

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：	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/>

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：東京大学

実施組織代表者（所属部局・職・氏名）：総長 五神 真

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. 平成 29 年度研究交流目標

<研究協力体制の構築>

本事業の中核となる東京大学 UTST、TST-2、京都大学 LATE、九州大学 QUEST、清華大学 SUNIST、ソウル大学 VEST の 6 実験装置間の相互協力体制は十分に確立されており、今年度は継続して運用することによって多くの研究成果の獲得に努める。球状トカマクプラズマを用いることによる先進燃料核融合炉の実現可能性を検討するため、核物理分野からも研究者に協力いただき、多角的な評価につなげていく。

<学術的観点>

28 年度までの研究交流活動により、各装置が取り組んでいた電流立ち上げ手法の開発については性能評価を概ね完了し、定常的な運用段階に到達したため、さらなる性能向上を目指した新実験の実施を中心課題とする。密度増加が重要とされる波動立ち上げについては、高密度プラズマを生成可能な同軸ヘリシティ入射法や、高密度でも伝搬可能な入射角度の選定・電子バーンシュタイン波への変換効率向上等によりプラズマ密度の増加ならびにプラズマ電流量の増大が期待される。合体立ち上げについては、新運転シーケンスの実施および予備電離用初期プラズマ源の改善によるプラズマ電流・合体時加熱量の増加を目標とする。さらに、両者の複合効果により中性粒子ビーム加熱効率の大幅な向上も期待されるため、合体法と中性粒子ビームの組み合わせによる高性能球状トラスプラズマ形成シナリオの構築を目指す。

<若手研究者育成>

昨年度までに引き続き、学生・若手研究者が中心となっている研究交流を推進し、雑誌論文等による発表を積極的に行わせる。また学生の自己表現能力を向上させ、研究者としての経験を積ませるためにも、学会での発表機会を多く与えることを目指す。今年 9 月には、韓国側拠点機関であるソウル大学にて球状トカマクの国際会議が予定されている。本事業の終了後の開催となるが、学生の研究遂行および交流の実施を積極的にサポートすることによって、多くの学生が当該会議で発表できるように環境を整備する。

<その他（社会貢献や独自の目的等）>

特にありません。

## 5-2. 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。

### 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】

研究交流目標として掲げた球状トカマク立ち上げの実証および高ベータプラズマの振る舞いの理解が達成され、日中間の大学を中心とした当該分野の研究組織の構築ならびに大学院学生・若手研究者の育成を高いレベルで実現することができたため、目標は十分に達成されたと考えられる。

## 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。)

<研究協力体制の構築>

最終年度は、本事業の中核となる東京大学 UTST、TST-2、京都大学 LATE、九州大学 QUEST、清華大学 SUNIST、ソウル大学 VEST の 6 実験装置の成果を共有し、事業終了後の体制維持を検討するためのセミナーを東京で開催した。共同研究の進捗に伴い、球状トーラスプラズマにおける先進燃料核融合炉の実現可能性や高速電子の影響を検討する必要が生じたため、核物理分野や理論・シミュレーション分野からも新たに研究者に協力いただき、コミュニティの発展・融合を行った。

<学術的観点>

電子サイクロトロン波による立ち上げ手法開発を行っている LATE 装置、QUEST 装置ではカットオフ密度を超えるプラズマ密度が達成されており、高周波波動による高密度プラズマの生成・維持を実用化する上で重要な知見が得られた。低域混成波を用いた立ち上げ手法については、TST-2 装置において外側／上側両側入射の開発が進展した。本事業において開発された電子サイクロトロン波／低域混成波によるプラズマ立ち上げ手法は、他の閉じ込め方式においても有用であると考えられ、韓国の大型トカマク装置 KSTAR との共同研究が進展した。また、コンパクトトーラス (CT) 入射ないし同軸ヘリシティ (CH) 入射との併用の検討が進められ、実験が行われた。

合体立ち上げの実証を行っている UTST 装置では、電流駆動効率を高めるための制御手法の導入を進めており、必要となるプラズマ形状・位置の高精度推定のための内部磁場センサを増強し、修正コーシー条件面法の実装を韓国 VEST 装置との共同で進めた。中国 SUNIST 装置においても、日本側研究者との共同研究の結果、真空容器壁の渦電流分布を考慮することで磁場推定精度の向上が実現された。

これらの高周波波動および合体によって立ち上げられた球状トーラスプラズマでは、高エネルギー電子の生成が共通に観測され、その存在が球状トーラスプラズマそのものの平衡および加熱／電流駆動メカニズムに寄与していると考えられる。高エネルギー電子を検出するための X 線計測や、高エネルギー電子の振る舞いについての理論／シミュレーションの活用が重要となり、共同研究を推進した。

<若手研究者育成>

昨年度までに引き続き、学生・若手研究者が中心となっている研究交流を推進した。共同研究として実施した 20 名の出張のうち大学院生が 14 名を占めており、本事業で実施された共同研究をさらに発展させ、今後の活動につなげるように支援を行った。

