

HOM 減衰型スポーク空洞の研究

STUDY OF HOM-DAMPED SPOKE CAVITIES

沢村勝[#]

Masaru Sawamura[#]

National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)

Abstract

We are developing a spoke cavity as a light source accelerator, and it is important to attenuate higher order modes (HOMs) in a superconducting accelerator for high current acceleration. For the same frequency, the cavity size of a spoke cavity can be smaller than that of an elliptical cavity, but the size of a conventional HOM attenuator remains the same, so the overall size of the accelerator cannot be made compact. Therefore, we propose a spoke cavity with HOM attenuation by incorporating a HOM attenuation function using a C-shaped waveguide inside the spoke. This enables HOM damping in superconducting accelerators during high current acceleration without compromising the compactness of the spoke cavity.

1. はじめに

スポーク空洞は加速周波数が同じなら楕円空洞と比べてコンパクトであり、さらにカップラーなどをタンク側面に設置することにより優れたパッキングファクターを持っている。この利点を生かせば、エネルギー回収型リニアック(ERL)を小型化することができ、レーザーコンプトン散乱(LCS)を組み合わせたLCS- γ /X線源を開発すれば産業・学術分野への利用拡大が期待できる[1]。

しかし、スポーク空洞加速器全体を考えた場合、加速周波数に対して空洞サイズは小さくなくても、そのほかのコンポーネントの大きさはあまり変わらない。特に大電流、大出力の超伝導加速器において問題となるビーム不安定性を抑えるための高調波(HOM)減衰器に従来型のものを用いると、HOM減衰器がスポーク空洞サイズに比べて相対的に大きなものになってしまう。

前回C形導波管[2]を用いたHOMカップラー(C-Shaped Wave Guide HOM Coupler: CSWG-HOMC)をスポーク空洞に用いることを報告したが[3]、それでもまだスポーク空洞に対して、相対的に大きなHOM減衰器になってしまう。

そこで、さらにコンパクトにするため、CSWG-HOMCをスポークの内部に組み込んだHOM減衰型スポーク空洞を提案する。

2. HOM 減衰型スポーク空洞

CSWG-HOMCをスポーク空洞の側面に取り付けた場合はFig. 1のようになる。スポークの太さとCSWG-HOMCの太さはほぼ同等なので、CSWG-HOMCをスポーク内部に組み込む。ボア径の外側に同軸状の結合部を設け、空洞高周波とカップリングさせ、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。そこでさらに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

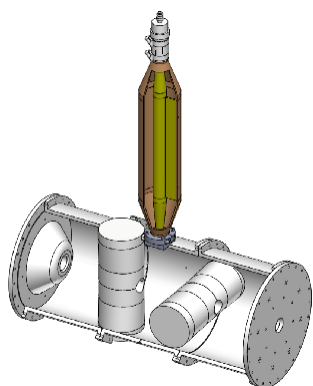


Figure 1: Spoke cavity model with CSWG-HOMC.

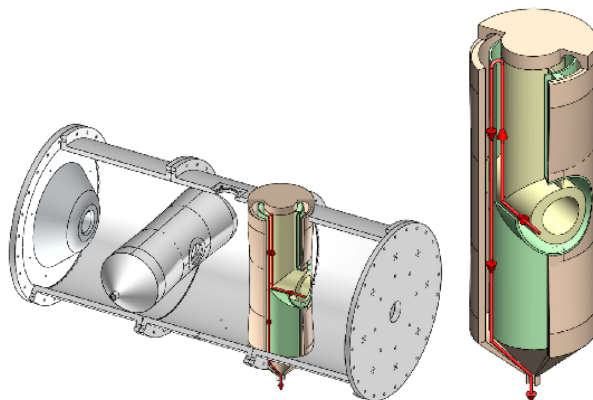


Figure 2: Schematic view of HOM damped spoke cavity (left). Red arrows show RF path inside the HOM damped spoke (right).

