誘電体アシスト型高周波加速管の研究

佐藤 大輔*

A Study on Dielectric Assist Accelerating Structure

Daisuke SATOH*

Abstract

Dielectric assist accelerating (DAA) structure, which has an extremely high-quality factor (Q_0) and a shunt impedance (Z_{sh}) at room temperature, has been proposed and demonstrated the expected cavity properties experimentally. The DAA structure consists of low-loss dielectric cylinders and disks with irises which are periodically arranged in a metallic cavity. The metal wall loss of a higher-order TM_{02n} mode excited in this structure could be significantly reduced as compared with that of a TM_{01} mode excited in conventional normal-conducting linac structures, leading to high power efficiency. In the experiments, a C-band five cells DAA structure using high-purity magnesia ceramic showed that the Q_0 of the accelerating mode was over 10^5 and the Z_{sh} was 617 M Ω /m at room temperature, respectively.

1. はじめに

高周波加速管は、20~21世紀にかけて高エネ ルギー物理学や放射光科学といった基礎科学分野 の発展に大きく貢献し、工業分野から医療分野 に至る産業面でも欠かすことのできない基盤技 術の一つである.特に、電子加速で一般的に利 用されている円盤装荷型常伝導加速管において は、1. 精密加工技術や表面洗浄技術の向上、2. 高精度な三次元電磁場計算が可能となったこと. 3. Sバンド以上の高周波数帯が選択可能となっ たことなど、科学技術の進歩とともに、その性能 も大幅に向上し、今日ではXバンド周波数帯の 進行波型加速管と定在波型加速管の両方で100~ 150 MV/m の高い加速電界が得られている^{1,2)}.た だ,超伝導加速管と比較すると,Q値やシャント インピーダンスといった電力効率に関する性能に おいては、遠く及ばない(厳密には、冷却システ ムを含む電力効率で議論するべきであるが、ここ では省略).仮に、室温動作で常伝導加速管の電 力効率を大幅に向上できれば、加速器システムの 小型化や高繰り返し化などが可能となり、その波

及効果は学術的にも産業的にも大きい.

常伝導加速管のQ値やシャントインピーダンス といった加速管性能は、加速管の①材質(材料固 有の電気伝導率),②運転周波数,③ビーム加速 モード (TM_m モード等) を選択することによって, おおよそ決まる、言い換えれば、①~③を変えな い限り、加速管のQ値やシャントインピーダンス は、大幅には改善しえない、電力効率改善の一例 としては、常伝導加速管の低温運転³⁻⁵⁾などが挙げ られる.一般に、常伝導加速管を構成する無酸素 銅という素材は、不純物などが混在しない理想的 な場合、その電気伝導率σは温度 T におおよそ反 比例 (ただし, T <数十Kでは. $\sigma \propto T^{-5}$)⁶⁾ するた め,低温にすることで空洞内の表面抵抗が減少し, 加速管自体の電力効率が向上する. しかしながら. 加速管を極低温に冷却したとしても異常表皮効果 といって、見かけ上、電気伝導に寄与する有効な 電子数が減少したような余剰損失が生じ、古典的 表皮効果から求められる表面抵抗ほどは減少せず, Q値等の上昇としては6倍程度で頭打ちとなる。 つまり、既存の高周波加速管のQ値等をこれまで の10倍以上に向上させようとした場合。①~③を

* 産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

(Daisuke Satoh E-mail: dai-satou@aist.go.jp) 佐藤大輔氏は第15回日本加速器学会奨励賞を受賞されました. 考慮し,加速管構造や材質,動作方法を含めた抜本的な解決策が必要であると考えられる.

