

日中韓フォーサイト事業 平成25年度 実施報告書

1. 拠点機関

日本側拠点機関：	東京大学
中国側拠点機関：	清華大学
韓国側拠点機関：	ソウル大学

2. 研究交流課題名

(和文)： 球状トーラスにおける革新的トカマクプラズマの立ち上げと電流駆動
(交流分野：プラズマ物理学)

(英文)： Innovative Tokamak Plasma Startup and Current Drive in Spherical Torus
(交流分野：Plasma Physics)

研究交流課題に係るホームページ：[http:// tanuki.t.u-tokyo.ac.jp/A3/](http://tanuki.t.u-tokyo.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：東京大学

実施組織代表者(所属部局・職・氏名)：総長 濱田 純一

研究代表者(所属部局・職・氏名)：大学院新領域創成科学研究科・准教授・井通暁 (1-1)

協力機関：京都大学、九州大学、自然科学研究機構

事務組織：東京大学大学院 新領域創成科学研究科 研究交流係

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) Tsinghua University

(和文) 清華大学

研究代表者(所属部局・職・氏名)：(英文)

Department of Engineering Physics・Professor・GAO, Zhe (2-1)

協力機関：(英文) Chinese Academy of Sciences, Southwestern Institute of Physics

(和文) 中国科学院、西南物理研究院

(2) 韓国側実施組織：

拠点機関：(英文) Seoul National University

(和文) ソウル大学

研究代表者(所属部局・職・氏名)：(英文)

Department of Nuclear Engineering・Professor・HWANG, Yong-Seok (3-1)

協力機関：(英文) Pohang University of Science and Technology

(和文) 浦項工科大学

5. 研究交流目標

5-1. 全期間を通じた研究交流目標

経済的な核融合発電を実現するための革新的な磁場閉じ込め概念である「球状トカマク」の炉心プラズマ物理に関して、日中韓の大学を中心とした研究機関での実験を軸とした共同研究を実施し、米国や欧州の国立研究機関における球状トカマク実験に匹敵する世界的水準の研究遂行体制を形成すると同時に、大学院学生ならびに若手研究者の育成に資する研究組織の構築を目的とする。

球状トカマクは、比較的小さい磁場によって高い圧力のプラズマを閉じ込め得る(=高いベータ値が実現可能)ことから、トカマク方式における核融合発電所建設コストの大部分を占める超伝導コイルの量を大幅に削減することができる。その一方で球状トカマクでは、プラズマ立ち上げ/初期加熱法として一般的に用いられている中心ソレノイドコイルを使用することが困難であり、それに代わる電流駆動手段の確立が喫緊の課題となっている。

本研究は、(A) 高周波ならびにプラズマ合体法を用いた球状トカマクプラズマ立ち上げ/電流駆動の実験的検証および相互比較、および(B) 高ベータプラズマにおける電磁流体的不安定性や乱流による輸送機構の解明といった、核融合開発とプラズマ物理学の双方を視野にいれつつ、各課題について特に若手研究者および大学院学生の相互派遣・実験参加を通して磁場閉じ込め核融合研究に関するアジアの大学間連携を確立し、先端的研究と人材育成の遂行を実現するものである。

5-2. 平成25年度研究交流目標

今年度は、プラズマスクール(日本)、ワークショップ(中国)という二種類のセミナーを開催するが、前者は本事業に参加する球状トカマク分野の若手研究者の育成に大いに役立つのみならず、広く宇宙や天体プラズマの学生にも参加を促すことによって、東アジアの物理教育に貢献し、また幅広い分野にわたる学際的な連携を促進する効果が期待できる。また、後者は韓国において開催された初回に引き続き実施するものであり、継続的なセミナーの開催は本事業で構築しつつある研究協力体制の維持発展に大いに役立つと考えられる。これらのセミナーには大学院学生を含む若手研究者を積極的に参加させることによって表現能力の向上と国際意識の発揚を促し、研究者育成に貢献する。

