

論文の内容の要旨

論文題目 **Research and Development of The High-Performance
Capacitive Voltage Divider Using Ceramics
for Pulsed High Voltage Applications**
(セラミックスを用いた高性能
パルス高電圧用容量性分圧器の研究開発)

氏 名 高 須 ゆう子

粒子加速器は昨今の先端科学における精密測定の担い手として重要な役割を果たしてきた。殊に円形加速器によって得られるビームエネルギーが限界に達しつつある現在、より高特性のビーム生成が見込まれる線形加速器は物理学のみならず科学全般に及ぶ利用が期待され、その重要性が指摘されている。

粒子加速器の応用は主に加速されたビームの直接利用とビームから放射される放射光の利用とがある。前者の例には粒子線治療への利用や原子核・素粒子物理学等における精密物理実験などがある。現在、標準模型の最も重要なメカニズムであるヒッグス粒子の発見・測定を目的とした重心系エネルギー1TeV 程度の大規模な電子陽電子リニアコライダーの建設が検討され、建設実現に向けた開発が推し進められている。

放射光においてはその利用がさらに多岐にわたる。現在一般利用できる放射光施設には8GeVの円形加速器とアンジュレーターを用いたSPring-8をはじめとするシンクロトロン放射光施設などがあり、SPring-8については高輝度かつX線領域の波長が得られるゆえに構造解析にも多く利用されている。しかしこれらの放射光はコヒーレント性に乏しく、最近の生物学におけるゲノム解析や構造生物学などからは、高い輝度と高いコヒーレンス性を併せ持つ放射光への要望があった。この実現のため電子リニアックとアンジュレーターを組み合わせたX線自由電子レーザーの開発が各国で行われている。中でも理化学研究所におけるSCSSプロジェクトではその建設がすでに始まっており、最終的には波長0.1nmの高

輝度レーザーの発振を目指している。

これら粒子加速器では、粒子源や加速用高周波源など様々な箇所においてパルス高電圧を用いるデバイスを多数使用する。そのため加速器の運転は元よりこれらデバイスの開発・改良や保守においてもパルス高電圧の測定・観測が必要である。通常数 kV 以上の電圧は電圧分圧器により測定可能なレベルに分圧した電圧を測定するが、加速器で使用するデバイスの多くは絶縁油の中で数百 kV という高い電位差と数 μs 程度の幅をもつパルスを用いるため、このパルス高電圧の測定には絶縁油中で使用するよう特別に設計された容量性分圧器を用いている。現在一般的に使用されている容量性分圧器は、1960 年代にクライストロンのカソード電圧を測定する目的で開発された分圧器の概念を受け継いだもので、パルス電源の中に満たされた絶縁油が高電圧コンデンサーの誘電体となるような機構を有する。その構造は開発当時のものとしては電氣的安定性や安全性について最適化されており、現在に及ぶ長年の実績をあげている。しかしながら絶縁油の温度変化や変質、周囲の電界などの影響を受けやすいことから、測定には度重なる較正を必要としていた。

大規模な電子陽電子リニアコライダーや X 線自由電子レーザーなどで必要となる安定した高特性の電子ビームの生成には、電子源や大電力クライストロンの性能向上を目指した開発と安定出力を目指した運転が必要不可欠である。これら装置の開発や運転にはその印加電圧の測定が重要な鍵となる。例えば、高効率の大電力クライストロンの開発ではクライストロンの陰極に印加するパルスの電圧値および電流値が効率測定において重要なパラメーターであり、それらの信頼性の高い測定が必須である。また、加速高周波の安定供給のためにはクライストロン印加電圧の制御が必須であり、そのためにはクライストロンの印加電圧を終始安定して測定する必要がある。しかし既存の容量性分圧器では使用状態等によって測定値の精度にばらつきが生ることから上記のような信頼性の高い電圧値の測定が困難であり、数百 kV 級のパルス高電圧を高精度で安定測定するための容量性分圧器を開発する必要があった。

