

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24561024

研究課題名(和文) NBI水素ビームとタングステニオンの荷電変換衝突断面積の実験的測定

研究課題名(英文) Measurements of charge-changing cross-sections between NBI hydrogen beams and tungsten ions

研究代表者

今井 誠 (Imai, Makoto)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60263117

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：プラズマ中のタングステニオン不純物挙動解明のために不可欠となる、NBI水素ビームとタングステニオンの荷電変換衝突断面積を測定した。実際の測定は、～1 MeVのNBI水素ビームを想定し、これと等速である～184 MeVのタングステニオンビームと水素原子標的を利用することとし、日本原子力研究開発機構のタンデム加速器を用いて実施した。ビーム導入ポート付きチェンバー蓋の納品まで思わぬ時間を要し、当初の研究計画から遅延を生じたが、2015年度も測定を継続して成果を論文発表する。

研究成果の概要(英文)：Charge-changing cross-sections between NBI hydrogen atomic beams and tungsten ions, which is essential to a modeling of tungsten impurity transports in fusion plasmas, have been measured. Actual measurements have been performed at the Tandem accelerator facility in Japan Atomic Energy Agency using tungsten ion beams upto 184 MeV, which is equivalent to the 1-MeV NBI hydrogen beams in velocity, and atomic hydrogen targets. The experiments have gone behind the original schedule because of an unexpectedly slow delivery of a side-lid of the vacuum chamber, but the plan will be completed in FY2015.

研究分野：原子衝突

キーワード：プラズマ計測 中性粒子入射 電離断面積 電子捕獲断面積 タングステン

1. 研究開始当初の背景

(1) 熱核融合実現のためには、プラズマの効率的な生成と保持はもとより、その状況を把握するための計測や、燃焼灰や不純物の挙動解明と排出など、原子分子反応を利用する局面が数多く存在し、そのための基礎データを生産供給することは、核融合科学研究者よりも、むしろ原子分子物理研究者の役割となる。国際原子力機関 (IAEA) では、国際核融合研究評議会の監修のもと、核融合科学研究者と原子分子物理研究者の橋渡しを行って熱核融合実現のための基礎データ生産と供給を促進し、またその評価や公開を実施する活動が行われている。

(2) 水素吸蔵量が少ない上にスパッタリング率が低く、ラーマー半径が大きいタングステンは、熱核融合実現のために重要な材料であり、現在建設中の国際熱核融合実験炉 ITER や、さらに次の世代の実証炉における高温・高粒子束対向壁構成材の有力な候補に挙げられている。が、タングステンは、その高放射損失率によりプラズマ冷却を生ずる他、プラズマ中に蓄積しやすいなどの欠点も知られている。プラズマ中のタングステニオン不純物の挙動解明のための衝突輻射モデル構築は、核融合研究における重要課題であり、IAEA ではタングステニオンに関する光学データおよび衝突データを実験的・理論的に生産・評価するプロジェクト「1 eV ~ 20 keV エネルギー領域でのタングステンの光学および衝突データ」が採択された。同プロジェクトにおいては、タングステニオンが他の原子、イオンと衝突する過程に関して、~1 MeV の中性粒子加熱 (NBI) 水素原子がプラズマ中のタングステニオン不純物と衝突する過程が最優先と考えられたが、この過程を実験的に研究する研究者が見つからず、理論計算のみによる断面積生産が検討されていた。本研究代表者は、1 価および 2 価タングステニオンが、プラズマ周辺領域に存在する希ガス原子や炭化水素分子に ~20 keV で衝突する際の電子捕獲断面積データを測定した経験があることから、同プロジェクトにオブザーバ参加したが、タングステニオンを 184 MeV に加速できる加速器と水素原子標的を用意すれば、最優先とされる NBI 水素原子ビームとプラズマ中のタングステニオン不純物の衝突断面積が測定可能となることを示し、同プロジェクトにて、この過程の実験測定を担当することとなった。

(3) プラズマ中の原子やイオンといった重粒子の衝突反応に関して求められるデータは、衝突による電離や電子捕獲によって重粒子がその価数を変える、あるいは励起状態を生ずる過程の断面積である。対象となる衝突過程は多岐にわたる上、電子捕獲される電子準位を指定した部分断面積が求められるため、その量は膨大となり、すべての過程の断

面積を実験的に測定することは不可能である。このため、理論計算による断面積生産の併用が不可欠となるが、タングステニオンのように多くの電子を含む複雑な原子構造を持ったイオンに関する計算は未だ寡少であり、理論計算の精度向上のためにも、正確な実験値が欠かせない。

