

DIELECTRIC CONSTANT MEASUREMENT USING RESONANT FREQUENCIES FOR MINIMIZING THE REFLECTION OF PILLBOX RF WINDOWS

H. Ao^{*A)}, H. Asano^{A)}, J. Tamura^{A)}, N. Ouchi^{A)}, K. Takata^{B)}, F. Naito^{B)},

^{A)}Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shirakata-shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

^{B)}High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

In the case of the RF window operated with the standing-wave cavity coupled to waveguides using coupling apertures, the reflection of the RF window affects the total coupling factor (voltage standing wave ratio, VSWR) consisted of the RF window and the cavity. Hence, the reflection (VSWR) of the RF window should be minimized not to change the cavity VSWR optimized separately, and to prevent standing waves between the RF window and the cavity. This time, it was found that the VSWR of the RF window depends on the manufacturing lot of the alumina ceramic even though the same type ceramic material (NTK HA95) is used. For minimizing the VSWR of the pillbox-type RF window, this report proposes that the dielectric constant of the ceramic is measured directly using the resonant frequency in the fabrication process of the RF window. In this work, three RF windows are fabricated additionally using the same type ceramic (NTK HA95), the small VSWR (< 1.05) could be achieved using this procedure. This result also shows that the dielectric constant increases linearly with increasing the density.

共振周波数を用いた誘電率測定とRF窓の反射低減

1. はじめに

アイリスで導波管と結合した定在波形空洞にRF窓を取り付ける場合、RF窓の反射(VSWR)により、クライストロン側から見た負荷全体(RF窓と空洞)のVSWRが変化します。一般的に導波管と加速空洞の結合には、アイリスまたはループ形のカップリングが用いられ、各々に長所短所がある。アイリス形はカップリングの調整はできないが、構造が単純である。一方、ループ型はカップリングの調整が可能だが、構造が複雑となる。負荷全体(RF窓と空洞)のVSWRを調整する場合、ループ形カップリングと(同軸形)RF窓の組み合わせでは、ループのカップリング調整でRF窓の反射分を含めて調整可能である。しかし、アイリス形を用いる場合には、冒頭で述べたようにRF窓の反射に注意する必要がある。

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)用のAnnular-ring Coupled Structure (ACS)形空洞^[1]では、構造を単純にするため導波管との結合にアイリス形を採用した(Fig.1参照)。RF窓の主なパラメータをTable 1に示す。

表 1: J-PARC ACS 空洞用 RF 窓の主なパラメータ

Frequency	972 MHz
Peak power	2.0 MW
Pulse length	600 μ s
Repetition	50 Hz
Average power	60 kW
Ceramic material	Alumina 95% (NTK ^[2] HA95)

次に、RF窓の反射による影響を見るため、VSWRの

*hiroyuki.ao@j-parc.jp

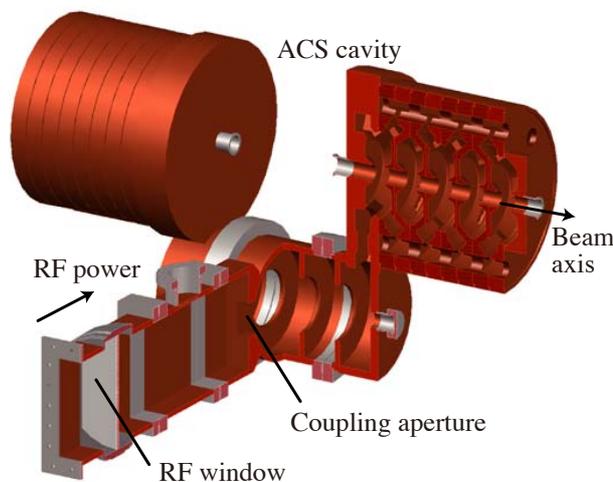


図 1: ACS 空洞での RF 窓と空洞との結合用開口部の構造および位置関係

異なる2つのRF窓を用いて負荷全体のVSWRを比較した結果をTable 2に示す。RF窓のVSWRが大きくなると、空洞全体のVSWRが小さくなるのが分かる¹。RF窓の反射の影響を抑え、空洞単体で調整したVSWRを変化させないようにするためには、RF窓単体のVSWRを小さく抑える必要がある。

