

電子技術

ELECTRONIC ENGINEERING

2

月号

1992 Vol.34 No.2

●特集

小型・大容量化するコンデンサの信頼性向上技術

[アルミ電解コンの安全対策から各種最新コンデンサの使い方まで]

キヤノンのアルミ電解コンデンサ発火対策
各社の信頼性・安全性向上策
パワー用電気二重層コンデンサに注目
最新コンデンサ、回路設計/実装のポイント

[好評連載]

ミスタートロン……坂村健の電腦電子部品
ミスターファジィ……戸貝方規の楽しくファジィ応用
ミスターLCD……小林駿介の液晶革命

[シリーズ]

最新電子部品/デバイスを使うには
東北シリコンロードを行く

[読者プレゼント]

チップ部品収納システム手帳



アルミ電解コンデンサの発火メカニズム

●キヤノンがショート原因を究明、各社の安全対策を促進

スイッチング方式の電源を使用した事務機器が家庭に入ってきている。

そこで、一次側に使われるアルミ電解コンデンサが、

機器の安全対策において重要な意味をもってくる。

ここでは、部品ユーザーの立場からその発火メカニズムを解明した、

キヤノンの研究成果について紹介する。

写真1 キヤノン品質本部製品安全部
PLP推進課課長の渡部利範氏



これまでオフィスで使われていたさまざまな電子機器が家庭に入り込みつつある。事務機器と家電機器の垣根がどんどんなくなっていく状況の中で、変わらないのが安全性の問題。むしろ、小型・軽量化が進むにつれて、事は一層深刻となりつつある。

これら電子機器のスイッチング電源において、DC回路の一次側平滑用コンデンサとして使用されているのがアルミ電解コンデンサ(図1)。そして、陽極箔と陰極箔のDCの一次異極間を絶縁しているのはわずか0.4μm程度の電気化合物である陽極箔の誘電体(酸化

表1 試料と試験条件

試料: 250V 820μF 105°C品

試験条件: 各条件につき5個ずつ試験を行った。

印加電圧	制御電流
DC 375V (1.5倍)	2A, 5A, 7A, 10A
DC 450V (1.8倍)	2A, 5A, 7A, 10A
DC 500V (2.0倍)	2A, 5A, 7A, 10A

アルミニウム)のみである。

つまり、アルミ電解コンデンサは異常ストレスにより発火する危険性をもっているのである。

部品ユーザーとして、このアルミ電解コンデンサの発火メカニズム解明に挑み、見事に成功したのがキヤノンの品質本部。ここでは、それに至る経緯と成果を詳しく紹介する。

キヤノン品質本部の研究成果

発火ポイントは巻芯部のショートだった

まず、同社品質本部の成果から紹介する。この成果は昨年の6月にすでに日科技連のシンポジウムで発表されているものだが、その結果はメーカー各社に多大な影響を及ぼしている。そこでここでは、新たな立場でそれを検証してみる。

(1) 試験方法

試験には構造的に弱い部分、つまりアルミ電解コンデンサの弱点を見つけるため、DC過電圧が用いられた。

電源には700Vの10Aという直流電源が使われた。そこから電線を持ってきて、プリント基板の上に設置した電解コンデンサに一気にDC過電圧をかけただけである(図2)。

「いままてDC過電圧をかける方法というのは、JISにも規格に決まっていま

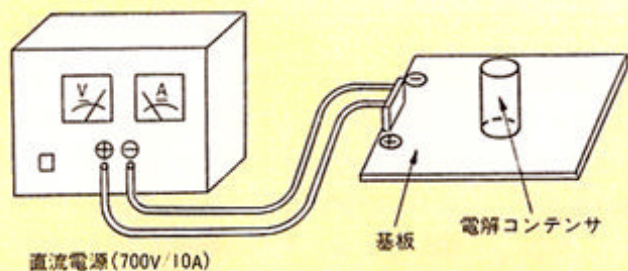
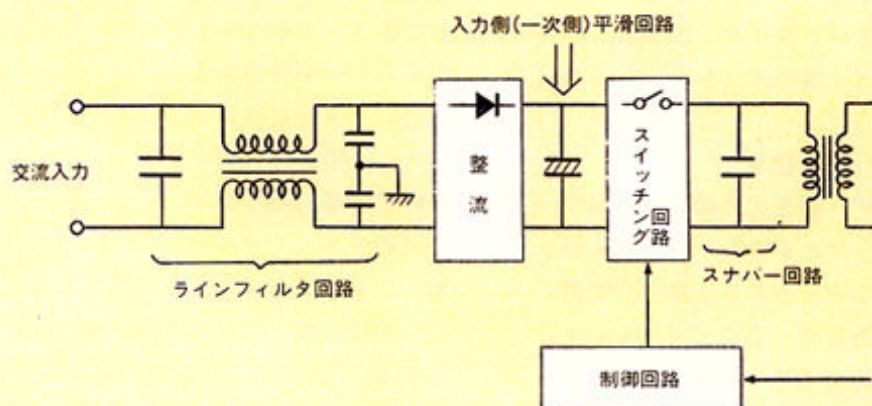


