

超伝導空洞のコストダウンに向けた新規ニオブ材の検討と縦測定結果

STUDY ON NEW NIOBIUM MATERIAL FOR COST-REDUCTION OF SUPERCONDUCTING CAVITIES AND THE RESULTS OF VERTICAL TEST MEASUREMENT

荒木 隼人, 阿部 慶子, 道前 武, 井藤 隼人, 佐伯 学行, 梅森 健成, 渡邊 勇一, 山中 将
Hayato Araki*, Keiko Abe, Takeshi Dohmae, Hayato Ito, Takayuki Saeki, Kensei Umemori,
Yuichi Watanabe, Masashi Yamanaka
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The cost-reduction method of fabricating niobium superconducting cavities has much importance in spreading and applying superconducting accelerators. Cavity Fabrication Facility (CFF) in KEK is working on fabricating cavities with lower cost niobium material that can achieve higher performance. Last fiscal year, niobium materials from different companies were smelted by ULVAC, and cavity fabrication was done in CFF. One is fine-grain single-cell cavity (KEK-R12), and others are large-grain 3-cell cavities (KEK-R16, R16b, R17 and R17b). We will report the progress of surface treatments and the vertical test results of these 5 cavities.

1. はじめに

ニオブ製超伝導加速空洞の製造コスト削減は、International Linear Collider (ILC) の早期実現に向けた重要課題である。KEK では空洞製造技術開発施設 (CFF) において、空洞の高性能化のための製造技術開発や、従来よりも安価に入手できるニオブ材を使用して性能を損なわない空洞を製造する研究を行っている。性能向上のためには、熱的超伝導破壊 (quench) や電界電子放出 (field emission) の原因となる溶接欠陥を生じさせないことが重要である。また製造コストの削減として、従来の Fine grain 材の製造工程から一部を省略してより安価に入手できる Large Grain 材を使用しつつ、性能を損なわない方法を研究開発している。

ここでは、昨年度に CFF で製造された空洞のうち 5 台について、製造後の表面処理の進捗状況および性能測定の結果を報告する。

2. 1-CELL 空洞 KEK-R12

2.1 空洞形状および素材

R12 空洞は、fine-grain (FG) ニオブ材を使用した TESLA 形状の single-cell 空洞である。ニオブ材は株式会社アルバックの電子ビーム溶解炉にて溶解・インゴット化を行った。

超伝導空洞のニオブの純度の評価には、残留抵抗比 (Residual Resistance Ratio, RRR) が用いられる。これは、常温 (300 K) とニオブの超伝導転移温度直前 (9.3 K) の電気抵抗率の比

$$RRR = \frac{\rho(300 \text{ K})}{\rho(9.3 \text{ K})} \quad (1)$$

であり [1], ILC-TDR では 300 以上が望ましいとされて

いる [2]。R12 に使用したニオブ材の RRR は 399 であり、ILC の要求を満たす標準的な high-RRR 材である。

2.2 空洞製造

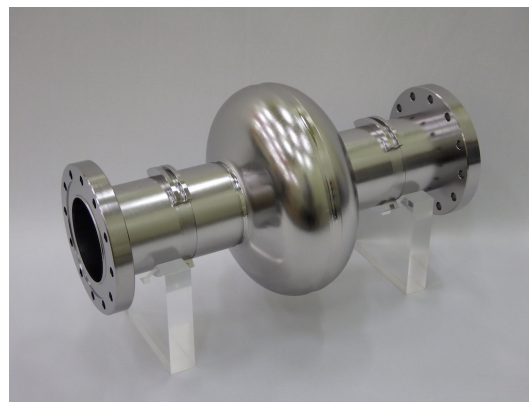


Figure 1: The picture of KEK-R12 cavity taken just after fabrication completed.

空洞製造は主に KEK の空洞製造技術開発施設 (Cavity Fabrication Facility, CFF) にて行った。完成した空洞の写真が Fig. 1 である。

空洞製造の最終段階である赤道部の溶接時に、電子ビーム溶接のビーム電流が揺らいだ影響で溶接欠陥が発生した。この欠陥は深さが最大 100 μm 以上になっており、空洞完成後に内面局所研磨装置および手作業で研磨し完全に取り除いた。内面検査装置で撮影した欠陥部の写真を Fig 2 に示す。

