

No.51 2016

NAKABOH REPORT



株式会社 ナカボータック
NAKABOHITEC CORROSION PROTECTING CO. LTD.

— 目 次 —

● 巻頭言

..... 1

執行役員 篠田 吉央

● 技術報告

《事例 1》

博多港(箱崎ふ頭地区)岸壁(-12m)(改良)工事

セル式および栈橋式の複合構造施設における補修および防食事例..... 2

九州支店 岩瀬 雄次郎

《事例 2》

東北電力株式会社新仙台火力発電所殿に適用した鉄イオン供給装置

および各種鉄イオン供給装置の紹介..... 8

東北支店(現在 東京支店) 鈴木 達朗

《事例 3》

全チタン製熱交換器への電気防食の適用..... 14

技術開発センター 八木 雄太

巻頭言

初の南米大陸開催オリンピックで盛り上がった2016年度でしたが、世界ではイギリスのEU離脱やアメリカの政治経験のない実業家の新大統領誕生、国内では豊洲市場移転問題など、予想を反する出来事が起こりました。

しかし、社会資本の維持延命は近々の課題であり、世の中がどう変わろうと安全安心な生活を守るためには、ぶれる事の許されない仕事であります。そこで、本号では維持延命対策を施した土木構造物の他、発電所の機械設備に施工されている信頼できる防食事例について紹介いたします。

1. 港湾施設の大気中から海中・海土中まで、各種環境・構造に適した被覆防食・電気防食工法を安全・品質に留意しながら完遂した工事
2. 東日本大震災で被災した発電所の高温水蒸気を純水に戻す復水器の電気防食および鉄イオン供給システムを短期間で補修した例とそのシステムの紹介
3. 耐食性の高いチタン材料を使用した熱交換器ではあっても炭素鋼との異種金属接触腐食に留意して電気防食を設計運用している例

なお、本年度の学協会における対外発表は下表に示すように24件です。国際学会(EUROCORR2016)では被覆防食の耐久性評価と国内では一般的なMgを添加したAl-Zn-In系の犠牲陽極材について発表し、日本の腐食防食技術をアピールしました。また、電気防食の評価や維持管理方法についての共同研究を紹介し、より効率的な運用を目指して参ります。今後とも腐食防食の技術経験を地道に積み重ね、社会資本の維持延命に貢献して参りますので、ご指導・ご鞭撻のほど、よろしくお願い申し上げます。

表 主要学協会での発表件数(弊社発表件数/連名含む件数)

年度	腐食防食学会			日本 防錆技術 協会	日本 コンクリート 工学会	土木学会	日本 材料学会	その他	国際学会	計
	春	秋	他							
2016 (H28)	1 / 2	1 / 1	0 / 0	2 / 2	1 / 1	3 / 5	0 / 1	4 / 5	5 / 7	17 / 24
2015 (H27)	1 / 5	2 / 2	0 / 0	1 / 1	0 / 1	2 / 3	1 / 1	1 / 1	0 / 0	8 / 14
2014 (H26)	2 / 2	1 / 1	1 / 1	2 / 2	2 / 4	1 / 3	3 / 4	3 / 3	0 / 0	15 / 20
2013 (H25)	3 / 3	2 / 2	0 / 0	2 / 2	1 / 1	5 / 6	0 / 1	1 / 1	7 / 9	21 / 25
2012 (H24)	1 / 2	1 / 2	0 / 0	3 / 4	1 / 2	3 / 3	2 / 4	0 / 0	0 / 0	11 / 17
2011 (H23)	5 / 7	3 / 4	0 / 0	1 / 4	4 / 5	3 / 5	0 / 0	0 / 0	0 / 0	16 / 25
2010 (H22)	5 / 6	3 / 4	0 / 0	2 / 2	1 / 1	2 / 2	0 / 0	0 / 0	0 / 0	13 / 15
2009 (H21)	2 / 3	3 / 3	0 / 0	1 / 1	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	1 / 1	7 / 8
2008 (H20)	2 / 3	2 / 2	0 / 0	3 / 7	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	7 / 12
2007 (H19)	1 / 1	0 / 0	0 / 0	2 / 4	0 / 2	0 / 1	0 / 0	0 / 0	0 / 0	3 / 8
2006 (H18)	0 / 0	1 / 1	0 / 0	0 / 1	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	2 / 2	3 / 4
2005 (H17)	2 / 2	2 / 3	0 / 0	2 / 4	0 / 1	0 / 0	1 / 1	0 / 0	0 / 0	7 / 11
2004 (H16)	2 / 2	1 / 2	0 / 0	1 / 3	0 / 0	0 / 0	1 / 1	0 / 0	0 / 0	5 / 8
2003 (H15)	2 / 2	1 / 2	0 / 0	1 / 7	1 / 1	0 / 0	1 / 1	0 / 0	1 / 2	7 / 15
2002 (H14)	3 / 5	3 / 6	0 / 0	1 / 2	0 / 0	0 / 0	0 / 0	1 / 1	0 / 0	8 / 14
2001 (H13)	2 / 2	0 / 0	0 / 0	2 / 3	0 / 0	0 / 0	1 / 1	0 / 0	0 / 0	5 / 6
2000 (H12)	2 / 3	1 / 3	0 / 0	2 / 3	0 / 0	0 / 1	0 / 0	0 / 0	0 / 0	5 / 10
総計	36 / 50	27 / 38	1 / 1	28 / 52	11 / 19	19 / 29	10 / 15	10 / 11	16 / 21	158 / 236

文責 技術管理部 篠田吉央

博多港(箱崎ふ頭地区)岸壁(-12m)(改良)工事 セル式および棧橋式の複合構造施設における補修および防食事例

九州支店 岩瀬 雄次郎

1. はじめに

箱崎ふ頭地区岸壁(-12m)は博多港のほぼ中央に位置しており、昭和45年に同地区の着工が始まり、昭和60年12月に完成した。同岸壁には専用の大型クレーンのベルトコンベアが設置されており、主に飼料等を取り扱う施設で、背後にはサイロや関連企業が隣接している。

博多港は九州北部にある博多湾の奥部にあり、天然の良港として古来より国際貿易港として利用され、現在では九州の経済文化の中核である福岡市の海の玄関であり、国際色豊かな貿易港として、また国内離島への物資輸送の拠点として発展している港である。

箱崎ふ頭地区岸壁(-12m)は図1に示す通り、重力式護岸の前面に鋼管杭式棧橋、さらにその前面にセル式構造岸壁という複合型の係船岸壁として建設されている。

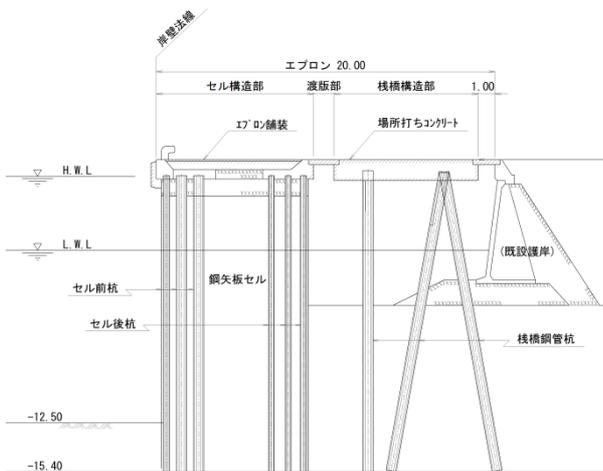


図1 岸壁(-12m)構造図(標準断面図)

岸壁は建設後約30年が経過し、海洋環境下におかれ塩害を受けていると考えられ調査を行ったところ、上部工および下部工双方に劣化が生じていることが判明した。上部工のコンクリートにはひび割れや浮き、はく離等の劣化が確認された。調査結果から鉄筋位置において塩化物イオンが発錆限界である $2.0\text{kg}/\text{m}^3$ を超えていることが判明し、塩害対策が必要と判断された。

下部工の鋼矢板セルおよび鋼管杭には肉厚減少とともに、一部に貫通孔、破断が発生していることが確

認された。調査結果では現状の腐食環境が継続すると想定した場合、50年後において応力による耐力の許容値を満たさないことが判明した。一般腐食もさることながら集中腐食による局部的な腐食による急激な施設耐力低下を防止する目的で、鋼管杭および鋼矢板の腐食抑制をするための補修が必要であると判断された。

維持管理計画において施設供用50年を満足させるため、抽出された補修工法について、安定性・耐久性・経済性・施設利用制限・工期・施工性等を総合的に比較検討した結果、以下の組み合わせを採用することとなった。

1) 上部工コンクリート

- ①断面修復：原型復旧
- ②ひび割れ補修(注入・充填)：塩害因子浸入抑制
- ③電気防食(線状陽極方式)：鉄筋防食

2) 下部工鋼材

- ①貫通孔補修：原型復旧
- ②ペトロラタム被覆(鋼矢板・鋼管杭)：鋼材防食
- ③水中硬化形被覆(セル鋼管杭頭部)：鋼材防食
- ④鉄筋コンクリート被覆(セル鋼管杭)：鋼材防食＋補強
- ⑤電気防食(水中設置・土中埋設型)：鋼材防食

2. 工事概要

2.1. 目的

本工事は平成25年度および26年度の2ヶ年計画で行われ、3工区に分けて施工された。建設後30年経過し塩害を主原因とした劣化部を補修し、防食効果により施設供用50年間を維持管理していくことを目的に以下の工種が施工された。(当社担当工種のみ記載)

