

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF ERL SPOKE CAVITY SHAPE FOR NON-DESTRUCTIVE ASSAY RESEARCH

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

Abstract

A spoke cavity has advantages over an elliptical cavity for the ERL accelerating cavity because of short distance between cavities, small frequency vibration due to microphonics and easy field flatness adjustment for strong coupling between cells. The spoke cavity which is more complicated has more parameters to be optimized than the elliptical cavity. Multi-function to be optimized requires multi-objective optimization for cavity design calculation. Multi-objective optimization with genetic algorithm was carried out and the results will be presented.

非破壊核種分析用 ERL スポーク空洞形状の多目的最適化計算

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、大電流の特徴は高輝度、高品質の放射光源を発生させるだけでなく、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、核保障措置および核セキュリティにとって有用な技術となると考えられる [1]。そこで我々は 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

このシステムを実用化する場合、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。

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多目的最適化の手法を用いて行っているため、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をスポーク空洞では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。(Fig. 1)

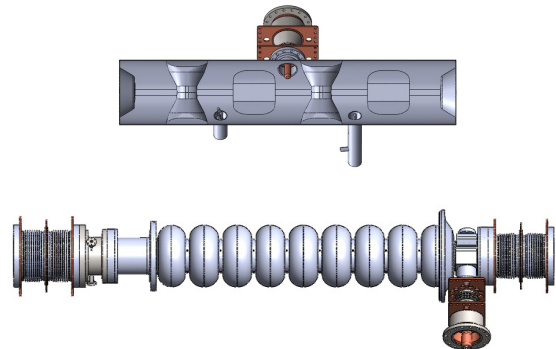


Figure 1: スポーク空洞の概略図(上)と楕円空洞の概略図(下)

- ② スポーク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

¹ E-mail: sawamura.masaru@jaea.go.jp

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 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。

3. スポーク空洞形状

スポーク空洞は主にスポーク、洞体およびエンドノーズの3つの部分で構成されている。

計算に用いたスポークの形状は3つの異なる断面形状をもち、各断面は長方形から角丸四角形、楕円形と変化させることができる。中央部分は同一断面を押し出した形状をしており、端の部分は2つの断面形状を滑らかにつなぐように形状を変化させている。スポークの中央にはビームが通るボアが開けられており、突起部分ができないように角は丸められている。(Fig. 2)

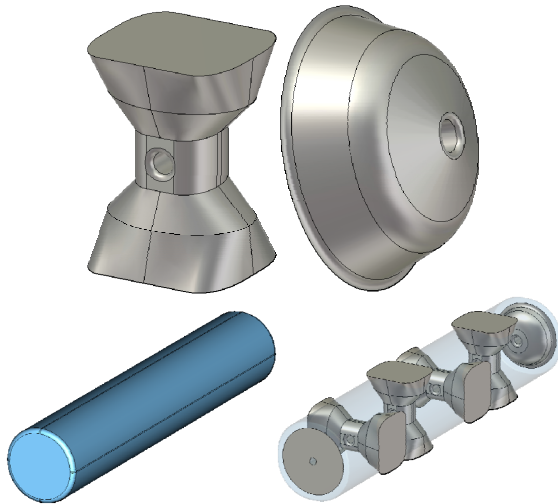


Figure 2: スポーク形状の例。スポーク（左上）、洞体（左下）、エンドノーズ（右上）と組立図（右下）

洞体はスポークを収める中空タンクで、その断面形状は、正方形から角丸正方形、円形へと変化させることができる。また端板部分の角は丸められている。

エンドノーズは円錐台と円錐を重ねた形状で、中央にビームが通過するボアが開けられている。ボア部分、円錐台と円錐の接続部分、および円錐台と端板の接続部分はそれぞれ丸まられ、各部分が滑らかに変化するようにしている。