図1 一次側平滑回路に使われるアルミ電解コンデンサ

図2 試験方法(DC過電圧)





壊れて燃えてしまうからです」[同社品質本部製品安全部 PLP推進課課長の渡部利範氏(写真1)]

この700V、10Aという電源装置は特注(高砂電源)したもの。その後、この研究のおかげでやたらと売れたという話も残っている。

(2) 試料と試験条件

ここで、使われた試料と試験条件を表1に示す。

ここで示された制御電流は、同社の事務機で使っているスイッチング電源を全部調べ、その静電容量とヒューズの関係、その相関をとって、アンペア数を決定したもの。

また、電圧の入れ方も一気に入れる方法とだんだん入れる方法とがあるが、中接線欠落の場合は一気に電圧がかかるため、一気に印加する方法が選ばれた。この場合は、電源ラインの両端の負荷の関係でちょうど1.4倍くらいの電圧がかかる。つまり100Vのところは140Vの電圧がかかるわけだ。

「通常の電解コンデンサだと少しずつ電圧を上げていくことにより段々もれ電流が増えていくのですが、1.37倍はまだもつのです。1.5倍かけるとだいたいだめです。ですから1.5倍は酸化皮膜の破壊する電圧なんです。これによって、一番弱いところを見つけようというわけです」(渡部氏)

使用電解コンデンサは7社、各社100個ぐらいずつ。これを1個、1個実験して、分解して調べた。もちろん発火すれば多少の危険が伴う。その写真も

写真2 実験中に発火するアルミ電解コンデンサ

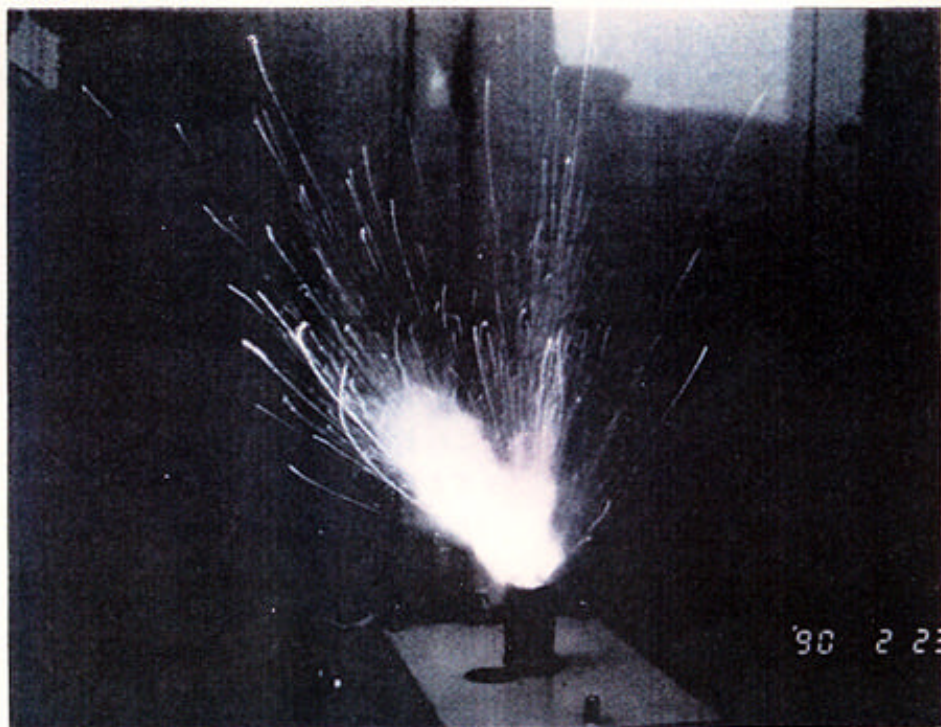


表2 実験結果
全サンプル数 60個

	A社	B社	C社	D社	E社	F社	判定
正常弁作動	15	18	14	46	1	36	OK
発火・火花	30	16	19	7	19	9	NG
ショート・弁作動	45	42	46	14	59	24	

