

直流送電用酸化亜鉛避雷器

Zinc Oxide Lightning Arresters for HVDC Application

従来、直流送電用避雷器にはギャップ付き避雷器を使用してきたが、最近のZLAの技術進歩により直流送電系統に高性能ZLAを適用して、雷サージからの保護だけでなく系統の絶縁レベル自体を低減することも可能となった。

本稿では、最近の直流送電用ZLAに対する技術的課題と必要な基本特性、DC125kVギャップなしZLAの開発、及びこれらの結果に基づくUHV-DC避雷器の開発見通しについて述べる。

白川晋吾* Shingo Shirakawa

水越明男** Akio Mizukoshi

1 緒 言

ZLA(酸化亜鉛避雷器)¹⁾²⁾³⁾は優れた非直線電圧-電流特性があることから、現在では過電圧抑制装置として交流系統で広く適用されており、UHV-AC(交流1,100kV)系統の絶縁レベル選定の基本となる機器とみなされるまでになってきた。一方、交流系統にとどまらず、直流送電用避雷器の適用に対しても種々の検討がなされており⁴⁾、特に直流系統の根幹であるサイリスタバルブの経済性を左右する絶縁レベルを低減するために不可欠の機器と考えられている。本論文では、新たに開発した直流送電用ZLA(Zinc Oxide Lightning Arresters for HVDC Application: 直流送電用酸化亜鉛避雷器)について述べる。

2 直流送電用ZLAの課題

直流送電用交直変換所での避雷器は、図1に示すように直流線路、直流母線、サイリスタバルブなどの雷及び開閉サージ保護用に配置される。通常、避雷器の制限電圧はLIWL(雷

インパルス耐電圧)に対し約20%、SIWL(開閉インパルス耐電圧)に対し15%の裕度をとって選定される。公称放電電流は避雷器設置位置の雷撃条件によって異なる。交直変換所内ではAC側は変換器用変圧器、DC側は直流リアクトルによって雷サージは抑制されることから3~5kAに設定し、一方、直流線路側は雷撃に直接さらされることから10~20kAに選定される。

2.1 交流避雷器と直流避雷器の比較

変換器用変圧器の一次側には通常の交流用避雷器が適用されるが、二次側の交直変換装置の各部には図1に示すように単純な商用周波電圧と異なる種々の波形が印加され、電圧的に複雑な波形となる。

一方、直流避雷器には交流避雷器の雷及び開閉サージ動作責務の外に、万一の交直変換器の不具合動作に伴う特殊な動作責務及び直流遮断の条件が課せられ、従来から技術的に難しい機器のひとつとされていた⁵⁾。

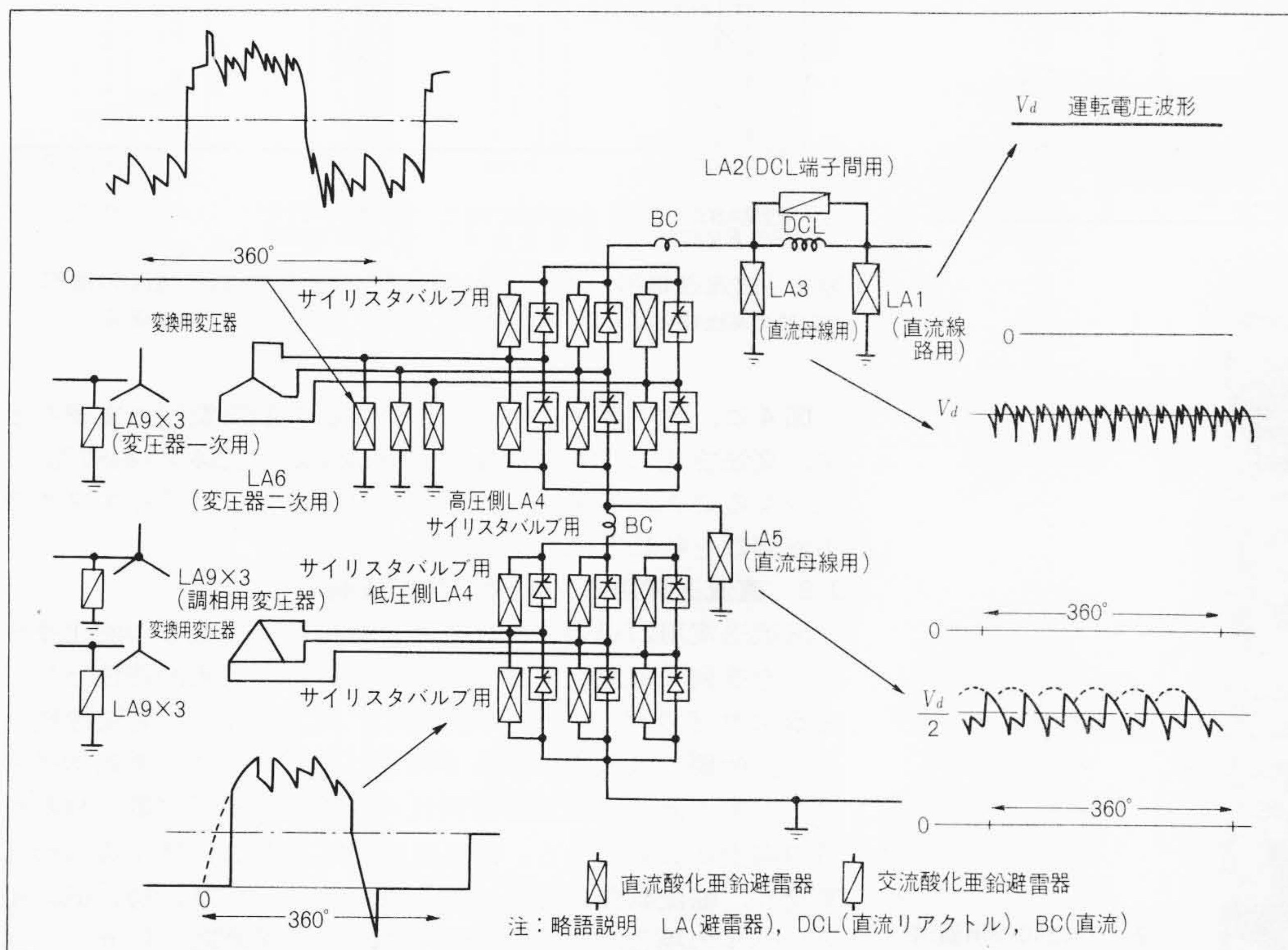


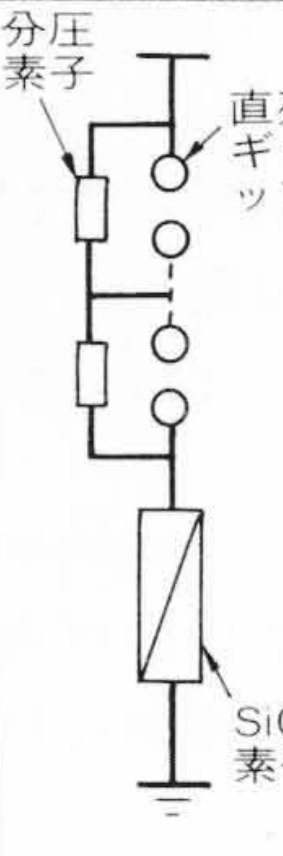
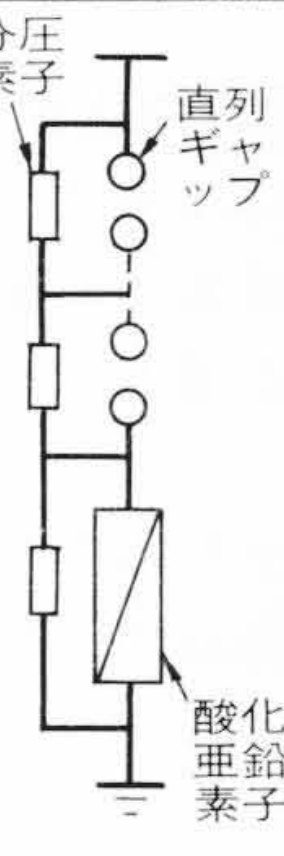
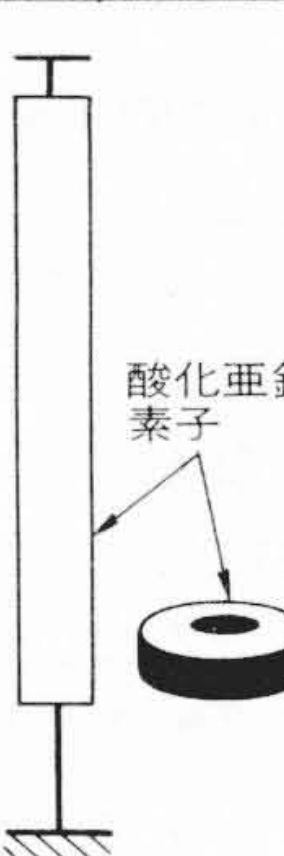
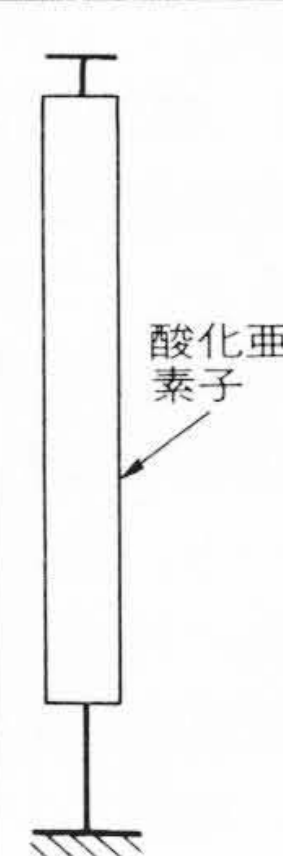
図1 交直変換所での避雷器の配置と運転電圧波形 避雷器には設置位置により、ACからDCまで種々の電圧波形が印加される。

