

## 超伝導QWR空洞の開発

### DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING QWR CAVITY

仙入克也<sup>#A)</sup>, 柳澤剛<sup>A)</sup>, 原博史<sup>A)</sup>, 宮本明啓<sup>A)</sup>, 松田竜一<sup>A)</sup>  
上垣外修一<sup>B)</sup>, 奥野広樹<sup>B)</sup>, 坂本成彦<sup>B)</sup>, 山田一成<sup>B)</sup>, 須田健嗣<sup>B)</sup>, 大関和貴<sup>B)</sup>, 渡邊裕<sup>B)</sup>  
加古永治<sup>C)</sup>, 仲井浩孝<sup>C)</sup>, 梅森健成<sup>C)</sup>  
Katsuya Sennyu<sup>#A)</sup>, Takeshi Yanagisawa<sup>A)</sup>, Hiroshi Hara<sup>A)</sup>, Akihiro Miyamoto<sup>A)</sup>, Ryuichi Matsuda<sup>A)</sup>  
Osamu Kamigaito<sup>B)</sup>, Hiroki Okuno<sup>B)</sup>, Naruhiko Sakamoto<sup>B)</sup>, Kazunari Yamada<sup>B)</sup>, Kenji Suda<sup>B)</sup>,  
Kazutaka Ozeki<sup>B)</sup>, Yutaka Watanabe<sup>B)</sup>  
Eiji Kako<sup>C)</sup>, Hirotaka Nakai<sup>C)</sup>, Kensei Umemori<sup>C)</sup>  
<sup>A)</sup> Mitsubishi Heavy Industries, Ltd (MHI)  
<sup>B)</sup> RIKEN Nishina Center, <sup>C)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

MHI has supplied the superconducting RF cavities and cryostats for electron accelerators. And Now MHI is developing the superconducting QWR cavity for heavy ion accelerator project at RIKEN in collaboration with RIKEN and KEK. For development of QWR cavity, MHI did the RF analysis in collaboration with KEK and did the forming examination of parts of QWR. This report provides the detail of activities for QWR development.

#### 1. はじめに

三菱重工業(MHI)では、これまでに KEK の STF 計画や ERL 計画など、様々な電子加速器計画に向けて超伝導加速空洞及びクライオモジュールを開発・提供してきた<sup>[1][2]</sup>。また、超伝導電子加速器で培った技術を用いて、低 $\beta$ の陽子・重粒子用超伝導加速器の開発にも取り組んでいる。現在は、理化学研究所(理研)と高エネルギー加速器研究機構(KEK)と共同で、理研 RI ビームファクトリー増強計画 SRILAC<sup>[3,4]</sup>向けに重イオン加速用の超伝導 QWR 空洞及びクライオモジュールの試作機開発<sup>[5]</sup>を行っているところである。

超伝導 QWR 空洞を開発する為に様々な要素技術を開発してきたが、その中から本稿では空洞の周波数解析と、空洞構成パーツの成形試験について報告する。また合わせて、現在当社にて進めている超伝導 QWR 空洞の製造設備の整備状況についても報告する。

#### 2. QWR 空洞&クライオモジュール

理研, KEK と共同で超伝導 QWR 空洞クライオモジュール試作機的设计を進めている。

超伝導 QWR 空洞の断面図を Figure 1 に示す。超伝導 QWR 空洞の材料は純ニオブであり、機械加工や成形加工によって製作した構成パーツを、電子ビーム溶接によって組み立てる。現在開発している理研向け超伝導 QWR 空洞試作機の周波数は 75.5MHz, 高さ 1055mm, 直径 300mm である。

製造の過程では、加工誤差や溶接誤差を補正する為、ある程度のパーツを組み立てた後に、調整加工を行う必要がある。

製造した QWR 空洞を収納するクライオスタット試作機の計画図を Figure 2 に示す。QWR 空洞 2 台を収納できる設計となっている。運転温度は 4.2K であり、小型冷凍機により冷却される 40K 熱シールドが設置される。<sup>[5]</sup>

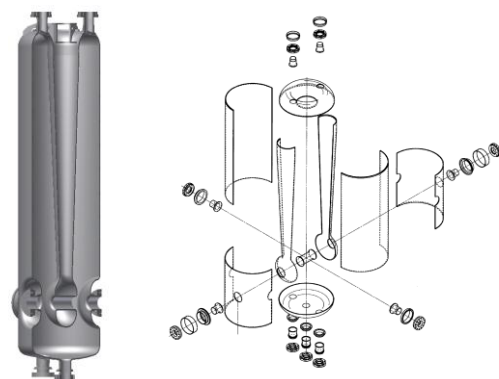


Figure 1: QWR cavity.

