# 1,000 kV用避雷器の開発

高エネルギー耐量素子避雷器

# Development of Zinc Oxide Surge Arrester for 1,000 kV Power System

山形芳文\*

Yoshibumi Yamagata

白川晋吾\*\*

Shingo Shirakawa

Seiichi Yamada 山田誠一\*\*\*\*

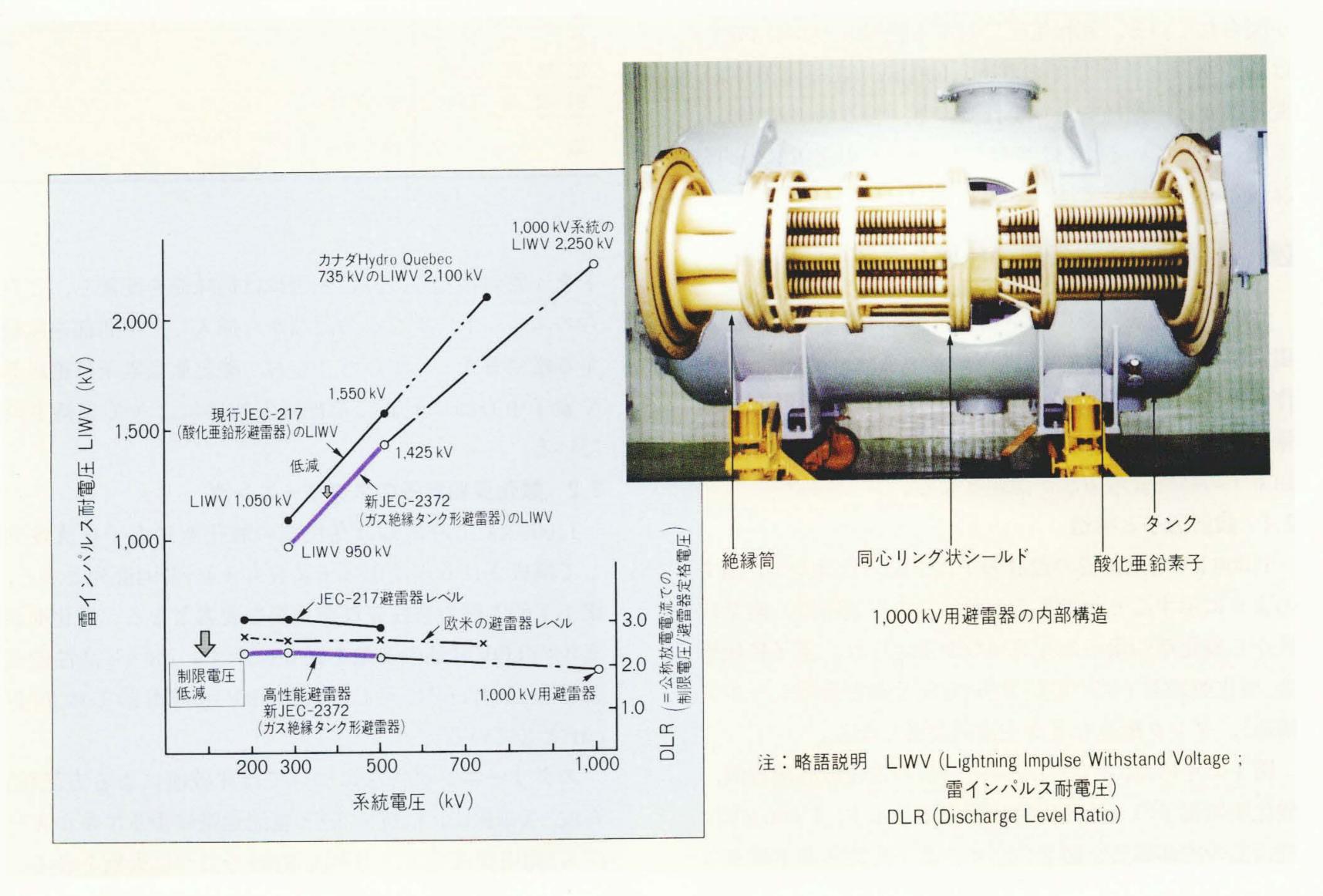
田中晃司\*

Kôji Tanaka

飯村紀夫\*\*\*

Norio Iimura

Jun Ozawa



#### 1,000 kV用避雷器とLIWVの関係

I,000 kV用避雷器の内部構造と系統電圧と絶縁レベルの関係について示す。I,000 kV用高性能避雷器の開発により,I,000 kVガス絶縁開閉装置 でLIWV2,250 kVの絶縁設計を可能にしている。

電力需要に対応して,電源の拡充や広域運営の拡 大が進められ、この一環として1,000 kV送電導入が 検討されている。平成5年には1,000kV実証器の基 本仕様が発表されている1),2)。

1,000 kV用避雷器の開発によって送変電設備の 絶縁レベルを適切な値に設定することができ、1,000 kV送変電機器〔例:GIS(ガス絶縁開閉装置),変圧 器など〕が合理的に実現できるようになってきた。

避雷器の基本特性は制限電圧-電流特性で示され る。避雷器は動作時の制限電圧をできるだけ低くし,

常時の系統電圧に接続して耐えるようにすることに より, 高性能化が進められてきた。このため日立製 作所は,酸化亜鉛素子の小電流領域での課電寿命特 性,TOV(Temporary Over Voltage:短時間過電 圧) 耐量, 開閉サージ放電耐量, 大電流領域の制限電 圧などの改善を実施し、さらにTOV耐量確保のため のスクリーニング方法を確立し、1,000 kV系統の LIWV(雷インパルス耐電圧)選定の根幹をなす絶縁 協調のかなめである1,000 kV用避雷器を開発した。

