

Lバンド RF 窓用セラミックスの高周波誘電特性

RF DIELECTRIC PROPERTIES OF ALUMINA CERAMICS FOR L-BAND RF WINDOW

平野耕一郎^{#, A)}, 内藤富士雄^{B)}

Koichiro Hirano^{#, A)}, Fujio Naito^{B)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

Production of alumina ceramics used for L-band RF window of the coupler in J-PARC linac was discontinued. Thus, we have carried out the measurement of the RF properties of L-band RF windows made of various alumina ceramics in order to find the usable ceramic substitute for the RF window. The measured resonant frequency and Q value of TE111 mode in the cavity resonator with an alumina ceramics was compared with the values simulated by HFSS code for the estimation of the relative permittivity and dielectric loss tangent of ceramics.

1. はじめに

J-PARC リニアック空洞の入力カップラーの RF 窓は、日本特殊陶業株式会社製のアルミナセラミックス(型名 HA95 および HA997) 製である。運転周波数 324 MHz の RFQ 空洞の RF カップラーには、直径 166 mm の HA95 が使用され、DTL 空洞の RF カップラーには、直径 150 mm の HA997 が使用され、SDTL 空洞の RF カップラーには、直径 203 mm の HA95 が使用されている。更に、運転周波数 972 MHz の ACS 空洞のピルボックス型 RF 窓には、直径 285 mm の HA95 が使用されている。しかし、残念ながらこれらの RF 窓材が製造中止になったため、現在代替品を検討している。これら L バンド RF 窓材は大口径のため製作が難しい。また、メーカーのカタログに記載されているセラミックスの誘電特性は、小口径で厚さが薄い試験片を用いており、大口径で厚さが厚いものと異なる場合がある。そこで、今回は、J-PARC リニアックで最も大きな直径 285 mm を有する RF 窓材について種々のセラミックス素材で試作し、空洞共振器を用いて比誘電率および誘電正接を測定した結果について報告する。

2. 比誘電率および誘電正接の測定

大電力 RF が透過するカップラーの RF 窓には、窓の温度上昇を低減させるため、パワロスが小さく、熱伝導率が高い特性を有するセラミックスが使用される。また、比誘電率が設計値から違ってくると RF 窓の VSWR が悪くなるため、セラミックスの生産ロットや形状が違ってても比誘電率が変わらない品質が求められる。

各種セラミックスのカタログ値を Table 1 に示す。これらの比誘電率および誘電正接の測定には、直径数 cm、厚さ 1 mm 程度の小さな試験片が用いられている。今回の測定には、直径 285 mm、厚さ 10 mm のアルミナセラミックスを用いた。これは、ACS 空洞の RF 窓と同形状のアルミナセラミックスである。Figure 1 に測定に用いた空洞共振器を示す。外径 230 mm のアルミ製の空洞共振器は、内径 185 mm、長さ 66.1 mm の円筒空洞部を 2 個有する。それらの円筒部でセラミックスを挟み込み、円筒底辺部の両側からループ型プローブを差し込んで、TE111 モードの共振周波数および Q 値の測定を行った。

Table 1: Characteristics of Alumina Ceramics

Type number	AM997	AM997QII	A479B	A479U	A480S	SSA-S1	HA95
Manufactures	Ferrotec	Ferrotec	Kyocera	Kyocera	Kyocera	Nikkato	NTK
Alumina content (%)	99.7	99.7	99.8	99.7	99.7	99.6	95
Relative permittivity	9.7	9.7	9.8 (3.2GHz)	9.7 (3.2GHz)	9.7	-	9.2 (1MHz)
Dielectric loss tangent ($\times 10^{-4}$)	0.7~2 (10GHz)	0.2~0.25 (10GHz)	0.3 (3.2GHz)	0.2 (3.2GHz)	1 (1MHz)	-	3 (1MHz)
Thermal conductivity (W/mK)	32	33	29	31	32	35	27

[#] hirano.koichiro@jaca.go.jp

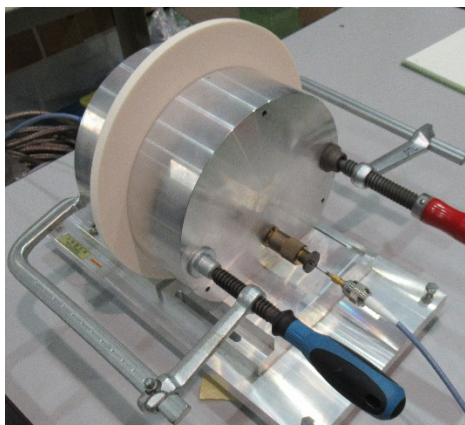


Figure 1: The photograph of a cavity resonator.

