C バンド大電力高周波窓の開発*

道園真一郎^{*1}・松本 利広^{*1}・中尾 克己^{*1}・竹中たてる^{*1}
柿原 和久^{*1}・吉田 清彦^{*2}・福田 茂樹^{*1}

(受理2003年11月28日, 掲載決定2004年1月10日)

Development of C-band High-power rf Window

Shinichiro MICHIZONO^{*1}, Toshihiro MATSUMOTO^{*1}, Katsumi NAKAO^{*1},
Tateru TAKENAKA^{*1}, Kazuhisa KAKIHARA^{*1},
Kiyohiko YOSHIDA^{*2} and Shigeki FUKUDA^{*1}

^{*1}High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki 305-0801

^{*2}Mitsubishi Electric Corporation, Amagasaki, Hyogo 661-8661

(Received November 28, 2003, Accepted January 10, 2004)

High power c-band (5712 MHz) rf system (40 MW, 2 μ s, 50 Hz) is under consideration for the electron-linac upgrade aimed for the super KEKB project. An rf window, which isolates the vacuum and pass the rf power, is one of the most important components for the rf system. The window consists of a ceramic disk and a pill-box housing. The mix-mode rf window is designed so as to decrease the electric field on the periphery of the ceramic disk. A resonant ring is assembled in order to examine the high-power transmission test. The window was tested up to the transmission power of 160 MW. The rf losses are also measured during the rf operation.

1. 序 論

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の電子・陽電子線形加速器では, C バンド (5712 MHz) 高周波源によるエネルギー増強を検討している¹⁾. 計画では, C バンド 50 MW 大電力クライストロン (使用ピーク電力 40 MW, 2 μ 秒, 50 pps) から導波管, 高周波窓, パルス圧縮増幅器 (SLED¹⁾: SLAC Energy Doubler) を通じて加速管に高周波を導入する. ここで, 高周波窓とは, 真空を保持し高周波を通過させるもので, アルミナセラミック円板とピルボックスハウジングからなる. 現在使用されている S バンドクライストロン (2856 MHz, ピーク電力 50 MW, 4 μ 秒, 50 pps) においては, 高周波窓の破壊がクライストロンの破損原因の一つとなってお

り²⁾, 高周波窓の開発は高周波システムの発展のためには重要な役割を担っている. 高周波窓の破壊とは, アルミナセラミック端部からの高周波電界による沿面放電により生じる貫通孔の生成等をさす.

本報告では, C バンド用大電力高周波窓の設計, および大電力通過試験の結果についてまとめる. 大電力試験のために, クライストロンからの高周波出力を重畳するレゾナントリングを製作した. これについても報告する.

2. 高周波窓の開発

設計にあたっては, S バンドの高周波窓を参考にしていく. この高周波窓は, レゾナントリングの試験で 200 MW 以上の通過試験実績があり, 高周波窓の交換の平均故障間隔 (MTBF: Mean Time Between Failure) は 10 万時間を越えている²⁾. 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

* 平成15年11月14日 第44回真空に関する連合講演会で発表

^{*1} 高エネルギー加速器研究機構 (〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1)

^{*2} 三菱電機通信機製作所 (〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1)

ていると考えられており、端部の電界は充分小さい方が望ましい。

今回のCバンド高周波窓では、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。Table 1に示すように、Sバンド高周波窓のセラミック（直径84 mm、厚さ3.2 mm）表面での50 MW通過時の最大電界は5.5 MV/m程度で、端部では1.7 MV/m程度である。Cバンド高周波窓でこれらの値を上限とすると、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るため、高周波窓での伝搬可能な高周波モードが複数存在（ TM_{11}^o モードおよび TE_{11}^o モード）する。これらを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³⁾）。

セラミックについては、運転周波数付近に寄生発振モードが存在しないように選択し、直径78 mm、厚さ4 mmとした。材質は、Sバンドの高周波窓で実績のある高純度アルミナセラミック HA-997⁴⁾を採用した。

高周波窓は半径の異なる複数個の円筒の組み合わせとした。設計のパラメータはFig. 1に示す5つである。Sバンド高周波窓のように、波長に対して形状が小さく伝搬可能な高周波モードが単一（ TE_{11}^o モード）の場合と異なり、2つのモードについて最適化を行う必要があるためパラメータを多くとる必要があった。高周波計算ソフト HFSS を使って計算を行い、低い高周波反射が得

Table 1 Rf field and bandwidth of the conventional S-band pill-box window

Electric field at the center of the ceramics	3.7 [MV/m@50 MW]
Electric field at the edge of the ceramics	1.7 [MV/m@50 MW]
Maximum electric field on the ceramics	5.5 [MV/m@50 MW]
Bandwidth (VSWR < 1.2)	600[MHz]

Fig. 1 Schematic drawing of the c-band mix-mode window. Five parameters are optimized by simulation.

