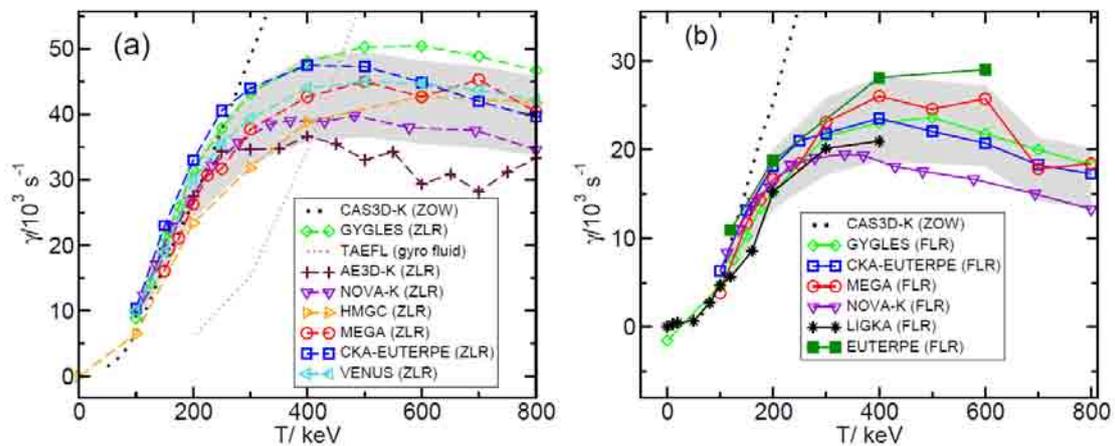


図 5.2-3 トカマクプラズマにおける TAE モードの成長率に関するベンチマーク結果のまとめ。高エネルギー粒子の速度空間分布は Maxwell 分布を仮定しており、横軸はその温度である。(a)は有限ラーモア半径効果を含まず、(b)は含む。灰色の領域は平均値を中心として(a) $\pm 15\%$ 、(b) $\pm 20\%$ の範囲を示しており、ほとんどのコードの結果がこれに含まれている。

周辺ペデスタルグループでは、ITERプラズマの3次元MHD平衡に関する研究成果を報告した。ITERの標準運転モードはType-I ELMを伴うELMy H-modeである。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精力的に行われている。

これまでのRMP磁場を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、3次元外部摂動磁場の大きさは真空中で計算された値に固定され、プラズマ応答の効果は一切入らない。プラズマ応答による3次元外部摂動磁場の変化は、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3次元MHDモデリングとして、3次元MHD平衡計算を行った。図5.2-4に、 $n=4$ のRMP磁場を重畳したITERプラズマについてHINT2により計算された3次元MHD平衡を示す。3次元MHD平衡では、セパ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。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。

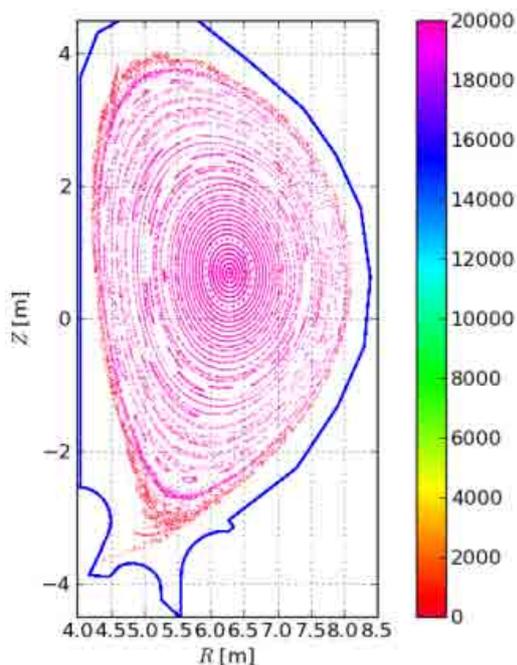


図 5.2-4 HINT2 により計算された $n=4$ の RMP 磁場が重畳された ITER プラズマの 3 次元 MHD 平衡。

ITPA に加えて、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 IMEG(Integrated Modelling Expert Group)の会合にも参加している。主に LHD 実験を対象として開発を進めている統合輸送コード TASK3D の状況について情報提供を行った。TASK3D では、3次元平衡、輸送過程に及ぼす3次元磁場構造の効果などを当初から取り込んでおり、トカマクにおける軸対称性の破れに起因する種々の物理過程に対して、モジュール提供など具体的な寄与を検討できる。また、IMEGで行われている、ショット間解析ツールの整備(迅速性優先)、実験データ収集システムとの連携などの検討に関する情報は、現在に至る TASK3D 実験適用作業に大きな指針を与えるなど、双方向の大きな寄与が今後期待できる段階にある。

・ITER 連携に向けた国際データ転送実験

情報ネットワークを通じて遠距離のサイトへデータを送ると非常に長い時間を要する場合がある。これは、転送データの正確さを保証する通信プロトコル TCP/IP の特性により、広帯域の回線を用いても実行転送速度が向上しない現象であり、LFN(Long Fat Network)問題と呼ばれている。これは国内の大学・研究機関を結ぶ共同遠隔実験 SNET においても観測されており、今後の ITER 計画における参加各極への実験・解析データの配布において、一層厳しくなる問題である。

いかにして LFN 問題を回避するか実証するために、東大平木研、ITER 本部、ならびに各ネットワーク管理団体の協力の元、日仏間のデータ転送実験を実ネットワーク環境下で行った。ネットワークの経路は日常的に利用される共用回線と L2VPN による専用回線を準備した。両端のサーバは市販の PC に Linux をインストールしたものであり、一方のディスクから他方のディスクへファイルを転送した。

Linux OS のカーネルパラメータの調整の他、データの塊であるパケットの送信間隔を調整するパケットペーシングの技術を用いることにより、4Gbps の回線帯域にて平均 3.3Gbps という高効率のデータ転送を行った。また、同時に今回利用した共用回線と専用回線の差異はほとんどないことが示された。



図 5.2-5 データ転送試験のネットワーク経路。経路の大部分は 10Gbps の帯域を有し、SINET3 共用回線 (SINET3) と専用回線 (APAN/JGN2plus) を用いた。

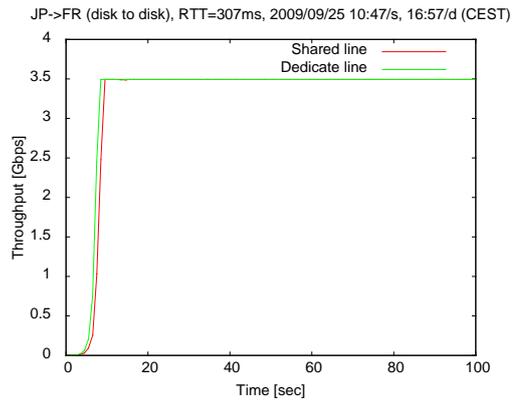


図 5.2-6 日仏間のデータ転送試験結果。赤は共用回線、緑は専用回線を示す。両者に違いはほとんどなく、いずれも高効率の安定したデータ転送を実現できた。

・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下記の2件が採択されている。

1. 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

2. 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

下記の ITER 国際サマースクールに講師として参加した。

	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	エクサンブ ロバンス(フ ランス)	2011.6.20-24	藤堂 泰	Nonlinear Simulations of Alfvén Eigenmodes Destabilized by Energetic Particles

6 人材育成

6.1 人材育成の概要

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、京都大学、東京工業大学等、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 6.1-1 年度ごとの大学院生・博士研究員等在籍者の人数

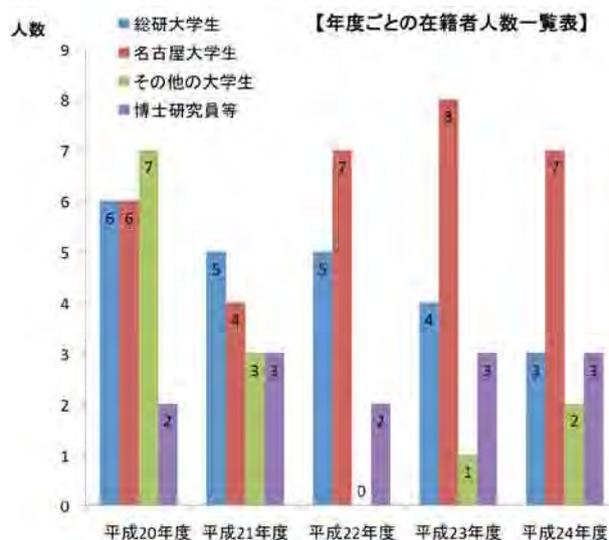


図 6.1-1 および図 6.1-2 に、平成 20 年度から平成 24 年度までの期間の、理論シミュレーション研究の指導を行った大学院生および博士研究員の人数を示した。平成 20～24 年度の間、合計 39 名の博士課程大学院生および 7 名の博士研究員を受け入れ、教育・指導した。研究テーマは、ヘリカル系プラズマの MHD 平衡・安定性、新古典輸送、乱流輸送シミュレーション、高エネルギー粒子駆動不安定性、高周波加熱、プラズマ壁相互作用、レーザープラズマや無衝突磁気リコネクション等、多岐にわたり、シミュレーション科学を構成する流体・粒子・ハイブリッド・ジャイロ運動論や分子動力学等の様々な数値計算手法の開発・応用することにより、核融合・複雑系プラズマの挙動の物理機構を解明するための人材育成がなされた。これらの成果は、10

件の博士学位論文として提出され、Nuclear Fusion, Physics of Plasmas 等の主要学術雑誌に 46 件掲載された。また、IAEA 核融合エネルギー会議等の国際会議においても、大学院生・博士研究員による研究成果の発表が積極的に行われ(図 6.1-3 参照)、その活躍は、総研大学長賞や日本シミュレーション学会賞奨励賞等 13 件の賞が授与されるなど、高い評価を受けている。

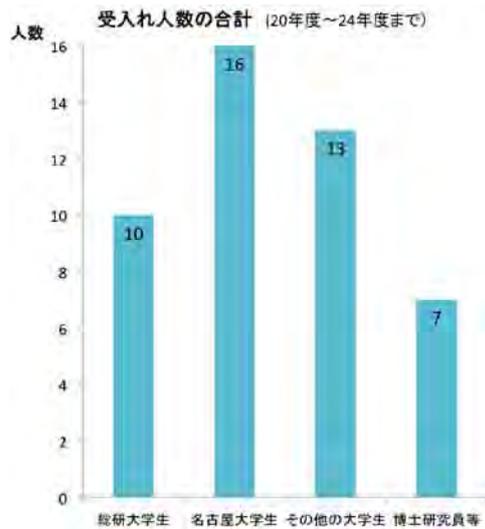


図 6.1-2 平成 20 年度から平成 24 年度までに受け入れた大学院生・博士研究員等の人数



図 6.1-3 指導学生の国際会議での年度別発表総数

6.2 その他の教育プログラム

・SSH・SPP 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。

- 理論解析と数値計算（平成20年度）、コンピュータシミュレーション（平成21年度から）
- 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。

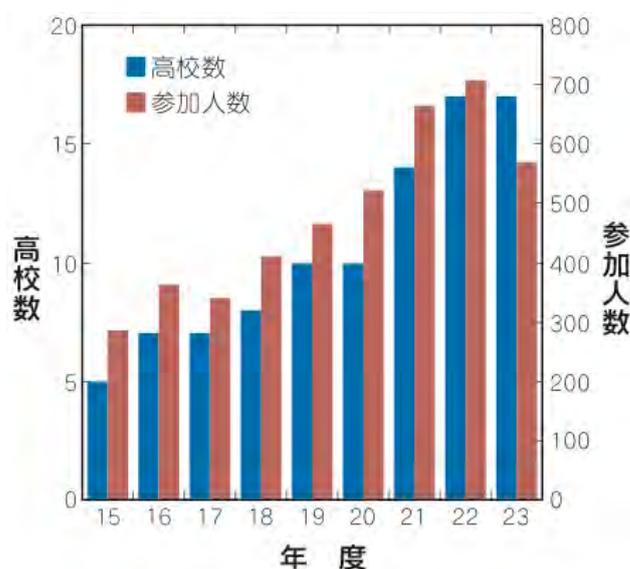


図 6.2-1 各年度に教育連携活動に参加した高校数および参加人数（平成23年度教育連携活動報告書より抜粋）



図 6.2-2 バーチャルリアリティ装置を使った実習の様子
(平成 23 年度教育連携活動報告書より抜粋)

・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に選択してもらい、合宿形式で研究の最前線を体験してもらう企画である。開校式、オリエンテーションから始まり、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。研究内容は研究発表会で発表され、核融合科学研究所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 20 年度

- 静電粒子コードによる壁前面の電位形成の体験
- 核融合プラズマの輸送シミュレーション
- プラズマ中電位構造形成のシミュレーション

平成 21 年度

- 高温プラズマの電磁流体シミュレーション
- プラズマの粒子シミュレーション
- 核融合プラズマの高エネルギー粒子軌道解析

平成 22 年度

- 核融合磁場閉じ込めプラズマの平衡解析入門
- 高温プラズマの電磁流体シミュレーション
- トロイダルプラズマの輸送シミュレーション

平成 23 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
- 高温プラズマの電磁流体シミュレーション
- 磁化プラズマ乱流のジャイロ運動論的シミュレーション
- 粒子シミュレーションで見るプラズマ現象

平成 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

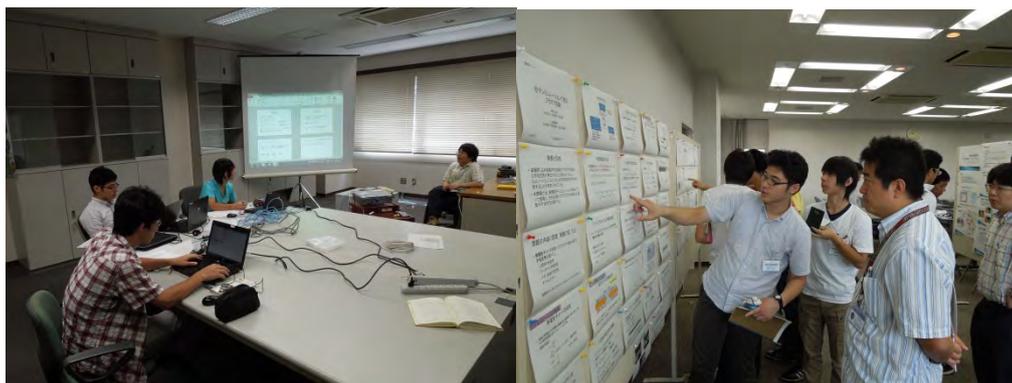


図 6.2-3 体験入学中のひとこま。

図 6.2-4 研究成果発表会。

・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4日間に渡って行っている。参加希望者の数は年々増加しており平成23年度は海外から50名をこえる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。

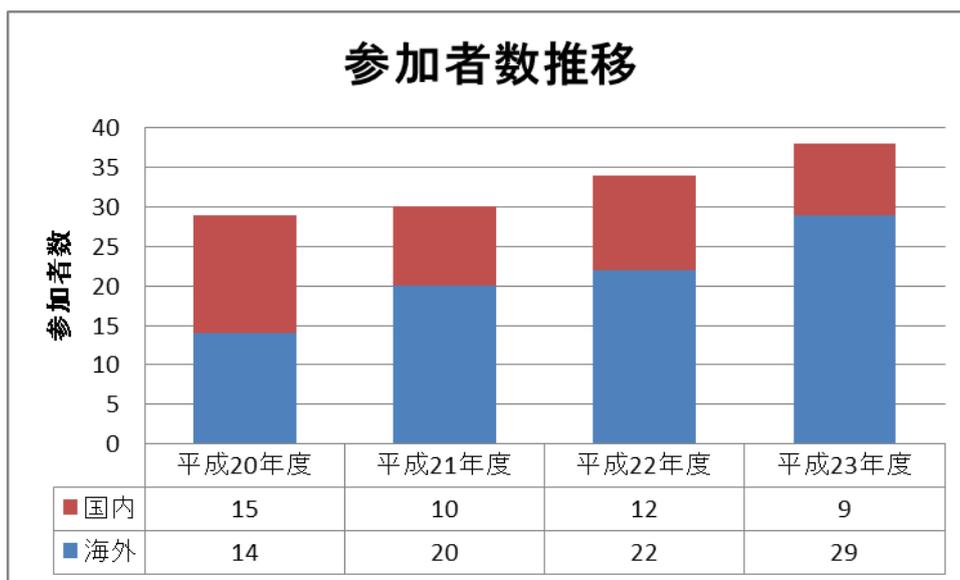


図 6.2-5 総研大アジア冬の学校 & シミュレーション科学教育講座参加者数の推移



図 6.2-6 講義での実演風景



図 6.2-7 ポスター発表会

7 将来計画

まず、数値実験研究プロジェクトの第2期中期計画期間の6年間（2010年～2015年）で「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」として掲げた研究計画「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」を目指した研究として、核融合プラズマを構成する要素物理の解明を中心とするシミュレーション研究をより着実に進展させる。さらに、第3期中期計画の6年間（2016年～2021年）を展望し、「核融合プラズマ閉じ込めの物理機構解明とその体系化」によりコミュニティ全体への学術貢献や関連分野への学術発信をするとともに、「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計画の柱とする。図7-1にそのロードマップを示す。

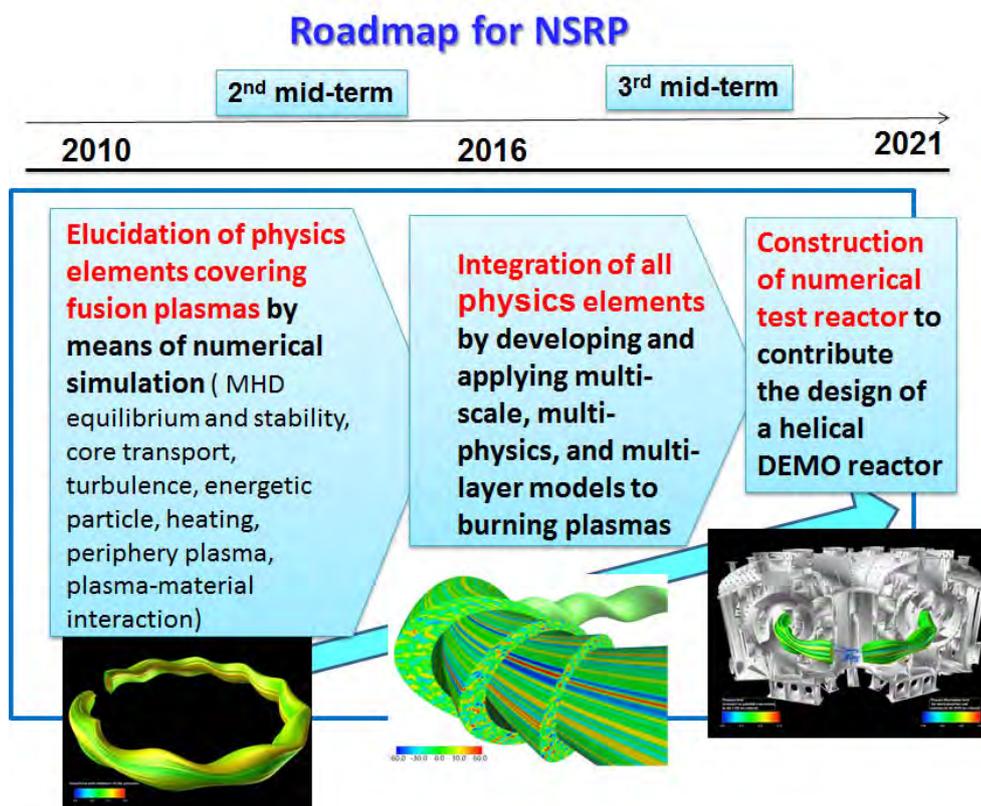


図7-1 数値実験研究プロジェクトのロードマップ。

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」、「コア流体輸送・コア運動論輸送」、「高エネルギー粒子・波動」、「周辺プラズマ輸送・プラズマ壁相互作用」、「統合輸送」、「基礎物理・研究基盤」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。

➤ 平衡・安定性

MHD を基本とする巨視的流体モデルを発展させることにより、平衡、安定性、ペレット挙動の解析を推進する。

(1) MHD 平衡では、入れ子状の磁気面の存在を仮定しない3次元平衡を求める HINT2 コードを開発してきた。また、一方で、非等方圧力分布や FLR によるプラズマ流を含む2次元平衡を解析する FLRGS コードの開発も進めている。今後は、HINT2 コードを種々のプラズマ実験に適用していくことにより、ストキャスティック層を含む3次元平衡の物理の解明を推進するとともに、このコードに非等方圧力分布やプラズマ流の効果に対する知見を取り込んで、さらに汎用性の高い平衡計算コードの開発を目指す。

