

RIBF 大強度化計画のための重イオン超伝導線形加速器の概念設計

CONCEPTUAL DESIGN OF SC LINAC FOR RIBF-UPGRADE PLAN

山田一成^{#, A)}, 須田健嗣^{A)}, 坂本成彦^{A)}, 上垣外修一^{A)}

Kazunari Yamada^{#, A)}, Kenji Suda^{A)}, Naruhiko Sakamoto^{A)}, Osamu Kamigaito^{A)}

^{A)} RIKEN Nishina Center, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract

For the intensity upgrade of very-heavy ions such as ^{238}U and ^{124}Xe at the RIKEN RI-Beam Factory (RIBF), a design study of new SC linac injector has started on. In the RIBF, the very-heavy ions are accelerated in a cascade of the injector linac (RILAC2), the RIKEN ring cyclotron (RRC), the fixed-frequency ring cyclotron (fRC), the intermediate-stage ring cyclotron (IRC), and the world's first superconducting ring cyclotron (SRC). We plan to substitute the SC linac for the RRC with respect to the very heavy ions, and to boost up the energy of ions with mass-to-charge ratio of 7 from 1.4 MeV/u to 11 MeV/u in the cw mode. The SC cavity is assumed to be a two gap QWR with an rf frequency of 73 MHz, that is twice the rf frequency of IRC and SRC.

1. はじめに

理研仁科センターの RI ビームファクトリー (RIBF) [1] は、多種多様な RI ビームを世界最大強度で生成し、元素合成過程の解明や不安定核を含む原子核の統一的理解を確立することを目的とした重イオン加速器施設であり、2007 年度より実験へのビーム供給を行っている。現在稼働中の加速器は、3 種類の入射器 (1981 年から 30 年以上使用されている可変周波数重イオン線形加速器 RILAC^[2,3]、2010 年から運転を開始した固定周波数重イオン線形加速器 RILAC2^[4,5]、K 値 70 MeV の AVF サイクロトロン^[6]) と、4 台のリングサイクロトロン (K 値 540 MeV の理研リングサイクロトロン RRC^[7]、K 値 700 MeV の固定周波数リングサイクロトロン fRC^[8,9]、K 値 980 MeV の中間段リングサイクロトロン IRC^[10]、K 値 2600 MeV の超伝導リングサイクロトロン SRC^[11]) である。RIBF ではこれらの複数のリングサイクロトロンを縦続接続し、ウランまでの重イオンを光速の約 70% まで CW 加速することが出来る。重陽子、ヘリウム、窒素、酸素などの軽粒子は、AVF+RRC+SRC の縦続接続により、核子あたり最大 440 MeV まで加速することができる。カルシウム、亜鉛、クリプトンなどの中重核は、RILAC+RRC+IRC+SRC の縦続接続により、核子あたり最大 400 MeV まで加速することができる。質量電荷比 m/q の大きいウランとキセノンは、Figure 1 の上図の様に RILAC2+RRC+fRC+IRC+SRC をフルに使って核子あたり 345 MeV に加速する。加速の過程で必要に応じて荷電変換を行っており、例えばウランビームの場合は、RRC の後で 35 価から 64 価に荷電変換し、fRC の後で 64 価から 86 価に再び荷電変換している。

RIBF の加速ビーム強度は、軽粒子に関しては当初からの目標である 1 μA を達成しており、中重核の場合も ^{48}Ca が 415 pA、 ^{70}Zn が 110 pA とゴール

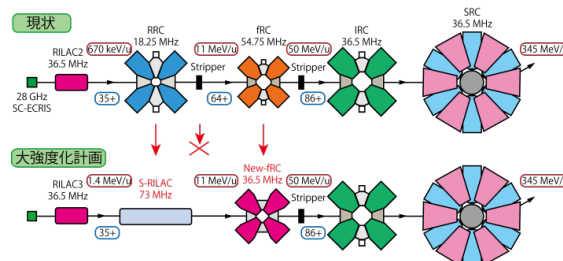


Figure 1: Present (upper half) and proposed (lower half) accelerator chains for the uranium beam at RIBF.

