

日中韓フォーサイト事業  
最終年度 実施報告書（平成 24 年度採用課題用）

（※本報告書は、前年度までの実績報告書とともに事後評価資料として使用します。）

1. 拠点機関

日本側拠点機関：	自然科学研究機構 核融合科学研究所
中国側拠点機関：	中国科学院 等離子体物理研究所
韓国側拠点機関：	韓国国立核融合研究所

2. 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

（交流分野：プラズマ物理学）

（英文）：Study on critical physics issues specific to steady state sustainment of high-performance plasmas

（交流分野：Plasma physics）

研究交流課題に係るホームページ：[http:// A3foresight.nifs.ac.jp/index.html](http://A3foresight.nifs.ac.jp/index.html)

3. 採用期間

平成 24 年 8 月 1 日～平成 29 年 7 月 31 日

（ 6 年度目 ）

4. 実施体制

日本側実施組織

拠点機関：自然科学研究機構 核融合科学研究所（NIFS）

実施組織代表者（所属部局・職・氏名）：核融合科学研究所・所長・竹入康彦

研究代表者（所属部局・職・氏名）：核融合科学研究所・教授・森田 繁

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

事務組織：核融合科学研究所 管理部研究支援課

相手国側実施組織（拠点機関名・協力機関名は、和英併記願います。）

（1）中国側実施組織：

拠点機関：（英文）Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science（ASIPP）

（和文）中国科学院 等離子体物理研究所

研究代表者（所属部局・職・氏名）：（英文）

Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Professor, HU Liquan

協力機関：(英文) University of Science and Technology of China,  
Huazhong University of Science and Technology  
(和文) 中国科学技術大学, 華中科技大学

(2) 韓国側実施組織：

拠点機関：(英文) National Fusion Research Institute (NFRI)  
(和文) 韓国国立核融合研究所

研究代表者(所属部局・職・氏名)：(英文)  
National Fusion Research Institute, KSTAR Research Center,  
Principal Researcher, OH Yeong-kook

協力機関：(英文) Pohuang University of Science and Technology, Hanyang University,  
Daegu University, Dankook University,  
Korea Atomic Energy Research Institute  
(和文) 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

## 5. 研究交流目標

### 5-1. 平成29年度研究交流目標

＜研究協力体制の構築＞

本共同研究は、「I. 閉じ込め磁場配位の定常保持」, 「II. 周辺及びダイバータプラズマ制御 (IIa. 周辺プラズマ輸送と IIb. 周辺プラズマ安定性の二つの小課題に分類)」, 「III. アルファ粒子の閉じ込め」及び、上記三課題に共通する「IV. 理論・シミュレーション」の四課題から構成される。それぞれのカテゴリーにはキーパーソンを配置する。キーパーソンは共同研究及び人的交流に関して各カテゴリーの実施計画を主導する。

最近の核融合研究では核融合炉の早期実現が強く望まれており、これと関連して「周辺及びダイバータ制御」研究が非常に重要になってきている。そこで、定常プラズマ研究にとって非常に大事となる「プラズマ壁相互作用」及び「原子分子」研究を「R-2 (カテゴリーIIa)」に加え、それぞれサブキーパーソンを配置する。「R-5 (カテゴリーIV)」にはキーパーソン及びサブキーパーソンの2名を配置し、1名を大学に所属する研究者とする。また、コーディネーター(研究代表者)にはサブコーディネータを配置し、本共同研究の研究統括がスムーズに行えるよう配慮する。以上のように、専門的なカテゴリーを個別に設定することで、同じ研究内容を有する研究者同士が各カテゴリーの中でより緊密に議論を行い、共同研究を実行する環境が着実に出来上がりつつある。また、本事業を契機として総合研究大学院大学・核融合専攻・博士課程(後期)に入学し、博士の学位を取得した4名の中国人学生が、中国・等離子体物理研究所及び西南物理研究所で職を得て、日中協力事業に参加している。本事業の開始当初から参加している中国人若手研究者の数は、現在、等離子体物理研究所及び西南物理研究所で実験キーパーソンとなり、研究を推進する立場で

本研究事業の共同研究に参加している。研究協力体制は、中国・等離子体物理研究所や韓国・核融合研究所のような大きな研究組織のみではなく、中国・大連理工大学・中国科学技術大学・華中科技大学・蘭州師範大学・復旦大学及び韓国・浦項工科大学・ソウル大学・蔚山科学技術大学（UNIST）等、大学にも広がり、ネットワークが充実してきている。平成 28 年度には外部資金（JST さくらサイエンスプラン）を利用して、合計 20 名余りの中国科学技術大学・大学院学生が核融合科学研究所に滞在し、講義と研究指導を受けた。多くの学生は帰国後も日本側と連絡を密にしており、今後の協力研究に向けた研究体制の充実が期待される。

平成 29 年度は、本事業の最終年度であることから、これまで継続してきた共同研究に加え、本事業終了後の共同研究の継続や若手研究者の育成について議論し、形成してきた体制の維持と新たな発展について具体的な方策を検討する。このために、各カテゴリーのキーパーソンが原則、全員参加する A3 セミナーを開催する。

**コーディネータ及びサブコーディネータ**

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	キーパーソン サブキーパーソン プラズマ壁相互作用 サブキーパーソン 原子分子 サブキーパーソン	キーパーソン	キーパーソン
カテゴリーIV （理論・シミュレーション）			
キーパーソン、サブキーパーソン			

<学術的観点>

**R-1（カテゴリーI）：**

磁場閉じ込め装置における巨視的不安定性の特性理解や制御手法の確立は、高性能プラズマを安定して定常保持する上で極めて重要な課題であり、現在、世界中で精力的に研究が推進されている。ティアリング不安定性や交換型不安定性はトカマク・ヘリカル型の各装置においてプラズマ性能を左右する重要な要素となる。閉じ込めを大きく劣化させるこれら不安定性の発現領域、成長率及びその飽和過程について明らかにし、将来の核融合炉における運転領域及び運転手法を確立することが本共同研究の最終的な学術目的となる。

特に回転が減速、停止する危険な不安定性については、ITER の運転領域を確定する上でも極めて重要な課題であり、現在もなお不安定性が発現するパラメータ領域に対する実験則の精度向上を目指した共同実験が進められている。よって LHD, EAST 及び KSTAR の各装置において観測される不安定性の減速または停止が生じる不安定性の特性に着目した共同研究を進め、物理的解明を目指すとともにその制御手法の検討を進める。環状プラズマの総合的理解につながる世界最先端の研究成果を挙げることを目標とする。

**R-2 (カテゴリーIIa) :**

タングステン不純物の中心蓄積とその抑制に関する研究を継続する。また、タングステン不純物の空間分布計測が可能になったので、その空間分布放射強度の絶対較正を進め、タングステン密度の計測を開始する。同時にその空間分布を用いて、タングステンイオンのプラズマ中心部での輸送解析を始める。EAST 放電でのタングステンの挙動について放電形態や加熱装置に関して系統的な実験結果をまとめ、その結果を論文を投稿するよう準備を進める。炭素ダイバータを有する KSTAR 装置でもタングステン粉末の入射実験が成功したことを受け、同じく炭素ダイバータを有する LHD のタングステンペレットを入射実験との比較研究を共同研究として進める。

核融合炉は重水素と三重水素の核反応で生じた高エネルギーヘリウムイオンによる加熱で高温・高密度プラズマは定常維持されるが、現在の核融合炉設計ではそのコアプラズマから流れ出てくる巨大な周辺熱流束をどのように制御し処理するかが緊急の課題となっている。その対策として、周辺不純物の放射損失を増大させ周辺プラズマ温度を低下させることにより、ダイバータ領域に到達する熱流束を最適化する手法が有力となっている。更に融点の最も高いタングステン材をダイバータ板として使用することも重要事項となっている。定常核融合炉を成立させるために不可避であるこれらの実験課題を克服するためには、周辺不純物の輸送機構を解明すること、タングステン材料のプラズマ対向特性やコアプラズマへの影響を理解することが非常に重要となる。平成 29 年度はタングステンダイバータを設置した中国・EAST 装置で共同研究として新たに設置した 3 台目の空間分布計測用 EUV 分光器を本格的に活用し、プラズマ中でのタングステン輸送研究を日中韓の共同研究として継続する。中国・HL-2A 装置（西南物理研究院・SWIP）においては、低電離タングステンスペクトルを共同研究として製作・設置した EUV 分光器を用いて核融合実験装置として世界で初めて観測することに成功した。これらの実験研究を継続し、成果の公表に向け論文執筆を進める。平成 29 年度には新たに 3 台目の EUV 分光器を共同研究として導入し、次期装置「HL-2M」の不純物計測の本格的準備を進める。

PWI 研究では以下の事柄について引き続き共同研究を実施する。EAST 装置及び ITER 装置のダイバータ材であるタングステン金属を主体とする試料片をプラズマへ曝露し、長期的なタングステン試料内での水素同位体蓄積量及び脱離挙動を調べる。タングステン試料には、多結晶タングステンおよび日本（九州大学）・中国（蘭州科学研究所, ASIPP）の研究室で成膜した微結晶質タングステン膜を使用する。微結晶質タングステン膜については、

構造特性を NIFS で分析し、構造特性を明らかにした。KSTAR 装置では新たな NBI 装置の導入を進めており、従来の放電よりは高熱負荷となる KSTAR ダイバータプラズマへの曝露実験を上記の試料を用いて行う。また、EAST 装置においても第一壁でのプラズマ曝露実験を行い、水素リテンションの温度依存性に関する実験研究を実施する。試料の分析を行い、タングステン膜中の水素同位体の拡散効果について知見を深めると共に、拡散モデリングの改良を進める。一方、水素の壁リサイクリングは比較的短時間で変化することがこれまでの共同研究により明らかにされつつある。その現象のより深い理解の為、EAST 装置で水素同位体ダイナミクス測定に関する実験研究を実施する。加熱手法により流入粒子束は異なるので、その違いを明らかにすべく、レーザーを用いた第一壁中の水素同位体挙動の実時間測定実験を実施する。共同研究成果を、アジア・プラズマ核融合学会 (APFA: 土岐市, 12 月), 及び ICFRM 国際会議 (青森, 10 月) で発表する予定にしている。

原子分子研究分野では、LHD 装置、EAST 装置及び HL-2A 装置や原子衝突装置 (EBIT, ECRIS 等の多価イオン源) から観測された実験結果を基に理論スペクトル解析を更に継続して進め、タングステンイオンの核融合プラズマでの不純物輸送解析に必要なデータの蓄積に努める。今年度は、故障により運転を停止していた電気通信大学の高エネルギー・高磁場 EBIT 装置 (Tokyo-EBIT) が復旧する予定である。中国でも同型 EBIT を用いた研究が復旦大学で行われており、ITER の中心プラズマで生成されるような高価数のタングステン多価イオンの発光スペクトル、二電子性再結合、M1 線発光寿命の測定などで共同研究を進展させる。また、西北師範大学でも永久磁石を用いた小型 EBIT 装置の運転が開始される予定であり、EBIT を用いた多価イオン分光研究の更なる成果が期待できる。より低価数のタングステンイオンの発光スペクトルデータの取得やプラズマ壁相互作用への応用のために、タングステン材料のイオンスパッタリングの共同研究を NFRI の研究者と開始する。タングステン多価イオンスペクトル解析に必要な原子過程データの高精度理論計算に関する西北師範大学との理論面での共同研究を継続し、論文による成果発表に向け議論を深化させる。

### **R-3 (カテゴリー-IIb) :**

周辺部の輸送特性の改善により生じる急峻な圧力勾配は周辺局在化不安定性 (ELM) と呼ばれる危険な不安定性を誘起する。この ELM の抑制または ELM の小振幅化は高性能プラズマの維持可能性を左右している。ELM 制御法のなかで有力なものの一つに外部摂動磁場 (RMP) の印加があげられる。ELM が発生している周辺部の磁場に共鳴するような外部摂動磁場の印加により、ELM 振幅が抑制される現象が多くのトカマク装置で観測されている。この抑制効果の物理機構を解明し、外部摂動磁場を用いた ELM 制御技術の次世代の核融合炉における有効性を検証することが本カテゴリーの課題である。

二つの物理的な課題を解明する必要がある。第一課題は「外部摂動磁場のプラズマへの浸透機構の物理過程の解明」である。プラズマは電気伝導度が高く、外部の磁場を遮蔽する性質がある。遮蔽電流は磁力線に沿って流れるため、低次のモード数を持つ外部摂動磁場は共鳴する有理面で遮蔽される。しかし、プラズマが不安定になると、その有理面の不

安定性も助長され、外部摂動磁場がより増幅された形でプラズマに侵入する。第二課題は「侵入した遮蔽磁場が MHD 不安定性に与える影響」である。

前者に挙げた課題研究の為、外部摂動磁場印加によって変形するプラズマの形状観測用 2次元計測器の実装を継続する。具体的には日本側の協力指導の下、「VUV イメージング計測システム」を EAST 及び KSTAR の両装置への設置を進めている。接線方向 2次元像は摂動電流によって変化する有線面付近の電流の影響を強くうけるので、外部摂動磁場の位相を変化させた時、摂動磁場のプラズマ内への侵入長を観測することが可能となる。これは世界で初めての実験的試みであり、成果が強く期待される。後者の課題研究の為には、外部摂動磁場が印可された放電の平衡配位での MHD 不安定性を調べることが可能な非線形 MHD 時間発展コード（たとえば MIPS）を活用する。実験時に観測される MHD 揺動の空間構造と MIPS コード等を用いて予測される MHD 揺動の直接的な比較を行う。日中韓の協力研究を通して、摂動磁場印加時のプラズマ平衡と MHD 不安定性の関係について詳しく研究することにより、世界的な研究成果を目指す。

#### **R-4 (カテゴリーIII) :**

将来の核融合炉では D-T 燃焼で生成される高エネルギー  $\alpha$  粒子による自己加熱によって高温プラズマが維持される。従って、 $\alpha$  粒子の閉じ込めに関与する物理機構の正確な理解は、核融合炉の成否に直結する重要な課題となる。日中共同で設計活動を行ったシンチレータ型損失高エネルギーイオンプローブ (FILD) の本格運用が EAST 装置 (中国) で始まり、その結果、日本側の強力な指導の下、EAST 装置、KSTAR 装置 (韓国) 及び LHD 装置 (日本) の 3 装置で FILD が同時稼働することになった。また、平成 29 年 3 月 7 日から LHD 装置において重水素実験が開始された。既に重水素を使用した実験が行われていた EAST 装置及び KSTAR 装置と同様に、LHD 装置においても高エネルギーイオン測定器としての役割を果たす中性子計測機器が活用できるようになり、日中韓の三装置において、本共同研究に関して同じ実験環境が整った。ヘリカル及びトカマク配位における高エネルギーイオンの閉じ込め・輸送機構に関する物理的全体像の理解を着実に深め、環状プラズマにおける高エネルギーイオン挙動の包括的理解を得るため、FILD 及び中性子計測機器を駆使し、日中韓の 3 カ国の装置での共同実験を実施する。特に、高エネルギーイオン励起 MHD 不安定性による高エネルギーイオン輸送・損失、三次元 RMP 磁場印加時における高エネルギーイオンの挙動に着目した実験研究を日中韓の連携の下、EAST、KSTAR 及び LHD の各装置で実施する。高エネルギーイオン測定器として役割を果たす NFM からのデータ、中性子発生分布、中性子揺動計測データも併せて活用する。また、将来の D-T プラズマにおけるアルファ粒子の閉じ込め予測に向け、高エネルギー MeV 級イオンの閉じ込め検証に向けた共同研究も同時に実施する。KSTAR 装置では、MeV 級イオンの閉じ込め研究のため、放射化箔システム (NAS) によるトリトン燃焼中性子計測が行われている。LHD 装置においても既に NAS によりトリトン燃焼中性子が確認されており、EAST 装置では NAS が整備されつつある。日中韓共同で MeV 級イオンの閉じ込めに関する連携研究を進める。

**R-5 (カテゴリーIV) :**

R-5 (カテゴリーIV) は、高性能プラズマの定常保持に必要な

- (1) プラズマの巨視的安定性と微視的乱流輸送
- (2) 高エネルギー粒子の閉じ込め
- (3) ダイバータプラズマの物理特性に関する理論・シミュレーション研究

を日中韓の三研究拠点を中心とした協力により推進している。最終年度である平成 29 年度には、これまで以上に実験部門との協力関係の構築を意識して、共同研究を進める。(1) については、カテゴリーI 及びカテゴリーIIb のコアプラズマでの巨視的安定性・乱流輸送や周辺プラズマでの MHD 乱流等との協力研究を進める。(2) については、カテゴリーIII の環状プラズマ実験での高エネルギーイオンの閉じ込め研究とこれまで以上に連携を密にして協力研究を進める。世界最先端の実績を有するシミュレーション研究をトカマク型 EAST 装置に適用し、ヘリカル型 LHD 装置との比較研究を理論面での研究を進展させる。(3) については、カテゴリーIIa の周辺プラズマ輸送研究で得られた実験結果を基により深い連携を模索する。そのために、ASIPP 及び大連理工大学と協力して、LHD 装置や EAST 装置などの周辺プラズマモデリングやプラズマ壁相互作用に関する共同研究を実施する。

**<若手研究者育成>**

平成 28 年度に外部資金(さくらサイエンスプラン)を利用して核融合科学研究所に滞在した合計 20 余名の中国科学技術大学・大学院との研究連携を更に密にし、学位論文等の指導を中国側責任者と協同して推進する。学位論文作成のために、中国・等離子体物理研究所(ASIPP)に総研大に所属している博士課程学生を派遣する。中国・科学技術大学・大学院博士課程学生を3か月間、核融合科学研究所で受入れ、LHD 装置で実験を行うことにより、論文作成に貢献する。中国・西南物理研究所・大連理工大学・等離子体物理研究所や韓国・核融合研究所・蔚山科学技術大学の若手研究者を受け入れ、また、日本からは中国・等離子体物理研究所・西南物理研究所等に若手研究者を派遣する。セミナー開催時には積極的に若手研究者を参加させ、口頭発表や論文発表の機会を与えると共にシニア研究者との積極的な交流を行う。

**R-1 (カテゴリーI) :**

日中韓の大学に在学する大学院生や若手研究者の派遣に特に留意して共同研究を実施することにより若手研究者の育成に努める。また、セミナー開催時には本カテゴリーの研究に携わる日中韓の大学院生を積極的に参加させ、英語での口頭発表やプロシーディング論文の作成を通してより研究者として必要な技術を身に着けさせることにより世界で活躍できる研究者育成を目指す。

**R-2 (カテゴリーIIa) :**

日本・核融合科学研究所において中国・韓国からの博士課程学生の育成に努める。平成 29 年度に日本で開催予定のセミナーに周辺不純物輸送やプラズマ壁相互作用関係の大学院学生、ポストドク学生及び若手研究者を参加させ、国際的に通用する研究者育成に努める。平成 28 年度には本共同研究（周辺プラズマ輸送）を中心的に遂行していた総研大・中国人大学院生が、等離子体物理研究所（ASIPP, 中国・合肥）にて研究者として職を得て研究を開始し、平成 29 年度には同じく本共同研究（不純物蓄積）を中心的に遂行している核融合科学研究所・中国人ポストドク研究員が西南物理研究所（SWIP, 中国・成都）で研究者として研究を開始する予定になっている。日中の若手研究者間の橋渡し役が期待できる。

**R-3 (カテゴリーIIb) :**

中国・ASIPP の中国人大学院生を 2 名日本に滞在させ、MHD 平衡及び MHD 不安定性の解析を行う。また、総合研究大学院大学の博士課程に所属する日本人大学院学生を中国に派遣し、MHD 不安定性研究に必要な計測器開発に従事させる。博士課程の大学院生に対して相互訪問を原則として相互補完教育を実践することにより、継続した若手研究者の育成を進める。

