

[13P-18]

Development of the Nb/Cu Clad Cavities

T.Fujino, K.Ohara^{*)}, K.Saito, H.Inoue, N.Hitomi, T.Shishido, E.Kako, M.Ono, K.Abe,
T.Higuchi, S.Noguchi, Y.Yamazaki, K.Takaishi^{*)}, J.Shibuya^{*)} and T.Ota^{*)}

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801, Japan

*Toshiba Corporation
2-4, Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama, 230-0045, Japan

Abstract

For the future large application of superconducting RF cavities, one has to fabricate cheaply the cavities with high gradient. We propose to fabricate the seamless cavity out from Nb/Cu clad material as unnecessary electron beam welding process and low fabrication cost. We made a fabrication study of 1.3Ghz Nb/Cu clad single cell cavity out of clad tube by HIP (Hot Isostatic Pressing) bonding. Two single cell Nb/Cu clad seamless cavities were fabricated by the collaboration with KEK/Toshiba Corporation. In this paper, the fabrication and cold test result of cavity of seamless type obtained by hydrostatic bulging will be presented.

ニオブ・銅クラッド空洞の開発

1. はじめに

高性能と経済性の両面を兼ね備えた空洞として、厚肉銅の内面に薄肉のニオブを接合したクラッド管を液圧バルジ法で一体成型することにより、ニオブ材の減量と電子ビーム溶接を軽減した超伝導空洞の開発を行っている¹⁾。

今回 KEK と (株) 東芝の共同研究で、HIP 接合で三層構造の Cu/Nb/Cu クラッド管を作り、これをスエーピングと液圧バルジで成型して 2 個の空洞を製作した。そしてこれらの空洞の性能を測定した。またニオブ材に対する HIP の影響を調べた。更に空洞内部で発見され、表面欠陥と見なされるニオブの溶接痕の状態を CCD カメラで観察した。これらについて報告する。

2. HIP 処理によるニオブと銅の接合

液圧バルジ成型用のクラッド管は外側銅管 (外径 ϕ 138mm×肉厚 2mm×全長 500mm) と内側銅管 (外径 ϕ 132mm×肉厚 1mm×全長 500mm) の間に溶接ニオブ管 (外径 ϕ 133.5mm×肉厚 0.5mm×全長 460mm) を挟んだ Cu/Nb/Cu の三層構造である。また管の両端のニオブがない部分 (管の端から 20 mm 長さの部分) には銅のスペーサーが挿入されている。これによりニオブ管の全面が銅で覆われる。各部材を組立てた管の両端は電子ビーム溶接で

真空封じした。従って各部材間は真空状態である。この状態で、ニオブと銅の接合は 2000 気圧、800 °C、2 時間保持という条件で HIP 処理で行った。この HIP 条件は母材の引張り強さ以上の接合強度が得られる。クラッド管を三層構造にした理由は、HIP や空洞成型の中間熱処理の影響からニオブを保護するためである。また引抜き法等で長尺クラッド管を製作する時の熱処理や、引抜き工具との接触による影響からニオブを保護するために、そして超伝導線の線引きの如く周辺の銅の伸びに引きずられてニオブが伸び易くなるためにもこの構造は必要である。

クラッド管の HIP 処理と同時に、HIP によるニオブ材の影響を調べるために、裸のニオブ、ニオブの片側を銅で保護したもの、及びニオブ両面を銅で包んだ 3 種類の試料を処理した。ニオブの RRR と板の表皮から深部の方向へ断層硬度を測定して、HIP しない元のニオブ材と比較した。

RRR の測定結果は表 1 の通りで、周囲を銅で包んでも約 18%~25% の減少が見られた。裸の状態で HIP した RRR は半分以下に減少し、HIP によるニオブ材の劣化が示された。

硬度測定の結果は図 1 に示すように、HIP で高温・高圧のアルゴンガスにさらされたニオブ材は、表面から約 500 μ m に至る深部まで硬度が硬く変化している。一般的に

