

最近の酸化亜鉛避雷器と絶縁協調

Recent Aspects of Zinc Oxide Lightning Arrester and Insulation Co-ordination

優れた非直線性の電圧-電流特性をもつ酸化亜鉛素子を使用したZLAは近年急速に普及し、従来の特性要素(炭化ケイ素)を使用した直列ギャップ付避雷器にとって代わってきた。このZLAは昭和50年代初めに使用開始後、3kVから500kV系統まで広く実用に供されて実績が出てきたこと、更に、酸化亜鉛素子の開発研究が進んだことなどによって保護特性の優れた1,000kV級避雷器までの適用も進められている¹⁾。そこで、最近のZLAの開発技術及びZLAによる絶縁協調の動向について述べる。

中野幸一* Kōichi Nakano
 白川晋吾* Shingo Shirakawa
 高橋 研** Ken Takahashi
 小沢 淳*** Jun Ozawa

1 緒言

優れた非直線性の電圧-電流特性をもつ酸化亜鉛素子を使用し、直列ギャップを使用しないZLA (Zinc-Oxide Lightning Arrester: 酸化亜鉛避雷器)は、既に数千台の納入実績をもち、各方面で順調に稼働している。この避雷器は小形・軽量で、多重雷処理能力があること、急峻波制限電圧特性が優れること、がい管表面汚損時直列ギャップ付避雷器のように内部放電しないこと、大口径素子の開発及び並列配置による重責務化が容易なことなどの利点をもっている^{2),3)}。

今回、電力用避雷器として開発した最近のZLA及びそれを活用した絶縁協調の動向について述べる。

2 最近のZLAの課題

避雷器の保護レベルは避雷器性能の向上により、系統電圧の高電圧化に伴って図1のように推移してきている。また、近年のガス絶縁開閉装置の急速な普及からも分かるように、変電所の縮小化が進められており、今後、更にコスト及び据付所要面積の最小化を指向して変電所の絶縁協調が検討されるものと思われ、これに対応できる避雷器が要求されてきている。

3 ZLAの基本特性

ZLAは優れた非直線抵抗特性をもつ酸化亜鉛素子を直列又は並列に接続したもので、直列ギャップをもっていないことから、その基本特性は図2に示す制限電圧-電流特性で表わされる。避雷器による絶縁協調を検討する場合、基本的には、LIWL(雷インパルス耐電圧値)を設定し、それに雷サージ反射現象による電位上昇を考えた裕度(国内では約20%に設定)をとって、保護レベルすなわち公称放電電流での制限電圧を設定する。一方、避雷器が所定の動作責務能力を発揮することが要求されるAC電圧から定格電圧が設定され、避雷器の性能評価は、この定格電圧と公称放電電流での制限電圧の比、すなわちDLR(Discharge Level Ratio)で表わされる。図1に示したように系統電圧の高電圧化に伴い、このDLRが小さく設定され、また経済性を考えLIWLの低減が図られていることは、ZLAとしては、図2の特性を①から②に改善する必要があることを意味する。

すなわち、ZLAの制限電圧-電流特性の中で、技術的には次の四つの重要な領域の特性改善が必要である。

- (1) 領域Aは、常時系統電圧が印加され、課電寿命特性が要求される領域で、DLRの低減とともに課電率は高くなる(図1)ため、課電寿命特性の向上が必要である。
- (2) 領域Bは、系統のAC性過電圧に対して、避雷器のエネルギー耐量が要求される領域で、耐量の向上が必要である。

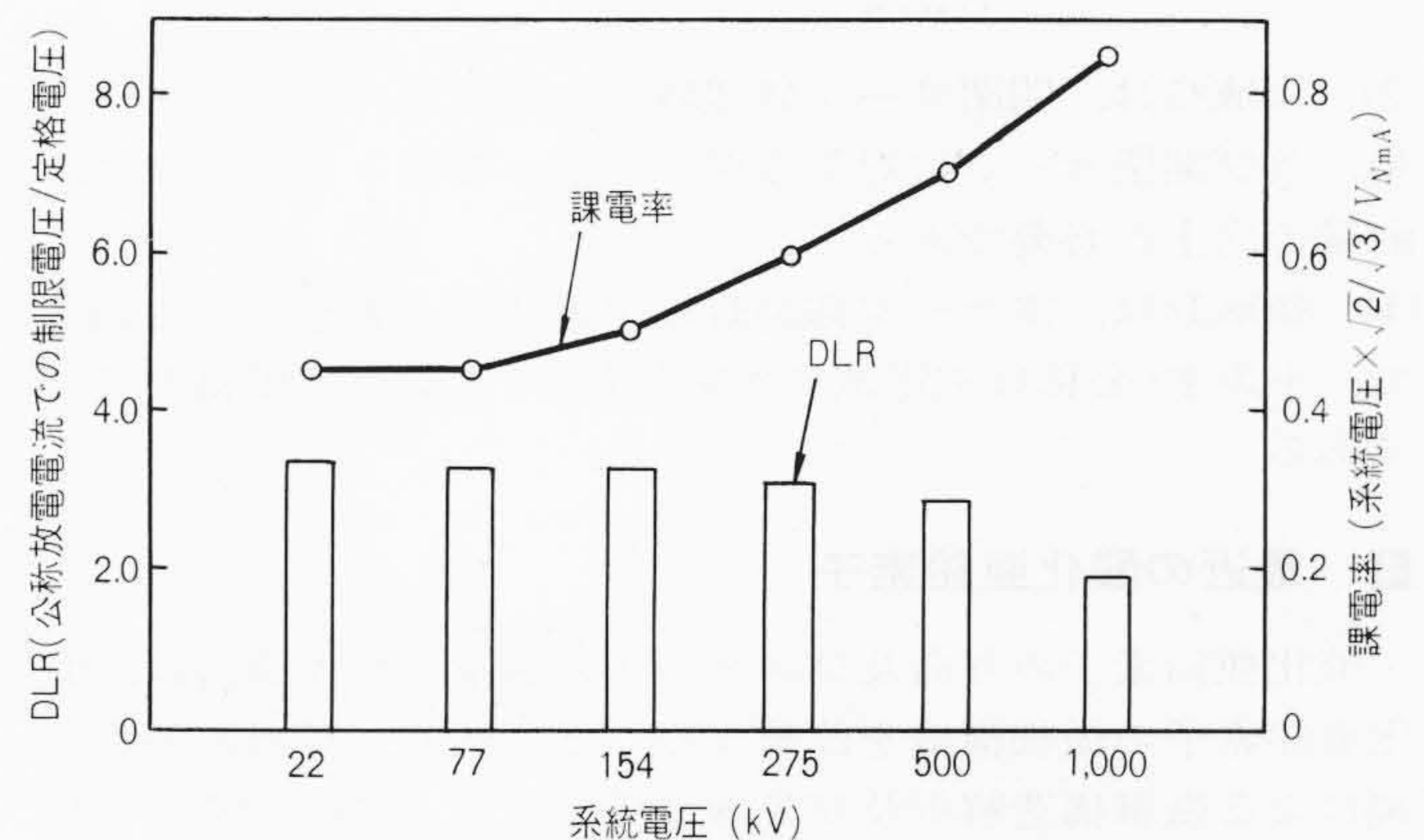


図1 避雷器の保護レベルと課電率 系統電圧が高くなるほど高い課電率でも使用できる寿命特性の優れた素子が要求される。

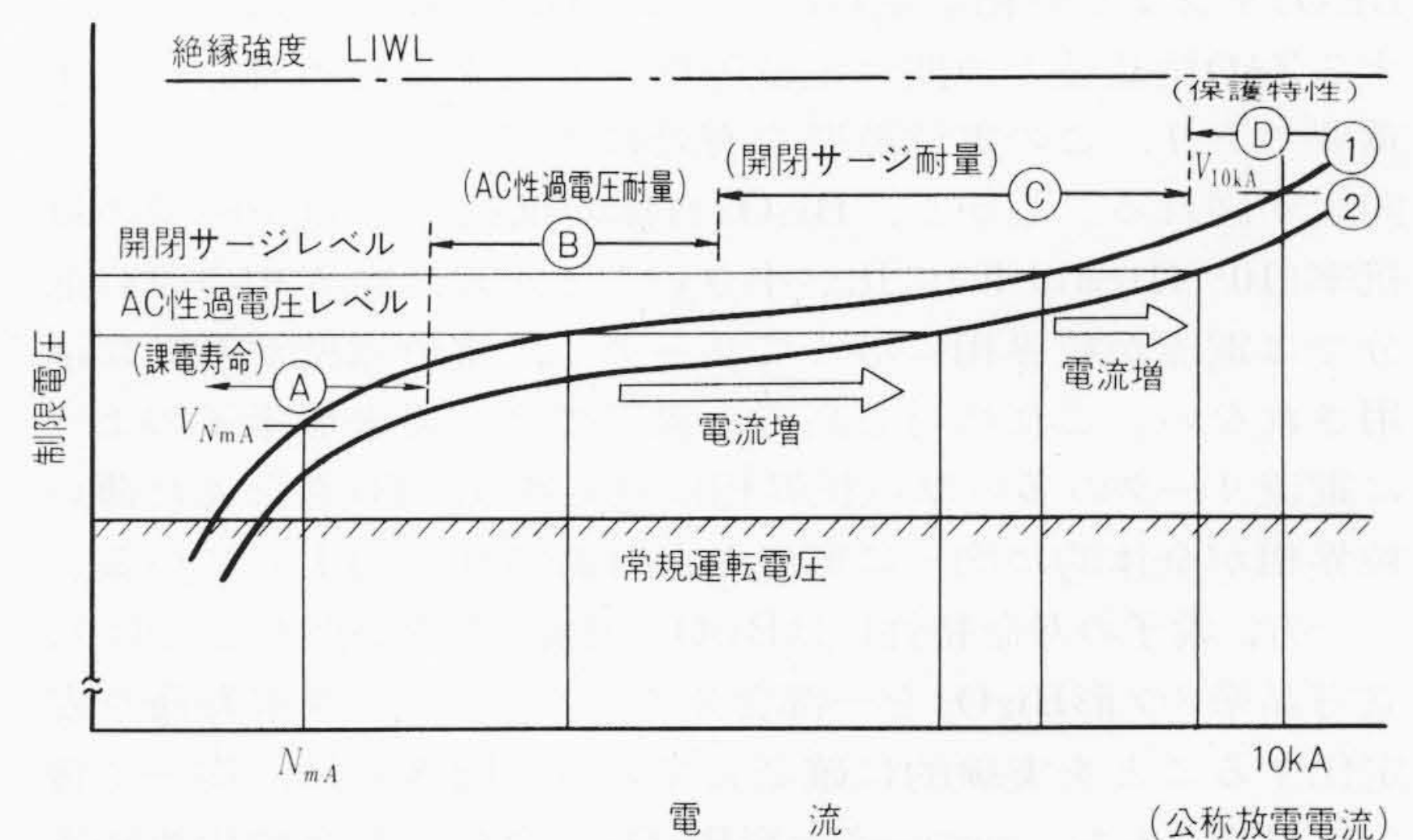


図2 ZLA(酸化亜鉛避雷器)の電圧-電流特性 避雷器の特性を①から②に改善すると、AC性過電圧、開閉サージに対する電流が増大。エネルギー耐量の向上が必要となる。()内は、A~D領域で要求されるZLA特性を示す。

