

理化学研究所向け超伝導重イオン線形加速器クライオモジュールの製作 PRODUCTION OF SRF CRYOMODULES FOR SRILAC AT RIKEN RIBF

原 博史[#], 宮本 明啓, 仙入 克也, 柳澤 剛

Hiroshi Hara[#], Akihiro Miyamoto, Katsuya Sennyu, Takeshi Yanagisawa
Mitsubishi Heavy Industries Machinery Systems, Ltd.

Abstract

At RI beam factory (RIBF) of RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science, upgrade plan of RIKEN linear accelerator (RILAC) for the purpose of heavier element synthesis is progressing. The total acceleration voltage is enhanced by replacing a part of the latter stage of a normal linear accelerator with a superconducting accelerator. Mitsubishi Heavy Industries Machinery Systems, Ltd. completed the delivery of three superconducting cryomodules for this project in March, 2019. This paper reports the outline of the superconducting cryomodule components and the details of manufacturing technology of the superconducting quarter-wave resonator (QWR).

1. 概要

1.1 RILAC 増強計画

理化学研究所 仁科加速器科学研究センターの RI ビームファクトリー(RIBF)では, 113 番元素の発見に続き, 119 番, 120 番, またさらに重い元素の発見を目指して, 理研線形加速器(RILAC)の増強計画が進行中である。具体的には, 常伝導の線形加速器の後段の一部を超伝導クライオモジュールに入れ替えることにより総加速電圧を増強し, 重いイオンを元素合成に必要なエネルギーまで加速できるようにすることにより, 5 倍のビーム強度を実現するものである。RILAC 増強計画の概要を Fig. 1 に示す。また, クライオモジュールの据付レイアウトを Fig. 2 に示す。

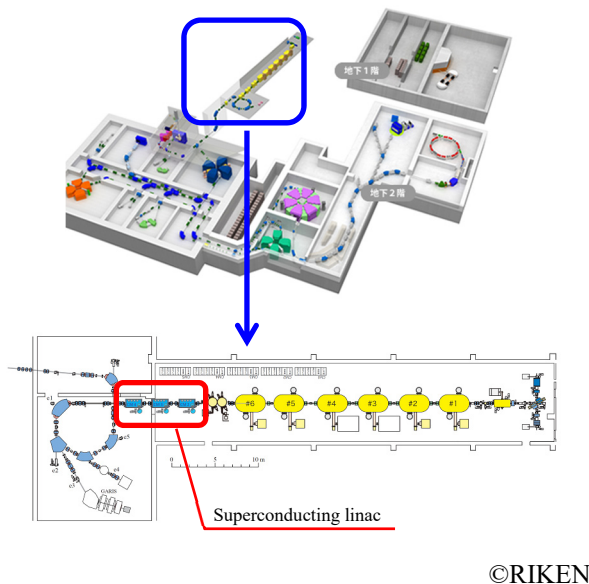


Figure 1: Upgrade of the RILAC.

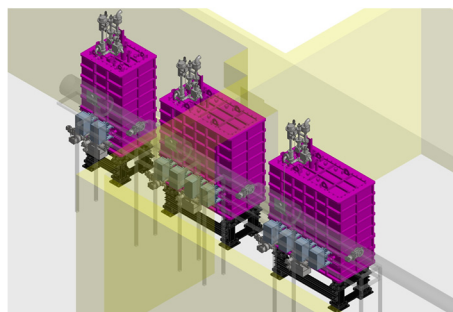


Figure 2: Installation layout of the cryomodules.

