

## 1 GeV リニアック検討資料

## 1 GEV LINAC DESIGN NOTE

題目(TITLE) \*進行波型高周波窓のLバンド及びSバンドへの応用  
(Application of traveling-wave type RF window in L and S bands)

著者(AUTHOR) 竹内 保直 (Yasunao TAKEUCHI)

## 概要(ABSTRACT)

\*進行波型高周波窓とは、セラミック中の電磁波が進行波となるインピーダンス整合解を用いた高周波窓で、S.Yu. Kazakov氏によって提唱された。進行波型高周波窓をLバンド及びSバンドのピルボックス型窓に適用し、整合解のふるまいを、従来型窓で用いたスミスチャートでの解析方法を使用して調べ、従来型の整合解と比較した。その結果、進行波解で $T = \lambda g/4$ の解が、 $T_{1max}$ 及び $T_{2min}$ の解として表されるなど、従来型の解から進行波型の解へ移行する様子がわかった。進行波型高周波窓は、電場の大きさの計算値が、Lバンドの例では、従来型の約1/3になることから、より大きな高周波電力の透過性能が期待される。現在、大きさが製作容易となるSバンドでの高電力モデルを計画している。

(The traveling-wave type RF window, which was proposed by Kazakov, has no standing wave in the window ceramic and the electric field strength in the window ceramic is lower than the conventional one. Therefore it can handle higher RF power than the conventional one. We analyzed matching solutions of traveling-wave type windows (pillbox type) comparing with conventional ones using Smith chart. Examples of the window in L and S bands are showed and discussed.)

KEY WORDS: Ion Source, RFQ, DTL, Magnet, Monitor, Beam Dynamics, Transport, Vacuum, Cooling, Klystron, Low Level RF, High Power RF, Modulator, Control, Operation, Radiation, Others

# APPLICATION OF TRAVELING-WAVE TYPE RF WINDOW IN L AND S BANDS

Yasunao TAKEUCHI

KEK, National Laboratory for High Energy Physics  
Oho 1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken 305, Japan

**ABSTRACT** The traveling-wave type RF window, which was proposed by Kazakov, has no standing wave in the window ceramic and the electric field strength in the window ceramic is lower than the conventional one. Therefore it can handle higher RF power than the conventional one. We analyzed matching solutions of traveling-wave type windows (pillbox type) comparing with conventional ones by using Smith chart. Examples of the window in L and S bands are showed and discussed.

## 進行波型高周波窓のLバンド及びSバンドへの応用

### 1 はじめに

進行波型高周波窓とは、セラミック中の電磁波が進行波となるインピーダンス整合解を用いた高周波窓で、S.Yu. Kazakov氏によって提唱された[1]。進行波型高周波窓をpillbox型高周波窓（概略を図1に示す。）に適用した場合の特徴は、以下のように説明される。

- 1) 進行波のため、定在波型（従来型）と比較してセラミック中の電場が小さい。
- 2) 特にセラミックの比誘電率 $\epsilon_r$ （約10）によって波動インピーダンスが小さくなるため、電場が、真空の円形導波管中の進行波に比較して $(Z_{\epsilon_r}/Z_{vac})^{1/2}$ 倍に小さくなる。約 $(1/\epsilon_r)^{1/4}$ 倍。尚、 $Z_{\epsilon_r}$ はセラミックが詰められた円形導波管の波動インピーダンス、 $Z_{vac}$ は、中が真空の円形導波管の波動インピーダンスを表す。
- 3) 周波数帯域が狭い。（他の整合要素を用いない場合。）
- 4) 整合解は、セラミックの厚さ $T$ によらない。
- 5)  $T = \lambda g/4$ で周波数帯域が最大となる。

