

# Cバンド-レゾナントリングを用いた大電力試験

竹中たてる<sup>1</sup>、道園真一郎、松本利広、中尾克巳、大越隆夫、柿原和久、福田茂樹  
高エネルギー加速器研究機構 加速器第三研究系  
〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

## 概要

今回、レゾナントリングを用いてCバンド(5712MHz)の大電力高周波窓について試験評価を行った。ここではレゾナントリングの設計・構成、同調周波数の調整、および直管を用いたコンディショニングについての特徴をまとめた。

## 1. はじめに

KEKB入射器において検討しているCバンド化計画<sup>(1)</sup>では、40MWの高周波出力を加速管に投入する。

クライストロン交換を考えると導波管系には高周波窓は必須である。通常大電力クライストロンでは2個の高周波窓が使われており、1個の高周波窓で50MW透過の実績は充分でない。一方、保守や真空系の簡便さから50MW透過能力のある1台の高周波窓の使用が望ましい。以上を考慮してS.Y.Kazakovにより提案されたミックスモード(TE<sub>11</sub>+TM<sub>11</sub>)型高周波窓をCバンドに応用し、セラミック表面とセラミック端での電界を下げた高周波窓を開発した<sup>(2)</sup>。この窓の大電力での性能を調べるためにレゾナントリングを組み立てて、試験を行った。

今回はレゾナントリングを用いて全反射を起こした場合の最大電界に相当する160MWの通過電力試験を行った。レゾナントリングでは、クライストロンから発生する2倍、3倍の高調波はカットされるが、基本波出力を同期・重畳させることにより、基本波は10~20倍の通過電力を得ることができる。このため、大電力高周波源で用いられる各種部品(高周波窓、フランジ、導波管等)の開発に適しており、今回は導波管回路に用いる高周波窓の評価を行った。ここではレゾナントリングの共振周波数の最適化、直管および、高周波窓の大電力試験などについて報告する。

## 2. レゾナントリングの設計と調整の概要

レゾナントリングは、クライストロン出力の10~20倍の高周波を周回させるので、放電抑止のために真空圧力を充分低く(運転圧力で、10<sup>-6</sup>Pa程度以下)し、放電の可能性のある部品は極力使用しないことが望ましい。今回のレゾナントリングでは、Sバンドのレゾナントリングで放電や放射線発生が確認されているフェーズシフタは使用せず、周長をスペーサで変更し、微調整は運転周波数を変更するこ

とで対応する。最初に空気中で高周波窓などの試験部品ではなく直管を挿入し、スペーサと共振周波数の関係を測定しておくことが必要となるが、その後は電気長を比較することによりあらかじめ最適なスペーサを事前に選択可能となる。

真空圧力を低く抑えるため、試験部品の前後に排気速度75l/sイオンポンプ2台と300l/sのNEGポンプ2台を配置する。また、レゾナントリングでは順方向だけでなく、反射電力も増大するので、これを抑えるためにスタブチューナを配置した。クライストロン出力をレゾナントリングに入力する部分のハイブリットについては、高周波損失から最適化を測っている。

周長は、上記の排気ポート、スタブチューナやハイブリットのスペースを確保して、約3.7mとした。これは、管内波長で60波長程度であり、一周あたりの高周波損失は2.7%となる。この条件下では、図1に示すように、ハイブリットの結合度が11~15dbのときに増倍率が大きくなる。今回は、14dBのカップリングとした。

このような構成のレゾナントリングでは、例えば、周波数を±10MHz(±0.17%)可変とすると、14mm程度は周波数で調整できる。

クライストロンは、狭帯域デバイスであるが、レゾナントリングの最大定格を300MWとした場合も、レゾナントリングのゲインを15倍と低く見積もってもクライストロン出力は20MW程度であるため、充分可能である。

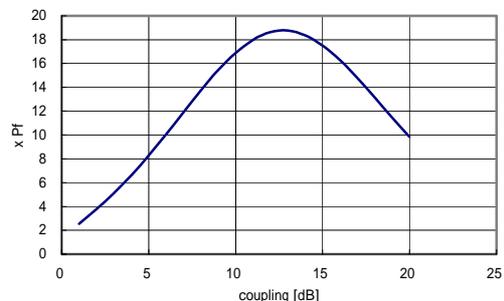


図1: 周回損失2.7%時の周回電力利得と結合度

スペーサとして、10mm, 15mm, 20mm, 25mmおよび37mmのものを用意した。このスペーサと、運転周波数の最適化により、挿入する全ての高周波機器の位

