北海道-本州直流幹線におけるがいし金具の腐食に関する研究結果

正員 岡 本 東 行 (電源開発)

非会員 田 代 義 雄 (電源開発)

正員 高 須 和 彦 (電力中研)

正員 松 岡 良 輔 (日本ガイシ)

正員 坂 西 健 治 (日本ガイシ)

Investigation of Corrosion of Insulator Hardware in the Hokkaido-Honshu DC Transmission Line

Haruyuki Okamoto, Member, Norio Tashiro Non-member (Electric Power Development Co., Ltd.), Kazuhiko Takasu, Member (Central Research Institute of Electric Power Industry), Ryosuke Matsuoka, Member, Kenji Sakanishi, Member (NGK Insulators, Ltd.)

The Hokkaido-Honshu DC transmission line, the first DC transmission line in Japan, has been successfully operated for the past 11 years since its operation started in December, 1979 with 125 kV and its operating voltage was increased to 250 kV in June, 1980. This DC line, which interconnects the Hokkaido and Mainland of Japan, is located at a distance ranging from 0.5 km to 12km from the seacoast.

Under such circumstances, the authors have been concerned about insulator contamination flashover and the corrosion of hardware, especially pin, due to the electrolysis.

Thus a series of periodical ESDD measurements and investigation of the insulator hardware corrosion have been conducted.

The investigation results show that the original design ESDD values are adequate and the effectiveness of zinc sleeve against the electrolytic corrosion of pin has been clarified. Reduction in weight of zinc sleeve is not only due to the electrolysis but also due to the natural corrosion in the corrosive atmosphere near the seacoast.

キーワード：直流送電線，がいし，電荷量，電食，亜鉛スリーブ，等価塩分付着密度

1. ま え が き

北海道-本州直流幹線（以下、北-本直流幹線と略記）は、我が国初の本格的直流送電線路であること、架空線路が重汚損地区を通過していることなどから、がいしの保守管理のため、等価塩分付着密度、表面漏れ電流による電荷量、がいし金具の腐食などについて継続的な調査が行われている。

特にがいし金具の腐食については周囲の雰囲気やがいし表面の汚損に左右されると共に、直流課電に起因する電食も心配される。がいしの合理的な保守管理を行うには広範囲な地区のがいし金具の腐食の実態を把握しておく必要がある。このような観点から、北-本直流幹線では毎年汚損の激しい臨海地区のがいしを中心に、ピンの腐食、亜鉛スリーブの減耗量の調査を実施している。本論文ではこれらの調査研究結果を報告する。

2. がいし金具の腐食の概念

〈2・1〉 電 食 直流電圧が印加された懸垂がいしにおいて、がいし表面が汚損湿潤すると、キャップとピンを漏れ電流が流れ、電気分解の原理に従って正極側の金具が溶出することとなる。ピン側が正極課電の場合、ピンの大気露出部は、電食によりやせ細って機械的強度が低下し、またセメント内部のピンは、電食により腐食すると体積膨張し、磁器を押し割る恐れがある。

ピン側が負極課電の場合には、キャップが電食を受けることになるが、キャップの場合には、ピンに比べ電流密度が小さいので、一般には問題とならない。しかし海外の直流送電線において、キャップ下端面とがいし上面にほとんど間隙のない場合に、キャップ下端部の腐食生成物の体積膨張により、ガラスがいしが破損している例もある。

〈2・2〉 自然腐食 がいし金具の腐食としては、上述の電食以外に課電に無関係に進行する自然腐食がある⁽¹⁾。なお、課電されていない金属の自然腐食は金属表面に絶縁性の酸化被膜が形成されると腐食の進行は抑制されるが、課電されている場合には局部放電によって酸化被膜が破壊されるので、腐食の進行の抑制はあまり期待できない。

