

## 理化学研究所向け QWR 型超伝導加速空洞の製作 PRODUCTION OF SUPERCONDUCTING QWR FOR RIKEN

原 博史<sup>#</sup>, 宮本 明啓, 仙入 克也, 柳澤 剛  
Hiroshi Hara<sup>#</sup>, Akihiro Miyamoto, Katsuya Sennyu, Takeshi Yanagisawa  
Mitsubishi Heavy Industries Machinery Systems, Ltd.

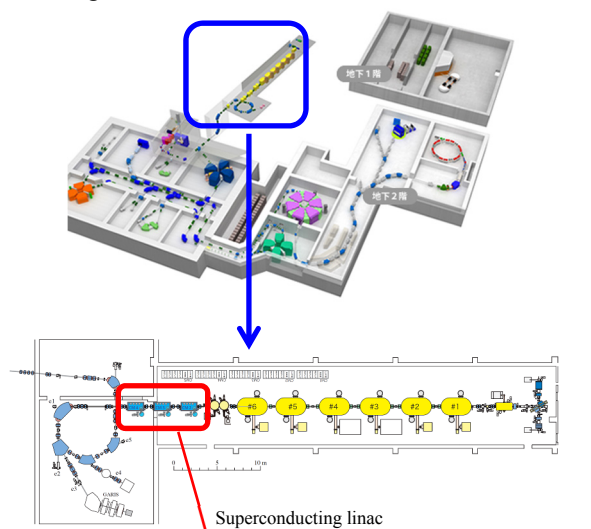
### Abstract

SRF cryomodules are installed in the end section of RILAC for Upgrade of RIBF. MHI-MS is manufacturing ten superconducting quarter-wave resonator (QWR) and three Cryomodules for this project. In this report, recent progress will be reported.

## 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, 価数のより低い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。



©RIKEN

Figure 1: Upgrade of the RILAC.

### 1.2 超伝導クライオモジュール

三菱重工機械システム株式会社 (MHI-MS) では, 本計画に向けて, 超伝導クライオモジュール 3 台の製造に取り組んでいる。超伝導クライオモジュール 3 台の構成部品を以下に示す (Fig. 2)。本年会では, QWR 型 (4 分の 1 波長型) 超伝導加速空洞の製造状況について報告する。

- QWR 型超伝導加速空洞 10 台
- 入力カップラー 10 台
- 共振周波数調整用チューナー 10 台
- クライオスタット (真空容器, 熱遮蔽板) 3 台

今回製造する QWR 型超伝導加速空洞は, 純ニオブ材を成形・溶接した容器 (空洞本体) と, その外側を覆う純チタン 2 種材製の容器 (ヘリウムジャケット) で構成され, 空洞本体とヘリウムジャケットの間に貯めた  $-269^{\circ}\text{C}$  の液体ヘリウムで超伝導状態に保持される。ヘリウムジャケット外部には別途製作される共振周波数調整用チューナーと呼ぶ駆動部品が取り付けられ,  $-269^{\circ}\text{C}$  においてのみ空洞本体を機械的に伸縮させて運転周波数を調整するという運転条件がある。これらの運転条件を満たしつつ, 高圧ガス保安法冷凍則に準拠した製作を行う必要がある。

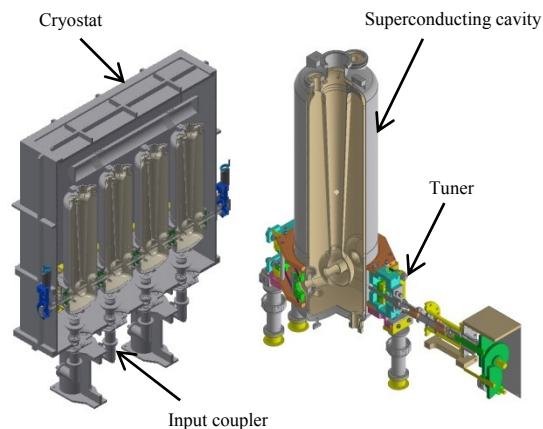


Figure 2: Cryomodule for QWR.

