

コンクリートメンテナンス協会
コンクリート構造物の補修・補強に関するフォーラム2022

電気防食技術と施工事例の紹介

2022年10月4日

コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会

日本エルガード協会

小林浩之

(株)ナカポーテック

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電気化学的防食工法研究会(CP研)とは

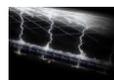
コンクリート構造物の長寿命化に貢献できる電気化学的防食工法の普及・発展および技術の向上等を活動の目的とする研究会

・発足：1992年，会員会社：23社（2022年8月現在）

会 長	濱田秀則（九州大学 教授）
名誉会長	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 名誉教授） 武若耕司（鹿児島大学 名誉教授）
事務局	東亜建設工業(株)内
HPアドレス	https://www.cp-ken.jp/

【活動内容】

- ① 普及活動の実施
- ② 学術研究の実施
- ③ 技術指針類の作成
- ④ 施工実績の調査



●日本エルガード協会とは

- 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，会員会社：23社
- 電気防食技術研究会：27社 コンサルタント中心（2022年3月現在）

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 名誉教授） 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/

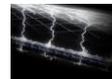
【活動内容】

- 特別記念講演
- 電気防食施工管理技術者
認定試験（累計693名合格）
- 共同研究
（土木研究所，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
発注者セミナー開催
- 次世代技術者の会

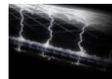


講演内容

1. 鋼材の腐食と電気防食
2. 劣化対策としての電気防食の位置づけ
3. 電気防食のマニュアル類
4. 電気防食設計と補修事例
5. 技術発展に向けた取り組み(トピックス)



1. 鋼材の腐食と電気防食

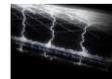


コンクリート構造物における鋼材腐食

●鋼材腐食はコンクリートに致命的な影響を与える！



特に塩害には要注意！



鋼材の腐食メカニズム

●鉄が錆びる(腐食する)のは自然の摂理

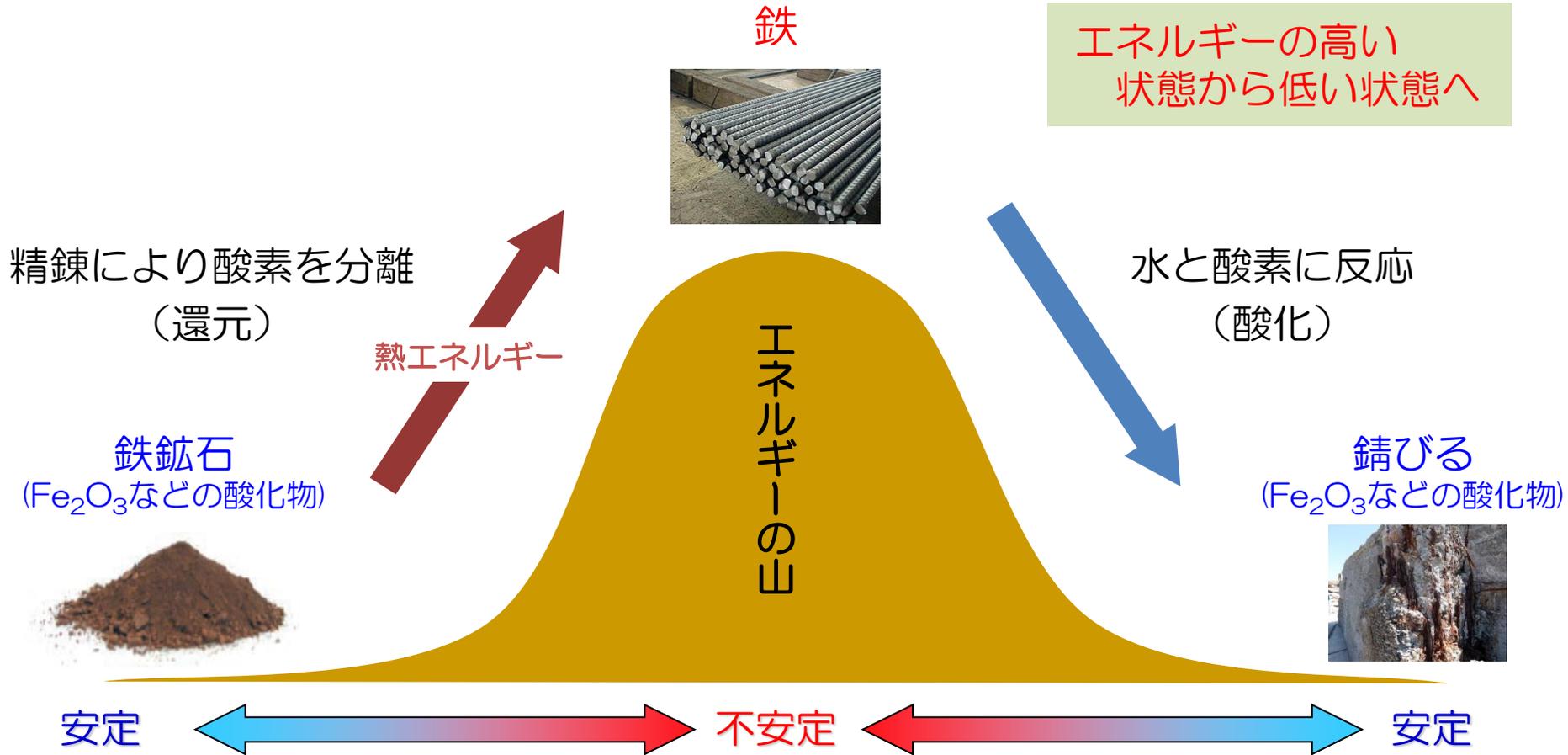
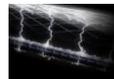


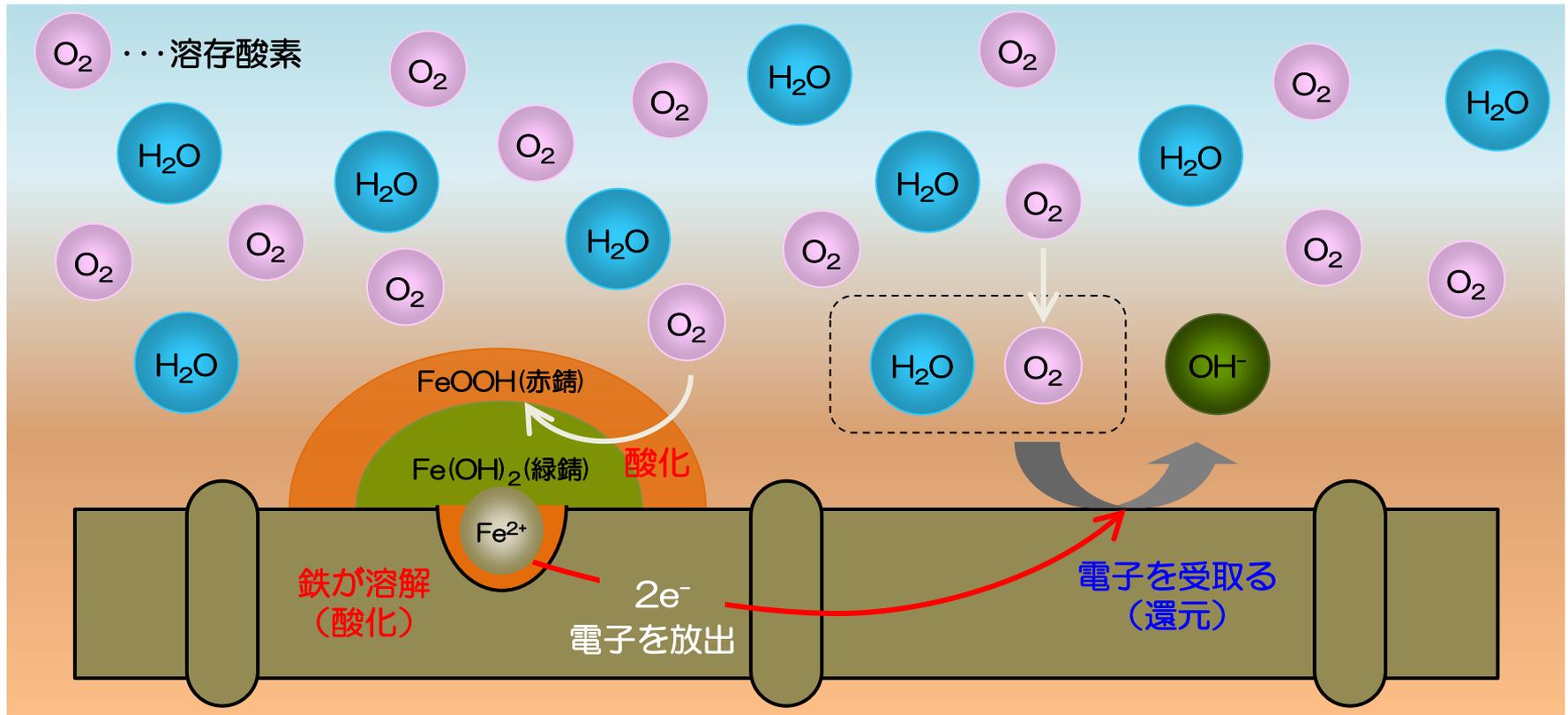
図 鉄鉱石から錆びへの変化



鋼材の腐食メカニズム

●腐食している鋼材の表面

例えば、鋼材を水の中に浸漬すると...赤錆が生じて水が赤褐色になる



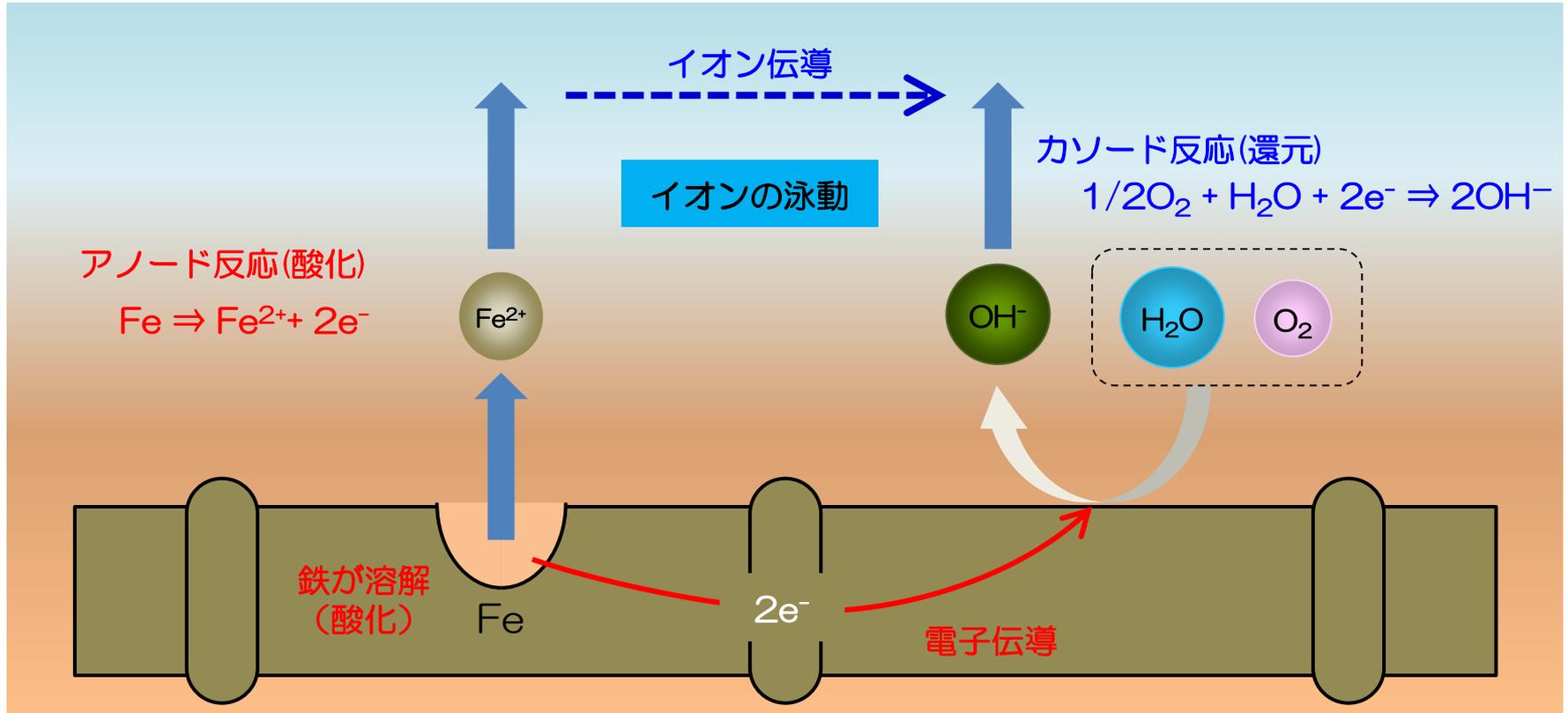
鋼材が腐食するためには水と酸素が必要！ ……ここが Point !



