電力流通設備の防食技術の開発とその普及*

市場幹之*

* 東京電力ホールディングス株式会社 経営技術戦略研究所

Development and Penetration of Technologies for Preventing Corrosion of Electric Power Distribution Facilities*

Mikiyuki Ichiba*

* R & D Dept., Tokyo Electric Power Company Holdings Inc.

The structure of the electric power business has been undergoing a major transformation in recent years. Japan's vertically integrated electric power supply system is now going through a historical paradigm shift with respect to the wide-area operation of power transmission lines, complete liberalization of electricity retailing, and separation of power generation and transmission. These trends also affect the issue of preventing the corrosion of power distribution facilities, making efforts to maintain the facilities and to estimate their service life and damage risk all the more important. This paper focuses on the issue of preventing the corrosion of utility poles and outside steel structure facilities that account for a large portion of the installed electric power distribution network. It describes the present status of performance evaluation tests conducted on prestressing steel tendons used in concrete poles (PC steel) and heavy duty coatings as well as the activities of related academic societies.

Key words : power distribution facility, concrete pole, hydrogen embrittlement, FIP, JSCE S 1201, ammonium thiocyanate, corrosion, pole transformer, PC steel, salt damage environment, exposure test, corrosion map, heavy duty coating

1. はじめに

近年、電気事業の体制は大きな変貌を遂げつつある。戦後構築された電力供給体制は、当時の米国の電気事業制度を模した垂直統合型の体制で、地域独占と総括原価方式で電力会社の経営基盤を担保し電力供給を促すものであった。

垂直統合型の電力供給体制は電力システム改革の途上にあり、送電線の広域運用、小売全面自由化、発送電分離といった歴史的なパラダイムシフトを迎えている¹⁾。従来の電力事業は、Fig. 1に示すように「発電事業」、「送配電事業」、「小売電気事業」に再編される。「送配電事業」は2020年の法的分離を含め高い中立性が求められている。この変化は、「送配電事業」を支える電力流通設備の保全や関連する腐食防食課題にも大きく影響する。設備管理者は合理的な設備形成や維持管理と設備寿命や損傷リスクに関する取り組みが求められる。

筆者らは腐食防食学会を中心に電力流通設備の経年劣化事例や対策を報告してきた²⁾⁻¹²⁾。建設時は想定していなかった経年劣化事象や品質管理としての試験評価法の課題も顕在化している。本稿では筆者が関与した電力流通設備の腐食防食課題への取り組みや学協会と連携した活動について紹介する。

2. 電力流通設備と供給体制の変化

垂直統合型の電力供給体制における電力供給の流れをFig.2に示す。ここでは発電所から消費者に送り届ける

設備を電力流通設備としている。電力流通設備は、主に発電所や変電所をつなぐ送電、送電からの電圧を降圧するなど電圧を変化させる変電、変電と需要家をつなぐ配電の3部門から構成される。各部門は設備の広がりがあり、変電所は点、送電網は線、配電網は面に例えられる。部門間の設備量も3桁以上の差異があり、当社の例では変電設備が約1600箇所、送電鉄塔が約45000基、電柱が約580万基である。これらの設備は高度成長期に多くが形成され、経済成長の鈍化に伴い設備更新の機会は減少傾向にある。島国である日本の厳しい自然環境に

Fig. 1 Power transmission and distribution business and the business classification after the domestic electricity system reform

Fig. 2 Vertically integrated power supply system

* 〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1 (4-1, Egasaki-cho, Tsurumi-ku, Yokohama, 230-8510 Japan)

曝される電力流通設備の腐食対策を中心とした設備保全は重要な経営課題である。

電力流通設備の形成や保全は、地域独占と総括原価方式に基づく費用積算により電力の安定供給とお客様への安全安心を指向している。電力システム改革以降の「送配電事業」においても地域独占と総括原価方式は継承されるが、その実態は大きく変化する。電力流通設備は公的インフラとなり、2015年に電力市場の監視を目的に電力事業者から独立した電力取引監視等委員会が設立された¹⁾。託送料金は電力取引監視等委員会の審査を経て国の認可により決定される。電力会社が積算した託送料金に対する審査や認可の過程では、従来の電力安定供給と安全安心に加えて電力流通コストの透明化や徹底した削減が強く求められる。このため将来的な保全費用に直結する設備の性能や品質に対する管理はより重要となる。さらに、審査の中立性や透明性の観点から設備に要求される品質や性能は標準化された規格や試験で規定することが望まれる。電力流通コストの削減では設備仕様の共通化や統合も要求される。設備製造者が独自に実施していた性能試験を、設備管理者を含めて実施可能な中立的な試験評価技術とすることなども必要となる。現行の規格で品質の規定が難しい場合には、品質管理精度の向上を目的とした新たな試験評価技術の確立が必要となる。

