

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360415

研究課題名(和文)トレーサー内蔵ペレットによる不純物輸送計測及びプラズマ制御法開発

研究課題名(英文)Developments of impurity transport diagnostics and plasma control method with a tracer-encapsulated solid pellet

研究代表者

須藤 滋 (Sudo, Shigeru)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：50142302

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円、(間接経費) 4,020,000円

研究成果の概要(和文)：我々が独自に開発したトレーサー内蔵ペレットはトレーサーをプラズマの局所に注入できるというメリットがあり、しかもペレットの侵入の深さを研究目的に応じて調整することができる特長がある。プラズマ中におけるそのトレーサーの振る舞いを観測したところ、プラズマの密度が高い場合にはトレーサーがプラズマ内に長時間留まる一方、プラズマ外の不純物はプラズマの中にほとんど入って来ないことを発見した。プラズマの密度が低い場合にはこのような現象は起こらない。そのメカニズムの解析を行った。また、不純物からの放射光強度データの蓄積も進んだ。

研究成果の概要(英文)：With our original tracer-encapsulated solid pellet, the tracer can be deposited in a plasma, and the penetration depth can be adjusted according to the research purposes. We found the tracer particles stay a long time in the plasma in case of a high density plasma, while the impurity existing outside of the plasma cannot enter into the plasma core. Such a phenomenon does not occur in case of a low density plasma. We analyzed the mechanism of such a process. Data of the radiation intensity from the impurity are also accumulated.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：プラズマ・核融合 不純物輸送 計測ペレット

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者等はプラズマにおける粒子の輸送を高い精度で計測する手法、即ち内層が元々プラズマ中に存在しないトレーサー粒子で、その外側が別種の固体(常温タイプは通常ポリスチレンで炭素と水素で構成される)であるようなトレーサー内蔵固体ペレット(Tracer-encapsulated Solid Pellet: TESPEL)を用いることを独自に考案し、TESPEL 射出装置を作成して、CHS 装置に続き LHD 装置において、TESPEL 入射実験を行い、トレーサーとしてのチタンからの発光ラインの強度変化を観測することにより、チタン粒子の輸送を解析するなど多くの成果を挙げることができた。この結果、米国プリンストンプラズマ物理研究所の球状トラス装置である NSTX においても、核融合分野における日米協力事業として TESPEL の入射実験を実施した。これら一連の研究において、プラズマへの TESPEL 入射により、豊富な物理量を観測できることが明らかとなった。さらに、トレーサーのデポジション位置が特定できることやプラズマ中に注入したトレーサー粒子数が正確にわかることから、単層ペレットやガスパフと比べて粒子源の点で曖昧さを減らせるという大きなメリットがあることもクロ-ズアップされてきた。これに加えて、現有装置で TESPEL の外径を 0.4mm から 0.9mm 程度まで任意に選べるという柔軟性がある。従って、TESPEL による研究の一層の発展を図る礎ができていた。

## 2. 研究の目的

ポリスチレン球の内側にトレーサーを封入したトレーサー内蔵固体ペレット(TESPEL)の概念・製法を独自に考案し、不純物輸送、熱輸送や分光の研究など多岐にわたり成果を挙げてきているが、これをさらに発展させて、トレーサーを複数種類装填する手法のコンセプトにより系統的に荷電数Z依存性などを精度よく計測し、不純物輸送モデルとの比較等により、不純物輸送特性の解明を目指す。また、温度・密度分布の情報と併せてトレーサー粒子当たりの放射光パワーが実験的に求められるので、放射光パワー強度分布を設計することができ、これにより周辺部プラズマの熱フラックス制御等により、ダイバータ保護やトカマクではディスラプション緩和などに応用するための基礎データを取得することを目的とする。

トレーサー内蔵ペレットの手法の特色はプラズマ中でほぼ任意の位置にトレーサーを局所的にデポジットできること、トレーサー粒子の総原子数がTESPEL製作時に前もって決定できること、トレーサー粒子種の選定は任意なので粒子の電荷数Zや質量依存性など多様な研究が可能となることなどがある。これらの特長を活かして、本研究により、同一プラズマでの複数のトレー

