

## RIBF 加速器のビームコミッショニング

福西 暢尚\*

## Beam Commissioning of RI Beam Factory Accelerator Complex

Nobuhisa FUKUNISHI\*

## Abstract

RIKEN Nishina Center started commissioning of the RI Beam Factory accelerator complex in July 2006. We succeeded in extracting the first beams from the fixed-frequency Ring Cyclotron, Intermediate-stage Ring Cyclotron and Superconducting Ring Cyclotron on September 29, November 22 and December 28, 2006, respectively. We also accelerated a uranium beam up to 345 MeV/u using all the cyclotrons newly constructed in the RIBF project in march 2007. Our progress on commissioning of RIBF accelerator complex will be outlined.

## 1. RI ビームファクトリー計画

RI ビームファクトリー (RIBF) 計画<sup>1)</sup>は、水素からウランに至る全元素を核子あたり 345 MeV (光速の約 70% に相当) に加速したビームをその後段の不安定核ビーム生成分離装置 BigRIPS<sup>2)</sup>に打ち込んで世界最大強度の不安定核ビームを生成し、宇宙における元素合成の謎や自然界に安定に存在しない短寿命原子核の性質を解明するために、1997 年度より理研和光キャンパスで建設が始まった。2006 年度は加速器系建設の最終年度に当たる。世界最大強度の不安定核ビーム施設を目指した理研は、1  $\mu\text{A}$  (毎秒  $6 \times 10^{12}$  個) のビームを BigRIPS に供給するという目標を設定、これを実現するために世界に類を見ないサイクロトロン・カスケードを建設することとした。RIBF プロジェクト開始前、RARF (RIKEN Accelerator Research Facility) と呼ばれた理研既存施設では 3 台の加速器、理研リングサイクロトロン (RRC) 及びその入射器たる理研重イオンライナック (RILAC) と AVF サイクロトロンが休みなく稼働し、軽い不安定核ビームを用いた研究、超重元素探索実験、重イオンビームを用いた植物の品種改良など基礎から応用に至る幅広い研究が行われてきた。RIBF は RRC を入射器とし、その後段に 3 台の新設のサイクロトロンを直列に繋ぐことにより前述の仕様を満たすというもので、新設されるサイクロトロンは上流から fRC<sup>3)</sup>

表 1 RIBF 各サイクロトロンの仕様

	fRC	IRC	SRC	RRC
K 値 (MeV)	570	980	2600	540
セクター数	4	4	6	4
速度ゲイン	2.1	1.5	1.5	4.0
トリムコイル構成	10	20	4(超伝導) +22	26
RF の構成	2 台+FT	2 台+FT	4 台+FT	2 台
加速周波数 (MHz)	54.6	18~38	18~38	18~38

表中トリムコイルの構成ではセクター電磁石あたりのトリムコイルの本数を示す。また RF の構成で「2 台+FT」とあるのは 2 台の加速共振器と 1 台のフラットトップ共振器を有することを意味する。

(fixed-frequency Ring Cyclotron), IRC<sup>4)</sup> (Intermediate-stage Ring Cyclotron), SRC<sup>5)</sup> (Superconducting Ring Cyclotron) と名付けられた。その仕様は表 1 の通りである。fRC, IRC は基本的に conventional な 4 セクター常伝導サイクロトロンであるのに対し、SRC は世界初の分離セクター型超伝導サイクロトロンで、その K 値はこれまでの常識を覆す 2600 MeV、技術的に実現不可能と言われた構造に挑んだものである。

RIBF のレイアウトは図 1 に示す通りであるが、既存施設の拡張で最高のスペース効率を追求したために複雑な配置になった。RIBF では既存施設の 3 台の加

\* 理化学研究所 仁科加速器研究センター加速器部門 Accelerator Division, RIKEN Nishina Center  
(E-mail: fukunisi@ribf.riken.jp)

速器，新設の3台のサイクロトロンの組み合わせで様々な加速モードが可能であり，代表的な二つのモードを図2にまとめる．標的にぶつかる就容易に fission 反応を起こすウランビームは RILAC から始まり SRC に至る全5台の加速器で，またクリプトンより質量数の小さなイオンは fRC を除く4台で核子あたり 345 MeV まで加速することが出来る．後者はイオン源の引き出し電圧を上げ，RILAC と RRC をウラン加速の場合の2倍の周波数で運転することにより実現される．また，核子あたり 345 MeV のウランビーム加速では RILAC, RRC, fRC の下流で計3段階の荷電変換が予定され，クリプトンビームにおいても RILAC と RRC の下流で計2段階の荷電変換が必要なスキームである．RIBF の詳細に関しては参考文献1に詳しいのでそちらを参照されたい．