〈2・3〉 亜鉛スリーブの防食作用 亜鉛スリーブは、図1に示すように、電食の発生しやすいセメントと大気境界部に、ピン本体に密着して取付けられている。亜鉛はピン本体の材料である鋼よりも電気化学的に陽極性であり、表面漏れ電流により、亜鉛スリーブ

が選択的に電食を受け、鋼ピン本体の電食を防止しようとするものである。

亜鉛スリーブ付きピンを使用したがいしは、北-本直流幹線を初め世界各地の直流送電線で使用され、優れた効果をあげている。

〈2・4〉 直流課電がいしの破損例 直流課電がいしの破損例を表1に示す^{(2)~(4)}。重汚損地区では、普通ピンを用いたがいしは6~10年程度でピンの腐食膨張により破損している。亜鉛スリーブ付きピンを使用したがいしが破損した例は、ニュージーランド250 kV直流送電線の重汚損地区のみである。当初、破損の原因が、スリーブに用いた亜鉛に混入した鉛に起因するスリーブの粒界腐食による体積膨張であるとして、純亜鉛スリーブ付きがいしに取替えられたが、純亜鉛スリーブ付きがいしについても、一部重汚損地区でセメント内部のピンの腐食膨張により破損が発生した。他の地域では良好な性能を示す亜鉛スリーブ付きがいし

図1 犠牲電極取付け図

Fig. 1. Insulator with sacrificial electrode.

表1 直流課電がいしの電食による破損例

Table 1. Examples of damaged DC insulators caused by electrolytic corrosion.

使用場所	がいし	使用条件			亜鉛スリーブの有無	破損原因
		使用期間(時間)	分担電圧(kV/個)	つり形		
電研武山	250mm懸垂 250mm耐塩	5年9箇月 (37,294h)	>+17 >+21	耐張	無	セメント内ピンの腐食膨張による磁器破壊
	250mm懸垂 250mm耐塩	7年7箇月 (47,132h)	>+17 >+21	懸垂	無	
JR宇部	180mm懸垂	10年	1.5/2	懸垂	無	セメント内の亜鉛スリーブの腐食膨張による磁器破壊
ニュージーランド	旧耐塩がいし	6年以降	8.3 8.9	懸垂 耐張	有 (亜鉛合金)	
	250mm耐塩	6年以降	8.9	懸垂	有 (純亜鉛)	セメント内ピンの腐食膨張による磁器破壊
電研武山	下ひだSP (SP-850H)	14年 (95,500h)	62.5	垂直	無	金具内面の腐食膨張による金具破壊
		11年 (67,600h)	80(9年) 62(2年)	垂直	無	

が破損するのは、この地区の汚損が非常に厳しいという頻繁に高湿度(霧)にさらされるため、セメント内部が常に湿潤した状態となり、漏れ電流がセメント内部を通してセメント内部のピン本体に流れ込み、亜鉛スリーブがあるにもかかわらず、セメント内部のピン本体が腐食し体積膨張するためと考えられる。このような特殊環境条件用として、セメント内の亜鉛スリーブとピンの表面に絶縁コーティングを施し、ピンの腐食を防止する対策を考案し、現在実フィールドでがいしの一般的性能と併せてその効果を検証している⁽³⁾。実験室の評価では、長期性能を含めたがいしの機械的性能は標準がいしと同等であることを確認済みである。

なお電研武山で、11年間と14年間直流課電されたSPがいしの金具にクラックが発見された。原因は電食により金具内面にさびが発生し、体積膨張により金具自身にクラックが生じたものである。

3. 北-本直流幹線

北-本直流幹線は、図2に示すように北海道函館変換所と本州上北変換所間約170 kmを直流250 kVで

図2 北-本直流幹線経路図

Fig. 2. Route of Hokkaido-Honshu HVDC line.

図3 北-本直流幹線使用がいし

Fig. 3. Insulators used in Hokkaido-Honshu HVDC line.

