

酸化亜鉛避雷器 “ZLA”

Zinc Oxide Lightning Arrester

酸化亜鉛素子の電力用避雷器への適用により、従来の直列ギャップと特性要素とを組み合わせ構成される避雷器の代わりに、直列ギャップを省略した酸化亜鉛避雷器が近年普及しつつある。この避雷器は小形、軽量化に加え、非直線抵抗性が優れ、かつ放電耐量があることから種々の利点をもっている。このたび日立製作所は、3.3~500kV系統用酸化亜鉛避雷器を開発し、系列化したので概説する。

白川 晋吾* Shirakawa Shingo
 大和田伸一* Ôwada Shin'ichi
 飯村 紀夫* Imura Norio
 三吉 忠彦** Miyoshi Tadahiko
 水越 明男*** Mizukoshi Akeo

1 緒 言

避雷器の発展過程を回顧すると、単純な火花ギャップからスタートした避雷器はSiC(炭化ケイ素)を主体とした特性要素と直列ギャップに改善を加えることにより、磁気吹消形避雷器や限流形避雷器へと発展し、約50年間広く採用されてきた(図1参照)。

今回、金属酸化物焼結体である酸化亜鉛素子(Z元素)を使用して、直列ギャップ部を省略したZLA(Zinc Oxide Lightning Arrester: 酸化亜鉛避雷器)を開発し、3.3~550kV系統用避雷器の系列化を完成したので以下に概説する。

この避雷器は小形軽量化に加え、電圧-電流特性の非直線性が優れ、かつ強い放電耐量特性をもっていることから数々の利点がある。一方、酸化亜鉛焼結体素子の特性については既に多くの資料で報告されている^{1),2)}。今回、電力用避雷器として応用技術を開発し、ZLAとして製品化した。

図2に定格電圧196kV ZLAの適用例を示す。

2 ZLAの原理・構造

ZLAはZ元素の優れた非直線抵抗特性を活用したものである。

2.1 Z元素の微構造と導電機構

Z元素はZnO(酸化亜鉛)を主体とし、これにBi₂O₃(酸化ビスマス)、CoO(酸化コバルト)、Cr₂O₃(酸化クロム)、MnO(酸化マンガン)、Sb₂O₃(酸化アンチモン)などの微量の添加物に加え、混合→造粒→成形→焼成して得られるセラミックスである¹⁾。これをSEM(走査形電子顕微鏡)で観察すると、図3に示すように粒径約10μmの低抵抗のZnO粒子の周囲を、添加物を主体とする約0.1μm程度の高抵抗酸化物層(境界層)が取り囲み、この境界層や空乏層を介してZnO粒子が立体的に接続されている。

図4(a)は、これらを電気回路で示したものである。ここでRbは境界層や空乏層に基づく非直線抵抗で、印加される電界に応じて約10¹⁰Ω・cm(低電界)から1Ω・cm以下(高電界)まで変化する。一方、電界は主に薄い境界層や空乏層に印加され、

