

超伝導スポーク空洞開発の現状

PRESENT STATUS OF SUPERCONDUCTING SPOKE CAVITY DEVELOPMENT

沢村 勝^{#,A)}, 羽島良一^{A)}, 佐伯学行^{B)}, 久保毅幸^{B)}, 江並和宏^{B)}, 岩下芳久^{C)}, 頓宮 拓^{C)}, 銚之原久雄^{C)}
Masaru Sawamura^{#,A)}, Ryoichi Hajima^{A)}, Takayuki Saeki^{B)}, Takayuki Kubo^{B)}, Kazuhiro Enami^{B)},
Yoshihisa Iwashita^{C)}, Hiromu Tongu^{C)}, Hisao Hokonohara^{C)}

^{A)} National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization/SOKENDAI

^{C)} Kyoto University

Abstract

We are developing the superconducting spoke cavity for laser Compton scattered (LCS) photon sources. We adopt the superconducting spoke cavity for electron beam drivers to realize a wide use of LCS X-ray and γ -ray sources in academic and industrial applications. The spoke cavity can make the accelerator more compact than an elliptical cavity because the cavity size is small at the same frequency and the packing factor is good by installing couplers on outer conductor. Though our proposal design for the photon source consists of the 325 MHz spoke cavities in 4K operation, we are fabricating the half scale model of 650 MHz spoke cavity in order to accumulate our cavity production experience by effective utilization of our limited resources. Since the spoke has more complicated structure than an elliptical cavity, we performed press forming tests for the half spoke. Though there occurred wrinkles around the spoke side corner at the 1st press forming test, we obtained good results at the 2nd press forming test after increasing the sheet thickness and modifying the molds. The pressed shapes were estimated with two types of 3-dimensional measurements.

1. はじめに

エネルギー回収型リニアック(ERL)とレーザーコンプトン散乱(LCS)を用いた光源のための電子ビーム加速器の開発を行っている[1]。スポーク空洞は周波数が同じなら楕円空洞と比べてコンパクトであることや、カップラーなどをタンク側面に設置できるためパッキングファクターに優れているなどの長所がある。スポーク空洞のこれらの利点を生かせば、ERL 加速器の小型化が期待できるため、LCS- γ /X線源を産業・学術分野に利用していくための小型加速器の候補として超伝導スポーク空洞の開発を進めている。

我々は4Kでの運転を目指し325MHzのスポーク空洞を提案しているが、限られた資産の中で空洞製作技術を獲得するためハーフスケールである650MHzのスポーク空洞モデルの製作を開始した。

ハーフスポークの金型の設計[2]、製作を行い、最初のプレス成型試験を行ったが、コーナー部分に皺が発生した。そこで金型を修正し、再度プレス成型試験を行った。スポーク空洞製作の現状について報告する。

2. ダイセットの修正

ハーフスポークの金型を製作し、最初に行ったプレス成型試験において、スポーク側面コーナー部分に皺が発生した[3]。プレス板はパンチが下がるに従ってダイに沿って滑らかに引きずり込まれるはずであったが、プレス板がダイのコーナーで少し引っかかり、予定以上に大きく曲げられ、この部分がダイに押し付けられることにより皺になったと考えられた。またプレス板を厚くすることによ

り、コーナー部分での曲がり方が緩やかになることも分かった。そこでダイのコーナー部分を削って緩やかにするとともに、インナーパンチとアウトーパーパンチを削り、厚さ2.5mmの板を成型できるようにした。また、最初の設計でダイ入れ子の上面は Figure 1 (bottom left)のように平らであった。これは、ハーフスポークの中央部分はプレス板がインナーパンチの形状に沿って成型されると想定されていたためであるが、インナーパンチとダイ入れ子との間の隙間が皺発生の原因の1つであると思われた。そこでダイ入れ子の形状を Figure 1 (bottom right)のように隙間がなくなるように修正した。このダイ入れ子の修正は既存のダイ入れ子を加工することではできないので、新しくダイ入れ子を製作することにした。

