

[P7-21]

DEVELOPMENT OF THE HIGH-PERFORMANCE CAPACITIVE DIVIDER FOR THE PULSED HIGH-VOLTAGE MONITORING

Yuko Takasu, Hiroshi Matsumoto* and Tsumoru Shintake*

Department of Physics, Graduate School of Science, University of Tokyo,

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033, Japan

*High Energy Accelerator Research Organization (KEK),

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

We are developing a new capacitive divider using alumina-ceramics for the pulsed high-voltage monitoring, applied to klystron power supply in the RF-system of the Linear Collider project. While there are commercially available capacitive dividers using insulating oil for sensor capacitor, they have many inconvenient points and we need special care to perform accurate measurement. One candidate to solve these problems is to use the alumina-ceramic, whose dielectric constant has lower sensitivity to the temperature change, and higher mechanical stability. In order to make a highly reliable device, we plane to investigate high-voltage performance of the ceramic materials, such as flash-over voltage along surface and interior volume.

高性能パルス高電圧モニタ用分圧器の開発

1 はじめに 〈なぜ電圧モニタ?〉

次期リニアコライダー計画ではさまざまな部分での効率の向上が要求される。KEK C-band グループ [1] ではマイクロ波源であるクライストロンの高効率化を特に重要課題として行なっている。これには RF の電力や入力ビームの電力を精度良く測定することが研究・開発の重要な鍵となる。

ビーム電力はカソードに印加する電圧及び電流の測定値より算出できる。一般的に、クライストロンやそれに電力を供給するモジュレータ等の装置で扱う電圧は十～数百 kV のパルス高電圧である。このような高電圧を正確かつ安全に測定するためには特別の配慮が必要である。現在一般的に使用されているパルス高電圧モニタ用分圧器は 1960 年代に開発された容量性分圧器の流れを汲むものである [2]。ところがこの分圧器で測定した電圧値は信頼性が乏しい場合が多い。そこで今回、パルス電圧を精度良く測定できる装置として、新たに高性能の容量性分圧器の開発を進めている。

本論文では、分圧器の開発状況を中心に報告する。

2 分圧器の原理と従来品の性能

数百 kV に及ぶパルス高電圧を直接スコープ等で測ることができないため、通常は容量性分圧器 (図 1 中の四角で囲った部分) を用いる。これは高圧側と接地

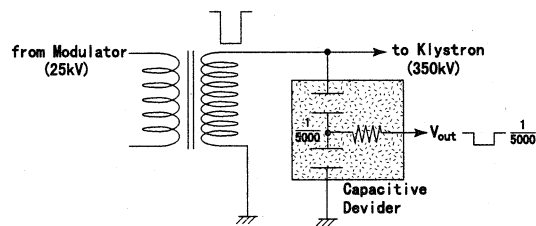


図 1: モジュレータからのパルス電圧は、トランスを用いることによってクライストロン・カソードのパルス高電圧に変換される。図中の四角で囲った部分が電圧モニタ用容量性分圧器である。

側のコンデンサーの容量比で入力電圧を分圧するものである。この分圧器を用いてパルス高電圧を決まった比率の測定可能な数百 V の電圧値に分圧してオシロスコープなどで計測する。

さて、図 2 は実際分圧器 (Stangenes, CVD-350) の写真である。この分圧器ではアクリル製サポートの中に見える高圧側中心電極とガードリング内部に空いた幾つかの穴の中にある電極によってコンデンサーが形成される。また、電極棒より見える穴の面積を接地したガードリングよりも小さくすることで万一高電圧によって放電がおきてもほとんどが接地面に流れるよう工夫されている。こうして設計された容量性分圧器は多くの箇所利用され、実績をあげている。