* 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

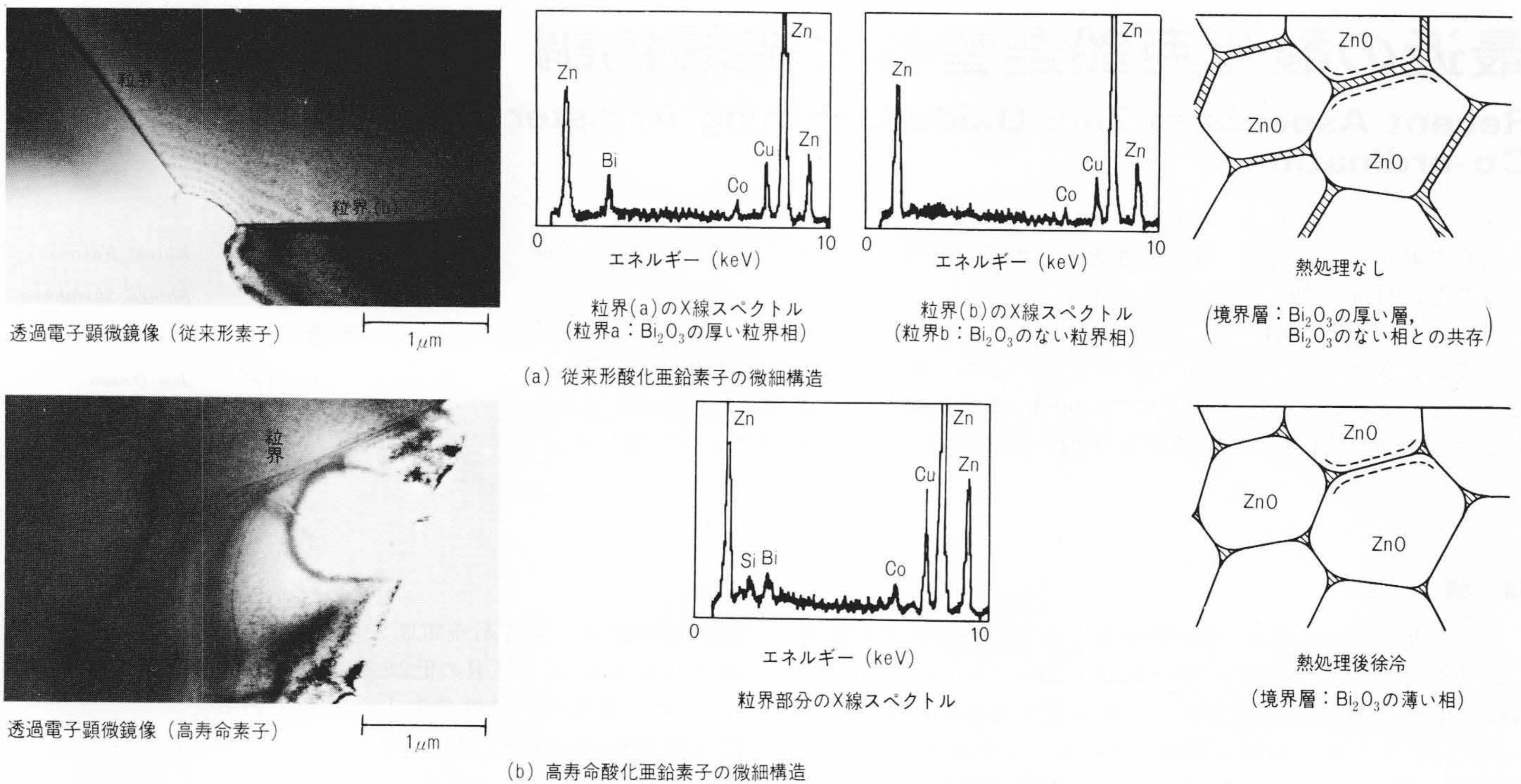


図3 従来形素子と高寿命素子の微細構造比較 高寿命化を図った素子には、ビスマスを含む薄い粒界相が見られ、境界相が均一になる。

(3) 領域Cは、開閉サージ処理時での避雷器のエネルギー耐量、及び開閉サージに対する保護特性が要求される領域で、耐量の向上が必要である。

(4) 領域Dは、雷サージ抑制時の保護特性が要求される領域で、平坦率(公称放電電流での制限電圧/ V_{NmA})の低減が必要である。

4 最近の酸化亜鉛素子

酸化亜鉛素子の寿命及びエネルギー耐量の特性改善は、酸化亜鉛素子の微細構造を改善することにより、透過電子顕微鏡による微細構造解析及びX線分析を行なって微細構造を検討し、特性の改善を図ってきた。

4.1 酸化亜鉛素子の微細構造と寿命特性

従来形素子では図3(a)に示すように、 Bi_2O_3 相の厚い相と Bi_2O_3 を含まない相が見られる。この Bi_2O_3 粒界相はそれに接するZnO結晶粒との間に電位障壁を形成するため寿命特性上重要であり、この電位障壁を有効に活用することにより寿命向上が図れる。しかし、 Bi_2O_3 自体の抵抗率が電位障壁の抵抗率($10^{13} \Omega \cdot cm$ 以下)に比べ小さいことから、粒界相の厚い部分では電流が粒界相に沿ってリークし、電位障壁が有効に活用されない。これに対し高寿命素子では、従来形素子のように電流リークの多い厚い粒界相は見られず、Biを含んだ薄い粒界相が全体的に均一に形成され寿命特性が向上している。

一方、素子の寿命特性には Bi_2O_3 の結晶構造が関与しており、立方晶系の γ 形 Bi_2O_3 を一部含んでいることが、課電寿命を安定化することを実験的に確認している。図3(b)に、均一で薄い粒界相をもち、かつ一部 γ 形 Bi_2O_3 を含む高寿命酸化亜鉛素子の微細構造を示す。

これら従来形素子と高寿命素子に対して、同一過酷条件で加速試験を行なった結果を図4に示す。高寿命素子の Bi_2O_3

相に一部含まれる γ 形 Bi_2O_3 は、正方晶系 β 形 Bi_2O_3 に比べて抵抗率が小さいため、一時漏れ電流に極大が現われるが、その後は減少してほとんど変化しない特性を示し、素子の高寿命化が図られる。これらの結果は、素子の寿命がイオンの拡散や化学反応によって電位障壁が変化するものとして、有機絶縁材料の寿命評価と同様、寿命と温度の関係を表わすアレニウス(Arrhenius)の式を適用して評価され、実験でも確かめられている。(アレニウスの式から寿命の対数と温度の逆数が直線関係にあることが示される)。

図5は従来形素子の寿命推定プロットに対して、本開発素子の寿命推定を行なった、いわゆるアレニウスプロットを示しており、従来形素子に対して2桁以上寿命が向上している。

4.2 製造工程における改善

素子の高寿命化での製造上のポイントは、酸化亜鉛素子焼成時の冷却速度であり、金属酸化物の気相-液相-固相の変化のパターンが最重要ポイントである。この焼成時の冷却速度を制御することにより、一部 γ 形 Bi_2O_3 を含む安定な粒界相ができ、素子が高寿命になると、同時に境界相が均一となっ

