

# RECOVERY OF ACCELERATION FIELD GRADIENTS OF SUPERCONDUCTING BOOSTER RESONATORS BY HIGH PRESSURE WATER JET RINSING

Hiroshi Kabumoto<sup>1,A)</sup>, Suehiro Takeuchi<sup>A)</sup>, Nobuhiro Ishizaki<sup>A)</sup>, Takahiro Yoshida<sup>B)</sup>,  
Takayuki Ishiguro<sup>B)</sup>, Kazushi Yamaguchi<sup>B)</sup>,

<sup>A)</sup> Japan Atomic Energy Agency, Tokai Research and Development Centre, Nuclear Science Research Institute,  
Tandem Accelerator Section

2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

<sup>B)</sup> Atox co., ltd.

2-3-4 Shintomi, Chuo-ku, Tokyo, 104-0041

## Abstract

The JAEA-Tokai superconducting booster was constructed in 1994 for the post accelerator of 20UR tandem facility. The booster consists of 40 coaxial quarter wave resonators (QWR) of which frequency is 129.8MHz, and optimum beam velocity is 10% of the light velocity. The acceleration field gradients of superconducting resonators were 5.0MV/m at RF power input of 4W on their average. But, the performance decrease little by little, and it become 4.0MV/m now. Some of the resonators generate X-rays from a low electric field. A field emission will be occurred from small contaminations accumulated on the surfaces of niobium. We examined the high pressure water jet rinsing (HPWR) to re-recondition the superconducting booster. The acceleration field gradients of 20 resonators improved from 4.4MV to 5.7MV/m at RF power input of 4W after the HPWR.

## 高圧純水洗浄による超伝導ブースターの性能回復

### 1. はじめに

原子力機構 東海の20MVタンデム加速器は重イオンによる原子核物理、核化学、物性物理などの基礎研究に用いられており、その後段にはエネルギーを増強するための超伝導ブースターが設置されている<sup>[1][2][3]</sup>。ブースターは1/4波長型の超伝導加速空洞（図1）40個とバンチャー、デバンチャーから構成されるリニアックで共振周波数は129.8MHz、最適ビーム速度は光速の10%である。1994年の運転開始よりマシンタイムを提供してきたが、建設当時にはRF電力で4W入力時（ヘリウム冷凍機の能力から決めた標準消費電力）の加速電界が5.0MV/mほどであったが、現在では約4.0MV/mにまで低下してきている。性能が低下した空洞の中には3.0MV/m付近からX線を発生するものもある。これは空洞内にチリや金属粉などが混入し、フィールドエミッションが起こっていると考えられる。我々は高圧純水洗浄の技術を用いて空洞性能の回復を図ることにした。

### 2. 高圧純水洗浄について

超伝導空洞のニオブ表面へチリや金属粉が付着すると、高電界を発生させたときにトンネル効果で電子の電界放出現象（フィールドエミッション）が起こる。電子は電磁界により加速されてニオブ表面へ衝突し、制動X線の発生や発熱、2次電子放出などを

引き起こす。放出された2次電子は再加速されて更に電子の数を増大させるため、RF電力の入力を増やしても電子によって消費されてしまい、空洞の加速電界は制限される。このように超伝導空洞では表面の清浄度が非常に重要であるが、ブースターでも長年の運転・整備によりチリや金属粉等が空洞内に蓄積してきたため、性能が徐々に低下してきたと考えられる。

