

話 題

電子加速用スポーク型超伝導空洞の開発計画

羽島 良一^{*1}・沢村 勝^{*1}・岩下 芳久^{*2}

Proposal of Superconducting Spoke Cavity Development for Electron Accelerators

Ryoichi HAJIMA ^{*1}, Masaru SAWAMURA ^{*1} and Yoshihisa IWASHITA ^{*2}

Abstract

We have launched a development program of superconducting spoke cavities for electron beam acceleration. While the spoke cavity was originally invented for proton and ion acceleration for a velocity range of $\beta=0.3-0.5$, it can be also applicable to electron acceleration, $\beta=1$, with a minor modification. We plan to design and fabricate superconducting spoke cavities for laser Compton scattered photon sources, where the spoke cavities are expected to realize a compact industrial-use X-ray source with a reasonable cost and easy operation. In this paper, we describe features of the spoke cavity and results of cavity shape optimization for electromagnetic and mechanical properties.

1. はじめに

建設が進んでいる European XFEL, 国内誘致に向けた議論が佳境を迎えた国際リニアコライダーは、いずれも、超伝導空洞を用いた電子（陽電子）リニアックであり、TESLA 型と呼ばれる 1.3 GHz (L-band) の楕円空洞 (elliptical cavity) を採用している。これらの大規模計画の旗のもと、高い加速勾配、高い Q 値を持った空洞を大量生産するための技術開発、ノウハウの蓄積が進められてきた結果、超伝導加速空洞の分野は大きく花開きつつある。

本報告で取り上げるスポーク空洞 (spoke cavity) は、TESLA 空洞とは全く異なる形状の超伝導加速空洞であり、これまで、国内での開発例はなかった。

2013 年 6 月、文部科学省の国家課題対応型研究開発推進事業—光・量子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発—「光・量子融合連携研究開発プログラム」の一つとして、「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 (代表：浦川順治)」が採択され、9 月より研究をスタートした。5 年間の研究期間で超伝導加速器によるレーザー・コンプトン散乱 X 線源と、こ

れを用いた X 線イメージングに関する技術開発を行うものである。われわれは、このプロジェクトの一部として、電子加速用のスポーク空洞の開発を行うこととなった。研究プロジェクトが正式にスタートして 3 か月あまりであるが、これまでの検討状況と今後の計画について簡単に紹介したい。

2. スポーク空洞とは

TESLA 空洞は楕円型のセルが連結した構造を持っており、セルの接続部 (アイリス) から隣のアイリスに向けて電気力線が伸びるような共振モードで励起される。Pillbox 空洞に代表される TM 空洞の一種である。

スポーク空洞は、タンデム加速器の超伝導ブースターで用いられている 1/4 波長空洞 (quarter-wave cavity) や 1/2 波長空洞 (half-wave cavity) と同様、同軸共振器から派生した TEM 空洞の間である。

1/4 波長、1/2 波長の超伝導空洞は、いずれも、直立した円筒の中心軸に内導体を備えた同軸共振器である。高いエネルギーを得るには、独立した円筒を並べて用いる。個々の空洞の位相を自由に設定できるためイオン加速に適しているが、加速

^{*1} 日本原子力研究開発機構 Japan Atomic Energy Agency
(E-mail: hajima.ryoichi@jaea.go.jp)

^{*2} 京都大学 Kyoto University

電圧を大きくするには効率的でない。

図1に示すように、スポーク空洞は、横に倒した円筒タンクの内部に支柱（スポーク）を取り付けた構造であり、スポークが1/2波長の共振器となっている。複数のスポークを連続して配置する場合には、隣接するスポークは180度反転した位相で共振する。加速粒子の設計速度を決めれば、一つの空洞に複数のスポークを取り付けられるので、高い加速電圧を得るのに適している。

スポーク空洞は、1980年代後半に大電流の陽子、イオン加速器のために提案されたのが最初である¹⁾。当時、開発の舞台であったArgonne研究所では、IFMIF（国際核融合材料照射施設）、ADS（加速器駆動未臨界炉）といった現在の計画までつながる大強度加速器において、中程度の β 領域を受け持つ加速空洞としてスポーク空洞の開発がスタートしたが、1990年代に入ると、これら予算が打ち切れ、スポーク空洞の開発は一時中断した。しかしながら、その後すぐに、RIA計画（Rare Isotope Accelerator）をはじめとした大型加速器計画の中で、ふたたびスポーク空洞が注目されるようになった歴史がある。