<sup>#</sup>hiroshi\_hara@mhims.co.jp

## 2. QWR 型超伝導加速空洞の製造

### 2.1 部品構成

QWR 型超伝導加速空洞の部品構成図を Fig. 3 に示す。成形加工・機械加工された部品は、電子ビーム溶接によって組み立てられる。各種部品の製造方法については、これまでの年会で報告しており[1]、ここでは割愛する。

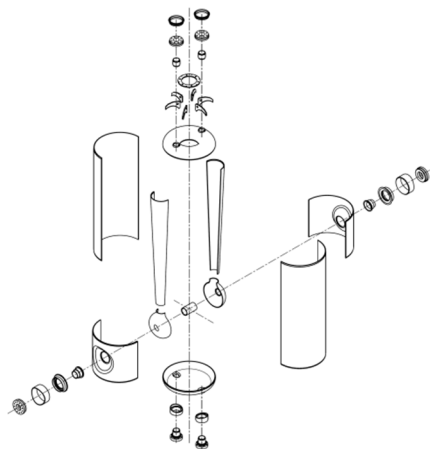


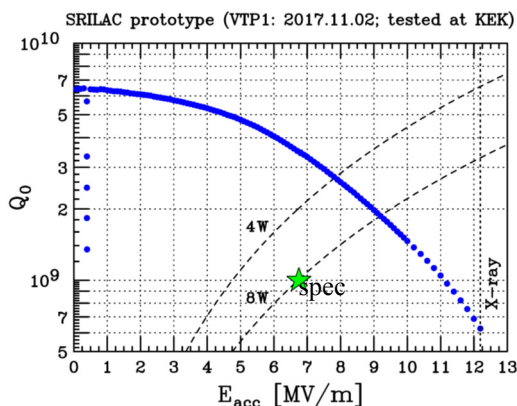
Figure 3: QWR for RIKEN.

### 2.2 要求性能

QWR 型超伝導加速空洞の要求性能を Table 1 に示す。2017年にMHI-MSが納入したプロトタイプ空洞において、本要求加速性能を達成することが確認された(Fig. 4)。

Table 1: Spec of QWR Cavity

Item	Value
Frequency at 4.2K	73.0 [MHz]
$Q_0$	$1.0 \times 10^9$
$E_{acc}$	6.75 [MV/m]



©RIKEN

Figure 4:  $Q_0$ -E curve of the prototype QWR for RIKEN.

### 2.3 電子ビーム溶接組立

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. 5)。2018 年 7 月末現在、7 台の溶接組立を完了している。尚、溶接室には最大 4 台の QWR 型超伝導加速空洞を収納することができ、更なる生産性の向上が可能である。

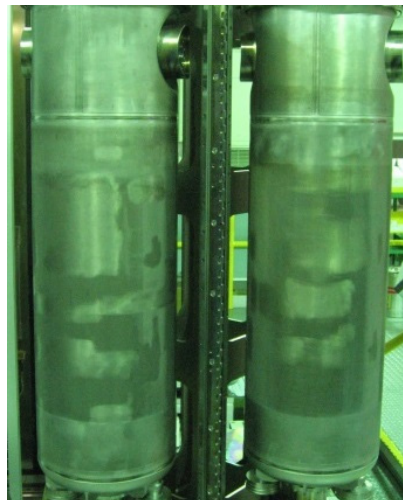


Figure 5: Welding of cavities.

### 2.4 化学研磨

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) を施工する(Fig. 6)。BCP は、粗研磨(BCP1)と仕上げ研磨(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。この処理レシピは、プロトタイプ空洞において検証済のものである。また、BCP 施工後の QWR 型超伝導加速空洞の内面写真を Fig. 7 に示す。2018 年 7 月末現在、6 台の BCP を完了している。

Table 2: Specifications of the BCP Facility [2, 3]

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



Figure 6: BCP.