<sup>1</sup>E-MAIL: tateru.takenaka@kek.jp

相変化に対応する調整が可能である。

### 3. レゾナントリングの構成および調整

レゾナントリング（図2）は5スタブチューナ、60dBベータホールカップラ、ハイブリッド、高周波窓、導波管等などで構成され、ほかに水冷ダミーと真空ポンプ、真空ゲージなどが付いている。フランジ<sup>(3)</sup>はCバンドの導波管組立てと同じ仕様のものを用いている。

レゾナントリングの全周長にわたり $30 \pm 0.1$  l/minの冷却水を循環させた。高周波窓のセラミック面の異常発光を確認できるようにHバンドに付属するのぞき穴にCCDカメラを設置している。

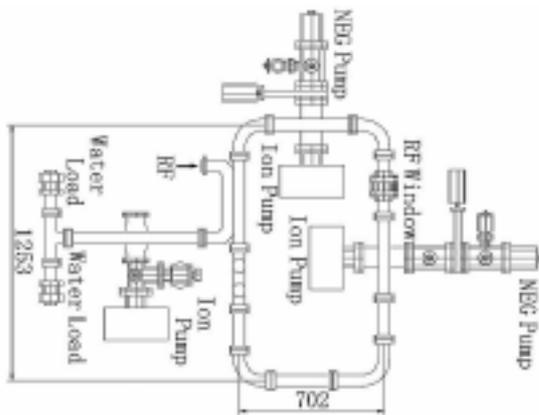


図2：レゾナントリングと真空排気系

レゾナントリング本体は15mmのアルミ平板の上に据付固定されており、低電力測定はサブスタークライストロン<sup>(4)</sup>の出力を1kW程度として導波管スペーサの同調周波数を測定した。レゾナントリング低電力測定の後、放射線遮蔽コンクリート室に移して直管で240MWまでのコンディショニングを行い、高周波窓では160MWまでの試験を行った。

### 4. レゾナントリングの共振周波数

直管にて周長がNとなるように周波数とスペーサ0、10、15、20mmで共振周波数を測定した（図3）。

スペーサを5mm×2変えたとき共振周波数が11MHz変化した。従ってスペーサの精度で合わせておけば周波数微調で調整が可能であることが確かめられた。

真空中における直管での共振周波数は空気と誘電率に差があるため、スペーサ0mmの場合、空気中では5749.3MHzで、真空中は5751.06MHzとなり、1.7MHz共振周波数が高くなった。

温度に対する共振周波数の変化（図4）は冷却水25℃に対して冷却水30℃を流したときの方が0.47MHz共振周波数が低くなった。

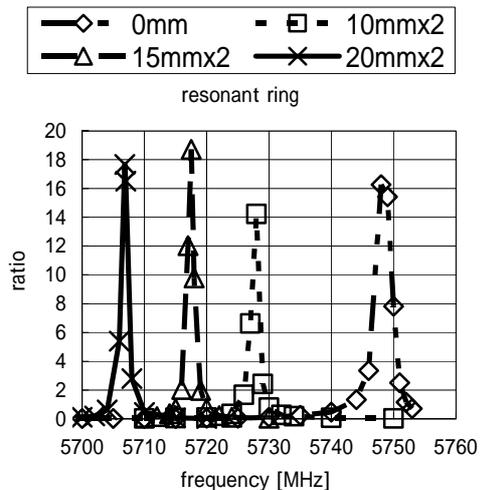


図3：スペーサによる同調周波数

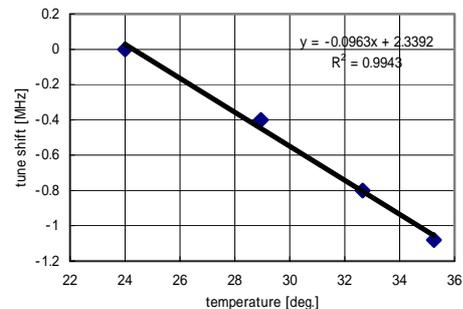


図4：温度に対する共振周波数の変化

### 5. 直管を用いたコンディショニング

最初に高周波窓の代わりに直管を使用し、レゾナントリング単体のコンディショニングを50MWクライストロン（50MW、2μs、50pps）<sup>(4)</sup>で行った。

予定していた2μs、50pps、200MW（図5）（クライストロン出力11.8MW）に到達するまで10日間のコンディショニングを行った。このとき入射電力とレゾナントリングの倍率は18.2倍となる。

クライストロン出力2μs、50pps、6MW以上でコンディショニング中（レゾナントリングが100MW）はフランジの温度上昇があり、200MWでは15℃程度の温度上昇となり、導波管自身も熱を持ち同調がずれるので適宜、周波数の調整を行った。平均通過電力16kW時に導波管表面温度上昇は12℃でフランジは17℃であった。熱効率が様でなく、導波管で温度差ができ同調周波数がずれた。