<その他 (社会貢献や独自の目的等) >

特にありません。

- (1) 平成 29 年度に学術雑誌等に発表した論文・著書 4 本  
うち、相手国参加研究者との共著 0 本
  - (2) 平成 29 年度の国際会議における発表 2 件  
うち、相手国参加研究者との共同発表 0 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）

日本側拠点機関は、国内の協力機関や協力研究者の助力の下、共同研究やセミナーのとりまとめを行い、協力ネットワークの構築・維持と共同研究の推進を実施した。国内で開催した4回のセミナーのうち2回は拠点機関が主催として、残り2回は協力機関との共催として開催し、のべ150名の研究者が参加した。研究の進展に伴って国内協力体制の強化を行い、事業開始時の研究者に加えて26名の専門家に途中参加いただくこととなった。

#### 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）

本事業では、夏の学校とワークショップの2回のセミナーを毎年実施する方針が策定され、各国で3回ずつを開催するスケジュールとなった。最終年度のみ追加のワークショップを日本で開催することとなったが、それを除けば各国で機会・費用を公平に分担して事業実施を遂行することができた。すべてを合計すると、のべ400名以上の研究者が本事業で主催したセミナーに参加しており、3カ国の拠点機関が緊密に連携協力できたことを示している。個々の共同研究については、当事者間で日程等を調整した後に両国の拠点機関により出張を具体化するというプロセスで実施され、良好に運用された。

#### 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）

拠点機関から十分な事務支援を得られ、ガイドラインに則って円滑に事業を推進することができた。計画書に基づいて適切に委託費を使用するための財務会計支援、物品の購入手続き等の契約支援、各研究者の出張に関わる旅費申請処理及び旅費支給をスムーズに実施するための経理支援をはじめ、日本学術振興会との窓口として事業内容の確認や計画書／報告書の提出まで、多くの支援を得ることができた。特に本事業では多数の出張処理を行うこととなり、国内でセミナーを開催する際には数十件の手続きを迅速に行う必要があったが、事務支援によって滞りなく業務を遂行することができた。

## (2) 学術面の成果

本事業では、日中韓三か国の大学で運用されている 6 台の球状トーラス実験装置（東京大学 UTST、TST-2、京都大学 LATE、九州大学 QUEST、清華大学 SUNIST、ソウル大学 VEST）を活用し、革新的な立ち上げ手法として高周波波動法および合体法の開発研究を実施した。

高周波波動としては、GHz 以上の周波数帯の電子サイクロトロン波と、数百 MHz 程度の周波数帯の低域混成波を用いている。電子サイクロトロン波を用いた立ち上げ手法としては、LATE 装置において 2.45GHz の高周波波動を用いて約 20kA のプラズマ電流立ち上げが達成された。縦方向の真空磁場中を流れる初期電子電流によって磁場が概ねキャンセルされることによって、磁場を横切る電子が発生することが閉じた磁気面を形成するというモデルが提案された。得られた球状トーラスの密度は、電子サイクロトロン波のカットオフ密度を大きく超過していることから、電子バーンシュタイン波が励起されたと考えられる。到達密度が電子サイクロトロン共鳴層の位置に依存するという実験結果から、高密度を実現するためには電子バーンシュタイン波を第一伝播帯に励起することの必要性が示唆された。到達密度の上昇を目的とした入射波偏波の改善を実施し、3 台の 2.45GHz マグネトロンのうち、2 台のマグネトロンからは O モード様の直線偏波を入射し、3 台目のマグネトロンからの偏波を O モード様から X モード様にかけての左回り楕円偏波として変化させたところ、特定の偏波において電子密度、電子温度、軟 X 線発光量の増加が観測された。最外殻磁気面内の密度がカットオフ密度を超過していることから、このような差異は電子バーンシュタイン波へのモード変換率の向上によってもたらされたと考えられる。さらに、2.45GHz マイクロ波と同時に使用する 5GHz マイクロ波の入射システムが新たに構築され、初期入射実験では 2.45GHz の場合と同様にカットオフ密度を超えるプラズマの生成が確認された。QUEST 装置においても、プラズマ密度がカットオフ密度を超えて急増する例が観測されたことから、電子バーンシュ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と考えられる。

QUEST 装置では定常化を念頭においた実験が行われ、28GHz と 8.2GHz の電子サイクロトロン波を用いた実験では最大で約 70kA のプラズマ電流が得られ、長時間運転においては約 2 時間の定常状態が達成されるなど、性能面で大きな進捗が得られた。長時間放電時の水素の挙動を明らかにするために、動的な吸蔵メカニズムの解明が進展し、壁の粒子吸蔵が支配的となる放電開始直後の時間帯では再堆積層における水素バリアモデルが現象をよく説明できることが示された。並行して中国 EAST 装置での実験において、長時間放電における壁熱負荷計測を実施し、高性能プラズマを実現するための壁条件の解明が進展した。

