

Large Grain ニオブを用いた 9 セル超伝導加速空洞の製造と評価

FABRICATION AND EVALUATION OF SRF 9-CELL CAVITY MADE OF LARGE GRAIN NIOBIUM

道前 武[#], 梅森 健成, 渡辺 勇一, 井上 均, 山中 将
Takeshi Dohmae[#], Kensei Umemori, Yuichi Watanabe, Hitoshi Inoue, Masashi Yamanaka
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The superconducting radio frequency (SRF) 9-cell cavity made of Large Grain (LG) niobium (Nb) was fabricated at Cavity Fabrication Facility (CFF) in KEK. It is expected that high quality factor (Q_0) can be obtained using LG Nb, which reduces the heat load at cavity surface especially in continuous wave operation. Specific manufacturing technique is necessary for the cavity made of LG Nb due to strong anisotropy of deformation. The accomplished cavity is then vertical tested in KEK, and resulted accelerating gradient of 23 MV/m and high Q_0 value of 3.9×10^{10} .

1. はじめに

超伝導加速空洞の開発に於いて、空洞表面の発熱を抑えることは重要である。特に連続波を扱う空洞では、空洞表面での発熱が冷凍機システムに与える負荷が大きいため、これを抑えることが冷凍機システムの規模及び運転コストの削減につながる。空洞表面での発熱を抑える手段の一つとして、空洞の素材に Large Grain (LG) 材と呼ばれる大きな結晶を持ったニオブ材を用いる方法がある。LG 材を用いることによって高い Q_0 値が得られ、結果として空洞表面での発熱を抑えることが出来る [1, 2]。

超伝導加速空洞に用いる高純度ニオブのインゴットは単結晶ではないが、中心部は 150mm 角程度の巨大結晶が並んでいる。また周辺には 10~50mm 程度の結晶が見られる。この様なインゴットをスライスした材料を LG 材と呼んでいる。これに対し、従来の鍛造・圧延をしたものは Fine Grain (FG) 材と呼んで区別している。Figure 1 に LG 材の板材を示す。



Figure1: Sliced LG Nb. The circular diameter is about 290mm.

KEK では空洞製造技術開発施設 (CFF) を 2011 年に整備し、空洞の内製が可能になった[3]。2013 年には LG 材を用いた 1 セルの超伝導加速空洞を試作し、最大加速勾配 45MV/m 以上、最大 Q_0 値は 10×10^{10} と非常に高い値を得た[4]。

[#] dohmae@post.kek.jp

本研究の目的は LG 材を用いて 9 セルの超伝導加速空洞を製造し、高い Q_0 値を得ることである。また、LG 材の加工特性を把握し、適切な 9 セルの空洞製造技術を開発する。ここでは空洞製造の詳細、及び 2 回行った縦測定結果について述べる。

2. 空洞製造

今回製造した空洞の形状には周波数 1.3GHz に対応した Tesla-like 型を採用した。ビームパイプフランジでのエネルギーロスを少なくするため、ビームパイプ長を input port 側で 8mm、pickup port 側で 19mm 従来より長くした。また、構造を単純化するため HOM coupler はつけていない。材料には東京電解株式会社から購入した残留抵抗値比が 500 程度のニオブ板を使用した。

空洞の製造は板材のプレスや溶接などの工程から成り、今回の空洞製造は板材をプレスする工程から CFF にて行った。また溶接には電子ビーム溶接を用いた。製造工程は以下の通りである。

1. ハーフセル形状のプレス成形
2. ハーフセル端部 (赤道部、アイリス部) の切削加工
3. ハーフセルの化学研磨
4. アイリス部の溶接
5. 強め輪をアイリス部に挿入、溶接して固定
6. セル内部の機械研磨
7. エンドグループの製造
8. ダンベルの化学研磨
9. 赤道部の溶接
10. リークチェック

まず初めにニオブ板をプレスした後、不均一になっているハーフセルの両端を縦型旋盤を用いて切削する。この際、赤道部分に関しては組み立てを簡単にするため、はめ合い形状に成形する。

