

重イオン線形加速器用 $\lambda/4$ 型超伝導空洞共振器プロトタイプシステムの開発

山田一成^{*A)}、上垣外修一^{A)}、大関和貴^{A)}、坂本成彦^{A)}、須田健嗣^{A)}、渡邊裕^{A)}、
加古永治^{B)}、仲井浩孝^{B)}、梅森健成^{B)}

Kazunari Yamada^{*A)}, Osamu Kamigaito^{A)}, Kazutaka Ozeki^{A)}, Naruhiko Sakamoto^{A)}, Kenji Suda^{A)}, Yutaka Watanabe^{A)},
Eiji Kako^{B)}, Hirotaka Nakai^{B)}, Kensei Umemori^{B)}

^{A)}RIKEN Nishina Center

^{B)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Prototype system including a superconducting quarter-wavelength resonator was started at RIKEN Nishina Center in 2015, in order to develop elemental technologies required for the low-velocity part of the CW high-intensity ion linear accelerator. The prototype cryomodule consists of a superconducting resonator, cryostat, coaxial input coupler, frequency tuner, thermal shield, magnetic shield, and measurement instrumentation. The cryomodule was successfully fabricated and cooling-down tests are in progress. This contribution summarizes the present status of the development.

1. はじめに

2014年度より始まった内閣府の革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の一つである「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」[1]は、長寿命核分裂生成物 (LLFP) を加速器を用いて核変換して資源化するプロセスの概念を創出することを目標としている。理研仁科センターが参加しているこのプログラムでは、偶奇分離された元素に加速器からの大強度中性子や陽子、重陽子ビームを照射して核変換することを想定しており、イオン種や必要なビームエネルギーを大規模なシミュレーションと核反応の新しい測定データの取得によって最適化して、この必要なビームエネルギーと強度を実現するための加速器および標的の技術開発課題を洗い出すとともに、必要な要素技術の開発を行っている。このプログラム中のプロジェクト4では、核変換システムの検討と要素技術開発を行っており、低速度領域の大強度重イオン線形加速器のための要素技術として、2015年より $\lambda/4$ 型超伝導空洞 (SC-QWR) およびクライオモジュールのプロトタイプを開発してきた [2]。

開発を行ってきたプロトタイプシステムのクライオモジュールは、SC-QWR 1 式、ダミー空洞 1 式、入力コプラー 2 式、チューナー 1 式、クライオスタット 1 式で構成される。クライオモジュールの概略図を図 1 に示す。加速粒子は重陽子以上を想定しており、SC-QWR の共振周波数は 75.5 MHz、ギャップ電圧は 800 kV 以上として設計した。ギャップ中心間距離 $\beta\lambda/2$ を 160 mm としたので、イオン速度の最適値は $\beta_{opt} = 0.08$ となる。これにより、イオン速度範囲 $\beta = 0.06 \sim 0.15$ 程度に適合する SC-QWR となっている。プロトタイプシステムは 2015 年度に設計を行い、2016 年度に製作された。本稿ではこのプロトタイプシステムの開発状況および今後の予定を報告する。

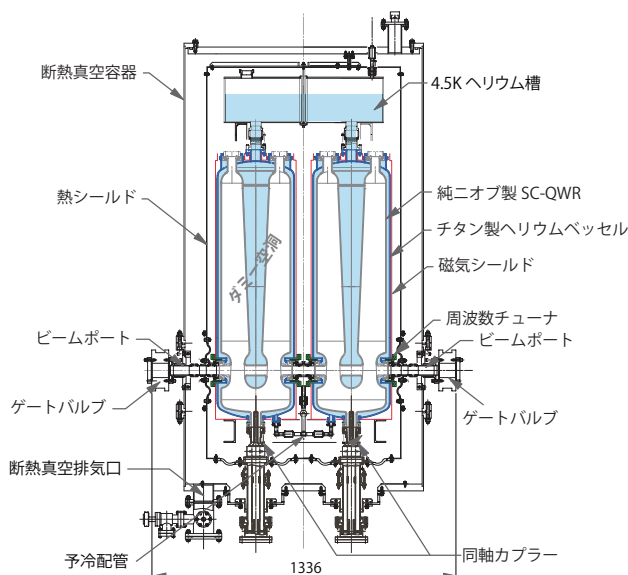


Figure 1: Schematic of the prototype system.

