

コンクリート中の鋼材に対する
犠牲陽極材の低電流下での防食効果

2022 年 3 月

小野田 基

要旨

我が国では高度経済成長期、特に 1964 年に開催された東京オリンピックを契機に、全国的高速道路や鉄道網が急ピッチで整備され現在に至っているが、地理的要因もあり、海岸沿いでは海からの飛来塩分による、また山間部や寒冷地域では凍結防止剤による塩害、さらには中性化との複合などにより鉄筋コンクリート構造物に劣化が生じ、それらに対する維持管理には多額の人件費や補修費用がかかっており、非常に大きな負担となっている。

多くのコンクリート構造物が補修を必要とし、より効率的、より効果的な補修工法が必要とされる中、中長期的な延命対策の一つとして電気防食が採用されている。その中でも犠牲陽極材を用いた電気防食は、異種金属間のイオン化傾向の差により防食電流を発生させ、それを鉄筋に供給するため、人為的に防食レベルをコントロールすることができない。また比較的小さい電流密度での運用となるが、このような条件下での防食性能とその適用範囲は明確ではない。しかしながら、システム運用のためのモニタリングを必要とせず、大がかりな装置も不要なため、一般的な断面修復工法に準じて施工が可能であるというメリットがある。

犠牲陽極材はマクロセル腐食対策として既に多く採用されており、欧米では電流密度による基準も存在し、国内外ともに中長期的な防食の実績も得られるようになってきた。そこで本研究では、コンクリート構造物用埋設型犠牲陽極材に着目し、一般的な亜鉛を用いた犠牲陽極材が発生可能な低電流下での防食効果を検証することで、より費用対効果の高い、かつ効率的な犠牲陽極材の選定や合理的な工法設計が可能になると考え、外部電源方式との比較を行うことで犠牲陽極材の防食効果を評価することとした。

第 2 章ではコンクリート中の鋼材腐食メカニズムと電気化学的防食原理およびコンクリート用埋設型犠牲陽極材の適用範囲や特徴を検証した。特に、腐食環境としての塩化物イオン濃度の影響や犠牲陽極材の特徴とその性能差について海外のデータを元に検証した。犠牲陽極材の適用に際し基準となる塩化物イオン濃度の設定とその根拠を明確にし、犠牲陽極材の素材の違いによる防食電流値や耐用年数に関しても明らかとすることで、第 3 章以降で使用する犠牲陽極材の選定根拠とした。

第 3 章では、埋設型犠牲陽極材の評価方法を検討するにあたり、実橋梁での試験施工結果を踏まえ、実験室内にて可能な限り実際の構造物との相関性が期待できる供試体および鋼材の寸法、塩分濃度など実験要因を検討すると共に、比較対象とする外部電源方式での防食電流密度の設定も合わせて実験を行った。実橋梁での試験施工では防食電流密度が $0.2\text{mA/m}^2 \sim 3.5\text{mA/m}^2$ 、復極量が $15\text{mV} \sim 40\text{mV}$ と外部電源方式の基準と比較し小さな値であったが、OFF 電位は時間の経過とともに貴側にシフトしたため、一定の防食効果があることは確認された。また、試作した供試体から、鋼材の面積に対する犠牲陽極材の防食性能が過大であることが判明し、供試体寸法および鋼材表面積の拡大が必要であることが明らかとなった。

第 4 章では、第 3 章にて検討した結果に基づきマクロセル腐食抑制効果の検証を行った。犠牲陽極材からの防食電流は、抵抗器を使用することで目標とする低電流値に調整した。実験の結果、犠牲陽極材

の持つ防食能力内であった場合、塩分濃度等の鋼材の腐食環境によらず近似の防食電流を発生することが確認され、塩化物イオン濃度の低い供試体では外部電源方式の防食基準の一つである復極量 100mV を満たさない場合でも鋼材を防食できていた。また、防食電流密度が同程度であった場合、犠牲陽極材は外部電源方式よりも優れた防食効果を示した。

第 5 章では進行中の鋼材腐食に対する防食性能を検証するため、作製した供試体内の鋼材に対し電食を行うことで、腐食中の環境を再現した。電食は $20\text{mA}/\text{m}^2$ を通電することにより行ったが、供試体中の塩化物イオン濃度が高いほど鋼材の腐食が進行した。第 4 章との比較を行うため、犠牲陽極材には同一の抵抗器を使用した。但し、本実験より鋼材を鋼板から丸棒へ変更することで、打設時のブリージング等の影響をできる限り避けられるように改善した。犠牲陽極材の発生させる電流は、それぞれの性能が異なるため、容量の大きい陽極材では塩分濃度による発生防食電流の差は小さく、容量の小さい陽極材では塩分濃度が増えるに従い防食電流が小さくなった。同程度の防食電流を発生させていた犠牲陽極材と外部電源方式供試体を比較すると、塩分濃度 0.8% ではほぼ同様の復極量を示していたのに対し、1.5% では犠牲陽極材の方が大きな復極量を得ており、犠牲陽極材と外部電源方式では、必要な復極量を得るために必要な電流に違いがあることが明らかとなった。なお、OFF 電位を検証したところ、復極量 100mV 未満の供試体であっても時間の経過とともに貴側にシフトしていたことから、犠牲陽極材の防食電流値においても、一定の防食効果があることが明らかとなった。

第 6 章では研究にて明らかになった事実より、犠牲陽極方式が適用可能な基準を示すと共に、RC 構造物に対する有用性と今後の課題をとりあげた。

目次

第1章 序論.....	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 コンクリート構造物に用いられる電気化学的工法.....	2
1.3 本研究の目的	3
1.4 本論文の構成	4
第2章 既往の研究と鋼材腐食に対する電気化学的工法	5
2.1 コンクリート中の鋼材腐食	5
2.1.1 鋼材腐食メカニズム	5
2.1.2 環境が鋼材の腐食に与える影響.....	7
2.1.3 マクロセル腐食	9
2.1.4 塩化物イオンの影響	10
2.2 電気化学的防食工法	13
2.2.1 陰極防食法	14
2.2.2 埋設型犠牲陽極材方式	16
2.3 電気防食基準	18
2.4 既往の研究.....	18
2.4.1 外部電源方式による復極量 100mV 未満の防食効果	18
2.4.3 犠牲陽極材の防食電流に影響を与える要因	20
2.4.4 犠牲陽極材の発生防食電流の減衰	22
2.5 本論文で検討する課題.....	27
第3章 埋設型犠牲陽極材の評価方法の検討.....	29
3.1 はじめに	29
3.2 埋設型犠牲陽極材の簡易的設置工法による防食効果	29
3.2.1 試験施工概要	29
3.2.2 工法概要	30
(1) 工法の特徴	30
(2) 使用材料	31
(3) 犠牲陽極材の設置.....	31
3.2.3 試験施工方法	31
(1) 照合電極設置	31
(2) 犠牲陽極材設置	32
(3) 防水材塗布	33
3.2.4 試験施工結果	33
(1) 外観	33
(2) 防食電流	34

(3) 復極量	34
(4) オフ電位	35
3.2.5 本工法の効果	36
3.3 埋設型犠牲陽極材による防食電流と復極量の検証	36
3.3.1 実験概要	37
(1) 供試体概要	37
(2) 犠牲陽極材供試体概要	38
(3) 電気防食供試体概要	39
(4) 実験方法	41
3.3.2 実験結果	41
(1) 防食電流	41
(2) オン電位	42
(3) 復極量	44
(4) オフ電位	45
(5) 鋼材腐食状況	46
3.3.3 室内試験結果を踏まえた実橋梁施工結果に対する考察	49
3.4 本章のまとめ	49
第4章 犠牲陽極方式におけるマクロセル腐食抑制効果	50
4.1 はじめに	50
4.2 実験概要	50
(1) 供試体概要	50
(2) 犠牲陽極材供試体の概要	51
(3) 外部電源方式供試体の概要	53
4.3 実験方法	54
4.4.1 犠牲陽極材供試体における防食電流	56
4.4.2 オン電位	58
4.4.3 自然電位と復極量	60
(1) 基準供試体の自然電位	60
(2) 犠牲陽極供試体の復極量	60
(3) 外部電源供試体の復極量	62
4.4.4 オフ電位	64
(1) 犠牲陽極材供試体のオフ電位	64
(2) 外部電源供試体のオフ電位	65
4.4.5 鋼材腐食状況	67
(1) サイクル 25 終了時の基準供試体	67
(2) サイクル 25 終了時の犠牲陽極材供試体	67
(3) サイクル 25 終了時の外部電源供試体	68
(4) 全サイクル終了時の基準供試体	69

(5) 全サイクル終了時の犠牲陽極材供試体.....	69
(6) 全サイクル終了時の外部電源供試体.....	71
4.4.6 防食に必要な電流量の考察.....	72
4.5 本章の結論.....	73
第5章 犠牲陽極方式における進行中の腐食抑制効果.....	75
5.1 はじめに.....	75
5.2 実験概要.....	75
5.2.1 供試体概要.....	75
5.2.2 犠牲陽極材供試体概要.....	77
5.2.3 外部電源供試体.....	78
5.2.4 電食方法.....	79
5.2.5 実験方法.....	80
5.2.6 実験結果.....	81
(1) 犠牲陽極材供試体における防食電流.....	81
(2) 犠牲陽極材供試体におけるオン電位.....	82
(3) 外部電源供試体におけるオン電位.....	84
(4) 基準供試体の自然電位.....	85
(5) 犠牲陽極材供試体の復極量.....	85
(6) 外部電源供試体の復極量.....	87
(7) 犠牲陽極材供試体におけるオフ電位.....	89
(8) 外部電源供試体におけるオフ電位.....	90
5.2.7 鋼材腐食状況.....	92
(1) 腐食状況の目視確認.....	92
(2) 鋼材の質量変化.....	92
(3) 塩分濃度による質量変化.....	92
5.3 防食に必要な電流の考察.....	99
5.4 本章の結論.....	100
第6章 結論.....	101
6.1 本研究による結論.....	101
6.2 埋設型犠牲陽極方式適用基準の提案.....	102
6.3 RC 構造物に対する犠牲陽極方式適用の有用性.....	103
6.4 今後の展望と課題.....	104
謝 辞.....	105
付録1.....	106
付録2.....	151

第1章 序論

1.1 本研究の背景

我が国では高度経済成長期、特に1964年に開催された東京オリンピックを契機に全国的高速道路や鉄道網が急ピッチで整備され現在に至っている。2012年の笹子トンネル天井板崩落事故をきっかけとし、2014年に道路法施行規則が施工され近接目視による5年に1度の点検の義務付けなど対策が取られているが、2020年度末時点での健全性判定区分Ⅲ、Ⅳ^(1.1)（表1-1）に該当する橋梁のうち措置が必要な施設数61,170件に対し、約60%の36,712橋が未着手となっている（表1-2）。また、高速道路総延長は約9,000kmに及ぶが供用後30年以上経過している区間が約3,700kmと、インフラ構造物の効率的な維持修繕が重要な課題である。このように、我が国では地理的要因もあり、海岸沿いでは海からの飛来塩分、山間部や気温の低い地域では凍結防止剤による塩害、さらには都市部での中性化との複合による鉄筋コンクリート構造物の劣化など、維持管理には多額の人件費や補修費用がかかっており、非常に大きな負担となっている。

多くのコンクリート構造物が補修の対象時期となり、より効率的、より効果的な補修工法が必要とされる中、中長期的な延命対策の一つとして電気防食が採用されている。塩害が生じた鉄筋コンクリート構造物の補修においては、鉄筋の防錆やマクロセル腐食対策が必要となるが、電気化学的防食工法はコンクリート構造物中の鋼材腐食を抑制する、既に確立された工法であり、その内の一つである流電陽極工法に属するコンクリート埋設型犠牲陽極工法は、実構造物で多数の実績を持つが比較的歴史の浅い技術である。一方、費用対効果に優れ、継続的なモニタリングやメンテナンスを必要としない工法であるために着目されている。

以下に構造物の健全性に関する指標と対策の現状を示すが、多くの構造物が補修対象となっている中、未対応件数が非常に多い。インフラ構造物の点検作業時間と共に補修に必要な費用と労働力確保の難しさが読み取れる。今後の高効率かつ耐久性を含めた費用対効果に優れた工法の選定が重要であると考え

表 1-1 橋梁、トンネル等の健全性^(1.1)

区分		状態
I	健全	構造物の機能に支障が生じていない状態
II	予防保全段階	構造物の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態
III	早期措置段階	構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態
IV	緊急措置段階	構造物の機能に支障が生じている、または生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態

表 1-2 2016～2020 年度点検結果^(1.1)

管理者	措置が必要な施設数	措置に着手済の施設数		未着手施設数
			うち完了数	
国土交通省	3,536	2,019 (57%)	487 (14%)	1,547 (43%)
高速道路会社	2,686	1,061 (40%)	484 (18%)	1,625 (60%)
地方公共団体	54,918	21,378 (39%)	8,698 (16%)	33,540 (61%)
都道府県政令都市	18,225	9,144 (50%)	3,433 (19%)	9,081 (50%)
市区町村	36,693	12,234 (33%)	5,265 (14%)	24,459 (67%)
合 計	61,170	24,458 (40%)	9,669 (16%)	36,712 (60%)

1.2 コンクリート構造物に用いられる電気化学的工法

鋼材腐食に起因するコンクリート構造物の補修工法としてはライニングや吸水防止剤による、腐食に関与する酸素や水等の供給の低減、断面修復によるかぶりコンクリートの補修や鋼材の防錆、電気化学的手法の利用が原則となる。電気化学的防食工法とその目的および効果は以下のとおりである（表 1-3, 4）。

表 1-3 電気化学的防食工法^(1.2)

工法名	防食の目的	期待される効果	適用対象
電気防食工法	腐食反応の抑制	腐食反応速度の低減	塩害, 中性化
脱塩工法	鋼材腐食環境の改善	塩化物イオン濃度の低減	塩害
再アルカリ化工法		アルカリ性の回復	中性化
電着工法	腐食因子の供給抑制	腐食因子の移動抵抗性の向上	塩害, 中性化, 進行性でないひび割れ

表 1-4 外観グレードと適用可能工法（塩害）^(1.3)

構造物	外観上の グレード	劣化過程	期待する効果	
			耐久性の回復・向上	力学的な性能の回復
新設構造物			表面処理,電気防食	
既設構造物	グレードⅠ	潜伏期	表面処理,脱塩,電気防食	
	グレードⅡ	進展期	表面処理,脱塩,電気防食	
	グレードⅢ-1	加速期前期	断面修復,脱塩,電気防食	
	グレードⅢ-2	加速期後期	断面修復,脱塩,電気防食	断面修復
	グレードⅣ	劣化期	脱塩,電気防食	断面修復

本研究では電気防食工法のうち流電陽極に属する犠牲陽極材について検討する、電源方式による違いは以下のとおりである。（表 1-5）

表 1-5 電源方式

電源方式	特徴
外部電源	電流調整が可能, 電源設備が必要
流電陽極	電源設備が不要, 電流調整不可

外部電源方式は電流調整が可能であるため、劣化状況や腐食要因に合わせ防食レベルを調整することが可能であるが、電源設備が必要であることや継続的なモニタリングが必須であることなど大がかりな工法となる。それに対し流電陽極方式、特に埋設型犠牲陽極材は電流調整は不可能であるが、腐食環境に合わせ自動的に犠牲陽極材より防食電流が供給されるため、電源装置やモニタリング等、大がかりな設備を必要としない利点がある。

1.3 本研究の目的

電気化学的防食工法はコンクリート構造物中の鋼材腐食を抑制する、既に確立された工法である。そのうち流電陽極工法に属するコンクリート埋設型犠牲陽極工法は実構造物で多数の実績を持つが比較的歴史の浅い技術である。外部電源方式の電気防食工法であれば、復極量が 100mV 以上となるようモニタリングを行うことで適切な防錆効果が得られるようコントロールすることができるが、一方、犠牲陽極材は異種金属間のイオン化傾向の差により防食電流を発生させ、それを供給するため、人為的に防食電流値を調整し、防食レベルをコントロールすることができない。また比較的小さい電流密度での運用となるが、このような条件下での防食性能とその適用範囲は明確ではない。しかしながら、犠牲陽極材はマクロセル腐食対策として既に多く採用されており、欧米では電流密度による基準^(1.4)も存在し中長期的な防食の実績も有する。

そこで本研究ではコンクリート構造物用埋設型犠牲陽極材に着目し、一般的な亜鉛を用いた犠牲陽極材が発生可能な低電流下での防食効果を検証することで、より費用対効果の高い効率的な工法選定や合理的な設計が可能になると考え、外部電源方式との比較を行うことで犠牲陽極材の防食効果を評価することとした。

1.4 本論文の構成

本論文は6章から構成される。

第1章では「序論」として、本論文の背景と目的について述べた。第2章では既往の研究と鋼材腐食に対する電気化学的工法、特に埋設型犠牲陽極材について述べると共に、コンクリート中の鋼材の腐食メカニズムやマクロセル腐食、腐食抑制工法について整理した。第3章では本研究を行うにあたり、犠牲陽極方式の評価方法の検討を行った。犠牲陽極材の選定や塩分濃度、防食対象となる鋼材の面積等、供試体の腐食環境についても検討を行った。第4章では犠牲陽極方式におけるマクロセル腐食の抑制効果を検証した。3段階の塩分濃度別にそれぞれ異なる犠牲陽極材および複数の防食電流を設定した外部電源方式による防食を行い比較検討した。第5章では犠牲陽極方式における進行中の腐食抑制効果について検証した。腐食進行中の防食はマクロセル腐食と比較して大きな防食電流を必要とするが、第4章と同様の腐食環境下にてそれぞれ複数の犠牲陽極材と外部電源方式にて比較検証した。第6章では「結論」として、第3章から第5章で得られた結果より、埋設型犠牲陽極材を使用した低電流下での防食効果および今後の展望と課題をまとめた。

【参考文献】

- (1.1) 国土交通省令和3年8月25日道路メンテナンス年報（2巡目の2年目）の公表
- (1.2) 土木学会：電気化学的防食工法指針，コンクリートライブラリー157，p16
- (1.3) 土木学会：電気化学的防食工法指針，コンクリートライブラリー157，p18
- (1.4) EN12696:2000 Cathodic protection of steel in concrete

第2章 既往の研究と鋼材腐食に対する電気化学的工法

2.1 コンクリート中の鋼材腐食

コンクリート中の鋼材は、強いアルカリ性により不動態を形成することにより、腐食から保護されているが、塩害や中性化によって不動態被膜が破壊されると鋼材の腐食が進む。不動態被膜が破壊された部分がアノードとなり、不動態被膜で保護されている部分やアノード部と比較して電位の高い部位はカソードとなることで腐食電池が形成され腐食が進行していくこととなる。

なお、鋼材の腐食では次の条件が満たされることにより腐食回路が形成される。

- アノード
- カソード
- アノードとカソードの金属的接続
- アノード、カソード間の電解質による経路

2.1.1 鋼材腐食メカニズム

金属は溶液中にてイオン化するが、なかでも鉄は比較的イオン化しやすい金属である（図 2-1）。鉄は自然界では化合物として存在することで安定しているが、鉄単体では非常に不安定であり酸化しやすい。

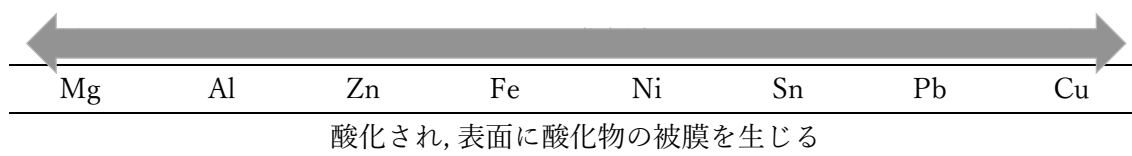


図 2-1 金属のイオン化傾向

鉄がコンクリート中の水分にてイオン化する際にはアノード側にて酸化反応が、カソード側にて還元反応が起きることになる。



図 2-2 に示すとおり、実際の構造物では、雨水などが溜まりやすい部位や水の通り道となる部位、クラックによる水分の浸入など、コンクリート中の水分が多い場合や、中性化の進行、塩分の鉄筋位置への到達などをきっかけとしてアノードが形成される。

アノードにて放出された電子は金属的接続を通じカソードへ流入（腐食電流）し、カソードにて生成された水酸基がアノード側へ電解質の移動として接続されて腐食回路が形成される。この際の鋼材電位はアノード側が低く、カソード側が高い不均衡状態である。

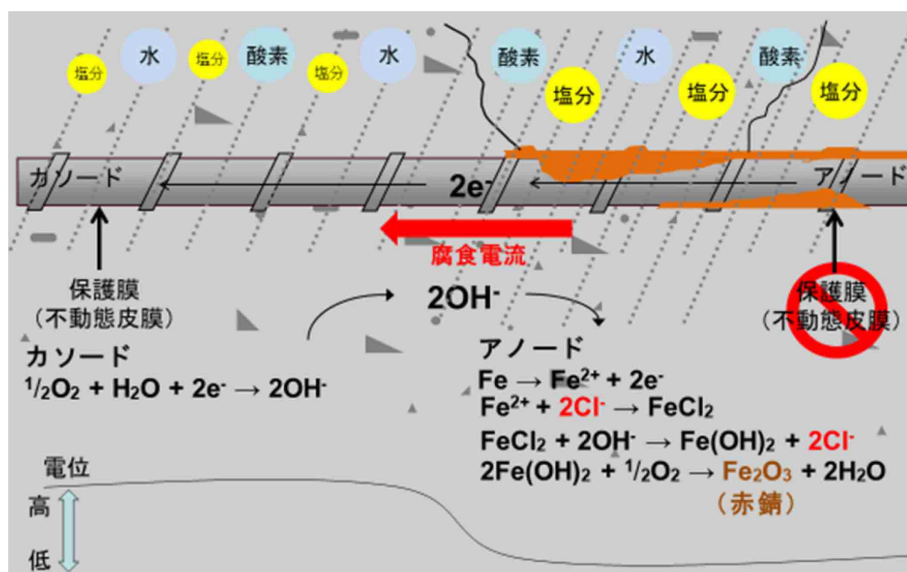


図 2-2 コンクリート中の鋼材腐食モデル^(2.1)

なお、pH と電位の関係に着目して腐食の発生領域をみると、中性化による鋼材腐食は以下のとおりである（図 2-3）。

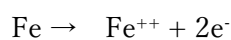
破線 b は oxygen line であり、この線を境に酸素を発生させる。



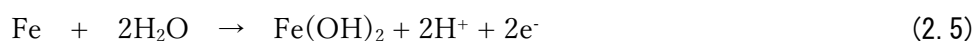
破線 a は hydrogen line であり、この線を境に水素を発生させる。



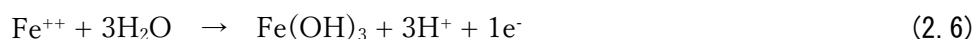
領域①は腐食領域である。

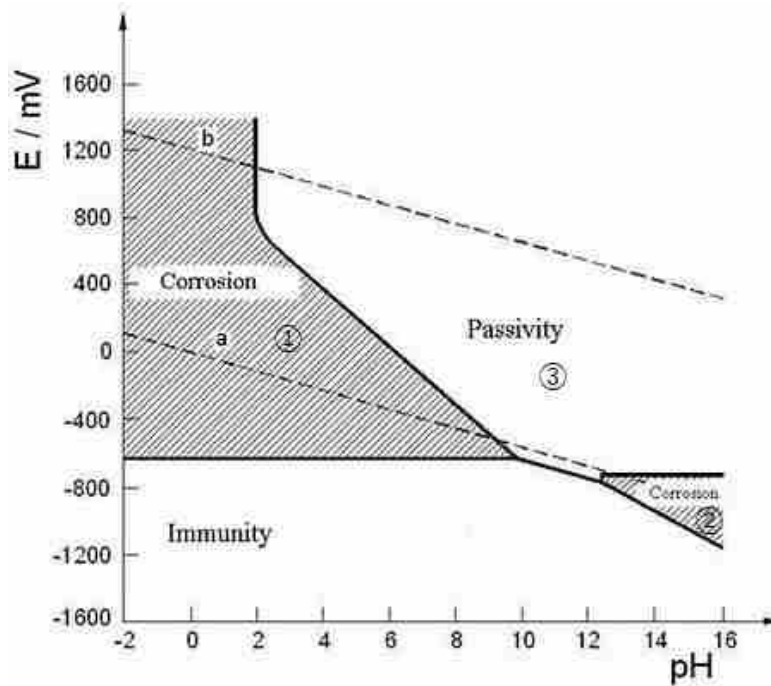


領域②も腐食領域であるが、必ずしも腐食が進行するわけではない。

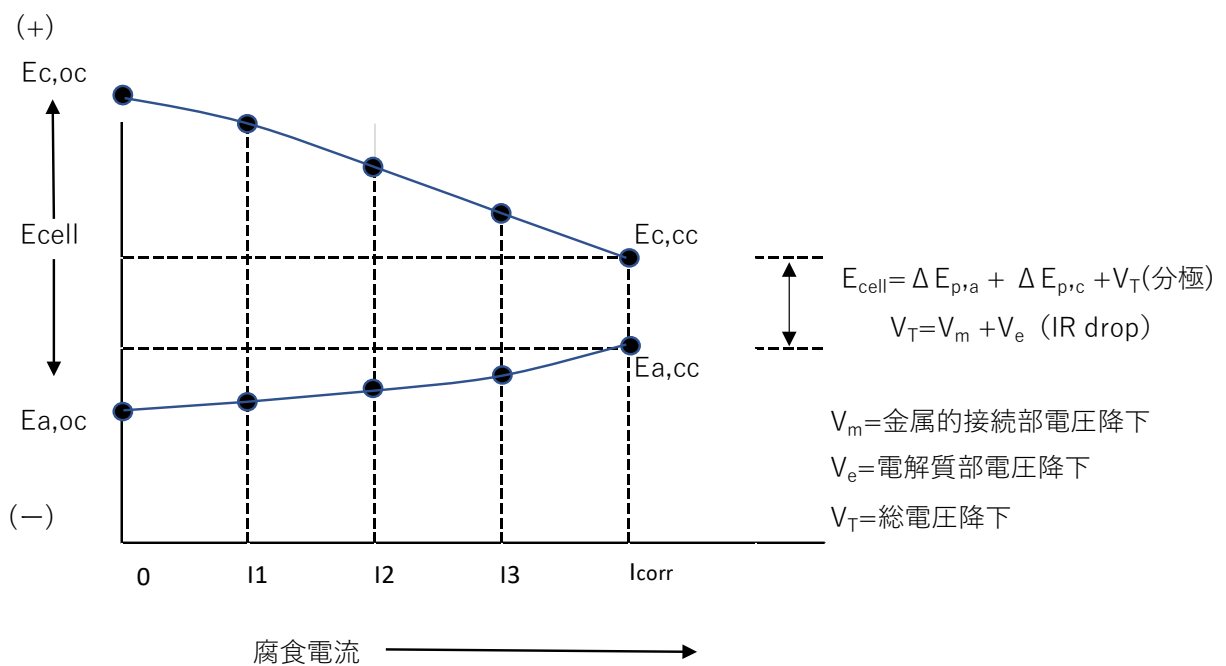


領域③不動態領域である。この領域では水酸化鉄と酸化鉄が鉄表面に形成され、表層と水の間に不動態被膜を形成することで錆びの進行を防いでいる。





2.1.2 環境が鋼材の腐食に与える影響



- ① 図 2-4 よりカソード閉回路電位とアノード閉回路電位の差は金属的接続部の電圧降下 + 電解質部の電圧降下である.

$$E_{c,cc} - E_{a,cc} = V_m + V_e \quad (2.7)$$

- ② つまり、カソード閉回路電位とアノード閉回路電位の差は総電圧降下である。

$$E_{c,cc} - E_{a,cc} = V_T \quad (2.8)$$

- ③ なお、アノード閉回路電位はアノード開回路電位とアノードの電位変化量の和であり、カソード閉回路電位はカソード開回路電位とカソード電位変化量の差である。

$$E_{a,cc} = E_{a,oc} + \Delta E_{p,a} \quad (2.9)$$

$$E_{c,cc} = E_{c,oc} - \Delta E_{p,c} \quad (2.10)$$

- ④ したがって、カソード閉回路電位とアノード閉回路電位と差は IR ドロップである。

$$E_{c,oc} - \Delta E_{p,c} - (E_{a,oc} - \Delta E_{p,a}) = V_T \quad (2.11)$$

$$E_{c,oc} - E_{a,oc} = V_T + \Delta E_{p,a} + \Delta E_{p,c} \quad (2.12)$$

- ⑤ カソード開回路電位とアノード開回路電位の差はアノードとカソードの総電位変化量である。

$$E_{c,oc} - E_{a,oc} = E_{cell} \quad (2.13)$$

- ⑥ したがって、アノードとカソードの総電位変化量は総電圧降下、アノード電位変化量、カソード電位変化量の総和である。

$$E_{cell} = V_T + \Delta E_{p,a} + \Delta E_{p,c} \quad (2.14)$$

図 2-4 および式 2.7～14 に示すとおりアノード分極電位とカソード分極電位の差は IR ドロップであるが、起電力が同じである場合、オームの法則により抵抗が変わることによって腐食電流が変化することとなる。構造物を取り巻く環境の変化によって鋼材の腐食速度は変化するということである。なお、これらの変化はアノード、カソードそれぞれ一極にて起こることもある。外部電源方式ではモニタリングによりこのような変化に応じて防食電流を増減させることで一律の復極量を確保できるよう調整をおこなうが、犠牲陽極材を含む流電陽極方式では電流の調整をおこなうことはできない。しかしながら、埋設型犠牲陽極材はコンクリート中の鋼材付近に埋設されるため、鋼材と同様の環境変化を同時に受けることとなるので、犠牲陽極材から供給される防食電流も合わせて増減する。

抵抗が増える要因には次のものがあるが、抵抗が増加することにより腐食電流は減少する（図 2-5）。

- 水分の減少
- 温度の低下
- 金属的接続部の抵抗増加
- イオン濃度の低下

抵抗が減る要因には次のものがあるが、抵抗が減少することにより腐食電流は増加する（図 2-6）。

- 水分の増加
- 温度の上昇
- 金属的接続部の抵抗減少
- イオン濃度の増加

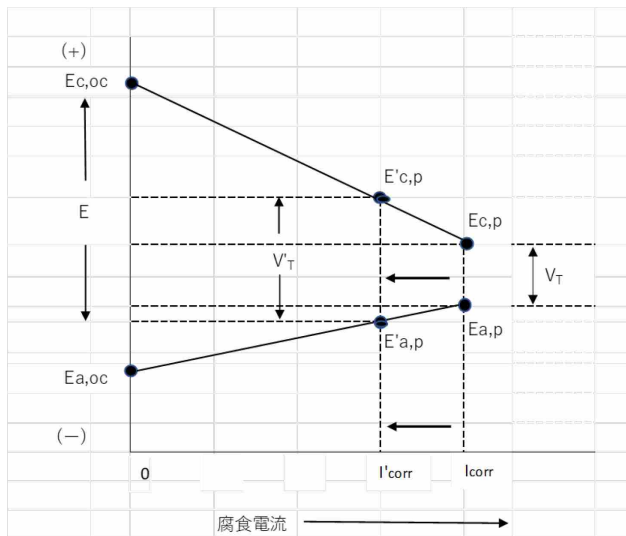


図 2-5 腐食電池内の抵抗が増加^(2.4)

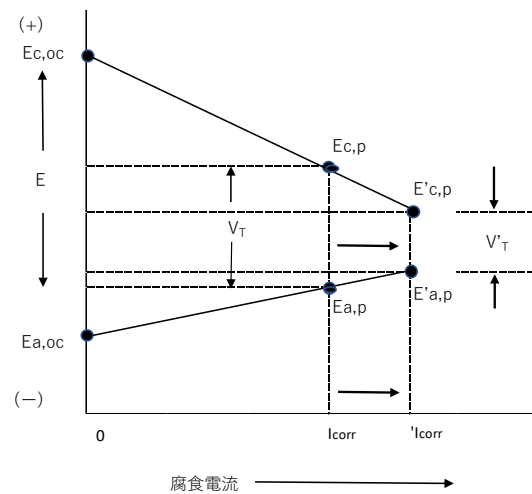


図 2-6 腐食電池内の抵抗が減少^(2.5)

2.1.3 マクロセル腐食

マクロセル腐食は、鉄筋表面がある程度均一に腐食していく通常のミクロセル腐食と異なり、カソード部と比較して小さい面積のアノード部が比較的短時間に腐食する現象である。マクロセル腐食は主に部分断面修復後の未補修部との境界付近に発生し、Barkey^(2.6)らによると境界部より約 10 cm程度に起こりやすい現象とされている。主に図 2-2 のように塩害の影響を受けたコンクリート構造物にて、鉄筋腐食によるコンクリートの浮きや、爆裂に対し部分的に断面修復を行った際、図 2-7 のようにアノード部が断面修復により腐食要因が取り除かれてカソードとなり、断面修復前までカソードであった未補修部の鉄筋電位が補修部と比較し低くなるためアノードとなり、マクロセル腐食が発生する。

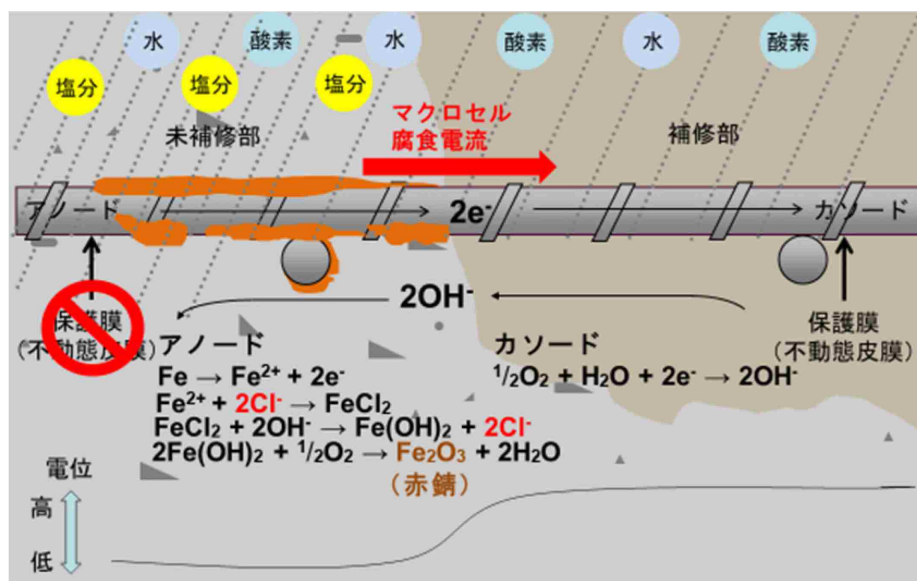


図 2-7 コンクリート中のマクロセル腐食発生モデル^(2.1)

2.1.4 塩化物イオンの影響

塩害は、飛来塩分やコンクリートでの海砂の使用、凍結防止剤の影響を受け発生する。コンクリート中の鉄筋はアルカリ性による不動態被膜を保持している状況においても、塩化物イオンの影響を受けると不動態被膜が破壊され腐食が進行することが分かっている。我が国では土木学会コンクリート標準示方書により 1.2 kg/m^3 を腐食発生限界塩化物イオン濃度と示されているが、2018 年制定のコンクリート標準示方書維持管理編ではコンクリートの種類に応じた算定式より求めてもよいこととなった^(2.7)。

$$C_{\text{lim}} = -3.0(W/C) + 3.4 \quad (2.15)$$

普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを例にとると、水セメント比が 0.30-0.55 の場合、1.7-2.5 kg/m^3 が腐食発生限界塩化物イオン濃度となる。また、実際の鋼材を目視にて確認できる場合は、腐食のグレードにて鋼材の腐食状況を評価することも行われている（表 2-1）。

表 2-1 腐食グレードと鋼材の状態^(2.7)

腐食グレード	鋼材の状態
腐食グレード I	黒皮の状態，または錆は生じているが全体的に薄い緻密な錆びであり，コンクリートに錆が付着していない
腐食グレード II	部分的な浮き錆びがあるが，小面積の斑点状である
腐食グレード III	断面欠損は目視観察では認められないが，鋼材の全周または全長にわたって浮き錆びが生じている
腐食グレード IV	断面欠損が生じている

海外ではコンクリート中の対セメント比にて危険度を分類することが主となっており，BRE Center for Concrete Construction によると，以下の事項が腐食発生限界塩化物イオン濃度に影響を与える要因として考慮されており，それを考慮し 6 段階に分類されている（表 2-2, 3）。

- 水セメント比
- セメント種類
- 細孔溶液の pH
- セメントマトリックスの塩化物イオン包容力
- 塩化物イオン含有要因（内在塩分または飛来塩分）
- 環境要因

表 2-2 鋼材腐食リスク分類^(2, 8) (内在塩分の場合)

リスク分類		定義
Negligible	影響なし	腐食は予測されない
Low	低度	通常のメンテナンスを行なうことで重大な腐食は起こりにくい. 軽微な腐食が見つかる可能性あり
Moderate	中程度	腐食は発生するが腐食速度は遅い
High	危険	重大な腐食が特に端部へ向かい発生
Very High	非常に危険	重大な腐食が全体にて発生
Extremely High	極めて危険	激しい腐食は避けられない. 広い範囲にて腐食の影響を受ける

表 2-3 鋼材腐食リスク分類^(2, 8) (飛来塩分の場合)

リスク分類		定義
Negligible	影響なし	構造物の耐用年数に対し腐食のリスクはほとんどない
Low or Moderate	低、中程度	現状に対し腐食は発生し得るが腐食速度は遅い
High	危険	共用期間により重大な腐食が発生する可能性が高い. 腐食速度は部分的に速くなる可能性あり
Extremely High	極めて危険	激しい腐食は避けられない. 広い範囲にて腐食の影響を受ける

中性化が進行していないコンクリート構造物の場合、塩化物イオン濃度 0.4%まではほぼ鋼材腐食が生じない結果となっている^(2,8)。しかしながら、中性化と塩害の複合条件の場合やコンクリートが湿潤状態にある場合では低度または中程度の腐食リスクを示す。コンクリート用埋設型犠牲陽極材の使用に関しては供用後 40 年程度の構造物を対象とした場合、表 2-4 で示す塩化物イオン濃度にて腐食リスク管理を行っている。

表 2-4 犠牲陽極材設計時の腐食リスク管理

Chloride Content by Weight of Cement %	Risk of Corrosion Uncarbonated concrete (pH >10)
<0.2	Negligible ¹
0.2 to 0.4	Very Low ¹
0.4 to 0.8	Low or Moderate ¹
0.8 to 1.5	High ¹
>1.5	Extremely High ¹

図 2-8, 9, 10 に示すように、塩化物イオン濃度が 0.4%未満であったとしても、乾燥状態中性化なしでは、ほぼリスクはないと判断されるが、中性化が進行すると、低中程度の腐食リスクとなり、塩化物イオン濃度 1.0%の場合は低度のリスクが危険レベルの腐食リスクとなる。同程度の塩化物イオン濃度であっても、条件により大きく変動するため、コンクリート中の鋼材腐食リスクの評価は中性化の進行状況およびコンクリート中の水分量を考慮の上決定することが重要である。

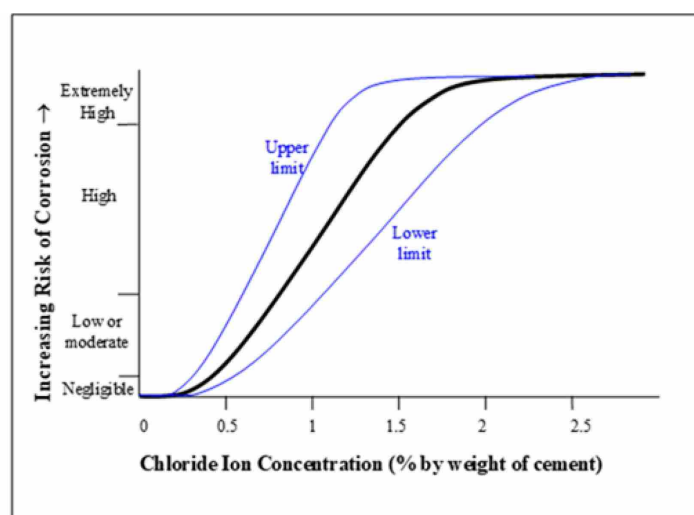


図 2-8 鋼材付近での塩分濃度増加に伴う腐食リスク (BRE Digest 444 Revised)

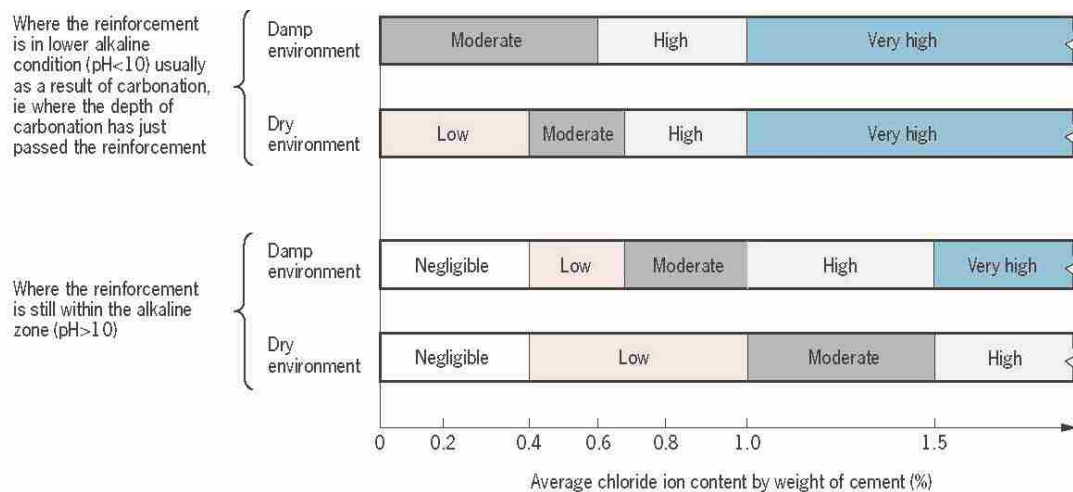


図 2-9 25 年を経過した構造物での腐食リスク (2.8)

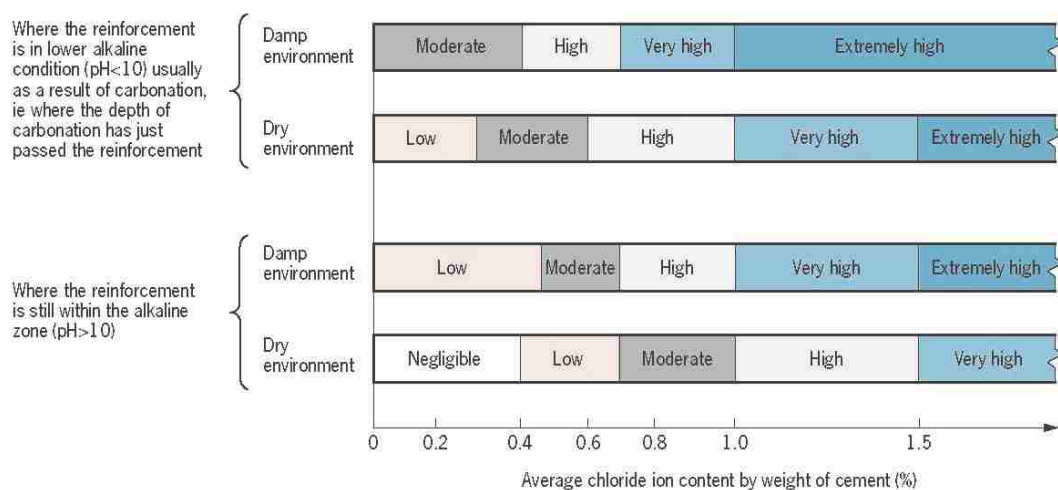


図 2-10 40 年を経過した構造物での腐食リスク (2.8)

2.2 電気化学的防食工法

電気化学的防食工法とはコンクリート表面、外部、あるいは内部に設置した陽極とコンクリート内部の鋼材の間に直流電流を流すことで、鋼材表面あるいはコンクリート内部に発生する電気化学的反応を鋼材の防食に利用するものであり、次の 4 種類の工法がある (表 2-5)。

表 2-5 電気化学的防食工法^(2.9)

工 法	特 徴
電気防食工法	コンクリート表面あるいは内部に設置した陽極から内部鋼材に直流電流を供給することで鋼材腐食の進行を抑制する
脱塩工法	コンクリート表面に設置した仮設陽極から内部鋼材に直流電流を供給することで塩化物イオンを鋼材位置より移動させる
再アルカリ化工法	コンクリート表面に設置した仮設陽極から内部鋼材に直流電流を供給することでアルカリ性溶液を浸透させ pH を回復させる
電着工法	コンクリート表面に設置した仮設陽極から電解質溶液を介し内部鋼材に直流電流を供給することで、無機質の電着物を析出させ、ひび割れの閉塞や表面の被覆および表層の緻密化を図る

上記 4 種の工法の内、電気防食工法については陽極システムの違いにより次の種類がある（表 2-6）。

表 2-6 電気防食工法^(2.9)

電源方式	陽極方式	特徴
外部電源方式	直流電源装置を使用し電流調整が可能 モニタリング及び定期的なメンテナンスが必要	
	面上陽極	防食電流分布の均一性に優れるが下地の全面処理が必要
	線状陽極	塗装面などで部分的な前処理にて施工可能
	点状陽極	局所的な防食に適する
流電陽極方式	電源装置は不要であるが電流調整が不可 防食管理の為にモニタリングや定期的なメンテナンスは不要	
	亜鉛シート方式	亜鉛シート等と保護カバーをアンカーボルトにて表面に設置. 死荷重は増加
	亜鉛アルミ擬合金溶射方式	亜鉛アルミ擬合金からなる陽極材を表面に溶射 複雑な形状の構造物に適用可能
	アルミパネル方式	アルミニウム製パネルをアンカーボルトやリベットにてコンクリート表面に設置
	埋設型犠牲陽極材方式	断面修復部や削孔によりコンクリート内部へバックフィル材一体型の犠牲陽極材を埋設設置

2.2.1 陰極防食法

陰極防食法（カソード防食法）とは鋼材のアノード、カソード間の電位差をなくすために、カソード側の電位を人為的に下げることで腐食を抑制する方法である。電気防食は、表 2-7 の外観グレードに対応されている。

表 2-7 外観グレードと適用可能工法^(2.9)

外観上のグレード	劣化過程	対象となる工法
グレード II	進展期	表面処理, 電気防食, 脱塩, 再アルカリ化
グレード III-1	加速期前期	断面修復, 電気防食, 脱塩, 再アルカリ化
グレード III-2	加速期後期	
グレード IV	劣化期	断面修復, 電気防食, 脱塩, 再アルカリ化

電気防食工法（陰極防食法）の原理を下記に示す。コンクリート中の鋼材が腐食した状態ではアノード部からカソード部へ腐食電流が供給される（図 2-11）ことで、アノード部の電位が低くなり腐食が進行する。鋼材の腐食を止めるためにはアノードとカソードの電位差をなくすることが必要となる。そこで、直流電源装置や犠牲陽極材などの流電陽極を鋼材と接続し防食電流をカソードへ供給する（図 2-12）ことでカソード部の電位が下がり、アノード部の電位同等まで下がり電位差がなくなることで腐食電流は消滅し防食された状態となる。仮にカソード部へ供給される防食電流がアノード電位まで下げるに不十分であった場合は電位差が小さくなった分アノード部からの腐食電流は減ることになるが、依然として腐食は抑制されつつも進行中の状態となる。

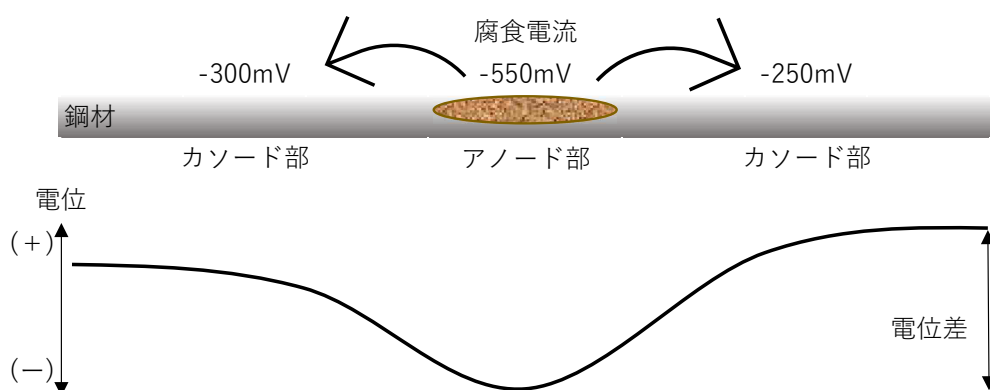


図 2-11 鋼材腐食時

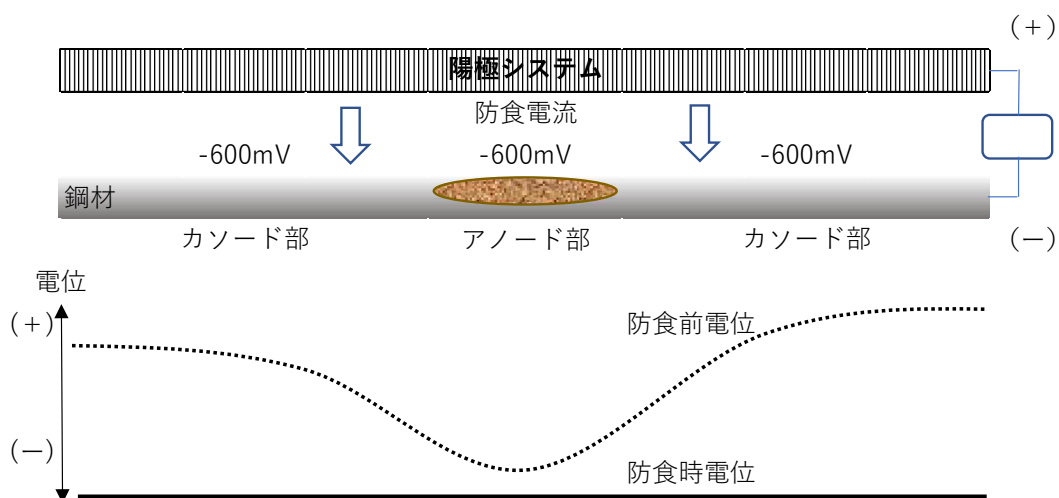


図 2-12 電気防食時

2.2.2 埋設型犠牲陽極材方式

埋設型犠牲陽極材は流電陽極方式に属するが、他の流電陽極方式が陽極をコンクリート表面に設置し防食電流を供給するのに対し埋設型犠牲陽極材方式はコンクリート中に陽極を設置し、コンクリートまたはモルタルにて埋め戻す。コンクリート用犠牲陽極材の歴史は比較的浅く、1996 年イギリスの Fosroc 社にて初めて開発に成功した。埋設型犠牲陽極材の開発においての重要な課題は、如何にして継続的に陽極である亜鉛を腐食環境下に置き続けるかということであった。海中であれば、亜鉛表面に堆積した亜鉛酸化物は海水によって洗われ、亜鉛表面が常にイオンと接する状態を維持することができるため起電力は低下しない。1990 年後半にコンクリート中でも抵抗の増加を抑制する手法が確立されたことにより埋設型犠牲陽極材を実際の構造物にて使用できるようになった。その後、2000 年より日本国内にて試験施工が開始、2002 年より一般的に使用され、現在まで継続的に使用されている。

