

Cバンド・ミックスモード高周波窓の開発

道園 真一郎^{1A)}、松本 利広^{A)}、中尾 克巳^{A)}、竹中 たてる^{A)}、福田 茂樹^{A)}、吉田 清彦^{B)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

^{B)} 三菱電機 通信機製作所

〒661-8661 尼崎市塚口本町8-1-1

概要

Cバンド (5712MHz) 用に開発した大電力高周波窓について報告する。高周波窓は、ミックスモード ($TE_{11}^{\circ}+TM_{11}^{\circ}$) 型とし、セラミック内での電界が進行波になるような設計指針で行った。これにより、現在使用しているSバンド (2856MHz) の50MW用高周波窓の電界より、約2割程度低減させることができた。今回は、設計の方法、シミュレーションによる考察、低電力での測定結果についてまとめる。

1. はじめに

KEKBの電子・陽電子入射器では、Cバンド (5712MHz) 高周波源でのエネルギー増強計画を検討している^[1]。計画では、Cバンド50MW大電力クライストロン (使用ピーク電力40MW、 2μ 秒、50pps)^[2]から導波管、高周波窓、SLEDを通じて加速管^[3]に高周波を導入する。

大電力クライストロンでは、高周波窓セラミックでの沿面放電を避けるため、高周波出力を二分割して並列した高周波窓を通過させた後に合成させる方法が取られるが、一つの高周波窓で全電力の通過が可能になれば、導波管系および真空系が単純となり、設計・配置の自由度が広がる。また、1個の高周波窓で可能となれば、構造が若干複雑になっただとしても、真空・導波管を含めた全体としては予算的にも安価となる。このため、導波管高周波窓のために高周波出力50MWに耐えるCバンド高周波窓の設計を行った。

KEKB入射器では、50MWクライストロン (2856MHz、平均通過電力40MW、 4μ 秒、50pps) の高周波出力を通過させるピルボックス型高周波窓が導波管部分に約60個使用されており、設計にあたっては、この高周波窓の実績値を参考にしている。この高周波窓は、レゾナントリングの試験で200MW以上の通過試験実績がある。また、高周波窓の交換のMTBFは5万時間を越えている^[4]。ピルボックス窓の内部では TE_{11}° と TM_{11}° の混在モードでセラミック中は定在波となっていて^[5]、表1に示すように50MW通過時の最大電界は5.5MV/m程度で、端部では1.7MV/m程度である。高周波窓の破壊は、端部のセラミック・真空・金属の三重点からの電子放出を端緒としていと考えられており、端部の電界は中心部より充分小さい方が望ましい。今回のCバンド窓では、セラミック上の中

心電界、および端部電界がSバンド高周波窓の電界を下回るようにすることとした。

また、周波数特性としては、クライストロンの帯域より充分広く、将来のSLEDの反転に伴う周波数成分にも対応できるように、VSWRが1.2以下の領域が100MHz以上とした。目標仕様を表1にまとめる。このような仕様では、セラミックの形状は必然的に使用波長に比較して大きなものとなり、セラミックのみならず、円型導波管部分においても TM_{11}° モードが伝播モードとなるため、 TE_{11}° モードだけでなく、 TM_{11}° モードを念頭においた設計が必要となる。 TM_{11}° モードを TE_{11}° モードとうまく混在させることができれば、セラミック部分で端部の電界をかなり小さくすることが可能となる (ミックスモード高周波窓^[6])。

2. セラミック形状の決定

セラミック径が大きくなると、セラミック内部に局在するモードも多くなる。セラミック局在モードは、高周波窓の形状を変化させても逃れることができないので、あらかじめセラミック内部に局在するモードを避けるような形状を選択する必要がある。このため、セラミック単体のモードを、セラミック径および厚さをパラメータとして計算を行なった。セラミックとしては、Sバンドの高周波窓 (直径84mm厚さ3.2mm) で実績のある日本特殊陶業社製のHA-997 (純度99.7%) を使用する。局在モードのセラミック径依存性を計算した結果を図1に示す。セラミックの厚さは $\lambda/4$ 程度で帯域が広く取れることを考慮して、セラミックの直径78mm、厚さ4mmを採用することとした。

