

JCMA:一般社団法人コンクリートメンテナンス協会主催
コンクリート構造物の補修・補強に関するフォーラム2018

電気化学的防食技術と健康寿命

2018(平成30)年07月26日(木曜日)

CP工法研究会・日本エルガード協会

東洋建設(株) 湯地 輝
(日本エルガード協会・若手の会)

CP工法研究会

コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会

- コンクリート構造物の劣化を電気化学的な原理により防止する工法（電気化学的防食工法）の普及・発展のため創られた研究会
- 発足：1992年，現在の会員会社：19社

会長	宮川豊章（京都大学 特任教授）
顧問	関 博（早稲田大学 名誉教授） 福手 勤（東洋大学 教授） 武若耕司（鹿児島大学 教授）
事務局	東亜建設工業(株)内
HPアドレス	http://www.cp-ken.jp/

主な活動内容

- 普及活動の実施
- 学術研究の実施
（土研・材料学会）
- 設計施工マニュアルの作成
- 工法別施工実績調査

日本エルガード協会

- エルガード工法を核とした電気防食工法の普及と技術の研鑽
- 発足：2001年，現在の会員会社：23社
- 電気防食技術研究会：22社(コンサルタント)

会長 副会長	住友大阪セメント(株) ショーボンド建設(株)
顧問	福手 勤 (東洋大学 教授) 宮川豊章 (京都大学 特任教授)
理事	五洋建設(株) 東洋建設(株) (株)ナカボーテック 三井住友建設(株) 日本防蝕工業(株)
HPアドレス	http://www.elgard.com/

主な活動内容

- 特別記念講演
- **電気防食施工管理技術者認定試験(485名)**
- 共同研究
(土研、材料学会、東洋大、
岐阜大、鹿児島大、JCI)
- **技術講習会、ディスカッション
セミナー、発注者セミナー**
- 次世代技術者の会

目次

1. 鉄筋の腐食とは？
2. 電気防食とは？
3. 劣化対策としての電気防食の位置づけ
4. 電気防食の設計・施工の実際
5. 電気防食のメリット・デメリット
6. 電気防食Q&A
7. 技術発展に向けた取り組み(トピックス)

1. 鉄筋の腐食とは？
2. 電気防食とは？
3. 劣化対策としての電気防食の位置づけ
4. 電気防食の設計・施工の実際
5. 電気防食のメリット・デメリット
6. 電気防食Q&A
7. 技術発展に向けた取り組み(トピックス)

なぜ鉄は錆びる？



鉄: Fe



錆: $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 等

錆を分析すると鉄の水酸化物であることが分かる。
すなわち鉄Feに酸素Oと水素Hが付くと錆 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ になる！

回答 地球上には、酸素(O_2)と水(H_2O)
があります。

どちらかが無ければ錆びません！

腐食は自然現象

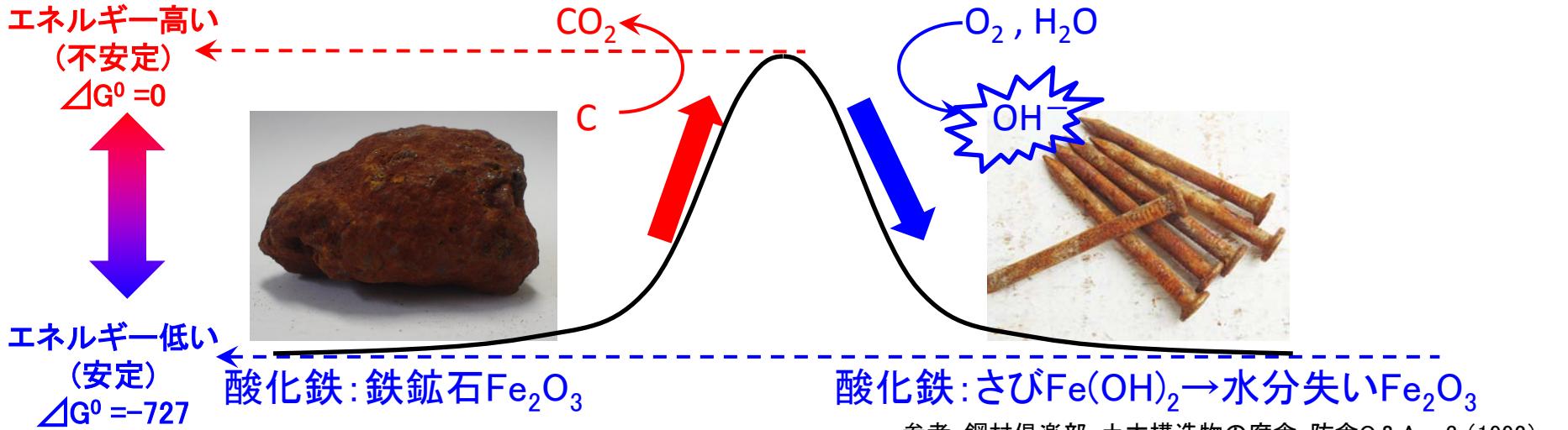
鉄は鉄鉱石(酸化鉄)を高温(1500°C以上)で製錬(還元)して製造します。
 実は製錬された鉄はエネルギーが高く不安定です。
 だから鉄は安定した元の状態(さび≒酸化鉄)に戻ろうとします。
 つまり、鉄がさびる(腐食する)ことは自然なことです。



鉄Fe

製錬:還元反応(化学反応)
 $2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C} \rightarrow 4\text{Fe} + 3\text{CO}_2$

腐食=酸化反応(電気化学反応)
 $\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$



ΔG° [J·mol⁻¹]
 標準自由エネルギー

参考:鋼材倶楽部:土木構造物の腐食・防食Q&A, p3 (1992)

腐食(鉄が錆びる)の条件

- ①水分があること。また、**イオン**が溶けていること。超純水では錆びない。
- ②**酸素**があること。酸欠状態では錆びない。ただし、酸欠でも酸性側では錆びる。

(例)

- ・海水や淡水。ただし、鉄板が海水や淡水に没していれば腐食速度はほぼ同じ。
- ・大気。ただし、乾燥していると水膜ができないので錆びない。
- ・酸性から中性の土。
- ・アルカリ性のコンクリートや土は錆びにくい。



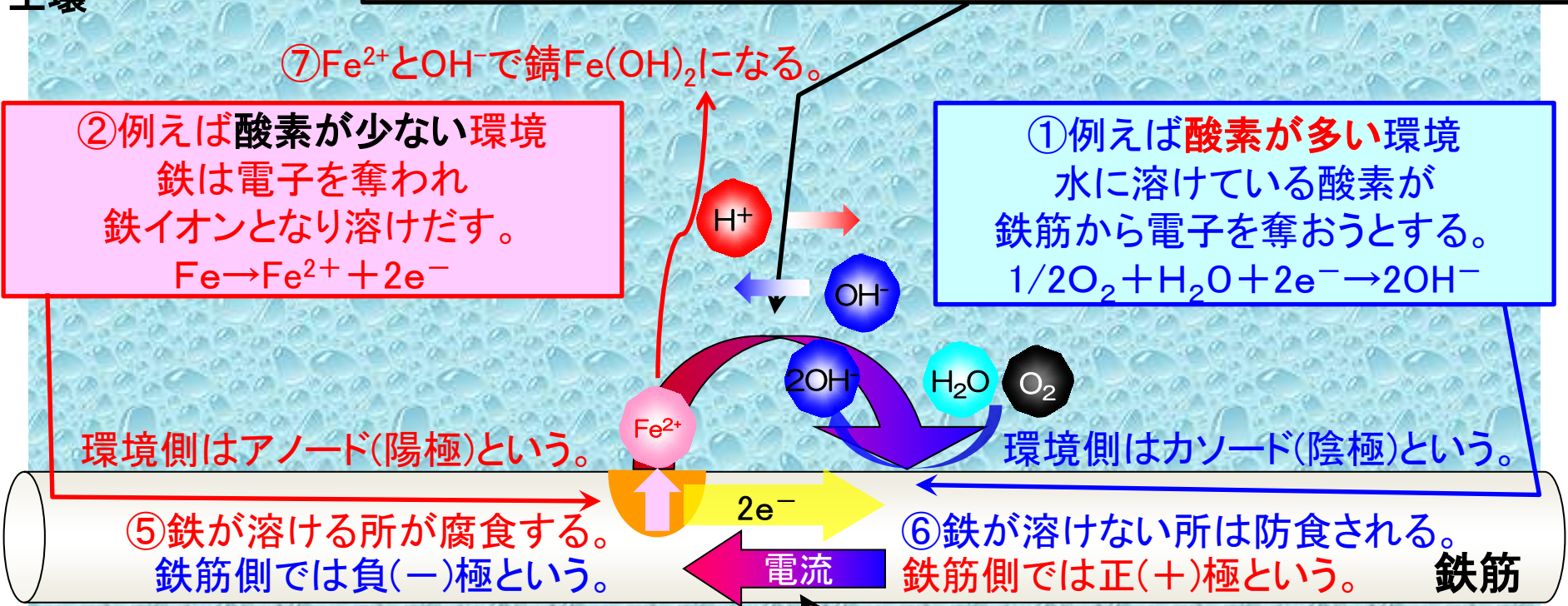
錆びのメカニズム(電気化学反応で電流が流れる)

