

DESIGN STUDY OF THE SECOND SUPERCONDUCTING RING CYCLOTRON

Jun-ichi Ohnishi, Hiroki Okuno
RIKEN Nishina Center
2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

Abstract

In order to increase the uranium beam current tenfold at the RIBF, we designed the second superconducting ring cyclotron (SRC2). The SRC2 is an alternative to the fixed frequency ring cyclotron (fRC) accelerating U^{71+} and enables to accelerate U^{35+} from the ion source without charge stripping. The beam energy is 11 MeV/u at the injection and 48 MeV/u at the extraction. We designed successfully the superconducting sector magnets, and the beam injection and extraction system. In this design, we adopted the following basic policy to reduce the construction cost; (1) fixed accelerating frequency, (2) four sector magnets, (3) not use a large scale helium refrigeration system, (4) use only normal conducting trim coils (5) no superconducting magnet except one for the beam injection and extraction system.

第2の超伝導リングサイクロトロン設計研究

1. はじめに

理研 RIBF では生成断面積の小さい RI ビームを用いた原子核実験が主たる研究テーマであるため、1次ビームの強度を向上させることは加速器にとって最も重要な課題である。とくにウランは RI 生成において重要なイオンでありビーム強度の増加が強く望まれている。ウランビームは図1に示すように RFQ、線型加速器(RILAC2)および4台のリングサイクロトロン (RRC, fRC, IRC, SRC) によりカスケード加速される。28 GHz ECR イオン源から U^{35+} が引き出され RILAC2, RRC で加速された後、11 MeV/u において U^{71+} に、fRC 加速後の 50 MeV/u において U^{86+} に荷電変換(CS)された後、IRC, SRC により最終の 345 MeV/u まで加速される。第1 CS の収率は約 18%、第2 CS の収率は約 28%であり、イオン源から SRC 出口までの荷電変換を含めた通過効率は約 1/200 と非常に小さい。そこで本研究では fRC の代わりに第2の超伝導リングサイクロトロン (SRC2) を建設して磁場強度を増強し、 U^{35+} のままで加速することを設計検討することとした。この場合、第1 CS を使用しないことと荷電変換に伴うビームの広がりを抑制できるため、10 倍程度の通過効率の向上を見込むことができる。SRC2 の設計にあたって投資可能な建設コストであることが重要で、現 SRC^[1] に比べて大幅にコストを低減するため、以下を基本方針とした。(1) 加速周波数は固定とする。

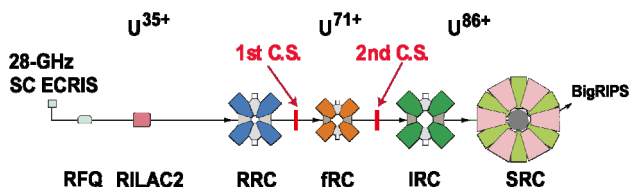


図1：ウランビームの加速システム（現状）

(2) セクター数を 4 とする。(3) 超伝導コイルの冷却は大型ヘリウム冷凍プラントを使用せず GM または GM-JT 冷凍機によるものとする。(4) トリムコイルは常伝導のみとする。(5) 入射取り出し機器はできるだけ常伝導とする。

2. 第2超伝導リングサイクロトロン (SRC2)

図1と表1に SRC2 の全体図と諸元を示す。セクター数は4でK値は 2200 である。2台の加速共振器と1台の FT 共振器が設置される。加速共振器の周波数は、RILAC2 が 36.5MHz 固定であるため、73

