

# RF Characteristics of Spoke Cavity Model for ERL

Masaru Sawamura<sup>1</sup>, Ryoji Nagai, Nobuyuki Nishimori, Ryoichi Hajima

Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki 319-1195

## 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. ERL cavities are also required to have good properties of higher order modes (HOMs) against BBU (beam break up) as well as good accelerating properties. A spoke cavity model of aluminium was fabricated to estimate rf and HOM properties.

## ERLスポーク空洞モデルの高周波特性

### 1. はじめに

エネルギー回収型リニアック (ERL) の低エミッタンス、大電流の特徴を生かせば、レーザーと組み合わせたレーザーコンプトン散乱(LCS)によって発生させるX/γ線の輝度および単色性を大幅に向上させることができる。このLCS-γ線を使った核共鳴蛍光法(NRF)によって使用済核燃料中のウランやプルトニウム、さらには長半減期のマイナー・アクチナイド(MA)などを非破壊で測定することができ、保障措置にとって有用な技術となると考えられ[1]、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

このシステムの実用化には、ERLを小型化することが必要になり、加速空洞のコンパクト化が重要になる。従来の楕円型超伝導空洞では、高調波(HOM)を減衰させるためのHOMカップラー又はHOMダンパー、さらには高周波入力カップラーなどをビームパイプに設置するため、ビームパイプを含めた加速器全体の長さが長くなる傾向にある。

一方、スポーク型超伝導空洞は楕円空洞に比べて空洞全長を短くできること、空洞間隔を短くできること、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加速空洞として用いる利点が多い[2]。そこで電磁波解析コードを用いて多目的最適化の手法でERLスポーク空洞の設計計算を用いて行ってきた[3]。

ERLではHOMによるビーム不安定性(BBU)によってビーム電流の上限が制限されるため、ERLに用いるためには加速モードの特性が優れているだけでなく、高調波モードも優れた特性を持つ必要がある。そこで空洞の高周波特性を調べるためにアルミニウム製のスポーク空洞モデルを試作し、加速モードをはじめHOMなどの高周波特性を調べた。

### 2. スポーク空洞モデル

製作したスポーク空洞モデルは、アルミニウム製で、Fig.1のようにスポーク、円筒、エンドノーズおよび端板に分割され、スポークおよびエンドノーズを容易に変更できるようになっている。この空洞モデルのパラメータをTable 1に示す。

Table 1 スポーク空洞モデルのパラメータ

材質	アルミニウム
周波数	650MHz
スポーク数	2
セル数	3
セル長	230.6mm
円筒内径	274mm
ボア径	40mm

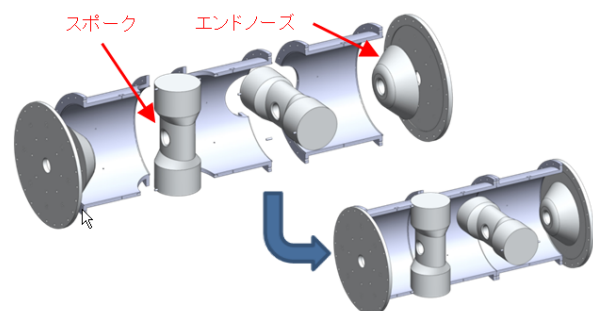


Fig.1 スポーク空洞モデル組立

### 3. 高周波特性測定

モデル空洞内の電磁場分布は、ビーズプル法を用いて測定した。測定系のセットアップをFig.2に示すが、2つのリニアステージと1つの回転ステージを

<sup>1</sup> E-mail: sawamura.masaru@jaea.go.jp

組み合わせることにより、ビーズは加速軸方向とその垂直平面内の3軸を自由に動かすことができる。軸上分布だけでなく、垂直平面での電磁場分布を測定することにより、各モードの極性を特定することができる。ビーズが動いた時の周波数変化はネットワークアナライザを用いて測定した。高周波の入出力用のカップラーは空洞の中央セルに取り付けた。