現在流通している埋設型犠牲陽極材には数種類あり、亜鉛コア形状、結束線と亜鉛コアの接続、バックフィル材等それぞれ構造が異なり、構造により犠牲陽極材としての性能、特に耐久性に違いがある。埋設型犠牲陽極材の例を表 2-8 に示す。

表 2-8 埋設型犠牲陽極材種類

	陽極形状	結束線とコアの接続	バックフィル材
A	鑄造	亜鉛コア中を貫通	水酸化リチウム
B	鑄造	亜鉛コア中を貫通	硫酸塩/塩化物
C	層状	亜鉛コア外部に結束	臭化リチウム
D	層状	亜鉛コア外部に結束	硫酸塩/臭化物

陽極の表面積は起電力に直結するため、陽極の形状は重要である。一般的には大きく分けて 2 種類の形状があり、亜鉛コアが鑄造で製造されているものと板状の亜鉛プレートを数枚重ね層状にしているものである。層状にすることで表面積を多く確保することが可能であるが、各層の亜鉛はボルトやリベットにて結束されているため亜鉛酸化状況によって接続不良が発生する可能性が指摘されている。

亜鉛コアの腐食により発生した防食電流をコンクリート中の鋼材へ送るための結束線がどのように亜鉛コアと接続されているのかは耐久性の観点より非常に重要である。鑄造の亜鉛コアでは結束線が中心を貫通した状態で鑄造されているため、接続不良または断線が発生することは考えにくい。層状の亜鉛コアには外部にて結束することになるため、亜鉛コアの酸化が進行していくにつれ亜鉛表層の消費や酸化物の堆積による接続不良や断線の可能性が指摘されている。

バックフィル材は亜鉛が効率よく酸化する状態を維持するために使用される。水酸化リチウムは高アルカリ性でありバックフィル材内を pH14 以上に保ち、亜鉛を腐食させるが鉄には無害である。また、酸化亜鉛は高アルカリ性に溶解するため、亜鉛コアの表層が常にイオンに触れる環境を維持することが可能となる。対して、臭化リチウムなどのハロゲン化合物や塩化物をバックフィル材に使用したものも存在

する。ハロゲン化合物や塩化物は亜鉛の腐食を助けるが、同時に鉄に対しても腐食性をもつ。ハロゲン化合物や塩化物の使用により酸化亜鉛が溶解することはないため、酸化物は亜鉛コア表層に堆積していくこととなる。仮に亜鉛からの防食電流が停止した場合はハロゲン化合物や塩化物の影響によりコンクリート中の鋼材が腐食しやすくなるため注意が必要である。特に、臭化物/臭化リチウムは強力な酸化剤である。亜鉛はもとより鉄も腐食させる。塩化物の使用と同じく、亜鉛酸化物の堆積を防ぐ機能はなく、防食電流の停止により鋼材の腐食を助長するため注意が必要である。なお、バックフィル材には亜鉛の腐食環境を維持する目的で保水性の高い材料が使用されている。バックフィル材の保水性や厚みは亜鉛の酸化効率や寿命に影響する重要な要素である。

既存の研究において、コンクリート中の鋼材に対し埋設型犠牲陽極材を使用する場合の耐用年数は、主に亜鉛量によるとされ、犠牲陽極材の発生電流よりファラデーの法則に従い計算することで予測されているが、この方法は埋設型犠牲陽極材方式には不十分であり、その他の要因を考慮する必要があることが分かった。図 2-13 に示すように、影響を与える要因としては、主にバックフィル材であり、酸化安定剤としての薬剤の種類が重要となる。バックフィル材中の pH により亜鉛酸化物の溶解性能が異なるためである。また、バックフィル材の保水性や亜鉛コアの形状も要因となる。また、耐用年数経過後の更新についても、水酸化リチウムを使用した場合は、コンクリート中の鋼材に対する悪影響がないため、使用済み陽極を取り出す必要はなく、通常の再設計を行うことで追加設置できる。一方、ハロゲン化合物や塩化物を使用した場合は、コンクリート中の鋼材を腐食させる原因となる成分が鋼材位置付近に存在することとなるため、耐用年数経過後は速やかに陽極材を取り除く必要がある。

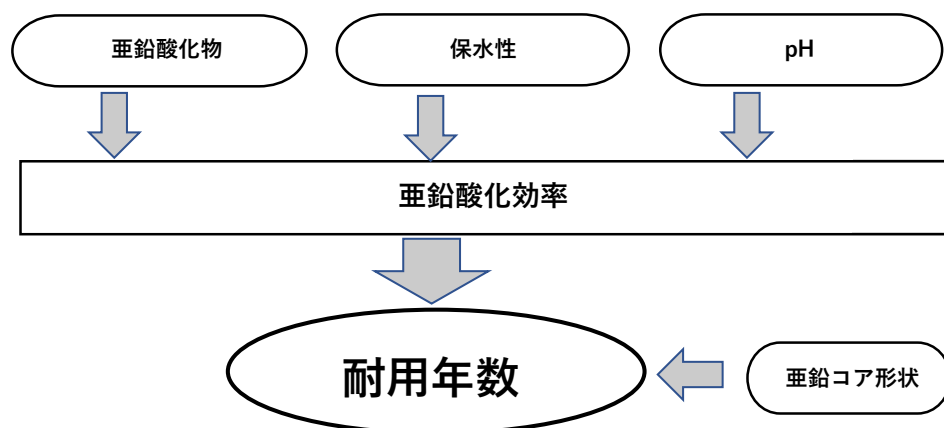


図 2-13 埋設型犠牲陽極材の耐用年数決定要因

2.3 電気防食基準

我が国では主に次の国内外の基準を採用し、電気防食を管理している。(表 2-9)

表 2-9 国内外の主な電気防食管理基準

組織	基準名	指標	基準値	備考
土木学会	電気化学的防食工法指針 コンクリートライブラリー157	分極量または復極量	100mV以上	
		オン電位	-1000mV _{CSE} より貴 -800mV _{CSE} より貴	RC構造物およびPC鋼材 PC鋼材（中性化）
		オフ電位	-200mV _{CSE} より貴	
NACE International	Standard Recommended Practice RP0290-2006	分極量または復極量	100mV以上	
		オフ電位	-200mV _{CSE} より貴	
European Norm	EN12696:2016 (BS EN ISO 12696:2016) Cathodic protection of steel in concrete	分極量または復極量	100mV以上	
		オン電位	-720mV _{CSE}	
ASTM International	ASTM C876 Standard Test Method for Half - Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete	オフ電位	-200mV _{CSE} より貴	
DIN	DIN30676	オン電位	-750mV _{CSE}	

- 電流密度： 1～30mA/m² (電気防食, 土木学会)
0.2～2.0mA/m² (マクロセル腐食, EN12696:2000)
2～20mA/m² (電気防食, EN12696:2000)

2.4 既往の研究

2.4.1 外部電源方式による復極量 100mV 未満の防食効果

電気防食基準により復極量 100mV シフトが主に採用されるが、カナダの橋梁にて復極量 100mV を満たしていないにも関わらず 96%や 75%の防食率を達成した事例が報告されている^(2,10)。1956 年に建設された橋梁 The Burlington Bay Skyway は 1987 年の床版打ち換えを経て 1990 年、1991 年にチタンメッシュにより、また 1994 年に亜鉛溶射によりそれぞれ電気防食が施された。1980 年代に行われた調査では凍結防止剤による塩害を受け鉄筋位置でのイオン濃度は腐食発生限界を超えていた。全体の 40%で自然電位が $-0.35V_{CSE}$ より卑の値で腐食状態を示し、その他の部位も $-0.2 \sim -0.35V_{CSE}$ と不確定領域であった。チタンメッシュによる電気防食部では当初 20mA/m²の電流を供給していたが、ライニング材に浸潤部位が見られ、その原因として酸と塩素による影響と判断された。ライニング材に含まれるアクリル系セメント材料に原因があり、防食電流を 5mA/m²に下げることにより解決した。1993 年のデータによると、オフ 4 時間後の復極量は 59mV であり、その後の 500 時間の防食期間より 360 時間後のオフ電位は全体の 40%でのみ復極量 100mV の基準を満たした。しかしながら、塗装の剥離を比較すると、通常の塗装の剥離は防食前では 1%/年であったが、防食後は 0.04%/年と 96%の防食率となった。1994 年に行われた亜鉛溶射による電気防食では当初 10～15mA/m²の防食電流を供給していたが、亜鉛酸化物の堆積により高電圧となり 1995 年に 3.5～10mA/m²に調整減少させた。その時は 48 時間後の復極量が 100mV シフトを満たしていたが、依然として高電圧となったため、最終的に 5mA/m²まで電流を減らすことで電圧の問題を解決した。5mA/m²での復極量は全体の 65%のみで 100mV シフトを満たした。防食前の塗装剥離は 0.2%/年であったが、防食後は 0.05%/年となり 75%の防食効果を得た。The Burlington Bay Skyway の結

果は埋設型犠牲陽極材ではなく外部電源方式によるものであるが、 $5\text{mA}/\text{m}^2$ という犠牲陽極材が維持可能な電流下での防食であったこと、通常の 4 時間後の復極量は 59mV_{CSE} であったにも関わらず 96% の防食効果があったこと、また、同橋梁にて行われた亜鉛溶射による電気防食において、35% の部位にて復極量 100mV を得られなかったにも関わらず 75% の防食効果があったことは、埋設型犠牲陽極材の発生し得る低電流下での防食効果を検証するにあたり非常に興味深い。

2.4.2 犠牲陽極材による防食電流 $2\text{mA}/\text{m}^2$ 未満での復極量

低電流下での防食効果については躯体条件や環境条件に左右されるが、EN12696: 2000 に示されている電気防食基準を下回る $2\text{mA}/\text{m}^2$ 未満の防食電流にて復極量 100mV 以上を達成した事例が報告されている。

Lai, David らは橋梁床版に適用した犠牲陽極材について約 15 年間の測定結果を報告している^(2,11)。The North Otter Creek Bridge, カナダ, オンタリオ州 (図 2-14) は 1960 年に建造され 1984 年に補修が行われている橋梁である。コンクリート平均かぶり厚は 100mm , 塩化物イオン濃度は腐食発生限界イオン量の約 4 倍であり、鉄筋の電位は全体の 88% で $< -0.35\text{V}_{\text{CSE}}$, 残りの 12% で $-0.2 \sim -0.35\text{V}_{\text{CSE}}$ (ASTM C-876) でありほとんどの部位で腐食が発生していた。2000 年より橋梁の一部 26m^2 にて埋設型犠牲陽極材を設置しモニタリングを開始した。初期防食電流は $2\text{mA}/\text{m}^2$ であり、約 1 年後に $1 \sim 2\text{mA}/\text{m}^2$ となり、最終的には約 $1\text{mA}/\text{m}^2$ にて推移した。また、すべての電流密度で復極量 100mV 以上となった。モニタリングデータを表 2-10 に示す。



図 2-14 The North Otter Creek Bridge^(2.11)

表 2-10 モニタリングデータ^(2.11)

Time (days)	Temp (°C)	Current Density (mA/m ²)	Depolarization (mV)
13	7	6.5	273
33	10	6.1	238
222	20	3.8	271
258	23	2.6	220
267	21	2.5	260
336	23	1.7	211
426	8	1.4	230
486	-20	0.55	142
571	3	1.4	293
655	20	1.7	350
676	20	1.8	313
766	8	1.3	284
789	0	1.1	276
859	-7	0.8	167
942	10	1.4	330
1040	25	1.6	353
1165	7	1.24	281
1299	-3	1	201
1433	22	1.5	501
1573	0	7.6	322
1649	3	1.1	314
1755	20	1.6	421
2000	-5	0.65	273
3174	22	1.8	278
3646	23	1.13	128*[DL1]
4300	25	1.08	432
5140	23	0.6	202
5383	20	0.57	181
5770	23	0.66	212

※4 日経過後のデータ

2.4.3 犠牲陽極材の防食電流に影響を与える要因

犠牲陽極材の発生する防食電流は陽極表面積, 鉄筋表面積, 主に水分量の影響を受けたコンクリート抵抗によるが, コンクリート温度の影響も大きいとの報告がある. Geroge Sergi ら^(2.12)はオハイオ州, アメリカ合衆国にある橋台にて気温とコンクリート温度と防食電流について 14,000 データ以上のモニタリングを行なった(図 2-15, 16). その結果として防食電流はコンクリート温度 15°C, (外気温 25°C) の上昇によっておおよそ 2 倍となることが分かった. 一定の環境とコンクリート抵抗下では温度がアノード発生電流の重要な要因となり, アレニウス式によって求めることができる.

$$k = Ae^{-\frac{Ea}{RT}} \quad (2.16)$$

ここで,

k = 定数 (率)

A = 周期係数

Ea = 活性化エネルギー

R = 気体定数

T = 絶対温度(°K)

$$\text{Log} i_{corr} = \text{Log} A - \left(\frac{\Delta Ea}{2.303RT} \right) \quad (2.17)$$

ここで,

i_{corr} = 亜鉛の腐食電流

ΔEa = 腐食過程での見かけの活性化エネルギー

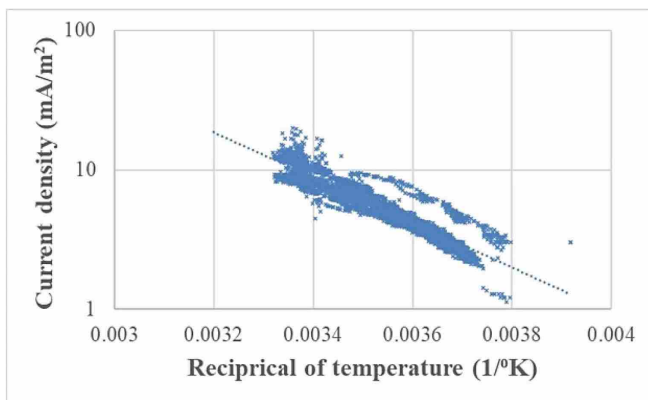


図 2-15 コンクリート温度と電流密度の関係^(2.12)

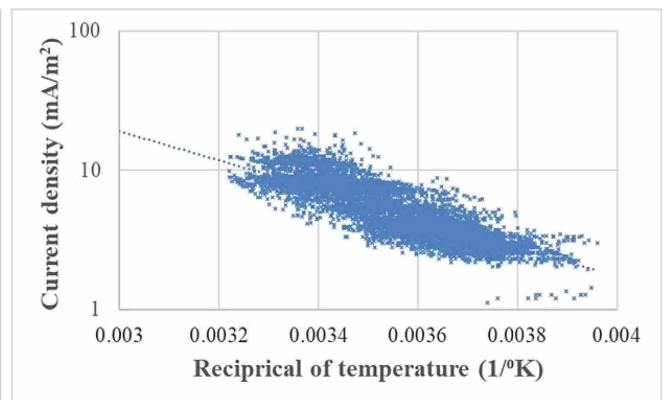


図 2-16 気温と電流密度の関係^(2.12)

図 2-17 はアメリカ合衆国, オハイオ州での測定結果であるが, 供用期間に応じて一定の割合で防食電流が減少していることが分かる. なお, グラフ中の上下の線は 30°C の温度差を示しており, 上記図 2-15, 16 より得た関係性と一致している.

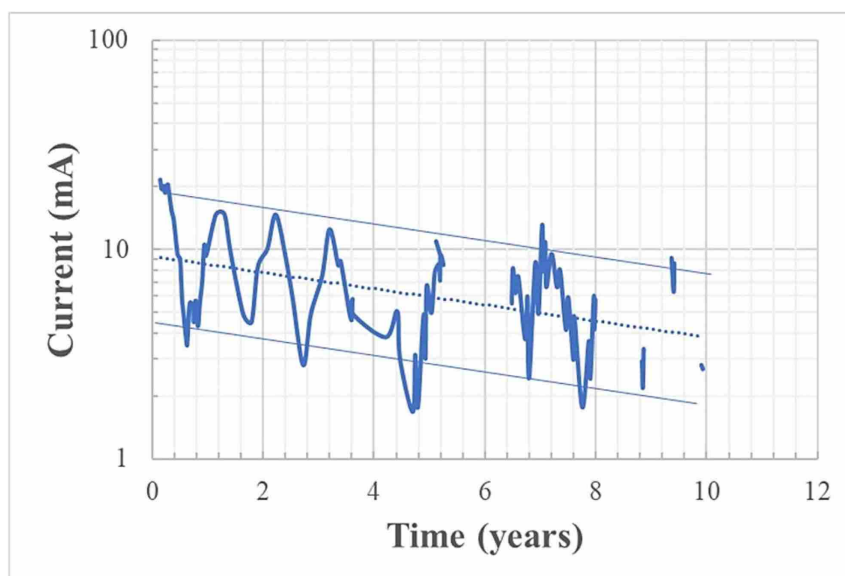


図 2-17 電流密度の経時変化と温度の影響による変位^(2.12)

2.4.4 犠牲陽極材の発生防食電流の減衰

George Sergi^(2.12)らによると、犠牲陽極が発生可能な防食電流は、一定の期間ごとに半減することが分かった（図 2-18）。20 年以上のデータより防食電流を検証した結果、穏やかな減少傾向が導き出されたが、式 (2.18) と整合性のあるものであった。

$$i_t = i_0 e^{-\lambda t} \quad (2.18)$$

ここで、

i_t = ある時点での電流密度, t (mA/m²)

i_0 = 初期電流密度, (mA/m²)

λ = 減衰定数,

t = 時間 (年)

なお、一定期間で防食電流が半減するが、半減期の原理に整合し、半減に必要な期間は、式 (2.18) と (2.19) に λ を入力することで容易に計算できる。

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (2.19)$$

ここで、

$t_{1/2}$ = 電流密度が半減するのに必要な時間

λ = 減衰定数, 式 (2.18) と同様

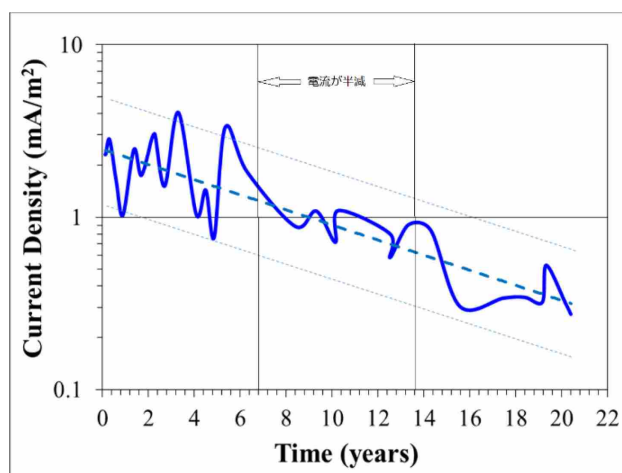


図 2-18 電流密度の減衰(アルカリ) Leicester, UK^(2, 12)

電流減少の原因としては、陽極の消費による表面積の減少、バックフィル材の細孔が亜鉛酸化物によって満たされることによる抵抗の増加、亜鉛酸化触媒の減少があげられる。表 2-11, 12 にそれぞれ水酸化リチウムを使用した犠牲陽極材とハロゲン化合物を使用した犠牲陽極材の半減期を示す。なお、犠牲陽極材 X 1 は開発初期のスタンダードモデルであり、X 2 は X 1 と比較して 2 倍、X 4 は 4 倍の有効亜鉛表面積を持つ。ハロゲン化合物を触媒とした犠牲陽極材のデータは少ないため埋設型ではない亜鉛シートも参考としている。

表 2-11 アルカリバックフィル材陽極半減期^(2, 12)

Anode type and size	Site Location/Concrete Element	Reference	Initial current per anode (mA)	Anode spacing (mm)	λ	$t_{1/2}$ (years)	Mean $t_{1/2}$ (years)
X1-Repair	Leicester Crossbeam	Sergi et. al. (2020)	0.25	600	0.101	6.9	5.6
X1-Repair	Leicester Coloum		0.50	750	0.165	4.2	
X1-Grid	India Slab	Kamde et. al. (2019)	0.62	300	0.118	5.9	
X2-Repair	Leicester Coloum	Sergi et. al. (2014)	0.26	300	0.055	12.6	13.0
X2-Grid	India Slab	Kamde et. al. (2019)	0.99	300	0.055	12.6	
X2-Grid	M53 Abutment	Rathod et. al (2019)	0.29	300	0.050	13.9	
X4-Repair	Leicester Coloum	Sergi et. al. (2014)	0.36	300	0.075	9.2	10.3
X4-Grid	India Slab	Kamde et. al. (2019)	2.22	300	0.066	10.5	
X4-Grid	M53 Abutment	Rathod et. al (2019)	0.55	300	0.066	10.5	
X4-Grid	Ivy St. Abutment	Rathod et. al (2019)	0.64	300	0.064	10.8	
Long Rod	Ohio Abutment	Sergi et. al. (2011)			0.089	7.8	11.3
Long Rod	North Otta Bridge Deck				0.047	14.7	
Mean all						10.0	

表 2-12 ハロゲン化合物バックフィル材陽極半減期^(2. 12)

Anode type	λ	$t_{1/2}$ (years)	Reference
Point	0.237	2.9	Bewley (2016)
Point	0.544	1.3	Bennett & McCord (2006)
Zinc Sheet	0.432	1.6	Van den Hondel et. al. (2018)
Mean		1.9	
Zinc Sheet*	0.167	4.2	Van den Hondel et. al. (2018)

*初期の高い電流値を除外

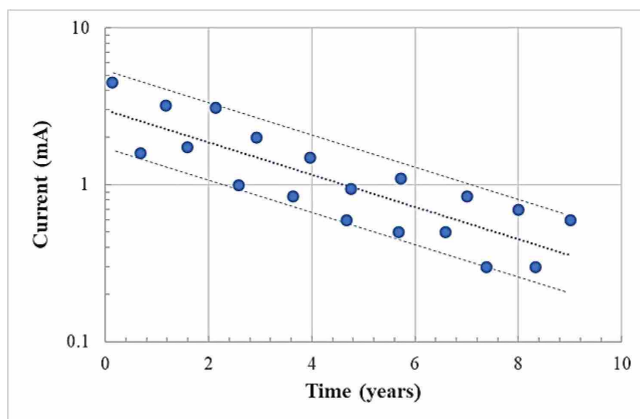


図 2-19 電流密度の減衰（ハロゲン化合物）
Bewley 2016^(2. 12)

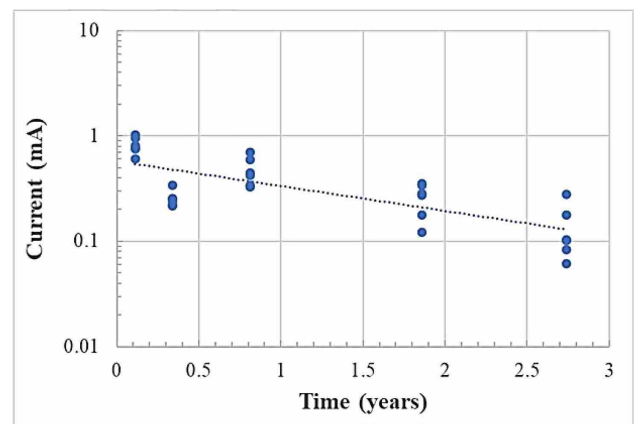


図 2-20 電流密度の減衰（ハロゲン化合物）
Bennett & McCord 2006^(2. 12)

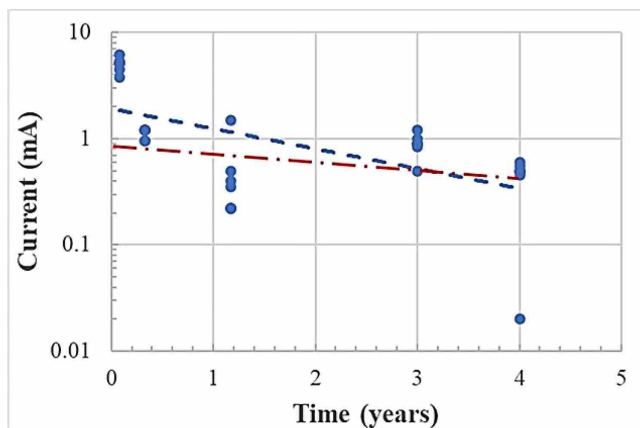


図 2-21 電流密度の減衰（ハロゲン化合物）
Van den Hondel et. al. 2018^(2. 12)

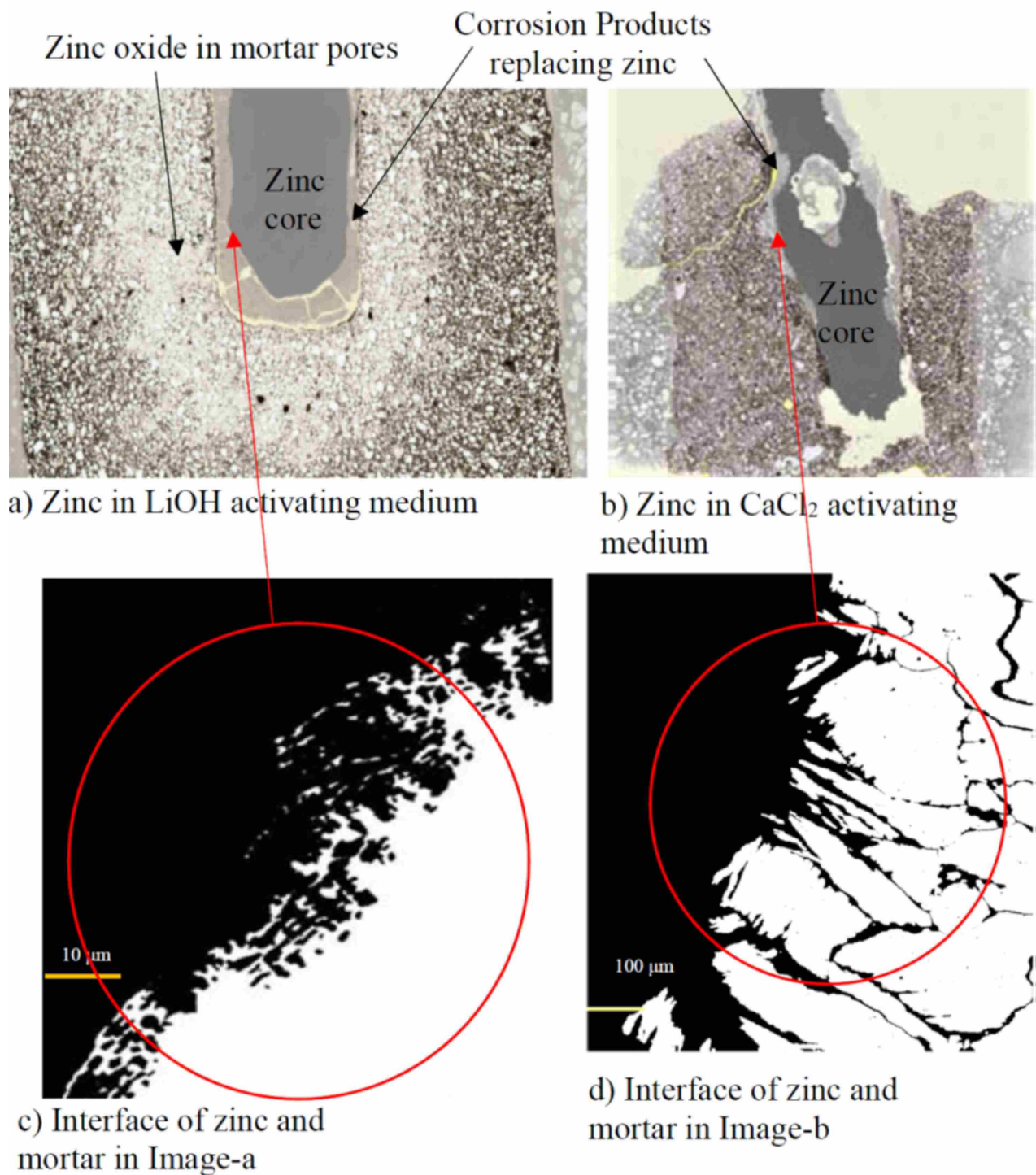


図 2-22 バックフィル材による陽極周辺部の酸化物堆積状況^(2, 12)

腐食電流減少の要因をアルカリバックフィル材を使用した犠牲陽極材で検証すると、亜鉛の消費による表面積の減少は通常の劣化による減衰となる。George Sergi ら^(2,12)の研究によると亜鉛の発生電流は pH により決まるとあり、また、亜鉛酸化物は高アルカリによって溶解する。水酸化リチウムを使用したバックフィル材の pH は 14 以上であり、細孔の亜鉛酸化物により満たされることを防ぐ働きがある。この細孔が塞がることで金属亜鉛表層に酸化物が堆積することで抵抗が上がり、防食電流が減少する。

最後にバックフィル材の消費は直接的に防食電流発生に影響を及ぼすこととなる。

ここで、表 2-11 よりアルカリバックフィル材を用いた犠牲陽極材の減衰率を検証する。X1 タイプの犠牲陽極材は初期型で、円盤型の単純な亜鉛コアを使用している。半減期は最長約 6 年で約 14 年間は防食電流を維持していたが、14 年以降は防食電流の急激な低下があった。その理由としてはバックフィル材の pH が 14.6 から 13.9 へ減少したことにある。このことより、バックフィル材の消費による影響が耐用年数を決定したと考えられる。なお、X2 や X4 タイプには約 7 倍の水酸化リチウムが使用されている。また、発生電流値による減衰率への影響も予測される。X1 タイプの Leicester Crossbeam と Leicesster Coloum は鉄筋密度や塩分量ともにほぼ同じであったが、犠牲陽極材の設置間隔に違いがあった。設置間隔が広い場合は陽極材一つ当たりの必要防食電流が多くなる。設置間隔 600mm の場合の初期電流値は 0.25mA で半減期は 6.9 年であるが、設置間隔 750 mm の場合の初期電流値は 0.5mA で半減期は 4.2 年であった。このことより、亜鉛酸化物の生成が速いほどバックフィル材の細孔を満たしてしまうリスクが高くなる。一方、X1 タイプの India Slab は設置間隔は狭いものの、初期電流値が 0.62 と最も高いが、半減期は 5.9 年であった。また、X2, X4 タイプの India Slab においても、それぞれ他の X2, X4 タイプ 2 件とは設置間隔は同様であるにもかかわらず初期電流値は非常に高くなっているが、半減期は他の X2, X4 タイプ 2 件とほぼ同じであった。これは、インドでの高温多湿な環境が影響したためと考えられ、温度と湿度による発生電流の増加は減衰に影響を与えないことが確認されたが、亜鉛酸化物の生成が促進されたとともに、その他の化学的反応も活性化されたことにより、細孔中の酸化物の溶解拡散速度も速くなったためと考えられる。

さらに表 2-12 よりハロゲン化合物バックフィル材を用いた犠牲陽極材の減衰率を検証する。公開されているハロゲン化合物を使用した犠牲陽極材データが少ないため、亜鉛シートのデータも加えてある。また、亜鉛シートの初期電流値が非常に高かったため、初期の電流値を除外した場合も記載されている。平均半減期は 1.9 年または 2.8 年（亜鉛シートの初期値を使用しない場合）となり、アルカリバックフィル材を用いた犠牲陽極材と比較して非常に短い値となった。ハロゲン化合物は亜鉛の腐食を促進するが、亜鉛酸化物を溶解することができないことが、強固な酸化物を亜鉛表面に堆積させると考えられ、半減期が非常に短い理由とされる。図 2-19, 20, 21 が示すように、半減期が短い場合でも直線的に一定の割合にて減衰している。半減期を比較すると、アルカリバックフィル材を使用した犠牲陽極材は平均約 10 年であり、ハロゲン化合物を使用した犠牲陽極材は約 2 年である。これは耐用年数を 20 年と仮定した場合、電気防食基準の下限值 $2\text{mA}/\text{m}^2$ を 20 年後も維持するためにはそれぞれ $8\text{mA}/\text{m}^2$ と $2048\text{mA}/\text{m}^2$ の初期防食電流値が必要となるが、ハロゲン化合物を使用した場合は達成不可能な電流値である。逆に、犠牲陽極材で合理的に達成可能である初期防食電流値を表 2-10 よりそれぞれ $6.5\text{mA}/\text{m}^2$ と仮定した場合の 20 年後の電流値は、アルカリバックフィル材を使用した犠牲陽極材で $1.625\text{mA}/\text{m}^2$ 、ハロゲン化合物を使用した犠牲陽極材で $0.006\text{mA}/\text{m}^2$ となり、防食性能に非常に大きな差があることが分かった。なお、アルカリバックフィル材とハロゲン化合物を使用したバックフィル材をそれぞれ使用し、酸化物の堆積状況を比較した図を示す。アルカリバックフィル材を使用した場合は、亜鉛酸化物がバックフィル材内に拡散浸透しており^(2,13)、亜鉛表層付近も酸化物が溶解してできたポーラス状の表層が確認できる（図 2-22a, 22c）。ハロゲン化合物を使用した場合は、バックフィル材への拡散浸透はなく、亜鉛表層には多くの酸化物の堆積が確認できる（図 2-22b, 22d）。

2.5 本論文で検討する課題

コンクリート中における鋼材腐食のメカニズム、特に塩化物イオン濃度の増加に伴う腐食リスクと電気化学的防食工法による腐食抑制理論をまとめた。また、流電陽極法の一つである埋設型犠牲陽極法について、構造の違いによる性能差や耐久性の検討を既往の研究結果より得られた知見をもとにまとめた。

本論文では主に塩害を伴うコンクリート構造物を対象とし、断面修復に伴うマクロセル腐食や進行中の腐食に対する抑制工法を埋設型犠牲陽極法にて検討した。第3章以降では以下の課題について検討する。

- 1) 埋設型犠牲陽極材の選定と犠牲陽極材の発生可能電流に基づき、コンクリート中の塩分が与える影響について検討し実験方法を確立する。埋設型犠牲陽極材のコンクリート構造物での施工件数は日本国内だけでも500件以上と十分な実績を有するが、定量的なモニタリングを行なった案件はそれほど多くない。そのため実験を開始するにあたり、実際の環境に対応した供試体の作成および実験方法の検討が必要である。また、本章にて取り上げたとおり使用する犠牲陽極材の選定についても検討が必要である。
- 2) マクロセル腐食の発生条件を再現し、犠牲陽極材が発生可能である低電流下での防食効果の検証が必要である。塩化物イオン濃度別に電気防食基準である復極量 100mV 未満での防食効果の検証を外部電源方式と埋設型犠牲陽極方式にて行う。
- 3) 進行中の腐食に対する埋設型犠牲陽極材の適用に関し、低電流下での防食効果の検証が必要である。海外においても、マクロセル腐食に対する防食電流値($0.2\text{--}2.0\text{mA/m}^2$)^(2.14)と外部電源方式に代表される防食電流値($2.0\text{--}20\text{mA/m}^2$)^(2.14)は規格が存在するが、腐食を合理的な範囲で抑制し得る低電流での規格は存在しない。防食電流 1.0mA/m^2 付近での防食効果の検証が必要である。

[参考文献]

- (2.1) クリディエンス株式会社 ガルバシールド工法設計資料
- (2.2) NACE CP3 Cathodic Protection Technologist January 2009-April 2009, P1:5
- (2.3) NACE CP3 Cathodic Protection Technologist January 2009-April 2009, P1:21
- (2.4) NACE CP3 Cathodic Protection Technologist January 2009-April 2009, P1:37
- (2.5) NACE CP3 Cathodic Protection Technologist January 2009-April 2009, P1:39
- (2.6) Dale P. Barkey; Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete Adjacent to Surface Repairs, ACI materials Journal, Vol.101, PP. 266-272, 2004
- (2.7) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編], 2018, p145
- (2.8) BRE Digest 444 Part2, 2000
- (2.9) 土木学会電気化学的防食工法指針, コンクリートライブラリー157, p16, 42
- (2.10) E. Gulis, P. Lai, B. Tharmabala; Performance of Cathodic Protection on The Burlington Bay Skyway Substructure, 1997
- (2.11) Lai, David, H. Liao; Targeted Corrosion Protection with Distributed Galvanic Anode System for Bridge Decks, 10th International Conference in Short and Medium Span Bridges, Quebec Canada July 31 – Aug 3, 2018

- (2.12) George Sergi, Gamini Seneviratne; Improved Design Considerations for Steel Reinforcement Corrosion Control with Galvanic Anodes Following Performance Evaluation from Analysis of Site Data, submitted in Structural Faults and Repair 2022
- (2.13) 野村倫一, 垣尾徹, 小出剛: 犠牲陽極材による鉄筋防食効果の検証, 土木学会年次学術講演会 2005 年 9 月
- (2.14) EN12696: 2016 Cathodic protection of steel in concrete

第3章 埋設型犠牲陽極材の評価方法の検討

3.1 はじめに

第2章では鋼材腐食のメカニズムと電気防食による腐食抑制、また埋設型犠牲陽極材の仕組みとその効果、耐久性を考慮し検証した。第3章では、今後の実験にて使用する埋設型犠牲陽極材の選定、塩分濃度等の環境条件および実験より得られるデータの評価方法について、第2章での既往の研究結果と実構造物にて行われた試験施工のデータを元に設定し供試体を作製した。その実験結果より第4章以降の実験の基礎と評価方法を決定した。まず、埋設型犠牲陽極材を中国自動車道にて断面修復を行わずに簡易的に設置した場合の試験施工より発生防食電流や復極量、オフ電位より犠牲陽極材の防食効果を判定し、第4章にて開始する実験の電流設定を行った。

3.2 埋設型犠牲陽極材の簡易的設置工法による防食効果

通常の断面修復を伴う鉄筋腐食対策工法にかわり、日常点検時に簡易的に施工でき、その耐用年数が5年以上であることにより、維持管理の定期点検を5年サイクルのままで実施し続けても構造物の安全性を高いレベルで確保することが可能な犠牲陽極工法を開発^(3.1)した。断面修復を伴わないことで、不必要なはつりによる産業廃棄物の低減や、大がかりな仮設構造物、人材を必要としない利点が得られる。

現在、高騰する人件費や補修費用、そして5年毎である点検サイクル間における劣化の進行が問題となっている。日常点検で不具合が発見された場合、修繕予定日または次回の定期点検までを目標とした簡易的な対策を行うにとどまり、鉄筋腐食に対する主な対応としては、浮きが確認されたコンクリート部は叩き落とし、露出した鉄筋に防錆剤を塗布することが実施されるのみである。環境によっては数か月しか防錆効果が持続しない場合もあり、鉄筋腐食の進行やその周辺部の劣化進行が問題となっている。

そこで、簡易的な犠牲陽極工法を開発することとなり、その際、日常点検の範疇として設置施工可能であることを目標として、断面修復を伴わない工法を考案し^(3.1)試験施工を行った。

3.2.1 試験施工概要

対象構造物は1974年6月に供用開始した自動車専用道の橋台であり、2015年5月に施工し、その後3年間防食電流等の計測を行った。試験設置箇所をA1、A2とし、2箇所にて設置計測を行った（表3-1、図3-1、2、3、4、5）。なお、図3-1に示すように、鉄筋位置付近となる深さ40mm程度の塩分量が非常に多く、鋼材腐食限界値以上となっていた。

表3-1 試験設置箇所

	面積	中性化深さ	状況写真
A1	1.4m ²	13mm	図3-2, 3
A2	1.7 m ²	21mm	図3-4, 5

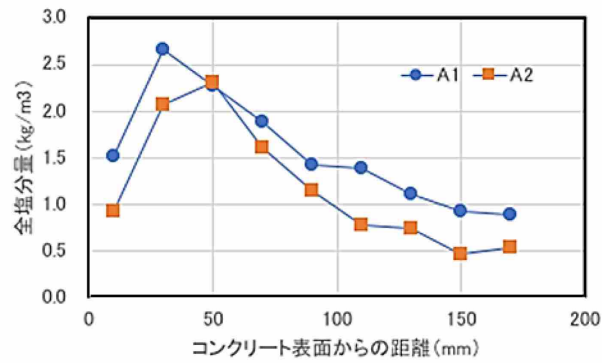


図 3-1 コンクリート中の塩分量



図 3-2 A1 外観



図 3-3 A1 近接



図 3-4 A2 外観



図 3-5 A2 近接

3.2.2 工法概要

(1) 工法の特徴

電気化学的防食工法^(3.2)の一つである犠牲陽極工法はコンクリート中の鉄筋との金属的接続およびコンクリート中のイオン移動により防食回路を形成するが、本開発工法はコンクリートやモルタルによる断面修復を伴わない方法にて防食回路を維持し、対象鉄筋の防食を行うものである。

(2) 使用材料

表 3-2 に使用材料の一覧と概要を示す。犠牲陽極材は亜鉛をコアとし水酸化リチウムをバックフィル材として使用している。第 2 章にて検証したとおり、水酸化リチウムを使用した犠牲陽極材が腐食安定性および耐久性に優れるため採用が決定された。導電性ゲルシートは吸水性に優れたゲルシートで、フィルムによって保護されたパック状のものをを使用した。この導電性ゲルシートをコンクリート躯体面と犠牲陽極材の間に挟み込むことで、犠牲陽極材をコンクリート面に接着させ、且つ犠牲陽極材とコンクリート間のイオン移動を可能とする。防水材は耐久性の高い材料であればポリウレタンやポリウレア樹脂、エポキシ系樹脂など素材は問わないが、今回はアクリル系防水材を使用することとした。

表 3-2 使用材料

材料	概要
犠牲陽極材	亜鉛＋水酸化リチウム
導電性ゲルシート	シート状ゲルシート
防水材	アクリル系防水材

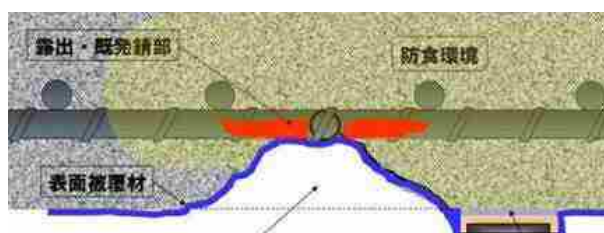


図 3-6 設置概要図

(3) 犠牲陽極材の設置

防食回路を形成するにあたり、犠牲陽極材をコンクリート面または鉄筋上に設置し、鉄筋との金属的接続を行う。犠牲陽極材は防食対象鉄筋上、その横、または有効範囲内の任意のコンクリート面に設置する。鉄筋上に設置した場合は防食電流が接続鉄筋周辺に集中し、鉄筋から離して設置すると防食電流は広範囲に分散する傾向がある。目的に応じた設置箇所を選定することとなるが、鉄筋上に配置する場合には、導電性ゲルシートを介した接続となり、犠牲陽極材と鉄筋との付着面積が小さく設置が不安定となるため、コンクリート表面への設置が望ましい。

コンクリート表面へ設置する場合にも、導電性ゲルシートに接着することによって行う。コンクリート表面の凹凸に応じ、ゲルシートを数枚重ねることで犠牲陽極材とコンクリートを密着させることによって、防食回路を形成し、イオン交換が確実に行われるように配慮する。なお、モルタルやその他導電性材料にて接着することもできる。犠牲陽極材のコンクリート表面への設置および鉄筋への接続が完了した後、犠牲陽極材、対象鉄筋、その周辺コンクリートを覆うように防水材を塗布する。防水材で覆うことにより、犠牲陽極材、鉄筋、周辺コンクリートを大気より絶縁することでコンクリート中と同様の環境下に置くことができ、それにより防食電気回路が作成される。図 3-6 に設置概要図を示す。

3.2.3 試験施工方法

(1) 照合電極設置

照合電極は二酸化マンガン照合電極（MNO）を使用した。（図 3-7）



図 3-7 照合電極 (MNO)

(2) 犠牲陽極材設置

防食範囲内の鉄筋がすべて電氣的に接続されていることを前提とし、鉄筋密度と塩分濃度より、犠牲陽極材の設置間隔を 400mm と決定した (図 3-8, 9)。犠牲陽極材設置時は、犠牲陽極材底面に 2, 3 枚程度の導電性ゲルシートをあらかじめ接着しておき、設置間隔に従ってコンクリート面に付着させた。通常であれば犠牲陽極材を個別にそれぞれ鉄筋と結束し、通電確認 (抵抗値確認) を行うが、今回は防食電流の測定を目的に犠牲陽極を直列に接続し両端部を鉄筋と結束したので、両端部でのみ通電確認した (図 3-10, 11)。

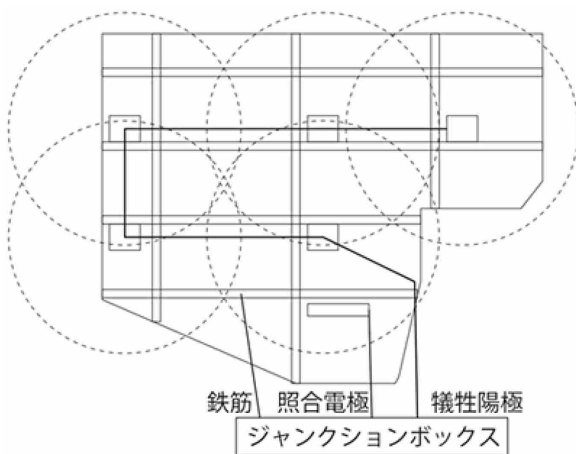


図 3-8 犠牲陽極材配置図 (A1)

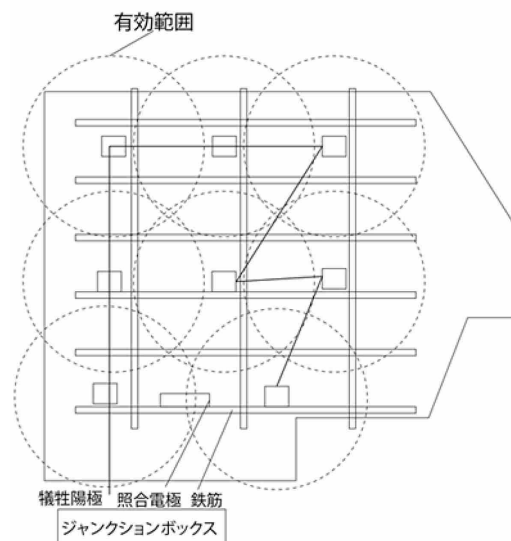


図 3-9 犠牲陽極材配置図 (A2)



図 3-10 犠牲陽極材設置写真 (A1)



図 3-11 犠牲陽極材設置写真 (A2)

(3) 防水材塗布

本試験施工では、施工後の保護鉄筋の状況の目視確認を容易にするため、可視化可能な防水材を選定した。(図 3-12, 13)



図 3-12 防水材塗布後 (A1)

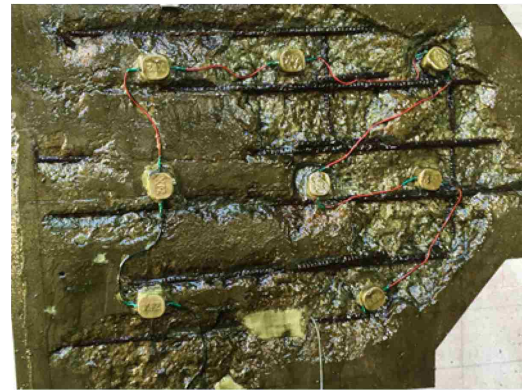


図 3-13 防水材塗布後 (A2)

3.2.4 試験施工結果

目視確認、打音確認、防食電流量測定、復極量測定を 1 か月ごとに 15 か月間、その後 3 か月ごとに 36 か月経過まで実施した。

(1) 外観

7 か月経過後より一部の犠牲陽極材上の防水塗膜に変状が見え始めた。その後変状は進行し、12 か月後には犠牲陽極材と防水塗膜間の剥がれが確認された箇所もあった。18 か月経過後には鋼材の腐食が原因と思われる防水材の破断が確認された。次節で述べるように、A2 全体としての防食回路は正常に機能していたため、鉄筋背面の空隙の存在または防水塗膜の不具合の可能性も考えられるが、詳細は不明である。24 か月経過後より犠牲陽極材からの白い析出物が多く確認されるようになった。36 か月後(図 3-14, 15)では多くの犠牲陽極材から白い析出物が確認された。白色析出物は犠牲陽極材中に含まれていた水酸化リチウムが、炭酸リチウムとなり付着したものと思われる。

また、A1 側ではコンクリートよりエフロレッセンスの析出が見られていることから、コンクリート内部へ多くの水分の侵入があることが確認された。その過剰な水分の存在も水酸化リチウムを溶出させた要因の一つであると考えられる。



図 3-14 36 か月後 (A1)



図 3-15 36 か月後 (A2)

(2) 防食電流

電流密度を図 3-16 に示すが、犠牲陽極材から鉄筋への防食電流の供給を確認できた。設置後約 2 か月で一度大きな電流密度を計測し、その後は湿度や気温、湿度などの影響により変動していると考えられる。

