

OPERATING EXPERIENCE WITH ACCELERATION OF HIGH INTENSITY HEAVY-ION BEAMS IN RIBF

Naruhiko Sakamoto*, Tomoyuki Dantsuka, Tadashi Fujinawa, Nobuhisa Fukunishi, Hiroo Hasebe, Yoshihide Higurashi, Kumio Ikegami, Eiji Ikezawa, Hiroshi Imao, Tadashi Kageyama, Osamu Kamigaito, Masayuki Kase, Masanori Kidera, Misaki Komiyama, Hironori Kuboki, Keiko Kumagai, Takeshi Maie, Makoto Nagase, Takahide Nakagawa, Makoto Nakamura, Junichi Ohnishi, Hiroki Okuno, Kazutaka Ozeki, Kenji Suda, Hiroshi Watanabe, Tamaki Watanabe, Yutaka Watanabe, Kazunari Yamada, Liang Lu, and Hideyuki Yamasawa,

Abstract

Since 2008, the accelerator complex of RIKEN RI-Beam Factory has provided heavy ion beams which nuclear physicists requested. To date, the ions which have been developed are deuteron(polarized, unpolarized), ^4He , ^{14}N , ^{18}O , ^{48}Ca , ^{70}Zn , ^{86}Kr , ^{124}Xe , and ^{238}U . Using the acceleration mode of variable energy, the energy range from 230 to 345 MeV/u has been achieved with ^{18}O and their intensities were 1 pμA to the maximum. On the other hand the beam currents of very heavy ions like uranium did not respond to the intensities requested for the nucleosynthesis experiments at RIBF. In the last year the uranium beam with an intensity of 3.5 pA has been successfully achieved owing to the new injector RILAC2 and 28 GHz SC-ECR ion source.

理研 RIBF における大強度重イオンビーム加速

1. はじめに

2008 年本格的に稼働を開始した理研 RI ビームファクトリー (RIBF) 加速器群は、旧施設の理研リングサイクロトロンの後段に新たに建設した 3 台のリングサイクロトロンと荷電変換装置を用いて大強度のウランビームを 345 MeV/u まで加速して、実験的に元素合成の謎を解き明かすことをその主たる目的とする^[1]。また組み合わせにより、重陽子からウランまでの広範囲にわたる核種が加速可能で、これまでに図 1. に示されるビームを実験に供給してきた。世界に先んじて実験を開始した次世代の RI ビーム施設である RIBF は、諸施設との競争の中さらなるビーム量の強化が急務となっている^[2]。サイクロトロンを用いて大強度ビームを加速するにあたり、問題になるのはビームの損失が特定の機器に集中することであり、大電力ビームによる破壊が最も懸念さ

れる装置が EDC である。サイクロトロンに入射されたビームは、セクター電磁石によって発生する等時性磁場により、複数台挿入される高周波加速空洞のギャップを加速位相のタイミングで数百回周回し (SRC の場合は、加速空洞 4 台で約 300 周)、最大半径まで達したのちに静電デフレクションチャンネル (EDC) によって取り出し軌道に導かれる (図 2.)。第 7 回の加速器学会において大強度の ^{48}Ca ビームの加速について報告されている通り^[3]、SRC 周回ビームのビームパワーは 3 kW を越えている。EDC でビームを損失しないためには、安定したシングルターン取り出しが必要で、そのためには、高い加速電圧とその安定度が重要となる。

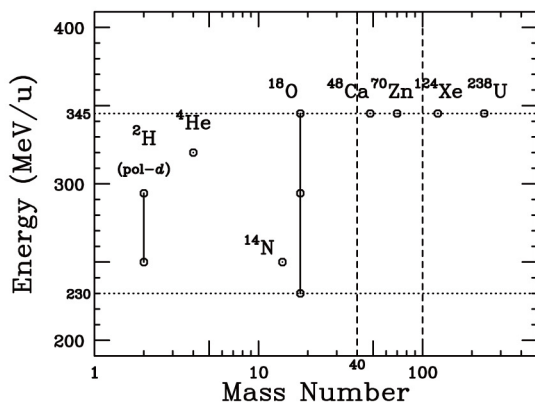


図 1: これまで加速され実験に供給された核種とエネルギー (2008 年以降)

