

二国間交流事業 共同研究報告書

令和4年4月11日

独立行政法人日本学術振興会理事長 殿

[代表者所属機関・部局]
東京大学大学院新領域創成科学研究科
[職・氏名]
教授・小野靖
[課題番号]
JPJSBP1 20199920

1. 事業名 相手国: 英国 (振興会対応機関: OP) との共同研究

2. 研究課題名

(和文) 高出力リコネクション加熱の核融合応用のための日英連携トカマクプラズマ合体実験

(英文) UK-Japan tokamak plasma merging experiments for fusion application of high-power reconnection heating

3. 共同研究全実施期間 2019年4月1日～2022年3月31日 (3年0ヶ月)

4. 相手国代表者(所属機関・職・氏名【全て英文】)

Tokamak Energy Inc. ・ Chief Executive ・ Mikhail Gryaznevich

5. 委託費総額(返還額を除く)

本事業により執行した委託費総額		31,37,262 円
内訳	1年度目執行経費	1,237,262 円
	2年度目執行経費	1,900,000 円
	3年度目執行経費	0 円

6. 共同研究全実施期間を通じた参加者数(代表者を含む)

日本側参加者等	15名
相手国側参加者等	12名

* 参加者リスト(様式 B1(1))に表示される合計数を転記してください(途中で不参加となった方も含め、全ての期間で参加した通算の参加者数となります)。

7. 派遣・受入実績

	派遣		受入
	相手国	第三国	
1年度目	3	0	3(0)
2年度目	0	0	(0)
3年度目	0	0	(0)
4年度目	0	0	0

* 派遣・受入実績(様式 B1(3))に表示される合計数を転記してください。

派遣: 本委託費を使用した日本側参加者等の相手国及び相手国以外への渡航実績(延べ人数)。

受入: 相手国側参加者等の来日実績(延べ人数)。カッコ内は本委託費で滞在費等を負担した内数。

8. 研究交流実績の概要・成果等

(1)研究交流実績概要(全期間を通じた研究交流の目的・研究交流計画の実施状況等)

磁気リコネクションは高導電率のプラズマ中で反平行の磁力線がつなぎ変わる現象で、ブラックホールから太陽フレア、実験室プラズマ等でプラズマ構造変化とともに発生し、本共同研究を通じて、我々はトカマクプラズマの合体・リコネクション実験によって、つなぎ変わる磁場（再結合磁場）の2乗に比例するイオン加熱のスケーリング則を keV オーダーの高温・高磁場領域で確認した。このアイデアを英国トカマクエナジー研究所 ST-40 実験装置に持ち込み、日英の相補的な協力をバックにした ST-40 合体実験において、従来考えられなかった簡素な合体で、2019 年度、我々のスケーリング通りにイオン温度が最大 2.3keV まで増加し、従来の最高イオン温度である英国カラム研 MAST 実験の 1.2keV を大幅に更新した。その後、コロナウィルスの世界的蔓延により、1年以上の実験長期休止と小規模活動時期を経験したものの、その間も2次元計測の整った東京大学 TS-6 実験で物理機構を解明しつつ、電源パワーに優れたトカマクエナジー研究所の ST-40 実験がパラメータ向上を進め、イオン加熱スケーリング則を 3keV まで拡大・実証し、さらに中性粒子ビーム加熱も併用して1億度を達成した。合体加熱法に関する日英の TS-6, ST-40 の相補的な検討によって、合体・リコネクション加熱を最大化するコイル配置を見出し、Nuclear Fusion 誌 2 件を報告した他、静電ポテンシャルを介したリコネクションアウトフローによる加熱機構を解明することができた。2020 年までの成果は、小野、Gryaznevich らの共同論文として Fusion Energy 2020 論文にまとめられた他、この合体・リコネクション加熱研究が評価され、小野には米国物理学会から 2019 年 Fellow、田辺にはアジア太平洋物理学会から Young Researcher Award (U40 Award)が与えられた。

(2)学術的価値(本研究交流により得られた新たな知見や概念の展開等、学術的成果)

東京大学で見出されたトカマク合体加熱比例則：即ち再結合（ポロイダル）磁場の2乗に比例したイオン温度上昇する予測は、東京大学 TS-6 実験でも英国 ST-40 実験でも当てはまり、比例則の予測通り、合体加熱によって 3keV のイオン加熱を得たこと、さらに中性粒子ビーム入射と組み合わせて1億度を得たことにより、トカマクプラズマの合体という簡便な手段によって核融合プラズマ点火への見通しを得たことは核融合炉の経済性向上にとって大きな成果と言える。リコネクション加熱比例則が keV 領域でも成り立つことを実証したことは、太陽、磁気圏、実験室の全ての磁化プラズマに共通する磁気リコネクションによる再結合磁場エネルギーからイオン運動・熱エネルギーへの変換現象の物理解明の観点からも意義深い。心配された高ガイド磁場領域のリコネクション加熱の低下についても、電流シートをイオンラマ半径程度まで圧縮するインフローがあれば高速リコネクションがトリガーされて、比例則通り、再結合磁場の2乗に比例するイオン加熱が得られ、その80%がリコネクションアウトフローによることが結論できた。