1.2 超伝導クライオモジュール

Figure 3 は, QWR 型超伝導加速空洞を 4 台収納したクライオモジュールの模式図である。他に QWR 型超伝導加速空洞を 2 台収納したクライオモジュールがある。三菱重工機械システム株式会社(MHI-MS)では, 本プロジェクト向けに, 合計 10 台の QWR 型超伝導加速空洞を収納した超伝導クライオモジュールを製造した。Table 1 に, QWR 型超伝導加速空洞の仕様を示す。2017 年 5 月に製造を開始し, 2018 年 11 月に部品を理化学研究所に搬入, 2019 年 3 月に組立及び据付作業を完了した。

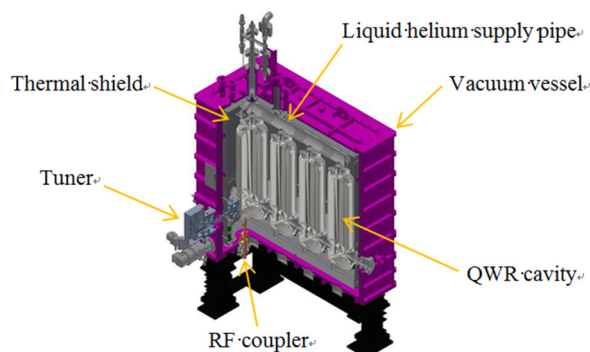


Figure 3: Schematic of cryomodule.

[#]hiroshi_hara@mhims.co.jp

Table 1: Spec of QWR Cavity

Item	Value
Frequency at 4.5K	73.0 [MHz]
Q ₀	1.0 × 10 ⁹
E _{eacc}	6.75 [MV/m]

2. ニオブ製 QWR 型超伝導空洞の製造技術

2.1 部品構成

MHI-MS では、電子加速器用超伝導空洞の製造において、プレス成形、バーリング、電子ビーム溶接等の製造技術を向上させてきた。これらを活用する為、QWR 型超伝導加速空洞の部品を Fig. 4 に示す構成に決定した。

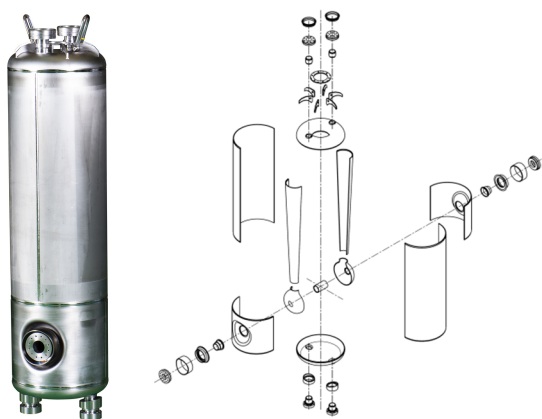


Figure 4: QWR for RIKEN.

2.2 3次元周波数解析

QWR 型超伝導加速空洞の周波数調整の手順検討として、空洞の Open 側と Short 側の周波数感度の違いを仮計算した(KEK と共同で実施)。解析結果を Fig. 5 に示す。Open 側の周波数感度は、Short 側の約 1/60 と算出された。計算モデルの見直しと理化学研究所での詳細解析により、周波数感度の比は約 1/10 となり、管理可能な製造精度であることが確認された。

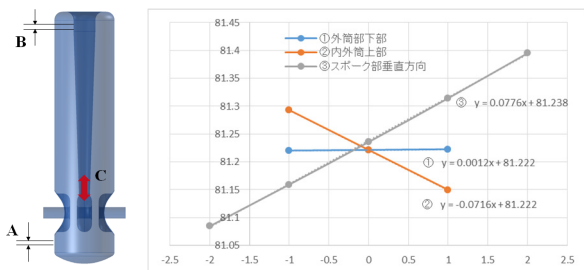


Figure 5: Results of frequency analysis.

2.3 3次元構造解析

QWR 型超伝導加速空洞は、純ニオブ製容器(空洞本体)の外側に純チタン 2 種材製容器(ヘリウムジャケット)で構成される円筒 2 重容器である。-269°Cの液体ヘリウ

ムによる冷却、共振周波数調整の為の空洞本体の機械的な伸縮という運転条件を満たしつつ、高圧ガス保安法冷凍則に準拠する必要があり、有限要素法を用いた構造解析を行い、空洞の板厚を決定した。解析結果を Fig. 6 に示す。

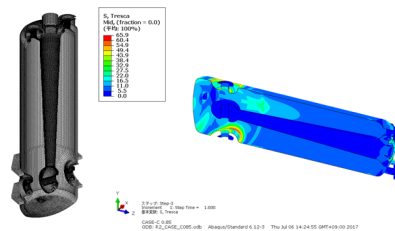


Figure 6: Results of structure analysis.

