

超伝導スポーク空洞のプレス成型試験

PRESS FORMING TEST OF SUPERCONDUCTING SPOKE CAVITY

沢村 勝^{#, A)}, 羽島良一^{A)}, 佐伯学行^{B)}, 久保毅幸^{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)},

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 electron beam drivers used for laser Compton scattered (LCS) photon sources. For realizing a wide use of LCS X-ray and γ -ray sources in academic and industrial applications, we adopt the superconducting spoke cavity to electron beam drivers. The spoke cavity has advantages such as relative compactness in comparison with an elliptical cavity of the same frequency, and the better packing in a linac to install couplers on outer conductor. On the other hand the spoke cavity has disadvantage of more complicated structure than an elliptical cavity. Though our proposal design for the photon source consists of the 325 MHz spoke cavities in 4K operation, we have begun to fabricate the half scale model of 650 MHz spoke cavity in order to accumulate our cavity production experience by effective utilization of our limited resources. We fabricated the die set and performed press forming test with copper and aluminum plates. In this paper, we present our fabrication status.

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。

高周波特性を最適化したスポーク空洞は[2]、楕円空洞に比べて形状が複雑であるため、プレス加工工程を含めた金型の設計[3]・製作を行い、ハーフスポークの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. ダイセットの製作

周波数が倍の650MHzになったため、空洞サイズとダイセットのサイズは325MHzのときに比べて半分になった。そのため325MHzで設計を行っていたプレス成型のシミュレーションを650MHzにスケールダウンして行った。シミュレーションは汎用構造設計コードABAQUSを用いて行った。Figure 1に示すようにハーフスポークの計算結果を比べると325MHzと650MHzで大きな違いはな

かった。

ダイセットのサイズが半分になったので、プレス成型試験をKEKのプレス機AMADA SDE1522を用いて行う計画を立てた。このプレス機の仕様をTable 1に示すが、325MHzで設計したダイセットの高さを半分にしただけでは、プレス機のダイハイトを超えてしまっていた。そのためダイセットの修正を行い、ガススプリングの大きさや本数を変え、ダイセットの厚さも可能な限り薄くすることによりダイハイトに収まるようにした。オペレータのスケジュールの都合で別のプレス機(AIDA NCI-15)を使うことになったが、このプレス機の仕様はKEKのものとはほぼ同等である。ダイセットは加工シートと接触する部分に関してはA7075又はANP79の超タジュラルミンを用い、その他の部品はSS400を用いて製作した。ダイセットを組み立て、プレス機に設置した様子をFigure 2に示す。

Table 1: Specifications of Press Machines

Press machine	AMADA SDE1522	AIDA NC1-15
Capacity of nominal force	1500 kN	1500 kN
Slide stroke	225 mm	200 mm
Die height	430 mm	400 mm
Capacity of die cushion	80 kN	100 kN
Die cushion stroke	80 mm	80 mm

[#] gakkai@kasokuki.com

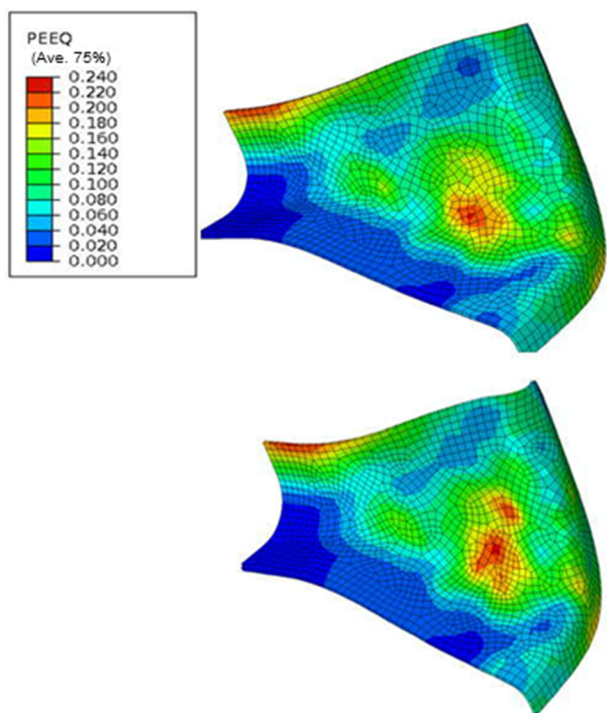


Figure 1: Calculated strain distributions by press forming of 325 MHz (top) and 650MHz (bottom) half-spoke.



