

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560829  
 研究課題名（和文） 等価的中性粒子ビーム入射による高ベータコンパクトトラスの加速・粒子補給法の開発  
 研究課題名（英文） Acceleration and particle buildup of high beta compact troid by a back ground particle injection in translation process.  
 研究代表者  
 高橋 努 (TAKAHASHI TSUTOMU)  
 日本大学・理工学部・教授  
 研究者番号 50179496

研究成果の概要：磁場反転配位（FRC）プラズマを閉じ込め磁場に沿って移動する（移送）際、その経路内に存在する中性粒子や弱電離プラズマの効果を実験的に明らかにした。背景にある粒子は、移送速度に相当する速度で入射する一種のビーム入射の効果（FRCへの粒子やエネルギーの補給の効果）を持つと考えられる。背景粒子種や移送速度の制御により粒子閉じ込め時間、磁束減衰時間の伸長や回転不安定性の発生時間の遅延など FRC プラズマの閉じ込め特性の改善が可能になる。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：プラズマ物理学，核融合学

科研費の分科・細目：核融合学 プラズマ閉じ込め・安定性

キーワード：コンパクトトラス，高ベータ，磁場反転配位，中性粒子ビーム入射，移送，中性粒子密度計測，トロイダル流，速度シア

## 1. 研究開始当初の背景

磁場反転配位プラズマは、高ベータ配位と単純な炉心構造を持つことにより中性子の発生しない重水素-ヘリウム核融合炉として注目されている。しかし、FRC プラズマ実験においては未だ現実的な炉設計を描くための定常運転を得るに至っていない。

最も現実的なシナリオである逆バイアステーパピンチ法(FRTP)，移送法，中性粒子ビーム入射(NBI)を組み合わせた定常運転のシナリオで

は、閉じ込め磁場 0.15T，プラズマ半径 0.2m，電子密度  $2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ，イオン温度 100 eV，電子温度 100 eV，エネルギー閉じ込め時間 500  $\mu\text{s}$ （エネルギー損失率 2 MW/m），ポロイダル磁束 4mWbの FRC生成が現状のNBI技術水準（ビーム径 2cm，エネルギー 10 keV，電力 1.5 MWの重水素ビーム）で必要とされている。

## 2. 研究の目的

この研究では、1.で述べたプラズマパラメー

タを達成する一つの方法として、FRTP法で生成したFRCを移送する過程の背景に存在する中性粒子や弱電離プラズマに注目し以下の様な研究目的を設定した。

(1) 移送過程の背景に存在するプラズマパラメータを明らかにする。特に、中性粒子数密度を簡便な方法で見積る方法を確立する。

(2) 背景粒子の移送過程に与える効果を定量的に実験から見積り、その効果を明確にする。効果のモデリングには、背景粒子を移送速度で入射する一種のビーム入射と考える。入射粒子の種類や移送速度と背景粒子の効果の関係を明確にする。

(3) 閉じ込め特性を改善する効果とし、トロイダル流速やトロイダル磁場発生の有無、電場の効果などを実験的に調べ、その外部制御法を確立する。

(4) FRCプラズマのMHD運動、断面形状、フロー、プラズマベータ値などの新しい計測法を開発する。

### 3. 研究の方法

(1) 多チャンネル光学計測を改良し、重水素スペクトル強度(バルマー系列の $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ )の簡易計測と分光モデル(衝突輻射モデル)を用いて原子数密度、イオン密度、電子密度、電子温度など推定法を確立する。

(2) FRTP法と移送法を組み合わせた実験装置NUCTE-IIIおよびNUCTE-III/T(図1:写真)を用いて行う。FRCプラズマ(プラズマ密度  $3 \times 10^{21} \text{m}^{-3}$ , プラズマ温度 200eV(電子温度 80eV), イオン温度(120eV)), プラズマ半径, プラズマ長さ)を移送速度 100km/sで背景粒子として重水素弱電離プラズマおよび中性ガスみの条件中を移送させ、閉じ込め特性や回転不安定性の発生の様子を観測する。背景粒子のパラメータ(プラズマ・中性粒子密度, 電子温度)を開発された(1)の計測法で推定する。また、実験条件での粒子シミュレーションを行い実験結果と比較する。