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

Table 1: Parameter of HOM Damped Spoke Model

	Inner radius	Outer Radius
Inner Axis	20 mm	25 mm
Middle Axis	35 mm	40 mm
Outer Axis	50 mm	55 mm
Length of Input Port	90 mm	
Length of Outer Axis	360 mm	

を組み込んだ空洞を Fig. 2 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 度折り返しと重なる部分は 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。

3. HOM 減衰型スポークの高周波特性

HOM 減衰型スポーク単体の高周波特性を確かめるため、アルミニウム製の HOM 減衰型スポーク単体モデルを製作した。これは、空洞での高周波とのカップリングになるボア径の部分と同軸の入力としたものである。

このスポークモデルは製作コストを下げるため、規格のアルミパイプを用いて設計・製作を行った。そのためスポーク空洞として狙った遮断周波数にしたわけではなく、計算と測定との一致を確かめるためのものである。

製作したスポーク単体モデルのパラメータを Table 1 に、写真と構造の模式図を Fig. 3 に示す。

内軸と中軸との間の接続板の位置として2種類を製作した。内軸と中軸が 90 度折れ曲がるときに接続板が折れ曲がりの内側に位置するものと、外側に位置するものである。

スポークの端で 180 度折り返したあと、中軸と外軸はボアを横切ることになる。このとき同軸の2か所でボアが障害物となり、そのままでは C 形導波管の構造から大きくずれるため HOM の透過が悪くなってしまふ。そのため高周波の入口側はそのまま、反対側は中軸と外軸の同軸構造になるように、ボア部分をくり抜いている。

透過係数をこのモデルを使ってネットワークアナライザで測定した結果と CST Microwave Studio を用いた計算

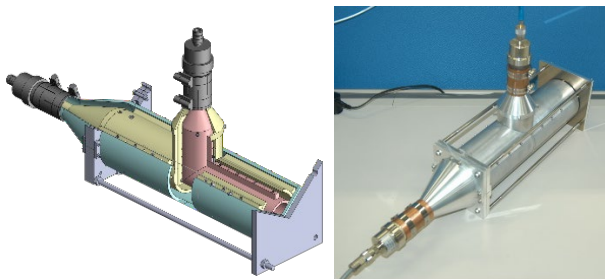


Figure 3: Schematic view and picture of model for measurement of RF transmission of HOM damped spoke.

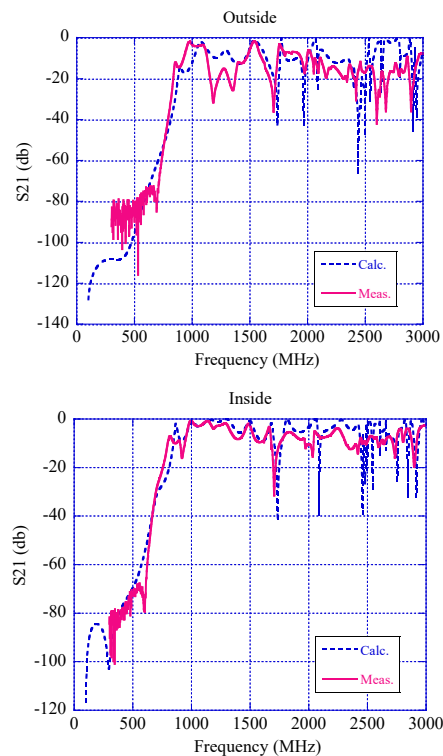


Figure 4: Calculation and measurement results of transmission coefficients of Fig.3 model for outside (top) and inside (bottom) connection plates.

結果を Fig. 4 に示す。接続板が内側と外側で遮断周波数が少し変わるが、計算と測定はほぼ一致している。

4. HOM 減衰型スポーク空洞の高周波特性

HOM 減衰型スポーク単体モデルの高周波カップリング部分を改造し、空洞タンクに取り付け[4]、加速モードならびに HOM の外部 Q 値の測定を行った。測定方法はネットワークアナライザを用いて、入出力ポートにおける反射波、透過波を測定することにより行った[5]。測定結果を Fig. 5 に示す。これには CST Microwave Studio を用いて外部 Q 値を求めた計算結果と併せて載せている。概算の遮断周波数 (830 MHz) 以上の外部 Q 値は低

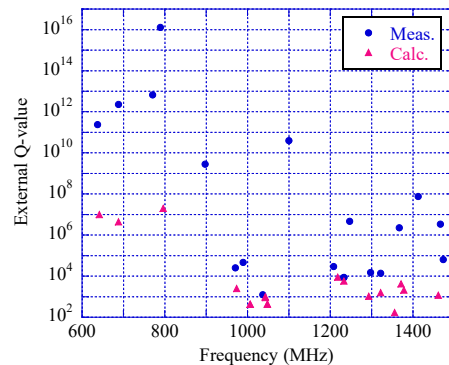


Figure 5: Calculation and measurement results of external Q-values for 1-HOM damped spoke cavity.