(2) 安定性に関しては、非線型流体ダイナミクスの観点から評価手法の高精度化を図る。現在、3次元 Full MHD コード (MINOS,MEGA-D,MIPS) によるダイナミクス計算と簡約化流体モデルに基づいたコード (NORM,R2FLUID,HEAL) によるダイナミクス計算が進んでいる。前者では、HINT2 コードとのインターフェースが確立され、ヘリオトロンプラズマの形状を厳密に含んだ非線型解析が可能になっている。また、後者においては、その機動性を生かして、背景平衡の時間変化を含む解析、二流体効果の影響、磁気島の挙動等の個々の物理課題に注目した解析がなされている。今後は主として、3次元プラズマの巨視的安定性をこのような崩壊現象によって評価することを目指し、その物理機構の解明を進める。そのために、既存の3次元 Full MHD コ

ードの更なる整備を行い、それを軸として簡約化モデルによって培われている手法や知見を組み込んだ3次元流体コードの開発を行う。

(3) ペレット挙動に関して、現在 CAP コードによるプラズモイドの非線型 MHD 挙動の解析が進んでいる。これにより、プラズマの幾何形状及びプラズモイドの初期位置と、その後のプラズモイドの挙動との関係が明らかになりつつある。今後は、このコードを拡張してペレットの電離過程も含めた解析を進め、ペレット入射による密度分布変化の観点から入射の最適化を検討する。

▶ コア流体輸送・コア運動論輸送

(1) 非軸対称磁場配位に対する汎用的な新古典輸送シミュレーションコード FORTEC-3D コードについて、異種粒子種間クーロン相互作用の効果を取り入れた多イオン種プラズマへの拡張として、以下の手順で verification と validation を進め、その成果を原型炉設計に適応し、数値実験炉の構築に貢献する。

- FORTEC-3DコードをTJ-II, W7-AS, HSXなどLHD以外の非軸対称、準ヘリカル対称配位の輸送解析にも応用し、新古典輸送や新古典粘性に関する装置間比較の理論研究、実験解析を推進。
- LHDバイアス実験解析への応用:新古典ポロイダル粘性の $E \times B$ 回転速度に対する非線形依存性の研究。
- FFHR-d1における新古典熱輸送評価、DT比や不純物の影響についてなど。

(2) δf 法に基づくドリフト運動論的シミュレーションコード (KEATS) を用いて、ELM制御用RMPによって生じたエルゴディック領域におけるプラズマ輸送解析を進め、電氣的準中性条件による電場の評価や、ブートストラップ電流に対するRMPの影響を明らかにする。

(3) 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、電子運動および磁場揺動を考慮できるよう従来のGKVコードの拡張を進めてきた。その結果、より広いパラメータ領域での解析が可能になり、LHDにおける有限ベータプラズマの乱流輸送や、粒子輸送、電子熱輸送、磁場揺動の効果を評価が可能になった。さらに、VMECコードから得られる3次元磁場配位を、磁気面幾何情報も含めて正確に導入し、LHD実験に対応した配位での解析が可能になった。

以上の開発状況を踏まえ、下記の点について将来計画を述べる。

- LHD有限ベータプラズマの乱流輸送の理解と予測

LHD実験で観測される有限ベータプラズマでは、ITG乱流は安定化される傾向がある。典型的には、ベータ値が1%を超えるとITG乱流は安定になると予想さ

れる。一方、ベータ値が1%を超えると不安定になる運動論的バルーニングモードが粒子・熱輸送を引き起こし得る。この有限ベータプラズマにおける乱流輸送のシミュレーションを行う。

- 多成分プラズマにおける輸送現象の解析

LHD 実験の高イオン温度プラズマのコア領域では炭素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。これは新古典理論では説明できず、乱流輸送による理解が期待される。また、電子の非断熱応答を考慮することにより、捕捉電子モード乱流の解析や、断熱近似では不可能であった粒子輸送の評価が可能となる。さらに多イオン種に対応できるように GKV コードを拡張し、これを用いて乱流による不純物輸送を評価する。

- 高精度衝突モデルの実装

多イオン種を含むプラズマにおいても質量、運動量、エネルギー、自己随伴性を保つことのできる線形衝突演算子を実装し、従来の簡略化衝突モデルからの脱却を図るとともに、衝突周波数のより高い領域への適用を行う。

- 半陰解法を用いた計算の高速化

運動論的電子を取り扱う場合、電子・イオンの質量差に起因して、取り扱う時空間のスケールの差が大きくなり、シミュレーションに必要な計算機資源は莫大なものとなる。これを解決するため、運動論的電子の数値解法を改良し、半陰解法等を用いて計算の効率化と計算時間の短縮を図る。

- 線形解析を通じた輸送モデルの構築と統合コードへの適用

磁場配位、衝突効果、不純物粒子効果、運動論的電子効果など、各物理効果を取り込んだヘリカル配位における非線形シミュレーションを基盤とした異常輸送モデルを構築する。その成果を統合輸送コード TASK3D 等の輸送コードへ適用し、異常輸送が閉じ込めに及ぼす効果の効率的な評価と数値実験炉への機能の提供を図る。

- 国際共同ベンチマークの推進

これまでに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進めてきた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相互ベンチマークを、粒子輸送や電磁揺動を含む領域へと拡張し、コードの **verification** を進める。

(4) これまで LHD プラズマを代表とするトロイダルプラズマにおいて、円柱座標系におけるモデル化した輸送方程式によって、実験で観測されている電場の時間的な振動現象に対する予測を行ってきた。また数値直線装置を活用した乱流構造形成研究、帯状流、ストリーマ、孤立渦の形成機構と構造分岐に対する考察が行われて

いる。さらに外部加熱に制御されたトーラスプラズマにおいて、電磁的微視的乱流(運動論的バルーニングモード)による乱流熱輸送の3次元流体シミュレーションを進めてきた。

以上の成果を踏まえて、数値実験炉構築のために将来計画として以下の3課題を行う。

- ・ 運動論的シミュレーションから導かれた輸送係数を用いた輸送ダイナミクス解析。
- ・ 乱流計測シミュレータ研究を推進。乱流場でのデータ解析をする際の統計手法の確立。トーラスプラズマでの数値実験のプラットフォームを整備し、燃焼プラズマにおける自己組織化現象を探求。
- ・ 運動論シミュレーションでは困難な有限ベータプラズマにおけるグローバルシミュレーションを行い、電磁的乱流における温度密度分布についての研究。

運動論的シミュレーションから導かれた輸送係数を用いた計算を輸送ダイナミクスについて行い、現存のトロイダルプラズマ実験結果との比較を行うことが最初のステップになる。その後乱流計測シミュレータ研究で用いられているトロイダル形状を反映した計算方法を取り入れたコード開発を行う。その際に電磁的乱流におけるプラズマ分布に対する考察を加えて、シミュレーション計算結果による予測の精度を高める。

▶ 高エネルギー粒子・波動

LHDにおける高エネルギー粒子駆動型不安定性を研究するために、これまでに高エネルギー粒子・MHD連結シミュレーションコードMEGAおよびMHD非線形性を省略した簡約化MEGAを開発してきた。これらのコードを用いてLHDにおけるアルフベン固有モードに関するコードベンチマークをマックスプランク研究所(ドイツ)およびオークリッジ国立研究所(米国)と協力して実施している。このベンチマークを継続して、アルフベン固有モードの周波数、空間分布、成長率に関するコードの信頼性を実証する。

次の段階として、LHDにおけるアルフベン固有モードバーストのシミュレーションを実行し、実験との詳細な比較によりコードの有効性を実証する。そのためには、NBIによる高エネルギー粒子生成分布データを用いた計算が可能となるようにコードを拡張するとともに、損失粒子検出器(SLIP)による計測データと直接比較できるようなシミュレーション結果の解析が必要である。重水素実験が実施されている場合には、高エネルギー粒子損失に起因する中性子放射の減少も比較の対象となる。

アルフベン固有モードバーストのシミュレーションは簡約化MEGAを用いて実施

するが、非線形 MHD 効果を省略した簡約化コードではアルフベン固有モードバーストを定量的に再現できない可能性がある。その場合は、非線形 MHD 効果を考慮して簡約化モデルを拡張するか、または(非簡約化)MEGA を用いてアルフベン固有モードバーストのシミュレーションを実行する。

➤ 周辺プラズマ輸送・プラズマ壁相互作用

(1) 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流体 1 次元コードによるダイバータレグ中でのプラズマ輸送、不純物輸送コード (ERO) を用いたダイバータプラズマ中での不純物輸送、3 次元流体コード (EMC3) を用いた 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。以上の成果を踏まえて、数値実験炉構築のために将来計画として以下の 3 課題を順次行う。

- ・ EMC3 及び EIRENE コード計算領域の第一壁までへの拡張
- ・ 上記拡張コードと ERO コード等のプラズマと壁との相互作用解析コードとの連結を行って「周辺プラズマ輸送統合コード」を構築
- ・ 「周辺プラズマ輸送統合コード」と「ヘリカルプラズマ統合輸送コード」への組み込み

第一段階の EMC3 拡張コードを用いることによって、現在の LHD 不純物輸送、ガスパフの効果、中性粒子輸送現象が解明でき、第 16 サイクルで計画されている閉ダイバータ配位の実験結果との比較検討を行う。さらに第二段階の結果から、ダイバータ板や第一壁からの不純物生成、輸送やレサイクリングなどの燃料プラズマの振る舞いも自己無撞着に解明できる。第三段階では数値実験炉に向けた統合コードを目指す。

(2) 磁場閉じ込め装置周辺部におけるプラズマコヒーレント構造 (プラズマブロブ) のダイナミクスについて、プラズマ粒子シミュレーションや多階層シミュレーションモデル等、第一原理に基づく手法を用いて調べ、粒子的 (微視的・運動論的) 効果が与える影響を解明し、境界領域における輸送現象の理解に貢献することを目指す。この研究では、3 次元静電粒子シミュレーションコードの大規模化などの整備とブロブ伝播特性等に関する研究を推進しながら、ブロブ挙動を扱う多階層シミュレーションモデルを構築し、コードの開発を進める。

(3) プラズマ壁相互作用：炭素材への水素同位体照射の入射流量・エネルギー依存性を、分子動力学(MD)法を用いて調べてきた。現在、MD 法のタングステンなどを調べるために、密度汎関数(DFT)法を用いてポテンシャルを作成中であり、MD 法を用いたイオン照射による材料研究の準備が整ってきている。

プラズマ対向材には、高温環境下での低プラズマ損耗・低トリチウム捕捉率・高熱伝導率・高融点といった条件を満たす必要がある。例えば ITER の対向材として、高 Z 材であるタングステンが有力な候補と考えられている。しかし、これはプラズマの照射影響が小さい初期段階での特性であり、核融合炉の高温プラズマ運転下で、前述の特性が維持されるかについて十分な情報は得られておらず、粒子流の照射量・入射エネルギーが高くなった際の材料の影響については、未だ不十分である。そこで、本研究では、数値実験炉構築のために必要な高温プラズマ運転時の粒子流に対する材料の影響を、以下のシミュレーションを用いて系統的に調べる。

- ・ DFT 法によるタングステンなどの炉材候補のポテンシャル作成
- ・ 上記ポテンシャルを用いたタングステンの溶融条件の検討
- ・ 差分法を用いた熱伝導などの巨視的輸送現象の解明

以上のように、プラズマ壁相互作用現象に現れる(1)電子を扱うミクロレベルの量子化学計算、(2)原子レベルの分子動力学計算、そして、(3)マクロ輸送現象を扱う差分法と、時空間が異なる階層での現象に相応しいシミュレーション技法を用いて数値実験炉構築の炉材料に関して必要な知見を与えることを目指していく。

➤ 統合輸送

統合輸送コード構築のための個別物理過程に対応した要素コードの開発とその部分統合を進めてきた結果、2012 年度に LHD 実験データ解析型統合輸送パッケージを共同利用に供する段階に到達した。LHD 実験に対応した 3 次元平衡、NBI 加熱解析、エネルギー・運動量輸送解析がルーチン的に行える状況を実現している。この進展を基盤として、LHD での検証を通じた要素コード・輸送モデリングの妥当化や高精度化、新規要素コードの開発や導入を行うとともに、プロジェクト内外の様々なモデリング活動との連携を強める。例えば、周辺プラズマ輸送グループとは、周辺部の中性粒子挙動解析とコアプラズマ解析との連携について具体的な議論を始めている。共同利用に供している TASK3D-a は、新規要素コードを導入する点で汎用性に富んでおり、輸送解析の機能拡張を通じて、数値実験炉の基盤として発展させていく。LHD での検証研究を通じて、LHD プラズマのさらなる高性能化や原型炉設計に向けた予測精度の向上を図っていく。

➤ 基礎物理・研究基盤

(1) 核融合プラズマの微視的效果を取り込んだ3次元非線形MHDシミュレーションを行うことを目的として、二流体平衡及び安定性解析コードの開発、Braginskii方程式を用いた3次元トーラスシミュレーションコードの開発、計算負荷を軽減する適合格子細分化(AMR)手法モジュール開発、比較的小規模でフルシミュレーションに近い計算を行うためのラージエディシミュレーション(LES)手法の開発を行う。

(2) これまで、マイクロ階層とマクロ階層をつなぐ多階層シミュレーションコード(MARISコード)の開発として、領域分割方式による1方向2階層モデルを構築し、磁気リコネクション現象に適応することによりその有効性を実証している。この多階層モデルを、複雑な形状の核融合プラズマへ応用するには、中間階層を取り入れた3階層モデルを3次元空間の3方向に連結したモデルへと拡張する必要がある。この研究では、縦磁場存在下での磁気リコネクション、粒子衝突が効く場合の磁気リコネクション、低電離プラズマでの磁気リコネクションへの応用を具体的なターゲットとしながら開発を進め、最終的には磁場閉じ込め装置におけるプラズマ崩壊現象、鋸歯現象の解明が可能となる多階層シミュレーションコードの構築を目指す。

(3) 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、以下にあげるバーチャルリアリティを活用する研究計画を予定している。

- ・ 設計段階である原型炉 FFHR の CAD データをバーチャルリアリティ空間で再現する。また、その平衡プラズマシミュレーションの結果を原型炉の真空容器内で同時バーチャルリアリティ可視化をする。これによって、原型炉の設計への寄与を目指す。
- ・ ITER の建設ですでに不安視されているように、核融合炉を実際に建設する際に各部品を確実に組み上げられるかは大きな問題である。そこで、建設や製造工程をバーチャルリアリティ空間内でシミュレーションができるような環境の構築を目指す。
- ・ これまで開発してきた技術や成果、あるいはバーチャルリアリティ装置の特性を生かして、将来的には、核融合炉実現へ包括的かつ対話性のあるシミュレーション・可視化環境の構築を目指す。

➤ 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

数値実験研究プロジェクトでは、以下に示した計画により、プロジェクト課題間の連携を強化し、シミュレーションコードおよび物理成果の統合化を図ることにより、高精度・高信頼化された数値実験炉の構築に向けた研究活動を推進する。

- 原型炉の設計において、想定する物理パラメータを反映した3次元平衡をHINT2コードによって生成し、この3次元平衡を開発や高度化が進められている種々の数値シミュレーションコードに取り込むことにより、原型炉の炉心プラズマの物理特性を評価する。
- 新古典輸送シミュレーションコードFORTEC-3Dコードの拡張により、原型炉における新古典熱輸送評価、DT比や不純物の影響評価を実施する。
- 磁場配位、衝突効果、不純物粒子効果、運動論的電子効果など、各物理効果を取り込んだコード(GKV+)を用いて、ヘリカル配位における非線形ジャイロ運動論的シミュレーションを進め、その成果を基盤として、新しい異常輸送モデルを構築する。同時に、統合輸送コードTASK3Dへの適用を行い、異常輸送の効率的な評価と数値実験炉への機能の提供を図る。
- ITERや原型炉の炉材料として想定されている高Z材であるタングステンに対する、高温プラズマ運転時の粒子流の影響を系統的に調べる。
- 統合輸送コード環境をベースとしたプロジェクト内外の様々なモデリング活動との連携の促進、例えば、(1) LHD実験での検証を通じた要素コード・輸送モデリングの妥当化や高精度化、新規要素コードの開発や導入、(2)「周辺プラズマ輸送統合コード」と「ヘリカルプラズマ統合輸送コード」との連携を図る。
- 設計段階にある原型炉のCADデータとそこで予定される平衡プラズマシミュレーションの結果をバーチャルリアリティ空間内で同時可視化する。
- 流体平衡モデルの高精度化とそれを用いた平衡・安定性解析、LES手法を通じた運動論的効果のより広範な取り込み、AMR手法の他の計算モデル(運動論的シミュレーション等)への応用を図る。

このように、将来計画は、個別要素物理現象の解明から、得られた成果や開発したシミュレーションコードの統合化、原型炉設計に貢献する数値実験炉の構築に至るまでの系統的かつ具体的な研究戦略に基づいており、目標の達成に向けた適切なものとなっている。さらに、将来計画には、国内外の共同研究者およびNIFSのLHD実験計画プロジェクトや総合工学研究プロジェクトとの連携を基にした、すべての物理課題に関する長期的かつ具体的な計画が含まれており、向こう10年を展望した現実的なものとなっている。

8 まとめ

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。3 プロジェクトの 1 つである「数値実験研究プロジェクト」は、これまでの理論・シミュレーション研究の成果を基に、「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」を目指した研究計画を策定するとともに、この研究計画をより着実に推進するための機動性と柔軟性を基調とした新たな研究体制を構築した。

新たな数値実験研究プロジェクトの研究体制では、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進められながら、プロジェクト研究が全体として効率的に機能するように運営されている。特に、国内外の研究者の英知を結集して数値実験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。

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。数値実験研究プロジェクト関連の論文の総数は、平成 20 年から 24 年までの 4 年半で 458 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 12 編、IAEA 核融合エネルギー会議の発表論文（数値実験研究プロジェクトのメンバーが第 1 著者のもの）29 編が含まれるなど、新研究体制の下、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 2 期中期計画期間の残り 3 年間（2013 年～2015 年）および第 3 期中期計画の 6 年間（2016 年～2021 年）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。

論文リスト

**Published Papers related to NSRP
in 2008-2012**

National Institute for Fusion Science

Published papers in 2008

1. "Development of hydrogen storage electrode for plasma biasing in the Tohoku University Heliac", Utoh H., Nishimura K., Takahashi H., etc, Journal of Physics: Conference Series 123 012024 (2008), refereed
2. "Calculation of Microscopic Stress Tensor with Non-equilibrium Molecular Dynamics", Atsushi ITO, Hiroaki NAKAMURA , Theoretical and Applied Mechanics Japan 57 159-167 (2008), refereed
3. "MHD study of the reactor-relevant high-beta regime in the Large Helical Device", S Sakakibara, K Y Watanabe, Y Suzuki, etc, Plasma Physics and Controlled Fusion 50 124014 (2008), refereed
4. "Nonlinear Effect on the Plasma Blob Propagation in the Scrape-off Layer", Satoru SUGITA, Masatoshi YAGI, Sanae-I. ITOH, Kimitaka ITOH , Theoretical and Applied Mechanics Japan 57 207-215 (2008), refereed
5. "Optimization activities on design studies of LHD-type reactor FFHR", A. Sagara, O. Mitarai, T. Tanaka, etc, Fusion Engineering and Design 83 1690-1695 (2008), refereed
6. "Multi-scale Transport Simulation of Non-local Turbulent Effect on Internal Transport Barrier Collapse in Tokamak Plasma", Shinsuke TOKUNAGA, Masatoshi YAGI, Sanae-I. ITOH, Kimitaka ITOH , Theoretical and Applied Mechanics Japan 57 429-436 (2008), refereed
7. "Multi-scale Interaction between Neoclassical Tearing Mode and Drift Wave", Masatoshi YAGI, Sanae-I. ITOH, Kimitaka ITOH , Theoretical and Applied Mechanics Japan 57 199-205 (2008), refereed
8. "Benchmark Tests of Fusion Plasma Simulation Codes for Studying Microturbulence and Energetic-Particle Dynamics", T. -H. Watanabe, Y. Todo, W. Horton, Plasma and Fusion Research 3 061-1-061-6 (2008), refereed
9. "Simulation science for fusion plasmas", S. Sudo, M. M. Škorić, T-H. Watanabe, etc, Journal of Physics: Conference Series 133 012025 (2008), refereed
10. "Large Scale Particle-in-cell Plasma Simulation", Seiji Ishiguro , 139-144 (2008), High Performance Computing on Vector Systems 2008, Springer, not refereed
11. "Coexistence of zonal flows and drift-waves in a cylindrical magnetized plasma", Yoshihiko NAGASHIMA, Sanae-I. ITOH, Shunjiro SHINOHARA, etc, Journal of the Physical Society of Japan 77 114501 (2008), refereed
12. "Electron Force Balance in Steady Collisionless Driven Reconnection", Bin Li, Ritoku