なお、防食電流密度 0.2mA/m^2 であればマクロセル腐食を防ぐことができるとされている値^(3.3)である。ここでは変動はあるが 0.2mA/m^2 から 3.5mA/m^2 の間で推移しており、防食効果が期待できる結果であるといえる。

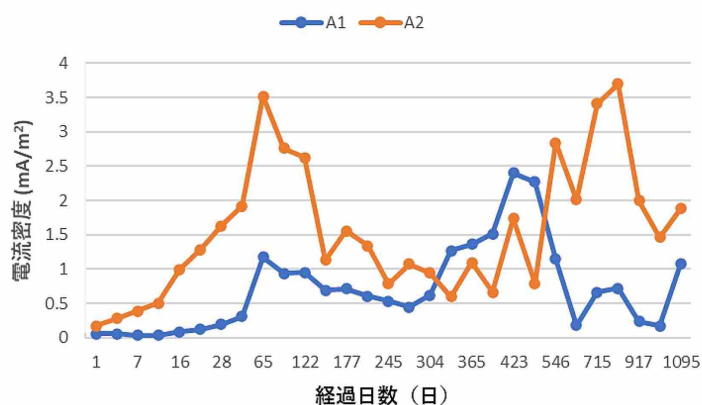


図 3-16 防食電流密度

(3) 復極量

電流密度はマクロセル腐食対策としては効果が期待できる値であったが、試験施工条件として、鉄筋ケレンや防錆処理は行われなため、進行中の鋼材腐食を抑制するためにはより多くの電流が必要とされる。予想通り復極量 100mV 未満であり、季節変動はあるものの A1 側で平均約 18mV(2mV~40mV)、A2 側で平均約 16.5mV(6mV~30mV)と小さな値となった。なお復極量は防食電流密度との相関が強く、電流密度が大きくなる環境条件時に復極量も大きくなっている (図 3-17, 18)。

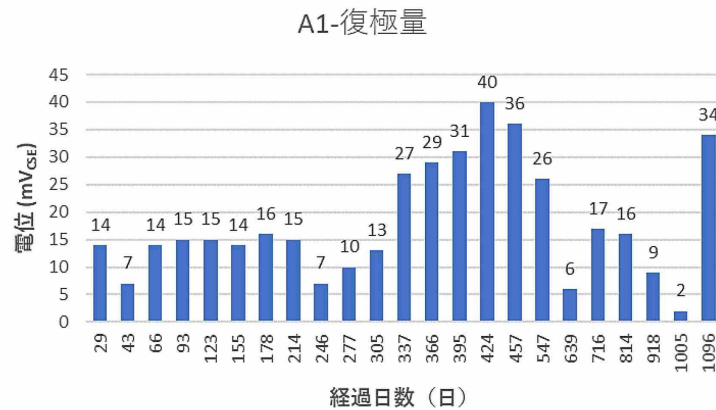


図 3-17 A1 復極量

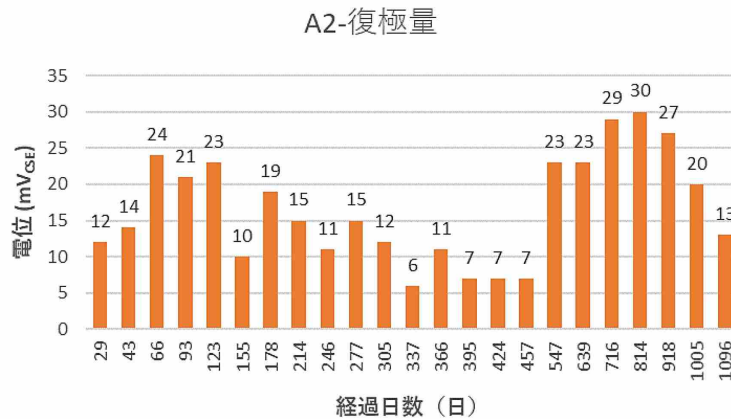


図 3-18 A2 復極量

(4) オフ電位

防食電流値や復極量が環境要因に応じて変動していることから、外部電源方式による防食基準は満たしていないがある程度の腐食抑制効果があることが予想されるため、オフ電位に着目した。オフ電位については A1, A2 とともに時間の経過とともに貴側にシフトしており A2 に関しては $-200\text{mV}_{\text{CSE}}$ よりも貴の値を示している。これは ASTM C876 では 90%以上の確率で腐食なしと判断される値^(3,4)である。これにより、仮に復極量が小さい値であっても継続的に防食電流が供給されることで、鋼材位置での腐食環境が改善され鋼材オフ電位が貴側にシフトすることが確認された (図 3-19, 20)。

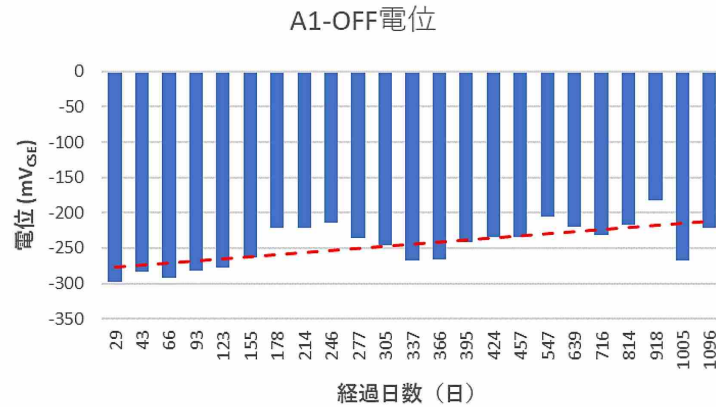


図 3-19 A1 オフ電位

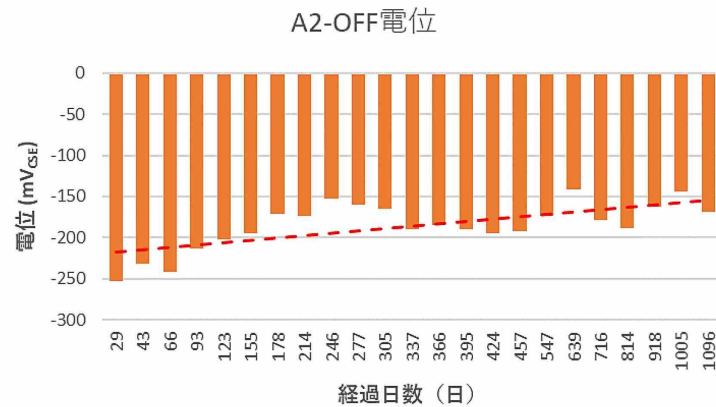


図 3-20 A2 オフ電位

3.2.5 本工法の効果

断面修復を行わずにコンクリート表面に埋設型犠牲陽極材を設置し、防水材にて絶縁することで防食電流回路を形成する工法である。単位面積あたりの防食電流密度はマクロセル腐食対策となる $0.2\text{mA}/\text{m}^2$ 以上を維持したが、犠牲陽極材 1 つあたりの発生電流値としては小さかった。これは、通常コンクリート中に埋設されることにより犠牲陽極材全面でイオン交換を行うことで回路を形成するが、防水材を使用したため、犠牲陽極材の 1 面のみを使用することとなり、発生電流が減少したと考えられる。復極量は、主に防食電流値により増減するため、 $15\text{mV}\sim 40\text{mV}$ と低い値となった。防食効果を復極量にて判断することは難しいが、オフ電位の経過を観察すると、継続的な防食電流の供給により電位が貴側にシフトしており、最終的に A2 側では $-200\text{mV}_{\text{CSE}}$ よりも貴の値を示し、A1 側でも継続的な貴側へのシフトが確認され、防食電流密度 0.2mA 以上で復極量約 16.5mV でも防食効果があった。

3.3 埋設型犠牲陽極材による防食電流と復極量の検証

次に、今後の実験にて使用する埋設型犠牲陽極材の選定、塩分濃度等の環境条件の設定および実験より得られるデータの評価方法を決定することを目的に、前節の試験施工のデータを参考に供試体を作製した。外部電源方式と犠牲陽極方式の両方式で防食効果を確認することにより、第 4 章にて開始する実験

の電流量を決定することとした。

3.3.1 実験概要

(1) 供試体概要

コンクリート供試体の寸法は 100mm×100mm×250mm で、底面より 30 mm の位置に 60mm×150mm×3mm の鋼板を埋設した。鋼板には測定用の銅線を接続した（図 3-21）。表 3-3, 4, 5, 6 に供試体コンクリートの原料, 配合および圧縮強度を示す。なお、供試体の塩化物イオン濃度は対セメント比 0.8%, 1.5%, 2.0% とした。

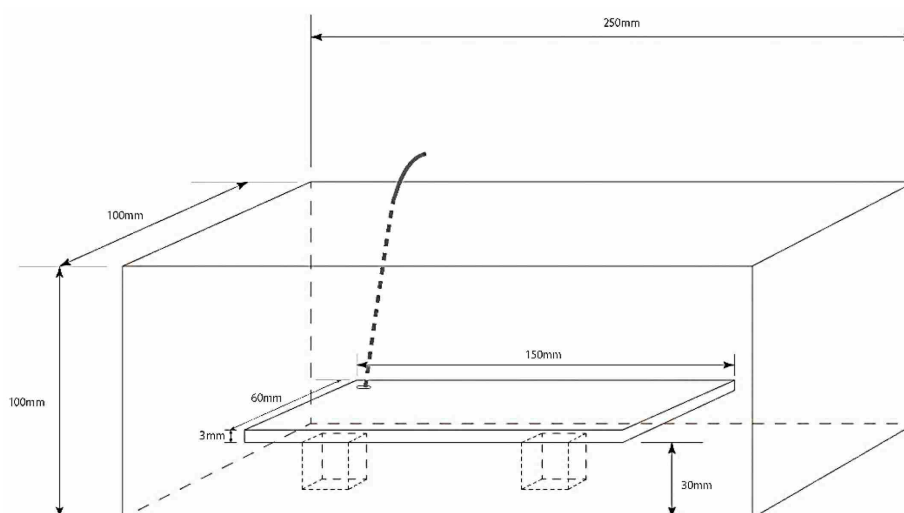


図 3-21 供試体図

表 3-3 使用材料

材料	概要
セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	密度: 2.63g/cm ³
粗骨材	密度: 2.63g/cm ³
鋼板	酸洗鋼板(SS400 相当) 60x150x3mm (表面積 0.02m ²)

表 3-4 コンクリート配合 (kg/m³)

W/C(%)	W	C	S	G	NaCl
60	170	283	885	906	※

※表 3-5 参照

表 3-5 塩化物混入量

Cl ⁻ (%) (対セメント質量)	Cl ⁻ (kg/m ³) (対コンクリート体積)	NaCl (kg/m ³) (対コンクリート体積)
0.8	2.26	3.73
1.5	4.25	7.00
2.0	5.66	9.32

表 3-6 コンクリート圧縮強度

塩分濃度 (%)	作製日	実施日	圧縮強度 (N/mm ²)	
			結果	平均値
0.8(1)	8/1/2018	11/5/2018	23.59	23.23
0.8(2)			23.22	
0.8(3)			22.90	
1.5(1)	8/3/2018	11/5/2018	20.72	20.74
1.5(2)			19.72	
1.5(3)			21.78	
2.0(1)	8/10/2018	11/5/2018	27.59	28.06
2.0(2)			26.65	
2.0(3)			29.96	

(2) 犠牲陽極材供試体概要

供試体の形状を図 3-22 に示す。アルカリバックフィル材を使用した犠牲陽極材より 5 種類（図 3-23, 24, 25, 26, 27）を選定した。表 3-7 に示すとおり，それぞれの犠牲陽極材は亜鉛量と表面積に違いがあり，電流供給能力に違いがある（ $A < B < C < D < E$ ）。それぞれ 4 個の供試体を作成し，4 か月間実験室内にて検証した後，1 つを破壊して内部鋼材の状況を確認する。その後屋外にて暴露試験を継続し，16 か月後に 1 体を破壊し鋼材の状況を確認した。

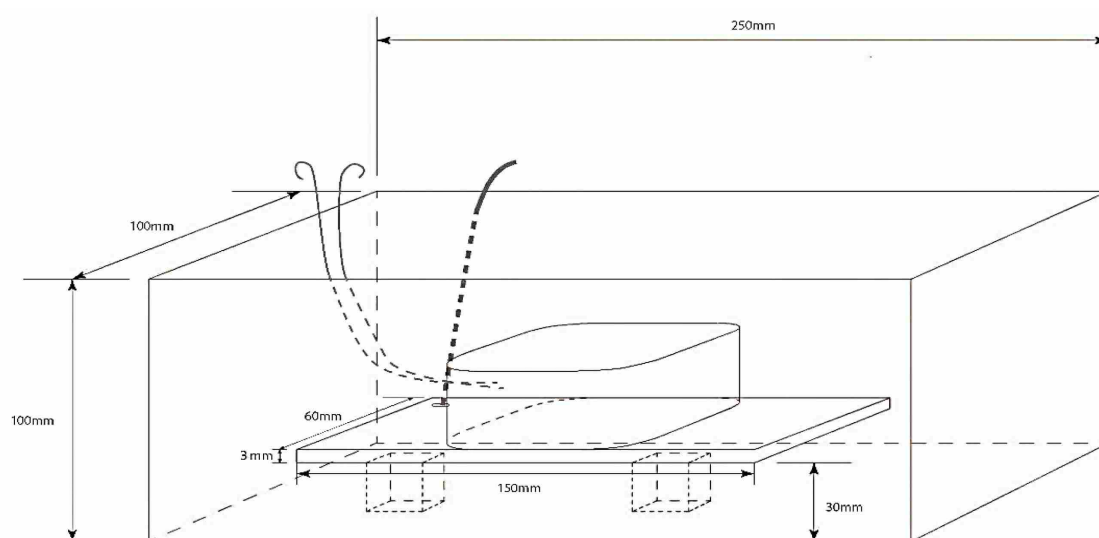


図 3-22 犠牲陽極材供試体

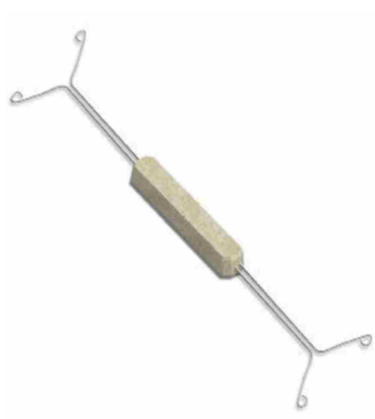


図 3-23 供試体 A



図 3-24 供試体 B



図 3-25 供試体 C



図 3-26 供試体 D



図 3-27 供試体 E

表 3-7 犠牲陽極材一覧

種類	亜鉛量(g)	寸法(mm)
A	60	25×25×125
B	100	32×70×60
C	160	32×110×54
D	110	Ø32x150
E	60 (+電池)	Ø40x100

(3) 電気防食供試体概要

犠牲陽極材と比較する目的で 2 種類の電気防食（図 3-28）と無防食（図 3-21）の供試体も作製した。チタンメッシュを陽極とした外部電源方式で、設定電流値は 0.05mA(2.5mA/m²)と 0.1mA(5.0mA/m²)である。供試体の一覧を表 3-8 に示す。

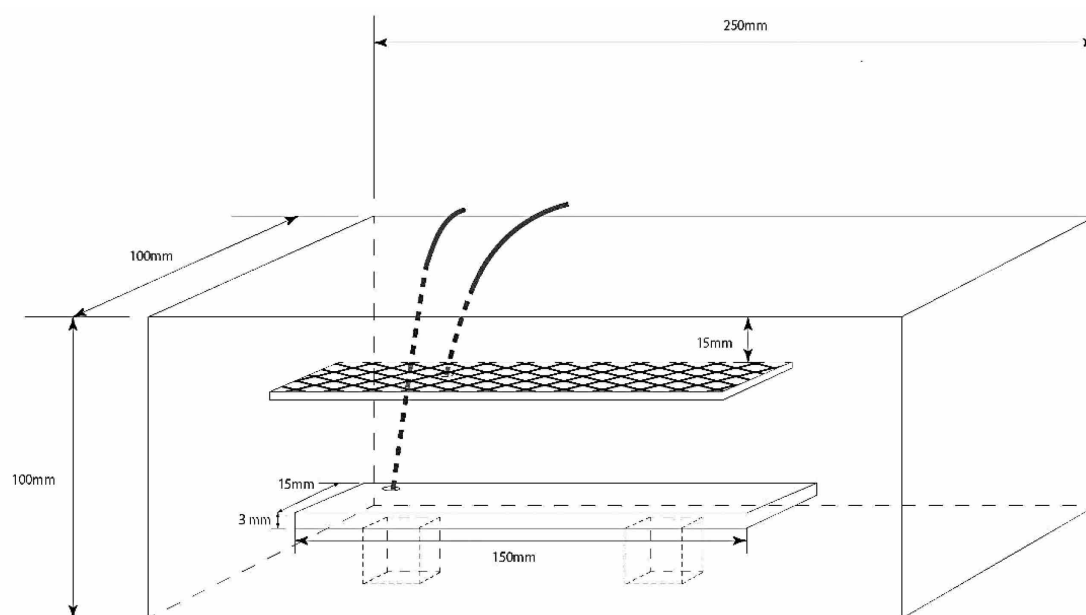


図 3-28 外部電源方式供試体

表 3-8 供試体一覧

電防種類	電流値 mA (mA/m ² 対鋼材比)	塩分濃度(%) (対セメント比)	サンプル数
外部電源 F	0.05 (2.50)	0.8	4
	0.05 (2.50)	1.5	4
	0.05 (2.50)	2.0	4
外部電源 G	0.1 (5.00)	0.8	4
	0.1 (5.00)	1.5	4
	0.1 (5.00)	2.0	4
犠牲陽極材 A		0.8	4
		1.5	4
		2.0	4
犠牲陽極材 B		0.8	4
		1.5	4
		2.0	4
犠牲陽極材 C		0.8	4
		1.5	4
		2.0	4
犠牲陽極材 D		0.8	4
		1.5	4
		2.0	4
犠牲陽極材 E		0.8	4
		1.5	4
		2.0	4

基準サンプル	0.8	4
	1.5	4
	2.0	4

(4) 実験方法

犠牲陽極材供試体は打設直後より通電を開始したが、外部電源方式供試体は脱型後の通電開始となった。12 日間の通電と 2 日間の遮断を 1 サイクルとして、9 サイクルを屋内実験として行った。実験室の気温は約 20℃に管理され、樹脂製のトレイ内に常に水が溜められている状態で供試体を設置した（図 3-29）。犠牲陽極材供試体では防食電流の計測およびオン電位、インスタントオフ電位、48 時間後のオフ電位を測定し、インスタントオフ電位と 48 時間後オフ電位との差を復極量とした。外部電源方式では、複数の供試体を直列に繋いでいるため、オン電位と 48 時間後オフ電位のみを測定し、オン電位とオフ電位の差を復極量とした。9 サイクル終了後（107 日または 114 日）は犠牲陽極材供試体のみ屋外にて暴露試験を行い（図 3-30）、約 500 日後に 3 体の内のそれぞれ 1 体を破壊し内部の鋼材を確認し、約 850 日後に残りの 2 体を破壊し鋼材の確認を行った。



図 3-29 実験状況



図 3-30 屋外暴露状況

3.3.2 実験結果

(1) 防食電流

犠牲陽極材が発生させる防食電流の測定結果を次に示す（図 3-31, 32, 33, 34, 35）。犠牲陽極材は初期のコンクリート水分率が高い状況で多くの防食電流を発生し、その後緩やかに減少していく傾向がある。また、腐食環境にて差はあるが塩化物イオン濃度によらず概ね同様に増減した。屋内実験室にて一度安定した犠牲陽極材の防食電流は、サイクル 9 終了後に屋外へと環境が変化した後、気温や水分量などの環境変化に応じて増減している。犠牲陽極材一つあたりの防食電流は約 0.2mA～4.0mA(10mA/m²～200mA/m²)程度であり、一時的な最大値としては供試体 B（2.0%）にて 7.1mA を発生した。供試体 A～D に関しては、概ね正常に機能しているが、供試体 D（1.5%）で 477 日を経過した付近より防食電流値が 1mA/m²前後に低下し、その後 1mA/m²を下回った。また、供試体 E(1.5%, 2.0%)で 638 日目の測定より防食電流値が非常に小さくなり、最終的に 0.5mA/m²よりも小さな値となった。供試体 E は電池と亜鉛のハイブリッド型犠牲陽極材であるが、この供試体のみ陽極からの結束線が鉄線ではなく被覆銅

線となっているため、屋外での暴露中に接続不良が発生したと予想される。通常は被覆銅線にてコンクリート内の鋼材に直接結束したのち埋設されるが、今回は供試体外部での接続であったため暴露中の養生が不十分であった可能性がある。供試体 D, E にて腐食が発生した塩分濃度 1.5%以上の供試体では最低電流値が約 $0.5\text{mA}/\text{m}^2 \sim 1.0\text{mA}/\text{m}^2$ であったため、 $1.0\text{mA}/\text{m}^2$ が防食の下限値付近である可能性がある。

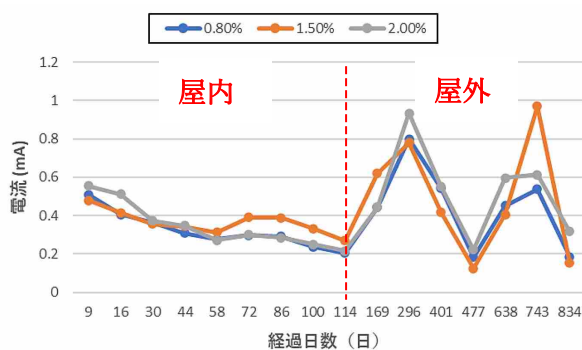


図 3-31 防食電流（供試体 A）

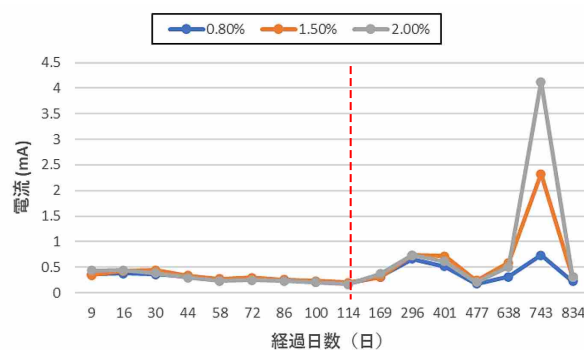


図 3-32 防食電流（供試体 B）

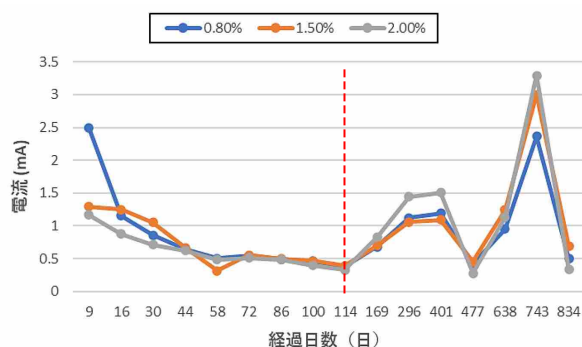


図 3-33 防食電流（供試体 C）

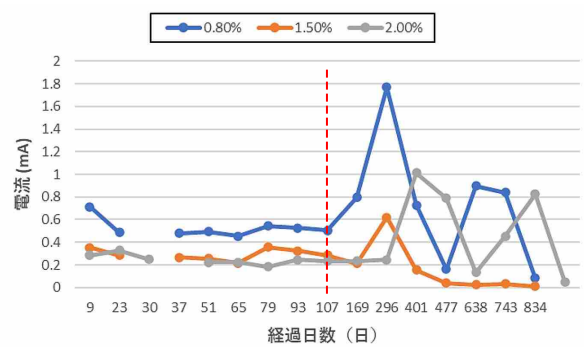


図 3-34 防食電流（供試体 D）

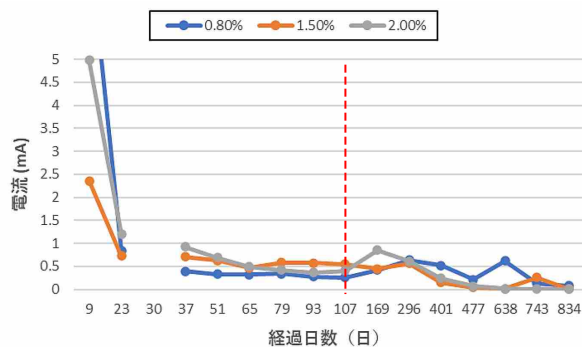


図 3-35 防食電流（供試体 E）

(2) オン電位

オン電位の測定結果を（図 3-36, 37, 38, 39, 40, 41, 42）に示す。犠牲陽極材と外部電源によるオン電位を計測した。供試体のオン電位は防食電流値と相関があるため、腐食環境により増減している。電源装置の接続不良により、外部電源方式の供試体で無防食状態となっていた期間があった。結果として、外部電源方式供試体の防食電流は 0.05mA ($2.5\text{mA}/\text{m}^2$), 0.1mA ($5.0\text{mA}/\text{m}^2$) と犠牲陽極材供試体が発生する電流よりも小さな値の設定となった。

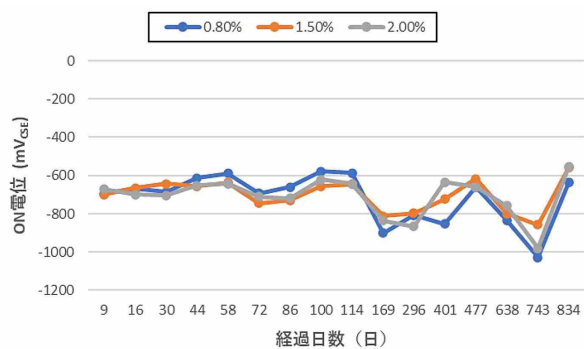


図 3-36 オン電位 (供試体 A)

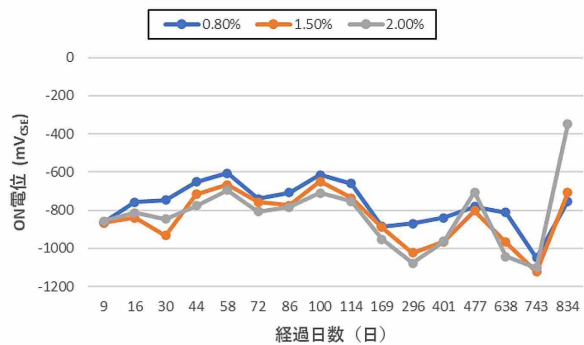


図 3-38 オン電位 (供試体 C)

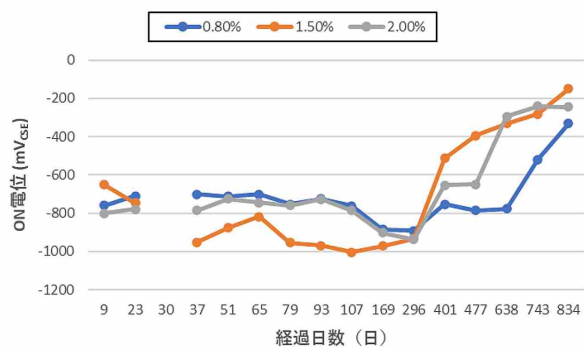


図 3-40 オン電位 (供試体 E)

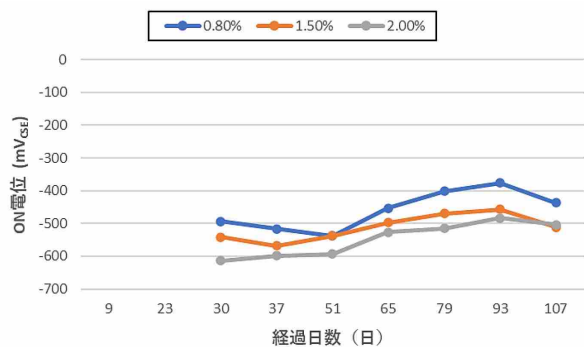


図 3-42 オン電位 (供試体 G)

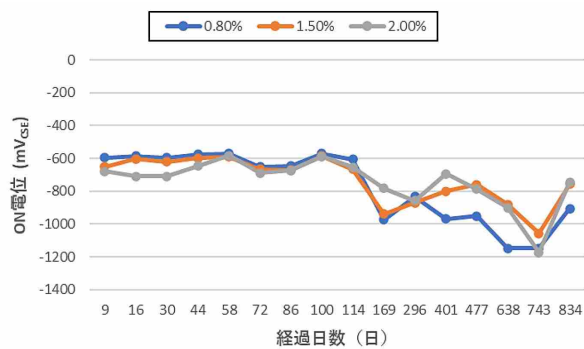


図 30-37 オン電位 (供試体 B)

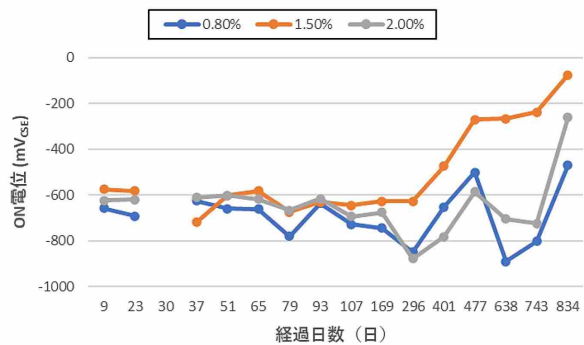


図 3-39 オン電位 (供試体 D)

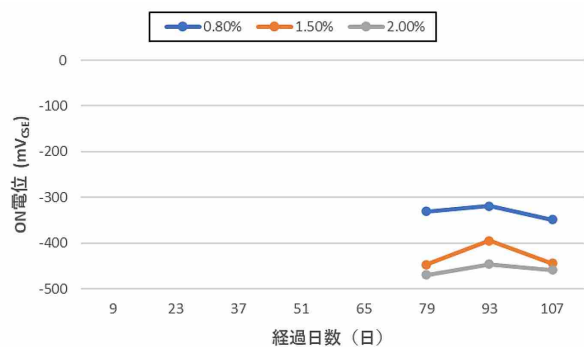


図 3-41 オン電位 (供試体 F)

(3) 復極量

各供試体の復極量を以下に示す（図 3-43, 44, 45, 46, 47, 48, 49）．屋内実験室での復極量はすべての犠牲陽極材供試体および外部電源方式供試体 G で 100mV シフトを満たしていた．供試体 F の設定電流は 0.05mA(2.5mA/m²)であり，通常であれば十分な防食効果が期待できる設定値^(3.3)であったが，塩化物イオン濃度 0.8%のみ復極量 100mV を満たしたが，1.5%と 2.0%では 100mV を下回った．しかしながら，サイクル 6 まで無防食状態であったことと，サイクル 7（79 日）からサイクル 9（107 日）までの間で復極量が増加していることから，電源装置の接続不良による無防食期間の影響が大きいと考える．

犠牲陽極材供試体では屋外での暴露後も復極量は増加傾向にあった．暴露実験終盤において復極量 100mV を下回ることがあったが，オフ電位が貴側にシフトしていることも要因の一つと考える．

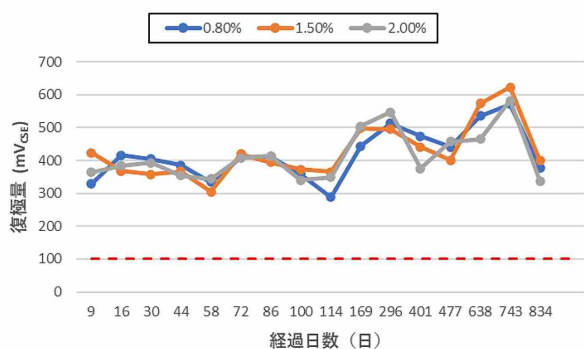


図 3-43 復極量（供試体 A）

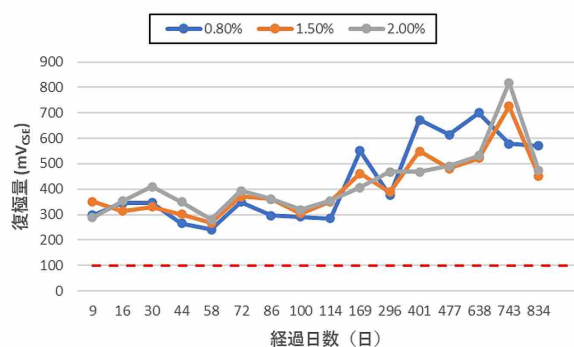


図 3-44 復極量（供試体 B）

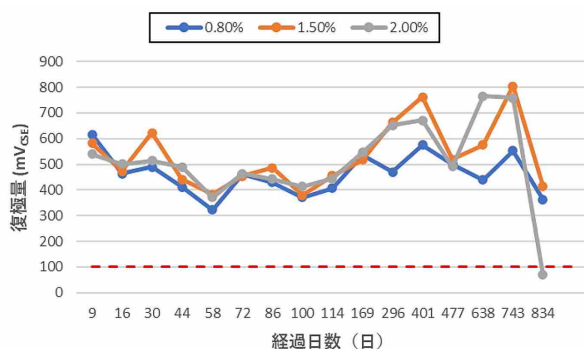


図 3-45 復極量（供試体 C）

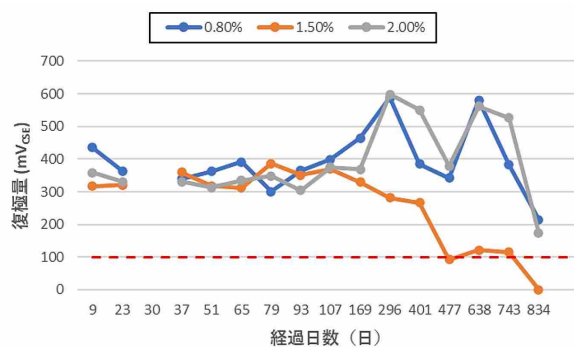


図 3-46 復極量（供試体 D）

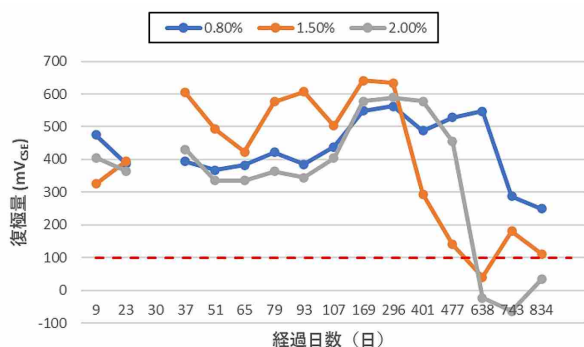


図 3-47 復極量（供試体 E）

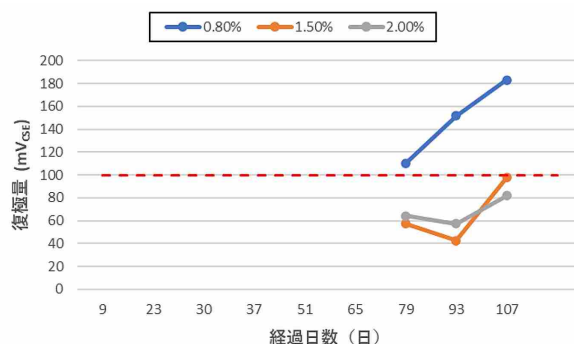


図 3-48 復極量（供試体 F）

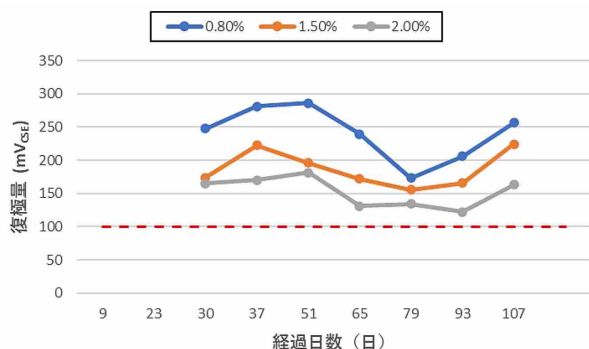


図 3-49 復極量（供試体 G）

(4) オフ電位

以下にオフ電位を示す（図 3-50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57）。オフ電位はオン電位および電流密度との相関がみられ、環境条件により変動した。暴露後は変動が大きくなったが、概ね時間の経過とともに貴側にシフトし、特に供試体 D では 200mV より貴側となり、腐食環境が大幅に改善された。

基準供試体の暴露後の自然電位が貴側にシフトし、200mV よりも貴側となり腐食していない状態^(3,4)となったことと比較して、犠牲陽極材は暴露後に防食電流の増減を繰り返していることから、イオン化傾向により、犠牲陽極材がコンクリート中の鋼材よりも事前に腐食環境となり防食していることを示唆している。

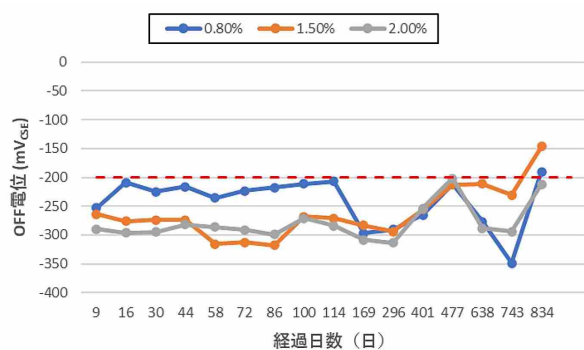


図 3-50 オフ電位（供試体 A）

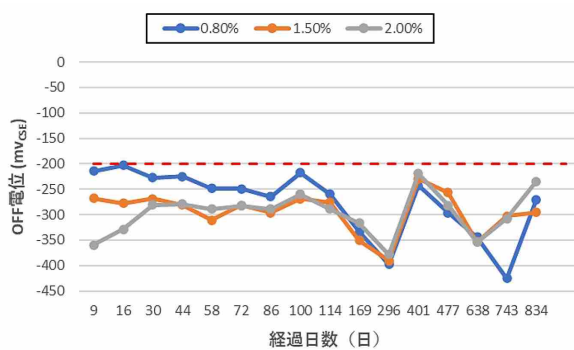


図 3-51 オフ電位（供試体 B）

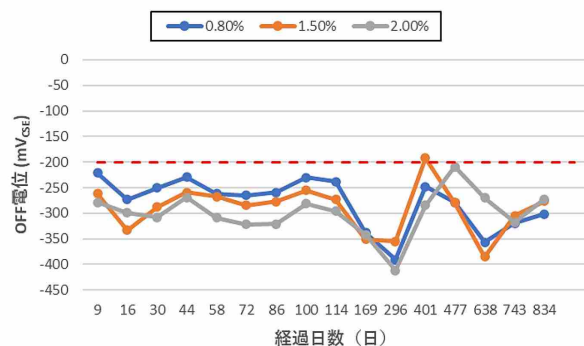


図 3-52 オフ電位（供試体 C）

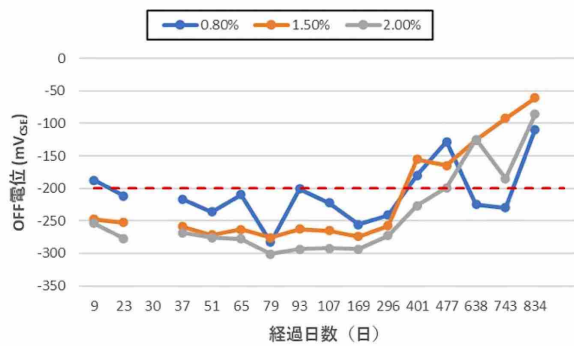


図 3-53 オフ電位（供試体 D）

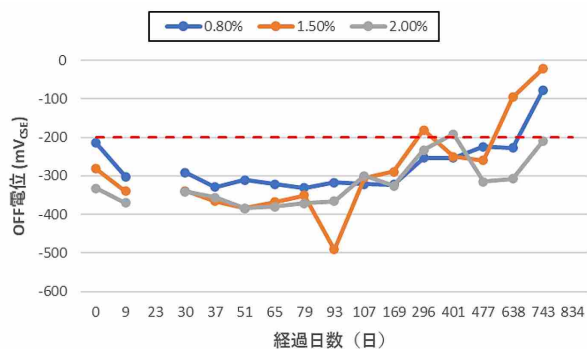


図 3-54 オフ電位 (供試体 E)

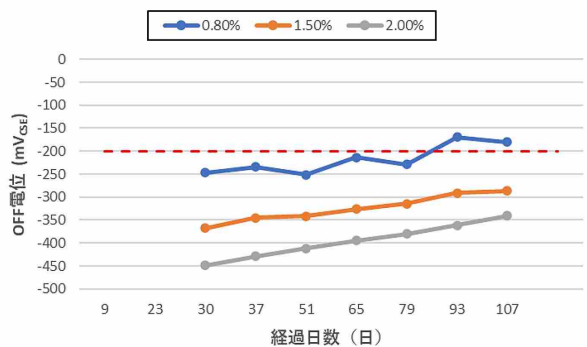


図 3-56 オフ電位 (供試体 G)

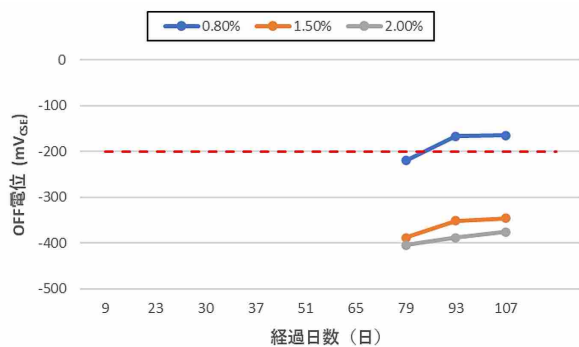


図 3-55 オフ電位 (供試体 F)

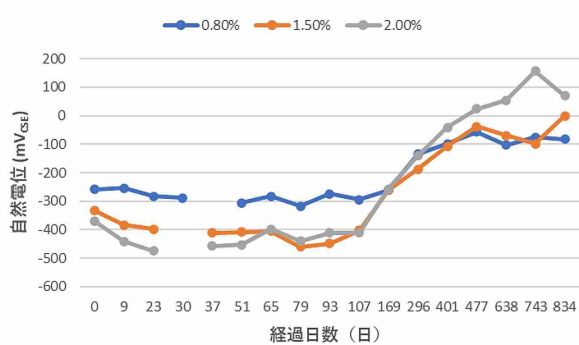


図 3-57 自然電位 (基準供試体)

(5) 鋼材腐食状況

腐食のあった供試体の写真を以下に示す (図 3-58, 59, 60, 61) . 通電開始後約 500 日にて各供試体より 1 つを破壊し鋼材の状況を確認した. 基準供試体では塩化物イオン濃度が増えるに従い腐食面積も増加している. その他の供試体では供試体 B (2.0%) にのみ一部腐食がみられたが, 被覆銅線の接続部付近であり異種金属による腐食がきっかけとなった可能性がある. なお, 腐食は供試体底面側に集中しておりコンクリート打設時のブリージングによる鋼材下面の部分的なコンクリート密度の低下が要因の一つであると考えられる.



図 3-58 基準供試体 (0.8%)



図 3-59 基準供試体 (1.5%)



図 3-60 基準供試体 (2.0%)

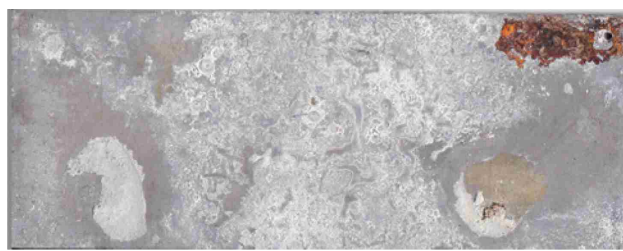


図 3-61 供試体 B (2.0%)

通電開始後約 850 日の鋼材腐食状況を確認した. すべての供試体の腐食状況を図 3-62 に示す. 電流値の低下した供試体 D (1.5%) と供試体 E (1.5%, 2.0%) に腐食が発生したが, その他犠牲陽極材供試体に目立った腐食はなかった. 鋼材のごく一部に腐食が見られる場合があったが, 電流値や復極量からコンクリートと鋼材間に空隙や組成が極端に異なる部位があったと考えられる.

基準供試体の腐食状況より, 塩分濃度 0.8% では腐食のリスクは小さく, 進行も緩やかであった. 一方, 塩分濃度が 1.5% を超えると無防食である基準供試体, 電流値の低下した供試体 D と供試体 E で腐食が発生した. 電流値が低下し, 復極量が 100mV を下回った時の防食電流は約 0.01mA (0.5mA/m²) であり, 塩分濃度 1.5% 以上の環境では不十分であると考えられる.



