

技術資料

UDC 620.197.5 : 669.14-462 : 620.193.7

パイプライン電気防食技術の現状*

中村 典道**

Recent Progress of Cathodic Protection Technique for Pipelines

Norimichi NAKAMURA

1. ま え が き

ガス・石油・水・電力などのエネルギーあるいはその他の物質の輸送手段として近年パイプラインが大幅に使用されている。これらパイプラインの主体をなす鋼管に対しては、地中部・地上部ともに防食処理を講じて、漏れによる事故を未然に防止し、安全を確保することが必要なことは論をまたない。

アメリカにおける埋設石油パイプラインの事故は、DOT (アメリカ合衆国運輸省) がまとめた資料の図1にも示されるごとく、他工事による事故と腐食による事故が最大の要因として数えられている。しかし、これら腐食事故といつても古い時期に埋設されたもので、裸のパイプラインか、または程度の低い塗装管などで、いづれ

も電気防食が不十分か、あるいは適用されていないパイプラインに生じているものである。

近代的パイプラインにおいては、良好な塗覆装鋼管を使用しこれに電気防食を施すことによつて腐食防止の完璧を期しており、このため腐食による重大事故の発生を見ていない。

本稿においては、主として埋設パイプラインの外面の電気防食技術の現状について述べるものとする。

2. 防食の歴史の変遷

防食の具体的手段を述べるに先だつて、地中における腐食の概念を極く簡単に述べる。金属の腐食現象をその機構によつて正確に分類することは困難であるが、一般に表1のごとく表わされている。1966年、電気学会発行の電食防止研究委員会編「電食、土壌腐食ハンドブック」でも、表1の分類に準拠して電鉄軌条よりの漏れ電流あるいは電気防食施設からの干渉電流のような外部電源による迷走電流によつて生じる腐食のみを電食とし、その他のものを自然腐食または土壌腐食と呼んでいる。いずれも金属表面から電解質(土壌)に向つて電流が流出することによつて発生する金属溶解を腐食と呼んでいる。これに対し広義に電気防食法を定義すれば、その原

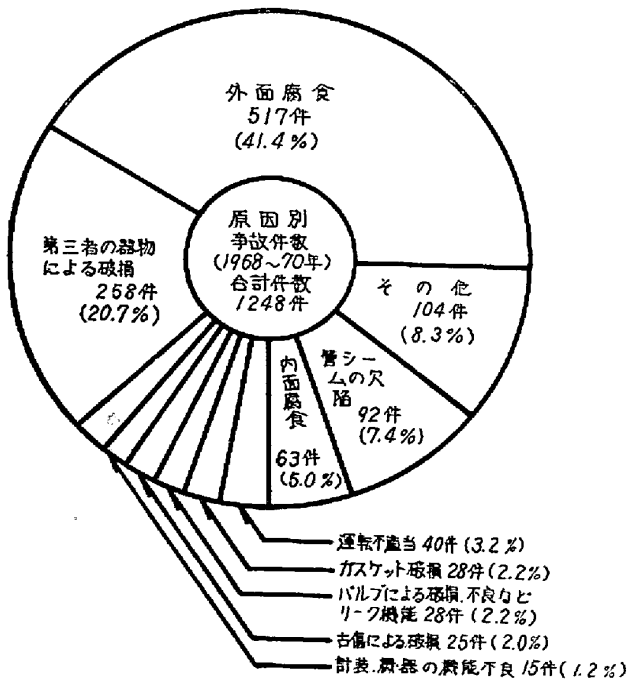
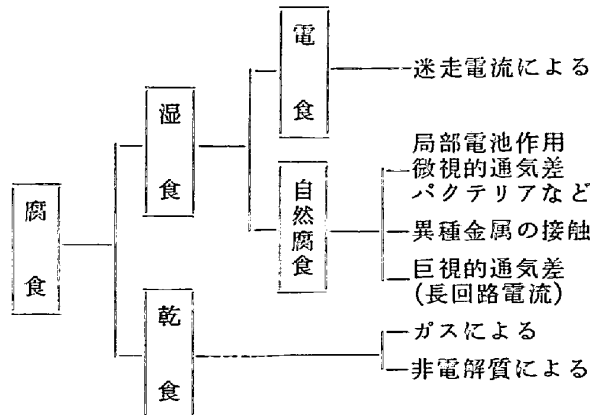


