

避雷器の適用とその動向

Trends of the Application of Lightning Arresters

電力エネルギーは、架空送電線や送変電機器など電力流通設備により輸送されている。しかし、落雷などによる異常電圧の影響で、地絡故障などが発生し、送電不能に陥る場合がある。送変電機器などを健全に運転するためには、この異常電圧を機器の耐電圧レベル以下に抑える必要がある。このため、日立製作所では、時代のニーズに対応した避雷器(避雷装置)を開発してきた。

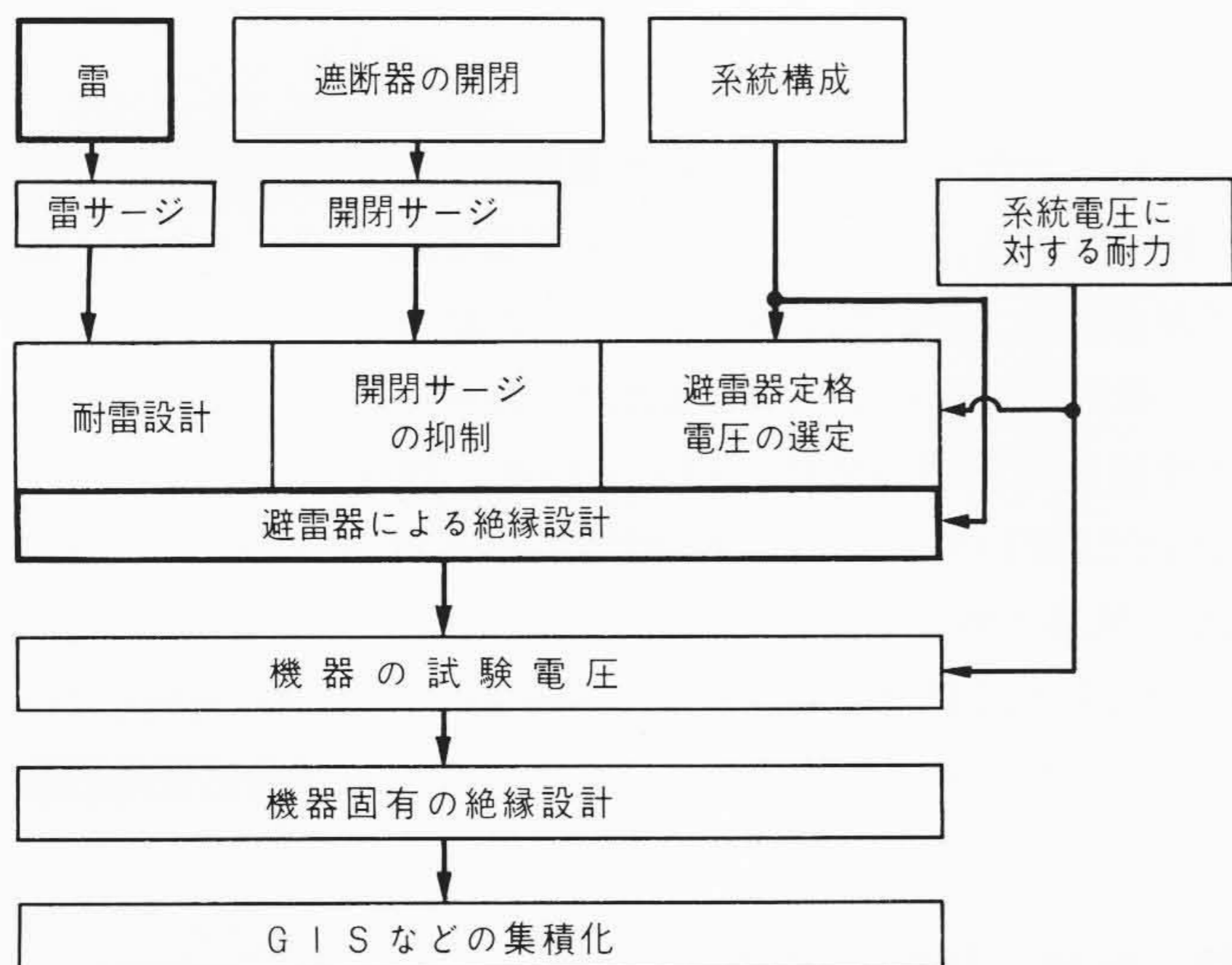
避雷器の適用範囲は、従来発電所や配電線が主であったが、最近では送電線にも適用されるようになってきた。また、避雷器の高性能化により、送変電機器(被保護機器)の絶縁レベルを低減することが可能となり、送変電機器の小形・軽量化に役立っている。

白川晋吾* *Shingo Shirakawa*
 伊藤守夫** *Morio Itô*
 飯村紀夫** *Norio Imura*
 小沢 淳*** *Jun Ozawa*

1 緒 言

避雷器は、送変電機器の進歩と送電電圧の変遷に大きく依存しつつ発展してきた。これは、他の機器の試験電圧が避雷器の特性を基準にして選定させているからであり、送電電圧の昇圧とともに大きな変遷を遂げてきた。電力機器の絶縁協調の考え方は、図1に示すように異常電圧の抑制を図る一方、設備の重要度、使用形態に照らして設備の事故確率があ

る許容水準値以内となるように、機器の絶縁強さや配置を決定することにある。異常電圧の抑制は、まず第一に遮断器や保護装置によって極力発生しないようにし、さらに避雷器の保護性能を十分に活用することが基本である。この考え方から、従来、避雷器の用途は避雷器自身のハード上の課題もあって、絶縁協調を図る対象として発電所用変圧器の雷サージ保護を主としていた。近年、酸化亜鉛形避雷器は線路引込口用遮断器の極間絶縁保護、GIS(ガス絶縁開閉装置)の雷サージ過電圧保護、配電線の配電用変圧器や開閉器の雷サージ保護、これに加えて送電線への送電用避雷装置(避雷器)設置による送電線支持がいし連のフラッシュオーバの防止に適用されるようになり、雷害による事故の防止に一役を担うようになった。また、酸化亜鉛形避雷器の低減絶縁形高性能避雷器の開発をデジタル解析技術の進歩によりこの避雷器を積極的に活用した絶縁の合理化設計が可能となり、従来の絶縁レベルを低減した高性能変電機器が出現する時代背景を醸成し、避雷器は機器の小形・軽量化にも役立つ時代となってきた。



注：略語説明 GIS(ガス絶縁開閉装置)

図1 電力機器の絶縁協調の考え方 発生過電圧の種類と避雷器による絶縁設計の関係を示す。

2 避雷器の変遷

避雷器の機能は、過電圧侵入時のインパルス電圧に対する応答特性、応答後のインパルス電流通流時の制限電圧特性や続流遮断特性に代表される。この機能を満足させるために、種々の避雷器が開発、実用化されてきた。図2は日立製作所で、1920年から1990年代の約70年間にわたり開発してきた代

