

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2016

コンクリート構造物の電気防食工法の紹介

コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会

技術委員 小林浩之

((株)ナカボーテック)

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

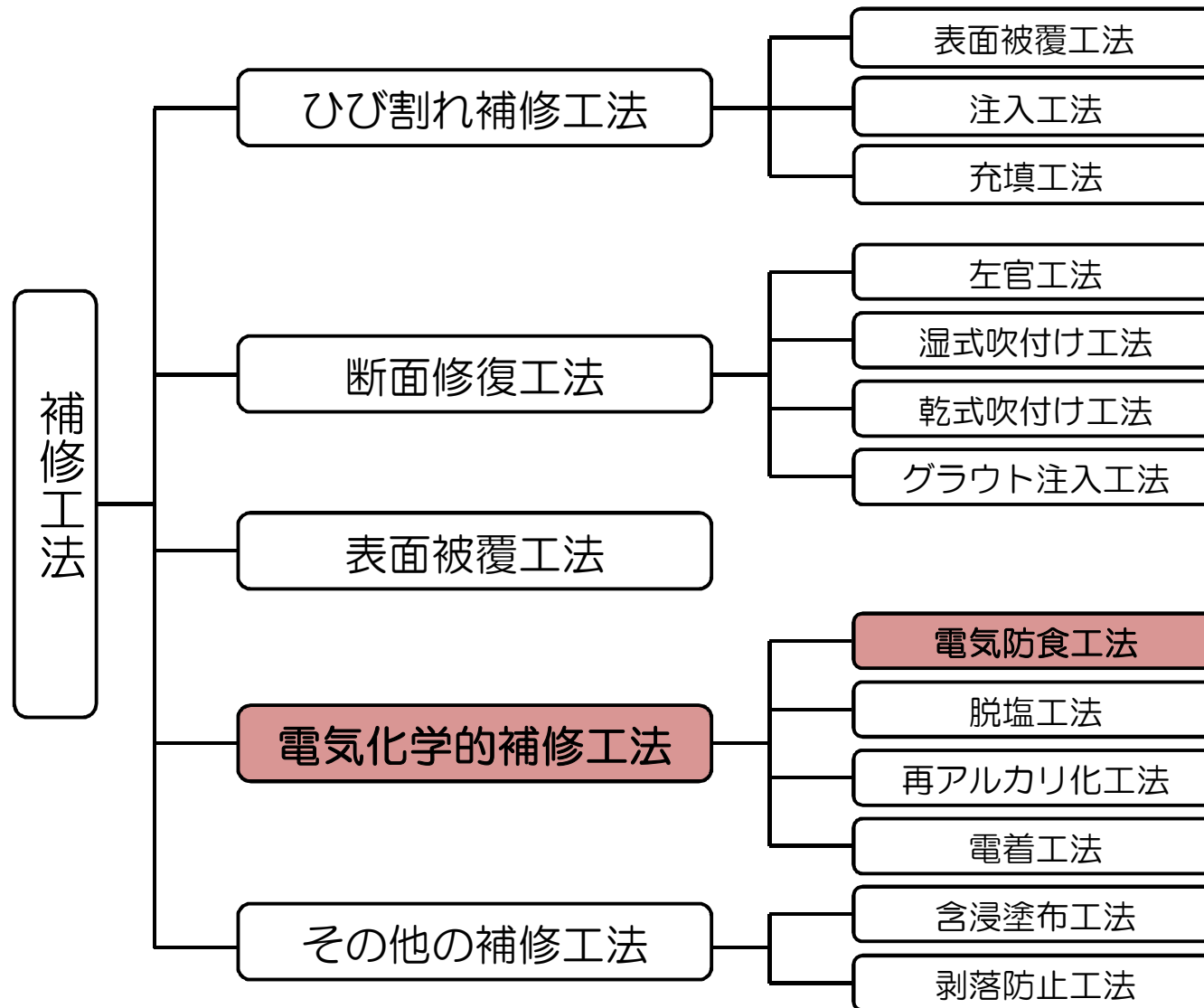
会 長	宮川豊章（京都大学 特任教授）
顧 問	関 博（早稲田大学 名誉教授） 福手 勤（東洋大学 教授） 武若耕司（鹿児島大学 教授）
事務局	東亜建設工業(株)内
会員会社	19社
HPアドレス	http://www.cp-ken.jp/

【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



CP研が取り扱う電気化学的防食工法



電気化学的防食工法とは...

