

# THE OPERATION OF THE RIKEN RIBF RING CYCLOTRONS

Makoto Hamanaka<sup>B)</sup>, Masayuki Kase<sup>#, A)</sup>, Eiji Ikezawa<sup>A)</sup>, Hiroshi Imao<sup>A)</sup>, Shigeru Ishikawa<sup>B)</sup>, Yukimitsu Ohshiro<sup>C)</sup>, Jun-ichi Ohnishi<sup>A)</sup>, Hiroki Okuno<sup>A)</sup>, Tadashi Kageyama<sup>A)</sup>, Osamu Kamigaito<sup>A)</sup>, Masanori Kidera<sup>A)</sup>, Hironori Kuboki<sup>A)</sup>, Keiko Kumagai<sup>A)</sup>, Yasuteru Kotaka<sup>B)</sup>, Kiyoshi Kobayashi<sup>B)</sup>, Misaki Komiyama<sup>A)</sup>, Ryo Koyama<sup>B)</sup>, Naruhiko Sakamoto<sup>A)</sup>, Junsho Shibata<sup>B)</sup>, Kenji Suda<sup>A)</sup>, Noritoshi Tsukiori<sup>B)</sup>, Takahide Nakagawa<sup>A)</sup>, Makoto Nagase<sup>A)</sup>, Takeshi Nakamura<sup>B)</sup>, Minoru Nishida<sup>B)</sup>, Makoto Nishimura<sup>B)</sup>, Hiroo Hasebe<sup>A)</sup>, Yoshihide Higurashi<sup>A)</sup>, Seiji Fukuzawa<sup>B)</sup>, Nobuhisa Fukunishi<sup>A)</sup>, Masaki Fujimaki<sup>A)</sup>, Takeshi Maie<sup>A)</sup>, Kazuyoshi Yadomi<sup>B)</sup>, Kazunari Yamada<sup>A)</sup>, Tamaki Watanabe<sup>A)</sup>, Yutaka Watanabe<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN Nishina Center, <sup>B)</sup> SHI Accelerator Service Ltd., <sup>C)</sup> CNS, the University of Tokyo  
2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama, 351-0198

## Abstract

The yearly status report (August 2011-July 2012) of the ring-cyclotron complex (RRC, fRC, IRC, SRC) in RIKEN RI beam factory is provided.

## 理研 RIBF リングサイクロトロン(RRC, fRC, IRC, SRC)の運転報告

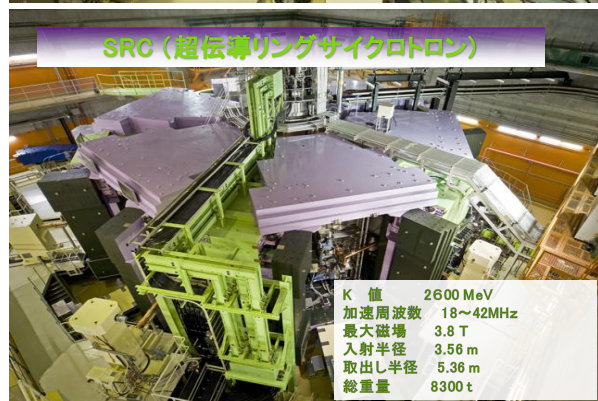
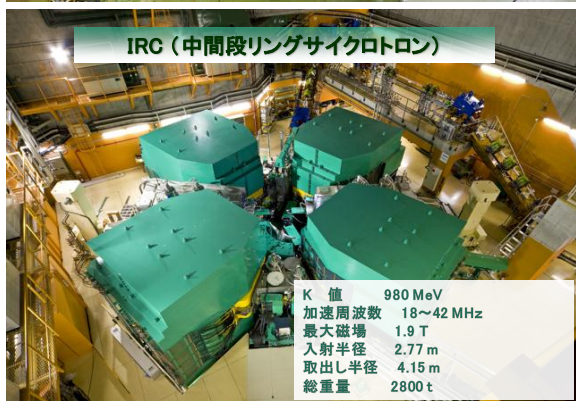
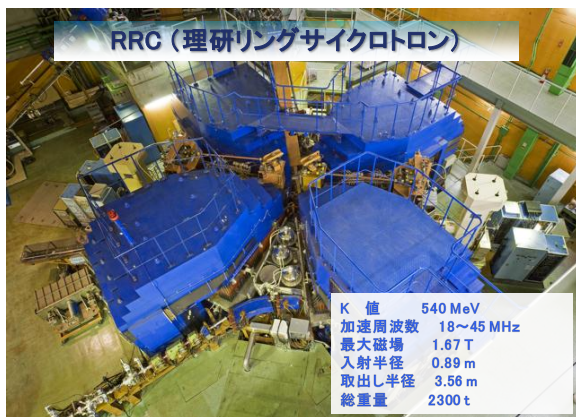
### 1. はじめに