* 日立製作所国分工場 ** 日立製作所日立研究所

2.2 直流送電用避雷器の変遷

表 1 に日立製直流送電用避雷器の変遷を示す。本格的な直流送電用避雷器として、昭和52年に限流形直列ギャップと炭化けい素から成る特性要素とを直列接続したDC125kV用避雷器を東京電力株式会社新信濃変電所⁶⁾に、一方、昭和54年に図 2 に示す直列ギャップと酸化亜鉛素子とを直列接続して無続流化したDC250kV用避雷器を電源開発株式会社北本連系函館変換所⁷⁾に納入した。更に、昭和58年には電源開発株式会社と共同でサイリスタバルブ保護用ギャップなし酸化亜鉛避雷器を開発し、図 3 に示すように電源開発株式会社佐久間周波数変換所に設置⁸⁾して、1 年間の実系統試験を行ない、実用性能を検証した。

表 1 日立製直流送電用避雷器の変遷とサイリスタ直列数の関係
避雷器を高性能化することにより、サイリスタ使用直列数を約15%低減させている。

適用	DC125kV	DC250kV	DC125kV	DC500kV
	東京電力株式会社 新 信 濃 変 電 所	電源開発株式会社 函 館 変 換 所	電源開発株式会社 佐久間周波数変換所	UHV-DC作業会
項目				
サイリスタ直列数 (125kV バルブ)	120 (100%)	114 (95%)	102 (85%)	—
構 成	直列ギャップ + SiC (特性要素)	直列ギャップ + ZnO (特性要素)	ギャップなし ZLA	ギャップなし ZLA
				
備 考	1. 続流あり (直流遮断が課題) 2. 放電特性あり (直列ギャップの放電電圧時間特性が課題)	1. 続流なし 2. 放電特性あり	1. 続流なし 2. 放電特性なし 3. 高寿命酸化亜鉛素子の開発	1. 続流なし 2. 放電特性なし 3. 高寿命酸化亜鉛素子の開発

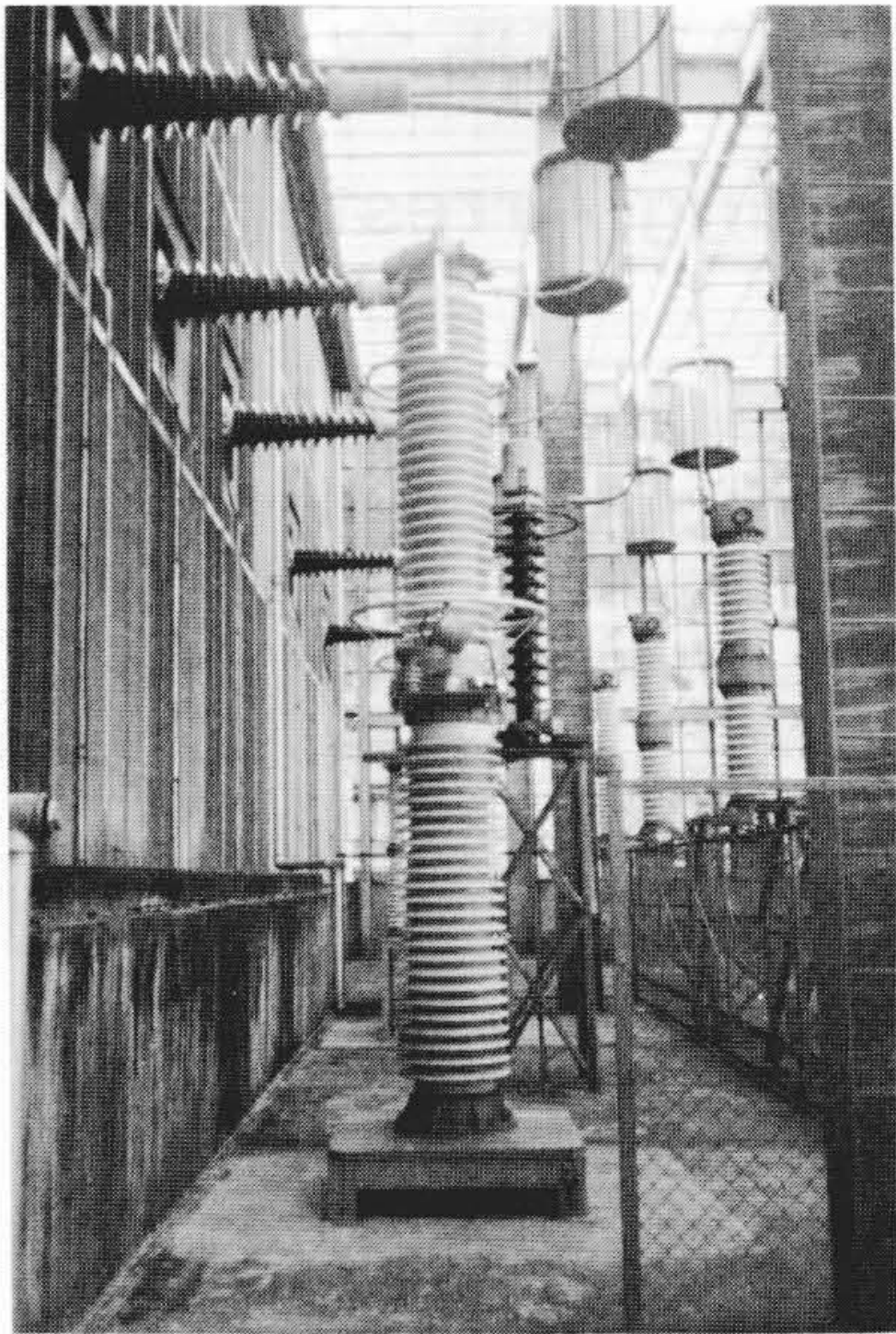


図 3 DC125kV用直流避雷器の外観 実系統で運転中のサイリスタバルブ端子間ZLA(酸化亜鉛避雷器)の外観を示す。制限電圧320kV at 5kA, 印加電圧235kVp(=110√2×1.12×1.35), AC過電圧耐量1.5pu×1秒

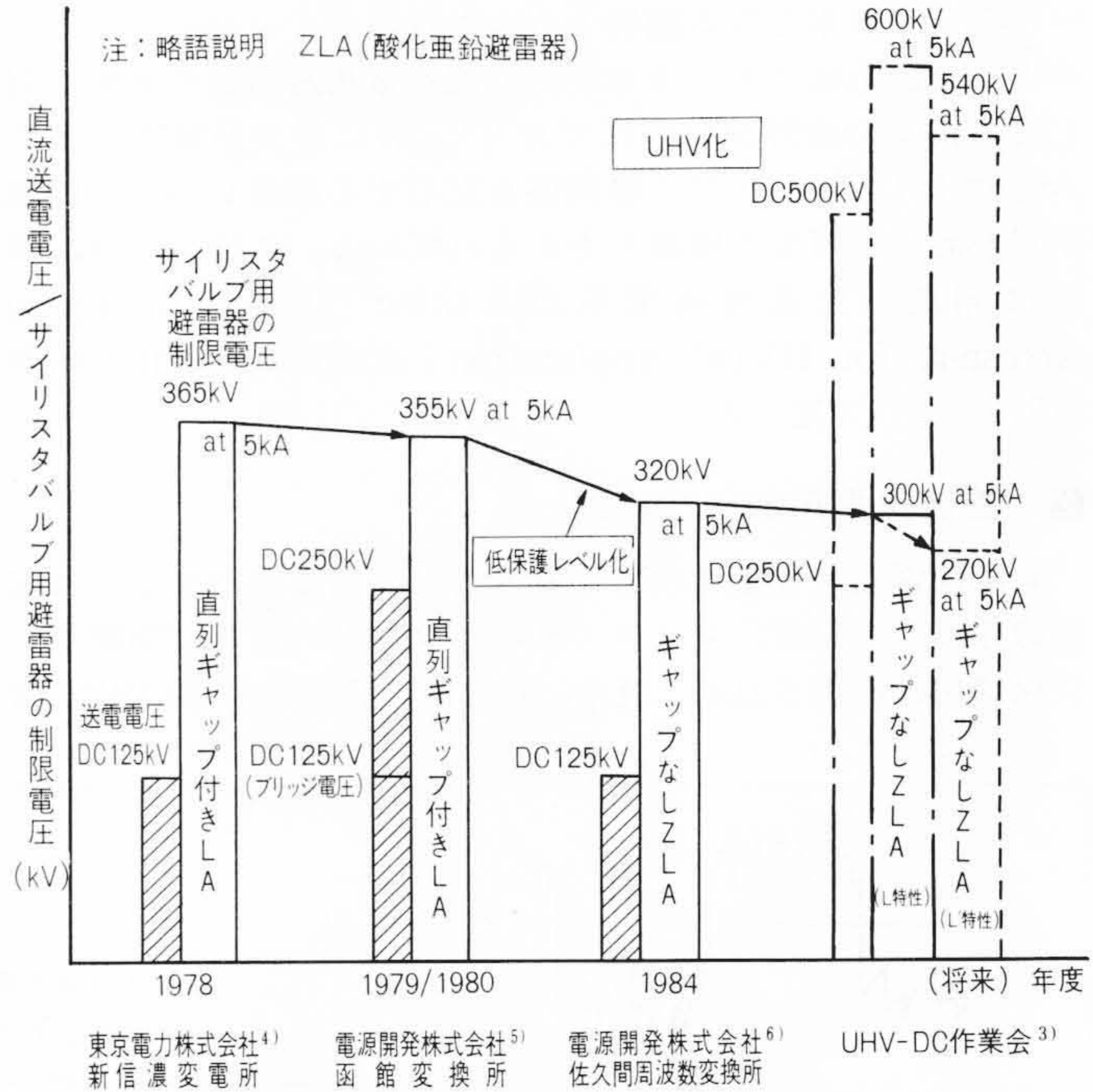


図 4 直流送電用サイリスタバルブ用避雷器の制限電圧の推移
避雷器の高性能化により、制限電圧を365kVから320kV(約87%)に低減した。

図 4 に、サイリスタバルブ用避雷器の制限電圧の変遷を示す。高性能化により制限電圧を365kVから320kV(約87%)に低減することが可能となり、この効果としてサイリスタの使用直列数を約15%低減することができた。

2.3 直流送電用ZLA開発の技術課題

直流送電用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接続して構成される。代表的特性として図 5 にサイリスタバルブ用125kV ZLAの電圧-電流特性を示す。所要の制限電圧特性を得るためには、酸化亜鉛素子の平坦率の低減、課電寿命特性の改善、過電圧耐量、放電耐量の向上が必要となる。特に直流送電用ZLAには交流波形と異なり、転流動作に伴う複雑な波形が印加され、特に低減絶縁レベルの場合、零力率運転時には動作開始電圧 V_{Nm_A} (避雷器に Nm_A 通電したときの端子電圧、通常 $N=1\sim10$) を超える場合があり、課電寿命特性を改善する必要がある。

