プローブ電流密度を指標とした土壌埋設パイプラインの カソード防食設計に関する検討*

細川 裕司**, 梶山 文夫**, 深谷 朝之***, 菊池 純***

** 東京ガス株式会社 導管部

*** 日本防蝕工業株式会社

Design of CP System for Newly Constructed Pipelines with Respect to Cathodic Protection Criteria Based on DC and AC Current Densities Measured Using Probes*

Yuji Hosokawa**, Fumio Kajiya**, Tomoyuki Fukaya*** and Jun Kikuchi***

** Pipeline Department, Tokyo Gas Co., Ltd.

*** The Nippon Corrosion Engineering Co., Ltd.

Recently, the risks such as AC corrosion, overprotection and corrosion inside casing pipes are increasing on cathodically protected pipelines due to the changes in burial situations, application of new construction techniques and so on. Authors have proposed new cathodic protection (CP) criteria based on DC and AC current densities measured using probes that provide an appropriate assessment of those risks together with effective measures to eliminate those risks. The design of CP systems for newly constructed pipelines, on which those risks were likely to occur, was then successfully performed based on the new CP criteria. In this paper, actual procedures to design CP systems with respect to the new CP criteria are demonstrated. In addition, the methodology to eliminate the risk of AC corrosion is presented.

Key words : pipeline, cathodic protection, AC corrosion, overprotection, casing pipe, pipe-to-soil potential, probe, coupon, DC current density, AC current density

1. 緒 言

近年、埋設パイプラインにおける敷設環境の変化、新工法の導入などに伴い、交流腐食、過防食、鞘管内腐食といった新たな防食管理上のリスクが生じている。これらのリスクの評価においては、プローブ直流電流密度およびプローブ交流電流密度（以下、合わせてプローブ電流密度と称する）を計測することが有効であり、著者らは、これらのリスクの有無を判断するための基準として、プローブ電流密度を指標としたカソード防食管理基準を提案した¹⁾。

本報では、著者らの提案したプローブ電流密度を指標とするカソード防食管理基準に従って、交流腐食、過防食、鞘管内腐食といったリスクが懸念される新設パイプラインのカソード防食設計を実施したので、その考え方と内容について述べる。また、交流誘導電圧を低減するための低接地措置の考え方や実施例についても併せて述べる。

2. パイプラインの概要

新設されたパイプラインの概略を Table 1 にまとめた。また、パイプラインルートの概略を Fig. 1 に示した。図中には、後述する外部電源装置（以下、外電と称

する）などの各防食設備の設置位置についても併せて示した。本パイプラインは、AラインとBラインの2ラインから構成されており、これらは互いに電氣的に絶縁されている。また、Bラインの管径 400 mm および 300 mm のラインは、互いに電氣的に導通している。

AラインおよびBラインのカソード防食設計を進めるにあたり、事前に建設ルートや採用される工法について調査した結果、Fig. 1 に示したように、本パイプラインは高圧架空送電線と並行する区間が長く、また、直流電気鉄道との軌条横断部を多く有することが明らかになった。さらに、長距離推進工法が採用され、鞘管内に敷設される区間も長いことが明らかになった。すなわち、本パイプラインにおいては、交流腐食、過防食、鞘管内腐食といったリスクが懸念された。これらのリスクの評価には、プローブ電流密度の計測が必要であることから、建設段階よりパイプ近傍にプローブを設置し（鞘管内も含む）、これをパイプと電氣的に接続した。これらプローブを用いてフィールド試験を行い、得られたプローブ電流密度の計測結果を、プローブ電流密度を指標とするカソード防食管理基準¹⁾に照らし合わせて評価を行い、本パイプラインに対するカソード防食システムの設計を行った。

3. 試 験 方 法

3.1 計測項目

本報告における著者らのフィールド試験結果は、いずれも以下の方法²⁾に従って計測されたものである。

パイプラインの路線上の各計測地点（以下、TB と称する）において、パイプ、プローブおよび照合電極から

* 第 48 回材料と環境討論会（札幌、2001）で発表

** 〒105-8527 東京都港区海岸 1-5-20 (5-20, Kaigan, 1-Chome, Minato-ku, Tokyo, 105-8527 Japan)

*** 〒144-8555 東京都大田区南蒲田 1-21-12 (21-12, Minami-kamata, 1-Chome, Ohta-ku, Tokyo, 144-8555 Japan)

Table 1 Specifications for the newly constructed pipelines of Line-A and Line-B.