2.4 成形加工技術

QWR 型超伝導加速空洞の成形部品を Fig. 7 に示す。いずれも、ニオブのシートもしくはディスクから金型成形を行った[1, 2]。

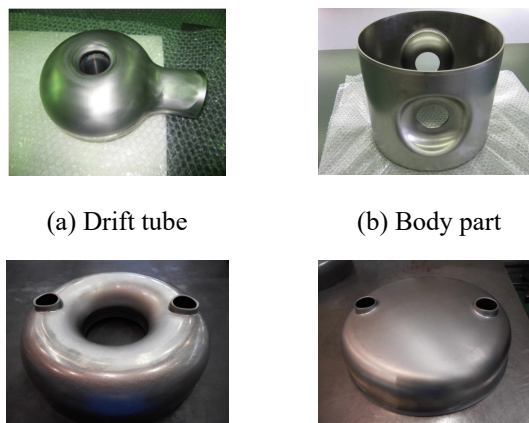


Figure 7: Results of frequency analysis.

2.5 電子ビーム溶接(EBW)

MHI-MS では、縦長の溶接室を持つ電子ビーム溶接機を保有しており、複数台の空洞部品(最大 4 台)を同時に溶接することが可能である。今回、2 台の QWR 型超伝導加速空洞を同時に溶接室に入れて電子ビーム溶接を施工した(Fig. 8)。



Figure 8: Welding of cavities.

2.6 周波数調整

EBW 組立工程の途中に、空洞部品を仮組立して共振周波数を測定した(Fig. 9)。空洞の Open 側と Short 側の長さを機械加工で調整し、共振周波数のばらつきを補正した(Fig. 10)。ばらつき幅は約 3kHz であり、周波数チューナーの調整範囲(20kHz)に収まった。



Figure 9: Frequency measurement of QWR.

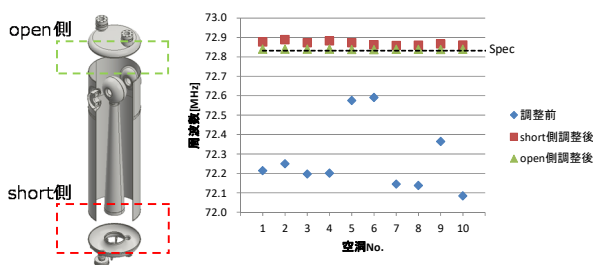


Figure 10: Results of frequency tuning.

2.7 表面処理

溶接組立完了後の QWR 型超伝導加速空洞は、内面の清浄化・平滑化の為に BCP (Buffered Chemical Polish) を施工した(Fig. 11)。BCP は、粗研磨(BCP1)と仕上研磨(BCP2)の 2 回に分けて施工し、BCP1 と BCP2 の間には、水素脱ガスの為の熱処理を行っている。BCP 処理レシピを Table 2 に示す。BCP 施工後の QWR 型超伝導加速空洞の内面写真を Fig. 12 に示す。

BCP 施工後は、内面の異物を除去するため、ISO4(class10)以上のクリーンルーム内で、高圧水洗浄(High Pressure Rinsing, HPR, Fig. 11)と計測アンテナ類の組立を行った[3, 4]。

Table 2: Specifications of the BCP Facility

Item	Value
Acid	Mixture of HF, HNO ₃ and H ₃ PO ₄
Temperature control of acid	10-30deg.C
Acid flow	60L/min
Etching rate	1μm/min
Rinsing	Pure water



(a) BCP



(b) HPR

Figure 11: BCP and HPR.



(c) Bottom



(d) Top

Figure 12: Inner surface of cavity.