供試体 A① (0.8%)



供試体 A① (1.5%)



供試体 A① (2.0%)



供試体 A② (0.8%)



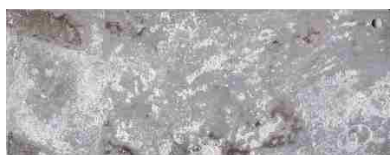
供試体 A② (1.5%)



供試体 A② (2.0%)



供試体 B① (0.8%)



供試体 B① (1.5%)



供試体 B① (2.0%)



供試体 B② (0.8%)



供試体 B② (1.5%)



供試体 B② (2.0%)



供試体 C① (0.8%)



供試体 C① (1.5%)



供試体 C① (2.0%)



供試体 C② (0.8%)



供試体 C② (1.5%)



供試体 C② (2.0%)



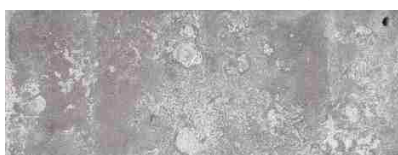
供試体 D① (0.8%)



供試体 D① (1.5%)



供試体 D① (2.0%)



供試体 D② (0.8%)



供試体 D② (1.5%)



供試体 D② (2.0%)



供試体 E① (0.8%)



供試体 E① (1.5%)



供試体 E① (2.0%)



供試体 E② (0.8%)



供試体 E② (1.5%)



供試体 E② (2.0%)



基準供試体① (0.8%)



基準供試体① (1.5%)



基準供試体① (2.0%)



基準供試体② (0.8%)



基準供試体② (1.5%)



基準供試体② (2.0%)

図 3-62 鋼材の腐食状況

3.3.3 室内試験結果を踏まえた実橋梁施工結果に対する考察

既に 3.2 にて述べたように、中国自動車道にて行われた試験施工は犠牲陽極材をコンクリート表層に貼り付け、埋設しない新工法であったが、犠牲陽極材が発生させた電流密度が約 $0.2\text{mA}/\text{m}^2 \sim 3.5\text{mA}/\text{m}^2$ であった。復極量は平均 $17 \sim 18\text{mV}$ 、最大値は 40mV と 100mV に満たなかったものの、オフ電位は経時的に貴側へシフトしており防食電流の継続的な供給により腐食環境が改善されていることが確認された。電流密度は $0.2 \sim 3.5\text{mA}/\text{m}^2$ で、電流密度および復極量が非常に小さいが、犠牲陽極材がコンクリート中に埋設されていないため、陽極材の腐食効率が悪いことを考慮すると通常の使用方法であれば同じ設置数量でより高い防食効果が得られると予測される。また、室内実験での犠牲陽極材 1 つあたりの発生可能防食電流は最大で 7.1mA で、通常 $0.2 \sim 1.0\text{mA}$ の間で増減を繰り返していた（ただし供試体 E は電池とのハイブリッドであるため、ここでの対象から除外した）。仮に室内実験より得られた防食電流を上記橋梁での試験施工にあてはめると、防食電流密度は A1 で $0.7 \sim 3.5\text{mA}/\text{m}^2$ 、A2 で $1.0 \sim 5.2\text{mA}/\text{m}^2$ となり、十分な防食効果が期待できる値である。

3.4 本章のまとめ

屋内実験の結果より、犠牲陽極材単体の供試体への使用では過防食となり、目的とする低電流下での防食効果の検証が行えない可能性があることも分かった。外部電源方式供試体の復極量データより、供試体 F の電流密度 $2.5\text{mA}/\text{m}^2$ で最終的にすべての塩分濃度で 100mV シフトを満たす可能性が示され、電流密度 $5.0\text{mA}/\text{m}^2$ ではすべての塩分濃度で復極量 100mV 以上の値であったため、次章以降で行われる実験での最大電流値の設定の参考となった。

なお、屋内試験後より継続的に行われた暴露試験環境下において、犠牲陽極材が基準供試体と比較して腐食状態となり防食電流を発生させ、電位を増減させたことは犠牲陽極材が正しく機能していることを示している。

【参考文献】

- (3.1) 特許 6393601：犠牲陽極材を用いた断面修復を伴わない鉄筋コンクリート構造物の簡易補修方法および簡易修復構造, 2018.08.31
- (3.2) 平石剛紀, 新井淳一, 坂田昇, 須田久美子：犠牲陽極材のマクロセル腐食抑制効果に関する実験的研究, Vol.24, No.1, pp1431-1436, 2002.7
- (3.3) EN12696:2016 Cathodic protection of steel in concrete
- (3.4) ASTM C876 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete

第4章 犠牲陽極方式におけるマクロセル腐食抑制効果

4.1 はじめに

本章では犠牲陽極材による低電流下における防食状況を塩分濃度別に実験評価した。腐食前の健全な鋼板をコンクリート中に埋設し実験を行い、主に新規の腐食発生や、劣化して補修された部位近傍でのマクロセル腐食^(4.1)の抑制効果に対する評価となっている。また、既往の研究^(4.2-4)によりマクロセル腐食速度についての検証がされているが、防食電流値の違いによる腐食抑制効果を検証した研究は少ない。そこで、外部電源方式による防食を行った供試体を同時に作製し、犠牲陽極材を使用した場合との比較を行うこととした。

4.2 実験概要

コンクリート供試体を Cl^- 濃度 0.8%, 1.5%, 2.0% (対セメント比) にて作製し、コンクリート中の鋼材の電位を測定した。また、一定期間が経過した後一部の供試体を破壊して鋼材の腐食状況を確認した。供試体の塩分濃度は第2章にて検討した BRE の腐食リスク^(4.5)と犠牲陽極材メーカーの採用しているリスク分類を第3章にて検証し妥当であると判断し採用した。また、第3章の結果より鋼材表面積が不足し、犠牲陽極材供試体にて過防食の状態が明らかとなったため、鋼板寸法を変更し表面積を約 2.5 倍へと変更した。

(1) 供試体概要

表 4-1 に使用材料の一覧と概要を示す。供試体には普通ポルトランドセメントを使用し、塩化ナトリウムを配合した (表 4-3)。供試体の寸法は $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 500\text{mm}$ で、コンクリート中には鉄筋の代わりに $60\text{mm} \times 400\text{mm} \times 3\text{mm}$ の鋼板を埋設し計測用被覆銅線を結束した (図 4-1)。供試体コンクリートの配合は第3章での実験にて使用したものと同様で (表 4-2) のとおりである。

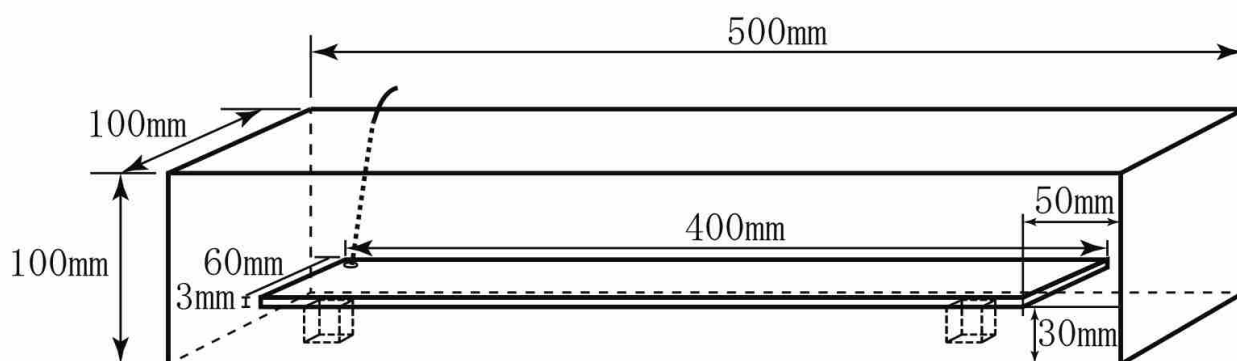


図 4-1 基準供試体（無防食）

表 4-1 使用材料

材料	概要
セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	密度: 2.63g/cm ³
粗骨材	密度: 2.63g/cm ³
鋼板	酸洗鋼板 (SS400 相当) 60x400x3mm (表面積 0.05m ²)

表 4-2 コンクリート配合 (kg/m³)

W/C(%)	W	C	S	G	NaCl
60	170	283	885	906	※

※表 4-3 参照

表 4-3 塩化物混入量

Cl ⁻ (%) (対セメント質量)	Cl ⁻ (kg/m ³) (対コンクリート体積)	NaCl (kg/m ³) (対コンクリート体積)
0.8	2.26	3.73
1.5	4.25	7.00
2.0	5.66	9.32

(2) 犠牲陽極材供試体の概要

犠牲陽極材を鋼材の端部に設置し、プラスチックバンドにて鋼材に固定した (図 4-2)。使用した犠牲陽極材は 5 種類 (表 4-4, 図 4-3) であり、すべての犠牲陽極材にはバックフィル材に水酸化リチウムが活性剤として使用されているものを採用した。水酸化リチウムが持つ高アルカリ性 (pH14 以上) によりコンクリート中の鋼材を腐食させることなく亜鉛のみを酸化させ、また、亜鉛酸化物が高アルカリに溶解する特性を利用し、亜鉛酸化物が金属亜鉛表面に堆積することを防ぐためである^(4,6)。なお、それぞれの陽極材は亜鉛量や亜鉛表面積に違いがあり (図 4-4)、防食性能が異なる。最大発生可能防食電流は $A < B < C < D < E$ であるが、犠牲陽極材 D は供試体サイズに切断して使用したため、本来の性能に劣る可能性がある。また、犠牲陽極材 E は亜鉛と電池による電気防食の両方を活用するもので、初期に電池により直流電流による電気防食が施され、後に亜鉛による流電陽極工法に自動的に変換される。なお、犠牲陽極材より左右 2 本ずつ計 4 本の結束線がでているものについては、片側の 2 本は切断し、残りの 2 本のみを使用した。

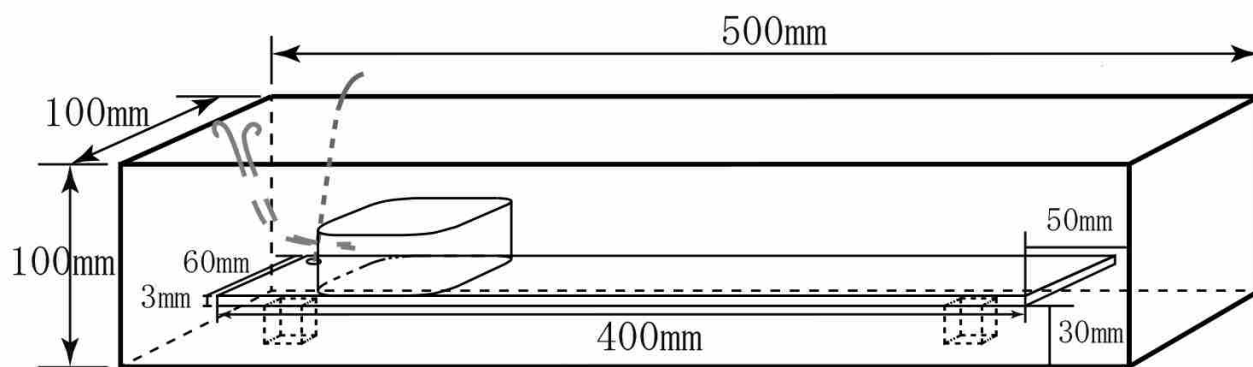
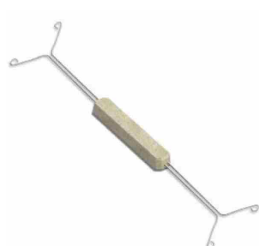


圖 4-2 犧牲陽極材供試體

表 4-4 犧牲陽極材一覽

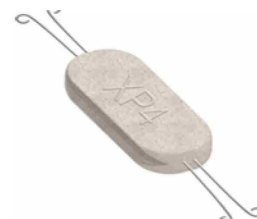
種類	亜鉛量(g)	寸法(mm)
A	60	25×25×125
B	100	32×70×60
C	160	32×110×54
D	110	∅32x150
E	60 (+電池)	∅29x135



a) 犧牲陽極材 A



b) 犧牲陽極材 B



c) 犧牲陽極材 C



d) 犧牲陽極材 D

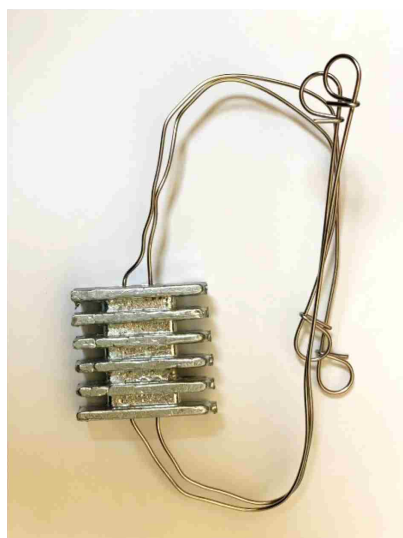


e) 犧牲陽極材 E

圖 4-3 犧牲陽極材外觀



a) 犠牲陽極材 A



b) 犠牲陽極材 B



c) 犠牲陽極材 C

図 4-4 犠牲陽極材垂鉛コア

(3) 外部電源方式供試体の概要

犠牲陽極材による低電流下での防食効果と比較するために、チタンメッシュを陽極とした外部電源方式の電気防食供試体も併せて準備した(図 4-5)。陽極であるチタンメッシュはコンクリート表面より約 15mm の位置に埋設し、被覆銅線を結束した。一般的に十分な防食効果が得られる防食電流が鋼材表面積あたりで $1\text{mA}/\text{m}^2$ 程度以上とされている^(4,7)のに対し、本研究では低電流下での防食効果を検討するために、それ以下の値も含めた 0.2, 1.0, 2.0, 4.0 (mA/m^2 , 対鋼材全表面) の 4 種類を適用した。なお、 $0.2\text{mA}/\text{m}^2$ は EN12696:2016^(4,8)にてマクロセル腐食に対する防食効果が認められる電流密度の下限であり、 $2.0\text{mA}/\text{m}^2$ はその上限である。また、第 3 章で行われた事前研究の結果より、電流密度 $0.5\text{mA}/\text{m}^2$ にてある程度の防食効果が期待でき、 $5.0\text{mA}/\text{m}^2$ ではすべての塩化物イオン濃度にて復極量 100mV 以上を満たしていたことより $4.0\text{mA}/\text{m}^2$ を採用した。

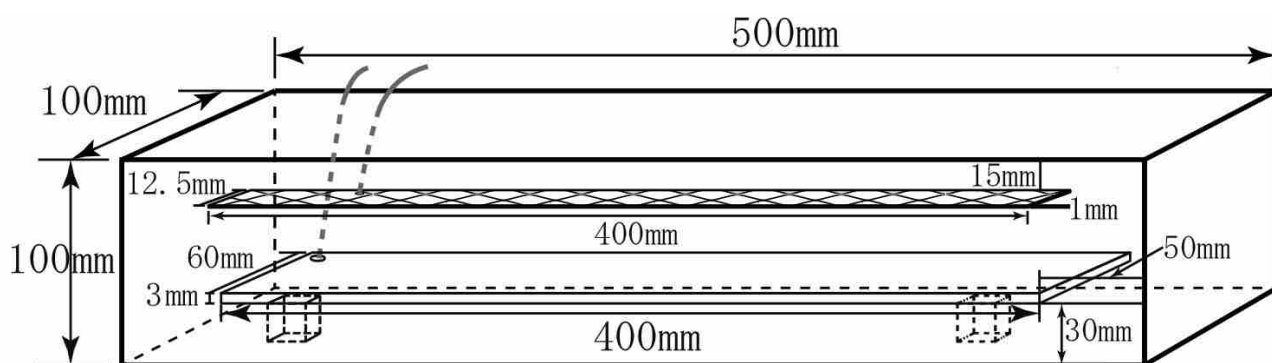


図 4-5 外部電源方式供試体

4.3 実験方法

犠牲陽極材供試体, 外部電源供試体ともに, 養生期間中の鋼材腐食の進行を避けるため, 脱型の直後から通電を開始した。

12 日間の通電が終了する度毎に, すべての供試体の鋼材のオン電位と犠牲陽極材供試体における防食電流とを測定し, かつ, 犠牲陽極材供試体の鋼材のインスタントオフ電位, 及び 48 時間後のオフ電位を測定し, 復極量を求めた. 外部電源方式供試体は外部電源装置に複数の供試体が直列に接続され電源供給を受けているため, 本研究の設備ではインスタントオフ電位を測定することができない. 従ってオン電位と 48 時間後のオフ電位を測定し, これらの差を復極量とした. なお, 電位の測定位置は被覆銅線より鋼材最遠部側面とし, 銅-硫酸銅電極を使用した. 図 4-6 に実験状況と使用した照合電極, 直流電源装置, マルチメーター (図 4-7, 8, 9) を示す.

実験室は室温約 20°C に管理され, 供試体をそれぞれ合成樹脂製のトレー内に設置することによって, 互いに絶縁した. さらにトレー内に水を溜めることで供試体の湿潤状態を保持した. 供試体上面から 40 mm 内部の水分率は概ね 4% 台に保たれていたが, 水分の過剰供給に起因すると思われる現象も発生していた. 詳しくは 4.4.5 節で述べる.



図 4-6 実験状況



図 4-7 照合電極 (CSE)

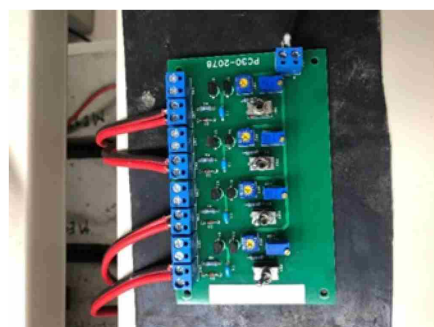


図 4-8 基盤型直流電源装置



図 4-9 マルチメーター

計測は全供試体を 2 グループに分け, 通電 12 日 + 電流遮断 48 時間 = 2 週間を 1 サイクルとし, 10 サイクル終了後に犠牲陽極材供試体 A, 外部電源供試体 $0.2\text{mA}/\text{m}^2$ と同 $4.0\text{mA}/\text{m}^2$ をそれぞれ 1 体ずつ破壊し, 鋼材の腐食状況を確認した (表 4-5). その結果, 鋼材寸法が小さいために犠牲陽極材の防食電流が外部電源供試体と比較して過大であると判断されたため, 鋼材と犠牲陽極材との間に電気抵抗を設置

し、犠牲陽極材より供給される防食電流を減少させることとした。さらに供試体 A, B, C は 15 サイクル終了後に抵抗を増加することにより、防食電流が外部電源方式供試体と同レベルとなるように調整した。

表 4-5 供試体一覧

電防種類	電流値 mA (mA/m ² 対鋼材比)	塩分濃度(%) (対セメント比)	サンプル数
外部電源	0.2 (4.00)	0.8	4
	0.1 (2.00)	0.8	3
	0.05 (1.00)	0.8	3
	0.01 (0.20)	0.8	4
	0.2 (4.00)	1.5	4
	0.1 (2.00)	1.5	3
	0.05 (1.00)	1.5	3
	0.01 (0.20)	1.5	4
	0.2 (4.00)	2.0	4
	0.1 (2.00)	2.0	3
	0.05 (1.00)	2.0	3
	0.01 (0.20)	2.0	4
犠牲陽極材 A		0.8	4
		1.5	4
		2.0	4
犠牲陽極材 B		0.8	3
		1.5	3
		2.0	3
犠牲陽極材 C		0.8	3
		1.5	3
		2.0	3
犠牲陽極材 D		0.8	3
		1.5	3
		2.0	3
犠牲陽極材 E		0.8	3
		1.5	3
		2.0	3
基準サンプル		0.8	3
		1.5	3
		2.0	3

4.4 実験結果

グラフの値は、それぞれ同一要因の供試体から得られた値の平均値である。

4.4.1 犠牲陽極材供試体における防食電流

図 4-10, 11, 12 に 2 週間に 1 度測定した犠牲陽極材から鋼材への防食電流を示す。サイクル 1 から 10 では抵抗器の使用はなく、サイクル 11 (167 日) から 15 では $4.3\text{k}\Omega$ 、サイクル 16 (237 日) 以降では供試体 A, B, C には $20\text{k}\Omega$ を、供試体 D, E には引き続き $4.3\text{k}\Omega$ の抵抗器を犠牲陽極材と鋼材の間に使用し、防食電流を調整した。電気抵抗設置後の犠牲陽極材 A, B, C の電流密度は、これら犠牲陽極材の性能が異なるにもかかわらず、塩分濃度に左右されず、いずれも約 $0.6\text{mA}/\text{m}^2$ であった。このことから、犠牲陽極の防食能力内であった場合には、塩分濃度等の鋼材の腐食環境によらず、近似の量の防食電流を発生させることができる可能性が高い。その後時間の経過とともに約 $0.1\text{mA}/\text{m}^2 \sim 0.7\text{mA}/\text{m}^2$ で推移した (表 4-6)。また、小さな抵抗器を使用し続けた供試体 D, E では平均約 $2.0\text{mA}/\text{m}^2$ の電流密度より始まり、犠牲陽極材 D では $0.2\text{mA}/\text{m}^2 \sim 2.4\text{mA}/\text{m}^2$ 、犠牲陽極材 E では $1.4\text{mA}/\text{m}^2 \sim 2.8\text{mA}/\text{m}^2$ の電流密度で推移した (表 4-7)。なお、これら供試体 D, E においてもサイクル 11 から 15 では供試体 A, B, C とほぼ同様の電流値となっていることから、やはり犠牲陽極材の種類や塩分濃度は防食電流にさほど影響を与えないといえる。なお、抵抗器設置後の犠牲陽極材供試体 A, B, C では経過日数約 400 日を境に防食電流密度が不安定となったが、室内環境条件は同一であるため、供試体内の腐食環境やコンクリート抵抗に変化が生じたと推察する。

表 4-6 犠牲陽極材供試体 (A, B, C) における防食電流密度 (サイクル 16 以降)

Cl ⁻ (対セメント 質量)	犠牲陽極材 A 電流密度(mA/m^2)		犠牲陽極材 B 電流密度(mA/m^2)		犠牲陽極材 C 電流密度(mA/m^2)	
	発生値	平均値	発生値	平均値	発生値	平均値
0.8%	0.3-0.7	0.52	0.2-0.7	0.41	0.5-0.7	0.63
1.5%	0.2-0.6	0.49	0.1-0.6	0.35	0.2-0.6	0.43
2.0%	0.2-0.7	0.52	0.1-0.6	0.41	0.5-0.7	0.63

表 4-7 犠牲陽極材供試体 (D, E) における防食電流密度 (サイクル 11 以降)

Cl ⁻ (対セメント質量)	犠牲陽極材 D 電流密度(mA/m^2)		犠牲陽極材 E 電流密度(mA/m^2)	
	発生値	平均値	発生値	平均値
0.8%	0.2-2.7	1.32	1.4-2.8	2.18
1.5%	0.9-2.2	1.49	1.7-2.6	2.10
2.0%	0.2-2.4	1.16	1.4-2.8	2.10

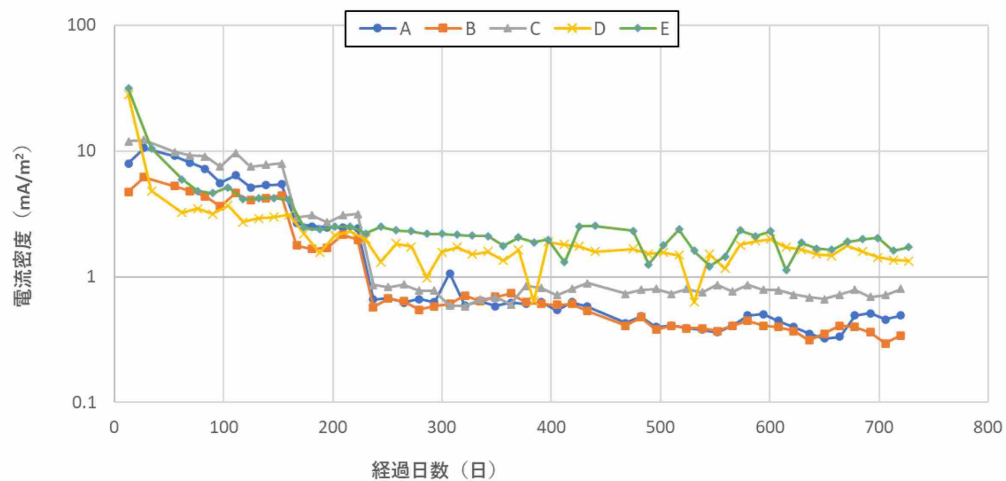


図 4-10 犠牲陽極材供試体における防食電流密度 (0.8%)

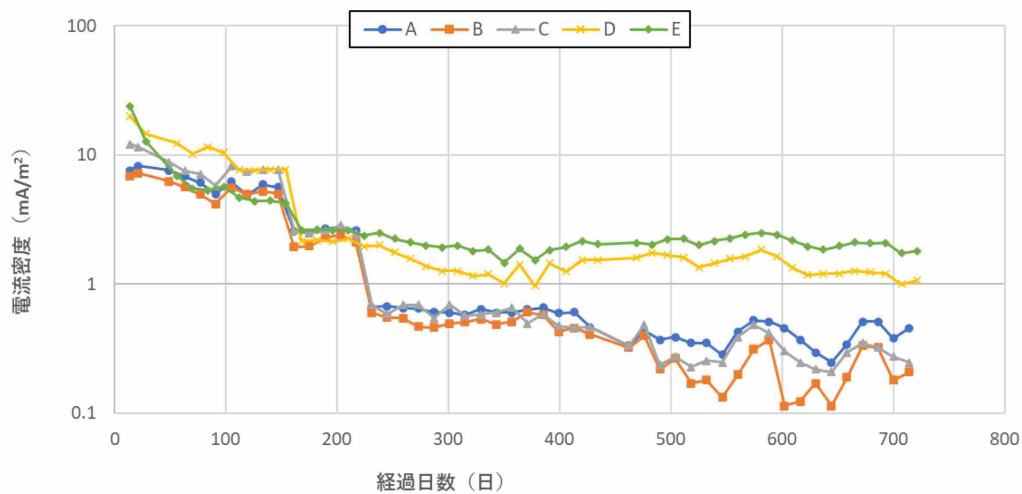


図 4-11 犠牲陽極材供試体における防食電流密度 (1.5%)

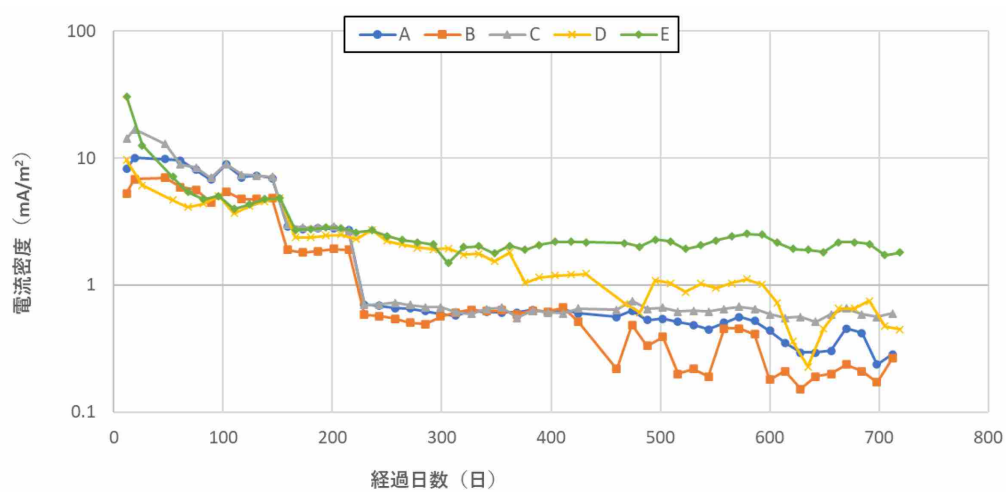


図 4-12 犠牲陽極材供試体における防食電流密度 (2.0%)

4.4.2 オン電位

オン電位の実験結果を以下に示す(図 4-13, 14, 15, 16, 17, 18). 時間の経過とともに一部の犠牲陽極材供試体の防食電流密度が低下したが, オン電位には緩やかに貴側へシフトした傾向はあるものの大きな変化はみられなかった. 外部電源供試体では安定したオン電位を維持し, 基準供試体の自然電位の変化と相関のある変移となった. 但し, 電流密度 $1.0\text{mA}/\text{m}^2$ と $2.0\text{mA}/\text{m}^2$ にオン電位の明確な差はみられなかった. 全体的な傾向として, 犠牲陽極材供試体および外部電源供試体にて塩分濃度が増加するに従い $50\sim 150\text{mV}$ ほど卑側の値を示した.

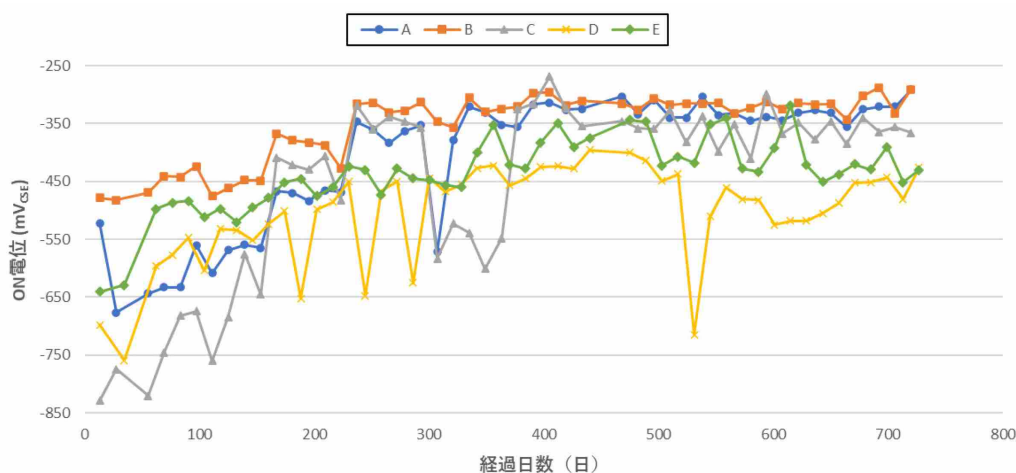


図 4-13 犠牲陽極材供試体におけるオン電位 (0.8%)

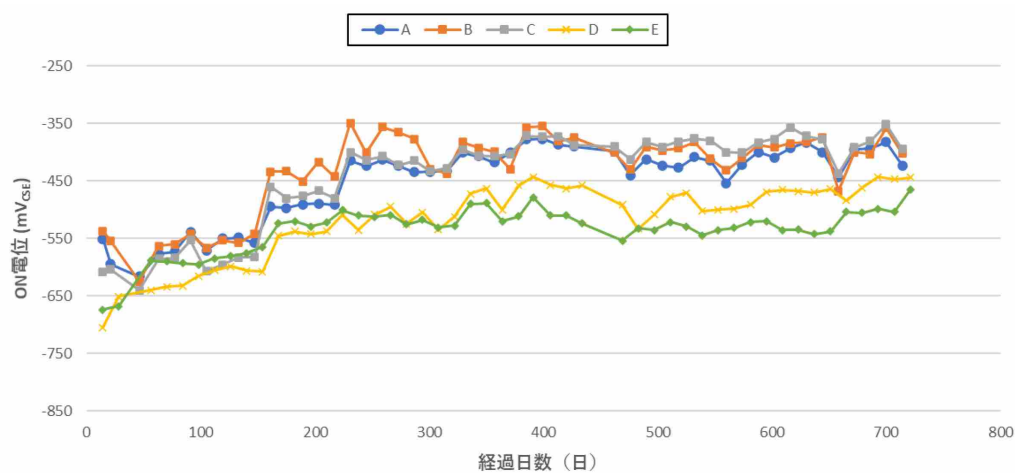


図 4-14 犠牲陽極材供試体におけるオン電位 (1.5%)

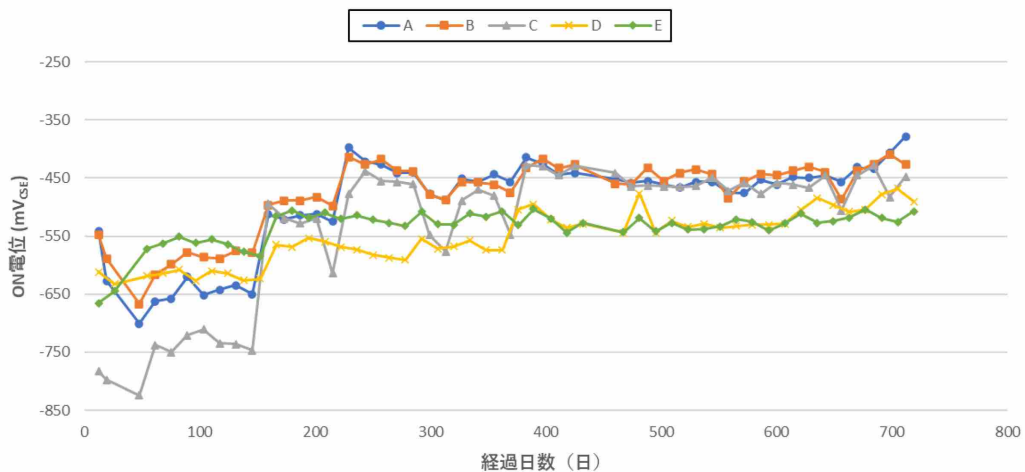


図 4-15 犠牲陽極材供試体におけるオン電位 (2.0%)

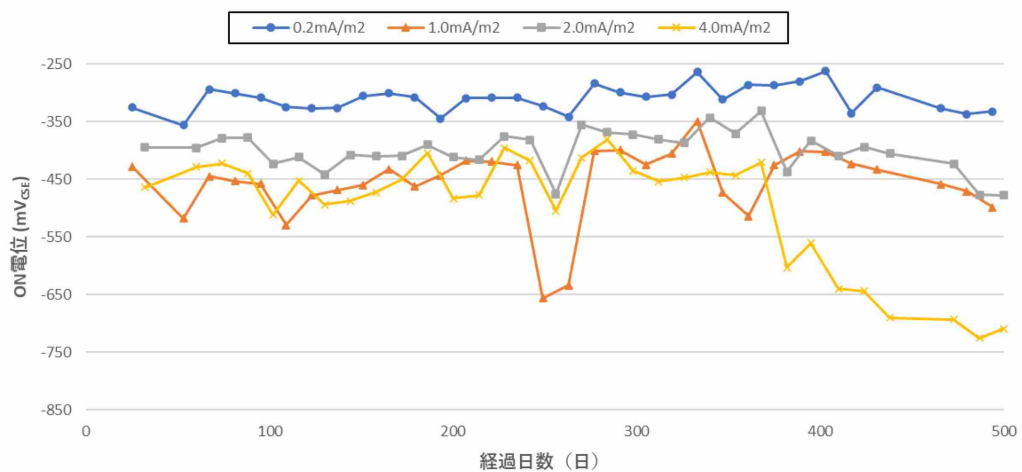


図 4-16 外部電源供試体におけるオン電位 (0.8%)

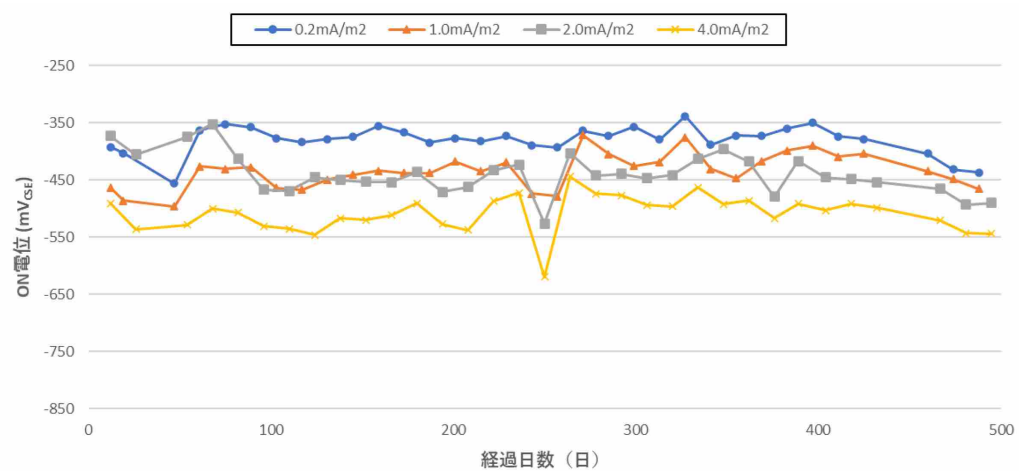


図 4-17 外部電源供試体におけるオン電位 (1.5%)

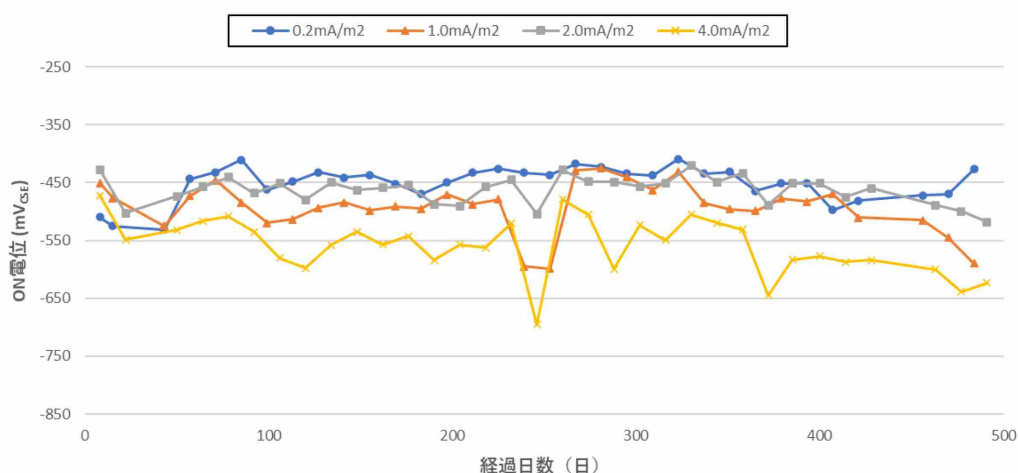


図 4-18 外部電源供試体におけるオン電位 (2.0%)

4.4.3 自然電位と復極量

(1) 基準供試体の自然電位

無防食である基準供試体の 2 週間毎の自然電位を図 4-19 に示す. 開始時の自然電位は ASTM C876^(4.9) にて判定すると, 塩分濃度 0.8%は Intermediate corrosion risk, 1.5%以上の供試体は High risk of corrosion と判定されるが, 1.5%と 2.0%との間の自然電位の差は小さかった. また, 自然電位が時間の経過とともに貴側にシフトしているが, 水和の進行にともない, 供試体内の酸素濃度や金属イオン量の変化, 酸化被膜による抵抗の増加などにより腐食環境が緩和されたためと考えられる.

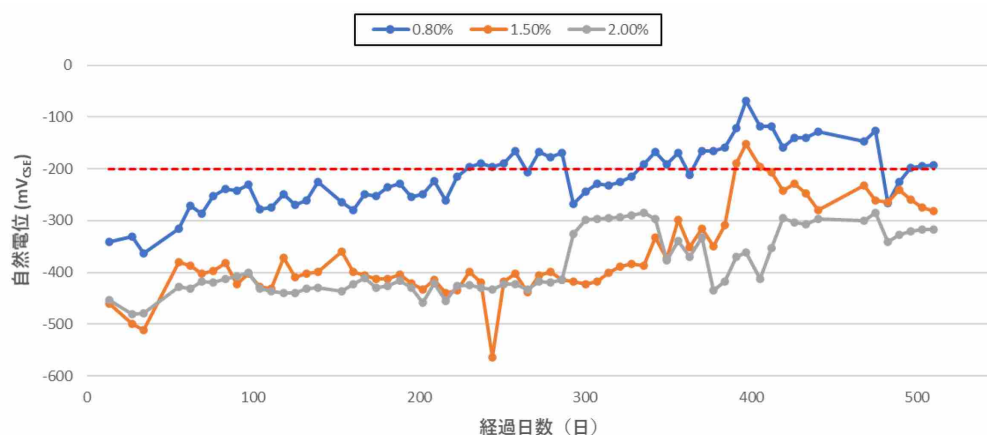


図 4-19 基準供試体の自然電位

(2) 犠牲陽極供試体の復極量

抵抗器設置後からの平均復極量を表 4-8, 9 に示す. 抵抗器設置前の高電流値における防食効果を考慮し, 抵抗器設置後 5 サイクルの数値は除外した. 塩分濃度 0.8%では全ての供試体で概ね復極量 100mV を達成していた. しかしながら塩分濃度が 1.5%, 2.0%と高い場合には, 一部の供試体で電気抵抗の追加や交換後に復極量が 100mV を下回る結果となった. 塩分濃度 1.5%と 2.0%の結果に逆転現象が見られる

が、理由は定かではない。また、犠牲陽極材 B の結果に大きな差異が見られるが、使用した犠牲陽極材の保管状況に問題があった可能性がある。塩分濃度 1.5%と 2.0%に大きな腐食環境の違いないと仮定すると、マクロセル腐食の抑制に対しては、前述の防食電流値にてすべての塩分濃度で腐食抑制または低減効果が期待できるといえる。2 週間毎の鋼材の復極量を図 4-20, 21, 22 に示す。

表 4-8 犠牲陽極材供試体 (A, B, C) における平均復極量 (サイクル 21 以降)

Cl ⁻ (対セメント質量)	復極量(mV _{CSE})		
	犠牲陽極材 A (平均値)	犠牲陽極材 B (平均値)	犠牲陽極材 C (平均値)
0.8%	114.9	115.1	172.3
1.5%	30.5	19.9	68.4
2.0%	99.8	16.7	93.6

表 4-9 犠牲陽極材供試体 (D, E) における平均復極量 (サイクル 16 以降)

Cl ⁻ (対セメント質量)	復極量(mV _{CSE})	
	犠牲陽極材 D (平均値)	犠牲陽極材 E (平均値)
0.8%	262.9	225.8
1.5%	214.7	240.8
2.0%	157.7	210.1

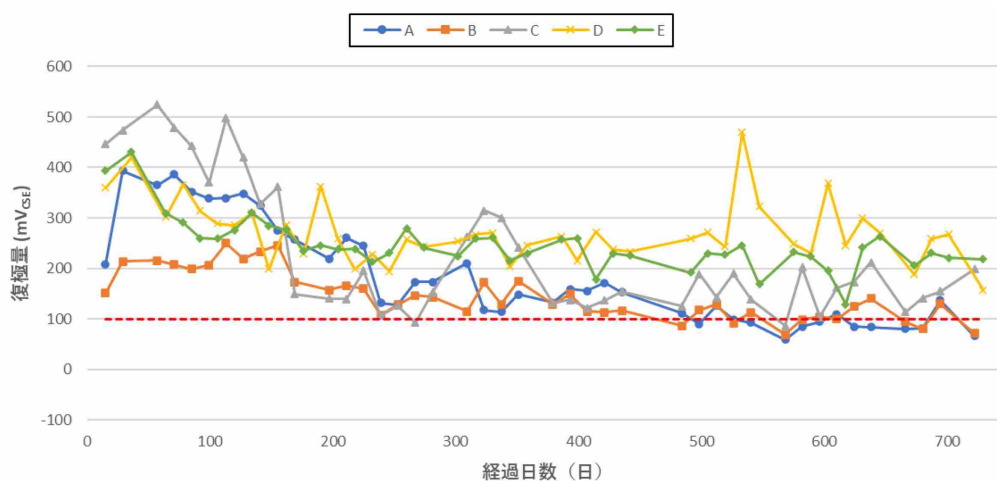


図 4-20 犠牲陽極材供試体における復極量 (0.8%)

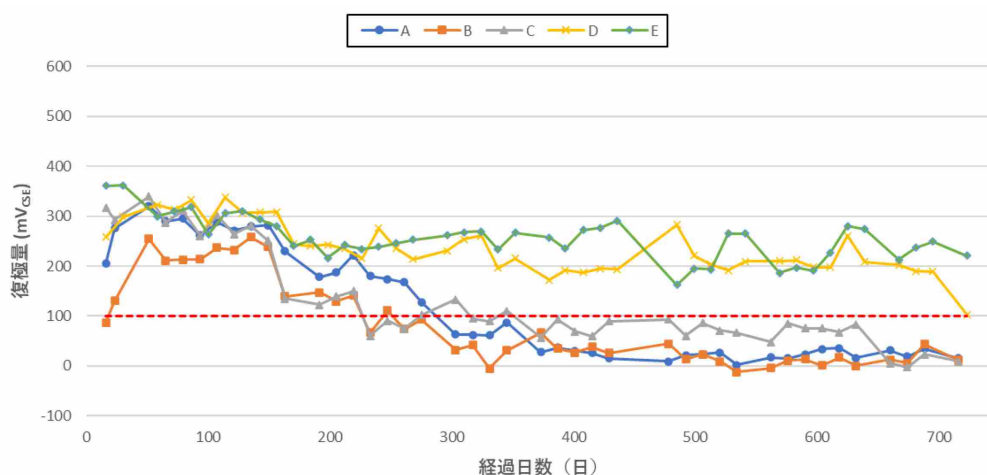


図 4-21 犠牲陽極材供試体における復極量 (1.5%)

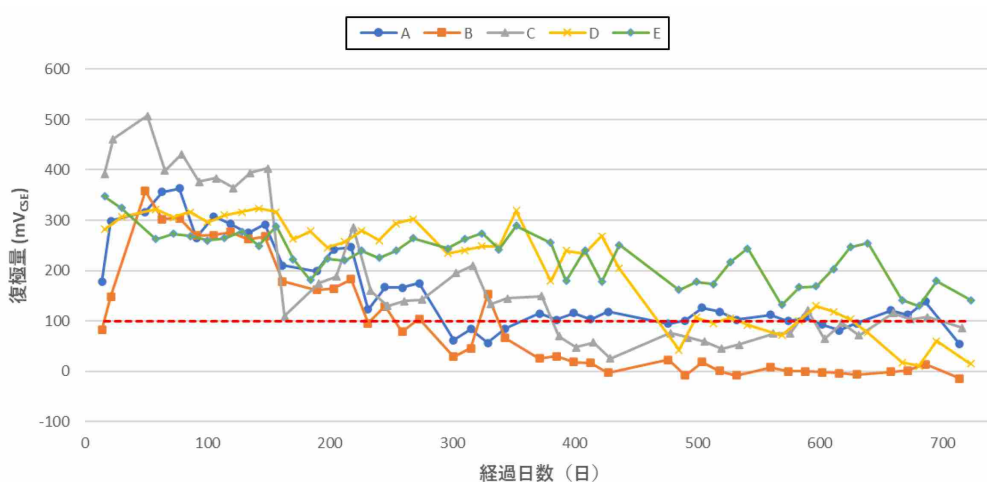


図 4-22 犠牲陽極材供試体における復極量 (2.0%)

(3) 外部電源供試体の復極量

2 週間毎の鋼材の復極量を図 4-23, 24, 25 に示す. 復極量 100mV を防食基準^(4,7)として判定すると, 塩分濃度 0.8%では電流密度が最小の 0.2mA/m²のケースで復極量がこの防食基準にほぼ一致した. 塩分濃度が 1.5%と 2.0%の場合では 4.0mA/m²ではこの防食基準を達成できているものの, 1.0mA/m²と 2.0mA/m²では防食基準を達成できていない場合があるという結果となった. ここで 1.0mA/m²と 2.0mA/m²の復極量を比較すると, 電流密度が小さな 1.0mA/m²の方が復極量が大きくなることもあり, 電流密度が復極量に与える明確な違いは見られず, これら電流密度が防食を達成できるかどうかの境界値付近であるものと考えられる.

表 4-10 外部電源供試体における平均復極量

Cl ⁻ (対セメント質量)	復極量(mV _{CSE})			
	0.2mA/m ²	1.0mA/m ²	2.0mA/m ²	4.0mA/m ²
0.8%	104.2	257.0	218.2	335.6
1.5%	37.4	75.5	106.5	223.0
2.0%	6.8	130.8	85.5	232.4

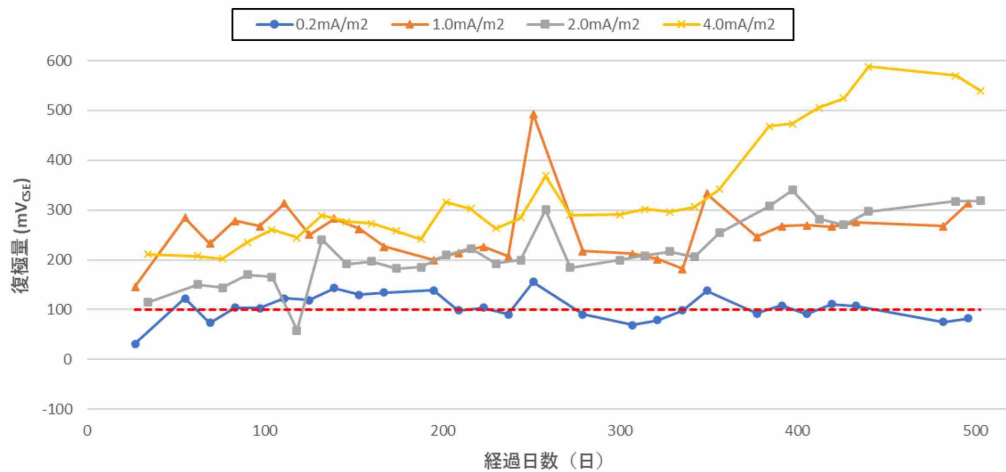


図 4-23 外部電源供試体における復極量 (0.8%)

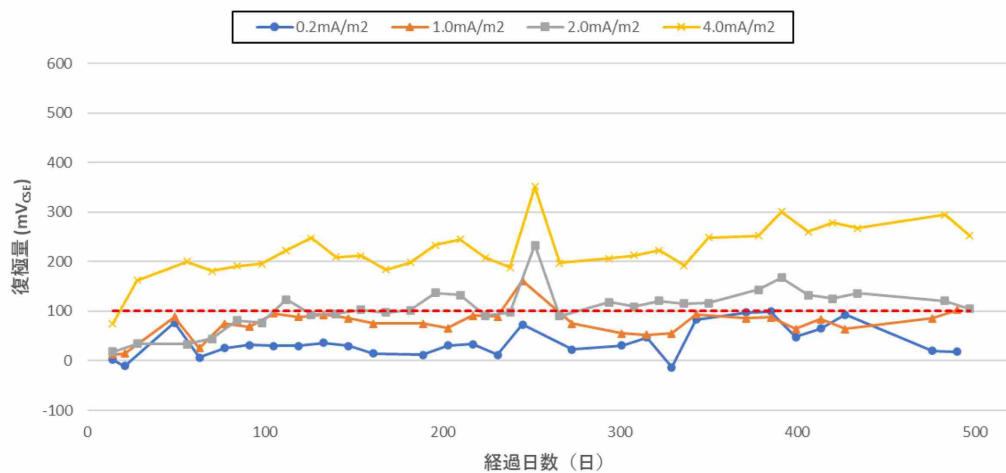


図 4-24 外部電源供試体における復極量 (1.5%)

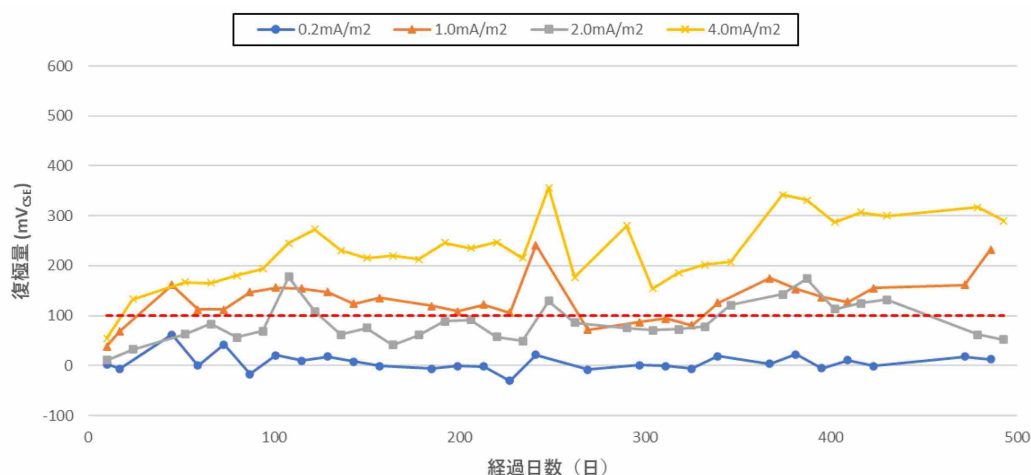


図 4-25 外部電源供試体における復極量 (2.0%)

4.4.4 オフ電位

(1) 犠牲陽極材供試体のオフ電位

犠牲陽極材供試体でのオフ電位を示す (図 4-26, 27, 28). 犠牲陽極材供試体では腐食環境に応じ自動的に防食電流の調整が行われるため、復極量のみで腐食抑制効果を判断することが難しい. そこで、オフ電位の変化を腐食環境の変化とみなし、腐食環境を比較することで検証を試みた. 腐食環境とは鋼材位置での塩化物イオン濃度や酸素、水酸基、金属イオンなどの濃度を含む環境を指すが、電気防食を継続的に行うことにより、カソードの水酸基の増加による pH の改善や塩化物イオン濃度の低減が見られる. 犠牲陽極材供試体 (0.8%) では、電位の増減があるものの、オフ電位は -200mV より貴側^(4.9)を示すなど腐食環境が改善されたことが読み取れる. 一方、塩分濃度 1.5%と 2.0%では明確な改善は確認できなかった. 本実験でのオフ電位は 48 時間後の電位であるため、鋼材の実際の電位はより貴側である可能性がある.

