

シームレスニオブパイプを用いた 液圧成形による超伝導加速空洞の製造

HYDROFORMING SRF CAVITIES FROM SEAMLESS NIOBIUM TUBES

山中 将^{#, A)}, 井上 均^{A)}, 清水洋孝^{A)}, 梅森健成^{A)}, James A HOCKER^{B)}, Tsuyoshi TAJIMA^{C)}
Masashi Yamanaka^{#, A)}, Hitoshi Inoue^{A)}, Hiroataka Shimizu^{A)}, Kensei Umemori^{A)},
James A Hocker^{B)}, Tsuyoshi Tajima^{C)}
^{A)} KEK, ^{B)} FNAL, ^{C)} LANL

Abstract

The authors are developing the manufacturing method for superconducting radio frequency (SRF) cavities by using a hydroforming instead of the conventional methods, such as a press forming and an electron beam welding. We expect a cost reduction by hiring the hydroforming. To realize this development, getting a high-purity seamless niobium tube with good forming ability and an advancement of hydroforming technique are necessary. We got the seamless niobium tube made by ATI Wah Chang with the cooperation of FNAL, and succeeded to manufacture the 1-cell cavity by hydroforming. The accelerating gradient attained to 36 MV/m, and we confirmed it was available to use as the SRF cavity.

1. はじめに

だ円のセル形状を有する超伝導加速空洞の製造方法は、圧延したニオブの板材をおわん状にプレス加工し、それらを電子ビーム溶接(EBW)で接合する方法が一般的である。空洞は内面が滑らかなことが要求されるが、EBWの電子銃は大型のため空洞の外側から貫通溶接を行い、隆起の少ない滑らかな溶接裏ビードを形成する必要がある。これは熟練を要する非常に難しい溶接作業である。さらに溶接前に開先を化学研磨したり、溶接時に異物の混入を防止したり、後工程として溶接により発生した欠陥の除去が必要な場合もある。また EBW 機の導入コストも高く、EBW が空洞製造コスト上昇の主要因である。

溶接はセルの赤道部(大径部)とアイリス部(小径部)で行われるが、それぞれ磁場と電場の最も大きい位置であり、理想的には溶接ビードのような隆起は無い方がよい。EBWを用いずに空洞を製造する方法として、塑性加工の一つである液圧成形がある。この工法は古くから知られ、自動車部品や油圧部品の製造に広く用いられている。これはパイプの外側に金型を配置し、パイプの内側を高圧にして軸方向に圧縮することにより、金型に沿って変形させるものである。これを空洞製造に用いる研究が行われ、特に DESY において Singer らによって精力的に行われた。内径 150 mm、肉厚 2.7 mm のニオブシームレス(継ぎ目なし)パイプを用いて 3 セルの 1.3 GHz TESLA 空洞を液圧成形によって製造し、これを 3 台 EBW で接合して 9 セル空洞を製造した。最大加速勾配は 30~35 MV/m に達した^[1]。DESY における一連の取組みや他の研究所での取組みについても、文献 [1] に詳述されているので参照されたい。KEK は 1994 年より液圧成形の研究に着手した。藤野らは空洞コスト低減のために薄肉のニオブと厚肉の銅を接

合したクラッド材を用いてシームレスパイプを製造し、これを液圧成形にて 1 セル空洞に仕上げ、最大加速勾配 40 MV/m を得た^[2]。その後、上野らにより、くびれ加工機と液圧成形機が開発され^{[3][4]}、KEK はシームレスパイプから空洞に仕上げる一連の工程を所内で実施できるようになった。

