

## 10A 級大電流ビームの加速に向けた 大口徑高周波空洞の高次モード電場分布測定

### HIGHER ORDER MODE ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION MEASUREMENT OF THE LARGE APERTURE RF CAVITY FOR THE ACCELERATION OF 10-AMPERE-CLASS HIGH CURRENT BEAM

佐古貴行<sup>#, A)</sup>, 石禎浩<sup>B)</sup>, 上杉智教<sup>B)</sup>, 栗山靖敏<sup>B)</sup>, 森義治<sup>B)</sup>, 津守克嘉<sup>C)</sup>, 安藤晃<sup>D)</sup>, 米村祐次郎<sup>E)</sup>  
Takayuki Sako<sup>#, A)</sup>, Yoshihiro Ishi<sup>B)</sup>, Tomonori Uesugi<sup>B)</sup>, Yasutoshi Kuriyama<sup>B)</sup>, Yoshiharu Mori<sup>B)</sup>,  
Katsuyoshi Tsumori<sup>C)</sup>, Akira Ando<sup>D)</sup>, Yujiro Yonemura<sup>E)</sup>

<sup>A)</sup> Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

<sup>B)</sup> Kyoto University

<sup>C)</sup> National Institutes for Quantum Science and Technology

<sup>D)</sup> Tohoku University

<sup>E)</sup> Kyushu University

#### Abstract

We study the acceleration of a high current beam over 1 A using the new acceleration method called single cell cavity. One of the features of the single cell cavity is that it has a larger beam duct compared to conventional accelerators. There is a need to verify the accuracy of the simulation of the higher-order mode electric field within the large aperture duct that inhibits beam acceleration. We compared the experimental and numerical RF simulation results of the higher-order mode electric field using existing RF cavity.

#### 1. はじめに

イオン源から静電加速されたビームの初段加速には RFQ (高周波四重極線形加速器) が一般的に使われている。RFQ はバンチング・加速・収束の機能を併せ持つ優れた加速器であり、100 mA 級の加速実証がなされている[1-3]。一方で、一般に RFQ のボア径は mm オーダーであり、必要な高周波電力・冷却等の観点で 100 mA 級を超える大電流ビームの加速は難しい。

近年、1 A 級を超える大電流ビームを要求される分野があり、RFQ に代わる新たな加速方式の構築が望まれている。原子力発電においては、核分裂時に生成される放射性廃棄物の低減・短寿命化が要望されている。使用済み核燃料には半減期が 10 万年を超える長寿命の放射性廃棄物が含まれているが、核変換により実用的に短寿命化するためには 1 A 級のビームが必要とされる。核融合発電においては、プラズマ点火に必要な外部熱源として、ITER[4]の場合には NBI (中性粒子ビーム入射加熱: Neutral Beam Injection heating) が主加熱法として用いられる[5]。ITER-NBI の仕様はエネルギー 1 MeV・電流値 10 A 級であるが、発電実証を目的とする原型炉ではプラズマ半径の大型化に伴い 2 MeV 程度のより高いエネルギーが必要となる。

従来の加速器では困難な 1 A を超える大電流ビームの加速方式として単胞型空洞[6]が提唱されている。単胞空洞の課題の一つに大口徑ビームダクト内の電場分布の再現性がある。今回、大口徑ダクトを備えた既存の高周波空洞を用いて、大口徑ダクト内の電場について解析と実験の比較により検証した。

#### 2. 単胞型空洞

Figure 1 に単胞型空洞の外観と断面図を示す。単胞型空洞は高周波加速空洞の一種であり、高周波空洞と収束磁石内蔵空洞の 2 種類の空洞で構成される。高周波空洞は空洞 1 台に対して 1 個の加速間隙が設けられており、基本モード  $TM_{010}$  モードを用いてビームを加速する。高周波空洞の特徴の一つは大口徑のビームダクトを備える点である。一般的な RFQ のボア径は 1 mm のオーダーであるが、単胞型空洞では 100 mm のオーダーの大口徑ダクトを備える。大口徑ダクト内でビームサイズを広げ、空間電荷効果による発散を抑える目的である。収束磁石内蔵空洞には超電導ソレノイドコイルを備え、ビームを空洞内で収束させる。一般的なマルチセルの線形加速器と異なり、単胞型空洞では空洞毎に単一の加速間隙を備え、高周波源も空洞毎に 1 台ずつ独立に接続する。これらの空洞を必要なエネルギーに到達するまで複数台接続して構成する。各加速間隙に個別の高周波源を接続するため、電圧・位相の個別制御が可能となり、空間電荷効果の影響を個別に補償することができる。