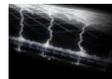
鋼材の腐食メカニズム

●腐食している鋼材の表面

鋼材の中では電子が移動 ⇒ 水の中ではイオンの移動・・・一つの回路を形成



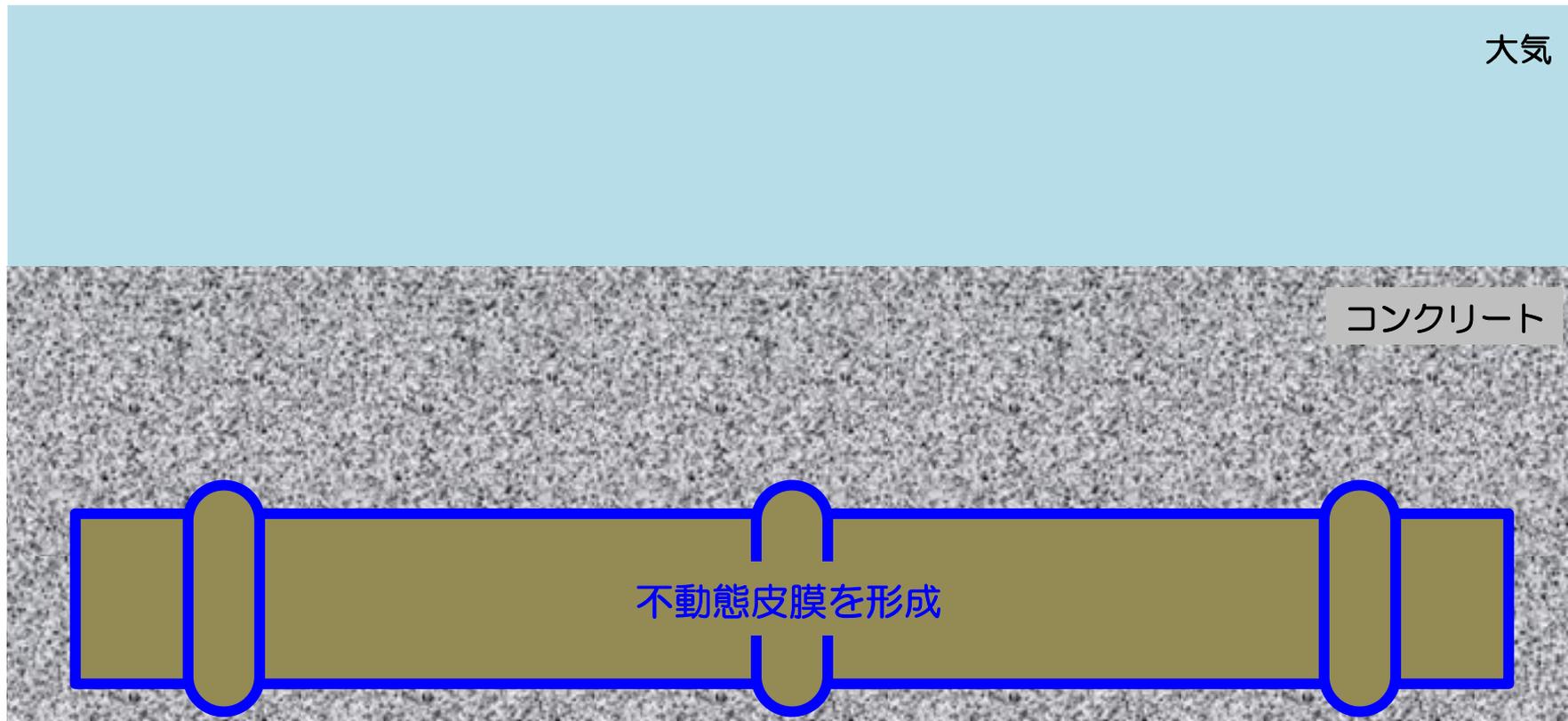
鋼材の表面には**腐食電池**が形成され、**腐食電流**が流れる



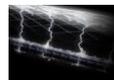
コンクリート中鋼材の腐食メカニズム

●鋼材腐食によるコンクリートの劣化

健全なコンクリートはpHが12.5と高く、アルカリ性である

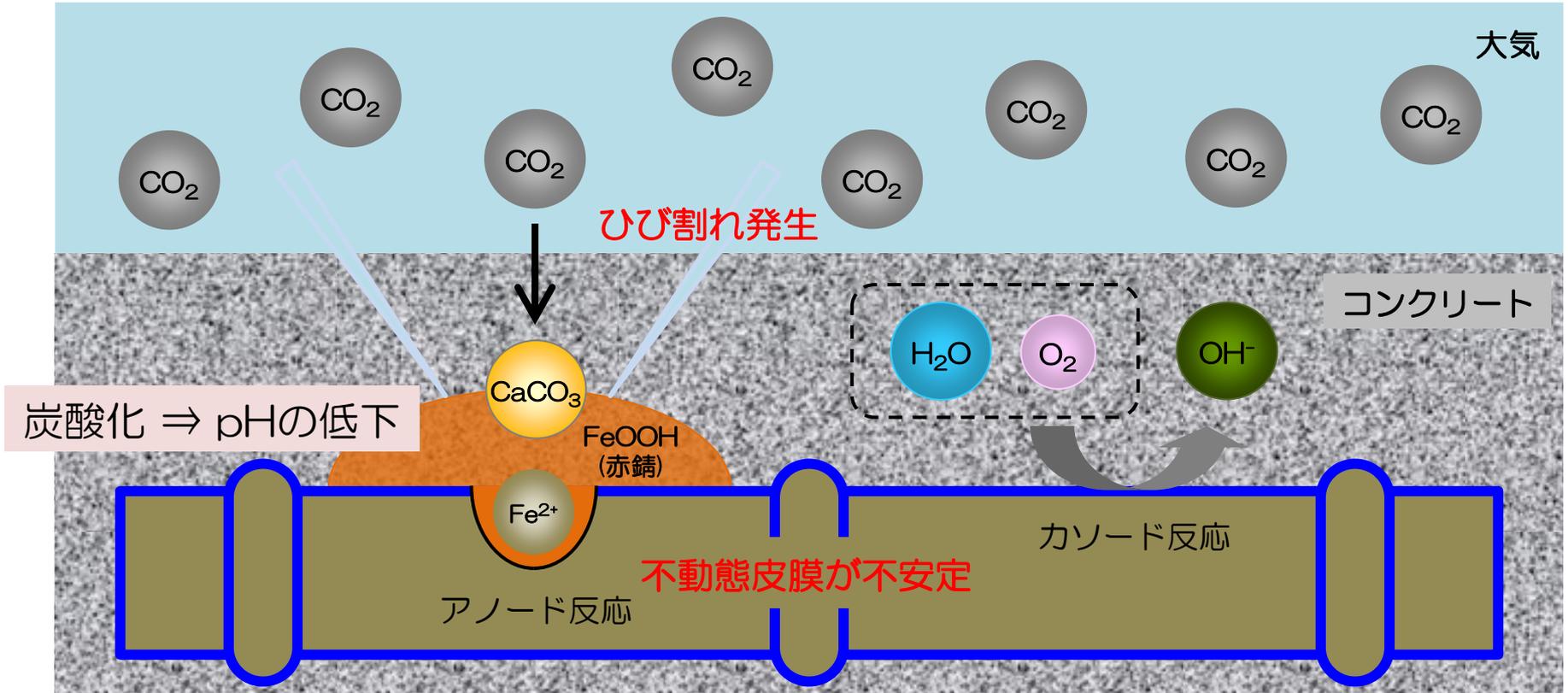


鋼材の表面には不動態皮膜が形成され、腐食はほとんど進行しない

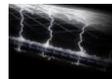


コンクリート中鋼材の腐食メカニズム

● 鋼材腐食によるコンクリートの劣化・・・中性化



鋼材の表面の**不動態皮膜が不安定**となり、腐食が進行 ⇒ **ひび割れ**



コンクリート中鋼材の腐食メカニズム

●コンクリートの腐食劣化・・・中性化

フェノールフタレイン1%水溶液による中性化試験

フェノールフタレイン水溶液を噴霧

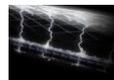


中性化深さを計測



【判定方法】

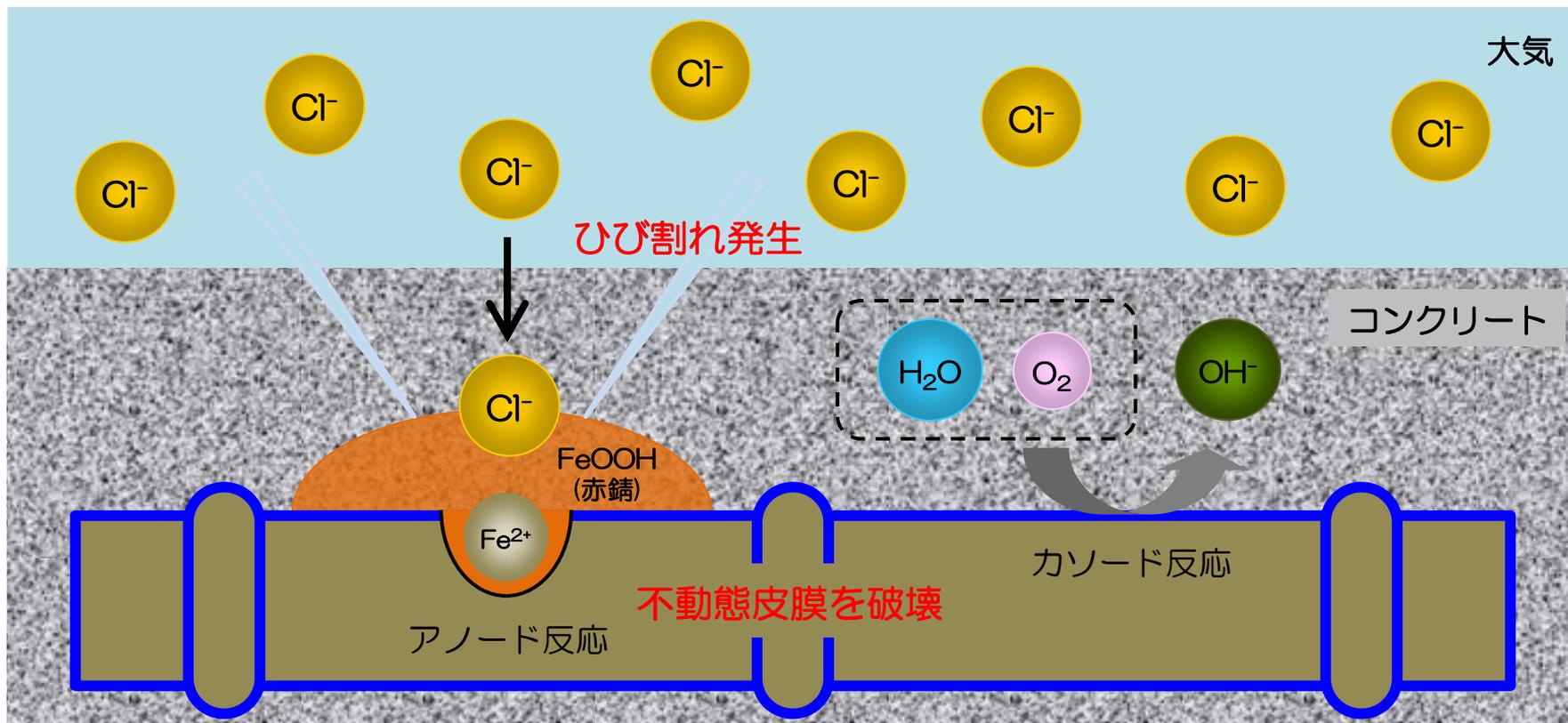
赤色に変化 ⇒ 健全(アルカリ性) 変化なし ⇒ 中性化



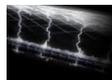
コンクリート中鋼材の腐食メカニズム

●コンクリートの腐食劣化・・・塩害

腐食発錆限界塩化物イオン量 ⇒ **コンクリート標準示方書に記載**



鋼材の表面の**不動態皮膜が破壊**され、腐食が進行 ⇒ **ひび割れ**

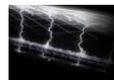


コンクリート中鋼材の腐食・・・塩害劣化事例

塩害劣化事例①・・・港湾施設の栈橋上部工



塩害劣化事例②・・・コンクリート橋梁（鉄道・道路）



電気力で腐食を防ぐ 電気防食

●電気防食の原理

電気エネルギーによって、不活性域まで変化させること！

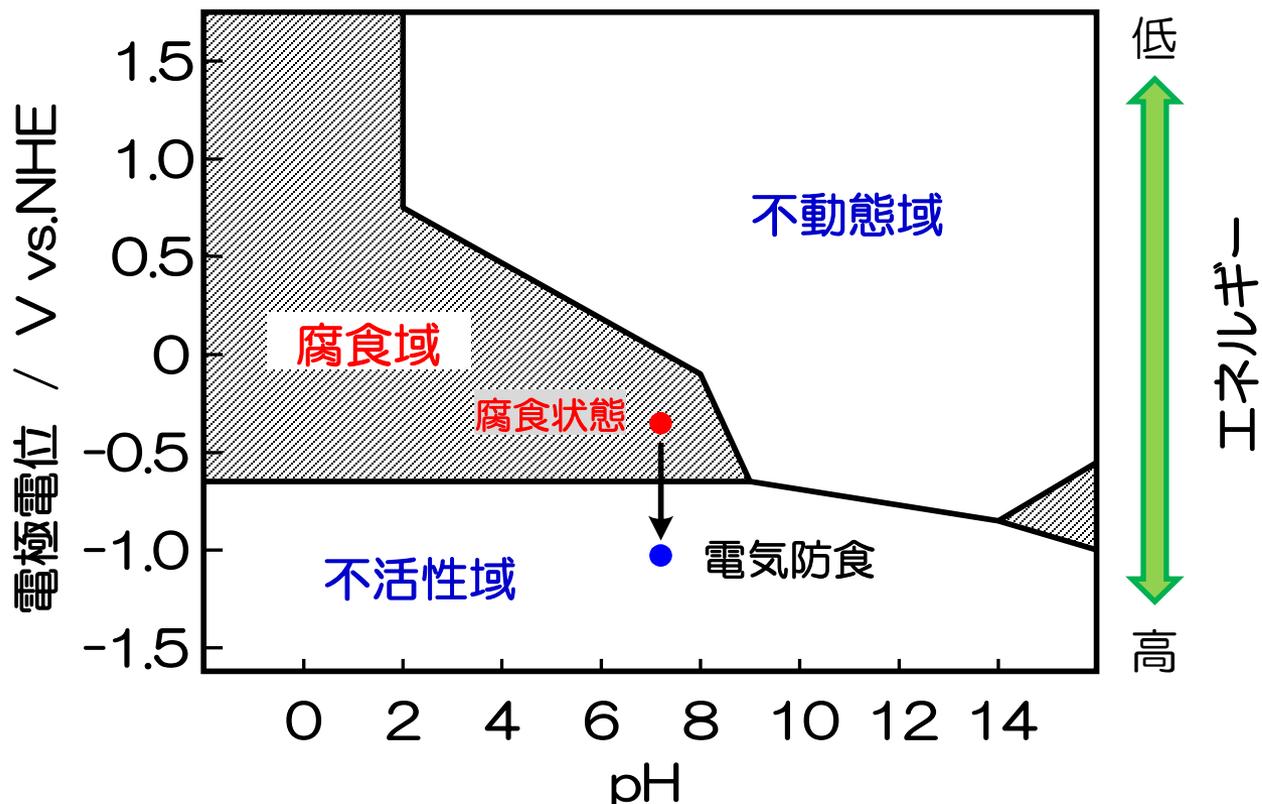
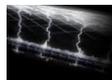


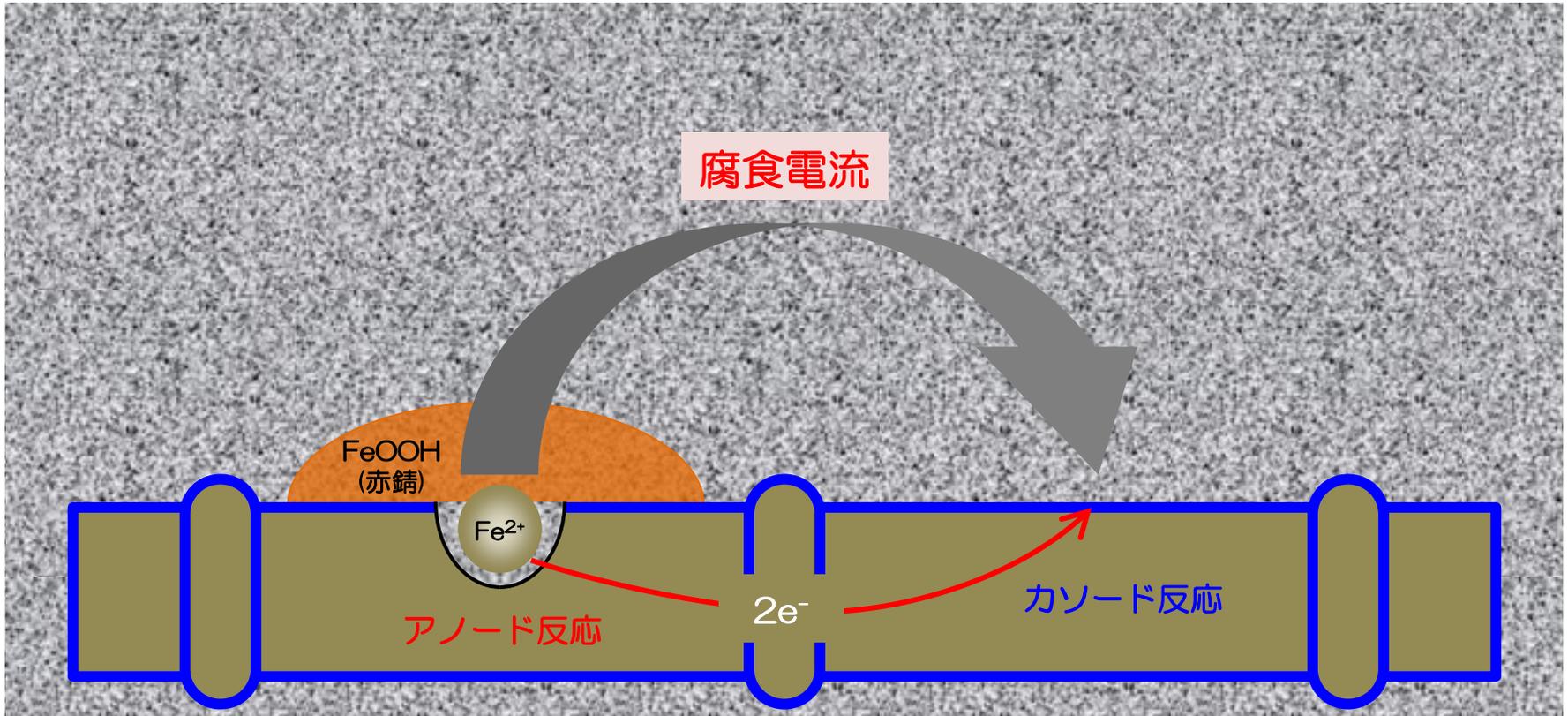
図 鉄の電極電位—pH図(模式図)



