

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K07002

研究課題名（和文）アルファ粒子のチャネリングによる炉心プラズマ要求緩和と核融合炉設計空間の拡大

研究課題名（英文）Impact of ion heating such as alpha particle channeling on fusion reactor design space

研究代表者

飛田 健次（Tobita, Kenji）

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：50354569

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：アルファ粒子のチャネリングの利用によりイオン温度が電子温度より高くなるプラズマ条件に対して、核融合炉の運転空間（温度・密度空間）および設計空間（プラズマ大半径・小半径空間）への影響を核融合炉システム解析により分析した。このような高イオン温度条件では、プラズマ閉じ込め改善度などの炉心プラズマに対する設計要求が緩和される結果、コンパクトな核融合炉が成立しやすくなり設計領域が拡大することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の目的は、将来的に構想しうる核融合技術を核融合炉設計の立場からバックキャストしてその開発の価値を再定義することにある。アルファ粒子のチャネリングは、プラズマ制御概念としては黎明段階に留まっているが、この技術が発展してプラズマ制御に活用できるようになればこれまでになかったコンパクトで魅力的な核融合炉を構想しうることを示したもので、核融合エネルギーの将来的潜在力を示す成果といえる。

研究成果の概要（英文）：In the plasma condition with ion temperature higher than electron temperature, which could be realized as a result of alpha channeling, the operation space (plasma temperature and density space) and the design space (plasma major radius and minor radius space) of fusion reactor were investigated on the basis of fusion reactor system analysis. It was concluded that, in such a higher ion temperature condition, the design space is expanded, especially in a compact reactor regime, as a result of reduced plasma requirements such as energy confinement time.

研究分野：核融合学

キーワード：核融合炉 システム設計 アルファ粒子 イオン加熱 チャネリング

1. 研究開始当初の背景

核融合炉では、炉心プラズマで生ずる DT 反応： $D+T \rightarrow \alpha(3.5\text{MeV})+n(14.1\text{MeV})$ で生成される中性子 (n) は炉内機器で熱となり発電に利用され、電荷を持つアルファ粒子 (α 粒子) はプラズマ中に留まりプラズマを加熱して核燃焼を持続させるエネルギー源となる。反応直後の α 粒子は高速であるため、速度の近いプラズマ中の電子にそのエネルギーの大部分を渡し、核融合反応に寄与するイオン (D^+ および T^+) 電子から間接的にエネルギーを受け取るため効率的でないという問題がある。 α チャネリングはこの問題の解決案として 1990 年代に提案された概念 [1] であり、電磁波と高速 α 粒子の集団的相互作用によってイオンサイクロトロン周波数帯域の波を励起し、主に電子加熱として働いていたエネルギー移行をイオン加熱にする手法である。この手法を利用すれば核融合反応率が向上するため核融合炉の設計領域・運転領域にも影響を及ぼすと考えられるが、核融合炉システムの観点から α チャネリングの見直し取り組んだ研究例はこれまでなかった。

2. 研究の目的

本研究のような炉システム研究の意義は、現状技術から将来の核融合炉を見通すフォアキャストするとともに、将来の核融合炉のあるべき姿からバックキャストして現在の研究課題の価値を再定義することにある。

本研究では、 α チャネリングによる高イオン温度プラズマ条件が核融合炉設計に与える影響に焦点をあてて研究を行った。研究の主な目的は以下のとおりである。

- (1) 高イオン温度条件となる運転による核融合炉の他パラメータへの影響を明らかにする。
- (2) 高イオン温度条件での炉心プラズマに対する要求緩和の分析 (エネルギー閉じ込め時間に対する要求緩和、電流高度パワーの低減など) を行う。
- (3) システム設計解析に基づき、高イオン温度条件による核融合炉設計領域の拡大の可能性を探索する。

