



PRESS RELEASE



報道関係各位

2023年11月2日
大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構
日本ニューロン株式会社

世界初の継ぎ目なし加速器心臓部の製造に成功

～次世代加速器のコストダウンに貢献～

本研究成果のストーリー

● Question

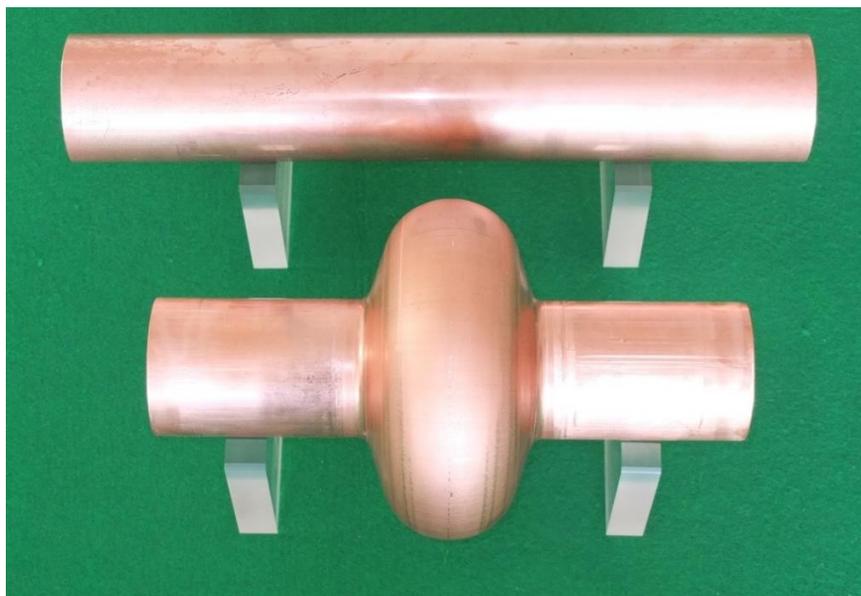
超伝導加速器は省エネというメリットがある。しかし、心臓部と言える「加速空洞」をレアメタル（ニオブ）で作るため初期コストが高い。性能を上げながらコストを低く抑える製造方法はないだろうか。

● Findings

銅で作った空洞の内面にニオブをコーティングして超伝導を発現させ、廉価な超伝導空洞を実現する技術が海外にある。この技術をいかすために、従来より高性能な継ぎ目なしの空洞を作ることに挑戦し、技術を確認した。

● Meaning

採用した金属加工法「液圧成形」は油圧部品や自動車部品の製造に広く利用されている技術だが、今回確認した空洞製造法は、これを応用し銅の性能を極限近くまで引き出したものである。生産性が抜群によく、劇的なコストダウンが期待できる。



1本の銅パイプ（上）が、液圧成形技術でここまで変形する（下）

1本の銅パイプから、液圧成形により一体型の加速空洞下地を製造することに世界で初めて成功した。継ぎ目のない滑らかな内面に、従来の超伝導空洞の材料である金属ニオブをコーティングすれば、廉価な超伝導空洞を製造することができ、コストダウンに繋がる。

概要

電気抵抗がほぼゼロの状態では粒子を加速できる超伝導加速空洞*1 を利用した加速器が、近年、世界各地に建設され、各種の新しい実験を可能にしています。超伝導加速空洞は、消費電力は低いのですが、材料にレアメタルであるニオブ*2 を使うため初期コストは高くなります。

そこで、銅で空洞本体を製作し、内面にニオブをコーティングして超伝導を発現させ、廉価な超伝導空洞を実現する研究が盛んに行われています。加速空洞の内面は滑らかであることが求められるため、コーティングの下地には継ぎ目のない空洞が理想的ですが、まだ誰も製造に成功していませんでした。

今回、塑性加工法の一つである液圧成形*3 を用いて、1本のシームレス（継ぎ目なし）銅パイプから、一体型のフルシームレス空洞を製造することに世界で初めて成功しました。

