

大強度ビーム加速のための単胞型空洞の電場分布評価

EVALUATION OF THE ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION IN SINGLE CELL CAVITY FOR HIGH CURRENT BEAM ACCELERATION

佐古貴行^{#, A, B)}, 石禎浩^{B)}, 上杉智教^{B)}, 栗山靖敏^{B)}, 森義治^{B)}, 津守克嘉^{C)}, 安藤晃^{D)}
Takayuki Sako^{#, A, B)}, Yoshihiro Ishi^{B)}, Tomonori Uesugi^{B)}, Yasutoshi Kuriyama^{B)}, Yoshiharu Mori^{B)},
Katsuyoshi Tsumori^{C)}, Akira Ando^{D)},

^{A)} Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

^{B)} Kyoto University

^{C)} National Institute for Fusion Science (NIFS)

^{D)} Tohoku University

Abstract

We are investigating RF acceleration of ampere-class high-current beam by a new acceleration method called a Single Cell Cavity for plasma burning in a fusion reactor. As an elemental test, electric field measurements in a large diameter beam duct using ERIT cavity were performed. It was confirmed that the electric field strength can be predicted within a range of up to 8 % over a region of 10 times larger than that of the conventional first-stage accelerator RFQ. This report describes the results of the electric field measurement.

1. はじめに

ITER[1]の建設が進行し、高温プラズマの加熱方法の開発が進められている。核融合プラズマの初期加熱にはジュール加熱が用いられるが、プラズマの比抵抗値が電子温度の3/2乗に反比例して小さくなり、温度上昇により輻射損失も増大するため、ジュール加熱での到達電子温度は2 keV程度に留まる。一方でITERの点火条件は10 keV程度であり、プラズマ点火にはジュール加熱以外の熱源が必要となる。ITERでは外部熱源として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[2]。イオン源から引き出したイオンを加速し、プラズマ温度の10~100倍程度のエネルギーの中性粒子ビームに変換、プラズマに入射する。入射された中性粒子がプラズマ中で再度イオン化され、ビーム粒子が熱化する過程で、プラズマ中の荷電粒子にエネルギーを与え、プラズマ温度を上昇させる。また、ITER NBIは、ビーム電流による閉じ込め磁場の維持(プラズマ電流駆動)という重要な役割を担っている。

ITER-NBIでは1 MeVのエネルギーが要求され、静電加速方式を採用している。一方、発電実証を目的とする原型炉 DEMO[3]においてはプラズマ小半径がITERより大型化し、閉じ込めプラズマの中心加熱と電流駆動のためには、より高いビーム入射エネルギーが必須となる。しかしながら静電加速方式では絶縁耐圧、多孔電極系への熱負荷等の課題が多く、静電加速に代わる加速技術が模索されている。

本稿では原型炉実現に向けた単胞型空洞と呼ばれる新たな加速方式の検証の一環として実施した大口径ビームダクトの電場分布測定について報告する。

2. 単胞型空洞

静電加速に代わる方式として高周波加速の場合は実効的な耐電圧を向上させ、DEMO級プラズマに必要とされる2 MeVまでの高エネルギー化が可能となる。しかしながら従来の低エネルギー領域のイオンビームの高周波加速に用いられる高周波四重極線形加速器(RFQ)では電極ボア径はmmオーダーであり、空間電荷効果により加速可能なビーム電流値は最大でも100 mA級に限られていた。DEMO級プラズマに必要とされるアンペア級のビーム加速の実例はない。

近年、長寿命放射性廃棄物の核変換を目指すImpACT計画において低エネルギー領域の大電流ビーム加速のために単胞型空洞と呼ばれる新たな加速方式が提案された[4]。Figure 1に単胞型空洞の概観と構造を示す。RFQの場合は典型的には1空洞に対して100以上のセルを設定して高周波を一括して投入して加速する。単胞型空洞の場合は1空洞に対して1個の加速間隙を設け、空洞を複数連続して配置する。複数の空洞に対して高周波電圧や位相を独立に制御することでビームを加速する。空洞のビームダクトは100 mm程度まで大口径化し、ビームサイズを広げることでアンペア級のビームの空間電荷効果を抑制する。高周波による発散効果も生ずるため、空洞内に設けた超電導ソレノイドによりビームを収束させることで加速と輸送を実現させる。