スポーク空洞の共振周波数を650MHzとした。これは楕円空洞の多くが1.3GHzで設計・製作されており、

その半分の周波数とすることで外径を同程度とした。また650MHzであれば超伝導状態で運転するときに4Kの液体ヘリウム温度での運転も可能となる利点がある。スポーク空洞のセル数は9セル楕円空洞の長さと同じになるように5セルとした。5セルの場合4本のスポークが空洞内に立てられるが、隣同士が直交するようにスポークを配置した。

4. 最適化手順

3次元電磁波解析コードを用いて、スポーク空洞形状を最適化していくが、最適化すべき目的関数として最大電界と加速電界の比 (E_{peak}/E_{acc})、最大磁場と加速電界の比 (H_{peak}/E_{acc})、およびR/Qがある。これらを最小化問題とするためにR/Qに関しては逆数を取り、 E_{peak}/E_{acc} 、 H_{peak}/E_{acc} および $1/(R/Q)$ の3つの関数の最小値多目的最適化問題として、遺伝的アルゴリズムを用いた最適化の手順は以下の通りである。

- ① 各形状パラメータを2進化するため、各パラメータの取り得る最小値と最大値、およびその範囲内のデータ個数に対応するビット数を決める。
- ② 個体と呼ばれる一連の形状パラメータを染色体と呼ばれる1つのビット列データに変換する。
- ③ 最初の集団はランダムに染色体データを発生させる。
- ④ 1つの染色体データを解読してスポーク空洞形状を作成し、3次元電磁波解析コードを用いて空洞内の電磁界分布を求める。
- ⑤ 求めた電磁界分布の中から軸上電界分布がTM010 π モード相当のものを探す。
- ⑥ その周波数が $650\text{MHz} \pm 5\text{MHz}$ を外れているときは、空洞外径を調整して周波数範囲内に入るまで繰り返す。
- ⑦ 軸上加速電界分布から各セルの最大加速電界を求め、その最小値と最大値が1割以上違う場合は端板のエンドノーズの長さを調整し、各セルの軸上加速電界分布が揃うまで繰り返す。
- ⑧ 加速電界、空洞内の最大電界、最大磁場およびR/Qを求める。
- ⑨ すべての染色体データに対して、④から⑧までの操作を行う。
- ⑩ パレートランキング法を用いて評価関数を求める[3]。この方法は、その個体より優越している他の個体数を評価関数とするもので、各個体の目的関数の値の大小に関わらず、パレートフロントに近いものほど優れた評価関数を持つと

いう特徴がある。

- ⑪ この評価関数をもとに新しい世代の親を抽出する。
- ⑫ 抽出方法は、まず評価関数の優れたエリートを一定数優先的に選択する。
- ⑬ 次に評価関数の値により抽出確率が決まるルーレットを用いて所定の数を選択する。
- ⑭ 新しく選ばれた親世代の評価関数に応じて新たに作成したルーレットを用いて、2つの親を選ぶ。
- ⑮ 一様分布交叉で新しい子データを2つ生成する。
- ⑯ 所定の子データが得られるまで⑭から⑮の操作を繰り返す。
- ⑰ 生成された子データに対して一定確率で突然変異を起こさせる。
- ⑱ ④から⑰までの操作をより良い解が得られなくなるまで繰り返す。

遺伝的アルゴリズムで採用したパラメータをTable.1に示す。

Table 1: 遺伝的アルゴリズムで用いたパラメータ

エリートによる選択	20
ルーレットによる選択	80
交叉方法	一様交叉
突然変異確率	2%
親ペア数	200

5. 計算結果

Epeak/Eacc、Hpeak/Eaccおよび1/(R/Q)の各世代の平均の推移をFig.3に示す。各パラメータとも最初は順調に減少しているが、12世代あたりから、1/(R/Q)が順調に減少しているのに対し、Epeak/Eacc、Hpeak/Eaccはあまり変化しなくなっている。そこでEpeak/Eacc、Hpeak/Eaccおよび1/(R/Q)の3つで行っていた評価関数の算出方法を、第15世代からEpeak/EaccおよびHpeak/Eaccの2つに変更した。1/(R/Q)に関しては悪くなったが、Epeak/EaccとHpeak/Eaccに関しては再び減少するようになった。