理研に現存する4台のリングサイクロトロンは、1986年完成の理研リングサイクロトロン (RRC)、と2004~2006年にあいついで完成した中間段リングサイクロトロン (IRC)、周波数固定型リングサイクロトロン (fRC)、そして理研 RIBF の主加速器である超伝導リングサイクロトロン (SRC)である。

RRCは、リニアック(RILAC)とサイクロトロン

(AVF)を入射器としてこれまでに25年間にわたり多種の重イオンビームを供給し続けてきた。

また2008年より理研 RIBF の本格的運転が開始され、RILAC-RRC-fRC-IRC-SRCモードにより<sup>238</sup>Uビームを345MeV/nまで加速し、RILAC-RRC-IRC-SRCモードにより<sup>48</sup>Caビーム同エネルギーまで加速した。2009年には、新たにAVF-RRC-SRCモードで<sup>14</sup>Nビームと偏極重イオンビームを250MeV/nまで加速した。2010年には重イオン入射ライナック (RILAC2)が建設され2011年よりRILAC2-RRC-



# mkase@riken.jp 図1 理研 RIBF4台のサイクロトロン (RRC,fRC,IRC,SRC)

fRC-IRC-SRC モードにより  $^{124}\text{Xe}$ ,  $^{238}\text{U}$  を 345MeV/u まで加速した。本論文では主に 2011 年 8 月から 2012 年 7 月までの一年間のこれら 4 台のリングサイクロトロン(RRC)の運転の状況を報告する。

## 2. 加速モード

RIBF の加速方式を図 2 に示す。RILAC を入射器とする加速方式には、これまで周波数可変方式(mode1)と、fRC を用いる周波数固定方式(mode2)の 2 つがあった。このたび新入射器 RILAC2<sup>[3]</sup>が完成したことにより mode2 は、主に RILAC2-RRC-fRC-IRC-SRC により周波数固定方式で 345MeV/n の Xe と U の加速を専門に行う。この mode2 では、最上流に強力な 28GHz-ECR イオン源を装備し、ウランビームのビーム大強度化が期待される。今後 RILAC2 入射で運転中、古い RILAC は、単独運転で超重元素探索などの実験へのビーム供給に専念できるようになった。

AVF を入射器に用いる方式 mode3 は、軽イオン(A<40)の加速に用いられ、最高 440 MeV/n までの効率的加速が可能である。しかしこれまでビーム強度は 100 pnA 程度に制限される場合があったが、このたび  $^{18}\text{O}$  ビーム加速で数百 pnA までの加速に成功した。(表 1 参照)

## 3. 運転実績 (2011 年後半から 2012 年前半)

あらゆる加速モードのうち、RRC は、常に一番目のリングサイクロトロンとして運転しなければならないが、2011 年 8 月~2012 年 7 月の RRC の運転総時間数は 5801 時間で、必然的に他のサイクロトロンにくらべて多い。昨年同期間の運転総時間は、4058 時間で、東日本大震災に伴う節電要請により運転に制限があったため少なかった。

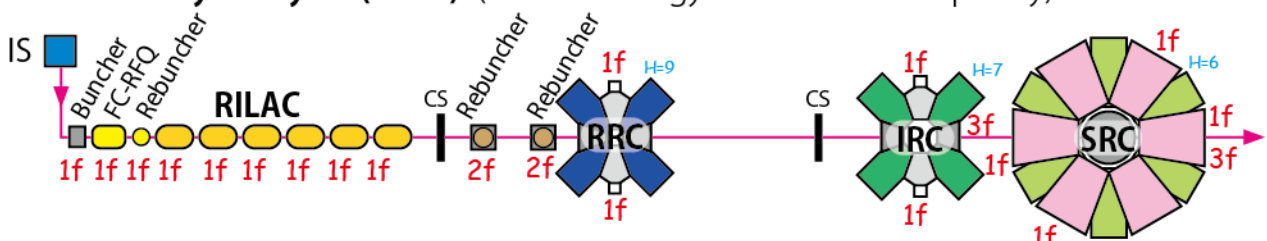
この一年間の RRC の運転総時間数のほぼ約 40% は、RILAC2 の mode2 の試験に使われ、Xe, U の加速試験をした。並行して U ビーム大強度化の鍵となるガスstripper開発実験が行われた。