金属材料が硬くなるのは純金属に不純物を混入した場合であり、この場合は 炉中の不純物がニオブ金属に拡散したためと推定される。以上のことから HIP 処理に際してはニオブの周囲を銅で包むことが必要であることが判る。

表 1. RRR 測定結果

試料	(1)	(2)	平均
Nb(A) (HIP しない)	257	248	252.5
Cu/Nb(A)/Cu-HIP (全面を銅で保護して HIP)	193	203	198
Nb(B) (HIP しない)	173	170	171.5
Nb(B)-HIP (裸で HIP)	74	75	74.5
Nb(B)/Cu-HIP (片面を銅で保護して HIP)	129	136	132.5

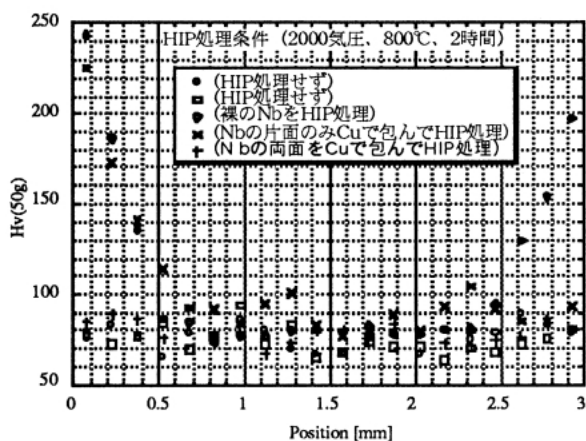


図 1 ニオブの板厚方向の断層硬度

3. クラッド管の空洞成型

スエーピングと液圧バルジでクラッド管を空洞に成型する工程は、クラッド管→スエーピング→熱処理→バルジ(50%成型)→熱処理→バルジ(100%成型)である。

スエーピングは外径φ 138mmのクラッド管の両端をビームパイプの径(外径φ 85mm)に絞る加工で、管の両端から数段階のダイスを押し込み、管の径を徐々に細くする。この加工はバルジに必要な長さを管の中央部に残して両端部分について行う。スエーピングによりビームパイプの内面はかなり粗くなった。これは HIP の高温により銅の結晶粒が粗大化したためである。また銅のスペーサーを入れた部分で、図 2 の如く周方向に凹凸で、軸方向に伸びたひだ状のシワが発生した。この原因は、薄い板を曲げたエンドレスでない複数のスペーサーを使用したことと、スペーサーの端面とニオブ管の端面の HIP が困難な構造であることから、完全な接合がされず剥離を生じたものと考えられる。このような状態は、この部分が液圧バルジの水圧シール面であることや、せっかく覆ったニオブを大気中に

さらすことになり望ましくない。

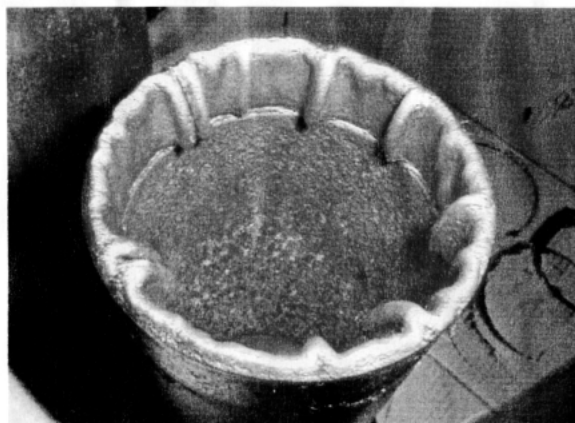


図 2 スエーピングで生じた管端部のシワ

今回のクラッド管のバルジ加工の前に、スエーピング長さやバルジ圧等のバルジ条件を調べるために、銅管で試験した。この結果適切なバルジ条件のもとでは、中間アニールを省いても成型できた。当初この条件をクラッド管に適用したが、中間アニールを省いた成型はバーストした。またアニールを施しても、8割位成型したところでバーストした。これらバーストの原因は、HIP 温度(800℃)が銅の伸びを減少させる熱処理温度に相当するためである。これを考慮してスエーピング長さを調整して、バルジ加工する部分を多少長くした。またスエーピング後と約半分バルジ加工した後にアニールをした。更にバルジ圧を銅管の時より低圧で成型した。この結果二つの空洞の成型に成功した。

