

## DEVELOPMENT OF S-BAND TRAVELING WAVE RF WINDOW (II)

T.Sakai<sup>1,A)</sup>, I.Sato<sup>A)</sup>, K.Hayakawa<sup>B)</sup>, T.Tanaka<sup>B)</sup>, Y.Hayakawa<sup>B)</sup>, S.Fukuda<sup>C)</sup>, S.Michizono<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Advanced Research Institute for the Sciences and Humanities (ARISH), Nihon University

12-5, 5-bancho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8251 Japan

<sup>B)</sup> Laboratory for Electron Beam Research and Application, Institute of Quantum Science, Nihon University

7-24-1, Narashinodai, Funabashi-shi, Chiba 274-8501

<sup>C)</sup> High Energy Accelerator Research Organization, KEK

1-1 Oho, Tukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

The electrical field distribution at the S-band traveling-wave-in-ceramic (TWC) RF-window was measured with the nonresonant perturbation method using a Titanium Dioxide (TiO<sub>2</sub>: Rutile) tetragonal crystal. Rutile is a ferroelectric crystal with static dielectric constants  $\epsilon_a=86$  and  $\epsilon_c=170$  (at 300K). The electric field has been deduced from the S<sub>11</sub> parameter which was measured with the c-axis both parallel and perpendicular to the direction of the field. The results are consistent with the calculation by the simulation code HFSS which was used for the design of the window.

## Sバンド用進行波型高周波窓の開発 (2)

### 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) は紫外領域から赤外領域の自由電子レーザー (FEL) (0.3~6.0 $\mu$ m) と、パラメトリックX線放射 (PXR) を発生させ、広領域の単色光による研究を行うための施設である。現在は0.885~6.0 $\mu$ mのFEL発振<sup>[1,2]</sup>、エネルギー6~20keVのPXR発生に成功している<sup>[3]</sup>。特に短波長領域でのFEL発振では利得が低くなり、飽和状態になることが難しくなるため、長パルスの電子ビームが要求される。そのため、LEBRAのリニアックは、クライストロンRFパルス幅20 $\mu$ sで運転している。クライストロンは三菱電機製のPV-3030Aと3040Nの2台用いている。これらのクライストロンは短パルス用であるが、クライストロン下流側真空排気能力強化<sup>[4]</sup>、PV-3040Nクライストロンでは、クライストロン内部の真空排気強化等を行い、出力高周波窓一つのクライストロンでパルス幅20 $\mu$ sの運転に成功している<sup>[5]</sup>。

昨年度から長パルスモードでの安定出力動作を目指すために、高周波窓の構造に関して検討を行い、進行波型高周波窓の設計、低電力モデルの製作を行った<sup>[6]</sup>。進行波型高周波窓は、ロシアBINPのSergey Kazakov氏によって考案されたもので、セラミック中で電界が進行波となり、セラミック表面での電界を下げるのが可能で、また窓に対して垂直方向の電界が存在しない、といった特徴がある<sup>[7]</sup>。

製作する高周波窓は、Cバンド、Xバンドで製作されているmix-modeタイプ<sup>[8]</sup>をSバンドへそのまま適用すると、全長がかなり大きくなってしまう (3 $\lambda$ 程度)。そこで、Sバンドクライストロン用に実装できるサイズが望ましいため、矩形から円形導波

管の変換部にアイリスを入れるタイプで設計した (図1参照)。設計は、KEKの竹内保直氏により考案された、アドミタンスチャートを用いる半解析的手法<sup>[9]</sup>とHFSSによる計算を組み合わせで行った。この窓はアイリスとセラミックの片面で整合を取り、セラミック内が進行波となる。

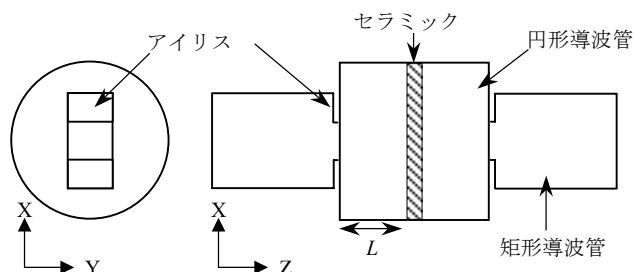


図1：製作した進行波型窓低電力モデル概要図。矩形から円筒導波管変換部分にアイリスを入れた構造で、アイリスとセラミックの片面で整合を取る。

### 2. 進行波型高周波窓低電力モデル

誘電率が9.7、9.8、9.9のセラミックでの共振モード (ゴーストモード) の関係を図2に示す。セラミック表面でのフィールドマッチングを用いる解析的な計算法から、セラミックに無限長円形導波管を接続した場合で、セラミックの局在モードを計算している<sup>[10]</sup>。図2より、運転周波数の2856 $\pm$ 100MHz周辺にはゴーストモードが無いことがわかる。しかし、新たな厚さや純度を変えたセラミック材を用いる場合、セラミック材接合の問題や、セラミックでの共振モードに関する考慮等を行う必要が出てくること