(3)相手国との交流(両国の研究者が協力して学術交流することによって得られた成果)

合体・磁気リコネクションというトカマク研究者には馴染みの薄い高出力加熱方式について日本側、英国側の協力によって、再結合磁場の2乗に比例するイオン加熱を実証する過程で共通の理解が深まり、2次元計測で合体加熱の物理機構を解明する日本側と強力な電源設備による高磁場合体で高出力加熱、1億度を実現する英国側の協力によって、今後の合体加熱応用のノウハウが多数得られた他、リコネクション加熱を最大化するコイル配置についても最適化を完成することができた。例えば、ST-40 装置のST生成コイル2基の距離が近すぎると、再結合する磁束が少なく、リコネクション加熱が減少する点や、ST をコイルからピンチオフする前に再結合した磁束のエネルギーはコイルを通じて失われるが、ST 生成コイルの上下にあるダイバータコイルでダブルヌルを形成し、実質的に生成する2つの ST プラズマの間隔を広げて再結合磁束を増やし、損失の少ないコイルからの切り離し後に再結合を行なうなどの対策を立案することができた。

(4)社会的貢献(社会の基盤となる文化の継承と発展、社会生活の質の改善、現代的諸問題の克服と解決に資する等の社会的貢献はどのようにあったか)

トカマクプラズマ2個の合体により、核融合反応を点火できるとの我々の提案は、近年設立が相次いでいる核融

合ベンチャー企業には経済的なトラスプラズマ立ち上げ法として相次いで採用されており、そうした活動が日本経済新聞 2021 年 8 月 7 日等で取り上げられ、新聞読者を広く啓蒙することになった。国際熱核融合炉 ITER の活動とは別に、核融合炉の早期実現に向けた核融合ベンチャーの必要性が広く認識されるに至っている。

(5)若手研究者養成への貢献(若手研究者養成への取り組み、成果)

英国 ST-40 実験に 1 ヶ月単位で張り付いて本共同研究を推進したのは、大学院生であり、多くはオンライン実験とはなったものの、彼らにとっても英国オックスフォードの研究所で研究者として扱われた経験は大きな刺激となった。ST-40 実験の現場では、Gryaznevich らが個別に派遣学生のケアを行い、共同研究と同時に学生教育という意味でも成果があがったといえる。英国 ST-40 実験へ長期参加してリコネクション加熱応用の確立を担うのは、研究実績、成績、語学の 3 方面から選抜された優秀な大学院生であり、本計画は若手研究者養成の日英協力ともいえる。1) リコネクション加熱物理・応用開拓に関する日英連携、2) 実験室、天体・太陽・磁気圏観測、理論・シミュレーション間の異分野連携が、参加する院生、若手研究者の育成、教育にとっても有益であった。

(6)将来発展可能性(本研究交流事業を実施したことにより、今後どのような発展の可能性が認められるか)

2つのトカマクを合体するだけで核融合反応が点火できるとする本共同研究の成果は、今後の経済性の高いトカマク型核融合炉のプラズマ立ち上げにとって極めて有用といえる。既に、合体を初期加熱に利用する核融合実験は、本共同研究で用いた ST-40 実験装置の他、米国の核融合ベンチャー企業である TriAlpha Energy 社の C-2 実験装置をはじめ、韓国ソウル大学の VEST 実験装置、中国大学清華大学 SUNIST-2 実験装置などで採用が相次いでおり、経済性が重視される核融合原型炉の開発に向けて大きく発展するものと期待される。また、今回オンライン中心ではあったが、東京大学 TS-6, Tokamak Energy の ST-40 の両プラズマ合体実験の協力体制は、2次元計測の開発やそれを用いた物理解明を受け持つ前者と高磁場加熱・高温・高閉じこめを受け持つ後者の役割分担が機能し、さらなる協力拡大に向かって計画が進展中である。

(7)その他(上記(2)~(6)以外に得られた成果があれば記述してください)

例:大学間協定の締結、他事業への展開、受賞、産業財産権の出願・取得など

受賞として、代表者・小野には、磁気リコネクションのイオン加熱機構の解明と本共同研究を含む国際協力プログラムの推進により、2019 年米国物理学会フェローが与えられたほか、分担者・田辺博士には、磁気リコネクションのイオン加熱の先進的な 2次元イメージング計測により、2021 年アジア太平洋物理学会の Young Researcher Award (U40 Award)を受賞した他、分担者 Hyeon Park には、同じくリコネクション物理を含む先進的な 2次元イメージング計測により、2021 年同学会の最高賞である S. Chandrasekhar Prize in Plasma Physics が与えられている。関連した学生の受賞も多く、プラズマ・核融合学会論文発表賞を 3 件、電気学会学術奨励賞を 1 件などがある。