室温動作の高周波加速管で大幅に電力効率を 向上させるためのキーテクノロジーとして、われ われは、誘電体材料に着目した、近年、スマート フォンなどの移動体通信の基地局用小型共振器と して誘電体共振器などが用いられ、高誘電率・高 Q値の誘電体材料が盛んに研究されてきた⁷⁻¹³⁾. そ の中には、約9 GHz のマイクロ波帯で10⁵ 以上の Q 値が得られている材料も存在し、この値は同じ周 波数帯の pillbox 空洞の Q 値と比較すると、10 倍 程度に相当する¹³⁾.そこで、これら誘電体材料の 低損失特性を利用して、常伝導加速管の10 倍程度 のQ値を持つ高電力効率の「誘電体装荷型加速管」 を実現するという着想に至った、ただ、これまで 研究されてきた誘電体装荷型加速管¹⁴⁻¹⁶⁾に関して は、上記のような低損失誘電体をそのまま適用す るだけで大幅に高電力効率化するわけではなかっ た、そこで、新たに誘電体アシスト型高周波加速 管という独自の誘電体装荷型加速管を考案し、C バンド周波数帯で10⁵を超える非常に高いQ値を 有する室温動作の高周波加速管を実現した^{17,18)}.

本稿では,冒頭で述べた通り,室温動作で10⁵ を超えるQ値を有する誘電体アシスト型高周波 加速管の研究成果と今後の展望等について述べ る.以下,第2章では誘電体アシスト型高周波加 速管の動作原理等に関して概説し,第3章では原 理実証機の設計・製作,第4章では加速管性能評 価試験,第5章で今後の展望,そして最後に第6 章でまとめとする.

2. 誘電体アシスト型高周波加速管

誘電体アシスト型高周波加速管(Dielectric Assist Accelerating Structure, DAA 管)の内部構造を 図1に示す. DAA 管の基本構造は,図1に示すよ うに金属と低損失誘電体からなる同軸構造にアイ リス付誘電体円板を周期的に装荷した構造を備え る¹⁷⁾.また,その内部構造はレギュラーセルとエ ンドセルという2種類のセル構造に分類される. レギュラーセルはビーム軸近傍の真空中に高周波 電力を蓄積し,実際に電子加速する基本的なセル のことを指す.エンドセルは,DAA 管の両端に 位置する金属端板表面での導体損失を低減化させ るためのセル構造で,このセルでの電子加速は想



図1 DAA 管の内部構造.



図2 DAA 管内に励振される加速モードの加速電界分布 (上),回転磁界分布(下).

定されない.

図1に示す DAA 管は、5つのレギュラーセルを 有することから5 セル DAA 管と呼ばれる.そし て、DAA 管はビーム加速に TM_{02n} モード (*n*>1, *n*はレギュラーセル数に依存)という、円筒座標 系における半径方向とビーム軸方向に高次の共振 モードを利用する定在波加速管である¹⁷⁾.図2 に 5 セル DAA 管に励振されるビーム加速モードの 電磁場分布を示す.DAA 管は、図2 に示すよう に誘電体同軸構造より内側 (ビーム軸側)の電磁



図3 セルの中心位置での加速モードの加速電界 $E_{s}(r)$ と回 転磁界 $H_{\theta}(r)$ の半径r依存性.(a)一般的な π モード定 在波型加速管,(b) DAA 管¹⁷⁾.両グラフの横軸は空洞 の共振波長 λ_{0} で規格化したr値で示す.横軸の最大値 は共に金属管内径 c_{1} の位置を示しており,(b)上の点 線はそれぞれ,誘電体円筒の内径 a_{1} と外径 b_{1} の位置 を示す.

場分布に着目すると、一般的なπモード定在波型 加速管の電磁場分布と酷似していることが分か る.ただし、DAA 管は一般的な常伝導加速管の 連成空洞というとらえ方とは異なり、あくまで単 一の空洞共振器であるという点には、注意が必要 である.

