

シームレスニオブパイプを用いた 液圧成形による 3 セル超伝導加速空洞の製造と評価

HYDROFORMING SRF THREE-CELL CAVITY FROM SEAMLESS NIOBIUM TUBE

山中 将^{#,A)}, 井上 均^{A)}, 道前 武^{A)}, 梅森健成^{A)}, Gun-Tae PARK^{A)}, 江並和宏^{A)},

Andy HOCKER^{B)}, Tsuyoshi TAJIMA^{C)}

Masashi Yamanaka^{#,A)}, Hitoshi Inoue^{A)}, Takashi Dohmae^{A)}, Kensei Umemori^{A)}, Gun-Tae Park^{A)}, Kazuhiro Enami^{A)},

Andy 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 using conventional electron beam welding (EBW). We expect higher reliability and reduced cost with hydroforming. For successful hydroforming, high-purity seamless niobium tubes with good formability as well as advancing the hydroforming technique are necessary. Using a seamless niobium tube from ATI Wah Chang, we were able to successfully hydroform a 1.3 GHz three-cell TESLA-like cavity and obtained an accelerating gradient of 32 MV/m. A barrel polishing process after the hydroforming was omitted. The vertical test was carried out with very rough inside surface. We got amazing and interesting result.

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。

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、ネッキング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。2014 年には米国 ATI Wah Chang 社製のシームレス

ニオブパイプを用いて 1 セル空洞の製造に成功し、最大加速勾配 36 MV/m を得た[5][6]。さらに ULVAC 社が開発した国産のシームレスニオブパイプを用いて 1 セル空洞の製造に成功し、最大加速勾配 37 MV/m を得た[7]。

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[8]。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。DESY 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 セル空洞を一気に液圧成形で製造し、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、3 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

ここでは前報[5]と同じく、ATI Wah Chang 社製のシームレスニオブパイプを用いた。寸法は外径 130 mm、内径 123 mm、長さ 800 mm である。パイプに加工する前のニオブインゴットの化学成分を Table1 に示す。超伝導性能を示す指標である、残留抵抗比(RRR)は 387 である。パイプに加工した後の硬さは 46 HV、引張強度は 190 MPa、破断伸びは 56%である。引張強度はパイプを展開し板状にしてから試験片を切り出し KEK で測定した。

[#] masashi.yamanaka@kek.jp

Table 1: Chemical Compositions of Nb Ingot (unit: wt ppm)

H	C	O	N	Fe	Si	Ta
<3	<20	<40	<20	<30	<30	<100

3. 空洞の製造

3.1 予成形と液圧成形

予成形と液圧成形の工程を Figure 1 に示す。工程は 1 セルの場合と同じである[5]。まず、まず、パイプが液圧成形の金型に入るように予成形を行う。Figure 2 に示すネッキング加工機を用いてアイリス部にくびれを成形する。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。加工機の構成は、スピニング加工機と同じである。ローラはパイプに連れ回しする。ローラとパイプの間に潤滑剤は用いていない。ネッキング加工は 1 か所ずつ行う。3 セル空洞の場合は 4 か所となる。ネッキング加工終了後、真空炉を使って焼鈍しを行った。熱処理条件は $800^{\circ}\text{C} \times 3$ 時間である。前報[5]では $750^{\circ}\text{C} \times 3$ 時間としたが、今回は温度を少し上げた。経験的に温度が高い方が伸びの回復が大きい。その代わりに肌荒れがひどくなる。多少、肌荒れが大きくても液圧成形を成功させることを優先して、処理温度を高くした。

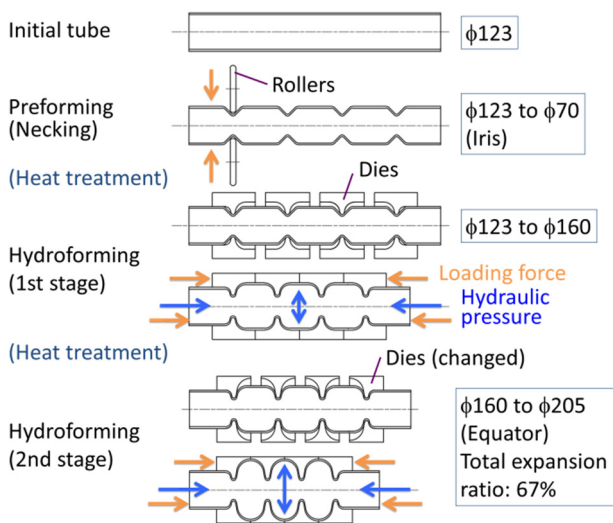


Figure 1: Process of preforming and hydroforming.