**R-4 (カテゴリーIII) :**

日本から KSTAR 装置（韓国）や EAST 装置（中国）へ若手研究者を派遣し、FILD・中性子計測データに基づく高エネルギーイオンの挙動解析及び高エネルギーイオン軌道計算等を実施する。更に、高エネルギーイオンの径方向輸送を調べる上で重要な役割を果たす中性子分布計測システムの改良、FILD の更なる高性能化を行う。また、当該計測・物理に関わる韓国・中国の若手研究者の受入を予定している。

**R-5 (カテゴリーIV) :**

中韓の研究者派遣先において大学院生をはじめとする若手研究者を対象とした講義や研究に関する議論を行って若手研究者の育成に貢献する。日本から若手研究者を中韓に派遣するとともに中韓の若手研究者を日本に受け入れて共同研究を推進し、理論・シミュレーション研究における若手研究者のレベルアップを計る。

**<その他（社会貢献や独自の目的等）>**

核融合科学研究所では、毎年秋にオープンキャンパスを実施し、広く一般社会に理科学及び核融合研究の啓蒙・広報活動を行っている。本研究所に滞在している中国・韓国大学院生や COE 研究員にもオープンキャンパスへの参加をお願いしている。また、スーパーサイエンスハイスクール等の事業で来所した高校生等に国際共同研究を通じた外国人研究者との交流を紹介することにより、科学研究への啓蒙活動を行う。日本人研究者が中国・韓国に滞在し共同研究を行う機会を利用して相手国側研究機関の近隣大学で積極的に講義を持つことを奨励する。



**R-1 (カテゴリーI) :**

中国や韓国で共同研究を実施する際に近隣の大学で講義を行い、一般学生に核融合研究の重要性を啓蒙する。また、本共同研究で進めている研究課題は、太陽表面で生じる磁気再結合での不安定性の成長・飽和現象と物理的に深い関連がある。本共同研究で得られる知見と自然科学との関係についても言及し、一般市民に自然科学研究の面白さを伝える。

**R-2 (カテゴリーIIa) :**

中国で共同研究を行う際には、併せて学生に向けた核融合・プラズマ物理の講義を行う。本カテゴリーでは共同研究の一つとして EUV 分光計測システムに真空中で稼働する真空紫外用 CCD 検出器を用いている。分光器には迷光や高次光の少ないホログラフィック回折格子を使用し、高波長分解能で且つ高空間分解を有する分光システムを完成させている。ここで開発している装置は科学用 CCD 検出器開発の世界のトップメーカーである Andor 社のウェブサイト

([http://www.andor.com/pdfs/literature/Andor\\_High\\_Energy\\_Detection\\_Brochure.pdf](http://www.andor.com/pdfs/literature/Andor_High_Energy_Detection_Brochure.pdf))

や関連する資料集で広く公開されている。日本での研究事情や核融合科学研究所の知名度向上に貢献すると共に一般市民への社会貢献を兼ねる。

**R-3 (カテゴリーIIb) :**

核融合科学研究所が大学院生を対象に開設している総合研究大学院の大学院特別講座枠で、周辺 MHD 揺動の解析に必要な揺動データ解析と画像解析についての講義を継続的に行い、核融合科学研究所に滞在中の留学生に指導を行う。日本のさくらサイエンスプランを利用して来日した学生に対しても継続して指導を行う。

**R-4 (カテゴリーIII) :**

中国・韓国への研究者派遣時に若手研究者並びに学生を対象とした核融合科学に係る講義を実施する。日本の核融合開発戦略や先端科学施設、及び総合研究大学院大学の紹介も同時に行う。また、フリートークの時間を設けることにより、研究に向かう姿勢等、精神的な面を含め膝を突き合わせて議論し、学生の核融合科学研究所を基盤とする総合研究大学院大学物理科学研究科核融合科学専攻への進学を促す。

**R-5 (カテゴリーIV) :**

世界最先端のスーパーコンピュータの紹介とそれを用いたコンピュータシミュレーションを一般人にも容易に理解できる平易な解説を核融合科学研究所のウェブサイト等で公開し、社会へ広く啓蒙する。

**5-2. 全期間を通じた研究交流目標**

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トーラス型プラズマ閉じ込め装置（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，韓国・国立核融合研究所（NFRI）・KSTAR 装置）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，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 カ国間を横断する学術的研究交流基盤を構築する。3 カ国で稼動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研究所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。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 カ国の超伝導プラズマ閉じ込め装置を共同研究の中心とし，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。

#### 目標に対する達成度とその理由

- 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】

5 年間の A3 事業を通して日中韓の間に緊密な人的ネットワークを構築することができた。ネットワーク構築には共同研究・研究交流だけではなく，多数回開催した A3 セミナーが大きく貢献した。現在の核融合研究に必要な定常放電（カテゴリー I），不純物制御（カテゴリー IIa），ダイバータ熱制御（カテゴリー IIb），高エネルギーイオン輸送（カテゴリー III）及びそれらの理論的解析（カテゴリー IV）について，論文出版を初めとして多くの共同研究成果を挙げる事ができた。特に，EAST 装置での長時間放電におけるタングステン不純物制御，KSTAR 装置の低誤差磁場下での RMP コイルを用いた ELM 制御，LHD 装置で高エネルギーイオン励起 MHD 揺動及び LHD 及びトカマク配位での高エネルギーイオン輸送の理論的解析に於いては世界的な成果を得ることができた。また，日中韓大学院生の博士課程教育（日本・総研大，韓国・UNIST，中国・USTC）や若手研究者の育成にも大きな成果があった。A3 事業の共同研究を実際に遂行した若手研

研究者や大学院生は、現在 LHD・KSTAR・EAST・HL-2A の各装置で中心的な役割を担いつつある。一部の若手研究者は准教授としてグループリーダーを務めている。

以上の成果により、各拠点機関の日中韓協力への理解と併せ、日中韓の拠点機関もしくは核融合研究者間の関係がこれまで以上により親密になった。これが、中国でのヘリカル装置建設、日中韓での核反応計測の一体化、HL-2A 装置での不純物輸送研究 5 か年計画、日韓 MHD 乱流共同研究の定例化、A3 事業での「プラズマ壁相互作用」研究の米国・DIII-D 装置を含めた新展開等、当初には予期できなかった成果に結びついた。

## 6. 研究交流成果

### 6-1. 平成 29 年度研究交流成果

(研究協力体制の構築状況、学術面の成果、若手研究者育成、社会貢献や独自の目的等についての平成 29 年度の成果を簡潔に記載してください。なお、交流を通じての相手国からの貢献及び相手国への貢献を含めてください。)

平成 29 年度は、異例の長期間にわたる実験（平成 29 年 2 月 8 日－8 月 3 日）が LHD 装置で行われ、重水素実験も平成 29 年 3 月に開始された。また、重水素実験終了後の 7 月には A3 事業セミナーを開催した（平成 29 年 7 月 11－14 日、札幌）。このため、平成 29 年度（4 月－7 月）は、日程と経費の両面で研究交流を実施する余裕があまりなく、多くの共同研究がメールや A3 セミナー開催時を利用しての実施となった。

一方、本 A3 事業の全体に関わる研究交流を平成 29 年 7 月に核融合科学研究所で実施した。ASIPP・HU 教授（中国側 A3 研究代表者）、Dong 准教授、Wu 副所長が核融合科学研究所に滞在し（平成 29 年 7 月 15－21 日）、日本側研究代表者を含め本 A3 事業後の協力研究のあり方について直接議論した。また、同時期には ASIPP・国際協力課の主任（WU Sha）が核融合科学研究所に滞在し（平成 29 年 7 月 2－16 日）、核融合科学研究所・国際支援係・担当者と共同研究実施等実施時の事務手続きや日中国内でのビザ書類発行に関する手続き等、情報交換を行った。本 A3 事業後の日中協力事業継続に必要な予算処置や公的外部資金獲得等の技術的な作業・問題についても情報交換し、議論した。

#### 6-1-1 研究協力体制の構築状況

##### R-1 (カテゴリー-I) :

中国科学技術大学 (USTC) の逆転磁場ピンチ実験装置 KTX において、Wandong Liu 教授とプラズマ高性能化に向けた共同研究を継続した。また、等離子体物理研究所・EAST 装置及び国立核融合研究所・KSTAR 装置の MHD グループと LHD 装置の MHD グループとの間で、トカマク型装置とヘリカル型装置で観測されるロックトモードの比較研究を継続した。同時に

次回 IAEA 核融合エネルギー会議（2018 年 10 月・インド）に向け、共同発表の可能性について検討を開始した。また、EAST 装置ではタングステンダストにより、LHD 装置ではカーボンダストにより長時間放電が停止する様子が観測されている。そこで、定常プラズマを阻害する重要な要因として挙げられているダストの問題について、共同研究を開始した。

## **R-2 (カテゴリーIIa) :**

ITER 核燃焼実験炉と同じタングステンダイバータを装着した等離子体物理研究所 (ASIPP)・EAST 装置を用いて、Zhang 准教授、Wu 教授、及び大学院生 (Huang, Xu 博士課程学生等) を中心とする分光研究グループと核融合科学研究所 (NIFS) の分光研究グループとの間で共同研究を継続した。特に、EAST 装置での ECH 加熱を用いたタングステン不純物制御について電子メールを利用して詳細に議論した。また、3 台目の分光器による 50-500 Å 領域での 100ms 毎の空間分布計測が完成し、今春から 7 月末まで継続している EAST 実験において、鉄やタングステンをはじめとする金属不純物スペクトルの空間分布データを継続的に取得した。ASIPP の Hu 教授及び Dong 准教授が 7 月に核融合科学研究所を訪問し、共同研究を実施した。Zhang 准教授も 6 月に核融合科学研究所を訪問し、LHD 装置で共同研究を実施する予定であったが、個人的な理由で延期になり、今秋 (11 月頃) 実施することにした。これに合わせて核融合科学研究所分光グループが参加して行う EAST 装置での共同研究も今秋以降に延期した (外部資金利用予定)。また、西南物理研究所 (SWIP)・HL-2A 装置を用いたコアプラズマの不純物輸送について、Cui 教授、Dong 准教授及びその大学院生 (Zhang 博士課程学生等) を中心とするグループと共同研究を継続した。7 月に日本で開催された A3 セミナーの際に、Cui 教授と HL-2A 装置での不純物輸送解析結果について議論した。Dong 准教授は 7 月に核融合科学研究所に滞在する予定であったが、SWIP 側の事情により 8 月に滞在を延期し、LHD 実験データの解析や HL-2A 装置での次期 EUV 分光器の設置準備を中心に共同研究を本事業経費以外の経費で実施する予定にした。

プラズマ壁相互作用 (PWI) グループは本 A3 事業の開始と共に日中韓の関係者で計画立案を行い、LHD 装置をはじめ、EAST 装置 (ASIPP・中国) 及び KSTAR 装置 (NFRI・韓国) でタングステン材料を中心としたプラズマ照射実験を実施してきた。共同研究の実施にあたっては、共通の研究基盤が得られるよう照射対象材料を 3 カ国間で共通化した。特にタングステン堆積膜は九州大学 (日本)、中国科学院蘭州化学物理研究所 (中国) で成膜し、材料の詳細分析は核融合科学研究所 (日本)、プラズマ照射は EAST 装置 (中国) 及び KSTAR 装置 (韓国) で実施するという役割分担を明確にしている。平成 29 年度は追加実験として KSTAR 装置の異なった場所 (第一壁とダイバータ部) での同時照射実験を実施した。平成 29 年度から KSTAR 装置でのプラズマ生成は常温の壁温度から高温壁 (150 度) 放電に変更されており、第一壁では高温壁での特性評価を目的とした。平成 28 年度のダイバータ部照射ではプラズマとの位置調整に少し誤差があった。そこで、今年度の実験前には、芦川 (核融合研) と E. N. Bang (NFRI) が試料搬送装置の動作領域と照射領域について再度入念に確認作業を行った。首尾よく正確なデータを取得することに成功した。更に平成 29 年 7

月には、EAST 装置・タングステンダイバータ配位でのダイナミックリテンションに関する追加実験を実施した。ASIPP・Y. W. Yu と共同でプラズマ実験を実施し、解析に必要なデータを取得した。EAST 装置ではリチウム壁コーティング実験を行っている為、リチウムによる水素蓄積効果評価を目的とした材料照射実験を M. Z. Zhao (ASIPP) と共同で実施した。日中韓での共同研究体制を更に発展させ、研究グループ間でのより建設的な研究協力に向け今後も連携を進展させる。

機器の故障により運転を停止していた電気通信大学の高エネルギー・高磁場 EBIT 装置 (Tokyo-EBIT) の復旧が平成 29 年 3 月に完了し、高密度電子ビームの引出しとネオン様タングステンイオンからの X 線の観測に成功した。復旦大学 (中国) でも同型の高エネルギー EBIT を用いた研究が行われており、ITER の中心プラズマで生成されるような高価数のタングステン多価イオンの発光スペクトル、二電子性再結合、磁気双極子禁制線 (M1) 発光寿命の測定など、今後の共同研究課題の選択幅を大きく広げることができた。また、本 A3 事業を通して研究協力してきた中国・西北師範大学での永久磁石を用いた新たな小型 EBIT 装置の開発も進展しており、核融合科学研究所・CoBIT 装置を含め、EBIT 装置を用いた重元素多価イオン分光に関する共同研究の更なる発展に向け、研究環境が充実してきた。低価数のタングステンイオン発光スペクトルデータの取得やプラズマ壁相互作用への応用のために、国立核融合研究所 (NFRI・韓国) の研究者とタングステン材料のイオンスパッタリングに関して共同研究を進めているが、使用予定の大強度イオン源装置 (核融合科学研究所) の不具合の発生により、共同研究の実施時期を平成 30 年 1 月以降に遅らせた。

### **R-3 (カテゴリー-IIb) :**

プラズマ周辺部で不安定となる MHD 揺動やその制御に有効と考えられている外部摂動磁場の振舞いを研究することが本カテゴリーの主要課題である。重水素実験に伴う高中性子場でも測定可能な周辺 MHD 揺動計測用軟 X 線揺動計測器の開発プロジェクトを引き続き進めている。開発している軟 X 線揺動計測器を比較的中性子発生量の少ない EAST トカマク装置に実装して試験した上で、LHD 装置での同計測機器の運用を計画している。EAST 実験に総研大・博士課程学生 (坂東隆宏) が参加し、設置した計測器からデータを取得した。計測器感度が当初見積りより低かったため、軟 X 線入射量を増大させる必要が生じた。若干の設計見直しが必要ではあるが、ITER を代表とする次世代高性能プラズマ放電における強中性子場下でも、ここで開発した軟 X 線揺動計測機器は十分機能を発揮できる確信を得た。本プロジェクトに参加している中国・等離子体物理研究所 (ASIPP) ・博士後期課程在学中の大学院学生 (原毅) を核融合科学研究所に 2 か月滞在させ (平成 29 年 4 月 25 日 - 6 月 30 日)、データ解析手法について直接指導した。

中国・西南物理研究所 (SWIP) では、高速度接線 X 線カメラシステムの開発に関する共同研究を H. Zhou 博士と継続して実施した。設置ポート、ポートからの視線、ポート位置での予想される信号強度、カメラシステム設置スペース等、カメラシステム本体の開発と併せて、検討を進めた。また、四川省・樂山市にある SWIP・樂山研究所にて RIX 線源を用

いて装置の感度試験を実施した。

韓国・国立核融合研究所（NFRI）の KSTAR 装置では、周辺 MHD 揺動や外部摂動磁場によるプラズマ変形を計測目的とした二次元イメージング計測装置の設置に向け準備を継続した。平成 28 年度には、既に一部の補助機器を NFRI に送付済みであったが、平成 29 年度には LHD 装置の軽水素実験時に使用していた計測器本体を EAST 装置へ移設する。平成 29 年度中の KSTAR 装置への実装を目指しており、NFRI の S.G.Lee 博士、KSTAR 装置での軟 X 線計測担当の KAIST・WONHO Choe 教授及び京都大学・山本助教とともに、準備を加速させている。平成 29 年 7 月に日本（札幌）で開催した A3 セミナーで、韓国側と KSTAR 装置に設置するためのポート作業やデータ処理等の準備について詳細な打合せを行った。

#### R-4 (カテゴリーIII) :

日本・LHD 装置（核融合科学研究所）と韓国・KSTAR 装置（国立核融合研究所）において、14MeV 中性子を計測し、重水素プラズマでのトリトン燃焼率評価を行った。国立核融合研究所、ソウル国立大学及び核融合科学研究所の 3 機関での連携共同研究として実施した。この共同研究では、総合研究大学院大学（日本）の博士課程学生 PU Neng 氏、ソウル国立大学（韓国）の博士課程学生 JO Jungmin 氏の指導も同時に行った。LHD 装置では、放射化箔システム及びシンチレーティングファイバー（Sci.-Fi.）検出器を駆使し、トリトン燃焼率の磁場強度及び磁場配位依存性を調べている。KSTAR 装置では、放射化箔システムの他、核融合科学研究所のシリコン（Si）半導体検出器を用いて 14MeV 中性子束の時間変化測定を試みたが、Si 半導体検出器では検出効率が低く、目的とするデータ取得が困難だった。そこで、LHD 装置に比して中性子発生量の少ない KSTAR 装置用に大口径 Sci.-Fi. 検出器の開発を進めることを決め、ソウル国立大学・JO Jungmin 氏、核融合科学研究所・小川国大助教等と共同で開発作業に着手した。

高速イオンの損失過程を調べる上でシンチレータ型損失高エネルギーイオンプローブ（FILD）は重要な役割を果たす。中国・EAST 装置（等離子体物理研究所）では、FILD の設計から装置立ち上げまでの全過程を日中共同で進めてきた。EAST 装置での共同研究として平成 28 年度には多数の損失高速イオン束データを取得していた。平成 29 年度には、超音速分子ビーム入射、ペレット入射及び 3 次元共鳴摂動磁場印加時の損失高速イオン束の時間変化について、核融合科学研究所・小川国大助教や等離子体物理研究所・CHANG Jiafeng 博士等と共同でデータ解析を進めた。

高速イオン励起 MHD 不安定性の励起条件を調べるには中性子スペクトロメトリーによる高速イオン速度分布関数の計測が重要となる。そこで、北京大学重イオンビーム研究所の FAN Tieshuan 副所長のグループと共同で LHD 装置用中性子スペクトロメータの開発を行うことで合意し、核融合科学研究所と北京大学の間で国際学術交流協定の締結を行った。

#### R-5 (カテゴリーIV) :

核融合科学研究所（NIFS）と中国・等離子体物理研究所との研究交流では、XIANG Nong 教授のグループと EAST 装置におけるフィッシュボーン不安定性のシミュレーションに関する共同研究を進めるとともに、LUO Guangnan 教授のグループと EAST 装置および PREFACE 装置のプラズマモデリング研究、EAST 装置および KSTAR 装置のプラズマ壁相互作用研究を進めた。NIFS と大連理工大学との研究交流では、WANG Dezhen 教授のグループとの協力により EMC3-EIRENE コードに関する共同研究を進めた。

京都大学と中国・西南物理研究所の間における共同研究では、HL-2A 装置における実験パラメータを用いて大域的ジャイロ運動論シミュレーションを行い、主要な微視的不安定モードの特定を行った。京都大学と韓国・国立核融合研究所の間における研究では、7 月に KIM Jinyong 博士と JHANG Hogun 博士が京都大学を訪問し、イオン温度勾配モード/捕捉電子モードに対するプラズマパラメータ依存性に関する議論を行った。

### 6-1-2 学術面の成果

平成 29 年 12 月 5-8 日に予定で、日本・土岐市で開催される第 11 回アジアプラズマ核融合会議・第 26 回土岐国際会議にて、本 A3 事業を柱とするアジア地域での核融合研究とその国際共同研究成果がプレナリートークとして招待講演されることになった。「Fusion research and international collaboration in Asian region」として、日本側研究代表者（森田繁）が口頭発表する。