RF窓のVSWRが変動する一つの要因としてセラミックの誘電率が考えられる。セラミックは焼成工程で大き

¹ここでVSWRが増加するか減少するかは、空洞からの反射波とRF窓の反射波の位相差に依存する。空洞とRF窓はそれぞれ別々に製作した後、フランジで接続される。その際、空洞に対してRF窓がどれだけ離れた位置に取り付けられるかで、この位相差つまりVSWRが増加するか減少するかが決まる。

表 2: RF 窓 (RFW) 単体での VSWR 測定値 (#A と #B) および空洞に取り付けた際の全体 (RF 窓+空洞) の VSWR 測定値

ID of RFW	VSWR		
	RFW only	Cavity only	Total
#A	1.07	1.58	1.47
#B	1.16	1.58	1.31

く収縮するため、収縮の度合いによって誘電率が変動する可能性がある。Table2に示したRF窓#Aと#Bの場合、同一寸法、同一素材のセラミックであるがVSWRが約0.1異なっていた。そこで、RF窓製作工程の途中でセラミックの誘電率を共振周波数を用いて測定し、誘電率に応じてRF窓寸法を調整することで、RF窓のVSWRを小さく抑えることを試みた。本手法は周波数帯に依らず、正確な誘電率が分からないセラミック材を用いたピルボックス形RF窓（部分的に空洞を構成できればピルボックス以外でも可）に応用可能な手法である。

今回、10枚焼成したセラミック材 [日本特殊窯業 (NTK) 製 HA95] のうち、比重が 3.509, 3.491, 3.483 である3枚を用いてRF窓を製作した。セラミックの誘電率に応じて、RF窓寸法の調整を行い、RF窓のVSWRを小さく抑えることを試みた。また共振周波数から求めた誘電率とセラミックの比重との相関を調べた。本報告ではこれら誘電率を共振周波数を用いて測定した結果、およびその結果を用いたRF窓寸法決定の手順、組立後のRF窓のVSWR測定結果について報告する。

2. 共振周波数を用いた誘電率の測定とピルボックス長さ L の決定

今回製作したRF窓の構造と寸法を Fig. 2 に示す。ま

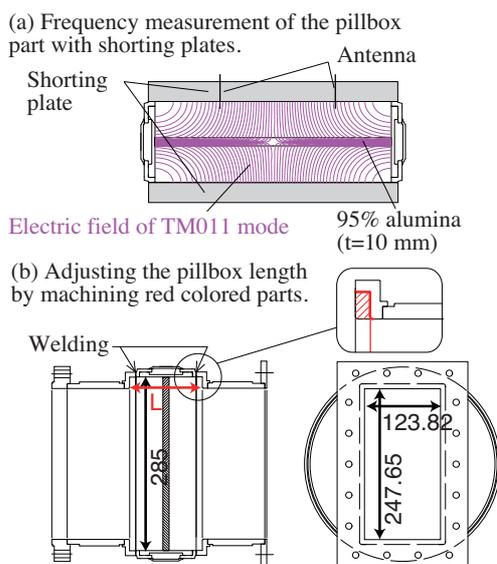


図 2: RF 窓の構造と各部寸法

ずセラミックとスリーブをロウ付けにより接合したピ

ルボックス部に、ショート板を組み合わせることで共振周波数を測定した。誘電率の決定にはセラミック内に電場が集まり、かつ SUPERFISH を用いて精度の高い周波数計算が可能な TM011 モードを用いた [Fig. 2(a) 参照]。セラミックの誘電率は周波数に依存するが、後述のとおり TM011 モードの周波数は約 1230 MHz と運転周波数 972 MHz に近く、問題ない。

