

## DEVELOPMENT OF SELF-HEALING CAPACITORS FOR KLYSTRON MODULATORS

Mitsuo Akemoto<sup>1,A)</sup>, Syusaku Tujio<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization(KEK)

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

<sup>B)</sup> Nichicon Kusatsu Corporation

2-3-1 Yagura, Kusatsu, Shiga, 525-0053

### Abstract

In order to realize a compact pulse modulator for klystron, a reliable capacitor with a long lifetime is required. We have evaluated lifetime performance of self-healing(SH) capacitor using a PFN-type modulator. From the test results, it was confirmed that the SH capacitor has energy densities more than three times compared with the conventional non-healing(NH) capacitor. This paper describes SH capacitors developed by KEK.

## クライストロン電源用SH型コンデンサの開発

### 1. はじめに

最近、クライストロン電源の大電力化に伴い、ますます電源の小型化が求められている。この要求を実現するためには電源で使用される蓄積コンデンサの小型化が不可欠である。

本稿ではSHコンデンサの寿命評価試験の結果及び、KEKでこれまでに開発されたパルス成型回路(PFN)用コンデンサ及び直流用コンデンサについて紹介する。

### 2. コンデンサの小型化

コンデンサのケース容積 $V_{case}$  (m<sup>3</sup>) 次式で与えられる。

$$V_{case} = \frac{2W}{\epsilon_0 \epsilon_r \eta E^2},$$

ただし、Wは蓄積エネルギー(J)  $\epsilon_r$ は誘電体の比誘電率、 $\epsilon_0$ は真空の誘電率(8.85x10<sup>-12</sup> F/m)、 $\eta$ は誘電体容積のケース容積に対する占有率、Eは使用する電位傾度(V/m)である。従って、コンデンサを小型化するには、比誘電率の大きい誘電体で、かつ高い電位傾度までとれるかにかかっている。

従来のコンデンサはコンデンサ薄紙( $\epsilon_r$ ~4.5)またはプラスチックフィルム( $\epsilon_r$ =2.0~3.1)、あるいはその複合体を数層重ねて構成され、電極としてアルミ箔を用いたNH(Non-Healing)コンデンサが一般的であった。NHコンデンサはパルス電流耐量に優れるが、誘電体材質中に確率的に存在する弱点部分でその耐電圧が決定され、電位傾度で50~100V/ $\mu$ mが限界である。これに対して、電極として誘電体フィルム上に薄い膜状金属亜鉛又はアルミ(厚さ200~300Å)を蒸着したSH(Self-Healing)コンデンサは一

度破壊しても、その部分の電極が瞬時に蒸発消化し絶縁が回復する自己回復性の特徴がある。耐電圧性に優れたポリプロピレンフィルム( $\epsilon_r$ ~2.2)を使用した場合、電位傾度を~200V/ $\mu$ m以上上げることができる。

SHコンデンサのもう一つの特長として、フィルム上に多数の分割(パターン)蒸着された電極構造にすると、自己回復限界を超えて誘電体破壊が生じても絶縁破壊の際に生じる過電流によって、小区分単位に故障部分のコンデンサが回路より切り放される。この事によって健全なコンデンサとしての維持ができるので安全面でも優れている。

### 3. SHコンデンサの寿命評価試験<sup>1)</sup>

#### 3.1 コンデンサ素子

SHコンデンサの寿命を評価するために実器過電圧試験(加速度寿命試験)を実施した。図1に試験したコンデンサ素子の断面の構造を示す。誘電体は幅36mmの、300Åの亜鉛蒸着電極を持つ厚さ5.8 $\mu$ mのポリエチレンテレフタレートフィルム(PET)と厚さ10.8 $\mu$ mのポリプロピレンフィルム(PP)を使用し、素子が小さいコンデンサが3直列された構造になっている。

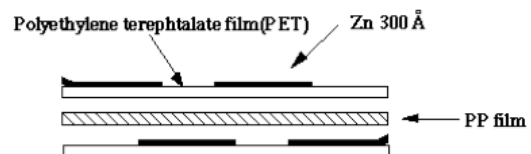


図1 : コンデンサ素子の誘電体と電極の構成

<sup>1</sup> E-mail: mitsuo.akemoto@kek.jp

### 3.2 試験コンデンサと試験条件

試験はATFのパルス電源のPFN（16段、各段コンデンサが3並列接続、特性インピーダンス3.8 Ω、パルス幅6.5μs）に実装して試験した。試験コンデンサの定格容量はコンデンサ素子の直列数を調節して0.0167μFとし、電位傾度は充電電圧47kVで7種類、114V/μm、131V/μm、152 V/μm、183 V/μm、214 V/μm、229 V/μm、274 V/μmとして、それぞれ3台の試験コンデンサを製作した。図2に試験コンデンサの外観写真を示す。PFN用なので特殊引出し電極構造ユニットを碍管に収納して、低インダクタンス構造になっている。試験条件はLC共振充電方式の電源で、充電時間は13 ms、充電電圧47 kV、繰り返しが25Hzである。