\* 東京電力株式会社 送変電建設本部 \*\* 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 \*\*\*\*\* 日立製作所 日立研究所 工学博士

#### 1 はじめに

1,000 kV用ガス絶縁タンク形避雷器は、酸化亜鉛素子の課電寿命特性、TOV耐量、開閉サージ放電耐量および制限電圧特性の改善により、表1に示すように現状の500 kV用避雷器、欧米の735 kV避雷器に比較して高性能化が図られている。運転電圧に対する絶縁レベル(LIWV)は約20%以上低減しており、1,000 kV GIS、1,000 kV変圧器などの絶縁レベルを低減でき、機器の小型化に大きく寄与している。ここでは、1,000 kV用避雷器の開発課題と特性について述べる。

# 2 1,000 kV用避雷器の仕様と課題

1,000 kV用避雷器の基本仕様は, 定格電圧826 kV, 制限電圧1,620 kV/20 kA, TOV耐量55 MJ, 開閉サージ動作責務221 μF/14 kVである。TOV耐量が開閉サージ耐量より大きくなっているので, TOV耐量に耐える酸化亜鉛素子の特性管理方法が課題となる。

#### 2.1 設計因子と構造

1,000 kV用避雷器の設計因子は上記の仕様から,図1 のように示すことができる。避雷器の保護特性,耐量特 性から酸化亜鉛素子の直並列数が選定され,素子接続構 造,酸化亜鉛素子間の電圧分担(電位分担制御用シールド 構造),タンク構造などが主設計要素となる。

図1の中には、1,000 kV用避雷器の電位分布解析例、酸化亜鉛素子の4並列16柱配置構造を示す。1,000 kV用避雷器の内部構造を図2に示す。素子配置の基本構造は500 kV用避雷器をベースとし、この500 kV避雷器ユニッ

#### 表 | 避雷器の特性比較

1,000 kV用避雷器が最も運転電圧に対する制限電圧が低く,高性能の特性が求められている。

	_					
	Į	頁	目	現状	欧米	高性能1,000 kV用ガス 絶縁タンク形避雷器
系	統	電	圧(kV)	500	735	1,000
L	1	W	V(kV)	1,425,1,550	2,100	2,250
避定	格	雷電	器 圧(kV)	420	612	826
制	限	電	圧(kV)	870/10 kA	I,560/20 kA	1,620/20 kA
備			考	タンク形	カナダHydro Quebec	タンク形

トを4並列接続し、高電圧側には絶縁筒を配置し、これらのユニットをタンクの両端から挿入し、中間部を接続する組立方式としている。なお、酸化亜鉛素子は絶縁筒や素子中心部に配置した絶縁支持棒によって支持されている。

#### 2.2 酸化亜鉛素子のスクリーニング

1,000 kV用避雷器は高性能の酸化亜鉛素子を直並列して構成される。使用素子個数も4並列294直列と多く、素子1個1個の特性管理が重要な要素となる。酸化亜鉛素子のTOV耐量の変遷を図3に示す。500 kV高性能避雷器の250J/cm³に対し、1,000 kV用避雷器では300J/cm³としている³。

スクリーニング方法については非破壊による方法(超音波, X線撮影, 抵抗分布)と電流通電によるエネルギー注入(商用周波電流, 方形波電流)の二つに大別される。ここでは, 方形波電流通電と通電時の温度分布とを組み