(3) イオンドプラー計測法(IDS)を用いてイオン流速の空間分布(セパトロリックスの内部, 外部)を明らかにする。制動放射光強度のトモグラフィ法によりセパトロリックスの変形とセパトロリックス内部の変形の違いを明らかにし両者の相関関係を調べる。イオン流速発生のメカニズムを粒子シミュレーションコードで調べ実験結果と比較する。考慮する物理過程としては、粒子損失, ポロイダル磁束減衰, 電場短絡などである。

(4) MHD運動による揺動磁場成分の計測するために新しい磁気探針計測法を開発する。広開口角の光ファイバーを用いた計測と集光性の良い光ファイバー計測を組み合わせたMHD運動(シフト, 傾斜, 内部傾斜, 楕円変形)を開発する。制動放射光分布と磁場計測(セパトロリックス形状)を組み合わせたセパトロリックス状の $\beta$ 値を推定する方法を確立する。

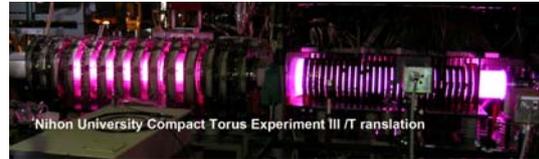


図1 磁場反転位相プラズマ生成装置NUCTE-III/T(重水素プラズマを移送)

### 4. 研究成果

(1) 水素原子密度計測法の開発とFRC周辺の重水素密度(論文④, 発表④)

プラズマ中の重水素粒子密度の簡易評価方法が確立された。この方法は、重水素のバルマー系列の可視光 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ 線スペクトルの絶対強度測定と原子過程を考慮した分光モデルを使って原子密度を推定する方法である。トカマク方式のプラズマで開発された手法を安価で多チャンネル化が容易に行える光学系にして改造し同時分布計測が行えるようにした。準定常近似による衝突輻射モデルから計算される励起レベルの数密度は、3つのパラメータ(電子温度, 電子密度(イオン密度は、電子密度に等しくプラズマの実効電荷数を1と仮定する), 基底状態の中性原子密度)の特性関数として決定されることに注目し、実験で計測される4つの線スペクトル絶対強度測定から得られる励起レベルの数密度と一致する電子温度, 電子密度と基底状態の中性原子密度を最小二乗法に類似した手法で求め、プラズマ中に存在する原子密度を推定

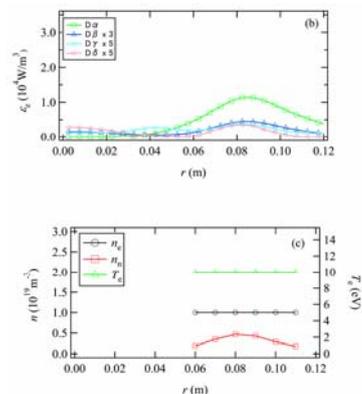


図2 FRC周辺の $D_{\alpha}$ ,  $D_{\beta}$ ,  $D_{\gamma}$ ,  $D_{\delta}$ の分布と推定された重水素原子の分布, 電子密度, 温度

する。確立された方法では、励起レベルの複数の数密度の分布が求まるためプラズマの状態（電離進行プラズマ、再結合プラズマ、両者が混在している状態）を知ることも容易に行える。

FRC 生成過程における中性粒子の挙動からこの過程のプラズマの振る舞いが初めて調べられた。FRC の生成過程を予備電離、径方向圧縮、軸方向収縮、平衡配位の4つに分けて各過程でのFRC セパトリティクス外側における中性原子数密度、その空間分布やプラズマの状態が決められた。