大気(湿度60%以上)
海水・淡水
土壌

④環境側では自由電子無く水に溶けてる**イオン**が動き電流が流れる。
H⁺やNa⁺は②→①, OH⁻やCl⁻は②←①へ動く。
腐食電流(イオン伝導)という。

②例えば**酸素が少ない環境**
鉄は電子を奪われ
鉄イオンとなり溶けだす。
 $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$

①例えば**酸素が多い環境**
水に溶けている酸素が
鉄筋から電子を奪おうとする。
 $1/2O_2 + H_2O + 2e^{-} \rightarrow 2OH^{-}$



⑧私達が目にする腐食は全てこの原理。
腐食電池という。
電気と電気化学では極性が違う！
電子伝導とイオン伝導があって始めて電流が流れ腐食が起こる。イオン伝導を止めて腐食抑制する対策代表が塗装！

③鉄筋内では**自由電子**が動き電流の流れとなる。
腐食電流(電子伝導)という。

⑨あるいは鉄筋を何等かの方法で全てカソードにすれば防食できる！
それが**電気防食(Cathodic Protection)**

コンクリートにおける鋼材腐食



**鋼材腐食は
コンクリートに
致命的な影響を与える！**

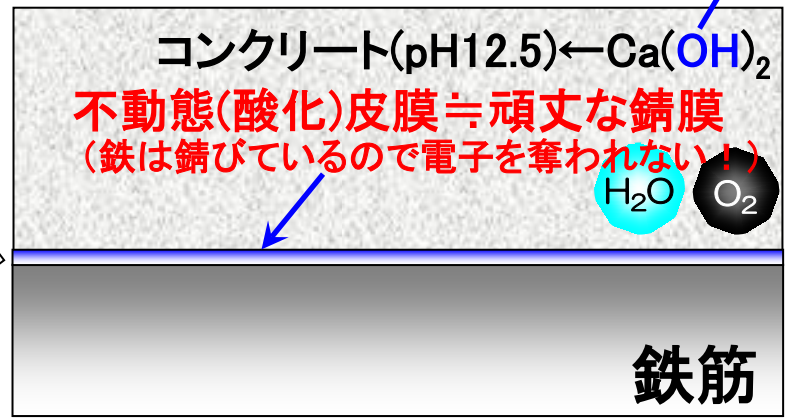
特に塩害は要注意！



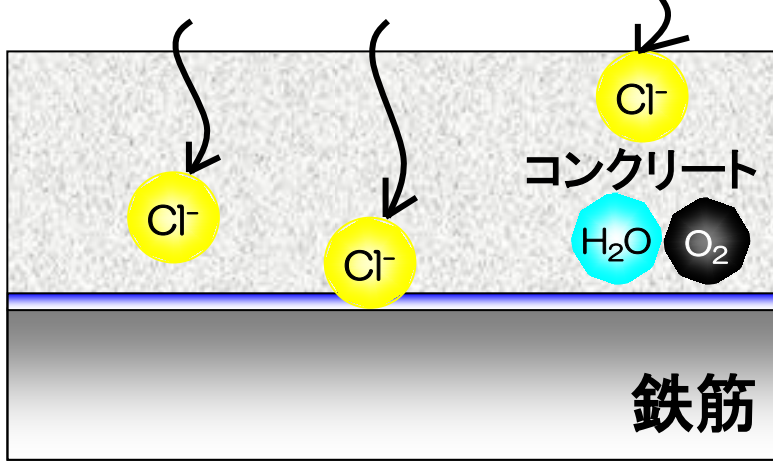
コンクリートの塩害と鉄筋腐食メカニズム

アルカリ源

① 健全な鉄筋コンクリート

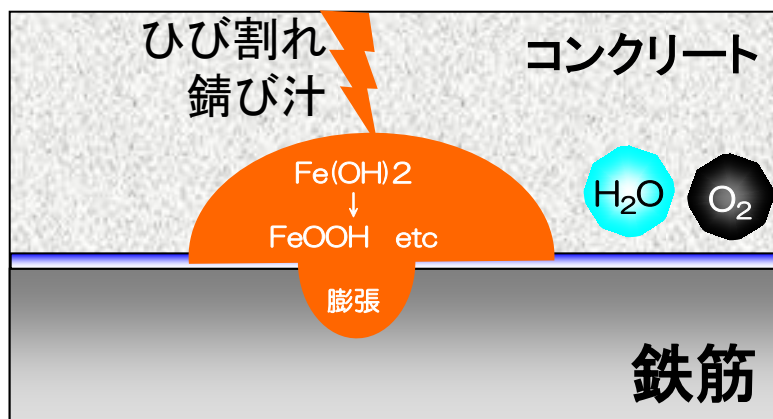


② 不動態皮膜の破壊

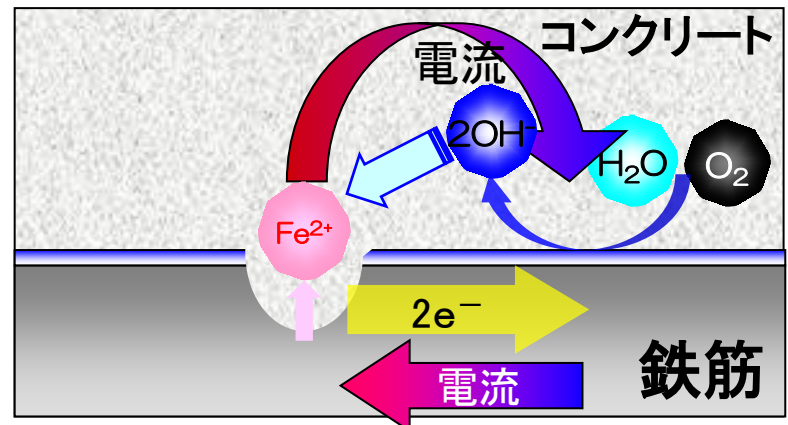


限界値以上の塩化物イオンが鉄筋近傍に到達すると不動態皮膜が破壊
 (限界値: Cl^-/OH^- が小さいと再不動態化)