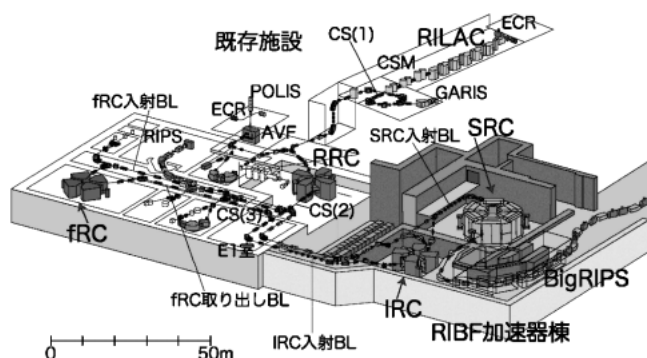


図1 RIBFのレイアウト．図中BLはビームラインを意味し，CSは荷電変換を行う場所を示している．

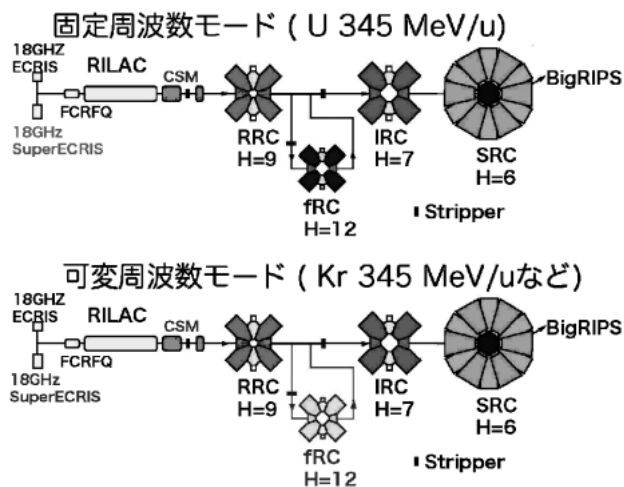


図2 RIBFの代表的な2つの加速モード．各々のモードにおいて，名称が濃く記載されている機器が利用されることとなる．

## 2. 2006年3月時点の状況

今から約一年半前，2006年3月の状況から話を始めよう．RIBFで建設中の3台のリングサイクロロンとそれらを繋ぐビームラインのうち，2006年3月末の時点でビーム加速可能な状態まで仕上がったものは一つなかった．最も製作スケジュールが先行していたIRCではセクター電磁石の磁場測定とRF共振器のパワー試験は終了していたが，ビーム診断系，制御系の一部作業にやり残しがあった．fRCは電磁石や共振器など主要機器の据え付けこそ完了していたが，電源現地調整や運転パラメータを決めるための磁場測定，RF系現地調整，ビーム診断系及び制御系の整備は未実施という状況であった．RIBFの主加速器たるSRCにおいては超伝導電磁石の冷却励磁試験最終段階の2005年11月8日に超伝導コイル断熱真空系にリークが発生，徹底的な原因追求と万全の再発防止策を取るのに約5ヶ月を要した結果，終わっていないはずの磁場測定が2006年3月末時点で未実施，RF共振器など他のエレメントは未だ据え付けすらされていない状況であった．ビームラインについても，工程上先行したSRC入射ビームラインはごく一部を除いて据え付けが完了していたが，他のビームラインの据え付けは一切実施されておらず，ビームラインとしては未だ影も形もないという状況であった．一方，我々は中期計画に記された(1)2006年12月までにSRCからビームを取り出すこと，(2)2006年度内にSRC下流のBigRIPSを使って不安定核ビームを発生させること，(3)2006年度内にSRCから核子あたり345 MeVのウランビームを取り出すこと，この3つ

	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
fRC			RF現地調整/電源調整	RF実負荷試験	磁場測定	ビーム診断系据付	ビーム診断系試験			
SRC		冷却、励磁試験	磁場測定				RF系据付、記録、現地調整	実負荷試験	ビーム真空系、ビーム診断系工事	ビーム真空系、ビーム診断系試験
BL			fRC入射BL	fRC取り出しBL			IRC入射BL	SRC入射BL残工事		
制御系				IRC、IRC入射BL				IRC、SRC、BL残り		
加速試験								fRC	IRC	SRC

図3 RIBF建設最終年度のスケジュール．2006年3月末の時点におけるファーストビームまでの工程を記したものの．

を実現せねばならない。一見するとかなり悲惨な状況に見えるが、SRC 以外は当初スケジュール通りであり、SRC に関しては中期計画実現に必須の作業のみをピックアップして実施することとし、図 3 のスケジュールでコミッショニングを進めることとした。工程短縮のポイントは SRC 磁場測定の測定条件を見直し 1 ヶ月の期間短縮を実現すること、SRC 残工事の工程を見直し工期を一ヶ月短縮すること、RF 系の調整試験はコミッショニング時に必須の 36.5 MHz 運転のみに限ることである。これで工程表上は 2006 年 12 月に SRC からビームが取り出せる形になった。後はこれを如何に実現するかの問題である。

### 3. ビームコミッショニング時の課題

工程に 5 ヶ月の遅れを抱えた我々にとってコミッショニング時の最優先事項はとにかくビームを加速して見せることであった。サイクロトロンでビームを加速する際に最低限必要なことは(1)セクター電磁石が設計通りの等時性磁場を安定(数 ppm 程度の安定度が必要)に生成すること、(2)必要な真空度 ( $10^{-5}$  Pa 以下)を実現すること、(3)RF 共振器が必要な加速電圧を安定に発生すること、(4)入射取り出し機器が設計通りの性能を発揮すること、(5)各種ビーム診断機器が正常に作動することの 5 点である。(1)~(4)に関してはビームを使わない試験でその性能を検証できるし、理研の技術力、それまでに行われた各種試験結果から考えて本質的な困難はないと考えられた。一方、ビーム診断機器に関しては RRC で実績あるデザインを踏襲しながらも、実際の運転条件下ではノイズの問題もあり、イオン種やエネルギーによるモニターの応答の違いも大きくビームコミッショニングで確認するしかない。

技術的に問題はないはずだが実績がないため幾つかの点で我々が「漠然とした不安」を抱えていたのもまた事実である。まず世界初の分離セクター型超伝導サイクロトロン SRC に関しては磁場測定が 2006 年 3 月時点で未実施、設計通りの磁場を実際に発生出来るか早期に確認する必要があった。次に、シングルギャップタイプで加速電圧 450 kV から 600 kV の設計を採用した 3 台の新サイクロトロンの加速共振器のエイジングがスケジュール的に fRC, SRC で間に合うか、IRC の経験から容易ではないとの声も聞かれた。

上記以外に、ウランビーム加速における固有の問題も指摘されていた。第一に、ウランビーム加速では  $UF_6$  ガスを材料に 18 GHz-ECR イオン源から 14 価

ウランを引き出し、RILAC 下流で 35 価に荷電変換して RRC に送るスキームを予定していたが、チャージストリッパーの寿命が極端に短い可能性がある指摘されていた<sup>6)</sup>。この場合には金属ウランを用いてイオン源から 35 価イオンを引き出さなくてはならない。当初予定では 2005 年度中にイオン源及び RILAC を用いウランビーム関連の技術開発を行う予定であったが、2004 年 9 月 28 日に発見された 113 番元素の追試実験が RILAC における最優先課題となり、ウランビーム加速のための技術開発は 2006 年度送りとなっていた。第二の問題は、fRC 下流で行う第三段の荷電変換において 88 価ウランを取る予定であったが、これはあくまで計算による評価値に過ぎず、早期に理研で確認する必要があった。設計上 SRC は 86 価ウランまで無理なく加速する事が出来るが、86 価でも十分な収量が得られない場合はそれなりの対策を講じなければならない。またこの第三ストリッパーはビームエネルギーを 10% 下げるという極端に厚いストリッパーを使うのだが、ストリッパー通過後のビームの質が想定範囲内に収まるか、これも計算にのらない問題として早期に実験的に確認することが求められていた。