10 A ビームについて縦・横各方向が独立の仮定の下、ビーム加速について計算した結果をFigure 2に示す。本計算においてはビームダクト内の電場分布の影響は考慮されておらず、加速間隙中心で瞬間的にエネルギーゲインを与えている。各空洞の電圧・位相を適切に設定することで2 MeVへの加速が示されている。

単胞型空洞ではRFQと比べて10倍以上のビームサイズとなるため、空洞内の電場分布の影響を顕著に受ける。今回、単胞型空洞の検討のため、既存の大口径ビー

[#] takayuki1.sako@toshiba.co.jp

ムダクトを有する加速空洞を用いて電場測定試験を実施し、大口径ダクト内の電場分布について解析と比較した。

に対する依存性も確認した。

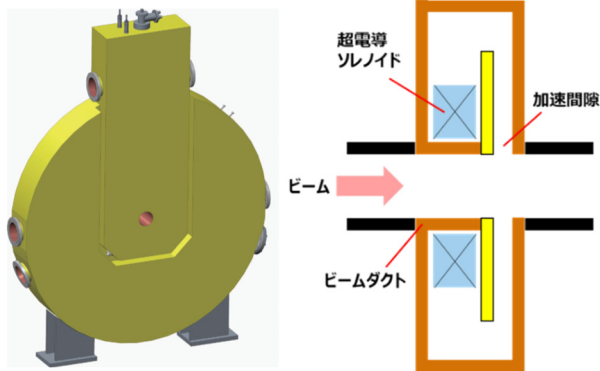


Figure 1: Structure of the Single Cell Cavity.

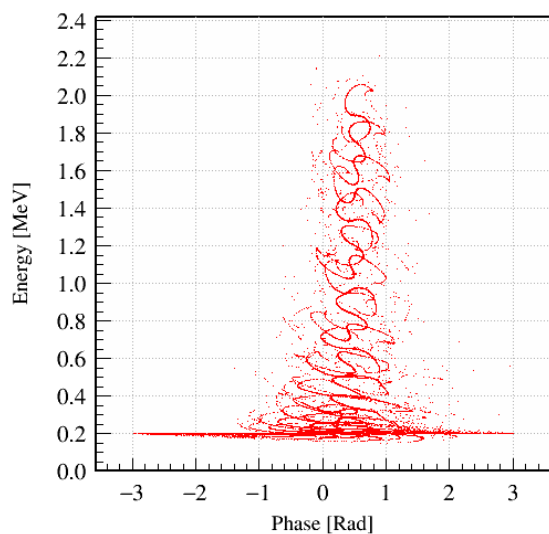


Figure 2: Correlation of beam phase and energy.

3. 電場測定試験

単胞型空洞は試作前の段階であるため要素試験には ERIT 空洞[5]を利用した。ERIT 空洞は空洞内にソレノイドはないものの、単胞型空洞と同一の TM010 モードの加速モードであり、109 mm × 385 mm の大口径ビームダクトを備えることから要素試験に最適である。ERIT 空洞の電場測定により、大口径ビームダクトを有する高周波加速空洞の基礎特性を評価、ビーム加速検証のための高周波解析の精度について確認した。

Figure 3 に測定セットアップを示す。測定にはビーズブル測定法を用いた。空洞内に糸を這わせ、摂動体となる金属円柱を挿入し、糸を駆動させることでビーム軸方向位置に応じた周波数変化をネットワークアナライザで測定、電場強度へ変換した。また、糸の設置箇所を変えることで $|x| \leq 52$ mm、 $|y| \leq 30$ mm の範囲で xy 平面に