図1 アメリカ合衆国における事故件数 (3年間合計)

表1 腐蝕の分類



* 昭和51年2月12日受付 (Received Feb. 12, 1976) (依頼技術資料)

** 日本防蝕工業(株) (The Nippon Corrosion Engineering Co. Ltd., 1-6-4 Marunouchi Chiyoda-ku Tokyo 100)

表2 電気防食法の長所と短所

	長 所	短 所
流電陽極法	<ol style="list-style-type: none"> 1. 簡便である. 2. 短距離のパイプラインでは安価である. 3. 他の埋設金属体への障害(干渉)がほとんどない. 4. 過防食の恐れがない. 5. 管路の塗膜抵抗が十分に高ければ長距離でも効果が充分得られる. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 塗装の悪いパイプラインでは効果範囲が狭い. 2. 長距離のパイプラインではやや高価になる. 3. 塗装の悪いパイプラインでは消耗が多いためある期間ごとに補充する必要がある. 4. 平常の管理個所が多くなり煩わしい. 5. 強い電食に対しては無効である.
外部電源法	<ol style="list-style-type: none"> 1. 効果範囲が広い. 2. 長距離のパイプラインには数が少なくすむ. 3. 電極の消耗が遅いので平常の管理が容易である. 4. 電圧, 電流の調整が容易である. 5. 電食に対しても防食ができる. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 初期投資がやや大きい. 2. 強力なため他の埋設金属体への障害(干渉)について充分検討を必要とする. 3. 電源のない場合は, 電池, 発電機などを必要とする. 4. 過防食になることがよくある.
選択排流法	<ol style="list-style-type: none"> 1. 電鉄の電流を利用するので維持費が極めて少ない. 2. 電鉄との関係位置によつては非常に効果的である. 3. 比較的安価である. 4. 電鉄運行時には自然腐食の防止にもなる. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 他の埋設金属体への障害(干渉)については充分検討を必要とする. 2. 電鉄との関係位置によつては効果範囲が狭く, また設置不可能の場合もある. 3. 電鉄の休止期間(夜間など)は電気防食の用をなさない. 4. 過防食になることがよくある.

理は電解質を通し、埋設管に電流を流入せしめ金属溶解を阻止することであり、その方法には表2に示すような三種類があり、それぞれ長短がある。

地中埋設管路の防食は、古くから塗装することから始まり、1930年代頃から米国標準局(NBS)が中心となり、米国ガス協会及び米国石油学会と協力して、当時の各種塗料および覆装材料について、組織的な研究が行なわれた。また、最近のプラスチック類の発達はめざましいものがあり、塗覆装による防食上大きな役割りを果たしている。

2.1 電気防食法の変遷

電気防食法は近年めざましく普及した比較的新しい防食法であるが、その起源は古く、1824年英国のH. DAVY 卿により提唱されたのに始まっている。本法はこのように古い起源をもつにもかかわらず初期においては適用技術の不備な点が少なくなかつたため、久しくその発達が遅れていたが、1930年ころよりアメリカで急速に発達し地下埋設管、特に石油と天然ガス輸送管の防食法として注目されるようになった。さらに最近十数年間には電気防食の基礎および応用面の研究が活発となり広範な実績をみるに至っている。

また、腐食防止のための一方法として、電鉄帰線と埋設管を直接結ぶ直接排流法の起源も古く、20世紀の初めごろから欧米でボンディングと称し、かなり多く用いられてきた。我が国でも大正末期にはすでに選択排流器が取り付けられており、昭和38年度調査によると全国の選択排流器の数は755台に及んでいる。すなわち電車の普及とともに埋設管の電食対策としての排流方式は、必要不可欠のものとして装備されている。しかし、わが国

