

## ERL超伝導スポーク空洞製作の現状

### STATUS OF ERL SUPERCONDUCTING SPOKE CAVITY FABRICATION

沢村 勝<sup>#, A)</sup>, 羽島良一<sup>A)</sup>, 西森信行<sup>A)</sup>, 永井良治<sup>A)</sup>, 岩下芳久<sup>B)</sup>, 頓宮拓<sup>B)</sup>, 久保毅幸<sup>C)</sup>, 佐伯学行<sup>C)</sup>

Masaru Sawamura<sup>#, A)</sup>, Ryoichi Hajima<sup>A)</sup>, Nobuyuki Nishimori<sup>A)</sup>, Ryoji Nagai<sup>A)</sup>,

Yoshihisa Iwashita<sup>B)</sup>, Hiromu Tongu<sup>B)</sup>, Takayuki Kubo<sup>C)</sup>, Takayuki Saeki<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Atomic Energy Agency

<sup>B)</sup> Kyoto University

<sup>C)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

We are developing laser Compton scattering (LCS) X-ray and gamma-ray sources combined with an energy-recovery linac (ERL) and a laser. The LCS X/γ-ray source is expected for application of non-destructive assay system of nuclear materials, analysis of nano-structure, drug development, medical diagnostics and so on. We have launched a 5-year research program to develop superconducting spoke cavity for LCS photon sources. Spoke cavities have many advantages such as shortening the distance between cavities, small frequency detune due to micro-physics and easy adjustment of field distribution for strong cell coupling. We have almost finished cavity shape optimization and been making a study of mold design and mechanical design to fabricate the niobium one-spoke cavity.

#### 1. はじめに

我々はエネルギー回収型リニアック (ERL) とレーザーを組み合わせたレーザーコンプトン散乱 (LCS) X/γ線光源の開発を行っている。LSC-γ線を用いた核共鳴蛍光を使えば核燃料を非破壊で検査することが可能で、核保障措置および核セキュリティに応用することができる[1]。LCS-X線はナノ構造の解析や、創薬、医療診断・治療への応用が期待される。2013年よりJST受託研究「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」の5年計画のプログラムが立ち上がり、LCS光源のためのスポーク空洞の開発を行っている。

スポーク空洞は空洞間隔を短くできることや、マイクロフォニクスによる空洞周波数の変動も小さいこと、セル間のカップリングが強く電界分布調整が容易なことなどLCS用のERL加速器として用いる場合に利点が多い。

現在、空洞形状の最適化をほぼ終え[2]、製作のための加工方法、強度計算などの検討を進めている。

#### 2. スポーク空洞プレス加工

スポーク空洞製作に際して、Figure 1 に示すように大きくは3つのパートに分けて成型、加工することになっている。

- ① スポーク部分
- ② エンドプレート部分
- ③ タンク部分

タンクとの接続を考慮して、スポークの端部はタンクと同じ形状になるように折り曲げられる。

スポーク部分に関しては、さらに2つのハーフスポーク、ビームパイプに分けて成型加工を行う。

ハーフスポークの形状は複雑であるため、1組の金型の1工程で成型加工を行うとひずみが大きくなりすぎて割れの恐れがある。そこで Figure 2 のように成型加工を3工程に分けて行う。

- ① ダイセンターが上がった状態で、インナーパンチのみが降下し、ダイセンターとインナーパンチとでニオブシートを成型し、縦方向に曲げていく。
- ② ニオブシートを挟んだ状態で、ダイセンターとインナーパンチと一緒に降下し、ダイでニオブシートを成型し、周方向に曲げていく。

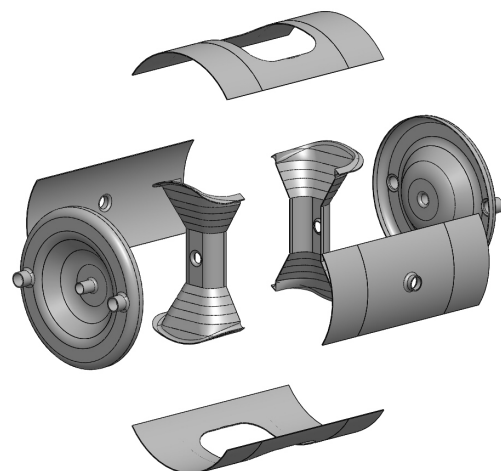


Figure 1: Exploded schematic of one-spoke cavity.

