

# IMPROVEMENTS TO THE PFN CAPACITORS FOR THE KLYSTRON MODULATORS OF THE KEK PF LINAC

Hiroyuki HONMA, Tetsuo SHIDARA, Shozo ANAMI

National Laboratory for High Energy Physics

## ABSTRACT

The PFN capacitor break down failure of the klystron modulators was one of major troubles in the microwave source of the KEK PF linac. Many kinds of researches were accomplished to trace the cause of it. Acceleration tests of the life span for the design of new type capacitor were performed. On the basis of its results, new type capacitors were manufactured. Two fifths of the PFN capacitors were replaced by new type ones.

## PFライナック大電力パルス電源 PFN用コンデンサーの故障と改善

### 1. はじめに

放射光実験施設入射器マイクロ波源においては、大電力パルス電源用PFNコンデンサーの故障が問題となっていた。故障原因推定のための種々の調査の結果、故障はその使用方法<sup>1)</sup>ではなくコンデンサーそのものに起因するものであることがはっきりしてきた。

故障の対策として新タイプのコンデンサーを製造することが急がれた。設計のための電圧加速試験の結果に基づいて新タイプのコンデンサーを製造した。そして現在までに49台中20台のパルス電源で使用を始めた。

本報告では最初に旧コンデンサーの構造、使用条件について説明し、82年以降定期的に測定してきたコンデンサー特性の経時変化について述べる。次に旧コンデンサーの分解調査結果から故障原因を推定し、終わりに電圧加速試験結果から新コンデンサーの寿命を予測する。

### 2. 旧コンデンサーの構造<sup>2)</sup>と使用条件

図1に旧コンデンサーの内部構造を示す。誘電体材料はマイカペーパーとポリプロピレンフィルムによる複合誘電体であり、電極のすぐ隣にはポリプロピレンが配置されている。素子数は15個でそれを直列に接続したものが絶縁油含浸の形で磁器碍子中に収められている。図2の様にPFNは20組のコンデンサーとコイルの梯子型回路であり、コイルのインダクタンスは通常0.6  $\mu$ Hである。パルス波形の微調整を可能にするためにコンデンサーの残留インダクタンスはこの値よりかなり小さくする必要がある。コンデンサーの構造をブッシングタイプにせず筒型にしたのはこのためである。また絶縁油の熱膨張、収縮はベローズで吸収され、更に異常な熱膨張時には防爆機構が働くようになっている。

図3 a), b)にPFNの充放電条件を示す。この様な条件下でのコンデンサーの寿命(T)は素子数を15と決めるために行なった電圧加速試験の結果から、印加電圧(V)との関係が、 $T \propto V^{-12}$ であると仮定して、約28万時間と予測されていた。

### 3. 旧コンデンサーの故障とtan $\delta$ 経時変化

旧コンデンサーの故障は使用時間が1万時間を越えたあたりの86年夏から始まった。図4は87年夏に測定したパルス電源の各ユニットにおける誘電体損失(tan $\delta$ )の平均値とバラつき範囲を示したものである。上の部分にそれぞれの印加電圧値を同時に示した。2-4から4-1までと1-1, 4-4, 5-5のtan $\delta$ は他のユニットの値に比べてその平均値及びばらつき範囲の両者においてはるかに小さい値となっている。故障コンデンサーの発生は全てこれらのユニット以外のユニットで起きている。この時これらのユニットの印加電圧が他と比べて低かったという事もできない。この時点の47台のユニットで使用されていた全コンデンサーは製造ロットNO.により81A, 81B, 82, 84の4つに分類される。

