

生活の安全を守る電気防食法

山田 哲也

科 学 と 工 業 別 刷



特集 生活・環境にやさしい金属材料

生活の安全を守る電気防食法

山田 哲也

鉄をはじめとして金属は我々の生活に欠かせない構造物に使用されているが、多くの金属が“さびる”現象を日常生活の中でよく見かけることがある。このさびることを放っておくと構造物は耐久性を失い、生活の安全を脅かすことになる。

本講では、電気でもってさびを制する防食法、すなわち電気防食法について、身近な構造物に適用された事例を説明する。

キーワード：電気防食法，腐食コスト，維持管理，パイプライン，港湾構造物，コンクリート構造物，ダム堰

1 はじめに

第二次世界大戦後の経済復興期および高度成長期にかけて我国では社会資本と称する多種多様の土木構造物が築造されてきた。これらの社会資本施設は建設後数十年を経過し耐用年数を過ぎたか、今後迎える時期にあり、維持管理および更新に多額の投資が必要な時代になってきている。

近年、トンネルや高架橋のコンクリート剝落と落下などの構造物の劣化が顕在化してきたことを契機に維持管理のあり方、安全に対する考え方が議論されてきている。また、良質な社会資本の整備を目的とする施設の維持管理と再利用のための耐久性向上の手段として、防食対策工の利用が高まる傾向にある。

本講では、21世紀の循環型社会において各種構造物の維持管理技術の中で、生活の安全を守るために適用されている電気防食法について説明する。

2 我国の腐食コストについて

金属材料の錆による損失は、一つは直接損失といって錆びた材料を交換するために費やされた費用と錆

を防ぐ対策費であり、もう一つは間接損失といわれる錆による操業中断、危害の誘発、製品の汚染など、損失額を予測しにくいものがある。

2001年に腐食防食協会と日本防錆技術協会が中心となり、我国として1975年以来2回目の腐食コストの定量的解析が実施された。調査方法は、防食方法に関する生産・製造面からの直接的な腐食対策費を加算して推定する方法(Uhlig法)および各使用分野ごとに腐食による直接的損失と腐食対策費を

表1 Uhlig法により推定した腐食コスト

防食対策の内容	腐食コスト(億円)	構成比(%)
表面塗装	22994.6	58.4
金属の表面処理	10135.2	25.7
耐食材料	4432.4	11.3
防錆油	636.8	1.6
インヒビター	449.0	1.1
電気防食	216.8	0.6
腐食研究費	416.5	1.1
腐食調査費	95.6	0.2
計	39376.9	100

積み上げていく方法(Hoar法)によって行われた。

Uhlig法による結果を表1に示す。今回の調査では腐食コストは3兆9,377億円となりGNPの0.77%となった。この方法の場合には間接額が含まれないので、実際の腐食コストはもっと大きくなると思われる。我々の身の回りにある金属材料を腐食から守るために、このような多額の費用がかけられていることを認識する必要がある。

3 腐食・防食と安全のための維持管理

安全とは、辞書によれば「物事が損傷したり、危害を受けたりするおそれのないこと」と説明されているが、これは人間が被害を受けないことを基本としている。構造物が損傷したとしても、根本的な崩壊につながることはないが、第三者に被害を与えるような場合は安全とは言えない。したがって、構造物の維持管理は「予防保全」の観点から実施する必要がある。

構造物には設計耐用年数が設定されており、この設計耐用年数の期間は構造物としての機能を全うしなければならない。今、耐用年数がきたら壊して作り直す(スクラップアンドビルド)ことが困難な時代になり、耐用年数を過ぎても供用していくようになってくると、構造物の機能を維持していく計画的な維持管理が必要である。

金属材料で構成されている構造物の場合、腐食は耐用年数を支配する大きな要因であり、腐食調査および防食管理は維持管理の主要な技術である。図1に腐食対策の面からの維持管理フローの一例を示す。

4 生活環境における金属の腐食

金属は、自然界で化学的に安定な鉱石として存在する。これに多大なエネルギーをかけて作られるものであるから、放置しておく環境物質と反応して元の鉱石の形へ戻っていく。これが「さびる(錆る)」という現象で一般的に腐食と言われるものである。

さて、我々の生活環境の中にある腐食に関する環境をみると、最も基本的なものは大気と上水道、河川水などの淡水である。この環境での腐食に係る化学物質は水と酸素および炭酸ガス等である。このような環境に曝されている構造物としては、橋梁、ダム堰の水門、給水・給湯系の配管などがある。さらに、ガス・水道・石油等のパイプラインや港湾施設などの土木構造物が建設されている土壌や海洋

環境は腐食性が強い環境と言われるが、塩素イオンや硫酸イオンといった腐食性化学物質の他に、迷走電流あるいは複数の環境に接するという外的要因が存在し激しく複雑な腐食を示すことになる。