磁場反転配位生成直前の予備電離プラズマは、電離進行と再結合プラズマが混在している状態で平均原子密度としては  $5 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$  と推定された。これらの原子は径方向圧縮過程および軸方向収縮過程でほぼ電離される。平衡状態ではFRCプラズマの周辺に平均密度  $5 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$  の重水素原子が存在していると推定される（図2参照）。これらの中性粒子の変化から推定されるプラズマの挙動は、他の計測から得られる結果のものとはほぼ一致している。

(2) 移送過程における背景中性粒子の効果（論文③, ④, ⑨, 発表⑦, ⑧, ⑩, ⑬, ⑭, ⑮, ⑱, ⑲, ⑳）

磁場反転配位プラズマ移送過程における中性粒子の挙動の物理過程を考察するためにNUCTE-III-translation 装置で行った弱電離プラズマへの移送過程の実験結果と NUCTE-III/T 装置で行った中性粒子（重水素ガス）中への移送過程における中性粒子の挙動の実験結果について比較検討された。

共通する結果として、FRC に閉じこめられたプラズマの総粒子数の増加、ポロイダル磁束の減衰時間の伸長（損失量の低減）が確認された。これらは、背景粒子（プラズマや中性ガス）から供給される粒子やエネルギー供給量から説明される。（図3参照）FRC プラズマの崩壊の原因の一つである回転不安定性の発生時間の遅れ、FRC プラズマ内部構造や周辺プラズマの構造の変化（図4参照）なども同時に観測されている。

背景粒子は移送速度でFRCに入射する中性粒子や荷電粒子ビームと同等の効果を持っていることが明らかになった。これらの結果は、NUCTEの実験条件で計算した粒子シミュレーションの

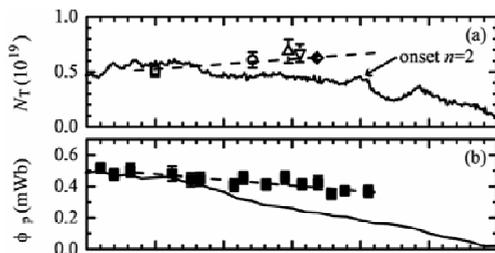


図3 移送過程背景粒子の効果

(a) 粒子補給の効果, (b)ポロイダル磁束減衰の低減

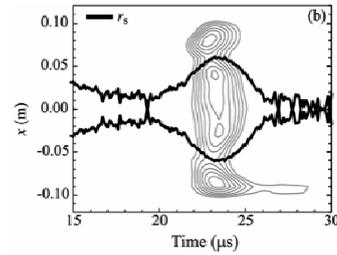


図4 移送過程で発生する内部およびセパトリティクス付近の構造の変化（制動放射光の強度分布の変化）

結果とよく一致する（図5参照）。また、表1に背景粒子入射によるエネルギー付与率をまとめる。

(3) IDS 計測によるプラズマ流速の計測（論文⑦, ⑩, 発表①, ⑥, ⑨, ⑰）

表1 等価ビーム入射と考えた場合のエネルギー付与率（プラズマパラメータはNUCTE-III の条件を用いる）

入射粒子種	重水素		ヘリウム	
	100	150	100	150
入射速度/エネルギー [km/s]/[eV]				
Separatrix 内部 [%]	93.6	81.1	90.6	53.2
Separatrix 外部 [%]	3.3	17.6	7.6	41.2
電子 [%]	2.8	5.7	3.8	7.3
イオン [%]	94.1	93.1	94.4	87.1

磁場反転配位(FRC)プラズマは、MHD的には極めて不安定であることが知られているが、実験で生成されるFRCプラズマは傾斜モードやキンクモードに対し極めて安定であり、配位に破壊的な変形をもたらす回転不安定性についても $n = 3$ 以上の高

