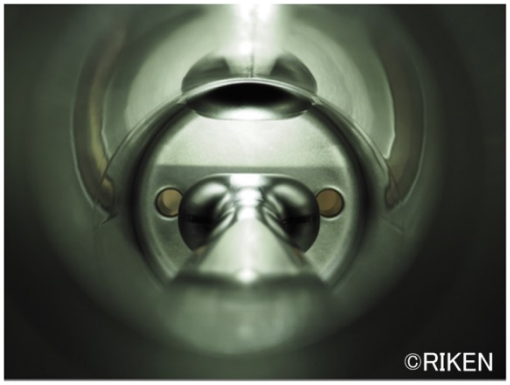
# 重イオン用超伝導加速管製造技術

Manufacturing Techniques of Superconducting RF Cavities for Heavy Ions




原 博史[*1] Hiroshi Hara
仙入 克也[*2] Katsuya Sennyu
宮本 明啓[*3] Akihiro Miyamoto
柳澤 剛[*4] Takeshi Yanagisawa

国立研究開発法人 理化学研究所(以下, 理研)において, 113 番元素がニホニウムと命名されたことをきっかけに, 新元素合成に必要なエネルギーまで重イオンを加速するために既存の線形加速器を増強するプロジェクトが開始された。限られたスペースで増強を実現するためには超伝導加速管の導入が不可欠であったが, 純ニオブ製の重イオン用超伝導加速管は国内で開発例がなかった。三菱重工機械システム株式会社(以下, 当社)は電子用超伝導加速管の製造技術を活用し, 理研とともに重イオン用超伝導加速管の開発に取り組み 10 台の実用機の製造に成功した。本報では, 高性能の重イオン用超伝導加速管を実現した製造技術について述べる。

## 1. はじめに

重イオン加速器は, 重イオン(通常炭素より重い元素のイオンを指す)を高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。

重イオン加速器研究施設の一つである理研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, Radioactive Isotope Beam Factory)において, 重イオンを加速する線形加速器(RILAC, RIKEN Heavy-Ion Linac)のエネルギーとビーム強度のアップグレードのために超伝導加速管を導入することとなった。図1に RILAC 増強計画の概略図を示す。超伝導加速管の特徴の一つに高加速勾配(単位:V/m)で連続波(CW, Continuous wave)加速が可能なことが挙げられる。今回の RILAC の増強は, 限られた長さ(単位:m)で高い加速電圧(単位:V, すなわち加速勾配と長さの乗算)を得て連続波加速することを目的とするものであり, これを実現するには超伝導加速管の適用が不可欠であった[(1)]。

重イオン用超伝導加速管は複雑な形状を有し, 世界的には米国や仏国などの加速器研究所において開発が進められている。一方, 日本国内では日本原子力研究開発機構においてニオブ・銅クラッド材を用いたタンデムブースターの稼働例があるものの純粋なニオブ製のものはこれまで開発例がなかった。

当社は 1980 年代後半より蓄積してきた高い加速勾配と高い Q 値(空洞の高周波損失に関する性能指標。高いほど高周波損失の割合が小さい。)を両立(近年では国際リニアコライダー(ILC,

*1 三菱重工機械システム株式会社設備インフラ事業本部機械技術部 技術士(機械部門)
*2 三菱重工機械システム株式会社設備インフラ事業本部品質保証部 部長 技術士(機械部門)(総合技術管理部門)
*3 三菱重工機械システム株式会社設備インフラ事業本部機械技術部 課長
*4 三菱重工機械システム株式会社設備インフラ事業本部機械技術部

International Linear Collider)計画の要求仕様を満足)する電子用純ニオブ製超伝導加速管製造技術を生かし，2017 年度から 2018 年度の短期間で 10 台の重イオン用超伝導加速管の製造に取り組んだ。