* 日立製作所 国分工場 工学博士 ** 日立製作所 国分工場 *** 日立製作所 日立研究所 工学博士

避雷器の推移

避雷器の構成原理

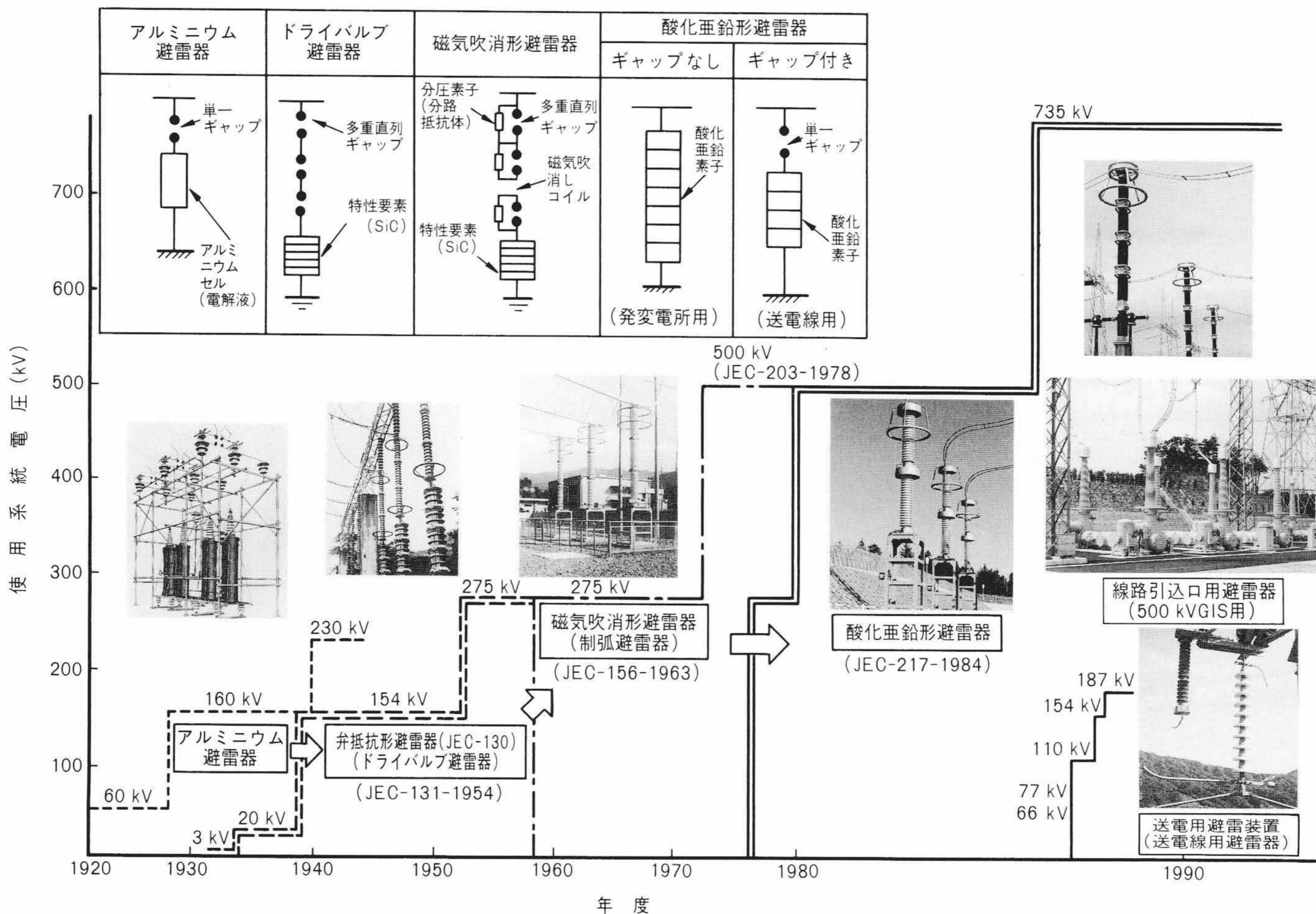


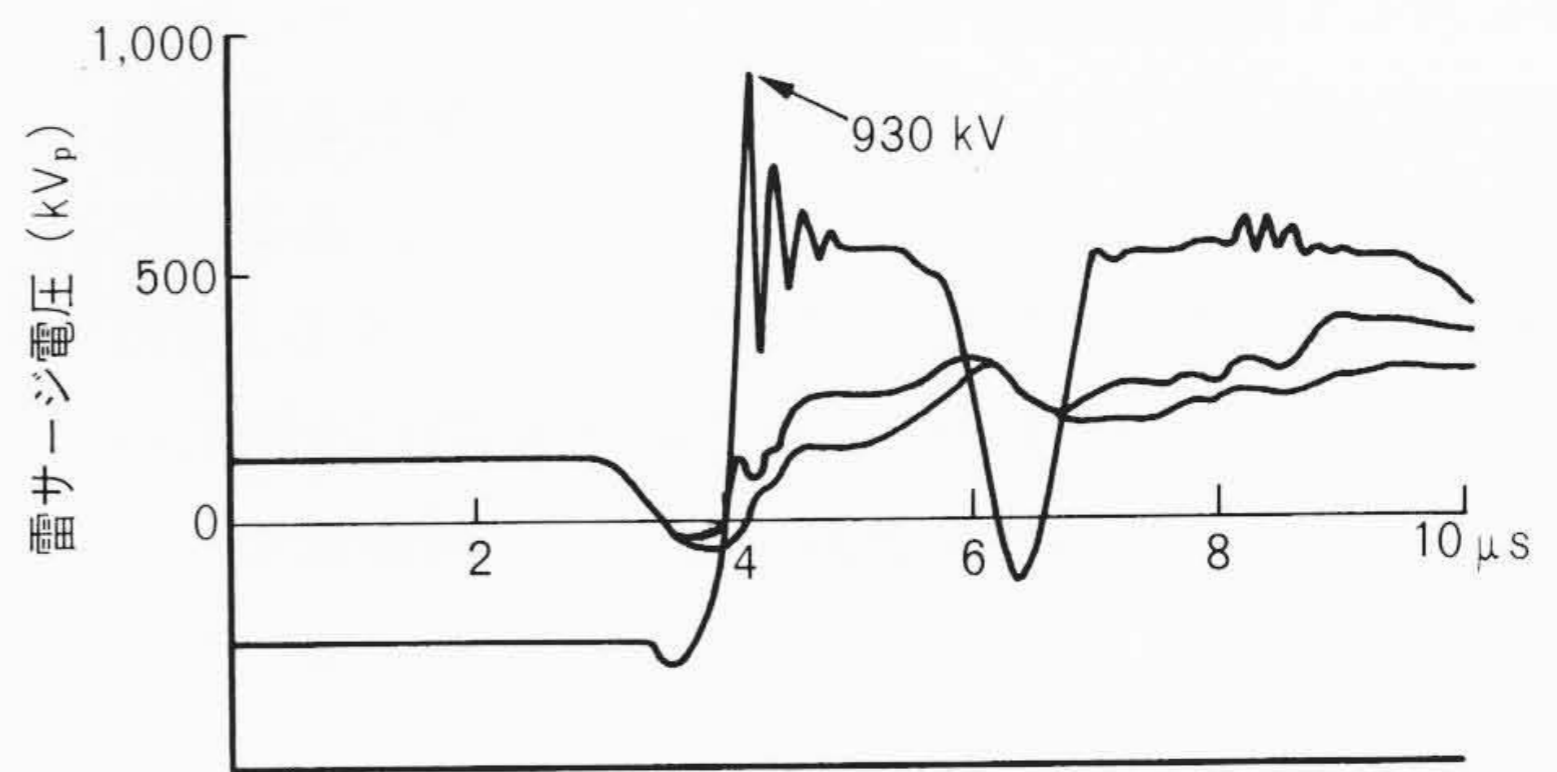
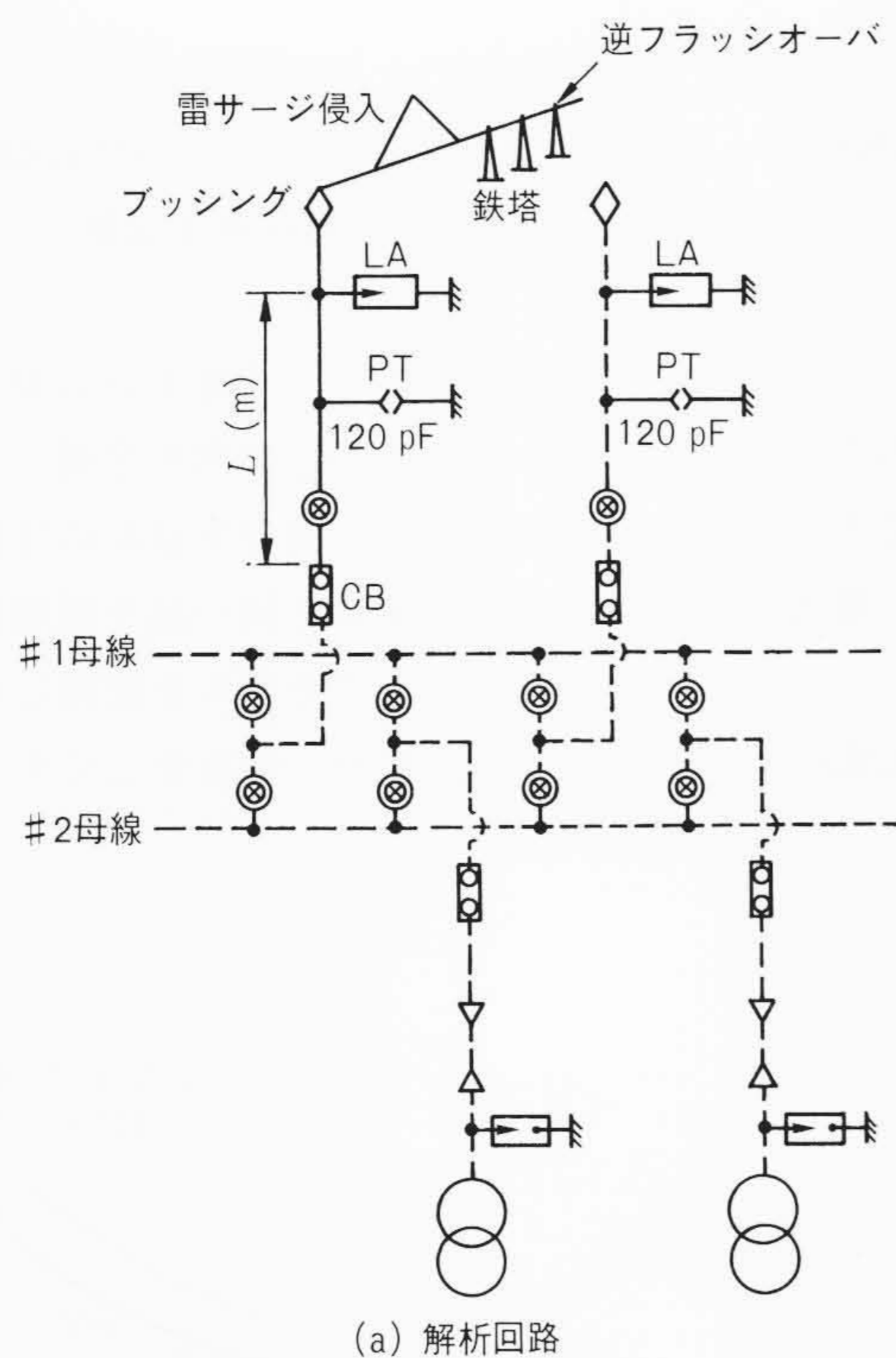
図2 避雷器の推移 大正、昭和の時代から平成に至るまでの70年間にわたる避雷器の変遷と適用状況を示す。

表的な避雷器を示す。大正時代の60 kV級避雷器は、単一ギャップとタンク内にアルミニウムセル電解液を封入した特性要素で構成されていた。この避雷器は充電作業の煩わしさがああり、電解液の入手難もあって、昭和10年代には非直線抵抗体(炭化ケイ素系)を用いた乾式(ドライバルブ)避雷器、すなわち、非抵抗形避雷器へと移行していった。非抵抗形避雷器は戦後の275 kV超高压変電所まで使用された。この避雷器はギャップ部を懸垂形にして使用しており、避雷器の設置場所を多く必要としていた。設置条件から自立形避雷器へのニーズと開閉サージ動作責務に対する続流遮断性能向上の観点から、ギャップ部のアークを駆動する磁気吹消形避雷器(制弧避雷器)へと進展し、昭和40年代後半に建設された500 kV変電所用避雷器に適用された。この段階までの避雷器はギャップの放電現象と続流遮断現象を応用していたが、昭和50年代の初頭に非直線電圧-電流特性の優れた酸化亜鉛素子が出現し、酸化亜鉛形避雷器の時代を迎えた。酸化亜鉛形避雷器は従来のギャップ付き避雷器に比べ、動作時には電源から供給される続流

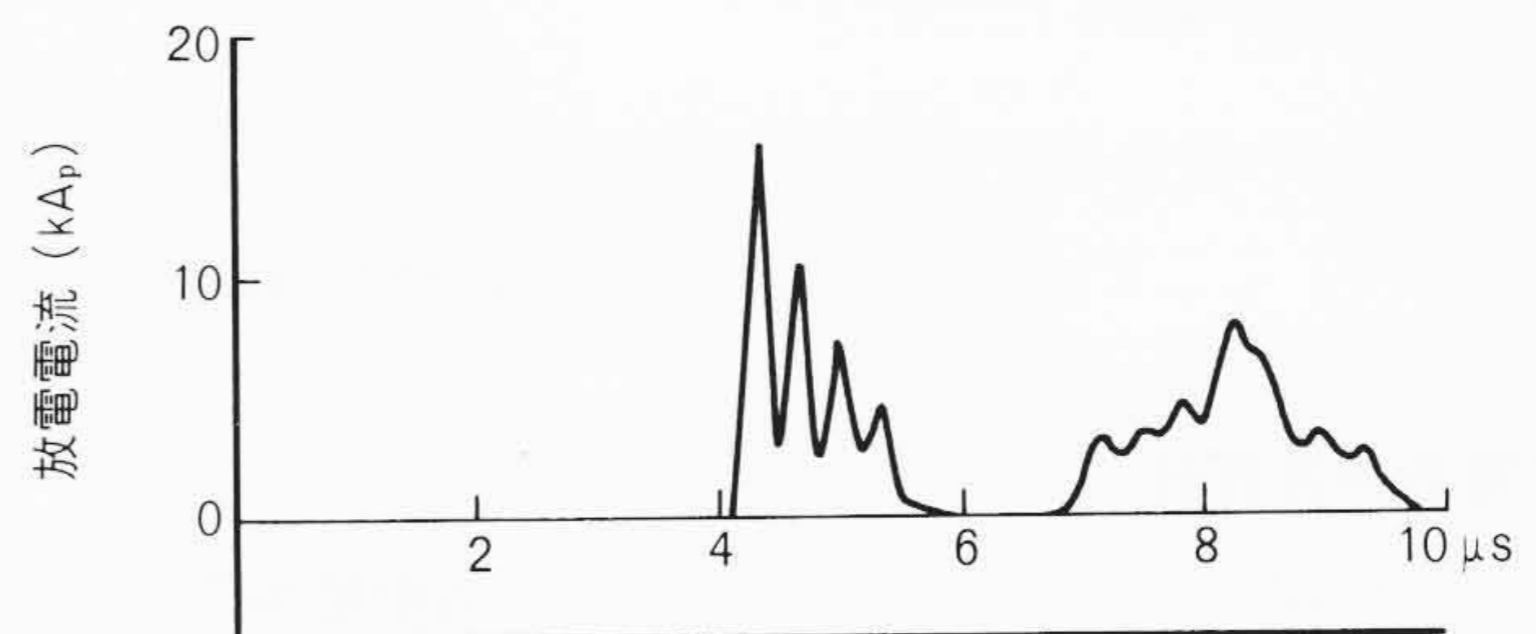
がないことから、雷サージ動作責務を容易に処理できる利点を持っている。さらに、酸化亜鉛形避雷器の特長として、課電寿命特性、制限電圧特性が向上した結果^{1),2)}、低減絶縁レベルの採用が可能となり、絶縁設計の合理化³⁾がなされて小形・高性能変電機器の時代を迎えている。絶縁レベルは500 kV GISでLIWL(雷インパルス耐電圧レベル)1,550 kVから1,425 kVに低減の時代を迎えている。これらの技術を展開し、275 kV GISではLIWL1,050 kVから950 kVへの低減も実現している。日立製作所は海外で、すでに735 kV系統用酸化亜鉛形避雷器の稼動実績を有している¹⁾。