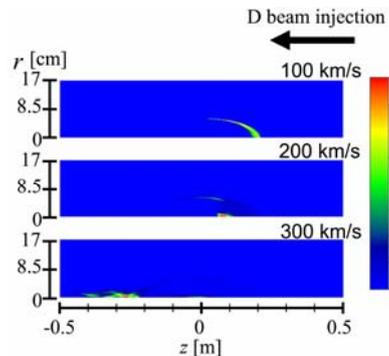


図5 NUCTE の条件での粒子シミュレーションの結果の例（移送速度の違いによる背景粒子の電離位置）

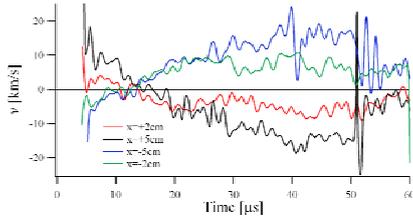


図6 トロイダル流速の時間発展（生成直後は常磁性方向の流速を持ちその後反磁性方向のトルクによって反磁性方向の流速が加速される。

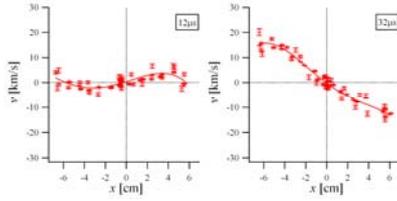


図7 トロイダル流速の径方向分布（左）生成直後（12μs）の分布，（右）平衡配位の分布（32μs）

次のトロイダルモードはその成長が観測されない。この原因のひとつとしてFRCに発生する強いトロイダル流とその速度シアによる2流体効果が考えられる。これを実験的に検証するため、イオンドップラー分光を用いたトロイダル流速の径方向分布およびその時間発展の測定をおこなった。NUCTE-IIIで生成されたFRCプラズマに対し、イオンドップラー分光法によってトロイダル流速の径方向分布測定をおこなった。メタンやヘリウムガスをドーピングして4価の炭素イオン(CV)のスペクトル227nm)および1価のヘリウムスペクトルで行った。プラズマ半径6cmのFRCプラズマに対し

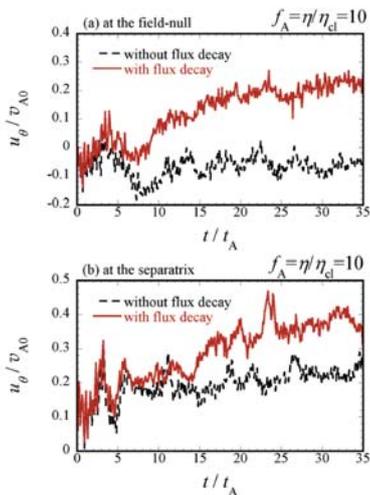


図8 トロイダル流速の時間発展（ポロイダル磁束の減衰の有無による違い）

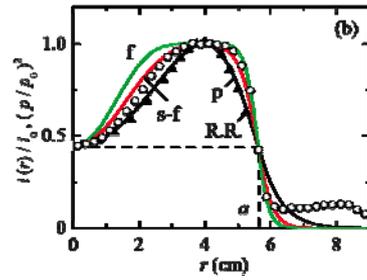


図9 規格化した制動放射光の分布  $i(r)/i_0$  と3つの磁場分布から推定した規格化圧力分布から推定される  $(P(r)/P_0)^2$  の比較

実験で得られたトロイダル流速（角速度）の時間発展は、生成過程においてイオン流速はイオンの常磁性方向を向いている。時間と共に反磁性方向に加速され、平衡を迎える20 μsには反磁性方向になる。30 μsには定常的なトロイダル流となり磁気軸付近からセパトリックス付近に速度シアが存在していることがわかった。（図6（トロイダル流速の時間変化）、7（速度シアの分布）を参照）