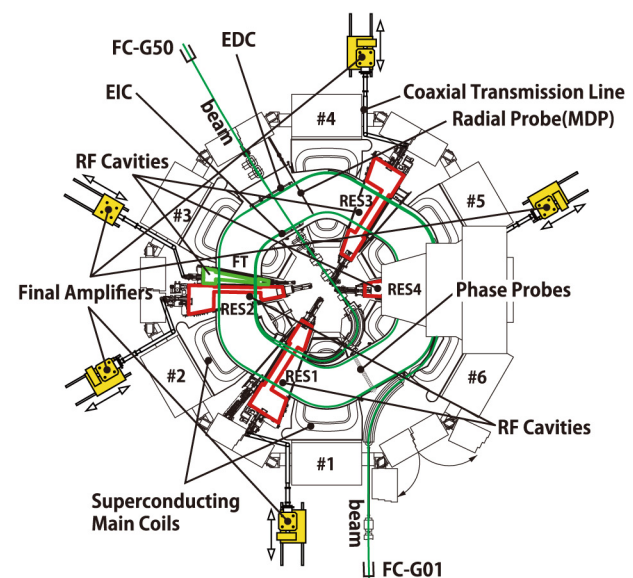


図 2: 超伝導リングサイクロトロンのビーム加速のための主要機器

* nsakamot@ribf.riken.jp

表 1: RIBF サイクロトロンの基本性能

	RRC	fRC	IRC	SRC
K-number	540	570	980	2600
# of sectors	4	4	4	6
Velocity gain	4	2.1	1.5	1.5
Harmonic #	5,9	12	7	5,6
# of RF cavities	2	2 w/FT	2 w/FT	4 w/FT
RF Frequency	18-38.2	54.75	18-38.2	18-38.2
RF Power(kW)	150	100	150	150
Voltage(kV/cav)	500	500	650	650

2. RIBF 加速器の基本性能

2.1 RIBF サイクロトロン群

RIBFにおいて新たに建設された3台の加速器の主な性能を表1に示す。理研リングサイクロトロン(RRC)^[4]の後段に建設された3台のリングサイクロトロン、上流から順に固定周波数リングサイクロトロン(fRC)^[5]、中間段リングサイクロトロン(IRC)^[6]、超伝導リングサイクロトロン(SRC)^[7]により、薄膜による荷電変換の技術を用いて重陽子からウランまでの核種を345 MeV/uまで加速する能力をもつ。高周波系は、全てコンベンショナルな銅を用いた常伝導空洞で、磁石は、fRC、IRCが常伝導セクター電磁石、SRCが世界初の超伝導セクター電磁石を採用する^[8]。セクター電磁石には、周回ビームが同じタイミングで加速ギャップを通過するための等時性磁場を発生させるためにトリムコイル群が設置されているが、その性能については既に報告されている通りである^[9]。入射器は、加速する核種によって使い分けられ、比較的軽い核種(A<40)は、AVF型サイクロトロン(K70MeV)^[10]、CaやZnは理研重イオン線形加速器(RILAC)^[11]、そして、U、Xeは、電荷、質量数比Q/A~1/7のイオン加速に特化して、新たに設計・建設された固定周波数の新理研重イオン線形加速器(RILAC2)が用いられる。

2.2 3つの加速モード

RIBFの加速器群は、加速粒子によって以下のように使い分けを行う。図3.にRIBF加速器群と加速モードを示す。

モード1は、RIBFの基本モード。このモードは、エネルギー可変で、⁴⁸Caなど荷電・質量比Q/A>0.42のイオンをRF運転周波数38.2 MHzで400 MeV/uまで加速可能である。これまでの最高加速エネルギーは、345 MeV/u(運転周波数36.5 MHz)である。加速の際、RRCとIRCの入射側で炭素膜を用いた荷電変換を行う。

モード2では、UやXeを345 MeV/uに加速するモード。RRC入射側の荷電変換を排除するため、イオン源からの35価の大強度のウランビームのビームを、RILACとRRCでモード1の345 MeV/u加速の場合の1/2の周波数で約10 MeV/uまで加速する。その後、速度ゲインが2のfRCで加速し、36.5 MHzで運転される後段のIRC、SRCに送られる。荷電変換はfRCを挟んで前後2回で比較的厚い膜(Uの場合、1枚目0.3 mg/cm²、2枚目17 mg/cm²)が用いられる。荷電変換の際にエネ