#### R-1 (カテゴリー-I) :

トカマク装置では誤差磁場等に起因して、突然のプラズマ回転の停止と磁気島の成長により、放電が崩壊する現象は良く知られている。一方、ヘリカル型の LHD 装置でもプラズマ中で回転している交換型不安定性が停止する直前に磁気島構造に変化する様子が明らかになりつつある。交換型不安定性がトカマクと同様の磁場構造（磁気島）に変質し、プラズマ回転の停止後大きく成長する。プラズマ放電は崩壊には至らないものの、プラズマ中の全エネルギーの半分程度が失われる。従って、トカマクと同様、LHD 装置でも MHD モードの回転を制御できれば、プラズマ不安定領域においても安定な放電を維持できる。今回の成果を電流駆動されたトカマク放電等の安定性に向けた議論に展開する。

一方、プラズマダストは、放電時間が長くなるにしたがって深刻な問題を提起する。EAST 装置や LHD 装置では最近、放電中に多量のダイバータ材料に起因したダストが発生している様子が観測された。長時間放電を阻害する明らかな要因となっている。これを受けて KSTAR 装置では、プラズマ中にタングステンパウダー（粉）を入射し、ダストの影響を確認する実験を開始した。日中韓でこれらダストの長時間放電に対する影響を実験的に調べることは、ITER での長時間放電に向けた貴重な実験データとなる。

#### R-2 (カテゴリー-IIa) :

EAST 装置での長時間放電中に ECH 加熱を行うことにより、効率的にプラズマ中心でのタングステン不純物蓄積が抑制できることを、本共同研究を基にして初めて実験的に示すことに成功した。実験結果をまとめ、Nuclear Fusion 誌へ投稿すべく準備を進めた。また、速報結果を米国物理学会・プラズマ分科会（米国・ウィスコンシン・2017 年 10 月 23 日－27 日）で発表すべく、アブストラクトを投稿し、口頭発表として採択された。同様にプラズマ電流を駆動する LHCD を用いた放電でも、タングステン不純物の抑制を観測しており、結果は Nuclear Materials and Energy 誌に掲載予定になっている。共同研究の枠組みを利用して、大学院生 (Xu) の博士論文の主論文の論文内容や図面について議論、検討を進め、HL-2A 装置の輸送コードを用いた不純物量の定量化に関する論文をまとめ、共同研究成果として Nuclear Fusion 誌に投稿した。HL-2A 装置では、コアプラズマの不純物輸送への MHD 揺動の影響について、図面の検討・原稿の作成を進め、8 月には Nuclear Fusion 誌へ投稿予定にしている。また、低電離タングステン ( $W^{6+}$ ) スペクトルとそのイオンのダイバータ部での振舞いについて、若手研究者 (C. F. Dong) とデータ解析を継続した。C. F. Dong 氏は平成 29 年 8 月に核融合科学研究所を訪問予定にしており、その際に Nuclear Fusion 誌への投稿論文を目指し、図面・英語表現等の議論・検討を進める計画にしている。一方、LHD 装置では、磁力線に平行方向の輸送が支配的となるエルゴディック層における不純物輸送について、RMP コイル印加によってトリガーされるデッタチプラズマの磁気島生成と不純物分布形成機構の関連を含め、研究が進んだ。結果は Physics of Plasmas 誌に共同研究成果として公表された。また、コアプラズマの不純物輸送を鉄不純物について解析し、密度分布を変化させることにより、対流輸送を制御できることが分かった。結果を Nuclear Fusion 誌に公表した。

EAST・KSTAR 装置において、タングステン材料を中心にプラズマ照射による水素同位体変化に関する共同研究を継続した。KSTAR 装置では 6 月に高熱負荷ダイバータ部での材料照射実験を行い、首尾よくデータ取得に成功した。タングステンとの比較の為、金属材料としてモリブデンを併用した。水素蓄積の試料深さ方向分析に関するデータ結果では、1 回のプラズマ照射に相当する 18 秒間に、水素の蓄積・脱離の同時進行を示唆する非常に重要な結果を得た。プラズマによる材料温度上昇とそれに伴う材料中水素の拡散増加が要因と考察している。1 回の材料照射による水素拡散率変化の評価は世界的にも新しい結果であるため、速報を Plasma and Fusion Research 誌・Rapid communications へ投稿した。今後同時に照射したタングステン試料の分析も日本・中国で行う。平成 28 年度に KSTAR 装置で実施した真空容器第一壁タングステン堆積膜の水素リテンションに関する共同研究成果は ICFRM 国際会議（平成 29 年 11 月、青森）でポスター発表として採択された。EAST 装置では、タングステンダイバータ配位での静的リテンションに関する共同実験を実施した。100 秒以上の定常プラズマ維持を目指す EAST 装置では、壁リサイクリングの定量評価は非常に重要な課題の一つである。異なる入射パワーによる放電時に燃料ガスを停止した後の電子密度の減衰時間を解析した。加熱パワーがより高い放電ではより長い密度減衰時間が得られた。リサイクリングの変化は周辺プラズマでの高エネルギー粒子生成と第一壁との相互



作用に起因する。EAST 装置でも加熱入力の異なる放電ではダイバータへの粒子束が顕著に変化する。壁リサイクリングの物理機構のより深い理解のため、詳細な解析を日本・中国 (ASIPP) で継続して行い、結果を論文投稿する予定にしている。EAST 装置で得たタングステンへの水素蓄積に関する共同研究成果については、Nuclear Materials and Energy 誌での論文掲載が決定した。

西北師範大学 (中国) と進めているタングステン多価イオン原子過程の理論面での共同研究の学術的成果を 3 編の論文として公表した (J. Phys. B 誌, Eur. Phys. J. D 誌, Atomic Data and Nuclear Data Tables 誌)。また、電気通信大学の小型電子ビームイオントラップ (CoBIT) で測定された低価数タングステンイオン ( $W^{7+}$ - $W^{13+}$ ) 発光スペクトルの構造はこれまで正確には解明されていなかったが、発光スペクトル理論計算の高精度化によりほぼ解明することができた。タングステン多価イオン発光スペクトルに関する共同研究として大きな成果を挙げることができた。結果を原子物理分野最大の国際会議の一つである International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (オーストラリア, 平成 29 年 7 月 26 日~8 月 1 日) において、特別講演として発表した。LHD 装置 (核融合科学研究所) で観測されたタングステン多価イオンの禁制線 (M1) スペクトルの理論解析を更に進め、プラズマ中のタングステン原子過程データの大きな不確定性をより小さくするための検証が可能となった。本成果を Plasma Conference 2017 (PLASMA2017, 平成 29 年 11 月・姫路) の招待講演として公表する。

### **R-3 (カテゴリー-IIb) :**

周辺局在化モード (ELM) を安定化する効果が期待される外部摂動磁場と周辺プラズマとの相互作用に関する共同研究を継続して実施した。LHD 装置では高速粒子が駆動する EIC と呼ばれる MHD 揺動を外部摂動磁場により安定化する実験を共同研究として行った。トカマク装置で観測される ELM 振動の高次モードに関する解析が行われ、特に KSTAR 装置ではマイクロ波 2 次元イメージングシステムを用いて詳細な高次モードの空間構造が観測された。これに関連して、LHD プラズマで存在していると思われる高次の MHD モード数の同定を共同研究として行った。ASIPP の博士課程学生 (原毅) が平成 28 年度以前の軟 X 線データを解析したが、明瞭な高次モードを見つけることはできなかった。プラズマ周辺での軟 X 線強度や軟 X 線アレイのチャンネル数や空間分解能等にデータ解析を行う上での不足があった可能性がある。今後、他の計測機器信号を活用して同様の解析を継続し、会議発表・論文投稿を目指す。最終的にはトカマク装置での高次モードとの比較を目指す。

### **R-4 (カテゴリー-III) :**

重水素 (D) プラズマ放電においては、D-D 核融合反応の結果 1 MeV のトリトン (T) が生成される。1 MeV トリトンは速度空間において等方的であり、ラーマー半径や歳差ドリフト周波数等の運動パラメータはアルファ粒子のそれらと近いので、トリトンの挙動を精査することによりアルファ粒子の挙動を評価することができる。トリトンはプラズマ中での減

速過程で僅かながら 2 次核融合反応 (D-T 反応) を起こし, 14MeV 中性子を発生させる. LHD 装置において発生した 14MeV 中性子を放射化箔システム及びシンチレーティングファイバー (Sci.-Fi.) 検出器を用いて 14MeV 中性子を選択的に測定し, トリトンの挙動について研究した. ヘリカルリップル捕捉粒子の閉じ込め性能は磁場配位の磁気軸位置により変化する. そこで, トリトン燃焼率 (DT 中性子発生量/DD 中性子発生量) と磁気軸位置の関係を解析したところ, 磁気軸位置をトーラス大半径内側に移動させた場合, トリトン燃焼率が增大することが判明した. 内寄せの磁気軸位置ではヘリカルリップル捕捉粒子の軌道が磁気面と一致するようになるので, 得られた結果は粒子軌道の改善効果を明瞭に示す. 今回の初期実験結果を中国・上海で開催された 27th IEEE SOFE 国際会議 (Symposium On Fusion Engineering, 平成 28 年 6 月 4-8 日) にて日韓共著の形で口頭発表 (核融合科学研究所・磯部光孝教授) を行い, 併せて論文を投稿した. その後進展した解析結果を総合研究大学院大学の博士課程学生 (PU Neng) が, 日本・札幌で開催された 11th A3 Foresight Program Workshop on Critical Physics Issues Specific to Steady State Sustainment of High-Performance Plasmas (平成 29 年 7 月 11-14 日) にて口頭発表した. また, KSTAR 装置においても放射化箔システムを用いたトリトン燃焼率測定を継続し, 現在解析を進めている. トリトン燃焼率に関する研究を更に進展させるためには, 14MeV 中性子束の時間変化を計測する必要がある. そこで, 中性子発生量の少ない KSTAR 装置用に, 高い検出効率を有する Sci.-Fi. 検出器の開発に着手することを日韓で合意した. 共同研究を継続し, 次年度以降の KSTAR 実験に使用できるよう整備を進めている.

本事業支援により日中韓共同で推進してきた日本・LHD 装置, 韓国・KSTAR 装置, 中国・EAST 装置及び HL-2A 装置におけるシンチレータ型損失高エネルギーイオンプローブ (FILD) の整備, それを用いた損失高速イオン束の測定結果について本事業の成果として纏め, 「Recent Advances of Scintillator-Based Escaping Fast Ion Diagnostics in Toroidal Fusion Plasmas in Japan, Korea, and China」と題して米国の査読付きのジャーナルに論文出版した. また, 5 年間の成果を纏めた内容を, 11th A3 Foresight Program Workshop on Critical Physics Issues Specific to Steady State Sustainment of High-Performance Plasmas (平成 29 年 7 月 11-14 日, 札幌) において, 「Summary of energetic-particle diagnostics and physics collaborations in Japan, Korea, and China for the last five years」と題して日中韓の共同発表の形で口頭発表した (NIFS・磯部光孝). また, 同セミナーでは日韓の共同研究成果を「Research Status of Energetic Particle Physics & Diagnostics in KSTAR」として口頭発表した (韓国・国立核融合研究所・KIM Junghee).

中国・EAST 装置 (等離子体物理研究所) では, 北京大学と共同で立ち上げた中性子スペクトロメータ (TOFED) による中性子スペクトロメトリーを本格的に開始し, LHD 装置においても更に改良した TOFED の共同開発に合意した. 核融合科学研究所と北京大学との共同プロジェクトとしてその設計に着手し, 今後も共同研究を継続することで 3 年後の LHD 実験への設置を目標にした.

**R-5 (カテゴリーIV) :**

核融合科学研究所と中国・等離子体物理研究所との研究交流では、2次元粒子コード PICS2 により、EAST 装置および KSTAR 装置に設置されたダイバータタイル表面の熱負荷を評価した。それら周辺プラズマのモデリングに関して議論を行い、論文投稿に向け準備を進めた。3次元流体コード EMC3-EIRENE を用いた EAST 装置及び PREFACE 装置の周辺プラズマシミュレーションのため、コード計算に必要な実空間メッシュを開発し、理論モデリングの構築に努めた。核融合科学研究所と中国・大連理工大学との研究交流では、EMC3-EIRENE コードの技術的情報に関する情報交換や同コードを用いた周辺プラズマの不純物輸送に関する共同研究を進展させた。

京都大学と中国・西南物理学研究所の間における研究では、HL-2A 装置における実験パラメータを用いた大域的ジャイロ運動論シミュレーションを行った結果、ECRH 入射前後で主要な微視的不安定モードがイオン温度勾配モードから捕捉電子モードに遷移することを確認した。京都大学と韓国・国立核融合研究所 (NFRI) の間における研究では、7月に KIM Jinyong 博士と JHANG Hogun 博士が京都大学を訪問し、イオン温度勾配モード/捕捉電子モードに対するプラズマパラメータ依存性に関する議論を行い、京都大学の大域的ジャイロ運動論コードと NFRI 側の固有値コードでそれぞれ得られた結果の比較を行った。コードの長所と欠点を詳細に検討する良い機会となり、今後の研究交流に向け具体的な研究課題が明瞭になった。

**6-1-3 若手研究者育成**

A3事業セミナーを開催し(札幌, 7月11-14日), 大学院生及びポスドク研究員のための若手研究者セッション (Session 9 & 10: Fostering of young scientists) を設けた。合計14名の若手研究者が英語で口頭発表を行い、質疑応答もこなした。また、中国・USTC・大学院(博士後期課程)2年生・YUAN Yi氏が博士課程研究の一環として核融合科学研究所に3か月間(4月25日-6月30日)滞在し、共同研究としてLHD実験に参加し、データ解析を実施した。博士学位取得のために必要なデータ解析を行うことができた。総研大・博士課程学生・坂東隆宏氏を6月20-24日の5日間、中国・ASIPPに派遣し、EAST実験に参加し、博士学位論文作成のためのデータ取得を行った。

**R-1 (カテゴリーI) :**

A3 事業を通して総合研究大学院大学に入学し、LHD 装置で研究を行っている大学院生や中国・等離子体物理研究所から核融合科学研究所に長期滞在した大学院生に対して、MHD 平衡や不安定性に関する教育指導を行った。

**R-2 (カテゴリーIIa) :**

A3 セミナーの若手研究者セッションに総研大・大学院生一名(劉洋), NIFS・ポスドク

研究員 1 名（黄賢礼）を派遣した。

**R-3（カテゴリーIIb）：**

2次元 VUV カメラシステムについて共同研究を実施している ASIPP の Hu 教授のグループから核融合科学研究所に長期派遣（平成 29 年 4-6 月）された 1 名の大学院生（原毅）の学生指導を行った。得られた成果は博士論文の一部になる。

**R-4（カテゴリーIII）：**

A3 事業における共同研究活動を基にして中国・等離子体プラズマ物理研究所から総合研究大学院大学博士課程学生に留学している PU Neng 氏及び同大大大学院生・河瀬広樹氏を 7 月 11 日から 14 日にかけて日本・札幌で開催された 11th A3 Foresight Program Workshop on Critical Physics Issues Specific to Steady State Sustainment of High-Performance Plasmas に参加させ、「LHD 装置におけるトリトン燃焼率測定」、「中性子プロファイル測定の初期結果」についてそれぞれ口頭発表する機会を与えた。日中韓の大学院生・若手研究者同士の良い研究交流の機会となった。また、テレビ会議システム等を利用し、ソウル国立大学の博士課程学生 JO Jungmin 氏に KSTAR 装置におけるトリトン燃焼実験に係る研究指導を実施した。

**R-5（カテゴリーIV）：**

核融合科学研究所と中国・等離子体物理研究所（ASIPP）の PICS2 コードを用いた共同研究に参加している ASIPP の若手研究者に研究指導を行った。京都大学と中国・西南物理研究所の共同研究に参加している京都大学の特別研究学生に研究指導を行った。

**6-1-4 その他（社会貢献や独自の目的等）**

**R-1（カテゴリーI）：**

LHD 装置で重水素実験を行うにあたって、プラズマ実験で発生する中性子や自然の放射線量等、近隣住民へ放射線管理について啓蒙活動を行った。

**R-2（カテゴリーIIa）：**

中国・等離子体物理研究所・国際共同研究係の若手職員（WU Sha 氏）を核融合科学研究所に滞在させ（7 月 2-16 日の 15 日間）、核融合科学研究所・国際支援課職員と交流及び情報交換することにより、今後の日中協力事業の事務手付き等に関して相互理解を深めると共に、日本での国際共同研究推進のための取り組みを教示することにより、事務職員の育成に貢献した。

**R-3（カテゴリーIIb）：**

画像解析技法の進展は本共同研究の成果の一つであるが、得られた成果を基に「画像解析技法ワークショップ」を平成 29 年後半に開催する。現在、その準備を進めており、国内外の研究者と議論する予定にしている。

**R-4 (カテゴリーIII) :**

核融合科学研究所を中心に韓国・国立核融合研究所 (NFRI) の若手研究者・大学院生、ソウル国立大学の大学院生、中国・等離子体物理研究所 (ASIPP) の若手研究者、中国・西南物理研究所 (SWIP) の若手研究者、中国・北京大学大学院生、総合研究大学院大学大学院生、名古屋大学大学院生を主体とする研究体制を構築した。東アジアの各国で研究を進める若手研究者が協同で同じ課題に取り組むことで核融合科学の活性化に寄与した。

**R-5 (カテゴリーIV) :**

核融合科学研究所の一般見学コースにおいてバーチャルリアリティ装置を公開し、核融合研究における理論・シミュレーション研究について解説した。

- (1) 平成 29 年度に学術雑誌等に発表した論文・著書 16 本  
うち、相手国参加研究者との共著 11 本
  - (2) 平成 29 年度の国際会議における発表 5 件  
うち、相手国参加研究者との共同発表 2 件
  - (3) 平成 29 年度の国内学会・シンポジウム等における発表 0 件  
うち、相手国参加研究者との共同発表 0 件
- (※ 「本事業名が明記されているもの」を計上・記入してください。)

**6-2. 全期間にわたる研究交流成果**

(1) 研究協力体制の構築状況

- ① 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)

共同研究を物理項目別に 4 つのカテゴリーに分け、日本側拠点機関の実施体制を構築した。各カテゴリーにはコーディネータ及びサブコーディネータを配置した。コーディネータ及びサブコーディネータが国内協力機関との協力体制を構築し、共同研究の調整に努めた。

- 1. カテゴリーI : 閉じ込め磁場配位の定常保持  
(コーディネータ : NIFS・榊原悟)

2. カテゴリーII：周辺及びダイバータプラズマ制御
  - カテゴリーIIa：プラズマエッジ及びダイバータプラズマ輸送  
(コーディネータ：NIFS・森田繁)  
(サブコーディネータ：NIFS・加藤太治, NIFS・芦川直子)
  - カテゴリーIIb：エッジプラズマの安定性  
(コーディネータ：NIFS・大館暁)
3. カテゴリーIII：高エネルギー粒子とバルクプラズマの相互作用  
(コーディネータ：NIFS・磯部光孝)
4. カテゴリーIV：理論・シミュレーション  
(コーディネータ：NIFS・藤堂泰)  
(サブコーディネータ：京大・岸本泰明)

## ② 相手国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・韓国にも上記のカテゴリー枠を設定し、各カテゴリーにコーディネータを設置した。カテゴリー毎に日中韓の間で緊密なネットワークを構築した。また、共同研究を実施する単位でも、それぞれの共同研究に応じた相手側の共同研究キーパーソンを介して人的ネットワークを形成した。また、研究代表者（森田繁）が中国・韓国を共同研究で訪問する際には、各研究機関の長（中国・等離子体研究所所長及び韓国・国立核融合研究所所長）との会合を行い、より強固なネットワークの構築に努めた。5年間のA3事業を通して、合計11回のセミナー及び多数回のワークショップを開催し、同じ相手と意見交換や共同研究実施のための議論・検討を行うことにより、ネットワークが強固なものになった。更に、各拠点機関の長（所長）がお互いの研究所を相互訪問し、研究機関同士の情報交換も活発になった。5年間にわたる以上のネットワーク構築への努力の結果、各研究機関の装置（特にLHD, EAST, HL-2A及びKSTAR）を利用した共同研究はこれまで以上に円滑になり、簡単な電子メールのやり取りのみで共同研究の実施や会合開催が可能となっている。