2.3 表面処理

この空洞に対しては、2 通りの表面処理を施して性能を測定した。

1 つ目の表面処理は、清浄な真空炉で熱処理を行うことで EP-2 および 120°C ベーキングを省略する方法であ

* arakih@post.kek.jp

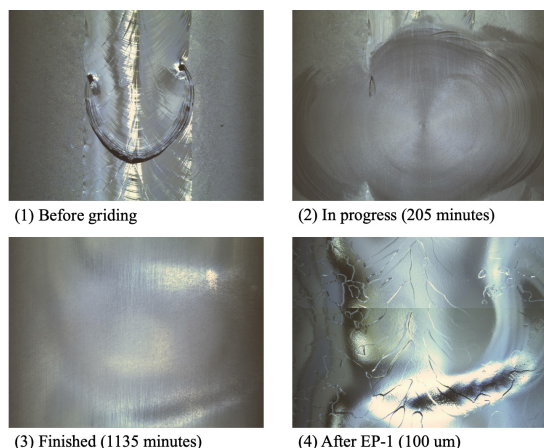


Figure 2: The pictures of welding defect in each steps of local grinding.

る。電解研磨の工程を省略することができれば量産時のコスト削減につながる。また 120°C ベーキングの省略は新しい処理方法である“furnace baking” [3] の研究の一環として行われ、組み立て後の 120°C 48 時間熱処理の代わりに組み立て前に真空炉で 200°C 3 時間熱処理することで、同等の性能が得られる可能性がある。これも工期短縮によるコスト削減の可能性がある処理方法である。

これに対して 2 つ目は、1 つ目の処理による測定結果と比較するための ILC 標準処理である。標準処理による測定は多くの空洞で行われており、これによって処理方法によらない空洞の性能を比較することができる。

実際に行った空洞の処理は次の通りである。まず ILC の標準的な空洞処理手順に従い、空洞受け入れ時の内面検査、Pre-EP ($5\ \mu\text{m}$), EP-1 ($100\ \mu\text{m}$), 真空炉アニールを行った。アニールは表面汚染の可能性を避けるため、オイルフリーのポンプを使用した清浄度の高い真空炉を使用した。なお、アニール温度は 900°C とした。次に、一旦真空炉から取り出して空洞の内面を洗浄し、再度真空炉に入れて 200°C 3 時間の furnace baking を行った。その後、空洞の内面を洗浄してから空洞組立と縦測定 (VT1, VT2) を行った。

次に、再度内面を検査してから EP-2 ($10\ \mu\text{m}$) を行い、組み立て後に 120°C 48 時間のベーキングを施した。これによって先の表面処理の影響がほとんどない ILC 標準処理の表面として扱える。この状態で、縦測定 (VT3) を行った。

2.4 磁束排斥実験

VT1 および VT2 の冷却に寄生して、異なる冷却速度による磁束排斥を観察した。これは超伝導空洞を冷却する際、転移温度付近で空間的な温度勾配を大きくすることで磁束トラップ量が減少するという効果 [4,5] の理解を目的としている。

磁束を測定するために 1 軸磁気センサー (フラックスゲート) を空洞外面に取り付け、3 点での 2 次元磁場分布を測定した。実際に空洞に磁気センサーを取り付けた

様子を Fig. 3 に、得られた磁場分布を Fig. 4 に示す。なお、温度勾配 ΔT は空洞赤道部とセル下端の温度差としている。赤道部には周方向の磁場を測定するセンサーを 1 個設置して測定したが、観測された変化量が他の成分より十分小さかったため、3 次元の磁場分布はこの 2 次元分布をビーム軸周りで回転させたものと考えられる。また、これは印加磁場 B_a の方向を逆向きにしても同様の結果が得られている。

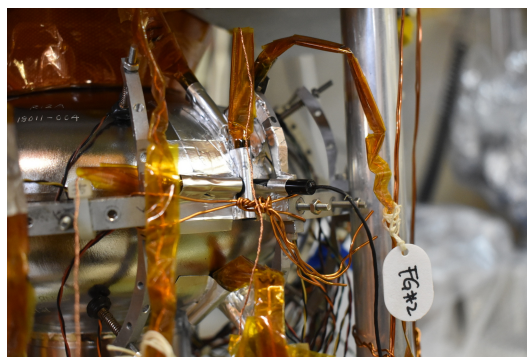


Figure 3: The fluxgate sensors attached on the outer surface of KEK-R12 cavity.