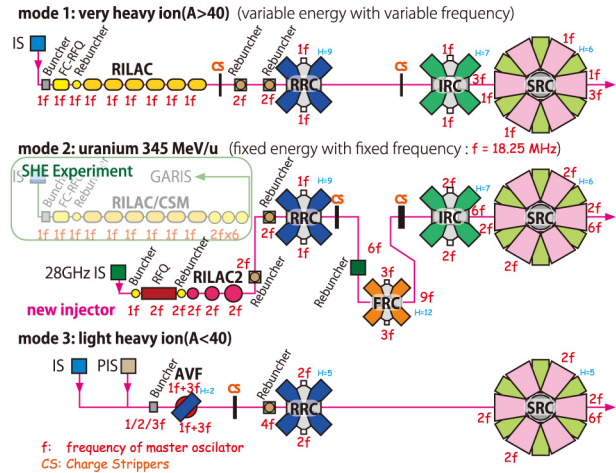


図 3: RIBF 加速器群と加速モード

ルギー広がりが発生するため、fRC入射側に設けたりバンチャーで再度バンチされる。2011年以降は、超重元素探索実験^[12]との両立を主たる目的として新たに建設された28 GHz超伝導ECR^[13]イオン源とRILAC2が入射器として投入された。

モード3は、偏極重陽子や¹⁸Oなど、比較的軽いイオン(A<40)を加速するのに用いられるモード。ただし、要求量が最大ビーム強度1 pμAの場合には、モード1で加速、供給する。

2.3 高周波系の性能

サイクロトロンの通過効率を上げるために、高い高周波加速電圧とその安定度が重要であると先に述べた。一般的に、平均ターン間ギャップ(ΔR̄)を得る為に必要な加速電圧は、

$$V = \frac{A}{qe} \cdot m_N c^2 \cdot \gamma(\gamma^2 - 1) \cdot \frac{\Delta \bar{R}}{R}, \quad m_N c^2 = 931.5 \text{ MeV}$$

から求めることができ、加速粒子²³⁸U⁸⁶⁺、345 MeV/uの場合、取り出し半径(R̄)5.36 mのSRCで4mmのターン間ギャップを得るためには、ベータトロンの振動による効果を除くと1周あたり約2 MVの加速電圧¹が必要となる。表2に、これまでの²³⁸U⁸⁶⁺、345 MeV/uのビームサービス(以下、MTとよぶ。)の時の実際の加速電圧を示す。初期の頃、空洞の電圧を500 kV以上に上げると空洞の粗同調装置に取り付けられたコンタクトフィンガーが焼損する事象が多発したため、電圧を下げて運転せざるをえなかった。その原因は接点押し付け圧力が設計値に比べて不足していたためと判明し、コンタクトフィンガーの形状を改良することによりこの問題は解決された。次に問題となったのは、SRCからの漏れ磁場の影響である。RIBFの高周波系は、放電などでギャップ電圧が失われた際に供給RFをパルス化しマルチパクタのレベルを越えて電圧が発生した時点でc.w.モードに切り替え、設定電圧に自動的に約1ミリ秒で回復するようになっている。しかしながら、その

¹1周あたりの加速電圧は4台の加速空洞の電圧の和から減速位相で使用するFT空洞の電圧を引いたもの。FT空洞電圧は加速空洞の電圧の約13%で、2MV/周時、加速空洞の電圧は一台あたり580 kV。

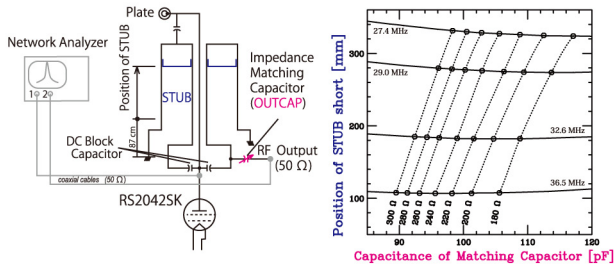


図 4: 終段アンプパラメータ測定のセットアップとデータ

表 2: SRC の $^{238}\text{U}^{86+}$ 加速における加速電圧と通過効率

	2008.11	2009.12	2011.10
Accel. Voltage (MV/turn)	1.6	1.5	2.0
FC-G01/G50 電流比 (%)	50	32	79
Intensity(μA)	0.037	0.072	0.3