2. 超伝導空洞

2.1 設計と製作

本 SC-QWR は 2013 年より設計、最適化した理研仁科センターのアップグレード計画用 SC-QWR [3, 4] の形状をもとにして、共振周波数が 75.5 MHz となるように全長および内導体の角度を調整したものである。高周波電磁場計算には CST の Micro Wave Studio を使用した。SC-QWR の設計上のパラメータを表 1 に、概略図を図 2 に示す。ここで E_{acc} を求める際の有効長は $\beta_{opt}\lambda = 0.32$ m としている。

SC-QWR は主に 4 mm 厚、RRR=250 の純ニオブ材を使ったバルクニオブ空洞で、各ポートのフランジにはグレード 2 の高硬度ニオブ材を使用し、ヘリウムジャケットは純チタン二種材を使っている。開発期間が短かったため高圧ガス保安法には非対応となっているが、後のことを考えて基本的には準拠できるように製作を

*nari-yamada@riken.jp

Table 1: Design parameters of the SC-QWR prototype. Surface resistance was assumed to be 25 nΩ in the calculation.

Frequency [MHz] at 4.5 K	75.5
Duty [%]	100
β_{opt}	0.08
G [Ω]	23.5
R_{sh}/Q_0 [Ω]	578
Q_0	9.4×10^8
P_0 [W]	3.8
V_{acc} [MV] at $E_{acc} = 4.5$ MV/m, $\beta = 0.08$	1.44
E_{acc} [MV/m]	4.5
E_{peak}/E_{acc}	6.2
B_{peak}/E_{acc} [mT/(MV/m)]	9.7

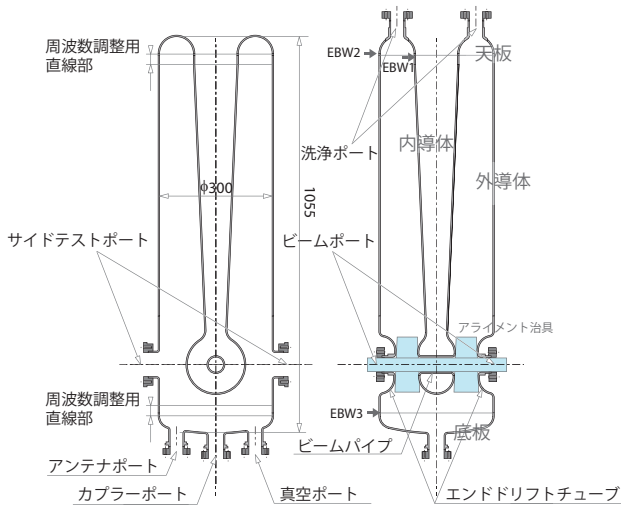


Figure 2: Schematics of the SC-QWR.

行った。製作工程は、まず純ニオブ板を機械加工およびプレス成形し、純ニオブ丸棒の削り出しで製作した各ポート部品を電子ビーム溶接 (EBW) して、天板、内導体、外導体、底板の 4 部品を製作した。天板には洗浄用ポート 2 箇所、外導体にはビームポート 2 箇所およびサイドテストポート 2 箇所、底板には洗浄用ポート 2 箇所とカプラー用ポート 1 箇所を設けた。天板と内導体および外導体の溶接部と、外導体と底板の溶接部には共振周波数調整用の直線部をあらかじめ用意した。また、高周波磁場によるキック力を電場で補償するため、ドリフトチューブには 2.3° の面角を付けている。図 3 は製作された天板、内導体、外導体、底板の写真である。

