

Design of Spoke Cavity of Energy-Recovery Linac for Non-Destructive Assay Research

Masaru Sawamura¹, Ryoji Nagai, Nobuyuki Nishimori,
Ryoichi Hajima, Takehiro Hayakawa, Toshiyuki Shizuma
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki 319-1195

Abstract

We propose a non-destructive assay system of nuclear materials using laser Compton scattering combined with the energy-recovery linac and laser. To construct this system in a building such as the nuclear reprocessing plant, it is important to make the accelerating cavity small. The spoke cavity has advantages over the elliptical cavity to use for our proposing system. The calculation to optimize the spoke cavity shape has been begun with the 3D electromagnetic simulation code MAFIA.

非破壊核種分析のためのエネルギー回収リニアック用スポーク空洞の設計

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、レーザーコンプトン散乱 (LCS) による X/γ 線を用いた核燃料物質を含む様々な核種の非破壊分析法を提案している。これは ERL の持つ低エミッタンス、大電流ビーム加速の特徴を生かして、LCS-X/γ 線の輝度および単色性を大幅に向上させることによって可能になる。

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) を非破壊で測定することができ、次世代核燃料サイクル施設の計量管理、保障措置にとって有用な技術となると考えられる [1]。そのためには非破壊核種分析用 ERL を再処理工場内に設置できるように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。

ERL では高調波モード (HOM) によるビーム不安定性によってビーム電流の上限が制限されるため、HOM 対策が重要になる。従来の楕円型超伝導空洞では、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。

これに対し、スポーク型超伝導空洞は楕円型空洞に比べて空洞全長を短くできるなどの利点がある [2]。そこで電磁波解析コードを用いて ERL に適したスポーク空洞の設計計算を行っているので、その結果を発表する。

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 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は、楕円型空洞の場合ビームパイプ上に取り付けられる。

(Fig. 1) ビームパイプ長さは加速に寄与しないため、加速器全長が長くなる傾向にある。これに対してスポーク型空洞は HOM カップラーや入力カップラーを空洞側面に取り付けることができるため、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。

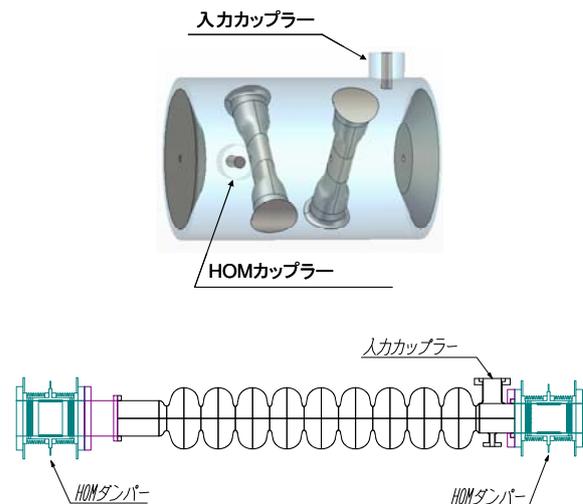


Fig.1 スポーク型空洞の概略図(上)と楕円型空洞の概略図(下)

¹ E-mail: sawamura.masaru@jaea.go.jp

- ②ERLにおいては加速のための高周波電力をビーム減速によって回収するため、加速のための高周波電力はほとんど必要ない。しかし、空洞の機械振動等により共振周波数変動するので、ビームを安定に加速させるためには、周波数変動幅に応じた高周波電力を用意する必要がある。楕円型空洞は団子状に各セルを連結した構造になっており、剛性を強めるため各セルの間に強め輪といわれるリングを溶接しているが、共振周波数の変動幅はあまり小さくない。一方スポーク型空洞の周波数は主にスポークの長さで決まり、空洞としての剛性も高く、マイクロフォニ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。
- ③楕円型空洞と同程度の大きさのスポーク型空洞を考えた場合、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。
- ④楕円型空洞においては各セルは径の小さくなったアイリス部分を通して結合しているのに比べて、スポーク型空洞は均一太さの洞体で囲まれている。そのためスポーク型空洞ではセル間のカップリングが強く、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。