2. 研究の目的

(1) IAEA の研究プロジェクト「1 eV ~ 20 keV エネルギー領域でのタングステンの光学および衝突データ」に参加し、~1 MeV の NBI 水素原子ビームがプラズマ中のタングステニオンと衝突し、タングステニオン標的を電離する過程 (タングステン電離)、タングステニオン標的の電離と同時に高速水素原子がイオン化する過程 (水素原子電子損失 + タングステン電離)、ならびに高速水素原子からタングステニオン標的に電子移行する過程 (電子移行) の衝突断面積の実験測定を担当し、理論研究者とも協働して、衝突輻射モデル構築に必要な重粒子衝突断面積データを高精度で生産供給する。

(2) 実際の測定では、目的の過程と本質的に同過程となる ~184 MeV タングステニオンビームが水素原子標的と交叉衝突し、高速タングステニオンが電離される過程 (タングステン電離)、水素原子標的の電離と同時に高速タングステニオンがイオン化する過程 (水素原子電子損失 + タングステン電離)、ならびに水素原子標的から高速タングステニオンへ電子移行 (電子移行) する過程の衝突断面積を実験測定する。

3. 研究の方法

(1) NBI エネルギーすなわち、~1 MeV で水素原子とタングステニオンが衝突する過程のタングステン電離、水素電子損失、電子移行断面積の実験測定のためには、衝突の相対性を利用して入射粒子と標的を入れ替え、タングステニオンビームを水素原子標的に NBI 水素ビームと等速度で衝突させ、タングステニオンビームの衝突後価数変化と水素原子標的の電離を観測する。タングステンビームの入射エネルギーは、~184 MeV となり、このビームを得て、入射タングステニオンの価数を変化させて実験を行うため、日本原子力研究開発機構 (JAEA) のタンデム加速器施設および、標的衝突後のイオン価数を選別測定する重イオンスペクトロメータを利用した。

(2) タングステン電離断面積の測定では、0.5 および 1.0 MeV の NBI 水素原子入射を想定し、タンデム加速器から得られた 92 および 184 MeV のタングステン 13 価あるいは 15 価イオンビームを、ストリッパ薄膜を透過させて価数を上げ、26 価から 38 価のイオンを電磁石により選別して入射ビームとした。

このタングステンビームに、水素ガスの熱分解により生成した水素原子をビーム化して交叉衝突させ、衝突によるタングステンイオンの価数変化を重イオンスペクトロメータと位置敏感型ガスチェンバ検出器により検出する。衝突断面積の絶対値を得るためには、標的水素原子の密度と衝突長の積を正確に知る必要があるが、評価済み推奨断面積既知の0.8 MeV/u 鉄イオンの水素原子標的電子捕獲断面積[1]を利用して、水素原子源の各種運転状態（水素ガス圧力・熱解離炉温度など）における標的密度・衝突長の積を求める。

(3) 水素原子源調達の間、予備実験として、水素原子標的より断面積が大きく、より効率的に実験セットアップの確定に至ることが期待できる炭素薄膜標的に184 MeV タングステンイオンを照射し、衝突後のタングステンイオン価数分布を測定した。これにより、JAEA タンデム加速器では加速実績のなかった~184 MeV タングステン26~38 価イオンが十分な強度で得られること、また衝突後のすべてのタングステンイオンが位置敏感型ガスチェンバ入口のマイラー膜を透過できることなど、実験実施のための条件が整っていることを確認した。

(4) 前項の予備実験と既存のスケーリング則からの類推により、水素原子標的を用いて十分な精度での断面積測定を行うには、JAEA タンデム加速器設置の衝突真空槽の真空度を1桁程度改善する必要があると認められた。そのため、水素原子標的設置に先立ち、真空封入性に問題があったメンブレンシートを利用した衝突真空槽スライド式横蓋を、ステンレス製のビーム導入用ポート付きチャンパー蓋に換装し、衝突後の水素原子ビームを効率よく排出できる位置に、ターボ分子ポンプを追加設置した。

(5) 水素原子電子損失+タングステン電離断面積および電子移行断面積の測定のため、衝突領域から電離後の水素イオンを引き出し検出するための飛行時間分析装置を追加設置し、衝突後のタングステンイオン価数との同時検出を行う。

<引用文献>

[1] C. Bottcher, D.C. Griffin, H.T. Hunter, *et al.*, "Recommended Data on Atomic Collision Processes Involving Iron and its Ions," Special Supplement to Nuclear Fusion, 1987.

