

大電流繰り返し印加による ZnO 素子の動作特性と限界性能把握

二木真吾¹⁾ ・ 本田親久²⁾ ・ 大坪昌久²⁾ ・ 原田貴司³⁾

Performance characteristic and limit performance grasp of ZnO elements by repetitive operations using of heavy-current.

Shingo FUTATSUKI, Chikahisa HONDA, Masahisa OTSUBO, Takashi HARADA

Abstract

As a lightning measure, excellent ZnO element has been applied to the transmission and distribution system in Japan. In this paper, to understand the limit performance of the arrester being used now, the lightning impulse current was repeatedly impressed to the zinc oxide arrester for 6.6kV. And, the performance characteristic of the ZnO element of the element in the arrester was measured. When the lightning impulse current of 4/10 μ s and 30 kAs was impressed to a gap type arrester, stripe destruction signs were confirmed on ZnO element surface. However, the main body of the arrester was not destroyed.

Moreover, to understand the limit performance of a present arrester, the AC 2kA of power frequency superposition examination was executed. As a result, the arrester operated up to about 5.5kA of lightning impulse current.

Key Words :

Arrester, ZnO-element, Lightning impulse current, Stripe destruction signs, Lightning impulse current superposition examination

1. はじめに

近年の高度情報化社会の進展に伴い、従来にも増して信頼性の高い安定した電力の供給が強く望まれている。しかし、落雷などの自然災害、設備の保全不備、公衆の故意・過失など、電力の安定供給を阻害する要因は様々であり、それらによる事故は避けることの出来ない事象である。この中でも落雷事故による停電は、落雷の予測や対策が困難であるため、依然事故の大半を占めている。そこで、各電力会社では配電系統に雷から電力機器を保護するために、直列ギャップ付酸化亜鉛(ZnO)形避雷器を主に設置している。この避雷器は、黄銅製の電極とそれを支持するスペーサか

ら成るギャップと、優れた非直線性の電圧電流特性を持つ酸化亜鉛素子で構成されており、サージ侵入時にはギャップ橋絡と低く安定した制限電圧を保持すると共に、過電圧エネルギーを速やかに処理し、続流遮断責務を確実に果たしている。この避雷器の開発により、落雷による外部異常電圧は勿論、開閉サージなどの内部異常電圧の処理も可能となり、配電系統の絶縁強度の低減や電力供給の安定性に役立っている。さらに最近では酸化亜鉛素子の特性向上により、酸化亜鉛素子を内蔵した ZnO 内蔵碍子などの開発・適用が進められており、電力供給の信頼性向上に貢献している¹⁾。

しかし、現場で故障した避雷器内酸化亜鉛素子の様相は貫通破壊に伴うスジ状の破壊痕が残っていた、避雷器の外観は底部金属蓋に穴が開いたり、膨らんだりしていたなどの事故様相が報告されている。これに対し、本研究では何が要因で避雷器内素子にスジ状の破壊痕ができるか、そのメカニズムの解明、スジ状破壊

1) 電気電子工学専攻大学院生

2) 電気電子工学科教授

3) 九州電力総合研究所 主幹研究員

痕の試験での再現，構造，材料を含めた現行避雷器の限界性能の把握などの研究を行うことにより避雷器の改良に関する知見を得ることを目的としている。

本論文では，未使用の配電用酸化亜鉛形避雷器（プラセオジウム形）に対し，放電耐量試験として負極性雷インパルス電流を繰り返し印加し，動作回数に対する ZnO 素子に及ぼす影響を確認した。また，配電用避雷器の限界性能を把握するために AC インパルス電流重畳試験を実施したので報告する。

2. 配電用酸化亜鉛形避雷器

配電用酸化亜鉛形避雷器の断面図の例を図 1 に示す。図の様に構造としては，良質な磁器で作られている碍管，内部構成物の接触抵抗を小さくして，動作回路を確保するスプリング，放電耐量，電流耐量が大きく材質は黄銅製のギャップ電極，円筒形のセラミック製で絶縁抵抗が $M\Omega$ オーダーでギャップ長を確保するためギャップ間に挿入されているスペーサ，湿気による放電特性，酸化亜鉛素子の特性の変化を防ぐ乾燥剤と，円筒形セラミックス素子の酸化亜鉛素子を密閉した簡単な構造をしている。直列ギャップは衝撃電圧の測定にも使用されるように，ギャップ長を適当に調整しておけば，それより高い過電圧が印加されれば自動的に放電する。