<sup>1</sup> E-mail: sakai@lebra.nihon-u.ac.jp

から、セラミック部分には、すでにKEKBのSバンドピルボックス窓で用いられ、実績のある、日本特殊陶業製の窓部分（HA-997（純度99.7%）、径84.7mm、厚さ3.2mm）をそのまま用いることとした。しかし、セラミック内で完全な進行波とするためにセラミックの厚さは、セラミック管内波長 $\lambda_{\text{ceramic}}$ の1/4付近が良い<sup>[11]</sup>（Sバンドでは7~8mm付近）。図3に例を示すように、その範囲ではpass band（VSWRが1.2以下の範囲）が広く、且つ、運転周波数でのVSWRが小さくなる。そのため、設計で用いたセラミックの厚さ（3.2mm）では、完全な進行波にすることは出来ないが、ピルボックス型高周波窓に比べ窓表面での電界強度は、水平方向を30~35%、垂直方向の電界をほぼ0まで下げることが可能である。また製作した進行波型窓の低電力モデルでの周波数特性等の試験をすでに行い、ほぼ設計どおりの周波数特性であることを確認している<sup>[6]</sup>。

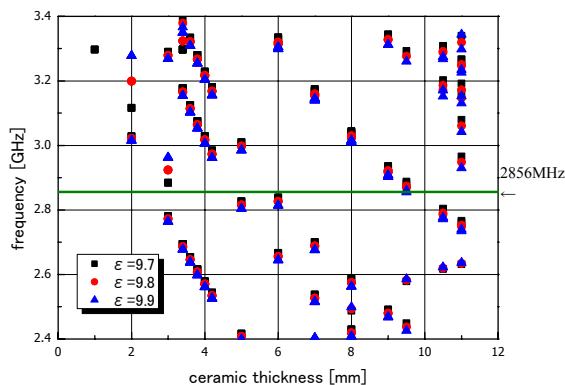


図2: セラミック厚とゴーストモードの関係。誘電率を9.7、9.8、9.9でそれぞれ計算を行った結果。

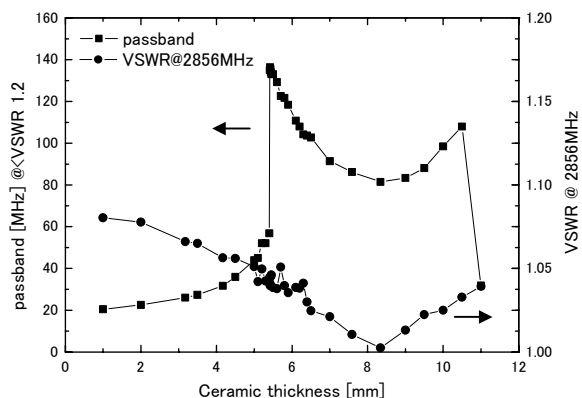


図3: セラミック厚とVSWR、パスバンドの関係例。 $L = 69.6\text{mm}$ 、 $\text{iris} = 14.7\text{mm}$ 、 $R = 42.35\text{mm}$ 、 $\epsilon = 9.9$ の場合での計算例。 $\lambda_{\text{ceramic}}/4$ がおよそ8mmの周辺でVSWRが低く、pass bandが広い。

### 3. 電界分布測定

電界分布測定は、進行波型の非共振摂動理論に基づいたビーズパータベーション法<sup>[12]</sup>を用いて行った。Sパラメータの $S_{11}$ （入力反射係数）の実部と虚部の値から反射係数 $\Gamma$ を求め、以下の式(1)から電場

を求めた。

$$\Delta\Gamma = \Gamma_p - \Gamma_a \propto E_a^2 \quad (1)$$

ここで、 $\Gamma_p$ 、 $\Gamma_a$ はそれぞれ空洞内にビーズがある場合とない場合の反射係数、 $E_a$ は空洞内にビーズが無い場合の電場の振幅である。