- Horiuchi , Physical Review Letters 101 215001 (2008), refereed
13. "Effects of finite Larmor radius on equilibria with flow in reduced two-fluid models", A. Ito, N. Nakajima, AIP conference proceedings 1069 121-132 (2008), not refereed
 14. "Molecular Dynamics Simulation of the Chemical Interaction between Hydrogen Atom and Graphene", Atsushi ITO, Hiroaki NAKAMURA, Arimichi TAKAYAMA , Journal of the Physical Society of Japan 77 114602 (2008), refereed
 15. "Bifurcation of heat transport in high temperature plasma", Katsumi Ida, Shigeru Inagaki, Ryuichi Sakamoto, Kimitaka Itoh, Kenji Tanaka, Hisamichi Funaba , Journal of the Physical Society of Japan 77 124501 (2008), refereed
 16. "Scientific Visualization of Magnetic Reconnection Simulation Data by CAVE Virtual Reality System", Hiroaki OHTANI, Ritoku HORIUCHI , Plasma and Fusion Research 3 054-1-054-3 (2008), refereed
 17. "Generation and confinement of high energy electrons generated by irradiation of ultra-intense short laser pulses onto cone targets", T. Nakamura, K. Mima, H. Sakagami, T. Johzaki, H. Nagatomo, Laser and Particle Beams 26 207-212 (2008), refereed
 18. "Numerical Analysis of Non-Resonant Pressure Driven Mode in Heliotron Plasma", K. Ichiguchi, B. A. Carreras, Abstracts of 35th EPS Conference on Plasma Phys. Hersonissos,9-13 June 2008, ECA 32D - (2008), not refereed
 19. "Modeling of Hydrocarbon Redeposition in the Gaps of Castellated Structures", K. Ohya, K. Inai, Y. Kikuhara, A. Ito, H. Nakamura, Y. Tomita, G. Kawamura, T. Tanabe, IAEA2008, not refereed
 20. "Transport due to Electromagnetic Turbulence in Externally Heated Plasma", A. Ishizawa, N. Nakajima, IAEA2008, refereed
 21. "プラズマの乱流構造", 伊藤 公孝, 伊藤 早苗 , 日本物理学会誌(BUTSURI) 63 785-790 (2008), refereed
 22. "Integrated Simulations and Respective Simulation Modeling for FIREX-I", H. Sakagami, T. Nakamura, T. Johzaki, H. Nagatomo, Y. Nakao, T. Taguchi, K. Mima, IAEA2008, refereed
 23. "Simulation Study of Interaction between Energetic Ions and Alfvén Eigenmodes in LHD", Y. Todo, N. Nakajima, M. Osakabe, S. Yamamoto, D. A. Spong, IAEA Fusion Energy Conference 2008 1-6 (2008), not refereed
 24. "Core electron temperature rise due to Ar gas-puff in EC-heated LHD plasmas", N. Tamura, S. Inagaki, K. Ida, etc, Journal of Physics: Conference Series 123 012023 (2008), refereed

25. "Development of Multi-hierarchy Simulation Model for Studies of Magnetic Reconnection", S. Usami, H. Ohtani, R. Horiuchi, M. Den, *Communications in Computational Physics* 4 537-544 (2008), refereed
26. "Formation of non-Maxwellian distribution and its role in collisionless driven reconnection", R. Horiuchi, H. Ohtani, *Communications in Computational Physics* 4 496-505 (2008), refereed
27. "Molecular Dynamics Simulation of Bombardment of Hydrogen Atoms on Graphite Surface", Atsushi ITO, Hiroaki NAKAMURA , *Communications in Computational Physics* 4 592-610 (2008), refereed
28. "Anatomy of plasma turbulence", TAKUMA YAMADA, SANAE-I. ITOH, TAKASHI MARUTA, etc, *Nature Physics* 4 721-725 (2008), refereed
29. "Nonlinear Dynamics of Rotating Drift-Tearing Modes in Tokamak Plasmas", S. Nishimura, S. Benkadda, M. Yagi, S. -I. Itoh, K. Itoh, *Physics of Plasmas* 15 092506 (2008), refereed
30. "Influence of the band structure of BiSb alloy on the magneto-Seebeck coefficient", Takayuki Teramoto, Takashi Komine, Shinji Yamamoto, Masahiro Kuraishi, Ryuji Sugita, Yasuhiro Hasegawa, Hiroaki Nakamura , *Journal of Applied Physics* 104 053714 (2008), refereed
31. "Roles of ion and electron dynamics in the onset of magnetic reconnection due to current sheet instabilities", Toseo Moritaka, Ritoku Horiuchi , *Physics of Plasmas* 15 092114 (2008), refereed
32. "Temporal evolution of particle transport of Super Dense Core plasma in LHD", K Tanaka, C Michael, L N Vyacheslavov, etc, *Journal of Physics: Conference Series* 123 012020 (2008), refereed
33. "Change of fluctuation properties during non-local temperature rise in LHD from 2d phase contrast imaging", C A Michael, K Tanaka, L Vyacheslavov, etc, *Journal of Physics: Conference Series* 123 012018 (2008), refereed
34. "Local observations of fast ion responses to energetic particle modes using a directional probe in the Compact Helical System (CHS)", K. Nagaoka, M. Isobe, K. Toi , etc, *Nuclear Fusion* 48 084005 (2008), refereed
35. "Selection rule for turbulent structural formation: Study of magnetized cylindrical plasmas", N. Kasuya, M. Yagi, K. Itoh, S. -I. Itoh, *Journal of Physics: Conference Series* 123 012026 (2008), refereed
36. "Effect of Ellipticity on Thermal Transport in ECH Plasmas in LHD", Hiroshi YAMADA,

- Masayuki YOKOYAMA, Sadayoshi MURAKAMI, etc, Plasma and Fusion Research 3 S1032 (2008), refereed
37. "Development of a Non-Local Neoclassical Transport Code for Helical Configurations", Shinsuke SATAKE, Ryutaro KANNO, Hideo SUGAMA, Plasma and Fusion Research 3 S1062 (2008), refereed
 38. "Transition between internal transport barriers with different curvatures of temperature profiles in JT-60U tokamak plasmas", K. Ida, Y. Sakamoto, H. Takenaga, etc, Physical Review Letters 101 055003 (2008), refereed
 39. "Multi - scale interactions among micro - turbulence, macro - MHD, and zonal flow", Akihiro Ishizawa, Noriyoshi Nakajima , AIP conference proceedings 1069 110-120 (2008), not refereed
 40. "Effect of zonal flow caused by microturbulence on the double tearing mode", A. Ishizawa, N. Nakajima, Physics of Plasmas 15 084504 (2008), refereed
 41. "Clear Transition to High-Te State with an Electron Internal Transport Barrier Creation in EC Heated LHD Plasmas", T. Shimozuma, S. Kubo, H. Igami, etc, Journal of Physics: Conference Series 123 012022 (2008), refereed
 42. "Monte-Carlo Simulation of Neoclassical Transport in Magnetic Islands and Ergodic Regions", Ryutaro KANNO, Masanori NUNAMI, Shinsuke SATAKE, Hisanori TAKAMARU, Yukihiro TOMITA, Keisuke NAKAJIMA, Masao OKAMOTO, Nobuyoshi OHYABU , Plasma and Fusion Research 3 S1060 (2008), refereed
 43. "Formation of Sweet-Parker-like electron dissipation region in a driven open system", Bin Li, R. Horiuchi, H. Ohtani, Plasma and Fusion Research 3 S1054 (2008), refereed
 44. "Ion Heating Experiments Using Perpendicular Neutral Beam Injection in the Large Helical Device", Kenichi NAGAOKA, Masayuki YOKOYAMA, Yasuhiko TAKEIRI, etc, Plasma and Fusion Research 3 S1013 (2008), refereed
 45. "Drift-Wave Instabilities Modified by Parallel and Perpendicular Flow Velocity Shears in Magnetized Plasmas", Toshiro Kaneko, Shuichi Tamura, Atsushi Ito, Rikizo Hatakeyama , Plasma and Fusion Research 3 S1011 (2008), refereed
 46. "Simulation Study of Energetic Ion Transport due to Alfvén Eigenmodes in LHD Plasma", Yasushi TODO, Noriyoshi NAKAJIMA, Masaki OSAKABE, Satoshi YAMAMOTO, Donald A. SPONG, Plasma and Fusion Research 3 S1074 (2008), refereed
 47. "Hydrogen isotope sputtering of graphite by molecular dynamics simulation", Atsushi Ito, Hiroaki Nakamura , Thin Solid Films 516 6553-6559 (2008), refereed
 48. "Neoclassical Transport Properties in High-Ion-Temperature Hydrogen Plasmas in the

- Large Helical Device (LHD)", Seikichi MATSUOKA, Masayuki YOKOYAMA, Kenichi NAGAOKA, etc, Plasma and Fusion Research 3 S1056 (2008), refereed
49. "Development of a Hierarchy-Integrated Simulation Code for Toroidal Helical Plasmas, TASK3D", Masahiko SATO, Shinichiro TODA, Yuji NAKAMURA, Kiyomasa WATANABE, Atsushi FUKUYAMA, Sadayoshi MURAKAMI, Masayuki YOKOYAMA, Hisamichi FUNABA, Hiroshi YAMADA, Noriyoshi NAKAJIMA , Plasma and Fusion Research 3 S1063 (2008), refereed
 50. "Effect of Toroidal Current on Rotational Transform Profile by MHD Activity Measurement in Heliotron J", Gen MOTOJIMA, Satoshi YAMAMOTO, Hiroyuki OKADA, etc, Plasma and Fusion Research 3 S1067 (2008), refereed
 51. "Effect of Rotational Transform and Magnetic Shear on Confinement of Stellarators", E. ASCASIBAR, D. LOPEZ-BRUNA, F. CASTEJON, etc, Plasma and Fusion Research 3 S1004 (2008), not refereed
 52. "Improvement of ion confinement in core electron-root confinement (CERC) plasmas in Large Helical Device", Yasuhiko TAKEIRI, Masayuki YOKOYAMA, Kenichi NAGAOKA, etc, Plasma and Fusion Research 3 S1031 (2008), refereed
 53. "Nonlinear Simulation of Collapse Phenomenon in Helical Plasma with a Large Pressure Gradient", Naoki MIZUGUCHI, Yasuhiro SUZUKI, Nobuyoshi OHYABU , Plasma and Fusion Research 3 S1034 (2008), refereed
 54. "Spectrum Properties of Hall MHD Turbulence", Dan HORI, Hideaki MIURA , Plasma and Fusion Research 3 S1053 (2008), refereed
 55. "Transport Analysis of Dynamics of Plasma Profiles in Helical Devices", Shinichiro TODA, Kimitaka ITOH, Plasma and Fusion Research 3 S1068 (2008), refereed
 56. "Geodesic Acoustic Modes in Multi-Ion System", Makoto SASAKI, Kimitaka ITOH, Akira EJIRI, Yuichi TAKASE , Plasma and Fusion Research 3 S1017 (2008), refereed
 57. "Non-local turbulent effect on internal transport barrier collapse in reversed shear configuration", S. Tokunaga, M. Yagi, S. -I. Itoh, K. Itoh, Journal of Physics: Conference Series 123 012030 (2008), refereed
 58. "Gyrokinetic Studies of Ion Temperature Gradient Turbulence and Zonal Flows in Helical Systems", Hideo SUGAMA, Tomo-Hiko WATANABE, Sergi FERRANDO-MARGALET, Plasma and Fusion Research 3 041-1-041-9 (2008), refereed
 59. "Comparisons of density profiles in JT-60U tokamak and LHD helical plasmas with low collisionality", H. Takenaga, K. Tanaka, K. Muraoka, H. Urano, N. Oyama, Y. Kamada, M. Yokoyama, H. Yamada, T. Tokuzawa, I. Yamada, Nuclear Fusion 48 075004 (2008),

refereed

60. "Erratum: "High-Beta Axisymmetric Equilibria with Flow in Reduced Single-Fluid and Two-Fluid Models"", Atsushi ITO, Jesús J. RAMOS, Noriyoshi NAKAJIMA , Plasma and Fusion Research 3 045-1-045-1 (2008), refereed
61. "Dependence of spontaneous growth and suppression of the magnetic island on beta and collisionality in the LHD", Y. Narushima, K. Y. Watanabe, S. Sakakibara, K. Narihara, I. Yamada, Y. Suzuki, S. Ohdachi, N. Ohyaabu, H. Yamada, Y. Nakamura, Nuclear Fusion 48 075010 (2008), refereed
62. "Propagation Velocity Analysis of a Single BLOB in the SOL", Satoru SUGITA, Masatoshi YAGI, Sanae -I. ITOH, Kimitaka ITOH, Plasma and Fusion Research 3 040-1-040-3 (2008), refereed
63. "Stability and Confinement Studies of High-Performance NBI Plasmas in the Large Helical Device Toward a Steady-State Helical Fusion Reactor", Yasuhiko TAKEIRI, Akio KOMORI, Hiroshi YAMADA, etc, Plasma and Fusion Research 3 S1001 (2008), refereed
64. "RELATIVISTIC COMPRESSION OF A LASER PULSE REFLECTED FROM A MOVING PLASMA", M. M. Skoric, B. V. Stanic, Lj. R. Hadzievski, Lj. Nikolic, Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade 84 499-502 (2008), refereed
65. "Eigenmode analysis of Geodesic Acoustic Modes", Zhe Gao, K. Itoh, H. Sanuki, J. Q. Dong, Physics of Plasmas 15 072511 (2008), refereed
66. "Scaling Law for Fast Electron Beam Intensity in Fast Ignition", H. Sakagami, T. Johzaki, H. Nagatomo, T. Nakamura, K. Mima, Journal of Physics: Conference Series 112 022070 (2008), refereed
67. "Simulation Studies for Core Heating Properties in FIREX-I", T. Johzaki, H. Nagatomo, T. Nakamura, H. Sakagami, A. Sunahara, K. Mima, Y. Nakao, Journal of Physics: Conference Series 112 022054 (2008), refereed
68. "High-beta axisymmetric equilibria with flow in reduced single-fluid and two-fluid models", Atsushi ITO, Jesus J. RAMOS, Noriyoshi NAKAJIMA , Plasma and Fusion Research 3 034-1-034-7 (2008), refereed
69. "Target Design for High-density Non-spherical Implosion in Fast Ignition", H. Nagatomo, T. Johzaki, A. Sunahara, T. Nakamura, H. Sakagami, K. Mima, Journal of Physics: Conference Series 112 022053 (2008), refereed
70. "Systematic study of impurity pellet injection with $Z=6-74$ for improvement of plasma performance in LHD", S. Morita, R. Sakamoto, M. B. Chowdhuri, etc, 32D P1.105 (2008), not refereed

71. "Particle Simulations of High-Intensity Laser Interaction with Cone Targets", Lj. Nikolic, M. M. Skoric, S. Ishiguro, H. Sakagami, F. Vidal, T. Johnston, *Journal of Physics: Conference Series* 112 022086 (2008), refereed
72. "磁場閉じ込め核融合における電磁流体力学", 三浦 英昭, 榊原 悟 , ながれ 27 209-216 (2008), not refereed
73. "Erosion of Graphene in Hydrogen Atom Gas", Atsushi ITO, Hiroaki NAKAMURA , *Japanese Journal of Applied Physics* 47 4715-4718 (2008), refereed
74. "Two-Dimensional Model Including the Mechanism of a Poloidal Shock Structure and Geodesic Acoustic Mode in Toroidal Plasmas", Naohiro KASUYA, Kimitaka ITOH , *Plasma and Fusion Research* 3 S1016 (2008), refereed
75. "Integrated Simulations for Transport of Laser-Produced Relativistic Electrons in Solid Targets", T. Johzaki, H. Nagatomo, T. Nakamura, H. Sakagami, K. Mima, R. Kosama, *Journal of Physics: Conference Series* 112 022091 (2008), refereed
76. "Mercier Stability Improvement in Nonlinear Development of LHD Plasma", Katsuji ICHIGUCHI, Benjamin A. CARRERAS, *Plasma and Fusion Research* 3 S1033 (2008), refereed
77. "Abrupt Flushing of High-Density Core in Internal Diffusion Barrier Plasmas and its Suppression by Plasma Shape Control in LHD", Junichi MIYAZAWA, Ryuichi SAKAMOTO, Satoshi OHDACHI, etc, *Plasma and Fusion Research* 3 S1047 (2008), refereed
78. "Study on a fuel layering sequence of the foam target for the FIREX project", A. Iwamoto, T. Fujimura, M. Nakai, etc, *Journal of Physics: Conference Series* 112 032067 (2008), refereed
79. "Extension of High-Ion-Temperature Regime in the Large Helical Device (LHD)", M. Yokoyama, K. Nagaoka, M. Yoshinuma, etc, *Physics of Plasmas* 15 056111_1-056111_8 (2008), refereed
80. "Primal Macro-Projective Integration Method for Multi-Scale Plasma Simulation", Miloš M. ŠKORIĆ, Aleksandra Maluckov, Seiji Ishiguro , *Plasma and Fusion Research* 3 021-1-021-3 (2008), refereed
81. "Reduction of Turbulent Transport with Zonal Flows Enhanced in Helical Systems", T. -H. Watanabe, H. Sugama, S. Ferrando-Margalet, *Physical Review Letters* 100 195002 (2008), refereed
82. "Sheared flow generation and mode suppression in a magnetized linear cylindrical plasma", H Tsuchiya, S Itoh, A Fujisawa, K Kamataki, S Shinohara, M Yagi, Y Kawai, A

- Komori, K Itoh, Plasma Physics and Controlled Fusion 50 055005 (2008), refereed
83. "Configuration Effects on Local Transport in High-Beta LHD Plasmas", Hisamichi FUNABA, Kiyomasa WATANABE, Sadayoshi MURAKAMI, etc, Plasma and Fusion Research 3 022-1-022-11 (2008), refereed
 84. "Selective formation of turbulent structures in magnetized cylindrical plasmas", Naohiro Kasuya, Masatoshi Yagi, Kimitaka Itoh, Sanae -I Itoh, Physics of Plasmas 15 052302 (2008), refereed
 85. "Virtual laboratory for fusion research in Japan", K. Tsuda, Y. Nagayama, T. Yamamoto, R. Horiuchi, S. Ishiguro, S. Takami, Fusion Engineering and Design 83 471-475 (2008), refereed
 86. "Control, Data Acquisition, Data Analysis and Remote Participation in LHD", Y. Nagayama, M. Emoto, H. Nakanishi, etc, Fusion Engineering and Design 83 170-175 (2008), refereed
 87. "A Macro Projective Integration Method in 2D Microscopic System Applied to Nonlinear Ion Acoustic Waves in a Plasma", A. M. Maluckov, S. Ishiguro, M. M. Skoric, Communications in Computational Physics 4 556-574 (2008), refereed
 88. "Refinement of the gyrokinetic equations for edge plasmas with large flow shears", G. Kawamura, A. Fukuyama, Physics of Plasmas 15 042304 (2008), refereed
 89. "Estimation of the advanced TCP/IP algorithms for long distance collaboration", T. Yamamoto, Fusion Engineering and Design 83 516-519 (2008), refereed
 90. "Particle Orbit Analysis in the Finite Beta Plasma of the Large Helical Device using Real Coordinates", Ryouyuke SEKI, Yutaka MATSUMOTO, Yasuhiro SUZUKI, Kiyomasa WATANABE, Masafumi ITAGAKI, Plasma and Fusion Research 3 016-1-016-9 (2008), refereed
 91. "Moment-equation methods for calculating neoclassical transport coefficients in general toroidal plasmas", H. Sugama, S. Nishimura, Physics of Plasmas 15 042502 (2008), refereed
 92. "Transport Modeling of Edge Plasma in an $m/n=1/1$ Magnetic Island", Ryutaro Kanno, Masanori Nunami, Shinsuke Satake, Hisanori Takamaru, Masao Okamoto, Contributions to Plasma Physics 48 106-110 (2008), refereed
 93. "Radial Eigenmodes of Geodesic Acoustic Modes", M. Sasaki, K. Itoh, A. Ejiri, Y. Takase, Contributions to Plasma Physics 48 68-72 (2008), refereed
 94. "Disparate Scale Nonlinear Interactions in Edge Turbulence", M. Yagi, S. -I. Itoh, K. Itoh, P. H. Diamond, Contributions to Plasma Physics 48 13-22 (2008), refereed