撮らねばならない(写真2)。

「かなり危なくて根気のいる実験でした。(発火すると)ドカーンという音が出て燃えるのです。ものによっては、上だけでなく、横からすさまじい火を吹くものもあります。だいたい、50cmぐらいの火がでます。火は出続けるものもありますし、瞬間的なものもある。長いもので10分ぐらい燃え続けるものもあるのです」

研究に携わったメンバーはこう証言した(写真3)。この実験で行われたショートしたコンデンサを輪切りにして調べるという方法が、結果的には発火メカニズム解明の決め手となったのである。

(3) 実験結果

ここで、表2に実験結果を示す(1社はサンプルが少なかったため省いている)。ショートしても煙だけで終わったものもあるが、ここではショートしたものは総てNGと判断している。

ショートしたのは巻芯部、リード部、

外周部、箔サイド部。そのショート箇所を分析したものを表3に示す。表に見るように、巻芯部のショートは全社のコンデンサに共通している。

ここで各ショート部とそのメカニズムを示す(写真4)。

このショートする巻芯部とは、巻き始めの中心部の5周目から6周目、それも“く”の字に折れ曲がっている(座屈している)部分に集中している(写真5)。

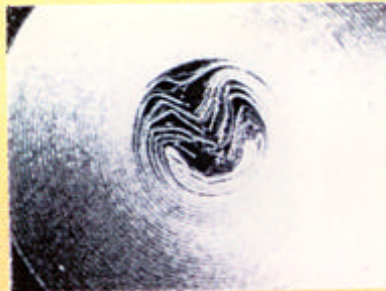
コンデンサは平行になっている状態が理想である。折れ曲がっているとそこに電流が集中してしまい、電流が集中すると熱が発生する。そうすると中の液がガス化しはじめる。ガス化しはじめると中心部にますますストレスが集中して巻芯部の方向に突き破り、プラスのアルミとマイナスのアルミが接触してショートするというわけである。

く”の字に曲がってしまうのには理由がある。はじめに巻いた状態では曲がっていないのが、紙が電解液を吸って

写真 4 ショートのメカニズム

①巻芯部ショート

小型化を追求したため、巻取り半径が小さく、固く巻いてある。その結果、酸化皮膜（絶縁物）にストレスが加わっていることと、異常ストレスが加わったとき、素子が巻芯部に向かって膨張するために、箔が破れ電極間がショートする。各社共通して巻芯部の中心より5～6周目でショートしていた。



②リード部ショート

リード部加工時のバリと、かしめによるバリが酸化皮膜を傷つけて、膨張時電極間がショートしてしまう。



③外周部ショート

異常ストレスが加わったとき、素子が外側に膨張するため、アルミケースと接触してショートしてしまう。



④箔サイドショート

箔サイドは酸化皮膜が薄いことや箔端面の加工時のバリ、また、異常ストレスが加わったとき、素子が外側に膨張するためアルミケースと接触してショートしてしまう。



膨張し、そのストレスが原因で起こる。これはぎゅっと巻いて、芯が小さいものほどその度合いが大きい。

研究の目的とアルミ電解コンデンサの品質について

以上の結果をもとに、対策が立てられたわけである。ここで対策について述べる前に、この研究が開始された1985年頃に遡って、研究のきっかけと目的とを再確認する。なお、これは同社品質本部部長の秋山光男氏（写真6）に伺ったものである。

（1）競争の対象外となっていた安全性

この当時（1985年以前）、電解コンデンサメーカーは小型で長寿命、かつ低コストの3つを目指し、その方向にどんどん進んでいたが、安全性という点では競争の対象外になっていた。ところが、だんだん電解コンデンサも一次側の高い電圧のところに使われるようになってきていた。