*1. 超伝導加速空洞

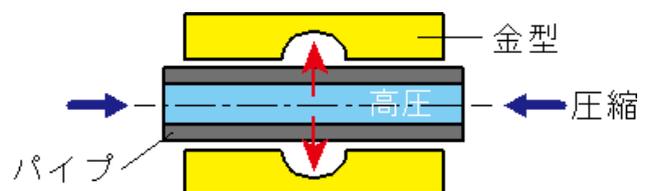
加速空洞とは金属製の空洞内部に高周波を印加し、マイクロ波が作る電場で電子や陽電子などの荷電粒子を加速する加速管で、超伝導と常伝導に分類できる。超伝導加速空洞は冷媒（液体ヘリウム）により、空洞を極低温に冷却して超伝導化することで、常伝導加速空洞に比べて高周波損失を10～100万分の1にできるため、主として高加速電界かつ連続波で運転する加速器に用いられる。材料の金属として、超伝導加速空洞ではニオブ、常伝導加速空洞では銅が用いられる。

*2. ニオブ

原子番号41の金属元素。元素記号はNb。非常に高価なレアメタルである。純度99.9999%以上の純ニオブが超伝導加速空洞の材料として用いられる。

*3. 液圧成形

パイプの外側に金型を配置し、パイプ内に高い液圧を加えることによりパイプを膨張させて成型する加工方法。バルジ加工ともいう。製管や自動車部品の製造に用いられる。加工条件は内圧とパイプの押し込み量である。



研究グループ

この成果は高エネルギー加速器研究機構（KEK）共通基盤研究施設 機械工学センターの山中将教授と日本ニューロン株式会社の共同研究によるものです。日本ニューロンは京都府にある伸縮管やダンパーの製造を行う会社で、大型の液圧成形機を有し液圧成形に関する多くの知見を有します。

2015年からニオブ製空洞の開発を目指して共同研究を開始しましたが中断があり、2021年に銅製液圧成形空洞の開発を目指した共同研究を再開し、今回の成功に至りました。

研究者からひとこと



左から、日本ニューロンの西森一喜さん、西勇也さん、KEKの山中将教授

KEKの山中です。2011年にKEKに着任し、この研究を引き継ぎました。毎月のように日本ニューロンさんを訪問し、液圧成形機を借りて成形テストを繰り返しました。コロナ禍で思うように実験ができない時期もありましたが、日本ニューロンさんの若い技術者と一緒に実験と解析を行い、開発を成功させました。

世界中の加速器の研究所にこの空洞を提供して、同じ土俵でコーティングの技を競ってもらうのが夢です。

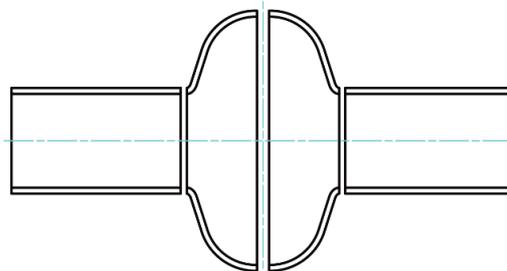
加速空洞とは

加速空洞は加速器の荷電粒子の通り道に設置して、粒子を加速するために使われるもので、高周波高電界を効率的に蓄積するために設計された膨らみがあります。この膨らみをセルと呼び、荷電粒子が接する内面が、設計通りであることと鏡のように滑らかであることが求められます。加速器の用途や出力によって必要とされるセルの数や大きさ、形が異なります。

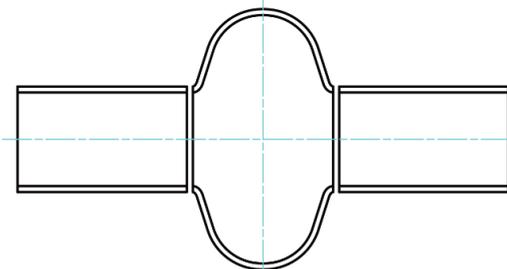
従来の空洞は、お椀型の部品2個と左右のパイプ状の部品2個からなり、溶接で結合されています。精密な溶接を行っても溶接継ぎ目が残し、継ぎ目の部分は磨く必要があります。