3 絶縁協調解析技術

解析技術として、通常の電力系統では雷サージ、開閉サージや短時間過電圧が解析の対象となる。ここでは主として雷サージ解析の動向について述べる。雷サージは、雷撃によって発生する比較的急しゅんな過電圧で送電線の停電事故を引き起こす最大の要因であり、変電設備の絶縁レベルを決定す



(i) CB開放端電圧波形



(ii) 避雷器放電電流波形

(a) 解析回路

(b) 解析波形

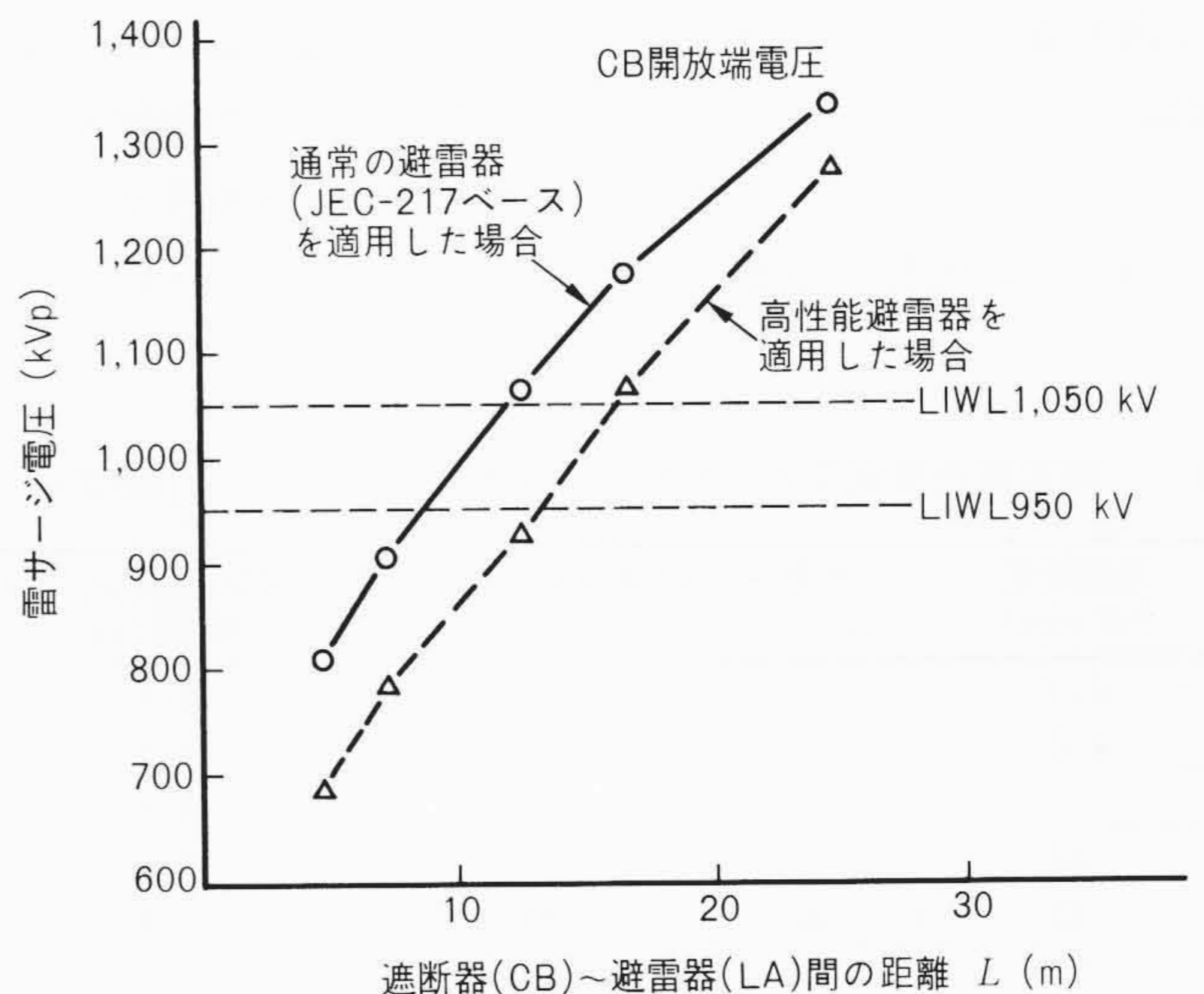
注：略語説明 PT (変成器), CB (遮断器)

図3 雷サージ解析モデルと解析波形 高性能避雷器を適用した275 kV三相一括形GISでの雷サージ解析モデルと解析波形を示す。

る主要因である。

絶縁協調解析を行うための解析入力モデルは、雷撃源として電流源と400 Ωの雷道インピーダンスで与えられる。電流波形は1 × 70 μsのRamp波とし、波高値は電圧階級ごとに想定されている。想定雷撃電流値は66~77 kVで30 kA, 110~154 kVで60 kA, 187~220 kVで80 kA, 275 kVで100 kA, 500 kVで150 kA⁴⁾と考えられてきた。鉄塔はサージインピーダンスが100~150 Ω程度、伝搬速度は210 m/μs程度の単一分布定数で模擬されていたが、最近では鉄塔各相のアームの位置で分割する4段モデルで模擬され始めた。送電線も従来は架空地線と電力線間に電氣的結合がない単相回路で模擬されていたが、最近では多相回路で模擬するようになった。また、従来、逆フラッシュオーバは、単純なスイッチあるいは雷撃と同時にアークホーンを短絡することで模擬していたが、リーダによる前駆電流現象を考慮して、インダクタンス値をスイッチによって時間的に変化させることで模擬されるようになった⁵⁾。

雷サージ解析例として、最近の解析条件を考慮した275 kV三相一括形GISの日立製作所での解析例を図3に示す。雷サージ解析条件としては、変電所の近接鉄塔で逆フラッシュオーバが発生するケースとして鉄塔雷撃電流130 kA(第三鉄塔)とし、アークホーン間隔2.02 m, 交流電圧245 kVp(=300√2/√3)で逆極性の雷サージが侵入したものとした。避雷器は高性能酸化亜鉛形避雷器とし、公称放電電流10 kAでの制限電圧を



注：略語説明 LIWL (雷インパルス耐電圧レベル)

図4 雷サージ解析結果 避雷器の設置位置と遮断器極間にかかる雷サージ電圧との関係を示す。適切な距離を選択することで、GISとして低減絶縁レベルを採用できる。

600 kVとした。雷サージ解析条件としては、最も厳しい条件として、線路引込側遮断器が開放時の雷サージ過電圧を遮断器~避雷器間の距離L(m)をパラメータとして解析した。解析結果は図4に示すように、従来の275 kVの標準のLIWL

1,050 kVに対して避雷器を適切な位置に配置することにより、LIWL 950 kVが実現できる。代表的な雷サージ解析波形を先の図3(b)に示す。なお、避雷器の適用方法として、基本的には一つの避雷器で雷サージ過電圧をLIWL値以下とするように絶縁設計しているが、AC TOV(交流短時間過電圧)が厳しい場合、避雷器の制限電圧特性を低減しないで、開放端部の近接に避雷器を分散配置してLIWLを低減することも、酸化亜鉛形避雷器の有効な適用方法の一つである。

4 避雷器の適用状況

最近の酸化亜鉛形避雷器は発電機専用、配電用、送電用に使用されている⁶⁾。ここでは代表的な避雷器の適用例と動向について述べる。

4.1 発電機専用避雷器

発電機専用避雷器としては、GIS用避雷器と気中絶縁変電所用のがいし形避雷器がある。JEC-217-1984規定の避雷器仕様とGIS用高性能避雷器の仕様を含めて表1に示す。代表例として、最近の275 kV GIS用タンク形高性能避雷器とがいし形避雷器の動向について述べる。

(1) タンク形高性能三相一括形避雷器

この避雷器は現行JEC-217-1984の公称放電電流10 kAでの制限電圧の規格値851 kVに対し、600 kVと約30%低減してLIWL 950 kVを可能にした高性能避雷器である。図5は266 kV避雷器の制限電圧-電流特性を、通常の避雷器と高性能避雷器とを対比して示す。図6には実際にタンク形高性能三相一括形避雷器を適用した275 kV三相一括形GISを示す。タンク形避雷器はGISの重要な主要素の一部を担っている。

次に、避雷器を高性能化したときの課題は、(a) 課電寿命特性、(b) 開閉サージ動作責務特性、(c) 安定性評価試験、(d) 電位分担、(e) 動作開始電圧試験、(f) 漏れ電流試験などがある。特にタンク形避雷器では、酸化亜鉛素子とタンク間の漂遊容量によって素子間の電位分担について考慮する必要がある。電位分布を均一にするために、同心上分割形金属シールドが配置してある。電位分布測定回路と測定供試品の外観を図7に示す。避雷器本体は三相とも実器と同一品を使用し、タンクについては実器と同一径のタンクモデルを使用した。測定には交流電圧を三相に印加し、光センサを介してデジタル