## ③ 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）

日中韓の拠点機関の管理部にはそれぞれ国際共同研究支援体制が整備されており（核融合科学研究所では国際支援係）、共同研究の実施やセミナー会合の開催時には、管理部を通して派遣者の情報（派遣者名、所属、派遣期間、共同研究の具体的内容、相手側キーパーソン情報等）を決められた書類形式（Visit Proposal）により代表者名でやり取りした。もちろん、派遣に伴う事務手続き等も国際支援係が行った。この結果、派遣交流を派遣側及び受入側の双方で非常に円滑に行えた。また、セミナー・ワークショップ開催時にも必要な事務手続きを含め、全面的な支援体制を構築できた。

## (2) 学術面の成果

## カテゴリーI:

5年間のA3共同研究期間中に日中韓の3装置では長時間放電に関して大きな進展を得た。LHD装置(日本・核融合科学研究所)では、これまでのICRF加熱を用いた低密度( $n_e < 1 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ )1時間放電に加え、入射電気出力を増大することにより、10秒-1分程度の長時間放電を高密度領域( $n_e \sim 2-3 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ )で達成した。放電時間は周辺粒子、H/He比及びアンテナ近傍で負荷抵抗等の振舞いによって左右される。もちろん、アンテナの温度制御を含めた熱負荷制御は特に重要であった。最近ではECHの加熱電気出力の増大より、ECH加熱での高密度領域長時間放電も試みられている。一方、EAST装置(中国・等離子体物理研究所)・KSTAR装置(韓国・国立核融合研究所)では70秒程度のHモード放電が達成された。EAST装置での長時間放電ではタングステンダイバータを有しており、LHCDの不純物抑制効果によりタングステン不純物を完全に制御することに成功した。また、KSTAR装置の長時間放電では、RMPコイルを用いた長時間ELMバースト制御を達成した。以上の成果は国際核融合炉(ITER)にとっても大きな朗報となった。A3事業研究交流を基盤として、日本側からはEAST・KSTAR装置ではICRF・NBI・ECH等の加熱装置の改良と維持、プラズマ壁相互作用制御、温度・電子密度分布等のプラズマ計測に関して、それら長時間放電の生成に寄与した。トカマクでは高性能プラズマの実現には、 $q$ (安全係数)分布や圧力分布の制御が重要とされている。ごく最近、EAST・KSTAR装置では、LHCDやカウンターNBI入射を使用して電流分布制御実験を開始した。KSTAR装置では逆転磁場シアアの形成には成功したが、内部輸送障壁(ITB)の形成には至っていない。LHDのITB放電と比較した結果、更に強力なイオン加熱が必要なのかもしれない。今後も共同研究を継続し、ITB形成の物理機構に関して共通の理解に努める。

一方、EAST及びKSTARトカマク装置では定常放電を妨げる共通の課題としてロックトモードが挙げられる。ロックトモードはプラズマ流の低下と共にモード回転が停止し、その直後にプラズマ放電の崩壊をもたらす回避すべきMHD不安定性である。LHD装置でも、交換型不安定性の回転停止に伴う崩壊現象が観測され、現象的にはトカマクで観測されるロックトモードと酷似している。ITERにおけるロックトモードでは、プラズマ回転停止の原因の一つとして誤差磁場の影響が予測されている。平成26年にはLHD、EAST及びKSTARの3装置で共鳴摂動磁場コイルを設置し、誤差磁場強度の正確な評価を終了した。誤差磁場強度および不安定性が発現する閾値について3装置の間で定量的な評価を行うことが可能となった。

LHDでの交換型不安定性は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。従って交換型不安定性は線形理論の枠組みでは磁気島構造を形成しないことが知られているが、プラズマ中で回転している不安定性が停止する直前に交換型不安定性が磁気島構造に変化することがLHD実験で明らかになった。これはティアリン

グモード不安定性に対して本来安定なヘリカルプラズマが、ある条件下では交換型不安定性がティアリング化（磁気島化）し、トカマクで観測されるロックドモードに変質することを示唆している。プラズマの抵抗率の勾配の条件によって交換型構造がティアリング構造に変化している可能性がある。しかし、プラズマ崩壊には至らず、エネルギー損失はプラズマが有するエネルギーの約 50%に留まることが判明した。共同研究を通して明らかになったこれらの実験事実は、ヘリカルプラズマでは、MHD モードの回転を外的に制御することにより不安定性が予測されるプラズマ領域においても制御可能であることを示唆している。LHD での回転の減速・停止がトカマクで観測されるような抵抗壁効果や外部摂動磁場（誤差磁場）によるものではなく、不安定性の成長に伴う径方向摂動磁場の増大および圧力分布平坦化に伴う反磁性回転の低下による可能性が高いことが共同研究を通して明らかになった。また、EAST・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との比較研究を共同研究として進めた。モード回転に着目して解析を行った結果、ティアリングモードについてはイオントロイダル流と電子反磁性流の和、交換型モードについてはほぼ電子反磁性流によって決定されることが明らかになった。誤差磁場の少ない KSTAR 装置での共同研究の結果、ELM バースト抑制のために大きな  $n=1$  共鳴非軸対称磁場を印加してもロックドモードを制御できることが分かった。トカマク装置ではロックドモードが生じる実験則は確立されつつあるが、その物理的背景は完全には解明されていない。一方、LHD ではモード回転周波数の低下と誤差磁場強度の関係は未だ実験的にも明らかになっていない。共同研究の結果得られたこれらの成果は、今後の更なる共同研究を通して、ロックドモードのより深い理解につながることを期待される。

一方、プラズマダストは、放電時間が長くなるにしたがって深刻な問題を提起する。EAST 装置や LHD 装置では最近、放電中に多量のダイバータ材料に起因したダストが発生している様子が観測された。長時間放電を阻害する明らか目の要因となっている。これを受けて KSTAR 装置では、プラズマ中にタングステンパウダー（粉）を入射し、ダストの影響を確認する実験を開始した。日中韓でこれらダストの長時間放電に対する影響を実験的に調べることは、ITER での長時間放電に向けた貴重な実験データとなる。今後の共同研究の進展が期待される。

#### カテゴリーIIa :

中国・EAST トカマク装置では ITER のための実証実験としてタングステンダイバータ配位構築を進めていたが、平成 26 年に上側タングステンダイバータを完成させた。タングステン不純物の振舞いを調べるため、EUV 分光に関する共同研究を Zhang 准教授・Wu 教授を中心とするグループと開始した。平成 25 年には、日本から EUV 分光器を輸出し、日本側の指導の下、EAST での分光器設置ポートの選定、取付ポートの製作を完了し、EUV 分光システム動作試験及び真空排気システム動作試験を終了した。これと並行して EUV 領域のタングステンスペクトルの実験解析とモデリングを開始した。そのため、LHD でタングステンペレット入射を行い、共同研究を実施し、データを協同して解析した。理論モデリングには内



殻衝突励起の効果を含めることにより、これまで説明できていなかったタングステンスペクトルを定性的にはあるがおおよそ理解できるようになった。平成 16 年から EAST 装置で本格的にデータ生産を始めた。EAST と LHD のタングステンスペクトルを比較検討した結果、同様のタングステン価数分布からスペクトルが構成されていることが判明した。これは EAST と LHD の電子温度がほぼ同じ領域にあることを意味している。LHD で観測されているタングステンスペクトルの理解はかなり進んでおり、EAST のタングステンスペクトルの解析に LHD での経験を活用することができ、非常に効率的な共同研の実施が可能になった。具体的には  $W^{44+}$  及び  $W^{45+}$  イオンが発光しており、不純物輸送コードと組み合わせることにより、コアプラズマのタングステンイオンの定量的解析を行った。

EAST での順調な共同研究の進展を受けて、平成 27 年には、新たに短波長用 EUV 分光器及び空間分計測用 EUV 分光器を日本から輸出した。ポート作業等を共同で行い、空間分布計測システムを整備することができ、LHD と同様の体制が整った。同時に、EAST 装置でのタングステン不純物蓄積抑制に向けた共同研究を開始した。データ解析を通して、低域混成波 (LHW) を用いた電流駆動・加熱実験時にタングステン不純物が抑制されることを発見した。同様の現象は共鳴摂動磁場 (RMP) の印加時や電子サイクロトロン加熱 (ECH) 時にも観測されることが分かった。LHW や RMP 時にはプラズマ周辺磁場の変形により不純物遮蔽効果が増大し、タングステンの流入束が減少すること、また、ECH 加熱では密度・温度・電場等の分布形状変化により不純物輸送が変化したことが原因として挙げられる。平成 29 年には、タングステン不純物抑制の結果、100 秒を超える H モードを伴った非誘導電流駆動放電の実現に至った。これら一連の実験結果は EAST 装置での最大のハイライトとなり、共同研究として非常に大きな成果と評価を得た。以上の結果をプラズマ・壁相互作用国際会議 (2016 年)、IAEA 核融合エネルギー会議 (2016 年)、米国物理学会プラズマ分科会 (APS) 会議 (2017 年) 等で発表もしくは発表予定にしている。併せて論文発表も行いつつある。LHD では炭素ダイバータを用いているためタングステン観測には不純物ペレット入射を行う必要があり、利用できるマシンタイムが非常に制限される。これに対して、EAST 装置では常時タングステンスペクトルが観測されており、日本側のタングステンスペクトル・輸送研究にとって、EAST のデータは非常に貴重な存在になっている。平成 28 年度から LHD・EAST 共同でタングステンの輸送解析を開始した。今後、作業を継続する。

中国・西南物理研究所・HL-2A 装置においても、Cui 教授・Dong 准教授を中心とする分光グループと不純物輸送に関する共同研究及び研究交流を開始した。EAST 装置同様、A3 事業の 5 年間に、EUV 分光器 3 台を日本から輸出し、日本側の指導の下、2 台 (スペクトル観測用及び空間分布用) を HL-2A 装置に設置した。残りの 1 台 (短波長用) については、今後共同研究を継続し、設置ポート整備や較正実験等を進めていく予定にしている。平成 25 年後半から初期データを取得することができ、HL-2A トカマクのリミター、ダイバータ及びバップル配位での不純物挙動の違いについて共同研究した。ダイバータ配位では明らかにコアプラズマに流入する不純物束が減少しており、スクレープオフ層の開磁力線に沿った不純物輸送に明確な違いが認められ、不純物-バルクイオン間に働く摩擦力が重要な役割を

果たしていることが分かった。また、3次元シミュレーションコード解析から炭素ダイバータを起源とする不純物生成機構にバルクイオンの高エネルギー成分や不純物イオン衝突によるスパッタリング率の増大が予測された。結果を IAEA 会議（2014年セントペテルスブルグ）で発表し、NF 誌に公表した。Al 不純物を HL-2A プラズマに入射し、ECH 加熱時に励起される  $m/n=1/1$  モードや鋸歯波と不純物輸送の関係を調べた。オーミック放電ではプラズマ全体にわたって内向きの対流速度が観測され、密度勾配による新古典輸送が支配的であることが分かった。しかし、プラズマ中に MHD 振動が誘起されるとプラズマ中心では大きな外向きの対流速度が観測され、乱流輸送の可能性が示唆された。残念ながらイオン温度分布が計測されておらず、プラズマ中心での温度勾配による新古典輸送の寄与を正確には解析できていない。結果を IAEA 会議（2016年京都）で発表し、現在 NF 誌投稿中である。この他にも計測機器の開発を含め、多くの研究成果が共同研究として得られた。特に、 $W^{6+}$ 等の低電離のタングステンイオンの EUV 波長領域での発見は特筆すべきものであった。これを利用して、ダイバータから主プラズマに流入するタングステン粒子束を求めることが可能になる。可視分光で計測されるタングステンスペクトルは通常中性タングステン原子であり、ダイバータ付近に局在しており、主プラズマへの流入束を評価できない。ITER で装置のタングステン流入束が計測できれば、タングステン輸送に関する研究のみならず放電の安定維持という観点からも非常に重要な運転指標となる。結果の論文公表に向け、準備を進めている。また、得られた結果を LHD 装置で検証すべく、共同研究を継続している。

プラズマ壁相互作用 (PWI) 研究では、中国・ASIPP の Luo 教授及び J. S. Hu 教授を中心とする 2 グループ、韓国・NFRI の Hong 教授を中心とするグループと共同研究・研究交流を実施した。日本・中国側で主に研究試料を準備し、それを EAST・KSTAR の各装置内に設置しプラズマに曝露させた後、試料をプラズマ装置より取り出し日本に持ち帰り、主に核融合科学研究所所有の分析装置を用いて共同で解析する研究体制を構築した。日本（核融合科学研究所等）における表面分析機器等の研究環境が中国・韓国と比べて進んでおり、本共同研究を通じて中国・韓国研究者の分析技術の向上にもつながった。まず、中国・EAST 装置で ITER（国際熱核融合実験炉）での活用が予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、日本側研究グループで評価を行った結果、プラズマ曝露後の試料表面にはタングステン、リチウム、炭素等の再堆積層がほぼ存在しないことが分かった。評価対象であるタングステン堆積層への重水素リテンションを評価する上で適切な実験条件であることが分かった。平成 27 年からは、同様の研究手法を用いて水素同位体蓄積量や水素リテンションの評価を行うため、日中韓の 3 カ国で共同研究を開始した。タングステン材試料として、ニラコ社・アライドマテリアル社製タングステン材及び中国製 EAST ダイバータ用基板を用いた。装置の特性やフルエンスの違いにより結果が左右されると考えられるので、EAST・KSTAR の装置間比較実験を実施した。3 か国間でのマシンタイムの調整や準備に時間を要したが、平成 29 年にはデータが揃い、解析結果を比較検討できる予定である。先に EAST 装置で得られた結果を解析したところ、タングステン堆積層を含む試料では、堆積層が無いタングステンに比べて水素保持量が約 10 倍高くなる結果を得た。通常のタング

ステン材での水素溶解度は低いですが、材料中の粒界や欠陥が多い場合は水素保持量に大きく寄与する。堆積層における水素捕捉量増加の要因として、1) 表面変質による実効的な表面積増加、2) 堆積物の内部構造の変質(欠陥形成)、3) 酸化物の影響等が考えられる。そこで、X線光電子分光法でタングステン堆積物の酸化状態を分析したところ、表面のみ大気吸着成分による酸化物が形成され、堆積層内部の酸化程度は大変低いことが分かった。通常のタングステン固体材料でも同様の大気吸着による酸化物が表面に形成されることが知られている。従って、今回得られた結果は、タングステンの内部構造や内部欠陥に起因し堆積層中の水素蓄積量が増加したものと結論できる。プラズマ照射後の試料を日本に持ち帰り、重量測定による空孔率評価、透過型電子顕微鏡・X線回折像による構造特性評価、昇温脱離法による重水素蓄積量測定を核融合科学研究所及び九州大学で共同研究として実施した。この結果、水素同位体リテンション量の増加が結晶構造に強く依存することが明らかになった。金属材料でも堆積層では水素同位体蓄積量の増加が報告されているが、原因は明確には解明されていない。本実験を行うことにより初めてリテンション量の増加要因を明らかにした。更に EAST 装置では、レーザーを用いたプラズマ対向壁や真空容器第一壁での水素リテンションの経時変化を観測し始めている。EAST 装置での結果を A3 経費以外の外部資金を用いてプラズマ・壁相互作用国際会議(2016年5月、ローマ)で発表した。また、KSTAR 装置での共同研究成果を ICFRM 国際会議(2017年11月、青森)で発表する。

一方、水素を蓄積したタングステン試料の放電洗浄放電の効果に関する実験も行った。イオンサイクロトロン共鳴加熱(ICH)を用いた放電洗浄実験での試料分析結果では、放電洗浄動作ガスである重水素が試料表面から40nm程度まで拡散していることが明らかになり、この領域での水素同位体置換が期待される。ヘリウムグロー放電では通常タングステンにバブルなどの表面変質をもたらすが、ヘリウム ICH 放電洗浄では表面変質の度合いが低い事を明らかにした。これは温度およびフルエンスがヘリウムバブルの発生領域よりも低いことに起因する。更に、タングステン試料を用いた高熱負荷下でのダイバータ部プラズマ照射実験を KSTAR 装置にて実施した。試料は日本・中国で準備した。データを解析した結果、1回の放電(18秒)で水素の蓄積・脱離の同時進行を示唆するデータが得られた。プラズマ照射効果による試料温度上昇と温度上昇による水素の拡散増加が要因として考えられる。現在、ダイバータプラズマの分布と水素の3次元分布との比較検討を進めている。1回の材料照射により水素拡散が変化する様子を実験で明らかにできる可能性があり、世界初の成果として、速報を Plasma and Fusion Research 誌・Rapid communications へ投稿した。また、これら一連のタングステン堆積層およびバルク試料への水素同位体蓄積のモデル構築も開始した。初期結果は Japanese Journal of Applied Physics 誌で公表される予定である。

壁リテンションについては、動的及び静的応答実験を EAST 装置でマシンタイムを確保した上で実施した。動的応答実験では定量評価の為の燃料ガス間歇入射法として超音速分子ビーム入射(SMBI)を活用し、SMBI 後の電子密度減衰時間を解析した。短 SMBI パルス幅(10ms 及び 20ms) に比べて長パルス幅(30ms) では、ガス入射量が増大するにもかかわらず密度

減衰時間は減少した。短時間では壁リサイクリングは変化しないので、結果には粒子閉じ込め時間が関係していると思われる。静的応答では、プラズマ加熱に起因する高速中性粒子束と第一壁との相互作用に着目し実験を行った。入射パワーが高くなるにつれ、密度減衰時間が長くなった。粒子閉じ込め時間を含む周辺プラズマパラメータの変化が主な要因と推測でき、長時間放電の維持に関して興味深い結果を得た。特に EAST 装置ではリチウム壁コーティングが行われており、水素と化学結合するリチウムが壁リサイクリングに大きな影響を与えていることも判明した。100 秒以上の高性能定常プラズマ維持を目指す EAST 装置では、壁リサイクリングの定量評価は非常に重要な研究課題の一つである。今後、周辺密度・温度分布等を考慮した詳細な 3 次元シミュレーション解析を進める。結果をアジアプラズマ核融合国際会議（平成 29 年 12 月、日本・土岐）で発表する予定である。

タングステンのプラズマ中での原子分子過程研究を目的として、日本（電気通信大学、核融合科学研究所、首都大学東京）の電子ビームイオントラップ装置（EBIT・ECRIS）、中国（復旦大学）の EBIT 装置、中国・蘭州師範大学の Dong 教授を中心とするグループ、韓国・国立核融合研究所の原子分子グループとの間で共同研究・研究交流を実施した。分光研究により蓄積されたタングステン多価イオンデータを活用し、LHD・EAST・HL-2A 装置で観測したタングステンの発光線の同定とスペクトル解析を行った。これまでタングステンの UTA と呼ばれるスペクトル群とモデリング解析には大きな隔たりがあったが、新しく内殻励起・電離の寄与をモデリングに含めることで、定性的ではあるが、実験スペクトルとモデリングの良い一致を初めて得ることができた。一方、小型電子ビームイオントラップ（CoBIT）および LHD を使用した分光共同研究では、近紫外～可視域においてタングステン多価イオンから放射される禁制線を新たに発見した。測定した遷移波長を中国・Dong 教授等の理論計算と比較検討し、原子構造理論モデリングの精度向上に寄与した。禁制線強度の空間分布からこれまでに不確定性が大きかったタングステン多価イオンの電離/再結合速度係数データの詳細な評価が可能になった。原子分子分野と核融合分野との直接の共同データ解析を通して、コアプラズマでのタングステン多価イオン発光線の理解が格段に進み、不純物輸送研究の基礎データ構築に大きく寄与した。特に、日本と中国の EBIT 装置を用いたタングステン多価イオン発光スペクトルの共同研究では世界をリードする研究成果が出ている。平成 26 年 7 月には中国・蘭州で、平成 28 年 7 月には中国・成都で、プラズマ中のタングステンイオンを初めとする多価イオンの原子分子セミナーを日中韓で開催した。原子分子分野の主要な国際会議である「多価イオン物理に関する国際会議」（HCI：平成 28 年 9 月 11-16 日、ポーランド）及び原子分子データとその応用に関する国際会議（ICAMDATA：平成 28 年 9 月 25-29 日、韓国）において、上記の共同研究成果を招待講演として発表した（必要経費は A3 経費以外の外部資金を使用）。また、IAEA 主催の技術会合（Uncertainty Assessment and Benchmark Experiments for Atomic and Molecular Data for Fusion Applications、平成 28 年 12 月 19-21 日、IAEA 本部、オーストリア）でも招待講演として今回の成果を発表した（必要経費は A3 経費以外の外部資金を使用）。本事業による

