

Design of H- injection system for FFAG accelerator at KURRI

K. Okabe^{#A)}, Y. Ishi^{B)}, Y. Kuriyama^{B)}, J. B. Lagrange^{C)}, R. Nakano^{C)}, Y. Niwa^{A)}, T. Planche^{C)},
T. Uesugi^{B)}, E. Yamakawa^{C)}, Y. Arakida^{D)}, Y. Mori^{B)}, I. Sakai^{A)}

^{A)} University of Fukui

3-9-1 Bunkyo, Fukui City, Fukui 910-8507, Japan

^{B)} Kyoto University Research Reactor Institute

2, Asashiro-Nishi, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0494, Japan

^{C)} Graduate School of Engineering, Kyoto University

Yoshida Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan

^{D)} High Energy Accelerator Research Organization

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

Abstract

In Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI), a neutron source based on the accelerator driven sub-critical reactor (ADSR) concept has been proposed in 1996 [1]. Aiming to demonstrate the basic feasibility of ADSR, proton Fixed Field Alternating Gradient (FFAG) accelerator complex [2] as a neutron production driver has been constructed and the ADSR experiment has been started in March 2009. In order to upgrade beam intensity, multi-turn charge exchange injection system for scaling FFAG accelerator is being studied. The injection scheme is converted from orbit shift single-turn injection to H⁻ multi-turn injection. The method to escape the stripping foil is orbit shift by rf acceleration. The 11MeV H⁻ beam is injected from linac and is accelerated up to 100MeV in FFAG main ring. In this paper, the detail of injection system is described and feasibility of such a low energy H⁻ injection system is discussed.

京都大学原子炉実験所における FFAG 加速器 H-入射システムの設計

1. はじめに

京都大学原子炉実験所(KURRI)では加速器駆動未臨界炉のための FFAG 加速器の研究開発を行い、世界初となる高エネルギー陽子加速器のビームによる核破砕中性子を用いた ADSR 実験が行われている。この実験は KURRI に設置された京都大学臨界集合体 (KUCA) と陽子加速器を結合させ、中性子エネルギーに依存した中性子増倍特性を中心とした未臨界炉特性に関する実験的研究を核設計計算との比較・検討を行うとともに、エネルギー発生装置としての基本的な成立性評価を主目的としている。2009年3月には、FFAG からエネルギー100MeVの陽子ビームをタングステンターゲットに照射し、発生した中性子を京都大学臨界集合体装置に構築した未臨界核燃料体系に導入して核分裂反応により増倍される事を確認した [3]。

将来的に ADSR 実験効率の上昇、および、パルス中性子源としての FFAG 加速器システムの利用用途拡大を目的として、FFAG 加速器のビーム強度増強計画が進められている。この計画では新しい入射器として H⁻大強度線形加速器を使用し、主リングへの入射方式を荷電変換多重入射方式に変更する。荷電変換入射方式では、入射ビームを位相空間上の周回ビームに重ね合わせて入射することが可能である。この利点から荷電変換入射は大強度シンクロトロンにおいては一般的な方式となっているが、FFAG 加

速器では今回が初の試みとなる。本計画では、11 MeV の H⁻ビームを FFAG 加速器複合系の主リングに多重入射することで、将来的に主リングのビーム電流を空間電荷効果による制限値程度まで大強度化することを旨とする。

本文では FFAG 加速器における H⁻荷電変換入射システムについて、ビームライン、FFAG 主リング内のビーム入射路について紹介する。また、荷電変換フォイルによる周回ビームのエミッタンス増大や、非常に薄い荷電変換フォイルの作成方法に関する検討結果についての進捗状況を報告する。

2. KURRI における FFAG 加速器システム

現在、ADSR 実験で KUCA に結合する加速器システムはイオンペータ、ブースター、主リングと呼ばれる3つの円形加速器から構成され、これらのリングにはすべて FFAG 型の収束系が用いられている。図1に KURRI に建設された FFAG 加速器複合系を示す。

2.1 現状の入射器(イオンペータ + ブースター)