95. "Self-Consistent Simulations of the Plasma-Wall Transition Layer", D. Tskhakaya, S. Kuhn, Y. Tomita, K. Matyash, R. Schneider, F. Taccogna, Contributions to Plasma Physics 48 121-125 (2008), refereed
96. "Molecular Dynamics Simulation of Hydrogen Isotope Injection into Graphene", H. Nakamura, A. Takayama, A. Ito, Contributions to Plasma Physics 48 265-269 (2008), refereed
97. "Effect of Oblique Magnetic Field on Release Conditions of Dust Particle from Plasma-Facing Wall", Y. Tomita, R. D. Smirnov, T. Takizuka, D. Tskhakaya, Contributions to Plasma Physics 48 285-289 (2008), refereed
98. "Investigation of competitive oscillations between drift mode and flute mode in linear cylindrical ECR plasma", K. Kamataki, S-I. Itoh, Y. Nagashima, S. Inagaki, S. Shinohara, M. Yagi, T. Yamada, Y. Kawai, A. Fujisawa, K. Itoh, Plasma Physics and Controlled Fusion 50 035011 (2008), refereed
99. "Gyrokinetic Approach to the Analysis of Incident Angle Distribution of Ions in a Magnetized Sheath", G. Kawamura, A. Fukuyama, Contributions to Plasma Physics 48 126-130 (2008), refereed
100. "Derivation of jump conditions in multiphase incompressible flows with singular forces", H. Miura, Plasma and Fusion Research 3 S1052- (2008), refereed
101. "Characterization of intermittency in plasma edge turbulence", M. M. Skoric, M. R. Rajkovic, Contributions to Plasma Physics 48 37-41 (2008), refereed
102. "Experiment on direct energy conversion from tandem mirror plasmas by using a slanted cusp magnetic field", Y. Yasaka, T. Yamamoto, Y. Kurumatani, H. Takeno, Y. Nakashima, T. Cho, Y. Tomita, M. Ishikawa, Nuclear Fusion 48 035015 (2008), refereed
103. "Two dimensionally steep structure of the electric field in tokamak H-mode", N. Kasuya, K. Itoh, Nuclear Fusion 48 035003 (2008), refereed
104. "Experimental studies of zonal flow and field in compact helical system plasma", A. Fujisawa, K. Itoh, A. Shimizu, etc, Physics of Plasmas 15 055906 (2008), refereed
105. "Erratum: 'Collisionless damping of geodesic acoustic modes' [J. Plasma Physics (2006) 72, 825]", H. SUGAMA, T. -H. WATANABE, Journal of Plasma Physics 74 139-140 (2008), refereed
106. "Modification of Symmetry of Poloidal Eigenmode of Geodesic Acoustic Mode", Makoto SASAKI, Kimitaka ITOH, Akira EJIRI, Yuichi TAKASE, Plasma and Fusion Research 3 009-1-009-8 (2008), refereed
107. "講座 オープンソースソフトウェアを使った実践データ解析 3. Python を使った実践デー

- タ解析", 鈴木 康浩 , プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research) 84 108-116 (2008), not refereed
108. "Numerical analysis of the magneto-Seebeck effect of bismuth with anisotropic band structure", Takayuki Teramoto, Takashi Komine, Masahiro Kuraishi, Ryuji Sugita, Yasuhiro Hasegawa, Hiroaki Nakamura , Journal of Applied Physics 103 043717 (2008), refereed
109. "Radial Transport Characteristics of Fast Ions Due to Energetic-Particle Modes inside the Last Closed-Flux Surface in the Compact Helical System", Kenichi Nagaoka, Mitsutaka Isobe, Kazuo Toi, etc, Physical Review Letters 100 065005 (2008), refereed
110. "先進燃料核融合における直接エネルギー変換の実験則の研究", 竹野 裕正, 八坂 保能, 中嶋 洋輔, 長 照二, 富田 幸博, 石川 本雄 , Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 84 117-120 (2008), refereed
111. "Some properties of the resonant state in quantum mechanics and its computation", Naomichi Hatano, Keita Sasada, Hiroaki Nakamura, Tomio Petrosky , Progress of Theoretical Physics 119 187-222 (2008), refereed
112. "Characterization of Local Turbulence in Magnetic Confinement Devices", Milan Rajković, Miloš Škorić, Knut Sølna, Ghassan Antar , Nuclear Fusion 48 024016 (2008), refereed
113. "Development of Electromagnetic Particle Simulation Code in an Open System", Hiroaki Ohtani, Seiji Ishiguro, Ritoku Horiuchi, Yasuharu Hayashi, Nobutoshi Horiuchi, Lecture Notes in Computer Science 4759 329-343 (2008), refereed
114. "Bifurcation Phenomena of a Magnetic Island at a Rational Surface in a Magnetic-Shear Control Experiment", K. Ida, S. Inagaki, M. Yoshinuma, Y. Narushima, K. Itoh, T. Kobuchi, K. Y. Watanabe, H. Funaba, S. Sakakibara, T. Morisaki, Physical Review Letters 100 045003 (2008), refereed
115. "Distributed Parallelization of Exact Charge Conservative Particle Simulation Code by High Performance Fortran", Hiroki Hasegawa, Seiji Ishiguro, Masao Okamoto , Lecture Notes in Computer Science 4759 358-364 (2008), refereed
116. "講座 オープンソースソフトウェアを使った実践データ解析 2. 便利なツールの使い方", 鈴木 康浩 , プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research) 84 33-45 (2008), not refereed
117. "Poloidal Flow Generated by Drift-Tearing Mode", Seiya NISHIMURA, Masatoshi YAGI, Sanae-I. ITOH, Kimitaka ITOH, Journal of the Physical Society of Japan 77 014501 (2008), refereed

118. "Axisymmetric equilibria with flow in reduced two-fluid models", Atsushi Ito, Jesus J. Ramos, Noriyoshi Nakajima, NIFS-PROC-69 611-614 (2008), not refereed
119. "High Performance Fortran の現状", H. Murai, H. Sakagami, システム/制御/情報(会誌) 52 14-20 (2008), not refereed

Published papers in 2009

1. "Orthonormal Divergence-free Wavelet Analysis of Energy Transfer in Magnetohydrodynamic Turbulence", K. Araki, H. Miura, 8 96-99 (2009), not refereed
2. "インフォメーション 第21回プラズマ数値シミュレーション国際会議(ICNSP09)", 堀内 利得, 石黒 静児, 渡邊 智彦, 中村 浩章, 大谷 寛明, 沼波 政倫, プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research) 85 843-844 (2009), not refereed
3. "Numerical studies on ultrarelativistic ion motions in an oblique magnetosonic shock wave", Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, Yukiharu Ohsawa, Physics of Plasmas 16 122104 (2009), refereed
4. "Kinetic Description of Nonlinear Plasma Turbulence", S. -I. Itoh, K. Itoh, Journal of the Physical Society of Japan 78 124502 (2009), refereed
5. "Numerical Simulation of Contactless Methods for Measuring jC Distribution of High Temperature Superconducting Thin Film", Teruo Takayama, Atsushi Kamitani, Nakamura Hiroaki, Plasma and Fusion Research 5 S2113 -S2113-5 (2009), refereed
6. "Macro-Micro interlocked simulation algorithm: an exemplification for aurora arc evolution", Tetsuya Sato, Hiroki Hasegawa, Nobuaki Ohno, Computational Science and Discovery 2 015007 (2009), refereed
7. "Poloidal eigenmode of the geodesic acoustic mode in the limit of high safety factor", M. Sasaki, K. Itoh, A. Ejiri, Y. Takase, Journal of Plasma Physics 75 721-729 (2009), refereed
8. "Linearized model collision operators for multiple ion species plasmas and gyrokinetic entropy balance equations", H. Sugama, T. -H. Watanabe, M. Nunami, Physics of Plasmas 16 112503 (2009), refereed
9. "First Demonstration of Collisionless Driven Reconnection in a Multi-Hierarchy Simulation", Shunsuke USAMI, Hiroaki OHTANI, Ritoku HORIUCHI, Mitsue DEN, Plasma and Fusion Research 4 049-1-049-3 (2009), refereed
10. "Relativistic Laser-Plasma Interactions - On the Paradigm of Stimulated Raman Scattering -", Milos M. Skoric, AIP conference proceedings 1188 15-34 (2009), not

refereed

11. "会議報告：第12回核融合装置における周辺プラズマ理論に関する国際会議(PET12)", 河村学思, 星野 一生, プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research) 85 800-800 (2009), not refereed
12. "Development of Net-Current Free Heliotron Plasmas in the Large Helical Device", A. Komori, H. Yamada, S. Sakakibara, etc, Nuclear Fusion 49 104015 (2009), refereed
13. "MHD Stability Analysis of IDB Plasma in LHD", Y. Narushima, K. Y. Watanabe, R. Sakamoto, etc, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 1070-1074 (2009), refereed
14. "Hall effects on local structures in decaying MHD Turbulence", Hideaki MIURA, Dan. HORI, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 73-76 (2009), refereed
15. "Plasma physics and laser development for the Fast-Ignition Realization Experiment (FIREX) Project", H. Azechi, K. Mima, Y. Fujimoto, etc, Nuclear Fusion 49 104024 (2009), refereed
16. "Interaction of energetic particles, Alfvén eigenmode, and zonal flow and fields", Y. Todo, H. L. Berk, B. N. Breizman, - (2009), not refereed
17. "An EDDY-PIC simulation of co-deposition of hydrogen isotopes on castellated structure of plasma facing tiles", K. Inai, K. Ohya, G. Kawamura, Y. Tomita, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 433-437 (2009), refereed
18. "Reynolds Stress Measurements for Investigation of Nonlinear Processes of Turbulence in the Large Mirror Device and in the Large Mirror Device-Upgrade", Y. Nagashima, S. -I. Itoh, K. Itoh, etc, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 50-54 (2009), refereed
19. "Numerical Simulation of Collisionless Driven Reconnection Controlled by Multi-Scale Physics in Open Systems", Ritoku Horiuchi, Shunsuke Usami, Hiroaki Ohtani, Mitsue Den, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 184-188 (2009), refereed
20. "Plasmoid Motion in Helical Plasmas", R. Ishizaki, N. Nakajima, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 0995-0998 (2009), refereed
21. "Effects of Micro-Fluctuations on Magnetic Island Evolution", S. Nishimura, S. Benkadda, M. Yagi, S. -I. Itoh, K. Itoh, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 1179-1182 (2009), refereed
22. "Two-channel quantum wire with an adatom impurity: Role of the van Hove singularity in the quasibound state in continuum, decay rate amplification, and the Fano effect", S. Garmon, H. Nakamura, N. Hatano, T. Petrosky, Physical Review B 80 115318 (2009),

refereed

23. "Multi-scale Interaction between MHD, Turbulence and Transport in Tokamak Plasmas", Masatoshi YAGI, Sanae-I. ITOH, Shinsuke TOKUNAGA, Seiya NISHIMURA, Kimitaka ITOH , Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 122-125 (2009), refereed
24. "Collisional Effects on Fast Electron Generation and Transport in Fast Ignition", H. Sakagami, Y. Kaseda, T. Taguchi, T. Johzaki, - (2009), refereed
25. "Seesaw Mechanism in Turbulence-Suppression by Zonal Flows", Kimitaka ITOH, Sanae-I. ITOH, Masatoshi YAGI, Atsushi FUKUYAMA , Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 119-121 (2009), refereed
26. "Measurement of Nonlinear Mode Couplings in the Large Mirror Device-Upgrade", T. Yamada, S. -I. Itoh, S. Inagaki, etc, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 87-90 (2009), refereed
27. "Dynamics of Drift and Flute Modes in Linear Cylindrical ECR Plasma", K. Kamataki, S. -I. Itoh, Y. Nagashima, S. Inagaki, S. Shinohara, M. Yagi, T. Yamada, Y. Kawai, A. Fujisawa, K. Itoh, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 82-86 (2009), not refereed
28. "Analyses of Nonlinear Coupling for Turbulent Structural Formation in Magnetized Cylindrical Plasmas", N. Kasuya, M. Yagi, K. Itoh, S. -I. Itoh, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 77-81 (2009), refereed
29. "Numerical Study of Inflation of a Dipolar Magnetic Field in Space by Plasma Jet Injection", Yoshihiro KAJIMURA, Hideyuki USUI, Masanori NUNAMI, Ikkoh FUNAKI, Iku SHINOHARA, Hideki NAKASHIMA, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 1616-1621 (2009), refereed
30. "Multi-Scale Plasma Particle Simulation for the Development of Interplanetary Flight System", Hideyuki USUI, Yoshihiro KAJIMURA, Masanori NUNAMI, Ikkoh FUNAKI, Iku SHINOHARA, Hiroshi YAMAKAWA, Masao NAKAMURA, Daisuke AKITA, Hiroko UEDA , Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 1569-1573 (2009), refereed
31. "Numerical Computation of Flows with Moving Boundaries Using an Immersed Interface Method", Caesar. O. HARAHAAP, Hideaki MIURA , Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 914-919 (2009), refereed
32. "MULTI-SCALE MHD SIMULATION INCORPORATING PRESSURE TRANSPORT EQUATION FOR LHD PLASMA", Katsuji ICHIGUCHI, Benjamin A. CARRERAS, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 1171-1175 (2009), refereed
33. "Numerical Analysis of Laser Produced Plasma Expansion with Large Ion Larmor

- Radius via 3D PIC Simulation", Masanori Nunami, Katsunobu Nishihara , Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 0815-0818 (2009), refereed
34. "Level-crossing function in the analysis of edge plasma turbulence", Milan Rajković, Tomo-Hiko Watanabe, Miloš Škorić , Nuclear Fusion 49 095016 (2009), refereed
 35. "小特集 連結階層モデルによって見えてきたプラズマシミュレーションの新たな局面 2. プラズマにおける連結階層シミュレーション 2. 2 磁気リコネクション研究をめざした多階層シミュレーションモデルの開発", 宇佐見 俊介, 大谷 寛明, 堀内 利得, 田 光江 , プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research) 85 585-588 (2009), not refereed
 36. "Spatiotemporal dynamics and transport reduction in helical magnetic configuration", Milan Rajković, Tomo-Hiko Watanabe, Miloš Škorić , Physics of Plasmas 16 092306 (2009), refereed
 37. "ENERGY CONVERSION IN MAGNETIC RECONNECTION WITH CHAOS DIFFUSION", Hiroaki Ohtani, Wendell Horton, Tomio Petrosky, Ritoku Horiuchi , Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 203-207 (2009), refereed
 38. "Dynamics of ion internal transport barrier in LHD heliotron and JT-60U tokamak plasmas", K. Ida, Y. Sakamoto, M. Yoshinuma, etc, Nuclear Fusion 49 095024 (2009), refereed
 39. "Nonlinear dynamics of a collapse phenomenon in heliotron plasma with large pressure gradient", N. Mizuguchi, Y. Suzuki, N. Ohya, Nuclear Fusion 49 095023 (2009), refereed
 40. "Experimental study of non-inductive current in Heliotron J", Gen MOTOJIMA, Kazunobu NAGASAKI, Hiroyuki OKADA, etc, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 1010-1014 (2009), refereed
 41. "1D fluid model of plasma profiles in the LHD divertor leg", Gakushi KAWAMURA, Yukihiro TOMITA, Masahiro KOBAYASHI, David TSKHAKAYA , Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 455-459 (2009), refereed
 42. "Seesaw Mechanism in Turbulence-Suppression by Zonal Flows", Kimitaka ITOH, Sanae-I. ITOH, Masatoshi YAGI, Atsushi FUKUYAMA , Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 119-121 (2009), refereed
 43. "小特集連結階層モデルによって見えてきたプラズマシミュレーションの新たな局面 2. プラズマにおける連結階層シミュレーション 2. 4 粗視化投影法による多スケールプラズマシミュレーション", 石黒 静児, M. M. Skoric, プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research) 85 593-596 (2009), refereed
 44. "Optical Observation of Neutral Beam Attenuation in Hydrogen Discharge at LHD",

- Katsunori Ikeda, Masaki Osakabe, Allan Whiteford, etc, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 987-990 (2009), refereed
45. "Orthonormal Divergence-free Wavelet Analysis of Energy Transfer in Magnetohydrodynamic Turbulence", K. Araki, H. Miura, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 96-99 (2009), refereed
 46. "Observations of abrupt changes in the fluctuation spectrum on LMD-U", H. Arakawa, K. Kamataki, S. Inagaki, etc, Plasma Physics and Controlled Fusion 51 085001 (2009), refereed
 47. "Quantum Nernst Effect in a Bismuth Single Crystal", Mari Matsuo, Akira Endo, Naomichi Hatano, H. Nakamura, Ryoen Shirasaki, Ko Sugihara, Physical Review B 80 075313 (2009), refereed
 48. "Transient excitation of zonal flows by geodesic acoustic modes", M Sasaki, K Itoh, A Ejiri, Y Takase, Plasma Physics and Controlled Fusion 51 085002 (2009), refereed
 49. "Fundamental relation between longitudinal and transverse conductivities in the quantum Hall system", Akira Endo, Naomichi Hatano, Hiroaki Nakamura, Ryoen Shirasaki, Journal of Physics: Condensed Matter 21 345803 (2009), not refereed
 50. "High-density plasma with internal diffusion barrier in the Large Helical Device", R. Sakamoto, M. Kobayashi, J. Miyazawa, etc, Nuclear Fusion 49 085002 (2009), refereed
 51. "Observations of spontaneous toroidal flow in the LHD", M. Yoshinuma, K. Ida, M. Yokoyama, K. Nagaoka, M. Osakabe, Nuclear Fusion 49 075036 (2009), refereed
 52. "Temperature Control in a Cryogenic Target with a Conical Laser Guide for Fuel Layering", A. Iwamoto, T. Fujimura, M. Nakai, etc, Fusion Science and Technology 56 427-431 (2009), refereed
 53. "Effects of the stochasticity on transport properties in high- β LHD", Yasuhiro SUZUKI, Kiyomasa WATANABE, Hisamichi FUNABA, Satoru SAKAKIBARA, Noriyoshi NAKAJIMA, Nobuyoshi OHYABU, Plasma and Fusion Research 4 036-1-036-6 (2009), refereed
 54. "Multi-scale transport simulation of toroidal momentum source profile effect on internal transport barrier collapse", S. Tokunaga, M. Yagi, S. -I. Itoh, K. Itoh, Nuclear Fusion 49 075023 (2009), refereed
 55. "Generation control of fast electron beam by low-density foam for FIREX-I", H Sakagami, T Johzaki, H Nagatomo, K Mima, Nuclear Fusion 49 075026 (2009), refereed
 56. "Numerical study of the advanced target design for FIREX-I", H. Nagatomo, T. Johzaki, H. Sakagami, Y. Sentoku, A. Sunahara, T. Taguchi, H. Shiraga, H. Azechi, K. Mima,