このように、セラミック中の電場が従来型（定在波型）に比べて小さいことから、高ピーク電力及び高平均電力を透過する高周波窓に適している。

この整合解の性質を、従来型窓で用いた、スミスチャートでの解析方法を使用して調べた。その結果、周波数帯域が $T = \lambda g/4$ で最大となる解は、従来型で最適解として筆者が提唱した「 $T1$ 最大」の解の一種であり、従来型の「 $T1$ 最大」解の性質を備えていることがわかった。すなわち、「 $T1$ 最大」では、 $l$ の微小変化に対し、整合解が停留値となること。また、 $l$ の微小変化についての整合解の停留は、周波数 $f$ についても同じようなふるまいをするため、周波数帯域が多少広がることである。

進行波型高周波窓（pillbox型）の設計例を、Lバンド及びSバンドについて示す。進行波の解は従来型に比べて、pillboxの円筒直径を大きくすること、又は、矩形導波管の高さを小さくすることにより、見いだすことができる。（ $l$ の調整も必要。）Lバンドの例では、セラミック中の電場は、従来型に比べ、約1/3程度

に下がる。この結果、誘電損失が問題になる高平均電力型窓では、従来型の約9倍の電力を透過できることが期待される。

### 2 スミスチャートでの解析

図1のpillbox型高周波窓は、図2に示す等価回路で表すことができる。ここで

B1 矩形導波管からpillboxに移るステップで生じるサセプタンス。

Y1 矩形導波管の特性アドミタンス。

Y2 直径 $d$ の円形導波管の特性アドミタンス。

Y3 直径 $d$ の円形導波管の内部に誘電率 $\epsilon_r$ のセラミックを入れた場合の特性アドミタンス。

である。伝送モードは、矩形導波管ではTE<sub>10</sub>モード、円形導波管ではTE<sub>11</sub>モードを仮定している。この等価回路をスミスチャート上で調べることにより、インピーダンス整合の解の多くの重要な性質がわかった[2,3]。ここでは、その性質の一部を用いて従来型の整合解から、進行波型の整合解を誘導する。

#### ●2-1 従来型高周波窓のインピーダンス整合解

従来型のpillbox型高周波窓の整合解は、矩形導波管とpillboxの直径及びセラミックの誘電率を決めると、次の性質を持つ。（図3～図7は、Lバンドpillbox型高周波窓の例である。）

1) 両側に同じ矩形導波管を接続する場合、 $T = \lambda g/2$ 以外の整合解は、左右対称な形となり、 $l_1 = l_2$ となる。

（ $l_1, l_2 < \lambda g/2$ のとき。）このとき、 $l_0 = l_1 = l_2$ とおく。

2)  $T \leq \lambda g/4$ かつ $T$ が充分小さいとき、二つの $l_0$ （ $l_0 < \lambda g/2$ ）の整合解を持つ。このときの $T$ を $T_1$ とする。図3は、これらの解の軌跡を表す。円C1は、図2上の③-④間で $l_1$ を変化させたときに負荷側を見たアドミタンスの軌跡である。円C2は、C1上の点をY3で規格化した写像である。矩形導波管とpillboxの直径及びセラミックの誘電率を決めると、円C1, C2が定まる。

3)  $\lambda g/4 \leq T < \lambda g/2$ かつ $T$ が充分大きいとき、二つの $l_0$ （ $l_0 < \lambda g/2$ ）の整合解を持つ。このときの $T$ を $T_2$

とする。図4に、これらの解の軌跡を示す。

4) 2)からわかるように、整合解T1は、最大値を持ち、二つの整合解10は一つになる。この解をT1maxとする。この解の軌跡を、図5に示す。ここで、C1→C2の軌跡が中心から円C2に引いた接線の接点を通る。このため、この解は、10の整合解からの微小変化に対して停留する[4]。周波数fについても、B1の周波数依存性からの整合解への寄与が小さければ、停留する。したがって、この解では、10の許容誤差を大きくとることができ、周波数特性が多少広がることが期待される。筆者は、従来型のピルボックス型窓で、この解を有効性を提案し、Lバンド高周波窓で実際に採用した[2]。