初段の加速器はイオンペータと呼ばれる FFAG 加速器で、イオン源から輸送された 120 keV の陽子ビームを 1.5 MeV まで加速する。イオンペータは 8 セクターのスパイラル型 FFAG 収束系であり、トリムコイルによる磁場形成、誘導加速方式が用いられている。ブースターおよび主リングでは半径方向の磁場分布を磁極の形状によって実現しているのに対

[#] kota@rri.kyoto-u.ac.jp

し、イオンベータは主コイルの他に上下平行かつ平坦な磁極面に 32 本のトリムコイルを配置し、電流を独立に調整することによって、磁場分布を調整している。従って、磁場分布をスケーリング則を保ちつつ変化させることで、取り出しエネルギーを可変にすることが可能となっている。

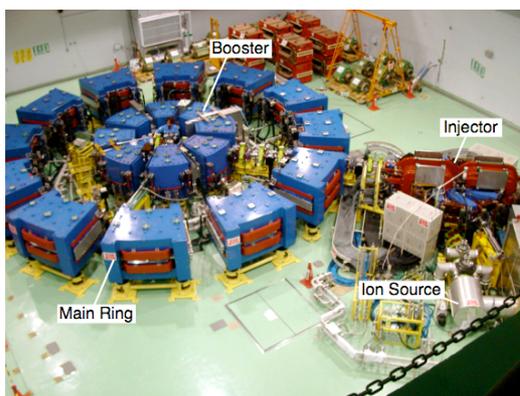


図 1 : KURRI における FFAG 加速器複合系

8 セクターのラディアル型収束系を持つブースター FFAG 加速器は、イオンベータからの陽子ビームを軌道シフト型多重入射方式により入射する。入射機器として、1 対のバンプ電磁石と静電セプタム、パルス型のセプタム電磁石を装備している。ブースターでは高周波加速方式により陽子ビームを 11.6 MeV まで加速し、次段の主リングへ出射する。

2.2 線形加速器

ビーム強度増強計画で使用される入射器は Accsys 社製の線形加速器である。この線形加速器は 428MHz の RFQ と 2 台の DTL で構成されており、負イオン源からの H⁻ビームを 11MeV まで加速する。繰り返し 200Hz 時でのビームデューティーは約 1.8% であり、高周波のピークパワーは全体で 1.5MW 程度である。また、イオン源として体積生成型の負イオン源を使用し、そのピーク電流値は 5mA に達する。

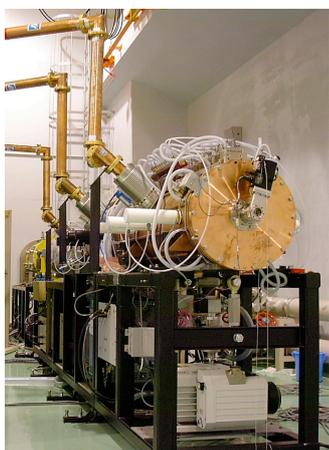


図 2 : KURRI に設置された線形加速器

この入射器はそもそも FFAG-ERIT [4]用の入射器であり、FFAG 複合系と同じフロアに既に建造されている。図 2 は KURRI イノベーションラボラトリ 1F に設置されている線形加速器の写真である。

2.3 入射加速器の比較

現状と新規の入射器のスペックを表 1 にまとめた。線形加速器からの出射ビーム強度は現状の入射器に比べて 1000 倍以上にも達する。また、出射ビームのエネルギーは両者ともほぼ同じであるため、FFAG 主リングの磁場を多少変更するだけで入射ビームの軌道を調整することが可能である。

表 1 : 入射加速器のスペック

	Ion-beta and booster FFAG	Linac + H ⁻ ion source
イオン	proton	H ⁻
出射ビームエネルギー	11.6 [MeV]	11 [MeV]
ビーム強度	6.00 * 10 ⁸ [ppp]	3.12 * 10 ¹² [ppp]
繰り返し	30 Hz	1 ~ 200 Hz

3. 入射軌道とビームラインの設計

図 3 に H-ライナックから FFAG 主リングをつなぐビームトランスポートラインを示す。最終段の FFAG 主リングは高周波加速方式で 12 セクターのラディアル型の FFAG 加速器である。FFAG 電磁石は“ヨークフリー”タイプと呼ばれる構造になっている。入射ビームエネルギー 11MeV に対して取り出しエネルギーは 100MeV となる。加速空洞には FINEMET を使用し、広帯域で ~2.5kV 程度の出力電圧を確保している。