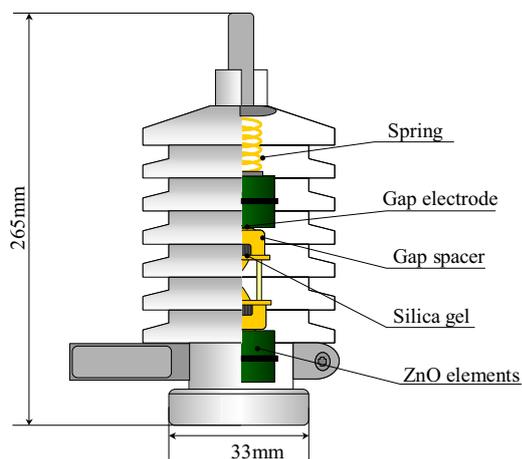


図 1 ZnO 避雷器の構造

3. 繰り返し動作の電流変化による動作特性

3.1 実験方法

避雷器に大電流を繰り返し印加し放電耐量試験を

行う。実験は，避雷器の碍管から取り出した直列ギャップと ZnO 素子（プラセオジウム形）について行った。図 2 に実験サンプルの配列を示す。図の様に取り出したギャップ電極，スペーサ，乾燥剤，ZnO 素子のみを平板電極で挟む。この状態で HAEFELY 社製 1200kV インパルスジェネレータを使用し，4/10 μ s の電流試験回路を用いて，印加電圧 175kV—インパルス電流 20kA，印加電圧 200kV—インパルス電流 25kA，印加電圧 230kV—インパルス電流 30kA の 3 条件で行い，印加時間間隔は各 1 分とし，50 回印加している。その際，1 回目と 50 回目の動作時に V-I 特性を測定した。その後，1.2/50 μ s の標準雷インパルス電圧試験回路を用い，V-t 特性と 50%フラッシュオーバー電圧を測定した。50%フラッシュオーバー電圧の測定方法は昇降法を用い，30 回の電圧印加試験を行った。印加時間間隔は各 1 分としている。今回の実験では，ZnO 素子の温度変化も同時に測定した。

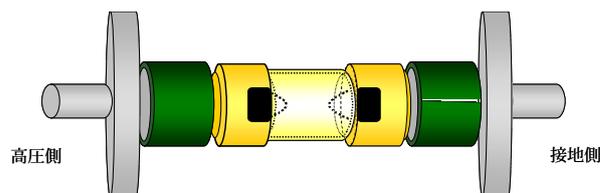


図 2 実験サンプルの配列

3.2 実験結果および検討

図 3 に雷インパルス電流 30kA，1-35 回動作時の V-I 特性を示す。

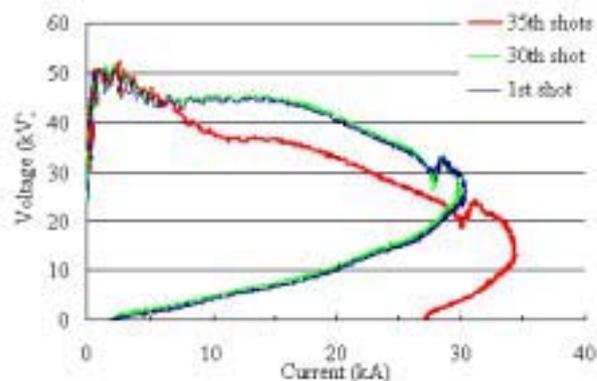


図 3 雷インパルス電流 30kA V-I 特性

20kA，25kA の雷インパルス大電流については記載していないが，繰り返し 50 回印加し V-I 特性を描くと，放電電流には殆ど変化がなく，ZnO 素子沿面を確認し

