

C-band クライストロン用セラミックス容量性分圧型パルス高電圧モニターの開発

高須 ゆう子¹、新竹 積^{A)}、松本 浩^{A)}
東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1
^{A)} 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

概要

セラミックス材料は、熱膨張係数が低く、耐電圧特性も良好である。本研究では、これらの特性を生かしたセラミックス材を容量性分圧器に用いた、高精度で高安定の高電圧モニターの開発が目的であり、クライストロンのカソードに印加するパルス高電圧（350-kV, 6- μ sec）を実用測定することを目標としている。使用するセラミックスの性能として最も重要となる絶縁耐圧を正確に評価するため、独自の絶縁耐圧試験装置を開発した。これを用いた実験結果から、2種類のセラミックス材料を選定し、実機を製作中である。本論文では、設計のポイントを中心に、セラミックス材料の耐電圧評価試験結果等も含めて報告する。

1. はじめに

C-band グループ^[1]では JLC に向けて様々なコンポーネントの開発を行っており、中でもクライストロンの高効率化は最重要課題と位置付けている。高効率を目指した開発にはクライストロンの効率評価が必要であり、クライストロンに印加する電流・電圧を如何に精度良く測るかは開発の鍵となる。

C-band クライストロンの印加電圧は 350-kV, 6- μ sec のパルス高電圧であり、直接には測定できない。そこで容量性分圧器を用い、決まった比率で分圧した電圧値を観測している。一般的に用いられている容量性分圧器は 1960 年代に開発された分圧器^[2]の概念を受け継いだもので、クライストロン・オイルタンク中の絶縁油を誘電体としている。実際に市販されているパルス高電圧用容量性分圧器の一つが図 1 である。これは Stangenes 社の分圧器で、オイルタンクの絶縁油が高圧側コンデンサーの誘電体となっている。構造的には良く考えられた設計であり、多くの個所で使用され実績をあげている。



図 1：容量性分圧器 (Stangenes CVD-350)

しかし、(1)輸送やクライストロン運転時の振動で機械的変形が生じ、コンデンサーの容量が変化するため外場（浮遊容量等）が影響しやすく、設置場所によって分圧比が変化する^[3]、(2)絶縁油の温度変化や変質による誘電率の変化に伴って分圧比も変化する、(3)高インピーダンス出力のため測定用ケーブルの容量が分圧比に影響する、等様々な問題点がある。結果的に測定した電圧値の信頼性は乏しく、実際これら問題点に対して使用者がそれぞれ工夫・妥協している。

そこで、信頼のおける測定値を得るために、新たな容量性分圧器の開発に着手した。

2. 材料の選定・評価

2.1 容量性分圧器用材料の選定

新しい容量性分圧器の開発ではコンデンサーを形成する材料から見直した。使用する誘電体材料の条件として、(1)絶縁耐圧が高い(2)高誘電率である(3)温度変化が少ない(4)丈夫で経年変化が少ない(4)供給が安定していて安価である、等があげられる。これらを満たす誘電体材料の中からセラミックスに着目した。実際、セラミックスにメタライズを施した数 kV オーダーの高圧用セラミックコンデンサーが市販されており、現実的であると同時にすでに確立された技術を用いることが可能である。

2.2 自作した試験装置による絶縁耐圧試験

分圧器の設計上最も重要な性能が材料の絶縁耐圧である。各メーカーのカタログに表記している絶縁耐圧の多くは JIS の絶縁耐力試験法^[4]に従ったものであるが、これは測定環境の配慮が乏しいため材料自体の絶縁耐圧としての信頼性が少ないことや、商用周波数による測定であることから、参考値にしかならない。容量性分圧器は脱気した絶縁油中で使用するので、設計にはこれと類似した環境におけるより正確な絶縁耐圧が必要である。そこで、脱気した絶縁油中で直流電圧を印加するよう設計した絶縁耐圧試験装置を独自に製作^[5]し、この装置を用いて様々なセ

¹ E-mail: yuko@c-band.kek.jp

ラミック材料の絶縁耐压試験を行ってきた。その結果、脱気した油中における緻密な Al_2O_3 セラミックの絶縁耐压として DC 75-kV/mm という値を得た。こうして得られた結果から、新しい分圧器として純度の異なる 2 種類の Al_2O_3 セラミックを選定し、測定結果を基に分圧器の具体的な設計を行った。

なお、表 1 に絶縁油及びセラミックス等、各誘電体材料の主な性質をまとめておく。

	絶縁油	アクリル	Al_2O_3 セラミックス	
			一般	高純度・緻密
絶縁耐压 (kV/mm)	30 ~ 40	20 ~ 30	10 ~ 15 ¹⁾	15 ~ 20 ¹⁾ (75 ²⁾)
誘電率 ϵ_r	2.2	3.0	8 ~ 10	
体積固有抵抗 (Ωm)	10	$> 10^{13}$	$10^{10} \sim 10^{13}$	$10^{12} \sim 10^{15}$
熱膨張率 ($\times 10^6 / \text{K}$)	-	0.7	7 ~ 8	