3. 研究の方法

(1) 前提条件

核融合炉のプラズマ中では、核融合反応で生成した α 粒子の速度の近いプラズマ中の電子にそのエネルギーの大部分を渡し、核融合反応に寄与するイオン (D^+ 及び T^+) にはエネルギーが直接は渡される割合は小さい。この結果、核燃焼プラズマでは T_e (電子温度) $>$ T_i (イオン温度) となる傾向にある。ただし、 T_e と T_i の等温化時間が短い高密度条件、または放射損失による電子のエネルギー損失が大きい条件下では $T_e \approx T_i$ になる場合がある。 α チャネリングがあるときのプラズマ中における α 粒子、電子、イオン間のパワーのやり取りは図 1 のとおりである。 α チャネリングの物理は未だ発展段階にあり、その発現方法も実証されてはいないが、本研究では α チャネリングは制御可能と仮定し、プラズマ温度比 T_i/T_e を外部入力値として炉概念へのインパクトを評価する。

(2) 解析手法

核融合炉の設計パラメータはシステムコード解析によって決定する。システムコードとは、プラズマの幾何形状、概略物理パラメータおよび炉工学に関連する要求値または拘束条件の下で、整合の取れた設計パラメータ・セットを求める計算コードである [2]。パラメータ間の整合をとる過程で重要になるのは、プラズマの

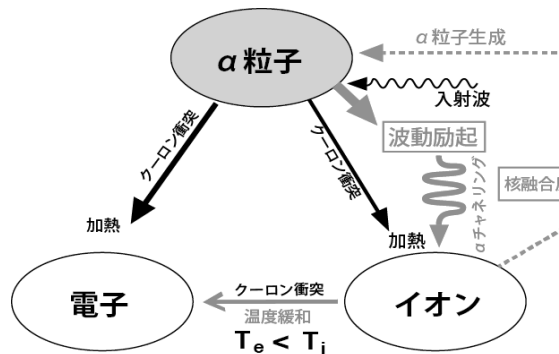


図 1. α チャネリングがある場合のパワーフローの概略図

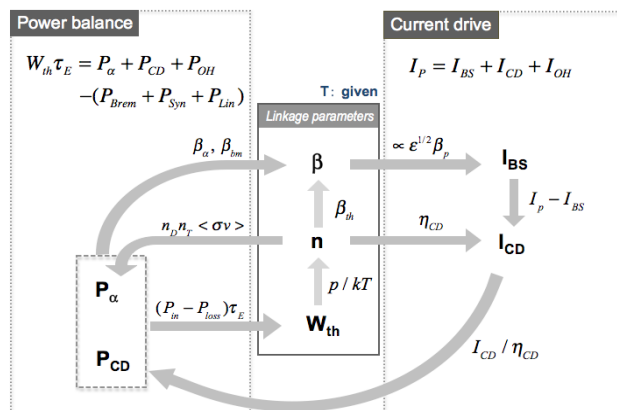


図 2. システムコード TPC における核融合炉パラメータの計算手順 [2]

パワーバランスの式と電流駆動の式の 2 つであり、これらの式を中心としたイタレーションによって収束解が求まる (図 2)。ここでは、ITER の運転パラメータ最適化のために開発された TPC コードを本研究用に改造して使用した。

(3) 解析条件

本研究の遂行のため、次の二つのアプローチでシステム設計解析を行った。

a) 運転領域の探索 (T_e - n_e 空間) :

核融合炉の幾何形状、磁場条件、設計上の拘束条件を固定し、プラズマパラメータを幅広くスキャンし、 T_e - n_e 空間でマッピングする (ここで、 T_e は電子温度、 n_e は電子密度)。この結果から、炉心プラズマ運転領域への影響を分析する。

運転領域の分析は、日本の原型炉概念 JA DEMO (図 3) を基本パラメータとして実施した。JA DEMO の主要パラメータを表 1 に示す。

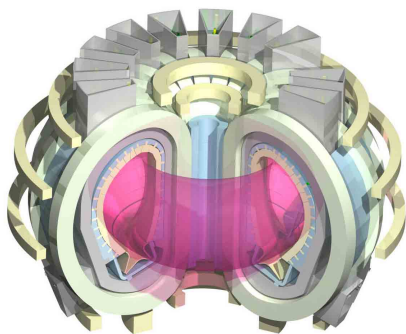


図 3. 原型炉 JA DEMO の概念図[3]