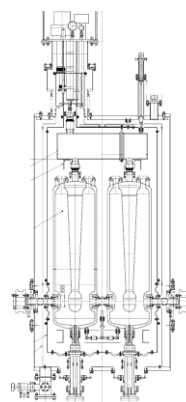


Figure 2: Cryomodule for QWR cavities.

<sup>#</sup>katsuya\_sennyu@mhi.co.jp

### 3. QWR 空洞の周波数解析

超伝導空洞の製造手順と周波数の調整加工代を決定する為に、KEK と共同で、QWR 空洞各部の周波数感度を、電磁場解析ソフト MWS を使用して求めた。

解析のモデルを Figure 3 に示す。製造過程での寸法変化として以下のケースを想定した。

- A: 胴体下部の長さ変化
- B: 胴体上部(ステムも含む)の長さ変化
- C: ドリフトチューブと胴体のずれ

特に A は、十分な周波数感度と調整代が確保できれば、空洞の底板を最終溶接組み立てとして、最終溶接直前に必要に応じて調整加工を実施すれば良く、製造手順が比較的容易になる為、重要である。



Figure 3: Calculation model of QWR.

解析結果を Figure 4 に示す。A の周波数感度は 1.2kHz/mm であり、B、C の約 1/60 と算出された。例えば、溶接等で B や C の部分に 0.3mm の誤差が発生した場合、A の部分のみで調整すると 18mm 程度の調整代が必要となり、現実的ではない。

この結果から、A のみで周波数調整を行うのではなく、他の方法も組み合わせた調整が必要であることが判明した。

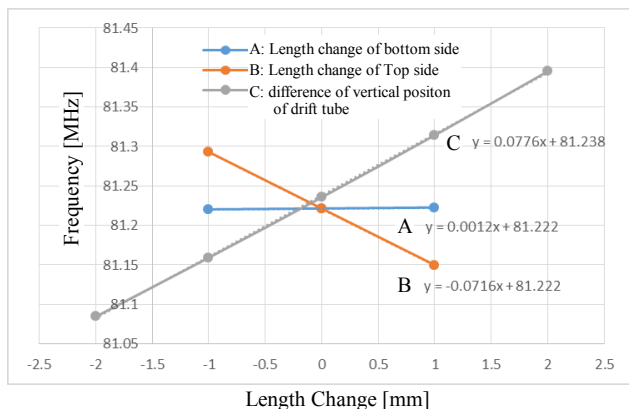


Figure 4: Results of calculation.

### 4. ステム部成形試験

QWR 空洞中央のドリフトチューブ部とステム部の製造方法は、それぞれ別部品で製作し、接合する方法も考えられるが、部品点数及び溶接コスト削減を目的に、プレス成形にて半割れ一体で製造する方

法を開発した。

これまで、ニオブ製超伝導空洞の成形部品を製作する際に、以下の手法で開発を行ってきており、今回も同様に開発を行った。

- 1) 成形解析による成形性の確認、金型設計
- 2) テスト材による成形試験
- 3) ニオブ材による成形試験

解析では、解析ソフト LS-DYNA を用いて弾塑性解析を実施し、割れ・しわの発生の有無、板厚分布、必要な成形荷重、金型形状等を確認し、金型を設計した。

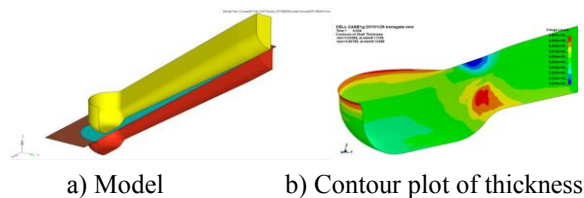


Figure 5: Forming analysis model and result.

金型製作後、テスト材 (アルミ) を用いて成形試験を行い、割れ・しわなく成形できることを確認した。形状は、ドリフトチューブ部は 0.5 mm 以下の精度であり、板厚の変化は±10%以下であった。ステム部ではスプリングバックの影響が見られたが、部分金型による修正プレスにより修正可能と判断した。

最後にニオブ材による成形試験を実施した。試験はもっとも変形量が大きくなるドリフトチューブ部と接続部の一部のみを対象とした。ニオブ材でも割れ・しわなく成形できること、形状精度は 0.5 mm 以下、板厚の変化は±15%以下であることを確認した。

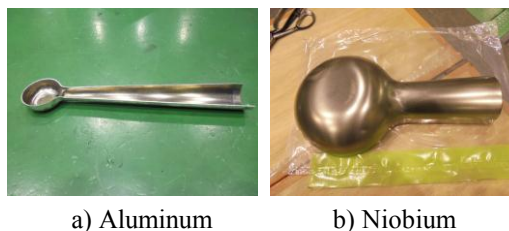


Figure 6: Forming test.

