

UPGRADE OF RIKEN FIXED-FREQUENCY RING CYCLOTRON

Keiko Kumagai^{A)}, Nobuhisa Fukunishi^{#,A)}, Masaki Fujimaki^{A)}, Takeshi Maie^{A)}

^{A)} RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science

2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

Abstract

In order to accelerate $^{238}\text{U}^{65+}$ ions charge-stripped by He gas stripper instead of $^{238}\text{U}^{71+}$ ions obtained by carbon-foil strippers, we have successfully upgraded the bending power of RIKEN fixed-frequency Ring Cyclotron. A brief sketch of design studies, results of magnetic-field measurements and those of an acceleration test are summarized in this report.

RI ビームファクトリー固定周波数サイクロトロン(fRC)の改造

1. はじめに

理研固定周波数リングサイクロトロン(fixed-frequency Ring Cyclotron, fRC)^[1]は RI ビームファクトリー(RIBF)^[2]複合加速器系の一翼を担う重イオンサイクロトロンである。RIBF 複合加速器系は 2 つの重イオン線形加速器コンプレックス、1 台の AVF サイクロトロン及び 4 台のリングサイクロトロンより構成され、fRC は Xe から U に到る重いイオンを核子当たり 345 MeV に加速するのに用いられる。この固定エネルギー加速モードは新線形加速器 RILAC2^[3]を入射器とし、後段に 4 台のリングサイクロトロンを用いて全 5 台の加速器で加速を行う。fRC はこの固定エネルギーモードにおいて第 3 段の加速を担う。fRC の加速共振器はその名の通り周波数固定であり、入射エネルギーは核子当たり 10.6 MeV、取り出しエネルギーは 50 MeV である。

fRC はその仕様を見るに常伝導技術を用いた従来型の 4 セクターリングサイクロトロンに過ぎないが、以下に述べる幾つかの特長がある。第一に、fRC はその偏向能力に比して軽量であり、結果として建設コストの大幅な低減が実現された。技術的にはポールギャップを 50 mm に切り詰めたことによる。第二に、近年の高精度磁場計算技術を最大限利用して実現されたサイクロトロンであり、等時性磁場は大部分ポール形状の最適化により実現されている。トリムコイルは設計の不確かさと加速イオンの M/q 比の違いを吸収するために用いられる。結果としてトリムコイルの本数、最大電流値は通常のリングサイクロトロンより少ない(表 1)。また、50 mm のポールギャップのうち各々上下 10 mm をトリムコイルが占めるため実効開口が 30 mm しかなく、通常の二次元磁場測定装置が使用できなかった。よって磁場計算の結果を補正する目的でセクター電磁石中心線上、つまり 1 次元の磁場測定のみ実施した。この様に 2 次元以上の磁場のマッピングを行わずにイオン加速を実現している点も大型のサイクロトロンとしては特筆される。なお、表 1 中 fRC の K 値 600 MeV は $^{238}\text{U}^{69+}$ イオン加速試験の実績によるものだがユーザーへのビーム供給の実績はない。

RIBF において、その核分裂片を二次ビームとして利用出来るウランは第一義的な重要性を持つ。

fRC は 2006 年の運転開始以来これまで主として $^{238}\text{U}^{71+}$ イオン加速してきた。 $^{238}\text{U}^{71+}$ イオンは fRC の前段加速器たる理研リングサイクロトロン(RRC)^[4]で加速された $^{238}\text{U}^{35+}$ イオンを炭素薄膜荷電ストリッパーに通すことにより得られるが、炭素薄膜の寿命は短くビームの安定供給に問題を抱えていた。具体的には、ユーザーに 1 pnA、これは RIBF の最終目標の 1/100 以下のビーム量であるが、を供給する場合ですら、約 12 時間で炭素膜の交換が必要であった。ウランビーム大強度化を目的として建設された新入射器 RILAC2 が本格稼働を始めればビームの安定供給は不可能である。よって原理的に寿命に制限のないガスストリッパー、とりわけ同じガス厚で高い価数のイオンが得られる He ガスストリッパー^[5]の開発が行われている。He ガスストリッパーを用いれば $^{238}\text{U}^{65+}$ が炭素薄膜と同等の収率で得られる。しかし、fRC は本来 $^{238}\text{U}^{73+}$ に対し設計されたもので、原設計では $^{238}\text{U}^{69+}$ イオン加速が限界である。よって $^{238}\text{U}^{65+}$ イオンを fRC で加速するべく改造を行った。