さらにコンパクトトーラス (CT) 入射ないし同軸ヘリシティ (CH) 入射との併用が検討され、QUEST 装置において前者による密度上昇が観測された。また後者の開発および実装が進められ、初期実験が開始された。まだ効率は低いものの、20kA 程度のプ

ラズマ電流が観測されており、今後高周波波動との同時運用によって運転領域の拡大ならびにプラズマ性能のさらなる向上が期待される。

一方 TST-2 装置では 200MHz の低域混成波を用いたプラズマ立ち上げ手法の開発が行われた。三種類のアンテナ（誘導結合コムラインアンテナ、グリルアンテナ、容量結合コムラインアンテナ）による球状トーラス立ち上げ実験が実施され、いずれのアンテナでも同程度のプラズマ電流駆動が実現できることが示された。特に高い電流駆動効率を有する容量結合型コムラインアンテナの有限要素法解析結果によると、プラズマへの放射が強すぎることによって波数スペクトルの劣化が生じ、駆動電流が制限されている可能性が指摘された。そこで、アンテナ近傍のプラズマ密度を低下させるためにリミターを設置することによって、入射スペクトルの改善と不純物放出の抑制が実現され、最大 25kA 程度のプラズマ電流が達成された。また、高周波電力の吸収効率が低いことが課題となっていたが、プラズマ外部の密度をコントロールする一連の実験により、外側入射用のアンテナ配位では波動がプラズマ中をポロイダル方向に一周できずに外部で損失する可能性が示された。プラズマ電流および密度が増加するにつれて高周波パワーの吸収領域がプラズマ中心から端部にシフトする傾向が観測されたことから、球状トーラス配位が形成された後は、外側入射よりも上側入射を用いる方が高い吸収効率を示すと予想された。そこで、上側入射アンテナが新たに開発・実装され、外側／上側同時入射の初期実験では良好な結果が得られている。

このように、球状トーラス分野で開発された電子サイクロトロン波／低域混成波によるプラズマ立ち上げ手法は、他の閉じ込め方式においても有用であると考えられる。韓国の大型トカマク装置 KSTAR との共同研究が実施され、電子サイクロトロン波による閉じた磁気面形成の確認や、低域混成波／ヘリコン波用アンテナの開発等が行われた。

高周波波動によって立ち上げられた球状トーラスプラズマでは、初期の開いた磁力線領域の電流が高エネルギー電子によって担われているだけでなく、閉じた磁気面形成後の平衡状態においても高エネルギー電子がプラズマ電流や圧力、あるいは損失の大部分を担っていると考えられることから、平衡状態の新たな記述およびその特性解明が必要と考えられる。

一方、プラズマ合体法による高ベータ球状トーラスの形成に関しては、UTST 装置においてイオンフローの形成、イオン加熱に加えて、可視光高速イメージングおよび軟 X 線分光計測により、高エネルギー電子が生成されていることが明らかになった。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、高電子温度球状トーラスをダイナミックに形成する手法として新たな可能性が見いだされた。VEST 装置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等を改良した結果、外側 PF コイルのみを用いて 2 つの球状トーラスを同時に立ち上げ、それらを合体させることによって、最大 100kA 程度のプラズマ電流を有する球状トーラスを立ち上げることに成功した。合体にともなう磁気リコネクションでイオン・電子それぞれの加熱が観測され、1.5 程

度のポロイダルベータ値を有していることが確認された。

また、新たに構築された電源によって平衡磁場コイル電流の維持時間を増加させることに成功し、中性粒子ビーム入射時に電子が加熱されていることを示唆する結果を得た。さらに中性粒子ビーム入射効率を改善する目的で電流駆動効率を高めるための制御手法の導入を進めており、必要となるプラズマ形状・位置の高精度推定のための内部磁場センサを増強した。修正コーシー条件面法を採用し、真空容器壁を流れる渦電流を考慮することで、プラズマ合体の初期段階から形状推定が可能となることを UTST プラズマ数値解で確認し、さらに韓国 VEST 装置の実験データへの適用作業を進め、良好な成果を得た。中国 SUNIST 装置においても、日本側研究者との共同研究の結果、真空容器壁の渦電流分布を考慮することで磁場推定精度の向上が実現された他、高周波波動によって立ち上げられたプラズマでも開いた磁力線領域を流れる高エネルギー電子電流の寄与を含める必要があることから磁気面推定手法の開発が行われた。

外部コイルによるトーラス放電については、通常のヌル点形成法に加え、サイクロトロン共鳴によって加熱された電子を捕捉する新手法が提案された。韓国の VEST 装置や KSTAR 装置において検証実験が実施された結果、より少ない磁束供給で十分な電流のプラズマ形成が可能であることが示された。

高周波波動あるいは合体法によって立ち上げられた球状トーラスはこれまでの磁場閉じ込めプラズマとは異なったパラメータを有していることから、計測手段の開発も必要とされる。高周波波動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、電子圧力分布が得られた。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、データを活用することで立ち上げ手法の機構解明と高効率化が行われた。重イオンビームプローブによる静電ポテンシャル計測が新たに開発、実装され、LATE 装置においてプラズマ内部が+50V 程度のポテンシャルを有していることが明らかとなった。この結果は、形成されたプラズマからの損失機構を解明する上で有用である。

