

SETTING OF MAGNETIC FIELD IN THE SUPERCONDUCTING RING CYCLOTRON AND ITS ANALYSIS FROM OPERATION DATA

Jun-ichi Ohnishi, Hiroki Okuno, Nobuhisa Fukunishi, Kazunari Yamada, Akira Goto, and Osamu Kamigaito

RIKEN Nishina Center

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

Abstract

The superconducting ring cyclotron (SRC), the final-stage accelerator in RIKEN RI-beam factory, accelerated U^{86+} and six other kinds of ions since the first beam was extracted in December 2006. The beam energies were 345 MeV and 250 MeV per nucleon. The magnetic field strengths of the sector magnets are 3.0 T ~ 3.7 T for 345 MeV/u U^{86+} with the highest magnetic rigidity and 1.9 T ~ 2.2 T for 250MeV/u N^{7+} with the lowest one. These magnetic field regions contain almost design ones, and that these seven ions were injected, accelerated and extracted successfully means the SRC has a full design performance. This paper describes the calculation method of the coil currents for the isochronous magnetic field, their difference in the initial setting and after beam adjustment and performance estimation in the magnetic and electrostatic channels for the beam injection and extraction.

超伝導リングサイクロトロンの磁場設定とその分析

1. SRCの概要

超伝導リングサイクロトロン(SRC)はR I ビームファクトリーの最終段に置かれ、K値が2600MeV、水素からウランまでのすべての元素を核子あたり345MeV以上のエネルギーに加速することができる^[1]。図1にSRCの平面図を示す。6台のセクター電磁石(SM1~SM6)と4台のRF共振器(18MHz~38MHz)から構成される。入射半径及び取り出し半径は3.56 mと5.36 mである。ビーム入射と取り出しは超伝導偏向電磁石(SBM)、磁気チャンネル(MIC1, MIC2, MDC1~3)、静電チャンネル(EIC, EDC)及び取り出し用偏向電磁石(EBM)によって行なわれる。2006年12月に最初のビーム取り出しに成功し、これまでに表1に示すように、7種のイオンが加速された。IRCリングサイクロトロンから入射される場合はハーモニクス6、AVFサイクロトロンからRRCリングサイクロトロンを経て入射される場合はハーモニクス5で運転される^[2]。

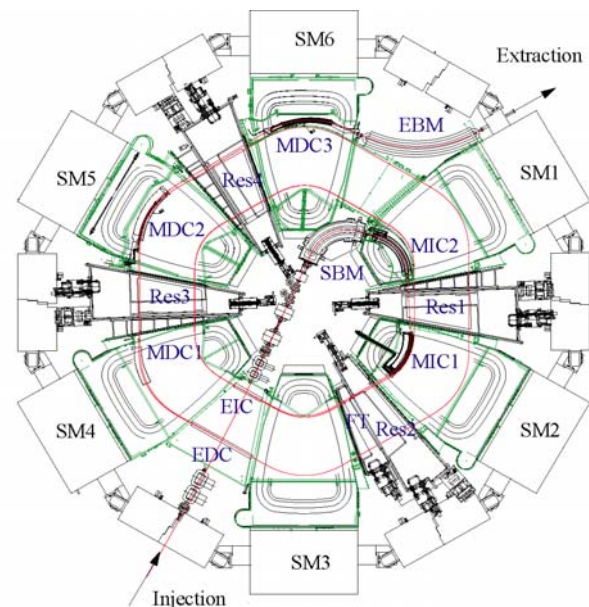


図1: SRC 平面図

2. 等時性磁場の生成

図2にこれまでに加速されたイオンの等時性磁場(セクター電磁石中心)を示す。M/Q=2のイオンに対しては低い等時性磁場、 U^{86+} イオンに対しては、最高の等時性磁場となる。陽子はまだ加速されていないが、運転は可能である。等時性磁場は各セクター電磁石に設置される、超伝導メインコイル、4つの超伝導トリムコイル及び22対の常伝導トリムコイルにより生成される。