これらのバルジ加工は高低二種類の水圧で行い、比較的 low 圧で成型した空洞を BC-1、high 圧で製成型した空洞を BC-2 と名付けた。BC-2 の方が、赤道部の真円度 0.1~0.2mm で、BC-1 より形状精度が良かった。成型した空洞の肉厚分布を測定した結果、赤道部で肉厚の減少があり、その度合いはバルジ圧の高い方が小さい結果を示した。これは、バルジ圧が小さい場合、上下の空洞型が閉じても未だ空洞の赤道部が型に密着せず、その後に管軸方向の押し込みがなく材料が拘束された状態で、バルジ圧のみにより赤道部の張り出しが行われるためと考えられる。

成型した空洞の内側の銅を硝酸で除去して現れたニオブの表面は、銅の肌荒れが転写されてオレンジピールの状態であった。ビームパイプのニオブの表面粗さは、最大高さ(Rmax)で 50~60 μm であった。また内側銅を除去した後の空洞の厚みは、一番薄い赤道部で 1.7mm で、最も厚いビームパイプで 3.5mm であった。バルジ成型の特徴として、赤道部での肉厚の減少があり、またスエーピング成型はビームパイプの肉厚増加を生じる。図 3 に BC-2 空洞の肉厚分布を示す。ビームパイプにステンレスのフランジを電子ビームで銅ロー付けして空洞を完成した。バル

ジ成型後の空洞の写真を図4に示す。

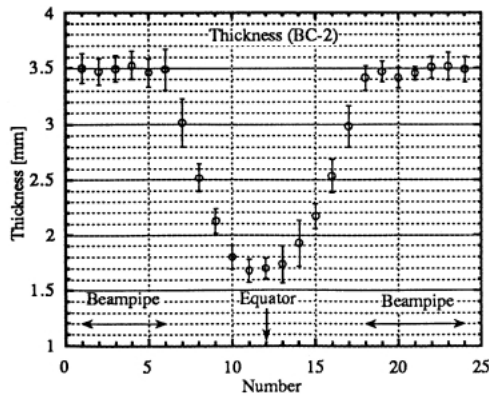


図3 厚み分 (BC-2 空洞)

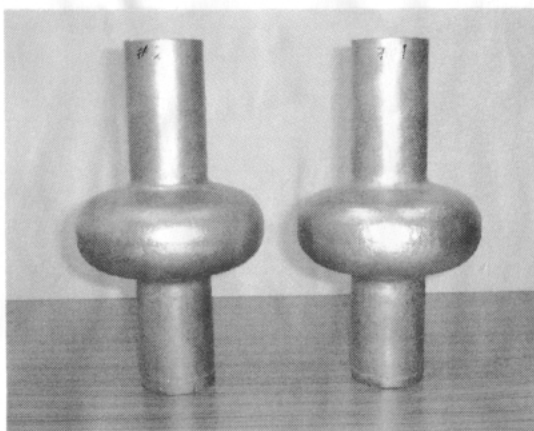


図4 液圧バルジ成型した空洞

4. バルジ空洞の性能

BC-1 空洞の最初の測定は電解研磨 $100\ \mu\text{m}$ と高圧水洗の表面処理を施して行ったが、最大加速電界が 1MV/m で、最大Q値は 2×10^7 、残留表面抵抗は $15\ \mu\Omega$ で、性能が悪かった。硝酸による内側銅除去の影響があるものと考え、ガス出しのための熱処理 $750^\circ\text{C} \times 3\text{hr}$ の後、電解研磨 $30\ \mu\text{m}$ と高圧水洗の表面処理を施して行った2回目の測定では、最大加速電界が 11.8MV/m 、最大Q値は 1.9×10^9 、残留表面抵抗は $147\text{n}\Omega$ で、前回に比べ性能が向上した。

