

## 低 $\beta$ 用超伝導加速空洞の超純水高圧水洗技術

### HIGH-PRESSURE RINSING TECHNIQUES OF LOW- $\beta$ SUPERCONDUCTING RF CAVITY

原 博史<sup>#, A)</sup>, 宮本 明啓<sup>A)</sup>, 増田 開<sup>B)</sup>, 蛭沢 貴<sup>B)</sup>

Hiroshi Hara<sup>#, A)</sup>, Akihiro Miyamoto<sup>A)</sup>, Kai Masuda<sup>B)</sup>, Takashi Ebisawa<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Mitsubishi Heavy Industries Machinery Systems, Ltd.

<sup>B)</sup> National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

#### Abstract

Domestic plan to construct advanced fusion neutron sources (A-FNS) with 40 MeV - 125 mA CW deuteron beam and liquid lithium target are on going in QST/Rokkasho. A Half-Wave Resonator (HWR), which is a candidate for the SRF accelerator for the A-FNS, is well known as a low-beta accelerator. Mitsubishi Heavy Industries Machinery Systems, Ltd. has presented a solution to the problem of high-pressure rinse of HWR as part of the conceptual design of the superconducting accelerator for A-FNS.

## 1. 概要

### 1.1 低 $\beta$ 用超伝導加速空洞

重イオン加速器は、重イオンを高いエネルギーに加速する粒子加速器である。重イオン加速器を用いる研究活動としては、原子核物理学(元素合成研究など)、素粒子物理学(高エネルギー重イオン衝突実験など)、放射線療法(重粒子線がん治療など)、材料の照射損傷研究などが挙げられる。

重イオンの加速では、粒子の相対速度  $\beta (=v/c, v$ : 粒子の速度,  $c$ : 光の速度) が小さく、低 $\beta$ 用超伝導加速空洞として 1/4 波長型空洞 (QWR, Quarter-Wave Resonator), 1/2 波長型空洞 (HWR, Half-Wave Resonator) が一般的に利用されている。

### 1.2 核融合中性子源 A-FNS の概念検討

量子科学技術研究開発機構では、日欧で進めている核融合研究開発の幅広いアプローチ活動(BA 活動)における IFMIF/EVEDA 事業の成果を基に、核融合中性子源 A-FNS の設計検討が進められている。(Fig. 1)

核融合中性子源 A-FNS においては、より長尺の超伝導加速器を用いた 40 MeV までの追加速が求められる。高い信頼性を確保し、125 mA, 40 MeV のビームを常時安定に後段の液体 Li ターゲットに入射するためには、高い加速電界を安定に印加できる多数の SRF 加速空洞を備えたクライオモジュールを実現する技術の確立が必要である。

三菱重工機械システムは、理化学研究所向 1/4 波長型空洞(QWR)の製造実績[1]に基づき、A-FNS 用超伝導加速器クライオモジュールの概念検討の一環として、1/2 波長型空洞(HWR)の超純水高圧水洗(HPR)における課題に取り組んだ。

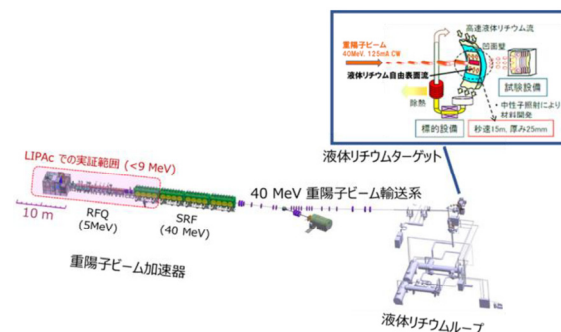


Figure 1: Conceptual view of A-FNS.

## 2. 超純水高圧水洗技術

### 2.1 概要

超純水高圧水洗は、空洞内表面に高圧超純水を噴射し、電界放出の基になる空洞内表面の残留異物(粒子状物質, 化学的残留物)を除去することを目的とする、最終表面を決定づける重要な工程である。A-FNS 用 SRF 加速器の候補である 1/2 波長型空洞(HWR)の超純水高圧水洗施工プロセスの検討材料とした超純水高圧水洗システムを以下に述べる。

### 2.2 超純水高圧水洗装置

技術検討に用いた三菱重工機械システム保有の超純水高圧水洗装置を Fig. 2, Fig. 3 及び Table 1 に示す[2]。

超純水高圧水洗装置は、超純水製造装置, 高圧ポンプ, ステージ, ノズルで構成される。空洞はステージ上に設置され、ステージの昇降及びノズルの回転により内面を洗浄する。ノズルヘッドはステンレス製で水平・斜めの計 6 方向に噴射できる。

尚、洗浄後の組立作業は、超純水高圧水洗装置に隣接する ISO Class 4 クリーンルームで行われる。

<sup>#</sup>hiroshi.hara.pe@mhi.com



Figure 2: High-pressure rinse facility.

