

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656585

研究課題名（和文） 資源探査のためのロバストなタンデム型中性子源

研究課題名（英文） Robust neutron source for resource exploration

研究代表者

北島 純男 (KITAJIMA SUMIO)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30161475

研究成果の概要（和文）：

本研究においては、過酷な環境や輸送あるいは衝撃に耐える可搬型小型のためのタンデム型中性子源で用いる荷電変換器の開発を行った。具体的には、ビーム源ならびにビームライン、測定システムの開発を行い、負イオンから正イオンへの変換効率を測定した。またそのため荷電変換器表面での反射率、変換率を検討するための原子物理を組み込んだコードを開発した。その結果、表面に特殊な加工を施した金属表面を用いることにより、最大で約 90% の変換効率を達成した。さらに、金属表面に注目し、3次元形状測定レーザー顕微鏡を使用した表面形状比較、荷電変換器表面でのスパッタリング率、荷電変換器の熱負荷等の調査に基づき、荷電変換器最適化の指針を得た。

研究成果の概要（英文）：

A robust electron stripper for H^- to H^+ using a metal surface was developed for a compact tandem-type DD or DT neutron generator of next generation. The experimental results showed that the conversion efficiency, H^+ fraction in the reflected particles, improved by surface polish up to the maximum value of about 90%. Roughness parameters were measured for 2 samples of metal surface, polished and non-polished, using a 3D laser-scanning microscope. The surface measurement indicated that there was factor 4 improvement in the average roughness by polish.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：中性子源、荷電変換器、タンデム型加速器、高エネルギーイオン、イオンビーム

1. 研究開始当初の背景

中性子源は近年様々な分野で需要が高まっており、特に資源開発や地雷探査といった用途に対しては容易に移動可能で、過酷な環境や輸送あるいは衝撃に耐える小型な中性子源が必要である。この目的のためには、運搬時に大掛かりな遮蔽を必要とせず、安全に取り扱うことのできる DD（重水素-重水素）反応や DT（重水素-3重水素）反応を用いた数百 keV 領域の加速器型中性子源が最適

であると考えられる。さらに小型で大強度という条件を共に満たすためには、負重水素イオンを用いたタンデム型が有利である。しかし、問題となるのが負イオンから正イオンへの荷電変換器である。

従来、荷電変換装置としては荷電変換箔やガスセルが用いられてきた。荷電変換箔は一般的に数十から数百 mg/cm^2 の炭素蒸着膜であり、特に MeV オーダーの高エネルギービームの荷電変換に用いられてきた。しかし

数百 keV のエネルギー領域での利用実績は乏しく、また機械的強度が非常に低くハンドリングも難しいため可搬型の装置には不適であると考えられる。一方ガスセルは機械的強度が問題になることは無いが、十分な線密度を確保するためには多くのガスを導入する必要があり、ガスセル自体が大型となる他、ガス導入系と排気系の設置に伴い装置の大型化することが問題である。

2. 研究の目的

本研究では、特殊な加工を施した金属表面を用いることによって、頑強でかつ半永久的に使用できる荷電変換器（荷電変換プレート）の開発を目的とする。荷電変換プレートは本研究で新たに提案する荷電変換装置であり、数層の高融点金属の薄板のから構成される。負イオンビームをプレートにほぼ平行に近い浅い角度（大きな入射角）で入射させると、入射粒子は表面付近の原子との複数回の衝突によって最終的に表面から脱出する。この過程で負イオンから電子が剥ぎ取られ、正イオンとなることが期待される。

そこで、本研究の目的は、実験的に荷電変換プレートの評価を行い、その有用性を検討することである。

3. 研究の方法

本研究では、荷電変換プレートの評価実験のために H⁻ビームを用いることとし、東北大学工学研究科に設置されている He⁰ビーム生成法原理検証実験装置 ABS103 を改造・改良し、荷電変換プレートによる荷電変換実験を行えるよう実験システムを構築した。このビーム源ではイオン源から引き出された H⁺ビームをアルカリガスセルで H⁻ビームに変換し磁気分析器で H⁻ビームのみを約 60-150 keV に加速する。多段スリットでビーム発散角を制限し、荷電変換プレートを組み込んだ荷電変換器に入射する。出力されるビームの電荷とエネルギー分離は平行平板電極で行い、駆動式のファラデーカップにて分離された電流を測定する。図 1 に実験装置の概念図を示す。