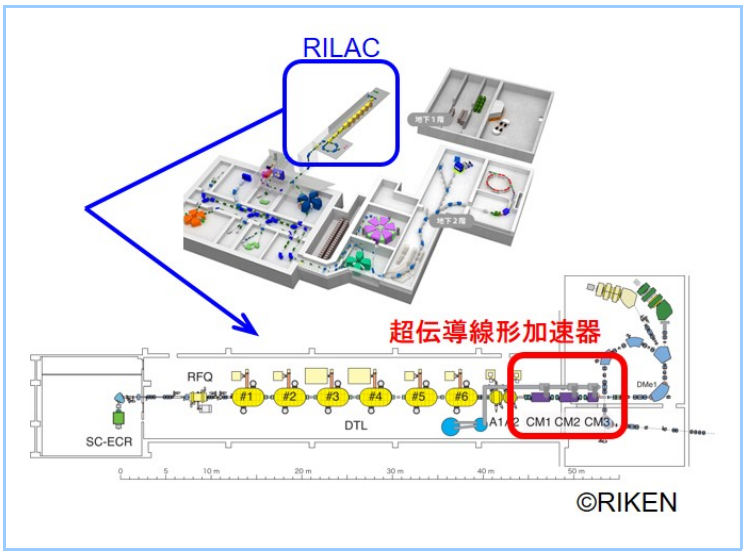



図1 RILAC 増強計画の概略図

## 2. 重イオン用超伝導加速管の概要

### 2.1 構成

超伝導加速管は超伝導材料(ニオブ)の容器とその外側を覆う容器の2重容器である。ニオブ製容器の内面には外部から投入された高周波電力によって電場が形成され，重イオンは電場からエネルギーを得て加速する。2重容器の間には液体ヘリウムが貯蔵されて 4.5K まで冷却される。ニオブ製容器が超伝導状態となることで電気抵抗による電力損失を限りなく小さくして運転することができる。

超伝導加速管には，高周波電力を投入するための入力カプラ，超伝導加速管の共振周波数を調整するためのチューナ，超伝導特性に影響を及ぼす磁気を遮蔽するための磁気シールド，超伝導加速管への熱負荷を低減するための輻射熱遮蔽板，超伝導加速管を断熱保持するための真空槽などが組み立てられて(モジュール化されて)ビームラインに設置される。これら附帯機器についても当社で設計，製造及び組立てを行った。図2に RILAC 向け重イオン用超伝導加速管モジュールの構成を示す。