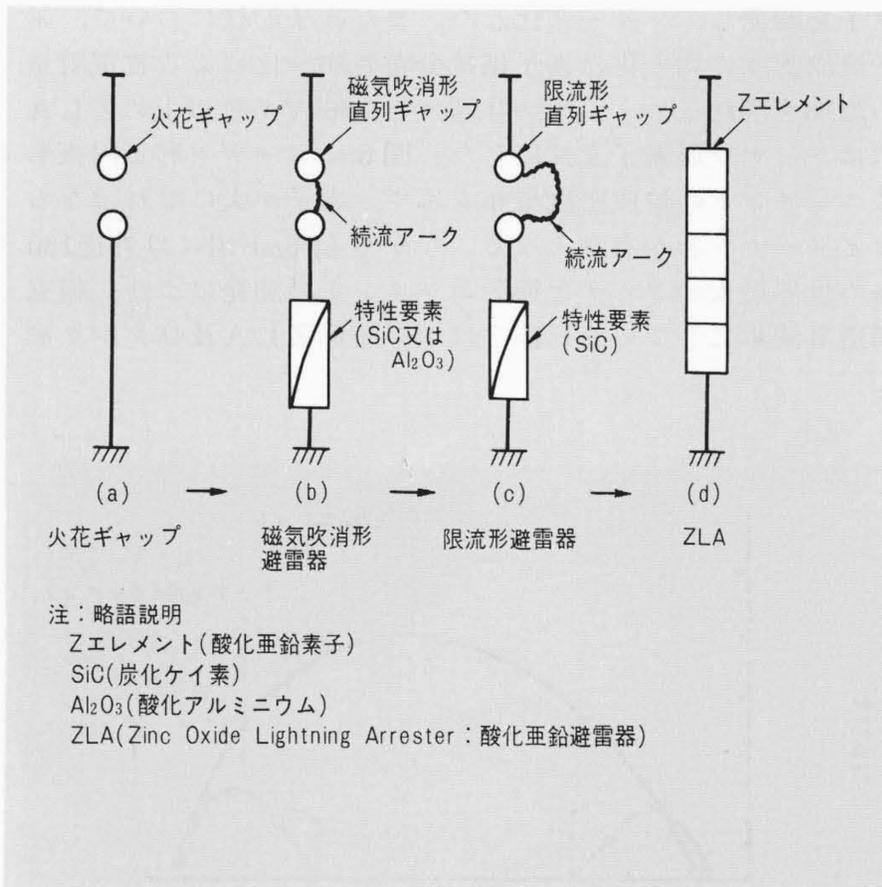


図1 避雷器の変遷 電力用過電圧保護装置としての避雷器の発展過程を、発展順に示す。

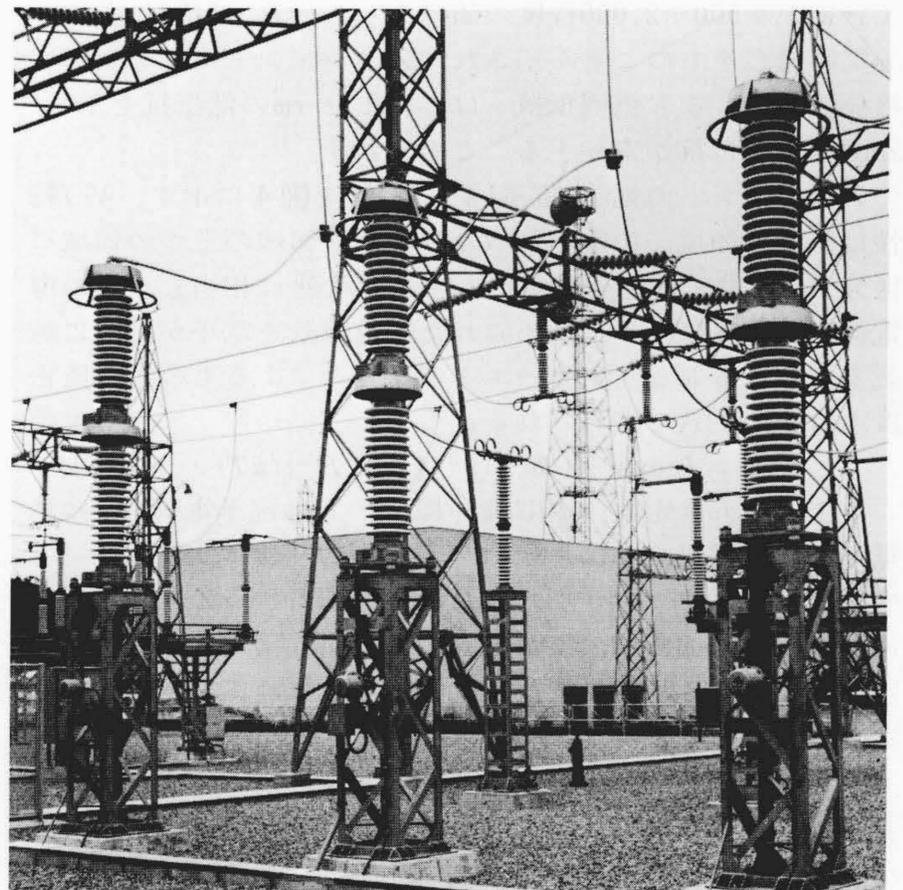


図2 定格電圧196kV ZLAの適用例 ZLAの使用状況を示す。

* 日立製作所国分工場 ** 日立製作所日立研究所 理学博士 *** 日立製作所日立研究所

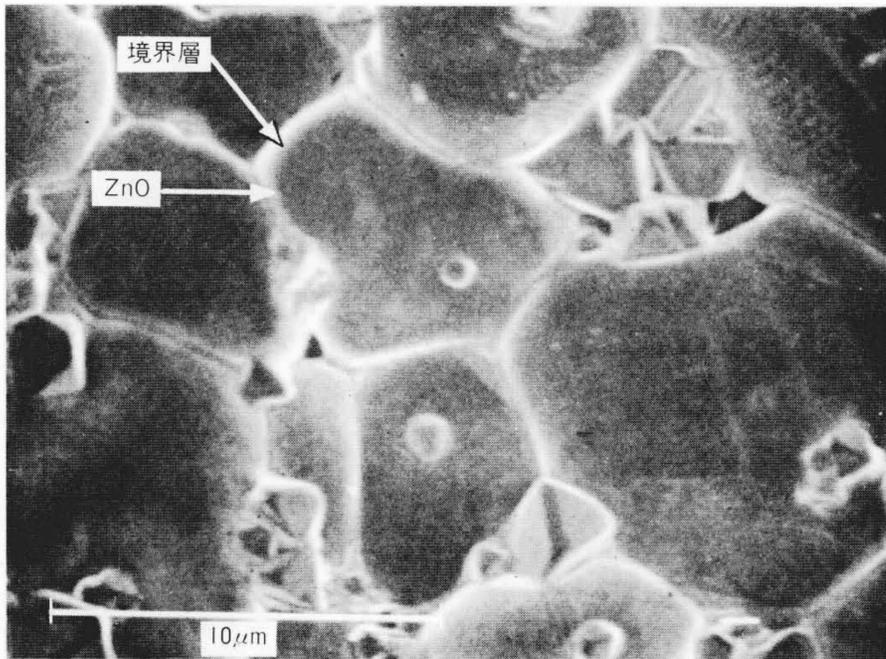


図3 Zエレメントの微構造 走査形電子顕微鏡によるZエレメントの表面を示し、ZnO粒子が境界層を介して立体的に接続されることを表わす。

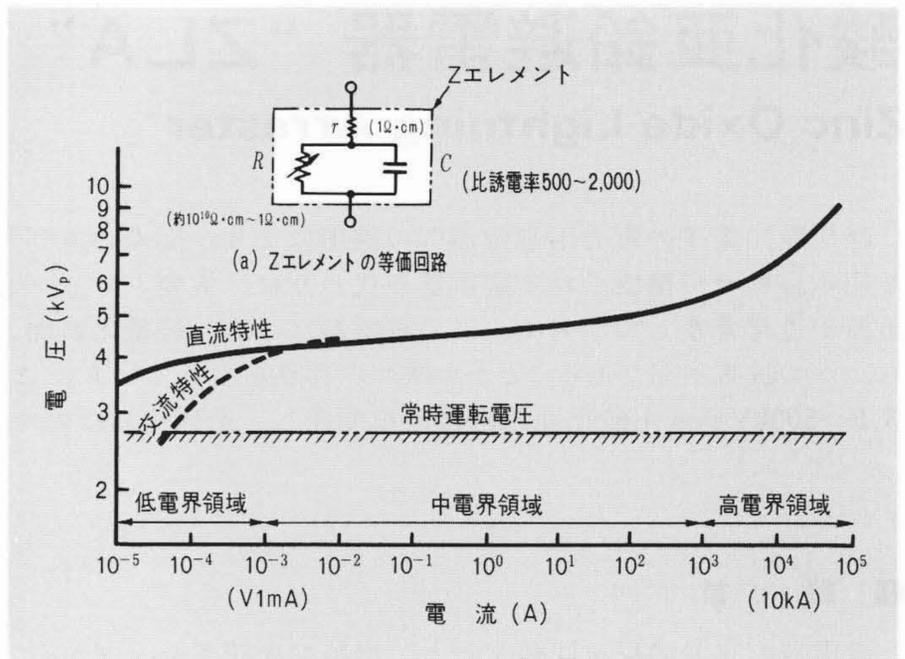


図4 Zエレメントの代表的V-I(電圧-電流)特性 Zエレメントの等価回路及びV-I特性を示す。

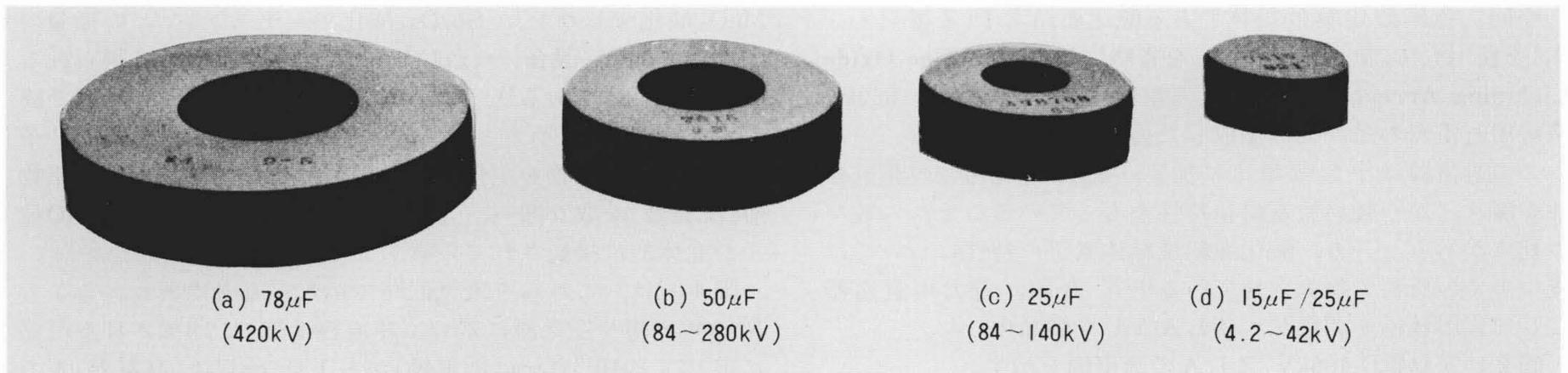


図5 Zエレメントの外観 動作責務容量ごとにシリーズ化されたZエレメントの外観を示す。

比誘電率が500~2,000程度の値を示し、 R (抵抗)に並列に静電容量 C をもつことが示され、Zエレメントはコンデンサ機能をもつ。なお直列抵抗 r は、約 $1 \Omega \cdot \text{cm}$ の低抵抗を示し、ZnO粒子の抵抗が寄与することを表わす。