その後、二つのハーフセルのアイリス部 (空洞のくびれ部分) どうしを溶接し接続する。この溶接された二つのハーフセルはその形状からダンベルと呼ばれる。溶接は、仮溶接、シーム溶接、本溶接の順で行う。仮溶接、シーム溶接ではビームが裏側には到達しない程度のビーム

電流値で行う。仮溶接では1カ所につき15度の範囲で90度毎に照射する。これに対しシーム溶接は全周にわたり照射する。本溶接は裏側にも到達するビーム電流値で行う。それぞれのビーム電流値はLG材の1セル空洞を製造した際に最適化している[4]。

空洞内部の傷は電界放出などを引き起こす原因となり、空洞性能の低下の要因となる。このため、セル内部の目視できる傷は回転ヤスリを用いて研磨した。この際、結晶粒界の様なLG材特有の表面を出来るだけ残すため、傷の箇所だけ部分的に研磨を行った。仕上げは#800~#1000のヤスリを用いて行っており、この研磨跡は空洞が完成した後に電解研磨で十分取り除くことが出来る。

内面研磨を行ったダンベルは赤道部を溶接し、フランジやビームパイプ、端板などのエンドグループと溶接した後、リークチェックを経て完成となる。Figure 2 に完成した空洞を示す。



Figure 2: Accomplished LG 9-cell cavity.

2.1 セル形状のひずみ

LG材は結晶粒が大きく、FG材に比べ異方性が強いいためプレス成型後のひずみが大きい[5]。3次元測定機を用いて測定した、ハーフセルの赤道内側の真円度をFigure 3示す。LG材を用いたセルの真円度はFG材を用いたセルの真円度の平均値より1mm以上悪い。

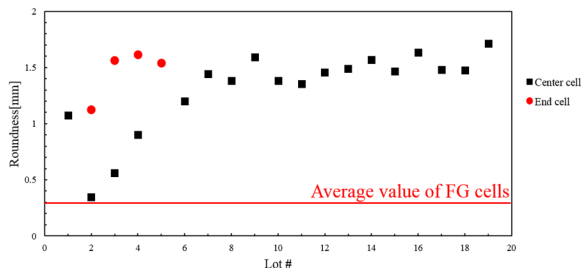


Figure 3: Roundness at equator of LG cell and average value of FG cells (red line).

2.2 赤道部の溶接

上述の様に、LG材を用いたセルはひずみが大きいいため、赤道部のはめ合いを嵌合するためFigure 4(left)に示す赤道部を強制的に真円形状に変形させる専用の治具を用いる。この治具を用いて赤道部をはめ込んだ後、治具上の8カ所に開けられた穴を通して点溶接 (spot welding) を行う。点溶接もシーム溶接や仮溶接同様に表面のみを溶接する。Figure 4(right)に点溶接後の赤道部を示す。

点溶接で赤道部を仮止めした後、治具を取り外し、アイリス部の溶接と同様に仮溶接、シーム溶接、本溶接を行う。これはFG材の場合と比べ余分な工程である。

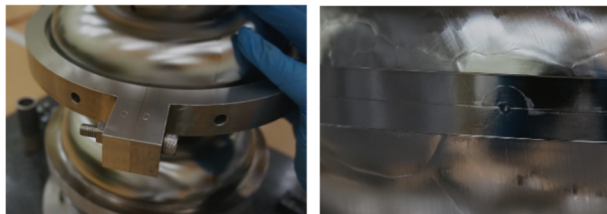


Figure 4: Equator with supporting jig(left) and equator after spot welding(right).