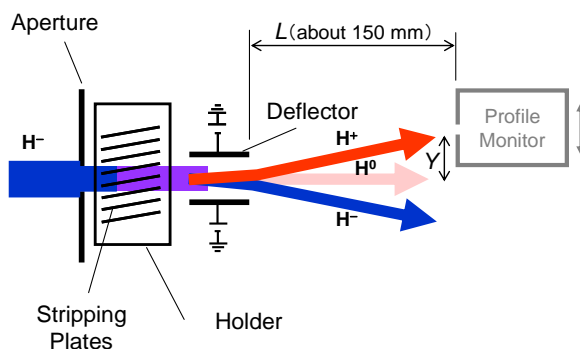


図 1 荷電変換器と出力ビーム分析部概念図

次に、荷電変換プレートでの変換効率を求めるために、イオン反射計算コードを開発し、イオンの反射率や反射粒子のエネルギー分布、角度分布、実験結果の予測を行う。

構築した実験環境において荷電変換プレートによる H⁻ビームの荷電変換実験を行い、荷電変換が可能であることを確認する。計算結果との比較から荷電変換の効率を評価する。また、プレート表面状態を分析し、それに対する依存性や入射角依存性を調査する。

4. 研究成果

構築した実験環境において荷電変換プレートによる H⁻ビームの荷電変換実験を行った。プロファイルモニターで検出する正イオン電流 $I_{p,FC}$ は、入射ビーム電流 $I_{n,in}$ に対して次の式で表されるとする。ただし、 $I_{n,in}$ は荷電変換プレート表面に入射した分のビーム電流であり、プレートの厚さで損失した分やすり抜けてしまった分は含まない。

$$I_{p,FC} = \eta I_{n,in}$$

ここで η は入射粒子がその体系において正イオンとして観測される割合で、次の式で表されるとする。

$$\eta = sRG\varepsilon$$

ここで、 R は理想的な平坦な表面における入射粒子の反射率、 G は幾何学的損失効果（反射粒子がその体系において測定系に入射する割合）、 ε は反射時の荷電変換効率、 s は表面形状効果（実際の表面状態による補正係数）である。

まず無研磨のモリブデンプレートによって荷電変換が可能であることを確認した。次に鏡面仕上げのモリブデンプレートで同様の実験を行い、図 2 に示すように、表面研磨によって観測できる正イオンが大幅に増加することが確認された。図 3 に η の実験結果を入射エネルギーの関数として示す。

次に計算の結果との比較から実効的変換効率（反射時の変換効率と表面形状効果の積）を求め、鏡面仕上げモリブデンプレートにおいて 80 % を超えることを示した。この値は入射角を多少変化させても変わらないことがわかった。

表面形状効果に関して形状測定レーザー顕微鏡による表面観察を行い、表面が荒いほどその起伏によって粒子のミクロな入射角が変化し、反射率の減少などを引き起こしていることを示唆した。よって十分に研磨し、特にビーム進行方向に急な起伏がない状態にすれば表面形状効果は 1 に近づくと考えられる。

