

平成26年度 日中韓フォーサイト事業 中間評価資料(進捗状況報告書)

1. 概要

研究交流課題名 (和文)	高性能プラズマの定常保持に必要な物理基盤の形成		
日本側拠点機関名	自然科学研究機構 核融合科学研究所		
研究代表者 所属・職・氏名	核融合科学研究所・教授・森田 繁		
相手国側	国名	拠点機関名	研究代表者 所属・職・氏名
	中国	中国科学院 等離子体物理研究所	等離子体物理研究所・教授・HU Liqun
	韓国	韓国国立核融合研究所	国立核融合研究所・主任研究員・ OH Yeong-kook

2. 研究交流目標

申請時に計画した目標と現時点における達成度について記入してください。

○申請時の研究交流目標

海水中に豊富に存在する重水素を利用する核融合発電は化石燃料の代替エネルギーとして早期実現が期待されている。現在核融合研究では、高性能プラズマの定常保持が最も重要な課題の一つに挙げられている。日中韓の3カ国は全ての磁場コイルが超伝導コイルで構成されたプラズマ装置（日本・LHD, 中国・EAST, 韓国・KSTAR）を近年相次いで建設し、世界の他の地域には存在しないこれら超伝導プラズマ装置を用いて核融合炉実現に不可欠な高性能プラズマの定常保持に関する学術研究を開始した。そこで本共同研究では、2001年度から10年間にわたって推進した日本学術振興会 拠点大学交流事業「プラズマ・核融合」により日中間で構築した研究ネットワークをさらに充実させるとともに韓国へ拡張し、高性能プラズマの定常化に伴い必須となる物理課題の解明を目指して日本・中国・韓国の3国間を横断する学術的研究交流基盤を構築する。3国で稼働している世界最先端の装置を活用し、生成される高性能プラズマの定常化に関する共同研究を行うことにより東アジアの核融合研究の更なる発展を促し、世界をリードできる核融合科学の学術拠点を東アジアに形成することを本研究交流の目標とする。また、核融合研究は今後更に長期的な展望に立脚した学術研究が必要であり、若手研究者の育成は3カ国に共通した最重要課題である。人的交流を通して若手研究者を育成し研究者養成基盤を形成する必要がある。**高性能プラズマの定常保持に必須の物理課題**、すなわち、「**閉じ込め磁場配位の定常保持**」、「**周辺及びダイバータプラズマ制御**」及び「**アルファ粒子の閉じ込め**」の3課題を本研究における物理課題の柱とし、それぞれの国が強みを持つ物理課題を中心に効果的に研究グループの組織化を進め、密接かつ協調的な協力体制を構築する。3国の超伝導プラズマ装置を研究の中心とし、高性能プラズマの定常保持のために解明すべきプラズマ物理の必須課題に関する先駆的な研究を実験と理論の緊密な連携の下に行うと共にその新展開を図る。今後5年間の計画を遂行することにより本研究交流を基盤としたネットワークがアジア地域全体へのネットワーク拡大形成への基礎となるよう、日中韓の3カ国間に強固な学術基盤の構築を目指す。