ILC 計画では 17000 本強の 1.3 GHz 9 セル空洞を製造する必要がある。空洞の製造コスト低減は必須の課題である。2013 年に完成した技術設計報告書(TDR)には、空洞を高純度(RRR>300)のニオブ材を用いて、プレス加工、EBWにて製造する方法が、基本設計(Baseline Design)として示されている^[5]。著者らは TDR を踏まえて、改めて液圧成形による空洞製造がコスト低減の観点から基本設計の方法と置換できないかを検討している。材料は TDR に示されている高純度ニオブとする。上述の 3 セル空洞を液圧成形で 3 台製造して、これらを EBW で接合する方法はコスト低減には不十分であり、1 本の長尺パイプから 9 セル空洞を製造することが必須である。現在のところ、これは実現されていない。

本研究の目的は 1.3 GHz 9 セル空洞を液圧成形で製造し、空洞性能が従来技術で製造した空洞と同等であることを示し、液圧成形がコスト低減に有効かを見極めることである。本報は、まず最初に行った 1 セル空洞の製造と性能評価の結果について述べる。

2. シームレスニオブパイプ

液圧成形による空洞製造を実現するには、『成形性が優れた高品質のシームレスニオブパイプの入手』と『液圧成形技術の高度化』が必要である。KEK はこれまで良質のニオブパイプを入手できなかったが、今回 FNAL の協力により、米国 ATI Wah Chang 社製のシームレスニオブパイプを入手できた。

1.3GHz 空洞の赤道部の内径は、約 205 mm である。一方、アイリス部の内径は 70 mm である。70 mm のパイプを 205 mm まで膨らませるには、200%程度の

[#] masashi.yamanaka@kek.jp

伸びが必要である。ニオブの伸びは 50~60%であるため、これは困難である。そこで、小径部と大径部のほぼ中間値である内径 123 mm のパイプを用いることにした。従来のプレス加工によりセルを製造する場合、板厚 2.6 mm のニオブ材を用いているが、シームレスパイプの肉厚は少し大きく 3.5 mm とした。液圧成形により空洞の赤道部の肉厚が薄くなることが予想され、そこでも 2.6 mm 程度を確保するためである。また、成形後の空洞の剛性が高く、強め輪の装着を省略できることを期待している。1 セル空洞に必要なパイプ長さは 450 mm である。これは加工機に把持する部分の長さを含む。空洞両端のビームパイプは別部品を EBW で接合するので、これには含まれない。同様に 3 セルは 800 mm、9 セルは 1700 mm である。

3. 空洞の製造

3.1 くびれ加工と液圧成形

くびれ加工と液圧成形の工程を Figure 1 に示す。図は 3 セル空洞の場合を示している。まず、くびれ加工でアイリス部を成形する。くびれ加工の様子を Figure 2 に示す。ニオブパイプを回転させ、対向する 2 枚のローラをパイプに押し込むことにより、くびれを形成する。ローラはパイプに連れ回す。ローラとパイプの間に潤滑剤は用いていない。くびれ加工は 1 か所ずつ行う。1 セル空洞の場合は 2 か所となる。くびれ加工終了後、真空炉を使って焼ならしを行った。熱処理条件は 750°C×3 時間である。

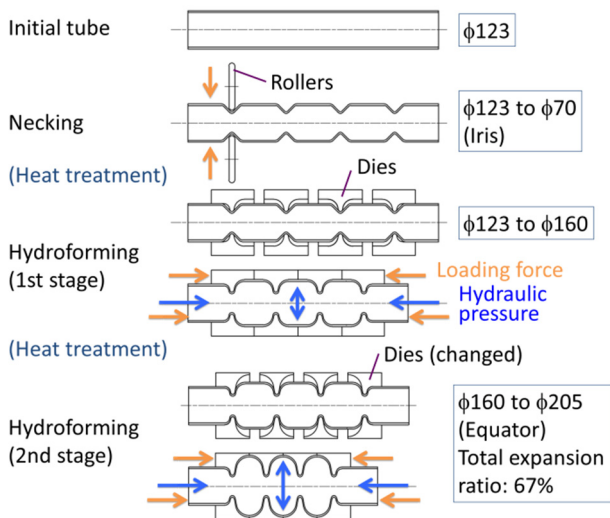


Figure 1: Process of necking and hydroforming.

