

ACCELERATION OF ^{48}Ca BEAM AT RIKEN RIBF

Masayuki Kase^{#, A)}, Eiji. Ikezawa^{A)}, Hiroshi Imao^{A)}, Yukimitsu Ohshiro^{B)}, Junichi Ohnishi^{A)}, Hiroki Okuno^{A)}, Osamu Kamigaito^{A)}, Tadashi Kageyama^{A)}, Masanori Kidera^{A)}, Hironori Kuboki^{A)}, Keiko Kumagai^{A)}, Misaki Komiyama^{A)}, Akira Goto^{A)}, Naruhiko Sakamoto^{A)}, Kenji Suda^{A)}, Takahide Nakagawa^{A)}, Makoto Nagase^{A)}, Masato Nakamura^{A)}, Hiroo Hasebe^{A)}, Yoshihide Higurashi^{A)}, Nobuhisa Fukunishi^{A)}, Masaki Fujimaki^{A)}, Takeshi Maie^{A)}, Kazunari Yamada^{A)}, Sigeru Yokouchi^{A)}, Tamaki Watanabe^{A)}, Hiroshi Watanabe^{A)}, Yutaka Watanabe^{A)}

^{A)} RIKEN Nishina Center, ^{B)} CNS, the University of Tokyo, ^{C)} SHI Accelerator Service Ltd.

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

Abstract

In order to produce useful RI beams in nuclear physics research on exotic nuclei, a ^{48}C beam has been one of most important primary beams. At RIKEN Accelerator Research Facility, ^{48}Ca beam with an energy around 70 MeV/u has been used since 1996. After the RIKEN RIBF was completed in 2007, a ^{48}Ca beam can be accelerated up to an energy as much as several hundreds MeV/n with new two ring cyclotrons. Recently, we succeeded in acceleration of 345MeV/u ^{48}Ca beam with an intensity more than 200pnA and several experiments were carried out successfully using some RI beams produced in the process of projectile fragmentation.

理研RIBFにおける ^{48}Ca ビームの加速

1. はじめに

理研RIBF^[1] (RIビームファクトリー)の加速器は、2006年までに完成し、それ以来これまでに6種類のビームの加速に成功してきた。2007年以来、ビームをBigRIPS (RIビーム生成分離装置)へ供給し様々な実験が行われてきた。345MeV/核子のエネルギーの ^{238}U ビームを用いた実験で、45個の新しい中性子過剰核が発見され報告がなされた^[2]。

^{48}Ca は、 ^{238}U とならんで理研RIBFの重要な一次ビームのひとつである。図1に2007年から理研RIBFで行われた国際課題採択委員会で認められた実験日数275日に対して、一次ビーム種の要求割合を示す。実に30%あまりが ^{48}Ca ビームに対する要求である。

^{238}U ビームは核分裂による広い質量範囲のRIビームの生成が期待されるが、一方 ^{48}Ca ビームは、入射核破砕反応によるドリップライン上の中性子過剰核の生成に使われる。

^{48}Ca ビームは、理研では1996年にはじめて加速された。入射サイクロトロン (AVF) と理研リングサイクロトロン (RRC) を用いてエネルギーは70MeV/核子で13pnAのビーム強度がやっとであった。その後2002年に入射リニアック (RILAC) にエネルギーブースター (CSM) が設置されRRCにおけるハーモニックス8の加速が可能になり加速モードRILAC-RRCにより、エネルギーは63MeV/核子と若干下がるもののこれまでの10倍以上のビーム強度140pnAの加速が可能になった。これらのビームを使ってドリップライン上の質量31-43付近の新アイソトープを多数発見してきた。

2007年にRIBF^{3, 4)}が完成してから、 ^{48}Ca ビームのこ

れまでのビーム強度を維持しながら、そのエネルギーを大幅にあげることができるようになった。これまでに345MeV/核子のエネルギーの ^{48}Ca ビームを3回加速してきた。

2008年末に新しい超伝導リングサイクロトロン (SRC) から170pnAのビームの取り出しに成功し実験をはじめたが、BigRIPSの一部装置の放射化の問題で実験期間が制限された。2009年末に再び加速を試みたが、SRCの静電デフレクター (EDC) の高電圧導入部に問題が発生しビームが不安定であった。結局ビーム量を数十pnAに制限した。2010年5月に3度目の加速が行われ、345MeV/核子のエネルギーの ^{48}Ca ビームを230pnAまで取り出すことに成功し、2種類の実験が効率よく行われた。

