

## 令和3(2021)年度 研究拠点形成事業(A. 先端拠点形成型)

## 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)	磁場の多様性が拓く超高温プラズマダイナミクスと構造形成の国際研究拠点形成		
日本側拠点機関名	京都大学エネルギー理工学研究所		
コーディネーター 所属部局・職名・氏名	エネルギー理工学研究所・教授・長崎百伸		
相手国側	国名	拠点機関名	コーディネーター所属部局・職名・氏名
	米国	ウイスコンシン大学マディソン校	College of Engineering, Professor, David Anderson
	ドイツ	マックスプランク・プラズマ物理研究所	The project Wendelstein 7-X, Director, Professor, Thomas Klinger
中国	西南交通大学	Institute of Fusion Science, Director, Professor, Yuhong Xu	

## 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。

※新型コロナウイルス感染症拡大の影響により、申請時に予定していた共同研究の実施、セミナーの開催及び研究者交流等が困難又は延期せざるを得なかった場合、当初目的の達成に向け代替的に行った取組があれば、その成果も含めて記入してください。

## ○申請時の研究交流目標

磁場閉じ込め核融合の超高温プラズマ中の乱流現象では、中性流体と異なり、閉じ込め磁場の電磁力を介した強い非線形結合や、核融合反応により生成されるアルファ粒子のような熱平衡状態から遠く離れた高エネルギー粒子との波—粒子相互作用により、プラズマ中に「自発流」が駆動され、その自発流が巨視的な「構造」を作りだす。また、これらの自発流は、超高温プラズマを閉じ込める磁場の三次元構造により制御できる可能性が近年の実験結果から明らかになりつつある。

本研究交流の目標は、世界各国で行われている超高温プラズマ閉じ込め研究の成果を結集し、多様な閉じ込め磁場中の超高温プラズマ閉じ込めで見られる乱流状態から自発流が駆動されるメカニズムを比較・考察することで、自然界に存在する大規模構造形成を理解する鍵となる新たな学理を創出する国際研究拠点を形成することである。そのために、次の3つのタスクフォース、(R1) プラズマ乱流と自発流形成、(R2) 高エネルギー粒子による自発流形成、(R3) 3次元磁場による自発流形成の制御、を設定する。

タスクフォースで設定された課題は、拠点研究機関として京都大学エネルギー理工学研究所に「超高温プラズマダイナミクス国際拠点コンソーシアム」を構築して実施する。タスクフォースは研究課題を設定し、長期滞在を基本とした国際共同研究を実施する。そして、得られた成果を統合することで超高温プラズマ中の自発流形成の物理機構の理解と制御機構の確立と若手研究者の人材育成に取り組む。

## ○目標に対する達成度とその理由

上記目標に対する2カ年分の計画について

※延長対象課題の令和2年度事業については、延長期間終了日までの状況を踏まえること。

- 十分に達成された
- 概ね達成された
- ある程度達成された
- ほとんど達成されなかった

### 【理由】

本事業の支援を得て、国際共同研究、セミナーを活発に進めることが出来た。新型コロナウイルスの影響により若手研究者の長期派遣には影響が出たが、リモート参加による国際共同研究の環境を整備することにより、研究者派遣と同等の共同研究環境を提供できた。海外への派遣、オンラインを用いた遠隔実験・シンポジウム・セミナー、国際サマースクールへの参加を通し、若手研究者育成へ貢献した。

### 3. これまでの研究交流活動の進捗状況

※新型コロナウイルス感染症拡大の影響により、申請時に予定していた共同研究の実施、セミナーの開催及び研究者交流等が困難又は延期せざるを得なかった場合、代替的に行った取組があれば、その内容及び成果も含めて記入してください。

- (1) これまでの研究交流活動(延長対象課題の令和2年度事業は延長期間終了日まで)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。  
※各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】