○目標に対する達成度

上記目標に対する2年分の計画について

- 研究交流目標は十分に達成された。
- 研究交流目標は概ね達成された。
- 研究交流目標はある程度達成された。
- 研究交流目標はほとんど達成されなかった。

【理由】

【学術交流基盤の形成】

過去2年間の研究交流を通して、全体会合（研究者交流会合1回、セミナー会合4回）を5回開催した（第1回：2012年8月・韓国、第2回：2013年1月・日本、第3回：2013年5月・中国、第4回：2013年11月・韓国、第5回：2014年6月・日本）。第1回の実施組織代表者（研究所所長）、研究代表者及び事務支援代表者が集合し、今後の活動方針を確認し強固な学術交流基盤形成に向け最大の努力を行うことに合意した。2回目以降はセミナーとして全体会合を開催し、常時40-80名程度の参加者を得て（参加者の半数程度は若手研究者及び博士課程学生）、共同研究、研究者交流及び若手研究者の育成を目的に口頭発表や個別グループでの議論を行うと共に学術交流基盤の形成に努めてきた。セミナーでは、日中韓の実施組織代表者もほぼ毎回参加しており、本交流計画を各研究所の研究方針に円滑に組み込むことに大きく寄与している。また、第3回の中国・北京セミナーでは中国・NSFC、韓国・NRF及び日本・JSPS（北京センター）より担当係員の参加と挨拶・講演の機会を得た。参加者全員が本交流計画の意義の重要性を再認識し、より強固な学術交流基盤の形成に向けた意思統一を即した。これらのセミナー活動に加え、共同研究、研究者交流、若手教育を通じてシニア研究者間だけでなくシニア-若手研究者間の交流基盤形成も充実し、交流基盤の形成とその発展に向けたより能動的な姿勢が明確となりつつある。現在では多くの国際会議でお互いに挨拶を交わし、今後の共同研究に向けた相談や議論を積極的に行えるようになっている。

【共同研究・研究者交流】

「閉じ込め磁場配位の定常保持」、「周辺及びダイバータプラズマ制御」及び「アルファ粒子の閉じ込め」の3課題について共同研究が着実に進展した。具体的にはプラズマ電流を必須とするEASTトカマク装置で小振幅ELM（周辺局在モード）を付随したHモード（改善閉じ込めモード）状態を30秒という長時間維持に成功し、LHD装置の無電流長時間放電とのプラズマ崩壊に至る巨視的不安定性の特性に関して装置間比較が可能となった（2013年韓国・APFA国際会議で招待講演）。

長時間放電で重要となる周辺不純物の振舞いに関して、HL-2Aトカマク装置とLHD装置との比較を行った。開いた周辺磁場の平行方向の不純物輸送は不純物遮蔽の物理的要因となっているが、トカマクのダイバータ部と主プラズマ周辺部とでは不純物輸送に影響を与える摩擦力と温度勾配力に基づいた力学バランスが異なっている。全てのポロイダル位置で摩擦力が支配的となるLHDとは周辺不純物輸送に大きな違いが観測された（Morita, Cui, Kobayashiの各Nucl.Fusion論文、及びIAEA会議で発表）。また、EASTでは世界初のタングステンダイバータを用いた長時間放電の準備が完了した。タングステンの挙動を観測するためにEUV分光器を共同で開発していたが、EAST装置での設置を完了し、2014年7月に成功裏にファーストデータを得た。今後、Hモードを有する長時間放電でのタングステンの挙動を研究する。LHDでのタングステン挙動との比較研究も計画している。KSTAR装置でも2014年秋以降にタングステン不純物輸送研究がスタートする。複雑なタングステンスペクトルを解析するためにタングステンスペクトルモデリングの確立にむけ日中韓の原子分子関係者が共同研究を進めており、その成果と今後の計画を議論するために、中国・蘭州で2014年8月にセミナーを開催する（本事業以外の経費を使用）。タングステンを初めとするプラズマ対向材料の水素やヘリウムに関する物理特性を調べるために、EASTトカマクやKSTARトカマクで暴露した材料を日本で表面分析し、データ

を解析し始めた。タングステン材は水素同位体の保持量が少ないことが特筆されているが、実際にプラズマに接する部分ではプラズマ粒子による損耗―再堆積が生じるため、単なる固体材料とは特性が異なっている可能性も考えられる。水素や重水素の挙動を研究することによりトリチウム除去についての重要な知見が得られつつある。

Hモードに付随して発生するELMバーストによる瞬間的高熱流束がダイバータ部を損傷する。これを防止する目的でKSTAR装置に共鳴磁場摂動(RMP)コイルを設置し、瞬間的高熱流束の低減に向け実験を継続している。RMPコイルで生成されると予想されている統計的磁場の空間構造を観測し、ELM励起に関する物理機構のより深い理解とその制御に関する新たな知見を得るため、2次元軟X線揺動計測器の共同開発を開始した。HL-2A装置では2次元軟X線計測器の設置を開始し、KSTAR装置ではELM励起やRMPコイルの効果に関する共同研究も開始した。

