

機関番号：63902

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2007～2010

課題番号：19340179

研究課題名 (和文) トレーサー内蔵ペレットによる粒子輸送・高速粒子・元素スペクトル
同時計測研究課題名 (英文) Simultaneous measurements of impurity transport, fast particle and
line spectra by means of tracer-encapsulated 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

研究成果の概要 (和文)：プラズマ中の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やトレーサー粒子数が既知であることなどのトレーサー内蔵計測ペレットの特色を活かして、不純物輸送や高速粒子などを同時に計測することにより、プラズマの振る舞いや関連する物理の研究を進めた。特に原子番号の異なる粒子種依存性を同一プラズマにおいて、それぞれのトレーサーからの真空紫外光及び特性X線を一度に計測する原理検証実験にも成功した。

研究成果の概要 (英文)：Impurity transport and high energy particle behaviors are studied with a tracer-encapsulated solid pellet which has unique features of ability to deposit tracer particles in arbitrary local position inside a plasma and to offer the information about the definite number of the deposited particles. It was especially successful as a proof-of-principle experiment to observe tracers having different charge number simultaneously in a plasma.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2008 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2010 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：プラズマ物理学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：計測用トレーサー、計測ペレット、不純物輸送、高速粒子、元素スペクトル

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合研究では、燃焼プラズマの実現とその制御へ向けて、熱、粒子、そして高速粒子の輸送を理解することの重要性がますます高まってきている。これらが効率的な磁場核融合炉の設計に決定的な役割を果たす重要な要因となるからである。しかし、これらは未だもって十分に解明されたとは言えず、解明を目指した実験及び理論研究は世界的にも最も重要な課題の一つとなっている。

2. 研究の目的

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 LHD において、トレーサー内蔵ペレット入射を利用した不純物輸送、熱輸送、高速粒子及び元素スペクトルなどの同時計測によって、プラズマの振る舞いや関連する物理量を従来と比べて格段に高い精度で計測する手法を確立することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究において重要な要素であるトレーサー内蔵ペレット手法は、次のような特長を有している。i) プラズマ中のほぼ任意の位置に不純物トレーサーを局所的に注入することができる。ii) 不純物トレーサー中の総原子数をトレーサー内蔵ペレット製作時に決めることができる。iii) 不純物トレーサーとなる粒子種の選定はほぼ任意である。その常温型の外殻は、ポリスチレンであり、トレーサー内蔵固体ペレット TESPEL と呼んでいる。

高温プラズマ中に入射された TESPEL は、まずその外殻が溶発する。溶発した粒子により、ペレットの周囲に低温・高密度の中性粒子からなる溶発雲が形成される。この時、プラズマ中の高エネルギーイオンが溶発雲の中性粒子と荷電交換し、高速中性粒子としてプラズマ外に出てくる。この高速粒子を中性粒子分析器 NPA により測定することで、プラズマ中の高エネルギー粒子のエネルギースペクトルの空間分布を得ることができる。この計測手法を、ペレット荷電交換 PCX 計測という。ここで、TESPEL 外殻中を起源とする溶発雲中の水素イオン線スペクトルを測定することで、そのシュタルク拡がりから溶発雲中の電子密度が得られる。これを用いて、高エネルギー粒子の絶対量についての情報を得ることができる。

TESPEL の外殻が溶発し終わると、次に不純物トレーサーが溶発する。さらに電離した不純物トレーサーイオンからの線スペクトルを分光システムで測定することで、不純物トレーサーの振舞いを観測できる。

このように、トレーサー内蔵ペレットを用いることで、様々な物理量を同時に観測することができる。本研究では、トレーサー内蔵ペレット入射を用いた同時計測により不純物や高速粒子などについて高い精度で測定することを目指す

4. 研究成果

(1) 同時計測を構成する個々の計測器の基本性能の確認を行い、それに基づく関連装置や計測器の整備を計画開始から速やかに行った。高エネルギー粒子の振る舞いを調べるための PCX 計測については、ペレットがヘリウムネオンレーザーを横切る際の信号低下をトリガーとするシステムの改良を行って、TESPEL 入射毎に確実にデータ取得ができることを確認した。また、ペレットのプラズマ中での侵入深さの選択範囲拡大等のために、従来(約 0.9 mm 以下)よりも大きなサイズ(約 1.5 mm 以下)の TESPEL を装填可能な TESPEL 保持ディスクを製作し、実験に使用できるようにした。不純物トレーサーの振る舞いを調べるための負イオン中性粒子ビームを用いた荷電交換分光システムについては、同シ