セラミックスを挟み込んだ空洞共振器の共振周波数はセラミックスの比誘電率の違いによって異なる。このとき、 Q 値はパワロスの度合いを表す誘電正接の違いによって異なる。そこで、電磁場解析コード HFSS を用い、セラミックスを空洞共振器で挟んだ状態の共振周波数と比誘電率との関係、および、 Q 値と誘電正接との関係をあらかじめ計算し、共振周波数と Q 値の測定値から比誘電率および誘電正接を求めた。

TE111 モードは空洞共振器の中央部に挟み込んだセラミックスから電磁波が漏れるため、円筒部と同心円状に電界分布を有する電波漏れの影響がない TE010 モードを用いて測定が行われる[1]。今回、TE11 モードが ACS 空洞のピルボックス型 RF 窓の円筒部に励起されることと、測定時の漏れ電波の影響が小さいことにより、空洞共振器の測定では TE111 モードを使用した。

まず、セラミックスがない空洞共振器だけの状態で TE111 モードの共振周波数および Q 値を測定し、1/8 体系で計算した TE111 モードの値と比較した。ここで、アルミ製空洞共振器の Q 値を再現するため、HFSS の空洞内面の表面粗さの値を調節して導電率を補正し、計算値が測定値と同じになるようにした。測定及び計算結果を Table 2 に示す。このとき、共振周波数の計算誤差は 1.7×10^{-4} であった。

Table 2: Measurements and Calculations for TE111 Mode in the Cavity Without an Alumina Ceramics

	Measurements	HFSS
Resonance frequency (GHz)	1478.35 ± 0.01	1478.57
Q value	17600 ± 600	17596
Roughness (μm)	-	7.4

次に、空洞共振器にセラミックスを挟んだ 1/8 体系で TE111 モードを計算した。この TE111 モードの電場分布を Fig. 2 に示す。HFSS の空洞内面の表面粗さは Table 2 に示す値を使用した。セラミックスを挟んだ状態の TE111 モードの共振周波数は ACS 空洞の運転周波数に近い 0.9 GHz である。電波漏れの影響を調べるため、Fig. 1 に示す空洞共振器からはみ

出したセラミックスを含めて、空洞共振器の外側が空気となる体系で解析を行った。Figure 3 に示すように、空洞中心から 115 mm 離れた空洞共振器端部の電界強度は空洞中心の電界強度に対して 3 桁以上低かった。また、漏れ電波を考慮した体形と空洞共振器外側を無視した体系との共振周波数の差は 1 kHz であった。空洞共振器境界部の電界は小さく、電磁波漏れによる影響は無視できると判断し、Fig. 2 に示す体形で解析を行った。比誘電率を 8 から 10 まで変えて、TE111 モードの共振周波数を計算した。共振周波数と比誘電率の関係を Fig. 4 に示す。

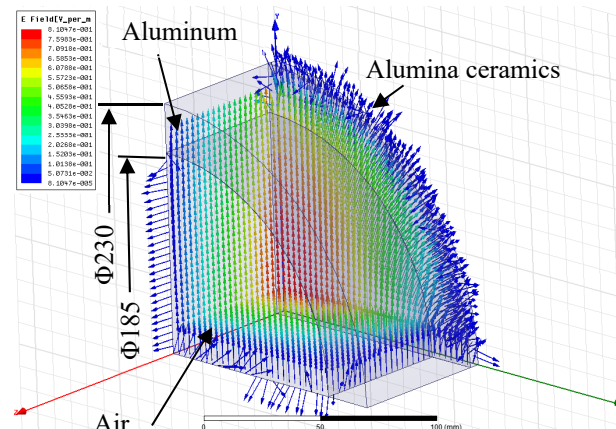


Figure 2: Electric field distribution of TE111-mode in an eighth of the cavity resonator with an alumina ceramics.

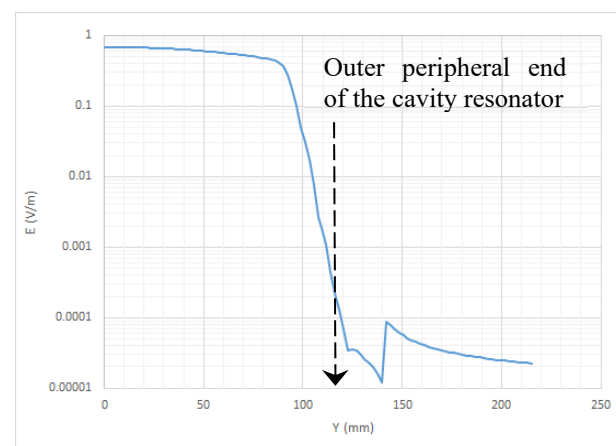


Figure 3: Electric field on a y axis in the cavity resonator with an alumina ceramics.