共同研究成果は核融合エネルギー開発のための原子過程データとして国際的に高い評価を得ている。

#### カテゴリー IIb :

トカマクでの周辺局在化モード (ELM) によるダイバータ熱流束の抑制を中心課題として、EAST 装置 (中国)、KSTAR 装置 (韓国) 及び LHD 装置 (日本) で周辺プラズマの安定性と MHD 揺動に関する共同研究・研究交流を実施した。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周辺摂動磁場 (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ことは非常に重要である。

日中研究交流を通して、周辺 MHD 揺動や RMP 磁場成分を検出するための計測器開発などについて継続して検討・議論を行った。日本側が計測装置設計を担当し、中国側が実際の計測装置開発を担当する形式で共同研究を進めることにした。EAST 装置では 2 次元軟 X 線カメラを共同開発したが、接線ポートの数が非常に限定されており設置に多くの年月を必要としたが、最近ようやく設置にこぎつけた。データ取得に向け、今後も共同研究を継続する。一方、次世代の高い中性子発生を伴う高性能装置で使用予定のシンチレータを用いた中性子影響回避型軟 X 線検出システム (核融合科学研究所で開発中) を EAST 装置に持ち込み、総研大大学院生 (坂東隆宏) が長期に等離子体物理研究所に滞在し、データを取得した。実験結果を博士論文に活かせるよう、現在データ解析を継続している。初期結果を共同研究成果として RSI 誌に公表した。中国・西南物理研究所では軟 X 線を可視光に変換し、高速応答 CMOS 検出器で 2 次元像を観測する新しい検出システムを若手研究者 (周航宇) と共同開発し、HL-2A 装置の接線ポートに設置した。EAST 装置同様、接線ポートは多くの研究者との共用であり、数か月のマシンタイムの内、限られた期間での限定使用ではあったが、初期データを取得することができた。しかし、データの S/N 比が想像以上に悪く、MHD 揺動の解析には至っていない。現在、検出システムの特性或感度を西南物理研究所の梁山地区にある X 線発生装置を用いて詳細に調べている最中である。検出システムの HL-2A 装置への早期の再設置を目指している。

日韓間の共同研究を促進するために、韓国・慶州で開催された A3 セミナー (平成 25 年 11 月) のサテライトミーティングとして、RMP 磁場に関する小規模ワークショップを開催した。ワークショップには日本側から 3 名、韓国側から 7 名が参加し、LHD 装置の周辺統計的磁場領域の輸送物理、摂動磁場のモデル化、KSTAR 装置の ELM 抑制実験等について意見交換した。摂動磁場中での熱・粒子輸送を研究課題として LHD 装置と KSTAR 装置での研究交流を開始することで合意した。KSTAR 装置ではトロイダルモード数が  $n=1, 2$  の外部摂動磁場によって ELM が安定化される。安定化に至る周辺磁場構造の変化を調べる実験を共同で実施した。外部摂動磁場によって周辺磁場が乱れた場合、磁気面に垂直方向の熱流速増大が予想される。これを検証する為、プラズマコア部で誘起される鋸歯状振動が作る熱パルスの周辺部への伝搬特性から熱輸送特性を調べた。 $n=1$  の摂動磁場を印加した場合、熱パルスの波高は小半径外側でその減衰が小さく、伝搬速度も早くなることが判明した。熱

パルスに同期したアンサンブル平均を行うソフトウェアを開発して雑音レベルを減少させた結果、 $n=2$  の摂動磁場を印加した場合も熱パルスの波高値は小半径外側でその減衰が小さく、伝搬速度も早くなることが判明した。これらの結果は熱輸送係数の増大と周辺磁場の乱れを強く示唆する。また、その変化は鋸歯状振動の励起位置である  $q = 1$  面のすぐ外から始まっており、外部摂動磁場のプラズマコア部近への侵入を示している。現在の核融合研究の最重要研究課題の一つである RMP を用いた巨大 ELM 励起の抑制に関連して、最先端の研究結果が得られつつある。これらの共同研究成果を基礎として、外部摂動磁場とプラズマとの相互作用を調べるために、プラズマ平衡の変化をイメージング技法により計測する手法を提案した。外部摂動磁場をプラズマに印可したとき、外部摂動磁場は共鳴する有理面に流れる電流によって大きく遮蔽されたり、増幅されたりする。また、この有理面に流れる電流はプラズマを変形させる。プラズマを対称な二つの位置で 2 台のカメラを用いて観測することができれば、その差分イメージからプラズマの変形の度合、ひいては有理面に流れる電流を推定することができる。波長領域として軟 X 線を使えばコア部の変形を、VUV 光を用いれば周辺部の変形を推定することができる。万が一、2 台のカメラが使用できない場合でも、外部摂動磁場の位相を変化させることで同様の解析が可能なことを数値シミュレーションで確認した。KSTAR 装置に実装予定の VUV カメラをつかった場合の模擬イメージの計算を進め、実験データの物理的理解への準備を完了した。共同研究を今後も継続する。

日本・LHD 装置でも、RMP 磁場印加に関して日中韓の共同研究を実施した。LHD 装置では、これまでよりも格段に高いベータ値（3～4%）でプラズマの閉じ込め改善モードへの遷移が観測されている。真空磁場配位での最外殻磁気面位置より有意に外側で有理面に局在化した MHD モードが励起され、このモードと高い相関を持つ熱流速がダイバータ板上で観測された。この周辺 MHD モードを制御するために外部摂動磁場を印加した。形成される磁気島によって閉じ込め特性が劣化しないよう弱い摂動磁場を印加したが、この条件でも MHD モードは変化し、熱流速揺動の減少をダイバータ板上で観測した。これらの結果は炉心条件に近い高ベータ域 LHD 放電においても RMP 磁場の印加が有効であることを示した。更に、トカマクで誘起される ELM 振動と密接に関連するバルーニングモードをイメージング手法を用いて解析することにより、バルーニングモードの空間構造について非常に重要な情報を得ることに成功した。バルーニングモードが駆動するコア密度崩壊現象の前置振動を多チャンネル  $\text{CO}_2$  干渉計と新設の  $6 \times 8$  チャンネル 2 次元 SX アレイで観測した。2 次元アレイの信号解析により、モードが横長断面部外側に局在化し、磁力線に平行な構造をもつバルーニング的空間構造を観測した。これまで  $\text{CO}_2$  干渉計で観測されていた前置振動の 2 つの径方向ピークが見かけ上のものであることが明確になり、イメージング計測手法による MHD 揺動解析の有効性を十分に示すことができた。これらの結果は現在開発を行っている周辺 MHD 揺動観測のためのイメージング計測の大きな可能性と重要性を強く示唆している。一方、LHD 装置の高ベータ放電では高速粒子が駆動する EIC（高エネルギー粒子駆動交換型不安定性）と呼ばれる MHD 揺動が発現する。そこで、外部摂動磁場を用いて EIC を安定化する実

験を共同研究として実施した。EIC は LHD ヘリカル磁場の磁場強度が弱い部分に捕捉された粒子の歳差運動周波数が MHD 揺動と共鳴することにより生じる。外部摂動磁場がプラズマによって磁気遮蔽されずにプラズマ中に浸透した場合に限って MHD 不安定性が抑制される現象を初めて発見した。プラズマ中に外部摂動磁場が浸透し MHD 不安定性が抑制される時、MHD 揺動のモード構造が複雑に変調されることを突き止めた。周辺磁場構造の変化に対応している可能性があり、MHD 不安定性抑制現象の詳細な物理機構解明に向け、引き続き共同研究を進める。これら複雑な MHD 揺動を解析するために新たに共同開発した解析手法について RSI 誌に論文発表した。A3 事業期間中、中国・等離子体物理研究所から大学院学生（王智君：USTC 所属）が核融合科学研究所に 1 年間滞在し（平成 27 年 10 月－平成 28 年 9 月）、LHD 装置で共同研究を行った。共同研究成果の一つである VUV 光のイメージング計測装置での特性結果について米国・RSI 誌に論文発表した。

### カテゴリー III :

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解明のため、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や損失、非軸対称性磁場の高速イオン軌道への影響等に関する研究交流・共同研究を、中国・等離子体物理研究所（EAST 装置・J. F. Chang 等）、中国・西南物理研究所（HL-2A 装置・Y. P. Zhang 等）、中国・北京大学（T. S. Fan 等）、韓国・国立核融合研究所（KSTAR 装置・J. H. Kim 等）、韓国・ソウル国立大学（J. M. Jo 等）、日本・核融合科学研究所（LHD 装置）、日本・名古屋大学（富田等）の間で実施した。日本側の指導の下、シンチレータ型高速イオン損失プローブ検出器（FILD）や中性子検出器を各装置に設置し、共同研究を進めた。5 年間の A3 事業の期間中、多くの若手研究者や中韓・拠点機関の研究者と研究交流を進め、論文発表や国際会議を通して多くの共同研究成果を挙げる事ができた。

平成 24 年に初めて EAST 装置へ設置された NBI 加熱機器は翌年からの装置運転で順調に装置性能を向上させた。これを受けて、あらかじめ日中共同で準備を進めていた FILD 検出器を用いた損失高速イオン研究を開始した。首尾よく MHD 不安定性に起因する損失高速イオン束の測定が可能となった。超音速分子ビーム入射やペレット入射時に損失高速イオン束が増大した。また、非軸対称性磁場である 3 次元共鳴摂動磁場（RMP）を印加した場合にも損失高速イオン束は増大した。データ整理・解析のための研究交流を進めた。設置した FILD 検出器の特性や初期観測データを中心に、得られた成果を日中共著の形で査読付き論文として出版した。非誘導電流駆動による長時間放電での高速イオン輸送等、今後も EAST 装置で研究を継続する。

KSTAR 装置でも同様に、日韓共同で設置を進めた FILD 検出器を中心に共同研究を実施した。テアリングモードと鋸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。摂動磁場（RMP）コイルによる非軸対称磁場を印加すると EAST 装置同様損失高速イオン束が増大した。観測結果はトーラス軸対称磁場の破れを強く示唆し、プラズマ閉じ込め物理を考える上で重要な結果となった。

非軸対称磁場が高速イオン輸送に与える影響を調べるため、三次元磁場を考慮した粒子軌道計算コードにパッシブプレート等の真空容器内構造物を追加し、モデルを精密化した。その結果、多くの損失高速イオンは 3ヶ所に設置されたポロイダルリミターの大半径方向外側部分に衝突すること、下方のパッシブプレート及びダイバータプレートで損失した高速イオンはトロイダル方向に概ね一様に損失していること等が分かった。また、ポロイダルリミターやパッシブプレートをすり抜けた一部の高速イオンが FILD 検出器に到達していることが判明した。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ブローブに到達する損失高速イオン束強度の相関について理解を進めた。共同研究成果を国立核融合研究所の若手研究者 (J. H. Kim) 及び大学院生 (J. Y. Kim) が A3 フォーサイト事業ワークショップや国際会議にて発表を行った。一方、重水素 (D) プラズマ放電においては D-D 核融合反応の結果、1 MeV のトリトン (T) が生成される。1 MeV トリトンは速度空間において等方的であり、ラーマー半径や歳差ドリフト周波数はアルファ粒子のそれらと近いので、トリトンの挙動を精査することによりアルファ粒子の挙動を予測することができる。また、トリトンはプラズマ中での減速過程で僅かながら 2 次核融合反応 (D-T 反応) を起こし、14 MeV 中性子を発生させる。KSTAR 装置で発生した 14 MeV 中性子を放射化箔システムを用いて選択的に測定し、トリトンの挙動について調べた。磁場強度を一定にし、トリトン燃焼率 (DT 中性子発生量/DD 中性子発生量) とプラズマ電流値  $I_p$  の関係を調べたところ、 $I_p$  の増加に伴うトリトン燃焼率の増大を得た。 $I_p$  の増加に伴い粒子軌道の磁気面からの偏差は小さくなるので、放射化箔による今回の計測結果は  $I_p$  増大に伴う粒子軌道の改善効果を明瞭に示している。今回の共同研究成果実験を査読付き論文として出版した。現在、KSTAR 装置でのプラズマ実験で求めたトリトン燃焼率を古典的減速過程から予測される理論値と比較することにより解析を日韓共同で進めている。

HL-2A 装置では、日中共同で設置した FILD 検出器から得られたデータを解析した結果、鋸波不安定性もしくは 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と異なり、即発損失とは違ったエネルギー・ピッチ角帯に高速イオン損失が出現する。また、プラズマ放電の電流崩壊時には、高速イオンの損失が特に著しいことが判明した。鋸波不安定性や電流崩壊時の FLIP データの解析を進め、共同研究成果を IAEA 核融合エネルギー会議での発表した。解析内容を再吟味した後、成果を論文として公表した。これらの共同研究成果を通して、トカマク装置での鋸歯状波不安定性及び電流崩壊時における損失高速イオンの挙動が明らかになりつつある。今後も共同研究を継続する。

日本・LHD 装置では平成 29 年 3 月より重水素実験を開始した。重水素実験開始前に、800 MBq の  $^{252}\text{Cf}$  中性子源を用いた中性子フラックスモニタ (NFM) のその場中性子束絶対値較正実験を核融合科学研究所主導で日中韓共同研究として実施した。KSTAR・EAST 装置では、NFM のその場較正がなされておらず、今回の共同研究はそれぞれの装置で今後絶対較正を進めるための絶好の実験機会となった。日中韓の 3 装置 (LHD, EAST 及び KSTAR 装置) でリアルタイムに中性子発生率・量の絶対評価が可能になれば、装置間での直接的且つ定量的な高エネルギーイオンの閉じ込めに関する研究を推進できる。今後の日中韓での高速イオン



閉じ込め共同研究に向け、大きな前進となった。

#### カテゴリーⅣ：

日本・核融合科学研究所 (NIFS)・理論部門, 日本・京都大学・岸本研究室, 中国・等離子体物理研究所 (ASIPP)・理論部門, 中国・大連理工大学 (DUT)・理論グループ, 韓国・国立核融合研究所 (NFRI)・理論グループとの間で研究交流・共同研究を実施した。

高エネルギー粒子駆動型不安定性の研究では, EAST・KSTAR 装置における実形状プラズマ平衡を用いたシミュレーションコードの整備を進めた。ASIPP の若手研究者 (HU Youjun) が日本側研究者と協力して, EAST 装置実験での予測可能な高エネルギー粒子駆動型不安定性についてシミュレーションを実行し, その成果を A3 セミナーおよび中国国内研究会で発表した。また, EAST 装置の実験において予想されるアルフベン固有モード不安定性に関するシミュレーション研究を実施し, 共同研究成果を 1 編の査読付論文として発表した。フィッシュボーン不安定性に関するシミュレーション研究も ASIPP の大学院生 (PEI Youbin) が並行して実施し, 共同研究成果を 1 編の査読付論文として発表した。韓国・国立核融合研究所 (NFRI) との研究交流活動では, NFRI の若手研究者 (RHEE Tongnyeol) が日本側研究者と協力して KSTAR 装置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を実行し, その成果をアジア太平洋理論国際会議 (11th APPTC, 平成 26 年 7 月 1-4 日・韓国・チェジュ島) で発表した。

周辺プラズマの輸送に関する理論研究では, まず, ASIPP との研究交流活動として磁場を含む 1 次元 PIC コードの開発を行った。コード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を進め, リミター損耗メカニズムに関する物理的理解の進展に努めた。その後, 2 次元 PIC コードの開発を進め, それを用いた EAST プラズマに対するシミュレーション解析共同研究を進展させた。EAST 装置のダイバータを模擬した 2 次元粒子コード PICS2 により表面への粒子および熱流束分布計算, 3 次元流体コード EMC3-EIRENE のための EAST 周辺プラズマ計算グリッド作成プログラムの導入, 同流体コードによる PREFACE 装置プラズマの計算および装置形状を取り入れる方法の検討を共同で行った。また, 大連理工大学との研究交流を通して, EMC3-EIRENE 用 EAST 周辺プラズマ計算グリッド作成プログラムを完成させた。この成果を基に, 平成 29 年には EAST 装置のタングステンダイバータ配位での周辺プラズマの 3 次元シミュレーションコードによる初期解析結果が得られた。大連理工大学・若手研究者 (戴舒宇) がそれらの成果を A3 セミナー (平成 29 年 7 月, 札幌) で公表した。

マルチスケール乱流シミュレーションに関する理論研究では, 京大と大連理工大学との研究交流活動成果として, 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, 多階層乱流現象に関する理解を進めた。また, 「シア流を伴う二重テアリングモードにおける帯状流の発展」と「テアリングモードとイオン温度勾配モードの非線形相互不安定化」に関する共同研究成果を二編の査読付論

文として発表した。同様に、「非線形マルチスケール相互作用におけるシア流の役割」と「二重電流シートにおけるケルビン・ヘルムホルツ不安定性の非線形発展」に関する共同研究成果も 2 編の査読付論文として発表した。韓国・国立核融合研究所との研究交流では、乱流輸送における運動量輸送の役割や熱/運動量源が分布硬直性や内部輸送障壁形成に与える影響についての理解を進め、2 件の国際学会発表を行った。KSTAR 実験で MHD 乱流を実験研究している Park 教授 (UNIST) のグループとも定期的な研究交流を開始した。中国・西南物理研究院と京都大学の研究交流では、HL-2A において観測された超音速ガスパフ (SMBI) による非局所輸送現象や内部輸送障壁形成に関する実験結果を京都大学側のシミュレーションコードで解析した。熱源駆動型乱流の非局所乱流構造や運動量入射による内部輸送障壁形成機構について理論的解説を行い、両者の共通点について議論を行った。

### (3) 若手研究者育成

A3 セミナー開催時には、大学院学生及びポスドク研究員を中心とした若手研究者発表セッションを設け、英語での口頭発表を行わせると共に、4 ページ以上の英語のプロシーディングを作成させている。他財源 (JST さくらサイエンス) を利用して、本 A3 事業の中国側拠点機関の一つである中国科技大学 (USTC) から 10 人の修士学生を平成 28 年 10 月に招請し、核融合科学研究所で 1 週間にわたり核融合研究に関連した講義を本 A3 事業の各キーパーソンが中心となって講義を行った。また、名大・東大・科学未来館を訪問し、各大学院生の今後の進路指導や研究の詳細について個別議論も同時に行った。中国・福州で外部資金を用いて「China-Japan Collaborative Workshop on Stability and Transport of Edge Plasmas」と題するカテゴリーII に関連したワークショップを平成 29 年 3 月に 2 日間の日程で開催し、大学 4 年生・大学院修士課程 1 年生を含め 11 名の日本人学生を招請し (日本人参加者: 16 名)、英語で口頭発表の機会を設けた。大部分の学生が初めての英語口頭発表で緊張していたが、貴重な経験となった。