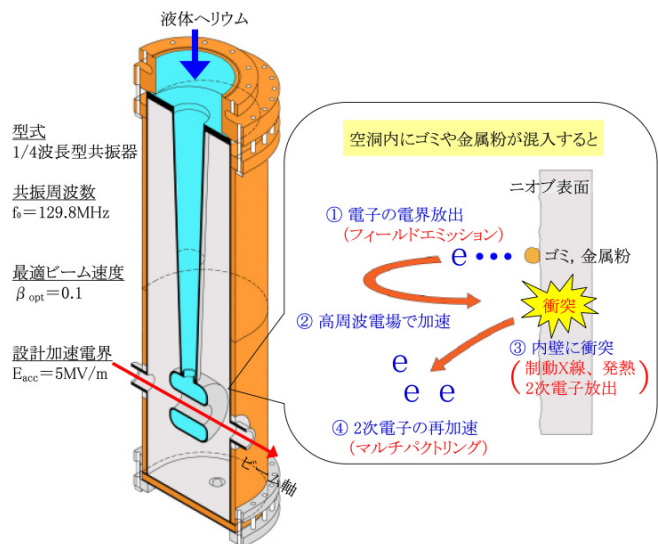


図1: 超伝導加速空洞とフィールドエミッション

<sup>1</sup> e-mail: kabumoto.hiroshi@jaea.go.jp

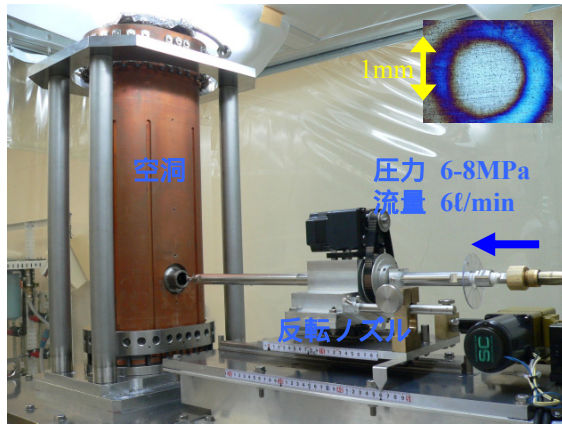


図2：高圧純水洗浄装置とニオブ酸化皮膜

図2は製作した高圧純水洗浄装置である。洗浄方法としては、まず空洞内部をエタノールで洗い流し、ゴミや化学物質、油分などを大まかに除去する。当初は超純水で高圧洗浄を行う予定であったが、比抵抗が $18\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ と絶縁性の高い超純水を高圧で吹き付けると、静電気が発生してニオブに電流が流れることにより酸化皮膜が形成されることが分かった。そのため現在はイオン交換樹脂で生成した超純水に炭酸ガスを溶かして比抵抗を $0.04\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ まで下げた炭酸水を使用している。炭酸水はコンプレッサーで6~8MPaまで加圧され、流量6リットル/分で約2時間かけてニオブ表面の洗浄を行っている。洗浄後は乾燥を早めるために空洞内部を再度、エタノールで洗い流している。最後に、ニオブ酸化皮膜の緩和と到達真空度の向上を目的として120℃、2日間のベーキングを行っている。

### 3. 高圧純水洗浄の効果

#### 3.1 高圧洗浄によるニオブ酸化の影響

我々はまず高圧超純水洗浄によるニオブ酸化の影響を検証することから始めた。図3は予備の空洞を用いて行った性能試験結果である。炭酸水洗浄、超純水洗浄、ベーキングの順に洗浄と性能試験を繰り返したところ、炭酸水洗浄では $7.9 \times 10^8$ であった空洞の $Q_0$ 値（加速電界 $0.5\text{MV/m}$ 時）が超純水洗浄によって $5.6 \times 10^8$ まで低下し、ベーキングを施したところ $8.1 \times 10^8$ まで回復した。いずれの試験においても $5.0\text{MV/m}$ 付近からX線が発生したため、この空洞の表面には電子放出源となる突起があるとされる。

ニオブの表面が酸化すると不純物の酸素量が増えて超伝導状態でのRF表面抵抗が増加するため、超純水洗浄により $Q_0$ 値が若干低下したと考えている。そのため、洗浄には炭酸水を使用することとした。

また、ベーキングの効果はまだ明らかにされていない部分が多いが、酸化皮膜周辺の酸素が超伝導状態のRF表面抵抗に関係する厚さよりも奥深くへ拡散することによって、 $Q_0$ 値が回復するのではないかとこの説が議論されている。ベーキングの試験で

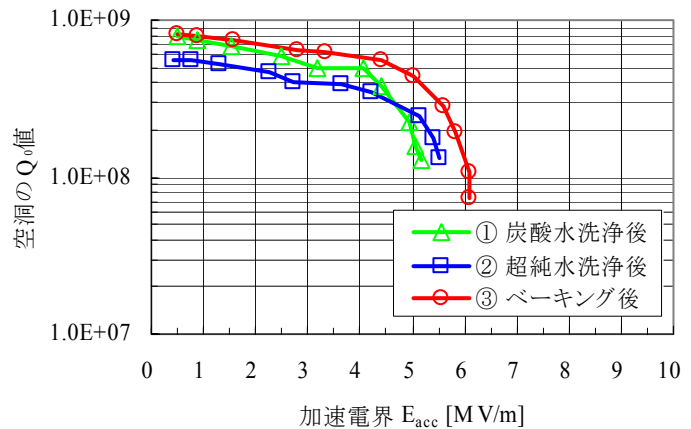


図3：高圧純水洗浄による酸化の影響

も $Q_0$ 値の回復がみられたことから、洗浄後にはベーキングを施すことにした。

#### 3.2 空洞性能の回復

高圧純水洗浄の効果を検証するためにオンラインの空洞（L-40）を用いて試験を行った。図4は洗浄前後における空洞の性能（ $Q_0$ - $E_{\text{acc}}$ 曲線）である。洗浄前には $3.0\text{MV/m}$ 付近からフィールドエミッションによるX線が発生し、RF電力を $4\text{W}$ 入力したときの加速電界は $3.6\text{MV/m}$ であった。しかし、洗浄後には高い電界においてもX線が発生しなくなりRF $4\text{W}$ 入力時の加速電界は $6.5\text{MV/m}$ まで改善された。