3. 電柱と PC 鋼材の水素脆化

配電設備は電力流通設備の中で最も消費者に近く、かつ数量が大きい設備である。電柱は架空配電機材や電線が装柱される重要な設備で数量も膨大である。電柱を例に腐食防食課題への取り組みを紹介する。

電柱には一般的にプレストレストコンクリート柱が用いられる。コンクリート柱内の鉄筋には高強度である PC 鋼材が用いられる。コンクリート柱の製造工程を Fig.3 に示す。鉄筋籠を型枠に設置し、型枠内で緊張筋となる PC 鋼材に引張応力を付与した状態で固定する。型枠にコンクリートを注入し、遠心成型、養生を行う。コンクリートと鉄筋の付着を確保した後に PC 鋼材の緊張を解放し、コンクリート柱にプレストレスを付与する。遠心成型で脱水して製造されるためコンクリート柱の水セメント比は 20~40% と小さく¹³⁾、経年による中性化

Fig. 3 The manufacturing process of the pre-stressed concrete poles

はほとんど進行しない¹⁴⁾。このためコンクリートにひび割れなどの損傷がない限り、柱内部は高い pH が保たれ内部鉄筋の腐食が長期にわたり抑制される。コンクリート柱はコンクリートにより圧縮強度、内部の PC 鋼材によるプレストレスで靱性が付与される。このため高荷重が加わると柱体がたわみコンクリート表面にはひびが発生し、荷重が除荷されるとプレストレスによりひびが閉じる。JIS A 5373 : 2010 では除荷後のひび巾として 0.05 mm 以下であることが規定されている¹⁵⁾。台風などで過大な荷重がかかるとひび割れが生じ雨水が侵入する。PC 鋼材の周囲の pH が低下すると鋼材は腐食を始める¹⁶⁾。プレストレスを付与するため高い応力がかかった状態で PC 鋼材のような高強度鋼に腐食反応で生じた微量の水素が鋼材に侵入すると、靱性が失われ脆化により破断を生じる可能性がある¹⁷⁾。この現象は水素脆化と呼ばれ、PC 鋼材を用いた一部のコンクリート柱で水素脆化による鉄筋破断が報告されている¹⁸⁾。腐食のみによる鋼材の破断は減肉によるため進行が遅いが、水素脆化による破断は突然生じる。このためコンクリート柱の設備信頼性の維持や保全負荷軽減において、PC 鋼材の水素脆化感受性を安全側で評価する品質管理試験法の確立は重要である。

4. コンクリート柱内の PC 鋼材の品質管理試験

プレキャストプレストレストコンクリート製品を規定した JIS A 5373 では、2010 年の改訂時にコンクリート柱に使用される PC 鋼材の応力腐食割れに対する耐久性能の重要性を考慮した改訂がなされている¹⁵⁾。受渡当事者間の協定として、「ポール類に使用する PC 鋼材は、受渡当事者間で協議して応力腐食割れに対する耐久性能が確認されたものを使用する。」の記載が追加された。ここに記載された「応力腐食割れ」は水素脆化に起因した遅れ破壊を意味する。PC 鋼材が水素脆化を生じる条件は、鋼材強度、応力、鋼中水素濃度の三つの因子が揃うことである。品質管理に用いる水素脆化評価試験では、対象鋼材や使用状態が特定されるため、鋼材強度と負荷応力は限定される。このため水素脆化を促進するためには鋼中水素濃度を高めて試験を行う必要がある。

PC 鋼材の品質管理を目的とした代表的な水素脆化評価試験方法は、公的試験規格として 1980 年に国際プレストレストコンクリート連盟 (FIP : Fédération Internationale de la Précontrainte) で規格化され¹⁹⁾、その後 ISO 15630 に採用されている²⁰⁾。日本国内では通称 FIP 試験として知られている。FIP 試験装置の概要を Fig.4 に示す。この試験方

Fig. 4 The schematic diagram of FIP test equipment

法は荷重が安定する定荷重試験と、簡便な浸漬法を組み合わせた方法である。FIP 試験の浸漬条件は 20 mass% チオシアン酸アンモニウム溶液、温度 50°C である。チオシアン酸アンモニウムは、浸漬法の中では塩酸より高い鋼中水素濃度が得られ²¹⁾、亜ヒ酸などの水素吸蔵促進薬品²²⁾に比較し扱いやすいという特徴がある。評価は 200 h を試験打ち切り時間として試験材の破断時間で行う¹⁹⁾。この試験で得られる破断時間から実環境での破断寿命を直接算出することはできない。しかし、鋼材間の耐水素脆性の相対評価はある程度可能であることから、PC 鋼材を製品状態で評価する水素脆化評価試験法として広く普及している^{20), 23)}。