一方、一定直流電圧を印加すると図 6 に示すように従来の

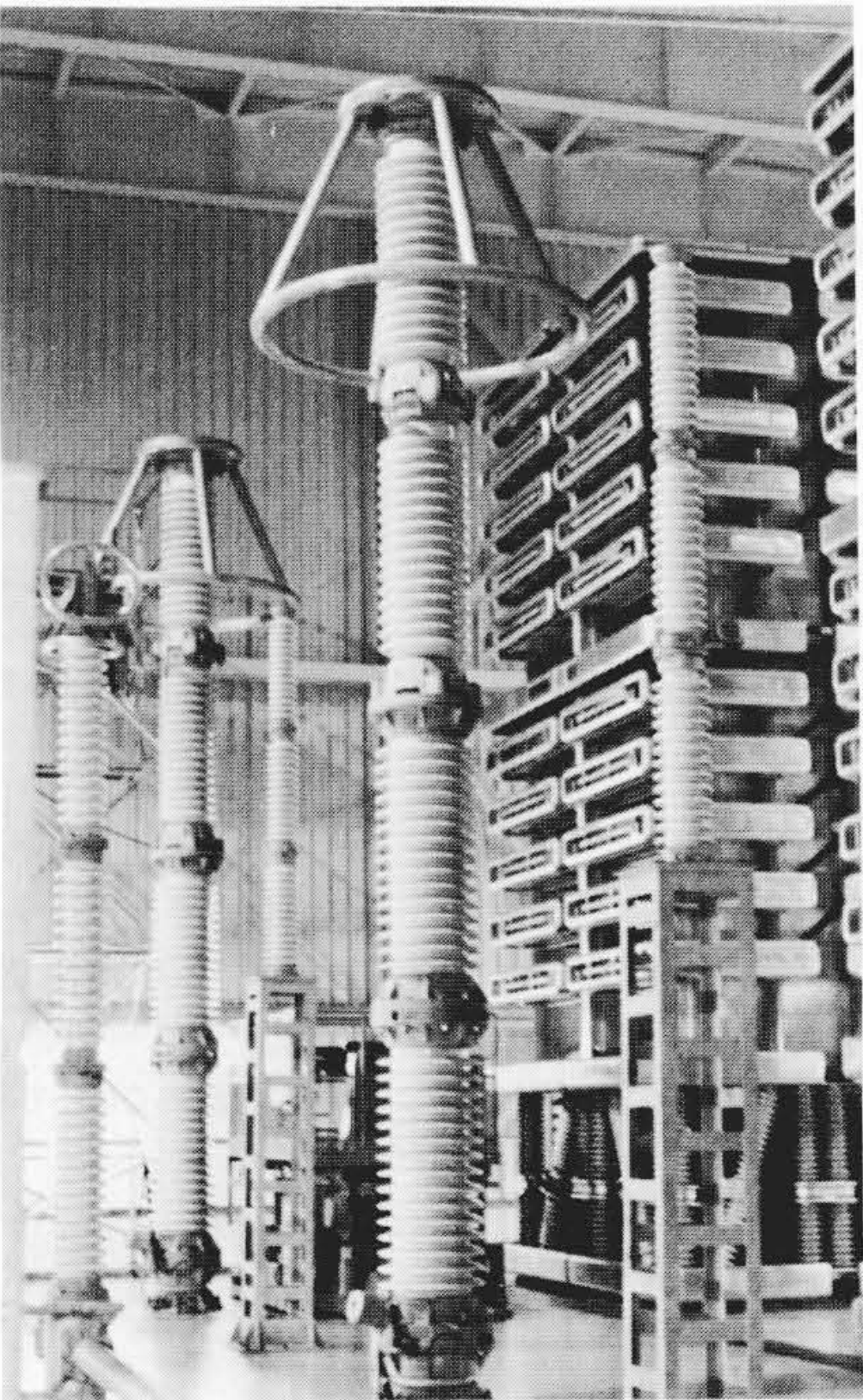


図 2 DC250kV用直流避雷器の適用例 電源開発株式会社函館変換所納め直流避雷器の適用状況を示す。

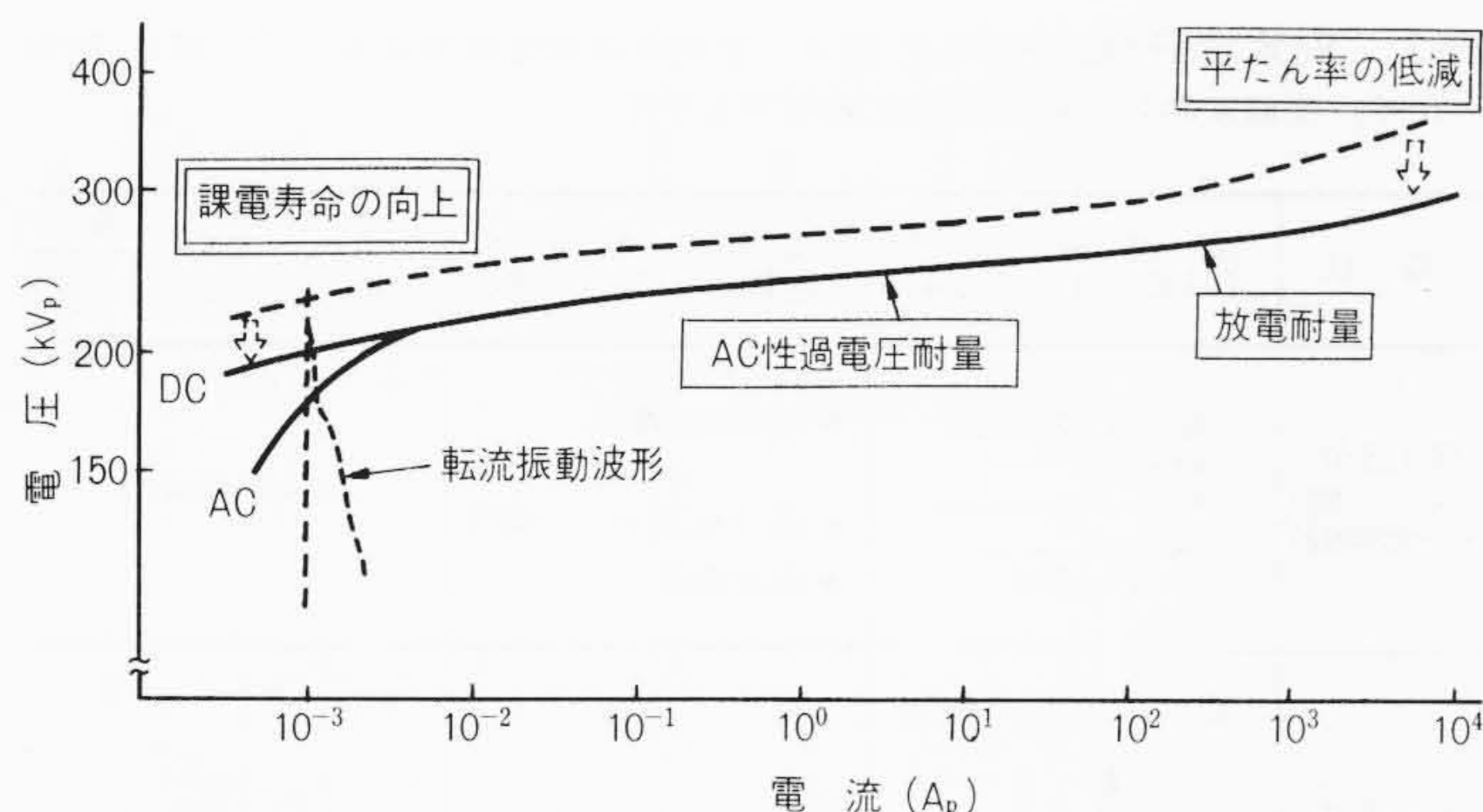


図5 サイリスタバルブ用直流125kV ZLAの電圧-電流特性 直流ZLAでは、交流用に比べ、複雑な波形が印加され、 V_{NMA} を超える場合があり、課電寿命が厳しくなる。また、保護レベルが低いことから平たん率の向上がいう必要になる。

