

京大炉 FFAG 加速器現状報告 STATUS REPORT ON KURRI FFAG

石 禎浩 ^{*A)}, 上杉智教 ^{A)}, 栗山靖敏 ^{A)}, 不破康裕 ^{A)}, 沖田英史 ^{B)}, 森 義治 ^{A)}
Yoshihiro Ishi ^{*A)}, Tom Uesugi ^{A)}, Yasutoshi Kuriyama ^{A)}, Yasuhiro Fuwa ^{A)}, Hidefumi Okita ^{B)}, Yoshiharu Mori ^{A)}

^{A)}Kyoto University Research Reactor Institute, Kumataro, Osaka, Japan

^{B)}Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan

Abstract

At Kyoto University Research Reactor Institute, using the 150 / 100 MeV proton beams from FFAG accelerator, various kinds of experiment have been carried out: injection to a subcritical core for the studies of the accelerator driven system (ADS), irradiation to the material used for the ADS reactor, irradiation to the chamber filled with air to measure the chemical species including radiative and non-radiative aerosols, basic studies for BNCT irradiating living cells of rats. We are also planning to upgrade the beam current of micro amperes aiming to the proton driver of pulsed neutron source. In this report, the study of beam experiments and simulations for the purpose of reducing the beam loss in the main ring will be described as well as the current status of the facility.

1. はじめに

京都大学原子炉実験所における FFAG 加速器の研究開発は、文部科学省のエネルギー対策特別会計委託事業の課題「FFAG 加速器を用いた加速器駆動未臨界炉に関する技術開発」として 2002 年度より開始された。加速器複合系は当初、イオンベータ (FFAG ベータトロン)・ブースター (FFAG シンクロトロン)・主リング (FFAG シンクロトロン) の 3 つのリングから構成されていた [1]。2009 - 2010 年の期間は、このシステムを用いて京都大学臨界集合体 (以下 KUCA) ヘビームを供給し、世界初の加速器駆動未臨界システム実験 (以下 ADS 実験) を実施した [2]。その後ビーム強度増強の目的で、入射器システムをイオンベータ+ブースターから 11 MeV H⁻ リナックへ変更し [3]、150 MeV - 10 nA のビームを生成することに成功した。

その後、加速器駆動未臨界システム (ADS) 実験をはじめとし、ADS 未臨界炉用材料挙動解明のための陽子ビーム照射実験、放射性・非放射性のエアロゾルを含む化学種定量のための空気チェンバーへの照射実験、BNCT の基礎研究のための生体ラットへのビーム照射実験等が実施されてきたが [4]、2015 年 11 月に入射器 LINAC の初段の RFQ に重故障が発生したため、2017 年 6 月までは、ビーム運転を休止していた。2017 年 7 月現在、LINAC 最終段の DTL2 からビーム取出しが確認され、FFAG 主リングでのビーム運転再開に向け調整中である。

本稿では RFQ 故障から復旧までの経緯およびビーム復旧状況、ならびにビーム増強に向けたビームスタディーとシミュレーション等について報告する。

2. 入射器の重故障と復旧

2015 年 11 月に発生した RFQ の重故障については文献 [5] に報告されているが、ここでは、故障に関する簡単な経緯とその後の復旧状況について報告する。入射器として使用している RFQ は表面を銅メッキしたアルミニウム製である。図 1 の左側の模式図に示すように、

冷却液はペインの肉の厚い部分に設けられた流路を流れている。重故障とは流路の表面が冷却液によって腐食し、冷却液が真空側に漏洩したものである (同図右側写真)。冷却液は純水とエチレングリコールを 1 対 1 に混合したもので、RFQ を冷却する際はアルミニウムの流路を通り、DTL1, DTL2 を冷却する際は銅の流路を通る。このように、異種金属でつくられた流路を同一の冷却液が流れる事で、化学反応による腐食が進んだものと推測される。故障した RFQ は代替機と交換した。また、再発防止策として冷却システム及びその運用に関し、下記の変更を実施した。

- アルミニウム系統 (RFQ) と銅系統 (DTL1,2) の流路を分離し、独立に熱交換器を設ける。
- エチレングリコールのグレードを高純度 (99.9%) からラジエーターグレード¹⁾のものに変更する。
- 冷却液の流量を必要最低限の量に絞る。
- RF 運転後は冷却液の循環を止める。

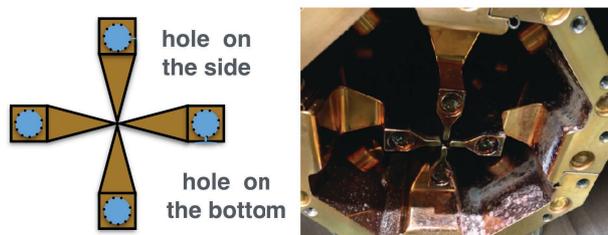


Figure 1: A serious trouble in RFQ happened in November 2015. The coolant, which is an 1:1 mixture of deionized water and ethylene glycol leaked into the vacuum thru the holes produced by erosion.

