

DEVELOPMENT OF S-BAND TRAVELING WAVE RF WINDOW

T.Sakai^{1,A)}, I.Sato^{B)}, T.Tanaka^{B)}, K.Hayakawa^{B)}, Y.Hayakawa^{B)}, A.Mori^{B)}, K.Nogami^{B)},
K.Kanno^{A)}, K.Ishiwata^{A)}, K.Nakao^{A)}, S.Fukuda^{C)}, S.Michizono^{C)}

^{A)} Graduate School of Science and Technology, Nihon University

1-8-14 Surugadai, Kanda, Chiyodaku, 101-8308

^{B)} Laboratory for Electron Beam Research and Application, Institute of Quantum Science, Nihon University

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

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK

1-1 Oho, Tukubashi, 305-0801

Abstract

A cold model of a traveling-wave-in-ceramic (TWC) type S-band (2856MHz) RF window was designed and fabricated. The ceramic in the RF window has the same dimensions as those used in S-band pillbox type windows. The impedance matching between the rectangular waveguide and the cylindrical waveguide was adjusted with irises located on the boundary. The dimensions of the window were determined by calculations using the simulation code HFSS.

Sバンド用進行波型高周波窓の開発

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では0.3~6.0 μm までの紫外領域から赤外領域の自由電子レーザー (FEL) 発振、パラメトリックX線放射 (PXR) を目標に開発研究を進めている。

現在は0.885~6.0 μm の範囲のFEL発振^[1,2]、2004年4月にはPXR発生に成功している^[3]。特に紫外領域でのFEL発振では利得が低くなるので、長パルスの電子ビームが要求され、LEBRAではクライストロンRFパルス幅20 μs で運転を行っている。これまで行ってきたクライストロン下流側排気能力強化や^[4]、クライストロン内側の排気強化等を行い新しく試作したPV-3040Nクライストロンでは、出力高周波窓一つのクライストロンで20 μs のパルス幅での運転に成功している^[5]。

本研究では長パルスモードでのさらなる安定動作を目指すために、高周波窓の構造に関して検討を行った。高周波窓の構造に関する研究はこれまで数多くなされており、その中でセラミック表面での電界を下げる事が出来る、進行波型高周波窓がある。この進行波型高周波窓は、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事が可能で、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^[6]。

製作する高周波窓は、Sバンドクライストロンに実用できるサイズが望ましく、矩形導波管から円形導波管に変換する部分にアイリスを入れるタイプで設計を行うこととした。この窓はアイリスとセラミックの片面で整合を取ることで定在波が生じるのはセラミックとアイリスの間だけとなり、セラミッ

ク内は進行波となる。設計は以下の手順で行った。初めにアドミッタンスチャートを用いるKEKの竹内保直氏の方法から半解析的に進行波となる寸法を決め^[7]、次にHFSSを用いて全体計算、共振モードの計算を行い、各寸法の調整を行った。HFSSによる計算結果から低電力モデルを製作し、周波数特性測定を行った。

2. セラミック部分の選択と共振モード

通常、進行波型高周波窓に用いるセラミック材の厚さは、帯域が最も広く取れるように、セラミックの管内波長の1/4付近が選ばれる (Sバンドでは7~8mm程度)。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、セラミック材の接合の問題や、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。そこで、セラミック部分には、すでにKEKBのSバンドピルボックス高周波窓で用いられ、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) をそのまま用いた進行波型高周波窓の検討を行う事とした。また現在使用中の窓部分をそのまま使用できるため、導波管部分の交換のみで置き換えることができるというメリットもある。

設計の前に、使用するセラミックの共振モードの確認を行った。計算では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^[8]、セラミックに無限長の円形導波管が接続されているとして、セラミックの局在モードを計算している。結果を図1に示す。これより、運転周波数の2856 MHz \pm 100MHzに共振は無いことを確認した。

¹ E-mail: sakai@lebra.nihon-u.ac.jp

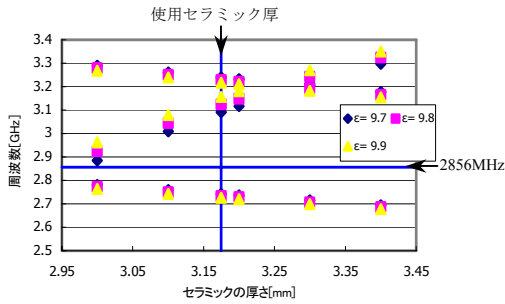


図1：セラミック局在モードの周波数とセラミック厚の関係。セラミック径84.7mm、誘電率9.7～9.9での計算した結果。2856MHz±100MHzに共振は無い。