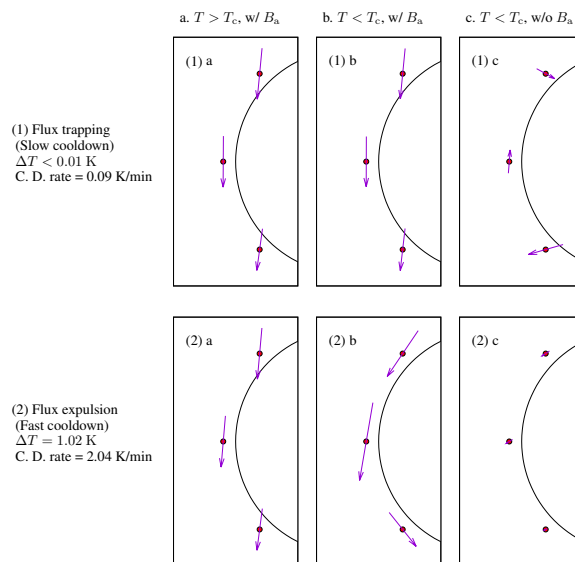


Figure 4: The results of magnetic field measurement during cool-down. The rows corresponds to each cool-down methods and the columns corresponds to each temperature and magnetic field states: the cavity was cooled down from “a” column to below the critical temperature “b” with applied magnetic field $B_a = 2.0\ \mu\text{T}$, and the field was turned off at “c”.

Figure 4 からわかるように、温度勾配のない遅い冷却ではニオブが磁束をほぼ全てトラップし、印加磁場を除去してもピン止め効果により磁束を維持した。一方で温

度勾配をつけた早い冷却を行うと、Meissner 効果によって磁束が排斥された。これは以前より 1 軸磁気センサー 1 点の測定から示唆されていた結果ではあるが、フラックスゲートによる平面 3 点の測定および可視化は KEK では初めて成功した。

2.5 縦測定の結果

3 回の測定で得られた 2.0 K での Q-E curve を Fig. 5 に示す。また、各測定での加速勾配 (E_{acc}) の最大値および $E_{acc} = 3.5$ MV/m での残留抵抗 (R_{res}) を Table 1 に示す。

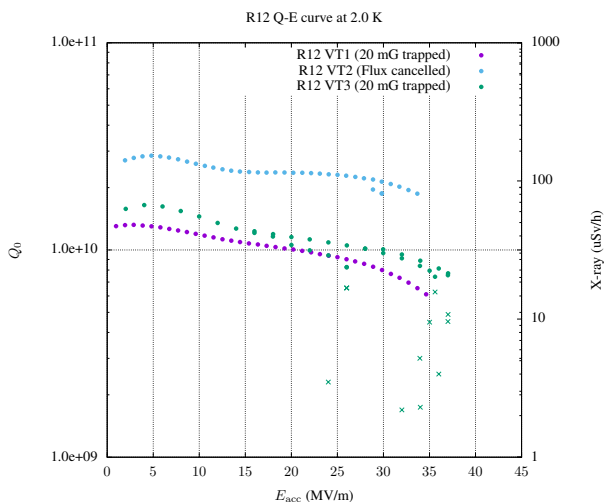


Figure 5: The result of KEK-R12 Q-E measurement on VT1-3.

VT1 と VT2 は、トラップ磁場に対する Q 値の感度を測定するために、磁束のトラップ量を変えて測定した。VT1 はビーム軸方向にソレノイドコイルで 2.0 μ T かけ、冷却速度を遅くして磁束をほぼ全てトラップさせた。VT2 は環境磁場をキャンセルするようコイルの電流値を調整し、また早い冷却を行うことで磁束排斥の効果を与えて磁束のトラップ量がほぼ 0 になるようにした。

これらの測定では最大加速勾配まで 1 度も quench せず、また field emission による X 線も観測されなかった。しかし 1 度 quench した後は最大加速勾配が低下し、VT1 では 26.4 MV/m, VT2 では 30.1 MV/m となり high power processing による回復も見られなかった。また、VT2 では quench の際に磁束をトラップした影響とみられる Q 値の低下が観測された。

VT3 は、VT1 と同様に 2.0 μ T トラップでの測定である。この測定では、20 MV/m 程度から quench を繰り返して process していき、Q 値回復と field emission の減少が見られた。

この後に続けて VT4 として、VT2 と同様に磁場キャンセルでの測定を行う予定だったが、VT3 終了後に空洞の真空リークが発生したため実験を中止した。

これらの測定での quench location はそれぞれ別の箇所であり、縦測定後の内面検査で周辺部を観察しても欠陥等は見られなかった。現在、quench および field emission の原因調査を進めている。

2.6 今後の測定計画

今回の縦測定では、VT4 が中止になったことから ILC 標準処理での磁束キャンセルという重要なデータが測定できなかった。この測定は空洞性能の比較において非常に重要であるので、これに再挑戦するのが当面の目標となる。また、性能を制限している要因が現在のところ明らかになっていないので、これを特定して空洞の製造工程および処理工程の改善点を洗い出しを行いたい。