表 1 : RIBF の常伝導リングサイクロトロンの仕様

	RRC	fRC	IRC
入射半径 (cm)	89	155	277
取り出し半径 (cm)	356	330	415
K 値 (MeV)	540	600	980
トリムコイル本数	26	10	20
トリムコイル最大電流 (A)	600	200	600

2. 設計

今回の改造は fRC の偏向能力を 6%上げるだけのものであるが、メイン磁場は $^{238}\text{U}^{71+}$ イオンに対し既に 1.7 T であり、鉄心が強く飽和するため注意が必要である。検討した項目は以下の通りである。

- 等時性磁場形成に必要なメインコイル、トリムコイルの仕様
- 入射用、取り出し用機器の仕様
- メインコイルによる漏れ磁場が入射軌道に与える影響および補正方法の確立
- 入射取り出し機器と等時性磁場のクロストーク

磁場計算には TOSCA¹⁶⁾を用いた。精度良く設計するには BH 曲線の選択が重要であるが、TOSCA がデフォルトで用意する BH 曲線を用いた。実績から fRC で使用された純鉄の磁気特性は TOSCA のデフォルト BH 曲線よりやや良いと判断されており、これを設計裕度とした。

2011 年 4 月下旬から物理設計に着手し、2 ヶ月で設計を完了し、機器の製作を年度内に終わらせることとした。

2.1 入射取り出し機器の設計

fRC へのビーム入射は上流から偏向電磁石(BM)、二台の磁気チャンネル(MIC2、MIC1)、入射用静電チャンネル(EIC)を用いて行われる。検討の結果、BM と MIC2 の能力が不足するため改造が必要との結論となった。BM は電源を新作して励磁電流を 1250 A に増強すれば $^{238}\text{U}^{65+}$ イオン入射に十分な磁場が得られるが、その際コイルの冷却水温度上昇は 39 度でかつ強い 6 極成分を発生することから、電源ではなく電磁石の改造が合理的と判断した。改造前後の BM の仕様の比較を表 2 に示す。磁気チャンネルは入射イオンを加速軌道に整合させるために用いる機器で、セクター電磁石が形成する等時性磁場に磁場を重畳することによりこの機能を実現する。ポールギャップが狭い fRC では、MIC2 に与えられたスペースも制限されるためコイル巻数を減らし 7 mm という極めて厚い鉄板を導入し 0.5 T の嵩上げ磁場を発生していた。今回、セクター電磁石の励磁レベルが一層高くなることに伴い、鉄がより強く飽和し MIC2 コイルに要求される電流値は 1500 A と従来の 2 倍以上となる。冷却水温度上昇は 60 度と評価されるため既存 MIC2 は使用不能で、ホローコンダクターを $\square 7\phi 4$ から $\square 8.5\phi 5$ に変更するとともに冷却水路を上下 2 分割とする設計を採用した。新 MIC2 用電源もないことからこれも新作した。

表 2 : 入射取り出し機器の仕様。括弧内は改造前の仕様値を表す。

	BM	MIC2	ST
極率半径 (cm)	91	72	磁極長
偏向角 (度)	100.35	80	9 cm
ポールギャップ (mm)	40	28	40
導体サイズ (mm)	$\square 9\phi 6$	$\square 8.5\phi 5$ ($\square 7\phi 4$)	$\square 7\phi 4$
コイル巻数	84 (72)	4	60
冷却水路数	14 (12)	2 (1)	6
最大磁場 (T)	1.95 (1.8)	0.6 (0.5)	1.1

