

# さび

vol.44-1

135

2002



# さび 第135号

平成14年 1号

## 目次

年頭ご挨拶	日本防蝕工業株式会社 社長	高橋 道也	3
有限要素法による防食電位電流分布解析	日本防蝕工業株式会社 技術研究所	田代 賢吉 須藤 光	4
復水器細管のチタン二重管化に伴う電気防食装置の改修工事	日本防蝕工業株式会社 技術総轄部	阿部 三之	8
シールド立抗仮壁補強鋼材のアノード溶解工法による京都地下鉄工事の紹介	日本防蝕工業株式会社 新規事業開発プロジェクト	植田 英樹 阿部 勝邁	12
	飛島建設株式会社 機電統轄部	向谷 常松	
埋設管電気防食総合管理システムの紹介	日本防蝕工業株式会社 名古屋支店 東京支店	近藤 充浩 寺山 哲	16

平成14年1月1日発行  
発行所・日本防蝕工業株式会社「さび」編集室（非売品）

## 三菱商事株式会社

東京都千代田区丸の内二丁目6番3号  
電話 東京 03(3210)2121番  
(郵便番号 100-8086)  
URL <http://www.mitsubishi.co.jp/>

## 三菱マテリアル株式会社

東京都千代田区大手町一丁目5番1号  
大手町ファーストスクエア  
電話 東京 03(5252)5200  
(郵便番号 100-8117)  
URL <http://www.mmc.co.jp/>

## 日本防蝕工業株式会社

東京都大田区南蒲田一丁目21番12号 昭和ビル  
電話 東京 03(3737)8400  
FAX 東京 03(3737)8479  
(郵便番号 144-8555)  
URL <http://www.nitibo.co.jp/>



日本防蝕工業株式会社  
代表取締役社長 高橋 道也

明けましておめでとうございます。

今年も本小誌「さび」を発刊できましたことと、併せてご愛読いただけることに感謝申し上げますと共に大きな喜びを感じる処です。

一昨年、昨年と世紀変わりというものを体験した訳ですが、20世紀末の2000年は、所謂IT景気に頼りながらも新世紀に明るい展望を抱いて居られた方が多数であったと思われます。しかしながら現実には、拡大・発展の礎と期待されていたITそのものに起因する不況の真只中に置かれている訳です。従来の好不況に大きな影響力を持った鉄鋼、自動車、家電は既にPC携帯電話とそれに伴うソフト関連事業に主力の座を譲っており、今後の市況の動向は、従来の実績や知識だけでは計り知れない様相を程していると言えましょう。ITの次の好況のけん引役候補としては、諸説ありますが、遺伝子を含めた医療関連技術が有力と言われています。

新世紀の一年目は、期待と予想に反し、米国での同時多発テロを発端にした自由対テロリズムに、宗教抗争がからんだ争いに世界中が巻き込まれています。このつけが解消するのに何年かかるかも解かりませんし、事後の経済的負担は、更に数年乃至10年単位で継続する筈です。率直に言って非常に先行の思いやられる幕開けであると思うのは、皆様方も同感されていることと推察致します。

前置が長くなりましたが、昨年度の当社業績は、相変わらずの需要減という大きな流れの中で、非常に厳しい条件の下ではありましたが、かろうじて皆様の御支援に応え得る黒字決算を得ることができました。改めて日頃の御愛顧、御支援に感謝申し上げますとともに、厚く御礼申し上げます。

昨年は、当社にとっても業界としても、1951年事業開始から50年目の節目の年でありました。この間、電気防食装置、電極材料及びモニタリング装置などの開発・改良による性能と信頼性向上が図られ、防食効果も確実に評価されるようになりました。しかし、この数年間の所謂装置産業の低迷と財政緊縮の継続とにより、新規大型案件は、期待し難い状況となっております。この内で、当社に限らず、同業他社、顧客業界に於いても防食技術の有効活用の方策として、既存設備の延命、補修に軸足を置き始めています。この事は、単に不具合箇所を見

付けてまたは、指示を受けて手直しをするという様な単純な事ではなく、防食專業会社としての、真の技術力を総合的に展開し、具現化しなければならない成果を要求され、更に、評価されるということに他なりません。その意味では、幸い当社は、50年に及ぶ永年の経験と実績に裏付けられた確固たる技術専門家の集団であるという自信と強味を従来にも増して再認識していただける絶好の機会であると考えております。

更に、社内的には、認証を取得したISO活動を共通基盤として、システムのグレードアップに留まらず、目指すべき理念、情報、技術知見の共有、共通化を図っています。

今年度の品質方針として

1. 顧客が満足する製品を提供するために、市場の要求を的確にとらえ、すぐれた技術を駆使して品質向上を図る。
  2. 顧客ニーズへの適合と品質マネジメントシステムの有効性について、継続的な改善を推進する。
- を掲げました。

是非とも調査、技術検討の機会を当社に与えていただきたく、お願い申し上げます。

次に、新規事業については、色々な機会に報告させていただいてきております。電食工法(EW工法)の実用化に関し、京都市地下鉄工事と大阪市南住吉下水道工事の2件が昨年中に採用され、実現場での工法及び成果の有効性が確認されました。これは当社単独ではなく御協力御支援をいただいた関係先があつてこそこの事ではあります、大変楽しみな展開であるといえましょう。

今年は午年です。馬は神社に於ける神馬に代表される様に、縁起の良い動物として崇められています。皆様方にとりまして当社にとっても、午にあやかり良い方向へ転回する契機となる一年であること祈念したいと思います。

本年の一層の御支援御鞭撻をお願い申し上げます。

# 有限要素法による防食電位電流分布解析

日本防蝕工業株式会社 技術研究所 田代 賢吉  
技術研究所 須藤 光

## 1. はじめに

半導体製品の価格破壊によりパソコンなどの売価は下がり続けています。一方マイクロプロセッサの演算能力や動作速度、消費電力は驚異的な伸びを見せ、メモリの早さや容量などはまさしく信じられない勢いで増加しています。1976年に登場した世界初のスーパーコンピュータは現在のパソコン以下の演算能力しかありませんでした。それに対して現在市販されているパソコンは1985年前後のスーパーコンピュータ並の演算能力を持っています<sup>[1]</sup>。このようにパソコンの演算能力が飛躍的に向上し、かつ安価になったため、今までならスーパーコンピュータでしかできなかったような複雑なシミュレーション（数値計算）を気軽に行えるようになりました。

## 2. 電気防食設計の現状

従来の電気防食設計ではカソード表面に連続して分布している電位を二点間の関係に置き換えて計算する式<sup>[2]</sup>を基に設計してきました。この方法ではアノードを中心とした同心円状の単純な電位分布は計算できますが、連続した複雑な電位分布は計算できません。平面的或いは立体的に連続な電流電位分布を解析する手法として有限要素法<sup>[3]</sup>や境界要素法<sup>[4]</sup>が注目されています。当社では市販の有限要素解析ソフト<sup>[5]</sup>を利用し、当社のknow-howを有限要素解析に導入して、防食設計へ反映しています。

## 3. 有限要素法とは

有限要素法は微分方程式の工学的近似計算法の一つです。有限要素法のイメージは円の面積を求める問題で考えるとわかりやすいと思います。円周率や円の面積の公式を使わず、三角形の面積を求める公式を使って円の面積を求めるとします。円の面積は、円をその中に収まる複数の三角形で分割してそれぞれ三角形の面積を計算し、三角形の面積を合計すれば円の面積に近い値が得られます。ただし、円の中に収まるように三角形で分割

していれば必ず「円の真の面積」より小さい「近似値」しか求められません。しかし実用上十分な精度の近似値であれば問題ありません。今は6つに分割するだけで十分だとすると、円（解析対象）を6つ（有限個）の三角形（要素）に分割して足し合わせることで全体の面積（微分方程式の解）が求まったこととなります。この「微分方程式の解」の「実用上十分な精度の近似値を求める方法」が「有限要素法」です。因みに円の面積は分割している三角形を無限に小さくしたときの総和すなわち積分量であり、円の面積の公式となります。

先程の「全体を三角形で分割する」という作業をモデル化といいます。有限要素解析を行うためには解析対象のモデル化が必要です。まずアノードとカソード（防食対象）がどのような位置関係にあるのかをモデル化します。次に分極条件や環境の抵抗率をそのモデルに与え計算します。電極の位置関係が同じモデルであれば分極条件や環境の抵抗率を様々に変化させ、比較検討が可能です。また、アノードの数や容量を変化させたモデルを作成し解析するなど多角的な検討を加えることで安全かつ効果の高い電気防食設計につながります。

## 4. 橋脚基礎防食二次元解析事例

### 4.1 概要

腐食性の高い、産廃埋立土壌に建設される道路の橋脚基礎 11 基に外部電源方式の電気防食を施すことになりました。発注者からは各橋脚の防食回路数が最小限となるように電流分布、電位分布等を解析し、比較、評価した上で最も経済的、効果的、安全な装置設計を行うよう要請されました。そこで、想定される様々なケースをモデル化して二次元有限要素解析を行い、その解析結果が設計の比較検討に有効利用されました。

### 4.2 解析環境

防食対象と電極井戸は深さ方向が同じ長さの設計であるため、深さ方向の電位電流分布は一樣（等価）と見なせます。従って地表面に水平な任意の断面をモデル化し二次元解析を行いました。