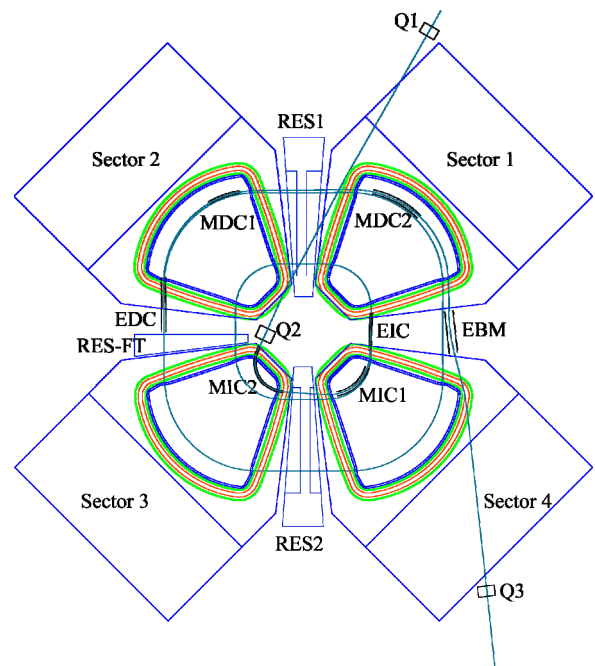


図2：SRC2の平面図

表 1 : SRC2 の諸元

K値			2220
エネルギー	入射	MeV/u	10.8
	取り出し	MeV/u	48
加速周波数		MHz	73 or 48.7
ハーモニクス			18 or 12
平均半径	入射	m	1.775
	取り出し	m	3.65
チューン	vr		1.09~1.15
	vz		0.71~0.76

表 2 : SRC2 セクター電磁石の諸元

セクター数			4
ヨーク重量		t	670
磁極間隙		mm	180
起磁力		MA	1.62
軌道上最大磁場		T	3.2
常伝導トリムコイル			
	数量	対	20
	定格電流値	A	600~1200

MHz あるいは 48.67 MHz とする。ハーモニクスはそれぞれ 18 または 12 となる。現 fRC は 36.5 MHz の 1.5 倍の 54.75MHz、ハーモニクス 12 であるので、軌道半径は 9/8 倍となる。共振器は加速電圧が 500 kV 程度必要であり設置スペースの問題もあるが未設計である。

2.1 セクター電磁石

表 2 にセクター磁石の諸元を示す。軌道上の最大磁場は 3.2 T で、メインコイルは NbTi 超伝導導体を使用する。磁極間隙は後述の超伝導入射磁気チャンネル (sMIC2) を挿入するため 180mm とした。電磁ヨークの重量はもれ磁場と超伝導コイルに働く電磁力を小さくするため、fRC の約 2 倍の 1 セクター 670 トン程度とした。ビームエネルギーと N 値は固定であるので、等時性磁場は磁極形状を最適化することにより 20 対 1 ターンの常伝導トリムコイルで作成することができ、各コイルの電流値は概ね 600A (15 ガウス程度) 以下であった。U³⁵⁺ から m/q=2 までのイオンについて等時性磁場は作成できた。内周側と外周側のトリムコイルは、入射取り出し用磁石のもれ磁場を補正するため、電流値を大きくとる必要がある。

2.2 超伝導メインコイル

超伝導メインコイルの諸元を表 3 に示す。コイルの最大経験磁場は 2.53 T と小さいので、銅比が 10 程度で線径が 3 mm 程度の NbTi/Cu モノリス丸線を使用する。コイル断面寸法は 100 mm x100 mm で、液体ヘリウム浸漬冷却の密巻きコイルとする。コイルおよびクライオスタットの仕様は、2011 年に完成した RIBF のスペクトロメーター「SAMURAI」の門型 2 重極電磁石^[2]を参考にすることができる。SAMURAI 電磁石は磁極直径 2 m、磁極間隙 880 mm、中心磁場 3 T で、平均直径 2.5 m、断面サイズ 180

表 3 : 超伝導メインコイルの諸元

コイル断面寸法	mm	100 x 100
コイル平均周長	m	10.9
起磁力	kA/coil	810
蓄積エネルギー	MJ/sector	11.3
最大経験磁場	T	2.53
超伝導線		NbTi/Cu
平均電流密度	A/mm ²	81
銅比		10
導体負荷率		0.3
クエンチ時平均温度	K	100

表 4 : 超伝導コイルに働く電磁力の比較

		SRC2	SRC	SAMURAI
拡張力	MN/m	0.8	2.6	2.3
鉛直方向	MN/coil	0.21	3.3	6.1
動径方向	MN/coil	0.18	0.36	0