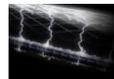
電気力で腐食を防ぐ 電気防食

●電気防食の原理

鋼材の表面に腐食電池が形成され、腐食電流が生じている



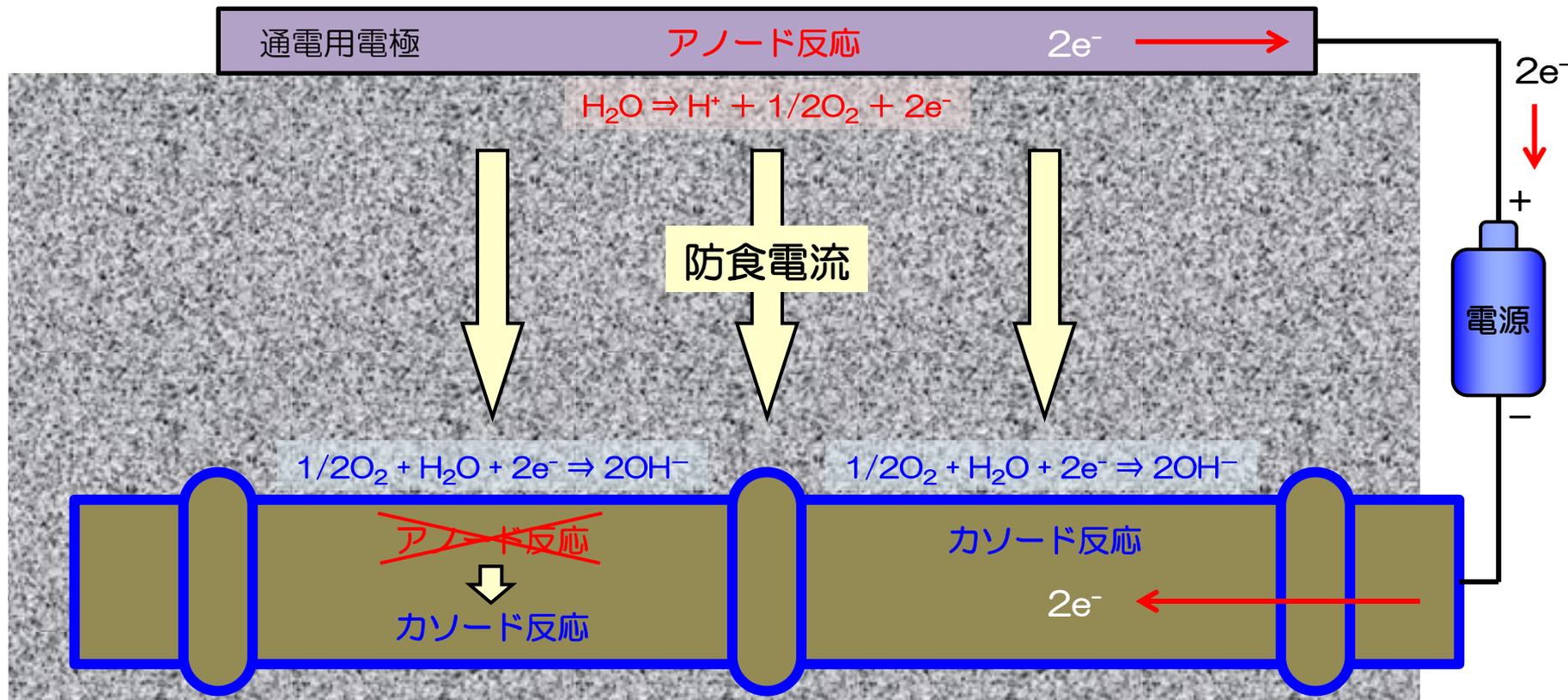
電気エネルギーによって電子の流れの向きを変えられれば腐食が抑制される



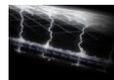
電気力で腐食を防ぐ 電気防食

●電気防食の原理

通電用の電極をコンクリート内部・外部に設置 ⇒ 外部電源を用いて通電



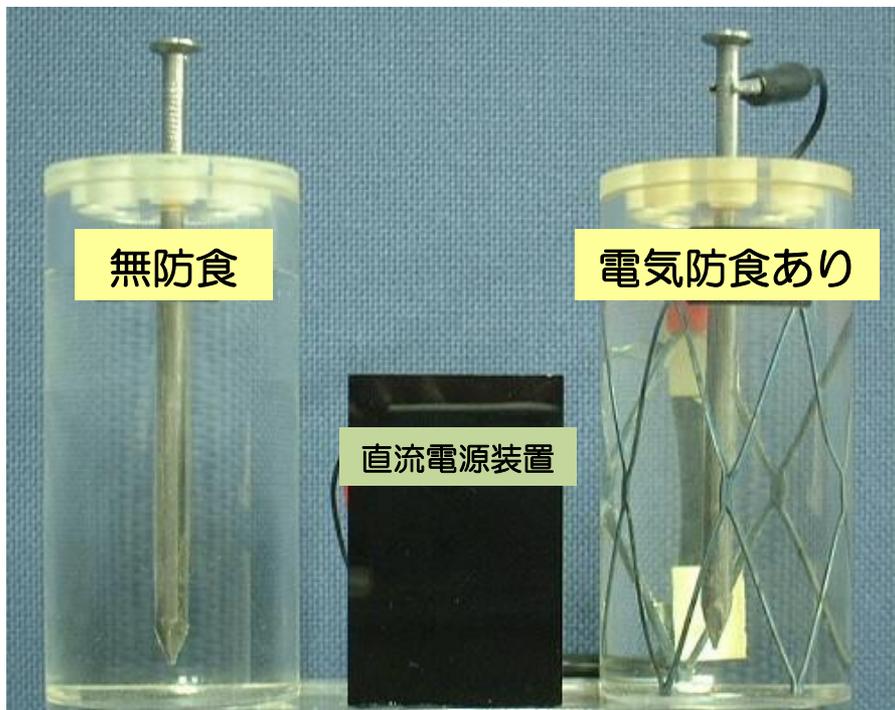
アノード(酸化)反応は全て通電用電極上で生じる ⇒ 腐食抑制



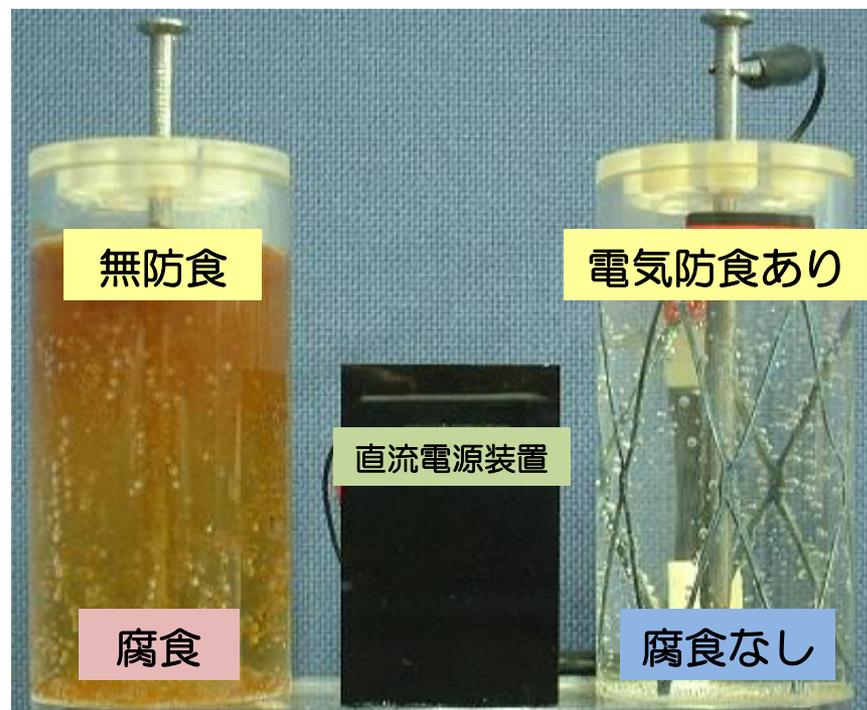
電気防食の効果を実験で検証

● 検証実験・・・食塩水に浸漬した鉄釘に電気防食を適用

《通電前》

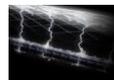


《通電後》



出典：日本エルガード協会

電気エネルギーにより，鉄釘の腐食を抑制！



電気防食の特徴 メリット

●電気防食は腐食反応を直接的に抑制し鋼材の再不動態化を促す

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

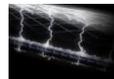
4) 鋼材の防錆処理が不要

鋼材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

鋼材の電位計測によって判定できる



電気防食の特徴 デメリット

1) イニシャルコストが割高

約8~12万円/m²程度

2) 維持管理が手間（よくわからない）

外部電源方式は電源保守が必須。経年劣化に応じて交換も必要。
流電陽極方式も定期点検実施がベター。

3) 電気代が必要（外部電源方式）

外部電源方式の場合 約30~50円/m²・年

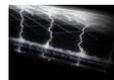
4) 陽極材の定期的な交換が必要

流電（犠牲）陽極材の定期的な交換が必要

5) 陽極被覆材の劣化が起きる場合がある



外部電源方式の陽極表面では水の電気分解反応が起こる。
通常はコンクリートの主成分Ca(OH)₂で中和される。



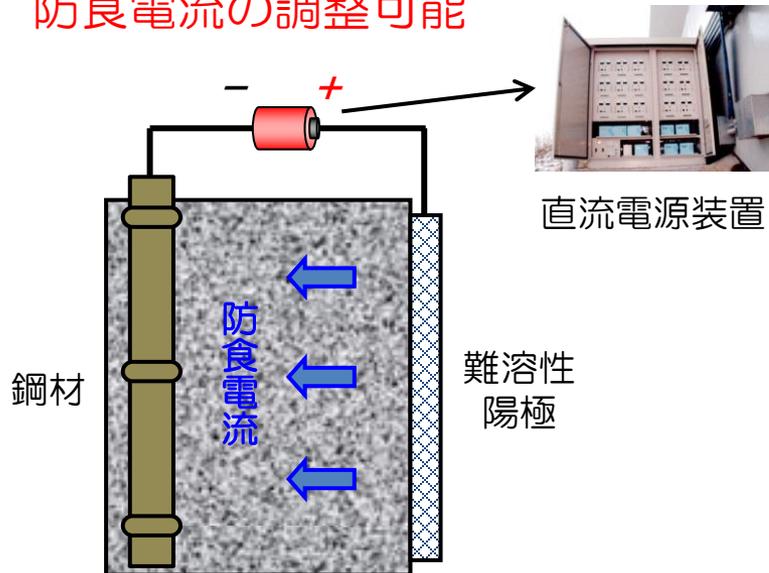
電気防食システムの種類

- 防食電流の供給方法によって2方式がある

電気防食システム

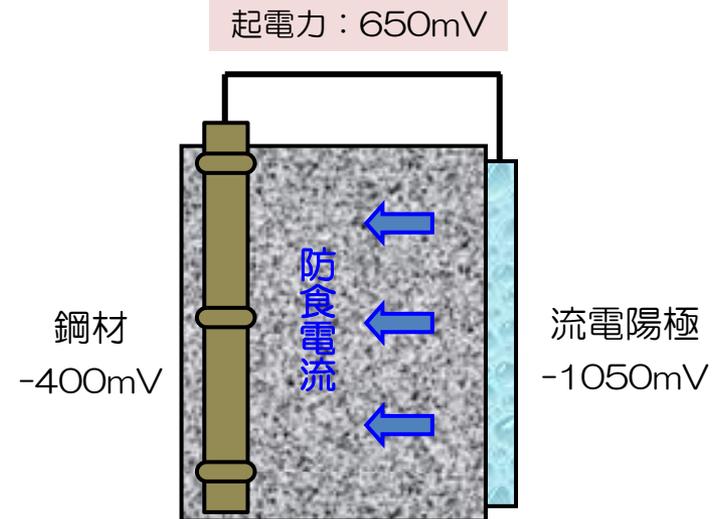
外部電源方式

直流電源装置を用いる
防食電流の調整可能



流電(犠牲)陽極方式

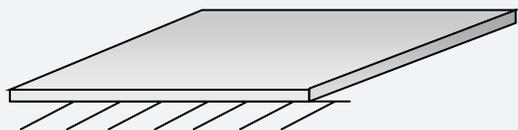
陽極と鋼材の電位差を利用する
防食電流の調整不可能



電気防食システムの種類

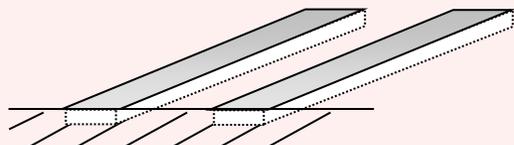
●陽極システムの形状による分類

面状陽極



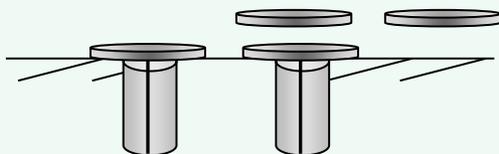
防食対象に対して、陽極材を面状に設置
防食電流の均一性に優れる

線状陽極



所定の設置間隔（300mm以下）をあけて設置
設置間隔の検証必要
補修構造物表面に塗装がある場合など有効
⇒塗装を全面除去する必要なし

点状陽極



コンクリート表面からドリル削孔して設置
所定の設置間隔をあけて設置
局所的な防食に有効

※図：コンクリート構造物の電気防食 Q&A 日本エルガード協会編から一部抜粋

●電気防食システムの基本構成

① 陽極材

- 防食電流を供給するための電極
- 流電陽極方式では、陽極材が溶解(腐食)して防食電流を供給する

② 鋼材

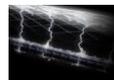
- 防食対象であり、表面に防食電流が流れ込む
- 排流端子を溶接し、排流線を直流電源装置あるいは流電陽極に接続する

③ 照合電極

- 鋼材の電位を測定するための基準になる電極

④ 直流電源装置(外部電源方式のみ)

