

ガス絶縁開閉装置用酸化亜鉛避雷器“ZLA”

Zinc Oxide Lightning Arrester “ZLA” for Gas Insulated Switchgear

近年、酸化亜鉛避雷器は従来の直列ギャップ付避雷器に代わり、大幅に普及しつつある。なかでもガス絶縁開閉装置用酸化亜鉛避雷器は、酸化亜鉛素子をSF₆ガス中に封入することにより、SF₆ガスのもつ高い絶縁能力を十分に活用でき、小形で構造簡単な避雷器を実現できる利点をもつ。このたび、66～500kVガス絶縁開閉装置(GIS)用酸化亜鉛避雷器(ZLA)を系列化したので、その内容について概説する。

白川晋吾* Shingo Shirakawa
丸山征一* Seiichi Maruyama
赤津 芳** Yoshi Akatsu
三吉忠彦*** Tadahiko Miyoshi

1 緒 言

ガス絶縁開閉装置用ZLA(Zinc Oxide Lightning Arrester: 酸化亜鉛避雷器)は、電圧-電流の非直線特性の優れた酸化亜鉛素子(Z元素)を使用し、これを接地タンク内のSF₆ガス中に配置して直列ギャップを省略し、SF₆ガスの優れた絶縁耐力を活用した避雷器である。

この避雷器は従来の直列ギャップ付SF₆ガス避雷器に比べ、格段に小形で構造簡単な無アーク避雷器であることから、ガス絶縁開閉装置そのものの配置上の自由度を増すとともに、装置全体としての縮小化に寄与する利点をもっている。

今回66～500kVガス絶縁開閉装置用ZLAを開発したので以下にその内容を概説する。

図1に182kV ZLAの187kVガス絶縁開閉装置への適用例を示す。

2 ガス絶縁開閉装置用ZLAの原理・構造

ZLAは優れた非直線抵抗特性をもつZ元素を、避雷器定格電圧に対応した員数を直列接続して構成されている。

2.1 Z元素の電圧-電流特性

Z元素は酸化亜鉛を主体とし、これに酸化ビスマス、酸化コバルト、酸化クロム、酸化マンガン、酸化アンチモンなど微量の金属酸化物を添加し、焼結されたセラミックスである¹⁾。微構造は約1Ω・cmの比抵抗を示すZnO粒子と10¹⁰Ω・

cm以上の比抵抗をもつ高抵抗の境界層とで構成され、境界層部分が非直線性の電圧-電流特性の役割を果たす。図2にZ元素を直列接続した420kV ZLAの代表的電圧-電流特性と、従来形(直列ギャップ付)SF₆ガス避雷器用特性要素(SiC: 炭化ケイ素)の電圧-電流特性を示す。

電流は、常規運転電圧状態でSiCを使った従来形SF₆ガス避雷器では数百アンペア流れるのに対し、ZLAでは数百マイクロアンペア以下であることから、直列ギャップを不要にしてある。

2.2 従来形避雷器との構造比較

表1に、500kVガス絶縁開閉装置用の従来形避雷器と酸化亜鉛避雷器との比較図を示す。直列ギャップ部分の省略により、次のような利点をもっている。(1)構造的に容積、重量とも約60%に縮小でき、部品点数も30%に縮減した。(2)従来形では、SF₆ガス又はN₂ガスの放電及びしゃ断特性を利用しているため、封入ガス圧力個別の管理を実施していた。ZLAでは直列ギャップ省略により封入ガス圧力による特性差を考慮する必要はなくなり、封入SF₆ガス圧力をガス絶縁開閉装置と同一に設定できる。(3)特性面では、表2に示すように放電現象でなく、Z元素の固体導電現象を利用することにより、侵入インパルスに対して、従来形のように避雷器端子電圧が放電電圧まで上昇する必要がなくなり、インパルス応答特性

