

[F17p17]

R&D of the Nb/Cu Clad Seamless Superconducting RF Cavities

T. FUJINO, K. SAITO, H. INOUE, N. HITOMI, S. NOGUCHI, M. ONO, E. KAKO,
T. SHISHIDO, Y. YAMAZAKI, S. TAKEUCHI*, and V. PALMIERI**

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

*Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

**Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN-LNL)
Laboratori Nazionali di Legnaro
Via Romea 4-35020 Legnaro (Padova) Italy

Abstract

For a future large scale application of superconducting RF cavities like TESLA, one has to fabricate cheaply cavities with high gradients > 30 MV/m. We propose to fabricate seamless cavities out of Nb/Cu clad material in order to eliminate electron beam weldings and to reduce the niobium material cost. We did a feasibility study for 1.3 GHz Nb/Cu seamless clad cavities. Mechanical property of the Nb/Cu clad material was investigated, then three single cell Nb/Cu clad seamless cavities were fabricated by the collaboration with INFN-LNL in Italy. These cavities were cold tested. In this paper these results will be presented.

Nb/Cu クラッドシームレス超伝導加速空洞の開発

1. はじめに

粒子加速器の大型化と高性能化に備えるために、高電界発生と経済性の両面を兼ね備えた空洞の開発が必要である。そのため、高価なニオブ材の減量と煩雑な電子ビーム溶接を省いた空洞として、Nb/Cu クラッドシームレス空洞を提案する。

この空洞の利点は、1) ニオブのバルク性が保存されているので、これまでの KEK で開発されている表面処理技術が適用でき、高電界が保証される [1]。2) 電子ビーム溶接が省けるから、溶接欠陥の問題がさげられて性能向上が期待される。また製作コストが下がる。3) ニオブ材の消費量が抑えられて、材料コストが下がる。4) 銅が熱伝達を担うから、ニオブ表面欠陥でのサーマルインスタビリティの問題が抑えられ、さらなる性能の向上が期待できる。

空洞製作に先立ち、空洞の用材である Nb/Cu クラッドシームレス管を開発する必要がある。クラッドする方法として、1) 爆着、2) HIP、3) 熔融法の 3 つの方法が考えられる。製管の方法としては、これらの方法により、ニオブパイプと銅パイプを接着して厚肉の素管を作り、その後スエーミング、引き抜き、フローフォーミング等により定寸

管に引き伸ばす方法と、クラッド板をスピニングや深絞りして素管にして、同様な方法で定寸に伸ばす方法とが考えられる。

今回、Nb/Cu クラッド材の塑性加工性を把握するためにクラッド材の機械的性質を調べた。また空洞の問題点を早急に見極めるために、一枚板からスピニング法で空洞を一体成型する技術 [2] を確立している INFN-LNL (イタリア) との共同研究により、3 台の 1.3 GHz の単空洞を製作し、その内 2 台を KEK で測定した。これらについて報告する。

2. Nb/Cu クラッド材の機械的性質

INFN-LNL に送った Nb/Cu クラッド材と同材の試料に 260°C~950°C の間のいろいろな温度で 90 分間の熱処理を施し、引っ張り試験を行った。図 1 に結果を示す。横軸に熱処理温度を示し、縦軸は引っ張り強さと 0.2% 降伏応力及び伸びを示す。伸びは 300°C で最大になり、700°C で減少し始める。引っ張り強さと降伏応力は 250°C で既に低下している。700°C~850°C で最も低く、それぞれ 23kg/mm²、6 kg/mm² である。これらは高純度ニオブ材のもの (17kg/mm²、

4kg/mm²) よりも高い値である。測定した機械的性質は一般的な銅の機械的性質と殆ど同じである。このことは、ニオ

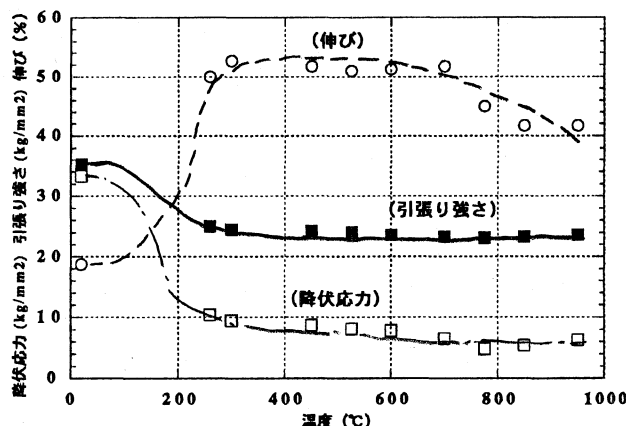


図1. Nb/Cuクラッド材の機械的性質

ブと銅の厚み比が1対4程度のクラッド材ならば、銅材と見なして良いことを意味する。銅に関する液圧バルジ成型は既に(株)東芝との共同研究の実験に於いて、技術的に確立している[3]。したがって、Nb/Cuクラッドパイプさえ製作できれば、すぐにもNb/Cuクラッドシームレス超伝導空洞が製作できると期待される。

