

**日中韓フォーサイト事業**  
**平成 26 年度 実施報告書（平成 22～26 年度採用課題用）**

**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:// http://dg1.nifs.ac.jp/A3

**3. 採用期間**

平成 24 年 8 月 1 日～平成 29 年 7 月 31 日  
 ( 3 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 Liqun

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)

KSTAR Research Center, Principal Researcher, OH Yeong-kook

協力機関：(英文) Pohang 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. 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。

## 5-2. 平成26年度研究交流目標

### 5-2-1 研究協力体制の構築

本共同研究の物理課題，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」に直接関連した3課題を下記の4つの実験カテゴリー（カテゴリーI-IV）に分類し，すべてに共通する理論・シミュレーション課題をカテゴリーVとして集約する．それぞれのカテゴリーにはキーパーソンを配置する．

「R-2（カテゴリーIIa）」には周辺プラズマを研究する上で非常に大事な「プラズマ壁相互作用」及び「原子分子」研究を加え，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．これらの研究組織を日中韓の3国に共通化することで円滑な共同研究な組織的な学術研究の運営を目指す．

平成26年度は，当初計画した共同研究の成果が実験データや解析結果として得られる見込みであり，議論がより深まるように共同研究の協力体制を再確認する．特に若手研究者がこれらの議論に参加し共同研究の指導的な役割を担えるよう，より弾力的な研究協力体制の構築に配慮する．

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  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			

### 5-2-2 学術的観点

### R-1 (カテゴリーI) :

高温プラズマの安定保持を阻害する巨視的不安定性の特性理解および制御手法の確立、マイクロ波等を用いたプラズマ電流制御によるプラズマの安定維持を目的とした実験及び理論研究を LHD 装置 (日本・核融合科学研究所), EAST 装置 (中国・等離子体物理研究所) 及び KSTAR 装置 (韓国・国立核融合研究所) を用いて行う。前年度は, モードの回転特性とプラズマ閉じ込めとの関係を中心に研究を進め, 交換型モードもトカマクにおけるティアリングモードと同様, 回転の維持が閉じ込め性能の著しい劣化を抑制する可能性を示した。このことを踏まえ, 平成 26 年度は EAST 装置 (中国)・KSTAR 装置 (韓国) においてティアリングモードの回転と揺動強度に関する磁場配位の効果および閉じ込めへの影響について明らかにし, 交換型モードとの比較を進める。特に回転減速の物理機構について交換型モードとティアリングモードとの差異がみられることから, プラズマ流とモード回転との対比を各装置において進める。具体的には, モード回転を決定するプラズマ流 (イオン流、電子流およびその方向) の同定を行った後, その減速の原因を明らかにするために抵抗壁との距離および外部摂動磁場強度のスキャンを行う。

### R-2 (カテゴリーIIa) :

現在の核融合炉設計では巨大なプラズマの周辺熱流束をどのように制御するかが大きな論点となっている。その方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の温度を低下させることにより, プラズマ熱流束を減少させ, ダイバータ領域に巨大な熱流束が到達しないように放電を最適化する手法が有力となっている。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な課題として挙げられている。そのためには周辺不純物の輸送機構を解明すること, また, タングステン板のプラズマ対向特性を理解することが非常に重要な研究課題となる。平成 26 年度は上記研究に必要な EUV 分光計測装置を中国・EAST 装置に設置し, 実験データの取得を開始する。また, 中国・HL-2A 装置 (西南物理研究院・SWIP) ではタングステン計測のための短波長 (10-100 Å) 領域計測用 EUV 分光器の製作準備に入る。また, 周辺不純物の空間分布を計測するために装置の改造を行い, 空間分布計測を開始する。プラズマ-壁相互作用研究 (PWI) では, タングステンおよびステンレスなど金属試料片をプラズマへ曝露し試料内での水素挙動を調べる。特に, バルク材料と堆積層との違い, 酸化層の影響, 水素同位体置換効果に着目した水素同位体捕捉特性評価およびトリチウム除去に関する研究を進める。日本・LHD 装置, 中国・EAST 装置, 韓国・KSTAR 装置を条件に応じて使用し比較研究を進展させる, タングステンのプラズマ中での振舞いを研究するためには多くの原子データが必要となる。中国・EAST 装置での観測が期待される低電離タングステンスペクトル解析のためのスペクトルモデリングをより広範囲の波長スペクトル解析に適応できるよう, 計算コードの開発を進める。同時に日本・LHD 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スペクトルと理論スペクトルモデリングとの比較研究を更に進め, タングステンのプラズマ中での挙動の診断に役立てる。

### R-3 (カテゴリーIIb) :

高性能プラズマの実現には改善閉じ込めモードである H-mode タイプの放電が必要とされる。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と呼ばれる危険な不安定性を誘起する。この ELM を抑制または ELM の小振幅化は高性能プラズマの維持、ひいては核融合炉を実現する上で重要な課題になっている。ELM 制御法のなかで有力なものの一つに外部摂動磁場の印可があげられる。周辺部の磁場に共鳴するような外部摂動磁場を印可すると、多くの装置で ELM の抑制現象が観測されている。この抑制効果の物理的なメカニズムを解明し、ELM 制御技術が次世代の核融合炉においても有効か検証することは本カテゴリーの大きな課題である。そのために、(1) 外部摂動磁場がいかに関与するか、(2) 磁場構造の変化によってどのように MHD 不安定性が影響されるか、を調べることに集中して共同研究を実施する。(1) の目的のために、外部摂動磁場の効果を取り入れることができる HINT 2 コードによる磁場のモデル化を、LHD, KSTAR, EAST 及び HL-2A の各装置を対象に進め、磁場構造の変化を計測できる計測機器の開発を加速する。(2) の目的では、MIPS 等の非線形 MHD 発展コード間の比較を行う一方、2次元イメージング計測による揺動の空間構造の測定準備を進める。また磁場構造の変化による輸送の変化を実証するために、コア部の鋸歯状振動による熱パルスの伝搬特性を調べる実験を KSTAR トカマクで実施する予定である。

### R-4 (カテゴリーIII) :

将来の核融合炉では D-T 燃焼で生成された高エネルギーアルファ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。よって、アルファ粒子の生成や閉じ込めに関する物理機構の解明は核融合炉の成否に直結する重要な課題である。しかし現行のプラズマ閉じ込め実験ではアルファ粒子を利用することができないため、NBI 等の追加熱によりプラズマ中に存在し、プラズマ小半径に対するラーマー半径の比や周回或いは歳差ドリフト周波数においてアルファ粒子と類似した特性を持つ高速イオンを用いてアルファ粒子を模擬することにより、その輸送過程を研究する。この研究を進める上で、プラズマ内に閉じ込められずに外部へ逃走してくる高エネルギーイオンを計測するためにシンチレータ型損失高エネルギーイオンプローブ (FILD) が必要不可欠であり、それを駆使することにより、三次元磁場環境下における高速イオン輸送、並びに高速粒子励起 MHD 不安定性に伴う粒子輸送・損失研究を EAST 装置 (中国)、KSTAR 装置 (韓国) 及び LHD 装置 (日本) において実施する。EAST 装置では、H25 年度までに FILD の設計が終わり、H26 年度は、FILD の設置・調整作業を日中共同で実施し、初期データ取得を試みる。KSTAR 装置では、三次元摂動磁場印加時の高速イオン輸送のモデリングをより精密化する。

