

アルバックにおける低コスト化に向けた超伝導加速空洞の開発

DEVELOPMENT OF LOW COST SUPERCONDUCTING CAVITY AT ULVAC

永田智啓^{#,A)}, 阿部知行^{A)}, 増居浩明^{A)}, 篠澤精一^{A)}, 長久保準基^{A)}, 村上裕彦^{A)},
井上均^{B)}, 山中将^{B)}, 加古永治^{B)}

Tomohiro Nagata^{#,A)}, Noriyuki Abe^{A)}, Hiroaki Masui^{A)}, Seiichi Shinozawa^{A)}, Junki Nagakubo^{A)}, Hirohiko Murakami^{A)},
Hitoshi Inoue^{B)}, Masashi Yamanaka^{B)}, Eiji Kako^{B)}

^{A)} ULVAC, Inc., ^{B)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

Niobium (Nb) refining and cavity fabrication process are investigated for low cost superconducting cavity. In order to carry out Nb purification, 600 kW electron beam furnace was introduced in our company. It makes possible the stable refining for cavity-quality RRR > 250 grade by optimization of melting condition. We also obtained RRR > 300 ingot from commercial grade raw material which includes 2200 ppm tantalum. This suggests that cavity production cost might be decrease by using cheap raw materials. We performed the trial manufacture of two 1.3GHz single-cell cavities are made from our high purity Nb ingot (RRR > 300). One is adopted the half cell conjugation with electron beam welding. We confirmed that an accelerating gradient of this cavity was achieved 41 MV/m at vertical test in KEK. Another cavity is fabricated by hydroforming from seamless tube, i.e. direct cavity-shape forming without electron beam welding process at cell equator. Seamless cavity was successfully formed. We consider that key point of successful forming is homogenization of crystal grain size all over the seamless tube.

1. はじめに

現在、超伝導加速空洞の製造方法は、高純度ニオブの板材をプレス加工し、それぞれのパーツを電子ビーム溶接により接合する手法が主流であり、これらは高い加速性能も得られている^[1, 2]。しかしながら、国際リニアコライダー計画 (ILC 計画) のように 1 万本以上の超伝導加速空洞が必要となる場合、生産性が高く、より安価な空洞製造技術が求められるが、未だ検討の余地が残されている。

我々は、高エネルギー加速器研究機構(KEK) 機械工学センターと超伝導加速空洞開発に関して共同研究を進めており、上述した課題を解決するべく二つの方針により事業化に向けた超伝導加速空洞開発を進めている。

まず一つが、高純度ニオブインゴットの精製技術確立である。ここでは、求められる純度や加速性能を満たすようなニオブ素材を準備し、そもそも高価な金属元素であるニオブを極力安価な形で供給することを目的とする。我が社ではこの開発に際して新たに出力 600 kW の電子ビーム精製炉を導入しており、今回は高純度化に向けた精製への取り組み、およびこのインゴットを用いた溶接法による単セル空洞の試作と加速性能試験について述べる。

もう一つの方針として、ニオブ板を成形したパーツを溶接して製造する現在主流の手法とは異なり、アルバック独自の技術で作製されるニオブシームレス管を利用して、液圧成形による空洞の製造技術確立を目指している。これまでに、周辺部材を除く空洞本体の製造において溶接を用いないシームレス法はコストメリットがあることが言及されている^[3]。

現状我々は、液圧成形に耐えるシームレス管材の調質に主眼を置いた開発を進めており、将来的にはコストの精査や技術フィードバックを繰り返し、低コスト化を実証したいと考えている。今回は、前述した電子ビーム精製炉で精製された高純度ニオブインゴットを用いて単セル用のシームレス管を作製し、液圧成形により単セル空洞形状への加工を行った。

2. 高純度ニオブインゴットの製造

電子ビーム精製により高純度のニオブインゴットを得るには、特にガス成分や高融点金属の不純物を効率的に除去するために高真空中にて高出力で精製することが望ましい。我が社ではすでに電子ビーム溶解により製造した金属製品の事業化が行われており、蓄積された技術と真空装置メーカーである強みを活かして、高純度ニオブ精製用の 600 kW 電子ビーム溶解炉を独自の設計により東北工場に導入した。電子ビーム溶解炉の外観写真を Figure 1 に示す。

本装置ではメートルオーダーのインゴットを製造できる機構になっている。この溶解精製炉を立ち上げてから数十回の溶解を行い、現在では ILC 計画でニオブ素材に求められる仕様である RRR ($= \rho(300K) / \rho(9.2K)$) が 250 を超えるインゴットを安定的に生産できる体制となっている (Figure 2)。初期の段階では、溶解精製炉の到達圧力や電子ビーム照射パワー、材料への照射方式などを調整していたため高い RRR を得ることができていなかったが、各種変動パラメータと RRR の関係を掴んできたトライアル約 30 回以降では RRR250 から条件によっては RRR650 というものもできています。尚、RRR 値のばらつき (特に 30 回目以降) は同条件での溶解精

[#]tomohiro_nagata@ulvac.com



Figure 1: Appearance of 600kW EB furnace.