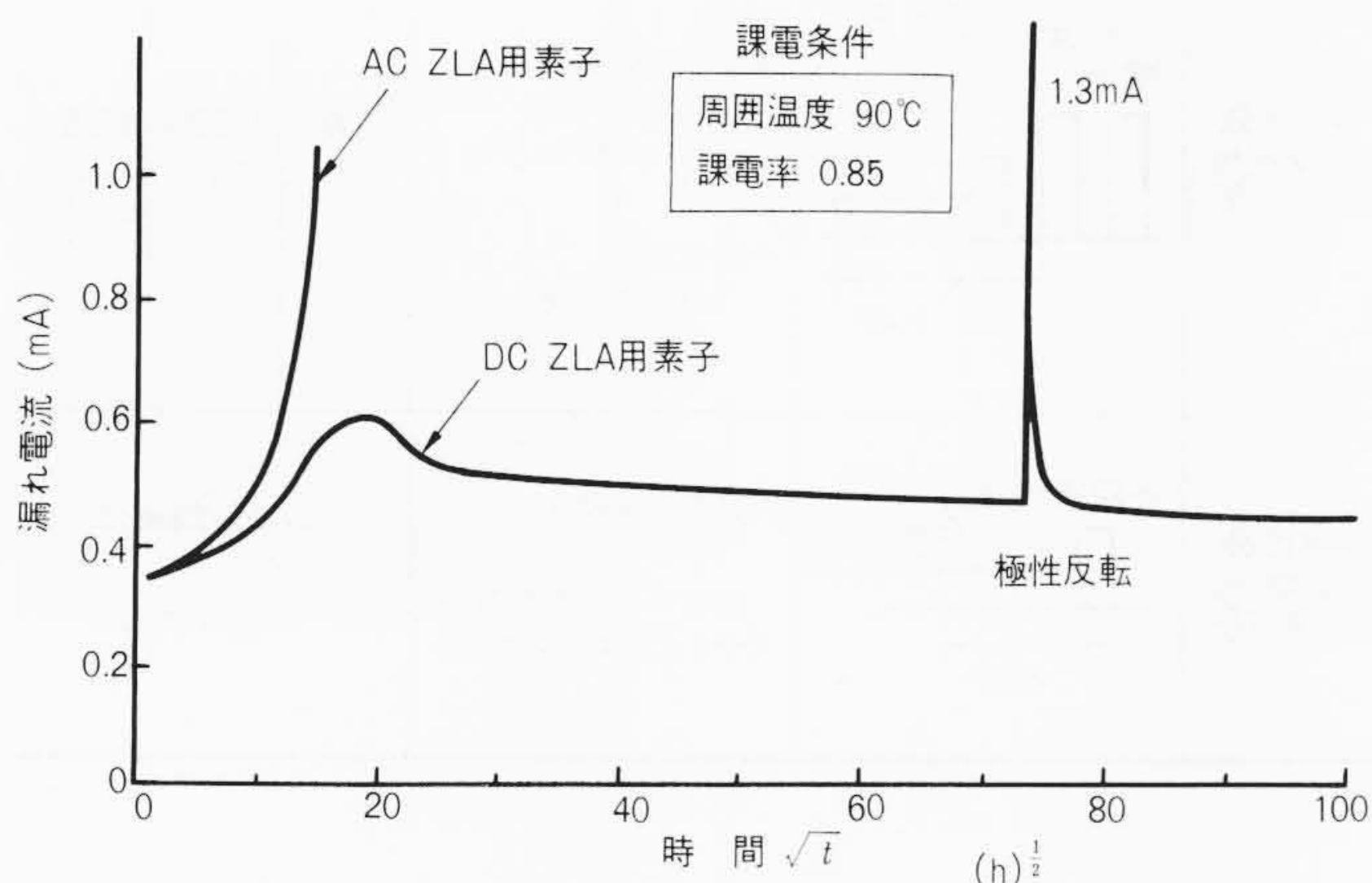


図6 酸化亜鉛素子の漏れ電流特性と時間の関係 交流用素子を直流課電下で使用すると、漏れ電流が急増し熱暴走に至るが、直流用素子では漏れ電流は安定し寿命的に耐える。

交流ZLA用素子では漏れ電流がしだいに増大し、最終的に熱暴走して直流用には適さないものもある。したがって、直流課電に強い酸化亜鉛素子を開発することが大切である。これらの条件を考慮し、直流送電用酸化亜鉛避雷器の開発に際しての技術的課題解決の過程をまとめたものを図7に示す。

3 直流送電用ZLAの基本特性と動作責務条件

3.1 基本特性

直流送電用ZLAの主要素は酸化亜鉛素子である。この酸化亜鉛素子は酸化亜鉛を主成分とし、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を添加して混合、造粒、成形後焼成したセラミックスである。直流用素子は、これら添加物に加え微量の特殊の金属酸化物を添加し、更に生産技術の改善により課電寿命特性の向上、平たん率の低減、処理エネルギーの向上を図っている。

このうち寿命特性の向上には境界層のガラス化を考え、酸素イオンの脱着防止を図ることが大切である。また、平たん率低減を実施する際、素子単体の平たん率の改善を図るとともに、これら素子を並列接続して素子1枚当たりの通電電流密度を下げることで平たん率を更に低減できる。図8に酸化亜鉛素子の並列数と平たん率の関係を示す。ただし、並列数の増加に伴い平たん率の低減は飽和していく傾向にある。一方、並列使用時の課題として、優れた非直線抵抗特性からくる電流の不均衡の問題があるが、これは動作開始電圧 V_{NMA} の管理値を、例えば±0.5%以内に設定することで分流比を±

