

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06937

研究課題名(和文) NBIエネルギーにおける水素原子-タングステニオン衝突断面積の実験測定

研究課題名(英文) Measurements of charge-exchange collision cross sections of hydrogen atoms from tungsten ions at NBI energy

研究代表者

今井 誠 (Imai, Makoto)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：60263117

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：核融合プラズマ中のタングステン不純物挙動の解明に必要となる水素原子-タングステニオン衝突断面積を、日本原子力研究開発機構原子力科学研究所設置のタンデム加速器を用いて測定した。施設側の都合でマシンタイムを予定通り確保できなかったため、研究期間を2019年度まで延長した。故障のため更新が必要となっていた重イオンスペクトロメータ分析電磁石磁場測定安定化装置を更新した後、タングステニオンの水素原子標的衝突後の電荷分布を測定した他、磁場測定安定化装置の調整のため、より広範で強度の高い電荷分布が得られる炭素薄膜標的による電荷分布を測定し発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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など、イオン-原子衝突反応を利用する局面が多く存在するが、必要な衝突データがすべて存在しているわけではない。特にプラズマ中のタングステニオン不純物の挙動解明は熱核融合研究における重要課題となっているが、その衝突断面積を実際に測定できる原子物理研究者と実験施設は世界的にも限られる。本研究は、水素原子とタングステニオンの電荷変換衝突断面積を実際に測定するとともに、関連理論計算の精度向上にも役立つもので、関連機関からも待ち望まれている。

研究成果の概要(英文)：Charge-exchange collision cross sections between hydrogen atom and tungsten ions at 0.5 and 1.0 MeV/u collision energies, which are essential to analyzing the reactions and behavior of tungsten impurities in fusion plasma, have been measured utilizing the tandem accelerator at the Nuclear Science Research Institute of Japan Atomic Energy Agency. We were not able to obtain machine times of the accelerator as planned, because of the accelerator side reasons, we had to extend the research period to the end of FY 2019. We have measured the charge distributions of tungsten ions at 0.5 and 1.0 MeV/u after collisions with hydrogen atom as well as carbon foil targets, in which the former results will be used for deriving the charge-exchange cross sections while the latter was presented in some international meetings as basic atomic-collision data.

研究分野：原子衝突学

キーワード：プラズマ計測 プラズマ・核融合 原子・分子物理 中性粒子入射 衝突断面積

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

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ンイオン不純物の挙動解明のための衝突放射モデル構築は、核融合研究における重要課題であり、IAEA ではタングステンイ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、タングステンイオンが他の原子、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ンイ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 価タングステンイオンが、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、タングステンイオンを 184 MeV に加速できる加速器と水素原子標的を用意すれば、最優先とされる中性粒子入射 (NBI) 水素原子ビームとプラズマ中のタングステンイオン不純物の衝突断面積が測定可能となることを示し、この過程の実験測定を担当することとなった。同プロジェクトは期限到来により 2014 年に終了したが、水素原子とタングステンイオンの衝突過程に関しては、新プロジェクト「中性ビーム関連電子移行断面積データ」に引き継がれている。

(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、タングステンイ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。

(4) 実際にタングステンイオンを様々な価数の 184 MeV ビームとして加速できる施設は世界的にも限られ、上述の背景のもと、2012 年度より科学研究費基盤研究 (C)「NBI 水素ビームとタングステンイオンの荷電変換衝突断面積の実験的測定」により日本原子力研究開発機構原子力科学研究所設置のタンデム加速器 L3 ビームラインにて測定を開始したが、水素標的との衝突後のタングステンイオンのイオン価数分析を行う重イオンスペクトロメータの磁場測定安定化装置 (Scanditronix 製 NMR751 型) が故障し、実験継続が不可能となった。同装置の製造元は (後継社も含め) もはや存在せず、他の複数の業者でも修理不可能であったことから、新規開発が必要である上に、予算的に加速器施設側による更新は不可能であったことから、本研究費により導入する必要が生じた。

2. 研究の目的

(1) 熱核融合科学研究に必要となるエネルギー~1 MeV の NBI 水素原子ビームがプラズマ中のタングステンイオンと衝突し、タングステンイオン標的を電離する過程 (タングステン電離)、タングステンイ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ンイ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実施し、理論研究者とも協働して、衝突放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 タングステンイオンビームが水素原子標的と交叉衝突し、高速タングステンイ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ンイ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ンイオンへ電子移行 (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