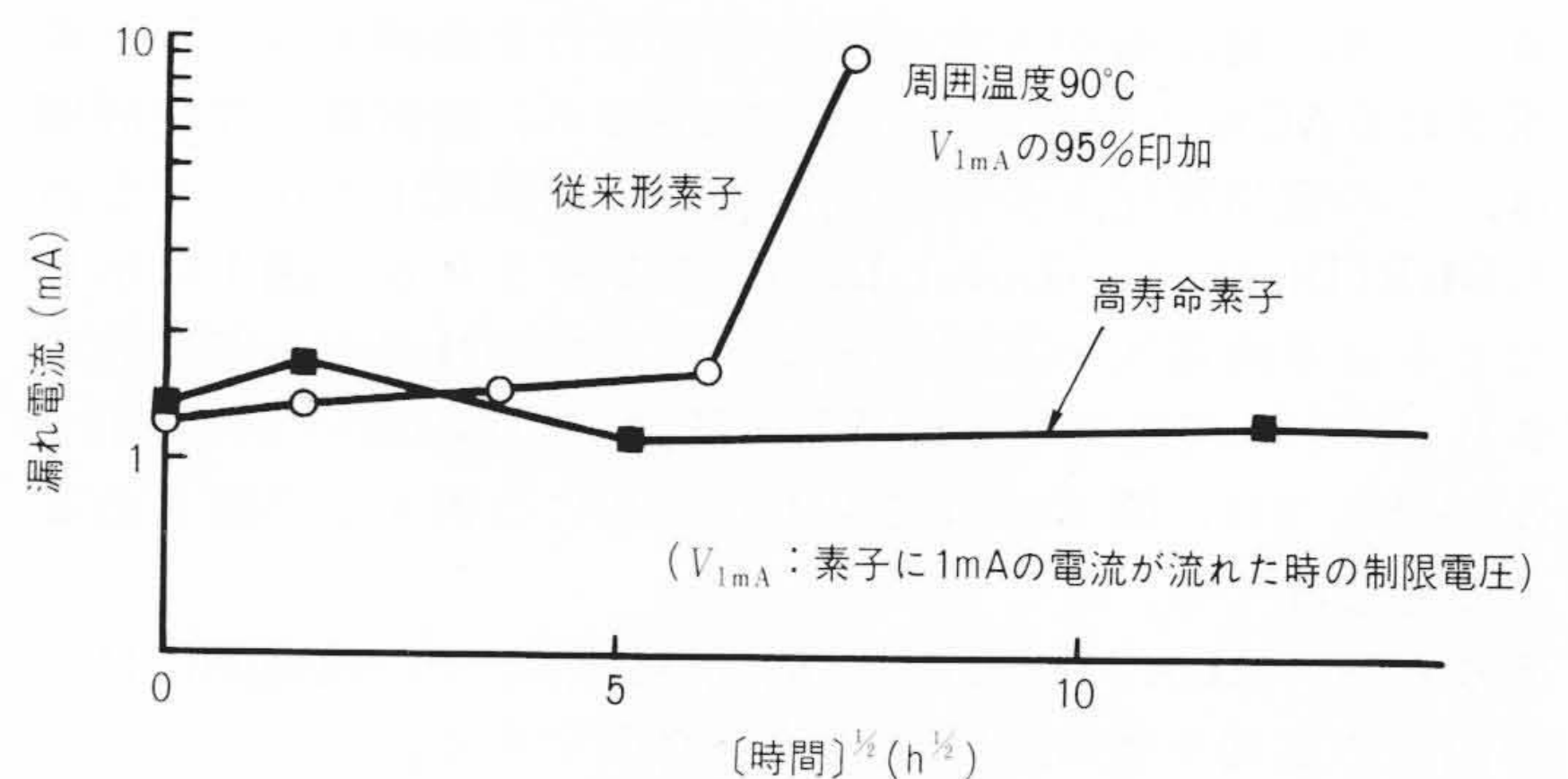


図4 酸化亜鉛素子の代表的漏れ電流と時間の関係 高寿命素子では、漏れ電流に一時極大が現われるが、その後は減少して漏れ電流は変化せず、寿命的に安定する。

※ V_{NmA} : 電流が NmA 流れた時の制限電圧。開閉サージ動作責務容量 (25 μF 用 $N=1$, 50 μF 用 $N=2$, 78 μF 用 $N=3$)

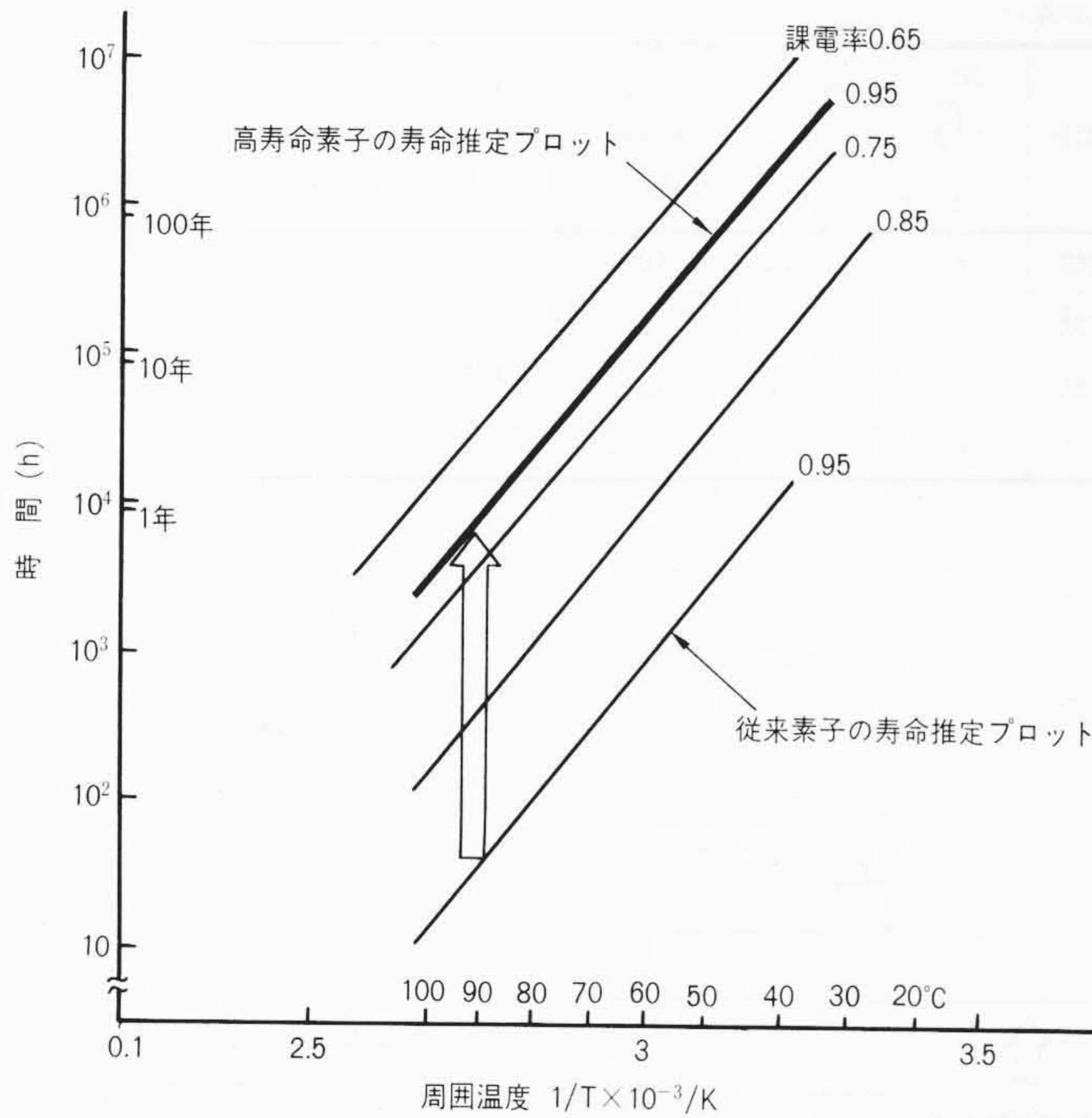


図5 酸化亜鉛素子の寿命特性の向上 高寿命素子では、従来素子に比べ二桁以上の寿命向上が図れる。

てエネルギー耐量の向上も図られた。

なお、粒界相を比抵抗の高いβ形Bi₂O₃相から一部比抵抗の低いγ形Bi₂O₃相に移行させたことにより、小電流領域での制限電圧以上に大電流領域での制限電圧が抑制され、素子の平坦率(公称放電電流での制限電圧/V_{NmA})が低減でき、保護特性上有利となった。

一方、素子のエネルギー耐量向上は、境界相の均一化のほか、酸化亜鉛結晶粒の微細化、均一化を図ることにあり、添加物の最適配合、**粉碎**—**混合**—**造粒**—**成形**にわたる製造工程での最適条件を検討することにより、素子の均一性を高め、従来形素子に対して単位体積当たりの処理

エネルギーを約50%向上できた。

図6は275kV及び500kV系統用ZLAが遮断器の再投入サージを対象とした動作責務時、あるいはAC性過電圧印加時に吸収するエネルギーを示しており、JEC規格レベルの避雷器(規格値×0.85~0.9)では避雷器の処理エネルギーを変えないで、酸化亜鉛素子の体積を約60%に小形・軽量化が可能となりこれにより素子の新系列化を行なった。

酸化亜鉛素子の形状は、適用する系統電圧と対象とする送電線巨長に応じた開閉サージ動作責務容量に対して、公称外径50mm円板形(25μF用)、80mmドーナツ形(50μF用)、115mmドーナツ形(78μF用)素子の新シリーズを開発した。

5 ZLAの特性及び試験結果

ZLAは当初避雷器規格(電気規格調査会規格)JEC-203(1978)に準拠して実用化されてきたが、昭和58年に電気規格調査会規格として酸化亜鉛形避雷器が新しく制定される。

現在製造中のZLAは、この新規格に基づいて試験を実施し、信頼性を検証した。従来規格に対して特に新しい項目について述べる。

5.1 安定性評価試験

本試験は、酸化亜鉛避雷器用に新たに規格試験項目として制定されたものである。

これは図7に示すように、試験が四つの試験区分から成り、第1~第3の試験で避雷器が実系統で課せられるであろう各種の責務を果たしても安定であることを検証するものであり、後者は系統にごくまれに発生するAC性短時間過電圧に対する耐量を検証するものである。

この試験結果の一部分を図8に示すが、いずれも仕様を満足するものである。

なお、試験は分割区分で実施しているが、供試器は実器と熱的に等価性をもつように配慮してある。

5.2 開閉サージ動作責務試験

JEC-203では、500kV用避雷器では遮断器の再点弧サージ及び再投入サージ、275kV以下では再点弧サージを対象としていたが、最近の遮断器では無再点弧が原則となっているこ

