

HOM 減衰型スポーク空洞の製作

FABRICATION OF HOM-DAMPED SPOKE CAVITIES

沢村勝[#]

Masaru Sawamura[#]

National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)

Abstract

It is important for high-current superconducting accelerators to damp higher order modes (HOMs), and various types of HOM dampers are installed. Spoke cavities can be made smaller than elliptical cavities at the same frequency, but HOM dampers cannot be made smaller with conventional designs, making it impossible to make the entire accelerator compact. Therefore, we propose an HOM-damped spoke cavity that enables the entire accelerator to be compact by incorporating C-shaped waveguides into the spoke interior. The HOM-damped spoke consists of a triple coaxial structure and connecting plates that connect each coaxial structure. To reduce the manufacturing process, the coaxial structures and connecting plates are manufactured as a single unit by press forming. Trimmed parts are assembled by welding. The manufacturing accuracy is checked by 3D shape measurements. This paper describes the manufacturing status of HOM-damped spokes.

1. はじめに

大電流超伝導加速器において、高調波モード (HOM) の減衰は重要であり、さまざまな種類の HOM 減衰器が設置されている。周波数が同じであれば、スポーク空洞は楕円空洞よりも空洞サイズを小さくすることが可能であるが、従来型の HOM 減衰器ではサイズを小さくすることができないため、加速器全体をコンパクトにすることができない。そこで、スポーク内部に C 形波導管 (CSWG) [1] を組み込み、加速器全体をコンパクトにした HOM 減衰型スポーク空洞を提案している [2]。エネルギー回収型リニアック (ERL) などの超伝導加速器を小型化できれば、レーザーコンプトン散乱 (LCS) を組み合わせた LCS- γ /X 線源を小型化することができ、産業・学術分野への利用拡大が期待できる [3]。

HOM 減衰型スポークは、3 重の同軸構造と各同軸を接続する接続板で構成されている。製作工程を簡素化するため、同軸構造と接続板はプレス加工により一体で成型する。トリムした部品は溶接により組み立てられる。溶接後の製作精度を確認し、治具等の有効性の確認も行っている。本稿では、HOM 減衰型スポークの製作状況について報告する。

2. HOM 減衰型スポーク空洞

スポーク空洞の周波数に対応した遮断周波数をもつ CSWG の太さはスポークとほぼ同等なので、CSWG をスポーク内部に組み込むことができる。空洞内高周波と CSWG との結合には、ボア径の外側に同軸状の結合部を設ける。CSWG はスポーク内部でスポークの軸方向に 90 度折り曲げる。このまま外部に取り出すと減衰長が短いため、加速モードと HOM との分離が悪くなるので、スポークの端で同軸状に 180 度折り返し反対側の端から HOM を取り出すようにする。カップリングの部分から取り出し部分までボア部分を 2 回横切ることになるが、ほぼ同軸状にできるので、同軸どうしを接続すると CSWG に

することができる。接続板の形状を最適化し、遮断周波数を調整すると、加速モードは透過できず、HOM だけが透過できるようになり、HOM 減衰型スポークにすることができる。

模式的な高周波の伝搬経路と HOM 減衰型スポークを組み込んだ空洞を Fig. 1 に示す。ビーム軸に沿ったカップリング部分は単層の同軸構造であるが、90 度折り曲げて、端で 180 度折り返す部分は 2 層の同軸構造になる。そしてボア部分を通り過ぎた部分から単層の同軸構造になっている。

HOM 減衰型スポークは半径の異なる 3 つの円筒で構成されている。半径の小さなものの順に、内軸、中軸、外軸と呼ぶこととする。

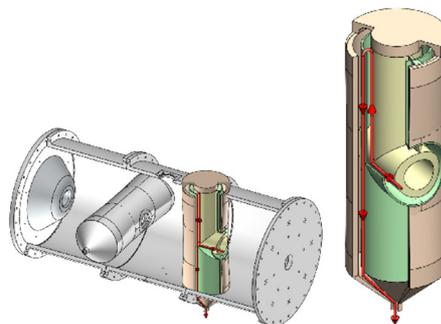


Figure 1: Schematic view of HOM damped spoke cavity (left). Red arrows show RF path inside the HOM-damped spoke (right).