式(1)で求めた電場の測定値を、HFSSでの計算で求めた電界の値と対応させるために、入力パワー50MW時の矩形導波管部分での最大電界値と比較し、それに対応した係数をかけることで、電界値への換算を行った。矩形導波管部の $\text{TE}_{10}^{\square}$ モード伝送時の電力は式(2)のように表される。

$$|E_{10}| = \left[ 2\zeta P_{\text{TE}} \left\{ 1 - (\lambda/\lambda_c)^2 \right\}^{-1/2} / ab \right]^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 $\zeta$ は真空の電波インピーダンス、 $P_{\text{TE}}$ は電力、 $a$ 、 $b$ はそれぞれ矩形導波管の長辺と短辺、 $\lambda$ は自由空間波長、 $\lambda_c$ は導波管の遮断波長を示す。式(2)より、WRJ-3矩形導波管（長辺 $a = 72.1\text{mm}$ 、短辺 $b = 36\text{mm}$ ）に、電力50MWを入力した場合、 $\text{TE}_{10}^{\square}$ モードの最大電界は、 $|E_{10}|_{\text{max}} = 6.7\text{ MV/m}$ となるので、この値で補正を行って比較を行う。窓表面での電界測定値の補正には、Z方向のスキャン結果の窓表面位置（表面から約3mmの位置）での電界強度から、その値を基準に補正を行った。

空洞内に入れるビーズには、5mm角の強誘電体のTitanium Dioxide( $\text{TiO}_2$ ; Rutile)キューブを用いた。ルチルは正方晶系の結晶であり、各軸方向で誘電率が大きく異なっている。誘電率は、温度300Kの時にa軸が89に対して、c軸は170と非常に大きな異方性を持っている<sup>[13]</sup>。

図4に電界分布測定時の概要図を示す（図はZ軸測定時の構成）。測定に用いたルチル( $\text{TiO}_2$ )は各面に穴を空け、糸を通すことが出来るようにしてあり、高周波窓に4箇所空けてある穴（表面から約3mmの位置）から釣糸を通し、その先に錘をつけることで均等に引っ張り、中心に来るように調整した。Sパラメータの測定には、Agilent Technologies E8358A PNAシリーズ RFネットワークアナライザを用いた。アナライザの校正はTRL\*2ポート校正を行った。測定時の室温、湿度はそれぞれ24.6~25.1°C、43.3~44.8%であった。

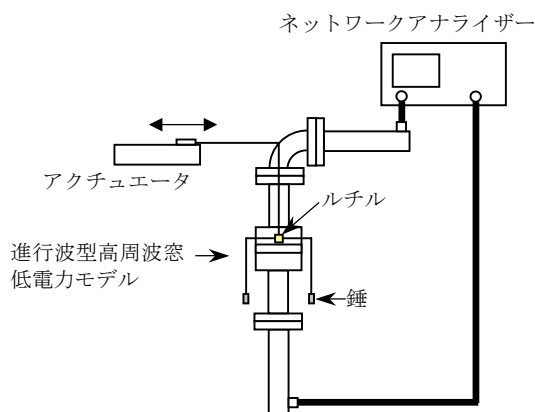


図4: 電界測定構成概要図。ビーズには強誘電体のルチルを使用。Agilentのネットワークアナライザを用い、TRL\*2ポート校正を行い測定に使用した。

#### 4. 電界分布測定結果

ルチルのc軸を高周波窓のZ軸方向に向け測定した場合と、Y軸方向へ向けた場合の測定結果を図5に示す。同様にルチルの向きを変えて行った、セラミック表面径方向の測定結果を図6に示す（セラミック表面の測定は、表面から約3mmの位置で測定している）。セラミック表面の測定では、Z軸測定中のルチルによる反射係数の変化は、最大で0.07であった。またセラミック表面を測定した場合では、ほとんど反射係数に変化が無いために（最大でも0.003以下と非常に小さい）、測定値の誤差は大きくなる。しかし、誤差を考慮すると、Z軸方向のスキャン結果は、HFSSの計算結果とほぼ一致していると言える。セラミック表面のスキャン結果も誤差が大きいが、これも誤差を考慮すればZ軸同様にほぼ設計どおりとなっていると考えられる。またc軸をZ軸方向へ向けた場合では、エッジ付近で少し電界が上がる結果になったが、Y軸へ向けた場合にはその傾向が見られなかったため、今後再測定を行い確認する必要がある。

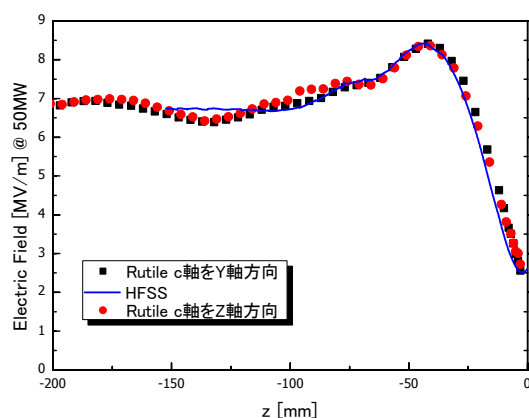


図5：z軸方向の電場分布測定結果。HFSSでの計算結果とルチルのc軸をZ軸、Y軸へ向けた場合の結果。z=0がセラミック表面。電界の測定値は、入力電力50MWの場合で換算。