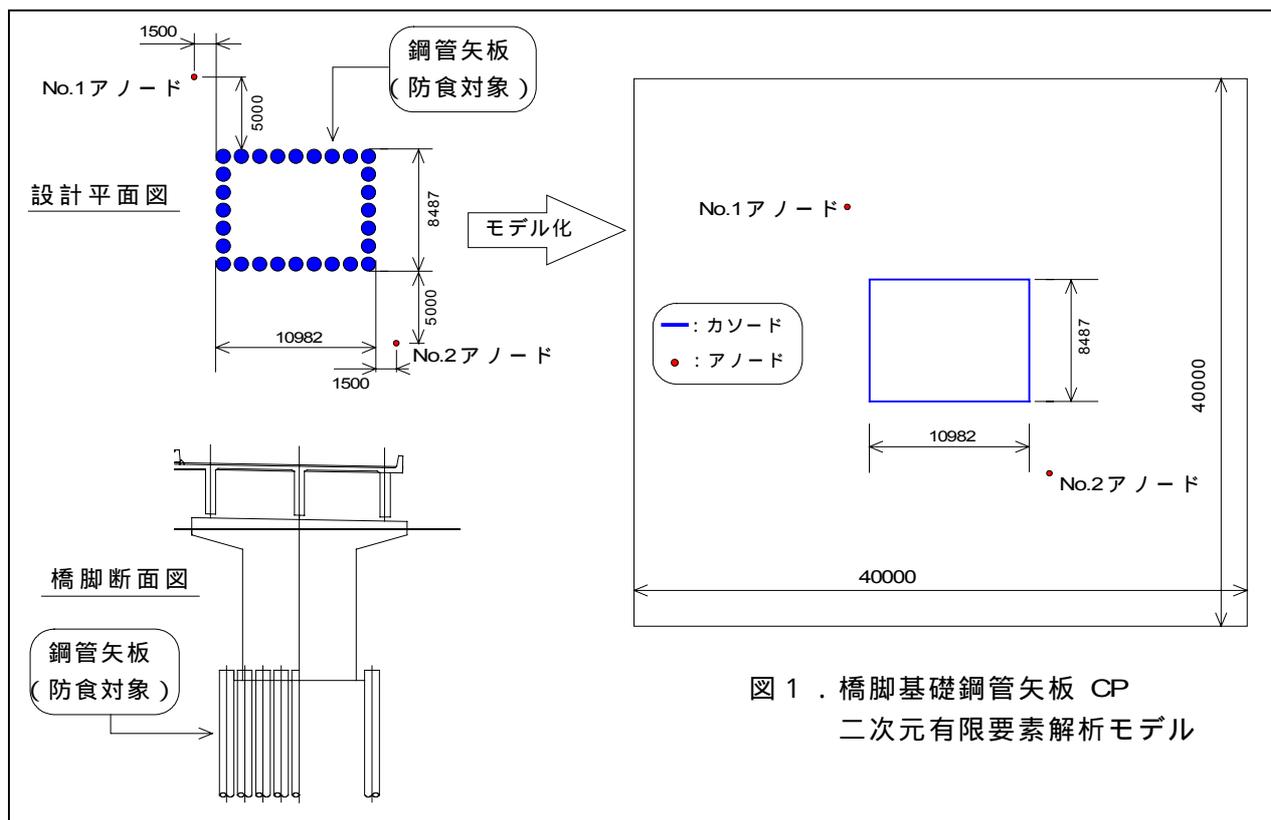


図1 . 橋脚基礎鋼管矢板 CP  
二次元有限要素解析モデル

#### 4.3 鋼管矢板基礎防食の解析

鋼管矢板を平板と見なし、矢板井筒断面を四角形でモデル化しました(図1)。モデル上の陰極面積に周辺係数を掛けた値を防食対象面積とし、防食対象面積に防食電流密度(=0.030 A / m<sup>2</sup>)を掛けた値を電流値として与えました。カソードの分極抵抗は10 [ Ω · m<sup>2</sup>]です。解析結果を図2、3に示します。

当初は図2に示すような3本の陽極井戸による防食設計でした。陽極位置は図中の紫色の部分です(右上方、左中、中央下)。しかし、陽極井戸数を減らした図3の配置でも電源や陽極の容量範囲内であることが判明したため、陽極の最終配置は図3を元に決定されました。どちらの場合も防食対象表面で防食電流密度(図中緑色)を満足しています。なお、図2、3中の数値の単位は全て電流密度 [A / m<sup>2</sup>] です。

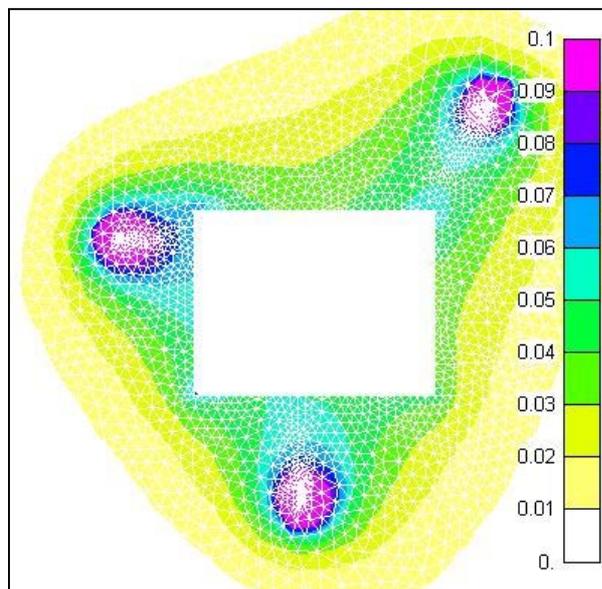


図2 . 当初の設計による防食電流密度分布

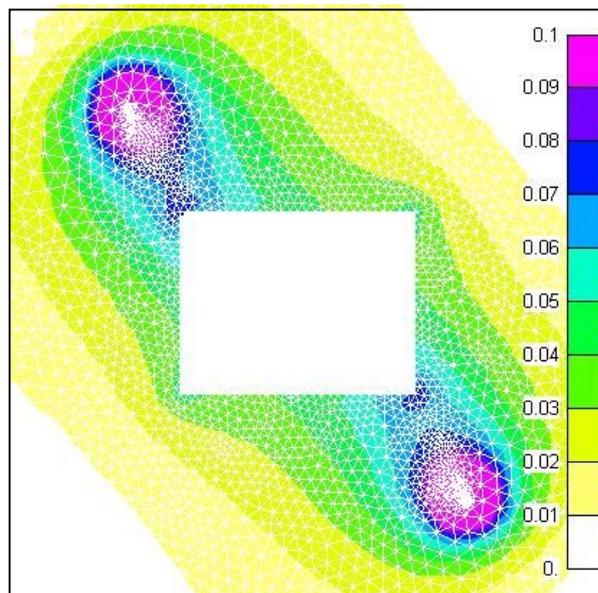


図3 . 設計変更後の防食電流密度分布

## 5. 鋼矢板防食の三次元解析事例

### 5.1 概要

港湾施設の護岸に使用される鋼矢板には比較的古くから電気防食が適用されてきました。海水環境は鋼矢板にとって厳しい腐食性環境です。一方で海水は電気伝導性に優れており低い電圧で大きな電流を流すことが出来るため「通電して対象物を腐食から守る」という電気防食の環境としては有利です。現在ではアルミ合金陽極を中心とした流電陽極方式が鋼矢板の電気防食方法として一般的です。

アルミ合金陽極は出力電流の大きさによって区別されます。ここでは防食電流値として3.5 [A] 必要な鋼矢板に3.5 [A] 出力のアルミ合金陽極を取り付けた場合の電位電流分布を解析しました。

### 5.2 解析環境

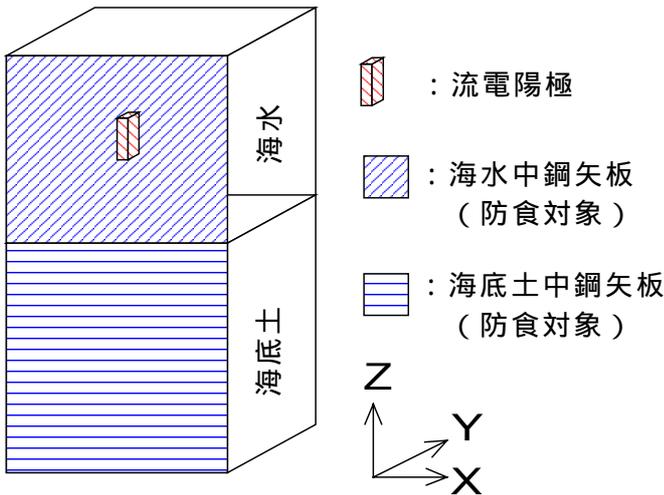


図4 鋼矢板防食三次元モデル

解析モデルを図4に示します。図中Y方向が沖合方向なので鋼矢板を陸側背面から見た図になります。鋼矢板は平板とし、海水側の面の中央にアルミ合金陽極が設置してあるとしました。海水の抵抗率(25  $\cdot$  cm)、海底土の抵抗率(300  $\cdot$  cm)は一般的な値を使用しました。海水中鋼矢板の防食電流密度は0.1 [A/m<sup>2</sup>]とし、海底土中鋼矢板の防食電流密度は0.02 [A/m<sup>2</sup>]としました。

### 5.3 解析結果

モデル全体の電圧分布を図5に、電流密度分布を図6に示します。

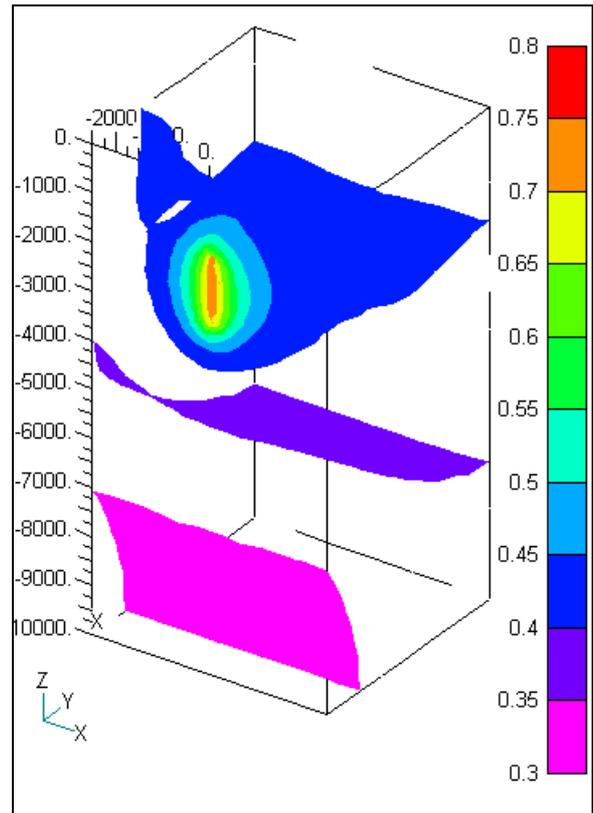


図5 電圧分布図 [V]