そこで、根本的に継ぎ目をなくすために、1990年ごろに液圧成形でセル部分を製造する方法が開発されました。この場合、部品は3個となります。

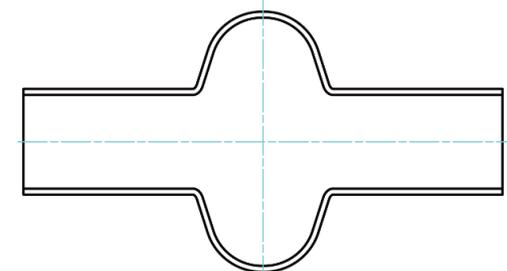
今回、さらに左右のパイプとセル間の溶接継ぎ目もなくして、完全に1個の部品としてセル1つの空洞を実現しました。これをフルシームレス空洞と呼びます。



従来の空洞形状（4個の部品から構成）



シームレス形状（セル部分を一体成形）



フルシームレス形状（完全に継ぎ目なし）

近年、銅で空洞本体を製作し内面にニオブをコーティングして超伝導を発現させる研究が、海外で盛んに行われています。ニオブをうまくコーティングするためには滑らかな内面が望ましいので、フルシームレス形状は理想的なコーティング用空洞と言えます。

なぜこの研究を始めたのですか

KEK は継ぎ目のない 9 連の空洞の製造を目指して、1990 年ごろに液圧成形による空洞製造の研究を開始しました。2010 年からはニオブ製の空洞開発を目指し、2015 年にニオブ製の 3 連の空洞製作に成功しました。しかし太いパイプを絞ることでセルを成形していたため、ニオブパイプのコストが高く、従来の継ぎ目のある工法に比べてメリットが出せず開発が中断していました。

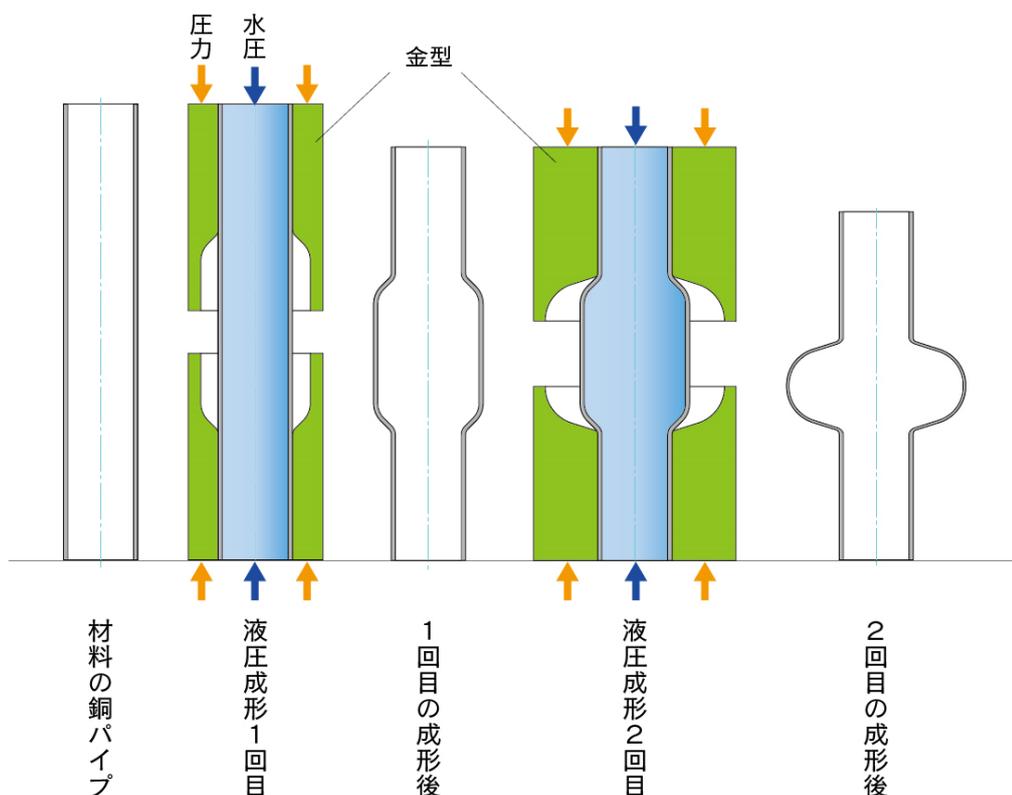
近年になって、欧州原子核研究機構（CERN）のコーティングの研究者から「滑らかな銅空洞が作れないか」と相談されたことをきっかけに、銅で空洞下地を作る研究が始まりました。