でも亀裂痕のようなものは確認できなかった。続いて、雷インパルス電流 30kA で繰り返し印加した場合、30 回動作時に高圧側素子に亀裂痕を確認し、その後続けて 5 回放電を繰り返した結果、高圧側素子は完全に破壊し、低圧側素子にも亀裂痕を確認することが出来た。1 回放電時と 30 回放電時の V-I 特性を比較すると、制限電圧が 45kV、放電電流波高値が殆ど同じ 30kA 程度なのに対して、ZnO 素子が破壊した 35 回動作時の V-I 特性を見てみると、放電電流波高値は約 35kA になっており、放電電流が 5kA 増加していることが分かる。この放電電流が増加したことについて、アークの放電負抵抗特性が認められることから、制限電圧が保たれず、35 回目付近で ZnO 素子が破壊したことによって ZnO 素子はその特性を失い、平行平板電極間で放電したものと考えている。

3.3 V-t 特性および 50%フラッシュオーバー電圧 (V_{50})

図 4 に雷インパルス電流 20kA、50 回動作後の V-t 測定波形、図 5 に雷インパルス電流 25kA、50 回動作後の V-t 測定波形、図 6 にそれぞれを重ね合わせた V-t 特性を示す。雷インパルス電流 30kA、35 回動作後の V-t 特性は素子が破壊してしまったため測定が不可能となっているため記載していない。

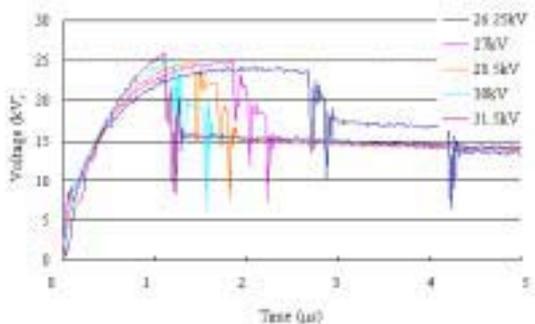


図 4 雷インパルス電流 20kA 50 回動作後 V-t 波形

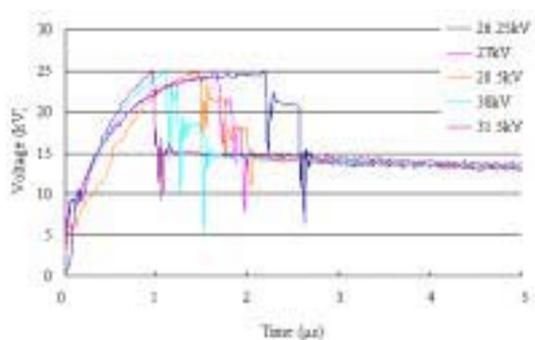


図 5 雷インパルス電流 25kA 50 回動作後 V-t 波形

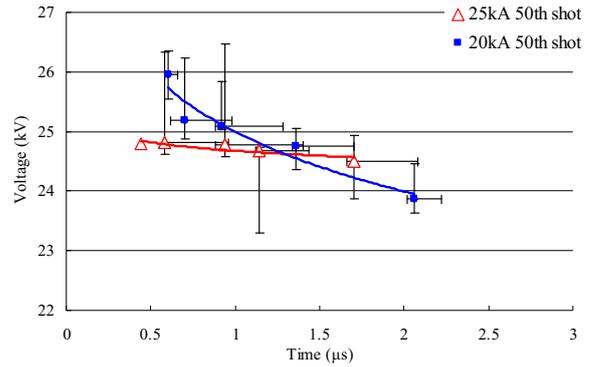


図 6 雷インパルス電流 20kA および 25kA の V-t 特性

図 6 の 20kA および、25kA で 50 回放電後の V-t 特性を見ると、放電開始電圧は大きく変化していなかった。この場合、ZnO 素子沿面に亀裂痕は確認されず、特性も殆ど低下していないため避雷器としての性能を十分保持していると考えられる。