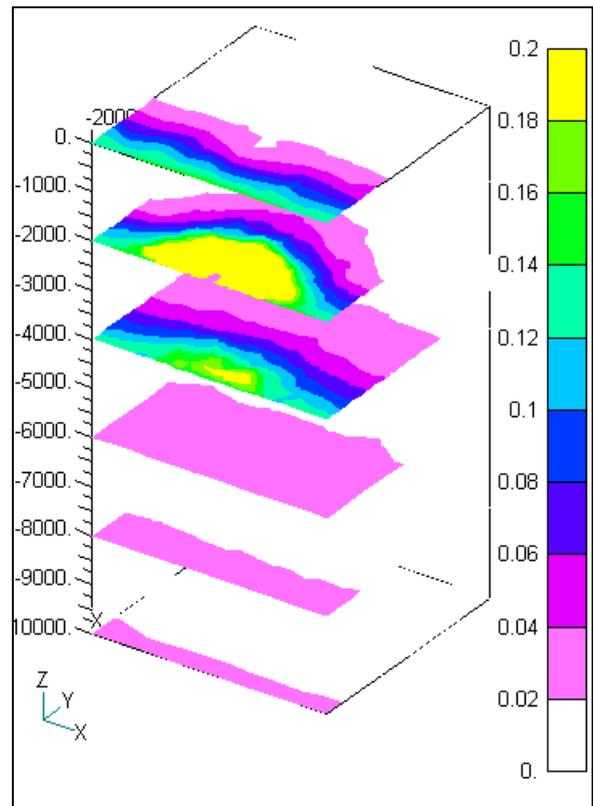


図6 電流密度分布図 [A/m<sup>2</sup>]

図5、6ともに左手前の面(Z-X面)に鋼矢板が存在します。

図6は海面(モデル最上部)から深さ方向に

2[m] ずつ区切って電流分布を示した図です。海底面付近（図6上から3枚目）で沖合方向へ最大の電流分布をみせ、抵抗率の高い海底土中にはいってからは急速に減少していることが分かります。

次に、鋼矢板表面の電流密度分布を図7に、分極量分布を図8に示します。図7の周囲に目盛りが打ってありますが、これはモデルの大きさをミリメートル単位で表しています。つまり、左側の目盛りが水深を表し -4500 [mm] が海底面です。

図7からは鋼矢板全面で防食電流密度を満足していることが分かります。海水中鋼矢板では水色で示される  $0.1 [A/m^2]$  より大きい値を、海底土中鋼矢板では薄紫で示される  $0.02 [A/m^2]$  より大きい値を示しており、すなわち防食電流密度を満足しています。図8からは鋼矢板全面で必要分極量 -0.3 [V] の緑色以上を示しており分極量も十分であることが分かります。

本解析のように、海水から海底土へと途中から環境の抵抗率が変わるようなモデルも有限要素法では連続して扱えるため、実際の現場を無理なくモデルに反映出来ます。

## 6.まとめ

有限要素解析は適切なモデルに適切なパラメータを与えて計算すれば優れた数値実験装置となり得ます。予め様々なケースを想定し、解析結果を検討することで合理的で効率の良い電気防食設計が可能となります。今後はより多くの事例を解析し、防食設計ツールとして活用できるように開発を進めていく予定です。

## 参考文献

- [1] 日本科学技術情報センター，スーパーコンピュータシステムに関する調査（抜粋），第3章，(1996)  
<http://www-scc.jst.go.jp/SCC/SC-houkoku/index.html>
- [2] C.Kasper, *Transactions of the Electrochemical Society*, 77, (1940), p.335
- [3] D.Rabiot, F.Dalard, J.J.Rameau, J.P.Caire, S.Boyer, *Journal of Applied Electrochemistry*, 29, (1999), p.541
- [4] 青木繁，天谷賢治，宮坂松甫，“境界要素法による腐食防食問題の解析”，裳華房，(1998)
- [5] 電気メッキ用電流分布解析ソフト「膜厚案内人」，上村工業（株）

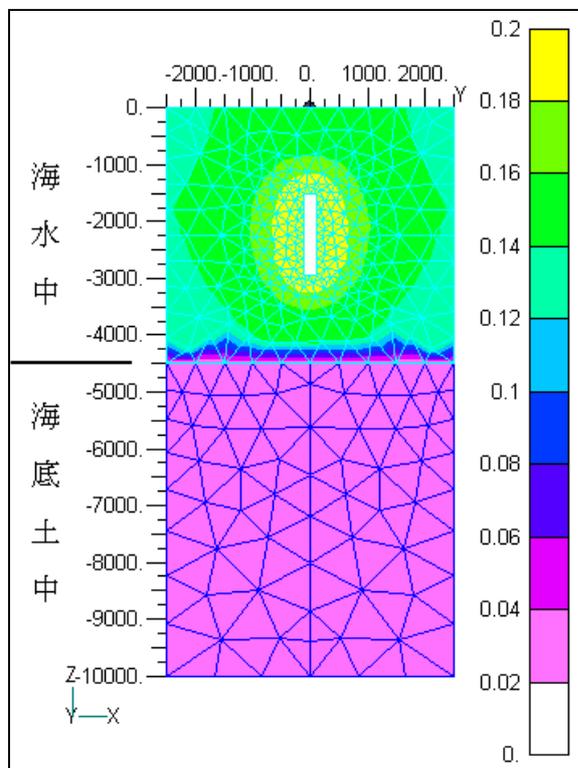


図7．鋼矢板表面の電流密度分布  $[A/m^2]$

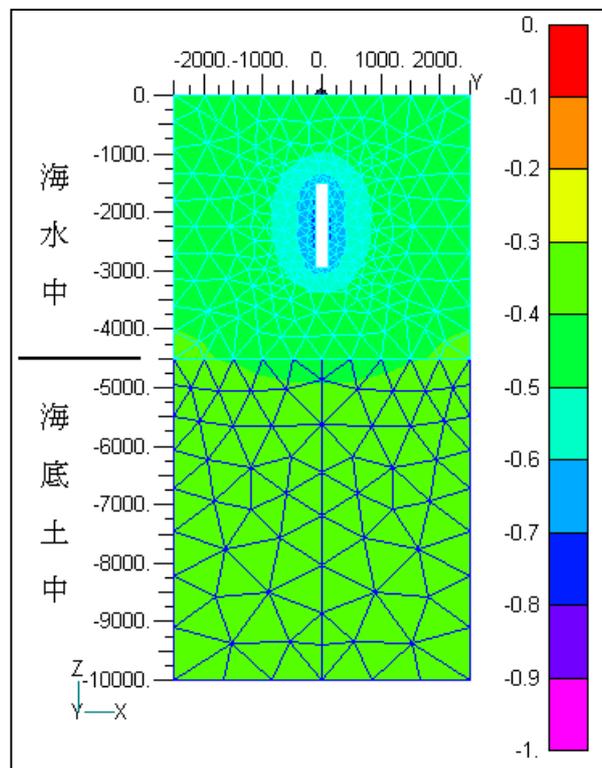


図8．鋼矢板表面の分極量分布 [V]

# 復水器細管のチタン二重管化に伴う電気防食装置の改修工事

## 1. はじめに

海水を冷却水として使用する既設火力発電プラントの復水器の細管には従来アルミブラスタ管が多く使用されている。しかし、使用環境や運転条件によって腐食が頻発し、腐食度合いによっては細管の取替を余儀なくされている。そこで、近年アルミブラスタ管を既設復水器の改造を行わなくても容易に交換できる耐食性の細管として開発されたチタン二重管（内側：チタン、外側：アルミブラスタ）に交換する例が増えている。

しかし、既設復水器のすべての細管をチタン二重管に交換した場合には、管板全域でネーバル黄銅管板と細管との異種金属接触腐食を防止しつつチタン管端に水素吸収が起こらないように電位を均一に管理しなければならず、従来の電気防食装置では対応できないことが多い。

そこで当社では、管板全域の電位を均一に管理する装置を開発し、実際に既設アルミブラスタ細管のすべてをチタン二重管に交換した復水器の電気防食電源盤にこの装置を取り付けるとともに、電気防食システム全体の改造を行った。

本稿において本開発装置と改造システムの概要を説明するとともに、改造後の防食性能等について報告する。

## 2. チタン二重管採用時の留意点

復水器水室内にチタン二重管と銅合金管板がある場合に電気防食を行うには下記の項目を考慮する必要がある。

### 2.1 管板の異種金属接触腐食

海水中のチタンの電位は  $\pm 0 \sim -0.1V$  vs.SCE(飽和甘汞電極。以下、電位はすべて SCE 基準で表示する)であり、チタン細管に銅合金(-0.2 ~ -0.3V)で構成されている管板が接触していると両者の電位差により管板が腐食する。

図1はチタン材と組み合わせた場合の金属ごとの腐食倍率を示したものである。実際の復水器ではチタン：ネーバル黄銅面積比が15~20倍となるため、管板の腐食倍率は図1よりも大きく、腐食速度は0.5~1.0mm/Yrにもなる。

