

コンデンサの静電容量特性

CAPACITANCE CHARACTERISTICS OF CAPACITORS

中田恭輔[#], 生駒直弥, 虫邊陽一, 徳地明,
Kyosuke Nakata [#], Naoya Ikoma, Yoichi Mushibe, Tokuchi Akira
Pulsed Power Japan Laboratory Ltd. (PPJ)

Abstract

A pulsed power supply is used in the accelerator to generate high power pulses of high voltage and high current. Two types of circuit elements are used to store the energy required for high-power pulses: capacitors and inductors. Among them, there are various types of capacitors in terms of materials and structures, and their capacitance varies with applied voltage and temperature depending on the properties of the materials. In this paper, we report the evaluation of the voltage and temperature dependence of the capacitance of several types of capacitors.

1. はじめに

キッカー電磁石電源やクライストロンモジュレータをはじめとする加速器の電源には、高電圧大電力を出力するパルス電源を必要とするものが多い。これらの電源は出力の安定度や信頼性が直接加速器に影響するため、十分な検討が必要である。また、価格や大きさ等も使用するうえで重要な電源性能の指標となる。

パルス電源とは時間的、空間的なエネルギー圧縮により大電力出力を行う電源を指す。大電力の出力を行うためには電源内にエネルギーを蓄える必要があり、エネルギーを蓄える回路素子にはコンデンサとリアクトルの2種類がある。一般的にはコンデンサのほうがエネルギー蓄積密度は高くなり電源を小型にすることができる。コンデンサの静電容量を C [F]、印可電圧を V [V] とすると蓄積されるエネルギー E_c [J] は下記 Eq. (1) で表される。

$$E_c = \frac{CV^2}{2} \quad (1)$$

コンデンサは電極間に誘電体を挟んだ構造をしており、その誘電体の誘電率に C の値は比例する。しかし、同じ誘電体でも印可電圧や温度により誘電率が変化する。 E_c がそのまま出力エネルギーとなる電源の場合、温度変化や印可電圧による静電容量の変化が出力の安定度に直接表れてしまう。そのため、そういった電源には温度や印可電圧による静電容量の変化の小さいコンデンサを用いるのが望ましい。

またコンデンサの内部構造によって、パルス大電流を流す度に静電容量や耐電圧が劣化していくものもある。これは電源の信頼性に直結するため、十分に試験し検討する必要がある。

本稿では、加速器に用いるパルス電源の電源性能向上のため、複数種の高耐圧コンデンサの静電容量の電圧依存性と温度依存性、パルス電流耐性を評価したので報告する。

2. 評価したコンデンサ

評価した4種類の高耐圧コンデンサの特性を Table 1、写真を Fig. 1 に示す。エネルギー密度は定格電圧で充電したときのコンデンサのエネルギーを体積で割ったものとした。

Table 1: List of Capacitors Tested

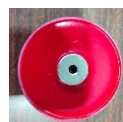
	Film capacitor A	Film capacitor B	Ceramic capacitor	Mica capacitor
Rated voltage [kV]	3	10	50	15
Capacitance [nF]	100	100	1.3	10
Size [cc]	25.2	61.9	72.2	40.1
Energy Density [mJ/cc]	17.9	80.8	22.5	28.1



(a) Film capacitor A



(b) Film capacitor B



(c) Ceramic capacitor



(d) Mica capacitor

Figure 1: Photo of the capacitor tested.

[#] nakata@myppj.com

3. 実験方法

3.1 静電容量の温度依存性測定

コンデンサの静電容量と $\tan \delta$ の温度依存性を調べるため、恒温槽を用いて温度を $35^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ に変化させながら、 10°C 毎にインピーダンスアナライザにて静電容量と $\tan \delta$ の測定を行う。試験の様子を Fig. 2 に示す。

