高抵抗全面導電釉懸垂がいしの開発

正員
篠田
明秀*

正員
知屋城清信*

正員
岡田
英幸*

正員
鈴木
良博**

正員
伊藤
進**

終身会員
内藤
克彦***

Development and Performance Verification of High Resistance Semiconducting Glaze Insulators

Akihide Shinoda*, Member, Kiyonobu Chiyajo*, Member, Hideyuki Okada*, Member,
Yoshihiro Suzuki**, Member, Susumu Ito**, Member, Katsuhiko Naito***, Life Member

In case of transmission lines along the sea coast, audible noise due to partial discharges may occur from insulators when contaminated with sea salt and wetted. From the consideration to residents, insulator washing has been performed periodically, but this results in increase in the maintenance cost. As a countermeasure to reduce the audible noise, semiconducting glaze insulator (DC resistance approx. 20 MΩ) has been developed and used. However, in case of a very special environment with direct spraying of sea water in seaside districts, there seems to be some risk of thermal runaway because voltage concentration on very small number of insulator units in a string is possible and it may rise the temperature of those units up to the critical point.

In this paper, the thermal runaway mechanism is clarified from view point of input and output energy of the semiconducting glaze insulator under contaminated and wetted condition. The surface temperature starting thermal runaway is estimated from various experiments. As a result, the high resistance semiconducting glaze insulator, which has higher thermal runaway withstand capacity and acceptable agreeable audible noise characteristics is developed and subjected to the field evaluation.

キーワード：導電釉，高抵抗導電釉，熱逸走，がいし，汚損，部分放電音，部分放電

Keywords: semiconducting glaze, high resistance, thermal runaway, insulator, contamination, audible noise, partial discharge

1. まえがき

臨海部を経過する送電線路では，海塩粒子によりがいし表面が汚損・湿潤し，これにより部分放電音が発生する場合がある。部分放電音が発生しても設備上の問題および人体への危険性はないものの，地域住民の生活環境に対する配慮から定期的ながいし洗浄を実施しており，これが保守費用の増大につながっている。

この部分放電音抑制技術のひとつにがいし表面に半導電性釉薬（以下導電釉という）を施し，直流抵抗を 20 MΩ 程度とした全面導電釉懸垂がいし（以下従来タイプ導電釉がいしという）があるが，がいしの熱逸走を防ぐために使用電圧に制限が設けられていた⁽¹⁾。このため，最も部分放電音の発生が懸念される海水の飛沫に曝されるような汚損環境下では，がいし連中の電圧分担のアンバランス等による少数がいしへの電圧集中による熱逸走が問題とされ，適用されてこなかった。

本報告は，上記のような汚損湿潤環境下に適用可能な高抵抗全面導電釉懸垂がいし（以下高抵抗導電釉がいしという）を製作し，実用性能を検証した結果を取りまとめたものである。

2. 導電釉がいしの材料および構造

導電釉がいしは，通常の釉薬材料中に導電性金属酸化物（SnO₂，Sb₂O₃ 等）を加えた導電釉を磁器部全面に施し，セメントを介して金具と導電釉との導通をとるため，通常ペ

* 中部電力（株）
〒461-8680 名古屋市東区東新町 1
Chubu Electric Power Co. Inc.
1, Higashi-shincho, Higashi-ku, Nagoya 461-8680

** 日本ガイシ（株）
〒485-8566 小牧市二重堀田神 1155
NGK Insulators, Ltd.
1155, Tagami, Futaebori, Komaki 485-8566

*** 名城大学
〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501
Meijyo University
1-501, Shiogamaguchi, Tenpaku-ku, Nagoya 468-8502

図1 導電釉がいしの材料および構造

Fig.1. Material and construction of semiconducting glaze insulator.

イントにカーボンを添加した導電ペイントを用いた図1のような構造をしている。これ以外の構成材料や笠部形状等の構造は、すべて通常釉がいしと同じであり、臨海部の過酷な海塩汚損環境下での使用を考慮して、ピン部の電食対策に亜鉛スリーブの採用を基本としている。導電釉がいしは、通常釉がいしの材料および構造を保つことで、従来からの設計思想や各種試験、使用実績等を継承しつつ、一方、前述のような半導電性を有する材料および構造を用いることで、漏れ電流がいし沿面を流れ、部分放電音発生の原因となるがいし表面での部分放電を抑制するという特徴を有する。

3. 部分放電音抑制および熱逸走のメカニズム

3・1 部分放電音抑制と熱逸走に至るメカニズム 通常釉がいしは、汚損され雨や霧によって湿潤するとがいし表面の部分放電により部分放電音が発生することがある。部分放電は、汚損層に漏れ電流が流れると、電流密度が高い部分にジュール熱により形成される局所的な乾燥帯（高抵抗部）ができ、この部分に電圧分担が集中するために生じるがいし沿面の絶縁破壊である。通常釉がいしでは、この乾燥帯の形成、増大、再湿潤を繰り返すことで継続的な部分放電音が発生する。このメカニズムを図2に示す。