調査には形状測定レーザー顕微鏡（KEYENCE 社製 VK-9700）を使用した。

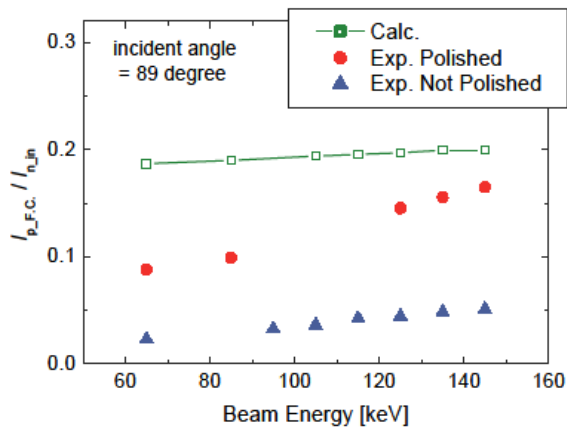


図 2 入射角 89 度の場合の入射負イオン電流と測定正イオン電流との比のビームエネルギー依存性。

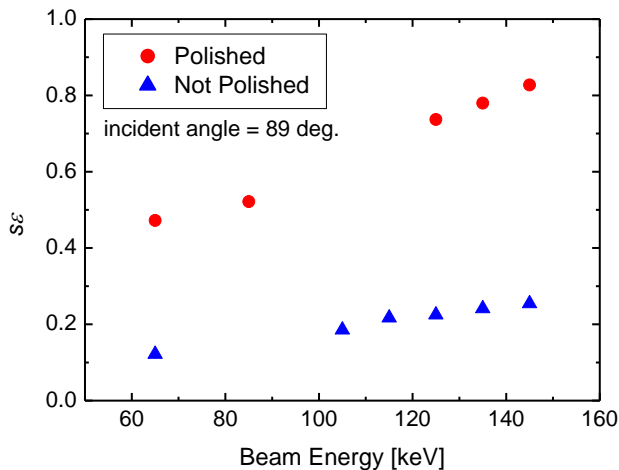


図 3 入射角 89 度の場合の実効的変換効率 $s\varepsilon$ のエネルギー依存性。 ε は反射時の荷電変換効率、 s は表面形状効果である。

実効的変換効率は表面状態に大きく依存していることがわかったので実験で用いた荷電変換プレートの表面状態を調査した。

表 1 に無研磨 Mo プレートと鏡面仕上げ Mo プレートについて、粗さの評価によく用いられる算術平均粗さ Ra は 1/4 以下であるし、尖りの度合いを示すクルトシス Rku も減少している。平均長さ RSm は 2 倍程になっており、これは凹凸の頻度が半分ほどに減少したことを示している。特に注目したいのは二乗平均平方根傾斜 $R\Delta q$ で、研磨によって 1/3 以下となっている。これは局部傾斜（微小長さにおける傾き）の二乗平均平方根をとったもので凹凸の傾斜の大きさを評価する値であり、これが小さいほどそれぞれの凹凸がなだらかである。表面にビーム粒子が入射したときマイクロには入射部分の凹凸の角度によって入射角が決定するため、粒子ごとの

Table I. Measured Roughness

	Peak value Rp[μm]	Valley Rv[μm]	Average Ra[μm]
Not Polished	0.209	0.207	0.053
Polished	0.024	0.037	0.012
	Skewness Rsk	Kurtosis Rku	
Not Polished	-0.147	3.56	
Polished	-0.336	2.06	

入射角の平均は $R\Delta q$ が低いほどマクロに設定した入射角に近づく。研磨によって実効的変換効率が大きく変化したのは主にこのマイクロな入射角が原因で、これを十分に小さくすれば表面形状効果 s は 1 に近づくと考えられる。

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 4 件)

- (1) N. Tanaka, M. Sasao, K. Terai, A. Okamoto, S. Kitajima, H. Yamaoka, and M. Wada, Development of a He- and HeO beam source for alpha particle measurement in a burning plasma, Review of Scientific Instruments 83, 2012 年, 02B115, 10.1063/1.3672113, 査読有
- (2) M. Sasao, M. Kasaki, T. Kobuchi, K. Tsumori, N. Tanaka, K. Terai, A. Okamoto, S. Kitajima, O. Kaneko, K. Shinto, and M. Wada, An alpha particle measurement system using an energetic neutral helium beam in ITER, Review of Scientific Instruments 83, 2012 年, 02B718, 10.1063/1.3673493, 査読有
- (3) K. Shinto, M. Wada, T. Nishida, Y. Demura, D. Sasaki, K. Tsumori, M. Nishiura, O. Kandko, M. Kasaki and M. Sasao, Development of a Negative Hydrogen Ion Source for Spatial Beam