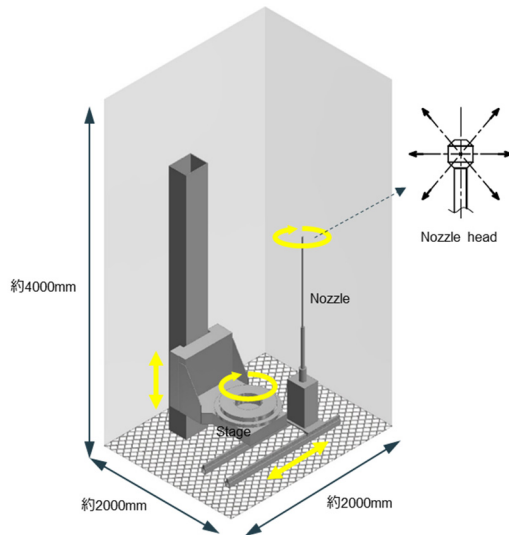


Figure 3: Schematic of High-pressure rinse equipment.

Table 1: Specifications of the High-pressure Rinse Facility

Item	Value
Specific resistance of Ultra-pure water	> 18MΩ·cm
Water Pressure	Max 10MPa
Water Flow	Max 10L/min
Movement	4 axes (Vertical movement of cavity, Cavity rotation around vertical axis, Rotation of cane, and Horizontal movement of cane)

### 2.3 超純水高圧水洗の施工例

超純水高圧水洗の施工例として、理化学研究所向 SRILAC 用 1/4 波長型空洞 (QWR) の超純水高圧水洗

状況を Fig. 4 に示す。超純水の噴射圧は広がり方向に減少するので、空洞内面全面に所定の圧力にて噴射するためには、噴射幅と噴射圧力の関係を知る必要がある。感圧紙を用いた噴射試験を行い、感圧紙濃度を画像解析して圧力分布を算出した。感圧試験結果の一例を Fig. 5 に示す。



Figure 4: High-pressure rinse for RIKEN-QWR.

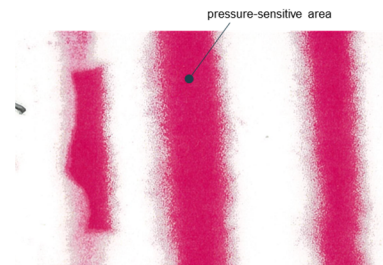


Figure 5: Results of the pressure sensitivity test.

## 3. A-FNS 用 HWR の超純水高圧水洗検討

### 3.1 1/2 波長型空洞 (HWR)

A-FNS 用 SRF 加速器の候補である 1/2 波長型空洞 (HWR) の概略図を Fig. 6 に示す。基本形状は、IFMIF-LIPAc 用 HWR の設計が踏襲されている。材料費・加工費の低減を目的として、端板及びドリフトチューブを削り出しから薄肉成形構造に見直す等の基本設計が進められている。

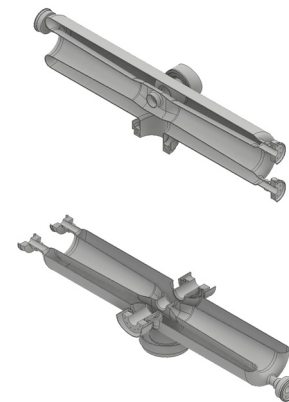


Figure 6: HWR for A-FNS.

### 3.2 超純水高圧水洗における課題

空洞の性能を確保するためには、超純水高圧水洗は空洞内面全面に施工しなければならない。1/2 波長型空洞は内導体・外導体の同軸構造であるため、内導体による死角を考慮して洗浄プロセスを決定する必要がある。

洗浄ノズルの挿入口として、空洞の端板にポートが配置される。A-FNS 用 1/2 波長型空洞の洗浄ポートの初期配置は、IFMIF-LIPAc 用 HWR と同様に空洞両端に 2 本ずつとし、一方はビームポートと同じ方向、他方はビームポートと直交方向である (Fig. 6)。この方向で問題となるのは、ビームポートがノズルの移動を制限し、空洞の半分までしかノズルを挿入できないことである (Fig. 7)。この問題については CEA-Saclay の論文において、4 つの洗浄ポートからの洗浄、ノズルヘッドの噴射角度を複数設定、として検討したところ端板付近の内導体円錐部に洗浄できない領域が発生することが示されている。[3]

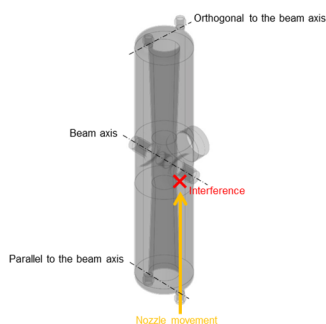


Figure 7: Initial layout of the rinsing port.