ひらめいたところはどこですか

液圧成形では、パイプの外側に金型を配置し、パイプの内部を水で高圧にして軸方向に圧縮し、金型に沿って変形させることにより空洞を作ります。

1 本のパイプを一気に空洞形状に成形する方法を試しましたが難しいことが分かりました。そこで、金型を 2 つ作り、成形を 2 段階に分けたことが成功のポイントでした。

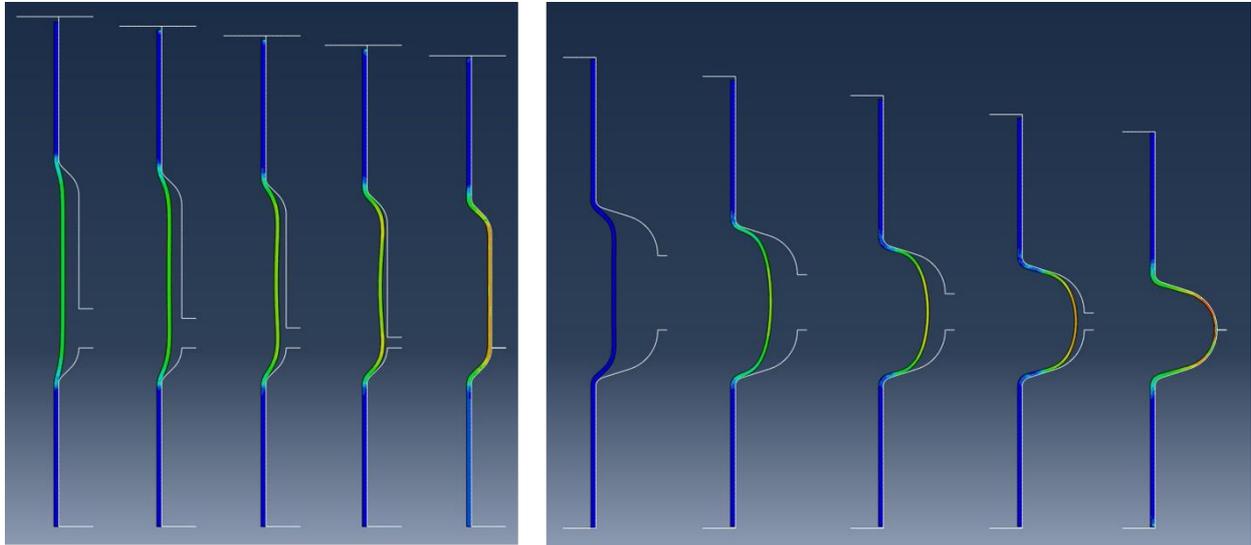
試作したサイズの空洞の場合、まず外径 88 mm のパイプの中央を 130 mm 程度に膨らませます。次に金型を交換して、最終形状の 210 mm 程度まで膨らませます。成形時間は各工程 2 分程度です。