燃焼プラズマの定常維持を可能にするアルファ粒子の輸送や損失過程を念頭に置き、既存の核融合装置を用いて高エネルギー粒子の振舞いを研究する。EAST装置では中性粒子加熱装置(NBI)を2014年春から導入を開始した。NBIの高エネルギーイオンの損失過程を研究するため、シンチレータ型損失高エネルギーイオンプローブ(FILD)の設計・製作に関して共同開発を進めた。2014年中には設置を完了し、計測を開始する予定にしている。KSTAR装置では既にFILDの設置を完了し計測を開始した。日本側で開発した解析コードを基にデータ解析を進めており、高エネルギーイオンとMHD不安定性や磁場リップルとの相互作用に関する物理機構を共同研究する。また、ヘリカルリップルを有するLHD装置との相互比較も検討している。プラズマ内に閉じ込められた高エネルギーイオンの振舞いを研究するため、中性子カメラや中性子スペクトルメータも共同研究としてKSTAR装置で開発を進めている。今後日中韓の3カ国でプロジェクトを進めていく予定にしている。

理論・シミュレーションについてはダイバータプラズマ輸送コード「ERO」、周辺プラズマ輸送コード「EMC3-EIRENE」、高エネルギー粒子駆動型不安定性輸送コード「MEGA」等を各装置の解析に使用できるよう、共同研究を行った。

[若手研究者育成]

若手研究者育成の手段として共同研究への参加、セミナーでの若手研究者の招待及び若手研究者の長期滞在を計画し、実行した。共同研究では全体の3割程度を若手研究者に割り振り、共同研究に参加すると共に現地で30分程度の口頭発表を要請している。また、セミナーでは積極的に若手研究者に口頭発表を依頼している。例えば第3回セミナー(中国)では総勢80名程度の参加者の内、30代前半までの研究者の発表が半数程度となった。第5回セミナー(日本)では博士課程学生口頭発表のセッションを設け、学位取得前の若手研究者の育成にも配慮した。長期滞在として、学位取得直後の中国人若手研究者(GAO Wei)は2か月(2013年8/19-10/19)、韓国人博士課程学生(KIM JunYoung)は3か月(2013年1/11-4/10)、核融合科学研究所に滞在し、日本側キーパーソンの研究指導の下、共同研究を行った。

[社会貢献等]

中韓で共同研究を実施する際に、近隣の大学で学生向けの講義をおこなっている。また、本交流事業に参加している中国人研究者・大学院学生やCOE研究員を含め、核融合科学研究所が毎年秋に行っているオープンキャンパスに参加し、広く一般社会に理科学・核融合研究に関する啓蒙・広報活動を実施している。

3. これまでの研究交流活動の進捗状況

(1)これまで(平成26年7月末まで)の研究交流活動について、「共同研究」、「セミナー」及び「研究者交流」の交流の形態ごとに、派遣及び受入の概要を記入してください。※過去2年度における派遣及び受入実績については、「中間評価資料(経費関係調書)」に記入してください。

○共同研究

【概要】

カテゴリーI：閉じ込め磁場配位の定常保持

中国・EAST 装置において観測されている古典・新古典ティアリングモードとプラズマ流との関係について共同研究を行った。ティアリングモードの回転停止現象はロックモードとして知られており、ディスラプションを引き起こす危険な現象である。交換型モードにおいても同様の回転停止現象が近年観測され、60%以上のエネルギー損失をもたらす。本現象の物理機構の解明、既存モデルとの比較およびその制御性について議論を進め、比較実験の提案等を行った。また、現在設置作業を進めている共鳴磁場摂動(RMP)コイルの仕様および安定性制御への適用方法について議論を行い、LHD における RMP 実験結果との比較を進めた。韓国・KSTAR 装置においても同様の議論を進め、プラズマ流およびプラズマ流シアと安定性特性との関係など明らかにすべき点を明確にし、今後の共同実験の進め方について議論を行った。またトカマクの長時間放電に必要な低域混成波による電流駆動(LHCD)や加熱でELM振動が抑制されることが見いだされ、その抑制効果をダブルヌル配位と下側ヌル配位とで比較研究した。