次に、DAA管の高周波特性に関しては、一般的な π モード定在波型加速管と比較しながら、その特徴を概説する.図3は、(a)一般的な π モード定在波型加速管と(b)形状最適化したDAA管のレギュラーセル内にそれぞれ励振される、セルの中心位置での加速モードの加速電界 $E_2(r)$ と回転磁界 $H_{\theta}(r)$ の半径r依存性を示したグラフである.図3に示す回転磁界 $H_{\theta}(r)$ の絶対値が0<r< c_1 の範囲で最大となるrの値を r_{max} とする.そして、金属管表面での回転磁界強度比、

 $|H_{\theta}(c_1)|/|H_{\theta}(r_{\max})|$ を求めると, (a)の場合, $|H_{\theta}(c_1)|/|H_{\theta}(r_{\max})|=0.89$ となる. 一方, (b)の 場合, $|H_{\theta}(c_1)|/|H_{\theta}(r_{\max})| = 0.23$ であり, 一般 的なπモード定在波型加速管の場合と比較すると 約1/4 も小さい値となる.ここで、金属管表面で の導体損失を考えると、Maxwell 方程式より、金 属管内径 c₁と金属管表面での回転磁界強度の2乗 $|H_{\theta}(c_1)|^2$ の積に比例する¹⁷⁾. したがって, 図3 に示すように DAA 管のレギュラーセルの c1 の値 は、一般的な π モード定在波型加速管の c_1 の値と 比較すると、約2倍大きくなってしまうが、回転 磁界強度の2乗比で見ると7%程度と大幅に小さ くなり、レギュラーセル内での導体損失は一般的 なπモード定在波型加速管での導体損失の14% 程 度まで低減できることになる.また,DAA 管の 場合、内部に誘電体構造を装荷しているため、導 体損失に加えて誘電損失が存在するが、セル構造 体には極端に低損失な材料を使っている上、図 2にみられるように誘電体部分の多くは電界の節 の位置近傍に配置されているため誘電損失自体も 極端に小さくなり、その結果、DAA 管のQ値や シャントインピーダンスは飛躍的に向上する.た だし、一般的な定在波型加速管の共振周波数は、 c₁の値でほぼ一意に決まってしまうのに対して, DAA 管の共振周波数は誘電体内径 a₁,外径 b₁, 金属管径 c₁の組み合わせで決まる. そのため, 所定の共振周波数を満たす解のうち、Q値やシャ ントインピーダンスが最大となる (a_1, b_1, c_1) の組 み合わせを探索する必要があり、形状最適化が非 常に重要である¹⁸⁾. なお,上記の計算は DAA 管 が高電力効率になる理由の定性的理解を深めるた めの概算計算である.詳しい設計方法等に関し ては次章で述べる。以上、DAA 管の動作原理と 特徴をまとめると、DAA 管は、図1 に示すよう な形状最適化された誘電体装荷型加速管の TM_{ov} モードをビーム加速に利用することで、常伝導加 速管のTM_mモードと比較して、金属管表面での 導体損失を大幅に低減化できることで、

非常に高 いQ値を実現できる.