●電気化学的防食工法

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



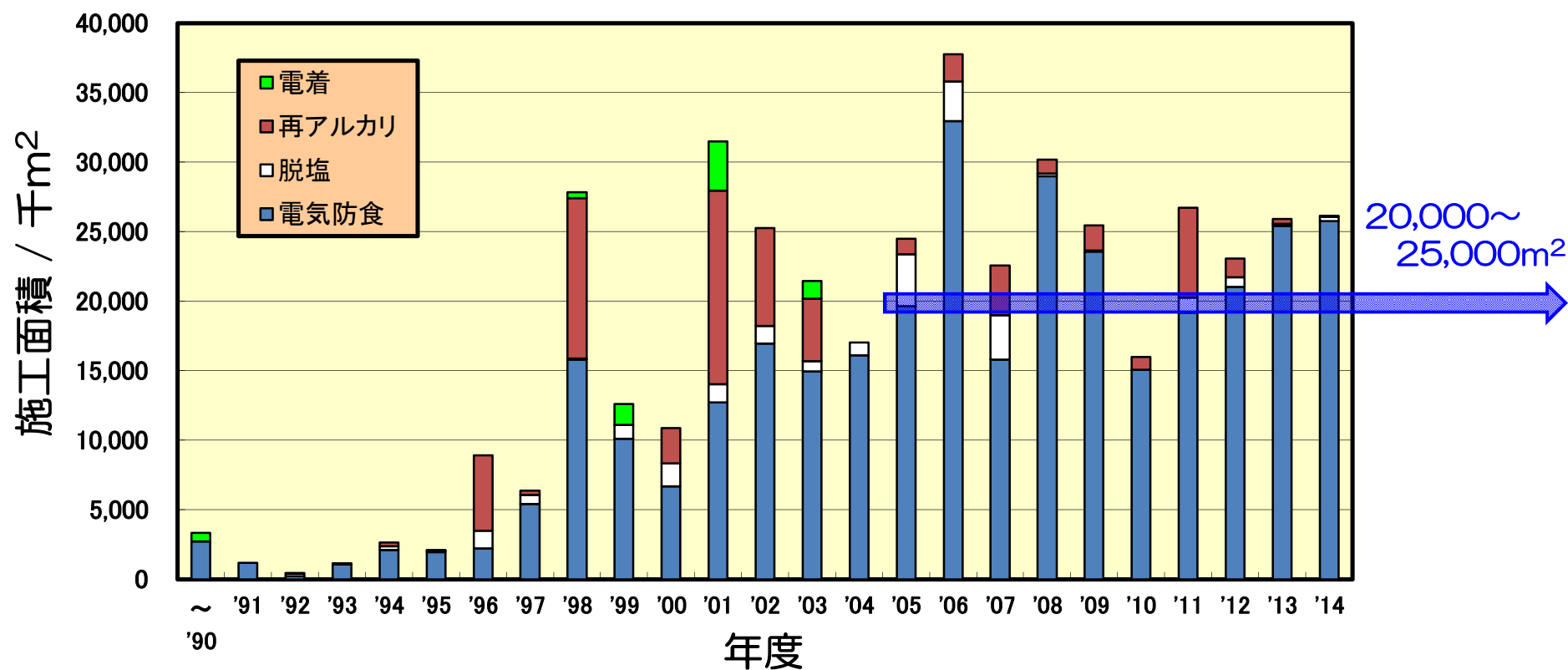
各工法により防止メカニズムが異なる

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



電気化学的防食工法の施工実績

●CP研の施工実績調査結果



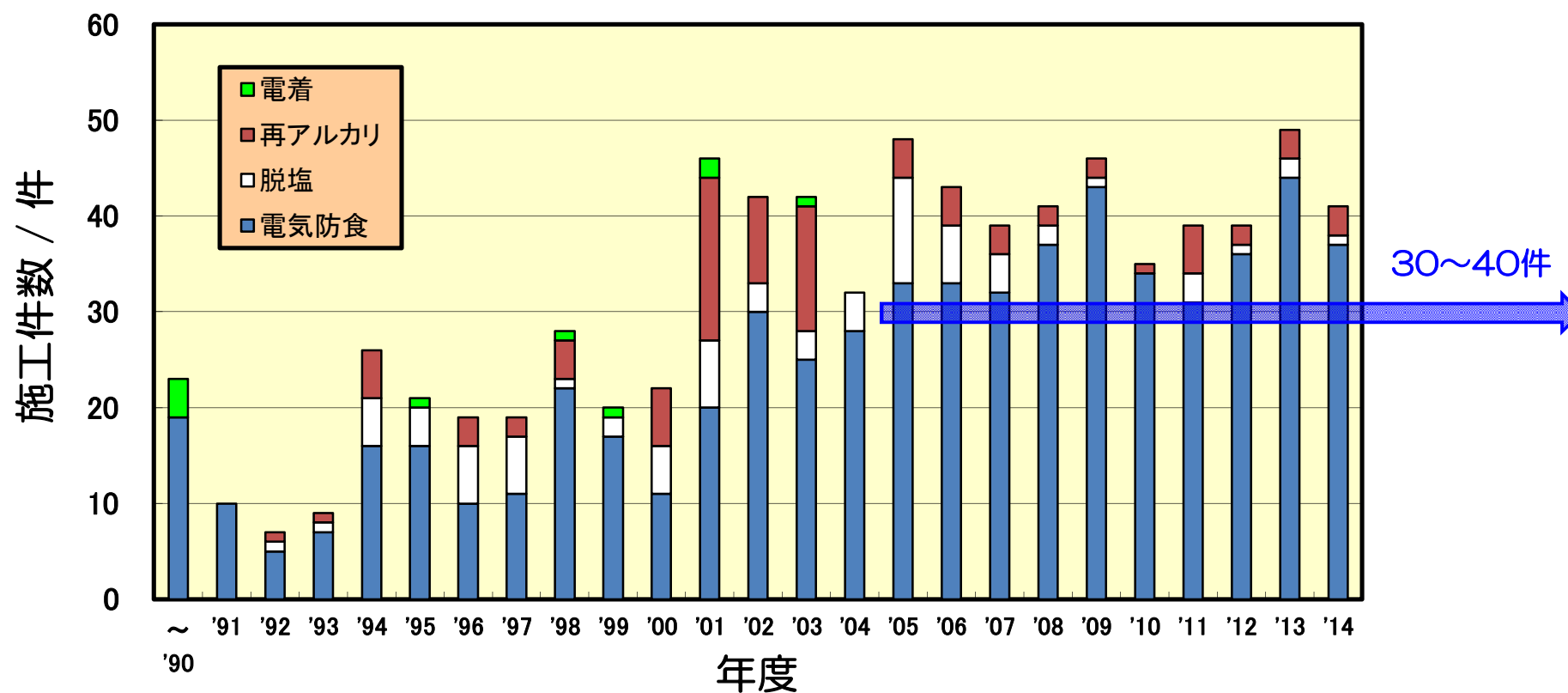
電気防食工法は、2005年以降：20,000~25,000m²/年の実績

⇒ 補修対策として根付いてきている



電気化学的防食工法の施工実績

●CP研の施工実績調査結果



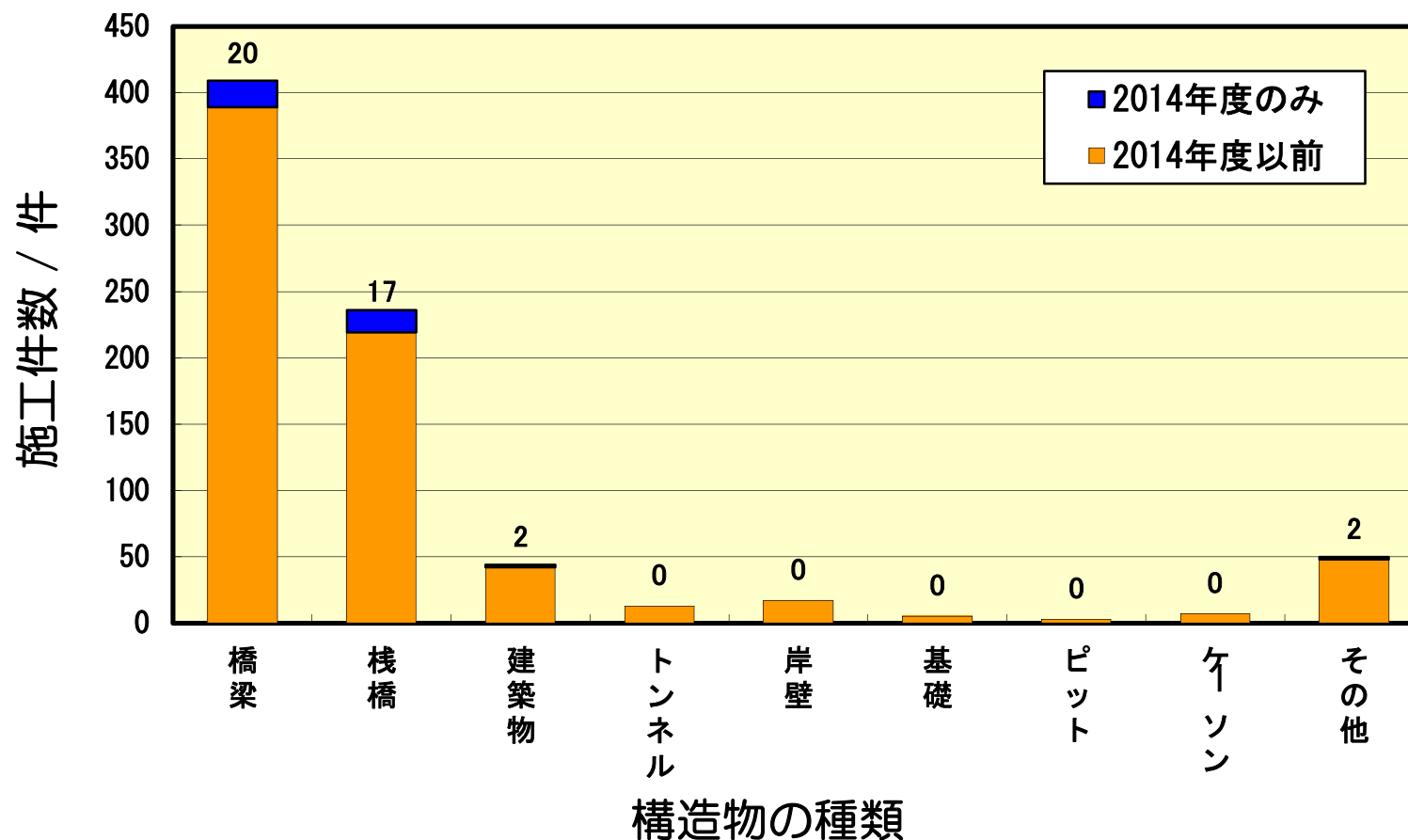
電気防食工法は、2005年以降：30~40件/年の実績

⇒ 補修対策として根付いてきている



電気化学的防食工法の施工実績

●CP研の施工実績調査結果



電気防食工法の適用は、**橋梁**、**栈橋**が多くを占める



鉄の腐食メカニズム

●鉄が錆びる(腐食する)のは自然の摂理

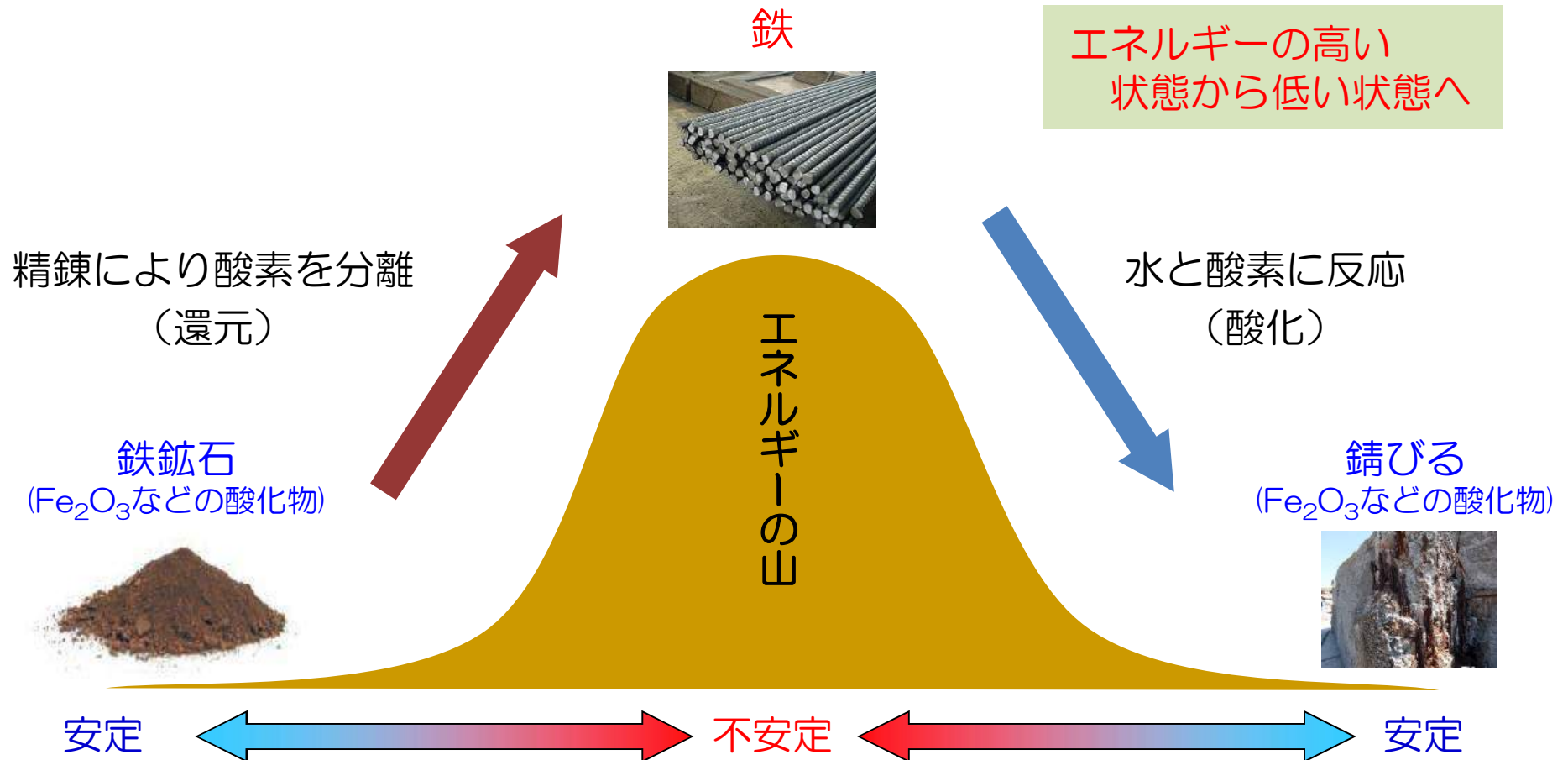


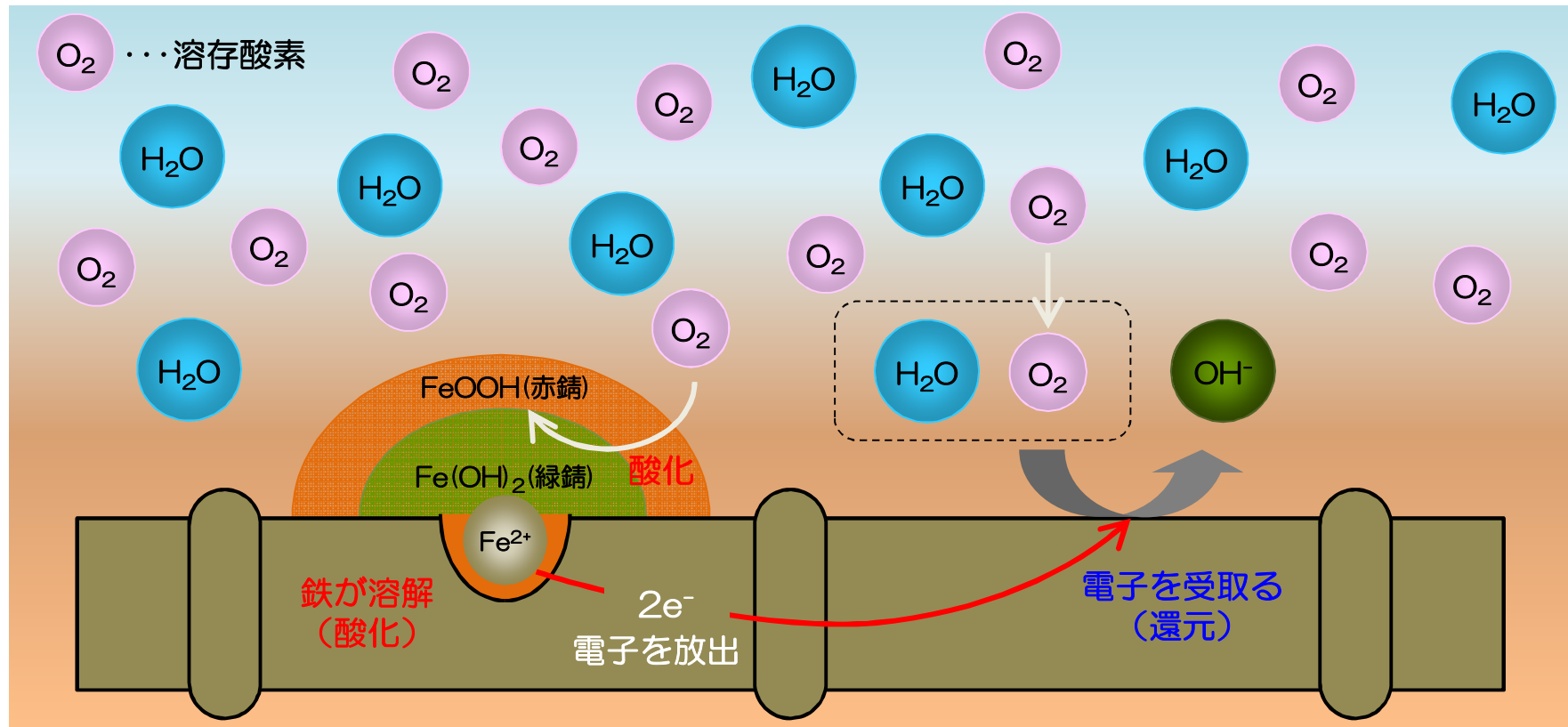
図 鉄鉱石から錆びへの変化



鉄の腐食メカニズム

●腐食している鉄の表面

例えば、鉄筋を水の中に浸漬すると...赤錆が生じて水が赤褐色になる



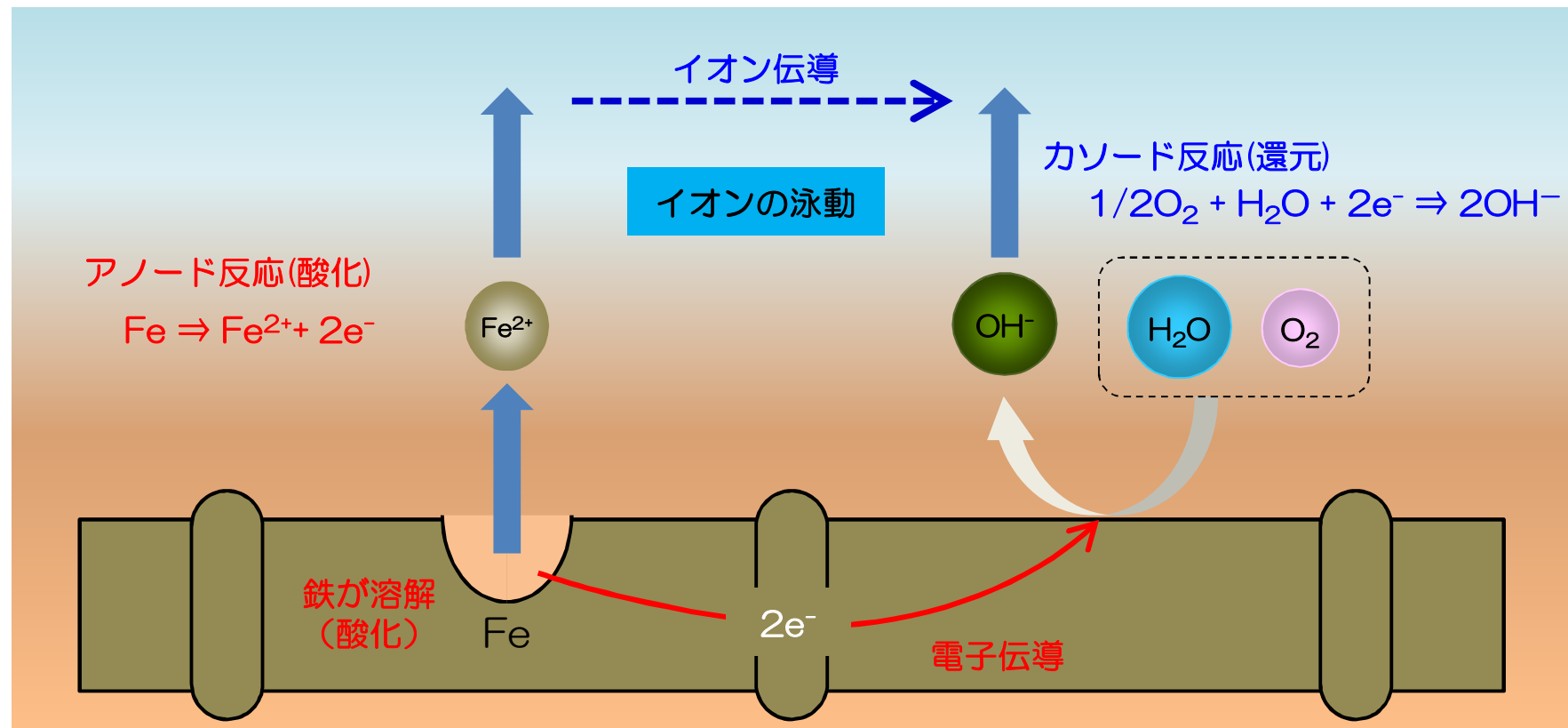
鉄が腐食するためには水と酸素が必要！ …ここが Point！



鉄の腐食メカニズム

●腐食している鉄の表面

鉄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



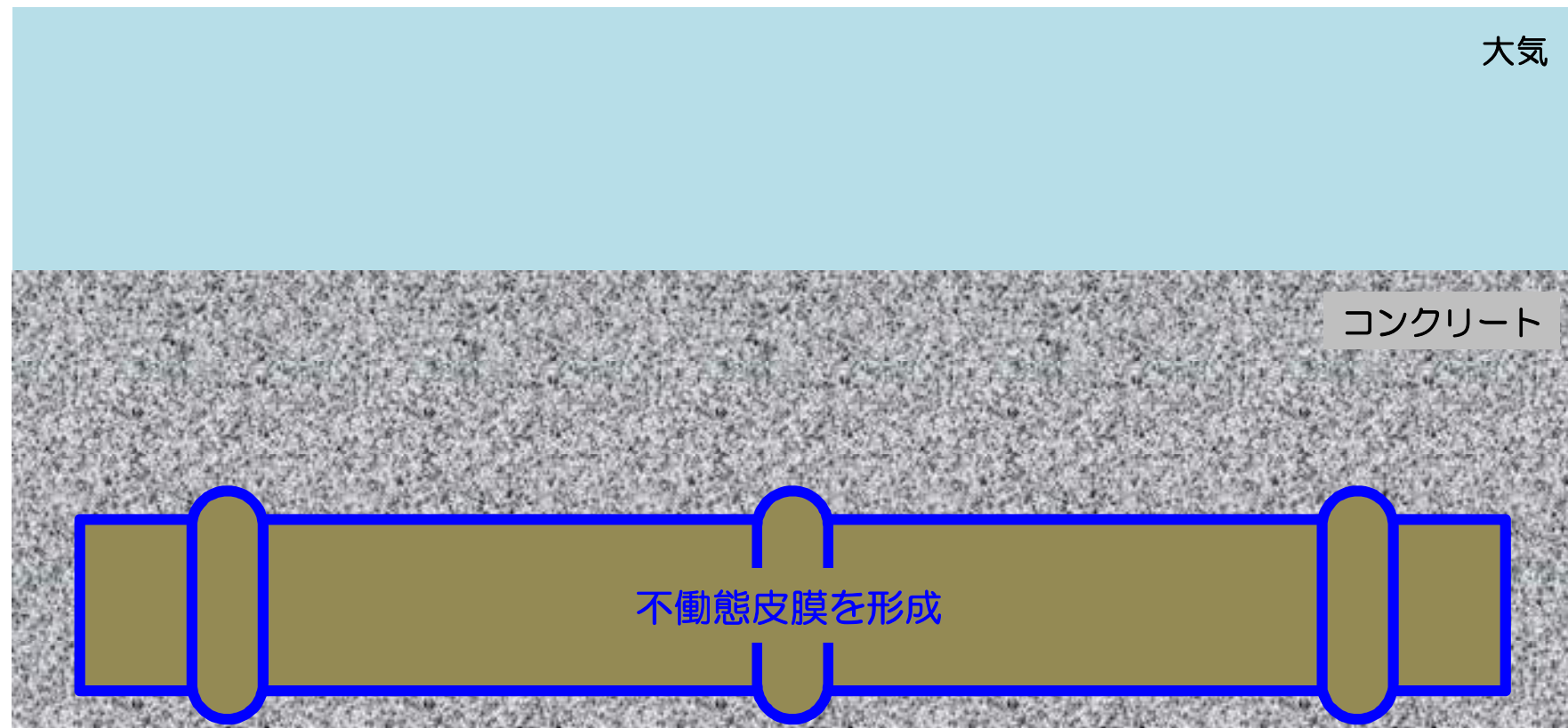
鉄の表面には**腐食電池**が形成され、**腐食電流**が流れる



コンクリート中鉄筋の腐食メカニズム

●鉄筋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

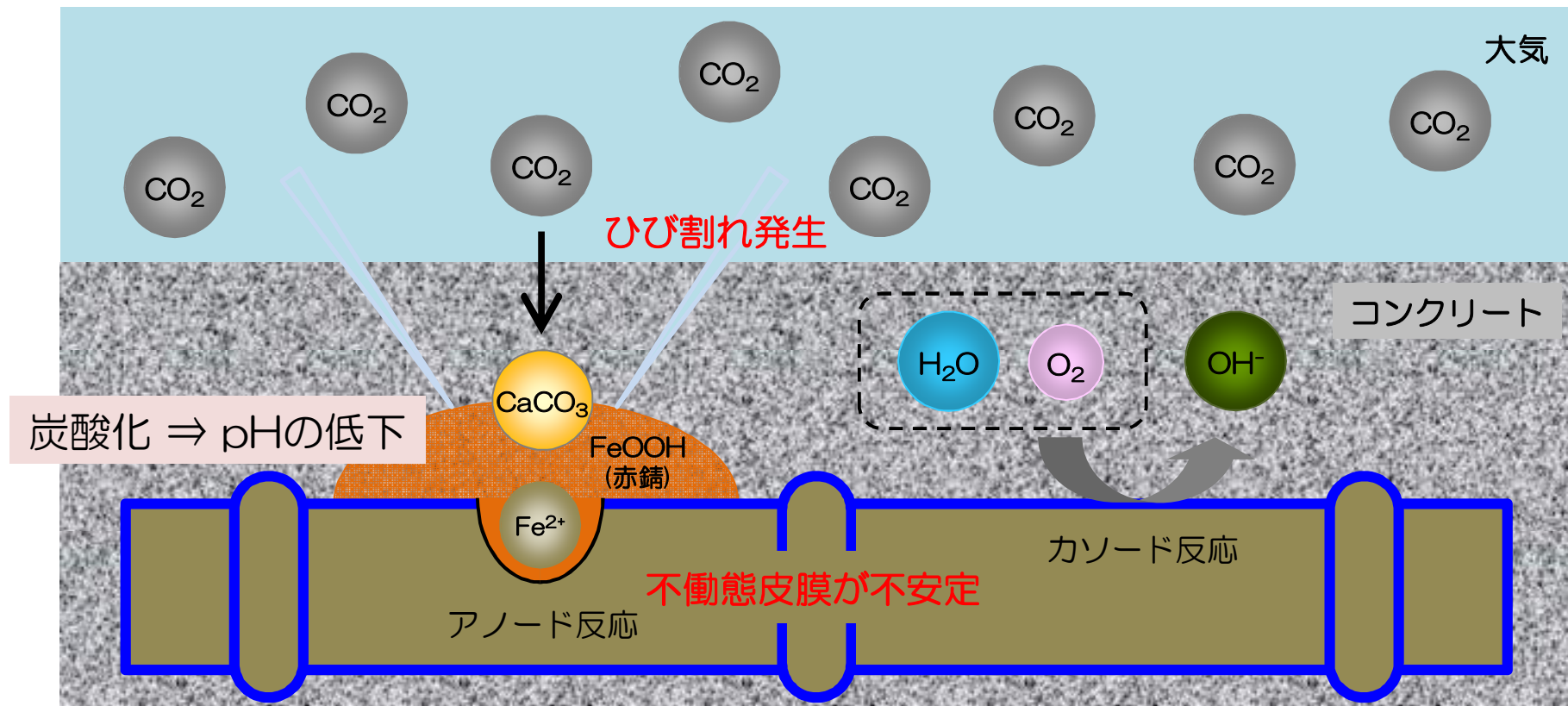
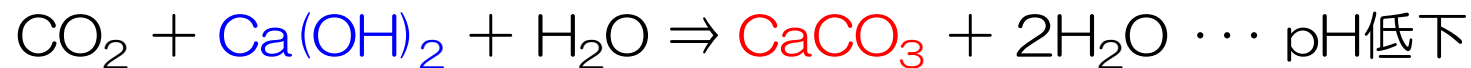