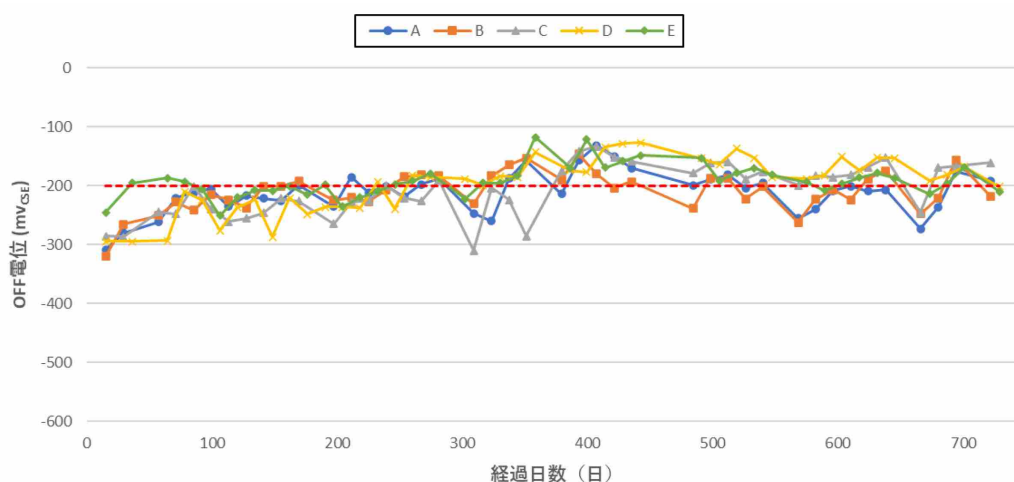


図 4-26 犠牲陽極材供試体におけるオフ電位 (0.8%)

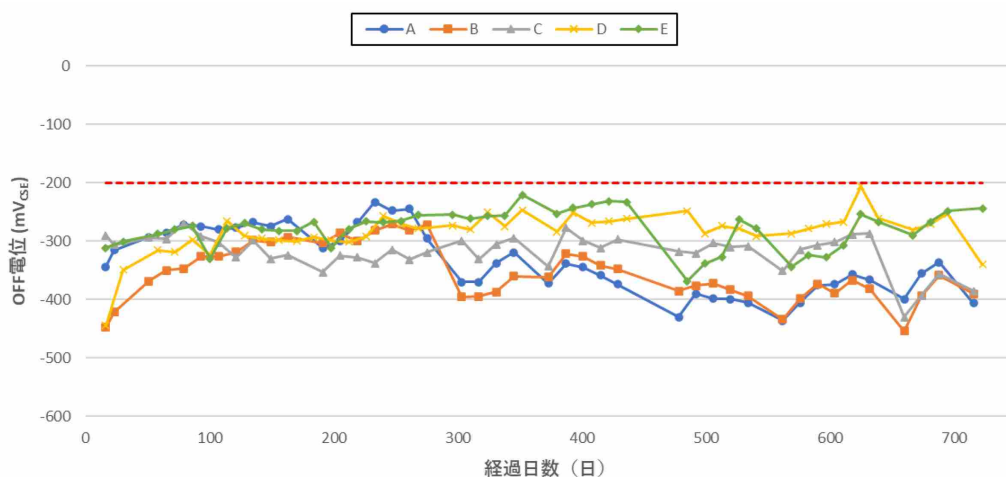


図 4-27 犠牲陽極材供試体におけるオフ電位（1.5%）

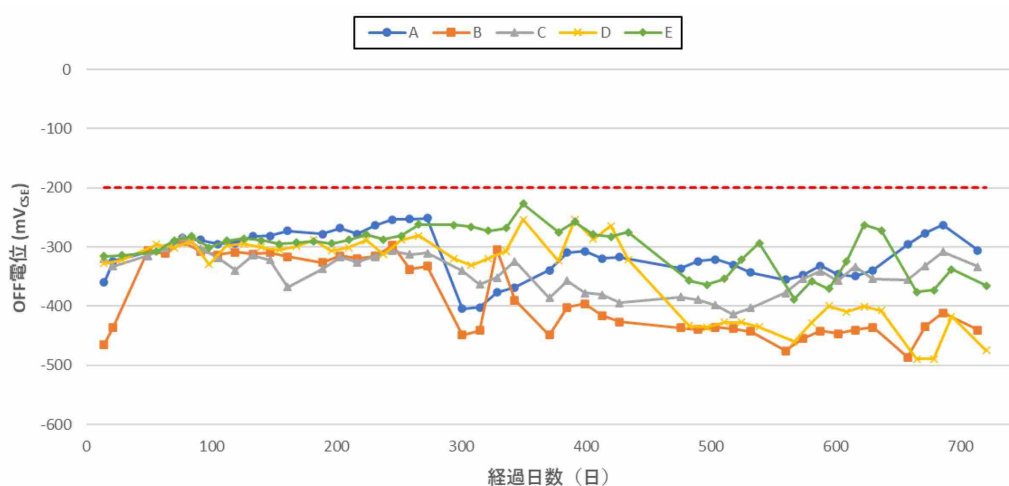


図 4-28 犠牲陽極材供試体におけるオフ電位（2.0%）

(2) 外部電源供試体のオフ電位

以下にオフ電位の結果を示す（図 4-29, 30, 31）。外部電源供試体のオフ電位は安定した値を示している。塩分濃度 0.8%では概ね-200mV を上回り、腐食が抑制されていることが分かる。塩分濃度 1.5%と 2.0%では-200mV よりも卑な値であったが、犠牲陽極材供試体同様、実際の電位はより貴側である可能性はある。

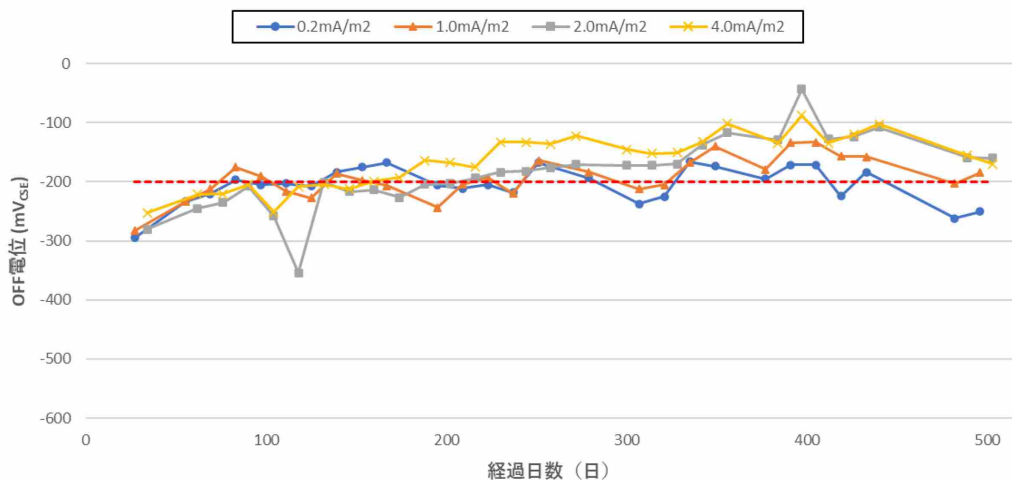


図 4-29 外部電源供試体におけるオフ電位 (0.8%)

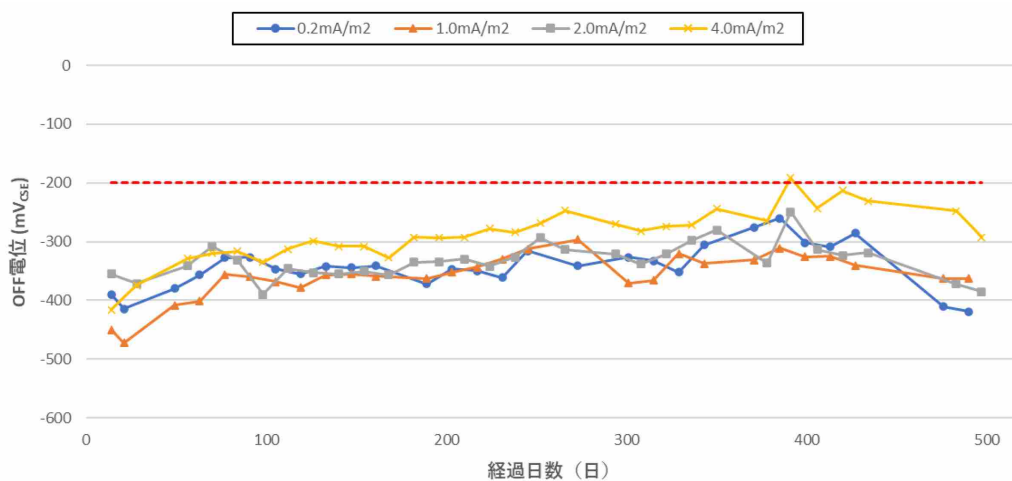


図 4-30 外部電源供試体におけるオフ電位 (1.5%)

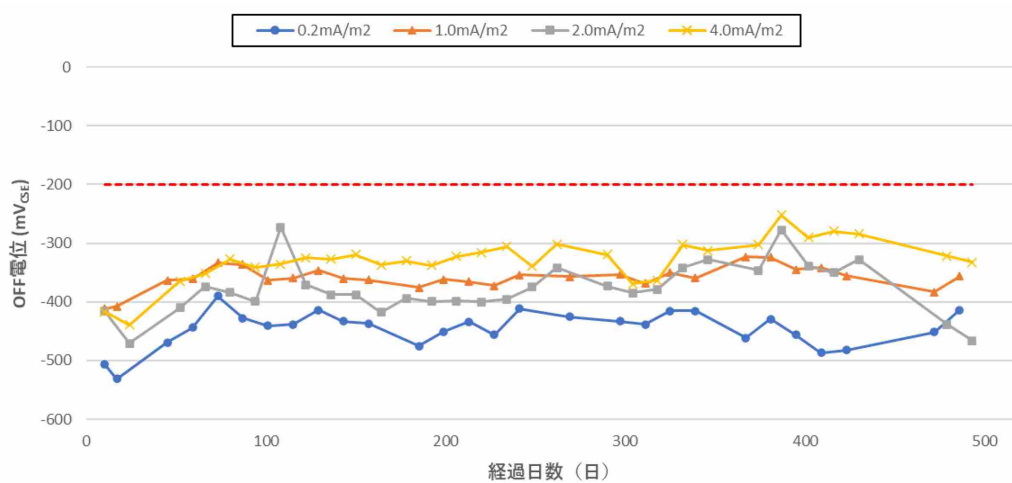


図 4-31 外部電源供試体におけるオフ電位 (2.0%)

4.4.5 鋼材腐食状況

サイクル 25 終了時（試験期間 50 週）に全種類の供試体のうちそれぞれ 1 体を解体し、鋼材の腐食状況を確認した（図 4-32）。なお、サイクル 25 は実験開始後約 1 年にあたる。基準供試体と外部電源供試体の鋼材には若干の腐食箇所が見受けられたが、犠牲陽極材供試体ではほぼ腐食は見られなかった。これは、犠牲陽極材供試体の初期防食電流密度が大きかったことも要因の一つと推察する。なお、腐食が発生している供試体では、鋼材下面に腐食が集中し上面での腐食はほとんど発生しなかった、これは打設時のブリーディングにより鋼材下面の組織が粗となり、また供試体を入れたトレーに水を張ることにより水分供給を行っていたため、鋼材下面がより腐食しやすい環境となったためであると考えられる。また鋼材腐食部には水酸化鉄と思われる生成物が付着しており、酸素の供給不足が生じていたようである。

その後約 500 日の実験予定期間を終了し、基準供試体および外部電源供試体の鋼材腐食状況を確認した。犠牲陽極材供試体は抵抗器設置までの期間は目的とする防食電流密度を上回っており、鋼材が腐食する要因はないと判断し、抵抗器設置後の期間を基準供試体および外部電源供試体と合わせるべく鋼材確認時期を外部電源供試体よりも遅らせた。

(1) サイクル 25 終了時の基準供試体

腐食状況を図 4-32 に示す。腐食があった鋼材のみを示すが、すべて鋼材下面のものである。基準供試体では塩分濃度 0.8%から腐食が発生した。腐食の程度は塩分濃度に依存し、塩分量の大きなものほど腐食が進んでいた。

(2) サイクル 25 終了時の犠牲陽極材供試体

図 4-32 には腐食の確認されたもののみを示しており、塩分濃度 0.8%の犠牲陽極材供試体では、供試体 C のみ鋼材上面に軽微な腐食が見られたが、その他の犠牲陽極材では腐食は発生していなかった。塩分濃度が 1.5%や 2.0%の場合には、大きな抵抗を挿入した犠牲陽極材 A, B, C 供試体の鋼材下面に腐食が見られたものの、比較的軽微であった。これら供試体については当初は目標とするよりも大きな防食電流が供給されていたが、最後に電気抵抗を交換して防食電流を減少させてから、少なくとも 100 日が経過しており、これはもし防食電流が過小であった場合に腐食が発生、進行するのに十分な期間であったと考えられる。

防食電流密度は犠牲陽極材 A, B, C で約 $0.6\text{mA}/\text{m}^2$ 、犠牲陽極材 D と E で $1.2\text{--}2.0\text{mA}/\text{m}^2$ であり、特に前者の場合には外部電源方式の電気防食にて求められる防食電流密度 $1.0\text{mA}/\text{m}^2$ の半分程度の値である^(4.7)がマクロセル腐食に有効とされる電流密度^(4.8)であった。埋設型の犠牲陽極材は小型であり、起電力は大きくないにもかかわらず、4.4.1 節で述べたように、塩分濃度が異なって鋼材の腐食傾向が異なっている、能力の範囲内である限り、一定の防食電流を発生させていた。但し、復極量は 100mV を下回る場合もあった。

犠牲陽極は金属毎にイオン化傾向が異なることを利用して鋼材の腐食を防ぐ。このような本質的な電気化学の原理を利用しているため、鋼材よりもイオン化傾向の強い材質を利用している限り、復極量や防食電流のモニタリング、それらを用いた厳密な管理を行なわなくとも大きな防食効果を達成することが可能で、外部電源方式用に設定されている種々の管理値を犠牲陽極方式に対して無理に適用する必要がないといえる。

(3) サイクル 25 終了時の外部電源供試体

図 4-32 に外部電源方式供試体における鋼材腐食状況を示す。電流密度の大小に関わらず、もっとも低い塩分濃度 0.8%より腐食が見られ、塩分濃度が大きいほど腐食面積が大きくなる傾向が見られた。また復極量が 100mV 以上であるにも関わらず腐食が進行している供試体が多かった。腐食は全て供試体下面側で生じていたことから、ブリーディングによる空隙の発生やセメント硬化体の組成の違いなども腐食の要因と考えられるが、同様の形状である犠牲陽極材供試体では顕著な腐食の進行は観察されていない。外部電源方式の電気防食では、鋼材全体の電位を均一に卑側にシフトさせ、かつ、腐食反応で失われる以上の電子を与えることにより鋼材の腐食を防ぐ。それが確実にこなわれることを担保するために復極量や電流量に関する管理基準が定められているが^(7,8)、特に塩分量が多い場合等、条件によってはこれら基準による防食では不十分な場合もあるため、外部電源方式を適用する場合には、設計時に十分な事前の検討が求められるといえる。





j) 2.0mA/m² 塩分濃度 2.0%



k) 4.0mA/m² 塩分濃度 2.0%

図 4-32 サイクル 25 終了時の鋼材下面の腐食状況

(4) 全サイクル終了時の基準供試体

基準供試体の鋼材腐食状況を図 4-33 に示す. 塩分濃度が高くなるに従い鋼材腐食が激しくなっている. なお, 供試体はそれぞれ 2 つあり, すべて鋼材下面の画像である.



a) 基準供試体 塩分濃度 0.8%



aa) 基準供試体 塩分濃度 0.8%



b) 基準供試体 塩分濃度 1.5%



bb) 基準供試体 塩分濃度 1.5%



c) 基準供試体 塩分濃度 2.0%



cc) 基準供試体 塩分濃度 2.0%

図 4-33 全サイクル終了時の鋼材下面腐食状況 (基準供試体)

(5) 全サイクル終了時の犠牲陽極材供試体

図 4-34 に鋼材下面の腐食状況を示す. 塩分濃度 0.8%ではすべての犠牲陽極材供試体で腐食はほぼみられず, 特に電流密度の高い供試体 D と E では腐食をほぼ 100%抑制できていた. 供試体 A,B,C の結果より塩分濃度 1.5%と 2.0%で腐食状況に大差はなく, 100mV 未満の復極量であっても防食効果が期待できるとされる 50mV^(4,10,11,12)以上を維持した供試体では鋼材の腐食は抑えられていた. 供試体 A,B,C の電流密度では塩分濃度 0.8%まで, 供試体 D,E の電流密度では塩分濃度 2.0%^(4,13)までの腐食抑制効果が確認された. なお, 供試体はそれぞれ 2 つあり, すべて鋼材下面の画像である.



a) 犠牲陽極材 A 塩分濃度 0.8%



aa) 犠牲陽極材 A 塩分濃度 0.8%



b) 犠牲陽極材 A 塩分濃度 1.5%



bb) 犠牲陽極材 A 塩分濃度 1.5%



c) 犠牲陽極材 A 塩分濃度 2.0%



cc) 犠牲陽極材 A 塩分濃度 2.0%



d) 犠牲陽極材 B 塩分濃度 0.8%



e) 犠牲陽極材 B 塩分濃度 1.5%



f) 犠牲陽極材 B 塩分濃度 2.0%



g) 犠牲陽極材 C 塩分濃度 0.8%



h) 犠牲陽極材 C 塩分濃度 1.5%



i) 犠牲陽極材 C 塩分濃度 2.0%



j) 犠牲陽極材 D 塩分濃度 0.8%



k) 犠牲陽極材 D 塩分濃度 1.5%



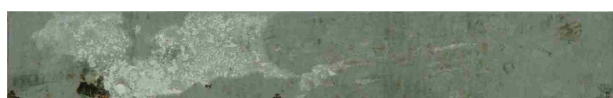
l) 犠牲陽極材 D 塩分濃度 2.0%



m) 犠牲陽極材 E 塩分濃度 0.8%



n) 犠牲陽極材 E 塩分濃度 1.5%



o) 犠牲陽極材 E 塩分濃度 2.0%



dd) 犠牲陽極材 B 塩分濃度 0.8%



ee) 犠牲陽極材 B 塩分濃度 1.5%



ff) 犠牲陽極材 B 塩分濃度 2.0%



gg) 犠牲陽極材 C 塩分濃度 0.8%



hh) 犠牲陽極材 C 塩分濃度 1.5%



ii) 犠牲陽極材 C 塩分濃度 2.0%



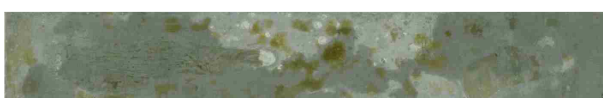
jj) 犠牲陽極材 D 塩分濃度 0.8%



kk) 犠牲陽極材 D 塩分濃度 1.5%



ll) 犠牲陽極材 D 塩分濃度 2.0%



mm) 犠牲陽極材 E 塩分濃度 0.8%



nn) 犠牲陽極材 E 塩分濃度 1.5%



oo) 犠牲陽極材 E 塩分濃度 2.0%

図 4-34 全サイクル終了時の鋼材下面腐食状況（犠牲陽極材供試体）

(6) 全サイクル終了時の外部電源供試体

図 4-35 に外部電源供試体の腐食状況を示す. 電流密度 $0.2\text{mA}/\text{m}^2$ ではすべての塩分濃度で鋼材の腐食が確認された. 塩分濃度 0.8% での腐食は軽微なものであったが, EN12696:2016^(4,8) のマクロセル腐食抑制基準値の下限であり, 復極量や OFF 電位からも腐食抑制効果の境界値であったことが分かる.

また, 電流密度 $1.0\text{mA}/\text{m}^2$, $2.0\text{mA}/\text{m}^2$ でも塩分濃度 1.5% や 2.0% で腐食が発生したが, 0.8% では十分な腐食抑制効果がみられた. 電流密度 $4.0\text{mA}/\text{m}^2$ では塩分濃度 0.8% と 1.5% で腐食抑制効果が確認されたが, 復極量 100mV 以上を維持していたにもかかわらず塩分濃度 2.0% では腐食が発生した. なお, 供試体はそれぞれ 2 つあり, すべて鋼材下面の画像である.



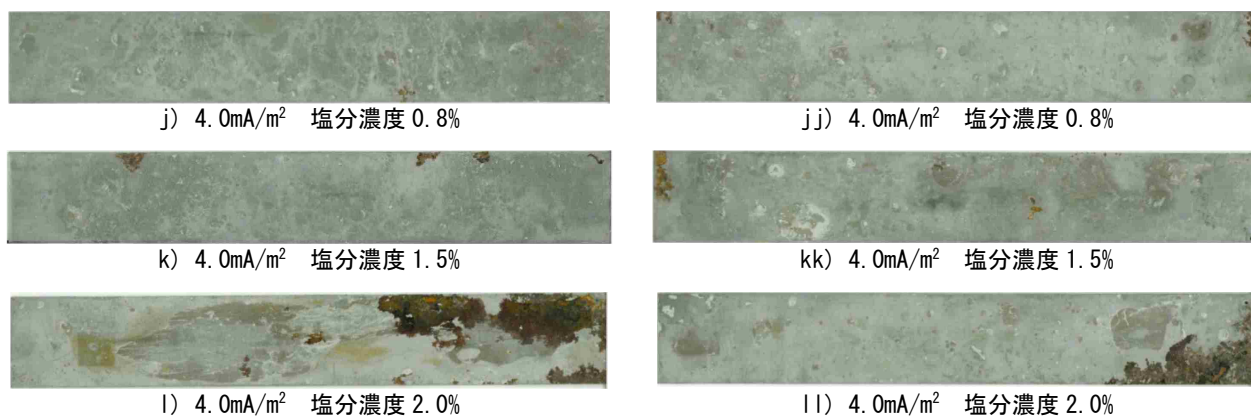


図 4-35 全サイクル終了時の鋼材下面腐食状況（外部電源供試体）

4.4.6 防食に必要な電流量の考察

得られた犠牲陽極材供試体の防食電流密度と復極量より，マクロセル腐食に対する防食電流別復極量（表 4-11）を作成した．この表により防食電流密度と塩分濃度から，鋼材が得られる復極量を設計することができる．

表 4-11 マクロセル腐食に対する防食電流別復極量

電流密度 (mA/m ²)	塩化物イオン濃度 0.8%	塩化物イオン濃度 1.5%	塩化物イオン濃度 2.0%
0.2	50mV～100mV	50mV 未満	50mV 未満
1.0	100mV	50mV～100mV	50mV～100mV
2.0	100mV	100mV	50mV～100mV
4.0	100mV	100mV	100mV
※0.4	100mV	50mV～100mV	50mV～100mV
※1.0	100mV	100mV	50mV～100mV
※2.0	100mV	100mV	100mV

※犠牲陽極材供試体データ

また，犠牲陽極材供試体において，鋼材のサイズに合わせ犠牲陽極材に抵抗器を使用することで，防食電流を検証目的である低電流値に調整したが，その調整作業時に犠牲陽極材が持つ特徴を発見した．その特徴とは犠牲陽極材が持つ防食能力内であれば塩分濃度等の腐食環境によらず近似の防食電流を発生させるというものである．犠牲陽極材では亜鉛量は耐用年数に影響し，亜鉛の表面積は発生電流に影響を与える．例えば，亜鉛表面積が 2 倍になれば理論上発生電流も 2 倍となるが，それぞれの陽極が持つ防食能力内であった場合は，亜鉛表面積の影響を受けず近似の防食電流を発生させるということである．

4.5 本章の結論

本章では犠牲陽極材による低電流下における防食状況を塩分濃度別に実験評価した。腐食前の健全な鋼板をコンクリート中に埋設し実験を行い、主に新規の腐食発生や、劣化して補修された部位近傍でのマクロセル腐食^(4.1)の抑制効果に対する評価を行った。犠牲陽極材を用いた供試体に加え、外部電源方式による防食を行った供試体を同時に作製し、犠牲陽極材を使用した場合との客観的な比較を行った。

以下に、本章での検討の範囲から得られた結果をまとめる。

- (1) 犠牲陽極の防食能力内であった場合には、塩分濃度等の鋼材の腐食環境によらず、近似の防食電流を発生させることができる。
- (2) 犠牲陽極材を使用した場合、電流密度 $1.0\text{mA}/\text{m}^2$ や復極量 100mV といった外部電源方式に対する一般的な防食基準^(4.7)を満たさない供試体でも、塩化物イオン濃度が低い場合には完全に鋼材を防食できていた、あるいは腐食量を大幅に低減できていた。
- (3) 犠牲陽極材を使用した場合、塩化物イオン濃度 1.5% や 2.0% の場合でも電流密度 $1.0\text{mA}/\text{m}^2 \sim 2.0\text{mA}/\text{m}^2$ で十分な腐食抑制効果を得ることができたが、外部電源方式の場合は電流密度 $2.0\text{mA}/\text{m}^2$ では十分な腐食抑制効果は得られず、電流密度 $4.0\text{mA}/\text{m}^2$ でも塩化物イオン濃度 2.0% で腐食が発生した。
- (4) 今回の実験の範囲からは、同等の防食電流密度であった場合、犠牲陽極材を使用した場合の方が外部電源方式と比較して優れた防食効果を示した。
- (5) 海外でのマクロセル腐食(Corrosion Prevention)に対する防食電流値の規格では $0.2\text{mA}/\text{m}^2 \sim 2.0\text{mA}/\text{m}^2$ となっているが、本実験より $0.2\text{mA}/\text{m}^2$ では不十分である可能性がみられた。 $0.4\text{mA}/\text{m}^2$ であれば低塩化物イオン濃度であれば十分な防食効果が得られるものと考える。

【参考文献】

- (4.1) 長滝重義, 大即信明, 守分敦郎, 宮里心一: 鉄筋コンクリート部材の断面修復部における腐食形成に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.544, V-32, 109-119, 1996.8
- (4.2) 宮里一心, 大即信明: 既存鉄筋コンクリート部材中のマクロセル腐食速度の推定, コンクリート工学論文集, 第12巻第2号, 2001.5
- (4.3) 小林孝一, 平澤征夫, 宮川豊章: RC部材のひび割れによるマクロセル腐食の電気化学特性を用いた解析的検討, 土木学会論文集, No.732, V-59, pp1-15, 2003
- (4.4) 吉田隆浩: 流電陽極法を用いた鉄筋コンクリート構造物の維持管理に関する研究, 京都大学博士論文, 2015.3
- (4.5) BRE Digest 444 Part2, 2000
- (4.6) George Sergi, Gamini Seneviratne; Improved Design Considerations for Steel Reinforcement Corrosion Control with Galvanic Anodes Following Performance Evaluation from Analysis of Site Data, submitted in Structural Faults and Repair 2022
- (4.7) 土木学会: 電気化学的防食工法指針, コンクリートライブラリー157, p58
- (4.8) EN12696:2016 Cathodic protection of steel in concrete
- (4.9) ASTM C876 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in

Concrete

- (4.10) 吉田隆浩, 内田康大, 渡辺佳彦, 垣尾徹：犠牲陽極材による鉄筋腐食抑制範囲の検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol. 66, V-248, 2011
- (4.11) 渡辺佳彦, 吉田隆浩：埋設型犠牲陽極材を用いた部分断面修復工法による鉄筋腐食抑制効果, 日本鉄道施設協会誌 2017.5 386
- (4.12) 瀬谷千恵, 中山裕昭, 高石佳宏, 野村敬之, 松久博敬：RC 床版の打継目における犠牲陽極材の防食効果, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol. 74, V-195, 2019
- (4.13) 松久保博敬, 真下昌章, 芦田公伸, 審良善和, 濱田秀則：海洋環境下における犠牲陽極材料の腐食抑制効果, JCI コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム, 2004.10

第5章 犠牲陽極方式における進行中の腐食抑制効果

5.1 はじめに

塩害等によるコンクリート中の鋼材腐食対策としてすでに適用されている犠牲陽極材による流電陽極方式は、実構造物にて防食効果が確認されている。一方、電気化学的防食工法に関する既存の防食基準（例えば復極量を 100mV 以上とする^(5.1,2)）は、主に外部電源方式を対象としている。流電陽極方式は電流の調整が不可能であるため、それら基準を犠牲陽極方式に対してそのまま適用することが難しい。

また、海外においては電気防食は新設構造物に対する Corrosion Prevention と、既に鉄筋腐食が生じてしまった構造物に対する Corrosion Control とに区別されて論じられることがある^(5.3)。これは鉄筋に新たに孔食が生じる電位 E_{pit} よりも、一旦腐食が生じた後に、その進行を止めて再不動態化させるための電位 E_{prot} の方が数 100mV 程度卑で、 E_{pit} と E_{prot} との間では腐食は新たに発生することはないが進展はすることが理由であり^(5.3)、腐食発生後に電気防食を適用する場合には、より大きな分極量が求められるためである。そのため、埋設型の犠牲陽極材では、その適用範囲を Corrosion Prevention（新たな腐食の発生への緩和）、Corrosion Control（進行中の腐食の速度低下）、および、Cathodic Protection（進行中の腐食の速度低下もしくは停止）の3つに分類しているものもある^(5.4)。

そこで、犠牲陽極材が発生させ得る低電流下、主に復極量 100mV 未満での腐食抑制効果を確認することとしたが、特にすでに腐食が発生、進行中の鉄筋に対する有効性を検証することとした。

5.2 実験概要

本研究では腐食進行中の鉄筋に対する犠牲陽極材による腐食抑制効果を、かぶりコンクリート中の塩分濃度別に実験評価した。まず腐食発生前の健全な鉄筋をコンクリート中に埋設した供試体を作製し、4 週間の養生後に電食を 9 週間行うことにより、あらかじめ腐食を発生、進行させた。その上で電気防食を適用し、外部電源方式による防食と犠牲陽極材による防食を同時に実験することで、両者の比較を行った。

5.2.1 供試体概要

鉄筋のみを埋設した供試体である基準供試体、犠牲陽極材を鉄筋上部に埋め込んだ供試体、チタンメッシュを鉄筋上部に埋め込んだ外部電源方式供試体を作製したうえで、まず対象鉄筋の腐食を電食で促進させた（表 5-1）。表 5-2 に使用材料の一覧と概要を示す。コンクリートには普通ポルトランドセメントを使用し、3 種類の濃度で塩化ナトリウムを配合した（表 5-3、表 5-4）。供試体の寸法は 100mm×100mm×500mm で、内部に配置した直径 13mm×400mm の丸棒 3 本は両端部にて計測用被覆銅線と軟鉄線にて結束した。図 5-1 に示すのが無防食の基準供試体である。

表 5-1 供試体一覧

電気防食種類	通電電流密度 (mA/m ²)	Cl ⁻ (%, 対セメント質量)	供試体数
外部電源方式	4.0	0.8	3
		1.5	3
		2.0	3
	2.0	0.8	3
		1.5	3
		2.0	3
	1.0	0.8	3
		1.5	3
		2.0	3
	0.2	0.8	3
		1.5	3
		2.0	3
犠牲陽極方式	A	0.8	3
		1.5	3
		2.0	3
	C	0.8	3
		1.5	3
		2.0	3
無防食 (PLAIN)	—	0.8	3
		1.5	3
		2.0	3
事前腐食の確認用	—	0.8	5
		1.5	5
		2.0	5

表 5-2 使用材料

材 料	概 要
セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	密度 2.63g/cm ³
粗骨材	密度 2.63g/cm ³
鉄筋	磨き丸鋼 Φ13mm x 400mm (3 本で 0.05m ²)

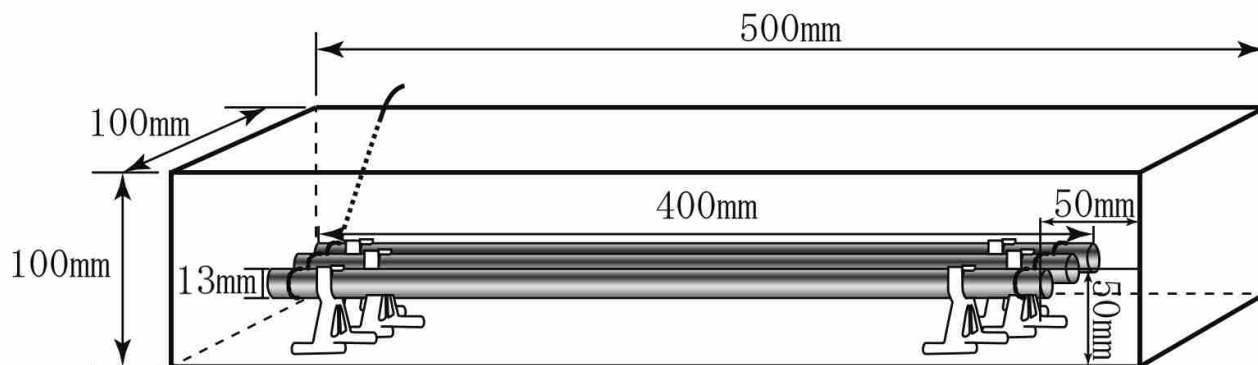


図 5-1 基準供試体（無防食）

表 5-3 コンクリート配合 (kg/m³)

W/C(%)	W	C	S	G	NaCl
60	170	283	885	906	※

表 5-4 塩化物混入量

Cl ⁻ (%) (対セメント質量)	Cl ⁻ (kg/m ³) (対コンクリート体積)	NaCl (kg/m ³) (対コンクリート体積)
0.8	2.26	3.73
1.5	4.25	7.00
2.0	5.66	9.32

5.2.2 犠牲陽極材供試体概要

犠牲陽極材供試体の概要を図 5-2 に示す。犠牲陽極材を鉄筋の端部に設置し、プラスチックバンドにて鉄筋と固定した。使用した犠牲陽極材は 2 種類（表 5-5, 図 5-3, 4）であり、犠牲陽極材のバックフィル材内には水酸化リチウムが活性剤として使用されているが、それは水酸化リチウムが持つ高アルカリ性（pH14 以上）によりコンクリート中の鉄筋を腐食させることなく亜鉛のみを酸化させ、また、亜鉛酸化物が高アルカリに溶解する特性を利用し、亜鉛酸化物が金属亜鉛表面に堆積することを防ぐためである^(5.5)。なお、犠牲陽極材より複数の結束線がでているが、片側の 1 本のみを使用した。

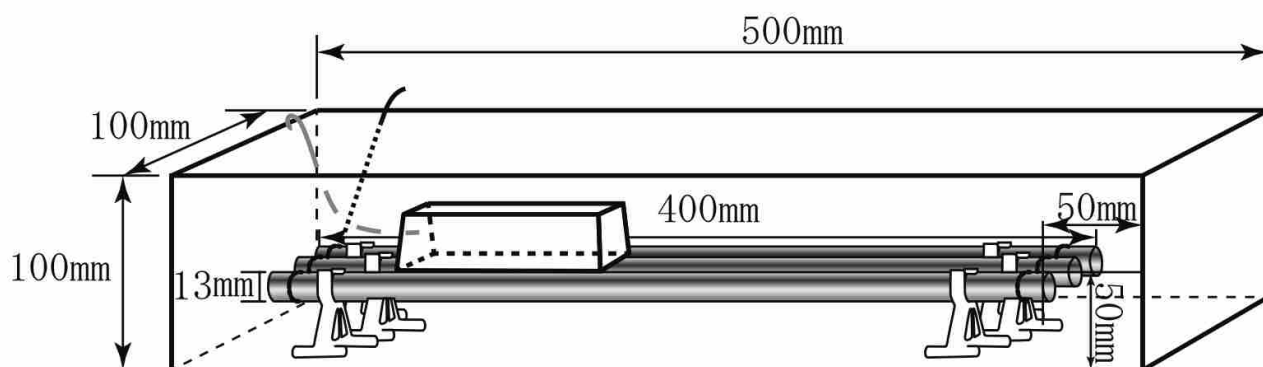


図 5-2 犠牲陽極材供試体

表 5-5 犠牲陽極材の仕様

犠牲陽極材	亜鉛量(g)	寸法(mm)
A	60	23×25×100
C	160	31×31×125

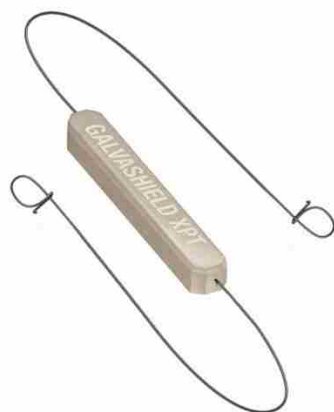


図 5-3 犠牲陽極材 A

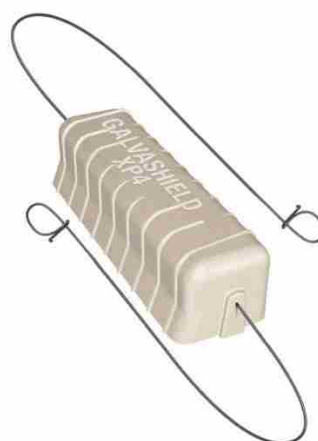


図 5-4 犠牲陽極材 C

5.2.3 外部電源供試体

犠牲陽極材による低電流下での防食効果と比較するために、チタンメッシュを陽極とした外部電源方式の電気防食供試体も併せて準備した（図 5-5）。陽極であるチタンメッシュは長さ 200mm であり、コンクリート表面より約 15mm の位置に設置し、被覆銅線を結束した。一般的に十分な防食効果が得られる防食電流量が鉄筋表面積あたりで $1\text{mA}/\text{m}^2$ 程度以上とされている^(1,2)のに対し、本研究では低電流下での防食効果を検討するために、第 4 章に引き続きそれ以下の値も含めた 0.2 , 1.0 , 2.0 , $4.0\text{mA}/\text{m}^2$ （対鉄筋全表面）の 4 種類の電流を適用した。

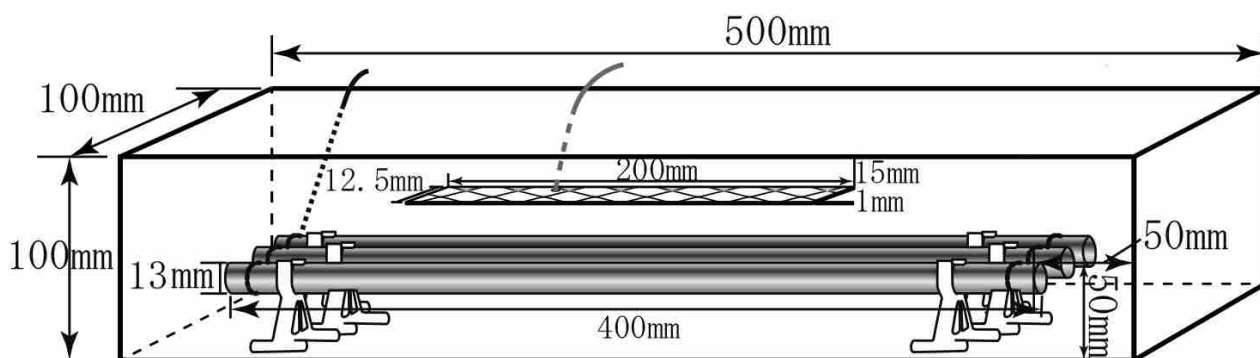


図 5-5 外部電源供試体

5.2.4 電食方法

4 週間室温で封緘養生した供試体に 9 週間電食を行い、鉄筋の腐食を促進した。電食は供試体のかぶり側表面にモルタルにてチタンメッシュを固定し、鉄筋に対して $20\text{mA}/\text{m}^2$ を通電することにより行った（図 5-6）。電食終了後に、電食程度の確認用に別途作製した供試体を解体して、腐食状況を調べた。電食により腐食した鉄筋の状況を塩分濃度別に図 5-7 に示すが、腐食は鉄筋の下部側に集中する傾向が顕著であったため、下部側のみを示す。下部側に腐食が集中した理由としては、トレーに水を溜める方法にて供試体への水分補給を行ったことが要因となったと推測する。なお塩分濃度が高い方がより腐食が進行する傾向があった。塩分濃度に関わらず、すべての供試体に $20\text{mA}/\text{m}^2$ の電流を供給し腐食を促したため、すべての供試体で同程度の鋼材腐食となる予想であったが、腐食電流が十分でなかったことが原因で腐食環境に差が生じたと思われる。塩分濃度別の通電停止 48 時間後の鉄筋電位を表 5-6 に示す。塩分量の多いものほど電位が卑となった。

次項で電気防食を行なった供試体は、同一条件ではあるが図 5-7 の供試体とは別の供試体であるので、厳密には電気防食開始前の腐食状況はここに示したものと若干異なるが、概ねこの程度の腐食が生じた状況から電気防食を開始した。



図 5-6 電食状況（モルタル中にチタンメッシュ）



a) 塩分濃度 0.8%①



b) 塩分濃度 0.8%②

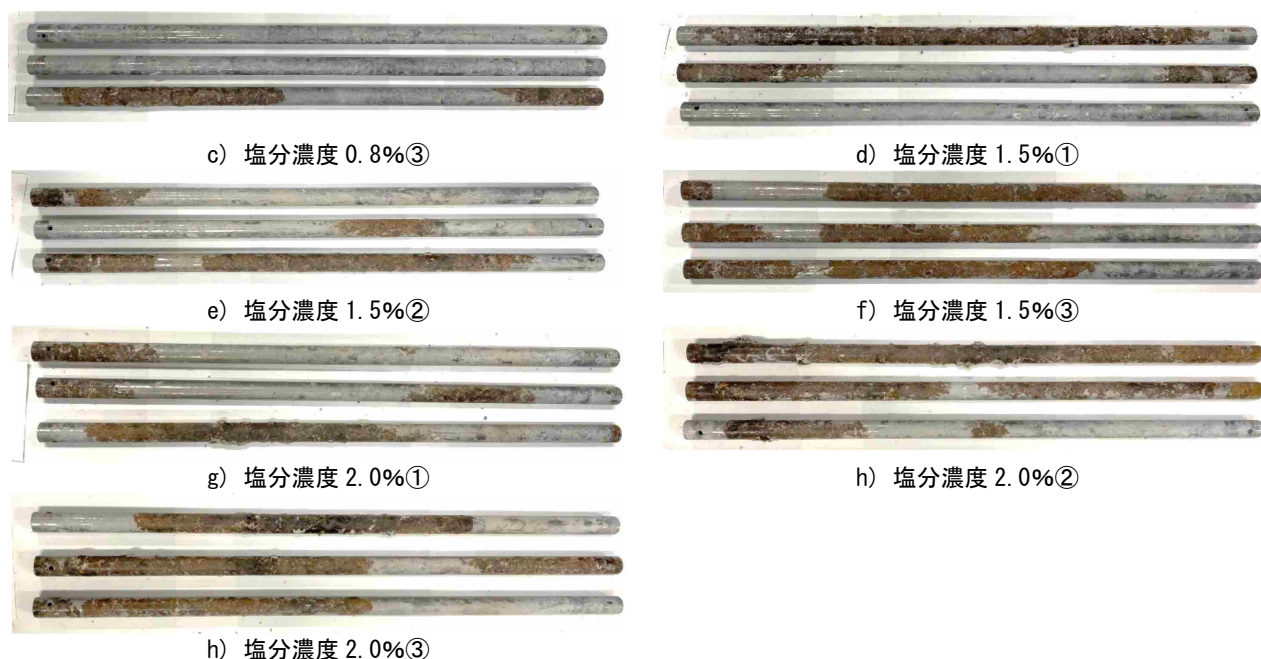


図 5-7 電食後の鉄筋腐食状況

表 5-6 電食終了 48 時間後の電位 (mV)

	Cl ⁻ =0.8%	Cl ⁻ =1.5%	Cl ⁻ =2.0%
①	-214	-339	-397
②	-226	-354	-379
③	-242	-334	-371
平均	-227	-342	-382

5.2.5 実験方法

電食終了後、直ちに犠牲陽極材供試体と外部電源供試体の防食を開始した。犠牲陽極材供試体は犠牲陽極材より供給される防食電流が外部電源方式供試体と比較し過大であるため、20k Ω の抵抗器を犠牲陽極材と鉄筋の間に接続し、防食電流を調整した。12 日間の通電が終了する度毎に、すべての供試体の鉄筋のオン電位と犠牲陽極材供試体における防食電流とを測定し、かつ、犠牲陽極材供試体の鉄筋のインスタントオフ電位、及び 48 時間後のオフ電位を測定し、復極量を求めた。外部電源方式供試体は外部電源装置に複数の供試体が直列に接続され電流供給を受けているため、インスタントオフ電位を測定することができない。そのためオン電位と 48 時間後の OFF 電位を測定し、これらの差を復極量とした。なお、電位の測定には銅－硫酸銅電極を使用した。

実験室は室温約 20℃ に管理され、供試体をそれぞれ合成樹脂製のトレー内に設置することによって、互いに絶縁した。さらにトレー内に 1 週間に一度水を供給することで人為的に乾湿を繰り返した。乾湿 1 サイクルは 1 週間程度である。供試体上面から 40 mm 内部の水分率は概ね 4% 台に保たれていたが、冬期は空調使用による乾燥による影響を受けて一時的に 2% 台となった供試体も存在した。

計測は全供試体を通電 12 日＋電流遮断 48 時間＝2 週間を 1 サイクルとし、11 サイクル終了後に全供試体のうち、各腐食要因それぞれ 1 体ずつ破壊し鉄筋の腐食状況を確認した。残りの供試体は全サイクル終了時に破壊し、同じく腐食状況を確認した。

5.2.6 実験結果

この節以降の結果はすべて同一腐食要因の供試体から得られた値の平均値である。ただし、11 サイクルまでは 3 体の平均、11 サイクル以降は 2 体の平均であり、後述する 11 サイクル後の鉄筋の状況は 3 体の内の 1 体の結果である。

(1) 犠牲陽極材供試体における防食電流

図 5-8, 9, 10 と表 5-7 に、2 週間に 1 度測定した犠牲陽極材から鉄筋への防食電流を示す。犠牲陽極材の発生する防食電流は塩分濃度に然程左右されず、変動はあるものの、平均値は約 $0.6\text{mA}/\text{m}^2$ ～ $0.8\text{mA}/\text{m}^2$ 、最大値は約 $0.8\text{mA}/\text{m}^2$ ～ $1.0\text{mA}/\text{m}^2$ であった。本実験の結果より、犠牲陽極材の発生可能な防食電流値は塩分の影響を受けないが、後述するように塩分濃度によって復極量に差が生じたことから、本実験における発生電流値は使用した犠牲陽極材の最大能力値であったと考えられる。ただし、本来の発生可能な最大電流値はここでの値以上となることは、あえて抵抗器を設置していることより明らかである。

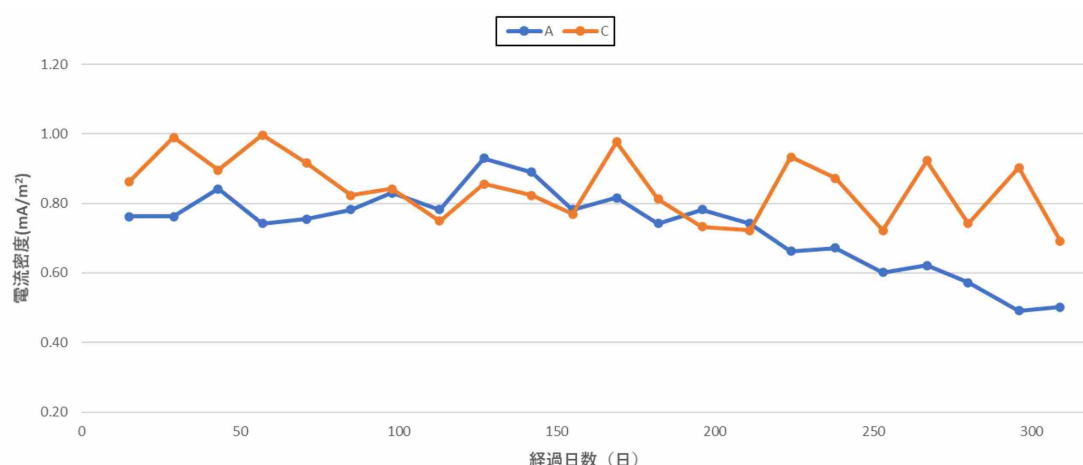


図 5-8 犠牲陽極材供試体における防食電流密度 (0.8%)

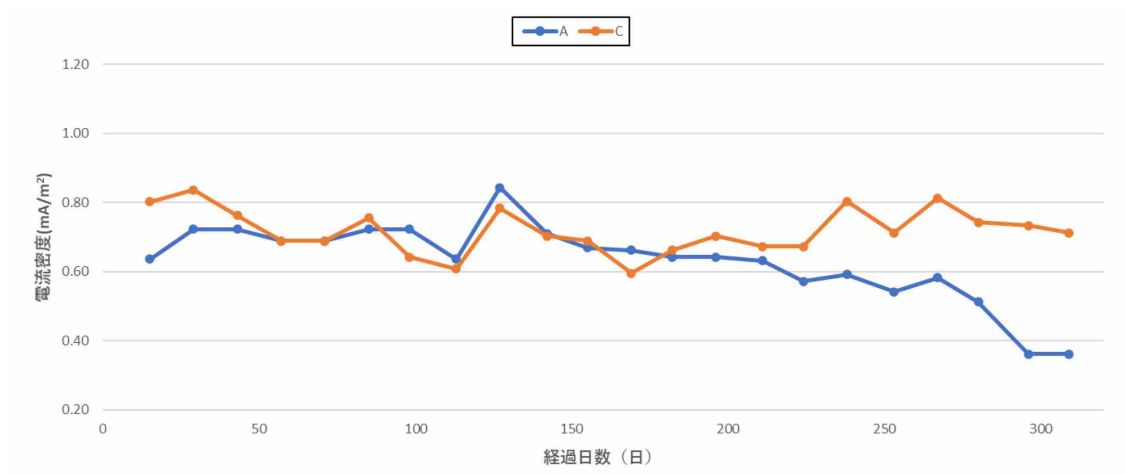


図 5-9 犠牲陽極材供試体における防食電流密度（1.5%）

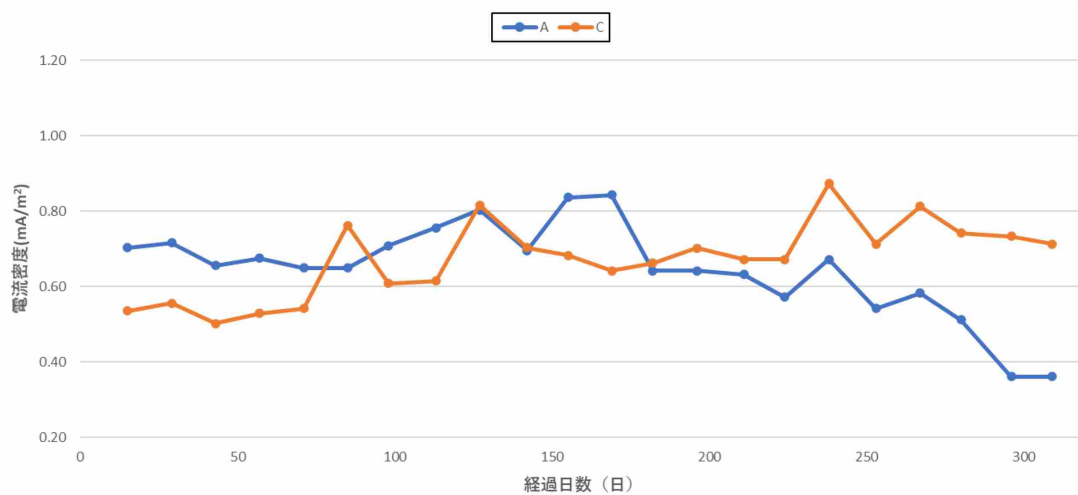


図 5-10 犠牲陽極材供試体における防食電流密度（2.0%）

表 5-7 犠牲陽極材供試体における防食電流密度

Cl ⁻ (対セメント質量)	犠牲陽極材 A 電流密度(mA/m ²)		犠牲陽極材 C 電流密度(mA/m ²)	
	発生値	平均値	発生値	平均値
0.8%	0.5-0.93	0.73	0.69-1.0	0.84
1.5%	0.36-0.84	0.63	0.6-0.84	0.72
2.0%	0.36-0.84	0.65	0.5-0.87	0.67

(2) 犠牲陽極材供試体におけるオン電位

供試体 A, C 共に時間の経過とともに緩やかに電位が貴側にシフトしている(図 5-11, 12, 13). 電位の増減と復極量との相関がみられる.