に近づきつつある。一方、ビーム強度が大幅に不足していたウランとキセノンに関しては、RIBF 稼働後 28 GHz 超伝導 ECR イオン源^[12,13] や新入射線形加速器 RILAC2 の建設、荷電変換装置の開発^[14,15,16]、運転パラメータの最適化などを行ってきたことにより^[9]、2014 年夏現在ウランが 25 pA、キセノンが 38 pA に到達している。特にウランビームは、核分裂片として安定線から遠く離れた中性子過剰な RI を得ることが出来るため、RIBF での最重要ビームとして位置づけられており、現時点で世界最大強度を達成しているが、さらなるビーム強度の向上が求められている。

RIBF のウランビーム加速では、現在イオン源から 3 μA 弱のビームを供給して運転しているが、荷電変換を 2 回行っていることにより、全変換効率が約 5% と低いため、大部分のビームをビームダンプで止めている状態である。また、RRC はウラン加速で使用する運転周波数 18.25 MHz で発生できる加速電圧が周回当たり約 280 kV と低く、フラットトップ加速共振器も搭載していないため、入射ビームの位相幅を絞るの必要があり、入射側で空間電荷効果の影響を強く受けている。加速位相の最適化により空間電荷効果の影響を減らすように加速しているが、既にビーム取り出し効率の悪化が問題となりつつある。よって、現在の構成では 100 pA 以上のウランビーム加速は困難であると考えられる。

そこで、核子あたり 345 MeV のウランビーム強度

[#] nari-yamada@riken.jp

を 1 μA 以上に増強する RIBF アップグレードとして、Figure 1 の下図の様な加速方式に変更することを計画している。既存の入射器と RRC の代わりとなる、超伝導線形加速器を含む新しい入射用線形加速器を建設して、35 価のウランを核子あたり 11 MeV まで加速する。さらに、35 価のウランを加速できるリングサイクロトロン^[17]を新設して、核子あたり 50 MeV 弱まで加速した後に 1 回のみ荷電変換し、既存の IRC へと入射する。これによってビーム強度を大幅に向上させることができる。本プロシードディングスでは、昨年度より開始した超伝導線形加速器部分の概念設計^[18]について記述する他、本年度行っているクライオスタットの概念設計や、超伝導空洞の機械設計についても紹介する。

2. 新しい入射用線形加速器

2.1 新入射器の概要

超伝導 ECR イオン源で生成される、 $^{238}\text{U}^{35+}$ や $^{124}\text{Xe}^{19+}$ などの m/q が 7 程度の重イオンを、核子あたり 11 MeV まで CW で加速するための線形加速器である。Figure 2 に新入射器のレイアウトプランを示す。イオン源からのビームを常伝導の RFQ および常伝導の Drift Tube Linac (DTL) で核子あたり 1.4 MeV まで加速し、1.4 MeV/u から 11 MeV/u までは超伝導線形加速器で加速する構成となる。超伝導線形加速器部は 1 種類の超伝導加速空洞で対応できるように、常伝導部と超伝導部の境目となるエネルギーである 1.4 MeV/u を決定した。

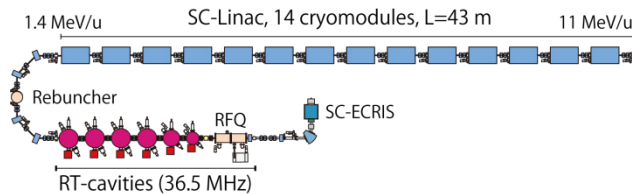


Figure 2: Layout plan of new linac injector.