「この頃、電解コンデンサも1次側の高い電圧のところに使われるようになってきました。例えば、OA機器などの

表 3 ショート箇所の分析

		A社	B社	C社	D社	E社	F社
①	巻芯部	43	40	23	10	51	21
②	リード部	20	0	7	0	0	3
③	外周部	0	1	16	4	9	1
④	箔サイド	1	21	21	3	38	8
ショート数		45	42	46	14	59	24

ただし、重複も含む。

電源も、ドロップ方式からスイッチング方式へと移り変わってきています。このように高い電圧のところで使うと、（過電圧がかかったりするなど）いろいろ危険な部分が出てくる。例えば市場において単相三線式のもので中線が欠落したものがでるなど、いろいろな問題もあったのです」（秋山氏）

こうした状況で、アルミ電解コンデンサの安全対策が逼迫してきたようだ。

「実際、私どもの会社でも、年間いくらか防爆弁が作動するという事故が起きます（これが作動すると機器から霧状のガスが出る）。また、中には火がでてしまったものもあります。幸い金属のカバーにより大きな事故には至りませんでした。これらのことがきっかけでコンデンサメーカーに問い合わせをしたところ、どこのメーカーも、安全性に対して安心できる答えをしなかった」

秋山氏は、各メーカーに対して、「お宅の製品が絶対火が出ないと保証してくれたら、キヤノンはすべてそれに換えますよ」と言ったというが、どこのメーカーも「いざという時はほとんど防爆弁が作動しますが、中には火が出ることもあります」という返事しかなかったという。

また、事故が起こった時にコンデンサメーカーにその製品を返すと、そのほとんどが、「過電圧がかかったせいでしょう。お客様の使い方が悪かったんじゃないでしょうか」と言われたという。

（2）機器の安全対策は部品レベルから、部品の安全対策はメカニズム解明から

市場としてはOA機器ならばまだ、



煙が出て驚きはしないが、パーソナルコピのような家庭用機器の場合はそうはいかない。

「当時副社長であった山路氏（現社長）から絶対に火や煙を出さないようにせよと強い御達しがあった。それで、その機械の発火源となるようなものをすべて調べていったわけです。当然、電解コンデンサも発火源となる。これをどうしても火を出させないようにするには、金属で囲ったり、（筐体の中で）火が出て燃え広がらないような場所に移すといった対策をせねばならなかったのです。

ところが、最近だんだん機器が小さくなってきて、セット側では対応しきれなくなってきました。そうすると、発火源そのものの部品から火を出さない対策をするしかないのです。その際、発火メカニズムは部品認定という立場からこちらで解明して、その上でコンデンサメーカーに対策をお願いしようということになったのです」

最初は事例集めから始まった。そして次に、電解コンデンサは火が出るものだと考えて、出た場合どうなるかという実験をして、それに対して対策をとろうという評価を始めた。

はじめのうち、ACを印加すると火が出やすいので、それによって火が付いた時の対策を考慮していたら、「AC印加に強いコンデンサを作ろう」と誤解する（実際はAC印加などということとは起こり得ない）メーカーがあったため、「それならばきちと（その原因を）