表 1 : 誘電体材料の性質

1) カタログスペック値 2) 自作した絶縁耐压試験装置での実測値

3. 設計

3.1 仕様

具体的な設計について記す前に、分圧器の基本的な仕様をまとめておく。

- 400-kV、10- μsec のパルス高電圧をターゲットとし、この電圧付近で放電が起こらないこと。
 - 分圧比は $10^4 \sim 10^5$ とすること。これにより 400-kV の電圧は 4 ~ 0.4-V となる。
 - 高精度の測定電圧値が得られること。
 - 輸送、設置環境の変化、経年変化等による分圧比の変化が無い、もしくは非常に小さいこと。
 - Stangenes CVD-350 の代替品として使用できるよう、固定ボルトの位置や大きさは同じとする。
 - 量産を踏まえて製作し易いものとする。
- 以上から、「高精度」「高安定」「高性能」「量産性」を keywords として設計を行った。以下に具体的な設計ポイントを記す。

3.2 電氣的設計

電氣的設計の最重要点は十分な絶縁耐压を有することである。放電には内部放電、沿面放電の 2 種類があり、それぞれに耐えられるよう設計する。

まず絶縁耐压試験結果に安全係数分を付加した上で、400-kV の電圧に対してコンデンサー部分の厚さを 20-mm とした。なお、今回選択したセラミックスは緻密度の高い Al_2O_3 セラミックであり、これらのセラミックスは緻密故に焼結できる厚さと形状の制限が厳しい。コンデンサー部分の厚さ 20-mm は、焼結可能な厚さとしての上限でもある。

また、沿面放電を防ぐため 2 電極間の沿面距離を十分に取る必要がある。最終的に、沿面放電の起こり難い形状として cup 型及び disk 型の 2 種類(図 4 参照)を設計した。

コンデンサーの電極となるメタライズについては、セラミックの厚さとメタライズ可能な領域との関係

から、cup 型を 5-pF、disk 型を 2-pF となるよう電極径を決めた。さらに、低压側電極が外場を拾うことにより分圧器全体としての分圧比が変化することを防ぐため、低压側電極の周りに保護電極となるメタライズを施した。この保護電極は接地される。

またメタライズ端は金属とセラミック、絶縁油から成る triple junction となり、電界の集中によって放電を引き起こす危険性がある。特に cup 型に関してはその形状により電界が集中する恐れが高い。そこで cup 型に関してのみガードリングを設けた。この際 EMSYS コードを用いてシミュレーションする事によりガードリングの大きさやメタライズの具体的な径を決定している。図 2 はガードリングをつけた場合の電界の様子をシミュレーションした結果である。実際はガードリングの R の大きさやメタライズ端の位置などを変えながら計算を行っている。

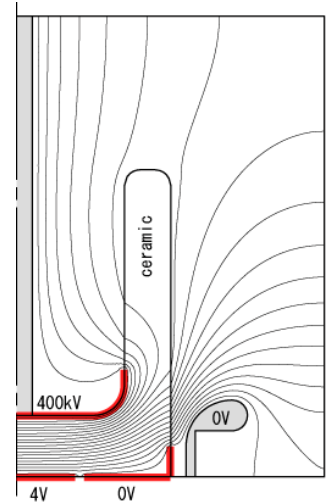


図 2 : Cup 型分圧器のシミュレーション結果
ガードリングをつけた場合の電界の様子をシミュレーションした。図中、灰色の部分は金属、細線は等電位面を示す。

3.3 機械的設計

機械的設計としては、以下に示す 3 点を踏まえて設計した。(1)電氣的理由等で必要な部分以外は加工精度を要求しない等、加工や組み立ての容易さ考慮する、(2)固定ボルトとボルト径は Stangenes 社の CVD-350 と同じとする、(3)Cup 型と disk 型の 2 種類の形状において出来るだけ共通の部品や材料を使用する。具体的には、セラミックスの場合は電極メタライズを施す部分以外の寸法は普通公差としている。また、メタライズ面積においても、1 次コンデンサーの容量を決める面以外は普通公差としている。

また、2 次コンデンサー等が入る台座の内部については、積極的に絶縁油を入れるか、絶縁油が入らぬようシールするのどちらかの対策が必要であるが、今回は試験的に絶縁油が入らぬようシールするよう設計した。

3.4 その他

セラミックの加工寸法公差に起因した容量の不確定性やセラミックコンデンサーの電極と保護用メタライズ間の浮遊容量は分圧器の分圧比に大きな影響を与えるので、正確に目的の分圧比を得るためにはセラミックコンデンサーに付加する 2 次コンデンサーの容量を計算のみからでは決められない。そこで、加工終了後のセラミックコンデンサーと既知容量の市販コンデンサーによってパルスジェネレータから