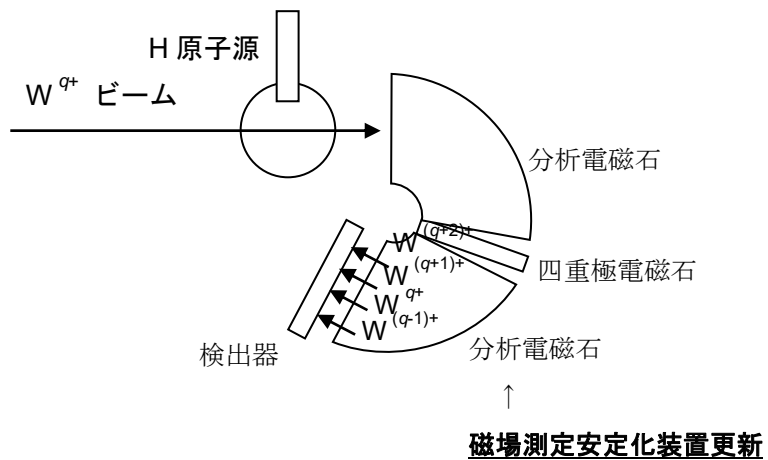
(1) NBI エネルギーすなわち、~1 MeV で水素原子とタングステンイオンが衝突する過程のタングステン電離、水素電子損失、電子移行断面積の実験測定のためには、衝突の相対性を利用

して入射粒子と標的を入れ替え、タングステンイオンビームを水素原子標的に NBI 水素ビームと等速度 ($\sim 1.0 \text{ MeV/u}$) で衝突させ、タングステンイ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、 $\sim 184 \text{ MeV}$ となり、このビームを得て、入射タングステンイ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 L3 ビームラインおよび、標的衝突後のイオン価数を選別するための同ビームライン設置重イオンスペクトロメータを利用した。

(2) 測定に先立ち、更新が必要となった磁場測定安定化装置の開発・設置と性能評価を行った。このため、水素原子標的より断面積が大きく、より効率的に評価が実施できると期待される炭素薄膜標的に 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。実験と磁場測定安定化装置の調整を繰り返すことにより、旧装置の制御パラメータを変更することなく同等の測定磁場と安定度を得られるまで性能を回復できたことを確認した。後述のように、この測定データ自体貴重なもので、国際会議および論文発表した。

(3) タングステン電離ならびに電子移行断面積の測定では、エネルギー 0.5 および 1.0 MeV/u 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 0.5 および 1.0 MeV/u (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、ストリップ薄膜を透過させて価数を高め、 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した。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。



(4) 申請時の研究計画に記述した飛行時間分析装置の追加によるタングステン電離断面積+水素原子電子損失断面積の測定は、予算的に飛行時間分析装置の追加が不可能となったため、今後の課題とする。

4. 研究成果

(1) 研究期間初年度となる 2016 年度に、重イオンスペクトロメータを設置 (1982 年) した住友重工(株)と磁場測定安定化装置更新につき検討したが、同社では当時の資料も状況を知る関係者も得られず、故障した磁場測定安定化装置 (Scanditronix 製 NMR751 型) の製造元も後継社を含めてもはや存在していないことから、新たに開発することとした。数社と検討の結果、(株)エコー電子製 NMR 磁場コントローラ ENC-0320T-HM 型と同制御部 ENC-0320T-CA 型をベースにフィードバック制御回路を併用したシステムを導入することとした。

(2) 2016 年 12 月にタンデム加速器において故障が発生し、その修理と性能回復のため、2016 年度残り期間と 2017 年度の全マシンタイムがキャンセルされた。マシンタイム再開後も、短寿命アインシュタニウム核を標的に用いる核物理学の国際共同研究実験に優先的にマシンタイムを配分するとの方針が出されたため、本実験測定のためのマシンタイムを予定通り確保できなかった。このため研究計画に大幅な遅れが生じることとなり、研究期間を当初予定の 2018 年度末までから 2019 年度末までに延長した。

(3) マシンタイム再開後、更新した磁場測定安定化装置の性能評価を行った。エコー電子製磁場コントローラでは、分析電磁石への励磁電流供給用電源を直接ドライブすることができないため、目的磁場を設定し安定化するためのフィードバック回路を製作した。実際に水素原子標的より密度が高く、より効率的な評価実施が期待できる炭素薄膜標的衝突後のタングステンイオン価数分布を測定することで回路調整を繰り返し、旧装置の制御パラメータを変更することなく同等の測定磁場と安定度を得られるまで性能を回復した。この間測定した 184 MeV (1.0 MeV/u) タングステンおよび 12 MeV (1.0 MeV/u) 炭素入射ビームの電荷分布自体これまでになかった測定例のないものであり、本研究計画の副産物として、その結果を国際会議にて速報し論

