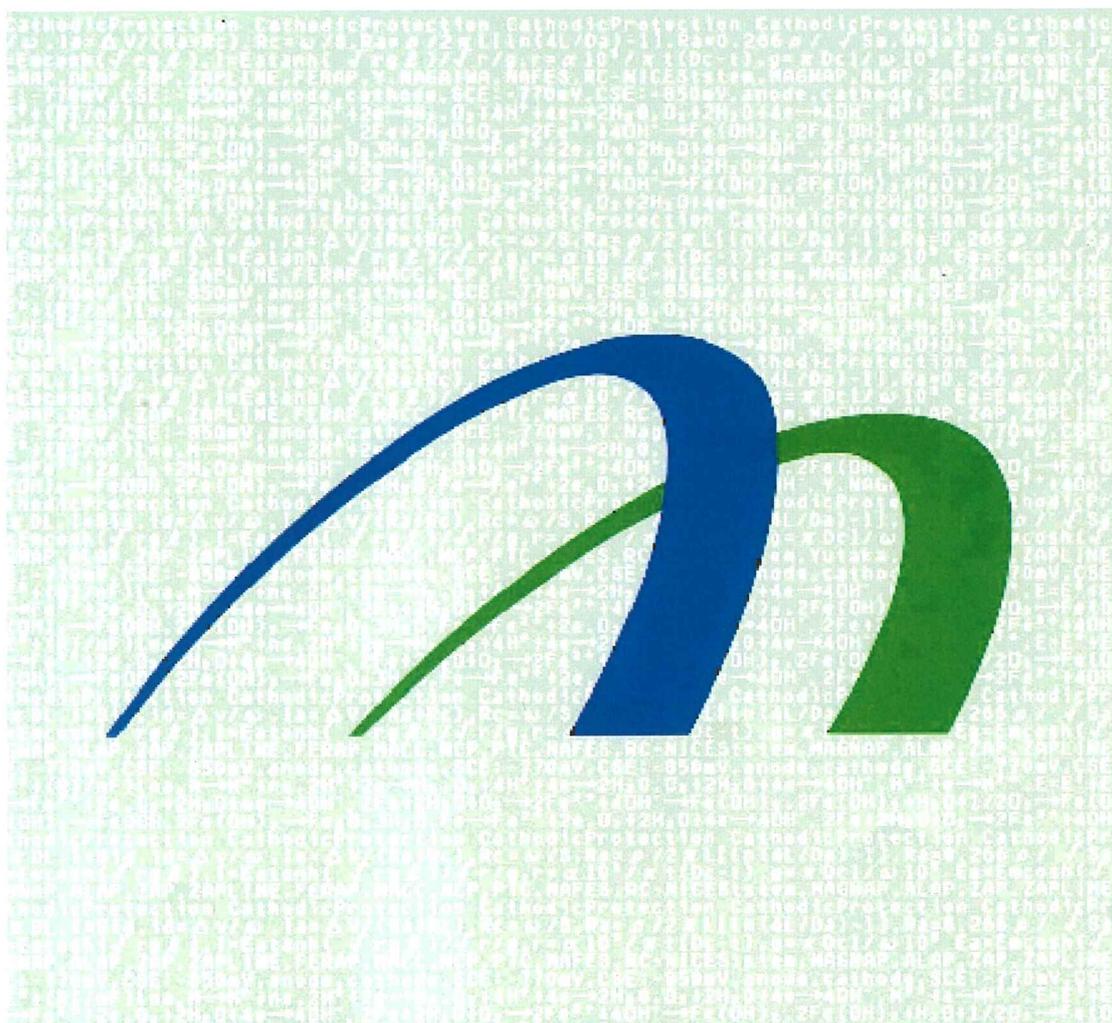


NAKABOH

REPORT

2017
No.52



想像にチャレンジして社会貢献する



株式会社 **ナカボータック**

NAKABOHTEC CORROSION PROTECTING CO. LTD.

— 目 次 —

● 卷頭言

..... 1

技術管理部 篠田吉央

● 技術報告

《事例 1》

富山ライン建設工事における電気防食装置設置工事 2

東京支店 田崎義浩

《事例 2》

コンクリート中鉄筋の電気防食効果に関する検討 8

技術開発センター 高久豊広, 大谷俊介, 望月紀保, 若林徹
事業開発部 小林浩之

巻頭言

2017年はものづくりの信頼揺らぐ年でした。日本を代表する自動車や金属素材メーカーの不正行為が報道されましたが、決して他山の石としてはなりません。電気防食・被覆防食業界も初心に帰り、一つ一つの手順を改めて確認し、マニュアル化されている部分の意味も深く考えて業務を成し遂げる必要があります。これは、安全・品質・営業・開発・製造・設計・工事の全てに共通する認識だと痛感します。

物事慣れてくると変化のない事象は省きがちです。しかし、先人達が何故この過程を変わず確認してきたのか、今一度思い起こす必要があると考えます。こうした地道な弛まない努力があって、企業の信頼は保たれるのだと思います。

社会資本の維持延命に電気防食・被覆防食技術が採用されるためには、我々も不断の地道な努力を重ねていく覚悟です。本号では真面目に実直に電気防食工事に立ち向かった工事の他、電気防食の効果について実験して深く考察した研究について、下記ご紹介します。

1. 国内最長の埋設高圧配管電気防食を、各種工程・検査測定に注意深く気を配りながら完成させた工事
2. 塩害を受けたコンクリート中の鋼材の電気防食効果について、地道に実験的検証を行った研究報告

なお、2017(平成 29)年度の学協会における对外発表は下表に示すように 20 件です。電気防食技術の基礎となる外部電源用電極の消耗研究も行いました。今後とも腐食防食の技術経験と研究に真面目に愚直に取り組み、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 学協会での口頭発表件数 : 弊社発表件数 / 連名含む件数

年度	腐食系 腐食防食学会 防錆技術協会	建設系 土木学会 コンクリート工学	その他 材料・電気化学 表面技術 etc	国際学会	計
2017(H29)	8 / 10	2 / 4	3 / 4	2 / 2	15 / 20
2016(H28)	4 / 5	4 / 6	5 / 10	5 / 7	18 / 28
2015(H27)	4 / 8	2 / 4	2 / 2	0 / 0	8 / 14
2014(H26)	6 / 6	3 / 7	6 / 7	0 / 0	15 / 20
2013(H25)	7 / 7	6 / 7	1 / 2	7 / 9	21 / 25
2000~2012 (期間年平均)	71 / 115 (6 / 9)	15 / 24 (1 / 2)	7 / 9 (1 / 1)	4 / 5 (0 / 0)	97 / 153 (7 / 12)
計	100 / 151	32 / 52	24 / 34	18 / 23	174 / 260

文責 技術管理部 篠田吉央

富山ライン建設工事における電気防食装置設置工事

東京支店 田崎義浩

1. はじめに

本報で報告する富山ライン（図1参照）は、新潟県糸魚川市から富山県富山市までの約103kmの高圧ガス導管である。日本国内で最長の高圧ガス導管（富山ラインを含めて約1,500km）を所有・管理している国際石油開発帝石株式会社殿（以下、INPEX殿）が建設した。富山ラインの施工は、2012年4月の本格的な工事開始から2016年6月の工事終了までの4年以上の長い歳月をかけて建設された。

これまで富山県内には高圧ガス導管は無く、富山市内の都市ガス事業者である日本海ガス株式会社殿では、天然ガスを液体にした液化天然ガス（LNG）をタンクローリーで輸送していた。そして岩瀬工場で液化天然ガスを気化させて天然ガスに戻してから、各家庭、工場等に供給していた。

今回の富山ラインの完成により、INPEX殿が新潟県長岡市の『南長岡ガス田』で生産している天然ガスを直接供給することが

可能となる。また、INPEX殿が2013年に新潟県上越市に建設した『直江津 LNG 基地』で、海外から輸入した液化天然ガスを、LNG基地内で気化した後、天然ガスとして供給することも可能となる。富山ラインは、現在、日本海ガス株式会社殿の他に、アサヒ飲料株式会社・北陸工場殿、日産化学株式会社・富山工場殿等にも天然ガスを供給し、今後も富山ライン沿線の各事業者への天然ガス供給が期待される。

将来においても安定的に天然ガスを供給するためには、自然腐食、電食等の腐食からガス導管を守る必要がある。弊社は長年、電気防食法を使用して埋設鋼管の腐食防止対策を実施しており、新設された富山ラインにおいても、実績と信頼性がある深埋再生方式による外部電源装置を4箇所設置した。

