

研究種目：特定領域研究

研究期間：2004～2009

課題番号：16082201

研究課題名（和文） ビーム中性化法によるアルファ粒子計測法の開発

研究課題名（英文） Development of A Confined Alpha Particle Diagnostic System
Using an Energetic He⁰ Beam

研究代表者

笹尾 真実子 (SASAO MAMIKO)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00144171

研究成果の概要（和文）：

本研究においてはプラズマの自己加熱源となり燃焼を持続させる役割を担うアルファ粒子の磁場中での挙動研究ため、ヘリウム中性粒子ビームにより2個の電子を与えてアルファ粒子を中性化する方法について、ITERのような次期計画において実現可能なシステムとしての基本設計を行い、必要なビーム源開発を行った。特に後者については実機に必要なヘリウムイオンビーム電流(>3A)、ビーム径(~2cm)を荷電交換に最適なビームエネルギー(20keV)で得る事に成功し、大電流ビームの正イオンから負イオンへの安定した変換に関わる工学技術と自然飛行を使ったヘリウム中性粒子ビーム生成の原理検証に成功した。

研究成果の概要（英文）：

As a realistic and promising method to diagnose alpha particles produced in a DT self-sustaining burning plasma, a “beam probe charge exchange system” was designed applicable to the DT experiments on International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). This method can achieve the desired S/N level if the incident ground state He⁰ beam is produced through an auto-detachment of an 1-2 MeV He⁺ beam of 10 mA. Considering the conversion efficiency from He⁺ to He⁰, a strong focusing He⁺ beam was designed and constructed. A beam current of more than 2 A was obtained at acceleration voltages of 20–25 kV with a beam radius about 2cm at the designed beam waist, where a conversion alkali-vapor cell would be located. For the He⁰ production, a test stand device was built and a ground state He⁰ beam was successfully generated through the “free flight method”. In summary, the principle and the engineering feasibility of “beam probe charge exchange system” has been proved.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	50,500,000	0	50,500,000
2005年度	109,000,000	0	109,000,000
2006年度	35,200,000	0	35,200,000
2007年度	26,300,000	0	26,300,000
2008年度	24,000,000	0	24,000,000
2009年度	10,200,000	0	10,200,000
総計	255,200,000	0	255,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・プラズマ計測

キーワード：中性粒子ビーム、イオンビーム、負イオンビーム、アルファ粒子計測、荷電変換

1. 研究開始当初の背景

核融合炉においては、DT核融合反応 ($D+T \rightarrow \alpha + n$) が利用され、中性子の 14MeV のエネルギーはブランケットにより熱に転換され、アルファ粒子は磁場に閉じこめられたままプラズマの自己加熱源となり燃焼を持続させる役割を担う。そのため、アルファ粒子の磁場中での挙動を研究することはプラズマ燃焼持続にとって不可欠である。しかしプラズマ内部に閉じ込められているアルファ粒子の空間、速度分布を測定する確実な方法は確立されていない。2 個の電子を与えてアルファ粒子を中性化して計測する方法については提案とそのための基礎研究はあるものの、実機に適用可能なレベルには至っていない。

2. 研究の目的

本研究ではヘリウム中性粒子ビームにより、2 個の電子を与えてアルファ粒子を中性化して計測する方法について、要素開発とシステムとしての確認を行うことを目標とする。

3. 研究の方法

具体的には、(1) ITER の実機に対するシステム設計を行うことに加えて、要素開発として(2)能動計測用中性ビーム生成法の原理検証、(3)実機サイズの多穴電極によるヘリウムビームの開発、(4)能動中性化実験の解析と調査、(5)候補となる検出器の検証をおこなう。5)ITER の実機に対するシステム設計を行う。

4. 研究成果

(1) ITER 中央チームを訪問し、CAD 図面に基づいた実機での自然飛行中性化法によるシステム配置を検討。この配置で必要となるヘリウムビームのパラメータ (1-2 MeV He^+ beam of 10 mA) を決定した (図 1)。この時得られる空間分解能、時間分解能、S/N を評価した。