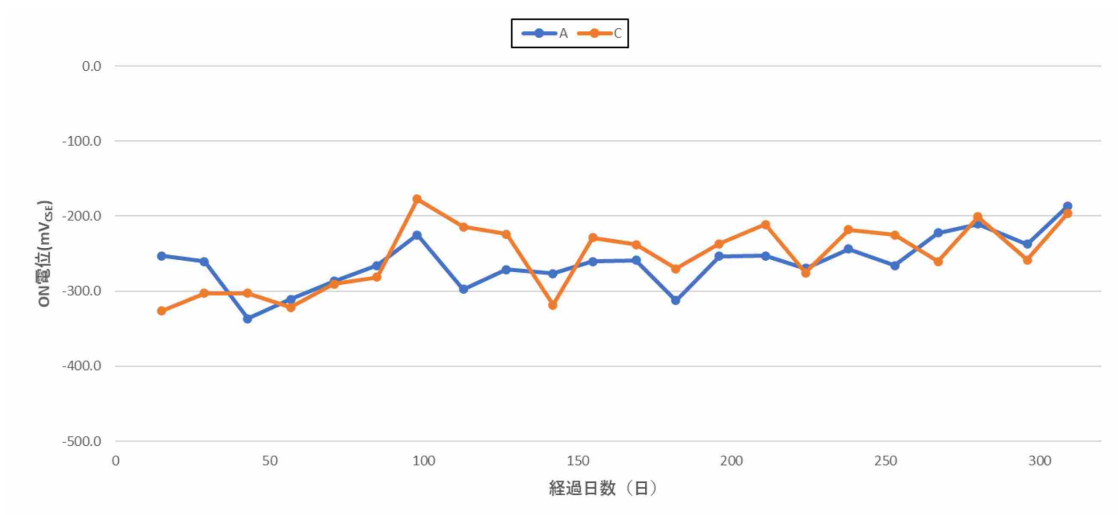


図 5-11 犠牲陽極材供試体におけるオン電位（0.8%）

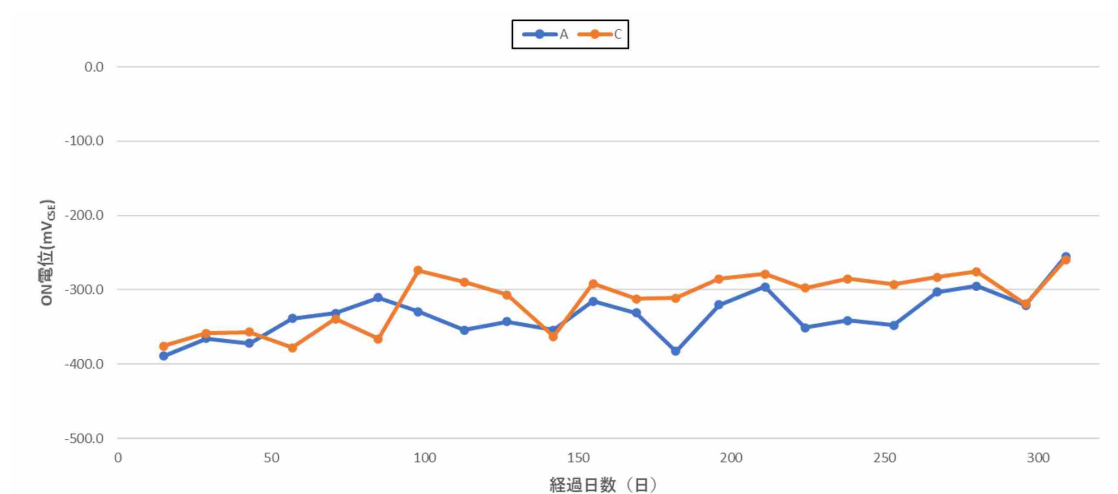


図 5-12 犠牲陽極材供試体におけるオン電位（1.5%）

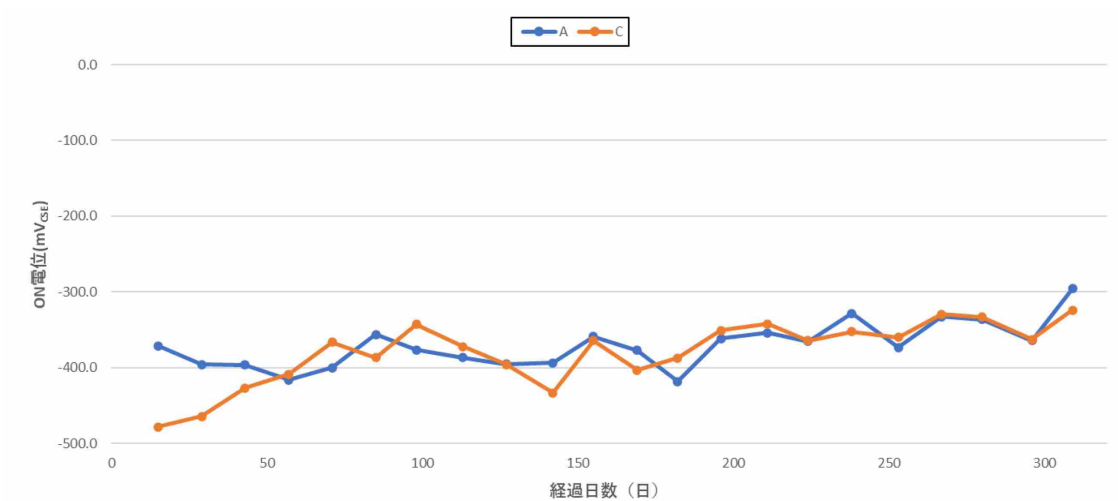


図 5-13 犠牲陽極材供試体におけるオン電位（2.0%）

(3) 外部電源供試体におけるオン電位

犠牲陽極方式の供試体と同様に電位と復極量とに相関がみられる（図 5-14. 15. 16）. 塩分濃度 2.0% の 2.0mA/m² のみ電位が貴側に位置するが、これは 3 体の供試体の内 1 体は何らかの理由により極端に貴側の値を示しているためである. それ以外の供試体では電流密度に応じた電位で推移している.

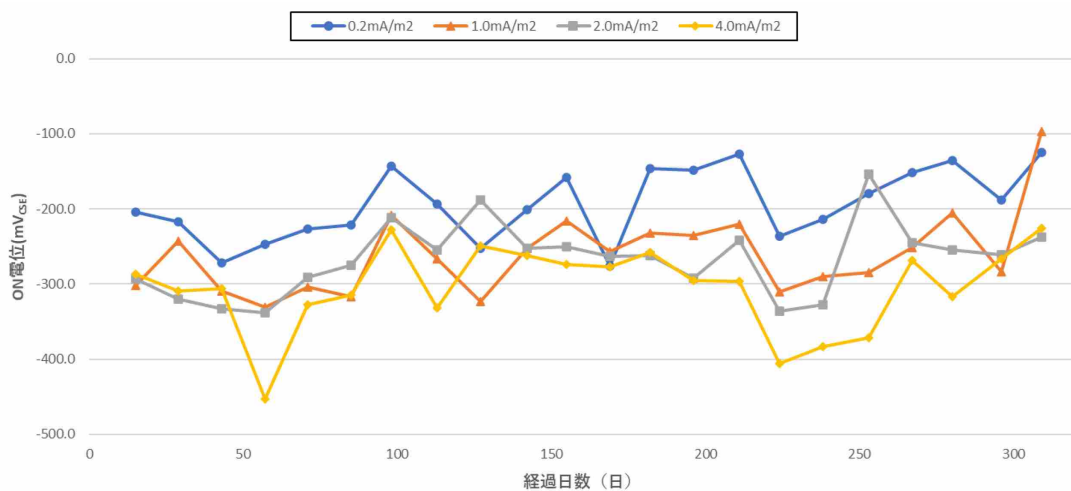


図 5-14 外部電源供試体におけるオン電位（0.8%）

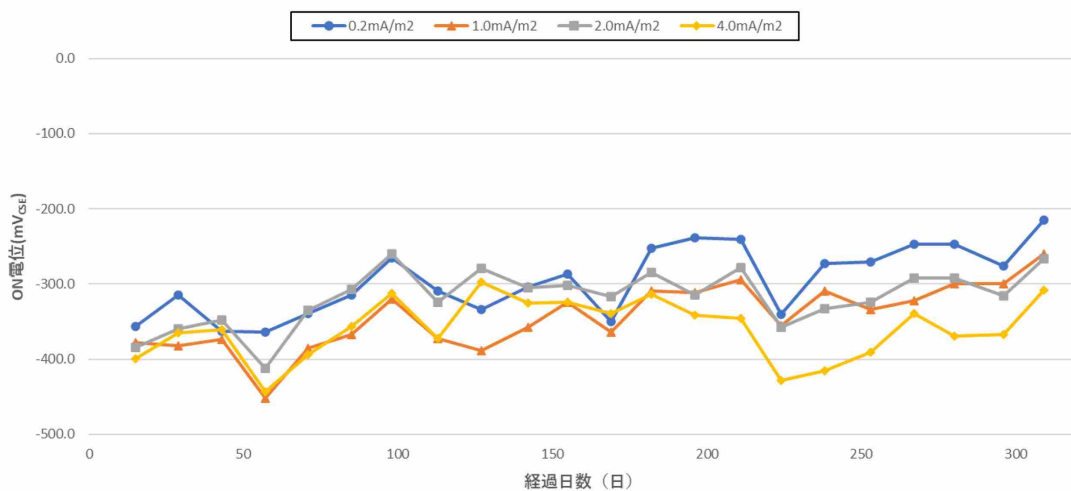


図 5-15 外部電源供試体におけるオン電位（1.5%）

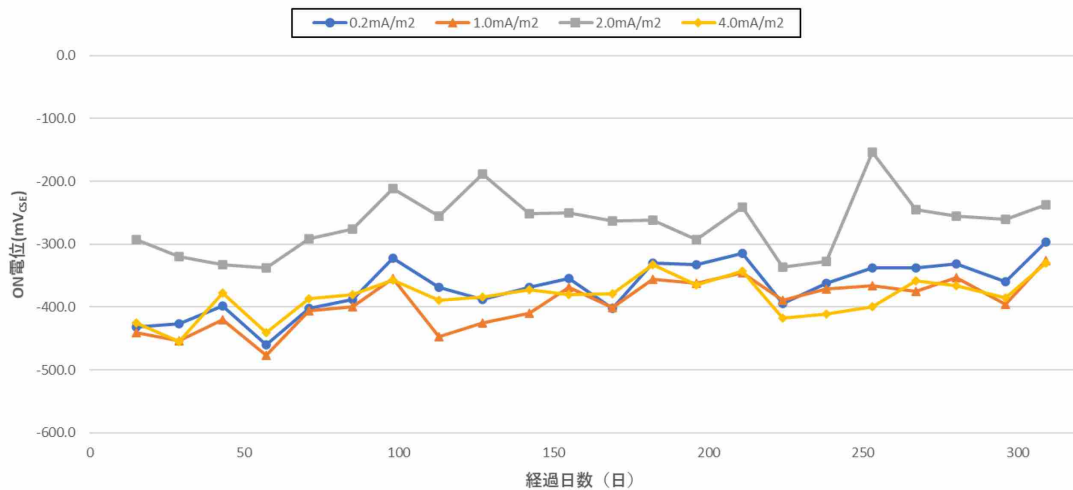


図 5-16 外部電源供試体におけるオン電位 (2.0%)

(4) 基準供試体の自然電位

無防食である基準供試体の 2 週間毎の自然電位を図 5-17 に示す。電食により初期段階で進行した腐食による卑な電位が時間の経過とともに貴側にシフトしているが、水和の進行にともない、供試体内の腐食環境が緩和されたためと考えられる。また、塩分量が高いほど電位が卑となる、という一般的な結果が得られている。塩分濃度 0.8%の供試体に関しては、自然電位が $-200\text{mV}^{(5,6)}$ よりも貴である期間が長いので、鋼材の腐食は進行していないと予想されるが、296 日目の計測では -200mV よりも卑の値を測定するなど環境の変化により腐食環境は変動している。

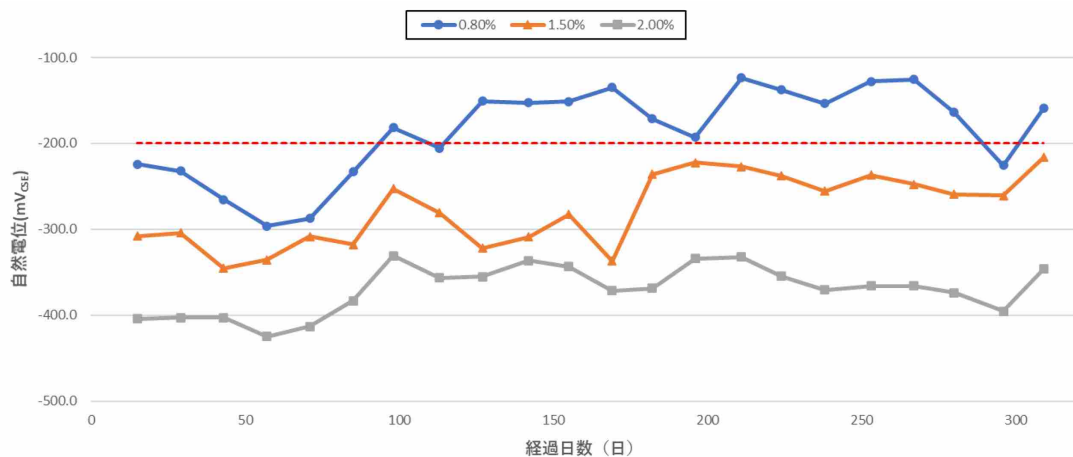


図 5-17 基準供試体の自然電位

(5) 犠牲陽極材供試体の復極量

2 週間毎に測定した鉄筋の 48 時間復極量を図 5-18, 19, 20, 表 5-8 に示す。塩分濃度 0.8%では両供試体共に平均復極量約 100mV となり、実験初期段階では 100mV シフト以下での増減を繰り返していたが、180 日を過ぎたあたりより 100mV 以上を維持するようになった。また、塩分濃度 1.5%の供試体でも平

均復極量 50mV 以上であり 250 日を境に 100mV シフトを満たし、維持した。しかしながら、塩分濃度 2.0%では平均復極量が 20mV 未満と、全サイクルを通じ復極量 100mV 以上を達成したことはなく、時間が経過しても復極量が増加傾向となることはなかった。

表 5-7 に示したように、犠牲陽極材供試体における試験期間中の電流密度は $0.36\text{mA}/\text{m}^2 \sim 1.0\text{mA}/\text{m}^2$ であり、平均電流密度も約 $0.6\text{mA}/\text{m}^2 \sim 0.8\text{mA}/\text{m}^2$ であった。すなわち、外部電源方式で用いた 4 段階の電流量のうち、下から 2 番目の $1\text{mA}/\text{m}^2$ よりも少ないぐらいのレベルであるが、復極量を比較した場合、塩分濃度 0.8%ではほぼ同じ値と変位を示し、1.5%では外部電源方式が復極量 100mV を満たした期間がなかったのに対し、犠牲陽極材供試体は最終的に 100mV に到達した。外部電源方式の復極量がインスタントオフ電位を使用していないため、IR ドロップ分実際のものよりやや大きめの値であることを考えると、犠牲陽極方式の復極量は、電流密度が同程度の外部電源方式よりもやや大きめになると言える。これはアノードの電位がほぼ一定となり、かつ、電流発生値がその材質や形状と寸法、バックフィル材によって規定される犠牲陽極方式の特徴であると言えるが、特にバックフィル材が水分を含みやすい素材で作られているためコンクリートの環境条件によっては抵抗が低く抑えられるメリットが大きな要因ではないかと推測する。

表 5-8 犠牲陽極材供試体における平均復極量

Cl ⁻ (対セメント質量)	復極量(mV _{CSE})	
	犠牲陽極材 A (平均値)	犠牲陽極材 C (平均値)
0.8%	102.8	99.2
1.5%	55.1	55.1
2.0%	19.3	18.9

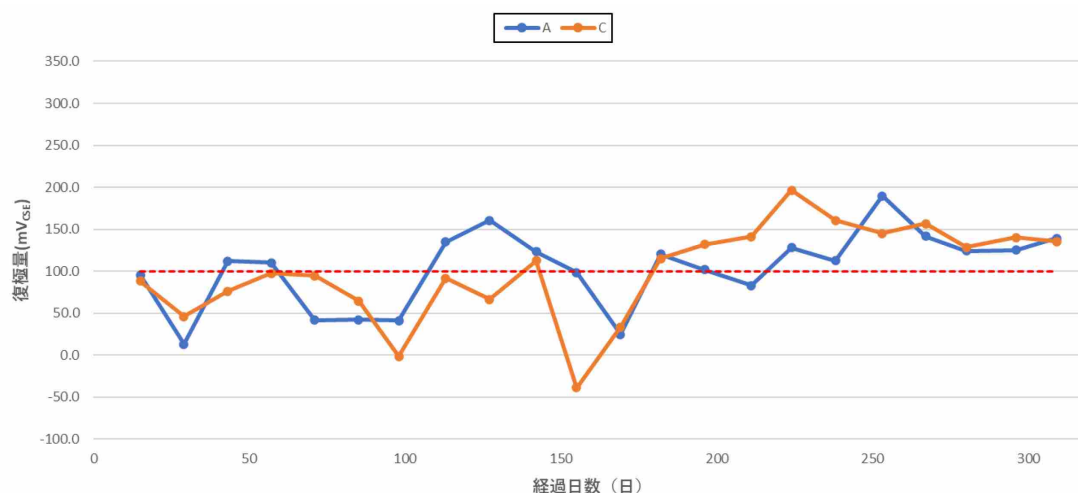


図 5-18 犠牲陽極材供試体における復極量 (0.8%)

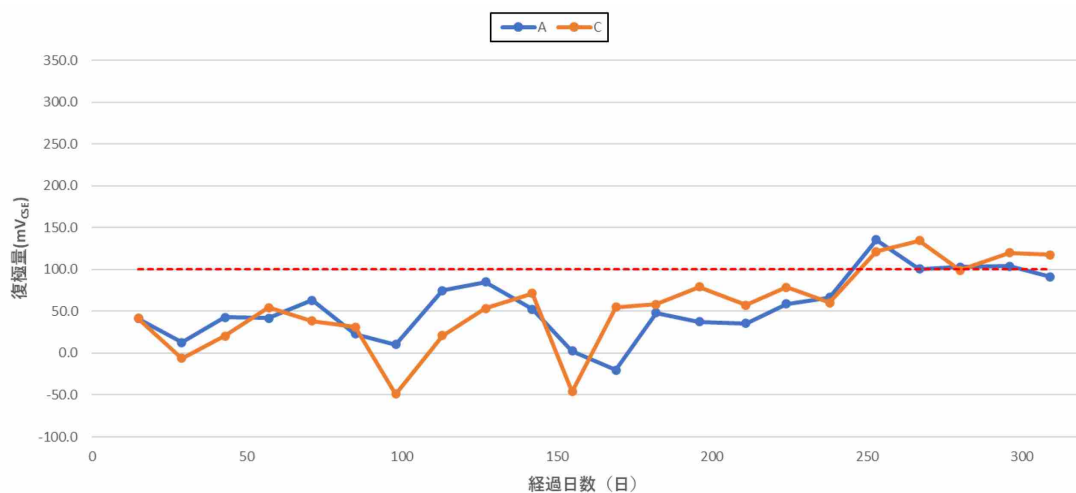


図 5-19 犠牲陽極材供試体における復極量（1.5%）

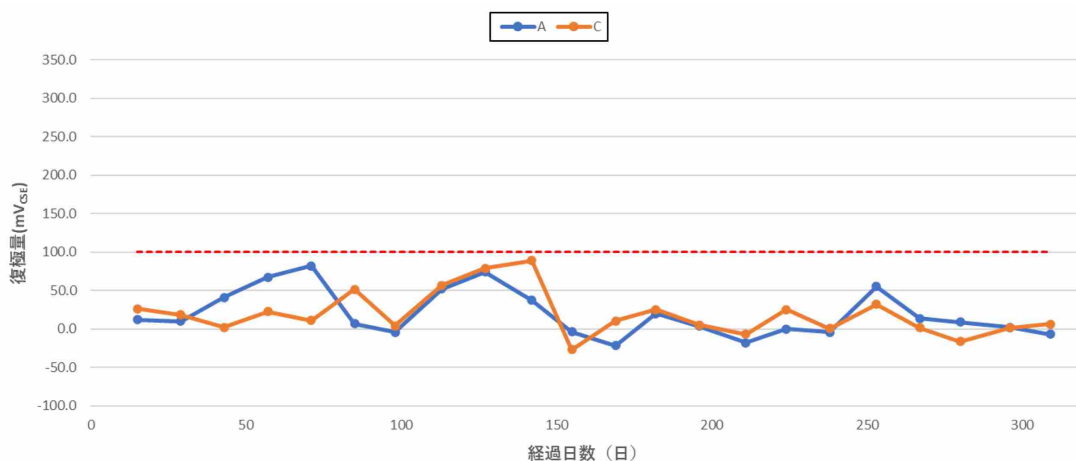


図 5-20 犠牲陽極供試体における復極量（2.0%）

(6) 外部電源供試体の復極量

2週間毎に測定した鉄筋の復極量を図 5-21, 22, 23 および表 5-9 に示す。なお、外部電源方式供試体の復極量は前述のようにかぶりコンクリートによる電圧降下分を含むため、本来の復極量よりも若干大きい値である。

塩分濃度 0.8%では 1.0mA/m^2 , 4.0mA/m^2 , 2.0mA/m^2 の供試体において、平均値で復極量 100mV を達成した。

塩分濃度の影響については、その増大にともない鉄筋の腐食が激しくなるが、復極量はすべての電流密度で減少した。塩分濃度 1.5%では 4.0mA/m^2 の供試体のみ復極量平均 100mV を達成したが、それ以下の電流密度では平均 50mV 以下となった。さらに塩分濃度 2.0%では、 2.0mA/m^2 , 4.0mA/m^2 の供試体では時折復極量 100mV を達成するサイクルが存在するが、すべての電流密度の供試体で復極量 100mV を下回った。この結果より塩分濃度 0.8%未満であれば電流密度 1.0mA/m^2 程度で防食が可能であるが 1.5%を超えると 4.0mA/m^2 以上の電流密度が必要となることが分かった。

表 5-9 外部電源方式供試体における平均復極量

Cl ⁻ (対セメント 質量)	復極量(mV _{CSE}) (平均値)				
	0.2mA/m ²	0.6~0.8mA/m ² (犠牲陽極材)	1.0mA/m ²	2.0mA/m ²	4.0mA/m ²
0.8%	40.8	101.0	105.9	124.7	198.4
1.5%	27.7	55.1	32.7	47.4	117.1
2.0%	14.4	19.1	25.6	65.7	57.9

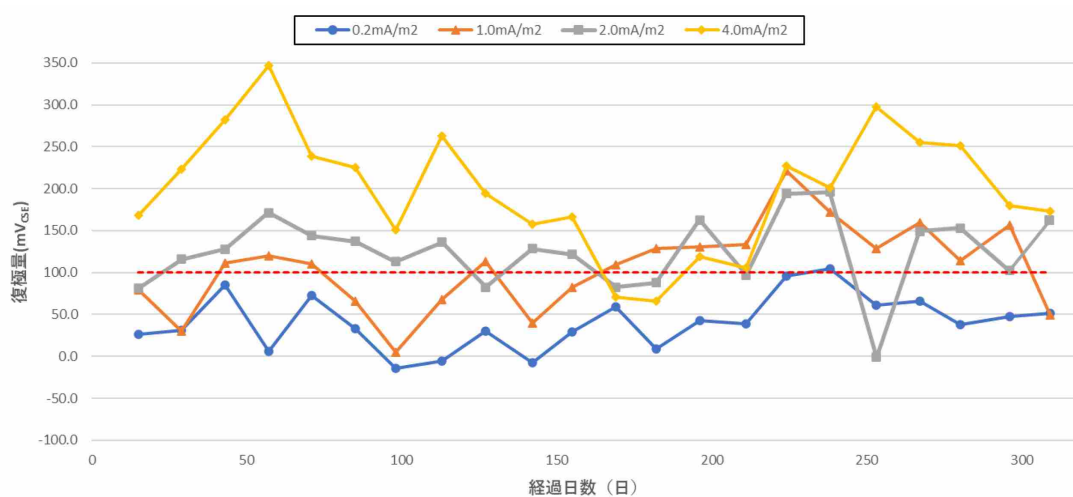


図 5-21 外部電源供試体における復極量 (0.8%)

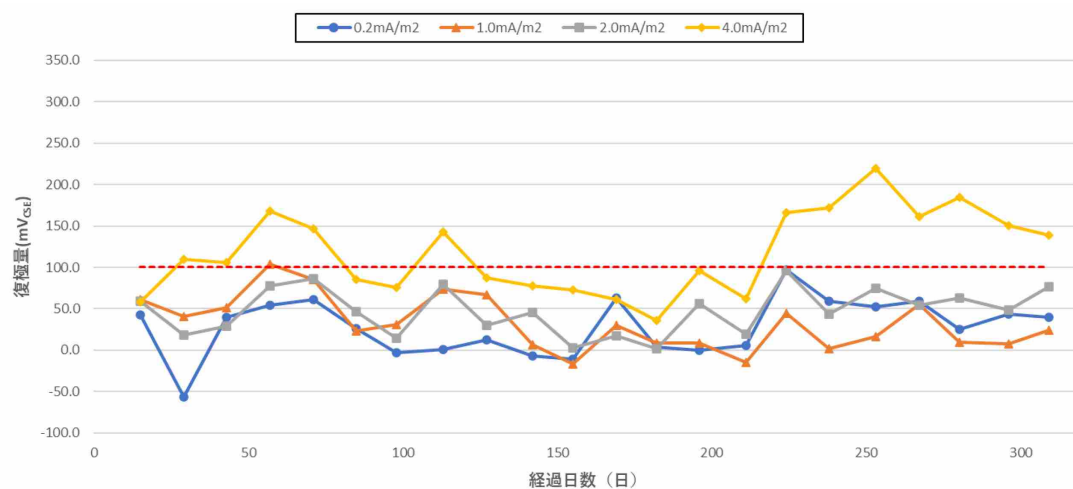


図 5-22 外部電源供試体における復極量 (1.5%)

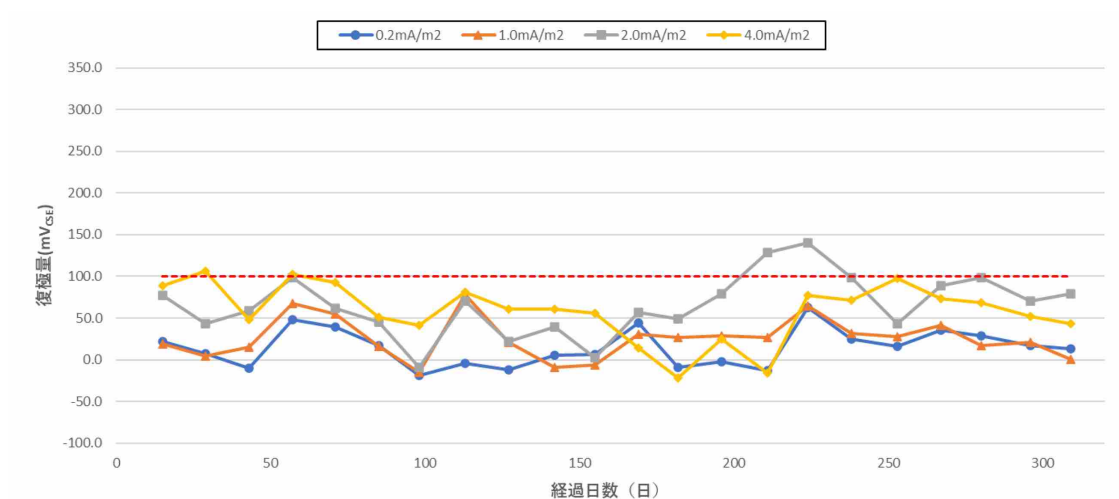


図 5-23 外部電源供試体における復極量 (2.0%)

(7) 犠牲陽極材供試体におけるオフ電位

全供試体で時間の経過とともに緩やかに貴側へシフトした(図 5-24, 25, 26). 塩分濃度 0.8%と 1.5%では復極量が 100mV を超えた時期とオフ電位が-200mV よりも貴となった時期が同期していた. その後のオフ電位の変動からも分かるように, 必要な復極量を維持することが鋼材の腐食環境の改善に重要である.

また, 塩分濃度 1.5%までは復極量 50mV を維持することでオフ電位が-250mV~-200mV^(5.6) となり, 塩分濃度等の腐食環境によるが, 復極量 50mV は腐食抑制効果が期待できる値であると言える.

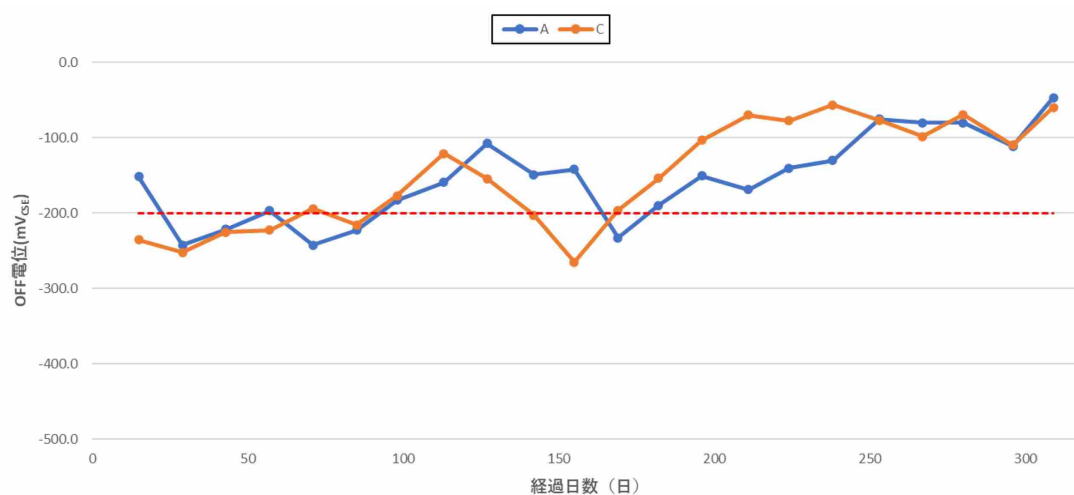


図 5-24 犠牲陽極材供試体におけるオフ電位 (0.8%)

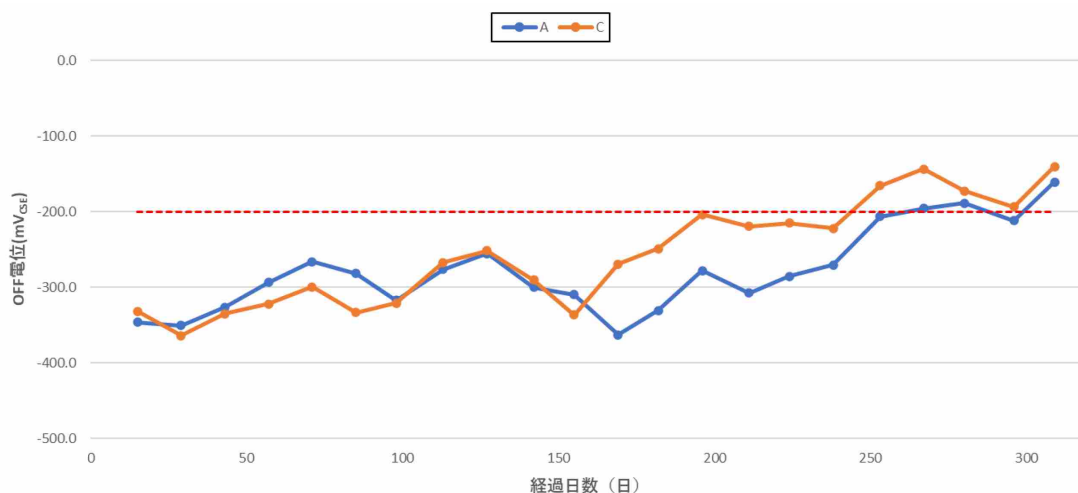


図 5-25 犠牲陽極材供試体におけるオフ電位（1.5%）

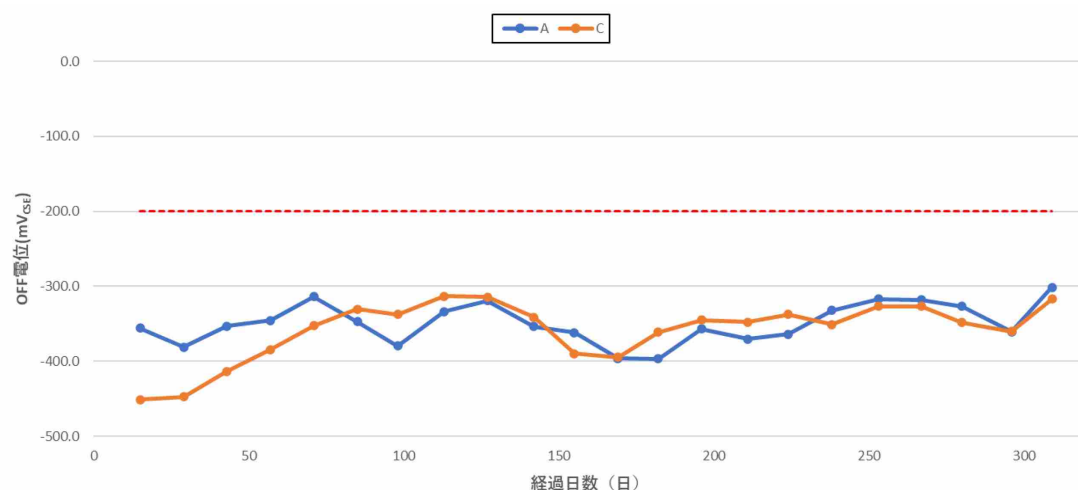


図 5-26 犠牲陽極材供試体におけるオフ電位（2.0%）

(8) 外部電源供試体におけるオフ電位

すべての供試体で時間の経過とともに緩やかに貴側へシフトした(図 5-27, 28, 29). 外部電源方式供試体では 0.8%ではすべての電流密度で最終的に-200mV よりも貴な値となった. 1.5%では時間の経過とともにすべての電流密度で-250mV 以上となった. 外部電源方式供試体では復極量 30mV 程度でも塩分濃度 1.5%で-250mV~-200mV となったため, 小さな復極量でも防食を継続することで腐食抑制効果が期待できる可能性を示した.

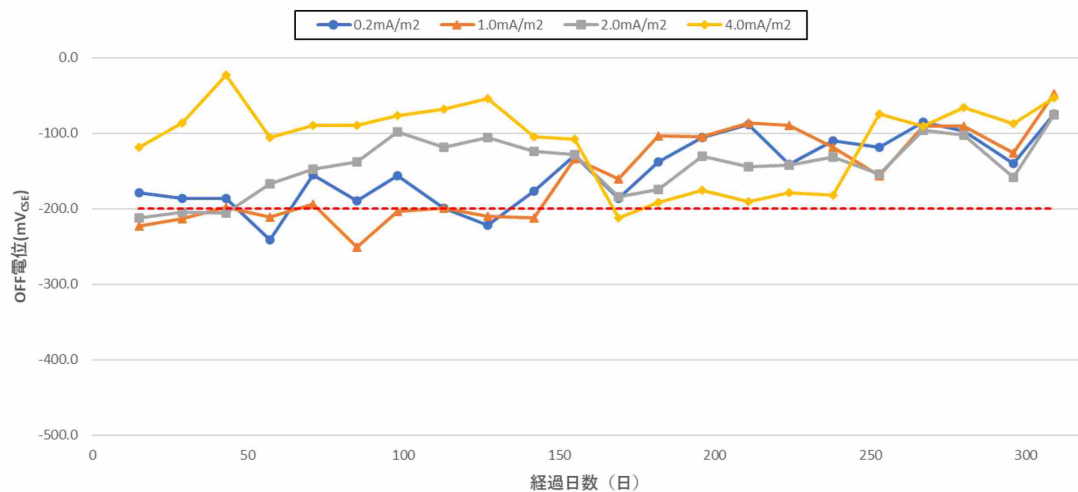


図 5-27 外部電源供試体におけるオフ電位 (0.8%)

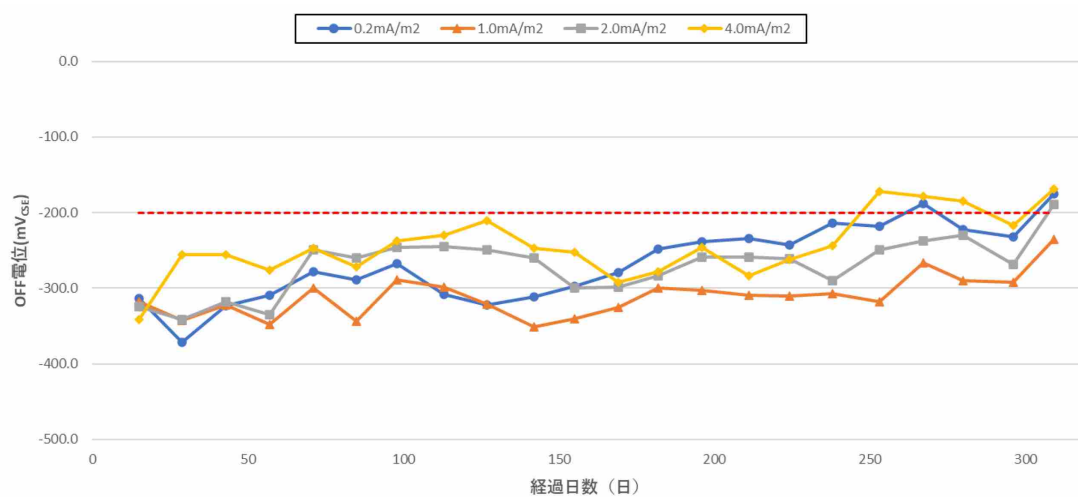


図 5-28 外部電源供試体におけるオフ電位 (1.5%)

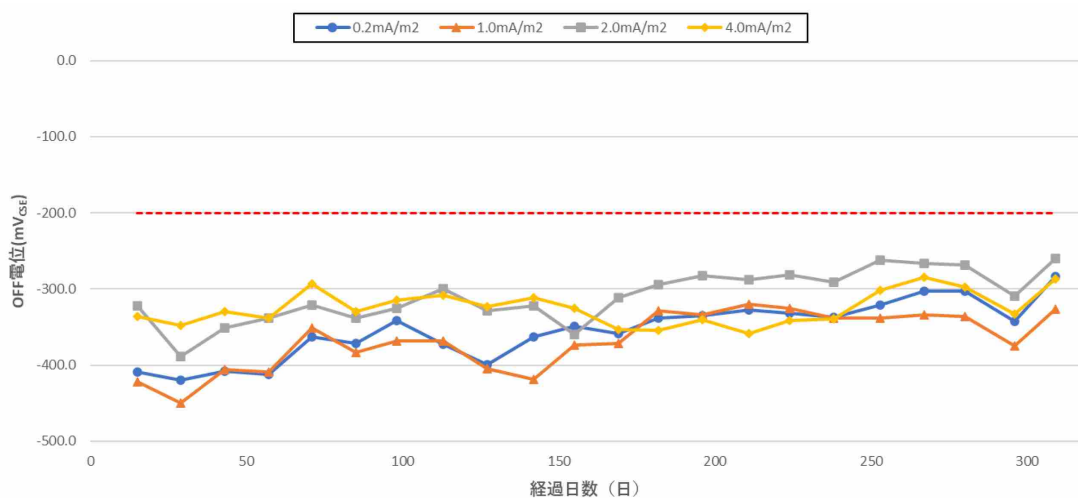


図 5-29 外部電源供試体におけるオフ電位 (2.0%)

5. 2. 7 鋼材腐食状況

(1) 腐食状況の目視確認

全サイクル終了後の鋼材腐食状況を確認した（図 5-30, 31, 32）．また，除錆後の鋼材の一部の腐食状況を示す（図 5-33）．電食にて腐食を進行させてあるため，腐食面積による判断は不可能であるが，塩分濃度で腐食状況の違いがみられ，塩分濃度 0.8%では腐食部位での均一な錆が発生したが，1.5%を境に腐食部位に孔食が発生し，2.0%では孔食がさらに深くなった．

(2) 鋼材の質量変化

鋼材の質量減少を伴う腐食の程度を評価するために，鋼材の質量減少量を算出した（表 5-10, 11, 12）．供試体内から取り出した鋼材を，温度 60℃の 10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液に 24 時間浸漬し，除錆作業を行った．腐食前および電食後の鋼材も同様に除錆作業を行い補正值を求めようと試みたが，実験期間が短く腐食量が少なかったため，除錆による健全な鋼材の減少が大きく客観的な補正を行うことができなかった．そのため，供試体間の比較は行わず，各供試体での塩分濃度による質量変化に着目し評価を行うこととした．なお，鋼材重量は供試体内 3 本の鋼材の平均値とした．これは 3 本の鋼材を結束線にて接続し供試体内に埋設していたため，3 本の鋼材中で腐食の偏りができるからである．

(3) 塩分濃度による質量変化

前述の除錆による影響を考慮し，腐食量の少ない塩分濃度 0.8%での質量変化を除外し，比較的腐食量が多く，除錆の影響を受けにくいと考えられる塩分濃度 1.5%と 2.0%の鋼材の質量差を比較することで，防食電流値の違いによる評価とした．塩分濃度 0.8%に関しては前述の復極量やオフ電位の値より鋼材腐食の進行は抑制されている可能性が高いため，塩分濃度 1.5%と 2.0%の同一供試体での質量差を計測し，他の供試体と比較することで低電流下での腐食抑制効果を検証する．なお，腐食抑制率を計算するための基準値として，基準供試体の質量変化を採用した．基準供試体の塩分濃度 2.0%から 1.5%を引いて求めた減少量（基準値）を超えた場合は抑制率を 0%とし，増加した場合は腐食抑制率を 100%と表記した．（表 5-13）．外部電源方式の 0.2mA/m² の供試体では塩化物イオン濃度 2.0%での腐食抑制率が 0%となったが，無防食の供試体に対し悪化する理由は存在しないため除錆の影響およびサンプル数が少ないことからの結果と考える．しかしながら，復極量が全供試体中最も低かったことや，オフ電位のデータより腐食の進行は容易に予想される．一方，外部電源方式の 1.0mA/m² では腐食抑制率が 100%となったが，データの偏りによるものと判断し，それ以下の抑制率であると予測する．発生電流密度の近い犠牲陽極材の腐食抑制率が 62.8%と 64.5%であったため，同程度の腐食抑制率であろうと考える．外部電源方式の 2.0mA/m² と 4.0mA/m² では復極量が平均で約 60mV であったことより，腐食抑制率が 69.8%，76.2%と比較的大きな値となった．



a) 基準供試体 塩分濃度 0.8%



aa) 基準供試体 塩分濃度 0.8%



b) 基準供試体 塩分濃度 1.5%



c) 基準供試体 塩分濃度 2.0%



bb) 基準供試体 塩分濃度 1.5%



cc) 基準供試体 塩分濃度 2.0%

図 5-30 鋼材腐食状況 (基準供試体)



a) 犠牲陽極材 A 塩分濃度 0.8%



b) 犠牲陽極材 A 塩分濃度 1.5%



c) 犠牲陽極材 A 塩分濃度 2.0%



d) 犠牲陽極材 C 塩分濃度 0.8%



e) 犠牲陽極材 C 塩分濃度 1.5%



aa) 犠牲陽極材 A 塩分濃度 0.8%



bb) 犠牲陽極材 A 塩分濃度 1.5%



cc) 犠牲陽極材 A 塩分濃度 2.0%



dd) 犠牲陽極材 C 塩分濃度 0.8%



ee) 犠牲陽極材 C 塩分濃度 1.5%



f) 犠牲陽極材 C 塩分濃度 2.0%



ff) 犠牲陽極材 C 塩分濃度 2.0%

図 5-31 鋼材腐食状況（犠牲陽極材供試体）



a) 0.2mA/m² 塩分濃度 0.8%



aa) 0.2mA/m² 塩分濃度 0.8%



b) 0.2mA/m² 塩分濃度 1.5%



bb) 0.2mA/m² 塩分濃度 1.5%



c) 0.2mA/m² 塩分濃度 2.0%



cc) 0.2mA/m² 塩分濃度 2.0%



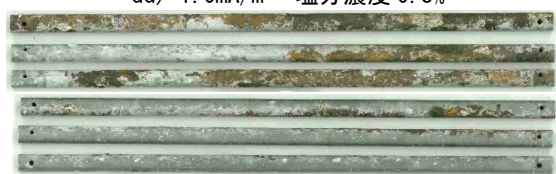
d) 1.0mA/m² 塩分濃度 0.8%



dd) 1.0mA/m² 塩分濃度 0.8%



e) 1.0mA/m² 塩分濃度 1.5%



ee) 1.0mA/m² 塩分濃度 1.5%



f) 1.0mA/m² 塩分濃度 2.0%



ff) 1.0mA/m² 塩分濃度 2.0%



g) 2.0mA/m² 塩分濃度 0.8%



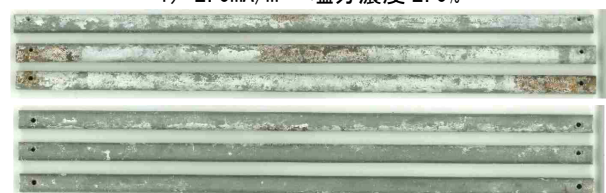
gg) 2.0mA/m² 塩分濃度 0.8%



h) 2.0mA/m² 塩分濃度 1.5%



i) 2.0mA/m² 塩分濃度 2.0%



j) 4.0mA/m² 塩分濃度 0.8%



k) 4.0mA/m² 塩分濃度 1.5%



l) 4.0mA/m² 塩分濃度 2.0%



hh) 2.0mA/m² 塩分濃度 1.5%



ii) 2.0mA/m² 塩分濃度 2.0%



jj) 4.0mA/m² 塩分濃度 0.8%



kk) 4.0mA/m² 塩分濃度 1.5%



ll) 4.0mA/m² 塩分濃度 2.0%

図 5-32 鋼材腐食状況（外部電源方式供試体）



除錆後 塩分濃度 1.5%



除錆後（拡大） 塩分濃度 1.5%



除錆後 塩分濃度 2.0%



除錆後（拡大） 塩分濃度 2.0%

図 5-33 除錆後腐食状況

表 5-10 除錆後鋼材質量 (0.8%)

塩分濃度 (%)	供試体	写真	鋼材質量 (g)	1本あたり (g)	平均 (g)
0.8	基準供試体	a	411.096	410.816	410.792
			410.652		
			410.701		
		aa	410.849	410.768	
			410.747		
			410.709		
	0.2mA/m ²	a	409.929	410.225	410.701
			410.714		
			410.032		
		aa	411.144	411.176	
			411.063		
			411.322		
	1.0mA/m ²	d	410.288	410.602	410.592
			410.802		
			410.715		
		dd	410.537	410.582	
			410.758		
			410.452		
	2.0mA/m ²	g	410.509	410.757	410.765
			411.106		
			410.656		
		gg	410.011	410.773	
			411.378		
			410.931		
	4.0mA/m ²	j	411.578	411.414	411.334
			411.334		
			411.329		
		jj	411.380	411.255	
			411.022		
			411.362		
	犠牲陽極材 A	a	410.899	410.829	411.020
			410.630		
			410.959		
		aa	411.646	411.211	
			410.882		
			411.104		
	犠牲陽極材 C	d	411.243	411.006	410.899
			410.671		
			411.105		
		dd	411.046	410.791	
			410.509		
			410.819		

表 5-11 除錆後鋼材質量 (1.5%)

塩分濃度 (%)	供試体	写真	鋼材質量 (g)	1本あたり (g)	平均 (g)
1.5	基準供試体	b	410.128		410.521
			410.012	平均	
			409.533	409.891	
		bb	411.531		
			410.721	平均	
			411.203	411.152	
	0.2mA/m ²	b	410.133		410.618
			411.654	平均	
			410.393	410.727	
		bb	410.659		
			410.927	平均	
			409.943	410.510	
	1.0mA/m ²	e	410.918		409.871
			409.007	平均	
			409.847	409.924	
		ee	410.013		
			409.378	平均	
			410.063	409.818	
	2.0mA/m ²	h	408.408		409.634
			410.781	平均	
			410.324	409.838	
		hh	409.570		
			409.431	平均	
			409.289	409.430	
	4.0mA/m ²	k	410.242		410.082
			409.943	平均	
			408.989	409.725	
		kk	411.408		
			408.414	平均	
			411.495	410.439	
	犠牲陽極材 A	b	409.773		410.097
			408.460	平均	
			409.319	409.184	
		bb	410.676		
			411.675	平均	
			410.678	411.010	
	犠牲陽極材 C	e	410.433		409.712
			409.913	平均	
			410.095	410.147	
		ee	408.426		
			409.786	平均	
			409.621	409.278	

表 5-12 除錆後鋼材質量 (2.0%)

