

新規ニオブ材を使用した超伝導空洞の性能測定

PERFORMANCE MEASUREMENT OF SUPERCONDUCTING CAVITIES USING NEW NIOBIUM MATERIAL

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, Saeki Takayuki, Kensei Umemori,
Yuichi Watanabe, Masashi Yamanaka
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The construction cost a superconducting accelerator is greatly affected by the material cost of niobium, which is used to make SRF cavities. In FY2020, KEK manufactured four cavities using two types of material: High-RRR Low-Ta material and High-RRR High-Ta material. The former is a tantalum-removed material and the latter is lower cost material without tantalum removal, both of which are remelted to high purity and have an RRR of over 300. The cavities were manufactured using large grain ingots, which omits forging and rolling process. The performance of these cavities was measured from FY2021, and all cavities achieved ILC-spec by standard surface treatment. We will report the fabrication process and the result of performance measurement of these four cavities.

1. はじめに

超伝導加速器の建設において、その心臓部である加速空洞の製造コストは建設費全体に占める割合が大きい。そのため超伝導空洞の製造コストの削減と高性能化のための技術は、国際リニアコライダー (ILC) のような大型超伝導加速器計画や、産業・医療分野での超伝導加速器応用に貢献できる重要な技術である。

KEK では、空洞製造技術開発施設 (CFF) においてコスト削減と高性能化を両立する空洞製造技術の研究を行っている。2020 年度には 2 種類の Large Grain 材料を用いて 2 台ずつ、計 4 台の 3-cell 空洞を製造し、2021 年度からその性能測定を行っている [1]。これらの従来よりも安価な材料が、標準的な表面処理でも従来材料と同等以上の性能を持っていればコスト削減の効果があるといえる。また、低損失高勾配のような高性能化が期待できる表面処理をこれらの材料に適用することにより、更なる高性能化が実現できる可能性がある。

現在までに、ILC-spec ($Q_0 > 8.0 \times 10^9$ at $E_{acc} = 35$ MV/m) を目標として標準的な表面処理による性能測定が終了したので、その結果を報告する。

2. ニオブ材料の比較

2.1 Large Grain 材料

一般的に超伝導加速空洞に用いられるニオブ材料は Fine Grain (FG) と呼ばれ、溶解処理の後に鍛造・圧延を行って結晶粒を $50 \mu\text{m}$ 程度以下まで小さくし、材料を均質化する。これに対し、Large Grain (LG) 材料では鍛造・圧延の工程を省略することで、材料の製造コストを低減している。LG 材の結晶粒は数センチメートル以上であり、均質性では FG 材に劣るが [2] 超伝導性能では遜色ないものである。

今回 4 台の空洞に使用した 2 種類の材料は、両方とも LG 材料である。空洞製造で実際に使用した材料の、プ

レス成形前のディスクの状態の写真を Fig. 1 に示す。

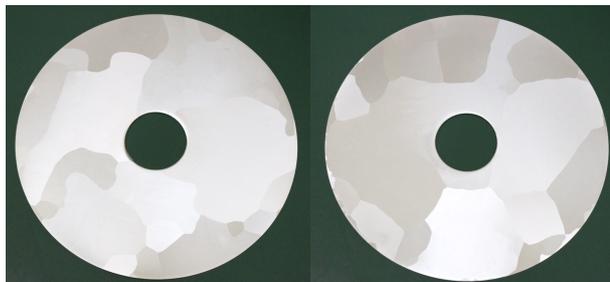


Figure 1: Large grain disks before press forming. Left one is High-RRR Low-Ta material and the other one is High-RRR High-Ta material.

2.2 RRR とタンタル含有量

ILC-TDR [3] には、空洞として使用できるニオブ材料の特性値が規定されている。この中で、残留抵抗比 (RRR) とタンタル含有量について TDR の規定値と今回使用した材料の測定値を Table 1 に示す。なお、表中の RRR は KEK での測定値であり、タンタル含有量は ULVAC による測定値である。

今回使用した 2 種類の材料は、その特性値から名前をそれぞれ “High-RRR Low-Ta” および “High-RRR High-Ta” としている。前者は従来から超伝導空洞に使われている材料と同様に、Silmet 社がタンタル除去の処理を行った RRR が 500 と非常に高い材料である。後者は CBMM 社由来の材料で、タンタルが規定値より多く含まれるが、商用で需要の多い品質であるため比較的安価であるという利点がある。

CFF では以前にも CBMM 社の LG 材で空洞を製造したが [4]、これまでの材料はいずれも RRR が 300 未満であった。今回の High-RRR High-Ta 材は、CBMM 社由来の材料を ULVAC 社で再溶解することにより、低価格を維持しながら RRR が 300 以上という条件を満たした材料である。