これまで、スポーク空洞による実際の粒子加速が行われた例はないが、多数の空洞について設計製作と性能確認が行われてきた。そのほとんどは、加速粒子の速度が $\beta=0.3-0.5$ の陽子またはイオン加速用であるが、最近では電子加速用のスポーク空洞の開発も始まっている。空洞あたりのスポークの数は1-3本の装置があり、それぞれ、シングルスポーク、ダブルスポーク、トリプルスポークと呼ばれる。複数のスポークを備える場合は、加速ビームの横方向の対称性を改善するために隣接するスポークを90度ずつ回転する形状と

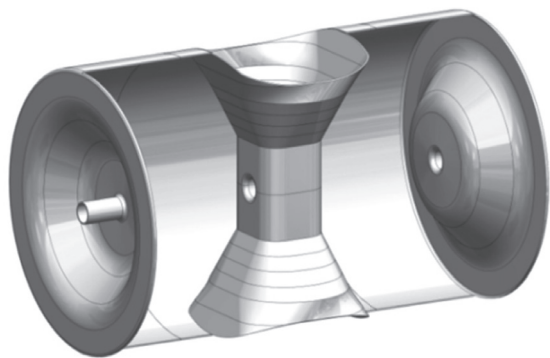


図1 電子加速用シングルスポーク空洞の例

する。

今年9月に行われた超伝導加速器の国際会議（SRF-2013）のプログラムを見ると、スポーク空洞に関する研究発表が多数なされている²⁾。ヨーロッパでは、核破砕中性子源のEuropean Spallation Source（ESS）で352 MHz、 $\beta=0.5$ のダブルスポーク空洞が、加速器駆動未臨界炉（ADS）の実験炉MYRRHAでは352 MHz、 $\beta=0.37$ のシングルスポーク空洞が、それぞれリニアックの中間エネルギー部に採用されている。加速粒子はいずれも陽子である。中国のADS計画（Chinese ADS）も、325 MHz、 $\beta=0.2-0.4$ のシングルスポーク空洞を用いる設計である。韓国の重イオン加速器施設（RAON）では、 $\beta=0.3, 0.51$ の二種類のシングルスポーク空洞（325 MHz）が U^{+79} などのイオン加速に用いられることになっている。米国ではFermi研究所の大強度陽子加速器計画であるProject-Xにて、325 MHz、 $\beta=0.22, 0.47$ のシングルスポーク空洞の採用が計画されている。米国では、また、電子加速用として、Old Dominion University（ODU）、Niowave社が500 MHzのダブルスポーク空洞を、ODU、Niowave、Los Alamos、Naval Postgraduate Schoolが700 MHzのダブルスポーク空洞を開発している。後者は艦載用の自由電子レーザーを目的としており、クライオモジュールに組み込んだ動作試験を既に行っている。

国内では、原子力機構によるレーザー・コンプトン散乱ガンマ線源用のエネルギー回収型リニアックのための650 MHzスポーク空洞の設計研究³⁾とアルミ製空洞の試作⁴⁾、理研RIBFにおけるスポーク空洞バンチャの設計研究⁵⁾の例があるが、ニオブ製の実機の製作には至っていない。

3. スポーク空洞の特長

スポーク空洞は、楕円空洞（TESLA型など）と比較して、いくつかの特長をもっている⁶⁾。

コンパクト性：同一周波数の楕円空洞に比べると、スポーク空洞の外径は約半分のサイズである。これは、楕円空洞の外径が共振波長の約0.9倍であるのに対して、スポーク空洞ではスポークの長さが半波長であることによる。

大きなセル間カップリング：楕円空洞ではセル

同士のカップリングはアイリスを通して確保されるが、アイリスを大きくするとシャントインピーダンスが下がり、また、同じ加速勾配を得るためには表面電界が高くなるため、カップリングを大きくとることは難しい。通常の超伝導楕円空洞のセル間カップリングは2%以下である。スポーク空洞では、スポークを囲む磁力線によって隣接するセル同士が磁気的にカップルされるので、20-30%のセル間カップリングを実現できる。このため、スポーク空洞の電場分布は空洞の形状誤差に鈍感で製作後のプリチューニングが不要である。