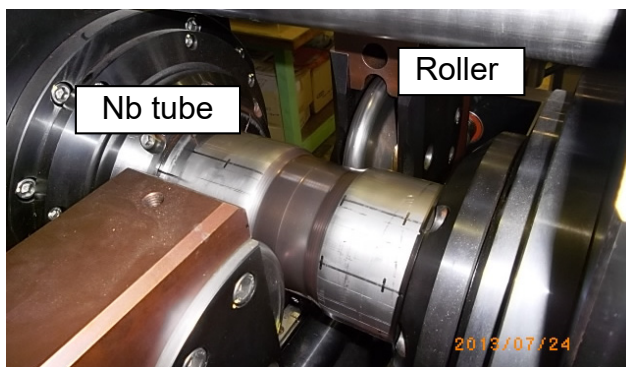


Figure 2: Necking machine.

次に液圧成形で空洞全体を成形した。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押し込む。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。金型同志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鈍しを行う。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。軸押し込み力は油圧ピストンで発生させる。ここでは膨らむ様子を目視で確認しながら、内圧と軸押し込み力を手動で調整した。内圧を上げてから、軸押し込みをした、実際の負荷経路は記録していない。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。肌荒れが多きことがわかる。前報[5]に比べても肌荒れが大きい。尚、セル形状は KEK が開発した TESLA-like であり、全て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.

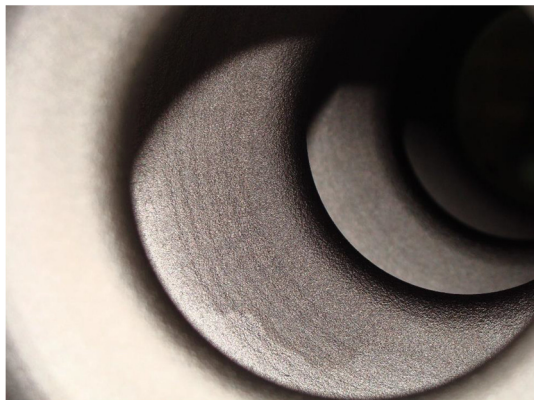


Figure 5: Inside cavity after hydroforming.

3.2 空洞への仕上げ

Figure 4 に示したパイプを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 3 セル空洞を Figure 6 に示す。前報[5]では、内面の粗さを改善するためにバレル研磨を行った。本報では、さらに製造工程を簡素化するためにバレル研磨の省略を試みた。



Figure 6: Finished appearance of 3-cell cavity.

4. 性能評価

4.1 たて測定の結果

液圧成形後の空洞を、従来工法で製造した空洞に対して行っているのと同じ 100 μm の電解研磨を行い、熱処理後に仕上げの 15 μm の電解研磨を施した。空洞の

内面の様子を Figure 7 に示す。表面粗さは Figure 8 に示すように 9.1 μmRa である。通常の電解研磨後の表面粗さは 0.1 μmRa 程度なので、かなり荒れた面であることは明らかである。

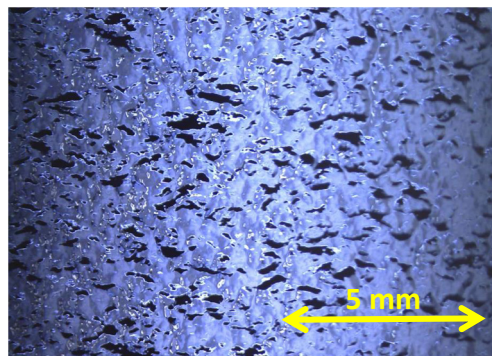


Figure 7: Inside cavity after EP at equator.