#### 3. ビーム計算

10 A の重陽子ビームの加速の実現性を検証するため、線形近似の下でエンベロップ計算[7]を実施した。Figure 2 にビーム軸進行方向に沿ったビームサイズ・壁損失を示す。10 A の大電流ビームであっても本近似の下ではダクト壁面に衝突することなく、加速・輸送可能であることが示されている。

<sup>#</sup> takayuki1.sako@toshiba.co.jp

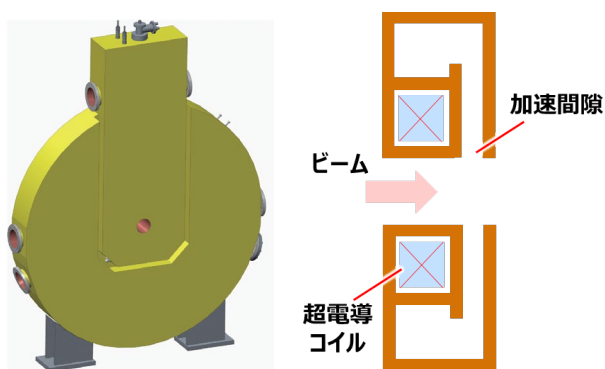


Figure 1: Structure of the single cell cavity.

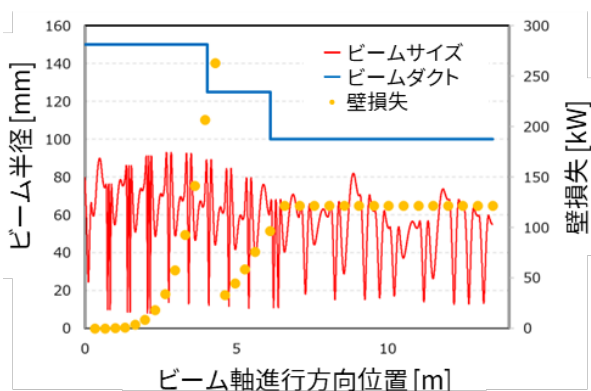


Figure 2: Result of the beam envelope calculation.

#### 4. 高周波解析

単房型空洞の課題の一つは大口径ビームダクト内の電場分布の再現性である。従来加速器と比べて 30 倍以上大きなダクトとなるため、広範な領域で高周波電場を再現できるかが課題となっている。ビーム加速に用いる基本モードについては既存の加速空洞である ERIT 空洞[8]を用いて検証試験を実施し、解析とよく一致する実験結果が得られている[9, 10]。一方で、ダクト内には基本モード以外の高次モードも励起され、ビーム加速を阻害する。今回、基本モードに続いて高次モードの再現性を検証した。

試験検証には基本モード試験と同様、ERIT 空洞を用いた。ERIT 空洞は超電導コイルを内蔵していないが、加速モードが単房型空洞と同一の  $TM_{010}$  モードであり、 $109\text{ mm} \times 385\text{ mm}$  の大口径ビームダクトを備える。CST Studio Suite [11]の Eigen mode で高周波解析を実施して、空洞内の高次モードの電場分布を得た。Figure 3 に解析モデルと解析結果を示す。

Table 1: Measured and Analyzed Values of the Resonance Frequency

モード	解析値	実験値
1	18.86	18.73
2	96.14	96.41
3	99.65	99.37

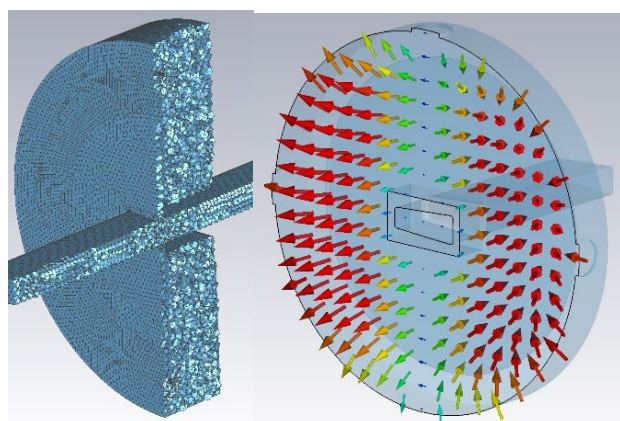


Figure 3: 3D Model and higher order mode electric field distribution by the numerical RF simulation.