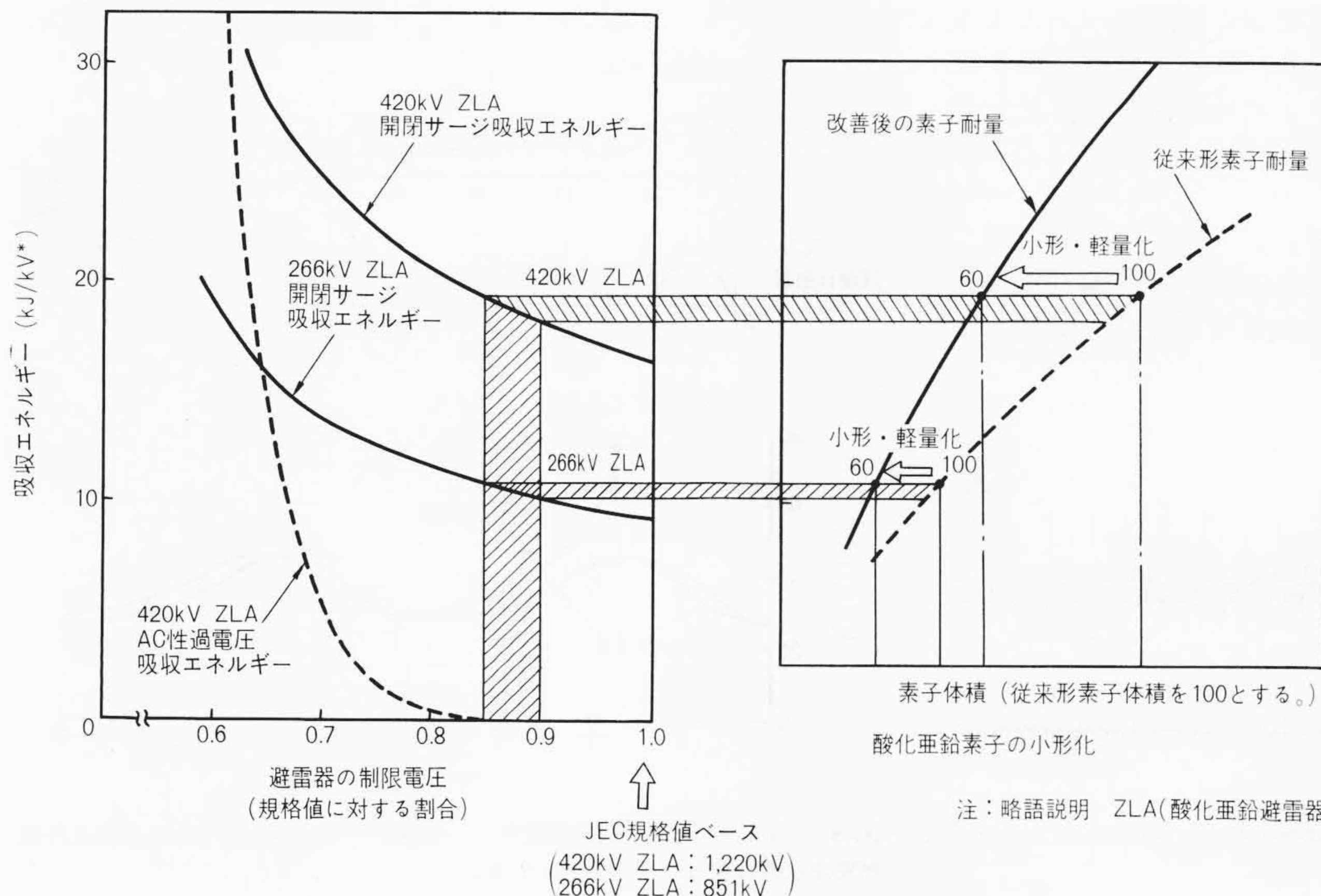


図6 ZLAの保護レベルと素子サイズの関係 素子の均一性向上による放電耐量向上により、素子の小形化が可能である。

(a) 雷インパルス放電電流波高値

公称放電電流	10,000A	5,000A
試験電流波高値	65kA	20kA

(b) 方形波電流波高値

公称放電電流	10,000A	5,000A		
開閉サージ動作 責務静電容量	78 μ F	50 μ F	25 μ F	—
試験電流波高値	1,200A	800A	400A	150A

(c) 商用周波過電圧試験条件

系統電圧	接地条件	試験電圧 (定格電圧に 対する倍数)		E_1, E_2 の 保持時間 t (秒)	試験電圧 E_3	E_3 の 保持時間
		E_1	E_2			
3.3~6.6kV	非接地	1.0	1.52	10秒	連続 使用電圧	30分
11~154kV	非有効	1.0	1.11	5秒		
187~275kV	有効	1.0	1.06	2秒		
500kV	有効	1.0	1.13	2秒		

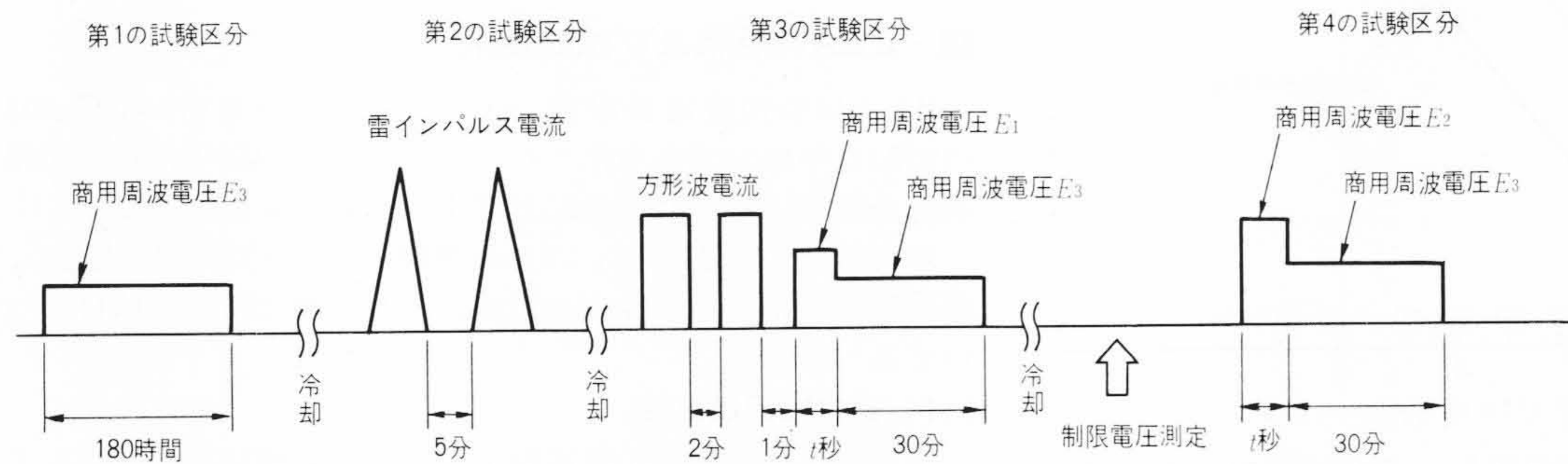


図7 安定性評価試験の試験手順 第1, 第2の区分は, 系統での素子の劣化を模擬している。

とから, 再投入サージを対象に試験を行なっている。

開閉サージ動作責務静電容量25 μ F, 50 μ F, 78 μ Fの3種類について各々3回の開閉サージを通流した後, 連続使用電圧を30分間印加し, 熱暴走しないことを確認してある。

5.3 放熱特性の検討

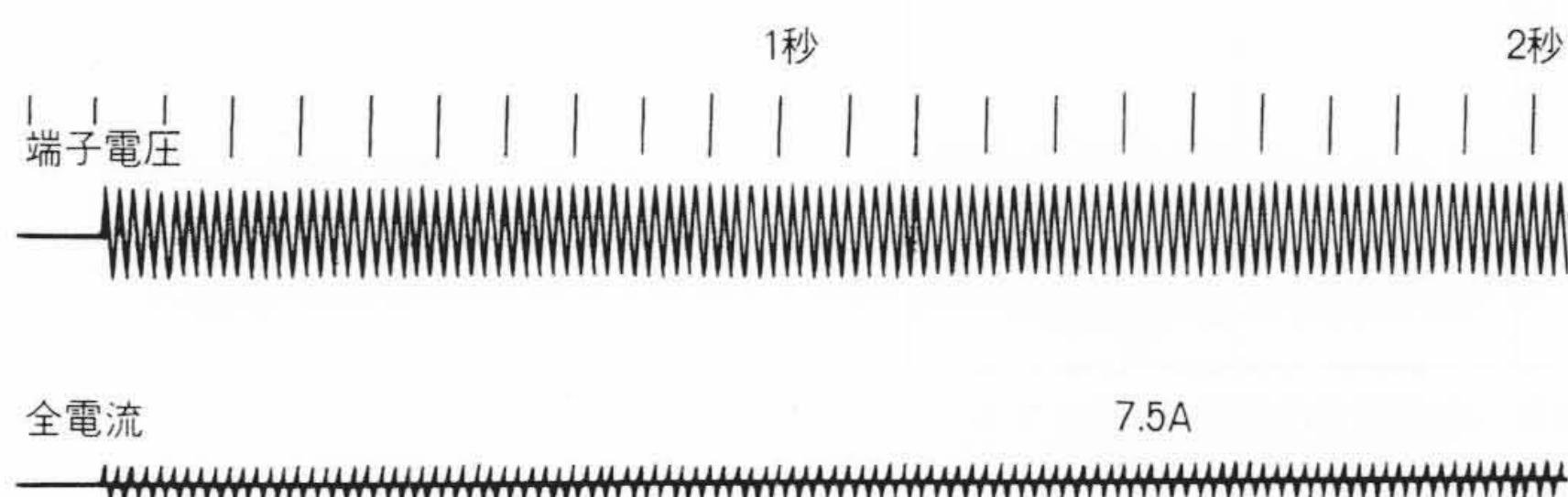
酸化亜鉛素子の寿命特性向上により避雷器の保護レベル低減も可能となったが, 適用に当たっては次の点に留意する必要がある。

すなわち, 安定性評価試験あるいは開閉サージ動作責務試験の中に新たに盛り込まれているように, 過電圧によるエネルギー吸収後の熱安定性を評価することが重要となる。タンク形ZLAでの熱伝達モデル及び試算例を図9に示す。タンク形では日射によるタンク温度上昇があるため, 太陽の直射及び周囲温度の時間変化も考慮した⁴⁾。

図9は遮断器の抵抗投入失敗を想定した開閉サージエネルギーを吸収して素子温度が上昇しても, 熱安定状態に戻る様子を示している。このシミュレーションは定格266kVタンク形ZLAでの放熱特性を実測し, 計算値とよく一致することを確認している(図10)。

