

# KEKB 入射器クライストロン電源 PFN コンデンサー寿命試験結果

## LIFE-SPAN TEST RESULTS OF THE PFN CAPACITORS FOR THE KEKB INJECTOR LINAC KLYSTRON MODULATORS

本間博幸<sup>#</sup>, 中島啓光, 明本光生, 設楽哲夫, 道園真一郎  
 Hiroyuki Honma<sup>#</sup>, Hiromitsu Nakajima, Mitsuo Akemoto, Tetsuo Shidara, Shinichiro Michizono  
 KEK, High Energy Accelerator Research Organization, Accelerator Laboratory

### Abstract

The present PFN capacitors for the KEKB injector linac klystron modulators have been used for more than 25 years since 1988 by replacing prototype capacitors which had breakdown failures during the initial stage of the linac operation. A life-span test of the capacitors started to confirm the design feasibility and finished lately after 100,000 hrs of operation. A life-span of  $2.77 \times 10^{15}$  hrs is expected which is far beyond our desired specification of 150,000 hrs.

### 1. はじめに

KEKB 入射器大電力クライストロン用パルス電源の PFN では、半値幅  $6.2 \mu\text{s}$  のパルス出力を発生するため、容量が  $0.0155 \mu\text{F}$  で、耐圧  $47 \text{ kV}$  の碍管型コンデンサーを 40 個使用している。パルス電源の台数は 59 台であり、入射器全体でコンデンサーの総数は約 2400 個にもなる<sup>[1]</sup>。このコンデンサーの誘電体材料は現在ポリプロピレンと低密度紙であるが、入射器の運転当初にはポリプロピレンとマイカペーパー用いた別のメーカーのものが用いられていた。旧コンデンサーには使用開始から 1 万時間を越えたころから、故障が発生し始め、運転に重大な影響を及ぼしたため、新しい設計で導入されたのが現在のコンデンサーである。設計寿命は 15 万時間以上であったが、導入前に行われた寿命試験では、製品の設計よりも過電圧がかかる試験サンプルで素子の絶縁破壊が起こらず、少なくとも 100 万時間以上の推定寿命が見込まれるとして、使用が始まった。

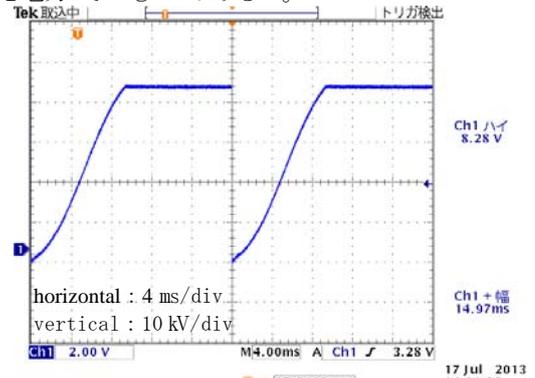
そのため、使用開始と平行して 2 回目の寿命試験が行われた。しかし、過電圧度の高い短時間領域の結果はすぐ得られたが、製品の電圧に近い長時間領域の結果は中々得られなかった。最近になり試験開始以来約 10 万時間で、長時間領域の結果が漸く得られ寿命曲線を描くことができた。

この報告では寿命試験の結果を、旧コンデンサーと現在のものとの設計の違い、また導入開始以来 30 年以上経過した中で発生してきたいくつかの問題とともに述べる。

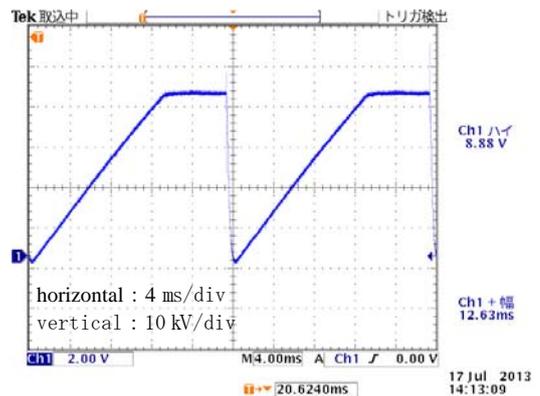
### 2. 旧コンデンサー故障原因分析と現コンデンサーの設計

図 1 に PFN コンデンサーの充電電圧波形を示す。図 1 (a) は運転開始以来パルス電源で用いられている共振充電方式のものであり<sup>[2]</sup>、次節で述べる寿命試験もこの条件で行われた。同図 (b) は

SuperKEKB 計画から本格的に使用されるインバーター充電方式のものである<sup>[3]</sup>。



(a) resonant charging type



(b) inverter charging type

Figure 1: PFN charging voltage waveform.