#### カテゴリーI:

毎年 12 月に核融合科学研究所において「アジア冬の学校」を開催している (核融合科学研究所・総研大予算を使用)。ポスター発表を通じてアジアおよび欧州の大学院生との交流を図った。中国・等離子体物理研究所において大学院生とカテゴリー I に関する講義を行うと共に、LHD および EAST の実験結果について議論を行った。ASIPP と同じ合肥市にある A3 事業拠点機関・中国科学技術大学及び KTX 装置において、大学院学生に向けた講義 (特にデータ解析に必要な理論モデル中心として) 行うと共に、セミナーも開催した。総研大に所属している中国人大学院留学生に向けた講義を核融合科学研究所において行った。

#### カテゴリーIIa:

A3 事業期間中に 4 名の中国人大学院学生（主任指導教官：森田繁，王二輝，黄賢礼，張洪明，劉洋）を総研大にて教育し，3 名が博士の学位を取得し（残り 1 名は在学中），現在中国側拠点機関（ASIPP 及び SWIP）で助教の職を得て，トカマク装置（EAST 及び HL-2A）で研究を継続している．特に張洪明・劉洋氏は A3 事業を基にして中国側拠点機関（ASIPP 及び華中科技大学）から総研大に留学した学生である．また，同じく A3 事業期間中に核融合科学研究所で 3 名の中国人 COE 研究者（董春鳳，黄賢礼，戴舒宇）が採用され，研究指導を行うと共に，カテゴリー IIa における共同研究を実施した．そのうちの 2 名は現在 SWIP・HL-2A 装置及び大連理工大学で准教授及び助教として研究を継続している．中国で職を得た上記の全ての中国人研究者と共同研究を継続している．A3 事業期間中には合計 20 名余り若手日本人研究者を中国での共同研究に参加させ，国際共同研究の経験を積ませた．

また，ASIPP，SWIP，中国科学技術大学（USTC），大連理工大学（DUT），華中科技大学（HUST）において大学院生を対象に講義を行い，セミナーを開催した．セミナーでは大学院生の研究発表を行い，個別に問題の解決策や今後の研究方針を指導した．「プラズマ中の原子分子過程に関する日中韓合同セミナー」を A3 事業期間中に 2 回開催し（2014 年 7 月 29－31 日：西北師範大学（中国・蘭州），2014 年 7 月 26－28 日：SWIP（中国・成都）），開催地や近隣から学生を含む若手研究者を招待し，現在の研究や世界の研究動向等について議論を行うと共に研究指導した．また，「A3 フォーサイトプログラム・タングステンワークショップ」を中国・東華大学（2015 年 9 月 24－25 日）にて開催し，多くの若手研究者とタングステンの分光と診断に関して議論し，今後の具体的な研究方針を論文作成も含めて指導した．多くの中韓の若手研究者がカテゴリー IIa に関する共同研究に参加した．特に，ASIPP の高伟氏は博士課程修了後，核融合科学研究所に 2 か月滞在し（平成 25 年 8 月 19 日－10 月 19 日），LHD での先進分光計測法を学んだ．

#### **カテゴリー IIb：**

A3 期間中に 3 名の日本人・中国人大学院生（主任指導教官：大館暁，明廷鳳，杜曉第，坂東隆宏）を総研大にて教育し，2 名が博士の学位を取得した（残り 1 名は在学中）．二人の中国人大学院生は学位取得後，核融合科学研究所・COE 研究員としてカテゴリー IIb の A3 事業共同研究に参加した．明廷鳳氏は現在 ASIPP・EAST 装置で准教授として研究を継続し，A3 事業の中国側共同研究者の一員になっている．また，杜曉第氏は，日本での実績を認められ，米国の大学（UCSD・サンディエゴ）で博士研究員として独り立ちし，D-IIID トカマクで研究を開始した．韓国の大学院学生（KAIST・Taemin JEON）が約 1 か月核融合科学研究所に滞在し（平成 25 年 4 月 1－24 日），トモグラフィ計算技術を指導した．A3 事業共同研究を実施している ASIPP・Ming 准教授のグループから派遣された大学院生（USTC・王智君）が 1 年間（平成 27 年 10 月－平成 28 年 9 月）核融合科学研究所に滞在した．2 次元 VUV カメラシステム及びそのデータ解析手法について指導した．

#### **カテゴリー III：**

韓国国立核融合研究所 (NFRI) の KSTAR 装置で研究している大学院生 (UST, Jun-Young KIM) 3 か月間 (平成 25 年 1 月 11 日 - 4 月 10 日) 及び 2 週間 (平成 27 年 12 月 12 - 27 日) 核融合科学研究所で受け入れ, KSTAR での損失高エネルギーイオンプローブ (FILD) のデータ解析及び摂動磁場 (RMP) コイル印加非軸対象磁場 MHD 平衡下での粒子軌道モデリングについて指導した. 平成 28 年に, Kim 氏は博士の学位 (論文題目: Study on fast-ion loss associated with external magnetic perturbation in KSTAR) を取得した. カテゴリー III のキーパーソン (磯部光孝) は学位審査会のメンバーとして NFRI に招聘され, 学位審査に参加した.

平成 24 年度に開催された A3 フォーサイト事業セミナーに参加した若手研究者 (ASIPP・普能) へ中性子計測について講義した. その後, 平成 28 年に総研大へ入学させ, 核融合科学研究所・LHD 装置で中性子分布測定について指導している (主任指導教官: 磯部光孝).

ASIPP, SWIP, 北京大学, 四川大学等で大学院生を対象に講義を行い, 同時に研究指導を行った. ASIPP では FILD 計測器の較正方法について CHANG Jiafeng 氏をはじめ, 若手研究者に研究指導した.

平成 28 年 11 月には, LHD 重水素実験に先立って中性子フラックスモニタのその場絶対較正を実施した. その際, 中国・ASIPP (ZHONG Guoqiang: 平成 28 年 11 月 2 - 15 日), 韓国・NFRI (CHEON MunSeong: 平成 28 年 11 月 13 - 20 日) 及び韓国・ソウル国立大学 (JO Jungmin: 平成 28 年 10 月 23 - 26 日) から若手研究者・博士課程学生を核融合科学研究所で受け入れ, 絶対感度較正を日中韓共同で行った. 若手研究者の指導を行うと共に, 中国・EAST 装置及び韓国・KSTAR 装置での中性子計測絶対較正の具体的手法を教示した. A3 事業期間中には若手日本人研究者を中国・韓国での共同研究に参加させ, 国際共同研究の経験を積ませた.

#### カテゴリー IV :

A3 事業期間中に, 多くの等離子体物理研究所・若手研究者を核融合科学研究所に滞在させ, 高エネルギー粒子輸送物理・周辺プラズマ物理とシミュレーション手法について教育を行った. 中国・等離子体物理研究所および韓国・国立核融合研究所において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実施する若手研究者に対して, 高エネルギー粒子に関する物理およびシミュレーション手法について指導した. 中国・大連理工大学の大学院生を京都大学 (岸本泰明研究室) に受け入れ, 日中の指導教員の連携協力の下, マルチスケール乱流シミュレーションを推進した. 平成 25 年に開催した A3 セミナーを契機として, 韓国・Hyeon K. Park 研究室 (POSTECH・UNIST) と日本・岸本泰明研究室との共同研究を開始した. KSTAR 装置で Park 研究室が行っている 2 次元マイクロ波計測による MHD 乱流研究について, 両研究室間のワークショップを外部資金により毎年開催し, 所属する大学院生を理論面から指導している. NIFS の研究者 (藤堂泰) が ASIPP の大学院生 (USTC・Youbin PEI) による高エネルギー粒子駆動不安定性に関するシミュレーション研究を指導し, その成果をまとめた論文を学術誌 (Physics of Plasmas) に公表した.

#### (4) 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・LHD）、中国（等離子体物理研究所・EAST トカマク、中国科学技術大学・核科学学科及び物理学科・CFETR（中国次期核融合工学技術炉）、華中科技大学・先進電磁工学技術研究所・J-TEXT トカマク、西南物理研究所・HL-2A トカマク）、韓国（核融合科学研究所・KSTAR トカマク）等の拠点機関で、年 1 回のセミナー開催を日中韓で継続することを取り決めた（A3 事業セミナーは日中韓の持ち回りで、年に 2 回開催した）。また、A3 事業で構築した共同研究体制を基盤として、今後も相互交流を継続する。現在、A3 事業終了後（8 月以降）の日中韓での共同研究を A3 以外の外部資金を用いて継続する計画を作成しつつある。また、A3 事業はプラズマ物理に特化していたが、共同研究が可能な一部の炉工学分野も日中韓協力事業に取り入れ、長期にわたる核融合研究推進のための国際協力の発展を目指す。

#### （５）社会貢献や独自の目的等

共同研究で滞在した際に、近隣の大学等でプラズマ物理に関する講義を行い、核融合研究や科学研究への啓蒙活動を実施した。核融合科学研究所では毎年、主に海外の大学院生を対象に「冬の学校」を実施し、日本への留学を援助しているが、A3 事業のネットワークを有効に活用し、中韓の大学院生を招待している。数名の大学院生が総研大等、日本の大学院に留学した。A3 事業でのネットワークを基にして総研大に入学し、核融合科学研究所で研究している中国人大大学院生やポスドク学生を講師として、中国語会話教室を開設している。一方、中国に短期留学している日本人学生は中国科技大学（USTC）の日本語会話を目的としたサークルとの交流を行っている。

#### （６）予期しなかった成果

A3 フォーサイト事業を基盤として以下の 2 件の研究協力協定が締結され、今後の新たな共同研究の進展と展開が期待される。

1. 西南交通大学（中華人民共和国）と核融合科学研究所（日本）における一般科学協力及び交流に関する協定

（Agreement on General Academic Collaboration and Exchange between National Institute for Fusion Science, Japan and Southwest Jiaotong University, People's Republic of China）

締結日：平成 29 年 7 月 3 日

日本側代表者：竹入康彦・核融合科学研究所所長

中国側代表者：張文桂・西南交通大学副学長

中国・成都市にある西南交通大学と日本・核融合科学研究所の間で、中国初となる本格的ヘリカル装置を西南交通大学に建設することで合意した。物理設計及び計測・加熱・実験支援を日本・核融合科学研究所（NIFS）が、実際の装置建設を中国・西南交通大学（SWJTU）

が行う。本計画の中国側のキーパーソンは、本 A3 事業の 카테고리 IIb で日本側と共同研究を精力的に実施していた Yuhong XU 氏（A3 事業当初：西南物理研究所教授，現在：西南交通大学・核融合科学研究所（IFS）所長）である。調印式には A3 事業の中国側拠点機関である等離子体物理研究所（ASIPP：中国・合肥）・万宝年所長も出席し，ASIPP の施設を利用して装置建設に全面的に協力する旨，意見表明があった。ASIPP は既に超伝導装置・EAST トカマクを建設した経験がある。今後，付属文書（ANNEX）を取り交わし，装置建設に向け詳細を決定する。本計画は日本・核融合科学研究所と中国・西南交通大学との対等な共同研究であり，装置建設後には非常に活発な研究者相互交流が実現する。本新規計画は，これまで行ってきた等離子体物理研究所・西南物理研究所を中心とした中国での A3 フォーサイト事業に立脚し，A3 事業終了後における日中協力事業の新たな展開をもたらす。A3 事業開始当初には全く予想していなかった進展であり，世界の核融合研究にとっても，中国でヘリカル装置研究が本格化する意義は非常に大きい。

2. 自然科学研究機構核融合科学研究所（日本）と北京大学（中華人民共和国）における一般的な学術および人材協力に関する協定

（Agreement on General Academic Collaboration and Exchange between Peking University, People's Republic of China and National Institute for Fusion Science, Japan）

締結日：平成 29 年 6 月 5 日

日本側代表者：竹入康彦・核融合科学研究所所長

中国側代表者：林建華・北京大学総長

ASIPP・EAST 装置に中性子エネルギー spektrometer (TOFED) を設置予定していた北京大学 Tieshuan FAN 教授グループ（重イオン物理研究所・副所長）は第 3 回 A3 事業セミナー（中国・北京：平成 25 年 5 月 20-23 日）に初めて参加した。TOFED 計測器は  $\gamma$  線等の遮蔽が必要なことから，核融合研究としては非常に大きなサイズの計測器である（約 5m 四方）。その際，A3 事業の 카테고리 III の日本側キーパーソンである磯部光孝教授と共同研究の話が進み，ASIPP・EAST 装置におけるその後の密接な共同研究の実施に発展した。しかし，EAST 装置では中性子発生量が多いため TOFED 計測器が本来有している高い装置性能を発揮できていなかった。そこで，FAN グループが開発した TOFED 計測器を中性子発生量が多い LHD に導入することになった。本共同プロジェクトを実施するにあたり上記協定を締結した。この結果，北京大学の職員や大学院生が LHD 実験に参加することが容易になり，更なる研究交流の進展が期待される。A3 事業では，日本で開発した計測器を中国の核融合装置に設置し，共同研究を実施することが多かったが，今回は中国で開発された計測器が日本の核融合装置に設置され，本格的な日中共同研究が開始される。核融合分野の日中協力事業は 30 年以上の歴史を有しているが，中国の計測器を日本の装置に設置し，共同研究を遂行するのは初めての出来事であり，予想していなかった成果が本 A3 事業を通して得られた。

3. 韓国・Hyeon K. Park 教授（当時 POSTECH 所属）は 카테고리 IIb のキーパーソンとし

て、日本・岸本泰明教授（京都大学）はカテゴリーIVのキーパーソンとして、第2回A3事業セミナー（日本・釧路：平成25年1月22-25日）に参加した。Park教授は韓国・KSTAR装置に2次元マイクロ波計測器を設置し、MHD乱流の研究を行っており、岸本泰明教授は理論・シミュレーションを通して乱流輸送を研究している。第2回A3セミナーの際に、MHD乱流に関して実験・理論の両面からの共同研究を開始することで一致した。その後、Park教授研究室（現在 UNIST 所属）と岸本泰明教授研究室間の協力研究に発展し、現在では、日本と韓国の間で、年に1-2回のワークショップを開催するまでに至っている。今後はこれを日韓協力事業として発展させる計画になっており、当初には想像できなかった成果となった。

4. カテゴリーIIaでは、分光・原子分子・プラズマ壁相互作用等、不純物輸送を中心として共同研究・研究交流を進めている。A3事業を通して中国・西南物理研究所・HL-2A装置でも、核融合科学研究所・LHDで開発したEUV分光器を導入し、活発に共同研究を展開している。HL-2A装置の次期5年研究計画の柱として「不純物研究」を行うことになり、平成29年にはその課題研究に必要な予算が採択される見込みになっている。当初には想定していなかった展開となった。西南物理研究所では今後5年間の研究組織の構築を始めており、現在、新たな先進的分光計測機器の設計と整備を日本側と共同で検討している。A3事業を基盤として進展してきた日中共同研究が今後ますます建設的に発展する見込みである。

5. 次期核燃焼炉・ITERでは、ダイバータ部でのトリチウム（三重水素）蓄積の抑制及び除去が非常に重要な実験課題となっている。カテゴリーIIaのPWI研究では、日中韓が連携して、ダイバータ部での水素リテンション・蓄積について協同研究を実施してきた。本A3事業で展開してきた日中韓ダイバータ部トリチウムリテンション研究を基盤として、米国・ジェネラルアトミック社・DIII-D装置を新たに加えた形で、共同研究が拡大発展することになった。DIII-D装置のプラズマ特性はEAST・KSTAR装置と異なり、2-3秒のプラズマ放電照射の繰り返しになる。また、DIII-D装置には詳細な表面温度測定が可能な高速赤外線カメラが設置されており、照射熱効果と水素蓄積との相関について更に新しい実験結果を得ることが期待される。DIII-D側からも本A3事業の拡大発展には高い評価を得ている。カテゴリーIIaのキーパーソンの一人（芦川直子）が全体を統括することになり、日中韓の若手研究者（斎藤、Y. W. Yu, J. Wu., Z. H. Hu, M. Z. Zhao, H. S. Zhou, S. H. Son, E. N. Bang）と共同して堆積膜の準備を進め、データ解析に集中する。

## （7）今後の課題・問題点及び展望

### 1. 日中韓での共同研究の双方向性

中韓の拠点機関での核融合研究は、EAST・KSTAR装置建設後に本格展開し始めたので、日本の核融合研究の展開に比べると歴史が浅く、個々の研究者の力量のばらつきもあり、

共同研究は日本から中韓へ一方向になりがちである。また、EAST・KSTAR 装置はトカマク型であるのに対して LHD 装置はヘリカル型であるため、中韓の研究者にとっては、LHD での研究は少し敷居が高くなる傾向がある。日中韓 A3 事業ではこれを克服することを目標に挙げた。A3 事業が進むにつれ、特に 5 年計画の後半あたりからは中韓からの日本への共同研究実績も増加しつつある。特に大学院生を含む若手研究者の研究意欲は旺盛で、3 カ国間での双方向研究の進展に大きく寄与した。しかし、中国では交流研究に外的要素が絡むことも多く、長期的な視野に立脚した共同研究計画の立案が肝要である（例えば、最近の諸事情により中国から韓国への交流研究は停滞気味である）。

一方、中国でのヘリカル研究の開始は上述した課題を一掃する効果が期待できる。西南交通大学に加え、最近では南華大学（湖南省・衡陽市）も H1-Heliac 装置を購入しヘリカル研究を開始した。日本側拠点機関の核融合科学研究所と中国との双方向協力事業の大きな進展が期待できる。

## 2. LHD 装置での重水素実験開始

平成 29 年 3 月に LHD 装置は重水素実験を開始した。規定により重水素実験に使用した機器を実験室外に持ち出しすることができなくなる。LHD 関連機器の海外研究期間への短期的設置や海外からの機器の LHD 設置も困難になる。従って、LHD 装置ではデータ解析を中心とした共同研究の拡充が重要になり、相手国側での機器を用いた共同研究では外部資金の活用が重要になる。既に、カテゴリ IIa では相手側科研費の申請に日本側が参画し、科研費の採択確率を上げると共に、機器整備に直接参画している。

## 3. JT-60SA の実験開始

平成 31 年には JT-60SA 装置（量子科学技術研究開発機構）が実験を開始する。JT-60SA 装置は日欧で共同製作した世界最大の超伝導トカマク装置である。当然、中韓のみならず他のアジア諸国も実験参加の強い希望がある。あらかじめ実験提案書を作成し、正式に実験参加する手法もあるが、より簡便な形での短期の JT-60SA への実験参加も重要である。A3 事業終了後もセミナー開催を計画しているので、JT-60SA 関係者をセミナーに招聘し、JT-60SA への実験参加の可能性を議論する。

## 4. アジア諸国への協力研究の展開

A3 事業を基盤として日中韓の東アジアでの核融合研究協力は着実に進展してきたが、これをアジア諸国へ展開していくことが重要になる。インドは超伝導トカマク・SST-1 装置を完成させ、オーストラリア・ニュージーランド・シンガポールは ITER への準加盟国交渉を開始した。また、タイではチェンマイ大学・タイ国家原子力技術研究所が中心となり、トラス装置の建設に意欲を示している。核融合科学研究所は平成 28 年にタイとの研究協力協定を締結した。A3 事業では、A3 の活動報告をインドで開催されたアジア太平洋核融合会議（APFA：アーメダバード、平成 27 年 12 月 14-18 日）で招待講演を行い、オーストラリ



アで開催されたアジア太平洋物理会議（APPC：ブリスベン，平成 28 年 12 月 4－8 日）では口頭発表した。会議に参加した多くの研究者には日中韓協力事業の参加への強い希望があった。A3 事業終了後に開催するセミナーでは，これらアジア諸国の研究者も招聘する予定にしており，今後アジア諸国に拡大したネットワークの構築に努める。