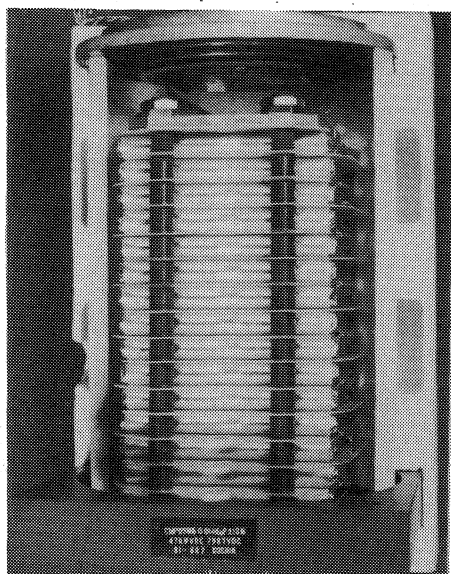


図1 旧コンデンサー内部構造

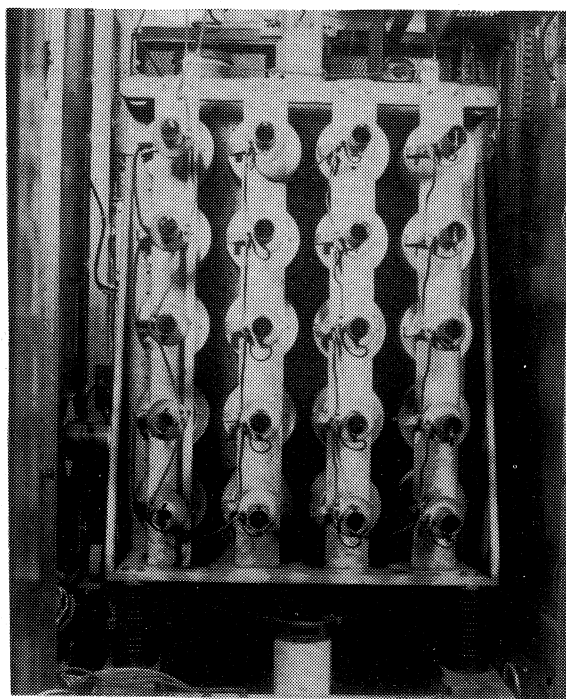


図2 PFN

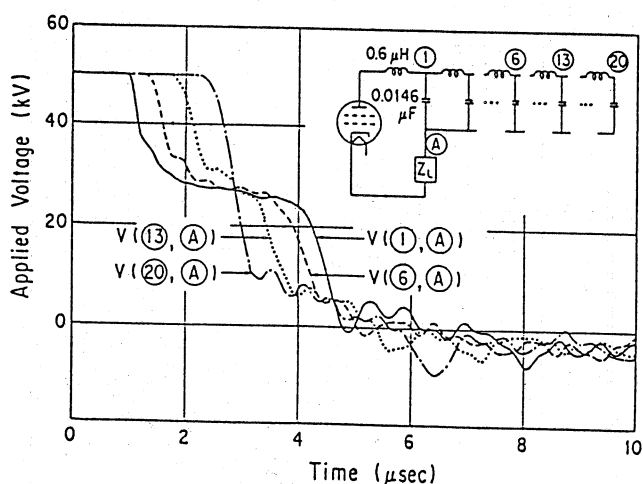


図3 a) 放電時PFNコンデンサー各部電圧

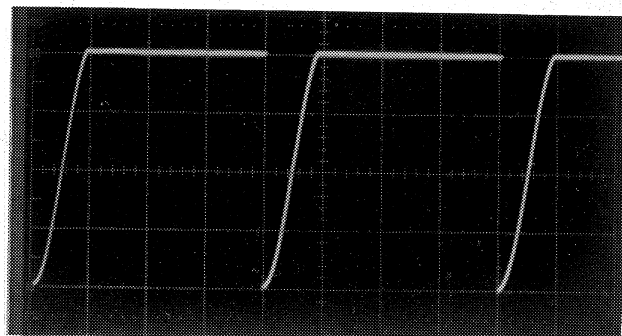


図3 b) 充電電圧波形

縦: 10kV/div  
横: 10msec/div

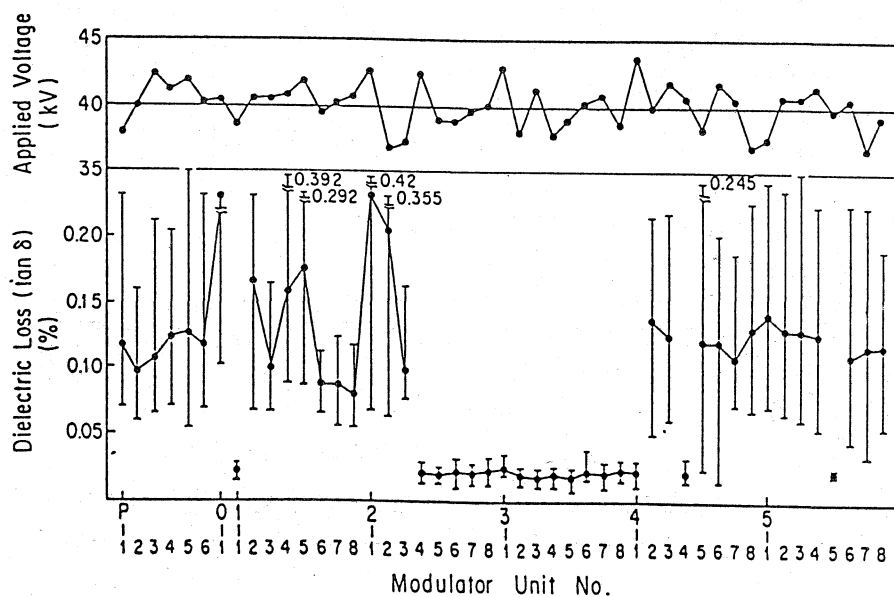


図4 各ユニットのtanδ平均値と印加電圧

図5は上述の4つの製造ロットから各2台ずつのユニットを選びそれぞれのユニットで平均した  $\tan \delta$  の値の経時変化を示すものである。これによると各ロットの平均値は使用開始時の0.02%から1000時間程度迄ほとんど変化していない。しかしそれを過ぎるあたりから、まずロットNO. 84のものが増加し始め、3000時間くらいからNO. 82のものが、次にNO. 81Bのものが増加し始めている。一方、故障を起こしたことの無いNO. 81Aのものは初期の値をそのまま維持している。

#### 4. 旧コンデンサーの分解調査

故障原因推定のため、88年に、それまで1万2千時間位使用したロットNO. 84のコンデンサーを数個分解した。それらのコンデンサーの単素子のコロナ開始電圧を測定したところその値は定格電圧(47kV)に対して平均1.16と言う低い値であった。この値は、50Hzの交流による開始電圧であるのでPFNでの実際の充放電条件では更に低い値である事が予想される<sup>3)</sup>。