常伝導 DTL は 1/4 波長型空洞共振器 (QWR) を用いたヴィドレー型で、基本構造は RILAC2 と同様である。1 台あたり 40 kW 以下の RF パワー入力で運転可能である。収束要素は各タンク間に常伝導四重極電磁石 (RT-Q) トリプレットを配置する。

超伝導線形加速器部は、73 MHz の 1/4 波長型超伝導空洞 (SC-QWR) を 4 台搭載したクライオモジュールを合計 14 台並べ、各クライオモジュール間に収束用の RT-Q ダブルレットを設置する設計となっている。全長は約 43 m である。

2.1 超伝導線形加速器部の概念設計

まず始めに、SC-QWR の共振周波数を、後段のリングサイクロトロン IRC や SRC の周波数の 2 倍となる 73 MHz に設定した。似たような共振周波数で、同程度の粒子速度で使われる SC-QWR として、アルゴンヌ国立研究所の ATLAS インテンシティーアップグレード^[19]用の SC-QWR がある。また、ギャップ電圧は保守的に 800 kV と設定し、ビーム

ダクト直径は余裕のある 40 mm とした。この設定で、各ギャップ中心で加速されるとしてハードエッジ近似計算によりエネルギーゲインを求め、なるべく空洞数を減らす様に SC-QWR のギャップ長とギャップ中心間距離を決定した。各ギャップ中心での RF 位相は、ギャップ中心間距離に適合する速度 β_{geom} を持つ粒子の同期位相を -25 度として、対称に振り分けるように粒子速度の変遷によって補正して求めた。反復計算を行うことにより、ギャップ長 $g = 60$ mm、ギャップ中心間距離 $d = 160$ mm の SC-QWR を 56 台使用することに決定した。この時、 β_{geom} は 0.078 となっている。Figure 3 に決定したジオメトリでのエネルギーゲインの変遷を示す。

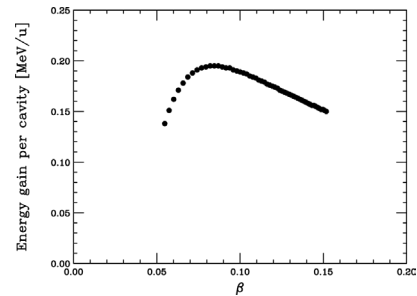


Figure 3: Evolution of energy gain by 73 MHz SC-QWRs.

次に、各構成要素の配置について第一次近似で計算し、適度な収束力で周期解を得られるか、縦方向のアクセプタンスが充分かを確認し、線形加速器としてのジオメトリを決定した。以下のそれぞれの場合について変換行列を計算して TWISS パラメータを求め、エンベロープを得た。全ての場合において、SC-QWR 中心間の距離はなるべく詰めて、400 mm としている。

- 5 台の SC-QWR と 1 台のソレノイド電磁石を搭載したクライオモジュールを 11 台並べた構成
- 3 台の SC-QWR と 2 台の SC-QWR の間に 1 台のソレノイド電磁石を入れたクライオモジュールを 11 台並べた構成
- 4 台の SC-QWR を格納したクライオモジュールを 14 台並べ、各クライオモジュール間に RT-Q ダブルレットを配置する構成
- 3 台の SC-QWR を格納したクライオモジュールを 18 台並べ、各クライオモジュール間に RT-Q ダブルレットを配置する構成

最終的に、4 台の SC-QWR を格納したクライオモジュールを 14 台並べ、各クライオモジュール間に RT-Q ダブルレットを配置する構成を採用した。Figure 4 に採用した配置図を示す。アクセプタンスの面ではベストではないが、RT-Q ダブルレットの製作容易性を考慮して決定した。この構成では、RT-Q のアパーチャー直径 50 mm として、四重極磁場勾配 20 T/m 程度で収束可能であるという結果になった。また、シンクロトロン振動の振幅を減らすため、クライオモジュール #1-#2 間と #2-#3 間だけ、RT-Q ダブルレット間の配置距離を 300 mm から 100 mm に短縮している。それ以外の 300 mm のスペースにはビー

ム診断箱を設置し、各クライオモジュールと RT-Q の間に X,Y ステアリング電磁石を設置する予定である。

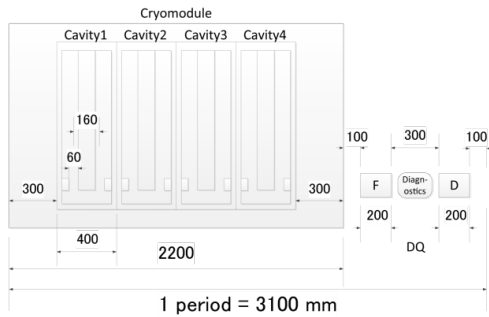


Figure 4: Selected layout plan of one periodic structure.

