

**平成26年度 日中韓フォーサイト事業
中間評価資料(進捗状況報告書)**

1. 概要

研究交流課題名 (和文)	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		
日本側拠点機関名	東京大学		
研究代表者 所属・職・氏名	大学院新領域創成科学研究科・准教授・井通暁		
相手国側	国名	拠点機関名	研究代表者 所属・職・氏名
	中国	Tsinghua University	Department of Engineering Physics・ Professor・GAO, Zhe
	韓国	Seoul National University	Department of Nuclear Engineering・ Professor・HWANG, Yong-Seok

2. 研究交流目標

申請時に計画した目標と現時点における達成度について記入してください。

○申請時の研究交流目標

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。

ITER 計画にて推進されているトカマク方式の核融合炉心と同等の閉じ込め性能を有するとされる球状トカマクは、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、トカマク方式においてプラズマ立ち上げ／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。

本研究では、(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。

○目標に対する達成度

上記目標に対する2年分の計画について

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

【理由】 中心ソレノイドコイルを用いずに球状トカマクプラズマの立ち上げを実現するという当初目標に関しては、日本側拠点および協力機関に存在する4台の実験装置すべてにおいて、それぞれに異なった手法により10kAを超えるプラズマ電流が達成された。当初申請に記載された二年間の研究内容としては、「斜入射電子サイクロトロン波による電子バーンシュタイン波の励起と電流駆動の実現」、「波動によるプラズマ立ち上げ過程の基礎的理解」、「50kAの初期プラズマを用いた合体立ち上げの実現」、「低密度プラズマおよび非定常合体プロセスを観測するための測定器の開発」、「合体中の磁気リコネクション過程の詳細な観測」等が設定されていたが、これらの内容については各機関での共同研究の結果十分達成されたと考えられる。しかしながら現状では論文発表が追い付いていないため、今後は共同研究成果の速やかな発信が必要と考えられる。人的交流としては、毎年2回（ワークショップとサマースクール）のセミナーを持ち回りで開催する他、大学院生の相互派遣を実施しており、研究推進・若手研究者の育成ならびに研究拠点の形成が進捗している。

3. これまでの研究交流活動の進捗状況

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

○共同研究

【概要】 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ず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台の球状トカマク装置における実験を中心とした研究交流を推進している。

本プログラムにおいて中心ソレノイドコイルの代替として開発を行っている手法は、大きく(1)波動(高周波の電子サイクロトロン/バーンシュタイン波:九州大学、京都大学、中程度周波数の低域混成波:東京大学、低周波のアルヴェン波:中国・精華大学。)、(2)プラズマ合体(外側ポロイダル磁場コイル:東京大学、分割ソレノイド/局所ヘリシティ入射:韓国・ソウル大学)に大別できる。さらに、(3)新手法において必要となる計測装置や高性能波動源・電源の開発、乱流輸送やリコネクション等を含めた理論研究についても共同研究を実施している。項目ごとの共同研究の概要を以下に示す。

- (1) 波動によるプラズマ立ち上げに関する共同研究は、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、電子バーンシュタイン波の励起と電流駆動の実現、アルヴェン波による電流駆動の実証を目的として主に九州大学、京都大学、東京大学、清華大学の実験装置を使用して実施され、相互に若手研究者・学生の派遣を行った。
- (2) 合体による立ち上げに関する共同研究は、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を目的として、主に東京大学、ソウル大学の実験装置を使用して実施され、相互に若手研究者・学生の派遣を行った。
- (3) 波動によって立ち上げた低密度プラズマにおけるトムソン散乱計測、合体による立ち上げ途中の非定常プラズマの電流分布推定、合体時に誘起される電場の直接分光計測、波動と合体の双方に共通する高エネルギー電子計測などの開発研究についても共同研究を推進した。

○セミナー

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

【概要】 初年度以降、冬にワークショップ、夏にサマースクールを実施するという体制を構築し、これまでに各2回ずつ計4回のセミナーを開催した。

平成24年度は、2013年1月に韓国・ソウル大学において第1回ワークショップを開催し、日本からの16名を含む40名の研究者が参加した。各国研究機関のこれまで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した。

平成25年度は、2013年7月に東京にてフォーサイト事業に参加する29名の学生を対象とした第1回サマースクールを、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。さらに 2014 年 1 月に中国側拠点機関である清華大学で第 2 回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。

H26 年度は、2014 年 7 月に韓国・済州島において第 2 回サマースクールを開催し、41 名の学生に対して、主にプラズマ電流駆動・加熱に関する 19 件の講義が提供された。参加学生によるポスターセッションも行われ、学生同士の活発な議論と交流が行われた。

○研究者交流

【概要】

平成 24 年度に、国内の球状トカマクに関する共同研究が統括されてきた電気学会プラズマ技術委員会に研究者を派遣し、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実施した。三カ国の研究者同士の打ち合わせに関しては、共同研究／セミナーや他の会合の際に同時に実施しているため、平成 25、26 年度には本カテゴリでの研究交流は実施していない。