図3にモジュール化される重イオン用超伝導加速管を示す。

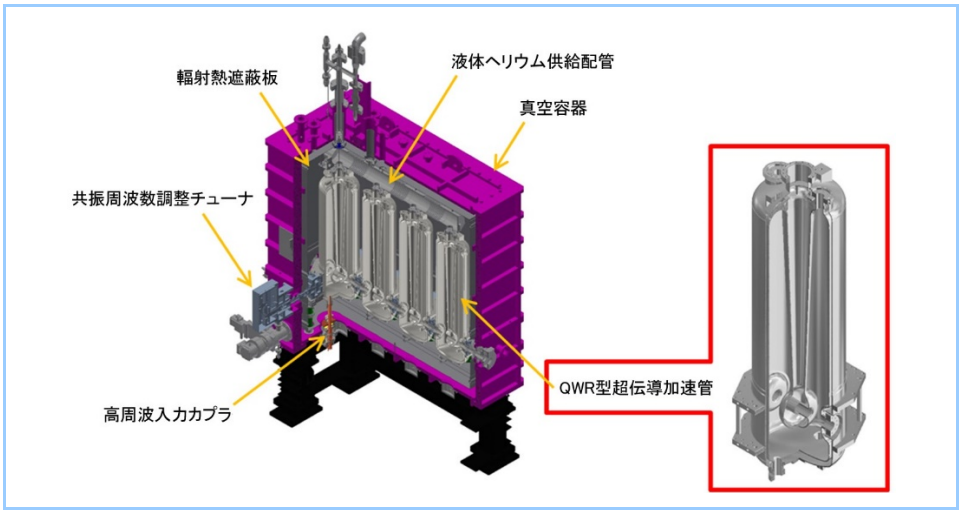



図2 RILAC 向け重イオン用超伝導加速管モジュールの構成

図3 モジュール化される重イオン用超伝導加速管

## 2.2 重イオン用超伝導加速管の設計

超伝導加速管の基本形状は，共振周波数と加速粒子の速度によって代表形状が分類されている。図4に超伝導加速管の代表形状の分類を示す[2]。

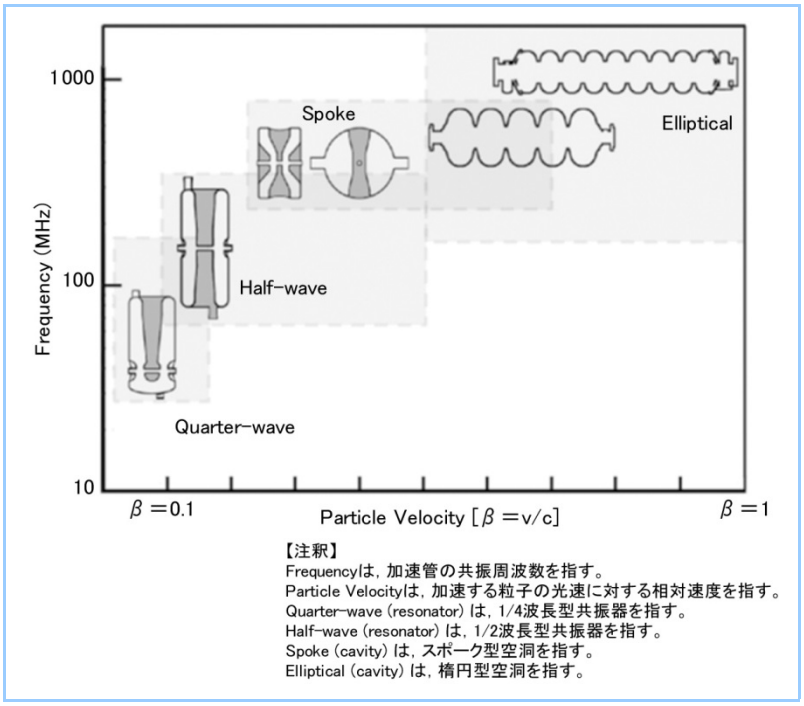



図4 超伝導加速管の代表形状の分類[2]

今回採用された加速管形状は，1/4 波長型共振器（QWR，Quarter-Wave Resonator）と呼ばれ，高周波設計は理研が実施した。表1に RILAC 向け重イオン用超伝導加速管の設計パラメータを示す[3]。

表1 RILAC 向け重イオン用超伝導加速管の設計パラメータ[3]

| 項目 | 設計値 | |
|---|---|---|
| 共振周波数（4.5K） | 73.0 | [MHz] |
| 加速勾配 $E_{acc}$ | 6.75 | [MV/m] |
| 粒子の相対速度 $\beta_{opt}$ | 0.078 | |
| 高周波損失に関する性能指標 $Q_0$ | $1.0\times10^9$ | |

超伝導加速管は液体ヘリウムを貯蔵することから高圧ガス保安法の適用を受ける。材料や形状が特殊なため当該法規則の評価式によることができない問題があったが，高圧ガス保安協会の詳細基準事前評価制度を通じて材料強度や構造強度について安全性を評価する基準を定め，関係県庁の認可を得た後に構造設計を実施した。

図5に RILAC 向け重イオン用超伝導加速管の部品構成を示す。本体を形成する部品は，厚さ 3.5mm～4.0mm の純ニオブ板材（純度 99.85%以上）からプレス金型等を用いて成形加工した。

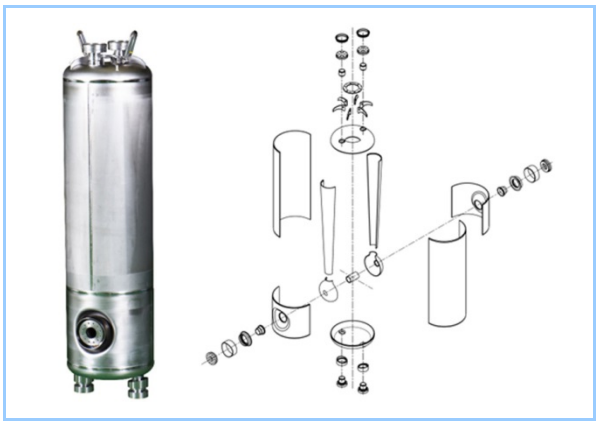


図5　RILAC 向け重イオン超伝導加速管の部品構成

## 3. 高加速勾配及び高 Q 値を実現する加速管製造技術

### 3.1　電子ビーム溶接（EBW，Electron beam welding）

超伝導加速管の壁面の不純物は発熱源となり超伝導特性の劣化につながる。不純物として塵，埃などの粒子状物質はもとより，酸素・窒素等のガス成分も該当する。このため清浄な雰囲気に管理されたクリーンルームで部品組立てを行い，真空雰囲気下で溶接を行う必要がある。この条件に沿うために，当社では ISO Class7（旧 Class 10000）のクリーンルームに出力 10kW の低電圧型電子ビーム溶接機を設置した加速器製造専用工場を保有している。