Zエレメントの電圧-電流($V-I$)特性を図4に示す。 $V-I$ 特性は低電界領域、中電界領域及び高電界領域の三つの領域に区分される²⁾。低電界領域は常時課電状態に相当し、この導電機構は電界によって低められた電位障壁を電子が熱的に越えるいわゆるショットキーエミッションによるもので電流密度 J_s は次の(1)式で表わされる。

$$J_s = J_0 \exp\left[-\left\{\Phi_B - \left(\frac{e^3}{4\pi\epsilon}\right)^{1/2} E^{1/2}\right\} / kT\right] \dots\dots(1)$$

ここで J_0 は定数、 Φ_B は電位障壁、 e は電子電荷、 ϵ は誘電率、 E は電界、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度を示す。中電界領域はサージが加わった場合に相当し、Zエレメントに高電圧が印加され、境界層に加わる電界が約 10^6V/cm 程度になるとトンネル効果で電位障壁を突き抜けて電流が流れ、次の(2)式で示される。

$$J_s = J_0 \cdot E^2 / \Phi_B \cdot \exp\left[-A\Phi^{3/2} / E\right] \dots\dots(2)$$

次に高電界領域では、電位障壁に基づく電圧降下はトンネル効果により小さく、抵抗 r による電圧降下が支配的になり、 $J_s = E/r$ で表わされる。

2.2 Z L Aの構造及び仕様

Zエレメントの形状は、図5に示すように適用する系統電圧と開閉サージ動作責務容量に応じて、公称外径130mm(78μF用)、90mm(50μF用)、70mm(25μF用)、50mm(15/25μF用)の

素子を開発し、シリーズ化した。また素子形状について、素子焼成密度の均一化は素子抵抗分布の均一化による放電耐量の増加を図れるという考え方にに基づき、66kV系統以上のZ L Aにはドーナツ形素子を採用した。図6にドーナツ形と円板形Zエレメントの焼成密度分布を示す。素子が大になればなるほどドーナツ形が有利となる。なかでも78μF用には外径130mmの世界最大のドーナツ形Zエレメントの開発により、組立構造も簡単にしている。図7にがい子形Z L A及びタンク形