* arakih@post.kek.jp

Table 1: Material Properties of Four 3-cell Cavities

	RRR	Ta (ppm)	Material Processor	Cavity
ILC-TDR	≥ 300	≤ 500	-	-
High-RRR Low-Ta	500	20	ULVAC (Silmet)	KEK-R16, R16b
High-RRR High-Ta	363	1390	ULVAC (CBMM)	KEK-R17, R17b

3. 空洞の製造と性能測定

3.1 空洞製造

KEK-R16, R16b, R17, R17b の 4 台の空洞は、2020 年度にいずれも CFF で製造された。空洞形状は全て同じ TESLA 形状であり、これら 4 空洞が CFF で初めて製造した TESLA 形状 3-cell 空洞である。

KEK-R17 の製造の際、溶接前の赤道部分に異物が噛み込む事故が発生した。これによる損傷部は削り取り、ニオブチップを埋め込んで溶接することで補修した。これ以外の 3 空洞ではトラブルなく製造が終了した。完成した 4 台の空洞の写真を Fig. 2 に示す。



Figure 2: 3-cell cavities; KEK-R16, R16b, R17 and R17b (from left to right).

3.2 表面処理

4 台の空洞には板材の評価のため、KEK で標準的に行われている ILC-TDR に準拠した処理を施した。すなわち、Pre-EP (5 μm), EP-1 (100 μm), Annealing (800°C 3 h), Local grinding, EP-2 (20 μm), Baking (120°C 48 h) である。ただし、再測定の際や直前に行った局所研磨の条件によっては EP-2 の研磨量を 5-30 μm の範囲で変更している。

また、先行して測定した KEK-R17, R17b の測定で激しいフィールドエミッションが見られたことから、KEK-R16, R16b は最初の測定より前にアイリス部を中心に局所研磨を行った。

3.3 性能測定

4 台の空洞の性能測定 (VT) の結果を Fig. 3 に示す。ただし、図中の結果は全て後述する性能劣化 (degradation) が起こる前の initial π -mode の測定結果であ

る。この結果より、4 台の空洞の最大加速勾配は 39.5-43.1 MV/m となり、大きなフィールドエミッションもなく全ての空洞が ILC-spec を達成した。

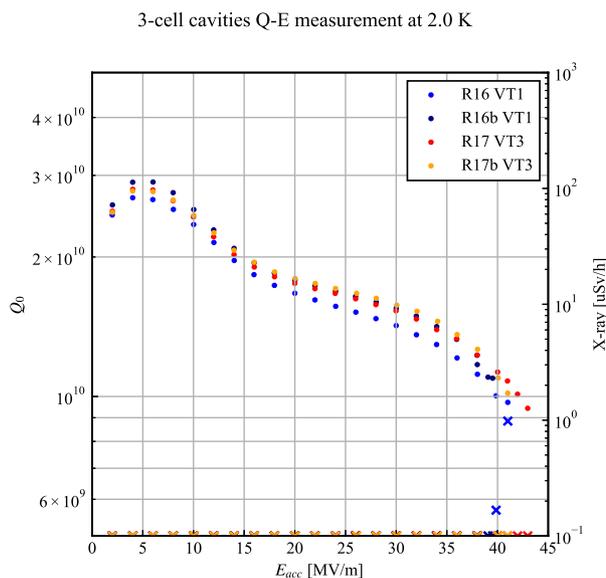


Figure 3: Q-E behavior of four 3-cell cavities. All cavities achieved ILC-spec ($Q_0 > 8.0 \times 10^9$ at $E_{\text{acc}} = 35$ MV/m).

この測定結果を詳細に比較すると、KEK-R16 のみ他 3 空洞と比較して Q_0 の値が低いが、これは R16 VT1 の際に環境磁場の更なる低減を目指して、磁場キャンセル用のソレノイドコイルの形状と設置位置を変更したことが影響したと考えられる。他 3 空洞では 5-10 mG 程度に抑えられていた環境磁場が、R16 VT1 の際には空洞外面に取り付けた磁場センサーの値が最大で 25 mG 程度まで増加しており、Q 値の低下はこの磁場トラップによる残留抵抗の増加で説明できる大きさである。

性能測定の結論として、今回使用した High-RRR Low-Ta 材と High-RRR High-Ta 材の 2 種類の材料は共に超伝導空洞の材料として十分な性能を有しているということが出来る。またこの 2 種類の材料の比較では、RRR やタンタル含有量の違いによる最大加速勾配や Q 値といった空洞性能に明確な差は見られなかった。

3.4 今後の課題

今回の製造及び性能測定にあたって、フィールドエミッションと性能劣化の 2 点が問題となった。これらの問題が影響した結果の例として、KEK-R17 の VT1 と VT3 の結果を Fig. 4 に示す。