日本防蝕工業株式会社 技術総轄部 阿部三之

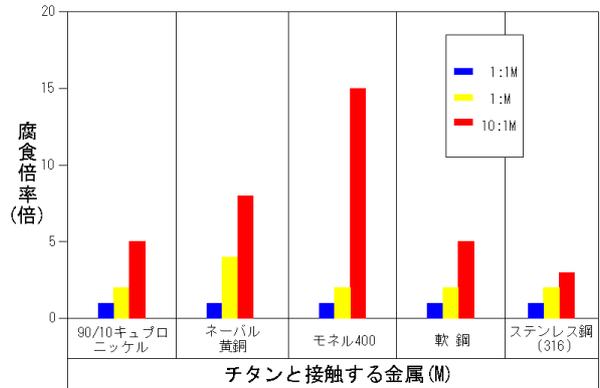


図1 流動海水中における異種金属接触による腐食の加速率<sup>1)</sup>

### 2.2 チタンの水素吸収

チタン表面において水素イオンの放電反応が起こり、その結果生成した水素原子の一部がチタン水素化物を形成・析出し、脆化する現象を水素吸収脆化という。

図2はチタンの水素吸収に及ぼす陰極印加電位の影響を示したものであり、通常 -0.75V よりもマイナス側でチタンの水素吸収が著しく増大する。

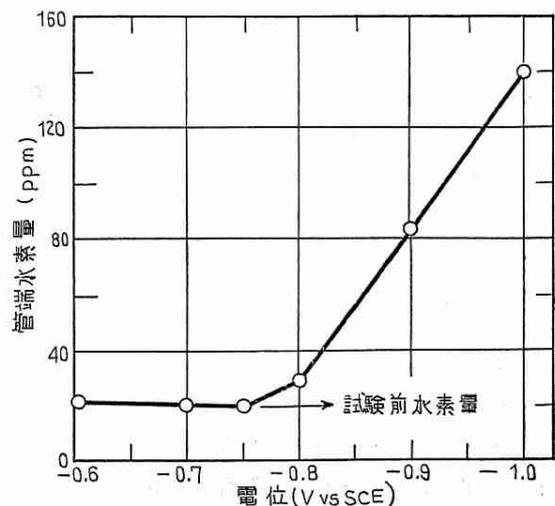


図2 チタン管の水素吸収量と陰極電位(自然海水中、流速 2m/s、3ヶ月浸漬)<sup>2)</sup>

### 2.3 銅合金とチタンがカップルした場合の防食電位

図3にチタンとカップルさせた銅合金の電位と腐食速度の関係を示す。-0.5V よりもマイナス側では銅合金の腐食はほとんど問題にならない。

以上のことから、細管をチタン二重管に交換した復水器の管板の腐食と管端の水素吸収を防止するためには、-0.5 ~ -0.75V で管理すれば良いという結果が得られる。

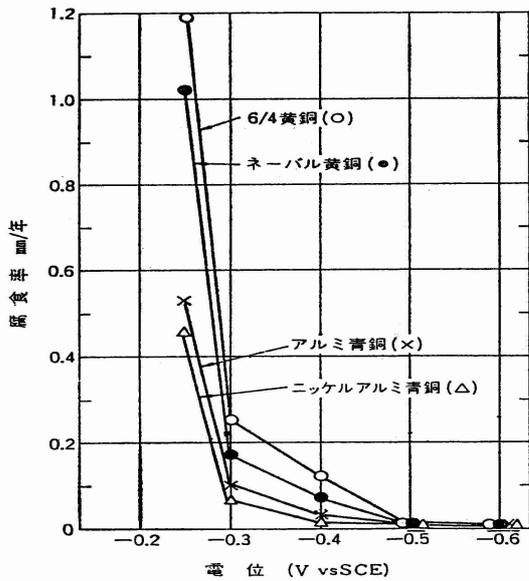


図3 銅合金 / チタンカップル材(面積比 1/20)の腐食と陰極電位(人工海水中、流速 2m/s) <sup>3)</sup>

### 3. 電気防食装置改造事例

#### 3.1 対象復水器の概要

今回改造対象となったのは某火力発電所 600MW プラントの既設復水器である。

- (1) 形式 表面接触一折流本区分復水器
- (2) 細管 チタン二重管  
25.4<sup>OD</sup>mm 1.25<sup>t</sup>mm 23006 本
- (3) 管板 ネーバル黄銅 (1 水室当たりの面積積：約 20m<sup>2</sup>)
- (4) 水室 鋼 + ゴムライニング

#### 3.2 電気防食制御盤

- (1) 形式: ユニット電源式
- (2) 制御方式: 複式自動定電位
- (3) 出力: 15V - 30A × 2 ユニット  
15V - 45A × 2 ユニット  
150A(1 水室当たり)

#### (4) 改造の概要

従来は1水室当たり1回路の定電位制御防食回路を一括して電位管理している。今回の改造では、

1 水室を4ブロックに分け、ブロック毎に小出力ユニット電源回路で定電位制御を行う方式を採用した。同一水室を複数の回路で制御すると一つの回路からの防食電流が隣接するブロックに流入して、ブロック毎の電位がアンバランスになるおそれがある。そこで、図4に示すように各ユニットにはブロック電位を一定に維持する定電位制御器とSCR制御出力回路とL-N-Hの3電位設定点(ボルテージリレー)とを設け、あるブロックの電位が防食管理値を外れると隣接するブロックのユニットの電位設定を切り替える動作条件がプログラムされたシーケンサに全ユニットを接続して水室全体の電位の均衡を図る構成とした。

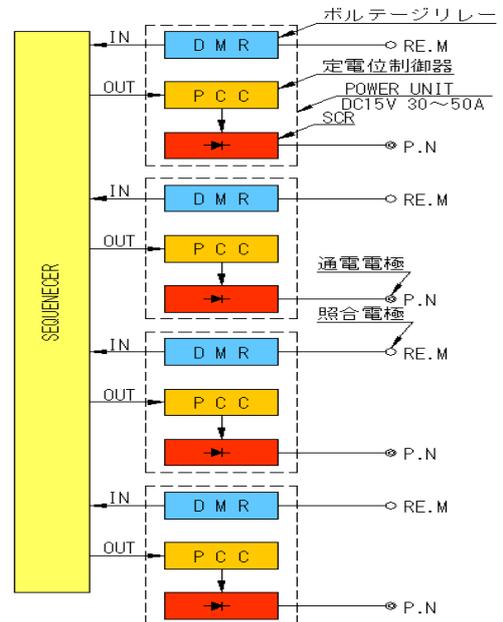


図4 電気防食制御装置ブロック図



写真1 電気防食制御盤正面パネル(ユニット電源装置が8台並んでいる。)



写真2 ユニット電源正面パネル

次に電位設定点の動作の例を説明する。

図5は上段ブロックが電位不足となり、防食管理電位に復帰するまでの流れを表したものである。

当初は3ブロックともユニットの電位設定点がNに設定され-600mVで管理されていたが(図左側)、上段ブロックの電位がプラス側にずれて管板が異種金属腐食を起こす電位(-500mV)を超えた(図中央)。すると中、下段のブロックを制御しているユニットの電位設定点がLに変わり防食電流を増大させ、直ちに上段ブロックの電位を防食管理電位(-500~-700mV)に移行させる(図右側)。

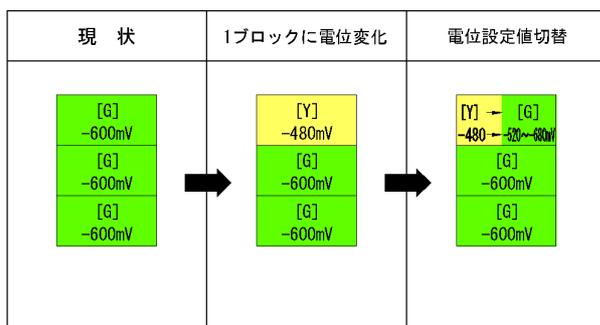


図5 上段ブロックが電位不足となった場合

図6は中段ブロックが電位過剰となり、防食管理電位に復帰するまでの流れを表したものである。当初は3ブロックともユニットの電位設定点がNに設定され-600mVで管理されていたが(図左側)、真中のブロックの電位がマイナス側にずれて

チタン水素吸収電位(-750mV)に近づいてきた(図中央)。すると上下のブロックを制御しているユニットの電位設定点がHに変わり、直ちに中段ブロックの電位を防食管理電位(-500~-700mV)の範囲内に移行させる(図右側)。

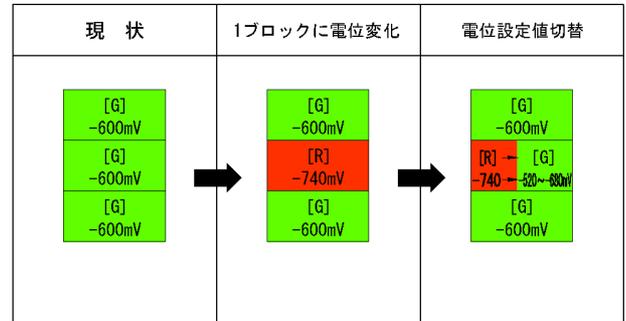


図6 中段ブロックが電位過剰となった場合

### 3.3 通電用電極

- (1) 種類: 白金チタン電極
- (2) 形状寸法: 30<sup>OD</sup> × 110<sup>L</sup>mm, 30<sup>OD</sup> × 220<sup>L</sup>mm
- (3) 取付数 : 4本/ユニット × 4ユニット/水室  
4水室合計64本

#### (4) 改造の概要

従来、通電用電極は水室の側壁に設置されることが多かった。

このような配置であると細管の密度が高い管板の中心部よりも周囲部が大きく分極して電位差が生じるが、細管がアルミ黄銅等の銅合金の場合は防食管理電位幅が広いので特に支障はなかった。