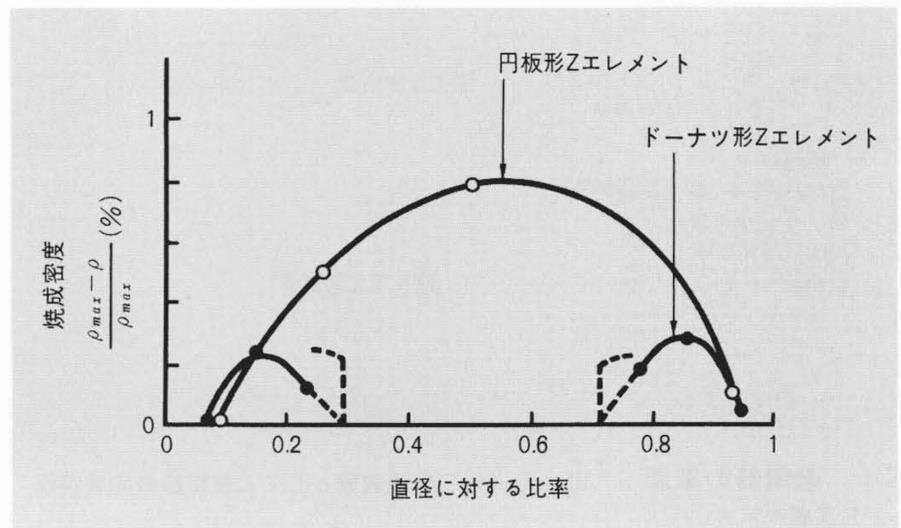


図6 ドーナツ形Zエレメントと円板形Zエレメントとの焼成密度分布の比較 ドーナツ形Zエレメントのほうが円板形Zエレメントよりも焼成密度分布がより均一である。

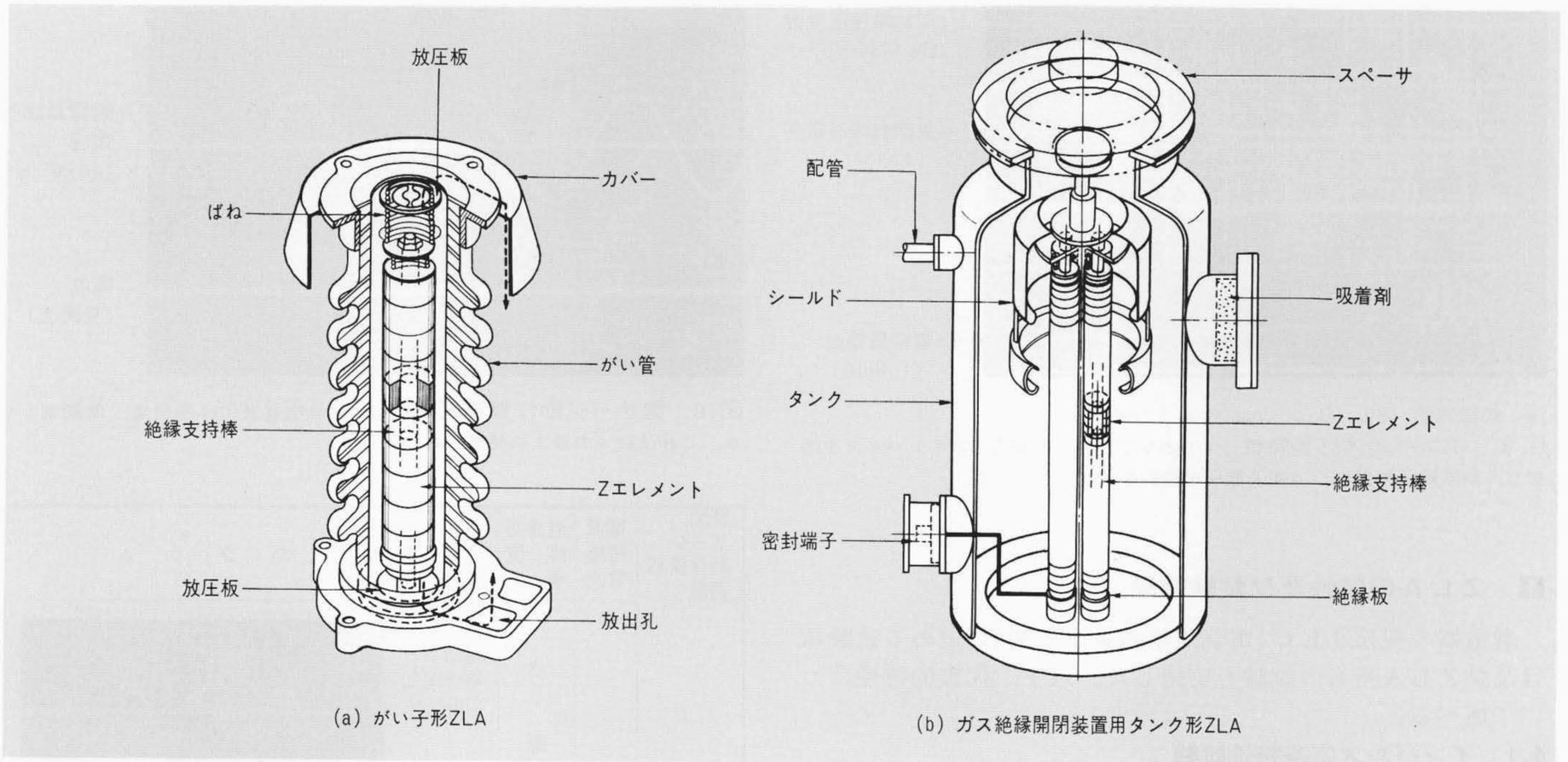


図7 ZLAの構造 がい子形ZLA及びタンク形ZLAの代表的な基本構造図を示す。

ZLAの代表的構造図を示す。なお、33kV系統以下のものについては円板形とし、縮小化を図った。

図8に、従来形500kV系統用避雷器とZLAとの構造比較を示す。直列ギャップの省略により、従来形に比べ、容積、重量とも約45%に縮小した。

表1にZLAの主な仕様を示す。

表1 ZLAの主な仕様 ZLAの定格電圧と保護性能を示す。

系統電圧 (kV rms)	避雷器 定格 電圧(kV rms)	所要絶縁強度 (BIL)kV _p	動作開始電圧* (下限値)kV _p	制限電圧(kV _p)	
				at 5kA	at 10kA
3.3	4.2	45	6	13	14
6.6	8.4	60	12	25	28
11	14	90	20	43	47
22	28	150	40	85	94
33	42	200	60	128	140
66	84	350	120	244	269
77	98	400	140	284	314
110	112**	450	160	325	358
	140	550	200	406	448
154	196	750	280	568	627
187	182	750	260	528	582
220	210	900	300	609	672
	224		320	650	717
275	266	1,050	380	771	851
	280		400	812	896
500	420	1,550	600	—	1,220 (20kA) 1,350

注：* ZLAに直流又は交流電圧を印加して抵抗分電流が1mA流れたときの電圧波高値であり、物理的にはZエレメントが絶縁物の状態から伝導状態に至ったことを意味する。4.2~280kV ZLAは直流電圧、420kV ZLAについては交流電圧印加時の特性を示す。

** 中性点避雷器

3 ZLAの主な特長

ZLAの主な特長は、次に述べるとおりである。

- (1) 部品点数が少なく、構造が簡単である。従来の直列ギャップを省略することにより、部品点数を約30%に縮小した。
- (2) 無発弧避雷器で急峻波制限電圧応答特性が優れる。ギャップ付避雷器のように放電現象に基づくのではなく、Zエレメントの固体電子導電機構により、優れた過電圧抑制効果を発揮できる。また、無アークのためガス絶縁開閉装置用避雷器に最適である。
- (3) 多重雷に強い性能をもつ。雷サージ通流後、不要な続流を流す必要がない。
- (4) 耐汚損特性が従来の直列ギャップ付避雷器に比べ優れる。

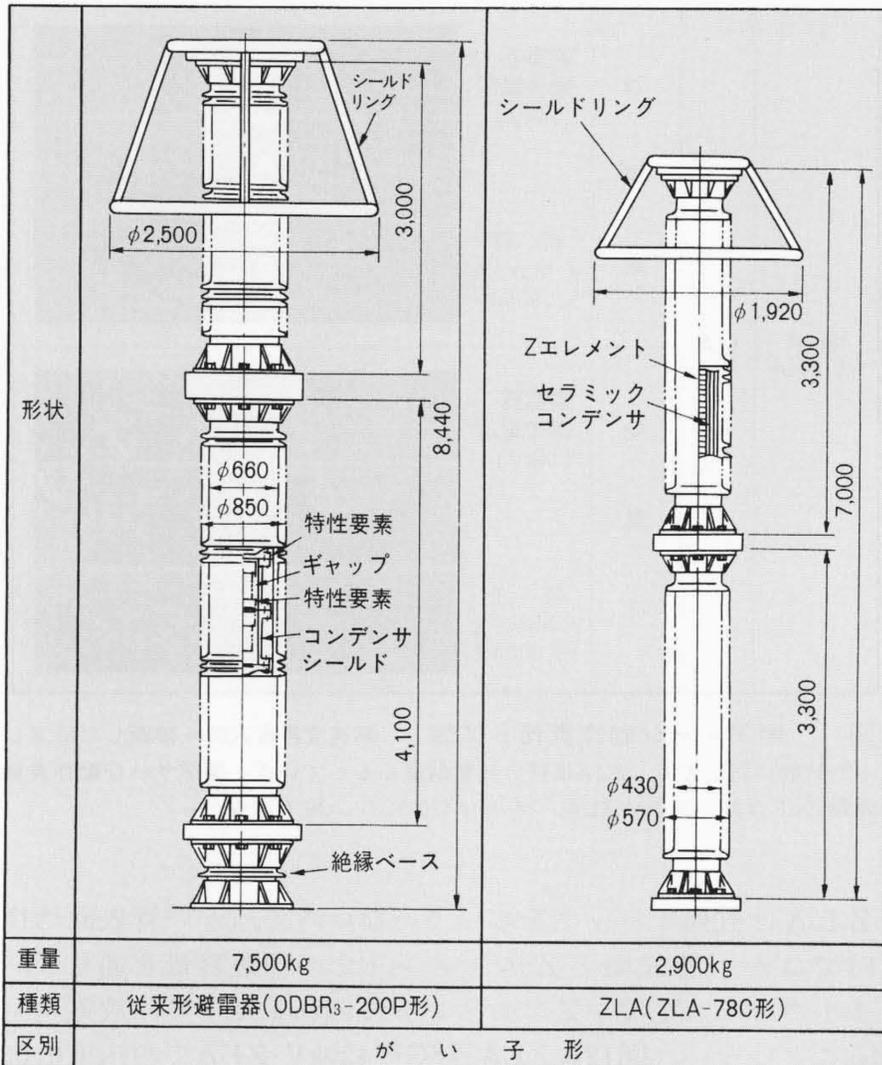
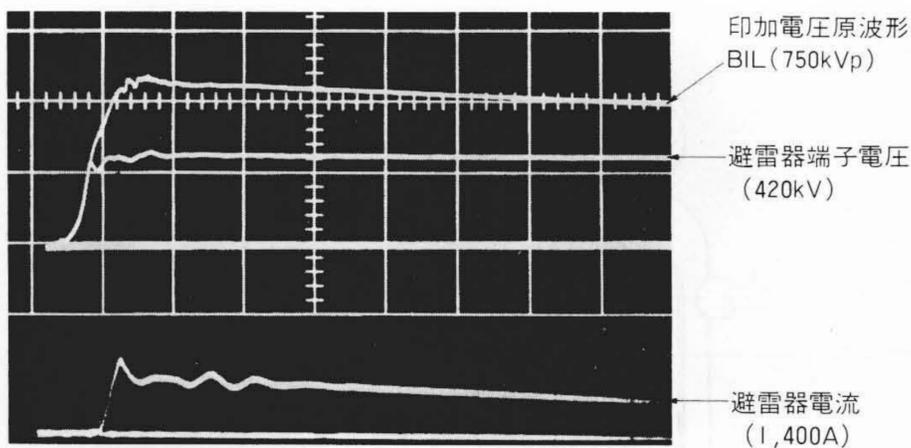