fRC のビーム取り出し系は入射系の逆順、すなわち静電チャンネル、二台の磁気チャンネル、取り出し用偏向電磁石(EBM)で構成される。取り出し用磁気

チャンネルは鉄を用いずコイルのみで嵩上げ磁場を発生するため、 $^{238}\text{U}^{65+}$ イオン加速に必要な性能向上は建設時の設計裕度で吸収される。一方 EBM は $^{238}\text{U}^{69+}$ イオン取り出しが限界であり、電磁石もしくは電源の改造が必要である。電源を新作するとすれば、多少の余裕を見て 1400 A、80 V の電源が必要となる。一方、電磁石は原設計において磁場均一度を重視した設計であるためポール形状の変更で励磁特性を改善する余地があった。よって今回は既存コイルを用いてポール、ヨークのみ新作することとした。EBM 鉄心改造に関して図 1 にまとめる。

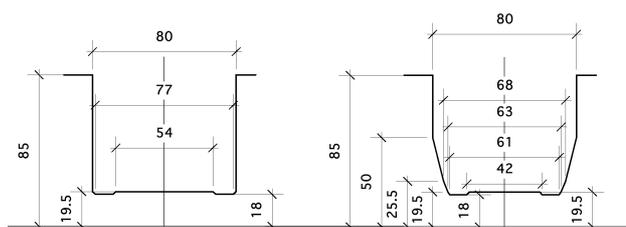


図 1 : EBM 鉄心改造。左が改造前、右が改造後の鉄心形状を表す。

2.2 入射軌道補正



図 2 : 漏れ磁場に対する入射軌道補正

fRC は図 2 の如くセクター電磁石間の低磁場領域(バレー部)を通過してビームが入射される。バレー部にはセクター電磁石を源とする漏れ磁場の寄与があり、ビームは加速イオンの周回方向とは逆向きに偏向される。 $^{238}\text{U}^{69+}$ イオンに対してはこの効果は無視できずステアリング電磁石による補正が不可欠であったが、 $^{238}\text{U}^{65+}$ イオンに対しては漏れ磁場が約 2 倍となるため入射軌道補正用に新たに 2 台の小型偏向電磁石を設置することとした。入射イオンが横切るバレー部には前述の EIC が設置されるが、EIC には入射イオンの通り道として 50 mm ϕ の開口が設けられている。上流 ST1 は漏れ磁場存在下でビームを EIC 開口に合わせるために使用され、下流 ST2 は開口通過後のビーム軌道を漏れ磁場の影響のない理想的な軌道に整合させるのに用いられる。磁石の仕様に関しては表 2 に記載した。ポールギャップを 40 mm とした理由は、磁石を小型軽量化することにより加速領域への不整磁場の発生を最小限に留めるた

めである。磁極形状は 6 極成分 を最小化するべく決定された。更に、電源に関してはオーバースペックであるが最大電流 700 A の既存電源を使用する。

2.3 メインコイル、トリムコイル

加速に必要なメインコイル、トリムコイル電流値を評価するために磁場計算を行った。等時性磁場の評価には電磁力、真空力によるポール変形の効果、入射取り出し機器が等時性磁場に与える影響などが考慮されている。加速実績によればメインコイル電流値は $^{238}\text{U}^{71+}$ イオンに対し 587 A、 $^{238}\text{U}^{69+}$ イオンに対し 643 A であるが、 $^{238}\text{U}^{65+}$ イオンに対しては 826 A と評価された。原設計において、fRC メインコイルは冷却水温度上昇 10 度で設計されており、要求される電流増加に対しセクター電磁石やメインコイルの改造は不要で、電源の性能向上で仕様を満たすとの結論を得た。これによりメインコイル電源を新作することとした。トリムコイルに関しては、最内周の 1 番トリムコイルの電流値が計算上 14 A 不足する。トリムコイル電流値に対しては、磁場計算には 1 mT 程度の予測誤差が見込まれるため、これに相当する 50 A 程度の不定性が残る。スケジュールに余裕があれば磁場測定結果を見て判断すべきであるが、今回は一番トリムコイルの電源を増強し、現在使っている電源は他のトリムコイル電源のバックアップとすることとした。