図 2 は旧コンデンサーについて毎年行われていた  $1 \text{ kHz}$  の  $\tan \delta$  の測定結果を累積使用時間とともにプロットしたものである。旧コンデンサーはいくつかの製造ロットに分かれていて少しずつ導入されていたが、各製造ロットについてその差異を示している。番号は製造年に対応している。この図から 81A の一番製造年の古いものは 16,000 時間まで  $0.02\%$  の値に変化がみられないが、新しいロッ

<sup>#</sup> hiroyuki.honma@kek.jp

トほど値が大きくなっており、劣化の発生点も段々早くなっていることがわかる。tan δ の変化したものの中から絶縁破壊の故障が起こったが、81A のロットではひとつも故障は起きなかった。

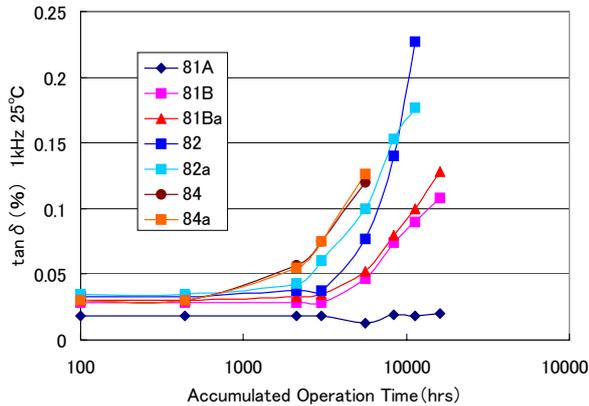


Figure 2: Long-term variation of tan δ of the prototype capacitors.

使用中のコンデンサーを PFN から外し、故障原因推定のため分解調査を行った。図 3(a)は旧コンデンサーの誘電体構成を示すものである。この図から2つの誘電体の内、ポリプロピレンが電極側に配置されていることがわかる。一般的にポリプロピレンは絶縁油によって膨潤し、電極との間の隙間を狭くすることが知られている。また絶縁油の種類も鉱物油であることがわかった。この油は膨潤を助長するものである。調査では更に、誘電体素子・絶縁油の tan δ、コロナ開始電圧、締め付け率(図 3 の b/a であり、この値が大きいほど電極・誘電体間の隙間が大きい)を、tan δ が劣化したロットのグループ (81B, 82, 84) と 81A のロットに分けて測定した。結果を表 1 示す。

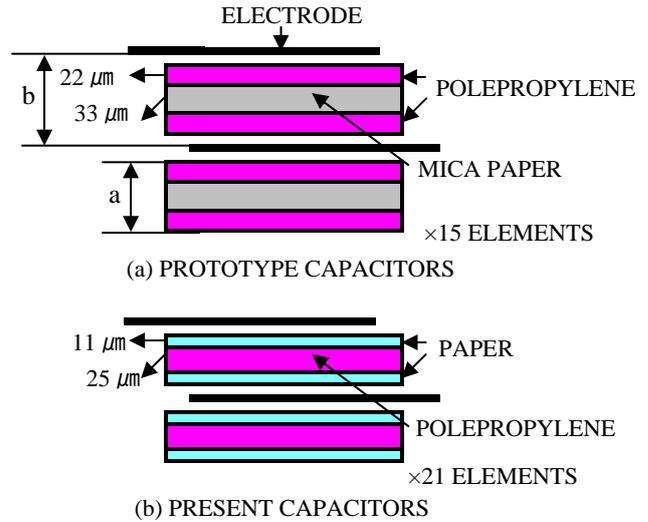


Figure 3: The structure of dielectric element.

この表から、

- 両者ともコロナ開始電圧が定格電圧 (47 kV /15=3.1 kV) にほぼ近くなっていること。
  - 締め付け率がどちらも 100%に近いこと。
  - 絶縁油の tan δ がコンデンサー本体のものと異なり 81A 側で大きくなっていること。
- がわかる。

以上のことから旧コンデンサーはポリプロピレンの膨潤により電極との隙間が減少し、コロナ放電のために電極エッジ付近のポリプロピレンが劣化し、tan δ の上昇により発熱し、故障に至ったと推測される。81A のロットに tan δ の劣化もなく故障も起こらなかったのは、コロナにより劣化した誘電体の成分が絶縁油の中に溶け出すことにより、電極エッジ付近で劣化が加速されなかったためではないかと思われる。