表 1 に 2011 年 8 月~2012 年 7 月までに加速器したビームのリストをビームデータと共に示す。総照射時間は、昨年同期間は、1700 時間だったのが今年、2646 時間が増えている。

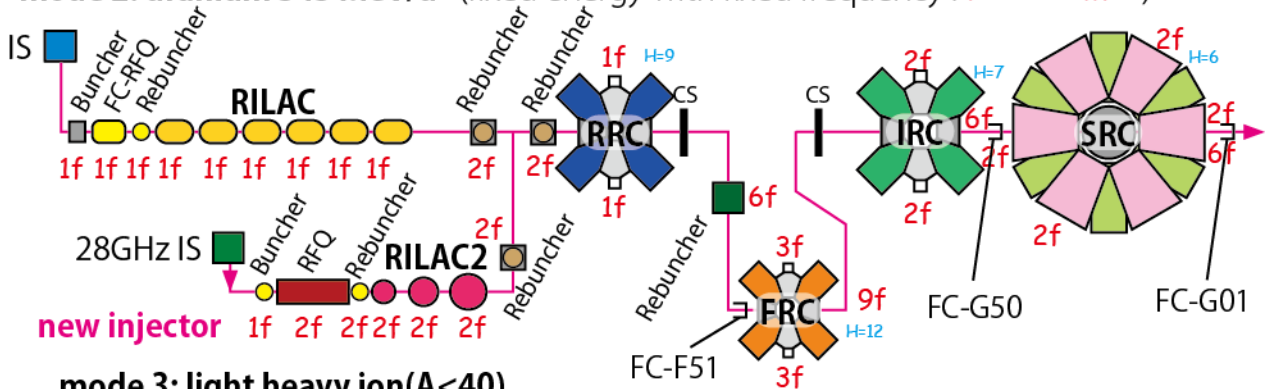
この一年は、RIBF 実験が精力的に行われ全有効時間の約 90%が費やされた<sup>[1]</sup>。そのうちユーザーからの要求の多い  $^{48}\text{Ca}$  345 MeV/n ビーム加速が 2012 年 5 月に行われ、ターゲットへのビーム供給率 80%以上を達成した。今年 6, 7 月に  $^{124}\text{Xe}$  と  $^{70}\text{Zn}$  の 345 MeV/n ビームを加速し RIBF 実験に初めて供給した。

一方 mode3 の加速方式<sup>[2]</sup>による運転は、3 種類のビーム (294MeV/u の偏極重陽子と  $^{18}\text{O}$  ビームと、

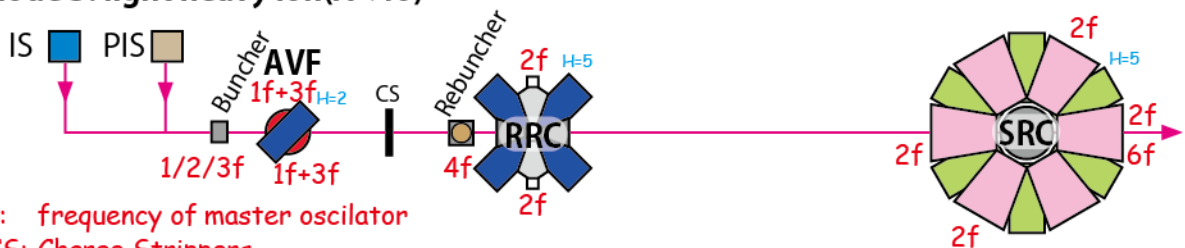
### mode 1: very heavy ion(A>40) (variable energy with variable frequency)



### mode 2: uranium 345 MeV/u (fixed energy with fixed frequency : f = 18.25 MHz)



### mode 3: light heavy ion(A<40)



f: frequency of master oscillator  
CS: Charge Strippers  
FC: Faraday Cup

図 2 入射器による RRC, IRC, fRC, SRC の加速方式

230 MeV/u<sup>18</sup>O) が加速され RIBF 実験に使われた。

この一年間は、古い施設での実験は、全照射時間の約 10%にとどまった。その中で生物実験は、ビームとして <sup>12</sup>C, <sup>20</sup>Ne-135MeV/n, <sup>40</sup>Ar-95MeV/n, <sup>56</sup>Fe-90MeV/n が使われ、例年通り定期的に実施された。