計算で得られたジオメトリ、RT-Q の磁場勾配、各ギャップでの電圧と位相を TRACE3-D に入力してプロットした横方向と縦方向のビームエンベロップを Figure 5 に示す。入力エミッタンスは、横方向がイオン源から $200 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ のビームが得られるとして X,Y 共 $9.6 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 、縦方向は RILAC2 からのビームに余裕を持たせて $\Delta\Phi = \pm 10^\circ$ 、 $\Delta E/E = \pm 3.0\%$ とした。横方向の入力楕円パラメータはクライオモジュール#1 での固有楕円にマッチするように、縦方向はアップライトとしている。Figure 5 に示されるとおり、エンベロップはビームダクト直径に比べて十分に小さいといえる。超伝導線形加速器部の概念設計仕様を Table 1 にまとめる。

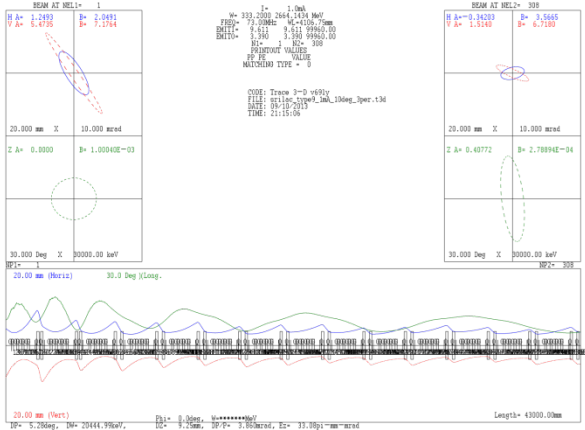


Figure 5: Transverse and longitudinal beam envelopes plotted by TRACE3-D code.

3. 各構成要素の検討

3.1 SC-QWR の形状の最適化

SC-QWR の RF 設計は、昨年度の初期設計^[18]の後に消費電力を減らす様に最適化を行った。内筒をテーパ状にして強度を上げ、外筒径を大きくして内容積を増やすとともに、ドリフトチューブ形状を変更した。これにより、消費電力は 2 割程度削減さ

Table 1: Design Parameters of SC-Linac

Frequency	73.0 MHz
Duty	100%
Mass-to-charge ratio	~7
Input energy	1.4 MeV/u
Output energy	11.0 MeV/u
Number of cavities	56
Number of cryomodules	14
Number of quadrupole magnets	28
Total length	43 m
Total acceleration voltage	~67 MV

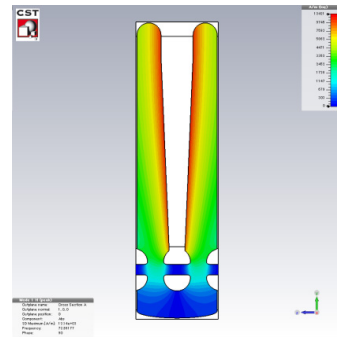


Figure 6: Magnetic-field strength (absolute) of optimized SC-QWR calculated by MWS.

れた。最適化後の CST Micro Wave Studio (MWS) による電磁場計算結果として、SC-QWR 内の磁場分布 (絶対値) を Figure 6 に示す。また、改良後の SC-QWR の仕様を Table 2 にまとめる。

3.2 クライオスタットの概念設計

本年度よりクライオモジュールの概念設計を開始した。Figure7 に現時点でのクライオモジュール案を示す。磁気シールドは全体を覆う形とし、バルブボックスは別置き型とした。入力カップラーは SC-QWR の下から挿入する方式となる。必要な構成要素の洗い出しと冷却運転方案および組立手順の確認は行ったが、仕様の確定および機械構造などの詳細設計はこれからである。

3.3 SC-QWR の変形と周波数変化の評価

SC-QWR の共振周波数調整機構 (チューナ) を検討するため、SC-QWR のビームポートを押して変形させる場合と、ビームポートの 90 度対向面を押して変形させる場合について、変形量と周波数変化を計算した。変形量の計算には、ANSYS のメカニカルソルバーと CST の MPHYSICS のメカニカルソル