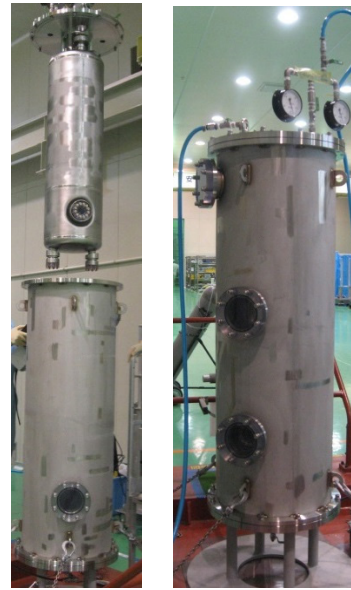
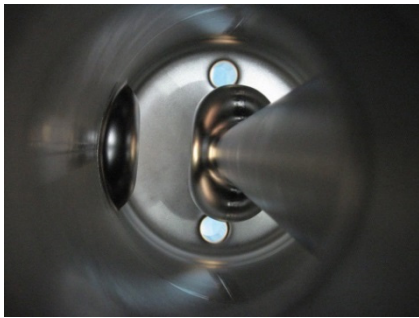


Figure 8: Pressure test.



(a) Bottom



(b) Top

Figure 7: Inner surface of cavity.

## 2.5 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。これらの検査の一例として、耐圧試験の状況を Fig. 8 に示す。

## 2.6 クリーンエア作業

耐圧試験が完了した QWR 型超伝導加速空洞は、性能試験に向けて、クラス 10 クリーンエア[2, 3]において、内面の高圧水洗浄(High Pressure Rinsing, HPR, Fig. 9)と計測アンテナ類の組立(Fig. 10)が行われる。2018 年 7 月末現在、5 台のクリーンエア作業を完了した。順次、理化学研究所内にて性能測定が行われている。



Figure 9: HPR.



Figure 10: Clean area assembly.

## 2.7 ヘリウムジャケット組立

性能試験が完了した QWR 型超伝導加速空洞には、外側にチタン製ヘリウムジャケットが溶接組立される。超伝導空洞の周囲には、地磁気を遮蔽するための磁気シールドが装着されるが、今回製造中の QWR 型超伝導加速空洞では、チタン製ヘリウムジャケットの内側への組み込み構造が採用された。ジャケット組立の状況を Fig. 11 に示す。2018 年 7 月末現在、1 台目のジャケット組立が行われている。

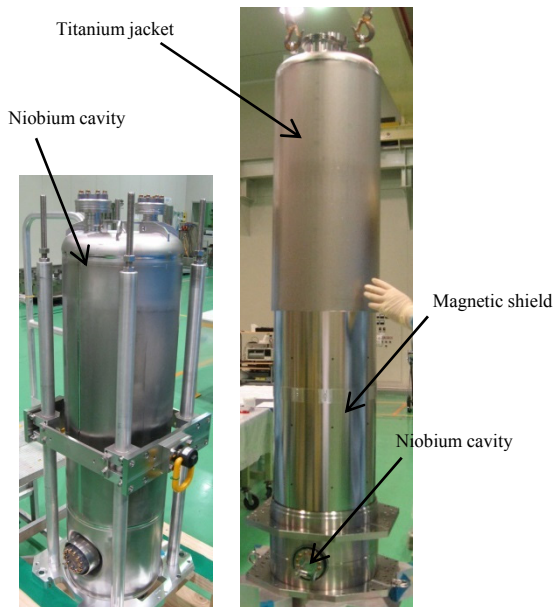


Figure 11: Jacketing.

## 3. 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の製作に取り組んでおり、QWR 型超伝導加速空洞について、2018 年 7 月末現在、以下の状況にある。

- 10 台中 7 台の電子ビーム溶接組立を完了した。
- 10 台中 6 台の BCP 処理を完了した。
- 10 台中 5 台のクラス 10 クリーンエア作業(HPR 処理, 性能試験用アンテナ類組立)を完了した。
- 10 台中 1 台のヘリウムジャケット組立が進行中である。

## 謝辞

本 QWR 型超伝導加速空洞の製作は、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成立しているものであり、ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] T. Yanagisawa *et al.*, “Development of superconducting QWR at MHI-MS”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, WEP048.
- [2] H. Hara *et al.*, “MHI-MS’s production activities of superconducting cavity”, in *Proc. IPAC’16*, Busan, Korea, May 2016, paper WEPMB026.
- [3] A. Miyamoto, “SRF cavity assembly in clean room with horizontal laminar flow”, presented at SRF2017, Lanzhou, China, Jul. 2017, TUPB096.