鉄の表面には不働態皮膜が形成され，腐食はほとんど進行しない



コンクリート中鉄筋の腐食メカニズム

●鉄筋腐食によるコンクリートの劣化・・・中性化



鉄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



コンクリート中鉄筋の腐食メカニズム

●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】

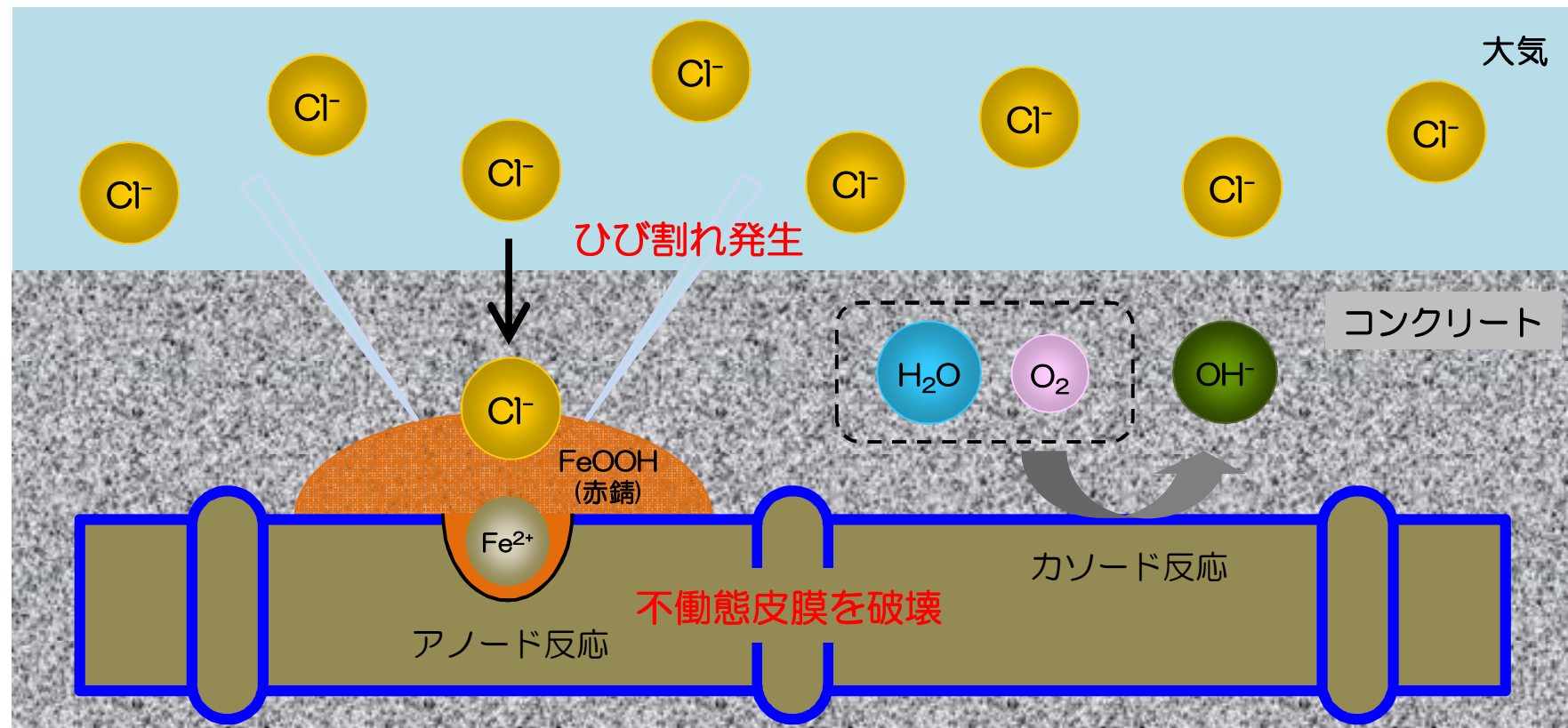
赤色に変化 ⇒ 健全(アルカリ性) 変化なし ⇒ 中性化



コンクリート中鉄筋の腐食メカニズム

●コンクリートの腐食劣化・・・塩害

発錆限界塩化物イオン量 ⇒ コンクリート標準仕様書に記載

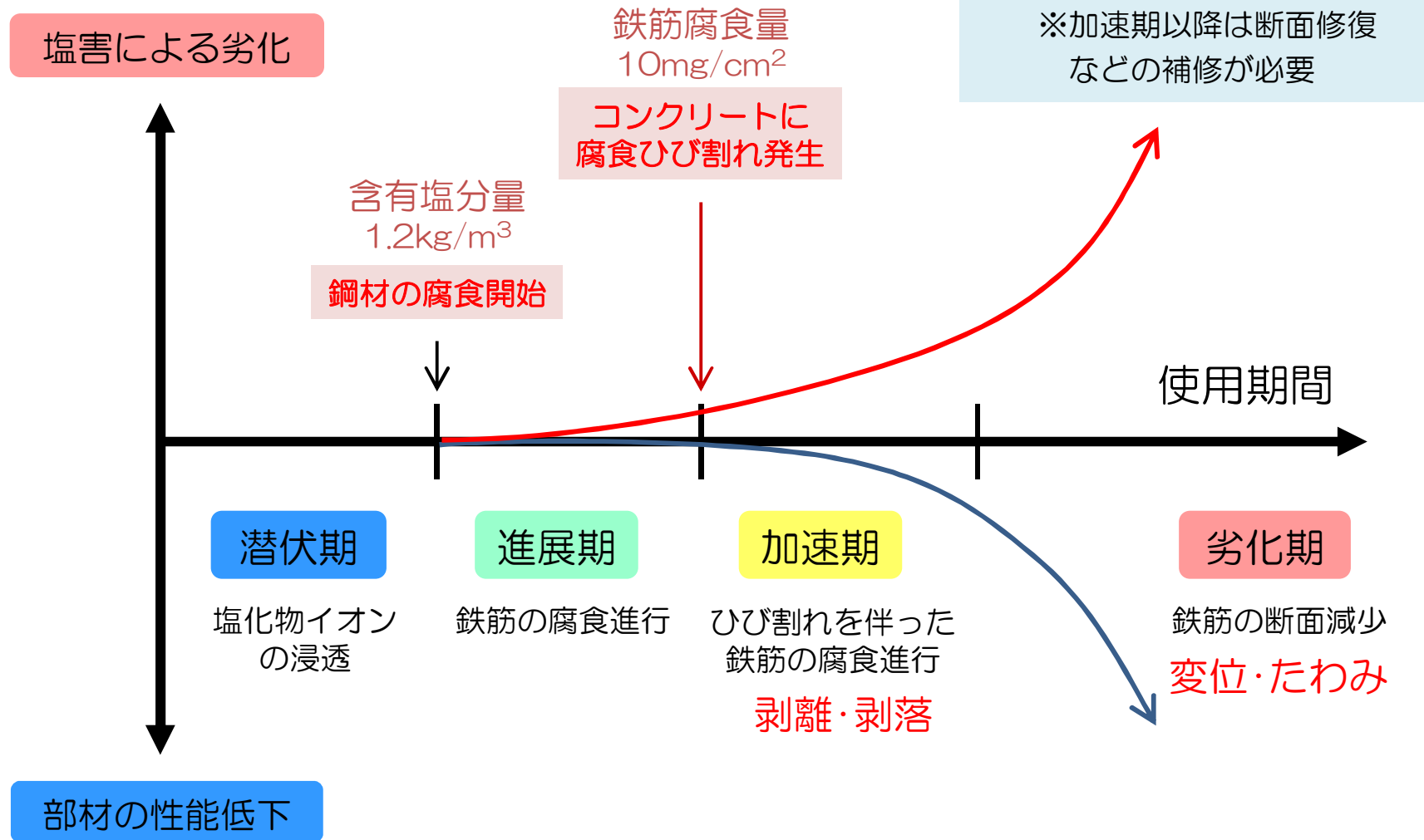


鉄の表面の不動態皮膜が破壊され，腐食が進行 ⇒ ひび割れ



電気の力で腐食を防ぐ 電気防食

●電気防食を適用できる施設の劣化状態



電気の力で腐食を防ぐ 電気防食

●断面修復・表面処理(塗装)工法の再劣化

橋 梁



表面被覆工法の再劣化

栈 橋



断面修復・表面被覆工法の再劣化



腐食ひび割れ

既設コンクリート

補修部

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



電気の力で腐食を防ぐ 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！

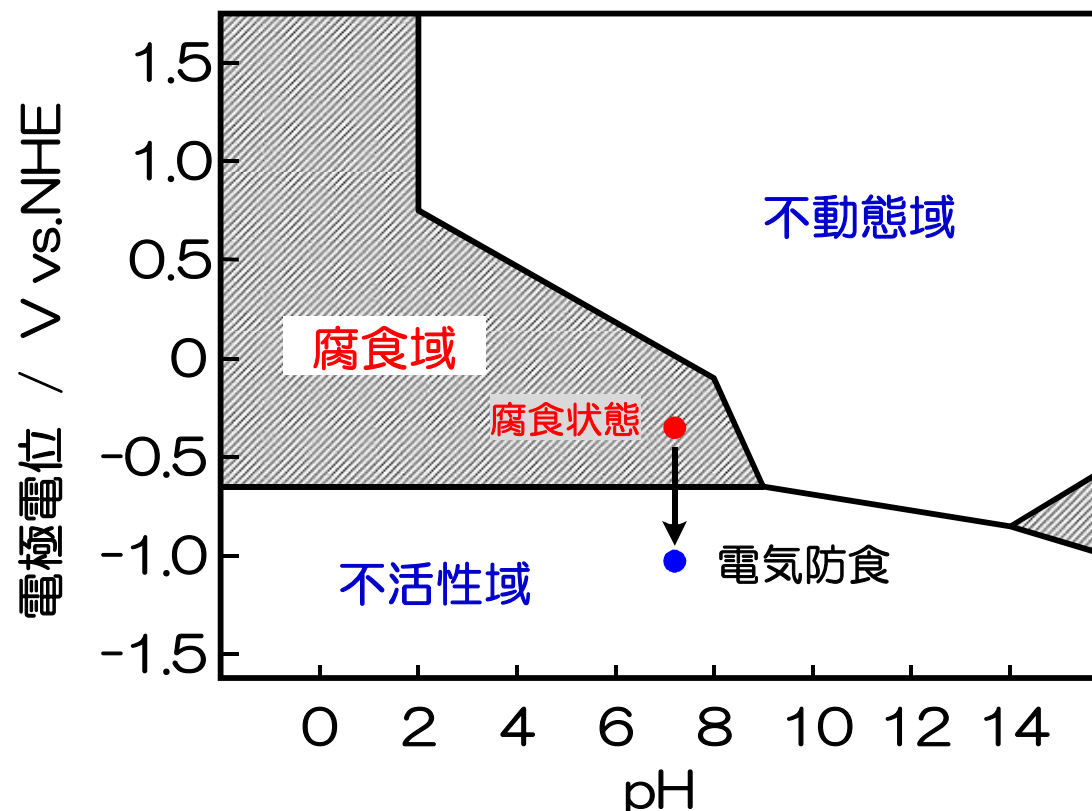


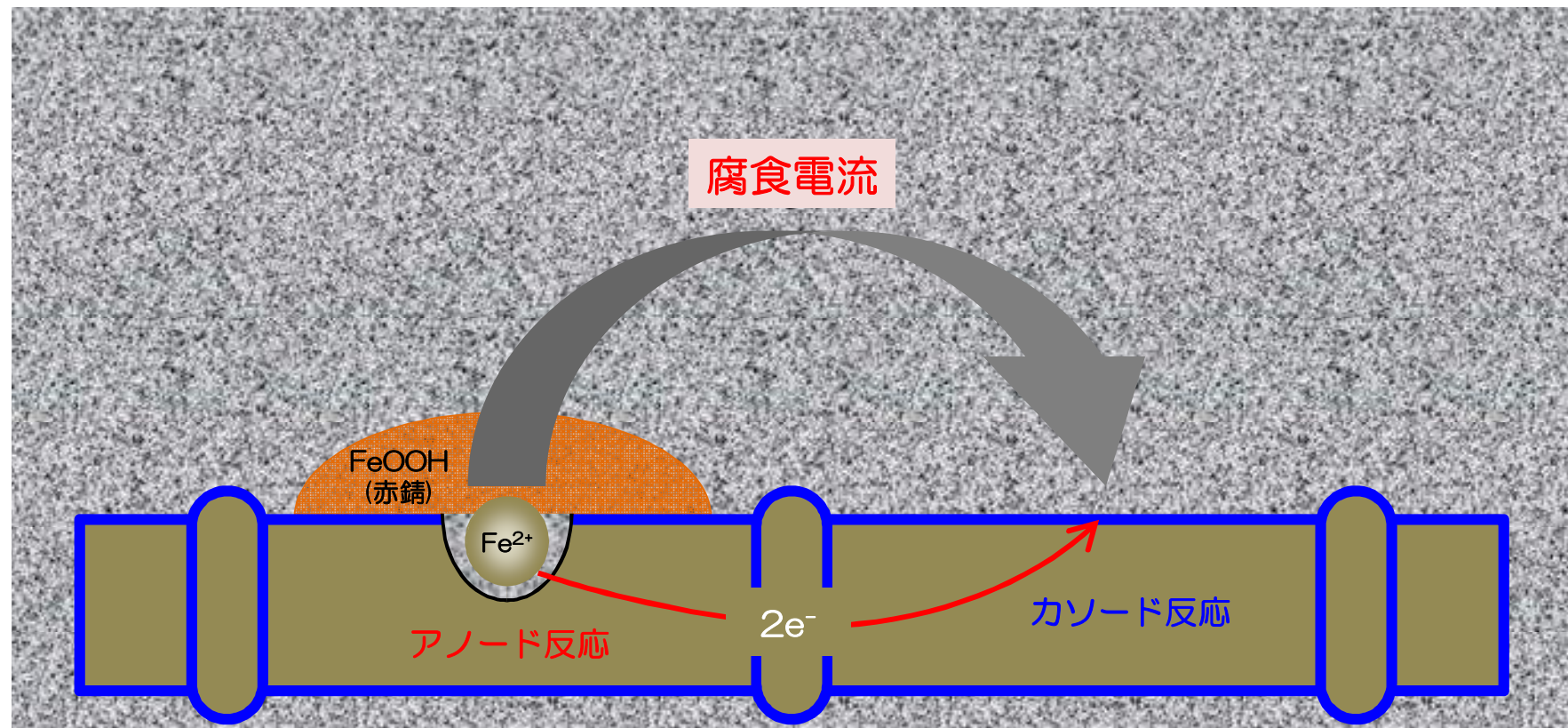
図 鉄の電極電位－pH図(模式図)



