

DEVELOPMENT OF 9-CELL SRF CAVITY FABRICATED BY INGOT SLICED LARGE GRAIN NIOBIUM MATERIAL

Kenji Saito^{1,A)}, Fumio Furuta^{A)}, Taro Konomi^{A)}, Hitoshi Inoue^{A)}, Hiroaki Umezawa^{B)}, Koichi Takeuchi^{B)}

Kiyokazu Nishimura^{C)}, Tatsumi Hamazaki^{D)}, Jun Oya^{D)}

A) High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801, Japan

B) Tokyo Denkai Co. Ltd.

3-20, Higashi Suna, Koto-ku, Tokyo, 136-0074, Japan

C) Co. Ltd. TKX

5-16, Shimizudani-chyo, Tennoji-ku, Osaka-shi, 543-0011, Japan

D) Toyo Advanced Technologies Co. Ltd.

5-3-38, Ujina Higashi, Minami-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima-ken, 734-8501, Japan

Abstract

We have successfully established the niobium ingot slicing method applied the silicon wafer technology at 20 sheets level. Every sheet is very uniform and has very smooth surface. A LL 9-cell cavity was fabricated from the sliced materials. The cavity gradient reached 25-27MV/m so far by chemical polishing.

巨大結晶ニオブ超伝導 9 セル空洞の開発

1. 何故巨大結晶ニオブ空洞

超伝導ニオブ空洞では、材料の粒界で高電界性が制限されることが多々ある。これまで、3種類の現象が確認されている。1) 結晶粒界には不純物や含有ガスが多く、それが放電の種となる[1]。2) 粒界の不純物うち、特に酸素の汚染(ニオブ酸化物)が多いとニオブ酸化物の磁性とRFとの相互作用で発熱する(Q-slope)[2]。3) 低いフィールドでも粒界ステップでRF磁場のエンハンスメントが起き、発熱あるいはクエンチ(臨界RF磁場に達した時)が起きる[3]。これらの問題を避けるためには、単結晶ニオブ材が理想的である。しかし、材料の高コスト化の問題がある。インゴットをスライスして、巨大結晶ニオブ材を製作する方法が現実的である。この方法では結晶粒の問題は残るが、鍛造+ロールで製作される従来の多結晶ニオブ材に比べて、粒界パスが著しく(例えば~1/1000)減り、上記の問題がほぼ解決できる。このような理由から巨大結晶ニオブ空洞が注目されている。

2. 同時スライス多数円板製造法の実証

インゴットをスライスして巨大結晶ニオブ板材を作る方法として他の研究所では、放電加工(Jlab)や鋸歯での切断+機械表面研磨(中国・IHEP)などが行われている。しかし、これらは量産(ILC)に向かず、より効率的な方法が必要である。昨年度の本研究会で報告[4]したように、我々はシリコンウエハー・スライスマシンを使って、270 のニオブインゴットから複数(6枚)の円板を同時スライスする(45時

間)ことに成功した。材料製造法の単純化とその製造工程で発生する材料の捨て材を大幅に減らすことで、大幅な材料コスト削減可能な方法を開発した。今回この方法で270、60mm長さの巨大結晶ニオブインゴットから2.8mm厚の円板を20枚程度で製造する、前回の5倍の規模の試験を行った。そして、その材料を使ってILC用のLL9-セル空洞を製作・性能評価を行った。

前回と同様な方法で、このインゴットから、 2.906 ± 0.037 mmの円板を19枚(有効な物)を45時間で同時スライスできた。それぞれの板の重さは 1387 ± 1.2 gで、各板ともよく揃っていた。スライス面の粗さは、 4.9 ± 1.8 μmで非常に滑らかでそのままプレス加工に進むことができ、特に機械表面仕上げを要しなかった。また、今回の経験から板材製作途中で発生する捨て材の量を評価した結果、15%であり、鍛造+ロールによる従来法の45%に比べて、1/3に減らせることが分かった。ニオブは、銀よりも高単価であり、この捨て材の減量は大きなコスト削減に繋がる。

