

# LIFE-SPAN DIAGNOSIS ABOUT HV COMPONENTS FOR THE KLYSTRON MODULATORS OF KEKB INJECTOR LINAC

Hiroyuki Honma#, Hiromitsu Nakajima, Mitsuo Akemoto, Tetsuo Shidara, Shinichiro Michizono

KEK, High Energy Accelerator Research Organization, Accelerator Laboratory  
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

## Abstract

Degradation phenomena in the high voltage transformers of the KEKB linac klystron modulators were investigated aiming to use the existing resonant charging type modulators in the Super KEKB project. Although about 10 inverter charging type modulators will be newly introduced in SuperKEKB injector linac, we still have remaining 50 conventional type modulators, utilizing rectifier and charging transformers. For the stable operation of klystron modulators, reviews of the degradation in the insulating paper as well as in the insulating oil characteristics of the transformers are inevitable. The way to judge their degradation, based on the life-span dependence on the applied electric-field strength, is presented in this report.

## モジュレーター高圧部品の寿命診断

### 1. はじめに

KEKB 入射器では約 60 台の大電力クライストロン用パルス電源を使用している。SuperKEKB 計画に伴い、その内 12 台の電源がインバーター充電方式を用いた小型パルス電源となる予定である。しかし残りの約 50 台の電源では、従来の高圧部品である整流電源ユニット三相トランスと PFN 共振充電用の充電チョークトランスを使い続けることとなる。図 1 に電源の回路図を示す。これらのトランスは KEKB 計画が始まる時に、それまでの容量 24kVA

を 2 倍とする改造を行った。改造は 2 社のトランスメーカーによって行われ、その内 1 社（仮に A 社とし、もう 1 社を B 社とする）が製作した三相トランス  $\Delta$ - $\Delta$  結線タイプと充電チョークトランスに初期故障が発生し、改修を行った経緯がある。

このようなことから、新計画が始まりつつある現時点で、改修を行ったトランスの層間絶縁紙の耐圧設計が長期間の使用に耐えるものになっているかを検討し、絶縁油の特性測定を通じた保守点検を続けていくことは電源の安定な運転にとって重要なことになる。

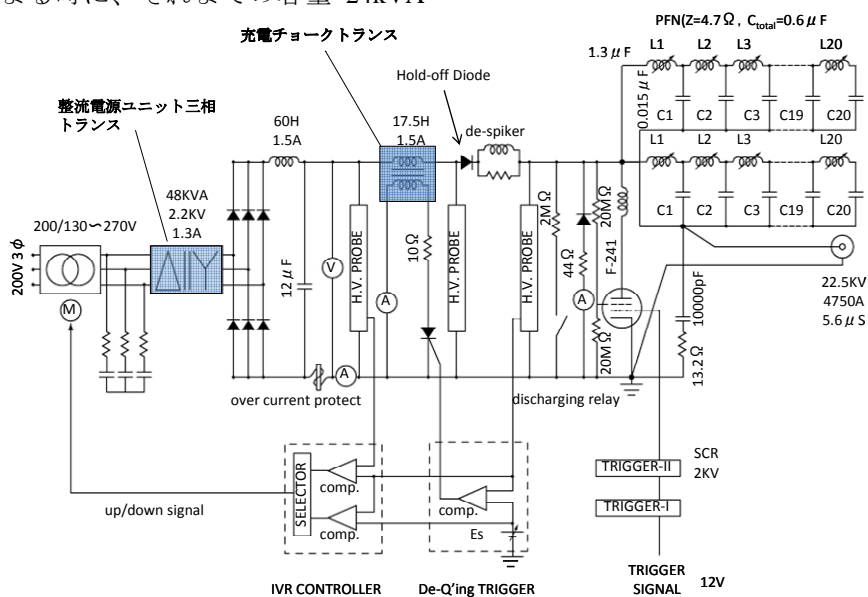


図 1 : 大電力クライストロン用パルス電源回路図

## 2. トランス構造と絶縁紙のストレス電界

図2は整流電源ユニット三相トランスと充電チョークトランスの構造を示したものである。

三相トランスでは低圧の1次側コイルが鉄芯のすぐ隣に巻かれ、高圧の2次側コイルがその外側に巻かれる。このトランスでは、入射器全体の電源を運転中、入力電源ラインに出て行く高調波を抑制するために、 $\Delta$ - $\Delta$ 結線と $\Delta$ -Y結線のものを同数ずつ使用している。充電チョークトランスでは、漏れインダクタンスを低く抑えるため、2次側コイルが1次側コイルをサンドイッチ状に囲んでいる。