富山ラインで実施した工事等の概略について報告する。



図1 富山ライン概略路線図

2. 工事概要

2.1 目的

富山ラインは、バルブステーション等の施設内の露出配管以外、全て埋設配管となる。埋設配管部は、腐食防止のためにポリエチレン被覆鋼管を使用しており、腐食要因となる水、酸素（空気）の遮断を行っている。ポリエチレン被覆が完全であれば、腐食は防止できるが、ガス導管敷設時の施工管理を確実にしても、現場塗覆装箇所等において塗覆装の欠陥発生リスクがある。また、経年的な塗覆装劣化や他工事等による塗覆装損傷等も考えられる。これらの塗覆装の劣化・損傷があった場合、土壤中に埋設されたガス導管には自然腐食が発生する。さらに、富山ラインは6箇所（富山地方鉄道・軌道電車5箇所、富山地方鉄道・路面電車1箇所）の直流電鉄の軌条横断部があり、電食による集中腐食も懸念される。

よって、富山ライン埋設配管部の自然腐食および電食防止を目的として、深埋再生方式（防食電流供給用電極を地中深い位置に設置し再生可能な工法）による外部電源装置を設置した。

2.2 防食対象

防食対象は、土中埋設部の配管外面で、総延長は冒頭記載の通り約103 km、うち20B配管が91.511 km、12B配管が10.532 kmとなる。配管延長が非常に長く、外部電源装置を4箇所設置することになる。よって、迷走電流の影響範囲の限定化、および今後の電気防食管理の簡略化を目的として、地域毎のブロック化による電気防食管理とした。各バルブステーション（以下、VS）は電氣的導通を目的としてボンドを行っているが、一部のVSにおいてはボンド箇所もOFFしてブロック化を行った。ブロック化一覧表を表1に示す。

表1 ブロック化一覧表

ブロック名称	防食対象区間	配管径	配管延長
上路外電ブロック	田海 VS 下流 ~ 入善 VS 上流	20B	38,491.03m
魚津外電ブロック	入善 VS 下流 ~ 魚津 VS 上流	20B	15,270.02m
上市外電ブロック	魚津 VS 下流 ~ 塚原 VS 上流	20B	35,318.38m
小泉外電ブロック	塚原 VS 下流 ~ 小泉 VS	20B	2,432.92m
	塚原 VS 下流 ~ 日本海ガス(株)岩瀬工場	12B	10,531.97m

3. 工事内容

3.1 ボーリング工事

今回設置した外部電源装置は、4箇所共に深埋再生方式であり、電気防食工事の主工事はボーリング工事であった。ボーリング工事は10 m弱のボーリング櫓とボーリングマシンを使用して、ボーリングロッドの先端に地盤を掘削するためのトリコンビットを取り付けて掘削を行った。ボーリング掘削状況写真を写真1に示す。

各ボーリング箇所において規定深度を掘削後、土壤抵抗率を確認するために電気検層を実施し、電気抵抗率から定格出力電流が通電可能

であることを確認した。



写真1 ボーリング掘削状況

3.2 電極装置設置工事

電気検層後、ボーリング孔内に電極装置を設置した。電極装置設置フローを図2に示す。また、通電用電極で使用したNST-5型の写真を写真2に、電極装置施工図（上路外電）を図3に示す。さらに、各外部電源装置施工結果について表2に示す。

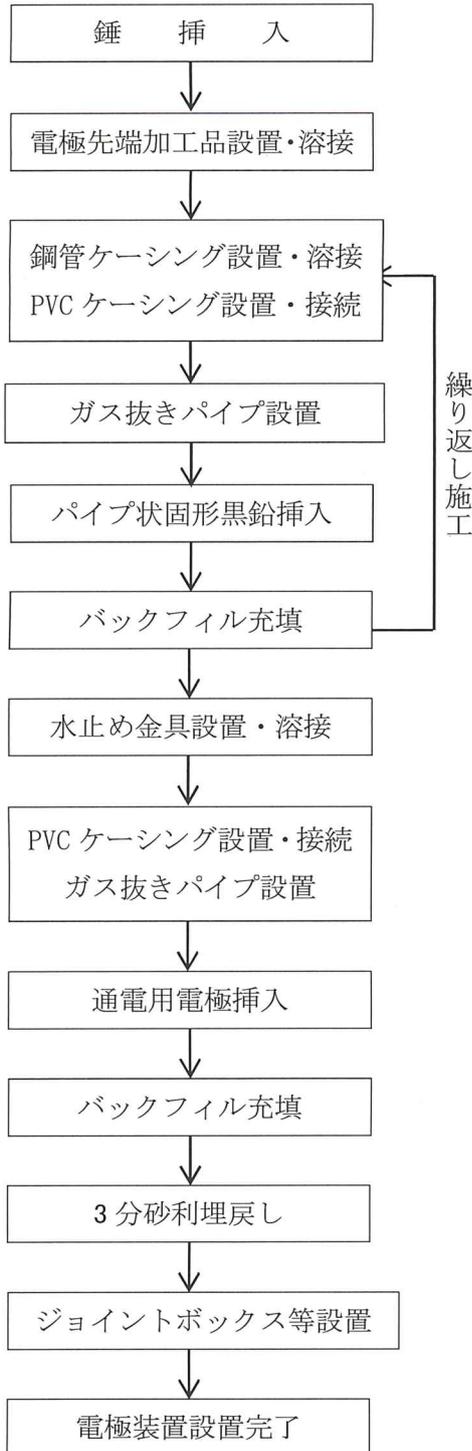


図2 電極装置設置フロー



写真2 通電用電極 (NST-5型)

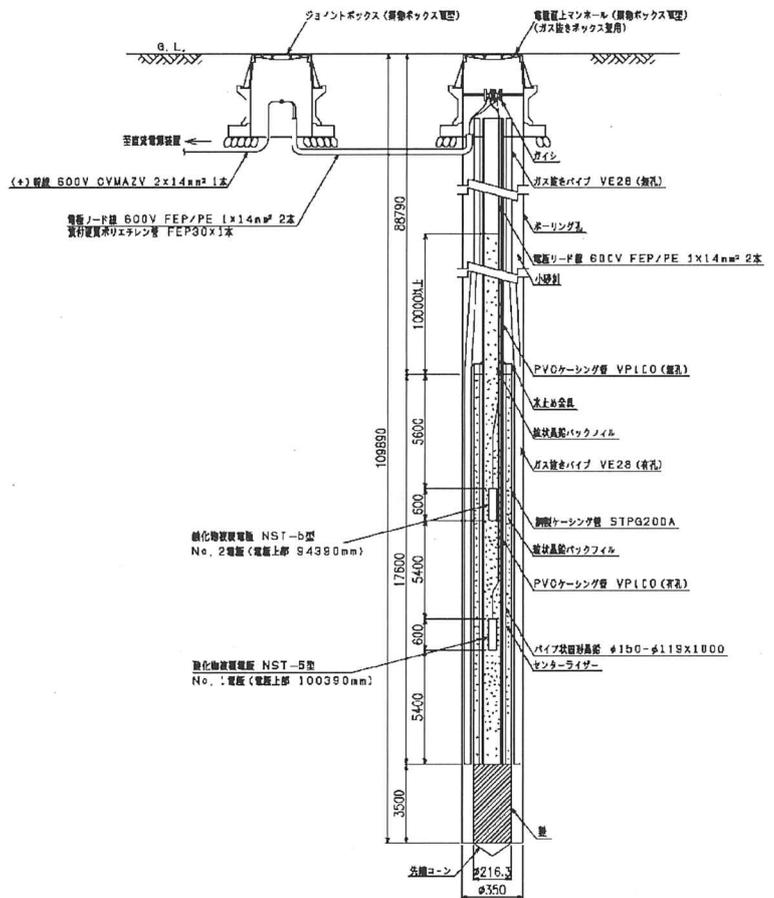


図3 電極装置施工図

表2 各外電部電源装置施工結果

	上路外電	魚津外電	上市外電	小泉外電
直流電源装置容	60V×10A×1回	60V×5A×1回路	60V×10A×1回	60V×5A×1回路
通電用電極型式	NST-5型	NST-5型	NST-5型	NST-5型
通電用電極本数	2本	5本	5本	2本
ボーリング径	φ350	φ350	φ350	φ350
深度	109.890m	141.600m	142.460m	109.830m
電極延長	17.6m	50.6m	56.1m	17.6m
錘延長	3.5m	1.0m	0.5m	5.0m