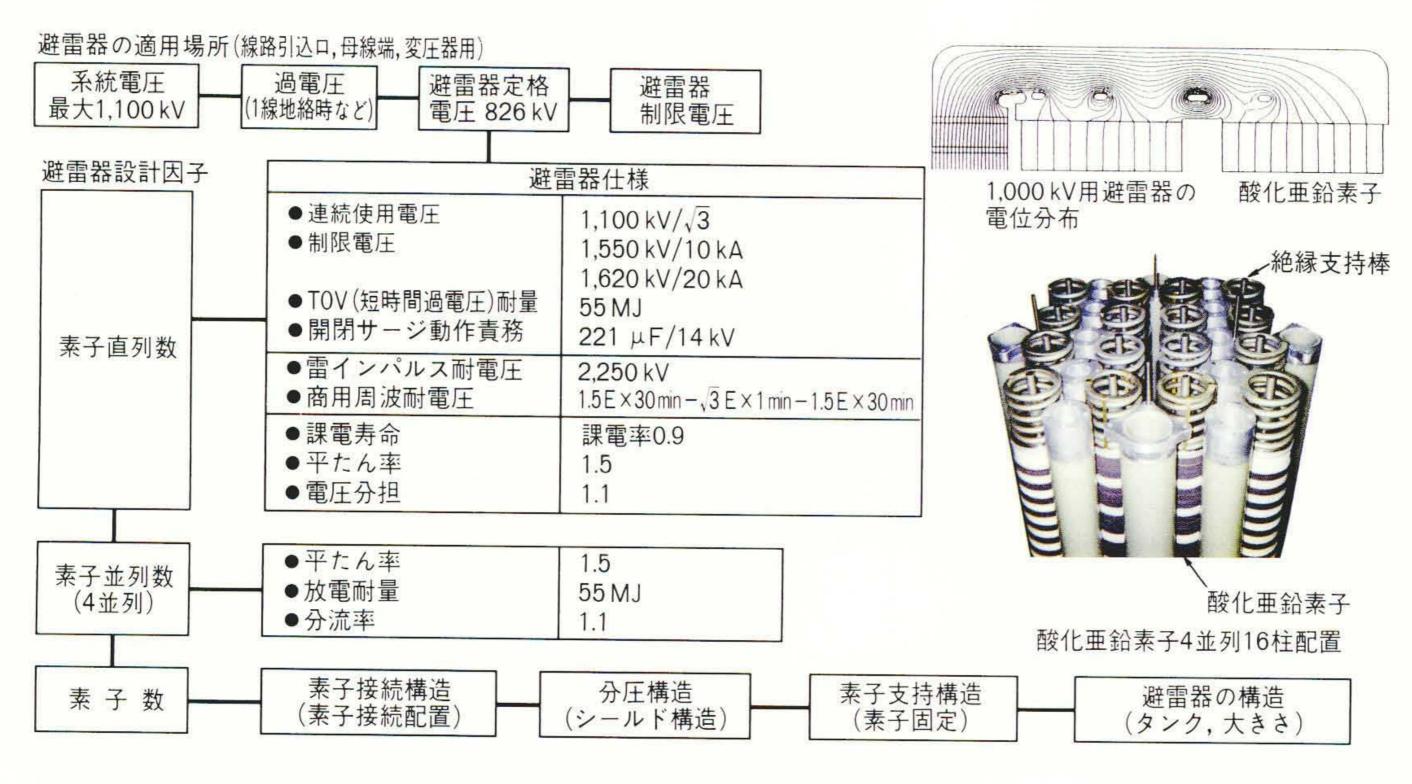


図 I 1,000 kV用避雷器 の設計因子と構造検討 避雷器の仕様と設計因 子,構造設計要素との関連 を示す。

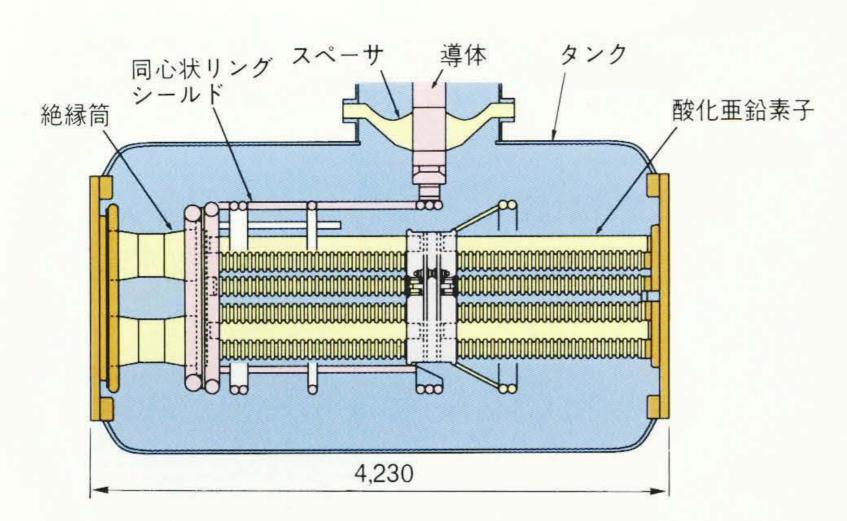


図2 1,000 kV用避雷器の内部構造

酸化亜鉛素子を4並列, 16柱配置して500 kVユニットを構成し, 高電圧側に絶縁筒を配置し、これら500 kVユニットをタンク両端か ら挿入して中間で接続し、電位分担は同心状リングシールドによっ て行っている。

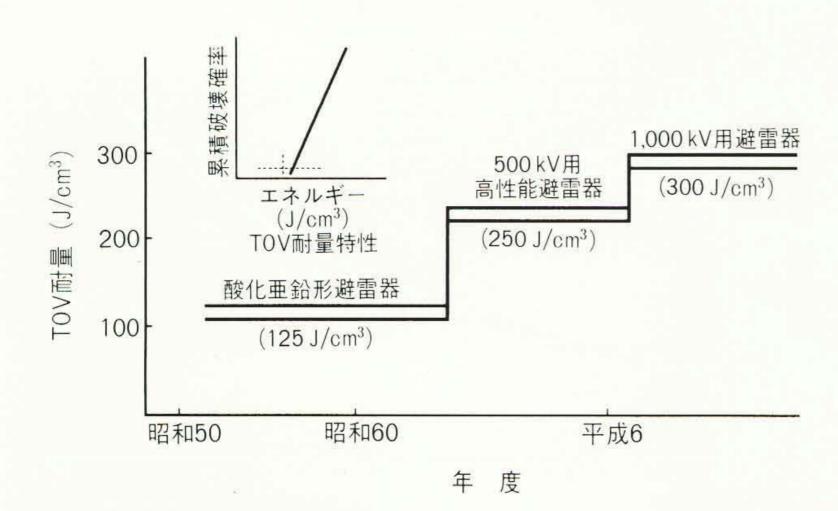
合わせた方法を採用した。スクリーニング手法とTOV耐 量の考え方のフローを図4に示す。

酸化亜鉛素子のTOV耐量評価として,酸化亜鉛素子に あらかじめ 2 ms方形波電流(開閉サージ放電耐量相当) を印加し, 全数所定のエネルギーに耐えるかどうかで第 一次のスクリーニングを行っている。さらに、このとき 酸化亜鉛素子表面の温度均一係数る(=酸化亜鉛素子表 面の最高温度/最低温度),および最高温度/平均温度を素 子全数試験ラインのコンピュータで自動的に算出するよ うにした。素子全数試験ラインでの試験状況を図5に, 素子試験ラインで求めた素子の熱画像の例を図6に示 す。素子表面の温度均一係数のよい素子はTOV耐量がよ い傾向を示す。