における近代的な電気防食法の採用は、昭和26年東京瓦斯(株)の大船～藤沢間のガス鋼管路線に、外部電源方式の電気防食を施工したのに始まっている。その後昭和29年同じく東京瓦斯(株)尻手～平沼間ガス導管にMg陽極を初めて埋設しており、以後排流法、流電陽極法、外部電源法の三方式が、単独かまたは併用で逐次増加している。また、それぞれの方式もその後次第に改良を重ね、いろいろな型が誕生しているが、外部電源方式を例にその経過を追うと、昭和41年に自動制御型外部電源方式が実用され、昭和44年にはその電極を地下100m以上埋設する深埋設外電工事が実施され、昭和45年には外部電源方式と排流方法を組み合わせた強制排流法が試用されるに至っている。

2.2 電気防食と塗覆装防食の併用

1971年アメリカ合衆国運輸省のパイプライン安全局(Office of Pipeline Safety (CPS))は、石油やガスパイプラインの防食を義務づける法規²⁾を作成した。この法規によると塗覆装を施せば必ず電気防食を併用しなければならないとしている。この2種類の防食方法をなぜ同時に用いなければならないか、ということに疑問を持たれる向きも多いようである。塗装による防食手段は、絶縁性皮膜で腐食環境から金属を物理的に防護することから始まっているのである。しかし塗覆装はいかに嚴重に装備しても鉄より柔らかく、衝撃などにも弱いものである。また、パイプラインの建設という土木工事に附随する作業のなかで、完璧な塗覆装状態を維持することがなかなか困難であり、微少な欠陥部の発生はさけられないことである。欠陥部が存在するとその部分から流出する腐食電流は電流密度が高く、孔食が意外な速度で進行す

る。

一方、電気防食法は、理論的に完全な防食方法であるがこれも実施上の制約がある。すなわち裸（無塗装）のパイプラインに電気防食を施すことは、莫大な電流を必要とし労多くして効少なしの結果になりやすい。大電流を流すことは日本のように狭い国土の中に数多くの埋設物がある場合に、それらの隣接他埋設物に干渉を起こすことにもなる。また電気防食は海水中などのごとく環境が一様な場合には比較的均一な電気分布を与えることが容易であるが、パイプラインの場合は多様な土壌条件、とくに岩砕や、礫まじりの土中では電流の分布が不均一になりがちである。

要するに塗覆装はそれ自体欠陥を持ちやすいが、電気防食の電流分布を良好にし、また所要防食電流を減少させることに重大な寄与をなしている。一方、電気防食はそれ単独では莫大な防食電流を必要とし、かつ到達距離のはなはだ短いものであるが、塗覆装との併用においては電流が集中することによって、塗覆装の弱点をみごとに補うのである。このように塗覆装と電気防食の併用は両者の欠点を補い合う相互補完の意味を持っているのである。この相互補完があればこそ長大パイプラインの完全防食が可能となるのである。

3. 日本におけるパイプライン防食上の特殊性

3.1 地理的条件

日本は山岳地帯と海岸とが接近して平野が少ない上に、この狭隘な平野部に人口も工業も密集していて、埋設管も自然、都市およびその周辺が大部分である。このことは電車も密集し洩れ電流も多くなるし、隣接他埋設管も多くなり防食設計上大変困難をきたす基本的条件となつていく訳であるが、腐食に最も直接的要因となつていく土壌抵抗率について考えてみる。米国シカゴ市のガス管に電気防食を実施するに際し³⁾、土壌抵抗率を一律に $3000\Omega\text{-cm}$ と設定して Mg 陽極を設計し、一年後の中間調査で要すれば若干の修正を加えるのみで成功を収めたことが報告されているが、東京近郊の土壌抵抗率の一例⁴⁾をあげると、表3のようであつて、最低数百 $\Omega\text{-cm}$ から、数万 $\Omega\text{-cm}$ までの広いバラツキを示し、少なくとも数段階に区分しないと、シカゴのような概算方法は採用困難なことがわかる。また、最近の急速な宅地や工場造成に伴つて、はなはだしい場合は岬を削り入江を埋めて造成した平地と、サンドポンプで埋立をしたような土地の連続からなる地域などもある。これらは外観上からは一見判別不可能であり土壌抵抗率の調査結果から初めてその腐食地区を予知することができるのである。異なつた土質にまたがつて埋設されたパイプラインでは、土質差による巨大電池（マクロセル）電流による腐食や、酸素濃淡電池作用による腐食も促進される。パ

表 3 土壌抵抗率測定値

測定箇所	土壌抵抗率 ($\Omega\cdot\text{cm}$)	備 考
海岸埋立地(新)	300~2000	江東区, 川崎市
下街地帯	1000~3000	江東区, 港区, 品川区
赤土地帯(森の跡)	15000~30000	世田谷区, 練馬区
〃 (畑の跡)	5000~10000	〃
海岸砂丘地帯	10000~50000	茅ヶ崎市
砂地と砂岩層	3000~30000	鎌倉市, 逗子市

イプラインに生ずるマクロセルはある場合には微粒子の湿潤土部が陽極、粗粒土部が陰極となり、その間の電位差は $200\sim 300\text{mV}$ に達することがある。また、パイプラインと交錯する河川が、予想外の迷走電流の通路となつた腐食事例もしばしば体験している。

3.2 電鉄もれ電流の影響

表4は日本国有鉄道がまとめられた「1970年度世界各国鉄道統計」から抜粋したものであり、一日平均動いている電車数や、直流消費量のいずれも、我が国が世界第一位である。しかも日本の数値は日本国有鉄道のみで私鉄を包含しておらず、これらの電車が他の国より、はるかに狭い平野部に密集しており、その密度がいかに大きいかを示している。また日本の海岸に面した都会地の土壌抵抗率が低いこととも関連して、埋設管が受ける迷走電流の影響は、諸外国より大きくかつ複雑なことが充分想定されるのである。

これら迷走電流に対する埋設管側の最も簡単な防止対策は排流方式であり、東京周辺では、ガス会社のみで150台以上の排流器を設置して電食防止につとめている。一般に排流法では比較的低い設備費で長区間の防食が可能となる利点があるが、あまり過大な排流電流では過防食となるので直列に抵抗を挿入し、排流電流を絞る必要を生じる場合もある。一方単純な排流方式の適用のみでは、防食電位に調整することが困難な管路が最近増大し、流動陽極や外部電源などのやや手の込んだ防食方法を併用して問題の解決に当つている。

3.3 建設途上における防食⁵⁾

上述のごとく我が国においては、電鉄の迷走電流が諸外国と比べ格段に多いのであり、建設途上といえども、防食、特に電食の防止には注意を払わなければならない。我が国においては、欧米、特に米ソに見るような、壮大な森林原野を走る専用 Right of way など望むべくもないので、道路管理者の許可を待ちつつ、数10mから数1000m位の単位で分断された姿の工事を続けなければならない。

防食技術が長足の進歩を遂げつつあるとはいえ、まだ莫大な漏れ電流が流れている地区でのパイプラインの建設については、

a) 電鉄漏れ電流の減少, b) 防食技術の向上の2点でパイプライン当事者が、力を尽さねばならないところであるが更に、

表4 世界各国鉄道電化諸数値

国名	営業キロ km	軌道延長 km	一日平均 動車数(台)	電力消費量 (年間) ×10 ⁶ kWh	直 流 率 %	直 流 消 費 ×10 ⁶ kWh
日本	6021	17027	13874	6061	80.0	4850
フランス	9351	26299	2853	4625	54.5	2520
西ドイツ	8586	25431	2906	5535	1.2	64
イタリヤ	7916	18064	2223	3065	94.0	2880
スイス	7042	11098	916	1311	1.5	20
スペイン	4238	8976	1928	2316	100.0	2316
南アフリカ	3972	10146	—	2264	100.0	2264
ポーランド	3553	9311	1015	1041	10.1	104
インド	3162	8516	7658	1849	60.0	1110
イスラエル	3075	5860	634	727	100.0	727
スウェーデン	2911	6338	1011	1529	0.5	7
チェコスロバキア	2510	6240	914	1691	66.5	1120
ノルウェー	2440	3128	271	293	0	0
オーストラリア	2374	3654	611	1003	0	0
オランダ	1645	3812	528	817	99.9	817
ユーゴスラビア	1510	2771	206	359	24.3	82
東ドイツ	1357	3260	—	851	24.2	205
ベネズエラ	1217	3182	562	590	100.0	590
カナダ	—	63	24	12	100.0	12
アメリカ	—	—	270	1341	?	1341