カテゴリーII：周辺及びダイバータプラズマ制御

中国・HL-2A トカマク装置において不純物輸送に関する共同研究を実施している。HL-2A トカマクでは現在、1mVUV 分光器、モニター用 EUV 分光器及び空間分布計測用 EUV 分光器を共同研究として、Cui 教授を中心とするグループと共に共同開発してきた。プラズマ周辺の不純物輸送について、ダイバータトカマクと LHD との比較研究を行っている。また、2014 年 5 月より空間分布計測用 EUV 分光器の設置に向けた準備を開始した。ダイバータ部から主プラズマ周辺部にかけての分布計測を行う予定にしており、2014 年秋頃には分光器の設置を完了し、データ生産に向け共同研究を継続する。中国・EASTトカマク装置では2014年5月にタングステンダイバータの設置を完了した。長時間放電中のタングステンの振舞いを調べるため、Wu 教授・Zhang 博士を中心とするグループと EUV 分光器を共同開発し、同6月にEAST装置に設置し、7月にファーストデータを得た。韓国・KSTAR 装置でもタングステンに関する輸送研究を開始し、2014 年度の実験で初めてタングステンを入射する。実質的な共同研究の開始となる。これらタングステンの振舞いを理論的に予測するために、中国・蘭州の西北師範大学をはじめとする中国側理論・実験グループとの共同研究を開始した。2014年8月にはこれに関するセミナーを西北師範大学で開催する。また、タングステンスペクトルのモデリングに関する解析コードも準備が進み、EAST 装置で得られる予定のタングステンスペクトルの解析に応用する。

日本側の核融合研を中心とするプラズマ-壁相互作用(PWI)グループは EAST 装置の G.N.Luo 及び J.S.Hu 教授をはじめとする PWI グループと共同研究を実施している。若手研究者である F.Ding 及び R.Ding 氏と共同してプラズマに暴露した固体資料の表面物性を評価するため、周辺プラズマシミュレーションコードを用いた共同研究も開始している。また、KSTAR 装置の S.H.Hong 氏を中心とするグループとも PWI に関する共同研究を開始し、炭素堆積層への水素蓄積の結合状態に関する新しい知見を得た。更に、次回の EAST 実験では日中韓の3カ国共同研究として、イオン共鳴周波数帯(ICRF)加熱を用いた壁コンディショニング(ICWC)放電が材料表面におよぼす水素同位体置換(日本・NIFS: 芦川)、同放電による材料中の水素同位体除去効果に対する粒子エネルギー依存性(中国・ASIPP: Y. W. Yu)、同放電時における静電型プローブによるプラズマパラメータ計測(韓国・NFRI: S. K. Hong)の計画を立ち上げた。特に超伝導磁場装置での ICWC 長時間放電による壁コンディショニングは日中間で協力し発展させてきた世界的にも独自の研究課題であり、ITER を初めとする超伝導装置のプラズマ対向材料の効率的洗浄への有効

な解決策を提示している。これに関する新たな実験計画を立案するため、2014年3月、3か国担当者（芦川、YU, Hong）がASIPPに集合し、ワークショップ形式で議論を行い今後の方針を決定した。

周辺MHD揺動を計測し、RMP磁場印可の周辺磁場構造への効果を検出するため、EAST装置で計測器開発等について議論を進めた。また、同テーマに関して、KSTAR装置での共同研究も具体化させた。新たに周辺MHD揺動を共同研究する組織を作るためにRMP磁場印加とプラズマ応答に関する小規模なワークショップを2013年11月に開催した。2014年夏に予定されているKSTAR装置実験に参加し、実質的な共同研究を開始する。共鳴磁場摂動（RMP）と周辺プラズマとの相互作用について周辺磁場構造を異にするLHD装置とKSTAR装置を用いて並行して実験を行う。実験結果を周辺プラズマの安定性と周辺統計的磁場や磁気島の構造に関して比較研究することにより、共同実験の利点を生かした研究活動を展開する。