# 1,000 kV用避雷器の特性

#### 3.1 絶縁性能

酸化亜鉛素子を取り除いた1,000 kV用避雷器で,最低



AC TOV耐量の変遷

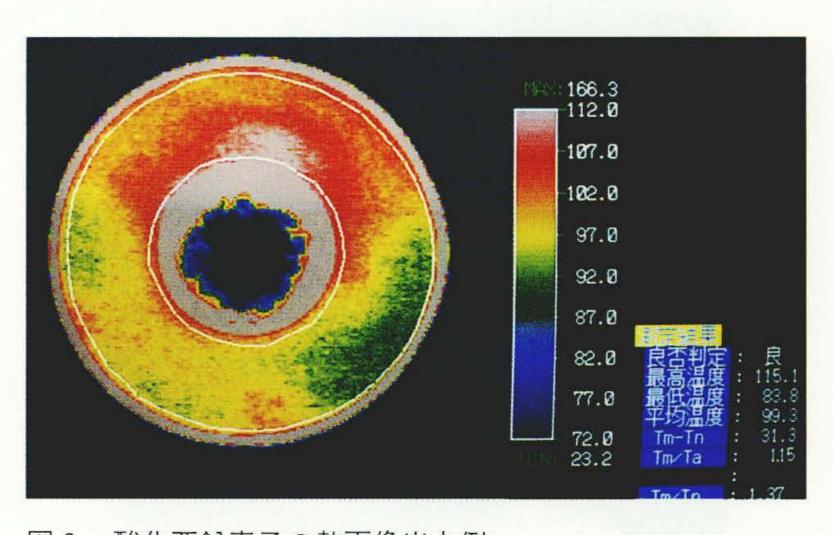
酸化亜鉛素子のTOV耐量の推移を示す。1,000 kV用では最も高い 耐量が必要とされている。

酸化亜鉛素子全数に方形波電流通電 (不良素子の除去) 方形波電流通電時の素子表面温度分布 をサーモカメラで測定 温度均一係数δ=最高温度/最低温度= T max./T min.を算出 酸化亜鉛素子の 熱画像面 均一係数と方形波耐量からTOV耐量を 推定(300 J/cm<sup>3</sup>以上) 安定性評価試験(TOV耐量試験)により, TOV耐量55 MJ, (75 MJ)を確認

スクリーニング手法とTOV耐量の考え方 酸化亜鉛素子のスクリーニングの方法を示す。



酸化亜鉛素子の試験ラインでの試験状況 酸化亜鉛素子の均一係数が自動的に求められる。



酸化亜鉛素子の熱画像出力例 酸化亜鉛素子に方形波電流を通電したときの素子表面の温度分 布を測定する。

保証ガス圧力で雷インパルス試験電圧2,250 kV, 商用周波試験1.5E(953 kV)×30分 $-\sqrt{3}$  E(1,100 kV)×1分 $-\sqrt{3}$  E(953 kV)×30分に耐えることを確認した。

### 3.2 制限電圧試験

制限電圧試験は雷インパルス発生装置に適切なインダクタンスを入れ、完成品避雷器で試験した。1,000 kV用避雷器の制限電圧試験状況を図7に、避雷器の制限電圧一電流特性の波形を図8に示す。10 kA通電で仕様値1,550 kV/10 kAを満足している。なお、ブッシング入り口での端子電圧を図9に示す。原電圧は約3,000 kV以上を発生させており、避雷器は所定の制限電圧一電流特性によって電圧抑制していることを示す。1,000 kV用避雷器の制限電圧特性は、分割区分での換算値と完成品での測定値で図10に示す。換算値と測定値は一致している。

#### 3.3 分流特性

1,000 kV用避雷器は4並列接続構造としている。下段側500 kVユニット間で測定した分流波形を図11に示す。分流比は1.1以内であり、4並列間でほぼ均等に分流している。