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

○学術的側面

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。本プログラムでは、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手法によって 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。

- (1) 波動を用いた球状トカマクプラズマの立ち上げ実験では、京都大学において 2.45GHz の高周波を用いて 10kA を超えるプラズマ電流の立ち上げが達成され、遮断密度の 7 倍を超える高密度プラズマ放電を達成するなど、電子サイクロトロン／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検証が進んでいる。同じく電子サイクロトロン／バーンシュタイン波による立ち上げ手法の開発が行われている九州大学では定常化を念頭においた実験が行われ、最長で 10 分を超える放電維持が達成されると同時に、長時間放電における真空容器壁との粒子のやりとりに関する検証が進展した。また、トーラス内側に磁場の存在しない地点を形成するような高ベータ配位の定常維持が実現され、その物理的特性に関する研究が進展しつつある。共同研究を通して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展した結果、電子圧力分布の測定に初めて成功し、放電維持および電流駆動機構の検証が大きく進展した。東京大学においては 200MHz の波動を用いて 10kA のプラズマ電流駆動が達成されており、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、アンテナからのパワー伝達効率の解析、プラズマ回転速度の計測等が進展している。

- (2) 合体を用いた高ベータ球状トカマクの立ち上げ実験に関しては、予備電離および電源シーケンスの改良によりプラズマ生成効率を大幅に改善することに成功し、中心ソレノイドを全く使用せずに 20kA 程度のプラズマ電流を有する 2 個の球状トカマクの立ち上げが東京大学において達成された。さらに中心ソレノイドを補助的に運用することによって、50kA 程度のプラズマ電流を有する初期プラズマを 2 個立ち上げることに成功し、その合体時に 30km/s 程度のイオンフローと 40eV 程度のイオン加熱、20eV 程度の電子加熱、高エネルギー電子の生成等が観測され、合体によるエネルギー変換（加熱）過程の解明が進展している。研究の推進に際しては、ソウル大学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、トムソン散乱による電子温度密度計測等についての進展が得られた。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。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プラズマ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。

○若手研究者の育成

プラズマ核融合実験分野の若手研究者育成はフォーサイト事業の中心的課題の一つであるが、本事業では特に学生の教育に注力しており、毎年サマースクールを実施している。基礎から専門に至る幅広い講義に加えて、学生自身が座長を務める口頭セッションや、ポスターセッションでの優秀発表賞を設定するなど、学生が研究者としての経験を積み、高いモチベーションで研究に参加できるように工夫している。

研究交流に関しても、平成 24 年度、25 年度に実施した日本を含む国際交流人数はのべ 90 名であるが、このうち学生が占める割合は 75%に達している。学生にとって、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ふ貴重な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。平成 25 年度末までに、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。

○日中韓における継続的な研究拠点の構築

一般に核融合プラズマ実験には長期的な研究遂行が必要であるため、本事業が発端となってスタートした共同研究テーマについては当該装置のグループ（大学）を中心とした継続的な協力体制の維持が期待される。サマースクールを毎年実施し、フォーサイト事業全体としてプラズマ核融合分野の学生教育を実施していることによって、将来彼らが研究者となった際にはより垣根のない交流が実現できると考えられる。

4. 事業の実施体制

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

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

日本側は、東京大学大学院新領域創成科学研究科が拠点となって、共同研究および交流活動全般の取りまとめを行った。研究面では、東京大学にて運用されている2装置と九州大学、京都大学の各1装置の間での共同研究や技術共有を行い、強固な協力体制を築いている。交流活動に関しては、国内で行われた本事業のセミナーを主幹事となって運営したほか、海外でのセミナーについても日本側代表として会議運営に参画し、日本側参加者の取りまとめを行った。

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

本事業では毎年1回のワークショップとサマースクールを開催しており、その際に各実験装置の代表者による運営会議を開催し、成果の取りまとめと方針の策定を行っている。例えば初年度はソウル大学にワークショップを開催したが、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会議を併せて開催し、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。その後、東京、北京、済州にて開催されたセミナーのたびに運営会議を開催している。

研究面では、プラズマ合体立ち上げ全般、中性粒子ビーム入射技術、レーザ計測技術、高電圧パルス電源開発、大型トカマクにおける波動立ち上げ、トカマク放電初期の数値解析に関する共同研究を韓国側と、波動立ち上げ全般、波動源技術、輸送理論、分光計測、電流推定法等に関する共同研究を中国側と実施している。

若手研究者育成・教育面においては、サマースクールを継続的に開催することによってフォーサイト事業全体での人材育成を遂行しており、事業終了後も継続的なネットワークの維持が期待できる。

○日本側拠点機関の事務支援体制（拠点機関全体としての事務運営・支援体制等）

本事業では、東京大学大学院新領域創成科学研究科事務および柏キャンパス共通事務からの支援によって、日本学術振興会との連絡調整、研究交流に係る出張業務、出納管理を円滑に実施することを得た。共同研究の実施やセミナーの運営については、新領域創成科学研究科研究交流係との連携の上で事務処理を行っている。