これら諸課題が実際にどうであったのか、建設とビームコミッショニングが並行して進んだこの一年半の様子を以下に概観することとしよう。

### 4. 2006 年 4 月~6 月 建設工事

この時期、大別して以下の 3 つの作業が並行して行われていた。SRC では、断熱真空系の補強工事完了を受けて 3 月 16 日より超伝導コイルの再冷却を始め、4 月 13 日に SRC コントロールデュアーの液体ヘリウム貯槽に所定量の液体ヘリウムが溜まり励磁可能となった。4 月 15 日 20 時 22 分にまず超伝導メインコイルが定格電流 5000 A に到達、同 21 時 17 分には全超伝導トリムコイルが定格電流 3000 A に到達した。引き続き 4 月 17 日から 6 月 14 日にかけて磁場測定を行った。磁場測定の詳細に関しては昨年(2005)の加速器学会にて報告されているが<sup>7)</sup>、この磁場測定によって SRC が設計通りクエンチフリーで安定に励磁出来ること、実測と設計磁場の違いは 0.1% 程度であり問題なく等時性磁場を作れることが確認され、年内のファーストビームに向けて加速器グループ一同大いに意を強くした。

fRC においては 4 月下旬より RF 系の現地調整、具体的には励振器調整、ローレベル試験、ダミーロード試験、実負荷試験、制御試験などが、更にセクター電

磁石メインコイル、トリムコイルのインターロック試験、現地調整作業などが始まった。RF系は数多くの問題を解決しながら6月第二週より実負荷試験に漕ぎ着けたが、ここで一つの問題に遭遇した。fRCはRIBFのサイクロトロンの中で唯一の固定周波数マシンであるが、運転予定周波数54.6 MHzにおいて基本波に対して-40 dBの強度で7倍波が混入することが明らかとなった。ビームに対する影響は軽微であると思われたが、ビーム診断系、とりわけ位相プローブに対する悪影響が懸念されるので、7倍波の成分が桁小さくなる54.75 MHzに運転周波数を変更することとした。この点を除けばRF系の調整はIRCと比較にならない程順調に進み、6月15日には設計電圧450 kVに対して400 kVを達成し、加速試験が可能な状態となった。fRC-RF系の立ち上げに関しても昨年の加速器学会にて報告されている<sup>8)</sup>ので詳細はそちらを参照されたい。

第三にfRC入射およびfRC取り出しビームラインの建設も同時並行で行われた。ビームラインはまっさらの状態に据え付ければ一般的に大した工事ではないが、この工事は以下の理由で大変な難工事であった。まずfRCの取り出しビームラインは壁から400 mmの所を通してのために、二つの偏向電磁石が既存建屋の構造壁に食い込む形で配置される。このため既存ビームラインを一旦解体し、2 m および3 m 厚の構造壁を箱抜きにしないといけない。これは2006年3月に行われた。4月に入ってビームライン電磁石の据え付け工事が開始されたが、fRC入射側は既存ビームラインの電磁石を再配置して使用する部分が多く、既存ビームラインの解体、それに続く電磁石の移動と据え付け、ケーブル配線、冷却水配管、真空系の再組み立て、ビーム診断機器の設置と配線作業をするというもので、これらを専門に応じて計4社が担当した。電磁石の据え付けこそ4月から始まったが、電源の配線工事は入札で業者が決まったのがGW明け、一方7月第一週にはビームを通さなくてはならないというタイトなスケジュールを選んだ理由は、当該工事部分は既存施設のいわばブロードウェーにあたる部分で、RIBF建設中とはいえ既存施設ユーザーの出来るだけ多くの実験をという要求に最大限応えるため、運転停止期間が最小となるスケジュールを組んだからである。担当者と施工業者の献身的な努力の結果無事に工事は完了したが何とも凄まじい工事であった。

残るはfRCの磁場測定である。fRC級のリングサイクロトロンでは加速領域全体にわたって磁場の2次元もしくは3次元マップを取るのが常識で、RRC,

IRC, SRCはいずれも2次元マップを測定した。一方fRCは近年の3次元磁場計算の高精度化を最大限生かして設計されたサイクロトロンであり、磁場のマップを取らずに計算値ベースで加速する予定であった。とは言え3次元磁場計算の精度は磁場分布において0.1~0.2%程度、絶対値で1%程度でありこれでは運転時の出発点としては如何にも不十分なので、計算値を補正するデータ、とりわけその励磁特性を補正するデータを取得するためにセクター電磁石中心線上の磁場分布を6月21日から6月23日の間に測定した<sup>9)</sup>。NMR および Hall プローブを載せた棒を人間が動かしながら測定するというローテクな測定であったが、測定データ自体は全域にわたってNMRで較正されており信頼に足るものであった。

## 5. 2006年7月~11月中旬 fRC 加速試験

fRCでは7月に2回、9月から11月の間に5回、計7回の加速試験を実施した。1回の加速試験はおよそ1週間程度で、既存施設の実験の間に行われた。fRC加速試験にこれだけの時間を割り当てた最大の理由はRIビームファクトリーで最も加速が難しいウランビームを最大の収量かつ最高の品質で後段加速器系に送り込みたかったからである。また多くの機器はIRC, SRCと共通の仕様で作られており全ての問題点をfRCで洗い出しておくというのも重要なポイントである。ところがこのfRC加速試験は後述の通り非常に難渋することとなった。真っ先に直面した問題はfRCではなく既存RRCにおいてウランビームが奇麗に加速出来ないという問題であった。上流RILAC+RRC系におけるウランビーム加速試験は2006年2月中旬に行われた。その結果RRCにおけるターンパターンが計算による予測と大きく食い違い、EICを通過していないと指摘されていた。EICは入射ビームの軌道を規定する装置であり、EICを通らないビームは奇麗に加速出来ない。2月の時点では手荒く調整したのだろうぐらいの認識であったが、高いつけを払わされることとなった。7月3日から始まった第一回の試運転は、長期の加速器運転停止期間明けということで不安定な機器が多く、また様々バグがあったりしてfRC入射ビームラインにビームを通し、fRCにビームを入射して終了した。突貫工事のビームラインも無事機能を果たすことが確認された。この試運転では大変丁寧にRRCの調整をしたのだが、RRCで奇麗に加速出来ないという問題は何ら改善せず、これに加えて当初より懸念されていた通りRILAC下流のチャージストリッパーの寿命が極端に短い(ビーム量10

eμA で数十分程度) 事が明確に認識されるに至った。一週間明けて臨んだ7月17日からの加速試験でも RRC で奇麗に加速出来ないという状況は全く変わらず、入射エネルギーを1% 下げても、運転パラメータを別の計算値より出発して探してみたりとありとあらゆることを試したが状況は好転しない。数日間の試行錯誤を経て関係者に疲労が色濃く見え始めた7月19日、RRC の入射領域を守備範囲とするトリムコイルの電流値を上げ下げしたところ計算の極性と逆の挙動を示すことに気がついた。これが問題解決の糸口であった。7月20日に現場にて極性確認した所確かに計算の極性とは逆のトリムコイルが3本見つかった。これらトリムコイルは加速領域の等時性磁場の形成に関与しないため位相プローブでは極性の違いが分からず、また実際に他の運転モードではこの極性の方が好都合であったらしいが、加速エネルギーの低いウランビームではこれらのトリムコイルをほぼ最大電流で使用するためどうにもならなかったのである。正しい極性でやり直した結果、7月21日18時45分にビームをfRCの最外周まで、つまり規定エネルギーまで加速することに成功した(図4)。しかしながら加速ビーム量が少なくビーム取り出しには至らなかった。