写真 5 輪切りにされた巻芯部（ショート前）：巻芯の右上に“くの字”に曲がった部分がある

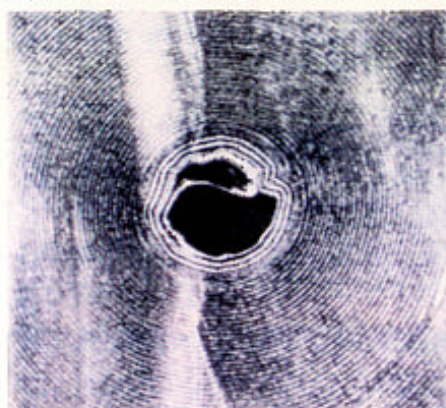


表 4 ショート対策内容

	対策箇所	対 策 内 容	理 由
素子内部でのショート対策	①電 解 紙	電解紙を厚くする 2枚構造にする	箔サイド・リード板、切断時のバリ、異物流入などによる両極間のショート防止
	②リ ー ド 接合点数	接合点数を増やす	接触抵抗を改善し、接合部での局部発熱、電流集中によるショート防止
	③リ ー ド 接合方法	冷間圧着を採用する	バリによるショートを防ぐ
	④電 解 液	電解液の耐圧を上げる	電解液自身による放電（スパーク）を防止する
	⑤酸化皮膜	酸化皮膜の耐圧を上げる （膜厚を上げる、化成電圧を上げる）	過電圧印加による破壊を抑制
	⑥巻 芯 部	巻芯部にストレスが加わらないように、素子の巻取改善、上記の①、④、⑤の対策要	酸化皮膜に欠陥が生じると両極間でショートの危険
シケ ョー ス ト 接 触 策	①巻 取 テ ー プ	テープ幅を素子側面の全体に巻きつける	素子の膨張・バラケを抑えて、ケース接触によるショートを防ぐ
	②巻 芯 上 部	検討中	ケース頭部の接触によるショートを防ぐ

解明してみよう」となった。

（3）煙はいいが、火は出さない

家庭用となるとちょっとした煙でも問題となる。例えば、複写機などでも、大きな機械の場合は煙だけなら直ればよいと思われるが、小型の機械の場合はそうはいかない。

ただし、安全規格上では火さえ出なければいいということになっている。

「電気用品取締法（UL）などでは、異常試験をした場合、煙までは許されている。実際、煙を出さないという技術はコストとの兼ね合いを考えていくと大変むずかしい。そこから考えても、まずは煙はいいから絶対に火が出ないというところから実現したい」（秋山氏）

過電圧が印加された場合は中で熱が発生、電解液が気化する。熱が絶対に発生しないという技術がないので、気

化した煙を防爆弁から逃していくように設計されているのが現状の対応。したがって煙が出るまでは仕方がない。しかし、中で電極同士がくっついて火花が出る（ショート）ことによって気化した電解液に火がつくのはまずい。

「つまり壊れた場合は、設計通りに煙だけで収まって静かに死んでくれたらいいのです。死ぬ前にひと暴れされるのはたまらない。現実にもそういう例があったのです」（秋山氏）

このようにして、アルミ電解コンデンサのショート原因を探りだして対策しようという研究が始まったのである。

発火対策

巻芯部を中心としたショート対策

それではここで、解明された発火メカニズムを基にしたショート対策につ

いて示す。

表4はショート対策をまとめたものである。肝心の巻芯部の対策の場合は、単独にそれだけ行えばいいというものではない。①と④と⑤を選択、組み合わせて対策しなければならない。巻芯部の対策は⑥のストレスが加わらないようにするだけでは対策できないという。

また、巻芯部にストレスが加わらないようにするには巻芯部を大きくするか、巻き方を変える（つまり巻き初めのスピードを緩めるなど）、あるいは、はじめ紙だけを巻く、陰極と紙を最初に巻いていく、といった方法がとられている。コンデンサの芯に巻芯として樹脂を入れる方法もあるが、これは製造工程も煩雑となり量産に向かず、し

かもコストアップの原因となる。

これらの工夫は各社各様でここにあるのはその1例である。これをしてなおかつ電解質の紙質を変えとか、電解液の耐圧を上げるなどの対策がとられている。

本特集ではこのほかにも、メーカーによる対策例を紹介しているので参考にされたい。

アルミ電解コンデンサ、メーカー側の安全対策——エルナー

部品メーカー側のアルミ電解コンデンサの安全対策の1例として、エルナーの安全対策を紹介する。キヤノンの紹介原稿の表4「ショート対策内容」(p.13)を参考にされたい。

同社では安全対策コンデンサもシリーズ化しているが(写真参照)、ショート対策内容では表4の①から④までは一般用のコンデンサにも対策可能であり、またすでに対策済みだという。例えば、③のリード接合方法では、同社は業界に先駆けてコールドウェルドという方式(冷間圧着)を採用している。また、電解紙、電解液における対策も量産品ですでに確立しているという。

ただし、⑤の酸化皮膜の対策に関しては耐圧を上げると理論上、体積当たりの容量が減ることになりサイズが大きくなる。また、コストが高くなり、

さらにエッチング倍率の高いものを使わなければならない、箔の値段も高くなるため、安全対策コンデンサシリーズでの対応となる。

最後に、⑥については、同社は巻取り機として対策可能な機械をもっていう。ただし、全機械ではない。

この巻取り機械は実際には、巻取りの仕方によるのであって製造上のコスト高にはならない。しかし、最新のコンピュータコントロールによって非常に精度よく巻く機械なので、設備投資の必要がある。現段階では機械が限定され、巻取りプログラム(シーケンサ)の確認などの管理上の手間があるため、納期などの面では制約がある。また、この機械は去年できたもので、対応は汎用品とは別個となる。なお、従来機を改造して対応することはむずかしいようだ。