**（8）本研究交流事業により全期間中に発表された論文**

①全期間中に学術雑誌等に発表した論文・著書 506 本

うち、相手国参加研究者との共著 112 本

②全期間中の国際会議における発表 130 件

うち、相手国参加研究者との共同発表 58 件

③全期間中の国内学会・シンポジウム等における発表 63 件

うち、相手国参加研究者との共同発表 18 件

（※ 「本事業名が明記されているもの」を計上・記入してください。）

（※ 詳細は別紙「論文リスト」に記入してください。）

**7. 平成 29 年度及び全期間にわたる研究交流実績状況**

**7-1 共同研究**

整理番号	R-1	研究開始年度	平成 24 年度	研究終了年度	平成 29 年度
研究課題名	(和文) 閉じ込め磁場配位の定常保持 (英文) Steady state sustainment of magnetic configurations				
日本側代表者 氏名・所属・職	(和文) 榊原 悟・核融合科学研究所・教授 (英文) SAKAKIBARA Satoru, National Institute for Fusion Science, Professor				
相手国側代表者 氏名・所属・職	(英文) ZHANG Ge, Huazhong University of Science and Technology, Professor KWAK Jong-Gu, National Fusion Research Institute, Principal Researcher				
29年度の研究 交流活動	等離子体物理研究所・EAST 装置及び国立核融合研究所・KSTAR 装置の MHD グループと LHD 装置の MHD グループとの間で、トカマク型装置とヘリカル型装置で観測されるロックモードの比較研究を継続した。中国科学技術大学 (USTC) の逆転磁場ピンチ実験装置 KTX において、Wandong Liu 教授のグループとのピンチプラズマの高性能化に向けた共同研究も継続した。次回 IAEA 核融合エネルギー会議 (2018 年 10 月・インド) に向け、共同発表の可能性について検討を双方で開始した。また、EAST 装置ではタングステンダストにより、LHD 装置ではカーボンダストにより長時間放電が停止する様子が観測されている。そこで、定常プラズマを阻害する重要な要因として挙げられているダストの問題について、日中韓での共同研究を開始した。平成 29 年 2 月 8 日から 8 月 3 日まで継続して実施された LHD 実験の進展により、その期間での共同研究の実施が難しくなったが、本事業以外の経費を利用して、平成 29 年 12 月頃の共同研究を予定している。				
29年度の研究 交流活動から得 られた成果	トカマク装置では誤差磁場等に起因して、突然のプラズマ回転の停止と磁気島の成長により、放電が崩壊する現象は良く知られている。一方、ヘリカル型の LHD 装置でもプラズマ中で回転している交換型不安定性が停止する直前に磁気島構造に変化する様子が明らかになりつつある。交換型不安定性がトカマクと同様の磁場構造 (磁気島) に変質し、プラズマ回転の停止後大きく成長する。プラズマ放電は崩壊には至らないものの、プラズマ中の全エネルギーの半分程度が失われる。従って、トカマクと同様、LHD 装置でも MHD モードの回転を制御できれば、プラズマ不安定領域においても安定な放電を維持できる。今回の成果を電流駆動されたトカマク放電等の安定性に向けた議論に展開する。				

	<p>一方、プラズマダストは、放電時間が長くなるにしたがって深刻な問題を提起する。EAST 装置や LHD 装置では最近、放電中に多量のダイバータ材料に起因したダストが発生している様子が観測された。長時間放電を阻害する明らかな要因となっている。これを受けて KSTAR 装置では、プラズマ中にタンゲステンパウダー（粉）を入射し、ダストの影響を確認する実験を開始した。日中韓でこれらダストの長時間放電に対する影響を実験的に調べることは、ITER での長時間放電に向けた貴重な実験データとなる。</p>
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

整理番号	R-2	研究開始年度	平成 24 年度	研究終了年度	平成 29 年度
研究課題名	(和文) プラズマ周辺及びダイバータプラズマ輸送 (英文) Transport of edge and divertor plasmas				
日本側代表者 氏名・所属・職	(和文) 森田 繁・核融合科学研究所・教授 (英文) MORITA Shigeru, National Institute for Fusion Science, Professor				
相手国側代表者 氏名・所属・職	(英文) GUO Houyang, Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Professor CHUNG Kyu-Sun, Hanyang University, Professor				
参加者数	日本側参加者数	23名			
	中国側参加者数	17名			
	韓国側参加者数	10名			
29年度の研究 交流活動	<p>等離子体物理研究所・EAST装置のタングステン不純物挙動について、結果を論文投稿するために議論を継続した。また、平成29年度に開催される国際会議での発表も検討した。具体的には、10月に米国で開催される米国物理学会・プラズマ物理分科会及び12月に日本・土岐で開催されるアジアプラズマ核融合学会で成果を公表することとした。12月の会議には、ASIPPの共同研究者の張凌准教授が来日し、成果を発表すると共に、核融合科学研究所に滞在する予定になった(A3事業以外の経費を使用)。同時に日本(森田繁)から論文投稿の詳細打合せと実験参加の為、平成30年1月頃にASIPPを2週間、訪問する予定にしている(A3事業以外の経費を使用)。一方、西南物理研究所では、平成29年4月に10-100Å領域を計測する短波長用EUV分光器を日本から輸入し、HL-2A装置への設置準備を開始した。この分光器の動作・校正試験と装置への設置のため、平成29年10月と12月の2回に分け、日本人研究者(各1名)を1週間単位で派遣する(A3事業以外の経費を使用)。また、HL-2A装置でのMHD振動と不純物輸送に関する実験結果をNuclear Fusion誌に投稿していたが、査読者より多くの指摘事項を受けた。原稿を修正するために、平成29年7月に開催されたA3セミナー(札幌)の会期中に、共同研究者のSWIPの崔正英教授と詳細な議論と検討を行った。MHD振動に関する部分については、同じくSWIPの劉教授も議論に参加した。HL-2A装置で共同実験した低電離タングステン発光線の発見とそのプラズマ計測応用について論文発表を目的として、SWIP・董春鳳准教授が核融合科学研究所に1週間滞在し(平成28年8月、A3事業以外の経費を使用)、図面の作成や本文の内容について詳細に議論した。</p> <p>EAST・KSTAR装置においてタングステン堆積層およびタングステンバルク材をプラズマ曝露し、水素同位体リテンション量評価に関する共同研究を実施した。EAST装置におけるタングステンダイバータ配位での静</p>				

	<p>的リテンション評価のために数ショットのマシンタイムを確保し、共同研究を実施した。燃料ガスである重水素停止後の密度変化について、加熱入力依存性を確認すべく実験を行った。現在、ASIPP 担当者と共同でデータ解析を進めている。EAST 装置では特にリチウム壁コーティングを実施しており、静的リテンションでの実験結果もリチウム壁による影響があると推測している。そこで、リチウム壁の水素リテンションにもたらす影響を明らかにするため、7月下旬に共同研究を EAST 装置で実施した。</p> <p>電気通信大学の高エネルギー・高磁場 EBIT 装置 (Tokyo-EBIT) の復旧、西北師範大学での永久磁石を用いた新たな小型 EBIT 装置の開発等、EBIT 装置を用いた重元素多価イオン分光に関する研究交流の更なる発展に向けた研究環境の整備を進めた。低価数タングステンイオンの発光スペクトルに関してデータ取得を含め研究交流を実施し、それらイオンのプラズマ壁相互作用研究への応用のため、タングステン材料のイオンスパッタリングの共同研究を NFRI (韓国) の研究者と実施した。</p>
<p>29年度の研究交流活動から得られた成果</p>	<p>平成 28 年から進めていた HL-2A 装置への短波長 EUV 分光器の設置計画が順調に進んだ。平成 29 年秋には分光器試験と較正実験を終了し、12 月には分光器を HL-2A 層に設置する。平成 29 年度中には初期データを得られる見込みで、より波長分解能が高いタングステンスペクトルの観測が期待できる。また、同時に高電離炭素・酸素等の不純物も観測でき、HL-2A プラズマの不純物研究が一層進展する見込みである。核融合科学研究所の COE 研究員として研究を行ってきた黄賢礼博士は、平成 29 年 9 月に日本での研究を終了し、10 月から HL-2A 装置で研究を再開する。黄賢礼博士は 10 月の分光器試験や 12 月の分光器設置にグループの一員として参加する予定で、共同研究の更なる進展が期待される。電子メールや A3 セミナー・核融合科学研究所での直接の研究打合せの結果、9 月には論文を再投稿できる見込みになった。また、10 月の米国・物理学会では、本共同研究成果が口頭発表として採択された。より多くの聴衆に本共同研究で得られた成果を知らせることが可能になった。</p> <p>PWI 実験では、新たに KSTAR 装置で高熱負荷プラズマ照射下でのダイバータ部曝露実験を実施し、首尾よくデータ取得に成功した。試料の深さ方向への水素分布の解析を進めている。1 回の放電に相当する 18 秒間のプラズマ照射を行った結果、水素の蓄積・脱離が同時進行する結果を観測した。プラズマ照射効果による試料温度の上昇と水素拡散係数の変化が要因と考えられる。3 次元シミュレーションコードを用いて、ダイバータプラズマの温度・密度分布と水素の 3 次元分布との比較研究を進めている。1 回の材料照射による水素拡散率変化の評価は世界的にも新</p>

	<p>しい結果であるため、速報として Plasma and Fusion Research 誌・Rapid communications へ投稿した。タングステンへの水素捕捉についてもモデリング研究を開始した。初期結果が Japanese Journal of Applied Physics 誌に公表される。</p> <p>西北師範大学（中国）と進めているタングステン多価イオン原子過程の理論面での共同研究の学術的成果を3編の論文として国際学術誌に公表した。タングステン多価イオン発光スペクトルに関する共同研究成果を原子物理分野最大の国際会議の一つである International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions（オーストラリア，平成 29 年 7 月 26 日～8 月 1 日）において特別講演として発表した。また，タングステンイオンの禁制線に関する共同研究成果を Plasma Conference 2017（PLASMA2017，平成 29 年 11 月・姫路）の招待講演として公表する。</p>
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**平成 24 年度採用課題用**

整理番号	R-3	研究開始年度	平成 24 年度	研究終了年度	平成 29 年度
研究課題名	(和文) 周辺プラズマの安定性				
	(英文) Stability of edge plasma				
日本側代表者 氏名・所属・職	(和文) 大館暁・核融合科学研究所・准教授				
	(英文) OHDACHI Satoshi, National Institute for Fusion Science, Associate Professor				
相手国側代表者 氏名・所属・職	(英文) XU Guosheng, Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Professor PARK Hyeon K., Pohuang University of Science and Technology, Professor				
参加者数	日本側参加者数	10名			
	中国側参加者数	9名			
	韓国側参加者数	9名			
29年度の研 究交流活動	<p>周辺 MHD 揺動現象の理解とその制御のためには、現象をより正確に観測する手段の開発が必要となる。次世代中性子環境下で使用可能なシンチレータを使用した軟 X 線揺動計測器の試験運用を共同研究として LHD 装置で開始した。多少の改修が必要ではあるが、基本的な装置特性を確認でき、次世代強中性子場下での計測器として活用が期待できる。</p> <p>シンチレータ式軟 X 線計測器は中国・西南物理研究所・HL-2A 装置でも設置しており、信号強度改善を目指した改造について議論した。</p> <p>LHD 装置・軽水素実験で使用していた VUV 画像計測器を韓国・KSTAR 装置へ移設する作業を継続した。平成 29 年度は計測器本体を KSTAR 装置へ移設する。これに関して研究交流を実施した。</p> <p>等離子体物理研究所の大学院生一名（原毅）が2か月間、核融合研に滞在して（平成 29 年 4 月 25 日ー6 月 30 日）LHD 装置で共同研究を実施した。</p>				
29年度の研 究交流活動から得 られた成果	<p>高中性子束下での次世代高性能プラズマ計測用に開発を進めてきた軟 X 線揺動計測器を EAST 装置に実装し、データ取得を継続した。計測機は順調に稼働しており、長期にわたる計測器の動作安定性や確実なデータ取得を確認した。計測器の動作に関して特段の問題は発生せず、今後の共同研究の進展に向け、大きな前進となった。</p> <p>LHD 装置で観測される高エネルギー粒子駆動抵抗性交換型モードの解析を共同研究として継続実施した。A3 セミナー（平成 29 年 7 月 11-14 日・札幌）開催中に、ヘリカル補足粒子が存在する LHD 装置とトロイダル補足粒子のみが存在するトカマク装置での高エネルギー粒子駆動 MHD 揺動について、日中韓で議論した。両装置での補足粒子軌道の違いと励</p>				

**平成 24 年度採用課題用**

	起される MHD 揺動の関連について相互理解を深めた.
--	-----------------------------



**平成 24 年度採用課題用**

整理番号	R-4	研究開始年度	平成 24 年度	研究終了年度	平成 29 年度
研究課題名	(和文) 高エネルギー粒子とバルクプラズマの相互作用				
	(英文) Interaction of energetic particle and bulk plasma				
日本側代表者 氏名・所属・職	(和文) 磯部光孝・核融合科学研究所・教授				
	(英文) ISOBE Mitsutaka, National Institute for Fusion Science, Professor				
相手国側代表者 氏名・所属・職	(英文) QIN Hong, Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Professor RYU Chang-Mo, Pohang University of Science and Technology, Professor				
参加者数	日本側参加者数	11名			
	中国側参加者数	10名			
	韓国側参加者数	10名			
29年度の研 究交流活動	<p>将来の核融合炉においてはアルファ粒子の異常損失に関連して、高速イオン励起 MHD 不安定性と高速イオンの相互作用やその結果生ずる高速イオンの異常輸送の理解と制御が重要な研究課題となっている。</p> <p>その課題研究の為、高検出効率を有する中性子エネルギー spektrometer (NES) の開発を既に進めている北京大学と核融合科学研究所は国際学術交流協定を締結し、同大で開発した NES の LHD 装置への実装に向けて、日中共同プロジェクトとして NES 設計に着手した。</p> <p>トリトン燃焼実験を LHD 装置及び KSTAR 装置の双方で実施した。ヘリカル型 LHD とトカマク型 KSTAR 装置における 1MeV トリトンの閉じ込め特性の比較解析を継続する。そのために、本事業以外の経費を使用し、日本人研究者が EAST 実験に参加し (8 月, 1 週間), またソウル国立大学・大学院生 1 名が核融合科学研究所に滞在し (JO Jungmin, 10 月, 1 週間), 得られたデータの議論・検討を行う予定にしている</p> <p>また、西南物理研究所 (SWIP)・HL-2A 装置との研究交流では、次期装置・HL-2M における FILD の共同設計を継続した。</p>				

<p>29年度の研究 交流活動から得 られた成果</p>	<p>5年間のA3事業を通して、日中韓の全ての主要磁場閉じ込め核融合プラズマ実験装置（LHD・KSTAR・EAST・HL-2A）において、シンチレータ型損失高速イオンプローブ及び中性子計測機器の設置を完了した。現在それら計測器は順調に本格稼働している。LHD装置でも平成29年3月に重水素実験が始まり、中性子計測と核反応高速イオンの計測を開始した。これまではEAST・KSTAR装置の重水素実験とLHDの軽水素実験で相互比較研究を行ってきたが、LHDでの重水素実験の開始に伴い、中性子発生と核反応生成粒子を伴う重水素実験同士での比較研究が可能になった。日本側キーパーソン（磯部光孝）は「Recent Advances of Scintillator-based Escaping Fast Ion Loss Diagnostics in Toroidal Fusion Plasmas in Japan, Korea, and China」と題した論文を米国・Fusion Science and Technology誌に公表した。EASTでの共同研究では、「Extended scintillator-based fast ion loss diagnostic in the EAST」と題した論文を新たに投稿した。KSTARでの共同研究では、損失高速イオン・中性子・トリトン燃焼計測に関する共同研究を更に進展させ、多くの成果を得た。</p>
--------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**平成 24 年度採用課題用**

整理番号	R-5	研究開始年度	平成 24 年度	研究終了年度	平成 29 年度
研究課題名	(和文) 高性能プラズマにおける不安定性と輸送に関する理論・シミュレーション研究				
	(英文) Theoretical and simulation study of instabilities and transport in high-performance plasmas				
日本側代表者 氏名・所属・職	(和文) 藤堂泰・核融合科学研究所・教授				
	(英文) TODO Yasushi, National Institute for Fusion Science, Professor				
相手国側代表者 氏名・所属・職	(英文) XIANG Nong, Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Professor KIM Jin-Yong, National Fusion Research Institute, Group Head				
参加者数	日本側参加者数	6 名			
	中国側参加者数	10 名			
	韓国側参加者数	2 名			
29 年度の研究 交流活動	<p>核融合科学研究所 (NIFS) と中国・等離子体物理研究所との研究交流では、XIANG Nong 教授のグループと EAST 装置におけるフィッシュボーン不安定性のシミュレーションに関する共同研究を進めるとともに、LUO Guangnan 教授のグループと EAST 装置および PREFACE 装置のプラズマモデリング研究、EAST 装置および KSTAR 装置のプラズマ壁相互作用研究を進めた。NIFS と大連理工大学との研究交流では、WANG Dezhen 教授のグループと EMC3-EIRENE コード開発に関する共同研究を進めた。</p> <p>京都大学と中国・西南物理学研究所の間における研究では、HL-2A 装置における実験パラメータを用いて、大域的ジャイロ運動論シミュレーションを行い、主要な微視的不安定モードの特定を行った。京都大学と韓国・国立核融合研究所の間における研究交流では、7 月に KIM Jinyong 博士と JHANG Hogun 博士が京都大学を訪問し、イオン温度勾配モード/捕捉電子モードに対するプラズマパラメータ依存性に関する議論を行った。</p>				

<p>29年度の研 究交流活動から得 られた成果</p>	<p>核融合科学研究所と中国・等離子体物理研究所との研究交流では、2次元粒子コード PICS2 により、EAST 装置および KSTAR 装置に設置されたダイバータタイル表面の熱負荷を評価した。それら周辺プラズマのモデリングに関して議論を行い、論文投稿に向け準備を進めた。3次元流体コード EMC3-EIRENE を用いた EAST 装置及び PREFACE 装置の周辺プラズマシミュレーションのため、コード計算に必要な実空間メッシュを開発し、理論モデリングの構築に努めた。核融合科学研究所と中国・大連理工大学との研究交流では、EMC3-EIRENE コードの技術的情報に関する情報交換や同コードを用いた周辺プラズマの不純物輸送に関する共同研究を進展させた。</p> <p>京都大学と中国・西南物理学研究所の間における研究では、HL-2A 装置における実験パラメータを用いた大域的ジャイロ運動論シミュレーションを行った結果、ECRH 入射前後で主要な微視的不安定モードがイオン温度勾配モードから捕捉電子モードに遷移することを確認した。京都大学と韓国・国立核融合研究所 (NFRI) の間における研究では、7月に KIM Jinyong 博士と JHANG Hogun 博士が京都大学を訪問し、イオン温度勾配モード/捕捉電子モードに対するプラズマパラメータ依存性に関する議論を行い、京都大学の大域的ジャイロ運動論コードと NFRI 側の固有値コードでそれぞれ得られた結果の比較を行った。コードの長所と欠点を詳細に検討する良い機会となり、今後の研究交流に向け具体的な研究課題が明瞭になった。</p>
--------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**7-2 セミナー**

**(1) 全期間において実施したセミナー件数**

	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度
国内開催	1 回	0 回	1 回	1 回	0 回	1 回
海外開催	0 回	2 回	1 回	1 回	2 回	0 回
合計	1 回	2 回	2 回	2 回	2 回	1 回

**(2) 平成 29 年度セミナー実施状況**

整理番号	S-1
セミナー名	(和文) 日本学術振興会日中韓フォーサイト事業「第 11 回高性能プラズマの定常保持に必要な物理基盤の形成に関するセミナー」 (英文) JSPS A3 Foresight Program “11th seminar on Critical Physics Issues Specific to steady State Sustainment of High-Performance Plasmas“
開催期間	平成 29 年 7 月 11 日 ~ 平成 29 年 7 月 14 日 (4 日間)
開催地 (国名、都市名、会場名)	(和文) 日本, 札幌, TKP ガーデンシティ札幌 (英文) Japan, Sapporo city, TKP Garden City Sapporo
日本側開催責任者 氏名・所属・職	(和文) 森田繁・核融合科学研究所・教授 (英文) MORITA Shigeru, NIFS, Professor
相手国側開催責任者 氏名・所属・職 (※日本以外で開催の場合)	(英文)