- Nuclear Fusion 49 075028 (2009), refereed
57. "International Stellarator/Heliotron Database Activities on High-Beta Confinement and Operational Boundaries", A Weller, K Y Watanabe, S Sakakibara, etc, Nuclear Fusion 49 065016 (2009), refereed
 58. "Observation of an impurity hole in the Large Helical Device", M. Yoshinuma, K. Ida, M. Yokoyama, etc, Nuclear Fusion 49 062002 (2009), refereed
 59. "Molecular dynamics simulation of hydrogen atom sputtering on the surface of graphite with defect and edge", Atsushi Ito, Ying Wang, Stephan Irle, Keiji Morokuma, Hiroaki Nakamura , Journal of Nuclear Materials 390-391 183-187 (2009), refereed
 60. "Simulation of hydrocarbon reflection from carbon and tungsten surfaces and its impact on codeposition patterns on plasma facing components", K. Ohya, Y. Kikuhara, K. Inai, A. Kirschner, D. Borodin, A. Ito, Hiroaki Nakamura, T. Tanabe, Journal of Nuclear Materials 390-391 72-75 (2009), refereed
 61. "Extension of Improved Particle and Energy Confinement Regime in the Core of LHD Plasma", Osamu KANEKO, Masayuki YOKOYAMA, Mikiro YOSHINUMA, etc, Plasma and Fusion Research 4 027-1-027-9 (2009), refereed
 62. "Open Boundary Condition for Particle Simulation in Magnetic Reconnection Research", Hiroaki OHTANI, Ritoku HORIUCHI , Plasma and Fusion Research 4 024-1-024-14 (2009), refereed
 63. "LABCOM/X Experiment Data Platform and Fusion Virtual Laboratory in Japan", Nakanishi H., Ohsuna M., Kojima M., etc, - (2009), not refereed
 64. "Boundary of the geodesic acoustic eigenmode in the vicinity of the magnetic separatrix", Y. Nagashima, K. Itoh, A. Fujisawa, etc, Plasma Physics and Controlled Fusion 51 065019 (2009), refereed
 65. "Optimum Density and Thickness of Low-Density Foam Coating on Cone Tip for FIREX-I", H. Sakagami, T. Johzaki, H. Nagatomo, K. Mima, 33E ESP2009 1-4 (2009), refereed
 66. "Boundary of the geodesic acoustic eigenmode in the vicinity of the magnetic separatrix", Y. Nagashima, K. Itoh, A. Fujisawa, etc, Plasma Physics and Controlled Fusion 51 065019 (2009), refereed
 67. "Kinetic analysis of ion incident angle distribution on a plasma-facing wall", G. Kawamura, A. Fukuyama, Y. Tomita, Journal of Nuclear Materials 390-391 172-174 (2009), refereed
 68. "Effect of external magnetic perturbation on MHD characteristics in the Large Helical

- Device", S. Sakakibara, K. Y. Watanabe, H. Yamada, etc, Plasma and Fusion Research 10-1 (2009), refereed
69. "Effect of the curvature and the β parameter on the nonlinear dynamics of a drift tearing magnetic island", M. Muraglia, O. Agullo, M. Yagi, S. Benkadda, P. Beyer, X. Garbet, S. -I. Itoh, K. Itoh, A. Sen, Nuclear Fusion 49 055016 (2009), refereed
70. "Thermal transport due to turbulence including magnetic fluctuation in externally heated plasma", A. Ishizawa, N. Nakajima, Nuclear Fusion 49 055015 (2009), refereed
71. "Observation of an impurity hole in a plasma with an ion internal transport barrier in the Large Helical Device", K. Ida, M. Yoshinuma, M. Osakabe, etc, Physics of Plasmas 16 056111 (2009), refereed
72. "CAVE 型 3次元バーチャルリアリティ装置 CompleXcope を用いたサイエンティフィック・ビジュアライゼーション", 大谷 寛明, 田村 祐一, 陰山 聡, 大野 暢亮, 水口 直紀, 伊藤 篤史, 分子シミュレーション研究会会誌 アンサンブル 11 51-57 (2009), not refereed
73. "Energy Current on Multi-body Potential with Dirac Delta Function", Atsushi ITO, Hiroaki NAKAMURA, Progress of Theoretical Physics Supplement 178 107-112 (2009), refereed
74. "Molecular dynamics simulation of amphiphilic molecules in solution: Micelle formation and dynamic coexistence", Susumu Fujiwara, Takashi Itoh, Masato Hashimoto, Ritoku Horiuchi, The Journal of Chemical Physics 130 144901 (2009), refereed
75. "Shape effect of the outermost flux surface on effective helical ripple and zonal flow response in an L = 2 heliotron", Osamu Yamagishi, Sadayoshi Murakami, Nuclear Fusion 49 045001 (2009), refereed
76. "解説 流体としての磁場閉じ込め核融合プラズマ実験を意識した電磁流体力学方程式の拡張", 中島 徳嘉, 内藤 裕志, 藤堂 泰, 石澤 明宏, プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research) 85 105-118 (2009), not refereed
77. "Analytic high-beta tokamak equilibria with poloidal-sonic flow", Atsushi Ito, Noriyoshi Nakajima, Plasma Physics and Controlled Fusion 51 035007 (2009), refereed
78. "Nonlinear self-interaction of geodesic acoustic modes in toroidal plasmas", M. Sasaki, K. Itoh, Y. Nagashima, A. Ejiri, Y. Takase, Physics of Plasmas 16 022306 (2009), refereed
79. "Simulation of Electric Quadrupole and Magnetic Dipole Transition Efficiencies in Optical Near Fields Generated by a Subwavelength Slit Array", Kazuhiro Deguchi, Michihiro Okuda, Atsushi Iwamae, Hiroaki Nakamura, Keiji Sawada, Masahiro Hasuo, Journal of the Physical Society of Japan 78 024301 (2009), refereed
80. "Reflection of an Electromagnetic Pulse from a Relativistically Moving Plasma", Milos M.

- Skoric, Bozidar V. Stanic, Lj. Hadzievski, Ljubomir V. Nikolic, *Journal of Plasma Physics* 75 111-115 (2009), refereed
81. "Turbulence-driven zonal flows in helical systems with radial electric fields", H. Sugama, T. -H. Watanabe, *Physics of Plasmas* 16 056101 (2009), refereed
 82. "Charging of Dust Particles in Magnetic Field", Y. Tomita, G. Kawamura, T. Yamada, O. Ishihara, *Journal of Plasma and Fusion Research SERIES* 8 273-276 (2009), refereed
 83. "Analysis on EAST LHCD Operation Space by Using Simple Core-SOL-Divertor Model", R. Hiwatari, A. Hatayama, S. Zhu, Y. Tomita, *Plasma Science and Technology* 11 389-393 (2009), refereed
 84. "Acceleration of dust particle in SOL/Divertor plasma of HL-2A", Y. Tomita, G. Kawamura, Y. D. Pan, Y. Zhou, L. W. Yan, *Plasma Science and Technology* 11 427-429 (2009), refereed
 85. "Release conditions of dust particle from plasma-facing wall in oblique magnetic field", Y. Tomita, G. Kawamura, R. Smirnov, T. Takizuka, D. Tskhakaya, *Journal of Nuclear Materials* 390-391 164-167 (2009), refereed
 86. "Core heating properties in FIREX-I—influence of cone tip", T. Johzaki, Y. Sentoku, H. Nagatomo, H. Sakagami, Y. Nakao, K. Mima, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 51 014002 (2009), refereed

Published papers in 2010

1. "ECRH Superposition on Linear Cylindrical Helicon Plasma in the LMD-U", K. Kamataki, S. -I. Itoh, S. Inagaki, H. Arakawa, Y. Nagashima, T. Yamada, M. Yagi, A. Fujisawa, K. Itoh, *Plasma and Fusion Research* 5 S2046 (2010), refereed
2. "Examination of Temperature Dependence of Chemical Sputtering on Graphite by Comparing the Langevin and Berendsen Thermostats", Atsushi ITO, Hisashi OKUMURA, Seiki SAITO, Hiroaki NAKAMURA, *Plasma and Fusion Research* 5 S2020 (2010), refereed
3. "Nonlinear Mode Couplings in a Cylindrical Magnetized Plasma", T. Yamada, S. -I. Itoh, S. Inagaki, etc, *Plasma and Fusion Research* 5 S2016 (2010), refereed
4. "Molecular Dynamics Simulation of the Incident Angle Dependence of Reactions between Graphene and Hydrogen Atom", Seiki SAITO, Atsushi M. ITO, Hiroaki NAKAMURA, *Plasma and Fusion Research* 5 S2076 (2010), refereed

5. "Orthonormal Divergence-free Wavelet Analysis of Energy Transfer in Hall-MHD Turbulence", Keisuke Araki, Hideaki Miura, Plasma and Fusion Research 5 S2048- (2010), refereed
6. "小特集 周辺プラズマからプラズマ対向壁材料までのシミュレーションコード・モデルの最前線 4.二体衝突近似・モンテカルロ法によるイオン・固体相互作用シミュレーション", 斎藤 誠紀, 河村 学思, 井内 健介, プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research) 86 690-693 (2010), not refereed
7. "Influences of Short-Wave Truncations to Spectral Energy Budget in Hall MHD Turbulence", H. Miura, Plasma and Fusion Research 5 S2059 (2010), refereed
8. "Turbulence Response in the High Ti Discharge of the LHD", K. Tanaka, C. Michael, L. N. Vyacheslavov, etc, Plasma and Fusion Research 5 S2053 (2010), refereed
9. "Probability Density Function of Density Fluctuations in Cylindrical Helicon Plasmas", Hiroyuki ARAKAWA, Shigeru INAGAKI, Yoshihiko NAGASHIMA, etc, Plasma and Fusion Research 5 S2044 (2010), refereed
10. "小特集 周辺プラズマからプラズマ対向壁材料までのシミュレーションコード・モデルの最前線", 伊藤 篤史, 星野 一生, 藤間 光徳, 河村 学思, 斎藤 誠紀, 井内 健介, 大野 哲靖, プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research) 86 679-707 (2010), not refereed
11. "Magnetic Reconnection Controlled by Multi-Hierarchy Physics in an Open System", Ritoku HORIUCHI, Shunsuke USAMI, Hiroaki OHTANI, Toseo MORITAKA, Plasma and Fusion Research 5 S2006 (2010), refereed
12. "Multi-scale simulation for plasma science", S. Ishiguro, S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, A. Maluckov, M. M. Skoric, Journal of Physics: Conference Series 257 012026 (2010), refereed
13. "Progress of Impurity-Related Physics Experiment in LHD", Shigeru MORITA, Chunfeng DONG, Motoshi GOTO, etc, Plasma and Fusion Research 5 S2004 (2010), refereed
14. "小特集 周辺プラズマからプラズマ対向壁材料までのシミュレーションコード・モデルの最前線 5.プラズマ壁相互作用における分子動力学", 伊藤 篤史, プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research) 86 694-697 (2010), not refereed
15. "Effect of Molecular Rigidity on Micelle Formation in Amphiphilic Solution", S. Fujiwara, T. Itoh, M. Hashimoto, H. Nakamura, Y. Tamura, Plasma and Fusion Research 5 S2114 (2010), refereed
16. "Summary of the 19th International Toki Conference - Advanced Physics in Plasma and

- Fusion Research", K. Itoh, Plasma and Fusion Research 5 S2118 (2010), refereed
17. "Study of the Effect of the Helical Ripple Transport on the Confinement via Zonal Flows in Helical Plasmas", Shinichiro TODA, Kimitaka ITOH , Plasma and Fusion Research 5 S2023 (2010), refereed
 18. "Numerical Diagnostics of the Electrostatic Potential Perturbed by Magnetic Islands", S. Nishimura, N. Kasuya, M. Yagi, K. Itoh, S. -I. Itoh, N. Ohyaabu, Plasma and Fusion Research 5 S2057 (2010), refereed
 19. "Bispectral Analysis of Density and Potential Fluctuations in a High Neutral Density Cylindrical Plasma", T. Kobayashi, S. Inagaki, H. Arakawa, etc, Plasma and Fusion Research 5 S2047 (2010), refereed
 20. "Simulation Study of Ballooning Modes in the Large Helical Device", Yasushi TODO, Noriyoshi NAKAJIMA, Masahiko SATO, Hideaki MIURA , Plasma and Fusion Research 5 S2062-1-S0262-4 (2010), refereed
 21. "Introduction of Adhesive Force to DEM Simulation and Application to Fracture of Fragile Powder Materials", Toshiki Matsui, Kyoichi Tsurusaki, Ryoen Shirasaki, Hiroaki Nakamura , Plasma and Fusion Research 5 S2116 (2010), refereed
 22. "High Performance Analysis of Shielding Current Density in High Temperature Superconducting Thin Film", Atsushi Kamitani, Teruo Takayama, Nakamura Hiroaki , Plasma and Fusion Research 5 S2112 (2010), refereed
 23. "Three Dimensional Extended Boundary Node Method to Potential Problem", Taku ITOH, Ayumu SAITOH, Atsushi KAMITANI, Hiroaki Nakamura , Plasma and Fusion Research 5 S2111 (2010), refereed
 24. "FDTD simulated observation of a gold nanorod by scanning near-field optical microscopy", Keiji SAWADA, Hiroaki Nakamura, Teruto MARUOKA, Yuichi TAMURA, Kohei IMURA, Toshiharu SAIKI, Hiromi Okamoto, Plasma and Fusion Research 5 S2110 (2010), refereed
 25. "Comparison of Hydrogen Adsorption on Diamond and Graphite Surfaces", 中村 浩章, 伊藤 篤史, 斎藤 誠紀, 田村 祐一, 藤原 進, 大野 哲靖, 梶田 信 , Plasma and Fusion Research 5 S2072 (2010), refereed
 26. "Simulation Data Analysis by Virtual Reality System", H. Ohtani, N. Ohno, N. Mizuguchi, M. Shoji, S. Ishiguro, Plasma and Fusion Research 5 S2109 (2010), refereed
 27. "Application of Two Dimensional Extended Boundary Node Method to Potential Problem", Ayumu SAITOH, Taku ITOH, Atsushi KAMITANI, Nobuyuki Matsui, Hiroaki Nakamura , Plasma and Fusion Research 5 S2108 (2010), refereed

28. "Haptization of Molecular Dynamics Simulation with Thermal Display", Yuichi Tamura, Susumu Fujiwara, Nakamura Hiroaki , Plasma and Fusion Research 5 S2107 (2010), refereed
29. "Plasmoid Motion in Helical Plasmas", R. Ishizaki, N. Nakajima, Plasma and Fusion Research 5 S2060- (2010), refereed
30. "Calibration of Compact Electron Spectrometer for the FIREX-I Project in Gekko XII", Tetsuo OZAKI, Mayuko KOGA, Hiroyuki SHIRAGA, Ryuko KATO, Shigeru KASHIWAGI, Goro ISOYAMA, Hitoshi SAKAGAMI, Plasma and Fusion Research 5 S2098 (2010), refereed
31. "Experimental study of radial electric field and electrostatic potential fluctuation in the Large Helical Device", T. Ido, A. Shimizu, M. Nishiura, etc, Plasma Physics and Controlled Fusion 52 124025 (2010), refereed
32. "Modelling of ion energy transport in perturbed magnetic field in collisionless toroidal plasma", R. Kanno, M. Nunami, S. Satake, H. Takamaru, M. Okamoto, N. Ohya, Plasma Physics and Controlled Fusion 52 115004 (2010), refereed
33. "On Distance of Turbulent Plasma from Thermal Equilibrium", S-I. Itoh, K. Itoh, Journal of the Physical Society of Japan 79 124501 (2010), refereed
34. "A mini-max principle for drift waves and mesoscale fluctuations", S-I. Itoh, K. Itoh, Plasma Physics and Controlled Fusion 53 015008 (2010), refereed
35. "Observation of Quasi-Two-Dimensional Nonlinear Interactions in a Drift-Wave Streamer", T. Yamada, S. -I. Itoh, S. Inagaki, etc, Physical Review Letters 105 225002 (2010), refereed
36. "Forced Magnetic Reconnection in Helical Plasmas", Seiya Nishimura, Yoshiro Narushima, Shinichiro Toda, Masatoshi Yagi, Kimitaka Itoh, Sanae-I. Itoh, Plasma and Fusion Research 5 040-1-040-3 (2010), refereed
37. "Wavelet analyses using parallel computing for plasma turbulence studies", A. Fujisawa, A. Shimizu, K. Itoh, Y. Nagashima, T. Yamada, S. Inagaki, K. Matsuoka, S. -I. Itoh, Physics of Plasmas 17 104503 (2010), refereed
38. "Evidence of Stochastic Region near a Rational Surface in Core Plasmas of LHD", K. Ida, N. Tamura, H. Tsuchiya, etc, - (2010), not refereed
39. "Haptization on Numerical Simulation of Plasma", Yuichi Tamura, Hiroaki Ohtani, Tomohiro Umetani, Nakamura Hiroaki , IEEE Transactions on Plasma Science 38 2974-2979 (2010), refereed
40. "Theoretical Transport Analysis of Density limit with Radial Electric Field in Helical

- Plasmas", S. Toda, K. Itoh, - (2010), not refereed
41. "Equilibrium and Stability of High-beta Toroidal Plasmas with Toroidal and Poloidal Flow in Reduced Magnetohydrodynamic Models", A. Ito, N. Nakajima, THC/P5-03- (2010), not refereed
 42. "Observation of Reversed-Shear Alfvén Eigenmodes Excited by Energetic Ions in a Helical Plasma", K. Toi, F. Watanabe, T. Tokuzawa, etc, Physical Review Letters 105 145003 (2010), refereed
 43. "Simulation Study of Nonlinear Magnetohydrodynamic Effects on Alfvén Eigenmode Evolution and Zonal Flow Generation", Y. Todo, H. L. Berk, B. N. Breizman, IAEA Fusion Energy Conference 2010, RHW/2-3Ra- (2010), not refereed
 44. "Full Particle-in-Cell Simulation Study on Magnetic Inflation Around a Magneto Plasma Sail", T. Moritaka, H. Usui, M. Nunami, Y. Kajimura, M. Nakamura, M. Matsumoto, IEEE Transactions on Plasma Science 38 2219-2228 (2010), refereed
 45. "Bifurcation of the plasma turbulence on LMD-U", H. Arakawa, S. Inagaki, Y. Nagashima, etc, Plasma Physics and Controlled Fusion 52 105009 (2010), refereed
 46. "Influences of short-wave filtering in Hall-MHD turbulence", H. Miura, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 9 535-540 (2010), refereed
 47. "Study on possible fuel layering sequence for FIREX target", A Iwamoto, T Fujimura, M Nakai, K Nagai, T Norimatsu, H Azechi, R Maekawa, H Sakagami, Journal of Physics: Conference Series 244 032039 (2010), refereed
 48. "Enhancement of Residual Zonal Flows in Helical Systems with Equilibrium Radial Electric Fields", H. Sugama, T. -H. Watanabe, Contributions to Plasma Physics 50 571-575 (2010), refereed
 49. "Pellet Ablation in Helical Plasmas", R. Ishizaki, N. Nakajima, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 9 471-478 (2010), refereed
 50. "Turbulence Diagnostic Simulator for Analzing Structural Formation in Magnetically Confined Plasmas", N. Kasuya, S. Nishimura, M. Yagi, K. Itoh, S. -I. Itoh, N. Ohyabu, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 9 523-528 (2010), refereed
 51. "Shear flow effects on double tearing mode global magnetic reconnection", T. Voslion, O. Agullo, P. Beyer, M. Yagi, S. Benkadda, X. Garbet, K. Itoh, S-I. Itoh, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 9 574-579 (2010), refereed
 52. "Visualization of energy transfer to magnetic energy by rolling-up vortices with uniform background magnetic field", Keisuke Araki, Hideaki Miura , Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 9 446-451 (2010), refereed

53. "A new framework for integrated simulation model using MPMD approach", A. Takayama, K. Shimizu, Y. Tomita, T. Takizuka, *Journal of Plasma and Fusion Research SERIES* 9 604-609 (2010), refereed
54. "Simulation of feedback instability in the coupled magnetosphere-ionosphere system", Hiroki Hasegawa, Nobuaki Ohno, Tetsuya Sato, *Journal of Geophysical Research - Space Physics* 115 A08304 (2010), refereed
55. "A convergence study for the Laguerre expansion in the moment equation method for neoclassical transport in general toroidal plasmas", S. Nishimura, H. Sugama, H. Maaßberg, C. D. Beidler, S. Murakami, Y. Nakamura, S. Hirooka, *Physics of Plasmas* 17 082510 (2010), refereed
56. "Development of full particle-in-cell simulation code with adaptive mesh refinement technique", T. Moritaka, M. Nunami, H. Usui, *Journal of Plasma and Fusion Research SERIES* 9 586-591 (2010), refereed
57. "Monte Carlo Study Based on a Real Coordinate System for Tangentially Injected High-Energy Particles in the Large Helical Device", Ryosuke SEKI, Yutaka MATSUMOTO, Yasuhiro SUZUKI, Kiyomasa WATANABE, Kiyotaka HAMAMATSU, Masafumi ITAGAKI, *Plasma and Fusion Research* 5 027-1-027-9 (2010), refereed
58. "Core Plasma Design of a Heliotron Reactor", T. Goto, Y. Suzuki, K. Y. Watanabe, S. Imagawa, A. Sagara, *Contributions to Plasma Physics* 50 620-623 (2010), refereed
59. "Nonlinear magnetohydrodynamic effects on Alfvén eigenmode evolution and zonal flow generation", Y. Todo, H. L. Berk, B. N. Breizman, *Nuclear Fusion* 50 084016 (2010), refereed
60. "ROLE OF NEOCLASSICAL TRANSPORT AND RADIAL ELECTRIC FIELD IN LHD PLASMAS", M. Yokoyama, A. Wakasa, S. Murakami, K. Y. Watanabe, S. Satake, S. Nishimura, H. Sugama, N. Nakajima, H. Funaba, Y. Nakamura, *Fusion Science and Technology* 58 269-276 (2010), refereed
61. "Corrigendum of "Analytic high-beta tokamak equilibria with poloidal-sonic flow"", Atsushi Ito, Noriyoshi Nakajima, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 52 079802 (2010), refereed
62. "Study of Amplitude Correlation Technique in a Cylindrical Magnetized Plasma", T. Yamada, S. -I. Itoh, S. Inagaki, Y. Nagashima, K. Kamataki, H. Arakawa, M. Yagi, A. Fujisawa, K. Itoh, *Journal of the Physical Society of Japan* 79 085001 (2010), refereed
63. "Improvement of Plasma Core Confinement Via Electron-Root Realization by Strongly Focused ECRH in LHD: Core Electron-Root Confinement", T. Shimozuma, M. Yokoyama,