#### 3.4 放熱特性

完成品避雷器に試験用変圧器で電流を流すことにより,酸化亜鉛素子を温度上昇させ,放熱特性を求めた。 1,000 kV用避雷器の放熱特性を図12に示す。酸化亜鉛素

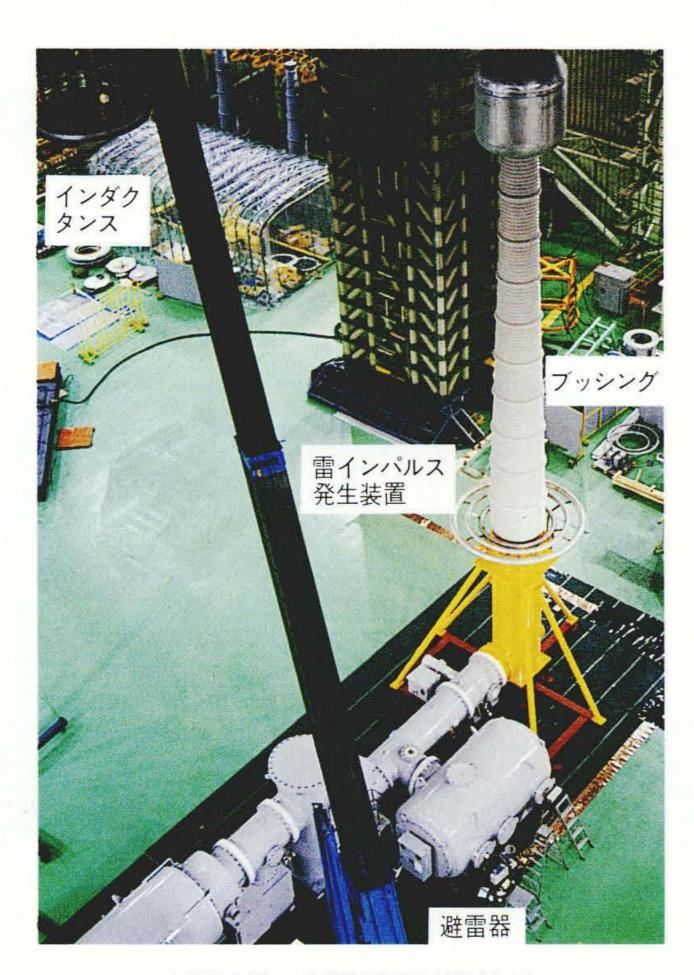


図7 1,000 kV用避雷器の制限電圧試験状況 雷インパルス電圧発生装置を使用して,避雷器の制限電圧試験を 行っている状況を示す。

子の放熱特性は指数関数的になり、放熱時定数は約98分である。この特性を満足する分割区分によって安定性評価試験を行った。

#### 3.5 安定性評価試験

第1区分では、実フィールド25℃の環境で30年間使用

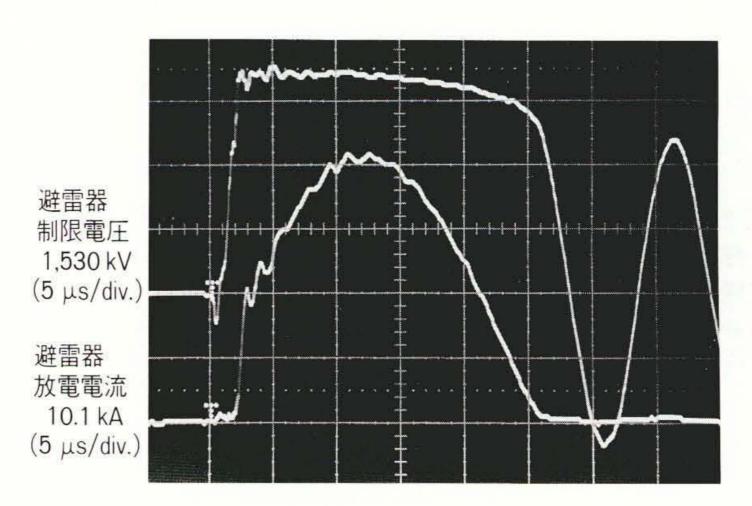


図 8 1,000 kV用避雷器の制限電圧-電流波形 10 kA領域での避雷器の制限電圧-電流応答波形を示す。

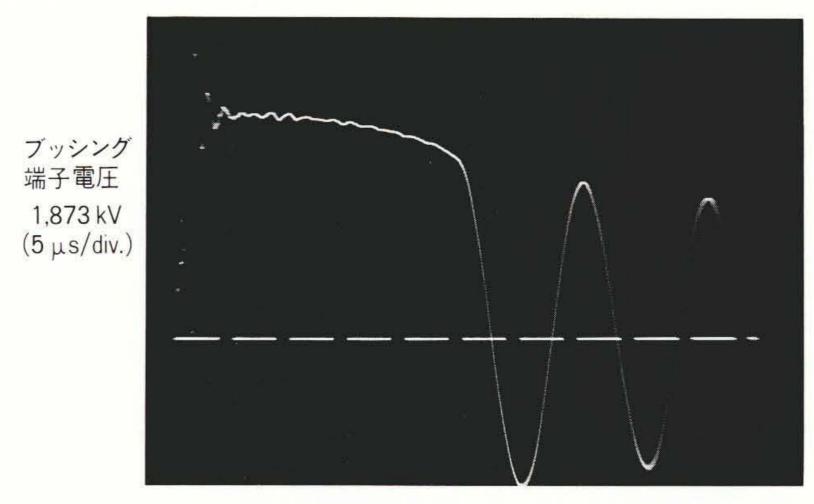


図9 ブッシング端の電圧波形

避雷器によって雷インパルス電圧が抑制されたときのブッシン グ端の電圧波形を示す。

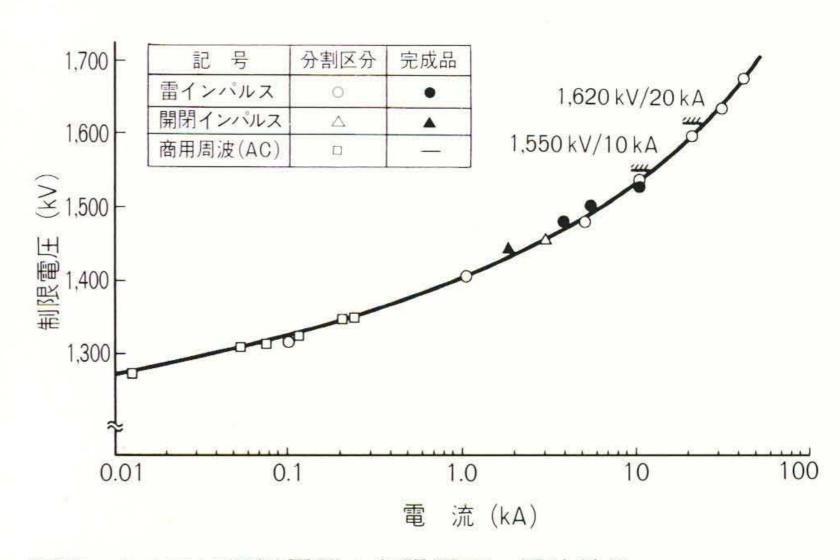