200MWで測定したときの放射線量はフランジ付近が他より高く、2~3μS/hを示した。試験の結果レゾナントリングのフランジ構造（RF/真空）に問題ないことを確認した。

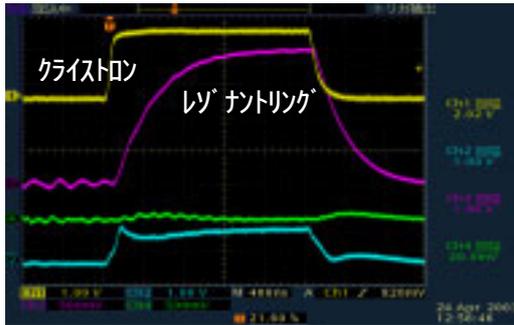


図5：200MWパルス波形

## 6. 高周波窓の試験

直管からミックスモード高周波窓<sup>[2]</sup> (図6) に交換した。37mmスペーサを用い、この時の運転周波数は5709.7～5710.2MHzであった。出力を上げながら目標である160MWまでコンディショニングを行ったが、直管で200MWまでのコンディショニングを行っていたので高周波窓ではガス放出が非常に少なく2日間で窓の高周波損失などの評価を行うことができた。

窓の高周波損失試験は窓の冷却水入出力に設置した温度計で差を測定しその差から発熱を算出した。図7に示すように平均通過電力10kWで9.6Wの損失があった。セラミックの厚さは現在使用しているSバンドの従来の導波管高周波窓に使用されているセラミックより25%厚いが、損失は同程度なので熱的に40MW、2μs、50ppsでも充分であると考えられる。

50MW程度から窓で対称形の発光が観察された。これは、Sバンドで数MWの通過電力から発生する電子衝撃によるアルミナのルミネッセンスである。

160MW周回中も放電時以外は放射線発生は数μSv/h以下であり、Sバンドでの同様の試験で得られる値より一桁程度低い値となっている。これは進行波型窓で電界を抑えているために局所的な放電が起こりにくくなっているためとも考えられる。そして、窓本体の真空漏れ、目視異常もなかった。

今後、この高周波窓の試験を250MW程度まで行うことを考えている。

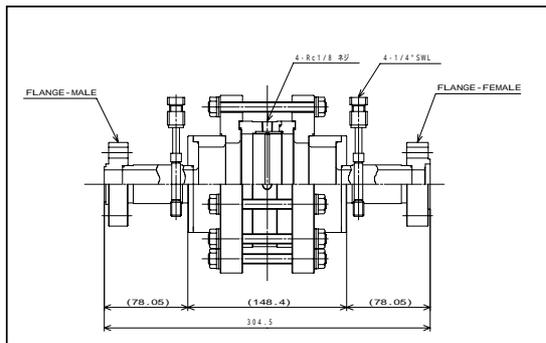


図6：ミックスモード高周波窓

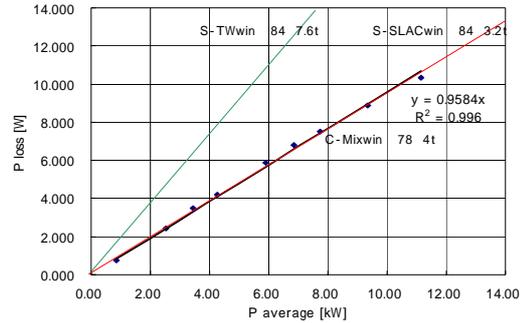


図7：平均通過電力と高周波損失

## 7. まとめ

直管の試験では200MWまで試験を行い、最大240MWを記録した。また、Mix-Mode高周波窓に対して160MWまで通過試験を行った。これは40MWでクライストロンを運転したときの完全反射に電界強度最高値は対応するもので、Sバンド高周波窓での経験からすれば、これで少なくとも40MWの運転には問題ないと考えられる。

高周波窓のコンディショニングはガス放出も非常に少なく真空が安定していた。これは直管でガス出しをしたためと考えられる。

## 謝辞

今回のCバンドレゾナントリング大電力試験は三菱電機システムサービス株式会社の方に運転、組立て等で助力を頂いたのでこの場をおかりして感謝を申し上げます。

## 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] 道園真一郎,他, “ Cバンド・ミックスモード高周波窓の開発 ”, ibid.
- [3] 柿原和久,他, “ C-band矩形導波管用フランジの検討 ”, ibid.
- [4] 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源(I)-低電力励振系の構築- ” 及び “ 同(II)-大電力試験- ”, ibid.