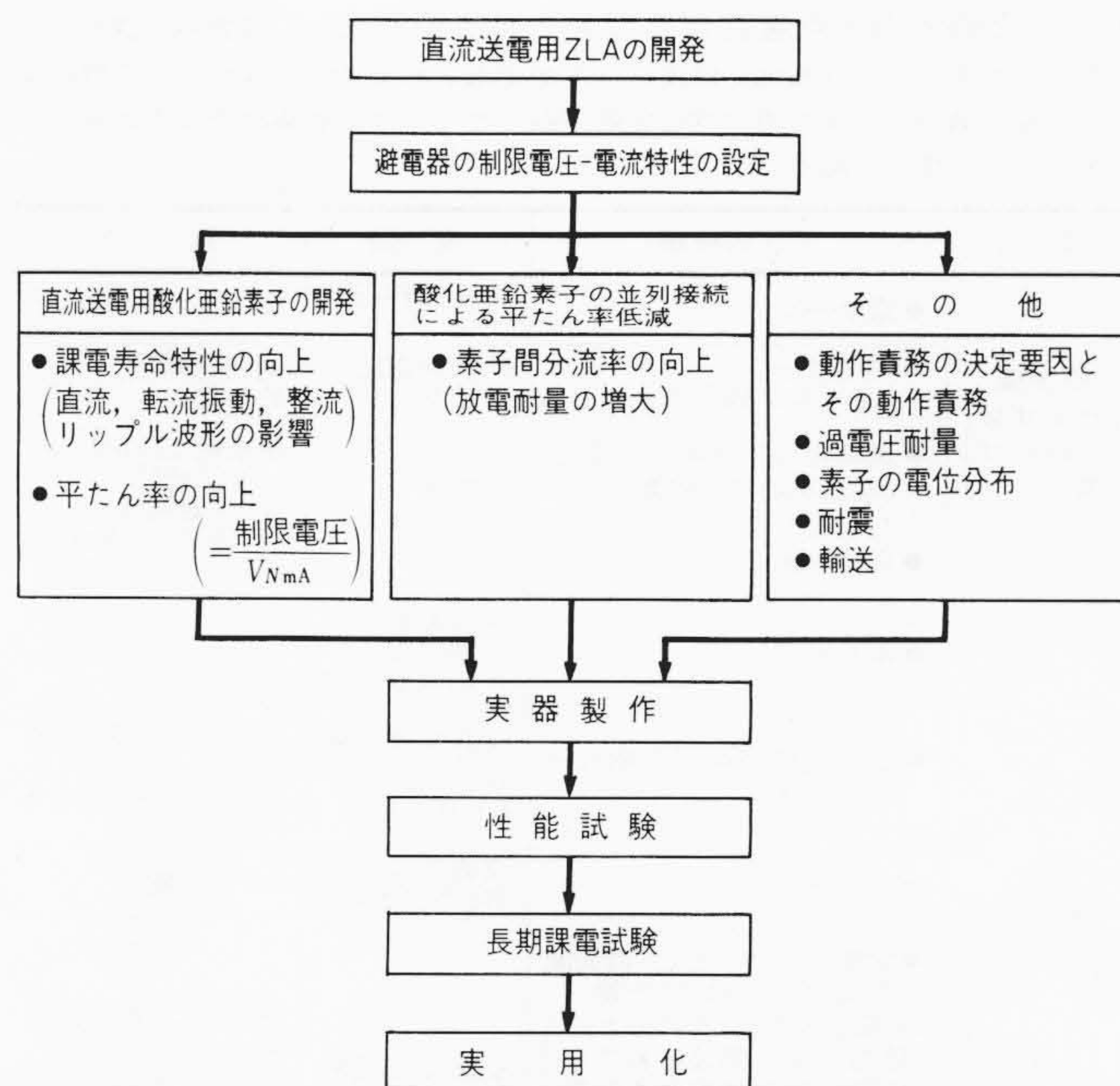


図7 直流送電用ZLAの開発課題 直流送電用ZLAの開発項目及び課題を示す。

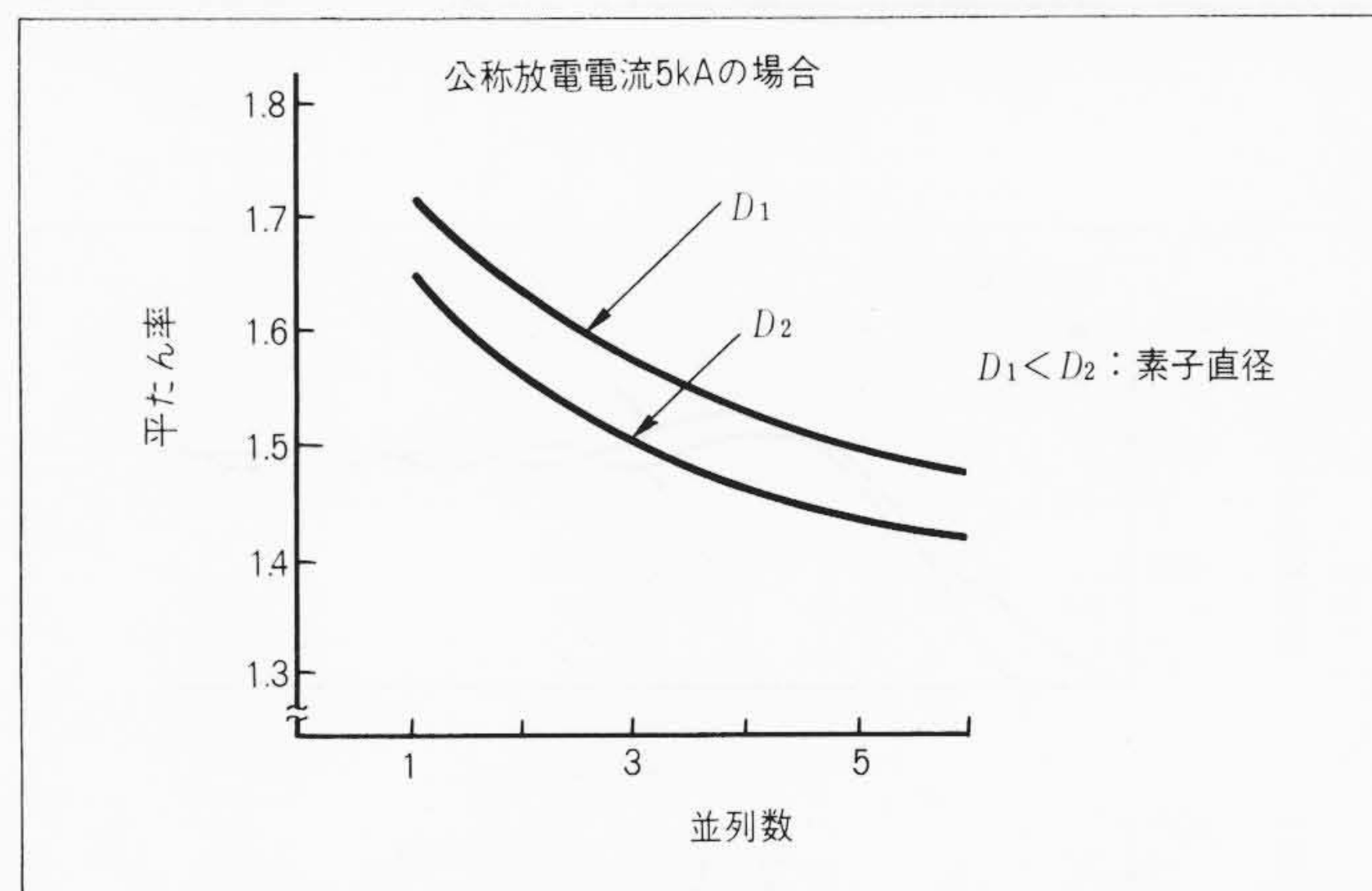


図8 ZLAの素子並列数と平たん率 素子の並列数を増やすことにより、平たん率の低減が図れる。

20%以内に収めることができる。

3.2 動作責務条件

交直変換所用避雷器に印加される過電圧を表2に示す。これらの避雷器には交流避雷器と同様の雷及び開閉サージに対する責務だけでなく、直流系統特有の動作責務が課せられる。これらの責務条件はシミュレータ解析やデジタル解析で求められる。

交直変換器の異常動作時、例えば変換器の転流失敗、パルス喪失、逆変換器側開放時の全電圧起動などにより過電圧が発生する。この一例として図9に全電圧起動時のデジタル解析波形を示すが、逆変換器側の直流線路用避雷器が吸収すべきエネルギーはDC500kV、線路長600kmを想定して計算すると約1,600kJに達する。

一方、系統の運用条件で潮流を定格の約10%程度に絞った場合、送電電力急減によるAC性過電圧が系統によっては発生することがある。この際サイリスタバルブ用直流ZLAは印加される複雑な転流振動電圧に耐えねばならない。この責務は過電圧値と継続時間で示すことができる。この種の過電圧は制御保護によって抑制することができ、また継続時間を短縮

表 2 交直変換所用避雷器に印加される過電圧 避雷器に課せられる責務を示す。このうち低い保護レベルが要求されるサイリスタバルブ用には AC 性過電圧責務が、また直流線路側避雷器にとっては、各事故時での処理エネルギーが特に重要である。

種 別	電圧の種類	要 因	備 考
交流側 (サイリスタバルブ用)	●雷サージ	変圧器移行サージ	—
	●開閉サージ (フィルタ投入時)	開閉過電圧 地絡サージ	過渡過電圧 約1.3pu
	●送電電力急減時の過電圧 (潮流を約10%程度に絞った場合)	過電圧 (AC性)	解析例：250kVケーブル系統 ⁸⁾ AC性過電圧 (110kV×1.5pu×1秒)
	●負荷遮断		
直流側 (直流線路用)	●雷サージ	逆せん絡 汚損による がい管せん絡	—
	●逆変換器バルブの転流失敗	交直変換器動作 (不具合時)	解析例 ⁹⁾ ：500kV架空線 線路充電電圧 1.4 pu
	●パルス喪失	交直変換器動作 (不具合時)	AC性過電圧
	●全電圧起動(逆変換器側開放時)による線路充電 (逆変換器側が、なんらかの理由により開放されている際に順変換器側を起動すると、直流リアクトルと線路対地キャパシタンスによって決まる充電電流によって直流線路を充電し、過電圧を発生させる。)	交直変換器動作 (不具合時)	解析例：500kV架空線 図9に避雷器の電圧電流、処理エネルギーの解析例を示す。

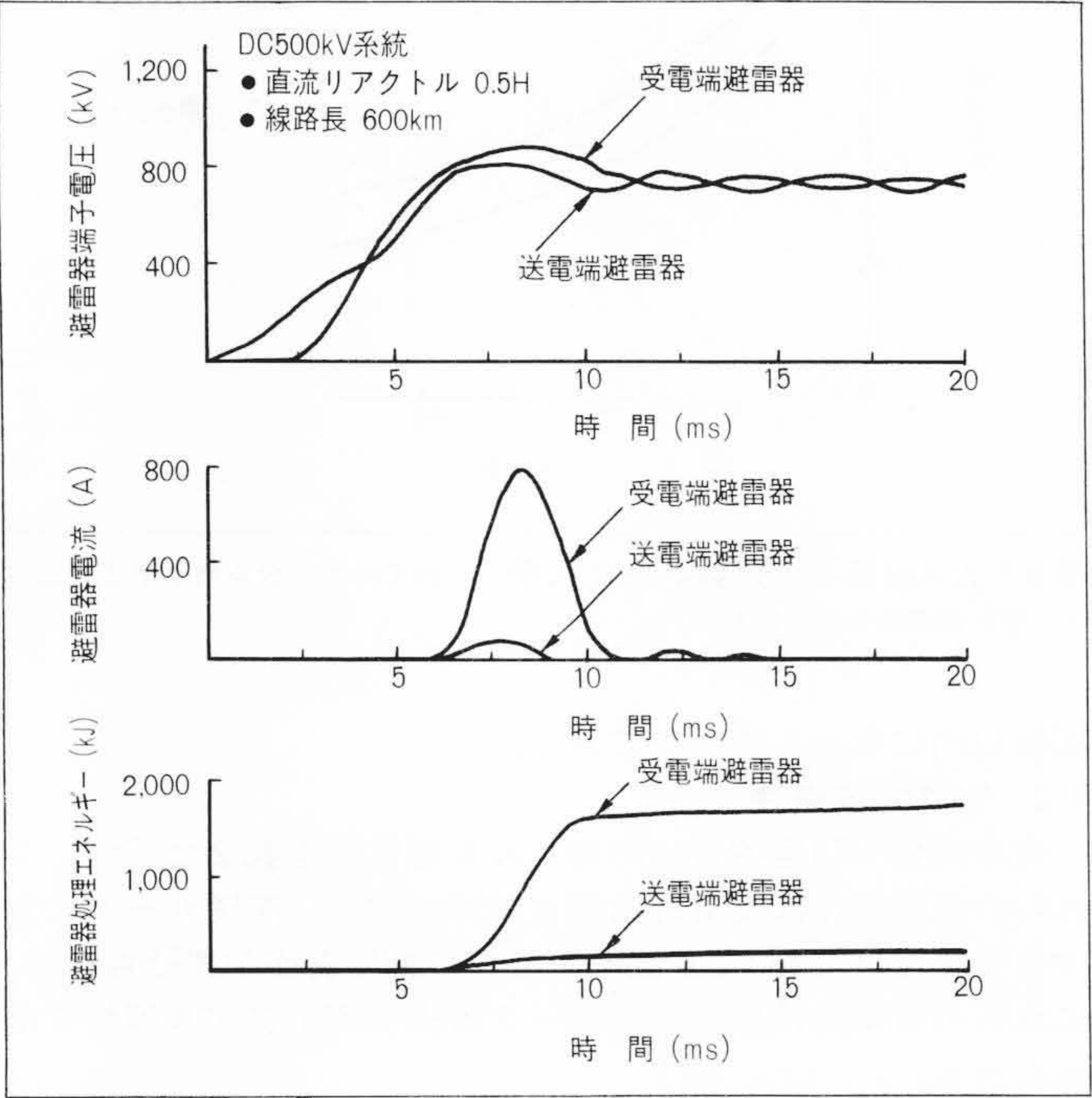


図 9 全電圧起動時の避雷器動作責務の解析例 直流送電電圧500 kV、送電線路長600kmの開放線路充電時の過電圧、直流線路用避雷器の電流及び注入エネルギーの解析例を示す。

することも可能である。過電圧値は交流系統の短絡容量が小さい場合1.4～1.5pu(1pu＝運転電圧)継続時間は0.1～1秒の範囲に制御され得るものと考えられる。

4 直流送電用ZLAの主な試験項目及び結果

直流送電用ZLAの主な試験項目として、動作開始電圧試験、漏れ電流試験、部分放電試験、動作責務試験、制限電圧試験及び安定性評価試験がある。

表 3 安定性評価試験の比較 交流用避雷器規格JEC-217-1984に対応させて、交直変換所用避雷器の試験項目を示す。

項 目	交 流 避 雷 器 (JEC-217-1984)	交 直 変 換 所 用 避雷器の条件比較	供 試 器		
			DC125kV	DC250kV	DC500kV
第1区分 (課電劣化模擬)	商用周波電圧 	●商用周波電圧 ↓ ●AC+転流サージ電圧 ●直流電圧	ZLA素子単体		
第2区分 (サージ劣化模擬)	雷インパルス電流 	左記に同じ	5kV分割単位		
第3区分 (熱安定性試験)	商用周波電圧E ₁ 方形波電流 商用周波電圧E ₂ 	商用周波電圧E ↓ ●交流+転流振動電圧 (零力率運転) (サイリスタバルブ用) ●直流電圧 (直流線路用)	制限電圧 12kV	制限電圧 12kV	制限電圧 12kV (600×5kV/250)
第4区分 (過電圧耐量試験)	商用周波電圧E ₁ 商用周波電圧E ₂ 	商用周波電圧 ↓ 交流+転流振動電圧 (サイリスタバルブ用)	5kV分割単位 (上記に同じ)		

このうち安定性評価試験は、交流のZLA用に新しくJEC-217-1984で制定されたものである。この試験は使用期間中に種々の電氣的ストレスを課せられたZLAが、系統から要求される責務を果たしても安定であることを検証するために考案された試験法であり、避雷器の性能を評価するために重要なものである。表3に交流用避雷器と交直変換所用避雷器とを対比させた試験方法と供試品の条件を示す。

一方、サイリスタバルブ用ZLAでは、バルブ端子間電圧がDC250kVの場合でも、避雷器はDC125kV用ZLAの2段直列接続で構成できることから、同一分割区分の試験で評価することができる。供試品として5kV分割単位ZLAを使用した。このZLAの制限電圧は5kV分割単位で11.6kVであり、UHV-DCサイリスタバルブ用ZLA(L特性)に要求される放電電流5kAで600kVの仕様を満足している。