溶接工程での欠陥は超伝導加速管の性能制限につながるため，溶接開先の厚み・隙間・段差，溶接開先面の清浄度，組立てエリアの清浄度，溶接パラメータの安定性など管理項目は多岐にわたる。今回の溶接はいずれも片面から施工し，表裏ともに機械的研磨することなく平滑な溶接ビードを形成した。図6に溶接ビードの一例を示す。

### 3.2　周波数調整

超伝導加速管の共振周波数は内面形状によって決まるが，製造工程中の製作精度によって設計値との誤差を生じる。製造工程中の周波数変化量を測定し加工長さにフィードバックすることによって，溶接組立て完了時の共振周波数の誤差を数 kHz に収めた。これは，超伝導加速管の全長約 1000mm に対して 0.1mm 単位の精度で加工，溶接組立てを行ったことに相当する。図7に常温で実施した共振周波数測定の状況を示す。

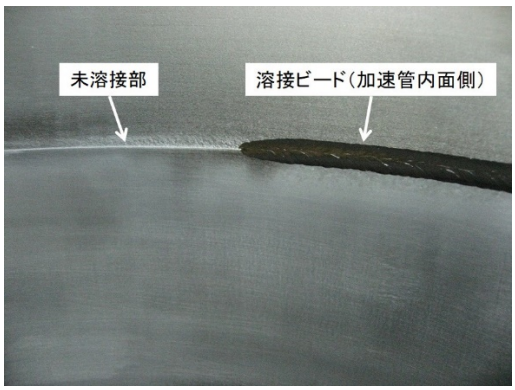



図6　溶接ビードの一例

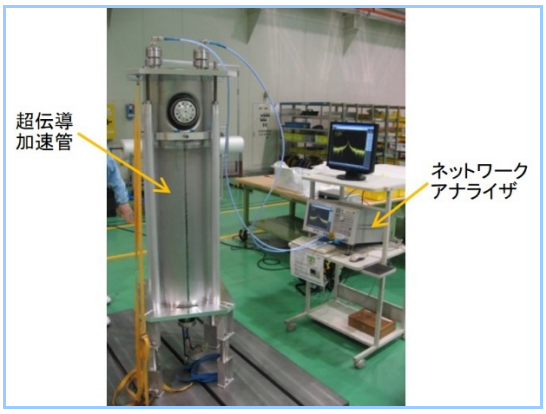



図7　共振周波数測定状況（常温）

### 3.3　化学研磨（BCP，Buffered chemical polishing）

超伝導加速管の表面処理は，加速管の性能を左右する非常に重要な工程であり，内表面を

滑らかに仕上げるために通常電解研磨もしくは化学研磨が施工される。今回，形状的な制約がない化学研磨が採用され，表面処理設備を自社導入して対応した。

化学研磨薬液には，ニオブ表面を酸化させる硝酸（$HNO_3$），酸化ニオブ膜（$Nb_2O_5$）を溶解するフッ化水素酸（HF），研磨速度を抑えるリン酸（$H_3PO_4$）の混合液を用いた。ニオブの化学研磨で注意すべきことは，①研磨反応熱により液温が上昇すると研磨速度が急激に上昇すること，②研磨後の液抜きに時間がかかると残存薬液による研磨が進むこと，であり液温及び流量を制御するための循環システムを構築した。**タイトル写真**に示すように，表面処理後の超伝導加速管内面は化学研磨特有の半鏡面の仕上がりとなった。

### 3.4 真空熱処理

真空熱処理は，化学研磨中にニオブ材料内に吸蔵された水素を除去する工程である。水素が残存した超伝導加速管を 100K 程度の温度に長時間さらすと表面抵抗が増大して加速管性能の制限につながる。図8に示す自社保有の大型真空熱処理炉にて3時間の真空熱処理を施工した。

### 3.5 超純水高圧水洗（HPR, High pressure rinse）

超純水高圧水洗は，化学研磨後の超伝導加速管内表面に高圧超純水を噴射し，清浄な表面を得る工程である。超伝導加速管内表面に残留する異物（粒子状物質，化学的残留物）は電界放出電子の基になる。粒子状物質は流し洗いでは除去されないが高圧水洗浄によって十分に除去されることが分かっており，超純水高圧水洗装置を自社導入して対応した。