*ishi@rri.kyoto-u.ac.jp

¹⁾DOW 社 SR-1。国内の同機種を配備する他施設において、無故障で長期間の稼働実績あり。

これらの変更工事と復旧作業により、2017年7月よりビーム運転が可能となり、LINAC 出口でビームが確認された。図2の左側の写真はビーム測定のために暫定的に設置されたビームライン、同図左側の写真はこのビームラインに設置された蛍光板モニターにて検出されたビームプロファイルである。2017年7月現在、主リングへの入射のための調整を実施している。

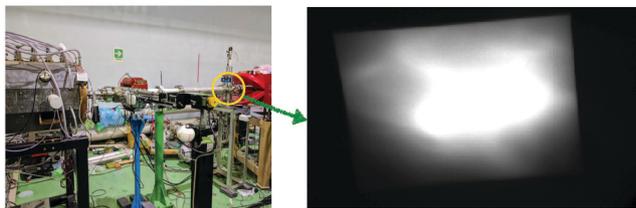


Figure 2: The replacement of the RFQ has been done. The beam from the LINAC composed of the RFQ, DTL1 and DTL2 has been successfully detected at the exit of the DTL2 by using a fluorescent screen monitor.

3. ビームロスに関するシミュレーションスタディ

KURRI FFAG 主リングでは、加速の途中でビームロスが発生している。ビームロスは大きく分けて、加速開始から 1 ms の間に起こるものと、それ以降に発生するものがある。以下にそれぞれについて述べる。

3.1 最初の 1 ms

ビームロス原因特定のため、以下の効果を入れたシミュレーションスタディーを行った [6]。

- 荷電変換フォイルによるエネルギーロスと散乱。
- 入射ビームのベータ関数および分散関数の主リングとのミスマッチ。
- 入射ビームの運動量分散。

荷電変換フォイルによるエネルギーロスと散乱角のシミュレーションは GEANT4 を用いて行った (図 3(a),(b))。これらの値を用いてフォイルによるエネルギーロスと散乱、さらに加速のプロセスを考慮したビームトラッキングを行った。横方向の運動に関するシミュレーションには、TOSCA による 3次元磁場マップを用いた。図 3の (c) から (f) にシミュレーション結果を示す。これらのプロットから分かるように、ビームロスにもっとも寄与するパラメータは入射ビームの運動量のずれと広がりである。今後のビーム運転では、LINAC からのビームの運動量の中心値と分散を常時測定できるようなモニターを整備する予定である。

3.2 1 ms 以降

加速開始から 1 ms 以降では、図 4 (左) に示すように、いくつかの速いビームロスがみられる。これの原因はビーム電流の測定とチューン測定の結果 (同図中央) から、ベータトロンチューンの共鳴によるものと

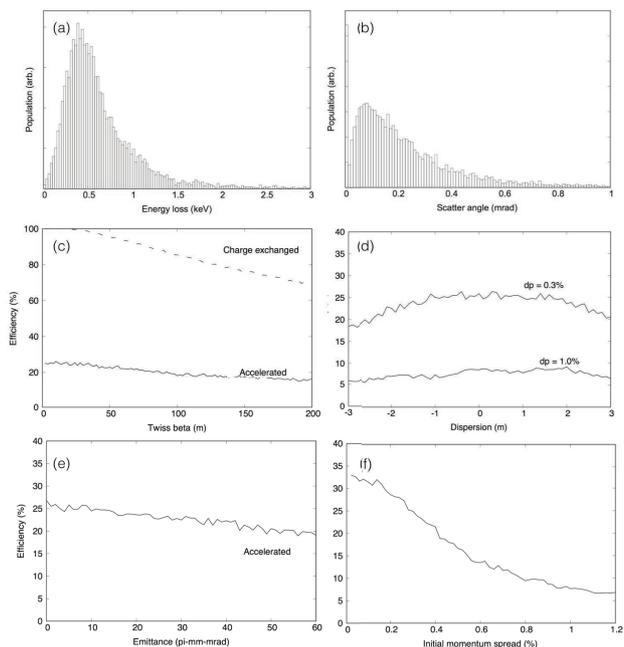


Figure 3: Beam simulation studies have been done to understand the mechanism of beam losses within the first 1 ms after the beam injection. The energy loss and the scattering angle of the particles have been calculated using GEANT4. Distributions of the energy loss and the scattering angle are shown in (a) and (b), respectively. Using these quantities, beam simulations have been performed. In the plot (c), the solid and dashed lines respectively show the acceleration and charge exchange efficiency as a function of the value of horizontal beta function which should be 2.9 m at the foil. In the plot (d), the upper and lower lines show the survival ratio at 1 ms after the injection of the beam with the momentum spread of 0.3% and 0.1%, respectively as a function of the value of the dispersion function which should be 0.6 m at the foil. The plot (e) and (f) are show the survival ratio at 1 ms after the injection of the beam as functions of the beam horizontal beam emittance and the momentum spread $\Delta p/p$, respectively. Plots (c) - (f) show that the most sensitive parameters to the beam losses are the central value and the spread of the beam momentum.

