

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340175

研究課題名(和文)電子ビーム多価イオントラップで創り出す模擬プラズマの分光学的研究

研究課題名(英文)Spectroscopy of highly charged ions with an electron beam ion trap

研究代表者

坂上 裕之(Sakaue, Hiroyuki)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：40250112

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円、(間接経費) 4,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、可視分光装置及びEUV分光装置を用い、多価イオンの発光スペクトルの観測を行った。LHDプラズマにタングステン不純物ペレットを入射し、得られたEUVスペクトルを、本装置で電子ビームエネルギーを走査することで再現することに成功した。このように我々の研究で、多価イオン源を用い核融合プラズマで得られるであろうスペクトルを、電子エネルギーを広範囲で走査することによって模擬することが可能であることが実証された。

研究成果の概要(英文)：In this study, using the EUV and visible spectrometer installed in Electron Beam Ion Traps (EIBT), we observed the emission spectra of highly charged ions. We succeeded in reproducing the EUV spectrum of tungsten impurity pellets LHD plasma by scanning the electron beam energy in the present device. Based on these results, we will proceed with the collection of basic data useful for nuclear fusion.

研究分野：数物系科学

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：EBIT 多価イオン タングステン 分光計測

## 1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマのような高温・高密度のプラズマにおいて、電離／再結合プラズマは、関与する原子過程が多岐にわたりその振る舞いは複雑化する。しかも急峻な温度・密度の上昇・下降時の非平衡プラズマは、粒子輸送も含めその理解は困難を極め、学術的に未知の分野である。このような複雑な非平衡プラズマの粒子・エネルギー輸送の解明は、多くの研究者が挑戦している一大研究テーマであり、「非平衡プラズマ原子モデル」の構築は、その研究に必要な不可欠なものである。非平衡プラズマの実験的研究は、温度・密度が制御されたプラズマを用い分光学的アプローチにより、多くの研究が行われている。しかしこのような分光計測において、プラズマの密度効果、イオン価数分布、電子の温度・密度構造の複雑化、そして観測視線方向の積分データ、つまり異なる電子温度領域に渡っての積分データしか直接的には得ることができないという制限があり、得られるデータの精度は大きく制限されてしまうのが現状である。またこのような複雑なプラズマの光放出やイオン構造を正確にモデル化して理解するには、電子-イオン衝突における何万もの励起、イオン化、再結合過程のレート係数を精度良く知ることが必要不可欠である。理論計算は、この必要なレート係数が導きだされる大部分の断面積を計算することになるが、そこでは多くの近似が用いられる。また計算に必要な実験データのエネルギー範囲は非常に広く、電子-イオン衝突実験で、そのすべてを測定することは、時間的制約や実験装置の制約により非常に困難であるのが現状である。

これらの困難を克服する方法として、電子ビームイオントラップ (EBIT) を用いて、その単色エネルギー電子ビームを高速にエネルギー掃引することで、模擬的にプラズマの電子分布をデザインし、その電子と相互作用するトラップされた多価イオンを観測する実験方法を試みる。この制御された模擬プラズマの分光計測により、非平衡プラズマ現象を誘起する原子過程の遷移波長・遷移確率・原子過程断面積・共鳴強度などの基礎物理量を測定し理解を深め、それを基に非平衡プラズマの新しいプラズマモデルを構築するためのベンチマークを提供する。そしてそのプラズマモデルを核融合プラズマ (LHD)

に適用し、その精度を確認し、実際の非平衡プラズマのダイナミクスや粒子・エネルギー輸送の研究に応用する。

このような非平衡プラズマの研究は、天文学の分野における「太陽大気コロナの加熱機構の解明」という一大研究テーマに直結しており、核融合分野（地上の太陽）と天文分野（太陽プラズマ）を結ぶ、分野間横断の連携研究の推進に貢献することが可能である。

## 2. 研究の目的

我々は、電子ビームイオントラップ実験装置を用いて、電子エネルギー分布を模擬したプラズマを創り出し、その模擬プラズマ中の多価イオンからの発光スペクトルを実際の核融合プラズマ装置 (LHD) からのスペクトルと比較することにより、プラズマの温度・密度ばかりでなく核融合プラズマのダイナミクスや粒子・エネルギー輸送などの情報を得ることを目的とする。また温度・密度の時間的変化や Maxwellian 分布からのズレなど、任意の非平衡プラズマの模擬も試み、非平衡プラズマの新しい研究アプローチの開拓を目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究において、最も重要な課題は、EBIT の電子ビームのエネルギーを高速に掃引しプラズマを模擬する実験手法を確立することである。電子ビームのエネルギーを断続的に変化させ原子データを取得し、そのエネルギーや密度依存の整合性を既知のデータと比較することで確認する。確認後、電子ビームエネルギーの高速掃引で Maxwell-Boltzmann (MB) 電子エネルギー分布を模擬し、多価イオン発光ラインの電子密度・温度依存性を LHD プラズマと比較しその妥当性を確認する。その後、任意の電子エネルギー分布での実験へと発展させていく。