	Outside diameter (mm)	Length (km)	Grade (API 5L)	Coating
Line-A	600	27.6	X65	Polyethylene
Line-B	400	7.6	X60	Polyethylene
	300	0.6	X52	Polyethylene

Fig. 1 Schematic of the newly constructed pipelines.

のリード線を立ち上げ、プローブ直流電流密度、プローブ交流電流密度、プローブ ON 電位およびその原波形、プローブ OFF 電位、交流誘導電圧をそれぞれ計測した。

3.2 計測方法

使用したプローブは、パイプラインと同一の材料からなる鋼製プローブであり、環境と接する金属面の表面積は $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 (=10 \text{ cm}^2)$ とした。電位計測用の照合電極としては、計測時に TB 内あるいはその近傍に設置した飽和硫酸銅電極を使用した。

プローブ ON 電位は、プローブとパイプを電氣的に接続している時の、プローブおよびパイプの対地電位の計測時間中における平均値とした。よってこの値は従来からの管対地電位に相当するものである。プローブ OFF 電位は、プローブとパイプを電氣的に切断してから 10 ms~30 ms の、プローブの対地電位の計測時間中における平均値とした。これは、プローブがパイプから切断された後においても、プローブが交流誘導の影響を受けてプローブの対地電位に 50 Hz の変動が見られるケースがあるため、その 1 周期である 20 ms の平均値として定義することが妥当であると判断したものである。

交流誘導電圧 $E_{AC}(\text{Vrms})$ は、プローブ ON 電位 E_{ON} (V, 飽和硫酸銅電極基準) の原波形が対称性の良い 50 Hz の正弦波であることを確認した上で、プローブ ON 電位の最高値 E_{ON}^{max} と最低値 E_{ON}^{min} から以下の式により計算した。

$$E_{AC} = \{ (E_{ON}^{\text{max}} - E_{ON}^{\text{min}}) / 2 \} / \sqrt{2}$$

プローブ直流電流密度およびプローブ交流電流密度は、プローブとパイプの間を流れる直流電流および交流電流を計測し、これをプローブの表面積 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 (=10 \text{ cm}^2)$ で除することにより求めた。また、プローブ直流電流密度は、電流が環境側からプローブに流入する方向を正とした。

プローブとパイプの電氣的な接続時間 (ON 時間) を 8.5 秒、切断時間 (OFF 時間) を 1.5 秒として、10 秒 1 サイクルによる計測を行った。計測時間は 1 分間あるいは 15 分間、また、各データのサンプリング周期は 0.1 ms とした。

3.3 試験概要

以下の 3 つの試験を順に実施した。詳細については各章で説明する。

① 暫定防食状況評価試験

パイプライン建設直後の暫定防食状況において、外電の設置位置を決定することを目的として試験を行った。

② 外電設置完工試験

外電を設置した後、その効果を確認することを目的として試験を行った。

③ 交流誘導対策評価試験

交流誘導低減対策を実施した後、その効果を確認することを目的として試験を行った。

4. 交流誘導低減方法決定の考え方

本パイプラインのように、交流腐食の懸念されるパイプラインのカソード防食設計においては、交流腐食を防止するための交流誘導低減措置を適切に施すことが重要である。著者らは、交流誘導低減方法を決定する際の基本的な考え方として、Fig. 2 に示すフローのように定めた。

まず、高圧架空送電線との並行部や交流電気鉄道との近接部など、交流誘導の影響を強く受けることが予想される箇所において、パイプラインの建設時に Mg 電極をパイプの近傍に埋設して、これをパイプと接続することにより、分散的な接地を行うこととした。Mg 電極は、5. で述べるように、建設段階の暫定的なカソード防食を施すための犠牲陽極としてパイプに接続するものであるが、同時に交流誘導低減のための低接地物として活

Fig. 2 Methodology for the elimination of AC corrosion risk in the design of CP system.