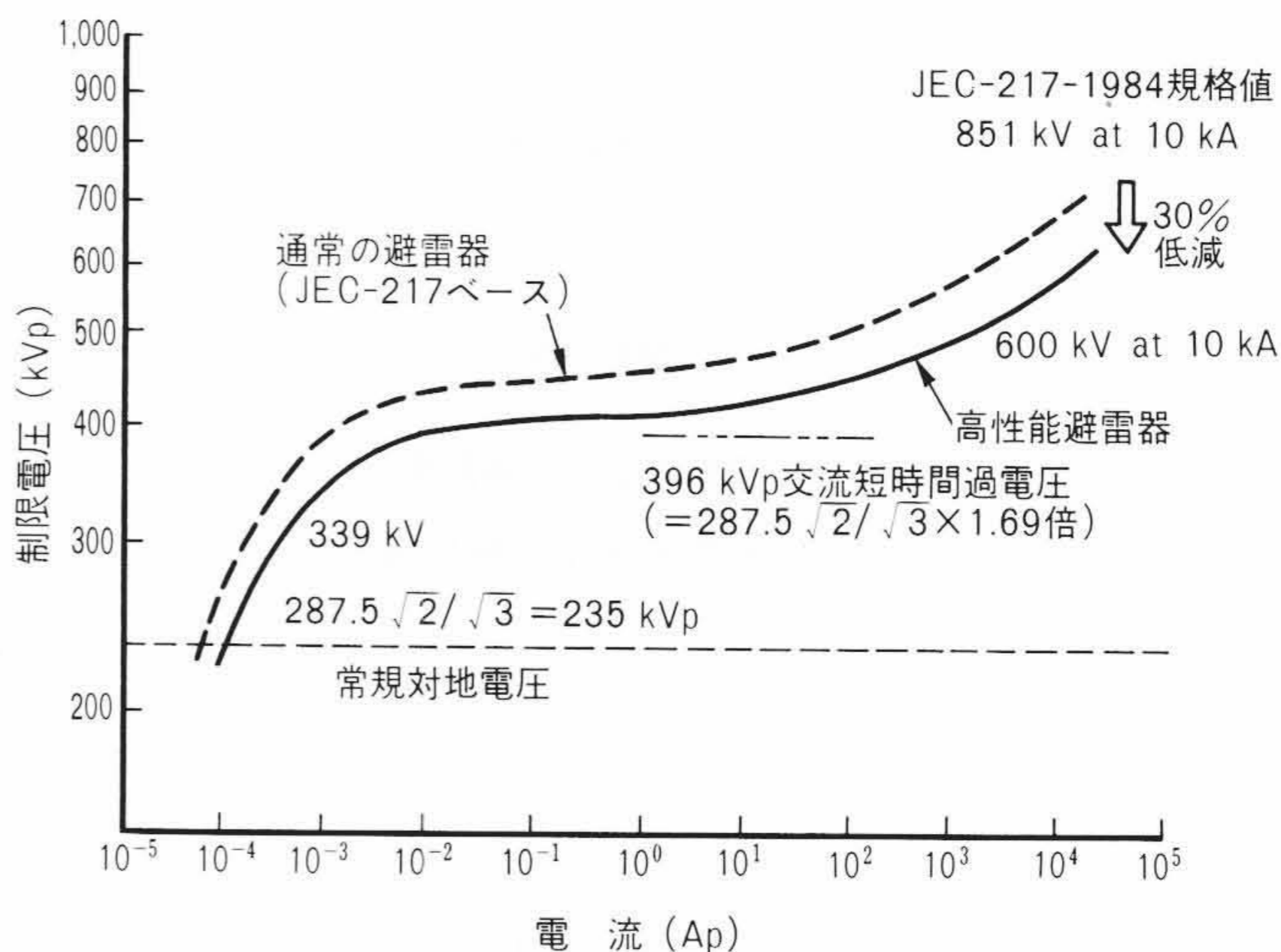


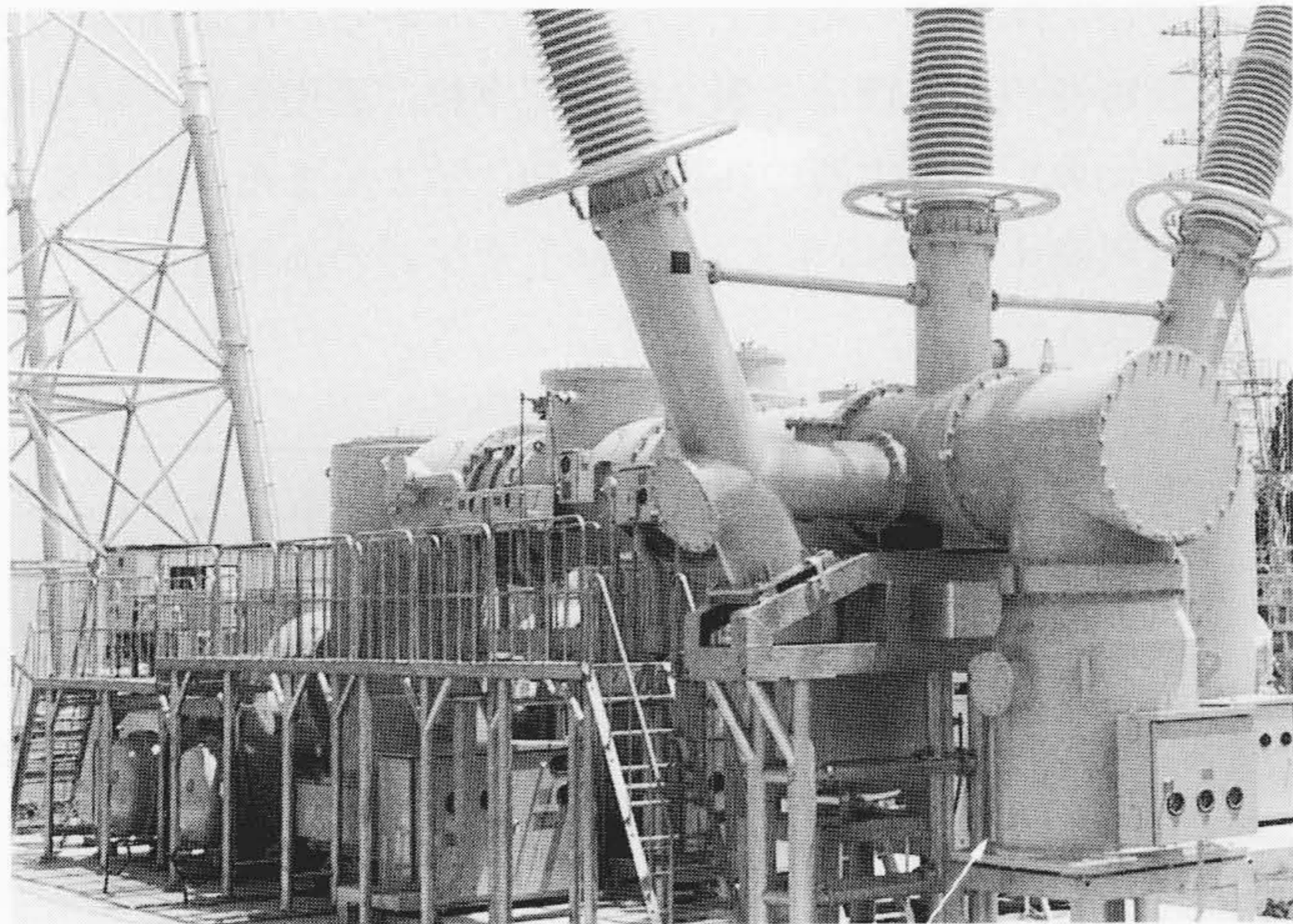
図5 266 kV避雷器の制限電圧-電流特性 通常の避雷器と高性能避雷器の制限電圧特性を対比して示す。高性能避雷器では規格値に対し、約30%低減している。

表1 発電機専用避雷器の特性 通常の避雷器(JEC-217規定)と低絶縁形高性能避雷器の特性を示す。

系統電圧 (kV rms)	定格電圧 (kV rms)	絶縁強度(LIWL) (kV _p)	動作開始電圧(V _N mA) (下限値)(kV _p)	制限電圧(kV _p)		交流短時間過電圧耐量 (AC TOV)
				急峻(しゅん)インパルス	雷インパルス: 10 kA	
3.3	4.2	45	7.1	19	17	3.2 pu × 10 s
6.6	8.4	60	14.3	36	33	
11	14	90	19.8	52	47	
22	28	150	39.6	103	94	2.34 pu × 5 s
33	42	200	59.4	154	140	
66	84	350	119	296	269	
77	98	400	139	345	314	
110/154(中性点)	112	450	158	394	358	
110	140	550	198	493	448	1.69 pu × 2 s
154	196	750	277	690	627	
187	182	750	232	640	582	
220	210	900	267	739	672	
275	266	950	339	660	600*	1.69 pu × 2 s
		1,050	339	936	851	
500	420	1,425	535	957	870*	1.5 pu × 0.2 s
		1,550	535	1,340	1,220	1.5 pu × 2 s
					20 kA: 1,350	

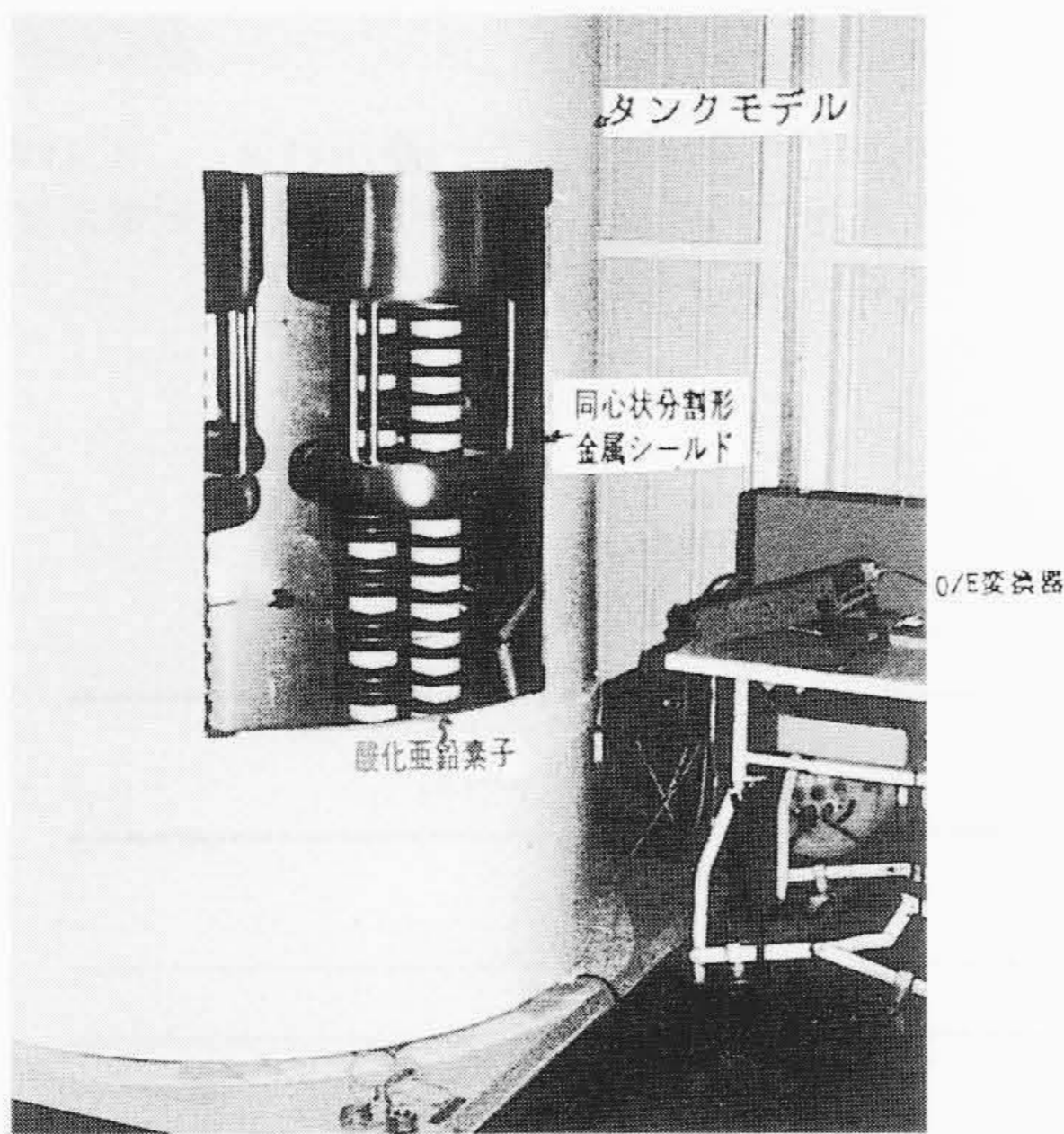
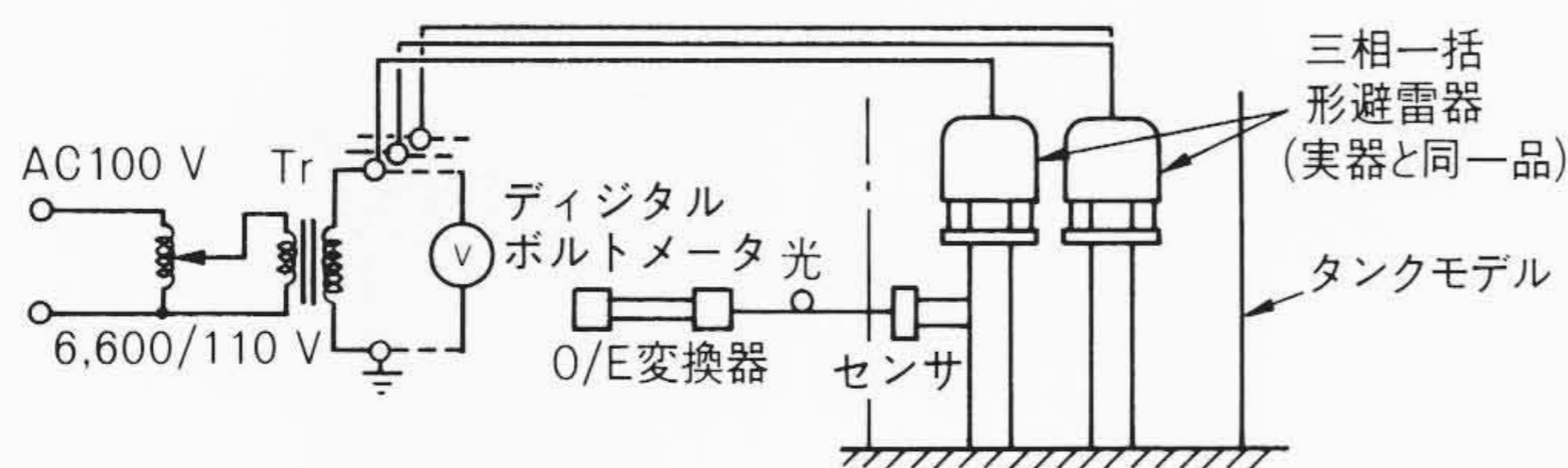
注: * 高性能避雷器(GIS用)