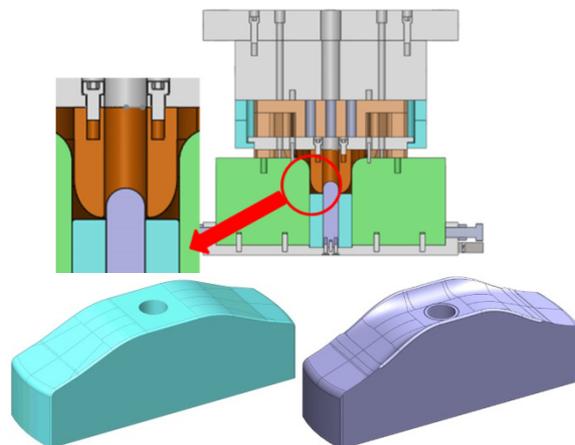


Figure 1: Schematic view of the first die set (top), the die center (bottom left) and modified die center (bottom right).

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

3. ハーフスポークのプレス成型再試験

修正したダイセットを用いて、再度プレス試験を行った。使用したプレス機は最初のプレス試験と同じプレス機を用いた[4]。プレス材として厚さ2.5mmのアルミ板、銅板、ニオブ板を用意した。

アルミ板を用いたプレス試験において、前回のような皺が発生することはなくなった。ただしインナーパンチが最初に当たる部分とダイ入れ子の側面盛り上がり部分で筋のような跡が見られた(Figure 2)。まずダイ入れ子の盛り上がり部分が当たるプレス材下面に厚さ7 μ m厚の保護テープを5枚重ねて貼り付け、さらにインナーパンチが当たる上面には Figure 3 のようなゴム板(2.8mm厚)とアルミ板(1.5mm厚)を当ててプレス試験を行った。ただしこの設定では下死点までプレスすることはできないので、金型の隙間が4mm程度になるまでプレスしたら、一旦パンチを戻し、ゴム板とアルミ板を取り外し、再びパンチを下げて下死点までプレスを行った。下面の保護シートは最後まで貼り付けた状態でプレスを行った。このような手順で行った結果、筋はなくなり、改善が見られた。

またボア付近に傷とうねりが見られた(Figure 4)。これはダイ入れ子と位置決めガイドの間に段差があり、その部分で傷ができると考えられた。そこで段差部分にアルミのリングをはめ込み、さらにその部分をプラスチックの板でカバーした。その結果ボア付近にうねりは残るものの傷はなくなった。

次にボア部分のバーリングを行った。当初の計画では上下のダイセットをひっくり返し、バーリング棒を移動させる予定になっていたが、セッティングに手間がかかるため、上下のダイセットを入れ替えず、下型ダイセットに取り付けたバーリング棒にサンプル板がインナーパンチとともに押し当てられることでバーリングを行った。バーリング結果は良好で、ニオブ板を成型した結果を Figure 5 に示す。



Figure 2: The 2nd Press forming test of half-spoke with 2.5 mm thick plates of aluminum. Traces of pressing were observed.

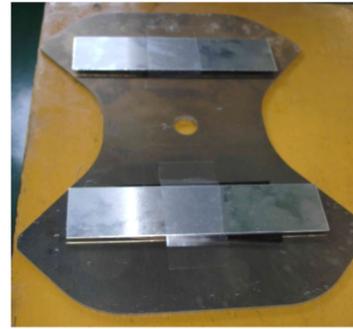


Figure 3: Rubber sheets and aluminum sheets were attached to disperse the bending force.



Figure 4: Traces and undulation near the bore.



Figure 5: Press formed shape after burring with niobium sheet of 2.5 mm thick.

