

日中韓フォーサイト事業 平成24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

(1 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. 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。

6. 平成24年度研究交流目標

本事業は核融合プラズマ分野における実験研究を主体とした学術研究拠点の構築を目的としており、学生を含む若手研究者を相互派遣することによる共同実験を実施する体制を早期に実現することが重要である。事業初年度である平成24年度は、各国の実験設備を実際に訪問し、具体的な共同研究テーマの確立を行うと同時に、韓国にて開催されるセミナーにおいて各研究機関のこれまでの研究内容を概観し、2年目以降の詳細な計画を策定する。共同研究テーマとしては、球状トカマクプラズマの非誘導立ち上げ/電流駆動として、高周波を用いた手法とプラズマ合体を用いた手法のそれぞれについて、複数の研究機

関で行われている研究内容を再確認した上で、理論あるいは計測技術を含めた幅広い分野における相互技術協力の可能性を調査する。セミナーあるいは研究者交流には、学生を含む若手研究者を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。

7. 平成24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。)

7-1 研究協力体制の構築状況

初年度は、韓国側拠点機関（ソウル大学）において40名が参加したセミナーを開催したが、その際に本事業の中心となる球状トカマク実験を有する全6組織（東京大学（2グループ）、京都大学、九州大学、清華大学、ソウル大学）のスタッフによる運営委員会を併せて開催し、研究協力体制の構築および研究交流の進め方についての議論を行った。これにより初年度の共同研究の実施に関して、短期間に非常に多くの国際交流を実現することができた。プラズマ実験装置を用いた共同研究については、それぞれの具体的な課題に基づく4組の国際相互交流を実施した。清華大学からは3名の博士課程学生が東京大学および九州大学の実験研究に参加し、高周波波動によるプラズマ立ち上げの実現およびプラズマ平衡再構成手法の確立に関する共同研究の推進に協力すると同時に、清華大学における実験・理論研究を促進するための知見を得ることができた。ソウル大学と東京大学の間ではのべ20人の研究者・学生が相互に行き来してお互いの実験に参加し、プラズマ合体法の確立・イオン流速計測・中性粒子ビーム入射装置等に関する相互協力を実施した。また、ソウル大学からは4名の学生が京都大学での実験研究に参加し、2.45GHzの高周波を用いた電子バーンスタイン波電流駆動手法の確立に向けての協力体制を構築した。計測器開発・理論解析・その他一般的な実験技術等に関する幅広いネットワークの構築も進んでおり、次年度以降にはそれらの連携を含めた有機的な研究交流の推進を目指す。

7-2 学術面の成果

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るため、それに代わる電流駆動手段の開発が必須である。

波動を用いた球状トカマクプラズマの立ち上げ実験に関しては、京都大学において2.45GHzの高周波を用いて20kAのプラズマ電流立ち上げが達成され、電子バーンスタイン波による電流駆動が高いポテンシャルを有していることが実証されつつある。高精細なマイクロ波干渉計や軟X線放射計測による密度・温度分布測定の整備により、高周波電力の吸収および電流駆動のメカニズムに関する知見が得られた。東京大学においては200MHzの高周波を用いて10kAのプラズマ電流が達成されており、波動の磁場成分を直

接計測することによる波動のモード同定実験が進展している。九州大学においては、定常化を念頭においた実験が行われ、リミター配位において 5 分間の放電維持が達成された。波動によるプラズマ立ち上げに関連して、各研究機関において揺動、電子温度、高エネルギー電子等の計測手段の開発が進展した。プラズマ合体による高ベータ球状トカマクの形成に関しては、東京大学において 30km/s 程度のイオンフローと 30eV 程度のイオン加熱が観測され、合体時のエネルギー変換過程の解明が進展している。ソウル大との相互協力により、合体させるための 2 つのプラズマを同時にバランスよく生成するための予備電離やイオンフロー計測、磁気面再構成手法等の技術についての進展が得られた。