以上述べたように、本共同研究では球状トーラスプラズマの新規立ち上げ手法の開発を行った結果、電子サイクロトロン波あるいは低域混成波といった高周波波動を用いた手法と、プラズマ合体を用いた手法のいずれにおいても良好な原理実証が達成され、数十～百 kA 程度のプラズマ電流を立ち上げることに成功した。現有設備における性能評価・最適化を行った上で、更なる性能向上のための装置改善案が策定され、その一部を実施した。

また、これら高周波波動および合体によって立ち上げられた球状トーラスプラズマでは、高エネルギー電子の生成が共通に観測され、その存在が球状トーラスプラズマそのものの平衡および加熱／電流駆動メカニズムに寄与していると考えられる。今後の展開として、高エネルギー電子を検出するための計測や、高エネルギー電子の振る舞いについての理論／シミュレーション研究との連携が必要になると考えられる。



### (3) 若手研究者育成

本事業は、日中韓で稼働している 6 台の球状トーラス実験装置を中核として協力体制を構築し、共同研究を推進したプロジェクトであったが、これらの実験装置は、日中韓の拠点機関である東京大学、清華大学、ソウル大学と、九州大学、京都大学において開発・運用されている。本事業に参加する主要機関がすべて大学であったことから、事業遂行においては大学院生が研究者として独り立ちするための教育・育成を主眼として方針の策定を行った。最終的には、いくつかの共同研究テーマに大学院生が主体的に参画し、教員が同行することなく直接相手方に出張して研究を遂行するなど、研究者としての自立がうかがえる成果を得たほか、大学院生の国際会議や雑誌論文での発表を推進・支援した。

計 10 回主催したセミナーのうち 4 回を夏の学校形式で、大学院生・若手研究者の育成を目的として開催した。三か国からのべ 150 名の大学院生が参加し、研究遂行上必要となる講義の提供ならびに研究発表会を実施した。日本側参加者の多くは大学院生が占めていたが、そのうち 23 名が事業期間内に博士号を取得した。さらに、そのうち 14 名が大学や研究機関などで研究職を得ていることは、本事業が大学院生の教育に大いに貢献した成果であり、本分野を担う将来の研究者を多く輩出することができた。

### (4) 日中韓における継続的な研究拠点の構築

平成 28 年度以降に開催されたセミナー等で、拠点機関・協力機関の研究者間で議論を行い、本事業で構築された体制が極めて有効であることが確認され、事業終了後も維持・拡大を目指す方針で一致した。三か国のネットワークをそのまま維持できる枠組みの構築には至っていないが、大学間協定や二国間交流制度等を活用していくこととなった。本事業終了後に韓国ソウル大学で開催される球状トーラス国際会議の開催などにおいて本事業で構築された協力体制を活用しつつ、個別の共同研究／セミナー等の維持発展を目指す。

### (5) 社会貢献や独自の目的等

特にありません。

### (6) 予期しなかった成果

本事業開始当初は、6 拠点の実験研究を軸とした協力体制構築を予定していたが、研究の進捗に伴い、プラズマ計測、プラズマ理論、シミュレーション、核物理、他の閉じ込め方式実験など、様々な分野の研究者との連携が必要となり、研究コミュニティを大幅に拡大することができた。多くの研究者から球状トーラス分野に興味を持っていただけ、分野全体として効率的な研究推進体制を実現することができた。

学術面では、高エネルギー電子の寄与というこれまでの閉じ込め配位では見られなかった特徴が、革新的手法で立ち上げられた球状トーラスプラズマに共通していることから、新たな研究分野の必要性を示すことができた。

**(7) 今後の課題・問題点及び展望**

本事業の成果により、球状トーラスプラズマの核融合炉心への適用および開発された革新的立ち上げ手法の他閉じ込め装置への転用を現実的な視野に入れることができた。世界的に展開されている球状トーラス研究体制を強化し、核融合分野全体への寄与を高めていくことが今後の課題といえよう。すでに共同研究として実施した大型トカマクとの連携に加え、他の閉じ込め研究や欧米の球状トーラス実験研究との連携も進んでいることから、今後は世界的規模での協力を充実させつつ、アジア地区拠点としての強固なネットワークを維持し、大学院生・若手研究者育成を継続的に行うことによって研究体制強化を目指す。