一方、導電釉がいしでは上記のような部分放電は観測されない。これは、図3に示すとおり導電釉がいしの表面に局所的な乾燥帯が生じて、この部分を流れる漏れ電流は抵抗の低い導電釉内部を流れるため、電圧分担を緩和し部分放電の発生を抑制するためである。

さらに、この導電釉内を漏れ電流が流れることで、そのジュール熱により、湿潤した汚損層を乾燥させる効果もあり、継続的な部分放電音の発生を抑制する。

導電釉がいしは、このような優れた部分放電音抑制効果を有する一方で、過酷な海塩汚損環境下でがいしが熱的に破壊する熱逸走という課題も有している。これは、導電釉および磁器の抵抗には次式および図4で示されるような負の温度依存特性があることによる。

$$R(T) = R_0 \exp B \left(\frac{1}{(273 + T)} - \frac{1}{(273 + T_0)} \right)$$

ここで $R(T)$: 温度 T のときの抵抗 (Ω)

R_0 : 温度 T_0 のときの抵抗 (Ω)

図2 通常釉がいしの部分放電音発生メカニズム

Fig.2. Mechanism of audible noise due to partial discharge on ordinary glaze insulator.

図3 導電釉がいしの部分放電音抑制および熱逸走メカニズム

Fig.3. Mechanism of audible noise suppression and thermal runaway of semiconducting glaze insulator.

B : サーミスタ定数 (K)

T_0 : 初期温度 ($^{\circ}C$) (= 周囲温度)

漏れ電流が導電釉内に流れ込むことで発生したジュール熱により、まず導電釉が発熱する。導電釉の温度上昇に伴い、その抵抗が低下するとともに、導電釉の温度が磁器に伝導し、磁器の抵抗も同様に低下する。各々の抵抗が低下することで、漏れ電流が増大し、さらに発熱・温度上昇を繰り返す。この発熱が放熱と平衡状態にあるうちはいいが、これを上回る場合には熱安定性を失い、磁器自体が発熱・温度上昇を繰り返す、ついには、がいしが熱的破壊に至る。この、がいしが熱安定性を失い、破壊に至る現象を熱逸走という。

図4 磁器および導電釉の抵抗-温度特性

Fig. 4. Relation between resistivity and temperature for porcelain and semiconducting glaze.

図5 熱逸走とがいしに出入りするエネルギー

Fig. 5. Input and output energy of insulator and thermal runaway.

3.2 熱逸走に至る条件 熱逸走を導電釉がいしに出入りするエネルギーに着目して述べると次のようになる。

がいし表面が清浄な場合、初期温度 T_0 (= 周囲温度)、初期抵抗値 $R(T_0)$ の導電釉がいしに電圧 V が印加されると、このがいしには単位時間に Q_G ($= V^2 / R(T)$) なるエネルギーが注入され、これによりジュール熱が発生し、がいし温度が上昇する。しかし、風雨や大気等により単位時間に熱放散されるエネルギー Q_L があるため、がいしの発熱は熱平衡状態 (図5に示す T_1) となり、温度上昇が停止すると考えられた。

一方、海水の飛沫に曝されるような汚損環境下では、がいし連内の電圧分担に極端なアンバランスを生じることによる電圧 V の上昇等から熱平衡点を失った場合に、がいし温度は上昇を続け、熱逸走に至ると考えられる。なお、 Q_G はがいし抵抗値 $R(T)$ と反比例の関係があることから、導電釉の初期抵抗値を高抵抗化することにより熱逸走を制御できる可能性が示唆された。

そこで、以降の検討においては、がいし初期抵抗とがいし温度を指標として熱逸走の発生条件の定量化を試みた。

図6 導電釉がいしの発熱状況

Fig. 6. Surface temperature distribution of semiconducting glaze insulator under thermal runaway.

図7 導電釉がいしの熱逸走状況

Fig. 7. Puncture path due to thermal runaway.