しかし、実際には以下の様な問題点もある。(1) 分圧

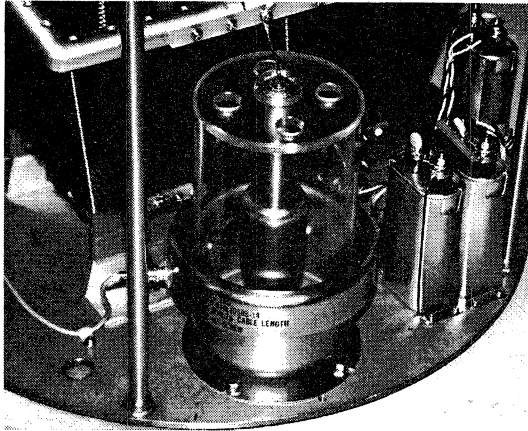


図 2: 実際に KEKB 8GeV クライストロンに使用している分圧器

器の出力は高インピーダンスでケーブルの容量によって分圧比が変わるため、測定に使用するケーブルが決められている。(2) 電極棒の支えとなるアクリル部分において、クライストロン稼働時の振動により固定ねじが外れ落ちたり、アクリル上部の円盤が剥がれたという事例が報告されている。(3) 分圧器を形成するコンデンサー容量の温度特性により、温度上昇に従って分圧比が変化する。特に、クライストロン稼働時には分圧器周辺温度が 40°C 前後に上昇するにもかかわらず電気的校正は温度が低い時点で行なっているため、校正時と測定時では約 20°C もの温度差がある。その結果、測定した電圧値の信頼性が欠けてしまう。

そこで、従来品の欠点を補う新たな電圧モニタ用分圧器を以下の要領で開発している。

3 要求される分圧器の性能

クライストロン・カソードの電圧モニタ用分圧器として求められる主な性能には、(1) 高精度、(2) 高安定、(3) 安全、(4) 量産性が挙げられる。

3.1 安定性

従来品からの教訓により、新たに開発する分圧器は機械的に安定であり、長時間の運転でも保証され、かつ電氣的な負荷による影響を受けないものでなければならない。そのうち、機械的安定性に対しては、コンデンサー間の誘電体を絶縁油ではなく固体材料にすることが考えられる。

3.2 安全性

パルス高電圧を扱うことから、高電圧による事故の危険性を十分考慮して設計しなければならない。特に、放電しにくい構造となるよう設計する。具体的には、電極部の端を大きな曲率で曲げ、誘電体はその曲率に合わせて厚くした上に高さを沿面放電の起こりにくい高さにする。

3.3 量産性

リニアックの多数のクライストロンすべてに使用する分圧器が同じ性能であることが望ましい。そのためには、大量生産に向いている製造法で作れるものがある必要がある。また、1回の校正だけで精度が保てるよう、校正の容易なものが望ましい。

4 誘電体材料の選定

コンデンサーの誘電体として固体材料を選択することはすでに述べたが、高電圧のコンデンサーに用いることから固体材料の選定・評価を慎重に行なわなければならない。材料の満たすべき条件には (1) 絶縁耐力が十分大きい、(2) 熱膨張係数が小さい、(3) 入手・加工が容易である、(4) 量産向きである、などが考えられる。

表 1 は主な誘電体材料の性質をまとめたものである [3]。これより、(1)~(3) の条件を満たす材料は熔融石英ガラスやアルミナセラミックスなどであることが分かる。今回開発中の分圧器では、これらの材料から量産性を加味してアルミナセラミックスを採用する。現在、ロウ接着性の良さから、アルミナ含有率が 95~99% 程度のセラミックを採用する予定である。

5 設計案

以上の条件及び材料の特性を考慮し、パルス高電圧モニタ用容量性分圧器の基本構成を設計した。図 3 に設計案を記す。特徴はコンデンサーの誘電体にセラミックを用い、内側と裏側をメタライズすることで電極としている点、及び、1次側からみたインピーダンスをトランスを用いて 5kΩ にすることで 250μsec の時定数を実現している点である。この時定数では、パルス幅 5μsec に対するパルスドレップは約 2% である。また、トランスの性質として 1次と 2次が絶縁されることから、トランスを挟むことが安全対策にもなっている。

	石英ガラス	エポキシ	アルミナセラミックス
耐電圧 (kV/mm)	32	30	14~15
熱膨張係数 (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	0.5~0.54	65	6.6~8.0
比誘電率	3.6	3.7	8.5~9.0
入手・加工	△	◎	○
量産性	△	◎	○