両者とも高圧側コイルは複数のユニットに分かれ、その数は三相トランスで2、チョークトランスでは20である。各ユニットはエナメル線と層間絶縁紙を交互に重ねて何層にも巻いてある。絶縁紙の表裏に加わる電圧(層電圧) $V$ はトランスのタイプに応じて以下のように計算される。

$$V = \frac{V_0}{aN} \dots\dots\dots(1)$$

$V_0$ (トランス1脚の電圧) :

- 21,810V(三相トランス  $\Delta$ - $\Delta$ 結線)
- 21,810 $\times$ 1/ $\sqrt{3}$  V(同上  $\Delta$ -Y結線)
- 25,000 $\times$ 1/ $\sqrt{2}$  V(充電チョークトランス)

$a$ (ユニット数) : 2(三相トランス)

20(チョークトランス)

$N$ (層数) : 表1による

表1は(1)式から計算された層電圧と層間絶縁紙厚から求めたストレス電界等を各トランスについてまとめたものである。右から3列目にはKEKB開始以来の故障数を示した。故障が始まった順番は充電チョークトランス、三相トランス $\Delta$ - $\Delta$ 結線、同 $\Delta$ -Y結線の順番である。ここで、この順番とストレス電界の大きさの順番を見ると三相トランスの2つの結線については故障順番と対応している。しかし、 $\Delta$ - $\Delta$ 結線の値が2.16kV/mmであるため、電界が0.82kV/mmのチョークトランスが一番早く故障を起こしたのは理解することが難しい。

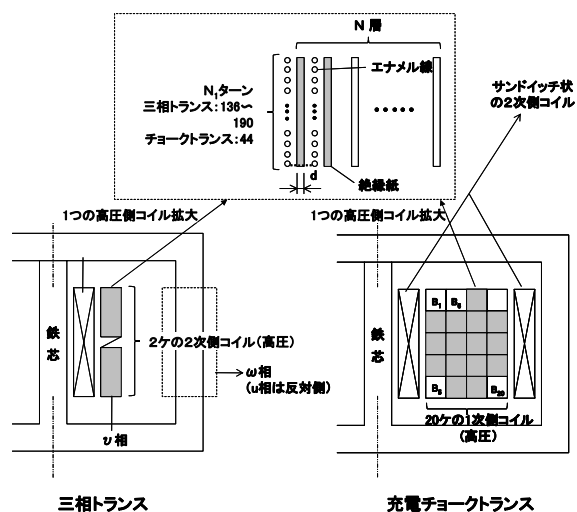


図2 : トランス構造と層間絶縁紙

表1 : 絶縁紙ストレス電界比較

種類	層数	層電圧 (V)	絶縁紙厚 (mm)	電界 (kV/mm)	故障数	改修紙厚 (mm)	改修電界 (kV/mm)
チョークトランス	3	295	0.36	0.82	4	0.54	0.55
時間補正				1.11*			0.74
$\Delta$ - $\Delta$	14	779	0.36	2.16	3	0.90	0.86
$\Delta$ -Y	12	525	0.52	1.01	2	0.72	0.73
$\Delta$ -Y(B社)	11	573	0.72	0.80	0		
$\Delta$ - $\Delta$ (トリスタン)	21	519	0.36	1.44	2		

\*は 0.82 $\times$ 1.35

そのため、当初はこのトランス4台の故障箇所が20個のユニットの内、高圧側に近い側で集中していれば、チョークトランスから充電されるPFNの

放電時に発生するスパイク電圧の影響と言える可能性もあったため、分布を調べてみたがそういうこともなく、低圧側から高圧側に広く分布していることが分っていた<sup>[1]</sup>。

ただ $\Delta$ - $\Delta$ 結線との関係は別として、 $\Delta$ -Y結線の電界との大小関係は以下のように考えることができる。図3は充電チョークトランスの電圧波形を三相トランスと比較して示したものである。電圧が実効値以上である時間の比は1.67倍となり、電圧そのものの違いも含めるとストレス電界は1.11kV/mmとなるので、 $\Delta$ -Y結線タイプの値より大きくなる。