表 1. システム解析に用いた主要パラメータ

プラズマ主半径 R_p	8.5 m
プラズマ小半径 a	2.4 m
プラズマ楕円度 κ_{95}	1.65
安全係数 q_{95}	4.1
最大磁場 B_{max}	13.7 T
プラズマ電流 I_p	12.3 MA
規格化ベータ値 β_N	3.4

b) 設計領域の探索 (R_p - a 空間) :

核融合炉に求められる設計要件を満たす核融合炉の設計パラメータを異なる T_i/T_e に対して探索し、 R_p - a 空間でマッピングする (R_p はプラズマ主半径、 a はプラズマ小半径)。探索のための設計条件は表 2 のように設定した。

表 2. 設計領域の探索条件

プラズマ主半径 R_p	5.5 - 8.5
アスペクト比 $A (=R_p/a)$	2.5 - 4.5
規格化ベータ値 β_N	≤ 5.0
安全係数 q_{95}	4.1
トロイダルコイル設計応力	800 MPa
規格化プラズマ密度 n_e/n_{GW}	≤ 1.3
閉じ込め改善度 $HHy2$	≤ 1.5
電流駆動パワー P_{cd}	≤ 100 MW
正味電力 P_{net}	≥ 500 MW

4. 研究成果

(1) 運転領域の探索 (T_e - n_e 空間)

原型炉 JA DEMO の基本パラメータ[4]を用いて、a) $T_i/T_e = 1$ (以下、「等温度」という)、および b) $T_i/T_e = 1.3$ (以下、「高 T_i 」という) の 2 ケースについて、核融合出力 $P_{fus} = 2$ GW、規格ベータ値 $\beta_N = 3.5$ 、電流駆動パワー $P_{cd} = 80$ MW とする運転領域を計算した結果を図 4 に示す。図から明らかなように、高 T_i の場合には ($T_i/T_e = 1.3$)、等温度 ($T_i/T_e = 1$) のときよりも核融合反応率が上昇するため、運転領域は低密度側にシフトしていることがわかる。

運転領域 (範囲) の変化の様子を明示的に比較するため、表 1 の解析条件を部分的に変更するとともに (運転領域を拡大して比較しやすくするため) 総発電量等を追加し、核融合炉の運転条件を以下のように定義した。

- ・ 規格化ベータ値 $\beta_N \leq 3.8$
- ・ 閉じ込め改善度 $HHy2 \leq 1.4$
- ・ 総発電量 $P_{gross} \geq 500$ MW

これらと表 1 を満足する運転点の散布図を T_e - n_e 空間で示したものが図 5 である。高 T_i

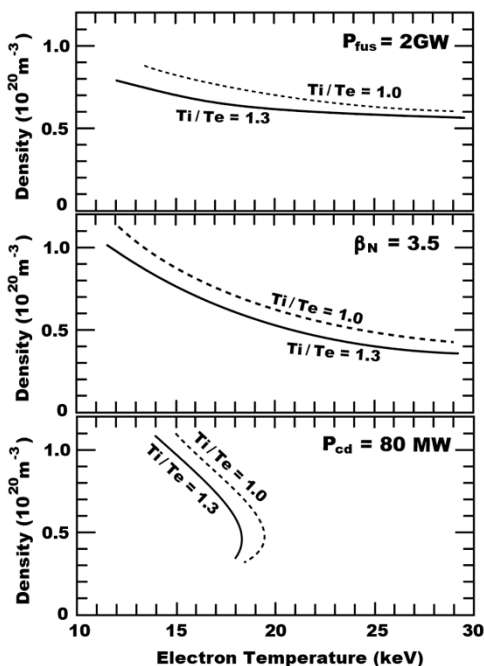


図 4. 等温度 ($T_i/T_e = 1.0$) および高 T_i ($T_i/T_e = 1.3$) の場合の運転パラメータの比較

($T_i/T_e=1.3$)の場合に、運転領域が低密度側にシフトしていることは図4の傾向と同様であるが、運転領域(範囲)の広さにはさほど違いがない。

同図の運転領域は4方向の境界で決定されている。図6から明らかのように、ベータ値 β_N 、プラズマ閉じ込め改善度 $HHy2$ 、電流駆動パワー P_{cd} 、核融合炉に求められる電気出力下限 P_{gross} の4つが運転領域を決定づける重要なパラメータであることがこの解析を通して明らかになった。