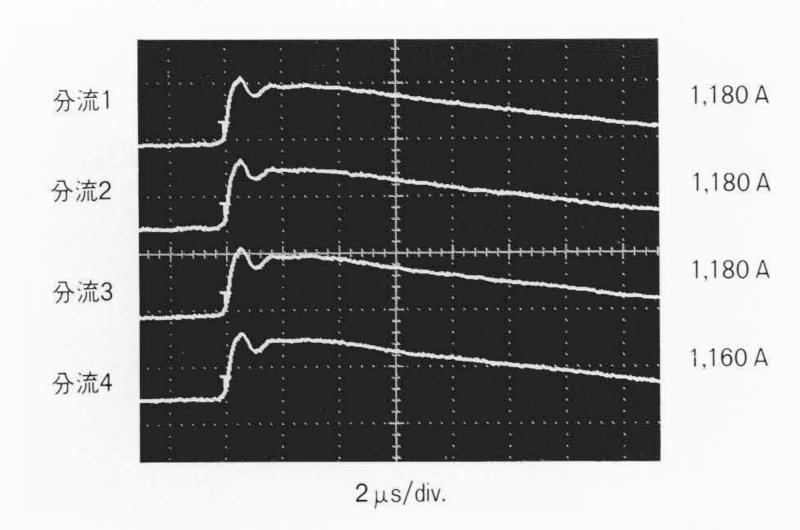
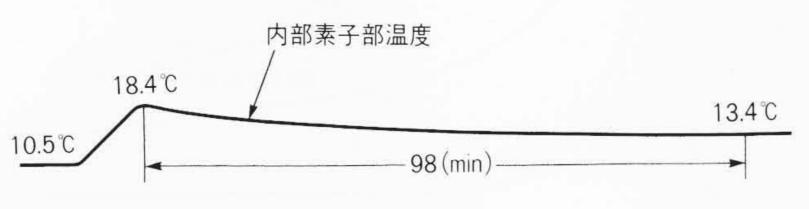


図10 1,000 kV用避雷器の制限電圧-電流特性 完成品避雷器と分割区分避雷器で求めた特性を示す。



1,000 kV用避雷器のインパルス電流分流波形 4 並列で構成されている素子群に、放電電流は500 kVユニット間 でほぼ均等に分流されている。



1,000 kV用避雷器の放熱特性 図12 内部素子温度の放熱は指数関数的になる。

することを想定し、アレニウス経験則に従うものとして, 温度が10℃上昇すると課電劣化の加速係数が2.5倍にな るという経験則から、寿命を素子単体で、高温加速劣化 試験を周囲温度115℃,課電率0.90で実施した。酸化亜鉛 素子のワットロスと漏れ電流の経時変化を図13に示す。 酸化亜鉛素子は安定して良好な課電特性を示している。

第2区分では、雷インパルス大電流に対する放電耐量 の検証として、素子単体に65kA通電している。

第3区分では、開閉サージ動作責務時のエネルギーに 相当する方形波電流として素子単体に2,000 A×2 ms× 2回通電し、定格電圧2秒印加後、運転電圧を印加して 熱暴走しないことを確認した。