サー粒子種の同時観測により電荷数Z依存性などを詳細に調べる。ここで複数のトレーサー粒子種の特性X線であるK線が重ならない粒子種を選択する。真空紫外域の分光計測と合わせて、複数のトレーサー粒子の輸送を精度良く同時に計測する。これを系統的に活用して、電荷数Zの異なる不純物の振舞いを同じプラズマ条件のもとで調べ、その比較等を行うことによって、プラズマ中の不純物輸送特性を調べ、さらに、TESPEL中に装填したトレーサー粒子数が正確にわかり、これがプラズマ中に確実に注入されるので、プラズマの電子温度・密度の情報と併せて、そのトレーサー粒子数あたりの放射光強度を特定することができる。これにより、例えば、プラズマ閉じ込め容器内のダイバータ板に向かう粒子熱フラックスの一部を放射光のエネルギーに変換して、ダイバータ板への熱フラックス強度を軽減するための定量的な検討が可能となる。また、トカマクではディスラプションの軽減が大きな課題の一つとなっているが、このディスラプション対策としても有効な候補となり得る。複数のTESPELの同時あるいはシーケンス入射により、粒子デポジション分布や放射光強度分布を設計することも可能である。このように、TESPELを使ってプラズマ中での不純物輸送を従来に比べて格段に高い精度で計測することだけでなく、周辺プラズマの熱フラックス制御やトカマクのディスラプション制御等に活用できることが期待される。

## 3. 研究の方法

複数のトレーサー粒子を1個のポリスチレン球に封入したトレーサー内蔵固体ペレット(TESPEL)をLHDプラズマに入射して、それぞれのトレーサー粒子を主として真空紫外域とX線領域の分光計測により、同一ショットで、それらの振る舞いを必要な時間分解能をもって観測する。真空紫外域はSOXMOSS装置により各トレーサーからのLi-like線やBe-like線の発光強度変化を50msの時間分解能で計測する。X線領域はX線パルス波高分析器(X線PHA)を用いて各トレーサーのK線を50msの時間分解能で計測する。これに基づいて、1次元の不純物輸送コードであるSTRAHLにより計算したプラズマ中の各場所からの発光強度の視線方向に積分したものと実験で得られた発光強度変化を比較し、実験データがある程度再現できるような不純物の拡散係数と内向き対流速度を求める。また、同じプラズマ条件において、複数トレーサーのデータを比較することにより、精度よくそれら異なるトレーサーの振る舞いの異同を観測することが可能となる。また、電子温度等に応じて、トレーサー粒子当たりの放射光強度を測定し、周辺プラズマの熱フラックスに影響を与えるトレーサー粒子量を求め、ダイバータへの熱負荷軽減やトカマク

でのディスラプション軽減などプラズマ制御への応用のための基礎データを得ることを目指す。

#### 4. 研究成果

TESPEL を用いてトレーサーを用いた不純物輸送等を中心とする物理研究を行った。TESPEL はサイズの自由度があり、プラズマ中のペレットの侵入長を研究目的に応じて調整することができる特長がある。さらに、トレーサー粒子としては固体であれば装填可能なので自由度が非常に大きい。また、プラズマ中にデポジットするトレーサー粒子量が正確に同定できることも大きな利点である。この TESPEL を用いて、コアプラズマにおける不純物輸送研究や TESPEL の特長を活かした多岐に渡る多くの研究を総合的に推進した。まず、それらの基本となる一連の TESPEL 手法の開発をまとめる目的で、TESPEL のコンセプトと入射システムに関する論文 S. Sudo et al. “Tracer-encapsulated solid pellet injection system” Rev. Sci. Instrum. 83, 023503 (2012) を発表した。

不純物輸送研究では、1 個の TESPEL 中に 3 種類の異なったトレーサーを装填するトリプル・トレーサー手法を独自に考案し、トレーサーの粒子数が  $1\text{-}7 \times 10^{17}$  個程度の微量で、3 種類のトレーサー V( $Z=23$ ), Mn( $Z=25$ ), Co( $Z=27$ ) の各  $K\alpha$  線を X 線 PHA で観測し、また同時に、SOXMOS 観測で 1 つのグレーティングでの分散波長範囲において 3 種類のトレーサーからの Li-like のライン光などが同時観測でき、トレーサーとは別にプラズマ周辺部から混入する Fe 等との違いを見出した。即ち、密度が低い場合には、トレーサーが減衰するのに対して、密度が高くなると ( $5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  以上)、トレーサーはプラズマコア部に長時間滞留し、一方 Fe 等はプラズマコア部に入って来ないことを観測した。この成果を S. Sudo et al. “Multiple-tracer TESPEL injection for studying impurity behavior in a magnetically-confined plasma” Nucl. Fusion 52 (2012) 063012 にて発表した。さらに、Fe 等のプラズマ外部からの不純物の生成量のプラズマ密度による違いの効果を避けるため、同量の Ar のガスパフ (SSGP) を行って模擬し、プラズマ密度によって外部不純物の抑制効果が劇的に変化することを初めて明確に示した。そして、不純物輸送に関する実験結果と 1 次元の不純物輸送コードである STRAHL コードによる輸送シミュレーションとの比較に関する研究成果を合わせて、第 22 回国際土岐コンファレンスにおいて口頭発表した。また、この成果は S. Sudo et al. “Impurity transport study with TESPEL injection and simulation” J. Plasma Fusion Res. 8 (2013) 2402059 にて発表した。さらに、プラズマ密度によって不純物の振る舞いが変化する現象を解析し、これを Shigeru Sudo et al. “Transport characteristics of tracer and intrinsic impurities