α チャネリングで期待される高 T_i 領域は β_N 上限付近では、電流駆動効率の低下(低 T_e のため)による P_{cd} の増大のためシステム設計上不利と予想していたが、約8,000組の運転パラメータの組合せを調べた結果、 $T_e - n_e$ 空間での運転領域に付随する他のプラズマパラメータの変化はあるものの決定的に不利と考える要素は見出せなかった。ただし、運転領域が低密度側に移動したことに伴い、ダイバータプラズマのデタッチメントとの整合性[5]は懸念材料となるため、より詳細な炉設計に際しては留意が必要である。

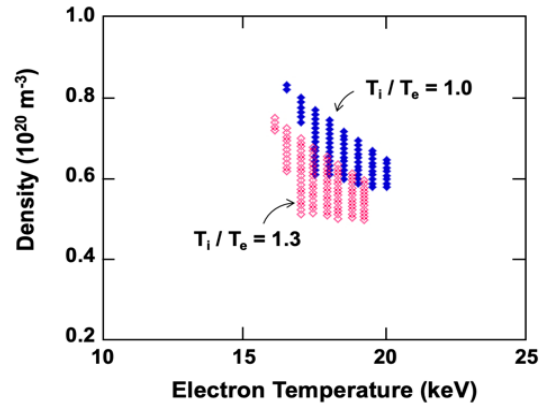


図5. 等温度 ($T_i/T_e=1.0$) および高 T_i ($T_i/T_e=1.3$) に対する運転領域の比較

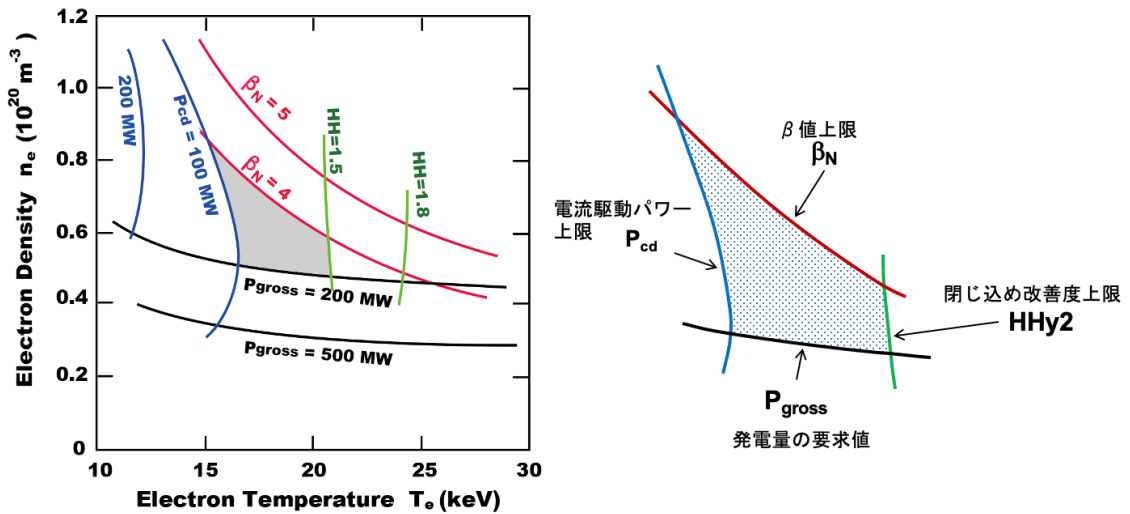


図6. $T_e - n_e$ 空間での運転領域の決定要因

(2) 設計領域の探索 ($R_p - a$ 空間)

