



M. Yamanaoka

## 液圧成形による超伝導加速空洞の製造

山中 将\*

### 1. まえがき

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。加速した粒子を衝突させ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。従来の加速器に比べて省エネというメリットがあるが、材料にレアメタルであるニオブを使うため初期コストは高くなる<sup>1)</sup>。



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。特にドイツ電子シンクロトロン研究所（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<sup>2)</sup>。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と考えた。現在のところ、これは実現されていない。

本研究の最終目標は 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<sup>3)</sup>。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<sup>4)</sup>、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。しかしながら当時は成形性のよいニオブパイプが入手できず、液圧成形による空洞製造の成功に至らなかった。本報告では、2012-16 年に行ったニオブ製の 1 セルと 3 セル空洞の製造と性能評価の結果について述べる<sup>5)</sup>。さらに 2021 年より取り組んでいる銅フルシームレス空洞の製造についても紹介する。

### 2. シームレスニオブパイプ

1.3 GHz 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 のニオブ板材を用いているが、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。

開発の当初は DESY で実績のある、米国 ATI Wah-Chang 社（当時）製のシームレスニオブパイプを入手して実験を行った。引張強度 190 MPa、伸び 56%、硬さ 46 HV 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。その後、日本のアルバック社がシームレスニオブパイプの製造に成功し、同社製のパイプも使用し実験を行った。

\* 高エネルギー加速器研究機構 機械工学センター 教授

### 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りする。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。3 セル空洞の場合はパイプ長さは 800 mm である。予成形終了後、ネッキングによる加工ひずみを減らすために、真空炉を使って 750℃×3 時間の焼鈍を行った。

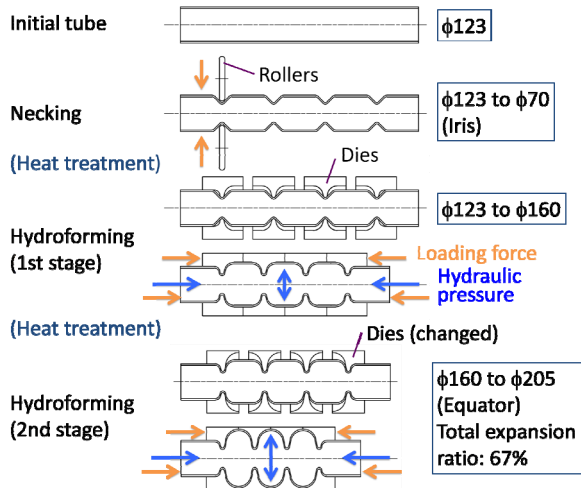


図 2 予成形と液圧成形の工程

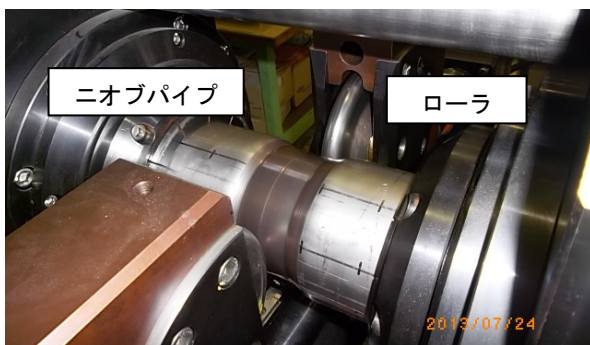


図 3 ネッキング加工機とニオブパイプ

次に液圧成形でセル部分を成形した。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。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。同様の工程で 3 セル空洞の製造を行い成功した。

その後、9 セル空洞の成形にトライした。9 セル空洞の場合は、パイプ長さは 2000 mm である。2 本のパイプを試したが失敗した。長尺のニオブパイプは非常に高価である。成形コストが下がっても、トータルコストが従来工法に比べてメリットが出せない状況であり、開発を中断した。