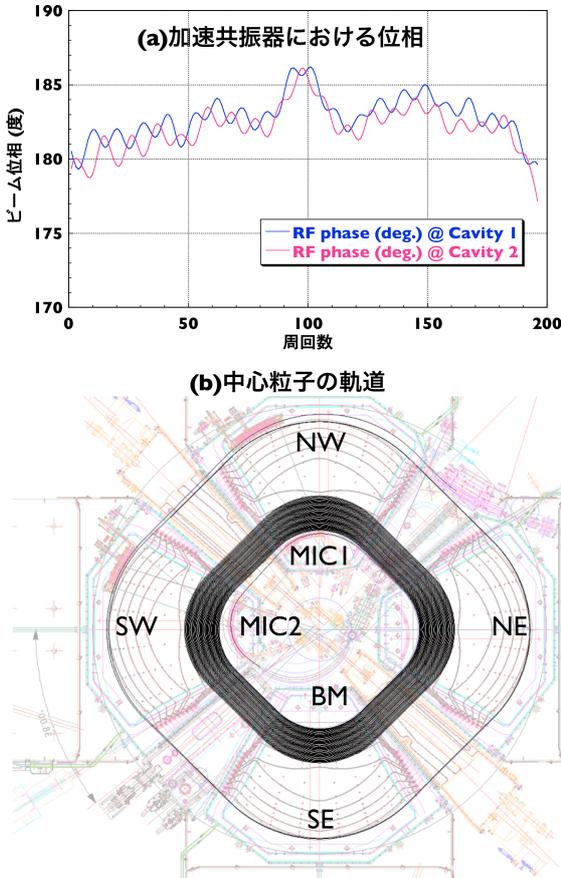


図 3：軌道解析の結果

図 3(a)は、設計で得られた等時性磁場の精度評価

を目的として行った軌道計算において、加速共振器における中心粒子の位相をプロットしたものである。サイクロトロンは電圧最大の位相(180 度)で加速するが、全加速周回に亘る位相のずれは±3 度程度に収まり、必要十分な等時性磁場が実現されると期待される。図 3(b)は中心粒子の加速軌道の一部を図示したもので、適度なオフセンタリング加速が実現されることを示している。メインコイル、トリムコイル電流に対する設計値と実際の加速パラメータとの比較は 5 章で行う。

2.4 クロストークの評価

改造もしくは新規導入される入射取り出し機器による等時性磁場への影響、逆にサイクロトロンの等時性磁場が入射取り出し機器に与える影響の双方に関して評価を行った結果、これらクロストークは設計仕様を変更するほどの影響がないとの結論を得た。また、 $^{124}\text{Xe}^{46+}$ イオンは fRC の設計下限の磁場で加速されるが、今回の入射取り出し系の改造がこれら低磁場運転に対しても従来と同程度の影響しか与えないことも確認した。

3. 各機器の製作

fRC の性能向上に必要となる機器は、BM、MIC2、EBM 鉄心、入射軌道補正用偏向電磁石 2 台、メインコイル電源、MIC2 用電源、1 番トリムコイル用電源 2 台である。更に、入射軌道補正用電磁石の導入に伴う N バレー箱の改造も必要となる。トリムコイル電源 2 台を除く他の機器は据え付け、配線工事まで含めて 2011 年度内に製作が完了した。トリムコイル電源は 2012 年度に製作が開始され、10 月に使用可能となる予定である。

BM、MIC2、EBM 鉄心に関しては fRC を製造した住友重機械工業(株)により既存機器との取り合いに細心の注意を払った機械設計が行われた。これら電磁石類は通常の常伝導技術で製作されており、取り合い以外に大きな技術的困難はなかった。

一方、メインコイル電源、MIC2 電源に関しては RIBF 施設全体の安定運用の観点から fRC 以外でも使用可能な汎用性のある電源として製作することとした。具体的には、1986 年に運転を開始した RRC は線形加速器 RILAC^[7]、AVF サイクロトロン^[8]の単独運転利用を除く全運転モードで使用される。運転開始以来 25 年を経過し、RRC の電源類は老朽化し、重篤な故障の発生が数ヶ月の長期に亘る RIBF 施設全体の生産性の大幅な低下に直結すると懸念されていた。これら老朽化電源に対する近い将来の更新は予定されておらず、今回製作する fRC のメインコイル電源に RRC メインコイル電源の、また MIC2 電源に RRC 入射取り出し系電源のバックアップ機能を持たせることが妥当と判断した。電源の仕様はこれらの条件を考慮して決定された。

