

DESIGN AND MODIFICATION OF ACCELERATION CAVITIES FOR THE NEW INJECTOR SYSTEM RILAC2 AT RIBF

Kazunari Yamada^{1,A)}, Kenji Suda^{A)}, Naruhiko Sakamoto^{A)}, Shigeaki Arai^{A)}, Hiroshi Fujisawa^{A)},
 Hiroki Okuno^{A)}, Eiji Ikezawa^{A)}, Masayuki Kase^{A)}, Osamu Kamigaito^{A)},
^{A)}RIKEN Nishina Center

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

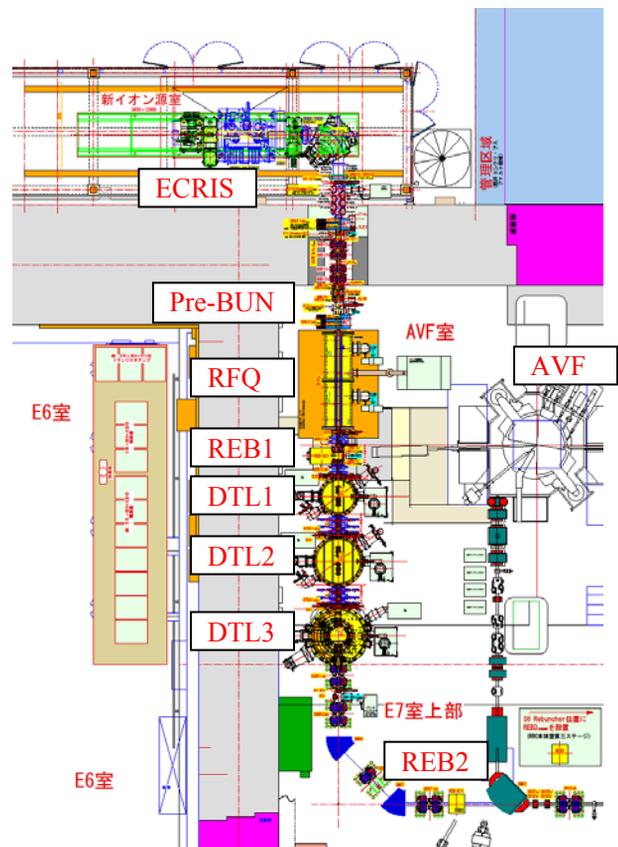
Abstract

RIKEN Heavy-Ion linac (RILAC) provides the very heavy-ion beams such as $m/q=7$ as the main injector for RIKEN RI-Beam Factory (RIBF). However, RIBF research conflicts with the research of the synthesis of super-heavy elements, because both of them use the RILAC. In order to reconcile them, a new additional injector linac to the RIBF (RILAC2) has been proposed, and now under construction. The RILAC2 will be ready in the fiscal 2010. This article presents the details of design study and progress for acceleration cavities on the RILAC2.

理研RIBF新入射器RILAC2の加速空洞の設計および改造

1. はじめに

最新のRIビーム生成施設であるRIKEN RI-Beam Factory (RIBF) [1] は、2006年度よりビームコミッショニングが開始され、ビームトランスミッションを改善してビーム強度を増加させ、2008年度には⁴⁸Caビームを170pnA、²³⁸Uを0.4pnA供給することができるようになり、世界最強のRIビームを利用することが可能となった[2]。加速器基盤研究部では、最終目標である1pμAの重イオンビームを供給するためにさらなる加速器の高度化を行っている。中でも、最もRIビーム生成に有利なウランビームで目標の1pμAを実現するためには、イオン源そのものからのビーム量を大幅に増やし、ビームの質を落とさずにトランスポートし、取りこぼさないように加速しなければならない。また、現在RIBFの主入射器である重イオンライナック (RILAC) [3] には、長期に及ぶ超重元素探索実験 [4] へのビーム供給という重要な役割もあり、RIBF実験と超重元素探索実験を両立させる必要性があった。そのため理研仁科センターでは、28GHzの超伝導ECRイオン源を製作し、RIBFの主となる新入射器を導入して、ビーム強度の大幅増加とマシンタイムの両立を実現することにした。