2.1 等時性磁場の初期設定

平均半径rのビーム軌道に沿って平均した等時性磁場は模式的に次式で表される。

表1: SRCでこれまでに加速されたイオン

イオン	エネルギー MeV/u	RF周波数 MHz	ハーモニクス	初加速日
$^{27}Al^{10+}$	345	36.5	6	2006/12/28
$^{86}Kr^{31+}$	345	36.5	6	2007/3/12
$^{238}U^{86+}$	345	36.5	6	2007/3/23
$^{86}Kr^{34+}$	345	36.5	6	2007/11/4
$^{48}Ca^{20+}$	345	36.5	6	2008/12/5
$^{14}N^{7+}$	250	27.4	5	2009/2/7
d^+	250	27.4	5	2009/4/19

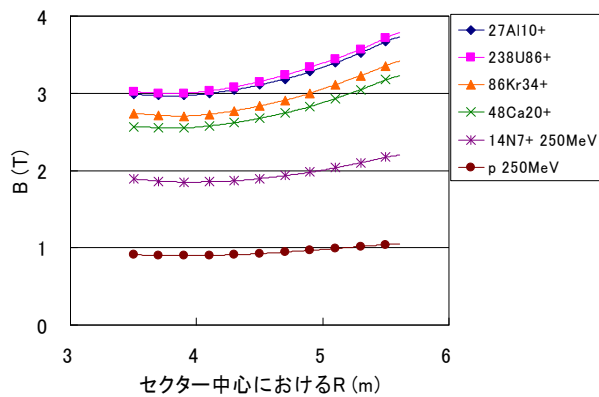


図 2 : セクター中心の磁場

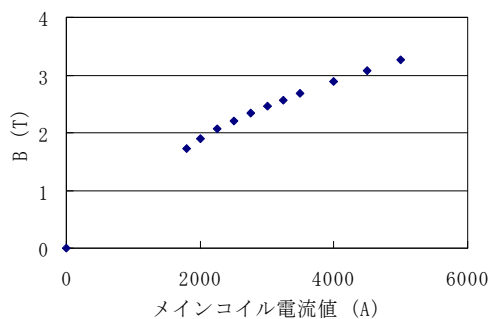


図 3 : 励磁曲線 (セクター中心 R=4.5m)

$$\bar{B}_{iso}(r) = \bar{B}_{main}(I_{main}, r) + \sum_{i=1}^4 b_i \bar{B}_i^{sc}(r) + \sum_{j=1}^{22} c_j \bar{B}_j^{nc}(r) \quad (1)$$

各項はメインコイル、超伝導トリムコイル、常伝導トリムコイルの平均磁場を表す。鉄ヨークの影響があるため、各コイルの磁場は自己電流値に対して線形ではなく、他のコイルの磁場にも依存する。しかし、トリムコイル磁場はメインコイル磁場に較べて小さいので、メインコイル磁場にのみ依存し、自己電流値に対して線形であると近似すると、①式の係数 b_i , c_j は各電流値に比例する定数となる。平均磁場は磁場測定データおよび 3次元磁場計算(TOSCA)から求められる。

図 3 に SRC のセクター電磁石中心位置 ($r=4.5m$) でのメインコイルの励磁曲線を示す。磁場マッピング測定は、図にプロットされているメインコイル電流値 1800A から 5000A の間の 11 レベルにおいて、行なった^{[3][4]}。一例として図 4 にメインコイル電流値 2000A と 5000A におけるメインコイルと超伝導トリムコイルのマッピングデータから求めたビーム軌道に沿った平均磁場の分布を示す。コイル電流値はこれらの平均磁場から①式のフィッティングによって求められるが、11 レベルのデータしか無いので、メインコイルについては 4 次補間、トリムコイルについて線形補間した平均磁場を使用する。メインコイル磁場のセクター間の偏差は平均磁場で 20~40 ガウス存在し、1 次ハーモニクス成分を作るので、これは隣り合った 3 組のセクター電磁石 (SM6-SM1, SM2-SM4, SM5-SM6) 毎に設置された分流電源によって補正する。メインコイルと 4 つの超伝導トリム