カテゴリーIII：アルファ粒子の閉じ込め

高エネルギーイオンの閉じ込めを研究するにあたって重要な役割を果たすシンチレータ型損失高エネルギーイオンプローブ（FILD）、共役粒子同時計数型中性子エネルギー spektrometa及び原子核乾板に基づく中性子カメラをKSTAR装置において共同開発し、J. KIM博士、M. S. CHEON博士及びJ. Y. KIM博士課程大学院生と実験を開始した。EAST装置では、FILDの設計を共同で進めた結果2014年に設置できる段階に至った。また、HL-2A装置では、プロジェクト形式でFILDの開発を進めており、首尾よくデータが得られ、解析が進んでいる。これら共同開発した計測装置を中心に日中韓の協力体制を構築している。

カテゴリーIV：理論・シミュレーション

EAST装置およびKSTAR装置との共同研究として、実形状プラズマ平衡を用いた高エネルギー粒子駆動型不安定性シミュレーションの準備を完了した。タングステンダイバータを新規に設置したEAST装置の周辺プラズマの振舞いを理解するために、磁場を含む1次元粒子シミュレーションが可能なPICコードを開発し、共同研究への応用を開始した。データ解析を通してプラズマ壁相互作用研究と周辺プラズマ研究の連携が進んだ。中国・大連工科大学との研究交流を行い、マルチスケール乱流シミュレーションに関する共同研究を実施した。今後も継続的に共同研究を実施する。

○セミナー

	平成24年度	平成25年度	平成26年度(7月末まで)
国内開催	1回	0回	1回
海外開催	0回	2回	0回
合計	1回	2回	1回

【概要】

これまで日中韓共同でセミナーを4回開催した(2013年1月・日本開催, 2013年5月・中国開催, 2013年11月・韓国開催, 2014年6月・日本開催)。2012年8月に開催した本協力事業開始にあつたのキックオフ会合(研究交流による会合)に始まり、セミナー回数を重ねるごとにメンバー間の意思疎通も緊密になり、共同研究実施に向けより具体的な内容へ議論が進んでいる。セミナーでは常時40-80名程度の参加者を得て(参加者の半数程度は若手研究者及び博士課程学生)、共同研究、研究者交流及び若手研究者の育成を目的に口頭発表や個別グループでの議論を行うと共に学术交流基盤の形成に努めてきた。セミナーでは、日中韓の実施組織代表者もほぼ毎回参加しており、本交流計画を各研究所の研究方針に円滑に組み込むことに大きく寄与している。また、これらのセミナーとは別に主にキーパーソンで構成された少人数(合計10名程度)のワークショップを2013年6月に韓国(NFRI)、2014年3月に中国(華中科技大学)でそれぞれ開催した。現在の研究内容を詳細に説明し、今後の共同研究の進展に向けた環境整備と研究内容の具体化を計った。同時に若手研究者の育

成について具体的な話を進めた。2014 年 8 月にはタングステンを含む不純物計測のための「原子分子セミナー」を中国で開催予定にしている（必要経費は本事業以外の予算を使用）。

○研究者交流

【概要】

I から IV のカテゴリーに示した共同研究を実施するために、活発に研究者交流を実施した。2012 年度には合計 8 名（中国へ 2 名，韓国へ 6 名，その他国内 12 名），2013 年度は合計 55 名（中国へ 42 名，韓国へ 13 名）及び 2014 年度は合計 1 名（中国へ 1 名，韓国へ 0 名，その他国内 16 名）がこれまで本協力事業として研究者交流に参加した。共同研究の進展に伴い研究者交流も活発になってきており，本経費以外の資金を利用した本共同研究・研究者交流の推進を予定している。特にカテゴリーII 及び III ではハードウェアの設置が完了しつつあり，設置したハードウェアの特性試験，データ取得及びデータ解析等に関して研究者交流が増加しつつある。

(2)(1)の研究交流活動を通じて申請時の計画がどの程度進展したかを「学術的側面」「若手研究者の育成」及び「日中韓における継続的な研究拠点の構築」の観点から記入してください。

○学術的側面

カテゴリーI：閉じ込め磁場配位の定常保持

LHD装置で生成されるプラズマの安定な定常放電を妨げるMHD不安定性の中でも代表的な形態である交換型モードの成長・飽和に対するプラズマパラメータおよび配位依存性について、その飽和強度が磁気レイノルズ数に依存し、その依存性が線形成長率とほぼ一致することを見つけた。これによりEAST装置やKSTAR装置の代表的なMHD不安定性であるティアリングモードの飽和強度の同依存性を交換型モードと比較することにより安定化に寄与するMHDモード回転に関する比較が可能となった。周辺プラズマMHD安定性に関してトカマク装置とヘリカル装置間の比較という新しい学術的側面を有する共同研究が展開し始めた。