3. スピニング Nb/Cu クラッド空洞とその測定結果

既に述べたようにシームレス空洞を作る方法としては、INFN-LNLで開発されたスピニング法が存在する。しかし、この方法では塑性加工度が大きいので、十分な空洞性能が確保できるかどうか疑問である。我々が液圧バルジ成型に注目するのは、一つには塑性加工度が小さいからである。しかし、高電界性はともかくとしても、Q値に関する情報はスピニング空洞でも十分に得られると期待される。我々は、早くNb/Cuクラッド超伝導空洞の可能性を検証するために、INFN-LNLとの共同研究により、スピニング法でクラッド空洞を製作した。その空洞を図2に示す。フランジはSUS材で、この部分はKEK工作センターで電子ビーム加熱により銅ロー付けした。スピニング空洞の素材は10mm厚(Nb=2, Cu=8mm)のNb/Cu爆着クラッド板(NbのRRR=100)をロール圧延で4mm(Nb=0.8, Cu=3.2)まで薄くした後、KEK工作センターに於いて300°C×120分の熱処理を施し、INFN-LNLに送った。

スピニング成型された空洞の肉厚測定をKEKで行った。測定は超音波厚み計を用い、予めクラッド材でも測定できることを確認した。3個の空洞の厚み分布はセル部で2mm~2.5mm、ビームパイプで2mm~3.5mmとバラついていた。成型は外見的には良好だが、内面のニオブに割れが発生している。その写真を図3に示す。割れの程度は個々の空洞で差はあるが、典型的な値は

250µmである。成型始め側の方が、終わり側より割れが小さく且つ少ない。INFN-LNLに送った残材を調べたが、

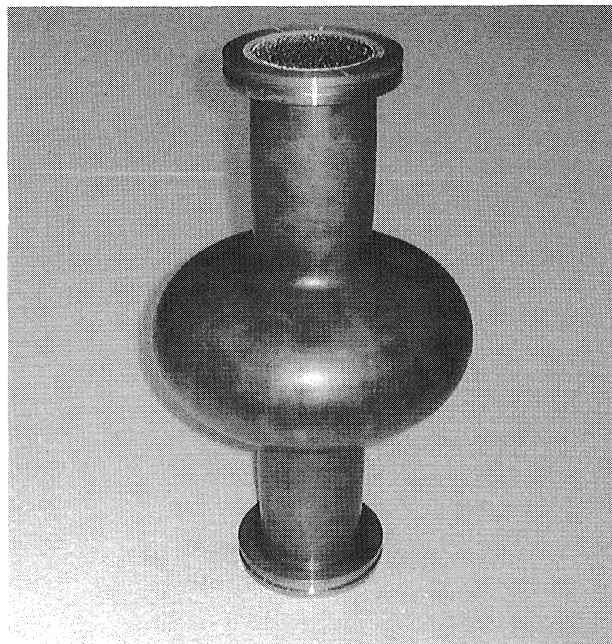


図2. スピニング Nb/Cu シームレスクラッド空洞

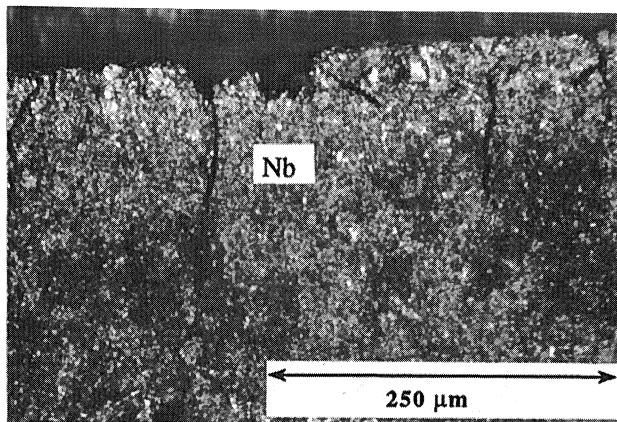


図3. スピニング Nb/Cu 空洞の Nb 表面の割れ

割れは認められない。また、別の試料で液体ヘリウムによる割れの影響を調べたが、その過程では割れは発生しなかった。この割れはスピニング加工中に発生したものと考えられる。化学研磨のエッチング作用や水素脆性によりこの割れが拡大したり、熱処理時には銅とニオブの膨張の違いにより割れが助長するのが観察された。