表 5 : 入射、取り出し用機器の強度と周回軌道との距離。強度は U³⁵⁺ ビームの場合。

	長さ (m)	磁場または電場 (T) (kV/cm)	周回軌道との距離 (mm)
MIC2	1.47	1.68	186
MIC1	1.03	0.25	50
EIC	0.9	80	
EDC	1.3	90	
MDC1	0.76	-0.06	41
MDC2	1.26	-0.25	118
EBM	0.99	1.6 + (2 T/m)	147

mm X 160 mm の NbTi 密巻きコイルを使用している。クエンチ保護はコイル両端をダイオードでクランプし、クエンチ時はクエンチバックヒータでコイル全体をクエンチさせ局所的な温度上昇を抑える方式を採用する。クエンチ後の SRC2 コイルの平均温度は約 100 K である。表 4 にコイルに働く電磁力を SRC と SAMURAI コイルと比較して示す。電磁力は SRC、SAMURAI コイルよりかなり小さい。コイルの断熱支持は SAMURAI と同様に軸方向の多重折り返し管方式をとることが可能であると考えられ、コイルへの入熱量も SAMURAI と同様と考えられる。従って、SAMURAI と同じくクロードサイクルヘリウム冷凍プラントを使用せず、1 コイルあたり GM 冷凍機数台と 4K で 3 ~ 4 W の冷凍能力をもつ GM-JT 冷凍機 1 ~ 2 台により液体ヘリウムの再凝縮運転を行う方式を採用する。

3. ビームの入射と取り出し

図 1 に SRC2 の入射および取り出し軌道を示す。ビーム入射はセクター磁石の磁極間隙中に置かれた、磁気チャンネル sMIC2、MIC1 及び静電チャンネル EIC を使用し、取り出しは静電チャンネル EDC と磁気チャンネル MDC1、MDC2 及び偏向磁石 EBM を使用する。表 5 に U³⁵⁺ ビームにおける各機器の磁場

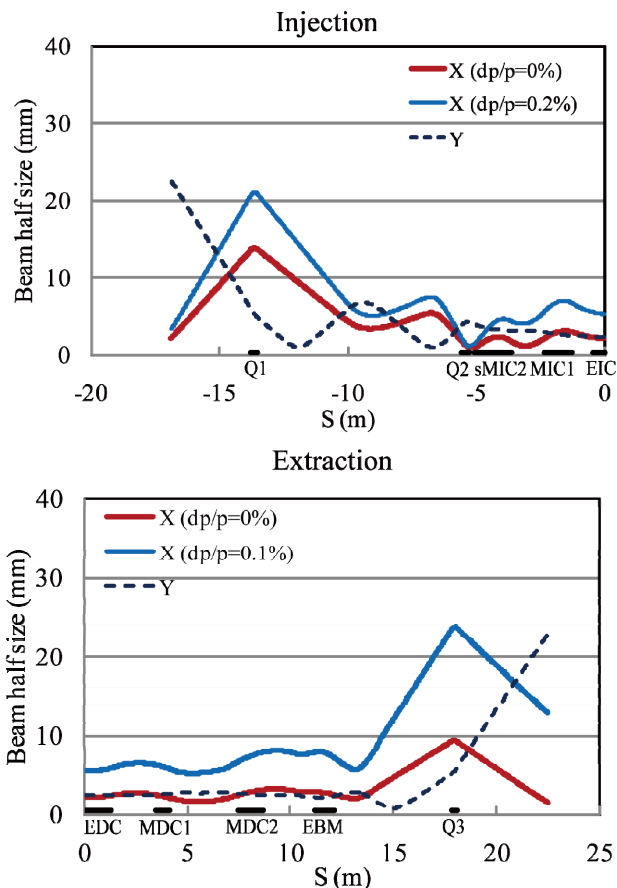


図3：入射と取り出しビームのエンベロップ
青線は運動量分散による広がりをプラスしたもの
を示す。

と電場の計算値を示す。sMIC2 は超伝導コイル（後述）であるが、他の磁気チャンネルは常伝導で SRC のものと同様断面構造^[3]をもつ。図3に入射および取り出しビームのエンベロップを示す。入射と取り出しビームのエミッタンスはそれぞれ 3π と 1.5π mmmrad とした。青線は入射側 0.2%、取り出し側 0.1% の運動量分散をプラスしたものを表す。入射ビームは第1セクター外周側 ($S = -10$ m 付近)、取り出しビームは第4セクター外周側 ($S = 13$ m 付近) においてメインコイルの勾配磁場の影響を受け、ビームサイズの増大が見られる。それらの近傍には4極磁石を置くことはできないが、鉄シムなどによって勾配磁場を軽減することは難しくないと考えられる。

3.1 超伝導磁気チャンネル sMIC2

超伝導磁気チャンネル sMIC2 は入射取り出し機器のうち唯一の超伝導磁石で、セクター電磁石の磁極間隙内に設置する。sMIC2 はセクター磁場約 3T にプラスして入射軌道上に約 1.7 T の磁場を生成する。図4に超伝導コイルの配置を示す。上下のコイル A と側コイル B および鉄ポールで軌道にかさ上げ磁場を生成する。図5に断面内の磁場分布を示す。コイル A とコイル B は周回軌道へのもれ磁場を小さくするように配置している。コイル A、B は