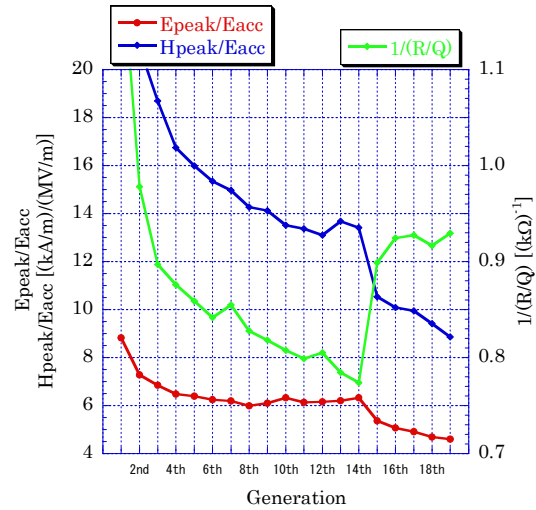


Figure 3: 各世代のEpeak/Eacc、Hpeak/Eaccおよび1/(R/Q)の推移

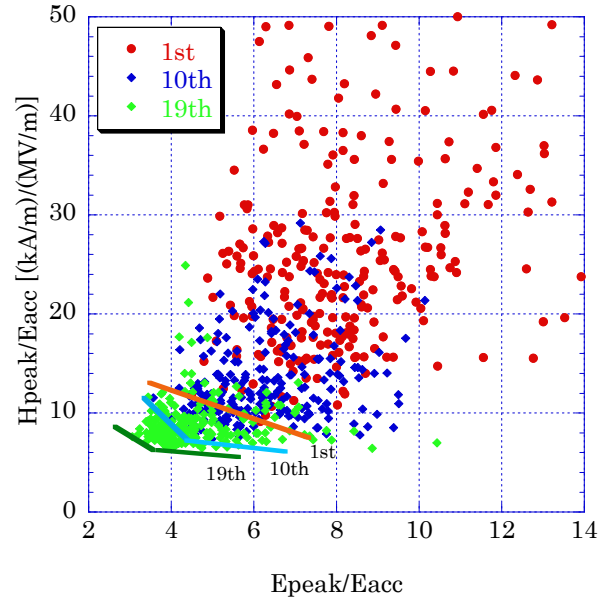


Figure 4: 各世代のEpeak/Eacc-Hpeak/Eacc分布(ドット)とパレートフロント(ライン)

Epeak/Eacc-Hpeak/Eacc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.4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。

またパレートフロントにおける代表的な形状の例をFig.5に示す。Epeak/Eaccが優位な点(A)では、スポーク中央部の幅が厚みより長くなり、スポークの根元が太くなっている。一方Hpeak/Eaccが優位な点(C)では、スポーク中央部は厚みの方が幅より長くなり、スポークの根元が細くなっている。2つの中間に位置する(B)では、2つの中間的な形状になっている。

Epeak/EaccとHpeak/Eaccを他のスポーク空洞と比較したものを、それぞれFig.6とFig.7に示す[4, 5]。

E_{peak}/E_{acc} は β が大きくなると少しずつ大きくなる傾向があり、 B_{peak}/E_{acc} も β とともに電界の場合より急速に大きくなる傾向がある。特に B_{peak}/E_{acc} は楕円空洞と比べると劣っているが、 $\beta = 1$ の今回の設計は他のスポーク空洞の設計に劣るものではない。