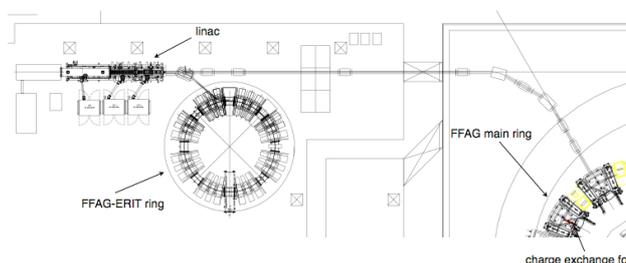


図 3 : ビームトランスポートライン

周年軌道と H-ビームの入射軌道とは、FFAG 主リングの電磁石磁場のみを利用して合流するように設計されている。それ故、セプタム電磁石等のビーム入射機器は今回の計画では使用しない。FFAG 主リング内での入射ビーム軌道は磁場計算ソフト TOSCA の 3 次元磁場マップを用いたトラッキングコードによって計算した。図 4 に主リング内での H-ビーム入射軌道を示す。

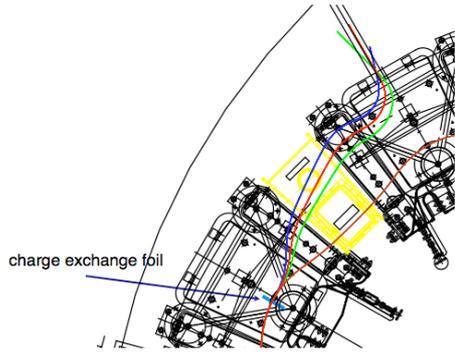


図 4 : 主リング内における H-入射ビーム軌道。

4. FFAG 主リングにおける荷電変換入射

H 荷電変換入射方式は、現在、世界中の大強度陽子加速器で広く用いられている。加速器内に打ち込まれた負電荷ビームは、リング内に設置された荷電変換フォイルを通過する際に正電荷に変換される。従って、通常の多重入射方式と異なり、荷電変換入射方式ではリウビルの定理の制約を受けずにビームを加速器へ入射することが可能である。しかしながら、ビーム入射時において周回ビームが荷電変換フォイルに多数回衝突することから、フォイルの発熱、及び、多重散乱による周回ビームのエミッタンス増大などの問題が発生する。

4.1 荷電変換フォイル

入射 H ビームのエネルギー 11MeV は荷電変換入射方式を採用している陽子加速器の中で最も低いものである。従って、荷電変換フォイルの加熱とフォイルによる周回ビームのエネルギーロスを最小限にするため、変換効率を保証しつつ、且つ、非常に薄い膜圧の荷電変換フォイルが必要となる。KEK-PS における荷電変換入射での経験を参考として、フォイルの材質は比較的安価で耐久性のあるカーボン、厚みは $10 \sim 20 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^2$ のものを使用する。図 5 はホルダーにマウントされた $10 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^2$ のカーボン薄膜である。この膜厚での荷電変換効率率は約 98%程度と想定している。本計画で用いる荷電変換フォイルは非常に薄いものとなるため、その取り扱いには細心の注意が必要となる。

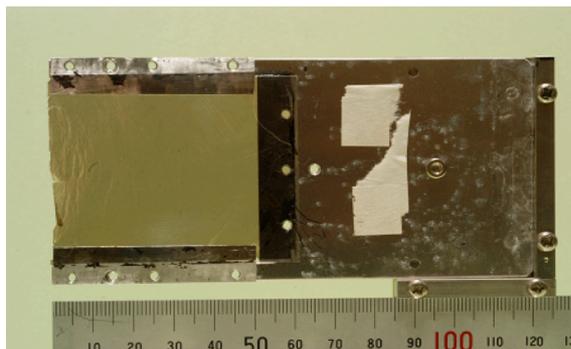


図 5 : マウントされた膜厚 $10 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^2$ のカーボン薄膜。

