

PRODUCTION OF RADIOACTIVE ION BEAMS BY THE JAEA-ISOL

Yoshinori Otokawa^{1,A)}, Akihiko Osa^{A)}, Makoto Matsuda^{A)}, Tetsuya Sato^{A)}, Shin-ichi Ichikawa^{A)}, Sun-chan Jeong^{B)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

2-4 Shirakata, Tokai, Ibaraki, 319-1195, Japan

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

For acceleration of medium-heavy neutron-rich radioactive ion beam with Tokai Radioactive Ion Accelerator Complex (TRIAC), two types of ion sources have been installed in an isotope separation on-line at the JAEA (JAEA-ISOL); a forced electron beam induced arc discharge (FEBIAD) version-B2 type integrated-target-ion source (operation temperature: 1550°C) and a surface ionization type one (operation temperature: 2200°C). With both ion sources, about 100 isotopes produced in proton-induced fission of ²³⁸U with separation efficiencies of 0.1%-30% have been ionized and mass-separated. In addition, radioactive ion beams of ¹²³In ($T_{1/2}=6$ s) and ¹⁴³Ba ($T_{1/2}=14$ s) were successfully accelerated with energy of 0.178MeV/u with TRIAC.

Recently, for mass separation of short-lived isotopes, we have developed new FEBIAD type integrated-target-ion source which has higher operation temperature. We achieved the result that the target was heated to be 2000°C at the total input power of 1200W (the target input power of 900W and the anode input power of 300W). Under this condition, ionization efficiency of stable Xe fed by the standard-leak was measured to be 15%. Also, short-lived isotopes of ¹²⁹In ($T_{1/2}=0.61$ s) and ¹³³Sn ($T_{1/2}=1.20$ s) were successfully mass-separated with the strength of 1×10^3 ion/s.

オンライン同位体分離器を用いた放射性核種ビームの生成・分離

1. はじめに

日本原子力研究開発機構 (JAEA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) は、2001年から放射性核種ビームの生成と加速に関する共同研究を進めている [1]。これまでに、ウランの陽子誘起核分裂で生成した ¹²³In (半減期 $T_{1/2}=6$ s) と ¹⁴³Ba ($T_{1/2}=14$ s) 並びに核子移行反応 [¹³C(⁷Li,⁸Li) 又は B(⁷Li,⁸Li) を利用] により生成した ⁸Li ($T_{1/2}=0.8$ s) の再加速に成功すると共に、物性物理、天体核物理、偏極ビーム実験などにビームを供給している。

本報告は、ウランの陽子誘起核分裂により生成する放射性核種のビーム利用を可能にするオンライン同位体分離用イオン源の現状と開発状況について述べる。

2. 施設の概要

図1に放射性核種ビーム加速実験施設の概略を示す。施設は、JAEA東海タンデム加速器とオンライン同位体分離器 (Isotope Separation On-Line: ISOL) 並びに短寿命核分離加速実験装置 (Tokai Radioactive Ion Accelerator Complex: TRIAC) から構成されている。JAEA東海タンデム加速器は、最高加速電圧18MVの静電加速器であり、水素 (H) からビスマス (Bi) までの約50元素200核種の荷電粒

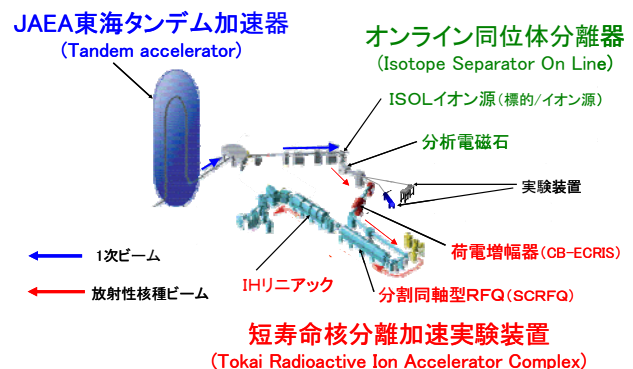


図1 施設の概略図

子を加速することができ、放射性核種生成のために必要な1次ビームの供給を行なう。ISOLは、標的付イオン源 (以下、ISOLイオン源) と質量分離用電磁石及びビーム光学系からなる装置であり、生成した放射性核種を、1価の正イオンにイオン化し、引出した後、質量毎に分離する [2]。TRIACは、荷電増幅器 (CB-ECRIS) と線形加速器群 (SCRFO linac, IH linac) から構成される装置であり、放射