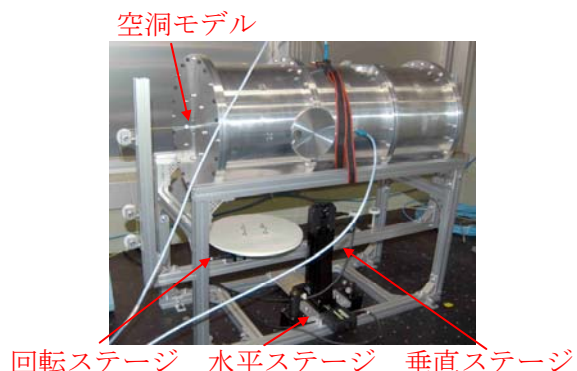


Fig.2 スポーク空洞測定セットアップ

#### 4. 高周波特性結果

スポーク空洞モデルの500MHz～1500MHzの周波数スペクトラムをFig. 3に、Q値の測定値とMW-STUDIOによる計算結果をFig. 4に示す。Q値は計算値の60～80%程度の値となっている。これはスポークと円筒の接触不足が原因と考えられる。モデル空洞はスポークと円筒をそれぞれ組み合わせて1つの空洞になるように設計されているが、最初、加速モードのQ値は計算の1割程度であった。これはスポークと円筒の間に隙間があり、その部分で表面電流が切られたためと考えられた。そこでスポークと円筒の間にインジウム線を挟み込みことにより、加速モードのQ値を計算値の8割程度にすることができた。しかし、インジウム線はスポークを円筒が両側から抑え込む方向には十分な接触を確保することができるが、それと90度方向では円筒がスポークを抑え込む方向ではないため、インジウム線を十分挟み込むことも困難であり、モードによってその部分に流れる表面電流の分布の違いによってQ値が大きく影響されるものと考えられる。

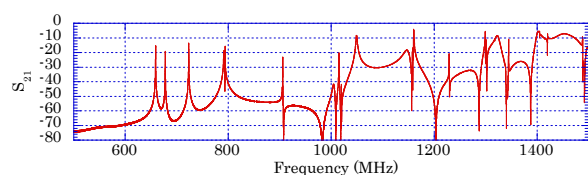


Fig.3 スポーク空洞モデルの周波数スペクトラム

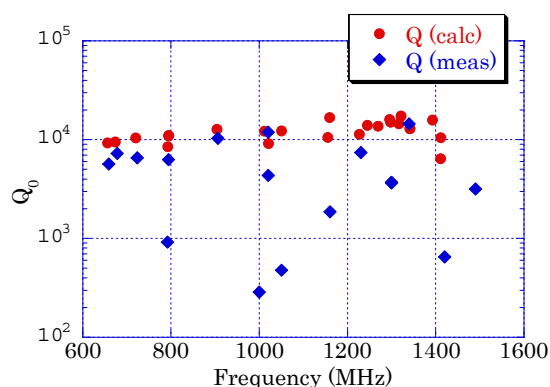


Fig.4 各モードのQ値の測定値と計算値

Fig. 3の周波数スペクトラムの各ピークについて、加速軸方向と垂直平面での電磁場分布の測定を行い、これにより各ピークの高周波モードを特定することができる。

加速モードであるTM010-like  $\pi$ モードとその高調波である $2\pi/3$ と $\pi/3$ モードの軸上分布の測定値と計算値をFig. 5に示す。 $\pi$ モードは1セル目と2セル目はほぼ計算通りであるが、3セル目が低く、対称性が悪くなっている。一方、 $2\pi/3$ および $\pi/3$ モードはほぼ計算通りで、対称性も良いため、両端セルの対称性はいいものと考えられるので、中央部のアンテナを端のセルに移動させたが、分布に変化はなかった。加速モードの対称性が悪い原因については現在調査中である。

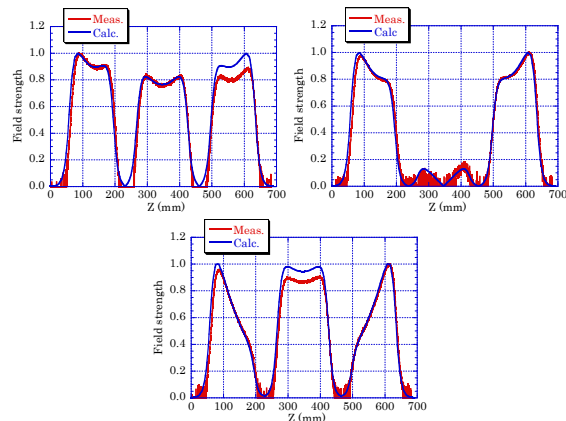


Fig.5 TM010-likeモードの軸上分布。  
(上左) $\pi$ モード、(上右) $2\pi/3$ モード、  
(下) $\pi/3$ モード

その他のモードに関しても同様にモード特定を行った。例として1020MHzのモードの軸上と垂直平面での電磁場分布の測定結果をFig. 6に示す。測定結果は1セル目と2セル目のフィールドが強く、垂直平面内では鉛直方向が水平方向に比べて周波数変化が大きいことから、Dipoleモードと考えられ、計算においても同様の分布を持つモードが求められている。