用する。

次に、プローブ電流密度を計測した結果、パイプラインの建設時に接続した Mg 電極による接地のみでは、交流誘導の低減が不十分であると判明した地点に対しては、プローブ交流電流密度 I_{AC} の大きさに応じて対策を施す。

(1) $I_{AC} < 70 \text{ A/m}^2$ の時

この場合、外電によるカソード防食を施して、プローブ流入直流電流密度を増加させることにより、防食が達成される。

(2) $I_{AC} \geq 70 \text{ A/m}^2$ の時

この場合、さらなる低接地化によりプローブ交流電流密度の低減を図る必要がある。低接地措置の方法として、直流ブロック装置を利用する方法と Mg 電極を直接接続する方法の 2 つがあり、交流誘導レベルや埋設環境を考慮していずれかの方法を選択する。各方法の特徴を以下にまとめた。

① 直流ブロック装置を利用する方法

これは、直流ブロック装置 (Solid-state DC Decoupling Device) を介して低接地物とパイプを電氣的に接続することにより、パイプの低接地化を図るものである。直流ブロック装置は、回路としてコンデ

ンサー、コイル、サイリスタなどから構成され、直流電鉄からの漏れ電流や外電からの防食電流などの主成分である直流電流に対しては高インピーダンスで、交流誘導により発生する交流電流に対しては低インピーダンスであり、また、雷電流を大地に逃がす機能も有する装置である。特に、以下のようなケースにおいては、本方法による低接地化が有効である。

・交流誘導のレベルが非常に高いケース

この場合、接地抵抗が 1Ω 以下といった非常に低いレベルである低接地物を接続する必要がある。しかし、こういった低接地物をパイプと直接接続すると、防食電流が過大に低接地物に流入して防食効率の低下を招くため、直流ブロック装置を利用することが有効である。

・直流電鉄軌条や外電の近傍部で低接地措置が必要となるケース

この場合、低接地物を直接接続すると、直流電鉄軌条からの漏れ電流や外電からの迷走電流が低接地物を介して過度に流入する可能性がある。漏れ電流が流入した場合は、遠方の塗覆装欠陥で流出する危険性が増す。また、防食電流が流入した場合は、防食効率の低下を招く。そこで、直流ブロック装置を利用すること

により、漏れ電流や防食電流の流入を防ぎつつ、交流誘導の低減が可能となる。

② Mg 電極を直接接続する方法

土壤抵抗率が低く、数本の Mg 電極のみでも十分に接地抵抗が低下する場合や、交流誘導の影響範囲が局所的であり、大きな低接地物を必要としない場合には、Mg 電極を直接パイプに接続して低接地にすることが有効である。

5. 防食設備の配置

プローブ電流密度を指標としたカソード防食設計を実施するための準備として、建設段階よりプローブ、Mg 電極、直流ブロック装置の各防食設備を配置した。以下にその内容について述べる。

プローブ

高圧架空送電線近傍、直流電鉄軌条横断面部、鞘管内などにおいて、プローブ電流密度を計測するためのプローブをパイプ近傍に設置し、これをパイプと接続した。

Mg 電極

パイプラインは、各工区ごとに分割して建設されていくため、建設段階において各管路はそれぞれ電氣的に独立している。そこで、最終的には外電でカソード防食されることになるが、建設期間中の暫定的なカソード防食を施すため、Mg 電極を犠牲陽極としてパイプラインに接続した。また、本パイプラインは交流誘導の影響を強く受けており、これら Mg 電極は防食用の犠牲陽極のほかに、4. に述べたように、交流誘導電圧低減のための低接地物としても機能している。パイプラインの各工区ごとに Mg 電極を接続することで、分散的に接地が確保できるため、パイプラインの交流誘導電圧を効果的に低減できる。

犠牲陽極および交流誘導低減用の低接地物として Mg 電極を選択した理由としては、土壤中における電位が非常にマイナス寄りの値であることが挙げられる。すなわち、これにより、大きなカソード防食の効果が得られること、また、外電稼動後も外電からの防食電流の流入を最小限に抑制できるため、防食効率が低下しないことが挙げられる。

直流ブロック装置

本パイプラインの建設途中で交流誘導レベルを調査した結果、いくつかの地点では Mg 電極による分散接地のみでは交流誘導電圧が十分低下しないことが明らかになった。これらの地点では、Mg 電極の増設では対応しきれないと判断されたため、パイプラインの建設時に使用した鋼製鞘管など非常に接地抵抗の低い低接地物を、直流ブロック装置を介してパイプと接続することにより、交流誘導の低減を図った。直流ブロック装置を介して接地した箇所は、AラインとBラインで合わせて2か所である (Fig. 1 参照)。

6. 暫定防食状況評価試験

6.1 試験条件

パイプラインの建設終了直後における防食状況を評価し、外電の設置位置を決定することを目的として、暫定

Fig. 3 The results of the CP level evaluation for the pipelines cathodically protected by magnesium anodes with respect to the CP criteria based on DC and AC current densities measured using probes.