5. FIP 試験への取り組みと活用

5.1 FIP 試験の技術的な課題

従来の設備仕様は性能規定を指向していたことからメーカー間で構造や使用材料が異なり、使用材料に適した品質管理試験がメーカー独自に行われる傾向があった。電力システム改革を背景に近年では設備仕様に付帯する構造や使用材料は共通化される傾向にある。仕様書内では使用材料と付帯する品質管理試験法や閾値が規定される。仕様に用いる品質管理試験法は実施機関による測定誤差を小さくする必要があり試験再現性が要求される。

品質管理に用いる FIP 試験の技術課題の一つが 12 回の試験繰り返し数を必要とする試験再現性の向上である^{19), 23)}。同一仕様の PC 鋼材の鉄筋で、実施機関により FIP 試験での平均破断時間が 1 オーダー以上異なる例が報告されている²⁴⁾。メーカーが独自に PC 鋼材の品質管理を行う場合、試験再現性の欠如は各社異なる閾値を設定し、試験繰り返し数を増やすことで対応できる。一方、機材や材料仕様の共通化では、同一規格の PC 鋼材の性能を仕様書で明確に規定し、統一した閾値で品質管理を行う。このため複数の実施機関での試験再現性の向上や試験機会内のバラツキの抑制が課題となる。試験中の溶液 pH の変化、比流量、溶存酸素などの基本的な試験条件の破断時間に対する影響やメカニズムを解明することが必要となる¹⁹⁾。

定荷重試験である FIP 試験では荷重の繰り返し再現性は確保される。試験再現性の欠如は試験時の水素吸蔵に起因している。このため、水素吸蔵を支配するチオシアン酸アンモニウム溶液中での鋼材腐食反応を解明して、試験条件を最適化し試験再現性を向上することが重要となる。

5.2 FIP 試験環境中での鋼材腐食機構

FIP 試験の主要条件が決定された当時の鋼材の腐食反応機構として、pH が 7 未満において (1) 式のアノード反応と (2) 式のカソード反応が示されている¹⁹⁾。

溶液 pH は試験中 pH 4~7 を示す。(2) 式の反応は単純な H^+ の還元反応で溶液の H^+ 濃度に吸蔵水素量が依存することを示唆する。しかし、pH 4~7 の FIP 試験溶液が pH 2 の塩酸溶液より水素吸蔵量が大きいことと整合しない²¹⁾。

(2) 式の反応が提案された背景には SCN^- の高い安定性に関係する。 SCN^- は $-\text{S}-\text{C}\equiv\text{N}$ の構造で CN 間の 3 重結合は一般に安定である。 SCN^- が S^0 と CN^- に分解する反

応は、標準生成ギブスエネルギー ΔG° が 79.7 kJ/mol で進行しない²⁷⁾。このため NH_4SCN の関与するカソード反応が提案されず、(2) 式の反応が FIP 試験環境でのカソード反応とされたものと推定される。

FIP 試験環境に浸漬した PC 鋼材の腐食減量および溶液 pH の経時変化を Fig.5 に示す²⁵⁾。図中 (●) で示した腐食減量は経時に伴い増加した。図中 (○) で示した浸漬試験前の溶液 pH は 4.5、浸漬後 24 h で pH は約 6.5 まで上昇し、鋼材の腐食が継続する 24 h 以降も pH は 6.5 付近で一定であった。

浸漬後の試験材表面は、極初期から鉄酸化物と鉄硫化物が生成し²⁶⁾、24 h 浸漬後で全面に Fe, O, S を含む厚さ 1~2 μm の多孔質な黒色皮膜が、196 h 浸漬後で厚さ約 40 μm の FeS (Mackinawite) を含む緻密な内層とポーラスな外層の黒色皮膜を生成した²⁵⁾。

$\Delta G^\circ < 0$ となる CN^- の分解を伴うカソード反応として (3) 式のカソード反応を新たに示した^{25), 28)}。

(3) 式の ΔG° は -184.2 kJ/mol で、鉄電極表面の H^+ の単純な還元反応の ΔG° である -78.9 kJ/mol より小さい²⁷⁾。(3) 式のカソード反応は安定とされる SCN^- の分解を伴う反応である。CN 結合が切断し NH_3 を生成する腐食反応は、反応に伴う微量の NH_3 や NH_4^+ を検出して実証した。 NH_4SCN 溶液中では高濃度の NH_4^+ により微量の NH_3 を検出できない。 SCN^- のみに N を含有する NaSCN 溶液の腐食試験後の溶液をイオンクロマトグラフで分析して NH_4^+ の生成を確認した結果を Fig.6 に示す。腐食試験条

Fig. 5 Weight loss of specimens and pH of test solutions during immersion tests in 20% NH_4SCN at 50°C.