5.4 ZLAの品質管理及び保守点検

ZLAは出荷に際して構造検査, 絶縁抵抗測定, 漏れ電流試験及び動作開始電圧を測定し, 更に部分放電試験を実施して出荷される。

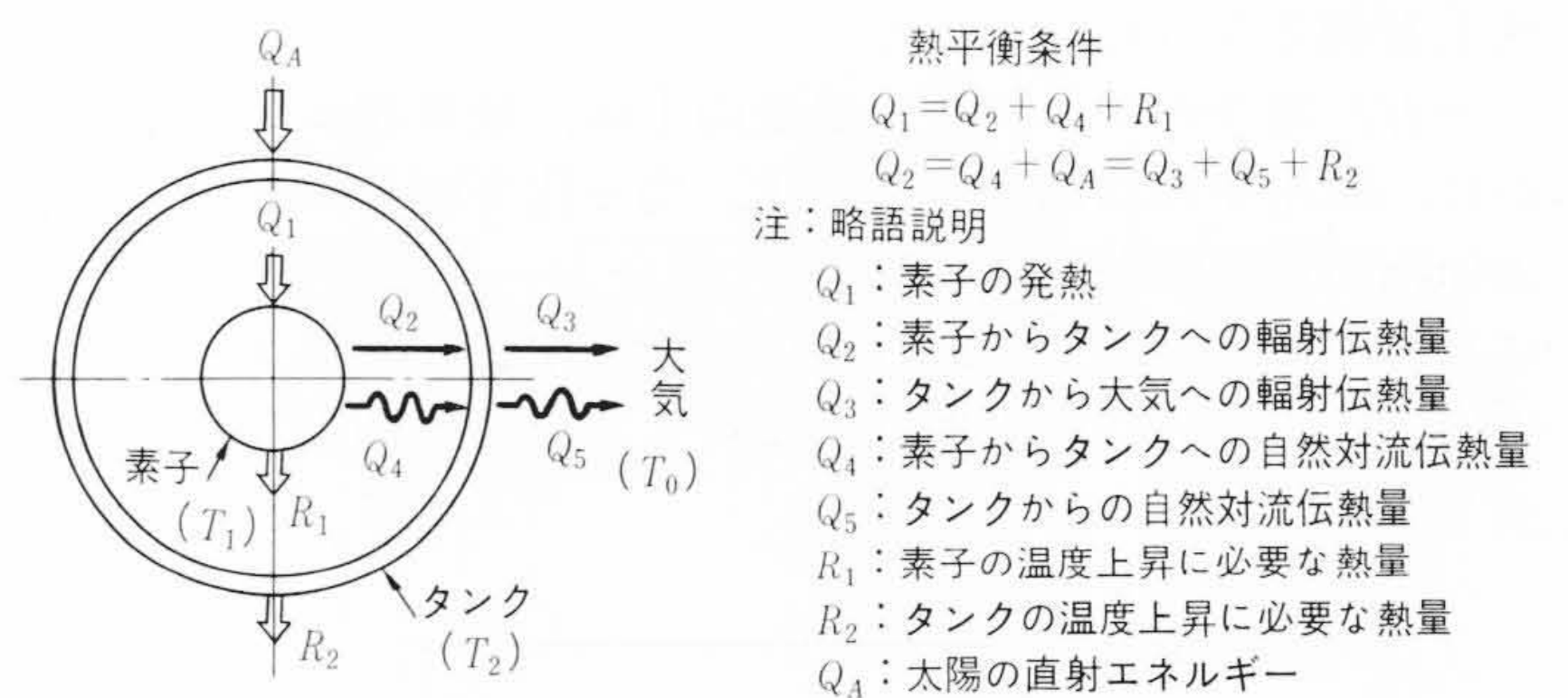


注: 商用周波電圧 $E_2 \times 2$ 秒印加

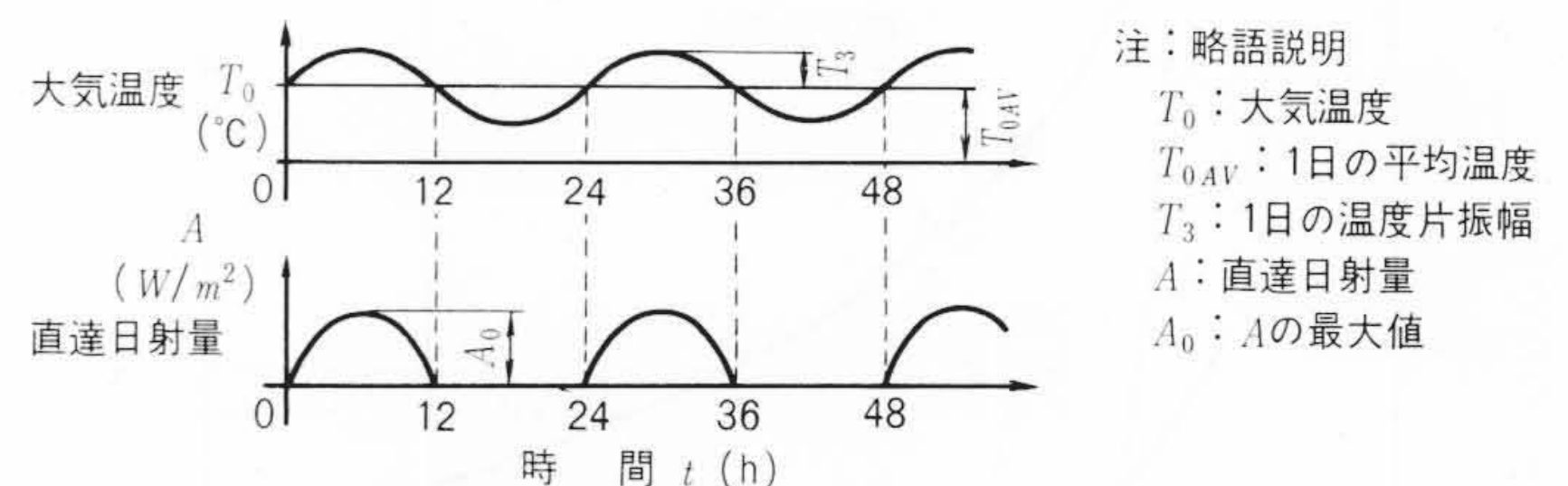
図8 AC過電圧耐量試験結果 系統の短時間過電圧に対してZLAは, 素子漏れ電流を通流し耐えている。