3. DAA 管の設計と製作

DAA 管の原理実証機として製作したCバン ド5セル DAA 管の設計・製作方法について述 べる.まず,設計条件として原理実証機はCバ

ンド (5.712 GHz) のπモード定在波型とした. ま た。内部の誘電体セル構造材として非常に低誘電 損失なマグネシアセラミックを採用した. DAA 管の高周波設計には、ウィスパーリングギャラ リーモード共振器法を用いて計測したマグネシ アセラミックの複素誘電率 (ε_r =9.64, tan δ =6.0× 10⁻⁶.約10 GHz, 室温)を利用した¹⁸⁾.そして. 原理実証機の設計では誘電体セル構造の製作プ ロセスを考慮して DAA 管の形状パラメータを図 1(b)に示す8個とした.以下の3つの形状パラ メータに関しては、*h*=10.00 mm, また設計条件 によりL=26.24 mm, Dに関しては誘電体円板で の反射を考慮して誘電体内部での電磁波の波長 の1/4 と設定した¹⁸⁾. DAA 管は, 第2章で述べた 通り.非常に複雑な誘電体セル構造を内部に有す る単一の空洞共振器の高次モードをビーム加速に 利用するため. 図1(b)に示す形状パラメータの 組み合わせが共振周波数や電磁界分布、加速管性 能にシビアに効いてくる、そのため、これら形状 パラメータを変数とし、Q値やシャントインピー ダンスを最大化させるための多変数最適化問題を 滑降シンプレックス法で解くことで加速管設計を 行った.具体的には、まず DAA 管の Q 値やシャ ントインピーダンスが最大になる可能性のある最 適形状を探索するため,これらの性能パラメータ とトランジットタイムファクターを用いて、この アルゴリズムの評価関数を定義する.そして、(4, r_1, a_1, b_1, c_1)の様々な組み合わせで固有値問題を 解くわけであるが、DAA 管の場合、その共振周 波数がり、に対して特に敏感に変化する. そこで. b_1 を除く4つの形状パラメータ (l_1, r_1, a_1, c_1) を滑 降シンプレックス法のアルゴリズムで変更し, DAA 管の共振周波数は各シンプレックスポイン トで*b*₁をチューンすることにより常にCバンド となるようにした、このような設計アルゴリズム を用いて設計したCバンド5セル DAA 管の加速 管性能を表1に示す、高周波設計の結果、商用の セラミックスを用いて室温動作でQ値が10⁵以上 もの性能を有する常伝導加速管が実現できること が明らかになった。

原理実証機は、図4 に示すように無酸素銅製円 筒内に分割した誘電体セル構造を円筒軸方向から 順にスタックし、両端面を無酸素銅製端板で閉じ る構造とした.誘電体セル構造については、誘電

Parameter Five-cell DAA Structure Dielectric material Magnesia 9.64 \mathcal{E}_r 6.0×10^{-6} $\tan \delta$ Accelerator type Standing wave type Accelerating mode TM_{02} - π mode Operation frequency 5.712 GHz Number of accelerating cells 5 Total cavity length 157.5 mm 126,400 Q_0 $630 \text{ M}\Omega/\text{m}$ $Z_{\rm sh}$ $E_{\rm max}/E_0$ 2.92 $H_{\rm max}/E_0$ 2.74 mA/V

表1 Cバンド5セル DAA 管の加速管性能¹⁸⁾.



図4 原理実証機のアセンブリ方法.

体円筒が誘電体ディスク面の垂直方向に一体成型 された3種類の構造体を製作した。製作した3種 類の誘電体セル構造を図5にそれぞれ示す.図5 (a),(b)はそれぞれ、レギュラーセル、エンドセ ルを構成する誘電体セル構造である. 図5(c)に示 す誘電体セル構造は、誘電体ディスクを介して一 体に形成されたレギュラーセルとエンドセルを 両方の機能を担うハイブリッド誘電体セルであ る。原理実証機では、無酸素銅製円筒内の両端に エンド誘電体セル、ハイブリッド誘電体セルを配 置し、その間に4枚のレギュラー誘電体セルを装 荷することで5セル DAA 管となる. 実際に高電 界試験を行う際に、DAA 管ではビーム軸近傍以 外にも誘電体円筒と金属管の間の真空排気を行う 必要がある。そのため、原理実証機では銅製の円 筒と両端板上に、十分な真空コンダクタンスを確 保しつつ、高周波電力が漏れないような多数の真



図5 製作した誘電体セル構造. (a) レギュラー誘電体セル. (b) エンド誘電体セル. (c) ハイブリッド誘電体セル¹⁸⁾.

空排気口を設け、原理実証機全体を真空容器に入 れることで DAA 管内全体を真空排気するような 構造とした.原理実証機への高周波電力の入力 は、矩形導波管で高周波を輸送してきた後、矩形 TE₁₀-円形 TM₀₁ へのモードコンバータを経て、円 形導波管 TM₀₁ モードの入力カプラーから行う構 造とした.なお、モードコンバータ、入力カプ ラーの設計に関しては、参考文献18 をご参照い ただきたい.こうして設計・製作してきた各コン ポーネントを組み上げることで、Cバンド5 セル DAA 管の原理実証機を完成させた.図6(a)には 原理実証機の内部構造、図6(b)には外観写真を 掲載している.