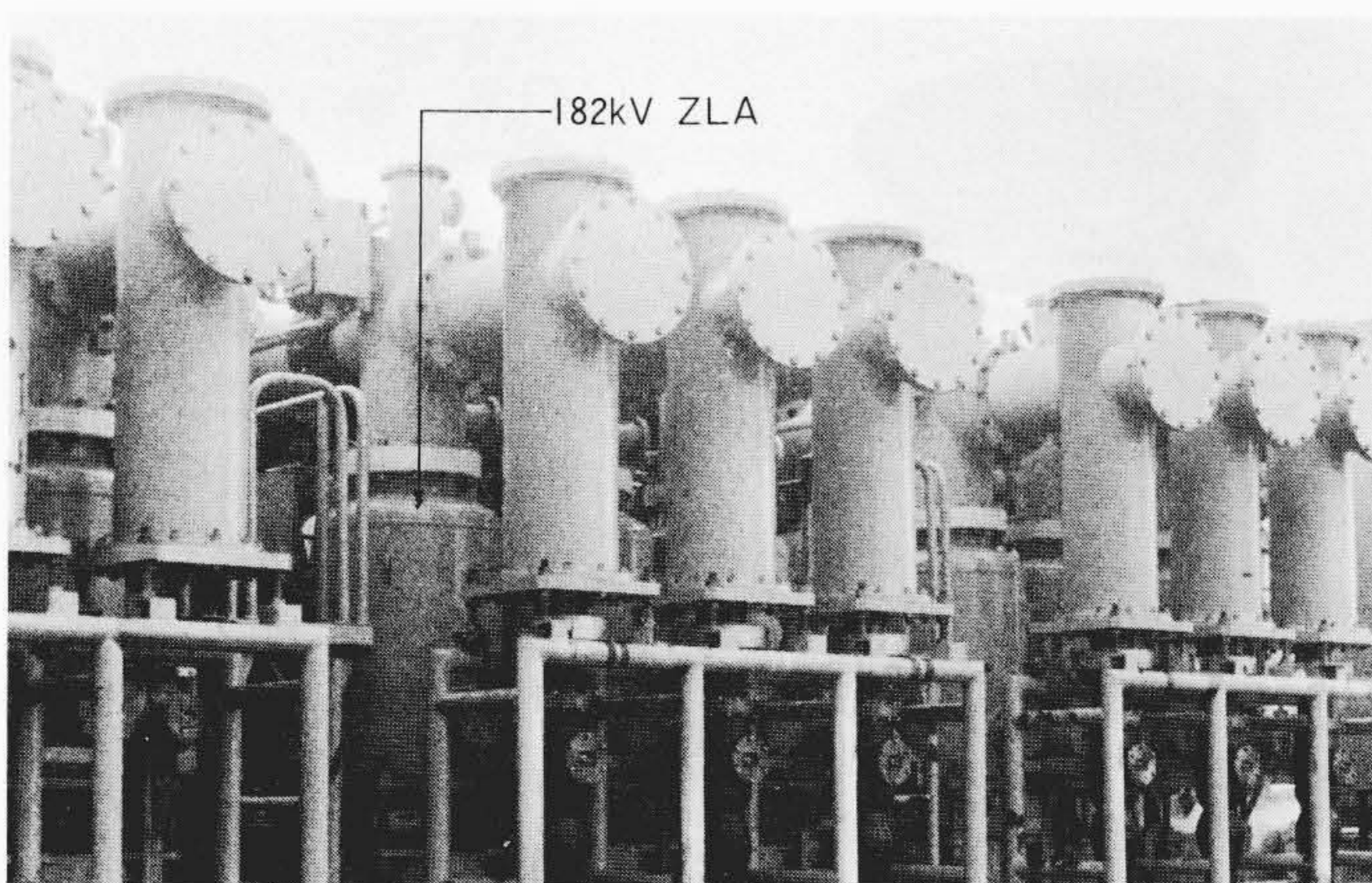


図1 ガス絶縁開閉装置用ZLA(酸化亜鉛避雷器)の適用例
187kVガス絶縁開閉装置への182kV ZLAの適用状況を示す。

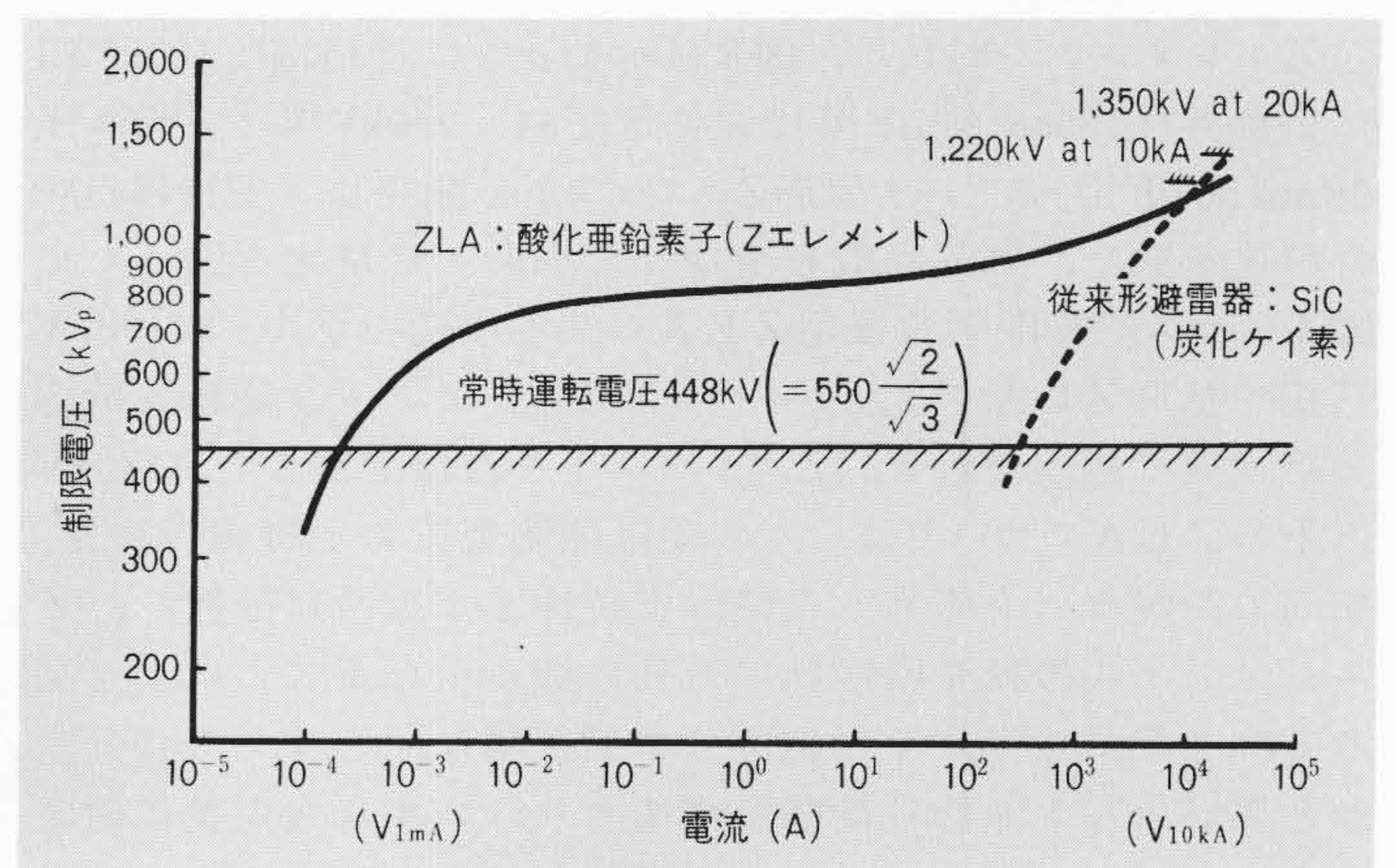


図2 420kV ZLAの代表的電圧-電流特性 従来形避雷器とZLAとの電圧-電流特性を示し、ZLAでは非直線性の良いZ元素を使用しているため直列ギャップが不要となる。

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

表1 500kVガス絶縁開閉器用の従来形避雷器とZLA(酸化亜鉛避雷器)との構造比較 ZLA化することにより、大幅に構造が簡単化し、縮小化する。

No.	項目	従来形	ZLA
1	形式	ODF-160形 420kV	ZLA-78F形 420kV
2	構造		
3	定格ガス圧力	1.5ゲージ圧力kg/cm ²	3.5ゲージ圧力kg/cm ² (ガス絶縁開閉装置と同じ)
4	重量	100%	60%
5	タンク容積	100%	60%
6	部品点数	100%	30%
7	特性要素	炭化ケイ素(SiC)	酸化亜鉛素子(ZnO)
8	放電特性	あり (封入ガス圧力により変動)	なし
9	制限電圧特性	あり	あり

注：略語説明 FRP(ガラス繊維強化プラスチック)

が優れる。一方、従来形避雷器では、雷サージによる避雷器動作時に続流を流して不要なエネルギーをSiCで消費していたが、Z元素の優れた非直線電圧-電流特性により雷サージによる続流を流す必要がなくなった。