4. 研究成果

(1) 研究期間初年度となる2012年度に熱分解水素原子源の調達を開始し、MBE コンポーネンテ製 HABS-40 を選定、調達した。2013年2月の同品納入までの間、研究の方法(3)項に記した予備実験を実施し、184

MeV タングステン13, 15, 28, 29, 30, 38 価入射ビームの1.4~20 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 炭素薄膜透過後の電荷分布が測定可能であることを確認した。この結果自体これまでにまったく測定例のないものであり、その結果を国際会議にて速報した他、本研究以前の測定データとあわせて国際会議で発表し、論文発表した。

(2) 前項の予備実験の際、衝突真空槽と重イオンスペクトロメータ内の真空度は、それぞれ 2×10^{-4} Pa と 5×10^{-5} Pa 程度であった。これは、炭素薄膜標的による測定には十分であったが、水素原子源より得られる標的密度と既存のスケーリング則から大まかに予想されるタングステン電離断面積を考慮すると、衝突真空槽内の真空度をさらに一桁向上させる必要が認められた。それゆえビーム導入用ポート付きチャンパー蓋の製作を2013年度内に決定したが、大型で難易度の高い加工であることから、仕様打合せの段階で2業者から受注できない旨通知があり、3社目の業者が受注した。結局、ビーム導入用ポート付きチャンパー蓋は、発注仕様を満足するまで3度にわたる現地調整を経て2014年7月に納品され、これにより研究計画に遅延を生じることとなった。

(3) 衝突真空槽にビーム導入用ポート付きチャンパー蓋を設置した結果、真空度は 1×10^{-5} Pa 程度まで改善され、水素原子源を設置して衝突エネルギー184 MeV でのタングステン電離断面積の測定を開始した。研究期間度終了時点では、水素原子の標的密度と衝突長を規格化するための鉄イオンによる測定が完了していないため、2015年度に継続して測定を行い、断面積の絶対値はその完了後、論文ならびにIAEA会議にて発表する。

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)

M. Imai, M. Sataka, M. Matsuda, S. Okayasu, K. Kawatsura, K. Takahiro, K. Komaki, H. Shibata, K. Nishio, Equilibrium and non-equilibrium charge-state distributions of 2.0 MeV/u carbon ions passing through carbon foils, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B, 査読有, Vol. 354, pp. 172-176 (2015).

今井 誠, 炭素薄膜透過後の重イオン電荷分布, JAEA-Review 2014-002, 査読なし, pp.135-145 (2014).

M. Imai, M. Sataka, K. Kawatsura, K. Takahiro, K. Komaki, K. Nishio, H. Shibata, S. Okayasu, Charge state

distribution of tungsten ions after penetration of C-foil targets, JAEA-Review 2013-057, 査読なし, pp. 45-46 (2014).

小特集 IAEA における原子分子データ Coordinated Research Projects (CRP), プラズマ核融合学会誌, 査読なし, Vol. 89, No. 9 (2013).

1. はじめに, B.J. Braams, 今井 誠, 加藤 太治, pp. 579-582.
3. 原子分子データの評価とコード比較, 市川 行和, 高木 秀一, 中村 義春, 今井 誠, 佐々木 明, pp. 600-610.
5. まとめ, B.J. Braams, 今井 誠, 加藤 太治, pp. 615-621.

M. Imai, Y. Iriki, A. Itoh, Target Dependence of single-electron-capture cross sections for slow Be, B, C, Fe, Ni and W ions colliding with atomic and molecular targets, Fusion Sci. Tech., 査読有, Vol. 63, pp. 392-399 (2013).

講座 原子分子データベースの構築と利用, プラズマ核融合学会誌, 査読なし, Vol. 88, No. 2 (2012).

3. 原子分子データベースの構築, 村上 泉, 加藤 太治, 北島 昌史, 坂上 裕之, 今井 誠, pp. 107-118.

I. Yu. Tolstikhina, M.-Y. Song, M. Imai, Y. Iriki, A. Itoh, D. Kato, H. Tawara, J.-S. Yoon, V.P. Shevelko, Charge-changing collisions of tungsten and its ions with neutral atoms, J. Phys. B, 査読有, Vol. 45, 145201 (8 頁) (2012).