RRCに入射したビーム量は800 nA程度、荷電変換して得られたビーム量は40 nA程度、fRCで加速出来たビーム量はわずか3 nAであった。この当時fRCの基本性能に関してはそれまで行われた各種試験によって自信を持っていたのだが、ウランビーム加速はRIBFで最も難しい加速モードであり、加速効



図4 fRCにおいて初めてウランビーム加速に成功した時の様子(06/07/21)。ラディアルプローブを設計最外周軌道においてビーム量を測定した。3.6 nAのビームが観測されている。

率の上がない理由は複合的で(後になって整理がついたが)、(1)RRCから取り出したビームの質が不十分、(2)RRC下流のチャージストリッパで予想以上にビームの質が悪化する、(3)設計上必要なRRC-fRC間リバンチャーが工程の関係で未だ稼働していなかった、(4)RRCからfRCに至るビームラインにおける分散整合が不十分であった、(5)ビームラインに設置された電流モニター(ファラデーカップ)のノイズ対策が不十分であった、(6)fRCの位相プローブ信号がノイズに埋もれて検出できず、精度良い等時性磁場が生成されなかった、などである。我々はパズルを解くが如く一つ一つ問題を解決していくこととなった。(3)のリバンチャーの実負荷試験は当初予定通り8月の既存施設メンテナンス期間中に行われた。実負荷試験自体は順調で、8月23日には運転時電圧に相当する124 kVのCW運転に成功し、8月30日には定格の5.3 kW(474 kV)におけるCW運転に成功した<sup>10)</sup>。(5)のファラデーカップのノイズ対策は純度が上がらない冷却水を抜きノイズフィルターを増強することによってかなり改善された。(4)は計算と実測の比較から運転パラメータを見直し、9月第二回の試験運転で奇麗に分散整合させることに成功した。(6)においては、RRCでは位相プローブ(静電ピックアップ)の信号をアンプで増幅してオシロスコープで観測していたのだが、いくらノイズフィルターを入れても運転周波数の高いfRC(54.75 MHz)ではこの方法は成り立たず、ロックインアンプ(LIA, SR844を使用)を導入することにした。LIAで位相プローブの信号測定に成功したのは秋も押し詰まった10月27日である。ストリッパ関係では、(1)のリニアック下流のストリッパに関してはイオン源から35価イオンを供給してもらうこととし、当面は強度を抑えて運転することとした。これによりイオン源グループはfRC試験中には14価ウランの安定供給に力を尽くし、試運転のない週は金属ウランを用いた35価イオン生成試験を行うという大車輪の活躍で、まず9月20日に35価イオンの引き出しに成功した後、大強度化、安定度向上を計り11月中旬の時点では14価加速とほぼ同等のビーム量をRRCに供給できる状態に近づいた。

この様に数々の手を打った結果、まず9月29日2時30分にfRCからファーストビームの取り出しに成功(図5)、前述のリバンチャーが大いに活躍した。取り出しビーム量は僅か3 nAであった。LIAを用いた等時性磁場の生成に成功した11月14日の試運転では取り出しビーム量は35 nA、かなり改善したとは言えfRCの加速効率は11月15日の試運転終了時で未

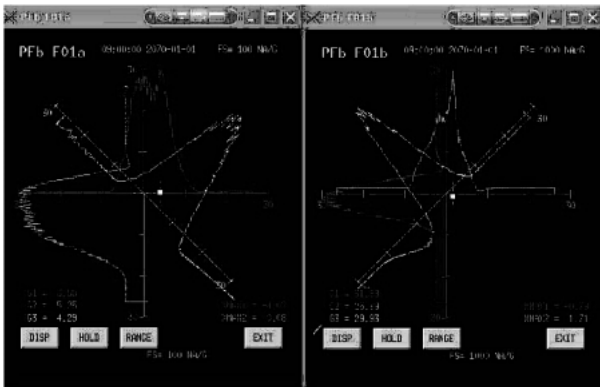


図5 fRCのファーストビーム (06/09/29). fRC 下流の二つのビームプロファイルモニターの測定結果。

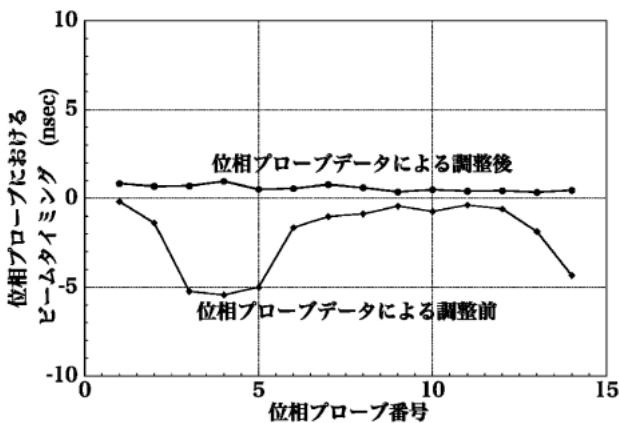


図6 fRCの等時性磁場 (06/11/13). 1 nsecのずれはRFの位相に換算すると約20度に対応する。

だ30%であった。なお、簡単な磁場測定で計算値を補正し等時性磁場を作ろうという我々の試みは十分機能したが、運転パラメータは計算による評価と測定誤差以上のずれがあったことも事実である(図6)。セクター電磁石中心線上の測定データをもとに2次元磁場マップを計算で予測するプロセスの不定性のためである。