4.1 安定性評価試験

安定性評価試験を第1～4区分に分けて実施した。

(1) 第1区分(課電劣化模擬試験)

AC用と同様、温度と電圧の加速係数を基準にしてDC用について評価した。例えば、酸化亜鉛素子の温度-ワット損を求めると図10に示すように、通常の使用状態ではACのワット損に比べてDCのほうが少ないが、周囲温度が約130℃以上になるとDCのワット損が大きくなるので、動作責務時の温度上昇及び熱的安定性の確認が大切である。

なお酸化亜鉛素子の印加直流電圧の極性を反転すると、図6に示したように過渡的に漏れ電流が増大するが、その後徐々に元の状態に回復する。

一方、サイリスタバルブ用直流ZLAには転流振動による複雑な波形が印加されるので、図11に示す実規模の5kV直流送

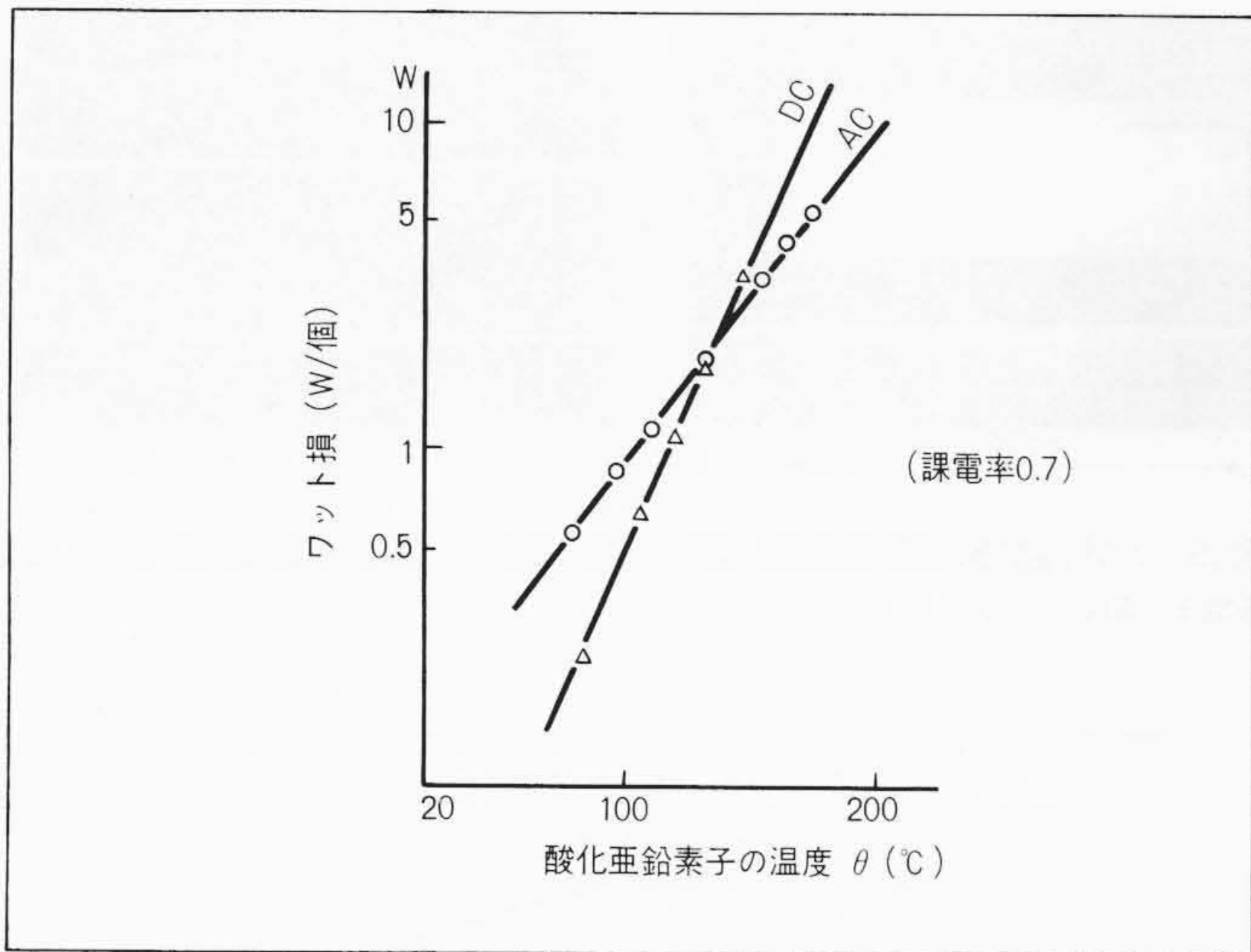


図10 酸化亜鉛素子の温度-ワット損の関係 周囲温度が約130°C以上になると、ACよりもDCのほうがワット損が大きくなる。

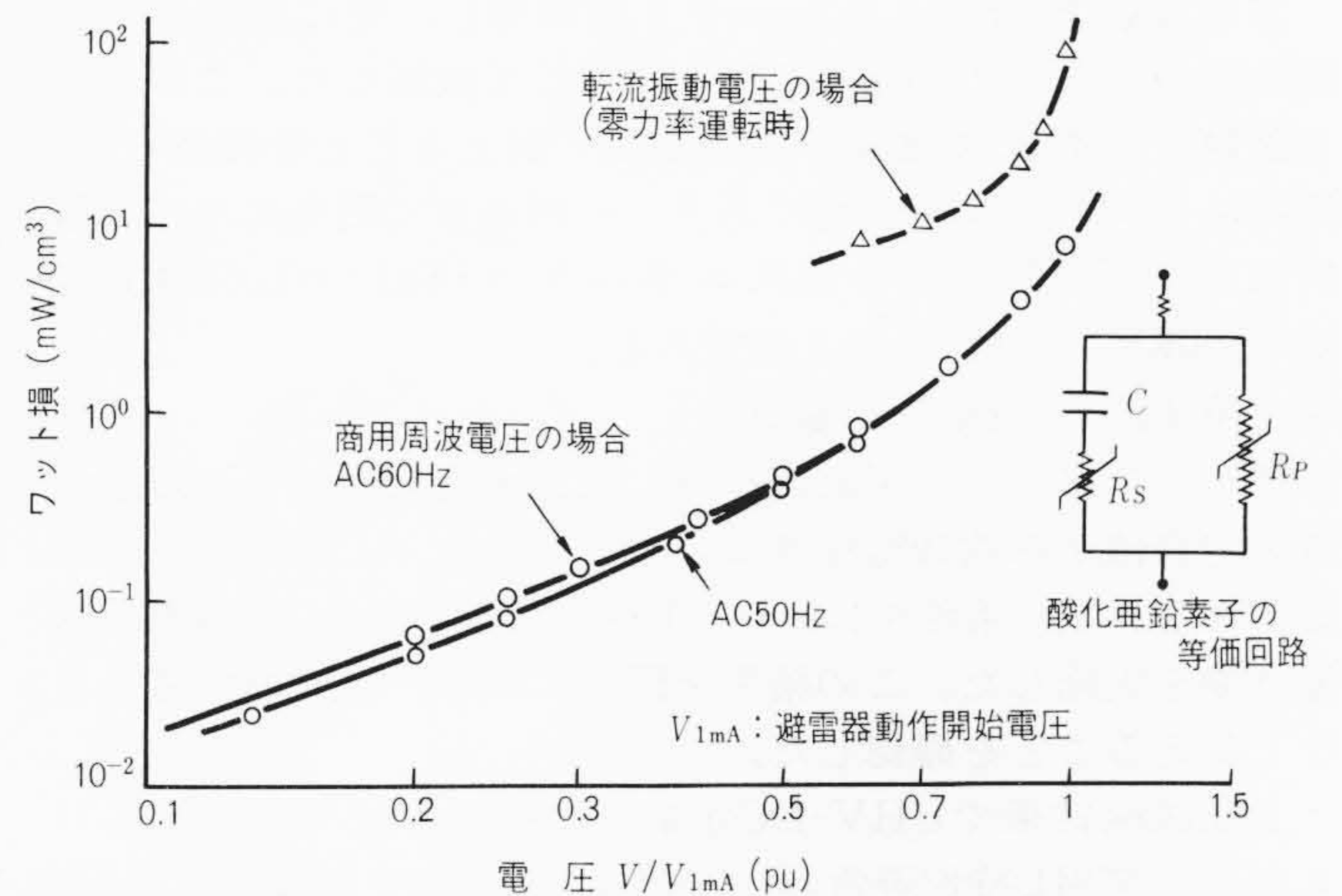
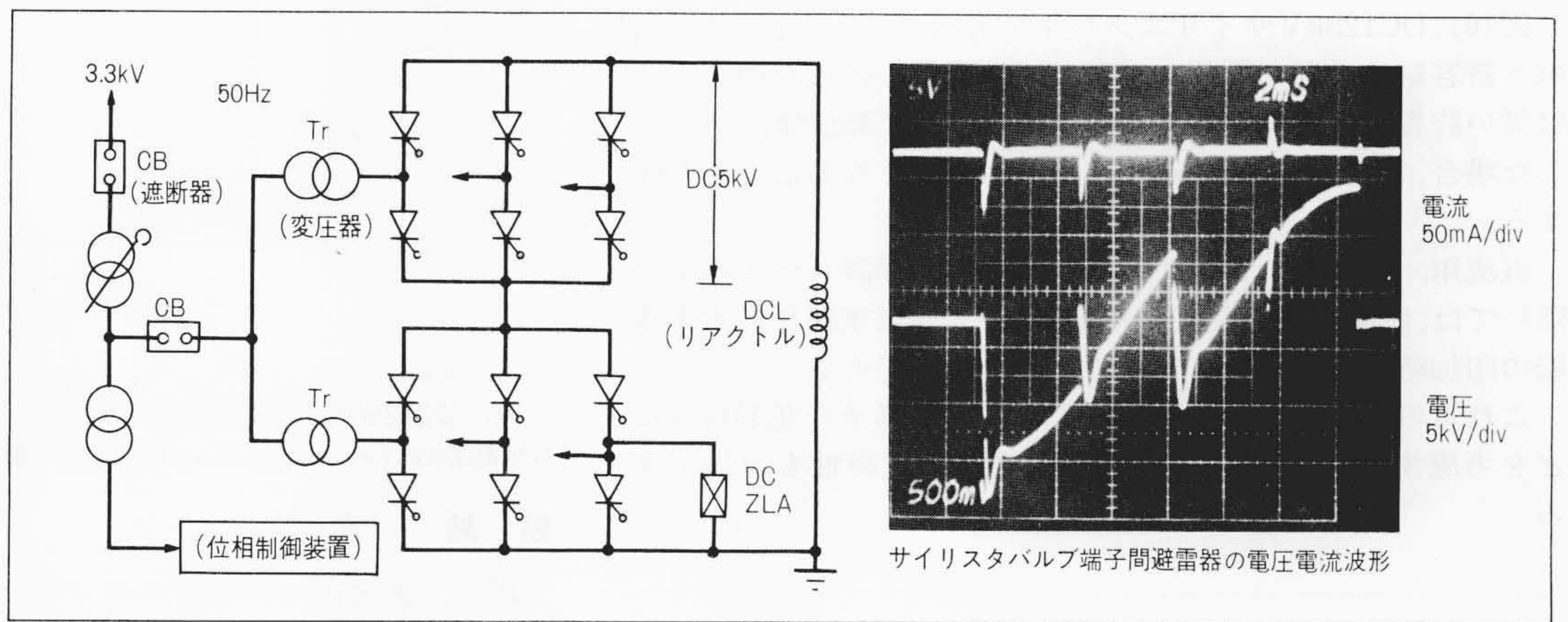