製で生じているわけではなく、例えば短時間精製（=低コスト）で仕様値をクリアするためのものや精製効果を追及したものなど、目的に応じて様々な溶解条件を変えた際のデータであることを述べておく。

導入した電子ビーム溶解炉で高純度のニオブを精製できることが示されたが、実際に事業化が進み大量にニオブ原料が必要になる場合にはコスト面や生産量の観点から原料選択の多様化が求められる。そこで、市場へ多く流通している安価な商用グレード（ASTM 規格 Type 2）を精製の原料として溶解試験を進めた。Figure 3 に精製後のタンタル含有量と RRR の関係を示す。ILC 計画の仕様としては RRR が 250 以上かつタンタル含有量 500 ppm 以下であり、グラフ左上の領域にあたる。その右のタンタル含有量 3000 ppm までが商用グレードの規格値となっている。タンタルはニオブより沸点が高いので、ニオブの蒸発を抑えて溶解精製する場合にはタンタルはほとんど除去されることはない。したがって今回用いた商用グレードの原料では精製後も 1510 ppm や 2180 ppm といった多くのタンタルを含むインゴットも存在するが、RRR としてはそれぞれ 300、309 と仕様値を満たすものが得られている。このように安価な原料を用いることによりコストダウンの可能性を示唆する結果となったが、タンタルの含有が加速器の性能を決める加速勾配や Q 値にどの程度の影響を与えるかは現状では明らかになっていないので、今後、加速空洞を試作して加速特性の評価を行うことにより明確にする予定である。

3. 単セル加速空洞の試作

3.1 溶接法による単セル空洞試作と加速性能試験

アルバックで精製したインゴットを素材として、溶接法により単セルの加速空洞の作製を試みた。インゴットを切断・加工して円板状の板材を準備し、ひずみを除去するための熱処理を行った後、それをプレス加工によりハーフセル状に成形する (Figure 4)。2つのハーフセルの大口径部分を突き合わせて溶接し、またその両端にはビームパイプやフランジ

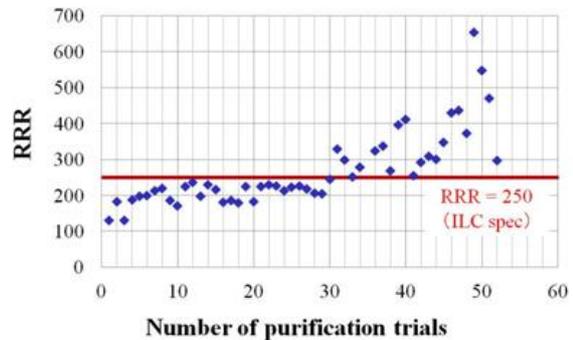


Figure 2: RRR vs. ingot making number.

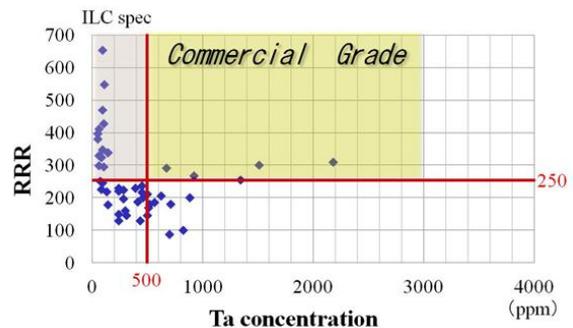


Figure 3: RRR vs. Ta concentration.