④ 錆の生成・成長



③ 鉄イオンの溶出

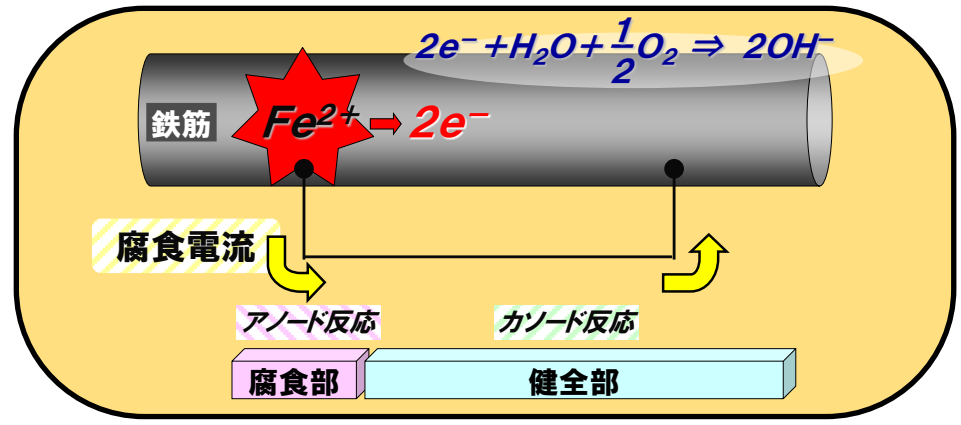


不動態皮膜が無ければ裸の鉄と同じ。
 後は先程の電気化学反応で腐食進行。
 中性化でも不動態皮膜は破壊される。

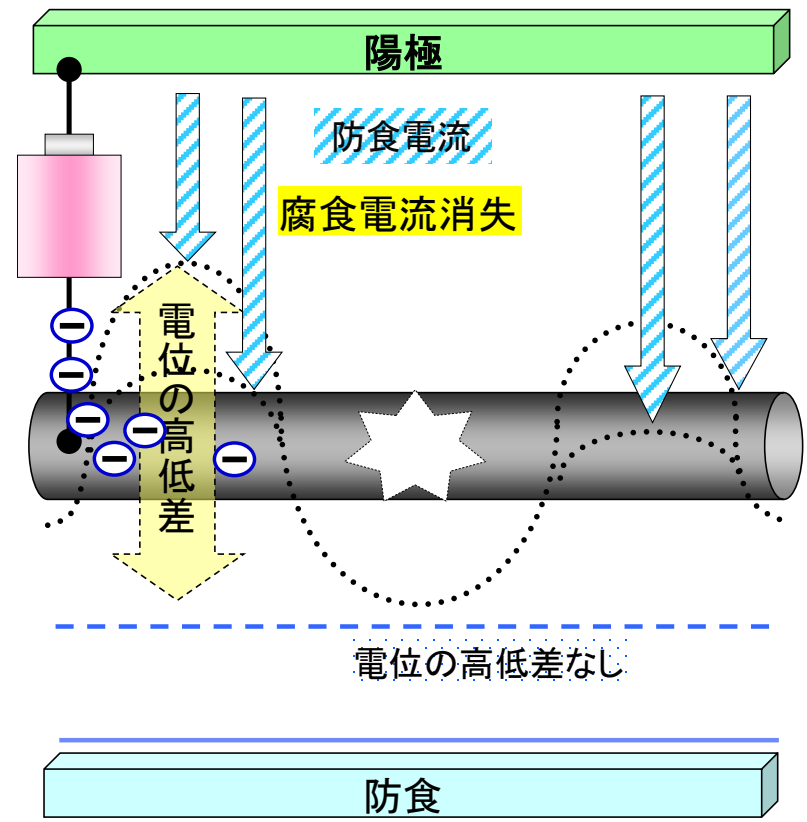
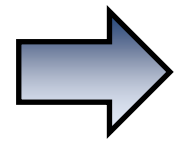
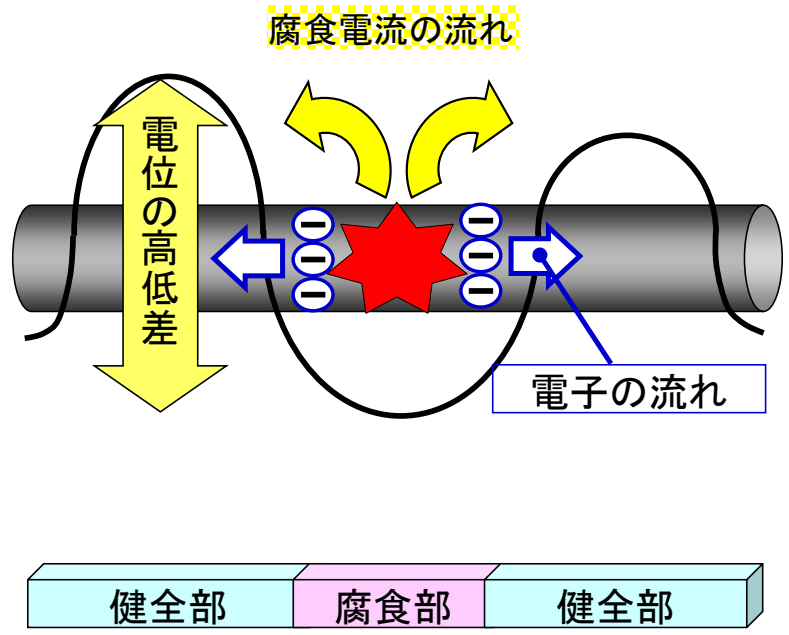
1. 鉄筋の腐食とは？
2. 電気防食とは？
3. 劣化対策としての電気防食の位置づけ
4. 電気防食の設計・施工の実際
5. 電気防食のメリット・デメリット
6. 電気防食Q&A
7. 技術発展に向けた取り組み(トピックス)

電気防食とは？

腐食反応



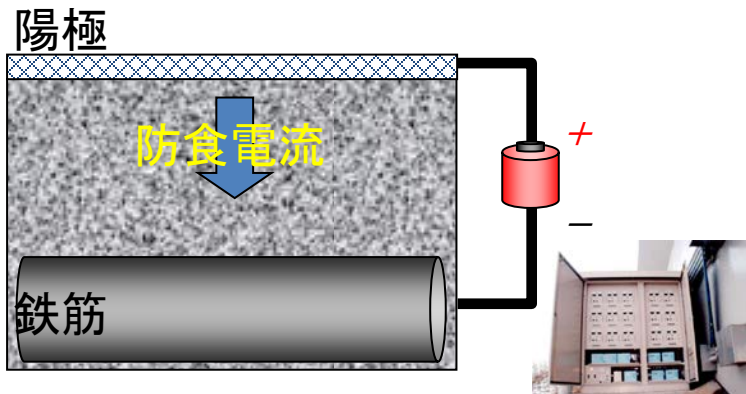
電気防食



電気防食とは？（種類）

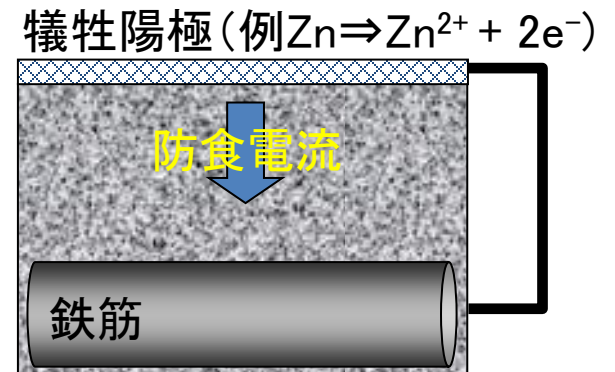
防食電流の供給方法で大きく2種類

外部電源方式



直流電源装置を用いる
防食電流の調節可能

流電(犠牲)陽極方式



鉄筋と金属のイオン化傾向を利用する(直流電源不要)
防食電流の調節不可能

電気防食が有効な理由

- 電気防食は腐食反応を直接的に抑制する！
- コンクリートでは鉄筋の再不動態化も担う！

1) 腐食による再劣化はしない

電流を供給している間は腐食は進行しない

2) 多量の塩分が存在する環境でも防食可能

所定の防食電流を供給すれば腐食は進行しない

3) 塩分を含有するコンクリートの除去が不要

塩分の存在は電気防食上は全く問題ない

4) 鉄筋の防錆処理が不要

鉄筋の表面に錆びがあっても防食可能

※但し、できる限り取り除くことが望ましい

5) 防食効果の確認が容易

鉄筋の電位計測によって確認できる

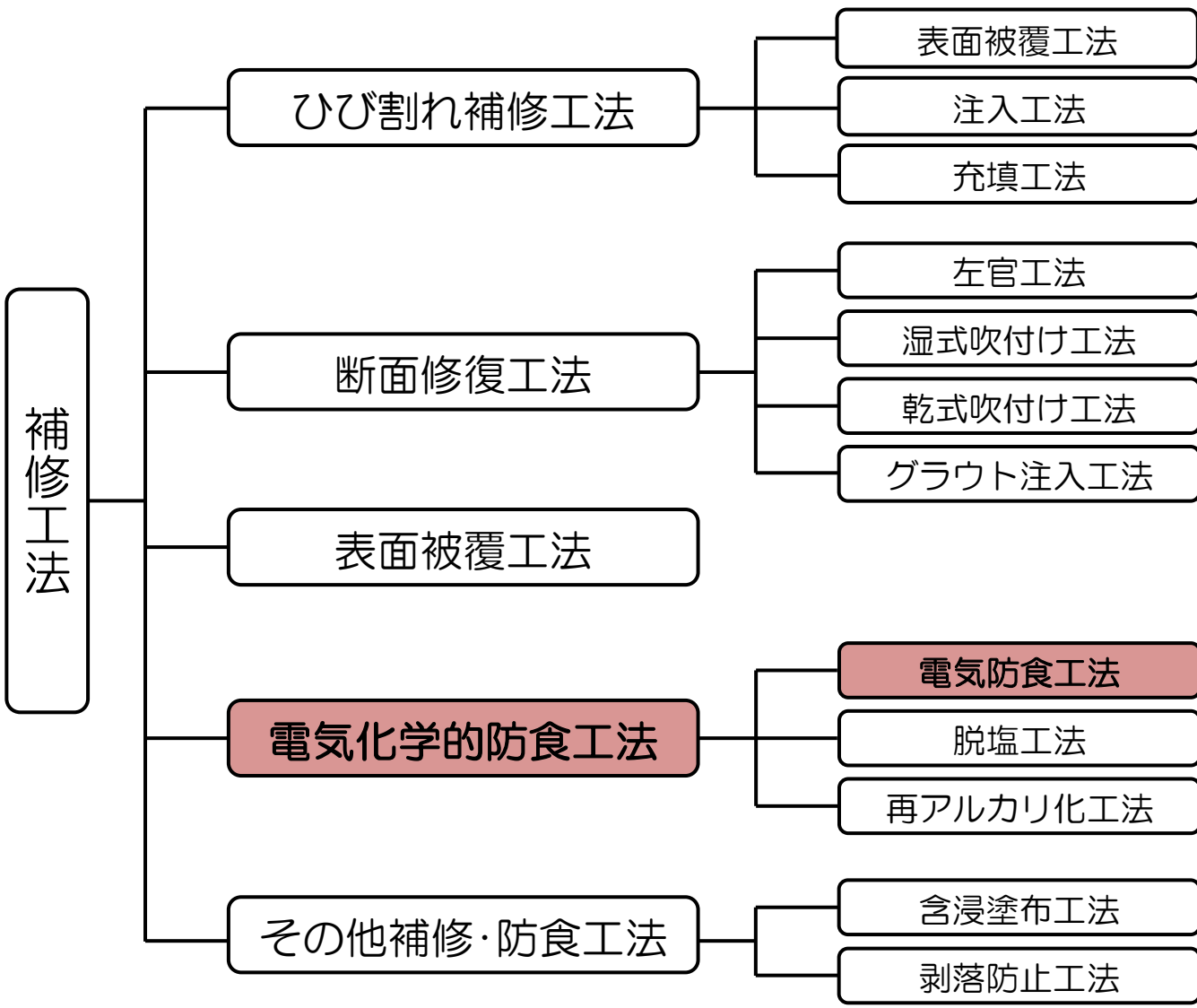
電気防食の歴史

西暦	1850	1900	1950	2000					
海外	1824年: 英国でDavyが軍艦銅外板を鉄犠牲陽極で電防したのが起源								
				1928年: 米国でKuhnが埋設ガス管に電防適用					
				1933年: Kuhn電気防食基準-850mVvsCSEを提唱					
国内	<p>凡例</p> <p>海水</p> <p>土壌</p> <p>コンクリート</p>					1919年: 日本では帝国海軍が戦艦三笠に電防用Zn犠牲陽極を艀装			
						1930年: 埋設管の電防研究開始			
						1946年: 天然ガス油井管に電防適用			
	1952年: 尼崎港の防潮堤閘門にMg陽極適用								
	1962年、Al合金陽極・水中溶接の開発により、電防急速発展								
	1986年、土研が旧洞川橋梁で外電電防試験								
	1988年、清水港棧橋に亜鉛板電防を適用								
	1997年、大井埠頭にエルガード外電電防適用								
	<p>海中や土中の電防の歴史は古く豊富な実績がある。</p> <p>コンクリート構造物中の鋼材の電気防食への技術展開も海外で40年以上、国内で30年になる。</p>								