Table 2: Design Parameters of SC-QWR

Frequency	73.0 MHz
Cavity inner diameter	ϕ 300 mm
Cavity height	1103 mm
Gap length	60 mm
Gap voltage	800 kV
β_{geom} of cavity	0.078
Beam aperture	ϕ 40 mm
Synchronous phase for β_{geom}	-25°
Operating temperature	4.5 K
$G = Q_0 \times R_s$	22.6 Ω
R_a/Q_0	718 Ω
$R_s = R_{BCS} + R_{res}$	25 n Ω
Q_0	9.0×10^8
Shunt impedance, R_a	6.5×10^{11}
Rf power loss	4.0 W
E_{acc}	4.5 MV/m
E_{peak}/E_{acc}	6.0
B_{peak}/E_{acc}	9.5 mT/(MV/m)

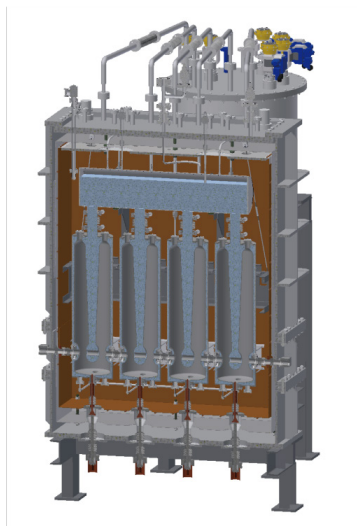


Figure 7: First conceptual design of a cryomodule.

バーを使用した。周波数変化は MWS を使用して求めた。まずはジャケットの強度は考慮せず、Nb の SC-QWR 単体で変形計算を行った。Nb 材のヤング率は 125 MPa、ポアソン比は 0.38 とした。Nb の板厚は全て 4 mm となっており、変形には大きな力が必要と考えられる。

空洞間の距離を詰めているため、チューナ機構を取り付ける上ではビームポートの 90 度対向面を押す方が自由度が高い。しかし、容量成分を稼ぐよう

な構造を設けないと、変形に対する周波数変化量は小さいはずである。ビームポート側を固定した場合の変形量を計算すると、5000 N という大きな荷重をかけた場合に ANSYS の結果が 0.347 mm、MPHYSICS の結果が 0.355 mm となった。またこのときの周波数変化量は -0.67 kHz となった。別の条件として、ビームポートの固定を外して自由になると、同一の荷重でも最大変位が 0.448 mm (ANSYS) と 0.450 mm (MPHYSICS) になった。この場合ビームポート側が外側へ約 0.23 mm 押し出され、MWS で計算した共振周波数の変化量は +6.23 kHz となり、ビームポートを固定した場合と符号が逆になっている。押しつぶした分の容量成分上昇と比較して、ビームポート側の容量成分低下が大きいためである。応力については ANSYS では固定ありの場合は最大 172 MPa であったが、固定しない場合は 205 MPa となり、19%増加した。MPHYSICS では逆に 2%減少した。

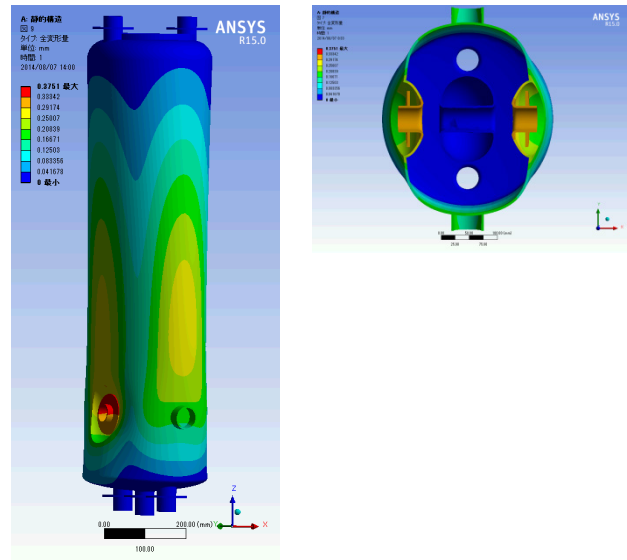


Figure 8: Defomation of SC-QWR calculated by ANSYS. Two beam ports were pushed by load of 5000 N.