研究面では、3か国のそれぞれに特徴のある6台の球状トカマク実験装置を用いて、プ

ラズマの非誘導立ち上げに関する共同研究を並行して実施することによって、効率的かつ迅速な研究の遂行が期待できる。具体的には、各種高周波波動による立ち上げ手法の高性能化、達成プラズマパラメータの向上といった開発研究を進めると同時に、波動—プラズマ相互作用や非熱的粒子の振る舞いの理解、さらには各種プラズマ計測手段の性能向上などを直接的な目標としている。

6. 平成25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

平成25年度には、日本側が主催した学生向け夏の学校(7月、東京)と、中国側が主催したワークショップ(1月、北京)を開催し、本事業参加研究者の多くが参加・議論を行ったことによって研究協力体制を強化した。7月の夏の学校は、本事業に参加する3か国29名の学生を対象としたものであったが、宇宙プラズマ分野を中心とした別の東アジアプラズマスクールと一部日程を重複して開催することによって、本事業をコアとしつつ、より広範な研究分野および地域をカバーする研究拠点の構築に資することができた。また、1月のワークショップでは、今年度の協力活動の総括と次年度計画の調整を行った。

本事業の中心となる3か国6台の球状トカマク実験装置では、それぞれに異なる手段による非誘導立ち上げ手法の実現を目指しているが、その際の物理素過程の理解、基幹的な測定機器/電源/計測システムの整備、および理論構築の面での研究交流が進展した。合体法に用いる初期プラズマ形成手段の開発、磁気ヌル点における放電開始と電流駆動のメカニズムの解明および必要な計測機器の開発に関して、日本と韓国の拠点機関を中心とした相互交流に基づく共同研究が進展しており、日本で開発されたパルス電源/磁場計測/トムソン散乱計測システムの技術を韓国の実験装置に導入し、韓国側で実施されている粒子シミュレーションに基づく放電開始過程の解析手法の日本への導入を進めている。高ベータ球状トカマクにおける中性粒子ビーム入射加熱法の実現に関しても、日本側の拠点/協力機関と韓国拠点機関を中心とした性能向上と新方式の開発が進展している。

高周波による球状トカマク立ち上げに関しては、特に初期立ち上げ状態の検証に不可欠となる磁気面再構成手法の開発を日本と中国の共同研究により実施中である他、韓国の大規模トカマク装置における高周波立ち上げ実験への日本側研究者の参加等を通して、密接な研究協力を構築しつつある。

6-2 学術面の成果

これまでに4台の球状トカマク実験において、中心ソレノイドコイルを用いない革新的な手法によって最大10kAオーダーのプラズマ電流の立ち上げが達成されており、高効率化に向けたプラズマパラメータの詳細計測が一部実験においてスタートした。主に日本の研究機関で開発された高感度トムソン散乱計測システムにより、高周波立ち上げ時の低密度プラズマの電子圧力分布が初めて計測され、放電維持および電流駆動機構の検証実験が大き

く進展した。同じく初期電離・電流駆動過程の解明を目的としたプラズマ中の静電ポテンシャル分布計測や、電流の多くを担うと考えられている高速電子計測の開発も進展しており、日本と中国とが共同開発を行っている磁場情報を用いたプラズマ形状高精度推定手法との総合的な運用によって、高周波によるプラズマ立ち上げ過程の解明が達成されるものと期待される。

合体法に関しては、初期プラズマ生成シーケンスの改善によりプラズマ加熱パワーを大幅に上昇させることに成功し、非定常な磁気リコネクションに伴う高エネルギー電子形成が確認された。日本と韓国とが中心となってリコネクション加熱観測用のトムソン散乱計測システムを開発しており、リコネクション点近傍での電子加熱とそれに付随する密度変動を示唆する実験結果が得られている。軟 X 線計測による高速電子の検出や、高速カメラを用いた合体過程のイメージング計測の整備により、可視～軟 X 線の広い波長帯での光量の突発的増加現象が発見された。これらの実験結果と、主に日本と韓国で開発されている粒子シミュレーション結果との比較検証を通して、プラズマ合体における電子へのエネルギー付与のメカニズム解明が進展しつつある。初期プラズマ立ち上げ過程とプラズマ合体過程のそれぞれの実験結果およびシミュレーション結果を総合的に分析することによって、高ベータ球状トカマク形成のために必要となる装置条件に関する多くの知見が得られ、次年度以降に実施予定の大幅な装置改修の準備作業を着実に進めることができた。

