

## ERL 超伝導スポーク空洞加速器の開発計画

### DEVELOPMENT PROJECT FOR ERL SUPERCONDUCTING SPOKE CAVITY ACCELERATOR

沢村 勝<sup>#</sup>、永井良治、西森信行、羽島良一

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

Japan Atomic Energy Agency

#### Abstract

We are proposing non-destructive assay system of nuclear materials with laser Compton scattering combined with an energy-recovery linac (ERL) and a laser. Since constructing accelerator system for nuclear safe guard and security requires small cavities, 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.

Calculations of optimized cavity shape and HOM coupler shape have been performed and rf properties with aluminum spoke cavity model have been also measured. Considering refrigerator system required for superconducting accelerator, we are planning to develop 325MHz spoke cavity which can be practically operated with 4K liquid helium. We have started to fabricate the niobium 3-cell spoke cavity and will check the performance at the vertical test.

#### 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核物質の非破壊核種分析検査システムを提案している<sup>[1]</sup>。核保障措置および核セキュリティのため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、コンパクト化に有利なスポーク空洞を検討してきた。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 ERL 加速器として用いる場合に利点が多い。

これまで MW-STUDIO を用いた空洞形状の最適化計算や HOM (高調波モード) カップラーの設計計算など各コンポーネントの設計を行うとともに、アルミニウム製のスポークモデル空洞を用いてスポーク空洞の高周波特性の測定等を行ってきた。

超伝導加速器を運転するには冷凍機が必要となるが、実用性を考慮すると、4 Kヘリウムシステムを用いる方が好ましく、4 Kヘリウムで運転可能な 325 MHz のスポーク空洞の開発を計画している。今年度からニオブを用いた 3 セルススポーク空洞試作機の製作に着手し、数年後の縦測定での性能試験を行う予定になっている。

#### 2. スポーク空洞の利点

スポーク型超伝導空洞を ERL 用空洞として用いたとき以下の様な利点がある。

##### ① 小型化

スポーク空洞の周波数は主にスポークの長さで決まり、楕円空洞に比べておおよそ半分の径になるた

め、低い周波数でも比較的小さくすることができる。

##### ② 産業利用

低い周波数にすると、超伝導加速器を 4 Kヘリウム温度で運転することができる。7MV/m の加速電界で、25MeV のエネルギーゲインを得る条件で、空洞でのパワーロスについて周波数と空洞形状の関係を Fig.1 に示す。1.3GHz 楕円空洞の 4 K相当のパワーロスと 325MHz スポーク空洞の 4 Kでのパワーロスがほぼ同じになる。

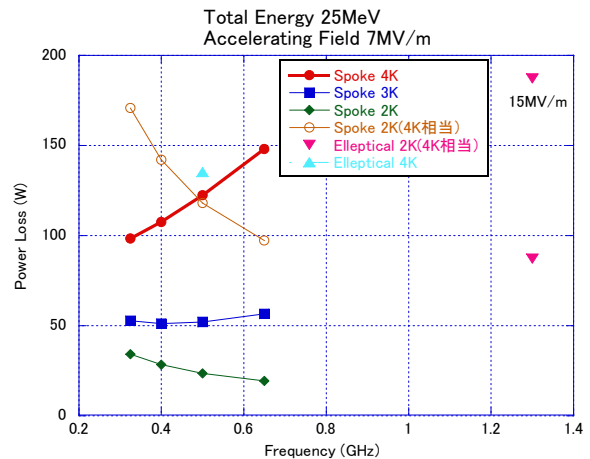


Figure 1: Power loss comparison of spoke cavity and elliptical cavity of various frequencies and temperatures

##### ③ 調整が容易

スポーク空洞は均一太さの洞体で囲まれているためセル間のカップリングが楕円空洞に比べて強く、セルごとの電界分布の調整が容易である。さらにセル間の結合が強いとセル数を多くしても電界分布が乱れにくく、加速器の有効長を長くすることができる。

##### ④ 高効率

スポーク空洞の周波数は主にスポークの長さで決

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

まり、空洞としての剛性も高く、マイクロフォニックスによる空洞周波数の変動も小さい。空洞周波数の変動が小さい空洞を ERL として用いると必要な高周波電力の最大値を小さくできる。それに伴い高周波電源および入力カップラーの耐電力も小さくでき、加速器本体だけでなく、付帯する高周波電源もコンパクトにできる可能性がある。

⑤ 高い実効加速電界

超伝導空洞の HOM を減衰させるための HOM カップラーや HOM ダンパー、さらに空洞に高周波電力を供給するための入力カップラーなどはスポーク空洞側面に取り付けることができるため、楕円空洞に比べて加速空洞の長さが短くでき、さらに空洞間隔も短くすることができる。