図12 直流ZLAのワット損 商用周波50/60Hz及び転流振動電圧下でのワット損を示す。転流振動電圧時にはワット損が増える。

図11 DC5kV 直流送電シミュレータでのサイリスタバルブ端子間避雷器の電圧電流波形 実際のサイリスタバルブを使用し、避雷器の電圧、電流特性を求める実験回路を示す。



電シミュレータを用いて避雷器のロット損を測定した。この結果を図12に示す。商用周波電圧印加時に比べて転流振動電圧、特に零力率運転時にはワット損が大きくなるので注意を要する。次に、直流ZLAの酸化亜鉛素子の課電寿命予測に際して、実波形を印加して試験することが望ましいが、試験設備条件によって困難である。そこで、単純な交流及び直流波形に転流サージを重畳した課電寿命試験電源を製作し、図13

に示す波形で課電寿命試験を実施した。試験は周囲温度85°C、課電率(=転流振動を含まないときの印加電圧波高値/ V_{1mA})0.85で実施し、交流用素子と同様な課電寿命推定を行ない、周囲温度40°Cで30年以上を確認した。

(2) 第2区分(サージ劣化模擬試験)

従来の交流用と全く同様に試験し、65kA ($4 \times 10\mu s$) を通電して劣化のないことを確認した。

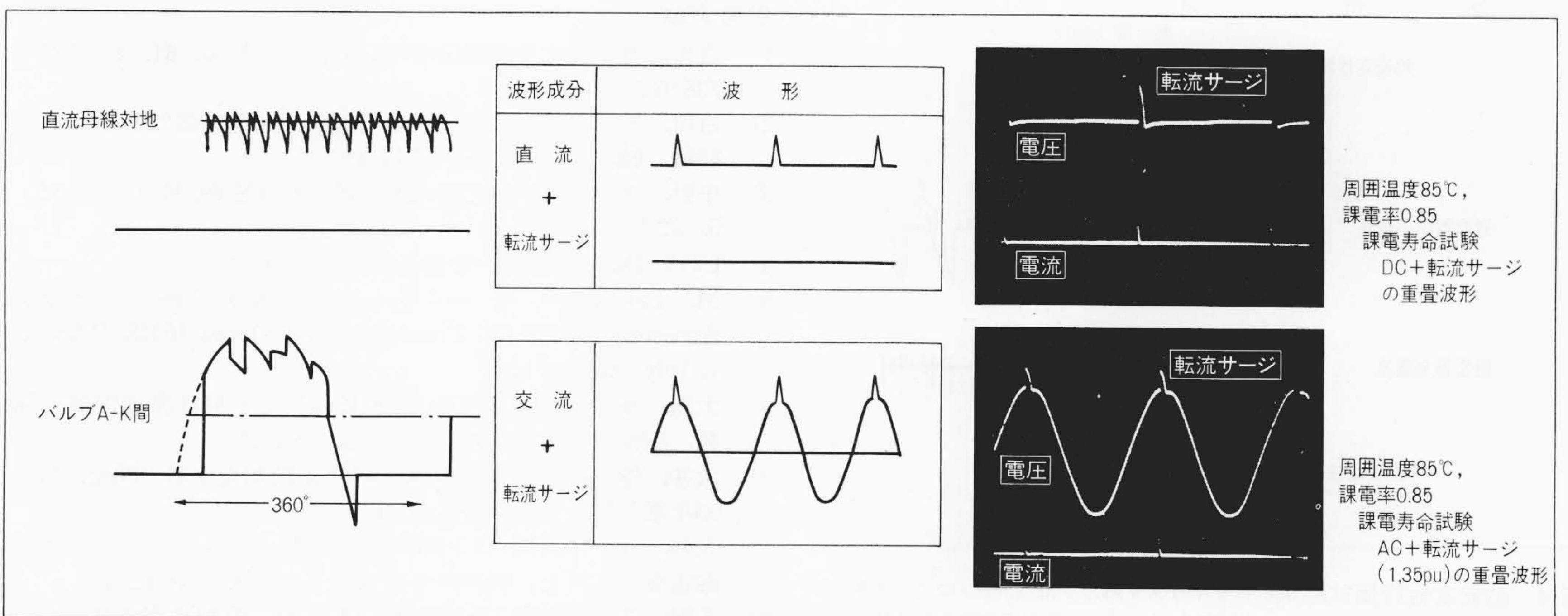


図13 転流振動条件下での課電寿命試験 DC, AC波形に転流振動パルスを重畳し、加速試験を実施して寿命予測を行なう。

(3) 第3区分(熱安定性試験)

方形波電流 $2,500\text{A} \times 2\text{ms}$ を2回印加し、更に実際の交直変換器の零力率運転時の波形を印加して検証した。この結果を図14に示すが、熱暴走することなく耐えることを確認した。処理エネルギーは約 50kJ であり、一例として図9に示した解析波形の 5kV 単位の注入エネルギー $16\text{kJ} (=1,600\text{kJ} \times 5\text{kV}/500\text{kV})$ に対して約3倍である。

(4) 第4区分(過電圧耐量試験)

サイリスタバルブ用直流ZLAには、系統条件にもよるが潮流を定格値から約10%程度に急減した場合、AC性過電圧が印加される。この条件を $1.5\text{pu} \times 1\text{秒}$ と想定してAC性過電圧耐量試験を実施した。この結果を図15に示す。熱破壊することなく耐えることを確認した。

上記試験結果でUHV-DC作業会で提案されているサイリスタバルブ用L特性避雷器⁴⁾(制限電圧 5kA で 600kV 以下)を満足することからUHV-DC(500kV 級)避雷器の開発見通しを得た。

4.2 その他

図16にDC125kVサイリスタバルブ用ZLAのAC性過電圧倍数と許容継続時間の関係を示す。AC性過電圧倍数が高くなるに従い許容継続時間が短くなる。これは更に制限電圧を低くした場合、ますますAC性過電圧耐量が厳しくなることを意味する。