残る要改善項目は(2)で、このストリッパーはウラン73個を取るためにエネルギーを3%下げただけの厚さを持ち、実効的な膜厚均一度10%程度を期待していたが、ビームで見ると実際には20~30%程度、これはエネルギー広がり1%に相当するが、これではfRC-RRC間ビームラインおよびリバンチャーのアクセプタンスに収まらない。他の問題がほぼ解決したこの時点でこの問題の抜本的な解決なしにはこれ以上の改善は望めないと判断し、厚さ半分のストリッパーを採用しウラン71個をfRCで加速することとした。これに伴い、fRCの入射半径を1cm大きくする改造

工事と71個加速用データ取得のための磁場測定が必要になるが、後者は前もって10月17日から19日の間に実施済みであり、他の建設工事がほぼ一段落した11月17日より入射半径改造に向けて作業を始めることとした。

## 6. 2006年7月~11月中旬 建設工事

6月14日に磁場測定を終了したSRCでは、6月下旬より再び据え付け工事が始まっていた。工事内容はRF系とそれ以外に大別される。RF系の工事は全5台の共振器と励振器の据え付け、RF系配線工事、現地調整、各種試験である。一方RF系以外ではバレー箱組み立て、SRCビーム真空系の組み立て試験、ビームモニターの組み立て、配線、試験等である。言い換えるとSRCを6台の超伝導電磁石からサイクロトロンにする作業一切がこの期間に行われた。工事自体は大きなトラブルなく進行し、9月末にはビーム真空系の真空引きが始まり、約3週間のリークハントの後、10月18日にはクライオポンプの全数立ち上げが完了した。これに先だて磁場測定終了後昇温していたSRC超伝導コイルの再冷却を9月13日に開始し、10月12日には励磁可能な状態となった。リークハントと並行してフローズスイッチなど磁場中で誤作動する可能性のある機器の動作試験と漏れ磁場対策が精力的に行われたのもこの頃である。真空系が立ち上がった後は、入射及び取り出し静電チャンネルの駆動試験、エージング、さらにビーム診断機器の配線工事、駆動試験などが行われた。一方RF系は9月25日より真空管アンプのダミーロード試験が始まり、SRC励磁に合わせて10月中旬よりSRC漏れ磁場中( $B_z > 100$  gauss)における真空管アンプの動作試験が行われた。SRC励磁中における真空管アンプの動作に関しては実績がないため心配されていたがこの時点では大きな問題はないと判断された。10月下旬にはそれまでの試験で見つかったビーム診断機器の断線やSRC中心部入射系との結合のため一旦SRCを大気解放し、11月13日に実負荷試験開始に漕ぎ着けた。更に11月13日から15日にかけて、SRC超伝導コイル系電源のリプルを低減するための調整が行われた。

SRC以外にこの時期大忙しであったのがビームライン関連工事および、ビーム診断系関連の工事と試験、さらに制御系完成に向けての各種作業であった。ビームライン工事に関しては、fRC取り出しビームラインは電磁石据え付け、配線工事こそ6月中に終了したが、夏期メンテナンス中の8月に真空、ビーム診断関連の据え付け作業等を実施し、8月末までに

通電試験と遠隔制御試験を完了した。前述の通り fRC の試運転は大変難航したため、実際に fRC 取り出しビームラインにビームを通したのは 11 月 14 日であった。残るビームラインは IRC 入射ビームラインと SRC 入射ビームラインの一部であるが、これも fRC ビームラインと同じ戦略を採用、9 月上旬から 11 月 20 日の間に、電磁石据え付け、ケーブル配線、冷却水配管、真空系組み立て、ビーム診断機器設置、各種試験が行われ、使用可能な状態になった。この工事と同時並行の形で、ビームラインに設置されるビーム診断機器を制御ネットワークにぶら下げ、遠隔駆動制御およびデータ取り込みを可能にする作業が休みなしで行われた。この際、fRC の試運転で問題となったノイズ対策も併せて実施された。制御系関連では IRC 入射ビームライン以降の全てに関して、統合化された形でコンソールより制御出来る様に各種制御メニューの作成、試験が実施され、使用可能な状態となった。この様に 11 月 20 日の時点では当初予定通り IRC における加速試験が可能な状態にまで仕上がった。「為せば成る」の言葉通りである。

## 7. 2006 年 11 月下旬 IRC 加速試験

IRC と SRC のビームコミッションングは  $^{84}\text{Kr}^{31+}$  ビームで行うことになった。このビームは Bp が  $^{238}\text{U}^{88+}$  とほぼ同じで、上流から安定に供給されるので選ばれた。これとは別に  $^{27}\text{Al}^{10+}$  も候補に上がったが、年度内に Kr ビームで施設検査を受ける予定なので Kr ビームを選択した。11 月 21 日より RRC の磁場を立ち上げ、11 月 22 日午前中に RRC から取り出したビームをまず RIBF 棟の直上流たる E1 室まで輸送した。11 月 22 日中には RIBF 棟に初めてビームを入れるという事で放射線管理グループのチェックを受け、その後約 2 日を IRC 入射ビームラインのバグ取りおよび調整に費やし、11 月 25 日の 0 時 30 分に IRC で加速すべくビームを入射した。IRC は fRC とは比較にならない程順調で、一時間後の 1 時 30 分には最外周までの加速に成功し、加速開始から 1 時間 50 分後の 2 時 20 分にはファーストビームの取り出しに成功した (図 7)。

この様に大変容易にファーストビーム取り出しに成功した要因としては、IRC は工程上最も先行していたこと、fRC における経験が的確に反映されたことなども重要であるが、やはり Kr ビームと U ビームの品質の違いが最大の要因であったと思われる。その後調整を続けながら各種ハードウェアの試験を行い、11 月 28 日の 0 時 31 分にはほぼ良好な等時性磁場が