#### 4. トラブル

2011 年 8 月～2012 年 7 月までのビーム加速は比較的順調に行われたが、細々したトラブルは頻繁に起こった。

2011 年 5 月、RRC-E セクター電磁石の上メインコイルに層間短絡<sup>14)</sup>が発見され、同電磁石に 20ppm 程度の磁場変動を起因した。本年の MT 中のビーム安定度に大きな影響を与えた。この夏期メンテナンス期間中にそのメインコイルは更新の予定である。2012 年 6 月には、W セクター下メインコイルで別の層間短絡が起こり、こちらは 1000ppm 以上の磁場変動を起こしたが、幸い場所が特定され、コイルの絶縁を剥いで応急処置を施した。

また 2012 年 4 月に RRC-#2RF 共振器のカプラー碍子よりリークが発生し実験を中断して新碍子と交換修理した。

2012 年 6 月には RRC-W セクター電磁石のトリムコイルを収容するサブチャンバーの真空度悪化のトラブルがあった。調査の結果、使用していないトリムコイル冷却水導入配管からの水漏れとわかり、現在この系統の冷却配管を封印して対処している。

#### 5. 開発更新

2011 年 11, 12 月に <sup>238</sup>U 345 MeV/n ビームを加速しこれまでの最高のビーム強度 3.5pnA を達成したが、RRC 直後の第一チャージストリッパーとして使われる炭素薄膜の寿命 (半日程度) のため安定供給に限界がある。

その対策として第一チャージストリッパーとして差動排気を用いたガスストリッパーを開発中である。最近のテストにより He ガスストリッパー<sup>15)</sup>として安定運転のめどがたった。しかし、得られる荷電状態は低く、これまで固体膜では 69+から 74+であったが、最大でも 65+となりそうだ。

このため、新しい He ガスストリッパーによる荷電数とエネルギーロスを考慮してウランイオンを fRC で加速実現するために、その入射半径と偏向能力を変更するべく改造<sup>16)</sup>が進行中である。

#### 6. まとめ

RI ビームファクトリーでは、この 1 年間で 6 種類の加速モードによる運転が行われ、その運転総時間は 5801 時間であった。また <sup>238</sup>U ビームの大強度化のプログラムが進行中である。

一方 2012 年夏に RRC メインコイル層間短絡問題でメインコイルの交換工事、ウランビーム等の大強度化に伴い、第一ストリッパー直後の偏向電磁石チャンバーの改造が予定されより安定なビーム供給を目指している。

#### 参考文献

- [1] N. Sakamoto et al., “理研 RIBF における大強度重イオンビーム加速”, In this Proceedings.
- [2] J. Shibata et al., “理研 AVF サイクロトロン運転状況”, In this Proceedings.
- [3] K. Yamada et al., “Beam Commissioning and Operation of New Linac Injector for RIKEN RI-beam Factory”, Proc. Of IPAC 2012, New Orleans, LA, USA, May 2012
- [4] Y. Watanabe et al., “理研リングサイクロトロン(RRC)の電磁石の老朽化”, In this Proceedings.
- [5] H. Imao, et al., “大強度ウランビームのための He ガス荷電ストリッパー”, In this Proceedings.
- [6] K. Kumagai, et al., “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”, In this Proceedings.

表 1 2011.08-2012.07 コース別加速時間

加速器運転モード	ビームコース	実験回数	加速粒子 & エネルギー (MeV/u)	供給実績ビーム強度(pnA)	照射時間(h)	全体比率 (%)
AVF+RRC	E6	3	<sup>22</sup> Ne-110	22.5	26	1.0
			<sup>13</sup> C-100	688	33	1.2
	E5B	9	<sup>40</sup> Ar-95	6	17	0.6
			<sup>12</sup> C-135	783	46	1.7
			<sup>56</sup> Fe-90	1	6	0.2
			<sup>20</sup> Ne-135	18	2	0.1
RILAC+RRC	E5A	1	<sup>70</sup> Zn-63	31	118	4.5
	E3A	1	<sup>86</sup> Kr-36	58	7	0.3
RILAC+RRC+IRC+SRC	SAMURAI SHARAQ	2	<sup>48</sup> Ca-345	260	548	20.7
	BigRIPS	1	<sup>70</sup> Zn-345	100	107	4.0
AVF+RRC+SRC	Big-Pol	1	Pol.d-294	67	111	4.2
	BigRIPS	1	<sup>18</sup> O-294	344	184	7.0
	SAMURAI	1	<sup>18</sup> O-230	425	514	19.4
RILAC2-RRC-fRC-IRC-SRC	BigRIPS	1	<sup>238</sup> U-345	3.5	544	20.6
	ZDS	2	<sup>124</sup> Xe-345	7.7	430	16.3
RILAC2-RRC	E5A	1	<sup>238</sup> U-10.75	10.3	12	0.5
				Total	2646	100