テム内の多層膜反射鏡型軟 X 線分光器にクライオポンプを用いた差動排気システムを取り付け、同分光器を恒常的に運用できるようにした。

(2) 各種計測器を用いて、様々な物理量の同時計測を実施した。鉄、スズ及びタングステンそれぞれをトレーサーとした TESPEL を LHD プラズマ中に入射し、TESPEL 溶発雲中の電子密度分布の測定、PCX 計測及び各トレーサーの多価イオンからの線スペクトルの時間発展の測定を行った。さらに、LHD プラズマの電子密度及び電子温度を変化させ、様々なパラメータ下で実験データを取得した。

(3) 当初計画にはなかったが、研究を進める過程で、不純物輸送計測の幅を広げるアイデアを出し、実験を実施した。具体的には、不純物輸送の粒子種による違いを明確にすることを目的として、2種(これまでに、チタンとスズ、スズと鉄の2通り)混合トレーサーの入射実験を実施し、それぞれのトレーサーからの発光線の時間変化を測定することに成功した。これはプラズマのショット毎のばらつきによる変化の可能性を排除でき、同じプラズマ条件で異なった電荷 Z の不純物の振舞いの比較ができる画期的なものである。TESPEL による複数トレーサーのプラズマ内への局所的デポジションは初めてのものである。これにより、不純物輸送の原子番号依存性を効率的に調べる手法として、複数種トレーサーを用いる方法が有効であることを示すことができたという成果を挙げた。

(4) 溶発雲中の電子密度の2次元分布を得ることにより、PCX計測による高エネルギー粒子の絶対量評価の精度を高める等のために、溶発雲中の水素イオンの線スペクトル H_{α} 線の拡がり測定を2次元的に行える分光システムの高性能化を進め、電子温度・密度の2次元分布の導出に成功した。

(5) LHD プラズマにおいて比較的径の小さい(直径 0.4mm 程度) TESPEL を入射して周辺部を冷却すると、中心電子温度が 1ms 以内という短時間に急速に上昇する現象が観測されており、これは拡散では説明がつかず、非局所輸送現象として電子温度勾配との関連など解析が進展した。この現象は衝突周波数が高くなると起こらなくなり、衝突周波数が低い領域で顕著に起こるなどプラズマ条件などの系統だった整理なども進展した。また、ある条件において、イオン温度に関しても明確に非局所輸送として捉えられる中心イオン温度の上昇を観測しており、電子・イオンの熱輸送解明の重要な手掛かりを得ることに成功した。

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 20 件)