### 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プラズマの巨視的安定性と微視的乱流輸送、高エネルギー粒子の閉じ込め及び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 3 研究拠点で協力して推進する。各国のシミュレーションコードに関する情報を交換してコード開発を促進すると共に日本・LHD 装置、中

国・EAST 装置及び韓国・KSTAR 装置における実験条件と結果に関する情報を共有し現実的な物理条件における理論・シミュレーション研究を推進する。平成 26 年度は、EAST 装置および KSTAR 装置に関す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開始する。

## 6. 平成 26 年度研究交流成果

(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。)

### 6-1 研究協力体制の構築状況

#### R-1 (カテゴリーI) :

中国・等離子体研究所 (ASIPP) において、EAST 装置における MHD 安定性研究の現状および最近設置された共鳴摂動磁場コイルを用いた初めての実験結果について Hu 教授のグループおよび ASIPP に所属する大学院生と議論を行った。MHD 安定性については、高エネルギー粒子によって励起されるフィッシュボーンと呼ばれる不安定性に関する研究が着実に進められている。外部共鳴摂動磁場印加はロックモードを引き起こす誤差磁場の低減が目的の一つであるが、ELM と呼ばれる周辺プラズマに生じる不安定性の制御にも広く用いられている。EAST では共鳴摂動磁場を用いた誤差磁場の評価を行い、トカマク装置の中では二番目に誤差磁場強度が低いことが明らかとなった (誤差磁場の最も低いトカマク装置は KSTAR)。LHD では約 23cm の大きさを有する磁気島が誤差磁場により形成されているが、共鳴摂動磁場を用いることにより磁気島を消滅させることが可能となっている。これら共鳴摂動磁場を用いて EAST 装置で ELM 制御実験が初めて行われ、ELM のバースト周期の低減が観測された。同様の実験は LHD でも行っており、LHD の結果を基に周辺プラズマの安定性制御に与える効果やその制御手法に関する議論や検討を進めた。また、本カテゴリーで課題としている MHD モードの回転と安定化効果についても議論を進め、EAST 及び LHD の両装置間で比較研究を行う際のパラメータ領域の設定、ロックモード発現の条件等について検討を進めた。

#### R-2 (カテゴリーIIa) :

本 A3 フォーサイト事業の開始から計画し、開発を進めてきた EAST 装置での EUV 分光システムが平成 26 年 6 月に完成し、データ取得を始めた。EAST 装置は ITER 核燃焼実験炉と同様にタングステンダイバータを装着し、平成 25 年度からその運転を開始している。定常運転時のタングステンダイバータ特性を調べ、ITER 計画への準備研究をその目的としている。完成した EUV 分光システムの重要な役割は EAST プラズマにおけるタングステン不純物の挙動を研究することにある。LHD 装置でも不純物ペレットでタングステンをプラズマ中に入射することにより、タングステン不純物の分光研究を行っている。高原子番号を有するタングステンのスペクトルは複雑で、まずはスペクトルの同定を進める必要がある。EAST と LHD で得られたタングステンスペクトルを比較し、各スペクトルの荷数と遷移を理解す

るために ASIPP にて共同作業を実施した。また、EAST 装置でのタングステンスペクトルの空間分布を観測するために第二 EUV 分光システムを構築する準備を始めた。HL-2A 装置でもレーザーブローオフ法を用いてタングステンを入射し、スペクトルを観測するため共同研究を実施した。HL-2A プラズマの電子温度は EAST や LHD に比較してかなり低いので、得られたスペクトル形状に大きな違いがみられた。また、HL-2A のダイバータ配位、バッフル配位、リミター配位について周辺不純物輸送を共同研究した。より短波長領域を計測できる新たな EUV 分光システムの建設について議論し、計画を実行に移すべく具体的な予定を立てることで合意した。

芦川 (NIFS)、坂本 (筑波大)、大野 (名大)、片山 (九大)、鳥養 (富山大) による日本側プラズマ壁相互作用 (PWI) グループは、中国・等離子体物理研究所・EAST トカマク装置の G. N. Luo 及び J. S. Hu をはじめとする PWI グループとの共同研究を引き続き実施した。あわせて若手研究者である F. Ding、R. Ding、Y. W. Yu、B. Cao、H. S. Zhou 等との議論も重ねて行った。また、日本側研究グループは韓国・国立核融合研究所 (NFRI) の Suk-Ho Hong を中心とするグループと PWI 研究に関する共同研究を実施した。若手研究者の E. Bang も共同研究に参加し、積極的に議論に参加した。タングステン試料のトカマク・プラズマ曝露による水素/重水素リテンション評価および壁コンディショニングによる水素/重水素除去効果の評価に関する実験を日中韓の 3 カ国による共同提案として実験計画を立案した。現在、計画は予定通り進行中である。タングステン試料を暴露するためのプラズマ装置として EAST (中国)・KSTAR (韓国) を使用し、日本側の芦川・片山等が実験計画の立案、試料調整および試料表面分析の実施を担当する。中国の Y. W. Yu、F. Ding 等は試料を準備し、EAST 実験を実施し、韓国の S. K. Hong、E. Bang 等は静電プローブによる周辺プラズマのパラメータ測定を EAST 及び、KSTAR で行い、同時に KSTAR 実験を実施する予定にしている。2015 年 3 月には中国・等離子体物理研究所にて芦川、片山、J. S. Hu、Y. W. Yu、F. Ding、S. K. Hong が共同研究の現状確認および平成 27 年度に向けた計画の改善点について検討会を開き、議論した。この議論を基に、1) ICRF 壁コンディショニング放電による材料中の水素同位体置換効果、2) 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、3) 同放電時の静電プローブによるプラズマパラメータ計測を実験内容とする実験提案書を EAST 側へ提出した。KSTAR に対しては平成 27 年度の実験について同様の実験提案書を提出する予定としている。

本 A3 フォーサイト事業の一環として 2014 年 7 月 29 日～31 日にかけて西北師範大学 (中国・蘭州) にて、「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」(現地主催者：西北師範大学・董晨鐘 教授、丁曉彬 准教授) を開催した (A3 以外の別枠予算を利用)。本セミナーの参加者は約 40 名で、日本から 12 名 (核融合科学研究所から 4 名)、中国からは西北師範大学の他、近代物理研究所 (蘭州)、中国科学技術大学 (合肥)、応用物理計算数学研究所 (北京)、西南物理研究所 (成都) 等から参加者を得た。韓国からは中国側研究者により共同研究成果の発表が行われた。セミナーでは、大型ヘリカル装置 (LHD) や西南物理研究所・HL-2A トカマク装置でのタングステンを初めとする不純物イオン輸送