3. HOM 減衰型スポークの製作

3.1 プレス加工

HOM 減衰型スポークの CSWG 部分は 3 種類の半径の同軸で構成され、それぞれの同軸は接続板でつながることになる。部品製作の方針として、1) 各円筒を半割にし、接続板と一体で金型成形する。2) 複雑なパンチア

[#] sawamura.masaru@qst.go.jp

クションを必要としない、単純なプレスアクションで成形できるように円筒と接続板は滑らかな円弧でつなぎ、まっすぐな形状のみにする。3) できるだけ金型の種類を多くしない、とした。

プレス加工ではスプリングバックを考慮して金型を製作する必要があるが、今回は製作費削減のため、プレス金型とトリム加工治具を共通で使用できるように、設計値の寸法でプレス金型を製作することにした。今回製作する部品の分解図を Fig. 2 に示す。

部品 1 組は、内軸 1 種類 4 個、中軸 3 種類 8 個、外軸 1 種類 4 個の計 5 種類 16 個の部品で構成されており、5 種類の金型を製作した (Fig. 3)。

最大荷重 50 トンの油圧式プレス機を用いて、銅板とアルミニウム板でプレス加工を行った。

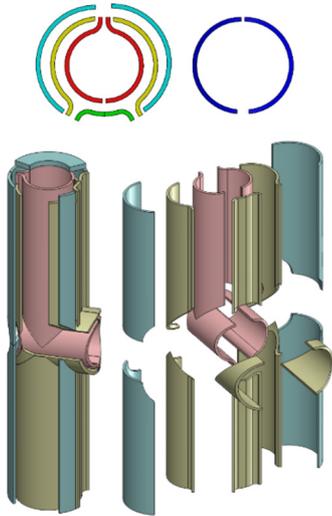


Figure 2: Cut views of semicylinders (top), schematic views of HOM-damped spoke (bottom left), and component parts (bottom right).

3.2 トリム加工

プレス加工した部品は QST 関西光量子科学研究所工作室のフライス盤を用いてトリム加工した。プレス加工した部品はスプリングバックで変形するため、プレス金型と兼用のトリム加工治具にはめ込み変形を補正した状態でトリム加工を行った。多くの部分は単純な水平方向移動のトリム加工であるが、斜め方向にトリム加工する部分に関しては、回転ステージで角度を合わせてトリム加工



Figure 3: Press molds for outer axis (left), middle axis (second to fourth from left), and inner axis (right).

を行った。円形にトリムする部分については、回転ステージで回転させながらトリム加工を行った。トリム後の部品を Fig. 4 に示す。



Figure 4: Trimmed parts.

3.3 溶接

トリム加工した部品を TIG 溶接により組み立てる。HOM 減衰型スポークは 3 重構造になっているため、3 段階に分けて、溶接を行う。スプリングバックの影響を抑えるため、部品を円弧形の治具で押さえる。

TIG 溶接機はハイガー製 YS-TIG200PACDC を使用した。現在、内軸および中軸-内軸の溶接を実施し、溶接後の形状を Fig. 5 に示す。



Figure 5: Welded parts of inner axis (right), middle and inner axes (left).

4. 形状測定

溶接加工した部品は接触変位計と直線・回転ステージを組み合わせた 3 次元形状測定器を使って形状測定を行い、設計形状との比較を行った。これまで形状測定にはレーザー距離計を用いていたが[4]、測定範囲が広く、垂直にレーザーを照射できない測定箇所も多いため接触変位計に変更した。溶接した内軸の測定結果を Fig. 6 に、中軸-内軸の測定結果を Fig. 7 に示す。誤差は外向きをプラスとしている。

内軸および中軸-内軸とも半円筒の溶接部分が外側に広がり、その中間部分では内側にずれているのが分かる。これはプレス加工でのスプリングバックの傾向と符合しており[2]、溶接治具での形状矯正が不十分だった可能性がある。

内軸および中軸の位置関係については今後測定していく予定である。

C形導波管の円筒が扁平し、楕円になった時の遮断周波数変化を CST Microwave Studio で計算した結果を Fig. 8 に示す。離心した楕円の平均周長が同軸円の平均周長と同じになるように、楕円の長軸、短軸を調整している。平均周長が変わらなければ、遮断周波数への影響はわずかであることが分かる。

同軸円の内側円筒が位置ずれしたときの遮断周波数変化の計算結果を Fig. 9 に示す。接続板に平行に位置ずれする方が接続板に垂直に位置ずれするときより遮断

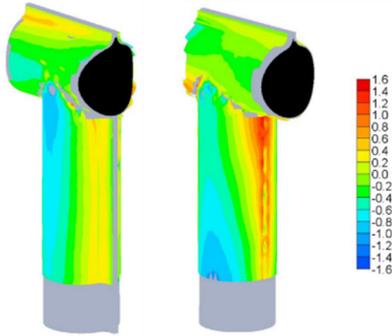


Figure 6: Measured difference of welded inner axis from design value. Positive values indicate outward direction.