- セル部
- ①上部工断面修復(コンクリート)
 - ②ひび割れ補修工(コンクリート)
 - ③ペトロラタム被覆(セル矢板)
 - ④ペトロラタム被覆(セル後杭)
 - ⑤水中硬化形被覆(セル矢板接合部)
 - ⑥水中硬化形被覆(セル前杭)
 - ⑦電気防食(セル矢板・セル前杭・水中)

⑧電気防食(セル矢板・セル後杭・土中)

栈橋部 ①足場架設

②上部工断面修復(コンクリート)

③ひび割れ補修工(コンクリート)

④電気防食工(コンクリート内鉄筋)

⑤ペトロラタム被覆(鋼管杭)

⑥電気防食(鋼管杭土中部・土中埋設)

2.2. 工事対象

施設は大きく分けてセル部と栈橋部とに分けられ、それぞれ構造が異なるため補修対策も異なる。

セル部は直線鋼矢板をセルとアークの組み合わせで打設された構造物で、そのセルとアークの前面と背面に鋼管杭が打設されている。セルとアーク、鋼管杭の上に上部工コンクリートが設置されているという構造である。上部工コンクリートは断面修復とひび割れ対策が実施されることとなった。下部工は被覆防食と電気防食とが採用されたが、セル・アークを境に海側(前)と陸側(後)では海底面レベルの差が11.7m(海側-12.5m、陸側-0.8m)もあり、また、前杭は鉄筋コンクリート被覆(他社工種)が施されるため非常に複雑な施工区分となった(図2)。

栈橋部は上部工コンクリートの下に鋼管杭が打設されているテーブル状の構造である。上部工コンクリ

ートには断面修復、ひび割れ補修および電気防食を施すこととなった。下部工はペトロラタム被覆および電気防食(土中埋設型陽極)を実施することとなった。

3. 上部工コンクリート補修

上部工コンクリート補修フローを図3に示す。

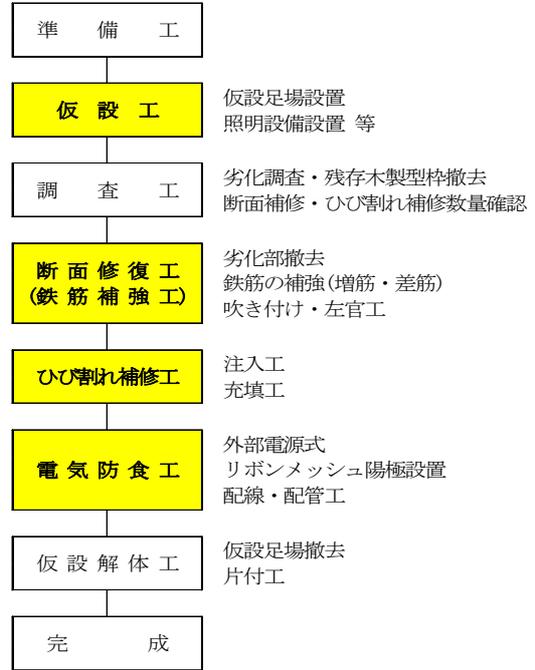


図3 上部工コンクリート補修フロー

3.1. 足場仮設工

上部工コンクリートの施工するに当たり足場が必

標準断面図

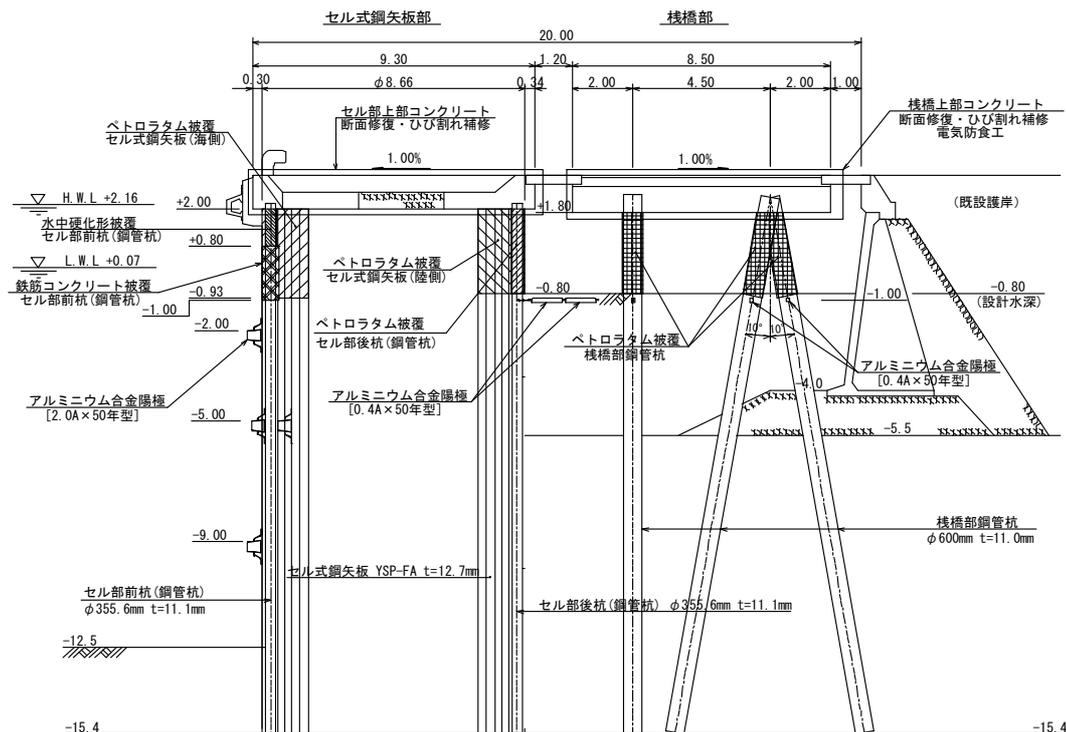


図2 補修・防食区分

要となる。セル部に関しては上部工下端(梁下)レベルが+2.0mであり潮位の影響を受け難いが、栈橋部は下面すべてが対象であり、上部工下端も+1.8mと低いために潮位による作業時間および作業性を考慮する必要があった。1期工事においては梁下100cmに設定した。移動や梁の作業においては適していたが、床版作業時に作業床を別途用意しなければならず、また、平均水面が+1.1mであるため作業時間が短い日もあったことから、2期工事では梁下80cmに設定した。移動や梁下作業では不便を感じたが、床版部の作業効率が上がったことと、潮位による作業時間が大幅に増えたことで作業環境としては改善できた。

足場の構造についても、1期工事では鋼管杭にブラケットを溶接して角鋼管およびエキスパンドメタルを組み合わせて設置した。しかし、角鋼管が長く重いことと、施設への出入りが狭いこと、潜水士が組むが潮位に左右される等で架設・撤去に時間を要した。そこで、2期工事では吊り足場に変更した(写真1)。1期工事では断面修復の数量も多かったことから立ち上げ式を採用したが、2期工事では断面修復が少なくなったので吊り足場でも可能と判断したことにもよる。吊り足場設計時にも予めアンカーを打つ場所、単管位置およびエキスパンドの配置も図面上で設定しておき、単管間隔も狭くして作業時間を限りなく短くすることで、短期間で安全に仮設することが出来た。



写真1 栈橋下出入口・吊り足場(2期)

3.2. 断面修復工

事前調査により決定した範囲の断面修復を実施した。断面修復材は2種類選択した。セル式上部工コンクリートは電気防食を適用しないので、防錆能力等を重視しポリマーセメント系の補修材を、栈橋式は断面修復後に内部鉄筋の電気防食を適用するため電気抵抗の低い補修材料を使用した。

断面修復時に鉄筋の腐食が進行している箇所では、その腐食量から鉄筋の補強の要否を検討した。応力度からの必要鉄筋量に対して使用鉄筋量による差を腐食しる分と考えて算出した結果、法線直角方向の小梁中

央部主筋は腐食率5%、その他の部分に関しては腐食率20%と設定し、鉄筋の補強の有無を確認した。鉄筋を露出させた箇所に関して鉄筋径を測定し、元の鉄筋径を100%とした時の腐食率との差である残存率95%(小梁中央部主筋)もしくは80%(その他部分)を下回っている鉄筋に関しては補強の対象とし、補強鉄筋(同径)を溶接にて取付けた(写真2)。



写真2 補強鉄筋溶接(D16)

3.3. ひび割れ補修工

事前調査によって確定したひび割れに対して補修を実施した。ひび割れ幅0.2~1.0mm未満においてはひび割れ注入工を、幅1.0mm以上ではひび割れ充填工を採用された(図4)。使用材料は断面修復工と同様に電気防食を適用する栈橋部には電気防食用補修材を、セル部にはポリマーセメント系補修材を使用した。



図4 ひび割れ注入工と充填工

3.4. 電気防食工

適用する電気防食方式は、外部電源方式のうち線状陽極方式(チタンリボンメッシュ方式)とした。チタンリボンメッシュ方式は、高純度チタンをエキスパンドメタルリボン状に加工し、白金族酸化物を焼付コーティングした陽極を電極とする外部電源方式の電気防食工法である。