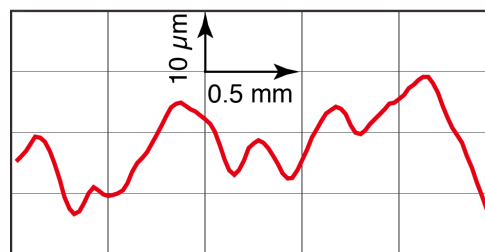


Figure 8: Measured roughness (measured direction: radial near the equator).

たて測定を KEK の STF で行った。空洞形状は製造の都合で、すべてセンターセル形状である。そのためフィールドバランスが一様にならない。 π モードにおけるフィールドフラットネスは 70%程度である。両端のセル間のフィールドバランスも悪かったので、機械的な矯正を行ったところ、1290.085 MHz においてフィールドフラットネスは 66.6%に改善された。たて測定の結果を Figure 9 に示す。 E_{acc} は 1 セル(端部)で測定している。クエンチが 2 セル(中央)で発生した。1 セルでの測定結果をフィールドバランスを使って換算して 2 セルでの最大加速勾配を求めたところ、32 MV/m は得た。グラフの横軸はこれを説明するため 2 本表示した。ILC 仕様の 35mV/m には達しなかった。このような荒れた内面形状で加速空洞として使用できるのは、非常に驚くべきことである。尚、この結果は 1 回目のたて測定の結果である。

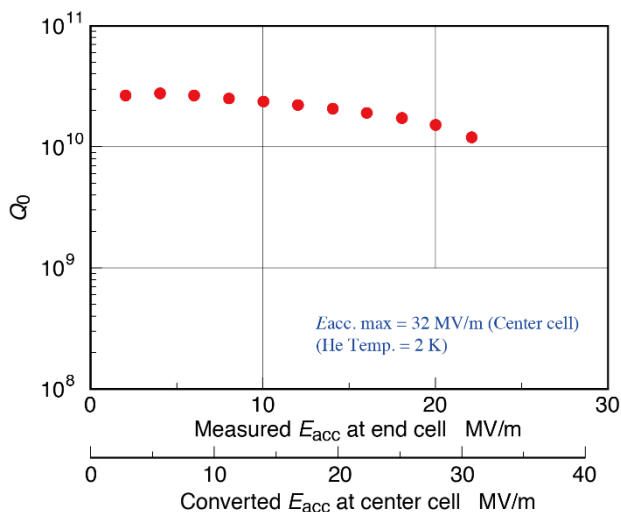


Figure 9: Result of vertical test (Q-E curve).

4.2 内部形状の測定

空洞は内部を真空引きして使用するので、耐圧の観点から最少厚みを 2 mm として設計した。これが満たされているかを調べるために、空洞の肉厚分布を超音波厚み計で測定した。測定結果を Figure 10 に示す。円周上の 4 か所について測定した。Figure 6 に示した空洞の左側のセルを 1 セルとした。0mm の位置が各セルの赤道部、その左右 ± 80 mm の位置がアイリス近傍である。赤道部近傍の肉厚が最も薄く、1 セルでは、2 mm を下回る結果となった。Figure 6 を見ると 1 セルの赤道部には、筋のような凹みが見える。幅は 1 mm 程度である。これは、液圧成形時の金型の合わせ面が十分に密着していなかったため発生したと思われる。厚み計の測定子の直径は 2 mm のため、局所的に厚みが変わるところでは、誤差が大きく 2,3 セル目の傾向と較べると小さい測定結果になったと考えられる。今回はパレル研磨を行っていないため、前報[5]に較べて、全体的に肉厚が大きい。もう少し赤道部の減肉を減らしたいので、予成形のくびれ間ピッチをもう少し大きくする等の成形条件の最適化を進めたい。

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、空洞の外形を 3 次元測定機 (CMM) で測定し、Figure 10 に示した肉厚を外径各点の測定値から差し引くことにより、内部形状を推定した。推定した内部形状を Figure 11 に示す。アイリス部内径は、直接、3 次元測定機で測定した。