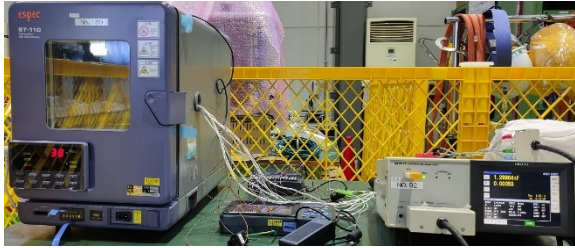
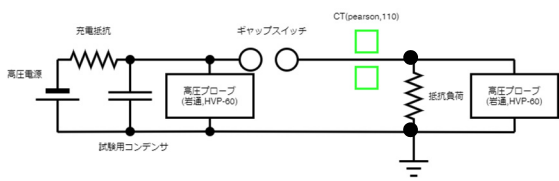


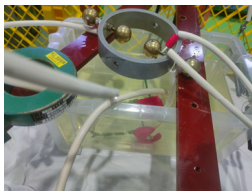
Figure 2: Measurement of temperature dependence of capacitance.

3.2 静電容量の電圧依存性測定

コンデンサの静電容量の電圧依存性を調べるため、コンデンサの端子間に定格電圧を印可し、抵抗負荷に放電を行う。放電の時定数をそろえるため負荷の抵抗値はそれぞれ 200Ω (フィルムコンデンサ)、 $15 \text{ k}\Omega$ (セラミックコンデンサ)、 $2 \text{ k}\Omega$ (マイカコンデンサ) とした。試験回路を Fig. 3(a) に、試験時の様子を Fig. 3(b) に示す。コンデンサの端子間電圧と抵抗負荷の電圧を高圧プローブ、抵抗負荷に流れる電流を CT にて測定する。定格電圧印可前の静電容量を 3.1 で測定した値を参考に計算し、その静電容量から得られる充電エネルギーと抵抗負荷で消費したエネルギーを比較することで、定格電圧印可時の静電容量の変化を評価する。また、セラミックコンデンサは沿面放電の防止策として油中にて試験を行う。



(a) Test circuit



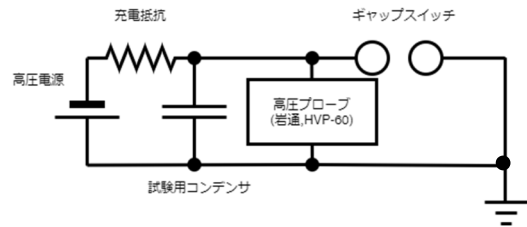
(b) Measurement of voltage dependence of capacitance

Figure 3: Voltage dependence of capacitance.

3.3 パルス電流耐性測定

コンデンサのパルス電流耐性を調べるため、コンデンサの端子間に定格電圧を印可し、100 回短絡放電を行う。試験回路を Fig. 4(a) に、試験時の様子を Fig. 4(b) に示す。回路はなるべくインダクタンスが小さくなるように配線

し、コンデンサの端子間電圧を高圧プローブにて測定する。試験前と試験後の静電容量と $\tan \delta$ の値を比較し、パルス電流耐性を評価する。また、セラミックコンデンサは沿面放電の防止策として油中にて試験を行う。



(a) Test circuit



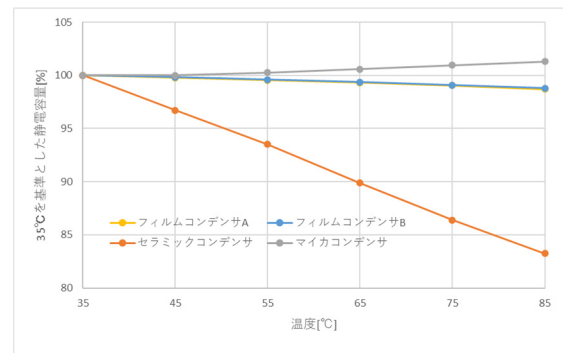
(b) Measurement of pulse current durability

Figure 4: Pulse current test.