3. 竹内法を用いた基本寸法の決定

図2にピルボックス型高周波窓の等価回路を示す。ここで、Bは矩形導波管から円形導波管へのステップで生じるサセプタンス、Y₁、Y₂、Y₃はそれぞれ、矩形導波管、円形導波管、円形導波管内部に誘電率εのセラミックを入れた場合の特性アドミタンスである。またTはセラミックの厚さ、Lはセラミック表面から矩形導波管までの長さである。伝送モードは、矩形部分はTE₁₀モード、円形部分はTE₁₁モードを仮定する。使用する矩形導波管寸法、円形導波管の径、及びセラミックの誘電率が決まっているため、アイリスの長さ等を変化させ整合が取れるように決めると、B/Y₁、Y₁/Y₂、Y₂/Y₃が決まる。Y₂/Y₃=0.225はインピーダンスの比から求め、B/Y₁=1.07、Y₁/Y₂=1.93の値はHFSSを用いて求めた。

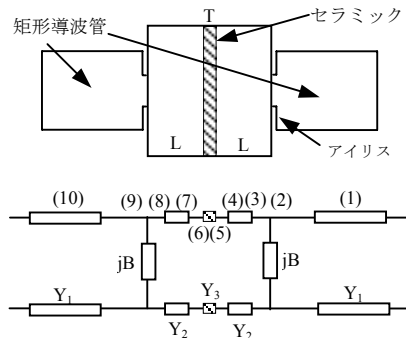


図2：ピルボックス型高周波窓の等価回路

図3にアドミタンスチャート上での整合解を示す。各番号は等価回路上のそれぞれの番号位置から負荷側を見た時のアドミタンスに対応している。これより、基本寸法はL=70mm、irisの長さ=14.5mm付近、厚さ3mmとした。この基本寸法を基にHFSSを用いて全体計算を行い、各寸法の調整を行う。

4. HFSSによる計算

アドミタンスチャートから求めた寸法を基にHFSSを用い各寸法の調整を行った。図4に計算に用いた窓の1/4の模式図を示す。矩形導波管から円形導波管変換部にアイリスを入れた構造をし、また矩形から円形のステップ部にはRをつけ計算を行った。

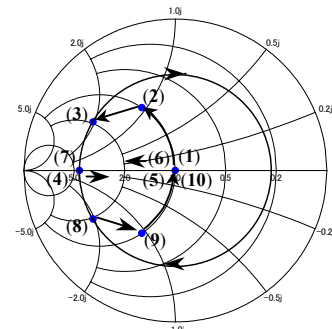


図3：アドミタンスチャート上での整合解。等価回路上のそれぞれの番号位置から負荷側を見た時のアドミタンスに対応。

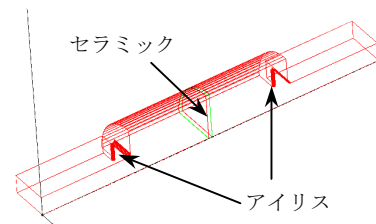


図4：進行波型高周波窓の模式図(1/4カット図)

計算では透過電力50MW時での従来窓のセラミック中心電界3.7MV/m、端部1.7MV/m、最大電界6.0MV/m(HFSSでの計算値)を下回り、パスバンド(VSWRが1.2以下の帯域)は過去に製作されている他の進行波窓での100MHz付近を目標とした^[6,9]。計算より、L=71.7mm、iris=13.2mmのときに、運転周波数でのVSWR1.02、パスバンド68MHz、セラミック中心電界2.5MV/mという結果が得られたが、2827MHzに図5に示すような体積共振が現れる事がわかった。そこで、電界は2.6MV/mとわずかに上がるが、少しずらした、L=72.5mm、iris=13.1mmを基本寸法とした。これよりVSWR1.06、パスバンド68MHzとなり、共振周波数は2813MHzとなる。

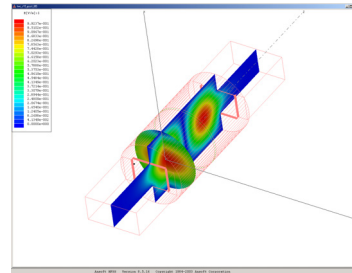


図5：体積共振計算例。L=72.1、iris=13.2のときの周波数2827MHzでの体積共振の様子。

またパスバンドは70MHz程度と狭いが、LEBRAではSLED等を用いる予定は無く、またクライストロン、加速管等と比較して広いために、問題は無いと判断した。また基本寸法のL、アイリスの値を±0.2mmずらした場合のVSWR特性の様子を図6に示す。この結果より、L=72.3mm、iris=12.9mmでは運転周波数でのVSWRは下がる傾向にあり、パスバンドは200MHz付近まで広がる事が分かった。しかし少しの寸法のずれにより、折り返している部分の

VSWRが1.2以上になり、その場合、パスバンドが半分以下に急に下がってしまうため、それを避けるために全体の精度を $\pm 0.1\text{mm}$ 程度とし、その領域を避けるようにした。