その後、オンラインの空洞に対して順次、高圧純水洗浄を施した。図5は洗浄前後における加速電界（RF $4\text{W}$ 入力時）と $Q_0$ 値（加速電界 $1 \sim 2\text{MV/m}$ 時）である。これまでプースターの20空洞に対して洗浄処理を施し、洗浄前には平均して $4.4\text{MV/m}$ であった加速電界が洗浄直後には $5.7\text{MV/m}$ まで回復した。

しかし、洗浄からしばらく時間が経過すると性能が再び低下してくる空洞があった。クライオスタット（低温真空容器）の内部を調査するとメカニカルチューナーのギア潤滑用に焼き付けてあるモリブデンの削れた粉が飛散しており、これが窒素ベントや真空ポンプで粗引きする際に空洞内へ舞い込むのではないかと考えている。現在は空洞洗浄に併せてクライオスタットの分解清掃も行うことにした。

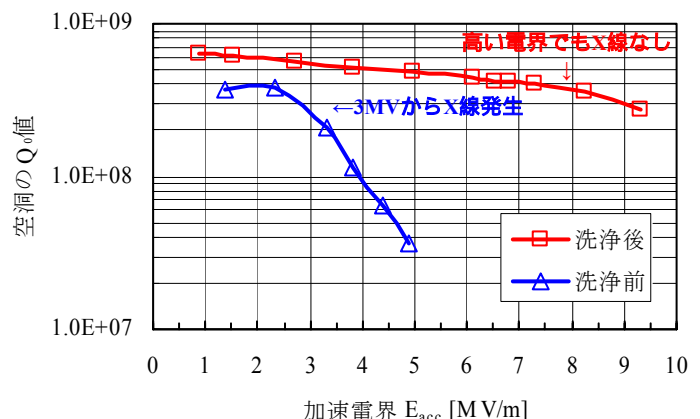


図4：高圧純水洗浄による性能回復例

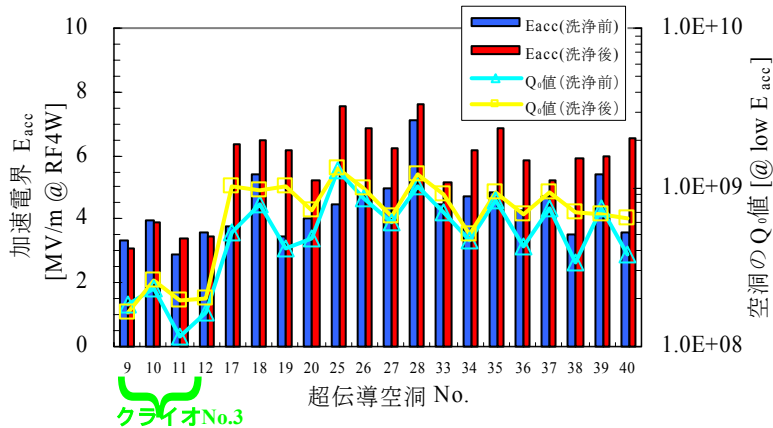


図5：洗浄前後におけるオンラインの空洞性能

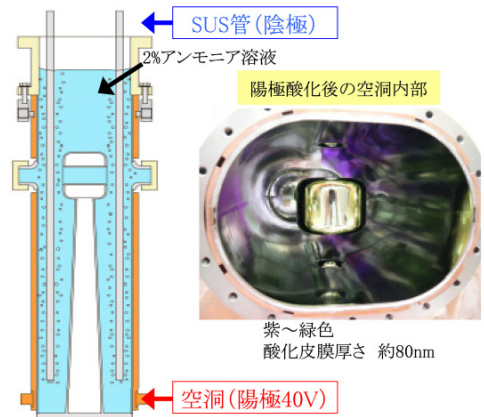


図6：空洞の陽極酸化

#### 4．陽極酸化による水素病の影響軽減

クライオスタットNo.3の4空洞 (L9-12) は洗浄前後において性能の変化がほとんどみられなかった (図5)。それらの空洞は製作時の電解研磨等において水素ガスを吸蔵してしまったため、オンラインでの $Q_0$ 値が約 $2.0 \times 10^8$ であり、他の空洞の $1.0 \times 10^9$ 前後と比べてもかなり低い。ニオブ製の超伝導空洞が水素を吸蔵すると、80~120Kの温度領域において低質な超伝導体のニオブ水素化物を形成し、空洞の $Q_0$ 値が著しく低下する現象 (水素病) が起こる。水素病の程度は水素吸蔵量だけでなく、80~120Kの温度領域に保持されていた時間にも依存する<sup>[4]</sup>。高圧純水洗浄は空洞内のチリなどを除去することでフィールドエミッションの発生を抑える技術であり、水素病によりニオブの表面抵抗が大きい空洞に対しては性能を改善させることができない。

我々はニオブ表面に陽極酸化を施して酸化皮膜を形成することで水素病の影響を軽減できないか試験を行った。図6は陽極酸化の処理体系である。空洞内に2%のアンモニア溶液を満し、SUS管を陰極、空洞を陽極としてDC40Vの電圧で陽極酸化を行った。形成された酸化皮膜の厚さは約80nmである。

図7は陽極酸化の前後における空洞の性能である。まず酸化前にオフライン性能試験を行い、高速冷却での $Q_0$ 値は $4.4 \times 10^8$ であった。次に水素病の影響が十分発生するように100Kの温度に20時間保持した