1. Tamura, N., Ida, K., Inagaki, S., Tanaka, K., Tokuzawa, T., Itoh, K., Shimozuma, T., Kubo, S., Tsuchiya, H., Nagayama, Y., Kawahata, K., Sudo, S., Yamada, H. "Characteristics of nonlocally-coupled transition of the heat transport in LHD" Contributions to Plasma Physics, Volume 50, Issue 6-7, August 2010, Pages 514-519.
2. Goncharov, P.R., Kuteev, B.V., Ozaki, T., Sudo, S. "Analytical and semianalytical solutions to the kinetic equation with Coulomb collision term and a monoenergetic source function" Physics of Plasmas, Volume 17, Issue 11, November 2010, Article number 112313.
3. Tamura, N., Inagaki, S., Tokuzawa, T., Michael, C., Tanaka, K., Ida, K., Shimozuma, T., Kubo, S., Itoh, K., Nagayama, Y., Kawahata, K., Sudo, S., Komori, A. "Experimental study on nonlocality of heat transport in LHD" Fusion Science and Technology, Volume 58, Issue 1, July 2010, Pages 122-130.
4. C. Suzuki, T. Kato, H. A. Sakaue, D. Kato, K. Sato, N. Tamura, S. Sudo, N. Yamamoto, H. Tanuma, H. Ohashi, R. D'Arcy, G. O'Sullivan: "Analysis of EUV spectra of Sn XIX, XXII observed in low-density plasmas in the Large Helical Device", Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, Vol. 43 (2010) p. 074027-1-6.
5. Tokuzawa, T., Kawahata, K., Nagayama, Y., Inagaki, S., De Vries, P.C., Mase, A., Kogi, Y., Yokota, Y., Hojo, H., Tanaka, K., Ejiri, A., Pavlichenko, R.O., Yamaguchi, S., Yoshinaga, T., Kuwahara, D., Shi, Z., Tsuchiya, H., Ito, Y., Hirokura, S., Sudo, S., Komori, A. "Developments of electron cyclotron emission spectroscopy and microwave reflectometry on LHD" Fusion Science and Technology, Volume 58, Issue 1, July 2010, Pages 364-374.
6. Kawahata, K., Peterson, B.J., Akiyama, T., Ashikawa, N., Emoto, M., Funaba, H., Hamada, Y., Ida, K., Inagaki, S., Ido, T., Isobe, M., Goto, M., Mase, A., Masuzaki, S., Michael, C., Morisaki, T., Morita, S., Muto, S., Nagayama, Y., Nakamura, Y., Nakanishi, H., Sakamoto, R., Narihara, K., Nishiura, M., Ohdachi, S., Okajima, S., Osakabe, M., Sakakibara, S., Sanin, A., Sasao, M., Sato, K., Shimizu, A., Shoji, M., Sudo, S., Tamura, N., Tanaka, K., Toi, K., Tokuzawa, T., Veshchev, E.V., Vyacheslavov, L.N., Yamada, I., Yoshinuma, M. "Overview of LHD plasma diagnostics" Fusion Science and Technology, Volume 58, Issue 1, July 2010, Pages 331-344.
7. Inagaki, S., Tamura, N., Ida, K., Tanaka, K., Nagayama, Y., Kawahata, K., Sudo, S., Itoh, K., Itoh, S.-I., Komori, A. "Characterization of bifurcation induced by long distance correlation between heat flux and temperature gradient in toroidal plasmas" Plasma Physics and Controlled Fusion, Volume 52, Issue 7, 2010, Article number 075002.
8. Inagaki, S., Tamura, N., Ida, K., Kubo, S., Shimozuma, T., Nagayama, Y., Kawahata, K., Sudo, S., Fujisawa, A., Itoh, K., Itoh, S.-I. "Internal transport barrier formation induced by edge perturbation on LHD Nuclear Fusion" Volume 50, Issue 6, 2010, Article number 064012.
9. T. Ozaki, P. R. Goncharov, E. A. Veshchev N. Tamura, et al. "Radial Profiles of High-Energy Particles in NBI and ICH Plasmas Measured by Pellet Charge Exchange Technique on Large Helical Device", JPR, 8, 1089-1094 (2009).
10. C. Suzuki, T. Kato, K. Sato, N. Tamura, D. Kato, S. Sudo, N. Yamamoto, H. Tanuma, H. Ohashi, S. Suda, G. O'Sullivan and A. Sasaki: "EUV spectra from highly charged tin ions observed in low density plasmas in LHD", Journal of Physics: Conference Series, Vol. 163 (2009) p. 012019-1-4.
11. N. Tamura, Y. Liu, N. Iwama, S. Sudo, K.V. Khlopenkov, A.Yu. Kostrioukov, B.J. Peterson, S. Inagaki, Y. Nagayama, K. Kawahata, T. Morisaki, K. Ida, N. Ohyabu, A. Komori and LHD Experimental Group, "Confinement property of