電源の主要仕様を表 3 にまとめる。メインコイル電源においてはモード 1 が fRC、モード 2 が RRC に対応する。表 3 ではメインコイル主電源に対する仕様のみ記載したが、これ以外にセクター電磁石毎

の励磁特性のバラツキを補正するためにメインコイル電源は4台のバイパス電源(各々50 A, 150V)を持つ。技術的特徴としては、サイクロトロンメインコイル用電源なので長時間安定度に対する要求が厳しいこと、かつ1 ppm 精度の電流設定を可能とするべく粗設定(1080A に対して 16 bit)、細設定(± 25 A/16 bit)の両者を持つことが挙げられる。

表 3 : 新電源の仕様

電源	メインコイル電源		MIC2 電源	
	1	2	1	2
モード	1	2	1	2
回路方式	サイリスタ+トランジスタドロップ			
受電	AC415 V \pm 5% 3 相 3 線			
最大電流 (A)	920	1080	1500	2800
最大電圧 (V)	550		100	65
リップル	$\pm 3 \times 10^{-6}$ p-p		1×10^{-4} p-p	
安定度	$\pm 3 \times 10^{-6}$ / 8 時間		$\pm 5 \times 10^{-5}$ / 8 時間	
電流検出	DCCT		DCCT	
電流設定精度	16 bit + 16 bit		16 bit	
制御	日立造船製 NIO			

MIC2 電源に対しては、RRC の入射用電磁石類 (BM 及び MIC)への適用を想定したため高い性能が要求された。MIC2 電源は内部的には受電・整流部が2系統の回路で構成されており、モード切り替えはこれら2回路の接続を、直列・並列に切り替えることおよびそれぞれのモードに適したトランスタップを選ぶことで実現される。fRC においてはモード2で使用される。

これら2台の電源に対して、2012年3月に実負荷を用いて安定度試験を実施し、両電源ともに仕様を満たすことを確認した。fRC メインコイル電源に対しては、温度変化2度で管理された環境において初期ドリフトを除く8時間安定度 ± 1 ppm以下の性能を確認した。

4. 磁場測定

磁場測定はユーザーへのビーム供給の合間を縫って2012年5月21日から6月1日の間に行われた。測定にはfRC用に開発された1軸駆動の磁場測定装置2台を用い、セクター電磁石の中心線、所謂 hill center 線上の磁場の動径方向分布を測定した。1次元の磁場測定データはサイクロトロンの運転パラメータを決めるには不十分であるが、高精度磁場計算と併用することにより問題なく加速が行われることはこれまでのfRCの実績が示す通りである。今回は4台のセクター電磁石全てに対して磁場測定を行う時間がなかったため、SW、NWの2台に対してのみ測定を行った。

磁場測定装置の先端にはNMRプローブとヒータで一定温度に保たれた銅ブロックに固定されたホー

ルプローブが装着されている。入射領域および取り出し領域は磁極端部に当たるため高磁場では磁場分布の均一度が不足しNMRでは測定は出来ない。よって全加速領域をホールプローブとNMRで測定し、NMRがロックしない測定点をホールプローブのデータで補完した。ホールプローブの校正には、磁場が均一な領域で様々な励磁電流下で測定された両者のデータを使用した。