- K. Ida, etc, Fusion Science and Technology 58 38-45 (2010), refereed
64. "Ion-temperature gradient modes affected by helical magnetic field of magnetic islands", A. Ishizawa, P. H. Diamond, Physics of Plasmas 17 074503 (2010), refereed
 65. "ION HEATING EXPERIMENTS AND IMPROVEMENT OF ION HEAT TRANSPORT IN LHD", K. NAGAOKA, Y. TAKEIRI, S. MORITA, etc, Fusion Science and Technology 58 46-52 (2010), refereed
 66. "Considerations from the viewpoints of neoclassical transport towards higher ion-temperature heliotron plasmas", M. Yokoyama, S. Matsuoka, H. Funaba, K. Ida, K. Nagaoka, M. Yoshinuma, Y. Takeiri, O. Kaneko, Contributions to Plasma Physics 50 586-589 (2010), refereed
 67. "LHD: PROGRESS IN THE INTEGRATED DEVELOPMENT OF THE HELICAL SYSTEM", H. Yamada, K. Kawahata, T. Mutoh, etc, Fusion Science and Technology 58 12-28 (2010), refereed
 68. "Charge-Exchange Spectroscopy with Pitch-Controlled Double-Slit Fiber Bundle on LHD", Mikiro Yoshinuma, Katsumi Ida, Masayuki Yokoyama, Masaki Osakabe, Kenichi Nagaoka, Fusion Science and Technology 58 375-382 (2010), not refereed
 69. "Remote Participation for the LHD Experiment", M. Emoto, M. Yoshida, H. Nakanishi, T. Yamamoto, T. Watanabe, K. Watanabe, M. Shoji, Y. Nagayama, Fusion Science and Technology 58 458-464 (2010), refereed
 70. "MICROINSTABILITIES, TURBULENT TRANSPORT, AND STRUCTURE FORMATION IN HELICAL PLASMAS", K. ITOH, H. SUGAMA, T. -H. WATANABE, O. YAMAGISHI, S. TODA, N. KASUYA, R. KANNO, M. NUNAMI, Fusion Science and Technology 58 256-268 (2010), refereed
 71. "MHD Modes Destabilized by Energetic Ions on LHD", K. Toi, M. Isobe, M. Osakabe, etc, Fusion Science and Technology 58 186-193 (2010), refereed
 72. "Characteristics of nonlocally-coupled transition of the heat transport in LHD", N. Tamura, K. Ida, S. Inagaki, etc, Contributions to Plasma Physics 50 514-519 (2010), refereed
 73. "ACTIVITIES ON INTEGRATED SIMULATIONS IN LHD", N. Nakajima, M. Sato, Y. Nakamura, A. Fukuyama, S. Murakami, A. Wakasa, K. Y. Watanabe, S. Toda, H. Yamada, Fusion Science and Technology 58 289-296 (2010), refereed
 74. "Turbulence driven magnetic reconnection causing long-wavelength magnetic islands", A. Ishizawa, N. Nakajima, Physics of Plasmas 17 072308 (2010), refereed
 75. "Ion Internal Transport Barrier in the Large Helical Device", K. Ida, M. Yoshinuma, K.

- Nagaoka, etc, Contributions to Plasma Physics 50 558-561 (2010), refereed
76. "Simulation Study of the MHD Stability Beta Limit in LHD by TASK3D", M. Sato, K. Y. Watanabe, Y. Nakamura, etc, Contributions to Plasma Physics 50 665-668 (2010), refereed
 77. "Characteristics of MHD Equilibrium and Related Issues on LHD", K. Y. WATANABE, Y. SUZUKI, S. SAKAKIBARA, T. YAMAGUCHI, Y. NARUSHIMA, Y. NAKAMURA, K. IDA, N. NAKAJIMA, H. YAMADA, Fusion Science and Technology 58 160-175 (2010), refereed
 78. "Configuration of the Virtual Laboratory for Fusion Researches in Japan", T. Yamamoto, Y. Nagayama, H. Nakanishi, S. Ishiguro, S. Takami, K. Tsuda, S. Okamura, Fusion Engineering and Design 85 637-640 (2010), refereed
 79. "LOCAL TRANSPORT PROPERTY OF HIGH-BETA PLASMAS ON LHD", H. Funaba, K. Y. Watanabe, S. Sakakibara, etc, Fusion Science and Technology 58 141-149 (2010), refereed
 80. "PARTICLE TRANSPORT OF LHD", K. Tanaka, K. Kawahata, T. Tokuzawa, etc, Fusion Science and Technology 58 70-90 (2010), refereed
 81. "A proposal for the ITER remote participation system in Japan", Y. Nagayama, M. Emoto, Y. Kozaki, H. Nakanishi, S. Sudo, T. Yamamoto, K. Hiraki, S. Urushidani, Fusion Engineering and Design 85 535-539 (2010), refereed
 82. "Experimental Study on Nonlocality of Heat Transport in LHD", N. TAMURA, S. INAGAKI, T. TOKUZAWA, etc, Fusion Science and Technology 58 122-130 (2010), refereed
 83. "DATA ACQUISITION AND MANAGEMENT SYSTEM OF LHD", H. NAKANISHI, M. OHSUNA, M. KOJIMA, etc, Fusion Science and Technology 58 445-457 (2010), refereed
 84. "PROSPECTS TOWARD AN INTEGRATED HELIOTRON FUSION REACTOR", S. IMAGAWA, A. SAGARA, H. YAMADA, N. NAKAJIMA, A. KOMORI, O. MOTOJIMA, Fusion Science and Technology 58 593-598 (2010), refereed
 85. "Theoretical MHD Analyses of LHD Plasmas", K. Ichiguchi, H. Miura, N. Mizuguchi, Y. Suzuki, N. Nakajima, Y. Nakamura, Fusion Science and Technology 58 242-255 (2010), refereed
 86. "NUMERICAL ANALYSES OF ENERGETIC PARTICLES IN LHD", Y. TODO, S. MURAKAMI, T. YAMAMOTO, A. FUKUYAMA, D. A. SPONG, S. YAMAMOTO, M. OSAKABE, N. NAKAJIMA, Fusion Science and Technology 58 277-288 (2010), refereed
 87. "DEVELOPMENT OF 6-MeV HEAVY ION BEAM PROBE ON LHD", T. IDO, A. SHIMIZU, M. NISHIURA, etc, Fusion Science and Technology 58 436-444 (2010),

refereed

88. "SPONTANEOUS DYNAMICS OF MAGNETIC ISLANDS DEPENDING ON PLASMA PARAMETERS IN LHD", Y. NARUSHIMA, K. Y. WATANABE, Y. SUZUKI, S. SAKAKIBARA, K. IDA, K. NARIHARA, N. OHYABU, Fusion Science and Technology 58 194-199 (2010), refereed
89. "炭素材への水素照射のシミュレーション", 斎藤 誠紀, 伊藤 篤史, 高山 有道, 中村 浩章 , 311-314 (2010), not refereed
90. "Observation of edge Reynolds stress increase preceding an L-H transition in Compact Helical System", Yoshihiko NAGASHIMA, Kenichi NAGAOKA, Kimitaka ITOH, etc, Plasma and Fusion Research 5 022-1-022-3 (2010), refereed
91. "Interaction between Static Magnetic Islands and Interchange modes in a Straight Heliotron Plasma with High Resistivity", K. Saito, K. Ichiguchi, N. Ohyabu, Physics of Plasmas 17 062504 (2010), refereed
92. "Improved Open Boundary Model for Plasma Particle Simulations", Hiroki Hasegawa, Tetsuya Sato , Plasma and Fusion Research 5 020-1-020-7 (2010), refereed
93. "Spontaneous Toroidal Rotation Driven by the Off-diagonal Term of Momentum and Heat Transport in the Plasma with Ion Internal Transport Barrier in LHD", K. Ida, M. Yoshinuma, K. Nagaoka, etc, Nuclear Fusion 50 064007 (2010), refereed
94. "Effects of time-varying $E \times B$ flow on slab ion-temperature-gradient turbulence", S. Maeyama, A. Ishizawa, T. -H. Watanabe, M. M. Škorić, N. Nakajima, S. Tsuji-Iio, H. Tsutsui, Physics of Plasmas 17 062305 (2010), refereed
95. "Benchmark test of drift-kinetic and gyrokinetic codes through neoclassical transport simulations", Shinsuke Satake, Yasuhiro Idomura, Hideo Sugama, Tomohiko Watanabe , Computer Physics Communications 181 1069-1076 (2010), refereed
96. "Effects of long rarefied plasmas on fast electron generation for FIREX-I targets", H. Sakagami, T. Johzaki, A. Sunahara, H. Nagatomo, - (2010), refereed
97. "Electron Velocity Distributions at a Sheath Edge in the Presence of Secondary Electron Emission from a Metal Surface", K. Inai, K. Ohya, G. Kawamura, Y Tomita, Contributions to Plasma Physics 50 458-463 (2010), refereed
98. "Two-dimensional bispectral analysis of drift wave turbulence in a cylindrical plasma", T. Yamada, S. -I. Itoh, S. Inagaki, etc, Physics of Plasmas 17 052313 (2010), refereed
99. "Selective formation of streamers in magnetized cylindrical plasmas", N. KASUYA, M. YAGI, K. ITOH, S. -I. ITOH, Nuclear Fusion 50 054003 (2010), refereed
100. "Summary of IAEA Technical Meeting on Theory of Plasma Instabilities", Kimitaka Itoh ,

- Nuclear Fusion 50 054001 (2010), not refereed
101. "Gyrokinetic Vlasov Code Including Full Three-dimensional Geometry of Experiments", Masanori NUNAMI, Tomo-Hiko WATANABE, Hideo SUGAMA , Plasma and Fusion Research 5 016-1-016-8 (2010), refereed
 102. "Analysis of Carbon Deposition on the First Wall of LHD by Monte Carlo Simulation", G. Kawamura, Y. Tomita, M. Kobayashi, M. Tokitani, S. Masuzaki, A. Kirschner, Contributions to Plasma Physics 50 451-457 (2010), refereed
 103. "Locking of magnetic island rotation by static error field", S. Nishimura, M. Yagi, K. Itoh, S. -I. Itoh, S. Benkadda, Nuclear Fusion 50 054007 (2010), refereed
 104. "Monte-Carlo Study Based on Real Coordinates for Perpendicularly Injected High-Energy Ions in the LHD High-Beta Plasma", Ryosuke SEKI, Yutaka MATSUMOTO, Yasuhiro SUZUKI, Kiyomasa WATANABE, Kiyotaka HAMAMATSU, Masafumi ITAGAKI , Plasma and Fusion Research 5 014-1-014-3 (2010), refereed
 105. "Internal transport barrier formation induced by edge perturbation on LHD", Shigeru Inagaki, Naoki Tamura, Katsumi Ida, etc, Nuclear Fusion 50 064012 (2010), not refereed
 106. "Characterization of bifurcation induced by long distance correlation between heat flux and temperature gradient in toroidal plasmas", S. Inagaki, N. Tamura, K. Ida, K. Tanaka, Y. Nagayama, K. Kawahata, S. Sudo, K. Itoh, S-I. Itoh, A. Komori, Plasma Physics and Controlled Fusion 52 075002 (2010), refereed
 107. "Locking of magnetic island rotation by static error field", S. Nishimura, M. Yagi, K. Itoh, S. -I. Itoh, S. Benkadda, Nuclear Fusion 50 054007 (2010), refereed
 108. "MHD Simulation of High Wavenumber Ballooning-like Modes in LHD", H. Miura, N. Nakajima, Nuclear Fusion 50 054006 (2010), refereed
 109. "Formation of coherent vortex streets and transport reduction in electron temperature gradient driven turbulence", Motoki Nakata, Tomohiko Watanabe, Hideo Sugama, Wendell Horton , Physics of Plasmas 17 042306 (2010), refereed
 110. "Influences of ballooning modes with moderate wave number on MHD equilibrium in LHD", H. Miura, N. Nakajima, Nuclear Fusion 50 054006 (2010), refereed
 111. "Richtmyer-Meshkov instability: theory of linear and nonlinear evolution", K. Nishihara, J. G. Wouchuk, C. Matsuoka, R. Ishizaki, V. V. Zhakhovsky, Philosophical Transactions of The Royal Society A (Phll. Trans. R. Soc. A) 368 1769-1807 (2010), refereed
 112. "Propagation of magnetic island due to self-induced zonal flow", K. Uzawa, A. Ishizawa, N. Nakajima, Physics of Plasmas 17 042508 (2010), refereed
 113. "Interchange Turbulence and Radial Transport in Tokamak Scrape-Off Layer Dominated

- by Meso-scale Structure", S. Sugita, M. Yagi, S. -I. Itoh, K. Itoh, Journal of the Physical Society of Japan 79 044502 (2010), refereed
114. "Intrinsic Rotation of a Magnetic Island with Finite Width", Ken UZAWA, Akihiro ISHIZAWA, Noriyoshi NAKAJIMA , Plasma and Fusion Research 5 S1016 (2010), refereed
115. "1D modeling of LHD divertor plasma and hydrogen recycling", G. Kawamura, Y. Tomita, M. Kobayashi, D. Tskhakaya, Plasma and Fusion Research 5 S1020 (2010), refereed
116. "Gyrokinetic simulations of turbulent transport", X. Garbet, Y. Idomura, L. Villard, T. -H. Watanabe, Nuclear Fusion 50 043002 (2010), not refereed
117. "Clustered Data Storage for Multi-site Fusion Experiments", H. Nakanishi, M. Kojima, M. Ohsuna, etc, Plasma and Fusion Research 5 S1042 (2010), refereed
118. "Theoretical Modeling of Transport Barriers in Helical Plasmas", S. Toda, K. Itoh, N. Ohya, Plasma and Fusion Research 5 011-1-011-9 (2010), refereed
119. "Potential Measurement with the 6-MeV Heavy Ion Beam Probe of LHD", A. Shimizu, T. Ido, M. Nishiura, etc, Plasma and Fusion Research 5 S1015 (2010), refereed
120. "インフォメーション プラズマ物理学・核融合科学の振興をめざした 「物性物理学・一般物理学分野の大型計画に関するシンポジウム」 検討ワークショップ", 伊藤 公孝, 小川 雄一, 居田 克巳, etc, プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research) 86 188-201 (2010), not refereed
121. "Statistical Analysis Technique for Estimation of Causal Relationship in Plasma Turbulence", K. Kamataki, K. Itoh, S. -I. Itoh, A. Fujisawa, S. Inagaki, Y. Nagashima, M. Yagi, T. Yamada, Journal of the Physical Society of Japan 79 024501 (2010), refereed
122. "Clustered frequency analysis of shear Alfvén modes in stellarators", D. A. Spong, E. D'Azevedo, Y. Todo, Physics of Plasmas 17 022106 (2010), refereed
123. "Feedback instability in the magnetosphere-ionosphere coupling system: Revisited", T. -H. Watanabe, Physics of Plasmas 17 022904 (2010), refereed
124. "Development of the compact electron spectrometer for the FIREX-I Project in Gekko XII", T. Ozaki, M. Koga, H. Shiraga, H. Azechi, H. Sakagami, Journal of Physics: Conference Series 244 022056 (2010), refereed
125. "Statistical Analysis Technique for Estimation of Causal Relationship in Plasma Turbulence", K. Kamataki, K. Itoh, S. -I. Itoh, A. Fujisawa, S. Inagaki, Y. Nagashima, M. Yagi, T. Yamada, Journal of the Physical Society of Japan 79 024501 (2010), refereed
126. "小特集 LHD におけるイオン熱輸送研究の進展", 永岡 賢一, 横山 雅之, 吉沼 幹朗, 居田 克巳, 竹入 康彦 , プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research) 86

- 69-96 (2010), not refereed
127. "Integrated simulations of core heating in cone-guiding fast ignition, FIREX-I", T. Johzaki, H. Nagatomo, A. Sunahara, H. -B. Cai, H. Sakagami, K. Mima, *Journal of Physics: Conference Series* 244 1-4 (2010), not refereed
 128. "Controlling dynamics of imploded core plasma for fast ignition", H. Nagatomo, T. Johzaki, A. Sunahara, H. Shiraga, H. Sakagami, H. Cai, K. Mima, *Journal of Physics: Conference Series* 244 1-4 (2010), not refereed
 129. "Acceleration and Redeposition of a Dust Particle in SOL/Divertor Plasma of HL-2A Tokamak", Y. Tomita, G. Kawamura, Y. D. Pan, L. W. Yan, *Contributions to Plasma Physics* 50 426-431 (2010), refereed
 130. "Effects of preformed plasma of CH foam on fast electron generation", M. Hata, H. Sakagami, A. Sunahara, T. Johzaki, H. Nagatomo, *Journal of Physics: Conference Series* 244 1-4 (2010), not refereed
 131. "Multi-Scale MHD Analysis Incorporating Pressure Transport Equation for Beta-Increasing LHD Plasma", K. Ichiguchi, B. A. Carreras, *Proc. 23rd IAEA Fusion Energy Conference, 2010, Daejeon, Republic of Korea, THS/P5-08.* not refereed

Published papers in 2011

1. "Study of electric field pulsation in helical plasmas", S. Toda, K. Itoh, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 53 115011(1)-(14) (2011), refereed
2. "Transport Analysis Study of Oscillation Phenomena for the Electric Field in Helical Plasmas", S. Toda, K. Itoh, - (2011), not refereed
3. "Multipoint Spectroscopy Measurement of Spherical Tokamak Heating by Magnetic Reconnection in UTST", S. Kamio, Q. Cao, K. Abe, etc, *Plasma and Fusion Research* 6 2402033-1-4 (2011), refereed
4. "Dust Charging and Dynamics in Tokamaks", TOMITA Yukihiro, KAWAMURA Gakushi, HUANG Zhihui, PAN Yudong, YAN Longwen , *Plasma Science and Technology* 13 11-14 (2011), refereed
5. "Local structures of homogeneous Hall MHD turbulence", H. Miura, K. Araki, *Journal of Physics: Conference Series* 318 072032 - (2011), not refereed
6. "Recent Fusion Research in the National Institute for Fusion Science", Akio KOMORI, Satoru SAKAKIBARA, Akio SAGARA, Ritoku HORIUCHI, Hiroshi YAMADA, Yasuhiko