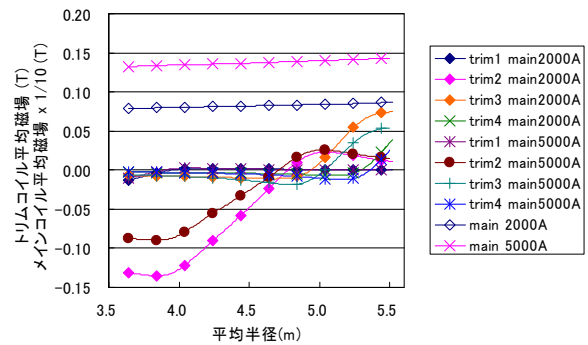


図 4 : メインコイルと超伝導トリムコイルの平均磁場の分布

ムコイルで 0.2% 程度の偏差をもつ等時性磁場が生成される。さらに常伝導トリムコイルにより 0.01% 程度の残差となる。常伝導トリムコイルの磁場測定はコイルの健全性の確認のためを除いて行っていないので、3次元磁場計算で得られた平均磁場を使用する。

ビーム調整を容易にかつ短時間で行なうため、初期設定した磁場においてビームが最終軌道まで周回することが望ましい。そのために必要な磁場精度は以下のように求められる。等時性磁場から dB の偏差がある場合、RF 位相に対するビーム位相のずれは

$$\phi = -2\pi h \frac{1}{\gamma^2} \int \frac{dB}{B} dn, \quad h: \text{harmonics}, n: \text{周回数}$$

と表される。取り出しエネルギー 345MeV/u の U^{86+} において、一周あたりの実効的な平均加速電圧を 1.5MV とすると周回数は約 420 ターン、位相変移を $\pi/2$ とすると $dB/B \sim 1.5 \times 10^{-4}$ となる。実際にはメインコイル電流値を調整するので、位相が一方向に変移していくことはなく、 $3 \sim 4 \times 10^{-4}$ 程度で最終軌道まで加速可能である。

2.2 運転における等時性磁場の調整

メインコイルなどの微調整によりイオンが最外周まで加速された後、各半径でビーム位相の測定を行なって精度の高い等時性磁場に調整する^[5]。ビーム位相は SM1 と SM6 間のバレー部に設置された 20 対の位相プローブで測定される。位相プローブは径方向 73mm、周方向 123mm の長方形の平行平板電極で、ギャップは 30mm である。最初に測定された Kr^{31+} のビーム位相を図 5 に示す。ビーム位相の測定データを磁場偏差に換算して、それを打ち消すようにトリムコイル電流値を修正する。これを繰り返して、等時性磁場の精度を上げる。ビーム量など、信号の S/N 比にもよるが、概ね ± 3 度以内には可能である。