3. 3-CELL 空洞 KEK-R16, R16B, R17, R17B

3.1 空洞形状および素材

KEK-R16, R16b, R17, R17b の 4 空洞は、large-grain (LG) ニオブ材を使用した TESLA 形状の 3-cell 空洞である。これらの諸元を Table 2 に示す。ただし、表中の RRR は KEK による測定値、タンタル含有量は ULVAC 社による測定値である。LG 材は FG 材の製造工程から鍛造・圧延の工程を省略したものであり、製造コストの低減が期待できる素材である。また、これらの空洞に用いられているニオブ材料の最終溶解処理は全て ULVAC 社で行っているが、R16, R16b のものが Silmet 社由来の材料であるのに対して、R17, R17b のもの (high-Ta 材) は CBMM 社に由来する材料である。

ニオブ鉱石には多くのタンタルも含まれるため、精錬後のニオブ材料にもタンタルを含むが、Silmet 社由来のニオブ材はタンタル除去の追加処理を行っているため含有量が少なくなっている。CBMM 社由来のニオブ材は Silmet 社由来のものと比較して多くのタンタルを含むが、商用で需要の多い品質であるため価格が安定しているという利点がある。

3.2 空洞製造



Figure 6: The photograph of KEK-R16, R16b, R17 and R17b (from left to right).

空洞製造はこちらも CFF で行った。完成した写真を

Table 1: Summary of KEK-R12 Vertical Tests

	Max. E_{acc} (MV/m)	R_{res} (n Ω)	Surface treatment	Magnetic flux
VT1	35.4	14.3 \pm 0.2	200°C 3 h furnace baking	2.0 μ T trapped
VT2	34.3	2.3 \pm 0.1	200°C 3 h furnace baking	Cancelled
VT3	37.1	10.9 \pm 0.3	ILC-TDR (EP-2 + 120°C 48 h baking)	2.0 μ T trapped

Table 2: Material Properties of 3-Cell Cavities

	Material processor	Cavity fabricator	RRR	Ta (ppm)
KEK-R16, R16b	ULVAC (Silmet)	KEK-CFF	500	20
KEK-R17, R17b	ULVAC (CBMM)	KEK-CFF	363	1390

Fig. 6 に示す。

KEK-R17 の製造中に、ハーフセル赤道部に異物が噛み込む事故が発生した。これはダンベル溶接後、アイリス部の外側に強め輪をはめ込むため治具を取り付けた際に、治具とダンベルの間に挟まったトメネジに気づかず圧縮してしまったことが原因である。この損傷は、損傷部を大きめに削り取ってからニオブチップを溶接することで補修した。噛み込んだ状態とニオブチップを埋め込み溶接する直前の状態を Fig. 7 に示す。なお、これ以外の 3 空洞の製造時に大きなトラブルはなかった。



Figure 7: The dumbbell that a set screw bit on the equator. The left picture shows the set screw attached on the equator, and the right picture shows the small niobium tip embedded in the repair point before welding.

3.3 表面処理

これら 4 台の空洞の 1 回目の測定は、材料評価を目的として全て ILC の TDR に準じた処理を行っている。すなわち、Pre-EP (5 μ m), EP-1 (100 μ m), 800°C 3 h アニール、欠陥局所研磨、EP-2 (20 μ m), 120°C 48 h ベークである。

R16, R16b については 7 月現在アニール処理が終了した段階であり、EP-2 から測定までは 9 月以降に行われる予定になっている。

R17, R17b は 1 回目の縦測定 (VT1) まで終了した。両空洞ともに複数箇所の局所研磨を行ったため、EP-2 の研磨量を 30 μ m に増やしている。

3.4 縦測定の結果

標準処理を行った R17, R17b に対して Flux cancelled での縦測定をそれぞれ行った。その 2.0 K π -mode での Q-E curve を Fig. 8 に示す。また、passband 測定で得られた各セルの最大加速勾配および $E_{acc} = 3.5$ MV/m での残留抵抗の値を Table 3 に示す。