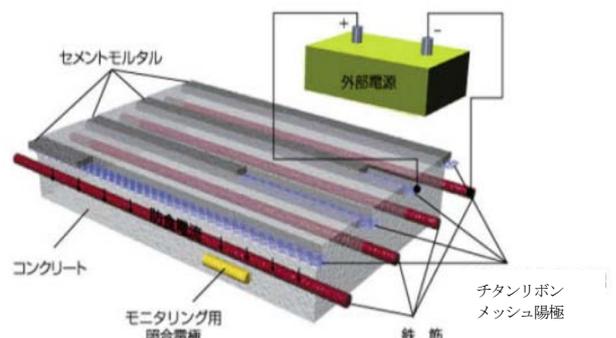


図5 チタンリボンメッシュ陽極を使用した外部電源方式

図5に示すように電源装置の(+)側にチタンリボンメッシュ陽極、(-)側に鉄筋をつないで所定の電流を流し、モニタリング装置を設置し防食効果を確認する。

施工は図6の施工フローに示すように、上部コンクリートにチタンリボンメッシュ陽極を埋め込み、その陽極から鉄筋に対して電流を流すまでの工程である。まず上部コンクリート表面に陽極を設置するための溝の位置をマーキングし、その位置にカッターで縁切りをして溝内をはつり出した。この際、照合電極や排流・測定端子の埋設位置もはつり出した。溝内に電気防食用のモルタルを充填しながら陽極を設置し、陽極と陽極とをコンダクターバー(チタン製薄肉の帯板材)に接続して同様にモルタルで埋め戻した。栈橋上部に電源装置を設置し、電源装置から陽極や排流・測定端子、照合電極までを配線配管で接続した後、通電調整を実施した。

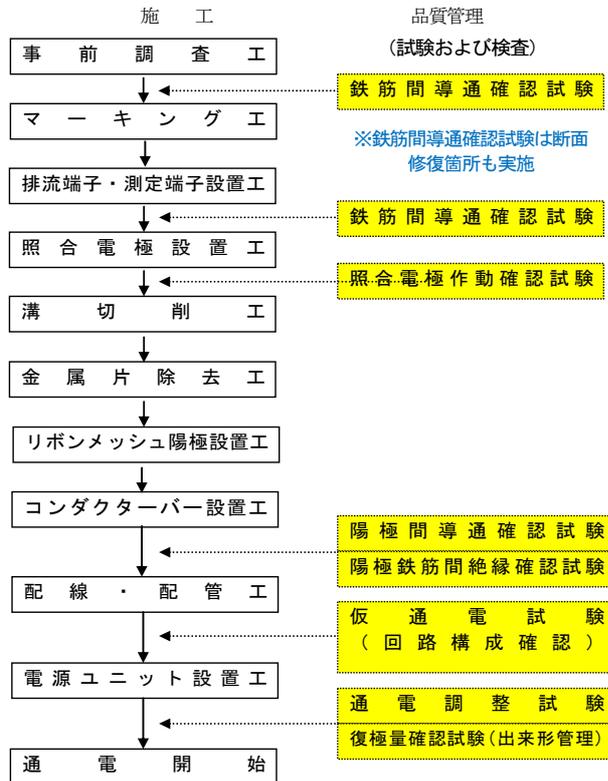


図6 電気防食施工フロー

品質項目は鉄筋間導通確認試験を慎重に行った。上部工内の鉄筋はすべて電氣的に繋がっているという前提で電気防食が採用されるため、実際に鉄筋間の電氣的導通(電位差 1mV 未満)があるかを確認する必要がある。通常行われる排流・測定端子と鉄筋間、各端子間の導通確認の他、断面修復時に露出した鉄筋についても導通確認を実施した。実際に腐食により絶縁してい

る鉄筋も存在し、その際には導通用の鉄筋を設置することで確認できる範囲の全ての鉄筋の導通を確認した。

また陽極鉄筋間絶縁確認(電位差 10mV 以上)も確実に実施した。電気防食は陽極からコンクリートを媒体とし鉄筋に電流が流入して防食状態となるため、陽極鉄筋間が導通すると短絡状態となり電気防食回路は成立しない。個々の陽極他、コンダクターバー接続後の陽極群に対しても絶縁確認を実施し、確実な電気防食回路の形成に努めた。

さらに仮通電試験を実施し、各回路において防食電流が流れ、鉄筋の電位が卑方向に変化することを確認して回路の成立を確認した。

最後に通電電流調整試験を行った。同試験は通電電流を段階的に変化させ、100mV 分極を得る通電電圧・電流値を確認し電気防食を稼働させた。しばらく電気防食した後、防食電流遮断直後の鉄筋電位と、24 時間程度放置した後の鉄筋電位との差(復極量)が 100mV 以上あることを全ての回路において確認し完成とした。

4. 下部工鋼材補修

下部工の補修は主に腐食抑制対策である。腐食対策(防食)は一般的に採用されている、上部工下端～L. W. L. -1.0m間を被覆防食、被覆防食以深を電気防食という組み合わせで実施した。ただし、セル背面と栈橋部に関しては海底面が L. W. L. より上方にあるため、上部工～海底面間を被覆防食、海底面以深を電気防食という組み合わせにした。被覆防食は対応年数と経済性を考慮した結果、ペトロラタム被覆が採用された。電気防食は港湾鋼構造物の防食方法として最も採用されているアルミニウム合金陽極を使用した流電陽極方式が採用された。

4.1. ペトロラタム被覆(セル矢板)

ペトロラタム被覆は、ペトロラタム系防食材が鋼材と腐食環境(水分と酸素)を遮断することと自身の持つ腐食抑制剤の作用で防食効果を発揮し、FRP 保護カバーがペトロラタム系防食材を保護することでシステマ的な防食効果を得ることができる。鋼矢板の素地調整後、保護カバー固定用のスタッドボルト付ベースプレート水中溶接し、ペトロラタム系ペーストを塗布した。その後、内面にペトロラタム系シートを貼り付けている FRP 保護カバーを鋼矢板に設置し、ナットにて

締め付け固定した。ボルト・ナットの防食として樹脂製ボルトキャップ（内部には水中硬化型エポキシ樹脂充填）を装着した。カバー上下に水中硬化型エポキシ樹脂を充填し内部に水や酸素が侵入しないよう端部処理した（写真3）。



写真3 ペトロラタム被覆 施工前・完了

4.2. ペトロラタム被覆(栈橋鋼管杭)

ペトロラタム被覆の適用事例では鋼管杭が圧倒的に多い。本施設ではセル後杭および栈橋鋼管杭に適用した。鋼管杭表面の素地調整後、ペトロラタム系ペーストを塗布し、ペトロラタム系テープを巻き付けた。その上に保護層としてFRP保護カバーをボルト・ナットにて締め付け固定した。栈橋部の鋼管杭は組杭であり斜杭と斜杭との間に隙間が無く、テープを巻き付けることが出来ない。そうした箇所はテープを切り貼りして防食層を形成し、FRPカバーもその形状に合うよう現地加工してペトロラタム系防食材が鋼材に密着し暴露されないように保護した。（写真4）



写真4 ペトロラタム被覆 施工前・完了

4.3. 水中硬化形被覆(セル矢板結合部・セル前杭)

セル前杭は杭頭部の半周が露出し、もう半分は防舷材取付基礎内に入り込んでいるため、FRP保護カバーを取り付けることが困難であり、その範囲において水中硬化形被覆が採用された。また、セルとアークの接合部において当板やリベットが存在し、ペトロラタム被覆を適用することが困難であると判断されたため、水中硬化形被覆が採用された。水中硬化形被覆は耐用年数がペトロラタム被覆より劣るが、複雑な形状の構造にも適用できるという長所があることから採用されることも多い。鋼材表面を水中サンドブラストにより素地調整を施し、水中硬化型エポキシ樹脂をウェットハンド法にて塗布した。鋼材に強固に密着した樹脂

(5mm厚)が鋼材と腐食環境を遮断するために防食効果が得られる。（写真5）



写真5 水中硬化形被覆 塗布・完成

4.4. 電気防食(セル矢板・セル前杭)(水中設置)

アルミニウム合金陽極(2.0A×50年型)をクレーンにて海水中へ吊下げ、矢板および鋼管に水中溶接により取り付けた。矢板に取り付ける場合は通常取付金具(溝形鋼)は使用しないが、陽極が大型であり矢板の継手に接触してしまうことから鋼管杭への取付と同様に取付金具を使用した。また、現地での作業性を考慮して取付金具を取り付けた状態で納入することとした。

(写真6)



写真6 水中設置用陽極 納品時・取付後

4.5. 電気防食(セル矢板・セル後杭・栈橋杭)(土中埋設)

本対象はセル背面と栈橋部となるが、上部工から海底面間はペトロラタム被覆を施すため、電気防食対象範囲は土中部のみとなる。陽極自体も海底土中部に設置することを前提に設計されており、0.4A×50年型(環境抵抗150Ω・cm)を採用した。海底土をジェットポンプで掘削して陽極を置き、鋼管杭・鋼矢板と丸鋼で電気的導通を取り、埋戻した。（写真7）



写真7 土中設置用陽極 施工時・取付後

5. まとめ

本工事は施設の稼働を約2年間中止した状態で施工を実施したので工事関係者のみが使用できる環境にあった。しかし、多工種重複により施設上部には作業車・

通勤車・仮設事務所・加工場・資機材置場が混同している状態であり、結果的には非常に狭い範囲の中で施工せざるを得ない状況にあった。多い時では栈橋下に50人近い人員が各々の作業をするという状況もあった。栈橋上部工補修は潮位によって作業時間が異なるため日々作業時間のズレが生じるとともに、粉じん・騒音もあり、技術員・作業員の健康管理にも注意を払った。ただし、施設が工場地帯の中央にあり、栈橋下も閉塞された空間であったことから、周辺第三者への考慮は少なく済んだことは助かった。