7-3 若手研究者育成

平成 24 年度には、当初計画の 23 名を大きく上回る、のべ 44 名の国際交流を実施した。このうち学生が占める割合は 75%にのぼり、自らが所属する研究室以外の実験設備に初めて触れ、具体的な共同実験研究に携わるという機会を得ることができた。共同研究そのものの効果もさることながら、自らの研究を客観視し、これまで当たり前と考えていた内容に対する疑問を感じる切っ掛けとなりえたことは、研究能力を育成するという点において非常に効果的であったと考えられる。共同研究の実施に際しても、博士課程学生や助教が中心となって研究が実施されており、次年度以降は若手研究者からの自発的な共同研究の推進が期待できる。

7-4 その他（社会貢献や独自の目的等）

特になし。

7-5 今後の課題・問題点

計画初年度は研究体制構築のために多くの時間が必要となったため、運営委員会を兼ねたセミナーの開催時期が当初予定より 1 か月遅れることとなった。そのため、共同研究を目的とした交流が活発になったのは 2013 年 2 月以降であり、その形態も多数の研究者を短期間派遣するというものであった。次年度以降は、夏季休暇等の大学の長期休暇の時期における中・長期の相互派遣を中心とした共同研究の実施形態に移行し、より核心的かつ効率的な共同研究の遂行を目指す必要がある。

7-6 本研究交流事業により発表された論文

平成 24 年度論文総数 0 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。)

8. 平成24年度研究交流実績状況

8-1 共同研究

—研究課題ごとに作成してください。—

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)																																																									
交流人数 (※日本側予算によらない交流についても、カッコ書きで記入のこと。)	① 相手国との交流 <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">派遣先</th> <th>日本</th> <th>中国</th> <th>韓国</th> <th>計</th> </tr> <tr> <th colspan="2">派遣元</th> <th><人/人日></th> <th><人/人日></th> <th><人/人日></th> <th><人/人日></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">日本 <人/人日></td> <td>実施計画</td> <td rowspan="2"></td> <td>3/6</td> <td>0/0</td> <td>3/6 (0/0)</td> </tr> <tr> <td>実績</td> <td>0/0</td> <td>18/56</td> <td>18/56</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">中国 <人/人日></td> <td>実施計画</td> <td>4/8</td> <td rowspan="2"></td> <td>(0/0)</td> <td>4/8 (0/0)</td> </tr> <tr> <td>実績</td> <td>3/18</td> <td></td> <td>3/18</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">韓国 <人/人日></td> <td>実施計画</td> <td>4/8</td> <td>(4/8)</td> <td rowspan="2"></td> <td>4/8 (4/8)</td> </tr> <tr> <td>実績</td> <td>10/30</td> <td></td> <td>10/30</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">合計 <人/人日></td> <td>実施計画</td> <td>8/16</td> <td>3/6</td> <td>0/0</td> <td>11/22</td> </tr> <tr> <td>実績</td> <td>13/48</td> <td>0/0</td> <td>18/56</td> <td>31/104</td> </tr> </tbody> </table>					派遣先		日本	中国	韓国	計	派遣元		<人/人日>	<人/人日>	<人/人日>	<人/人日>	日本 <人/人日>	実施計画		3/6	0/0	3/6 (0/0)	実績	0/0	18/56	18/56	中国 <人/人日>	実施計画	4/8		(0/0)	4/8 (0/0)	実績	3/18		3/18	韓国 <人/人日>	実施計画	4/8	(4/8)		4/8 (4/8)	実績	10/30		10/30	合計 <人/人日>	実施計画	8/16	3/6	0/0	11/22	実績	13/48	0/0	18/56	31/104
派遣先		日本	中国	韓国	計																																																					
派遣元		<人/人日>	<人/人日>	<人/人日>	<人/人日>																																																					
日本 <人/人日>	実施計画		3/6	0/0	3/6 (0/0)																																																					
	実績		0/0	18/56	18/56																																																					
中国 <人/人日>	実施計画	4/8		(0/0)	4/8 (0/0)																																																					
	実績	3/18			3/18																																																					
韓国 <人/人日>	実施計画	4/8	(4/8)		4/8 (4/8)																																																					
	実績	10/30			10/30																																																					
合計 <人/人日>	実施計画	8/16	3/6	0/0	11/22																																																					
	実績	13/48	0/0	18/56	31/104																																																					
		② 国内での交流																																																								
		14/50 人/人日																																																								
日本側参加者数																																																										
60 名		(12-1 日本側参加研究者リストを参照)																																																								
中国側参加者数																																																										
19 名		(12-2 中国側参加研究者リストを参照)																																																								
韓国側参加者数																																																										
40 名		(12-3 韓国側参加研究者リストを参照)																																																								