### 3.3 課題解決の検討結果

課題を解決するために以下の方策を立てた。

- i. 洗浄ポートの配置角度を変更する。
- ii. 洗浄ノズルの挿入口としてビームポート、カップラーポートを利用する。

洗浄ポートの配置角度の変更について、ビームポートに干渉することなく洗浄ノズルを空洞の全長に渡って挿入させるためには、ビーム軸に対して 50°以上の傾きが必要であることを確認した。洗浄ポートの配置を変更した検討モデルを Fig. 8 に示す。

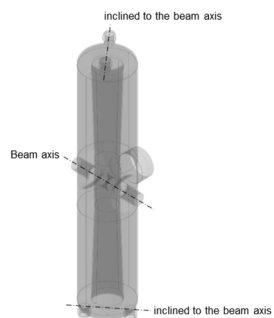


Figure 8: Change the rinsing port layout.

ビームポート及びカップラーポートを洗浄ノズルの挿入口として利用するプロセスは、理化学研究所向 SRILAC 用 1/4 波長型空洞 (QWR) の超純水高圧水洗で前例がある[4]。

各ポートにおける超純水高圧水洗の洗浄領域を明ら

かにするため、3D-CAD を用いて 3D モデル検討を行った。検討結果を Fig. 9 に示す。

両側の洗浄ポートからのノズル挿入により、内導体・外導体の大部分が洗浄可能であることが明らかとなった。この時の非洗浄領域は、ビームポート内面と内導体側面の一部となる。次にビームポートからのノズル挿入により、上記の非洗浄領域をカバーできることが明らかとなった。また、カップラーポート内は洗浄ポートからの施工可能領域に含まれるが、接線領域があるためカップラーポートからのノズル挿入が必要である。全てのポートからのノズル挿入により、空洞内面全面の洗浄が可能であることが明らかとなった (Fig. 10)。

洗浄水が空洞内部に留まると洗浄効果を失うため、次の順番で洗浄を行うことが有効である。

- 1) ビームポートからの洗浄  
(空洞が横姿勢となるため、外導体下部に水溜まりが発生する。ビームポート内はそのまま排水される。)
- 2) カップラーポートからの洗浄  
(同上)
- 3) 洗浄ポートからの洗浄  
(空洞が縦姿勢となり、洗浄ポートから排水が可能である。)

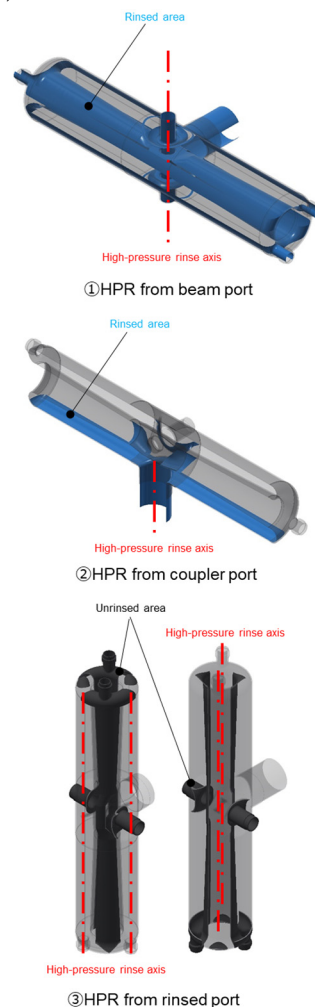


Figure 9: Study results of high-pressure rinsed area.

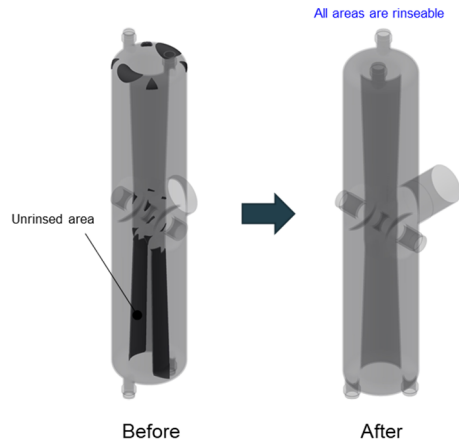


Figure 10: Optimization Results.

#### 4. まとめ

量子科学技術研究開発機構と三菱重工機械システムは、核融合中性子源 A-FNS の概念検討に取り組む中で、1/2 波長型空洞(HWR)の超純水高圧水洗(HPR)における課題に対して、洗浄ポートの配置最適化による解決案を示した。

三菱重工機械システムは超純水高圧水洗を始めとした技術協力により、次世代加速器の発展に貢献していく所存である。

#### 参考文献

- [1] H. Hara *et al.*, “Production of SRF cryomodules for SRILAC at RIKEN RIBF”, in Proc. the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. - Aug. 2019, WEP1003.
- [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] G. Devanz *et al.*, “Progress in IFMIF Half Wave Resonators Manufacturing and Test Preparation”, in Proc. SRF2015, Whistler, Canada, Sep. 2015, THPB045.
- [4] <https://www.pasj.jp/kaishi/cgi-bin/kasokuki.cgi?articles%2F17%2Fp70-80.pdf>