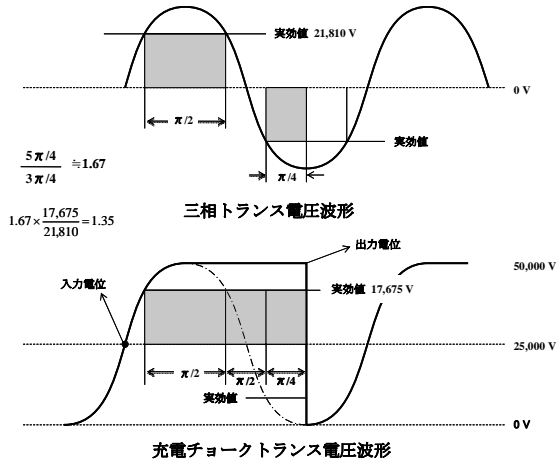


図3：両トランスの電圧波形比較

故障の対策として、三相トランス $\Delta$ - $\Delta$ 結線、充電チョークトランスともに層間絶縁紙厚を増やしストレス電界がそれぞれ、0.86kV/mm、0.55 kV/mmに少なくしている。但し、上述したようにチョークトランスの値は元々大きくないので、このトランスについては念のため、エナメル線を綿が二重に被覆されたものに置き換え、製作中にエナメル線に傷をつくの防止している。

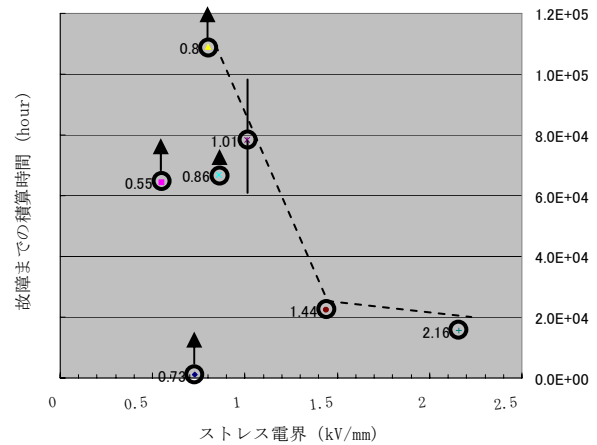
$\Delta$ -Y結線の三相トランスについては、初期の時点で故障は起こしていなかったが、他のものの改修が終わり一段落した2003年に1台と、少し間をおいて昨年2011年6月に1台が故障を起こし、これについてはストレスを0.73kV/mmにする対策をしている。

図4は、A、B両社製トランスについてストレス電界と故障までの積算時間（A社製改修品とB社製については2012年3月31日現在の運転時間）との関係を示したものである。ここで、これまでの議論から充電チョークトランスではストレス電界と故障との因果関係がはっきりしないので、改修品のプロットのみにした。その代わりに、ストレス電界と故障時間との関係を明らかにするため、電源容量増前トリスタン運転中1990年に、 $\Delta$ - $\Delta$ 結線タイプ（ストレス1.44 kV/mm）が故障を起こした時のプロットを加えている。

この図からストレスが1kV/mm付近から故障時間、運転時間ともに大きく増加を示し、A社製 $\Delta$ -Y（ストレス1.01kV/mm）の故障までの時間は8万時間に及び、B社製 $\Delta$ -Yの運転時間（ストレス

0.8kV/mm）は10万時間を越えていることがわかる。従って、A社製三相トランス2タイプと充電チョークトランスの改修品（ストレス0.73kV/mm、0.86kV/mmと0.55kV/mm）とも、今後も安心して使用できると考えられる。

但し、次節で述べるように改修前の $\Delta$ -Y結線タイプ（同1.01kV/mm）に層間絶縁紙劣化の兆候が現れている。 $\Delta$ - $\Delta$ 結線タイプの改修品（同0.86kV/mm）については、そのストレスに値が近いため、現在はまだ兆候が見られないものの、今後注意が必要である。



プロット横の数値はストレス値を、上向きの矢印は運転時間を示す。

図4：ストレス電界と故障までの積算時間

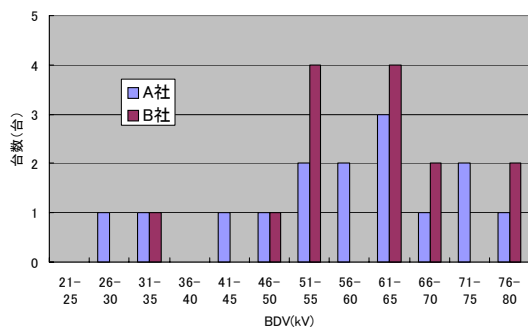
### 3. トランス絶縁油の特性測定

トリスタンからKEKBへの容量2倍化の際、三相トランス、充電チョークトランスともに冷却をそれまでの空冷式から、水冷式に変更している。しかし、48kVAの容量の値は大きいため、トランスメーカーから定期的な絶縁油の劣化診断と交換を勧められていた。