しかしチタン二重管に交換した水室では電位管理幅が狭くなる。そこで管板面の電位分布を均一化するため、細管の分布を考慮しつつ水室カバー正面に電極の配置換えを行った。

### 3.4 照合電極

- (1) 種類: 銀/塩化銀照合電極
- (2) 形式: 管端部固定型
- (3) 取付数 : 2組/ユニット × 4ユニット/水室  
4水室合計32組

#### (4) 改造の概要

従来、照合電極は管板から約300mm離れた水室側壁に1~3箇所設置されることが多かった。

このように照合電極と管板とが離れていると、通電用電極から管板に向かって流れている電流と照合電極と管板との間の抵抗との積(IRドロップ)が管板の真の電位に加算され、数十~百数十mVの誤差を生じる。

細管がアルミ黄銅等の銅合金の場合は防食管理電位幅が広いので特に支障はなかったが、チタン二重管に交換した水室では電位管理幅が狭くなるので管板の電位を厳しく管理しなければならない。また、管板全体の電位をできるだけ正確に把握しなければならない。

そこで、銀/塩化銀照合電極ができるだけ管板面に近接するように構成するとともに、設置数を1水室当たり8組に増やして管板全体に分散配置した。

#### 4. 改修後の通電結果

電気防食装置改修後、各ユニットの防食管理電位を - 600mV に設定して通電を開始した。

通電後1年7ヶ月間の防食電流と防食電位の推移を図7に示す。

通電開始直後から防食電流は急激に上昇し、特に出口水室ではA系列、B系列とも約2カ月間定格電流を超え、通電リミッタが作動する電流値に達した。このためA系列、B系列出口水室の一部が防食管理電位に達しなかった。このように防食電流が予想を上回る増加を示したのは、近年汚染海域の夏場によく見られるバクテリアの繁殖によるチタンの電位貴化現象により、チタンの自然電位と防食管理電位との電位差が大きくなったことが主な原因と考えられる。

実際に通電開始時の平成9年5月31日から8月27日にかけて管板の自然電位を測定したが、夏場にはA系列入口水室が + 130mV、A系列出口水室は + 170mV に達していた。清浄海水中のチタンの自然電位は - 0.1 ~ - 0.15V といわれており<sup>4)</sup>、それと比べると約 200 ~ 300mV 貴な電位を示していた。

通電開始2ヶ月を過ぎる頃から翌年の冬場にかけて徐々に防食電流は減少し、管板の電位も防食管理電位(- 600 ± 100 mV)内で安定した状態が続いた。

3月以降防食電流は再び上昇傾向にあったが、管板の電位は防食管理電位を維持していた。

#### 5. まとめ

既設復水器の銅合金細管を全てチタン二重管に交換した後の管板および管端部全体を均一に防食管理するには、ここに紹介した複数のユニット電源を用いた複式自動定電位電源装置の適用並びに通電用電極と照合電極の適切な配置等の改造が有効である。

#### 参考文献

- 1) 尾崎敏範、下平三郎 日本金属学会報 10.575
- 2)、3) 福塚敏雄 他 火力原子力発電 vol.30 No.1
- 4) F.L.LaQue "Corrsion Testing", ASTM 44th Annual Meeting

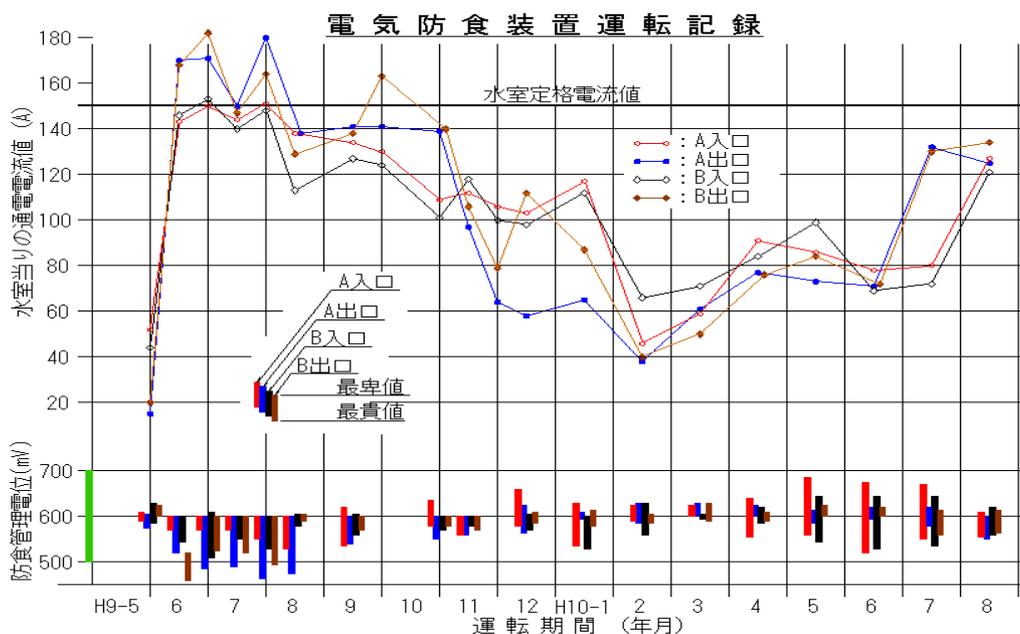


図7 電気防食装置改修後の防食電流、防食電位の推移

# シールド立坑仮壁補強鋼材のアノード溶解工法による京都地下鉄工事の紹介

日本防蝕工業株式会社 新規事業開発プロジェクト 植田英樹  
阿部勝邁  
飛鳥建設株式会社 機電統轄部 向谷常松

## 1. はじめに

近年、地下の利用が盛んになっており、鉄道、共同溝、下水道、地下発電などの施設が数多く建設されている。特に、都市部では過密化によってその深度が深くなる傾向にあり、工法としては安全性ならびに信頼性が高いシールド工法が採用されている。

シールド工法とは、工事区間の始点（発進）と終点（到達）に立坑を設け、シールドと呼ばれる鋼殻の内側で切羽の安定を保ちながら安全に掘削を行い、セグメントと呼ばれる覆工部材をその後部で組み立てて、これに反力を取りながらジャッキでシールドを推進し、トンネルを構築する工法である。

本稿は、上記の発進又は到達立坑の仮壁鋼材を貫通させるための新工法として開発したアノード溶解（ここでは電食と称す。）工法の京都地下鉄工事に適用した事例について紹介するものである。

## 2. 従来工法の改善課題と補強鋼材電食による直接発進工法開発の意義

### 2.1 従来工法と、その他工法の改善課題

シールド工法自体は昭和40年代に普及し始め、過密な市街地の軟弱地盤に適することから、近年は一般的な工法になっている。

立坑を設けシールド機による掘進開始（発進立坑）掘進終了（到達立坑）時の仮壁貫通方法に改善の余地があり、作業が安全・容易で尚且つ経済性に優れた仮壁貫通工法の開発が望まれていた。

従来工法では、シールド機の発進・到達時に、仮壁（補強鋼材入り）の切削貫通作業（人力又は機械によるコンクリート壁のはつりや、補強鋼材の切断作業）を行うため、立坑仮壁背面側を地盤改良（開削埋め戻し、薬液注入、凍土壁工法等）しなければならない。