次にビームポートを両側から 5000 N の力で変形させ、周波数変化量を求めた。90 度対向側を固定しない場合の変形量の結果を Figure 8 に示す。なお、実際の変位を 100 倍に誇張して表示させている。また、各計算結果を Table 3 に示す。変形量 1 mm あたりの周波数変化量は 90 度対向面を押した場合の 15 倍となっている。90 度対向側を固定しない方が変形量 1 mm あたりの周波数変化量が小さくなっているのは、外側に変位して容量成分が低下するためであると考えられる。エンドドリフトチューブが大きいことから、最大応力も 90 度対向面を押した場合の半分程度となっている。

ビームポート側を押すことにより、変形量と周波数変化量はチューナ機構に充分であると考えられる。しかし、必要な力は 1/10 程度にする必要があり、エンドドリフトチューブ周辺の構造を変更する必要が

ある。1/10 の力で同程度変形できるようにできれば、最大応力も許容範囲に収まるはずである。空間的制約のあるビームポート側を押す機構については多くの検討が必要である。

Table 3: Deformation

	Tool	Fixed	Free
Max. deformation [mm]	ANSYS	0.275	0.375
Max. deformation [mm]	CST MPHYSICS	0.278	0.380
Max. stress	ANSYS	113	116
Max. stress	CST MPHYSICS	138	123
Freq. variation [kHz]	CST MWS	-8.03	-9.40
Freq. variation [kHz/mm]	CST MWS	-28.90	-24.75

3.3 高周波磁場によるステアリング量の評価

ステムを鉛直方向に配置した SC-QWR では、ビーム軸水平面に対して構造が上下対称ではないため、高周波磁場の水平横方向の成分が発生し、同期位相加速時に鉛直方向に一定量のキックを受ける。これは、低速度でかつ質量電荷比 m/q が比較的小さい粒子に対して、エミッタンスに深刻な影響を与える事が指摘されている^[20]。そこで、ウラン加速時の高周波磁場によるキックの量をシミュレーションにより評価した。具体的には、SC-QWR のデザインに対して MWS で得られた電場、磁場分布をもとに、運動方程式

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = qe \left\{ \vec{E}(\vec{x}) \cos(\omega_{rf}t + \phi) + \vec{v} \times \vec{B}(\vec{x}) \sin(\omega_{rf}t + \phi) \right\}$$

を Runge-Kutta-Gill 法で数値的に解いた。高周波磁場の影響が比較的大きい低速側の最初のクライオモジュールにおいて、各ギャップに発生する高周波の電場、磁場と中心粒子の軌道を Figure 9 に示す。入射エネルギー 1.4 MeV/u の $^{238}\text{U}^{35+}$ は、各空洞の同期位相約 -25° で、2.03 MeV/u まで加速される。その結果、クライオモジュール出口の位置 2.2 m で鉛直下方向に約 1.8 mrad の角度をもち、中心が約 1.8 mm 下がることになった。次に、入射粒子の Figure 10(a) に示したエンベロップ上の粒子をクライオモジュール 14 台で最終エネルギーの 11 MeV/u まで加速した様子を Figure 10(b) に示す。鉛直方向に約 2 mm のずれが生じている。また、高周波磁場の影響は、鉛直方向へのキックだけでなく各ギャップでのキック量がエネルギー（速度）に依存するため、鉛直方向の図を見るとエネルギー広がり位置、角度に表れている。高周波磁場によるキックを各クライオモジュール毎にステアリング電磁石で補正すると、Figure 10(c) のようにその影響を最小限に押さえるこ

とができる。しかしながら、ステアリングの量を変えると加速ビームのエネルギーも変わってしまうため、ステアリング電磁石を調整すると後段のサイクロトロンへの入射の位相が変わってしまうことになり、実際のビーム調整時に問題となると思われる。