2. RILAC2

RIBFの新入射器RILAC2[5] は、28GHz超伝導 ECRイオン源[6,7]、プリバンチャー、RFQライナック、3台のドリフトチューブライナック (DTL1~3)、RFQとDTL間のリバンチャー、集束

要素として強力な四重極電磁石及びソレノイド電磁石で構成される。図1にRILAC2の全体図を示す。RILAC2の加速空洞は既存のAVF室に設置し、加速されたビームはAVFからのコースと合流してそのままRRCに入射される。RILAC2は¹³⁶Xe²⁰⁺や

¹ E-mail: nari-yamada@riken.jp

$^{238}\text{U}^{35+}$ といった m/q レシオが7のイオンを680keV/uまで加速する設計になっている。RF空洞の共振周波数は36.5MHz固定で、プリバンチャーのみ18.25MHzとなる。このビームをRRC (18.25MHz, $h=9$) [8]、fRC (54.75MHz, $h=12$) [9]、IRC (36.5MHz, $h=7$) [10]、SRC (36.5MHz, $h=6$) [11]と加速することにより最終的に345MeV/uの $^{136}\text{Xe}^{52+}$ や $^{238}\text{U}^{86+}$ ビームが得られる。RILAC2の建設は2008年度末より開始され、2009年度中に加速空洞が設置され、ハイパワー試験を行った後に、2010年度夏にイオン源を移設して秋にビーム加速を開始する予定である。以下、RILAC2の加速空洞について報告する。

3. RFQライナックの改造

RILAC2に使用するRFQライナックは元々1993年にイオン注入装置用に日新電機株式会社で開発されたものである[12]。その後、京都大学化学研究所先端ビームナノ科学センターにて維持管理が行われてきたが、2007年11月に譲り受けることができた。図2にオリジナルのRFQ内部の写真を示す。このRFQは4ロッド型であり、 $m/q=16$ 以下のイオンを84keV/uまでCWモードで加速することができる。空洞の共振周波数は33.3MHzで、最大入力電力は50kW(CW)となっている。RILAC2ではこのRFQを改造して共振周波数を36.5MHzに上昇させることにより、ベーン電極を交換することなく $m/q=7$ のイオンを100keV/uまで加速することが可能となる。RILAC2で必要なベーン間電圧は42kVであり、オリジナル設計のベーン間電圧55kVより低い。RFQの主な仕様を改造後の値にスケーリングしたものを表1に示す。

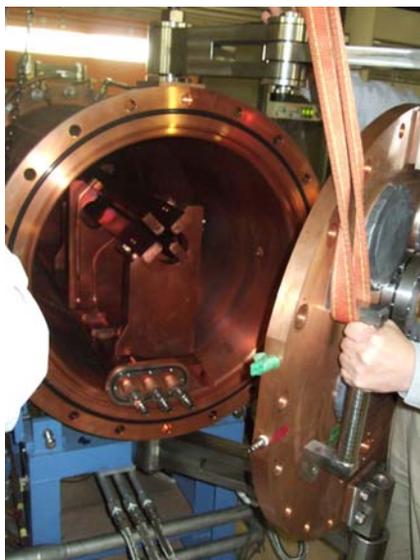


図2:オリジナルRFQ

Frequency (MHz)	36.5
Duty (%)	100
m/q ratio	7
Input energy (keV/u)	3.28
Output energy (keV/u)	100.3
Input emittance (mm · mrad)	200π
Vane length (cm)	225
Inter-vane voltage (kV)	42.0
Mean aperture (mm)	8.0
Cavity diameter (cm)	60
Focusing strength	6.785
Max. modulation	2.35
Final synchronous phase (deg.)	-29.6

表1:改造後のRFQの仕様

理研搬入後、ハイパワー試験で14kW入力し、問題の無いことを確認した。オリジナルのシャントインピーダンスは77.9k Ω [13]であるので(以下 $P=V^2/2R$ とする)、この状態では11kW程度で所定の電圧が得られる。またローパワー試験で、現状の共振周波数は33.8MHz、 Q_0 は5300であることが分かった。CST Micro Wave Studio (MWS) を用いた計算(ベーン電極のモジュレーションなしモデル)では、 Q_0 は5430、シャントインピーダンスは73k Ω 、MWS計算と実測の共振周波数の差は、モジュレーションの有無の影響分を含めて-1.8%であった。

