

# ERL超伝導スポーク空洞開発の現状

## STATUS OF ERL SUPERCONDUCTING SPOKE CAVITY DEVELOPMENT

沢村 勝<sup>#,A)</sup>, 永井 良治<sup>A)</sup>, 西森 信行<sup>A)</sup>, 羽島 良一<sup>A)</sup>,  
岩下 芳久<sup>B)</sup>, 藤澤 博<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>, Ryoji Nagai<sup>A)</sup>, Nobuyuki Nishimori<sup>A)</sup>, Ryoichi Hajima<sup>A)</sup>,  
Yoshihisa Iwashita<sup>B)</sup>, Hiroshi Fujisawa<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, JAEA

<sup>B)</sup> Kyoto University

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

### Abstract

We have launched a 5-year research program to develop superconducting spoke cavity for laser Compton scattered (LCS) photon sources. For realizing a wide use of LCS X-ray and gamma-ray sources in academic and industrial applications, we adopt 325-MHz superconducting spoke cavity to electron beam drivers. In this paper, we present our developing status of cavity shape optimization and fabrication design.

### 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。LCS-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。これらのシステムを構築するには加速器を小さくすることや、取扱いやすいシステムにすることが重要であり、これらに有利なスポーク空洞を検討してきた。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。

現在、空洞形状の最適化を行うとともに、加工方法の検討を進めている。

### 2. スポーク空洞形状最適化

スポーク空洞形状は楕円空洞形状よりも複雑であり、最適化すべき目的関数も複数あるため、遺伝的アルゴリズムを用いた多目的最適化計算によりスポーク空洞形状を求めた[2]。目的関数として最大電界と加速電界の比( $E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ )、および最大磁界と加速電界の比( $H_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ )の2つを用いた。加速電界として、

$$E_{\text{acc}} = \frac{1}{L} \left| \int_0^L E_z(z) e^{-jkz} dz \right| \quad (1)$$

を用いた。ここで、 $E_z(z)$ は軸上電界、 $k$ は波数、 $L$ は空洞全長である。

電磁界計算はCST MICROWAVE STUDIO (MWS)を用いて、Fig.1のような2スポーク空洞について

行った。

各空洞形状は遺伝的アルゴリズムのプログラムによって生成される「個体」と呼ばれるパラメータセットを用いてモデル化される。共振周波数と加速電界の平坦度を調整した後、各個体に対する目的関数を求める。

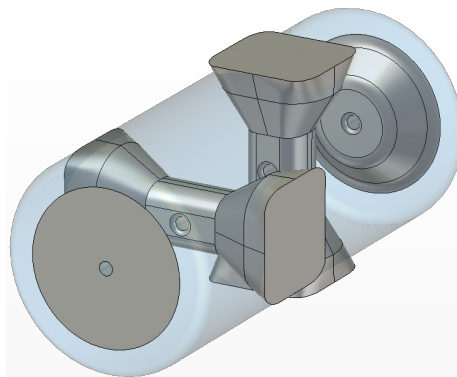


Figure1: An example of 2-spoke cavity model used for CST MWS.

各個体の目的関数の評価には”rank-based fitness assignment”といわれる方法を用いた。この方法は絶対値を基に評価するのではなく、自身より優れた個体の数を求めることにより、優劣を評価するものである。ランクが1のものはすべての目的関数に対して、それより優れた個体が存在しないことを意味している。パレートフロントにより近い個体は絶対値に関係なく、ランクの優れたものになっている。

スポーク空洞形状の最適化によって得られたパレートフロント付近のデータを Fig.2 に示す。この結果から  $E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$  と  $H_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$  の最小値はそれぞれ 3.0 と 5.7 であるが、最小値は必ずしも最適なパラメータではない。超伝導加速器の加速電界の最大値は最大電界と最大磁界によって制限されている。臨界磁界以上では超伝導状態が破壊され、この最大磁

<sup>#</sup> sawamura.masaru@jaea.go.jp

界は 139kA/m 程度である。最大電界は放電を引き起こし、超伝導状態を破壊することになるが、この値は表面処理状態によって変わってくる。パレートフロントにあるデータに関して最大加速電界を計算した結果を Fig.3 に示す。  $E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$  が小さいときは最大磁界により加速電界が制限されているが、  $E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$  が大きいときは最大電界によって制限されている。最大加速電界を最大電界の関数として計算したものを Fig.4 に示す。最大加速電界は最大電界とともに増加するが、最大電界が 90MV/m 以上では最大磁界に制限されるため一定になる。最大電界が 90MV/m の時に加速電界が最大になるスポーク空洞パラメータを Table1 に示す。この時の軸上電界分布を Fig.5 に示す。