3. 設計計算方針

3次元電磁波解析コードMAFIAを用いて、スポーク型空洞内の電磁界分布を求め、洞体、スポークおよび端板形状のパラメータを変えながら、R/Qや最大電界、最大磁場などを比較し、空洞形状を最適化した。

形状パラメータとしてはFig. 2のように、洞体形状に関して円筒形と方形の2種類について計算を行った。またスポークの形状として簡単化のため、軸対称なスポーク形状とし、ビーム軸付近は円柱形、洞体部分に近づくにつれて径が太くなる形状とした。ビーム軸付近のスポーク径、洞体付近のスポーク裾径、中央部分の円柱部分の高さの3つをパラメータとした。

4本のスポークを交互に直交するように配置した5セル相当の空洞について計算を行った。

周波数に関しては、原子力機構のERL-FELに使っ

ていた500MHzの5セル超伝導空洞と性能の比較ができるように500MHzを基準とした。

スポーク形状が変わると共振周波数も変化するが、周波数調整には洞体部分の大きさを調整して周波数を揃えた。

計算結果として、R/Q、最大電場と加速電場の比、および最大磁場と最大電場の比を求め、各形状を比較した。

各計算においては、第1表に示すように、スポーク径がパラメータのときはスポーク裾径も同時に変化させ、ストレートな棒状のスポークで計算した。スポーク裾径をパラメータにするときはスポーク径とスポーク中央長さを固定し、スポーク中央長さがパラメータのときはスポーク径とスポーク裾径を固定して計算を行った。

第1表 計算パラメータ

		Spoke 径	Spoke 裾径	Spoke 中央長さ
変数	Spoke 径	30~60mm	30~60mm	50mm
	Spoke 裾径	50mm	50~100mm	50mm
	Spoke 中央長さ	50mm	100mm	50~120mm

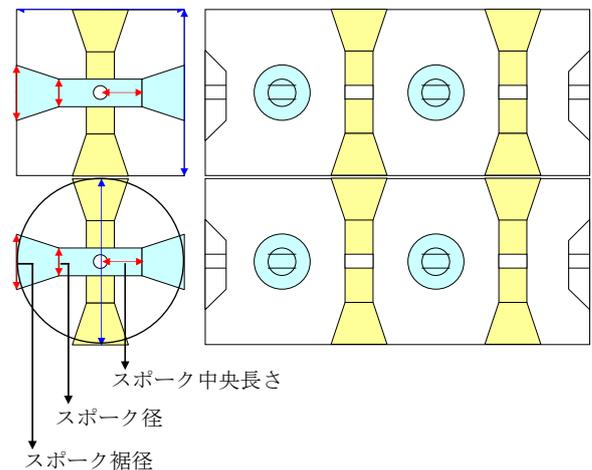


Fig.2 スポーク空洞計算のパラメータ。
方形空洞(上)と円筒形空洞(下)