地盤改良を行うためには、用地の確保や、地盤

改良の資機材と労力、時間等を必要とし、大深度化するにつれて、費用の高騰を招き、安全確保に課題を残すこととなる。

更に、土質によっては所定の強度が得られない場合も生じる。

他の工法として、炭素繊維等の特殊補強材を用いた直接仮壁切削工法が近年開発され、実用化されているが、使用材料費が高いことや、切削効率改善等の課題が残されている。

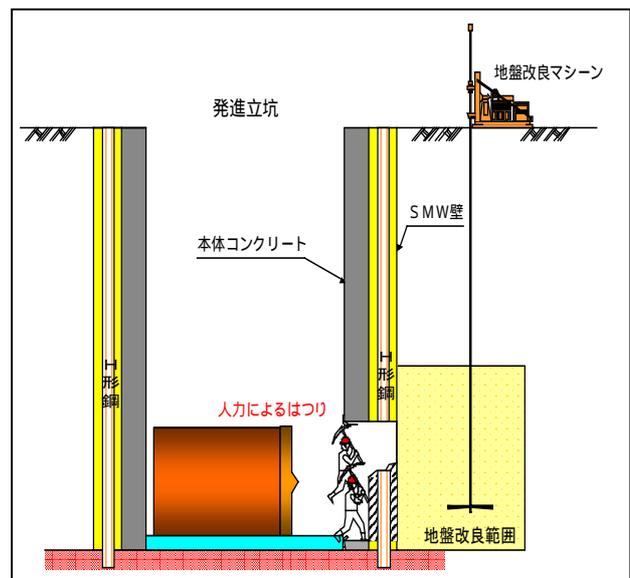


図1 従来工法による立坑仮壁切削作業の概況

### 2.2 補強鋼材電食工法による直接発進・到達工法開発の意義

発進・到達の立坑土止め壁は、背面土圧や水圧に十分耐えられる構造とするために、深度が増す程大きな補強鋼材入りのコンクリート連続壁で作られている。

シールド機の切羽ではこれらの補強鋼材を、効率的に切削して掘進することが困難なため、電食させて補強鋼材を薄肉化させてから、仮壁の切削を行い貫通するものである。

この様に仮壁裏側の地盤改良をせずに、シールド機の直接発進・到達が可能となることは、地上

部用地や、地上作業が不要となるため、施工費の削減効果大きい。

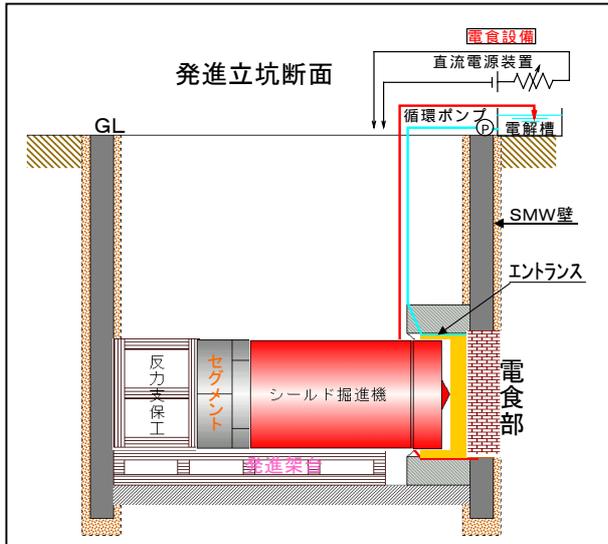


図2 本工法による立坑仮壁切削作業の概況

### 3. 仮壁鋼材アノード溶解工法の原理

海水の様な低抵抗率の電解液中に浸漬された金属に、プラス方向の直流電流を流すと金属はイオン化して電解液中に溶解する。

この時の鉄（鋼材）溶解量は、通電電流  $I$  と通電時間  $T$  の積に電気化学当量を掛け合わせた値となる。

例えば、通電電流 1000A、通電時間 10 日間（240 時間）とすれば

鉄の電気化学当量は  $1.04 \times 10^{-3} \text{kg/Ah}$  であるから 249kg の鉄が溶解する。

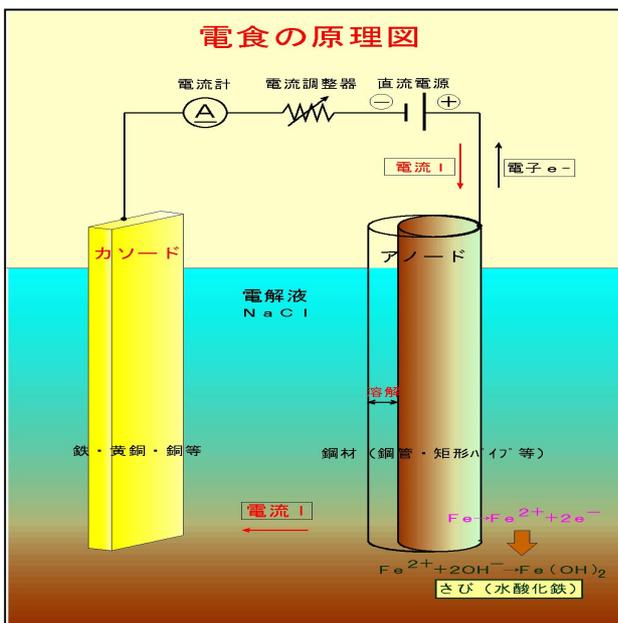


図3 アノード溶解(電食)の原理図

## 4. 京都地下鉄工事の発進立坑仮壁補強鋼材アノード溶解工事の紹介

### 4.1 工事概要

(1) 工事名: 高速鉄道東西線建設工事(石田北地区)のうち、本坑と作業立坑を結ぶシールドトンネルの発進立坑杭芯材電食工事

(2) 企業先: 京都市交通局

(3) 工期: 平成 13 年 8 月 6 日から 9 月 22 日  
(うち、通電期間 14 日間)

(4) 概要: 本工事は、京都市が都心部を貫通し周辺の新市街地や人工急増地域とを結ぶために整備を進めている十字形の地下鉄網のうち、東西線の醍醐駅から六地蔵駅間の伸延工事のうち、本坑と作業立坑を結ぶシールドトンネルの発進立坑に仮壁補強鋼材電食工法を適用したものである。



写真1 発進立坑

### 4.2 杭芯材電食部の概要

電食用杭芯材は一般部杭芯材(H 形鋼)とシールド機発進部分に位置する下表の電食用杭芯材および両者を接続する継手部から構成されている。

電食用杭芯材の中心は地表から約 20m の深さにある。

形状	台形矩形管
長辺	500mm
短辺	200(220)mm
板厚	12mm
長さ	4360mm
本数	5 本

杭芯材電食部内面は、少ない溶解電流でシールド機による切削が可能な薄肉化を達成するため、70%が絶縁材で被覆されている。

また、杭芯材電食部の内部には電食を行うための陰極が挿入されている。



写真2 杭芯材電食部（中央部）



写真5 電解液処理プラント

#### 4.3 主要機器

機器名	仕様
直流電源装置	出力 DC30V,1000A
送液ポンプ	15kW,1.82m <sup>3</sup> /min
排液ポンプ	15kW,1.82m <sup>3</sup> /min
電解液処理プラント	30m <sup>3</sup> /min
電解液貯留槽	10 m <sup>3</sup>
排泥槽	20 m <sup>3</sup>
コンプレッサ	3m <sup>3</sup> /min

電解液処理プラントは循環される電解液に含まれる水酸化鉄の処理に用いられ、コンプレッサは杭芯材電食部に付着・滞留した水酸化鉄を洗浄・排出するために用いられる。



写真3 直流電源装置



写真4 電解液貯留槽

#### 4.4 施工手順

##### (1) 電食準備工

電食用装置の設置および配線・配管をする。

電解液を準備する。

設備設置、配線・配管完了後、EW 杭芯材内部に電解液を充満した状態で通電チェック・漏水の有無を確認する。

##### (2) 電食工

送排液ポンプにより電解液を循環させた上で、それぞれの杭芯材に対して直流電源装置から一定電流を通電する。

杭芯材電食部分を通過した電解液は排液ポンプにて立坑上の水酸化物処理装置により電解液性状を回復後、再び送液ポンプへ送る。

電流・電圧等のデータの自動計測を行う。

所定の時間電食を行い、電食完了の確認をもって作業完了とする。

#### 4.5 電食経過

通電開始当初は直流電源装置の出力電流を500A/台、電解液流量を1.2m<sup>3</sup>/minにセットして慣らし運転を12時間行い、杭芯材電食部や電食装置各部に異常がないことを確認した。

つづいて出力電流を800A/台、電解液流量を1.8m<sup>3</sup>/minに上げて本通電を継続した。直流電源装置の出力定格電流1000Aよりも少ない電流としたのは、今回が初めての実施工であり、安全を見込んだものである。

杭芯材電食部の電食が進むにつれて肉厚が次第に薄くなり電食回路の抵抗が増大し続けるため直

流電源装置の出力電圧は上昇していった。電食作業終盤には定格電圧に達し、その後出力電流が減少していった。上記出力電圧の上昇、出力電流の減少、ならびに電食部の上下両端のIR計測結果から電食終了時を判断し、電食作業はほぼ予定通り完了した。電食開始から完了までの通電期間は14日間であった。

電食作業のまとめを下表に示す。No.1杭の電食率が107%となったのは、電解液を電気分解するのに消費されている電氣量が加算されているためであり、実際のNo.1杭の電食率はほぼ100%である。

No.1杭の電食率10%ごとの電流と積算電氣量の推移を図4に示した。

なお、今回の電食作業の結果から、連続で電食を続ければ1週間で電食が完了することがわかった。

	杭No.	NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5
平均電流(A)	<30V	778	765	793	763	791
	>30V	520	354	357	421	417
電氣量(kAh)		347	338	347	350	316
電食率(%)		107	82	80	85	97
電食時間(h)		458	543	542	539	536
排泥量(m3)		38				
処理流量(m3)		8463				

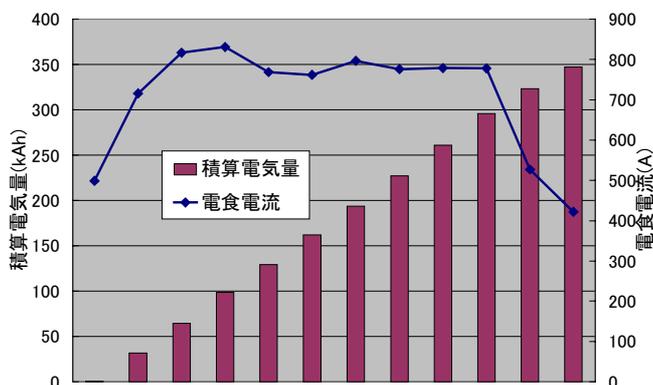


図4 No.1電食杭の電食電流と積算電氣量の推移(電食率1%から100%までは10%きざみでプロット。右端は107%時のデータ)

#### 4.6 迷走電流による電食調査

##### (1) 調査の目的

迷走電流による電食とは、電気設備に近接する埋設金属体とその電気設備から漏れ出た電流が流入し、流出部において腐食をひき起こす現象をい

う。

本工法開発の段階でこのような現象は殆ど起こらないことが明らかになっていたが、当現場においては最大5000Aの通電を予定していたため、念のため電食作業と並行して迷走電流による電食調査を行った。