超純水高圧水洗の諸元は電子用超伝導加速管で実績のある，水圧8MPa，電気伝導度18MOhm・cm 以上とした。

超純水高圧水洗後の封止作業は，超純水高圧水洗装置に隣接されたクリーンルームで実施した。設置コスト，メンテナンス，製品の組立て容易性の観点から天井開閉式とし，清浄な空気を水平に流す方式を採用した。クリーン度は ISO Class4（旧 Class 10）に到達し，一般的な HEPA フィルタを吹出口とし，壁，天井面又は床面を吸込口とする方式と遜色ない性能が得られた。

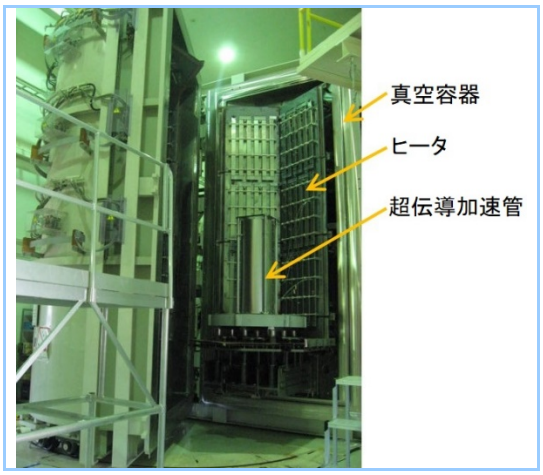



図8 大型真空熱処理炉

## 4. 重イオン用超伝導加速管の達成性能

溶接工程が完了した 10 台の重イオン用超伝導加速管は，理研において性能確認試験（縦測定）が行われた。図9に示すように超伝導加速管は縦長円筒容器に設置された。その後液体ヘリウムで 4.2K まで冷却され，小電力高周波が入力されて加速勾配と Q 値が測定された。

図 10 に性能確認試験（縦測定）で得られた結果を示す[3]。10 台すべての重イオン用超伝導加速管で仕様値を上回る性能が安定して得られ，理研からは以下の評価を頂いた。[1]

・超伝導加速管の一連の製作過程（加工，溶接，表面処理）の健全性・妥当性が確認できた。

・理想的な状態に非常に近い超伝導加速管の表面状態を実現した。

図9　性能確認試験（縦測定）の準備の様子

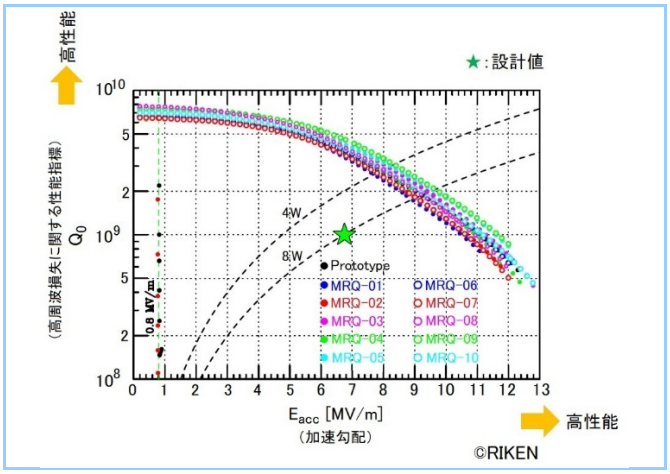



図 10　性能確認試験（縦測定）結果[3]

## 5. まとめ

当社の超伝導加速管製造技術の活用・発展により，国内初の純ニオブ製重イオン用超伝導加速管の製造に成功した。現在，理研重イオン線形加速器（RILAC）の後段に 10 台すべての超伝導加速管が設置され，119 番以降の新しい元素生成に向けて日夜運転がなされている。重イオン加速器は海外各地で建設あるいは計画がなされており，また国内においても次世代加速器としての検討が進められている状況にあり，その発展に技術貢献していく所存である。

## 参考文献

(1) 坂本成彦，理研 RIBF における低速重イオン用超伝導線形加速器の開発，加速器 Vol.17 No.2 (2020)，p.70～80
(2) M. Kelly, TEM-class Cavity Design, SRF2013, Paris, France, Sep. 2013, Tutorial Program
(3) 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