くなっているが、測定値が計算値より大きくなっている。この原因については現在検討中である。また加速モードの外部 Q 値が小さいが、これに関しては、遮断周波数等のパラメータを調整することで、必要な外部 Q 値にできると考えている。

5. HOM 減衰型スポークの製作

HOM 減衰型スポークは構造が複雑なため、製作方法の検討を行った。内軸、中軸、外軸と半径の違う 3 種類の円筒とそれぞれの円筒をつなぐ接続板が必要になる。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ぐ。3) できるだけ金型の種類を多くしない、とした。この方針に基づき Fig. 6 のような 4 種類の円筒部品で構成するようにした。

最初に一番半径の小さい内軸を製作するための金型を製作し、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成形試験を行った。成形した半円筒はレーザー距離計と直線・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[6]、設計形状との比較を行った。測定結果を Fig. 7 に示す。銅、アルミニウムでそれぞれ最大 0.5 mm、1 mm 程度のスプリングバックがあるが、トリミング、溶接の際には矯正用の治具にはめ込んで加工を行うため、問題となる量ではないと考えられる。

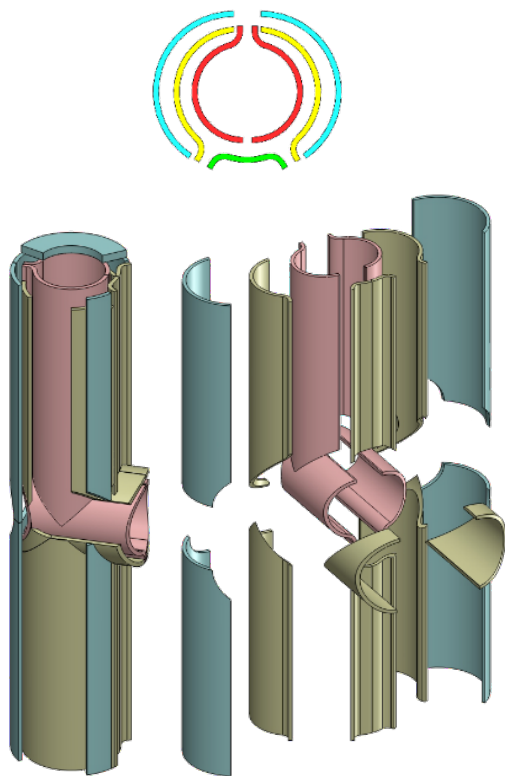


Figure 6: Cut views of semicylinders (top), schematic views of HOM damped spoke (bottom left), and component parts (bottom right).

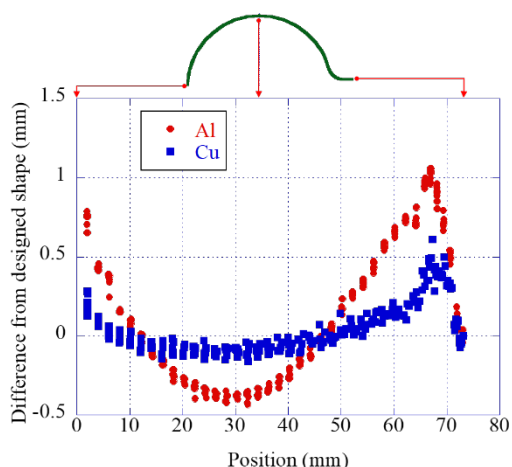


Figure 7: Measurement results of difference from designed shape of press-shaped semicylinder of copper and aluminum plates.

6. 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た。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。

ただ HOM 減衰型スポーク空洞は構造が複雑なため、今後プレス加工、トリミング、溶接などの製作工程を進めながら、製作上の課題を見直していく予定である。

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] 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.
- [2] 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.
- [3] M. Sawamura, “Study of HOM attenuation in spoke cavities”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug. 29-Sep. 1, 2023, pp. 646-468.
- [4] M. Sawamura *et al.*, “RF Characteristics of Spoke Cavity Model for ERL”, Proc. 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2012), Toyonaka, Japan, Aug. 8-11, 2012, pp. 1201-1203.
- [5] E. L. Ginzton, Microwave Measurements, (McGraw-Hill Book Company, Inc., 1957)
- [6] 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.