なお、320 mm の従来タイプ導電釉がいし7個連を耐張吊りに設置し、がいし下面の方向へ0.3 mm/minの模擬海水を注水し、試験電圧48 kV ($= 525 \text{ kV} / \sqrt{3} \times 7 \text{ 個} / 44 \text{ 個}$) を印加したところ、熱逸走に至る場合があったことを確認している⁽²⁾。

また、導電釉がいしの発熱箇所は、図6のように漏れ電流の密度が高いキャップおよびピン周辺付近であることが多く、熱逸走によるがいし破損状況の一例を図7に示す。

4. 高抵抗導電釉がいしの仕様検討

高抵抗導電釉がいしの仕様検討にあたり、下記について試験を行って特性を把握し、評価を行った。

- ① 部分放電音抑制面から見た抵抗値の評価
- ② 熱安定性からみた抵抗値の評価
- ③ 磁器の冷熱強度の評価

4.1 部分放電音抑制面からみた抵抗値の評価 部分放電音発生メカニズムから釉薬抵抗は低いほうが望ましい。しかし、熱逸走防止の面からは釉薬抵抗は高いほうが望ましい。そこで、釉薬抵抗をパラメータとして、部分放電音抑制効果について下記の試験条件にて確認した結果を表1に示す。

(試験条件) 定印霧中法に準ずる。ただし、試験電圧印加15分後に人工霧を発生させ、霧発生から40分間漏れ電流の測定を実施。

試料: 320 mm 高抵抗導電釉がいし $\times 7$ 個連

印加電圧: 48 kV ($= 525 \text{ kV} / \sqrt{3} \times 7 \text{ 個} / 44 \text{ 個}$)

これによると、がいし抵抗値が高くなるにつれて部分放電音が発生しやすくなる傾向があるが、900 MΩ程度であ

表 1 高抵抗導電釉がいしの部分放電音抑制効果

Table 1. Audible noise suppression effect of high resistance semiconducting glaze insulators.

kind of glaze	Ordinary glaze		High resistance semiconducting glaze					
resistance of insulator (MΩ/unit)	2000 ≥		200	380		600	695	904
ESDD (NSDD) (mg/cm ²)	0.5 (0.1)	1.0 (0.2)	1.0 (0.2)	0.5 (0.1)	1.0 (0.2)	1.0 (0.2)	1.0 (0.2)	1.0 (0.2)
Occurrence of partial discharge	×	×	○	○	○*	○*	○**	○**

(注) ○* : partial discharge occurs at initial stage of moisture (no problem for practical use), which disappears for a short time

○** : partial discharge occurs just after initial wetting and intermittent discharge is observed and several times in measuring duration (no problem for practical use)

図 8 各種導電釉がいし抵抗増加率の経年変化 (実フィールド)

Fig. 8. Increase rate of DC resistance of various semi-conducting glaze insulators in the field.

ても継続的な部分放電音が発生することはなく実用上問題はない。しかしながら、十分な部分放電音抑制効果を得るためには、湿潤初期に部分放電音が発生するものの短時間でこれが消失することを確認した 600 MΩ 程度以下に、がいし抵抗値を抑える必要があると考えられる。

また、高抵抗導電釉がいしは、長期間使用すると、導電釉層と湿潤した汚損層周辺との間で生じる極微少な放電により釉薬表面が劣化し荒れてくる。その結果、抵抗値が増加する。

したがって、劣化が極端に進んで抵抗値が大幅に増加すると、高抵抗導電釉がいしの部分放電抑制効果に影響を及ぼすことが懸念されるため、この劣化特性について評価した。

実フィールドにおいて、各種導電釉がいしの抵抗値について、その経年変化を観測した結果を図 8 に示す。これによると、従来タイプ導電釉がいしは、33 kV 配電線の長幹がいしより、やや抵抗増加率が小さい傾向にある。この 33 kV 配電線の長幹がいしでは、抵抗増加率は経年 15 年以降飽和傾向を示し、20 年経過しても 25% 以下の増加率であることから、導電釉の劣化という点では、従来タイプ導電釉が

図 9 課電時間-抵抗増加率の関係

Fig. 9. Relation between energized time and increasing ratio of DC resistance.

いしの抵抗増加率も同様に 20 年経過しても 25% 以下と推定される。

また、φ22 mm の円柱形テストピースを用いて、課電時間と抵抗増加率との関係を確認したところ、図 9 に示すとおり、抵抗値が高くなるほど抵抗増加率は低くなる傾向にあり、課電時間が 5000 時間を超えたあたりでは、初期抵抗値が低い 20 MΩ のものは抵抗増加率が約 15% なのに対し、高抵抗の 300 MΩ のものは約 5% で、抵抗増加率は 3 分の 1 に抑制されていた。これは、高抵抗化により漏れ電流を抑制することで導電釉層と汚損層周辺との間で生じる極微少な放電による釉薬表面の荒れが抑制されたものと考えられる。

これらの実フィールドおよび円柱形テストピースでの抵抗値の経年特性から、高抵抗導電釉の抵抗増加率を見積もると、25%/20 年 $\times 1/3 \times 50$ 年 = 約 20% より、50 年で 20% 程度と想定される。よって釉薬の劣化を織り込んででも部分放電抑制効果を消失しない抵抗値として上限値を 500 MΩ と評価できると考えた。