各モードをMonopoleおよびDipoleモードで区分したものをFig. 7に示す。

加速モードである650MHzの2倍付近にはMonopoleモードが存在しないことが分かる。

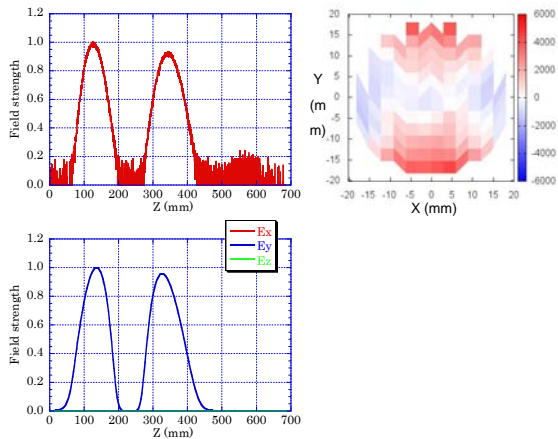


Fig.6 軸上分布と垂直平面分布によるモード特定。(上左)軸上分布の測定値、(上右)垂直平面内での周波数変化の測定値、(下) 軸上分布の計算値

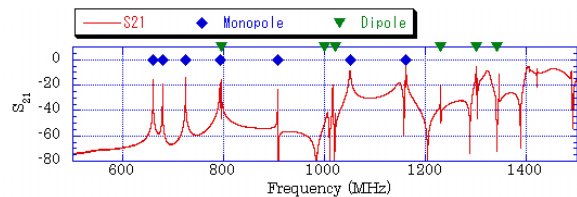


Fig.7 スポーク空洞のMonopoleモードとDipoleモード分布

## 5. HOM特性の評価計算

スポーク空洞のHOM特性の評価計算を行った。計算条件として、

- ① HOMカップラーがない状態で計算を行う。
- ② 2KでQ値が $10^{10}$ となる1.3GHzの楕円空洞と同等のニオブの残留抵抗をスポーク空洞でも用いる。
- ③ 運転温度を2Kとし、周波数に応じたBCS抵抗を加える。

HOMの評価として、次の値 $R/Q$ を用いる。Dipoleモードに対しては

$$R/Q (\Omega/cm^2) = \frac{\left| \int E_z(r=r_0) e^{jkz} dz \right|^2}{\omega U r_0^2}$$

Quadrupoleモードに対しては

$$R/Q (\Omega/cm^4) = \frac{\left| \int E_z(r=r_0) e^{jkz} dz \right|^2}{\omega U r_0^4}$$

ここで $E_z(r=r_0)$ は半径 $r_0$ での軸方向電場、 $k$ は波数、 $\omega$ は角周波数、 $U$ はstored Energyである。計算結果をFig. 8に示す。他に比べて $(R/Q)Q/f$ が高くなるよ

うな特異なモードはなさそうである。これはスポーク空洞が楕円空洞と違ってIrisモードやセル内に閉じ込められるモードが立ち難いためである。またQuadrupoleモードはDipoleモードに比べてかなり低くなっている。これはスポークが直交しているのでQuadrupoleモードが立ち難いためである。

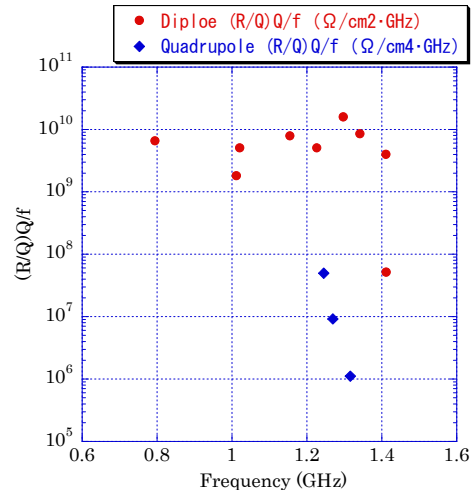


Fig.8 スポーク空洞のDipoleモードとQuadrupoleモードの $(R/Q)Q/f$ の評価計算

## 6. まとめ

スポーク空洞モデルを製作し、加速モードおよびHOMの高周波特性を調べた。HOMの内、Monopoleモードは加速モードの2倍付近には存在しない。Dipoleモードには特に危険なモードはなさそうである。またQuadrupoleモードはDipoleモードに比べて安全である。これらよりスポーク空洞は楕円空洞よりHOM特性が優れているといえる。

今後の予定としては、HOMカップラーの設計を行い、空洞HOMをどれくらい減衰できるかを調べ、さらにより高い周波数のHOM特性を調べて、ERL空洞としての性能評価を行う予定である。

## 参考文献

- [1] R.Hajima et al., Proceedings of 8<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle accelerator Society of Japan, TUPS040, 2011
- [2] F.Krawczyk, Proceedings of 11<sup>th</sup> Workshop on RF-Superconductivity (SRF2003), Sept. 8-12, 2003, WeO05
- [3] M. Sawamura et al., Proceedings of 8<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle accelerator Society of Japan, TUPS148, 2011