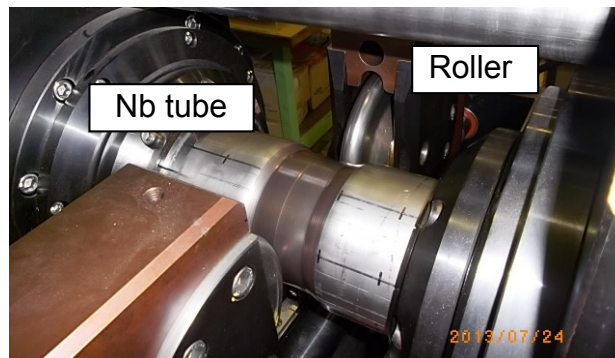


Figure 2: Necking machine.

次に液圧成形で赤道部を成形した。液圧成形は Figure 1 に示したように 2 段階で実施する。最初に内径 123 mm から 160 mm まで膨らませる。外側に金型を配置して、パイプに内圧を加え、さらにパイプの両端を圧縮する。金型の外周は円筒形状である、長いシリンダーの中に配置され長手方向に移動可能である。金型同士が密着するまで押し込み、内圧を 25 MPa まで上げてしばらく保持し、金型に密着させる。その後、金型を外して再び焼ならしを行う。次に金型を交換して同様に 160 mm から 205 mm まで膨らませる。長手方向のパイプ長さは図に示したように短くなる。成形の様子を Figure 3 に示す。長手方向の推力は油圧ピストンで発生させる。この圧力と内圧の二つを独立した油圧ポンプより供給し、圧力の大きさを制御している。尚、流体は油を使用している。成形が完了したニオブパイプを Figure 4 に示す。また空洞内面の赤道部付近の写真を Figure 5 に示す。赤道部が最も伸びる部位であり、67%伸びている。金型の合わせ面であり、多少の凹凸と面の荒れが認められた。尚、セル形状は KEK が開発した TESLA-like であり、センターセル形状を用いている。



Figure 3: Hydroforming machine (Final hydraulic pressure: 25 MPa).

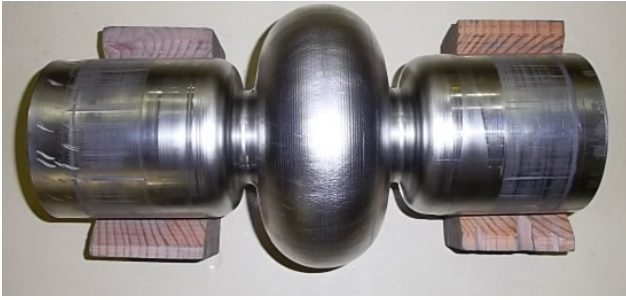


Figure 4: Niobium tube just after hydroforming.

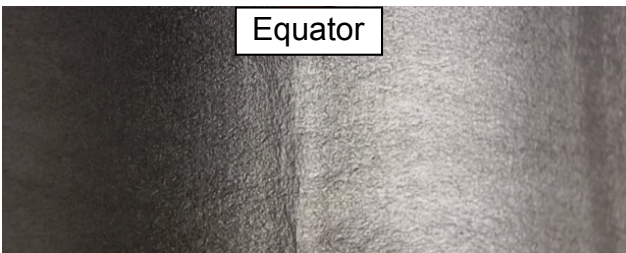


Figure 5: Cross view at equator area (inside).