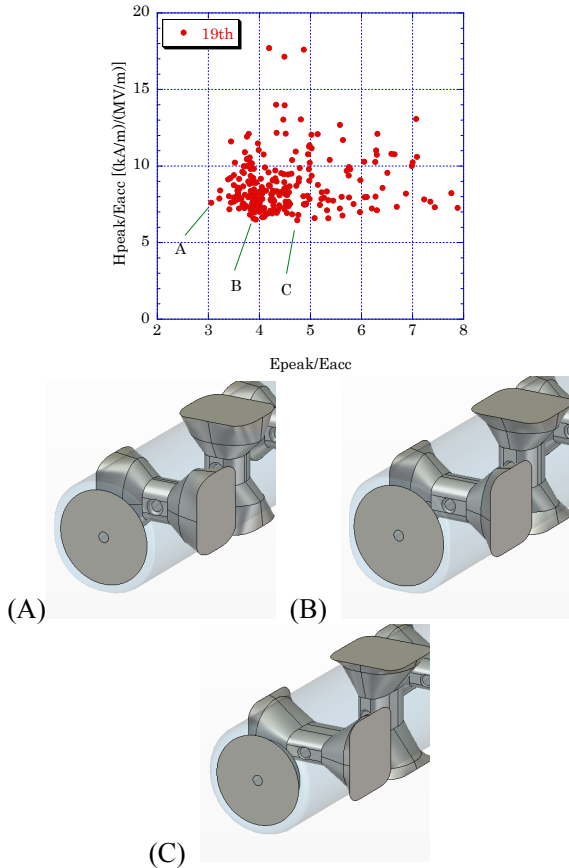


Figure 5: パレートフロント近傍における E_{peak}/E_{acc} 優位な形状(A)と H_{peak}/E_{acc} 優位な形状(C)、その中間(B)。

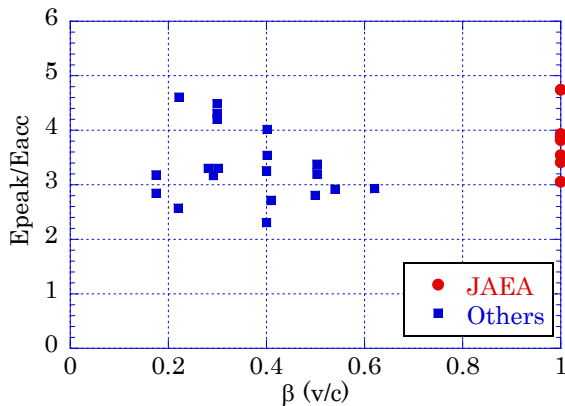


Figure 6: E_{peak}/E_{acc} の β による変化。赤丸は JAEA の設計、青四角は他のスポーク空洞を示す。(参照[4-5])

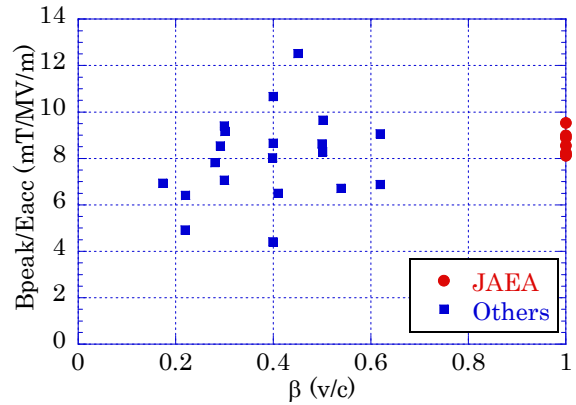


Figure 7: B_{peak}/E_{acc} の β による変化。赤丸は JAEA の設計、青四角は他のスポーク空洞を示す。(参照[4-5])

6. まとめ

遺伝的アルゴリズムを用いた多目的最適化の手法を用いてスポーク空洞形状の最適化を行っている。計算する世代が進むにつれてパレートフロントが進行し、各個体の計算結果もパレートフロント近傍に集ってきている。現在までの計算は他のスポーク空洞の設計に劣るものではなく、計算は現在も進行中である。

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、電磁場分布だけでなく HOM 特性も調べる必要があり、さらにスポーク空洞に最適な 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,
- [3] C. M. Fonseca and P. J. Fleming, Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms, pp. 416-423, 1993.
- [4] J. R. Delayen, Proc. of the 10th Workshop on RF superconductivity (SRF2001), pp. 152-161, 2001.
- [5] M. Kelly, Proc. of the 13th Workshop on RF superconductivity (SRF2007), pp. 414-418, 2007.