

## Status of the RIKEN Superconducting Ring Cyclotron

Hiroki Okuno, Kazunari Yamada, Jun'ichi Ohnishi, Nobuhisa Fukunishi, Shigeru Yokouchi, Hiroo Hasebe,  
Kumio Ikegami, Takeshi Maie, Keiko Kumagai, Naruhiko Sakamoto, Osamu Kamigaito, Makoto Nagase,  
Masaki Fujimaki, Misaki Komiyama, Akira Goto, Masayuki Kase and Yasushige Yano  
RIKEN, Nishina Center for Accelerator-based Science One of Accelerator Facilities  
2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

### Abstract

RIBF加速器系の最終段加速器である超伝導リングサイクロトロン (SRC) は世界で初めての超伝導コイルを用いたリングサイクロトロンであり、その規模も世界最大のものである。SRCは、1997年に設計検討がはじめられ、2005年8月に超伝導磁石部分の組み立てが終了した。超伝導磁石部分の冷却励磁試験、磁場測定を行ない、これらが設計通り出来上がっていることを確認した後、2006年6月より、他の部分のパーツ (高周波加速系、真空系、ビーム診断系等) の組立を開始した。組み立て終了後ビーム真空排気、rfの焼き出しと進み、12月中旬よりSRCのビームコミッショニングを開始した。幾つかの困難はあったが、12月26日に無事ファーストビームを取り出すことに成功した。

## 理研超伝導リングサイクロトロンの現状報告

### 1. はじめに

1997年より、理化学研究所では、RIビームファクトリー計画 (RIBF) の設計建設が進められてきた。[1] このRIBFは次世代のRIビーム施設として、世界で最も強度のあるRIビームを全元素領域で発生させる事が出来る。RIビームは、高速に加速された安定なイオンビームの入射核破砕反応の産物として出来るため、この様な施設には、大変強力な重イオン加速器が必要不可欠である。これを実現させるために、RIBFでは、fRC, IRC, SRC の3つのリングサイクロトロンを現存する加速器複合系の後段加速器として、新たに建設してきた。2006年末にこの加速器部分が完成し無事ファーストビームを得る事が出来た。2007年3月にはこの施設の第一目標であるウラン加速に成功し、5月には、このウランビームを使った新同位元素探索を開始し、 $^{125}\text{Pd}$ の新同位元素を発見した。

図1にSRCの平面図を示す。SRCは世界初の超伝導リングサイクロトロンであり、K値は史上最大の2600MeVである。総重量8300トン、高さ8m、直径19mの巨大なものである。6基の超伝導のセクター電磁石はセクター角25度で、最大3.8Tの磁場を加速領域に生成する。加速は4台の加速共振器と1台のフラットトップ共振器で行う。SRCの中心側と外周側には、静電及び磁気チャンネルが設置され、ビームの入射と出射が行われる。このサイクロトロンの特徴的な所は、通常はオープンとなっているセクター電磁石間のバレイ領域も約1mの鉄の板で囲われている事である。これにより磁氣的及び放射線的なシールドが付加され、超伝導コイルから外部への漏洩磁場が減ると共に、要求磁場を実現するために必要な起磁力も低減する事が可能である。

セクター電磁石は1対の主コイルと等時性磁場を

形成する4対の超伝導トリムコイルの2種類の超伝導コイルを有する。主コイルは周長が約10mで、8mm x 15mmのアルミ安定化されたNb-Ti超伝導ケーブルが396ターンソレノイド巻きされている。コイルの冷却はコイル容器で作られた液体ヘリウムのBathの中で冷却される。この超伝導線に5000Aの電流を流して、1セクター辺り約4MATの起磁力を生成する。超伝導トリムコイルは薄くて広いコイルであり、メインコイルに取り付けられる。色々な加速条件に対応