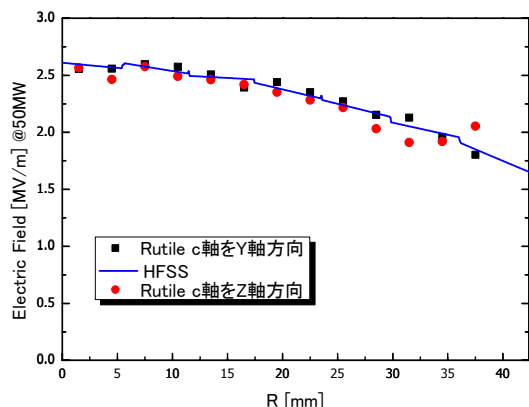


図6：窓表面径方向電場分布測定結果。HFSSでの計算結果（表面から3mmの位置）とルチルのc軸をZ軸、Y軸に向けた場合の結果。R=0がセラミックの中心。電界測定はセラミック表面から約3mmの位置で行い、Z軸の測定結果を元に換算。

#### 5. まとめと今後の課題

強誘電体であるルチルを用いた電場測定の結果は、HFSSで計算した結果とほぼ一致した。今回の測定結果、及び、先に行った低電力モデルを用いた周波数特性測定結果とあわせて考えると、窓はほぼ設計どおりとなっていることが確認できた。但し、ルチルのc軸を高周波窓のZ軸に向け、窓表面の径方向の電場分布を測定した結果では、エッジ付近で少し上がる結果が得られたが、原因はまだ不明である。これに関しては、再度測定を行い、確認を行う予定である。

今後は低電力試験での測定結果を踏まえ、最適化した寸法で大電力モデルの製作を行い、大電力試験を行う予定である。また、クライストロンに実装し、長パルス動作での試験も検討する予定である。

#### 謝辞

今回の電場分布測定にあたっては、ネットワークアナライザの校正、使用等に関して、日本高周波の一木 臣主任に貴重な助言を頂きました。感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] T.Tanaka, et al., "Status of 125MeV Linac and Light Source at LEBRA", in these proceedings.
- [2] K.Hayakawa, et al., "Characteristics of the LEBRA FEL", in these proceedings.
- [3] I.Sato, et al., "The future view of Parametric X rays", in these proceedings.
- [4] T.Sakai et al., "S-Band Klystron for Long Pulse Operation" Proc. The XXI International Linac Conference (LINAC2002), Gyeongju, KOREA (2002) p712-714.
- [5] T.Sakai, et al., "FEL用Sバンド大電力クライストロンの長パルステスト運転", Proc. 28th Linear Accel. Meeting in Japan, Aug. 2003, Tokai, Japan, pp.351-353.
- [6] T.Sakai et al., "DEVELOPMENT OF S-BAND TRAVELING WAVE RF WINDOW", Proc. 29th Linear Accel. Meeting in Japan, Aug. 2004, Funabashi, Japan, pp.84-86.
- [7] Sergey Kazakov, "Development of New Type of High Power RF Windows", Doctoral dissertation(2003).
- [8] S.Michizono, et al., "Cバンドミックスマード高周波窓の開発", Proc. 28th Linear Accel. Meeting in Japan, Aug. 2003, Tokai, Japan, pp.330-332.
- [9] Yasunao Takeuchi, "Impedance-matching solutions for RF windows", KEK Preprint 2002-124, December 2002, A, 4th Superconducting Linear Accelerator Meeting in Japan, KEK, Tsukuba, Ibaraki, JAPAN, Mar. 12-13, 2002.
- [10] M.P.Forrer and E.T.Jaynes, "Resonant Modes in Waveguide Windows", IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Volume MTT-8 March, 1960 Number 2, pp.147-150.
- [11] W.R.Fowkes, R.S.Callin, S.G.Tantawi and E.L.Wright, "Reduced Field TE01 X-band Traveling Wave Window", 16<sup>th</sup> IEEE Particle Accelerator Conference (PAC95) and International Conference on High Energy Accelerators, Dallas, TX, May 1-5, 1995 (SLAC-PUB-6777), pp.1548-1586.
- [12] Charles W.Steele, "A Nonresonant Perturbation Theory", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Volume 14, Issue 2, Feb 1966 Page(s):70-74.
- [13] Rebecca A. Parker, "Static Dielectric Constant of Rutile (TiO<sub>2</sub>), 1.6-1060°K", Phys. Rev. 124, 1719-1722 (1961).