図8 従来形500kV系統避雷器とZLAとの構造比較 ZLA化することにより小形、軽量化となる。



注：略語説明 BIL (Basic Insulation Level)
 図9 インパルス応答特性 182kV ZLAにBIL相当の雷インパルスを印加し、制限電圧相当にZLA端子電圧が抑制されることを示す。

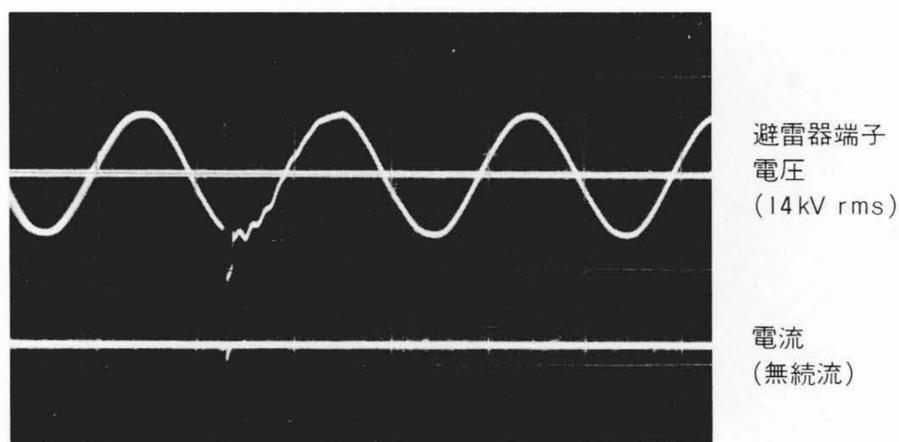


図10 雷サージ動作責務試験 公称放電電流10kA通流後、無続流となる。これはZLAの最大の特長である。

4 ZLAの特性及び試験結果

避雷器の規格JEC(電気規格調査会)-203に定める試験項目及びZLA特有の試験を実施した。以下、代表的特性について述べる。

4.1 インパルス応答特性試験

ZLAはギャップレス避雷器であるため、従来の避雷器で実施した放電開始電圧試験は不要となる。このため、避雷器の過電圧抑制効果を検証するため、BIL(Basic Insulation Level)相当の雷インパルスを印加し、応答特性を求めている。この例として、図9に182kV ZLAの雷インパルス応答特性試験結果を示す。従来形避雷器のように放電開始電圧まで端子電圧は上昇しないで、ZLAの制限電圧-電流特性相当に抑制されることから、保護性能が優れる。なお、急峻波電流制限電圧応答特性についてZ元素は波頭 $10\mu s$ 領域に対する $0.5\mu s$ 領域での立上りは約5%以下で、SiCに比べて低い値である。

4.2 動作責務試験

4.2.1 雷サージ動作責務試験

$50\mu F$ 用14kVユニット避雷器で実施した公称放電電流10kAの試験結果を図10に示す。従来の直列ギャップ付避雷器では放電電流を通流後、非直線性が優れないため続流が流れていたが、ZLAでは不要な続流を流すことなく、しゃ断できる。この特性が多重雷に強いことを示し、従来500kV系統用避雷器にだけ課せられた断路器サージ動作責務試験に対しても十分余裕をもって対応できる特長をもつ。

4.2.2 開閉サージ動作責務試験

開閉サージ動作責務試験としてしゃ断器再点弧サージを模擬したA試験としゃ断器再投入サージを模擬したB試験とがある。従来、B試験は500kV系統用避雷器だけに課せられた試験であり、A試験では線路模擬回路部分を避雷器が動作後切り離すのに対し、接続された状態であることから、続流値が大きいこと及び続流しゃ断後の回復電圧が急峻になることから、B試験はギャップ付避雷器にとって過酷であった。これに対し、ZLAは直列ギャップを不要としていることから、直列ギャップの絶縁回復特性を考慮する必要はなく、素子そのものに方形波耐量をもたせておけば容易に開閉サージ動作責務を遂行できる。この代表的試験結果を図11に示す。この試験は、高速度再投入した場合の線路側避雷器の動作責務に相当する。

4.3 汚損及び活線洗浄試験

この試験はがい子形避雷器にだけ実施する試験であり、従来の直列ギャップ付避雷器の最も難点とするところであった。

開閉サージ動作責務容量	電源短絡電流	避雷器設置場所	オシログラム
$50\mu F$ (/14kV)	6kA	送電端	避雷器端子電圧 (14kV) 続流 (Max. 850A)
		受電端	避雷器端子電圧 (14kV) 続流 (Max. 2,180A)
$78\mu F$ (/14kV)	6kA	送電端	避雷器端子電圧 (14kV) 続流 (Max. 1,900A)
		受電端	避雷器端子電圧 (14kV) 続流 (Max. 3,000A)

図11 開閉サージ動作責務B試験 高速度再投入時を模擬した続流しゃ断試験に対しても、ZLAは強い放電耐量をもっている。開閉サージ動作責務容量 $50\mu F$ は84~280kV ZLA、 $78\mu F$ は420kV ZLA用である。

ZLAは直列ギャップをもっていないので、がい管表面汚損時ではがい管表面とZ元素との標遊容量を通して、多小のパルス電流がZ元素に流れるだけで、放電に至ることはない。図12にZLA-78C形420kV ZLAで汚損度 $0.03 mg/cm^2$ の汚損及び洗浄試験状況を示す。なお、Z元素の温度上昇値は約 $10\sim 20 deg.C$ であり、実用上支障のないこと

