

京都大学原子炉実験所 F F A G 加速器施設現状報告 STATUS REPORT ON FFAG ACCELERATOR COMPLEX AT KURRI

栗山靖敏 *^{A)}, 石禎浩 ^{A)}, 上杉智教 ^{A)}, 阪本雅昭 ^{A)},
武藤正文 ^{A)}, 森義治 ^{A)}, 堀田有哉 ^{B)}

Yasutoshi Kuriyama*^{A)}, Yoshihiro Ishi^{A)}, Tomonori Uesugi^{A)}, Masaaki Sakamoto^{A)},
Masayuki Muto^{A)}, Yoshiharu Mori^{A)}, Yuya Horita^{B)}

^{A)}Kyoto University Research Reactor Institute, Kumatori (KURRI), 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 150 MeV FFAG main ring, ADS experiment and proton irradiation experiment have been carried out. As an injector for the main ring, 11 MeV H⁻ linac has been used. In October 2015, the leakage of the coolant had been observed at the inside of the RFQ. After this accident, the supply of the beam doesn't recover yet. In this report, the restoration work and future plan are presented.

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。

開発初期において、加速器複合系はイオンペータ (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 年 3 月には、このシステムを用いて京都大学臨界集合体 (以下 KUCA) へビームを供給し、世界初の加速器駆動未臨界システム実験 (以下 ADS 実験) [2] を実施した。

2012 年にビーム強度増強のため、主リングの入射器を 11 MeV H⁻ リナックへ変更した [3]。変更後には、ADS 実験のための KUCA へ 100 MeV - 1 nA の陽子ビームの供給及び、金属材料等へ 150 MeV - 1 nA または 100 MeV - 10 nA の陽子ビームの供給に成功している。

2015 年 10 月に発生した RFQ のトラブルによって、2016 年 8 月現在、ユーザーへのビーム供給は休止中である。本稿では本施設の概要及び RFQ の故障状況、ならびに今後の計画について報告する。

2. 加速器複合系の概要

2.1 加速器複合系の構成

2016 年現在、京都大学原子炉実験所の FFAG 加速器複合系は、150 MeV FFAG 主リングと主リングの入射器である 11 MeV 線形加速器及び 30 kV イオン源から構成されている。図 1 に、加速器複合系の概略図を示す。

30 kV イオン源及び線形加速器では負水素イオンを加速対象粒子とし、線形加速器で 11 MeV まで加速された負水素イオンをカーボン薄膜を利用した荷電変換入射方式を用いて、主リングに入射している。

主リングでは、ビーム利用ユーザーの要望に合わせ、100 MeV または 150 MeV でのビーム取り出しを行っている。

主リングでの加速に有する時間は約 20 ~ 25 ms、現在の営業運転パラメーターにおけるビーム繰り返しは、20 Hz である [4]。

表 1 に、150 MeV FFAG 主リングのマシンパラメーターを記載する。

Table 1: 150 MeV FFAG Main Ring Parameters

Particle	Proton
Injection Energy	11 MeV
Extraction Energy	100 or 150 MeV
Ave. Orbit Radius	4.54 - 5.12 m
Revolution Freq.	1.6 - 4.4 MHz
Repetition	20 Hz
Ave. Beam Current	10 nA (1nA @ 150 MeV extraction)

2.2 制御系

加速器複合系では、開発初期から一貫して加速器の制御に PLC ベースのシステムを採用している [5]。

加速器のオペレータは、ネットワーク経由で PLC と通信を行い、電磁石電源等の制御対象機器は、PLC からの指令を受けて操作される。図 2 に、制御系の概念図を示す。

開発初期においては、制御ソフトとして National Instruments 社の LabVIEW [6] と Windows PC を組み合わせて使用していたが、コスト、安定性、柔軟性等を考慮して、2009 年より EPICS [7] と Linux PC を組み合わせた制御体系への移行を進めている [8]。

制御系移行作業は、主に夏季のマシン停止期間を利用して実施され、2016 年 8 月の時点で、線形加速器の制御及び、ヒューマンプロテクションのための制御以外については、EPICS での置き換えが完了している。

