

## アルバックの高純度ニオブ材を用いた超伝導加速空洞

### SUPERCONDUCTING CAVITY FABRICATED FROM HIGH PURITY NIOBIUM MATERIALS PRODUCED BY ULVAC

永田智啓<sup>#, A)</sup>, 阿部知行<sup>A)</sup>, 増居浩明<sup>A)</sup>, 篠澤精一<sup>A)</sup>, 村上裕彦<sup>A)</sup>, 井上均<sup>B)</sup>, 山中将<sup>B)</sup>, 加古永治<sup>B)</sup>  
Tomohiro Nagata<sup>#, A)</sup>, Noriyuki Abe<sup>A)</sup>, Hiroaki Masui<sup>A)</sup>, Seiichi Shinozawa<sup>A)</sup>, Hirohiko Murakami<sup>A)</sup>,  
Hitoshi Inoue<sup>B)</sup>, Masashi Yamanaka<sup>B)</sup>, Eiji Kako<sup>B)</sup>  
<sup>A)</sup> ULVAC, Inc., <sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization, KEK

#### Abstract

Low cost cavity manufacturing is investigated in ULVAC. We succeed in a trial manufacturing of single-cell elliptical seamless cavity formed from seamless tube via hydroforming process. An accelerating gradient 37 MV/m is achieved in this cavity. However, rough surface is observed after forming. We consider that key point of fine forming is homogenization of crystal grain size all over the seamless tube. In order to scale up to multi-cell fabrication, we performed to improve the spinning machine. Seamless tube for three-cell can be made due to this improvement. Because average grain size in the tube for three-cell is smaller than that for single-cell, it is expected that smoother surface is obtained after hydroforming process.

#### 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。

我々はこのような課題を解決するべく、高エネルギー加速器研究機構(KEK) 機械工学センターとシームレス超伝導加速空洞に関して共同研究を進めている。シームレス空洞は、ニオブ板を成形したパーツを溶接して製造する空洞と異なり、ニオブの直管(シームレス管)を直接空洞形状に成形して作製される。この手法はこれまでに、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ため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、液圧成形に耐えう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。前回、自社精製した高純度インゴットからシームレス管を作製し、液圧成形によって単セルシームレス空洞の試作に成功したことを報告した[4]。今回は、この単セルシームレス空洞の加速特性と内面状態の評価を実施した。また、スケールアップの取り組みとして 3 セル用のシームレス管試作を進めた。

#### 2. 単セルシームレス空洞の評価

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空洞

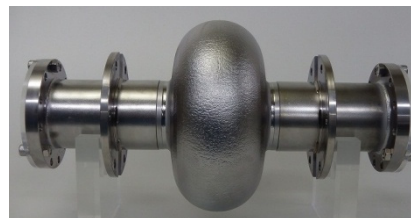


Figure 1: Single-cell Nb seamless cavity.

開発に取り組んでいる。空洞製造の概略としては、単セル空洞に向けた所定サイズのシームレス管(外径: 130mm, 内径: 123mm, 厚み: 3.5mm, 長さ: 400mm)を準備し、ネッキング工程と液圧成形により空洞形状へと加工した後、ビーム管・フランジ接続(溶接)と内面研磨・洗浄の後工程を経て、Figure 1のようなシームレス空洞を得た(文献[4]参照)。

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、設計上の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。

この空洞についても KEK において縦測定により加速特性評価を実施し、最大加速勾配  $E_{acc} = 37\text{MV/m}$  が得られた (Figure 2)。この値は ILC の要求される  $35\text{MV/m}$  を満たすものこれまで試作・評価した溶接型単セル空洞が  $41\text{MV/m}$  であったのに比べてわずかに低い。

原因を探索するため内面の状態を観察したところ Figure 3 に示されるようなマイクロサイズのくぼみが存在することが判明した。これが加速性能の劣化をもたらしたものと予測している。シームレス空洞の製造工程においてこのくぼみがどのように導入されたかは現状で明らかになっていないが、結晶組織の一部に不均一な部分があった可能性を考えている。

<sup>#</sup> tomohiro\_nagata@ulvac.com

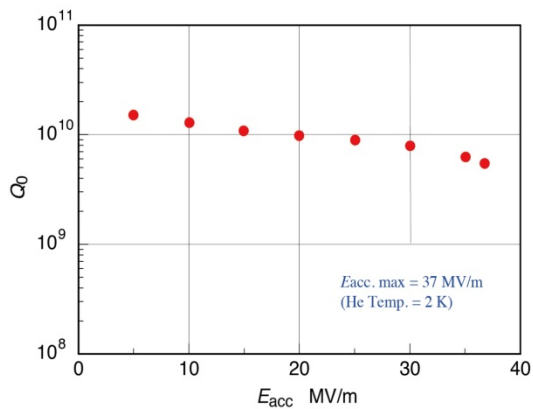


Figure 2: Q-E curve of seamless cavity.

