

液圧成形による超伝導加速空洞の製造

高エネルギー加速器研究機構 機械工学センター

教授・センター長 山中 将

(平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014017)

キーワード：液圧成形，ニオブ，加速器

1. 研究の目的と背景

粒子加速器は、電磁波などを使って電子や陽電子などの粒子にエネルギーを加え、粒子を加速する装置である。加速した粒子をぶつけて噴出する様々な粒子を観測したり、がん治療のための医療機器に用いられ、様々な学術および産業用途がある。加速器には種々の方式があるが、図 1 に示す超伝導加速空洞は、空洞セル内に大電力の高周波を導き、空洞内にできる電場を利用して粒子を加速する。空洞の材料には純ニオブが用いられ、液体ヘリウムを用いて 4 K まで冷却し、超伝導状態にして運転する。電気抵抗がほぼゼロのため、電力損失や発熱が抑制され、小さな電力、短い距離で大きなエネルギーを粒子に与えることができる¹⁾。



図 1 1.3 GHz 9セル超伝導加速空洞（全長 1.3 m，従来のプレス加工と電子ビーム溶接にて製造）

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) で結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 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。EBW を用いずに液圧成形を用いて空洞を低コストで製造する研究が行われている。特にドイツの DESY 研究所において 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パイプを用いて図 1 に示したものと同形式の 3 セル空洞を液圧成形によって製造し、これを 3 台 EBW で結合して 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²⁾。しかし、この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一気に 9 セル空洞を液圧成形で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 本の長尺パイプから一気に 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であるかを見極めることである。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) は 1994 年より液圧成形の研究に着手した³⁾。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⁴⁾、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。しかしながら成形性のよいニオブパイプが入手できず、KEK はこれまで液圧成形による空洞の製造の成功に至っていない。本報告では、初めて成功した 1 セル空洞の製造と性能評価の結果について詳細に述べる。その後実施した、3 セル空洞の結果についても紹介する。

2. シームレスニオブパイプ

ここでは DESY 研究所で実績のある、米国 ATI Wah Chang 社製のシームレスニオブパイプ ($\phi 130 \times 450$, 硬さ: 46 HV) を入手して実験を行った。引張強度は 190 MPa、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パイプの長手方向に切り出して、当方で測定した。1.3GHz 空洞の赤道部 (大径部) の内径は、205 mm である。一方、アイリス部 (小径部) 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、円周方向に 200% 程度の伸びが必要である。ニオブの伸びは 50~60% であるため、これは困難と予想できた。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のが予想され、そこでも 2.6 mm 程度を確保するためである。

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図 2 に示す。図は 3 セル空洞の場合を示している。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。図 3 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す。ローラとパイプの間に潤滑剤は用いていない。パイプをローラ近傍の左右両側でコレットチャックにより把持し、くびれを 1 か所ずつ成形する。1 セル空洞の場合は 2 か所となる。く

びれの間隔は 165 mm で、両端を把持する部分を加えて、パイプ長さは 450 mm 必要である。予成形終了後、真空炉を使って焼鈍しを行った。熱処理条件は 750℃×3 時間である。

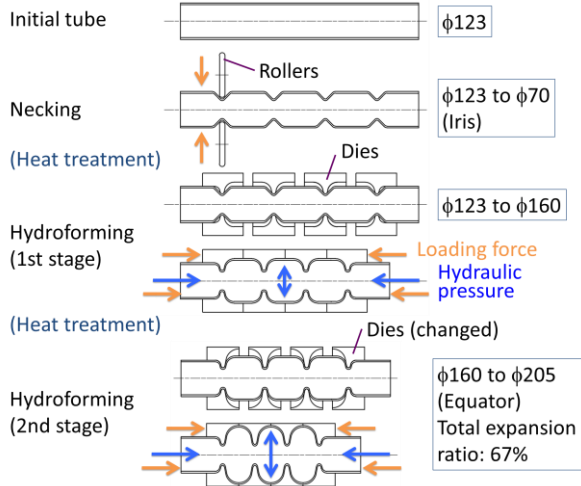


図 2 予成形と液圧成形の工程

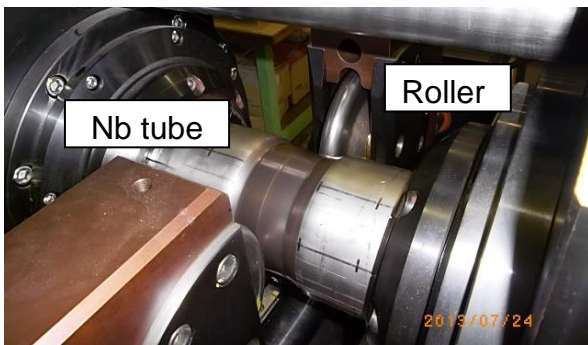


図 3 ネッキング加工機とニオブパイプ

次に液圧成形で空洞全体を成形した。液圧成形は図 2 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込む。金型の外周は円筒形状であり、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、パイプを金型に密着させる。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。パイプ長さは図に示したように短くなる。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、流体として油を使用している。液圧成形の様子を図 4 に示す。