2.3 ガス絶縁開閉装置用ZLAの構造

Z元素の形状は、図3に示すように定格電圧420kV用に公称外径130mm(78μF用)、定格電圧84~280kV用に公称外径90mm(50μF用)のドーナツ形Z元素を開発して支持構造の合理化を図り、部品点数を少なくし小形・軽量化を図った。図4はガス絶縁開閉装置用ZLAの基本構造を示す。84/98kV三相一括形ZLAでは、ドーナツ形Z元素を絶縁支持棒と絶縁筒で組み合わせ、Z元素を直線配置した。182kV以上のZLAについては、ガス絶縁開閉装置の主母線の高さ、相間の距離などを考慮して絶縁支持棒を4箇所配置し、Z元素の接続を階段状に直列に積み重ねることにより高さ方向を縮減させ、かつ電位分布補正用に同心リング状分割形金属シールドを設け簡易な構造とし、いずれも振動に耐える構造とした。図5にガス絶縁開閉装置用266kV ZLAの内部構造(写真)を示す。

3 ガス絶縁開閉装置用ZLAの主な特長

ガス絶縁開閉装置用ZLAの主な特長は、次に述べるとおりである。(1)焼成密度の均一化を図り強力な放電耐量をもつドーナツ形Z元素の採用により、部品点数の縮減を図

表2 従来形避雷器とZLAとの特性比較 直列ギャップ付従来形避雷器とギャップレス避雷器ZLAとの特性差を示す。

項目	従来形避雷器 (直列ギャップ付)	ZLA
インパルス応答特性		
雷サージ動作責務		

り、組立構造の簡単化、小形・軽量化を図った。(2)構造簡単な同心状分割形金属シールドを開発し、分圧コンデンサなどの部品を付加することなく、Z元素間の電位の均一化を図った。(3)直列ギャップをなくした無アーク避雷器であるので、封入ガス圧力の個別の管理が不要となる。(4)多重雷に対する処理能力がある。

4 ガス絶縁開閉装置用ZLAの特性及び試験結果

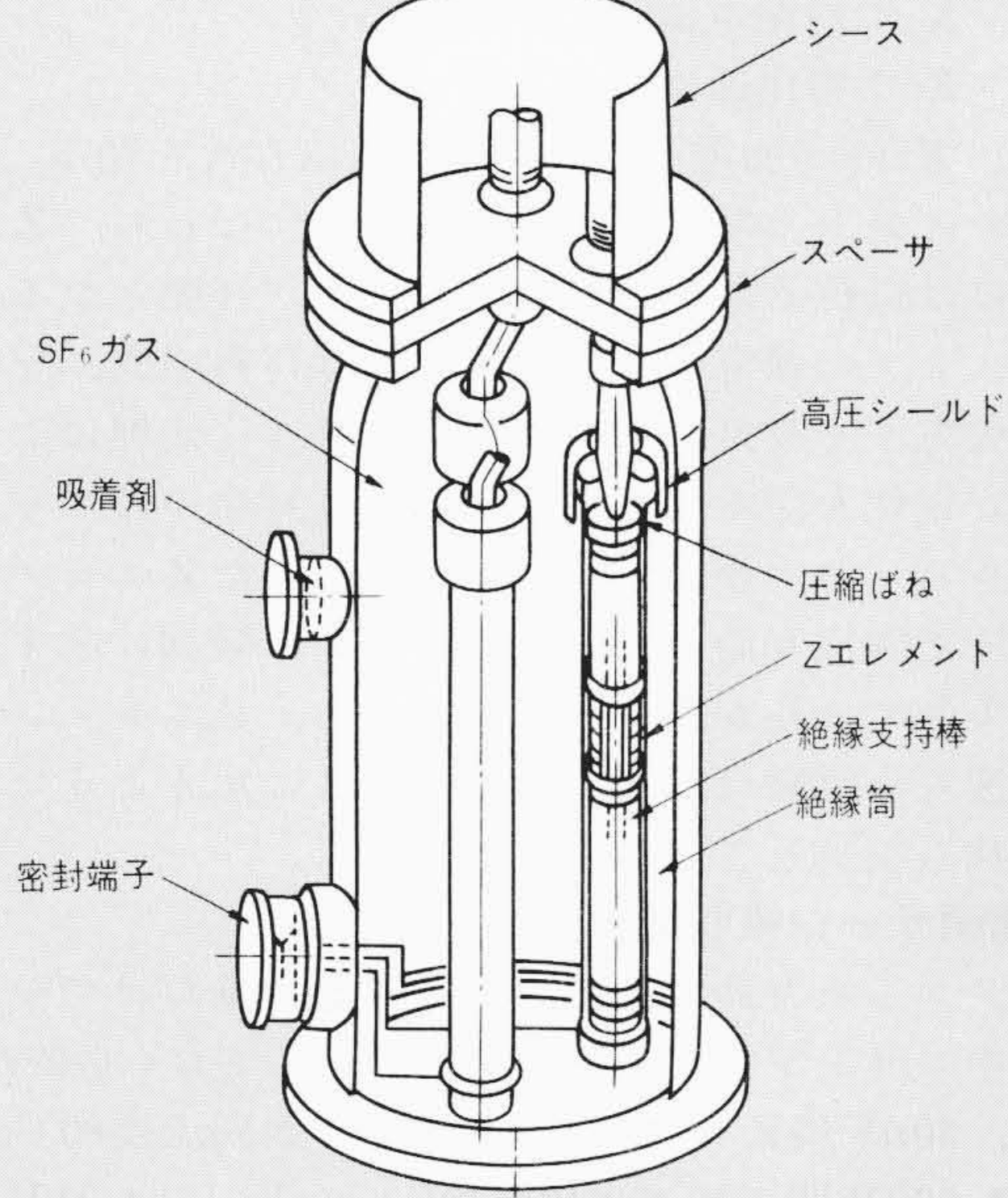
避雷器の規格JEC(電気規格調査会)-203に定める試験項目及びZLA特有の試験を実施し、信頼性を検証した。