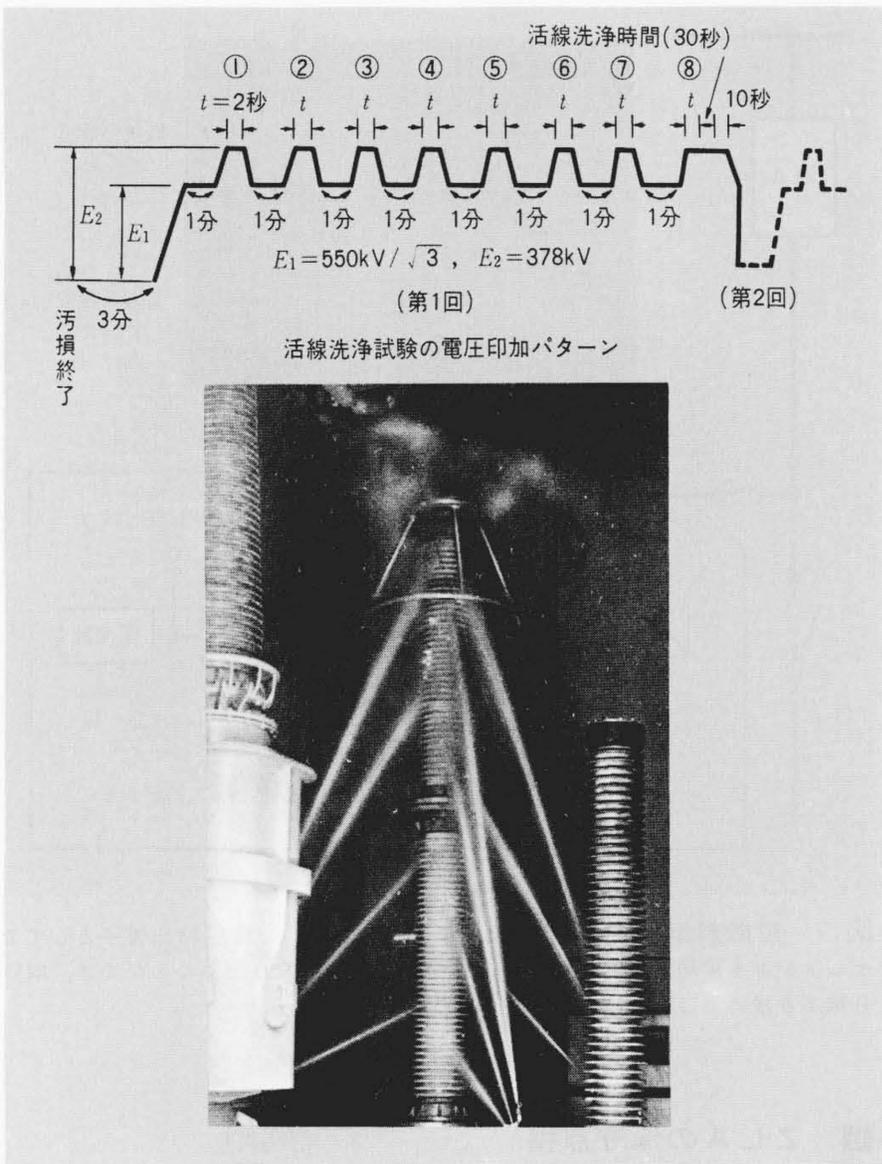


図12 ZLA-78C形420kV ZLAの汚損及び活線洗浄試験状況 汚損度0.03mg/cm²、水圧2.4MPaでの活線洗浄試験状況を示す。

を確認した。また、標準形で0.01mg/cm²汚損設計のものも同様の洗浄試験を実施して支障ないことを確認した。

以上、ZLAとしての代表的試験結果について述べたが、その他、JEC-203規定の放電試験(50kA×0.2秒, 300A×2秒)などを実施し、いずれも仕様を満たすことを確認した。

また、耐震性能は0.3G共振3波加振を実施し、安全率1.2以上であることを確認した。

一方、ZLAには常時系統の対地電圧が印加されているので、課電寿命について考慮する必要がある。実器による加速試験のほか、温度による劣化が化学反応によるものと考え³⁾、Zエレメント単体の加速寿命試験を周囲温度—課電率(=AC印加電圧波高値/動作開始電圧)をパラメータとして実施し、課電寿命をArrheniusの式により推定した。この結果を図13に示す。周囲温度40°Cで100年以上の課電寿命があると計算される。

5 ZLAの品質管理

ZLAの特性は、Zエレメントによって決定づけられるものであるため、これを製作する生産体制が最も重要となる。

既に専用の大形焼成炉、造粒機、混合機、研磨機などの設備を設置し、一貫した品質管理体制下で製造を行なっている。Zエレメントに対し寸法構造検査、V-I特性試験及び放電耐量試験を行なうとともに、特に超音波密度計及び超音波探傷器により、素子の均一性をチェックし品質の向上に努めている。

5.1 Zエレメントの均一性

Zエレメントは粉体を高温焼成により製作させる焼結体素子¹⁾であることから、特に素子の抵抗分布の均一化を図るには、焼成密度の均一化が重要となる。若し密度分布が著しく