## 4. 研究成果

ブランケット第一壁やダイバータ材料として注目されているタングステンが、スパッタリング等により不純物としてプラズマ中に混入した場合、タングステン多価イオンとなり放射損失によりプラズマを冷却しプラズマ性能を低下させることが問題となっている。スパッタリング等により不純物としてプラズマ中に混入したタングstenは高温

プラズマ中で電子衝撃により高電離（多価）イオンとなる。このタングステン多価イオンの放射過程は、核融合プラズマ制御及び診断において非常に重要な過程であるが、相対論的多電子系の放射スペクトルは非常に複雑であり、ほとんどの遷移が未同定・未分解のままである。

我々は、このような困難を克服するために、独自に開発した多価イオン源：小型電子ビームイオントラップ装置 (CoBIT) を用い、広範囲な電離状態のタングステン多価イオンを生成し、その放射過程の研究から原子データの取得を試みた。CoBIT は、電子エネルギーを変化させることで生成される多価イオンの価数を制御でき、タングステンの場合、100eV 程度から 2keV 程度まで変化させることで 5+~35+ 価の多価イオンの発光スペクトルを観測することが可能である。ダイバータ及び周辺プラズマ領域で発光するタングステンは 20~30 価程度のイオンで極端紫外 (EUV) 領域での発光が強い。まず我々は CoBIT の電子エネルギーを 540~1370eV まで変化させ EUV 領域のスペクトルの測定を進めた。図 1 上段にタングステン多価イオンからの EUV スペクトルのエネルギー依存性を示す。

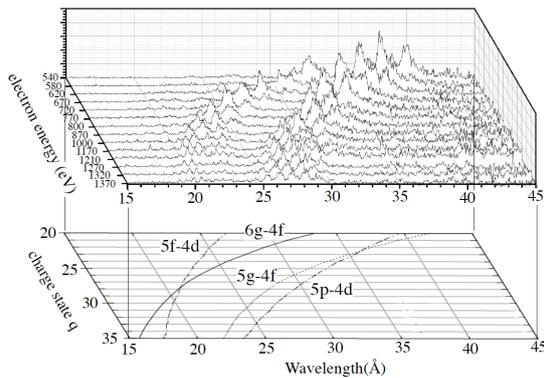


図 1  
上段: CoBIT におけるタングステン多価イオン EUV スペクトルの電子エネルギー依存性。  
下段: 衝突輻射モデルで計算されたタングステン多価イオンの発光ラインの電子配置。上段・下段の電子エネルギーとイオン価数は各イオン化エネルギーによって対応付けられている。

CoBIT のエネルギーが高くなるに従って発光線が短波長側にシフトしていくのがわかる。これは多価イオンの価数増加によりエネルギー準位間隔が次第に大きくなっていくことに起因している。図 1 下段に衝突輻射モデルで計算された各価数からの発光ラインの

波長シフトの様子を示す。これらの比較から各ピーク群の価数と遷移を同定することに成功した。

またそれらの CoBIT からのスペクトルを用い、核融合プラズマである LHD の発光スペクトルの再現を試みた。図 2 に CoBIT で同定された各タングステン多価イオン価数の 6g-4f, 5g-4f, 5f-4d, 5p-4d 遷移の出現波長を矢印で示した LHD スペクトルを示す。

下から順次ペレット入射後、時間が経過しており、次第にプラズマ温度が上昇し価数の高いタングステン多価イオンの発光ラインが出現しているのがわかる。LHD のようなプラズマからの複雑な発光スペクトルの各ピーク群が、どの遷移に相当するか、我々の CoBIT の発光線のデータから同定することが可能となり、複雑な核融合プラズマの模擬に成功した。