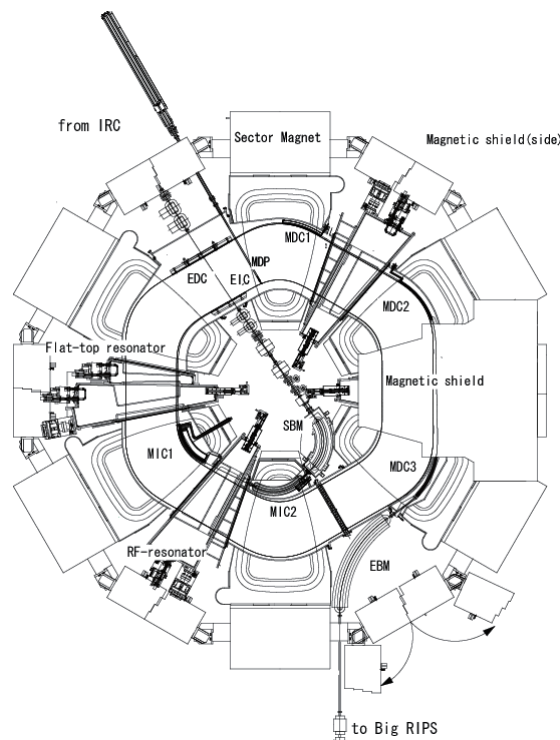


図1: SRC平面図

するために、4セットのコイルが用意されており、各電流値が自由に変える事が出来る。コイルの最大電流は3000Aであり、ダブルパンケーキ巻きが採用されており、冷却は間接冷却が採用されている。これらの超伝導コイルは組上げられた後、輻射シールドにより囲われ、クライオスタットの中に入る。室温部分と極低温部分を分けるために、コイルは、合計17本の断熱支持棒で支持される。

## 2. 磁石完成からファーストビームまで

超伝導セクター磁石の組上げは、2005年8月に終了した。昨年の仙台の年会の際には、組上げ終了後に実施された超伝導コイル部分の冷却励磁試験、磁場測定が終了し、磁石部分はほぼ設計とおりに仕上がっている事がわかった事、そして、磁場測定終了後は、共振器の設置、ビームチェンバーの接続作業を行なっている事を述べた。[2][3]

SRCの6つのバレイ領域の内4つは、共振器が設置されるが、残りの2つのバレイ領域には、入射取り出し用のEIC/EDCを内蔵するバレイ箱とビームの等時性磁場を測定する為のPhase Probeが入っているバレイ箱が設置される。それ以外に、ビームが通過する領域を真空排気するポンプ類、冷却水配管、共振器を励振するRFアンプ等が設置された。設置の最終段階ではやはり機器の干渉が多数見られ、配管、配線等のやり直しが頻繁に行われた。

各機器の設置配線配管が終了し、真空排気を開始したのは、9月下旬である。最初は、締め忘れたフランジが幾つかあり、音を聴いてリークを探すような状態だったが、10月18日にはクライオポンプが入り、 $10^{-5}$ Pa乗台に入った。図2には、真空の立ち上がりの様子を示す。MBPを入れて真空が立ち上がるには、2日もあれば十分である。通常は共振器を立てない状況で $2\sim 3 \times 10^{-6}$ Paの真空度で運転している。

真空が立ち上がり、ビーム診断機器、RFアンプの配線配管が終了した段階で、初めて超伝導コイルを励磁しての組み合わせ試験が可能となった。まず、RFアンプを起動させた際のノイズが超伝導コイルのクエンチ検出器にのり、誤動作してコイルが高速遮断にいたるのではないかと懸念されていたが、実際その様な現象は起こらなかった。セクター電磁石からの漏れ磁場により、RFアンプ内の

真空管の性能が低下するのではないかとということも懸念された。RFアンプの位置には100ガウス程度の漏れ磁場があり、真空管の許容磁場は50ガウス程度とあったが、特に真空管の性能の劣化は見られなかった。SRC内の主排気はクライオポンプによって行われるので、磁石励磁中にもクライオポンプが正常に動いていることが必要である。バレイ箱に設置されているクライオポンプは500ガウス程度の磁場にさらされるが、クライオポンプの温度が10Kから20K程度まで上昇する程度で、際立って真空が悪化することは無かった。しかしながらSRC外部に設置されているクライオポンプのコンプレッサーの流量計が20ガウス程度の漏れ磁場で誤動作して、最初はコイルを励磁すると殆ど全てのクライオポンプは停止した。これらは流量計を簡易的に磁気シールドすることで流量計の誤動作は無くなった。図3に中心領域の機器の設置状況を示す。ここには、入射BT用のプロファイルモニター、ファラデーカップ、共振器の密同調器等の重要な機器がひしめき合っているが、これらは、最大400ガウス程度の漏れ磁場にさらされる。図3に示すようにトリマーのサーボモータには、磁気シールドを被せた。またPF,FCの駆動の為に電磁弁、入射BT系内水冷磁石用の流量計は、ヨークの架台の中に退避させた。架台はちょうど大きな磁気シールドの役割をしており、5ガウス程度まで磁場が下がっている。