Figure 2: Assembled die set was mounted to press machine.

3. ハーフスポークのプレス成型試験

ダイセットの性能を確かめるためプレス試験を行った。プレス材料としてアニールした 1.5mm 厚のアルミ板と銅板を用意した。銅板のプレス成型結果を Figure 3 に示す。スポーク側面のコーナー付近に皺が出来ている。この皺はアルミ板でも出来ている。

この皺の原因を調べるためインナーパンチの位置を変えながら、変形の様子を調べた。この試験には 1.5mm のアルミ板を用いた。スポーク側面に割れが発生しているが、これはアニールしていない板を用いたためである。Figure 4 に下死点から 16mm、11mm、6mm、0mm の位置での変形を示す。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ている。この部分がダイに押し付けられることにより皺になっている。プレスされた板にダイに引っかかり擦れた跡が見られる。

ひずみ分布をスクライブド・サークル法によって測定した。この方法はプレス前の板に直径 5mm の円が格子状に並んだスタンプを押し、プレス成型によってひずんだ軸の長さを測定することにより主ひずみを評価するものである。プレス成型された面は平らではなくなるため、押印された模様は数片の透明テープに転写して長さを測定した。ハーフスポークの側面とベース部分の測定結果を Figure 5 に示す。測定値と計算値を比較するとひずみの大きい部分はほぼ一致しているが、ひずみ量は測定値の方が大きくなっている。今回製作したダイセットはプレス機のダイハイトに収まるようできるだけ高さを小さくさせたため、インナーパンチとアウトーパーパンチの初期位置が当初の設計よりかなり近くなった。これによりインナーパンチが成型し終わる前にアウトーパーパンチが成型を開始するという状況になった。そのためスポークベース部分により大きなひずみが発生したものと考えられる。



Figure 3: Press forming of half-spoke with 1.5 mm thick plates of copper (left) and aluminum (right).

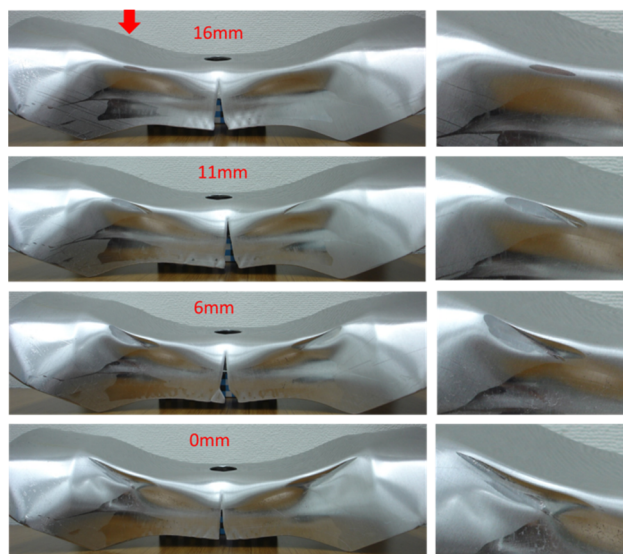


Figure 4: Press forming of unannealed aluminum plate by changing the slide position of 16 mm, 11 mm, 6 mm and 0 mm from bottom dead center. Red arrow shows the position of cross section of Figure 8.