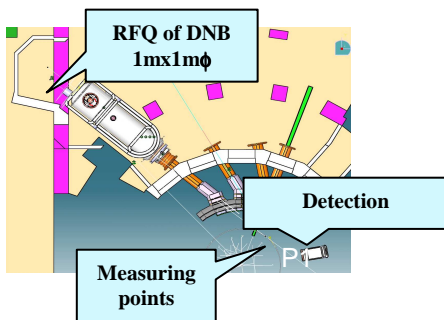


図 1 ITER 実機に適用した時の配置。

(2) 実機に必要な多穴電極による、強集束大電流ヘリウムビーム源を開発しその性能を調査した。

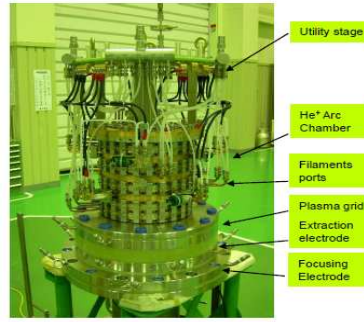


図 2 強集束大電流ヘリウムビーム源の概観

これらの実験のために、新たにビーム電流測定のためのロゴスキーコイル電流モニターと、ビームプロファイル測定のための黒鉛板と赤外カメラを組み合わせたシステムを開発した。図 3、図 4 にビーム電流のアーク電力依存性とビームウェスト特性を示す。

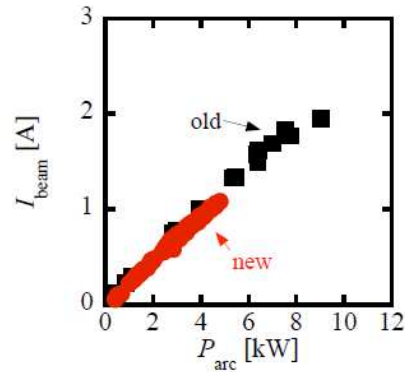


図 3 アーク電力依存性：目標とするビーム電流を 6kW 程度の運転で実現した。

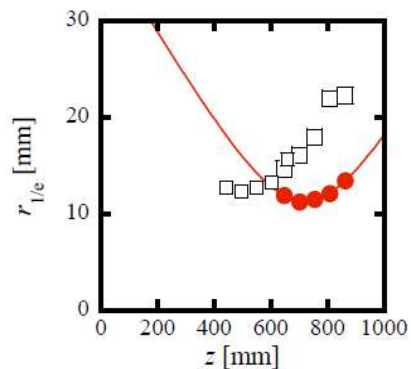


図 4 ビームウェスト特性。設計値の 750mm 近傍で最小半径をもち、そのビーム径は 2cm 程度まで集束されていることがわかる。

(3)基底状態のヘリウム中性粒子生成法の研究をおこなうために、原理検証装置を開発した(図5)。この装置では、イオン源から引き出された正イオンを荷電変換セルに集束させ負イオンを生成、その負イオンのみをレンズ効果をもつ偏向磁石で選択し加速する。さらに負イオンの自然飛行脱離により、透過性の良い基底状態の中性粒子ビーム生成を検証する。この装置の開発で実機におけるいくつかの工学的な課題解決の見通しを得た。