フルシームレス空洞の製造工程

液圧成形は油圧部品や自動車部品の製造に広く利用されている技術です。コンピュータにより成形過程をシミュレーションできます。

実際の成形実験を行う前に、どのような金型を使って、どのような条件で成形すればうまく膨らむか最適な成形条件を検討しました。シミュレーションは日本ニューロンが実施しました。



コンピュータによるパイプ変形のシミュレーション結果
薄いグレーの線は金型の内側を示す

苦労したところはどこですか

シミュレーション結果を基に成形実験を繰り返しました。

パイプ内には最大 30 MPa の高圧水が供給されます。家庭用の洗車などに使う高圧洗浄機の出
力（8 MPa 程度）に比べると格段に大きなポンプを使って高圧水を供給します。

成形がうまくいかないと、途中でパイプが破裂し水が一気に噴き出します。何十回も試行錯誤
を繰り返し、条件を微調整して、破裂せずに短時間で成形する条件を定めました。



成形の過程が分かる動画（57 秒）

YouTube KEK チャンネル「世界初の継ぎ目なし加速器心臓部の製造に成功」

この過程で、パイプの性状が最も重要であることが分かりました。パイプの肉厚は 5 mm ですが、一周にわたり同じ厚さで仕上がっている必要があります。使用したパイプは最も厚いところと最も薄いところの差が 0.1 ミリ以下で、高精度に仕上がっています。

またパイプのどの部分も同じように伸びることにより、美しい形状に成形することが可能です。引き抜きという工法でパイプは製造されますが、今回使用した銅パイプは引き抜きを専門に行う国内メーカーから調達しました。

空洞内の凸凹は空洞の性能に大きく影響します。わずかでも段差や突起があると、そこを通る高速な荷電粒子により空洞が発熱する恐れがあるためです。発熱すると超伝導状態を保てなくなり、加速器の運転ができなくなります。

ニオブのコーティング厚さは 5-10 μm 程度が適切とされています。きれいにコーティングするためには、下地の銅表面を粗さ 0.1 μm 程度に研磨する必要があります。研磨の時間とコストを減らすため、下地のセル内面が凸凹していないことが求められます。

今回開発した空洞は、成形前のパイプ内面の粗さが 1 μm で、成形後が 3 μm です。成形による表面の荒れを十分に小さく抑制できました。

それで世界はどう変わりますか

良質なパイプと自動化された液圧成形機を用いることで、パイプを機械にセットして起動ボタンを押せば、数分後に空洞形状ができあがります。これまでに十数本の成形に成功し、高い再現性を確認しました。

10 本程度の空洞完成品を製造する場合を想定すると、従来の工法に比べて 1/10 程度の時間で生産でき劇的な時間短縮となります。これにより廉価な空洞製造に貢献できます。コストが下がれば、超伝導加速器の普及につながります。

KEK 発の新しいアイデア、国産の銅パイプ、国内企業での成形の組み合わせであり、純国産の技術です。

現在、この銅空洞は欧州原子核研究機構（CERN）に提供され、コーティング作業が行われています。従来の継ぎ目のあるコーティング空洞に比べて良質な空洞ができることが見込まれていて、コーティング研究の飛躍的な進展も期待されます。



謝辞

本研究は公益財団法人天田財団の 2021 年度一般研究開発助成「液圧成形によるシームレス加速空洞の製造」を受けています。

研究発表

2023年6月27日、米国 ミシガン州で開催された 21st International Conference on Radio-Frequency Superconductivity (SRF 2023)にてポスター発表しました。

お問い合わせ先

<研究内容に関すること>

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構
共通基盤研究施設 機械工学センター 教授 山中 将
Tel : 029-864-5457
e-mail : masashi.yamanaka@kek.jp

<報道担当>

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 広報室
Tel : 029-879-6047
e-mail : press@kek.jp

日本ニューロン株式会社
総務部 橋本 茂美
Tel : 0774-95-3900
e-mail : info@neuron.ne.jp