5 腐食のメカニズム

5.1 金属の電気化学的性質

金属の腐食は、金属が電解質中にイオンとして溶解していく化学反応であるから、腐食・防食を理解するためには、次のような金属の電気化学的性質を覚えてもらわなければならない。

- ① 金属は電解質中で特定の電極電位をもつ。
電解質とは水や土壌のことであり、電極電位とは金属がイオンとなって溶解する時、金属と電解質の界面に存在する電位差である。
- ② 電極電位は金属によって異なる。
- ③ 電極電位は同じ金属でも電解質の状態によって異なる。
- ④ 電極電位は直流電流の導入・流出によって変化する。電流が流出(腐食)すると正の方向に、流入(防食)すると負の方向に変化する。

5.2 金属の自然腐食と電食

ここでは金属の中でも90%以上を占める鉄鋼の腐食を説明する。鉄鋼の表面は一見均一に見えるが、その化学組成、組織、酸化被膜、付着物等が局部的に異なっている。また、電解質側でも含まれている塩類濃度、溶存ガス濃度、温度等が異なっている。これらの不均一性によって、局部的に電位の高低を生じ電池が形成される。これを局部電池または腐食電池といい、模式的に示すと図2のようになる。鉄の中を流れる電流は電位の高い部分(陰極部=カソード)から低い部分(陽極部=アノード)へ、電解質の中では電位の低い部分から高い部分へ電流が流れ、電位の低い部分で鉄のイオン化が起こり腐食する。

よく「電食」という言葉を耳にすることがある。自然腐食は金属が自然にもつ電極電位の差によって腐食電池を形成し、電流が流れて腐食が起こるものである。これに対して、外部から電圧をかけて強制的に電流を流した場合に起こる腐食を電解腐食、通称「電食」と呼び自然腐食と区別している。中には自然腐食も電気化学的な腐食という意味で電食と呼ぶ人もいるが、一般的には電食とは電解腐食のことである。