の分光研究に注目が集まり、大型磁場閉じ込め核融合研究に必要な原子過程データや分光モデルについて活発な議論が交わされた。特に電子ビームイオントラップ (CoBIT) を用いたタングステン多価イオンの分光データが順調に取得され、それに基づいたプラズマ中のタングステン多価イオンスペクトルのモデリングや診断法の開発が着実に進んでいることが確認された。今後の東アジア国際共同研究の発展に向けて大きな成果があった。また、次回のセミナーを平成 28 年夏に成都 (中国) で開催することを合意した。一方、原子分子関連の共同研究として、韓国・NFRI 及び KAERI の原子分子過程データ専門家と会合を開催した。分光モデルの高精度化に向けた原子過程データに関する共同研究の具体化について打合せを行うと共に、鉄および低価数タングステンイオンの原子データおよび原子モデルに関する議論を行った。今後、連絡を密にとりながら研究を進めていくことで合意した。

### **R-3 (カテゴリーIIb) :**

プラズマ周辺部に局在する揺動の物理的性質を調べるため複数の計測器開発プロジェクトを進めている。中国・等離子体物理研究所・X. Gao 教授との共同研究では、大型ヘリカル装置で開発を行ってきた高速度 VUV カメラシステムと同様の原理を有する多層膜反射鏡を用いた VUV 望遠鏡装置を EAST トカマクに設置する。そのために、核融合研で大館准教授と同装置を共同開発してきた経験を有する T. F. Ming 氏が等離子体物理研究所で開発研究を進めている。平成 26 年度には等離子体物理研究所で装置開発に関する打合せを行い、設計・製作活動が進展しつつある。中国・西南物理研究所では、高速度接線 X 線カメラシステムの開発が共同研究として H. Zhou 氏により行われており、計測したデータの解析手法等について議論を行った。

韓国・国立核融合研究所の KSTAR 装置についても周辺 MHD 揺動を対象とした二次元イメージング計測装置の設置に向けて議論を進めている。大型ヘリカル装置に設置していた高速度 VUV カメラシステムを KSTAR トカマクへ移設することを検討している。そのため、KSTAR で軟 X 線計測を担当している KAIST・Wonho Choe 教授及び京都大学・山本助教を共同研究者として迎え入れ、共同で計測器設置に向けた準備を進めている。

### **R-4 (カテゴリーIII) :**

シンチレータ型損失高エネルギーイオンプローブ (FIELD), 共役粒子同時計数型中性子エネルギー spektrometers 及び原子核乾板を利用した中性子カメラは高速イオン閉じ込め研究において重要な役割を果たす。本研究カテゴリーの日本側研究グループは、これら検出器を用いた研究を韓国・KSTAR 装置側担当者 (KIM Junghee 博士、CHEON MunSeong 博士) 及び大学院生 (KIM Jun-Young 氏) と共同で進めている。得られた実験成果について国内外の学術会合の場で共同発表を行っており、論文作成に向けた内容検討を進めている。中国・EAST 装置では FIELD の設計を日中共同で進めていたが、2014 年の EAST 実験において NBI 稼働開始と同時に損失高速イオンの観測に成功した。現在計測データの蓄積に努めている。また、中国・HL-2A 装置 (西南物理研究所) でも同様に FIELD を駆使した研究を進めている。

他経費より支出し、2014 年秋にロシアで開催された IAEA 核融合エネルギー会合で成果発表を行った。密接な協力体制の下、共同研究を精力的に継続している。

#### R-5 (カテゴリーIV) :

日本側から中国・等離子体物理研究所(ASIPP)に 2 名, 中国・大連理工大学(DUT)に 1 名, 韓国・国立核融合研究所(NFRI)に 1 名をそれぞれ派遣するとともに, DUT から京都大学に大学院生 1 名, NFRI から核融合科学研究所(NIFS)に若手研究者 1 名をそれぞれ招聘した。

ASIPP では EAST 装置ダイバータタイルギャップ付近の表面粒子束計算のための PIC コード開発を進めるとともに, 周辺プラズマモデリングについて議論を行った。また, ASIPP の若手研究者が取り組んでいる EAST 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結果と今後の研究計画についても議論した。

DUT においては, 反転磁気シアプラズマにおいてシア流を伴った二重テアリングモードの非線形発展について議論した。京都大学においては, DUT から招聘した大学院生と協力して微視的乱流と MHD 揺動の相互作用に関する研究を推進した。

NFRI では, KSTAR 装置における高エネルギー粒子駆動型不安定性に関する情報を収集した。同時に 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研究を NFRI から NIFS に招聘した若手研究者が開始した。

## 6-2 学術面の成果

#### R-1 (カテゴリーI) :

LHD, EAST および KSTAR 装置において共通して観測さ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。ITER におけるロックトモードに端を発する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が, その許容値を評価することを目的として共同実験を進めている。平成 26 年度に共鳴摂動磁場コイルが EAST 装置に設置され, 誤差磁場強度の正確な評価が行われた。LHD 及び KSTAR 装置では既に評価を終えており, 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。全ての装置において共鳴摂動磁場コイルが設置され, 本カテゴリーの共同研究を通して誤差磁場の正確な評価が完了することができた。トカマク装置ではロックト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。今後ロックトモードに関する物理現象を解明するための共同実験を進めるにあたり大きな進展となった。

#### R-2 (カテゴリーIIa) :

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、解析するための計算コードの整いつつある。EAST のタングステンスペクトルの解析に LHD での経験が直接適用でき、より効率的な共同研究が実施可能になる。具体的には  $W^{44+}$  及び  $W^{45+}$  イオンが発光しており、コアプラズマのタングステンイオンを定量的に解析することができる。また、 $W^{6+}$  等の低電離のタングステンイオンも発光しており、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も可能なことが判明した。これらの結果は、タングステンダイバータからコアプラズマに至るタングステンイオンの輸送を定量的に理解できることを示唆しており、成果が大いに期待できる。HL-2A 装置では各磁場配位について周辺不純物輸送を解析した。ダイバータ・バッフル・リミターの各配位に応じてダイバータ板へ連結する磁力線長が変化し、解析結果は磁力線長が長くなるほど不純物遮蔽効果が有効になることが判明した。また、3次元シミュレーション計算の結果、実験結果を説明する上でより大きなダイバータ板の物理スパッタリングが必要となり、非熱的イオン流束や不純物イオンによるスパッタリングの影響が強く示唆された。これらの共同研究成果を 2014 年にロシアで開催された IAEA 会合で発表し、結果を論文誌に投稿した。

ITER（国際熱核融合実験炉）ではタングステン材料のダイバータ部への活用を予定しており、中国・EAST 装置では ITER への予備研究としてタングステンダイバータ実験を行っている。そこで、ICRF 壁コンディショニング（ICWC）による水素同位体除去に関する実験をタングステン試料を用いて行った。材料の初期条件としてグロー放電にて重水素打ち込みを行い、その後 EAST 装置にてヘリウムを用いた ICWC 放電へ曝露した。材料中の重水素量は昇温脱離法（TDS）にて測定した。TDS の結果から初期グロー放電による重水素打ち込み量は十分であったと判断できたが、その後の He-ICWC による重水素の減少量はわずか 7% であった。この値は予想値に比べ極端に低いため、2015 年の EAST 共同実験に向けて実験条件の改善および事前準備について議論した。議論の結果、実験計画への改善点として以下の 3 点を得た。