5) 4)と同様の議論で、T2は最小値を持つ。この解もT1最大の解と同じ性質を持つ。この解をT2minとする。

6) T、11、12の解は、それぞれ $\lambda g/2$ の周期性を持つ。

### ●2-2 進行波型高周波窓のインピーダンス整合解

図5で例にあげたLバンド従来型ピルボックス窓の直径d (d=190mm)を254.1mmまで大きくしていくと、それぞれの要素は次のように変化する。

$B1/Y1: 0.318 \rightarrow 0.736$ ,  $Y1/Y2: 1.97 \rightarrow 2.21$ ,  $Y3/Y2: 4.37 \rightarrow 3.67$ 。このとき図5に示した円C1、C2に注目すると、dの増大とともに(おもにB1/Y1の増大が効いて)C1の直径が大きくなり、C2の左側が、スミスチャートの中心Oに近づき(図6)、d=254.1mmで中心Oを通るようになる(図7)。従って、図8のように軌跡をとれば、等価回路の点⑤-⑥間は、中心O上を動かさないから、セラミック中で進行波となる。この整合解は、セラミックの厚さTによらない。また、C2に対する接線は、図6、図7のように変化する。進行波解では、 $T1max = T2min = \lambda g/4$ となる。このとき、T1maxとT2minの解は、一致する。

ところで、進行波解で $T = \lambda g/4$ のときに周波数帯域が最大になることは、T1max (T2min)の性質から説明できるが、このほかにも、二つの説明方法があげられる。

1) 構造が対称であるため、インピーダンス整合を得るためには、アドミタンスの軌跡が、セラミック中心で実数であることが必要である。周波数の進行波解からの微小変化に対しては、点⑤でのアドミタンスは、中心Oの近くでC2に添って分布することが予想されるため、 $T = \lambda g/4$ が周波数帯域を広くする解であることがわかる。実際にSバンドの進行波解の例で、点⑤でのアドミタンスを、2856MHz±40MHzについて10MHzおきに計算した結果を、図9に示す。大まかに、C2の近くに分布している。2) 等価回路を図10のようにY3の部分に注目して表すと、周波数の微小変化に対する左右の整合要素は、 $1 + \alpha$ のように表される。 $\alpha$ が微小で純虚数であるとき $T = \lambda g/4$ が帯域を広くする解となるが、図9よりほぼこの条件を満たしていることがわかる。

進行波解を作るには、ピルボックスの直径を大きくする方法のほかに、矩形導波管の高さを小さくする方法がある。このときは、主にY1/Y2が増大して解が得られる。

尚、従来型の解でも、等価回路の点⑤-⑥間をスミスチャートの中心Oの近くに来るように設計すれば(例えば、図6のT1maxの解。)セラミック中の電場を小さくできる。また、点⑤-⑥間の軌跡をスミスチャートの左側(例えば、T2の解。)になるように設計すれば、定在波の位相から、セラミック中の電場をさらに小さくできる[3]。

### 3 進行波型高周波窓のLバンド及びSバンドでの設計例

すでにLバンドの進行波解の例を図8に示した(d=254.1mm)。図11にLバンドで導波管の高さをWR650の1/2にした解を示す。また、図12にSバンドでの解を示す。図13、図14にLバンドの従来型(図5)と進行波型(図8、T=10mm)での、導波管の中心を通る線上の電場の大きさの計算値を示す。これらの電場は、セラミック中心でTE11モードが最大になる位相での計算値である。進行波型の電場が従来型の約1/3であることがわかる。

### 4 結論

ピルボックス型の進行波型高周波窓を、従来型窓で用いたスミスチャートでの解析方法を使用して調べた。その結果、進行波解で $T = \lambda g/4$ の解が、T1max及びT2minの解として表されるなど、従来型の解から進行波型の解へ移行する様子がわかった。進行波型高周波窓は、電場の大きさの計算値が、Lバンドの例では、従来型の約1/3になることから、より大きな高周波電力の透過性能が期待される。現在、大きさが製作容易となるSバンドでの高電力モデルを計画している。