Fig. 6 Semi-quantitative analysis of NH_4^+ concentration in the solution after the 24-h immersion test by ion chromatography. Immersion conditions: 2.73 mol/L Na SCN (pH 4.2), 50°C and solution volume-to-specimen surface area of 10 ml/cm².

件は 20 mass% NH_4SCN と同モル濃度の NaSCN 溶液、溶液 pH は酢酸系の緩衝溶液で 20 mass% NH_4SCN の初期とほぼ同 pH の 4.2、溶液温度 50 °C、浸漬時間 24 h である。緩衝溶液無添加の NaSCN 溶液中での浸漬試験では、溶液 pH は浸漬開始直後に 7.5 程度まで急激に上昇しほとんど腐食は生じない³⁰⁾。

(3)式のカソード反応に関する分極曲線を Fig.7 に示す³⁰⁾。試験浴は Fig.6 で用いた pH4.2 の NaSCN 溶液を基準に、緩衝溶液を低減(pH 5.9) および無添加とした 3 種の NaSCN 溶液を用いた。浸漬電位から -1.0 V vs. SCE 付近の領域でのカソード電流密度は溶液 pH の低下に伴い増加する。この領域での H^+ の供給は、緩衝溶液とは無関係な水の解離平衡に依存した H^+ の供給に対して、緩衝溶液の酢酸からの H^+ 供給に伴う腐食電流密度が約 30 ~ 100 倍大きな値を示す。(3)式のカソード反応は溶液からの H^+ 供給に依存する。

NH_4SCN は溶液中で NH_4^+ と SCN^- に完全に解離している。また、 NH_4^+ は溶液中で(4)式に示す加水分解を生じる。

アンモニアの塩基解離定数 pK_b は 25 °C で 4.75 であり(4)式の平衡は大きく左に寄っている。溶液中の $[\text{NH}_3]$ と $[\text{H}^+]$ は $[\text{NH}_4^+]$ の 10^{-4} 以下の非常に小さな値となり腐食反応による H^+ の消費や NH_3 の生成は溶液 pH を急激に上昇させる。FIP 試験環境中では H^+ の消費による pH 上昇により腐食反応速度は低下するが、(4)式の NH_4^+ の解離による H^+ の供給により継続する。

気相の変化は浸漬初期から H_2 が発生し O_2 が消費される²⁵⁾。(3)式と同時に進行するカソード反応が(5)式の溶存酸素の還元反応である。

FIP 試験の主要条件が決定された当時、(5)式のカソード反応は pH が 7 以上の領域のカソード反応とされていた¹⁹⁾。

(3)式の反応は浸漬時の FeS 、 H_2 、 NH_3 の生成と整合している。

Fig. 7 Polarization curves measured for specimens immersed in various pH of 2.73 mol/L NaSCN solutions with or without pH buffer solutions at 50 °C in an Ar deaeration atmosphere.

5.3 FIP 試験での水素吸蔵

FIP 試験時の鋼中水素濃度は経時に対してピークを示す。引張り強度が 1400MPa 級の焼入れ焼き戻し PC 鋼棒の例を Fig.8 に示す。鋼中水素濃度は浸漬後 24~48 h で約 3.2 mass ppm まで上昇した後に低下に転じるが、200 h でも 2.5 mass ppm の濃度を維持する¹³⁾。

本試験環境でのカソード反応は SCN^- の分解を伴う(3)式と(5)式の溶存酸素の還元反応である。純酸素雰囲気と脱気雰囲気では FIP 試験環境に浸漬した PC 鋼材の鋼中水素濃度はほぼ同濃度であった²⁸⁾。溶存酸素の還元反応に影響を与える酸素の有無により鋼中水素濃度は影響を受けない。水素吸蔵を支配するカソード反応は SCN^- の分解を伴う(3)式の反応である。

水素吸蔵を支配する(3)式の反応は、鋼材表面に生成する FeS を主体とする腐食皮膜により抑制される。Fig.8 で 200 h 経過時の試験材は鋼中水素濃度が低下傾向にある。表面の腐食生成物を除去して再浸漬すると鋼中水素濃度はピークに近い濃度まで再上昇する²⁹⁾。 FeS 皮膜は pH 上昇に伴い析出が促進され(3)式の反応を抑制し、鋼中水素濃度の上昇は鈍化する。析出した FeS 皮膜は鋼中に吸蔵した水素放出に対しては障壁効果を示さないため、鋼中水素濃度は低下に転じる。 FeS 皮膜は成長に伴い割れを生じ、腐食反応が割れ発生部で継続するため、鋼中水素濃度は低下するものの、試験期間中一定以上の濃度が維持される²⁸⁾。

5.4 FIP 試験の試験再現性向上

水素吸蔵量は(3)式の反応と FeS を主体とする腐食皮膜の生成に支配される。いずれも溶液 pH の影響を大きく受けることから、水素吸蔵を考える上で溶液 pH は重要な因子である。