- 防食電流を供給するための整流器



電気防食システムの施工手順

● 施工手順の例・・・チタンリボンメッシュ陽極方式

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
端子取付け部はつり



マーキング位置のコンクリートをはつり出し鋼材を露出させる。

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。照合電極を鋼材の近傍に設置する。

④ モニタリング装置設置工
鋼材間導通確認



マルチメータを用いて排流線と鋼材間の導通を確認し、1mV以下であれば合格。

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。

塩害や各種腐食からアクティブにコンクリート構造物を守る！

コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会

ELGARD SYSTEM

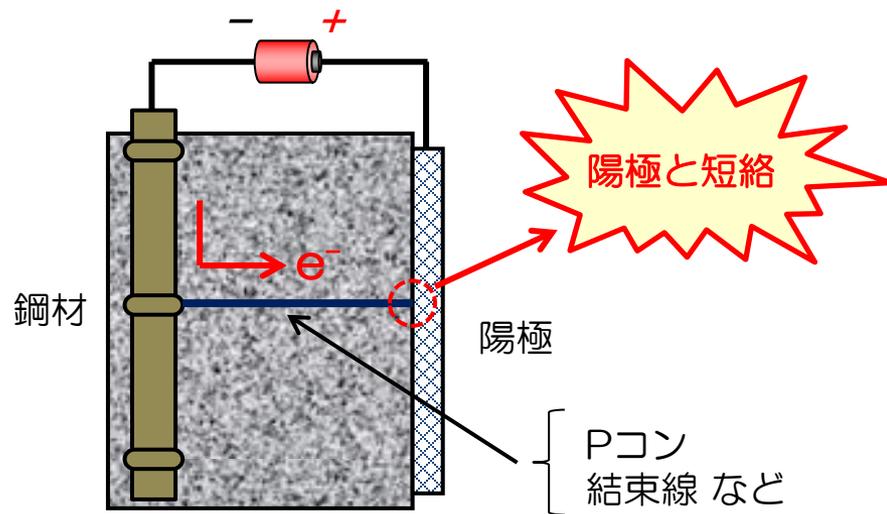
日本エルガード協会

電気防食システム施工時の注意点

●陽極材と鋼材がコンクリート中で短絡してはならない！

防食電流が短絡部を流れ、鋼材表面の腐食を抑制できない！

コンクリート表面には、内部鋼材と電氣的に導通した金属がある！

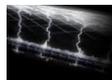


内部鋼材と繋がると ⇒ 単なる電線となる

処理方法：除去、エポキシなどで被覆

コンクリート構造物の補修・補強に関するフォーラム 2014
コンクリート構造物の電気防食工法の紹介資料から写真抜粋

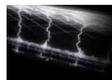
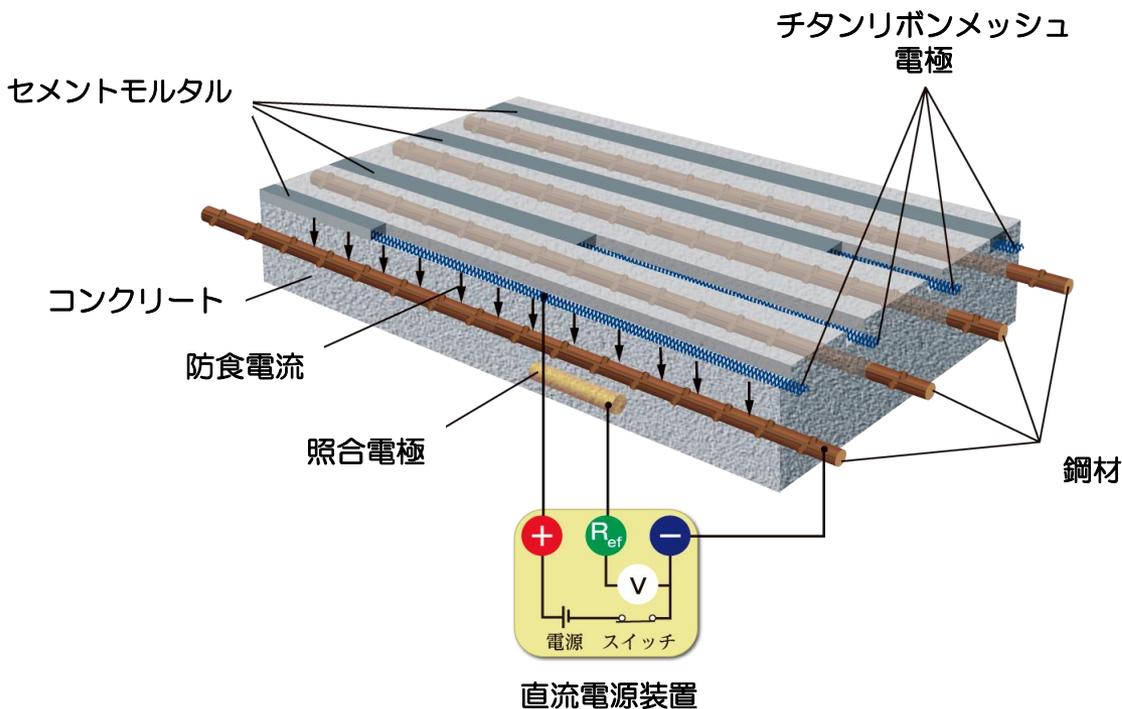
細目に陽極-鋼材間の
絶縁確認を行う



電気防食工法の種類（一部の紹介）

●チタンリボンメッシュ陽極方式：外部電源・線状陽極タイプ

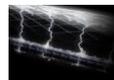
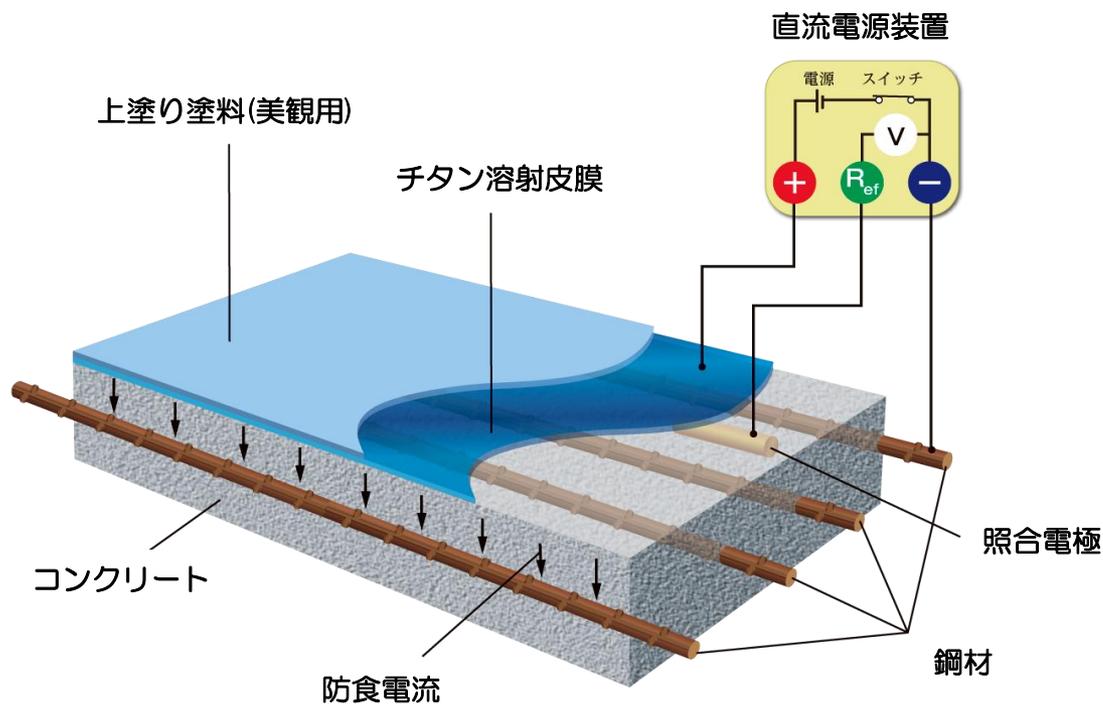
金属酸化物をコーティングしたリボンメッシュ電極を溝切したコンクリート中に設置し，直流電源装置を用いて防食電流を供給する方式



電気防食工法の種類（一部の紹介）

●チタン溶射方式：外部電源・面状陽極タイプ

高純度チタンをコンクリート表面にアーク溶射して耐久性のある電極皮膜を形成し，直流電源装置を用いて防食電流を供給する方式

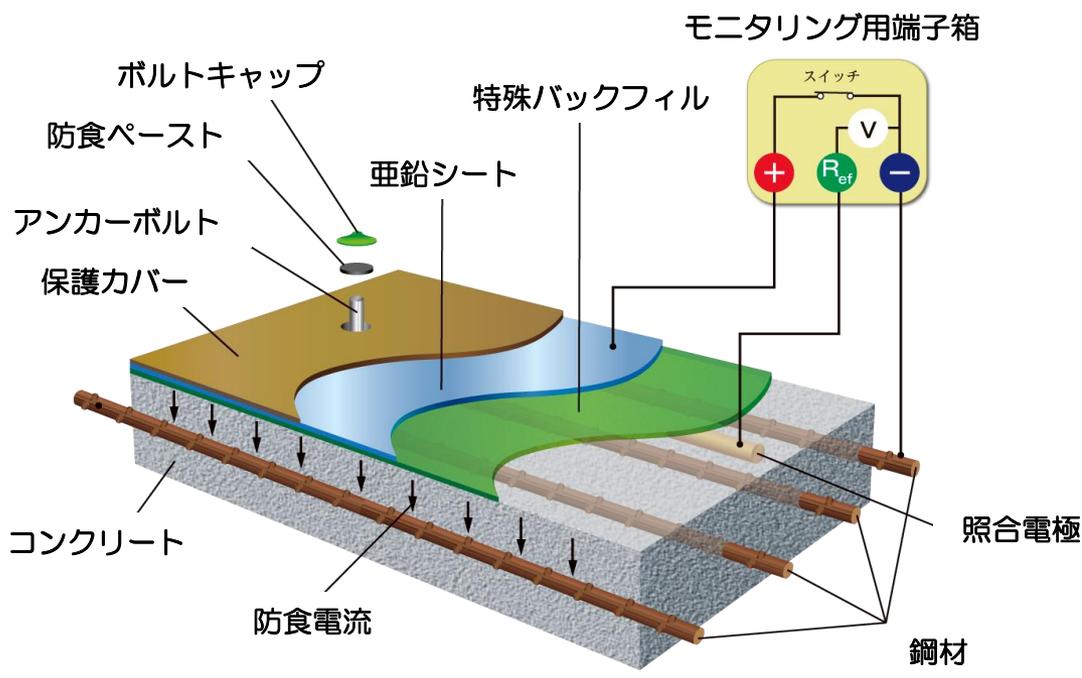


電気防食工法の種類（一部の紹介）

●亜鉛シート方式：流電陽極・面状陽極タイプ

電源不要！

亜鉛シート，バックフィル，保護カバーからなる亜鉛防食板をアンカーボルトでコンクリート表面に設置し，鋼材と接続して防食電流を供給する方式

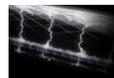
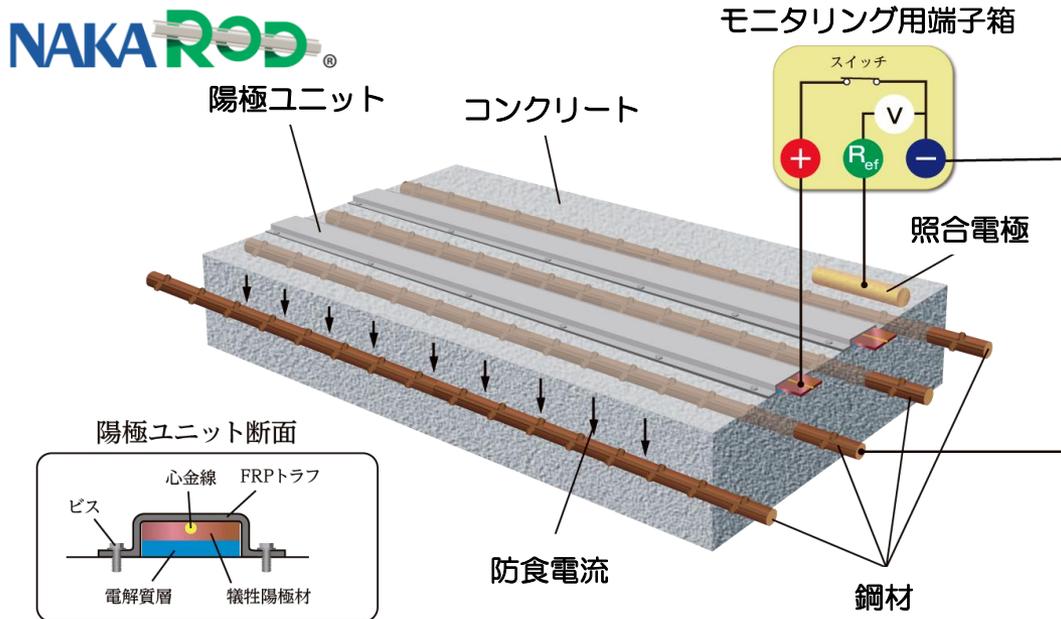


電気防食工法の種類（一部の紹介）

●NAKAROD方式：流電陽極・線状陽極タイプ

電源不要！

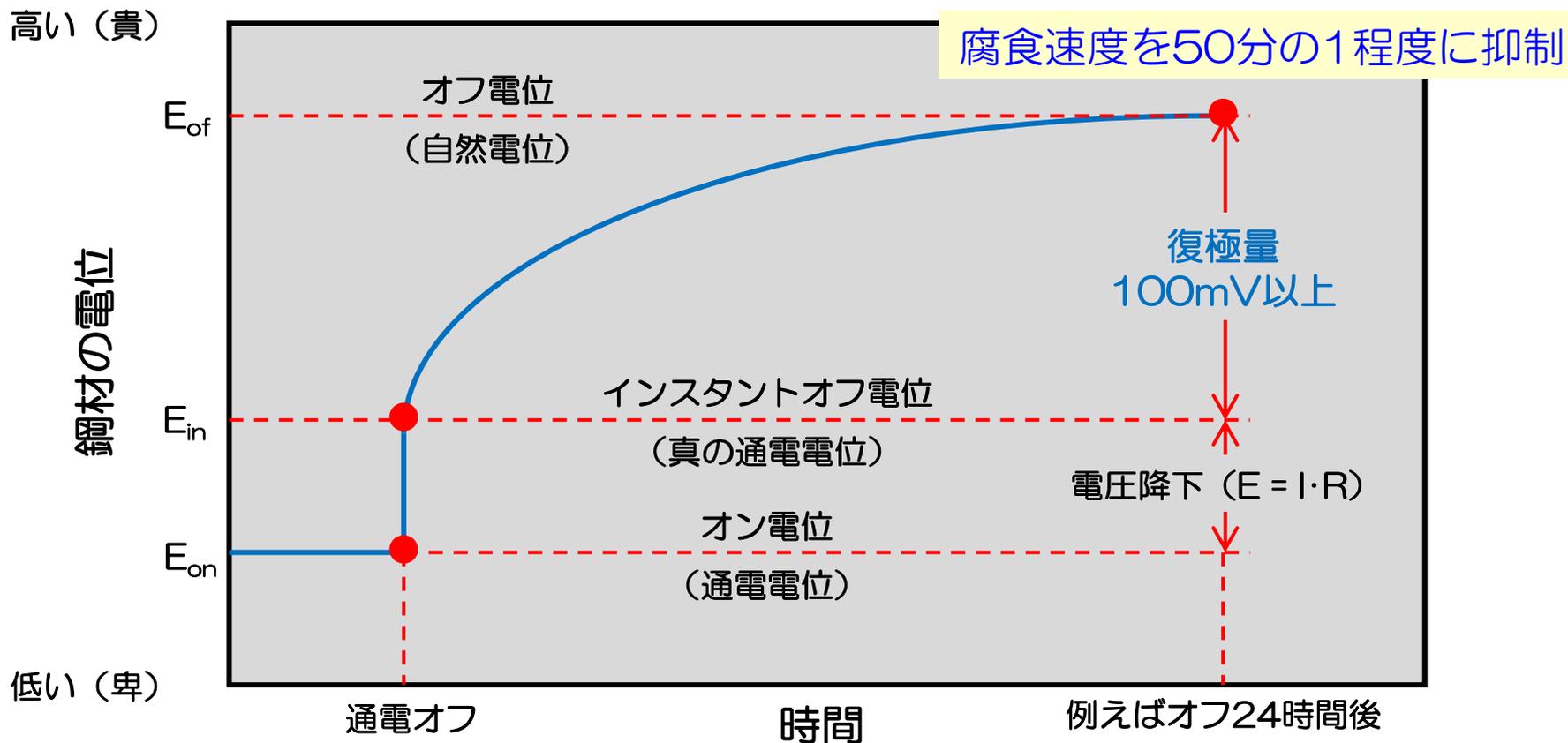
犠牲陽極材，電解質層，FRPトラフからなる陽極ユニットをステンレス製ビスでコンクリート表面に設置し，鋼材と接続して防食電流を供給する方式