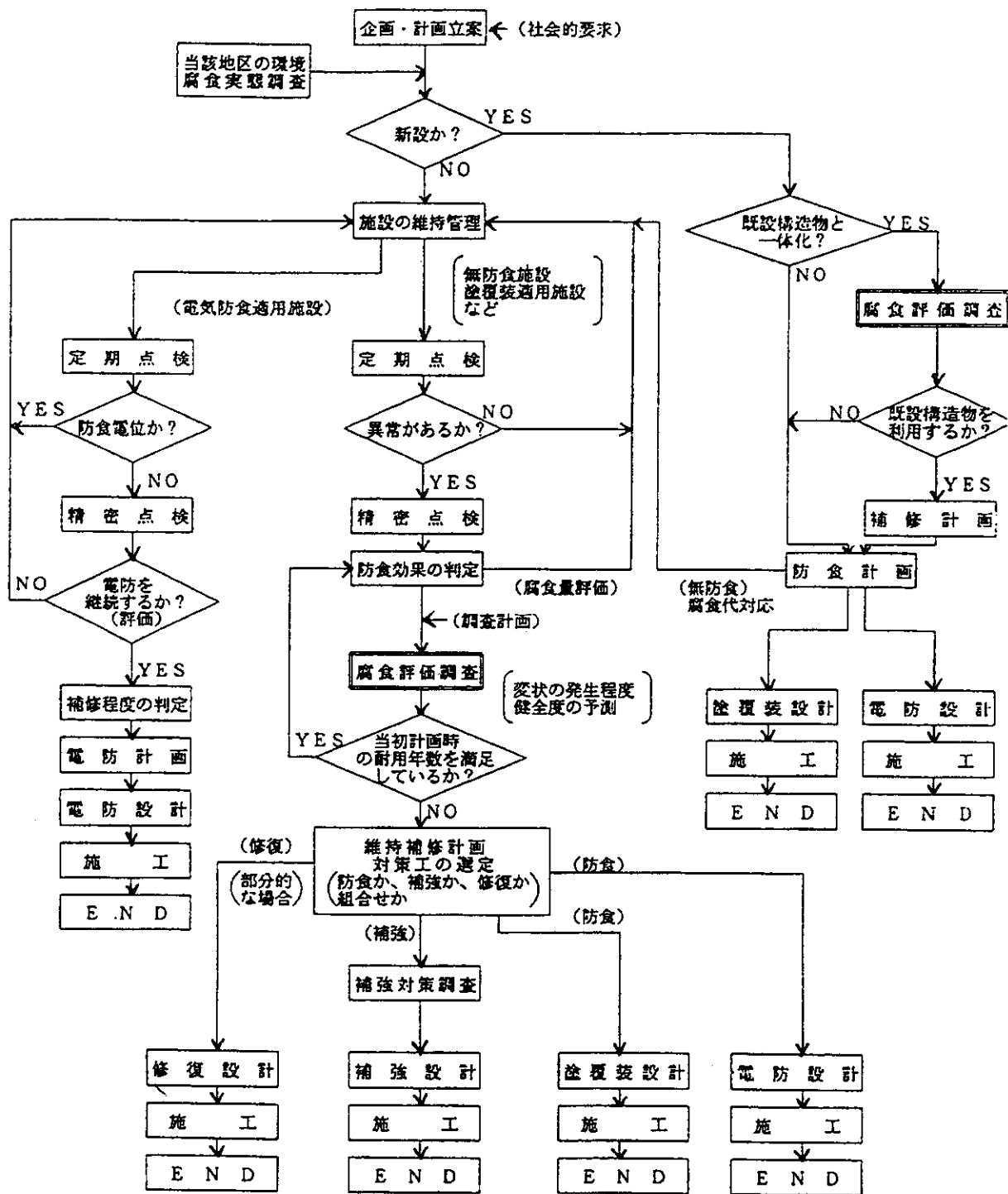


図1 維持管理フローと腐食対策

5.3 腐食の種類

腐食の発生と進行には多くの要因が関係するので、その分類も多様であるが、原因と腐食面の形態で分類すると図3のようになる。ここで、マイクロセル腐食は、金属表面に小さな電池がたくさん生じることによって発生する腐食で、マクロセル腐食は陽極部（アノード）と陰極部（カソード）が明確に分かれ

ていて電位差が大きな電池による腐食である。マイクロセルによる均一腐食の場合、淡水や海水中での鉄鋼の平均腐食速度は、およそ1年間に0.08mm程度であるが、マクロセル腐食の場合は孔食となり、平均腐食速度の5～6倍にも達する。したがって、構造物の寿命はこの最大孔食深さで決まってしまう、健全な部分があったとしても建て直しをしなければ