高 T_i 運転は、同じ電子密度で比べると等温度 ($T_i = T_e$) の場合よりも高い核融合出力が得られる。このことは、炉心プラズマに対する閉じ込め改善度 $HHy2$ 要求が緩和されることを意味しており、プラズマのエネルギー閉じ込め時間が低下するコンパクトな核融合炉の設計においては優位に働くと考えられる。この点が、本研究のインセンティブの一つであり、前節の結果を踏まえて、炉寸法 (R_p および a) に関する設計領域の探索を行った。

炉寸法を変更することで、炉心プラズマの体積は大きく変化し、核融合出力の幅も広がることから、電気出力の評価関数を総発電量 P_{gross} に代わり送電端の正味電力 P_{net} とした。また、(1)の原型炉ベースの評価からは離れ、将来の先進的な核融合炉の可能性を探索するため、表2に示すように、 β_N 上限を5.0、閉じ込め改善度の要求値 $HHy2$ を1.4と先進的なプラズマ条件を採用した。

核融合炉の設計が成立する $R_p - a$ 空間上の設計点の散布図を図7に示す。図から明らかのように、高 T_i ($T_i/T_e=1.3$) の場合には、炉設計の成立する設計点の明確な拡大が小 R_p および小 a 側に見られる。なお、図中の設計点は(a)、(b)とも数10点に見えるが、それぞれの点は、(R_p, a)以外に T_e, n_e などの複数次元を持ち、約30,000組の設計パラメータのうち、(a)等温度 ($T_i/T_e=1.0$) の設計解は194組、(b)高 T_i ($T_i/T_e=1.3$) の設計解は358組であった。同図の設計解の散布図における上側の境界は、計算条件として与えたアスペクト比 $A (=R_p/a)$ の下限値2.5で決まっている。散布図における下側の境界は、設計パラメータの組合せに依存して、 β_N 上限 (=5.0)、 $HHy2$ 上限 (=1.4)、 P_{net} 要求下限 (=600 MW) のいずれかで制限されている。

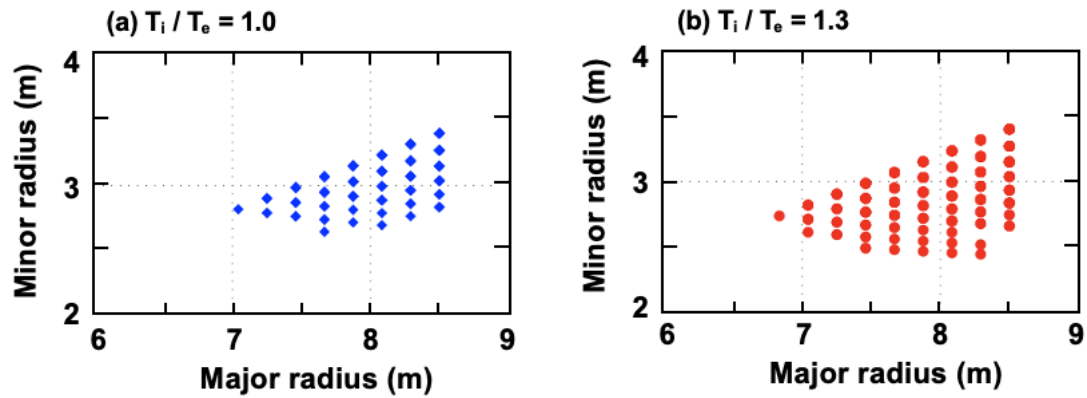


図 7. 炉設計が成立する炉寸法の解析結果の散布図：
 a) 等温度 ($T_i/T_e = 1.0$) の場合, (b) 高 T_i ($T_i/T_e = 1.3$) の場合

(3) まとめ

高イオン温度の場合には、コンパクトな核融合炉の方向に明確な設計領域の拡大が見られた。この結果は、 α 粒子のチャネリングによる高イオン温度化によって、核融合炉のコンパクト化の展望が広がることを示唆するものである。当初の予想どおり、このような設計領域拡大の要因は、閉じ込め改善度などの炉心プラズマに対する要求の緩和にあることが明らかになった。