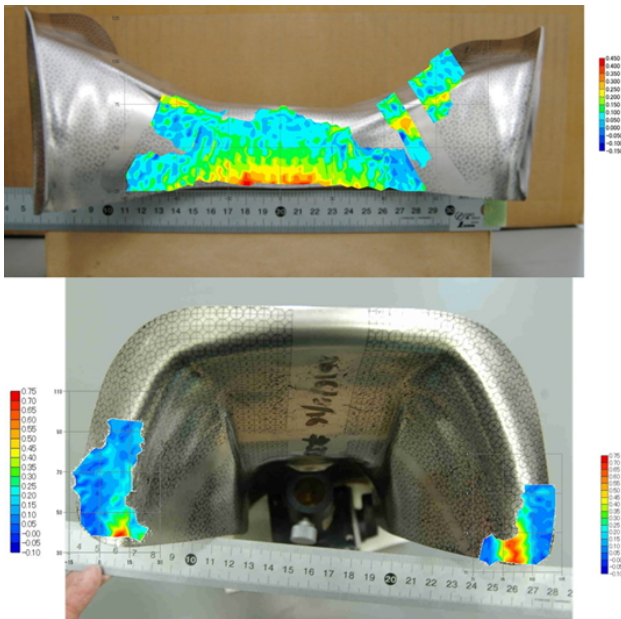


Figure 5: Measured strain distributions at the side (top) and the base (bottom) of half-spoke.

インナーパンチを上昇させたものである。2.5mm 厚の板は 1.5mm 厚のものに比べて、コーナー部分の曲がり方が緩やかになっており、板を厚くすることにより皺の発生を抑えられると期待される。

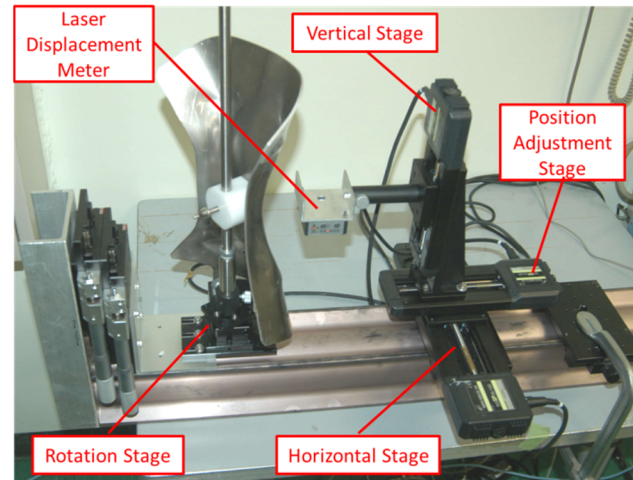


Figure 6: Setup for 3D shape measurement system using laser displacement meter.

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 3 次元測定を行った。今回用いた 3 次元形状測定装置は、Figure 6 のようなレーザー変位計と直線/回転ステージを組み合わせたもので、水平、鉛直、回転ステージを駆動し、測定対象物上をスキャンしながら位置を測定していくものである。レーザー変位計の測定可能範囲は $50\text{mm} \pm 10\text{mm}$ であるため、位置調整用直線ステージを動かしながら対象物までの距離を測定可能範囲の中心になるようにし、さらに対象物にレーザーができるだけ垂直に当たるように回転・水平位置を調整しながら測定を行った。スポークベース部分を成型しなかったものについては、1 軸の回転で試料にレーザーをほぼ垂直方向に照射させることができるが、スポークベース部分を成型した場合は多軸の回転が必要になるので、支持方向を変えながら細かな範囲に分けて測定する必要がある。

インナーパンチのみでプレス成型した形状の測定結果を Figure 7 に示す。これは設計形状に対して成型形状がどれくらいずれているかを等高線で示したもので、ハーフスポークのベース部分は成型されていないので、ずれが大きくなっている。中央部分を見るとハーフスポーク正面部分はほぼ設計通りに、側面部分はスプリングバックによって広がっていることが分かる。さらにコーナー部分に関しては大きくずれていることが分かる。この付近の加工途中の形状変化を Figure 8 に示す。Figure 4 で示した形状の断面形状を示すが、下死点から 16mm の段階で側面が大きく曲げられているのが分かる。その後の成型でこの付近が大きく変形し皺になっている。

アルミ板の厚さを 1.5mm と 2.5mm にした時のプレス成型断面を Figure 9 に示す。ダイセットの間隔は 2.5mm 厚の板を加工することはできないが、最少間隔が 2.5mm になる位置までインナーパンチを降下させ、その地点から