工事期間は約2年間であったが、実際には3期に分かれて実施しているため各々の工期は数ヶ月で、非常にタイトなスケジュールで進行した。特に、栈橋上部工の劣化が著しいブロックと腐食による貫通孔が原因で鋼管杭が座屈したブロックは上部工自体の造り替えに変更になったこと、栈橋鋼管杭の防食方法が変更になったこと、その他さまざまな設計変更が重なり大きく工程に影響を与えた。また、工事期間は東北復興により九州地区の作業員・潜水土・リース品・建設機材・仮設現場事務所に至るまで非常に不足している時期と重なったにも関わらず、元請から下請、作業員まで全員が一丸となって工事を仕上げられたと感じている。工種が輻輳する中でも連絡調整を怠らず、譲り合って協力ができ、事故も無く完成できたことは、全ての工事関係者の努力の賜物である。

6. 謝辞

本補修設計・工事を遂行するにあたり、国土交通省九州地方整備局博多港湾・空港整備事務所、株式会社日本港湾コンサルタント、株式会社不動テトラ、株式会社本間組、株式会社大本組、宮川建設株式会社の方々には多大なるご協力を賜りました。記して心より感謝申し上げます。

また、事故も災害もなく、安全に完工して頂いたすべての工事関係者各位に敬意を表します。

東北電力株式会社新仙台火力発電所殿に適用した鉄イオン供給装置 および各種鉄イオン供給装置の紹介

東北支店（旧）東京支店（現） 鈴木達朗

第1章 新仙台火力発電所鉄イオン供給装置

1. 概要

東北電力新仙台火力発電所殿 2号機復水器の管板面および冷却管管端部を定電圧手動方式にて電気防食していたが、防食状態の制御と管理が難しくチューブリークが発生した。そのため、電位分布試験や抜管試験により腐食状況を調査し、定電位自動制御方式による電気防食および鉄イオン供給の併用により、防食管理を行った。また、東日本大震災により、鉄イオン供給装置が使用不能となったため、工場に引き取り再利用可能部品と修理品を仕分け後に組み立て復旧した。復旧品を現地に納入し、早期に運用を再開した。

2. 履歴

- ①1973年6月 2号機復水器を手動切替方式にて電気防食の運用を開始した。
- ②2006年6月 2号機復水器にてチューブリークが頻発した。リークに関する原因究明および対策検討のため、2号機復水器にて電位分布試験を実施した。
- ③2007年10月～2008年2月
2号機復水器に対し仮設槽型鉄イオン供給装置を試験的に運用した。
- ④2008年3月～2011年3月
可搬式槽型鉄イオン供給装置を設置し、運用した。
- ⑤2008年5月～2011年3月
2号機復水器を定電位自動制御方式に更新し、電気防食を行った。
- ⑥2011年3月11日
東日本大震災の津波で新仙台火力発電所殿は甚大な被害を受けた。
- ⑦2011年3月30日
鉄イオン供給装置の被災状況を調査・対策検討した。

- ⑧2011年4月 被災した鉄イオン供給装置を当社指定工場に引き取り、修理した。
- ⑨2011年11月 鉄イオン供給装置修理品を納入し、1号機復水器に鉄イオン供給を再開した。
- ⑩2011年11月 2号機は廃止となった。
- ⑪2015年9月 1号機廃止に伴い鉄イオン供給を停止した。

以下に各履歴の詳細を示す。

- ①復水器の冷却管は黄銅材とチタン材が混在している。黄銅材の防食電位（上限）とチタン材の破壊（水素脆化）電位（下限）の範囲にて厳密な電位制御を行わないと適正な防食管理が行えない。手動切替方式は電位制御機能を有していないため、定電位自動制御方式への更新が必要であった。また、当時は電気防食装置の維持管理の認識が薄く、当社からのPR不足もあり、専門業者による装置の点検は実施されていなかった。さらに電気防食装置の効果対象外である冷却管奥部は防食対策が実施されていなかった。
- ②チューブリークが頻発し、これ以上進行すると復水器の使用に支障を来す状況であった。早急な電位分布確認試験（写真1）の実施と対策の検討が必要となり、定期検査期間中に急遽実施となったため夜間作業にて行った。試験の結果、既設の電気防食装置では電位制御が不十分で異種金属接触系への電気防食管理が難しいため、定電位自動制御方式への更新および管板面への照合電極の設置（写真2）を行うこととなった。さらに、写真3の冷却管内面の腐食状況により、鉄イオン供給装置の併設も実施し、冷却管奥部の防食対策とした。

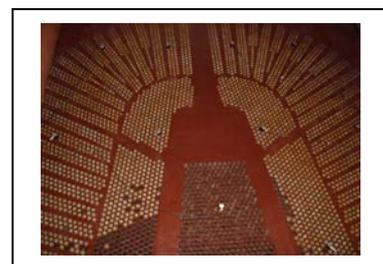


写真1 電位分布試験



写真2 管板面への照合電極設置

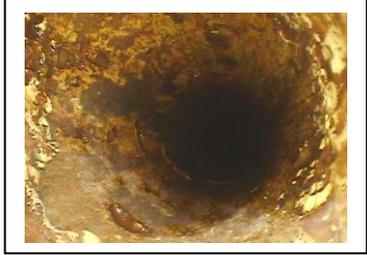


写真3 冷却管内面腐食状況

③鉄イオン供給装置効果検証のため、仮設槽型鉄イオン供給装置試験的に運用した(写真4)。さらに、自主点検による手動切替方式による電気防食装置の細かな電位調整も功を奏し、チューブリークが停止した。この実績により、鉄イオン供給装置が採用されることとなった。



写真4 仮設槽型鉄イオン供給装置デモ

④鉄イオン供給装置を(写真5)に示すトレーラーにて運搬可能な方式とし、2号機復水器だけではなく、1号機復水器にも鉄イオン供給を行った。



写真5 可搬式槽型鉄イオン供給装置

⑤管板面および冷却管管端部について良好な防食状態を常時維持するには厳密な電位制御が必要で、

手動切替方式の電位制御では困難を伴うため、定電位自動制御方式(写真6)に更新した。



写真6 定電位自動制御方式直流電源装置

⑥⑦東日本大震災により鉄イオン供給装置は転倒し(写真7)、使用不能な状態となった。電気防食装置も浸水し、使用不能な状態となった。新仙台火力発電所殿は鉄イオン供給の重要性を認識しており、早急な復旧を希望された。そこで直ちに鉄イオン供給装置を引き取り、当社指定工場にて可能な限り迅速に復旧することとした。



写真7 鉄イオン供給装置被災状況

⑧当社指定工場にて破損した鉄イオン供給装置を再利用可能部品と修理品を仕分けた後に組み立て復旧した。



修理前

修理後

写真8 鉄イオン供給装置修理状況

(再利用可能部品) 電解槽胴部および内部部品、基礎架台、電導金具および付属品、サイトフロー、健全な配管

(修理品) 直流電源装置、流量計、電解槽蓋部、手

摺、圧力計、ストレーナ、ケーブルおよび電線管、破損の認められた配管

⑨復旧した鉄イオン供給装置を納入し、1号機の運転再開に合わせて運用を開始した。再生利用可能な部品を活用することで、震災後8か月の短期間で運用を再開できた。

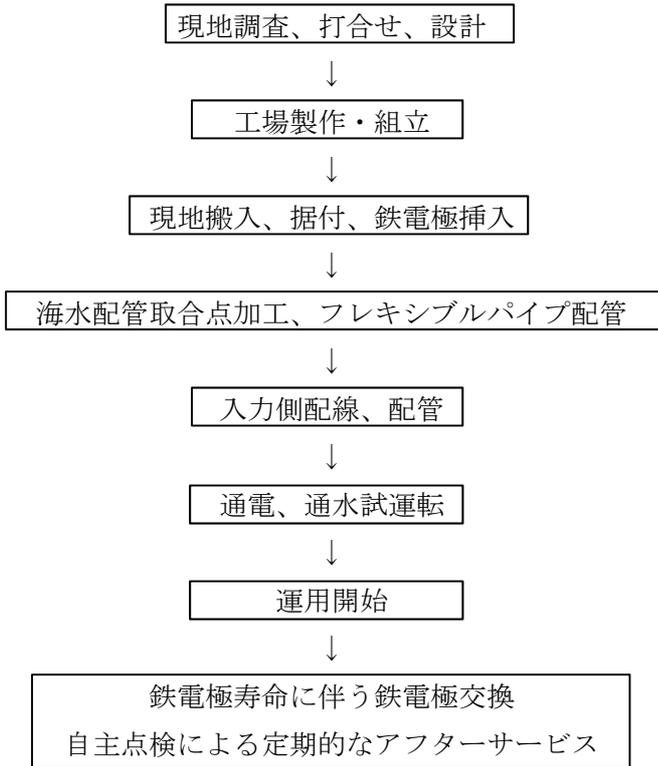


写真9 鉄イオン供給装置復旧

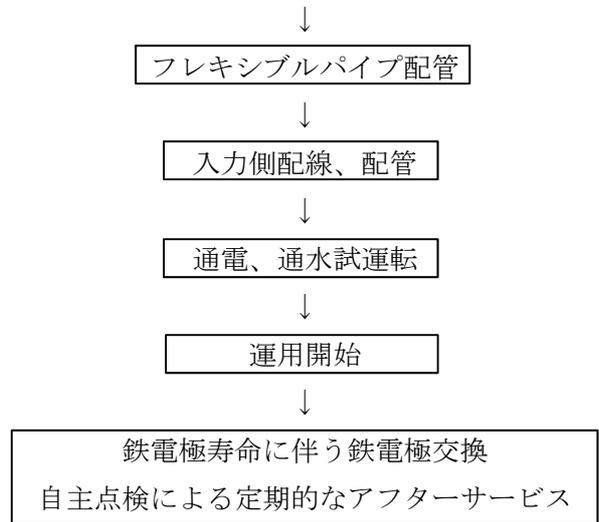
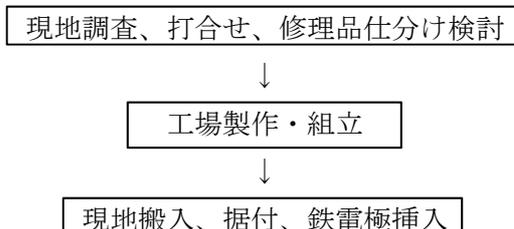
3. 施工フロー