防食状況評価試験を行った。本試験では、5. で述べた各防食設備を配置した状況 (暫定防食状況) 下で、各 TB においてプローブ電流密度を計測した。なお、試験は晴天時において実施した。

6.2 試験結果

Fig. 3 に、AラインおよびBラインの暫定防食状況下におけるプローブ電流密度の計測結果を示す。a～dの4地点 (Fig. 1 参照) において、交流腐食懸念域にあることが判明した。このうち、aおよびbの2地点については、外電を設置して十分な防食電流を流入させることにより、防食が達成される可能性があると考えられた。これに対し、cおよびdの2地点についてはプローブ流入直流電流密度を増加させても防食達成域には入り得ないことから、低接地措置を施してプローブ交流電流密度を低減する必要があると推測された。

また、複数の地点でプローブ流入直流電流密度が 0.1 A/m^2 もしくはそれに近い値を示していることが明らかになった。これらの地点では、迷走電流の影響がより強くなる雨天時などに計測を行うと防食電流不足になることが懸念された。

以上の結果をもとに、Aラインについては2基、Bラインについては1基の外電を設置して、それぞれのパイプライン全体を防食することとした (Fig. 1 参照)。

7. 外電設置完工試験

7.1 試験条件

各パイプラインに設置した外電の効果を確認することを目的として、外電設置完工試験を行った。この際、Mg 電極および直流ブロック装置については、交流誘導低減対策として必要であることから、すべて接続したままとした。いずれの外電も、設定電位を -2 V として電位制御で稼働させ、各 TB においてプローブ電流密度を計測した。

Fig. 4 The results of the CP level evaluation for the pipelines cathodically protected by CP rectifiers with respect to the CP criteria based on DC and AC current densities measured using probes.

7.2 試験結果

Fig. 4 に外電設置完工試験結果を示す。防食電流の不足が懸念された地点については、外電を設置することにより、いずれも十分な防食電流の流入が確認された。また、交流腐食の懸念されたaおよびbの2地点については、プローブ流入直流電流密度の増大により、防食達成域に入ることが確認された。これに対し、プローブ交流電流密度が70 Arms/m²以上であったcおよびdの2地点については、プローブ流入直流電流密度は増加したものの、プローブ交流電流密度が低下しないため、依然として交流腐食懸念域にあることが明らかになった。

7.3 交流誘導分布

本パイプラインにおいて、プローブ交流電流密度が最大を示したd地点（計測地点 TB-7）付近における交流

誘導レベルの分布について検討を行った。検討対象範囲は、Aラインの路線末端絶縁部～計測地点 TB-13であり、計測地点は路線末端絶縁部および計測地点 TB-4～TB-13の計11か所である。Aラインは、当該範囲のTB-4～TB-13において送電電圧66kV、TB-7～TB-13において送電電圧500kVの高圧架空送電線とそれぞれ並行している。TB-7における66kVおよび500kVの送電線との離隔距離は、それぞれ22.7mおよび48.2mである。また、この範囲では、TB-12を除く10か所のTBにおいて、パイプラインの建設段階よりMg電極を1～6本ずつ接続して低接地化を図っている。

各計測地点におけるプローブ流入直流電流密度 I_{DC} 、プローブ交流電流密度 I_{AC} 、プローブON電位 E_{ON} 、プローブOFF電位 E_{OFF} 、交流誘導電圧 E_{AC} を、路線末端絶縁部からの距離を横軸にプロットした結果を Fig. 5 に示す。また、図中には、パイプラインに接続されたMg電極の有無についても併せて示した。

d地点において、プローブON電位は-2.08V、プローブOFF電位は-1.39Vと極めて良好な値を示したにもかかわらず、プローブ交流電流密度は80 Arms/m²と、交流腐食の懸念される値を示した。交流誘導電圧はd地点から約220m離れたTB-6において最大値3.3Vrmsを示したが、プローブ交流電流密度は9 Arms/m²であり、防食達成域に入っていた。

このように、計測位置が200m程度離れただけでプローブ交流電流密度が大きく異なったことは特筆すべきことである。本フィールドにおけるデータから判断する限りにおいては、カソード防食設計を行う際には、200m程度の間隔でプローブ電流密度を計測する必要があると言える。すなわち、これより間隔を広げると、プローブ交流電流密度が基準値を超えて、交流腐食が発生し得るような地点を見逃す危険があると言える。

Fig. 5 Distributions of DC and AC current densities, probe ON and probe OFF potentials, AC induced voltages measured at from TB-4 to TB-13 where the pipeline is paralleling two overhead high voltage AC power transmission lines.