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

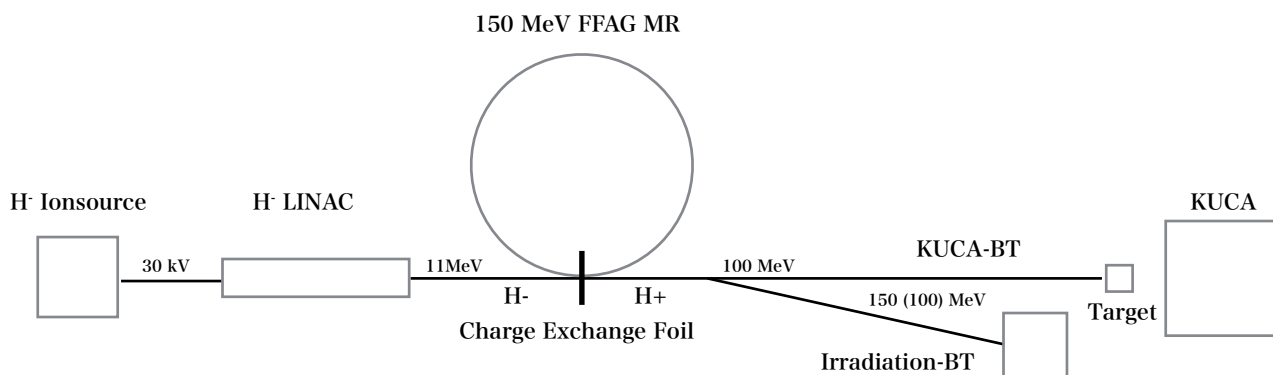


Figure 1: Layout of the KURRI FFAG complex.

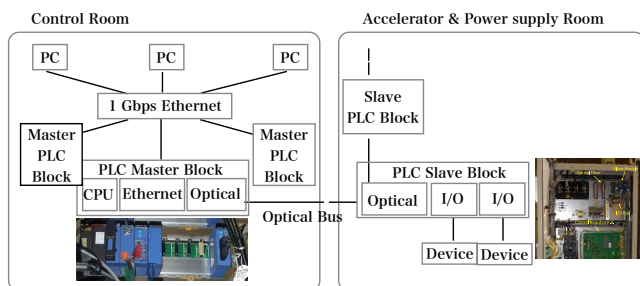


Figure 2: Schematic diagram of the control system.

また、本年度末で EPICS で使用している Linux OS のサポート期間が終了することから、本年度は OS の移行に伴う制御系の更新作業を実施している。

3. ビーム利用

主リングから取り出されたビームは、ADS 実験のために使用されるが、その他にも、図 1 に示した照射ビームラインを利用して、主リングから取り出した 100 MeV または 150 MeV の陽子ビームを利用した様々な実験が行なわれている [9]。

以下に主なビームユーザーの利用例を列挙する。

- 金属材料の放射線損傷メカニズムを解明するための照射実験 [10]。
- 中性子を利用した癌治療である BNCT で使用するための薬剤開発を目的としたラットへの照射実験。
- 中～高エネルギーに対応したはじき出しモデル構築のための金属材料への照射実験 [11]。

4. 線形加速器 (RFQ) のトラブル

4.1 症状

主リングの入射器である 11 MeV 線形加速器は、RFQ、DTL1、DTL2 の 3 つの部分から構成されている。

2015 年 10 月に実施された計画停電からの復旧作業の際に、RFQ のトラブルが発生した。RFQ の真空が悪

化する現象が見られたため、真空装置 (クライオポンプ) を調査したところ、RFQ 本体を冷却するための冷媒として使用していたエチレングリコールが RFQ 内部で漏れていることが判明した。

そのため、RFQ 内部をファイバーカメラを利用して調査したところ、ベインからのエチレングリコール漏れが観測された。図 3 に RFQ 内部、ベインの漏洩箇所を撮影した写真を示す。



Figure 3: Photograph of the RFQ vane.

また、図 4 に RFQ の DTL1 との境界面の箇所を撮影した写真を示す。漏れたエチレングリコールが結晶化している様子が分かる。

問題の RFQ は、米国 Accsys 社製のもので、2007 年に納品されている。当初は内部標的型中性子発生リング ERIT の入射器として使用されており、2012 年より FFAG 主リングの入射器として使用を開始している。納品から今年のトラブル発生時までの約 8 年間使用されていた。

RFQ を冷やすためのエチレングリコールは DTL1 と共用するチャラーを用いて循環されており、RFQ と DTL1 では、冷却用配管の材質が異なっていることが分かっている。RFQ 内部ではエチレングリコールはアルミの配管を経由し、DTL1 内部では鉄と銅の配管を経由している。これらの異種の金属が使われていることで、アルミ製配管の腐食が進んだことが、今回のエチレングリコール漏洩の原因と考えている。