3.2 空洞への仕上げ

Figure 4 に示した示したパイプのアイリス部で切断し、左右に内径 70 mm のビームパイプを EBW で接合した。ビームパイプはニオブの板材を巻いて EBW により筒状にして製作した。端部にはニオブチタン製のフランジを取り付けた。完成した 1 セル空洞を Figure 6 に示す。従来方法で製造した空洞は、内面観察を行い必要があれば欠陥を除去する処置をした後に電解研磨の工程に進めるが、本空洞は成形後の内面が肌荒れしたため、電解研磨の前に機械的な研磨が必要と判断した。超伝導加速空洞内面の機械式研磨に実績のあるバレル研磨を施した。KEK はバレル研磨機を所有していないため、処理を FNAL に依頼した^[6]。使用されたバレル研磨機を Figure 7 に示す。遠心バレル研磨機であり、空洞内部に研磨剤と水を入れて回転することにより、空洞内面を研磨する。本機は 9 セル空洞 (長さ 1.3 m) を同時に 4 本処理できる。研磨剤の種類を変えながら加工し、最後は鏡面仕上げとなった。バレル研磨の詳細は参考文献^[6]に示されているので、参照されたい。



Figure 6: Finish to 1-cell cavity.



Figure 7: Barrel polishing machine^[6].

4. 性能評価

4.1 たて測定の結果

バレル研磨後の内面仕上がりは良好のため、従来工法で製造した空洞に対して行っている 100 μm 程度の電解研磨工程は省略し、仕上げの 15 μm の電解研磨を施してから、たて測定を KEK の STF で行った。たて測定の結果を Figure 8 に示す。最大加速勾配は 36 MV/m に達し、加速空洞として使用できることを確認した。

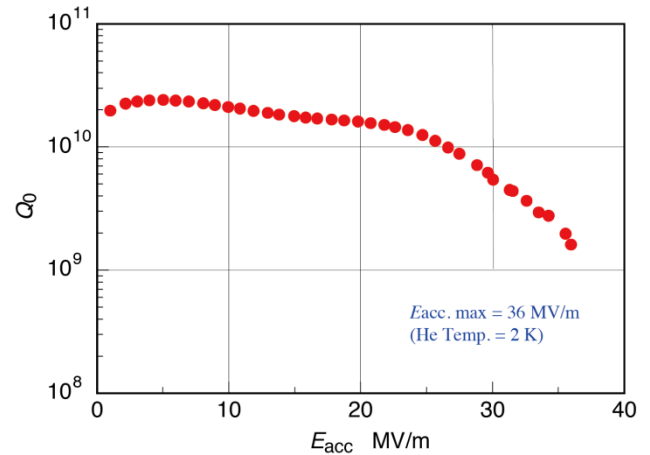


Figure 8: Result of vertical test (Q-E curve).

4.2 内部形状の測定

空洞の内部形状は設計値として与えられる。液圧成形に用いる金型の形状は、空洞の肉厚分布を考慮して設計する必要がある。赤道部の肉厚が薄くなることは予想できるので、これを考慮して金型を設計した。実際に成形した空洞の内部形状が設計値に対して、どの程度誤差があるかを調べた。

空洞内部の形状を直接測定するのは困難であるので、Figure 9 に示すように空洞の外形を 3 次元測定機で測定し、厚みを超音波厚み計で、それぞれ測定した。これらの測定結果より内部形状を推定した。Figure 10 に厚みの測定結果を示す。円周上の 4 か所について測定した。赤道部の肉厚が最も薄い。予想よりも薄いので、今後成形条件を改善して、減肉を

減らす工夫が必要である。推定したセルの内部形状を Figure 11 に示す。空洞の形状は赤道部が円、アイリス部がだ円であるので、推定形状を円とだ円、それを結ぶ接線でさらに近似し、得られた諸元から Superfish を用いて固有周波数を計算したところ、1273.0709 MHz を得た。ネットワークアナライザーを用いた実測値は 1274.4375 MHz であり、よく一致した。赤道部の肉厚が薄いため、内径は設計値より 2 ミリ程度大きい。そのため、設計周波数より 10 MHz 程度高くなった。

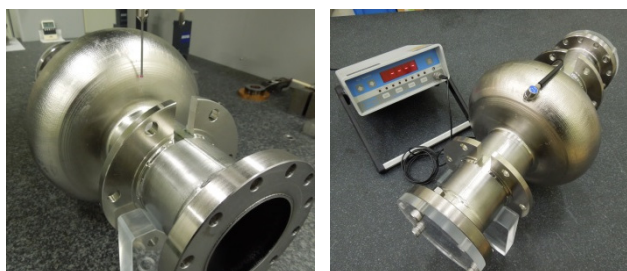


Figure 9: Measurement using (left) CMM and (right) ultrasonic thickness measurement device.