動作開始電圧試験時の抵抗分電流 25 μF用避雷器の場合1 mA(N=1): V₁ mA, 50 μF用避雷器の場合2 mA(N=2): V₂ mA, 78 μF用避雷器の場合3 mA(N=3): V₃ mA



266 kV高性能三相一括形
タンク形避雷器

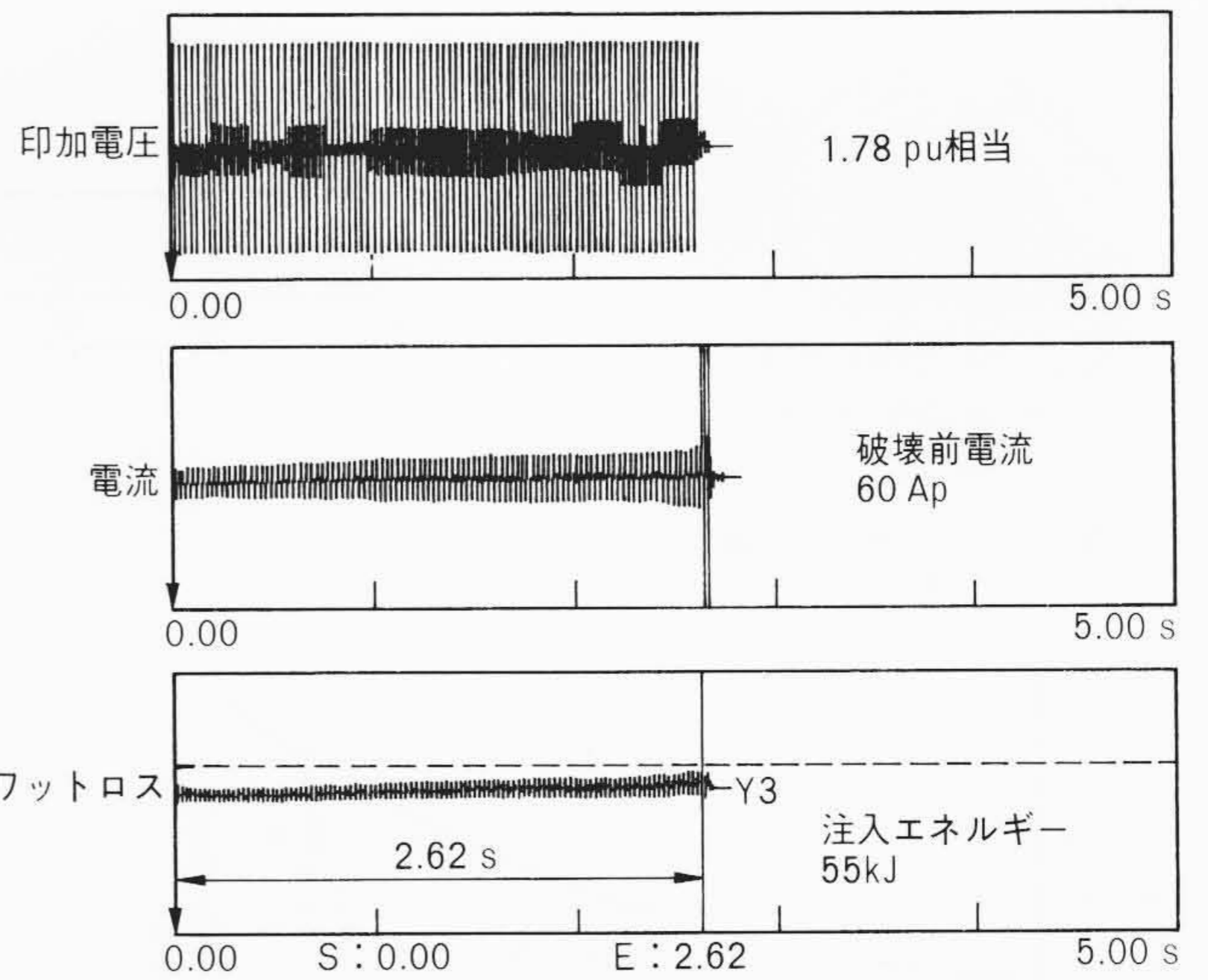
図6 266 kV高性能避雷器を適用した三相一括形275 kV GIS 線路
引込口に三相一括形266 kV高性能避雷器(形式:ZLA-U50Fc)を配置する
ことにより、275 kV GISのコンパクト化が実現されている。



注:略語説明 O/E変換器(光-電気変換器)

図7 266 kV高性能三相一括形タンク形避雷器の電位分布測定状況
実規模タンクモデルを使用した酸化亜鉛素子間の電位分布測定状況を
示す。

ボルトメータで電位分担を測定した。電位分担は1.1以下であ
った⁷⁾。酸化亜鉛素子の課電率は0.75程度であり、酸化亜鉛素
子の課電寿命特性を考慮して支障のない値である。一方、避
雷器の高性能化に伴う課題として交流短時間過電圧特性があ
るが、規格値の 1.69×2 秒まで耐えることができる。図8は
1.78倍($287.5 \text{ kV} / \sqrt{3}$ ベース)相当での交流短時間過電圧耐量



注:略語説明 S:開始, E:終了

図8 交流短時間過電圧(AV TOV)耐量試験時のオシログラム
高性能酸化亜鉛素子を使用し、AC TOV 1.78 pu \times 2.62秒通電時の電
圧、電流、ワットロスの測定例を示す。

試験時のオシログラムを示す。電流は最大60 Apで、注入エネ
ルギーは55 kJ/素子1枚の例を示す。このほか、雷サージ動作
責務試験、開閉サージ動作責務試験を実施し、性能を確認し
た。

(2) がいし形避雷器

気中絶縁変電所ではがいし形避雷器が使用されている。現
在、すでに先の表1に示すJEC-217-1984規格値標準の酸化亜
鉛形避雷器が、塩分汚損を考慮して国内で普及しているのが
実態である。

(3) 従来形直列ギャップ付き避雷器

一方、従来の直列ギャップ付き制弧避雷器ではギャップ間
の電圧分担を均一にするため、分路抵抗体を使用されている。
この抵抗体はカーボン、ケイ石と有機質のケイ素樹脂との接
合で数メガオームの抵抗値を持つ抵抗体であるため、経年劣化
が発生するものも散見された⁸⁾。制弧避雷器は開発年代も昭和
30年代のものであること、すでに酸化亜鉛形避雷器に切り換
えられて少なくとも課電後12年以上は経過していることもあり、
更新が進められている。このリプレース作業により、避
雷器の信頼性は従来形ギャップ付き避雷器の時代に比べて格
段に向上してきている。図9は、従来形ギャップ付き制弧避
雷器の経過年と漏れ電流変化率の関係を示すもので、避雷器
の寿命を評価する意味で役立つ。

4.2 配電用避雷器

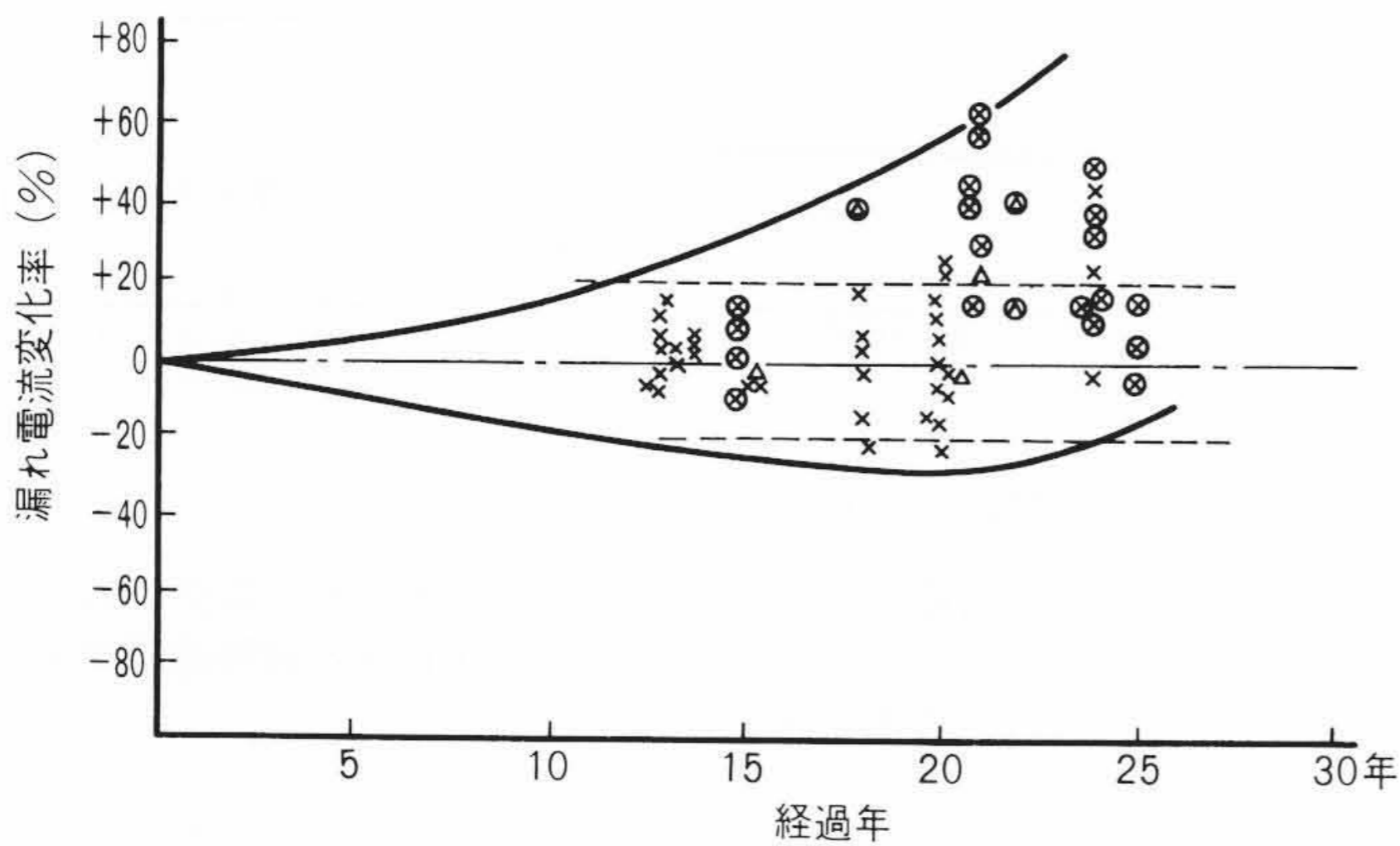
配電用避雷器は酸化亜鉛素子の優れた雷サージ応答特性を
活用し、真空遮断器開閉時の截断波サージの抑制に適したギ
ャップなし配電用酸化亜鉛形避雷器が受変電盤内に、がい管
内に単一のギャップを内蔵したギャップ付き配電用酸化亜鉛