Fig. 6 Assessment of the AC corrosion risk before and after the installation of a solid-state DC decoupling device on the point "c" and magnesium anodes on the point "d".

8. 交流誘導対策評価試験

8.1 交流誘導低減措置

外電設置完工試験の結果、c地点およびd地点における防食達成のためには、低接地措置を施して交流誘導レベルを低下させることが不可欠であることが判明した。そこで、Fig. 2に示した交流誘導低減の考え方に従って、以下のように低接地措置を施した。

d地点については、高圧架空送電線と並行しており、すでにMg電極1本が接続されていたが、4本追加して接続することによりさらなる低接地化を図った。

c地点については、パイプ近傍に埋設された鋼矢板を、直流ブロック装置を介してパイプと接続することにより、低接地化を図った。直流ブロック装置を利用した理由は、c地点付近において、パイプラインは直流電鉄軌道に近接しており、また、外電が設置されていたため、直流電鉄軌道からの漏れ電流や外電からの防食電流が鋼矢板に流入することを避けつつ交流誘導レベルの低減を図る必要があったためである。

8.2 試験結果

上述の通り、c地点において直流ブロック装置を介して鋼矢板と接続する、d地点においてMg電極を接続する、という交流誘導対策を実施した後、その効果を評価するために交流誘導対策評価試験を行った。

Fig. 6に、cおよびd地点の交流誘導対策前と対策後のプローブ電流密度の計測結果を示した。図中に示したように、低接地措置を施すことで、いずれの地点についてもプローブ交流電流密度が低減されて、防食達成域に入ることが確認された。

以上、各試験を実施し適切にカソード防食設計を進め、本パイプライン全線にわたり交流腐食防止、過防食防止、鞘管内腐食防止といった観点も含めたカソード防

食が達成された。

9. プローブ電流密度を指標としたカソード防食設計

以上のフィールド試験結果より、交流腐食、過防食、鞘管内腐食といったリスクが懸念されるパイプラインにおけるカソード防食設計の手順として以下に示すようなフローが考えられる。

- ① 事前調査や建設担当者との協議を行い、パイプラインの建設ルートと高圧架空送電線や直流電気鉄道との位置関係、鞘管が使用されて二重管構造となる区間を把握する。また、今回報告したパイプラインでは影響のなかった交流電気鉄道についても、交流腐食を引き起こし得ることが報告されており³⁾、交流電気鉄道との位置関係についても、あらかじめ把握する必要がある。
- ② これらの情報を元に、プローブ、Mg電極、直流ブロック装置などの防食設備を適切に配置する。
- ③ 建設段階から、プローブ電流密度を計測し、プローブ電流密度を指標としたカソード防食管理基準¹⁾に従って評価を行う。この際、基準を満足しない地点に対しては、外電を仮設置する、交流誘導低減のための低接地措置を施す、などの適切な対策を施す。
- ④ パイプライン建設後に暫定防食状況を評価し、外電の設置位置や稼動条件を決定する。
- ⑤ 外電設置後、再度防食状況を評価し、基準を満足しない地点に対しては、外電出力を調整する、交流誘導低減のための低接地措置を施す、などの適切な対策を施す。

10. ま と め

新設されたパイプラインにおいて、交流腐食、過防食、鞘管内腐食といったリスクが懸念されたため、プローブ電流密度を指標としたカソード防食管理基準に基づいてカソード防食設計を行った。また、交流誘導低減のための低接地措置を適正に施した。

同様のリスクが懸念されるパイプラインのカソード防食設計は、プローブ電流密度を指標として行うことが必要である。

参 考 文 献

- 1) 細川裕司, 梶山文夫, 中村康朗 (Y. Hosokawa, F. Kajiyama and Y. Nakamura): 第48回材料と環境討論会講演集 (Proc. 48th Japan Conf. Materials and Environments), p. 545, 腐食防食協会 (JSCE) (2001).
- 2) 梶山文夫, 中村康朗, 細川裕司 (F. Kajiyama, Y. Nakamura and Y. Hosokawa): 第48回材料と環境討論会講演集 (Proc. 48th Japan Conf. Materials and Environments), p. 553, 腐食防食協会 (JSCE) (2001).
- 3) W. Printz: Proc. UK Corrosion '92, 1 (1992).

(Manuscript received December 3, 2001 ;
in final form March 8, 2002)