FIP 試験時の Fig.5 に示した溶液 pH の経時変化は(2)式のカソード反応では説明できない。(1)、(3)、(5)式に基づき浸漬試験時の溶液 pH を計算した結果を Table. 1 に示す³⁰⁾。溶液調製時の 20 mass % NH_4SCN 溶液の溶液 pH は、(4)式に示した NH_4^+ の加水分解で生じる H^+ ((4)式では H_3O^+ と表記) NH_3 からの計算結果と整合する。また、浸漬時の溶液 pH の急激な上昇と上昇の鈍化は、浸漬後の(3)式のカソード反応による H^+ と NH_3 の変化に

Fig. 8 Hydrogen contents of PC steel after immersion for 0 - 200 h in a 20 mass% NH_4SCN solution at a specific solution volume of 20 ml/cm² at 50 °C

Table 1 Calculated solution pH on Eq.3 and measured solution pH as a function of the immerd time. Test conditions: 20 mass% NH_4SCN solution, 50° C and N_2 deaeration.

Immersion time / h	Solution pH	
	Measured	Calculated
0	4.5	4.4
6	6.1	6.0
24	6.5	6.3

に基づき説明することができる²⁵⁾。

FIP 試験中の溶液 pH の挙動の解明に基づき、試験破断時間に対する試験条件の作用がいくつか解明された³¹⁾。比液量の増加が破断時間を短縮する傾向があることは知られていたが、その機構については明らかにされていなかった¹⁹⁾。(3)式の反応に基づき比液量から溶液 pH の計算が可能で実験結果とも整合した³¹⁾。比液量の増加は(3)式の反応による H^+ と NH_3 の影響を緩和し溶液 pH の上昇を抑制する。(3)式の反応は長時間保持され吸蔵水素量が増加するため破断時間は短くなる。溶液 pH の上昇速度を小さくするため比液量は大きい条件が望ましく、複数の鋼材の評価試験では比液量を一定にした試験が望ましい。試験後溶液の再使用も規格により扱いが分かれていた^{19), 20)}。試験後溶液は溶液 pH が高く FeS 皮膜の析出に伴う(3)式の反応の抑制が早期に起こり、鋼中水素濃度が低下する。破断時間は長くなることから試験後溶液の再使用は好ましくない³¹⁾。また、従来解明されていなかった温度、溶液濃度、溶存酸素などの試験条件の影響も明らかにした^{30), 31)}。

以上の知見を反映して試験条件の共通化が行われた。同一 PC 鋼材を 4 機関で各 10~16 本の試験を実施した結果として、平均破断時間で 61~74 h が報告されて³²⁾、1 オーダー近い試験機関によるバラツキが大きく抑制された。

5.5 試験手順の標準化と活用

試験手順を仕様書などで活用するには公的な試験規格であることが望ましい。2007 年から腐食防食学会で FIP 標準試験手順の原案策定が行われ、2010 年から FIP 試験規格化小委員会(主査 高井健一 上智大学教授)が発足し FIP 標準試験手順の規格化が行われた³²⁾。産業界の委員として電力、通信のコンクリート柱ユーザーと、鋼材熱処理、鉄鋼の PC 鋼材メーカーが参画した。

本規格は、2012 年に腐食防食学会規格「20%チオシアン酸アンモニウム溶液中での PC 鋼材の水素脆化試験方法」JSCS 1201 の水素脆化評価試験手順として発行された³²⁾。国内の試験実施機関が保有する試験設備や運用を考慮し、現在国内で流通している PC 鋼材を用いて試験精度の向上を目的とした、実験条件、手順、使用機器について詳細な検討と規定を行っている。

本規格試験の再現性向上は繰返し試験数の減少による試験負荷軽減と試験品質向上につながり、PC 鋼材などの品質管理へ適用が拡大している。特にコンクリート柱については応力腐食割れに配慮した鋼材を使用するように規定されている¹⁵⁾。本規格試験で短時間破断を示す PC 鋼材はコンクリート柱内でも短時間で破断すること

も示唆されている³³⁾。PC 鋼材の製造者からコンクリート柱の設備管理者にまで本規格試験が PC 鋼材の応力腐食割れ試験として活用されている。特にコンクリート柱の場合、使用される PC 鋼材の水素脆化感受性の評価により、コンクリート柱自体の水素脆化に対する裕度の評価が可能となる。このため、経年による設備更新ではなく水素脆化を考慮したリスクベースマネジメントや、コンクリート柱の設計情報や保全データと照合して柱の保全や点検の精度向上にも寄与することが期待されている³⁴⁾。