雷インパルス電流 20kA 印加後の V_{50}

$$50 \text{ 回動作後 } V_{50} = 26.63 \text{ kV}$$

雷インパルス電流 25kA 印加後の V_{50}

$$50 \text{ 回動作後 } V_{50} = 26.48 \text{ kV}$$

以上のように、雷インパルス電流 20kA で 50 回動作後の V_{50} は 26.63kV、また雷インパルス電流 25kA の場合の V_{50} は 26.48kV とその特性は殆ど低下していなかった。そのため、雷インパルス電流 25kA を繰り返し印加しても、放電開始電圧も 50%フラッシュオーバー電圧も殆ど低下せず、避雷器としての特性を十分保持したままであった。30kA を印加した場合には、30 回動作後に高圧側素子沿面に微小な亀裂痕を確認した。そこで、どこまで耐えうるかを確認するため、さらに 5 回続けて印加した結果、35 回動作後には高圧側素子は完全に破壊し、接地側素子には微小な亀裂痕が確認された。

3.4 大電流繰り返し動作による ZnO 素子の温度変化

本実験では、大電流で繰り返し動作した ZnO 素子の温度変化について調べた。温度測定は、アズワン社製防水型非接触温度計を用いて測定を行った。図 7 に雷インパルス電流 20kA、25kA、30kA を繰り返し印加した時の温度変化を示す。なお、同図に示す温度測定箇所は高圧側 ZnO 素子の沿面部である。

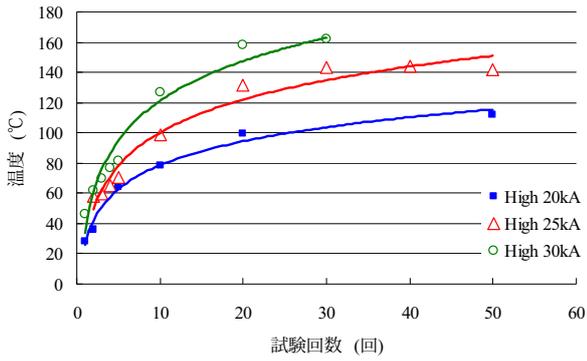


図7 雷インパルス電流変化による温度変化

図7には高電圧側素子の温度変化のみ記載しているが、接地側素子の温度変化も同様の傾向を示している。同図より、雷インパルス電流を繰り返し印加することによって、20kA では約 120°C、25kA では約 150°C、30kA では約 160°C とかなりの高温にまで上昇している事がわかった。ここで、25kA を印加した際、40 回目付近から温度が低下し始めていることについては、この時を境に ZnO 素子沿面を放電していると考えられ、ZnO 素子に電流が流れていないため ZnO 素子の温度が、低下したものと考えている。