図6は一つのコンデンサー中の15個の素子それぞれに定格電圧の6~7倍の電圧を印加して、貫通破壊を起こさせた時の故障箇所の分布を一つの図に重ねて書いたものである。この図でわかるように、破壊場所は誘電体の電極はく端部に集中している。2.で述べたように電極箔に接した誘電体はポリプロピレン箔であり、この材料はコロナに弱い事が一般に言われている。破壊試験前のこの部分には筋状の傷も観察された。その後の調査でこの傷はロットNO. 81Aを含めた全てのロットで確認できた。以上の事実から誘電体の電極箔端部がコロナ放電により劣化していたことは明らかであるが、この事実がコンデンサーの故障に繋がっていたかどうかははっきりしない。

#### 5. 新コンデンサー設計のための電圧加速試験

旧コンデンサーの故障対策として、二つのタイプのコンデンサーの加速試験を行なった。一つは天然マイカを誘電体として使用するもの(以下Aタイプと呼ぶ)であり、もう一つは低密度紙とポリプロピレンフィルムの複合誘電体を使用するもの(以下Bタイプと呼ぶ)である

図7にAタイプコンデンサーの電圧加速試験結果を示す。試験は実際のパルス電源に設置して行なった。このタイプのコンデンサーの実績として300ppsで運転されるPFNで単素子あたり30V/ $\mu\text{m}$ の電気ストレスで使用している例があるので、50ppsのPFNに対してはもっと高い所を狙って、71.6V/ $\mu\text{m}$ , 107.4V/ $\mu\text{m}$ , 137.9V/ $\mu\text{m}$ , 189.7V/ $\mu\text{m}$ の4点で測定を行なった。各点のサンプル数は三つずつであるが、189.7V/ $\mu\text{m}$ のサンプルは全て試験開始後すぐに破壊したので、寿命試験の参考にならないとして示していない。次式で与えられる電圧加速係数(n)は、