塩分濃度 (%)	供試体	写真	鋼材質量 (g)	1本あたり (g)	平均 (g)
2.0	基準供試体	c	409.837		409.063
			407.776	平均	
			408.996	408.870	
		cc	408.843		
			408.475	平均	
			410.448	409.255	
	0.2mA/m ²	c	409.508		408.649
			408.156	平均	
			409.058	408.907	
		cc	408.292		
			407.742	平均	
			409.139	408.391	
	1.0mA/m ²	f	410.304		410.355
			411.363	平均	
			410.221	410.629	
		ff	410.034		
			409.011	平均	
			411.199	410.081	
	2.0mA/m ²	i	407.427		409.194
			409.800	平均	
			409.130	408.786	
		ii	408.702		
			410.802	平均	
			409.303	409.602	
	4.0mA/m ²	I	408.273		409.735
			410.379	平均	
			410.222	409.625	
		II	409.472		
			410.018	平均	
			410.048	409.846	
	犠牲陽極材 A	c	409.583		409.555
			410.641	平均	
			409.850	410.025	
		cc	408.498		
			409.131	平均	
			409.624	409.084	
	犠牲陽極材 C	f	410.096		409.194
			408.156	平均	
			408.758	409.003	
		ff	409.792		
			408.919	平均	
			409.442	409.384	

表 5-13 塩分濃度による鋼材質量変化と腐食抑制率

	塩化物イオン濃度		質量変化 (g)	腐食抑制率 (%)
	1.5%	2.0%		
基準供試体	410.521	409.063	-1.458	(基準値)
0.2mA/m ²	410.618	408.649	-1.969	0
1.0mA/m ²	409.871	410.355	0.484	100
2.0mA/m ²	409.634	409.194	-0.440	69.8%
4.0mA/m ²	410.082	409.735	-0.347	76.2%
犠牲陽極材 A	410.097	409.555	-0.542	62.8%
犠牲陽極材 C	409.712	409.194	-0.518	64.5%

5.3 防食に必要な電流の考察

第4章でのマクロセル腐食に対する検証と同様に犠牲陽極材が発生する防食電流は塩分濃度の影響を受けにくく、近似の防食電流を発生させることが確認された。つまり、塩分濃度が高くなった場合は鋼材腐食を抑制するために必要な防食電流密度が増えるが、犠牲陽極材の数量を増やすことで防食が可能であるということである。また、第4章で明らかとなった傾向と同様に、外部電源方式と比較して同等の電流密度であった場合、犠牲陽極方式は得られる復極量が大きい。さらに、全体的な傾向として復極量が100mVに満たない場合であったとしても継続的な防食により腐食環境は改善され、腐食抑制効果を得られている。具体的には、復極量100mVを満たしている場合には即時に十分な腐食抑制効果が得られるとすると、50mVで継続的な防食を行うことである程度の腐食抑制効果を得ることができ、その腐食抑制効果の累積により鋼材の自然電位が貴側にシフトする。これにより、最終的には鋼材電位が腐食しない領域に達することが予想される。

本章にて得られた犠牲陽極材供試体の防食電流密度と復極量および外部電源方式の復極量より、進行中の鋼材腐食に対する防食電流別復極量（表5-14）を作成した。この表より防食電流密度と塩分濃度から、鋼材が得られる復極量を設計することができる。

表 5-14 進行中の腐食に対する防食電流別復極量

電流密度 (mA/m ²)	塩分濃度 0.8%	塩分濃度 1.5%	塩分濃度 2.0%
0.2	40mV	-	-
1.0	100mV	-	-
2.0	100mV	50mV	60mV
4.0	100mV	100mV	60mV
※0.6～0.8	100mV	50mV	-

※犠牲陽極材供試体データ

5.4 本章の結論

本章では、コンクリート中で既に腐食が発生した鉄筋に対する腐食進行の抑制効果を明らかにすることを目的として、犠牲陽極方式の電気防食工法について、外部電源方式と比較しながら検討し、 Cl^- 濃度 2.0%（対セメント比）までの条件で実験を行った。

以下に、本章での研究の範囲から得られた結果をまとめる。

- (1) 犠牲陽極材が発生する防食電流は塩分濃度の影響を受けにくく、塩分濃度が異なっている場合でも、同様の防食電流を発生させる。
- (2) 防食電流密度と復極量の関係性を見る限り、同等の電流密度であった場合、犠牲陽極方式は外部電源方式と比較すると、やや大きな復極量を得た。
- (3) 復極量から判断すると塩分濃度 0.8% の場合は犠牲陽極材の平均防食電流密度 $0.6\sim 0.8\text{mA}/\text{m}^2$ 程度で、外部電源方式では電流密度 $1.0\text{mA}/\text{m}^2$ にて 100mV シフトを得ることができていた。塩分濃度 1.5% では犠牲陽極材の平均電流密度が約 $0.6\sim 0.7\text{mA}/\text{m}^2$ のとき平均復極量は約 50mV であったが、時間の経過とともに復極量 100mV を得た。それに対し外部電源方式では $1.0\text{mA}/\text{m}^2$ では平均復極量が約 30mV、 $2.0\text{mA}/\text{m}^2$ で約 50mV にとどまり、100mV に達することはなかった。この結果より、犠牲陽極材と外部電源方式では若干必要な防食電流に違いがあることが明らかとなった。
- (4) 鉄筋の質量を検証した結果、犠牲陽極材供試体の場合は塩分濃度 2.0% の供試体に対し、平均電流密度 $0.66\text{mA}/\text{m}^2$ 、平均復極量約 19mV にて 60% 以上の腐食抑制率となった。外部電源方式供試体では電流密度 $1.0\text{mA}/\text{m}^2$ 以上で腐食抑制率約 70% 以上となった。この結果からも腐食抑制率は塩分濃度や防食電流、さらには電気防食の方式によって異なった防食効果が得られると考えられる。

【参考文献】

- (5.1) EN12696:2000 Cathodic protection of steel in concrete
- (5.2) 土木学会：電気化学的防食工法指針,コンクリートライブラリー157, P52
- (5.3) Pietro Pedeferra: Cathodic protection and cathodic prevention, Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 5, pp. 391-402, 1996.
- (5.4) https://www.vector-corrosion.com/uploads/content/1050-TDS-2020Jun%20Galvashield%20XP%20Series.pdf?force_download (2021 年 4 月 22 日閲覧)
- (5.5) George Sergi, Gamini Seneviratne; Improved Design Considerations for Steel Reinforcement Corrosion Control with Galvanic Anodes Following Performance Evaluation from Analysis of Site Data, submitted in Structural Faults and Repair 2022
- (5.6) ASTM C876 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete

第 6 章 結論

6.1 本研究による結論

インフラ構造物の効率的な維持修繕という問題に対する答えの一つとしてコンクリート構造物に対する埋設型犠牲陽極材の適用があり，その低電流下での防食効果を検証した結果をまとめる．

第 1 章「序論」では本研究の背景，目的と本論文の構成について述べた．

第 2 章「既往の研究と鋼材腐食に対する電気化学的工法」では埋設型犠牲陽極材の防食メカニズムとその選定について検証し，特にバックフィル材に含まれる成分が犠牲陽極材の性能と耐久性に重要であることが明らかとなった．

第 3 章「埋設型犠牲陽極材の評価方法の検討」では実橋梁にて行われた犠牲陽極材の試験施工モニタリングデータと屋内実験室にて行われた基礎的実験から検証すべき電流密度を求めた．試験施工の結果からは，復極量が 100mV に満たない場合でも鋼材の自然電位が貴側にシフトすることが確認された．また，屋内実験の結果より，第 4 章以降で設定すべき防食電流密度を予測することができ，その後の屋外暴露実験の結果より，腐食環境の変化に応じ犠牲陽極材が防食電流を増減させることが確認された．

第 4 章「犠牲陽極方式におけるマクロセル腐食抑制効果」では犠牲陽極材の防食電流について新たな知見が得られた．また，一般的な電気防食基準に満たない場合の腐食抑制効果も明らかとなった．以下に結論をまとめる．

- (1) 犠牲陽極の防食能力内であった場合には，塩分濃度等の鋼材の腐食環境によらず，近似の防食電流を発生させることができる．
- (2) 犠牲陽極材を使用した場合，電流密度 $1.0\text{mA}/\text{m}^2$ や復極量 100mV といった外部電源方式に対する一般的な防食基準を満たさない供試体でも，塩化物イオン濃度が低い場合には（本実験では 0.8%）復極量 100mV を達成することができた．また，防食基準である復極量 100mV シフトを満たしていない供試体においても十分な防食効果が確認され，腐食量を大幅に低減できていた．
- (3) 犠牲陽極材を使用した場合，塩化物イオン濃度 1.5% や 2.0% の場合でも電流密度 $1.0\text{mA}/\text{m}^2 \sim 2.0\text{mA}/\text{m}^2$ で十分な腐食抑制効果を得ることができたが，外部電源方式の場合は電流密度 $2.0\text{mA}/\text{m}^2$ では十分な腐食抑制効果は得られず，電流密度 $4.0\text{mA}/\text{m}^2$ でも塩化物イオン濃度 2.0% で腐食が発生した．
- (4) 今回の実験の範囲からは，同等の防食電流密度であった場合，犠牲陽極材を使用した場合の方が外部電源方式と比較して優れた防食効果を示した．
- (5) 海外でのマクロセル腐食(Corrosion Prevention)に対する防食電流値の規格では $0.2\text{mA}/\text{m}^2 \sim 2.0\text{mA}/\text{m}^2$ となっているが，本実験より $0.2\text{mA}/\text{m}^2$ では不十分である可能性がみられた． $0.4\text{mA}/\text{m}^2$ であれば低塩化物イオン濃度であれば十分な防食効果が得られるものと考えられる．

第 5 章「犠牲陽極方式における進行中の腐食抑制効果」では進行中の鋼材腐食に対する防食効果の検証を行った。前章のマクロセル腐食抑制と比較してより多くの防食電流を必要とすることを確認した。以下に結論をまとめる。

- (1) 犠牲陽極材が発生する防食電流は塩分濃度の影響を受けにくく、塩分濃度が異なっても、同様の防食電流を発生させる。
- (2) 防食電流密度と復極量の関係性を見る限り、同等の電流密度であった場合、犠牲陽極方式は外部電源方式と比較すると、やや大きな復極量を得た。
- (3) 復極量から判断すると塩分濃度 0.8% の場合は犠牲陽極材の平均防食電流密度 $0.7\sim0.8\text{mA/m}^2$ 程度で、外部電源方式では電流密度 1.0mA/m^2 にて 100mV シフトを得ることができていた。塩分濃度 1.5% では犠牲陽極材の平均電流密度が約 $0.6\sim0.7\text{mA/m}^2$ のとき平均復極量は約 50mV であったが、時間の経過とともに復極量 100mV を得た。それに対し外部電源方式では 1.0mA/m^2 では平均復極量が約 30mV にとどまり、 2.0mA/m^2 で約 50mV であったが 100mV に達することはなかった。この結果より、犠牲陽極材と外部電源方式では同等の復極量を得るために必要な防食電流に若干の違いがあることが明らかとなった。
- (4) 鉄筋の質を検証した結果、犠牲陽極材供試体の場合は塩分濃度 2.0% の供試体に対し、平均電流密度 0.66mA/m^2 、平均復極量約 19mV にて 60% 以上の腐食抑制率となった。外部電源方式供試体では電流密度 1.0mA/m^2 以上で腐食抑制率約 70% 以上となった。この結果からも腐食抑制率は塩分濃度や防食電流、さらには電気防食の方式によって異なった防食効果が得られると考えられる。

6.2 埋設型犠牲陽極方式適用基準の提案

本研究より得られた結果より、埋設型犠牲陽極方式の適用基準を表 6-3 のように提案する。Corrosion Prevention に必要とされている電流密度は $0.2\text{mA/m}^2\sim2.0\text{mA/m}^2$ ^(6.1) であるが、本研究結果より最低電流密度は 0.4mA/m^2 に引き上げることが望ましい。また、進行中の腐食に対する Corrosion Control には規格が存在せず、一般的な外部電源方式では 1mA/m^2 以上とされているが、犠牲陽極方式では 0.6mA/m^2 から効果が確認できた。但し、記載の上限値 5.0mA/m^2 は、本研究での上限値であったため記載したが、 5.0mA/m^2 では不十分である可能性が高い。Cathodic Protection に関しては、本研究の目的外であるため、既存の基準^(6.1,2)を採用した。

表 6-3 犠牲陽極材適用基準

腐食状況	電流密度
Corrosion Prevention マクロセル腐食	$0.4\text{mA/m}^2\sim2.0\text{mA/m}^2$
Corrosion Control 腐食抑制	$0.6\text{mA/m}^2\sim5.0\text{mA/m}^2$
Cathodic Protection 電気防食	$1.0\text{mA/m}^2\sim20\text{mA/m}^2$

6.3 RC 構造物に対する犠牲陽極方式適用の有用性

国内の複数の既往の研究にて懸念されていた塩分濃度が高い場合の防食性能および耐用年数であるが、本研究にて明らかとなった事実に基づいて設計を行うことで RC 構造物に対する適用が有用であることとなる。既往の研究により懸念されていた、塩分濃度が高い場合の適用に対しては、犠牲陽極材が発生する防食電流は塩分濃度の影響を然程受けないこと、必要な防食電流は設置数量によって対応可能であることにより解消される。また、耐用年数に関しては、既に実績が 20 年以上あることに加え、犠牲陽極材に使用されているバックフィル材の成分による効果が明らかとなったことで解消された。本研究より得られたデータをもとに作成した数量計算表（表 6-4）と、参考として実際の RC 構造物に適用されている犠牲陽極材 C の設計数量計算表（表 6-5）を示す。なお、本研究より得られたデータに基づいて作成した犠牲陽極材設置間隔表であるが、犠牲陽極材販売元が提供する設置間隔表とある程度整合性が見られた。但し、実験データのない高鉄筋比率の設置間隔には若干の差異が見られた。

表 6-4 では塩化物イオン濃度別に、また、鉄筋比率（鉄筋表面積/コンクリート表面積）毎に設置間隔（設置数量）を計算した。算出方法を以下に示す。

1. 犠牲陽極材一つが発生する防食電流を 0.5mA と設定した。これは、第 2 章より、防食電流の減衰率に電流値の大小が関連しているからである。
2. Corrosion Prevention（マクロセル腐食）に必要な防食電流値を、第 4 章より、 $0.4\text{mA}/\text{m}^2$ （塩化物イオン濃度 0.8%）、 $1.0\text{mA}/\text{m}^2$ （塩化物イオン濃度 1.5%）と設定した。
3. 犠牲陽極材の半減期を 10 年とし、設定耐用年数に必要な初期防食電流値を計算した。半減期の期間は第 2 章より、保守的な数値を採用した。
4. 半減期を考慮し算出された初期防食電流値に各鉄筋比率枠の最大値を乗じ、犠牲陽極材一つあたりの発生防食電流値 0.5mA で除することにより必要な設置数量を算出した。なお、犠牲陽極材の最大設置間隔は 750mm と製造元より指定があるため、 m^2 あたりの設置個数 3 個以下はすべて設置間隔 750 mm となる。

表 6-4 提案する犠牲陽極材設置間隔表（マクロセル腐食）

	塩化物イオン量(kg/m^3)				塩化物イオン量(kg/m^3)			
	<2.4				<4.5			
設定防食電流値	$0.4\text{mA}/\text{m}^2$				$1.0\text{mA}/\text{m}^2$			
耐用年数	25年		35年		25年		35年	
必要初期電流値	$1.6\text{mA}/\text{m}^2$		$3.2\text{mA}/\text{m}^2$		$4.0\text{mA}/\text{m}^2$		$8\text{mA}/\text{m}^2$	
鉄筋比率	必要数量	設置間隔	必要数量	設置間隔	必要数量	設置間隔	必要数量	設置間隔
	(個/ m^2)	(mm)	(個/ m^2)	(mm)	(個/ m^2)	(mm)	(個/ m^2)	(mm)
<0.3	0.96	750	1.92	750	2.4	750	4.8	650
0.31-0.6	1.92	750	3.84	700	4.8	650	9.6	500
0.61-0.9	2.88	750	5.76	600	7.2	550	14.4	300
0.91-1.2	3.84	700	7.68	550	9.6	500	19.2	250
1.21-1.5	4.8	650	9.6	500	12	400	24	200
1.51-1.8	5.76	600	11.52	400	14.4	300	28.8	175
1.81-2.1	6.72	550	13.44	300	16.8	250	33.6	150

表 6-5 犠牲陽極材設置間隔表（マクロセル腐食/製造元設定）^(6.3)

耐用年数	25 年		35 年	
鉄筋比率	塩化物イオン量 (kg/m ³)		塩化物イオン量 (kg/m ³)	
	<2.4	<4.5	<2.4	<4.5
	設置間隔(mm)		設置間隔(mm)	
<0.3	750	750	750	600
0.31-0.6	750	700	610	500
0.61-0.9	750	650	500	400
0.91-1.2	750	550	430	350
1.21-1.5	675	500	400	250
1.51-1.8	600	450	350	200
1.81-2.1	550	425	300	175

6.4 今後の展望と課題

(1) 復極量 50mV～100mV の防食効果の客観的検証

分極試験等を使用した客観的かつ定量的データによる防食効果の検証を行うことで、犠牲陽極材のみならず電気防食全般の信頼性と効率の改善に役立つと考える。

(2) 累積防食電流量による腐食抑制効果の検証

本研究でも明らかとなったように、復極量 100mV に満たない場合でも時間の経過とともに鋼材の自然電位が貴側にシフトすることで腐食環境の改善が確認され、結果として腐食抑制効果が得られていると判断されるが、どの程度の累積によって鋼材の腐食環境が改善されるのかを理解することは、今後の電気防食の設計と維持管理に有益であると考え、防食電流密度や防食電流密度、復極量と鋼材自然電位の変位を理解することで、より費用対効果に優れた埋設型犠牲陽極システムの適用が期待できる。

【参考文献】

(6.1) EN12696:2016 Cathodic protection of steel in concrete

(6.2) 土木学会：電気化学的防食工法指針,コンクリートライブラリー157, p52

(6.3) クリディエンス株式会社 ガルバシールド工法技術資料 2020 年 4 月

謝 辞

本論文は、岐阜大学大学院工学研究科 生産開発システム工学専攻 博士後期課程に在籍した 2018 年 4 月から 2022 年 3 月までの 4 年間に行った研究の成果をまとめたものです。

岐阜大学大学院 小林孝一教授には、本研究の基礎実験よりご指導を賜りました。また、論文の作成にあたり、経験の乏しい著者に親切丁寧に御指導賜りましたことに心より感謝申し上げます。また、研究過程における貴重なご教示や本論文をまとめるにあたり貴重な御助言を賜りました、岐阜大学大学院 内田裕市教授、国枝稔教授には厚く感謝の意を表します。また、日頃より貴重な御助言を賜り、本研究を岐阜大学大学院にて行う機会をくださいました岐阜大学情報連携推進本部 村上茂之教授には心より御礼申し上げます。

本研究の実験を進めるにあたり当時岐阜大学学生であった米窪祥平氏（現 東海旅客鉄道株式会社）、DINH NAM THIEN 氏（現 昭和コンクリート工業株式会社）、現 岐阜大学大学院生 篠崎瑠氏および小林研究室の在学生および卒業生の皆様には貴重な時間を供試体の作成や計測に費やしていただいたことに感謝いたします。

また、Vector Corrosion Technologies Ltd. の Dr. George Sergi と Dr. Liao Haixue には犠牲陽極材の知識とともに有益な御助言を賜り研究の視野を広げることができました。ここに御礼を申し上げます。

本論文は、今までの人生において御指導賜りました多くの方々の御協力により完成させることができました。ここに重ねて御礼申し上げます。

2022 年 3 月

付録 1

第 4 章にて使用したモニタリングデータを示す。

付表-1 供試体 A および B の ON 電位 (0.8%)

ON電位 サイクル	塩分濃度0.8% 経過日数 (日)	供試体 A (mV _{CSE})				供試体 B (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	13	-513	-493	-541	-541	-485	-474	-475	
2	27	-942	-551	-604	-609	-512	-490	-445	
3	55	-868	-543	-613	-550	-467	-469	-471	
4	69	-908	-526	-563	-533	-448	-449	-425	
5	83	-898	-527	-567	-540	-462	-441	-425	
6	97	-749	-475	-515	-503	-431	-430	-411	
7	111	-816	-516	-557	-544	-493	-467	-466	
8	125	-733	-495	-518	-529	-472	-456	-456	
9	139	-685	-498	-516	-538	-478	-437	-428	
10	153	-690	-517	-524	-527	-455	-454	-436	
11	167	-520	-435	-446		-382	-371	-348	
12	181	-516	-441	-453		-402	-369	-365	
13	195	-556	-443	-451		-391	-387	-371	
14	209	-527	-430	-439		-360	-461	-340	
15	223	-514	-450	-440		-386	-442	-453	
16	237	-367	-330	-344		-323	-324	-301	
17	251	-376	-339	-366		-307	-338	-297	
18	265	-422	-342	-387		-327	-346	-318	
19	279	-384	-349	-356		-335	-345	-302	
20	293	-370	-335	-353		-313	-333	-293	
21	307	-999	-350	-365		-344	-355	-341	
22	321	-389	-372	-376		-350	-359	-362	
23	335	-336	-308	-318		-312	-340	-264	
24	349	-349	-318	-325		-324	-336	-329	
25	363	-407	-323	-327		-316	-333	-324	
26	377	-367	-344			-311	-330		
27	391	-328	-306			-293	-301		
28	405	-311	-316			-296	-296		
29	419	-350	-302			-310	-326		
30	433	-339	-310			-307	-315		
31	468	-326	-280			-316	-315		
32	482	-351	-317			-334	-318		
33	496	-329	-290			-311	-301		
34	510	-365	-315			-322	-313		
35	524	-367	-312			-318	-312		
36	538	-314	-294			-321	-310		
37	552	-357	-314			-321	-308		
38	566	-342	-323			-332	-332		
39	580	-374	-317			-321	-325		
40	594	-372	-305			-310	-315		
41	608	-382	-307			-334	-317		
42	622	-373	-290			-327	-302		
43	636	-365	-288			-327	-306		
44	650	-363	-300			-326	-306		
45	664	-350	-362			-356	-330		
46	678	-352	-298			-299	-306		
47	692	-360	-281			-289	-287		
48	706	-353	-288			-323	-342		
49	720	-304	-279			-279	-303		

付表-2 供試体 C の ON 電位 (0.8%)

ON電位 サイクル	塩分濃度0.8% 経過日数 (日)	供試体 C (mV _{CSE})				供試体 (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	13	-665	-1222	-600					
2	27	-646	-1129	-548					
3	55	-640	-1269	-551					
4	69	-561	-1159	-516					
5	83	-528	-1015	-502					
6	97	-523	-1020	-480					
7	111	-564	-1123	-593					
8	125	-537	-1005	-510					
9	139	-509	-708	-510					
10	153	-516	-925	-494					
11	167	-415	-407	-405					
12	181	-427	-414	-424					
13	195	-430	-448	-409					
14	209	-424	-415	-381					
15	223	-531	-506	-410					
16	237	-309	-312	-333					
17	251	-358	-372	-349					
18	265	-330	-368	-316					
19	279	-353	-357	-329					
20	293	-358	-379	-332					
21	307	-359	-1048	-342					
22	321	-368	-866	-334					
23	335	-328	-957	-331					
24	349	-338	-1140	-324					
25	363	-323	-940	-380					
26	377	-338	-313						
27	391	-300	-330						
28	405	-283	-255						
29	419	-301	-346						
30	433	-333	-376						
31	468	-337	-355						
32	482	-358	-359						
33	496	-324	-394						
34	510	-329	-324						
35	524	-352	-412						
36	538	-333	-342						
37	552	-375	-421						
38	566	-362	-340						
39	580	-432	-389						
40	594	-264	-333						
41	608	-370	-365						
42	622	-340	-356						
43	636	-374	-381						
44	650	-307	-385						
45	664	-383	-387						
46	678	-369	-310						
47	692	-379	-349						
48	706	-386	-326						
49	720	-352	-379						

付表-3 供試体 D および E の ON 電位 (0.8%)

ON電位 サイクル	塩分濃度0.8% 経過日数 (日)	供試体 D (mV _{CSE})				供試体 E (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	13	-690	-793	-611		-663	-664	-594	
2	34	-575	-1097	-606		-661	-626	-600	
3	62	-584	-692	-512		-510	-523	-460	
4	76	-588	-649	-495		-503	-497	-460	
5	90	-532	-667	-442		-466	-494	-492	
6	104	-579	-748	-485		-505	-552	-478	
7	118	-503	-615	-477		-490	-541	-461	
8	132	-480	-641	-482		-525	-553	-483	
9	146	-520	-657	-479		-484	-541	-460	
10	160	-470	-621	-480		-483	-506	-446	
11	174	-479	-564	-460		-447	-492	-416	
12	188	-934	-556	-467		-436	-487	-414	
13	202	-471	-567	-456		-467	-505	-453	
14	216	-443	-570	-445		-451	-489	-439	
15	230	-404	-519	-429		-417	-453	-402	
16	244	-958	-537	-447		-425	-448	-418	
17	258	-465	-523	-412		-423	-562	-433	
18	272	-411	-517	-423		-424	-445	-414	
19	286	-921	-529	-425		-429	-476	-428	
20	300	-413	-500	-418		-440	-475	-429	
21	314	-423	-535	-444		-449	-495	-424	
22	328	-418	-521	-427		-449	-497	-434	
23	342	-389	-497	-395		-399	-423	-379	
24	356	-396	-499	-372		-391	-284	-381	
25	370	-416	-550	-404		-433	-419	-410	
26	384	-389	-500			-425	-431		
27	397	-367	-482			-384	-382		
28	412	-376	-470			-414	-284		
29	426	-392	-463			-427	-353		
30	440	-373	-419			-410	-340		
31	475	-385	-416			-430	-258		
32	489	-354	-474			-409	-284		
33	503	-378	-520			-443	-402		
34	517	-368	-506			-426	-389		
35	531	-916	-514			-432	-403		
36	545	-470	-551			-451	-251		
37	559	-376	-546			-457	-224		
38	573	-375	-586			-445	-411		
39	583	-380	-585			-448	-419		
40	601	-382	-668			-440	-343		
41	615	-390	-646			-454	-183		
42	629	-394	-642			-452	-391		
43	643	-388	-622			-457	-445		
44	657	-381	-594			-448	-427		
45	671	-355	-550			-424	-417		
46	685	-365	-538			-432	-427		
47	699	-358	-528			-398	-382		
48	713	-406	-555			-441	-462		
49	727	-365	-488			-412	-448		

付表-4 供試体 A および B の ON 電位 (1.5%)

ON電位	塩分濃度1.5%	供試体 A				供試体 B			
サイクル	経過日数 (日)	(mV _{CSE})				(mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	14	-545	-552	-556	-552	-539	-531	-541	
2	21	-597	-600	-593	-590	-560	-541	-563	
3	46	-610	-613	-615	-627	-603	-630	-642	
4	63	-597	-577	-578	-556	-514	-591	-586	
5	77	-594	-555	-568	-577	-535	-559	-588	
6	91	-547	-524	-536	-548	-524	-530	-573	
7	105	-570	-550	-570	-594	-520	-588	-592	
8	119	-549	-545	-555	-552	-508	-567	-585	
9	133	-551	-542	-553	-550	-520	-569	-585	
10	147	-555	-548	-563	-567	-498	-551	-577	
11	161	-493	-498	-493		-427	-456	-420	
12	175	-497	-500	-495		-437	-448	-415	
13	189	-477	-503	-494		-456	-465	-433	
14	203	-480	-502	-486		-433	-458	-361	
15	217	-479	-508	-488		-448	-449	-430	
16	231	-391	-432	-422		-359	-346	-344	
17	245	-416	-434	-422		-378	-391	-433	
18	259	-409	-412	-419		-381	-356	-332	
19	273	-414	-436	-423		-387	-357	-353	
20	287	-419	-469	-416		-379	-359	-394	
21	301	-410	-447	-446		-403	-423	-463	
22	315	-409	-450	-442		-437	-434	-441	
23	329	-377	-405	-420		-388	-386	-374	
24	343	-394	-417	-410		-390	-387	-401	
25	357	-392	-412	-451		-392	-410	-396	
26	371	-388	-414			-420	-439		
27	385	-366	-390			-364	-351		
28	399	-381	-374			-369	-341		
29	413	-400	-375			-388	-374		
30	427	-400	-381			-388	-362		
31	462	-411	-387			-398	-404		
32	476	-440	-440			-432	-429		
33	490	-423	-402			-382	-400		
34	504	-435	-411			-384	-410		
35	518	-443	-412			-393	-393		
36	532	-427	-391			-375	-390		
37	546	-405	-425			-411	-412		
38	560	-445	-464			-434	-429		
39	574	-421	-423			-415	-406		
40	588	-413	-387			-396	-378		
41	602	-413	-406			-392	-391		
42	616	-403	-384			-384	-386		
43	630	-410	-357			-391	-374		
44	644	-418	-382			-364	-385		
45	658	-416	-473			-472	-464		
46	672	-392	-400			-409	-392		
47	686	-413	-376			-428	-378		
48	700	-398	-367			-379	-337		
49	714	-407	-439			-389	-416		

付表-5 供試体 C の ON 電位 (1.5%)

ON電位 サイクル	塩分濃度1.5% 経過日数 (日)	供試体 C (mV _{CSE})				供試体 (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	14	-613	-605	-609					
2	21	-595	-613	-604					
3	46	-593	-664	-664					
4	63	-543	-612	-602					
5	77	-537	-613	-603					
6	91	-502	-587	-572					
7	105	-578	-622	-622					
8	119	-574	-597	-616					
9	133	-552	-593	-606					
10	147	-556	-589	-602					
11	161	-451	-457	-472					
12	175	-473	-485	-484					
13	189	-466	-472	-491					
14	203	-452	-455	-494					
15	217	-482	-472	-486					
16	231	-444	-362	-394					
17	245	-443	-399	-401					
18	259	-423	-386	-413					
19	273	-436	-400	-432					
20	287	-450	-397	-397					
21	301	-459	-410	-431					
22	315	-471	-400	-412					
23	329	-421	-383	-384					
24	343	-428	-397	-394					
25	357	-419	-372	-431					
26	371	-434	-372						
27	385	-375	-368						
28	399	-385	-361						
29	413	-372	-373						
30	427	-375	-401						
31	462	-403	-377						
32	476	-424	-401						
33	490	-403	-362						
34	504	-418	-364						
35	518	-408	-356						
36	532	-403	-350						
37	546	-410	-350						
38	560	-429	-371						
39	574	-410	-392						
40	588	-398	-368						
41	602	-400	-355						
42	616	-372	-343						
43	630	-376	-368						
44	644	-390	-366						
45	658	-447	-427						
46	672	-389	-395						
47	686	-355	-407						
48	700	-332	-371						
49	714	-400	-390						

付表-6 供試体 D および E の ON 電位 (1.5%)

ON電位 サイクル	塩分濃度1.5% 経過日数 (日)	供試体 D (mV _{CSE})				供試体 E (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	14	-723	-710	-681		-665	-653	-704	
2	28	-722	-703	-528		-654	-667	-683	
3	56	-703	-691	-526		-576	-611	-580	
4	70	-697	-685	-521		-585	-600	-586	
5	84	-712	-671	-515		-569	-584	-626	
6	98	-715	-589	-543		-578	-619	-590	
7	112	-706	-571	-539		-563	-608	-583	
8	126	-700	-562	-535		-557	-607	-580	
9	140	-705	-570	-544		-553	-605	-568	
10	154	-697	-580	-548		-538	-597	-559	
11	168	-580	-526	-530		-496	-555	-521	
12	182	-584	-508	-523		-503	-547	-512	
13	196	-594	-521	-512		-507	-560	-522	
14	210	-592	-507	-516		-496	-557	-515	
15	224	-558	-460	-510		-494	-531	-479	
16	238	-596	-487	-523		-491	-543	-498	
17	252	-547	-465	-514		-515	-542	-481	
18	266	-556	-417	-511		-495	-551	-483	
19	280	-620	-439	-515		-516	-561	-500	
20	294	-587	-421	-506		-499	-560	-494	
21	308	-599	-481	-525		-505	-574	-514	
22	322	-596	-422	-520		-507	-575	-502	
23	336	-551	-386	-480		-475	-530	-467	
24	350	-507	-388	-495		-483	-539	-444	
25	364	-543	-444	-515		-513	-571	-477	
26	378	-523	-393			-467	-557		
27	391	-475	-412			-446	-512		
28	406	-534	-381			-480	-540		
29	420	-499	-427			-490	-530		
30	434	-499	-417			-490	-559		
31	469	-519	-465			-514	-595		
32	483	-555	-511			-509	-556		
33	497	-545	-473			-508	-563		
34	511	-506	-450			-496	-547		
35	525	-513	-429			-501	-558		
36	539	-536	-469			-526	-564		
37	553	-538	-463			-512	-560		
38	567	-535	-462			-499	-564		
39	581	-520	-464			-497	-547		
40	595	-537	-402			-501	-539		
41	609	-537	-395			-507	-564		
42	623	-541	-395			-499	-571		
43	637	-539	-402			-503	-582		
44	651	-522	-406			-516	-560		
45	665	-552	-417			-462	-547		
46	679	-518	-405			-461	-550		
47	693	-489	-398			-457	-540		
48	707	-502	-392			-468	-541		
49	721	-490	-398			-427	-505		

付表-7 供試体 A および B の ON 電位 (2.0%)

ON電位 サイクル	塩分濃度2.0% 経過日数 (日)	供試体 A (mV _{CSE})				供試体 B (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	12	-566	-520	-548	-529	-507	-592	-545	
2	19	-677	-603	-616	-612	-563	-610	-592	
3	47	-842	-652	-674	-636	-631	-660	-709	
4	61	-787	-621	-612	-630	-612	-601	-635	
5	75	-775	-636	-621	-600	-597	-588	-611	
6	89	-720	-609	-559	-594	-573	-562	-600	
7	103	-795	-632	-581	-600	-592	-565	-603	
8	117	-810	-608	-562	-589	-596	-576	-593	
9	131	-805	-598	-554	-581	-579	-561	-587	
10	145	-846	-608	-563	-582	-586	-567	-584	
11	159	-540	-510	-489		-450	-488	-552	
12	173	-558	-505	-501		-442	-470	-555	
13	187	-550	-507	-486		-448	-475	-544	
14	201	-543	-504	-489		-440	-471	-538	
15	215	-571	-504	-501		-461	-491	-543	
16	229	-406	-390	-396		-372	-384	-485	
17	243	-436	-411	-417		-396	-394	-490	
18	257	-439	-423	-418		-393	-389	-470	
19	271	-465	-438	-422		-425	-400	-488	
20	285	-462	-433	-426		-432	-400	-484	
21	299	-455	-481	-496		-491	-466	-479	
22	313	-466	-486	-513		-497	-478	-488	
23	327	-424	-466	-463		-461	-454	-456	
24	341	-438	-471	-462		-457	-448	-467	
25	355	-425	-452	-454		-456	-453	-474	
26	369	-439	-475			-490	-461		
27	383	-412	-417			-437	-429		
28	397	-411	-440			-423	-410		
29	411	-438	-450			-448	-418		
30	425	-450	-433			-438	-415		
31	460	-451	-451			-464	-455		
32	474	-458	-458			-470	-451		
33	488	-465	-446			-448	-416		
34	502	-471	-451			-474	-437		
35	516	-472	-461			-451	-431		
36	530	-457	-457			-442	-429		
37	544	-456	-458			-456	-432		
38	558	-469	-482			-494	-474		
39	572	-485	-467			-463	-449		
40	586	-447	-459			-453	-433		
41	600	-448	-475			-448	-442		
42	614	-436	-460			-437	-438		
43	628	-430	-470			-413	-448		
44	642	-422	-469			-435	-445		
45	656	-452	-462			-489	-484		
46	670	-422	-441			-432	-443		
47	684	-414	-455			-430	-422		
48	698	-412	-401			-405	-414		
49	712	-344	-413			-431	-423		

付表-8 供試体 C の ON 電位 (2.0%)

ON電位 サイクル	塩分濃度2.0% 経過日数 (日)	供試体 C (mV _{CSE})				供試体 (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	12	-1010	-635	-704					
2	19	-1051	-635	-706					
3	47	-970	-719	-783					
4	61	-911	-610	-692					
5	75	-1001	-599	-650					
6	89	-961	-575	-625					
7	103	-859	-606	-667					
8	117	-949	-594	-660					
9	131	-952	-594	-661					
10	145	-1001	-600	-639					
11	159	-467	-468	-547					
12	173	-492	-509	-557					
13	187	-514	-504	-566					
14	201	-505	-497	-558					
15	215	-742	-516	-585					
16	229	-577	-394	-461					
17	243	-427	-433	-456					
18	257	-534	-424	-408					
19	271	-492	-437	-442					
20	285	-502	-433	-446					
21	299	-649	-517	-478					
22	313	-675	-511	-543					
23	327	-585	-475	-407					
24	341	-502	-473	-435					
25	355	-494	-489	-459					
26	369	-596	-498						
27	383	-408	-447						
28	397	-414	-445						
29	411	-434	-456						
30	425	-391	-467						
31	460	-423	-459						
32	474	-459	-470						
33	488	-468	-458						
34	502	-444	-484						
35	516	-470	-461						
36	530	-458	-469						
37	544	-461	-437						
38	558	-446	-498						
39	572	-430	-486						
40	586	-480	-475						
41	600	-429	-488						
42	614	-462	-461						
43	628	-472	-461						
44	642	-467	-424						
45	656	-508	-504						
46	670	-412	-478						
47	684	-420	-436						
48	698	-470	-496						
49	712	-450	-445						

付表-9 供試体 D および E の ON 電位 (2.0%)

ON電位 サイクル	塩分濃度2.0% 経過日数 (日)	供試体 D (mV _{CSE})				供試体 E (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	12	-591	-587	-657		-692	-692	-612	
2	26	-661	-576	-661		-673	-671	-589	
3	54	-629	-595	-631		-602	-610	-503	
4	68	-640	-587	-615		-577	-605	-506	
5	82	-634	-587	-603		-551	-615	-488	
6	96	-644	-607	-630		-585	-614	-487	
7	110	-621	-598	-611		-538	-636	-492	
8	124	-635	-597	-610		-537	-646	-509	
9	138	-630	-617	-632		-544	-653	-534	
10	152	-629	-607	-634		-537	-646	-569	
11	166	-570	-572	-552		-498	-541	-509	
12	180	-575	-576	-555		-503	-528	-487	
13	194	-564	-560	-537		-510	-557	-489	
14	208	-560	-572	-547		-504	-538	-487	
15	222	-573	-569	-565		-511	-566	-484	
16	236	-592	-577	-552		-517	-547	-478	
17	250	-583	-580	-584		-515	-568	-482	
18	264	-596	-581	-585		-512	-573	-497	
19	278	-592	-590	-592		-524	-575	-500	
20	292	-555	-565	-544		-501	-569	-455	
21	306	-580	-574	-562		-519	-578	-491	
22	320	-575	-562	-568		-513	-591	-486	
23	334	-561	-559	-551		-488	-568	-477	
24	348	-586	-569	-567		-483	-586	-481	
25	362	-582	-577	-564		-504	-578	-441	
26	376	-580	-429			-479	-584		
27	389	-536	-454			-463	-544		
28	404	-570	-472			-478	-561		
29	418	-577	-494			-515	-574		
30	432	-568	-489			-505	-549		
31	467	-586	-503			-526	-561		
32	481	-440	-513			-513	-525		
33	495	-582	-506			-521	-563		
34	509	-567	-480			-506	-549		
35	523	-584	-484			-515	-563		
36	537	-554	-503			-520	-556		
37	551	-566	-505			-514	-553		
38	565	-543	-522			-515	-527		
39	579	-552	-508			-509	-542		
40	593	-563	-498			-515	-565		
41	607	-557	-500			-502	-554		
42	621	-513	-497			-477	-545		
43	635	-465	-504			-493	-562		
44	649	-476	-517			-489	-560		
45	663	-503	-513			-513	-523		
46	677	-512	-496			-489	-519		
47	691	-473	-483			-497	-540		
48	705	-476	-460			-485	-566		
49	719	-483	-498			-491	-524		

付表-10 外部電源 0.2mA/m² および 1.0mA/m² の ON 電位 (0.8%)

ON電位 サイクル	塩分濃度0.8% 経過日数 (日)	0.2mA/m ² (mV _{CSE})				1.0mA/m ² (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	11	-372	-396	-351	-354	-362	-389	-433	
2	25	-326	-329	-317	-332	-367	-404	-514	
3	53	-387	-360	-355	-323	-412	-482	-661	
4	67	-290	-313	-288	-284	-325	-393	-616	
5	81	-309	-308	-294	-293	-348	-404	-609	
6	95	-320	-316	-297	-302	-312	-397	-666	
7	109	-345			-305	-473	-469	-646	
8	123	-334	-329	-321	-324	-417	-438	-578	
9	137	-325	-324	-344	-314	-365	-446	-595	
10	151	-299	-298	-309	-316	-367	-422	-591	
11	165	-288	-304	-312		-333	-434	-531	
12	179	-302	-308	-315		-365	-428	-595	
13	193	-328	-349	-357		-355	-426	-549	
14	207	-297	-320	-312		-325	-391	-538	
15	221	-277	-346	-304		-336	-390	-533	
16	235	-289	-339	-299		-310	-409	-558	
17	249	-299	-332	-340		-496	-458	-1016	
18	263	-318	-351	-356		-512	-485	-905	
19	277	-274	-305	-273		-316	-400	-486	
20	291	-276	-325	-297		-312	-393	-494	
21	305	-288	-327	-306		-344	-404	-526	
22	319	-277	-336	-298		-323	-388	-507	
23	333	-271	-259	-262		-271	-372	-405	
24	347	-294	-343	-298		-424	-429	-567	
25	361	-260	-320	-279		-426	-465	-652	
26	375	-277	-298			-414	-437		
27	389	-286	-274			-393	-410		
28	403	-246	-279			-398	-407		
29	417	-351	-320			-414	-433		
30	431	-291	-291			-435	-432		
31	466	-330	-324			-464	-454		
32	480	-343	-331			-496	-446		
33	494	-328	-337			-529	-469		

付表-11 外部電源 2.0mA/m² および 4.0mA/m² の ON 電位 (0.8%)

ON電位 サイクル	塩分濃度0.8% 経過日数 (日)	2.0mA/m ² (mV _{CSE})				4.0mA/m ² (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	11	-404	-439	-461		-376	-391	-440	-385
2	32	-379	-396	-410		-480	-432	-460	-485
3	60	-390	-407	-389		-431	-406	-414	-463
4	74	-353	-376	-408		-393	-400	-422	-476
5	88	-377	-369	-387		-420	-416	-447	-478
6	102	-396	-453	-421		-595	-478	-486	-488
7	116	-380	-412	-444		-422	-425	-469	-495
8	130	-434	-461	-430		-462	-508	-498	-507
9	144	-393	-400	-431		-556	-416	-501	-480
10	158	-377	-437	-416		-507	-416	-473	-494
11	172	-384	-414	-431		-396	-460	-495	
12	186	-378	-389	-403		-391	-385	-439	
13	200	-390	-414	-432		-466	-484	-501	
14	214	-404	-420	-425		-444	-477	-513	
15	228	-357	-376	-394		-357	-396	-434	
16	242	-392	-365	-388		-479	-391	-384	
17	256	-442	-480	-506		-437	-501	-577	
18	270	-337	-357	-372		-473	-391	-373	
19	284	-372	-342	-393		-358	-364	-421	
20	298	-345	-368	-404		-523	-379	-405	
21	312	-384	-360	-399		-506	-428	-428	
22	326	-374	-378	-409		-546	-399	-397	
23	340	-323	-349	-359		-541	-391	-383	
24	354	-370	-358	-385		-555	-367	-407	
25	368	-329	-325	-341		-510	-368	-385	
26	382	-431	-444			-763	-443		
27	395	-379	-387			-697	-425		
28	410	-402	-417			-780	-500		
29	424	-391	-398			-807	-482		
30	438	-405	-406			-862	-518		
31	473	-426	-420			-860	-527		
32	487	-476	-478			-905	-546		
33	500	-474	-482			-867	-552		

付表-12 外部電源 0.2mA/m² および 1.0mA/m² の ON 電位 (1.5%)

ON電位 サイクル	塩分濃度1.5% 経過日数 (日)	0.2mA/m ² (mV _{CSE})				1.0mA/m ² (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	12	-426	-337	-401	-405	-555	-430	-405	
2	19	-441	-359	-411	-403	-577	-463	-420	
3	47	-474	-479	-459	-414	-552	-457	-481	
4	61	-383	-330	-396	-345	-473	-406	-401	
5	75	-380	-325	-363	-341	-474	-399	-420	
6	89	-394	-339	-362	-338	-464	-400	-420	
7	103	-415	-341	-377	-376	-484	-450	-458	
8	117	-423	-345	-392	-378	-497	-447	-457	
9	131	-414	-346	-385	-370	-480	-441	-428	
10	145	-398	-339	-397	-365	-460	-435	-427	
11	159	-356	-337	-375		-429	-434	-439	
12	173	-388	-340	-374		-436	-443	-434	
13	187	-419	-344	-391		-435	-438	-440	
14	201	-399	-347	-386		-396	-429	-428	
15	215	-410	-349	-389		-422	-446	-437	
16	229	-396	-344	-379		-408	-428	-422	
17	243	-407	-360	-401		-473	-474	-476	
18	257	-429	-372	-380		-473	-467	-497	
19	271	-381	-338	-374		-313	-398	-405	
20	285	-388	-357	-374		-390	-402	-423	
21	299	-383	-327	-362		-417	-434	-425	
22	313	-398	-352	-389		-401	-419	-436	
23	327	-363	-309	-345		-358	-373	-397	
24	341	-425	-360	-382		-407	-427	-459	
25	355	-400	-336	-381		-437	-430	-475	
26	369	-415	-331			-416	-418		
27	383	-397	-323			-394	-404		
28	397	-392	-308			-385	-395		
29	411	-412	-336			-410	-409		
30	425	-414	-343			-398	-411		
31	460	-433	-376			-438	-432		
32	474	-459	-404			-449	-448		
33	488	-453	-422			-465	-467		

付表-13 外部電源 2.0mA/m² および 4.0mA/m² の ON 電位 (1.5%)

ON電位 サイクル	塩分濃度1.5% 経過日数 (日)	2.0mA/m ² (mV _{CSE})				4.0mA/m ² (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	12	-411	-361	-349		-512	-512	-480	-459
2	26	-456	-413	-348		-537	-522	-564	-524
3	54	-390	-437	-297		-483	-530	-559	-544
4	68	-384	-361	-312		-398	-533	-543	-528
5	82	-401	-405	-434		-423	-541	-535	-531
6	96	-432	-448	-521		-475	-543	-566	-539
7	110	-457	-468	-483		-447	-563	-566	-567
8	124	-442	-466	-429		-484	-572	-565	-566
9	138	-449	-464	-438		-434	-555	-533	-548
10	152	-453	-458	-450		-430	-555	-543	-552
11	166	-476	-453	-433		-447	-548	-540	
12	180	-446	-430	-434		-419	-542	-512	
13	194	-475	-462	-476		-455	-557	-569	
14	208	-478	-448	-461		-468	-567	-578	
15	222	-448	-426	-427		-402	-535	-524	
16	236	-438	-407	-426		-407	-526	-485	
17	250	-526	-502	-552		-579	-622	-658	
18	264	-406	-410	-394		-354	-517	-461	
19	278	-454	-428	-446		-398	-528	-497	
20	292	-442	-432	-444		-405	-534	-492	
21	306	-444	-448	-450		-426	-532	-524	
22	320	-453	-434	-439		-431	-537	-521	
23	334	-411	-431	-397		-397	-517	-477	
24	348	-331	-422	-437		-393	-575	-510	
25	362	-433	-403	-418		-400	-533	-527	
26	376	-494	-465			-458	-576		
27	389	-418	-417			-434	-550		
28	404	-449	-443			-442	-565		
29	418	-453	-445			-432	-551		
30	432	-461	-448			-444	-554		
31	467	-472	-459			-450	-592		
32	481	-499	-487			-496	-590		
33	495	-502	-478			-492	-597		

付表-14 外部電源 0.2mA/m² および 1.0mA/m² の ON 電位 (2.0%)

ON電位 サイクル	塩分濃度2.0% 経過日数 (日)	0.2mA/m ² (mV _{CSE})				1.0mA/m ² (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	8	-500	-503	-571	-464	-421	-466	-464	
2	15	-536	-537	-565	-462	-456	-465	-509	
3	43	-531	-568	-560	-466	-576	-479	-519	
4	57	-432	-428	-487	-428	-565	-439	-415	
5	71	-434	-420	-454	-421	-517	-403	-417	
6	85	-411	-395	-447	-391	-596	-429	-428	
7	99	-476	-452	-490	-431	-635	-457	-466	
8	113	-444	-428	-493	-427	-591	-455	-494	
9	127	-440	-399	-481	-409	-574	-437	-469	
10	141	-434	-440	-471	-420	-535	-454	-464	
11	155	-426	-432	-452		-564	-466	-465	
12	169	-443	-448	-464		-572	-458	-444	
13	183	-460	-470	-479		-540	-499	-445	
14	197	-434	-452	-463		-530	-460	-422	
15	211	-414	-430	-454		-563	-456	-444	
16	225	-412	-416	-449		-558	-444	-435	
17	239	-412	-423	-463		-828	-468	-489	
18	253	-422	-433	-456		-841	-477	-478	
19	267	-405	-422	-425		-495	-402	-390	
20	281	-408	-425	-435		-477	-407	-392	
21	295	-415	-440	-449		-481	-426	-415	
22	309	-420	-433	-459		-501	-431	-457	
23	323	-400	-401	-427		-464	-384	-446	
24	337	-432	-428	-443		-544	-452	-458	
25	351	-422	-429	-442		-573	-464	-451	
26	365	-430	-499			-556	-441		
27	379	-409	-494			-533	-422		
28	393	-423	-478			-551	-414		
29	407	-450	-544			-515	-424		
30	421	-449	-514			-581	-440		
31	456	-458	-486			-580	-450		
32	470	-477	-463			-612	-478		
33	484	-462	-392			-692	-486		