可搬式鉄イオン供給装置の施工フローを以下に示す。

(設置当初：震災前)



(震災後復旧)



4. 結果およびまとめ

(1) 鉄イオン供給と定電位自動制御方式電気防食の併用により、復水器水室管板面および冷却管奥部を適切に防食管理できた。

(2) 定期的なアフターサービスにより、客先と良好なコミュニケーションが取れるとともに状況変化やトラブルに迅速に対応できた。

(3) 震災時も迅速な対応ができ、8か月後には運用を再開できた。

(4) ユニットを工場で組み立て現地納入するため、現地作業が短期間であり、すぐに運用開始できる。

(5) 鉄電極(写真10)も工場にて組立納入するため、現地では、電解槽の開放清掃および閉止と鉄電極の撤去・挿入(写真11)のみの短期間作業である。



写真10 鉄電極装置



写真11 鉄電極装置挿入状況

5. 結言

本装置は、2006年に東北電力株式会社新仙台火力発電所技術G殿からの腐食検討依頼の対応から始まり、2015年の1号機廃止まで運用した。

十分な防食効果を発揮し、新仙台火力発電所殿の電力供給に微力ながら貢献できたものと考えている。

また、東日本大震災における関係各位の懸命な復旧作業には非常に感動したことが思い出となっている。

本装置が9年間大きなトラブルもなく運用できたのは、東北電力株式会社新仙台火力発電所殿および関係会社殿の熱心なご指導、ご協力があつたゆえと考える。

あらためて、東北電力株式会社新仙台火力発電所殿および関係会社殿に心から御礼を申し上げたい。

第2章 各種鉄イオン供給装置の紹介

1. はじめに

第1章では、東北電力株式会社新仙台火力発電所殿における槽型鉄イオン供給装置について紹介した。鉄イオン供給装置は、その他にも種類がある。本章において鉄イオン供給装置の原理および各種鉄イオン供給装置の紹介を行う。

アルミニウム黄銅管が使用されている復水器や熱交換器の冷却管は、高流速で流れる海水の乱流により、金属表面の不動態皮膜（酸化皮膜）が破壊され、腐食が進行する。冷却管が腐食により開孔すると復水器や熱交換器の機能を損ない、発電設備などの運転に支障をきたすこととなる。

防食対策としては、電気防食および鉄イオン供給が併用されている。

電気防食は冷却管内表面に防食電流を供給することにより、電気化学的に腐食を抑制する方法である。しかし、冷却管は管径が細く、内奥部まで効果的な防食電流が届かない（**図1**）。そこで、鉄イオン供給による銅管表面の保護皮膜形成を行う技術が採用される場合が多い。

2. 鉄イオン供給の方式

従来、鉄イオン供給の方法は硫酸第一鉄という薬品を海水取水口から投与する方法が一般的であった。その量は0.5ppm×2時間/日×2週間の間に高濃度鉄イオンを間欠注入するものであったが、薬品投与に対する環境配慮や注入作業に人力が必要となるなどの問題点があった。そこで電解式による鉄イオン供給が行われるようになった。

2.1. 電解式鉄イオン供給の原理

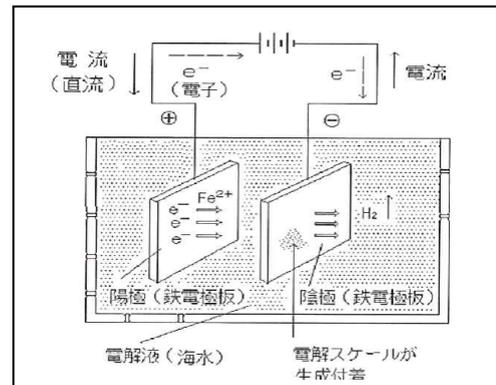


図2 電解式鉄イオン供給の原理

図2のような回路において海水の中で鉄電極板に直流電流を通電すると陽極部側の鉄電極板から鉄イオン Fe^{2+} が溶出する。さらに鉄イオンは陰極部側で生成された OH^- イオンと O_2 とが結合して水和酸化鉄 $FeOOH$ となる。これが冷却管内面に鉄皮膜として付着する。

一方、陰極部では海水中に含まれる Mg や Ca が電解スケールとなって析出する反応が起こる。電解スケールが過度に生成することを防止するために当社では通電電流のプラス、マイナスの極性を一定時間毎に切り換える極性変換回路を採用している。陰極部の電解スケールの成長が過大になる前に通電電流の極性を切り替えて陰極を陽極にし、スケール分を除去してしまう自己クリーニング効果を有している。また、極性変換によって2枚の鉄電極板が同じように溶解消耗するため、高効率の鉄電極寿命管理が可能となっている。

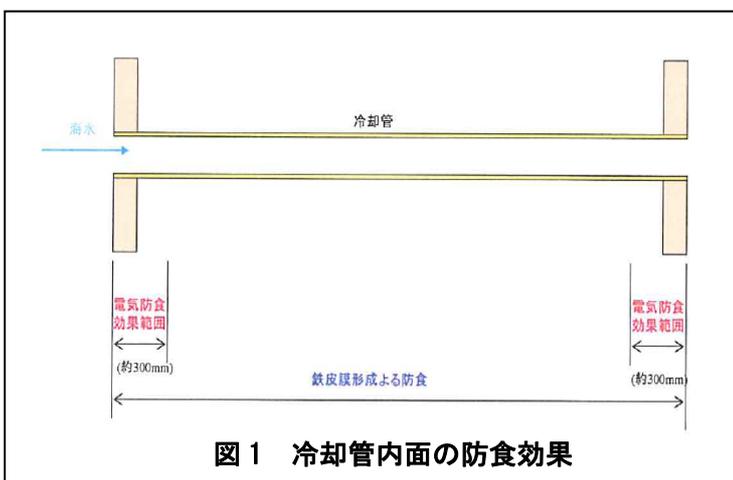


図1 冷却管内面の防食効果

2.2. 電解式鉄イオン供給の濃度

硫酸第一鉄の注入は高濃度間欠注入であるが、電解式鉄イオン供給は低濃度連続注入を基本とする。

一般的な仕様は、機器の開放清掃のあと初期皮膜形成濃度として0.03ppm×1ヶ月注入し、その後常用運転濃度として0.01ppmを連続注入する。硫酸第一鉄の場合の0.5ppmに比べて約1/20～1/50の濃度である。図3左から鉄イオン供給を長く行うほど腐食が減少することが分かる。

また、図3の右から0.5ppm×2h/日の高濃度間欠注入と0.03ppmの低濃度連続注入の効果はほぼ同等であることがわかる。

電解式鉄イオン供給における鉄イオン供給濃度の調整は、通電電流の調整により行う。常に一定の電流を供給することにより、鉄イオン供給濃度は一定に制御することができる。

鉄イオンの供給濃度は(1)式に示すように対象となる海水系の処理海水量に反比例し、通電電流に比例する。

また、鉄電極の消耗量は(2)式に示すように通電電流に比例する。

$$C = I \div (V \times Q) \quad (1)$$

$$W = I \times h \div Q \quad (2)$$

C : 鉄イオン供給濃度 (ppm)

I : 通電電流 (A)

V : 海水流量 (m³/h)

Q : 鉄の理論電気量 0.96 (A・h/g)

W : 鉄電極消耗量 (g)

h : 通電時間 (h)

このように積算電流計を用いて電流量を管理することで、鉄電極の取替え寿命の管理が可能となる。

2.3. 電解式鉄イオン供給装置の種類

鉄イオン供給装置は適用する対象機器に応じて4種類のシステムが商品化されている。(図4)



写真12 電解式鉄イオン供給装置の種類

(1) 槽型鉄イオン供給装置

電解槽を設け槽内で鉄電極を電解して生成した鉄イオンを供給する。鉄電極の交換時は海水本管から装置を切り離して作業することが可能であるため、プラントを停止する必要がない。装置の設計自由度が高く、あらゆる対象に適用が可能であり、4種類のうち最も優れたシステム性能を有する。一方、ポンプやストレーナなどの付帯設備および圧力計や流量計などの計装機器が必要となりコストは高額となる。