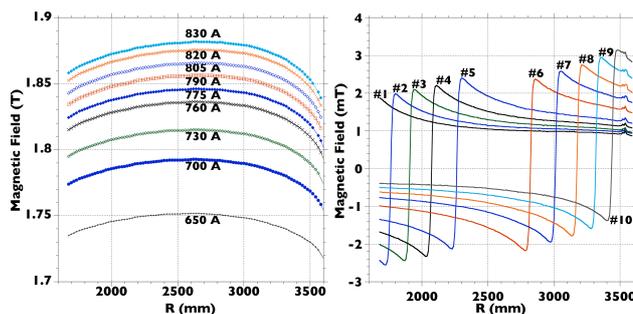


図 4 : 磁場測定結果

図4に磁場測定結果を示す。(a)は様々な励磁電流に対するNWセクター電磁石の磁場分布を、(b)は同じくNWセクター電磁石において10本のトリムコイル(#1~#10)が形成する嵩上げ磁場をプロットしたものである。トリムコイルの励磁電流は各々100 Aである。一方、図5は $^{238}\text{U}^{65+}$ イオン加速磁場に相当するメインコイル電流805 Aに対して、SW、NWセクター電磁石の実測磁場を設計時のモデル磁場と比較したものである。磁場の絶対値の差はSWに対して0.7%、NWに対して0.9%であり、両者とも許容範囲内であると判断される。

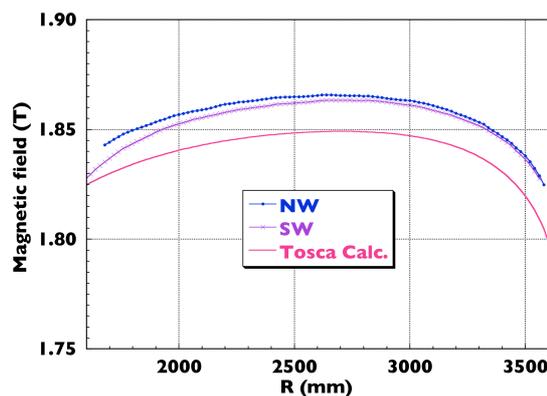


図 5 : 磁場計算と実測の比較(805 A)

5. 加速試験

fRCは改造後初めて2012年6月11日より $^{124}\text{Xe}^{46+}$ イオンを加速した。加速試験としてではなく、ユーザーに対するビームサービスとして実施された。改造前と同じ加速パラメータを用いて調整を行い、90%以上の通過効率を達成し、低磁場領域における健全性を確認した。

今回の改造の目的である $^{238}\text{U}^{65+}$ イオンの加速試験は、2012年7月14日21時から翌15日7時の間に

実施した。磁場測定は 2 台のセクター電磁石に対してのみ完了しており、詳細な加速パラメータの最適化は磁場測定完了後に譲り、今回の加速試験では基本性能の確認を主目的とした。

サイクロトロン等の等時性磁場は数 ppm の精度で合わせ込む必要があるため、メインコイル、トリムコイルの電流値に対しては適切な初期値から出発してビーム位相を位相プローブで測定しつつ調整を行う。今回は、トリムコイル電流の初期値に対しては計算値をそのまま用いる一方で、メインコイル電流値に関しては、磁場測定済の SW、NW セクターには磁場測定結果を用いて補正した電流値を、NE、SE セクターに対しては SW、NW セクターとのおよその差を計算から評価し、これを初期値とした。メインコイル電流値を表 4 に、トリムコイル電流値を図 6 にまとめる。

表 4：メインコイル電流値

	SW	NW	NE	SE
計算値	826.4	814.9	821.7	813.6
磁場測定補正值	797.8	787.8	793.8	787.0
運転値	795.4	784.2	791.4	783.4

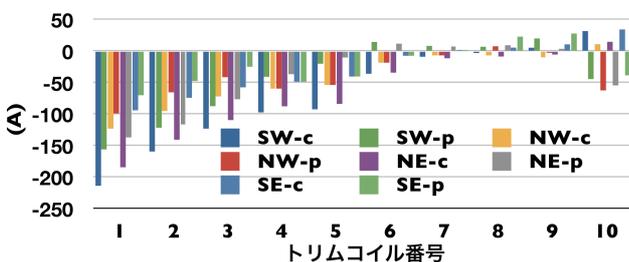


図 6：トリムコイル電流値。各セクターに関して”-c”は計算値、”-p”は実際の運転パラメータを示す。

前述の如く、TOSCA のデフォルト BH 曲線は実際に使用されている純鉄より励磁特性が悪く、電流値を 3.6% 過大に評価していた。3.6% の違いは大きい、これは鉄心が強く飽和しているためであり、同じ励磁電流における磁場の比較においては、実測値は計算値より 0.8% だけ高い。励磁特性の違いは励磁レベルのみならず磁場分布にも影響する。設計との比較において実際のより良い励磁特性は計算より平坦な磁場分布を与え、これがトリムコイル電流値に対する設計誤差の主要原因である。より詳細な比較は全セクター電磁石に対する磁場測定終了後に行う。

