

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03797

研究課題名(和文)大規模熱輸送解析データベースを活用した核融合プラズマの熱輸送モデリング

研究課題名(英文)Thermal transport modelling of fusion plasmas based on large-scale transport analyses database

研究代表者

横山 雅之(YOKOYAMA, MASAYUKI)

核融合科学研究所・研究部・教授

研究者番号：60290920

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：核融合プラズマの熱輸送の問題について、プラズマ物理の要素統合型研究とは異なる、大規模データベースを最大限に活用したデータ駆動的アプローチに基づく新たな研究動向を創出した。核融合プラズマ実験を対象とした統合輸送解析スイートの構築・運用を通じて蓄積されたデータベース、および、物理モデルと観測に基づくデータ同化から得られたモデル間のギャップを活用するという2つのアプローチでの研究により、いずれにおいても、統計的に重要な変数を抽出すると物理的にも重要と認識される変数が選出されるという興味深い知見を得ることができた。これらに基づき、他の研究課題への応用や、統計数理核融合学の提唱に至っている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

要素統合的な研究と相補的なデータ駆動的アプローチを、高度に複雑な核融合プラズマの課題に適用し、データ駆動的アプローチの有用性ととも、その手法によって、リアルタイムでの予測や判断が必要とされる状況への適応性を各段に高め得ることを示すことができた。さらに、統計的に重要な変数であるとして選出される変数が、物理的にも重要であることが認識されているものであるという知見も得ることができた。核融合プラズマ研究の新動向の端緒となるものであるが、他の研究分野にも同様の考え方が展開できる。

研究成果の概要(英文)：Regarding the problem of heat transport in fusion plasmas, we have created a new research trend based on a data-driven approach that makes full use of large-scale databases, which is different from elemental integrated research in plasma physics. Research using two approaches: the database accumulated through the construction and operation of an integrated transport analysis suite for the fusion plasma experiment (LHD), and the gap between models which (1) obtained from physics insights and (2) obtained from data assimilation, have been conducted. In both cases, we were able to obtain the interesting finding that when statistically important variables are extracted, variables that are recognized to be physically important are selected. Based on these achievements, we have applied such data-driven approach to other research topics eg., scenario development for the record-breaking experiments) and then proposed new interdisciplinary research, "statistical-mathematical fusion research".

研究分野：プラズマ物理・核融合科学

キーワード：核融合プラズマ 熱輸送 大規模データベース 統計解析 情報量規準 重要変数 統計数理核融合学

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 本研究の着想に至った背景と準備状況

核融合プラズマの熱輸送特性に関して、閉じ込め時間のスケーリング則、第一原理に基づく新古典輸送/乱流シミュレーションによる熱輸送係数の導出が従来から行われているが、プラズマパラメータの時間変化や分布の再現には程遠い状況である。

応募者は、核融合科学研究所の核融合プラズマ実験装置である、大型ヘリカル装置(LHD)におけるプラズマの統合輸送解析スイート TASK3D-a の開発と運用を主導してきたが、その過程で、「(径方向分布の情報を有する) 実験および解析データベース」が構築されていることを認識した。

この準備状況を踏まえて、従来の手法からの発想転換:「この大規模データベースそのものが熱輸送特性を示しているはずである」という着想を得た。この大規模データベースから系統的知見を抽出する手法として、統計的手法(具体的には log-linear 重回帰分析)による熱輸送モデリングに取り組む研究構想に至った。大型ヘリカル装置(LHD)の実験解析用統合輸送解析スイート TASK3D-a の開発・運用を先導してきた応募者だからこその発想と研究構想である。

### (2) 関連する国内外の研究動向と本研究の位置づけ

研究開始当初には、「データ駆動科学」や「機械学習」といった研究動向は様々な分野で大きな潮流となっており、研究手法の新機軸となりつつあった。国内外問わず、核融合研究はこの動向に乗り遅れていたが、下記のような進展が見られるようになっていた。

- ITPA (国際トカマク物理活動) の輸送・閉じ込めトピカルグループでは、トカマクプラズマにおける熱・粒子束を、ニューラルネットワークを用いて簡便かつ短時間に予測する組織的な取り組みが開始されていた。広範な密度・温度に対して、比較的短時間で行える線形ジャイロ運動論シミュレーションで、乱流起因の熱輸送係数データベースを構築し、ニューラルネットワークを用いて予測計算を行うものである。
- 米国では、SciDAC (先進コンピューティングによる科学的発見) において、核融合研究における機械学習の組織的取り組み立ち上げのため、Data analytics and machine learning workshop (C.S. Chang 氏主催) が 2018 年 6 月に開催された。日本からは私のみが参加し、日本国内の関連研究(本研究の申請内容を含む)を総括報告した。トカマクのディスラプション予測(欧州や、国内でも東大や量子科学技術研究開発機構で強力に推進)や、エクサスケール級計算機での大規模シミュレーションで想定される出力データ量縮減のための「イベント検知」等の議論が行われた。