共同研究は、次の3つのタスクフォース、(R1) プラズマ乱流と自発流形成、(R2) 高エネルギー粒子による自発流形成、(R3) 3次元磁場による自発流形成の制御、のもとに行った。本事業を”PLADyS” (Advanced Core-to-Core Network for High-Temperature Plasma Dynamics and Structure Formation Based on Magnetic Field Diversity)と名付け、海外拠点及び国内研究機関への本事業活動に関する認知度の向上を図った。令和元年度は研究者の派遣・受入を通して交流が順調に進んだが、令和2年度はコロナ禍で研究者の移動に支障が出た。代替措置として、オンライン会議等やメールベースでの共同研究を推進した。これにより、共同研究は非常に順調に進捗し、研究目標は十分に達成された。R1 では、3次元磁場構造が乱流に及ぼす影響への理解に大きな進展が見られており、プラズマを閉じ込める磁場の構造が乱流の抑制に重要な影響を及ぼすことを明らかにした。また、中国・西南物理研究所との共同研究を通じ、周辺部乱流揺動と閉じ込め改善の鍵と考えられる自発流(ゾナル流)形成の関連性を示し、協力体制構築を進めた。R2 では、米国・ウィスコンシン大学マディソン校と京都大学による共同研究による高エネルギー電子による自発トロイダル流形成メカニズムの解明、ドイツ・マックスプランク・プラズマ物理研究所等との共同研究による高エネルギーイオン駆動不安定性の制御、プラズマ生成に大きな進捗があった。R3 では、磁場構造による乱流と自発流形成の制御に大きな進展があった。電子輸送障壁を超高温プラズマを閉じ込める断熱層の位置を自在に制御できる方法を発見し、水素プラズマの中心部分の断熱層で閉じ込められた約2000万度の狭い超高温領域を短時間で拡大し、プラズマ全体に広げることによって世界で初めて成功した。本事業での国際共著論文は23件(令和元年度7件、令和2年度7件)、国際学会発表は19件(令和元年度5件、令和2年度5件)、国内発表は23件(令和元年度5件、令和2年度2件)である。

#### ○セミナー

	令和元年 (平成31年)度	令和2年度
国内開催	1回	2回
海外開催	0回	8回
合計	1回	10回

##### 【概要】

国内の研究連携コーディネーターの主導により、最新研究のレビューや国際共同研究体制の構築および若手人材育成を目的とした国内・国際セミナーを開催し、本研究課題の目的に対する計画を十分達成することができた。特に、令和2年度から問題となったコロナ禍での移動制限を逆手にとり、Zoom等のオンラインツールを活用し定期的な国際セミナー(毎週水曜開催)を開催できたことは、本拠点形成活動の趣旨に合致した活動ができたと言える。国内研究連携コーディネーターを主体として、本研究課題の主題でもある超高温プラズマダイナミクスと構造形成の理解に向けた講演を行い、各タスクフォース研究の進展を議論した。国内セミナーについては、オンラインで開催、分野を超えた研究交流を進めた。

## ○研究者交流

### 【概要】

対面での国内研究者派遣・海外研究者受け入れに関してはコロナ禍のため令和元年度のみの実施成果であったが、主に若手研究者の1ヶ月以上の長期派遣・受け入れを軸に調整を行い、我が国が主体となって当該領域を率先できる次世代の国際ネットワーク基盤を作るための体制を築いた。国内若手研究者の派遣（長期・短期）に関しては助教・大学院生、計10名を延べ346日の期間にわたって派遣し、国際的なリーダーシップを持った若手研究者の育成を図ることができた。派遣先は海外拠点機関・協力機関である、ドイツ・マックスプランク・プラズマ物理研究所、米国・ウィスコンシン大学、General Atomics、中国科学院・等離子体物理研究所である。令和2年度以降は、Zoomを中心に共通の研究課題を設定し、遠隔実験参加を行った。令和3年3月に各国の拠点リーダー間でコロナ禍での今後の国際交流の進め方について議論を行った。

「共同研究」「セミナー」「研究者交流」の詳細については、PLADyS ウェブサイト (<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/plasma/pladys/index.html>) に公開している。また、「PLADyS 活動報告冊子」 (<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/plasma/pladys/achievements/PLADyS.pdf>) として取り纏めている。