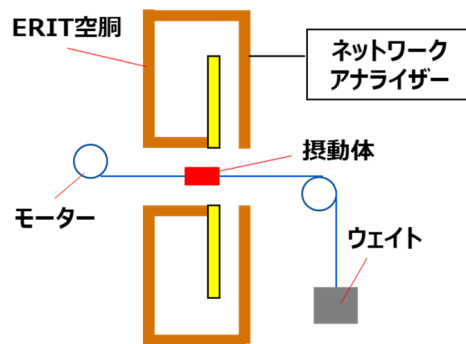
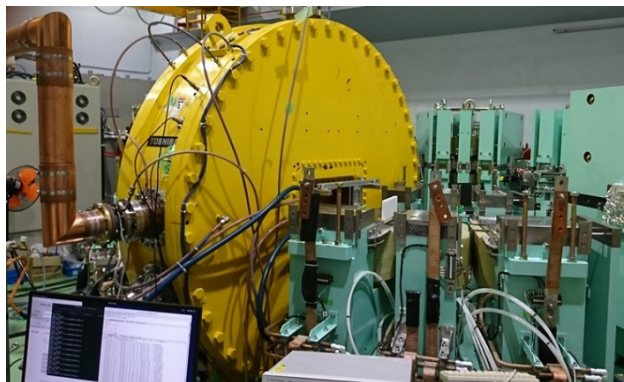


Figure 3: Experimental setup.

4. 測定結果

Figure 4 にビームダクト中心の軸方向電場分布測定の結果を示す。Figure 4 の点が測定により得られた周波数変化を電場強度に変換した結果である。Figure 4 の線は CST Studio による高周波解析の結果得られた電場強度分布である。絶対値については中心ビーム軸のピーク値で一致するよう規格化している。高周波解析が加速間隙の電場分布をよく再現している。

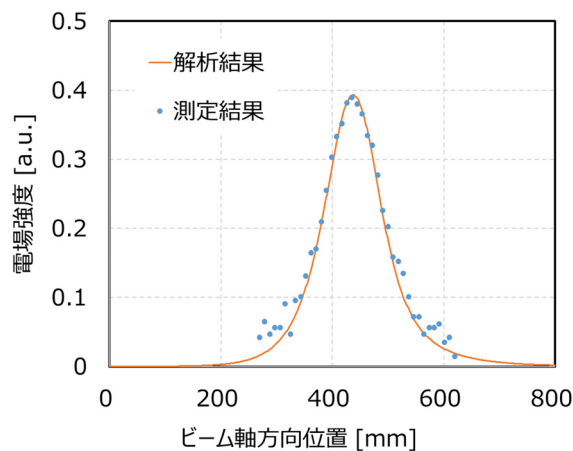


Figure 4: Electric field distribution at the center of the beam duct.

Figure 5 に xy 断面の結果を示す。x,y 位置を変えた測定結果について Fi. 4 記載のビーム軸中心のピーク強度を基準に規格化し、各測定位置でのピーク強度を解析結果と共に示した。さらに Fig. 6 に各測定結果を解析結果との差異として示した。測定・解析結果共に x のプラス方向に電場強度が強い傾向にあるが、これはビームダクトの断面形状が直方体ではなく、台形形状であることに由来する。

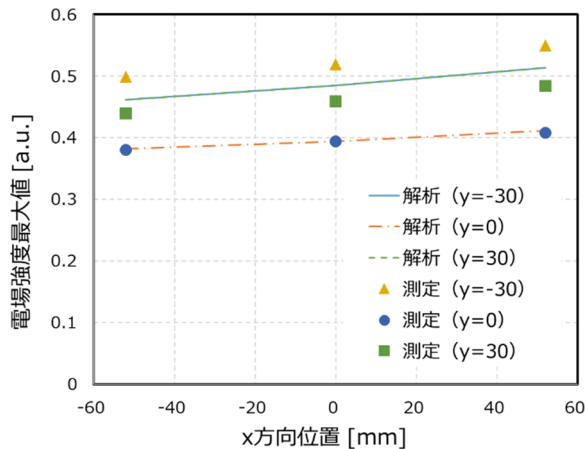


Figure 5: Relationship between xy-directional position and maximum electric field strength.

