

令和 2 年 4 月 22 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05127

研究課題名(和文) ナノ周期構造体を用いた励起イオンビームの生成に関する基礎研究

研究課題名(英文) Fundamental Study on the Production of a Excited Ion Beam by Means of Nano-Periodic Structure

研究代表者

藤田 奈津子 (FUJITA, Natsuko)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター・研究職

研究者番号：50707396

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：コヒーレント共鳴励起(RCE)は、イオンが静的な周期ポテンシャル場を通過するときの共鳴的なイオンの内部励起を言うが、この原理を利用し実用的な励起イオンビームを生成することはこれまでなかった。この技術は特に加速器質量分析(AMS)の高度化において有用である。RCEを最大限に利用するには、入射イオンと個体電子のランダムな衝突を徹底的に排除することが必要であるため、周期構造体上空を飛行させることが望まれる。本研究では、その学術および技術基盤の整備として、AMS装置でのRCEの観測に成功するとともに、表面チャネリング試験装置を製作した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

RCEの効果を最大限に引出し励起イオンの割合を高めるために、イオンを周期構造体上空に飛行させるという生成法の確立において学術的な意義がある。この成果は、特にAMS分野においては、その超微量分析というパフォーマンスを支える同重体分別を格段に向上させる技術に密接に関係する。これはAMS装置の小型化に繋がるため、AMSを利用する環境学、考古学、地質学等の広い分野の進展に貢献する。

研究成果の概要(英文)：Scientific and technical bases to produce a particle beam consisting of excited ions have been successfully created. The strongest candidate method for production of the excited ion beam is resonant coherent excitation (RCE). The RCE is known as an internal excitation of a channeled ion passing through a static periodic field formed by lattice structure in the crystal, and occurs when the perturbation frequency felt by the ion corresponds to the relevant internal energy difference. In order to make full use of the effect of the RCE, avoidance of the random interaction with electrons in the solid is crucial; thus, it is desired that ions are made to glide above the surface with periodic structure. In this project, for a creation of scientific and technical bases, we have clearly observed an RCE in a AMS system, and have constructed a test machine for studying ion-glide above the surface.

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：チャネリング 加速器質量分析 コヒーレント共鳴励起 同重体分別

1. 研究開始当初の背景

コヒーレント共鳴励起(Coherent Resonance Excitation: RCE) ①は、イオンが速度 v で静的な周期ポテンシャル場(周期間隔 d)を通過させた際、非相対論的には、イオンが感受する擬似光子のエネルギー $h\nu$ が、励起エネルギー ΔE に等しくなる(すなわち $\Delta E = N h v / d$, ただし N は次数)とき、イオンの内部励起が発生する現象をいう。これまでRCEは、学術的な研究対象にとどまっておらず、実用的な励起イオンビームの生成方法として用いられた例は無かった。

2. 研究の目的

申請者は、AMSの革新的な同重体分別方法の開発に向け、「RCEによる実用的な励起イオンビームの生成」を提案した。本研究で対象とするイオンビームは、比較的広く普及している数MVの静電加速器から生み出される1 MeV/u程度のイオンビームである。このエネルギー領域のイオンにRCEを効率よく起こすには、周期構造を持つ固体表面の上空を飛行させることが適切である。イオンを結晶に通すと、固体電子とのランダムな衝突の影響で、RCEは弱くなる。そこで申請者は、10 nm程度の間隔のグレーティング状のナノ構造体(以下、ナノ・グレーティング)の上空(d 程度)にイオンを飛行させること(広義では表面チャネリング)により、固体電子の影響を排除できると考えた。実験の主要システムは、表面チャネリングの観測方法に類似した周期構造体の表面への斜入射を行う系である。本研究では、RCEによる実用的な励起イオンビーム生成を目指し、この学術および技術基盤を整備した。それは、(1) AMS装置でのRCEの観測と、(2) 表面チャネリング試験装置の整備である。

3. 研究の方法

(1) AMS装置でのRCEの観測

観測対象のRCEは、ホウ素の+4価($^{10}\text{B}^{4+}$; 水素様)の主量子数1から2への共鳴遷移とした。これは、RCEの明確な観測結果を得るという観点より、次の三つを重視したためである。

- ・ 1 MeV/u程度のイオンエネルギーでRCEの観測事例に含まれる核種であること。
- ・ タンデム加速器のみにより水素様イオンの生成が容易であること。
- ・ AMSの同重体分別に関係する核種が望ましいこと。ホウ素は ^{10}Be の同重体である。