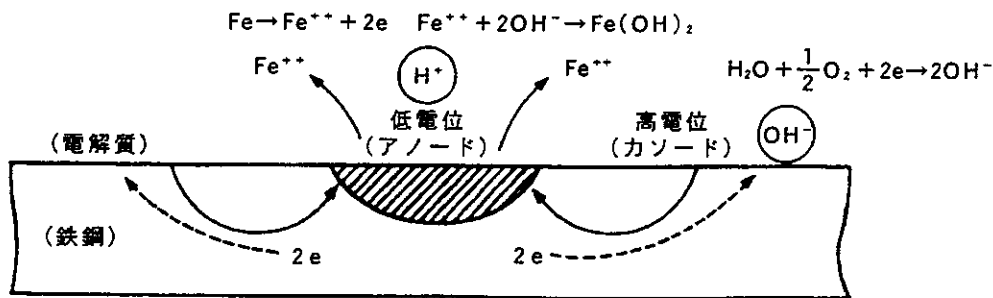


図2 鉄の局部電池腐食

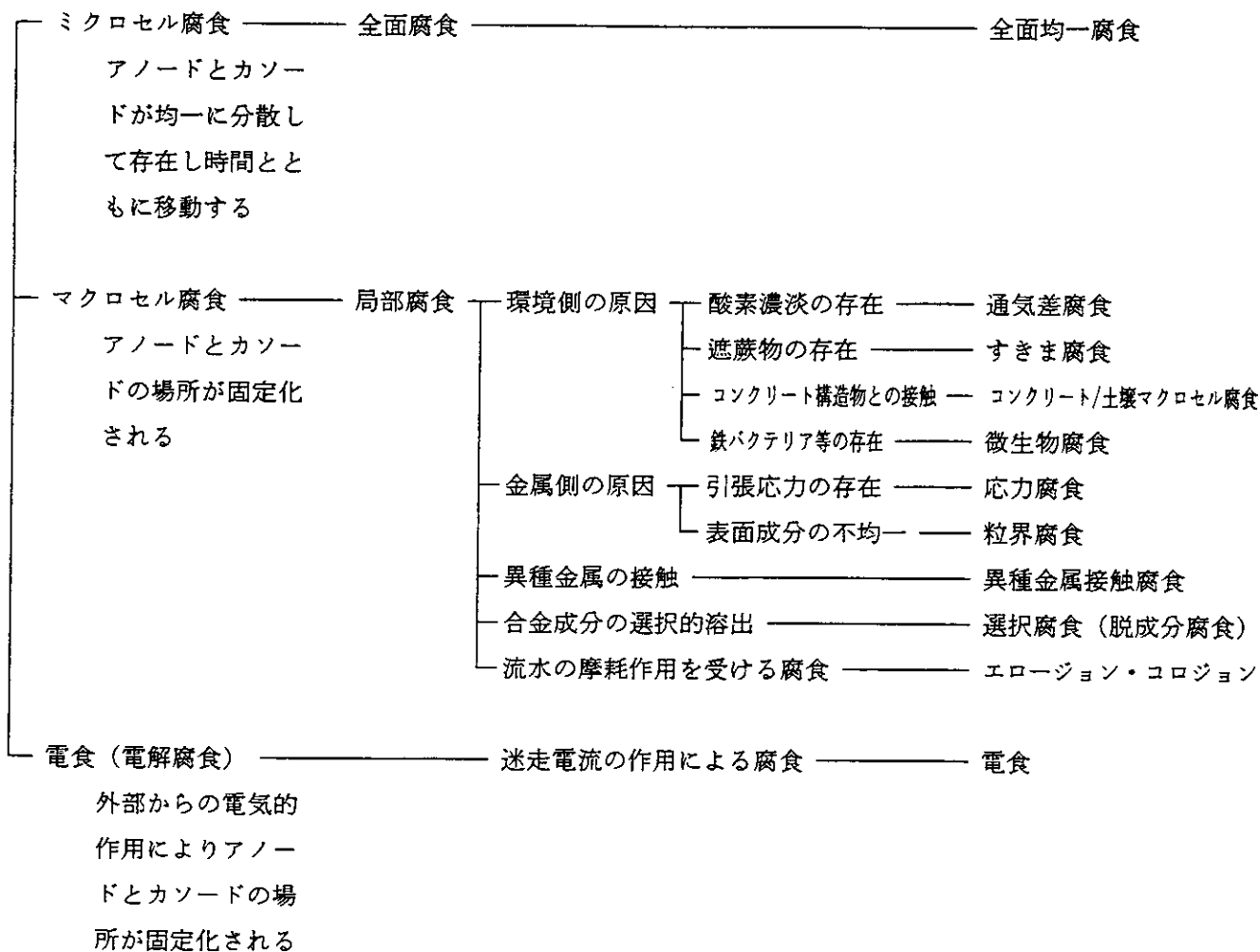


図3 腐食の分類

ならないことになるので、局部腐食を防止するだけでも構造物の寿命は大きく延長できることになる。

6 防食技術

腐食の要因は多く存在するが、環境条件を十分に把握していれば、いろいろな防食技術を組み合わせることで経済的で確実な防食を行うことができる。

6.1 環境処理

環境から腐食性の媒体を除去すること、例えば酸素や炭酸ガスを除くこと、空気中の湿度を下げることで、溶液の電導度を下げるなどである。その他、環境中へ腐食抑制剤 (インヒビター) を添加する方法がある。

6.2 環境遮断

金属表面を耐食性の材料で被覆する方法で、金属被覆、非金属無機質被覆、非金属有機質被覆等が使用される。金属被覆でもっとも一般的なのは亜鉛、スズ、ニッケル等によるめっきであり、耐食性金属のクラッドや金属溶射も含まれる。

非金属無機質被覆としては、ガラスライニング、セメントコーティング等が含まれ、有機質被覆としては、塗装、ゴムライニング、プラスチックライニング等が含まれる。

6.3 電気防食

腐食の発生は、金属の酸化反応であり表面から腐食電流が流れ出る（電位が正方向に変化する）ことによって起こるものであるから、腐食電流より少し大きい電流を防食対象となる金属表面に流し（電位を負方向に変化させる）、腐食電流を打ち消せば腐食が停止する。電気防食法は腐食環境に陽極を設置し、防食対象物に直流電流を流して電位を制御して、腐食を防止させる技術である。

図4は、鉄の電位とpHの関係を表した図で、腐食の起り得ない領域（不活性域）、腐食の進行する領域（腐食域）および保護皮膜に覆われて腐食の進行しない領域（不動態域）を表している。この図から腐食域Aにある鉄を防食する方法は、図に示す様に3通りがある。電位を制御して防食する方法（電気防

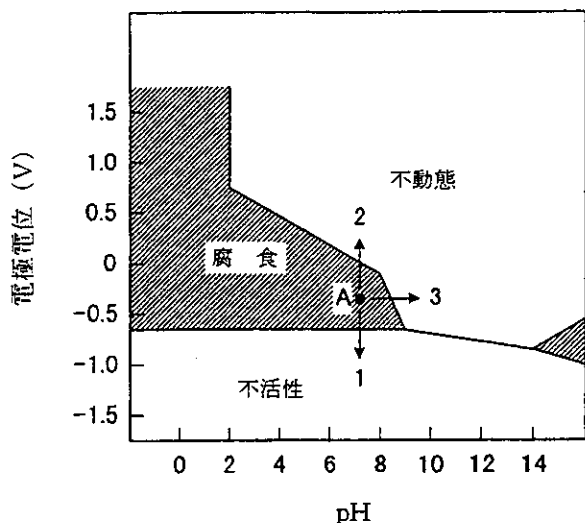


図4 鉄の電極電位-pH図

食法)は1および2である。すなわち、1は電位を低電位方向に変化させ不活性域にするもの、2は電位を高電位方向に変化させて不動態域にするものである。1を陰極防食法、2を陽極防食法というが、通常電気防食法というとは陰極防食法を指す。

7 各種構造物に対する電気防食法適用例

7.1 パイプラインに対する電気防食

7.1.1 被覆と電気防食の併用

土壌中に埋設されているガス、水道などのパイプラインは、直接目で見る事ができないため保安上とくに防食管理が重要である。このようなパイプラインに対しては、そのほとんどに有機質被覆や電気防食が施されている。有機質被覆は、金属表面が電解質である土壌と接触しないことを目的とし、電気防食は金属表面に形成される腐食電池の解消を目的とするものであるが、多くの場合両者を併用し、より確実な防食を達成している。

表2は、オーストラリアにおけるパイプラインの

表2 腐食によるパイプライン漏洩事故の発生状況

防食措置	延長 (km)	腐食漏洩件数	発生率 (件/1000 km・年)
なし(裸管)	47,200	117	2.5
防食被覆	11,800	34	2.9
電気防食(裸管)	23,700	117	4.9
防食被覆と電気防食	376,300	169	0.4

防食状況を示すものであるが、防食被覆と電気防食の併用が最も防食効果が優れていることを示している。

防食被覆は、敷設時あるいは掘り返し時の損傷、経年劣化は免れず、被覆に傷がつけばその部分がマクロセルのアノードとなり穴のあく激しい腐食を受ける。この傾向は高級な被覆ほど激しくなるので、万一損傷してもこれを補う電気防食法の併用が必要となる。

7.1.2 パイプラインへの電気防食適用例

ガス、水道、石油等のパイプラインには主として鋼管が使用されており、塗覆装と電気防食法が適用されている。電気防食法には防食電流の供給方法によって流電陽極方式（犠牲陽極方式ともいう）と外部電源方式、排流方式がある。

流電陽極方式は鉄よりイオン化し易い金属（土中ではマグネシウム合金が使用される）を埋設してパイプラインと接続し、鉄との電池反応で防食電流を流すものである。主として延長の短いパイプラインに使用される。概念図を図5に示す。

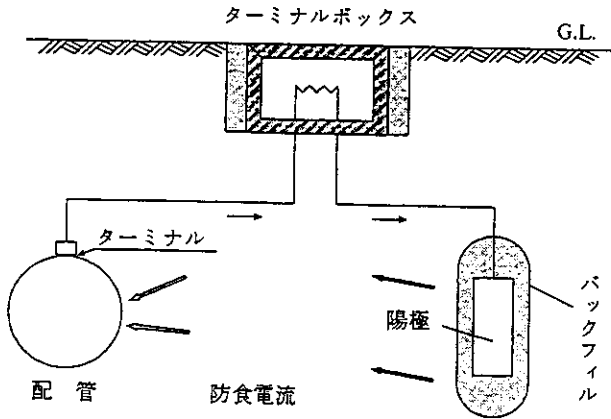


図5 流電陽極方式によるパイプラインの電気防食

外部電源方式は、直流電源装置を利用し土中に埋設した不溶性電極（白金めっきチタン電極等）から強制的に防食電流を流す方法で、延長の長いパイプラインに適用されている。適用例を図6に示す。

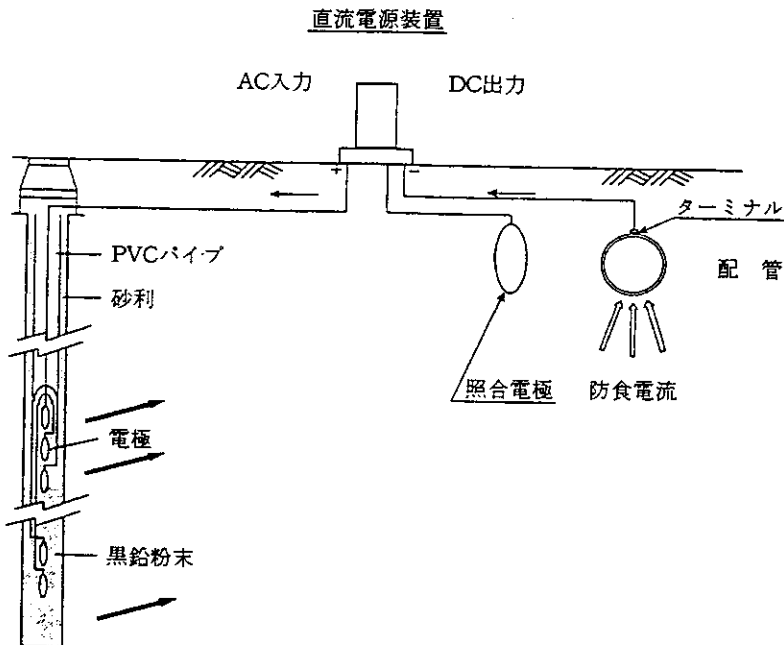


図6 外部電流方式によるパイプラインの電気防食

7.2 海洋構造物に対する電気防食

海に囲まれた我国は、東京湾横断道路や関西国際空港等、大規模な土木構造物が海洋環境に構築され

てきている。このような沖合海洋施設や港湾構造物の鋼材は、大気中、飛沫帯、干沫帯、海水および海底土という5種類の腐食環境に曝されており、図7に示す腐食プロフィールを示すので、各環境に適した防食が施されている。

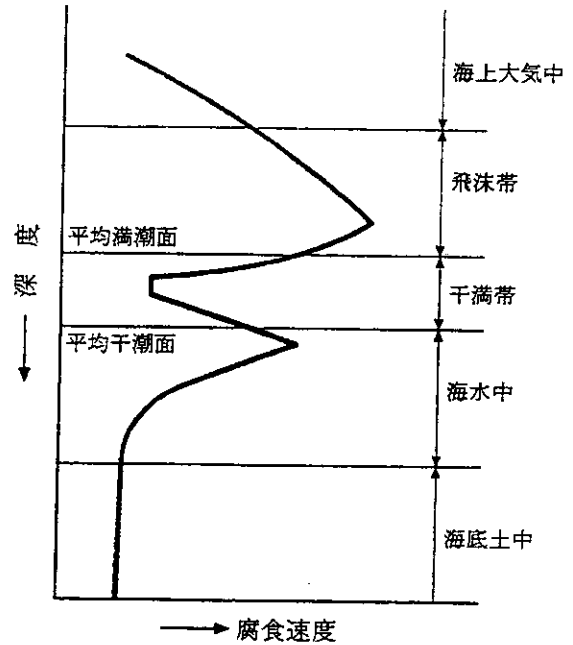


図7 海洋・港湾構造物の腐食プロフィール

海水、海底土中では海水自体がもつ電気導性を利用した電気防食法が適用されている。海洋環境の構造物の場合には、メンテナンスが容易であり経済性に優れているアルミニウム合金陽極を用いた流電陽極方式が主体となっている。図8に鋼矢板に溶接されたアルミニウム合金陽極を示す。

飛沫・干沫帯では海水の飛沫を浴び酸素の供給が十分なため腐食がとくに著しいこと、しかも補修の困難な場所であることから被覆やライニングが適用されることが多い。図9にはベトロラタムテープとFRPカバーによる被覆防食の例を示す。この環境ではチタンや高耐食性ステン

レスのような新素材を使用して、長期耐用を目的とした防食法も出現している。

大気部では、他の環境に比較して腐食が穏やかな

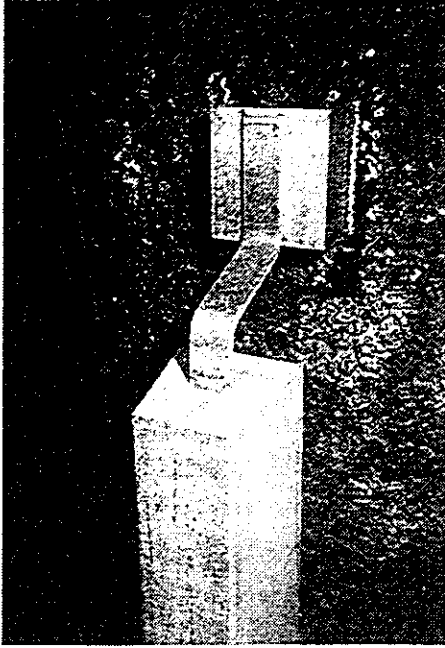


図8 アルミニウム合金陽極による岸壁の防食例

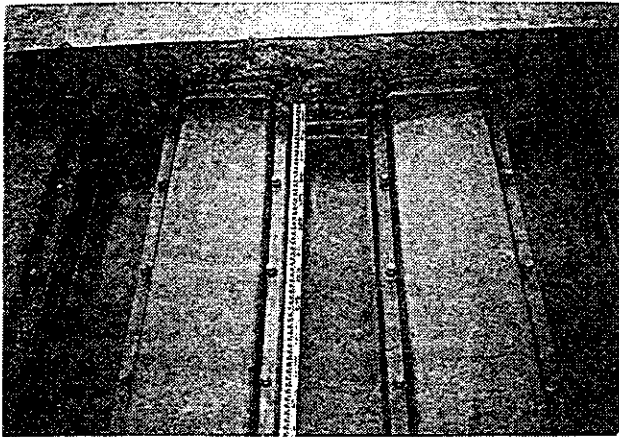


図9 被覆防食による鋼矢板の防食例

こと、補修も可能なことから、主として塗装が行われる。

7.3 コンクリート構造物に対する電気防食

7.3.1 コンクリート構造物の劣化

コンクリートはpHが12～13のアルカリ性のため、内部の鉄筋は不動態皮膜で保護され腐食は進行しない。しかし、飛来塩分がコンクリート表面から内部に浸透し鉄筋表面に達すると不動態皮膜が破壊され腐食が開始する。鉄筋腐食が始まる塩分量は、塩化物イオン量で1.2～2.0kg/m³とされている。

鉄筋腐食が進行すると、錆の膨張圧で被りコンクリートが破壊されひび割れとなり、そこから多量の

塩化物イオンが侵入し鉄筋腐食は飛躍的に増大し、ついにはコンクリートの剝離や剝落となる。図10に剝離、剝落を生じた構造物を示す。

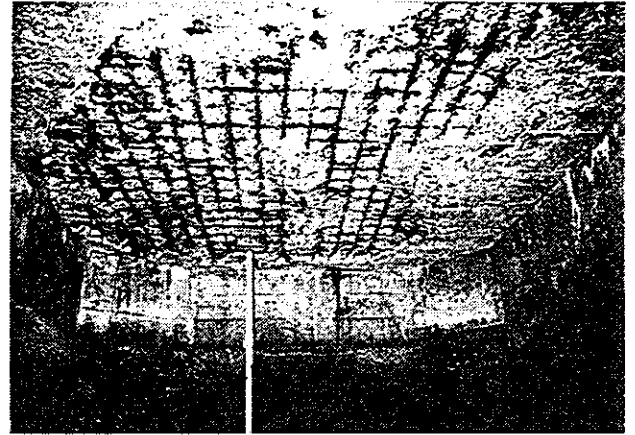


図10 剝離・剝落を生じた栈橋床板

7.3.2 コンクリート構造物の電気防食適用例

最近でこそ構造物の建設当初から電気防食を適用することが行われ始めたが、コンクリート構造物に対する電気防食は既設の劣化した構造物に対する補修工法としての採用が多い。塩害を受けた構造物に対する補修の従来工法としては、断面修復工法や表面被覆工法が行われてきたが、多量の塩化物イオンが含有した構造物に対しては再劣化が免れない。電気防食法はコンクリート中の塩分による鉄筋表面の不動態皮膜を破壊させない防食方法であり再劣化は生じない。米国連邦道路局では「塩害により劣化したコンクリート構造物を防食する唯一の方法は電気防食法である」と報告している。

ライフサイクルコストの面でも経済的な防食法として適用事例が増えており、鉄筋コンクリート構造物に対する電気防食の国内実績は4万m²を超えている。

コンクリート構造物の電気防食法の概念図を図11に示す。電気防食はコンクリート表面付近に設置した陽極からコンクリートを介して鉄筋に電流を流し、鉄筋表面の腐食部をアルカリ化して不動態化するとともに鉄筋表面全体を塩分から保護する技術である。

電気防食の方法は直流電源装置を使用して陽極から電流を流す外部電源方式の実績が多く、使用される陽極はチタン系が主流で形状はメッシュ状あるいは溶射皮膜として設置される。チタン溶射方式の概要図を図12に示す。

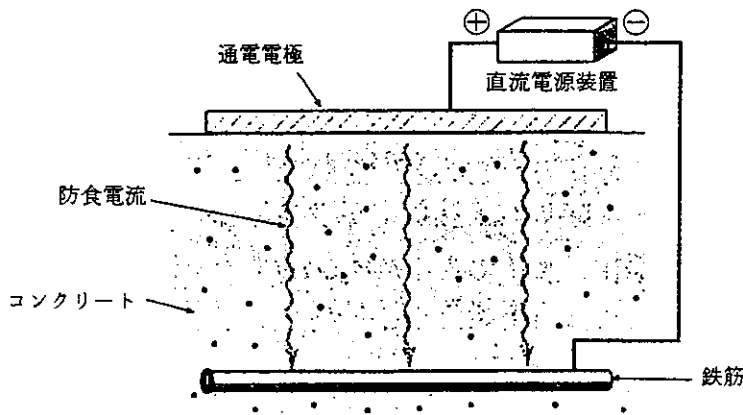


図11 コンクリート中铁筋の電気防食概念図

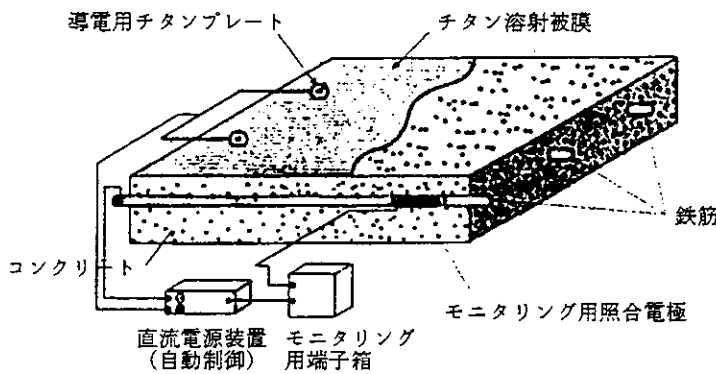


図12 チタン溶射方式の概要図

7.4 河川・ダム施設に対する電気防食

河川・ダム施設は、洪水調整や飲料水の確保、発電など生活の安全に欠かせない施設である。これらの施設の構造物は、複雑で異種の金属材料を使用することが多いので激しい腐食を起こすことがある。例えば水門を構成している金属は、戸当り金物や

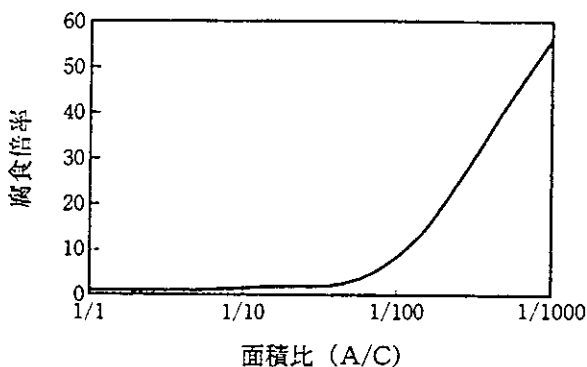


図13 異種金属接触腐食に及ぼす面積比の影響

扉体の一部にステンレス鋼や銅合金が使用され、水門が鉄鋼の場合には異種金属接触による腐食が起り、鉄鋼が腐食をすることになる。この腐食速度は水門が塗装され、面積の小さい塗膜欠陥部が存在する場合には局部的に大きな腐食となる。

図13にアノード/カソードの面積比(A/C比)を変えた時の異種金属接触腐食の大きさを示すが、面積比が100を超えると飛躍的に腐食倍率が增大することが示されている。

河川・ダム施設に電気防食法を適用する場合、構造部材に使用されている金属の腐食特性を考慮することと、抵抗の高い淡水環境にあるために防食電流の分布を検討することが重要である。すなわち、ステンレス鋼やアルミニウム合金の塩化物イオンによる腐食や過剰な防食電流を流すことによる水素脆化やアルカリ腐食に注意する事が必要である。また、塗装と電気防食法を併用して防食電流の分布を良くすることも必要である。水門を流電陽極方式で防食した例を図14に示す。

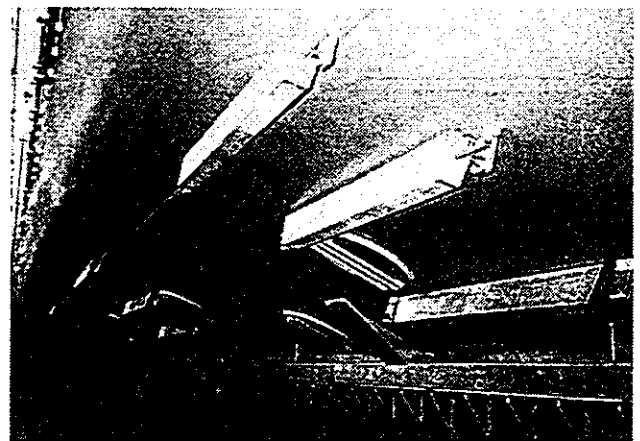


図14 流電陽極を取付けた水門

8 おわりに

われわれは生活の快適さ、安定を求めて知恵を絞り便利なモノ作りをしてきた。その過程で環境との調和なりメンテナンスのあり方は考慮されてきたと信じているが、今なお「環境」「維持管理」は大きなテーマとなっている。

コンクリート構造物の崩壊、いわゆる「コンクリートクライシス」という言葉が流行して早17年が経過した。この間、診断技術および補修技術は試験採用から本格採用へやっと動き出したところである。

またわが国で電気防食技術が初めて採用されたのは1947年東京工業試験所が冷却器に適用したもの

である。以来55年が経過し電気防食の信頼性は確立したと言えるが、新しい環境・構造物へ適用するには多くの技術の開発が必要になる。

「環境」と「維持管理」は古くて新しいキーワードであり、今後の技術開発の方向である。

(平成14年1月28日受理)

文 献

- 1) 腐食コスト調査委員会, 材料と環境, 50, 490 (2001).
- 2) 岡本勝群, プラントエンジニア, 11, 85 (1989).
- 3) 土木研究所資料第3767号 (1999).