3.3 電気工事

前項で設置した電極装置の電極ケーブルを、接続ボックスを経由して、VS内のテレメーター室（電気室）まで配線配管した。また、各VS建屋内露出配管に電気溶接したターミナルのリード線を、防爆ボックスを経由してテレメーター室まで配線配管した。さらに、各VS内埋設配管近傍に設置した亜鉛照合電極リード線とプローブリード線を接続ボックスを経由してテレメーター室内まで配線配管した。

テレメーター室内の所定の位置にアンカー用の孔をあけ、ケミカルアンカーを埋め込んだ。ケミカルアンカー硬化後、直流電源装置を設置し、配線した各リード線を直流電源装置に接続した。直流電源装置設置状況写真を**写真3**に示す。



写真3 直流電源装置設置状況

3.4 交流誘導対策工事

当ラインは、高圧送電線や北陸新幹線と一部並行して埋設されているため、ガス導管への交流誘導が懸念された。

よって、埋設管路線部の交流誘導対策として、路線上にMg合金陽極合計57本を分散埋設設置した。道路上に配置される各ターミナルボックス内にMg合金陽極リード線を収納し、ターミナルボックス内にて、埋設管に溶接取付したターミナルリード線と接続した。

さらに、各VS内には避雷針用のA種接地（接地抵抗10Ω以下）があることから、テレメーター室内に交流誘導低減器（コンデンサー内蔵：コンデンサーは直流電流を遮断するが、交流電流は通過できる電気部品）を設置し、交流誘導低減器を介してターミナルリード線とA種接地リード線を接続し、交流誘導対策を行った。

3.5 維持管理設備設置

電気防食の維持管理のために、約500m毎に管対地電位測定用のターミナル（埋設管に端子を溶接し端子からリード線を地表面まで立ち上げたもの）を設置し、ターミナルは本線に182箇所、支線に13箇所の合計195箇所設置した。また、軌条横断部や推進部等の深々度部、高圧送電線と北陸新幹線の並行部においては、亜鉛照合電極や埋設型プローブ、差込秤量型プローブ等（プローブ電流密度管理に使用）を、防食状態の維持管理の目的に設置した。

4. 完成測定結果

4.1 絶縁フランジ絶縁性、塗膜抵抗測定結果

各 VS や分岐バルブ等の絶縁フランジの絶縁測定を実施し、絶縁フランジの絶縁性が『良好』であることを確認した。絶縁不良があると電気防食の有効性が低減するからである。

その後、今回施工した富山ライン埋設ガス導管部の配管塗覆装の健全性を確認するため、外電ブロック毎に塗膜抵抗測定を実施した。測定結果より、全ブロックにおいて非常に良好な塗膜抵抗測定結果であることが確認された。

4.2 外部電源装置稼働状況測定結果

ガス導管の自然電位（電気防食を実施していない状態の電位）測定、亜鉛照合電極等の健全性確認、外部電源装置の稼働試験、防食効果確認試験等実施後、全測定点において防食状態となるように、外電ブロック毎に直流電源装置を調整し、各外部電源装置の稼働状況測定を実施した。外部電源装置稼働状況測定結果を表3に示す。

測定結果より、各外部電源装置において自動運転、手動運転で正常に稼働していることが確認された。

表3 外部電源装置稼働状況測定結果

ブロック名称	設定運転状況	出力状況	排流点管対地電位 (Vvs. CSE)
上路外電ブロック	自動運転・4.1	1.45V × 0.051A	-2.000V
魚津外電ブロック	自動運転・3.9	1.39V × 0.051A	-2.000V
上市外電ブロック	手動運転・2.9	11.3V × 1.925A	-5.870V ~ -6.070V
小泉外電ブロック	手動運転・2.7	6.2V × 0.346A	-2.990V ~ -3.040V

4.3 防食状態確認測定結果

外部電源装置稼働状況測定後、富山ライン全線における防食状態を確認するために、ブロック毎に防食状態確認測定を実施した。防食状態確認測定結果を表4に示す。

測定結果より、管対地電位は全測定点において客先防食管理基準（飽和硫酸銅電極 CSE 基準で-850mV よりマイナス側の値）を満足

していることを確認した。

また、直流腐食（自然腐食、電食）、過防食、交流腐食を一括して判定できるプローブ電流密度に関しても、プローブ電流密度管理判定値（表4の※印を参照）を満足していることを確認した。

以上のことより、富山ラインは全線において防食状態にあることを確認した。

表4 防食状態確認測定結果

ブロック名称	管対地電位 (Vvs. CSE)	プローブ流入直流電流密度平均値 (mA/cm ²)	プローブ交流電流密度平均値 (mA/cm ²)
上路外電ブロック	-1.710 ~ -2.210	0.012 ~ 0.288	0.005 ~ 0.701
魚津外電ブロック	-1.500 ~ -3.780	0.011 ~ 1.233	0.006 ~ 2.670
上市外電ブロック	-1.040 ~ -15.570	0.061 ~ 3.062	0.005 ~ 1.050
小泉外電ブロック	-1.160 ~ -4.260	0.020 ~ 0.836	0.003 ~ 0.930

※ プローブ電流密度判定基準は下記の通り。

I. プローブ流入直流電流密度 I_{DC} : $0.01\text{mA/cm}^2 \leq I_{DC} < 0.10\text{mA/cm}^2$ の場合

プローブ交流電流密度 I_{AC} : $I_{AC} \text{ mA/cm}^2 < 25 \times I_{DC} \text{ mA/cm}^2$

II. プローブ流入直流電流密度 I_{DC} : $0.1\text{mA/cm}^2 \leq I_{DC} < 4.0\text{mA/cm}^2$ の場合

プローブ交流電流密度 I_{AC} : $I_{AC} \text{ mA/cm}^2 < 7\text{mA/cm}^2$

5.謝辞

本工事を施工するにあたり、国際石油開発帝石株式会社、日鉄住金パイプライン&エンジニアリング株式会社の方々には多大なる御協力を賜りました。ここに記して心より感謝申し上げます。

2013年8月19日 SCMT3(第3回持続可能な建設材料・技術の国際会議)京都, 講演 e188 和訳版

コンクリート中鉄筋の電気防食効果に関する検討

高久豊広, 大谷俊介, 望月紀保, 小林浩之, 若林徹

概要

塩害コンクリート中鉄筋の電気防食効果判定基準として復極量100mV以上が適用されている。当該基準に対しては、酸化剤の供給に伴うカソード復極現象および鉄筋表面のpH上昇が大きく影響するため、溶存酸素の供給が良好な環境では適正な防食基準として機能するが、溶存酸素の供給速度が遅い湿潤環境などでは必ずしも適正な評価基準とはならない現象が生じている。

本研究では、溶存酸素の供給速度の遅い環境下における新たな防食効果評価基準について考察した。また、溶存酸素の供給が良好な環境下については、鉄筋表面の環境改善効果(pH上昇)という考え方に重点を置き、長期的視野に立った各種電気防食設計(通電方法)による防食効果についても検討した。

キーワード 電気防食、塩害、100mVシフト、復極量、防食基準

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の塩害対策の一つとして電気防食が注目されている。電気防食の効果確認は、**図1**に示すように通電状態の真の鉄筋電位(E_{io} :インスタントオフ電位)と通電オフ後の適当な時間を経過した鉄筋電位(E_{off})との電位差(復極量 ΔE)が100mV以上となることを基準としている¹⁾。