SC-QWR 運転時の共振周波数調整機構 (チューナー) は、ビームポートをそれぞれ内側に押しつけてギャップ長を変化させる一般的な方式とした。後日プランジャーによって容量成分を変化させて共振周波数を調整する方式を試験できるように、外導体にサイドテストポートを設けてある。真空力やヘリウム圧力、チューナーによる力を含めて SC-QWR の変形量、周波数変化量、応力を ANSYS、CST、ABAQUS で計算し評価した。その結果、最大応力を低減するようにエンドドリフトチューブ周辺



Figure 3: Photographs of each component for the SC-QWR.

の形状を最適化した。チューナーによる共振周波数の変化は、片側最大変位 0.3 mm を想定して $\Delta f = 13.7$ kHz (ヘリウムジャケット付き) という計算結果になった。また、純ニオブ材の許容引張応力は常温で 26 MPa、-269° で 75 MPa であり、チューナーに必要な変位 0.3 mm を考慮すると -269° のみでチューナーを使用すれば最大応力が 75 MPa 以下に充分収まるという結果が得られた。

共振の Q 値が高い超伝導空洞では振動による共振周波数の継続的微小変動が問題となるが、SC-QWR の場合は構造的に内導体の振動が起りやすく対策が必要である。入力カプラーをオーバーカップリングにして負荷 Q を 10^6 程度にして運転するのが一般的であるが、それでも周波数変動幅を ± 50 Hz 程度に抑えないと無駄に大きな出力の励振器が必要となる。振動を引き起こす外乱は設置環境にもよるため計算のみで振幅の絶対値を決定するのは困難であり、振動の周波数応答を計算して電源周波数の 50 Hz を避けつつ相対的に振幅が減少するように天板のリブ構造を強化することで、機械振動周波数の調整とともに大気圧やヘリウム圧の変動による変形の抑制を行った。その結果天板には 6 枚の縦リブと 1 枚の円板、円周方向の 2 本のリブを設けた。

4 部品の製作完了後、共振周波数の調整を行うために全部品を仮組みしてネットワークアナライザで測定し、計算と比較しつつ天板と内導体および外導体接合部にある直線部のカット量を決定して加工を行った。天板と内導体を EBW した後に再び全部品を仮組みしてネッ

トワークアナライザで測定し、次の加工量を決めて加工し EBW を行いまた仮組みして測定するという工程を EBW ごとに繰り返し行った。溶接による縮みも含めそれぞれの工程で周波数変化を測定して計算と比較することで、共振周波数を合わせこんで行った。後工程の表面処理や真空引き、ヘリウム圧力、冷却による周波数変化もあらかじめ計算で求めて各工程でのターゲット周波数を決めているが、初めての製作なので実際に各工程を行うまでどの程度合っているか厳密には分からない。よって、厳密に共振周波数を合わせることもよりもデータを蓄積して製作手法を確立し次回以降の製作精度を上げることに重点を置いて念入りに測定を行った。

EBW による組立が完了した SC-QWR に対して、ILC での標準的な表面処理レシピをもとに以下の様な表面処理工程を行った。

- 化学研磨 (BCP) ~ 100 μm
- 純水超音波洗浄
- 真空熱処理 (750 $^{\circ}\text{C}$, 3 時間)
- BCP ~ 20 μm
- 洗剤超音波洗浄
- 純水洗浄
- 超純水高压洗浄 (HPR) (6 MPa, 6 L/min)
- クリーンルーム組立
- 真空引き
- リークチェック
- ベーキング (120 $^{\circ}\text{C}$, 48 時間)

こちら各 BCP および熱処理の前後に周波数変化を測定しデータを蓄積した。BCP は夏の 35 $^{\circ}$ 以上の環境下で行ったが、平均液温 20 $^{\circ}$ 程度で 1.0~1.5 $\mu\text{m}/\text{min}$ の研磨速度 (重量測定により導出)、BCP による周波数変化は +0.19 kHz/ μm となった。BCP 前後にはそれぞれ内面観察を行い、表面欠陥や異物付着がないことを確認している。製作完了後の共振周波数は、EBW 時の修正による縮みの影響もありわずかに高めの 75.5199 MHz となった。