3. 空洞の製作上の問題点と対策

この材料からILC LL-9セル空洞を製作した。セル用ハーフカップのプレス、トリム加工に別段問題はなかった。しかし、電子ビームにおいていくつかの問題が発生した。

3.1 スティフナーリングのEBW手順の変更

今回、電子ビーム溶接(EBW)において二点改善した。一つは、空洞の機械強度を上げるためにセルに

¹ E-mail: kenji.saito@kek.jp

溶接するスティフナー・リングのEBW手順を変えた。従来法は、二つのセルをアイリス部でEBWしてダンベルを形成した後、ジグを使って半割りリングをダンベル背面の溶接位置に挿入しEBWした。しかし、この方法ではスティフナーの位置精度が不十分で、遠心バレル研磨等スティフナーをサポートに使う作業に問題が発生する。図1に示すように、ハーフカップのアイリス中心を基準に取ったジグでスティフナー半割リングをカップ背面に位置決めし、リング端部をEBWし、次にアイリス部をEBWしてダンベルを形成した。さらにダンベル片側背面のリング

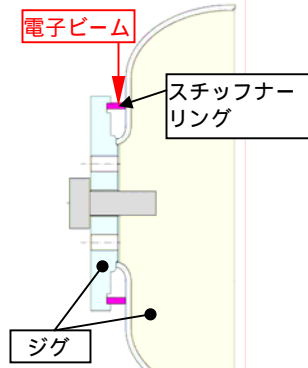


図1：スティフナー溶接

部端部をEBWしてダンベルを完成した。

3.2 電気中心軸を精度良く出すための嵌合EBW

現状のダンベル組立では、ダンベルの赤道部を外側からEBWしている。電子ビームは上部から垂直に照射される。EBW中、溶融ニオブドロップが重力で滴るので内面のシームは少し盛り上がる（オーバーカット）。RF磁場のフィールドエンハンスメント等を考えるとシームは滑らかでなければならない。我々はドロップの滴り効果を考慮に入れて、図2（右下）に示すようなトリム加工を施し、シームが滑らかになるようにしている。この方法で行った今回の空洞の赤道部溶接シームの典型例を図2右に示す。しかしながら、ダンベルの組立途中で図3に示すようにEBWの不具合が二つのセルで発生した。これらは、後工程の遠心バレル研磨で除去できるとは思われなかったため、長手のリユーターで除去した（図3右）。

図2の方法の問題点は付き合わせ溶接であるため、



図2：赤道部のトリム加工とEBWシーム状態



図3：ダンベル組立途中で発生した溶接不具合（左）とグラインドによる修正（右）

加工歪などで面が合わず、精度が不十分なことである。9セル空洞のフィールドフラットネスを測った時、空洞の両端セルでフィールドのベースラインがずれることが見られる。EBWの最終段階では、溶接された8ダンベルを水平にして、その両端にENDグループ（ビームパイプ、ヘリウムベッセルのベースプレートが溶接されているので重い）をEBWするので、エンドセル赤道の溶接面がずれ、電気軸がずれると考えられる。この問題を解決するために、今回のENDグループのEBWでは、図4に示すような嵌合溶接を採用した。試験セルでのEBW試験では目視で見える限り非常に滑らかなシームが得られたが、本番では図4右に示すように、シームにオーバーカット/アンダーカットが目立つ結果となった。