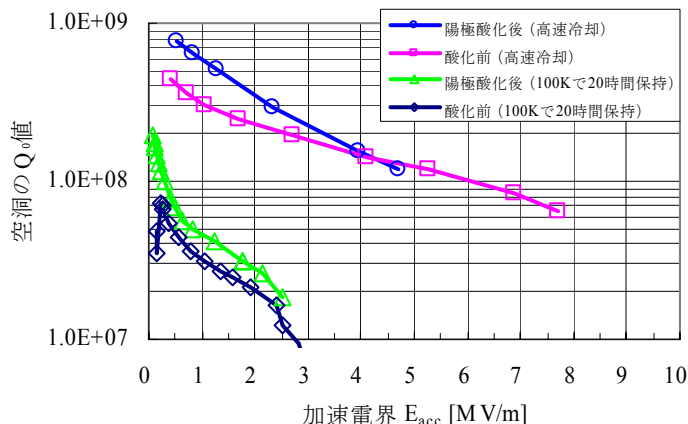


図7：陽極酸化の前後における空洞性能

後に4.2Kまで冷却したところ、 $Q_0$ 値は $4.9 \times 10^7$ まで低下し、この空洞が水素病を発症していることが確認できた。その後、空洞に陽極酸化を施したところ、高速冷却での $Q_0$ 値は $7.7 \times 10^8$ まで回復した。また、100Kの温度に20時間保持した場合にも $Q_0$ 値は $1.6 \times 10^8$ まで回復した。しかし、陽極酸化後の高速冷却において電界を上げていった時の $Q_0$ 値低下が大きく、RF4W入力時の加速電界はいずれも4.0MV/m付近であり変化がなかった。ニオブ表面に酸化皮膜を形成することで水素病の影響を軽減できる可能性があることが分かった。しかし、同時に不純物としての酸素量が増えるために表面抵抗の増加が伴うと考えられ、処理方法にはまだ改善が必要である。

#### 5．まとめ

超伝導加速空洞に高圧純水洗浄を施すことでフィールドエミッションの発生を抑えることができ、オンラインの20空洞において洗浄前には平均で4.4MV/m (RF4W入力時)であった加速電界が洗浄直後には5.7MV/mまで改善した。

また、水素病の空洞に対して陽極酸化を施すことで $Q_0$ 値を回復できる可能性があることが分かったが、処理方法には更なる改善が必要である。

#### 参考文献

- [1] H. Kabumoto, et al., "Performance test of low beta superconducting twin quarter wave resonator", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and The 32th Linear Accelerator Meeting in Japan, Wako, Aug. 1-3, (2007) 469-471 TP15,
- [2] S. Takeuchi, et al., "Acceleration of heavy ions by the JAERI tandem superconducting booster", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 382 (1996) 153-160
- [3] H. Miyatake, et al., "The KEK-JAERI joint RNB project", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 204 (2003) 746-751
- [4] K. Saito, et al., Proceeding of the 3<sup>rd</sup> EPAC, Berlin, Germany, (1992) 1231