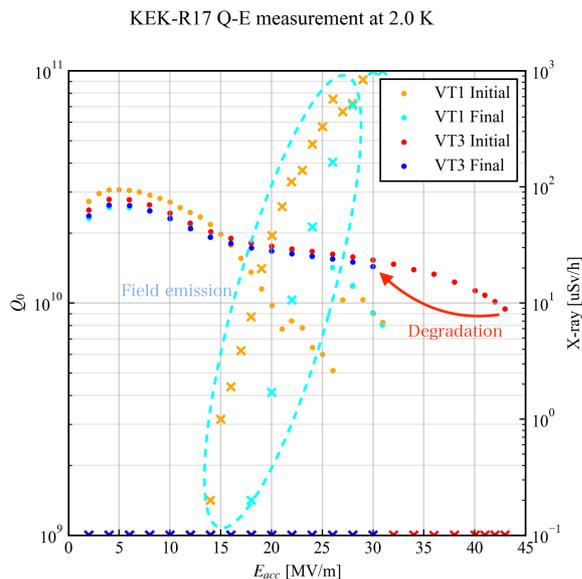


Figure 4: Field emission and degradation observed in KEK-R17. Heavy field emission limited maximum E_{acc} in VT1, but it was suppressed in VT3. During VT3, degradation occurred and maximum E_{acc} was decreased from 43.1 MV/m (initial) to 30.0 MV/m (final).

フィールドエミッションは KEK-R17, R17b の 2 空洞それぞれの VT1 と VT2 で発生し、最大加速勾配を制限する要因となった。この対策としてアイリス部を中心に局所研磨したほか、高圧超純水洗浄 (HPR) を通常よりも長く 10 時間以上行い、最終的にはフィールドエミッションを大幅に低減することができた、今後、製造段階でアイリス部へ傷や凹凸がつくことを防ぐよう手順や治具を見直すほか、HPR やクリーンルーム作業での清浄化の効果を評価したいと考えている。

性能劣化 (degradation) は、クエンチ後に最大加速勾配が大きく低下する現象で、程度の差はあるが今回の 4 空洞全てで見られた。劣化前後の最大加速勾配を Table 2 に示す。原因は明らかになっていないが、クエンチ場所で局所的に環境磁場をトラップしてしまうことが考えられる。もっとも変化が大きかったのが R17 VT3 で、43.1 MV/m が 30.0 MV/m まで低下し、空洞外面の磁気センサーで約 60 mG の変化が観測された。ただし、この現象によって低下した最大加速勾配は、空洞全体を一度転移温度以上まで昇温してトラップした磁場を解放し、再度冷却することで回復することが確認されている。この性能劣化は他の空洞でも見られており、観察および対策を行っていく。

4. まとめと展望

2020 年度に製造された新しい LG ニオブ材料を使用した 4 台の 3-cell 空洞について、全ての空洞が標準的な表面処理で目標である ILC-spec を満たす性能があることを確認した。また、今回使用した High-RRR Low-Ta と High-RRR High-Ta の 2 種類の材料では、超伝導空洞

Table 2: Quench Field Before and After Degradation (unit: MV/m)

	Before	After	Delta
R16 VT1	41.4	37.2	-4.2
R16b VT1	39.7	39.5	-0.3
R16b VT2	41.7	35.4	-6.3
R16b VT3	40.6	34.7	-5.9
R17 VT3	43.1	30.0	-13.1
R17b VT3	41.9	36.6	-5.2

としての性能に大きな差がないということがわかった。

この結果をもとに High-RRR High-Ta 材を使用した 9-cell 空洞が製造され、性能測定を行っている。また、これらの材料に furnace baking や 2-step baking といった高性能化が期待できる処理を適用することで、その効果を評価する予定である。

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] H. Araki *et al.*, “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”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, QST-Takasaki Online, Japan, Aug. 9-12, 2021, pp. 519-523; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/TUP0/TUP037.pdf
- [2] M. Yamanaka *et al.*, “ラージグレインとファイングレインニオブの液体ヘリウム温度における引張強度”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, QST-Takasaki Online, Japan, Aug. 9-12, 2021, pp. 325-329; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/MOP0/MOP034.pdf
- [3] C. Adolphsen *et al.*, “The International Linear Collider Technical Design Report — Volume 3.I: Accelerator R&D”, arXiv:1306.6328 [physics.acc-ph], 2013.
- [4] T. Dohmae *et al.*, “Investigation on 1, 3 and 9-cell SRF elliptical cavities made of large grain niobium”, Proceedings of 19th International Conference on RF Superconductivity, Dresden, Germany, 2019; doi:10.18429/JACoW-SRF2019-FRCAA6