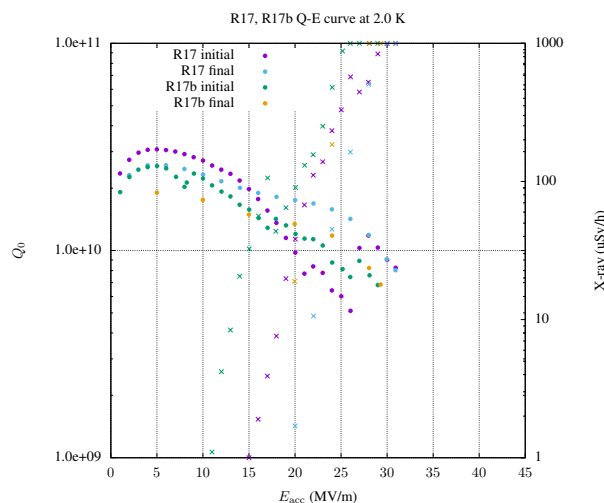


Figure 8: The result of the 3-cell cavities, KEK-R17 and R17b, π -mode Q-E measurement on VT1.

いずれの空洞も、15 MV/m 付近から加速勾配を上げるに従って field emission が激しくなり、またそれによると見られる Q 値の低下が観測された。空洞全体での性能指標となる π -mode での最大加速勾配はいずれも 30 MV/m 前後にとどまったが、このときの発熱箇所は赤道部ではなく、縦測定後の内面検査でも周辺に欠陥は見

Table 3: Summary of KEK-R17 and R17b First Vertical Test

	KEK-R17	KEK-R17b
Max. E_{acc} (MV/m)		
π -mode	30.9	29.0
Cell 1 & 3	36.0	30.0
Cell 2	32.6	33.1
R_{res} (n Ω)	6.5 ± 0.8	4.9 ± 0.9

つからなかった。また、内面検査で発熱箇所に近い部分のアイリス溶接部に凹凸が見つかったことから、これが field emission の原因として疑われる。次回の測定では、このアイリス部の凹凸を局所研磨によって取り除いて影響を確認する予定である。

20 MV/m 以上では process による X 線量の減少と Q 値回復も見られたが、最初の測定 (initial) と passband 測定後の最後の測定 (final) では 15 MV/m 以下の領域で Q 値が減少している。これは実験中の quench によって磁束がトラップされてしまった影響と考えられる。ただし、両者とも initial の測定では 5 MV/m で $Q_0 > 2.5 \times 10^{10}$ の高い Q 値を達成している。

3.5 今後の測定計画

まず KEK-R16 および R16b については、標準処理による最初の縦測定を行う予定である。これらは R17 および R17b で見つかったアイリス溶接部の凹凸と同様のものが既に見つかっていることから、最初の測定前に局所研磨を行ってこれらを取り除き、材料評価の測定に資する結果を出せるよう準備を進めていく。KEK-R17 および R17b については、アイリス溶接部の研磨の後に再測定を行う予定である。

標準処理による測定で材料評価として十分な結果が得られた場合、900°C でのアニール処理を行い測定することも計画している。これは、800°C アニールよりも 900°C アニールの方が磁束排斥が強く働き、残留抵抗の減少による Q 値向上が観測できることを期待している。

4. まとめと展望

昨年度製造された single-cell 空洞 1 台と 3-cell 空洞 4 台について表面処理および性能測定を進めている。KEK-R12 における 200°C 3 h furnace baking 処理と ILC 標準処理の比較、および通常材料とタンタル含有量の多い CBMM 材との比較を行うにはまだ十分な実験が行えていないため、今後はこれらの目的を達成するために空洞処理および縦測定を継続し、その後は更なる高性能化のための実験を行う。

謝辞

この研究は先端加速器共通基盤技術研究開発費補助金の助成を受けて行われました。

参考文献

- [1] W. Singer, A. Ermakov, X. Singer, “RRR-Measurement Techniques on High Purity Niobium”, TTC-Report 2010-02.
- [2] C. Adolphsen *et al.*, “The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 3.II: Accelerator Baseline Design,” United States, 2013; <https://doi.org/10.2172/1347940>
- [3] H. Ito, H. Araki, K. Takahashi, K. Umemori, “Influence of Furnace Baking on Q-E Behavior of Superconducting Accelerating Cavities,” Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2021; <https://doi.org/10.1093/ptep/ptab056>
- [4] A. Romanenko *et al.*, “Ultra-high quality factors in superconducting niobium cavities in ambient magnetic fields up to 190 mG,” Applied Physics Letters **105**, 234103, 2014; <https://doi.org/10.1063/1.4903808>
- [5] T. Kubo, “Flux trapping in superconducting accelerating cavities during cooling down with a spatial temperature gradient,” Progress of Theoretical and Experimental Physics **2016**, 053G01; <https://doi.org/10.1093/ptep/ptw049>