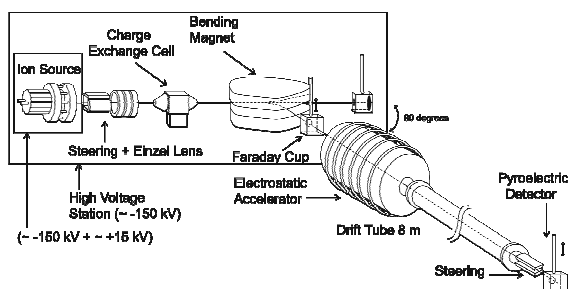


図5 原理検証装置概念図

また、この検証のため中性粒子ビームのフラックスを測定するためのパイロ検出器を開発した。図6はその信号例である。

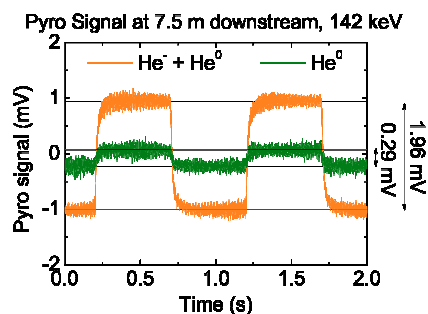


図6 パイロ検出器によりビームパワーの低い領域での信号検出に初めて成功。

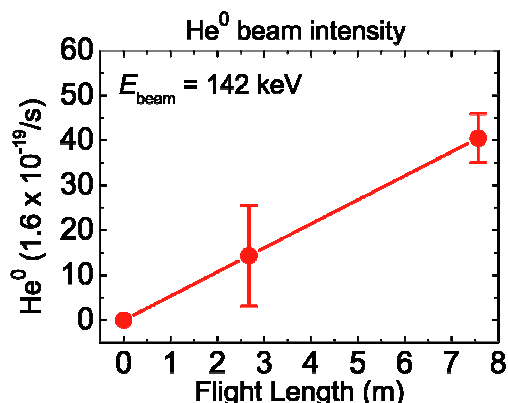


図7 飛行距離によるヘリウム中性粒子ビームのフラックス依存性。

このパイロ検出器を飛行距離の異なる地点に設置し、飛行距離による He^0 量の増加を確認した。この負イオンから中性粒子への変換は、

ヘリウム負イオンの自然寿命とほぼ一致するものであった。

以上の研究により、核燃焼実験の実機に対するシステム設置が可能であること、必要なプローブビームの要素研究が成功したことにより、求められる精度をもったアルファ粒子計測が実現可能であることを示した。

5. 主な発表論文等

(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 34 件)

- (1) M.Sasao, T. Kobuchi, M. Kasaki, H. Takahashi, A. Okamoto, S.Kitajima, O. Kaneko, Y.Tsumori, K. Shinto, M.Wada, "Fine-Structure Characteristics in the Emittance Images of a Strongly Focusing He^+ Beam", Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol.81(2), 2010, 02B115
- (2) M. Nishiura, T. Nagasaka, K. Fujioka, Y. Fujimoto, T. Tanaka, T. Ido, S. Yamamoto, S. Kashiwa, and M. Sasao, Development and irradiation test of lost alpha detection system for ITER, Rev. Sci. Instrum. 査読有, Vol.81(2), 2010, 10D313
- (3) M. Kasaki, N. Tanaka, T. Nagamura, K. Terai, A. Okamoto, S. Kitajima, M. Sasao, and M. Wada, Emittance measurement of multi-species ion beam produced via two-step charge exchange process in a Li vapor cell. Journal of Plasma Fusion Research, Series 9, 査読有, 2010, 248-252,
- (4) A. Okamoto, T. Isono, T. Kobuchi, S. Kitajima, and A. Okamoto, T. Isono, T. Nishiuchi, H. Takahashi, S. Kitajima, and M. Sasao, "High density helicon source for beam attenuating target", Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, 査読有, Vol.9, 2009, 428-431
- (5) A. Okamoto, T. Isono, T. Kobuchi, S. Kitajima, and M. Sasao, "Interaction of Helium Ion Beam with Argon Gas and Plasma", Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, 査読有, Vol. 8, 2009, 0039-0043 pp
- (6) N. Tanaka, T. Nagamura, M. Kikuchi, A. Okamoto, T. Kobuchi, S. Kitajima, M. Sasao, H. Yamaoka, M. Wada, Characteristics of a He^- Beam Produced in Lithium Vapor, NEGATIVE IONS, BEAMS AND SOURCES: Proceedings of the 1st International Symposium on Negative Ions, Beams and Sources. AIP Conference