^{48}Ca ビームの今回の加速の様子について、問題点等とともに報告する。

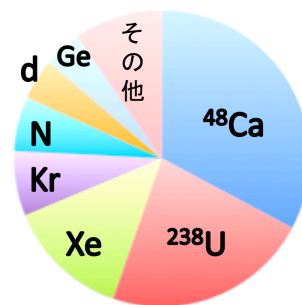


図1. 理研RIBFに対する一次ビーム要求の割合。2007年からの国際PACで認められた実験課題総日数275日に対する割合。

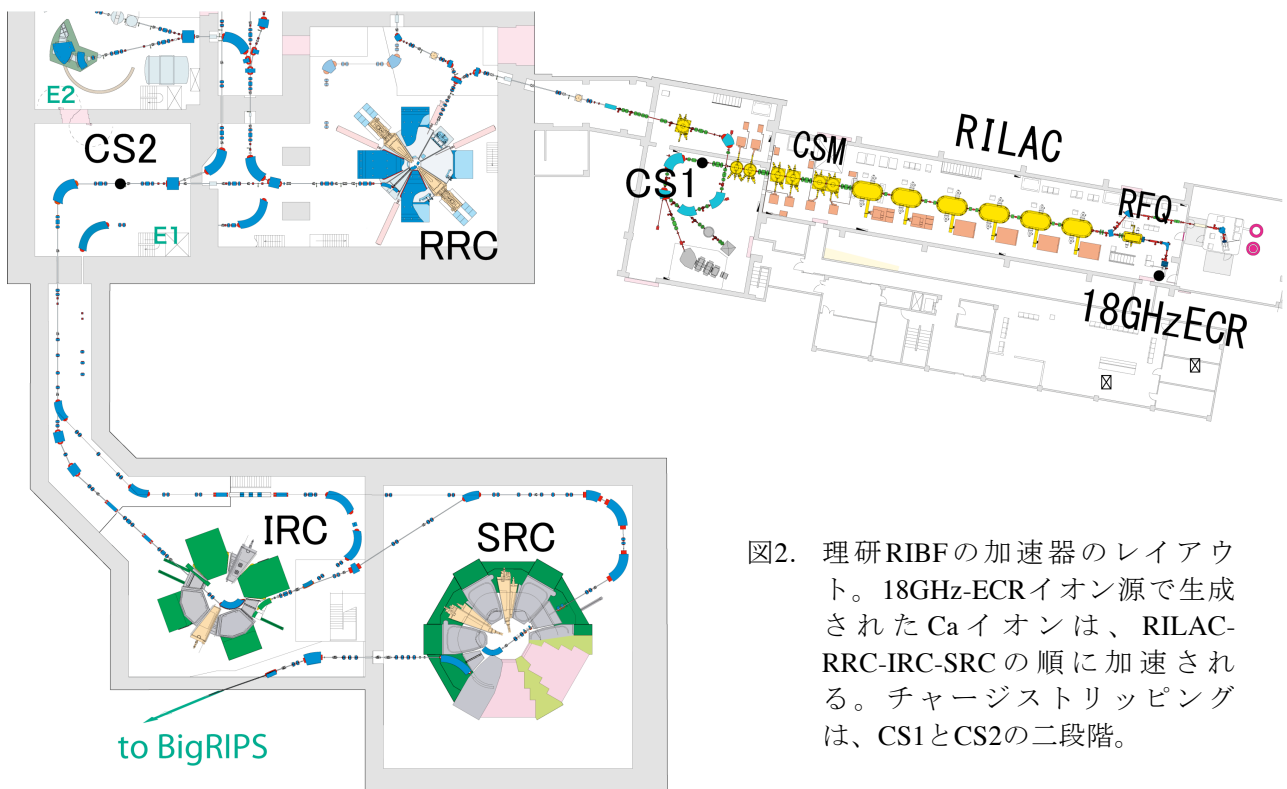


図2. 理研RIBFの加速器のレイアウト。18GHz-ECRイオン源で生成されたCaイオンは、RILAC-RRC-IRC-SRCの順に加速される。チャージストリッピングは、CS1とCS2の二段階。

2. 加速のプロセス

2.1 加速モード

^{48}Ca の加速は、RILAC-RRC-IRC-SRCの周波数可変モードで行われる。図2. に使われる加速器のレイアウトを示す。この加速モードで周波数は、18～38MHzまで選択可能であるが、最も経験のある周波数値での運転を優先して、最終エネルギーを345MeV/核子と決めた。イオン源から理研RIBFの主要加速器SRCまでの加速プロセスを、順を追って説明する。