<sup>#</sup> gakkai@kasokuki.com

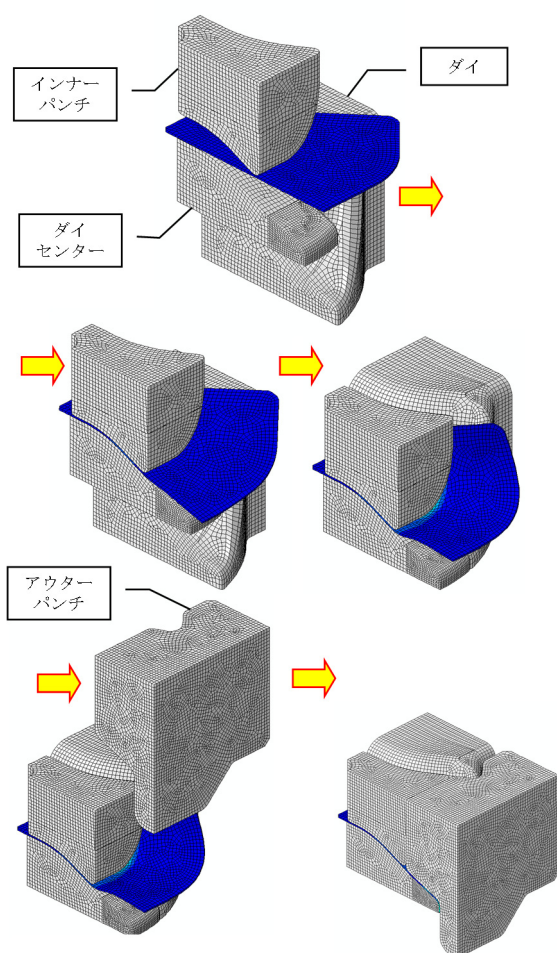


Figure 2: Procedures of press process for half spoke. The views are divided in quarters.

③ アウターパンチが降下し、ハーフスポークの端部を成型していく。  
この工程により成型されたニオブシートのひずみ分布の計算値を Figure 3 に示す。スポーク中央部の側面やスポークの広がり部分に大きなひずみが見られるが、ひずみの最大は 0.32 であり、この加工による割れ等は回避できると考えられる。厚さ変化を Figure 4 に示す。加工前 3.5mm のニオブシートであったが、最少 3.0mm になっている。

### 3. スポーク空洞サポート

スポーク空洞内部を真空に引くと、外力が加わり空洞が変形する。このとき塑性変形が起きるほどの応力がかかると、空洞に永久ひずみが生じ、真空引きの度に変形を蓄積していくことになる。Figure 5 (top)に空洞外面に 1 気圧の外力が加わったときの応力分布を示す。灰色の部分は応力が大きく、塑性変形を生じる部分である。スポークの付根部分とエンドプレート付近が大きくなっている。

エンドプレートのサポートとして、Figure 6 のよ

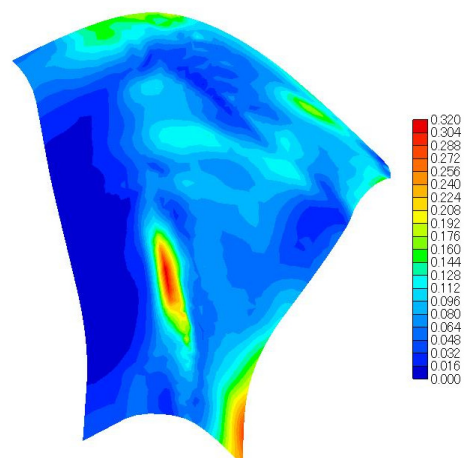


Figure 3: Strain distribution of pressed niobium sheet of half spoke.