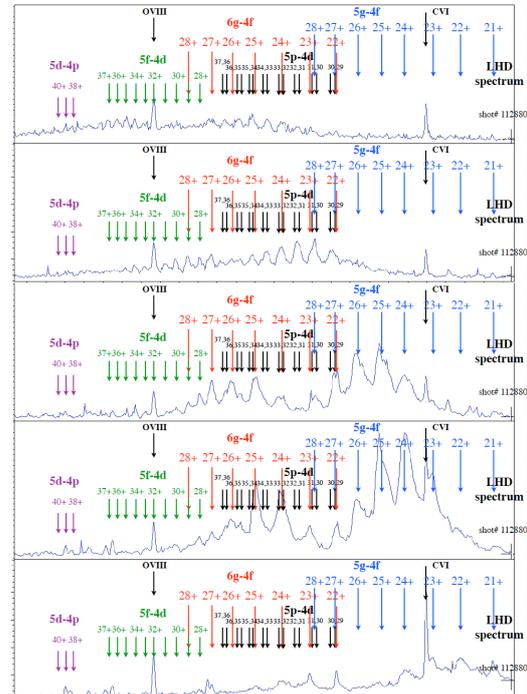


図 2  
LHD プラズマへのタングステンペレット入射後の EUV スペクトルの時間変化。CoBIT で同定された遷移の発光線が対応している。

このように CoBIT のスペクトルと理論計算を比較することにより精度の良い CR モデルの構築に成功した。次に我々はこの精度が向上した理論をもとに 100Å 付近に強いピークを持つ  $W^{26+}$  からの発光線が存在することを予測した。4f<sup>2</sup>→4f5s 遷移である。これらは、付近に重なるラインが少なくプラズマ計測

で同定が容易な発光線の一つになり得る可能性がある。我々はまず CoBIT を使い、 $W^{26+}$  の  $4f^2 \rightarrow 4f5s$  遷移の測定を試みた。 $W^{25+}$  の電離エネルギーを超える 800eV で出現する 100Å 付近のラインを発見し、電子エネルギー依存性からそれらが  $W^{26+}$  の  $4f^2 \rightarrow 4f5s$  遷移であることを初めて確認した。電子エネルギー 800eV でのスペクトルから 700eV のスペクトルを差し引いたのが図 3 のスペクトルである。

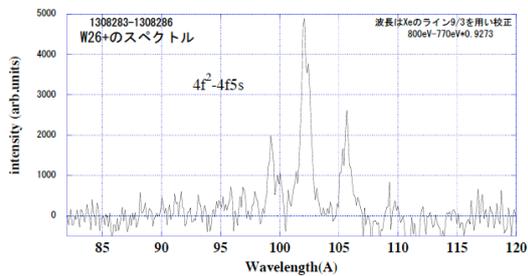


図 3 CoBIT で測定された  $W^{26+}$  のスペクトル

$W^{26+}$  イオンができる閾値を超えて出現した発光線であり、 $W^{26+}$  のラインであると同定した。以上の実験結果を踏まえ、LHD プラズマにタングステン不純物ペレットを入射し 100Å 付近の EUV スペクトルを測定した。図 4 に LHD におけるタングステン多価イオンの EUV スペクトルを示す。

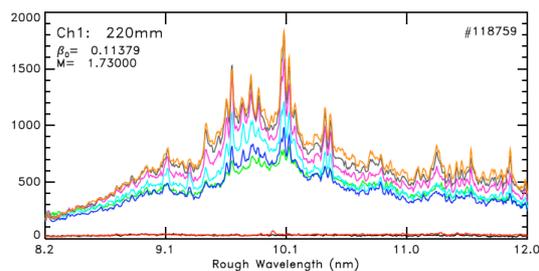


図 4 LHD プラズマへのタングステンペレット入射の EUV スペクトル。図 3 の CoBIT で観測されたラインに対応する発光線が確認される。

色の違いはペレット入射後の時間変化である。最終的な波長較正前であるため、多少波長のずれはあるが、100Å 付近に CoBIT の発光ラインに対応するラインが確認できる。非常に分解能が良く遷移の微細構造まで同定可能であり、今後の解析が期待される。このように CoBIT のデータとの比較は非常に有効であり、高電離重イオン多価イオンのスペクトル解析に威力を発揮することが証明された。

今後は、核融合に有用な基礎データの収集を進め核融合に貢献するばかりでなく、広く原子分子基礎データを整備することで他の分野へも広げていく必要があると考えている。

## 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 7 件)

① H. Ohashi, H. A. Sakaue and N. Nakamura, "Extreme ultra-violet emission spectroscopy of highly charged gadolinium ions with an electron beam ion trap" 査読有 Phys. Scr. **T156** (2013) 014013 (3pp)

② H. A. Sakaue, D. Kato, X. B. Ding, I. Murakami, F. Koike, T. Nakano, H. Ohashi, J. Yatsurugi and N. Nakamura, "Spectroscopy of Highly Charged Tungsten Ions with Electron Beam Ion Traps" 査読有 AIP Conference Proceedings, 1438 91 (2012)

③ N. Nakamura, E. Watanabe, H. A. Sakaue, D. Kato, I. Murakami, N. Yamamoto, H. Hara and T. Watanabe, "Intensity Ratio of Density-Sensitive Lines in Fe Ions Observed with Well-Defined Laboratory Plasma" 査読有 The Astrophysical Journal, 739:17(5pp) (2011)