4. スポーク形状の3次元測定

プレス成型したハーフスポークの形状を詳しく調べるため2種類の3次元測定を行った。1つ目はKEKにあるZEISS製の精密3次元形状測定装置UPMC850(Figure 6)を用いた測定であり、2つ目はレーザー変位計と光学ステージを組み合わせた簡易3次元形状測定装置である。簡易3次元形状測定装置はFigure 7のように3方向の直線ステージと水平と鉛直方向の2つの回転ステージを駆動しながらレーザー変位計と測定対象の表面までの距離を一定に保ちながら測定するものである。ただしこの測定方法にはレーザーの入射角によって誤差が大きくなる欠点がある。円柱形の物体に対して入射角を変えて測定した時の誤差の大きさをFigure 8に示す。入射角度が大きくなるにつれて誤差が大きくなり、7度を超えると誤差が0.2mmを上回る。そこで水平回転と鉛直回転を組み合わせて対象面できるだけレーザーが垂直に入射するようにステージを駆動しながら測定を行った。

精密3次元形状測定装置を用いて銅モデルを測定し

た結果を Figure 9 に示す。測定は Figure 9 (top)に示すようないくつかの曲線に沿って行われ、設計値との誤差を Figure 9 (bottom)に示す。設計値に対してハーフスポークの外側(真空側)方向をプラスとした。側面部分はスプリングバックの影響で大きくなっているものと思われるが、ほぼ設計値通り加工されている。

簡易 3次元形状測定でのニオブモデルの測定を行い、設計値からの誤差を Figure 10 に示す。こちらは Figure 10 (top)のような 3mm 程度の間隔で格子状に測定を行った。ボア付近が大きすぎてはいるのはモデルを固定するための直径 41mm の円盤状の治具があり、その治具を測定しているためである



Figure 6: Precise 3D measurement device of ZEISS UPMC850 at KEK.

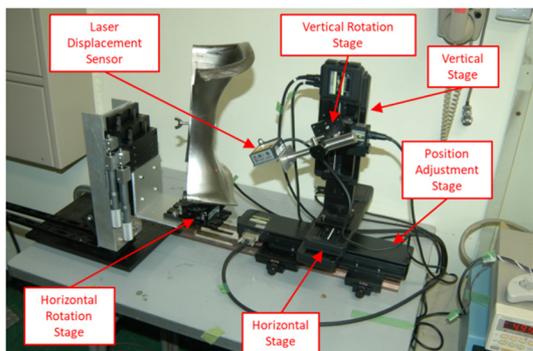


Figure 7: Simple 3D measurement device made with the laser displacement sensor and optical stages.

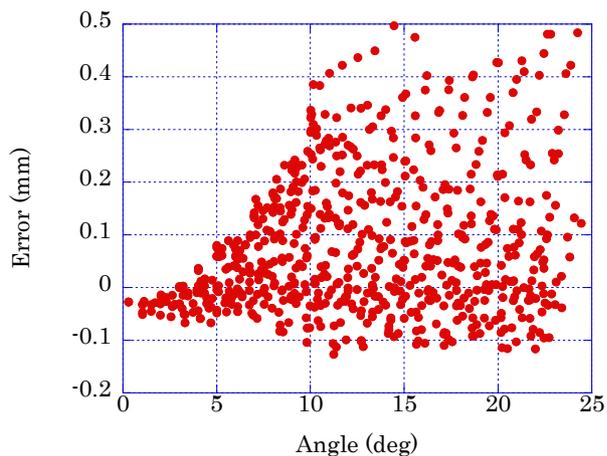


Figure 8: Measurement errors as a function of angular error from the perpendicular incidence.