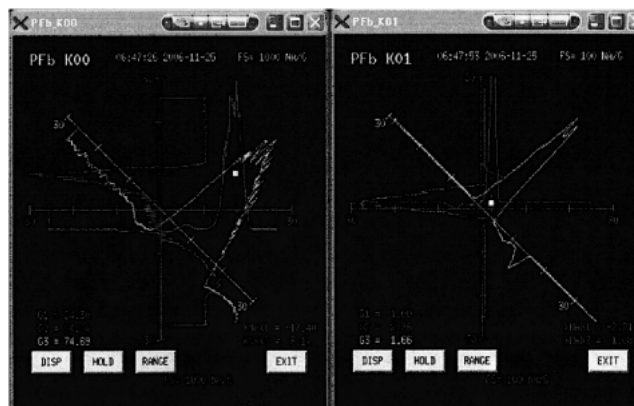


図 7 IRC 取り出しビームのプロファイル (06/11/25)。これはファーストビーム取り出しより約 4 時間後に記録されたものである。

得られ、サイクロトロンとしての基本性能の検証が終わった。

順調に進行した IRC 加速試験で生じた問題としては、IRC において無視できない一次ハーモニック磁場が認められたこと、及び最大で 110 kV 程度の電圧を印加する静電チャンネル (EIC, EDC) の高圧ケーブルに数回にわたり絶縁破壊が発生したことが挙げられる。前者はセクター電磁石毎に独立に電流値を設定出来るトリムコイルのパラメータを調整することにより補正し無害化された。IRC の磁場測定は製作メーカー工場において 2 台一組で行われた後、解体、補修を経て理研に運び込んで再度組み立てたが、一連の作業の過程でセクター電磁石が発生する磁場が僅かに変わった模様である。後者は電源を負荷直近に移動するという配置の見直しにより解決した。

## 8. 2006 年 12 月 トラブル続出

IRC は順調に立ち上がり、いよいよ公約の SRC ビーム加速が目前に迫ってきた。しかし好事魔多し、SRC エージング中の 12 月 3 日に SRC 冷凍機の冷凍能力低下が報告され、翌 4 日には SRC ビーム真空系にリークが発生した。この真空リークは後に FT 共振器の電力フィーダー碍子の機械的破損によるものと判明、大気解放して応急処置を行った。冷凍能力の回復には 1 週間を要する昇温、再冷却が必要であるが、無理な運転をしないという判断のもと 12 月 8 日に昇温が決定した。上流加速器系では再昇温後の SRC 試運転に向けて再度 Kr ビームの加速準備に入った。12 月 8 日から Kr ビームの加速を始め、12 月 12 日には IRC からビームを取り出したが、ビーム強度が予想ほど増えず、SRC のビームコミッションングが難し

くなるとの判断から Al ビームに切り替えることになった。12月13日に Al ビームに切り替え、12月17日には IRC からビームを取り出し、同日 SRC 入射ビームラインのコミッショニングを行い SRC 加速への準備が整った。Al ビームの IRC 通過効率は最大 60%、SRC 入射直前のビーム量は 80 nA で SRC 加速試験、ファーストビーム取り出しには十分な量である。一方昇温、再冷却中の SRC は 12月16日に冷却が完了し、励磁可能となった。トラブルで中断していた SRC-RF のエージングは再励磁後に再開、漸く 12月21日には SRC の 4 台の加速共振器のうち 2 台が CW 運転モードになり、SRC の本格的な調整を始める事とした。

fRC や IRC とは異なり SRC はビーム入射すら非常に難しかった。最初の調整では SRC 入射ビームのエネルギーが設計より 1% 程度低く、これは TOF 法でビームエネルギーを測定し、IRC においてより外周からビームを取り出すことによってマッチさせたが、何分設計では加速共振器 4 台合計で 2.2 MV に対しエージング不足で初期不良も抱えた状態でトータル 1.0~1.35 MV で加速しているため十分なターンセパレーションが得られない。更に SRC の入射用静電チャンネル (EIC) は 3 分割タイプで 4 軸の駆動パラメータを持つ構造であるが、設計とはかけ離れた条件でなかなか最適パラメータが見つからない。悪戦苦闘の末ビーム入射に成功、12月23日には入射点から約 1000 mm 外側まで加速できた。取り出しは入射点から約 1800 mm、ここに至って残る問題はビーム取り出しのみと思っていたが、これから 2 日間全く進展せず、いくら磁場パラメータを調整してもこれ以上外側に加速できなかった。実際に運転していた若者達 (といっても平均年齢 40 歳ぐらい) は磁場パラメータを必至で探っていたのだが、RRC を立ち上げたベテラン曰く等時性磁場が悪いのであれば加速位相から減速位相に入ったビームが位相プローブで測定出来るはずなのでそれを測って見よとの事で測定して見ると見事に戻りビームはない。更に、この状態でビーム強度を最大にすると真空度が明瞭に悪化する、この二つの事実からこの領域でビームが何ものかに当たって失われている事が明らかとなった。確信を持ったのは 12月25日の 23 時 35 分の事である。

翌日 SRC の磁場と RF を落として現場確認をした所、誤って加速軌道を横切る形で Q マスが取り付けられている事が判明、早速大気解放してこれを取り外し、12月26日の 15 時 40 分に真空引きを開始した。12月27日は大気解放したため SRC の RF が立たず、

RILAC から SRC 入射直前までの再調整を行い、励振完了を待った。

## 9. 2006 年 12 月 28 日

5 時 36 分に共振器 1 番が CW モードになり、5 時 50 分には 3 台が CW モードになった。これを承けて 6 時 00 分より SRC に再入射した。常伝導サイクロトロンではヒステリシスのため電流値を戻しても磁場が戻らないもので、SRC もどうかと心配したが再開して 8 分後には何らパラメータを調整する事なく取り出し領域まで加速出来た。SRC の磁場は 3.5 T 程度と鉄が完全に飽和しているためだと思われる。また調整なしに最外周まで加速できたのは磁場測定で決めたパラメータの精度が良かった証拠でもある。残るはビーム取り出し、6 時 40 分より取り出し調整に入ったが、入射同様難作業となった。ビーム取り出しでは取り出し用静電チャンネル (EDC) 下流の取り出しビーム軌道上にラディアルプローブ (RP) を移動し、そこでビームを確認すれば EDC を通過したビームを確認した事になるのであるが、飛程の長い核子あたり 345 MeV の Al ビーム加速では、取り出し軌道上でも、取り出し軌道より数センチ外側でも RP がビームに反応するという現象に直面した。何らかの理由で減速された Al ビームがバレー部の逆磁場で外側に偏向されたのか、各所で発生しているであろう二次電子に RP が反応しているのか、はっきりした事は分からない。また、RP 下流の SRC 取り出し用磁気チャンネルや取り出し偏向電磁石には出入りにバッフルスリットが取り付けられ、スリットに当たったビーム量が読めるようしてあるが、飛程の長い Al ビームの場合はバッフルスリットも RP も容易に突き抜けるため二次電子を測定することになる。我々が観測しているのはビームが当たったバッフルスリットから二次電子が放出された現象か、隣接するバッフルスリットから発生した二次電子を拾っているのか、バッフルスリットに繋ぎ間違いはないのか、測定系アンプの極性は正しいのか、容易に判断がつかない (本来これらを確認するためのビーム試験である)。朝からコンソールを埋め尽くすギャラリーの中、それでも試行錯誤を繰り返し、徐々に調整の感覚を掴みつつ、MDC2、MDC3 と一つ一つ下流のバッフルスリットでビームを確認、最後の取り出し偏向電磁石にビームを通す段階ではプロファイルモニターやファラデーカップより感度の高い放射線モニターまで持ち出して、ついに 16 時 00 分、SRC からのビーム取り出しに成功した (図 8)。5 ヶ月の工程遅延を乗り越えた瞬間である。RF 共振