- TAKEIRI, Plasma and Fusion Research 6 2102149 (2011), refereed
7. "Equilibria of Toroidal Plasmas with Toroidal and Poloidal Flow in High-beta Reduced Magnetohydrodynamic Models", Atsushi Ito, Noriyoshi Nakajima , Nuclear Fusion 51 123006 (2011), refereed
 8. "Zonal Flow Dynamics and Control of Turbulent Transport in Stellarators", P. Xanthopoulos, A. Mischchenko, P. Helander, H. Sugama, T. -H. Watanabe, Physical Review Letters 107 245002 (2011), refereed
 9. "Effects of Equilibrium-Scale Radial Electric Fields on Zonal Flows and Turbulence in Helical Configurations", T. H. Watanabe, H. Sugama, M. Nunami, Nuclear Fusion 51 123003-1-10 (2011), refereed
 10. "Data Acquisition System for Steady-State Experiment in LHD", H. Nakanishi, M. Emoto, Y. Nagayama, T. Yamamoto, M. Ohsuna, M. Kojima, S. Imazu, M. Nonomura, K. Kawahata, - (2011), not refereed
 11. "Data acquisition system for steady-state experiments at multiple sites", H. Nakanishi, M. Ohsuna, M. Kojima, etc, Nuclear Fusion 51 113014-6 (2011), refereed
 12. "Visualization of Three-Dimensional MHD Simulation Data to Study Fine Unstable Motions in a Helical Torus Device", H. Miura, IEEE Transactions on Plasma Science 39 3008-3009 (2011), refereed
 13. "Effects of Micro-Turbulence on Excitation of NTM", A. Ishizawa, F. L. Waelbroeck, R. Fitzpatrick, W. Horton, N. Nakajima, 1 25C06- (2011), not refereed
 14. "Feedback instability analysis for dipole configuration with ionospheric and magnetospheric cavities", Yasutaka Hiraki, Tomohiko Watanabe , Journal of Geophysical Research - Space Physics 116 1-11 (2011), refereed
 15. "Images of Aurora Light Based on Macro-Micro-Interlocked Simulation", Nobuaki Ohno, Hiroki Hasegawa, Tetsuya Sato , IEEE Transactions on Plasma Science 39 2708-2709 (2011), refereed
 16. "Progress of Binary-Collision-Approximation-Based Simulation for Cumulative Structural Changes of Target Materials", Seiki Saito, Arimichi Takayama, Atsushi M. Ito, Hiroaki Nakamura , 197-200 (2011), refereed
 17. "Hydrogen Atom Injection onto Diamond Surface by Molecular Dynamics Simulation", Sachio Yonemura, Seiki Saito, Atsushi M. Ito, Arimichi Takayama, Hiroaki Nakamura , 251-253 (2011), refereed
 18. "Investigation of phase behavior of bolaamphiphilic solution using dissipative particle dynamics simulation", R. Shirasaki, H. Qian, S. Fujiwara, H. Nakamura, - (2011),

refereed

19. "Reaction between Graphene and Hydrogen under Oblique Injection", S. Saito, A. M. Ito, H. Nakamura, *Journal of Applied Physics* 110 084320 (2011), refereed
20. "Three-dimensional Cauchy-condition surface method to identify the shape of the last closed magnetic surface in the Large Helical Device", Masafumi ITAGAKI, Tadaaki MAEDA, Takeshi ISHIMARU, Gaku OKUBO, Kiyomasa WATANABE, Ryosuke SEKI, Yasuhiro SUZUKI, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 53 1-17 (2011), refereed
21. "オーロラ形成の連結階層シミュレーション", 長谷川 裕記, 大野 暢亮, 佐藤 哲也 , ながれ 30 401-408 (2011), not refereed
22. "How to Combine Binary Collision Approximation and Multi-body Potential for Molecular Dynamics", S. Saito, A. M. Ito, A. Takayama, T. Kenmotsu, H. Nakamura, *Progress in Nuclear Science and Technology* 2 44-50 (2011), refereed
23. "Study of Magnetic Island Using a 3D MHD Equilibrium Calculation Code", Yasuhiro SUZUKI, Satoru SAKAKIBARA, Kiyomasa Y. WATANABE, Yoshiro NARUSHIMA, Satoshi OHDACHI, Satoshi YAMAMOTO, Hiroyuki OKADA, *Plasma and Fusion Research* 6 2402134 (2011), refereed
24. "Role of the pressure force in the explosive dynamics of magnetic islands in double tearing modes", M. Janvier, A. Ishizawa, J. Li, Y. Kishimoto, *Physics of Plasmas* 18 102112 (2011), refereed
25. "Interaction between Energetic Particles and Alfvén Eigenmodes in Reversed Shear Plasmas", Hao Wang, Yasushi Todo , *Journal of the Physical Society of Japan* 80 094501 (2011), refereed
26. "Three-dimensional Cauchy-condition surface method to identify the shape of the last closed magnetic surface in the Large Helical Device", M. Itagaki, T. Maeda, T. Ishimaru, G. Okubo, K. Watanabe, R. Seki, Y. Suzuki, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 53 105007 (2011), refereed
27. "Heat and Momentum Transport of Ion Internal Transport Barrier Plasmas on the Large Helical Device", K. Nagaoka, K. Ida, M. Yoshinuma, etc, *Nuclear Fusion* 51 083022 (2011), refereed
28. "Experimental Study of Poloidal Flow Effect on Magnetic Island Dynamics in LHD and TJ-II", Y. Narushima, F. Castejón, S. Sakakibara, etc, *Nuclear Fusion* 51 083030 (2011), refereed
29. "Quasisymmetric toroidal plasmas with large mean flows", H. Sugama, T. -H. Watanabe, M. Nunami, S. Nishimura, *Physics of Plasmas* 18 082505 (2011), refereed

30. "Response of the magnetosphere to microscopic effects in auroral arc formation", Hiroki Hasegawa, Nobuaki Ohno, Tetsuya Sato, Plasma and Fusion Research 6 2401128 (2011), refereed
31. "Investigation of the Noise Effect on Tomographic Reconstructions for a Tangentially Viewing Vacuum Ultraviolet Imaging Diagnostic", Tingfeng MING, Satoshi OHDACHI, Yasuhiro SUZUKI, Plasma and Fusion Research 6 2406120 (2011), not refereed
32. "Dissipative Particle Dynamics Simulation of Phase Behavior in Bolaamphiphilic Solution", Ryoen SHIRASAKI, Yuta YOSHIKAI, Hu-jun QIAN, Susumu FUJIWARA, Yuichi TAMURA, Hiroaki NAKAMURA, Plasma and Fusion Research 6 2401116 (2011), refereed
33. "PIC simulation of kinetic effects of plasma and consequences for physical sputtering", G. Kawamura, Y. Tomita, A. Kirschner, Journal of Nuclear Materials 415 S192-S195 (2011), refereed
34. "Heat flux reduction by helical divertor coils in the heliotron fusion energy reactor", N Yanagi, A Sagara, T Goto, etc, Nuclear Fusion 51 103017-1-6 (2011), refereed
35. "Hybrid simulation between molecular dynamics and binary collision approximation codes for hydrogen injection into carbon materials", S. Saito, A. M. Ito, A. Takayama, T. Kenmotsu, H. Nakamura, Journal of Nuclear Materials 415 S208-S211 (2011), refereed
36. "Neoclassical Toroidal Viscosity Calculations in Tokamaks Using a δf Monte Carlo Simulation and Their Verifications", S. Satake, J. -K. Park, H. Sugama, R. Kanno, Physical Review Letters 107 055001-1-4 (2011), refereed
37. "Molecular Dynamics Simulation of Micellar Shape Change in Amphiphilic Solution", Susumu FUJIWARA, Takashi ITOH, Masato HASHIMOTO, Yuichi TAMURA, Hiroaki NAKAMURA, Ritoku HORIUCHI, Plasma and Fusion Research 6 2401040 (2011), refereed
38. "小特集 長距離相関による自己組織化 2.3. 3次元ナビエ・ストークス系での自己組織化", H. Miura, プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research) 87 430-435 (2011), not refereed
39. "Design Support System with Haptic Feedback and Real-Time Interference Function", Yuichi TAMURA, Koji UKITA, Naoki MIZUGUCHI, Susumu FUJIWARA, Plasma and Fusion Research 6 2406061 (2011), refereed
40. "Nonlinear Hybrid Simulations of Energetic Particle Modes in Realistic Tokamak Flux Surface Geometry", A. Bierwage, Y. Todo, N. Aiba, K. Shinohara, Masao Ishikawa, M. Yagi, Plasma and Fusion Research 6 2403109 (2011), refereed

41. "Nonlocal Interaction of Inverse Magnetic Energy Transfer in Hall Magnetohydrodynamic Turbulence", K. Araki, H. Miura, Plasma and Fusion Research 6 2401132-1-01132-5 (2011), refereed
42. "Electrode Biasing Experiment in the Large Helical Device", S. Kitajima, H. Takahashi, K. Ishii, etc, Nuclear Fusion 51 083029-1-5 (2011), refereed
43. "Efficient Evaluation of Influence Coefficients in Three-Dimensional Extended Boundary-Node Method for Potential Problems", Taku ITOH, Ayumu SAITOH, Atsushi KAMITANI, Hiroaki NAKAMURA , Plasma and Fusion Research 6 2401106 (2011), refereed
44. "Pre-plasma effects on core heating and enhancing heating efficiency by extended double cone for FIREX", T. Johzaki, H. Nagatomo, A. Sunahara, H. -B. Cai, H. Sakagami, Y. Nakao, K. Mima, Nuclear Fusion 51 073022 (2011), refereed
45. "A Numerical Method for Parallel Particle Motions in Gyrokinetic Vlasov Simulations", Shinya MAEYAMA, Akihiro ISHIZAWA, Tomo-Hiko WATANABE, Noriyoshi NAKAJIMA, Shunji TSUJI-IIO, Hiroaki TSUTSUI , Plasma and Fusion Research 6 2401028 (2011), refereed
46. "Mechanical issues of FIREX target under cryogenic environment", A. Iwamoto, T. Fujimura, A. Sunahara, H. Sakagami, T. Norimatsu, Plasma and Fusion Research 6 2404070 (2011), refereed
47. "Integrated Visualization of Simulation Results and Experimental Devices in Virtual-Reality Space", H. Ohtani, A. Kageyama, Y. Tamura, S. Ishiguro, M. Shoji, Plasma and Fusion Research 6 2406027 (2011), refereed
48. "Effect of Parallel Diffusion of Equilibrium Pressure on Interaction between Interchange Mode and Static Magnetic Island", K. Saito, K. Ichiguchi, R. Ishizaki, Plasma and Fusion Research 6 2403072 (2011), refereed
49. "Monte Carlo Simulation Code for Solving Radial Fluid Equations in Toroidal Plasmas", Ryutaro Kanno, Shinsuke Satake, Masanori Nunami , Plasma and Fusion Research 6 2403066 (2011), refereed
50. "Gyrokinetic Simulations of Slab Ion Temperature Gradient Turbulence with Kinetic Electrons", Akihiro ISHIZAWA, Tomo-Hiko WATANABE, Noriyoshi NAKAJIMA , Plasma and Fusion Research 6 2403087 (2011), refereed
51. "New Implementation Method for Essential Boundary Condition to Extended Element-Free Galerkin Method: Application to Nonlinear Problem", Ayumu SAITOH, Taku ITOH, Nobuyuki MATSUI, Atsushi KAMITANI, Hiroaki NAKAMURA , Plasma

- and Fusion Research 6 2401089 (2011), refereed
52. "Importance of helical pitch parameter in LHD-type heliotron reactor designs", T. Goto, Y. Suzuki, N. Yanagi, K. Y. Watanabe, S. Imagawa, A. Sagara, Nuclear Fusion 51 083045 (2011), refereed
 53. "Transport Study of LHD High-beta Plasmas based on Power Balance Analysis with TASK3D Code Modules", Ryosuke SEKI, Hisamichi FUNABA, Kiyomasa WATANABE, etc, Plasma and Fusion Research 6 2402081 (2011), refereed
 54. "Numerical Investigation on Accuracy Improvement of Permanent Magnet Method for Measuring j_C in High-Temperature Superconducting Film", Teruou TAKAYAMA, Atsushi KAMITANI, Taku ITOH, Hiroaki NAKAMURA, Plasma and Fusion Research 6 2401059 (2011), not refereed
 55. "Extension of Meshless Galerkin/Petrov-Galerkin Approach without Using Lagrange Multipliers", Atsushi KAMITANI, Teruou TAKAYAMA, Taku ITOH, Hiroaki NAKAMURA, Plasma and Fusion Research 6 2401074 (2011), refereed
 56. "Simulation science at the National Institute for Fusion Science", Ritoku Horiuchi, Plasma and Fusion Research 6 2101055 (2011), refereed
 57. "Three-Dimensional Turbulence Analyses Using Turbulence Diagnostic Simulator", N. Kasuya, M. Yagi, K. Itoh, S. -I. Itoh, (2011), not refereed
 58. "Heavy Ion Beam Probe Measurement in Turbulence Diagnostic Simulator", N. Kasuya, S. Nishimura, M. Yagi, K. Itoh, S. -I. Itoh, Plasma Science and Technology 13 326-331 (2011), refereed
 59. "A Multi-Scale Electromagnetic Particle Code with Adaptive Mesh Refinement and Its Parallelization", H. Usui, M. Nunami, T. Moritaka, T. Matsui, Youhei Yagi, Procedia Computer Science 4 2337-2343 (2011), refereed
 60. "Scientific Visualization of Plasma Simulation Results and Device Data in Virtual-Reality Space", H. Ohtani, Y. Tamura, A. Kageyama, S. Ishiguro, IEEE Transactions on Plasma Science 39 2472-2473 (2011), refereed
 61. "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)]", S. Nishimura, H. Sugama, H. Maaßberg, C. D. Beidler, S. Murakami, Y. Nakamura, S. Hirooka, Physics of Plasmas 18 069901 (2011), refereed
 62. "Potential fluctuation associated with the energetic-particle-induced geodesic acoustic mode in the Large Helical Device", T. Ido, A. Shimizu, M. Nishiura, etc, Nuclear Fusion 51 073046- (2011), refereed

63. "Magnetohydrodynamic simulation on pellet plasmoid in torus plasmas", R. Ishizaki, N. Nakajima, Plasma Physics and Controlled Fusion 53 054009 (2011), refereed
64. "Calculation of neoclassical toroidal viscosity in tokamaks with broken toroidal symmetry", S. Satake, H. Sugama, R. Kanno, J. -K. Park, Plasma Physics and Controlled Fusion 53 054018 (2011), refereed
65. "Quantum Oscillations of Thermoelectric Effects in a Pseudo-one-dimensional Electron Gas With a Spin - Orbit Interaction", H. Nakamura, N. Hatano, R. Shirasaki, N. Hirayama, K. Yonemitsu, Journal of Electronic Materials 40 601-605 (2011), refereed
66. "Temperature Distribution in Two-Dimensional Electron Gases under a Strong Magnetic Field", Naomi Hirayama, Akira Endo, Kazuhiro Fujita, Yasuhiro Hasegawa, Naomichi Hatano, Hiroaki Nakamura, Ryoen Shirasaki, Kenji Yonemitsu, Journal of Electronic Materials 40 529-532 (2011), refereed
67. "Bracelet-Shaped Thermal Display for Representing Numerical Data", Yuichi Tamura, Susumu Fujiwara, Tomohiro Umetani, Hiroaki Nakamura , Journal of Electronic Materials 40 823-829 (2011), refereed
68. "疎行列-ベクトル積におけるブロック化 BSS 法と高スレッド並列環境での性能評価", 片桐孝洋, 佐藤 雅彦 , 情報処理学会論文誌 4 1-8 (2011), refereed
69. "Multi-Scale MHD Analysis Incorporating Pressure Transport Equation for Beta-Increasing LHD Plasma", K. Ichiguchi, B. A. Carreras, Nuclear Fusion 51 053021 (2011), refereed
70. "微粒子の荷電,挙動に関するモデリング", 富田 幸博, 田中 康規 , プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research) 87 149-152 (2011), not refereed
71. "ヘリカルプラズマにおける径電場ダイナミクスに関する輸送解析", 登田 慎一郎, 伊藤 公孝 , - (2011), not refereed
72. "Detection of kinetic geodesic acoustic mode (KGAM) near the center region of JIPPT-IIU tokamak plasmas", Y. Hamada, T. Watari, A. Nishizawa, etc, Nuclear Fusion 51 033005 (2011), refereed
73. "小特集「プラズマと微粒子」研究の諸分野における進展 5. 核融合プラズマ中での微粒子研究 5. 1 微粒子の荷電, 挙動に関するモデリング", 富田 幸博, 田中 康規 , プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research) 87 149-152 (2011), not refereed
74. "Radial Electric Field Formation Including Electron Radial Drift for a Core Electron-Root Confinement (CERC) Plasma in LHD", S. Matsuoka, S. Satake, M. Yokoyama, A. Wakasa, Plasma and Fusion Research 6 1203016 (2011), refereed
75. "Neoclassical electron transport calculation by using δf Monte Carlo method", Seikichi

- Matsuoka, Shinsuke Satake, Masayuki Yokoyama, Arimitsu Wakasa, Sadayoshi Murakami, Physics of Plasmas 18 032511 (2011), refereed
76. "MPI Parallelization of PIC Simulation with Adaptive Mesh Refinement", T. Matsui, H. Usui, T. Moritaka, M. Nunami, 277-281 (2011), refereed
77. "Momentum balance and radial electric fields in axisymmetric and nonaxisymmetric toroidal plasmas", H. Sugama, T. -H. Watanabe, M. Nunami, S. Nishimura, Plasma Physics and Controlled Fusion 53 024004 (2011), refereed
78. "Energetic-ion-driven global instabilities in stellarator/helical plasmas and comparison with tokamak plasmas", K. Toi, K. Ogawa, M. Isobe, M. Osakabe, D. A. Spong, Y. Todo, Plasma Physics and Controlled Fusion 53 024008 (2011), not refereed
79. "追悼吉川庄一先生", 伊藤 公孝, 伊藤 早苗, 日本物理学会誌(BUTSURI) 66 144- (2011), not refereed
80. "On Detection of a Global Mode Structure in Experiments by Use of Turbulence Diagnostic Simulator", Naohiro KASUYA, Seiya NISHIMURA, Masatoshi YAGI, Kimitaka ITOH, Sanae ITOH, Plasma and Fusion Research 6 1403002 (2011), refereed
81. "Linear Gyrokinetic Analyses of ITG Modes and Zonal Flows in LHD with High Ion Temperature", M. Nunami, T. -H. Watanabe, H. Sugama, K. Tanaka, Plasma and Fusion Research 6 1403001 (2011), refereed
82. "Molecular Dynamics Simulation of Hydrogen Injection onto Diamond Surfaces", 中村 浩章, 伊藤 篤史, 斎藤 誠紀, 高山 有道, 田村 祐一, 大野 哲靖, 梶田 信, Japanese Journal of Applied Physics 50 01AB04 (2011), refereed
83. "Extension of Binary-Collision-Approximation-Based Simulation Applicable to Any Structured Target Material", A. Takayama, S. Saito, A. M. Ito, T. Kenmotsu, H. Nakamura, Japanese Journal of Applied Physics 50 01AB03 (2011), refereed
84. "Effects of parallel dynamics on vortex structures in electron temperature gradient driven turbulence", M. Nakata, T. -H. Watanabe, H. Sugama, W. Horton, Physics of Plasmas 18 012303 (2011), refereed
85. "Temperature distribution in nano-devices under a strong magnetic field", N. Hirayama, A. Endo, K. Fujita, Y. Hasegawa, N. Hatano, H. Nakamura, R. Shirasaki, Computer Physics Communications 182 90-92 (2011), refereed
86. "Molecular Dynamics Simulation of Chemical Vapor Deposition of Amorphous Carbon: Dependence on H/C Ratio of Source Gas", Atsushi M. Ito, Arimichi Takayama, Seiki Saito, Noriyasu Ohno, Shin Kajita, Hiroaki Nakamura, Japanese Journal of Applied Physics 50 01AB01 (2011), refereed

Published papers in 2012

1. "Micellar Shape Change in Amphiphilic Solution: A Molecular Dynamics Study", S. Fujiwara, M. Hashimoto, T. Itoh, R. Horiuchi, Chemistry Letters 41 1038-1040 (2012), refereed
2. "1D Model Study on the Effect of Impurity Radiation Cooling in LHD SOL Plasma", G. Kawamura, I. Murakami, Y. Tomita, S. Masuzaki, Plasma and Fusion Research 7 2403129 (2012), refereed
3. "Saturation of toroidal Alfvén eigenmode due to enhanced damping of nonlinear sidebands", Y. Todo, H. L. Berk, B. N. Breizman, Nuclear Fusion 52 094018 (2012), refereed
4. "Modeling of Formation of Helical Structures in Reversed-Field Pinch", Naoki MIZUGUCHI, Akio SANPEI, Shinichi FUJITA, Kensuke OKI, Haruhiko HIMURA, Sadao MASAMUNE, Katsuji ICHIGUCHI, Plasma and Fusion Research 7 2403117- (2012), refereed
5. "Stability of externally driven magnetic islands in a helical plasma", Nishimura S., Toda, M. Yagi, Y. Narushima, Plasma and Fusion Research 7 2403107- (2012), refereed
6. "Spectral compact difference hybrid computation of passive scalar in isotropic turbulence", T. Gotoh, S. Hatanaka, H. Miura, Journal of Computational Physics 231 7398-7414 (2012), refereed
7. "会議報告：第20回制御核融合装置におけるプラズマ表面相互作用に関する国際会議", 鳥飼祐二, 河村 学思, プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research) 88 462-462 (2012), not refereed
8. "高ベータ自己組織化プラズマにおける理論・シミュレーション研究の進展", 高橋 俊樹, 神吉 隆司, 水口 直紀, プラズマ・核融合学会誌(Journal of Plasma and Fusion Research) 88 409-417 (2012), not refereed
9. "Nonlinear Simulation of Energetic Particle Modes in High-Beta Tokamak Plasma", A. Bierwage, N. Aiba, Y. Todo, Wenjun Deng, Masao Ishikawa, G. Matsunaga, K. Shinohara, M. Yagi, Plasma and Fusion Research 7 2403081 (2012), refereed
10. "Low Beta MHD Equilibrium Including a Static Magnetic Island for Reduced MHD Equations in a Straight Heliotron Configuration", K. Saito, K. Ichiguchi, R. Ishizaki, Plasma and Fusion Research 7 1403070 (2012), refereed