長時間放電ではHモードの出現と共に励起されるELMによる間欠的バーストの熱的制御が重要となる。EAST装置では低域混成波による電流駆動(LHCD)時に誘起される電流フィラメントにより周辺磁場がストカスティックになり、結果としてELM熱流束が緩和される現象が発見された(J. Li et al., Nature Physics NPHYS2795 (2013))。そこでEAST装置のダブルヌル(DN)配位と下側シングルヌル(LSN)配位でのHモード特性とELMの振舞いに関する比較検討を行った。LSN配位ではtype-I型ELMが10-50Hz周波数付近で増加したが、DN配位ではtype-I型ELMは一層強く励起された。これまでの共同研究の結果ではLHCDのELM抑制効果はあまり観測されなかった。しかし、最近のトカマク研究ではELM抑制にはプラズマ周辺の安全係数(q_{95})あるいはプラズマ電流に強く依存することが明らかになりつつある。今後、ELM励起に伴ってペデスタル部のトロイダル電流分布の経時変化を明らかにする必要がある。KSTAR装置でも安定した長時間放電実現のため精力的にELM抑制に関する実験を行っている。RMPコイルやガスパフによるELM制御を特に研究しており、EAST装置のLHCDによるELM抑制との関連を調べる必要がある。

カテゴリーII：周辺及びダイバータプラズマ制御

核融合炉の設計において不純物放射を用いた周辺熱流束の軽減はトカマク型やヘリカル型等の炉形式の違いによらず共通の重要な物理及び工学課題となっている。LHD装置ではRMPコイルや希ガス不純物入射を用いて周辺熱流束の低減が見込まれるデタッチプラズマを達成することに成功し、今後の核融合プラズマの定常化へ向けた重要な進展を図ることができた。現在EAST装置やKSTAR装置への応用を目指して共同研究を進めている。周辺プラズマの不純物輸送についてLHD装置の統計的(ストカスティック)磁場で構成されるエルゴディック層及びトカマクのスクレイプオフ層についての比較研究を開始した。トカマク装置ではX点付近のダイバータ領域のみで不純物遮蔽が有効になるが、ヘリカル装置であるLHDではX点を含む全領域で不純物遮蔽が有効になることが分かった。この結果、周辺統計的磁場領域を利用することにより、不純物をコアプラズマに持ち込むことなくプラズマ周辺に留めた状態を維持しながら有効なデタッチプラズマ生成の可能性を示した。

EAST装置における共同研究においてITER(国際熱核融合実験炉)での使用が決定されているタングステン堆積層付試料片の曝露実験を実施した。日本側研究グループが試料中の水素保持量及び不純物組成分析評価を行った結果、プラズマに対向する表面はプラズマ放電中に損耗を受け、結果として材料の表面酸化が軽減されることが明らかとなった。また、タングステン堆積層付資料片では堆積層無資料片と比較してかなり高い水素保持性を示した。これらの結果から材料中の水素保持性に酸化膜の影響は軽微であり、結晶粒界や格子欠格等との因果関係が重要となっていることが判明した。しかし、金属堆積層中の水素保持量増加の決定的な要因はいまだ明らかになっておらず、水素捕捉要因の物理機構を解明することはITERにおけるプラズマ対向壁における水素リサイクリングやトリチウム蓄積の制御に決定的に重要となる。

LHD装置を用いて核融合装置としては初めてタングステン多価イオンから発光される可視域禁制線を観測し

た。発光線スペクトルの波長について中国・蘭州の西北師範大学を中心とする理論グループと共同研究し、精度の高い原子構造モデルの構築に貢献した。これまでに電子ビームイオントラップ (EBIT) 装置や LHD 装置で同定された禁制線の強度比を衝突輻射モデルで計算し、強度比の密度依存性を詳細に説明することに成功すると共にプラズマの電子密度診断への応用可能性を示した。また、LHD プラズマ中での禁制線発光強度の空間分布を観測することによりタングステニオンの価数を決定することができ、電子温度分布と比較することによりタングステニオンの電離・再結合データの定量的評価を初めて試みた。タングステンスペクトルモデリングを進展させ、内殻励起過程を新たに加えることにより、これまで理解できていなかった 60 Å 付近の 4d-4p 遷移タングステンスペクトル列構造を新たに説明することに成功した。

