

アルバックにおける超伝導加速空洞の開発

DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING CAVITY IN ULVAC

永田智啓^{#,A)}, 増居浩明^{A)}, 篠澤精一^{A)}, 村上裕彦^{A)}, 井上均^{B)}, 山中将^{B)}, 加古永治^{B)}

Tomohiro Nagata^{#,A)}, Hiroaki Masui^{A)}, Seiichi Shinozawa^{A)}, Hirohiko Murakami^{A)},

Hitoshi Inoue^{B)}, Masashi Yamanaka^{B)}, Eiji Kako^{B)}

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

Abstract

We study about seamless cavity made from our high purity Nb materials as research for lower cost fabrication than present process. Seamless cavity is applied hydroforming process from seamless tube, i.e. direct cavity-shape forming without electron beam welding process at cell equator and iris area. Single-cell and three-cell cavity was successfully formed. Accelerating gradient of single-cell cavity was achieved 40 MV/m. In three-cell seamless cavity, surface roughness was to become smoother than that of single-cell cavity due to improvement of spinning machine.

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]。近年では世界各国で超伝導加速空洞を用いた大型加速器が実施・計画されており、生産性が高く、より安価な空洞製造技術が求められている。

我々はこのような要求を満足させるべく、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]。しかしながら、例えば国際リアコライダー計画(ILC計画)におけるメインビームラインの標準的な形状である9セル楕円型のシームレス空洞試作に成功した例はないため厳密な製造コスト試算まで至っておらず、シームレス法の有効性は明確になっていない。現状我々は、液圧成形における大きな変形に耐えるシームレス管材の開発に主眼を置いており、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、安価な超伝導加速空洞の製造プロセスを提案したいと考えている。これまでの報告で、アルバックで電子ビーム溶解精製炉を導入し、超伝導加速器グレード用の素材として使用可能な高純度インゴットが作製できることを示した[4]。また、このインゴットを用いて試作した溶接型単セル空洞で41MV/mの加速勾配が得られ、シームレス型の単セル空洞成形と3セル空洞向けのシームレス管の試作に成功したことを報告してきた[5]。

今回はこれらの続報として、アルバックにおいて精製した高純度ニオブインゴットを用いて試作した単セルシームレス空洞の加速特性評価(再評価)と3セル空洞向けのシームレス管における液圧成形法を用いた加速空洞試作について述べる。

[#]tomohiro_nagata@ulvac.com

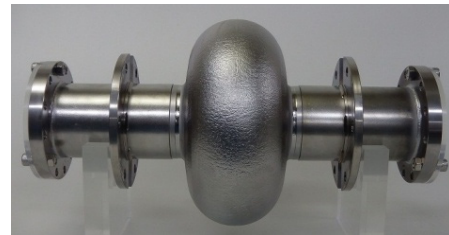


Figure 1: Single-cell Nb seamless cavity [5].

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ることができ、初回の加速特性評価では最大加速勾配 37MV/m が得られた(文献[4, 5]参照)。

この評価後に空洞内面にマイクロサイズのくぼみが複数あることが判明し、今回スポット研磨で平滑化処理を行った。また、測定方法においても残留磁場を改善した加速特性の再測定を実施した。今回の測定では最大加速勾配 40MV/m が得られ、35MV/m における Q_0 値は 1.1×10^{10} であった(Figure 2)。この性能は ILC 計画で求められているスペックを達成しており、これまでに報告されている溶接方式の空洞の性能と遜色のない値となった。我々の溶接型単セル空洞でも 41MV/m が得られていることから[4]、シームレス空洞に採用した素材や製造プロセス自体には性能を劣化させる要因がないことを示した。

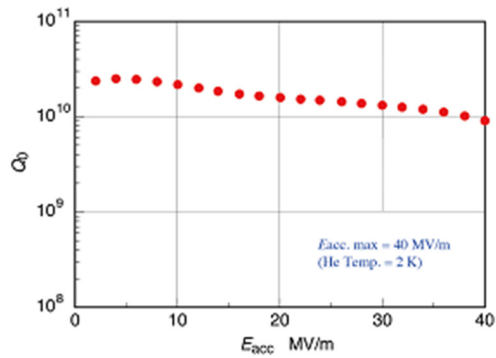


Figure 2: Q-E curve of single-cell seamless cavity.

液圧成形を用いたシームレス成形法は、成形時の変形量が多いことに起因して結晶粒を反映した凹凸が溶接法と比べ顕著になる傾向にあるものの、現状、研磨工程に関しては溶接型空洞の条件をベースにしているため、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セルシームレス空洞の試作

単セルシームレス空洞からのスケールアップ開発として3セルのシームレス空洞の試作に取り組んでいる。シームレス管の製造方法はFigure 3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)を試作したところまで前回報告した(文献[5]参照)。

今回、このシームレス管について、Figure 4に示すようなセルのくびれを作るネッキング工程と液圧成形工程を経て、セル形状の成形に成功した(Figure 5)。

現状、目視確認の段階ではあるが、大きな変形に起因した凹凸は見られたものの、単セルシームレス空洞より表面がスムーズに改善されたように思われる(Figure 6)。これは結晶粒径が121 μ mから89 μ mへと小さくできたことによると考えられる。今後、詳細に表面粗さや結晶粒径を検証し、液圧成形を成功させるポイントを導きたい。

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40MV/mとILC計画の仕様である35MV/mを超え溶接方式で製造した空洞と同程度の良好な結果を得たことで、素材はシームレス空洞製造工程を経ても劣化しないこと、また、成形直後の表面凹凸は荒いものの内面研磨によって溶接法と同程度の内面が達成できていると思われることが明らかになった。また、スケールアップとして取り組んだ3セル空洞について液圧成形に成功し、単セル空洞と比べて結晶粒径を小粒径化できたことによる効果と思われる肌荒れ改善が目視で確認された。

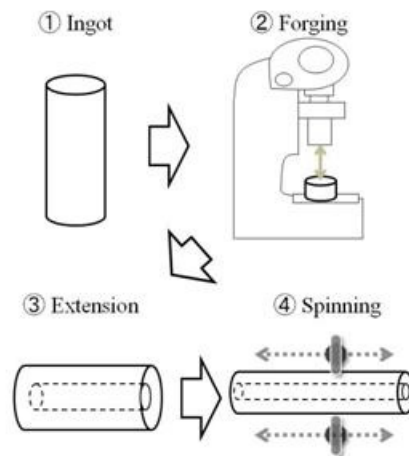


Figure 3: Manufacturing flow of seamless tube.

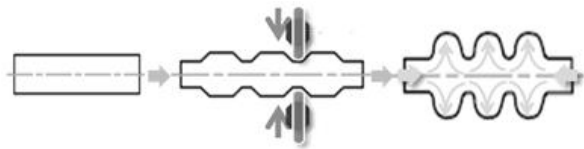


Figure 4: Manufacturing flow of seamless cavity.



Figure 5: 3-cell seamless cavity.



Figure 6: Comparison of cavity surface. Left) single-cell seamless cavity, Right) 3-cell seamless cavity.

今後、加速特性評価や製造プロセス最適化を進めながら、さらなるスケールアップとして 9 セルシームレス管の試作に着手する予定である。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。

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.
- [5] 永田智啓 他, “アルバックの高純度ニオブ材を用いた超伝導加速空洞” 第 13 回日本加速器学会プロシーディングス (2016) pp.345-347.