depending on the density of LHD plasmas” Plasma Phys. Control. Fusion 55 (2013) 095014 にて発表した。トリプル・トレーサー手法を活用して、電荷数  $Z$  の異なる不純物の振る舞いを同じプラズマ条件のもとで調べ、その比較をすることによって、プラズマ中の不純物輸送特性をより精密に解明するベースを築くことができた。

上述した 1 個の TESPEL 中に 3 種類の異なったトレーサーを装填するトリプル・トレーサー手法を活用して、この TESPEL を用いた不純物輸送等を中心とする一連の物理研究を進めた。最終年度においてはトレーサー粒子の注入位置を今までよりも浅くする目的で外径を従来の約  $700 \mu\text{m}$  から約  $600 \mu\text{m}$  に小さくし、なおかつ厚さが  $75 \mu\text{m}$  のポリスチレンシェル構造にして、トレーサーを封入した実験を行った。アブレーション光の観測の結果、確かに従来のトレーサー注入位置である  $\rho \sim 0.7$  から  $\rho \sim 0.85$  へとより浅いトレーサーの注入が実現した。その時に各トレーサー粒子からの  $K\alpha$  線を X 線 PHA 計測器で、Li-like 線や Be-like 線を SOXMOS 計測器で観測した。そのデータに基づいてトレーサー粒子の振る舞いを解析した結果、 $\rho \sim 0.85$  のトレーサー注入位置でも密度が高い時 (衝突周波数が Pfirsch Schlüter (PS) 領域) ではトレーサー粒子が  $\rho \sim 0.7$  の時と同様に長時間維持されることがわかった。一方、プラズマ外に不純物源があるケースをシミュレートするために、Ar のガスパフ (SSGP) を用いて実験を行ったところ、PS 領域では Ar の  $K\alpha$  線が観測されないことから、プラズマ周辺部で外部不純物の遮蔽効果が存在することが示されている。Ar よりも  $Z$  の高い V などのトレーサー粒子は同時にプラズマ中に直接的にデポジットしており、その場合には V などのトレーサーからの  $K\alpha$  線が観測されており、密度が高いプラズマにおいて電子温度が若干低下するが、それが原因では無いことは明らかである。ここで、プラズマ外からの不純物がプラズマ周辺部のどの程度の位置まで侵入してきているのかを調べた。Ar の  $K\alpha$  線は主として He-like イオンに起因するが、それより低電離の Li-like イオンや Be-like イオンからの発光線を観測することでどこまで Ar 粒子が侵入しているかを推定できる。それらの発光線の観測結果と 1 次元の不純物輸送コードである STRAHL コードによる計算との比較を行うために、STRAHL コードによる各プラズマ位置における発光線の emissivity の視線方向積分値を求め、これを観測結果と比較した。その結果、プラトー領域では Ar がプラズマのコア部に侵入するのに対して、PS 領域では  $\rho \sim 0.9$  までしか侵入していないことが分かった。即ち、プラズマパラメーターが PS 領域にある場合においては、不純物源の位置によって不純物の振る舞いが大きく異なるわけであり、その不純物源の位置を分ける境界層はほぼ  $\rho \sim 0.9$  の近傍となることを示す

ことができた。この結果は Shigeru SUDO et al. “Plasma Diagnostics with Tracer-Encapsulated Solid Pellet” Plasma Fusion Res. **9** (2014)1402039 にて発表した。

さらに、プラズマ周辺部での不純物の振る舞いを調べるため、通常のポリスチレン(C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>)<sub>n</sub> シェルに替えて、ポリ 2-6 ジクロロスチレン(C<sub>8</sub>H<sub>6</sub>Cl<sub>2</sub>)<sub>n</sub> を用いてシェル内の塩素 Cl もトレーサーとして用いる実験を行った。その結果、シェルコア内に封入した V トレーサーに比べて Cl トレーサーからの Li-like 線が非常に早く減衰してしまうことが観測された。これも明らかに、周辺部での不純物の遮蔽効果を示している。この結果やこれらから着想を得て今後の TESPEL 構造についての考察を Shigeru SUDO et al. “Plasma Diagnostics with Tracer-Encapsulated Solid Pellet” の論文にまとめ Plasma Fusion Res. にて掲載が既に決定している。