推測できる。すなわち、加速の途中でチューンが動き回り、共鳴線を跨ぐ際にビームロスが発生している可能性が高い。ビームロス低減のために加速時のチューンの変動幅を小さくすることが必要である。これについては、主電磁石の磁極に補正コイルおよび補正磁極を追加することで、同図右に示す通り、3次以下の共鳴を避けて運転可能であることが、TOSCA による 3次元磁場計算より明らかになった [7]。

4. ERIT リングの改造

ERIT (Energy/Emittance Recovery Internal Target の略) リングは FFAG リングにおける内部ターゲットで

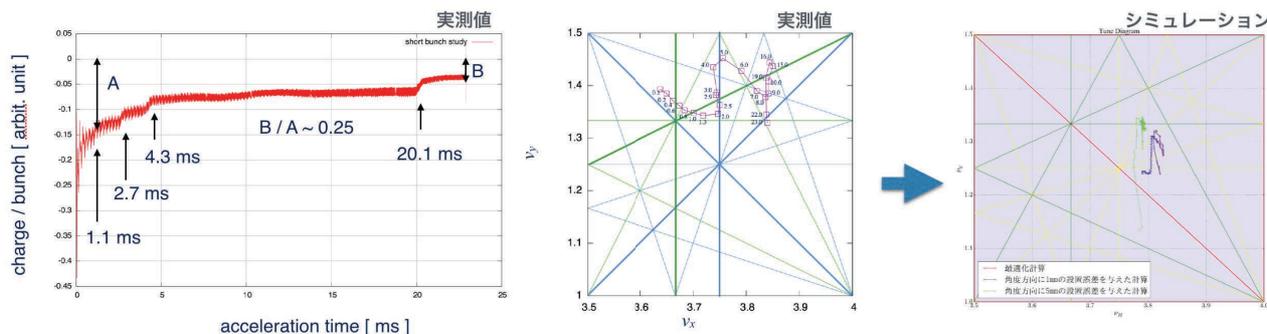


Figure 4: The left plot shows the circulating beam current measured by using the bunch monitor as a function of the acceleration time. From 1 ms to the timing of the beam extraction, there are still fast beam losses at the time 2.7 ms, 4.3 ms and 20.1 ms. The middle plot shows the tune variation during the acceleration. Squares are measured tune and the numbers beside them are the timing from the beginning of the acceleration. These plots imply that the betatron resonance crossings cause beam losses. According to the simulation studies aiming to reduce the tune variation, it is possible to squeeze the footprint of the tune variation and avoid crossing the resonance lines of the order less than 4th by adding the correction coils and correction poles.

の中性子発生を目的とした ERIT 機構原理実証機として設計・製作された [8]。現在、拡張化された ERIT 機構実証のため、図 5 に示すように、磁極改造工事を実施した。この改造により、固定周波数による加速の実証実験を実施する計画である。

- ビームロス低減に向けたシミュレーションスタディを継続中である。
- ERIT リング機能拡張に向けた改造作業を実施中である [9]。



Figure 5: The ERIT ring is now under modification. Additional poles have been installed in order to modify the k value suitable to demonstrate the serpentine accelerations and the extended ERIT mechanism.

5. まとめ

以下に本稿のまとめを示す。

- 2015 年 11 月に入射器 RFQ で重故障が発生したため、2017 年 6 月までビーム運転は休止状態であった。
- 代替 RFQ への交換が行われ、2017 年 7 月ビーム運転を再開した。

参考文献

- [1] T. Uesugi *et al.*, “FFAGS FOR THE ERIT AND ADS PROJECTS AT KURRI”, Proceedings of EPAC08, Geneva, 2008.
- [2] C.H. Pyeon *et al.*, “First Injection of Spallation Neutrons Generated by High-Energy Protons into the Kyoto University Critical Assembly”, *J. Nucl. Sci. Technol.* Vol. 46 (2009), No. 12 p.1091.
- [3] K. Okabe *et al.*, “DEVELOPMENT OF H- INJECTION OF PROTON-FFAG AT KURRI”, Proceedings of IPAC10, Kyoto, 2010.
- [4] Y. Ishi *et al.*, “Status Report on FFAG Accelerator Complex at KURRI”, Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accel. Soc. of Japan, Fukui, August 2015.
- [5] Y. Kuriyama *et al.*, “Status Report on FFAG Accelerator Complex at KURRI”, Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accel. Soc. of Japan, Makuhari, August 2016.
- [6] T. Uesugi *et al.*, “Emittance Growth at Charge-exchanging Multi-turn Injection in KURRI FFAG”, Proceedings of IPAC17, Copenhagen, 2017.
- [7] Y. Horita, “京都大学 150 MeV FFAG 加速器の チューン補正に関する研究”, Master’s thesis, Graduate School of Engineering, Kyoto University, 2017.
- [8] Y. Mori, *Nucl. Instr. Meth., A*, vol. 536(2006), p. 591.
- [9] Y. Mori *et al.*, *In these proceedings.*