[学会発表] (計 15 件)

M. Imai, M. Sataka, M. Matsuda, S. Okayasu, K. Kawatsura, K. Takahiro, K. Komaki, H. Shibata, K. Nishio, Quasi-equilibrium in charge state evolution for swift heavy ions after passing through carbon foils, The 9th International Symposium on Swift Heavy Ions in Matter, 2015年5月18日, ダルムシュタット (ドイツ)

M. Imai, A. Itoh, M. Sataka, M. Matsuda, Charge Exchange Collision Cross Sections of Tungsten Ions, IAEA Technical Meeting on Atomic, Molecular and Plasma-Material Interaction Data for Fusion Science and Technology, 2014年12月16日, 大田 (韓国)

M. Imai, A. Itoh, Electron capture cross

section scaling for low- q heavy ions at low energy, The 9th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications, 2014年9月22日, イェーナ (ドイツ)

今井 誠, 高慶 克己, 岡安 悟, 高速重イオン照射過程解明と固体材料物性改質, 第9回先進原子力科学技術に関する連携重点研究討論会, 2014年8月5日, 茨城県三の丸庁舎 (茨城県水戸市)

M. Imai, Electron Capture Cross Section Scalings for Low- q Heavy Ions, The 5th China-Japan-Korea Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma, 2014年7月30日, 蘭州 (中国)

M. Imai, M. Sataka, M. Matsuda, S. Okayasu, K. Kawatsura, K. Takahiro, K. Komaki, H. Shibata, K. Nishio, Charge-State Evolution for 1 MeV/u Tungsten and 2 MeV/u Carbon Ions Passing through Carbon Foils, The 26th International Conference on Atomic Collisions in Solids, 2014年7月15日, デブレツェン (ハンガリー)

今井 誠, タングステンイオン電荷変換衝突断面積測定, タングステン研究会, 2014年3月26日, かんぼの宿熱海 (静岡県熱海市)

今井 誠, 高慶 克己, 岡安 悟, 高速重イオン照射過程解明と固体材料物性改質, 第8回先進原子力科学技術に関する連携重点研究討論会, 2013年8月6日, 久慈サンピア日立 (茨城県日立市)

今井 誠, 柴田 裕実, 左高 正雄, 松田 誠, 高慶 克己, 川面 澄, 小牧 研一郎, 炭素薄膜透過後の重イオン電荷分布, タンデム領域の重イオン科学研究会, 2013年7月2日, 日本原子力研究開発機構 (茨城県東海村)

今井 誠, 低エネルギー低電離重イオン電子捕獲断面積のスケーリング, 核融合科学研究所共同研究セミナー, 2013年2月15日, 核融合科学研究所 (岐阜県土岐市)

今井 誠, 入来 仁隆, 太田 優史, 伊藤 秋男, タングステンイオンの電荷変換衝突断面積測定, 原子分子データ応用フォーラムセミナー, 2012年12月11日, 核融合科学研究所 (岐阜県土岐市)

Y. Ohta, T. Majima, M. Imai, H. Tsuchida, H. Shibata, A. Itoh, M.

Sataka, Charge State Distribution of 1 MeV/u Tungsten Ions after Penetration of Carbon Foils, The 8th International Symposium on Swift Heavy Ions in Matter, 2012年10月26日, 京都大学(京都市)

M. Imai, Y. Ohta, Y. Iriki, A. Itoh, Charge changing collision cross sections of Tungsten ions, The 8th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications, 2012年10月1日, ワシントン(米国)

M. Imai, Y. Ohta, A. Itoh, Target Dependence of Single Electron Capture Cross Sections for W^+ and W^{2+} Ions, IAEA-NFRI Technical Meeting on Data Evaluation for Atomic, Molecular and Plasma-Material Interaction Processes in Fusion, 2012年9月5日, 大田(韓国)

M. Imai, Charge Exchange Cross Sections for W^{q+} Ions at High Energy, The 2nd Research Coordination Meeting of the Coordinated Research Project on Spectroscopic and Collisional Data for Tungsten from 1 eV to 20 keV, 2012年8月30日, ハイデルベルク(ドイツ)

〔図書〕(計1件)

M. Imai, Springer-Verlag, Semiempirical formulae for inelastic atomic and molecular collisions, Atomic Processes in Basic and Applied Physics, Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics, 分担執筆 pp. 455-479 (2012).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今井 誠 (IMAI, Makoto)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：60263117

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

左高 正雄 (SATAKA, Masao)
独立行政法人 日本原子力研究開発機構・
原子力科学研究所・上席嘱託
研究者番号：70354826

松田 誠 (MATSUDA, Makoto)
独立行政法人 日本原子力研究開発機構・
原子力科学研究所・研究員
研究者番号：00354811

(4) 研究協力者

太田 優史 (OHTA, Yushi)

岡安 悟 (OKAYASU, Satoru)

高廣 克己 (TAKAHIRO, Katsumi)

西尾 勝久 (NISHIO, Katsuhisa)