電気の力で腐食を防ぐ 電気防食

●電気防食の原理

鉄の表面に腐食電池が形成され、腐食電流が生じている



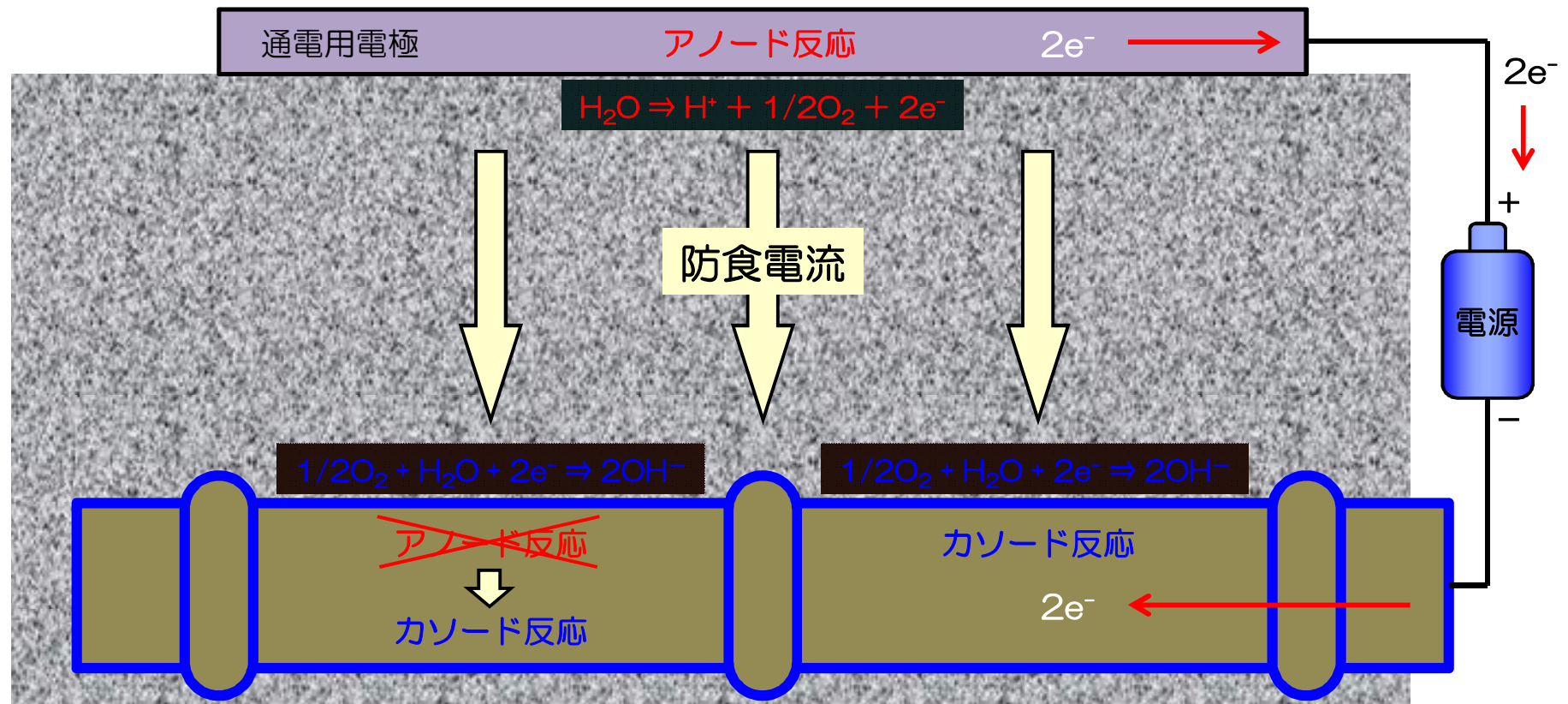
電気エネルギーによって電子の流れの向きを変えられれば腐食が抑制される



電気の力で腐食を防ぐ 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



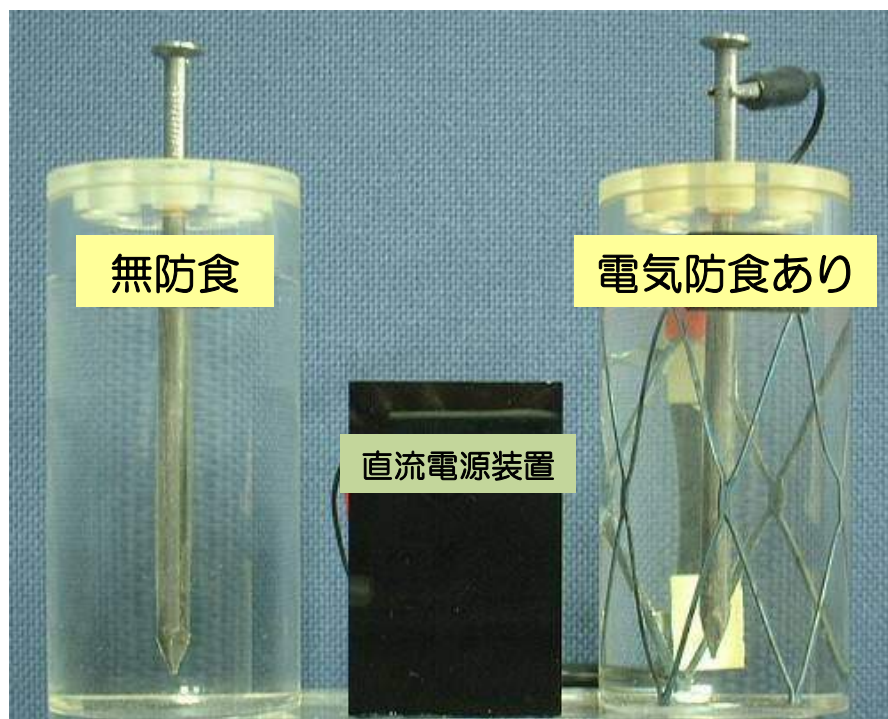
アノード(酸化)反応は全て通電用電極上で生じる ⇒ 腐食抑制



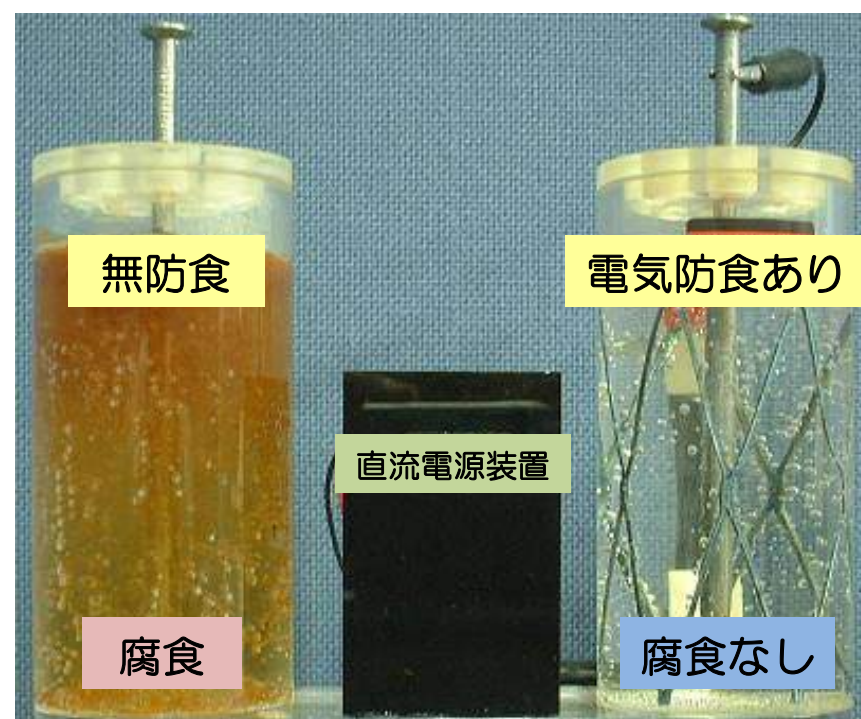
電気防食の効果を実験で検証

●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

●電気防食は腐食反応を直接的に抑制する

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



身の回りの様々な施設を腐食から守る電気防食

●電気防食の歴史

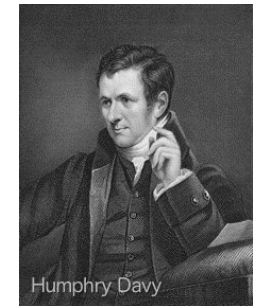
1824年 H.Davyが船舶に対して亜鉛陽極を適用したのが起源

1919年 帝国海軍が軍艦に対して亜鉛陽極の適用を規定

1953年 尼崎港の防潮堤の水門扉にマグネシウム陽極を適用

1954年 尼崎港の矢板式岸壁に外部電源方式電気防食を適用

1962年 アルミニウム陽極および水中溶接の開発により，転換が急速に進む



H.Davy(英国)



アルミニウム陽極の外観



水中溶接法



アルミニウム陽極の適用例



身の回りの様々な施設を腐食から守る電気防食

●電気防食の適用事例



港湾・海洋施設



土壌埋設施設



電力・化学プラント施設



コンクリート構造物



身の回りの様々な施設を腐食から守る電気防食

●コンクリート構造物の電気防食

アメリカでは...

1970年頃 コンクリート構造物に対して電気防食の試験施工を実施

日本国内では...

1980年頃 塩害が各地で顕在化

劣化対策は、断面修復や表面被覆 ⇒ 再劣化

1985年頃 電気防食の検討が始まる

外部電源方式および流電陽極方式が検討

1995年頃 電気防食効果が検証され実施工が始まる

陽極システムはチタン基材の酸化物電極(メッシュ, ロッド)が主流

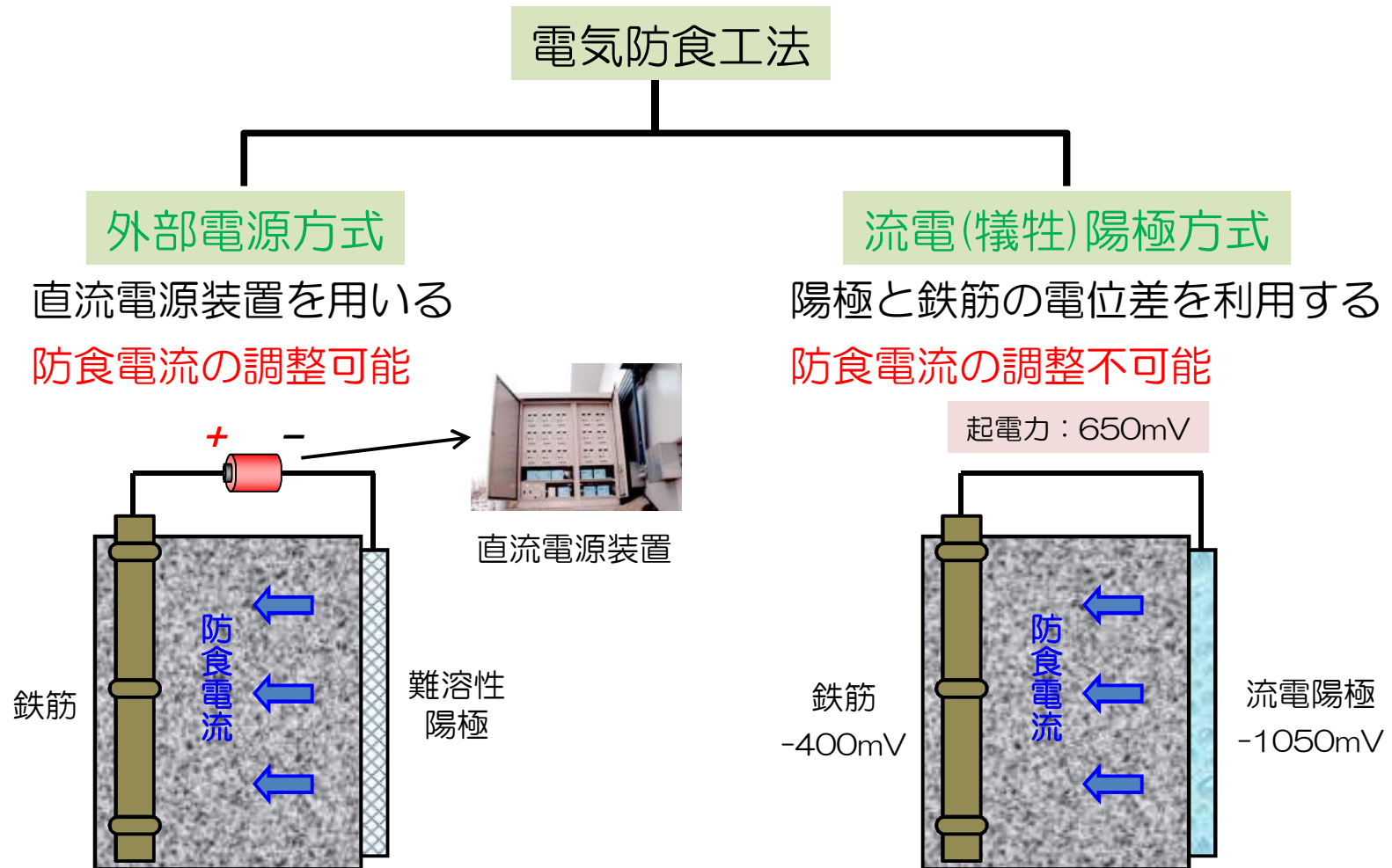
2008年頃 電気化学的防食工法の土木学会指針が制定

これにより電気防食が全国に普及して行く



電気防食工法の種類

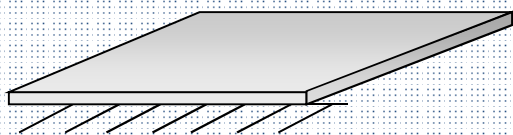
●防食電流の供給方法によって2方式がある



電気防食工法の種類

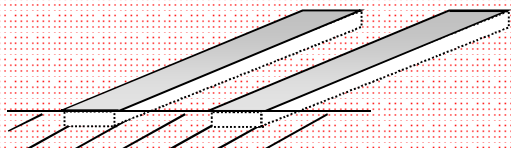
●電気防食用陽極の形状による分類

面状陽極



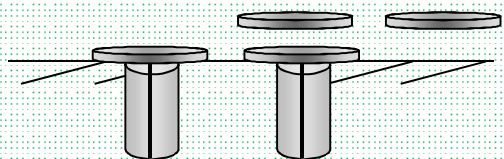
防食対象に対して、陽極材を面状に設置
防食電流の均一性に優れる

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

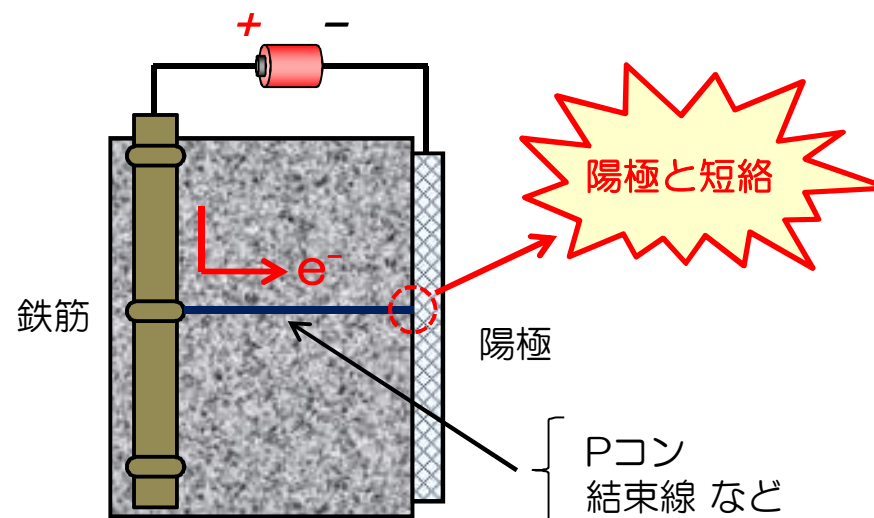


電気防食システム施工時の注意点

●陽極材と鉄筋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、鉄筋表面の腐食を抑制できない！

コンクリート表面には、内部鉄筋と電氣的に導通した金属がある！



内部鉄筋と繋がると ⇒ 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-鉄筋間の
絶縁確認を行う



●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

- ・ 防食電流を供給するための整流器



電気防食工法の種類（一部の紹介）

●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。

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



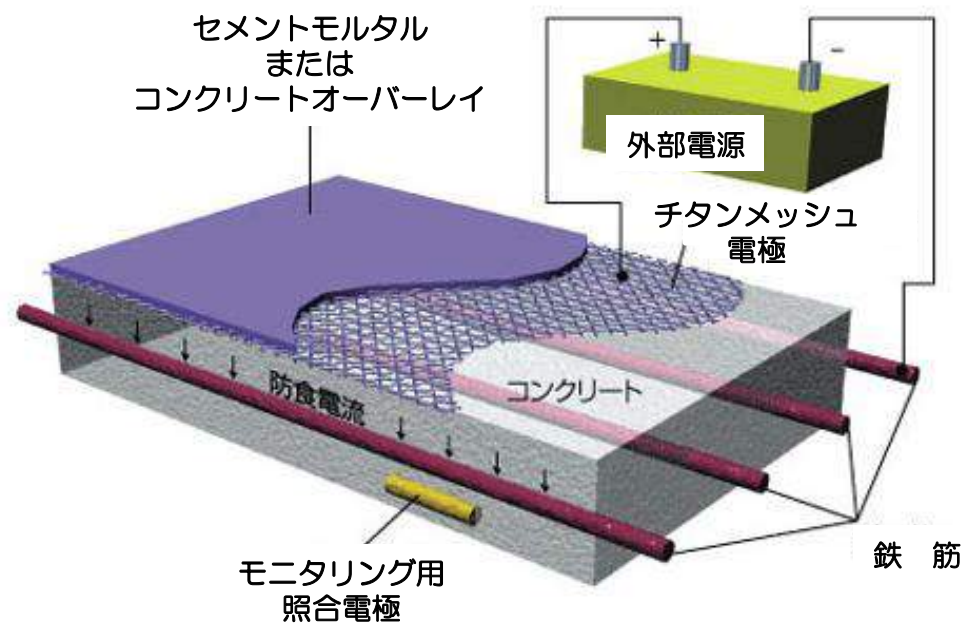
直流電源装置の設置、配線の接続を行う。通電調整試験によって防食電流を決定し、通電する。