**(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 32 本

うち、相手国参加研究者との共著 5 本

②全期間中の国際会議における発表 47 件

うち、相手国参加研究者との共同発表 7 件

③全期間中の国内学会・シポジウム等における発表 32 件

うち、相手国参加研究者との共同発表 1 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	<p>(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</p> <p>(英文) Innovative Tokamak Plasma Startup and Current Drive in Spherical Torus</p>				
日本側代表者 氏名・所属・職	<p>(和文) 井通暁・東京大学・准教授 (1-1)</p> <p>(英文) INOMOTO, Michiaki・University of Tokyo・Associate Professor (1-1)</p>				
相手国側代表者 氏名・所属・職	<p>(英文) GAO, Zhe・Tsinghua University・Professor (2-1)</p> <p>HWANG, Yong-Seok・Seoul National University・Professor (3-1)</p>				
29年度の研究 交流活動及び得 られた成果	<p>本事業の主要課題であった高周波波動ならびに合体法による球状トーラス立ち上げについては、実証および基礎的なメカニズムの解明が概ね完了し、効率改善や他の手法との並行運用、さらには他の装置への適用促進など、今後の発展を見据えた研究段階に移行した。</p> <p>LATE 装置では、主に 2.45GHz の電子サイクロトロン波を用いた立ち上げ手法が開発されてきたが、新たに 5GHz の入射実験が開始され、2.45GHz の場合と同様にカットオフ密度を超えるプラズマの生成が確認された。これは、第一共鳴層において電子バーンスタイン波が励起されたことを示唆する結果である。QUEST 装置においても、28GHz と 8.2GHz 入射を併用した運転で、プラズマ密度がカットオフ密度を超えて急増する例が観測された。これらの成果は、高周波波動による高密度プラズマの生成・維持を実用化する上で重要な知見である。</p> <p>低域混成波を用いた球状トーラス立ち上げについては、TST-2 装置において容量結合型アンテナを用いた外側/上側同時入射の実装が新たに進展し、良好な初期実験結果が得られている。このように、球状トーラス分野で開発された電子サイクロトロン波/低域混成波によるプラズマ立ち上げ手法は、他の閉じ込め方式においても有用であると考えられる。韓国の大型トカマク装置 KSTAR との共同研究として 2 名の研究者が 4 日間ずつ同施設を訪問し、低域混成波およびヘリコン波を用いた電流駆動実験に使用されるアンテナについて、TST-2 装置の実績に基づき検討を行った。</p> <p>高周波波動を用いた立ち上げについては、コンパクトトーラス (CT) 入射ないし同軸ヘリシティ (CH) 入射との併用が検討され、QUEST 装置において前者による密度上昇が観測された。また後者の開発および</p>				

	<p>実装が進められ、初期実験が開始された。まだ効率は低いものの、20kA 程度のプラズマ電流が観測されており、今後高周波波動との同時運用によって運転領域の拡大ならびにプラズマ性能のさらなる向上が期待される。</p> <p>合体立ち上げの実証を行っている UTST 装置では、中性粒子ビーム入射効率を改善する目的で電流駆動効率を高めるための制御手法の導入を進めており、必要となるプラズマ形状・位置の高精度推定のための内部磁場センサを増強した。修正コーシー条件面法を採用することで、プラズマ合体の初期段階から形状推定が可能となることを UTST プラズマ数値解で確認し、さらに韓国 VEST 装置の実験データへの適用作業を進めるために 2 名の研究者が 3 日間ずつ共同作業を行った。中国 SUNIST 装置においても、日本側研究者との共同研究の結果、真空容器壁の渦電流分布を考慮することで磁場推定精度の向上が実現された。</p> <p>これらの高周波波動および合体によって立ち上げられた球状トーラスプラズマでは、高エネルギー電子の生成が共通に観測され、その存在が球状トーラスプラズマそのものの平衡および加熱／電流駆動メカニズムに寄与していると考えられる。高エネルギー電子を検出するための X 線計測や、高エネルギー電子の振る舞いについての理論／シミュレーションの活用が重要となり、共同研究を推進した。他の計測手法についての開発も進展しており、LATE 装置では重イオンプローブによるプラズマ内部の静電ポテンシャル計測が開始された他、プラズマの挙動を観測するためのマイクロ波反射計などの開発が進展した。</p>
<p>全期間にわたる研究交流活動および得られた成果の概要</p>	<p>本事業では、日中韓三か国の大学で運用されている 6 台の球状トーラス実験装置(東京大学 UTST、TST-2、京都大学 LATE、九州大学 QUEST、清華大学 SUNIST、ソウル大学 VEST) を活用し、革新的な立ち上げ手法として高周波波動法および合体法の開発研究を実施した。</p> <p>高周波波動としては、GHz 以上の周波数帯の電子サイクロトロン波と、数百 MHz 程度の周波数帯の低域混成波を用いている。電子サイクロトロン波を用いた立ち上げ手法としては、LATE 装置において 2.45GHz の高周波波動を用いて約 20kA のプラズマ電流立ち上げが達成された。縦方向の真空磁場中を流れる初期電子電流によって磁場が概ねキャンセルされることによって、磁場を横切る電子が発生することが閉じた磁気面を形成するというモデルが提案された。得られた球状トーラスの密度は、電子サイクロトロン波のカットオフ密度を大きく超過していることから、電子バーンシュタイン波が励起されたと考えられる。到達密度が電子サイクロトロン共鳴層の位置に依存するという実験結果から、高密度を実現するためには電子バーンシュタイン波を第一伝播帯</p>