ODB-200P形

項目	266 kV	196 kV
稼動品	×	△
撤去品	⊗	⊙

直列ギャップ部の内部構造 (分路抵抗体)



注：略語説明 ODB (Outdoor Blow out：屋外磁気吹消形)

図9 従来形直列ギャップ付き避雷器(制弧避雷器)の経過年と漏れ電流の関係 据え付け後12~25年間にわたる漏れ電流変化率を示す。

形避雷器が配電線の電柱上で適用されている。配電用酸化亜鉛形避雷器の内部構造を表2に、配電線に適用されている配電用酸化亜鉛形避雷器の外観を図10に示す。また、柱上変圧器保護用避雷器(耐雷素子)が、柱上変圧器の油中に内蔵されて使用されている。

4.3 送電用避雷装置(避雷器)

架空送電線の事故の大半は雷に起因していることから、雷撃による送電線支持がいし装置のフラッシュオーバの防止を目的として、送電用避雷装置^{9), 10)}が誕生し、適用されている。配電線では、配電用避雷器の設置により誘導雷による雷害防止

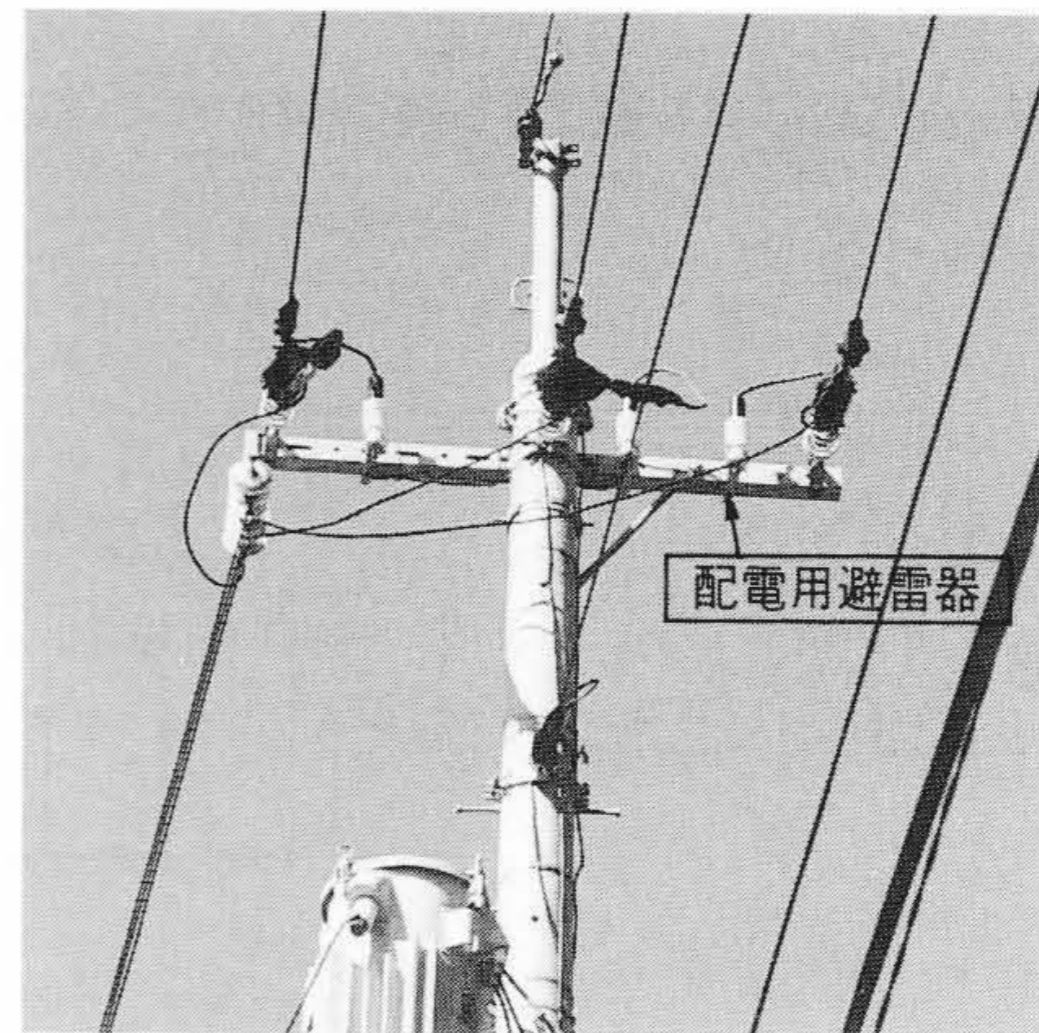


図10 配電用避雷器の適用状況 8.4 kV 配電用避雷器は電柱上に設置され、配電用変圧器保護に適用されている。

表2 配電用避雷器の構造 配電用避雷器の内部構造を示す。用途によって2種類が適用されている。

項目	ギャップなし 配電用避雷器	ギャップ付き 配電用避雷器
用途	受変電盤用 VCBサージ抑制用	配電線用
直列ギャップ	なし	あり
構造	形式：ZLA-5S 	形式：ZLA-2.5SG

注：略語説明 VCB (真空遮断器)

に効果があがっており、これと同様に送電線でも、送電用避雷装置が鉄塔雷撃による雷害防止に効果を発揮すると期待される。

送電用避雷装置の課題と要部を図11に示すように絶縁協調、続流遮断、特に素子内径側の空間活用に基づく内圧上昇抑制による防爆性能向上を考慮してドーナツ形の酸化亜鉛素子を使用している。さらに、鉄塔上設置につき、従来の磁器がい管に代わって汚損耐電圧特性の優れたポリマー絶縁容器を開発することにより、小形・軽量化および非磁器化による防爆性能の向上を実現した⁹⁾。また保護対象がアークホーンであることから、単一の気中ギャップと酸化亜鉛素子を内蔵している避雷要素部(避雷器)で構成している。送電用避雷装置の装柱構造(懸垂がいし連用)を図12に示すように、鉄塔アームから取付金具を配置して避雷要素部をつり下げ、電線の振動など不要な振動が加算されないようにしている。動作表示には雷インパルス電流で動作する動作表示器を、万一の故障表示には地絡電流で動作する故障表示器を設けている。避雷要素部が故障した場合、避雷装置は直列ギャップ部で耐電圧させ継続運転ができるように設定してある。

一方、避雷装置はギャップ部の漂遊容量と避雷要素部の静電容量によって分圧されているので、避雷要素部の静電容量とアークホーン間隔の関係を求めて適用する必要がある¹¹⁾。アークホーン間隔が同じでも避雷装置の静電容量の大きいほうが放電電圧は低く、絶縁協調の裕度は大きくなり保護効率は

高くなる。なお、酸化亜鉛素子の素子径が大きくなると静電容量も比例して大きくなり、放電耐量も増加する。アークホーンと110 kV送電用避雷装置との絶縁協調特性(V-t特性)を図13に示す。避雷装置のギャップ長590 mm、アークホーン間隔834 mmのとき、同時放電が発生する場合がある¹¹⁾。実際の避雷装置のアークホーン間隔は1,204 mmとした。