このような動向の中、本研究は、統計手法を用いた試行研究の段階ではあるが、核融合研究における上記研究動向の先駆的事例の一つとして認識された。研究コミュニティ全体ではないが、少なくとも、そのように認識する研究者が増えてきた。2018 年度に本研究申請の内容で招待講演を 2 件行ったこともその証左である。

## 2. 研究の目的

### (概要)

「実際に使える」核融合プラズマの熱輸送モデルを導出するため、第一原理に基づく従来の研究から発想を大きく転換して、大規模データ(多数の実験データ、多数の熱輸送解析データ)に向き合った手法を提唱、実践する。具体的には、統計解析手法に基づいて、広範囲のパラメータにわたって有効かつ簡便な「使える」熱輸送モデルを提示する。さらに、得られた熱輸送モデルの実験検証を行い、その妥当性を検証する。その上で、トカマクを含めた他実験装置における同様の研究の呼びかけを行うとともに、核融合炉運転制御への活用を見据えた展開も図る。

### 本研究の目的、学術的独自性と創造性

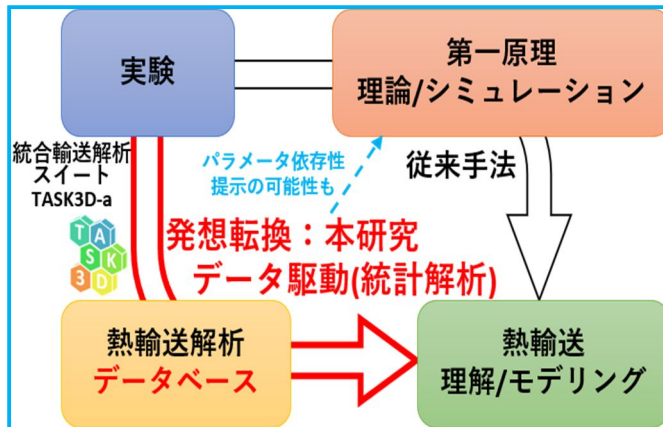
核融合プラズマを複雑極まりない媒質と捉えることから発想を大きく転換して、大規模データ(多くの実験データと多くの熱輸送解析データ)に向き合おうと考えた。統合輸送解析スイート TASK3D-a によって生み出されている膨大な熱輸送解析データベースを最大限に活用しようという試みである。

この取り組みによって広範囲のパラメータにわたって有効かつ簡便で「使える」熱輸送モデルを提示することが本研究の目的である。そのための手段として、従来の第一原理手法とは全く異なる、「大規模データベースの統計解析」という独自のアプローチを採る。数多くの実験(放電)それらの熱輸送解析データを最大限に活用して、「データが物語っている」ことを抽出しようとするものである。

右図に示すように、従来の「第一原理」や「物理的解明」とは一線を画す方向性ではあるが、「データ駆動」、「機械学習」や、多種多様なデータを基盤とした統計分野の研究と核融合研究との接点となる創造的な研究である。

核融合研究における統計手法の適用としては、エネルギー閉じ込め時間のスケールリング則導出がよく知られている。これらはプラズマの巨視的エネルギーバランスに基づくものであり、例えば、熱核融合実験炉（ITER）の装置サイズ決定にも重要な役割を果たした。（ただし、統計学に基づけば、スケールリング則（= 回帰式）の外挿性は保証されていないにも拘わらず、である。）

本研究は、温度「分布」の予測に用いることができる熱輸送モデルを導出しようとしており、この観点から、従来のエネルギー閉じ込め時間スケールリング研究とは根本的に異なる。



【図】核融合プラズマの熱輸送モデリング研究における本研究の位置づけ

本研究で獲得しようとしているのは、広いパラメータにわたって有効かつ簡便な熱輸送モデルである。具体的には、「予測型」統合熱輸送解析スイート TASK3D に導入して、温度分布の時間変化をも簡便に予測するための「使える」熱輸送係数である。