このRFQはベーン電極を6本のポストで交互に支える構造となっており、共振周波数を36.5MHzまで上昇させるために、各ポスト間にブロックチューナーを設置することにした。ブロックのサイズをMWS計算で決定し、さらにアルミ製のテストブロックを製作して取り付け、ローパワー試験を行い、高さ方向の微調整を行った。その様子を図3に示す。最終的にMWS計算と実測の共振周波数の差は、モジュレーションの有無の影響分を含めて-1.5%であった。



図3:アルミ製テストブロックでの測定

ブロックチューナー追加後のMWS計算では、 Q_0 が4400、シャントインピーダンスが55k Ω となるので、所定の電圧を得るには16kW程度のRF電力の入力が必要である。全体で5kW程度ロスが増えることになる。パワーアンプには40kW出力のものを使用するので充分である。図4にMWSで計算したRFQ内部構造物の電流密度分布を示す。この図は50kWパワーロスの時の値である。所定電圧時にスケールすると、ブロックチューナーの最大電流密度は26A/cmと問題ない値である。また、そのときのブロックチューナーでのパワーロスは2kW程度となる。冷却水を ϕ 10mmの穴に通すことにより20L/min程度流れると見積もられるので、水温上昇を2 $^{\circ}$ C程度に押さえることができる。ブロックチューナーを製作し、2009年中に改造を終えてハイパワー試験を行い、2009年度中にAVF室へ移設する予定である。

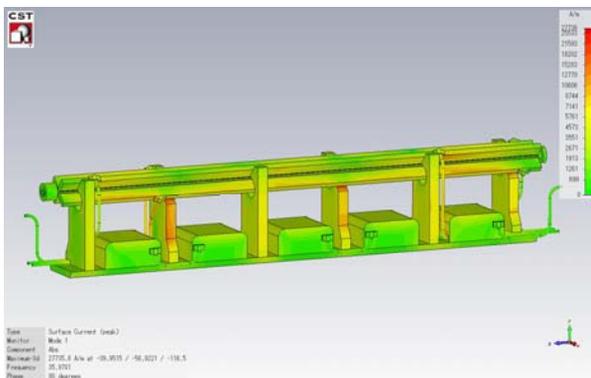


図4:RFQの電流密度分布計算結果

MWSの計算結果より、ブロックチューナーを設置した状態でRFQベーン電極間の電圧分布の非対称性が、15%あることが分かっている。ビードを用いた測定でも計算と同じ結果が得られているが、オリジナルの状態でも非対称性は12%あったので、まずは現状の設計で改造を行い、2010年度には現状の設計のものでビーム加速試験を行う。MWSで計算を行ったところ、ベーン電極間をジャンパーすることにより非対称性が8.5%程度までは低減できる結果となっているので、ビーム加速に問題があればポストを作り替えることで対応する。

4. ドリフトチューブライナック

RILAC2では3台のドリフトチューブライナックを使用する(DTL1~3)。このうち、DTL1,2は新規製作し、DTL3はCharge State Multiplier(CSM) [14]の減速用空洞を改造する。DTLのRF空洞は1/4波長の縦型同軸で、径方向が加速方向となる。トランスバースの集束用にDTL間に強力な薄型三連四

重極電磁石を設置する。表2に各DTLの主な仕様を示す。パワーアンプには4CW50000Eを使用し、設置場所の空きスペースが狭いので、容量によるダイレクトカップリング方式とした。アンプを組み込んだ状態で、真空管から見た負荷が700 Ω になるように調整して使用する。