電圧回復の過渡期において負荷の状態によっては、アンプの出力が過剰になりコントロールグリッドやスクリーングリッドなどの電流が規定値を越えてインターロックにより電源がオフされる事象が空洞ギャップ電圧が上がることにより頻繁に起こるようになった。一度電源がオフされると回復に少なくとも 10 分は要するため、ビーム供給時間がある水準以上に確保するために電圧を下げて運転せざるをえなかった。この事象の考えられる原因は、ひとつには SRC セクター電磁石のバレーへの漏洩磁場により状況が厳しくなるマルチパクタの対策のためパルスの電圧が高めに設定されること。もうひとつは、SRC の終段アンプへの漏れ磁場 (100 Gauss) の影響でアンプのスクリーングリッドを流れる電流が、出力電力に対して過剰に増大することである。メインアンプは、RRC 建設時に開発したもので^[14]、タレス社製真空管 RS2042SK (50 Gauss 以下の環境で使用することを推奨されている) を終段に据えたグリッド接地のタイプである。対策として、これまで使用していたダミーロード試験で得たアンプのパラメータを見直し、アンプ出力 50 Ω の条件でスタブと出力コンデンサのパラメータ (図 4.) をアンプ出力に合わせて変更した結果、状況が改善。2011 年 12 月の ^{238}U , 345 MeV MT 時に 2 MV/turn で加速することができ、FC-G01/G50 電流比に見る加速効率向上に貢献している。また、マルチパクタの対処としてアンプ出力、20~30 kW の CW 運転によるコンディショニングを、4~5 日に一度、計画的

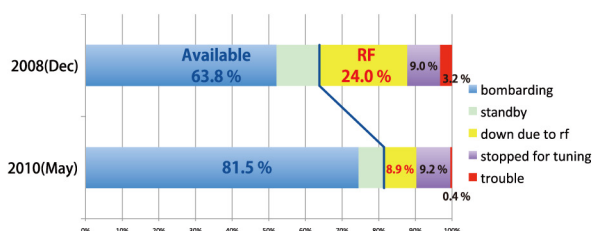


図 5: ある期間のビーム供給・停止時間の割合

に一時間ほどかけて実施することにより、不意の放電による RF のダウンの回数を大幅に減らすことができた。図 5. に、ある期間の ^{48}Ca , 345 MeV/u ビーム供給状況について積算したものを示す。2008 年 12 月の MT では、RF によるビームの停止が期間中 24% で、そのうちの 80% 以上が SRC 高周波系に関するものであったが、2010 年には大幅に減少された。

2.4 高周波系の調整とシングルターン取り出し

等時性磁場を位相プローブで周回ビームの位相プローブ (PP) のピックアップ信号のタイミングをモニタしながら実現したのちに、シングルターン取り出しとなるよう、つまり、ある特定の周回数のビームのみを EDC により取り出し軌道にキックさせるよう高周波系の調整を行う。高周波系の調整は具体的には、加速空洞、FT 空洞の位相と電圧を周回ビームのターン間の分離が得られるように微調整を行うことにより実施される。調整後のビームのターンパターンの例を図 6. に示す。入射から取り出し領域まで、ターンがはっきりと分離し、EDC により外周側にキックされたターンが見え、ほぼ完全にシングルターンで取り出すことができた。このときの高周波系の安定度は、電圧で $\pm 0.1\%$ 、位相 ± 0.1 度で、SRC の通過効率は 90% 以上を実現し最大で 230 pA の大強度ビームを供給することができた。

偏極重陽子ビームの加速時には、周回数によって偏極軸の向きが異なるため、さらなる取り出しターンの純度が要求される。偏極重陽子は、モード 1 で加速されるが、入射器の加速周波数が SRC の 2 分の 1 で、SRC のハーモニクが奇数 (5) であることから、取り出しビームの時間構造を測定することにより精密にターン純度を得ることができる (図 7.)。