⑥ エネルギー広がりが小さい

楕円空洞と同程度の大きさのスポーク空洞を考えた場合、周波数は半分程度になる。周波数が低くなると、電子ビームのバンチ長が同じならば加速位相幅が狭くなるため、エネルギー幅を小さくできる。エネルギー幅の小さな電子ビームを LCS に用いると、発生する光の輝度を高くすることができる。

### 3. スポーク空洞開発状況

#### 3.1 空洞設計

最大電界と加速電界の比( $E_{peak}/E_{acc}$ )、最大磁界と加速電界の比( $H_{peak}/E_{acc}$ )を評価関数として遺伝的アルゴリズムを用いてスポーク空洞形状の最適化計算を行った。

$E_{peak}/E_{acc}$ - $H_{peak}/E_{acc}$  空間における各世代の分布とパレートフロントの推移を Fig.2 に示す。世代が進むにしたがって、パレートフロントが改善し、各個体もパレートフロント付近に集ってきているのが分かる<sup>[2]</sup>。

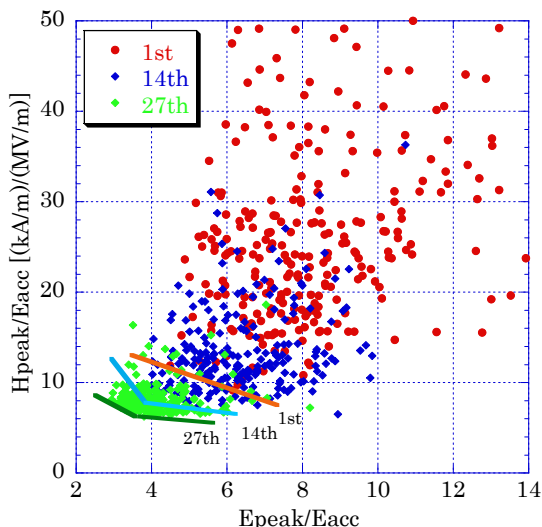


Figure 2:  $E_{peak}/E_{acc}$  and  $H_{peak}/E_{acc}$  distributions (dot) and Pareto fronts (line) of some generations

#### 3.2 高周波測定

アルミニウム製のスポーク空洞モデルを製作し、高周波特性の測定を行った。モデル空洞の主なパラメータを Table 1 に示す。

スポーク部分を取り外しできる構造にしたが、スポークと胴体との接触が悪く Q 値は計算の 60~80% であった。

500~1500MHz での空洞の共振モードスペクトラムをネットワークアナライザーで測定した結果を Fig.3 に示す。Monopole モードと Dipole モードは、ビーズプル法により電界分布を求めることにより決定した。

加速モードの 2 倍付近に Monopole モードはなく、Dipole モードについても他と比べて高い Q 値のモードがないことを確認した。(Fig.4)

Table 1: Parameters of aluminum spoke cavity model

| Material           | Aluminum |
|--------------------|----------|
| Frequency          | 650MHz   |
| No. of spoke       | 2        |
| No. of cells       | 3        |
| Cell length        | 230.6    |
| Radius of cylinder | 274mm    |
| Bore radius        | 40mm     |

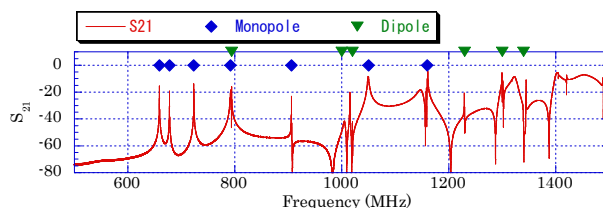


Figure 3: Measured frequency spectrum of spoke cavity

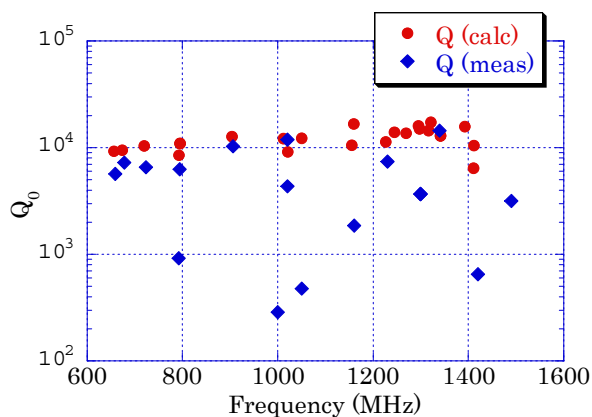


Figure 4: Measured and calculated Q-values of spoke cavity

#### 3.3 HOMカップラー設計

スポーク空洞を超伝導加速器として使用する場合には、HOM を減衰させる機構が必要になるが、スポーク空洞の場合ビームパイプが細くビームラインダンパーは使えないため、空洞側面に HOM カップ