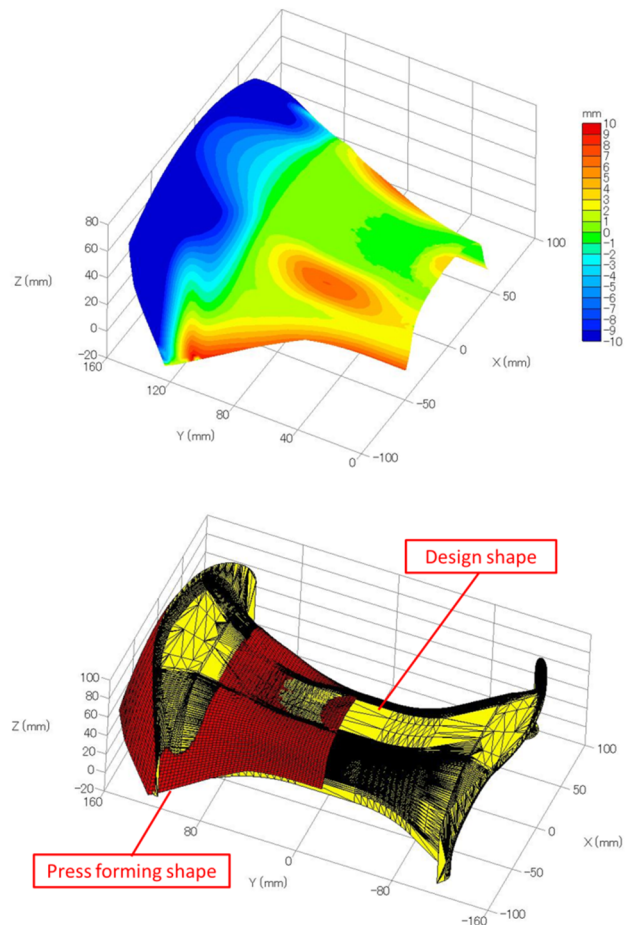


Figure 7: Contour plot of distance between press forming shape and design shape (top). Press forming shape and design shape are shown together (bottom).

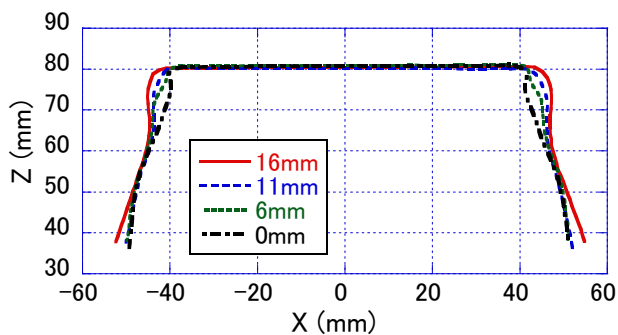


Figure 8: Cross sections of press forming shapes at the inner punch position from the bottom dead center.

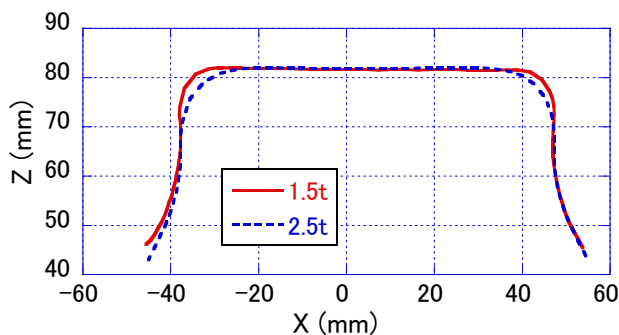


Figure 9: Cross sections of press forming shapes of aluminum plates of 1.5mm and 2.5mm thick.

5. まとめ

ハーフスポーク用のダイセットを製作し、銅板とアルミ板を使ってプレス成型試験を行った。プレス成型したハーフスポークのコーナー付近に皺が発生したが、この皺は板がダイを滑らかに滑り込まず、ダイのコーナー部分で大きく曲げられたためと考えられる。今後ダイセットを修正し、厚めの板を使ってプレス成型試験を行う予定である。

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.*, “Development of Superconducting Spoke Cavity for Laser Compton Scattered Photon Sources”, Proc. of IPAC2014, Dresden, Germany, June 15-20, 2014, pp.1946-1948.
- [3] 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.