6-3 若手研究者育成

今年度開催した夏の学校とワークショップは、各国の学生が他国の学生や教員と知り合うきっかけを与え、知識の共有や共同研究の実施へとつながっている。今年度までに、本事業に参加した日本側の博士課程学生の10名が修了（博士取得）したが、そのうち8名がプラズマ分野の研究職に就いており、本事業での経験が研究者としての能力育成に役立っているものと考えられる。

6-4 その他（社会貢献や独自の目的等）

日本、中国、韓国、台湾の宇宙・天体プラズマ研究者が中心となって開催した「第3回東アジアプラズマスクール」と一部日程を重複して本事業の夏の学校を開催した。本事業に関連する講義を宇宙・天体プラズマ分野の学生に対しても提供することによって、核融合研究に関する情報発信と分野間連携の可能性を提示することができた。これまで、各国内でも別々のコミュニティで活動することが多かった核融合プラズマと宇宙・天体プラズマの研究者／学生の相互交流をもたらし、プラズマ物理分野全体の活性化と新分野開拓に貢献できたと考えられる。

6-5 今後の課題・問題点

大学の休暇期間中に学生を長期派遣する計画を立てていたが、中国・韓国と日本の休暇期間のずれにより長期派遣が実施できなかった。

6-6 本研究交流事業により発表された論文

平成25年度論文総数 1本

相手国参加研究者との共著 0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25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) 球状トーラスにおける革新的トカマクプラズマの立ち上げと電流駆動				
	(英文) Innovative Tokamak Plasma Startup and Current Drive in Spherical Torus				
日本側代表者 氏名・所属・職	(和文) 井通暁・東京大学・准教授 (1-1)				
	(英文) INOMOTO, Michiaki・University of Tokyo・Associate Professor (1-1)				
相手国側代表者 氏名・所属・職	(英文) GAO, Zhe・Tsinghua University・Professor (2-1)				
	HWANG, Yong-Seok・Seoul National University・Professor (3-1)				
参加者数	日本側参加者数	80名			
	中国側参加者数	28名			
	韓国側参加者数	49名			
25年度の研究 交流活動	<p>日本・中国・韓国において稼働中の6台の球状トカマク装置（UTST、TST-2@東京大学、LATE@京都大学、QUEST@九州大学、SUNIST@清華大学、VEST@ソウル大学）での実験研究を中心に、プラズマ合体および高周波を利用した電流立ち上げ手法の確立を目指した共同研究を実施した。プラズマ合体法に関しては、高ガイド磁場リコネクション時の電子/イオンそれぞれへのエネルギー付与メカニズムの解明、初期球状トカマクの効率的な生成手段の開発、中性粒子ビームによる高ベータ球状トカマク維持手段の開発が主な研究課題であった。一方、高周波立ち上げ手法に関しては、低域混成波の励起と伝搬の解明、電子サイクロトロン波によって形成された電子の速度分布の解明、電子パーシュタイン波の励起と電流駆動の実現、アルヴェン波の励起を中心とした共同研究を実施した。また、プラズマ電流推定、高エネルギー電子計測、トムソン散乱計測等の開発についての協力を実施した。</p>				