炭素、ヘリウムスペクトルについても同じ傾向の結果が得られた。その後n=2モードの回転不安定性が成長してくる。

これらの物理メカニズムについて粒子シミュレーションと比較している。粒子シミュレーションでは、新たにトロイダル流の発生メカニズムとして磁束減衰による効果があることが明らかとされ実験結果との比較がおこなわれている。（図8参照）

#### （4）各種新計測法の開発

- ① MHD 揺動観測用の測定法の開発（論文⑤、⑧、発表⑩）、
- ② セパトリックス状のβ値を推定する方法（図9参照、論文①、発表③、⑩）、
- ③ セパトリックスの変形とセパトリックス内部の変形を抽出するトモグラフィの解析法（論文⑥）などが開発された。

#### 5. 主な発表論等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計10件）

- ① Taeko Ikeyama, Masanori Hiroi, Yasuyuki Nogi, Yasunori Ohkuma, “Beta value at separatrix of field-reversed configuration”, Phys. Plasmas **16**, 042512, pp.1-5, (2009), 査読有り

- ② 小特集「ITER時代における大学の革新的閉じ込め概念研究のあり方」 政宗貞男、永田正義、

高橋 努, 小口治久, 高村秀一, 桂井誠, S. Woodruff, B.A. Nelson, T.R. Jarboe, P. Martin, R. Raman, B. E. Hooper, J. S. Sarff, G. Fiksel, P. M. Bellan, M. Brown, JPFR **84** (11), pp. 750-821, 査読無し

③小特集「極限高ベータプラズマ閉じこめ:FRC研究の新展開」浅井朋彦, 高橋俊樹, 井通暁, 神吉隆司, 水口直紀, 高橋努, 平野洋一, 小野靖, 郷田博司, 富田幸博, T. P. Intrator, J. T. Slough, L. C. Steinhauer, JPFR **84** (8), pp. 498-540 (2008), 査読無し

④Yoshiki Matsuzawa, Tomohiko Asai, Tsutomu Takahashi, and Toshiki Takahashi, “Effects of background neutral particles on a field-reversed configuration plasma in the translation process” Phys. Plasmas **15**, 082504, pp.1-8, (2008), 査読有り

⑤Taeko Ikeyama, Masanori Hiroi, Yuuichi Nemoto, Yasuyuki Nogi, “Analysis of magnetic probe signals including effects of cylindrical conducting wall for field-reversed configuration experiment” Rev. Sci. Instrum. **79**, 063501, pp.1-10 (2008), 査読有り

⑥T. KIGUCHI, T. ASAI, N. YAMAMOTO, S. HIROMORI, T. OKANO, Y. MATSUZAWA, T. TAKAHASHI, Y. NOGI and S. INAGAKI, “Tomographic Reconstruction of Internal Instability in a Field-Reversed Configuration”, Plasma and Fusion Research **2**, S1122, pp.1-4 (2007) (査読有り)

⑦To. TAKAHASHI, H. YAMAURA, F. P. IIZIMA, Y. KONDOH, T. ASAI, Ts. TAKAHASHI, Y. MATSUZAWA, T. OKANO, Y. HIRANO, N. MIZUGUCHI, Y. TOMITA and S. INAGAKI “A New Explanation for Toroidal Spin-Up of a Field-Reversed Configuration” Plasma and Fusion Research **2**, 008, pp.1-3 (2007), 査読有り

⑧Yuki Kanamaru, Hiroshi Gota, Kayoko Fujimoto, Taeko Ikeyama, Tomohiko Asai, Tsutomu Takahashi, and Yasuyuki Nogi, “Magnetic probe array with high sensitivity for fluctuating field”, Rev. Sci. Instrum. **78**, 036105, pp.1-3 (2007), 査読有り

⑨ T. Asai, Y. Matsuzawa, T. Okano, T. Kiguchi, K. Sakuraba, Tsutomu Takahashi, Toshiki Takahashi, Y. Hirano, N. Mizuguchi, Y. Tomita, “Heating and particle build-up of field-reversed configuration due to neutral particle injection in a translation process”, Transactions of Fusion Science and Technology, **51**, pp. 379-381 (2007), 査読有り