4.1 電位分布

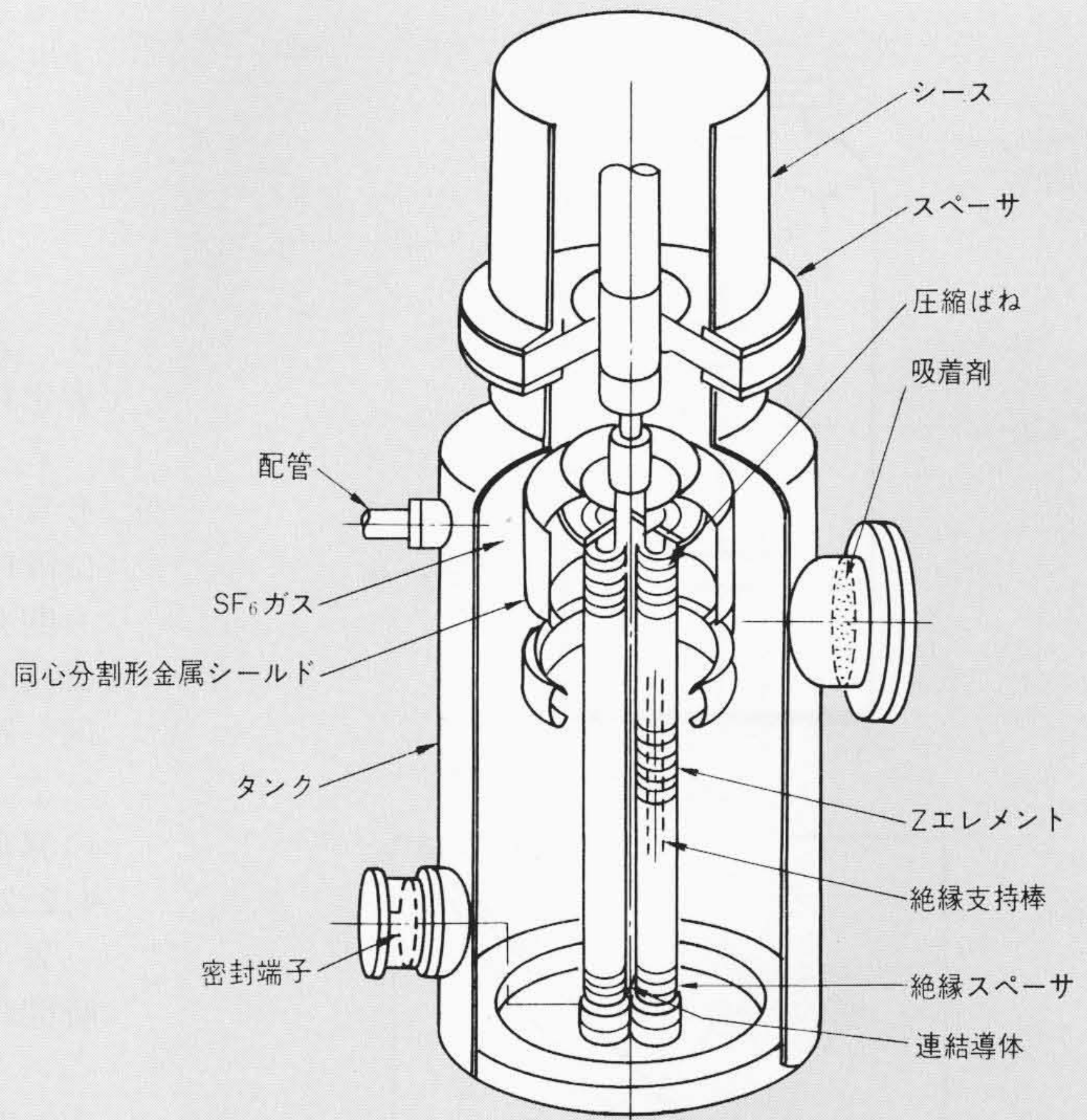
ガス絶縁開閉装置用ZLAの場合、図6(a)に示すようにZ元素と避雷器用タンク間の漂遊容量Csによる電位分布を考える必要がある。この対策として次の三つの方法が考えられる。(1)漂遊容量を補正するため、Z元素間に並列



図3 Z元素の形状及び組立構造 ドーナツ形素子の開発により、素子の放電耐量を上げるとともに焼成密度の均一化を図っている。組立構造はZ元素の内径側に絶縁棒を配置し、これをガイドとしてZ元素を積み重ねている。