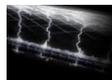
電気防食効果のモニタリング

● 復極量測定により電気防食効果を判定

100mVシフト基準：復極量が100mV以上で効果あり



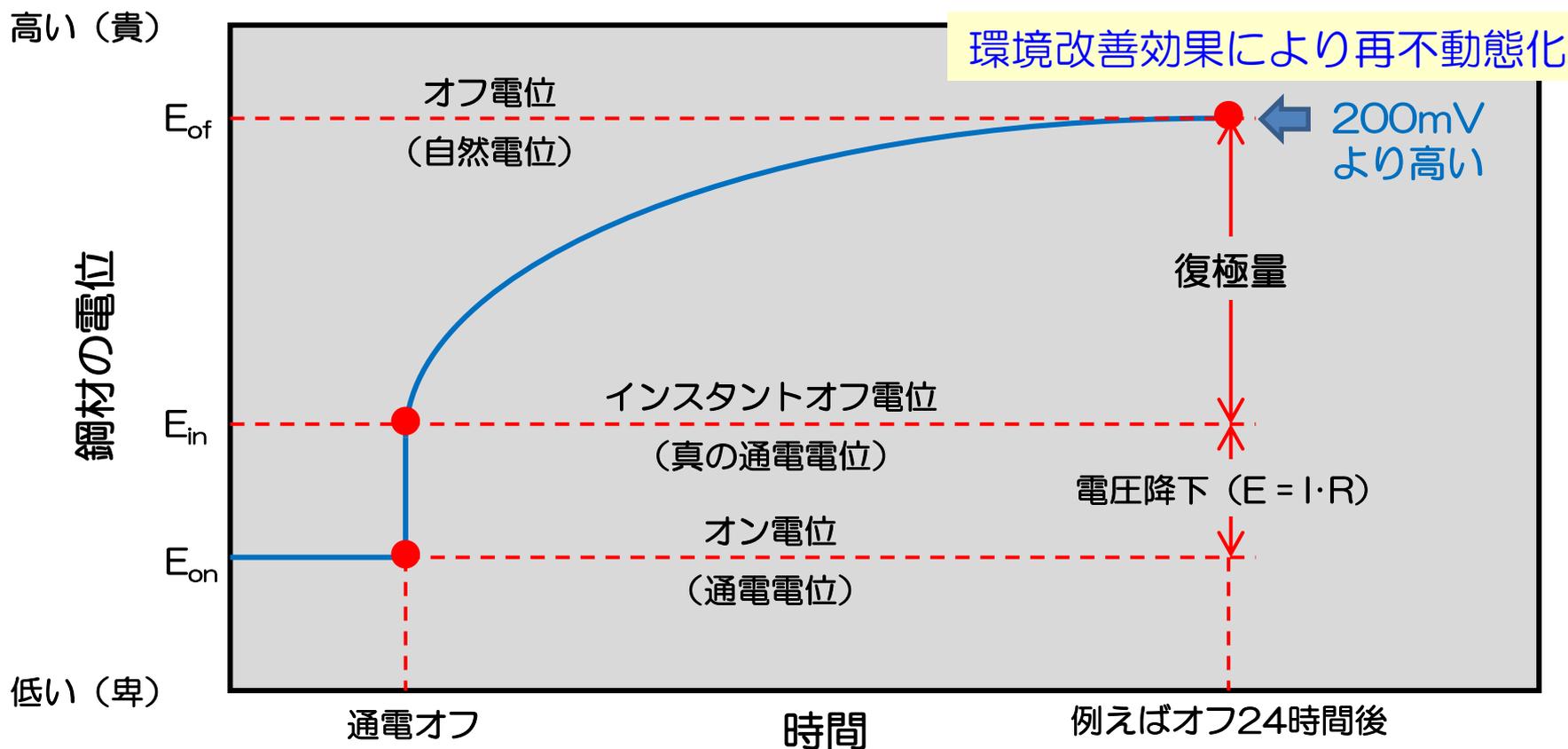
防食効果判定の模式図 (復極量)



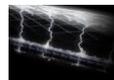
電気防食効果のモニタリング

● オフ電位測定により電気防食効果を判定

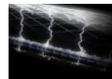
オフ電位基準：200mV vs.CSEより高いと効果あり



防食効果判定の模式図 (オフ電位)

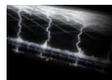
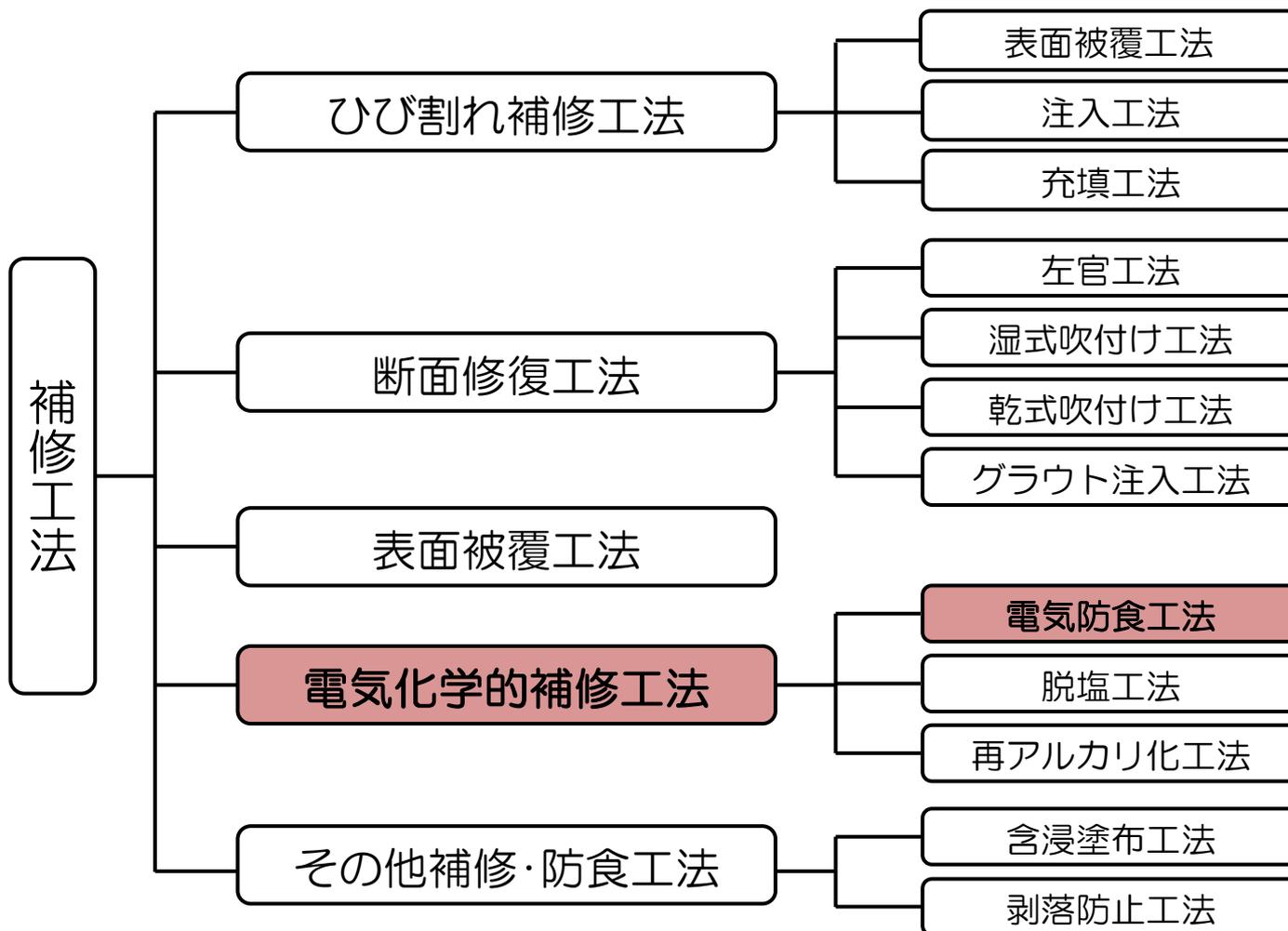


2. 劣化対策としての電気防食の 位置づけ



劣化対策としての電気防食の位置づけ

●各種補修・防食工法



劣化対策としての電気防食の位置づけ

●電気化学的補修工法

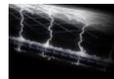
電気防食工法，脱塩工法，再アルカリ化工法，電着工法

コンクリートを介してコンクリート内部の鉄筋に直流電流を供給することを基本とするコンクリート構造物の劣化補修工法



各工法により防止メカニズムが異なる

鉄筋の腐食反応の停止	⇒	電気防食工法
コンクリート内部の塩分除去	⇒	脱塩工法
コンクリートのアルカリ回復	⇒	再アルカリ化工法
コンクリートの欠陥部閉塞など	⇒	電着工法

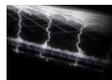
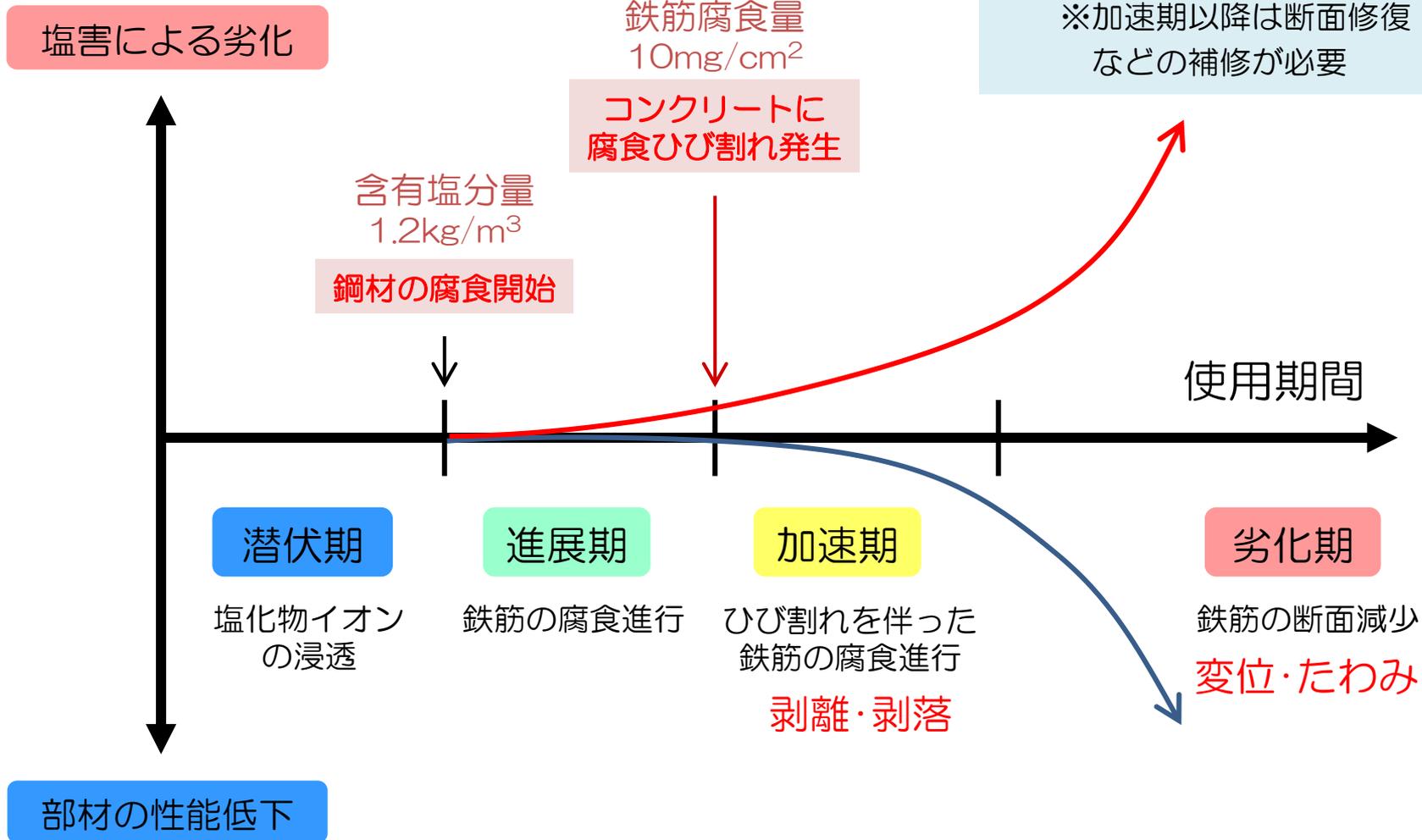


劣化対策としての電気防食の位置づけ

●電気防食が適用できる劣化状態

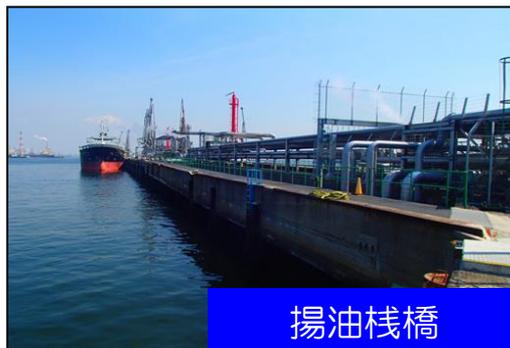
どの状態でも適用可能

※加速期以降は断面修復などの補修が必要

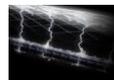


劣化対策としての電気防食の位置づけ

●電気防食が適用できる環境



- 一般的な鉄筋コンクリート構造物であれば適用可能である
- 大気中、飛沫帯、干満帯等の環境に応じて防食方式を選定できる
- 基本的に水中部のコンクリートは電気防食が不要である
※ Cl⁻があっても没水環境では溶存酸素の供給が極めて遅くほとんど腐食は進行しない
- 供用しながらの補修, 他の補修工法との併用, 部材単位での適用が可能である



劣化対策としての電気防食の位置づけ

●電気防食のLCC LCC算定の前提条件

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

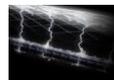
維持費 : 定期点検費

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



劣化対策としての電気防食の位置づけ

●電気防食のLCC コスト条件

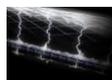
各工法補修費用

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

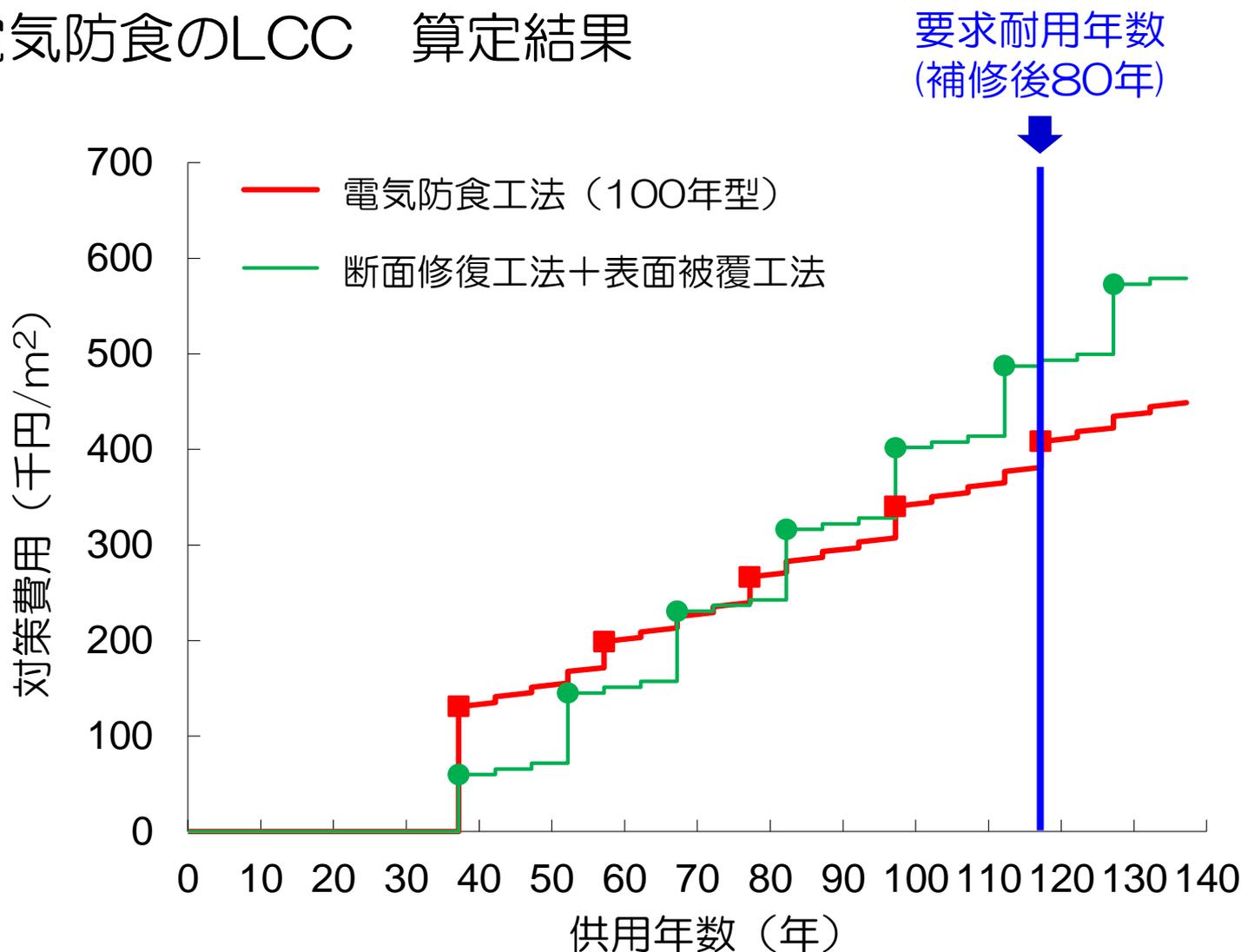
電気代 (1回/年)	30	円/m ²
効果確認費 (1回/年)	800	円/m ²
配線・配管 (1回/20年)	8,000	円/m ²
電源装置 (1回/20年)	11,000	円/m ²
一般定期点検 (1回/5年)	6,000	円/m ²