連系するもので、架空送電線約130 km、海底ケーブル約40 kmにより構成されている。送電線は片極で運転されており、極性反転によって潮流制御を行っている。運開は昭和54年12月であり、平成元年10月までの課電時間は累計17,883時間で、課電率は約21%である。

送電線のがいしは軽汚損地区が1連あたり250 mm懸垂がいし34個、中・重汚損地区は250 mm耐塩用懸垂がいし32個および37個、臨海地区は320 mm直流がいし34個である。これらのがいしはすべて亜鉛スリーブ付きである。

がいしの形状、寸法は図3に示すとおりである。

4. 調査項目、調査対象場所

〈4・1〉 等価塩分付着密度の調査 図2に示す各地点の鉄塔にパイロットがいしをつり下げ、無課電状態で年間を通して3箇月ごとに、冬季は1箇月ごとにがいし表面の汚損度の測定を実施している。測定対象がいしは北-本直流幹線で使用されているがいしと250 mm懸垂がいしの2種類である。

〈4・2〉 電荷量の測定 函館、上北両変換所および古川ケーブル立上り部のNo. 80鉄塔で実使用されているがいしについて、がいし連の接地側に電荷量計を挿入し、漏れ電流による電荷量を連続測定している。なお函館変換所、No. 80鉄塔では正負両極の電荷量を、上北変換所では負極のみの電荷量を測定している。

〈4・3〉 亜鉛スリーブ減耗量の調査 毎年1回実線路で使用しているがいしを撤去し、亜鉛スリーブの減耗量を測定している。スリーブの減耗量は、がいしを解体の後ピンスリーブ部を円周方向に4分割し、図9に示すような裁断面の拡大写真より減耗面積を測定し、計算により求めている。調査の対象は主として臨海地区の懸垂鉄塔No. 80とNo. 83、および耐塩鉄塔No. 81である。このほかの地区のがいしについても、適宜亜鉛スリーブの減耗量を調査している。

5. 等価塩分付着密度の調査結果

3箇月ごとの定期測定結果の50%値および実測最大等価塩分付着密度を図4に示す。

実測最大値は、3箇月ごとの定期測定値の50%値に対しては、3.0~6.5倍となっているが、設計塩分付着密度に対しては1/2~1/3となっている所が多い。このように設計値に比べ実測最大値が1/2~1/3であるのは、調査期間中に大形台風の襲来がなかったためである。250 mm懸垂がいしに対する250 mm耐塩

表 2 北-本直流幹線におけるがいの表面漏れ電荷量測定結果

Table 2. Measurement results of quantity of electricity due to the leakage current on the insulator surface.

測定地点	使用が	分担電圧 (kV/個)	ESDD* (mg/cm ²)	測定極性	測定期間	課電時間 (h)	実測電荷量 (C)	課電率100%を想定した場合 の年間電荷量** (C/年)
函館変換所	250mm懸垂	7.4	0.008	+	'86.12~'89.10	6,702	117	153
				-	'80.10~'89.10	3,990	77	169
上北変換所	250mm耐塩	6.8	0.002	-	'80.10~'85.2	3,890	298	671
No.80鉄塔	320mm直流	7.4	0.014	+	'80.10~'89.10	12,710	1,489	1,026
				-	'80.10~'89.10	4,046	464	1,005
電研武山	320mm直流	11.4	0.026	+	'81.1~'84.12	28,796	1,919	370~750
	250mm懸垂	10.0	0.025	+	'81.1~'84.12	28,796	1,772	400~750
電研米沢	250mm懸垂	11.2	0.008	-	'81.12~'83.4	7,950	175	150~210
		13.3~14	0.008	-	'83.5~'87.3	25,911	637	200~250

注) *: 等価塩分付着密度(無課電3箇月ばく露品の50%値) ** *: 実測電荷量×365日×24時間/実課電時間

図 4 等価塩分付着密度の測定結果
(無課電がいの下面)

Fig. 4. Measurement results of ESDD.