本論文で採用したスミスチャートでの高周波窓の解析は、他にも興味深い点があり、別の機会にまとめて発表する予定である。

### 5 参考文献

- [1] S.Yu.Kazakov, "Increased Power RF-Window", BINP Preprint 92-2, Protvino, 1992.
- [2] Y.Takeuchi et al., "Development of L-band Pillbox RF Window", Proceedings of 9th Symposium on Accelerator Science and Technology, KEK, Tsukuba, Ibaraki, Japan, Aug., 1993.
- [3] Y.Takeuchi, to be published.
- [4] 文献 [2] のFig.3に測定値が示されている。

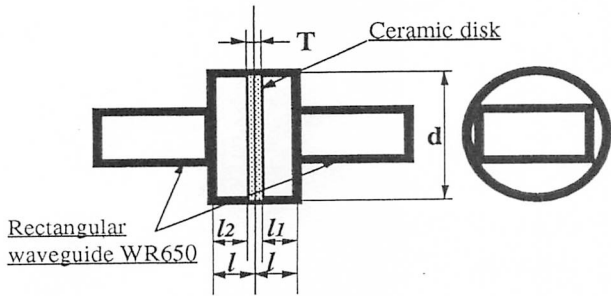


図1 Lバンドピルボックス型高周波窓の概略図

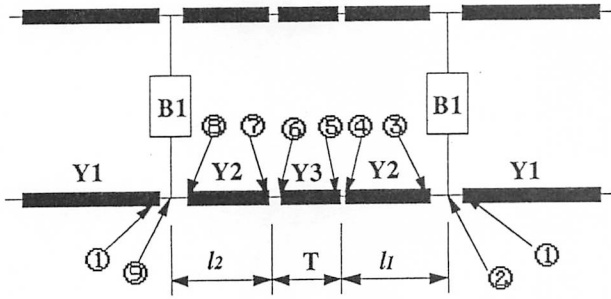


図2 ピルボックス型高周波窓の等価回路

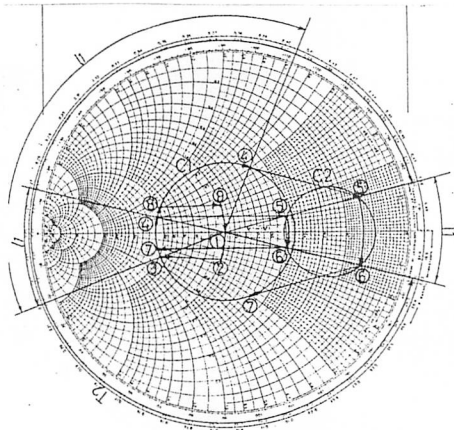


図3 スミスチャート上での整合解 (Admittance chart.)

$l_1=15.8, 61.0\text{mm}, d=190\text{mm}, T_1=3.0\text{mm}, \epsilon_r=9.9,$   
 $B_1/Y_1=0.318, Y_1/Y_2=1.97, Y_3/Y_2=4.37, f=1296\text{MHz}.$

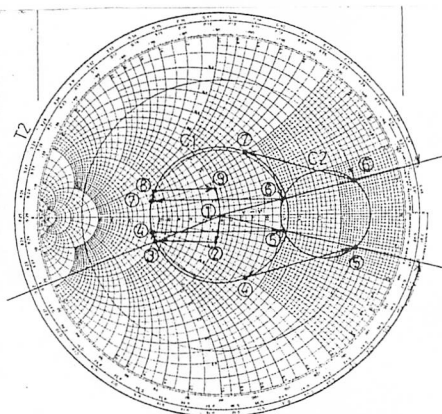


図4 スミスチャート上での整合解 (Admittance chart.)