電気防食工法の種類（一部の紹介）

●チタンメッシュ陽極方式：外部電源・面状陽極タイプ

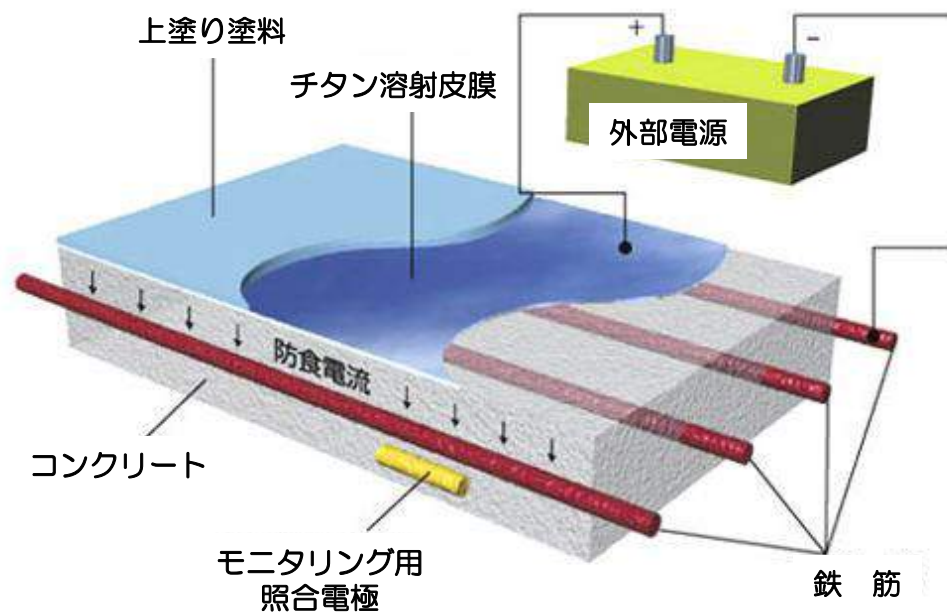
チタンメッシュ陽極をコンクリート面に固定し、モルタルのオーバーレイを行い直流電源装置を用いて防食電流を供給する方式



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

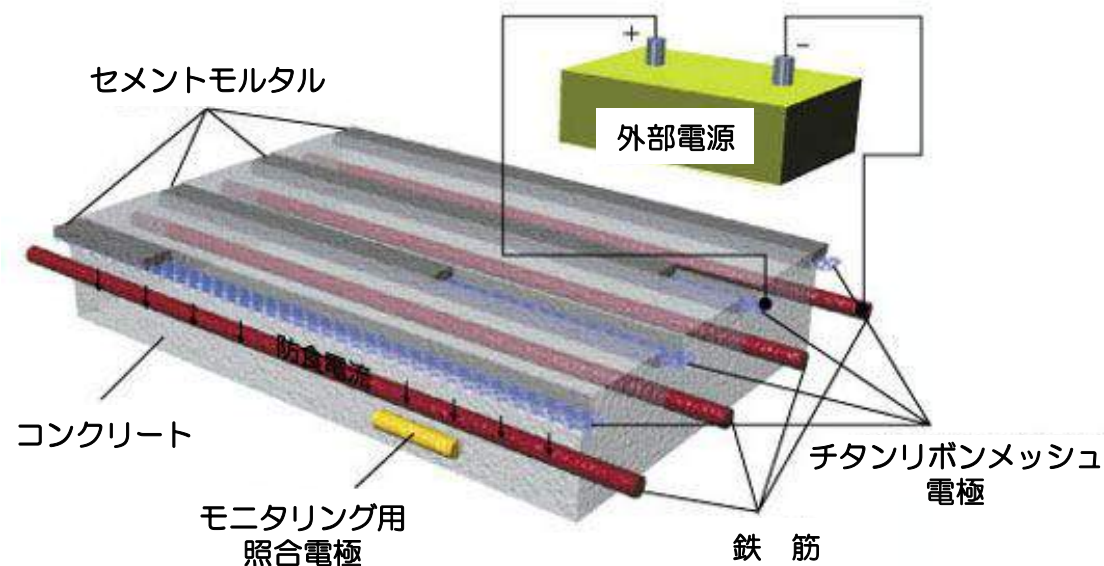
高純度チタンをコンクリート表面にアーク溶射して耐久性のある電極皮膜を形成し，直流電源装置を用いて防食電流を供給する方式



電気防食工法の種類（一部の紹介）

●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

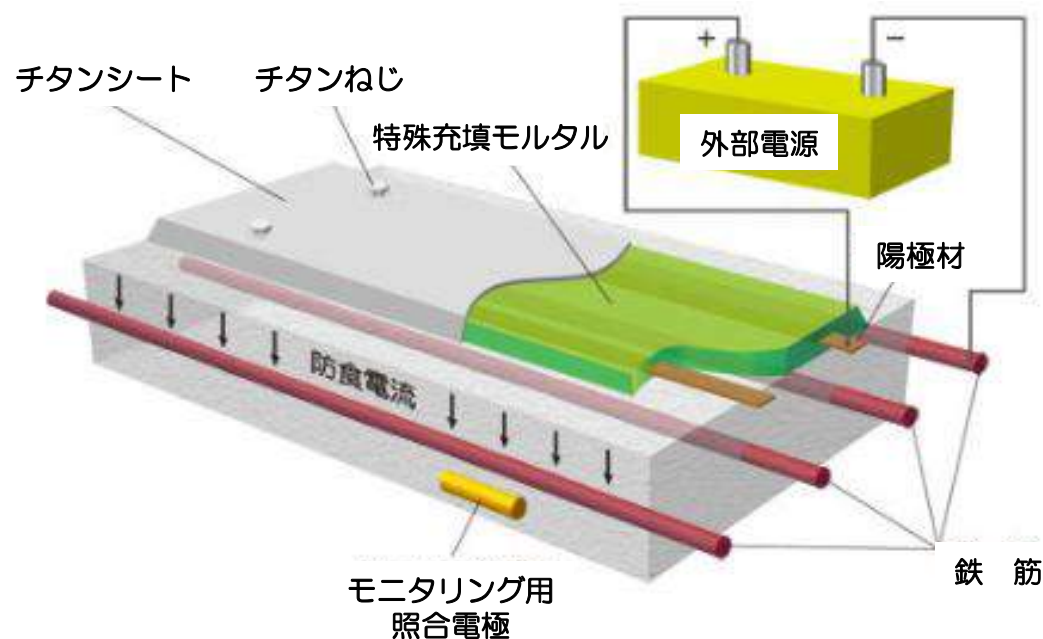
金属酸化物をコーティングしたリボンメッシュ電極を溝切したコンクリート中に設置し，直流電源装置を用いて防食電流を供給する方式



電気防食工法の種類（一部の紹介）

●チタントレイ方式：外部電源・線状陽極タイプ

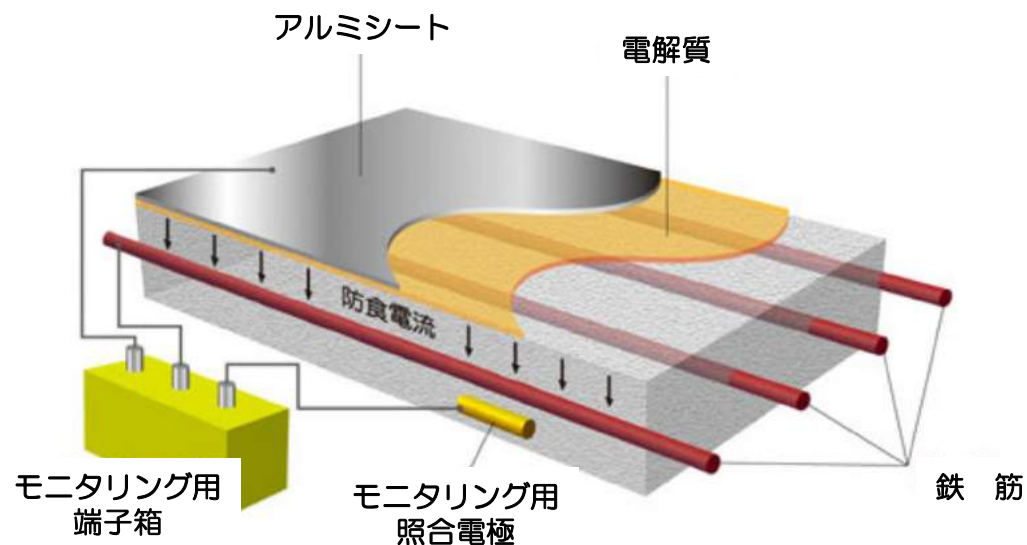
特殊モルタルを充填したチタントレイをコンクリート面にチタンねじを用いて固定し、直流電源装置を用いて防食電流を供給する方式



電気防食工法の種類（一部の紹介）

●ALAPANEL方式：流電陽極・面状陽極タイプ

アルミシート、電解質からなるアルミ防食板をコンクリート表面に設置し、鉄筋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

●鉄筋の電位測定

鉄筋の腐食および防食状態は、鉄筋の電位を測定して評価する

通電していない時・・・自然電位
通電している時・・・通電電位

電気防食システムでは、
埋設照合電極で電位計測

電位測定に必要なもの



照合電極と高抵抗電位差計

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



写真は照合電極設置状況(埋戻し前)

コンクリート環境用照合電極

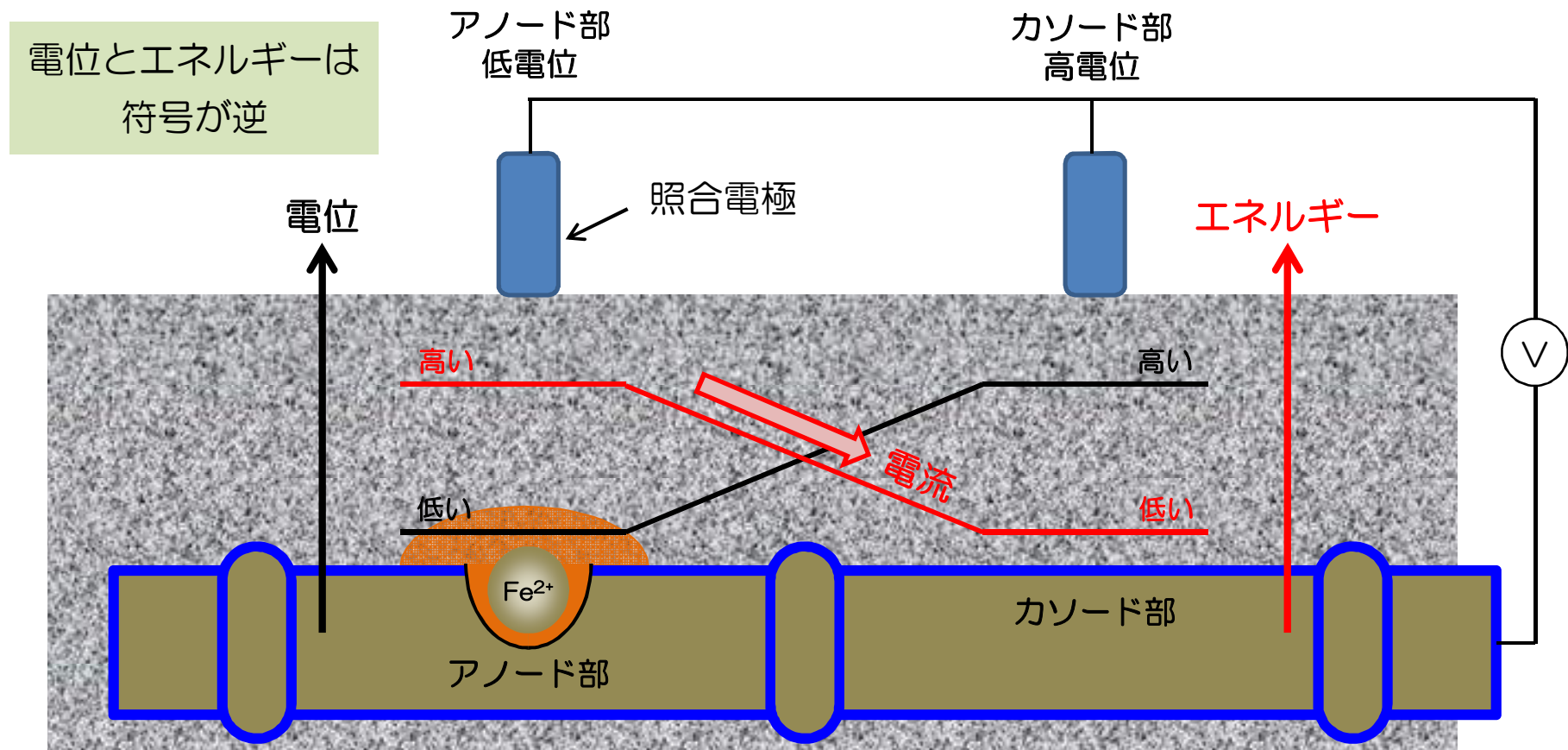
- ・二酸化マンガ照合電極
- ・鉛照合電極



電気防食効果のモニタリング

●鉄筋の自然電位測定

なぜ鉄筋の自然電位を測定すると腐食状況が評価できるのか？



電気防食効果のモニタリング

●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)

鉄筋腐食の可能性	鉄筋自然電位 (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	$-350 < E < -200$	$-285 < E < -135$
90%以上の確率で腐食あり	$E < -350$	$E < -285$