に励起することの必要性が示唆された。到達密度の上昇を目的とした入射波偏波の改善を実施し、3台の 2.45GHz マグネトロンのうち、2台のマグネトロンからは O モード様の直線偏波を入射し、3台目のマグネトロンからの偏波を O モード様から X モード様にかけての左回り楕円偏波として変化させたところ、特定の偏波において電子密度、電子温度、軟 X 線発光量の増加が観測された。最外殻磁気面内の密度がカットオフ密度を超過していることから、このような差異は電子バーンシュタイン波へのモード変換率の向上によってもたらされたと考えられる。さらに、2.45GHz マイクロ波と同時に使用する 5GHz マイクロ波の入射システムが新たに構築され、初期入射実験では 2.45GHz の場合と同様にカットオフ密度を超えるプラズマの生成が確認された。QUEST 装置においても、プラズマ密度がカットオフ密度を超えて急増する例が観測されたことから、電子バーンシュ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と考えられる。

QUEST 装置では定常化を念頭においた実験が行われ、28GHz と 8.2GHz の電子サイクロトロン波を用いた実験では最大で約 70kA のプラズマ電流が得られ、長時間運転においては約 2 時間の定常状態が達成されるなど、性能面で大きな進捗が得られた。長時間放電時の水素の挙動を明らかにするために、動的な吸蔵メカニズムの解明が進展し、壁の粒子吸蔵が支配的となる放電開始直後の時間帯では再堆積層における水素バリアモデルが現象をよく説明できることが示された。並行して中国 EAST 装置での実験において、長時間放電における壁熱負荷計測を実施し、高性能プラズマを実現するための壁条件の解明が進展した。

さらにコンパクトトラス (CT) 入射ないし同軸ヘリシティ (CH) 入射との併用が検討され、QUEST 装置において前者による密度上昇が観測された。また後者の開発および実装が進められ、初期実験が開始された。まだ効率は低いものの、20kA 程度のプラズマ電流が観測されており、今後高周波波動との同時運用によって運転領域の拡大ならびにプラズマ性能のさらなる向上が期待される。

一方 TST-2 装置では 200MHz の低域混成波を用いたプラズマ立ち上げ手法の開発が行われた。三種類のアンテナ (誘導結合コムラインアンテナ、グリルアンテナ、容量結合コムラインアンテナ) による球状トラス立ち上げ実験が実施され、いずれのアンテナでも同程度のプラズマ電流駆動が実現できることが示された。特に高い電流駆動効率を有する容量結合型コムラインアンテナの有限要素法解析結果によると、プラズマへの放射が強すぎることによって波数スペクトルの劣化が生じ、駆動電流が制限されている可能性が指摘された。そこで、アンテナ近傍のプ

ラズマ密度を低下させるためにリミターを設置することによって、入射スペクトルの改善と不純物放出の抑制が実現され、最大 25kA 程度のプラズマ電流が達成された。また、高周波電力の吸収効率が低いことが課題となっていたが、プラズマ外部の密度をコントロールする一連の実験により、外側入射用のアンテナ配位では波動がプラズマ中をポロイダル方向に一周できずに外部で損失する可能性が示された。プラズマ電流および密度が増加するにつれて高周波パワーの吸収領域がプラズマ中心から端部にシフトする傾向が観測されたことから、球状トーラス配位が形成された後は、外側入射よりも上側入射を用いる方が高い吸収効率を示すと予想された。そこで、上側入射アンテナが新たに開発・実装され、外側／上側同時入射の初期実験では良好な結果が得られている。

このように、球状トーラス分野で開発された電子サイクロトロン波／低域混成波によるプラズマ立ち上げ手法は、他の閉じ込め方式においても有用であると考えられる。韓国の大型トカマク装置 KSTAR との共同研究が実施され、電子サイクロトロン波による閉じた磁気面形成の確認や、低域混成波／ヘリコン波用アンテナの開発等が行われた。

高周波波動によって立ち上げられた球状トーラスプラズマでは、初期の開いた磁力線領域の電流が高エネルギー電子によって担われているだけでなく、閉じた磁気面形成後の平衡状態においても高エネルギー電子がプラズマ電流や圧力、あるいは損失の大部分を担っていると考えられることから、平衡状態の新たな記述およびその特性解明が必要と考えられる。

一方、プラズマ合体法による高ベータ球状トーラスの形成に関しては、UTST 装置においてイオンフローの形成、イオン加熱に加えて、可視光高速イメージングおよび軟 X 線分光計測により、高エネルギー電子が生成されていることが明らかになった。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、高電子温度球状トーラスをダイナミックに形成する手法として新たな可能性が見いだされた。VEST 装置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等を改良した結果、外側 PF コイルのみを用いて 2 つの球状トーラスを同時に立ち上げ、それらを合体させることによって、最大 100kA 程度のプラズマ電流を有する球状トーラスを立ち上げることに成功した。合体にともなう磁気リコネクションでイオン・電子それぞれの加熱が観測され、1.5 程度のポロイダルベータ値を有していることが確認された。