4.2 熱安定性からみた抵抗値の評価 導電釉がいしへの注入エネルギーが熱放散エネルギーを上回った場合、導電釉がいしは熱安定性限界を超えて熱逸走に至る。

そこで、以下の熱安定性限界試験および熱安定性確認試験を行い、熱逸走の条件を確認するとともに、釉薬抵抗の下限値を評価した。

(1) 熱安定性限界試験 直流抵抗値 100 ~ 360 MΩ 程度の 320 mm 高抵抗導電釉がいしを試作し、注入エネルギー量を増加させる条件で熱安定性限界試験を実施した。すなわち、設計電圧を上回る電圧を印加する等の条件で塩水注水試験を実施し、強制的に熱逸走を発生させ、これにより汚損湿潤状態で導電釉がいしが破損する最低温度および熱逸走への進展が認められず、がいし破損が発生しない最高温度〔許容温度〕を赤外線温度計により調べた。試験条件を表 2、試験結果を図 10 に示す。

これより、導電釉がいしの汚損湿潤条件での熱安定性限界は、がいし温度を指標として以下のとおりであった。

がいし破損発生時の最低温度上昇値: +110 K

表 2 試験条件

Table 2. Test conditions.

sample	320mm-high resistance semiconducting glaze insulator(1~7-units string)
salt density(weight%)	The amount of NaCl and MgCl ₂ is 3% of total weight (The ratio of MgCl ₂ is 16~48%)
direction of precipitation	45 ° toward a lower side of insulator
precipitation condition	uniformly , un-uniformly (precipitation rate was reduced at the line side unit in a string)
initial temperature of insulator	room temperature~40℃
test voltage (k V)	6.9~40kV /unit
test duration	1 hour (continued for 8 hours in long time test)

図 10 高抵抗導電釉がいしのがいし温度-初期抵抗特性
Fig. 10. Initial DC resistance of high resistance semi-conducting glaze insulators and surface temperature.

表 3 熱安定性限界試験におけるフラッシュオーバーの先行
Table 3. Occurrence of flashovers in the critical thermal stability tests.

Item \ number of unit in a string	5	7	7	9	44
Test voltage/design voltage (times)	1.3	1.3	1.2	1.3	1.4
number of flashover [times]	1	3	2	1	1

(がいし破損発生した最低温度 150℃- 設計周囲温度 40℃)

許容温度上昇値: +90 K

(がいし破損が発生しなかった最高温度 130℃- 設計周囲温度 40℃)

なお、先に述べた熱安定性限界試験において、海水しびきが全体的にかかる(均一注水)条件下で、表3のとおり設計電圧 6.9 kV/個 (= 525 kV/√3/44 個)を上回る電圧を印加し、強制的にがいしの熱逸走を試みたところ、熱逸走は発生せずフラッシュオーバーが先行した。

図 11 320 mm 高抵抗導電釉がいしの各部寸法
(熱逸走発生箇所の磁器厚さ)

Fig. 11. Dimensions of 320 mm high resistance semi-conducting glaze insulator (thickness of porcelain where thermal runaway may happen).

図 12 がいしの熱伝導特性 (厚さ 27 mm の平板磁器)⁽⁴⁾

Fig. 12. Heat conduction characteristics of porcelain (porcelain plate with 27 mm thickness)⁽⁴⁾.

さらに、通常考えにくいものの、周囲温度 40℃・無風状態で課電側のがいし 1 個のみ塩水注水量を減らした(不均一注水)条件下では熱逸走が発生し、笠欠けに至った。ただし、この場合でも、後述するように風速 8 m/s のもとでは、がいし温度上昇が抑制され熱逸走には至らなかった。ここで、がいし温度指標の設定について詳しく述べることをとする。

がいし温度については、試験制約上、表面温度の測定のみを実施していることから、がいし表面の温度が、がいし内部まで十分に熱伝導されていると考えられる時間および温度を以下のとおりと考えた。

がいし各部の寸法および熱伝導特性は図 11、図 12 に示すとおりであり、熱伝導時間は磁器厚さに比例すると考えられ、図 12 に示すとおり 27 mm 厚さでは約 10 分で内部まで熱伝導していることから、がいし内部まで十分に熱伝導される時間は下記のとおり設定した。

リブ部以外: 12 分以上

(10 分 ÷ 27 mm × 32 mm ≒ 12 分)

リブ部: 4 分以上

(10 分 ÷ 27 mm × 11 mm ≒ 4 分)