参考：港湾空港技術研究所報告，第48巻第2号，2009.6



劣化対策としての電気防食の位置づけ

●電気防食のLCC 算定結果



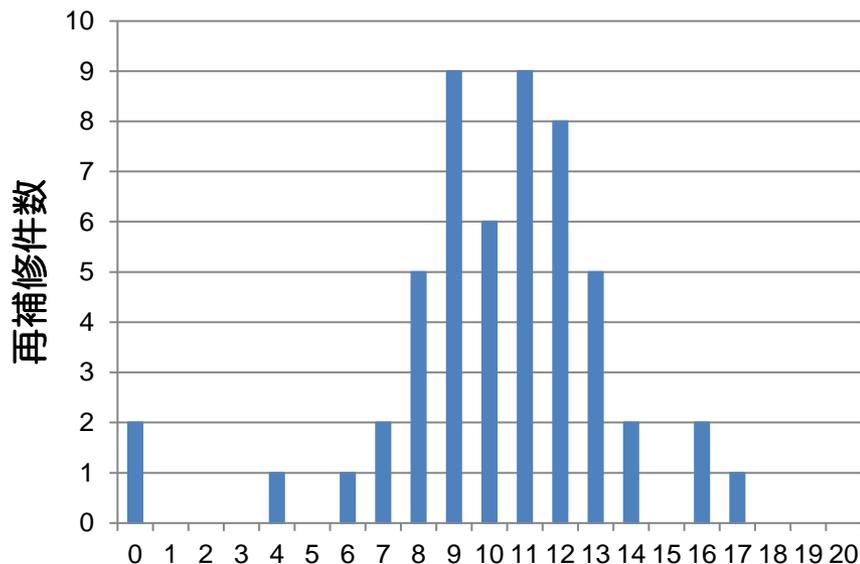
劣化対策としての電気防食の位置づけ

●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40万㎡**

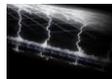
《1回補修した橋梁（53橋）の再補修時期》

1回補修後の経過年数



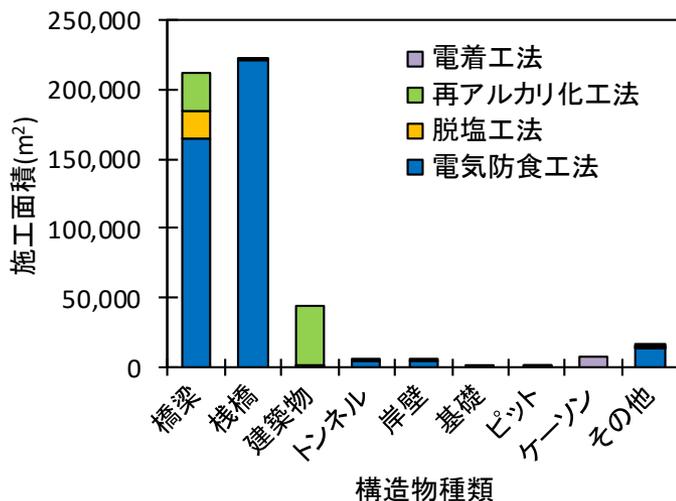
1回補修した88橋（補修時期は供用後8～25年）のうち53橋で再補修実施
初回補修より平均10年で再補修

88橋のうち3橋で**電気防食**を適用⇒**再補修無し**（再補修した53橋には入っていない）



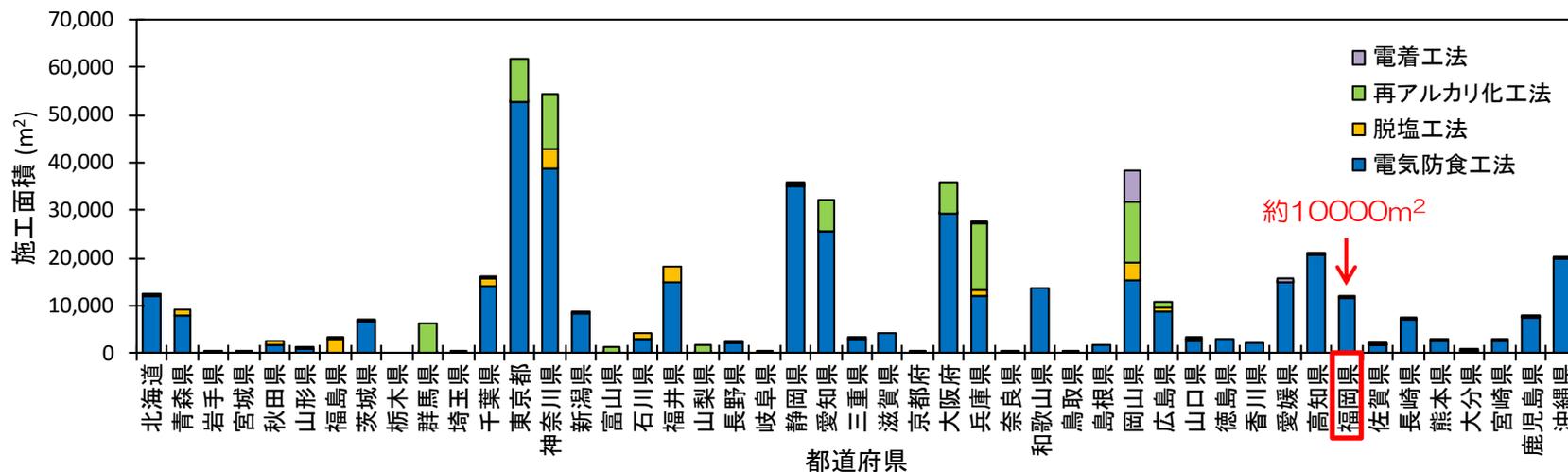
劣化対策としての電気防食の位置づけ

●電気化学的防食工法の施工実績



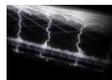
※CP工法研究会施工実績調査より

合計約51万m² (2021年3月現在)



塩害や各種腐食からアクティブにコンクリート構造物を守る！

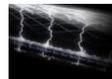
コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会



ELGARD SYSTEM

日本エルガード協会

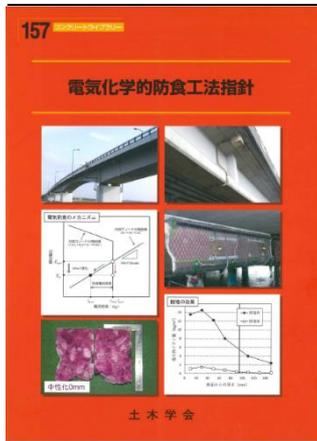
3. 電気防食のマニュアル類



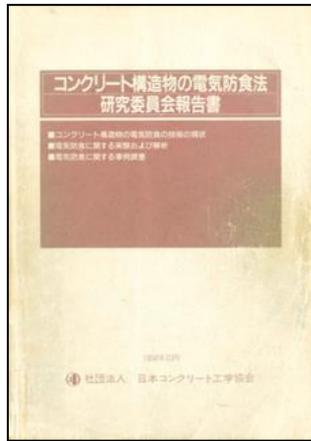
電気防食のマニュアル類

- ① 電気化学的防食工法指針
土木学会：コンクリートライブラリ157, 2020/9
- ② 港湾コンクリート構造物補修マニュアル
沿岸技術研究センター, 2018/7
- ③ 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
- ④ 栈橋劣化調査・補修マニュアル
東京港埠頭（株）, 2012/11
- ⑤ 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

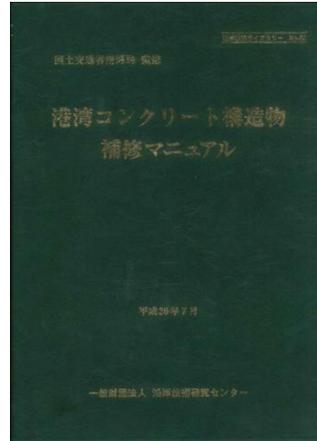
①



②



③



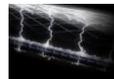
④



⑤



塩害や各種腐食からアクティブにコンクリート構造物を守る！
コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会



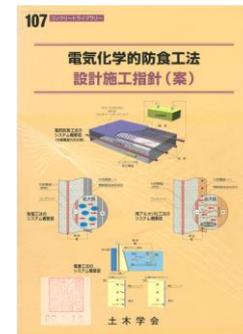
ELGARD SYSTEM
日本エルガード協会

電気防食のマニュアル類

●電気化学的防食工法指針について

旧指針「電気化学的防食工法設計施工指針（案）」は約20年にわたって、電気防食工法適用のためのより所となっていた。

- 適用事例の蓄積によって明らかになった新たな課題
- 課題克服のための調査研究による新しい知見や技術開発



旧 設計施工指針(案)



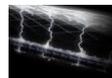
2018年 電気化学的防食工法設計施工指針改訂委員会 (258委員会)

委員長 武若教授(鹿児島大) 副委員長 濱田教授(九州大)
幹事長 山口教授(鹿児島大) 顧問 宮川教授(京都大)

コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会・日本エルガード協会からの委託委員会

コンクリートライブラリ157「電気化学的防食工法指針」へ改訂

コンクリート標準示方書維持管理編等現行の示方書及び補修・補強標準との整合。性能照査型設計への対応。最新の知見や実績データに基づく調査結果を反映。



電気防食のマニュアル類

●電気化学的防食工法指針について

目次構成 「共通編」と「工法別編」に大きく分けて構成

共通編 電気防食工法、脱塩工法、アルカリ化工法、電着工法全てに適用

1章 総則、2章 調査、3章 設計、4章 施工、5章 維持管理、6章 記録

工法別標準編 電気防食工法 脱塩工法、再アルカリ化工法、電着の各工法別に定めた

電気防食工法標準

1章 概要、2章 適用範囲、3章 設計、4章 施工、5章 維持管理

附属資料 (CD-ROM)

電気防食工法に関する資料、電気防食工法のLCC・LCCO₂の算定方法、設計施工維持管理のケーススタディ、陽極方式の概要と実施例、分極量または復極量と防食効果の関係、照合電極の性能低下時の動作不具合とその対策に関する事例、ASRに配慮した電気化学的防食工法の適用に関するガイドライン 他

●電気化学的防食工法指針について

共通編 第3章 設計

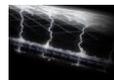
3.4 維持管理計画

P.25

3.4.3 評価

点検によって得られた情報に基づき、**設計防食期間にわたり目標とする防食効果が得られることを確認する。**

- 電気防食工法：システムの健全性と防食効果の総合的な確認
- その他の工法：防食のための管理基準を踏まえて防食効果を確認



●電気化学的防食工法指針について

共通編 第4章 施工

4.3 施工

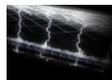
P.33

- (1) 施工計画に従って実施
- (2) 適用する電気化学防食工法に関する専門技術者の管理の下で実施
- (3) 使用する材料や機器類の特性に留意する
- (4) 品質管理計画に従った、施工の各段階での品質管理

4.4 検査

P.34

- (1) 検査計画に従って、発注者の責任において検査を行う
- (2) 検査結果が合格と判定されなかった場合は、対策措置を検討する



●電気化学的防食工法指針について

工法別標準編 電気防食工法標準 第3章 設計

基本

P.51

3.5 防食管理指標

- (1) 防食管理指標：鋼材の分極量あるいは復極量の水準を100mV以上とすること。…従来通り
- (2) 分極量または復極量で適正に防食効果を判定できないことが想定される場合は、鋼材の分極量あるいは復極量とは異なる防食管理指標を設定してもよい。
- (3) PC 鋼材では、インスタントオフ電位も、防食管理指標 -1000 mV vs CSE（飽和硫酸銅電極）よりもプラス（貴）側の電位を保つ