一連の不純物輸送研究のみならず、TESPEL からの発光について2次元マルチスペクトル画像観測を行い、TESPEL 溶発雲中の電子温度・密度の2次元分布計測を実施した。また、分光スペクトル共同研究として、W やその他の高Z 元素を中心とした種々のトレーサーを内蔵したTESPEL 入射を行い、多くの分光研究者に有用な分光スペクトルデータ取得に貢献した。さらに、TESPEL 中のトレーサー粒子をW やSn など比較的重い元素からV やMn など中間の元素まで各種の元素について放射光強度の増加を観測して、既知の粒子デポジション量との関係についてのデータベースを得た。今後のプラズマにおいて放射光強度分布を制御するための基本情報となったと考えられる。

#### 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9件)

1. Shigeru SUDO, Naoki TAMURA, Sadatsugu MUTO, Tetsuo OZAKI, Chihiro SUZUKI, Hisamichi FUNABA, Izumi MURAKAMI, Daiji KATO, Shigeru INAGAKI, Katsumi IDA “Plasma Diagnostics with Tracer-Encapsulated Solid Pellet” J. Plasma Fusion Res. **9** (2014) 1402039, 1-11.  
DOI:10.1585/pfr.9.1402039.
2. S. Sudo, N. Tamura, H. Funaba, S. Muto, C. Suzuki and I. Murakami, “Impurity transport study with TESPEL injection and simulation,” J. Plasma Fusion Res. **8** (2013) 2402059, 1-8. DOI:10.1585/pfr.8.2402059.

3. S. Sudo, N. Tamura, S. Muto, H. Funaba, C. Suzuki, A. Murakami, I. Murakami, Y. Yoshimura and the LHD Experiment Group, “Transport characteristics of tracer and intrinsic impurities depending on the density of LHD plasmas” Plasma Phys. Control. Fusion **55** (2013) 095014, 1-16.  
DOI:10.1088/0741-3335/55/9/095014.
4. S. Muto and LHD Experimental Group, “Design for X-Ray Imaging Spectroscopy in Large Helical Device, Plasma and Fusion Research” **8** (2013) 2402140 pp.1-4.  
DOI:10.1585/pfr.8.2402140.
5. C. Suzuki, F. Koike, I. Murakami, N. Tamura, S. Sudo, C. O’Gorman, B. Li, C. S. Harte, T. Donnelly and G O’Sullivan, “Extreme ultraviolet spectra from highly charged gadolinium and neodymium ions in the Large Helical Device and laser produced plasmas”, Phys. Scr. T156 (2013) 014078 pp.1-3.  
DOI:10.1088/0031-8949/2013/T156/014078.
6. Shigeru Sudo, Naoki Tamura, Chihiro Suzuki, Sadatsugu Muto, Hisamichi Funaba and LHD Experiment Group, “Multiple-tracer TESPEL injection for studying impurity behavior in a magnetically-confined plasma,” Nucl. Fusion **52** (2012) 063012 pp.1-15.  
DOI:10.1088/0029-5515/52/6/063012
7. Shigeru Sudo and Naoki Tamura, “Tracer-encapsulated solid pellet injection system” Rev. Sci. Instrum. **83**, 023503 (2012); DOI:10.1063/1.3681447 (6 pages).
8. C. Suzuki, F. Koike, I. Murakami, N. Tamura, S. Sudo, “Observation of EUV spectra from gadolinium and neodymium ions in the Large Helical Device”, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **45** (2012) 135002, 1-6.  
DOI:10.1088/0953-4075/45/13/135002.
9. C. Suzuki, C. S. Harte, D. Kilbane, T. Kato, H. A. Sakaue, I. Murakami, D. Kato, K. Sato, N.

Tamura, S. Sudo, M. Goto, R. D'Arcy, E. Sokell and G. O'Sullivan, "Interpretation of spectral emission in the 20 nm region from tungsten ions observed in fusion device plasmas", J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 44 (2011) 175004, 1-7.  
DOI:10.1088/0953-4075/44/17/175004.