- tracer impurity particle inside a static magnetic island 0-point of Large Helical Device”, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES Vol.8, (2009) pp. 975~980.
12. N. Tamura, V. Yu. Sergeev, D. V. Kalinina, I. V. Miroshnikov, K. Sato, I. A. Sharov, O. A. Bakhareva, D. M. Ivanova, V. M. Timokhin, S. Sudo and B. V. Kuteev, “Spectroscopic Diagnostics For Ablation Cloud Of Tracer-Encapsulated Solid Pellet In LHD,” Review of Scientific Instruments, Vol.79 (2008) pp.10F541-1~10F541-4.
 13. N. Tamura, S. Inagaki, K. Ida, K. Tanaka, C. Michael, T. Tokuzawa, I. Yamada, K. Narihara, T. Shimozuma, S. Kubo, H. Igami, T. Fukuda, K. Itoh, Y. Nagayama, K. Kawahata, S. Sudo, A. Komori and LHD team, “Core electron temperature rise due to Ar gas-puff in EC-heated LHD plasmas”, Journal of Physics: Conference Series, Vol.123 (2008) pp. 012023-1~012023-7.
 14. S. Sudo, M. M. Škorić, T-H. Watanabe, Y. Todo, A. Ishizawa, H. Miura, R. Ishizaki, A. Ito, H. Ohtani, S. Usami, H. Nakamura, A. Ito, S. Ishiguro, Y. Tomita, A. Takayama, M. Sato, T. Yamamoto, M. Den, H. Sakagami, R. Horiuchi, S. Okamura, and N. Nakajima, “Simulation science for fusion plasmas,” Journal of Physics: Conference Series 133 (2008) 012025, pp. 1-12.
 15. T. Ozaki, P. Goncharov, E. Veshchev, N. Tamura, S. Sudo, et al., “Pellet Charge Exchange Helium measurement Using Neutral Particle Analyzer in Large Helical Device” RSI, 79, 10E518 1-4 (2008).
 16. T. Ozaki, P. R. Goncharov, E. A. Veshchev, S. Sudo, et al., “Helium ion observation during 3rd harmonic ion cyclotron heating in Large Helical Device”, PFR 3 Spec., S1084 (2008) pp1-4.
 17. S. Sudo, N. Tamura, D. Kalinina, I. Vinyar, K. Sato, E. Veshchev, P.R. Goncharov, T. Ozaki, S. Inagaki, H. Funaba, S. Mutoh, Y. Igitkhanov, L. Yi, B. Peterson, D. Stutman, M. Finkenthal, and LHD Experimental Group, “Multi-Functional Diagnostic Method with Tracer-Encapsulated Pellet Injection”, Plasma Fusion Research 2 (2007) S1013, pp.1-4.
 18. N. Tamura, S. Inagaki, K. Tanaka, C. Michael, T. Tokuzawa, T. Shimozuma, S. Kubo, R. Sakamoto, K. Ida, K. Itoh, D. Kalinina, S. Sudo, Y. Nagayama, K. Kawahata, A. Komori and LHD experimental group, “Impact of nonlocal electron heat transport on the high temperature plasmas of LHD”, Nuclear Fusion, Vol.47 No.5 (2007) pp. 449-455.
 19. T. Ozaki, P. Goncharov, E. Veshchev, S. Sudo, T. Seki and N. Tamura, “High-energy neutral particle measurements simulating α particle diagnostics in Large Helical Device”, Fusion Engineering and Design, vol. 82 (2007), pp. 1251-1257.
 20. T. Ozaki, P. Goncharov, E. Veshchev, S. Sudo, N. Tamura, “Helium measurements using the pellet charge exchange in Large Helical Device”, JPFR Series, vol. 9 (2007) S1072-1.
- [学会発表] (計 39 件)
1. 田村直樹、「非局所輸送現象における電子熱輸送の空間構造II」、日本物理学会第65回年次大会 2011年3月25日 新潟(日本)
 2. 尾崎哲、「LHDにおける計測角度分解型中性粒子分析器を用いたロスコーンの研究」、プラズマ・核融合学会年会 2010年12月2日 札幌(日本)
 3. 鈴木千尋、「LHDにおける高Z元素からのEUVスペクトルの計測と解析」、プラズマ・核融合学会年会 2010年12月1日 札幌(日本)
 4. 田村直樹、「非局所輸送現象における電子熱輸送の空間構造」、日本物理学会2010年秋季大会 2010年9月24日 大阪(日本)
 5. C. Suzuki, “Measurement of EUV spectra of high Z elements from Large Helical Device” (Invited), 7th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Application, 2010年9月21日 ヴィルニウス(リトアニア)
 6. N. Tamura, “Nonlocal Interaction of Electron Heat Transport States in LHD” (Invited), 15th EU-US Transport Task Force Meeting and 3rd EFDA Transport Task Force meeting, 2010年9月10日 コルドバ(スペイン)
 7. N. Tamura, “Nonlocal Interaction of

Electron Heat Transport States in LHD”
(Invited), U.S. Transport Task Force
Workshop, 2010年4月14日 アナポリス
(アメリカ)

8. S. Sudo, Impurity transport study in the magnetic confinement device based on diagnostic method of tracer-encapsulated pellet injection, 2009 International Workshop on Frontiers in Space and Fusion Energy Sciences, 2009年12月1日、台南市(台湾)。
9. T. Ozaki, Comparison of neutral particle flux decay times on the NBI plasmas in Large Helical Device, 2008年12月9日、土岐市(日本)。

[その他]

ホームページ等

<http://http.lhd.nifs.ac.jp/>

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 (NAOKI TAMURA)

核融合科学研究所 ヘリカル研究部・助教
研究者番号：80390631

佐藤 国憲 (KUNINORI SATO)

核融合科学研究所 ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：70126861 (平成19～21年)

尾崎 哲 (TETSUO OZAKI)

核融合科学研究所 ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：50183033

乗松 孝好 (TAKAYOSHI NORIMATSU)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授

研究者番号：50135753 (平成19～21年)

鈴木 千尋 (CHIHIRO SUZUKI)

核融合科学研究所 ヘリカル研究部・助教
研究者番号：30321615

武藤 貞嗣 (SADATSUGU MUTO)

核融合科学研究所 ヘリカル研究部・助教
研究者番号：40260054

(3) 連携研究者

舟場 久芳 (HISAMICHI FUNABA)

核融合科学研究所 ヘリカル研究部・助教
研究者番号：40300727

加藤 太治 (DAIJI KATO)

核融合科学研究所 ヘリカル研究部・助教
研究者番号：60370136