- 1) 2014 年実験ではプラズマパラメータが不明であり、2015 年実験時には EAST 装置へ静電型プローブを設置する。2 種類のプローブを併用し、リアルタイムでプラズマパラメータを確認しながら共同実験を実施する。
- 2) TDS 分析装置の突然の不調も考慮し、他の試料の分析を引き続き実施する。
- 3) 深さ方向分析法による材料中の He 残留量を測定し、He-ICWC による材料への相互作用に関する評価を行う。

また、ヘリウムによる試料表面の損傷評価も 3 か国共同研究として実施することにした。試料の研磨状態を揃えるため処理を日本で行い、その後 EAST 及び KSTAR 装置へ設置する。実験の条件策定は 2014 年度中に検討し、確定した。

小型電子ビームイオントラップ（CoBIT）および LHD を使用した分光実験に関する共同研

究を行った。その結果、近紫外～可視域においては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。また、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り、プラズマ中での素過程の理解が進んだ。極端紫外領域での発光スペクトルを解析するためのタングステン多価イオン衝突輻射モデルについて、これまで考慮されていなかった多極子遷移等を新たに加え、モデルの高精度化を行った。これらモデルを使用し、CoBIT ならびに LHD 装置を用いた比較検証を行った。ITER を代表とする将来の核融合プラズマにおけるタングステン診断や不純物輸送研究を行うための学術的基盤を着実に構築した。

### R-3 (カテゴリーIIb) :

周辺局在化モード (ELM) を安定化する効果のある外部摂動磁場について、平成 26 年度には多数の共同実験を行った。KSTAR 装置ではトロイダルモード数が  $n = 1$  の外部摂動磁場によって ELM が安定化されることが知られている。安定化に至る周辺磁場構造の変化を推定する実験を行った。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が増大することが予想される。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には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。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、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。今後この手法を用いた磁場構造の同定を多くの実験条件に対して行うこととした。更に熱パルス伝搬を 2 次元測定することにより周辺磁場の 2 次元構造の観測とその解析を共同研究の目標とすることで合意した。

大型ヘリカル装置では、これまでよりも格段に高いベータ値 (3～4%) を有するプラズマにおいて改善閉じ込めモードへの遷移が観測された。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。閉じ込め特性が形成される磁気島により劣化しないよう弱い摂動磁場印加を行ったが、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ている。また、EAST 及び KSTAR トカマクと共同研究を行うことにより、トラス閉じ込め装置に共通する普遍的な物理現象の理解が進むことが期待できる。

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 CO<sub>2</sub> 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。以上により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する。

#### R-4 (カテゴリーIII) :

本研究カテゴリーは将来の核融合炉におけるアルファ粒子の生成や閉じ込めに関する物理機構の解明を目的としている。中性粒子ビーム入射によりプラズマ中に生じる高エネルギーイオン励起 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に関する共同研究を KSTAR 装置 (韓国), LHD 装置 (日本) 及び HL-2A (中国) において引き続き実施した。KSTAR では、摂動磁場 (RMP) コイルによる非軸対称磁場の印加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シンチレータ型損失高速イオンプローブ (FILD) に到達していることが判明した。EAST では 2014 年に初めて NBI 加熱機器が設置され、FILD による損失高速イオン検出を開始することができた。今後、実験データを蓄積し、KSTAR 及び LHD で取得したデータとの比較を行う。HL-2A では鋸波不安定性及びディスラプション時の FLIP データの解析が進み、IAEA 核融合エネルギー会議での共同発表を行った。内容を再吟味し、成果を論文として投稿した。

#### R-5 (カテゴリーIV) :

中国・等離子体物理研究所(ASIPP)との研究交流活動では、2次元 PIC コードを用いた EAST 装置に対するシミュレーション解析の共同研究について担当者と具体的計画を議論した。また、ASIPP の若手研究者が日本側研究者と協力して、現在計画されている 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。

中国・大連理工大学との研究交流活動では、「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。

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、その成果を国際会議で発表した。

### 6-3 若手研究者育成

#### R-1 (カテゴリーI) :

平成 26 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た。応募者は世界各国から 90 件以上あり、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。平成 26 年 3 月 23 日に中国・等離子体物理研究所において若手研究者および大学院生とカテゴリー I に関する LHD および EAST 装置の実験結果について議論を行った。また、総合研究大学院大学に入学を希望している中国人学生と面接を行うと共に現在行っている研究について議論した。ASIPP の近隣大学である中国科学技術大学において若手研究者と現在の研究内容について議論し、研究指導した。昨年に引き続き、核融合科学研究所で中国人大学院留学生に講義を行った。

#### R-2 (カテゴリーIIa) :

2 名の中国人留学生の研究指導を継続すると共に、大連工科大学で物理光工学学科の大学院生を相手に講義を行った。また、同大学院生が現在行っている研究の問題点を列挙し、解決策を研究指導した。中国・南寧で開催されたセミナーを利用して、中国・若手研究者を相手に周辺粒子輸送について研究指導し、具体的な解析方法を教授した。2014 年 7 月 29-31 日にかけて西北師範大学（中国・蘭州）にて「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」を開催し、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。

#### R-3 (カテゴリーIIb) :

中国人学生の指導を引き続き行うと共に、2 か月間米国・サンディエゴの DIII-D トカマクで共同実験を行う機会を与えた。2次元 VUV カメラシステムについて共同研究を行っている ASIPP の T. F. Ming 氏のグループから 1 名の大学院生を受け入れることに合意した。1 年間の研究指導を行う予定にしている。

#### R-4 (カテゴリーIII) :

2014 年度に開催された A3 フォーサイト事業セミナーにおいて、中国・等離子体プラズマ物理研究所 (ASIPP) の若手研究者 PU Neng 氏を対象に核融合プラズマ実験における高速イオン計測手法としての中性子計測の役割について講義するとともに、同氏が取得した中性子揺動測定データの解析方法について研究指導した。中国での共同研究時には北京大学・重粒子ビーム研究所において大学院生を対象に中性子計測及びその役割に関する講義を行った。また、ASIPP では損失高エネルギーイオンプローブ (FILD) の較正方法を CHANG Jiafeng 氏等若手研究者に研究指導した。その他当該分野研究に携わる若手研究者の育成に努めた。

#### R-5 (カテゴリーIV) :

韓国・国立核融合研究所の若手研究者を日本側の核融合科学研究所に受け入れ、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進展させた。中国・大連理工大学の大学院生を京都大学に受け入れて、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。鹿児島で開催した A3 セミナーに核融合科学研究所の若手研究者を派遣した。