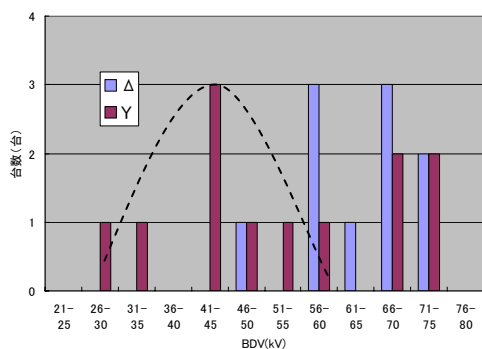
図5は2011年1月に各種トランスタンクからサンプルした絶縁油の絶縁破壊電圧試験結果の度数分布を示す。同図(a)は2メーカーによる充電チョークトランスの絶縁油試験結果であり、同図(b)はA社製三相トランスの2タイプの結果を色分けしたもの、同図(c)は同じくB社製の同様な結果である。これらの図から、(a)については両者のものともひとつの分布曲線に納まっており、(c)についてもB社製三相トランスの2タイプがひとつの分布に共存していることが分る。しかし、A社製の $\Delta$ -Y結線タイプと $\Delta$ - $\Delta$ 結線タイプについては別々な分布を持っており、 $\Delta$ -Y結線タイプの分布が低い破壊電圧の方にシフトしていることがわかる。

このタイプは前節で述べたように、故障実績が1

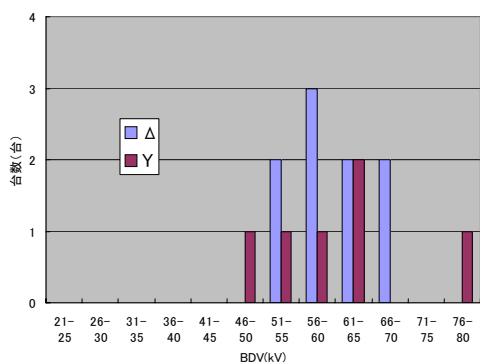
度しかなくストレス電界も比較的小さかったため、層間絶縁紙厚の補強を行ってこなかったものである。



(a) 2社製充電チョークトランスの分布



(b) A社製三相トランスの分布



(c) B社製三相トランスの分布

図5：絶縁破壊電圧度数分布

表2はこの年の三相トランス絶縁油の破壊電圧試験とガス分析の結果を、この時点より3年前に行った同様の測定結果とともにまとめたものである。この表から、破壊電圧試験の結果では、低い電圧にシフトを起こしたΔ-Y結線タイプ4台中2台のものに10kV以上の経年劣化が見られており、

2011年に34kVの値を示したno.4のトランスがこの年の6月に故障を起こしている。ここで、JISによれば30kV以上の破壊電圧は新油の出荷基準とされている値ではあるが、15kV未満になるまで使用は可能であることになっている<sup>[2]</sup>。一方、Δ-Δ結線タイプのもはこの表中ではどれも増加を示しており、この結果からも、両者の違いがはっきりしている。

可燃性ガス分析の結果では、文献3による要注意レベルに比較して量的には多くはないが、絶縁紙の放電で発生するとされるCOガスがΔ-Y結線タイプで検出されており<sup>[3]</sup>、Δ-Δ結線タイプでは未検出であることがわかる。故障後にガス分析を実施した上述の故障品でのCOガスの検出値は、表中では最大の62ppmを示している。更に、故障を一度も起こしていないB社製Δ-Y結線タイプ(no.8)では、破壊電圧が18kVと極端に低くなっているのにも関わらず、このガスが未検出であることは興味深い。

ガス分析では、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>ガス量の変化もひとつの特徴を示した。このガスは絶縁油の高温加熱を示すとされている<sup>[3]</sup>。no.1のΔ-Y結線タイプは破壊電圧が3年間で23kVもの低下を示しているが、このガスの値がその間、4ppmから要注意レベルである79ppmまで増加していることがわかる。

表2：絶縁油破壊電圧とガス分析結果

no.	結線	BDV(kV)		経年変化	ガス分析(ppm)			
		2008.1	2011.1		2008		2011	
					CO	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CO	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
1	Δ-Y	65	42	-23	28	4	31	79
2	Δ-Y	38	27.5	-10.5	25	3	21	2
3	Δ-Y	61	66	5	22	2		
4	Δ-Y		34				62*	1*
5	Δ-Δ	46	71	25	n	1		
6	Δ-Δ	52	58	6	n	2		
7	Δ-Δ	60	65.5	5.5	n	2		
8	Δ-Y	18			n	1		

nは未検出を表す

\*は故障後に測定した値を示す

これまでに列挙した3つのパラメーター即ち絶縁破壊電圧、COガス、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>ガスの内のどのパラメーターがトランスの故障に直接結びついているかに