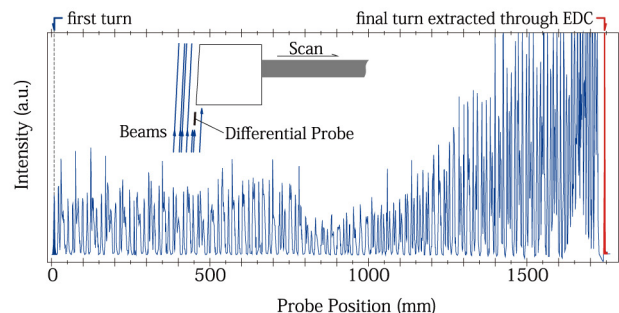


図 6: H=6, ^{48}Ca , 345 MeV/u 加速時の SRC の径方向のビーム強度分布 (2012 年 5 月)

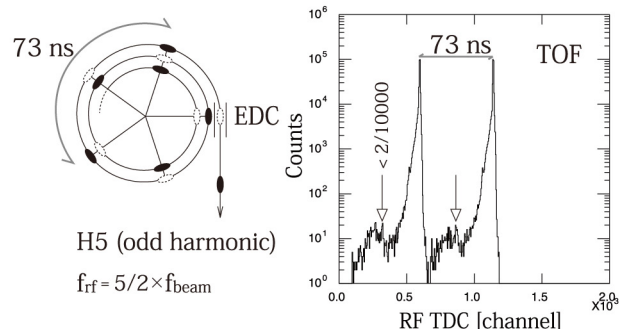


図 7: H=5, pol-d, 250 MeV/u、ターンの混じりは、2/10000 以下

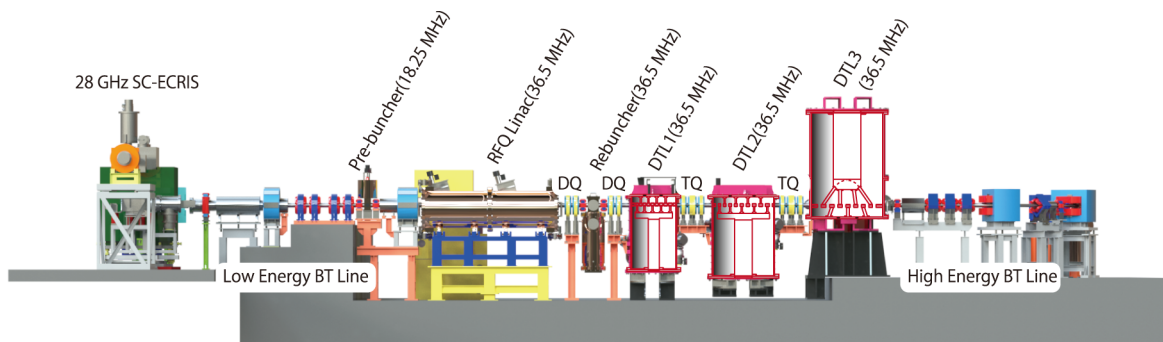


図 8: RILAC2 外観図。上流から、新イオン源、LEBT^[15]、バンチャー、RFQ、リバンチャー、DTL1-3、HEB。

表 3: DTL 諸元

	DTL1	DTL2	DTL3
Resonant Frequency (MHz)	36.5 MHz		
Synchronous Phase	-25°		
Resonator	Quarter Wave		
# of gap	10	10	8
Voltage (MV/gap)	0.10	0.21	0.26
Aperture (mm ϕ)	35		
Coupling	capacitive		
Voltage Stability $ \Delta V/V $	0.1 %		
Phase Stability $ \Delta\phi $	0.1°		

2.5 新入射器 RILAC2

多価の重イオンを発生することを目的に設計・建設された理研の超伝導 ECR イオン源は、28 GHz の電源を利用するという点では世界で 2 台目であるが、MT に実際にビームを供給するなど実戦投入されている 28 GHz 超伝導 ECR イオン源としては、唯一無二の存在である。その特徴としては、軸方向のミラー磁場を形成するソレノイドコイル 6 台を装備することにより、電子サイクロトロン共鳴領域の体積を従来のイオン源の 2 倍程度まで大きくすることで、これにより 35 価のウランビームの強度 500 e μ A を目指す。現時点での達成ビーム強度は、60 e μ A で、これは 2008 年にウランビームの MT 時のときの 30 倍である。