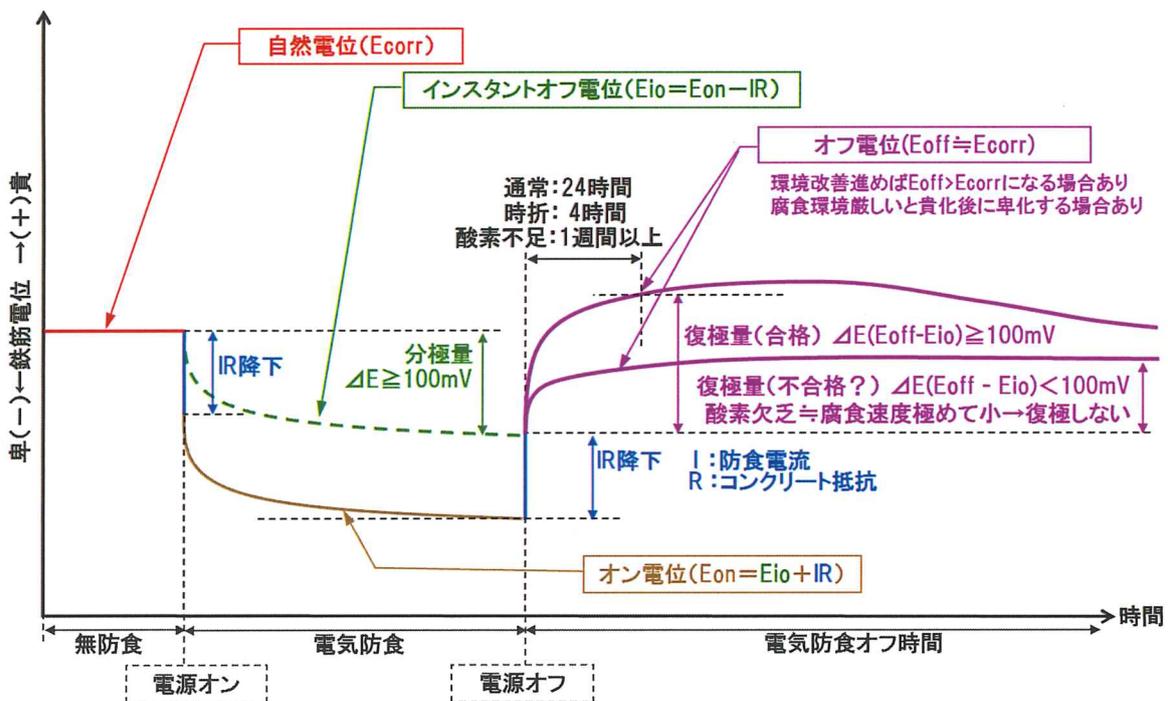


図1 電気防食時の鉄筋電位経時変化概念図(防食基準 100mVシフト概念図)

しかし、復極挙動は、鉄筋周囲環境や酸化剤の供給速度(カソード復極特性)に大きく依存するため、溶存酸素の供給速度が遅い湿潤環境などでは鉄筋が防食状態にあるにも拘らず 100mV 基準を満たさない場合がある。この場合、100mV シフトを満足させるため防食電流を増加させると、さらなる溶存酸素の供給速度の低下を引き起こし、復極速度がさらに低下・減少するため、さらに防食電流を増加させるという悪循環に陥る。過大な防食電流の供給は不経済であるばかりか、陽極充填モルタルの劣化や陽極周囲の水分枯渇による陽極性能の早期低下を招くことになる。適正な防食管理を行うためには鉄筋周囲の溶存酸素濃度供給速度を正確に把握することが重要との考え方から、鉄筋近傍に白金(Pt)電極を埋設し、その電気化学的特性を測定することで溶存酸素供給速度の評価を試みた²⁾³⁾。

一方、大気中のコンクリート構造物のように、鉄筋表面への溶存酸素の供給速度が大きい環境下では、電気防食の適用によって供給される防食電流により、鉄筋表面は(1)式で示すカソード反応が生じて pH の上昇や電気泳動による塩化物イオン濃度の低下が経時的に進行する。これを環境改善効果と呼ぶことにする。



電気防食の継続により Cl^-/OH^- の濃度比が低下し、環境改善効果が進展すると鉄筋の耐食性は向上(不動態化)し、初期に比べて復極量も大きくなる。すなわち、電気防食適用に際しては、経時的な環境改善効果を考慮した場合、当初から防食基準を満たす電流を通電する必要はないとも考えられることから、モルタル中の腐食状態にある鉄筋に対し、異なる電流密度で電気防食を行い、復極量がどのように変化するかについても検討した⁴⁾。

2. 実験

2.1 湿潤環境下の防食効果評価実験

2.1.1 試験体

図2に示す表面積 2cm^2 のPt板を2枚埋設した無縁のモルタル柱状試験体を海水中に完全没水させ、溶存酸素の供給速度の経時的な低減を以下に示す2種類の方法により追跡した。モルタル試験体は普通ポルトランドセメントを使用して、 $\text{W/C}=50\%$ 、 $\text{S/C}=3$ とした。

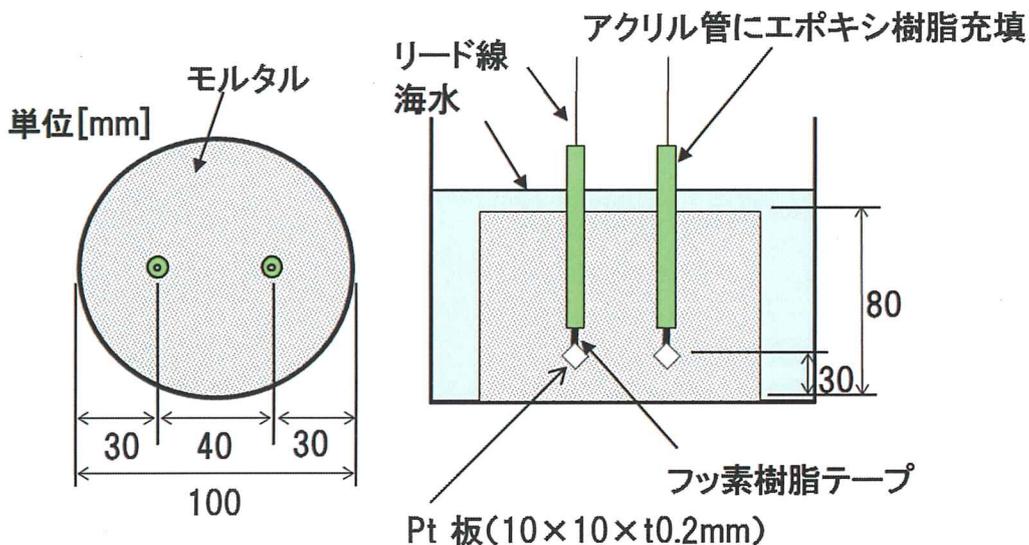


図2 モルタル試験体等の形状

2.1.2 溶存酸素供給速度評価方法

(1) カソード分極曲線

図3に試験装置を示す。一方のPt板を用いて掃引速度20mV/minによるカソード分極曲線の測定から溶存酸素の拡散限界電流密度(i_L)を評価した。照合電極は飽和銀・塩化銀(SSE : sat.KCl aq./AgCl/Ag)、対極は貴金属酸化皮膜(MMO)電極とした。

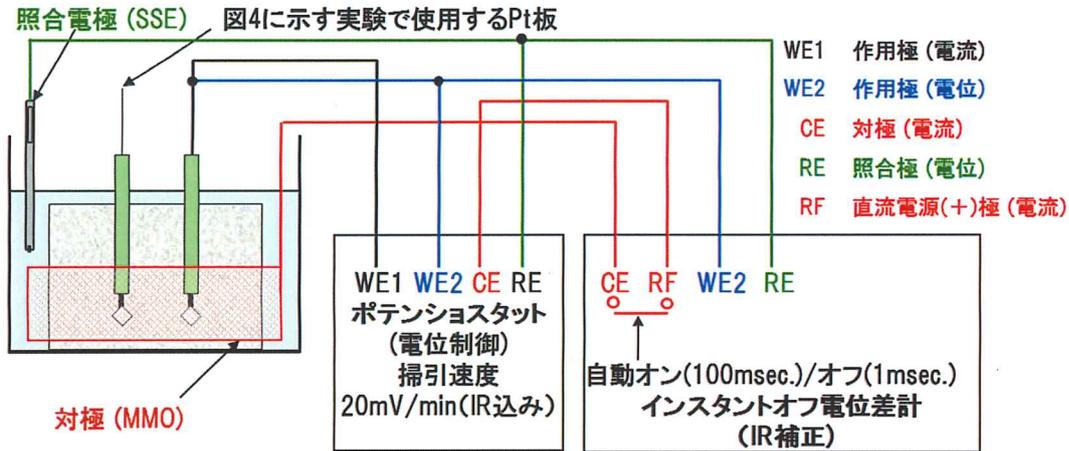


図3 カソード分極曲線測定方法

(2) 水素電極法(電位減衰曲線測定)