また、新たに構築された電源によって平衡磁場コイル電流の維持時間

を増加させることに成功し、中性粒子ビーム入射時に電子が加熱されていることを示唆する結果を得た。さらに中性粒子ビーム入射効率を改善する目的で電流駆動効率を高めるための制御手法の導入を進めており、必要となるプラズマ形状・位置の高精度推定のための内部磁場センサを増強した。修正コーシー条件面法を採用し、真空容器壁を流れる渦電流を考慮することで、プラズマ合体の初期段階から形状推定が可能となることを UTST プラズマ数値解で確認し、さらに韓国 VEST 装置の実験データへの適用作業を進め、良好な成果を得た。中国 SUNIST 装置においても、日本側研究者との共同研究の結果、真空容器壁の渦電流分布を考慮することで磁場推定精度の向上が実現された他、高周波波動によって立ち上げられたプラズマでも開いた磁力線領域を流れる高エネルギー電子電流の寄与を含める必要があることから磁気面推定手法の開発が行われた。

外部コイルによるトーラス放電については、通常のヌル点形成法に加え、サイクロトロン共鳴によって加熱された電子を捕捉する新手法が提案された。韓国の VEST 装置や KSTAR 装置において検証実験が実施された結果、より少ない磁束供給で十分な電流のプラズマ形成が可能であることが示された。

高周波波動あるいは合体法によって立ち上げられた球状トーラスはこれまでの磁場閉じ込めプラズマとは異なったパラメータを有していることから、計測手段の開発も必要とされる。高周波波動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、電子圧力分布が得られた。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、データを活用することで立ち上げ手法の機構解明と高効率化が行われた。重イオンビームプローブによる静電ポテンシャル計測が新たに開発、実装され、LATE 装置においてプラズマ内部が +50V 程度のポテンシャルを有していることが明らかとなった。この結果は、形成されたプラズマからの損失機構を解明する上で有用である。

以上述べたように、本共同研究では球状トーラスプラズマの新規立ち上げ手法の開発を行った結果、電子サイクロトロン波あるいは低域混成波といった高周波波動を用いた手法と、プラズマ合体を用いた手法のいずれにおいても良好な原理実証が達成され、数十～百 kA 程度のプラズマ電流を立ち上げることに成功した。現有設備における性能評価・最適化を行った上で、更なる性能向上のための装置改善案が策定され、その一部を実施した。

また、これら高周波波動および合体によって立ち上げられた球状トー

	<p>ラスプラズマでは、高エネルギー電子の生成が共通に観測され、その存在が球状トラスプラズマそのものの平衡および加熱／電流駆動メカニズムに寄与していると考えられる。今後の展開として、高エネルギー電子を検出するための計測や、高エネルギー電子の振る舞いについての理論／シミュレーション研究との連携が必要になると考えられる。</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	0 回	1 回	1 回	0 回	1 回	1 回
海外開催	1 回	1 回	1 回	2 回	1 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6回 球状トーラスワークショップ」 (英文) JSPS A3 Foresight Program “6th Workshop on Spherical Torus “
開催期間	平成 29 年 6 月 27 日 ~ 平成 29 年 6 月 27 日 (1 日間)
開催地(国名、都市名、会場名)	(和文) 日本・東京・東京大学 (英文) Japan・Tokyo・The University of Tokyo
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・University of Tokyo・Associate Professor(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 派遣元	セミナー開催国 (日本)	
	A.	B.
日本 <人/人日>	8/13	
中国 <人/人日>	1/3	
韓国 <人/人日>	2/6	
合計 <人/人日>	11/22	0

- 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	本セミナーでは、日中韓で稼働している 6 台の球状トカマク装置を代表する研究者が集合し、5 年間の共同研究成果を発表し、事業全体の総合的な評価を行う。さらに、事業終了後の協力体制についても議論を行う。	
セミナーの成果	本事業の中核を担っている 6 台の球状トラス実験装置（九州大学 QUEST、京都大学 LATE、東京大学 TST-2、UTST、清華大学 SUNIST、ソウル大学 VEST）の活動を統括する研究者をはじめ、本事業に参加した研究者 11 名が参加し、本事業における各装置の成果ならびに教育的効果について総合的な評価・整理を行った。また、今後の研究課題や活動方針についても議論を行い、協力体制の維持発展を確認した。	
セミナーの運営組織	セミナーの実施運営は、ホストである日本側（東京大学）が主体的に行い、韓国側および中国側は各 PI が国内のとりまとめ等の補助的な作業を行った。議論内容やプログラム編成等については、三カ国の拠点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	内容 国内旅費 <span style="float: right;">金額 464,420 円</span>
	中国側	内容 外国旅費
	韓国側	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**