3.5 ZnO 素子の沿面及び電極部写真

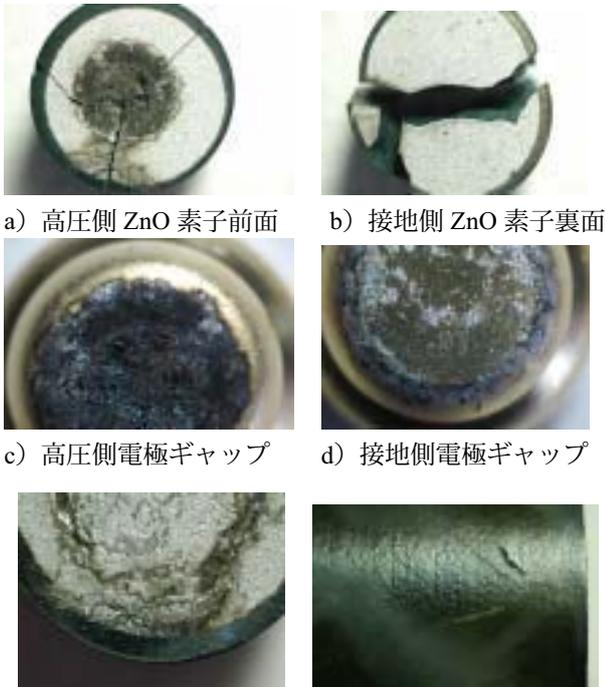


図8 雷インパルス電流 30kA、35 回動作後 ZnO 写真

図8に雷インパルス電流 30kA で、35 回動作後の ZnO 素子写真を示す。雷インパルス電流 20kA、25kA を印加した ZnO 素子の沿面には亀裂痕は確認されなかった。これに対し、図8の雷インパルス電流 30kA を印加した ZnO 素子は、高圧側 ZnO 素子は完全に破壊し、接地側 ZnO 素子沿面には亀裂痕が確認できた。これにより、雷インパルス電流 25kA 以下で繰り返し印加しても、ZnO 素子沿面には亀裂痕が発生しないことがわかった。これに対し、雷インパルス電流 30kA では個体差はあるが、高圧側 ZnO 素子沿面に亀裂痕が発生することが分かった。

4. AC 重畳インパルス電流による限界性能試験

4.1 実験方法

本実験は、神奈川県横須賀市にある電力中央研究所の大電力試験所において A 社のプラセオジウム形、B 社のビスマス形の避雷器について、商用周波電流と雷インパルス電流を重畳した場合の ZnO 素子の限界性能を把握することを目的とする。

AC 電圧は相間電圧 6.6kV、インパルス電流波形は 100/200 μ s(電力中央研究所の設備で出せる最も急峻な波形)、インパルス投入位相は相間電圧最大時(90°)とし、設定短絡電流は 2kA で 0.1s 間とする。想定試験回数は避雷器 1 グループ当たり 10 回、雷インパルス電流波形の 1 種類、避雷器の種類として 6 つのグループ (A 社：新品未使用 10 個、15 年経過(1991 年製)品 10 個、22 年経過(1984 年製)品 10 個、B 社：新品未使用 10 個、15 年経過(1991 年製)品 10 個、22 年経過(1984 年製)品 10 個)とした。本実験では避雷器電流(避雷器に流れるインパルス電流、及び AC 電流)、避雷器処理エネルギー(避雷器電流 \times 避雷器電圧の時間積分、インパルス・続流含み)、ビデオカメラによる画像、試験状況写真、供試器温度(赤外線温度計により、試験前後の避雷器底部の金属部の温度を測定)を調べた。

4.2 実験回路

図9に AC 重畳インパルス電流による限界性能試験回路を示す。この試験回路を用いて、供試避雷器の処理エネルギーを測定した。

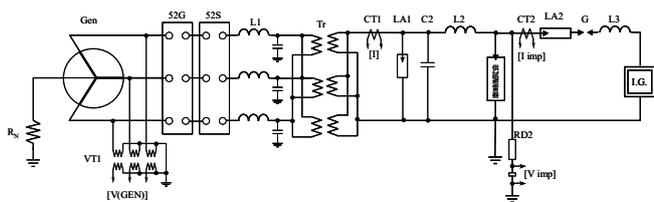


図9 インパルス電流重畳試験回路

4.3 実験結果

図10に新品未使用の電流に対する処理エネルギーを示す。同図には、A社プラセオジウム形、B社ビスマス形のそれぞれの条件における結果を示す。

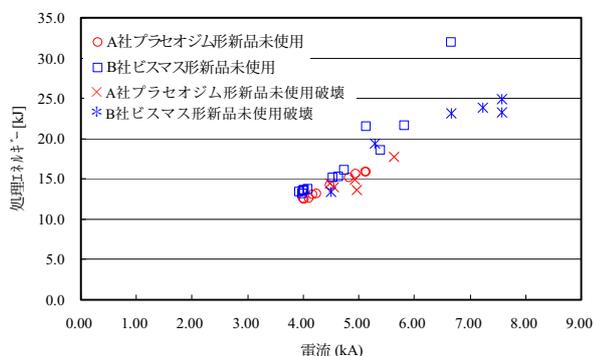


図10 新品未使用 I^2t に対する処理エネルギー

100/200 μs のインパルス電流重畳試験において、図10に示す電流に対する処理エネルギーは、ビスマス形 ZnO 素子が破壊しない場合の最大処理エネルギーが電流ピーク値約 6.8kA 時に最大 32kJ となり、プラセオジウム形 ZnO 素子が破壊しない場合の最大処理エネルギーは電流ピーク値約 5.2kA 時に最大 16kJ であった。続いて図11に15年経過品の電流に対する処理エネルギーを示す。

