

## 小型加速器中性子源の大強度化へ向けた正負イオン同時加速の試み

### SIMULTANEOUS ACCELERATION OF POSITIVE AND NEGATIVE IONS FOR ENHANCING THE INTENSITY OF A COMPACT ACCELERATOR-DRIVEN NEUTRON SOURCE

時田武<sup>#, A)</sup>, 小林知洋<sup>B)</sup>, 羽倉尚人<sup>A)</sup>, 河原林順<sup>A)</sup>, 池田翔太<sup>C)</sup>

Takeshi Tokita<sup>#, A)</sup>, Tomohiro Kobayashi<sup>B)</sup>, Naoto Hagura<sup>A)</sup>, Jun Kawarabayashi<sup>A)</sup>, Shota Ikeda<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Tokyo City University

<sup>B)</sup> RIKEN

<sup>C)</sup> Institute of Science Tokyo

#### Abstract

This study aims to realize a compact and high-intensity accelerator-driven neutron source by simultaneously injecting and accelerating positive and negative ions in an RFQ accelerator, thereby mitigating the space charge effect. In accelerator-driven neutron sources, increasing beam intensity is a key challenge. An RFQ accelerator can accelerate both positive and negative ions in the same direction, and both of them can be used for neutron production. Furthermore, the simultaneous use of positive and negative ions is expected to reduce the space charge effect. In this work, we are developing an injection system that combines a Cs sputter-type negative ion source with an ECR ion source for positive ions, aiming for simultaneous injection. Simulations of simultaneous injection and acceleration have also been conducted. This presentation reports on the simulation results for simultaneous acceleration, the commissioning of the Cs sputter-type negative ion source, and the development of the beamline for simultaneous injection.

#### 1. はじめに

加速器中性子源は、中性子イメージングや医療応用など、幅広い分野で利用されている。これらの応用では治療室や実験室に収まるサイズの小型かつ、ミリアンペア級の陽子電流を有する高強度の加速器中性子源が求められる。RFQ(Radio Frequency Quadrupole)加速器を用いた正負イオンの同時入射・加速では、小型加速器中性子源の大強度化が見込める。

RFQ 加速器は正負イオン両方を同方向へ同時加速が可能である[1]。また、正負イオンを同時に加速することで、通常では利用されない RF 位相を活用でき、RFQ 加速器のより効率的な利用が期待できる。さらに、入射時の空間電荷効果の軽減も見込まれる。高強度の陽子ビームを入射する際には、空間電荷効果によるビームの発散が課題となるが、正負イオンを同時に入射することでこの効果を緩和でき、高強度ビームの入射に有利に働く可能性がある。

理化学研究所では、RANS-II (RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source II)を用いて、正負イオン同時加速の実験的検証を計画している。Figure 1 に RANS-II の外観を示す。本研究はその初期段階にあたり、正イオン源として ECR(Electron Cyclotron Resonance)イオン源を、負イオン源として SNICS(Source of Negative Ions by Cesium Sputtering)を組み合わせた入射系の準備を進めている。SNICS は他施設から移設したものを再整備し、使用する予定である。また、RANS-II のパラメータを用いた正負同時入射・加速シミュレーションも実施した。

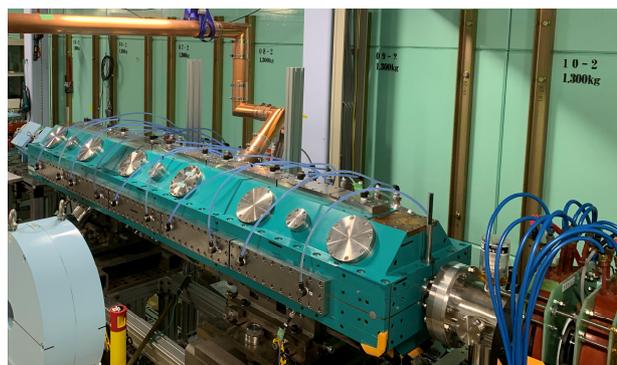


Figure 1: RANS-II.

#### 2. 正負イオン同時加速

正負イオン同時加速では、RFQ 加速器の正イオンを加速する RF 位相と負イオンを加速する RF 位相の両方を利用することで、同方向に両イオンを加速する。これにより、通常は利用されない RF 位相を活用でき、加速器の効率的な利用が期待できる。また、入射時の空間電荷効果の緩和にも寄与すると考えられる。

GPT(General Particle Tracer)を用いた RANS-II での同時加速シミュレーション結果を Fig. 2, Fig. 3 に示す。Figure 2 は正負両イオンの、ソレノイドへの入射前から RFQ 加速器での加速後までの x-z 平面における分布を示している。Figure 3 は、位置 z=410 mm, 1000 mm, 1400 mm, 3550 mm における粒子のエネルギーを示している。縦軸 E が粒子のエネルギー、横軸 t が位置 z を粒子が通過した時間を示している。

シミュレーションの各パラメータは、入射正イオン 50 mA、入射負イオン 50 mA、規格化 RMS エミッタンス

<sup>#</sup> g2481822@tcu.ac.jp

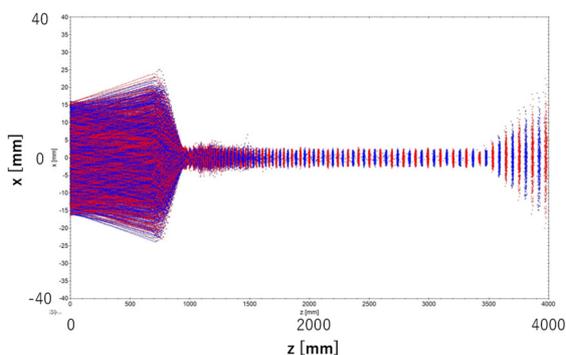


Figure 2: Overall simulation results for simultaneous acceleration.