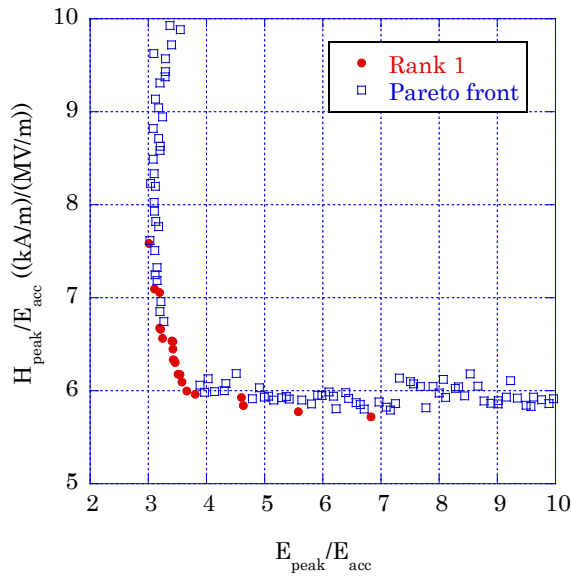


Figure 2: The Pareto front of  $E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$  and  $H_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$  objectives

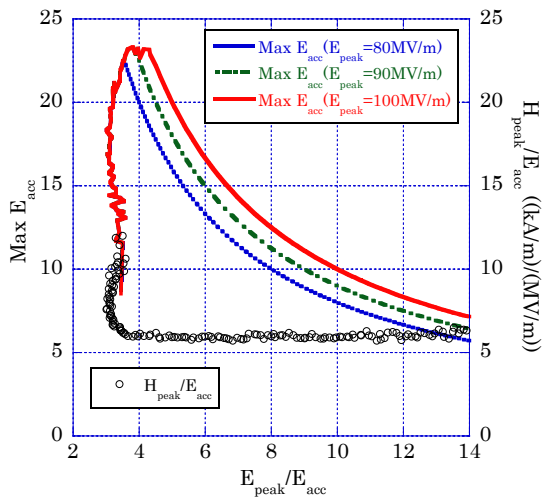


Figure 3: Maximum  $E_{\text{acc}}$  for Pareto front data for  $E_{\text{peak}}$  of 80, 90, and 100 MV/m.

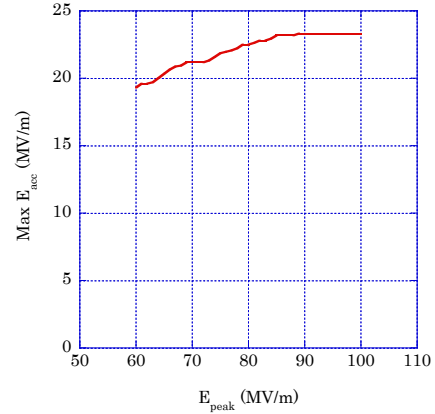


Figure 4: Maximum  $E_{\text{acc}}$  as a function of  $E_{\text{peak}}$  for Pareto front data.

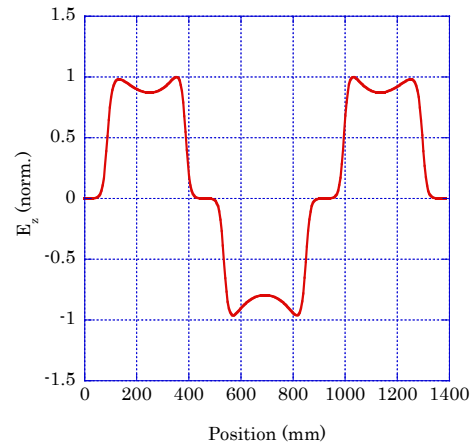


Figure 5: Normalized electric field distribution along the beam axis.

Table 1: Optimized Spoke Shape Parameters

Frequency	325 MHz
No. of Spokes	2
Tank Diameter	609.5 mm
Cell Length	461.2 mm
Cavity Length	1383.6 mm
$E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$	3.7
$H_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$	6.0 (kA/m)/(MV/m)
R/Q	691 $\Omega$
TTF	0.81

### 3. スポーク空洞形状製作

現在 Fig.6 のような 1 スポーク空洞の製作を開始している。最終形状を決定するにあたり、現在 CST PARTICLE STUDIO を用いてマルチパクタの計算を行っており [3]、その結果をもとに最終形状を決定する予定になっている。

真空耐圧や、そのためのサポート部品などの設計、プレス加工のための金型設計を汎用構造解析コード ABAQUS を用いて行っている。

金型の設計は以下の手順で行っている

① 3次元 CAD Solidworks を用いて金型形状を作成

- する。
- ② 金型形状を ABAQUS に読み込み、金型によるニオブ材モデルの弾塑性変形、スプリングバックを計算する。
  - ③ 目標形状との誤差を求め、金型形状を修正する。
  - ④ ①~③を繰り返す。