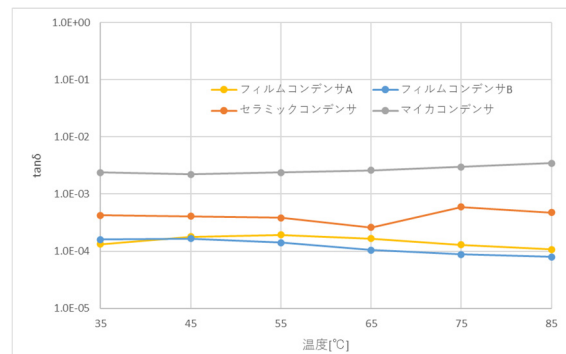
4. 実験結果

4.1 静電容量の温度依存性測定結果

35°C の値を 100% としたときの各コンデンサの温度毎の静電容量を Fig. 5(a) に、 $\tan \delta$ を Fig. 5(b) に示す。



(a) Capacitance



(b) $\tan \delta$

Figure 5: Temperature dependence of capacitors.

フィルムコンデンサとマイカコンデンサは静電容量の温度係数が $250 \text{ [ppm/}^{\circ}\text{C]}$ 程度であるが、セラミックコンデ

ンサは 3400 [ppm/°C]程度とかなり大きな値となった。また、フィルムコンデンサとセラミックコンデンサは温度が上がると静電容量が減少したが、マイカコンデンサは増加した。

$\tan \delta$ に関してはどの温度でも全て 0.5%以下と十分に小さい。試験したコンデンサ同士で比較するとマイカコンデンサ、セラミックコンデンサ、フィルムコンデンサの順に大きくなった。また、フィルムコンデンサコンデンサは $\tan \delta$ が高温で減少する傾向にあり、マイカコンデンサは増加する傾向にあった。

上記より温度が変化するような環境にて安定度の高い出力波形が必要な電源にはセラミックコンデンサの使用を避けた方がよいことがわかった。

4.2 静電容量の電圧依存性測定結果

各コンデンサの測定波形を Fig. 6 に示す。CH1(黄)は抵抗にかかる電圧、CH2(赤)は電流、CH3(青)はコンデンサの端子間電圧を測定している。また、測定したデータをまとめたものを Table 2 に示す。

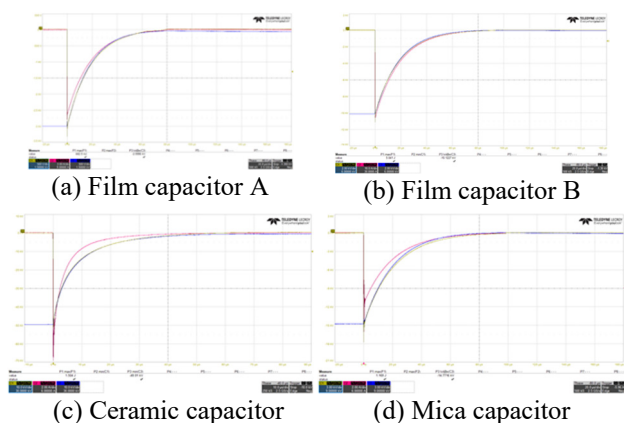


Figure 6: Waveform of discharge to a resistive load.

Table 2: Voltage Dependence of Capacitance

	Film capacitor A	Film capacitor B	Ceramic capacitor	Mica capacitor
Capacitance before charging [nF]	98.17	98.30	1.305	10.52
Charge voltage [kV]	2.999	10.123	49.910	14.772
Charge energy [J]	0.4413	5.037	1.625	1.148
Energy consumed by resistive load [J]	0.4429	5.041	1.504	1.169
Capacitance change rate [%]	0.4%	0.1%	-7.4%	1.9%

Table 2 より、フィルムコンデンサ A,B は充電電圧より計算したエネルギーと抵抗負荷で消費されたエネルギーの差がほとんどなく、端子間電圧による静電容量の変化はほとんどないと考えられる。それに対してセラミックコンデンサは充電エネルギーに対して消費エネルギーが約 7.4%の減少、マイカコンデンサは 1.9%の増加を見せた。Equation (1)より E_c は静電容量 C に比例するため、これらの値は定格電圧印可時の静電容量の変化率と同じであると考えられる。