c) 迷走電流地域での工事工程のあり方
についての検討も忘れてはならないものの一つである。

4. 最近の課題とその対策

4.1 独立系としてのパイプライン

先述のOP Sの法規では、ガス及び石油の埋設パイプラインは他の地下構造物から電氣的に絶縁することを要求している。これは具体的にいうと、(1) 鉄道や高速道路の横断面に用いられる金属ケーシング管(さや管)との絶縁、(2) 架台、橋梁、鉄筋コンクリート基礎、建家基礎鉄筋などとの絶縁をさしている。すなわち対象パイプラインの管周方向について他構造物系統との間に絶縁構造を採用することを要求しているのである。架管部などにおける絶縁構造は、振動や温度変化など機械構造上いろいろむずかしい問題を含むものだけに、設計時点での十分な配慮が望まれるわけである。

またパイプラインの防食目的を一定区間に限定する必要を生じることもある。すなわち、(1) 主配管と集配管との絶縁、(2) ガス工場の配管末端および需要家の入口、(3) 計量ステーション、ガバナーステーションなどの出入口、など防食対象となるパイプライン区間をいかに他区間と独立絶縁するかということである。これらは管軸方向の絶縁ということであり、ふつう絶縁継手を採用して最優先防食対象区域となる主管を単独の防食系としようとするものである。

最近のごとく塗覆装が極めて優秀な対象管路を電気防食する場合、極めて小さな防食電流を適用することになり、これら周方向および軸方向の絶縁が確立されてないと、他構造物や他区間に防食電流が分流され、防食対象はただちに防食不完全となることは当然である。

電気防食の適用は独立した防食系としてのパイプラインの設計と密接に結びついたところで成立するものであつて、我々防食技術者のみならず、ユーザー、配管設計施工技術者が密接に連携してまとめあげなければならない問題と考える。

4.2 干渉

電気防食を適用する場合、選択排流法、外部電源法などはそれ自体強力な電流の通電を伴うので他の隣接埋設物に干渉を及ぼすことがある。図2は干渉の概念図を示すものであるが、日本のごとく狭い国土の中で電気鉄道が発達し、かつ各種の埋設金属体が混ざり合った我が国においては、一つの埋設管企業体が万全な防食設計を行なつても、完璧を期することははなはだ困難である。そのため東京をはじめとし、関西、中部、中国、新潟などに鉄道、ガス、電力、水道、電々の各事業者が相寄り、この種の相互協議の場を目的とした電気防止対策委員会が設立され、電食・干渉問題の解決と防止に活躍しているのである。一方、この面倒な干渉問題をできるだけ防食