ラーを取付けることとなる。

楕円空洞で使用されている HOM カップラーと同等の形状のものについて 650MHz を加速周波数として透過係数を計算した結果を Fig.5 に示す。ただし、この形状の HOM カップラーは大きさが大きくなるだけでなく、HOM パワーを取り出すコネクター部分の発熱が問題となる<sup>[3,4]</sup>。

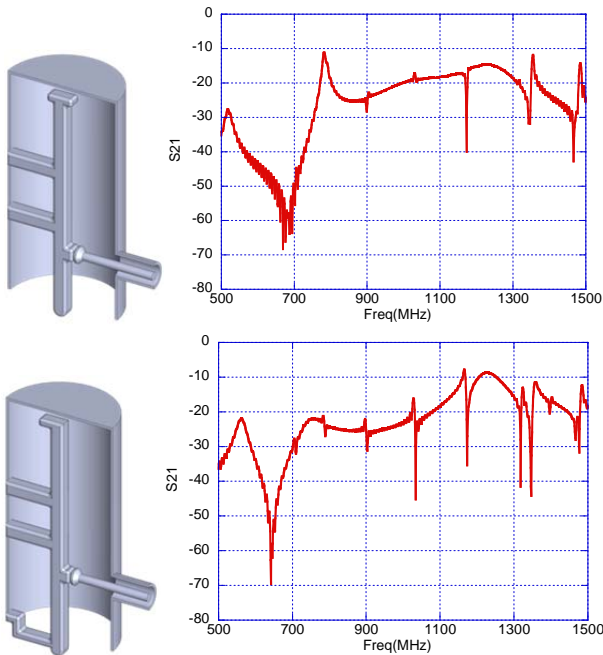


Figure 5: Calculated transmit coefficients of conventional HOM couplers of I-type (upper) and of L-type (lower)

そこで新しい HOM カップラーとして Fig.6 のような同軸と導波管を組み合わせた同軸—導波管変換型 HOM カップラーを提案する。この形状では空洞から加速モードを含めすべての HOM モードが同軸部分を伝搬するが、導波管の幅を加速モードのみを遮断するような長さにすると、加速モードは遮断されるが、HOM のみが導波管を伝搬することになる。この時の透過係数の計算結果を Fig.7 に示す。加速モードでは透過係数が小さく、加速モードより少し高い周波数で透過係数が急に大きくなっているのが分かる。

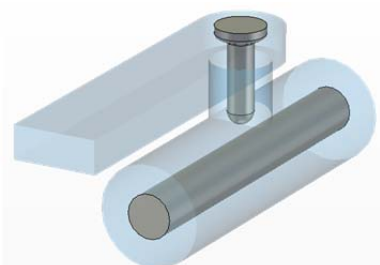


Figure 6: Outline view of coaxial-waveguide HOM coupler

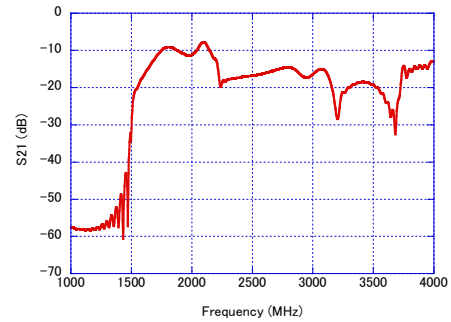


Figure 7: Calculated transmit coefficients of coaxial-waveguide HOM couplers

さらにこの HOM カップラーを変形させ小型化した同軸—C 形導波管変換型 HOM カップラーを Fig.8 に示す。これは導波管部分を丸めて C 形状に変形させたものであるが、導波管の側面がそのまま残り仕切り板のある同軸管のような構造になっている。この構造は仕切り板があるため Fig.9 に示すように C 形部分の平均周長で遮断周波数が決まり、加速モードを遮断することができる。さらに出力部分を同軸形状に再変換することにより同軸構造で HOM パワーを取り出すことができ、しかも内軸が仕切り板を通じて外軸につながっているため、内軸を効率よく冷やすことができ、HOM カップラーで問題となる内軸の発熱を解決することができる。