##### (2) 測定項目

埋設物対地電位測定

電食杭芯材から1m離れた位置にSGP鋼管と照合電極を埋設し、直流電源装置をON/OFFさせてその鋼管の電位変化量を計測する。

##### (3) 判定基準

埋設物対地電位変化が50mV以内であること。

##### (4) 調査結果

埋設物対地電位変化は最大で20mVであり、杭芯材電食工により近接埋設金属体が電食するおそれがないことが判明した。

#### 5. おわりに

電食作業終了後、飛島建設(株)殿のシールド機により電食杭の切削が開始され、短時間に貫通した。これにより本電食工事は無事完了した。

今回の実施工がほぼ計画通り完了したことから、本工法はシールド機による立坑仮壁貫通方法の改善工法として非常に有効であると考えられる。

今後、本工法の更なる改良を進め、より安全、容易かつ経済的な工法に発展させたい。

# 埋設管電気防食総合管理システムの紹介

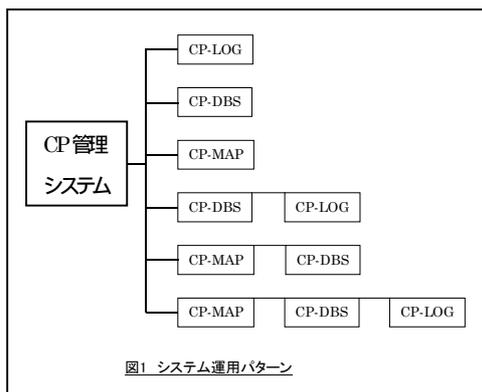
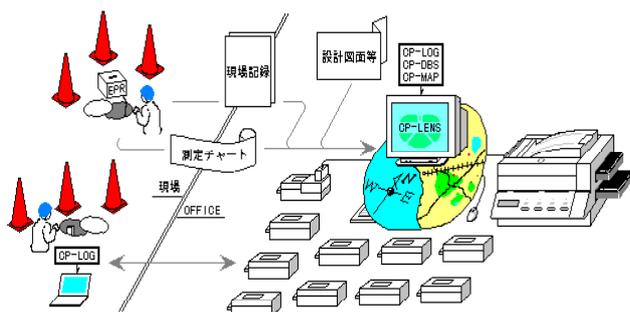
日本防蝕工業株式会社 名古屋支店 近藤充浩  
東京支店 寺山 哲

## 1. はじめに

電気防食に関わる設備と点検情報のデータベース(CP-DBS)とデジタル電圧測定器を用いた防食関連の検査・点検業務を行う計測システム(CP-LOG)を、配管網と検査対象が記された地図(CP-MAP)を介した双方向のアクセスによる総合的な管理・活用が行える仕組みを製作しましたのでここに紹介します。

## 2. システム構成

CP-管理システムは、図1の様に単体システムでも機能します。



## 3. 各システムの詳細

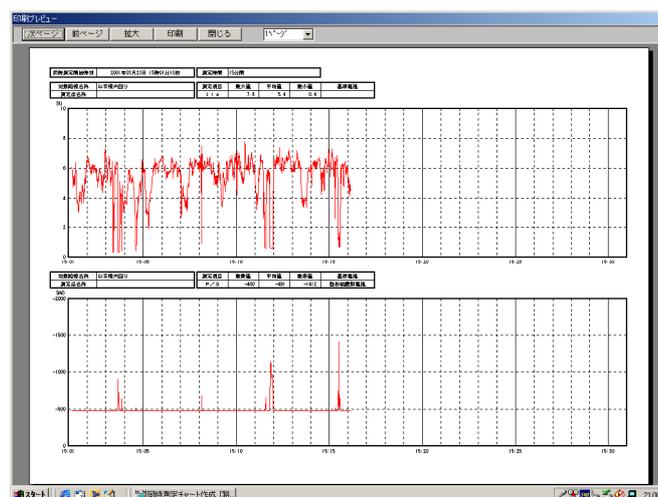
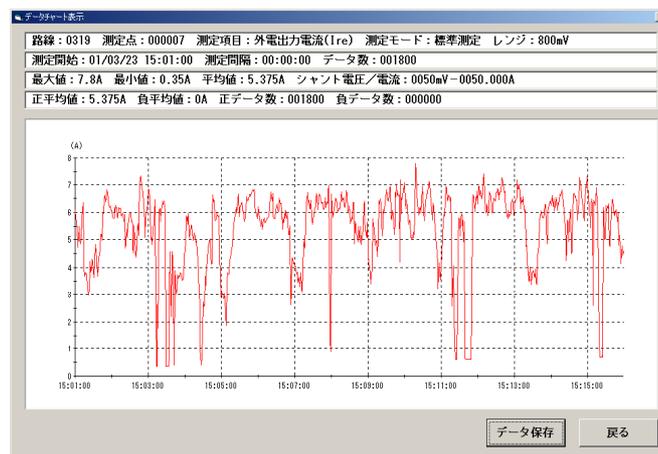
### 3.1. CP-LOG

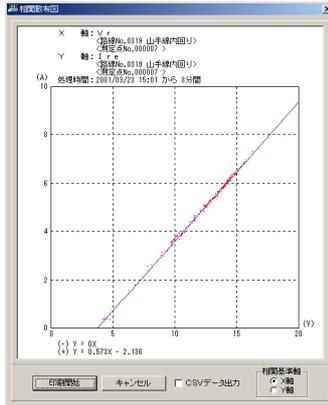
電気防食測定に特化したデジタル計測器を使用して現場の点検業務をサポートするシステムです。パイプラインで電食の恐れが大きい電鉄近接・横断部(1日の電位変動が大きい部位)を雨天時に

長時間モニタリングするなど、従来人件費がかさむ防食点検を行う時に威力を発揮します。

### (1) 主な機能

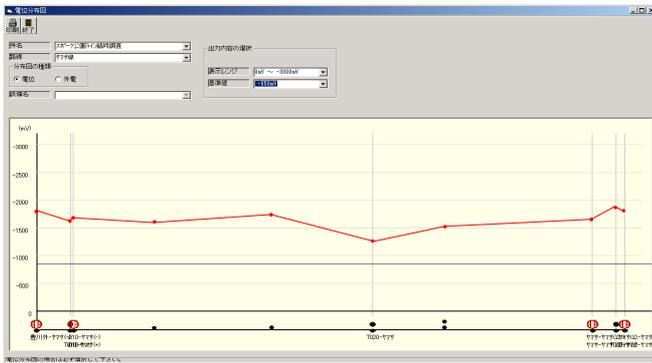
- ・ 作業件単位で路線，測定点，測定データなどの情報を管理・整理するデータベース機能。
- ・ 各種コードを意識せずにデジタル計測器へ計測条件を設定し収録する機能。
- ・ 生データ波形の表示 / 印刷機能。(4点までの同時刻列生チャート作成)





・ 計測データ自動演算機能。(良否判定は、電位・電流・絶縁性・干渉・防食設備性能まで応用可)

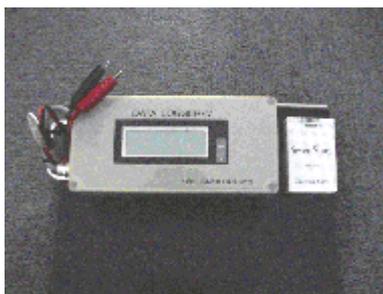
・ 測定結果一覧表と分布図の作成機能。



## (2) 計測器特徴

・ シャント電圧 (25  $\mu$ V 分解能) ~ レール電圧 (最大  $\pm 250$ V) 測定が行え、50Hz or 60Hz の 0.5 秒サンプリングで 24 時間連続測定、一分間演算モードで約 2 週間の連続測定が可能です。雨天時でのマンホールボックス内放置作業に耐えうる筐体で現場作業に適しています。

測定項目	データ処理	
電位測定	最大値	防食設備稼働率
電鉄レール電圧等の電圧測定	最小値	防食設備回路抵抗
シャント抵抗器の電圧測定	平均値	電位の良否判定
	+側平均値	相関係数
	-側平均値	度数分布(10分割)
	+率	電位の換算
	-率	



## 計測器仕様

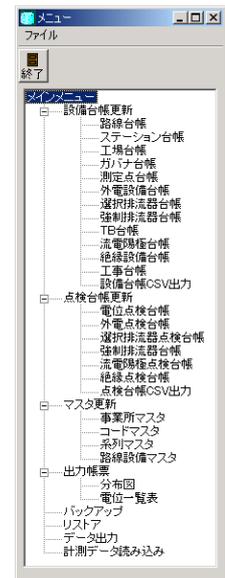
測定チャンネル	1ch
測定精度	読み値の $\pm 0.2\%$ , $\pm 1$ カウント
測定レンジ・分解能	$\pm 800$ mVレンジ 25 $\mu$ V $\pm 30$ Vレンジ 1mV $\pm 250$ Vレンジ 10mV
データ容量	172,800データ
入力インピーダンス	2M以上
通信インターフェース	赤外線通信インターフェース
ディスプレイ	LCD 20文字 $\times$ 4行
電源	単3型乾電池 $\times$ 8本
形状	W.97mm $\times$ D.198mm $\times$ H.80mm

## 3.2. CP-DBS

電気防食に関係する対象設備と防食設備情報、点検情報を統括して管理するデータベースです。CP-DBS は、前述の CP-LOG 並びに後述の CP-MAP と連動する仕様で製作されています。点検作業を行う時には CP-MAP, CP-DBS から CP-LOG へ作業件名, 点検箇所を指示する。現地確認に CP-MAP を利用し点検業務を行う。点検データは CP-LOG 上で演算, 解析処理, 整理, 出力処理する。CP-DBS へ移行処理し点検情報の蓄積をする。管理業務を行う時は CP-MAP 上からの視覚的な操作による CP-DBS 内データへのアクセスにより情報の検索, 抽出, 解析等を行う事ができます。

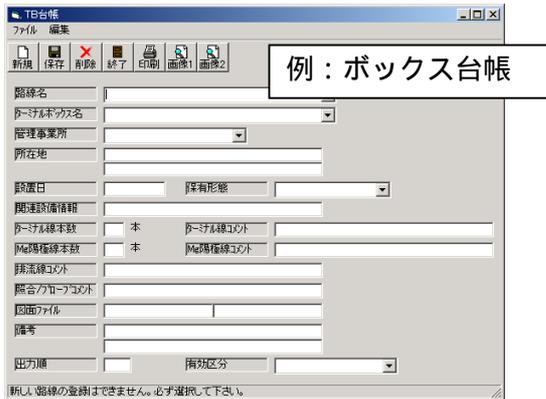
### (1) 主な機能

・ CP-DBS は、メインメニューで情報の検索, 表示, 帳票の出力, 計測データの読み込み等、各操作をツリー形式により表示された項目を選択する事により、対応した画面が表示されて各種操作が行える仕様で製作されています。