(2) (3) で管理する場合は、**予め構造物管理者と防食管理指標の運用方法について協議・合意しておく必要がある。**

4. 電気防食設計と補修事例



電気防食設計と補修事例

●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外観目視

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する。

②鋼材位置での塩化物イオン量

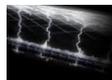
- フィック拡散式で供用年数内に発錆するか予測する。

⇒ 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

- 鋼材の腐食速度を推定する。

⇒ 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



電気防食設計と補修事例

●電気化学的測定・・・鋼材の自然電位測定

塩害潜伏期または進展期において、外観上劣化が顕在化していない時期に鋼材が腐食しているか否かを定性的に判定する。

鋼材腐食が生じていない ⇒ 塩害**潜伏期**の可能性が高い
鋼材腐食が生じている ⇒ 塩害**進展期**の可能性が高い

電位計測状況



照合電極をコンクリート表面に押し当てて電位計測

電位測定に必要なもの



照合電極と高抵抗電位差計

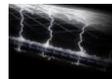
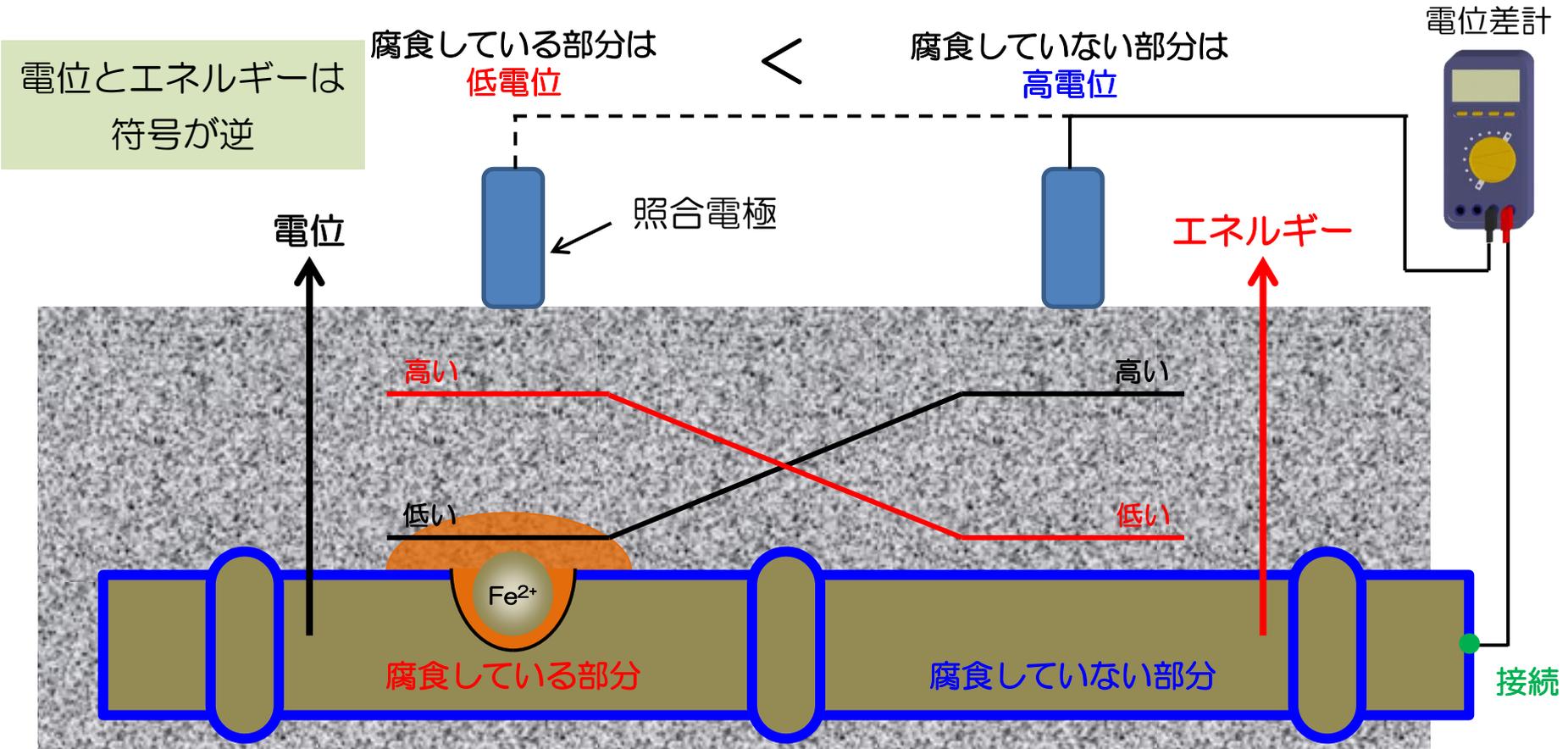
コンクリート環境用照合電極

- 二酸化マンガン照合電極
- 鉛照合電極
- 飽和塩化銀照合電極

電気防食設計と補修事例

●鋼材の自然電位測定方法

腐食が進行すると自然電位は高くなる傾向！



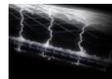
●自然電位による腐食判定

- 自然電位は腐食の速さに関する情報は与えてくれない。
- 相対的な腐食評価手法であり，多点測定を行い腐食位置を特定する。

自然電位による腐食判定基準 (ASTM C 876)

鋼材腐食の可能性	鋼材自然電位 (mV)	
	硫酸銅電極 vs. CSE	塩化銀電極 vs. Ag/AgCl[SW]
90%以上の確率で腐食なし	$-200 < E$	$-135 < E$
不確定	$-350 < E \leq -200$	$-285 < E \leq -135$
90%以上の確率で腐食あり	$E \leq -350$	$E \leq -285$

ASTM C 876 : Standard Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing in Concrete.



電気防食設計と補修事例

●電気化学測定・・・鋼材の分極抵抗測定（2周波数法）

塩害潜伏期または進展期において，外観上劣化が顕在化していない時期に鋼材の腐食程度を測定し，ひび割れ発生時期を予測する。

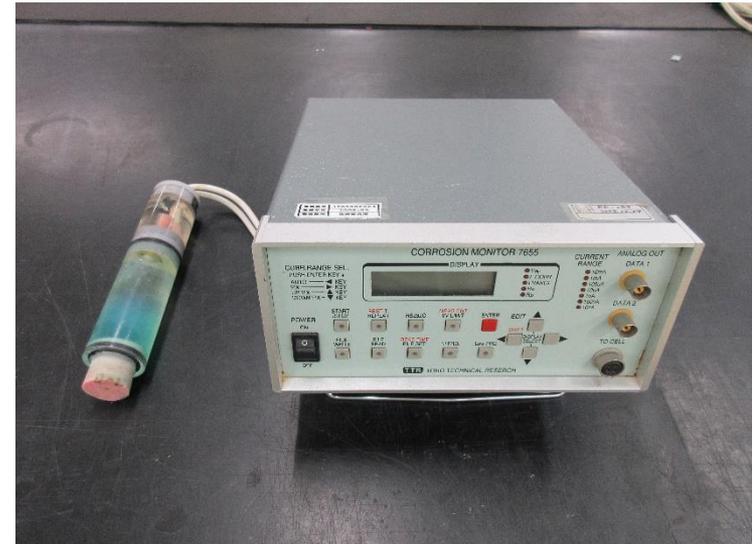
⇒ 補修時期を推定できる

分極抵抗計測状況



センサーをコンクリート表面に押し当てて分極抵抗を計測

分極抵抗測定装置



照合電極と対極を内蔵したセンサー(左)と腐食モニター(右)

塩害や各種腐食からアクティブにコンクリート構造物を守る！

コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会

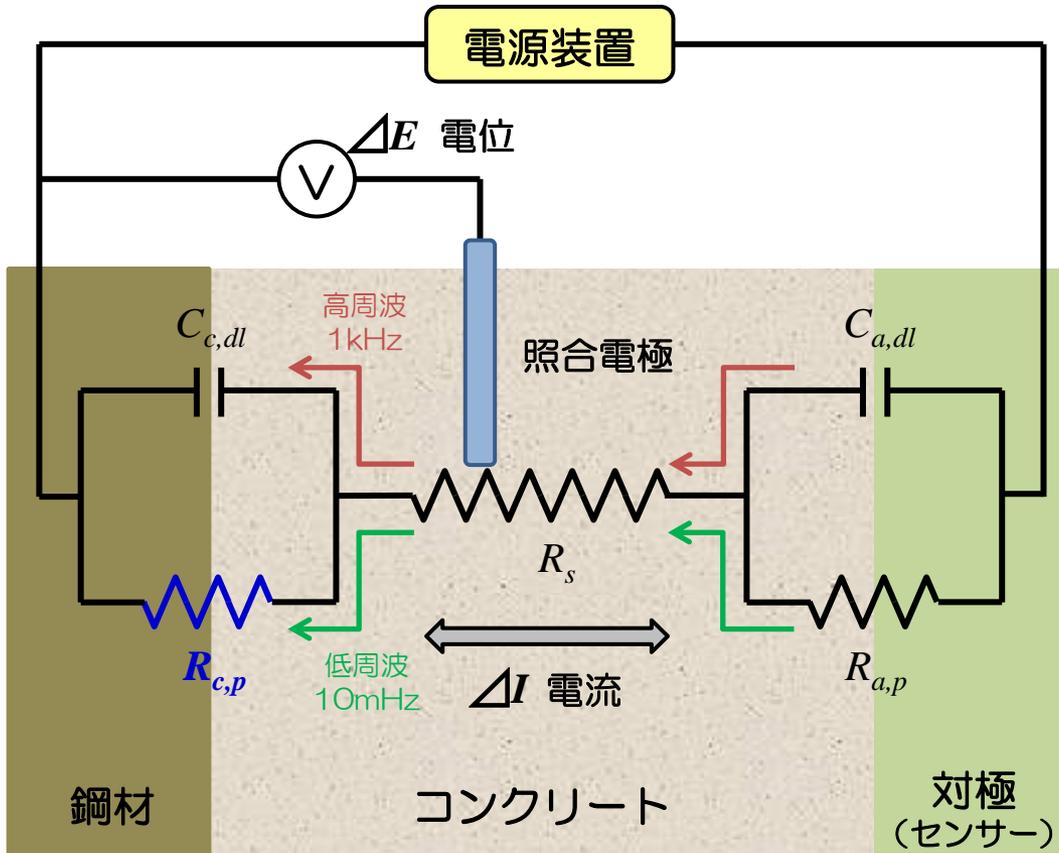
ELGARD SYSTEM

日本エルガード協会

電気防食設計と補修事例

● 鋼材の分極抵抗測定方法（2周波数法）

鋼材に2種類の交流を印加して分極抵抗を測定し，腐食速度に換算する。



Stern-Geary式

$$i_{corr} = \frac{K}{R_p}$$

i_{corr} : 腐食速度 R_p : 分極抵抗

K : 腐食速度への換算定数

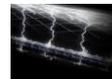
※ K 値には26mVが使用される

上式に測定した分極抵抗を
代入して腐食速度を算出

図 電極間の電気的等価回路と分極抵抗測定のイメージ

塩害や各種腐食からアクティブにコンクリート構造物を守る！

コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会



ELGARD SYSTEM

日本エルガード協会

●鋼材の腐食速度による腐食判定

- 腐食速度により、鋼材の腐食量が算出できる
⇒ 例えば、 $10\text{mg}/\text{cm}^2$ でひび割れ発生の可能性大

分極抵抗および腐食速度による腐食判定(CEB)

腐食速度の判定	分極抵抗 R_p ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$)	腐食電流密度 i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
不動態状態 (腐食なし)	130~260 より大	0.1~0.2 未満
低から中程度の腐食速度	52 以上 150 以下	0.2 以上 0.5 以下
中から高程度の腐食速度	26 以上 52 以下	0.5 以上 1 以下
激しい, 高い腐食速度	26 未満	1より大



電気防食設計と補修事例

● 商用電力の有無を確認

確保できる・・・外部電源方式・流電陽極方式
確保できない・・・流電陽極方式

外部電源方式では直流電源装置が必要

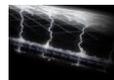
- 電柱や変圧器の有無を確認
- 施設近傍までの配電設備は電力会社負担
- 受電設備のみ利用者負担

流電陽極方式では直流電源装置は不要

- 流電陽極と鋼材を短絡するだけ！

どうしても商用電力が確保できない場合...

ソーラーや風力などの自然エネルギーも利用可能



電気防食設計と補修事例

●電気防食設計

防食方式選定条件

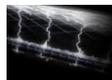
1. 構造物の供用期間
2. 構造物の形態と対象部位
3. 環境条件
4. 劣化の程度
5. 補修の履歴
6. コンクリートの電気抵抗
7. 商用電力の有無
8. 陽極の耐用年数
9. ライフサイクルコスト
10. 維持管理の難易度
11. 美観・外観の重要性

防食回路設計条件

1. 防食回路の面積
2. 陽極システムとその配置
3. 通電点および排流点の位置と数量
4. 配線・配管材料および設置位置
5. 電源装置および設置位置

モニタリング回路設計条件

1. 対象構造物の種類
2. 形状および対象部位
3. 環境条件



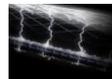
電気防食設計と補修事例

●電気防食工法比較表

方式	面状陽極方式		外部電極方式		点状陽極方式		流電陽極方式（電気代が不要）
	チタンメッシュ	チタン溶射	TCユニット	チタンリボンメッシュ	点状陽極方式 内部挿入方式	面状陽極方式 亜鉛シート方式	
概要図							
方式の概要	金属酸化物をコーティングしたメッシュ状のチタン陽極をコンクリート表面に設置し、これをモルタル（オーバーレイ材）で被覆する。	金属チタンをコンクリート表面に溶射し、触媒液を塗布することにより、陽極皮膜を形成する。	保護カバーで覆われたチタラス材陽極、特殊バックフィルからなる陽極を、チタンピスでコンクリート表面に一定間隔で設置する。	金属酸化物をコーティングしたリボンメッシュ陽極をコンクリート表面に一定間隔で切削した溝に設置し、セメントモルタルにより充填する。	金属酸化物をコーティングした棒状の内部挿入陽極をコンクリートに一定間隔で挿入する。各電極はチタンワイヤーで結束し、モルタルで埋設する。	保護カバーで覆われた亜鉛シート、特殊バックフィルからなる亜鉛陽極をアンカーボルトでコンクリート表面に設置する。	
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・死荷重が増加する（約20~50kg/m²）。かぶり厚さに影響されにくい。 ・施工全面にサンドブラストによる下地ケレンが必要で粉塵、廃棄物など発生する。・実観が悪い。 ・施工後躯体コンクリートを目標できない。・施工実績が比較的少ない。 ・電源装置の維持管理が必要である。 ・旧塗膜の撤去が必要である。 ・陽極材はチタン電極であり、高価である。プライマーを使用できないため、付着程度が施工士に左右される。 	<ul style="list-style-type: none"> ・死荷重の増加がない。 ・かぶり厚さに影響されにくい。 ・施工全面にサンドブラストによる下地ケレンが必要で粉塵、廃棄物などが多少発生する。・美観上全面に溶射粉が露出する。 ・施工後躯体コンクリートを目標できる。 ・施工実績が比較的少ない。 ・電源装置の維持管理が必要である。 ・旧塗膜の撤去が必要である。 ・陽極材はチタン電極であり、高価である。・陽極材がコンクリート表面に露出するための外的要因により損傷を受けやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・死荷重の増加はあまりない。 ・かぶり厚さに影響されにくい。 ・はつりガラなどの廃棄物がほとんど発生しない。 ・FRPトレイが橋脚方向一定間隔で配置される。 ・施工後躯体コンクリートを目標できる。 ・施工実績が最も多い。 ・電源装置の維持管理が必要である。 ・旧塗膜の撤去が必要である。 ・陽極材がコンクリート表面に露出するための外的要因により損傷を受ける可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・死荷重の増加がない。 ・かぶり厚さに影響されにくい。 ・はつりガラなどの廃棄物が発生する。 ・はつりガラに伴うはつりガラが発生する。 ・防食面全てに切削粉が残る。 ・施工後躯体コンクリートを目標できる。 ・施工実績が最も多い。 ・電源装置の維持管理が必要である。 ・旧塗膜の撤去が必要である。 ・陽極材はチタン電極であり、高価である。・鉄筋かぶりが高い対象物の設置は難しい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・死荷重が増加する（約30kg/m²）。かぶり厚さに影響されにくい。 ・はつりガラなどの廃棄物がほとんど発生しない。 ・美観上全面に亜鉛防食材が露出する。 ・施工後躯体コンクリートを目標できない。・施工実績は少ない。 ・電源装置を必要としない。（電気代不要） ・旧塗膜の撤去が必要である。 ・陽極材は亜鉛であり、高価である。 ・陽極材がコンクリート表面に露出するための外的要因により損傷を受ける可能性がある。 		
施工概要	<ol style="list-style-type: none"> ① 陰極端子・照合電極の設置 ② 防食対象面塗膜撤去 ③ コンクリート面ブラスト処理 ④ チタンメッシュ陽極設置 ⑤ セメントモルタルにて陽極被覆 ⑥ 配線配管 ⑦ 直流電源装置設置 ⑧ 通電調整、防食効果確認 	<ol style="list-style-type: none"> ① 陰極端子・照合電極の設置 ② 防食対象面塗膜撤去 ③ コンクリート面ブラスト処理 ④ チタンをアーク溶射 ⑤ 通電用チタンにて陽極被覆 ⑥ 配線配管 ⑦ 直流電源装置設置 ⑧ 通電調整、防食効果確認 	<ol style="list-style-type: none"> ① 陰極端子・照合電極の設置 ② 陽極設置面塗膜撤去 ③ 陽極・バックフィル-FRPトレイ設置 ④ 配線配管 ⑤ 直流電源装置設置 ⑥ 通電調整、防食効果確認 	<ol style="list-style-type: none"> ① 陰極端子・照合電極の設置 ② コンクリート面溝切削 ③ リボンメッシュ陽極設置 ④ セメントモルタルにて陽極被覆 ⑤ 配線配管 ⑥ 直流電源装置設置 ⑦ 通電調整、防食効果確認 	<ol style="list-style-type: none"> ① 陰極端子・照合電極の設置 ② コンクリート面穿孔 ③ 孔内にバックフィル材充填 ④ 孔内に内部挿入電極設置 ⑤ チタンワイヤー結束 ⑥ 配線配管 ⑦ 直流電源装置設置 ⑧ 通電調整、防食効果確認 	<ol style="list-style-type: none"> ① 陰極端子・照合電極の設置 ② 防食対象面塗膜撤去 ③ アンカーボルト設置 ④ 亜鉛防食材設置 ⑤ 陰極目録設置 ⑥ モニタリング用測定箱設置 ⑦ モニタリング用測定箱設置 ⑧ 防食効果確認 	
施工中写真							
仕上り写真							
耐用年数	20年以上（陽極材は40年）	20年以上（陽極材は40年）	20年以上（陽極材は40年）	20年以上（陽極材は40年）	20年以上（陽極材は40年）	20年以上	
概算工費	150,000円/m ²	適用できないため積算なし	適用できないため積算なし	103,500円/m ²	153,300円/m ²	136,400円/m ²	
577円/㎡21 50年	初期費用 380,909,000円 維持費用 439,518,000円 577円/㎡21 820,427,000円	—	—	初期費用 262,727,000円 維持費用 308,637,000円 577円/㎡21 571,364,000円	初期費用 389,161,000円 維持費用 435,071,000円 577円/㎡21 824,232,000円	初期費用 346,286,000円 維持費用 529,839,000円 577円/㎡21 876,125,000円	
本構への適用性	<ul style="list-style-type: none"> ・やがコストが高い。 ・橋脚等ではポリイミドの硬化時間と現地作業可能時間の確認が必要。 ・防食区域では溶射作業に留意が必要。 ・近年事例が増加に少ない。 ・死荷重が大きいため、適用には留意が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ・陽極設置はアーク溶射を行うため、防食区域での施工不可。 	<ul style="list-style-type: none"> ・橋脚等で漂流物等と接触する環境では適用できない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・橋脚等の位置に伴う切削作業時の周辺環境に留意が必要。 ・橋脚構造部では最も施工実績が多い。 ・敷金保証。 ・防食区域では溶射作業に留意が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ・防食電流供給範囲と切削位置との整合性に留意が必要。 ・鉄筋が多い部材では施工が困難。 ・敷金保証が高い。 ・他の防食方式に比べ電流分布に劣り、陽極設置間隔に留意が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ・流電陽極のため、防食区域に大きく影響しない。 ・死荷重が大きいため、適用には留意が必要。 ・比較的廉価。 ・橋脚構造への適用事例あり。 	
総合評価	△	—	—	◎	△	○	