目次

1. 鉄筋の腐食とは？
2. 電気防食とは？
- 3. 劣化対策としての電気防食の位置づけ**
4. 電気防食の設計・施工の実際
5. 電気防食のメリット・デメリット
6. 電気防食Q&A
7. 技術発展に向けた取り組み(トピックス)

各種補修・防食工法



適用できる環境は？



道路橋・鉄道橋



ボックスカルバート



ロックシェッド



荷役棧橋



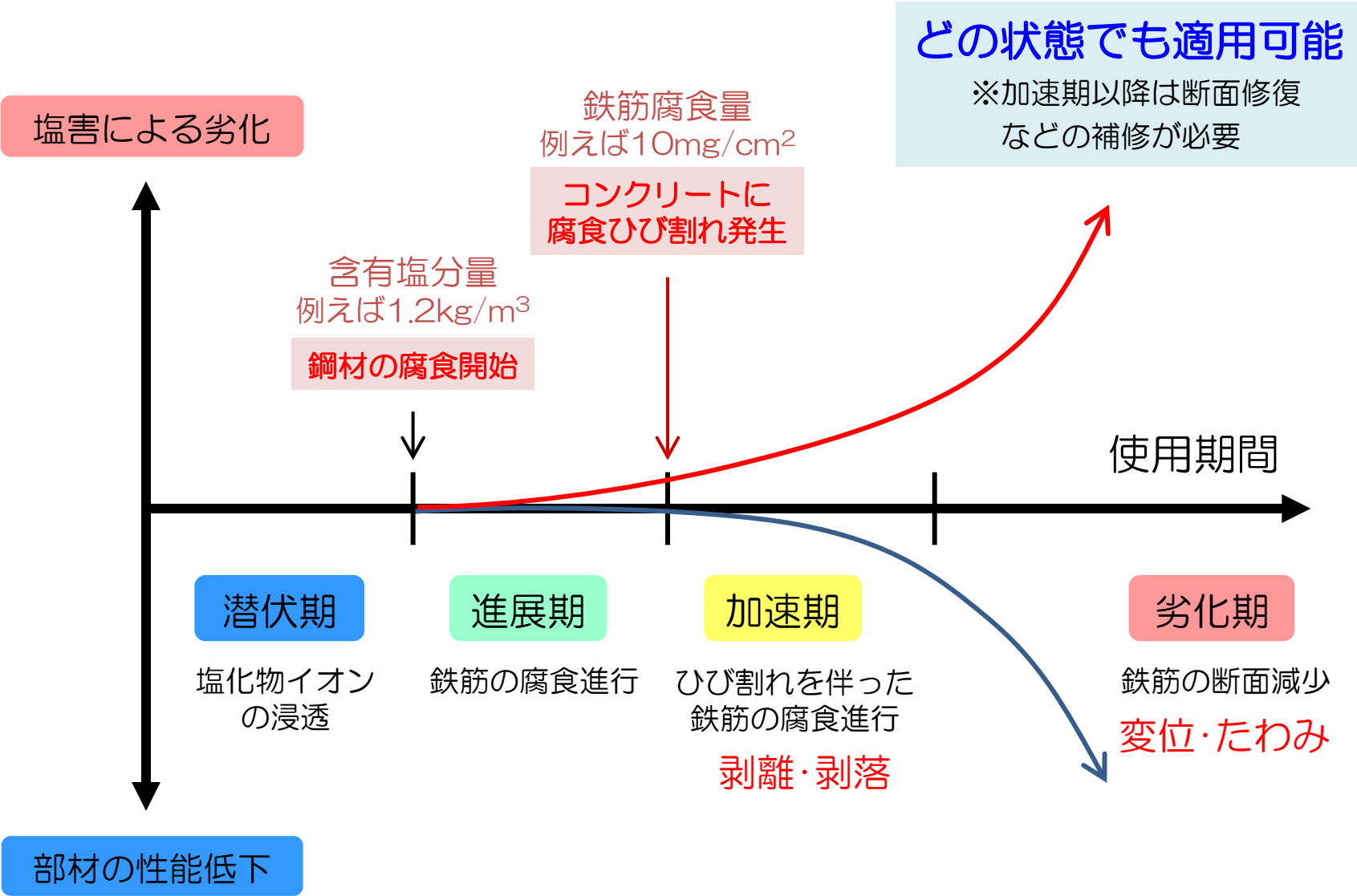
揚油棧橋



ドルフィン上部工

- 一般的な鉄筋コンクリート構造物であれば、ほとんど適用可能
- 大気中、飛沫帯、干満帯等の環境に応じて防食方式を選定
- 水中部は基本的に電気防食不要
(Cl⁻あってもコンクリートと水で腐食に必要な量の酸素が鉄筋に達しない事が近年分かってきた。)
- 供用しながらの補修が可能
- 他の補修工法との併用可能
- 部材単位での適用可能

電気防食が適用できる劣化状態



どのような調査が必要か？

特別な調査は不要！

基本的に塩害対策・最低限必要な調査は①

① **外観目視によるひび割れ・浮き確認！**

最低限の断面修復量を確認

② 鋼材位置での塩化物イオン量

フィック拡散式で**供用年数内の発錆予測**

発錆するようならば電防は補修対策として有効

③ 腐食が顕在化していない場合は電気化学的測定

鉄筋腐食速度を推定し、ひび割れ発生が予測されれば

電防は補修対策として有効

電源は？

○外部電源方式の場合

電柱や変圧器の有無を確認



<近辺に電柱・変圧器がない場合？>

施設近傍までの配電設備 ⇒ 電力会社負担

受電設備 ⇒ 利用者負担

<自然エネルギーの利用は？>

ソーラーや風力など可能：防食面積小さい場合有効

○流電(犠牲)陽極方式では電源不要

LCC 前提条件

断面修復材 : W/C=45%相当の材料を使用と仮定
初期修復時 : 両工法ともに40%の断面修復を実施
社会的割引率: 両工法ともに適用なし

表面被覆工法

耐用年数: 15年

断面修復: 表面被覆再補修時に**40%の断面修復**を実施

維持費 : 定期点検費

電気防食工法

耐用年数: **100年(陽極)**

維持費 : 電気代, 防食効果確認試験費

陽極システム, 配線配管, 電源装置等の更新費

LCC コスト条件

各工法補修費用

小断面修復工法	77,600 円/m ²
電気防食工法	89,000 円/m ²
表面被覆工法	17,600 円/m ² (初回)
	19,500 円/m ² (2回目以降)
仮設費	11,000 円/m ²