(a) 84～98kV 三相一括形ZLAの構造



(b) 182～420kV相分離形ZLAの構造

図4 ガス絶縁開閉装置用ZLAの基本構造

ドーナツ形Zエレメント及び同心分割形金属シールドの開発により分圧コンデンサを付加することなく、組立構造の簡単化を図っている。

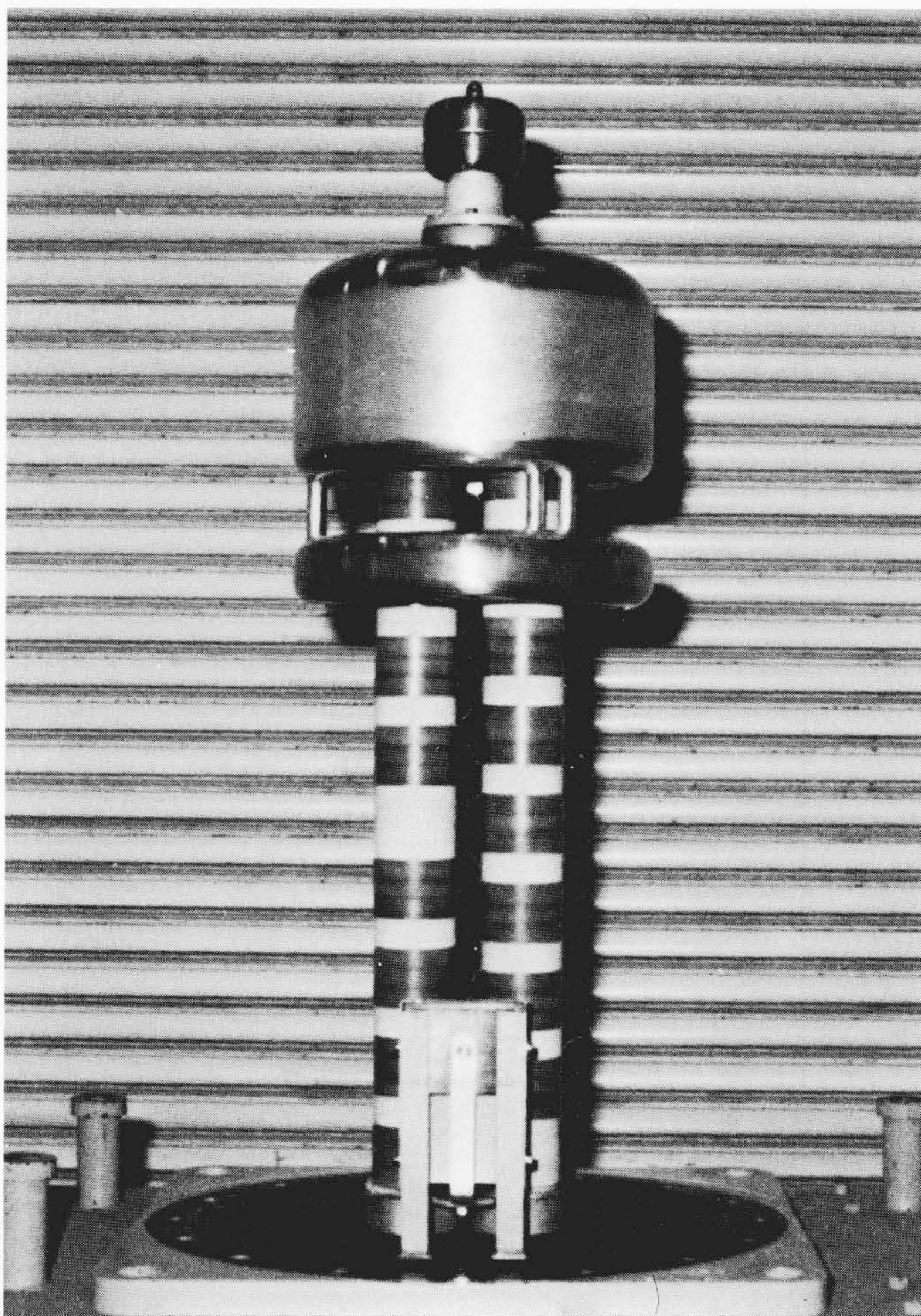


図5 266kVガス絶縁開閉装置用ZLAの内部構造

182kV ZLAの内部構造(写真参照)を示す。

コンデンサを付加する。(2)適切な漂遊容量補正用シールドを配置する。(3)漂遊容量による電位分布の影響を受けにくいように、Zエレメントの自己容量を上げる。ガス絶縁開閉装置用182～420kV ZLAでは、部品点数を増やさず、かつガス空間で絶縁をとる上記(2)の方法を採用した。電位分布は同図(b)に示すように電位分布補正用同心状分割形金属シールドを設けることにより、電位分布を最大1.1倍以下に抑えることができる。同図(c)の電界解析によるガス絶縁開閉装置用266kV ZLAの電位分布図に示すように電気力線を均等に分布させ、接地タンクへ流れる電流を補償してZエレメント間の印加電圧での電圧分担を一定にした。

4.2 ZLAの信頼性試験

ZLAは基本的に非直線性の優れた抵抗体のZエレメントを使用し、直列ギャップを不要にした避雷器であることから、Zエレメントの課電寿命特性及び避雷器としての開閉サージ吸収能力について検証しておくことが大切である。

4.2.1 課電寿命

Zエレメントの電圧-電流特性は三つの区分、すなわち低電界領域、中電界領域及び高電界領域¹⁾に区分される。常時使用状態では低電界領域に相当し、電圧-電流特性は温度に大きく依存される。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ある。電流は境界層の電位障壁が低下してくると抵抗分漏れ電流が増加し、Zエレメントは熱暴走する。この要因として周囲温度と印加電圧とが考えられることから、これらをパラメータとして課電寿命加速試験を実施して、アルレニウスの式から課電寿命を計算すると、課電率=0.75

($= \frac{\text{交流印加電圧波高値}}{V_{1mA} \text{ DC流れるときの直流電圧}}$)、周囲温度40℃で100年以上の課電寿命が推定される。¹⁾この素子で課電率=0.85、周

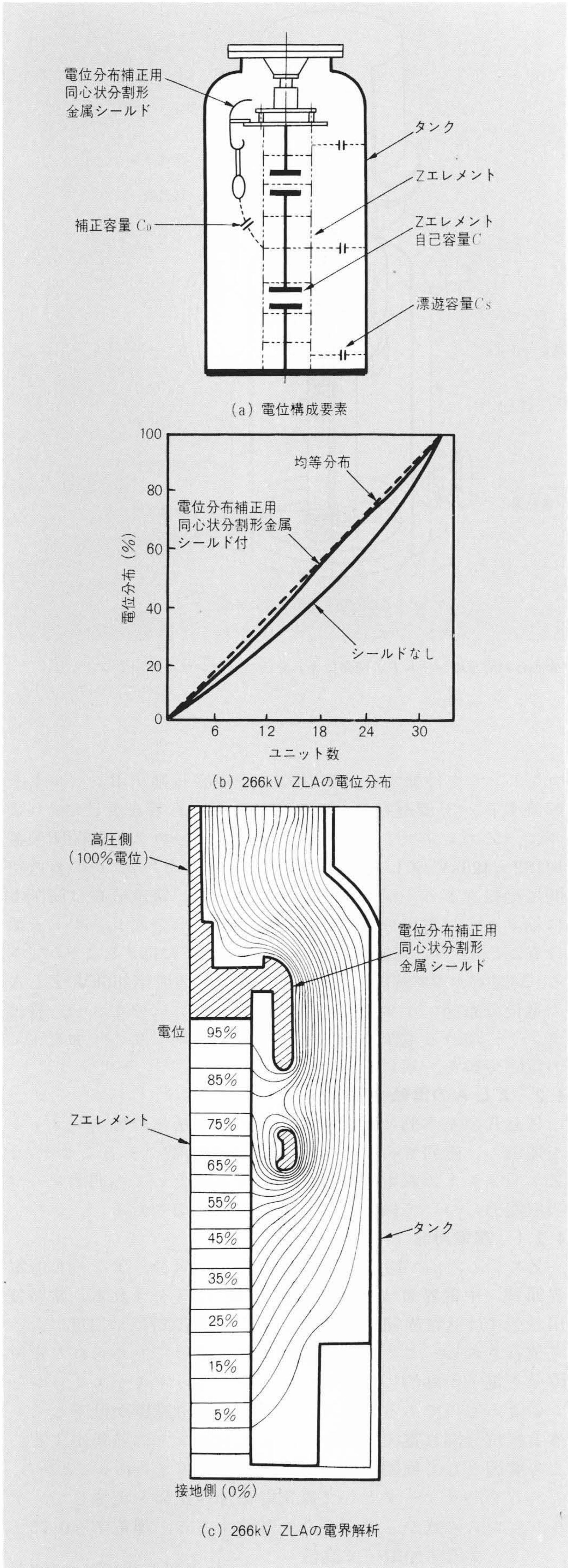


図6 ガス絶縁開閉装置用266kV ZLAの電位分布 266kV ZLAの電位分布の状況を示す。

周囲温度90℃での抵抗分電流 I_R と課電寿命 t の関係は図7に示すとおりで、次式により表わされる。

$$\log I_R = K_1 + K_2 \sqrt{t}$$

ここに K_1 : 初期電流

K_2 : 劣化速度を表わすパラメータ

この K_1 , K_2 の印加電圧依存性, 温度依存性を知ることにより, Zエレメントの寿命を予測できる。すなわち, ZLAの劣化判定には抵抗分電流を把握することが肝要となる。

Zエレメントの課電寿命を上げるには材料組成, 配合, 成形及び焼成方法を改良し, 境界層のガラス化処理によって電位障壁の安定化を図ることにより更に高寿命のZエレメントも開発できる。このガラス化処理を実施したZエレメントの抵抗分電流と課電寿命との関係は, 図7の破線に示すように同一課電条件でも I_R が増えにくい。一方, Zエレメント単体による加速寿命試験ばかりでなく, 図8に示すように実器での課電試験も実施して信頼性を確認した。