(2) 複合型鉄イオン供給装置

復水器や熱交換器の水室内に鉄電極を設置するシステムである。安価であるが鉄電極取替の際、プラントを停止する必要がある。

(3) 浸漬型鉄イオン供給装置

取水口に鉄電極を直接浸漬するシステムである。仮設備として適用される場合が多く安価である。

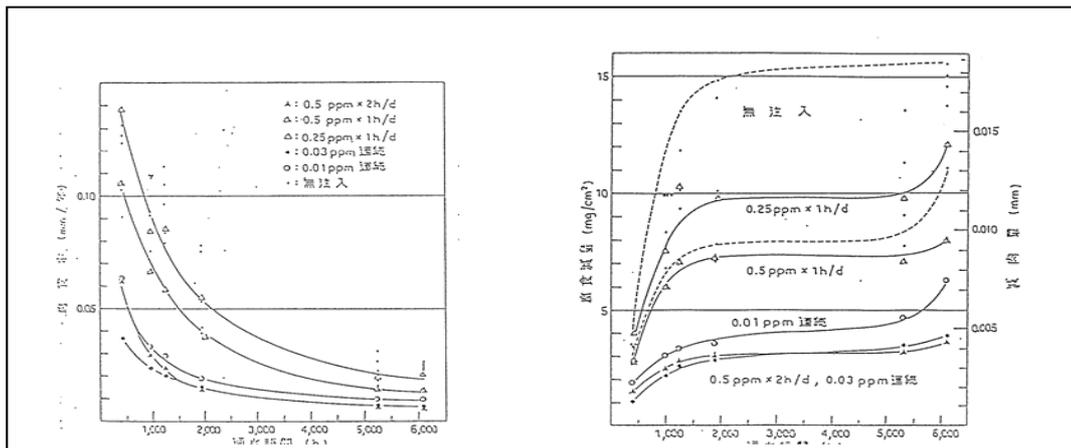


図3 鉄イオン供給濃度と腐食量の関係

(4) 挿入型鉄イオン供給装置

海水取水管の中に鉄電極を挿入するシステムであり、小型の熱交換器に適する。比較的安価であり、最も適用実績が多い。鉄電極取替の際、プラントを停止する必要がある。

(5) 移動式鉄イオン供給装置

移動用車両に槽型鉄イオン供給装置一式を搭載した装置である（写真12）。複数のユニットを移動しながら鉄イオンの供給を行う。設置は、対象ユニット近傍のスペースに自走して据付ける。海水配管への接続は耐圧のフレキシブルホースで取り合い、電源はAC200Vを仮設分電盤から受電する。鉄イオン供給は0.06ppm程度の濃度で約1ヶ月供給し、順次ユニットを移動していく。供給は半年に1回程度の冷却管開放清掃後を目安に行う。本装置は据付後に濃度調整し、運転を開始すると無人で稼働することになる。万一の故障や停電などのトラブルに対

応するために遠隔監視装置を備えている。遠隔監視装置は運転状態を常時記録するとともに、異常が認められた場合、携帯電話やパソコンにEメールで警報を発報するシステムとなっており、客先および当社の各担当者に同時に届き、緊急対応を迅速に行うことが出来る。また、運転情報を記録するデータロガー機能も有し、事務所にいながら運転状況を確認することが可能である。

《参考文献》

- ・復水器管の耐食性における鉄イオンの連続注入と間欠注入との関係／安藤秀一、山口誼、恩田勝弘、佐藤史郎、野世溪清
- ・新しい熱交換器細管内面の防食システム（移動式槽型電解鉄イオン供給装置（移動式NAFES）の紹介／(株)ナカボーテック 鈴木裕之、南正信

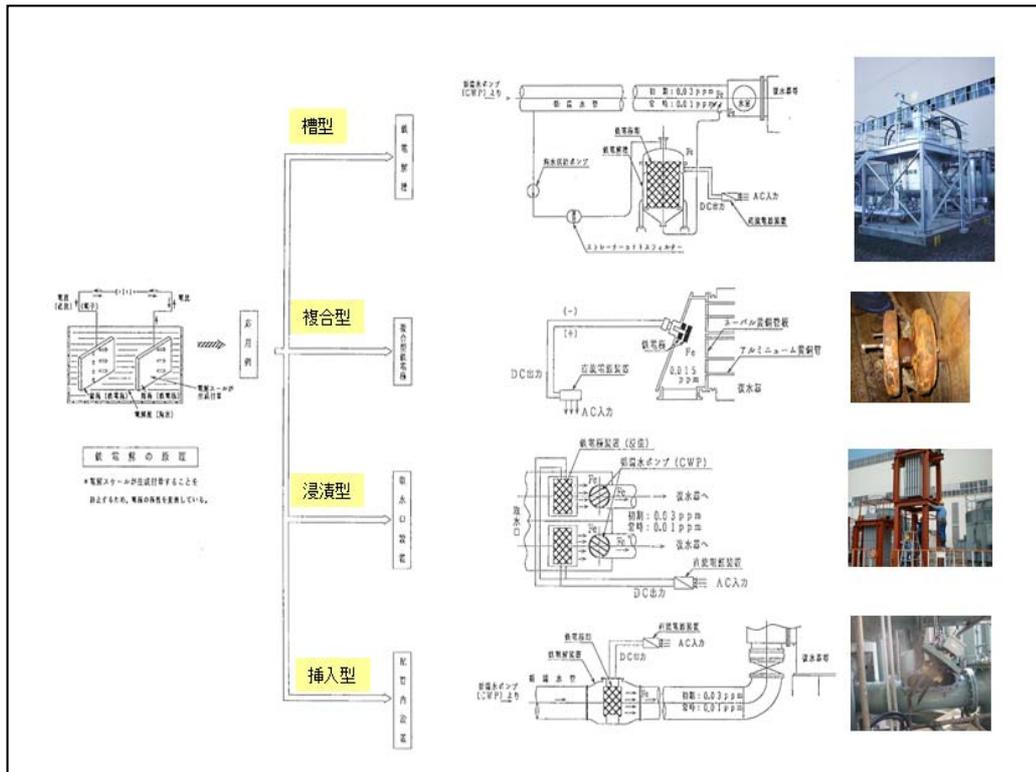


図4 移動式鉄イオン供給装置

全チタン製熱交換器への電気防食の適用

技術開発センター 八木 雄太

1. はじめに

発電所や化学プラント工場などでは多種多様な熱交換器が使用されており、重要な役割を果たしている。このため冷却水により熱交換器に腐食が生じ、機能や安全が低下すると大きな損害を受けることになる。そこで熱交換器にはさまざまな腐食対策が講じられている。近年は耐食材料による防食が多く、チタンやステンレス鋼が使用されている。特にチタンは常温の海水・淡水環境下では非常に耐食性に優れるため、他の腐食対策を講じなくてもよく、また密度が鉄系や銅系金属に比べ小さいことから、製造、設置、メンテナンスなどのコスト低減を目的に熱交換器への適用が増加している。従来の熱交換器においても冷却管の一部にチタンが用いられることはあったが、最近は冷却管と管板をすべてチタンにした全チタン製熱交換器が登場している。ただし、「全チタン製」とは冷却管と管板のみを指し、胴体や水室は従来どおりライニング鋼材が用いられている。そのため全チタン製熱交換器はチタン以外の金属に異種金属接触腐食が生じる危険性がある。もし胴体や水室のライニングが損傷した場合、露出した鋼材の面積に対しチタンの面積が非常に大きくなる。また、海水中においてチタンの電位は鉄の電位より非常に貴であり電位差が大きくなる。大きな面積比と電位差によりライニング損傷部の鋼材には激しい異種金属接触腐食が生じてしまう。そこで本稿では全チタン製熱交換器の腐食対策として電気防食を適用する場合の目的、注意事項などを述べ、弊社で初めて全チタン製復水器に電気防食を適用した事例について紹介する。

2. 電気防食が適用される熱交換器

2.1. 熱交換器

熱交換器は温度の異なる二つの流体間で熱を交換するために使用される機器で物質の加熱や冷却をおこなう目的で用いられる。復水器などの産業用の大型設備から自動車のラジエータなどの小型部品までさまざまな種類がある。熱交換器の中で電気防食の適用事例が多いのは産業用で、発電所の復水器や化

学プラント工場の化学物質製造用の熱交換器がある。また熱交換器は構造の違いによってプレート式、シェル&チューブ式(単にチューブ式ともいう、以下チューブ式と称する)、フィンチューブ式などに分類されるが、電気防食の対象となるのはチューブ式が圧倒的に多い。

2.2. チューブ式熱交換器の構造

図1にチューブ式熱交換器の模式図、図2に熱交換の仕組みを示す。チューブ式熱交換器は胴体、水室、折返水室、管板、冷却管などの部品で構成される。数百から数千本の冷却管を二枚の管板で固定し胴体の中に収め水室で蓋をする構造である。構成部品の材質は胴体、水室および折返水室はライニング鋼、管板および冷却管は黄銅と一部にチタンが使用されているものが一般的である。ただし近年は管板および冷却管がすべてチタンである全チタン製熱交換器が増加している。

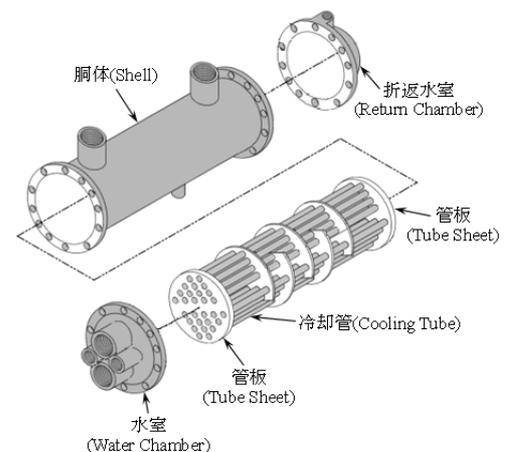


図1 チューブ式熱交換器の模式図

熱交換の仕組みは復水器などの冷却用熱交換器の場合、冷却水は水室にある入口配管から取り込まれ冷却管内側を通り折返水室で折り返されて再び冷却管内側を通り水室にある出口配管から排出される。冷却水が複数回折り返されるタイプや逆に一度も折り返されないタイプもある。一方、被冷却体(プロセス流体)は胴体にある入口配管から取り込まれ冷却管外側を通り胴体にある出口配管から排出される。