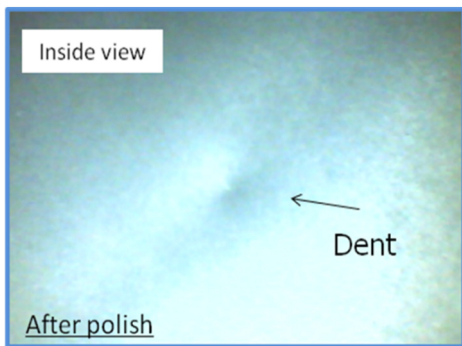


Figure 3: Microscope view of inner surface.

この場合、液圧成形工程において、結晶粒のサイズによって変形する量が異なるので、大きなくぼみを生じてしまい、研磨工程では除去できなかった可能性がある。外面の肌荒れが見られたことからこのような結晶粒の不均一性が示唆される。あるいは、材料が変形に耐えられず、肉厚が薄くなる初期段階で発生した可能性もある。これを解決するためには、結晶粒を微細かつ均一にコントロールして表面肌荒れを抑制する必要があると考えている。具体的には、鍛造やスピニング加工といった塑性加工を施す際に極力強い加工を加えることである。これにより、結晶粒が微細化し結晶粒も均一になると考えられる。また、今回は、研磨工程に関しては溶接型空洞の条件をベースにしており、今後はシームレス空洞に適した研磨工程・条件の精査も必要であると考えている。

### 3. 3セル空洞向けシームレス管の試作

#### 3.1 シームレス管の試作

インゴットからシームレス管を製造する方法は Figure 4 に示すように、高純度インゴット(アルバックで自社精製:RRR>250)を鍛造加工し、穴を空けて伸管加工を経て製造される。我々はパイプ材に極力強力な塑性加工を加えつつ長尺の管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3セル空洞用のシームレス管(外径:138mm,内径:131mm,厚み:3.5mm,長さ:830mm)を試作した(Figure 5)。単セル用

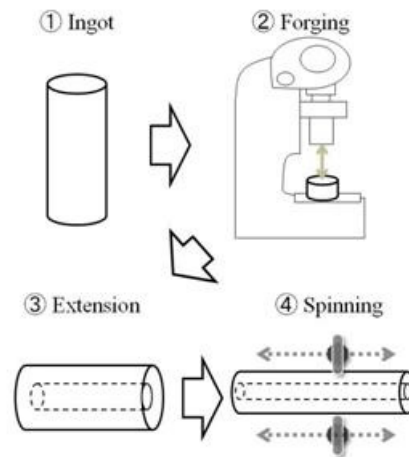


Figure 4: Manufacturing flow of seamless tube.



Figure 5: Nb seamless tube for three-cell cavity.

シームレス管の製造工程からの変更点は、管の直径を8mm大きくしたことで液圧成形工程において元の直径から最終の直径まで膨らむ量を減らして工程中に破裂してしまうリスクを低減させたこと、スピニング加工機のローラーを2軸から3軸へと改造することで、ローラーから管に加える力がより均等化することにより加工寸法精度を向上させた。これに伴い、単セル用ではスピニング加工の後に機械加工によって目標寸法に仕上げていたが、今回はスピニング加工が終了した段階で十分に目標公差以内に仕上げることができ、材料歩留りも約25%向上した。

#### 3.2 シームレス管の諸特性評価

3セルシームレス空洞の製造工程はシームレス管を作製が完了し、現在、KEKにてネッキング工程に取り組んでいる途中である。ここでは、シームレス管から切り出したテストピースを用いた評価について述べる。

まず、RRRについては350の値を示し、加工工程を経たことによる劣化は見られなかった。機械特性として、引っ張り強さは155MPa、伸び率は53%であった。この値も、従来の空洞用高純度ニオブ材と比べて遜色はないことがわかっている。元素分析結果をTable 1に示す。いずれの成分もASTM Type 5と呼ばれる(RRR gradeとも呼ばれる)国際標準規格の値を満たしており、不純物量の点でも特に問題がないことが示された。以上のようにRF超伝導加速空洞に用いる素材としては十分な特性を示すことが明らかとなったが、前項で述べたようにシームレス空洞へ成形するにあたり、破断のリスクを低減