観測は、イオンを単結晶薄膜に軸チャネリング条件で入射する系で行った。実験に使用した装置は、日本原子力研究開発機構(JAEA) 東濃地科学センターの加速器質量分析装置(JAEA-AMSTONO-5MV, 最大ターミナル電圧5 MV)を使用した。上記の共鳴遷移(励起エネルギー $E_{\text{ex}} = 255.2$ eV)に対応するイオンの入射エネルギー $E_{i,RCE}$ は、共鳴次数 $k = 2$, 周期場の間隔 d としてケイ素Si単結晶薄膜の100軸の格子定数 5.43 \AA とした場合、14.5 MeVである。実験では、入射エネルギー E_i を、 $E_{i,RCE}$ を中心に12 MeVから16 MeV(ターミナル電圧は3.0 MVから3.6 MV程度)まで変化させ、4価と5価の収量を測定した。

(2) 表面チャネリング試験装置の製作

本装置の製作は、JAEA内の競争資金をもとに製作中の超小型AMS装置の表面ストリッパーのシステムを一部共用するという位置づけとして、その整備を進めた。並行して、表面チャネリング時の重要な知見であるエネルギー損失についての数値的な検討を行った。具体的には、表面チャネリングでのイオンと表面の相互作用の程度を、数値シミュレーションSRIM(the Stopping and Range on Ions in Matter)-2013(以下、SRIM)より評価した。

4. 研究成果

(1) AMS装置でのRCEの観測

AMS装置においてRCEの観測に成功した。図1に、 $E_i = 14.5$ MeV(共鳴条件)と15.8 MeV(非共鳴条件)での V_D に対する収量の変化を示す。これより、共鳴条件での4価の存在比[4価/(4価+5価) = 0.33]は、その非共鳴条件での値(0.50)に比べ低いことが分かる(非共鳴条件の66%)。これは、予期された入射エネルギー付近でRCEを経て電離が進行し、4価の存在比が低下したことを示唆する。

イオンの入射エネルギー E_i を細かく変化させて4価の存在比を測定ところ、イオン速度にして共鳴速度の98%~99%において4価存在比は最低になり、非共鳴条件の4価比の55%に達

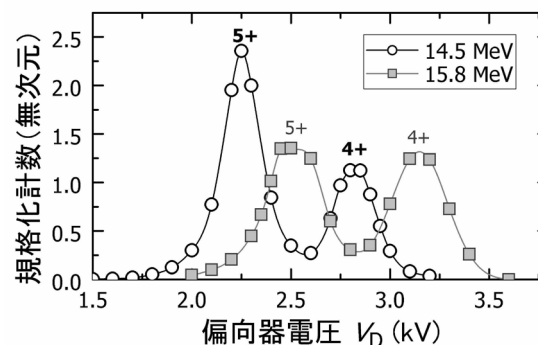


図1. 二つの入射エネルギーで得られた荷電分布。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

することがわかった。この実験を、非チャネリング条件で行った結果、 E_i の増加に対して4 価の存在比は単調に低下した。これより、本実験で得られた結果はRCEの観測を明確に示すと結論づけた。この成果は2020年度に論文の投稿を行う予定である。加えて、膜透過のチャネリングによる同重体分別の提案については査読付き論文②にまとめられた。

(2) 表面チャネリング試験装置の製作

本装置の概略を図2に示す。イオンの加速は、固体スパッタ負イオン源の総計40 kVのビーム引出し電圧のみである。イオン源から引き出されたイオンを軌道半径25 cmの入射電磁石で質量選別した後、斜入射による表面チャネリングシステムに入射する。表面チャネリング用の単結晶としては、表面チャネリングの研究で使用例のある塩化カリウムやテルル化スズを用いる予定である。入射角 $1^\circ \sim 4^\circ$ 程度に対する鏡面反射イオンの検出のため、分析電磁石を含む検出系ビームライン全体が表面チャネリングの位置を中心に 8° 程度まで回転できる構造になっている。イオンと表面の相互作用の強さは、通過イオンのエネルギー損失の大きさが指標となる。そこで、表面チャネリング時のエネルギー損失についての数値的に検討した。条件としては、40 keVの炭素イオンが、入射角 1.0° でケイ素の単結晶の(100)面に向かう系を想定した。イオン軌道に沿った電子密度の線積分を行い電子数についての厚さ(面密度) σ_e を得た。この結果、本想定では $3.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ となった。これに相当するSi膜の厚さをSRIMに取り入れ、電子的阻止能に基づいたエネルギー損失を求めた。その結果、イオンのエネルギー損失は0.7 keVとなり、エネルギー損失の割合は1.6%となった。この結果は、周期構造体による共鳴の強さを評価する上で重要なパラメータとなる。なお、本研究から得られた知見は、AMS装置の超小型化技術にかかわる特許に結びついたことを付記する。