BC-2 空洞はニオブ面を滑らかにするため、揺動パレルを行い、 $32.6\ \mu\text{m}$ を研磨した。その後、電解研磨 $3\ \mu\text{m}$ を施してから、 $750^\circ\text{C} \times 3\text{hr}$ の熱処理を行い、更に電解研磨 $30\ \mu\text{m}$ と高圧水洗を行って測定した。結果は最大加速電界は 7.7MV/m 、最大Q値は 3.4×10^9 、残留表面抵抗 $82\text{n}\Omega$ で、ニオブ表面を滑らかにすることで残留表面抵抗が小さくなった。しかし高電界は得られなかった。この原因として、溶接ニオブ管の溶接痕の一部が黒色に変質していることが観察されたことから(図6)、異物の付着が考えられる。図5に測定したQo-Eaccカーブを示す。

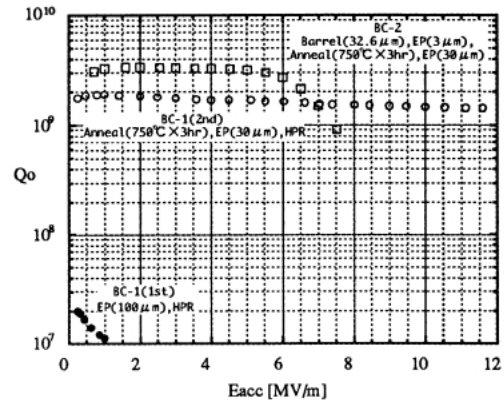


図5 Qo-Eacc カーブ

5. 空洞の内面観察

BC-2 空洞の性能が悪い原因を調べるために、その内部を注意深く目視で観察した。図6に示すようにニオブの溶接シームが一部黒く変色しているのが発見された。この部分をさらに詳しく調べるために CCD カメラを使って観察した。

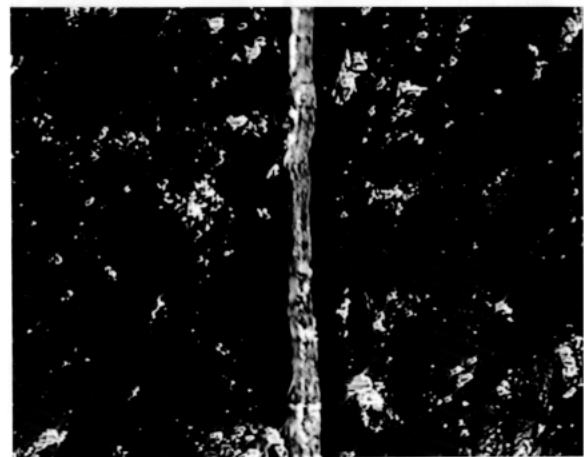


図6 BC-2 空洞の溶接シームによる表面欠陥

6. まとめ

クラッド管のバルジ成型に成功した。この空洞を測定した結果、硝酸による内側銅の除去の影響及びニオブの肌荒れの影響が空洞性能に関係することが判った。また BC-2 空洞の性能を制限していると思われるニオブの溶接シームによる表面欠陥が見つかった。今後、これらを改善して空洞の性能向上を計る。

参考文献

[1] T.Fujino et. al., "Promising Performance of the Nb/Cu Clad Seamless Superconducting RF Cavities", Proceedings of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sapporo, Japan, July 7-9, 1999, p.245-p.247.