11. "Kinetic Simulations of Neoclassical and Anomalous Transport Processes in Helical Systems", H. Sugama, T. -H. Watanabe, M. Nunami, S. Satake, S. Matsuoka, K. Tanaka, Plasma and Fusion Research 7 2403094-1-9 (2012), refereed
12. "Analysis of transport barriers with the oscillatory state for plasma dynamics in helical plasmas", S. Toda, K. Itoh, A. Wakasa, - (2012), not refereed
13. "Magnetic island evolution in hot ion plasmas", A. Ishizawa, F. Waelbroeck, R. Fitzpatrick, W. Horton, N. Nakajima, Physics of Plasmas 19 072312 (2012), refereed
14. "Effects of CH foam preplasma on fast ignition", M. Hata, H. Sakagami, A. Sunahara, T. Johzaki, H. Nagatomo, Laser and Particle Beams 30 189-197 (2012), refereed
15. "Collisional Effects on Fast Electron Generation and Transport in Fast Ignition", H. Sakagami, K. Okada, Y. Kaseda, T. Taguchi, T. Johzaki, Laser and Particle Beams 30 243-248 (2012), refereed
16. "Particle Simulation of Plasma Blob Dynamics: Preliminary Results", Hiroki Hasegawa, Seiji Ishiguro, Plasma and Fusion Research 7 2401060 (2012), refereed
17. "Electric Field at a Plasma-Facing Wall for a Two-Temperature Electron Distribution", Y. Tomita, G. Kawamura, M. Ueno, N. Ohno, Z. H. Huang, Y. D. Pan, L. W. Yan, Contributions to Plasma Physics 52 484-489 (2012), not refereed
18. "Numerical Calculation of MHD Equilibria Including Static Magnetic Islands in a Straight Heliotron Configuration by Means of a Field Line Tracing Method", Kinya SAITO, Katsuji ICHIGUCHI, Ryuichi ISHIZAKI, Plasma and Fusion Research 7 2403032 (2012), refereed
19. "Bootstrap Current Simulations with Experimental LHD Plasma Density and Temperature Profiles, Energy Scattering and Finite OrbitWidth", M. Yu. Isaev, K. Y. Watanabe, S. Satake, Y. Nakamura, W. A. Cooper, Plasma and Fusion Research 7 1-7 (2012), refereed
20. "A hybrid method of semi-Lagrangian and additive semi-implicit Runge-Kutta schemes for gyrokinetic Vlasov simulations", S. Maeyamaa, A. Ishizawa, T. -H. Watanabe, N. Nakajima, S. Tsuji-Iio, H. Tsutsui, Computer Physics Communications 183 1986-1992 (2012), refereed
21. "Ultra-short photon pulse generation in relativistic laser-plasmas", M. M. Skoric, Lj Nikolic, Lj Hadzievski, S. Ishiguro, K. Mima, Physica Scripta T149 014081 (2012), refereed
22. "Effects of long rarefied plasma on fast electron generation for FIREX-I targets", H. SAKAGAMI, A. SUNAHARA, T. JOHZAKI, H. NAGATOMO, Laser and Particle Beams

- 30 103-109 (2012), not refereed
23. "Ultra-short photon pulse generation in relativistic laser-plasmas", M. M. Skoric, Lj Nikolic, Lj Hadzievski, S. Ishiguro, K. Mima, *Physica Scripta* T149 014081(2012), refereed
 24. "Gyrokinetic turbulent transport simulation of a high ion temperature plasma in large helical device experiment", M. Nunami, T. -H. Watanabe, H. Sugama, K. Tanaka, *Physics of Plasmas* 19 042504 (2012), refereed
 25. "Simulation of Plasma Flow Injection with Multi-Hierarchy Model Aiming Magnetic Reconnection Studies", S. Usami, H. Ohtani, R. Horiuchi, M. Den, *Communications in Computational Physics* 11 1006-1021 (2012), refereed
 26. "Simulation of Alfvén eigenmode bursts using a hybrid code for nonlinear magnetohydrodynamics and energetic particles", Y. Todo, H. L. Berk, B. N. Breizman, *Nuclear Fusion* 52 033003 (2012), refereed
 27. "Development of Integrated Transport Analysis Suite for LHD Plasmas Towards Transport Model Validation and Increased Predictability", M. Yokoyama, C. Suzuki, R. Seki, etc, *Plasma and Fusion Research* 7 2403011 (2012), refereed
 28. "Development of Integrated Transport Code, TASK3D, and Its Applications to LHD Experiment", M. Yokoyama, A. Wakasa, R. Seki, M. Sato, S. Murakami, C. Suzuki, Y. Nakamura, A. Fukuyama, *Plasma and Fusion Research* 7 2403011_1_4 (2012), refereed
 29. "Nonlinear entropy transfer via zonal flows in gyrokinetic plasma turbulence", M. Nakata, T. -H. Watanabe, H. Sugama, *Physics of Plasmas* 19 022303-1-14 (2012), refereed
 30. "Zonal Flows Induced by Symmetry Breaking with Existence of Geodesic Acoustic Modes", M. Sasaki, K. Itoh, S. -I. Itoh, N. Kasuya, *Nuclear Fusion* 52 (2012), refereed
 31. "Anisotropic Bond Orientation of Amorphous Carbon by Deposition", Seiki Saito, Atsushi M. Ito, Arimichi Takayama, Hiroaki Nakamura, *Japanese Journal of Applied Physics* 51 01AC05 (2012), refereed
 32. "Visualization of Particle Trajectories in Time-Varying Electromagnetic Fields by CAVE-Type Virtual Reality System", N. Ohno, H. Ohtani, D. Matsuoka, R. Horiuchi, *Plasma and Fusion Research* 7 1401001-1-6 (2012), refereed
 33. "Attosecond Photon and Electron Pulses from Relativistic Laser Plasmas", M. M. Skoric, Lj. Nikolic, S. Ishiguro, *AIP conference proceedings* 1421 193-202 (2012), refereed
 34. "Plasma Physics and Fusion Science by Virtual-Reality System", H.Ohtani, Y.Suzuki, A.Kageyama, R.Kanno, S.Ishiguro, M.Shoji, and Y.Tamura, *Proceeding of International*

- conference on Simulation Technology(JSST 2012), OS9-3-4 (2012), refereed
35. " Structural Change of Single-Crystalline Graphite under Plasma Irradiation", S. Saito, A. M. Ito, A. Takayama, and H. Nakamura, accepted to Japanese Journal of Applied Physics, refereed
 36. Formation and Classification of Amorphous Carbon by Molecular Dynamics Simulation, Atsushi M. Ito, Arimichi Takayama, Seiki Saito, and Hiroaki Nakamura, Jpn. J. Appl. Phys., accepted.

List of published papers by students

指導学生の論文リスト

(2008年)

1. "Electron Force Balance in Steady Collisionless Driven Reconnection", Bin Li, Ritoku Horiuchi , Physical Review Letters 101 215001 (2008), refereed [student at Sokendai]
2. "Nonlinear Dynamics of Rotating Drift-Tearing Modes in Tokamak Plasmas", S. Nishimura, S. Benkadda, M. Yagi, S. -I. Itoh, K. Itoh, Physics of Plasmas 15 092506 (2008), refereed [Student at Kyusyu U.]
3. "Roles of ion and electron dynamics in the onset of magnetic reconnection due to current sheet instabilities", Toseo Moritaka, Ritoku Horiuchi , Physics of Plasmas 15 092114 (2008), refereed [student at Nagoya U.]
4. "Formation of Sweet-Parker-like electron dissipation region in a driven open system", Bin Li, R. Horiuchi, H. Ohtani, Plasma and Fusion Research 3 S1054 (2008), refereed [student at Sokendai]
5. "Neoclassical Transport Properties in High-Ion-Temperature Hydrogen Plasmas in the Large Helical Device (LHD)", Seikichi MATSUOKA, Masayuki YOKOYAMA, Kenichi NAGAOKA, etc, Plasma and Fusion Research 3 S1056 (2008), refereed [student at Sokendai]
6. "Particle Orbit Analysis in the Finite Beta Plasma of the Large Helical Device using Real Coordinates", Ryouyuke SEKI, Yutaka MATSUMOTO, Yasuhiro SUZUKI, Kiyomasa WATANABE, Masafumi ITAGAKI , Plasma and Fusion Research 3 016-1-016-9 (2008), refereed [student at Hokkaido U.]
7. "Derivation of jump conditions in multiphase incompressible flows with singular forces", H. Miura, Plasma and Fusion Research 3 S1052- (2008), refereed [student at Sokendai]
8. "Poloidal Flow Generated by Drift-Tearing Mode", Seiya NISHIMURA, Masatoshi YAGI, Sanae-I. ITOH, Kimitaka ITOH, Journal of the Physical Society of Japan 77 014501 (2008), refereed [student at Kyusyu U.]

(2009年)

1. "Numerical Computation of Flows with Moving Boundaries Using an Immersed Interface

- Method", Caesar. O. HARAHA, Hideaki MIURA, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 8 914-919 (2009), refereed [student at Sokendai]
2. "Observations of abrupt changes in the fluctuation spectrum on LMD-U", H. Arakawa, K. Kamataki, S. Inagaki, etc, Plasma Physics and Controlled Fusion 51 085001 (2009), refereed [student at Kyusyu U.]

(2010年)

1. "Probability Density Function of Density Fluctuations in Cylindrical Helicon Plasmas", Hiroyuki ARAKAWA, Shigeru INAGAKI, Yoshihiko NAGASHIMA, etc, Plasma and Fusion Research 5 S2044 (2010), refereed [student at Kyusyu U.]
2. "Numerical Diagnostics of the Electrostatic Potential Perturbed by Magnetic Islands", S. Nishimura, N. Kasuya, M. Yagi, K. Itoh, S. -I. Itoh, N. Ohya, Plasma and Fusion Research 5 S2057 (2010), refereed [NIFS Postdoc researcher]
3. "Bispectral Analysis of Density and Potential Fluctuations in a High Neutral Density Cylindrical Plasma", T. Kobayashi, S. Inagaki, H. Arakawa, etc, Plasma and Fusion Research 5 S2047 (2010), refereed [student at Kyusyu U.]
4. "Forced Magnetic Reconnection in Helical Plasmas", Seiya Nishimura, Yoshiro Narushima, Shinichiro Toda, Masatoshi Yagi, Kimitaka Itoh, Sanae-I. Itoh, Plasma and Fusion Research 5 040-1-040-3 (2010), refereed [NIFS Postdoc researcher]
5. "Bifurcation of the plasma turbulence on LMD-U", H. Arakawa, S. Inagaki, Y. Nagashima, etc, Plasma Physics and Controlled Fusion 52 105009 (2010), refereed [student at Kyusyu U.]
6. "Monte Carlo Study Based on a Real Coordinate System for Tangentially Injected High-Energy Particles in the Large Helical Device", Ryosuke SEKI, Yutaka MATSUMOTO, Yasuhiro SUZUKI, Kiyomasa WATANABE, Kiyotaka HAMAMATSU, Masafumi ITAGAKI, Plasma and Fusion Research 5 027-1-027-9 (2010), refereed [NIFS Postdoc researcher]
7. "炭素材への水素照射のシミュレーション", 斎藤 誠紀, 伊藤 篤史, 高山 有道, 中村 浩章, 311-314 (2010), not refereed [student at Nagoya U.]
8. "Interaction between Static Magnetic Islands and Interchange modes in a Straight Heliotron Plasma with High Resistivity", K. Saito, K. Ichiguchi, N. Ohya, Physics of Plasmas 17 062504 (2010), refereed [student at Sokendai]

9. "Effects of time-varying $E \times B$ flow on slab ion-temperature-gradient turbulence", S. Maeyama, A. Ishizawa, T. -H. Watanabe, M. M. Škorić, N. Nakajima, S. Tsuji-Iio, H. Tsutsui, *Physics of Plasmas* 17 062305 (2010), refereed [student at Tokyo Institute of Technology]
10. "Locking of magnetic island rotation by static error field", S. Nishimura, M. Yagi, K. Itoh, S. -I. Itoh, S. Benkadda, *Nuclear Fusion* 50 054007 (2010), refereed [NIFS Postdoc researcher]
11. "Monte-Carlo Study Based on Real Coordinates for Perpendicularly Injected High-Energy Ions in the LHD High-Beta Plasma", Ryosuke SEKI, Yutaka MATSUMOTO, Yasuhiro SUZUKI, Kiyomasa WATANABE, Kiyotaka HAMAMATSU, Masafumi ITAGAKI , *Plasma and Fusion Research* 5 014-1-014-3 (2010), refereed [NIFS Postdoc researcher]
12. "Formation of coherent vortex streets and transport reduction in electron temperature gradient driven turbulence", Motoki Nakata, Tomohiko Watanabe, Hideo Sugama, Wendell Horton , *Physics of Plasmas* 17 042306 (2010), refereed [student at Sokendai]
13. "Effects of preformed plasma of CH foam on fast electron generation", M. Hata, H. Sakagami, A. Sunahara, T. Johzaki, H. Nagatomo, *Journal of Physics: Conference Series* 244 1-4 (2010), not refereed [student at Nagoya U.]

(2011年)

1. "Feedback instability analysis for dipole configuration with ionospheric and magnetospheric cavities", Yasutaka Hiraki, Tomohiko Watanabe , *Journal of Geophysical Research - Space Physics* 116 1-11 (2011), refereed [NIFS Postdoc researcher]
2. "Progress of Binary-Collision-Approximation-Based Simulation for Cumulative Structural Changes of Target Materials", Seiki Saito, Arimichi Takayama, Atsushi M. Ito, Hiroaki Nakamura , 197-200 (2011), refereed [student at Nagoya U.]
3. "Hydrogen Atom Injection onto Diamond Surface by Molecular Dynamics Simulation", Sachio Yonemura, Seiki Saito, Atsushi M. Ito, Arimichi Takayama, Hiroaki Nakamura , 251-253 (2011), refereed [student at Nagoya U.]
4. "Reaction between Graphene and Hydrogen under Oblique Injection", S. Saito, A. M. Ito, H. Nakamura, *Journal of Applied Physics* 110 084320 (2011), refereed [student at Nagoya U.]
5. "Three-dimensional Cauchy-condition surface method to identify the shape of the last

- closed magnetic surface in the Large Helical Device", Masafumi ITAGAKI, Tadaaki MAEDA, Takeshi ISHIMARU, Gaku OKUBO, Kiyomasa WATANABE, Ryosuke SEKI, Yasuhiro SUZUKI, Plasma Physics and Controlled Fusion 53 1-17 (2011), refereed [student at Sokendai]
6. "How to Combine Binary Collision Approximation and Multi-body Potential for Molecular Dynamics", S. Saito, A. M. Ito, A. Takayama, T. Kenmotsu, H. Nakamura, Progress in Nuclear Science and Technology 2 44-50 (2011), refereed [student at Nagoya U.]
 7. "Interaction between Energetic Particles and Alfvén Eigenmodes in Reversed Shear Plasmas", Hao Wang, Yasushi Todo, Journal of the Physical Society of Japan 80 094501 (2011), refereed [student at Sokendai]
 8. "Three-dimensional Cauchy-condition surface method to identify the shape of the last closed magnetic surface in the Large Helical Device", M. Itagaki, T. Maeda, T. Ishimaru, G. Okubo, K. Watanabe, R. Seki, Y. Suzuki, Plasma Physics and Controlled Fusion 53 105007 (2011), refereed [student at Sokendai]
 9. "Investigation of the Noise Effect on Tomographic Reconstructions for a Tangentially Viewing Vacuum Ultraviolet Imaging Diagnostic", Tingfeng MING, Satoshi OHDACHI, Yasuhiro SUZUKI, Plasma and Fusion Research 6 2406120 (2011), not refereed [student at Sokendai]
 10. "Hybrid simulation between molecular dynamics and binary collision approximation codes for hydrogen injection into carbon materials", S. Saito, A. M. Ito, A. Takayama, T. Kenmotsu, H. Nakamura, Journal of Nuclear Materials 415 S208-S211 (2011), refereed [student at Nagoya U.]
 11. "A Numerical Method for Parallel Particle Motions in Gyrokinetic Vlasov Simulations", Shinya MAEYAMA, Akihiro ISHIZAWA, Tomo-Hiko WATANABE, Noriyoshi NAKAJIMA, Shunji TSUJI-IIO, Hiroaki TSUTSUI, Plasma and Fusion Research 6 2401028 (2011), refereed [student at Tokyo Institute of Technology]
 12. "Effect of Parallel Diffusion of Equilibrium Pressure on Interaction between Interchange Mode and Static Magnetic Island", K. Saito, K. Ichiguchi, R. Ishizaki, Plasma and Fusion Research 6 2403072 (2011), refereed [student at Sokendai]
 13. "Radial Electric Field Formation Including Electron Radial Drift for a Core Electron-Root Confinement (CERC) Plasma in LHD", S. Matsuoka, S. Satake, M. Yokoyama, A. Wakasa, Plasma and Fusion Research 6 1203016 (2011), refereed [student at Sokendai]
 14. "Neoclassical electron transport calculation by using δf Monte Carlo method", Seikichi Matsuoka, Shinsuke Satake, Masayuki Yokoyama, Arimitsu Wakasa, Sadayoshi

- Murakami, Physics of Plasmas 18 032511 (2011), refereed [student at Sokendai]
15. "Effects of parallel dynamics on vortex structures in electron temperature gradient driven turbulence", M. Nakata, T. -H. Watanabe, H. Sugama, W. Horton, Physics of Plasmas 18 012303 (2011), refereed [student at Sokendai]

(2012年)

1. "Stability of externally driven magnetic islands in a helical plasma", Nishimura S., Toda, M. Yagi, Y. Narushima, Plasma and Fusion Research 7 2403107- (2012), refereed [NIFS Postdoc researcher]
2. "Low Beta MHD Equilibrium Including a Static Magnetic Island for Reduced MHD Equations in a Straight Heliotron Configuration", K. Saito, K. Ichiguchi, R. Ishizaki, Plasma and Fusion Research 7 1403070 (2012), refereed [student at Sokendai]
3. "Effects of CH foam preplasma on fast ignition", M. Hata, H. Sakagami, A. Sunahara, T. Johzaki, H. Nagatomo, Laser and Particle Beams 30 189-197 (2012), refereed [student at Nagoya U.]
4. "Numerical Calculation of MHD Equilibria Including Static Magnetic Islands in a Straight Heliotron Configuration by Means of a Field Line Tracing Method", Kinya SAITO, Katsuji ICHIGUCHI, Ryuichi ISHIZAKI, Plasma and Fusion Research 7 2403032 (2012), refereed [student at Sokendai]
5. "A hybrid method of semi-Lagrangian and additive semi-implicit Runge-Kutta schemes for gyrokinetic Vlasov simulations", S. Maeyamaa, A. Ishizawa, T. -H. Watanabe, N. Nakajima, S. Tsuji-Iio, H. Tsutsui, Computer Physics Communications 183 1986-1992 (2012), refereed [student at Tokyo Institute of Technology]
6. "Nonlinear entropy transfer via zonal flows in gyrokinetic plasma turbulence", M. Nakata, T. -H. Watanabe, H. Sugama, Physics of Plasmas 19 022303-1-14 (2012), refereed [student at Sokendai]
7. "Anisotropic Bond Orientation of Amorphous Carbon by Deposition", Seiki Saito, Atsushi M. Ito, Arimichi Takayama, Hiroaki Nakamura, Japanese Journal of Applied Physics 51 01AC05 (2012), refereed [student at Nagoya U.]
8. "Structural Change of Single-Crystalline Graphite under Plasma Irradiation", S. Saito, A. M. Ito, A. Takayama, and H. Nakamura, accepted to Japanese Journal of Applied Physics, refereed, [student at Nagoya U.]



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/>