<p>24年度の研究 交流活動</p>	<p>経済的な核融合炉心として期待される球状トカマクプラズマの立ち上げ・電流駆動・加熱を、中心ソレノイドコイルを用いない非誘導的手法によって実現するという目的の下で、日本・中国・韓国において稼働している6大学の球状トカマク実験装置を中心とした研究交流を実施した。中心課題の一つである波動を用いた電流立ち上げ手法については、中国・清華大学と九州大学との間で電子サイクロトロン波を用いる手法について、東京大学との間で低域混成波を用いる手法についての共同研究を開始した。また、韓国・ソウル大と京都大学との間で電子サイクロトロン波と電子バーンスタイン波を用いた電流駆動についての共同研究を実施した。波動による電流立ち上げに関連して、プラズマ形状の再構成手法についての共同研究も中国・清華大学と九州大学との間で開始された。プラズマ合体による電流駆動・加熱については、韓国・ソウル大と東京大学の間で共同実験を実施し、相互のプラズマを比較した検証および計測器や中性粒子ビーム源の共同開発を開始した。また、乱流輸送・波動源・リコネクション物理・計測法等を含めた広範囲のプラズマ研究者に協力いただく体制の構築を進めた。</p>
-------------------------	--

<p>24年度の研究 交流活動から得 られた成果</p>	<p>波動を用いた球状トカマクプラズマの立ち上げ実験に関しては、京都大学において 2.45GHz の高周波を用いて 20kA のプラズマ電流立ち上げが達成され、電子バーンスタイン波による電流駆動が高いポテンシャルを有していることが実証されつつある。高精細なマイクロ波干渉計や軟 X 線放射計測による密度・温度分布測定の整備により、高周波電力の吸収および電流駆動のメカニズムに関する知見が得られた。東京大学においては 200MHz の高周波を用いて 10kA のプラズマ電流が達成されており、波動の磁場成分を直接計測することによる波動のモード同定実験が進展している。九州大学においては、定常化を念頭においた実験が行われ、リミター配位において 5 分間の放電維持が達成された。波動によるプラズマ立ち上げに関連して、各研究機関において揺動、電子温度、高エネルギー電子等の計測手段の開発が進展した。プラズマ合体による高ベータ球状トカマクの形成に関しては、東京大学において 30km/s 程度のイオンフローと 30eV 程度のイオン加熱が観測され、合体時のエネルギー変換過程の解明が進展している。ソウル大との相互協力により、合体させるための 2 つのプラズマを同時にバランスよく生成するための予備電離やイオンフロー計測、磁気面再構成手法等の技術についての進展が得られた。</p>
--------------------------------------	--

8-2 セミナー

—実施したセミナーごとに作成してください。—

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「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) JSPS A3 Foresight Program “Innovative Tokamak Plasma Startup and Current Drive in Spherical Torus “
開催期間	平成25年1月14日 ~ 平成25年1月16日 (3日間)
開催地(国名、都市名、会場名)	(和文) 韓国、ソウル市、ソウル大学
	(英文) Seoul National university, Seoul, Korea
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) HWANG, Yong-Seok・Seoul National Univ. Prof. (3-1)

参加者数

派遣先 派遣元	セミナー開催国 (韓国)	
	A.	B.
日本 〈人/人日〉	A.	13/39
	B.	3/9
	C.	0/0
中国 〈人/人日〉	A.	0/0
	B.	0/0
	C.	7/18
韓国 〈人/人日〉	A.	0/0
	B.	0/0
	C.	17/51
合計 〈人/人日〉	A.	37/108
	B.	3/9
	C.	0/0