用懸垂がいの, 320 mm 直流がいの等価塩分付着密度比は 0.5~0.8 であった。これは、これまでに他所で測定されている結果とほぼ同等の比率である⁽⁶⁾。

3 箇月ごとの定期測定値の 50% 値に対する冬季 1 箇月ごとの等価塩分付着密度の 50% 値の比を図 5 に示す。

函館変換所以外では冬季 1 箇月ばく露の等価塩分付着密度は、ばく露期間が短いにもかかわらず 3 箇月ばく露の等価塩分付着密度より大きくなっている。これは、冬季に強い季節風が吹くためである。

図 5 冬季 1 箇月ばく露と年間 3 箇月ばく露がいの等価塩分付着密度の比較

Fig. 5. Ratio of ESDD of one month exposure insulator in winter to that of three month exposure insulator in all seasons.

6. がいの表面漏れ電荷量測定結果

平成元年 10 月までのがいの表面漏れ電荷量測定結果を表 2 に示す。表には参考のため電研武山⁽⁶⁾、電研米沢⁽⁷⁾における測定結果も併記した。

函館変換所においても No. 80 鉄塔においても課電率を 100% と想定した場合の正、負両極性の年間電荷量はほぼ同等であり、極性による電荷量の差は見られない。なお、電研武山の調査でも印加電圧の極性による電荷量の差は見られていない⁽⁶⁾。

年間電荷量は軽汚損地区の函館では 150 C 程度、臨海地区の No. 80 鉄塔では、1,000 C 程度と測定地点によりかなり異なっている。また臨海地区の No. 80 鉄

塔と電研武山を比較すると、前者の等価塩分付着密度、がいしの平均分担電圧は、ともに後者より小さいにもかかわらず電荷量は前者のほうが大きくなっている。これは電研武山での電荷量の解析結果⁽⁶⁾にも示されているように、電荷量は等価塩分付着密度のほか降雨量、降雨時間、高湿度の時間など湿潤条件の影響も強く受けるためと考えられる。

7. 亜鉛スリーブ減耗量測定結果

〈7・1〉 使用場所と亜鉛スリーブ減耗量 使用期間2～4年の北-本直流幹線各所の懸垂づりがいしの亜鉛スリーブ減耗量測定結果を、使用期間1年あたりの減耗量で整理したものを図6に示す。

亜鉛スリーブ減耗量は、同一場所でも使用期間によって大きくばらついているが、臨海地区に位置するNo. 80, No. 83 鉄塔の亜鉛スリーブの減耗量はその他の地区の減耗量に比べ格段に多くなっている。

これは汚損環境の厳しい臨海地区では、がいし汚損と湿潤条件によって決まる電荷量による電食、〈7・3〉節で述べる課電の有無とは無関係な、自然腐食による減耗量の両者が他地区に比べて大きいと考えられる。

図 6 北-本直流幹線各所の亜鉛スリーブ減耗量

Fig. 6. Reduction in weight of zinc sleeve.

〈7・2〉 使用期間と減耗量 亜鉛スリーブの減耗量を継続的に測定している臨海地区のNo. 80, No. 83, No. 81 鉄塔における使用期間と亜鉛スリーブ減耗量の関係を図7に示す。

がいしが懸垂づりのNo. 80, No. 83 鉄塔における亜鉛スリーブ減耗量は年平均160～290 mg程度、耐張づりのNo. 81 鉄塔では55～130 mg程度であった。ただし、この値は正極性電圧の課電率が約11%における減耗量であり、課電率が上がれば年間の減耗量は更に大きくなると考えられる。耐張づりがいしの減耗量は懸垂づりがいしの40%程度となっている。これは、耐張づりのほうが懸垂づりより雨洗効果が良いこと、がいし表面が乾燥しやすいことなどが影響していると考えられる。なお電研武山において、平均分担電圧21～36 kV/個、課電率約80%で14年間懸垂づりではなく露した320 mm 直流がいしの亜鉛スリーブの年平均減耗量は680 mg程度である⁽⁶⁾。

〈7・3〉 電食量と自然腐食量 使用期間約8年のNo. 80 鉄塔におけるがいしの亜鉛スリーブ減耗量と電荷量の関係を表3に示す。

亜鉛スリーブの減耗量がすべて電食によるとして計算した年平均等価電荷量と実測電荷量の差は、自然腐食による減耗量で、その等価電荷量は480～570 Cである。一方、無課電がいしの亜鉛スリーブの減耗量は自

図 7 使用期間と亜鉛スリーブ減耗量 (臨海地区)

Fig. 7. Relation between duration of operation and reduction in weight of zinc sleeve.