文準備中である[2, 6, 7, 8, 14, 15]。また、V.P. Shevelko 博士（レベデフ物理研究所）、E. Lamour 教授（パリ第6大学）らと連携し、これらの測定結果の理論シミュレーションを実施し、これらの測定結果が理論計算された衝突断面積の評価に利用できることを示し、国際会議にて発表した[10, 12, 13]。下図は 12 MeV 炭素ビームの炭素薄膜透過後電荷の平均値を標的膜厚に対し、理論シミュレーション結果と共に示したものである。これらの成果をうけ、I. Tolstikhina および V.P. Shevelko 博士（レベデフ物理研究所）、N. Winckler 博士（GSI 研究所、ドイツ）と共著にて Springer 社より書籍“Basic Interactions of Accelerated Heavy Ions in Matter – Atomic Interactions of Heavy Ions”を出版[5]したほか、研究代表者今井および前述の V.P. Shevelko 博士（レベデフ物理研究所）、E. Lamour 教授（パリ第6大学）の3名がゲストエディタとなり、衝突後の非平衡電荷分布を応用した研究に関する特集号を編集することとなった。また 2019 年より、本実験を含む荷電変換衝突の知見を応用して京都大学宇宙線研究室との共同研究を開始し、多重電離過程を利用した宇宙線組成研究に関する論文を投稿し受理された他[4]、本研究を含む電荷変換衝突断面積研究成果につき、招待講演を含む国際会議ならびに論文発表を行った[3, 11]。

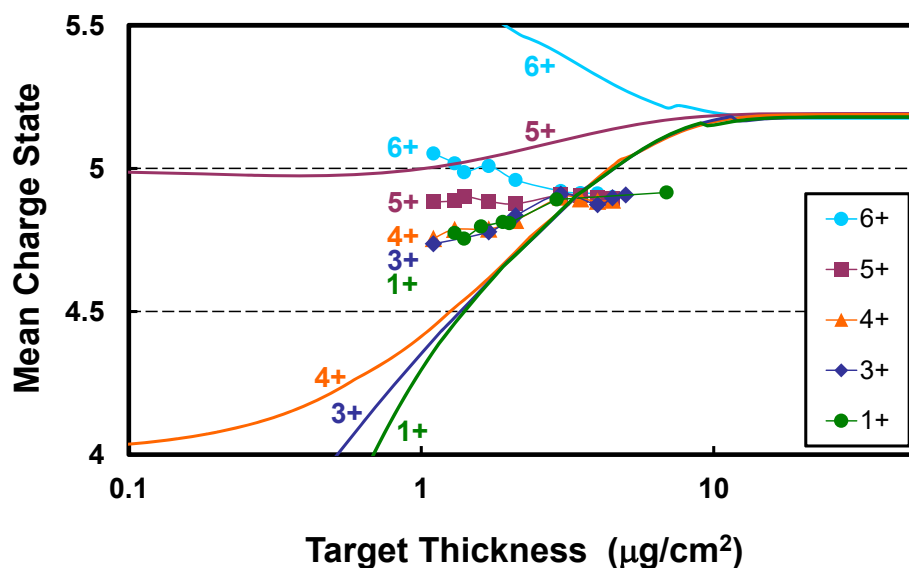


図 12 MeV 炭素ビームの炭素薄膜透過後の平均電荷の標的膜厚依存

(4) 本研究計画の主目的である衝突エネルギー184 MeV タングステンイオンの水素標的衝突による電離ならびに電子移行断面積の測定を実施した。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、継続して測定を実施し、断面積の絶対値はその完了後、論文ならびに国際会議にて発表する。IAEA 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」に続いて現在採択中の IAEA プロジェクト「中性ビーム関連電子移行断面積データ」では、タングステンイオンと水素標的の電子移行断面積に関しては、米国の研究者による 10 電子系タングステンイオン (W64+) の水素原子衝突断面積の理論計算が発表[16]されているのみで、実際に必要とされるさらに多くの電子含んだ実験値が望まれている。