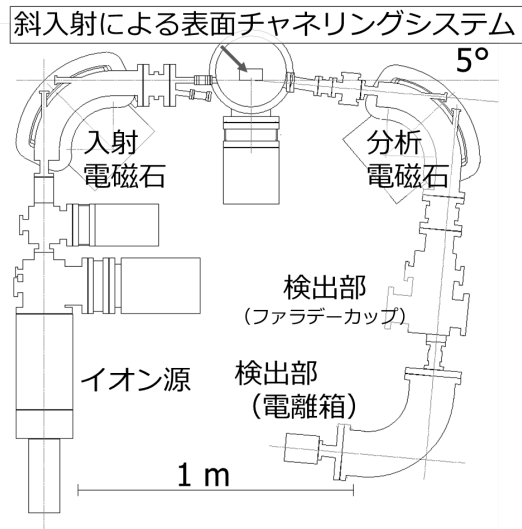


図2. 表面チャネリング試験装置の概略図. 本図では、入射角が 2.5° に合わせた設定になっている。

<引用文献>

- ① 中野裕司, 東俊行, 日本物理学会誌65 (2010) 516 ; 畠山温, しょうとつ 9 (6), (2012) 9.
- ② A. Matsubara, N. Fujita, K. Ishii, Nucl. Instrum. Methods, B 437 (2018) 81.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 1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 松原 章浩, 藤田 奈津子, 石井 邦和, 木村 健二	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 加速器質量分析装置の小型化に向けたイオンチャネリングの応用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 放射線	6. 最初と最後の頁 印刷中
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 無
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 Matsubara Akihiro, Fujita Natsuko, Ishii Kunikazu	4. 巻 437
2. 論文標題 Applications of ion channeling in accelerator mass spectrometry	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 81 ~ 86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.nimb.2018.09.032	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 岡部 宣章, 藤田 奈津子, 他	4. 巻 -
2. 論文標題 JAEA-AMS-TONOにおける129I/127I比測定 of 整備	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JAEA-Conf 2018-002	6. 最初と最後の頁 51-54
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 無
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 藤田 奈津子, 他	4. 巻 -
2. 論文標題 JAEA-AMS-TONO加速器施設の現状; 平成29年度	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第31回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集	6. 最初と最後の頁 108-111
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 無
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 松原 章浩, 藤田 奈津子, 他	4. 巻 -
2. 論文標題 イオンチャネリングを利用した同重体分別技術の開発	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JAEA-Conf 2018-002	6. 最初と最後の頁 68-71
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 無
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20件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 松原 章浩, 藤田 奈津子, 石井 邦和
2. 発表標題 イオンチャネリングのAMS技術への応用開拓
3. 学会等名 2018年秋季第79回応用物理学会学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 末岡 茂, 小松 哲也, 松四 雄騎, 代永 佑輔, 佐野 直美, 平尾 宣暁, 植木 忠正, 藤田 奈津子, 國分 陽子, 丹羽 正和
2. 発表標題 宇宙線生成核種法を用いた海成侵食段丘の離水年代の推定; 宮崎県日向市の事例(速報)
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (JpGU 2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松原 章浩, 藤田 奈津子, 三宅 正恭, 磯崎 信宏
2. 発表標題 イオンチャネリングを用いた同重体分別の技術開発の現状
3. 学会等名 第31回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤田 奈津子, 三宅 正恭, 渡邊 隆広, 國分 陽子, 松原 章浩, 加藤 元久, 岡部 宣章, 磯崎 信宏, 石坂 千佳, 虎沢 均, 西尾 智博, 西澤 章光, 島田 顕臣, 尾方 伸久
2. 発表標題 JAEA-AMS-TONO加速器施設の現状; 平成29年度
3. 学会等名 第31回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水谷 光太郎, 廣内 大助, 松多 信尚, 石山 達也, 杉戸 信彦, 安江 健一, 竹下 欣宏, 藤田 奈津子, 澤 祥, 道家 涼介, 丸山 陽央, 池田 一貴
2. 発表標題 糸魚川-静岡構造線断層帯神城断層南部における活動履歴調査
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (JpGU 2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松原 章浩, 藤田 奈津子, 木村 健二
2. 発表標題 超小型 AMS 装置開発に向けたチャネリング・ストリッパーの検討