短時間の加速試験ではあったが、ビームの通過効率は 85% と良好で、今回の改造により $^{238}\text{U}^{65+}$ イオンが問題なく加速されることが確認された。得られた等時性磁場を図 7(a) に、ターンパターンを (b) に示す。等時性磁場の調整は多少甘く、 $^{238}\text{U}^{71+}$ と同等の精密な等時性磁場を確立するには再度加速試験を行う必要があるが、設計で想定した以上のトリムコイル電源の増強は必要ないと判断される。また、ターンパターンの測定から、適度なオフセンタリング加速が

実現されており、入射軌道補正用電磁石の導入により適切な軌道でビームが入射されていることも確認された。なお、図 7(b) において、外周側に行くに従いターンパターンのベースライン(ビーム量ゼロのライン)が右下がりとなり、かつ信号強度が大きくなるのはウランビームがプローブに衝突した際に発生する二次電子の抑制が不十分であるためである。

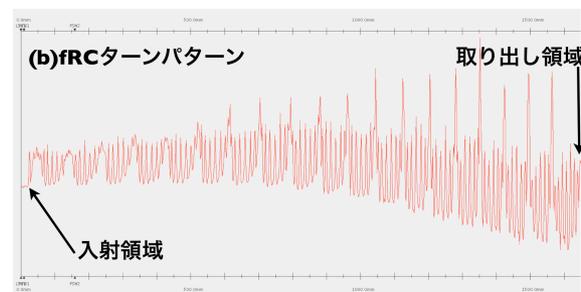
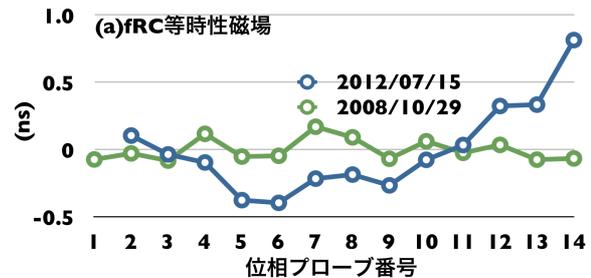


図 7：等時性磁場とターンパターン。(a)fRC 加速領域に設置された 14 台の位相プローブの測定結果。今回の加速試験で得られたデータ(2012/7/15)を $^{238}\text{U}^{71+}$ (2008/10/29)と比較して示す。(b)fRC のターンパターン。加速ビームの動径方向密度分布を測定したものの。

今回の加速試験で、 $^{238}\text{U}^{65+}$ イオンが問題なく加速されることを確認した。最近実施された He ガストリップ試験において、荷電変換効率は電子軌道の殻効果が効く $^{238}\text{U}^{64+}$ イオンの方がより高いとの結果が得られており^[9]、メインコイル電源にも余力があることから今後は $^{238}\text{U}^{64+}$ イオンの加速を実現し、ウランビームの大強度安定供給を実現したい。

参考文献

- [1] T. Mitsumoto et al.; Proc. 17th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, p. 384 (2004).
- [2] Y. Yano; Nucl. Instr. Meth. B261 p. 1009 (2007), doi:10.1016/j.nimb.2007.04.174.
- [3] K. Yamada et al.; Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, MOPD046 (2010).
- [4] Y. Yano; Proc. 13th Int. Cyclo. Conf. p. 102 (1992).
- [5] H. Imao et al.; Proceedings of IPAC'11, San Sebastian, Spain. TUPS088 (2011).
- [6] <http://www.cobham.com/products-and-services.aspx>
- [7] M. Odera et al.; Nucl. Instrum. Methods A227, p. 187 (1984).
- [8] A. Goto et al., Proc. 12th Int. Cyclo. Conf. p.51 and p. 439 (1989).
- [9] H. Imao et al.; Proceedings of IPAC'12, New Orleans, Louisiana, USA. THPP084 (2012).