4. 計算結果

4.1 R/Q

R/Qの計算結果をFig. 3に示す。R/Qに関してはスポーク形状の違いによる変化は、あまり大きくない。

洞体形状に関しては、円筒形の方が方形よりもR/Qは大きい。楕円型空洞との比較においては、スポーク型の方が優れていることが分かる。

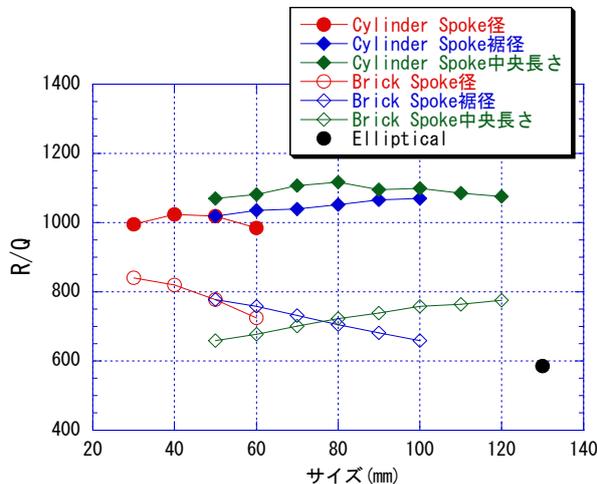


Fig.3 空洞形状の違いによるR/Qの変化

4.2 E_{peak}/E_{acc}

E_{peak}/E_{acc} の計算結果をFig. 4に示す。 E_{peak}/E_{acc} に関しても全体的に方形よりも円筒形の方が小さく、優れていると考えられる。スポーク形状に関しては、スポーク裾径を大きくした方が E_{peak}/E_{acc} を小さくできる傾向にある。また楕円型空洞との比較に関しては、楕円型空洞が同等か、小さめの値になっているが、スポーク型空洞においては電場が最大になるビーム軸径付近の最適化はまだ行っていないため、更なる計算で小さくなることが予想される。

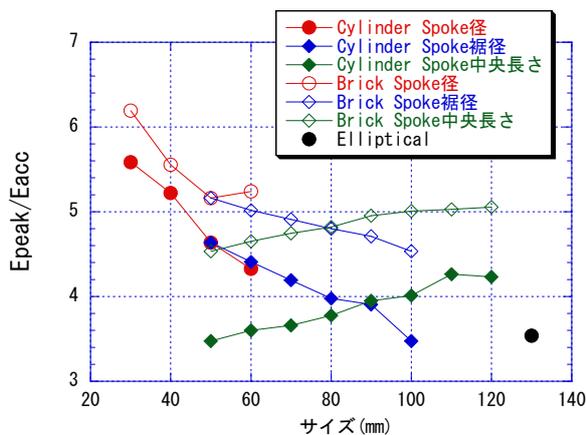


Fig.4 空洞形状の違いによる最大電界と加速電界の比の変化

4.3 B_{peak}/E_{peak}

E_{peak}/E_{acc} の計算結果をFig. 5に示す。 B_{peak}/E_{peak} に関

しては、スポーク形状において径および裾径を大きくして、中央長さを長くした方が小さくなる傾向にある。楕円型空洞との比較に関しては、楕円型空洞の方が小さめの値になっているが、今回の計算では磁場が最大になるスポークの裾部分があり滑らかにならなかった形状では計算できていないため、今後の計算でさらに改善するものと考えられる。

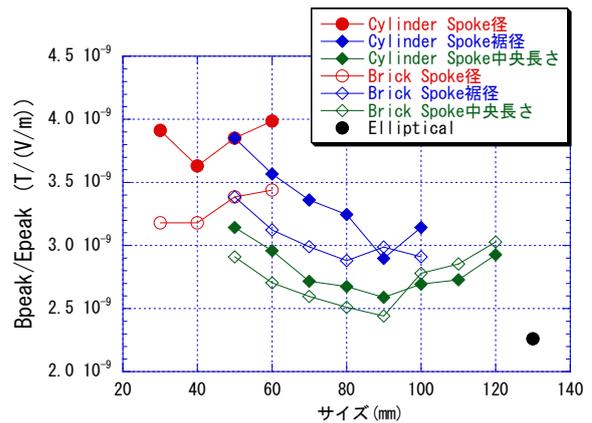


Fig.5 空洞形状の違いによる最大磁場と最大電界の比の変化

5. まとめ

MAFIAを使って簡単な形状についてスポーク型空洞の設計計算を行ったが、MAFIAでは曲線に沿って角を丸め込むことや、異なる形状要素の間を滑らかに繋ぐようにモデル化することは簡単ではなく、より複雑な形状のスポーク型空洞モデルを使って最適化することは難しい。そこでより複雑なスポーク型空洞形状に対応できるようにMW-STUDIOを購入し、さらなる最適化作業を開始した。今後の形状最適化の方針としては

- スポークを扁平させる
- ならかなエッジにする
- 端板形状を最適化する

などを行う予定である。

さらにERL空洞として用いる場合はHOMの減衰も大きな問題となるので、スポーク型空洞に最適なHOMカップラーの設計も合わせて行っていく予定である。

参考文献

- [1] R.Hajima et al., 本論文集
- [2] F.Krawczyk, Proceedings of 11th Workshop on RF-Superconductivity (SRF2003), Sept. 8-12, 2003, WeO05,