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



電気防食効果のモニタリング

●実橋梁での自然電位測定事例



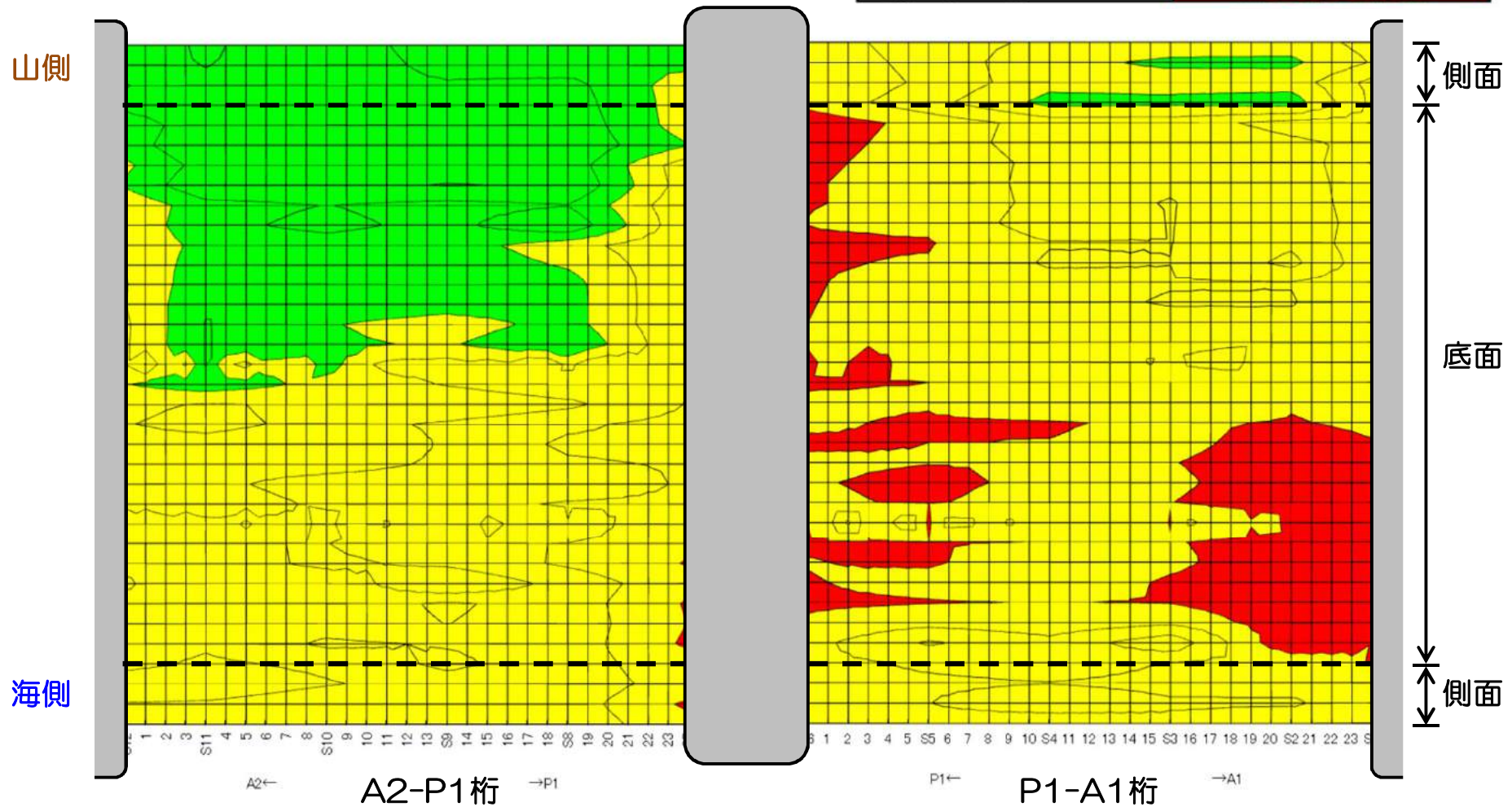
写真 塩害劣化が生じている鉄道橋



電気防食効果のモニタリング

●実橋梁での自然電位測定事例

鋼材自然電位: E_{off} (mV vs. CSE)	電気防食効果
$-200 \leq E_c$	90%以上の確率で腐食なし
$-350 < E_c < -200$	不確定
$-350 \geq E_c$	90%以上の確率で腐食あり