「今後、新規に購入する場合は別として、従来の巻取り機に手を入れることで新型のストレスがかからない巻取り機にすることは困難。おそらく新しく購入した方が安いくらいでしょう。これはシーケンサの問題だけではなく、機械そのものの構造が違うためです」

(エルナー(株)コンデンサ事業部生産技術部部長代理、伊東英雄氏)

アルミ電解コンデンサの扱い方については、「これはカタログに書いてあることですが、外部から過度な電氣的あるいは機械的ストレスを加えないということが重要です。コンデンサは中に電解液を含んでいるため構造上、気密を保たねばなりません。また、瞬時的な逆電圧であっても酸化皮膜が破壊されている場合が多いので、(アッセンブリ工程で逆ざしをするなどして)短時間でも逆電圧をかけてしまったような製品は特性上一見問題なくみえても破壊した方がよいでしょう。あとは基板洗浄は保証してあるものと保証していないものがあるので確認が必要です」

ユーザー側でも使い方で注意すべき点が多々あるようだ。



エルナー、コンデンサ事業部生産技術部部長代理 伊東英雄氏

エルナーの安全対策コンデンサ



アルミ電解コンデンサの安全対策

●メーカー側の対応 ●ニチコン

パワー電源に使用される大容量アルミ電解コンデンサ。

その安全性がセットメーカーによって問われる中、

供給側である部品メーカーも独自の対策を施してきている。

そこで、ここでは安全弁の作動状態などを中心にニチコンの安全対策を紹介する。

電気機器類のエレクトロニクス化に伴い、アルミ電解コンデンサも用途拡大の一途を辿っている。今までは、技術ニーズとして、小形化、高性能化、高温度長寿命化などに主眼を置いた技術開発、改良がなされてきた。

しかし、最近、パワー電源に使用されるアルミ電解コンデンサの発火危険性が着目されるようになり、その対策が望まれている。

ここでは、アルミ電解コンデンサの発火メカニズムと過電圧安全性アルミ電解コンデンサ(AKシリーズ)の特徴

について述べる。

アルミ電解コンデンサの 燃焼形態

(1) 燃焼の三要素

アルミ電解コンデンサは自己発火する性質(以下、一次燃焼と呼ぶ)があるとともに、他からの影響を受けて引火する性質(以下、二次燃焼と呼ぶ)もある。

物質が燃焼するということは、可燃物、酸素供給源、点火源の三要素が必要である。

アルミ電解コンデンサは、この燃焼の三要素を持っているため、一次燃焼も二次燃焼も起こり得ることになる(図1)。

(2) 一次燃焼の形態

① 点火源

コンデンサにためられた静電エネルギーが、電極間スパークなどで火花放電したときに、この火花が点火源となる。静電エネルギー(W)は、 $W=1/2 CV^2$ [C: 静電容量, V: 充電電圧] で表われ、充電電圧の2乗に比例するので、高電圧になれば火花エネルギー

図1 アルミ電解コンデンサの構造と燃焼の三要素

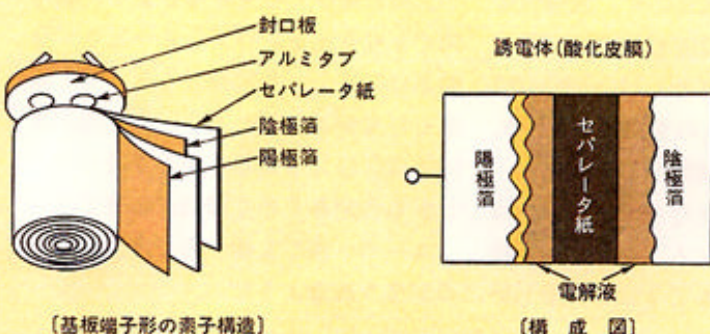
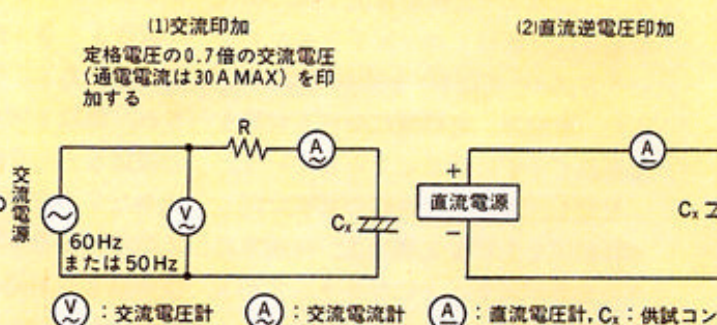