2.2 単体性能試験

理研仁科センターには完成した SC-QWR の単体性能試験を行う設備がないため、KEK の AR 東第二実験棟内にあるピット、クライオスタットおよび磁気シールドをお借りして試験を行うこととなった。クライオスタット天板、SC-QWR 用の空洞吊り下げ治具、断熱材、真空排気系、試験用カプラーおよびカプラー駆動機構等は新たに製作し、テストアセンブリを組み立てるためのやぐらや測定ブースを設置した。測定ブース内には 19 インチラックを並べ測定システムを構築した。またクライオスタット内の磁場分布を測定した結果、上部の残留磁場が多いため上部に磁気シールドを追加した。テストアセンブリをクライオスタットに格納している様子を図 4 に示す。

性能試験では、アンプ出力電力、反射電力、空洞透過電力をパワーメータで計測して各結合度 β を求め、オシロスコープで測定した空洞透過電力の減衰曲線の時定数から求めた負荷 Q から空洞の無負荷 $Q(Q_0)$ を導出



Figure 4: Installation of test assembly into the cryostat.

した。測定中は空洞の共振周波数の変動に合うように信号発生器の周波数を FM 変調した。

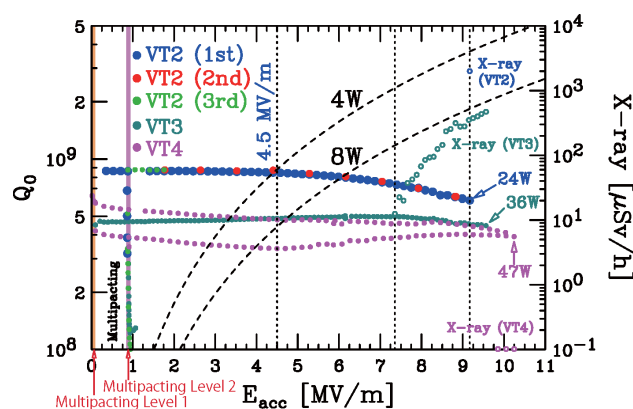


Figure 5: Q_0 vs E_{acc} plot of the SC-QWR for three independent tests.

測定システムの立上げ試験を 1 回行った後、2016 年 9 月に最初の性能試験を行った [5]。図 5 の VT2 がその結果であるが (測定を 3 回繰り返している)、想定している $E_{\text{acc}} = 4.5 \text{ MV/m}$ のときに $Q_0 = 8.7 \times 10^8$ というほぼ設計通りの性能が得られ、クエンチも起こらず 9 MV/m までは X 線も観測されなかった。表面抵抗は 27 n Ω 相当となる。

本 SC-QWR の BCP に使用した装置は新たに製作されたものであり、さらに試験を行ってデータを蓄積する目的と、追加で BCP を行って Q_0 を上げられるか試すため、性能試験後に 22 μm のライト BCP と HPR 以降の工程を施した。再び性能試験を行ったところ、図 5 の VT3 に示すように $E_{\text{acc}} = 4.5 \text{ MV/m}$ で Q_0 が 4.7×10^8 まで低下し、7 MV/m 付近で X 線が観測される結果となった。X 線に関しては表面処理後の組立で真空リークがあり、窒素ガスでスローリークして再組立を行った際に塵埃が混入したと考えられたが、 Q_0 の低下については原因が判然としなかった。

SC-QWR 内面をクリーニングするため HPR 以降の工程を再実行してから性能試験 (VT4) を行った。その結果 X 線の発生に関しては改善され、10 MV/m 以上の試験用アンプの限界まで励振できた。一方 Q_0 に関しては励振当初 VT3 より更に低下したかに見えたが、10 MV/m 以上まで電圧を上げたことによりコンディショ