3. ミックスモード窓形状

ミックスモード高周波窓の形状パラメータとしては、 TE_{11}° モードがセラミックで節となり (角型-円

表1: Sバンドピルボックス型高周波窓の電界強度の計算値とCバンド窓の設計目標値。

	Sバンド	Cバンド 目標値
Ecenter [MV/m @50MW]	3.7	<3.7
Eedge[MV/m @50MW]	1.7	<1.7
Emax[MV/m @50MW]	5.5	<5.5
Band width [MHz](VSWR<1.2)	600	>100

¹ E-mail: shinichiro.michizono@kek.jp

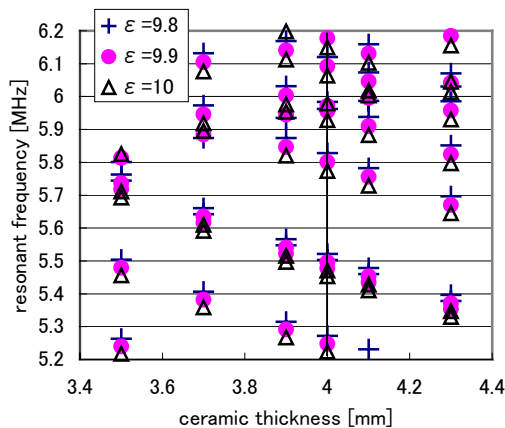


図1： セラミック局在モードの発振周波数とセラミック厚さとの関係。セラミック直径は78mm。

型変換部のサセプタンスと経路長がセラミック表面での反射と整合するために2パラメータ)、 TM_{11}° モードがセラミックで節となり(同様に2パラメータ)、さらに、体積共振を避けるためのパラメータを加えて5つ程度の設計パラメータが必要である。設計パラメータが少ない場合は、進行波型になったとしても端部の電界が高くなる、体積共振を避けられず採用できない等が生じて解を見つけるのが難しくなる。構造としては、製造が比較的単純になるリングを重ねたものとした。図2に模式図を示す。導波管部分が定在波となり、セラミック部分に節が来るようにする。導波管からセラミックの間は、角型導波管-円型導波管変換部のサセプタンスがあるため $N/2\lambda + \alpha$ となる^[7]。今回は、帯域が広くなり、 TM_{11}° も最適化となるように、 TE_{11}° モードに対して $N=2$ 、 TM_{11}° モードに対して $N=1$ となるように計算をすすめた。HFSSを使って計算を行い、比較的よい値が得られる部分で最適化の計算をすすめ設計値を決定した。表2の設計値の項でわかる通り、Sバンドの高周波窓より2割程度電界が逓減されている。各パラメータを±0.2mm変わった場合の、中心電界、端部電界、VSWRの変化についても表2にまとめる。いずれの場合も、一パラメータが±0.2mm程度の寸法精度であれば充分仕様を満たせることがわかった。このため、全体の寸法精度としては、±0.1mm程度とすること

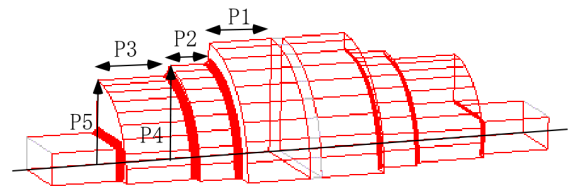


図2： Cバンド高周波窓の模式図。計算に使用したパラメータは、P1-P5。P1:セラミック再近接リングの厚さ。P2:第二リングの厚さ。P3:第三リングの厚さ。P4第二リングの内径。P5:第三リングの内径。セラミックの直径と厚さは、78mmおよび4mmで固定。