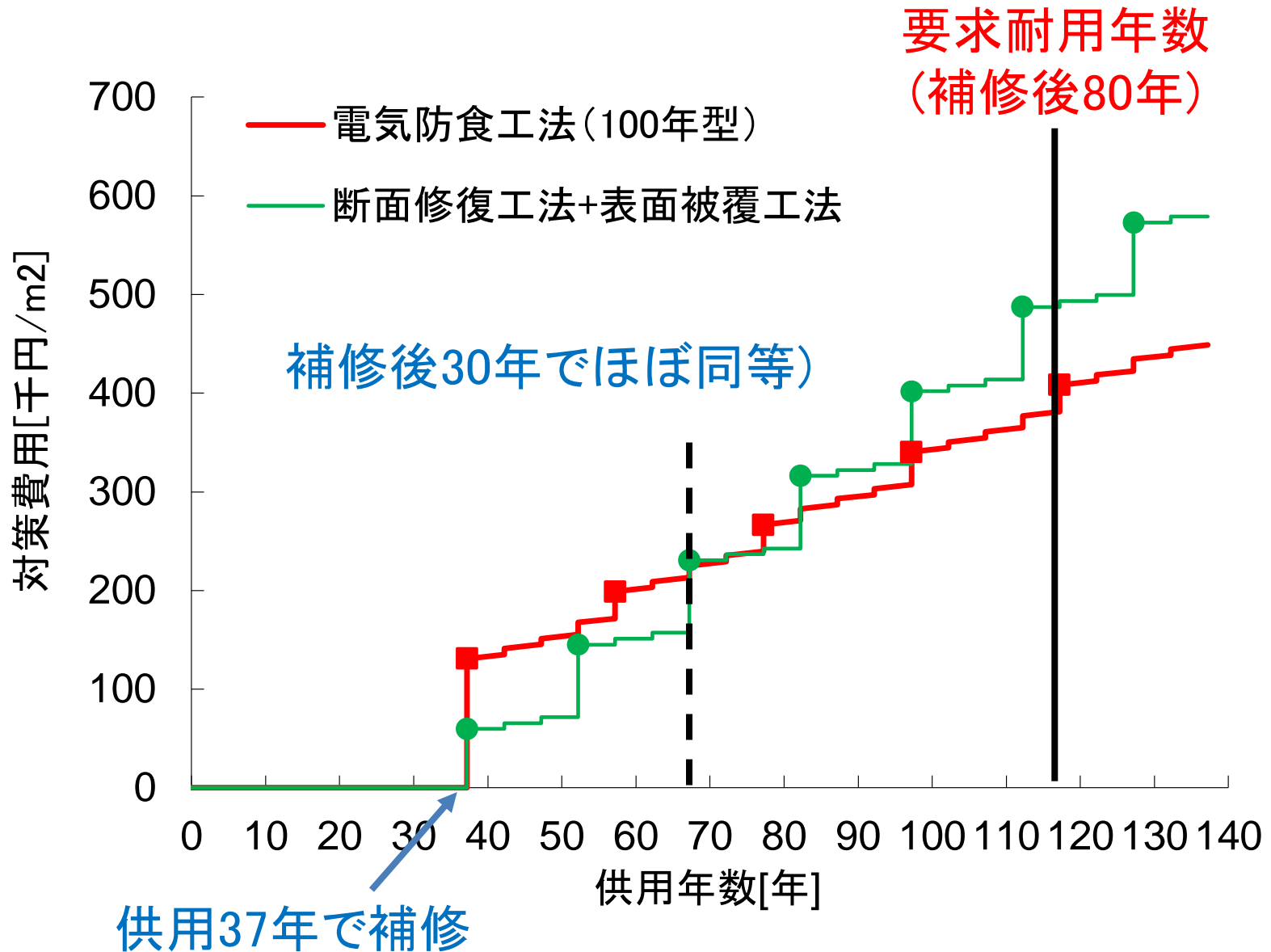
維持管理費用

電気代(1回/年)	30 円/m ²
効果確認費(1回/年)	800 円/m ²
配線・配管(1回/20年)	8,000 円/m ²
電源装置(1回/20年)	11,000 円/m ²
一般定期点検(1回/5年)	6,000 円/m ²

参考 : 港湾空港技術研究所報告, 第48巻第2号, 2009.6

© 2018 CP工法研究会 & エルガード協会

LCC 算定結果

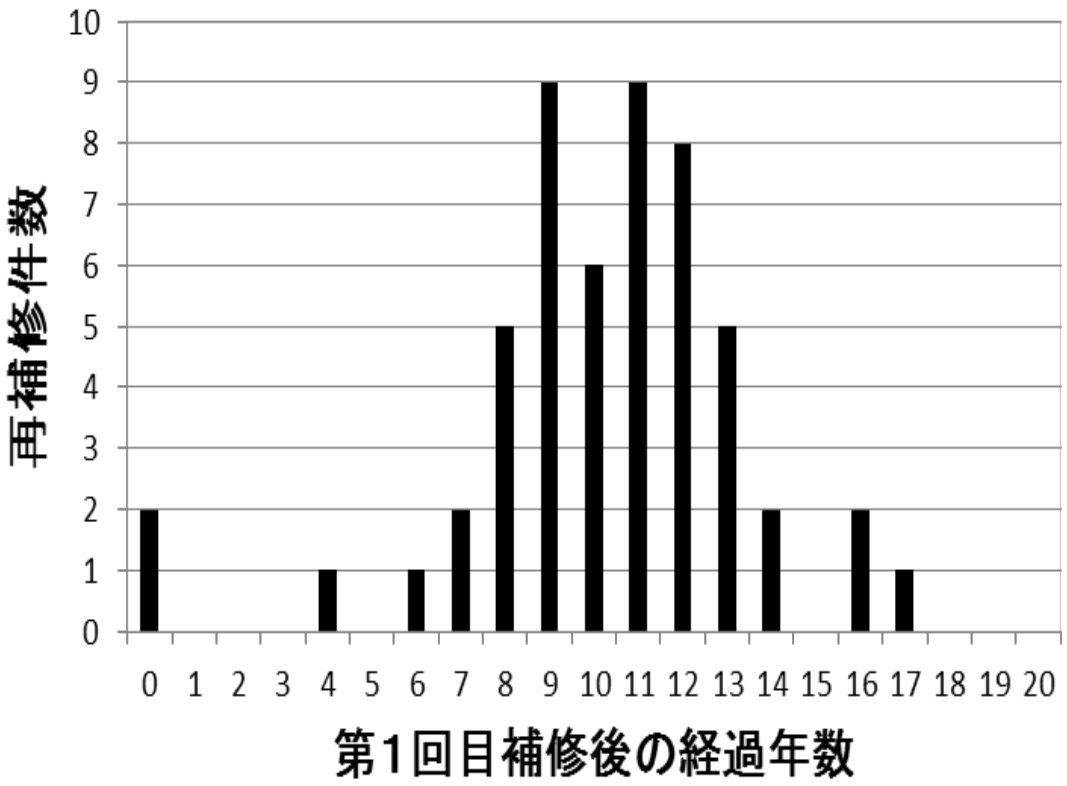


電気防食の信頼性

- ①電気防食は腐食反応や再不動態化に直接関与する**抜本的対策**
- ②アメリカFHWA公式見解: 鋼材腐食を止めることが確認された**唯一の補修方法**が電気防食
- ③国内のコンクリート構造物では30年の実績・約30万㎡

土木研究所資料第3811号などを参考に日本エルガード協会事務局が独自集計

経過年数8～25年で補修をした88橋の再補修実績



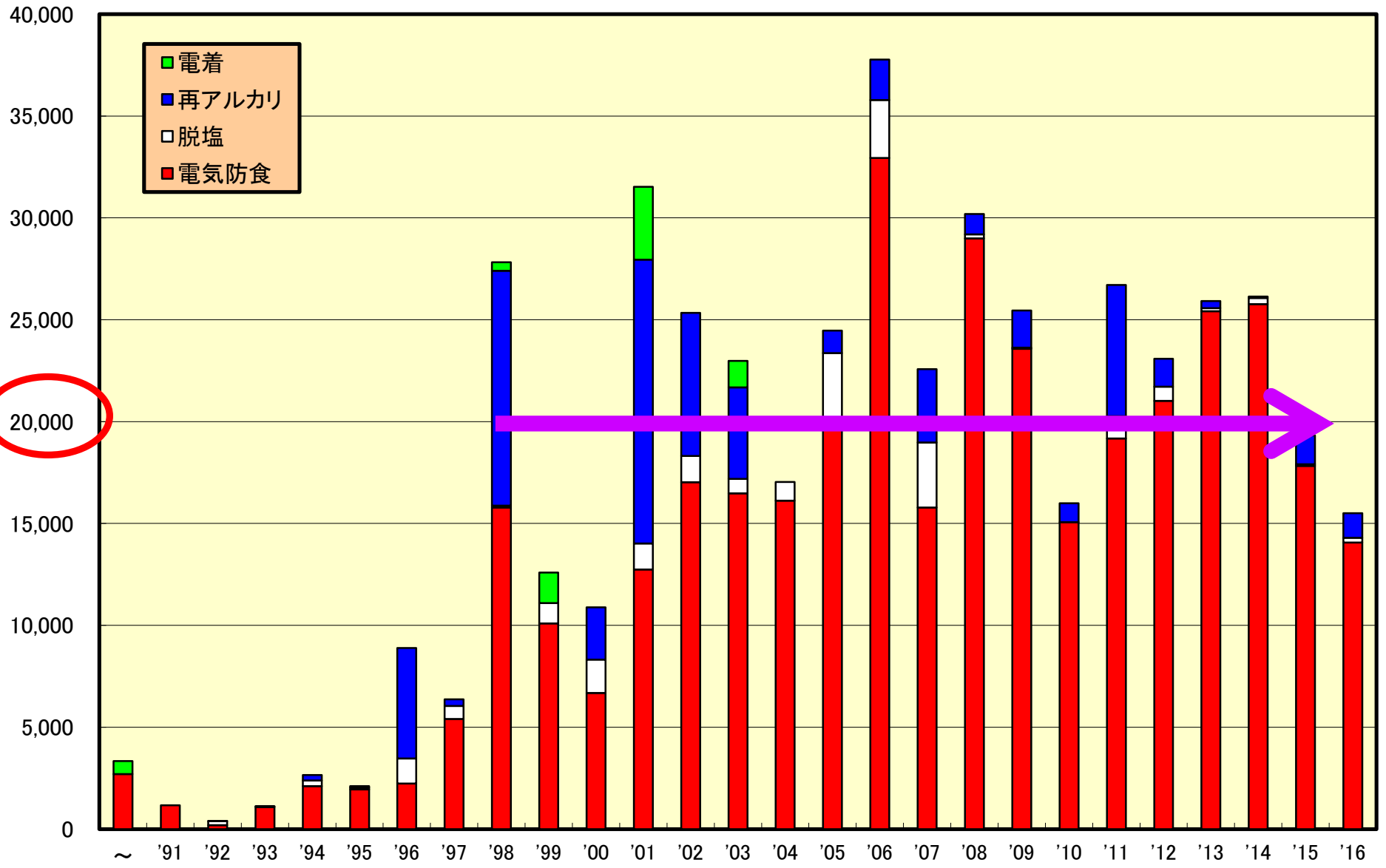
88橋の内、
53橋(60%)が再補修
初回補修より
平均10年で再補修

- 26橋(49%)は断面修復
- 25橋(48%)は補修・補強
- 1橋(2%)は表面被覆
- 1橋(2%)は電気防食(流電)