Fig. 3 に周波数測定の様子と測定結果を示す。周波数

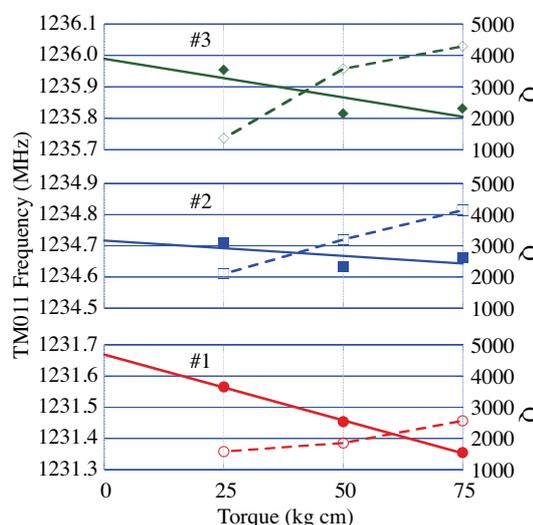


図 3: 上:RF窓ピルボックス部の高周波測定(周波数測定)、下:周波数とQ値(点線)の締め付けトルクに対する変化

はショート板の締め付けトルク 25, 50, 75 kg·cm と変化させて3点の測定を行い、0 kg·cm の外挿値を測定値とした。その際、#1 に比べトルクに対して周波数変化がリニアでない#2, #3 のデータについては 75 kg·cm のデータを外挿に用いるか否か²で 0.1 MHz 程度の誤差が生じうる。しかし、次に述べる比誘電率に換算すると 0.01 程度の差であり問題ないと判断した。

また、Fig. 3 に Q 値の測定結果をあわせて示した。75 kg·cm においてもショート板とスリーブ間の高周波的な接触が十分でなく、測定された Q 値は飽和していないが³、 $\tan \delta = 5 \times 10^{-4}$ の場合の SUPERFISH の計算値⁴ $Q = 3800$ と比べ概ね近い数値である。

²定性的には、締め付けによりショート板間の距離が小さくなると周波数は下がる方向であるため。

³ここでは周波数測定が目的であり、 $\tan \delta$ を求めることは意図していない。締め付け過ぎるとスリーブ部分が変形してしまうため締め付けトルクは 75 kg·cm にとどめた。

⁴TM011 では空洞内損失の 8 割以上が $\tan \delta$ に起因するため、計算値は $\tan \delta$ で大きく依存する。Q の飽和値が測定できれば、本測定で $\tan \delta$ の概算も可能と思われる。

次に SUPERFISH で計算した TM011 モードの周波数と比誘電率との関係を Fig. 4 に示す。Fig. 4 に示すよう

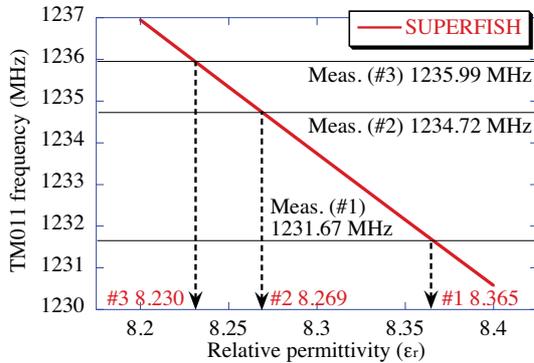


図 4: TM011 モードの周波数から求めた比誘電率

に、3 台のピルボックス部の測定結果 (#1 1231.67 MHz, #2 1234.72 MHz, #3 1235.99 MHz) から、#1, #2, #3 の比誘電率はそれぞれ #1 8.365, #2 8.269, #3 8.230 と求められた。

最後に HFSS を用いて、それぞれの誘電率でピルボックス長さ L と VSWR の関係を計算した結果を Fig. 5 に示す。この結果から #1, #2, #3 のピルボックス部の長さ