3. 学会等名 第 21 回 AMS シンポジウム (JAMS-21)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Natsuko Fujita, Nobuaki Okabe, Akihiro Matsubara, Masayasu Miyake, Tomohiro Nishio, Akimitsu Nishizawa, Nobuhiro Isozaki, Takahiro Watanabe, Yoko Saito-Kokubu
2. 発表標題 Present status of AMS 129I/127I measurement at the JAEA-AMS-TONO
3. 学会等名 14th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry (AMS-14) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akihiro Matsubara, Natsuko Fujita, Kunikazu Ishii
2. 発表標題 Applications of ion channeling to the isobar separation of AMS
3. 学会等名 14th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry (AMS-14) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoko Saito-Kokubu, N. Fujita, M. Miyake, T. Watanabe, C. Ishizaka, N. Okabe, T. Ishimaru, A. Matsubara, A. Nishizawa, T. Nishio, M. Kato, H. Torazawa, N. Isozaki
2. 発表標題 Current status of JAEA-AMS-TONO in the 20th year
3. 学会等名 14th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry (AMS-14) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松原 章浩, 藤田 奈津子, 三宅 正恭, 磯崎 信宏
2. 発表標題 イオンチャネリングを利用した同重体分別の開発
3. 学会等名 第 20 回 AMS シンポジウム (JAMS-20)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡部宣章、藤田奈津子、松原章浩、三宅正恭、西尾智博、西澤章光、磯崎信宏、渡邊隆広、國分(齋藤)陽子
2. 発表標題 JAEA-AMS-TONOによる129I/127I測定の整備
3. 学会等名 第 20 回 AMS シンポジウム (JAMS-20)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 國分(齋藤)陽子・藤田奈津子・松原章浩・西澤章光・西尾智博・三宅正恭・石丸恒存・渡邊隆広・尾方伸久・島田顯臣・石坂千佳・岡部宣章・加藤元久・磯崎信宏・虎沢均
2. 発表標題 JAEA-AMS-TONOの20年のあゆみ
3. 学会等名 第 20 回 AMS シンポジウム (JAMS-20)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊隆広・國分(齋藤)陽子・藤田奈津子・石坂千佳・西尾智博・松原章浩・三宅正恭・加藤元久・磯崎信宏・虎沢均・西澤章光・石丸恒存
2. 発表標題 JAEA-AMS-TONOにおける自動グラフィット調製装置AGE3の現状
3. 学会等名 ・第 20 回 AMS シンポジウム (JAMS-20)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤田 奈津子, 三宅 正恭, 渡邊 隆広, 國分 陽子, 石丸 恒存, 松原 章浩, 西尾 智博, 加藤 元久, 磯崎 信宏, 虎沢均, 西澤 章光
2. 発表標題 JAEA-AMS-TONO タンデム加速器施設の現状; 平成 28 年度
3. 学会等名 第30回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松原 章浩, 藤田 奈津子, 三宅 正恭, 磯崎 信宏, 西澤 章光
2. 発表標題 イオンチャネリングを用いた同位体分別の基礎技術
3. 学会等名 第30回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤田 奈津子, 松原 章浩, 國分 陽子
2. 発表標題 チャネリングコヒーレント電離による加速器質量分析における同重体分別法の開発
3. 学会等名 平成29年度東濃地科学センター地層科学研究情報・意見交換会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松原 章浩, 藤田 奈津子, 三宅 正恭, 磯崎 信宏, 西澤 章光
2. 発表標題 軸チャネリング近傍での荷電分布の取得
3. 学会等名 原子衝突学会第42回年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松原 章浩, 藤田 奈津子, 石井 邦和
2. 発表標題 イオンチャネリングのドーナツ効果における荷電分布
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会(物性)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡部 宣章, 藤田 奈津子, 渡邊 隆広, 國分 陽子
2. 発表標題 AMSによる129I/127I比分析のためのヨウ素前処理法の整備とJAEA-AMS-TONOでの現状
3. 学会等名 第20回ヨウ素学会シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松原 章浩, 藤田 奈津子, 石井 邦和
2. 発表標題 イオンチャネリングを利用したAMSの同重体分別
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔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
研究分担者	石井 邦和 (Ishii Kunikazu) (00397837)	奈良女子大学・自然科学系・准教授 (14602)	
研究協力者	松原 章浩 (Matsubara Akihiro)		