4.2.2 開閉サージ吸収能力

Zエレメントの寿命は上述の課電寿命試験だけでなく, 長時間課電中のサージ電流処理能力を検証しておく必要がある。このため, 50 μ F用Zエレメントの新品と周囲温度80℃, 課電率0.75で4,000時間の加速劣化品(V_{1mADC} 新品時4.1kV, 課電後3.73kV低下したもの。)を使用し, 開閉サージ処理能力について検討した。

試験パターンは開閉サージ吸収時の周囲温度40℃, 運転状態20℃の条件を考えて, 図9に示すような試験パターンで開閉サージとして1,600A $\times$ 2ms($\approx$ 20kJ)を印加した。通常の50

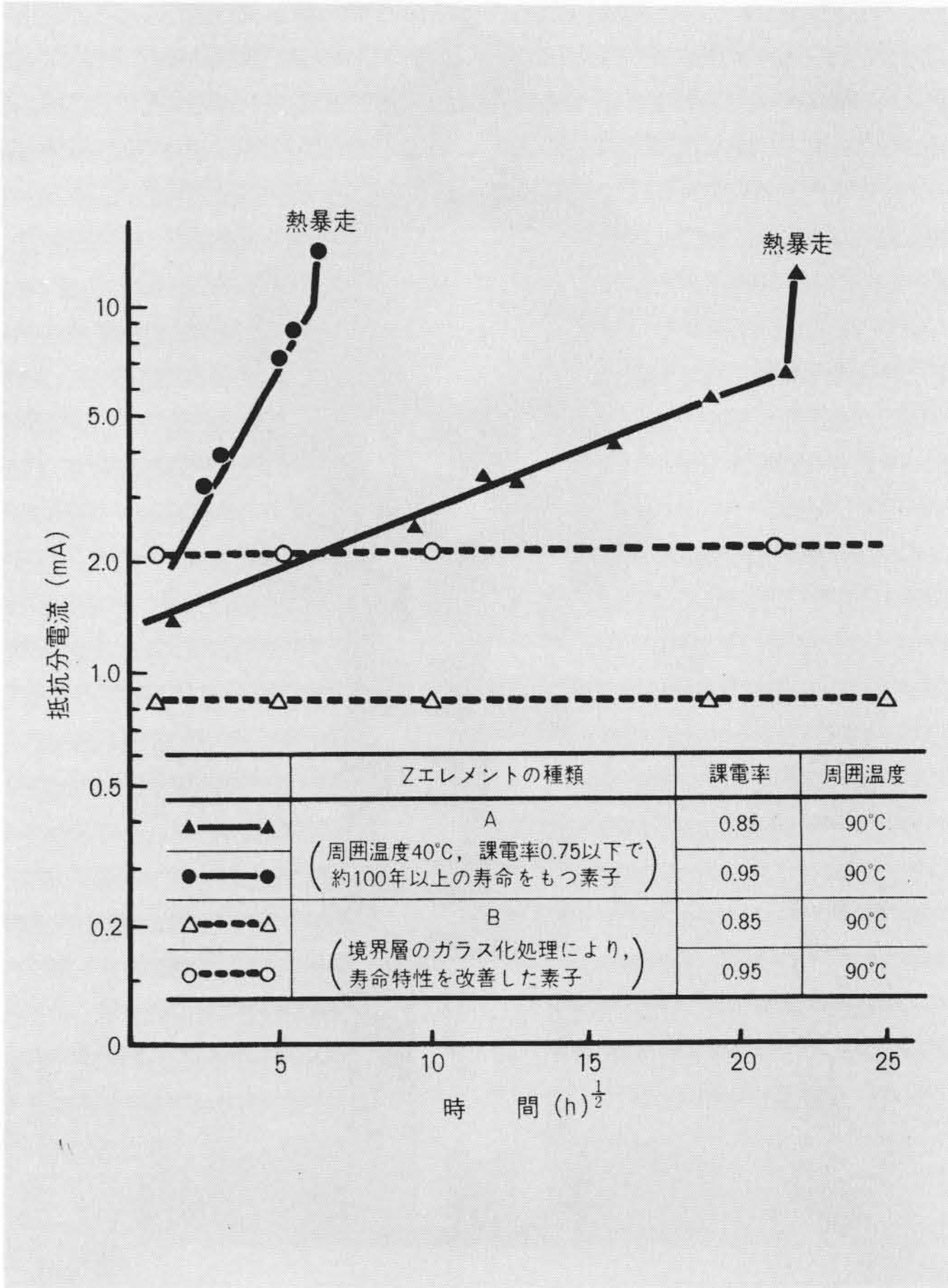


図7 Zエレメントの課電寿命加速試験 50 μ F用素子の課電寿命, 課電率0.85/0.95, 周囲温度90℃での抵抗分電流と時間との関係を示す。



図8 ガス絶縁開閉装置用420kV ZLA 420kV ZLAの工場内での課電試験状況を示す。

μF 用再投入サージエネルギーはMax.12kJ程度であり、過酷なエネルギーを素子に注入している。

試験結果は、図9に示すように約10%動作開始電圧が低下していても開閉サージ吸収後の抵抗分電流が増えるだけで、開閉サージは吸収できる。

したがって、Zエレメントの課電寿命として加速寿命試験で寿命を確認しておけばよいと推定される。

4.3 その他

ZLAとして動作開始電圧試験、漏れ電流試験、雷サージ・開閉サージ動作責務試験、インパルス応答特性試験、制限電圧試験、振動試験及び部分放電試験を実施し、仕様を満たすことを確認した。

5 ガス絶縁開閉装置用ZLAの品質管理及び保守点検

出荷前試験としてがい子形ZLAと同様に構造検査、絶縁抵抗測定、漏れ電流試験及び動作開始電圧試験を実施するとともに、ガス絶縁開閉装置用として特に気密試験、部分放電試験を実施して出荷される。

なおZエレメントについて、電気的特性試験を全数実施するとともに、寿命については抜き取り検査で先行チェックを実施してある。また、Zエレメントの放電耐量を安定化するため、素子内のボイドをZエレメント内部欠陥自動検出装置によりボイドの有無をチェックしている。本装置は図10に示