<引用文献>

- [1] N.J. Fisch, M.C. Herrmann, Alpha power channeling with two waves, Nucl. Fusion, 35, 1995, 1753-1760
- [2] 飛田健次 他, 核融合原型炉 SlimCS の概念設計, 日本原子力研究開発機構報告書 JAEA-Research 2010-019 (2010)
- [3] K. Tobita et al., Design strategy and recent design activity on Japan's DEMO, Fusion Sci. Technol., 72, 2017, 537-545.
- [4] K. Tobita, R. Hiwatari, H. Utoh et al., Overview of the DEMO conceptual design activity in Japan, Fusion Eng. Design 136, 2018, 1024-1031
- [5] K. Tobita, R. Hiwatari, Y. Sakamoto et al., Japan's efforts to develop the concept of JA DEMO during the past decade, Fusion Sci. Technol. 75, 2019, 372-383

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tobita Kenji, Hiwatari Ryoji, Sakamoto Yoshiteru, Someya Youji, Asakura Nobuyuki, Utoh Hiroyasu, Miyoshi Yuya, Tokunaga Shinsuke, Homma Yuki, Kakudate Satoshi, Nakajima Noriyoshi, for Fusion DEMO the Joint Special Design Team	4. 巻 75
2. 論文標題 Japan's Efforts to Develop the Concept of JA DEMO During the Past Decade	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fusion Science and Technology	6. 最初と最後の頁 372 ~ 383
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15361055.2019.1600931	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 Tobita K., Utoh H., Hiwatari R., Miyoshi Y., Tokunaga S., Sakamoto Y., Someya Y., Asakura N., Homma Y., Nakajima N., The Joint Special Design Team for Fusion DEMO	4. 巻 1293
2. 論文標題 Conceptual design of Japan's fusion DEMO reactor (JA DEMO) and superconducting coil issues	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012078 ~ 012078
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1293/1/012078	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 Tobita Kenji, Hiwatari Ryoji, Utoh Hiroyasu, Miyoshi Yuya, Asakura Nobuyuki, Sakamoto Yoshiteru, Someya Youji, Homma Yuki, Nakamura Makoto, Hoshino Kazuo, Tanigawa Hiroyasu, Nakamichi Masaru, Tokunaga Shinsuke, Kudo Hironobu, Nishimura Arata	4. 巻 136
2. 論文標題 Overview of the DEMO conceptual design activity in Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 1024 ~ 1031
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2018.04.059	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 2件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 清野智大、飛田健次、高橋宏幸、福山淳、長崎百伸、出射浩、坂本宜照、P. Boonyarittipong、坂田裕紀、草開薫、M.N. Winarto、吉村溪冴、岡本敦、北島純男
2. 発表標題 核融合原型炉における電子サイクロトロン波電流駆動の効率改善に向けた研究
3. 学会等名 第13回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Tobita, R. Hiwatari, Y. Sakamoto, Y. Someya, N. Asakura, H. Utoh, Y. Miyoshi, S. Tokunaga, Y. Homma, N. Nakajima, S. Kakudate, The Joint Special Design Team for Fusion DEMO
2. 発表標題 Japan's efforts to develop DEMO concept during the past decade
3. 学会等名 The 23rd Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy (TOFE), Orlando, U.S.A. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Tobita, H. Utoh, R. Hiwatari, Y. Miyoshi, S. Tokunaga, Y. Sakamoto, Y. Someya, N. Asakura, Y. Homma, N. Nakajima, The Joint Special Design Team for Fusion DEMO
2. 発表標題 Conceptual design of Japan's fusion DEMO reactor (JA DEMO) with emphasis on superconducting magnet issues
3. 学会等名 The 31st International Symposium on Superconductivity (ISS2018), Tsukuba, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清野智大、高橋宏幸、福山淳、岡本敦、北島純男、飛田健次
2. 発表標題 原型炉における電子サイクロトロン電流駆動効率の入射パワー依存性
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	高橋 宏幸 (TAKAHASHI Hiroyuki) (30768982)	東北大学・工学研究科・助教 (11301)	

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
---------	---------