なお, 酸化亜鉛素子単体について V_{1mA} , 放電耐量, 制限電圧特性の全数コンピュータによる自動検査を実施している。

現地据付後の保守点検は, 従来と同様に絶縁抵抗, 漏れ電流測定を2年ないし3年に1回実施し, 特性を確認すること



(a) 熱伝達モデル



(b) 大気温度と日射量のモデル化

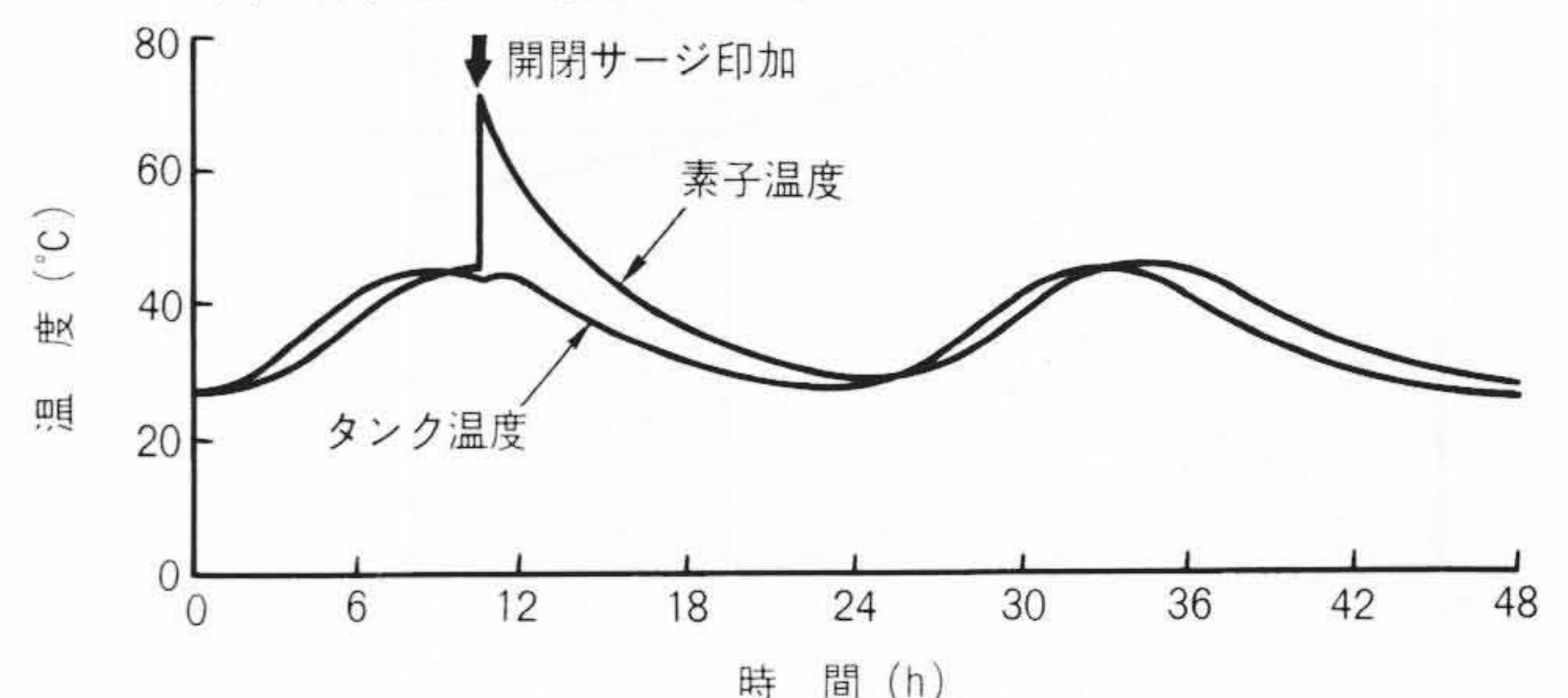


図9 動的熱安定性の試算例 開閉サージを吸収して素子温度上昇後, 熱安定状態に戻る様子を示している。

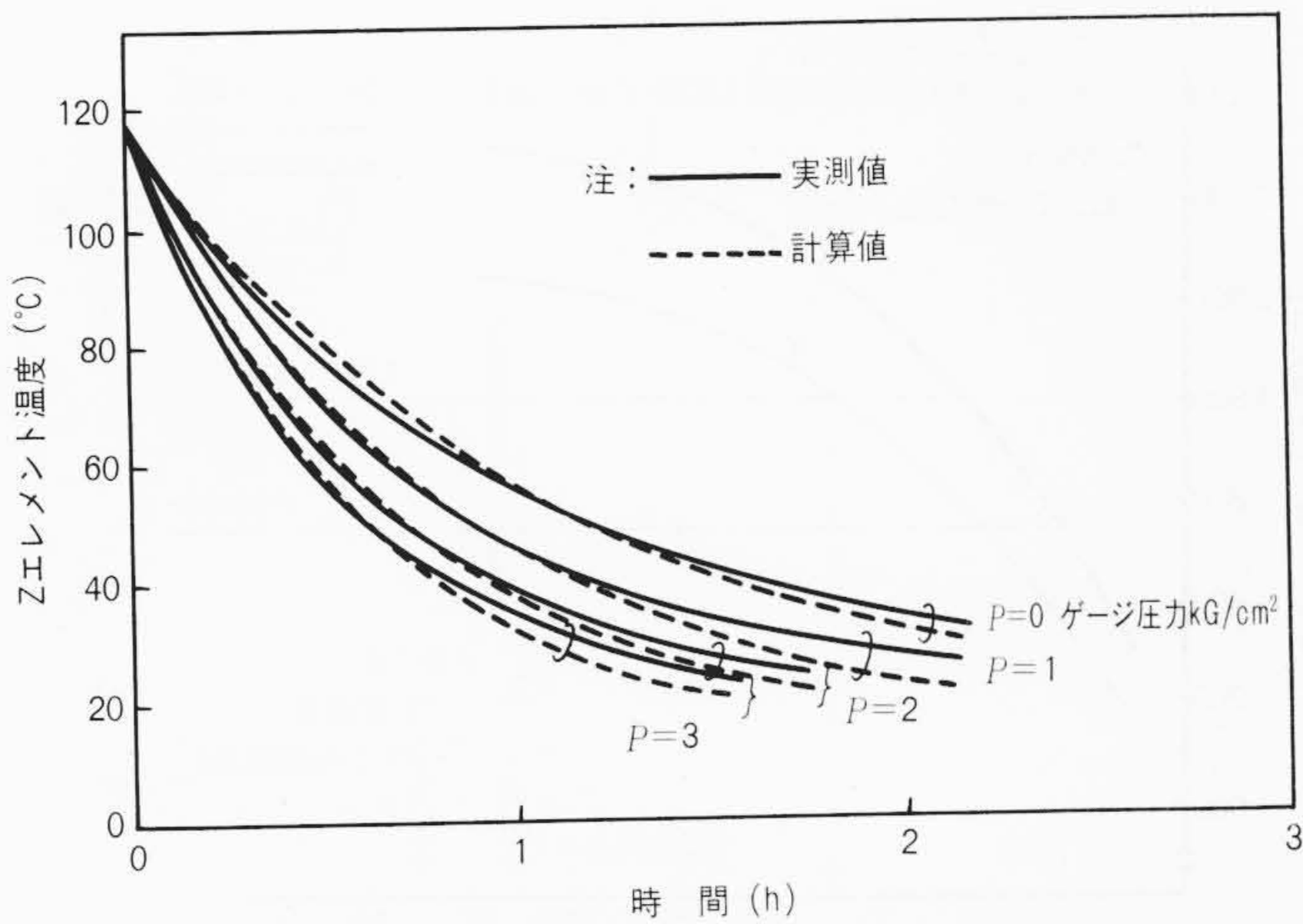


図10 ガス絶縁開閉装置用定格266kVタンク形ZLAの放熱特性
実測値と計算値は比較的良好一致し、ガス圧力が高いほど放熱特性が良くなる。

が望まれる。

本測定用には、断路部不要の分割形変流器により運転状態で漏れ電流測定を行なうことができる現地測定用簡易形可搬式漏れ電流測定器(図11)を開発してある。

6 ZLAによる絶縁協調

従来、気中絶縁変電所の耐雷設計は、高価で故障時のダウンタイムが大きい変圧器を最優先被保護機器として避雷器で保護することを基本とし、避雷器の保護範囲が及ばない線路引入口は協調ギャップにより保護する考え方が一般的であった⁴⁾。

一方、近年、変電所用地の取得難、環境調和からガス絶縁開閉装置が広く普及してきたが、気中絶縁方式に比べ絶縁協調上、(1)V-t特性が平坦である。(2)内部故障時のダウンタイムが大きく、変圧器同様信頼性の高い保護が必要となる。(3)変電所が縮小化され避雷器の保護する機器範囲が拡大される。(4)サージインピーダンスが低く、侵入したサージは内部に閉じ込められ複雑に伝搬、反射するなど、従来の絶縁協調のプラクティスがそのまま適用できない面があり、ZLAの普及とともにZLAの特質を考慮した絶縁協調が見直されてきた。

6.1 ZLAと従来形避雷器の保護特性

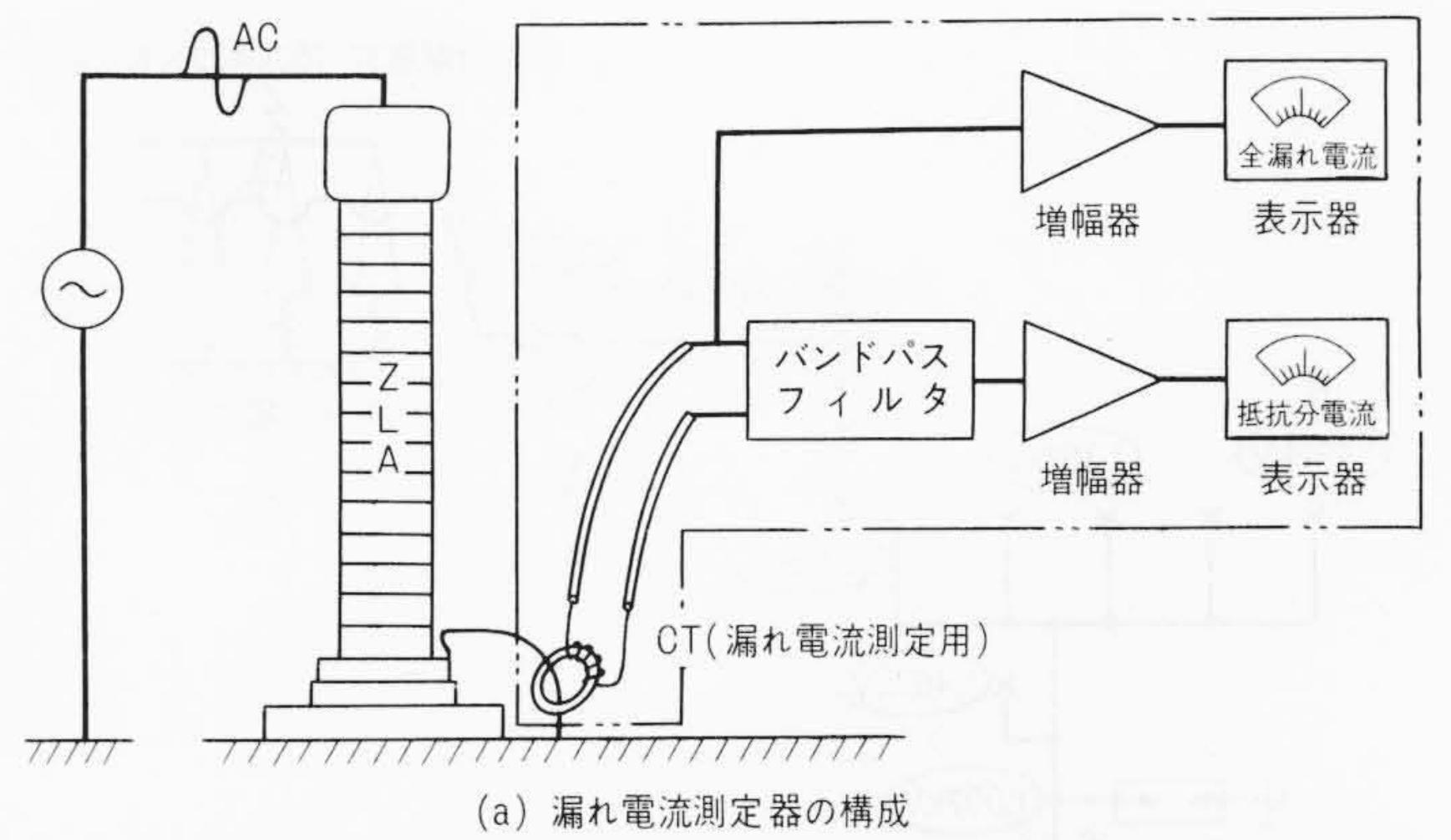
一般にZLAは直列ギャップをもたないことから放電の遅れがなく、急峻なサージに対して保護特性が優れている。図12に500kV変電所の線路引入口にZLAと従来形避雷器を設置したときの各部サージ電位分布を示す。各部の電位分布はZLAの急峻なサージに対する有効性が表われて、ZLAの保護特性は従来形避雷器に比べ5~15%低くなっている。また、線路引入口に設置したほうが変圧器端に設置するより保護効果が良く、この場合、線路側の遮断器又は断路器開放状態での線路引入口の保護も兼ねることができる。母線長が長くなると変圧器端にもZLAを設置することにより、いっそうの保護レベル低減が図れる。

6.2 ZLAによる絶縁協調解析例

従来500kV系統の絶縁レベルは、LIWL変圧器1,550kV、ガス絶縁開閉装置1,800kVで設計されていたが、急峻波サージ抑制能力の優れたZLAを過電圧発生部分に適用することにより、LIWL低減を可能にしている。

図13に線路引入口及び変圧器端の両方にZLAを設置して、LIWL1,550kVと協調がとれた解析例を示す。

この500kVガス絶縁開閉装置のように線路回線数が多く、



(a) 漏れ電流測定器の構成



(b) 測定装置外観

図11 漏れ電流測定器(簡易形可搬式) 避雷器の全漏れ電流及び抵抗分電流を接地回路部の開閉(断路器もしくは漏れ電流測定用チェック端子の開閉)を必要とせず、活線状態で測定し、避雷器の劣化の有無を判定できる。