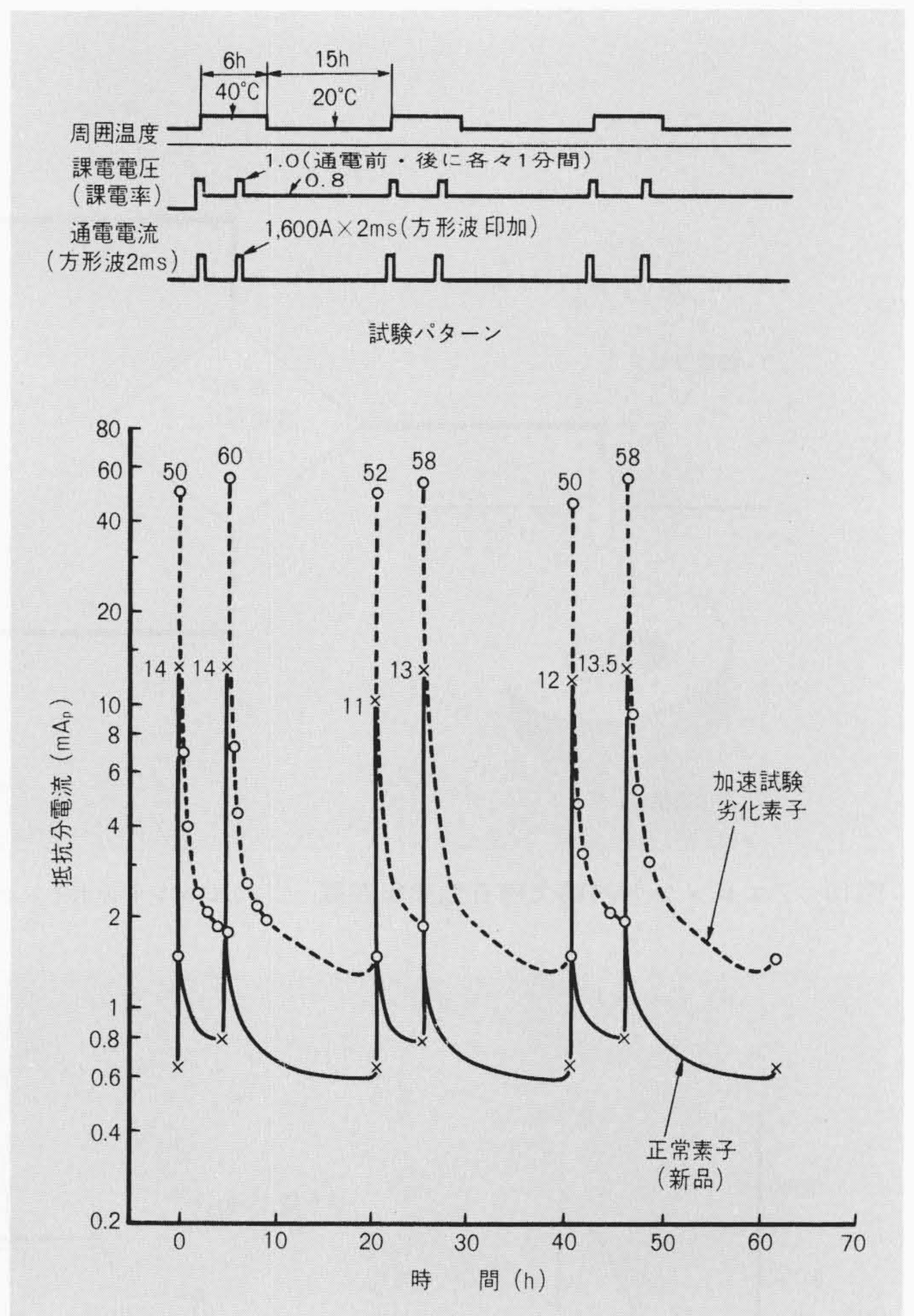


図9 課電時の開閉サージ処理回数とZエレメント抵抗分漏れ電流との関係 加速試験による劣化素子に、開閉サージ1.5倍相当のエネルギーを6回注入し、いずれも素子が処理できることを示している。

すように、非破壊検査による超音波探傷器で内部にボイドがあると自動的に除去される。また製造設備を自動化し、人為的エラーを極力防止するよう努めている。

現地据付後の保守点検は、従来形避雷器と同様に絶縁抵抗、漏れ電流測定を2～3年に1回実施し、正常な特性を確認することが望まれる。

6 保護性能

ZLAをガス絶縁開閉装置に適用した場合の絶縁協調について述べる。ZLAは先に述べたように、直列キャップ付避雷器のように避雷器端子電圧は放電電圧まで上昇せずに動作することから、急峻波インパルス応答特性が良いことよって近接雷に対する保護特性が優れている。例えば、500kVガス絶縁開閉装置の線路側入口及び変圧器前に420kV ZLAを配置することにより、図11の雷サージ計算プログラムによる計算結果に示すように、絶縁レベルはBIL(Basic Insulation Level)1,550kV以下に抑制される。