6. 屋外鋼構造電力流通設備への取り組み

6.1 架空配電機材の腐食環境の定量評価

コンクリート柱と同様に物量の多い機材は柱上変圧器である。当社管内でも約 200 万台が設置されている。柱上変圧器は需要家のニーズに応じて設置、撤去、交換されることから設置状態の面的な管理が重要となる。柱上変圧器などの腐食リスクの把握を容易にし、巡視や保全の精度向上や負荷の軽減を目的として、塩害地域に設置された架空配電機材の腐食環境の定量評価や可視化が行われている³⁵⁾。

架空配電設備の腐食環境可視化のフローを Fig.9 に示す。対象地域内の腐食強度や環境因子を複数地点で計測し、腐食強度に対する多変量解析から地域内の腐食強度の推定式を求める。得られた推定に基づく地域内の腐食強度分布は、実設備の経年劣化の状況とも対応していることが確認されている³⁵⁾。配電設備の保全は配電網に基づくブロックごとに管理されており、腐食環境定量評価に基づき地域内のブロックの管理方法を見直ことができる。腐食環境の厳しいブロックは防食性に優れた機材を配置し点検頻度を増加し、腐食環境が軽微なブロックは保全負荷を軽減することが可能である³⁶⁾。

架空配電設備の腐食環境定量評価で重要な点は目的変数の設定である。目的変数は定量的で対象機材の腐食を模擬した指標が望ましく、鋼材や亜鉛めっきの年間の腐食減量を用いている。腐食減量の測定は、Fig.10 に示すように配電設備の設置位置での暴露試験により計測している³⁷⁾。腐食センサーや環境センサーなどの計器測定に比較して計測に必要な作業負荷が小さく、計測環境での適性の検証が不要であるという利点がある³⁷⁾。

同種の設備は全国で使用され、電力システムの変化に伴い仕様の共通化などが要求される。多様な屋外環境に対応した設備仕様を検討するために、架空配電機材を対

Fig. 9 Procedure of corrosive environment quantitative evaluation of power distribution equipment.

Fig. 10 Exposure test at the installation location of the pole mounted power distribution equipment.

象とした全電力での劣化環境の定量化取り組みが行われた³⁸⁾。架空配電機材の劣化環境は、腐食だけではなく電気的絶縁を損ないトラッキングを生じる塩汚損環境、高電圧で絶縁破壊を生じる雷など多様である。腐食に関する取り組みは、腐食防食学会内に電力流通設備小委員会を組織して対応している。全電力での架空配電機材設置環境での Fig.10 に示した配電設備の設置位置での暴露試験による腐食環境指標の作成や、各種防錆材料の長期性能評価を行っている³⁸⁾。

6.2 塗装防錆の課題

屋外の鋼構造設備に汎用的に使用される塗装は防錆寿命の推定が難しい防錆技術である。重要設備に用いる塗膜の長期防錆寿命は、下塗りの防食性能を保護する上塗りの耐候性により主に担保される。上塗り塗膜の選定の拠り所となる規格は重要である。耐候性に優れた上塗りについては、ふっ素樹脂系塗膜に代表される JIS K 5659 上塗り 1 級の規格がある³⁹⁾。1 級に要求される主な耐候性能は、JIS K 5600-7-7 促進耐候性および促進耐光性(キセノンランプ法)に定める Xenon 照射 2000 h で塗膜の光沢保持率が 80% 以上である。この規格は 2008 年に改訂されており、改訂前はふっ素樹脂と異なるシリコン系樹脂、ポリウレタン系樹脂も規定され、樹脂系ごとに性能や成分の含有量などが規定されていた。改定後は樹脂組成などの仕様に関する規定がなくなり、促進試験に依存した性能規定の規格となっている。Xenon 照射試験と実環境での耐候性が異なる塗膜では誤った認定を与えることとなる。実際に 1 級に認定されている商用塗料でも製品により実環境での耐候性能に大きな差異が認められることが報告されている⁴⁰⁾。

塗膜は主に樹脂と顔料から構成される。JIS 規格は主として Xenon 照射による樹脂の耐候性評価に基づき決定され、顔料の耐候性に関する評価は反映されていない。顔料に用いられる酸化チタンは屋外で光触媒活性を示し樹脂を分解して塗膜の光沢を低下させることがアルキドメラミン系の自動車用塗膜で報告されている⁴¹⁾。顔料に用いられる酸化チタンは屋外で光触媒活性を示し樹脂を分解して塗膜の光沢を低下させることから、顔料表面に活性を抑制する処理が施されている。重防食用の耐候性塗膜の暴露試験後の表面形態の例を Fig.11 に示す。1 μ m 程度の酸化チタン顔料の周囲でクレーター状に樹脂が消失し、自動車用塗膜と同様の事象が確認されている⁴²⁾。

Fig. 11 Surface morphology after weathering test of heavy duty corrosion-proof coat for weather resistance.