#### 6-4 その他（社会貢献や独自の目的等）

##### R-1（カテゴリーI）：

夏の体験入学やアジア冬の学校での交流の他に、オープンキャンパスや共同研究先の近隣大学で講義を行い、核融合研究に関する啓蒙・広報活動を実施した。また、近年総合研究大学院大学入学希望の外国人学生が増加しており、メールを通じたコミュニケーションや情報発信に力を注いでいる。

##### R-2（カテゴリーIIa）：

核融合プラズマ学会誌（PFR）に投稿された国際土岐会議のプロシーディングの掲載の可否を判断するヘッドエディターを担当し、社会貢献に寄与した。同会議には中韓から多くの研究者が参加している。また、本カテゴリーの研究では検出器として真空中で使用する真空紫外用 CCD 検出器を用いている。その検出器を利用し、ここで開発した EUV 分光システムは科学用 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アップに貢献すると共に一般市民への社会貢献を行っている。

##### R-3（カテゴリーIIb）：

核融合科学研究所が実施する総合研究大学院大学・主催「アジア冬の学校」の公開講座として、「fluctuation studies using imaging diagnostics」という題目で講義を行った。同時に中韓の学生を中心とする各国の大学院生を対象にイメージング計測技術についての研究指導を行い、啓蒙活動に努めた。

##### R-4（カテゴリーIII）：

2015年3月に中性子エネルギー spektrometa 開発に係る議論のため北京大学・重粒子物理研究所の Fan Tie-shuan 教授研究室を訪問し、物理学科の学生を対象に磁場閉じ込め核融合実験における中性子・粒子計測の役割について講義するとともに日本が展開する核融合研究に関する啓蒙・広報活動を実施した。

##### R-5（カテゴリーIV）：

核融合科学研究所のオープンキャンパスにおいてスーパーコンピュータの見学コースを設け、最先端のスーパーコンピュータの構造と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広く啓蒙し、社会貢献を行った。

## 6-5 今後の課題・問題点

今年度の共同研究を通して明らかになった下記の課題や問題点を次年度の優先課題として取り上げ、より建設的で効率的な共同研究を遂行する。

### R-1 (カテゴリーI) :

誤差磁場を生むコイルの種類や場所によって誘起されるモード構造に違いが生じる。特に LHD とトカマクではコイル形状が大きく異なるため、現れる磁気島の空間構造の比較が簡単ではなくなる。丁寧な取り扱いが必要になる。

### R-2 (カテゴリーIIa) :

共同研究の相手側装置である EAST や HL-2A では利用できる計測ポートに限りがあり、新規に使用できるポートが非常に少なくなっている。研究者間でのポート占有の競争が激しくなっており、相手側研究者やグループとの十分で且つ密接な情報のやり取りが必要になってきている。

### R-3 (カテゴリーIIb) :

ヘリカル型実験装置である LHD で生成される無電流プラズマとトカマク型実験装置で生成されるプラズマ電流を有するプラズマでは励起される MHD 不安定性に関する物理機構に大きな違いがあり、トカマク実験を行っている共同研究者からの実験提案があまり促進できていない。相互の物理的理解を深める必要がある。また、HL-2A 装置において開発中の 2 次元 SX カメラで得られた信号の精度改善があまり進んでおらず、共同研究によるサポートが必要となっている。

### R-4 (カテゴリーIII) :

本カテゴリーにおいては 3 カ国間で親密な研究連携を既に構築しており、順調に共同研究が推移している。2015 年度から FILD 及び中性子計測を駆使した高速イオン輸送・損失に係る研究を 3 ヶ国共同で実施する予定にしている。マシンタイム及び研究者派遣の日程について慎重な調整が必要となる。

### R-5 (カテゴリーIV) :

高エネルギー粒子駆動型不安定性に関する中国・等離子体物理研究所および韓国・国立核融合研究所との研究交流活動では、EAST 装置および KSTAR 装置に関す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開始した。2015 年度は研究課題やシミュレーションモデルを更に注意深く設定し、研究レベルを向上させる必要がある。

## 6-6 本研究交流事業により発表された論文

平成 26 年度論文総数

61 本

相手国参加研究者との共著 29本

(※ 「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26年度研究交流実績状況

### 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) 榑原 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				
参加者数	日本側参加者数	20名			
	中国側参加者数	13名			
	韓国側参加者数	13名			
26年度の研究 交流活動	<p>昨年度に引き続き、古典・新古典ティアリングモードおよび交換型モードについてプラズマ回転を中心とした解析を進めた。A3セミナーが平成26年6月に鹿児島、平成27年1月に中国・南寧で開催され、3カ国の各装置における最新の研究成果・物理研究の進展について議論を行った。平成27年3月は中国・西南物理研究所・HL-2A装置におけるロックモードに起因するディスラプションの実験解析を進めた。低域混成波を用いた電流駆動実験では不純物の流入に伴い電流分布に変化が生じていた。これがティアリングモードの励起原因となっており、最終的にプラズマ回転が停止しプラズマ崩壊に至っていることを突き止めた。平成27年3月には中国・等離子体研究所においてEAST放電のMHD安定性に関する議論を行った。ティアリングモードと交換型モードのMHD特性の違い、新たに設置された共鳴摂動磁場を用いた誤差磁場評価やELM制御に関する実験結果についてもLHDやKSTARと比較検討しながら議論を進めた。</p>				

<p>26年度の研究 交流活動から得 られた成果</p>	<p>古典・新古典ティアリングモードは誤差磁場に代表される外部摂動磁場や抵抗壁によってプラズマ流が減速し、それに伴いモード回転も減速する。回転停止に至る原因の一つが誤差磁場であり、誤差磁場の強度や位相等を正確に調べる必要がある。LHDでは電子ビームを用いた磁場強度分布マッピングにより誤差磁場に起因する磁気島の幅や位相等が明らかになっており、別途共鳴摂動磁場実験において評価された結果と矛盾しないことがわかっている。KSTARでは昨年度に正確な誤差磁場評価を行い、その誤差磁場強度は既存のトカマク装置の中で最小であることがわかった。EAST装置では、今回新たに設置した共鳴摂動磁場コイルを用いて定量的に誤差磁場評価を進めており、KSTARに次いで誤差磁場が低いことが明らかになった。これらの結果はロックトモードを引き起こす摂動磁場強度の定量的評価に必要不可欠であり、現在装置間実験において構築されているロックトモードスケーリングの物理的背景を明らかにする上で非常に重要な知見となっている。</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			
26年度の研究 交流活動	<p>本 A3 フォーサイト事業の開始から計画し、開発を進めてきた EAST 装置での EUV 分光システムが平成 26 年 6 月に完成し、データ取得を始めた。EAST 装置では定常運転時のタングステンダイバータ特性を調べ、ITER 計画への準備研究をその目的としている。完成した EUV 分光システムの重要な役割は EAST プラズマにおけるタングステン不純物の挙動及び輸送を研究することにある。EAST と LHD で得られたタングステンスペクトルを比較し、各スペクトルの荷数と遷移を理解するために ASIPP にて共同作業・研究を実施した。また、EAST 装置でのタングステンスペクトルの空間分布を観測するために第二 EUV 分光システムを構築する準備を始めた。HL-2A 装置でもレーザーブローオフ法を用いてタングステンを入射し、スペクトルを観測するため共同研究を実施した。また、HL-2A のダイバータ配位、バッフル配位、リミター配位について周辺不純物輸送を共同研究した。</p> <p>EAST 装置において ICRF 壁コンディショニング (ICWC) によるタングステン材からの水素同位体除去実験を 3 か国の共同提案として開始した。上記 ICWC 実験の改善点について議論し、2015 年度への計画立案を修正のうえ具体化した。特に静電プローブ計測器、試料表面状態の改善、放電パラメータの評価に関する準備・考察を韓国側グループと共に行った。</p> <p>本 A3 フォーサイト事業の一環として 2014 年 7 月 29 日～31 日にかけて西北師範大学 (中国・蘭州) にて、「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」(現地主催者: 西北師範大学・董晨鐘 教授、丁曉彬 准教授) を開催した。本セミナーの参加者は約 40 名で、日本から 12 名 (核融合科学研究所から 4 名)、中国からは西北師範大学の他、近代物理研究所 (蘭州)、中国科学技術大学 (合肥)、応用物理計算数学研究所 (北京)、西南物理研究所 (成都) 等から参加者を得た。韓国</p>				