Pt板を水素ガス発生電位域で一定時間カソード電解することによってPt表面に水素ガス雰囲気を生じさせると、通電オフ後もPt板はしばらくの間その環境の水素電極の電位(卑電位)を示す。しかし、溶存酸素の拡散により表面の水素が消費されると、ある時点において急激に電位は貴化し水素電極としての電位を示さなくなる。通電オフから電位の貴化現象までの電位経時変化を電位減衰曲線と称することになると、それまでに要する時間 t_H は溶存酸素の供給速度(前述の溶存酸素の拡散限界電流密度 i_L)に対応すると考えられることから、 t_H より i_L を評価しようというもので、本報告ではこの手法を水素電極法と称する。図4に試験装置を示す。カソード分極曲線の測定に供さないもう一方のPt板は、確実に水素発生電位域となる電流密度として $2A/m^2$ を選択し10秒間カソード電解した後通電をオフにした。通電中および通電オフ後のPt電位を通電オフ30分までは1秒間隔、それ以降は電位変化のスピードに応じ2~30分の間隔で測定した。

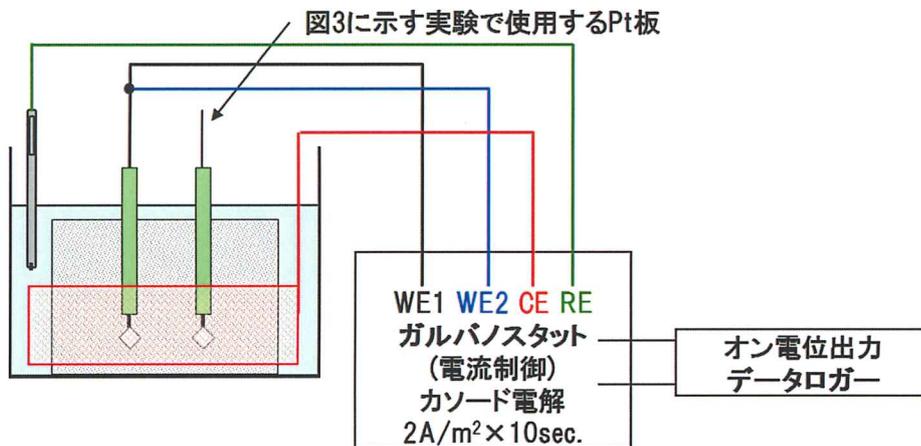


図4 水素電極法(電位減衰曲線測定方法)

2.2 異なる通電方式による電気防食実験

2.2.1 試験体

試験体は、普通ポルトランドセメントを使用してW/C=50%、S/C=2.5とし、 10kg/m^3 のNaCl (Cl⁻で 6kg/m^3)を混入したモルタル試験体で、4体作製した。ここで、 10kg/m^3 のNaClを混入したのは塩化物イオン濃度が高いモルタル中鉄筋に対しても電気防食効果が得られるかを評価するためである。作製した試験体は、図5に示すように $\phi 40\text{mm} \times 90\text{mm}$ の円柱とし、モルタルの下端から50mmの位置に塩ビ管に埋設した $\phi 13\text{mm}$ の鉄筋を設置した。なお、鉄筋は予め供試面のみ海水中で7日間腐食させた後に打設した。打設後24時間で脱型し材齢14日まで湿布養生した。

2.2.2 電気防食実験

電気防食実験に先立ちアノード電解により鉄筋供試面を腐食させた。これは、事前に腐食させた鉄筋を埋設したにもかかわらず、自然電位測定では腐食状態が軽微と判断されたためである。ここで、アノード電解は任意のアノード電流を鉄筋に印加することで、4体の試験体の腐食状態が同程度になるように、自然電位は -350mV vs. CSE (飽和硫酸銅電極)以下、分極抵抗は $10\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下になるように調整した。

鉄筋を腐食させたモルタル試験体は、図5に示すように海水中に陽極としたMMO電極とともに浸漬した。海水は、モルタル試験体の下端から20mmまでとすることで海水面から鉄筋供試面までの距離を30mmとした。通電期間中は、海水面が低下するため、イオン交換水を加えることで水位を保持した。また、モルタル試験体を設置した容器は、 25°C に設定した水槽に入れることで試験環境を一定にした。

モルタル試験体の通電条件を表1に示す。いずれの試験体の電流密度も試験期間を通して変更しなかった。電位の測定は、海水中に設置したSSEを用いて測定し、CSE基準に換算した。

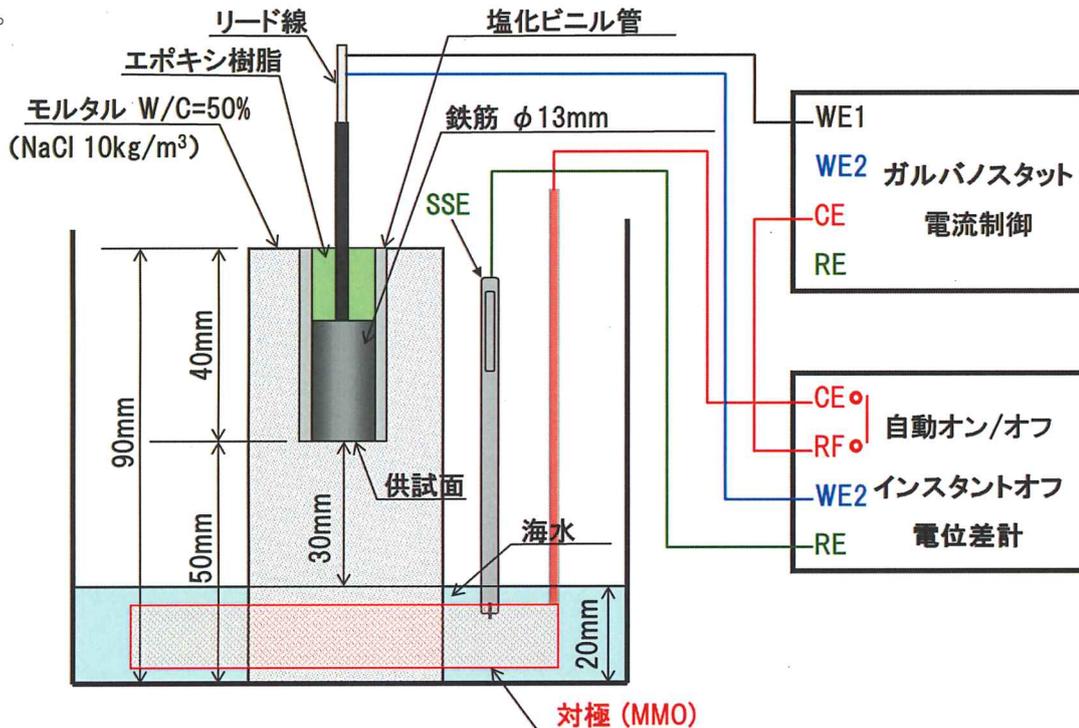


図5 モルタル試験体による電気防食実験

表1 モルタル試験体の通電条件

No.	通電条件	電流密度[mA/m ²]		通電方法
		鉄筋 面積 当たり	モルタル 断面 当たり	
1	通常通電	203	21.4	試験初期に 100mV カソード分極する電流密度で定電流通電を実施
2	小通電(1)	15	1.6	15mA/m ² で定電流通電を実施。初期には 100mV のカソード分極量は得られていない
3	小通電(2)	60	6.4	60mA/m ² で定電流通電を実施。初期には 100mV のカソード分極量は得られていない
4	間欠通電	226	23.9	試験初期に 100mV カソード分極する電流密度で8時間通電・16時間停止を繰返す間欠通電を実施。

試験期間中は、鉄筋のオン電位をロギングし任意で鉄筋のインスタントオフ電位を測定した。なお、間欠通電試験体のインスタントオフ電位は、各サイクルの通電7時間目に測定した。試験開始から6、23、43日目には、全ての試験体の通電を停止し、約20時間経過後の復極量を測定した。また、通電試験前と復極量測定後には、鉄筋のアノード・カソード分極曲線を測定した。分極曲線の測定は、2.5分間隔で50mVずつ定電位ステップにてオン電位を変化させた時のインスタントオフ電位と電流値を読み取った。

3. 結果および考察

3.1 湿潤環境下の新たな防食効果評価基準

海水に浸漬したモルタル試験体中のPt板カソード分極曲線と、それに対応する水素電極法により測定されたPt板の電位減衰曲線とを対にし、それぞれの完全没水後の経時変化をまとめて図6に示した。また、本試験はセメント硬化体の種類に関係なく適用の可否を判定する必要があることから、本実験関連で製作され海水中に一部浸漬されていたコンクリート試験体より得られたデータについても併記した。

図中にマークした点(○)は、カソード分極曲線では溶存酸素の拡散限界電流密度(i_L)、電位減衰曲線では水素電極が消失するまでに要した時間(t_H)を表しており、それぞれ変曲点に相当する部分を当該の評価値とした。

電位減衰曲線は電位差滴定における滴定曲線に類似していることから、 t_H は一定電気量のもとで生成された水素が溶存酸素によって消費されてしまうまでの時間と考えることができる。この場合、 t_H は溶存酸素の供給速度に依存するパラメータと考えられることから、カソード分極曲線より評価された i_L との関係を調べると図7のようになる。

両者の関係は両対数軸上でほぼ直線の関係(R^2 決定係数0.9619)が得られたことから、コンクリート中の鉄筋近傍に、Pt電極を埋設させて、水素電極法を適用することにより鉄筋表面に供給される溶存酸素の拡散速度を評価できることが分かった。

湿潤環境下では、復極量 100mV 以上の評価基準の適用が困難な場合が多い。本手法はそのような条件下でも電気防食時の腐食速度を評価して防食の良否を判定することが可能であ

る。例えば図8に示すように、 i_L が 10mA/m^2 と評価された場合、この値は当該構造物の平均腐食速度に等しいと考えられる。電気防食の適用によって腐食速度を 2mA/m^2 以下に低減させたい場合、鉄筋のアノード反応ターフェル勾配を 100mV/decade とすると復極量 70mV で防食条件を満足させることができる。よって、当該構造物にとっては復極量 70mV を新たな防食管理基準として設定できる。すなわち、本手法は、腐食速度という観点から対象物に応じた新たな防食管理基準を設定できるというメリットが存在する。