1回目の補修で
電気防食を実施した
3施設は**再補修無し**

© 2018 CP工法研究会 & エルガード協会

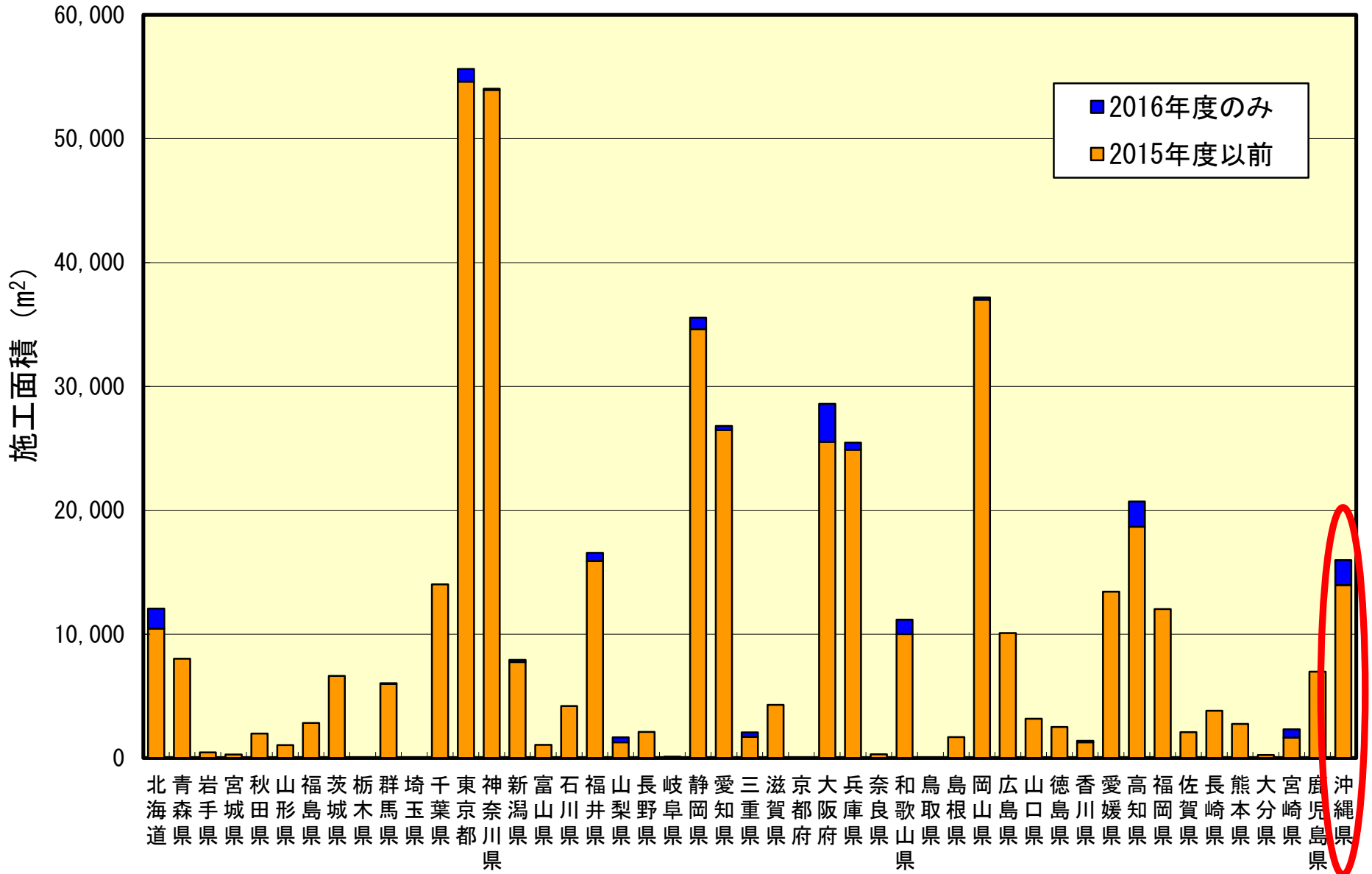
電気防食の施工実績推移



日本国内年度別実績(施工面積:m²)

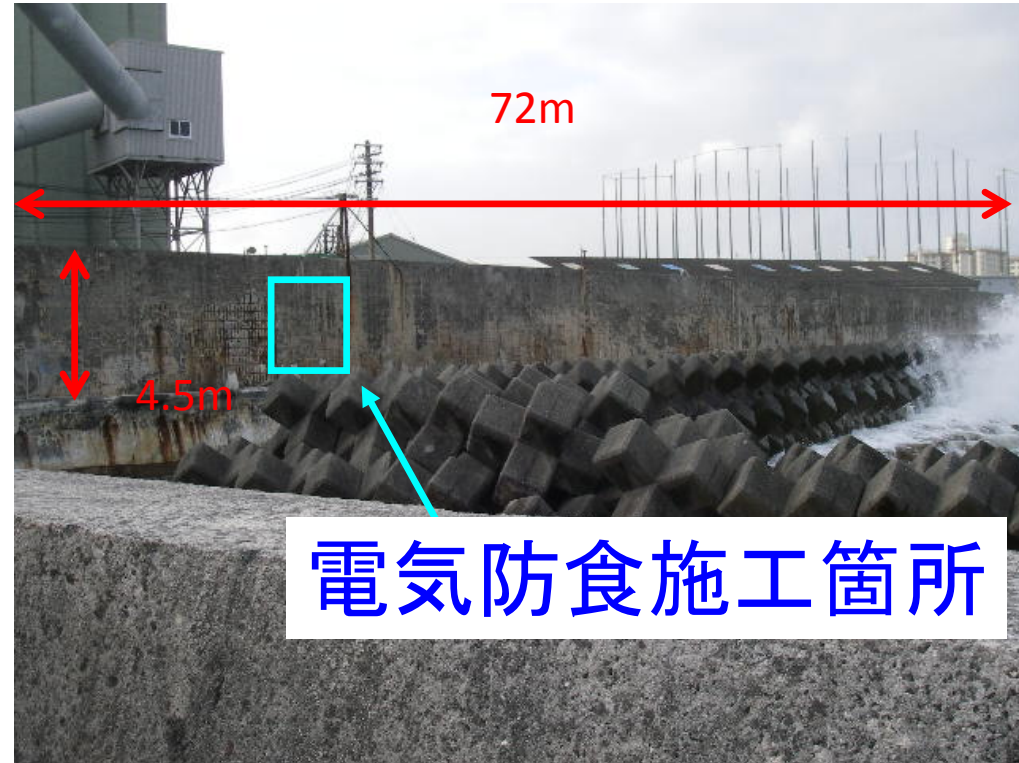
© 2018 CP工法研究会 & エルガード協会

電気防食の地域別施工実績(過去10年)



施工地域

沖縄：1989年に試験施工(約28年前)



電気防食適用約20年の調査報告の紹介

鈴木康弘、山本誠、鹿島篤志、本田和也、若杉三紀夫
「電気防食工法を適用して約20年経過した擁壁の追跡結果報告」
土木学会年次学術講演会概要集Vol.66、pp.505-506、2011

沖縄 : 1989年に試験施工(21年後)



1989年施工時



2010年調査時

沖縄 : 1989年に試験施工(約28年後)



2017年6月14日 写真

1. 鉄筋の腐食とは？
2. 電気防食とは？
3. 劣化対策としての電気防食の位置づけ
4. **電気防食の設計・施工の実際**
5. 電気防食のメリット・デメリット
6. 電気防食Q&A
7. 技術発展に向けた取り組み(トピックス)