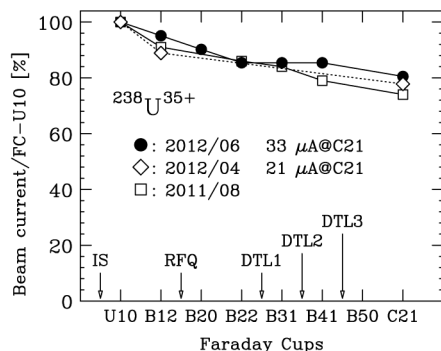


図 9: イオン源出口強度を基準とした FC 電流比

一方、新たに建設された RILAC2 は、固定周波数の RFQ、3 台の QWR 型のドリフトチューブリニアック (表 3) により構成され (図 8.)、¹²⁴Xe¹⁹⁺、²³⁸U³⁵⁺ を、後段の RRC の入射エネルギーである 0.68 MeV/u まで加速する。ウランビームの各タンク出側のファラデーカップで測定したビームの通過率を、イオン源出口直後のファラデーカップでの量を基準にプロットしたのが、図 9. である。前述の通り RRC は、18.25 MHz で運転され、RILAC2 の入射バンチャー (Pre-buncher) で集めきれなかったタイミングの違う粒子は RRC では加速されない。その量は、TOF の構造から約 20 %。また、RILAC2 単体では、およそ 80 % の通過率を実現するが、後段のサイクロトロン入射器としてのオペレーションには改善の余地があり、現在解析を進めている [16]。

2.6 荷電変換膜の寿命問題

サイクロトロンのサイズを現実的なものとするため、Ca より重い核種では、リングサイクロトロン出側の荷電変換膜を用いる事を想定している (図 3.)。中でも、Xe や U の場合、多価を得るため厚めの膜を用い、結果エネルギーロスが大きくなる (図 10.)。そのため、熱による膜の質の劣化による荷電変換効率の低下が早く、また厚みが増えることによりサイクロトロンに入射されるタイミングがずれ、荷電変換膜下流のサイクロトロンの加速効率が下がるという事象が起こる。現在の強度で一日に数度の膜交換が必要となっている。強度の向上により膜の寿命が極端に短くなり、膜交換に伴う加速器の調整時間が増えていることが可用性を下げる主要原因のひとつとなっている。



図 10: ¹²⁴Xe ビームにより光を放つ荷電変換膜 (46 価 → 52 価、炭素膜 22 mg/cm²)

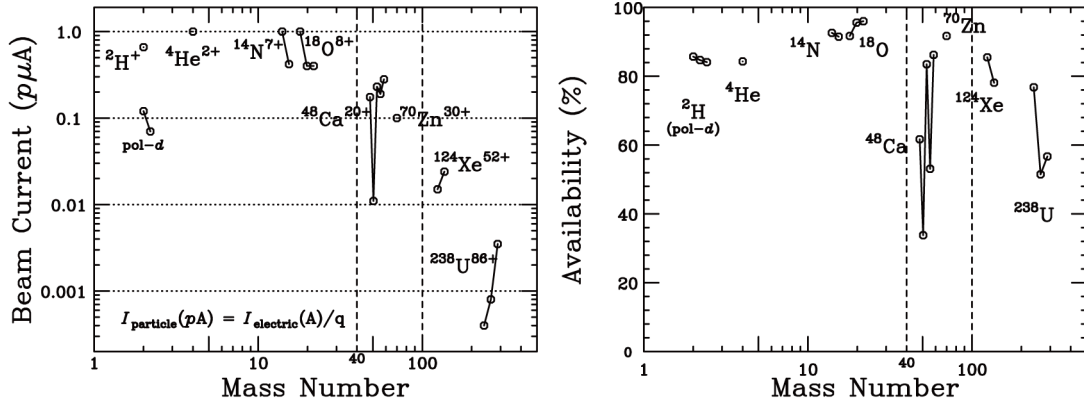


図 11: 2008 年～2012 年上期までのビーム強度と可用性

3. 現在までのパフォーマンス

2008 年度以降、2012 年度前期までの MT で達成しているビーム強度と可用性をそれぞれ図 11. に示す。核種によっては複数回供給しており、それぞれの点を時系列に従ってずらしてプロットしてある。ビーム強度（左側）は、SRC 取り出し直後のファラデーカップ FC-G01 の電流値を価数で割った量で表している。可用性（右側）はいろいろな定義があるが、ここでは、

$$\text{可用性} = \frac{\text{ユーザーへのビーム供給時間}}{\text{スケジュールされた供給時間}}$$

で算出している。加速器の機器の軽度・重度の故障や再調整時間が増えるとその分可用性が下がることになる。⁴⁸Ca MT で、2 度可用性が低いときがあったが、これは加速器の故障を抱えての運転であったことなどが主な理由である。