円筒タンク外周部へのカップラー配置：図2に示したように、スポーク空洞では、加速モードの電磁場がスポークの周りに集中している。つまり、円筒タンク外周部のスポークと直交する付近には、加速モードの電場・磁場ともに小さくなる領域が存在する。このような場所をうまく選べば、空洞外周部に主カップラー、HOMカップラーを取り付けることが可能になる。楕円空洞では主カップラー、HOMカップラー（またはHOMダンパー）を空洞両端のビームパイプに設ける必要があるのに対して、スポーク空洞は軸方向のスペースを有効に利用でき、加速器システム全体の小型化に寄与する。図3はスポーク空洞のカップラー配置を楕円空洞と比較したものである。

良好な変形振動特性：エネルギー回収型リニアック (ERL) では、たとえ完全な ERL 動作を行っ

たとしても、加速電場を制御するために一定の RF 入力を準備しなければならない。この RF 入力の大きさを決める主たる現象が、マイクロフォ

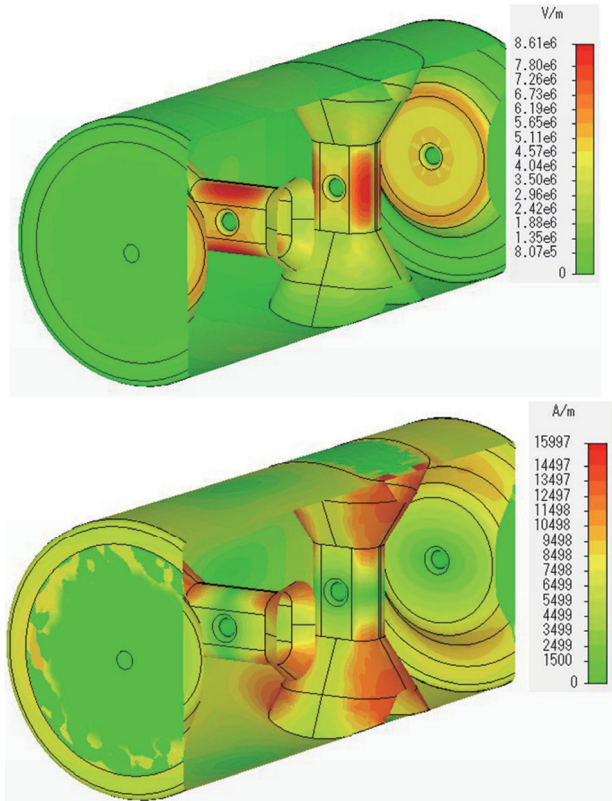


図2 ダブルスポーク空洞における、加速モードの表面電場分布(上)と表面磁場分布(下)。電場、磁場ともにスポーク周囲に局在しているので、外周部にカップラーの配置が可能となる。

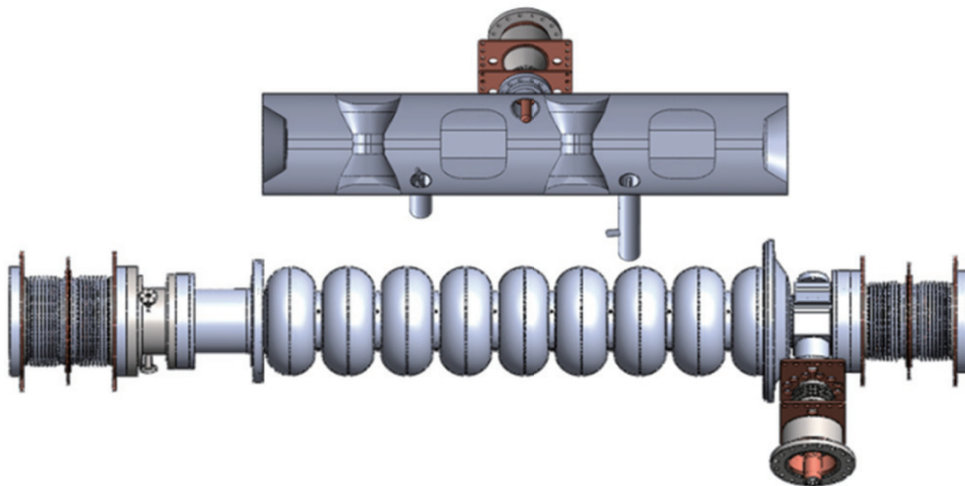


図3 650 MHz スポーク空洞(上)と1300 MHz 楕円空洞(下)の比較。空洞の直径はほぼ同一である。スポーク空洞では主カップラー、HOMカップラーが外周部に配置されるが、楕円空洞では空洞両端に配置される。