空洞の形状は赤道部が円、アイリス部がだ円で設計されているので、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 を用いて固有振動数を計算した。ネットワークアナライザを用いた実測値とよく一致した。Table 2 に設計値と合わせて各モードの結果を示す。測定は矯正後の空洞に対して行った。

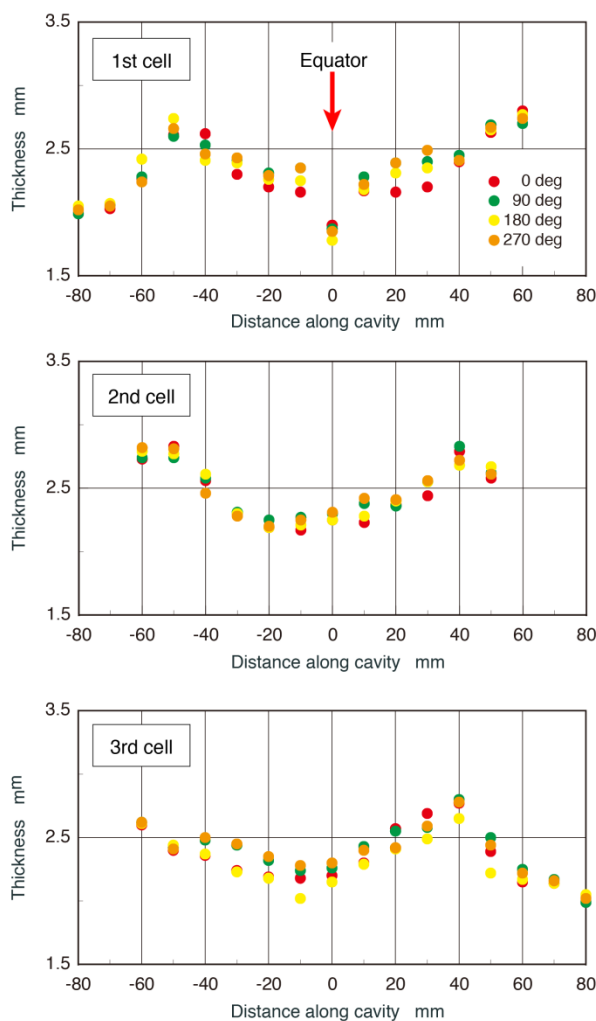


Figure 10: Thickness distribution along outer surface of curved cavity (from left-hand cell).

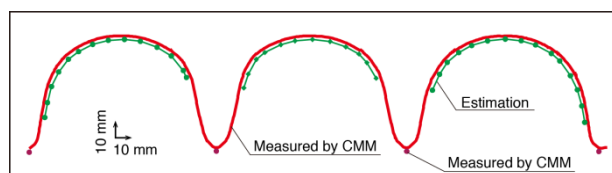


Figure 11: Estimation of inner shape.

Table 2: Natural Frequency of Cavity in Each Mode (unit: MHz)

Mode	π	$2/3 \pi$	$1/3 \pi$
Calculation (design shape)	1297.194	1287.921	1279.084
Calculation (measured and fitted shape)	1281.277	1272.874	1261.984
Measured (room temp.)	1285.187	1275.001	1265.781
Measured (low temp.)	1287.341	1277.012	1267.731

5. おわりに

液圧成形による 3 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 32 MV/m に達した。液圧成形で荒れた内面に電解研磨を施した、非常に荒れた内面状態で得られた結果である。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。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] 山中 他, “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”, 第 12 回日本加速器学会年会プロシーディングス, THP056, 2015, pp. 1105-1108.
- [6] M. Yamanaka *et al.*, “Hydroforming SRF cavities from seamless niobium tubes”, in Proc. SRF2015, Whistler, Canada, THPB041, 2015, pp. 1176-1180.
- [7] 永田 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”, 本プロシーディングス, MOP014.
- [8] “ILC Technical Design Report”, Volume 3- Accelerator, Part II: Baseline Design, 2013;
<https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>