図6 (a) 原理実証機の内部設計図,(b) Cバンド5セル DAA 管の外観写真.

4. DAA 管の性能評価試験

4.1 低電力試験

製作したCバンド5セル DAA 管の空洞特性は, ベクトルネットワークアナライザーを用いて計測 した.入力カプラーやモードコンバータを含む 原理実証機の低電力試験結果を図7に示す¹⁸⁾.また,この測定結果をもとにインピーダンス法¹⁹⁾ を用いて,原理実証機の共振周波数や各Q値, 入力カプラーと加速管の結合度βを求めた.それ らの計算結果を表2に示す.本結果はDAA 管の 周波数チューニングを行った後の測定結果であ る.DAA 管は単一の空洞共振器であるため,両 面の金属端板上の比較的,磁場強度が高い位置 (図6(a)参照)を削り込むことで低周波数側に共



表2 Cバンド5セル DAA 管の加速管性能における設計値 と低電力試験結果の比較表¹⁸⁾.

| Parameter | Design values | Measured values |
|--------------|---------------|-----------------|
| f_0 (GHz) | 5.7120 | 5.71192 |
| Q_0 | 125,000 | 119,314 |
| $Q_{ m ext}$ | 48,803 | 46,246 |
| Q_L | 35,112 | 33,328 |
| β | 2.56 | 2.58 |

振周波数をシフトさせることが可能である.本原 理実証機では,各誘電体セル構造の超精密仕上げ 加工を行わず,上記の方法のみで共振周波数をお およそCバンドに調整することができた.また, 無負荷Q値に関してもほぼ設計通り,10⁵を超え る高いQ値となっていることを確認した.

次に,ビードプル摂動法²⁰⁾を用いて DAA 管内 に励振される軸上加速電場分布とシャントイン ピーダンスの測定を行った.ビードプル摂動法 は,空洞における摂動論を利用して,加速管の ビーム軸上に沿って摂動体(微小な導体や誘電 体)を挿入していき,その摂動体の位置と非摂 動時からの共振周波数変化を測定することによ



図8 原理実証機内に励振される軸上規格化電場分布の計算 値と本計測結果の比較¹⁸⁾.

り、加速モードの電場分布を間接的に測定する 方法である.参考文献20によると、ビーム軸をz軸とすると、軸上電界E(z)は $\{-\Delta f(z)\}^{-1/2}/f_0$ に 比例する.ここで、 f_0 は非摂動時の共振周波数、 $\Delta f(z)$ は摂動体がzの位置での非摂動時からの共 振周波数変化を意味している.本測定では、直径 2 mmのアルミニウム製球状ビードを摂動体とし て利用して、ビーム軸上を掃引し、各点での周波 数変化から軸上電界の計測を行った.図8には、 原理実証機内に励振される軸上規格化加速電場分 布の計算値と本計測結果の比較を示しており、非 常に良い一致を示している.

また,加速管の*R/Qは*,参考文献18により, 以下の式で計算される.

$$\frac{R}{Q} = \frac{1}{f_0^2} \frac{2}{3\pi\varepsilon_0} \frac{1}{\Delta V} \left(\int_0^{L_{\text{tot}}} \sqrt{-\Delta f(z)} dz \right)^2$$

ここで、 ΔV は摂動体の体積、 L_{tot} は DAA 管の全 長を表しており、本測定と前述のQ値測定値を 用いて、上式より、単位長さ当たりのシャントイ ンピーダンス Z_{sh} を求めた、そして、その値は、 617 MQ/m となり、こちらもほぼ設計値通り、非 常に高いシャントインピーダンスとなった。