	DTL1	DTL2	DTL3
Frequency (MHz)	36.5	36.5	36.5
Duty (%)	100	100	100
m/q ratio	7	7	7
Input energy (keV/u)	100	220	450
Output energy (keV/u)	220	450	680
Cavity diameter = length (m)	0.8	1.1	1.3
Cavity height (m)	1.32	1.43	1.89
Gap number	10	10	8
Gap length (mm)	20	50	65
Gap voltage (kV)	110	210	260
Drift tube aperture (mm)	17.5	17.5	17.5
Peak surface field (MV/m)	8.2	9.4	9.7
Synchronous phase (deg.)	-25	-25	-25
Input power (100%Q:kW)	5	13	15
Power amp. (Max.:kW)	25	40	40

表2:各DTLの主な仕様

4.1 DTL3の改造

DTL3として改造する既存のRF空洞は、ショート板による周波数可変範囲36~76.4MHzの同軸空洞で、電力導入は50 Ω 系のキャパシティブフィーダー、200mm \times 500mmの角形プレートチューナーをストローク200mm変化させることによって共振周波数を1.2%程度微調整することが可能である。この空洞のドリフトチューブ及びシステムを交換し、ショート板駆動機構を取り外し、外筒・内筒を所定位置で切断して固定周波数に改造する。先行して2009年5月に工場へ移送し、ドリフトチューブ及びシステムをRILAC2用に交換した後、現地にてローパワー試験を行って最終的な空洞長を決定した。図5にドリフトチューブ交換後のDTL3内部の写真を示す。

まず、チューナーをストロークの中央位置(100mm)にし、電力フィーダーを外した状態でショート板の位置を変化させて共振周波数を測定した(図6)。次にショート板を36.975MHzになる位置にした後、チューナーを変化させて周波数変化範囲を測定し、周波数変化範囲の中心となるチューナー位置にして、再びショート板位置とチューナーを微調整した。最終的にショート板位置は1169mm、チューナー位置は61.6mmとなった。

このとき、目標周波数を36.975MHzにしたのは、アンプをダイレクトカップリングさせて真空管から見て負荷が700Ωになるように調整したときに、カップラーと真空管の容量で全体の共振周波数が低下して見えるので、その分をあらかじめRF空洞の共振周波数に上乗せしておく必要があるからである。当初必要な上乗せ分は、図7の様な集中定数回路による計算結果から-600kHz、周波数固定式にしたときに内筒を支えるフランジの分の周波数変化をMWSで計算した結果+125kHzから見積もった。



図5:ドリフトチューブ交換後のDTL3内部

さらに、DTL3に関しては既存の50Ω系フィーダーがあるので、フィーダーを取り付けてローパワー試験を行った。50Ωにマッチングさせたときに、集中定数回路計算での共振周波数低下の予想値-160kHzに対して実測では-30kHzとなり、フィーダーを付けることによってRF空洞そのものの容量が下がって見えることになり、集中定数回路計算では直接見積もれないことが分かった。また、周波数低下のMWS計算結果は実測に近い値となった。そこで、フィーダー先端の円盤とフィーダー位置を変えて測定したデータと、700Ωから真空管の容量55pF分を引いたインピーダンスを図8の様に比較し、新たに製作するカップラーとの寸法の違いを補正してスケールし、最終的に空洞中心から250mmの位置にφ160mm程度の円盤を入れれば700Ωでマッチングすると予想した。実際には現物で円盤の径を変えてローパワー試験を行い微調整する。また、このときの周波数の低下をスケールすると-225kHz程度だったので、最終的にカップラーなしで共振周波数が36.6MHzになるように、DTL3の全長を1.89mと決定した。MWS計算ではQ₀が28800、シャントインピーダンスが2.2MΩとなる。ビードによる摂動測定で求めたシャントインピーダンスが1.8MΩ