EAST, KSTAR 及び LHD 装置での周辺 MHD 揺動実験に関して共同研究を行った。周辺磁場構造の変化が MHD 揺動抑制に大きな役割を果たしていることを示唆する解析結果を得た。ITER では ELM 揺動で排出されるダイバータ部への過剰な熱流束を共鳴磁場摂動 (RMP) 印加によって制御する手法を採用しているが、その物理機構、特に磁場の侵入・遮断の物理を解明するための手掛かりを見つけている。

カテゴリーIII：アルファ粒子の閉じ込め

D-T 燃焼で生成される 3.5MeV アルファ粒子の生成や閉じ込めに関する物理機構を解明するために、プラズマ中に存在する高エネルギーイオンの MHD 不安定性に伴う粒子輸送・損失並びに非軸対称性磁場が高速イオン軌道に与える影響を KSTAR 装置及び LHD 装置において共同研究した。この結果、テアリングモードと鋸状波不安定性が共存している場合には損失高速イオン束信号が MHD 不安定性と同じ周波数帯の揺動を有することを発見した。RMP コイルによる非軸対称磁場摂動を印加することにより損失高速イオン束の増大を観測した。トーラスの軸対称性の破れを示唆するプラズマ閉じ込め物理における重要な結果となった。三次元磁場を考慮した粒子軌道計算により、印加摂動磁場の位相とプローブに到達する損失高速イオン束の相関について理解が進みつつある。また、HL-2A 装置の損失高速イオンプローブデータを解析した結果、鋸状波不安定性或いは Long-live モード (LLM) が存在している場合には、モードが存在しない場合に比して即発損失とは異なるエネルギー・ピッチ角帯に高速イオンの損失が現れることが分かった。ディスラプション時には、高速イオンの損失が著しくなる。

カテゴリーIV：理論・シミュレーション

マルチスケール乱流シミュレーションに関する中国・大連工科大学との研究より、巨視的 MHD テアリングモードと微視的イオン温度勾配モードが互いに相手を不安定化する場合があることを明らかにするとともに、非線形二重テアリングモードにおいて2種類の帯状流振動を見出した。多階層乱流現象に関する理解が進んでいる。周辺プラズマに関する ASIPP との共同研究により、磁場を含む1次元 PIC コードの開発とそれによる解析を通してプラズマ壁相互作用研究、特にリミター損耗メカニズムに関する理解が進展した。

○若手研究者の育成

若手研究者育成のために①共同研究及び研究者交流、②セミナー、③長期滞在、④大学院及び⑤COE (ポストドク) 研究員制度を活用している。共同研究では全体の3割程度を若手研究者に割り振り、共同研究に参加させると共に現地で30分程度の口頭発表を要請している。セミナーでは積極的に若手研究者に口頭発表を依頼して、英語での口頭発表の場を与えると共に英語のセミナープロシーディングを執筆させ、選択の上、英語論文誌への投稿を行っている。セミナーによっては博士課程学生口頭発表のセッションを設け、学位取得前の若手研究者の育成にも配慮した。長期滞在として、学位取得直後の中国人若手研究者 (GAO Wei) は2か月 (2013年8/19-10/19)、韓国人博士課程学生 (KIM JunYoung) は3か月 (2013年1/11-4/10)、核融合科学研究所に滞在し、日本側キーパーソンの研究指導の下、共同研究を行った。本協力事業を基盤として ASIPP 大学院・修

正課程で学んでいた張洪明氏を中国人留学生として総合研究大学院大学核融合専攻博士課程後期課程（2013年10月入学）に迎えた。また、明廷鳳氏（2012年10月－2014年9月）及び王 翀（2013年4月－2015年3月）はNIFS・COE 研究員として本共同研究の中核を担っている。