本論文は、数百 kV 級のパルス高電圧を測定するためのセラミックス製容量性分圧器の研究開発について記述されている。開発目標はCバンドクライストロンの陰極電圧である -360kV、4.5 μs のパルス電圧の測定とした。また高電圧試験時の際に、現在使用している容量性分圧器と入れ替えて出力を比較するため、開発した分圧器の分圧比を既存のものと同じ 1/5000 に設定し、その基本的な電気回路も同じものとした。

温度や経年変化、周囲環境等に依存しない安定した容量性分圧器の実現は、同条件を有する高電圧コンデンサーの開発・設計に帰着する。しかし容量性分圧器の使用環境である絶縁油を高電圧コンデンサーの誘電体として使用する限り、その実現は困難である。そこで、開発にあたり高電圧コンデンサー部の構造およびコンデンサーを形成する誘電体材料の根本的見直しを行った。既存の容量性分圧器の問題を払拭するためには、高電圧コンデンサーを形成する誘電体が高い絶縁耐圧、高誘電率、低い温度依存性を有することが最低条件であり、さらに経年変化が少なく比較的安価で安定供給が見込める必要がある。本研究で

は、これらの条件を満たす材料として2種類の高緻密性アルミナセラミックスを採用した。ただし、高緻密性アルミナセラミックスによる数百kV仕様のコンデンサーは他に例がなく、360kVの電位差でも絶縁破壊を生じないコンデンサーの設計が重要課題となる。そこで高電圧コンデンサーの設計に先立ち、脱気した絶縁油中にて材料の絶縁耐圧を測定できる装置を独自に設計・製作し、これを用いて測定したセラミックスの絶縁耐圧を基に、コンデンサーの設計を行った。

本論文では、材料の調査および絶縁耐圧試験を経て高電容量性分圧器全体の設計を行い、製造した試作品の高電圧試験について述べている。また、材料の絶縁耐圧を測定した試験装置の設計および絶縁耐圧試験についても述べている。

高電圧コンデンサーは、使用するセラミックスの誘電率と絶縁耐圧からコンデンサー部分の厚さを20mm、その電気容量を2pFから5pF程度とし、放電防止策とセラミックス焼結の簡便性を加味して全体形状の設計を行った。設計時には電極の端部の位置やそこに関係するセラミックスの形状について電界計算を行い、その結果によって得られた電界強度を押さえた形状および寸法に最適化することで、内部放電に対する危険性の軽減を図った。またセラミックスコンデンサーの低電圧側電極の周りに接地面を設けることで万一放電した場合の安全策と外部の高電界による影響の軽減を図った。その結果、円盤状とコップ状、計2種類の形状をもつセラミックスを設計・製作した。また、電極形成法としてメタライズ技術を利用した場合と金属塊から滑らかに削り出した電極を接着剤で固定した場合の2種類を製作し、最終的には計4種類の高電圧コンデンサーについて性能試験を行った。