4. まとめ

2008 年に本格的に MT を開始して 5 年目に入った。その間、実験の要求に従い上に述べた種類のビームの開発を行って来た。当初から、施設の上限のビーム量を満たしていた軽いイオンに加え、⁴⁸Ca や ⁷⁰Zn など、年々確実に強度を上げている。初期のころ問題があった高周波系の性能も設計仕様をほぼ満たすようになった。しかしながら、Xe や U ビームに関しては、その量においてユーザの要求を満たしていない。新イオン源と RILAC2

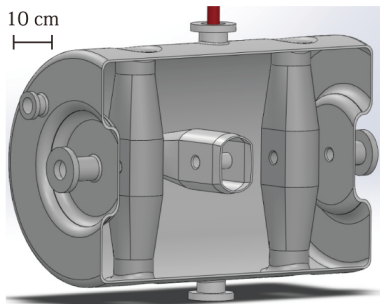


図 12: 開発中のスポーク型超伝導空洞。β=0.3、周波数 219.0 MHz。ギャップ電圧が一様、近接モードとの周波数分離が特徴。

の建設・稼働により上流の電流値が飛躍的に向上する一方、荷電変換膜の寿命が極端に短くなるため、強度と可用性を両立できない問題に直面している。2012 年度下期にスケジュールされている、Xe や U ビームの MT の要求量からするとこれまでの炭素膜による荷電変換の手法は、膜の耐久性の面から非常に困難である。この問題を解決すべく、炭素膜に代わるヘリウムガスを用いた荷電変換装置の開発を急ピッチで進めている^[17]。また、数年先を見越して fRC と IRC の間に設置する 3 スポーク型の超伝導リバンチャー空洞 (図 12.) の設計開発を行っている^[18]。

参考文献

- [1] Y. Yano, Nucl. Instr. Meth. B261 p.1009(2007), doi: 10.1016/j.nimb.2007.04.174.
- [2] N. Fukunishi, Proc. 25th Int. Linac. Conf., Tsukuba, p352(2010).
- [3] M. Kase et al., 第 7 回日本加速器学会プロシーディングス。
- [4] Y. Yano, Proc. 13th Int. Cyclo. Conf., Vancouver, p102(1992).
- [5] T. Mitsumoto et al., Proc. 17th Int. Cyclo. Conf., Tokyo, p384(2004).
- [6] J. Ohnishi et al., Proc. 17th Int. Cyclo. Conf., Tokyo, p197(2004).
- [7] H. Okuno et al., Proc. 17th Int. Cyclo. Conf., Tokyo, p373(2004).
- [8] H. Okuno et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **18**(2008)226.
- [9] N. Fukunishi et al., Proc. 23th Int. Particle Acc. Conf., Vancouver, p60(2009).
- [10] A. Goto et al., Proc. 12th Int. Cyclo. Conf., Berlin, p51, p439(1989).
- [11] M. Odera et al., Nucl. Instr. Methods A227, p187(1984).
- [12] K. Morita et al., J. Phys. Soc. Jpn. 78, 064201(2009).
- [13] T. Nakagawa et al., Rev. Sci. Instrum. 79, 02A327(2008).
- [14] T. Fujisawa et al., Sci. Papers I.P.C.R.80(1985).
- [15] Y. Sato et al., Proc. PASM6, FOBTA01, 801(2009).
- [16] K. Yamada et al., Proc. Int. Particle Acc. Conf. 2012, New Orleans, in print.
- [17] H. Imao et al., Proc. Int. Particle Acc. Conf. 2012, New Orleans, in print.
- [18] L. Lu et al., Proc. Int. Particle Acc. Conf. 2012, New Orleans, in print.