Table 1: Chemical Components of Seamless Tube

	(ppm)					
	H	O	N	C	Zr	Fe
ASTM Type5	5	40	30	30	100	50
ULVAC	1	<10	<10	<10	<10	<10
	Si	W	Ni	Ti	Al	Ta
ASTM Type5	50	70	30	50	50	1000
ULVAC	<10	<10	<10	<5	<10	80

させるためには結晶粒径のコントロールが非常に重要と考えている。そこで結晶粒に関する評価として EBSD 法 (Electron Back Scatter Diffraction 法) により、前項の単セルシームレス管との結晶粒径・方位の比較を実施した。

Figure 6 に結晶方位解析結果を示す。図中で見られるように 3 セル用の管の方が小さな結晶粒が多い傾向にあることがわかる。平均粒径は単セル用の管が 121 $\mu\text{m}$  であるのに対し 3 セル用では 89 $\mu\text{m}$  であった。このことはスピニング加工機の改造によってより強い加工を素材に加えられたことに起因したと考えている。また、結晶方位については、(001)、(101)、(111)方位でそれぞれ 15° 以内に入るものを異なる色で図示しているが、同色で数珠つなぎになって見えるはずの目立った集合組織はどちらの管においても確認されず、比較的ランダムに配向された組織であることがわかった。以前の我々の経験では集合組織が多く観察されたものは、液圧成形工程で管を膨らませた際にその部分からの破断が発生している。以上のような結果から、単セル同様に液圧成形工程の変形に耐え、今回の 3 セル用の管の方が、結晶粒が小さく表面荒れを低減できることが期待できるが、粒径分布という観点では試行回数が少ないために液圧成形に適した特性が見出せていないので、今後加工方法や熱処理条件で制御することが今後の課題である。

#### 4. まとめ

今回、試作した単セルシームレス空洞の加速特性を評価し、最大加速勾配 37MV/m と国際リニアコライダー計画の仕様である 35MV/m を超える良好な結果を得た。しかしながら、液圧成形後に肌荒れや微細な凹凸が空洞表面に存在することがわかり、結晶組織の微細化・均一化や後工程の精査などの課題があると考えている。

また、シームレス空洞のスケールアップのために 3 セル用のシームレス管を試作し、機械特性、RRR、不純物量などの特性は従来の加速空洞用の高純度ニオブ素材の条件を十分に満たすことが示された。結晶組織は、液圧成形に成功した単セル用のものと同様に目立った集合組織は見られず、液圧成形の変形に耐えて空洞形状への加工できることが期待できる。

液圧成形に成功した場合は、3 セル空洞を 3 つなげて 9 セル空洞を試作する計画を立てている。この取り組みによって、シームレス空洞が本体に溶接を用いないことで本当に低コスト化が可能であるかどうかの検証を進めたい。

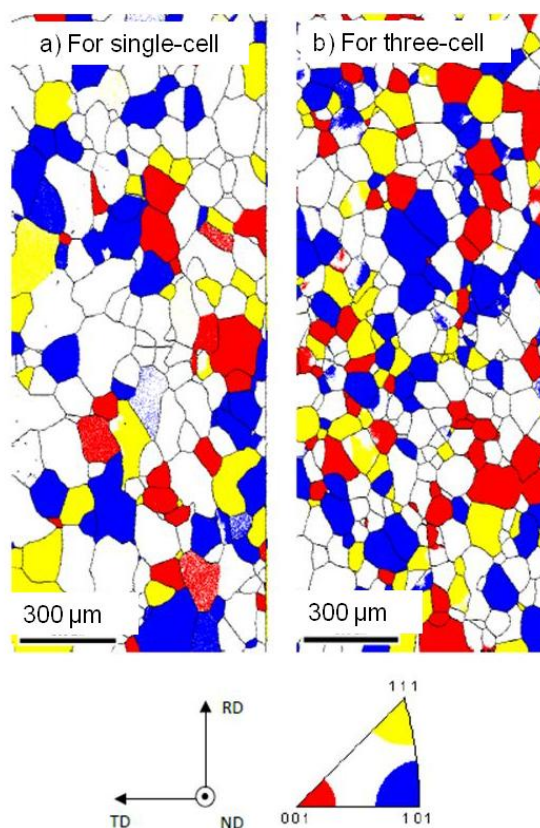


Figure 6: Crystalline orientation of seamless tube for a) single-cell and b) three-cell.

#### 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.
- [4] 永田智啓 他 “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” 第 12 回日本加速器学会プロシーディングス (2015) pp.587-590.