RFの焼き出しを開始したのは、11月頃であり、焼き出しは難航して、RFが立ちにくい状況のまま、ビームコミッショニングが始まった。12/1718時より入射を開始した。EIC直後に置いたMDPでビームが確認されるまでは割りと容易にビーム調整が出来たが、RFが立ってからビームが加速し始めるのに大分時間が掛かった。それは、以下の理由による。入射ビームはSBMを通った後、セクター電磁石の領域に入り、MIC2、MIC1を通った後EICを通過し加速軌道に乗せられる。図1を見れば解るようにMIC1を通過してから入射ビームはセクターを一つ越えてからEICに入る事になる。そのため通過できる軌道に自由度があり、EICを通過せず入射されたり、加速されない軌道であっても入射されてしまうことになる。

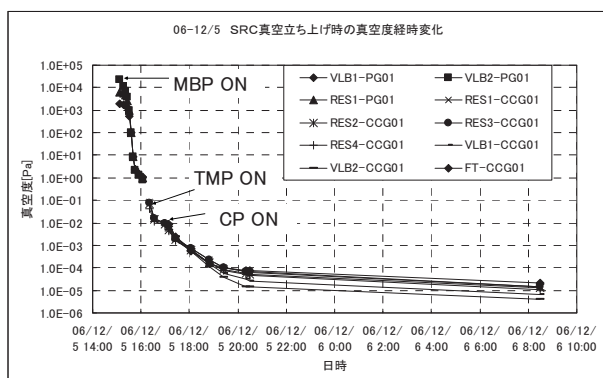


図2: SRCビーム真空の立ち上がり

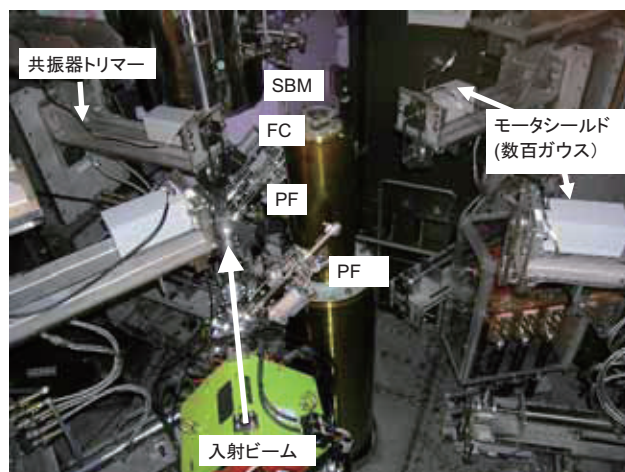


図3: 中心領域の機器の設置状況

最大でも3ターン程度しか廻らない状況が続き、外周まで加速される入射軌道のパラメータを探すのに大分時間が掛かった。SRC内でビームが加速され始めた後、MDPを外側に引きながら、主コイル、4つの超伝導トリムコイルの電流値、RFの位相を振り外周まで加速されるように最適化する。入射点から1000mm程度までは、特に困難も無く加速する事が出来たが、そこから外側へはどんなに詳細に各機器のパラメータを調整しても、加速されなくなってしまった。そういう状況が2,3日続き、どうも中に何か挟まっているのではという疑惑が我々の間で起こってきた。それを確認する為に、ビーム量をなるべく増やし、フェイズプローブの減速フェーズが見えないこと、MDPを外側に出した状態で最大ビームを照射した際にある特定のバレイの真空度が悪化していく事を確認した。そこで我々はビーム真空を大気開放し、真空が悪化バレイの調査を行なった。そのバレイ領域の入射軌道から1000mmのところにあるポートにはピラニーゲージが入っている事になっていたが、同じバレイ領域に設置されるはずの丈の長いQマスが大変放射化された状態で取り出された。我々はこれを取り除きビーム真空を再排気してビームを再開し、その3日後にファーストビームを得る事が出来た。