図2 安全弁の作動試験(JISC 5102-1986)



保護抵抗 R: 下表

静電容量 (μF)	保護抵抗 R (Ω)
11~100	10 ± 1
101~1000	1 ± 0.1
1001~10000	0.1 ± 0.01

C_x: 供試コンデンサ

通電電流

公称寸法 mm	直流電流 A
22.4 以下	1 (一定)
22.4 超	10 (一定)

燃焼の三要素	アルミ電解コンデンサの該当物質
可燃物	① 封口材料(ゴムパッキング、ゴム貼り積層板) ② 電解液(有機酸系) ③ セパレータ紙 ④ 発生ガス(水素ガス) ⑤ その他補助材料(素子固定材など)
酸素供給源	① 安全弁作動時の外気接触
点火源	① 酸化皮膜の絶縁破壊時に発生する火花 ② 電極間ショート時のスパーク

が増大する。

したがって、一般的には、電源入力用コンデンサで火花放電による発火が起こりやすく、電源出力用コンデンサでは、発火に至るほどの火花エネルギーにはならない場合が多い。

② 可燃物

点火源周辺には、電解液、セパレータ紙、発生水素ガスが存在するので、これらに着火する。

③ 酸素の供給

発熱または電極間スパーク時の衝撃で、コンデンサ内部圧力が上昇して安全弁が作動すると、可燃物が外気に触れるので燃焼が継続する。安全弁の開口面積が大きいほど、酸素供給量が多くなり、燃焼も激しくなる。

安全弁の開口面積が小さく、可燃物の外気飛び出しがないときは、燃焼が

継続せず、スパーク部分だけの焼損で終わる場合もある。

(3) 二次燃焼の形態

① 封口部の気密不良または安全弁作動などで、コンデンサから電解液が漏れ出し、トラッキング現象で発火が起こり、電解液以外の可燃物にも類焼する。

② コンデンサ周辺にある可燃物の燃焼が点火源になり、封口材に着火したり、外部熱で安全弁が作動したときに漏れ出た電解液に着火する。

アルミ電解コンデンサの安全対策としては、一次燃焼、二次燃焼とも解決する必要があることになるが、過電圧安全性アルミ電解コンデンサ AK シリーズは、一次燃焼を防止する機能を備えたもので、二次燃焼の対策は課題の 1 つである。

安全弁の性能

アルミ電解コンデンサが備えている安全弁は、JISC 5102-1986 の 8.10 項の試験条件 (図 2 に示す交流試験と直流逆試験) に適合するものであり、それ以外の条件 (例えば、大電流での過電圧印加など) では、うまく作動せず、発火する場合がある (写真 1)。

発火のメカニズムと発火対策

コンデンサ内部でのショート (スパーク) が点火源となり発火が起こる (図 3)。したがって、発火を防ぐためには、ショート箇所を対策することになる。ショートの要因とその具体的対策例について述べる。