A. セミナー経費から旅費を負担

B. 共同研究・研究者交流から旅費を負担

C.本事業経費から旅費を負担しない（参加研究者リストに記載されていない研究者は集計しないでください。）

セミナー開催の目的	<p>韓国側拠点機関であるソウル大学において、事業参加研究者が球状トカマクの非誘導立ち上げ／電流駆動および加熱に関する研究発表を行い、各国各研究機関におけるこれまでの研究成果の相互理解を深めると同時に、具体的な共同研究テーマに関する議論を行う。また、ソウル大学における実験装置を見学し、可能であれば短時間でも実験に参加することによって直接的な相互交流を早期に実現する。</p>		
セミナーの成果	<p>各国各研究機関の成果ならびに現在取り組んでいる課題を共有することによって、本事業で重点的に扱うべき共同研究の方向性を明らかにし、事業期間内での具体的な目標を設定することができた。セミナーでの議論を踏まえ、高周波による立ち上げ、プラズマ合体による立ち上げ、平衡再構成、計測手法等の個別テーマに関して、2月～3月に計5件の共同研究の実施を取りまとめることができた。また、これまで直接的な関わりが少なかった研究者同士が新たな人脈を形成する機会を持つことによって、国際的な研究ネットワークの構築を加速することができた。大学院学生をはじめとする若手研究者が他国の同世代の研究者と交流することによって研究に対する意識を向上させると同時に、キャリアパスの可能性を拡大することによって今後のアジア地域における研究者育成・研究拠点形成のための礎を築くことができた。</p>		
セミナーの運営組織	<p>セミナーの実施運営についてはホストである韓国側が主体的に行い、日本側および中国側は主としてPIが補助的な作業を行った。重要事項については、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。</p>		
開催経費 分担内容 と金額	日本側	内容 外国旅費	金額 845,530 円
		外国旅費に係る消費税	22,149 円
	中国側	内容 外国旅費	
	韓国側	内容 会議費 国内旅費	

8-3 研究者交流（共同研究、セミナー以外の交流）

① 相手国との交流

派遣先 派遣元		日本	中国	韓国	計
		<人/人日>	<人/人日>	<人/人日>	<人/人日>
日本 <人/人日>	実施計画		2/8	0/0	2/8
	実績		0/0	0/0	0/0
中国 <人/人日>	実施計画	0/0		0/0	0/0
	実績	0/0		0/0	
韓国 <人/人日>	実施計画	0/0	(2/8)		(2/8)
	実績	0/0			0/0
合計 <人/人日>	実施計画	0/0	2/8(2/8)	0/0	2/8(2/8)
	実績	0/0	0/0	0/0	0/0
② 国内での交流		1/2 人/人日			

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
東京大学・准教授・井通暁	日本・盛岡市・岩手大学	2012/8/8-8/9	電気学会プラズマ技術委員会にて、球状トカマク核融合炉に関する情報収集ならびに打ち合わせを行った

9. 平成24年度研究交流実績総人数・人日数

9-1 相手国との交流実績

派遣先		日本	中国	韓国	合計
派遣元		<人/人日>	<人/人日>	<人/人日>	<人/人日>
日本 <人/人日>	実施計画		5/14	10/20	15/34
	実績		0/0	31/95	31/95
中国 <人/人日>	実施計画	4/8		(10/20)	4/8 (10/20)
	実績	3/18		(7/18)	3/18 (7/18)
韓国 <人/人日>	実施計画	4/8	(6/16)		4/8 (6/16)
	実績	10/30			10/30
合計 <人/人日>	実施計画	8/16	5/14(6/16)	10/20 (10/20)	23/50 (16/36)
	実績	13/48	0/0	31/95 (7/18)	44/143 (7/18)

※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。)

9-2 国内での交流実績

実施計画	実績
40/100 <人/人日>	15/52 <人/人日>

10. 平成24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	1,510,476	
	外国旅費	1,804,170	
	謝金	0	
	備品・消耗品購入費	2,595,328	
	その他経費	0	
	外国旅費・謝金等に 係る消費税	90,026	
	計	6,000,000	
委託手数料		600,000	
合 計		6,600,000	

11. 四半期毎の経費使用額及び交流実績

	経費使用額 (円)	交流人数<人/人日>
第1四半期		
第2四半期	47,080	1/2
第3四半期	1,262,747	9/40
第4四半期	4,690,173	49/153
計	6,000,000	59/195