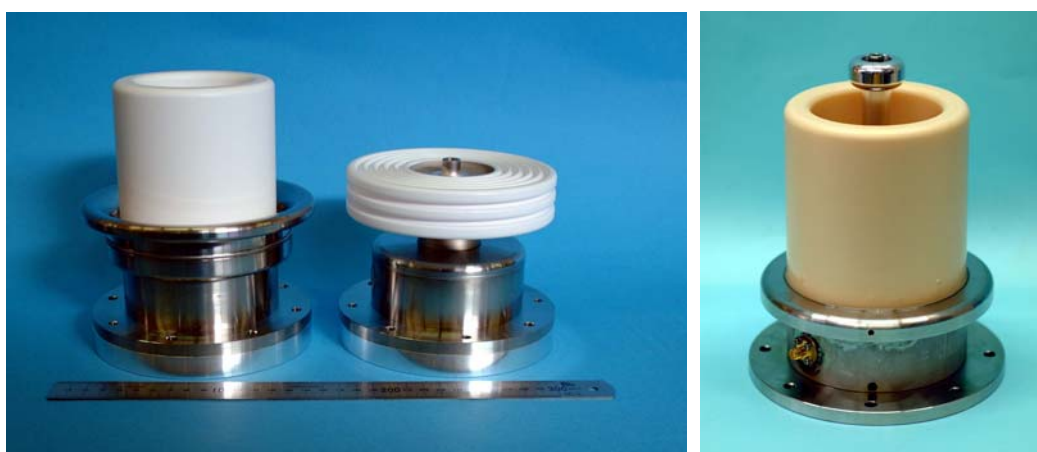


図1. 製作した試作品（一部）の写真

製作した容量性分圧器の出力は高インピーダンス出力であり、その回路の性質上、出力信号を送る伝送線の容量や接続する機器の入力インピーダンス等の影響を受ける。そのため、各高電圧コンデンサーは、それぞれの容量と分圧比から高電圧試験で使用する伝送線の総電気容量を含めた分圧容量を決定し、必要な分圧コンデンサーを取り付けることで容量性分圧器の試作品として完成させた。また、高電圧試験において制御や記録用の各機器およ

びそれらへ繋ぐ付加的な伝送線による分圧比や測定パルス形状への影響を防ぐため、容量性分圧器の出力とインターロック等制御機器の入力とのインピーダンス整合のためのバッファ増幅器を本研究において開発した容量性分圧器の仕様に合わせて新たに設計・製作し、それを高電圧試験で使用した。図2は開発した容量性分圧器およびバッファ増幅器の全回路図である。

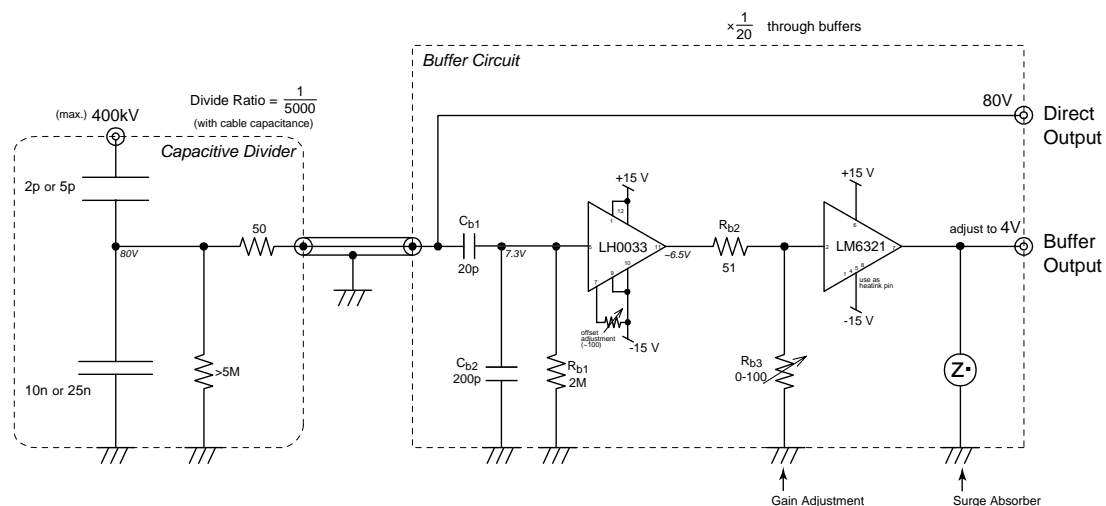


図2. 容量性分圧器およびバッファ増幅器の回路図

すべての試作品の性能評価は、Cバンドクライストロンを含む高周波実験ユニットにて行った。印加した電圧は最大電位差約 370kV、幅 4.5 μ s のパルス電圧であり、その繰り返しは 10pps である。評価試験の結果、すべての試作品において、非常に良いパルス再現性が確認された。メタライズによる電極形成を試みた試作器は放電による絶縁破壊を生じたが、接着剤で電極を固定した試作器は実験ユニットの最高電源である 367kV のパルスの観測に成功し、試験終了まで放電することはなかった。

本研究で開発した容量性分圧器はセラミックスを用いたことで使用する環境状態の影響を受け難く分圧器本体が化学的・物理的にも安定していることから、使用電圧によっては絶縁油中に限らず様々な環境下での使用が可能である。また、分圧比の決定後はその測定精度が保持できることも利点であり、今後はクライストロンの陰極電圧測定の他、加速器分野内外に関わらず幅広い応用も期待できる。