図 4 液圧成形の様子

成形が完了したニオブパイプを図 5 に示す。赤道部が最も伸びる部位であり、円周方向に 62%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。また空洞内面の赤道部付近の写真を図 6 に示す。工程の途中に入れている焼鈍しは、加工による局所的なひずみを解放し、全体の均一な成形性の回復を期待している。温度は経験的に決めたものであり、あまり高いと肌荒れを生じる。今後、熱処理のプロセスを最適化したい。

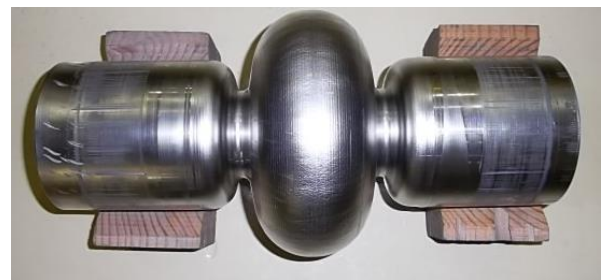


図 5 液圧成形後のニオブパイプ

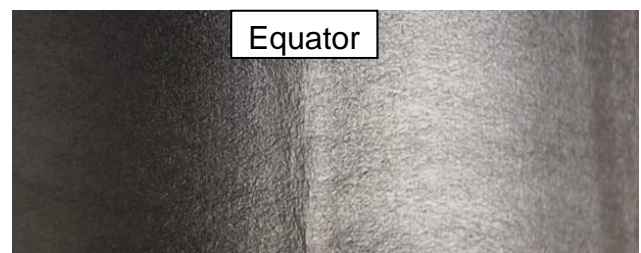


図 6 空洞内部の様子

3・2 空洞への仕上げ

図 5 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 1 セル空洞を図 7 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ので、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⁵⁾。KEKはバレル研磨機を所有していないため、処理を他の研究機関に依頼した。使用されたバレル研磨機を図8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5)に示されているので、参照されたい。



図7 完成した1セル空洞



図8 バレル研磨機⁵⁾

4. 性能評価

4・1 電界性能試験の結果

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、電界性能試験をKEKの超伝導リニアック試験施設で行った。電界性能試験では、液体ヘリウムを満たしたデュアーに真空引きした空洞を浸漬し、超伝導状態にする。さらに空洞内部に約1.3 GHzのマイクロ波を入力し、どの程度高い電場が立つかを調べる。空洞の性能は加速勾配（単位：MV/m）で表される。これは単位長さあたり、どの程度、荷電粒子を加速することができるかを示す。この値が大きいほど加速性能が優れている。試験結果を図9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⁶⁾。

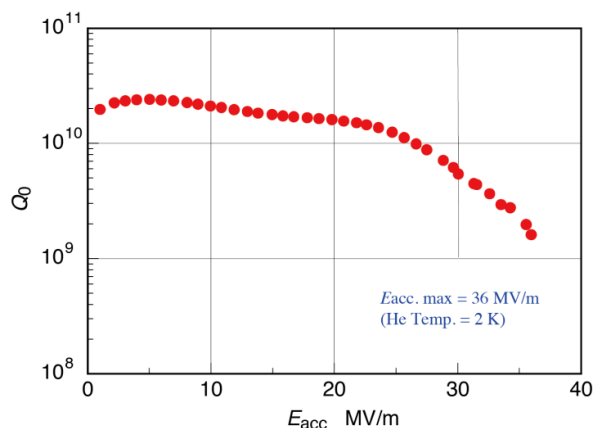


図9 電界性能試験の結果

4・2 肉厚と固有振動数の測定

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として設計している。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。測定結果を図10に示す。円周上の4か所について測定した。左右の±80 mmの位置がアイリス近傍である。赤道部の肉厚が最も薄く、下限値を下回った。今後、くびれの間隔を広げて軸押込量を増したり、負荷経路を最適化したり、成形条件の改善により減肉を減らす工夫が必要である。