ニックによる空洞の変形（共振周波数の離調）である。スポーク空洞は、楕円空洞に比べて周期性が小さいこともあり、離調に悪影響を与える変形振動の固有モードが少なく、マイクロフォニックによる離調も小さくできる。これにより、小出力のコンパクトなRFシステムでERL動作を実現できる。

さらに、光源用電子加速器にとっては、低い周波数（長い波長）の動作に適したスポーク空洞は、RF場による電子バンチのエネルギー広がりが小さくなり、光源の輝度が大きくなる利点もある。

4. 原子力機構におけるスポーク空洞の提案

原子力機構では、2002年に高出力自由電子レーザーのためのエネルギー回収型リニアックであるERL-FEL（500 MHz, 楕円空洞）⁷⁾を完成した後、KEKや国内の大学と共同で次世代放射光源のためのERL技術開発を進めてきた。大電流低エミッタンスビームの生成と加速のために新規に開発した電子銃、超伝導空洞（1.3 GHz, 楕円空洞）はコンパクトERLに据え付けられ、運転調整が始まっているところである⁸⁾。

原子力機構のERL開発は、核種の非破壊分析のためのレーザー・コンプトン散乱（LCS）ガンマ線源の実現を目的としている⁹⁾。コンパクトERLにおいても、2014年度にLCS実験を行う予定であり、これに向けたレーザー、ビームライン、実験室などの準備を進めている。

核種の非破壊分析技術は、原子炉や核燃料再処理工場といった核物質を取り扱う施設における、ウラン、プルトニウムの計量管理、保障措置に役立つと期待されている。このような産業利用向けの加速器においては、加速器の高い性能だけでなく、保守の容易さ、建設運転のコストといったファクターも重視される。

コンパクトERLの楕円空洞は、ビーム電流最大100 mA, 規格化エミッタンス0.1 mm-mradを実現するために設計された空洞である。回折限界X線放射光、共振器型X線自由電子レーザーに必要な電子ビームを得るための装置である。最先端の加速器であるが、産業利用の目的としては必ずしも最適化されていない。

原子力機構では、レーザー・コンプトン散乱ガンマ線をはじめとした加速器ベースの光源を産業

の分野に広く展開することを目的とし、産業利用向けのERLのために、電子加速用のスポーク空洞を2009年に提案し¹⁰⁾、その後、空洞周波数を650 MHzを選んで、空洞形状の最適設計、テスト空洞（アルミモデル）の製作と特性測定などを行ってきた^{3,4)}。

5. 小型高輝度X線源のためのスポーク空洞開発

冒頭でも述べたように、2013年9月から「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」の予算をうけて、電子加速用スポーク空洞の開発を本格的にスタートした。本プロジェクトは、レーザー・コンプトン散乱に基づく小型高輝度X線源として、企業、大学、病院等に設置できる装置を実現し、創薬、医療診断、治療に役立てることを目的としている。

高輝度X線の発生には超伝導加速器（ERL）が適しているが、運転保守が容易であることも必要条件である。このため、われわれは、325 MHzのスポーク空洞を採用する。原子力機構、京都大学、KEKが協力して空洞の設計製作、性能測定を実施する計画である。

325 MHzを選んだ理由は、ヘリウム温度4 Kで運転可能なこと、ERL、ILC用の1.3 GHzの分周周波数であるためである。直流と違い、交流動作では超伝導といえども抵抗はゼロではなく、周波数の二乗で表面抵抗（BCS抵抗）が増加する。常伝導では表皮効果によるそれが周波数の平方根で増加するのと好対照である。このため、ERL、ILC用の1.3 GHzの1/4である325 MHzまで周波数を下げることにより1.3 GHz動作で必要な超流動He温度の2 Kまでの冷却を避けることができる。