図14には避雷装置を既存の送電線(懸垂鉄塔)に装柱し、稼働中の送電用避雷装置の適用状況¹²⁾を示す。

5 避雷器の特性評価

避雷器の特性評価として、最近の測定技術の進歩により、

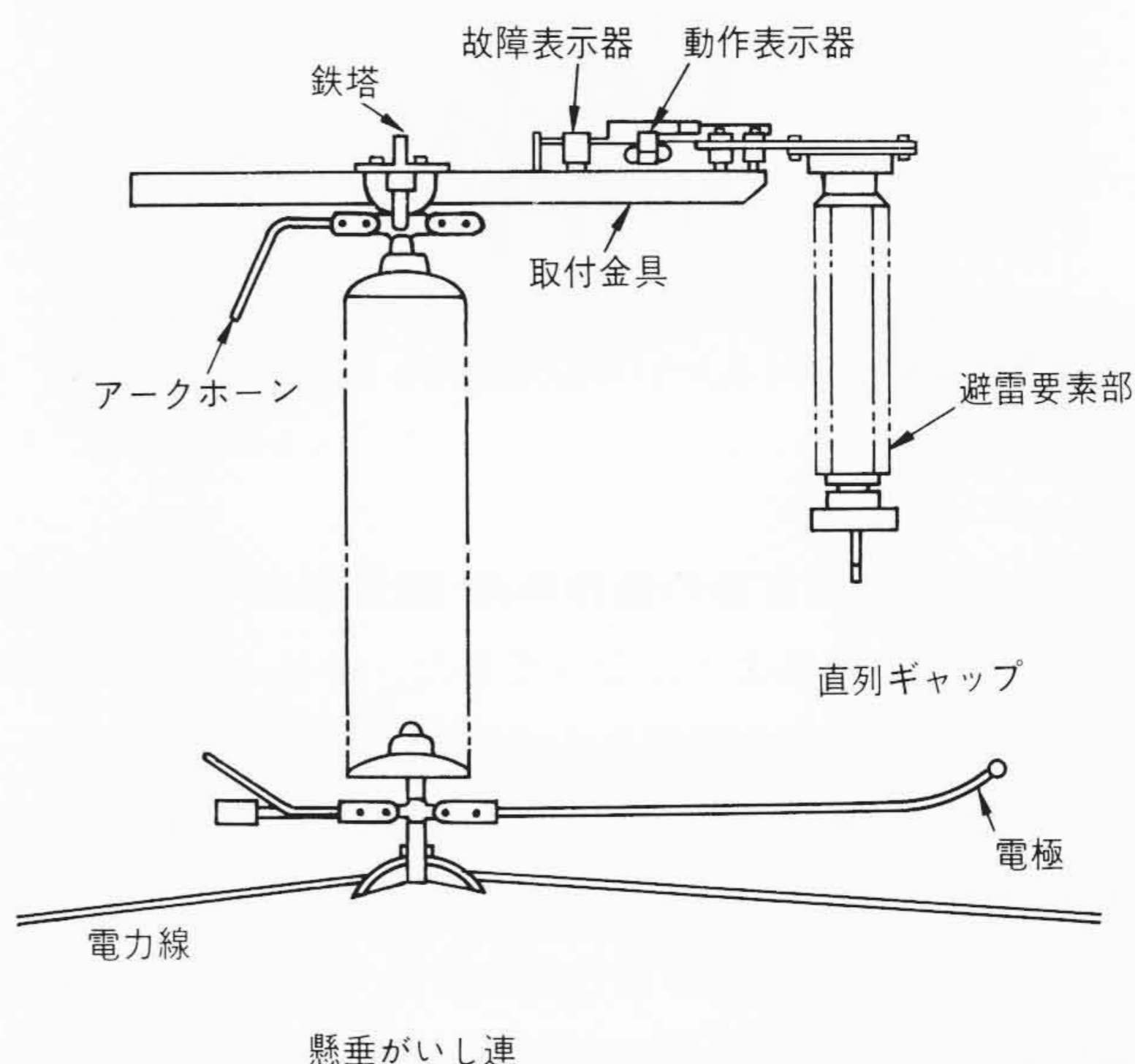


図12 送電用避雷装置の装柱構造(懸垂がいし連用) 送電用避雷装置は鉄塔アームから取付金具を出して、避雷要素部を絶縁ベースで固定し、垂直につり下げている。

課題 要部

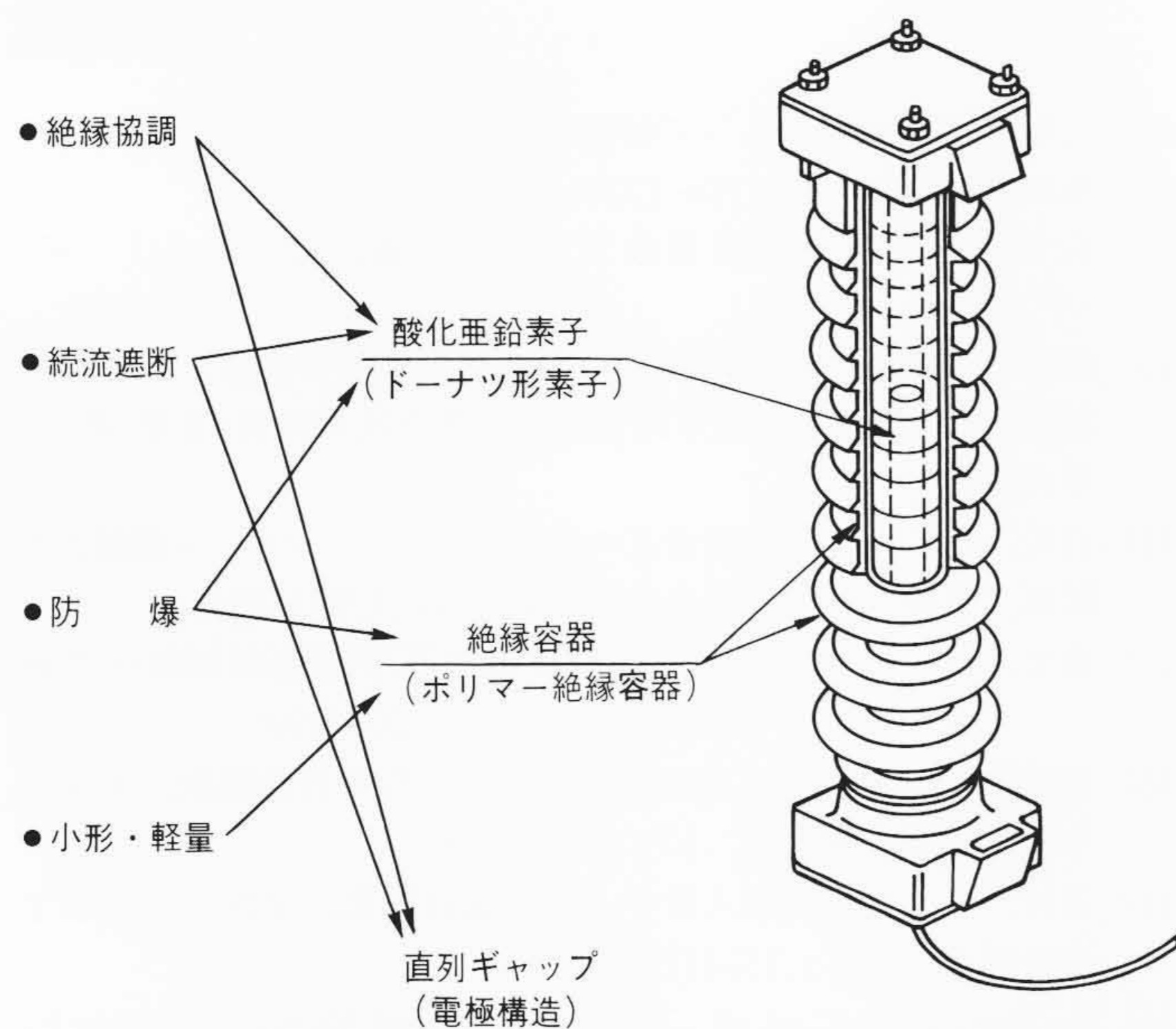


図11 送電用避雷装置の課題と要部 送電用避雷装置の課題と要部の関係を示す。

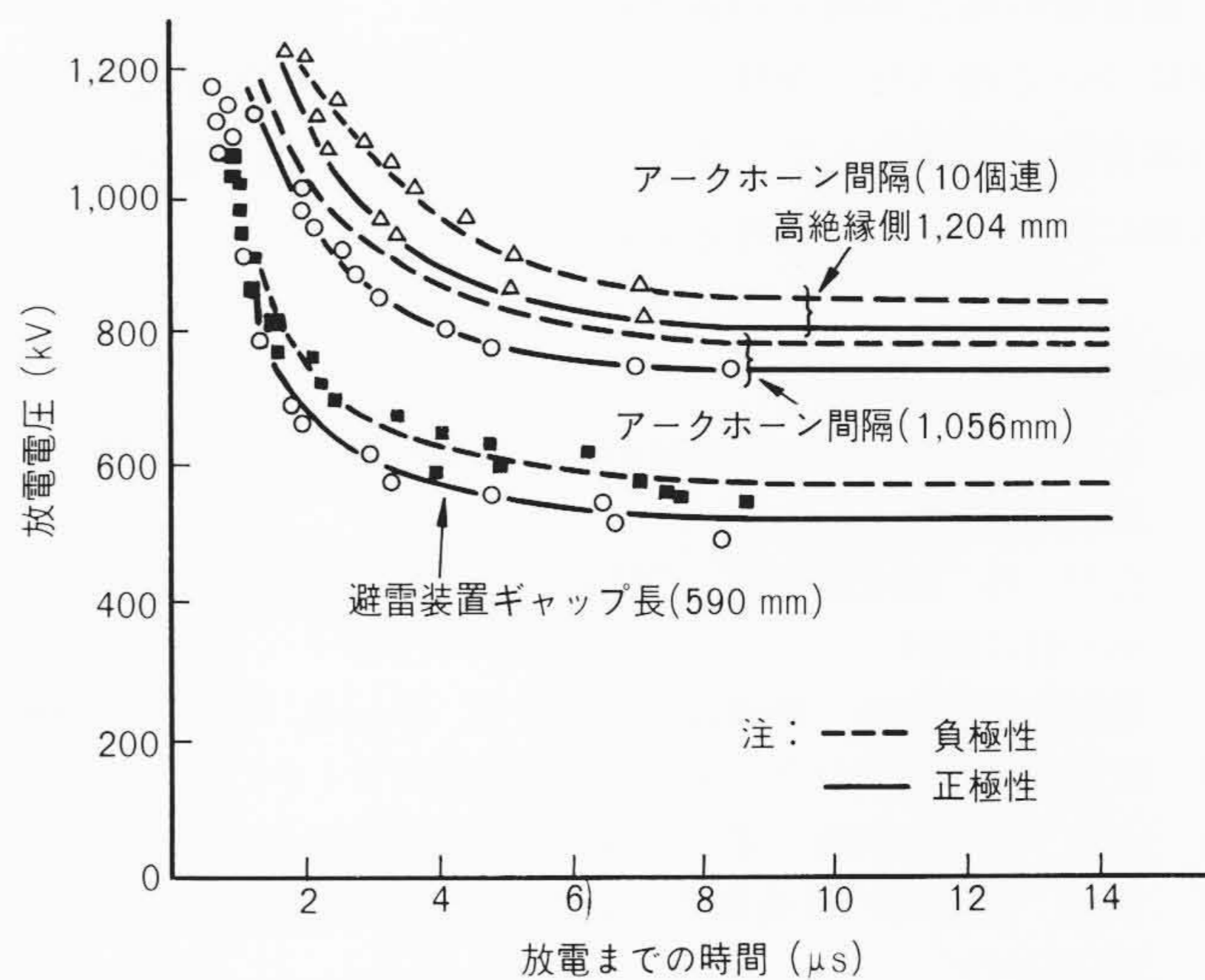


図13 送電用避雷装置のV-t特性 110 kV送電用避雷装置のV-t特性とアークホーンのV-t特性を併記して示す。

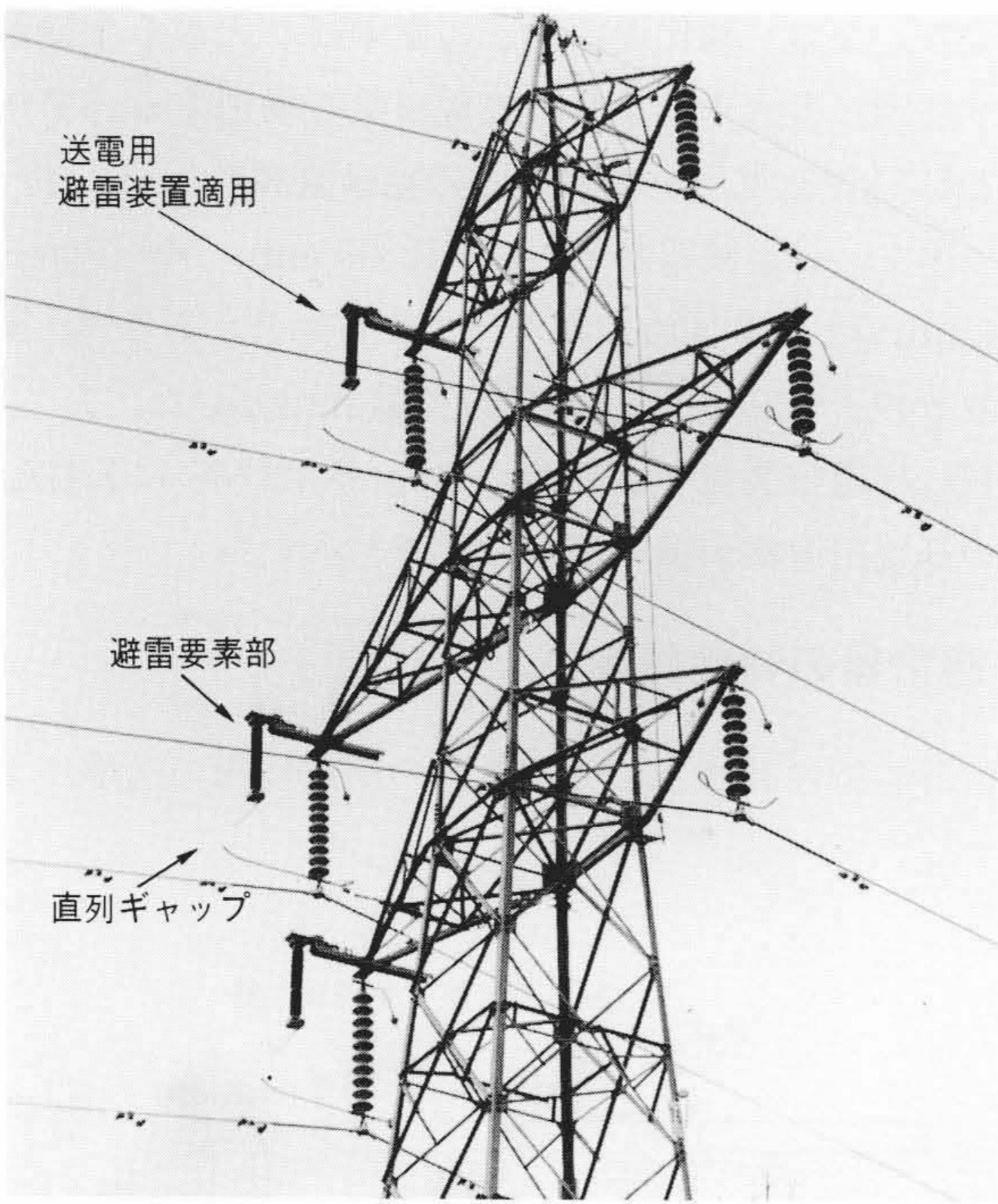
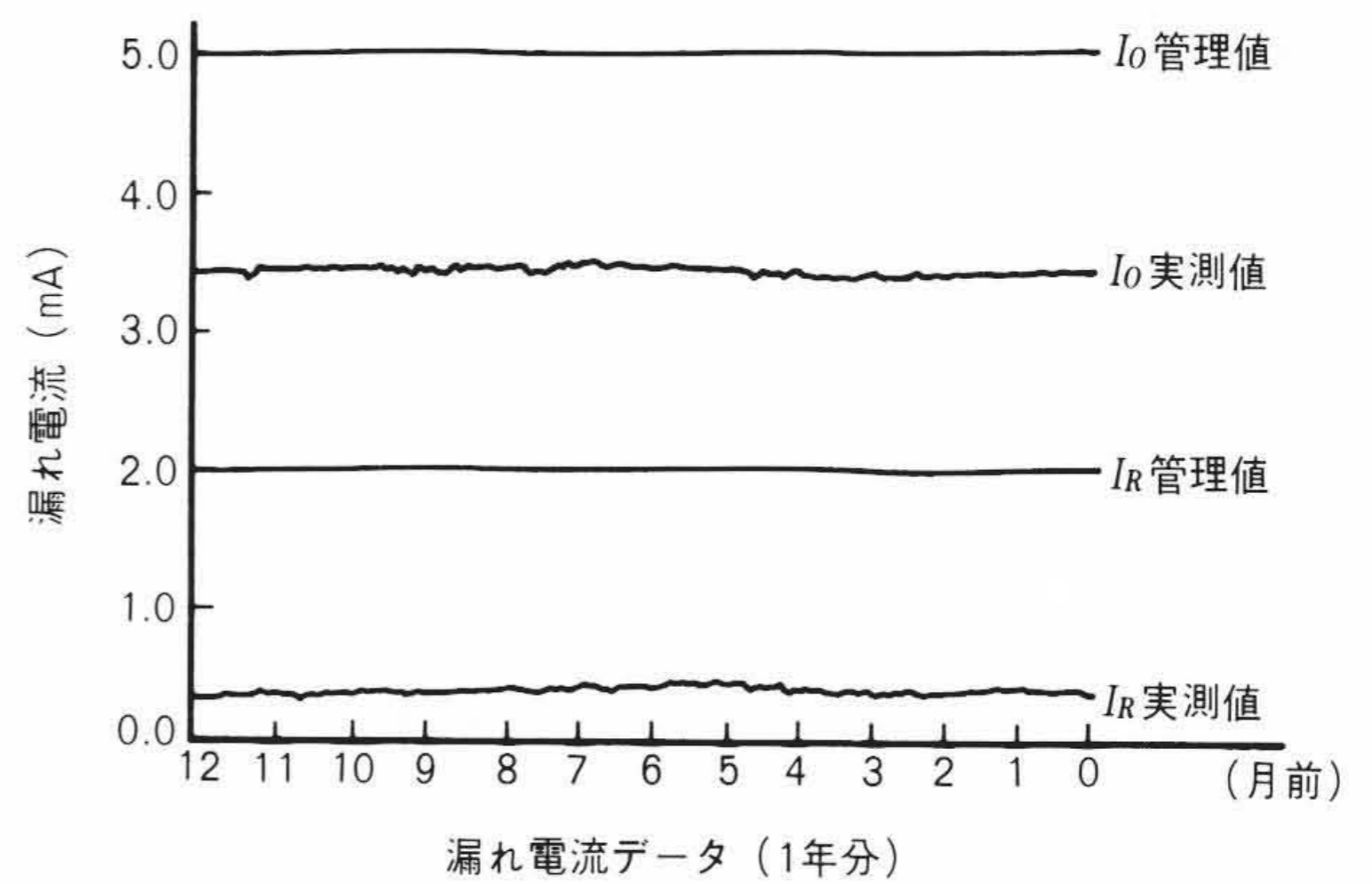
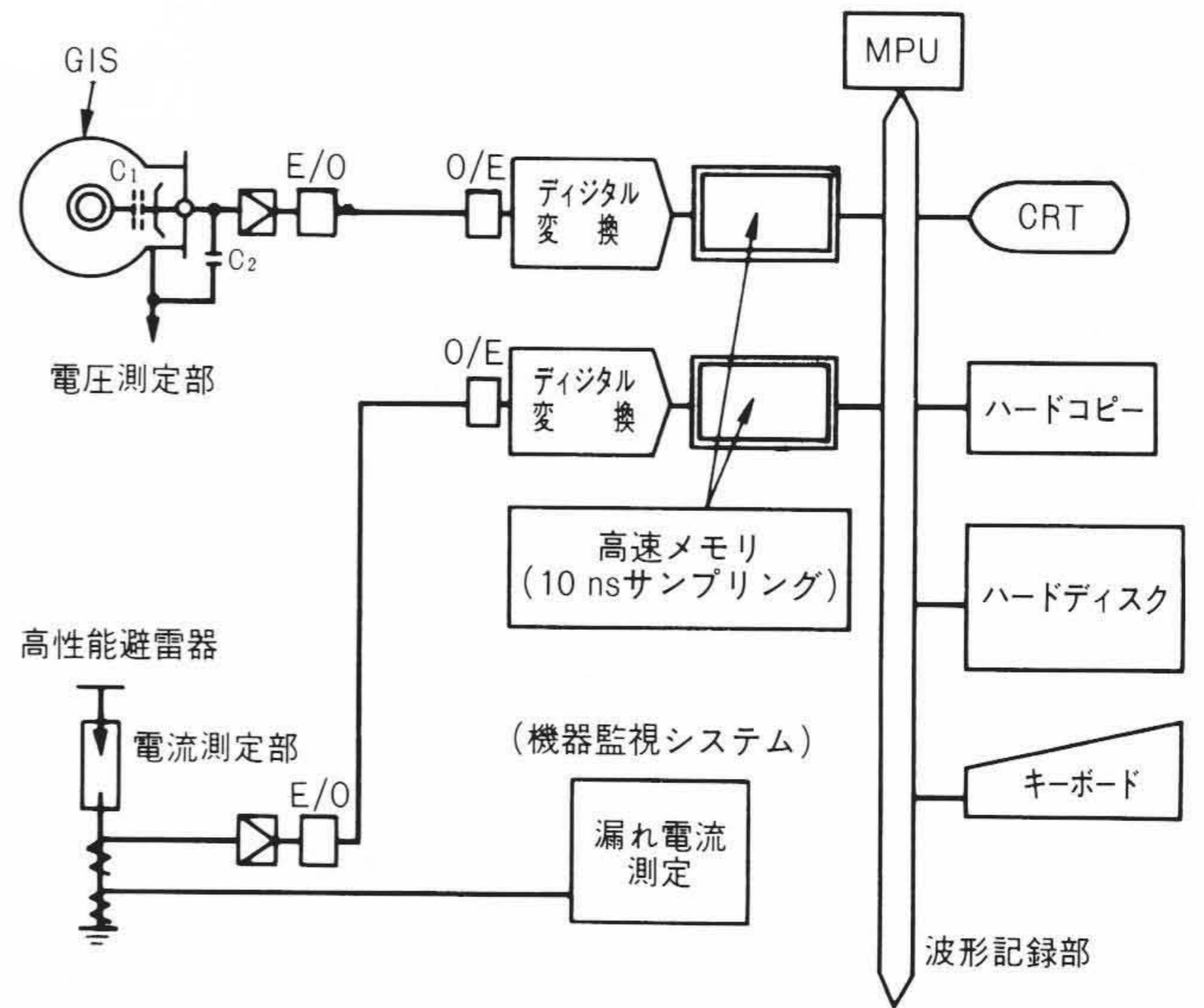


図14 送電用避雷装置の適用状況 実際110kV送電用避雷装置(形式:ZLA-L110G)を適用した送電線鉄塔を示す。



注:略語説明 E/O(電気-光変換器)

図15 500kV高性能避雷器の漏れ電流推移 運転支援機能付きGISからアウトプットした経過年と漏れ電流値の関係を示す。

フィールドでの避雷器の動作特性(制限電圧-電流)が実波形^{13),14)}で測定できるようになってきた。今後、データが蓄積され、避雷器の動作が評価されていくものと考えられる。

また、最近の運転支援システムの構築により、避雷器の運転状況(漏れ電流の推移)を画面で直接判定できるようになってきている。これを500kV高性能避雷器⁹⁾を例にして、避雷器の漏れ電流の経時特性を図15に示す。なお通常の避雷器では、避雷器の接地線から可搬形避雷器漏れ電流測定器⁵⁾により、漏れ電流は測定できる。

6 結 言

避雷器の電力系統での雷害防止機器としての役割と適用状況について述べた。今後とも、酸化亜鉛形避雷器は電力系統の雷害防止機器として、ますます広く適用され、電力の安定供給に寄与するものと考えられる。