表 3 亜鉛スリーブの減耗量と電荷量
Table 3. Reduction in weight of zinc sleeve and quantity of electricity.

使用場所	使用がいし	がいしの つり形	平均分担電圧 (kV/個)	使用期間 (年)	正極電圧 課電率 (%)	スリーブ 減耗量 (mg/年)	スリーブ減耗量から 計算した年平均 等価電荷量 A (C/年)	年平均実測 電荷量 B (C/年)	自然腐食 等価電荷量 A-B (C/年)
No. 80 鉄塔	320 mm 直流	懸垂	7.4	8.3	11	200～230	590～680	110	480～570
			無課電	8.3	—	185	540	0	540

表 4 ピン付着汚損物の化学分析結果(約 8 年使用後)
Table 4. Results of chemical analysis of contaminants deposited on pin.

鉄塔 No.		成 分 (wt%)						
		ZnO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SiO ₂ 他
No. 80	課 電 品	64.41	0.73	0.56	0.48	0.80	2.04	30.98
	無課電品	62.95	0.77	0.61	0.43	0.74	1.96	32.54
No. 83	課 電 品	63.81	0.55	0.40	0.31	0.66	2.39	31.88

課電品 無課電品 課電品
No.80鉄塔(懸垂吊) No.81鉄塔(耐張吊)

図 8 ピン外観写真(約 8 年使用後)

Fig. 8. Outside view of pin (after 8 years operation).

然腐食のみによるもので、これより計算した 1 年あたりの等価電荷量は 540 C であり、両者の自然腐食による等価電荷量はほぼ一致している。なお、電研武山の 1 年あたりの自然腐食等価電荷量は 850~950 C 程度⁽⁶⁾と計算されている。このように自然腐食量は測定地点の環境条件により大きく異なり、電荷量による電食に比べて無視できない量であると言える。今後他の地区においても長期にわたる調査が必要であろう。

〈7・4〉ピン解体結果 北-本直流幹線で約 8 年間使用したピンの代表的外観を図 8 に示す。臨海地区懸垂りの No. 80 鉄塔におけるがいしのピンの大気露出部は、課電品、無課電品とも白さび状の腐食生成物でかなり厚く覆われている。これに対し、同じ臨海地区でも耐張りの No. 81 鉄塔のがいしの白さび状腐食生成物の量は No. 80 鉄塔に比べかなり少ない。これは先に述べたように、耐張りの場合には、懸垂りに比べ雨洗効果が優れていること、乾燥しやすいことなどの影響によるものと考えられる。

No. 80, No. 83 鉄塔におけるピンの大気露出部の白さび状腐食生成物の分析結果を表 4 に示す。成分比

課電品 無課電品
図 9 亜鉛スリーブ半裁品の拡大写真
(No. 80 鉄塔で約 8 年使用後)

Fig. 9. Enlarged cross-sectional view of zinc sleeve (after 8 years operation at tower No. 80).