2.3 初期設定磁場と実際の磁場

ビームによる等時性磁場調整後に得られた磁場と初期設定磁場の差をコイル電流値の変更量から計算した結果を図 6 に示す。プラス方向は設定磁場が大

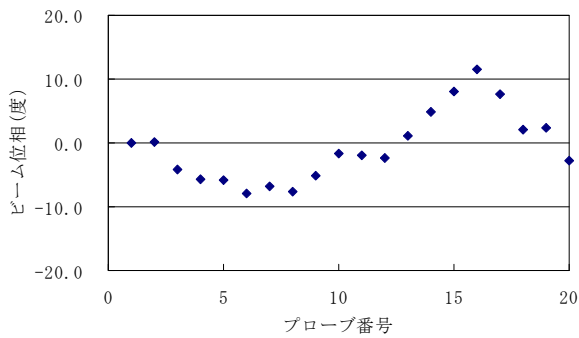


図5：Kr31+等時性磁場調整前のビーム位相

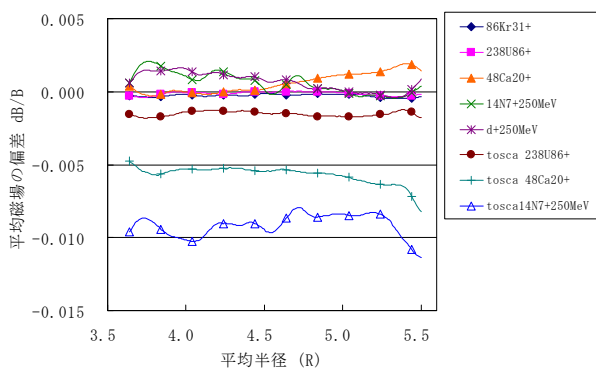


図6：ビーム運転調整後得られた等時性磁場と磁場測定、磁場計算による設定磁場の偏差

きいことを示す。Kr³¹⁺、U⁸⁶⁺については初期設定磁場の偏差は極めて小さいが、N⁷⁺、⁴⁸Ca²⁰⁺では偏差が大きく、N⁷⁺はトリムコイル調整なしで最外周まで加速できたが、Ca²⁰⁺はトリムコイルの調整が必要であった。Ca²⁰⁺で、外側で磁場の偏差が大きくなっているのは、EBMが加速軌道に作る誤差磁場を補償するコイルの設定に問題があった可能性がある。N⁷⁺の偏差についてはまだ良く理解できていない。toscaと記したものは3次元磁場計算から得られた電流値を設定した場合の磁場の偏差を示す。これらの偏差はヨークの磁気特性の相違、磁場計算に含まれていないSBMやEBMなどの入射取り出し用磁石の影響、メッシュの精度などにより生じている。

3. ビーム入射取り出し

ビーム入射取り出しに使用する磁気/静電チャンネルの定格を表2に示す。磁気チャンネルはセクター電磁石のギャップ内に設置される。MIC1、MDC1、MDC2は空芯コイルであるが、MIC2とMDC3はその断面を図7に示すように、強度を増加するために鉄が使用される。そのため、加速軌道部に生じる誤差磁場を補償するためにそれぞれ2コイル、2電源が使用される。これらのチャンネルの電流/電圧値はバッフルなどにより運転時に調整可能であるが、予め加速するイオンの等時性磁場を使った軌道計算から初期設定値を求める同時に補償コ

表2：磁気/静電チャンネルの定格

MIC2	0.54 T ~ 1.0 T	EDC	100 kV/cm
MIC1	0.29 T	MDC1	-0.075 T
EIC	108 kV/cm	MDC2	-0.15 T
		MDC3	-0.19 T ~ -0.57 T

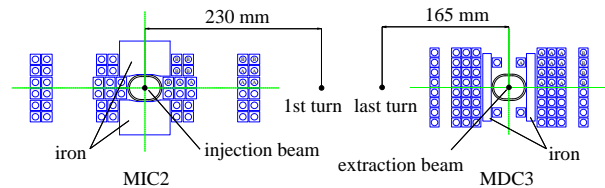


図7：MIC2とMDC3の断面図

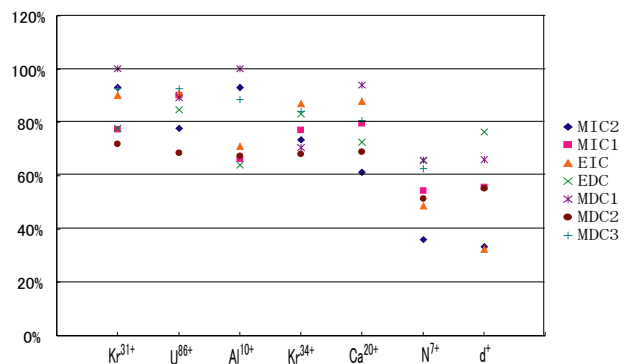


図8：磁気/静電チャンネルの運転実績

ルの電流値の計算を行なう。これまでに加速されたイオンについての運転実績を図8に示す。縦軸は定格磁場(電場)に対する割合である。運転強度はイオンの入射エネルギー、加速軌道におけるベータatron振幅など運転条件によっても依存するが、これまでに加速されたイオンについて強度は足りていることは分かる。EIC、EDCは、安定にかかる電圧から90%程度に制限されている。また、U⁸⁶⁺などBρの大きいイオンに対して、MDC1がほぼ100%となっている。ベータatron振幅が大きい場合、EDCとMDC1の蹴り角が不足するので、入射条件などの調整が必要である。

参考文献

- [1] H. Okuno et al., "The Superconducting Ring Cyclotron in RIKEN", IEEE trans. appl. superconductivity 17, 2, (2007) 1063.
- [2] N. Fukunishi et al., "Operation Experience with RIKEN Radio Isotope Beam Factory", PAC09.
- [3] J. Ohnishi et al., "The Magnetic Field of the Superconducting Ring Cyclotron", Proc. 18th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, p.429 (2007).
- [4] J. Ohnishi et al., "超伝導リングサイクロトロン の励磁試験と磁場測定", 第3回加速器学会年会, p. 77 (2006).
- [5] R. Koyama et al, "RIBFにおけるサイクロトロン の等時性測定", in these proceedings.