Table 1: Characteristics of Sample Capacitors and Elements

Lot No.	81B,82,84					81A					
Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Operation time × 1000 (時間)	14	14	13	21	21	16	25	25	25	25	
Capacitors 1kHz tan δ (%)	0.57	0.18	0.19	0.11	0.09	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	
Capacitor element	1kHz tan δ (%)	*	*	*	*	0.21	*	0.06	*	0.09	*
	60HZ tan δ (%)	0.52	0.19	0.2	0.31	0.48	0.04	0.05	0.05	0.13	0.08
	Corona starting voltage (kV)	3.3	3.6	3.6	3.3	3	2.7	3.6	3.3	3.6	3.3
	Clamp ratio(=b/a) (%)	*	*	*	97.5~102	97.2~101.5	*	98.9~103.5	98.1~106.6	100.9~103.3	96.7~105.6
	average (%)	*	*	*	100.4	99.5	*	101.6	104.3	102	101.3
Insulating oil tan δ (%)	0.28	0.94	1.29	0.84	0.58	2.5	2.2	1.5	1.2	1.3	

\* show to be not measured.

当初は 81A だけは使用し続けることも可能と思われたが、 $\tan \delta$  の劣化したロットと同様にコロナ開始電圧が低下しているため、入射器で使用している全数を、電極隣には低密度紙を配し、ポリプロピレンを挟んだ構成の現コンデンサー（図 3 (b)）に置き換えることになった。絶縁油についてもポリプロピレンをあまり膨潤させず、コロナ放電で発生する水素ガスに対する吸収性が良い芳香族系のものを使用することにした。また締め付け率は 110%とした。

### 3. 現コンデンサーの寿命曲線

図 4 はコンデンサーの使用開始と平行して始まった寿命試験の結果を示すものである。この試験は製品の素子数 21 を 4 段階に渡って減らし、誘電体素子に印可される電位傾度を大きくして、製品の寿命を加速させるものである。21 素子の製品を 43 kV で運転した時の電位傾度の値は 43.6 V/ $\mu\text{m}$  である。12,11,10,9 素子のサンプルを使うことによりそれが、それぞれ 76.2,77.9,91.5,101.7 V/ $\mu\text{m}$  となる。一般にコンデンサーの寿命試験の結果は (1) 式で表される<sup>[4]</sup>。

$$T = T_0 \left( \frac{E_0}{E} \right)^n \quad (1)$$

ここで  $T_0$ 、 $E_0$  は電位傾度の高いサンプルの寿命と電位傾度、 $T$ 、 $E$  は低いサンプルのそれぞれの値、 $n$  は電圧加速指数と呼ばれる。寿命曲線は短時間領域と長時間領域とに別れ、 $n$  は前者で小さく、後者では大きくなるのが知られている。誘電体によっても異なるがフィルムの場合、交流で使用されるコンデンサーでは前者は 9~11、後者は 25~30 とされている。今回の結果では、前者の値は 16.2、後者は 41.3 となった。図 1 からわかるように、PFN 充電電圧は電圧の反転がないので、交流での値に比べて大きくなっていると考えられる。図 5 は寿命試験で誘電体素子が寿命に至った破壊箇所を示したものである。同図(a)は短時間領域の故障のものであり、同図(b)は長時間領域のものである。前者では誘電体の全体に損傷が見られるが、これは高電位傾度の電圧と  $\tan \delta$  による発熱のため、全体が劣化することによる。後者の損傷部は電極エッジ部にあり、コロナ放電による誘電体の劣化がきっかけになった破壊であることを示している。長時間領域の指数 41.3 と 77.9 V/ $\mu\text{m}$  での 98,023 時間を  $T_0$ 、 $E_0$  とし、(1) 式に代入して計算した結果、製品の予測寿命は  $2.77 \times 10^{15}$  時間となった。設計寿命の 15 万時間を大幅に上回るものであり、高さ方向に小型化できることがわかった。

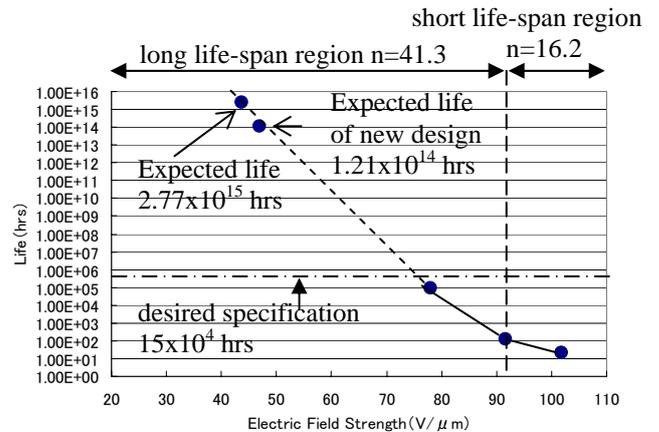
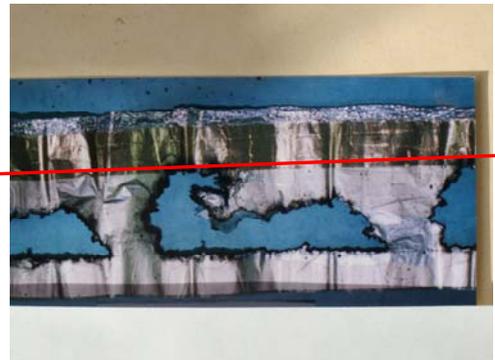
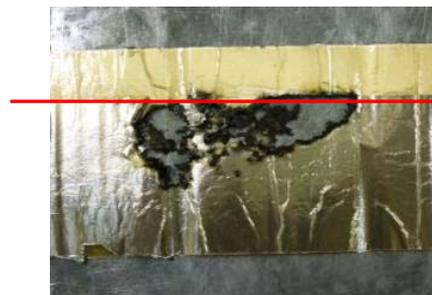