ニングされ、結局 VT3 と同程度の値となった [6]。 Q_0 の低下についてはいくつか原因の兆候は見られるが、現時点でまだ特定できておらず今後の課題である。

3. 空洞以外の主な構成要素

3.1 入力カプラー

SC-QWR 用の入力カプラーは入力接栓 WX-77D の同軸型で、円板状セラミック窓を二重に設けることとし、最大 RF 入力電力 CW 10 kW に対応できるように設計を行った。内導体は、無酸素銅無垢材削り出しで強制冷却は行わず、外導体は SUS316L 薄肉材に内面銅メッキを施して侵入熱を減らすようにした。侵入熱を最小化するために低温セラミック窓の位置とメッキ厚を最適化しており、メッキ厚による銅の RRR の変化を考慮している [7]。40 K の低温セラミック窓として NTK 製 HA997 と京セラ製 A479B を用いた窓を用意し、それぞれ 1 本ずつ合計 2 本の入力カプラーを製作した。低温セラミック窓の一つを図 6 の左上に示す。低温セラミック窓の空洞側はいずれも TiN コーティングされている。また、常温セラミック窓は 2 本の入力カプラーとも京セラ製 A479B を使用している。

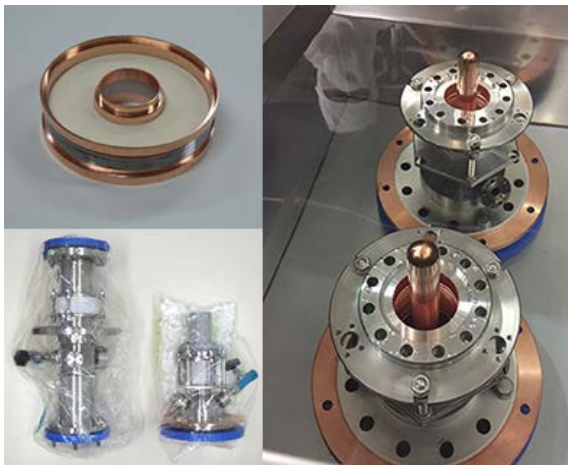


Figure 6: Coaxial input coupler for the SC-QWR.

入力カプラー製作前に低温セラミック窓単体での液体ヘリウム冷却試験を行ったところ、NTK 製低温セラミック窓が破損した。冷却速度が速すぎたことも原因の一つと考えられるが、構造上の対策として両低温セラミック窓とも内リング肉厚を 1.0 mm から 0.8 mm に減らし、内リングの形状も径変化のない円筒形に変更した。図 6 の左下が製作完了した入力カプラーである。

入力カプラーの CW 10 kW コンディショニングを行うため、ISO クラス 6 のクリーンブースを設置してその中で図 6 右に示すように超純水による超音波洗浄および掛け流し洗浄を行った。クリーンブース内で組み上げたカプラーを別途製作、洗浄したカプラーテスト用空洞に 2 本とも搭載し、真空引き後ベーキングを行った。片方のカプラーから RF 電力を入力し、もう一方のカプラーから RF 電力を取り出してダミーロードに送ることでコンディショニングを行った。コンディショニングでは真空度とアークセンサーの検出出力を RF アン

プのインターロックにして徐々に RF 入力電力を上げ、約半日で問題なく CW 10 kW でのコンディショニングが完了した。

3.2 周波数チューナー

SC-QWR の周波数チューナーの駆動は、図 7 に示すようにステッピングモーターによる回転力をギヤで減速して空洞周囲に巻き付けたワイヤーを引っ張り、ビーム軸方向の変位に変換してビームポートを押しつぶす方向に圧縮する方式とした。当初はウォームギヤを使用したのが、無潤滑によるギヤ歯面の損傷やトルク不足の問題がありギヤ部の大幅な改良の末に完成した。