<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.
論文
- [2] M. Imai, M. Sataka, M. Matsuda, S. Okayasu, K. Kawatsura, K. Takahiro, K. Komaki, K. Nishio, H. Shibata, “Charge state distribution of tungsten ions after penetration of C-foil targets (II),” JAEA-Review 25, pp. 49–50 (2016).
- [3] M. Imai, “Electron capture cross section scalings for low- q heavy ions”, Proceedings of Japan-China-Korea Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma, NIFS-PROC-99, Feb. 01, 2016, pp. 42–47 (2016).
- [4] H. Okon, M. Imai, T. Tanaka, H. Uchida, T.G. Tsuru, “Probing cosmic rays with Fe Kalpha line structures generated by multiple ionization process,” Publications of the astronomical society of Japan, to be published (2010).
- [5] I. Tolstikhina, M. Imai, N. Winckler, V. Shevelko, “Basic Interactions of Accelerated Heavy Ions in Matter – Atomic Interactions of Heavy Ions,” Springer Series on Atomic, Optical and Plasma Physics 98, Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland, 2018

- [6] M. Imai, M. Sataka, S. Okayasu, K. Kawatsura, K. Takahiro, K. Komaki, H. Shibata, K. Nishio, “Quasi-equilibrium in charge-state evolution for several MeV/u ions after carbon foil penetration”, 27th International Conference on Atomic Collisions in Solids, 24–29 July, 2016, Lanzhou, China. (ポスター発表)
- [7] M. Imai, M. Sataka, S. Okayasu, M. Matsuda, K. Kawatsura, K. Takahiro, K. Komaki, H. Shibata, K. Nishio, “Quasi-equilibrium in charge-state evolution for S and C ions after C-foil penetration”, 12th European Conference on Atoms, Molecules and Photons, September 5–9, 2016, Frankfurt am Main, Germany. (ポスター発表)
- [8] M. Imai, M. Sataka, S. Okayasu, M. Matsuda, K. Kawatsura, K. Takahiro, K. Komaki, H. Shibata, K. Nishio, “Quasi-equilibrium in charge-state evolution for several MeV/u ions after C-foil penetration”, 18th International Conference on Physics of Highly Charged Ions, September 11–16, 2016, Kielce, Poland. (ポスター発表)
- [9] M. Imai, “Scaling rules of electron capture cross sections for slow low- q ions on gaseous targets”, 10th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications, 25–29 September, 2016, Gunsan, Rep. of Korea. (招待講演)
- [10] M. Imai, V.P. Shevelko, “First step benchmark of inelastic collision cross sections for heavy ions using charge state evolutions via target penetration”, Uncertainty Assessment and Benchmark Experiments for Atomic and Molecular Data for Fusion Applications, 19–21 December, 2016, IAEA headquarter, Vienna. (口頭発表)
- [11] M. Imai, M. Sataka, K. Kawatsura, K. Takahiro, K. Komaki, H. Shibata, “Population of some excited states of projectile ions inside matter probed by zero-degree electron spectroscopy,” 25th International Symposium on Ion Atom Collisions, 23–25 July, 2017, Palm Cove, Australia. (ポスター発表)
- [12] M. Imai, V. P. Shevelko, “First-step benchmark of collision cross sections for heavy ions using charge-state evolutions after target penetration,” 30th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, 26 July – 1 August, 2017, Cairns, Australia. (ポスター発表)
- [13] M. Imai, M. Sataka, M. Matsuda, S. Okayasu, K. Kawatsura, K. Takahiro, K. Komaki, H. Shibata, K. Nishio, V.P. Shevelko, “Charge-State Evolution for 1.0 and 2.0 MeV/u C, S, and W ions after C-foil Penetration and their application to a benchmark of collision cross sections,” 26th International Symposium on Ion-Atom Collisions, July 20-22, 2019, Paris, France. (口頭発表)
- [14] 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 1.0 and 2.0 MeV/u carbon ions after carbon foil Penetration,” 31th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, 23–30 July, 2019, Deauville, France. (ポスター発表)
- [15] M. Imai, M. Sataka, S. Okayasu, M. Matsuda, K. Kawatsura, K. Takahiro, K. Komaki, H. Shibata, K. Nishio, “Charge-State Evolution for C- and W-Ions through C-foil Penetration,” 23rd International Workshop on Inelastic Ion-Surface Collisions, November 22-26, 2019, Matsue, Japan. (口頭発表)
- [16] Y. Ralchenko, “Atomic data for W64+ and H,” First Research Coordination Meeting of the Neutral Beams CRP, 19–21 June, 2017, Vienna, Austria.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 M. Imai, M. Sataka, M. Matsuda, S. Okayasu, K. Kawatsura, K. Takahiro, K. Komaki, K. Nishio, H. Shibata	4. 巻 25
2. 論文標題 Charge state distribution of tungsten ions after penetration of C-foil targets (II)	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 JAEA-Review	6. 最初と最後の頁 49-50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11484/jaea-review-2016-025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Imai	4. 巻 99
2. 論文標題 Electron capture cross section scalings for low-q heavy ions	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 NIFS-PROC	6. 最初と最後の頁 42-47
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Okon, M. Imai, T. Tanaka, H. Uchida, T.G. Tsuru	4. 巻 -
2. 論文標題 Probing cosmic rays with Fe K α line structures generated by multiple ionization process	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the astronomical society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件/うち国際学会 10件）