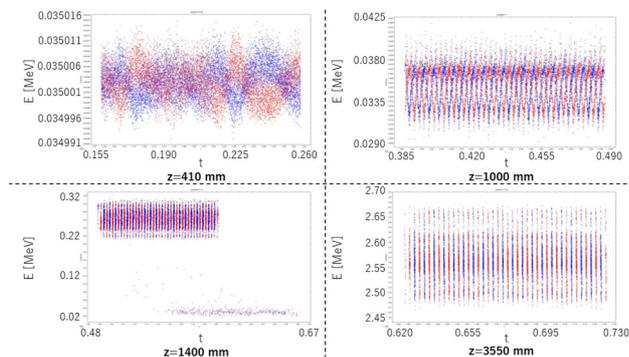


Figure 3: Beam energy at each position.

0.5 $\pi$  mm-mrad、入射エネルギー35 keV、ソレノイド磁場0.42 Tである。また、ソレノイド中心位置  $z=535$  mm、RFQ入射側電極先端位置  $z=804$  mmである。

Figure 2, Fig. 3より、粒子をロストせずに正負バンチが形成されていることが確認できる。これにより、RANS-IIを用いた正負イオンの同時加速が可能であることが示唆された。また、ソレノイドによるビーム集束後も発散せずにRFQへ入射されており、空間電荷効果の緩和による入射効率の向上が期待される。

### 3. 同時加速実験準備

#### 3.1 SNICSの立ち上げ

RANS-IIを用いた正負イオン同時加速実験に向け、他施設より移設したSNICSの再整備を行っている。まずSNICS単体での稼働テストを実施するため、SNICSを分解して内部洗浄を行い、電源系統および冷却系統を整備した。さらに、稼働テスト用ビームラインを構築するとともに、RANS-IIへの接続を考慮し、ジャッキによる高さ調整が可能な構成とした。Figure 4にSNICSの外観を示す。再整備完了後、単体稼働テストを経て同時入射・加速実験へ移行する予定である。

#### 3.2 同時加速体系の構想

RANS-IIを用いた正負イオン同時加速体系の構想をFig. 5に示す。正イオン源にはECRイオン源を、負イオン源にはSNICSを使用する。各イオン源で生成された陽子と負水素は、それぞれ $\pm 30^\circ$ の方向からマグネットに入射し、同一方向に統一される。その後、ソレノイドによりビームを集束し、RFQへ入射する。

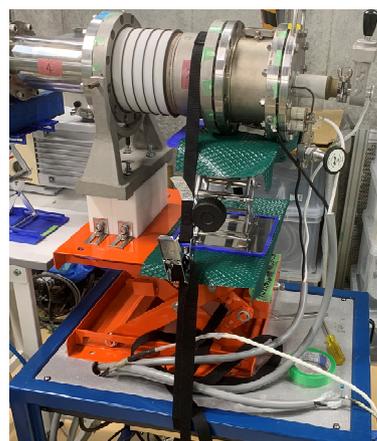


Figure 4: SNICS.

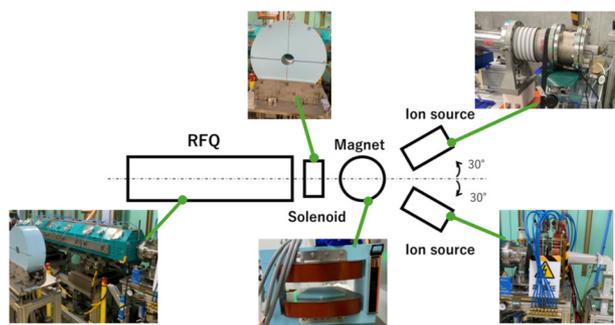


Figure 5: Configuration of simultaneous acceleration.

本実験では、まずマイクロアンペア級の正負イオン電流を入射し、RANS-IIでの同時加速の実現性を検証する。実現可能であれば、より高性能な負イオン源を用い、ミリアンペア級電流での同時加速を目指す。

### 4. まとめ

GPTによるRANS-IIを用いたシミュレーションにより、正負イオン同時加速の検討を行った。また、同時加速実験に向けたSNICSの立ち上げや、同時加速体系の構想について報告した。

シミュレーションでは、粒子をロストせずに正負バンチが形成されていることが確認でき、RANS-IIを用いた正負イオンの同時加速が可能であることが示唆された。また、正負イオン同時入射による空間電荷効果の緩和も期待できる結果となった。

今後はSNICSの立ち上げと同時加速体系の構築を並行して進め、SNICS単体稼働テストを経て同時入射・加速実験へ移行する予定である。

### 謝辞

本研究は、科研費(課題番号:23K26593 代表:小林知洋)の研究の一環として実施されました。

### 参考文献

[1] Y. Oguri, "Numerical simulation of simultaneous acceleration of positive and negative ions in an RFQ", Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A373 (1996) 175-178.