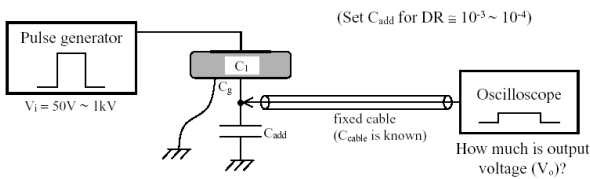


図3：2次コンデンサー総量の決定法

既知のコンデンサーを用いた時の分圧比を測ることでセラミックコンデンサーの容量を知ることができる。

の矩形波を分圧し、その分圧値を測定することにより2次コンデンサーの総容量を見積もる。

分圧器単体は単純に分圧のみを行い、インピーダンス整合等の回路はオイルタンクの外に直接接続する予定である。これは設置や測定時の扱いやすさを考慮したためである。また、オイルタンク内では電気的シール性が比較的高いケーブルを使用する。なお、分圧比は分圧器内部に設置したコンデンサーとタンクの外までを繋ぐケーブルの総容量とセラミックコンデンサーとの容量比で決められる。

4. 構造

4.1 実機の製作

現在、上記設計の cup 型及び disk 型分圧器の実機を2種類のセラミックス材料にて製造している。Cup 型と disk 型の共通の特徴は、

- ・ 台座の下方は共通設計とした。
- ・ 電気的シール性の高い SMA コネクタを使用した。
- ・ 絶縁油をシールした。
- ・ 2次コンデンサー等の回路接続用コネクタとして、マルチコンタクト社スプリングコンタクト・ソケットを使用した。

等が挙げられる。

また、今回は 400-kV の仕様で設計・製作してきたが、特に disk 型については、同じ disk 形状のセラミックを数段重ねることで、より高い電圧の測定が出来る、という拡張性をもっている。

なお、cup 型、disk 型共に共通して使用した部品および材料は表2の通りである。

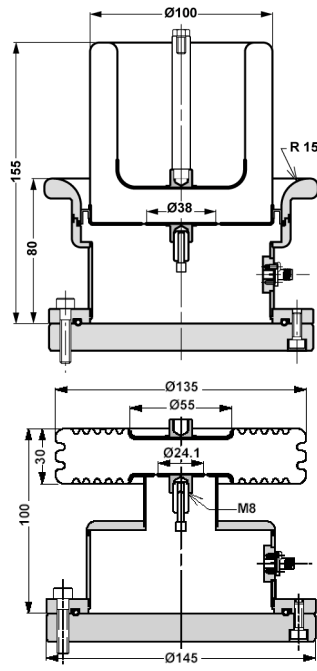


図4：Cup 型及び disk 型容量性分圧器の設計図

Al ₂ O ₃	日本セラテック AJPF 三井鉱山マテリアル MA999
電極用コネクタ	Multi-Contact BL3N
SMA レセプタクル	Suhner 23 SMA-50-0-6
O リング	G 110 (JIS standard)
SUS 丸管	φ101.6, 2t (JIS standard)

表2：使用する材料及び部品のリスト

4.2 性能パラメーターの比較

表3は製作中の2種類の分圧器 cup 型及び disk 型の完成後に予想される性能等を示す各パラメーターを、Stangenes 社の CVD-350 のパラメーターとともに記す。

	CVD-350	Cup 型	Disk 型
誘電体の材質	絶縁油	Al ₂ O ₃ セラミックス	
1次側容量: C ₁	?	5 pF	2 pF
全容量: C _t ¹⁾	15 pF	31 pF ²⁾	16 pF ²⁾
分圧比	1/5000 - 1/25000	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵	
分圧比の精度	5 % ³⁾	目標: < 1 %	
沿面距離	225 mm	165.7 mm	200 mm
パルススロープ	0.01 %/μsec ⁴⁾	目標: < 1 % / 6μsec	
出力コネクタ	BNC プラグ	SMA レセプタクル	
大きさ	φ6 1/2 × 9 3/4 in. (φ165.1 × 247.65 mm)	φ150 × 200 mm	φ135 × 150 mm
固定ボルト	φ5 in. (φ127mm) M6, 4本	M6, 4本	φ127 mm M6, 4本

表3：性能パラメーターの比較

- 1) 全容量はモジュレータの負荷となる。2) シミュレーションの結果。3) 出荷時のカタログ値。4) 1-MW ケーブル使用時。(カタログ値)

5. 現状及び今後の予定

分圧器は、2001年6月末の時点でセラミックスの焼結が終わりメタライズ及びろう付け工程に入るところである。今後、台座の加工、組み立てを経て9月頃に完成予定となっている。

完成後は、クライストロンのオイルタンクにインストールし実際にパルス高電圧を印加することで、測定精度の確認や耐久テスト等、様々な性能評価試験を順次行う予定である。

参考文献

- [1] <http://c-band.kek.jp>
- [2] W.R.Fowkes and R.M.Rowe, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. IM-15, No.4, pp284-292
- [3] K.Nakao, S.Michizono, Y.Saito, S.Fukuda, and S.Anami, “大規模リニアックにおけるクライストロン印加電圧の測定”, Proceedings of the 21st Linear Accelerator Meeting in Japan
- [4] “JIS ハンドブック セラミック”, 日本規格協会
- [5] Y.Takasu, et al. “パルス高電圧モニター用セラミック材料の絶縁耐圧試験”, Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan,