流電陽極による交流誘導対策

市野瀬比路実*, 山村隆男**, 後藤俊介***

*日本鋼管株式会社 **日本鋼管工事株式会社 ***日本防蝕工業株式会社

A Protective Measure against AC Induced Voltage on Pipeline by Means of Magnesium Anodes

Hiromi Ichinose,* Takao Yamamura** and Shunsuke Goto***

*Nippon Kokan K.K.

**Nippon Kokan Koji K.K.

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

A systematic mitigation method has been developed for AC voltage induction of well coated pipelines due to proximity to overhead HVAC powerlines. The method is based on the use of magnesium anodes for cathodic protection. Magnesium anodes of about 5 ohms were installed at 500 meters separation along a pipeline. Calculation of the voltage induced by fault current of a powerline indicate that the installation of 5 ohms magnesium anodes at every 250 meters is suitable to suppress the maximum voltage below 5000 volts. Field data of a pipeline having magnesium anodes at 250 meters separation show that this system is also satisfactory to mitigate the induced voltage under normal transmission of power.

1. 緒 言

近来, エネルギーの輸送が多様大量となり, 気体液体はいうに及ばず, 固形物すらスラリー輸送として, パイプラインが用いられてきている。エネルギー輸送の最たるものは, 超高圧の送電線がまず目に浮ぶところであろうが, 輸送経路がパイプラインと送電線とで近接してくることは, エネルギー輸送の増大と, 土地確保の困難さから, 世界的傾向として必然化している。場合によっては, パイプラインを送電鉄塔の直下に敷設しなければならないこともある。米国では, これを『multiple use of Right-of-Way』などと呼んでいる向きもある¹⁾。

しかし大電力架空送電線と, 金属製パイプラインとが近接平行すれば, 必ずパイプラインに誘導電圧を生じ, 種々の危険を伴うものである。この対策には, 一般の電気設備の安全対策と同様, 接地が最も有効なことはいくまでもない。他に遮蔽という方法もあるが, 現在のところ遮蔽を完全に行うことは, 非常に困難であると感じられる。一方, 接地をよくするためには, 金属製パイプラインなら裸のまま埋設すれば, これはほど良好な接地体はないのであるが, これは近来の防食思想が許すところでは

はない。防食塗覆装は近来増々重要視され, その電気絶縁性は非常に向上してきている。この高絶縁のパイプラインに, 良好な接地を設ける一見矛盾した方法が, 実は防食も, 誘導対策も一挙に解決するのである。

防食塗覆装の絶縁性の向上は, これまで長距離パイプラインの電気防食には, 外部電源法しか考えられていなかったものを, 流電陽極の採用がかなりの経済性をもって考えられるようになったのである。流電陽極は, 良好な接地体であることができる。米国でも, 日本でも, パイプ型ケーブルの接地にはかなり古くから用いられている²⁾。

ただ, この接地をどう定量的に扱うかについての文献は非常に少なく, 筆者らの知る限りでは, 藤倉電線技報『架空送電線下に布設された鋼管路の電氣的安全対策³⁾』が詳細な論述を行っている。筆者らが従事したパイプラインの建設工事は, 超高圧送電線との Right-of-Way の共用こそないが, 何カ所かで 8 km くらいずつの平行, 交差があって誘導対策が必要であり, これを流電陽極で行なった。その経緯と結果とを報告するものである。

2. 流電陽極の採用の経緯と計画

長距離パイプラインに流電陽極を基本とした防食法はあまり考えられていなかったが, 工事工程, 電食, 腐食環境, 送電線, 雷害, 過防食および他の地中埋設金属配管類との干渉, 被干渉対策として, 流電陽極による全線

* 〒100 東京都千代田区丸の内 1-1-2 (1-1-2 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100, Japan)