塩害や各種腐食からアクティブにコンクリート構造物を守る！

コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会



ELGARD SYSTEM

日本エルガード協会

電気防食設計と補修事例

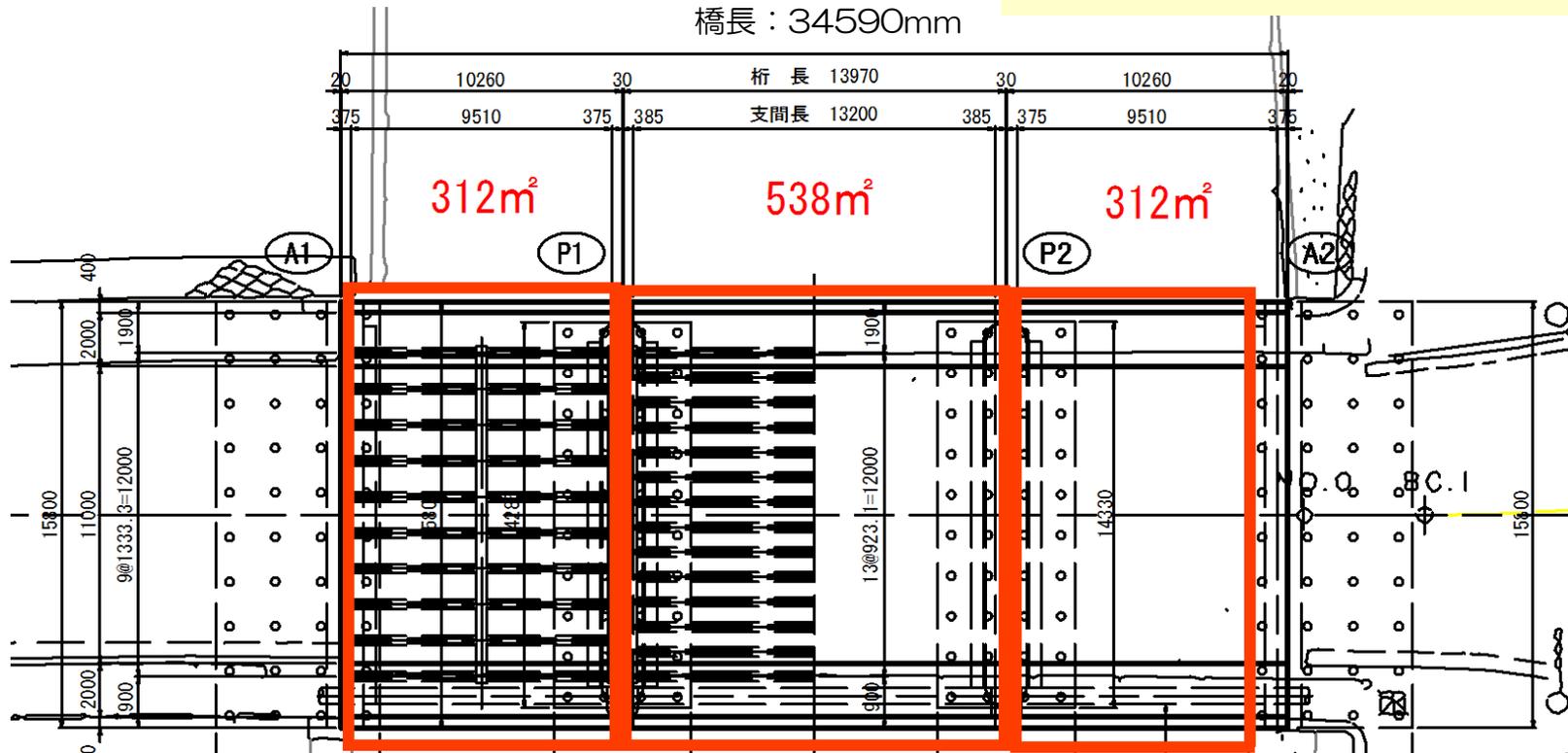
●電気防食回路の設計

【例】

第1・第3径間は500m²以下

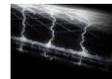
第2径間は500m²超え

合計 4回路で構成



電気防食の回路構成は1ブロック単位で500m²以下。

また、腐食環境条件が異なる場合、回路分けも考慮する。



電気防食設計と補修事例

●陽極システムとその配置

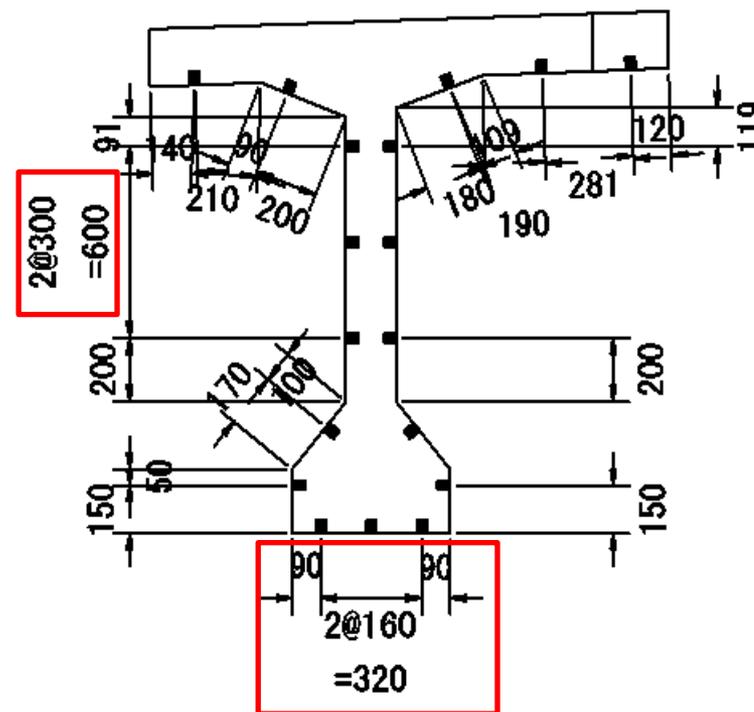
《面状陽極方式》

防食対象コンクリート面全面に陽極を設置する。

《線状・点状陽極方式》

鋼材量から必要防食電流を計上し、さらに電流分布を考慮して陽極相互間が300mm以内になるように配置する。

桁の断面図



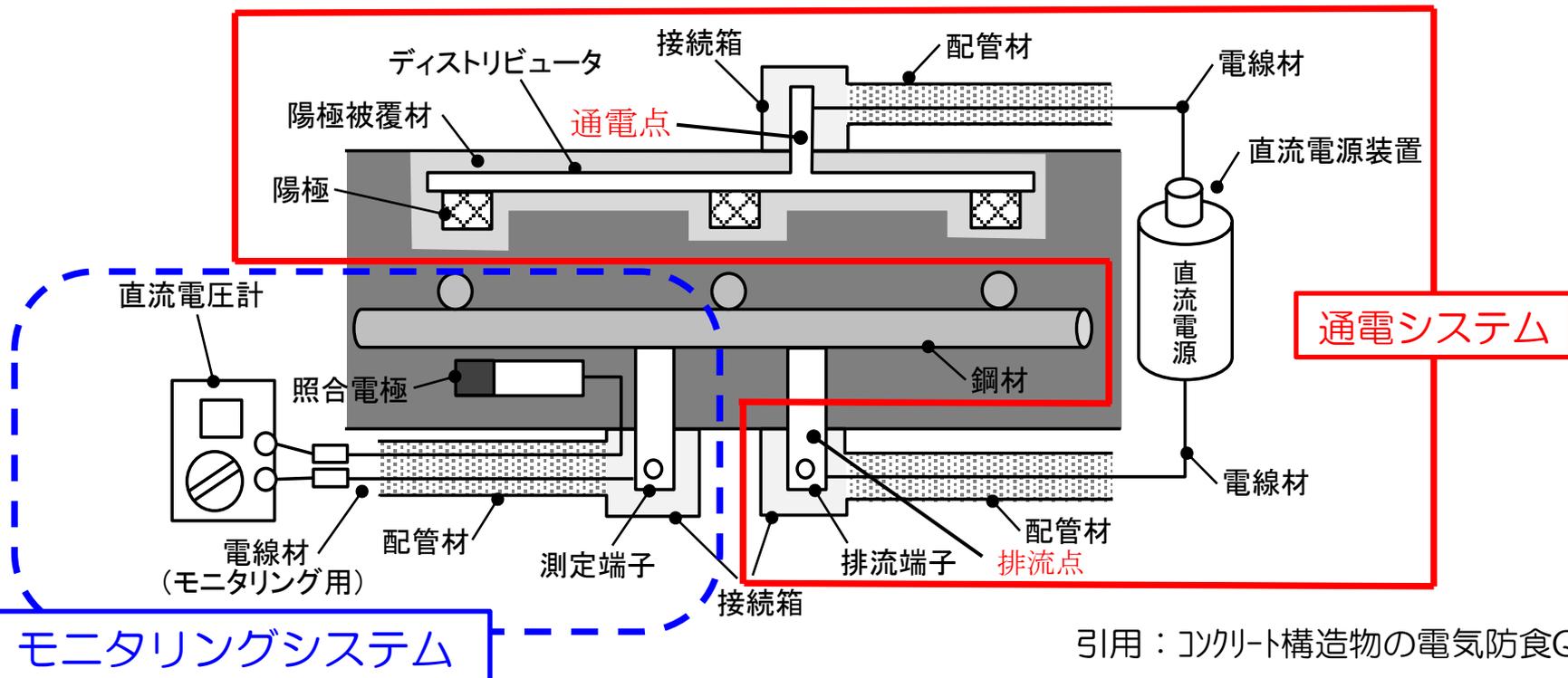
【線状陽極の設置例】

下フランジ底面では鋼材表面積が大きい = @160mm
ウェブでは比較的鋼材表面積が小さい = @300mm

電気防食設計と補修事例

●通電点・排流点の位置と数量

- **通電点**は、陽極のIRドロップを考慮して配置する。**IRドロップ**は300mV以内になるようにする。一般的には、栈橋構造物では各部材に1カ所、橋梁構造物では各桁4～5m程度の範囲に1カ所設置する。
- **排流点**は、1防食回路あたり2箇所以上設置することを基本とする。栈橋構造物の場合、1ブロックに対して均等に4カ所程度設置する。橋梁の場合、各桁2カ所程度設置する。



引用：コンクリート構造物の電気防食Q&A

●配線配管材料と設置位置

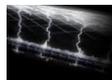
- ・配線材料は必要な電圧・電流からIRドロップを考慮して使用するサイズを選定する。
- ・電線管は屋外用・紫外線劣化を考慮して選定する。なお、外的要因による損傷を避ける位置に配管することを基本とする。

●直流電源装置

- ・外部電源方式では、直流電源装置を使用するため、その設置場所は協議が必要となる。
- ・現地踏査を行い、直流電源装置設置場所や主配管ルートを確認しておく必要がある。

直流電源装置設置箇所選定のポイント

- ① できれば発注者が管理している土地であること
- ② 交流電力の配線が容易であること（電柱があると便利）
- ③ なるべく第三者が干渉しないこと。場合によってはフェンスで囲う



電気防食設計と補修事例

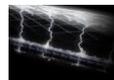
● 直流電源装置の設置例



8回路用直流電源装置の例
基礎コンクリートの上に設置



1回路用直流電源装置の例
コンクリート柱に設置



●モニタリング装置

《モニタリング装置》

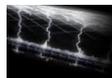
コンクリート中鋼材の電位を計測する照合電極と鋼材幹線の測定端子で構成される。

《照合電極》

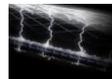
電気防食1回路あたり2カ所以上設置することが「電気化学的防食工法設計施工指針」に記載。

モニタリング装置設置箇所選定のポイント

- ① 鋼材腐食が大きい箇所
- ② 部材の種類が異なる箇所
- ③ 環境条件



5. 技術発展に向けた取り組み (トピックス)



技術発展に向けた取り組み（トピックス）①

●近年の公益団体との共同研究

①土木研究所・東北大学（CP研・エルガード協会）

- 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
- 電気防食工法の技術整理，間欠通電適用検討，電気防食システム標準化（2019～2020年）

②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（2016～2026年）

③東洋大学（エルガード協会）

- 干満帯の電気防食基準ConMat2015で成果発表（2009～2014年）

④岐阜大学（エルガード協会）

- 電気防食のLCM研究（2017～2020年）



技術発展に向けた取り組み（トピックス）②

●JCI公募「軍艦島共通試験」

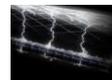
世界遺産 軍艦島（端島）での
電気防食の長期性能検証試験に**チャレンジ中！！**

協会会員5社との協同応募

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



塩害や各種腐食からアクティブにコンクリート構造物を守る！
コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会



ELGARD SYSTEM
日本エルガード協会

電気防食工法がコンクリート構造物に実施工されてから20年が経過しているが、塩害劣化に対して極めて有効な技術であり、抜本的補修工法と言われるまでに成長した。今や施工実績も510,000m²にも達し、システムの信頼性も大幅に向上した。また、電気防食特性に関して様々な研究がなされ、防食メカニズムについても徐々にではあるが明らかになってきた。

電気防食工法が広く理解され、社会資本の維持管理手法として普及し、良質な社会資本の蓄積にこれまで以上に大きな役割を果たすことを願う。