2.8 高圧ガス保安法冷凍則に係る試験

超伝導加速空洞をビーム運転する加速器設備とする為には、高圧ガス保安法に準拠する必要がある。今回製造中の QWR 型超伝導加速空洞の製作に際しては、高圧ガス保安法冷凍保安規則の適用を受ける。具体的には設計の検査(使用材料・構造強度の妥当性評価)、製作の検査(材料・加工が規格値を満足すること)、溶接部の検査(継手強度の確認、継手健全性の確認)、耐圧試験、気密試験を行う必要がある。これらの検査の一部を高圧ガス保安協会に委託検査申請し、所定の検査に合格した(Fig. 13)。

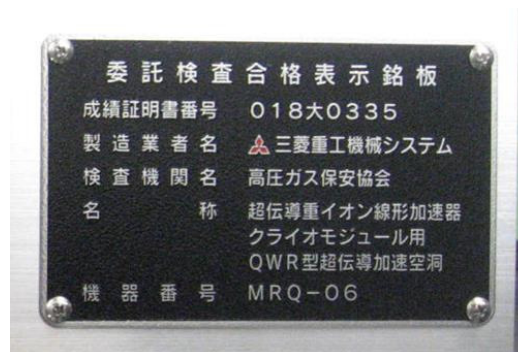
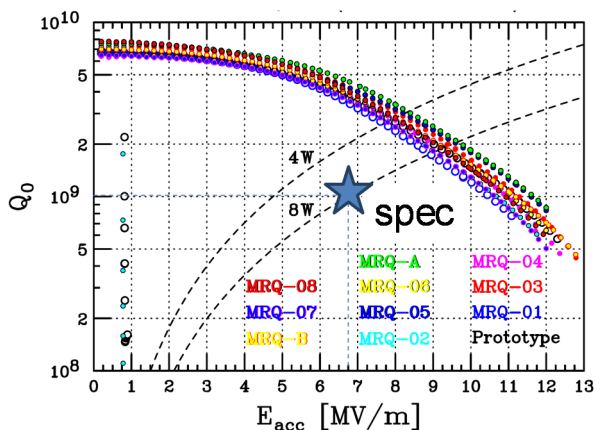


Figure 13: Nameplate.

2.9 空洞性能試験結果

Figure. 14 に、理化学研究所にて行われた空洞性能試験(縦測定)の結果を示す。すべての空洞で要求性能を上回る性能が安定して得られたことを確認した。



©RIKEN

Figure 14: Q_0 -E curve of the QWR bare cavity[5, 6].

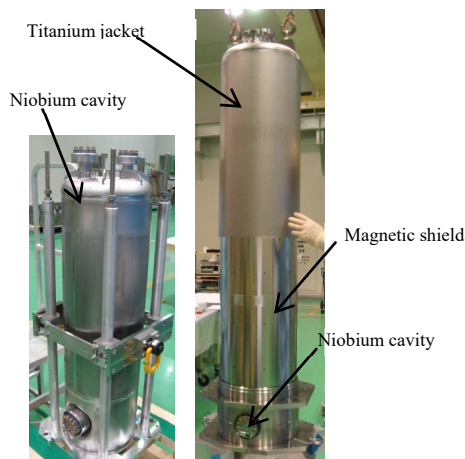


Figure 16: Magnetic shield.

3. 超伝導クライオモジュールの製造・組立

3.1 真空容器

真空容器の材料には、一般構造用圧延鋼材 (SS400) を使用した。理由は、高強度、廉価であることに加え、地磁気の遮蔽効果が期待できることである。内面は放出ガスを抑える為に Ni メッキを施工し、外面は塗装により錆を防止した (Fig. 15)。真空容器の寸法は幅 1000mm、長さ 2000mm、高さ 2300mm である。コールドマスの組立性を考慮し、高さ方向に 5 分割とした。



Figure 15: Vacuum vessel.