2.3 赤道部溶接時のトラブル

5セル(中央のセル)の赤道部のシーム溶接中に激しいスパッタが発生し、溶接ビード上に最大径5mm程の穴が空いた。このため、補修用ピースを作成し、以下の手順で補修を行った。

1. センタードリルを用いて穴の形状をすり鉢状に整形した。整形の際にはニオブ粉が空洞内に入り込むのを防ぐため、空洞内に圧縮空気を送り込み、穴から空気が吹き出す状態にして行った。
2. 穴および穴周辺の化学研磨を行った。研磨液の中に空洞を浸漬し、穴から研磨液が空洞内に入りこむようにした。その後、ビームパイプ側からパイプを使って純水を流し空洞内部のすすぎを行った。
3. 同じニオブ材で作成した穴の形に合わせた円錐台の形をした補修ピースを作成した。
4. 補修ピースを穴にはめ込み周辺4カ所を点溶接した。
5. 穴中心から±5mmの位置に2本シーム溶接を行った。溶接範囲は赤道に沿っておよそ30mmだけ行った。
6. 赤道部全周にわたって本溶接を行った。補修過程をFigure 5に示す。

尚、溶接中に穴が開く事例は過去にFG材の空洞を製造していた際にもあり、このトラブルはLG材の空洞に限った話ではない。



Figure 5: Repairing steps of the hole. Each numbers correspond to ones in context.

Figure 6(left)に補修箇所を空洞内部から撮影した図を示す。溶接ビームが補修ピースを通過した後、溶接ビードが細くなっているが、溶接箇所は比較的平坦に

仕上がっている。

また、補修後に空洞内部を観察した際、Figure 6(right)に示す様な突起物が補修箇所周辺に散見された。この突起物の直径はおよそ 300 μ m 程で、高さは 20 μ m 程度あり、赤道から 20mm 程度の位置に赤道にほぼ平行して散在している。今回はこの様な形状が性能にどのような影響を及ぼすか調査するため、この突起物は特に研磨などの処理はせずそのままの状態での性能評価を行うことにした。

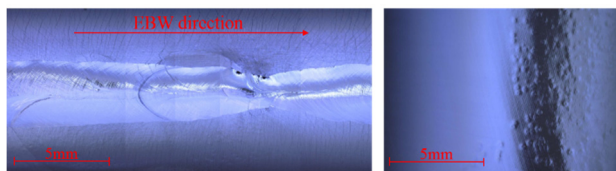


Figure 6: Welding bead at repaired position observed from inside(left) and strange defects(right).

3. 性能評価

3.1 測定準備

完成した空洞は KEK の超伝導 RF 試験施設にて空洞を立てた状態で性能評価を行う(縦測定)。縦測定を行う前にはアニール処理、電解研磨、超純水高圧洗浄などの表面処理を行う[6]。電解研磨は 100 μ m と仕上げに 30 μ m の計 2 回行う。この工程によって空洞内部は鏡面仕上げとなる。

また、 π モードでの空洞内に立つ電場が平坦になるようチューニングを行う。ここでは 1 つ 1 つの空洞をパッドで挟み、空洞を伸縮させて調整を行う。空洞内に立つ電場の平坦度は、それぞれの空洞での最大電場の中から最大と最小となる値の比で表すが、今回の空洞では完成後の平坦度が 60%だったのに対し、チューニング後は 98%となった。また、他のパスバンドでの電場分布も同時に測定した。これは縦測定を行った際に、それぞれの空洞に於ける加速勾配を予測するときに使用する。

3.2 縦測定

表面処理を行った空洞は真空用配管やアンテナなどを装着して縦型クライオスタットで縦測定を行う。

1 回目の測定では π モードに於いて 3 セルでのクエンチにより、21MV/m で測定を中止した[7]。測定後にクエンチ付近の内面を観察したところビード上に Figure 7(left)に示す様な形状が見つかったため、これがクエンチの原因と考え部分的に研磨を行った。研磨後の同箇所を Figure 7(right)に示す。

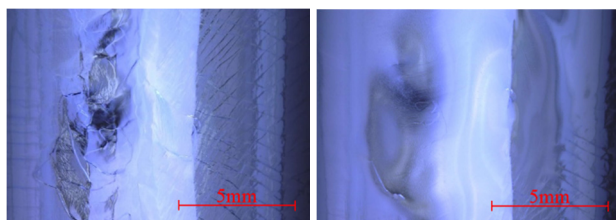


Figure 7: Found defect around the quench spot(left) and same spot after polishing.