化学研磨 160µm+湯洗+高圧洗浄を施した空洞(KENZO-1, 1st)では、割れの進行により下地の銅が見える所があったが、あえて低温試験を施した。その結果を表1に示す。また、Q₀-E_{acc}カーブを図4(▲)に示す。1.8KでのQ値はニオブバルク空洞に比べて2桁低い。また、1.8Kでの最大加速電界はE_{acc} = 5.7 MV/mに制限された。これら

の原因の一つは化学研磨後、ニオブの割れが成長し下地の銅が露出していることによると思われる。

この空洞の二回目の測定(図4には示していないが)では、アニールによる割れの影響を見るために敢えて熱処理を施した。その後、化学研磨、湯洗、高圧洗浄を施した。表1に示すように性能が劣化した。

次に別の空洞(KENZO-3)を用いて、その空洞のニオブ表面の割れを機械研磨で除去するために平均研磨厚み73 μ mのパレル研磨[4]施した。この時点での目視では割れが見えなくなったが、その後の30 μ mの化学研磨で再び出現した。しかし、その状態はKENZO-1に比べて著しく改善され、下地の銅が見えるような所は全くなかった。機械研磨の後、化学研磨を施すと特にニオブが水素を吸蔵し易く、水素病[5]を起こす。それを防ぐためにこの空洞を730 $^{\circ}$ C、2時間アニールした。その後、高圧洗浄を90分行って測定した。最初の4.2K(図4、■)では、Q値はKENZO-1,1stと同様な値(1.7 x 10⁸)であった。一方、1.8Kの低い電界でのQ値は9 x 10⁸で、Eaccは10MV/mでクエンチにより制限された(図4、●)。クエンチを複数回繰り返した後、再度Qo-Eaccカーブを測定したが、変化は無かった(図4、○)。

縦測定で空洞をクールダウンする際、急冷すると空洞の場所による温度むらが生じる。実際、KENZO-1とKENZO-3の測定ではすべて急冷された。クラッド材では温度むらがあると熱起電力が発生する(熱電対効果)。そして、この起電力によって流れる電流が超伝導状態でトラップされ、空洞性能に悪影響を及ぼすことが考えられる。今回の測定でQ値が低い他の原因として、そのようなメカニズムが考えられる。そのことを確かめるために、KENZO-3の実験では、一度10Kまでウォームアップし、超伝導状態を破り、さらに約10分間保持して温度むらを極力無くした後、再び4.2Kに冷却してQ値の測定を行った。表1に示すように、Q値は1.7 x 10⁸から2.6x10⁸に向上(図4の■→□)した。これは、表面抵抗で500n Ω 改善されたことになる。

一方、図5の表面抵抗の温度依存性の測定結果から分かるように、KENZO-3で最初fast coolで4.2Kに冷却し、引き続き1.8Kまで冷却したときの残留表面抵抗は504n Ω であった。数値が偶然の一致かもしれないが、この残留表面抵抗の値は、先に述べたように均一冷却によって改善された表面抵抗の値(500n Ω)に殆ど等しい。したがって、KENZO-1, KENZO-3のクラッド空洞でQ値が著しく悪いのは、空洞の冷却時の熱起電力の問題として説明可能である。また、図5のデータフィッティングからスピニングクラッド空洞のニオブのバンドギャップ(m1= Δ/k_B)は13.4

とニオブバルク空洞での値(18.5)に比べて小さく、材質が良くないことを示している。これは、ニオブ表面での割れの影響かもしれない。

表1.スピニングNb/Cuクラッド空洞の試験結果一覧

	KENZO-1 1st	KENZO-1 2nd	KENZO-3 1st
処理	CP(160 μ m) 湯洗 高圧洗浄	Anneal(800 $^{\circ}$ C) CP(5 μ m) 湯洗 高圧洗浄	パレル(73 μ m) CP(30 μ m) Anneal(730 $^{\circ}$ C) 高圧洗浄
4.2 K			
Qo	1.6 x 10 ⁸	1.0 x 10 ⁸	(1.7 →2.6) x 10 ⁸
Eacc,max (MV/m)	?	?	?→11
1.8 K			
Qo	3.2 x 10 ⁸	1.3 x 10 ⁸	(5.3→?) x 10 ⁸
Eacc,max (MV/m)	5.7	2.0	10.0→?