#### 5. 電場分布測定試験

摂動法[10]を用いて空洞内の電場分布を測定した。Figure 4, 5 に実験セットアップと写真を示す。空洞内に直径  $30\text{ mm}$ ・長さ  $30\text{ mm}$  のアルミニウム製中空円筒を摂動体として挿入し、糸を介して重りとモーターでビーム軸方向の位置を変化させた。断面方向については糸を固定するガイドの位置を変化させることで対応した。摂動体が空洞内の各位置に移動した際の共振周波数をネットワークアナライザーで測定し、空洞外で測定した基準周波数と差分を取ることで電場強度に相当する周波数シフトを測定した。

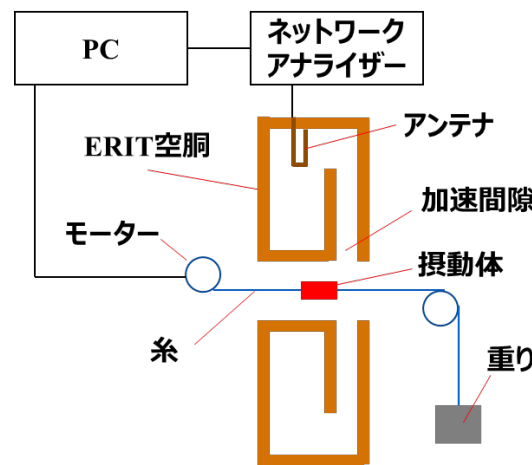


Figure 4: Experimental setup.

Table 1 に摂動体が空洞外にある時の共振周波数の解析と実験の値を示す。ERIT 空洞では基本モードが約  $19\text{ MHz}$  であり、最初の高次モードは約 5 倍の  $96, 99\text{ MHz}$  に現れる。 $96, 99\text{ MHz}$  のモードは空洞の上下左右の非対称性により分離したモードであり、 $99\text{ MHz}$  は Fig. 3 のように横長のビームダクトに対して節が垂直に現れる。一方で、 $96\text{ MHz}$  のモードはビームダクトに対して平行となり、ダクト全域で節に相当し、信号強度が非常に弱くなる。そのため、測定に際しては最初の高次モードであり、ダクト内で比較的信号強度が強くなる  $99\text{ MHz}$  のモードを解析との比較対象とした。

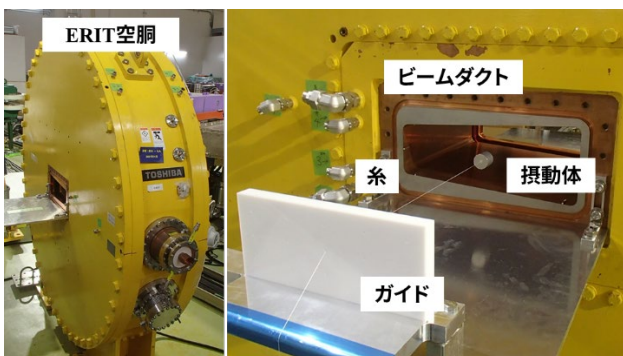


Figure 5: Photographs of the experiment.

Figure 6, 7 に周波数シフト分布の実験・解析の比較結果を示す。xy 断面については代表例としてビームダクト中心 ( $x=0, y=0$ ) を Fig. 6 に、中心軸から最も離れた端部位置 ( $x=104, y=52$ ) を Fig. 7 に示す。

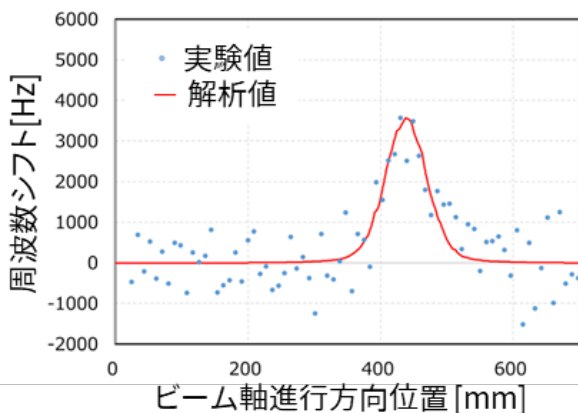


Figure 6: Frequency shift distribution in the beam axis direction ( $x=0, y=0$ ).