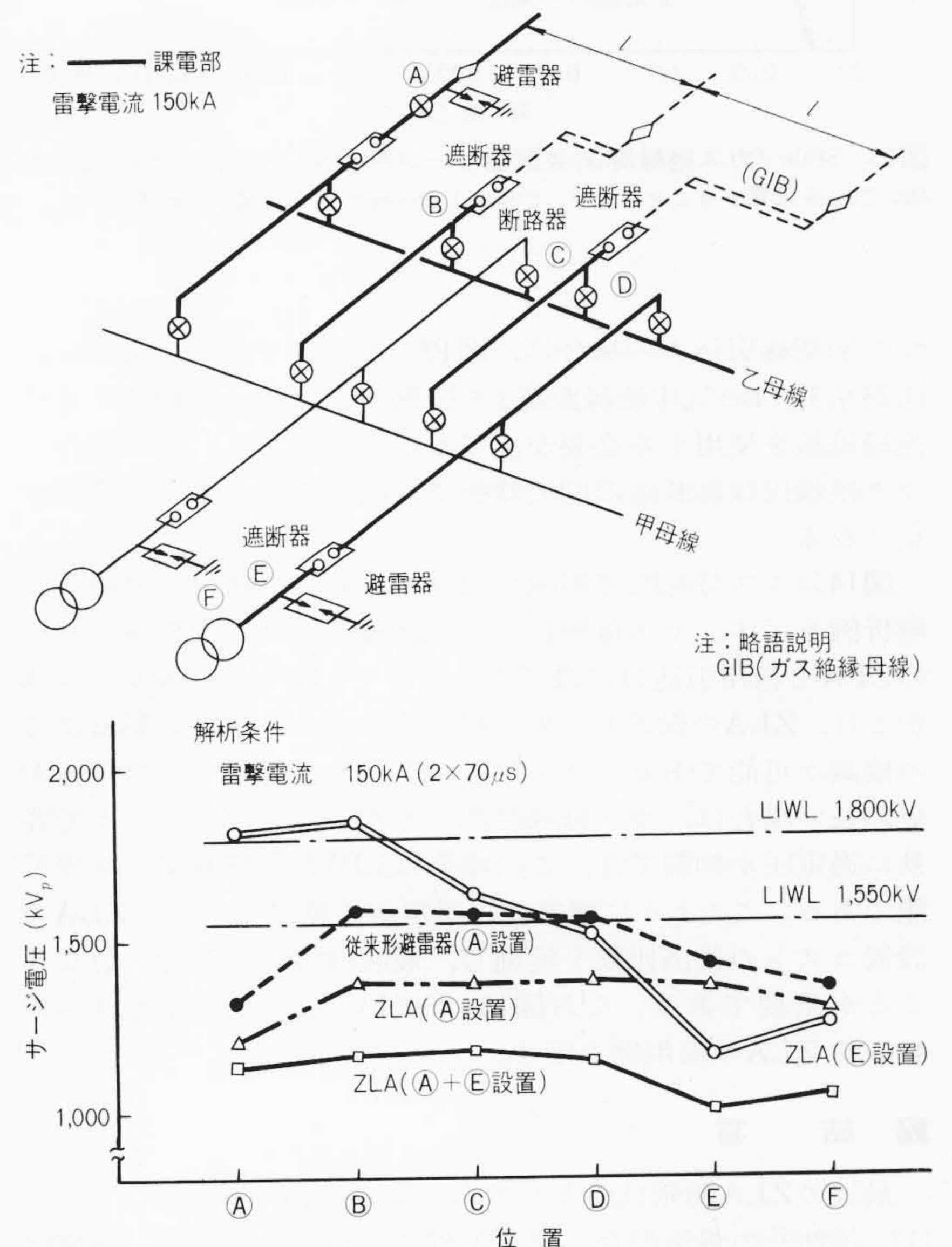
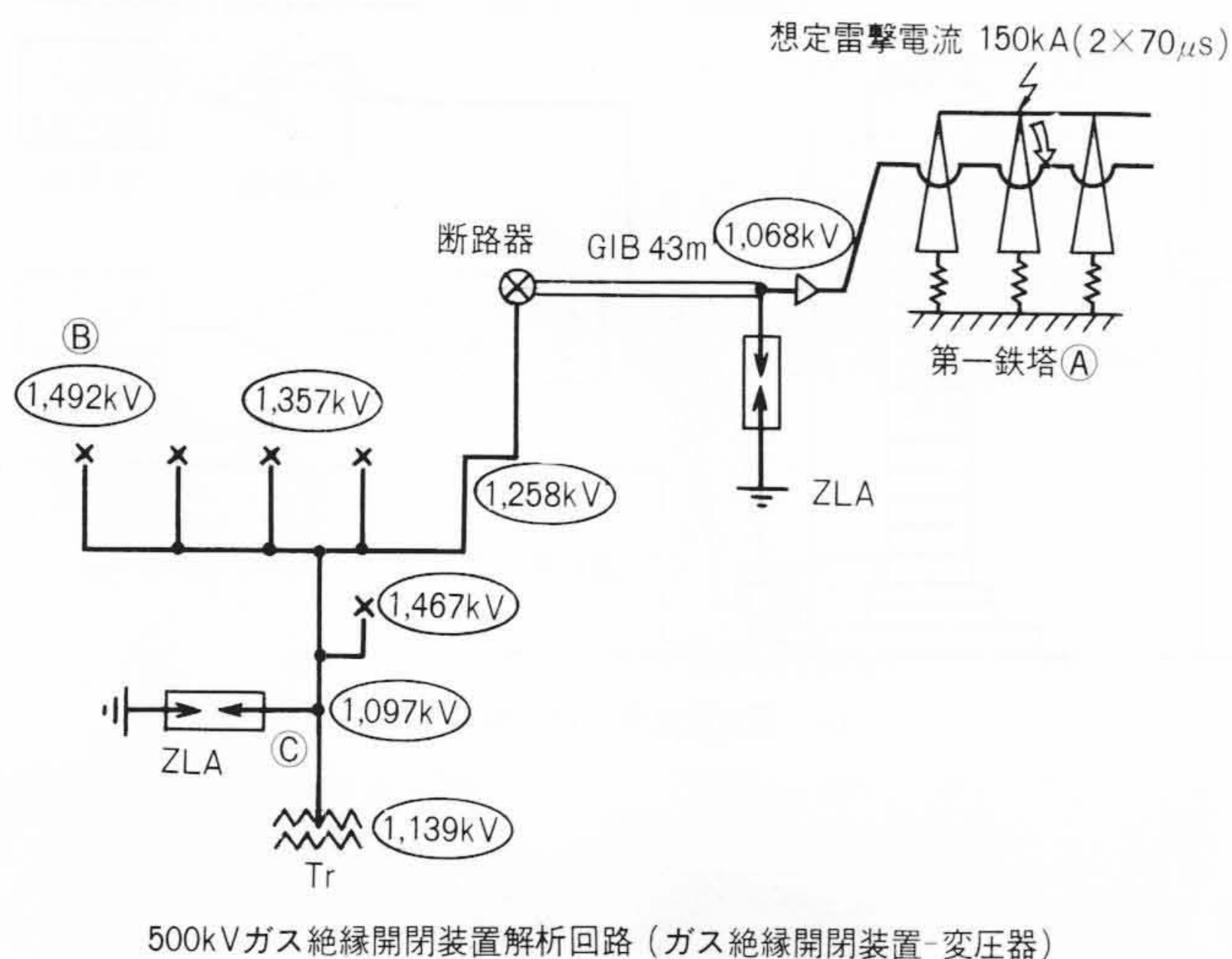


図12 ZLAと従来形避雷器の雷サージ分布 ZLAの保護特性は、従来形避雷器に比べ5~15%優れている。



500kVガス絶縁開閉装置解析回路 (ガス絶縁開閉装置-変圧器)

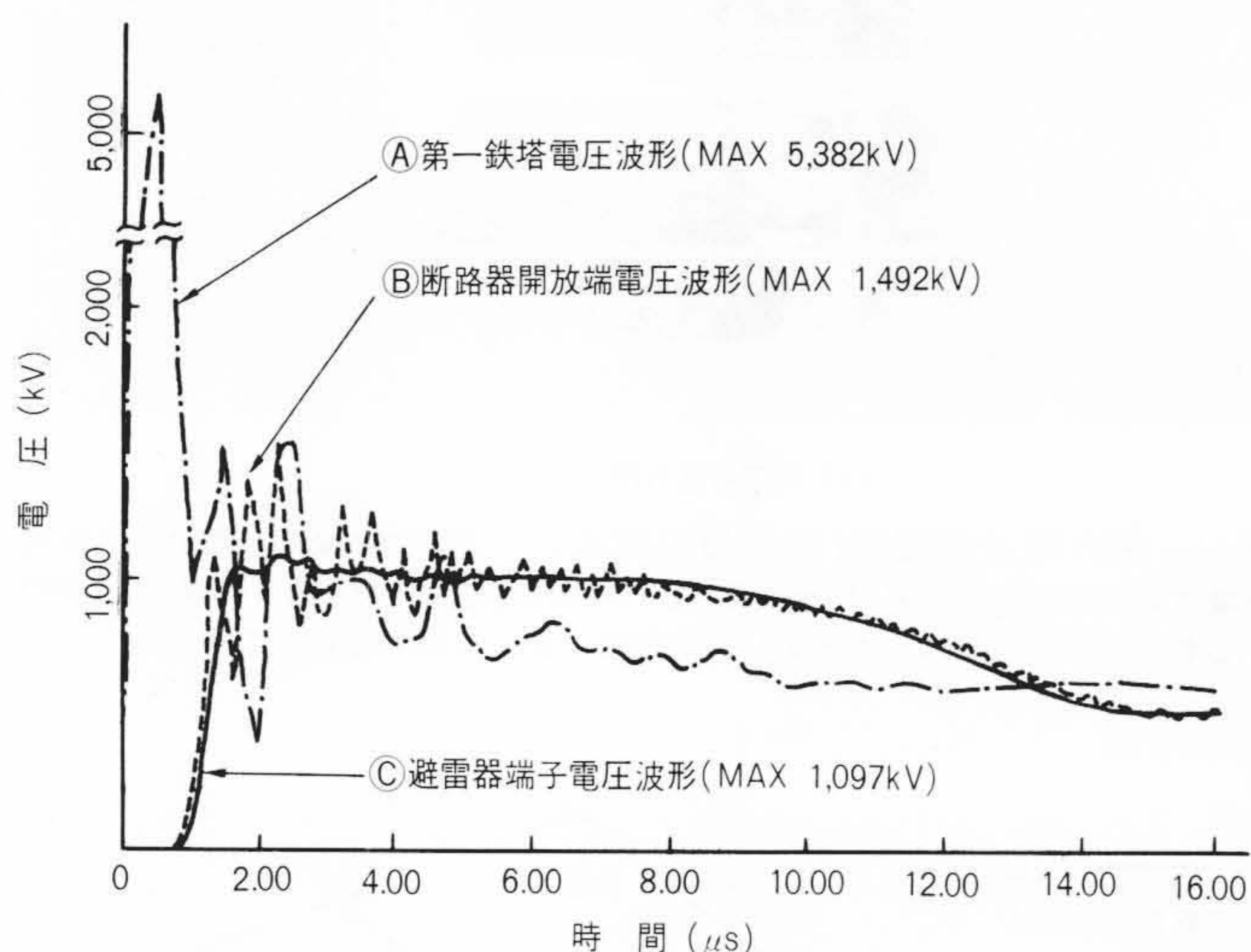


図13 500kVガス絶縁開閉装置雷サージ解析例 線路引込口と変圧器端にZLAを設置することにより、LIWL 1,550kVで絶縁協調が図れる。

かつ架空線引込みの場合は、図12の回路図で示したように、線路引込口の気中絶縁距離 l を確保するため、長距離のガス絶縁母線を使用する必要がある場合もある。この場合、ガス絶縁母線部断路器開放状態では開放端でのサージ電圧が高くなる。