1. 発表者名 M. Imai, M. Sataka, K. Kawatsura, K. Takahiro, K. Komaki, H. Shibata
2. 発表標題 Population of some excited states of projectile ions inside matter probed by zero-degree electron spectroscopy
3. 学会等名 The 25th International Symposium on Ion Atom Collisions（国際学会）
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 M. Imai, V. P. Shevelko
2 . 発表標題 First-step benchmark of inelastic collision cross-sections for heavy ions using charge-state evolutions after target penetration
3 . 学会等名 The 30th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 M. Imai, A. Itoh
2 . 発表標題 Scaling rules of electron capture cross sections for slow low-q ions on gaseous targets
3 . 学会等名 10th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications (ICAMDATA 2016) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 M. Imai, V.P. Shevelko
2 . 発表標題 First step benchmark of inelastic collision cross sections for heavy ions using charge state evolutions via target penetration
3 . 学会等名 原子衝突学会年会
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 M. Imai, V.P. Shevelko
2 . 発表標題 First step benchmark of inelastic collision cross sections for heavy ions using charge state evolution after target penetration
3 . 学会等名 IAEA Technical Meeting on Uncertainty Assessment and Benchmark Experiments for Atomic and Molecular Data for Fusion Applications (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 M. Imai, M. Sataka, S. Okayasu, K. Kawatsura, K. Takahiro, K. Komaki, H. Shibata, K. Nishio
2 . 発表標題 Quasi-equilibrium in charge-state evolution for several MeV/u ions after carbon foil penetration
3 . 学会等名 27th International Conference on Atomic Collisions in Solids (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 M. Imai, M. Sataka, S. Okayasu, M. Matsuda, K. Kawatsura, K. Takahiro, K. Komaki, H. Shibata, K. Nishio
2 . 発表標題 Quasi-equilibrium in charge-state evolution for S and C ions after C-foil penetration
3 . 学会等名 12th European Conference on Atoms, Molecules and Photons (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 M. Imai, M. Sataka, S. Okayasu, M. Matsuda, K. Kawatsura, K. Takahiro, K. Komaki, H. Shibata, K. Nishio
2 . 発表標題 Quasi-equilibrium in charge-state evolution for several MeV/u ions after C-foil penetration
3 . 学会等名 18th International Conference on Physics of Highly Charged Ions (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 M. Imai, M. Sataka, M. Matsuda, S. Okayasu, K. Kawatsura, K. Takahiro, K. Komaki, H. Shibata, K. Nishio
2 . 発表標題 Quasi-equilibrium in charge-state evolution for 1.0 and 2.0 MeV/u carbon ions after carbon foil Penetration
3 . 学会等名 31th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Imai, M. Sataka, S. Okayasu, M. Matsuda, K. Kawatsura, K. Takahiro, K. Komaki, H. Shibata, K. Nishio
2. 発表標題 Charge-State Evolution for C- and W-Ions through C-foil Penetration
3. 学会等名 23rd International Workshop on Inelastic Ion-Surface Collisions (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今井 誠, 左高正雄, 岡安 悟, 松田 誠, 川面 澄, 高廣克己, 小牧研一郎, 柴田裕実, 西尾勝久, V.P. Shevelko
2. 発表標題 MeV/uイオンの平衡前電荷分布と理論断面積ベンチマークへの応用
3. 学会等名 東海重イオン科学シンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Inga Tolstikhina, Makoto Imai, Nicolas Winckler, Viacheslav Shevelko	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer, Switzerland	5. 総ページ数 220
3. 書名 Basic Atomic Interactions of Accelerated Heavy Ions in Matter	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	左高 正雄 (Sataka Masao)	筑波大学・研究基盤総合センター・研究員 (12102)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	岡安 悟 (Okayasu Satoru) (50354824)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究主幹 (82110)	
連携研究者	松田 誠 (Matsuda Makoto) (00354811)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究所・研究員 (82110)	