・ 以下の設備と点検台帳が標準で付属し、必要に応じて追加する事が可能です。

設備	工場	ステーション	ガバナー
	路線	絶縁	測定点
	選択排流器	強制排流器	外電
	流電陽極	ターミナルボックス	
点検台帳	電位	選択排流器	強制排流器
	外電	流電陽極	
	絶縁部 (ボンド干渉を含む)		



- 各設備台帳を 10 階層までのツリー形式で自由に関連付けて整理ができる機能。(メインメニューと同様のイメージです)  
エンドユーザーが管理し易いように「路線，ターミナルボックスの階層下に外電を配置したツリーと、外電階層下に関連路線とボックスを配置して整理したツリーの両方を作成する事」や「路線下に絶縁やガバナを配置し再び関連路線を配置して相互に繋がりを持たせる事」などが自由に行えます。
- 設備台帳は更新により最新情報のみが表示されます。(履歴情報は、表示するツールがありませんが CSV 形式で保存されています)
- 各点検台帳の履歴情報を作業件名単位で照会し表示 / コピー印刷する機能。
- 電位点検台帳に対して一覧表と路線電位分布図を件名単位で表示 / 印刷する機能。
- 外電，排流器点検台帳の電圧，電流，電位測定結果を時系列でグラフに表示 / 印刷する機能。
- 手入力による点検台帳作成機能。
- CP-LOG への作業指示 (路線情報の転送) と計測データの点検台帳への自動登録機能。
- 工事台帳による工事概要の情報蓄積と関連設備台帳を選択 (複数可) する事により関連設備の工事履歴を自動で更新する機能。
- 画像データの取り込み管理機能。(外電・排流器 - 5 画像，ボックス・その他 - 2 画像)

- 路線単位に電気防食管理レベルを設定する管理レベル分類機能。
- データベースに登録されたデータや集計データを CSV 形式で出力する機能。

## (2) データベースの特徴

- 本台帳管理方式は、従来のデータベースで構築が困難である部位を各台帳にリレーショナル的な要素を持たせず系列マスターを利用して管理する事により、どんなに複雑なりレーショナルをも実現させる仕組みになっています。
- 本 CP-DBS と CP-LOG とを組み合わせて利用する事により、従来の点検業務では手作業であったペンレコーダーチャートの切り貼り、読み取り、ハンコ押し、ワープロによる帳票作成、路線電位分布図の作図、報告書データ集、計測結果の保存が自動化された事になります。

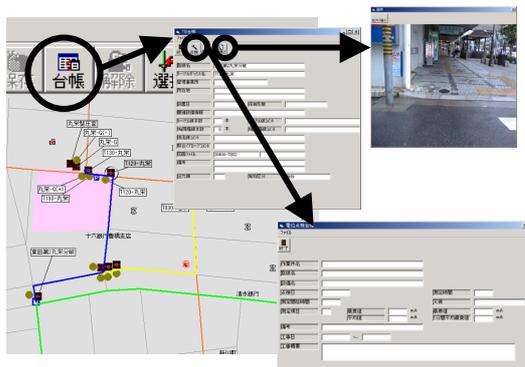
## 3.3. CP-MAP

地図 (全国デジタル道路地図データベース) 上に対象埋設配管を作図し、検査対象施設・設備や防食設備、関連施設・設備等のマークを記します。記したマークを位置情報 (配管上の起点距離や緯度経度) と名称で CP-DBS と関連付けることにより、地図上から様々な情報にアクセスできる仕組みになっています。

### (1) 主な機能

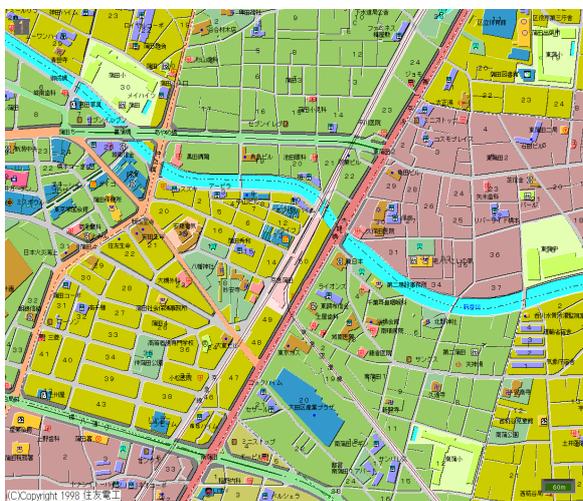
- 地図上に作図できる情報  
工場，路線，絶縁，外電，排流器，ターミナルボックス，測定点，ガバナ。
- 地図縮尺の変更機能。  
1/2000, 1/6200, 1/25000 他
- 地図スクロール機能。
- 公共施設, ガソリンスタンド, コンビニエンス等の情報を表示 / 非表示選択機能。
- 画面コピー印刷機能。
- 右クリックによる設備マークの名称表示機能。
- 設備のダブルクリックによる CP-DBS 台帳表示機能。
- CP-DBS での台帳選択操作に連動して選択された設備が地図画面上の中心に位置するように自動でスクロール表示する機能。
- 地図上に登録された情報を位置と名称で CP-DBS とリンクする機能。
- 電位不良箇所を作業件名単位で地図路線上に

表示させる等、登録情報を目的に応じて選択表示させる機能。



## (2) マッピングシステムの主な特徴

- ・ 地図上に登録された情報を位置と名称で関連するシステムとリンク可能となっています。
- ・ 地図は、都心や駅周辺部の人口密集地に上記表示地図のような街区図が提供されています。過疎地域では、道路が線で表現された地図となっています。本マッピングソフトでも2点間の移動ルートを検索して地図上に表示する事や、延長距離の算出などを行えるように機能拡張する事が可能です。



## 4. CP-管理システムその他の機能

- ・ CP-管理システムのデータ保護機能は、システム出荷状態へのリカバリ機能とバックアップ機能があります。
- ・ 日防製遠隔監視・制御タイプ外電と組み合わせ、地図上からの操作による防食施設稼働状況のリアルタイムのモニタリングや、点検情報を取り込んで異常判定を演算処理する機能を持たせる事も可能です。
- ・ 外電や排流器、絶縁点検を行う時に人為的に

ON-OFF 等を入れる事があります。点検データの ON-OFF 部をマウスでマークすると、ON-OFF 部の変化量や相関係数等を演算処理することにより外電、排流器の回路抵抗や絶縁部干渉の有無などを自動判定し、稼働率、最大・最小・平均値や設定しきい値(境界)による度数分布評価・異常判定と合わせて CP-DBS へ自動蓄積することが可能です。

- ・ 設備台帳に AUTO CAD の図面を登録しておき、設備図面表示や簡易印刷が可能です。
- ・ 設備位置情報を緯度経度で登録していますので道路上でない場合等も GPS を利用した設備登録が可能です。

## 5. CP-管理システムの利用方法

- ・ データロガーや遠隔監視装置の利用により、異なる地点の同時測定による腐食環境、防食効果分布などの調査・解析や従来のペンレコーダーと比較して長期間のモニタリングによる防食管理を少ない人数で行う事ができます。
- ・ CP-管理システムは、電気防食の特別な知識を必要とせず最小限の電気防食管理業務が行えるツールとして利用できます。
- ・ 電気防食の熟練者は、CP-管理システムに登録された防食対象関連の設備情報、詳細な点検結果情報から防食診断に必要な情報を総合的に抽出収集し、解析を行うツールとして利用できます。

## 6. 今後の CP-管理システム

CP-管理システムに登録された情報は、すべて汎用のデータ形式(CSV等)で保存されていますので他のシステムにデータを転送する場合も移行処理等がスムーズに行えるようになっています。地図情報も市販のデジタル地図を導入し、登録された設備を緯度経度で管理する事により、一度構築した情報が無駄になり難いように考えられています。また、本システム自身も埋設管にとられず電気防食全般の情報を管理し活用するツールとして設計・製作されています。よって、様々な場所の実作業で多く利用される事により、煩雑であった情報を容易に蓄積していくと共に、防食会社からの業務支援ツールとしてより使い勝手の良いシステムとして発展していくものと考えます。

## コンクリート鉄筋の電気防食に

### 遠隔監視制御システム

#### 子局 “ C P W A T C H E R ”

コンクリート構造物の防食維持管理においては防食対象物の復極量の測定などが行われていますが、これには多くの時間と労力を要します。本システムは電話回線を用いて、電源装置の稼働状況や防食状況などのデータを遠隔地の管理事務所で監視できます。また、必要に応じて遠隔地から電源装置の出力電流や防食電位設定をおこなうことにより、最適な防食状態を維持することができます。

#### 機 能

リアルタイム監視制御機能  
防食電流・出力電圧の監視・制御  
オン電位・インスタントオフ電位の監視  
時系列データ受信機能  
子局のメモリーより時系列データを受信してグラフ表示  
データベース機能  
受信した時系列データをアクセスDBとしてハードディスクへ保存  
検索結果を表計算データとしてハードディスクへ保存  
時系列データを管理報告書として印刷

警報機能  
A C 電源異常  
防食電流異常  
過防食電位検知  
子局メモリー不足  
電位制御機能  
適切な防食電位となるように防食電流を自動調整  
計測機能・データロガー機能  
防食状況監視：定期的に防食電流・出力電圧・オン電位・インスタントオフ電位を計測  
防食効果確認試験：月1回電源装置を停止して復極量を計測  
メモリー機能：上記計測結果をメモリーに保存(容量：約2000データ/回路)  
パネル表示機能  
防食電流・出力電圧・オン電位・インスタントオフ電位・警報内容  
パネル操作機能  
出力ON・OFF・防食電流増減、電流・電圧・電位の測定



#### 日 本 防 蝕 工 業 株 式 会 社

〒144 - 8555 東京都大田区南蒲田 1 - 21 - 12 昭和ビル

TEL: 03 - 3737 - 8455 FAX: 03 - 3737 - 8459