電気防食のマニュアル類

①「電気化学的防食工法設計施工指針(案)」

土木学会:コンクリートライブラリ107, 2001/11

②「電気防食工法研究委員会報告書」

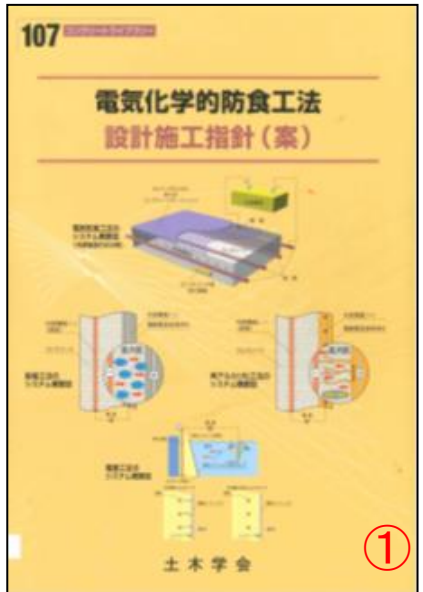
日本コンクリート工学会, 1994/10

③「棧橋劣化調査・補修マニュアル」

東京港埠頭(株), 2012/11

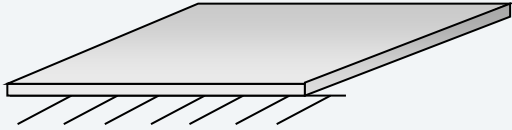
④「コンクリート構造物の電気防食Q&A」

新建新聞社, 日本エルガード協会編, 2008/5



電気防食の種類？ その違い？

面状陽極



防食対象に対して陽極材を面状に設置

防食電流の均一性に優れる

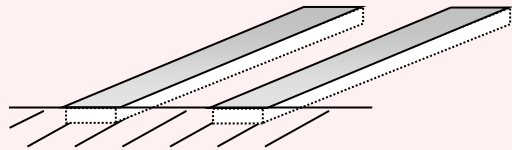
複雑な形状の構造物への設置は難しい場合がある

死荷重が増加する場合がある

美観に優れる

表面塗装の撤去必要

線状陽極



防食対象に対して陽極材を線状に設置

配筋量などに応じた陽極設置が可能

複雑な形状の構造物への設置は概ね容易

死荷重が増加はあまりない

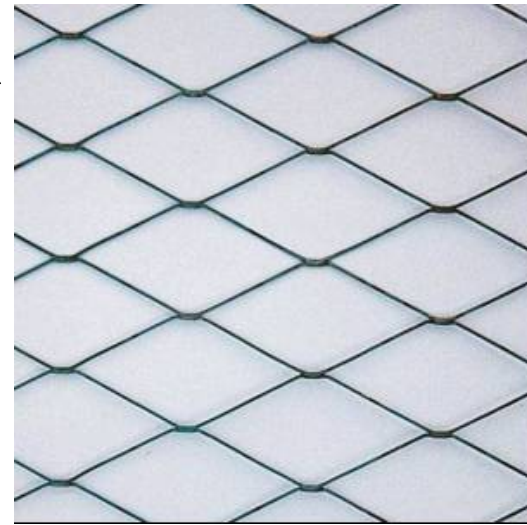
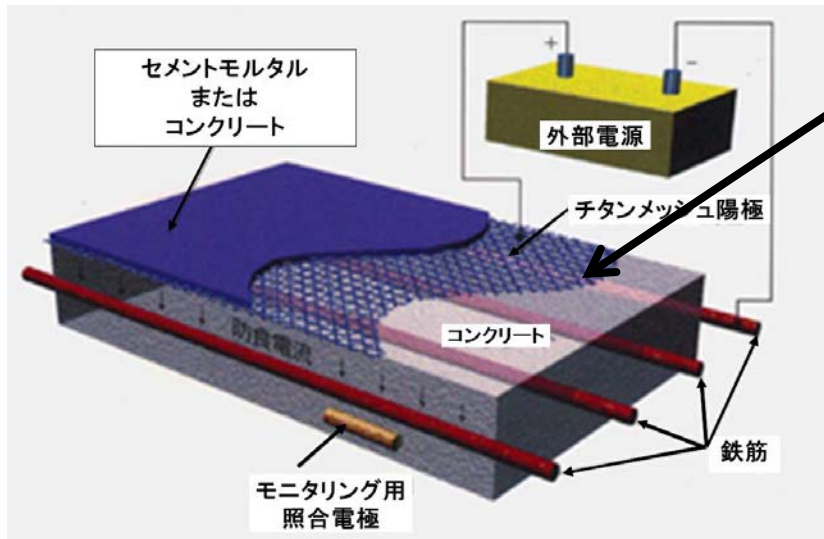
線状の模様が付く

工法によっては表面塗装の撤去不要

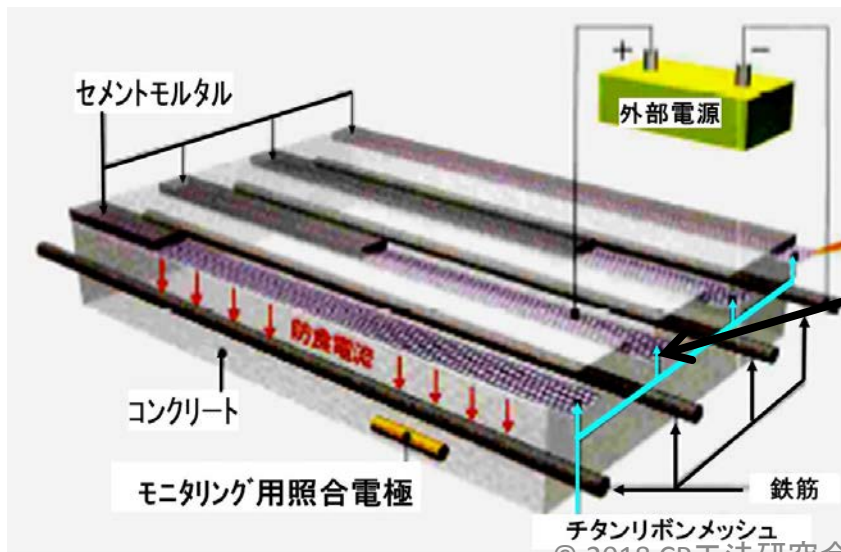
いずれも防食効果に違いは無い！

電気防食システムの例(エルガードシステム)

チタンメッシュ陽極方式



チタンリボンメッシュ陽極方式



電気防食設計の急所

①陽極の配置

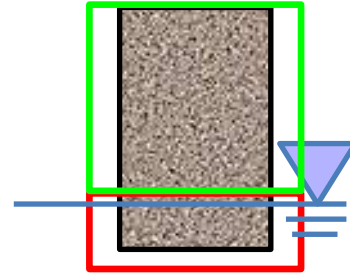
1)回路面積(1台の電源の防食範囲):500m²以下が目安。

2)環境別に陽極が区画化されているか？

コンクリートの湿潤状態により電気回路抵抗が変わるので回路を分けておく必要がある。(例:干満部と気中部)

3)配筋量などに応じて陽極数量を変えているか？

配筋量が多ければ必要な防食電流も増えるので陽極数量も増加する。(腐食程度が大 ⇒ 陽極数量也大)



②電線の太さ・配置

1)電線の太さは適当か？

電線の布設長さが長くなれば、電線抵抗も増すので、電線の径は太くなる。

2)電線の配置はある程度細かいか？

陽極配置は①により区分されているので、それに応じた電線配置になる。

施工の実際1/2

①モニタリング装置設置工マーキング



モニタリング装置や陽極の設置位置をマーキングする。

②モニタリング装置設置工端子取付部はつり



マーキング位置のコンクリートをはつり出し鉄筋を露出させる。

③モニタリング装置設置工端子類取付け



排流・測定用端子を溶接する。
照合電極を鉄筋の近傍に設置する。

④モニタリング装置設置工鉄筋間導通確認



マルチメータを用いて排流線と鉄筋間の導通を確認し、
1mV以下であれば合格。

施工の実際2/2

⑤モニタリング装置設置工はつり部復旧



コンクリートと同程度の抵抗率を有する無収縮のモルタルで埋戻す。

⑥陽極設置工溝切り,陽極設置,埋戻し



陽極を埋込むために溝切りを行う。陽極・コンダクターバーを設置し修復材で埋戻す。

⑦配線配管工配線配管



コンダクターバーとリード線をプルボックス内で結線し、直流電源装置まで配線配管を行う。

⑧直流電源設置工:電源設置,電流調整



直流電源装置の設置、配線の接続を行う。通電調整試験によって防食電流を決定し、通電する。

目次

1. 鉄筋の腐食とは？
2. 電気防食とは？
3. 劣化対策としての電気防食の位置づけ
4. 電気防食の設計・施工の実際
5. **電気防食のメリット・デメリット**
6. 電気防食Q&A
7. 技術発展に向けた取り組み(トピックス)

電気防食のメリット・デメリットのおさらい

■ 電気防食工法のメリット

- (1) 腐食反応に直接関与する抜本的対策
- (2) どのような腐食環境でも確実に防食
- (3) 塩分を含んだコンクリートの除去不要
- (4) 鉄筋の防錆処理が不要
- (5) 防食効果の確認が容易

■ 電気防食工法のデメリット

- (1) イニシャルコストが割高である
- (2) 維持管理が手間である（よくわからない）
- (3) 電気代がかかる（外部電源方式の場合）

目次

1. 鉄筋の腐食とは？
2. 電気防食とは？
3. 劣化対策としての電気防食の位置づけ
4. 電気防食の設計・施工の実際
5. 電気防食のメリット・デメリット
- 6. 電気防食Q&A**
7. 技術発展に向けた取り組み(トピックス)