にした。

4. 共振モードの回避

ミックスモード高周波窓の形状パラメータとしては、大口径の高周波窓では、 TE_{11}° モードのほかに、 TM_{11}° 、 TE_{01}° 、 TM_{01}° モードが伝播モードとなる。矩形導波管の TE_{01}^{\square} モードから励振されるのは TE_{11}° および TM_{11}° モードであるが、導波管の微小なアンバランスから TE_{01}° や TM_{01}° が励振されると、高周波窓がQ値の高い空洞となつて、内部での放電や伝播特性の悪化をもたらす。このため、高周波窓の設計においては、セラミック単体の共振を避けるだけでなく、高周波窓全体の共振を避ける検討も必要となる。特に、 TM_{01}° モードは、 TE_{11}° で $\lambda + \alpha$ となるときにちょうど TM_{01}° の λ に近くなり(TM_{014}° モード)、 TE_{01}° モードは、 TM_{11}° モードと同じ固有値を持つため、 $\lambda/2$ に近接することになる(TE_{012}° モード)。計算値と実際の共振周波数は、空洞の寸法をVSWRが最適となるように調整するため20MHz程度ずれることがあった。 TE_{014}° および TM_{012}° モードが計算で運転周波数より充分(50MHz以上)離れるような形状とするために、セラミック内で完全な進行波ではないような形状となった。

5. 低電力試験および大電力用窓

HFSSの計算を基に低電力モデルを製作し、円筒部分の長さをパラメータにしてVSWR特性が最小となるような形状の組み合わせを見出した。また、このときに発振周波数が運転周波数から50MHz以上離れていることを確かめた。強誘電体であるルチル(3mm

表2： 設計値からのずれに対する、電界、VSWRおよび帯域についての計算値。Rはセラミック内径。また、tはセラミックの厚み。

	設計値	P1 +0.2 -0.2	P2 +0.2 -0.2	P3 +0.2 -0.2	P4 +0.2 -0.2	P5 +0.2 -0.2	R +0.2 -0.2	t+0.2 -0.2
E_{max} [MV/m @50MW]	3.67	3.76 3.77	3.68 3.78	3.70 3.89	3.87 3.69	3.65 3.87	3.65 3.71	3.72 3.66
E_{center} [MV/m @50MW]	3.10	3.18 3.15	3.10 3.14	3.07 3.14	3.18 3.09	3.09 3.15	3.13 3.08	3.10 3.09
E_{edge} [MV/m @50MW]	0.77	0.80 0.79	0.79 0.74	0.79 0.79	0.77 0.79	0.82 0.77	0.80 0.78	0.78 0.84
VSWR (@5712MHz)	1.01	1.00 1.02	1.01 1.02	1.01 1.03	1.03 1.02	1.05 1.06	1.00 1.01	1.01 1.00
Band width [MHz] (VSWR <1.2)	198	194 202	196 202	200 198	182 214	222 174	202 198	190 214

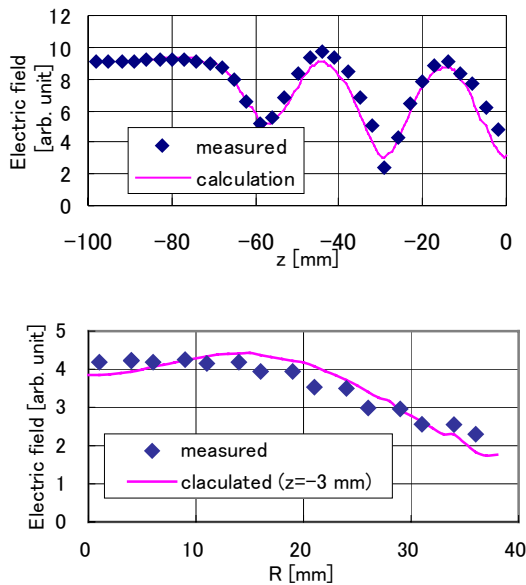


図3：ビーズパータバージョン法による電界の測定値とHFSSによる計算値の比較。高周波の進行方向（上図）および径方向（下図）

の立方体)を使って、進行波型のビーズパータバージョン法^[8]による測定を行った。高周波窓内部（特にセラミック表面近傍）の電界が導波管部分と比較して小さく、通常の誘電体ビーズでは進行波での測定が難しかったためである。測定は、 S_{11} の微小な変化を測定しているために、10%以上の誤差を含んでいる。特にセラミック近傍では、ビーズによる擾乱が非常に小さい（ビーズを入れた場合もVSWRの変化が0.01以下である）ために、誤差が大きい。図3に測定結果と計算結果を示す。ビーズの位置は、セラミック表面から3mm ($z=-3$ mm)の位置にあるため、セラミック表面ではなく、その場所での電界強度と比較している。誤差を考慮すると、ほぼ設計どおりとなっていると考えられる。