電気防食効果のモニタリング

●電気防食適用時の電位変化・・・E-log I 曲線

- 鉄筋に防食電流が流入すると自然電位よりも低くなる ⇒ 分極現象
- 電位が低くなるほど防食効果は高くなる。

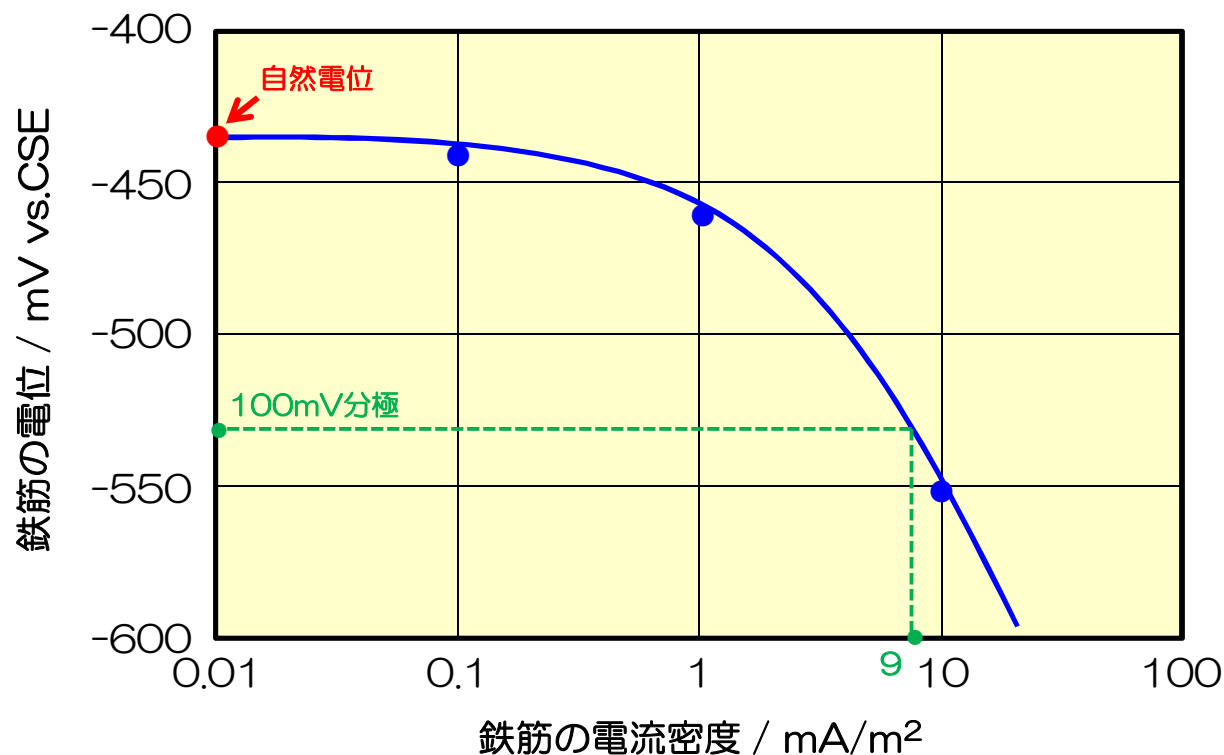


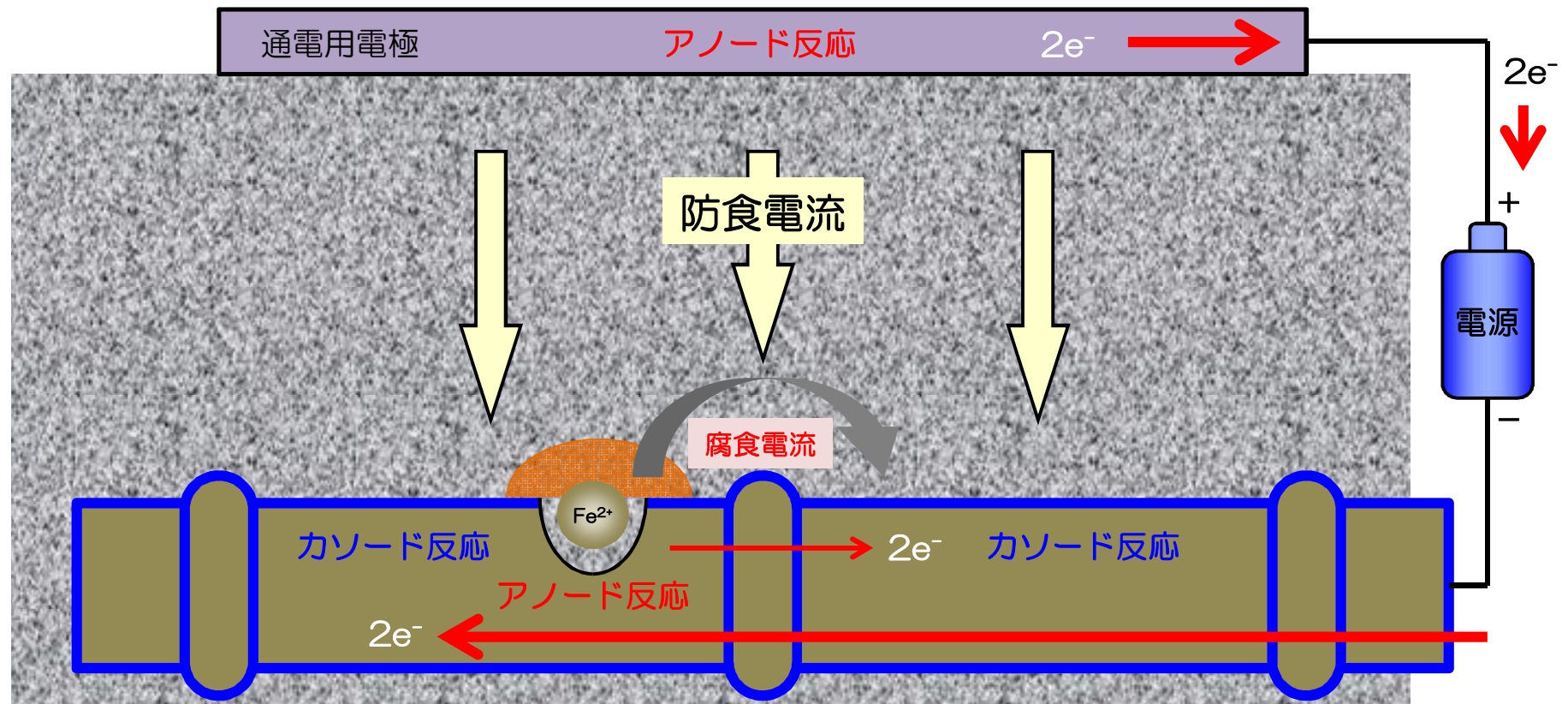
図 鉄筋に防食電流が流入した時の電位変化の様子



電気の力で腐食を防ぐ 電気防食

●電気防食適用時の鉄筋表面の様子

電気防食適用時も表面では腐食反応が生じている。



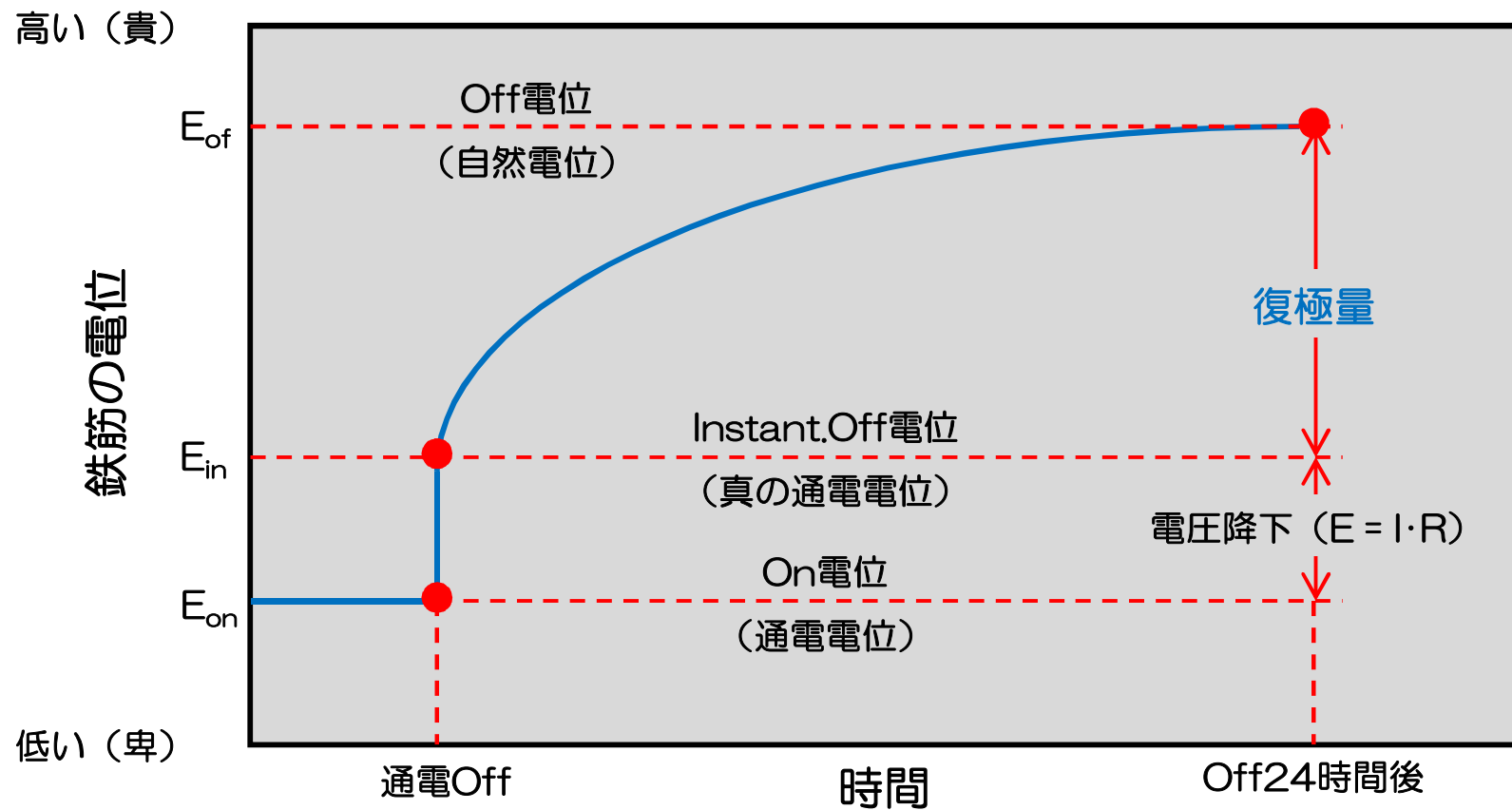
防食電流の増加とともに腐食電流は減少する ⇒ 腐食抑制



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：24時間後の復極量が100mV以上で効果あり

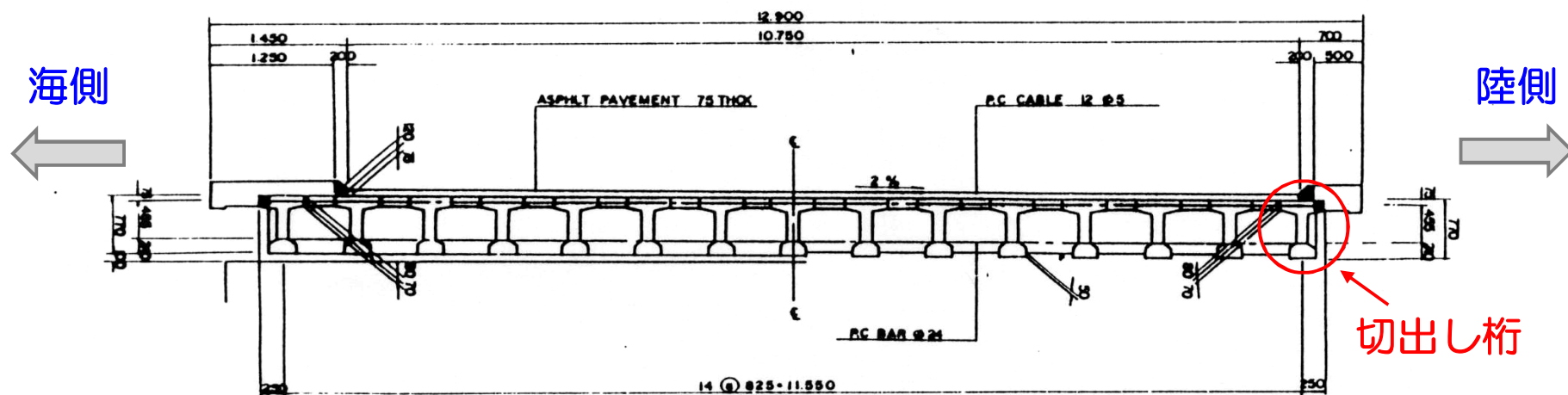


復極量測定の様式図



電気防食工法の適用例①

●電気防食を適用した撤去PC桁の10年経過後の調査結果



橋 長：14.14m

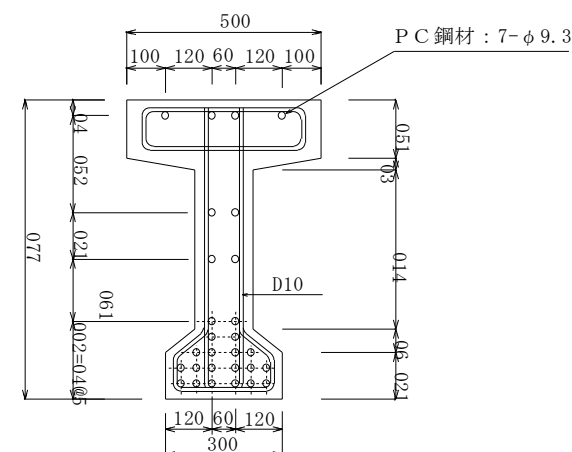
有効幅員：10.75m

竣工：昭和47年2月

※竣工10, 15, 20年後に断面修復と
表面処理を実施

竣工約25年で撤去

桁断面図



日本材料学会

「長期暴露供試体による塩害対策評価検討委員会」による成果



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

電気防食工法の適用例①

●電気防食を適用した撤去PC桁の10年経過後の調査結果

曝露場所：千葉県袖ヶ浦市 東京湾に面する岸壁

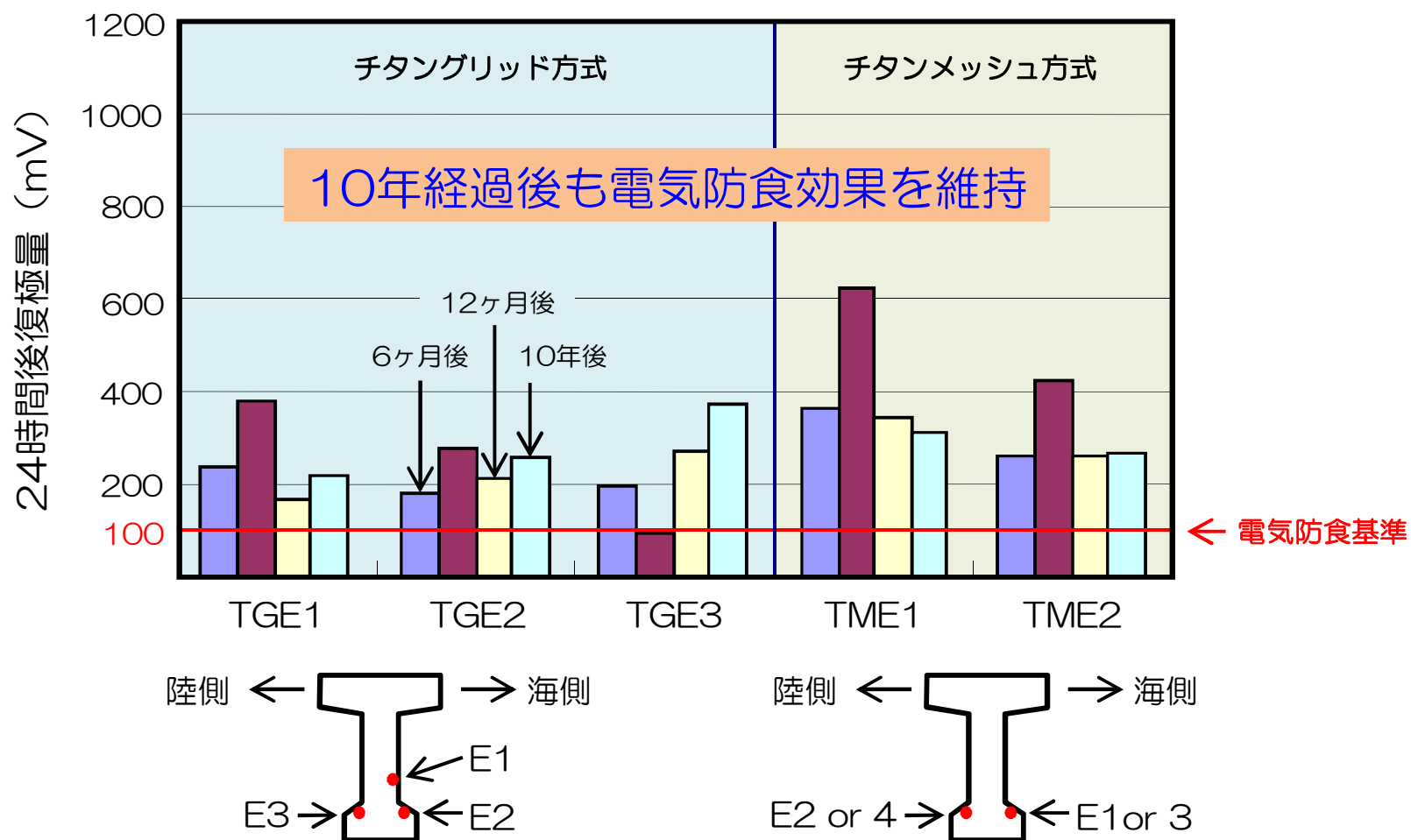


日本材料学会
「長期暴露供試体による塩害対策評価検討委員会」による成果



電気防食工法の適用例①

●電気防食を適用した撤去PC桁の10年経過後の調査結果



日本材料学会
「長期暴露供試体による塩害対策評価検討委員会」による成果



電気防食工法の適用例①

●電気防食を適用した撤去PC桁の10年経過後の調査結果

はつり結果

腐食度 I～II（電気防食適用前と同等）

チタングリッド方式



チタンメッシュ方式



日本材料学会
「長期暴露供試体による塩害対策評価検討委員会」による成果



電気防食工法の適用例②

●電気防食を適用した鉄道橋の10年経過後の調査結果

防食対象：北陸地方のコンクリート鉄道橋

防食方式：Znシート方式（流電陽極）

施工時期：平成10年

現場状況：日本海に面しており，塩害の激しい地域



布田ら，「コンクリート鉄道橋における電気防食効果の経時変化について」，第56回材料と環境討論会，腐食防食学会，2009



電気防食工法の適用例②

●電気防食を適用した鉄道橋の10年経過後の調査結果

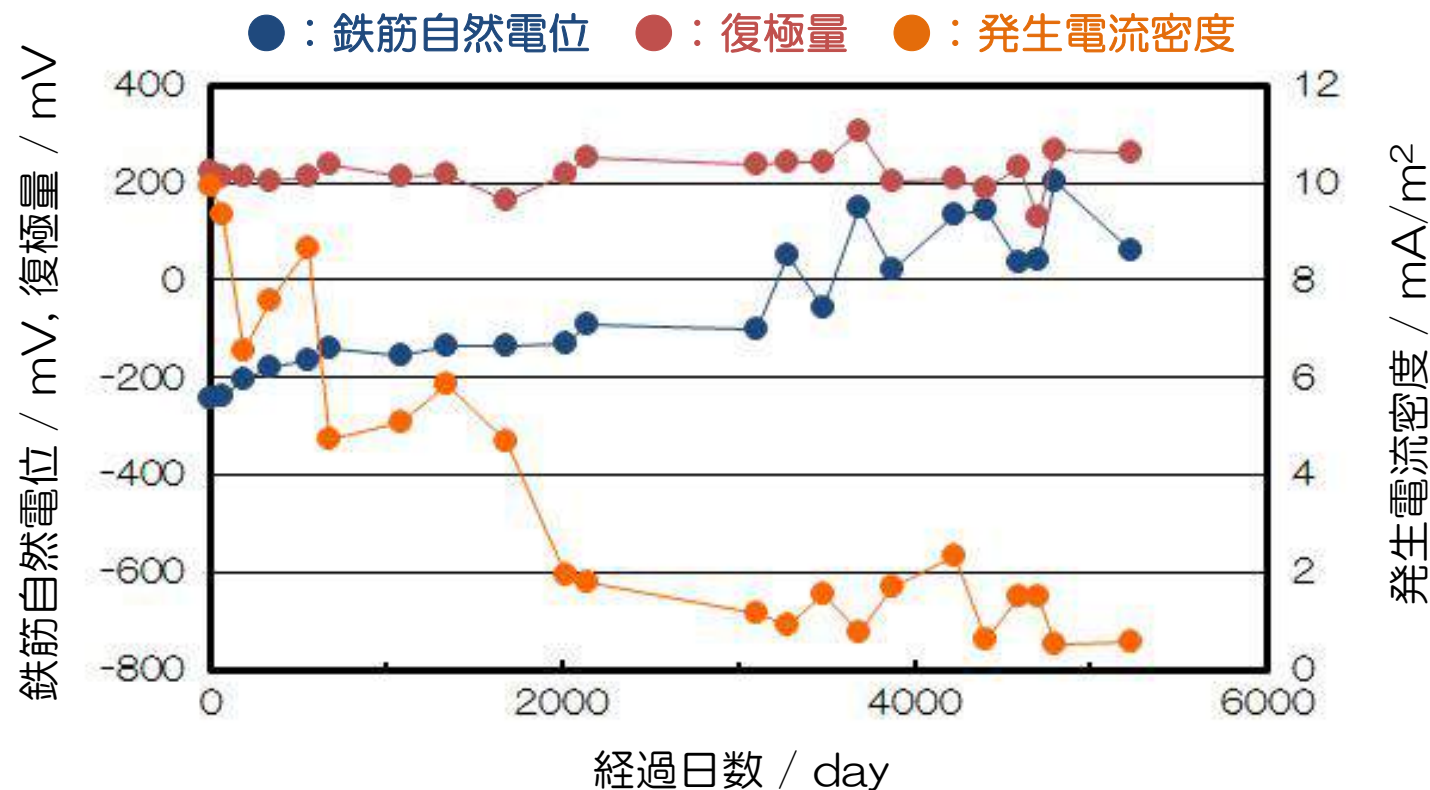


図 鉄筋自然電位，復極量，発生電流密度の経時変化

布田ら，「コンクリート鉄道橋における電気防食効果の経時変化について」，第56回材料と環境討論会，腐食防食学会，2009



電気防食工法の適用例②

●電気防食を適用した鉄道橋の10年経過後の調査結果

①外観目視観察

外観に変状は認められなかった。

②復極量

10年経過後も100mV以上を示しており、防食効果を維持していた。

③鉄筋自然電位

時間の経過とともに電位は高電位側に变化した。

電気防食による副次的効果（環境改善効果）により、鉄筋は再不働態化して電位が高くなった。

④発生電流密度

経時的な回路内の抵抗増加により発生電流密度が低下した。

⇒ 流電陽極方式の特徴・・・経済的な防食

布田ら、「コンクリート鉄道橋における電気防食効果の経時変化について」，第56回材料と環境討論会，腐食防食学会，2009



電気防食工法の適用例③

●マクロセル腐食への適用例

腐食劣化が生じている施設に対しては断面修復が行われる。

⇒ 断面修復によって未補修部の腐食が加速される。

断面修復を適用するかぎり、マクロセル腐食は避けられない

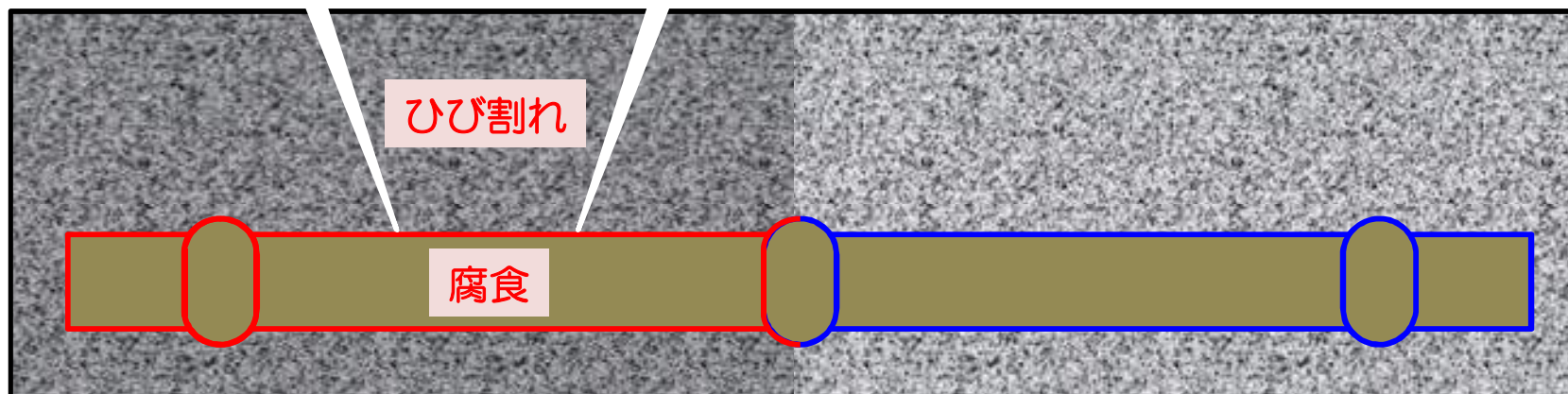


腐食の激しい部分は
断面修復を適用

電気防食が有効

塩分量が多い

塩分量が少ない



電気防食工法の適用例③

●マクロセル腐食への適用例

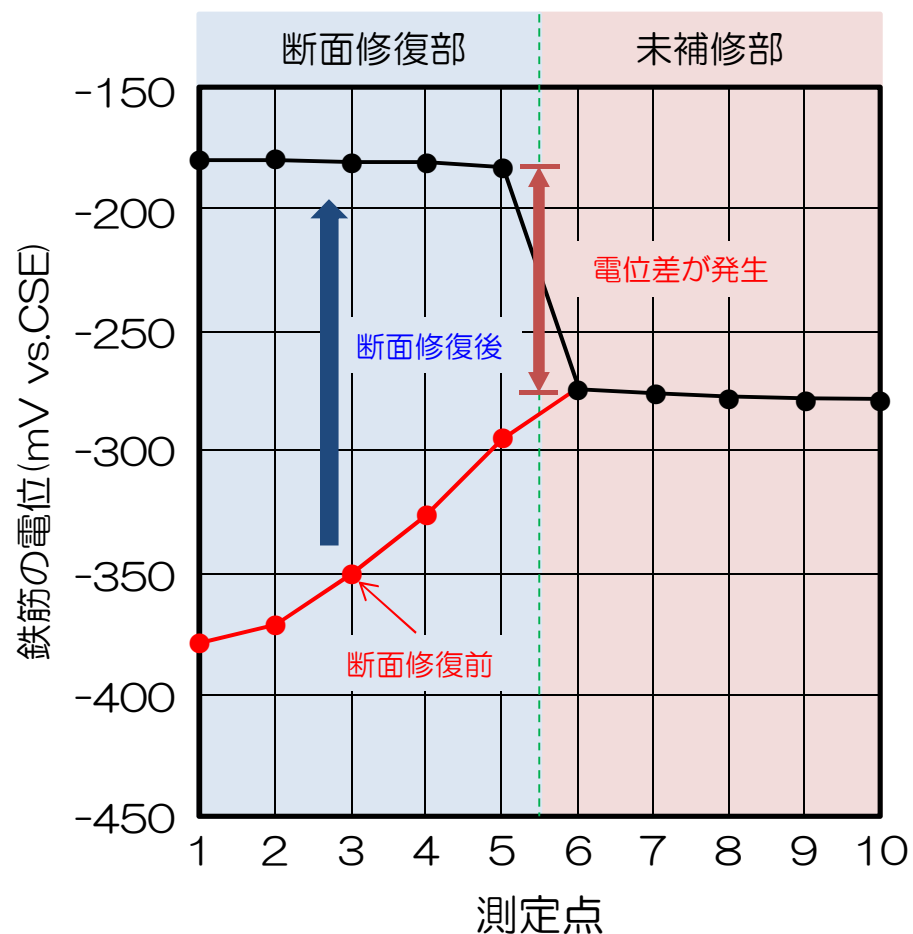
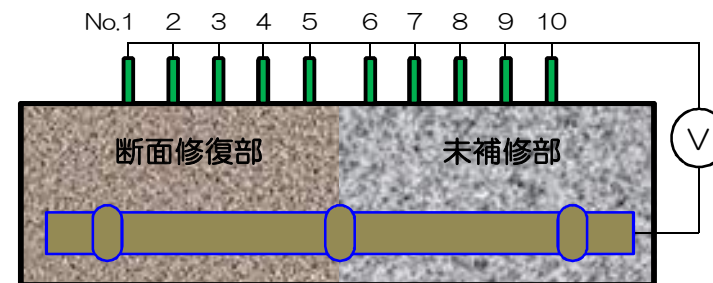