原子力機構のERL-FEL（500 MHz, 楕円空洞）では、Zero-Boil-Off Cryostatと呼ぶ冷凍機付きのクライオモジュールを採用することで、高圧ガスの規制をうけない超伝導加速器を実現していた¹¹⁾。今回開発するスポーク空洞は、CW、パルス（バーストモード）の両方に対応することを予定している。レーザーを含めた全体システムを最適化することで、パルス運転でも実用レベルの高輝度X線が発生できれば、JAEAのERL-FELと同様に高圧ガスの規制を受けない超伝導加速器

も可能となるだろう。

今年9月には、Spoke Cavity and Related Topics と題する研究会を KEK で開催した。国内の大学、研究所、企業から関連の発表があり、また、スポーク空洞の発明者である Jean Delayen 氏 (ODU/JLAB) には、スポーク空洞の設計、製作に関する講演をしていただく機会を得た。研究会での議論を通じて、スポーク空洞の完成に向けた技術開発の項目を整理することができた。

以下では、これまでに得られた結果を簡単に紹介したい。

6. 325 MHz スポーク空洞の開発状況

6.1 空洞形状の最適化

325 MHz のダブルスポーク空洞について、高い加速勾配を得るための形状最適化を行った。スポーク空洞は楕円空洞に比べて形状が複雑であるため、3次元電磁波解析コードを用いて形状を最適化した。最適化の作業では、スポーク空洞のスポーク、外周部およびエンドノーズの3つの部分に関して、形状パラメータを設定した。

スポークに関しては楕円柱のものから端部が広がった形状まで対応できるように、スポークを中央部、中間部、端部の3断面に分割し、各断面は長方形から角丸四角形、楕円形と変化する自由度を持たせた。中央部分は中央部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、突起部分ができないように角は丸められている。

外周部はスポークを取める中空タンクで、正方形から角丸正方形、円形へと変化した断面の押し出し形状である。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められ、各部分が滑らかに変化するようにしている。

6.2 最適化手順

スポーク空洞形状を最適化するにあたっては最大電界と加速電界の比 ($E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$)、最大磁界と加速電界の比 ($H_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$) を目的関数として、これらを最小とする設計を求めた。スポーク空洞

はスポークの数を基本に E_{acc} を定義するやり方もあるが¹²⁾、われわれは全空洞長を基本に E_{acc} を定義したので次式を用いた。

$$E_{\text{acc}} = \frac{\left| \int E_z e^{-\frac{2\pi jz}{\lambda}} dz \right|}{\frac{\lambda}{2} N_{\text{cell}}}$$

ここで、 λ は波長、 N_{cell} はセル数 (スポーク数 + 1) である。粒子速度は $\beta=1$ としている。

$E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ および $H_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ の2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を行った。そ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、およびその範囲内で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 MW-Studio 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 $TM_{010}\pi$ モード相当のものを探す。

⑥ その周波数が $325 \text{ MHz} \pm 2.5 \text{ MHz}$ 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高さを調整し、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、空洞内の最大電界および最大磁場を求める。

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¹³⁾。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、パレートの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。

図4にパレートフロントを示す。各ランクはその個体より優越している個体数を表しており、rank1は自身より優れた目的関数をもつ個体がないものを指す。

E_{peak}/E_{acc} が3.2, 4.0, 4.9の場合の形状を図5に示す。 E_{peak}/E_{acc} が小さいほど中央部分の正面が短くて太く、 E_{peak}/E_{acc} が大きくなるにしたがって、細長くなっている。

パレートフロントとして、 E_{peak}/E_{acc} が小さくなるに従って H_{peak}/E_{acc} は大きくなり、逆も同様であり、これらの解の中から形状を決定することとなる。これまでの様々な楕円空洞の測定結果によると、最大磁場は 139 kA/m 程度である¹⁴⁾。最