完成後常温でフランジ面間距離を 0.3 mm 縮め、入力トルク、フランジ面間距離変位、共振周波数変化を計測し確認した。その結果、フランジ面間距離を設計値の 0.6 mm 縮めるために必要な入力トルクは、常温でも設計時の値より大きな約 12 N·m であることが分かった。冷却時にはさらに大きなトルクが必要となる。そのため、真空回転導入端子は当初予定のマグネットカップリングシールではなくて磁性流体シールを使用することにした。また、ワイヤーの伸びにより設計より回転数が必要であることも判明した。フランジ面間距離変位と共振周波数変化の関係はほぼ設計通りであり、再現性に関しても問題ないことが確認できている。

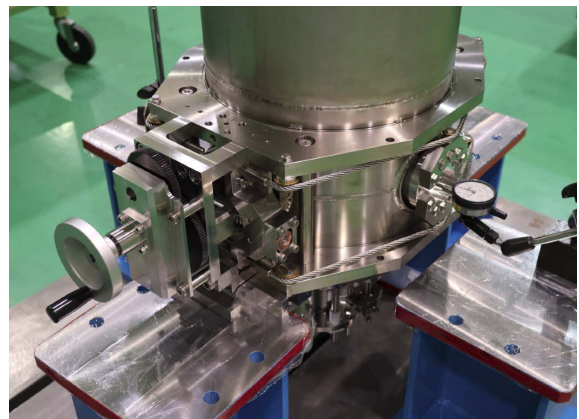


Figure 7: Mechanism of frequency tuner.

3.3 クライオモジュール

クライオモジュールは運転温度 4.5 K で SC-QWR 2 台を搭載できる設計となっているが、当面は 1 台の SC-QWR と 1 台のダミー空洞を搭載することになっている [8]。高圧ガス保安法非対応のため開放容器として使用するものであり、基本的にデューワーから液体ヘリウムを供給してヘリウムジャケット内およびクライオモジュール内蔵の円筒形ヘリウムバッファータンク（容量 77 L）に貯液して冷却運転するが、SHI 社製の小型 4 K GM-JT 冷凍機 V316SLCR (4.2 W@4.3 K) を最大 3 台搭載して蒸発ヘリウムを再凝縮できる設計とした。また、アルミ製の熱シールドも SHI 社製小型 GM 冷凍機 CH-110LT (100 W@40 K) を最大 2 台搭載して 40 K 以下に冷却する設計となっており、冷凍能力に余裕があるので現在は 1 台のみ搭載している。これら小型冷凍

機からの振動対策として、小型冷凍機ユニットはクライオモジュールとは別の架台で直接床面から支持するように設置し、ベローズを介してクライオモジュールに接続しており、冷凍機ヘッドと負荷は銅編線を介して接続している。

SC-QWR の磁気シールドは空洞天板付近で残留磁場が 20 mG 以下となるように、空洞周囲に個別に常温用パーマロイを巻いて低温で使用することとした。温度計はシリコンダイオード、PtCo、Pt100 を空洞、熱シールド、各コンポーネントの熱アンカー部等に取り付けた。クライオモジュール組み立て時の様子を図 8 に示す。全コンポーネントをクライオモジュールに組み上げた後冷却試験を行った。



Figure 8: Assembly work of the cryomodule.

3.4 クライオモジュールの冷却試験

2017 年 3 月末にクライオモジュールが完成したので引き続き冷却試験を開始した。測定準備の後 2017 年 6 月には RF 励振試験に成功した。クライオモジュールに組み込んだ状態で SC-QWR の共振周波数は 75.510 MHz@4.5 K となった。加速電界を設計値の 4.5 MV/m まで上げても X 線量は 1 μ Sv/h 以下であった。ラフな評価によると 4 K への熱負荷は 4.5 MV/m 運転時に合計 13 W 程度であった。また、熱シールド用小型冷凍機を運転していたが振動の影響は見られず、低電界運転時に共振周波数の変動は ± 10 Hz 程度であった。4 K GM-JT 冷凍機はまだ搭載されていない。SC-QWR をつかって開発中のデジタルローレベル回路の試験も実施した。空洞周波数に同期した自励振モード（周波数の安定化は行っていない）および信号発生器同期モードで励振に成功し引き続き開発を進めている。