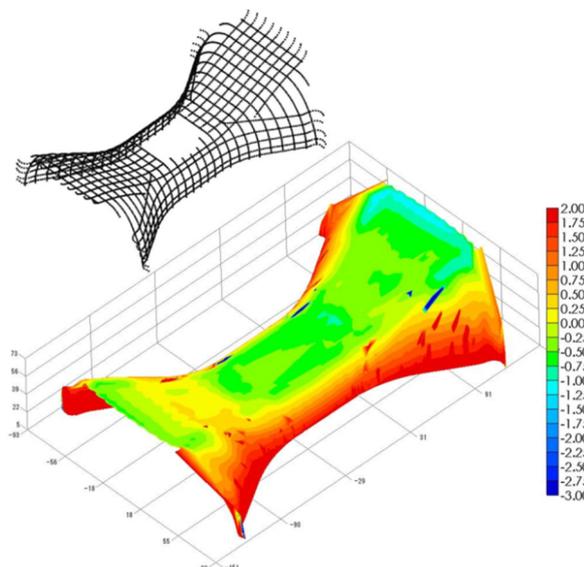


Figure 9: Measured results of precise 3D measurement. Measured points (top) and distances from the designed shape (bottom).

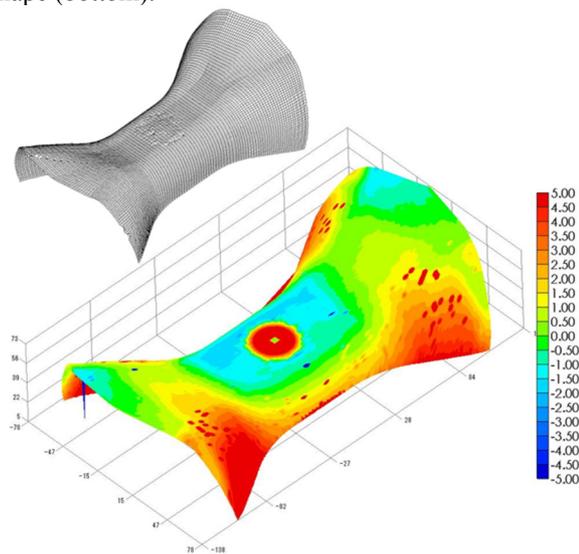


Figure 10: Measured distance from the designed shape with simple 3D measurement (bottom) and the lattice for measurement (top).

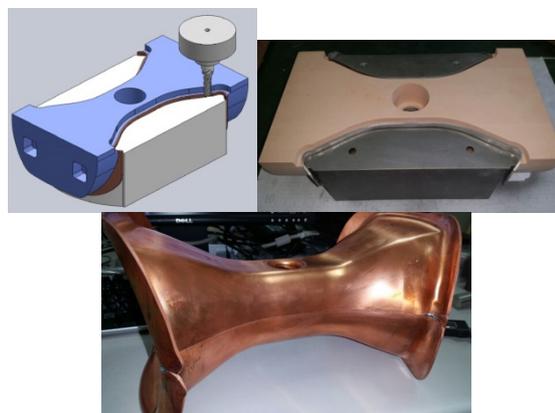


Figure 11: Designed (top left) and fabricated (top right) trim jigs. Temporarily assembled copper spoke (bottom).

5. トリム加工

ハーフスポークのプレス加工の後、ハーフスポークのトリム加工を行っている。トリム治具は Figure 11 のようなケミカルウッドを用いて設計・製作し、銅モデルを用いてトリム加工を行った。ニオブのハーフスポークをトリム加工するための条件を検討中である。

6. まとめ

ハーフスポーク用のダイセットを修正し、銅板、アルミ板、ニオブ板を使ってプレス成型の再試験を行った。プレス成型したハーフスポークに皺の発生もなく良好な結果が得られ、3次元測定において、スプリングバックの影響は見られるが、ほぼ設計値通りの加工ができています。

謝辞

本研究の一部は文部科学省委託事業「光・量子融合連携研究開発プログラム「小型加速器による小型高輝度X線源とイメージング基盤技術開発」」による。

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.*, “ERL超伝導スポーク空洞製作の現状”, Proc. of 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, 2015, pp.583-586.
- [3] M. Sawamura *et al.*, “Fabrication of Superconducting Spoke Cavity for Compact Photon Source”, Proc. of LINAC2016, East Lansing, MI, USA, Sept. 25-30, 2016, pp.212-214.
- [4] M. Sawamura *et al.*, “超伝導スポーク空洞のプレス成型試験”, Proc. of 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, 2016, pp.889-892.