研磨後は 1 回目の測定前と同じように、電解研磨などの表面処理を行い 2 回目の測定を行った。

Figure 8 に空洞内部の π モードでの表面抵抗値と温度の逆数との関係を示す。図中では、今回の LG 材を用いた 9 セル空洞(1 回目、2 回目の縦測定分を含む)と FG 材を用いた 9 セルを比較している。残留抵抗値 R_{res} はこの分布を以下の式でフィットすることによって求められる。

$$f\left(\frac{1}{T}\right) = A \frac{1}{T} \exp\left(B \frac{1}{T}\right) + R_{res}$$

ここで A、B は定数を表す。

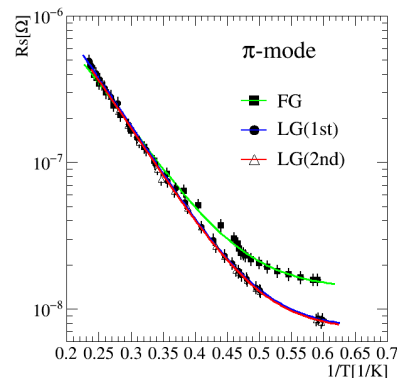


Figure 8: Cavity surface resistance.

残留抵抗値は FG 材の空洞の場合が 13.7 \pm 1.0n Ω だったのに対して、LG 材の空洞の場合は 1 回目の測定で 7.3 \pm 0.7n Ω 、2 回目の測定で 7.1 \pm 0.7n Ω といずれも FG 材の 1/2 程度の抵抗値が得られた。この表面抵抗の低さによって FG 材の空洞より高い Q_0 値を得ることが出来る。

Figure 9 に 1 回目と 2 回目の測定から得られた LG 材の空洞の π モードでの加速勾配と Q_0 値の関係を示す。

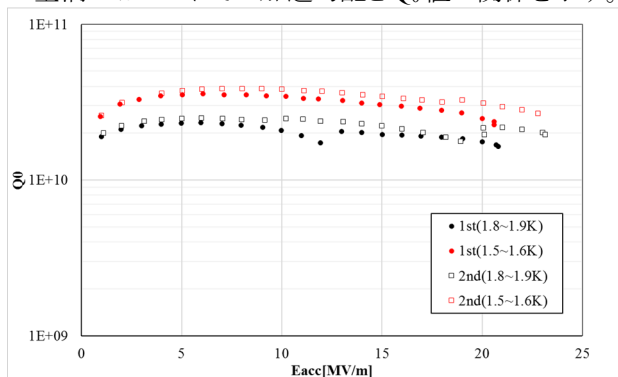


Figure 9: Q_0 curve with respect to accelerating gradients.

π モードでの測定は、温度が 1.8K~1.9K の状態と、1.5K~1.6K の状態で行った。2 回目の測定ではどちらの温度の測定でも加速勾配が 23MV/m に達したところで 1 回目と同じく 3 セルでのクエンチによって測定を中止した。 Q_0 値の最大値は 2 回目の測定の際の 1.5~1.6K に於ける測定で 3.9 \times 10¹⁰ まで達した。FG 材の空洞の最大 Q_0 値が 1.8 \times 10¹⁰ であるため[3]、2 倍以上の値が LG 材の空洞で得られた。

Table 1 に 1 回目と 2 回目の測定に於ける他のパスバンドでの測定、およびチューニング時に測定した電場分布から予測されるそれぞれのセルでの到達加速勾配

(E_{acc})を示す。表からも分かるように 3 セル以外のセルでは 30 MV/m を超える高い加速勾配が期待される。

Table 1: Expected Maximum Gradients at Each Cell (Unit: MV/m)

Cell #	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1st	36	37	23	>32	>39	32	>23	>37	>36
2 nd	31	37	23	>42	>37	>42	>23	>37	>31