前記の時間を指標として、がいし内部まで十分に熱伝導

し、かつ熱逸走への進展が認められなかったがいし表面温度データを調査した結果、上限は図 13 のとおりであった。これより、許容温度を下記のとおり定めた。

許容温度 リブ部以外：140℃
リブ部：130℃

なお、設計周囲温度は架空送電線の電流容量設計等で用いられている 40℃ を採用した⁽³⁾。

(2) 熱安定性確認試験 高抵抗導電釉がいしでは、釉薬抵抗値を低く設定しすぎると漏れ電流が大きくなり熱逸走を生じやすいため、抵抗値をできるだけ高く設定する必要がある。4・1 で設定した上限値 500 MΩ から製造上の釉薬配合や厚さの変動 ±30% 程度を考慮した抵抗の下限値は 250 MΩ となる。

そこで、想定される使用条件下で、抵抗値 250 MΩ 程度の高抵抗導電釉がいしの最高温度を測定し、上記の許容温度上昇値との比較を実施した。試験条件を表 4、結果を図 14 および図 15 に示す。

塩水注水時において、5～9 個/連の無風状態では、がいし温度が許容温度上昇値を上回ることがあったものの、7 個/連の風速 8 m/s の試験結果では温度上昇は 20～40 K に抑制された。また、15～44 個/連の無風状態では、許容温度上

図 13 がいし表面温度の時間変化

Fig. 13. Surface temperature of insulator with elapsed time.

昇値を下回り、図 15 に示す 7 個/連の試験結果から、有風時にはさらに温度上昇が抑制されることが期待できる。

さらに、7 個連、22 個連の汚損湿潤時においても、がいし温度は許容温度上昇値を下回ったことを確認した。

したがって、高抵抗導電釉がいしが許容温度上昇値を上回るのは、無風状態で実施した 5～9 個/連の塩水注水試験のみであり、この場合でも風速 8 m/s があれば温度上昇は 20～40 K 程度に抑えられた。気象庁風力階級表にも記され

表 4 試験条件

Table 4. Test conditions.

○salt water test

sample	320mm-high resistance semiconducting glaze insulator(5～44-units string)
salt water density(weight%)	The amount of NaCl and MgCl ₂ is 3% of total weight (The ratio of MgCl ₂ is 16%)
direction of precipitation	45 ° toward a lower side of insulator
precipitation condition	uniformly (un-uniformly in the case of wind blowing)
initial temperature of insulator	40℃
velocity of the wind	no wind、8m/s
test voltage (kV)	6.9kV/unit (in case of 44-units string, maximum applied voltage is 1.3 times of 500-kV operating voltage)
test duration	1 hour (long time duration test was made for 8 hours)

○clean fog method examination

Sample	320mm-high resistance semiconducting glaze insulator(7,22-units string)
ESDD、NSDD	ESDD 1.0mg/cm ² (The ratio of MgCl ₂ is 16%) NSDD 0.2 mg/cm ²
initial temperature of insulator	40℃
test voltage (kV)	6.9kV/unit

Note)the other condition was done by the clean fog method

図 14 熱安定性試験におけるがいし温度特性（無風時）

Fig. 14. Temperature rise of insulators in thermal stability verification test (no-wind).

ているとおり、海水しぶきがかかる条件下では風速 10 m/s を超えることが十分期待できるため、実フィールドにおいて、高抵抗導電釉がいしが熱逸走することはないと評価できると考えられる。よって、釉薬抵抗の下限値は 250 MΩ として問題ないと考えられる。

4・3 磁器の冷熱強度の評価 高抵抗導電釉がいしでは、通常釉がいしでは見られないようながいし温度となることがあるため、がいし発熱時に突然の降雨等により急冷された場合を想定する必要がある。そこで、高温にしたがいしを冷水に浸し、がいし磁器の限界冷熱強度を調べた。結果を表 5 に示す。

これより、限界冷熱強度は傷の内容（取扱い傷等）により低下するものの、最低破壊温度差が 130 K であり、温度差 90 K 以下では破壊しないことを確認した。

また、熱逸走付近まで高温にしたがいしを冷水に浸し急冷する（温度差 120 K）ことを 50 回繰り返し、試験後に限界冷熱強度を実施した結果、初期強度と同等以上の強度を有していることを確認した。

さらに、想定される使用条件下の豪雨（降雨量の国内最大記録より 5 mm/分）を模擬した注水冷熱試験では、冷熱温度差が 30 K 向上することを確認した。よって、実使用条件下に

おいては、高抵抗導電釉がいしは温度差 130 K+30 K=160 K まで冷熱破壊しないと想定される。

以上のとおり、がいし磁器の冷熱強度は、4・2 (1) で評価した許容温度上昇値（+90 K）を大きく上回ることから、従来どおり丁寧にがいしを取扱うことで、がいしの冷熱破壊等の問題はないと考えられる。