ここで、本研究における「熱輸送」について注釈を記す。熱輸送現象は、必ずしも拡散方程式で記述できるものではないというのは今や常識である。微視的乱流からメゾ・マクロスケールの構造形成など、多階層な時空間スケールの現象が複雑に入り組んでいることは周知の事実である。しかし、本研究では、それらを念頭に置きつつも、「どれだけ加熱をしたらどれだけの温度（あるいは温度勾配）が形成できるか」という単純な拡散方程式を基本とした捉え方を行う。つまり、 $Q = -n_X \nabla T$  ( $Q$ ,  $n$ ,  $X$ ,  $\nabla T$  は、それぞれ、イオン熱流束、イオン密度、イオン熱輸送係数、イオン温度勾配を表す)において、 $Q$  は TASK3D-a での熱流束解析データ、 $n$  と  $\nabla T$  は実験計測データが揃っているため、それらのデータから  $X$  を評価する（TASK3D-a が行っていることである）。複雑極まりない物理過程は、「出来上がりの温度勾配に全て集約されている」という考え方である。

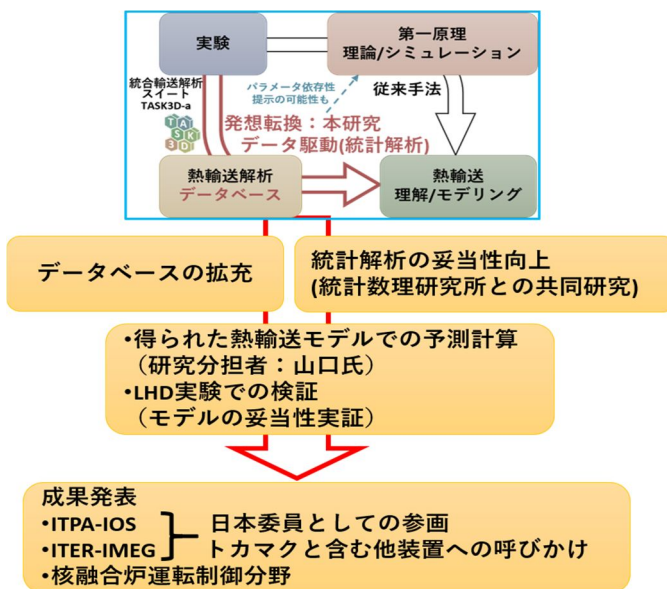
熱輸送係数としては、これまでの試行研究で採用している log-linear 線形回帰に基づく回帰式を第一義的には想定しており、これにより、短時間での温度分布予測計算が可能となる。この簡便な熱輸送モデルを用いて、大型ヘリカル装置（LHD）実験の放電全体にわたる時間追隨的予測計算を実証することを目指す。将来の核融合炉運転でのリアルタイムの温度分布や、さらには核融合出力の時間変動予測も視野に入れた取り組みを行う。

また、回帰式として得られるパラメータ依存性は、第一原理シミュレーションや理論研究におけるガイドラインとして活用できる可能性がある。「従来手法」との連携によって、実験、第一原理、データ駆動手法、モデリング（理解）の相互補完的進展を図る基盤にもなりうる（上図）。

### 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するための具体的研究方法は、右図、および、下記のような組み立てとした。

- 広い温度・密度領域にわたる LHD プラズマの実験データ、および、TASK3D-a による熱輸送解析データを整備・拡充する。
- 想定される説明変数（パラメータ）間の偽相関の排除、赤池情報規準（AIC）を用いた説明変数の取舍選択、回帰分析の寄与率の向上や相対誤差の低減などを通じて回帰式の妥当性向上を図る。
- この方法で得られると期待される、広範囲のパラメータ領域にわたって有効なイオン・電子熱輸送係数の回帰式を用いた到達温度予測を行う。



【図】本研究申請における研究の進め方、取り組み項目の流れ図

- この「データ駆動的」方法論の有用性を、LHD 実験データを用いて実証する。
- 一連の成果を国内外に発信する。この発信を通して、トカマクをはじめとした他装置における研究や、核融合炉運転制御への適用などと呼びかける。

#### 図中の言葉の説明

\* ITPA-10S：国際トカマク物理活動統合運転シナリオ トピカルグループ

\* ITER-IMEG：ITER 統合モデリング専門家会合

## 4. 研究成果

1. ~ 3. に記載した内容に即して、研究を行った。発表論文、学会発表の内容を踏まえて、研究成果を以下に記す。

LHD の高イオン温度プラズマの熱輸送係数の統計手法 (Log-linear 多変量回帰分析) によるモデリング研究を進めた。従前のイオン熱輸送係数のみならず、電子の熱輸送係数に関する考察も進め、イオン・電子双方の温度分布を再現することを目的とした研究へと進んだ。「モデル検証」の観点から、イオン・電子熱輸送係数について得られた回帰式を用いた温度分布再現計算を行ったところ、実験観測との差異が 2 割程度の範囲内で温度分布を再現できることを確認し、この手法の有用性を示すことができた。