$d=190\text{mm}, T_2=33.2\text{mm}, \epsilon_r=9.9, B_1/Y_1=0.318,$   
 $Y_1/Y_2=1.97, Y_3/Y_2=4.37, f=1296\text{MHz}.$

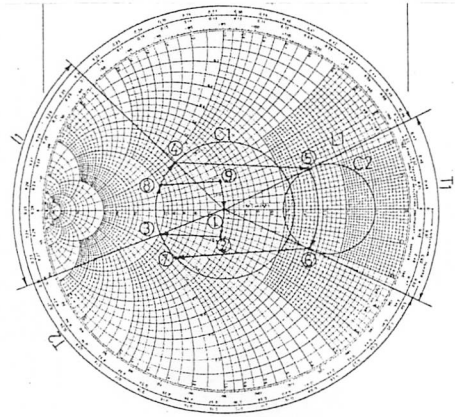


図5 スミスチャート上での整合解 (Admittance chart.)

$l_1=29.8\text{mm}, d=190\text{mm}, T_{1\text{max}}=5.45\text{mm}, \epsilon_r=9.9,$   
 $B_1/Y_1=0.318, Y_1/Y_2=1.97, Y_3/Y_2=4.37, f=1296\text{MHz}.$

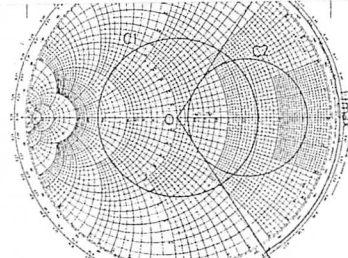


図6 dを増加させたときのC1, C2の変化 (Admittance chart.)

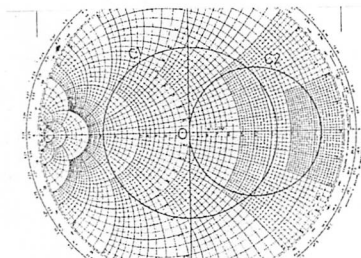


図7 dを増加させたときのC1, C2の変化  
 C2が中心Oを通る場合 (Admittance chart.)

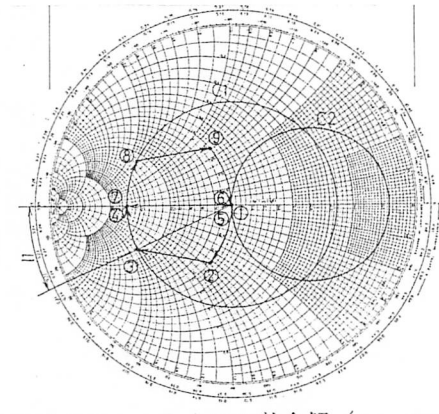


図8 スミスチャート上での整合解 (Admittance chart.)

$l_1=146.4\text{mm}, d=254.1\text{mm}, T_1$ は任意の値,  $\epsilon_r=9.9,$   
 $B_1/Y_1=0.736, Y_1/Y_2=2.21, Y_3/Y_2=3.67, f=1296\text{MHz}.$

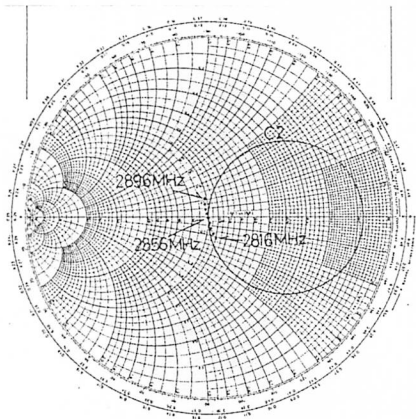


図9 図2上の⑤でのアドミタンス  
Sバンド (f=2856±40MHz) 2856MHzで進行波解

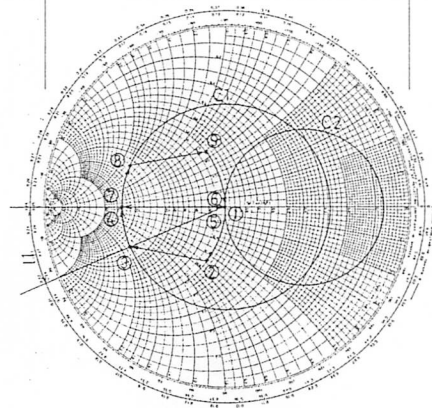


図12 進行波型の解 (Admittance chart)  
導波管: WR284, f=2856MHz  
d=114.1mm, εr=9.8, B1/Y1=0.677, Y1/Y2=2.42, Y3/Y2=3.66  
Tは任意の値