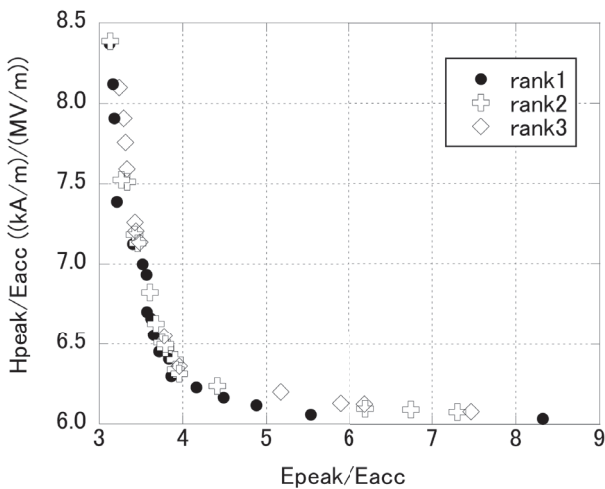


図4 E_{peak}/E_{acc} と H_{peak}/E_{acc} 分布のパレートフロント

大電場を仮定すると各パレートフロントの形状に関して最大の E_{acc} が求められる。その結果を図6に示す。

E_{peak}/E_{acc} が小さいところでは、最大磁場により E_{acc} が抑えられ、 E_{peak}/E_{acc} が大きいところでは最大電界によって E_{acc} が抑えられる。 E_{acc} が最大になるのは、 E_{peak}/E_{acc} が4前後の値をとる形状であることが分かる。

スポーク数が1本と2本の場合の空洞パラメータを表1に示す。

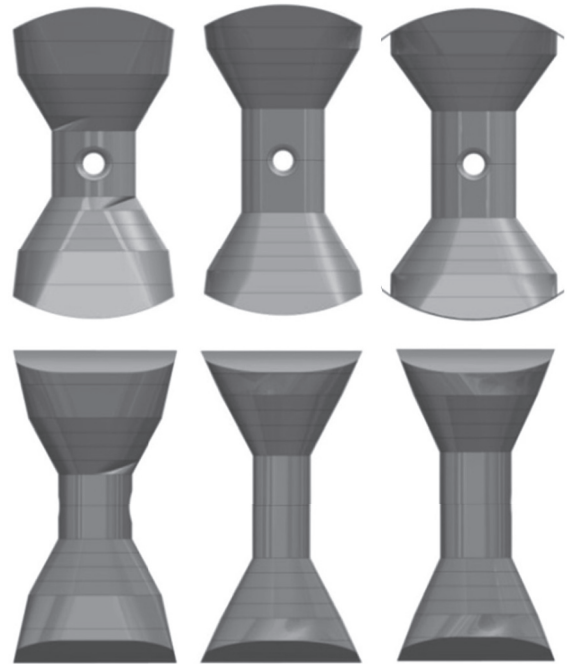


図5 スポーク形状の正面(上)と側面(下)を示す。左から $E_{peak}/E_{acc}=3.2, 4.0, 4.9$

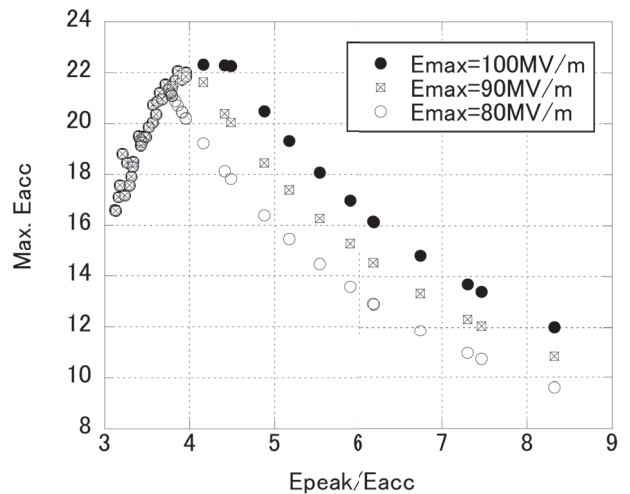


図6 E_{acc} の最大値と E_{peak}/E_{acc} との関係

表 1 スポーク空洞パラメータ

		2-spoke	1-spoke
周波数	MHz	325	325
β		1.0	1.0
空洞長	m	1.384	0.922
空洞直径	m	0.60	0.60
$E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$		3.8	3.9
$H_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$	kA/m/(MV/m)	6.4	6.0
R/Q	Ω	647	455

6.3 設計制約条件

スポーク空洞を用いて超伝導空洞にする場合、表面処理とマルチパクターの問題で制約を受ける。

表面処理としては、アニール、電解/化学研磨、超音波洗浄、高圧洗浄などが一般に行われるが、このうち表面処理の最後に行われる高圧洗浄はノズルから高圧の超純水を噴射させ、表面研磨の際に残った不純物や塵・埃などを除去するための重要な工程である。その際空洞長全域にわたってノズルを移動あるいは空洞を移動させながら空洞内面全域を洗浄していくことになる。ボアの部分も高圧洗浄のノズルの通り道として使われることになるので、ノズルが通るだけでなく、ノズルの振動があってもボアと接触しないように十分なボア径が要求される。