表6：超伝導磁気チャンネル MIC2 の諸元

		コイルA	コイルB
コイル数		2	2
コイル断面寸法	mm	28 x 20	14 x 52
コイル平均周長	mm	1.7	1.7
起磁力	kA/coil	74	180
蓄積エネルギー	kJ	9.4	20.6
最大経験磁場	T	4.35	4.8
超伝導線		NbTi/Cu	NbTi/Cu
平均電流密度	A/mm ²	132	247
銅比		3	3
導体負荷率		0.22	0.46
クエンチ時平均温度	K	35	40

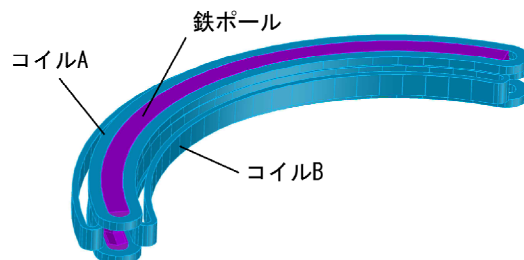


図4：超伝導磁気チャンネル sMIC2

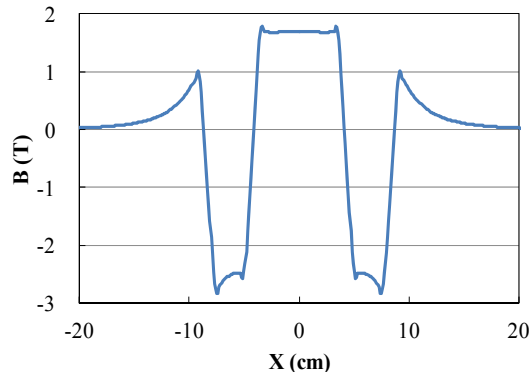


図5：sMIC2 の断面内の磁場分布（2次元計算）

NbTi/Cu 超伝導導体の密巻きコイルで、諸元を表6に示す。最大経験磁場はそれぞれ 4.35 T 及び 4.8 T である。銅比を 3 程度とすると、導体の負荷率はそれぞれ 0.22 および 0.46 となる。コイルの冷却は液体ヘリウム浸漬冷却で、セクター電磁石と同様、小型冷凍機で液体ヘリウムの再凝縮運転を行う。

3. おわりに

RIBF においてウランのビーム強度を約 10 倍に向上させるため、 U^{71+} を加速する現在の fRC に代わる、第2の超伝導リングサイクロトロン SRC2 の設計検討を行った。SRC2 はイオン源から引き出された U^{35+} を荷電変換なしに加速するものである。SRC2 は超伝導トリムコイルや大型の液体ヘリウム冷凍プ

ラントを使用しないため、SRC に比べて建設コストが大幅に削減でき、RIBF 増強計画として十分可能性のあるものと考えられる。本研究では超伝導セクター磁石と入射取り出しの基本設計を行った。この検討範囲においては大きな問題は見られなかったが、実現可能性に関しては、共振器、クライオスタット、真空チェンバー、ヨークなどの設計検討をさらに行なう必要がある。最後に SRC2 は入射エネルギーが 10.8 MeV/u と低いため、現在の重イオンリニアック (RILAC) を 75 MV まで増強して、建設から 25 年以上経過しているリングサイクロトロン RRC を使用せずに直接入射することも考えられる。これは通過効率がさらに向上することと、リニアック増強のためのコストがさほど大きくないことを考えると検討の余地がある。

参考文献

- [1] H. Okuno, et al., "The Superconducting Ring Cyclotron in RIKEN" IEEE Trans. Appl. Supercond., 17 (2007) 1063.
- [2] H. Sato, et al., "Construction of SAMURAI magnet", RIKEN Accel. Prog. Rep. 44, 144 (2011).
- [3] S. Fujishima, et al., "Design of the magnetic channels for the RIKEN Superconducting Ring Cyclotron", IEEE Trans. Appl. Supercond. 12 (2002) 1587.
大西ほか、「超伝導リングサイクロトロン」の磁場設定とその分析」、第 6 回日本加速器学会年会 Proceedings、東海、2009/8/5~7