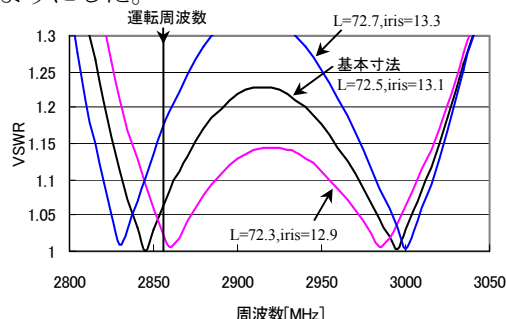


図6：基本寸法からL、irisを $\pm 0.2\text{mm}$ ずらした場合のVSWR特性の比較。

5. 低電力試験

HFSSの計算結果を基に図7に示す低電力モデルを製作した。導波管部分は真鍮で製作し、円筒部分は長さ調整用に2つに分離し、パーツの組合せにより基準値 $\pm 1\text{mm}$ の範囲を 0.1mm 間隔で調整できるようにしている。アイリス部も基準値 $\pm 0.2\text{mm}$ ずらしたものを3パターン用意した。



図7：低電力モデル概観写真。導波管部は真鍮、窓部分は実際に使われていたSLAC窓を使用。

VSWR特性測定の結果を図8に、共振周波数の測定結果とHFSSでの計算結果を図9に示す。Lが計算値から少しずれ、 $L=72.1\text{mm}$ 、 $\text{iris}=13.1\text{mm}$ で計算とほぼ一致し、VSWR1.06、パスバンドは少し狭くなり61MHzが得られた。共振周波数はそれぞれほぼ計算通りの周波数にあることが確認できたが、 $L=72.1\text{mm}$ と基本寸法から少しずれたため、体積共振が2819MHzとなり、運転周波数に近づいている。また計算では2737MHz付近での共振周波数を求めていたが、今回の測定では、見つからなかった。

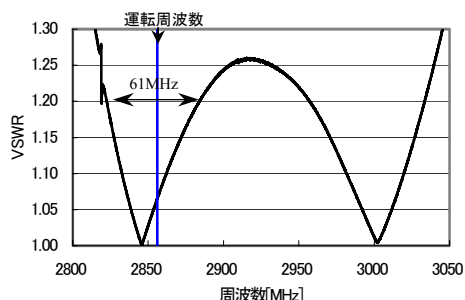


図8：VSWR特性測定結果。 $L=72.1\text{mm}$ 、 $\text{iris}=13.1\text{mm}$ 、パスバンド61MHz、 $\text{VSWR}@2856=1.06$ 。

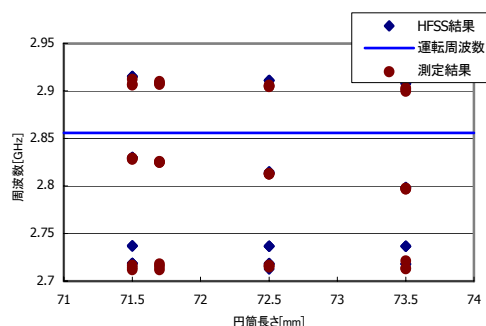


図9：共振周波数の測定値と計算結果。計算値とほぼ一致。2737MHzは測定では見つからなかった。

6. まとめと今後の課題

Sバンドpillボックス型高周波窓部分(HA-997(純度99.7%)、直径：84.7mm、厚さ：3.2mm)を用い、Sバンド用進行波型高周波窓の設計、及び低電力テストによる周波数特性の測定を行った。試験の結果、パスバンドは60MHz程度と狭いが、VSWR等は計算値にほぼ近い値であり、セラミック表面に水平方向の電界は従来のpillボックス型に比べ、30~35%程度低い $2.6\text{MV/m}@50\text{MW}$ となることが予想された。

今後はビーズ法により、窓表面での電界を測定し、今回の測定結果と計算値との比較を踏まえ大電力モデルの製作、及び、試験を行っていく予定である。またこの窓のクライストロンへの実装も検討を行う予定である。

参考文献

- [1] T.Tanaka, et al., "Operational Status of 125-MeV Linac at Nihon University", in these proceedings.
- [2] Y.Hayakawa, et al., "Analysis of the Gain Saturation in LEBRA FEL Using GENESIS", in these proceedings.
- [3] Y.Hayakawa, et al., "Present Status of the Parametric X-ray Generator at LEBRA", 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] Sergey Kazakov, "Development of New Type of High Power RF Windows", Doctoral dissertation(2003).
- [7] Yasunao Takeuchi, "高周波窓のインピーダンス整合解 (Pillbox型、及び同軸平板型について)", KEK Preprint 2002-124, December 2002, A, 4th Superconducting Linear Accelerator Meeting in Japan, KEK, Tsukuba, Ibaraki, JAPAN, Mar. 12-13, 2002.
- [8] 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.
- [9] S.Michizono, et al., "High-power Test of Pill-Box and TW-in-Ceramic Type S-Band RF windows", 17th International Linac Conference (LINAC94), Tsukuba, Japan, August 21-26, 1994.(KEK Preprint 94-157 December 1994 A).