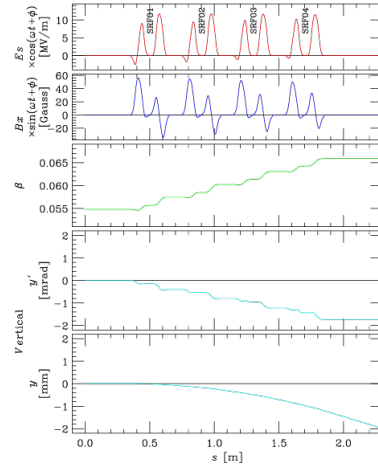


Figure 9: Motion of beam centroid accelerated by cryomodule #1. (Up to down) Rf electric field, Rf magnetic field, velocity, vertical angle, vertical position.

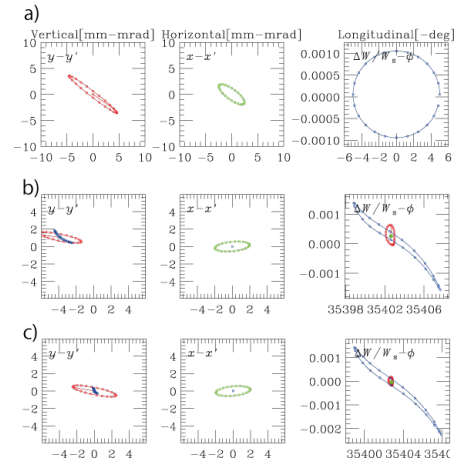


Figure 10: Beam envelopes of injection (a), extraction (b,c). Correction by steering magnets are included in (c).

4 今後の予定

超伝導 QWR については、周波数チューニング機構を検討中である。また、クライオモジュールについては、現在侵入熱計算を行っており、実際の機械設計を開始する予定である。入力カプラーは詳細設計は未着手であるが、円筒型ダブルウィンドウ式で CW 3 kW 対応のものを想定して設計する予定である。高周波磁場によるキックの影響は、ステアリング電磁石での補正が有効であるが、入射ビームのエネルギー、RF 電圧・位相設定で最適な補正量も変わるため、実際の運用を踏まえて、ドリフトチューブ端面をカットして鉛直方向の高周波電場を発生させて補正する方法を検討する。

参考文献

- [1] Y. Yano, Nucl. Instrum. Meth. **B261** (2007) 1009.
- [2] M. Odera et al., Nucl. Instrum. Meth. **A227** (1984) 187.
- [3] O. Kamigaito et al., Rev. Sci. Instrum. **76** (2005) 013306.
- [4] K. Yamada et al., Proc. of IPAC'12, TUOBA02, (2012) 1071.
- [5] K. Suda et al., Nucl. Instrum. Meth. **A722** (2013) 55.
- [6] A. Goto et al., Proc. 12th Int. Cyclo. Conf. (1989) 51, 439.
- [7] Y. Yano, Proc. 13th Int. Cyclo. Conf. (1992) 102.
- [8] T. Mitsumoto et al., Proc. 17th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications (2004) 384.
- [9] N. Fukunishi et al., Proc. of Cyclotrons2013, MO1PB01, (2013).
- [10] J. Ohnishi et al., Proc. 17th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications (2004) 197.
- [11] H. Okuno et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **17** (2007) 1063.
- [12] T. Nakagawa et al., Rev. Sci. Instrum. **81** (2010) 02A320.
- [13] Y. Higurashi et al., Rev. Sci. Instrum. **83** (2012) 02A308.
- [14] H. Imao et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **15** (2012) 123501.
- [15] H. Hasebe et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. **46** (2013) 133.
- [16] H. Imao et al., Cyclotrons 2013, TU3PB03 (2013).
- [17] J. Ohnishi et al., Proc. of Cyclotrons2013, MOPPT022 (2013).
- [18] K. Yamada et al., Proc. of SRF2013, MOP021, (2014) 137.
- [19] P. N. Ostroumov et al., Proc. of LINAC'12, TUPLB08, (2012) 461.
- [20] P. N. Ostroumov and K. W. Shepard, Phys. Rev. ST Accel. Beams **4** (2001) 110101.