直流用、特にサイリスタバルブ用ZLAの保護レベル選定に際しては、制限電圧と使用系統電圧のAC性過電圧や零力率運転の印加時間を考慮して定めることが大切である。

これらの条件及び交流系統電圧の変動、素子の並列構成などを考慮すると、UHV-DC作業会提案のL'特性も可能である。

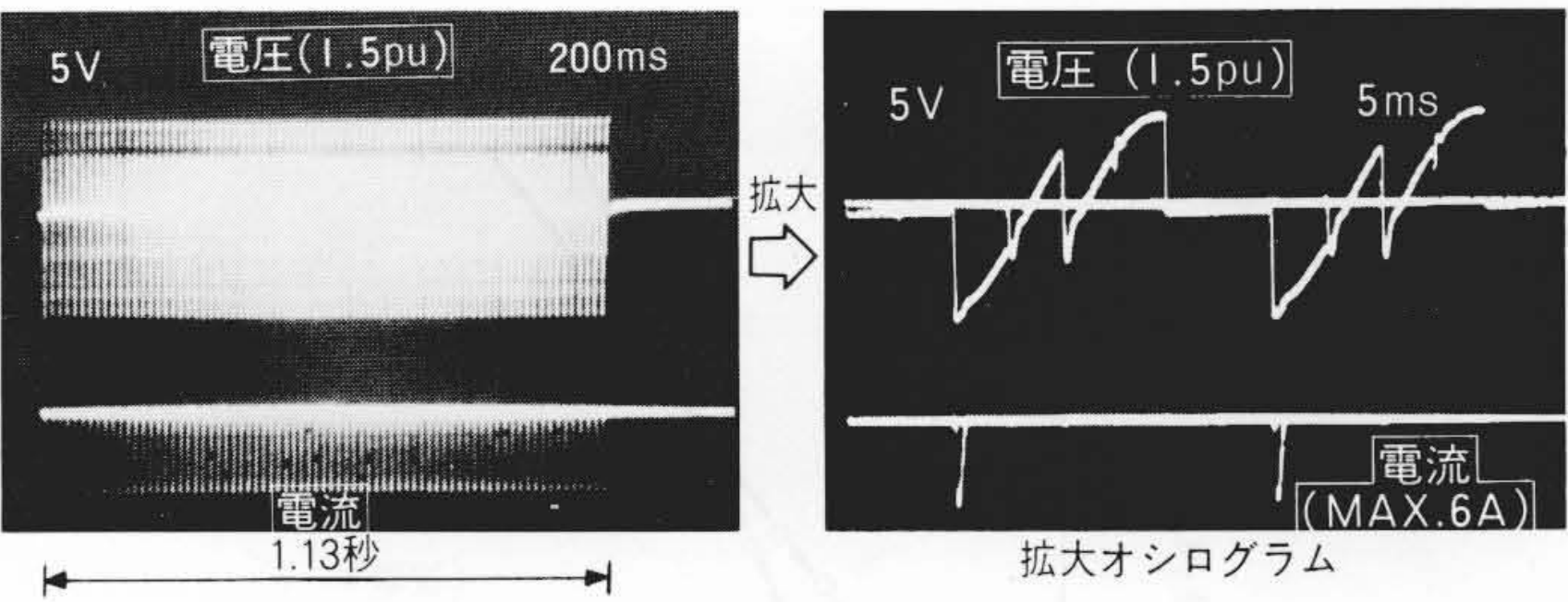


図15 AC性過電圧耐量試験(零力率運転) 零力率運転状態でのAC性過電圧 $1.5\text{pu} \times 1\text{秒}$ に耐えている。

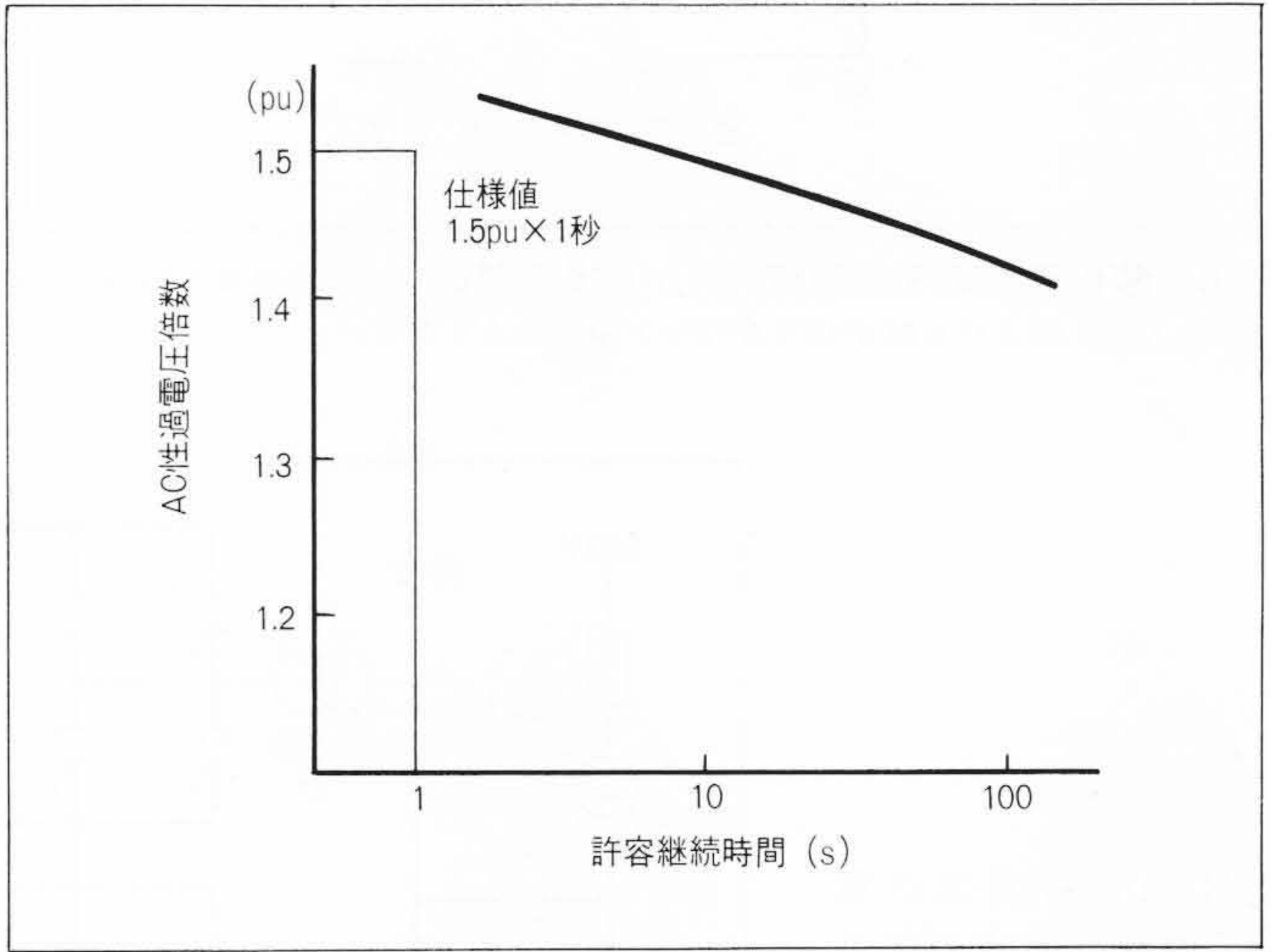


図16 DC125kV ZLAのAC性過電圧倍数と許容継続時間の関係 制限電圧 320kV at 5kA , DC ZLAのAC過電圧耐量の許容時間と倍数の関係を示す。

5 結 言

以上、直流送電用避雷器のうち、特にサイリスタバルブ用直流ZLAの開発上の課題及び試験結果を主体に述べた。従来の直列ギャップ付き直流避雷器に比べて、直流ZLAを適用することは保護レベルの低減、保護特性の安定化、部品点数の縮減などにより、直流送電の絶縁レベルの低減と信頼性の保持に大きく寄与するものと考ええる。

終わりに、直流送電用避雷器の開発に際し、種々御指導をいただいた財団法人電力中央研究所、東京電力株式会社及び電源開発株式会社の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, 10, 733~738(昭54-10)
- 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) 中野, 外: 最近の酸化亜鉛避雷器と絶縁協調, 日立評論, 65, 5, 327~332(昭58-5)
- 4) UHV DC施設部会, 避雷器作業会(昭60-2)
- 5) M. Takanashi, et al.: Operating Duty Test of Surge Arresters for HVDC Transmission Systems, IEEE, PAS-96, 4, July/August 1977
- 6) 大原, 外: 新信濃変電所納DC125kV系統用直流避雷器の開発, 昭和52年度電気学会全国大会No.1152
- 7) 大井, 外: 函館変換所納DC250kV系統用避雷器の開発, 昭和55年電気学会全国大会No.1033
- 8) 大井, 外: AC110/DC125kV変換所用ギャップレス酸化亜鉛避雷器の実用化, 昭和59年電気学会全国大会No.1204
- 9) 千野, 外: 直流母線A-K間避雷器の線路電荷放電責務, 昭和59年度電気学会全国大会No.1205

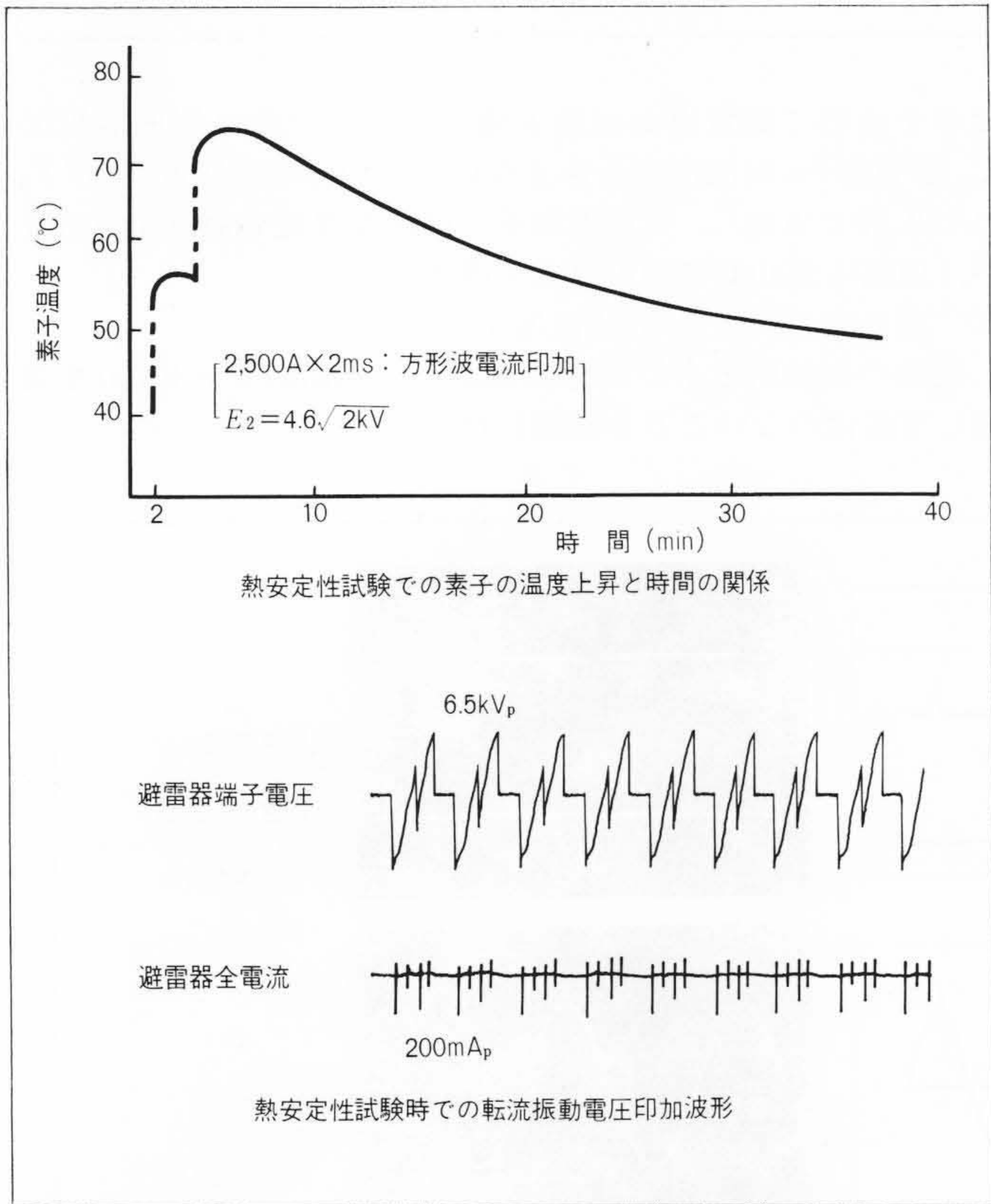


図14 熱安定性評価試験例 サイリスタバルブ用直流ZLAについて第3区分の試験例を示す。実際の転流振動電圧を印加して、熱安定性試験を実施している。