4.2 高電界試験

高電界試験用テストスタンドの設備写真を図 9に示す.高電界試験用テストスタンドでは高 周波源として、周波数5712±5 MHz,ピーク電力 150 kWのCバンドクライストロン(PV-5001)を 用いた.DAA管は、図9(b)に示すように真空容 器内に配置した.また、クライストロンと真空容 器の間に方向性結合器を設けており、入力電力と 反射電力の時間波形をモニターすることができ





図9 高電界試験用テストスタンド設備.(*a*)装置全体,(*b*) 真空容器内部.

る. 第3章で述べた通り, DAA 管の金属円筒部 には真空排気口を多数設けており, この排気口よ り放電時の発光などの一部をモニターすることが できる.

低電力・短パルスのRFから徐々に出力と パルス幅を伸ばしていきながら,約5µsのパ ルス幅,繰り返し10Hzで軸上平均加速電界が 1 MV/m 程度まで高周波を入力することができた. しかしながら,さらに入力電力を上げていくとマ ルチパクタや放電が頻発する.この傾向は,一般 的な誘電体装荷型加速管でも見られており²¹⁾,内 部構造や動作方法は異なるが,共通の解決すべき 課題があると考えられる.今後,さらなる高電界 化に向けて連携研究者とともに現在も,DAA 管 のアップグレードと高電界試験を継続して行って いる.

5. 今後の展望

前章で述べたように,DAA 管はマルチパクタ の解決が急務である。今回使用しているマグネシ アセラミックなどの低損失誘電体は,一般的に, 二次電子放出係数が非常に高い²²⁾ことからマル チパクタが頻発する一因となっている。ただ,誘 電体装荷型加速管の先行研究²³⁾によると,TiN コーティングを施しただけでは,当該問題は解決 されていない.また,ソレノイド磁場を印可する ことでマルチパクタの抑制に一定の効果が得られ ているが,完全には問題解決に至っていない現状 にある²⁴⁾.そのため,マルチパクタや放電の解決 には,DAA 管や入力カプラーの構造の再検討や, 他のセラミックス材料の選択など複数の対策が必 要であると考えている.その他,誘電体セルの冷 却や近接する共振モードのダンピングに向けた チョーク構造などに関しても検討している^{25,26)}.

今後、マルチパクタの対策と同時に DAA 管の さらなる高電力効率化にも取り組んでいく.数値 計算によると、BMT-BMW セラミックといった比 誘電率が24.2、誘電正接が2.5×10⁻⁵の誘電体材 料を用いることでシャントインピーダンスを原理 実証機の40% 程度向上させることができる可能 性がある²⁷⁾.また、原理実証機を30 K 程度に冷 却することで Q_0 が7×10⁵、シャントインピーダ ンスが3.8 GΩ/m と飛躍的に向上することが明ら かになっており²⁴⁾、ますます性能向上の可能性が ある.

6.まとめ

本研究でわれわれは. 誘電体アシスト型高周 波加速管という独自の高周波加速管を考案し、そ の原理実証を行った.この DAA 管は、金属管内 に誘電体同軸構造とアイリス付誘電体円板を周 期的に装荷した構造を備え、TM₀₂モードという 高次モードをビーム加速に利用する. その結果. DAA 管内での導体損失を常伝導加速管内での損 失に比べて大幅に低減化可能な解が存在すること を明らかにした、そして、原理実証機としてマグ ネシアセラミックを用いたCバンド5セルDAA 管を設計製作し、各種性能評価した結果、室温下 での無負荷Q値が既存の常伝導加速管の約10倍 に相当する Q₀>10⁵. 単位長さ当たりのシャント インピーダンスが $Z_{\rm sh} > 600 \,\mathrm{M}\Omega/\mathrm{m}$ という、これま でにない非常に電力効率が高い加速管を実現した ことが確認された.