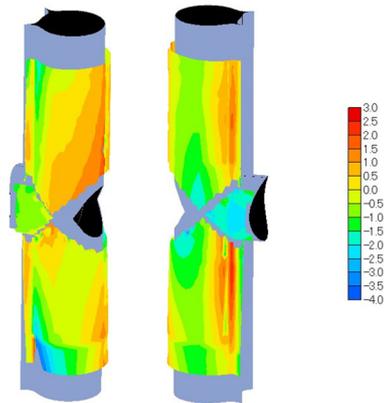


Figure 7: Measured difference of welded middle and inner axes from design value. Positive values indicate outward direction.

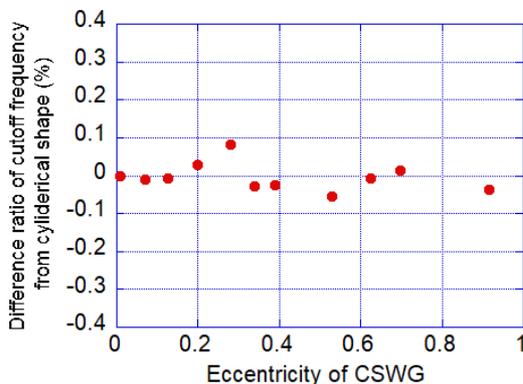


Figure 8: Calculated difference ratio of cutoff frequency of elliptical shape to cylindrical shape.

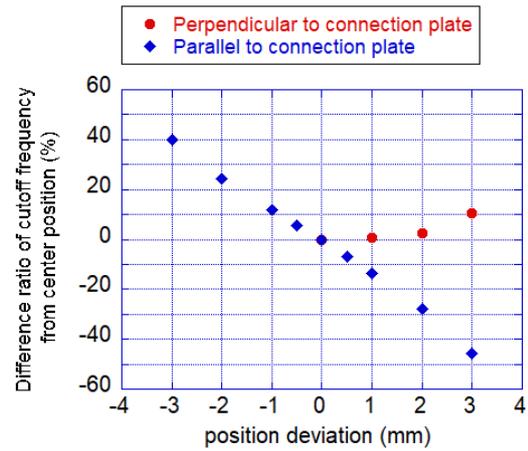


Figure 9: Calculated difference ratio of cutoff frequency of eccentric circular shape to coaxial cylindrical shape.

周波数の変化は大きい。これは CSWG 内では接続板と反対付近で電磁界が強くなり、接続板に平行にずれる場合は、より強く電磁界に作用するためと考えられる。これらのことから形状の変形による影響は少なく、同心からのずれによる影響が大きいいため、部品どうしの位置合わせが重要である。

4. まとめ

C形導波管をスポーク内部に組み込んだ HOM 減衰型スポーク空洞を提案し、その製作を進めている。この HOM 減衰型スポーク空洞を用いることで、スポーク空洞の持つコンパクトさの利点を生かし、小型の超伝導加速器を作ることができる。

現在、プレス加工、トリム加工を終え、内軸および中軸-内軸を溶接し、形状測定を行っている。

加工精度は、部品の変形よりも軸合わせが重要であることが分かった。

HOM 減衰型スポーク空洞は構造が複雑なため、プレス加工、トリミング、溶接などの製作工程で製作上の課題が明らかになりつつあり、さらなる検討を進めていく。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 23K11715 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] M. Sawamura *et al.*, “Properties of the RF transmission line of a C-shaped waveguide”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 882 (2018) 30–40.
- [2] M. Sawamura, “Study of HOM-damped spoke cavities”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, July 31-Aug. 3, 2024, pp. 342-344.
- [3] R. Hajima *et al.*, “Linac-Based Laser Compton Scattering X-Ray and Gamma-Ray Sources”, Proc. of LINAC2012, Tel Aviv, Israel, Sept. 9–14, 2012, pp.734-737.
- [4] M. Sawamura *et al.*, “Present status of superconducting spoke cavity development”, Proc. 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2014), Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2014, pp. 949-952.