** 〒230 横浜市鶴見区小野町 88 (88 Onomachi, Tsurumi-ku, Yokohama 230, Japan)

*** 〒144 東京都大田区南蒲田 1-1-25 (1-1-25 Minamikamata, Ota-ku, Tokyo 144, Japan)

防食が最適と考えられた。いずれの対策も重要であるが工期に関しての埋管追従方式の防食と、誘導、雷害対策がこの決定の主要因子をなしていると考えられる。

これまで、埋設管の塗覆装はアスファルトが主流であった。しかしアスファルトの吸湿性が云々され、現今ではポリエチレン被覆が主流にとって代っている。われわれが従事したこのパイプラインは、その過渡期にあったので、その時期最良の性能を持ち、かつ米国、英国では普通に用いられ、またわが国でも大径水道管には内外面に常用されているコールタールエナメルが採用された。その絶縁性の良好さは、電食防止研究委員会の長期試験結果⁴⁾に明白である。このような絶縁性塗膜のパイプラインに、埋設前から流電陽極の設置数を決めるような設計書が見当たらないのと、従来の設計案内がほとんど $-850\text{ mV vs. Cu/CuSO}_4$ で計算しており、安全率を含んでいないことなどから、独自に設計計算式を作らなければならなかった。

計算を単純化するため、管路の塗膜抵抗を経年劣化をも考慮して $5,000\ \Omega\cdot\text{m}^2$ と評価し、 500 mV の電位降下として、防食電流密度を 0.1 mA/m^2 とした。陽極設置間隔は 500 m である。管の自然電位は $-500\text{ mV vs. Cu/CuSO}_4$ 、使用マグネシウム陽極の電位は $-1,500\text{ mV vs. Cu/CuSO}_4$ とした。使用鋼管の外径は $600\text{ mm}\phi$ であるので、 500 m で 957 m^2 の外面積となる。従って、一陽極群の所要防食電流は 95.7 mA である。陽極群の発生電流 i_{mg} は、次の式により求められる。

$$i_{\text{mg}} = (1,500 - 500) / (R_p + R_{\text{mg}}) \quad (\text{mA}) \quad (1)$$

または、

$$i_{\text{mg}} = (1,500 - 1,000) / R_{\text{mg}} \quad (\text{mA}) \quad (2)$$

ここに、 R_p は 500 m の管の接地抵抗であり $5.22\ \Omega$ 、 R_{mg} は陽極群の接地抵抗である。

従って、 $R_{\text{mg}} = 1,000 / 95.7 = 5.22\ \Omega$

または、 $R_{\text{mg}} = 500 / 95.7 = 5.22\ (\Omega)$

この全く同じ結果になる式を二つ並べたのには理由がある。当時、管の塗膜抵抗を防食設計計算に折込む習慣に乏しかったので、 $1,000\text{ mV}$ の開路電圧を用いることに大きな抵抗があったのである。当時用いられた駆動電圧は、防食電位を $-850\text{ mV vs. Cu/CuSO}_4$ 、従って駆動電圧 E は

$$E = -1,500 - (-850) = -650 \quad (\text{mV}) \quad (3)$$

であったので、 $1,000\text{ mV}$ は大き過ぎるというものであった。この(3)式に合せるため、(2)式をここに追加したのである。すなわち、

$$E = -1,500 - (-1,000) = -500 \quad (\text{mV})$$

であって、防食電位 $-1,000\text{ mV}$ 、駆動電圧 500 mV は、(3)式よりも小さいことを示したものである。

陽極の接地抵抗が決ると、陽極の埋設環境の土壤抵抗

率によって設置数が異なってくるので、これを計算する必要がある。一陽極群の陽極設置数 N は

$$N = \rho \times K / R_{\text{mg}} \quad (1\text{ 個}) \quad (4)$$

ここに ρ : 土壤抵抗率 ($\Omega\cdot\text{m}$)

K : 分極値、管径などを含む定数

しかし、 N は自然数であり ρ は正の実数であるから、 ρ によって N を決定するよりは、 N を決めておいて、 ρ の範囲を決定する方が便利である。従って

$$\rho = kN \quad (\Omega\cdot\text{m}) \quad (5)^a)$$

と書き直した。 k は R_{mg}/K にほかならない。

次に、使用陽極の重量であるが、これも(5)式にならって次のごとく表現できる。

$$\rho = a/W - bN \quad (\Omega\cdot\text{m}) \quad (6)^b)$$

ここに、 W : マグネシウム陽極 1 個の重量 (kg)

a : 耐用年数、消耗率などを含む定数

b : 管径、陽極設置間隔などを含む定数

(5) 式と(6)式とより、Fig. 1 のごとき ρ - N 見取りグラフを作成する。この(5)式と(6)式の線で右側に囲まれた範囲では、マグネシウム陽極の接地抵抗は $5.22\ \Omega$ 以下となり、耐用年数(この場合 50 年)をも満足する。

Fig. 1. Number of anodes required for varying soil resistivity.

Pipe size: 600 mm diameter; coating resistance: $5,000\ \Omega\cdot\text{m}^2$ (coal tar enamel); grounded interval: 500 meters ; anode: magnesium anode, 1 meter long, 0.2 meter in diameter; voltage shift: -0.5 volt ; grounding resistance of grounded: 5.22 ohms ; anode life: 50 years .

Table 1. Number of Mg anodes required varying soil resistivity.

Soil resistivity ($\Omega\cdot\text{m}$)	Weight of anode (kg)	Anode size with backfill (mm)	Number of anodes
1.1-39.4	22.3	$1,000\text{ l} \times 200\phi$	3
39.3-52.4	13.6	"	4
52.4-104.8	7.6	"	8
104.8-209.6	3.6	"	16
209.6-301.3	2.0	"	23

(from Fig. 1)

Fig. 2. Soil resistivity and grounding resistance of anodes along the pipeline located in area 1.

これを Table 1 にまとめて示す。

以上のごとき計算により、パイプラインに沿って陽極を配置しても、土壤抵抗率が一様性を持たないことが多く、4 電極法で測定された値が、この計算にそのまま使われた場合、陽極の接地抵抗が必ず 5.22Ω 以下になるとは限らなかった。また、土壤抵抗率や接地抵抗の測定がむずかしいことも、よく知られた事実である。しかしながら、われわれが測定した土壤抵抗率と、陽極接地抵抗とは Fig. 2 に示すごとくであって、一応接地抵抗が、土壤抵抗率の関数とはならないようにコントロールされていることが理解していただけることと思う。なお、後述の理由で陽極設置間隔は 250 m ごとになっている。

3. 架空送電線からの誘導電圧

架空送電線からの影響は、4 とおり考えられている。しかしその表現法は、米国でも各 Corrosion Engineer によって異なっている。いま筆者らの目についたもので表を作ってみると、Table 2 のごとくである。ここに取上げる誘導とは、電磁誘導である。送電線の切断や垂れ下りによる接触は、ステーションなどの地上配管では問題

になるが、埋設管では生じし得ない状態である。静電誘導は、簡単な接地で消滅できるといわれている。土中放電、この表現が適切かどうかは今後の課題であるが、パイプラインと送電鉄塔とが至近距離にあり、その鉄塔で地絡事故が起きた際、大電圧がパイプラインに加圧される状態を仮にこう呼ぶことにする。この問題については、別に報告する機会があるものと思われる。ここでは、常時の誘導、主として人身の安全、事故時の誘導、主としてパイプラインの保護について述べるものである。

3.1 分布接地によるパイプラインの電磁誘導電圧

この項および次の項は、東京電力(株)ならびに藤倉電線(株)に負うものであるが、考え方と計算結果を記す。超高圧送電鉄塔は 60 m 級であるが、計算に用いられた数値は、Fig. 3 によっている。また、送電線とパイプラインとの電磁結合の状況を Fig. 4 に示す。このような状況のもとで、事故時に生ずるパイプラインの電磁誘導電圧は、端末からの距離 x を 0 としたとき、つまり端末において最大電圧 $V_{p \max}$ が現われ、次式によって計算される。

Table 2. Various terminology of pipeline voltage hazards.⁶⁾

	The Fujikura Cable Works Ltd.	M. A. Riordan	A. W. Peabody	C. A. Royce	E. A. Cherney
送電線との接触 (混触) (inducement)		conductive mode (metallic contact)			
電磁誘導 (inducement)	電磁誘導 (電磁力の不均衡)	inductive coupling mode (electromagnetic field)	effect of inductive coupling (magnetic field)	magnetic induction (electromagnetic field)	electromagnetic coupling
常時の誘導	常時の誘導	normal power-line operation	normal conditions		normal
事故時の誘導	事故時の誘導	abnormal power-line operation	fault conditions		fault
土中放電 (地絡による直撃) (inducement) 常時の電流流出 事故時の放電	地絡による大地電位上昇 (鉄塔の地絡)	electrolytic coupling mode (fault) normal operation abnormal operation	effect of resistive coupling (ground fault)	conductive interference (fault)	impedance coupling
静電誘導 (inducement)	静電誘導 (送電線電圧)	capacitive coupling mode (line voltage)	effect of capacitive coupling	electric induction (electrostatic field)	capacitive coupling

$$V_{p \max} = \left| \frac{\dot{\lambda} \dot{Z}_{op}}{\dot{r}} I_o \frac{2r' \sinh \dot{r}l/2}{2r' \cosh \dot{r}l/2 + \dot{Z}_e \sinh \dot{r}l/2} \right| \quad (\text{V}) \quad (7)$$

ここに

$\dot{\lambda} = 1 - (\dot{Z}_{os} \dot{Z}_{sp} / \dot{Z}_s Z_{op})$: 地線による遮蔽係数

$\dot{r} = \sqrt{\dot{Z}_p \dot{Y}_p}$: パイプラインの伝播定数 (m^{-1})

$\dot{Z}_e = \sqrt{\dot{Z}_p / \dot{Y}_p}$: パイプラインの特性インピーダンス (Ω)

Fig. 3. Configuration of conductor and pipeline.

Fig. 4. Electromagnetic coupling of powerline and pipeline.

r : grounding resistance of distributed magnesium groundbed, l_p : separation of magnesium groundbed, l : length of the pipeline in parallel to the powerline, Z_s, Z_o, Z_p : impedance, Z_{so}, Z_{op}, Z_{sp} : mutual impedance.

I_o : 起誘導電流 (事故時電流) (A) (A)

$\dot{Z}_s$: 地線大地帰路インピーダンス (Ω/m)

$\dot{Z}_p$: P.L. (パイプライン) 大地帰路インピーダンス (Ω/m)

$\dot{Z}_{os}$: 本線-地線大地帰路相互インピーダンス (Ω/m)

$\dot{Z}_{op}$: 本線-P.L. 大地帰路相互インピーダンス (Ω/m)

$\dot{Z}_{sp}$: 地線-P.L. 大地帰路相互インピーダンス (Ω/m)

Y_p : P.L. の対地アドミタンス ($1/r'l_p$) (U/m)

l : P.L. と本線の平行長さ (m)

r' : P.L. に取付けた分布接地の接地抵抗 (Ω)

l_p : P.L. に取付けた分布接地の取付間隔 (m)

P.L.: パイプラインの略

本線: 送電線の導体, ここでは最下段を用いた。

各線路の定数は計算式が同じなので, パイプラインの大地帰路インピーダンスについてのみ記す。

$$\dot{Z}_p = \left[R_p + j\omega \left(4.6 \log_{10} \frac{2}{\gamma \alpha a_p} + L'_p + 1 - \frac{\pi}{2} j \right) \right] \times 10^{-7} (\Omega) \quad (8)$$

ここに

γ : 1.78 (ベッセル定数)

α : $\sqrt{4\pi\sigma\omega} \times 10^{-7}$

σ : 大地の導電率 ($1/\rho$) ($1/100 \Omega/\text{m}$)

ρ : 大地の固有抵抗率 ($100 \Omega \cdot \text{m}$)

ω : 角周波数 (100π)

R_p : P.L. の交流抵抗 (Ω/m)

L'_p : P.L. のインダクタンス (Ω/m)

a_p : パイプの半径 (m)

また, 各線路間の相互インピーダンスは Carson-Pollaczek の式によって計算され, 次のごとくである。これも, 本線とパイプラインとの間の大地帰路相互インピーダンスをもって代表させる。

$$\dot{Z}_{op} = j\omega [4.6 \log_{10} (2/\gamma \alpha d_{op}) + 1 + (2\sqrt{2/3})\alpha(B+C) - j\{(\pi/2) - (2\sqrt{2/3})\alpha(B+C)\}] \times 10^{-7} (\Omega/\text{m}) \quad (9)$$