であったので、所定電圧時に必要なRF電力は19kW程度となる。DTL3は現在改造が進んでおり、2009年11月に工場にてローパワー試験を行う予定である。

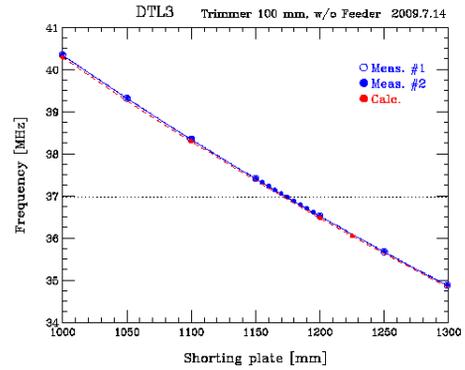
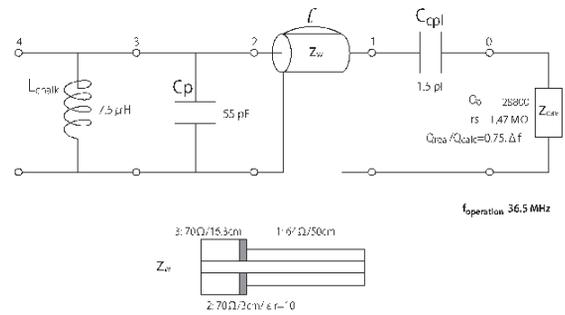


図6:DTL3のショート板位置と周波数



2009/07/14 N.Sakamoto

図7:集中定数回路による周波数変化の見積り

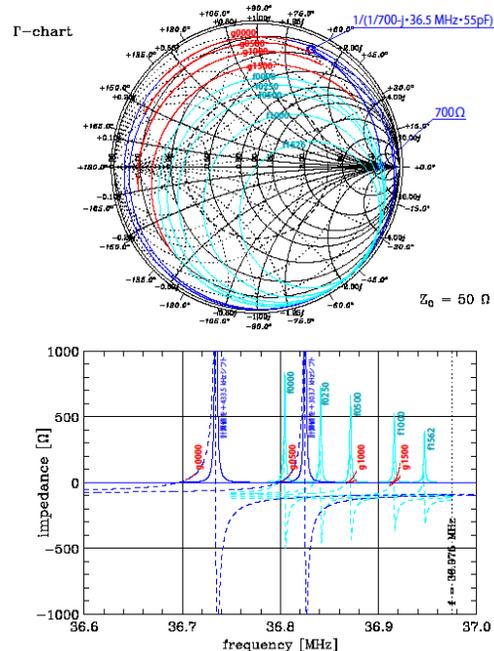


図8:アンプのダイレクトカップリングの見積り

4.2 DTL1, DTL2の設計

新規製作するDTL1,DTL2についてもMWS計算で最適化を図った。初期設計ではドリフトチューブシステムの長さが200mmであったが、ギャップ間電圧の偏差がDTL1で8.6%と大きかったので、150mmとすることにより6.6%になった。MWS計算では、DTL1については Q_0 が17500、シャントインピーダンスが1.1M Ω 、DTL2の Q_0 が23800、シャントインピーダンスが1.7M Ω となった。DTL3の測定でシャントインピーダンスが計算の8割程度になったので、スケーリングすると所定電圧時に必要なRF電力は、DTL1が7kW弱、DTL2が16kW程度と予想される。図9にDTL1に25kW入力したときの発熱分布の計算結果を示す。