- Proceedings, 査読有, Vol.1097, 2009, 443-448
- (7) H. Sakakita, S. Kiyama, H. Koguchi, Y. Hirano, T. Shimada, M. Sasao et al., "Evaluation of 25 keV Helium Hydrogen Ion Beam for Alpha Particle Measurement in ITER", Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, 査読有, Vol.8, 2009, pp.0674-0679,
- (8) M. Kikuchi, N. Tanaka, T. Nagamura, T. Kobuchi, A. Okamoto, S. Kitajima, M. Sasao, H. Yamaoka, M. Wada, "Study of the Beam Transport in a High-Energy Neutral Helium Beam System with Double Charge Exchange Cell", Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, 査読有, Vol.8, 2009, pp.1539-1541.
- (9) N. Tanaka, H. Yamaoka, M. Nishiura, K. Tsumori, T. Nagamura, M. Sasao, T. Kenmotsu, Y. Matsumoto, M. Wada, "Low-energy particle interaction at carbon nanowalls on W surface" Journal of Nuclear Materials, 査読有, 2009, pp.1035-1038
- (10) N. Tanaka, T. Nagamura, M. Kikuchi, A. Okamoto, T. Kobuchi, S. Kitajima, M. Sasao, H. Yamaoka, M. Wada, "Characteristics of a He⁻ Beam Produced in Lithium Vapor", AIP conf. Proc. 査読有, Vol. 1097, 2009, pp.443-448
- (11) A. Okamoto, K. Iwazaki, T. Isono, T. Kobuchi, S. Kitajima, and M. Sasao, "Development of a helicon plasma source for the measurement of He^{*} component in a He⁰ beam", Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.3, 2008, pp.059-1-059-7
- (12) T. Hirouchi, M. Nishiura, T. Nagasaka, T. Ido, D. Funaki, T. Kobuchi, A. Okamoto, S. Kitajima, M. Sasao, K. Fujioka, M. Isobe, T. Mutoh: "Effect of ion beam and neutron irradiations on the luminescence of polycrystalline Ce-doped Y₃Al₅O₁₂ ceramics", Journal of Nuclear Materials, Vol.386-388, 査読有, 2008, pp.1049-1051
- (13) M. Sasao, T. Kobuchi, N. Tanaka, M. Kasaki, M. Kikuchi, T. Nagamura, A. Okamoto, S. Kitajima, O. Kaneko, M. Nishiura, K. Tsumori, M. Wada, K. Shinto, H. Sakakita, S. Kizima, Y. Hirano "Development of an Energetic He⁰ Beam Injector for Fusion Application", IAEA-CN-165/FT/P28, 査読有, 2008.
- (14) T. Kobuchi, M. Kasaki, K. Shinto, A. Okamoto, S. Kitajima, M. Sasao, K. Tsumori, O. Kaneko, H. Sakakita, S. Kiyama, Y. Hirano, M. Wada, "Effects of filament geometry on the arc efficiency of a high-intensity He⁺ ion source" Rev. Sci. Instrum., 査読有, Vol.79, 2008, pp. 10F316-1-3.
- (15) N. Tanaka, M. Kasaki, K. Iwazaki, M. Kikuchi, A. Okamoto, T. Kobuchi, K. Shinto, S. Kitajima, K. Tsumori, O. Kaneko, M. Wada, M. Sasao, "Development of a He⁰ Source for Confined Alpha Particle Measurement", AIP conf. Proc. 査読有 Vol.988, 2008, pp.335-338.
- (16) N. Tanaka, H. Yamaoka, M. Nishiura, K. Tsumori, T. Nagamura, M. Sasao, T. Kenmotsu, Y. Matsumoto, and M. Wada, "Low-energy particle interaction at carbon nanowalls on W surface", Journal of Nuclear Materials 査読有, Vol. 390-391, 2009, pp. 1035-1038
- (17) M. Kasaki, M. Hanada, M. Kamada, Y. Tanaka, K. Kobayashi, and M. Sasao, "Electrons in the negative-ion -based NBI on JT-60U", AIP conf. Proc. 査読有, Vol. 1097, 2009, pp.443-448
- (18) M. Sasao, et al. "Fusion Product Diagnostics" Fusion Science & Technology, 査読有, Vol. 53, 2008, pp. 604 -639
- (19) M. Kasaki, K. Shinto, T. Kobuchi, A. Okamoto, S. Kitajima, M. Sasao, K. Tsumori, M. Nishiura, O. Kaneko, Y. Matsuda, M. Wada, H. Sakakita, S. Kiyama, Y. Hirano, "Development of a strongly focusing high-intensity He⁺ ion source for a confined alpha particle measurement at ITER", Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 79, 2008, 2C1131
- (20) H. Sugawara, K. Shinto, N. Tanaka, S. Takeuchi, M. Kikuchi, A. Okamoto, S. Kitajima, M. Sasao, M. Wada, "Diagnostics of a He⁺ beam extracted from a compact magnetic bucket-type ion source", Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 79 No. 2, 2008, pp.02B708
- (21) Tanaka N, Kikuchi M, Nagamura T, Sugawara H, Takeuchi S, Kobuchi T, Okamoto A, Shinto K, Kitajima S, Sasao M, Wada M. "A beam transport system for an intense He⁻ beam source" Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 79 No. 2, 2008, pp.02A512-1 - 02A512-3
- (22) S. Takeuchi, M. Sasao, H. Sugawara, N. Tanaka, M. Kasaki, A. Okamoto, K. Shinto, and S. Kitajima, "Energy straggling of low-energy ion beam in a charge exchange cell for negative ion production", Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 79 No. 2, 2008, pp.02A512-1 - 02A512-3
- (23) Atsushi OKAMOTO, Katsuhiko SHINTO,