低電力モデルでの最適化した寸法で大電力モデルを作成した。大電力モデルは、真空保持・高周波通過のためのフランジをもつ^[9]。図4に大電力用高周波窓のVSWR特性を示す。VSWRが1.2以下の帯域は200MHz以上であることを確かめられた。この高周波窓は、Cバンドレゾナントリングで160MWまでの通過試験を行っている^[10]。

6. まとめ

Cバンド・ミックスモード型高周波窓の設計を行った。セラミックの寸法を決定した後、現在使用しているSバンドの高周波窓より電界が低くなるよ

表3：発振周波数のHFSSによる計算値および大電力高周波窓での測定値。

	計算値	測定値
TM014 [GHz]	5.78	5.77
TE012 [GHz]	>5.85	>5.8

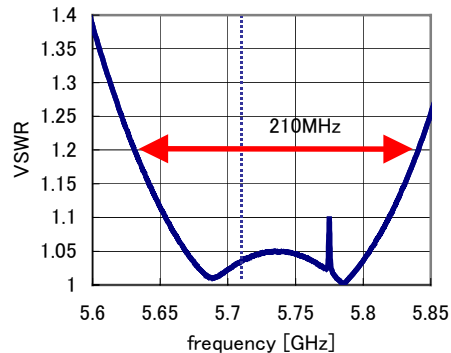


図4：大電力高周波窓のVSWR特性。

うな寸法を見出した。また、体積共振を避けるような考慮を行った。低電力モデルをつくり、計算寸法から最適化を行い、また、ビーズパータバージョン法で電界測定を行った。大電力モデルについて周波数特性、発振周波数が設計仕様を満たしていることを確認した。

今後は、クライストロン出力部の導波管高周波窓として使用するとともに、同タイプの高周波窓を制作してさらに大電力 (>200MW) の通過試験を進める予定である。

謝辞

今回の高周波窓設計にあたっては、BINPのS. Kazakov博士に計算・評価についての貴重な助言を頂きました。感謝いたします。

参考文献

- [1] 福田茂樹,他,“SuperB計画の為のKEK電子陽電子ライナックCバンド化計画”, 第28回リニアック技術研究会論文集, 東海, 茨城, 2003.
- [2] 松本利広,他,“Cバンド50MWクライストロンを用いた大電力高周波窓(II)-大電力試験-”, ibid.
- [3] 紙谷琢哉,他,“SuperKEKB計画のためのCバンド加速管開発について”, ibid.
- [4] S.Michizono et al.,“RF windows used at the KEKB linac”, Appl. Surf. Sci. 169-170 (2001) 742.
- [5] S.Yamaguchi et al.,“Trajectory Simulation of Multipactoring Electrons in an S-Band Pillbox RF Window”, IEEE Trans. Nucl. Sci. 39 (1992) 278.
- [6] S.Y.Kazakov,“A new traveling-wave mixed-mode RF window with a low electric field in ceramic-metal brazing area”, KEK Preprint 98-120, 1998.
- [7] Y. Takeuchi,“APPLICATION OF TRAVELLING-WAVE TYPE RF WINDOW IN L AND S BANDS”, Proc. 18th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, July 1993.
- [8] C.W.Steele,“A Nonresonant Perturbation Theory”, IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. 14 (1966)70.
- [9] 柿原和久,他,“C-band矩形導波管用フランジの検討”, 第28回リニアック技術研究会論文集, 東海, 茨城, 2003.
- [10] 竹中たてる,他,“Cバンドレゾナントリングを用いた大電力試験”, ibid.