⑩ H. Yamaura, Toshiki Takahashi, Y. Kondoh, T. Asai, Tsutomu Takahashi, “Rotation of a field-reversed configuration due to resistive flux

decay”, Transactions of Fusion Science and Technology, **51**, pp. 373-375 (2007). 査読有り

[学会発表] (計21件)

- ①浅井朋彦, 「磁場反転配位プラズマの自発回転と速度シア形成」平成20年度核融合科学研究所一般共同研究「自己組織化系高ベータプラズマの外部MHD制御と粒子制御技術への応用」研究会, 平成21年1月30日-31日, 核融合科学研究所
- ②廣井雅典 「電場プローブによる回転不安定生の観測」, 平成20年度核融合科学研究所一般共同研究「自己組織化系高ベータプラズマの外部MHD制御と粒子制御技術への応用」研究会, 平成21年1月30日-31日, 核融合科学研究所
- ③池山多恵子 「磁場反転配位プラズマのセパトリックスベータ値」, 平成20年度核融合科学研究所一般共同研究「自己組織化系高ベータプラズマの外部MHD制御と粒子制御技術への応用」研究会, 平成21年1月30日-31日, 核融合科学研究所
- ④田邨尚郎, 松澤芳樹, 山本直樹, 高尾昂平, 日吉まゆ, 田沢仁康, 赤川駿介, 小森谷勇樹, 平山泰行, 関谷修平, 浅井朋彦, 高橋 努 「磁場反転配位プラズマの生成過程における中性粒子の振る舞い」第25回プラズマ・核融合学会年会, 平成20年12月2日-5日, 栃木県総合文化センター
- ⑤日吉まゆ, 田邨尚郎, 高尾昂平, 山本直樹, 松澤芳樹, 浅井朋彦, 高橋努, 「移送過程における磁場反転配位プラズマ形状の決定」第25回プラズマ・核融合学会年会, 平成20年12月2日-5日, 栃木県総合文化センター
- ⑥山本直樹, 松澤芳樹, 平山泰行, 小森谷勇樹, 板垣宏和, 小石章太郎, 鈴木章太郎, 浅井朋彦, 高橋努, 高橋俊樹, 鈴木敬久 「FRC プラズマにおけるトロイダルシヤ一流の観測」第25回プラズマ・核融合学会年会, 平成20年12月2日-5日, 栃木県総合文化センター
- ⑦高橋 努 他, 「Control of plasma dynamics in a translation process of field-reversed configuration」, 第14回国際プラズマ物理学会議2008(ICPP2008), 平成20年9月8日-12日, 福岡国際会議センター
- ⑧松澤芳樹 他, “Particle and energy recovery process of a high-beta compact toroidal translated along an asymmetric mirror field” [P04], 7<sup>th</sup> International

Conference on Open magnetic System for Plasma Confinement, 平成20年7月15日-18日, 大韓民国, Daejeon EXPO Park

⑨山本直樹 他, "Self-generated toroidal flow in a high-beta compact toroid with mirror configuration" [P06], 7<sup>th</sup> International Conference on Open magnetic System for Plasma Confinement, 平成20年7月15日-18日, 大韓民国, Daejeon EXPO Park

⑩松澤芳樹 他, "Control of plasma dynamics in a translation process of field-reversed configuration", Innovative Confinement Concepts Workshop and US-Japan Workshop on Improvement in the Confinement of Compact Torus Plasmas, アメリカ合衆国ネバダ州 Reno, 平成20年6月24日-27日

⑪池山多恵子, 根本祐一, 廣井雅典, 野木靖之, 「FRCプラズマのMHD運動の観測」, 第7回核融合エネルギー連合講演会, 平成20年6月19日-21日, 青森市男女共同参画参画プラザ