4.2 入射方式

入射エネルギーが 11MeV と低いため、荷電変換フォイルによる周回ビームのエミッタンス増大や、エネルギー損失は大きな問題となり得る。11MeV 陽子ビームが $10 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^2$ のカーボン薄膜を通過する際のエネルギー損失は約 340eV である。このエネルギー損失は高周波加速によって補完される。現在、FFAG 主リングで使用されている高周波加速電圧は 2.5kV であり、フォイルによるエネルギー損失分を再加速するには十分な性能を持つ。さらに、周回ビームが荷電変換フォイルに衝突する確立を減少させるため、ビーム入射点を閉軌道から 10mm 程平行にオフセットする。図 6 に厚み $20 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^2$ のフォイルを想定した場合における 160 ターン後のエミッタンスとオフセットの関係を示す。入射ビームのパルス長は約 $100 \mu\text{sec}$ で、11MeV ビームの主リング周回数約 160 ターン分に相当する。

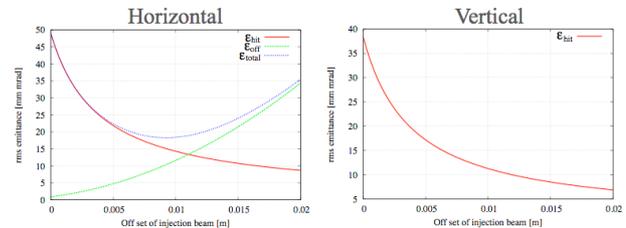


図 6 : 入射後 160turn 周回した後の水平、垂直方向の rms エミッタンス。左図青線はフォイルによる多重散乱に由来するエミッタンスの値、緑線はオフセットに由来するエミッタンスの値で、赤線はそれらの和である。右図垂直方向については赤線の多重散乱に由来するエミッタンスの値である。

周回ビームを荷電変換フォイルから躲す方法として、FFAG 加速器の場合、高周波加速による軌道シフトを用いることができる。この方法を採用した場合、バンプ電磁石等のパルス型電磁石を用いる必要がなくなる。しかし、エミッタンス増大を防ぐため早急に周回ビームをフォイルから躲すには、十分に高い高周波加速電圧が必要とされる。表 2 に高周波加速電圧によるターンセパレーションの大きさを示す。フォイルの膜厚として $20 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^2$ を想定した。また、荷電変換フォイル位置での運動量分散関数は約 0.57m である。表 2 の周回数の項目から考慮すると、必要な高周波加速電圧として 4kV 以上が見込まれる。この検討結果を踏まえ、現在、ビーム入射時のみ高周波電圧を 4kV まで上昇させるための高周波電源の増強、及び、パワーテストが行われている。

表 2 : 高周波加速によるターンセパレーション

	$V_{rf} = 2\text{kV}$	$V_{rf} = 4\text{kV}$
Bucket height [keV]	33	81
Energy gain [keV]	1.00	2.80
Orbit shift/turn [mm]	0.025	0.059
Turn number(10mm shift)	400	169

5. まとめ

KURRI-FFAG 加速器複合系のビーム強度増強に向け、FFAG 加速器における H-荷電変換多重入射の研究が進められている。アップグレード後の入射器である線形加速器のビーム強度は現状の入射加速器の1000倍以上に達する。ビームトランスポートラインの設計はほぼ完了しており、現在、建設が進められている。また、荷電変換フォイルとしては厚み $10 \sim 20 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^2$ のカーボンフォイルを使用し、フォイルから周回ビームを躲す方法として、高周波加速による軌道シフトを用いる。本紙ではこれらの研究開発の進捗状況を報告した。

参考文献

- [1] K. Kawase et al., APAC 1998, Tsukuba, Japan, 104-106 (1998).
- [2] T. Uesugi et al., Proc. of EPAC08, Genova, 2008.
- [3] C.H. Pyeon et al., J. Nucl. Scie. Technol. Vol. 46 (2009) , No. 12 p.1091-1093.
- [4] K. Okabe et al., Proc. of EPAC'06, Edinburgh, 2006, pp.1675-1677.