	<p>からは中国側研究者により共同研究成果の発表が行われた。また、次回のセミナーを平成 28 年夏に成都（中国）で開催することを合意した。</p> <p>一方、原子分子関連の共同研究として、韓国・NFRI 及び KAERI の原子分子過程データ専門家と会合を開催した。分光モデルの高精度化に向けた原子過程データに関する共同研究の具体化について打合せを行うと共に、鉄および低価数タングステンイオンの原子データおよび原子モデルに関する議論を行った。</p>
<p>26年度の研究 交流活動から得 られた成果</p>	<p>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。具体的には <math>W^{44+}</math> 及び <math>W^{45+}</math> イオンが発光しており、コアプラズマのタングステンイオンを定量的に解析することができる。また、<math>W^{6+}</math> 等の低電離タングステンイオンも発光しており、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も可能である。これらの結果は、タングステンダイバータからコアプラズマに至るタングステンイオンの輸送を定量的に理解できることを示唆しており、今後解析コードの整備が進めば、タングステン研究の世界的な研究拠点を形成できる。</p> <p>HL-2A 装置では各磁場配位について周辺不純物輸送を解析した。ダイバータ・バッフル・リミターの各配位に応じてダイバータ板へ連結する磁力線長が変化し、解析結果は磁力線長が長くなるほど不純物遮蔽効果が有効になることが判明した。また、3次元シミュレーション計算の結果、実験結果を説明する上でより大きなダイバータ板の物理スパッタリングが必要となり、非熱的イオン流束や不純物イオンによるスパッタリングの影響が強く示唆された。これらの共同研究成果を 2014 年にロシアで開催された IAEA 会合で発表し、結果を論文誌に投稿した。</p> <p>ICRF 壁コンディショニング (ICWC) の 1 回目の実験を EAST 装置にて 3 か国共同実験として実施した。予め実験室にて重水素を蓄積させたタングステン試料を専用プローブ装置にて ICWC へ曝露した。超伝導コイルを用いた核融合実験炉において定常強磁場下で可能な壁コンディショニング法として近年非常に注目されている手法である。残念ながら 2014 年の実験では重水素の除去量はわずか 7%にとどまり、実験手法の改善が必要であることが分かり、3 か国の担当者による議論を経て改善案を作成した。同時に実時間でプラズマパラメータ評価ができるハーモ</p>

	<p>ニックプローブの設置準備を韓国グループが進めた。実験室にて同ハーモニックプローブの動作確認を完了した。将来の核融合実験炉でのより効率的な壁コンディショニング法の開発として結果が期待されている。</p> <p>小型電子ビームイオントラップ (CoBIT) および LHD を使用した分光実験に関する共同研究を行った。その結果、近紫外～可視域においては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。また、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り、プラズマ中での素過程の理解が進んだ。極端紫外領域での発光スペクトルを解析するためのタングステン多価イオン衝突輻射モデルについて、これまで考慮されていなかった多極子遷移等を新たに加え、モデルの高精度化を行った。これらモデルを使用し、CoBIT ならびに LHD 装置を用いた比較検証を行った。ITER を代表とする将来の核融合プラズマにおけるタングステン診断や不純物輸送研究を行うための学術的基盤が着実に構築されつつある。</p>
--	---

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) 大舘暁・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			
26年度の研 究交流活動	<p>周辺 MHD 揺動現象の理解・制御のためには現象を正確に観測する手段の開発が必要となる。周辺 MHD 揺動実験やそれに必要となる RMP 磁場印可検出用計測器の開発等について日中間で議論を継続した。日本側は計測器の開発指針を指導し、中国側はそれに基づいて実際の計測装置開発を進めるという形で共同研究を実施した。計測器開発を加速するために打ち合わせを行い、共同実験を実施した。</p> <p>日韓間でも計測器の開発を促進するため、日韓計測セミナーの場で研究発表を行い、計画の具体化に向け議論した。また、KSTAR 及び LHD で共同実験も実施した。</p>				
26年度の研 究交流活動から得 られた成果	<p>外部摂動磁場(RMP 磁場)を用いて周辺 MHD 揺動 (特に ELM バースト) を制御するためには、周辺磁場構造の変化を観測することが必要である。周辺摂動磁場印可時に生じる周辺プラズマの磁場構造変化を調べるために、周辺不純物放射強度分布の変化を解析する。そのためのコード開発が進展した。摂動磁場によって対称性を失った平衡配位の磁力線を追跡するため大規模プログラムの並列化を促進した結果、実用的な時間内で計算が収束するようになった。</p> <p>KSTAR 装置において磁場構造を推定する実験を行った。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が増大することが予想される。プラズマコア部の鋸歯状振動によって生じる熱パルスの伝搬特性から輸送特性の変化を推定した。摂動磁場を印加すると、熱輸送係数がより大きくなることが判明した。また、変化は <math>q = 1</math> 面のすぐ外で始まることを突き止めた。この結果は外部摂動磁場がプラズマ</p>				

	<p>コア部近くまで浸透していることを示唆しており，周辺プラズマ揺動の制御に向け大きな進展を得た。</p> <p>大型ヘリカル装置ではこれまでよりも格段に高いベータ値（3－4％）を有するプラズマにおいて改善閉じ込めモードへの遷移を観測した．真空磁場の最外殻磁気面より外側に存在する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に到達する．この周辺MHDモードを制御するために摂動磁場を印加した．磁気島の生成が期待できないような小規模摂動磁場印加の場合でもMHDモードに変化が観測でき，ダイバータ板に到達する熱流速揺動を減少させることに成功した．</p>
--	--