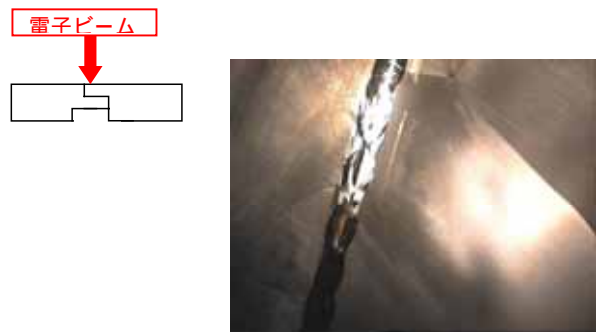


図4：嵌合溶接

4. 巨大結晶単セル空洞のTight Loop試験

9セル空洞の性能結果に移る前に、昨年製作した巨大結晶ニオブ単セル空洞の性能測定に触れておく。昨年の報告の後、その空洞に30 μ mの化学研磨を追加しては縦性能試験(2K)を行う、繰り返し試験（Tight Loop試験）を全部で5回行った。この時の表面処理の詳細は、KEKの化学実験棟で30 μ m化学研磨した後、化学実験棟内の超純水を使って一次洗浄し、KEK AR東第2実験棟に運び、脱脂剤を使って空洞内面をワイピングし[5]、15分の純水高圧洗浄を行い、一晩クラス10のクリーンルーム内で乾燥し、翌朝組立て、真空排気を行うという工程である。真空排気の際には、120 $^{\circ}$ Cで48時間のベーキングを施している。

図5に結果を示す。昨年報告したように、この空洞は最初の表面処理で42.6MV/mを達成した。しかし、その後化学研磨を追加すると、その度にフィールドエミッションに似た高いフィールドでのQ値の落ちが現れた。この時、X線の発生を伴う場合と伴わない場合があり、我々はこの現象は始めに説明したQ-slopeであると考えている。この試験では、化学研磨を追加する毎にQ-slopeのon-setが低い電界側に向かって下がることが分かった。その理由は、化学研磨により粒界ステップがエッチングされ、RF磁場のエンハンスメントが起こるためではないかと考えている。

5. 巨大結晶LL9セル空洞の性能

完成した巨大結晶9セル空洞を図6に示す。

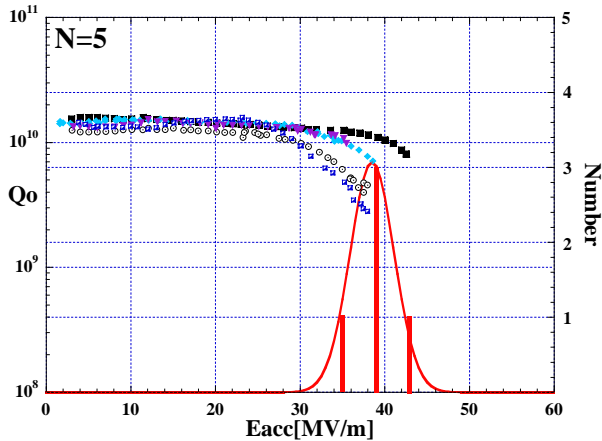


図 5 : 巨大結晶L-バンド単セル空洞のTight Loopの試験結果

5.1 表面処理

この空洞に遠心パレル研磨を施した。4セル目の赤道部EBWシームの溶接不具合部が深く、全部で500-600 μ m程内表面(赤道部)を削った。その後、化学研磨(10 μ m)で遠心パレル研磨による表面汚染層を除去し、KEKの工作センターで水素脱ガスのために750 $^{\circ}$ C-3時間の真空熱処理を行った。今回は化学研磨による性能を確認することを目的とした。その積み上げ効果を見るために最初、平均研磨量40 μ mの化学研磨を施して性能測定を行った。我々は、電解研磨を中心に表面処理を行っているので、9セル空洞に適した化学研磨装置を持っていない。空洞ビームパイプ両端にバルブを取り付け、縦姿勢で空洞半分程に研磨液を注入して封じた後、空洞を何回か上下回転しては、上部のバルブを開けて反応生成ガスを抜くという荒っぽい方法を取った。同様の方法を100 μ m(total)の化学研磨でも行った。図7に目標研磨量100 μ mの場合の研磨分布を示す。中央セル部で研磨液の滞在時間が多いので、両エンドセルの倍程研磨されている。野村メッキで化学研磨し、超純水で一次洗浄した後、KEKのAR東第2実験棟にある洗浄システムで純水高圧洗浄(50kg/cm 2)を施し、ク