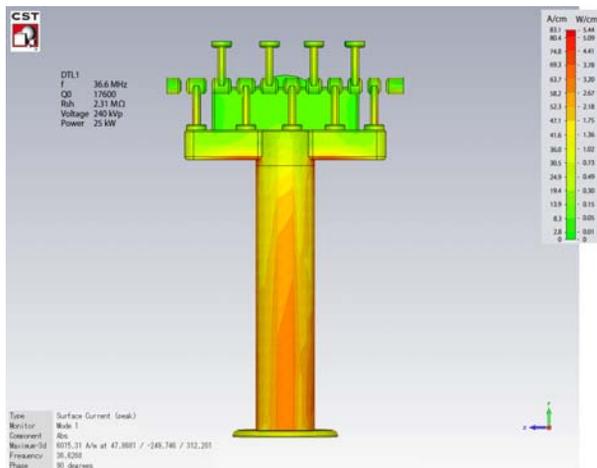


図9:DTL1内部構造の発熱分布計算結果

DTL1,2についても、アンプ取り付け時の共振周波数低下分の上乗せ量を見積もり、カップラーの位置と大きさを決定するために、DTL3の既存のフィーダーをMWS計算モデルに入れて外部Qを計算し、50 Ω にマッチングする位置を予想した。外部Qの計算には文献[15]の方法を使用し、フィーダーの同軸端をopenにして計算した場合の電場の積分と、shortにして計算した場合の磁場の積分から求めた。DTL1についてフィーダー位置を変えてプロットした外部Qの計算結果を図10に示す。実際の Q_0 が計算の6割とすると、空洞中心から285mmで $Q_0=Q_{ext}$ となる。DTL3と同様にスケーリングすると、DTL1では空洞中心から185mmの位置に、DTL2では中心から275mmの位置にカップラーの円盤を入れれば700 Ω にマッチングすると予想される。共振周波数の低下もMWS計算結果からDTL3と同程度と分かり、補正を加えて目標周波数を36.725MHzと決めた。対応する空洞長はDTL1が1.32m、DTL2が1.43mとなった。

これらも現在製作が順調に進行しており、2009年11月下旬に工場にてローパワー試験を行う予定である。その後DTL3と合わせて2009年度中にAVF本体室に設置され、ハイパワー試験を行う予定である。

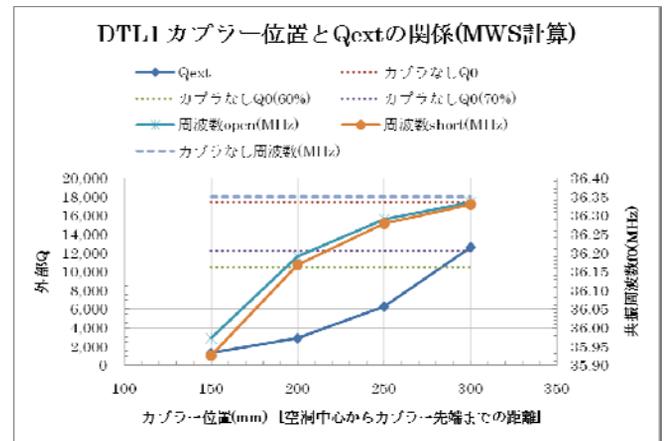


図10:外部Qと共振周波数の計算結果

参考文献

- [1] Y. Yano, Nucl. Instrum. Meth. B 261 (2007) 1009.
- [2] N. Fukunishi et al., PAC'09, Vancouver, May 2009, MO3GRI01.
- [3] M. Odera et al., Nucl. Instrum. Meth. 227 (1984) 187.
- [4] K. Morita et al., J. Phys. Soc. Jpn. 73 (2004) 2593; J. Phys. Soc. Jpn. 76 (2007) 043201; J. Phys. Soc. Jpn. 78 (2009) 064201.
- [5] O. Kamigaito et al., PASJ3-LAM31, Sendai, Aug. 2006, WP78, p502 (2006).
- [6] T. Nakagawa et al., Rev. Sci. Instrum. 79 (2008) 02A327, ECRIS'08, Chicago, Sep. 2008, MOCO-B01, p.8 (2008).
- [7] J. Ohnishi et al., EPAC'08, Genoa, Jun. 2008, MOPC153, p.433 (2008).
- [8] H. Kamitsubo, Proc. 10th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, East Lansing, MI, USA, 1984, p.257 (1984).
- [9] N. Inabe et al., Proc. 17th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Tokyo, 2004, p.200 (2004).
- [10] J. Ohnishi et al., Proc. 17th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Tokyo, 2004, p.197 (2004).
- [11] H. Okuno et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 17 (2007) 1063.
- [12] H. Fujisawa, Nucl. Instrum. Meth. A 345 (1994) 23.
- [13] H. Fujisawa et al., Proc. 7th Int. Symp. on Advanced Energy Research, Takasaki, Mar. 1996, p.436 (1996).
- [14] O. Kamigaito et al., Rev. of Sci. Instrum. 76, 013306 (2005).
- [15] P. Balleyguier, Proc. of 19th Int. Linac Conf., Chicago, IL, USA, 1998, p.133 (1998).