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 KIM Woong-Chae, National Fusion Research Institute, Principal Researcher				
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			
26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によるMHD不安定性の励起とそれに伴うアルファ粒子の異常損失が危惧されている。高速イオン励起MHD不安定性と高速イオンの相互作用、またその結果生ずる高速イオンの異常輸送に関する理解とその制御が重要課題となっている。これらに関連した研究を進めるためにはシンチレータを用いた損失高速イオン検出器(FILD)が必須計測機器として位置付けられている。KSTAR装置では、FILD共同研究の実施に向け若手研究者1名を派遣し、高速イオンと高速イオン励起MHD不安定性の相互作用研究の具体化について議論した。電子メールを通して情報をやり取りし、核融合科学研究所で開発された粒子軌道計算コードにKSTAR装置の真空容器内構造物を精密に取り込む作業を完了した。また、RMPコイルにより三次元周辺磁場を印加した場合に生じる新たな高速イオンの挙動解析を進めている。中性子エネルギー spektrometer 開発と得られたデータの解析も同時進行している。EAST装置ではNBI加熱実験が始まり、FILDによる損失高速イオンの検出に成功した。FILD共同研究のために2名をASIPPに派遣し、FILDの較正作業を日中共同で実施した。LHD装置では将来の重水素実験に受け中性子エネルギー spektrometer (NES)の導入を計画している。高検出効率を有するNESの開発を進めている北京大学に日本から2名を派遣し、NESの現地調査と情報交換を行った。HL-2A装置との研究交流では、2名の研究者を先方から受け入れ、FILDのデータ解析を行うと共に次期装置・HL-2MにおけるFILD設計を検討した。</p>				

<p>26年度の研究 交流活動から得 られた成果</p>	<p>KSTAR 装置では ELM 振動の緩和を目指して RMP コイルを利用した非軸対象磁場印加に関する研究が精力的に行われている。観測した損失高速イオン束の変化を解析するため、NIFS LORBIT コードに KSTAR のポロイダルリミターやパッシブプレート等の真空容器内構造物を精密に取り込み、RMP 磁場印加時の軌道解析を行った。その結果、高速イオン挙動の全体像を初めて明らかにすることができた。得られた成果を UST・博士後期課程学生の KIM Jun-Young 氏が 2014 年の欧州物理学会にて発表した。また、中性子スペクトルから高速イオンの減速・閉じ込めの情報を引き出すことを目的として名古屋大学と NIFS が共同で開発した 2 種類の中性子エネルギー spektrometers を KSTAR 装置に設置し、観測を継続している。KSTAR 装置の NBI 放電において原子核乾板を用いて中性子スペクトルデータ及び 2 次元イメージデータの同時取得に初めて成功した。現在、解析を進めている。名古屋大学、NIFS 及び NFRI の共同成果として結果を 26th International Conference on Nuclear Tracks in Solids で発表し、論文を投稿した。EAST 装置では、日中共同で設計・製作を進めてきた FILD が 2014 年から稼働を始め、初期データの取得に成功した。これにより、本カテゴリーの研究を推進する上で核となる FILD 検出器を LHD, KSTAR 及び EAST の三装置に整備完了した。今後の研究の発展が大いに期待される。</p>
--------------------------------------	--

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) 理論・シミュレーション				
	(英文) Theory and simulation				
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	11名			
	韓国側参加者数	2名			
26年度の研究 交流活動	<p>日本側から中国・等離子体物理研究所(ASIPP)に2名, 中国・大連理工大學(DUT)に1名, 韓国・国立核融合研究所(NFRI)に1名をそれぞれ派遣するとともに, DUT から京都大学に大学院生1名, NFRI から核融合科学研究所(NIFS)に若手研究者1名をそれぞれ招聘した.</p> <p>ASIPP では EAST 装置ダイバータタイルギャップ付近の表面粒子束計算のための PIC コード開発を進めるとともに, 周辺プラズマモデリングについての議論を行った. また, ASIPP の若手研究者が取り組んでいる EAST 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結果と今後の研究計画について議論した.</p> <p>DUT においては, 反転磁気シアプラズマにおいてシア流を伴った二重テアリングモードの非線形発展について議論した. 京都大学においては, DUT から招聘した大学院生と協力して微視的乱流と MHD 揺動の相互作用に関する研究を推進した.</p> <p>NFRI では, KSTAR 装置における高エネルギー粒子駆動型不安定性に関する情報を収集した. NFRI から NIFS に招聘した若手研究者が 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開始した.</p>				

<p>26年度の研究 交流活動から得 られた成果</p>	<p>ASIPP との研究交流活動では、2次元 PIC コードを用いた EAST 装置に対するシミュレーション解析の共同研究について担当者と具体的計画を議論した。また、ASIPP の若手研究者が日本側研究者と協力して、今後の EAST 装置の実験において予想され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 A3 セミナーおよび中国国内研究会で発表した。</p> <p>DUT との研究交流活動では、「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。</p> <p>NFRI との研究交流活動では、NFRI の若手研究者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、その成果を国際会議で発表した。</p>
--------------------------------------	--

## 7-2 セミナー

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「5th A3 Foresight Program Workshop on Critical Physics Issues Specific to Steady State Sustainment of High-Performance Plasmas」
	(英文) JSPS A3 Foresight Program “5th A3 Foresight Program Workshop on Critical Physics Issues Specific to Steady State Sustainment of High-Performance Plasmas“
開催期間	平成26年6月23日 ~ 平成26年6月26日 (4日間)
開催地(国名、都市名、会場名)	(和文) 日本・鹿児島・鹿児島東急イン
	(英文) Japan・Kagoshima・Kagoshima Tokyu Inn
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) Shigeru MORITA, 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.	14/74	
	B.	0	
中国 〈人/人日〉	A.	11/64	
	B.	1	
韓国 〈人/人日〉	A.	14/82	
	B.	1	
合計 〈人/人日〉	A.	39/220	
	B.	2	

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。

セミナー開催の目的	<p>A3 フォーサイト事業に採択された課題「高性能プラズマの定常保持に必要な物理基盤の形成」について3カ国のコーディネータ・キーパーソン・共同研究者が集まり、共同研究を遂行する上で必要な 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）及び実験結果について情報交換と議論を行う。今回のセミナーでは特にタングステンに関する話題（タングステンイオンの分光、タングステンの原子分子過程、タングステンスペクトルのモデリング、タングステン材料のプラズマ-壁相互作用等）を取り上げ、集中的に議論する。セミナーでは共同研究の現状を議論すると共に今後の方針についても検討を加える。</p>	
セミナーの成果	<p>次世代の熱核融合実験炉（ITER 等）ではコアプラズマからダイバータ領域へ流出する巨大な熱流束を制御・処理することが不可避の課題となっている。その一環としてタングステンダイバータが多くのトカマク装置で試験されている。プラズマ中でのタングステンの挙動や輸送を研究するためにはタングステンスペクトルの理解が必須となる。今回のセミナーでは特にこの話題を取り上げた結果、参加者全員がタングステン研究の重要性を認識できた。また、EAST 装置で平成 25 年より開始されたタングステンダイバータ実験とその定常維持研究の ITER を念頭に置いた核融合研究全体における位置づけを共有でき、今後の積極的な共同研究の推進に向け、大きな成果となった。同時に現在進行している共同研究の現状を把握し、必要な議論・検討を加えることができた。</p>	
セミナーの運営組織	<p>A3 フォーサイトセミナー開催委員会設置：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・日中韓フォーサイト事業のコーディネータ</li> <li>・日本側キーパーソン（サブキーパーソン含む）</li> <li>・核融合科学研究所・管理部・研究支援課</li> </ul>	
開催経費分担内容と金額	日本側	<p>内容 日本国内旅費 研究セミナー開催経費</p>
	中国側	<p>内容 国際航空運賃負担</p>
	韓国側	<p>内容 国際航空運賃負担</p>