3.3 縦測定後のクエンチ箇所の観察

2 回目の測定結果を受けて、再度クエンチ箇所付近の内面の観察を行った。その結果 Figure 10(top)に示すような欠陥が発見された。Figure 10(bottom)に示す断面図からも分かる通り、これは直径がおよそ 500 μ m、高さが 50~60 μ m の凸形状をしており、中央は平坦である。この平坦部分の端部は角が立っており、これがクエンチを引き起こした原因の一つと考えられる。しかし、この欠陥がどのようにして生成されたか原因は分かっていない。また、この欠陥は赤道からおよそ 25mm 離れた箇所が存在しており、1 回目の縦測定後に行った様な従来の研磨方法では除去できないため、新しい研磨方法を模索し、除去する必要がある。

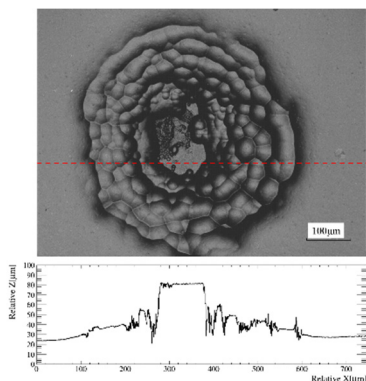


Figure 10: Observed defect(top) and profile along the red dot line of top picture(bottom).

4. まとめと今後の展望

LG 材を用いた 1.3GHz 対応の 9 セル超伝導加速空洞を製造した。その後、表面処理工程を経て縦測定を行った。空洞表面の残留抵抗値の測定では FG 材を用いた空洞よりも低い値が得られた。 π モードでの加速勾配の測定では、3 セルのクエンチにより最高到達加速勾配は 23MV/m という値にとどまったが、他のパスバンドの測定により、他のセルでは 30MV/m 以上の高い加速勾配が得られることが分かった。 Q_0 値の最大は 3.9×10^{10} で FG 材の空洞の 2 倍以上の値が得られた。

また、懸念されていた穴補修付近の突起物は、この電場強度の中では特に影響がないことが分かった。

この空洞はクエンチ付近を研磨した後、3 回目の縦測定を行う予定である。

参考文献

- [1] R. L. Geng *et al.*, “ Q_0 Improvement of Large-Grain Multi-Cell Niobium Cavities by Using JLAB’s Standard ILC Processing”, in *Proc. SRF2011*, Chicago IL USA, paper TUPO049, pp. 501-503.
- [2] W. Singer *et al.*, “The Challenge and Realization of the Cavity Production and Treatment in Industry for the European XFEL”, in *Proc. SRF2013*, Paris France, paper MOIOA03, pp. 18-23.
- [3] T. Saeki *et al.*, “Studies on the Mass-Production Fabrication of ILC Superconducting RF Accelerator Cavity”, *Journal of Particle Accelerator Society of Japan*, Vol. 11, No. 3, pp. 161-171, 2014.
- [4] T. Kubo *et al.*, “In-house Production of a Large-Grain SingleCell Cavity at Cavity Fabrication Facility and Results of Performance Tests”, in *Proc. IPAC’14*, Dresden Germany, Jun 2014, paper WEPRI022, pp. 2519-2521.
- [5] H. Shimizu *et al.*, “異なる材質と工法で製造された超伝導加速空洞の性能評価”, in *Proc. 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Tsuruga Japan, Aug. 2015, paper WEOM04, pp. 66-70.
- [6] E. Kako *et al.*, “Vertical Test Results on the STF Baseline 9-cell Cavities at KEK”, in *Proc. SRF2007*, Peking Univ., Beijing China, Oct 2007, paper WEP10, pp. 453-457.
- [7] T. Dohmae *et al.*, “Production and Investigation of Superconducting 9-cell Cavity Made of Large Grain Nb in KEK”, in *Proc. IPAC’16*, Busan Korea, May 2016, paper WEPMB012, pp. 2141-2144.