からみて白さびは亜鉛が溶出酸化したものと土砂などの汚損物が混合したものであると考えられる。

No. 80 鉄塔の課電、無課電がいしの亜鉛スリーブ半裁品の拡大写真を図 9 に示す。亜鉛スリーブの大気露出部の腐食状況は課電品、無課電品とも同じような形態を示している。これは表 3 から明らかなように、課電品の腐食の大部分が自然腐食によるためと考えられる。

8. む す び

北-本直流幹線は運開以来 11 年間大きなトラブルもなく順調に運転されている。現在までの課電率はそれほど高くないが、今後飛躍的に高くなる見込みである。

現在までの調査ではピンの痩せ細りもなく、亜鉛スリーブは犠牲電極としての役割を十分果たしている。

亜鉛スリーブの減耗量は、今後課電率が大きくなると電荷量による電食によりかなり増えると考えられるが、自然腐食による減耗量を含めて推定した場合でも

臨海地区の亜鉛スリーブの寿命は今後更に 40~50 年期待できる。また、セメント内部のピンの腐食に基づく磁器の押し割りについても、現在のところピンに腐食の徴候は認められず、汚損湿潤環境がニュージーランドの一部地区ほどは厳しくないと思われるので心配はないと考えられるが、腐食が進み亜鉛めっき層が失われ、赤さびが一旦発生すると腐食は急速に進行する恐れもある。今後とも調査を継続し、直流送電線におけるがいしの保守管理の指針を確立していきたい。

(平成 3 年 1 月 22 日受付)

文 献

- (1) 鬼頭・向坂・坂西:「懸垂碍子の電食と亜鉛スリーブの防食効果」, NGK レビュー, No. 43 (昭 57-10)
- (2) 渡辺・関・今野:「武山直流課電曝露実験場におけるがいしピンの電食状況の観察」, 電中研研報, 779001(昭 55)
- (3) L. M. Crabtree, K. J. Mackey, K. Kito, K. Naito, A. Watanabe & T. Irie: "Studies on Electrolytic Corrosion of Hardware of DC Line Insulators", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, **PAS-104**, No. 3 (1985)
- (4) 渡辺・谷口:「直流課電がいしの電食特性」, 電中研研報, W 86022 (昭 62)
- (5) 500 kV 送電実証試験研究(委): 500 kV 送変電設備の実証試験研究報告(昭 47)
- (6) 谷口・渡辺:「直流用懸垂碍子の電食」, 電中研研報, W 88005 (昭 63)
- (7) 高須・新藤・松田:「内陸地域における直流課電がいしの汚損特性」, 同上, T 86077 (昭 62)

岡 本 東 行 (正員)

昭和 18 年 10 月 7 日生。43 年 3 月東京工業大学電気工学科卒業。同年 4 月電源開発(株)入社, 56 年 10 月本四連系線事務所課長代理, 60 年 4 月工務部送電室課長代理, 60 年 10 月海外電力調査会調査統計部主任研究員, 63 年 10 月工務部送電室課長, 平成 3 年 3 月北本連系設備増設建設所所長代理。CIGRE SC-22 Member

田 代 義 雄 (非会員)

昭和 18 年 2 月 14 日生。36 年 3 月北海道立釧路工業高校電気科卒業。同年 4 月電源開発(株)入社。主として, 送電線の保守運営, 新增設工事, 直流がいしの汚損・放電現象業務に従事。現在, 北本連系送電所所長代理。北本直流幹線の保守運営業務に従事。

高 須 和 彦 (正員)

昭和 21 年 12 月 17 日生。45 年 3 月東京工業大学理工学部電気工学科卒業。同年 4 月電力中央研究所入所。平成元年 7 月同所泊江研究所送配電部放電研究室長, 現在に至る。主として, 送変電設備のがいし類の汚損および雪に対する電気絶縁性能, 絶縁設計に関する研究に従事。

松 岡 良 輔 (正員)

昭和 16 年 4 月 15 日生。41 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月日本碍子(株)入社。主として, がいしの汚損特性に関する研究に従事。現在, 超高压研究所所長代理。IEEE Senior Member, 日本沙漠学会会員。

坂 西 健 治 (正員)

昭和 18 年 9 月 15 日生。37 年 3 月県立岐阜工業高校電気科卒業。同年 4 月日本碍子(株)入社。主として, がいしの汚損特性に関する研究に従事。