5. フィールド性能検証

高抵抗導電釉がいしを 275 kV 送電線（280 mm 高抵抗導電釉 26 個×2 連、設計 ESDD 1.0 mg/cm²）および 77 kV 送電線（250 mm 高抵抗導電釉 8 個×2 連、設計 ESDD 0.5 mg/cm²）に取り付け、フィールドにおける多様な汚損湿潤状況での熱逸走抑制効果および部分放電抑制効果について、平成 13 年から平成 15 年までの約 2 年にわたり観測した。

(1) 275 kV 送電線（設計 ESDD 1.0 mg/cm²） 275 kV 送電線においては、集音マイク、カメラ、VTR 等で構成され、部分放電音の発生をトリガーに動作する観測装置を図 16 のように設置して、高抵抗導電釉がいし連および通常釉がいし連を常時観測するとともに、塔体内に設置したパイロットがいしの塩分付着量を定期的に測定し、気象データと合わせ分析に活用した。

さらに、台風接近通過後等には、夜間に赤外線温度計を用いたがいし表面温度観測と暗視カメラを用いた部分放電観測を実施した。

夜間観測結果を表 6 に示す。表 6 のとおり高抵抗導電釉がいしに特異な発熱ならびに部分放電の発生はなかった。また、観測期間中連続監視を行った部分放電音も発生しなかったことが確認できた。

なお、常時汚損に対するパイロットがいしの塩分付着量は定期的にしか確認できない。そこで、観測期間中の最大塩分付着密度を、定期測定の塩分付着密度および連続して 5 mm 以上の降水がなかった期間の最大風程から塩分付着量は風程（ΣVt）にほぼ比例すると想定し、塩分付着密度を

図 15 風によるがいし温度上昇の抑制効果

Fig. 15. Reduction of temperature rise of insulator by wind.

表 5 がいし磁器の限界冷熱強度

Table 5. Critical thermal shock strength of porcelain.

Sample insulators	content of the damage	temperature difference [K]	minimum temperature difference [K]
320mm suspension (new)	no damage	110~180	170
250mm Fog type(new)			170
400mm Fog type(new)			160
320mm suspension	after outdoor examination (5.5years)	70~160	140
	an artificially damaged		160
	after the examination	Handling damage	130

図 16 部分放電観測状況図（275 kV 送電線）

Fig. 16. Observation of partial discharge on 275 kV transmission line.

表 6 送電線夜間観測結果 (275 kV 送電線)

Table 6. Night observation results on 275 kV transmission line.

date, time 【remarks】	ESDD (mg/cm ²)	kind of insulator	Meteorological conditions	temperature distribution of a string line side - center - earth side	(reference) surface temperature of lower components	Night observation of partial discharge	
						visual inspection	the darkness camera
August 23, 2001 About 18:45 【typhoon No.0111】	upper surface: 0.002	High resistance glaze	25.5°C	25.0°C ~ 25.8°C	25.0°C ~ 25.5°C	No	No
	lower surface: 0.004	Ordinary glaze	81% breeze	25.0°C ~ 25.4°C		No	No
July 12, 2002 About 19:25 【typhoon No.0206】	upper surface: 0.003	High resistance glaze	28.0°C	22.3°C ~ 22.9°C	22.3°C ~ 23.4°C	No	No
	lower surface: 0.015	Ordinary glaze	74% 1.8 ~ 2.4 m/s	22.1°C ~ 22.8°C		No	No
October 4, 2002 About 16:00 【typhoon No.0221】	upper surface: 0.004	High resistance glaze	27.5°C	22.8°C ~ 23.6°C	24.0°C ~ 24.2°C	Not observe	Not observe
	lower surface: 0.013	Ordinary glaze	80% 2.5 m/s	23.1°C ~ 23.7°C		Not observe	Not observe
January 30, 2003 About 18:00	upper surface: 0.011	High resistance glaze	1.4°C	0.5°C ~ 0.9°C	1.3°C ~ 1.7°C	No	No
	lower surface: 0.017	Ordinary glaze	61% 0.3 m/s	0.7°C ~ 1.1°C		No	No
April 17, 2003 About 19:00	upper surface: 0.004	High resistance glaze	17.5°C	13.4°C ~ 14.0°C	13.4°C ~ 13.6°C	No	No
	lower surface: 0.011	Ordinary glaze	66% 0.5 ~ 0.8 m/s	13.6°C ~ 14.0°C		No	No

図 17 最大塩分付着密度の推定 (275 kV 送電線)

Fig. 17. Maximum ESDD on 275 kV transmission line.

図 18 部分放電観測状況図 (77 kV 送電線)

Fig. 18. Observation of partial discharge on 77 kV transmission line.