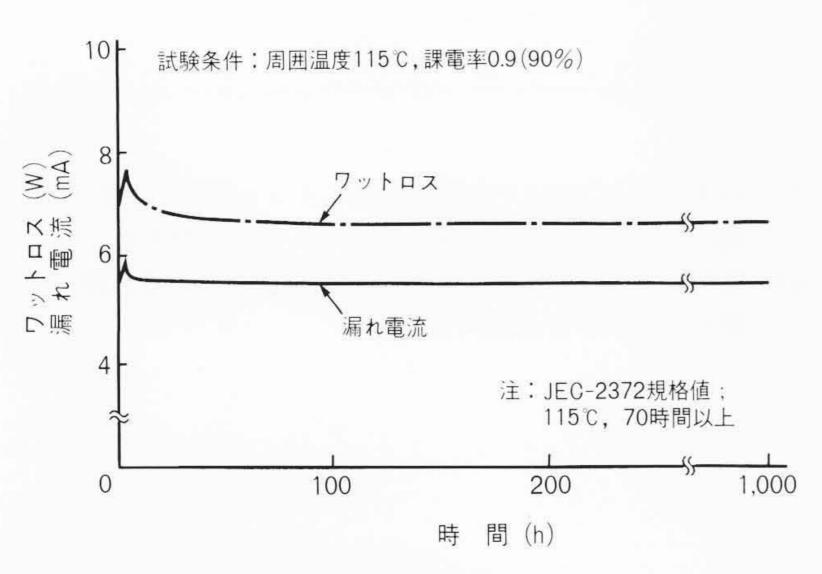


図13 酸化亜鉛素子の課電寿命試験 酸化亜鉛素子の経時的な特性を示す。安定した特性を示している。

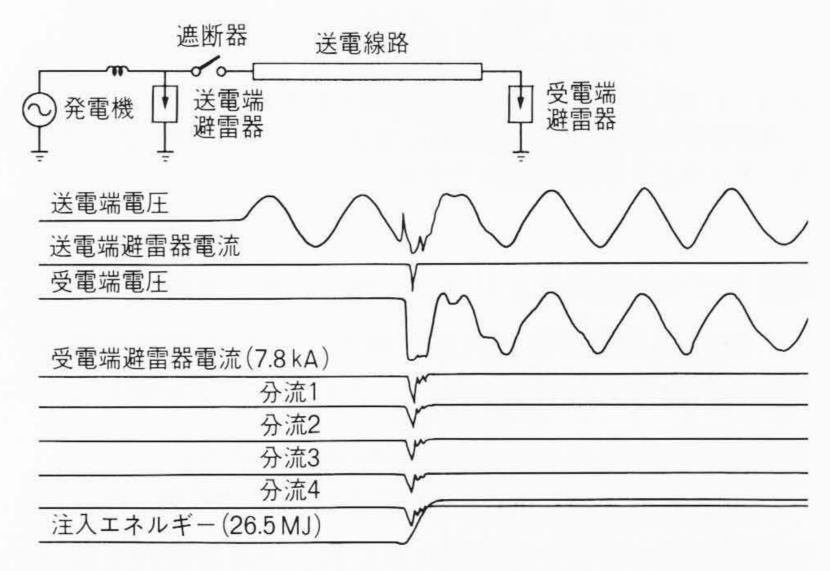
なお, 開閉サージ動作責務 (線路長250 km, 221 μF/14 kV)時の波形を図14に示す。

第4区分では、短時間過電圧仕様値55 MJ以上を注入 し、運転電圧30分印加で熱暴走しないことを検証した。

試験方法は上記スクリーニング手法によって得られた 酸化亜鉛素子を用いて4並列で14kV避雷器ユニットを 構成し,発電機を使用してTOV耐量試験を実施した。当 初,期待どおりのTOV耐量を求めることができた。試験 時の波形を図15に示す。これは完成品換算で56.3 MJに 相当している。

#### 3.6 機械的性能

1,000 kV用になると形状寸法が大きくなり、機械的検 討が重要となるので、(1)0.3G,正弦3波加振による実器 での耐震試験,(2)変圧器の励磁振動などによる微小振動 を考慮した100 Hz, 0.5 G, 10万回の支持構造安定性試 験4), (3) トレーラによる輸送試験, (4) 実器を恒温室内に