については、情報は十分ではない。しかし、KEKBの三相トランス $\Delta$ -Y結線タイプの故障に限っては、絶縁破壊電圧より、COガスが重要ではないかと推測される。2008年の測定では、充電チョークトランスでは破壊電圧が22kVを示すものが1台（表2には示していない）、三相トランスでは18kVの値を示すもの（表2のno.8）があった。充電チョークトランスでは工場出荷時に約2倍の出力電圧を1分間印加し、漏れ電流やその他の異常を確認する試験が行われている。図6はこの試験装置を示すものである。工場から出荷後KEKで6年ほど使用したこのトランスに、再度出荷試験を実施したところ問題なく通過した実績がある。

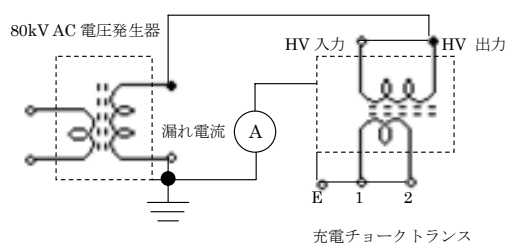


図6：過電圧出荷試験

KEKBへの増強では、48kVAへのトランス容量の2倍化は複数年にわたり行われたため、これらのある時点で一度にガス分析すれば可燃性のCOガス、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>ガスの経年変化のグラフを作ることができる。図7は2012年に測定した計20台の $\Delta$ -Y結線タイプ三相トランスの両方のガス量をプロットしたものである。横軸はトランスの運転時間である。この図から、1年のリニアックの運転時間が仮に5000時間として、両者とも測定年の数年前から急激にガス量が増加していることが確認でき、A社製 $\Delta$ -Y結線タイプを早急に改修する必要性を示している。

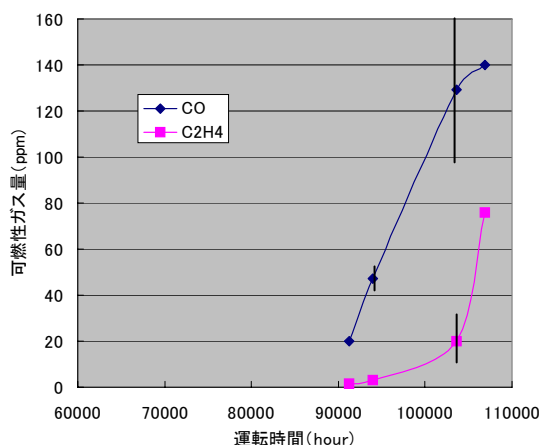


図7：絶縁油ガス量経年変化

#### 4. まとめ

クライストロン用パルス電源の高圧整流電源ユニット三相トランスと充電チョークトランスの故障時間とストレス電界の関係、また三相トランスの故障、絶縁油破壊電圧とガス分析結果との関係について述べた。

トランスを製造した2つのメーカーの内、B社製のトランスについてはKEKB開始に伴う容量2倍化の改造時点から1度も故障を起こしていない。A社製のものについては3種類のトランス全てについて故障が起こり、改修を施すことになった。層間絶縁紙のストレス電界の設定が高すぎたためと考えられる。

改修後のトランスについては、ストレス電界がどれも1kV/mm以下のレベルにあり、これからも長時間の運転に耐えることが予想される。

保守として行った絶縁油の特性測定結果から以下のことがわかった。

- COガス分析結果が三相トランス $\Delta$ -Y結線タイプの故障につながる絶縁紙劣化診断材料として有効である。
- 破壊電圧については15kV以下になると絶縁油を交換せざるを得ないが、20kV位に低下してもトランス出荷時に行われる過電圧試験を通過できる。

これまで改修が遅れていたA社製 $\Delta$ -Y結線タイプについては、2012,13年度に全て改修を終えることになっている。

改修後の $\Delta$ - $\Delta$ 結線タイプについてはまだ故障を起こしていない。しかし、ストレス電界がB社製のトランスと $\Delta$ -Y結線タイプの未改修品の間であり、未改修品に絶縁紙の劣化が見られることから、今後注意が必要であるため、絶縁油の特性測定を続けていく予定である。

#### 参考文献

- [1] H.Honma, et al., "KEKB 入射器クライストロンモジュレーターの故障", Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July 12-14, 2000
- [2] JIS C2320
- [3] 電気共同研究会 "第54巻 第5号 その1 油入変圧器の保守管理"