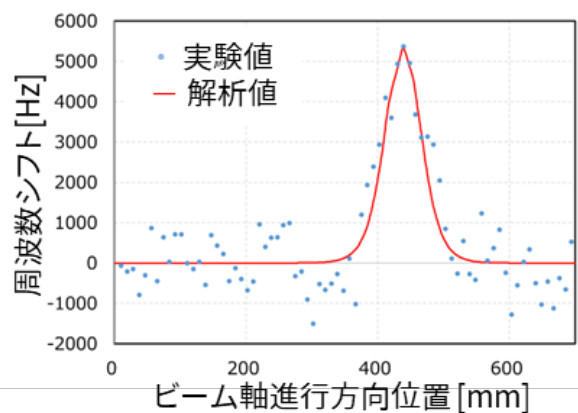


Figure 7: Frequency shift distribution in the beam axis direction ( $x=104, y=52$ ).

Eigen mode の空胴単体の解析ではダクト全体の理想

本論文に掲載の商品の名称は、それぞれ各社が商標として使用している場合があります。

的な電場分布を得ることができる。しかしながら、絶対値は摂動体の形状依存があるため、導出が難しく、相対分布に留まる。そこで、絶対値については別途摂動体を加速間隙中心に配置した解析を実施してスケールングファクターを求めて絶対値を合わせた。Figure 6 のダクト中心は電場分布の節に相当するため、信号強度が弱く、S/N 比が悪化している。一方で Fig. 7 のダクト端部では壁面が近いため、電場強度が強く、S/N 比が比較的良好であった。加速間隙以外の領域はノイズが多いものの、加速間隙近傍の電場強度分布は実験と解析がよく一致していることが分かる。

解析においても実験と同様、全測定箇所それぞれ摂動体を配置した体系を構築して計算することで直接周波数シフトの絶対値を得ることが可能であるが、多数回の計算が必要となる。今回のように相対分布として摂動体無しの理想状態の結果を、絶対値として加速間隙位置の摂動体有りの体系の結果をそれぞれ組み合わせることで計算時間を短縮することができる。本検証試験では既に製作済みの加速空胴を用いて比較したが、将来的に新たに単胞型空胴を設計・検討する際は今回のように摂動体有り・無しの 2 種の解析法を組み合わせることで、比較的短時間かつ精度よく高次モードを含めた電場分布を再現し、ビーム加速の検証が期待できる。

## 6. まとめ

核融合原型炉のプラズマ燃焼や長寿命放射性廃棄物の短寿命化のために要求される 1 A 以上の大電流ビームの加速法として単胞型空胴を検討している。単胞型空胴の特徴の一つである大口径ビームダクト内の高次モードを含む電場分布の再現性が課題であった。今回、既設の高周波空胴を利用して高周波解析と実測値を比較、両者はよく一致することが確認された。高周波解析については摂動体有り無しの 2 種の体系を組み合わせることで計算時間を短縮でき、今後の単胞型空胴の設計・検討への活用が期待される。

## 謝辞

本研究は、核融合科学研究所共同研究 (NIFS19KOAR023) の支援を受けて実施された。

## 参考文献

- [1] L. M. Young, "Operations of the LEDA resonantly coupled RFQ", in Proc. PAC2001, Chicago, IL, USA, Jun. 18-22, 2001, pp. 309-313.
- [2] A. Pisent *et al.*, "IFMIF-EVEDA RFQ Design", in Proc. EPAC2008, Genoa, Italy, Jun. 23-27, 2008, pp. 3542-3544.
- [3] K. Masuda *et al.*, "Commissioning of IFMIF prototype accelerator towards CW operation", in Proc. LINAC2022, Liverpool, UK, Aug. 28- Sep. 2, 2022, pp. 319-323.
- [4] <https://www.iter.org/>
- [5] R. S. Hemsworth *et al.*, "Overview of the design of the ITER heating neutral beam injectors", New J. Phys., vol. 19, 025005, 2017.
- [6] H. Okuno *et al.*, "Proposal of a 1-ampere-class deuteron single-cell linac for nuclear transmutation", in Proc. Jpn Acad., Ser. B95, pp. 430-439, 2019.

- [7] T. Sako *et al.*, “単胞型空洞による 10A 級大電流ビーム加速の検討”, Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. 29-Sep. 1, 2023, pp. 459-461.
- [8] Y. Mori *et al.*, “Neutron source with emittance recovery internal target”, in Proc. PAC09, Vancouver, BC, Canada, May 4-8, 2009, p.3145-3147.
- [9] T. Sako *et al.*, “大強度ビーム加速のための単胞型空洞の電場分布評価”, Proc. PASJ2022, Kitakyushu (Online meeting), Oct. 18-21, 2022, p.1007-1009.
- [10] T. Sako *et al.*, “Electric field in the RF cavity with large beam duct for high current beam acceleration”, JINST, vol. 18 P11019, 2023.
- [11] CST Studio Suite, Dassault Systemes, <https://www.3ds.com>