¹ E-mail: otokawa.yoshinori@jaea.go.jp

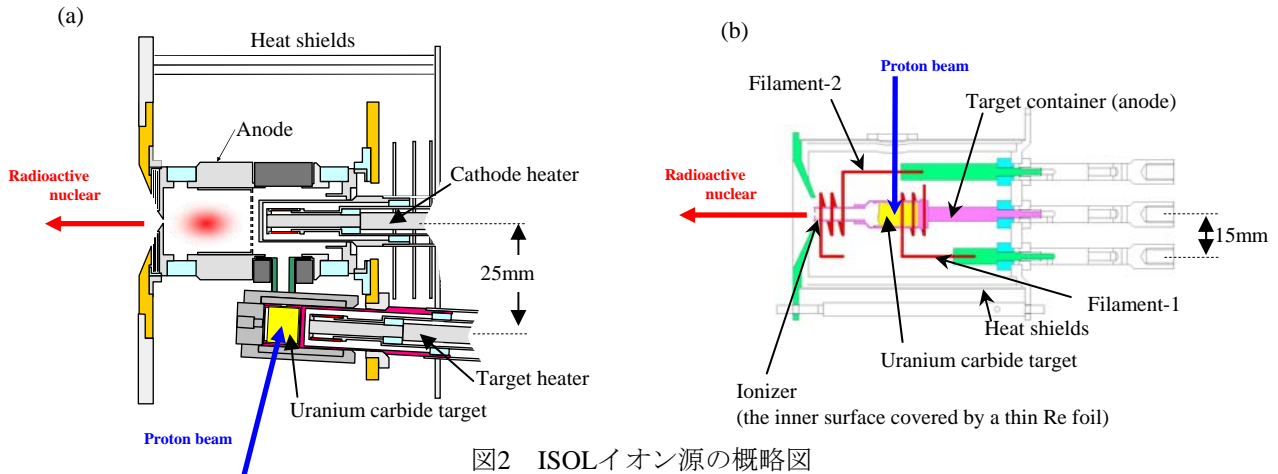


図2 ISOLイオン源の概略図
 (a) 低圧アーク放電型イオン源 (b) 表面電離型イオン源

性核種ビームを核子当たり最大1.5MeVまで加速することができる。

3. ウラン核分裂生成物のビーム利用

3.1 ウラン標的

ウラン標的は、11mm φのグラファイトファイバーを母材とするウラン量600mg/cm²の炭化ウラン(UC_x)を標的に使用している。これに32MeV、1 μAの陽子ビームを入射し放射性核種を生成している。

3.2 ISOLイオン源

ウランの核分裂では、様々な元素の放射性核種が同時に生成する。そのため、元素の化学的性質を考慮し、低圧アーク放電型(FEBIAD) version-B2(以下、FEBIAD-B2と表記)と表面電離型の2種類のISOLイオン源を開発した(図2参照)。FEBIADは、低圧アーク放電中に、被イオン化元素の蒸気を導入することでイオン化するものであり、クリプトン(Kr)、キセノン(Xe)などの希ガスや揮発性の高いスズ(Sn)、インジウム(In)、銀(Ag)、銅(Cu)など、比較的蒸気圧の高い元素のイオン化に使用している。一方、表面電離型は、熱せられた金属表面を通して被イオン化原子の電子が移動することでイオン化される現象を基本とし、アルカリ、アルカリ土類および希土類元素などイオン化ポテンシャルが低い元素のイオン化に適している。レニウム(Re)金属箔をイオン源内壁に巻付けイオン化面としている。