④ H. A. Sakaue, N. Yamamoto, S. Morita, N. Nakamura, C. Chen, D. Kato, H. Kikuchi, I. Murakami, S. Ohtani, H. Tanuma, T. Watanabe and H. Tawara, "Electron density dependence of intensity ratio for FeXXII extreme ultraviolet emission lines arising from different ground levels in Electron Beam Ion Trap and Large Helical Device" 査読有 Journal of Applied Physics 109, 073304 (2011)

⑤ H. Ohashi, J. Yatsurugi, H. A. Sakaue and N. Nakamura "High Resolution Extreme Ultraviolet Spectrometer for an Electron Beam Ion Traps" 査読有 Review of Scientific Instruments 82, 083103 (2011)

⑥ H. Ohashi, S. Suda, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, K. Nishihara, H. A. Sakaue, N. Nakamura and S. Ohtani. "EUV emission

spectra of iron ions following charge exchange collisions with He" 査読有 Phys. Scr. T144, 014030(3pp) (2011)

⑦ H. A. Sakaue, N. Nakamura, E. Watanabe, A. Komatsu, and T. Watanabe "A compact EBIT for spectroscopic studies of moderate charge state ions" 査読有 Journal of Instrumentation 5 C08010, (2010)

〔学会発表〕(計10件)

① 大橋隼人、東口武史、坂上裕之、中村信行 「電子ビームイオントラップを用いたプラズマ光源関連イオンのEUV分光」レーザー学会第450会研究会(早稲田大学)2013年10月22日

② 坂上裕之、中村信行、山本則正、加藤太治、村上泉、渡邊鉄哉 「鉄多価イオン(FeXV)のEUV発光線強度比の電子エネルギー依存性」日本物理学会2013年秋季大会(徳島大学)2013年9月25日～9月28日

③ 坂上裕之、中村信行、山本則正、加藤太治、村上泉 「小型EBITを用いたタングステン多価イオンのEUV分光計測」日本物理学会第68回年次大会(広島大学)2013年3月26日～3月29日

④ 大橋隼人、坂上裕之、中村信行 「EBITを用いた多価BiイオンのEUV分光」日本物理学会第68回年次大会(広島大学)2013年3月26日～3月29日

⑤ 坂上裕之 招待講演「多価イオン分光計測による対向壁からのタングステンの不純物の放出および電離過程の挙動分析」第29回プラズマ核融合学会年会(福岡)2012年11月27日～11月30日

⑥ 大橋隼人、坂上裕之、中村信行 「EBITを用いた多価GdイオンのEUV分光」日本物理学会2012年秋季大会(横浜国大学)2012年9月18日～9月21日

⑦ 坂上裕之、加藤太治、村上泉、山本則正、

中村信行 「電子ビームイオントラップを用いたタングステン多価イオンEUV分光計測」第9回核融合エネルギー連合講演会(神戸)2012年6月28日～6月29日

⑧ 坂上裕之、中村信行、山本則正、加藤太治、村上泉、渡邊鉄哉 「小型EBITを用いた鉄多価イオンEUV分光実験IV」日本物理学会第66会年次大会(新潟大学)2011年3月25日～3月28日

⑨ 坂上裕之、中村信行、小松明浩、佐古田淳平、加藤太治、村上泉、「EBITを用いたタングステン多価イオンの分光計測」第27回プラズマ核融合学会年会(北海道大学)2010年11月30日～12月3日

⑩ 小松明浩、渡辺越至、佐古田淳平、中村信行、渡辺裕文、加藤太治、村上泉、坂上裕之、山本則正 「タングステン多価イオンの可視分光II」日本物理学会2010年秋季大会(大阪府立大学)2010年9月23日～9月26日

〔図書〕(計1件)

① 中村信行、坂上裕之 研究最前線 高温プラズマにおける高Z多価イオンの分光と原子構造「EBITにおける高Z多価イオンの生成と分光」核融合学会誌 Vol.89 No.5 (2013年5月号)

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 電子ビーム多価イオン源における多価イオン生成法  
発明者: 坂上裕之・櫻井誠  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特願2012-110731  
出願年月日: 2013年11月28日  
国内外の別: 外国

○取得状況(計 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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

坂上 裕之 (SAKAUE Hiroyuki)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教  
研究者番号：40250112

### (2) 研究分担者

中村 信行 (NAKAMURA Nobuyuki)  
電気通信大学・レーザー新世代研究センター・准教授  
研究者番号：50361837

### (3) 連携研究者

加藤 太治 (KATO Daiji)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号：60370136

### (4) 連携研究者

山本 則正 (YAMAMOTO Norimasa)  
中部大学  
研究者番号：40350326