図 3 アルミ電解コンデンサの発火メカニズム

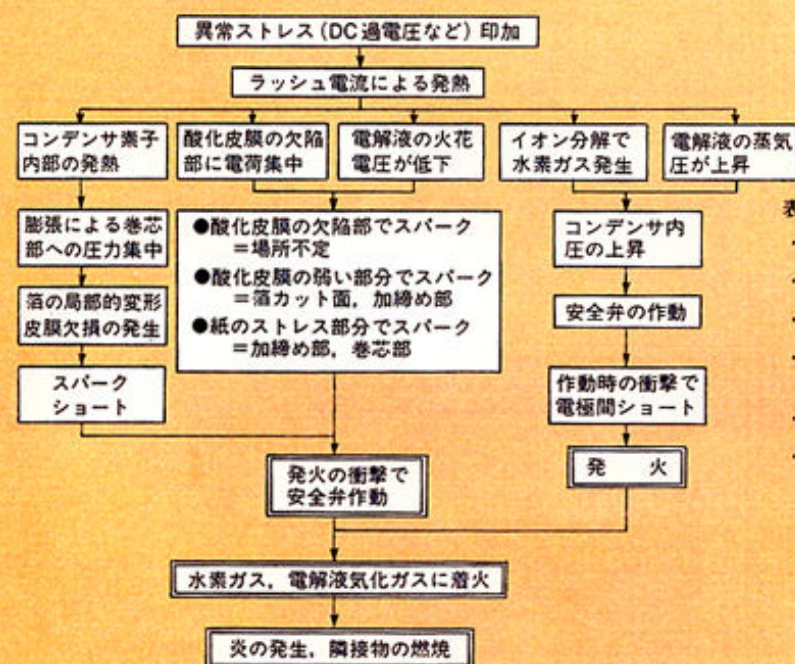


表 1 AK シリーズの性能仕様

- ・使用温度範囲: $-25 \sim +105^{\circ}\text{C}$
- ・定格電圧範囲: 200~450 V
- ・静電容量範囲: 33~1000 μF
- ・形状、寸法: プリント配線用自立形 $\phi 22 \times 20 \text{ mm} \sim \phi 35 \times 50 \text{ mm}$ (JIS C 5141-1991 の形状 692 形)
- ・高温負荷特性: リプル負荷 105°C , 2000 時間
- ・過電圧安全性: 下記試験で安全弁が正常に作動し、ショート、発火は起こらない

定格電圧	試験電圧	定格静電容量と電流制限値
200 V	300 V および 350 V	$C < 330 \mu\text{F}$: 4 A $330 \leq C < 470$: 5 A $C \geq 470 \mu\text{F}$: 7 A
250 V	375 V および 450 V	
400 V	600 V	$C < 100 \mu\text{F}$: 2 A $100 \leq C < 220$: 4 A $C \geq 220 \mu\text{F}$: 7 A
450 V	675 V	

① 巻芯部ショート

巻取り半径が小さく固く巻いてあるため、電極箔にストレスが加わっていることと巻芯部は空間になっているので、異常ストレスが加わったとき、巻芯部に圧力が掛かり、電極箔が局部的に変形し、ショートする。

⇒巻芯部電極箔の機械的ストレス緩和と電極箔の部分的変形の防止。

② 引き出しリード部および電極箔サイドのショート

リードタブ端面のカットバリや加締めバリおよび電極箔裁断面のカットバリがセパレータ紙を突き破り、対向電極とショートする。

⇒セパレータ紙を厚くする。

③ 酸化皮膜の絶縁破壊によるショート

酸化皮膜の耐電圧不足や電解液自身の火花放電でショートする。

⇒化成電圧のアップ、電解液の火花電圧アップ。

④ 異常ストレス時の素子変形によるショート

発熱による素子の膨張や安全弁作動時の圧力衝撃で素子変形して、電極間ショートする。⇒素子固定を強固にする。

AKシリーズの仕様

AKシリーズアルミ電解コンデンサはJIS条件の安全弁作動性能に加えて過電圧条件においても、ショート、発火が起こらないため、一次燃焼の危険性は解消された(表1)。

今後の技術課題

究極的にはコンデンサ自身の難燃化が必要であり、

① 高性能難燃性電解液の開発、

② 非破壊構造(保安装置付き)コンデンサの開発、が待たれるところである。

最後に、本文執筆に際して、キヤノン(株)品質保証部製品安全部PLP推進課殿の多大な御指導と御協力を戴いたことに感謝致します。

(ニチコン株 松田 清)



●正常作動

発熱、内圧上昇により安全弁が開く。ショート、素子飛び出しなどの異常はない。



●スパーク、ショート(発火なし)

スパーク、ショートし安全弁が作動したときセパレータ紙がわずかはみだしたが発火はなし。



●発火、炎上

スパーク、ショートと同時に安全弁が大きく開く。素子の一部が飛び出し、発火炎上。

写真1 安全弁の作動状態