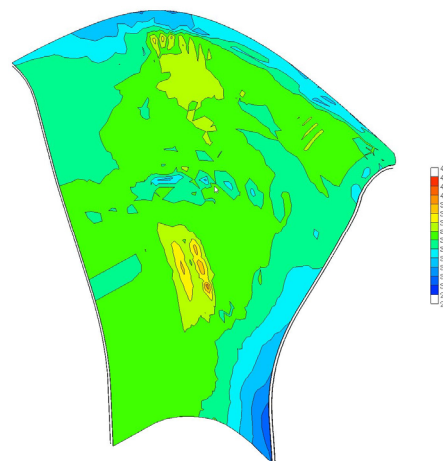


Figure 4: Thickness distribution of pressed niobium sheet of half spoke.

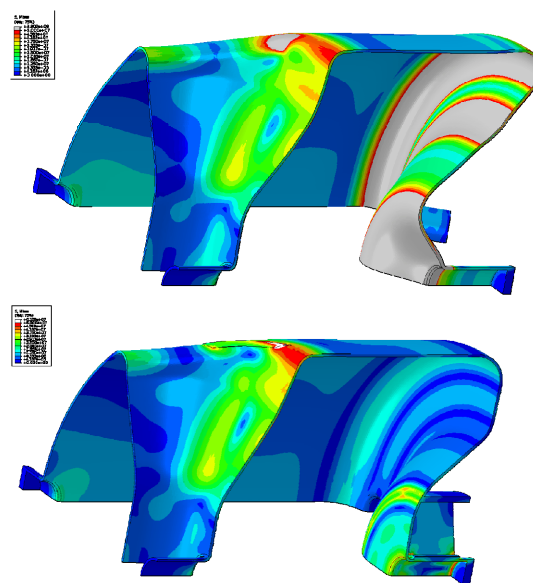


Figure 5: Stress distribution of one-spoke cavity without supports (top) and with supports (bottom).

うな円周リブと放射状リブを考える。エンドプレートとの溶接を簡略化するために、放射状リブは円周リブとビームパイプとを接続し、エンドプレートとの接続は円周リブのみとする。

円周リブの半径を変えていった時のエンドプレートの応力分布の変化を Figure 7 に示す。半径が大きくなるにしたがってエンドプレート中央の応力が減っていくが、逆にビームパイプ部分の応力が増えている。円周リブによるエンドプレートのばね定数の変化を Figure 8 に示す。円周リブの半径が増えると最初はほぼニアに増加していくが 100mm 以上ではほぼ一定になっている。

スポークの根元部分に関しては、製作工程を考慮して Figure 9 のような 3 種類のサポートについて強度計算を行った。

- (a) スポーク根元部分にタンク形状に沿ったサポート板を取り付ける (Figure 9(top))
- (b) スポーク形状に沿って縦にサポート棒を取り付ける (Figure 9(middle))
- (c) スポーク根元部分にサポート板を取り付ける (Figure 9(bottom))

応力計算の結果から、(a)についてはスポーク根元部分の応力を減らすことはできないが、(b)と(c)に関しては、応力を減らすことができる。今後取付加工工程を考慮して最終形状を決定する予定である。

サポートを取り付けた後のスポーク空洞の応力分布を Figure 5(bottom)に示す。ほぼ全域で塑性変形を起こさない応力分布になっている。これ以外にも実際の空洞にはポートが、エンドプレートとタンク側面に取り付けられることになるので、それらも含めた強度計算を行う予定である。

#### 4. 周波数変更

これまで 325MHz のスポーク空洞の設計・製作の検討を行ってきたが、試作機という意味合いもあり、空洞本体や治具製作のための材料費削減のために周波数を変更することとなった。ハーフスポーク成型のためのプレス金型の製作には、5 軸マシニングセンタを利用する必要があるが、その加工可能範囲を考慮して周波数が倍の 650MHz のスポーク空洞を製

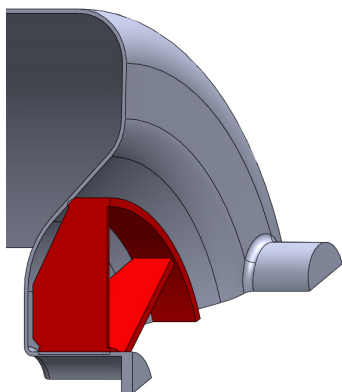


Figure 6: View of annular rib and radial ribs.