### 5. QWR 空洞製造設備

当社では、QWR 空洞製造の為に製造設備の整備を進めている。これまでに保有していた電子ビーム溶接装置、真空熱処理炉、Class10000(ISO-7)クリーンルームに加え、以下の設備を導入する予定である。

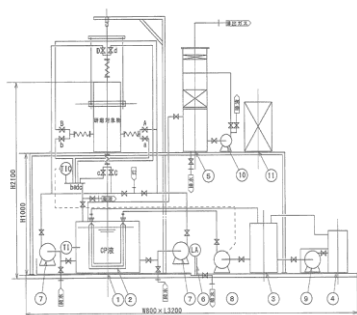
設備の様子は、KEK にて稼働中の各装置の様子を参考に、KEK と協議し決定した。また、導入後の設備検証に関しても、共同で実施する予定である。

これらの設備導入により、超伝導空洞を化学研磨で処理する場合、性能試験までに行われる空洞表面処理作業をすべて行える設備が整うこととなる。

#### 5.1 BCP 装置

空洞の内表面研磨する為の BCP(Buffered Chemical

Polishing)設備を整備する。研磨液を QWR 空洞下部から注入・循環させる。

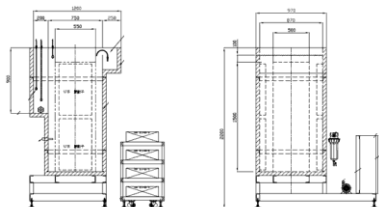


Bath:  
HF+HNO<sub>3</sub>+H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>  
Capacity:  
100 L  
Temperature control:  
14~20 degree C

Figure 7: BCP facility.

### 5.2 超音波洗浄装置

BCP 後の空洞を洗浄する為の超音波洗浄装置を整備する。QWR 空洞を縦置きで設置し、純水にて洗浄を行う。

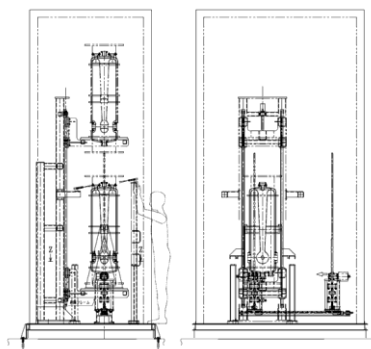


Size:  
L500mm x W550mm  
x H1500mm  
Vibrator:  
40kHz, 2000W x 4  
Rinsing liquid:  
Pure water

Figure 8: Ultrasonic rinsing equipment.

### 5.3 HPR 装置

空洞内表面に高圧の超純水を噴射して洗浄する為の HPR(High Pressure Rinse)装置と超純水精製装置を整備する。装置は弊社工場内の Class10000 クリーンルームに設置し、洗浄後の空洞は後述のクリーンエリアに搬出される。



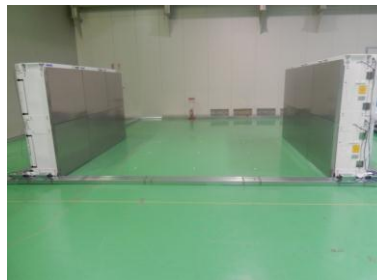
Water pressure:  
10MPa (Max)  
Flow rate:  
10 L/min  
Rinsing liquid:  
Ultra-pure water

Figure 9: BCP facility.

### 5.4 クリーンエリア

既存の Class10000(ISO-7)クリーンルーム内に Class100(ISO-4)クリーンエリアを新設する。クリーンエリアは、側面からコヒーレント気流を流して清

浄空間を生成する。



Cleanliness:  
Class 100 (ISO-4)  
Type:  
Horizontal coherent  
flow from side wall  
Location:  
Inside of class 10000  
clean room

Figure 10: Clean area.

## 6. 今後の予定

理研と共同で、超伝導 QWR 空洞&クライオスタットの詳細設計を進めるとともに、超伝導 QWR 空洞試作機の製造を行う。また新規に導入する製造設備については、H27 年 10 月までに整備を完了し、その後 KEK と共同で検証試験を実施する。検証試験完了後、超伝導 QWR 空洞試作機の内表面処理作業を H27 年 2 月から行う予定である。

## 参考文献

- [1] T.Tsuiki, et al., " Development of superconducting RF cryomodule for STF2", 第 11 回日本加速器学会年会, SUP040.
- [2] T.Yanagisawa, et al., "Status of superconducting cavity and cryomodule development at MHI", IPAC15, THPP099.
- [3] K.Yamada, et al., "Conceptual design of SC Linac for RIBF-upgrade plan", SRF2013, MOP021.
- [4] K.Yamada, et al., "Design of a new superconducting Linac for the RIBF upgrade", Linac2014, THPP118.
- [5] K.Ozeki, et al., " Heat flow estimation of the cryomodule for superconducting quarter-wavelength resonator", 本学会, THP059.