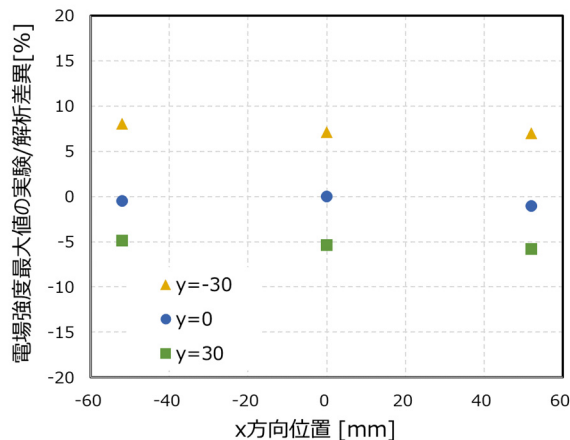


Figure 6: Difference between experiment and analysis of maximum electric field strength.

ビーム軸高さ $y=0$ については 1% 程度の精度でよく一致している。一方で、 $y=\pm 30$ mm では差異が大きい。 $y=-30$ mm では測定結果が大きく、 $y=30$ mm では測定結果が小さい傾向となっている。

これらの傾向は測定時の摂動体として用いた金属円柱による糸の垂れに起因すると考えられる。今回の測定では位相差測定用の端子として ERIT 空洞に接続したピックアップアンテナを用いた。ピックアップアンテナで測定可能となるよう、金属円柱は外径 $\phi 22$ mm、長さ 40 mm のアルミパイプを採用しており、比較的大型のプローブとなっている。そのため、金属円柱の重量による糸の垂れ

が無視できない結果となったと考えられる。空洞内の電場はビーム軸中心が最も弱く、周縁部に近づくほど強い。ビーム軸上部 ($y=30$ mm) では糸の垂れにより電場が弱い中心軸に近づくため解析と比較して小さい値として測定されたと考えられる。同様にビーム軸下部 ($y=-30$ mm) の場合も糸の垂れにより電場が強い周縁部に近づくため、解析と比較すると大きい値として測定されたと考えられる。同じビーム軸高さ同士で比較するとビーム軸中心と同様ピーク強度の差異は 1% 程度に収まっており、x 方向位置に依らず同一の傾向である。

y 方向位置により解析と実測の差異は変わるが、ビーム軸高さで 1%、現状の測定系でも $y=30$ mm 位置において最大 8% の範囲に留まった。従来の RFQ の電極ボア径に対して 1 桁以上大きいビームダクトにおいても上記精度以内で電場分布を解析できている。今後、これらの結果を踏まえて大口径ビームダクト内の電場分布を考慮しながらアンペア級ビームの加速の実現性について検証していく。

現在、測定系の改良を進めており、測定感度を向上させるため、今後小型のピックアップアンテナではなく大型の RF カプラーを測定端子として用いて、摂動体には小径の絶縁体もしくは金属球を利用する予定である。重量の軽減により測定精度の向上を目指す。さらに、今回は基本モードのみ測定したが、高次モードについても確認予定である。

5. まとめ

核融合原型炉のプラズマ燃焼のために単胞型空洞と呼ばれる新たな加速方式によりアンペア級の大電流ビームの高周波加速を検討している。要素試験として ERIT 空洞を用いた大口径ビームダクト内の電場測定を実施した。従来の初段加速器 RFQ と比べて 10 倍以上の領域において電場強度が最大 8% の範囲で予測可能なことを確認した。今後、測定系の改良により精度向上と高次モードの電場分布測定を実施する。また、これらの電場情報分布を考慮して大電流ビームの加速の実現性について検証する。

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] <https://www.iter.org/>
- [2] R. S. Hemsworth *et al.*, New J. Phys. 19, 025005, 2017.
- [3] <https://www.fusion.qst.go.jp/rokkasyo/ddjst/>
- [4] H. OKUNO *et al.*, Proc. Jpn Acad., Ser. B95, 2019.
- [5] Y. Mori *et al.*, Proceedings of PAC09, 2009.