られる部分で最適化の計算をすすめ設計値を決定した。

Fig. 2に示す通り、電界強度はSバンドの高周波窓より2割程度低減されている。

Sバンド高周波窓での通過電力50 MWと同じセラミック表面電界となるのはCバンド高周波窓で約70 MWの電力に相当するということであり、高周波運転での余裕は大きくなっている。また、端部についてはSバンド高周波窓の半分程度の電界強度となっている。これまでのSバンド高周波窓ではセラミック部分で定在波となっており、これに対してCバンド高周波窓ではセラミック部分が進行波になるような最適化がなされ、かつ、2つの伝搬高周波モードを適切に混在させているためである。

計算結果をもとに高周波窓を製作し、運転周波数で高周波反射がもっとも小さくなるような調整を行った。高周波窓の高周波通過特性の測定結果をFig. 3に示す。VSWR（電圧定在波比）が1.2以下となるような帯域は210 MHzあり、クライストロンの高周波帯域の数10 MHzより十分広い。

Fig. 2 Rf fields of S-band and C-band windows on the ceramic surface. The tangential ($E_{//}$) and total (E_T) fields are shown.

Fig. 3 Measured bandwidth of the mix-mode window.

Fig. 4 C-band resonant ring together with the evacuation pumps.

3. レゾナントリングによる大電力試験

3.1 レゾナントリング

大電力試験を行うためにレゾナントリングの設計も行った。レゾナントリングでは、クライストロンからの高周波出力を周回・重畳させることにより、高周波周回電力をクライストロンの10~20倍にすることができる。レゾナントリングの特性は、主として高周波分配器（ハイブリッド）の結合度により決まる⁵⁾。今回は14 dBの結合度とした。このときの周回倍率は計算によると18倍程度となる。Fig. 4にレゾナントリングの模式図を示す。

Fig. 5 Vacuum pressure and operation rf power at the resonant ring.

Fig. 6 Rf losses at the rf window during rf operation.

レゾナントリングでは、一周の電気長が波長の整数倍となる必要がある。レゾナントリングの電気長は、粗調整としてスペーサをいれ、微調整として運転周波数を変更し調整した。今回の高周波窓の場合、レゾナントリングの運転周波数は5710.2 MHzであった。レゾナントリングでは、3001/sの非蒸発型Getterポンプ（NEG）および601/sのイオンポンプを高周波窓の両側に配置して排気し、到達圧力は 1×10^{-7} Pa以下である。

3.2 大電力試験

大電力試験は160 MW (2 μ 秒, 50 pps) まで行った。この時の電界強度は、クライストロンの実際の運転電力(40 MW)に対し全反射が起こった場合の最大電界に対応する。高周波周回電力とレゾナントリング内の真空圧力の時間変化をFig. 5に示す。高周波通過時の真空圧力も 1×10^{-6} Pa以下となっている。

また、セラミック端部に流した冷却水の温度上昇から、高周波窓での高周波損失を求めた。通過電力と高周波窓での電力損失の関係をFig. 6に示す。Sバンドの高

周波窓は10 kW 通過時に10 W の損失であったので、C バンド高周波窓でもほぼ同様の高周波損失であるが、セラミックの厚さはC バンド高周波窓の方が30%程度厚いため単位厚さあたりの高周波損失は小さくなっており、セラミック内部でも電界が低減されていることが確認された。試験後の高周波窓セラミックに汚れ等はみられなかった。

4. 結 論

電子・陽電子線形加速器のC バンド化計画のための大電力高周波窓（仕様通過電力40 MW, 2 μ 秒, 50 pps）を設計した。ミックスモード型窓とすることで、放電の原因となる端部の電界をS バンド高周波窓と比較して半減させた。また、全体の電界強度も約2割低減させることができた。高周波窓を試験するために新たにレゾナ

ントリングを設計した。レゾナントリングでは高周波通過中も 10^{-6} Pa 以下を維持し、高周波窓を160 MW まで周回させることができた。今後は、200 MW 以上の大電力試験を行い、高周波窓の破壊のしきい値を調べる予定である。

〔文 献〕

- 1) T. Kamitani and T. Suwada: Proc. of the 2003 Particle Accelerator Conference (PAC 2003), Portland, U.S.A., 2003.
- 2) S. Michizono, Y. Saito, T. Matsumoto, S. Fukuda and S. Anami: Appl. Surf.Sci. 169-170 (2001) 742.
- 3) S. Y. Kazakov: KEK Preprint 98-120, 1998.
- 4) 日本特殊陶業株 (NGK SPARK PLUG CO. LTD.).
- 5) 齊藤芳男, 松田七美男, 穴見昌三, 福田茂樹, 設楽哲夫, 花木博文, 本間博幸, 中尾克己, 片桐広明, 金原 繁, 田中治郎: 真空, 30 (1987) 406.