2.2 イオン源

^{48}Ca イオンは、はじめに1998年に「金属イオン源」として導入された18GHz-ECRイオン源^[5]で生成される。常伝導ミラーコイルと永久磁石の六極磁石のイオン源である。炭酸カルシウムの状態で購入された90%エンリッチの ^{48}Ca 試料を酸化カルシウムCaOの粉末にして型にいれ焼結して4mm×5mm×35mmのセラミックロッド状に仕上げたものをイオン源のプラズマに挿入する。運転の経過とともにロッドの位置を押し込みながら使用する。プラズマはヘリウムをサポートガスとして安定に維持される。

Caイオンは15.9kVの引出電圧で引き出され、 $^{48}\text{Ca}^{+10}$ を分析の後加速器に送られた。運転期間約

1ヶ月にわたって、おおむね20 μA のビームが得られた。寿命とも関係するがまだビームを強くできる状況であった。

2.3 重イオンリニアック (RILAC)

イオン源からのビームは、鋸歯状波バンチャーを経てFC-RFQ^[6]へ予備加速され、その後6台の周波数可変キャビティ^[7]で加速される。CSMの6台の共振器は、素通りする。これらの加速でビームは2.7MeV/核子 ($\beta \sim 0.08$) となる。RFQを含め7台の加速共振器は $f_0 = 36.5\text{MHz}$ に励振される。

2.4 第一チャージストリッパー (CS1)

RILACを出ると直後でチャージを+10から+16に変換される。チャージストリッパーは、40 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の厚さの炭素膜^[8]で、+16への変換効率は35%である。膜の寿命は約100時間で、ストリッパー通過後分析したビームのプロファイルは、次第にエネルギーは上がり(膜は薄くなり)、エネルギー幅は増える。(膜厚のばらつきが増す)

2.5 理研リングサイクロトロン (RRC)

1986年に完成したK値540MeV^[9]の分離セクター型リングサイクロトロンで、2台の共振器は、 $f_0 = 36.5\text{MHz}$ で励振され、一周4つの加速ギャップにはおよそ250kVの加速電圧(ピーク値)が印加されている。引き出されるビームエネルギーは、46MeV/

核子 ($\beta \sim 0.30$) である。

2.6 第二チャージストリッパー (CS2)

RRCをでるとE1実験室でチャージを+16から+20 (裸イオン) に変換される。チャージストリッパーは、 $1.5\text{mg}/\text{cm}^2$ の厚さの炭素膜で、+20への変換効率は96%である。800時間使用後の膜の様子は寿命は多少しわが発生するがほぼ一枚の膜でまかなえた。

2.7 中間段リングサイクロトロン (IRC)

2005年にRIBFの中で最も早く完成したK値980MeVの分離セクター型リングサイクロトロン^{9, 10)}で、構造はRRCに類似しているが、FT共振器を有する。2台の共振器は、 $f_0=36.5\text{MHz}$ で励振され、一周2つある加速ギャップにはおよそ600kV (ピーク値)の加速電圧がかけられる。引き出されるビームエネルギーは、114MeV/核子 ($\beta \sim 0.45$) である。

2.8 超伝導リングサイクロトロン (SRC)

RIBFの主加速器で、2006年に完成した6つの超伝導セクター電磁石をもつK値2500MeVのリングサイクロトロン^{9, 11)}。引き出されるビームエネルギーは345MeV/核子 ($\beta \sim 0.68$) であり、ビームはRIビーム生成分離装置 (BigRIPS) へ送られる。

3. 加速性能

3.1 ビーム強度

ビーム供給期間中 (20010. 5. 14 ~ 2010. 6. 10) のビーム強度を図3. に示す。はじめの200時間は、BigRIPSでの二次ビーム調整のため微小ビームを供給している。その後8日間 (200時間) にわたりフルビームでの照射を行っている。400時間にて実験の