**参加者数**

派遣先 派遣元	セミナー開催国 (日本)	
	A.	B.
日本 〈人／人日〉	A.	16 / 73
	B.	2
中国 〈人／人日〉	A.	25 / 147
	B.	3
韓国 〈人／人日〉	A.	15 / 63
	B.	
合計 〈人／人日〉	A.	56 / 283
	B.	5

A. 本事業参加者 (参加研究者リストの研究者等)

B. 一般参加者 (参加研究者リスト以外の研究者等)

※日数は、出張期間 (渡航日、帰国日を含めた期間) としてください。これによりがたい場合は、備考欄を設け、注意書きを付してください。

<p>セミナー開催の目的</p>	<p>本事業において採択された課題「高性能プラズマの定常保持に必要な物理基盤の形成」の研究成果及び現状確認のため、3カ国のキーパーソンと共同研究者が集まり、EAST 装置（中国・等離子体物理研究所）、LHD 装置（日本・核融合科学研究所）、KSTAR 装置（韓国・国立核融合研究所）において進行中の共同研究の成果を発表し議論する。3事業もあと4か月となったので、今回は特に、これまでの成果の総合的評価について議論し、今後の具体的な研究の進め方について意見集約を行う。また、できる限り多くの若手研究者をセミナーに参加させ口頭発表や議論に加え、実験参加への機会を与える。セミナーでは本事業終了後の研究体制について、その必要経費等も含めて議論する。構築した研究体制が発展する方向に向け、具体的な方策を検討する。</p>					
<p>セミナーの成果</p>	<p>今回のセミナーでは、これまでの本 A3 事業における共同研究成果のまとめと評価を重点的に議論することに加え、本事業終了後の研究協力体制の確認と共同研究の継続について、具体的に検討した。これに合わせ、日中韓の既存の装置における今後の研究・実験計画についても情報交換した。また、近い将来の装置稼働が予定されている HL-2M 装置 (SWIP) や JT-60SA 装置 (QST) への共同研究参加についても議論した。今後も研究協力体制を維持し、共同研究を継続していくこと、また、年に1回のセミナー開催を継続することで参加者の意見が一致した。尚、今回のセミナーでも若手研究者枠を設け、14人の大学院生・ポスドク学生が口頭発表した。それぞれの発表について、修正すべき点等を指摘・議論した。</p>					
<p>セミナーの運営組織</p>	<p>A3 フォーサイトセミナー開催委員会を設置する。 委員会のメンバーは下記とする</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 日本・研究代表者（森田 繁）</li> <li>・ 中国・研究代表者（HU Liquin）</li> <li>・ 韓国・研究代表者（OH Yeong-Kook）</li> <li>・ 日本側キーパーソン</li> <li>・ 日本・核融合科学研究所・研究支援課</li> </ul>					
<p>開催経費分担内容と金額</p>	<p>日本側</p>	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">内容</td> <td style="width: 50%; text-align: right;">金額</td> </tr> <tr> <td>セミナー開催経費・国内旅費</td> <td style="text-align: right;">4,138,820</td> </tr> </table>	内容	金額	セミナー開催経費・国内旅費	4,138,820
内容	金額					
セミナー開催経費・国内旅費	4,138,820					
	<p>中国側</p>	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">内容</td> <td style="width: 50%;"></td> </tr> <tr> <td>外国旅費</td> <td></td> </tr> </table>	内容		外国旅費	
内容						
外国旅費						
	<p>韓国側</p>	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">内容</td> <td style="width: 50%;"></td> </tr> <tr> <td>外国旅費</td> <td></td> </tr> </table>	内容		外国旅費	
内容						
外国旅費						

**7-3 研究者交流（共同研究、セミナー以外の交流）**

共同研究、セミナー以外でどのような交流（日本国内の交流を含む）を行ったか記入してください。

**（1）平成 29 年度実施状況**

日数	派遣研究者		訪問先・内容		派遣先	
	氏名・所属・職名	氏名・所属・職名	氏名・所属・職名	内容		
7 日間	WU Xinchao	等離子体物理研究所・副所長	森田繁	核融合科学研究所・教授（日本側研究代表者）	A3事業終了後の研究協力体制・共同研究について議論した。	等離子体物理研究所
7 日間	HU Liqun	等離子体物理研究所・教授（中国側研究代表者）	森田繁	核融合科学研究所・教授（日本側研究代表者）	A3事業終了後の研究協力体制・共同研究について議論した。	等離子体物理研究所
7 日間	DONG Shaohua	等離子体物理研究所・准教授	森田繁	核融合科学研究所・教授（日本側研究代表者）	A3事業終了後の研究協力体制・共同研究について議論した。	等離子体物理研究所
14 日間	WU Sha	等離子体物理研究所・国際研究協力課・主任	森田繁	核融合科学研究所・教授（日本側研究代表者）	核融合科学研究所・国際支援係・担当者と事務手続き等、海外研修すると共に情報交換を行った。	等離子体物理研究所

**（2）全期間にわたる実施状況概要**

A3 事業として年に 2 回のセミナーを開催したが、以下にその他に開催したセミナー・ワークショップを示す。

1. 平成 24 年 8 月 22 日：韓国・済州島

「A3 フォーサイト事業開始のためのコーディネータ会合」

A3 事業開始にあつたてのキックオフ会合。各拠点機関の長・研究代表者が参加した。

2. 平成 25 年 6 月 28 日：韓国・国立核融合研究所

「A3 フォーサイト事業・キーパーソン会合」

日韓の A3 事業キーパーソンが集まり、KSTAR 装置を見学し、今後の共同研究・研究交流について議論

3. 平成 25 年 8 月 6-8 日：中国・Dunhuang（外部資金を利用）

「核融合科学研究所－西南物理研究所間での今後の共同研究に関するワークショップ」

両機関の長・研究代表者・キーパーソンが今後の共同研究について議論した。

4. 平成 26 年 3 月 20-21 日：中国・華中科技大学

- 「核融合科学研究所 (LHD) - 華中科技大学 (J-TEXT) 共同研究ワークショップ」  
LHD 装置及び J-TEXT 装置の間での研究情報交換を行った。大学院生の口頭発表も行った。内 1 名 (劉洋) が総研大に留学し、A3 事業に参加した。
5. 平成 26 年 7 月 29-31 日：中国・蘭州師範大学 (外部資金を利用)  
「プラズマ中の原子分子過程に関する日中韓ワークショップ」  
A3 事業の研究課題に関連する原子分子過程に関する共同研究を議論すると共に、非常に多くの大学院生 (40 名程度) のポスター発表を行った。
6. 平成 27 年 3 月 27-28 日：中国・大連理工大学 (外部資金を利用)  
「核融合科学研究所-大連理工大学共同研究ワークショップ」  
大連理工大学でのプラズマ研究施設を見学すると共に、両研究機関の研究紹介を行った。平成 28 年 10 月には、核融合科学研究所・COE 研究員が大連理工大学で助教の職を得た。
7. 平成 27 年 9 月 24-25 日：中国・東華大学  
「A3 フォーサイト事業によるタングステンワークショップ」  
分光・原子分子関係者が一堂に集まり、タングステンイオンの分光計測とそのデータ解析について、LHD・EAST・HL-2A 装置でのタングステンデータを基に詳細な議論を行った。
8. 平成 27 年 12 月 14-18 日：インド・アーメダバード (外部資金を利用)  
第 10 回アジアプラズマ核融合連合会議 (APFA2015)  
「Status of A3 Foresight Collaboration among China, Japan and Korea on Critical Physics Issues Specific to Steady State Sustainment of High-Performance Plasmas」  
と題して招待講演を行った。IPR 研究所・SST-1 超伝導トカマクを見学し、多くの大学院生・若手研究者と交流した。その後、2 名 (N. B. Nimavat, S. Prohit) の大学院生が総研大に留学した。
9. 平成 28 年 6 月 2 日：中国・等離子体物理研究所  
「核融合科学研究所-等離子体物理研究所間の A3 事業コーディネータ会合」  
両拠点機関の長・研究代表者が A3 事業の現状と今後について議論した。
10. 平成 28 年 7 月 26-28 日：中国・西南物理研究所  
「プラズマ中の原子分子過程に関する日中韓 A3 事業ワークショップ」  
タングステンイオンの原子構造・分光データ解析の現状を確認し、今後の共同研究の進め方を議論すると共に、HL-2A 装置を見学した。
11. 平成 28 年 10 月 20 日：日本・京都国際会議場  
「周辺及びダイバータ制御に関する打合せ」  
第 26 回 IAEA 核融合エネルギー会議中に、参加者で A3 事業のカテゴリー II の共同研究打合せと論文執筆に向けた研究内容の議論を行った。
12. 平成 28 年 10 月 23 日-11 月 1 日：JST さくらサイエンス事業  
中国側拠点大学である中国科技大学 (USTC) から 10 人の修士学生を招請し、核融合科学



研究所で1週間にわたり核融合研究に関連した講義を行った。本 A3 事業の各カテゴリーキーパーソンが中心となって講義を担当した。さくらサイエンス事業終了後、数名の大学院生は核融合科学研究所・研究者と研究交流を開始した。

1 3. 平成 28 年 12 月 4-8 日：オーストラリア・ブリスベン

第 13 回アジア・パシフィック物理会議・22 回オーストラリア物理学会会議

「Progress of International Collaboration among China, Japan and Korea on Plasma Physics based on A3 Foresight Program Collaboration」と題して口頭発表を行った。アジア・オーストラリアの若手研究者と交流を進めると共に、シドニー大学・H1-Heliac 装置の中国移転に関して情報交換を行った。

1 4. 平成 29 年 3 月 3-4 日：中国・福州（外部資金を利用）

「A3 事業・カテゴリーII・周辺プラズマの安定性と輸送に関するワークショップ」周辺不純物・ELM 制御に関してワークショップを開催し、共同研究を議論した。11名の日本側学士・修士・博士課程学生、6名の中国側・大学院生・若手研究者が口頭発表した。その後、ワークショップに出席していた1名の中国人大学院生（原毅）が核融合科学研究所に A3 事業共同研究の為に3か月間滞在し、LHD 装置で博士課程論文作成のためのデータを取得した。

#### 7-4 中間評価の指摘事項等を踏まえた対応

（※中間評価の指摘事項等を踏まえ、交流計画等に反映させた場合、その対応について記載してください。）

指摘事項： 中国・韓国に比べると日本の貢献度が高い印象がある。

対応： 中韓の核融合研究の歴史が日本と比べると格段に浅く、また、歴史的経緯から中国の核融合第一世代は現在 50 歳台前半で、高い専門性を有するシニアスタッフがあまり育っていない。また、韓国の核融合研究は米国帰りの研究者が実質的に研究を指導している場合が多いが、日中に比べかなり研究者数が少ない。従って広い範囲で同等の貢献を求めるのはかなり無理がある。そこで、A3 事業では分野を特定して、相手側研究グループと緊密な研究交流体制を築き、研究交流を実施した。5年間の A3 事業を通して、「不純物」、「プラズマ壁相互作用」、「原子分子」、「周辺 MHD 揺動」、「高エネルギー粒子」、「中性子計測」、「理論・シミュレーション（高エネルギー粒子、周辺プラズマシミュレーション、乱流輸送）」の分野で日中韓の相互研究協力が活発になり、共同研究成果として、多くの国際会議や論文誌での共同発表を得た。

指摘事項： 波及効果に関連して、研究者交流の結果として互いに留学生が増加するなどの効果が表れると良い。

対応： 5年間の A3 事業を通して、4名の中国人学生（王二輝、黄賢礼、張洪明、杜曉第）が総研大で博士の学位を取得し、2名（劉洋、普能）が現在在学中である。また、1名の韓

国人大学生 (J.Y.Kim) を指導し博士の学位を取得した。現在、韓国・KSTAR 装置で職員として研究に従事している。また、5名の中国人・COE 研究生 (董春鳳, 黄賢礼, 明廷鳳, 杜曉第, 戴舒宇) が A3 事業において中心的役割を担った。現在、中国・等離子体物理研究所, 西南物理研究所, 大連理工大学で職を得て、日中協力研究に継続して貢献している。また、中韓から複数名の大学院生及び若手研究者が核融合科学研究所に長期滞在した (王智君 (中国科学技術大学大学院生) : 12 か月, 高伟 (ASIPP 助教) : 2 か月, 原毅 (中国科学技術大学大学院生) : 2 か月, JO Jungmin (ソウル国立大学) : 2 か月, RHEE Tongnyeol (国立核融合研究所研究員) : 1 か月, KIM Jun-young (韓国科学技術大学大学院生) : 3 週間及び 3 か月, JOEN Taemin (韓国科学技術大学大学院生) : 1 か月)。

指摘事項： 研究者交流において日本からの派遣に比べ、中・韓からの受け入れが少ないようである。

対応： 中国では若手研究者の海外での育成に力を注いでおり、A3 事業でも多くの若手研究者の長期滞在を受け入れている、ビザ・出国制限等の問題もあり、派遣人数では差があるが、派遣日数 (人・日) では、少なくとも日中韓では同等になっている。韓国については、研究者・大学院生数が少なく、会議出張を除いては、(KSTAR 実験・ITER 機器開発等の仕事があり) 海外滞在が難しいようである。これを補う形で、年 2 回の A3 セミナーを開催している。A3 事業の 5 年間で 11 回のセミナー開催を行った。日中韓のそれぞれの国から少なくとも 10 名以上の研究者が毎回セミナーに参加しており、直接の研究交流の機会を設けると共に、建設的な共同研究の議論を行っている。

指摘事項： 中国との協力は過去の実績もあり盛んであるが、今後は韓国との協力の強化が望まれる。

対応： A3 事業を通して、日韓間での協力研究も着実に進展してきている。特に、「プラズマ壁相互作用」、「原子分子」、「高エネルギー粒子」、「中性子計測」、「(MHD) 乱流輸送」等の分野では明らかな研究交流の進展を得た。しかし、最近の中国の核融合研究の進展は目を見張るものがある。例えば、次期核融合実験炉・CFETR (オール中国)、新装置・HL-2M の建設と間もなくの稼働 (西南物理研究所)、新規ヘリカル装置の建設 (西南交通大学)、HI-Heliac 装置の移転と稼働 (南華大学)、超大型直線装置の建設 (建設場所未定) 等であり、中国との共同研究がますます重要になり、盛んになるのは自然な姿であると思われる。

指摘事項： 2017 年に中国・HL-2M 装置が、2018 年には日本・JT-60SA が稼働予定であり、これらを考慮して日本の主体性を確保する必要がある。

対応： HL-2M 装置の稼働は 2019 年以降になる見込みであり、JT-60SA は 2019 年中の稼働を予定している。HL-2M 装置に関しては、既に計測機器の設計 (分光, トムソン, 中性子, SX 揺動計測等) で共同作業を開始しており、ハードウェアの準備も共同で進めている。NBI や ECH 加熱機器に関する共同研究も開始しており、多くの加熱担当者が HL-2M 装置で加熱

機器の整備を目的として核融合科学研究所を訪問している。これまで同様、HL-2M 装置に於いても主体的な共同研究を実施することができる。JT-60SA に関しては、量子科学技術研究開発機構（QST）と外国，特に欧州との関係になるので、A3 事業として直接に言及することは無いように思える。しかし、A3 事業を基盤として確立した研究協力体制に JT-60SA 装置での共同研究を組み込むことは非常に重要な課題と考えられる。そのために、平成 29 年 11 月（もしくは 12 月）に開催する日中韓セミナー（本 A3 事業セミナーの最終版）に、JT-60SA 担当者を招待し、将来の共同研究のあり方について議論する予定にしている。

8. 研究交流実績総人数・人日数

8-1 平成29年度の相手国との交流実績

派遣先 派遣元	四半期	日本	中国	韓国		合計
日本	1	/	1/ 5 ( )	( )	( )	1/ 5 ( 0/ 0 )
	2		2/ 9 ( )	( )	( )	2/ 9 ( 0/ 0 )
	3		( )	( )	( )	0/ 0 ( 0/ 0 )
	4		( )	( )	( )	0/ 0 ( 0/ 0 )
	計		3/ 14 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	3/ 14 ( 0/ 0 )
中国	1	1/ 67 ( )	/	( )	( )	1/ 67 ( 0/ 0 )
	2	29/ 175 ( )		( )	( )	29/ 175 ( 0/ 0 )
	3	( )		( )	( )	0/ 0 ( 0/ 0 )
	4	( )		( )	( )	0/ 0 ( 0/ 0 )
	計	30/ 242 ( 0/ 0 )		0/ 0 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	30/ 242 ( 0/ 0 )
韓国	1	( )	( )	/	( )	0/ 0 ( 0/ 0 )
	2	15/ 78 ( )	( )		( )	15/ 78 ( 0/ 0 )
	3	( )	( )		( )	0/ 0 ( 0/ 0 )
	4	( )	( )		( )	0/ 0 ( 0/ 0 )
	計	15/ 78 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )		0/ 0 ( 0/ 0 )	15/ 78 ( 0/ 0 )
	1	( )	( )	( )	/	0/ 0 ( 0/ 0 )
	2	( )	( )	( )		0/ 0 ( 0/ 0 )
	3	( )	( )	( )		0/ 0 ( 0/ 0 )
	4	( )	( )	( )		0/ 0 ( 0/ 0 )
	計	0/ 0 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )		0/ 0 ( 0/ 0 )
合計	1	1/ 67 ( 0/ 0 )	1/ 5 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	2/ 72 ( 0/ 0 )
	2	44/ 253 ( 0/ 0 )	2/ 9 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	46/ 262 ( 0/ 0 )
	3	0/ 0 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )
	4	0/ 0 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )
	計	45/ 320 ( 0/ 0 )	3/ 14 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	48/ 334 ( 0/ 0 )

※各国別に、研究者交流・共同研究・セミナーにて交流した人数・人日数を記載してください。(なお、記入の仕方の詳細については「記入上の注意」を参考にしてください。)

※日本側予算によらない交流についても、カッコ書きで記入してください。(合計欄は( )をのぞいた人数・人日数としてください。)

8-2 平成29年度の国内での交流実績

1	2	3	4	合計
( )	16/ 90 ( )	( )	( )	16/ 90 ( 0/ 0 )

8-3 全期間にわたる派遣・受入人数

年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度
派遣人数 (人)	8	55	37	32	46	3
受入人数 (人)	29	10	29	35	4	45

※各年度の実施報告書の「相手国との交流実績」に記載の人数を転記してください。相手国側マッチングファンド等本事業経費によらない交流については( )で記載してください。

**平成 24 年度採用課題用**

**9. 経費使用総額**

**9-1. 平成 29 年度経費使用総額**

(単位 円)

	経費内訳	金額	備考
研究交流経費	国内旅費	3,583,060	国内旅費、外国旅費の合計は、研究交流経費の 50%以上であること。
	外国旅費	342,880	
	謝金	0	
	備品・消耗品購入費	0	
	その他の経費	796,630	
	不課税取引・非課税取引に係る消費税	27,430	
	計	4,750,000	研究交流経費配分額以内であること。
業務委託手数料		475,000	研究交流経費の 10%を上限とし、必要な額であること。また、消費税額は内額とする。
合 計		5,225,000	

**9-2 全期間にわたる経費使用額**

(単位 千円)

	平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度
国内旅費	2,851	723	2,548	3,211	534	3,583
外国旅費	1,171	8,135	5,442	4,564	6,470	343
謝金	0	0	0	0	0	0
備品・消耗品購入費	287	462	165	52	0	0
その他の経費	431	180	845	248	70	797
不課税取引・非課税取引に係る消費税	0	0	0	0	526	27
合計	4,740	9,500	9,000	8,075	7,600	4,750

※各年度の実施報告書「経費使用総額」に記載の内容を千円単位にして転記してください。