ここに

d_{op} : 本線と P.L. との直線距離 ($\doteq \sqrt{(B+C)^2 + X^2}$) (m)

A : 本線と地線との地上高さの差 (Fig. 3) (m)

B : 本線の地上高さ (Fig. 3) (m)

C : P.L. の埋設深さ (Fig. 3) (m)

X : 本線と P.L. との水平距離 (Fig. 3) (m)

以上のごとき諸数値を計算機によって計算し, Table 3 のごとき結果が得られた。この計算を行なったとき, パイプラインの計画は完成していなかったもので, 平行区間 5 km で計算されている。ただし式 (7) に見られるごとく, この長さは直線的に比例する数値ではないので, このまま用いた。実際は Fig. 5 に見られるような配置

Table 3. Induced voltage on pipeline by power-line fault.

Grounding resistance (r') Distance (X)	$V_{p \max}$ at $r'=5\Omega/250 \text{ m}$	$V_{p \max}$ at $r'=10\Omega/250 \text{ m}$
0 m	282 V/kA $\cdot$ 5 km	414 V/kA $\cdot$ 5 km
20 m	257 V/kA $\cdot$ 5 km	377 V/kA $\cdot$ 5 km
50 m	208 V/kA $\cdot$ 5 km	303 V/kA $\cdot$ 5 km

Fig. 5. Pipeline and powerline in area 1.

Table 4. Induced voltage on pipeline by fault current 14,000 A.

Grounding resistance (r') Distance (X)	$V_{p \max}$ at $r'=5\Omega/250 \text{ m}$	$V_{p \max}$ at $r'=10\Omega/250 \text{ m}$
0 m	3,950 V/5 km	5,800 V/5 km
20 m	3,600 V/5 km	5,280 V/5 km
50 m	2,910 V/5 km	4,240 V/5 km

にあり、パイプラインの中間完工長さは図に示されるごとく平行区間をはさんで 8 km であったが、平行実効長さは 5 km と見ても支障はないように思われる。

このような状況下で、この送電線の事故時電流の概算値は 14,000 A くらいと考えられるので、この値を Table 3 に加えると Table 4 が得られる。現今、パイプラインの防食層の向上により、かなりの耐電圧特性を有していることが分ってきているが⁷⁾、当時これに関する唯一といってよい資料は B. Favez によっており、彼は瀝青質防食被覆の 1.6 mm ϕ ピンホールの耐電圧を 5,000 ボルトを限度とし、これ以上の電圧では、鋼管を損傷する恐れがあるとしていた⁸⁾。この値と Table 4 とで考えると、分布接地は 5 Ω /250 m が必要であり、パイプラインの防食設計で必要とされた陽極の接地抵抗 5.22 Ω /500 m $\div$ 10 Ω /250 m では、事故時の誘導対策として不十分であることが分った。このため、Fig. 5 における 8 km の間は、通常区間の 2 倍に当る、250 m 間隔でマグネシウム陽極を設置することになった。

3.2 常時の電磁誘導によるパイプラインの電圧

Fig. 6. Configuration of powerline and pipeline.

常時の電磁誘導による電圧 V_p も、Carson-Pollaczek の式によっている。

$$V_p = -j\omega \lambda \Sigma M_{mn} \dot{I}_{mn} \quad (\text{V/m}) \quad (10)$$

$$M_{mn} = [4.6 \log_{10}(2/\gamma \alpha d_{mn}) + 1 + (2\sqrt{2}/3)\alpha(b_{mn} + c) - j\{(\pi/2) - (2\sqrt{2}/3)\alpha(b_{mn} + c)\}] \times 10^{-7} \quad (\text{H/m}) \quad (11)$$

ここに

$\dot{I}_{mn}$: 第 m 回線第 n 相の電流 (A) (A)