表 1: 高電圧に利用できる主な誘電体材料の比較。表中の記号について、◎:非常に適している、○:適している、△:利用できる

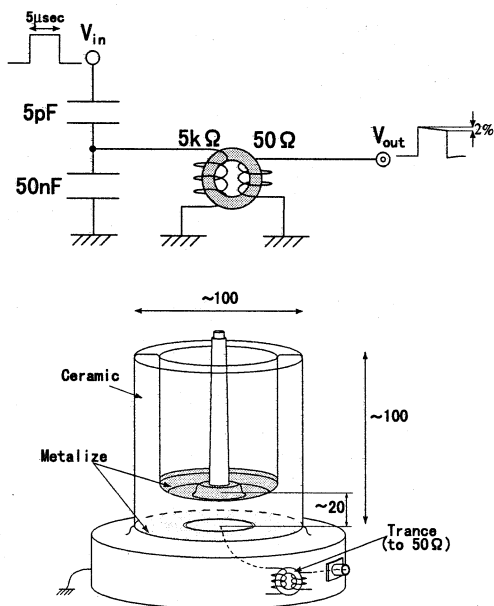


図 3: 新しく開発中の分圧器の回路 (上) 及び、設計 (下) 案

6 破壊電圧測定

4節で材料の目星はつけたが、使用するセラミックが本当に耐電圧の点で利用できるものか否かを実験的に確かめる必要がある。

6.1 JIS の絶縁耐力測定法とその問題

使用するセラミックの耐電圧を測定する方法について、最も一般的な方法として JIS の絶縁耐力測定法がある [4]。これは JIS で認められている固体絶縁材料の耐電圧測定法で、試料及び電極の形状、電極間圧着力、測定環境などの基準が定められている。

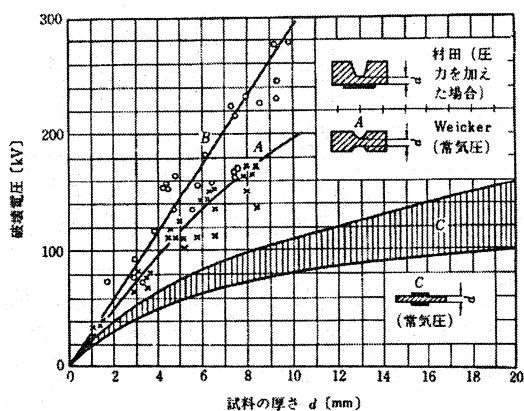


図 4: 測定方法と磁器試料の破壊電圧の違い。

さて、表 1 において各材質の絶縁耐力を比較すると、エポキシの絶縁耐力はセラミックスの 2 倍近く大きい。最近、高電圧を扱う様々な箇所でセラミックスが用いられていることを考慮すると、果たしてセラミックスの絶縁耐力は本当にプラスチックよりも小さいのであろうか？ここで疑問となるのが、この絶縁耐力

測定法に従って測定した絶縁耐力が試料の真の破壊電圧であるか、ということである。結果を先に記せば答えは否である。図 4 ([5] より引用) は測定方法と破壊電圧の違いを示したものである。破壊電圧は測定方法によって異なる結果となり得ることが分かる。では JIS の絶縁耐力の測定法はどのようなものか、というと、電極の端に曲率を持たせているが、試料は電極の曲率に関係なく板状のものとしている。これでは電極が試料から離れる点付近での放電が起こりやすい。つまり、JIS で定めた測定法に従って測定された絶縁耐力は試料の破壊電圧の目安にしかならない。

6.2 破壊電圧測定 (計画)

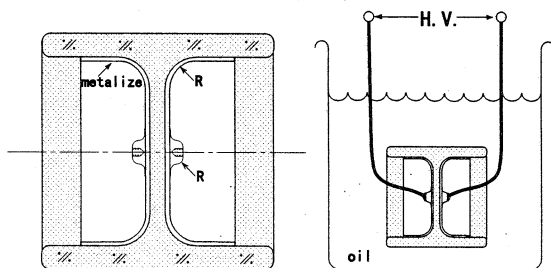


図 5: 破壊電圧測定試験の試料の形状 (左) 及び、測定環境の概念図 (右)

今興味があるのは、セラミックを実際に分圧器に使用した場合の破壊電圧である。そこで破壊電圧の測定試験は、図 5 左のような形状の試料について行なう。試料の製作は分圧器に使用するセラミックとほぼ同じ加工法を採用する。ただし、(1) セラミックの種類、(2) 成形方法・加工工程、(3) 電極の曲率・高さ、(4) 電極中心部の試料の厚さ、などの違いによる耐電圧の差を見るために、数種類の試料を製作し、同じ環境下で測定する。測定は絶縁油を満たした容器で行なうものとし (図 5 右参照)、印加する最大の直流電圧は 100kV オーダーを予定している。

現在、条件に合わせた試料の設計を行なっているところである。

参考文献

- [1] <http://c-band.kek.jp>
- [2] W.R.Fowkes and R.M.Rowe, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, IM-15 (1966) 284
- [3] 日本特殊陶業 技術資料
- [4] "JIS ハンドブック セラミックス", 日本規格協会
- [5] 原雅則 秋山秀典 共著, "高電圧パルスパワー工学", 森北出版