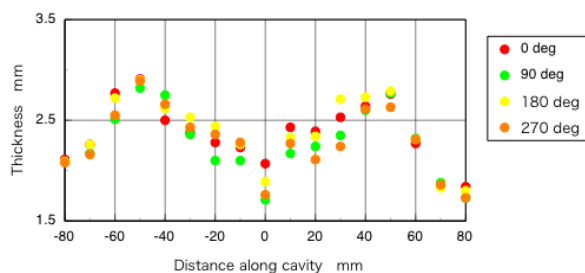


図10 空洞の肉厚分布

空洞の緒元の一つに固有振動数があり、設計値に合うように空洞の内部形状が決定される。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。空洞内部の形状を直接測定するのは困難であるので、図11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図12に示すように、内部形状を推定した。設計周波数は1287.2254 MHzで、成形した空洞を実測した結果は1274.4375 MHzである。上述のように赤道部の厚さが予想より薄く、空洞の容積が設計より大きいため、設計値より約13 MHz低くなった。誤差は1%程度であり、許容範囲である。この点においても、加速空洞として使用できることを確認した。赤道部内面の半径は設計値が102.4 mmに対して、実測値は103.48 mmである。

誤差は約 1 mm である。塑性加工の観点からは、空洞製造は精度があまり厳しくないアプリケーションと言える。

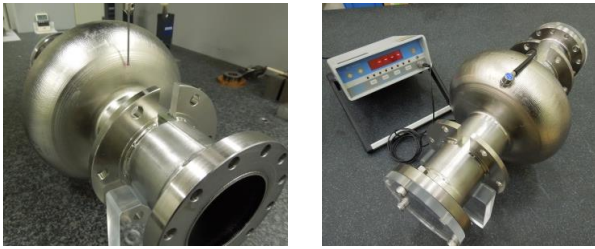


図 11 3次元測定器による外形形状の測定（左）と超音波厚み計による肉厚測定（右）

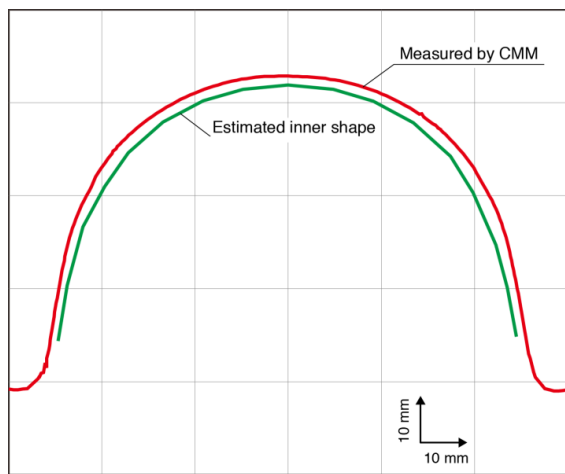


図 12 推定した内部形状

5. 3セル空洞の結果

1セル空洞の場合と同じく、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。製造工程は 1セル空洞の場合と同じである。完成した 3セル空洞を図 13 に示す。液圧成形後の内面は 1セル空洞の場合と同様に荒れているが、3セル空洞では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。



図 13 液圧成形により製作した 3セル空洞

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図 14 に示す。表面粗さは 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。電解性能試験の結果、最大加速勾配 32 MV/m を得た。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。

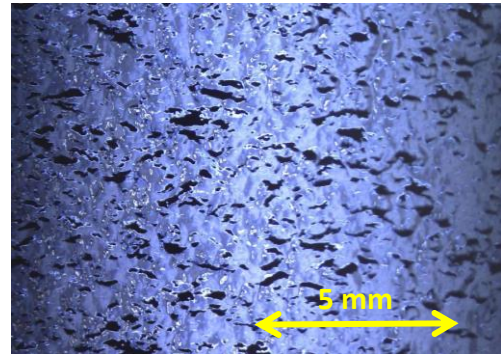


図 14 電解研磨後の 3セル空洞内面の様子

6. まとめ

液圧成形による 1セル空洞の製造に成功し、電界性能試験の結果、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。さらに 3セル空洞の製造にも成功した。今後は 9セル空洞の実現に向けて、研究を継続する。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の平成 26 年度一般研究開発助成 (AF-2014017) により行われた。空洞の試作に関しては、KEK 機械工学センターならびに空洞製造施設 (CFF) を利用した。これらを記して、深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Padamsee, H., Knobloch, J. & Hays, T. : RF Superconductivity for Accelerators, (1998), 37-56, John Wiley & Sons.
- 2) Singer, W. & Singer, X. : Phys. Rev. ST Accel. Beams, 18-022001 (2015), 1-22.
- 3) 藤野武夫: 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).
- 4) 上野健治・井上均・渡辺勇一・藤吉裕一・高橋明・斎藤健治・舟橋義聖・東保男: 第 4 回日本加速器学会年会プロシーディングス, (2007), 76-78.
- 5) Palczewski, A. D. & Cooper, C. A. : Proceedings of SRF2013, (2013), 395-400.
- 6) 山中将・井上均・清水洋孝・梅森健成・J. A. HOCKER・T. TAJIMA: 第 12 回日本加速器学会年会プロシーディングス, (2015), 1105-1107.