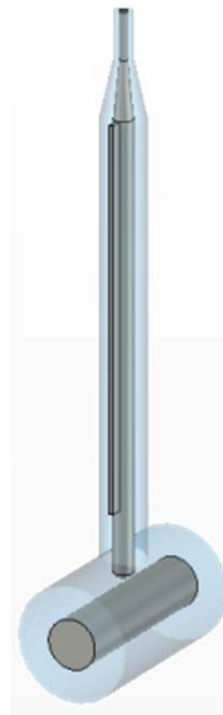


Figure 8: Outline view of coaxial-C-type waveguide HOM coupler

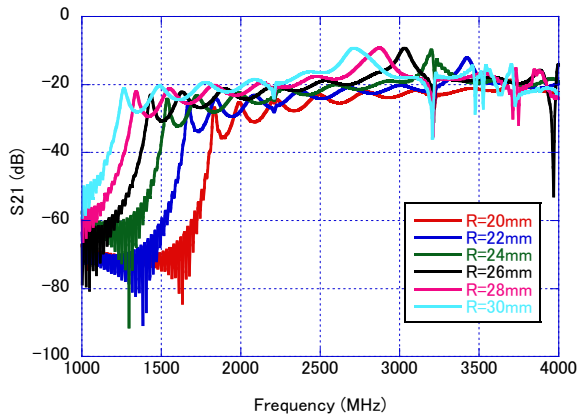


Figure 9: Calculated transmit coefficients of coaxial- C-type waveguide HOM couplers for various radiuses

### 3.4 強度計算

ニオブ製のスポーク空洞を製作するのに必要な強度計算を行った。ニオブ板の厚さを変えて真空耐圧でのミーゼス応力を構造解析コード ABAQUS で計算した。ニオブ板の厚さが 3mm あれば胴体部分は大丈夫であるが、端板部分とスポークの付け根付近にまだ大きな応力が残っている。そのため端板には放射状の、スポークの付け根には長手方向のサポート板を付け加えて応力を軽減した。その結果を Fig.10 に示す。

## 4. まとめ

スポーク空洞を製作するための要素設計を行っていたが、今年度から JST 受託研究の「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」の一部として 5年計画で 325MHz 3セルスポーク空洞加速器の製作を行うことになった。今年度は主に空洞形状等の最終設計を行い、次年度以降ニオブ製空洞を製作し、縦測定等による性能試験を行う予定である。

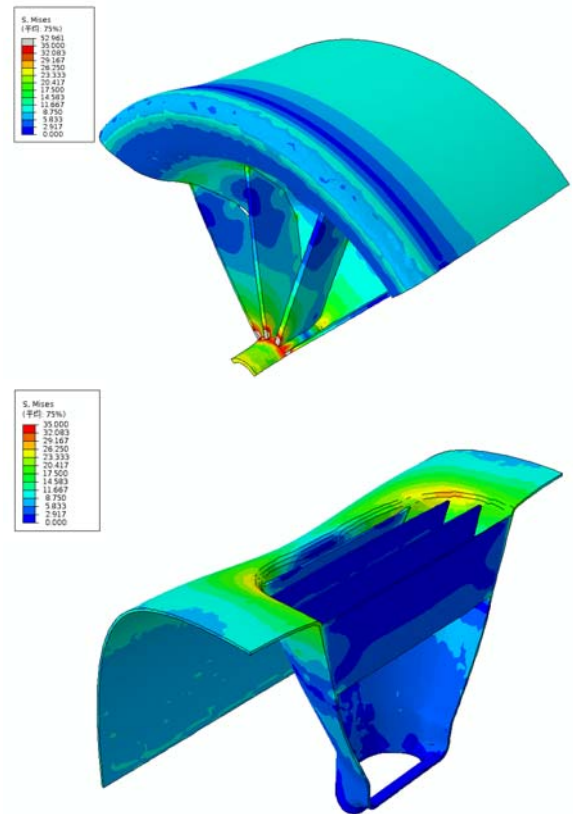


Figure 10: Calculated stress distribution of spoke cavity under vacuum pressure at the end plate (upper) and at the spoke (lower)

## 参考文献

- [1] R.Hajima et al., Proc. of 8<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle accelerator Society of Japan, TUPS040, 2011
- [2] M.Sawamura et al., Proc. of SRF2011, pp. 165-168, 2011
- [3] P. Kneisel et al., Proc. Of 2005 Particle Accelerator Conf., pp. 4012-4014, 2005 .
- [4] G. Wu et al., Proc. of the 12th Workshop on RF superconductivity (SRF2005), pp. 600-603, 2005.