$$T \propto (E)^{-n} \quad T: \text{寿命} \\ E: \text{電気ストレス}$$

139.7V/ $\mu\text{m}$ と107.4V/ $\mu\text{m}$ の2

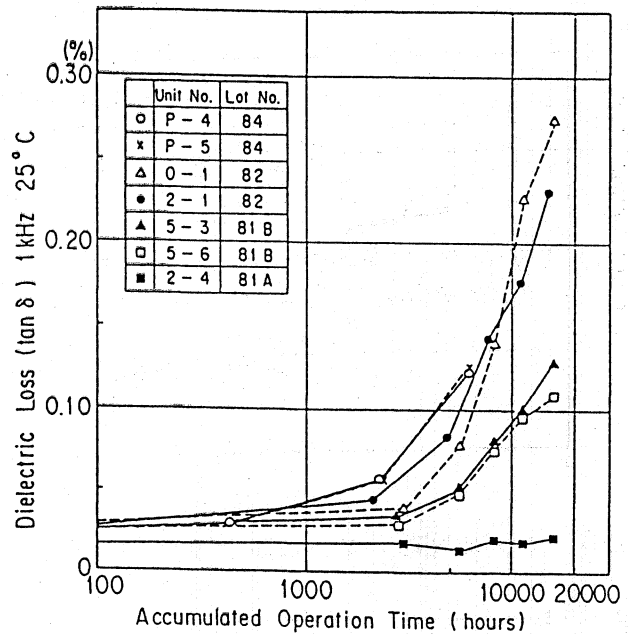


図5  $\tan \delta$  経時変化

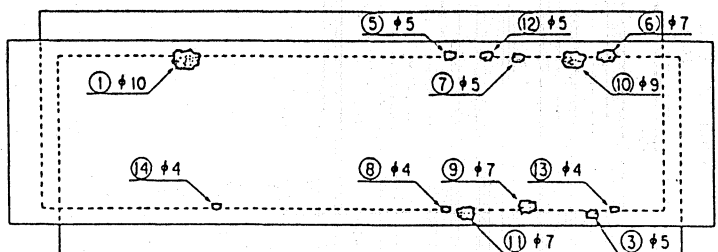


図6 素子破壊場所

点から9と得られ、 $107.4 \text{ V}/\mu\text{m}$ と  
 $71.6 \text{ V}/\mu\text{m}$ の2点から14.7と得られた  
 Bタイプコンデンサーについても、実際のパルス電源で試験を行なった。試した電気ストレスの値は $57 \text{ V}/\mu\text{m}$ 、 $61 \text{ V}/\mu\text{m}$ 、 $65 \text{ V}/\mu\text{m}$ の三通りである。こちらの方は87年6月の試験開始以来、1万時間経過したがまだ壊れていないここでAタイプとBタイプで試験した電気ストレスの値が異なるのは、マイカが強いと言うこともあるがコスト的な面でマイカには高い電気ストレスを与えなければならないという理由もある。今回の故障対策品としては、いくつかの理由でBタイプのコンデンサーを購入することにした。Bタイプコンデンサー試験品は購入を決めた時点で2500時間運転されていた。一番条件のきつい $65 \text{ V}/\mu\text{m}$ と製品の電気ストレスの比1.5と加速試験で得られた電圧加速係数14.7を使って計算された推定寿命は27万時間となり、PFリニアックの年間運転時間が5000時間としても十分満足のいく結果である。尚この推定寿命は現在100万時間以上に延びている。

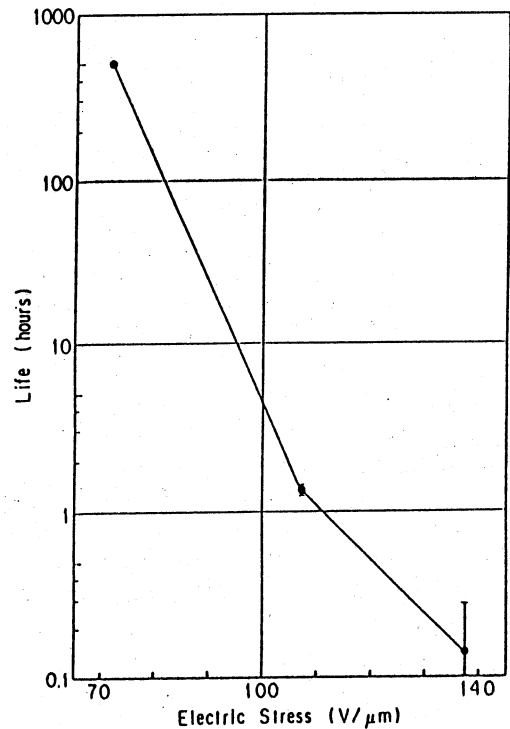


図7 電圧加速試験結果

## 6. まとめ

- 1) 旧コンデンサーは $\tan\delta$ の経時変化のない一番古いロット81Aとその他のロットに大きく分類され、今まで発生した故障は全てその他のロットのコンデンサーで起きている。
- 2) 82年夏以降定期的を実施してきた特性測定によって故障発生の徴候を知ることができた。
- 3) コンデンサーの分解調査の結果、どのロットのコンデンサーもコロナ放電によって誘電体の電極箔端部がかなり劣化していることが明らかになったが、ロットNO. 81Aのコンデンサーだけが故障を起こさない理由は、メーカーから単素子の厚みの違いとか、絶縁油の規格の違い等いろいろ報告を受けているが、はっきりしたことはわかっていない。
- 4) PFNコンデンサー不良対策としてポリプロピレンフィルムと低密度紙を誘電体としたコンデンサーを使い始めた。推定寿命は十分であり、 $\tan\delta$ 値の増加もまだ見られない。

## 謝辞

この報告を書くにあたって、コンデンサーの分解調査をして頂いたニチコン(株)の阪口氏、双信電機(株)の山田氏その他の皆さんに感謝します。

## 参考文献

1. H. Honma et al., Proc. of the 12th Linac Meeting in Japan, JAERI, 1987, 180.
2. T. Shidara et al., KEK Preprint 85-49, October 1985.
3. H. Sakaguchi (Nichicon Co.), Private communication.