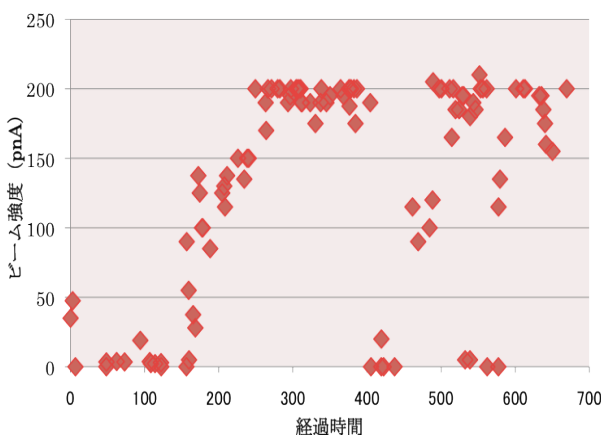


図3. 実験中の供給ビーム強度の変化。SRC出口のファラデーカップ：FC-G 0 1 のでビーム電流 (npA)。

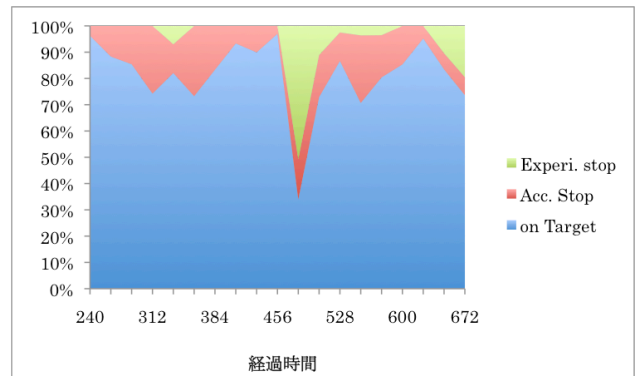


図4. 実験期間中のビーム供給率。On Target (青)、加速器停止 (赤)、実験事情による停止 (緑)

セットアップの変更のため約半日のブレイクがありその後2番目の実験が行われた。ほぼ全体にわたってフルビーム要求の際は、200pnAでのビーム供給が可能であった。ビーム強度の上限は、SRCのデフレクター (EDC) セプタム電極にあたるビーム量で制限をかけている。

セプタム電極に300Wの入熱条件で10%程度のビームロスを設定すると結果200pnAとなる。ビームロスは、セプタム電極の温度上昇とEDC付近の大気側に設置した電離箱の信号で判断をした。

他の加速器で得られている⁴⁸Caビームは、フランスGANILで60MeV/核子が260pnA^[12]、USA, MSUで140MeV/核子が160pnA^[13]であり二次ビーム生成効率を考えると理研のビームは、群を抜いている。

3.2 ビーム供給率

同じ実験期間中のビーム供給率を図4.に示す。実験期間中平均85%以上の供給率を得られた。図中赤の部分が加速器の事情でビームが停止した時間の割合である。主な停止原因はSRCの高周波 (主にSRCの共振器) のトリップと冷却系のトラブルである。2008、2009年の同じCa加速運転では、加速器停止時間の割合が30%を超えていたのに対し格段に改善されている。

3.3 リングサイクロトロン磁場安定度

長期間でのビーム不安定性の原因として、各リングサイクロトロンの磁場変動があげられる。

図5に、RRC、IRCのセクター電磁石メインコイル電流の変化を示す。それぞれ等時性磁場を維持した結果の電流値の変化である。RRCについては、実験期間中電流の調整幅は、770ppm (磁場換算で554ppm) の変化が見られ、これが長期間での不安定性の大きな原因の一つになっている。メインコイル温度が、2000トンに及ぶ磁石ヨークを長時間にわたって暖める熱膨張の結果磁場変動が生まれると考