### 3. ファーストビーム後の改善点&課題

ファーストビーム後、3月23日にファーストウランビーム、5月からそのウランビームを用いた新同位元素探索が行われた。同時にSRCの各機器の改善も行われた。

#### 3.1 改善点 1 (RFの焼き出し)

図4はコミッショニング後に時間を掛けて焼き出しを行った時の主コイル電流の推移である。3000Aの周辺で焼きだしに大分時間が掛かっているのがわかる。この電流値辺りで、漏れ磁場の向きが変わり、電磁石の鉄ヨークが飽和し始めるところである。この焼きだしも、図の示すように会を重ねるごとにRFが入りやすくなってきた事を顕著に示す。

#### 3.2 改善点 2 (EIC/EDC)

EIC/EDCはギャップ 12mmのところ、120 kV 程度の電圧が要求されるが、コミッショニング時は、90 kV も掛けると2mAもの電流が流れるほど悲惨な状況だった。コミッショニング後数回各チャネル

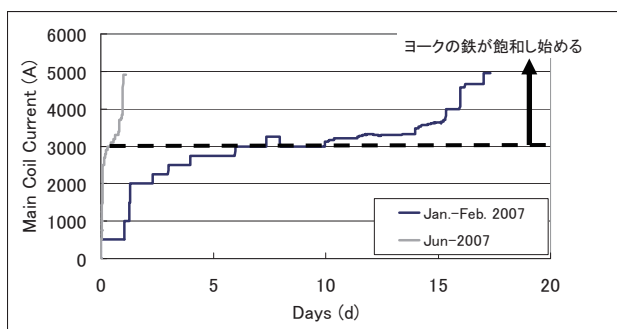


図4: RFの焼き出しの改善

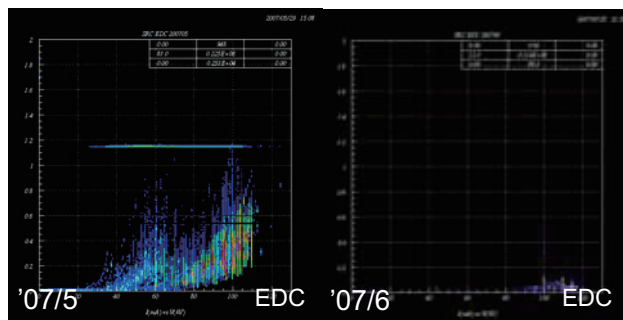


図5: EDCの改善。横軸が電圧縦軸が電流を示す。左側のグラフが洗浄前であり、右側が洗浄後である。

ルのセプタムと電極の洗浄を行った。通常は「ピカール」という金属洗剤とエタノールの洗浄だったが、電極に超音波洗浄を実施し、セプタムをバフ磨きするなどして、改善された。図4に改善された様子を示す。

#### 3.3 課題 (ヘリウム冷凍機の冷凍能力の低下)

SRCの超伝導磁石を超伝導状態に保つ為に必要なヘリウム冷凍機が2ヶ月以上の連続運転に持たないという問題を現在抱えている。これについては、他の発表 [4] において詳細を記す。

### 参考文献

- [1] Y. Yano, "The RIKEN RI Beam Factory Project: A status report", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 261 (2007) 1009-1013.
- [2] H. Okuno, *et al.*, "Status of the RIKEN Superconducting Ring Cyclotron", 第3回日本加速器学会年会・第31回リニアック技術研究会, Aug., (2006), Sendai, WO07.
- [3] J. Ohnishi, *et al.*, "Excitation Test and Magnetic Field Measurement of the Superconducting Ring Cyclotron", 第3回日本加速器学会年会・第31回リニアック技術研究会, Aug., (2006), Sendai, WO28.
- [4] H. Okuno, *et al.*, "Operational Status of the He Cooling System for RIKEN SRC", in this proceedings.