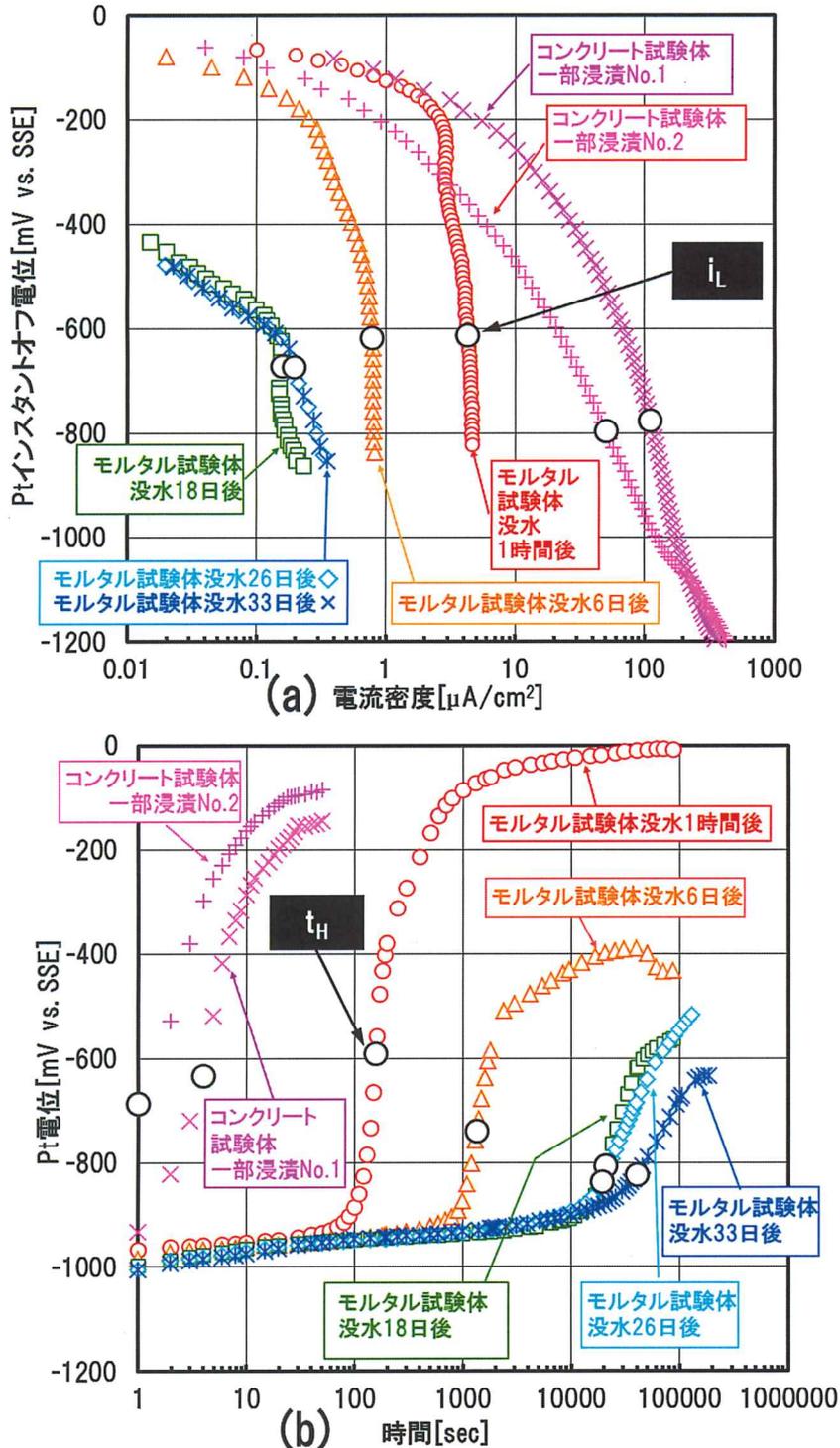


図6 Pt板の (a)カソード分極曲線 (b)水素電極法による電位減衰曲線

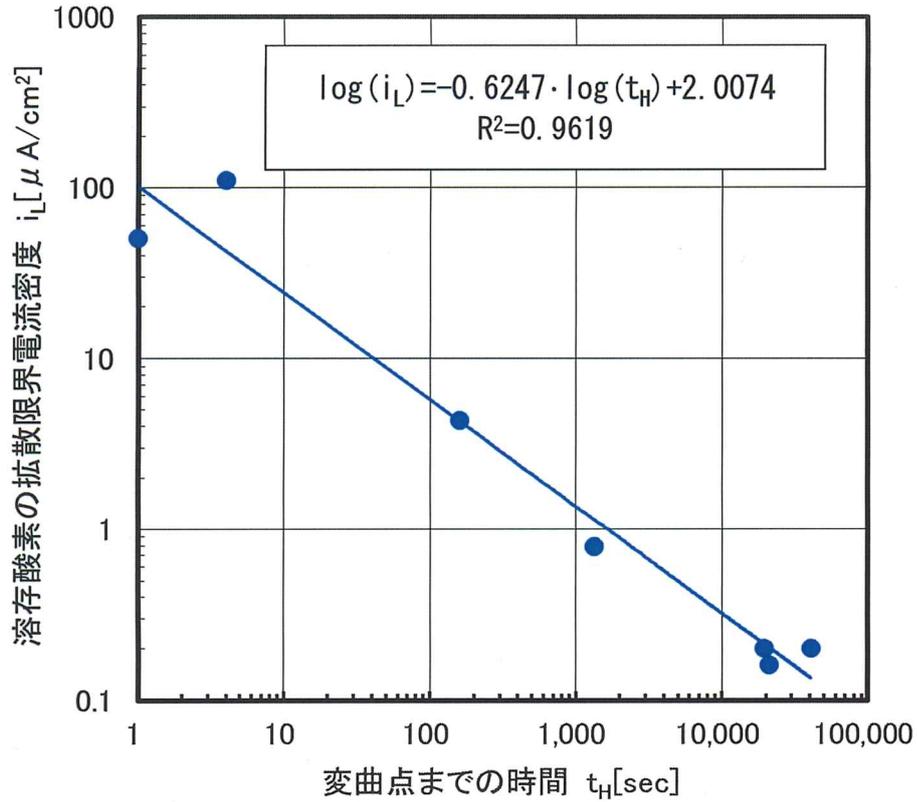


図7 水素電極法から求めた t_H とカソード分極法から求めた i_L の関係

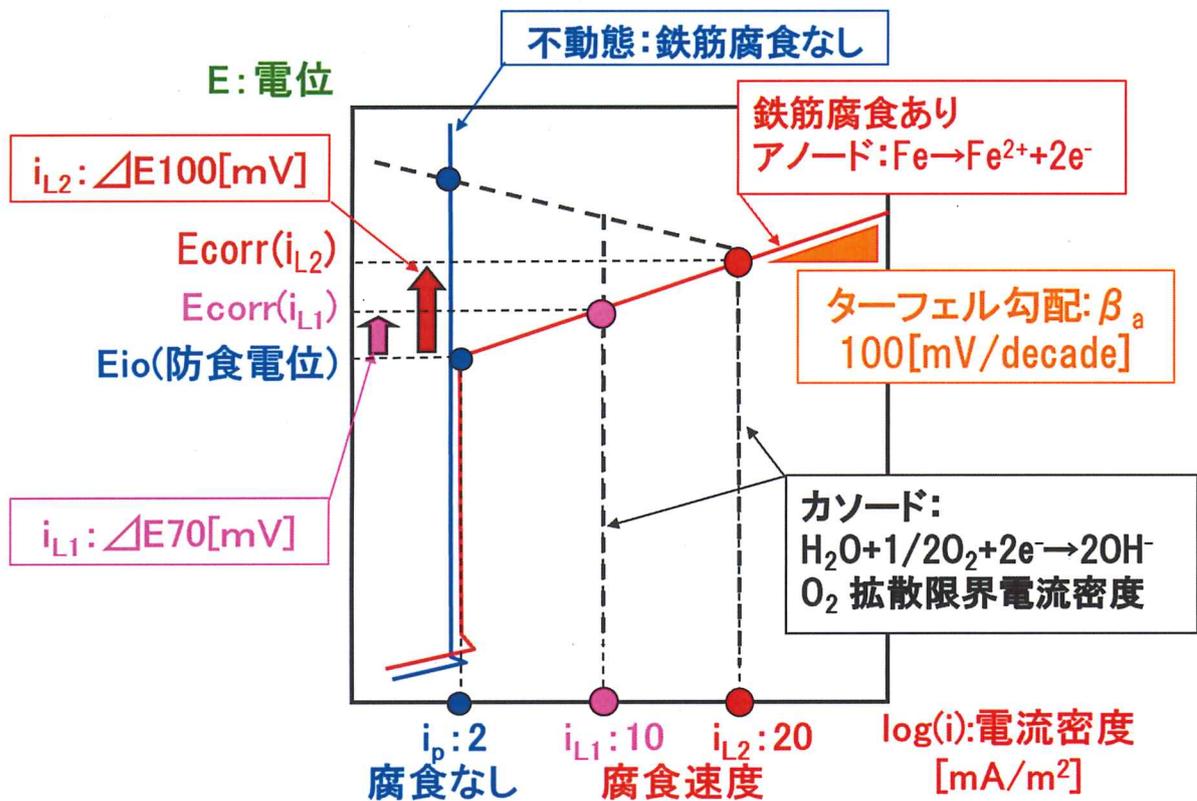


図8 溶存酸素供給量による電気防食効果の新しい評価概念図

3.2 各種通電条件での電気効果

各試験体の電流密度、鉄筋のオン電位、鉄筋のインスタントオフ電位の経時変化を図9に示す。鉄筋のオン電位およびインスタントオフ電位の図から、全ての試験体において通電6日目までは電位が上昇する傾向にあった。6日目以降は、No.1、No.3、No.4の通電時の電位が低下する傾向を示したが、これは鉄筋表面への溶存酸素供給速度の減少が影響していると思われる。なお、小さな電流密度で通電を行ったNo.2の試験体は、電位の低下はなかった。

試験を開始してから6日目、23日目、43日目に通電を停止し約20時間経過後に測定した鉄筋のオフ電位は、全ての試験体で経時的な上昇がみられた。各試験体の復極量の経時変化を図10に示す。No.1およびNo.4の試験体の復極量は、6日目で250mVを越え、とくに間欠通電を行ったNo.4はその後の増加量が大きい。しかし、No.1の試験体は43日目に復極量がやや減少した。No.3試験体は、6日目には防食基準である100mVの復極量が得られ、その後も増加した。最も小さな電流密度で通電を行ったNo.2の試験体は、6日目の復極量が55mVであったものの、23日目には102mVとなり、防食基準を満たす結果となった。