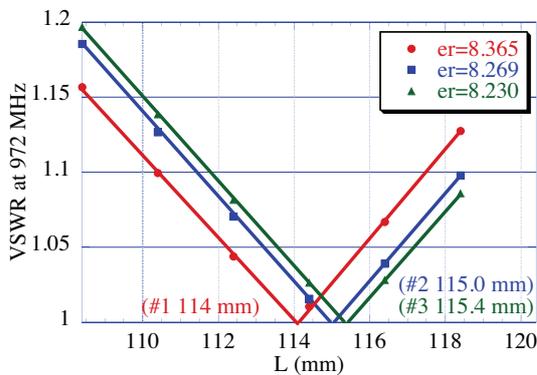


図 5: それぞれの誘電率でのピルボックス長さ L に対応した VSWR 計算値 [Fig. 2(b) 参照]

L は、それぞれ $L = 114.0, 115.0, 115.5$ mm に決定した。長さ L は、ピルボックスと導波管の接続部を切削することで調整した [Fig. 2(b) 参照]。

3. 測定結果

完成した RF 窓の VSWR 測定結果を Table 3 に示す。Table 3 に示すように、RF 窓単体で十分小さな VSWR (<

表 3: VSWR 測定結果 [RF 窓 (RFW)、空洞、全体 VSWR]

ID of RFW	L (mm)	RFW	Cavity	Total
#1	114.0	1.02	1.49	1.46
#2	115.0	1.03	1.69	1.64
#3	115.5	1.03	1.66	1.60

1.05) を実現し、RF 窓を取り付けた際の VSWR の変化を小さく (< 0.06) 抑えることができた。

次に 3 つのセラミック材について、誘電率と密度との関係を Fig. 6 に示す。この結果から、密度が大きいも

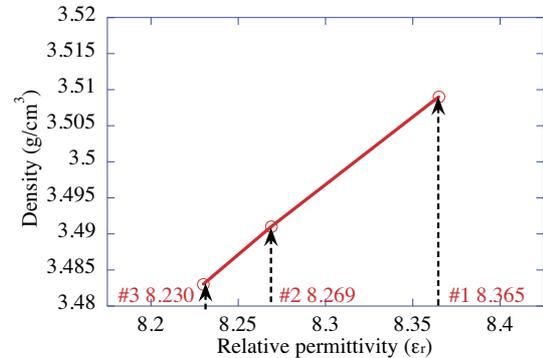


図 6: 誘電率と密度の相関

のが誘電率が高くなるという傾向が分かる。これは物理的にも妥当な傾向と言える。

4. まとめ

RF 窓の製作過程で固有モードを用いて誘電率を測定し、ピルボックス部の長さ L を調整することで VSWR を 1.05 以下に抑えることができた。これにより RF 窓による (空洞単体からの) VSWR の変化を 0.06 以下に抑えることができた (Table 3 参照)。本手法は周波数帯に依らず、正確な誘電率が分からないセラミック材を用いたピルボックス形 RF 窓 (部分的に空洞を構成できればピルボックス以外でも可) に応用可能な手法である。

現状 3 点だけではあるが、誘電率と密度の比例関係が認められた (Fig. 6 参照)。データを蓄積し精度が向上すれば、密度から誘電率を予想することが出来ると思われる。この場合は固有モード測定を省略することができ、より容易に VSWR の低減が可能となる。今後の RF 窓製作では、セラミック材の誘電率と比重との相関データを蓄積していく予定である。

5. 謝辞

今回の RF 窓の製作にあたり、三菱重工業株式会社菅野東明様、比嘉究作様には RF 窓の機械設計および有意義な助言を頂き、深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] H. Ao, Y. Yamazaki, First high-power model of the annular-ring coupled structure for use in the japan proton accelerator research complex linac, Phys. Rev. ST Accel. Beams 15 (2012) 011001.
- [2] www.ngkntk.co.jp.