スポーク部分の製作方法としては、Fig.7(left)のようにスポークを縦割りにした2分割案と、Fig.7(right)のように中央部分と付根部分に分割する4分割案を検討している。2分割案はスポーク形状を1回のプレス加工で成型できるため、加工工程は少なくなるが、金型形状が複雑になることや、プレス加工による割れやしわなどのリスクが多くなる。4分割案は加工工程が多くなるが、金型設計の複雑さは軽減される。

Figure 8にABAQUSの計算に用いる金型のモデルを示す。計算は対称性を考慮して1/4モデルで行っている。計算結果の例をFig.9に示す。灰色の形状が目標とする加工形状で、水色は目標形状と同じ形状の金型を作った場合の結果である。スプリングバックにより大きく曲げ戻されている。緑色は目標形状に近づくように金型を修正した結果である。かなり目標形状に近づいてきてはいるが、さらなる修正が必要である。

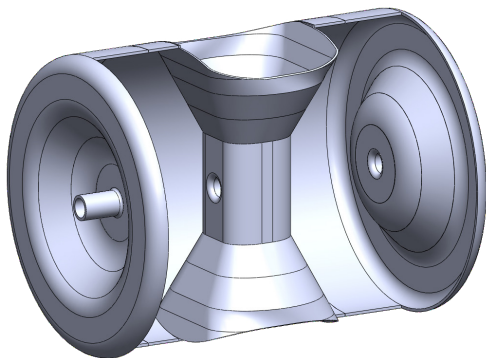


Figure 6: Outline view of 1-spoke cavity planning to be fabricated.

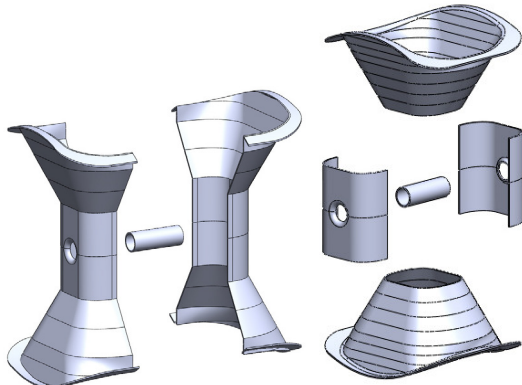


Figure 7: Fabrication plans for spokes divided into 2 parts except for beam pipe (left) and into 4 parts (right).

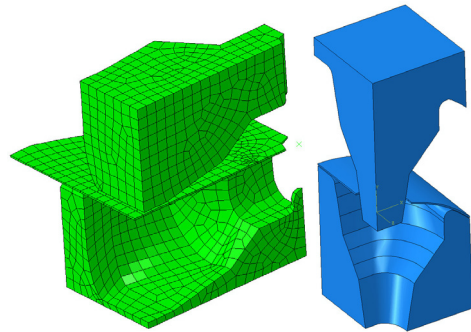


Figure 8: Dies and punches of metal mold for fabrication plans of 2-part division (left) and 4-part division (right).

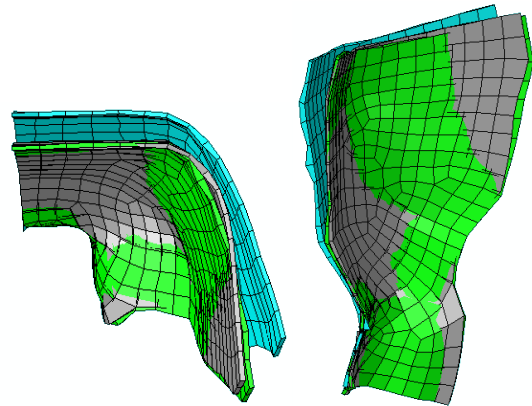


Figure 9: Examples of ABAQUS results: (gray) target shape, (aqua) metal mold of the same shape of target shape, and (green) modified metal mold shape.

#### 4. まとめ

現在1スポーク空洞製作のための空洞形状設計はほぼ終わり、現形状でのマルチパクタの計算を行っており、その結果をもとに最終形状を決定する。

今年度はさらに金型設計の結果をもとに、金型を用いたプレス成型を行う予定になっている。

#### 謝辞

本研究の一部は、文部科学省受託研究：光・量子融合連携研究開発プログラムの成果である。

#### 参考文献

- [1] R.Hajima et al., J. Nucl. Sci. Tech. 45, 441 (2008).
- [2] M.Sawamura et al., "Design Optimization of Spoke Cavity of Energy-Recovery Linac for Non-Destructive Assay Research", Proc. of SRF2011, Chicago, IL, USA, pp. 165-168 (2011), <http://jacow.org/>
- [3] Y.Iwashita, et al., "Multipactor Simulation on Superconducting Spoke Cavity for Laser Compton Scattered Photon Sources", Proc. of IPAC2014, Dresden, Germany, pp. 2543-2545 (2014), <http://jacow.org/>