この2つのISOLイオン源は共に、標的をイオン化室の内部または近接して取付けることで、生成核種のイオン化室への移送損失を少なくすると共に、短時間での移送を可能にした。これにより、生成量に限りがある放射性核種を効率よく、迅速に引出すことができる。運転時の温度は、FEBIAD-B2イオン源でおよそ1550℃、表面電離型イオン源でおよそ2200℃である。

この2つのイオン源を使いウラン核分裂生成物の

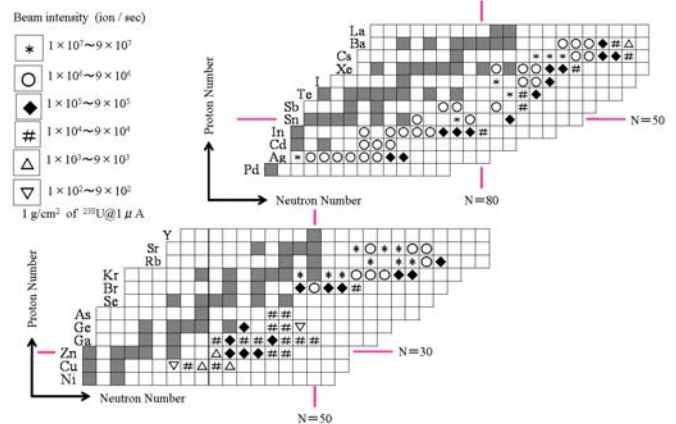


図3 引出しを確認した核種とその強度

内、19元素、約100種類について0.1-30%の効率で引き出しを確認し、最大毎秒10⁷個の放射性核種を供給している。図3に引き出しを確認した核種とその強度を示す。

4. FEBIADイオン源の高温化

4.1 開発目的

より半減期の短い核種のイオン化・分離を目的にFEBIADイオン源の高温化を行っている。短半減期核種を分離イオン化する場合、標的からの拡散・蒸発、イオン源内壁との吸脱着時間を短くし、核崩壊による損失を少なくすることが重要となる。これらの損失を少なくするには、イオン源を均一に高温化し、拡散・蒸発、吸脱着を活発にすることである。実際、FEBIAD-B2イオン源(運転温度1550℃)では、インジウム(In)の放出時間は7秒と長く、半減期1秒程度の核種の分離・イオン化が不可能である。そのため、図4に示すイオン源からの放出時間とその時の運転温度との関係から、運転温度を2000℃程度にすることで放出時間を2秒程度まで短くできると考え、高温型FEBIADイオン源の開発を行なった。