さらに、物理的理解との関連を意図した方向性として、プラズマの半径位置ごと (プラズマ中心部、プラズマ周縁部など: プラズマ加熱分布や電子温度/イオン温度比の違いなどの差異あり) のモデリングを指向する取り組みを行った。具体的には、用意した説明変数候補の中から赤池情報量規準を用いた重要変数の「自動」抽出 (従前は変数の逐次増加法で情報量規準への寄与の大小を見ていたが、今回は全ての組み合わせの全状態探索を実行) を行った。

その結果、(1) イオン・電子ともに、熱輸送の大きさを規定する規格化温度勾配長が「自動」抽出され、しかも、プラズマ中心部ほどその負べきが大きくなり、(2) 電子温度/イオン温度比も「自動」抽出され、その正べきは、イオン熱輸送係数では中心部に向かうほど大きくなり、電子熱輸送係数におけるべき数はイオン熱輸送係数におけるものよりも小さい (これらは、実験現場における認識とも一致、大規模乱流シミュレーションの結果整理への重要な示唆) などの知見を得た。

これらの内容について NUCLEAR FUSION 誌の論文として発表した。(M. Yokoyama and H. Yamaguchi, "Progress of statistical modelling of thermal transport of fusion plasmas", NUCLEAR FUSION 60 (2020) 106024.)

さらに、赤池情報量規準を用いて、回帰に用いている変数の中で統計的に重要な寄与を行っている変数を選び出す操作を行うと、物理的に重要と考えられる変数と合致し、しかも、そのべき数が収束する傾向にあるという興味深い知見も見出された。この発見について、国内外のオンライン講演などの機会を活用して発信することを精力的に行った。

オンライン講演では、データ駆動的な手法でしばしば言われる「ブラックボックス的」な知見獲得ではなく、分野知識の視点 (変数群や解析対象) と統計的視点 (情報量規準) を相補的に組み合わせることで、データ駆動的な研究によって得られる結果の分野知識による納得性や、プラズマ物理とは別視点での新発見や気づきを創出できることを強調した。この新しい視点が興味を喚起し、ドイツの実験装置におけるデータベースに適用してみるという国際共同研究が始まった。

また、本研究手法の派生的展開として、LHD 重水素実験における中性子発生率 ( $S_n$ ) データベースの回帰で得たガイドライン ( $S_n$  を記述する変数群とそのべき数) に基づいて、LHD における実証実験を行い、 $S_n$  の記録更新を実現した。データベースと回帰の活用によるプラズマ性能向上という研究動向を定着させる端緒を得たことは大きな成果である。また、「記録更新」は、データの観点からは「外挿」に当たる。データ駆動的アプローチでしばしば問題になる外挿性について、データベースからの緩やかな進展 (じりじりと外挿的にデータが伸びる) に対しては一定程度の外挿性があることを、核融合プラズマのデータによって示したことは、統計数理関係者の興味を惹いた。(K. Ogawa, M. Yokoyama and M. Isobe, "Regression Approach for Acquiring a Quantitative Guidance toward Updating the Deuterium-Deuterium Fusion Neutron Emission Rate in the Large Helical Device, Plasma and Fusion Research 15 (2020) 1202087, K. Ogawa, M. Isobe and M. Yokoyama, "Extending the total neutron emission rate of steady-state deuterium large helical plasma guided by a data-driven approach", Fusion Engineering and Design 167 (2021) 112367.)

これらの成果を大局的に俯瞰で見ること、核融合プラズマにおけるプラズマ物理と相補的な研究展開 (統計数理モデリング) の起点となり得ることに考えが至った。この着想に基づき、従来のプラズマ物理の積み上げでの記述・理解から、熱輸送のような研究対象に関連するデータにあてはまる統計数理モデル創成により、リアルタイム制御やその根拠となる予測や判断を与

えるという研究動向の提唱を行った。このような新機軸の研究動向について、特別講演、核融合研究機関や統計数理関係者との議論・情報交換を積み重ねた。(横山雅之、“統計数理核融合学～統計数理による核融合研究課題の取り組み～”，プラズマ・核融合学会誌 99 (2023) 3-8. 査読なしの「研究最前線」記事、2023 年掲載後 3 か月間のダウンロード数ランキング 3 位 (プラズマ・核融合学会調べ))