M_{mn} : 第 m 回線第 n 相の本線とパイプラインとの大地帰路相互インダクタンス (H/m) (H/m)

b_{mn} : 第 m 回線第 n 相の地上高さ (m) (m)

d_{mn} : 第 m 回線第 n 相と P.L. の直線距離 (m) (m)

大容量送電線の三相交流電流はほぼ平衡していること、さらに大地導電率が 1/100 Ω /m くらいであることから上式を整理すると、近似的に次式を得る。

$$V_p \div j\omega \lambda \Sigma 4.6 \log_{10} d_{mn} \dot{I}_{mn} \times 10^{-7} \quad (\text{V/m}) \quad (12)$$

これが Fig. 6 のような配置であるとして、パイプラインの常時電磁誘導電圧の計算結果は Table 5 のごとくである。また、送電線とパイプラインとの位置関係から、5 km では 0.157 V/A が得られ、この送電線の平均相電流は 2,000 A くらいであるので、約 300 V の誘起電圧が予想される場所である。この値は被誘導体の片端が接地されている場合、反対側の非接地端に現われる対地電圧であり、変圧器の 2 次側に現われる 2 次電圧と原理的に同じものである。

Table 5. Induced voltage on pipeline under normal power line operation.

Distance Voltage	$X=0 \text{ m}$	$X=19.6 \text{ m}$	$X=59.6 \text{ m}$
V_p (V/A $\cdot$ km)	7.6×10^{-2}	7.4×10^{-2}	2.2×10^{-2}

Fig. 7. AC pipe-to-soil voltage and current on the backfilled section in area 1.

Fig. 8. AC pipe-to-soil voltage and current in area 1 after completion of the pipeline construction.

4. 測定結果

対策を行なった結果を以下に述べる。

4.1 8 km 完工時の結果

工事途中において、Fig. 5 に示す 8 km が完工したので測定を行なった。このときは、試みにマグネシウム陽極群を全数リード線を開放し、パイプラインを無防食状態にして誘導対策もない状況を作り出した。また全マグネシウムを接続し、正規な防食状態にしての計測を行った。その状況を Fig. 7 に示す。

マグネシウム陽極をすべて外した状態で、このパイプラインに発生した電磁誘導電圧は、南側の末端で最高 36.5 V、北側末端で同じく 19 V であった。従って、片端接地の状態では約 50 V の電圧が生じるはずであって、3.3 項で予想した 300 V の 6 分の 1 である。これは A. W. Peabody が、実測値は計算の数分の一だと書いているのによく合うし、また彼が引用した誘起電圧の可能性としての 500 V、実測値としての 40~60 V と非常に合っている⁹⁾。

一方、誘導対策として 250 m ごとの防食(接地)用マグネシウム陽極をすべて接続した場合、南側の末端で 1.2 V、北側の末端で 2.3 V が計測され、最大値は北側末端に隣接した測点で 4.5 V が出ている。誘導電圧は何ボルトまで下げるべきであるという決りはないが、H. C. Robinson らは平常時の誘導電圧を 5 ボルト以下に抑えようとしているから⁹⁾、これに準ずれば完全に目的を達したことになる。

4.2 パイプライン完工後の結果

本パイプラインには、Fig. 5 以外にも送電線接近区間

があるので、いま一例を追加して完工後の結果について述べる。Fig. 8 は、Fig. 5 の区間のパイプライン完工後の誘導電圧と電流とである。全般に、前項の値より減少している。これは、一つにはパイプラインが延長され、500 m ごとの防食用のマグネシウム陽極が数 10 km にわたって設置されているため、接地効果がより向上していること、さらに送電線の送電電圧の昇圧がその後行なわれたため、相電流が当初より減少しているためと考えられる。ただ交流電圧、電流にそれぞれピークがあるので、送電線との近接の具合を記入してみたが、電流ピークの方は送電線との交差部に一致したが(A点)、電圧の方は交差部と 1 測点(250 m)ズレていた。この原因は分っていない。

Fig. 9 に他の区間における送電線とパイプラインの関係位置を示し、この区間における完工後の誘導電圧、電流を Fig. 10 に示す。本区間は最大値でも 1.8 V であって、問題はない。この区間の誘導対策は約 8.5 km であって、Fig. 9, 10 には無対策の部分も含まれている。

なお、Fig. 11 にマグネシウム陽極の ON-OFF 記録を、Fig. 12 および Fig. 13 に誘導電圧のオシロスコープによる記録を示す。

Fig. 9. Pipeline and powerline in area 2.