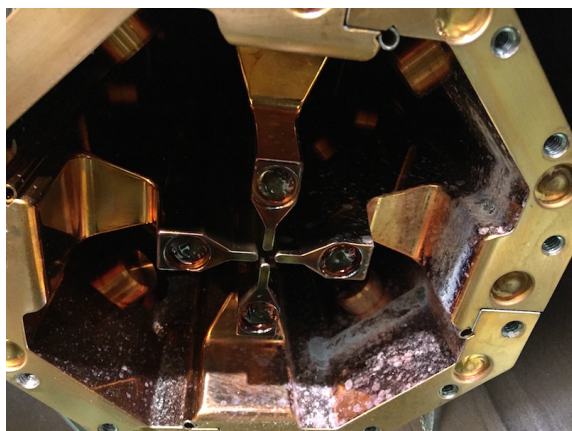


Figure 4: Photograph of the RFQ boundary.

4.2 対処

真空シーラントであるバックシールによる補修を試みた。漏洩箇所は複数あり、配管全体がダメージしていることが予想されたため、冷却用配管全体をバックシールで満たし、RFQを真空引きすることでバックシールの浸透を期待する方法を取った。

十分に時間をおいて、真空引きを行ったところ、真空度が改善されたが、冷却用配管に水を循環させたところ、再度真空が悪化する症状が観測された。バックシールによって一時的に塞がれた漏洩箇所が再度開いたものと推測している。

バックシールによる補修は難しいという結論に至ったため、早期のビーム供給開始のために、代替機の準備を進めることを決定した。

代替RFQにおいて腐食という事態を避ける為、RFQとDTL1のチラーを個別に用意すること、また、冷却剤として使用するエチレングリコールは防錆剤入りのものにする事とする。

5. 今後の計画

2017年1月に予定されているADS実験のためのビーム供給を目標として、クーラント（エチレングリコール）が漏洩し使用不可となったRFQの代替機の準備作業を行う。

また、ビーム増強を目標として、現在主リングに1台インストールされている加速空洞を増設し、計2台の加速空洞とするための研究開発を引き続き行う。

ビームモニター関係では、ビーム安定性向上のために、バンチ毎のビームプロファイルを観測できるモニターのビームラインへのインストールを行うことを計画している。

制御関係では、OS更新作業と並行して、マシンパラメーターを記録するアーカイバーの立ち上げ、インターロックシステムの改修などを実施し、ビーム品質の向上を追求していく。

6. まとめ

ADS実験のために建設された京都原子炉実験所のFFAG加速器複合系は、現在では原子力分野のみならず、

工学や医療分野にも範囲を広げて利用がなされている。

2016年8月現在、RFQの故障のために、ユーザーへのビーム供給が停止しているが、2017年1月に予定されているADS実験のためのビーム供給を目指して、RFQ復旧作業が行なわれている。

また、ビーム増強を目標として、150MeV FFAG主リングに追加の加速空洞を設置することを計画しており、ビーム安定性の向上を目標として、ビーム計測系、制御系の更新作業を計画している。

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 pp. 1091-1093.
- [3] K. Okabe *et al.*, “Development of H⁻ Injection of Proton FFAG at KURRI”, Proceedings of IPAC10, Kyoto, 2010.
- [4] T. Uesugi *et al.*, “RF capture of KURRI FFAG Main Ring FFAG at KURRI”, FFAG Workshop, Oxford, 2011. https://www.cockcroft.ac.uk/events/ffag11/FFAG_talks/15/am/2.Uesugi.pdf
- [5] M. Tanigaki *et al.*, “Control system for the FFAG complex at KURRI”, *NIM. A* Vol. 612 (2010), pp. 354-359.
- [6] <http://www.ni.com/labview/ja/>
- [7] <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [8] Y. Kuriyama *et al.*, “EPICS Control system for the FFAG complex at KURRI”, Proceedings of ICALEPCS2013, San Francisco, 2013.
- [9] Y. Ishi *et al.*, “Status Report of FFAG Accelerator Complex at KURRI”, Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accel. Soc. of Japan, Osaka, August 2015, pp. 368-370.
- [10] T. Yoshiie *et al.*, “Target depth dependence of damage rate in metals by 150 MeV proton irradiation”, *NIM. B* 342 (2015), pp. 166-169.
- [11] Y. Iwamoto *et al.*, “Measurement of the displacement cross-section of copper irradiated with 125 MeV protons at 12 K”, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 458 (2015), pp. 369-375.