○日中韓における継続的な研究拠点の構築

日本・核融合科学研究所（NIFS：LHD 装置）、中国・等離子体物理研究所（ASIPP：EAST 装置）及び韓国・国家核融合研究所（NFRI：KSTAR 装置）における各超伝導装置を用いた共同研究のためのネットワークとその研究拠点の構築について、ハードウェアの共同開発、共同設置、それに続く共同データ解析という観点に於いて、この2年間の本協力事業を行うことにより大きな進展を得た。特に日中韓の3研究所間で、①MHD 制御、②周辺不純物輸送、③プラズマ壁相互作用、④原子分子、⑤周辺揺動、⑥高エネルギー粒子及び⑦理論・シミュレーションに関する物理課題において強固な且つ継続的な研究拠点を構築しつつある。①及び⑦を除いてはハードウェアの共同開発・製作が同時進行しており、研究拠点は既に確固たるものになっている。理論・シミュレーション分野における活動は基本的に個別研究者にゆだねられているが、ASIPP 及び NFRI の理論部門責任者と本共同研究を通して良好な関係を築いている。LHD、EAST 及び KSTAR 装置での実験解析を強く意識することにより、より広範囲の研究分野にわたる研究拠点の構築が可能となりつつある。

4. 事業の実施体制

本事業を実施する上での「日本側拠点機関の実施体制」、「中国・韓国の拠点機関との協力体制」及び、「日本側拠点機関の事務支援体制」について記入してください。

○日本側拠点機関の実施体制（拠点機関としての役割・国内の協力機関との協力体制等）

核融合科学研究所は日本側拠点機関として下記の実施体制を構築している。

コーディネータ（森田繁）

カテゴリーI	カテゴリーII		カテゴリーIII
閉じ込め磁場配位の 定常保持	周辺及びダイバータプラズマ制御		高エネルギー粒子と バルクプラズマの 相互作用
	カテゴリーIIa	カテゴリーIIb	
	プラズマエッジ及びダイバ ータプラズマ輸送	エッジプラズ マの安定性	
キーパーソン (榊原悟)	キーパーソン (森田繁) プラズマ壁相互作用 サブキーパーソン (芦川直子) 原子分子サブキーパーソン (加藤太治)	キーパーソン (大舘暁)	キーパーソン (磯部光孝)
カテゴリーIV（理論・シミュレーション）			
キーパーソン（藤堂泰）			

拠点機関のキーパーソン及びサブキーパーソンはそれぞれのテーマについて日中韓の共同研究立案の責任者となり、国内の協力機関のメンバーと打合せを行い、共同研究を推進する。また、共同研究で得られた成果や今後の研究方針等をキーパーソンを中心としてテーマ毎に議論し、意見を集約する。

日本拠点機関：NIFS、日本協力機関：名古屋大学、九州大学、京都大学、電気通信大学、静岡大学、筑波大学、京都工芸繊維大学

○中国・韓国の拠点機関との協力体制（各国の役割分担・ネットワーク構築状況等）

中国・韓国側にも日本側と同様のカテゴリーとキーパーソンが存在する。各テーマの共同研究は、3カ国のそれぞれのキーパーソン(もしくはサブキーパーソン)同士が打合せを行い、研究計画を立案する。コーディネータは3カ国の3装置の実験スケジュールや国際会議日程を情報交換しつつ、年間の研究計画の調整を進める。中韓も日本側と同様、ASIPP及びNFRIが拠点機関として、協力機関と議論をしながら全体計画を作成する。

韓国拠点機関：NFRI、韓国協力機関：浦項工科大学、漢陽大学、大邱大学、檀国大学、韓国原子力研究所
中国拠点機関：ASIPP、中国協力機関：中国科学技術大学、華中科技大学

○日本側拠点機関の事務支援体制（拠点機関全体としての事務運営・支援体制等）

核融合科学研究所・管理部・研究支援課が中心となって事務支援体制を構築している。

管理部・研究支援課：課長・野々村晴子、課長補佐・浅井誠

研究支援課・国際支援係：係長・書上正則、係員・松井五月