図2：試験コンデンサの外観

表1：過電圧試験の結果

Group No.	Sample No.	Structure	Dielectric strength (V/μm)	lifetime (Hours)
1	1	10S	274	8
	2			8
	3			8
2	4	12S	229	8
	5			11
	6			12
3	7	13S	214	102
	8			135
	9			704
4	10	15S	183	1332
	11			-
	12			1272
5	13	18S	152	-
	14			-
	15			-
6	16	21S	131	-
	17			-
	18			-
7	19	24S	114	-
	20			-
	21			-

### 3.3 試験結果

合計2,293時間の試験運転を実施した。その結果

を表1に、図3に電位傾度とショット数（寿命時間）の関係を示す。塗りつぶした丸は破壊したコンデンサで、矢印のあるものは未破壊である。比較のために、白丸はNH型のコンデンサ<sup>[2]</sup>（KEKの入射器での試験）のデータを示す。

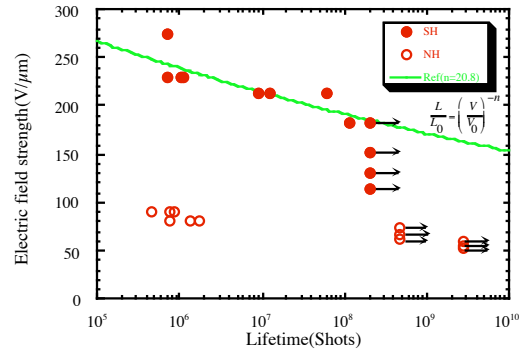


図3：電位傾度と寿命時間の関係

コンデンサの推定寿命は次式で求められる。

$$\frac{L}{L_0} = \left( \frac{V}{V_0} \right)^{-n}$$

ただし、Lは電圧Vでの寿命時間、L<sub>0</sub>は電圧V<sub>0</sub>での寿命時間、nは電圧係数である。破壊したコンデンサの全データをフィッティングして電圧係数を求めるとn=20.8となる。その推定寿命の曲線を図3に示す。この曲線より50 pps X 50,000時間(9 Gショット)の寿命時間のコンデンサを設計する場合、設計電位傾度は154 V/μmになる。この値をNHコンデンサと比較すると2倍以上の電位傾度の設計が可能であることが分かる。誘電体容積でいえば、1/4以上の小型化が可能となる。

### 4. PFNコンデンサの具体例

KEKのATFリニアックのSバンド85MWクライストロン用パルス電源<sup>[3]</sup>のPFNコンデンサは、3章で述べた試験結果に基づいて設計された。PFN回路は2並列14段で構成し、特性インピーダンスが3 Ω、出力パルス幅が7.5μsである。設計電位傾度は128 V/μmとして、余裕を持たせた。コンデンサの仕様を表2にまとめる。また図4に外観図を示す。

表2：PFN用SHコンデンサの仕様

静電容量	0.045 μF
定格電圧	55 kV
ピーク電流	4.2 kA
RMS電流	21 A
誘電体素子	PET+PP
設計電位傾度	128 V/m
設計寿命	50,000時間以上
繰り返し	50 pps
重量	5.8 kg
エネルギー密度	19.4 kJ/m <sup>3</sup>

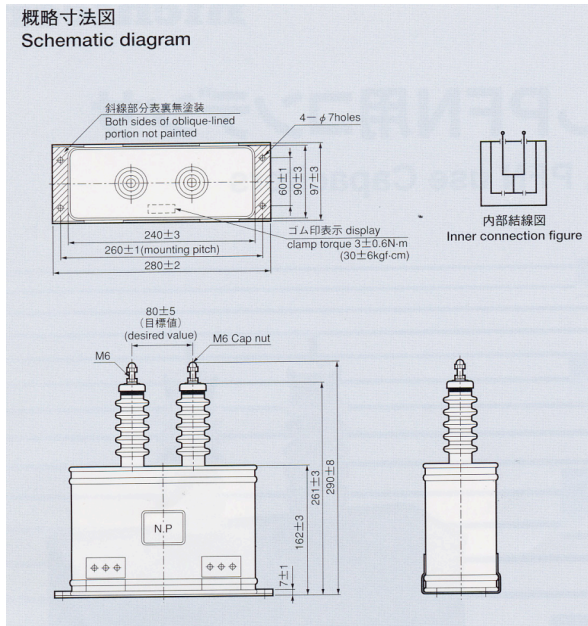


図4：ATFで使用しているPFN用SHコンデンサ

## 5. DCコンデンサの具体例

STFのLバンドクライストロン電源<sup>[4]</sup>は1.7 msの長パルスを出力する長パルス電源で、この電源のコンデンサバンク用にSH型コンデンサが使用されている。コンデンサバンクは定格電圧11 kV DC、容量500 μFのコンデンサ4台を、図5に示すように並列接続して使用する。1台の大きさは68cmW x 25cmD x 68cmHである。