規格に定めた樹脂の耐候性を評価する Xenon 照射試験は耐候性塗膜の実環境での性能評価に充分対応できていない。電力設備の管理者は必ずしも塗料の専門家ではなく基本的に公的規格に基づく塗料選定を行う。このため JIS K 5659 で用いられる促進耐候性試験を補完する試験法が必要とされている。現在、重防食用耐候性塗膜の顔料の品質に着目した新たな塗膜の耐候性試験法が腐食防食学会建設小委員会内の WG (HP 試験耐候性 WG 主査 貝沼重信 九州大学准教授) で検討されている。

この促進試験法は、自動車用塗膜への適用を目的として開発され過酸化水素(Hydrogen Peroxide)の間欠噴霧と Xenon 照射を併用して実環境で生じる顔料起因の光触媒劣化を加速するものである⁴¹⁾。重防食用塗膜についても検討が行われ HP-Xe 試験と称されている⁴³⁾。HP-Xe 試験は高耐候性塗膜の実環境での顔料に起因する耐候性低下と良い相関を示す⁴²⁾。HP-Xe 試験は塗料採用時の活用や学会での規格化が期待される。

7. ま と め

電柱の設備保全に関連する PC 鋼材の水素脆化感受性評価を中心に電力流通設備における腐食防食課題への取り組みや最近の腐食防食課題を取り巻く環境の変化について紹介した。設備の高経年化が進むにつれ、当初予期しなかった腐食問題に保全方策を含めて対応するケースが増えてくるものと予想される。電力流通設備における設備寿命や損傷リスクに関する産学連携した取り組みが今後も期待される。本稿が電力流通設備の腐食防食技術の将来を考える一助となれば幸いである。

謝辞

電力流通設備の水素脆化や防食経年劣化対策に多くの学識者、材料、機材、通信、電力会社の皆様のご理解とご協力をいただきました。特に、早稲田大学 酒井潤一教授、上智大学 高井健一教授には大変お世話になりました。この場を借りて厚く御礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) H. Yamauchi and A. Sawa, *Maruwakari denryoku system kaikaku key word 360*, Jpn. Electric Association News paper Division (2015).
- 2) M. Ichiba, T. Hirasaki, T. Tsuboi and S. Tsukao, Proc. 52th Jpn. Conf. Materials and Environments, JSCE, p.87 (2005).
- 3) M. Ishikawa, M. Ichiba, D. Akiba, M. Kamioka and Y. Tsuneishi, Proc. Annual Conf. Fundamentals and Materials Soc., IEE Japan, p.188 (2008).
- 4) M. Ishikawa, M. Ichiba, A. Koike, N. Kamata and K. Itoi,