しかし、図 7 に示すようにボア径が大きくなるにしたがって $E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ が大きくなる傾向があり、あまり大きくすることは得策ではない。 $E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ は 50 mm 程度以下では大きな変化はないが、60 mm を超えると大きく増加している。 $H_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ に関しては大きな変化は見られない。ある程度の大きさと余裕を考えて、56 mm 程度が適当と考えられる。

またマルチパクターに関しては加速電界を安定に上昇させていくうえで重要な点であり、現在検討を行っているが、一般的に円筒タンクのコーナーの丸みを大きくするとマルチパクターの発生電界が高くなる傾向にある。図 8 に円筒タンクコーナーの丸め半径を変えた時の $E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ と $H_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ の様子を示すが、コーナー半径の変化による $E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ と $H_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ の変化はほとんど現れず、マルチパクターの結果をもとにコーナー部分の形状を決定する予定である。

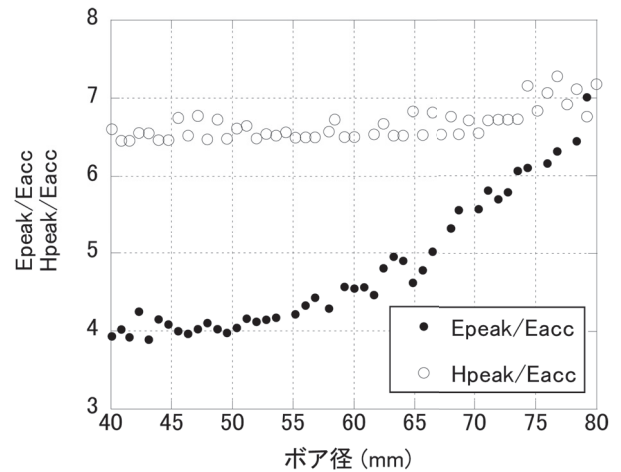


図 7 ボア径のみを変化させた時の $E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$, $H_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ の変化

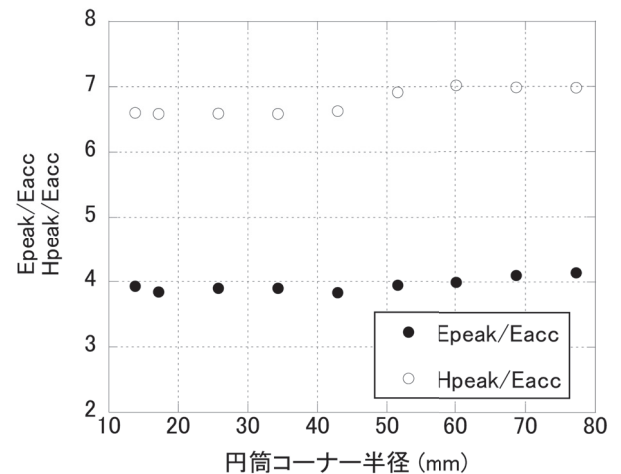


図 8 円筒コーナー径と $E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$, $H_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ の関係

6.4 強度計算

ニオブ製マルチスポークの空洞を製作する前に、製作工程等を確認するために、まず図 1 のようなニオブ製シングルスポーク空洞を製作する予定である。

ニオブ製のスポーク空洞を製作するのに必要なニオブ板厚さを決めるため強度計算を行った。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。その結果を図 9 (上) に示す。0.2%耐力が 39 MPa 以上のニオブ板を使用する予定であるが、余裕を見て 35 MPa 以上の部分が灰色で表されている。

ニオブ板の厚さが 3 mm あれば胴体部分の応力は十分小さくなっているが、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