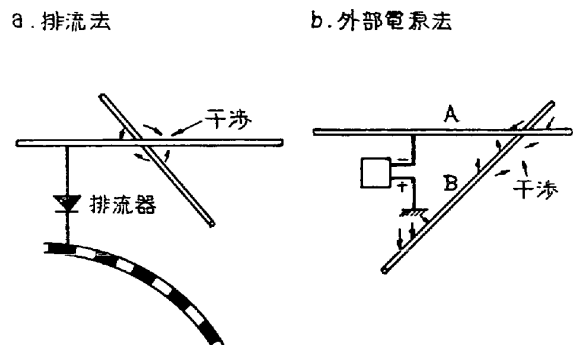


図2 排流法および外部電源法による干渉

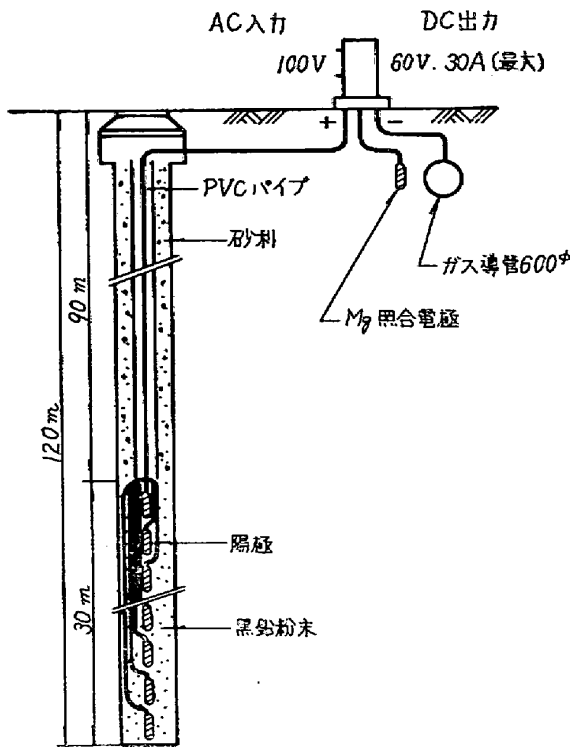


図3 深埋陽極自動制御式外部電源装置

設計上少なくするため、最近のガス幹線については Mg 陽極を主体とした防食工法が採用されている。

流電陽極法は有効電位差が小さいので他に干渉を及ぼすことは絶無に近いし、また法的制約も埋設管管理者同志の制約も受けない。このことは受動的な干渉以外にも他系統とのボンドなどの煩雑な業務に煩わされることなく、対象管路のみを独立した防食系として設計できる利点がある。

また外部電源方式の場合でも約5~6年前から地表面下70~100mまでボーリングを行ない、いわゆる深埋め電極式の採用により他施設に干渉を及ぼすことなく、長距離にわたって電気防食効果が及ぶよう設置されるようになった。その装置の概要は図3のごとくであり、現在約100基程度の深埋め式外部電源装置が稼働しているが、電極埋設深度と地表面電位分布の関係を調査した一例を図4に示した。地表面下 D (m) の深さに設置した球状電極から I (A) の電流が発散する場合、電極直上から距離 y (m) なる任意の地点の地表面電位 V (v) は土壤抵抗率 ρ ($\Omega \cdot m$) を一定と仮定すれば、次式で表わされる。

$$V = \frac{I\rho}{2\pi\sqrt{D^2+y^2}}$$

すなわち、地表面電位 V は、発散電流 I と土壤抵抗率 ρ に正比例し、位置的には距離 $\sqrt{D^2+y^2}$ に反比例する。特に電極付近では電極深さ D が地表面電位の減少に役立つのである。また実際の現場の地層で抵抗率の高い地層の下部に低い抵抗率の地層があれば、そこに電極を設置

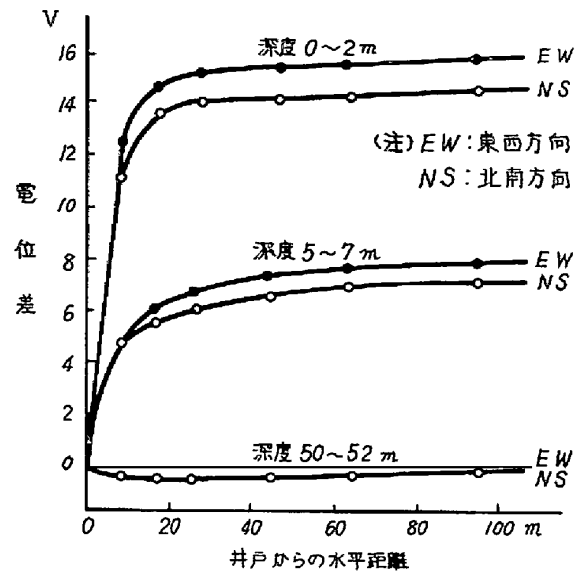


図4 地表面電位分布(電極深度別5A予備通電時)