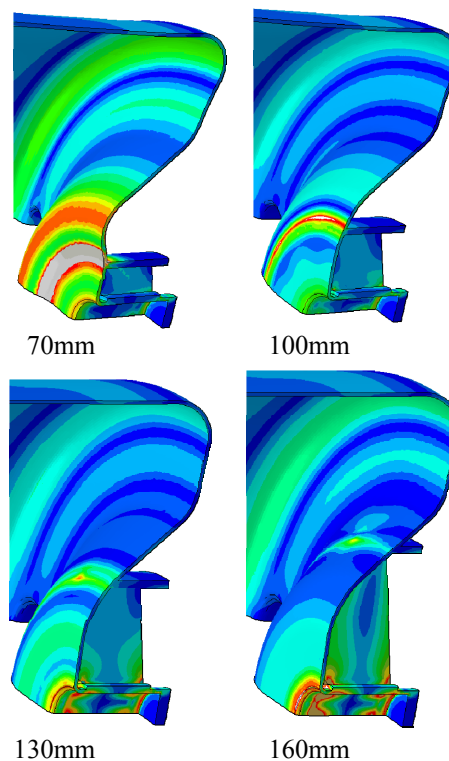


Figure 7: Stress distribution of end plate with various radii of annular rib.

作することにした。周波数が倍になったため、各寸法は半分になるが、金型のサイズ・形状、機械強度等スケージングで対応できるか検討を行っている。

#### 5. まとめ

プレス加工のための金型設計や機械強度等の検討を行ってきたが、周波数を倍の 650MHz にすることとなり、現在周波数変更に伴う設計の見直しの検討を始めている。325MHz スポーク空洞の設計結果をできるだけ利用し、スポーク空洞部品の製作を行っていく予定である。

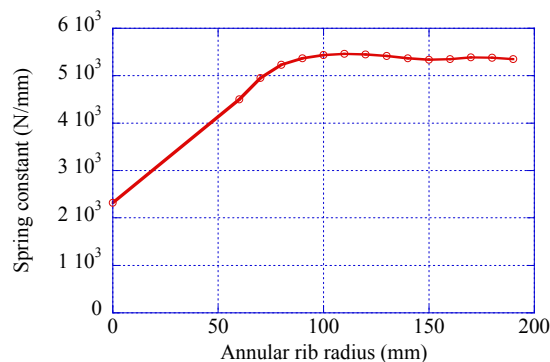


Figure 8: Spring constant as a function of annular rib radius.

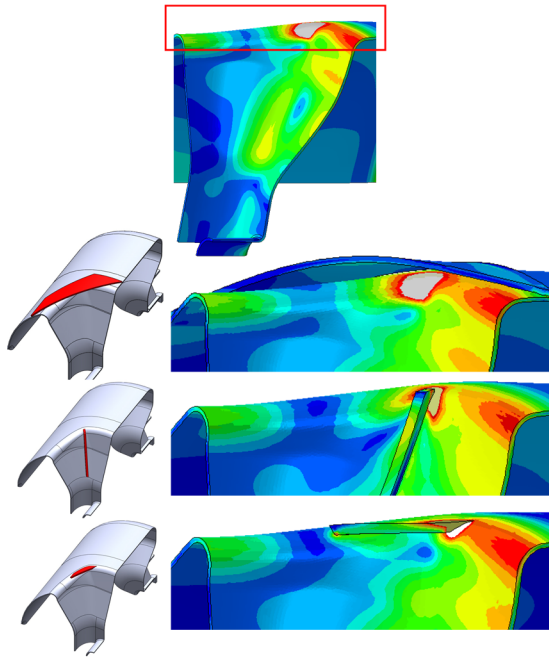


Figure 9: Stress distribution at the end of spoke with different types of supports.

## 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., J. Nucl. Sci. Tech. 45, 441 (2008).
- [2] M. Sawamura, et al., “E R L 超伝導スポーク空洞開発の現状”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014.