図 4 液圧成形の様子

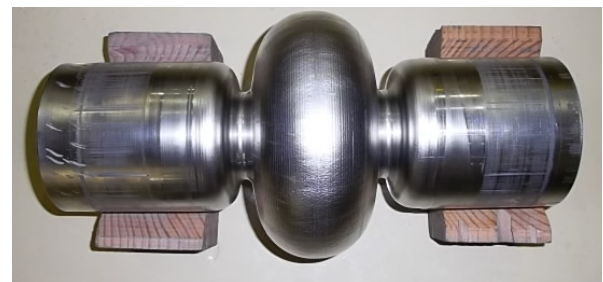
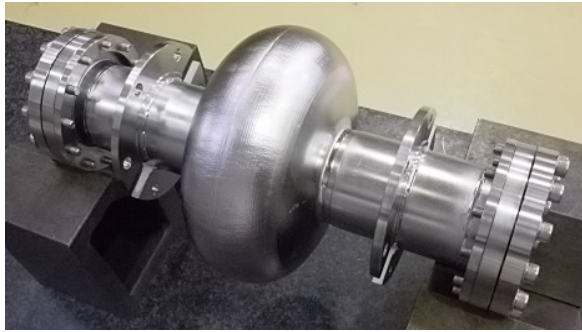


図 5 液圧成形後のニオブパイプ

#### 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。完成した空洞を図 6 に示す。これまでに 4 台の空洞 (Wah-Chang 製パイプ、アルバック製パイプ、各 2 台) を製造した。





(a) Wah-Chang 製ニオブパイプ



(b) アルバック製ニオブパイプ

図6 完成した液圧成形ニオブ空洞

#### 4. 電界性能試験結果

電界性能試験とは、加速空洞がどの程度、粒子を加速できるかを調べるものである。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。アルバック製パイプを用いて製造した 1 セル空洞の試験結果を図 7 に示す。最大加速勾配は 40 MV/m に達し、加速空洞として使用できることを確認した。3 セル空洞は 27 MV/m である。Wah-Chang 社パイプを使った 1 セル、3 セル空洞はそれぞれ 36 MV/m、32 MV/m である<sup>5)</sup>。図 1 に示した空洞の標準的な値（目標値）は 35 MV/m である。液圧成形後の内面が肌荒れしたので、1 セル空洞はバレル研磨により平滑化した。3 セル空洞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。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  $\mu\text{m}$  の電解研磨を行い、熱処理後に仕上げの 15  $\mu\text{m}$  の電解研磨を施した。空洞の内面の様子を図 8 に示す。表面粗さは 9.1  $\mu\text{mRa}$  である。通常の電解研磨後の表面粗さは 0.1  $\mu\text{mRa}$  程度なので、かなり荒れた面であることは明らかである。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。