<p>25年度の研究 交流活動から得 られた成果</p>	<p>高速カメラおよび軟X線分光計測により、球状トカマクプラズマ合体時の高エネルギー電子の検出に成功した。これは、高いトロイダル磁場の存在によって電子が磁力線方向に加速されていることを示唆する結果であり、ドップラー分光計測によるイオン流速／温度計測との統合により、プラズマ合体時の加熱および高ベータ化メカニズムの解明および高効率化の実現が期待できる。同様に高周波立ち上げ時においても、初期の開いた磁力線領域の電流が高速電子によって担われていることを示す実験結果が報告され、解析には非平衡なプラズマ状態を考慮する必要があるという共通認識が得られた。また、高周波によって維持された低密度プラズマの電子温度・密度を計測するためのトムソン散乱計測システムの整備が進み、いくつかの磁場配位における電子圧力分布が示された。これらの成果は、球状トカマクの革新的な立ち上げ手法における初期配位形成を理解する上で不可欠であり、得られたデータを活用することで各種立ち上げ手法の高効率化が期待できる。</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「第3回 実験室・宇宙・天文分野を融合した東アジアプラズマスクール」 (英文) JSPS A3 Foresight Program “3 rd East-Asian School and Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas“
開催期間	平成25年 7月 8日 ~ 平成25年 7月12日 (5日間)
開催地(国名、都市名、会場名)	(和文) 日本・東京・オリンピック記念青少年総合センター (英文) National Olympics Memorial Youth Center, Tokyo, Japan
日本側開催責任者 氏名・所属・職	(和文) 井通暁・東京大学・准教授 (1-1) (英文) INOMOTO, Michiaki・Univ. of Tokyo・Associate Prof. (1-1)
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		セミナー開催国 (日本)	
		A.	B.
日本 〈人／人日〉	A.	20/ 70	
	B.	35	
中国 〈人／人日〉	A.	5/ 35	
	B.	1	
韓国 〈人／人日〉	A.	9/ 58	
	B.	6	
合計 〈人／人日〉	A.	34/ 163	
	B.	42	

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	日本・中国・韓国の研究者による講義を行い、若手大学院生が幅広いプラズマ物理学の高度な理論を学ぶ機会を提供する。また、若手研究者による最新研究成果の講演、学生による研究発表等を実施する。	
セミナーの成果	フォーサイト事業に参加する3か国29名の学生を対象としたスクールを、宇宙プラズマ分野を中心とした別の東アジアプラズマスクールと一部日程を重複して開催した。球状トカマクプラズマに関する7件の講義に加えて、基礎プラズマ11件、天体プラズマ6件の講義を提供し、フォーサイト事業に参加する学生に対して、プラズマ物理の幅広い知識と、分野外の研究者／学生と交流する機会を与えることができた。また、学生セッションでは学生自らが座長を務めることによって、会議の進め方の経験を積ませることができた。本スクールは学生間の国際的な交流や情報交換を促進し、東アジア地域のプラズマ若手研究者育成の点で非常に効果的であった。	
セミナーの運営組織	本セミナーは日本側拠点機関である東京大学と、協力機関である自然科学研究機構の研究者を中心とした現地実行委員会が運営を行った。	
開催経費分担内容と金額	日本側	内容 国内旅費 金額 968,120円
	中国側	内容 海外旅費
	韓国側	内容 海外旅費

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「球状トーラスにおける革新的トカマクプラズマの立ち上げと電流駆動に関する第2回ワークショップ」 (英文) JSPS A3 Foresight Program “2 nd Workshop on Innovative Tokamak Plasma Startup and Current Drive in Spherical Torus “
開催期間	平成26年 1月 6日 ~ 平成26年 1月 8日 (3日間)
開催地(国名、都市名、会場名)	(和文) 中国・北京・清華大学 (英文) Tsinghua Univ. Beijing, China
日本側開催責任者 氏名・所属・職	(和文) 井通暁・東京大学・准教授 (1-1) (英文) INOMOTO, Michiaki・Univ. of Tokyo・Associate Prof. (1-1)
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) GAO, Zhe・Tsinghua University・Professor (2-1)

参加者数

派遣先 派遣	セミナー開催国 (中国)	
	A.	B.
日本 〈人／人日〉	A.	25/ 99
	B.	
中国 〈人／人日〉	A.	14/ 42
	B.	7
韓国 〈人／人日〉	A.	14/ 56
	B.	
合計 〈人／人日〉	A.	53/ 197
	B.	7