電気代はどの程度？

1人暮らし向けの冷蔵庫

75L: 年間消費電力243kWh

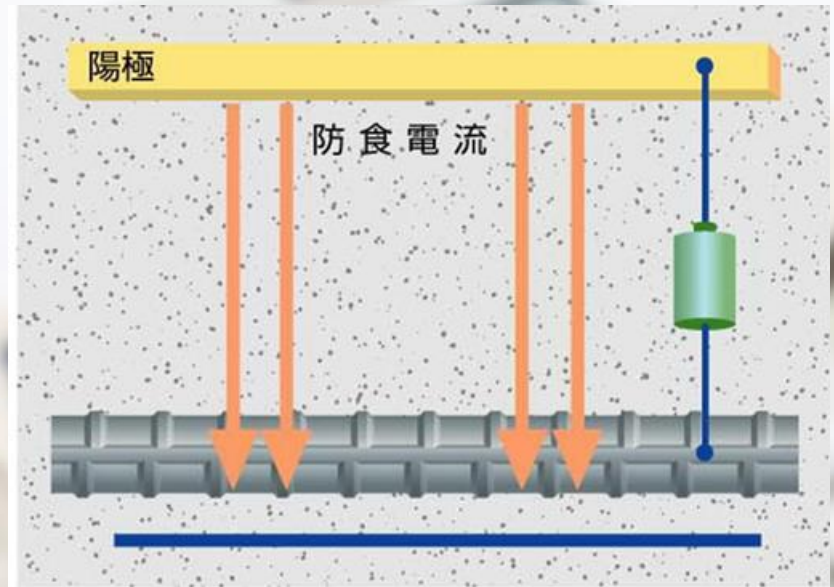
$243\text{kWh} \times 25.91\text{円} = 6,296\text{円}$



電気防食

500m²: 年間消費電力219kWh

$219\text{kWh} \times 25.91\text{円} = 5,674\text{円}$



防食面積	500m ² (1回路あたり最大)
通電電圧	5V(過去実績より)
防食電流	2.5A(500m ² × 0.005A/m ²)
交流から直流への変換効率	50%
年間消費電力	$5\text{V} \times 2.5\text{A} \div 50\% \times 8760\text{h}$ =219kWh

適用後に管理者がやるべきことは？

点検	概要	頻度
日常	維持管理者が定期的に目視可能な箇所について点検記録する 直流電源装置の運転ランプが点灯していることを確認する。	1回／月 管理者
定期	専門知識を有する調査員が定期的に異常個所の有無を点検記録する 専門家による電位変化量の確認と適切な電流調整	1回／1～2年 専門メーカー コンサル
詳細	専門知識を有する調査員が定期的に異常個所が確認された場合や天災などの異常時に実施する	1回／5年 (異常時) 専門メーカー コンサル

管理者の点検

日常点検で受電ランプと運転ランプの点灯を確認する。

受電ランプ 運転ランプ



柱上(ちゅうじょう)型

受電ランプ 運転ランプ



自立(じりつ)型

施工者は管理者がランプを目視確認しやすいように電源装置の立地・方向性を管理者と協議し設置する。

電気防食に失敗はないか？

あります！ 陽極配置不足による防食効果不足

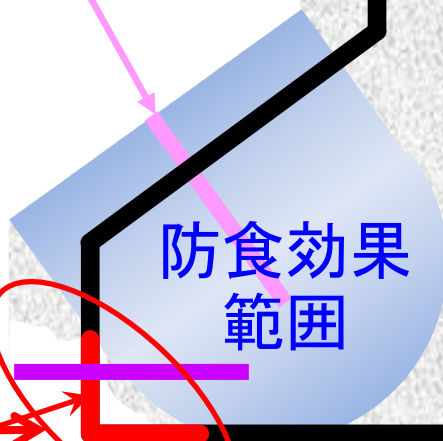


剥離・剥落箇所

防食効果不足

電気防食：外部電源方式

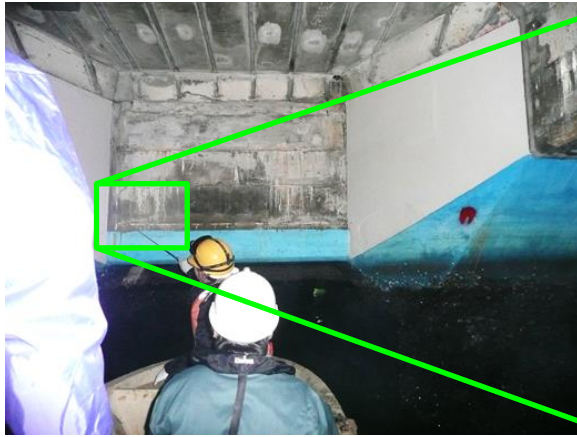
点状陽極



対策：点状陽極追加

他に電気防食に失敗はないか？

あります！ 陽極充填モルタルの変色 ただし防食効果はあり！



原因 外電不溶性陽極による電気化学反応： $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 1/2\text{O}_2 \uparrow + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
(流電陽極方式では陽極自体が溶けるため、この現象は起こらない。) 陽極電流密度高く H^+ (酸性イオン)が増加・中性化しモルタルが劣化・変色
通常はコンクリートのアルカリ(OH^-)と中和し変色は顕在化しない
陰極(鉄筋)電気化学反応： $\text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^- \Rightarrow \text{OH}^-$ は不足なし

対策 陽極かぶり不足 → 陽極かぶりを十分にとる
陽極電流密度増大 → 陽極設置数量を増やす
充填モルタルの改良 → 耐酸性モルタル
定期的な補修 → 陽極は健全なので定期的にモルタルを充填する

現在では変色無し！

その他の問題は？

自然災害等の不可抗力



原因: 落雷
対策: 修理
予防: 材質変更
(金属製)
設置位置
(物陰)

流木が衝突しプルボックス破損



原因: 落雷
対策: 取替
予防: 避雷器類

落雷による過大電流で電子部品焼損

経年劣化



原因: 紫外線
対策: 修理
予防: 材質変更
材料変更
(エルボ)
設置位置
(物陰)

経年劣化で応力負荷部劣化



原因: 経年劣化
対策: 取替
予防: 定期清掃
定期取替

経年劣化でゴムパッキン劣化

目次

1. 鉄筋の腐食とは？
2. 電気防食とは？
3. 劣化対策としての電気防食の位置づけ
4. 電気防食の設計・施工の実際
5. 電気防食のメリット・デメリット
6. 電気防食Q&A
7. 技術発展に向けた取り組み(トピックス)

公益団体との共同研究

日本材料学会(CP工法研究会・エルガード協会他)

コンクリート構造物の電気化学的防食工法の合理化に向けた調査研究
将来的には土木学会「コンクリートライブラリー107」の改訂に向けた取り組み

土木研究所(東北大学・CP工法研究会・エルガード協会他)

電気防食工法を用いた道路橋の維持管理手法に関する研究
電気防食適用橋梁の実態調査
電気防食工の技術整理、間欠通電適用検討、電気防食システム標準化
(新たな活用)

日本コンクリート工学会-JCI-(エルガード協会他)

軍艦島共通試験

東洋大学(エルガード協会)

干満帯の電気防食基準 ConMat2016で成果発表

岐阜大学(エルガード協会)

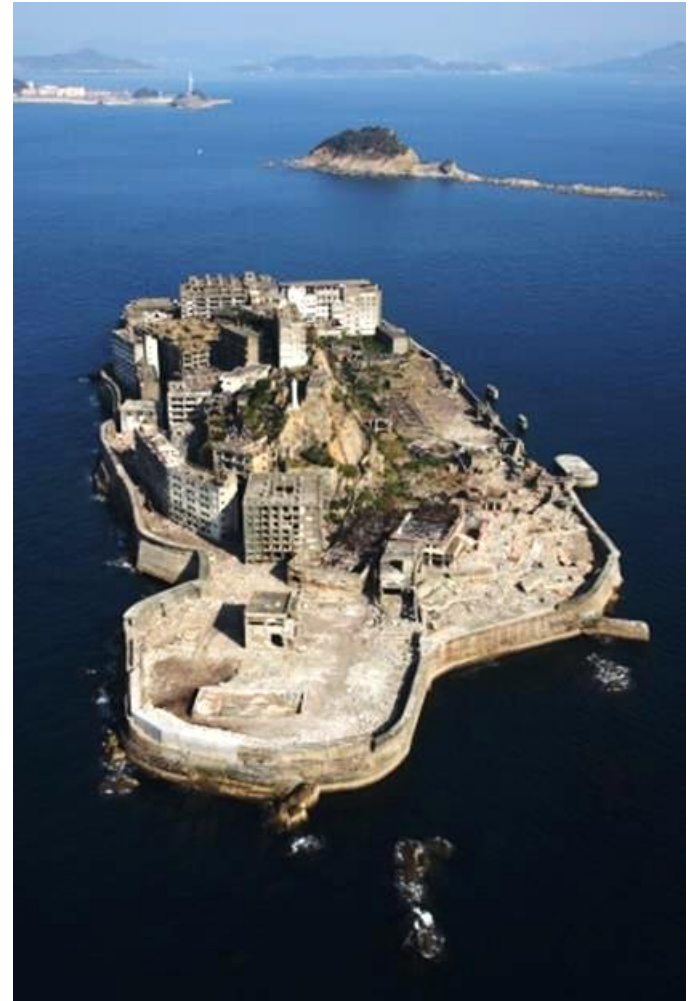
電気防食のLCM研究

トピックス

世界遺産・軍艦島での
電気防食の長期性能
検証試験に **チャレンジ！！**

日本エルガード協会
東洋建設
ショーボンド建設
ナカボーテック
日本防蝕工業
住友大阪セメント

協会会員5社との協同応募



ご清聴ありがとうございました。