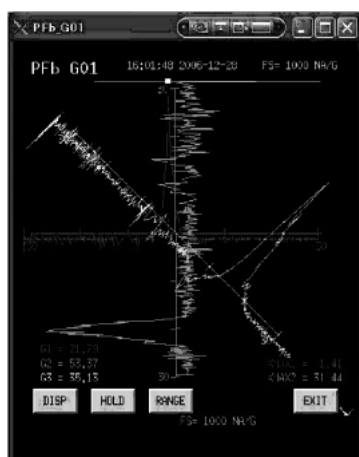


図8 SRCのファーストビーム (06/12/28). SRC 下流 G01におけるビームプロファイルである.

器は朝から一度もトリップせず CW モードを維持し続けた.

### 10. 2007年1月～3月

2007年の2月中旬からは BigRIPS 試験, 引き続き SRC におけるウランビーム加速試験が予定されていた. 1月から2月中旬にかけて, IRC, SRC では大気解放して加速試験後初のメンテナンスや各種改良作業が行われた. 12月時点ではエージング不足だった SRC-RF もこの時期に入念にエージングが行われた. また, ウラン 71 価加速用に入射半径を 1 cm 増やす改造を施した fRC では 1月17日より加速試験を行い, 1月20日の時点で加速効率 48% を記録した. この間 1月19日には懸案の fRC 下流ストリッパーにおけるウランビーム荷電分布測定が行われ, 86 価が最大収量となることが分かった. 更に 2月14日から 16日の間にウランイオンをイオン源から 35 価で引き出すモードで RRC までの加速試験を実施した. これらの作業および加速試験で全ての準備が整ったこととなる.

ウランビーム加速は 86 価で行うため, BigRIPS における RI ビーム生成試験には  $B\rho$  の近い  $^{86}\text{Kr}^{31+}$  を用いることとした. IRC, SRC においては 12月運転時よりも約 2% 高い磁場が必要で, 加速に成功した暁には SRC は K 値 2600 MeV を記録する. 3月11日に SRC に Kr ビームを入射した後, 3月12日には SRC からビーム取り出しに成功した. 3月12日より BigRIPS における RI ビーム生成試験が始まり 3月15日に, BigRIPS 試験は成功裏に終了した. 図9は BigRIPS 初の粒子識別, つまり RI ビーム生成を示したものである. さらに 3月15日には fRC を除く部分

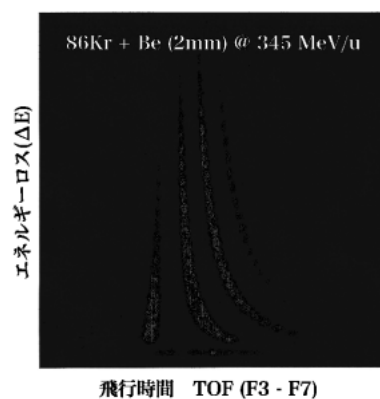


図9 BigRIPS における初の粒子識別の様子

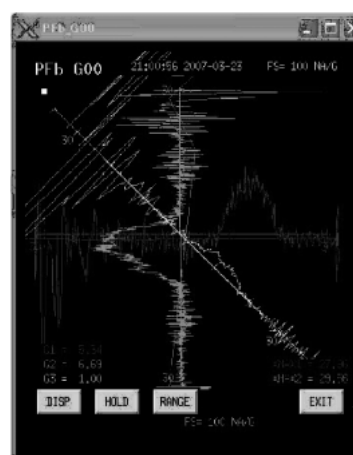


図10 SRC における初のウランビーム (07/3/23). SRC 下流 G00 におけるビームプロファイルである.

の RIBF 新加速器系の施設検査も行われ, 3月22日に合格の通知があった.

SRC におけるウランビーム加速試験は 3月18日より始まり, 3月22日に IRC より, また翌 23日 21時 00分には SRC よりウランビームの取り出しに成功した (図10). ここに我々は課された全ての課題を達成したのである. ウランビームはこの後 3月31日まで BigRIPS に供給され, 様々なテストが行われた. この間 3月27日には fRC の施設検査も行われ, こちらも問題なく合格した. ここに RIBF はユーザーにビームを供給して本格的に実験を行うことが可能になった.

### 11. 2007年5月～6月 RIBF 初実験

2007年2月の時点で, 5月に RIBF の初実験をウランビームで行うことが決定した. ウランビームを用いた新 RI 生成実験である. ビーム量が物を言う実験

であり、RRCに入射するビームのバンチ幅がfRC以降の新加速器系で要求される値よりも大きいという問題に対処するために、RRC上流にある2台のリバンチャーの配置換えを敢行、ウランビーム加速時にはリバンチャー2台を直列で使用し、より以上にバンチ幅を圧縮出来るシステムに改造した。改造作業は3月、4月に実行された。これによりfRC取り出しビーム量は2倍となった。図11にはコミッショニング期間を通じてのfRCにおけるウランビーム取り出しビーム量が示されている。様々な改善が功を奏し、

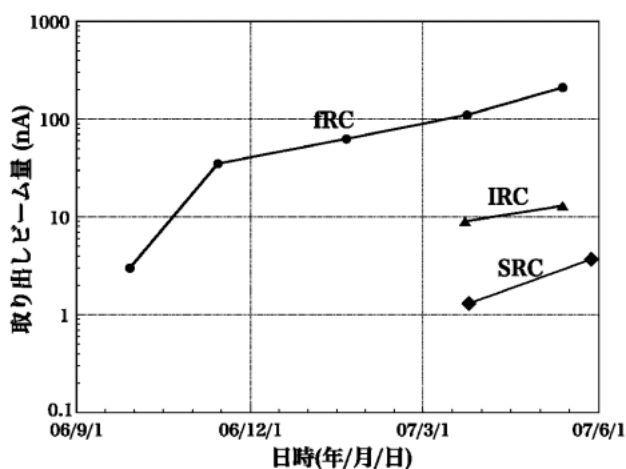


図11 加速試験で取り出されたウランビーム量。フェラデーカップの較正が未だ不十分なので2倍程度の誤差が含まれると思われる。

ビーム量 200 nA, 通過効率 100% (厳密に較正されていない) を達成した。

しかしながら未だIRC, SRCの加速効率は上がらず、ウランビーム実験時にユーザーに供給できたビーム量は最大4 nA程度である。このビームを用いて<sup>125</sup>Pdという新RIの生成に成功した。RIBFにおける初の実験成果で、この結果は6月6日東京で行われた原子核物理学国際会議INPC2007で緊急発表され、理研仁科加速器研究センターは面目を施すこととなった。