参考文献

- 1) 白川, 外: 避雷器の技術動向と応用技術, 日立評論, 70, 9, 855~862(昭63-8)
- 2) 白川, 外: 酸化物材料, OHM, 第76巻, 第10号, 第964号, 36~41(1989)
- 3) 電気協同研究会: 絶縁設計の合理化, 第44巻, 第3号(1988)
- 4) 耐雷設計基準委員会: 発変電所耐雷設計ガイドブック(昭51-3)
- 5) 小沢: サージ解析, 電気評論, 第290号, 71~80(1990-6)
- 6) 白川: 避雷器の技術動向, 動力誌, 第39巻, 第193号, 18~24(平1-7)
- 7) 花村, 外: 266kV高性能三相一括型タンク形避雷器の電位分担, 平成2年電気学会全国大会, No.1236(1990)

- 8) 山形, 外: 直列ギャップ付制弧避雷器の経年劣化, 平成2年電気学会全国大会, No.1230(1990)
- 9) 白川, 外: 送電用避雷装置, 日立評論, 72, 9, 947~954(平2-9)
- 10) 酸化亜鉛素子の線路保護への適用調査専門委員会: 送電用避雷装置の開発状況と適用効果, 電気学会技術報告(II部)第367号(1991)
- 11) 白川, 外: 送電用避雷装置の静電容量とアークホーン間隔との関係, 平成3年電気学会全国大会, No.1208(1991)
- 12) 藤原, 外: 110kV送電用避雷装置の不均衡絶縁線路への適用, 平成3年電気学会全国大会, No.1207(1991)
- 13) 花村, 外: 500kV高性能避雷器動作特性の自動観測, 平成2年電気学会全国大会, No.1243(1990)
- 14) 吉村, 外: 変電所侵入雷サージの観測結果, 平成3年電気学会全国大会, No.1334(1991)
- 15) S. Shirakawa, et al.: Maintenance of Surge Arrester by a Portable Arrester Leakage Current Detector, IEEE Vol. PWRD-3, No.3, July 1988, pp.998~1003