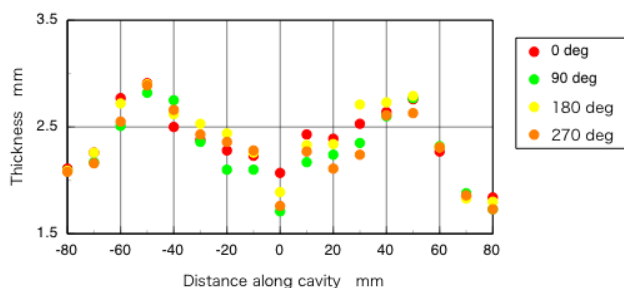


Figure 10: Thickness distribution along cavity shape.

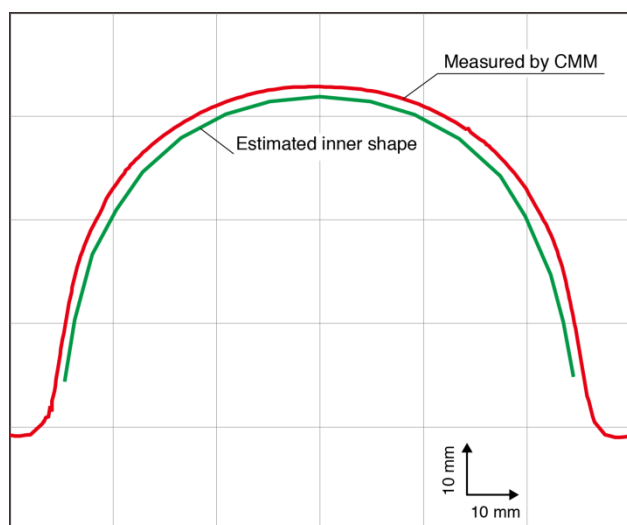


Figure 11: Estimation of inner shape.

5. おわりに

液圧成形による 1 セル空洞の製造に成功した。たて測定の結果、最大加速勾配は 36 MV/m に達し、加速空洞として使用できることを確認した。今後は 9 セル空洞の実現に向けて、研究を継続する。空洞の製造は、KEK 機械工学センターならびに空洞製造技術開発施設 (CFF) で行われた。たて測定は STF にて実施した。本研究の一部は天田財団の研究助成により行ったものである。これらを記して謝意を表する。

参考文献

- [1] W. Singer, et al., “Hydroforming of elliptical cavities”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 18, 022001, 2015.
- [2] 藤野, “ニオブ・銅クラッドシームレス超伝導高周波加速空洞の研究”, 総合研究大学院大学学位論文, 2003.
- [3] 上野 他, “超伝速空洞のシームレス化に関する装置開発”, 第 3 回日本加速器学会年会プロシーディングス, TO18, 2006, pp. 138-140.
- [4] 上野 他, “超伝速空洞のシームレス化に関する装置開発 (第 2 報)”, 第 4 回日本加速器学会年会プロシーディングス, TO04, 2007, pp. 76-78.
- [5] “ILC Technical Design Report”, Volume 3- Accelerator, Part II: Baseline Design, 2013. <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [6] A. D. Palczewski, C.A. Cooper, et al., “R&D progress in SRF surface preparation with centrifugal barrel polishing (CBP) for both Nb and Cu”, Proceedings of SRF2013, Paris, France, TUIOB01, 2013, pp. 395-400.