上記より充電電圧が変化しても安定度の高い出力波形が必要な電源にはフィルムコンデンサを用いるとよいことがわかった。

4.3 パルス電流耐性測定結果

各コンデンサの端子間電圧測定波形(黄色)を Fig. 7 に示す。

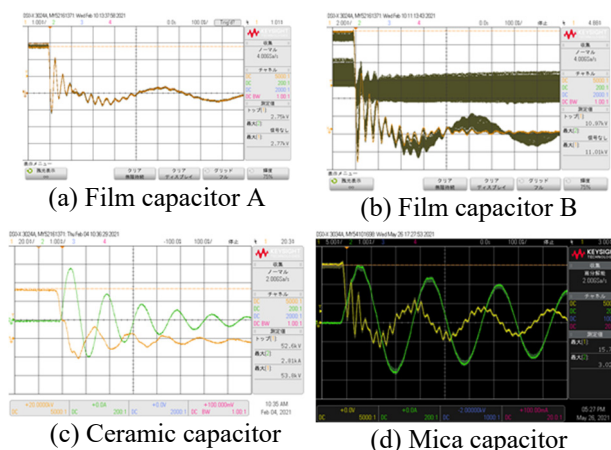


Figure 7: Waveform of discharge to a resistive load.

100 回の放電試験中、波形に変化が見られたのはフィルムコンデンサ B のみであった。フィルムコンデンサ B は放電を重ねるにつれ電圧の振幅が減少していき漏れ電流が増大していくのを確認し、57 回放電したところで充電電圧が上がらなくなったため中断した。また、試験前後の静電容量と $\tan \delta$ を比較したところ、他のコンデンサは値に差がほとんどなかったのに対しフィルムコンデンサ B は静電容量が約 1/1000 の 84 pF、 $\tan \delta$ は約 100 倍の 0.02 という値を示した。

上記よりフィルムコンデンサにはパルス電流耐性の弱いものがあることがわかった。

5. まとめと今後の展望

実験を通して、複数種の高耐圧コンデンサの静電容量の電圧依存性と温度依存性、パルス電流耐性を評価した。

セラミックコンデンサは温度による静電容量の変化 ΔC_t や定格電圧印可による静電容量の変化 ΔC_v がとても大きく、電源に用いた場合安定した出力を出すことは難しい。その反面小型のわりに定格電圧が高く、パルス電流に対して強いいため高電圧大電力を出力する電源を小型にするには最適である。

マイカコンデンサの ΔC_t は $250 \text{ ppm}^\circ\text{C}$ とフィルムコンデンサと同程度の大きさであるが、 ΔC_v はフィルムコンデンサがほとんど変化しないのに対し、1.9%増加した。しかし、フィルムコンデンサ A よりも耐圧、エネルギー密度が高くパルス電流に対して強いため高電圧大電力を出力する電源に広く用いることができる。

フィルムコンデンサ A、B は ΔC_t や ΔC_v にほとんど差はなく、どちらも変化が小さかった。フィルムコンデンサ A はエネルギー密度こそ B に対して 1/4 程度であるが、パルス電流耐性は良好な結果を示した。数 kV 程度の低い電圧かつコンデンサのサイズが問題にならない場合は安定度や信頼性の高い特性の良好なフィルムコンデンサ A が適している。フィルムコンデンサ B は定格電圧もマイカコンデンサに近いほど高く、エネルギー密度は他のコンデンサよりも倍以上大きい。しかしパルス電流耐性は悪く繰り返すうちに性能が悪化してしまった。短絡などの大きなパルス電流を流さない条件ならば、エネルギー密度の高いコンデンサ B を用いることでさらなる電源の小型化、安定化が可能である。

今後は本研究の試験結果を参照して、加速器に用いるパルスパワー電源の電源性能向上を目指す。

謝辞

本稿作成にあたり、マイカコンデンサを支給して頂いた高エネルギー加速器研究機構の多和田正文先生にこの場を借りて深く御礼を申し上げます。