図14はガス母線断路器開放状態での線路引込口の絶縁協調解析例を示す。ガス母線長さが約20mまでは、規格値レベルのZLAを線路引込口に設置するだけでLIWL1,800kVと協調がとれ、ZLAの保護レベルを15%低減すれば更に約35mまでの協調が可能である。ガス母線の広がり大きくガス母線が更に長い場合は、ガス母線端部にもZLAを配置することで容易に過電圧が抑制でき、この場合はLIWL1,550kVと協調可能である。このように機器及び送電線の絶縁レベルとZLAの設置コストの経済比較を実施し、最適耐雷絶縁設計を行なうことが重要である。なお図15に500kV系統線路引込口への420kV ZLAの適用例を示す。

7 結 言

最近のZLA開発技術として次のことがあげられる。

- (1) 添加物の最適配合、製造工程での最適条件検討、焼成時の最適な冷却速度により均一で安定な粒界相をもつ酸化亜鉛素子が得られる。

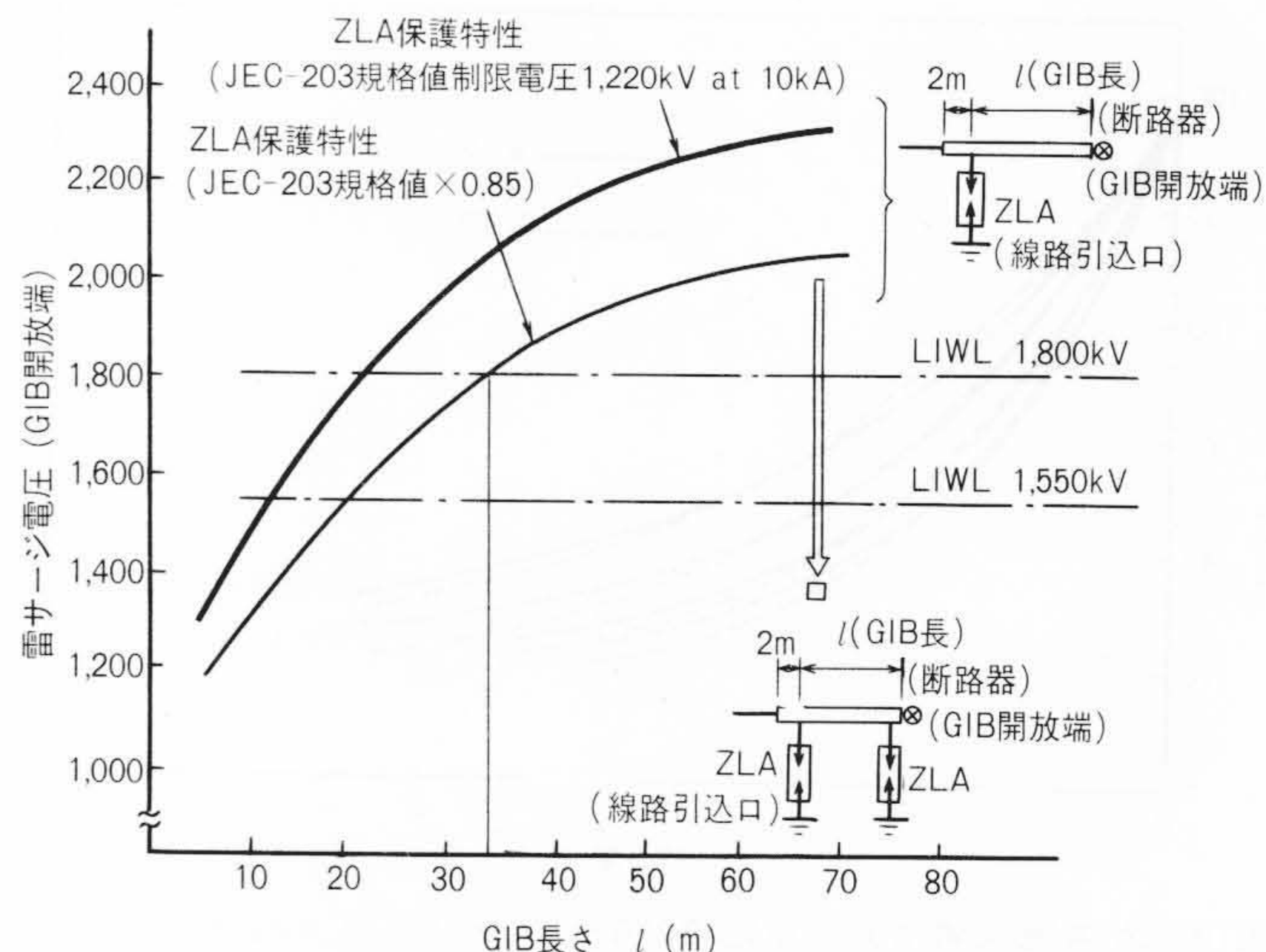


図14 ガス絶縁母線長さ と 雷サージ電圧 (ガス絶縁母線開放端) 長距離ガス絶縁母線の端部にZLAを設置することにより絶縁レベルを低減できる。

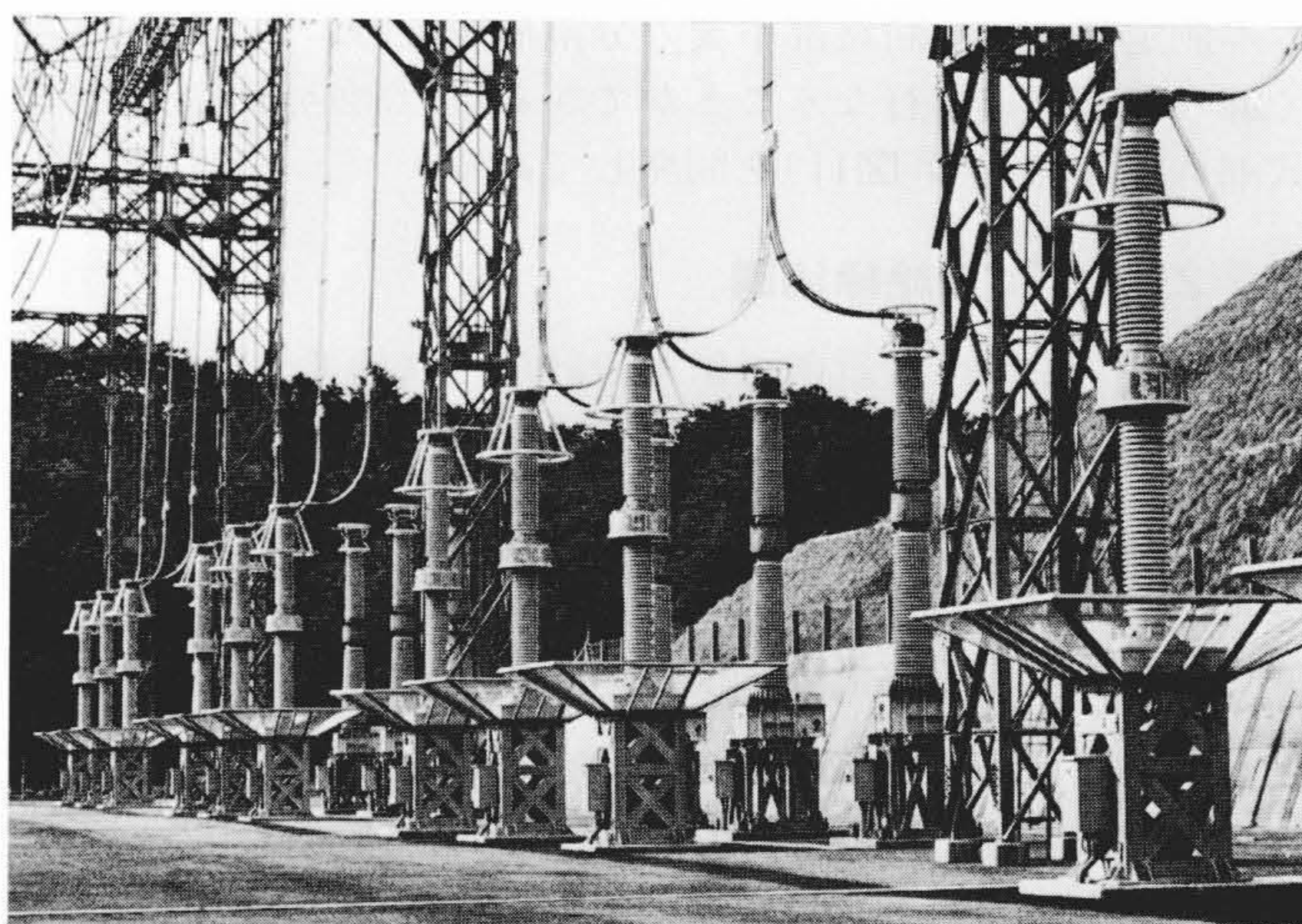


図15 線路引込口への500kV系統ZLA(碓子形)の適用例 線路引込口にZLAを配置し、遮断器「開」状態での絶縁協調をとっている。

- (2) 素子の微細構造の観察により、均一で薄い粒界相をもった素子の製造が可能となり、寿命特性、エネルギー耐量、平坦率の向上が図られている。
- (3) ZLAの最適な配置によりLIWLの低減を可能とし、最適な雷サージ絶縁協調を図れる。

この最近の開発技術適用によりZLAは過電圧保護装置として大きな役割を果たし、電力システムの信頼性向上に今後ともますます寄与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をいただいた電力会社及び社内関係各位に対し謝意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 電気学会誌：UHV交流送電Vol. 101, No. 11(1982-11)
- 2) 白川, 外：ガス絶縁開閉装置用酸化亜鉛避雷器“ZLA”日立評論, 62, 3, 181-186(昭55-3)
- 3) 白川, 外：酸化亜鉛避雷器“ZLA”, 日立評論, 61, 10, 733-738(昭54-10)
- 4) 中野, 外：酸化亜鉛形避雷器の熱安定性について, 昭和56年電気学会東京支部大会 (No.165)