- Sumio KITAJIMA and Mamiko SASAO, "Laser Absorption Spectroscopy for Diagnostics of a Neutral Helium Beam", Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 2, 2007, pp.S1044-1—S1044-4
- (24) N. Tanaka, H. Sugawara, S. Takeuchi, S. Asakawa, A. Okamoto, K. Shinto, S. Kitajima, M. Sasao, M. Wada "Proof of Principle Experiment of a Fast He⁰ Beam Production", Plasma Fusion Res. 査読有, Vol. 2 2007, pp.S1105/1-4
- (25) A. Okamoto, T. Kobuchi, S. Kitajima, and M. Sasao "Study of Metastable Population Density in a Hollow Cathode Helium Discharge", Plasma and Fusion Research, 査読有 Vol. 2, 2007, pp.029-037
- (26) M. Sasao, Steering Committee Members of MEXT Scientific Research of Priority Areas. "Advanced Diagnostics for Burning Plasma Experiments". Fusion Science & Technology 51, 査読有, February 2007, Pages 40-45
- (27) H.Yamaoka, N.Tanaka, Y.Matsumoto, M. Nishiura, K.Tsumori, S.Takeuchi, H.Sugawara, K.Shinto,A.Okamoto,M. Sasao,M. Wada: "Particle Refractions of Low Energy Light Ions from a Vanadium Alloy (V-4Cr- 4Ti)", Journal of Nuclear Materials, 査読有, Vol. 337-339, 2006, pp.942-945
- (28) M. Sasao, K. Shinto, M. Isobe, M. Nishiura, O. Kaneko, M. Wada, C. I. Walker, S. Kitajima, A. Okamoto, H. Sugawara, S. Takeuchi, N. Tanaka, H. Aoyama, and M. Kasaki, "Confined alpha particle diagnostic system using an energetic He⁰ beam for ITER", Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol.77, 2006, pp.10F130
- (29) K. Shinto, H. Sugawara, M. Takenaga, S. Takeuchi, N. Tanaka, A. Okamoto, S. Kitajima, M. Sasao, M. Nishiura, and M. Wada, "Optimization of a compact multicusp He⁺ ion source for double-charge-exchanged He⁻ beam", Review of Scientific Instruments, Vol. 77, 2006, pp.03B512-03B512-4, 査読有
- (30) K. Shinto, M. Sasao, M. Isobe, M. Nishiura, O. Kaneko, M. Wada, C. I. Walker, H. Haskell, S. Kitajima, A. Okamoto, H. Sugawara, S. Takeuchi, N. Tanaka, H. Aoyama and M. Kasaki: "Conceptual Design of Confined Alpha Particle Diagnostic System for ITER using an Energetic He⁰ Beam", Electric publication on , 査読有, 2006, <http://dgl.nifs.ac.jp/IAEATM-EP2005/progr am.html,21>
- (31) Y. Matsumoto, M. Nishiura, K. Matsuoka, M.Wada, M.Sasao, H.Yamaoka, "Density and velocity of H⁻ in the extraction region of a negative ion source estimated from the change in H⁻ beam current due to a pulse laser injection", Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 77, 2006, pp. 03B705-03-B705-4
- (32) K. Shinto, H. Sugawara, M. Takenaga, S. Takeuchi, N. Tanaka, A. Okamoto, S. Kitajima, M. Sasao, M. Nishiura and M. Wada, "Optimization of a compact multicusp He⁺ ion source for double-charge-exchanged He⁻ beam". , Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 77, 2006, pp. 03B512-03B512-4
- (33) K. Shinto, H. Sugawara, S. Takeuchi, S. Kitajima, M. Takenaga, M. Sasao, M. Nishiura, O. Kaneko, S. Kiyama and M. Wada"Design of a Fast Neutral He Beam System for Feasibility Study of Charge-Exchange Alpha-Particle Diagnostics in a Thermonuclear Fusion Reactor"Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee, 査読有, 2006, pp.2630-2632
- (34) M. Sasao, K. A. Connor, K. Ida, H. Iguchi, A. A. Ivanov, M. Nishiura, D. M. Thomas, M. Wada, M. Yoshinuma, "Ion sources for fusion plasma diagnostics", IEEE Transaction on Plasma Science, 査読有, Vol. 33, 2005, pp.1872-1900