ここに詳細を述べることはしないが、1月以降全てが順調だった訳ではない。いくつか初期不良と思われる故障が続発した時期もある。表2にこの一年半の主な故障をまとめておく。

ここではビームコミッショニング期間中にメーカーに依頼して修理した故障が記載されている。故障のうちかなりの部分は初期不良の類いであるが、一部は長期間の加速試験で初めてその脆弱性が現れたものもあり、また一部は試験環境と実際の運転環境が異なるためビームコミッショニング時に初めて現れたものである。RIBFを構成するエレメント数から考えれば少ないが、結構な数の故障が発生したのも事実である。

RIBF 加速器系の現時点のパフォーマンスを表すものとして、3月に行われたKrビームと5月に行われたウランビーム加速における各加速器の加速効率を表3にまとめておく。表中の値のうち、fRCの加速効率はベストの値を記載し、IRC, SRCは加速試験中

表2 RIBFの主な構成要素とビームコミッショニング中に発生した故障。ビームラインはfRC室からSRC室までの範囲でリストを作成した。電磁石類の台数は電源数で記載している。

	構 成	故 障 件 数
ビームライン電磁石関係	偏向電磁石 14 台, 四重極電磁石 75 台, ステアリング電磁石 65 台	電源故障 2
サイクロトロン (セクター電磁石, 入射取り出し系)	fRC/メインコイル 5 台, トリムコイル 32 台, 入射取り出し系 8 台/ IRC/メインコイル 7 台, トリムコイル 38 台, 入射取り出し系 11 台/ SRC/メインコイル 7 台, 超伝導トリムコイル 12 台, 常伝導トリムコイル 38 台, 入射取り出し系 20 台/	電源故障 9 ケーブル絶縁破壊 4 高圧導入部真空漏れ 1 EIC, EDC 用保護抵抗故障 2 コイルロウ付け不良 3
RF 系	fRC 加速共振器 2 台, FT 共振器 1 台 IRC 加速共振器 2 台, FT 共振器 1 台 SRC 加速共振器 4 台, FT 共振器 1 台 リバンチャー	機械的破損 3 アンプ, 電源関係 6
ビーム診断系	ビームライン/プロファイルモニター 46 台, フェラデーカップ 20 台, TOF 測定用プロスティックシンチレータ 9 台/ ラディアルプローブ/fRC 1, IRC 4, SRC 3/ 位相プローブ/fRC 14, IRC 15, SRC 20/	ラディアルプローブケーブル絶縁破壊 2 位相プローブケーブル破損 1 位相プローブ切り替えスイッチ 2
制御系	上記機器の制御	制御用ボード故障 1

表3 RIBF 各サイクロトロン加速効率(%)

ビーム	日時	fRC	IRC	SRC
$^{86}\text{Kr}$	07/03/14		50	15
$^{238}\text{U}$	07/05/28	100	35	20

の典型的な値である。表から明らかな様に IRC, SRC の加速効率はかなり低いが, IRC, SRC の基本性能, つまり等時性磁場の精度, 磁場安定度, RF 安定度に問題がある訳ではなく, IRC や SRC の通過効率が低い理由は初期故障のため一部装置が正常に稼働していなかったことに加え, 上流のビームの質が未だ十分でないためと考えられる。今後は各種ビームモニターの高精度化, それに伴う運転パラメータの見直し, システム全体としての安定性向上を今暫く行う必要があり, 精力的に作業を進める毎日である。

### 最後に

この報告は RIBF コミッショニングの雰囲気伝えるために, コミッショニングの経緯を著者の責任でまとめたものである。仁科センター加速器グループが成し遂げた技術的成果の詳細は本年度の加速器学会年会などしかるべき場で報告される予定であるのでそちらを参照されたい。RIBF の立ち上げに携わった理研加速器グループは総勢 28 名, 加速器コンプレックスの規模に比して少なすぎる陣容であったが, 予定通りビームを出すことが出来た。これは 10 年余りの歳月

をかけて行われた RIBF の設計, 製作, 各種試験が適切に行われたという事実の反映であり, RIBF の設計, 製作に参加した多くのメーカー技術者の方々の献身的な努力に負う所が大きい。またコミッショニング期間中, 装置の運転に携わったオペレータ諸氏の貢献や仁科加速器研究センターの全面的なバックアップなしにはここまで順調にコミッショニングを進めることは出来なかったであろう。ここに心から感謝の意を表す次第である。

### 参考文献

- 1) Y. Yano, "The RIKEN RI Beam Factory Project: A Status Report", Nucl. Instr. Meth. B (2007), doi: 10.1016/j.nimb.2007.04.174 (in press).
- 2) T. Kubo, Nucl. Instr. Meth. B204, 97 (2003).
- 3) N. Inabe et al., Proc. 17<sup>th</sup> Int. Conf. On Cyclotrons and Their Applications, 200 (2004).
- 4) J. Ohnishi et al., Proc. 17<sup>th</sup> Int. Conf. On Cyclotrons and Their Applications, 197 (2004).
- 5) H. Okuno et al., Proc. 17<sup>th</sup> Int. Conf. On Cyclotrons and Their Applications, 373 (2004).
- 6) H. Ryuto et al., Proc. 17<sup>th</sup> Int. Conf. On Cyclotrons and Their Applications, 307 (2004).
- 7) J. Ohnishi et al., Proc. PASJ3-LAM31, WO28 (2006).
- 8) N. Sakamoto et al., Proc. PASJ3-LAM31, FP49 (2006).
- 9) N. Fukunishi et al., Proc. PASJ3-LAM31, WO13 (2006).
- 10) T. Aoki et al., Proc. PASJ3-LAM31, FP20 (2006).