すれば発散電流は抵抗率一様の場合よりも、低抵抗の地層を多く流れて遠くに拡がるので、地表面電位勾配はより一層均一化されて好都合である。この方式を採用すると他の埋設物に対する干渉はほとんど認められておらず、また電極埋設用地難の解決、低接地による電力費の節減などの効果が大きい。

4.3 高压送電線下の保護対策

最近の傾向として土地問題が深刻になるとともに、パイプラインが高压送電線に接近したり、あるいは並行して敷設されるのも避けられない状況となってきた。送電線下のパイプラインは送電線系統の地絡事故や、電撃事故はもちろんのこと、平常時においても条件によつては送電線からの誘導作用によつてかなりの電気的影響をうける場合がある。低電圧短距離送電線では中性点は非接地でも格別支障はないが、高電圧長距離送電線では各種の障害を生ずるので中性点を直接接地するのが普通であり、その系統に地絡事故が起こった場合にはパイプラインに与える影響の程度が大きい。それらの保護対策としてはまず高压送電線下でパイプラインを建設する場合、作業員が大地から絶縁されている塗覆装鋼管に触れて、送電線から誘起される交流危険電圧をうけることがないように、あらかじめアースを確実にとり、管路溶接にあたってはアースマットとパイプをケーブルでつなぐなどの保安措置が必要である。

一般に電撃や電撃に対する安全策は接地の良否にかかわっており、パイプラインの安全も接地設備には十分注意をする必要がある。接地体の材質として銅や鉄は防食上不都合であるので、Mg 陽極を用いて保安接地と防食を兼用させる方法が実用されている¹⁰⁾。

4.4 過防食対策について

いままでのべてきた塗覆装と電気防食の相互補完の関係についても、全く問題がない訳ではない。すなわち過

大な防食電流をパイプラインに流入せしめると、鋼面において水素ガスが発生し、そのガス圧力および pH の増大などのため塗覆装が劣化したり剝離が生じやすい。剝離の状況も塗装の種類によつて一様でなく、W. R. Mc CAFFREY の論文⁸⁾によれば、コールタールエポキシ系塗装のものでは過防食でひどく侵されるが、押出しポリエチレン被覆によるものでは過防食によく耐えることが示されている。

さらに塗覆装欠陥部には防食電流が集中して流入するので、欠陥部の電流密度が過大となると素地鋼管の水素脆性割れを生じる危険性が種々の角度から論じられている。とくに降伏強さ、100 kg/mm² 以上⁹⁾の高張力鋼では危険性が增大するといわれているが、これらの研究は今だ日が浅く問題の定量化はこれからの課題と思われる。

現状では外部電源方式を自動制御方式のものに改良し適切な電位幅に調節することを行なつたり、Mg 陽極などの流電陽極を主体とした方式でできるだけ過防食を減少せしめる配慮が行なわれるようになった。

5. あとがき

以上主題に関して広汎な問題を略記したので、おわか

りにくい点があるかと思われるので、その際は電気学会編文献(1)「電食・土壌腐食ハンドブック」(近く改訂版が出版される予定)を御覧願うこととし、この短文が多少なりとも大方の御参考になれば筆者の最も幸いとすることである。

文 献

- 1) 電食防止研究委員会編：電食土壌腐食ハンドブック (1966), p. 4 [電気学会]
- 2) Code of Federal Regulation: Part 192, Title 48 (1971)
- 3) E. F. FOWLER: Corrosion, 14 (1958) 11, p. 53
- 4) 花田, 中村: 防蝕技術, 10 (1961) 3, p. 113
- 5) 市野瀬, 山村, 中村: 防蝕技術, 21 (1972) 8, p. 361
- 6) 星野: 防蝕技術, 22 (1973) 5, p. 175
- 7) 米山, 三浦, 千葉, 神田: 第20回腐食防食討論会予稿集 (1973)
- 8) W. R. Mc CAFFREY: Met. Protect. Perform., 12 (1973) 2, p. 10
- 9) H. P. LEEKIE and W. LOGINOW: Corrosion, 24 (1968) 9, p. 291
- 10) 市野瀬, 山村, 後藤: 防蝕技術, 25 (1976) 6, p. 393