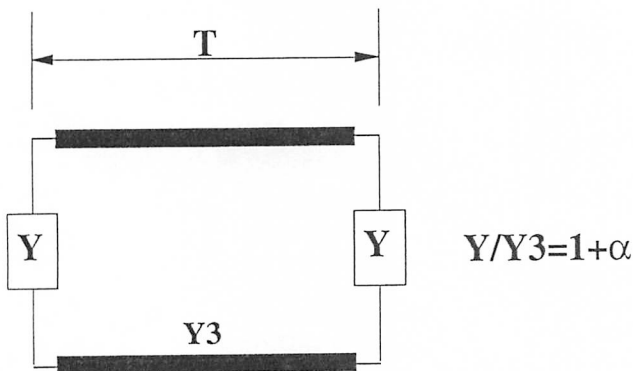


図10 進行波解からの微小変化 (周波数等)  
に対する等価回路

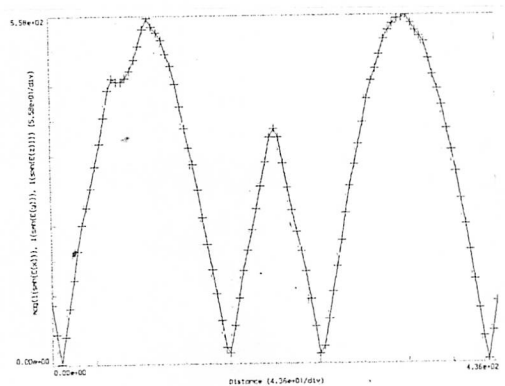


図13 Lバンド従来型高周波窓の電場  
横軸: 導波管方向の距離 (中心にセラミック有り)  
縦軸: 電場の大きさ (計算値)

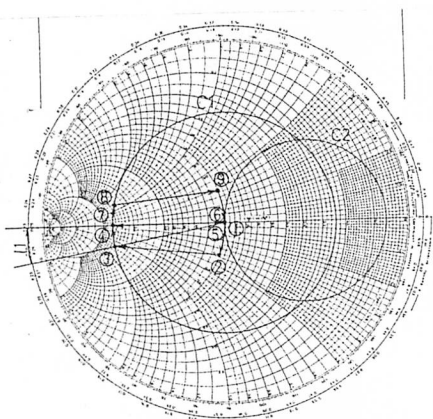


図11 進行波型の解 (Admittance chart)  
導波管: WR650 の1/2の高さ, f=1296MHz  
d=197.5mm, εr=9.9, B1/Y1=0.375, Y1/Y2=3.67, Y3/Y2=4.22  
Tは任意の値

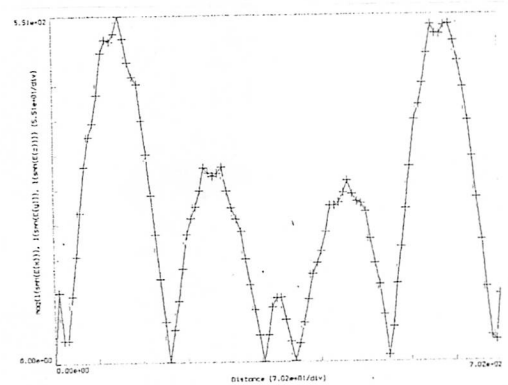


図14 Lバンド進行波型高周波窓の電場  
横軸: 導波管方向の距離 (中心にセラミック有り)  
縦軸: 電場の大きさ (計算値)