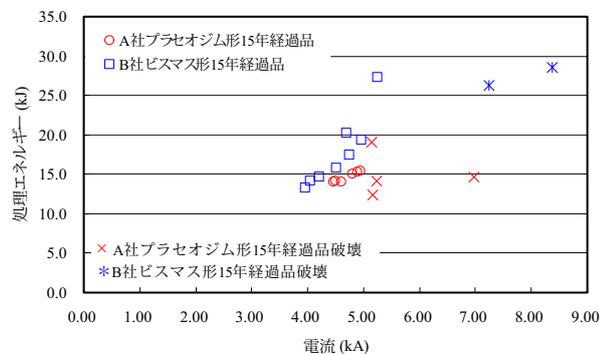


図11 15年経過品 電流に対する処理エネルギー

100/200 μs の商用周波電流と雷インパルス電流重畳

試験において、図11に示す電流に対する処理エネルギーは、ビスマス形 ZnO 素子が破壊しない場合の最大処理エネルギーは電流ピーク値約 5.3kA 時に最大 27kJ となり、プラセオジウム形 ZnO 素子が破壊しない場合の最大処理エネルギーは電流ピーク値約 5kA 時に最大 15kJ であった。続いて、図12に22年経過品の電流に対する処理エネルギーを示す。

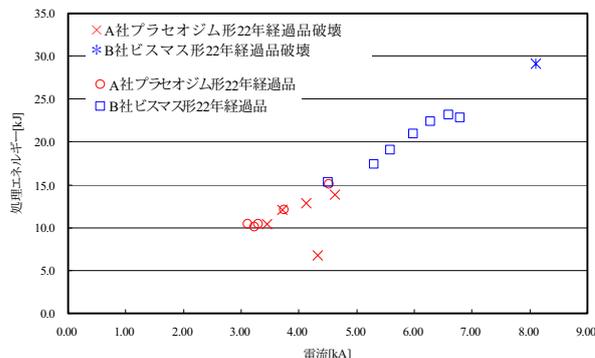


図12 22年経過品 電流に対する処理エネルギー

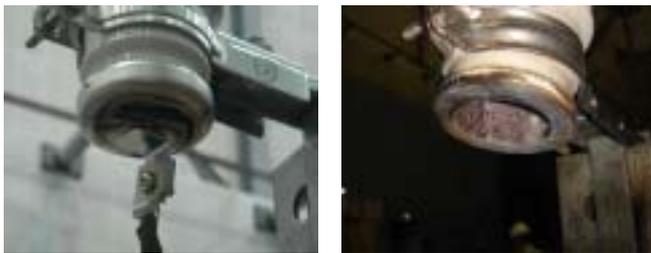
100/200 μs の商用周波電流と雷インパルス電流重畳試験において、図12に示す電流に対する処理エネルギーは、ビスマス形 ZnO 素子が破壊しない場合の処理エネルギーが電流 7kA 付近時に最大 24kJ となり、プラセオジウム形 ZnO 素子が破壊しない場合の処理エネルギーは電流 4.5kA 付近時に最大 15kJ であった。

これらの結果より、ビスマス形に対しプラセオジウム形の方が、処理エネルギーが小さいことが分かる。これについては、プラセオジウム形は ZnO 素子を 2 個設置しているのに比べ、ビスマス形は ZnO 素子を 1 個しか設置していない。1 個の ZnO 素子で大きさを比較すると、ビスマス形 ZnO 素子の高さが 38mm に対し、プラセオジウム形 ZnO 素子の高さ 26.5mm とビスマス形の ZnO 素子の方が大きいこと、また粒界層の材質の違いにより、最大処理エネルギーの値においてプラセオジウム形 ZnO 素子の処理エネルギーが小さくなり、プラセオジウム形 ZnO 素子の方が破壊しやすくなっていることが考えられる。

4.4 避雷器破壊後および避雷器解体後の素子写真

図13に新品未使用プラセオジウム形およびビスマス形避雷器の破壊様相、図14に15年経過品プラセオジウム形避雷器およびビスマス形 ZnO 素子の破壊様相、図15に22年経過品プラセオジウム形避雷器およびビスマ