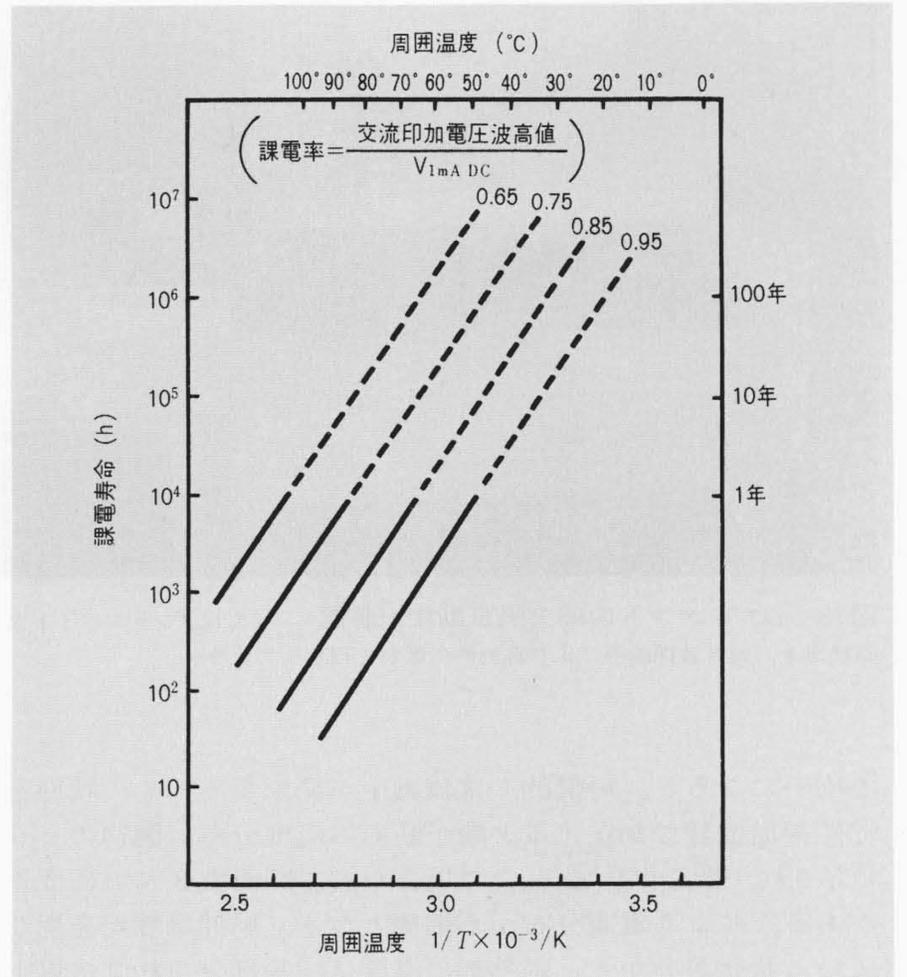


図13 Zエレメントの代表的課電寿命特性 周囲温度40°Cで約100年以上の課電寿命を持っている。

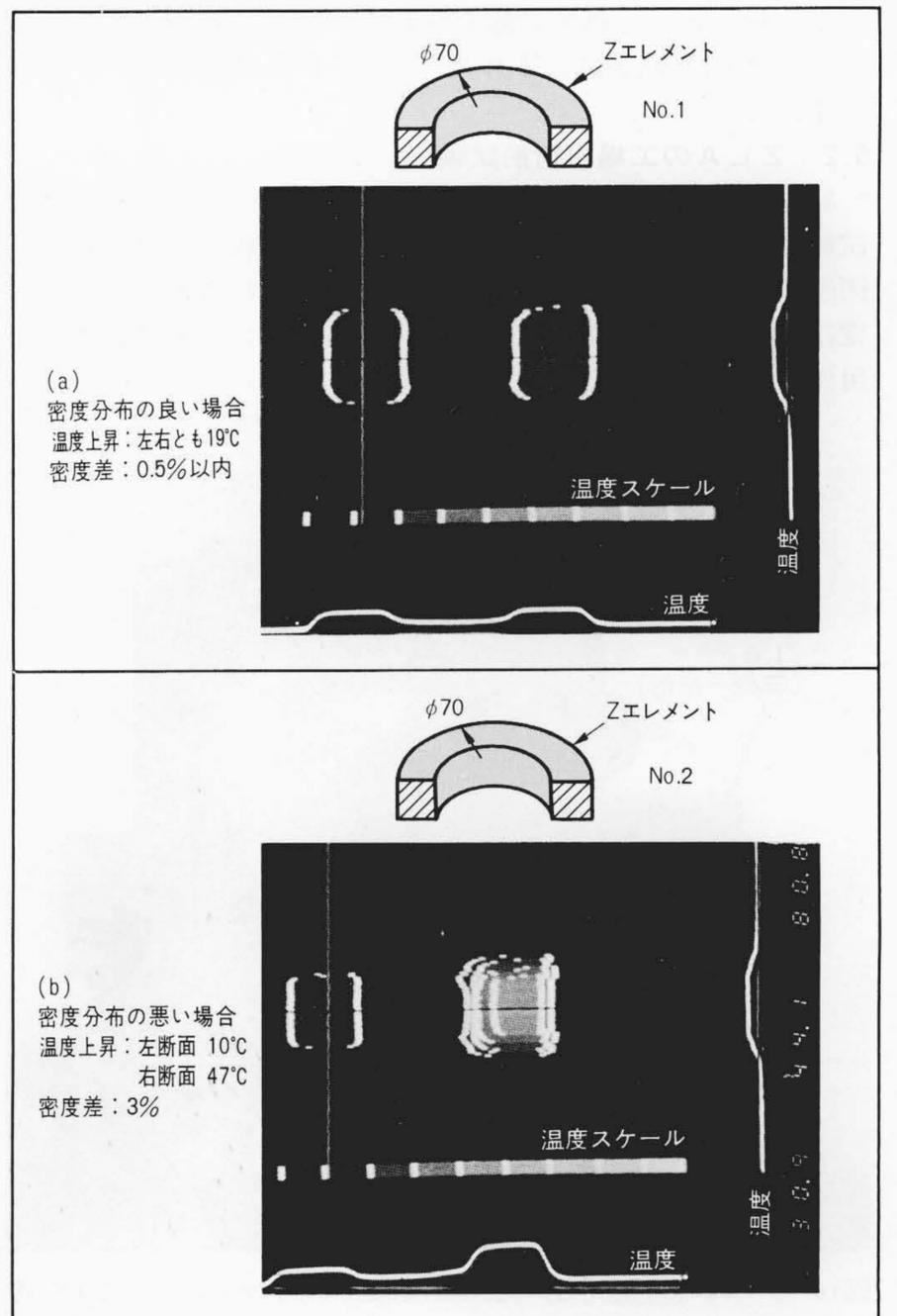


図14 Zエレメント切断面の温度 焼成密度の均一性の必要性を示す。

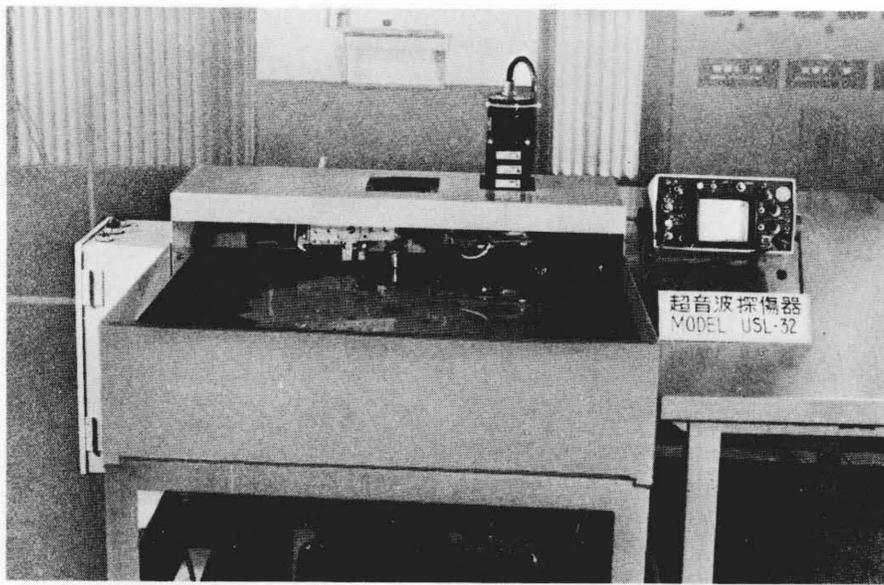


図15 Zエレメント内部欠陥自動検出装置 Zエレメントのボイド欠陥検出を、超音波探傷器により自動的に選別を行なっている。

不均一になると、局所的な電流集中が発生する。この状態を赤外線温度計で測定すると素子断面の温度分布は図14のように示され、密度の不均一(この場合左右の断面で3%の密度差がある。)により電流分布が不平等となり、局部過熱が発生している状態が分かる。過熱部の温度は均等部分の約2倍以上にもなり、素子密度の均一性が重要であることが分かる。

一方、Zエレメントの放電耐量を安定化させるためには、素子内のボイドなど内部欠陥を除去する必要がある。これを図15に示すような内部欠陥自動検出装置により実施し、欠陥がある場合には自動的に除去される。更に、規定電流値×2msの放電耐量試験によるスクリーニング処理を行ない、性能を確認している。

5.2 ZLAの工場出荷前試験

組立品として(1)構造検査、(2)絶縁抵抗測定、(3)漏れ電流試験、(4)動作開始電圧を実施して出荷される。ガス絶縁開閉装置用ZLAについては、ガス絶縁機器に合わせて部分放電試験及び気密試験を実施する。図16にタンク形ZLAの適用例を示す。