- Proc. 55th Jpn.Conf. Materials and Environments, JSCE, p.301 (2008).
- 5) Y. Niidome, M. Ichiba, Y. Ueki, M. Ando and S. Tsujikawa, Proc. 55th Jpn.Conf. Materials and Environments, JSCE, p.347 (2008).
 - 6) M. Ishikawa, A. Koike, M. Ichiba and K. Itoi, Proc. JSCE Materials and Environments 2009, JSCE, p.195 (2009).
 - 7) M. Ichiba and K. Takahashi, Proc. JSCE Materials and Environments 2010, JSCE, p.71 (2010).
 - 8) M. Ichiba and K. Okamura, Proc. JSCE Materials and Environments 2010, JSCE, p.75 (2010).
 - 9) Y. Hayakawa and M. Ichiba, Proc. 57th Jpn.Conf. Materials and Environments, JSCE, p.259 (2010).
 - 10) M. Ichiba, T. Takaoka, K. Kasahara and W. Oshikawa, Proc. JSCE Materials and Environments 2013, JSCE, p.125 (2013).
 - 11) A. Kataoka, M. Ichiba and M. Miyata, Proc. JSCE Materials and Environments 2014, JSCE, p.161 (2014).
 - 12) M. Ichiba, K. Watanabe, T. Suzuki, T. Ishii, N. Tanaka and K. Iwanaga, Proc. JSCE Materials and Environments 2015, JSCE, p.37 (2015).
 - 13) *Konkuri-to po-ru handobukku*, Railway Electrification Committee (1958).
 - 14) T. Uomoto and Y. Takada, *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements(V)*, Jpn. Soc. of Civil Eng., 17 [451] p.119 (1992).
 - 15) JIS A 5373:2016, *Precast prestressed concrete products*, JIS (2016).
 - 16) K. Takayama and J. Seki, *NTT Shisetsu*, Nippon Telegraph and Telephone Corporation, 41 [2] 26 (1989).
 - 17) S. Matsuyama, *Okurehakai*, Nikkan Kogyo Shimbun Ltd. (1989).
 - 18) Y. Miyata, Proc. 102nd Symposium, JSCE, p.53 (1994).
 - 19) FIP WG, *Technical Report "Report on Prestressing Steel:5. Stress corrosion cracking resistance test for prestressing tendons"*, FIP (1980).
 - 20) ISO 15630-3, *Steel for the reinforcement and prestressing of concrete - Test methods* (2002).
 - 21) K. Takai, S. Takagi and T. Omura, *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.*, 19 [12] p.911 (2014).
 - 22) M. Nagumo, *Suisozeisei no kiso*, Uchida rokakuho, p.142 (2008).
 - 23) M. Elices, L. Caballero, A. Valiente, J. Ruiz and A. Martin, *Corrosion*, 64 [2] p.164 (2008).
 - 24) M. Ichiba, E. Nakamura and H. Miyamoto, Proc. 170th Symposium, JSCE, p.14 (2010).
 - 25) M. Ichiba, Y. Niidome, S. Nakamura and J. Sakai, *Zairyo-to-Kankyo*, 62, p.289 (2013).
 - 26) M. Ichiba, K. Abe and J. Sakai, *Zairyo-to-Kankyo*, 64, p.244 (2015).
 - 27) The Chemical Society of Japan, *Kagakubinran kisoheon II 5th edition*, Maruzen, p. II-313 (2004).
 - 28) M. Ichiba, J. Sakai, T. Doshida and K. Takai, *Scr. Mater.*, 102, p.59 (2015).
 - 29) T. Doshida, K. Takai and M. Ichiba, *Zairyo-to-Kankyo*, 61, p.249 (2012).
 - 30) M. Ichiba, K. Takai and J. Sakai, *Zairyo-to-Kankyo*, 65, p.67 (2016).
 - 31) M. Ichiba, K. Takai and J. Sakai, *ISIJ*, 56, p.397 (2016).
 - 32) JSCE S 1201, *Method of hydrogen embrittlement test for steel for prestressed concrete in a 20% ammonium thiocyanate solution*, JSCE (2012).
 - 33) M. Ichiba, A. Kataoka and Y. Niidome, Proc. Annual Conf. Fundamentals and Materials Soc., IEE Japan, p.47 (2014).
 - 34) Genba repo-to No.7, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc., < https://www4.tepco.co.jp/challenge/cost_reductionreport_07.html > [Accessed 29 August 2016].
 - 35) M. Ichiba, A. Kataoka, T. Takaoka and H. Kase, Proc. JSCE Materials and Environments 2013, JSCE, p.135 (2013).
 - 36) A. Kataoka, M. Ichiba, T. Takaoka, H. Kase and T. Uduki, Proc. JSCE Materials and Environments 2013, JSCE, p.193, (2013).
 - 37) Y. Ueki, M. Ichiba, T. Usui, K. Ito and T. Tujikawa, Proc. 54th Jpn.Conf. Materials and Environments, JSCE, p.123 (2007).
 - 38) K. Michisita et al., *Quantitative Evaluation of Deterioration Environment for Power distribution equipments*, Electric Technology Research Association, 69 [3] 130 (2013).
 - 39) JIS K 5659, *Long durable paints for steel structures*, JIS (2008).
 - 40) M. Saito, S. Moriya, H. Hamanura, H. Goto, Y. Naito, M. Yamamoto and M. Fujishiro, Proc. 31st Forum on Corrosion-Proof Painting for Steel Structures, JSSC, 31, p.133 (2008).
 - 41) K. Mori, T. Natita, K. Tachi and S. Umemura, *J. Materials Life Soc.*, Materials life soc, Japan, 13 [4] p.180 (2001).
 - 42) M. Ichiba, K. Harada, K. Kasahara, O. Ikeda and T. Takayanagi, Proc. 57th Jpn.Conf. Materials and Environments, JSCE p.334 (2010).
 - 43) M. Ichiba, J. Ozaki, T. Suzuki, K. Kasahara and T. Takayanagi, Proc. 61th Jpn.Conf. Materials and Environments, JSCE, p.145 (2014).

(2016年9月1日受理)

要 旨

近年、電気事業の体制は大きな変貌を遂げつつある。米国の電気事業制度を模して戦後構築された垂直統合型の電力供給体制は、送電線の広域運用、小売全面自由化、発送電分離といった歴史的なパラダイムシフトを迎えている。この動きは電力流通設備の腐食防食課題へも影響し、設備の保全、寿命や損傷リスクに関する取り組みが重要となっている。本稿では電力流通設備で設備量の大きな電柱や屋外鋼構造設備の腐食防食課題を例に、PC鋼材や塗料の性能評価試験への取り組みや学協会との連携について示す。

キーワード 電力流通設備(配電設備)、コンクリート柱、水素脆化、FIP、JSCE S 1201、チオシアン酸アンモニウム、腐食、柱上変圧器、PC鋼材、塩害、暴露試験、腐食マップ、重防食塗装