ス形 ZnO 素子の破壊様相を示す。



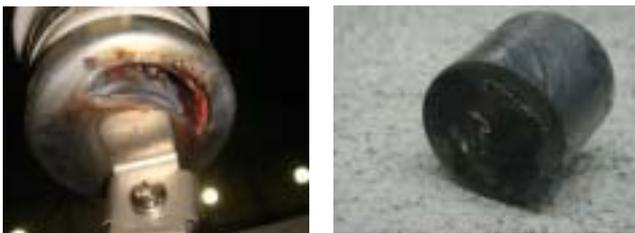
A) プラセオジウム形 B) ビスマス形

図 13 新品未使用避雷器



A) プラセオジウム形 B) ビスマス形

図 14 15年経過品避雷器



A) プラセオジウム形 B) ビスマス形

図 15 22年経過品避雷器

図 13 の新品未使用のプラセオジウム形避雷器 10 個の供試器のうち、1 個の供試器で破壊していることが分かった。その供試器の碍管を観察すると底部金属蓋に穴が開いていることが確認できた。また、図 14 の 15 年経過品においてプラセオジウム形避雷器 10 個の供試器のうち、4 個の供試器で破壊していることがわかった。その破壊様相として、底部金属蓋に穴が開いているもの、また底部金属蓋が完全に吹き飛び、避雷器内部素子が落下して割れているものがあった。その素子自体の温度は 120℃程度まで上昇していた。図 15 の 22 年経過品においてプラセオジウム形避雷器 10 個の供試器のうち、4 個の供試器で破壊が確認され、その破壊様相として底部金属蓋に穴が開いていた。ここで、プラセオジウム形とビスマス形の破壊様相を比較してみると、プラセオジウム形は底部金属蓋に穴が開いているものが多く、ビスマス形は避雷器碍管ごと破壊した

もの、また底部金属蓋が吹き飛び内部素子が避雷器外へ飛び出たものも多く見受けられた。これについては、プラセオジウム形避雷器の底部金属蓋が、防爆構造になっており、ビスマス形避雷器のように避雷器碍管ごとが破壊することはなく、破壊様相に違いが出たものと考えられる。

5. まとめ

本論文では、避雷器内素子にスジ状の破壊痕ができるメカニズムの解明、スジ状の破壊痕の試験での再現、現行避雷器の限界性能の把握等を行うことにより避雷器の限界性能や弱点を把握し、避雷装置の改良に関する知見をえることを目的として実験を行ってきた。主な結果は以下の通りである。

(1) 繰り返し動作の電流変化による動作特性

- ・雷インパルス電流 30kA を繰り返し印加すると、ZnO 素子沿面に亀裂痕が発生する。
- ・亀裂痕が発生する要因については、ZnO 素子の温度が影響する。

(2) AC 重畳インパルス電流による限界性能試験

- ・プラセオジウム形避雷器が破壊しない最大の処理エネルギーは新品未使用のもので 16kJ、15 年経過品および 22 年経過品のもので 15kJ となった。
- ・ビスマス形避雷器の処理エネルギーはプラセオジウム形避雷器より大きいことを確認した。
- ・避雷器の破壊様相として、底部金属蓋に穴が開いている事例が多く確認された。

参考文献

- (1) 電力中央研究所：「配電用避雷装置の限界性能に関する研究-インパルス電流試験およびインパルス電流重畳短絡試験結果-」, 受託報告, (2006)
- (2) 電力中央研究所：「配電線直撃雷に対する避雷器焼損率の検討」, 研究報告 T95022, (1996)
- (3) 堀口, 淵上, 大坪, 本田, 後藤, 賛田：「6kV 配電用避雷器の漏れ電流に対する水分の影響」, 電気関係学会九州支部大会, (1997)
- (4) 賛田, 大坪：「酸化亜鉛素子を用いた配電用 6kV 避雷器の特性試験と素子の表面観測」, 電気関係学会九州支部連合大会, 講演論文集 624, p.356, (1988)