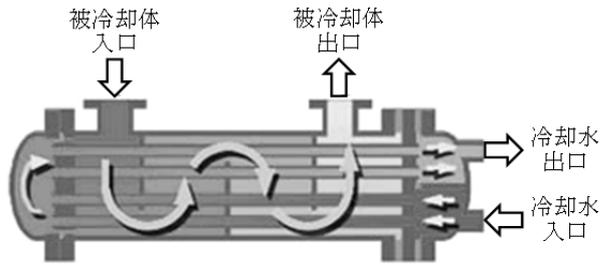


図2 チューブ式熱交換器の熱交換の仕組み

3. 全チタン製熱交換器における電気防食の目的と注意事項

全チタン製熱交換器において電気防食の対象となるのは水室などに使用されている鋼材である。一般的に海水中で鋼材を電気防食する場合、鋼材の電位を防食電位である -770 mV vs. SCE より卑に分極する。鋼材の電位を -770 mV vs. SCE より卑にすることは鋼材と電氣的に接触しているチタンも同程度の電位に分極されることになる。しかしチタンは常温の流動海水中において電位が -750 mV vs. SCE より卑になると水素脆化する可能性がある⁽¹⁾。水素脆化とは原子状水素が金属内部に吸蔵されると引張強度や硬さに変化はないが伸びや絞りなどの延性が著しく低下する現象である⁽²⁾。脆化しているときに引張応力が加わると割れが発生してしまう。つまり全チタン製熱交換器においては鋼材を防食電位まで分極することができない。そのため鋼材の通電電位を自然電位付近($-500\sim-600\text{ mV vs. SCE}$)に維持し、異種金属接触腐食を防止することが電気防食の目的となる。つまり鋼材の自然腐食は許容することになる。全チタン製熱交換器の電気防食においては電位を正確に制御する必要があるため外部電源方式の電気防食システムの適用が絶対条件となる。ただし外部電源方式の場合、電食について注意が必要となる。絶縁して設置された配管、各種センサなどが腐食する場合は電食の可能性がある。特に全チタン製熱交換器においては電気防食の電流が大きくなる傾向があるため電食の発生確率が高くなり腐食量も大きくなると思われる。電食を防止するためには①防食対象と導通させる、②流入する電流を低減させるという二つの方法がある。①はケーブル線などで防食対象に接続すればよく、②は絶縁性の高いライニングを施せばよい。近年はライニングのないステンレス鋼

管を熱交換器に接続することが多いが、この場合はステンレス鋼管と防食対象を絶縁せず必ず導通させなければならない。また各種センサも防食対象と導通させる必要がある。

4. 全チタン製熱交換器の電気防食設計

外部電源方式の電気防食システムの設計においては直流電源装置の定格出力、通電電極の数量・配置を算出・決定する。直流電源装置の定格出力電流は、防食対象面積・塗装はく離率・所要防食電流密度などから計算される防食電流とロス面積・ロス電流密度から計算されるロス電流より決定される。通電電極の数量・配置は直流電源装置の定格出力電流と電流分布より算出・決定される。全チタン製熱交換器の場合、所要防食電流密度の設定、ロス電流の算出がもっとも重要となる。所要防食電流密度とは対象金属を防食するために必要な電流密度のことで金属の種類・環境条件によって適切な値を設定しなければならない。特に防食対象が流動環境下にある場合は溶存酸素の供給速度が増加するため静止水中より大きな電流密度を設定する必要がある。流動環境下における所要防食電流密度の設定方法は複数提案されている^{(3),(4),(5)}が、熱交換器においては(1)式^{(6),(7)}を採用することが多い。

$$i_{p(\text{flow})} = 73 + 144 \times V^{0.4} \quad (1)$$

ここで $i_{p(\text{flow})}$ は流動環境下における所要防食電流密度、 V は流速である。また、ロス電流とは防食対象以外の金属に流入してしまう電流のことである。ロス電流を適切に算出しないと直流電源装置の電源容量が必要以上に大きくなり低効率、不経済となってしまう。全チタン製熱交換器においてはチタン管板およびチタン冷却管に流入する電流がロス電流となるが、冷却管へ流入する電流がロス電流の大部分を占める。そのため冷却管内面の電流到達距離の設定が重要となる。冷却管内面の電流到達距離は(2)式より算出する。

$$L = \frac{1}{2} \times \left\{ D + \left(\frac{DR_p}{4\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \times \cosh^{-1} \left(\frac{E_x}{E_m} \right) \right\} \quad (2)$$

ここで L は電流到達距離、 D は管内径(直径)、 R_p はチタンの分極抵抗、 ρ は環境抵抗率、 E_x は管端部の電位変化量、 E_m は L 点での電位変化量である。

(2)式は塗装鋼管内面における陽極の取付け間隔を算出する式(Morgan式)⁽⁸⁾を変換した式で、管内面の電流到達距離の算出に流用している。また、ロス電流密度は金属によりそれぞれ設定されるが、チタンの場合は電位を-600 mV vs. SCE までカソード分極するのに必要な電流密度として 0.4 A/m^2 を用いる。この電流密度は経験値である。

5. 全チタン製復水器への電気防食システムの適用

5.1. 対象設備

対象設備は海外 80 万 kW 石炭火力発電所でリプレイスされた発電ユニット内にある全チタン製復水器である。本発電所は熱帯気候に立地され、6月から9月に雨が非常に多く、一年をとおして日平均気温が 20°C 以上、平均湿度が 70% 以上という高温多湿地域にある。復水器はタービン建屋の地下一階から地上一階にまたがって設置され、**図 3** に示すとおり Condenser(A)、Condenser(B)の二つのユニットからなる。各ユニットには Line(A)、Line(B)の二つの冷却ラインがあり、冷却管および管板はチタン、水室はゴムライニング鋼である。プロセス流体は蒸気、冷却水は海水で一基あたりの冷却水流量は $1070 \text{ m}^3/\text{min}$ である。

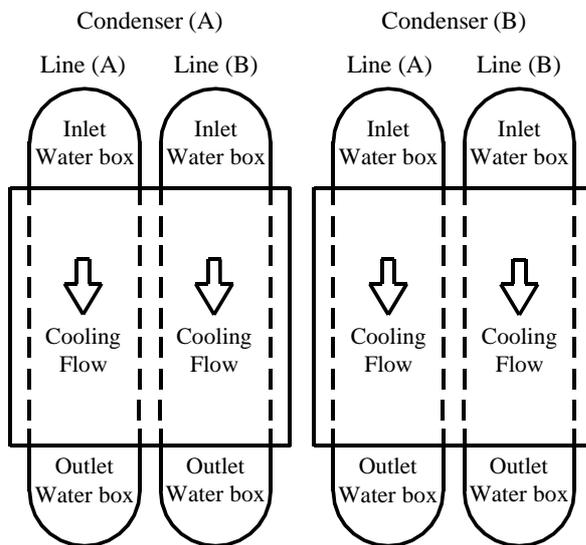


図 3 海外 80 万 kW 発電所の全チタン製復水器の模式図

5.2. 電気防食システムの構成

本復水器の電気防食システムには外部電源方式を採用しており、通電電極、照合(参照)電極、排流端子、電位測定端子および直流電源装置などから構成されている。復水器は各水室で流速、水温などが異

なるため水室ごとに制御する必要がある。本システムにおいては制御ユニットを水室数とおなじ 8 つに分割している。**図 4** に電気防食システムの模式図を示し、以下に各部品の用途、仕様、特徴などを示す。

5.2.1. 通電電極

防食電流を供給するための電極で防食対象の対極となる。チタンに白金めっきした難溶性電極を用いた。防食対象に絶縁して取り付け、直流電源装置の正極に配線した。一本当たり 10 A 連続出力して寿命は 5 年である。

5.2.2. 照合(参照)電極

防食対象金属の電位を測定するためのセンサで防食対象に絶縁して取り付け、電位測定装置(電位差計)の負極に配線した。海水中において安定した電位(-1000 mV vs. SCE)を示す耐久性のある亜鉛照合電極を用いた。

5.2.3. 排流端子および電位測定端子

防食対象にケーブル線を取付けるための接続部品で防食対象に導通して設置した。排流端子からのケーブル線を直流電源装置の負極に配線し、防食対象と通電電極の回路を形成させた。また電位測定端子からのケーブル線を電位測定装置(電位差計)の正極に配線し、防食対象と照合電極の回路を形成させた。

5.2.4. 直流電源装置

本システムにおいては 8 つの制御ユニットを持ち、すべての制御ユニットの定格出力を $30 \text{ V} \times 100 \text{ A}$ とした。電位を測定しながら、その電位が一定となるよう出力電流を自動で調整する定電位自動制御を採用している。また照合電極自動選択機能により二本の照合電極のうち貴な電位が測定された照合電極を自動で選択し、制御用照合電極に切替えることができる。制御ユニットと分離された電位監視装置が搭載されており、電位を常時監視し、電位が所定の電位範囲から逸脱した場合は警報が発令される。また通電電極の限界発生電流(10 A/本)を超えた場合またはユニット定格出力電流(100 A/ユニット)を超えた場合にも警報が発令され、同時に異常の発生した通電電極またはユニットを自動で停止させることができる。高温多湿環境を考慮し、温度センサ付きクーラーおよび湿度センサ付きスペースヒータを設置し、筐体の保護等級は IP52 とした。