図 断面修復前後の鉄筋の電位分布



電位が低い腐食部を断面修復



断面修復部は再不働態化し、部分的に腐食が進行している未補修部よりも電位が高くなる



境界部で電位差が発生



電気防食工法の適用例③

●マクロセル腐食への適用例

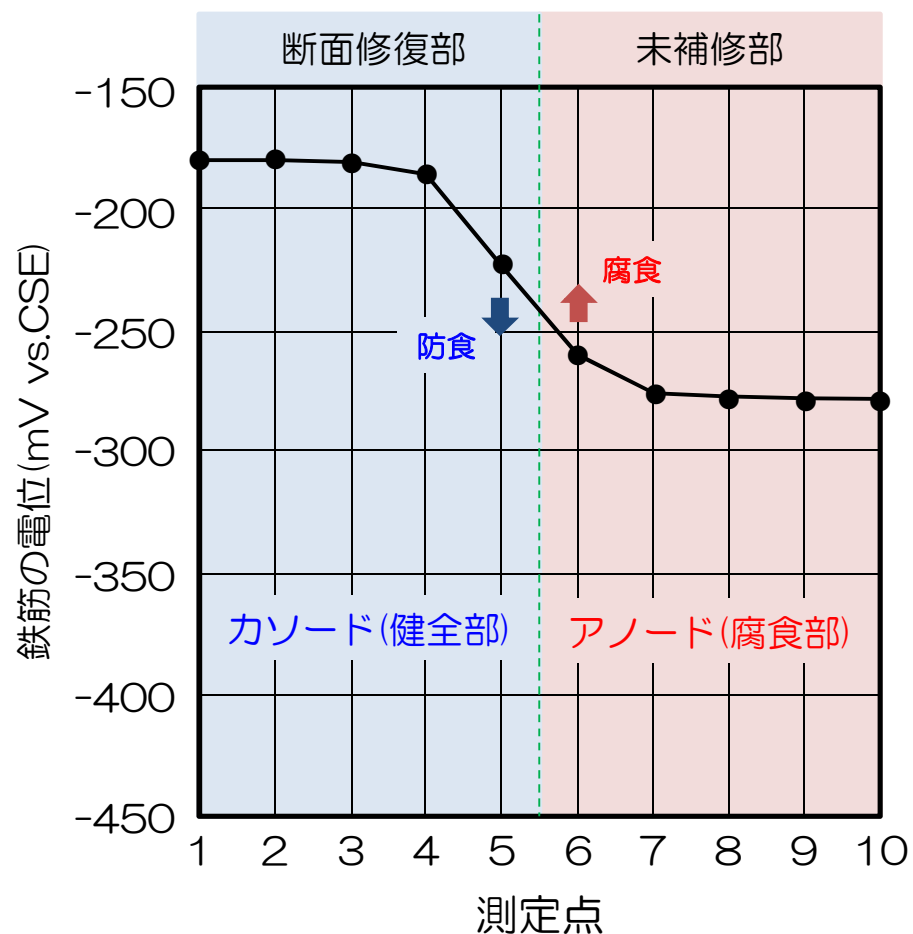
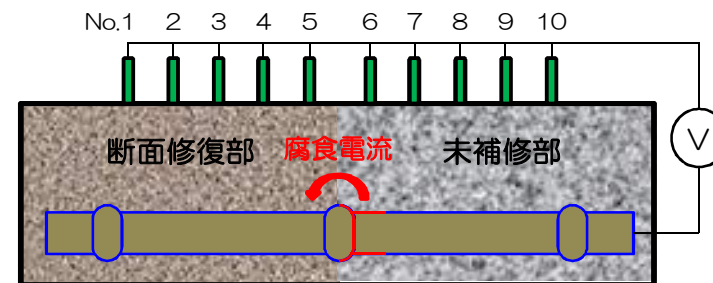


図 断面修復後の鉄筋の電位分布



境界部で電位差が発生
マクロセル腐食



断面修復部：防食されて電位が低くなる
未補修部：腐食して電位が高くなる



境界部の電位差が大きくなるほど
マクロセル腐食が加速される



電気防食工法の適用例③

●マクロセル腐食への適用例

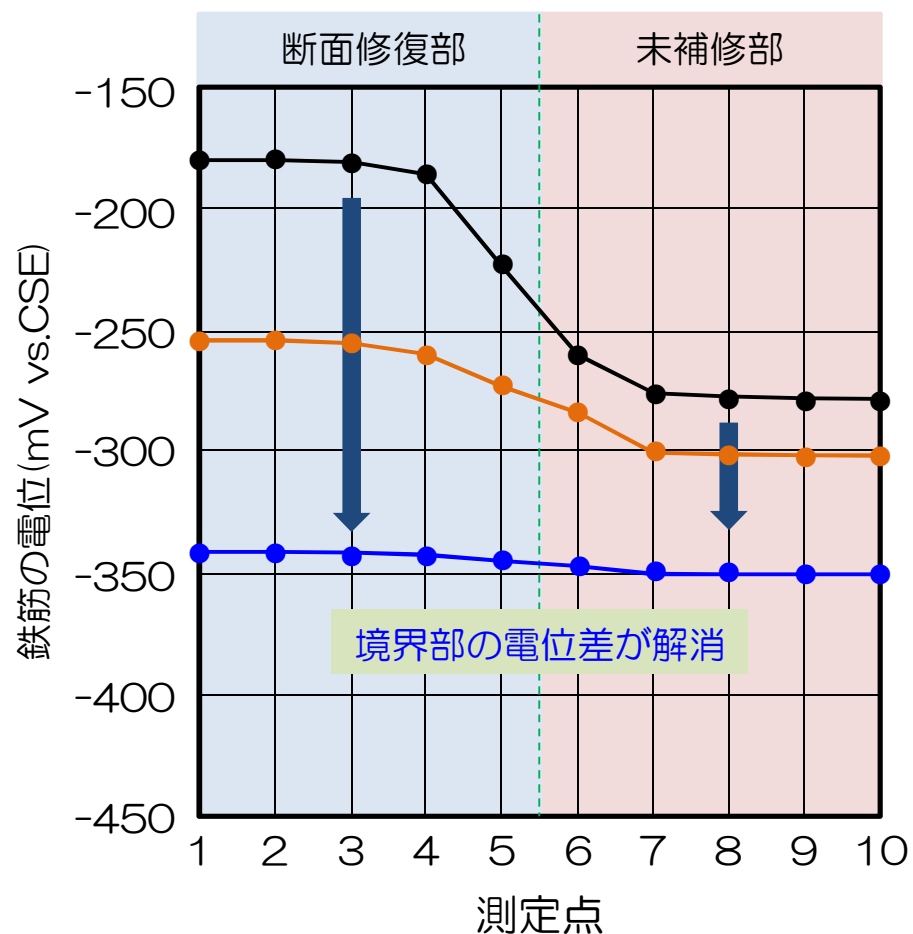
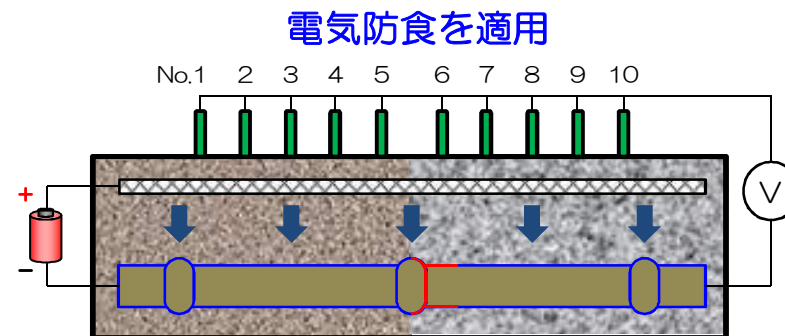


図 電気防食適用前後の鉄筋の電位分布



陽極を設置して防食電流を供給

断面修復部：低電位側に変化

未補修部：低電位側に変化



いずれも防食傾向となり、最終的には境界部の電位差が解消される

マクロセル腐食の停止

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

おわりに

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20,000～25,000m²/年を推移しており、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。



●CP研の施工実績調査結果

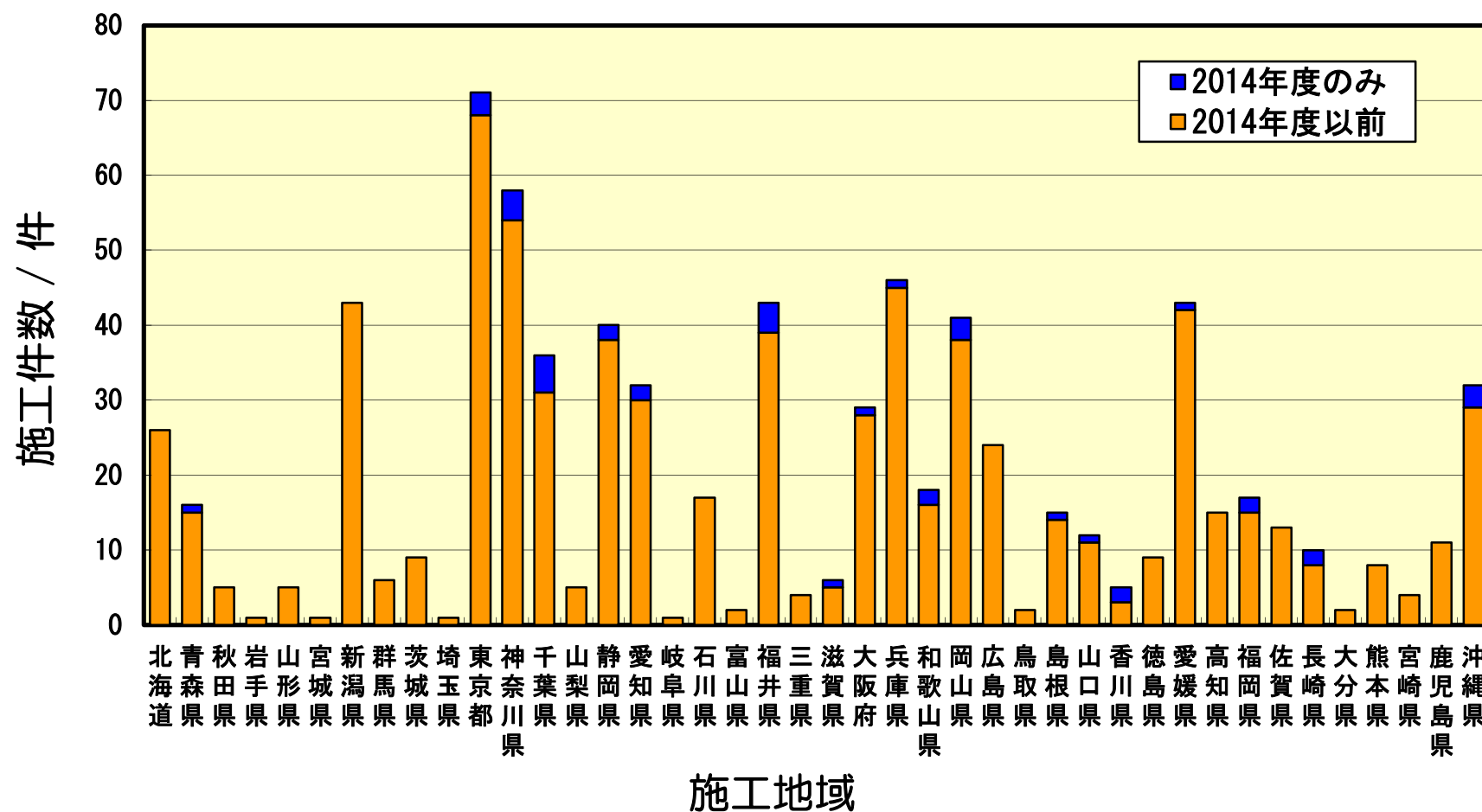


図 地域別の施工件数



●CP研の施工実績調査結果

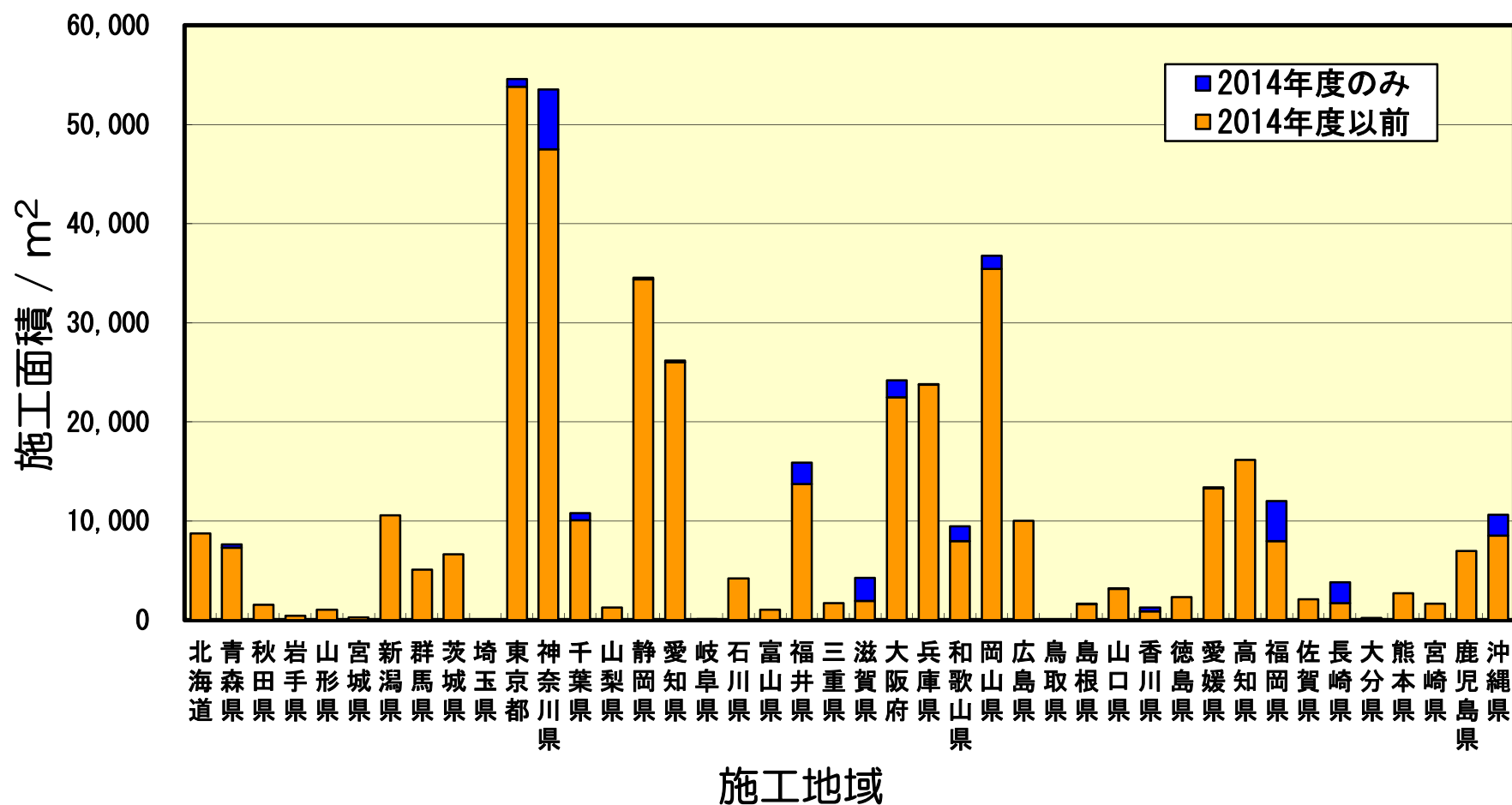


図 地域別の施工面積