平成 29 年度は実施していない。

**（2）全期間にわたる実施状況概要**

研究者交流としては、平成 24 年度～25 年度までは短期間の国内情報収集を行ったのみであったが、若手研究者の発表機会を増やすべきであるとの中間評価指摘を受け、

平成 26 年以降は第三国で開催される国際会議等への派遣を積極的に行うこととした。平成 28 年度までで延べ 16 名 (127 日) の派遣を行ったが、うち 10 名は大学院生、ポスドク、助教といった若手研究者であり、本事業成果を広く世界に発信すると同時に、若手研究者の経験向上、さらには国際的な人脈の形成に大いに役立った。

年度	人/人日	用途
H24	1/2	国内研究会参加
H25	なし	
H26	5/46	国際会議 (ロシア) にて発表
H27	8/57	国際会議 (トルコ、米国、インド) にて発表
H28	3/24	国際会議 (チェコ、米国) にて発表

#### 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。)

中間評価での指摘事項は、(1) 大学院生の発表機会の増加、(2) 国際共著論文の増加、(3) ネットワークを継続的に維持する仕組みの検討であった。

(1) に関しては、平成 25 年に実施した第 1 回夏の学校での口頭発表形式をポスター発表形式に改めることによって、平成 26 年度の第 2 回から最終の第 4 回夏の学校まで、大学院生・若手研究者向けのポスターセッションを開催し、三年間で 125 件の発表を実現した。そのようなトレーニングの成果を踏まえ、10 名の大学院生・若手研究者を第三国で開催された国際会議に派遣し、本事業の成果を発信することができた。

(2) については国際共同研究を重点的に推し進めることによって、雑誌論文 5 編、国際会議 7 件、国内会議 1 件といった成果を含め、複数の具体的な共同研究を遂行・発展させることができた。

(3) については、平成 29 年度 (本事業終了後) 韓国で開催される球状トーラス国際会議の開催などにおいて本事業で構築された協力体制を活用しつつ、個別の共同研究/セミナー等を維持発展させる方向性が、平成 29 年度に実施したワークショップにおいて確認された。

**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		2/ 12 ( 0/ 0 )	2/ 6 ( 0/ 0 )	( ) ( )	4/ 18 ( 0/ 0 )
	2		0/ 0 ( 0/ 0 )	2/ 8 ( 0/ 0 )	( ) ( )	2/ 8 ( 0/ 0 )
	3		( ) ( )	( ) ( )	( ) ( )	0/ 0 ( 0/ 0 )
	4		( ) ( )	( ) ( )	( ) ( )	0/ 0 ( 0/ 0 )
	計		2/ 12 ( 0/ 0 )	4/ 14 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	6/ 26 ( 0/ 0 )
中国	1	1/ 3 ( 0/ 0 )		( ) ( )	( ) ( )	1/ 3 ( 0/ 0 )
	2	0/ 0 ( 0/ 0 )		( ) ( )	( ) ( )	0/ 0 ( 0/ 0 )
	3	( ) ( )		( ) ( )	( ) ( )	0/ 0 ( 0/ 0 )
	4	( ) ( )		( ) ( )	( ) ( )	0/ 0 ( 0/ 0 )
	計	1/ 3 ( 0/ 0 )		0/ 0 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	1/ 3 ( 0/ 0 )
韓国	1	2/ 6 ( 0/ 0 )	( ) ( )		( ) ( )	2/ 6 ( 0/ 0 )
	2	0/ 0 ( 0/ 0 )	( ) ( )		( ) ( )	0/ 0 ( 0/ 0 )
	3	( ) ( )	( ) ( )		( ) ( )	0/ 0 ( 0/ 0 )
	4	( ) ( )	( ) ( )		( ) ( )	0/ 0 ( 0/ 0 )
	計	2/ 6 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )		0/ 0 ( 0/ 0 )	2/ 6 ( 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	3/ 9 ( 0/ 0 )	2/ 12 ( 0/ 0 )	2/ 6 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	7/ 27 ( 0/ 0 )
	2	0/ 0 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	2/ 8 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	2/ 8 ( 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	3/ 9 ( 0/ 0 )	2/ 12 ( 0/ 0 )	4/ 14 ( 0/ 0 )	0/ 0 ( 0/ 0 )	9/ 35 ( 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
5/ 12 ( 0/ 0 )	13/ 36 ( 0/ 0 )	( ) ( )	( ) ( )	18/ 48 ( 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)	31	30	29(2)	41	17	6
受入人数 (人)	13	16	20	2(1)	30(4)	3

※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	1,654,520	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	254,360	
	謝金	0	
	備品・消耗品購入費	1,678,790	
	その他の経費	193,352	
	不課税取引・非課税取引に係る消費税	18,978	
	計	3,800,000	研究交流経費配分額以内であること。
業務委託手数料		380,000	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		4,180,000	

**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	1511	2360	2973	758	4228	1655
外国旅費	1804	2513	2553	4464	1391	254
謝金	0	0	0	0	0	0
備品・消耗品購入費	2595	3211	1573	1992	888	1679
その他の経費	0	1299	1706	883	1383	193
不課税取引・非課税取引に係る消費税	90	117	195	403	110	19
合計	6000	9500	9000	8500	8000	3800

※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。