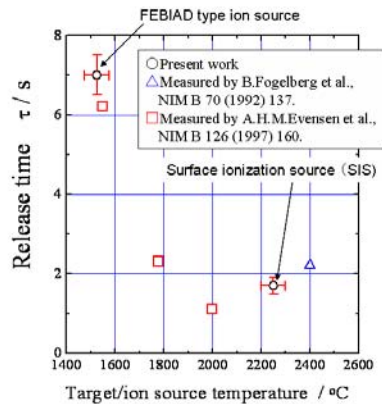


図4 イオン源からの放出時間と運転温度との関係

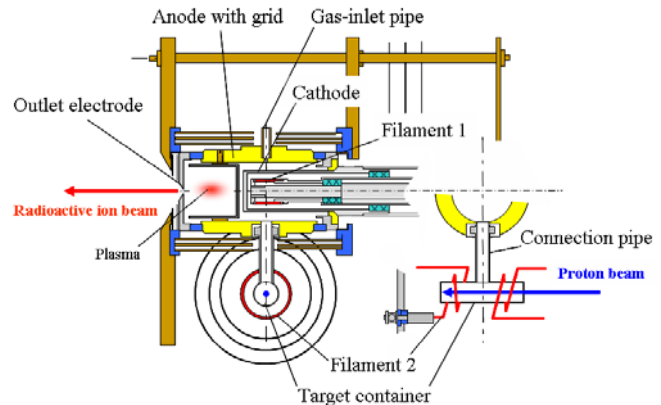


図5 高温型FEBIADイオン源の概略図

4.2 イオン源の設計・開発

図5に新しく開発したイオン源の概略図を示す。新しいイオン源は、ドイツ重イオン科学研究所(GSI)のR.Kirchnerにより開発されたFEBIAD version-E イオン源(以下、FEBIAD-Eイオン源とする)を基にして設計を行った[3]。このFEBIAD-Eイオン源は、2000–2300Kの動作温度を確保できるが、重イオン用に特化している為、箔状の金属標的のみ装着可能である。

そこで、このイオン源に、厚いウラン標的が装着できるように標的ホルダーを取付け、且つ2000°Cまで標的を加熱できるように改良した。標的ホルダーを一次ビーム軸方向に長い円柱形〔 ϕ 7mm、 $l=19$ mm (537mm³)〕にすることで、約2倍の厚さのウラン標的を装着可能となり、JAEA東海タンデム加速器から得られる細い1次ビームを有効に使えるようになった。一方、標的ホルダーの加熱は、ホルダーの周りにフィラメントを配置し、フィラメントとホルダー間に電圧を加え、フィラメントからの熱電子による電子衝撃で直接加熱できる構造とした。この加熱方法は、現在用いている表面電離型イオン源と同じ加熱方法であり、効率よく2000°Cまで加熱可能である。加えて、輻射による熱の逃げを防ぐために熱シールドを強化している。

4.3 オフライン試験

開発したイオン源の動作と標的温度の確認をオフラインで行なった。標的の温度測定は、1次ビーム入射口にガラス窓を取付け、外から標的を覗けるようにし、光高温計を用いて行なった。

試験の結果、投入電力1200W(標的側に900W、アノード側に300Wの電力を投入)で約2000°Cになることを確認すると共に、基準ガス(Xe)のイオン化効率15%を確認した(Xeビーム電流14nA、加速電圧20kV)。

4.4 オンライン試験

核分裂で生成する放射性核種のイオン化・分離を確認するため、30MeV、700nAの陽子ビームを637mg/cm²のウラン標的に照射し試験を行なった。

ゲルマニウム(Ge)半導体検出器による質量毎の γ 線測定から、分離核種の強度を求めた。その結果、半減期の短い核種として¹²⁹In(半減期0.610s)と¹³³Sn(半減期1.2s)をそれぞれ毎秒 1×10^3 個の強度で分離できることを確認した。

5. まとめ

陽子誘起ウラン核分裂反応により生成した放射性核種をビーム利用するために、低圧アーク放電型と表面電離型の2種類のISOLイオン源を開発した。この2つのイオン源を使いウラン核分裂生成物の内、19元素、約100種類について0.1-30%の効率で引き出しを確認し、最大で毎秒 10^7 個の放射性核種ビームを供給している。

現在、より半減期の短い放射性核種の分離・イオン化を目的に、温度2000°Cで運転可能なFEBIADイオン源の開発を行っている。イオン源の設計・製作は完了し、動作確認のためにオフライン及びオンラインで試験を行なった。試験の結果、標的温度2000°Cを確認すると共に、半減期の短い核種として¹²⁹In(半減期0.610s)と¹³³Sn(半減期1.2s)をそれぞれ毎秒 1×10^3 個の強度で分離できることを確認した。

参考文献

- [1] A.Osa, et al., Nucl. Instr. and Meth. B. 266 (2008) 4394.
- [2] Osa, for the TRIAC Collaboration, Nucl. Instr. and Meth. B. 261 (2007) 1048.
- [3] R. Kirchner, K.H. Burkard, W. Hüller, O. Klepper, Nucl. Instr. and Meth. 186 (1981) 295.