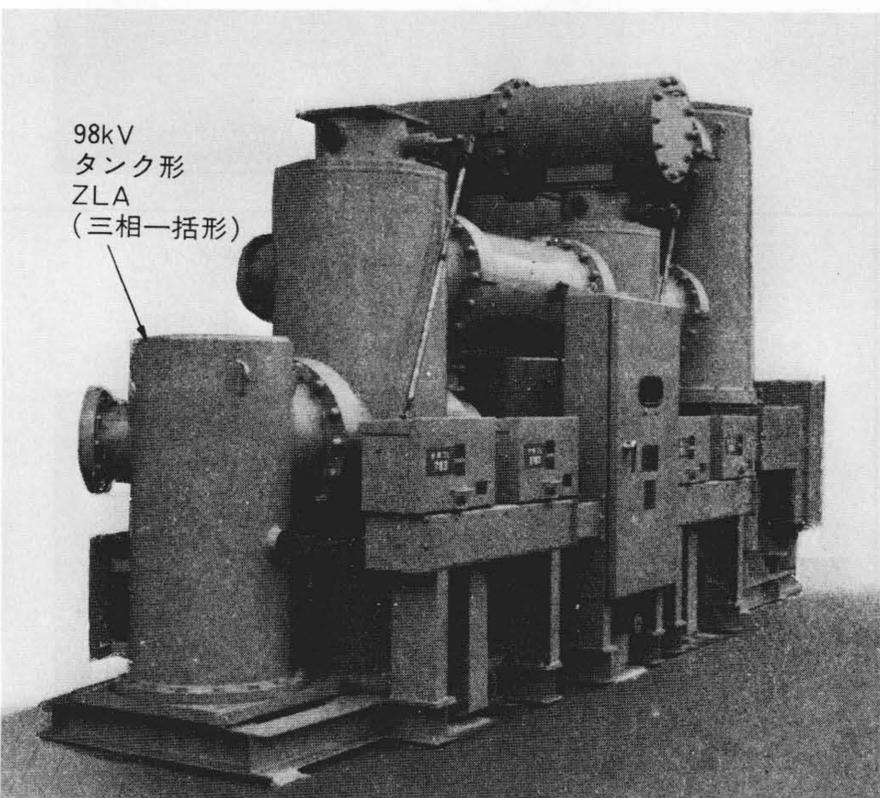


図16 77kV三相一括形ガス絶縁開閉装置への98kVタンク形ZLAの適用例 ZLAの適用により、ガス絶縁開閉装置の配置上の自由度を増し、縮小化を図っている。

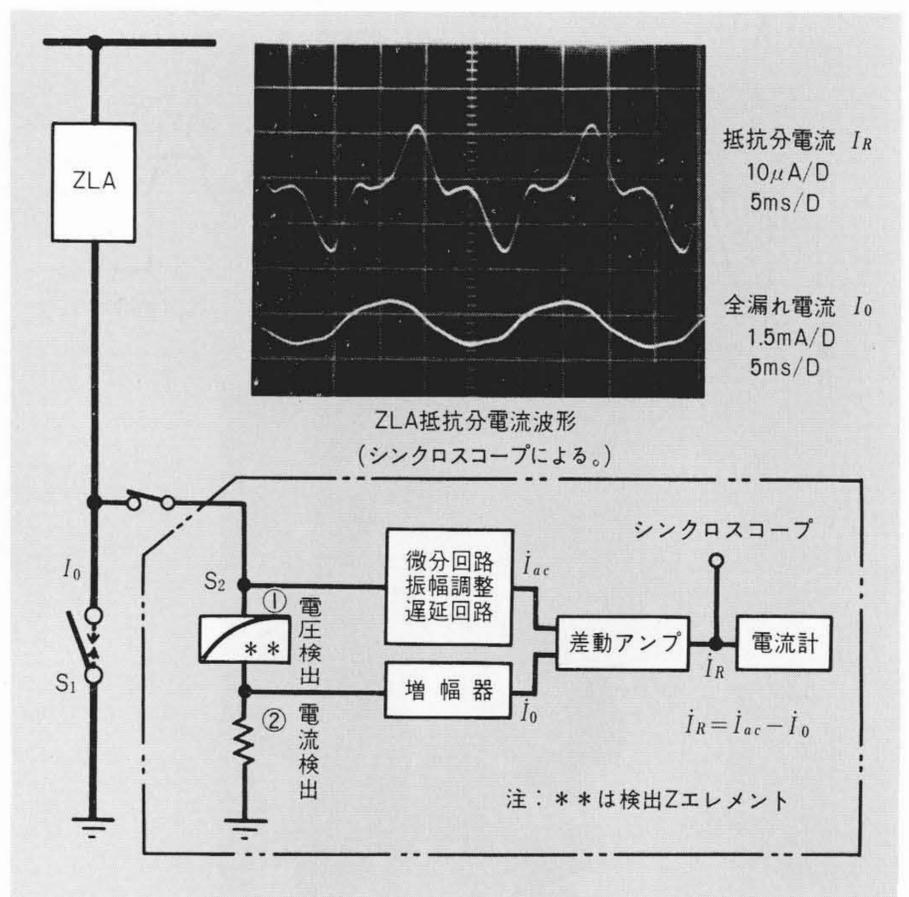


図17 可搬形抵抗分漏れ電流測定器の原理 電圧検出素子としてZエレメントを使用することにより進み電流を簡単に取り出すことができ、抵抗分電流を求めることができる。

6 ZLAの保守点検

前述の課電率から見た場合、現状のZLAは長期の高性能が保証でき、構造的にも無保守無点検を目指した避雷器であるが、開発後の運転実績も短いので当面は、2~3年に1回の絶縁抵抗測定及び漏れ電流測定を実施し、正常な特性を確認することが望まれる。なお、漏れ電流として全漏れ電流Ioを電流計で測定するのが便利であるが、Zエレメントが劣化すると抵抗分電流IRが増えるので、検出電流として進み電流Iacを除去し、抵抗分電流の変化を測定することが推奨される。図17に可搬形ZLA抵抗分漏れ電流測定器の原理及び測定波形例を示す。

7 結 言

以上、ZLAの原理、構造及び性能について述べたが、製作者側としては部品点数の低減と放電特性試験の不要による製品の信頼性向上、一方、使用者側にとっては保護範囲の拡大などによるメリットにより、今後ますます要求されるであろう過電圧抑制の問題に対して、ZLAは在来の交流送電及び直流送電はもとより、将来のUHV(極超々高圧)送電に対しても大きな効力を発揮するものと思われる。

最後に、この開発に際し種々御指導をいただいた電力会社、松下電器産業株式会社及び社内関係各位に対し深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) M. Matuoka: Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics. Journal of Applied Physics, Vol. 10 pp. 736~746(1971)
- 2) 白川, 三吉, 水越: 酸化亜鉛避雷器とその適用, 昭和53年電気四学会連合大会
- 3) E. C. Sakshauge et al.: A New Concept in Station Arrester Design IEEE Winter Meeting F76 393-9(1976)