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	日本・中国・韓国の参加研究者が、球状トカマクの先進的立ち上げ／電流駆動手法、加熱手法、計測手法および関連する理論計算手法について、特に本事業によって実施された共同研究の成果と途中経過を中心とした発表および議論を行う。													
セミナーの成果	中国側拠点機関である清華大学で3日間のワークショップを開催し、日本からの25名を含む60名の研究者が6件の概要講演と41件の研究発表を行った。特に、フォーサイト事業に参加している各実験装置の最新の成果について「磁気リコネクションと立ち上げ」「高周波立ち上げ」「計測技術」「理論・シミュレーション」の4つのトピックスに特化して活発な議論を行った上で、これまでの成果を相互に確認し、今後の共同研究運営方針についての議論を行った。													
セミナーの運営組織	セミナーの実施運営についてはホストである中国側が主体的に行い、日本側および韓国側は主としてPIが補助的な作業を行った。プログラム編成等については、三カ国の拠点機関研究者を中心とした運営委員会において議論を行った。													
開催経費分担内容と金額	日本側	<table border="0"> <tr> <td>内容</td> <td>外国旅費</td> <td>金額</td> <td>2,054,705円</td> </tr> <tr> <td></td> <td>外国旅費・謝金等に係る消費税</td> <td></td> <td>95,508円</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>合計</td> <td>2,150,213円</td> </tr> </table>	内容	外国旅費	金額	2,054,705円		外国旅費・謝金等に係る消費税		95,508円			合計	2,150,213円
	内容	外国旅費	金額	2,054,705円										
		外国旅費・謝金等に係る消費税		95,508円										
		合計	2,150,213円											
中国側	<table border="0"> <tr> <td>内容</td> <td>国内旅費</td> </tr> <tr> <td></td> <td>その他（会議費）</td> </tr> </table>		内容	国内旅費		その他（会議費）								
内容	国内旅費													
	その他（会議費）													
韓国側	<table border="0"> <tr> <td>内容</td> <td>海外旅費</td> </tr> </table>		内容	海外旅費										
内容	海外旅費													

7-3 研究者交流（共同研究、セミナー以外の交流）

平成25年度は実施していない。

8. 平成25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/ 9 ()	()	()	1/ 9 (0/ 0)
	2		1/ 7 ()	()	()	1/ 7 (0/ 0)
	3		()	3/ 14 ()	()	3/ 14 (0/ 0)
	4		25/ 99 ()	()	()	25/ 99 (0/ 0)
	計		27/ 115 (0/ 0)	3/ 14 (0/ 0)	0/ 0 (0/ 0)	30/ 129 (0/ 0)
中国	1	()		()	()	0/ 0 (0/ 0)
	2	5/ 35 ()		()	()	5/ 35 (0/ 0)
	3	()		()	()	0/ 0 (0/ 0)
	4	()		()	()	0/ 0 (0/ 0)
	計	5/ 35 (0/ 0)		0/ 0 (0/ 0)	0/ 0 (0/ 0)	5/ 35 (0/ 0)
韓国	1	()	()		()	0/ 0 (0/ 0)
	2	11/ 67 ()	()		()	11/ 67 (0/ 0)
	3	()	()		()	0/ 0 (0/ 0)
	4	()	(14/ 56)		()	0/ 0 (14/ 56)
	計	11/ 67 (0/ 0)	(14/ 56)		0/ 0 (0/ 0)	11/ 67 (14/ 56)
	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	0/ 0 (0/ 0)	1/ 9 (0/ 0)	0/ 0 (0/ 0)	0/ 0 (0/ 0)	1/ 9 (0/ 0)
	2	16/ 102 (0/ 0)	1/ 7 (0/ 0)	0/ 0 (0/ 0)	0/ 0 (0/ 0)	17/ 109 (0/ 0)
	3	0/ 0 (0/ 0)	0/ 0 (0/ 0)	3/ 14 (0/ 0)	0/ 0 (0/ 0)	3/ 14 (0/ 0)
	4	0/ 0 (0/ 0)	25/ 99 (14/ 56)	0/ 0 (0/ 0)	0/ 0 (0/ 0)	25/ 99 (14/ 56)
	計	16/ 102 (0/ 0)	27/ 115 (14/ 56)	3/ 14 (0/ 0)	0/ 0 (0/ 0)	46/ 231 (14/ 56)

※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
5/ 35 ()	34/ 100 ()	3/ 7 ()	1/ 6 ()	43/ 148 (0/ 0)

9. 平成25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	2,359,751	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	2,513,012	
	謝金	0	
	備品・消耗品購入費	3,210,651	
	その他の経費	1,299,058	
	外国旅費・謝金等に係る消費税	117,528	
	計	9,500,000	研究交流経費配分額以内であること。
業務委託手数料		950,000	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		10,450,000	