⑫廣井雅典, 根本祐一, 池山多恵子, 野木靖之, 「FRCプラズマのトロイダル電流が作る磁束」, 第7回核融合エネルギー連合講演会, 平成20年6月19日-21日, 青森市男女共同参画参画プラザ

⑬浅井朋彦, 松澤芳樹, 山本直樹, 高尾昂平, 田邨尚郎, 日吉まゆ, 田澤仁康, 高橋 努, 野木靖之, 高橋俊樹, 「FRC移送過程におけるプラズマ制御法」, 第7回核融合エネルギー連合講演会, 平成20年6月19日-21日, 青森市男女共同参画参画プラザ

⑭松澤芳樹, 「NUCTE-III/Tによる磁場反転記位プラズマ移送実験」平成19年度核融合科学研究所一般共同研究「能動的制御による高ベータプラズマの生成と維持」研究会平成19年12月17日-18日, 核融合科学研究所

⑮高橋努「ITER時代における革新的閉じ込め概念CT-RFP研究のあり方: 磁場反転記位プラズマ研究の進展 I (逆バイアステータピンチ法で生成されるFRC)」第24回プラズマ核融合学会年会特別企画II, 平成19年11月27日-30日, イーグレひめじ

⑯池山多恵子, 白井孝明, 根元祐一, 廣井雅典, 浅井朋彦, 高橋努, 野木靖之「円筒状導体効果を考慮した磁気揺動信号の解析」第24回プラズマ核融合学会年会, 平成19年11月27日-30日, イーグレひめじ

⑰高橋俊樹, 山浦秀文, 近藤義臣, 浅井朋彦, 高橋努「FRCの磁束減衰に伴う回転とピッチ角散乱の影響」第24回プラズマ核融合学会年会, 平成19年11月27日-30日, イーグレひめじ

⑱高橋努, 櫻庭健, 松澤芳樹, 木口知大, 山本直樹, 安藤智宏, 吉田博之, 浅井朋彦, 野木靖之「磁場反転記位プラズマの移送実験」第24回プラズマ核融合学会年会, 平成19年11月27日-30日, イーグレひめじ

⑲松澤芳樹, 櫻庭健, 木口知大, 山本直樹, 浅井朋彦, 高橋努, 高橋俊樹, 平野洋一, 水口直紀, 富田幸博, 野木靖之「移送FRCプラズマに対する背景中性粒子入射効果の粒子種による相違」第24回プラズマ核融合学会年会, 平成19年11月27日-30日, イーグレひめじ

⑳櫻庭 健他, "Plasma Dynamics in Translation process of Field-reversed Configuration", アメリカ合衆国物理学会プラズマ分野第49回年会, 平成19年11月12日-16日, アメリカ合衆国フロリダ州オーランド

㉑高橋 努他, "Overview of Translation Experiments on NUCTE-III/T", 2008 US-Japan Workshop on INNOVATIVE ACTIVE CONTROL FOR HIGH PERFORMANCE CONFINEMENT OF COMPACT TOROID (日米科学技術協力事業核融合分野「コンパクト・トーラスの高性能閉じ込めのための先進的能動的制御」)(2007年9月19日-21日) 日本大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高橋 努(TAKAHASHI TSUTOMU)  
日本大学・理工学部・教授  
研究者番号: 50179496

### (2) 研究分担者

野木靖之(NOGI YASUYUKI)  
元日本大学・理工学部・教授  
研究者番号: 90059569  
浅井朋彦(ASAI TOMOHIKO)  
日本大学・理工学部・講師  
研究者番号: 00386004  
高橋俊樹(TAKAHASHI TOSHIKI)  
群馬大学・工学部・准教授  
研究者番号: 10302457

### (3) 研究協力者

松澤芳樹(MATSUZAWA YOSHIKI)  
日本大学・理工学部・助手  
研究者番号: 10548051