3.2 磁気シールド

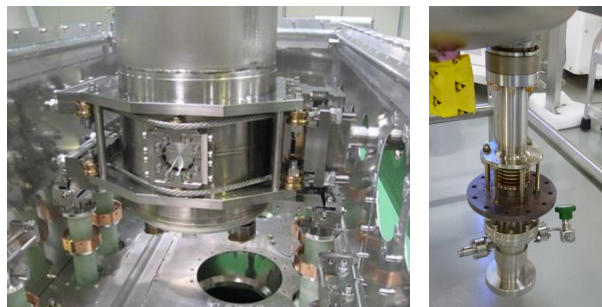
QWR 型超伝導加速空洞への地磁気を積極的に遮蔽するため、チタン製ヘリウムジャケットの内側へ磁気シールドを組み込む構造が採用された (Fig.16)。

3.3 共振周波数調整用チューナー

QWR 型超伝導加速空洞はビーム軸方向に圧縮することで、共振周波数を調整できる。ステップモーターに連結したワイヤーを駆動し、空洞圧縮方向に片側 10,000N の軸力を作用できる構造を採用した (Fig. 17)。

3.4 RF 入力カプラー

RF 入力カプラーは、同軸方式の single window 型である。入力電力は 5kW (CW) で、高周波設計は理化学研究所で行われた。外導体の材料はステンレスで、RF 面には銅メッキを施工した。内導体の材料は無酸素銅とした (Fig. 17)。



(a) Tuner

(b) RF coupler

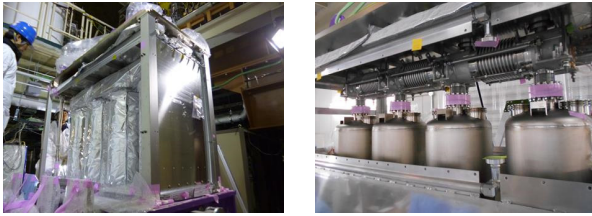
Figure 17: Tuner and RF coupler.

3.5 輻射熱遮蔽板, 多層断熱材

QWR 型超伝導加速空洞への輻射熱を遮蔽するため、真空容器内側に液体窒素で 80K に冷却するアルミ板を設置した。その外側にはアルミフィルムと樹脂フィルムを積層した多層断熱材を施工した (Fig. 18)。

3.6 液体ヘリウム供給配管

液体ヘリウムを供給する配管の材料はステンレス (SUS316L) とした (Fig. 18)。本部品は、高圧ガス保安法冷凍則に適合する必要があるため、QWR 型超伝導加速空洞と同様に高圧ガス保安協会に委託検査申請し、所定の検査に合格した。



(a) Thermal shield (b) Liquid He supply pipe

Figure 18: Thermal shield and Liquid helium supply pipe.

4. まとめ

MHI-MS は理化学研究所 RILAC 増強計画において、超伝導クライオモジュール 3 台を納入した。QWR 型超伝導空洞の製造技術を確認し、要求性能を上回る性能が安定して得られた。2019 年 9 月より、クライオモジュールに液体ヘリウムを流して冷却試験が行われる予定である。

謝辞

本超伝導クライオモジュールの製作は、理化学研究所 仁科加速器科学研究センター 加速器基盤研究部の上垣外先生、坂本先生、山田先生、須田先生、大関先生の御指導・現場サポートの下に玉成したものであり、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] N. Shigeoka, “Fabrication of Superconducting QWR at MHI-MS”, in Proc. IPAC’17, Copenhagen, Denmark, May 2017, paper MOPVA074.
- [2] T. Yanagisawa *et al.*, “Development of superconducting QWR at MHI-MS”, in Proc. the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 2017, WEP048.
- [3] H. Hara *et al.*, “MHI-MS’s production activities of superconducting cavity”, in Proc. IPAC’16, Busan, Korea, May 2016, paper WEPMB026.
- [4] A. Miyamoto, “SRF cavity assembly in clean room with horizontal laminar flow”, in Proc. SRF2017, Lanzhou, China, Jul. 2017, TUPB096.
- [5] K. Suda *et al.*, “Fabrication and performance of superconducting Quarter-Wavelength Resonators for SRILAC”, in Proc. SRF2019, Dresden, Germany, Jul. 2019, MOP055.
- [6] K. Yamada *et al.*, “Construction of superconducting linac booster for heavy - ion linac at RIKEN NISHINA CENTER”, in Proc. SRF2019, Dresden, Germany, Jul. 2019, TUP037.