それから、セラミックスを空洞共振器に挟み込み、万力で締め付けて周波数および Q 値が変化しないことを確認して測定した。プローブの先端が空洞内へ突っ込み過ぎないように注意した。また、セラミックスを交換する際、プローブの位置が変わらないようにした。共振周波数と Q 値の測定結果を Table 3 に示す。測定値は、セラミックスの測定場所をずらして測定した平均値を示す。Table 3 に示す共振周波数の測定値に一致する比誘電率を Fig. 4 から求めた。最後に、上記から得られた比誘電率を設定して、誘電正接を 1×10^{-3} から 10^{-6} 台まで変えて Q 値を計算した。 Q 値と誘電正接の関係を Fig. 5 に示す。Table 3

Table 3: The Results of Measurements for Relative Permittivity and Dielectric Loss Tangent

Type number	AM997	AM997QII	A479B	A479U	A480S	SSA-S1	HA95
Resonance frequency (MHz)	902.36 ±0.01	905.70 ±0.02	905.70 ±0.01	908.76 ±0.02	905.41 ±0.01	906.23 ±0.02	947.46 ±0.01
Q value	16800 ±200	16000 ±600	3990 ±100	12800 ±100	2500 ±100	1740 ±150	3360 ±100
Relative permittivity	9.91 ±0.01	9.81 ±0.01	9.81 ±0.01	9.72 ±0.01	9.82 ±0.01	9.79 ±0.01	8.60 ±0.01
Dielectric loss angle ($\times 10^{-4}$)	0.08 ±0.01	0.12 ±0.04	2.90 ±0.05	0.35 ±0.01	4.95 ±0.05	7.6 ±0.9	3.83 ±0.05

に示す Q 値の測定値に一致する誘電正接を Fig. 5 から求めた。

アルミナ純度が 95% の HA95 の比誘電率はカタログ値に対して 8% の差があったが、アルミナ純度が高い 99.7% 以上のセラミックスの比誘電率はカタログ値に対して 2% 以内で一致していた。

誘電正接は測定時の共振周波数に依存しており、カタログ値と異なる。0.9 GHz での HA95 と A479B の誘電正接はほぼ同じであり、AM997、AM997Q II および A479U の誘電正接は HA95 の値より 1 桁低い

ことが分かった。

3. まとめ

ACS 空洞の RF 窓と同形状の大口径アルミナセラミックス(直径 285 mm、厚さ 10 mm)について、各種セラミックスを製作し、空洞共振器を用いて 0.9 GHz の比誘電率および誘電正接を測定した。

アルミナ純度が高い 99.7% 以上のセラミックスの比誘電率はカタログ値に対して 2% 以内で一致していた。

生産中止となった HA95 の代替品としては、熱伝導率が HA95 の値以上であり、かつ、誘電正接の値が HA95 の値以下を示す AM997、AM997Q II、A479B、A479U などが考えられる。特に、パワロスによるセラミックスの発熱が懸念される場所については、誘電正接が 1 桁以上低い AM997、AM997Q II および A479U の使用が考えられる。

今後、メタライズを行ったセラミックスを用いて RF 窓を製作し、ハイパワ試験を行う予定である。

謝辞

KEK の吉野一男先生には各種セラミックス材料についてご助言を頂きました。測定の助勢を行っていただいた J-PARC リニアックの根本康雄氏、小坂知史氏、不破康弘氏に感謝します。

参考文献

- [1] 小林禱夫, “TE11 モード円筒空洞共振器法による誘電体平板材料の複素誘電率測定”, 信学技報(1988) MW88-69.

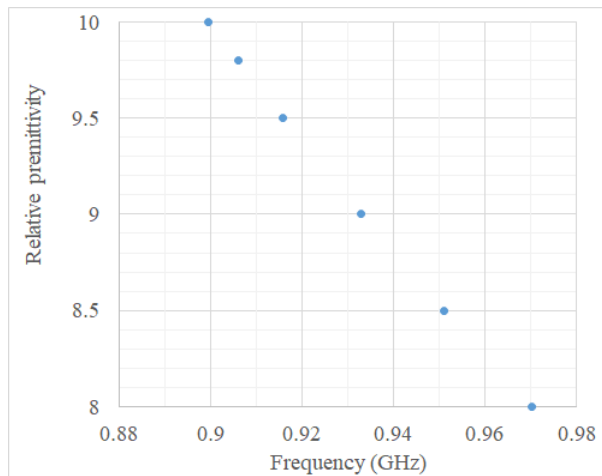


Figure 4: Resonance frequency vs. Relative Permittivity.

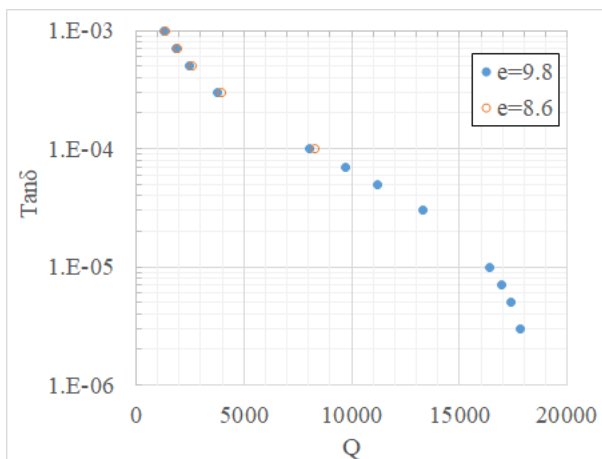


Figure 5: Q value vs. Dielectric loss tangent.