Figure 4: Life-span dependence of the present capacitors on the applied electric-field strength.



(a) short life-span region



(b) long life-span region

Figure 5: Area of dielectric material breakdown. Red lines show electrode edge.

### 4. PFN コンデンサーの現状

現コンデンサーはこれまで 25 年以上使用されている。図 6 はコンデンサーの外観を示すものである。前節で述べたように電気的な故障は起こりようがないのだが、コンデンサーの PFN への取り付け時に、①のエポキシ樹脂部でその盛り上がりのため、固定の際に絶縁油漏れが起きたことがあった。最近では高圧電極からの編組線リード ②)

が脱離することがあり、調査の結果、リードのハンダのつきをよくするため、銅製電極に施している錫メッキが、銅から剥離し易くなっていることがわかった。これについてはリードの補強方法を現在検討している。最後に誘電体の調達の問題について述べる。図 3 (b) でポリプロピレンの厚さは  $25\ \mu\text{m}$  であるが、この材料の調達ができなくなり、代替品の厚さは  $22\ \mu\text{m}$  となった。これに伴い、メーカーの設計はこのポリプロピレンと厚さ  $9\ \mu\text{m}$  の低密度紙を使った 23 素子のものになった。このため  $43\ \text{kV}$  運転時の電位傾度は  $46.8\ \text{V}/\mu\text{m}$  と現在の値より高くなる。図 4 にはこの設計での予測寿命もプロットされているが、それでも  $1.21 \times 10^{14}$  時間の長寿命を有していることがわかる。

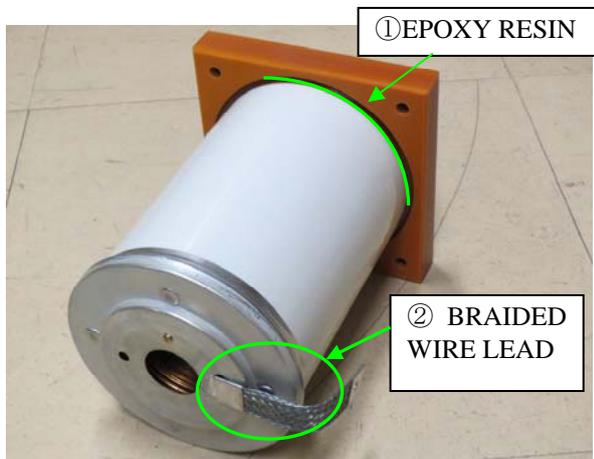


Figure 6: External view of a PFN capacitor.

## 5. まとめ

KEKB 入射器大電力クライストロンパルス電源用 PFN コンデンサーの長時間領域の寿命試験の結果が、試験開始以来約 10 万時間を経て漸く得られた。得られた加速指数 41.3 と、電位傾度  $77.9\ \text{V}/\mu\text{m}$  での寿命 98,023 時間から使用品の予測寿命は  $2.77 \times 10^{15}$  時間と推定される。これは設計寿命の 15 万時間を大幅に上回るもので、今後の SuperKEKB 運転での使用にも十分に余裕のあるものと考えられる。

## 参考文献

- [1] H.Honma, et al., "Upgrade of the PF 2.5 GeV linac Klystron Modulator for the KEKB", Proc. 1994 Linac Conference, Tsukuba, Japan, August 21-26, 1994.
- [2] T.Shidara, et al., "KLYSTRON MODULATOR FOR THE KEK 2.5GeV LINAC", *Nucl. Instr. Meth.* A279, 423(1989).
- [3] H.Nakajima, et al., "小型パルス電源の特性と今後の課題", Proc. 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, July 31-Aug. 1, 2003
- [4] ニチコン株式会社草津工場、「電力用コンデンサーの絶縁性能について」(資料 NO.82)、S63.4.