整理番号	S-2
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「6th A3 Foresight Program Workshop on Critical Physics Issues Specific to Steady State Sustainment of High-Performance Plasmas」
	(英文) JSPS A3 Foresight Program “6th A3 Foresight Program Workshop on Critical Physics Issues Specific to Steady State Sustainment of High-Performance Plasmas“
開催期間	平成27年1月6日 ～ 平成27年1月9日 (4日間)
開催地(国名、都市名、会場名)	(和文) 中国・南寧・Sanzan Hotel
	(英文) China・Nanning・Sanzan Hotel
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) Shigeru MORITA, 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) Liqun HU, Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science (ASIPP), Professor,

#### 参加者数

派遣先 派遣元		セミナー開催国 (中国)	
		A.	B.
日本 〈人／人日〉	A.	9 / 53	
	B.	2	
中国 〈人／人日〉	A.	14 / 56	
	B.	24	
韓国 〈人／人日〉	A.	11 / 44	
	B.	6	
合計 〈人／人日〉	A.	34 / 153	
	B.	32	

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。

セミナー開催の目的	<p>A3 フォーサイト事業に採択された課題「高性能プラズマの定常保持に必要な物理基盤の形成」について3カ国のコーディネータ・キーパーソン・共同研究者が集まり、共同研究を遂行する上で必要な 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）及び実験結果について情報交換と議論を行う。今回のセミナーではカテゴリーIIb の周辺プラズマ揺動の制御を重点的に取り上げ議論する。特に最近の核融合研究では、ELM 制御、放射ダイバータプラズマの理解と維持、新しいダイバータ配位の探求が非常に重要な研究課題となっている。また、若手研究者用の発表セッションを設け、若手研究者育成の一環とする。</p>	
セミナーの成果	<p>次世代の熱核融合炉ではHモードに付随して励起されるELMによる大きなダイバータ熱負荷の制御、周辺熱流束の不純物放射を用いた軽減（放射ダイバータ）、ダイバータ部の面積を広げ、磁力線長を長くすることによるダイバータ温度の低下を目指した新ダイバータ配位の探求についてLHD、EAST及びKSTARの核装置から発表があった。新しい解析や新しいアイデアに基づいた実験が世界の核融合研究をリードする形で、A3 フォーサイト事業を基盤とする共同研究を介して進行している様子が理解できた。また、今後の研究指針を参加者全員で具体的に議論することにより、更に建設的な共同研究の実施と効率的な研究手法に向け計画を発展させることができた。若手研究者のセッションを設け、大学院生を含む若手研究者が発表しやすい環境を作ることにより、活発な議論を促進することができ、今後の研究への動機をより高めることができた。</p>	
セミナーの運営組織	<p>セミナー運営委員会  Prof. Liqun HU (中国・ASIPP)  Prof. Shigeru MORITA (日本・NIFS)  Prof. Yeong-Kook OH (韓国・NFRI)  事務局：Dr. Yong Liu, Ms. Shaohua Dong</p>	
開催経費分担内容と金額	日本側	<p>内容  外国旅費・国内旅費</p>
	中国側	<p>内容  セミナー開催経費・国内旅費</p>
	韓国側	<p>内容  外国旅費</p>

### 7-3 研究者交流（共同研究、セミナー以外の交流）

所属・職名 派遣者名	派遣・受入先 (国・都市・機関)	派遣期間	用務・目的等
核融合科学研究所・ 教授・森田繁	中国・大連・ 大連工科大学	3月26-29 日	大連工科大学・物理光電子学科で大学院生に対する講義及び各大学院生の研究内容に対する研究指導
核融合科学研究所・ 助教・吉村信次	中国・大連・ 大連工科大学	3月26-29 日	大連工科大学・物理光電子学科で大学院生に対する講義及び各大学院生の研究内容に対する研究指導

## 8. 平成26年度研究交流実績総人数・人日数

### 8-1 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		1/6 ( )	( )	( )	1/6 (0/0)
	2		2/14 ( )	2/12 ( )	( )	4/26 (0/0)
	3		1/6 ( )	2/10 ( )	( )	3/16 (0/0)
	4		27/164 (4/18)	2/8 ( )	( )	29/172 (4/18)
	計		31/190 (4/18)	6/30 (0/0)	0/0 (0/0)	37/220 (4/18)
中国	1	13/80 (1/4)		( )	( )	13/80 (1/4)
	2	( )		( )	( )	0/0 (0/0)
	3	( )		( )	( )	0/0 (0/0)
	4	1/20 (1/20)		( )	( )	1/20 (1/20)
	計	14/100 (2/24)		0/0 (0/0)	0/0 (0/0)	14/100 (2/24)
韓国	1	15/109 (1/6)	( )		( )	15/109 (1/6)
	2	( )	( )		( )	0/0 (0/0)
	3	( )	( )		( )	0/0 (0/0)
	4	( )	( )		( )	0/0 (0/0)
	計	15/109 (1/6)	0/0 (0/0)		0/0 (0/0)	15/109 (1/6)
	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	28/189 (2/10)	1/6 (0/0)	0/0 (0/0)	0/0 (0/0)	29/195 (2/10)
	2	0/0 (0/0)	2/14 (0/0)	2/12 (0/0)	0/0 (0/0)	4/26 (0/0)
	3	0/0 (0/0)	1/6 (0/0)	2/10 (0/0)	0/0 (0/0)	3/16 (0/0)
	4	1/20 (1/20)	27/164 (4/18)	2/8 (0/0)	0/0 (0/0)	30/192 (5/38)
	計	29/209 (3/30)	31/190 (4/18)	6/30 (0/0)	0/0 (0/0)	66/429 (7/48)

※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。)  
 ※本事業経費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。

### 8-2 国内での交流実績

1	2	3	4	合計
14/75 (2/12)	( )	( )	( )	14/75 (2/12)

## 9. 平成26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	2,548,289	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	5,441,490	
	謝金	0	
	備品・消耗品購入費	164,749	
	その他の経費	845,472	
	外国旅費・謝金等に係る消費税		
	計	9,000,000	研究交流経費配分額以内であること。
業務委託手数料		900,000	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		9,900,000	