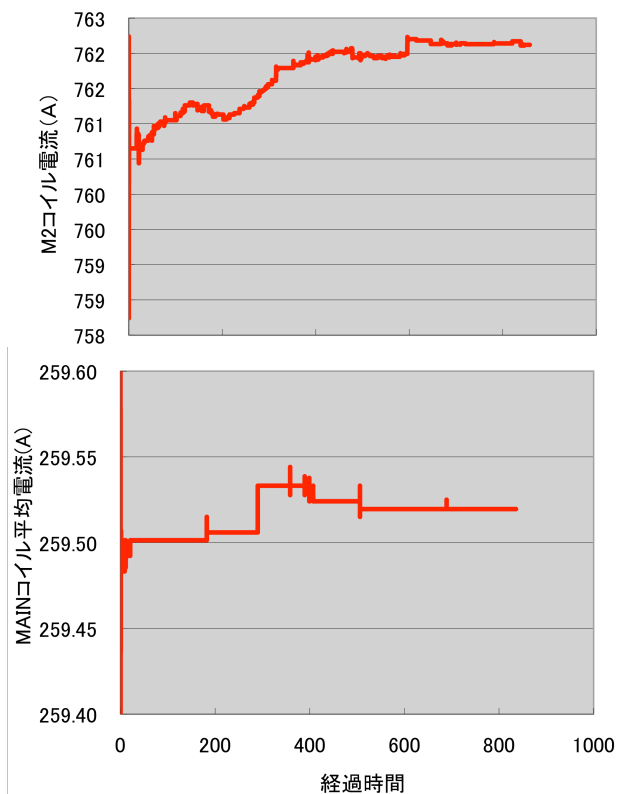


図5. 実験期間中のリングサイクロトロンメインコイルの電流値調整の様子。上図がRRC、下図がIRC。

えられる。ヨーク温度の変化は約1ヶ月で飽和する傾向があり図5.の曲線にもその傾向が見られる。

IRCについてはコイル自体の発熱が低くおさえられ、またコイルとヨークとの熱絶縁に考慮され、室温、冷却水温度も慎重に設計されているので問題は少ない。実際電流の調整範囲は高々40ppm程度(磁場換算で28ppm)である。電流の安定度と同等のレベルである。

SRCについては、超伝導のためコイル温度のヨークは無縁であるのでIRC同様電源の変動レベルの動きしか見られない。磁場換算で50ppm程度である。

総じてRRCの磁場変動が他のリングサイクロトロンに比して大きく、またターン数も大きいことからその影響は重大である。今後いかにRRCの磁場変動をおさえるかが課題となる。

3.4 その他不安定性の要因

第一ストリッパCS1の寿命は約100時間であるが、その間平均的厚さとそのばらつきがゆっくり変化して、エネルギーロスとエネルギー幅が変化する。エネルギーロスはリニアックの調整で補償は可能であるが、エネルギー幅は補償しようがないのでストリッパ交換周期を短縮するしかない。何時間周期で交換するのが見直す必要はある。

イオン源のCaOロッドの位置調整でビーム強度が変化する。10~20時間周期でロッド調整をするとこの周期でのビーム強度のノコギリ波状の変化が現れる。その他イオン源の調整は加速全体に微妙な影響を与える。

3.5 放射線の影響

今回の⁴⁸Caビームの加速がこれまでRIBFで加速運転の中で最もビームパワー(3.3kW)が最大でまた放出放射線も最大であった。BigRIPSターゲット照射中の外部への漏洩線量は、問題にはならなかった。SRC出口でフルビームを止めて調整したときIRC本体室天井上の非管理区域への漏洩が若干(1 μ Si/h)みられた。今後ビームを増やした場合に問題があるので遮蔽の強化と大強度での調整には、間引いたビームを用いる等の対策が必要である。

またSRC出口のファラデーカップからの放射線で近くの冷却系(流量計)に影響を与えトラブルの要因になった。

SRCヘリウム冷凍機システムへの影響は、メインコイルについてはみられなかったが、EDC下流のセクター電磁石内の超伝導トリムコイルについてビームに呼応する温度の変化がみられた。セプタムから放出された荷電粒子による入熱のためと思われる。

4. 今後の計画

⁴⁸Caビームは、ユーザーの要求が多いため、これから年一回程度定期的にこの加速モードでの実験は行われる見込みである。その他のビームについては、新入射器^[14]が完成すれば、2010年末よりXeビームの加速試験にはいり、新入射器の性能を確かめ、Xeビームを2011年度の新しいビームとしてリストアップする予定である。ビーム強度の増強の見込みがたてば、新入射器を用いたUビームの加速が行われる予定である。

参考文献

- [1] Y.Yano, Nucl Instr. Meth. B261 p1009(2007).
- [2] T. Ohnishi et al., J. Phys. Soc. Jpn. 79 (2010) 073201.
- [3] O. Kamigaito et al., Proc. PASJ5 (2008) p. 10.
- [4] N. Fukunishi et al., Proc. PASJ4-LAM32 (2007) p. 1.
- [5] Y. Higurashi et al., Nucl Instr. Meth. A510 (2003) 206-210.
- [6] O. Kamigaito et al., Jpn. J. Appl. Phys. 33(1966)L537.
- [7] M. Odera et al. Nucl Instr. Meth. 227 p187(1984).
- [8] H. Hasebe et al., PASJ5-LAM33 (2008) WP046
- [9] A. Goto et al., 18th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Gardini Naxos, Italy, Sep30 - Oct5, 2007.
- [10] J. Ohnishi et al., Proc. 17th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications (2004) p. 197.
- [11] H. Okuno et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 17 (2007) 1063.
- [12] F. Chautard et al., Proc. HIAT09 (2009) p.54
- [13] J. Stetson et al., Proc. Cyclotrons 2007 (2007) p.340.
- [14] O. Kamigaito et al., Proc. PASJ3-LAM31 (2006) p. 502.