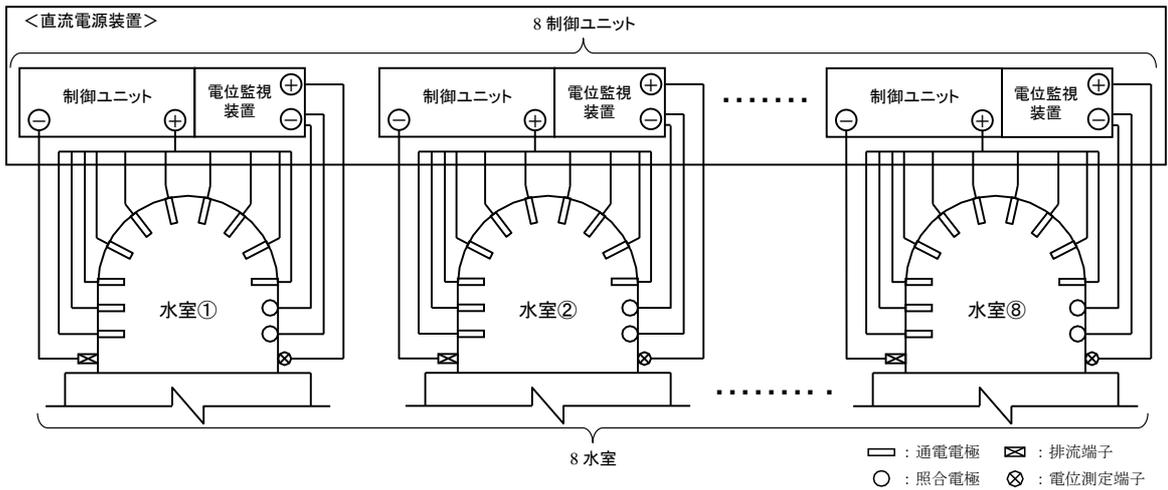


図4 全チタン製復水器に適用された外部電源方式電気防食システムの模式図

5.3. 電気防食システムの健全性、設計の妥当性および防食効果の確認

5.3.1. 気防食システムの健全性

電気防食システムの設置完了後、復水器が通常運転している状態で機能確認試験、シーケンス試験(動作試験)、性能試験を実施した。機能確認試験では絶縁抵抗測定、配線接続チェック、各通電電極の発生電流測定、出力電流の変化に対する通電電位の追従性確認などにより各部品の機能および部品間の接続に問題がないことを確認した。シーケンス試験では中央制御室からの起動信号を直流電源装置が受信したとき電気防食システムが正常に起動することを確認した。また、各種異常(ブレーカーのトリップ、ヒューズの溶断、通電電極の不良、電位異常など)を模擬したときに警報が直流電源装置に表示され、同時に中央制御室に送信されることを確認した。性能試験では手動運転時において定電圧制御により定格電流(100 A)が流れることおよび自動運転時において設定電位に対し通電電位が±10 mV以内に定電位制御されることを確認した。

5.3.2. 防食効果および設計の妥当性

(a) 電位

全チタン製熱交換器の場合、異種金属接触腐食が防止され、チタンが水素脆化しない電位範囲に防食対象の電位が維持される必要がある。本復水器においては水素脆化についてより安全を期して-700 ~ -500 mV vs. SCE を電位範囲基準とした。図5に電気防食システムの運転を開始してからの防食

対象の電位の経時変化を示す。運転開始から約1ヶ月間は-700 mV vs. SCE より卑を示すことがあったが、設定電位を微調整することにより、すべての水室において電位を電位範囲基準内に制御することができた。チタン冷却管および管板を水素脆化させず、鋼製水室の異種金属接触腐食を防止することができているといえる。

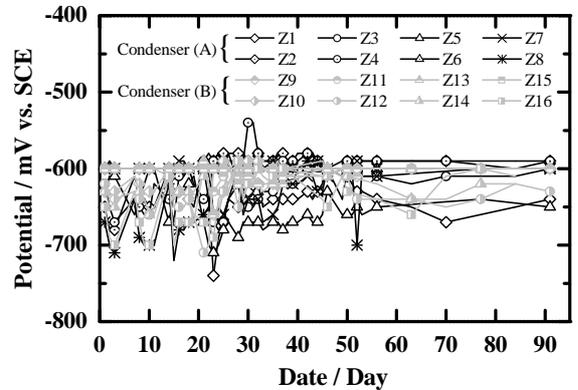


図5 電気防食システム運転時の防食対象の電位の経時変化

また、図6にZ13 照合電極およびZ14 照合電極で測定された電位の経時変化を示す。1 から20日目まではZ13、21 から46日目まではZ14、47 から85日目まではZ13で制御されていることがわかる。これは貴な電位に測定された照合電極が自動的に選択され、制御用照合電極が切り替わっていることを意味する。すべてのユニットにおいても照合電極が自動的に切り替わっており、照合電極自動切替機能が正常であることが確認された。

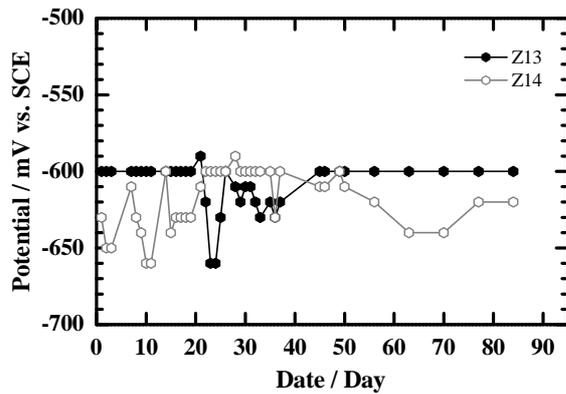


図6 電気防食システム運転時のZ13およびZ14照合電極で測定された電位の経時変化

(b) 出力電流

図7に電気防食システムの運転を開始してからの出力電流の経時変化を示す。出力電流は大幅な増減を繰り返している。チタン表面の汚れ、水温の上昇などによりチタン電位が貴化する^{(9),(10),(11)}場合は出力電流が増加していると考えられる。一方、チタン表面の清浄化、水温の低下などによりチタン電位が卑化する場合は出力電流が低下していると考えられる。出力電流が増減することにより、防食対象の電位がほぼ一定に維持されるため、定電位自動制御が正常に機能していると判断できる。また出力電流が直流電源装置の定格出力を超えていないことから電気防食設計が妥当であったといえる。

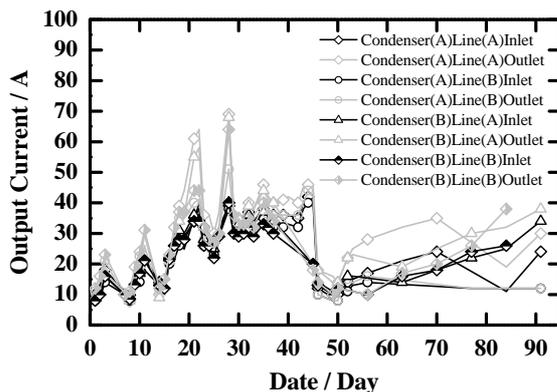


図7 電気防食システム運転時の出力電流の経時変化

5.4. 今後の点検およびメンテナンス

約3ヶ月間の運転データから良好な防食状態を維持していることが確認された。今後も運転データの測定を継続する予定である。また、現地は高温多湿環境であり電気防食システムの各装置・部品の早期劣化も懸念されるため定期的なメンテナンスも必要

であると考えている。

6. おわりに

全チタン製熱交換器であっても複数の防食法を併用することによりメンテナンスの効率化、LCCの低減などを達成することができると考えられる。われわれ防食技術者の使命は設備のオーナー、設計者、施工者などに対し、もっとも効果的で経済的な防食法およびその組合せを提案し施工することであると考える。今後もこの使命を達成できるように邁進していきたい。

参考文献

- (1) 正村克身：チタニウム・ジルコニウム、No.2、Vol.40(1992)
- (2) 田村博、石原政男：溶接学会誌、No.6、vol.33(1964)
- (3) (財)沿岸技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル、p77(2009)
- (4) W. Von. Baeckmann, W. Schwenk, W. Prinz : Handbook of CATHODIC CORROSION PROTECTION Third Edition、p394
- (5) K.G. Compton、J.S. Snodgrass、A.M. Reece、R.H. Rice : CORROSION、22-24、No.71(1970)
- (6) 吉川太、下平昌兵、河野幸彦、白水司、浅見徹、曾根幸宏：腐食防食'88講演集、p157-160(1988)
- (7) (社)日本防錆技術協会：防錆防食用語辞典、p211
- (8) John H. Morgan, CORROSION, Vol.15, No.8, 417(1959)
- (9) 森岡進、梅園昭巳：日本金属学会誌、No.7、Vol.20(1956)
- (10) 佐々木英次：Zairyo-to-Kankyo、475-480、Vol.46(1997)
- (11) 鷲頭直樹、升田博之、小玉俊明：Zairyo-to-Kankyo、330-333、Vol.50(2001)

※ 本稿は配管技術研究協会誌VOL56. No.1に掲載された内容を一部加筆・修正して転載した。

NAKABOH REPORT

No.51, 2016 年 12 月 2 日発行

編集発行人 篠田 吉央

(非売品, 無断転載を禁ず)

発行所 株式会社ナカボーテック

技術管理部

〒104-0033

東京都中央区新川 2 丁目 5 番 2 号

Tel. 03-5541-5826

Fax. 03-3555-9300

©2016 NAKABOHTEC CORROSION
PROTECTING CO., LTD.



株式会社 **ナカボーテック**
NAKABOHTEC CORROSION PROTECTING CO., LTD.