謝 辞

本研究は、JSPS科研費22684010,13J08681, 16H02134,19K20609の助成を受けたものである. 本研究を推進するにあたり、林崎氏(東工大)、 吉田氏,夏井氏,峠氏 (KEK) には,多大なるご 協力を頂いた.ここに感謝の意を表す.

参 考 文 献

- V. Dolgashev, S. Tantawi, Y. Higashi and B. Spataro: Appl. Phys. Lett. 97, 171501 (2010).
- 2) S. Dobert et al.: in Proceedings of the LINAC-2010, Tsukuba, Japan, pp. 208–210 (2010).
- A. D. Cahill et al.: in Proceedings of IPAC16, Busan, Korea, pp. 487–490 (2016).
- A. Iino et al.: in Proceedings of the IPAC16, Busan, Korea, pp. 417–419 (2016).
- 5) A. D. Cahill et al.: in Proceedings of the NAPAC16, Chicago, IL, USA, pp. 987–990 (2016).
- N. Ashcroft et al.: "Solid State physics", W. B. Saunders Co., p. 526 (1976).
- 7) E. S. Kim and C. J. Jeon: J. Eur. Ceram. Soc. 30, 341 (2010).
- 8) T. Tsunookaa et al.: J. Eur. Ceram. Soc. 23, 2573 (2003).
- 9) H. Ohsato, T. Tsunooka, T. Sugiyama, K. Kakimoto and H. Ogawa: J. Electroceram. **17**, 445 (2006).
- 10) N. M. Alford and S. J. Penn: J. Appl. Phys. 80, 5895 (1996).
- 11) C. L. Huang, J.-J. Wang and C.-Y. Huang: Mater. Lett. **59**, 3746 (2005).
- 12) C. L. Huang, J.-J. Wang and C.-Y. Huang: J. Am. Ceram. Soc. **90**, 1487 (2007).
- J. D. Breeze, X. Aupi and N. M. N. Alford: Appl. Phys. Lett. 81, 5021 (2002).
- 14) T.-B. Zhang et al.: Phys. Rev. E Stat. Phys. Plasmas Flu-

ids Relat. Interdiscip. Topics 56, 4647 (1997).

- K. DeckerFrench: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A 624, 731 (2010).
- 16) J. X. Zhang, B. J. Munroe, H. Xu, M. A. Shapiro and R. J. Temkin: Phys. Rev. Accel. Beams **19**, 081304 (2016).
- D. Satoh, M. Yoshida and N. Hayashizaki: Phys. Rev. Accel. Beams 19, 011302 (2016).
- D. Satoh, M. Yoshida and N. Hayashizaki: Phys. Rev. Accel. Beams 20, 091302 (2017).
- 19) E. L. Ginzton: "Microwave Measurements", *McGraw-Hill* Book Co. Inc., New York (1957).
- 20) L. C. Maier Jr. and J. C. Slater: J. Appl. Phys. 23, 68 (1952).
- J. G. Power, W. Gai, S. H. Gold, A. K. Kinkead, R. Konecny, C. Jing, W. Liu and Z. Yusof: PRL **92**, 164801 (2004).
- Suharyanto, Y. Yamano, S. Kobayashi, S. Michizono and Y. Saito: IEEE Trans. On Diele. and Electr. Insul. 13, 72 (2006).
- 23) C. Jing et al.: IEEE Trans. Plasma Sci. 38, 1354 (2010).
- C. Jing et al.: in Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, pp. 1319–1321 (2013).
- 25) S. Mori et al.: in Proceedings of IPAC2019, Melbourne, Australia, pp. 1179–1181 (2019).
- S. Mori et al.: in Proceedings of Proceedings of the 16th Annual Meeting of PASJ, Kyoto, Japan, pp. 1034–1037 (2019).
- 27) D. Satoh, T. Shibuya, H. Ogawa, M. Tanaka, R. Kuroda, S. Mori, M. Yoshida and H. Toyokawa: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 459, 148 (2019).