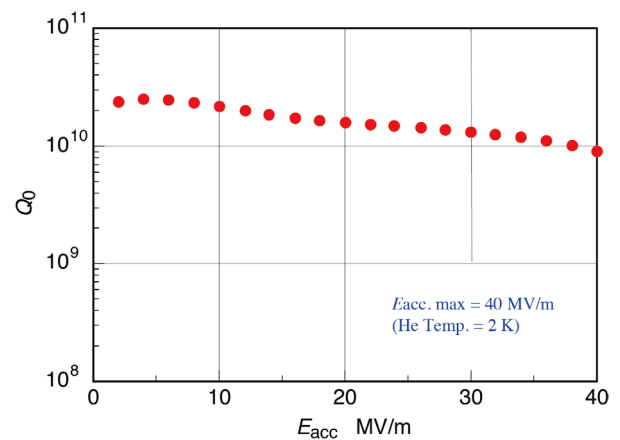


図7 電界性能試験の結果

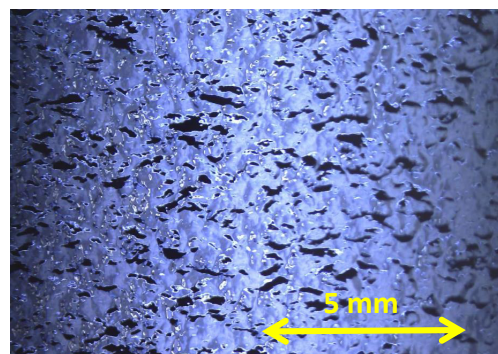


図8 電解研磨後の3セル空洞内面の様子

## 5. 銅フルシームレス空洞の製造

### 5.1 液圧成形の工程

超伝導空洞のコストを低減するために、銅で空洞本体を製作し、内部をニオブでコーティングして超伝導を発現させ、廉価な空洞を実現する研究が近年、盛んに行われている。加速空洞の内面は滑らかさが求められ、コーティングの下地は継ぎ目の無い空洞が理想的である。欧州原子核研究機構（CERN）は1989年までに銅パイプを用いて液圧成形による空洞製造に成功している<sup>6)</sup>。工程は3章で述べたのと同じく、アイリス径より太いパイプを使って、ネッキング後に液圧成形によりセル部を作る。図5に示した形状の仕上がりになるため、アイリス部で切断してビームパイプを左右に溶接する必要がある。今回、さらに左右のパイプとセルの間の溶接継ぎ目も無くして、完全に1個の部品としてセル1つの空洞を実現した。これをフルシームレス空洞と呼ぶ。これは日本ニューロン（株）との共同研究の成果である<sup>7)</sup>。1本のパイプを一気に空洞形状に成形する方法を試したが難しいことがわかり、図9に示す2工程による成形を提案した。2種類の金型を用意し、液圧成形のみで仕上げる。使用した液圧成形機は立型のため、パイプと金型は図2と異なり、縦方向の配置となる。一方の金型の底部を固定し、他方の金型を押し込む、図2ではネッキングが必要であるが、これを廃して工程を簡素化した。ネッキングはアイリス部を所すず加工するので時間がかかる。生産性の大幅な向上が期待できる。試作した銅空洞は、図6と同じ1.3 GHz 空洞あるが、寸法が少し異なる。まず外径88 mmの銅パイプの中央を130 mm程度に膨らませ、次に金型を交換して、最終形状の210 mm程度まで膨らませる。1工程と2工程の間には、伸び性を回復するために500℃×2時間の真空焼鈍を行う。

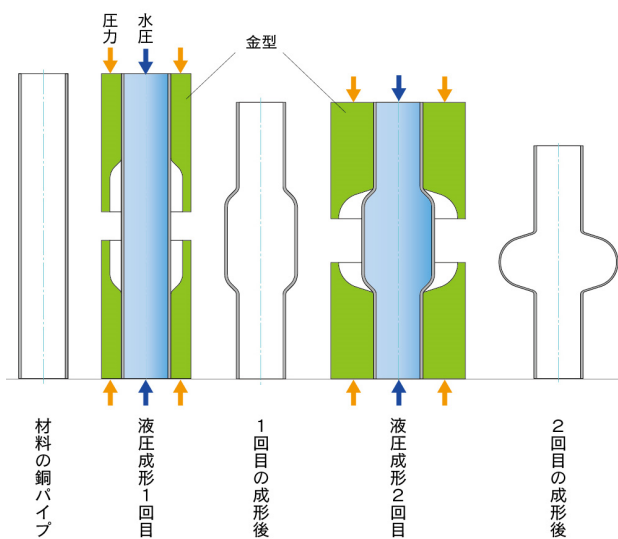


図9 フルシームレス空洞の製造工程

銅はニオブより成形性が良いが、液圧成形でこれほど大きく膨らませる工業的な例は見当たらない。近年、液圧成形の過程をコンピュータで精度よくシミュレーションできるので、どのような条件で成形すればうまく膨らむか、実際の成形に先立ちシミュレーションにより検討した。図10にシミュレーション結果を示す。シミュレーションには実際の銅パイプを展開して製作した試験片を用いて引張試験を行い、得られた材料パラメータを使用した。押し込み速度は1 mm/sである。