Fig. 10. AC pipe-to-soil voltage and current in area 2 after completion of the pipeline.

Fig. 11. Strip chart showing AC pipe-to-soil voltage and current.

Fig. 12. AC pipe-to-soil voltage with Mg anodes "off" under normal condition.

Fig. 13. AC pipe-to-soil voltage with Mg anodes "on" under normal condition.

5. ま と め

以上、筆者らの従事したパイプライン工事における交流電磁誘導対策について述べた。結果は一応満足すべきものとする。M. Riordan は、パイプの塗覆装を a "rob Peter to pay Paul" situation と述べ、塗覆装の役

割と低接地との二律背反にある妥協を考えているらしいが⁶⁾、われわれの方法は、塗覆装はあくまでも良好な絶縁を保持し、接地もまたあくまでも良好な低抵抗を保持することにより、防食と誘導対策は一つの方法で両立することを確かめた。しかし一方、われわれを脅かした問題が一つあった。

これは、マグネシウム陽極の交流腐食である。建設当初、交流最大電流密度は Fig. 5 のある地点で 0.19 mA/cm^2 であって、 0.1 mA/cm^2 を越えた地点は 3 カ所あった。これは、マグネシウム陽極の交流腐食の増加傾向が大きくなるボーダーラインと推測される 1 mA/cm^2 ^{10,11)} には充分余裕はあるが、薄気味の悪い値であった。しかし、この電流密度の大きい理由は端末近辺の誘導電圧が最も高く出る地点であり、パイプライン完成後は、端末効果もなくなり、交流電流も Fig. 7, 9 に見られるごとく減少して、われわれの心配はまずまず解消した。しかし交流電流密度の予測の問題として、今後の課題となろう。事故時の効果については、この送電線が建設以来 10 数年無事故であるので、実証のチャンスは今のところないが、有効に作動するものと確信する。

本誘導対策の策定について、東京電力(株)浅野直則氏ならびに藤倉電線(株)吉田直喜氏に、理論的裏付け、実際面での考え方など全面的なご援助を得た。ここに、紙上を借りて厚くお礼申上げる。

(Received January 16, 1976)

文 献

- 1) C. G. Siegfried: PIPE LINE NEWS, Aug. 8 (1971).
- 2) R. W. Gillette & J. E. Johnson: AIEE, Oct, 1173 (1954) (Discussion).
- 3) 高岡道雄, 吉田直喜, 猪鼻昭二: 藤倉電線技報, 40, 27 (1969).
- 4) 電食防止研究委員会: 塗覆装小委員会資料, No. 104 (1967).
- 5) 市野瀬比路実: 配管技術, 15, No. 11, 107 (1973).
- 6) a. 前掲文献 3).
b. M. Riordan: Material Protection and

- Performance, **11**, No. 10, 26 (1972); **11**, No. 11, 41 (1972).
- c. A. W. Peabody & Adrian L. Verhiel: IEEE Vol. IGA-7, No. 3, May/June, 395 (1971).
 - d. C. A. Royce: A. G. A. Operating Section Transmission Conference, May (1971).
 - e. E. A. Cherney & D. J. Carrigan: *Material Performance*, **13**, No. 7, 10 (1974).
- 7) 斎藤良次, 市野瀬比路実, 柏木達夫: '74 春期大会講演要旨集, B309 (1974).
 - 8) B. Favez & J. C. Gougeuil: CIGRE, No. 336 (1966).
 - 9) H. C. Robinson & J. W. Rog: *Material Performance*, **13**, No. 5, 27 (1974).
 - 10) 米山 潔, 三浦周敏, 千葉智祥, 田村祐一: 第 20 回腐食防食討論会講演要旨集, B 106, 61 (1973).
 - 11) 松島 巖, 福田岳久: 第 74 回日本金属学会講演会概要, C-II-156, 98 (1974).