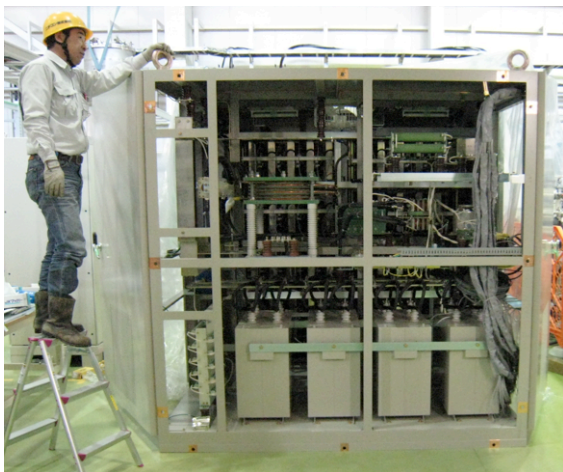


図5：STFで使用しているSH型DCコンデンサ

このコンデンサは誘電体にポリプロピレンフィルムを使用し、その上に、図6(左側)のように楕型に多数の分割(パターン)アルミ蒸着された電極構造を構成しているため、自己回復限界を超えて誘電体破壊が生じても絶縁破壊の際に生じる過電流によって、小区分単位に故障部分のコンデンサが回路より切り放される(図の丸印を参照)。この事によって健全なコンデンサとしての維持ができるので安全面でも優れている。

設計寿命約10万時間に対して設計電位傾度は約300 V/μmまで上げることができた。この値は通常のNHタイプと比較して2倍以上の電位傾度で、またエネルギー密度は270 kJ/m<sup>3</sup>になり体積は1/4まで小型、軽量化できた。コンデンサの仕様を表3にまとめる。

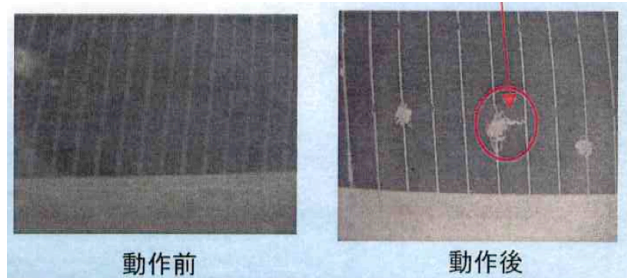


図6：楕型蒸着パターンとヒューズ動作

表3：DC用SHコンデンサの仕様

静電容量	500 μF
定格電圧	11 kV
充電エネルギー	30 kJ
誘電体素子	PP
設計電位傾度	300 V/μm
設計寿命	100,000時間以上
繰り返し	5 pps
重量	140 kg
エネルギー密度	270 KJ/m <sup>3</sup>

## 6. まとめ

SH方式を採用することで、コンデンサは高電位傾度設計が可能となり小型化、軽量化できる。パルス電源コンデンサのますますの大容量化、高電圧化にあって、SHコンデンサの特長が期待される。

## 参考文献

- [1] 阪口博数、松原正明、竹田誠之、明本光生. “パルス変調器用SH形PFNコンデンサの開発”, Proc. of the 20<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, pp. 281-283, 1995.
- [2] H. Honma, T. Shidara, S. Anami, A. Asami, H. Sakaguchi, “Improvements to the PFN Capacitors for the Klystron Modulators of the KEK 2.5-GeV Linac”, Proc. of 1990 Linear Accelerator Conference, pp. 235-237, 1990 KEK-PREPRINT-90-81.
- [3] M. Akemoto, S. Takeda, “Pulse Modulator for 85 MW Klystron in ATF Linac”, Proc. of the 17th International Linac Conference, pp. 415-417, 1994.
- [4] 明本光生、本間博幸、中島啓光、設楽哲夫、福田茂樹. “KEK超伝導試験設備(STF)に於ける10 MWクライストロン用パルスモジュレータの開発”, Proc. of the 32<sup>nd</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, pp109-111, 2007.