図 6 : 完成した巨大結晶ニオブ超伝導9セル空洞

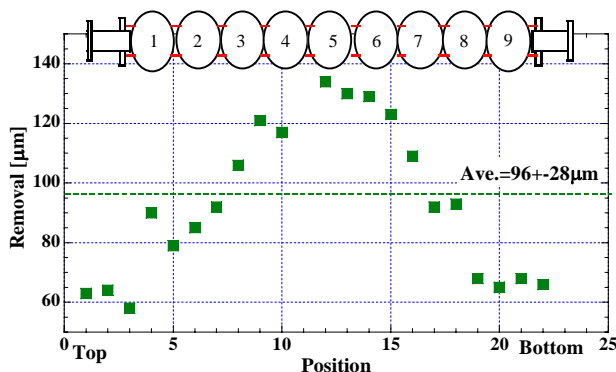


図 7 : 化学研磨での研磨分布

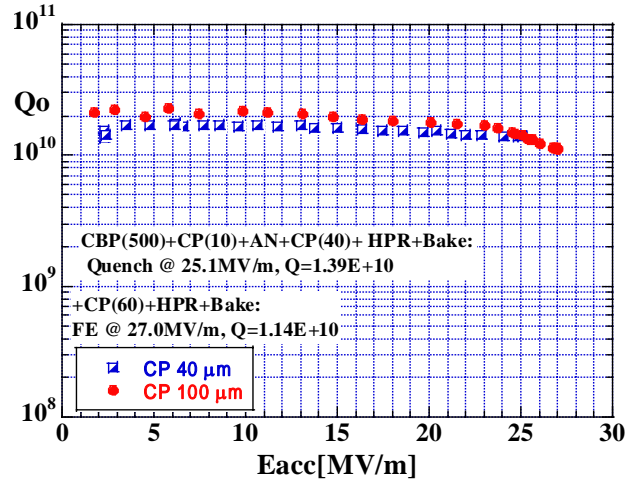


図 8 : 巨大結晶ニオブ超伝導9セル空洞の化学研磨における性能

ラス10のクリーンルームで一晩乾燥した後、組立て、真空排気および120 $^{\circ}$ C-48時間のベーキングを施し、真空封じて縦測定を行った。

5.2 空洞性能

化学研磨40 μ m,100 μ m(total)の2回の処理に対する縦測定結果を図8に示す。今回の荒っぽい化学研磨方法にしては、最大加速電界25MV/m (CP40 μ m)、27MV/m(CP total 100 μ m)と高い電界が達成された。単セル空洞の研究で巨大結晶ニオブ空洞で30MV/m以上の電界を達成するには、少なくとも170 μ mの研磨量が必要であることが分かっている[6]。今回の結果はまだ研磨不足の感がある。しかし、今の方法で化学研磨を増やしていくと中央セルが研磨されすぎて単セル空洞で発生したQ-slopeが起こると予想される。化学研磨の積み上げ効果を調べるには、各セル様に研磨できる化学研磨装置が必要であることが分かった。現在その装置を設計中である。

まとめ

巨大結晶ニオブインゴットから20枚規模の板材(2.9t)を同時にスライスすることに成功した。その材料でILC用LL-9セル空洞を製作した。電子ビーム溶接工程で多少の溶接不具合が発生した。電子ビーム溶接法の改善が必要である。空洞性能は化学研磨で25-27MV/mを達成した。化学研磨を追加して、さらに電界の向上を目指す。

参考文献

- [1] J.Knobloch and H.Padamsee, Proc. of the SRF1995, Gif sur Yvette, France, Oct. 17 – 20, 1995, pp.95 – 103.
- [2] T.Proslier et al. Phys. Lett. 93, 1(2008)
- [3] J.Knobloch and H.Padamsee, Proc. of SRF1995, Gif sur Yvette, France, Oct. 17-20, 1995, pp.95-103.
- [4] K.Saito et al., Proc of SRF1997, 1997 p.795-813.
- [5] F.Furuta and K.Saito, “単セル超伝導空洞による50MV/m高電界レシピの開発”, 本研究会, FPACA18
- [6] P.Kneisel, Lecture Note of the 1st LC Scholl, Hayama, Japan, 2006 May