開閉サージ動作責務時の波形

線路長250 km相当での再閉路(抵抗投入失敗)時の受電端避雷器 の動作状況を示す。

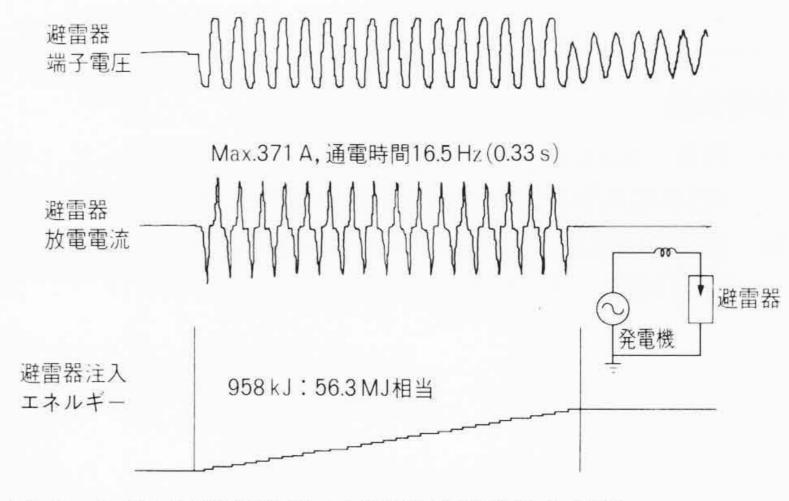


図15 1,000 kV用避雷器のTOV耐量試験時の波形 14 kVユニットで実施し、注入エネルギー換算値56.3 MJのTOV耐 量特性を示す。

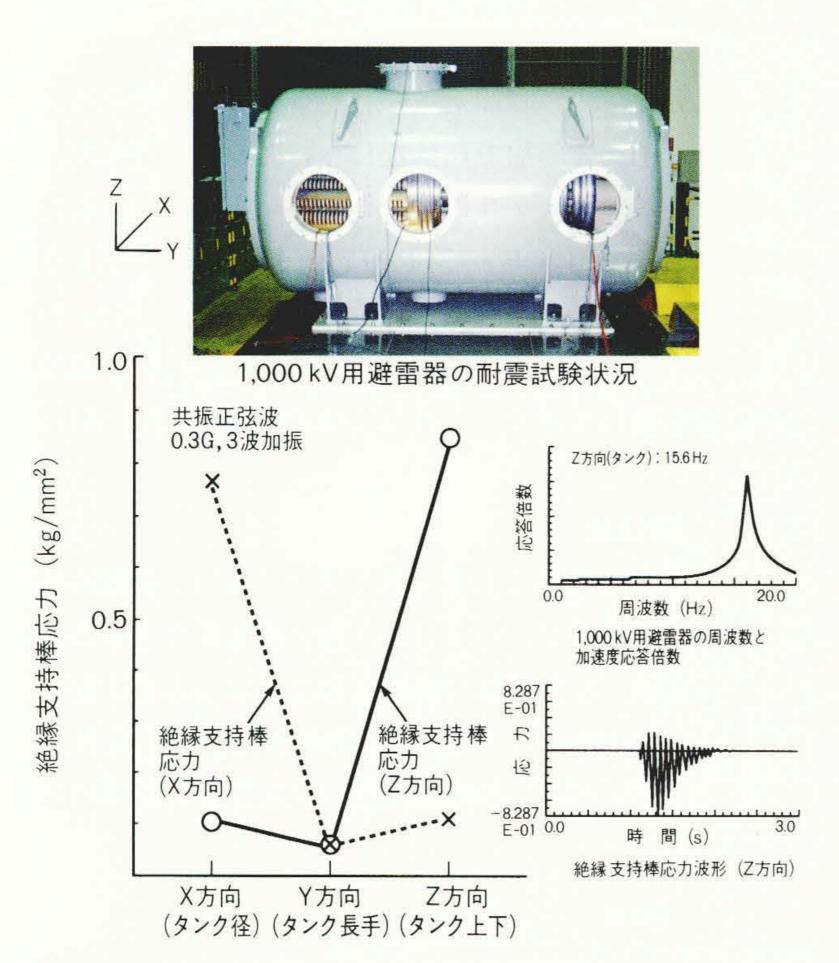


図16 1,000 kV用避雷器の耐震試験と発生応力 実避雷器を耐震試験台に搭載し、加振方向をタンク径、タンク長 手、タンク上下方向に加振したときの応力を示す。

配置しての冷熱試験などによる機械的検証を行った。

1,000 kV用避雷器の耐震試験状況と加振方向と絶縁 支持棒の応力との関係を図16に示す。タンク上下方向の 加振が最も大きいが、応力的には余裕がある。

環境試験室での1,000 kV用避雷器の設置状態,さらに恒温室温度の変化と内部酸化亜鉛素子の温度変化を図17に示す。SF<sub>6</sub>ガスは熱的緩衝材となり,酸化亜鉛素子の温度は周囲温度の変化に穏やかに応答している。

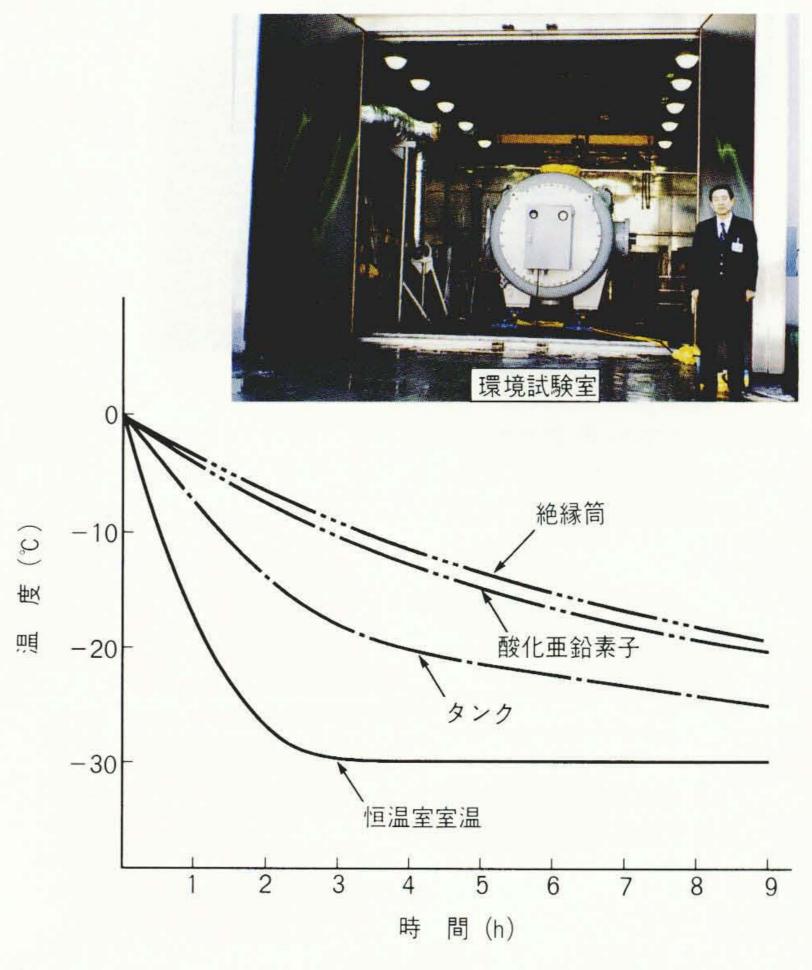


図17 1,000 kV用避雷器の冷熱試験 実避雷器を環境試験室に搬入し、ヒートサイクル試験に加え、 -30℃でのタンクおよび内部素子の温度推移を示す。

#### 4 おわりに

ここでは、1,000 kV用避雷器の開発内容と電気的、機械的特性について述べた。1,000 kV用避雷器は1,000 kV系統の合理的絶縁設計を可能にしてきた。他方、1,000 kV用避雷器は電力用避雷器の最高位にあり、今後、1,000 kV用絶縁協調のかなめとなって1,000 kV系統での過電圧抑制に役立つことを念願している。

## 参考文献

- 1) 田邊:100万V昇圧に向けた技術開発・建設について、平 成5年電気学会電力・エネルギー部門大会,575
- 2) 白川:酸化亜鉛形避雷器の最近の動向,電気学会論文誌 B,114巻,5号(平成6年)
- 3) 中田,外:1,000 kV用避雷器のスクリーニングとTOV耐量,平成6年電気学会電力・エネルギー部門大会,628
- 4) 中田,外:1,000 kV用避雷器の支持構造安定性試験,平成6年電気学会全国大会,1471