(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、以下の観点から記入してください。

**○日本側拠点機関及び相手国拠点機関の交流によってえられた、世界的水準の国際研究交流拠点となりうるような学術的価値の高い成果**

各タスクフォースでの活動の中で、特筆すべき成果を下記に記載する(記載している論文は国際共著論文)。

(R1) Task Force 1「プラズマ乱流と自発流形成」

- ・ 核融合科学研究所(日本)とマックスプランク・プラズマ物理研究所(ドイツ)との国際共同研究を実施し、プラズマ中に発生する乱流がその閉じ込めを劣化させるため、乱流を抑制することが求められている。LHD 装置(日本)とW7-X装置(ドイツ)との比較実験を実行し、プラズマを閉じ込める磁場の構造が乱流の抑制に重要な影響を及ぼすことを明らかにした(令和2年度にWarmerがPhys. Rev. Lett.に投稿)。ジャイロ運動論に基づく乱流輸送シミュレーションでも確認されたこの結果は、乱流抑制の新たな可能性を示すものであり、新たな乱流輸送最適化先磁場配位の概念創成に繋がる。
- ・ 京都大学で開発した先進ヘリカル配位向けのビーム放射分光装置を米国・ウィスコンシン大学の先進ヘリカル装置HSXに適用し、密度揺動の計測に成功した(令和2年度にKobayashiがRev. Sci. Instrum.に投稿)。本成果により、今後、先進ヘリカル配位の乱流揺動の時空間構造解明が期待される。
- ・ 米国・ウィスコンシン大学との共同研究を推進し、九州大学の直線装置PANTAで進められている温度揺動計測法をHSX装置に適用し、実験研究体制を構築した。これらの成果を基盤として、プラズマ乱流による自発流形成とトリガー機構の機構解明に向けての協力体制の構築が進んだ。
- ・ 中国・西南物理研究所との国際共同研究を通し、周辺部乱流揺動と閉じ込め改善の鍵と考えられるゾーナル流形成の関連性に同位体効果が見られ、これが磁場配位に依存することを初めて見出した(令和2年度にOhshimaがPlasma Phys. Control. Fusionに投稿)。本成果によりプラズマ乱流による自発流形成とトリガー機構の機構解明に向けての協力体制構築が期待される。

(R2) Task Force 2「高エネルギー粒子による自発流形成」

- ・ ドイツ・マックスプランク・プラズマ物理研究所、スペイン・CIEMAT 研究所との共同研究により、電子サイクロトロン波共鳴加熱/電流駆動(ECH/ECCD)を用いた高エネルギー粒子によるMHD不安定性の安定化にHeliotron J(京都大学)、LHD(核融合研)、TJ-II(スペイン・CIEMAT)の3装置で成功した(Yamamoto, Nucl. Fusion 2020, Varela, Nucl. Fusion 2020)。この成果は、装置によらず普遍的に高エネルギー粒子が作り出す不安定性を外部から制御できることを証明した。
- ・ ドイツ・マックスプランク・プラズマ物理研究所との共同研究を推進し、京都大学 Heliotron J 装置において非共鳴マイクロ波加熱を着火補助としたプラズマ生成・維持に世界で初めて成功した(Kobayashi, Plasma Phys. Control. Fusion 2020)。非共鳴マイクロ波によって高エネルギー電子及びプラズマ電流の生成が観測されており、宇宙でも観測されている統計加速を実験室で再現した。
- ・ 京都大学および核融合科学研究所で進められている高速イオン励起 MHD 不安定性の理解が進展し、実際の真空容器壁形状を考慮した MHD 不安定性解析ができるように数値計算コードが改良された。その結果、壁による MHD 安定化効果が明らかになり、予想される MHD 不安定性の空間構造は計測結果とも良い一致を示した。この成果により、今後の3次元磁場配位を持つ装置における MHD 不安定性の予測精度が向上した。
- ・ 京都大学でモデル化が進展している高エネルギー電子による自発トロイダル流形成メカニズムの実証を国際共同研究により推進した。本件では米国・ウィスコンシン大学との共同研究を開始した。核融合科学研究所LHD装

置、京都大学ヘリオトロン J 装置においても同類の現象が観測されており、装置に依存しない普遍的現象であることを明らかにした。

#### (R3) Task Force 3「三次元磁場による自発流形成の制御」

- ・ 東京大学・京都大学・名古屋大学・マックスプランク・プラズマ物理研究所(ドイツ)の国際共同研究において、磁場構造による乱流と自発流形成の制御として、京都大学の Heliotron J 装置において電子輸送障壁を超高温プラズマを閉じ込める断熱層の位置を自在に制御できる方法を発見した。水素プラズマの中心部分の断熱層で閉じ込められた約 2000 万度の狭い超高温領域を1万分の1秒で瞬時に拡大し、プラズマ全体に広げることに世界で初めて成功した(Kenmochi, Sci. Rep. 2020、プレス発表)。
- ・ オランダ・アイントホーフェン工科大学(協力機関)の大学院生 N. Smith が京都大学に3ヶ月間留学し、三次元磁場配位における乱流と自発流との関係を示す密度揺動径方向相関をマイクロ波反射計を用いて測定し、相関長がイオンラーマー半径よりも短い長さであること、また、磁場配位によって相関長が変わることを明らかにした(Smith, Plasma Fus. Res. 2020)。

#### ○研究交流活動の成果から発生した波及効果

##### 1. リモートアクセスによる国際セミナーの開催と国際共同研究の進展

米国・ドイツ・中国等と共同で令和2年度前半(4月～7月)に国際セミナーをオンラインで開催した。各会合で約100名と多くの参加者を募ることができた。国別の内訳は各回ともおよそ日本15名、米国15名、ドイツ50名、中国10名である。セミナーの最後に3つのタスクフォースのサマリを行い、今後の国際共同研究において共通の研究課題設定を行うことができるようになり、遠隔実験を通じたネットワーク形成が進展している。今後、日本側拠点が主導しながら研究の幅を広げる上で、非常に役立つものである。