推定したところ図 17 のとおりであった。

これより、275 kV 送電線では、冬期 (12 ~ 3 月) において観測期間中の最大塩分付着 0.1 mg/cm^2 と推定され、この汚損・湿潤環境下で、部分放電の発生がなかったと考えられる。

(2) 77 kV 送電線 (設計 ESDD 0.5 mg/cm^2) 77 kV 送電線において、図 18 のように高抵抗導電釉がいし連の鉄塔および隣接する通常釉懸垂がいし連の鉄塔について、部

表 7 夜間観測結果 (77 kV 送電線)

Table 7. Night observation results on 77 kV transmission line.

date, time 【remarks】	kind of insulator	meteorological conditions	temperature distribution of a string line side - center - earth side	(reference) surface temperature of tower components	Night observation of partial discharge	
					visual inspection	the darkness camera
July 25, 2002 about 3:00 【typhoon No.0209】	High resistance glaze	25.8°C	23.9 ~ 24.6°C	24.1°C	No	Yes
	Ordinary glaze	77 ~ 84% 1.6 ~ 4.2 m/s	24.9 ~ 28.1°C	25.5°C	Yes	Yes
October 30, 2002 about 3:00	High resistance glaze	10.1 ~ 10.4°C	10.1 ~ 10.4°C	10.1°C	No	No
	Ordinary glaze	47 ~ 52% 1.0 ~ 2.8 m/s	10.1 ~ 10.7°C		No	No
January 31, 2003 about 4:00	High resistance glaze	1.5 ~ 1.9°C	-1.1 ~ 3.14°C	-0.57 ~ 3.14°C	No	No
	Ordinary glaze	52 ~ 58% 0.6 ~ 4.3 m/s	-1.1 ~ 0°C	-0.57°C	No	No
April 23, 2003 about 21:00	High resistance glaze	15.8 ~ 16.7°C	15.0 ~ 19.9°C	14.6°C	No	Yes
	Ordinary glaze	74 ~ 82% 0 ~ 0.4 m/s	13.4 ~ 17.0°C	13.2°C	Yes	Yes

図 19 夜間部分放電観測結果 (77 kV 送電線)

Fig. 19. Night Observation results of partial discharge on 77 kV transmission line.

分放電音が発生した日の当該箇所の状況を観測するとともに、275 kV 送電線と同様、台風通過後等には夜間にがいし表面温度観測と部分放電観測を実施した。また、隣接鉄塔に設置したパイロットがいしの塩分付着密度を定期的に測定した。

77 kV 送電線の夜間観測結果を表 7 に示す。表 7 のとおり、観測期間中に特異な発熱は見られなかった。また、平成 14 年台風 9 号通過後 (7 月 25 日観測)、観測鉄塔 (高抵抗導電釉) において、暗視カメラではピン周辺にわずかに部分放電の発生が確認されたものの、目視では確認できず、部分放電音もなかった。

これに対し、観測鉄塔 (通常釉) においては、暗視カメラおよび目視で全相のピン周辺に部分放電の発生および部分放電音が確認された。これと同様の状況は、平成 15 年 4 月 23 日観測においても確認された。この状況を図 19 に示す。

また、常時汚損状態での部分放電音発生有無について観測期間中 86 日間にわたり耳目により観測した結果を表 8 に、塩分付着量測定結果を表 9 に示す。暴露期間中の様々な汚損状況において、観測鉄塔 (高抵抗導電釉) においてははかすかな部分放電音の発生が 3 日しか確認されなかった

表 8 部分放電音耳目観測結果 (77 kV 送電線)

Table 8. Inspection results of audible noise on 77 kV transmission line.

item	the observation duration	
	Ordinary glaze	Semiconducting glaze
the observation duration	May.15~October.26/2001:48 days May.10~September.17/2002:38 days	
	total : 86 days	
time zone	5:00~6:30	
audible noise level※	Recorded level A for 52 days	Recorded slight noise for 3 days

※ : level of audible noise

A : very Low

B : Low

C : High

D : very High

表 9 塩分付着密度測定結果 (77 kV 送電線)

Table 9. ESDD mesuring on 77 kV transmission line.

item	Measure-ment part	exposure period by pilot insulator			
		1 month	3 month	6 month	after the typhoon*
ESDD (mg/cm ²)	upper surface	0.050	0.032	0.027	0.037
	lower surface	0.070	0.049	0.036	0.141
	average	0.058	0.042	0.033	0.101

Note) Maximum ESDD during observation

* : on August 22, 2001 (After typhoon No.0111)

のに対し、観測鉄塔（通常釉）においては部分放電音の発生が52日も確認された。このことから、通常釉がいしに比べ、高抵抗導電釉がいしには部分放電音抑制効果があることが確認できた。なお、観測期間におけるパイロットがいしの最大塩分付着密度は0.141 mg/cm²であった。