[学会発表] (計 : 31 件)

- (1) M. Sasao, et al., "Measurement of Charge Exchange Cross Sections for the He⁻ Production in Li", The 22nd International Conference on Atomic Physics, July 25-30, 2010, Cairns, Australia
- (2) M. Sasao, et al., "Development of an Energetic He⁰ Beam for Alpha Particle Diagnostics on ITER", The European Physical Society (EPS) conferences, June 25-29, 2010, Dublin, Ireland
- (3) M. Sasao, "Report from Priority Area: Advanced Diagnostics for Burning Plasmas", "Feasibility Studies on confined and escaping alpha diagnostics at LHD", "Report of the Neutron Working Group", 15th ITPA-TG Meeting on Diagnostic, 2008/11/14~21, Ghandinabad, India
- (4) M. Sasao, T. Kobuchi, N. Tanaka, M. Kasaki, M. Kikuchi, T. Nagamura, A. Okamoto, S. Kitajima, O. Kaneko, M. Nishiura, K. Tsumori, M. Wada, K. Shinto, H. Sakakita, S. Kiyama, Y. Hirano, "Development of an Energetic He⁰ Beam Injector for Fusion Application", 22nd

- IAEA Fusion Energy Conf.2008/10/11~18, Geneva, Switzerland,
- (5) M. Sasao, "University activities in Japan", 12th Meeting of the ITPA Topical Group on Diagnostics, Princeton, USA March 26 - 30, 2007
- (6) M. Sasao, "ITER diagnostic beam for energetic alpha particle measurement", Japan EU Coordinating Committee on Neutral Beams, Naka, December 12-15, 2006
- (7) M. Sasao, "Advanced Diagnostics for Burning Plasmas", Meeting on ITER Relevant Diagnostic Developments in Japan combined with the Meeting on Priority Research Area, Sendai, September 4, 2006
- (8) M. Sasao, "Overview of recent activities of the priority research area "Advanced Diagnostics for Burning Plasmas". Meeting on ITER Relevant Diagnostic Developments in Japan combined with the Meeting on Priority Research Area "Advanced Diagnostics for Burning Plasmas", Sendai, September 4, 2006
- (9) M. Sasao, "R&D Status of Beam Neutralization System", 10th Meeting of the ITPA Topical Group on Diagnostics, Moscow, Russian Federation, April 10-14, 2006

[図書] (計1件)

- ① プラズマ核融合学会編、間瀬敦、笹尾真実子他、コロナ社「プラズマ診断の基礎と応用」2006、共著（担当 § 9.7 核反応計測，pp. 351-361）

[産業財産権]

○ 出願状況 (計1件)

名称：タンデム加速装置および電荷交換器
 発明者：笹尾真実子、和田元、北島純男、岡本敦、寺井健祐
 権利者：東北大学、同志社大学
 種類：特許
 出願番号：特願2010-254663
 出願日：平成22年11月15日
 国内外の別：国内

○ 取得状況 (計0件)

[その他]

研究室ホームページ
<http://tsubaki.qse.tohoku.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笹尾 真実子 (SASAO MAMIKO)
 東北大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：00144171

(2) 研究分担者

金子 修 (KANEKO OSAMU)
 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・教授
 研究者番号：00126848

和田 元 (WADA MOTOI)
 同志社大学・工学部・教授
 研究者番号：30201263

(3) 連携研究者

平野 洋一 (HIRANO YPUICHI)
 産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門・主任研究員
 研究者番号：80357863

北島 純男 (KITAJIMA SUMIO)
 東北大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：30161475