##### 2. 他研究分野の研究者との交流

核融合プラズマ研究分野とは異なる研究分野の研究者との交流を進め、乱流解析等に関連したデータサイエンス分野とのネットワーク形成、深層学習・敵対的生成ネットワーク、燃焼流や流体力学分野で注目されている、統計理論・情報理論の応用や畳み込みニューラルネットワークの応用による乱流の次元縮約に関する解析手法を取り入れることで、超高温プラズマだけにとどまらない構造形成のメカニズムについての議論が行えるようになった。

##### 3. 学術交流協定の締結を通じた国際共同研究と学生教育

令和元年11月に中国の協力機関である華中科技大学プラズマ物理国際共同研究所を訪問し、京都大学エネルギー理工学研究所との間で部局間学術交流協定を締結した。この交流協定をもとに、本事業の推進委員である長崎、鈴木が華中科技大学の学生に講義を行った。また、華中科技大学の学生が第1著者、長崎が共著の国際共著論文投稿の準備を進めた。

#### ○若手研究者育成への貢献

- ・若手研究者が身につけるべき能力・資質等の向上に資する育成プログラムの実施及びその効果

##### 1. 令和元年度は助教・大学院生、計10名を派遣し、国際的なリーダーシップを持った若手研究者の育成を図った。派遣先は海外拠点機関・協力機関である、ドイツ・マックスプランク・プラズマ物理研究所、米国・ウィスコン

シン大学、General Atomics、中国科学院・等離子体物理研究所である。また、海外の拠点・協力機関から合計 20 名の研究者・学生(米国 5 名、ドイツ 3 名、スペイン 2 名、オランダ 1 名、中国 9 名)を受け入れた。

2. 国際サマースクールを開催した(令和元年度、2 年度)。令和元年度は国内の若手研究者向けにサマースクールを対面で開催し、学生 17 名、教員 11 名が参加した。大学院生を対象とした講義 4 件の講師はドイツ・オランダ・米国・日本それぞれ 1 名である。加えて博士課程学生による英語の口頭発表を実施し、講師を含めた教員との質疑応答を設けることで国際学会での発表に向けたトレーニングを行った。令和 2 年度もサマースクールを開催し(オンライン)、博士課程・修士課程の大学院学生 51 名が参加した。プラズマ物理・核融合における世界的に著名な研究者 2 名(ITER 機構長の B. Bigot 氏、および、スウェーデン王立科学アカデミー会員の M. Tendler 教授)等を招聘し講義を行った。大学院学生が最先端の研究内容に触れるとともに、英語での議論を通して、国際的に活躍できる人材の育成に貢献した。
3. 本事業を通して、若手研究者・学生が 11 件の賞を受賞した。具体的には、仲田資季(核融合研・准教授)が若手科学者賞(令和 2 年度科学技術分野文部科学大臣表彰)、2019 年日本物理学会若手奨励賞、小林達哉(核融合研・助教)が 2021 IUPAP Young Scientist Award in Plasma Physics、鋦持尚輝(核融合研・助教)が 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics AAPPS-DPP Poster Prize、プラズマ・核融合学会第 25 回技術進歩賞、西澤敬之(マックスプランク・プラズマ物理研究所ポスドク)が 2019 年日本物理学会若手奨励賞、Panith Adulsiriswad(京都大学・博士課程学生)が日本物理学会 2020 年秋季大会領域 2 学生優秀発表賞、AAPPS-DPP2020 Poster Prize、令和 2 年度京都大学エネルギー理工学研究所・学生賞、的池遼太(京都大学・博士課程学生)が日本物理学会 2020 年秋季大会領域 2 学生優秀発表賞、岡佑旗(京都大学・修士課程学生)が COMSOL Conference 2020 優秀ポスター発表賞を受賞した。

・日本と交流相手国における次世代の中核を担う若手研究者の研究ネットワーク構築状況

令和元年度は海外若手研究者の受け入れに関しては研究員・大学院生、計 13 名を延べ日数 513 日の期間受け入れた(派遣元の国は米国・スペイン・オランダ・中国)。本課題で形成した研究総括拠点が当該研究領域における若手研究者ネットワークの中核となることで、研究ネットワークの構築に努めた。令和 2 年度はコロナ禍のため、若手研究者の研究ネットワーク構築ではオンライン会議等を通じた交流を行ったが、対面での交流のほうが優れている。国内の研究ネットワークの構築については、本事業国内セミナーや個別の研究会・講演会に積極的に若手研究者を参加させている。