なお表3に84～420kVガス絶縁開閉装置用ZLAの特性を示す。

7 結 言

以上、ガス絶縁開閉装置用ZLAの原理、特性について述べたが、従来のガス絶縁開閉装置用避雷器は、寸法が大きく配置上困難な点があったが、ZLAを適用することにより、

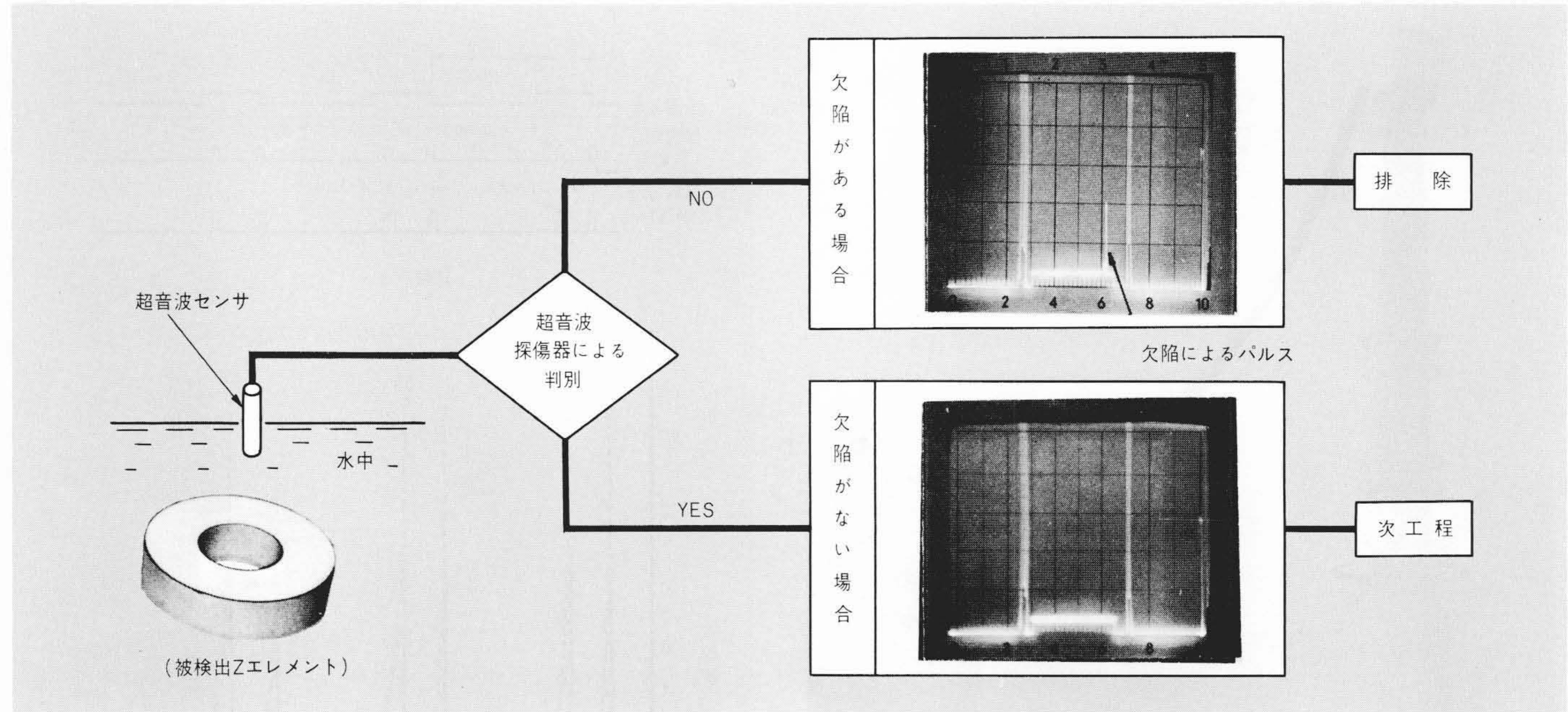


図10 Zエレメント内部欠陥自動検出装置 Zエレメントのボイドなどの内部欠陥を、超音波探傷器により検出している。

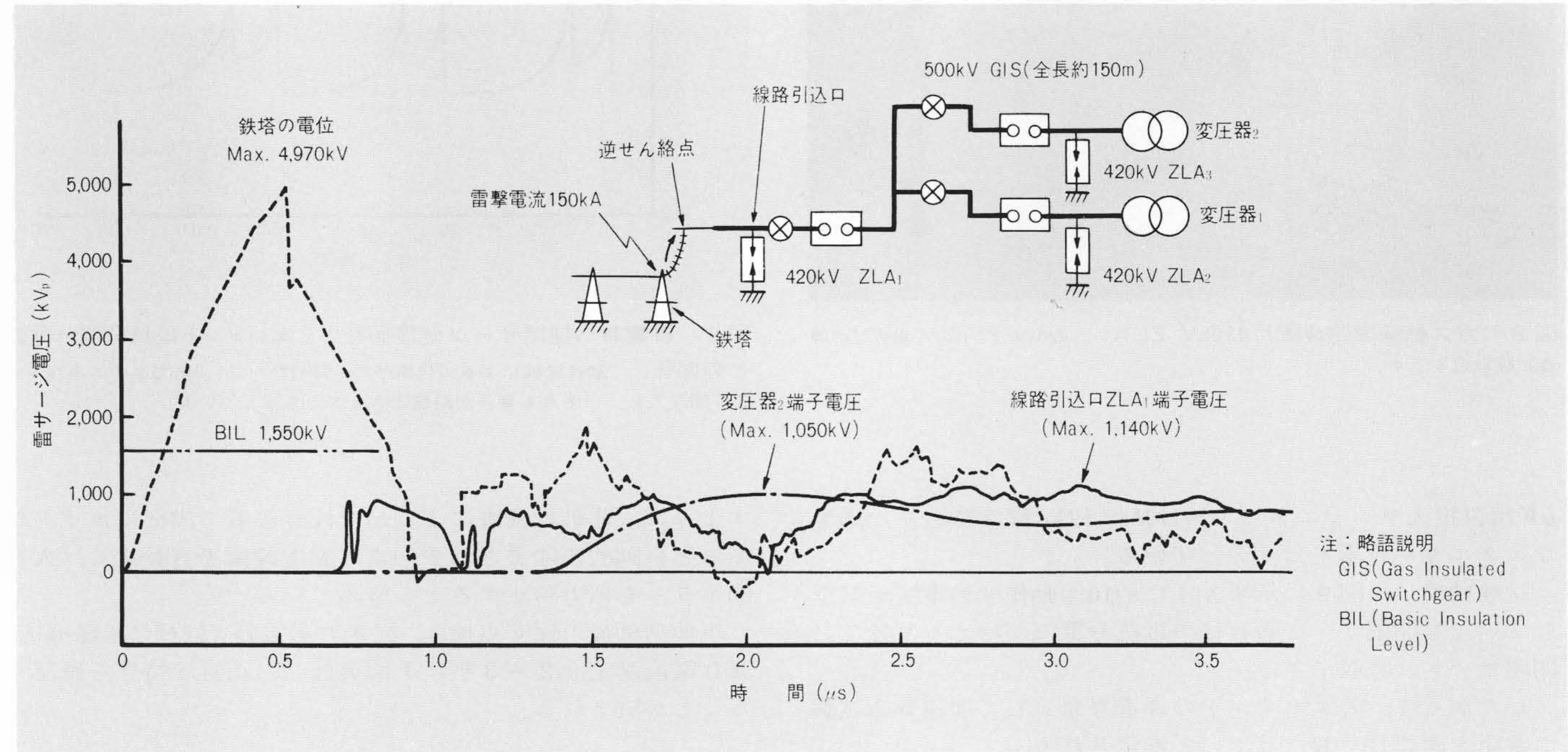


図11 500kVガス絶縁開閉装置の絶縁協調 500kVガス絶縁開閉装置の線路引込口及び変圧器前に420kV ZLAを配置することにより、雷サージによる過電圧をBIL 1,550kV以下に抑制できる。

表3 ガス絶縁開閉装置用84～420kV 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) kVp	動作開始電圧 (V _{1mA}) (下限値)kVp	制限電圧	
				at 5kA	at 10kA
66	84	350	120	244	269
77	98	400	140	284	314
110	140	550	200	406	448
154	196	750	280	568	627
187	182	750	260	528	582
220	210	900	300	609	672
275	266	1,050	380	771	851
550	420	1,550	600	—	1,220 (20kA) 1,350

注：＊ 84～266kVまで直流電圧、420kV ZLAについては交流電圧を印加し、抵抗分電流が1mA_p流れたときの端子電圧を示す。

配置上の制約が除かれること及び保護範囲が広がることから今後ますます要求されるガス絶縁開閉装置の過電圧抑制に大きな効果を発揮するものと思われる。

終わりに、ZLAの開発に際し種々御指導いただいた電力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) 白川，外：酸化亜鉛避雷器“ZLA”，日立評論，61, 733～738（昭54-10）