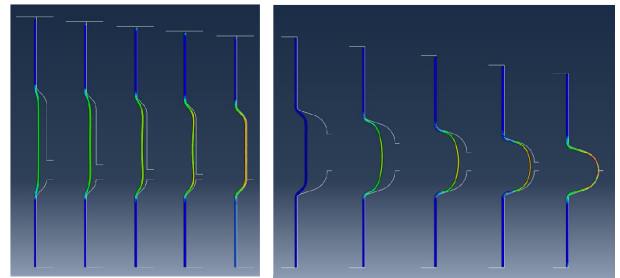


図10 シミュレーションの結果：各工程での最大トレスカ応力は、それぞれ382, 424 MPaとなった。シミュレーションは日本ニューロンが行った。

### 5.2 成形例

実際に使用した液圧成形機を図11に、成形した銅パイプを図12に示す。液圧成形機は縦方向に圧縮する。流体は水である。シミュレーションを基に決定した、ストロークと水圧の関係（負荷経路）を数値データとして、液圧成形機に入力することで、自動的に成形できる。図4に示した液圧成形機は手動機であるが、今回は自動機である。成形時間は各行程2分程度である。銅シームレスパイプは外径88 mm、肉厚5 mmである。材質は無酸素銅（JIS C1020）である。純度は99.98%、引張強度219 MPa、伸び67%、硬さ34HVである。電子管用無酸素銅 C1011 という高純度の材料もあるが、ここでは通常は無酸素銅を用いた。JIS H3300にシームレス銅パイプが規定されており、4 m程度のパイプを国内で複数社から調達可能である。使用したパイプは引き抜きにより製造された。成形により肉厚は減少し、中央部は1工程後に3.9 mm、2工程後に2.6 mmとなった。実験において破裂したパイプは、肉厚のばらつきが大きいものが見られた。今回は肉厚のばらつき（最大値－最小値）が0.1 mm以下になるように特別に製造したパイプを使用した。本成形では非常に大きく膨らませるので、材料の伸びも大切であるが、それ以上に肉厚のばらつきを小さくすることが重要である。銅パイプは工業的に流通しているので、ニオブパイプと比べるとコストは1/65以下である。

切断した空洞内面を図13に示す。成形前のパイプ内面の長手方向の表面粗さは1.0  $\mu\text{mRa}$  である。成形後の赤道部は2.9  $\mu\text{mRa}$  である。肌荒れの少ない良好な仕上がりとなった。これまでに十数本の成形に成功し、高い再現性を



確認した。空洞の両側にフランジを取付けて完成となる。

現在、この銅空洞は CERN に提供され、ニオブコーティング作業が行われている。従来の継ぎ目のある空洞に比べて良質なニオブコーティング空洞が出来ることを見込んでいる。



図 11 液圧成形機（日本ニューロンの好意による）



図 12 成形した銅パイプ：上段・素管，中段・1 工程後のパイプ，下段・2 工程後のパイプ，成形によりパイプの全長が短くなっていく様子がわかる。

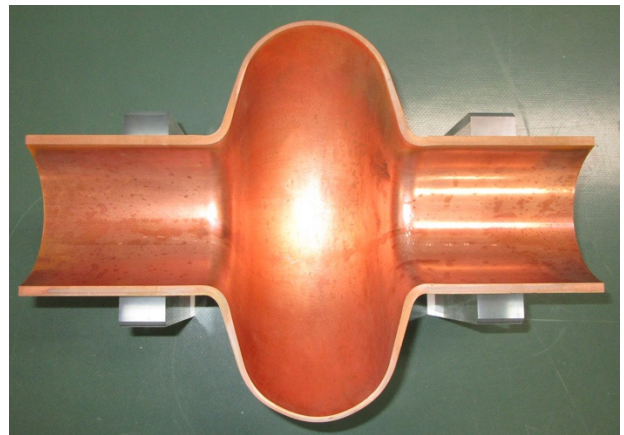


図 13 切断した空洞内部：パイプ部の肉厚は 5 mm，赤道部の厚さは 2.6 mm. 肉厚分布があることがわかる。

## 6. まとめ

液圧成形による 1 セル，3 セルのニオブ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 40 MV/m に達し，加速空洞として使用できることを確認した．さらに銅 1 セルフルシームレス空洞を開発し，廉価なニオブコーティング空洞の開発に貢献した．ニオブコーティング研究の進展を期待している．

## 謝 辞

本研究は，公益財団法人天田財団からの一般研究助成（平成 26 年度 AF-2014017，令和 3 年度 AF-2021005-B2）により実施した研究に基づいていることを付記するとともに，同財団に感謝いたします．銅空洞の液圧成形は日本ニューロン（株）で行われ，同社の西勇也氏，西森一喜氏との共同作業の結果である．また KEK の山本明名誉教授の橋渡しにより，CERN から銅空洞に関する多くの助言を得た．これらを記して感謝の意を表す．

## 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・他：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) 山中将・井上均・他：第 12 回日本加速器学会年会プロシーディングス，(2015)，1105-1107.
- 6) Hauviller, C.: Proc. 1989 IEEE Particle Accelerator Conf., (1989), 485-487.
- 7) KEK プレス発表，世界初の継ぎ目なし加速器心臓部の製造に成功，2023/11/2，