現時点でいくつか問題が見ついている。熱シールドの温度が 40 K まで下がらないという問題が発生しており、小型冷凍機のヘッド温度が 30 K に下がっても熱シールドは 70 K 以下にならなかった。コネクショング部の熱抵抗の問題および銅編線の断面積不足が考えられる。また、RF オンによりカプラーの 40 K サーマルアンカー温度が上昇する問題もある。上記熱接触の問題の他 Multipacting の可能性もある。

4. まとめと今後の予定

2015 年度より SC-QWR を搭載したクライオモジュールプロトタイプシステムの開発を行ってきた。SC-QWR の製作は問題なく完了し、空洞性能試験で 1 回目は想定通りの性能が得られたがその後 Q_0 が低下する問題が発生した。SC-QWR 以外の構成要素であるカプラー、チューナー、クライオモジュールも製作し、SC-QWR、ダミー空洞各 1 台と共にすべてクライオモジュールに組み上げ、クライオモジュールの冷却試験と励振試験を実施しているところである。

今後は、引き続き励振試験を行ってデジタルローレベル回路を開発するとともに、銅編線の熱抵抗測定試験を行ってそれをもとに改善を行う。また、制御盤および励振器を製作する他、プランジャー式チューナーの試験も行う予定である。 Q_0 低下原因の調査や小型 GM-JT 冷凍機の取付、運転も行っていく。

本開発で得られた知見を活用し、理研仁科センターでは理研重イオン線形加速器 (RILAC) のアップグレード計画が進行している。現在 73 MHz プロトタイプ SC-QWR を製作中で 10 月に第 1 回目の性能試験を行う予定となっている。また、実機用に 10 台の SC-QWR を製作開始している。

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の一環として実施したものです。本研究開発の遂行にあたり、三菱重工メカトロシステムズ株式会社の仙入氏、宮本氏、柳澤氏、原氏には多大なご協力を頂きました。この場を借りて心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] <http://www.jst.go.jp/impact/en/program/08.html>
- [2] N. Sakamoto *et al.*, “Design Studies for Quarter-wave Resonators and Cryomodules for the RIKEN SC-LINAC”, Proceedings of SRF2015, WEBA06, Whistler, Sep. 2015, pp.976–981.
- [3] K. Yamada *et al.*, “Conceptual Design of SC Linac for RIBF-Upgrade Plan”, Proceedings of SRF2013, MOP021, Paris, Sep. 2013, pp.137–139.
- [4] K. Yamada *et al.*, “Design of a New Superconducting Linac for the RIBF Upgrade”, Proceedings of LINAC14, THPP118, Geneva, Sep. 2014, pp.1127–1130.
- [5] K. Yamada *et al.*, “First Vertical Test of Superconducting QWR Prototype at RIKEN”, Proceedings of LINAC16, TH-PLR040, East Lansing, Sep. 2016, pp.939–942.
- [6] N. Sakamoto *et al.*, “Construction and Performance Tests of Prototype Quarter-wave Resonator and Its Cryomodule at RIKEN”, Proceedings of SRF2017, WEYA02, Lanzhou, July 2017, pre-release.
- [7] K. Ozeki *et al.*, “Design of Input Coupler for RIKEN Superconducting Quarter-Wavelength Resonator”, Proceedings of SRF2015, THPB084, Whistler, Sep. 2015, pp.1335–1339.
- [8] K. Ozeki *et al.*, “Cryomodule and Power Coupler for RIKEN Superconducting QWR”, Proceedings of LINAC16, TUPLR061, East Lansing, Sep. 2016, pp.598–600.