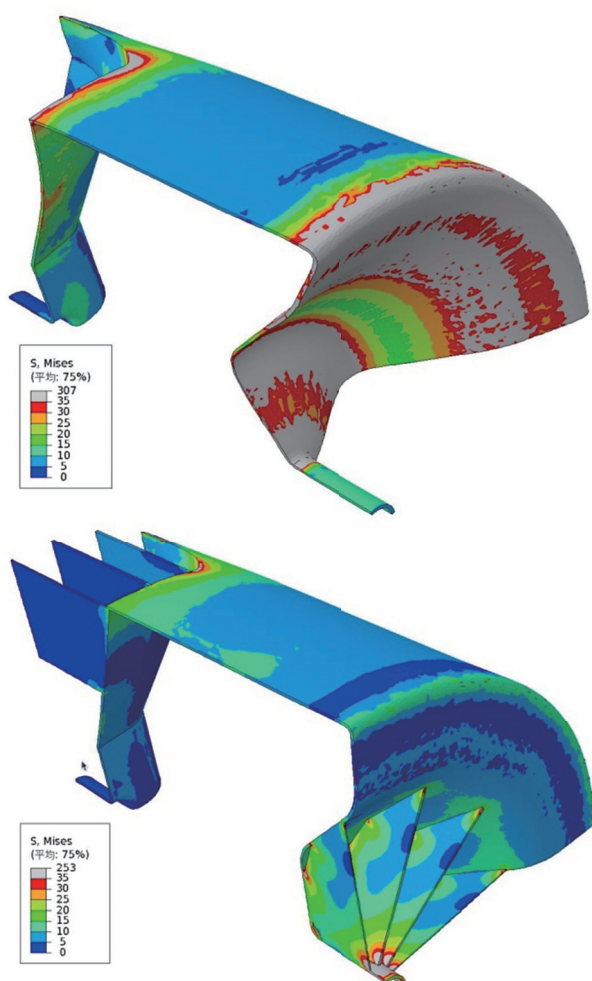


図9 スポーク空洞の真空耐圧による応力分布。(上) サポートがない場合 (下) 端板とスポーク端部にサポート板を入れた場合

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(図9)。

端部にはまだ0.2%耐力以上の部分が少し残っているが、端部は軸方向への変形によって周波数調整を行うため、あまり剛性を高めると周波数チューナーへの負荷が大きくなりすぎるため、周波数調整機構とも関係した検討が必要である。

7. ま と め

われわれは、「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」の一環として、電子加速用のスポーク空洞の開発をスタートした。スポーク空洞は産業用の超伝導加速に適した

長所をもっており、レーザー・コンプトン散乱光源の実用化に貢献すると期待される。

スポーク空洞は、TESLA型に代表される楕円空洞とは異なる形状のため、電磁場設計、機械設計、加工、溶接、組み立て、表面処理などの工程では、楕円空洞の経験を超えた新しい技術とノウハウが求められるだろう。

われわれは、5年間の研究期間で、スポーク空洞の製作と性能評価を計画している。小型高輝度X線源の産業利用を実現するための空洞開発が第一の目的であるが、さらには、わが国の超伝導加速器研究に新たな多様性を与えるとともに、ILCやERL計画の楕円空洞の製造にフィードバックできる知見が得られるよう、研究開発を進めていきたい。

なお、本研究は文部科学省の「光・量子融合連携研究開発プログラム」の支援を受けている。貴重な助言と励ましをいただいた、課題代表者の浦川順治教授(KEK)に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) J.R. Delayen, Proc. 1988 Linear Accelerator Conference p.199 (1988).
- 2) 16th International Conference on RF Superconductivity (SRF-2013), <http://www.srf2013.fr/>
- 3) M. Sawamura et al., 第8回加速器学会年会論文集, p.1332 (2011).
- 4) M. Sawamura et al., 第9回加速器学会年会論文集, p.1201 (2012).
- 5) L. Lu et al., Proc. LINAC-2012, p.642(2012).
- 6) J.R. Delayen, Proc. LINAC-2012, p.758(2012).
- 7) R. Hajima et al., Nucl. Instr. Meth. A507, p.115(2003).
- 8) S. Sakanaka et al., Proc. IPAC-2013, WEPWA015 (2013).
- 9) R. Hajima et al., J. Nucl. Sci. Tech 45, p. 441(2008).
- 10) R. Hajima, Proc. PAC-2009, p.97(2009).
- 11) E.J. Minehara, Nucl. Instr. Meth. A557, p.16(2006).
- 12) J.R. Delayen et al., Proc. of 2011 Particle Accelerator Conference, pp.1024-1026(2011).
- 13) C. M. Fonseca and P. J. Fleming, Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms, pp. 416-423(1993).
- 14) Proceedings of the Workshop on Pushing the Limits of RF Superconductivity, K-J. Kim and C. Eyberger, Ed., ANL-05/10(2005).