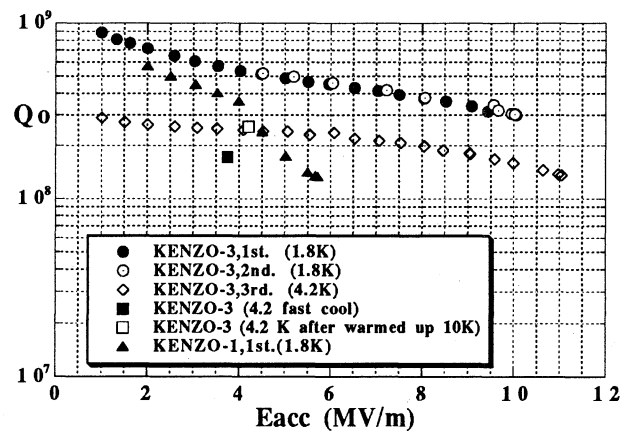


図4. スピニングNb/Cu空洞の性能測定結果

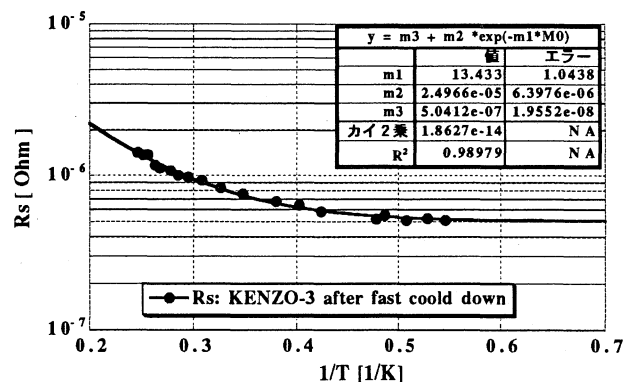


図5. スピニングNb/Cu空洞の表面抵抗の温度依存性

4. まとめ

割れの多いニオブ表面にも拘わらず、スピニングクラッド空洞で10MV/mが達成されたことは驚きである。また、Q値に関してクラッド材特有の熱起電力の問題があることが示唆され、そのメカニズムの詳細についての物理的解明に大きな興味がそそられる。ニオブの割れの問題をな無くす意味で、今後バルジ成型法によるクラッド空洞を早期に製作し、試験する必要がある。

謝辞

Nb/Cu クラッド板はロール圧延により、素板の10mmを4mm及び2.5mmに成型して、それぞれの用途に共された。この一連の作業は(株)東京電解の御好意によるもので、ここに深く感謝致します。KENZO-3の処理では日本原子力研究所の真空炉、高圧洗浄の設備を使用させて頂きました。草野譲一、大内伸夫 両氏に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] K. SAITO et. al., "Superiority of Electropolishing over Chemical Polishing on High Gradients", KEK Preprint 98-4, April 1998.
- [2] V. PALMIERI et. al., "COLD-FORMING OF 1.5 Ghz MULTICELL CAVITIES OF THE SEAMLESS TYPE OBTAINED BY SPINNING A CIRCULAR BLANK OR A TUBE", Proceedings of the 7th Workshop on RF Superconductivity, October 17-20, 1995, France, Volume 2, p. 595-p. 604.
- [3] T. FUJINO et., al., "HYDRO-BULGE FORMING OF L-BAND COPPER SINGLE-CELL CAVITIES", Proceedings of the 21th Lineat Accelerator Meeting in Japan, Tokyo, Japan September 30 - October 2, 1996, p.216-p.218.
- [4] T. HIGUCHI et., al., "FINISHED NIOBIUM CAVITY SURFACE WITH BARREL POLISHING", Proceedings of the 21th Lineat Accelerator Meeting in Japan, Tokyo, Japan, September 30 - October 2, 1996, p.228-p.230.
- [5] K. SAITO et., al., "Qo-DEGRADATION DUE TO HYDROGEN IN HIGH PURE NIOBIUM CAVITIES", Proceedings of the 18th Lineat Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Japan, July 21 - 23, 1993, p.229.