を溶接して接合させることで完成となる (Figure 5)。溶接とプレス加工は KEK にて実施した。ここで、精製したインゴットは RRR の値が ILC 計画用のニオブ材の仕様 (RRR > 250) を満たすことは述べてきたが、加工や熱処理によって、主に酸素混入の影響により RRR の低下が懸念される。そこで RRR の評価を実施したところ、インゴットの RRR が 330 であったのに対し、円板材の RRR は 324 であり、加工・熱処理の際に電気抵抗率に悪影響を及ぼすことはほとんどないことが明らかになった。また円板材の主要な不純物の定量分析を行い、仕様値を満たしていることも示された (Table 1)。試作した単セル加速空洞は目視で確認した範囲では傷・変形や溶接不具合部分は観察されなかった。詳細な内面評価は今後進める予定である。

この加速空洞について、KEK において内面研磨処理を実施したのち縦測定により加速特性を評価したところ、最大加速勾配 $E_{acc} = 41 \text{ MV/m}$ が得られ

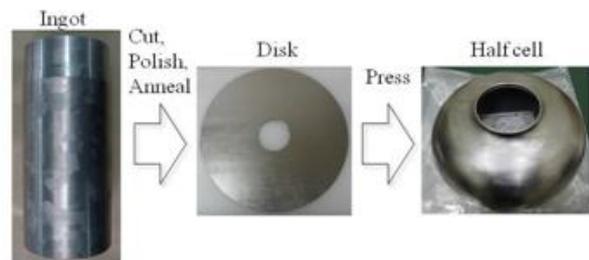


Figure 4: Manufacturing flow of half cell.



Figure 5: Single cell Nb cavity made by welding method.

Table 1: Impurity Element Analysis of Nb Disk

	H	O	N	C	Fe	Ti
ILC spec	5	15	10	10	10	10
ULVAC	1	<10	<10	10	<10	<5
	Si	Mo	Zr	W	Ta	
ILC spec	10	10	10	20	500	
ULVAC	<10	<10	<10	10	140	

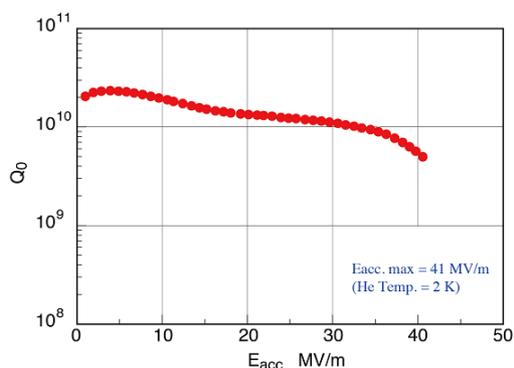


Figure 6: Result of accelerating property measurement (vertical test) for single cell Nb cavity.

た (Figure 6)。ここで得られた加速勾配や Q 値は他社のニオブ材を用いた単セル空洞と同程度であり、実用的なレベルの材料であることが実証された。

3.2 シームレス管を用いた単セル空洞試作

加速空洞の製造コスト低減を目指し、我々は溶接法とは異なる手法であるシームレス管を用いた液圧成形による加速空洞製造にも取り組んでいる。インゴットからシームレス管を製造する方法は Figure 7 に示すように、インゴットを鍛造加工し、穴を空けて伸管する工程を経て製造される。ここでは管材により強力な塑性加工を加えつつ長尺を得るためにスピニング加工を採用している。上記のような工程により単セル空洞用のシームレス管 (長さ 400 mm × 外径 130 mm × 内径 123 mm (厚さ 3.5 mm)) を準備した (Figure 8)。

作製されたシームレス管は、空洞形状に向けて Figure 9 の流れで加工される。素管はまずネッキン

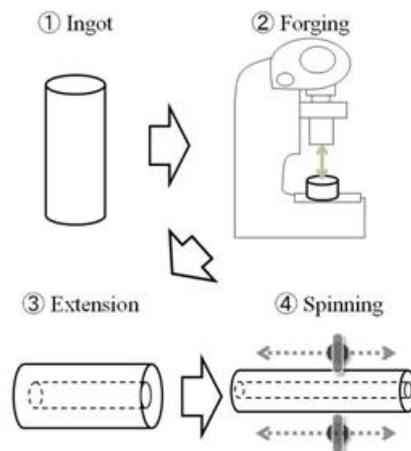


Figure 7: Manufacturing flow of seamless tube.

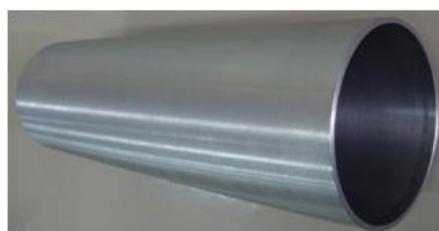


Figure 8: Nb seamless tube for single cell.