[学会発表](計12件)

1. 須藤滋、共著者：田村直樹、武藤貞嗣、鈴木千尋、舟場久芳「3種類の TESPEL 構造を用いた不純物輸送研究」日本物理学会第 69 回年次大会（東海大学）平成 26 年 3 月 27 日。
2. 須藤滋、共著者：田村直樹、武藤貞嗣、尾崎哲、鈴木千尋、舟場久芳、村上泉、加藤太治、稲垣滋、居田克巳、LHD 実験グループ「トレーサー内蔵ペレットを用いたプラズマ計測」プラズマ・核融合学会第 30 回年会（東京工業大学）(05aB01) 平成 25 年 12 月 5 日。
3. C. Suzuki, F. Koike, I. Murakami, N. Tamura, S. Sudo, T. Higashiguchi and G. O'Sullivan "Observations of EUV Spectra from Highly Charged Heavy Ions in Optically Thin Plasmas for Benchmarking of Models" (oral) 2013 International Workshop on EUV and Soft X-Ray Sources (Dublin, Ireland) S16 (November 5, 2013).
4. S. Muto, T. Miyoshi, N. Tamura, H. Nakanishi, Y. Itoh, K. Tsukada, T. Tsuru, Y. Ono, S. Sudo, Y. Arai, and LHD Experimental Group, "Development of Assembly of SOI Detector for Impurity Transport Study in LHD", Nuclear Science Symposium (Seoul, Korea) NPO1-88 (Oct.27<sup>th</sup> – Nov.2<sup>nd</sup>, 2013).
5. C. Suzuki, F. Koike, I. Murakami, N. Tamura, S. Sudo, H. A. Sakaue, N. Nakamura, S. Morita, M. Goto, D. Kato, T. Nakano, T. Higashiguchi, C. S. Harte and G. O'Sullivan "EUV spectroscopy of highly charged high Z ions in the Large Helical Device plasmas" (invited) 11th International Colloquium on Atomic Spectra and Oscillator Strengths for Astrophysical and Laboratory Plasmas (Mons, Belgium) IT-08 (August 8, 2013).
6. Sudo Shigeru "TESPEL diagnostics for magnetically confined plasmas" The 12th Asia Pacific Physics Conference (Makuhari, Japan) D1-PWe-22 (July 12, 2013).
7. S. Sudo, N. Tamura, S. Muto, H. Funaba, C. Suzuki, A. Murakami, I. Murakami and LHD Experiment Group "Impurity transport characteristics of the high density LHD plasmas" 40<sup>th</sup> EPS Conference on Plasma Physics P4.144 (July 4, 2013).
8. S. Muto and LHD Experimental Group, "Application of photo-absorption for x-ray spectroscopy in LHD" International Toki Conference, P4-49 (22<sup>nd</sup> Nov. 2012).
9. C. Suzuki, F. Koike, I. Murakami, N. Tamura, S. Sudo, C. S. Harte and G. O'Sullivan "Interpretation of EUV spectra from tungsten ions observed in the Large Helical Device" 22nd International Toki Conference on Cross-Validation of Experiment and Modeling for Fusion and Astrophysical Plasmas (Toki, Japan) P1-53 (November 19, 2012).
10. C. Suzuki, F. Koike, I. Murakami, N. Tamura, S. Sudo, C. O'Gorman, B. Li, C. S. Harte, T. Donnelly and G. O'Sullivan "EUV spectra from highly charged gadolinium and neodymium ions in LHD and laser produced plasmas" The 16th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (Heidelberg, Germany) B-d13 (September 6, 2012).
11. C. Suzuki, F. Koike, I. Murakami, T. Kato, M. Goto, T. Nakano, N. Tamura, S. Sudo, C. S.

- Harte and G. O'Sullivan "Observations of EUV spectra from tungsten and lanthanide ions in LHD" The 4th China-Japan Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma (Lanzhou, China) (August 2, 2012).
12. C. Suzuki, C. S. Harte, D. Kilbane, T. Kato, H. A. Sakaue, I. Murakami, D. Kato, K. Sato, N. Tamura, S. Sudo, M. Goto, R. D'Arcy, E. Sokell and G. O'Sullivan "Interpretation of spectral emission in the 20 nm region from tungsten ions observed in fusion device plasmas" The 17th International Conference on Atomic Processes in Plasmas (Belfast, UK) T-16 (July 20, 2011).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等 無し

## 6. 研究組織

(1)研究代表者  
須藤 滋 (SUDO SHIGERU)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：50142302

(2)研究分担者  
田村直樹 (TAMURA NAOKI)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教  
研究者番号：80390631

尾崎 哲 (OZAKI TETSUO)

核融合科学研究所 ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号：50183033

武藤貞嗣 (MUTO SADATSUGU)  
核融合科学研究所 ヘリカル研究部・助教  
研究者番号：40260054

鈴木千尋 (SUZUKI CHIHIRO)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教  
研究者番号：30321615

(3)連携研究者  
( )

研究者番号：