6. ま と め

本研究の成果を以下に列記する。

(1) がいしの熱エネルギー収支をもとに、導電釉がいしの熱逸走メカニズムを推定し、各試験により確認・定量化した。

(2) 高抵抗導電釉がいしの最適な釉薬抵抗値は、熱安定性、部分放電音抑制効果、導電釉の長期劣化および製造上の釉薬配合や厚さの変動を考慮し、250 MΩ～500 MΩと設定した。

(3) がいし温度を指標として、海水の飛沫に曝されるような汚損環境下での導電釉がいしの熱逸走限界をがいし温度130℃、許容温度上昇+90 K（設計周囲温度：40℃）であることを確認した。

(4) 許容温度上昇を上回るのは、無風状態で実施した5～9個/連の塩水注水試験のみであり、この場合でも風速8 m/sがあれば温度上昇は20～30 K程度に抑えられた。海水の飛沫に曝される条件下では風速10 m/sを超えることが

十分期待できるため、高抵抗導電釉がいしが熱逸走することはないと評価した。

(5) がいし磁器は、許容温度上昇を大きく上回る冷熱強度を有していることを確認した。

(6) 275 kV 送電線（設計 ESDD 1.0 mg/cm²）および77 kV 送電線（設計 ESDD 0.5 mg/cm²）において、2年間のフィールド検証試験を実施し、高抵抗導電釉がいしの熱逸走抑制効果および部分放電音抑制効果について実用性能を確認した。これにより、海水の飛沫に曝されるような汚損環境下での部分放電音抑制技術として実用化可能であることが明らかとなった。

今後は高抵抗導電釉がいしの不良がいし検出方法に関する研究を進め、メンテナンス技術の確立を目指す。

最後に、本研究を推進するに当たり、多くの方々のご指導・ご協力を賜った。ここに深甚なる謝意を表します。

（平成16年2月23日受付，平成16年6月24日再受付）

文 献

- (1) Y. Suzuki, Y. Nakashima, S. Mori, S. Ito, and M. Akizuki: "Application Design and Field Results of Semiconducting Glaze Insulators", *NGK Rev.*, No.58, pp.15-28 (1999-12) (in Japanese)
鈴木良博・中島康裕・森 重男・伊藤 進・秋月優宏：「全面導電釉がいしの適用設計とフィールド実績」, *NGK レビュー*, No.58, p.15-28 (1999-12)
- (2) Y. Suzuki, S. Ito, K. Miyahara, and M. Miyazaki: "Electric Characteristics of High-resistance Semiconducting Glaze Suspension Insulators under Contaminated Conditions", 2001 National Convention Record IEE Japan, No.7-072 (2001) (in Japanese)
鈴木良博・伊藤 進・宮原幸二・宮崎慎一：「高抵抗全面導電釉懸垂がいしの汚損性能」, 平 13 電気学会全国大会, No.7-072 (2001)
- (3) 電気学会：「架空送電線の電流量」, 電気学会技術報告, No.660, pp.8 (1997-8)
- (4) 村田八束：「冷熱試験について」, 日碍レビュー, No.24 (1961-5)

篠 田 明 秀（正員）1956年4月13日生。1979年3月東京大学工学部電気工学科卒業。同年4月中部電力（株）入社。現在工務部技術開発グループに勤務。主として送変電設備に関する研究開発に従事。

知屋城 清 信（正員）1953年11月28日生。1977年3月同志社大学工学部電気工学科卒業。同年4月中部電力（株）入社。現在研究企画部企画グループに勤務。主として研究開発・計画策定業務に従事。

岡 田 英 幸（正員）1964 年 10 月 3 日生。1987 年 3 月慶応義塾大学理工学部電気工学科卒業。同年 4 月中部電力（株）入社。現在工務部技術開発グループに勤務。主として送変電設備に関する研究開発に従事。

伊 藤 進（正員）1948 年 9 月 21 日生。1969 年 3 月鈴鹿工業高等専門学校卒業。同年 4 月日本ガイシ（株）入社。現在，同社電力技術研究所勤務。主としてがいしの高電圧研究，汚損耐電圧特性の研究に従事。IEEE 会員。

鈴 木 良 博（正員）1950 年 12 月 10 日生。1973 年 3 月名古屋大学卒業。同年 4 月日本ガイシ（株）入社。主として高電圧がいしの設計および汚損特性，インパルス電圧特性等の高電圧試験研究に従事。現在，同社ガイシ技術部長。工学博士。IEEE および CIGRE 会員。

内 藤 克 彦（終身会員）1934 年 12 月 24 日生。1960 年 3 月名古屋大学大学院修士課程終了。同年日本ガイシ（株）入社。1991 年同社退社後，名古屋工業大学教授。98 年同大学退官後，名城大学電気電子工学科教授。高電圧，絶縁，電磁界等の研究に従事。工学博士。IEEE Life Fellow。IEEE DLP Distinguished Lecturer。CIGRE 特別会員。