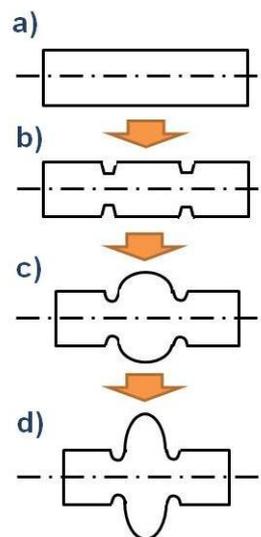


Figure 9: Schematic of manufacturing process of seamless cavity. a) seamless elementary tube, b) after necking, c) after 50 % hydroforming, d) after 100 % hydroforming.

グ加工により最少径まで押し込む「くびれ」を作る工程を経たあと、液体をパイプ内に高圧で注入し、外側に配置された金型に押し当てる液圧成形により複数段階で管を膨らませる加工を行った。ネッキング加工と液圧成形は KEK にて実施した。ここで、



Figure 10: Single cell Nb seamless cavity.

ネッキング後に一工程で最終形状まで液圧成形をせずに複数段階で行う理由としては、元の素管形状から最終形状への赤道部分（最も変形する部分）の周長変化から見積もった要求される伸び率は60%以上であり、そのようなニオブ材を得るのは困難で結晶回復の熱処理が必要となるためである（今回のシームレス管の伸び率は45%）。

シームレス管は上記の工程を経て、破裂することなく最終形状の単セルシームレス空洞を得ることができた (Figure 10)。目視観察では、表面全体に結晶粒を反映するような小さな凹凸が存在していたが、目立つ傷や溝は見られず、また、最終形状から大きく外れるような不均質な変形も観察されなかった。我々はこれまでに何回かのシームレス空洞の試作に取り組んでいるが、今回初めて空洞の成形に成功した。これまでの知見を踏まえて今回進めた材料設計の指針を以下に述べる。インゴット作製時に形成される鑄造組織は場所によっては数 cm の結晶粒が含まれており、その後の塑性加工工程により破壊することになるが、組織の破壊が不十分な場合、加工後の熱処理において、この残存組織を起点に肥大結晶粒や結晶方位が似た結晶粒の集合組織を形成することがわかっている。液圧成形工程でシームレス管を膨らませる際に、このような組織が管内に含まれると、これらの周囲にある微細組織の伸びが追いつけずに破断してしまうことになる。このことから液圧成形に耐えるためのシームレス管としては、鑄造組織が十分に破壊され、管全体にわたって均一性の高い結晶組織であることが望ましいと考える。以上のような観点から今回は、鍛造や伸管による加工量をこれまで以上に増やし、かつ、熱処理条件の最適化を行った。この組織均質化によって、局所的に破断しやすい部分の発生を抑えられたため液圧成形に成功したと考えている。今後、結晶組織の観察によりさらに詳細な考察を進めたい。

現在、このシームレス空洞については縦測定の準備を進めているところであり、加速空洞両端に周辺部材を接続し、内面研磨を行った後、加速特性を評価する予定である。

4. まとめ

今回、ニオブインゴットの精製から加速空洞試作までの一連の工程を通じた材料開発について報告し

た。インゴット製造に関しては、高出力の電子ビーム溶解炉を自社に導入し、ILC 計画の仕様である $RRR > 250$ といった高純度のインゴットを安定的に生産することができるようになった。今後は原材料や溶解精製条件を精査することでコストダウンに焦点を合わせた技術開発を進めていく。この自社製高純度インゴットを用いて、溶接型およびシームレス型の単セル空洞を試作し、共に作製に成功した。溶接型空洞に関しては縦測定を実施し、 $E_{acc} = 41$ MV/m, $Q > 10^{10}$ の良好な性能が得られた。シームレス空洞についての次の展開としては、今回試作した単セル空洞の加速性能試験の他にも、表面の微小な凹凸を抑制する新たな加工方法の検討やスケールアップした3セル空洞の試作を行う予定である。これらの取り組みにより、溶接方式と比べた際のコストメリットの検証を進めたいと考えている。

以上、当社では、このような一貫した加速空洞製造技術（リサイクルを含め）を確立することで、大幅な製造コスト低減化の実現を目指している。

参考文献

- [1] 人見晴樹 他 “ILC に向けた三菱重工業の取り組み” 第8回日本加速器学会プロシーディングス (2011) pp.1313-1315.
- [2] W. Singer *et al.* “Hydroforming of elliptical cavities” *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 18, 022001 (2015).
- [3] 上野健治 他 “超電導空洞のシームレス化に関する装置開発 (第2報)” 第4回日本加速器学会プロシーディングス (2007) pp.76-78.