さらに、本研究課題である大規模熱輸送解析データベースを活用した核融合プラズマの熱輸送モデリングの手法として、核融合研究へのデータ同化手法の導入によって生み出された、プラズマ物理に基づく輸送モデルと観測データに同化したモデルとのギャップを回帰式で表現するという「2 つ目の新たなアプローチ」についても成果を挙げた。ここでも、実験解析では認識されていた(論文等での図の横軸として活用されていた)が、輸送モデルには陽に含まれていなかった電子温度とイオン温度の比などの変数が統計的に重要な変数として選定され、しかもそのべき符号が実験で認識されているものと矛盾しない、という興味深い結果を導くことができた。

(M. Yokoyama, Y. Morishita and S. Murakami, “Plausible Model Improvement Utilizing the Information Obtained from Data Assimilation”, Plasma and Fusion Research 19 (2024) 1203005.) この成果についても、国際会議(国内開催)における基調講演やポスター発表、英文学術誌への論文発表などで成果発信するとともに、核融合プラズマの熱輸送の問題に取り組んでいる研究者や統計数理関係者との議論で、手法の波及性や汎化性についても議論を行っている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 横山 雅之	4. 巻 99
2. 論文標題 統計数理核融合学～統計数理による核融合研究課題の取り組み～	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 3,8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 M. Yokoyama, H. Yamaguchi	4. 巻 60
2. 論文標題 Progress of statistical modelling of thermal transport of fusion plasmas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 NUCLEAR FUSION	6. 最初と最後の頁 106024
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1741-4326/abac6a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Ogawa, M. Yokoyama, M. Isobe	4. 巻 15
2. 論文標題 Regression Approach for Acquiring a Quantitative Guidance toward Updating the Deuterium-Deuterium Fusion Neutron Emission Rate in the Large Helical Device	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1202087
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.15.1202087	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 K. Ogawa, M. Isobe, M. Yokoyama	4. 巻 167
2. 論文標題 Extending the total neutron emission rate of steady-state deuterium large helical plasma guided by a data-driven approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 112367
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.fusengdes.2021.112367	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Yokoyama, Y. Morishita, S. Murakami	4. 巻 19
2. 論文標題 Plausible Model Improvement Utilizing the Information Obtained from Data Assimilation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1203006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.19.1203006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 横山 雅之
2. 発表標題 データ駆動核融合科学 (特別講演)
3. 学会等名 核融合エネルギー連合講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横山 雅之
2. 発表標題 核融合研究における統計数理モデリング事例
3. 学会等名 統計数理研究所統計数理セミナー
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横山 雅之
2. 発表標題 核融合プラズマの統計数理モデリングとその制御活用の可能性
3. 学会等名 京大数理解析研究所共同研究集会「乱流の予測可能性と可制御性」 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横山雅之
2. 発表標題 核融合プラズマ解析における情報量規準の活用
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Yokoyama
2. 発表標題 Plausible exploitation of statistical approaches on fusion science
3. 学会等名 1st Workshop on Artificial Intelligence in Plasma Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Yokoyama
2. 発表標題 An example for complementarity between plasma physics and data-driven research
3. 学会等名 4th IAEA Technical Meeting on Fusion Data Processing, Validation and Analysis (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Yokoyama
2. 発表標題 One example for bridging the plasma-fusion and statistical-mathematical community on fusion research: Progress of statistical modelling of thermal transport of fusion plasmas
3. 学会等名 Phil Morrison 's Friday Meetings (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 横山雅之、山口裕之
2. 発表標題 回帰手法による核融合プラズマの熱輸送モデリングの進展
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横山雅之、山口裕之
2. 発表標題 輸送解析データベースと統計手法に基づく核融合プラズマの熱輸送モデリング
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Yokoyama
2. 発表標題 STATISTICAL INDUCTION OF A THERMAL TRANSPORT MODEL BASED ON THE TRANSPORT ANALYSES DATABASE
3. 学会等名 The 22nd International Stellarator-Heliotron Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Yokoyama
2. 発表標題 Plausible model creation by means of data assimilation ~ an example: on the thermal transport of fusion plasmas ~
3. 学会等名 The 4th International Conference on Data Driven Plasma Sciences (ICDDPS-4) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Yokoyama
2. 発表標題 Statistical-mathematical thinking in fusion research
3. 学会等名 JSST2023, Japan Society for Simulation and Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

コロナ禍のため、2年間の延長を承認していただきました。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山口 裕之 (Yamaguchi Hiroyuki) (90797101)	核融合科学研究所・研究部・准教授  (63902)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------