Profile Measurement of a High Intensity Positive Ion Beam in AIP Conference Proc. 1390, 675-683 (2011), 2011年, 978-0-7354-0955-2, 査読有

- (4) K. Terai, N. Tanaka, M. Kasaki, K. Tsugawa, A. Okamoto, S. Kitajima, T. Takeno, A. J. Antolak, K. N. Leung, M. Sasao, and M. Wada, Electron Strippers for Compact Neutron Generators, in AIP Conference Proc. 1390, 684-691 (2011), 2011年, 978-0-7354-0955-2, 査読有

〔学会発表〕(計 11 件)

- (1) 大坊昂, 岡本敦, 他, ダイバータ模擬装置 DT-ALPHA における ELM 模擬のための大電流イオンビーム源の開発, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26 日, 東広島
- (2) 笹尾眞実子, ITER における損失アルファ粒子計測の課題, プラズマ・核融合学会第 29 回年会, 2012 年 11 月 27 日~2012 年 11 月 30 日, 福岡
- (3) M. Sasao, Issues for the absolute neutron emission measurement on ITER, 22nd International Toki Conference, 2012 年 11 月 19 日~2012 年 11 月 22 日, Toki, Japan
- (4) S. Kitajima, Transition of Poloidal Viscosity by Electrode Biasing in the Large Helical Device, 24th IAEA Fusion Energy Conference, 2012 年 10 月 08 日~2012 年 10 月 13 日, San Diego, USA
- (5) 大坊昂, 岡本敦, 他, ダイバータ環境模擬のためのマルチカusp型イオン源における He⁺イオンビームの大電流化, 電気学会・プラズマ/パルスパワー合同研究会, 2012 年 8 月 10 日, 盛岡
- (6) A. Okamoto, Distribution of Footprint Marked by Energetic Alpha Particle Bombardment on the First Wall, 20th International Conference on Plasma Surface Interactions, May 21-25, 2012, Aachen, Germany
- (7) P. C. Stangeby, W. R. Wampler, D. L. Rudakov, J. N. Brooks, N. H. Brooks, A. G. McLean, D. Buchenauer, J. D. Elder, A. W. Leonard, A. Okamoto, J. G. Watkins, and C. P. C. Wong, An Experimental Comparison of Gross and Net Erosion of Mo in the DIII-D Divertor, 20th

International Conference on Plasma Surface Interactions, May 21-25, 2012, Aachen, Germany

- (8) 笹尾眞実子, タンデム加速のための個体表面を使った荷電変換器開発, プラズマ・核融合学会第 28 回年会/応用物理学会第 29 回プラズマプロセス研究会/日本物理学会(領域 2)2011 年秋季大会, 2011 年 11 月 22 日, 金沢
- (9) M. Sasao, An Alpha Particle Measurement System using Energetic Neutral Helium Beams in ITER, The 14th International Conference on Ion Sources, 16th, September, 2011, Giardini Naxos, Italy (招待講演)
- (10) T. Kobuchi, M. Sasao, Extraction of a strongly focusing He⁺ beam from three-stage concave electrodes for alpha particle measurement system in ITER, The 14th International Conference on Ion Sources, 13rd, September, 2011, Giardini Naxos, Italy
- (11) N. Tanaka, M. Sasao, Development of a He⁻ and He⁰ beam source for alpha particle measurement in a burning plasma, The 14th International Conference on Ion Sources, 13rd, September, 2011, Giardini Naxos, Italy

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北島 純男 (KITAJIMA SUMIO)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 30161475

(2) 研究分担者

笹尾 眞実子 (SASAO MAMIKO)
同志社大学・研究開発推進機構・嘱託研究員
研究者番号: 00144171

岡本 敦 (OKAMOTO ATSUSHI)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 50396793

(3) 連携研究者

和田 元 (WADA MOTOI)
同志社大学・工学部・教授
研究者番号: 30201263

新堀 雄一 (NIIBORI YUICHI)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 90180562