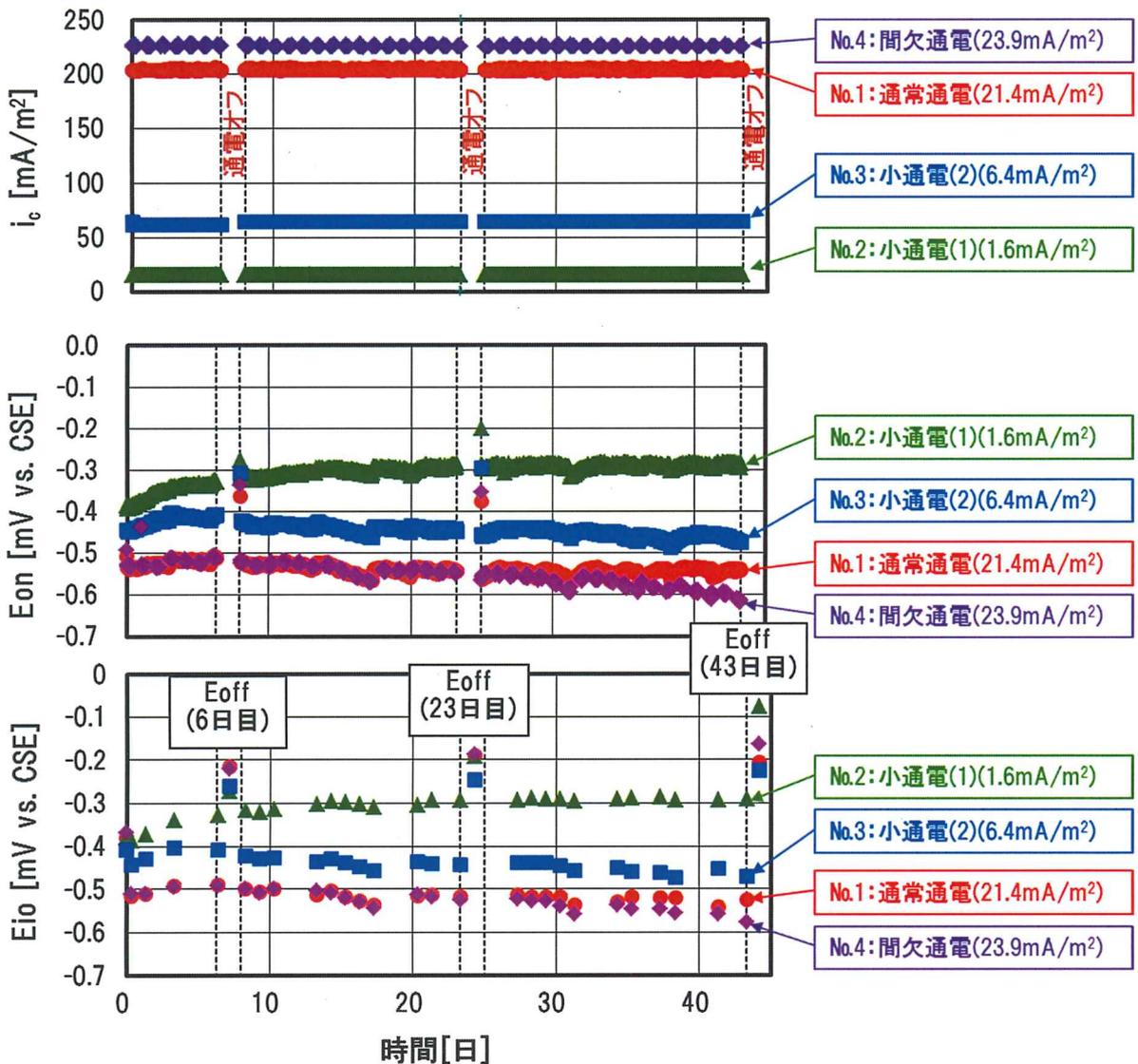


図9 防食電流密度(i_c)と鉄筋オン(E_{on})・インスタントオフ(E_{io})・オフ(E_{off})電位経時変化

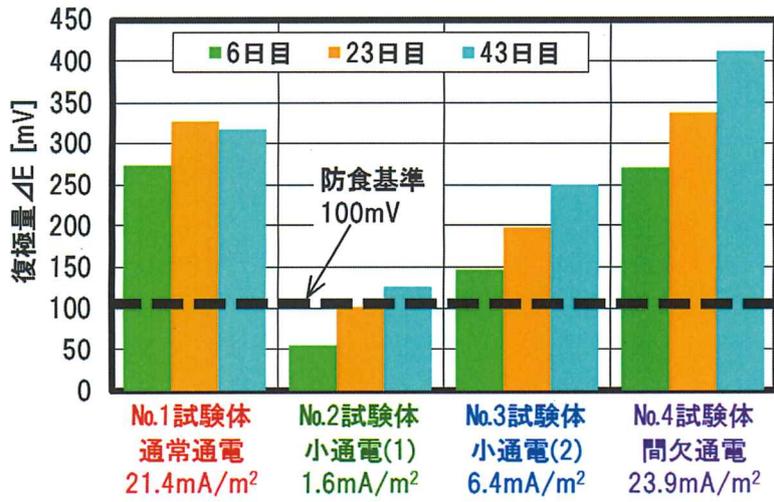


図10 各試験体の復極量経時変化

鉄筋のアノード・カソード分極曲線の経時変化を図11に示す。全ての試験体においてカソード分極挙動の経時変化は小さいものの、平衡電位の貴化とアノード分極の増大が認められ、不動態化が促進したと判断できる。これは、防食電流が供給されることによる鉄筋表面のpHの上昇とCl⁻濃度の低下といった鉄筋表面の環境改善による効果であると推測される。また、この結果から前述したオフ電位の上昇は不動態化に起因したことは明らかである。

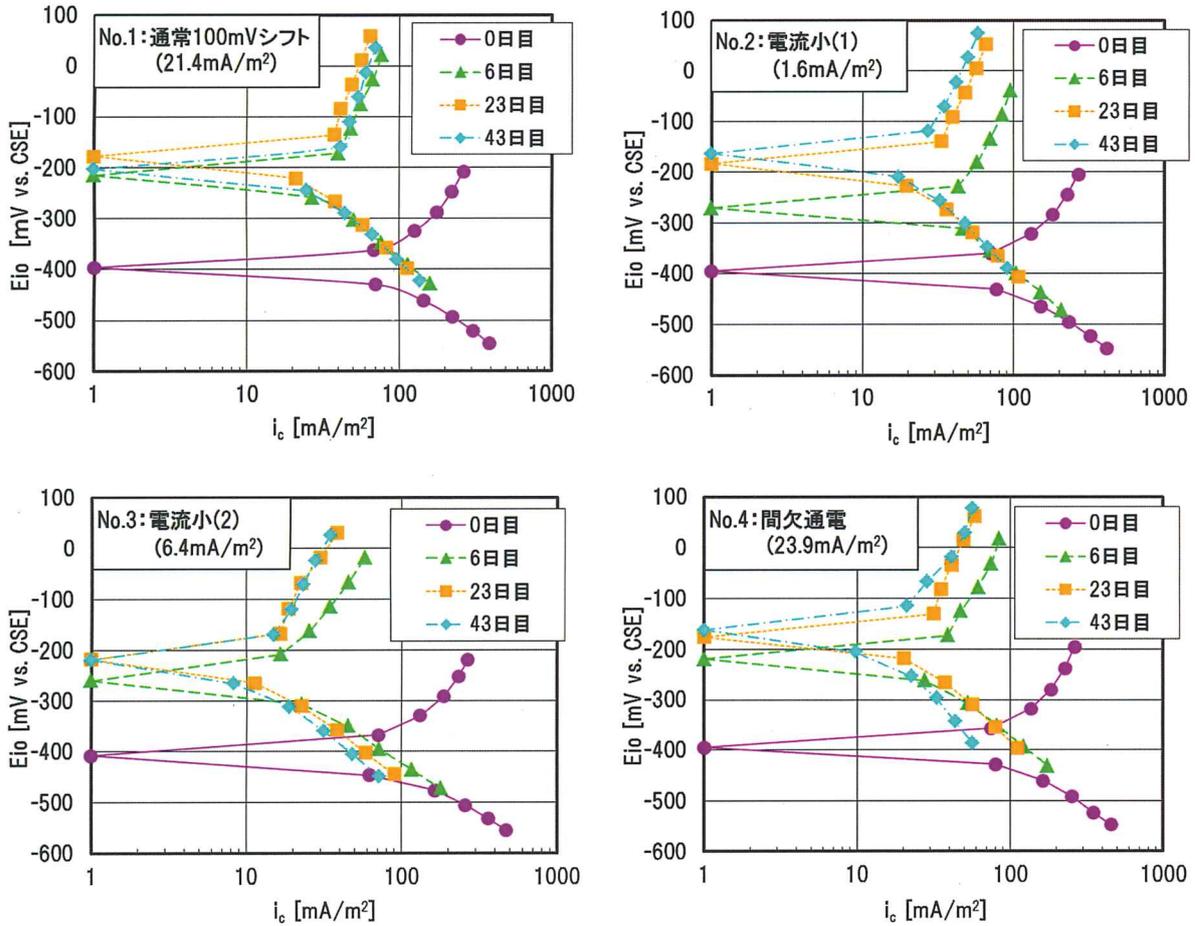


図11 鉄筋のアノード・カソード分極曲線経時変化

本実験の結果では、全ての試験体で通電によって不動態化が促進され、アノード分極抵抗が増大した。すなわち、小さな電流密度で通電した場合や間欠通電を行った場合でも、通常通電と同じく防食効果があった。これらと同様な結果は文献でも確認されている^{5)~7)}。したがって、100mVシフトさせるために大きな電流密度で通電するのではなく、鉄筋表面の環境改善を考慮した電気防食の運用が可能であることを示した結果であると言える。

4. まとめ

- ① コンクリート中に埋設されたPt表面にカソード電解により一定量の水素ガスを発生させ、Ptを一時的に水素電極とし、その後の電位変化から水素電極としての電位が消失する(貴化する)までの時間 t_H (電位減衰曲線)を測定することにより、当該環境下における溶存酸素の供給速度 i_L を評価する方法(水素電極法)がコンクリート環境下において適用可能な評価技術であることを確認した。
- ② 溶存酸素の供給速度の小さい環境では、過剰な防食電流を流さないためにも、当該環境における溶存酸素の供給速度を把握し、腐食速度を評価した上での管理が必要と思われる。
- ③ 溶存酸素の供給速度が良好な環境下では、腐食状態にある鉄筋に対して当初より100mV分極に必要な電流密度を供給しなくても、鉄筋表面の経時的な環境改善効果により現行の防食基準(復極量100mV以上)を満足させることが可能であることを示すことができた。
- ④ 鉄筋表面の環境改善を考慮した電気防食法では、間欠通電など多種の通電方法が可能である。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー107 電気化学的防食工法設計施工指針(案)，pp91-92，丸善(2001)
- 2) 高久豊広・曾根幸宏・望月紀保・仲谷伸人：A-104 コンクリート中における脱気環境の評価方法に関する検討，材料と環境2010，pp35-38(2010)
- 3) 篠田吉央・望月紀保・高久豊広・小林浩之：1187 湿潤環境下コンクリート電気防食の防食評価方法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp1157-1160(2011)
- 4) 大谷俊介・小林浩之・若林徹・望月紀保：1164 鋼材表面の環境改善を考慮した電気防食試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp1030-1033(2012)
- 5) G.K.Glass：Analysis of Data on a Reinforced Concrete Cathodic Protection System，Materials Performance，Vol.35，No.22，pp36-50(1996)
- 6) G.K.Glass・A.M.Hassanein：Surprisingly Effective Cathodic Protection，The Journal of Corrosion Science and Engineering，Vol.4，Paper7(2003)
- 7) 望月紀保：解説コンクリート中鉄筋のカソード防食について，材料と環境，Vol.59，No.4，pp121-128(2010)

NAKABOH REPORT

No.52, 2018年2月28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

事業統括本部 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

©2018 NAKABOHTEC CORROSION
PROTECTING CO., LTD.



株式会社 **ナカボーテック**

NAKABOHTEC CORROSION PROTECTING CO., LTD.