付表-15 外部電源 2.0mA/m² および 4.0mA/m² の ON 電位 (2.0%)

ON電位 サイクル	塩分濃度2.0% 経過日数 (日)	2.0mA/m ² (mV _{CSE})				4.0mA/m ² (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	8	-424	-428	-430		-577	-423	-436	-453
2	22	-505	-452	-552		-644	-518	-524	-510
3	50	-492	-421	-508		-599	-555	-497	-477
4	64	-527	-425	-421		-541	-581	-495	-450
5	78	-447	-413	-462		-513	-458	-590	-470
6	92	-457	-441	-507		-519	-552	-616	-453
7	106	-436	-439	-478		-523	-634	-647	-518
8	120	-466	-452	-521		-520	-685	-652	-533
9	134	-455	-442	-452		-497	-586	-648	-500
10	148	-454	-432	-503		-493	-599	-535	-512
11	162	-454	-448	-474		-506	-623	-543	
12	176	-460	-431	-473		-493	-588	-547	
13	190	-501	-456	-506		-515	-610	-627	
14	204	-503	-462	-506		-490	-585	-597	
15	218	-446	-454	-472		-476	-593	-618	
16	232	-444	-423	-469		-465	-551	-546	
17	246	-510	-500	-503		-572	-567	-947	
18	260	-417	-420	-447		-452	-502	-483	
19	274	-451	-438	-456		-462	-528	-524	
20	288	-444	-443	-460		-477	-787	-535	
21	302	-449	-457	-463		-483	-538	-550	
22	316	-441	-455	-458		-496	-562	-590	
23	330	-421	-435	-405		-449	-555	-510	
24	344	-463	-455	-429		-492	-515	-552	
25	358	-431	-443	-427		-479	-590	-525	
26	372	-504	-473			-553	-736		
27	385	-461	-442			-504	-663		
28	400	-467	-436			-503	-651		
29	414	-493	-457			-528	-646		
30	428	-489	-430			-517	-651		
31	463	-514	-464			-525	-675		
32	477	-508	-492			-541	-736		
33	491	-527	-509			-550	-696		

付表-16 供試体 A および B の OFF 電位 (0.8%)

OFF電位	塩分濃度0.8%	供試体 A				供試体 B			
サイクル	経過日数 (日)	(mV _{CSE})				(mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	15	-327	-311	-308	-289	-331	-308	-323	
2	29	-302	-283	-281	-256	-284	-272	-241	
3	57	-302	-250	-253	-241	-259	-252	-243	
4	71	-230	-222	-226	-205	-216	-230	-238	
5	85	-205	-212	-227	-202	-212	-225	-289	
6	99	-216	-186	-219	-203	-214	-220	-213	
7	113	-247	-237	-235	-225	-228	-223	-221	
8	127	-210	-212	-226	-222	-262	-234	-218	
9	141	-244	-202	-222	-218	-202	-211	-192	
10	155	-226	-225	-227	-225	-195	-210	-198	
11	169	-211	-182	-206		-196	-207	-174	
12	183								
13	197	-276	-206	-224		-223	-229	-222	
14	211	-143	-198	-215		-210	-218	-232	
15	225	-222	-212	-202		-210	-210	-261	
16	239	-224	-176	-204		-199	-202	-221	
17	253	-300	-169	-187		-175	-192	-187	
18	267	-274	-168	-152		-184	-190	-172	
19	281	-204	-177	-186		-182	-189	-179	
20	295								
21	309	-210	-253	-278		-220	-291	-183	
22	323	-189	-269	-322		-217	-181	-153	
23	337	-165	-233	-165		-195	-168	-132	
24	351	-152	-185	-134		-172	-161	-128	
25	365								
26	379	-178	-251			-209	-172		
27	393	-136	-178			-149	-144		
28	407	-125	-138			-121	-239		
29	421	-128	-173			-168	-240		
30	435	-145	-196			-152	-235		
31	470								
32	484	-152	-247			-220	-257		
33	498	-149	-230			-149	-226		
34	512	-132	-232			-164	-212		
35	526	-149	-259			-187	-258		
36	540	-160	-232			-168	-235		
37	554								
38	568	-202	-310			-239	-286		
39	582	-190	-291			-188	-258		
40	596	-170	-248			-181	-234		
41	610	-164	-238			-212	-237		
42	624	-174	-245			-182	-196		
43	638	-179	-235			-156	-194		
44	652								
45	666	-224	-322			-260	-236		
46	680	-219	-254			-218	-224		
47	694	-145	-207			-150	-163		
48	708								
49	722	-133	-250			-180	-257		

付表-17 供試体 C の OFF 電位 (0.8%)

OFF電位	塩分濃度0.8%	供試体 C (mV _{CSE})				供試体 (mV _{CSE})			
サイクル	経過日数 (日)	①	②	③	④	①	②	③	④
1	15	-324	-285	-248					
2	29	-295	-285	-281					
3	57	-256	-269	-210					
4	71	-245	-282	-216					
5	85	-188	-235	-180					
6	99	-281	-238	-200					
7	113	-244	-279	-260					
8	127	-247	-250	-270					
9	141	-223	-228	-288					
10	155	-222	-237	-206					
11	169	-228	-230	-221					
12	183								
13	197	-252	-283	-260					
14	211	-240	-230	-215					
15	225	-272	-209	-195					
16	239	-249	-181	-170					
17	253	-201	-209	-252					
18	267	-206	-217	-257					
19	281	-211	-199	-162					
20	295								
21	309	-222	-253	-456					
22	323	-195	-159	-258					
23	337	-352	-140	-181					
24	351	-168	-524	-164					
25	365								
26	379	-176	-174						
27	393	-140	-144						
28	407	-135	-132						
29	421	-156	-148						
30	435	-151	-167						
31	470								
32	484	-176	-182						
33	498	-170	-153						
34	512	-170	-149						
35	526	-196	-182						
36	540	-182	-171						
37	554								
38	568	-197	-202						
39	582	-185	-182						
40	596	-197	-174						
41	610	-190	-173						
42	624	-172	-165						
43	638	-138	-167						
44	652								
45	666	-233	-258						
46	680	-172	-167						
47	694	-176	-158						
48	708								
49	722	-152	-170						

付表-18 供試体 D および E の OFF 電位 (0.8%)

OFF電位	塩分濃度0.8%	供試体 D				供試体 E			
サイクル	経過日数 (日)	(mV _{CSE})				(mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	15	-259	-368	-257		-250	-259	-227	
2	36	-313	-310	-261		-180	-210	-197	
3	64	-301	-228	-350		-199	-179	-184	
4	78	-133	-257	-240		-197	-185	-199	
5	92	-222	-231	-221		-203	-208	-208	
6	106	-270	-291	-268		-237	-249	-267	
7	120	-232	-250	-230		-212	-212	-237	
8	134	-205	-237	-228		-191	-206	-228	
9	148	-391	-240	-231		-193	-212	-222	
10	162	-212	-246	-204		-181	-202	-220	
11	176	-257	-253	-236		-198	-220	-228	
12	190	-229	-251	-229		-185	-200	-211	
13	204	-219	-253	-237		-237	-241	-230	
14	218	-213	-262	-238		-222	-212	-227	
15	232	-125	-232	-225		-204	-220	-205	
16	246	-282	-225	-211		-191	-192	-212	
17	260	-107	-223	-217		-182	-197	-198	
18	274	-148	-208	-201		-171	-184	-184	
19	288								
20	302	-153	-214	-200		-188	-280	-199	
21	316	-178	-201	-219		-192	-194	-200	
22	330	-131	-213	-208		-187	-206	-195	
23	344	-167	-193	-197		-177	-193	-180	
24	358	-126	-154	-151		-107	-116	-132	
25	372								
26	386	-164	-184			-170	-170		
27	399	-235	-120			-104	-140		
28	414	-129	-141			-179	-160		
29	428	-110	-147			-166	-152		
30	442	-110	-145			-147	-150		
31	477								
32	491	-137	-171			-156	-150		
33	505	-142	-187			-193	-190		
34	519	-123	-151			-165	-193		
35	533	-135	-171			-156	-185		
36	547	-178	-193			-176	-187		
37	561								
38	575	-188	-189			-199	-190		
39	589	-132	-233			-215	-201		
40	603	-117	-185			-203	-191		
41	617	-119	-230			-186	-187		
42	631	-121	-184			-177	-180		
43	645	-113	-194			-186	-188		
44	659								
45	673	-125	-259			-221	-207		
46	687	-149	-214			-205	-190		
47	701	-164	-172			-162	-175		
48	715								
49	729	-193	-210			-192	-229		

付表-19 供試体 A および B の OFF 電位 (1.5%)

OFF電位	塩分濃度1.5%	供試体 A				供試体 B			
サイクル	経過日数 (日)	(mV _{CSE})				(mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	16	-322	-320	-326	-410	-454	-416	-475	
2	23	-306	-311	-308	-337	-429	-392	-444	
3	51	-290	-286	-283	-314	-429	-337	-341	
4	65	-275	-281	-278	-308	-384	-330	-337	
5	79	-264	-260	-260	-303	-416	-309	-316	
6	93	-261	-260	-269	-311	-363	-305	-312	
7	107	-266	-263	-269	-323	-339	-317	-323	
8	121	-268	-264	-264	-313	-326	-315	-316	
9	135	-261	-253	-257	-300	-308	-282	-306	
10	149	-270	-263	-264	-303	-296	-304	-305	
11	163	-269	-258	-261		-293	-289	-298	
12	177								
13	191	-292	-265	-379		-299	-315	-295	
14	205	-282	-255	-365		-281	-301	-277	
15	219	-278	-255	-271		-294	-312	-295	
16	233	-268	-231	-201		-268	-286	-291	
17	247	-262	-245	-236		-264	-286	-263	
18	261	-259	-248	-227		-283	-286	-276	
19	275	-243	-284	-359		-252	-257	-306	
20	289								
21	303	-264	-429	-418		-384	-397	-406	
22	317	-251	-418	-443		-382	-391	-412	
23	331	-236	-387	-391		-367	-356	-439	
24	345	-224	-362	-372		-342	-352	-388	
25	359								
26	373	-360	-385			-339	-385		
27	387	-335	-343			-318	-325		
28	401	-326	-364			-318	-335		
29	415	-346	-372			-348	-336		
30	429	-366	-382			-351	-345		
31	464								
32	478	-426	-434			-381	-390		
33	492	-382	-398			-371	-382		
34	506	-392	-405			-361	-384		
35	520	-400	-399			-380	-387		
36	534	-403	-409			-383	-405		
37	548								
38	562	-425	-448			-433	-436		
39	576	-393	-418			-408	-389		
40	590	-362	-389			-372	-374		
41	604	-361	-388			-395	-384		
42	618	-339	-375			-367	-367		
43	632	-373	-360			-395	-368		
44	646								
45	660	-333	-466			-457	-452		
46	674	-319	-393			-405	-384		
47	688	-322	-351			-388	-329		
48	702								
49	716	-392	-421			-387	-393		

付表-20 供試体 C の OFF 電位 (1.5%)

OFF電位	塩分濃度1.5%	供試体 C				供試体			
サイクル	経過日数 (日)	(mV _{CSE})				(mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	16	-285	-285	-300					
2	23	-310	-309	-301					
3	51	-281	-279	-323					
4	65	-291	-290	-309					
5	79	-253	-279	-280					
6	93	-289	-292	-295					
7	107	-271	-327	-310					
8	121	-358	-322	-305					
9	135	-295	-312	-290					
10	149	-346	-322	-323					
11	163	-376	-308	-288					
12	177								
13	191	-441	-320	-299					
14	205	-415	-289	-271					
15	219	-425	-289	-271					
16	233	-463	-289	-263					
17	247	-423	-265	-257					
18	261	-426	-294	-276					
19	275	-437	-264	-257					
20	289								
21	303	-292	-268	-339					
22	317	-448	-293	-253					
23	331	-404	-241	-272					
24	345	-400	-246	-239					
25	359								
26	373	-413	-274						
27	387	-344	-211						
28	401	-372	-227						
29	415	-394	-230						
30	429	-374	-221						
31	464								
32	478	-413	-223						
33	492	-415	-227						
34	506	-402	-205						
35	520	-410	-210						
36	534	-407	-210						
37	548								
38	562	-428	-274						
39	576	-392	-238						
40	590	-394	-220						
41	604	-386	-217						
42	618	-376	-202						
43	632	-369	-206						
44	646								
45	660	-459	-402						
46	674	-389	-398						
47	688	-363	-350						
48	702								
49	716	-393	-378						

付表-21 供試体 D および E の OFF 電位 (1.5%)

OFF電位	塩分濃度1.5%	供試体 D				供試体 E			
サイクル	経過日数 (日)	(mV _{CSE})				(mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	16	-336	-324	-675		-295	-328	-312	
2	30	-363	-330	-356		-275	-294	-335	
3	58	-311	-317	-320		-319	-283	-262	
4	72	-325	-326	-305		-288	-283	-269	
5	86	-306	-311	-277		-268	-274	-280	
6	100	-328	-338	-307		-390	-300	-302	
7	114	-205	-316	-275		-267	-286	-280	
8	128	-302	-304	-267		-264	-272	-273	
9	142	-306	-306	-276		-277	-278	-287	
10	156	-301	-317	-278		-270	-283	-295	
11	170	-320	-307	-273		-272	-289	-286	
12	184	-303	-308	-270		-260	-273	-268	
13	198	-312	-311	-273		-270	-384	-282	
14	212	-305	-324	-277		-271	-290	-278	
15	226	-302	-309	-267		-257	-279	-263	
16	240	-206	-309	-257		-260	-273	-272	
17	254	-299	-248	-264		-252	-277	-269	
18	268	-291	-299	-246		-246	-264	-258	
19	282								
20	296	-277	-301	-242		-242	-267	-256	
21	310	-290	-302	-248		-246	-266	-274	
22	324	-189	-300	-264		-223	-266	-283	
23	338	-284	-289	-252		-243	-273	-253	
24	352	-251	-264	-226		-205	-227	-230	
25	366								
26	380	-272	-297			-234	-273		
27	393	-239	-264			-246	-240		
28	408	-268	-270			-220	-254		
29	422	-264	-269			-225	-239		
30	436	-262	-262			-213	-253		
31	471								
32	485	-296	-202			-439	-299		
33	499	-287	-288			-402	-276		
34	513	-275	-273			-380	-275		
35	527	-280	-277			-245	-281		
36	541	-294	-290			-267	-290		
37	555								
38	569	-288	-286			-398	-291		
39	583	-281	-277			-374	-275		
40	597	-281	-261			-385	-271		
41	611	-276	-258			-332	-283		
42	625	-266	-147			-238	-270		
43	639	-275	-247			-248	-287		
44	653								
45	667	-303	-259			-279	-302		
46	681	-294	-248			-246	-289		
47	695	-266	-241			-242	-255		
48	709								
49	723	-303	-377			-229	-259		

付表-22 供試体 A および B の OFF 電位 (2.0%)

OFF電位	塩分濃度2.0%	供試体 A				供試体 B			
サイクル	経過日数 (日)	(mV _{CSE})				(mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	14	-422	-312	-388	-319	-432	-517	-445	
2	21	-316	-311	-377	-292	-407	-505	-396	
3	49	-331	-314	-304	-284	-327	-302	-291	
4	63	-322	-309	-307	-274	-334	-292	-306	
5	77	-305	-285	-282	-268	-309	-273	-290	
6	91	-281	-294	-295	-283	-327	-289	-306	
7	105	-322	-293	-286	-278	-324	-305	-311	
8	119	-315	-285	-305	-269	-323	-292	-312	
9	133	-306	-274	-266	-280	-320	-298	-317	
10	147	-314	-276	-260	-273	-322	-288	-318	
11	161	-298	-267	-252		-322	-298	-330	
12	175								
13	189	-294	-283	-258		-316	-307	-356	
14	203	-279	-268	-257		-309	-292	-343	
15	217	-288	-275	-271		-312	-300	-346	
16	231	-265	-259	-266		-299	-302	-346	
17	245	-260	-247	-254		-276	-274	-341	
18	259	-259	-251	-249		-389	-282	-341	
19	273	-263	-240	-251		-383	-286	-329	
20	287								
21	301	-276	-461	-476		-469	-449	-427	
22	315	-272	-458	-476		-467	-456	-401	
23	329	-248	-442	-440		-422	-328	-161	
24	343	-249	-429	-427		-428	-410	-331	
25	357								
26	371	-245	-433			-467	-431		
27	385	-222	-397			-413	-391		
28	399	-218	-396			-410	-382		
29	413	-227	-412			-439	-392		
30	427	-226	-408			-431	-422		
31	462								
32	476	-241	-432			-446	-427		
33	490	-242	-406			-457	-422		
34	504	-235	-407			-457	-415		
35	518	-243	-417			-448	-428		
36	532	-252	-434			-447	-438		
37	546								
38	560	-241	-469			-484	-467		
39	547	-247	-448			-456	-454		
40	588	-235	-428			-441	-443		
41	602	-236	-457			-440	-452		
42	616	-249	-449			-442	-439		
43	630	-233	-445			-427	-445		
44	644								
45	658	-261	-330			-496	-477		
46	672	-247	-306			-418	-450		
47	686	-247	-278			-405	-417		
48	700								
49	714	-195	-416			-445	-435		

付表-23 供試体 C の OFF 電位 (2.0%)

OFF電位	塩分濃度2.0%	供試体 C				供試体			
サイクル	経過日数 (日)	(mV _{CSE})				(mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	14	-334	-299	-326					
2	21	-360	-315	-323					
3	49	-330	-299	-315					
4	63	-331	-279	-295					
5	77	-313	-262	-272					
6	91	-341	-267	-300					
7	105	-337	-281	-335					
8	119	-323	-376	-318					
9	133	-339	-269	-334					
10	147	-342	-286	-337					
11	161	-338	-415	-349					
12	175								
13	189	-365	-309	-337					
14	203	-354	-289	-309					
15	217	-356	-296	-324					
16	231	-354	-278	-316					
17	245	-345	-278	-296					
18	259	-353	-288	-296					
19	273	-345	-267	-319					
20	287								
21	301	-205	-491	-323					
22	315	-333	-479	-277					
23	329	-330	-461	-263					
24	343	-322	-425	-225					
25	357								
26	371	-326	-446						
27	385	-305	-408						
28	399	-321	-434						
29	413	-328	-433						
30	427	-331	-457						
31	462								
32	476	-346	-423						
33	490	-349	-429						
34	504	-360	-436						
35	518	-373	-454						
36	532	-362	-443						
37	546								
38	560	-368	-387						
39	547	-338	-370						
40	588	-329	-352						
41	602	-348	-365						
42	616	-334	-333						
43	630	-358	-349						
44	644								
45	658	-360	-351						
46	672	-355	-308						
47	686	-353	-263						
48	700								
49	714	-345	-321						

付表-24 供試体 D および E の OFF 電位 (2.0%)

OFF電位 サイクル	塩分濃度2.0% 経過日数 (日)	供試体 D (mV _{CSE})				供試体 E (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	14	-319	-332	-333		-320	-320	-306	
2	28	-301	-325	-339		-310	-317	-316	
3	56	-281	-316	-290		-302	-335	-286	
4	70	-290	-314	-298		-294	-281	-292	
5	84	-273	-304	-294		-276	-282	-287	
6	98	-332	-336	-320		-306	-290	-306	
7	112	-289	-304	-299		-285	-303	-280	
8	126	-283	-300	-302		-291	-295	-271	
9	140	-293	-306	-302		-297		-281	
10	154	-297	-307	-310		-303	-302	-279	
11	168	-284	-306	-307		-300	-297	-281	
12	182	-272	-306	-287		-292	-300	-279	
13	196	-311	-312	-297		-309	-297	-277	
14	210	-273	-318	-313		-297	-303	-265	
15	224	-267	-300	-299		-288	-286	-262	
16	238	-366	-288	-283		-297	-296	-268	
17	252	-273	-295	-295		-300	-293	-250	
18	266	-267	-288	-289		-284	-278	-224	
19	280								
20	294	-399	-281	-278		-276	-273	-240	
21	308	-425	-283	-284		-285	-279	-233	
22	322	-398	-278	-281		-287	-284	-246	
23	336	-364	-278	-280		-273	-277	-255	
24	350	-262	-242	-257		-242	-245	-193	
25	364								
26	378	-360	-287			-272	-278		
27	391	-270	-238			-237	-278		
28	406	-309	-264			-264	-293		
29	420	-257	-271			-279	-286		
30	434	-380	-262			-263	-287		
31	469								
32	483	-388	-479			-438	-275		
33	497	-394	-478			-430	-297		
34	511	-378	-476			-403	-304		
35	525	-374	-480			-347	-294		
36	539	-366	-504			-296	-290		
37	553								
38	567	-411	-510			-465	-312		
39	581	-329	-527			-426	-289		
40	595	-311	-488			-453	-288		
41	609	-327	-492			-364	-284		
42	623	-316	-485			-252	-274		
43	637	-321	-493			-268	-276		
44	651								
45	665	-483	-496			-460	-292		
46	679	-492	-486			-440	-306		
47	693	-416	-419			-397	-279		
48	707								
49	721	-464	-486			-446	-285		

付表-25 外部電源 0.2mA/m² および 1.0mA/m² の OFF 電位 (0.8%)

OFF電位 サイクル	塩分濃度0.8% 経過日数 (日)	0.2mA/m ² (mV _{CSE})				1.0mA/m ² (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	13	-331	-382	-289	-296	-327	-364	-403	
2	27	-304	-345	-253	-276	-327	-274	-246	
3	55	-232	-255	-224	-222	-280	-220	-200	
4	69	-217	-249	-195	-220	-258	-200	-178	
5	83	-215	-217	-157	-198	-202	-161	-163	
6	97	-201	-234	-176	-211	-208	-180	-183	
7	111	-165			-240	-214	-240	-193	
8	125	-183	-236	-197	-215	-224	-260	-197	
9	139	-171	-204	-166	-194	-189	-201	-168	
10	153	-163	-195	-160	-184	-184	-247	-161	
11	167	-165	-185	-152		-192	-264	-164	
12	181								
13	195	-162	-280	-176		-201	-345	-184	
14	209	-160	-325	-148		-165	-284	-163	
15	223	-154	-317	-144		-158	-271	-150	
16	237	-140	-357	-158		-190	-304	-164	
17	251	-127	-256	-120		-149	-214	-128	
18	265								
19	279	-108	-314	-158		-179	-205	-166	
20	293								
21	307	-237	-309	-167		-190	-249	-198	
22	321	-191	-322	-162		-163	-246	-206	
23	335	-117	-267	-114		-116	-176	-211	
24	349	-115	-298	-109		-126	-165	-129	
25	363								
26	377	-98	-293			-164	-194		
27	391	-63	-280			-131	-136		
28	405	-68	-275			-121	-145		
29	419	-149	-300			-138	-175		
30	433	-94	-273			-144	-171		
31	468								
32	482	-211	-313			-158	-248		
33	496	-158	-343			-159	-210		

付表-26 外部電源 2.0mA/m² および 4.0mA/m² の OFF 電位 (0.8%)

OFF電位 サイクル	塩分濃度0.8% 経過日数 (日)	2.0mA/m ² (mV _{CSE})				4.0mA/m ² (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	13	-375	-370	-266		-289	-298	-404	-277
2	34	-259	-268	-315		-217	-223	-301	-270
3	62	-227	-243	-264		-217	-190	-230	-248
4	76	-190	-255	-261		-220	-178	-230	-255
5	90	-169	-217	-236		-191	-171	-220	-236
6	104	-224	-256	-294		-247	-237	-254	-268
7	118	-358	-375	-328		-189	-186	-210	-247
8	132	-148	-204	-250		-204	-178	-203	-233
9	146	-175	-227	-248		-236	-203	-182	-226
10	160	-170	-221	-249		-183	-179	-196	-239
11	174	-192	-231	-257		-187	-187	-204	
12	188	-188	-189	-237		-162	-155	-173	
13	202	-172	-196	-241		-173	-148	-182	
14	216	-164	-182	-234		-181	-147	-198	
15	230	-161	-163	-227		-121	-130	-147	
16	244	-161	-168	-218		-129	-113	-157	
17	258	-150	-162	-215		-137	-125	-147	
18	272	-156	-156	-200		-138	-105	-123	
19	286								
20	300	-156	-154	-207		-147	-133	-155	
21	314	-155	-151	-211		-163	-143	-150	
22	328	-160	-146	-204		-175	-138	-139	
23	342	-120	-120	-173		-146	-117	-134	
24	356	-105	-94	-151		-128	-82	-94	
25	370								
26	384	-105	-154			-156	-113		
27	397	-47	-39			-95	-80		
28	412	-137	-118			-157	-112		
29	426	-122	-126			-110	-130		
30	440	-108	-108			-111	-93		
31	475								
32	489	-155	-163			-152	-159		
33	503	-154	-165			-180	-159		

付表-27 外部電源 0.2mA/m² および 1.0mA/m² の OFF 電位 (1.5%)

OFF電位 サイクル	塩分濃度1.5% 経過日数 (日)	0.2mA/m ² (mV _{CSE})				1.0mA/m ² (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	14	-435	-335	-390	-399	-533	-425	-393	
2	21	-468	-374	-408	-407	-554	-442	-420	
3	49	-427	-357	-397	-339	-443	-383	-398	
4	63	-396	-329	-376	-326	-481	-377	-346	
5	77	-369	-271	-360	-308	-405	-347	-315	
6	91	-381	-274	-347	-304	-419	-349	-311	
7	105	-392	-266	-377	-352	-420	-379	-306	
8	119	-417	-269	-380	-353	-464	-363	-307	
9	133	-396	-256	-380	-336	-427	-353	-290	
10	147	-393	-250	-390	-344	-412	-360	-293	
11	161	-392	-258	-374		-409	-370	-298	
12	175								
13	189	-446	-253	-418		-399	-384	-305	
14	203	-402	-240	-397		-369	-402	-284	
15	217	-420	-233	-395		-371	-383	-276	
16	231	-449	-228	-407		-374	-353	-262	
17	245	-375	-213	-360		-334	-345	-259	
18	259								
19	273	-428	-213	-383		-353	-288	-249	
20	287								
21	301	-388	-210	-382		-368	-376	-367	
22	315	-406	-206	-385		-359	-375	-364	
23	329	-368	-360	-329		-324	-311	-327	
24	343	-375	-188	-354		-337	-357	-317	
25	357								
26	371	-386	-165			-338	-324		
27	385	-369	-152			-319	-304		
28	399	-395	-208			-326	-325		
29	413	-409	-209			-336	-314		
30	427	-388	-183			-349	-332		
31	462								
32	476	-438	-384			-361	-365		
33	490	-442	-396			-378	-348		

付表-28 外部電源 2.0mA/m² および 4.0mA/m² の OFF 電位 (1.5%)

OFF電位 サイクル	塩分濃度1.5% 経過日数 (日)	2.0mA/m ² (mV _{CSE})				4.0mA/m ² (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	14	-371	-342	-353		-459	-421	-434	-350
2	28	-402	-362	-350		-443	-330	-395	-329
3	56	-370	-346	-308		-409	-277	-339	-289
4	70	-310	-310	-303		-352	-290	-347	-288
5	84	-331	-328	-336		-393	-269	-326	-279
6	98	-352	-398	-420		-390	-297	-353	-299
7	112	-394	-371	-272		-380	-283	-338	-251
8	126	-365	-381	-313		-329	-272	-320	-274
9	140	-331	-398	-337		-348	-279	-327	-279
10	154	-350	-383	-318		-351	-277	-319	-285
11	168	-352	-393	-325		-378	-282	-322	
12	182	-362	-341	-302		-323	-260	-295	
13	196	-373	-320	-309		-320	-258	-303	
14	210	-372	-324	-294		-318	-255	-305	
15	224	-377	-354	-295		-311	-241	-283	
16	238	-365	-322	-292		-320	-238	-294	
17	252	-333	-271	-276		-238	-258	-309	
18	266	-325	-335	-280		-219	-248	-274	
19	280								
20	294	-341	-338	-285		-267	-262	-282	
21	308	-379	-351	-284		-288	-264	-293	
22	322	-348	-329	-287		-278	-260	-284	
23	336	-314	-313	-266		-279	-261	-275	
24	350	-281	-305	-255		-264	-234	-234	
25	364								
26	378	-351	-322			-283	-246		
27	391	-249	-250			-198	-185		
28	406	-326	-301			-275	-211		
29	420	-347	-300			-225	-202		
30	434	-349	-288			-249	-213		
31	469								
32	483	-401	-343			-282	-214		
33	497	-410	-360			-317	-268		

付表-29 外部電源 0.2mA/m² および 1.0mA/m² の OFF 電位 (2.0%)

OFF電位 サイクル	塩分濃度2.0% 経過日数 (日)	0.2mA/m ² (mV _{CSE})				1.0mA/m ² (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	10	-505	-487	-564	-470	-288	-464	-482	
2	17	-540	-547	-563	-476	-254	-455	-513	
3	45	-465	-483	-501	-427	-240	-411	-438	
4	59	-440	-430	-475	-431	-245	-420	-418	
5	73	-413	-403	-433	-312	-211	-392	-396	
6	87	-423	-426	-460	-401	-232	-387	-391	
7	101	-469	-420	-471	-404	-239	-427	-423	
8	115	-438	-416	-478	-420	-236	-404	-437	
9	129	-410	-393	-462	-391	-228	-395	-415	
10	143	-415	-450	-465	-401	-230	-432	-418	
11	157	-415	-448	-448		-239	-437	-412	
12	171								
13	185	-463	-479	-484		-237	-456	-433	
14	199	-441	-445	-466		-226	-466	-393	
15	213	-419	-421	-462		-220	-436	-441	
16	227	-441	-467	-461		-207	-460	-451	
17	241	-389	-392	-453		-244	-384	-433	
18	255								
19	269	-411	-431	-433		-269	-415	-387	
20	283								
21	297	-424	-434	-442		-279	-404	-376	
22	311	-429	-430	-456		-277	-415	-414	
23	325	-397	-412	-437		-249	-373	-428	
24	339	-408	-413	-426		-252	-407	-418	
25	353								
26	367	-420	-502			-242	-404		
27	381	-396	-462			-240	-408		
28	395	-417	-495			-240	-450		
29	409	-444	-529			-240	-444		
30	423	-445	-519			-260	-451		
31	458								
32	472	-455	-448			-274	-492		
33	486	-459	-369			-269	-444		

付表-30 外部電源 2.0mA/m² および 4.0mA/m² の OFF 電位 (2.0%)

OFF電位	塩分濃度2.0%	2.0mA/m ²				4.0mA/m ²			
サイクル	経過日数 (日)	(mV _{CSE})				(mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	10	-402	-408	-438		-549	-296	-408	-416
2	24	-470	-403	-538		-606	-286	-436	-430
3	52	-431	-349	-451		-520	-288	-275	-377
4	66	-394	-361	-366		-474	-298	-287	-348
5	80	-386	-346	-420		-430	-275	-278	-324
6	94	-396	-361	-441		-430	-292	-298	-345
7	108	-239	-186	-394		-412	-310	-294	-326
8	122	-355	-345	-412		-409	-295	-279	-316
9	136	-398	-349	-417		-413	-293	-284	-319
10	150	-418	-350	-394		-395	-297	-277	-309
11	164	-433	-370	-449		-415	-307	-289	
12	178	-423	-358	-400		-410	-306	-274	
13	192	-413	-365	-419		-412	-326	-276	
14	206	-413	-368	-415		-402	-290	-275	
15	220	-409	-372	-419		-382	-294	-270	
16	234	-403	-359	-425		-358	-282	-276	
17	248	-391	-349	-385		-308	-371	-338	
18	262	-292	-348	-385		-289	-338	-278	
19	276								
20	290	-384	-354	-381		-370	-287	-301	
21	304	-391	-367	-397		-365	-432	-310	
22	318	-385	-356	-395		-370	-408	-312	
23	332	-366	-319	-341		-341	-275	-292	
24	346	-355	-285	-343		-309	-347	-281	
25	360								
26	374	-366	-326			-326	-279		
27	387	-282	-272			-270	-234		
28	402	-351	-326			-300	-280		
29	416	-378	-322			-299	-260		
30	430	-353	-302			-297	-271		
31	465								
32	479	-432	-444			-351	-292		
33	493	-468	-464			-366	-299		

付表-31 供試体 A および B の復極量 (0.8%)

復極量 サイクル	塩分濃度0.8% 経過日数 (日)	供試体 A (mV _{CSE})				供試体 B (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	15	184	175	229	246	153	148	151	
2	29	635	265	322	350	224	216	202	
3	57	504	290	357	308	206	215	227	
4	71	579	303	336	327	224	213	185	
5	85	417	314	339	337	249	214	134	
6	99	492	272	291	299	214	209	197	
7	113	452	268	320	317	264	243	244	
8	127	517	278	291	306	208	215	235	
9	141	396	292	290	319	240	224	235	
10	155	214	290	295	301	259	243	236	
11	169	281	252	239		185	163	172	
12	183								
13	197	198	234	225		167	157	148	
14	211	344	217	220		149	242	107	
15	225	262	234	237		192	175	113	
16	239	104	152	139		123	120	79	
17	253	54	169	161		131	145	109	
18	267	113	173	234		142	153	145	
19	281	179	171	169		152	155	122	
20	295								
21	309	448	96	86		123	63	157	
22	323	197	101	53		132	177	208	
23	337	116	74	152		116	140	131	
24	351	123	132	190		151	174	200	
25	365								
26	379	178	87			101	157		
27	393	191	127			143	156		
28	407	134	177			174	56		
29	421	214	128			141	85		
30	435	192	113			154	79		
31	470								
32	484	155	68			113	60		
33	498	121	59			161	74		
34	512	170	82			157	100		
35	526	146	52			130	53		
36	540	124	61			152	74		
37	554								
38	568	106	12			92	45		
39	582	145	25			132	66		
40	596	132	56			128	80		
41	610	151	68			121	79		
42	624	125	44			144	105		
43	638	115	52			170	111		
44	652								
45	666	122	39			95	93		
46	680	120	42			79	81		
47	694	200	73			137	123		
48	708								
49	722	105	28			98	45		

付表-32 供試体 C の復極量 (0.8%)

サイクル	塩分濃度0.8% 経過日数 (日)	供試体 C (mV _{CSE})				供試体 (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	15	340	651	349					
2	29	345	831	246					
3	57	382	851	339					
4	71	313	827	298					
5	85	337	673	320					
6	99	240	591	279					
7	113	319	839	335					
8	127	289	732	238					
9	141	284	481	220					
10	155	293	505	286					
11	169	186	79	183					
12	183								
13	197	177	95	148					
14	211	183	71	164					
15	225	156	225	205					
16	239	58	102	159					
17	253	156	127	96					
18	267	123	96	58					
19	281	141	151	166					
20	295								
21	309	135	768	-115					
22	323	172	698	75					
23	337	-25	777	149					
24	351	168	400	159					
25	365								
26	379	161	102						
27	393	158	117						
28	407	137	107						
29	421	144	130						
30	435	181	128						
31	470								
32	484	134	117						
33	498	153	225						
34	512	158	128						
35	526	155	225						
36	540	150	127						
37	554								
38	568	89	83						
39	582	237	168						
40	596	66	142						
41	610	178	145						
42	624	165	181						
43	638	213	211						
44	652								
45	666	138	90						
46	680	207	75						
47	694	189	119						
48	708								
49	722	189	208						

付表-33 供試体 D および E の復極量 (0.8%)

復極量 サイクル	塩分濃度0.8% 経過日数 (日)	供試体 D (mV _{CSE})				供試体 E (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	15	423	306	351		411	404	365	
2	36	193	756	309		478	411	402	
3	64	281	461	161		310	343	275	
4	78	454	390	253		302	311	258	
5	92	308	416	218		262	285	233	
6	106	307	344	216		266	302	210	
7	120	270	340	246		277	328	222	
8	134	273	403	253		333	346	252	
9	148	127	226	242		290	328	237	
10	162	257	327	275		301	303	225	
11	176	218	248	223		248	271	185	
12	190	624	227	237		250	286	201	
13	204	251	309	218		229	263	222	
14	218	228	163	205		228	276	211	
15	232	277	205	203		212	232	196	
16	246	122	226	234		233	254	204	
17	260	357	220	194		240	364	234	
18	274	260	250	220		252	256	216	
19	288								
20	302	259	285	217		251	194	229	
21	316	244	333	224		256	299	223	
22	330	286	306	218		258	288	237	
23	344	221	193	197		221	229	198	
24	358	259	258	220		283	167	238	
25	372								
26	386	216	311			254	260		
27	399	131	300			279	241		
28	414	246	298			234	123		
29	428	281	194			260	200		
30	442	262	205			262	189		
31	477								
32	491	216	301			250	133		
33	505	234	309			249	211		
34	519	244	242			260	195		
35	533	734	205			275	217		
36	547	291	355			274	63		
37	561								
38	575	186	311			245	220		
39	589	247	213			230	217		
40	603	264	473			236	154		
41	617	270	221			263	-5		
42	631	272	327			273	210		
43	645	274	267			270	256		
44	659								
45	673	229	147			202	209		
46	687	215	303			226	236		
47	701	193	343			235	206		
48	715								
49	729	171	143			219	218		

付表-34 供試体 A および B の復極量 (1.5%)

復極量 サイクル	塩分濃度1.5% 経過日数 (日)	供試体 A (mV _{CSE})				供試体 B (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	16	218	230	229	141	84	114	64	
2	23	287	285	280	251	129	146	117	
3	51	318	323	330	309	172	292	300	
4	65	321	294	298	247	128	258	248	
5	79	329	292	287	272	118	249	271	
6	93	284	263	265	235	159	223	260	
7	107	300	285	299	269	173	270	267	
8	121	277	279	290	238	181	248	268	
9	135	289	286	295	248	211	286	278	
10	149	284	284	298	263	200	246	271	
11	163	223	239	228		132	165	121	
12	177								
13	191	184	237	114		156	149	137	
14	205	197	246	119		150	156	83	
15	219	199	252	215		153	136	134	
16	233	122	200	219		90	58	52	
17	247	152	186	184		113	104	115	
18	261	149	163	191		97	69	55	
19	275	170	151	63		134	99	46	
20	289								
21	303	145	17	27		18	25	53	
22	317	157	31	-2		54	42	28	
23	331	140	17	28		20	29	-66	
24	345	169	54	37		47	34	12	
25	359								
26	373	27	28			80	53		
27	387	27	45			45	25		
28	401	54	7			48	5		
29	415	51	1			39	37		
30	429	33	-2			36	16		
31	464								
32	478	13	5			50	38		
33	492	40	3			10	17		
34	506	42	5			22	25		
35	520	42	12			12	5		
36	534	23	-19			-9	-16		
37	548								
38	562	19	15			0	-8		
39	576	27	4			6	16		
40	590	50	-3			23	3		
41	604	51	17			-4	6		
42	618	63	8			16	18		
43	632	36	-4			-5	5		
44	646								
45	660	56	6			14	11		
46	674	37	1			3	7		
47	688	45	24			39	48		
48	702								
49	716	13	17			1	22		

付表-35 供試体 C の復極量 (1.5%)

サイクル	塩分濃度1.5% 経過日数 (日)	供試体 C (mV _{CSE})				供試体 (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	16	326	319	307					
2	23	281	302	296					
3	51	307	374	337					
4	65	251	320	291					
5	79	283	332	319					
6	93	211	294	276					
7	107	303	293	310					
8	121	213	272	307					
9	135	252	279	313					
10	149	208	266	278					
11	163	74	148	183					
12	177								
13	191	24	151	191					
14	205	36	164	218					
15	219	56	182	213					
16	233	-20	72	130					
17	247	18	111	143					
18	261	-4	91	136					
19	275	-2	135	174					
20	289								
21	303	166	141	91					
22	317	22	106	158					
23	331	16	141	111					
24	345	27	150	154					
25	359								
26	373	18	95						
27	387	30	157						
28	401	7	132						
29	415	-23	142						
30	429	0	179						
31	464								
32	478	9	177						
33	492	-13	134						
34	506	15	158						
35	520	-3	145						
36	534	-5	139						
37	548								
38	562	0	96						
39	576	17	153						
40	590	3	147						
41	604	13	137						
42	618	-5	140						
43	632	5	161						
44	646								
45	660	-13	24						
46	674	-1	-5						
47	688	-9	56						
48	702								
49	716	6	11						

付表-36 供試体 D および E の復極量 (1.5%)

復極量 サイクル	塩分濃度1.5% 経過日数 (日)	供試体 D (mV _{CSE})				供試体 E (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	16	385	384	5		368	324	391	
2	30	357	369	171		377	369	340	
3	58	391	372	205		255	327	317	
4	72	370	357	211		295	316	318	
5	86	404	358	236		300	309	345	
6	100	374	250	235		185	317	287	
7	114	497	254	263		295	321	302	
8	128	397	257	267		291	334	306	
9	142	395	263	265		274	326	280	
10	156	395	262	268		267	312	263	
11	170	259	218	256		223	265	234	
12	184	279	191	252		242	273	243	
13	198	281	209	238		236	175	239	
14	212	286	182	238		224	266	236	
15	226	255	150	242		236	251	215	
16	240	387	177	263		223	268	224	
17	254	246	215	248		262	264	211	
18	268	264	116	261		248	286	224	
19	282								
20	296	309	119	263		256	292	237	
21	310	308	178	276		258	307	239	
22	324	406	121	254		283	308	218	
23	338	266	96	227		231	256	213	
24	352	255	123	268		277	311	213	
25	366								
26	380	249	95			232	283		
27	393	240	144			199	271		
28	408	265	110			259	285		
29	422	234	157			264	290		
30	436	233	154			276	305		
31	471								
32	485	258	308			69	256		
33	499	257	184			105	286		
34	513	230	176			115	271		
35	527	232	151			255	276		
36	541	241	178			258	273		
37	555								
38	569	246	175			100	272		
39	583	238	186			122	271		
40	597	255	140			115	267		
41	611	260	136			174	280		
42	625	274	247			260	300		
43	639	263	154			254	294		
44	653								
45	667	247	157			182	244		
46	681	223	156			214	260		
47	695	221	156			214	284		
48	709								
49	723	186	20			197	245		

付表-37 供試体 A および B の復極量 (2.0%)

復極量 サイクル	塩分濃度2.0% 経過日数 (日)	供試体 A (mV _{CSE})				供試体 B (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	14	140	205	158	207	73	74	99	
2	21	356	289	235	316	152	99	194	
3	49	216	334	367	350	302	356	416	
4	63	460	310	302	354	275	305	327	
5	77	436	348	337	331	285	312	315	
6	91	178	313	263	307	245	272	292	
7	105	281	338	292	318	267	256	289	
8	119	279	318	253	319	271	283	275	
9	133	203	323	286	288	257	261	269	
10	147	227	330	301	307	261	277	265	
11	161	152	242	236		126	189	221	
12	175								
13	189	148	223	225		131	167	187	
14	203	262	234	230		130	169	193	
15	217	282	228	229		147	189	213	
16	231	109	129	129		71	80	135	
17	245	175	163	162		119	119	148	
18	259	167	163	168		3	106	127	
19	273	165	190	170		41	113	158	
20	287								
21	301	147	18	19		21	15	51	
22	315	193	26	33		29	21	86	
23	329	125	22	22		38	125	294	
24	343	179	40	34		27	35	135	
25	357								
26	371	191	39			22	29		
27	385	188	17			23	37		
28	399	189	43			10	27		
29	413	170	37			8	25		
30	427	212	24			4	-9		
31	462								
32	476	164	25			23	23		
33	490	163	39			-10	-7		
34	504	209	43			16	21		
35	518	193	43			2	-1		
36	532	183	22			-6	-10		
37	546								
38	560	223	1			9	6		
39	574	181	18			6	-6		
40	588	183	30			11	-11		
41	602	169	17			7	-11		
42	616	155	8			-6	-2		
43	630	167	24			-15	2		
44	644								
45	658	159	82			-8	6		
46	672	159	66			13	-10		
47	686	127	150			24	4		
48	700								
49	714	112	-4			-15	-13		

付表-38 供試体 C の復極量 (2.0%)

サイクル	塩分濃度2.0% 経過日数 (日)	供試体 C (mV _{CSE})				供試体 (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	14	470	331	376					
2	21	686	318	381					
3	49	639	417	466					
4	63	526	328	343					
5	77	581	336	377					
6	91	501	305	323					
7	105	498	322	331					
8	119	535	217	340					
9	133	539	323	322					
10	147	598	313	299					
11	161	80	52	197					
12	175								
13	189	109	190	225					
14	203	112	204	248					
15	217	383	217	260					
16	231	220	115	144					
17	245	77	154	159					
18	259	173	135	110					
19	273	135	169	122					
20	287								
21	301	407	25	154					
22	315	337	30	263					
23	329	245	13	143					
24	343	178	47	209					
25	357								
26	371	250	48						
27	385	102	38						
28	399	86	9						
29	413	93	22						
30	427	42	9						
31	462								
32	476	106	46						
33	490	106	28						
34	504	71	47						
35	518	83	6						
36	532	81	25						
37	546								
38	560	64	85						
39	574	78	73						
40	588	147	96						
41	602	68	61						
42	616	114	78						
43	630	94	48						
44	644								
45	658	130	101						
46	672	41	166						
47	686	61	155						
48	700								
49	714	86	86						

付表-39 供試体 D および E の復極量 (2.0%)

復極量 サイクル	塩分濃度2.0% 経過日数 (日)	供試体 D (mV _{CSE})				供試体 E (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	14	271	254	322		370	369	304	
2	28	356	246	317		354	352	268	
3	56	347	277	340		297	274	216	
4	70	345	262	311		285	321	212	
5	84	359	282	308		274	332	199	
6	98	309	270	309		276	323	180	
7	112	329	292	310		252	330	211	
8	126	348	295	306		245	350	237	
9	140	334	309	328		246		252	
10	154	329	298	323		233	343	289	
11	168	283	265	240		197	243	227	
12	182	302	267	267		210	127	207	
13	196	252	247	239		200	259	211	
14	210	286	253	233		206	234	221	
15	224	305	268	264		222	276	221	
16	238	225	288	267		218	250	209	
17	252	309	284	288		214	274	231	
18	266	323	291	294		227	294	272	
19	280								
20	294	155	283	265		224	295	213	
21	308	154	290	277		233	298	257	
22	322	176	283	286		278	306	239	
23	336	196	280	270		214	290	221	
24	350	323	326	309		240	340	287	
25	364								
26	378	217	141			206	305		
27	391	264	215			93	265		
28	406	260	207			213	267		
29	420	315	222			235	120		
30	434	187	222			241	261		
31	469								
32	483	51	33			74	249		
33	497	187	27			90	265		
34	511	188	3			102	244		
35	525	209	3			167	268		
36	539	186	-2			223	265		
37	553								
38	567	131	11			49	214		
39	581	222	-20			82	252		
40	595	250	9			61	276		
41	609	229	7			137	269		
42	623	195	11			224	269		
43	637	143	10			224	285		
44	651								
45	665	19	16			52	230		
46	679	19	2			48	212		
47	693	56	63			99	260		
48	707								
49	721	18	11			44	238		

付表-40 外部電源 0.2mA/m² および 1.0mA/m² の復極量 (0.8%)

復極量 塩分濃度0.8%		0.2mA/m ²				1.0mA/m ²			
サイクル	経過日数 (日)	(mV _{CSE})				(mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	13	41	14	62	58	35	25	30	
2	27	22	-16	64	56	40	130	268	
3	55	155	105	131	101	132	262	461	
4	69	73	64	93	64	67	193	438	
5	83	94	91	137	95	146	243	446	
6	97	119	82	121	91	104	217	483	
7	111	180			65	259	229	453	
8	125	151	93	124	109	193	178	381	
9	139	154	120	178	120	176	245	427	
10	153	136	103	149	132	183	175	430	
11	167	123	119	160		141	170	367	
12	181								
13	195	166	69	181		154	81	365	
14	209	137	-5	164		160	107	375	
15	223	123	29	160		178	119	383	
16	237	149	-18	141		120	105	394	
17	251	172	76	220		347	244	888	
18	265								
19	279	166	-9	115		137	195	320	
20	293								
21	307	51	18	139		154	155	328	
22	321	86	14	136		160	142	301	
23	335	154	-8	148		155	196	194	
24	349	179	45	189		298	264	438	
25	363								
26	377	179	5			250	243		
27	391	223	-6			262	274		
28	405	178	4			277	262		
29	419	202	20			276	258		
30	433	197	18			291	261		
31	468								
32	482	132	18			338	198		
33	496	170	-6			370	259		

付表-41 外部電源 2.0mA/m² および 4.0mA/m² の復極量 (0.8%)

復極量 塩分濃度0.8%		2.0mA/m ²				4.0mA/m ²			
サイクル	経過日数 (日)	(mV _{CSE})				(mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	13	29	69	195		87	93	36	108
2	34	120	128	95		263	209	159	215
3	62	163	164	125		214	216	184	215
4	76	163	121	147		173	222	192	221
5	90	208	152	151		229	245	227	242
6	104	172	197	127		348	241	232	220
7	118	22	37	116		233	239	259	248
8	132	286	257	180		258	330	295	274
9	146	218	173	183		320	213	319	254
10	160	207	216	167		324	237	277	255
11	174	192	183	174		209	273	291	
12	188	190	200	166		229	230	266	
13	202	218	218	191		293	336	319	
14	216	240	238	191		263	330	315	
15	230	196	213	167		236	266	287	
16	244	231	197	170		350	278	227	
17	258	292	318	291		300	376	430	
18	272	181	201	172		335	286	250	
19	286								
20	300	189	214	197		376	246	250	
21	314	229	209	188		343	285	278	
22	328	214	232	205		371	261	258	
23	342	203	229	186		395	274	249	
24	356	265	264	234		427	285	313	
25	370								
26	384	326	290			607	330		
27	397	332	348			602	345		
28	412	265	299			623	388		
29	426	269	272			697	352		
30	440	297	298			751	425		
31	475								
32	489	321	315			753	387		
33	503	320	317			687	393		

付表-42 外部電源 0.2mA/m² および 1.0mA/m² の復極量 (1.5%)

復極量 サイクル	塩分濃度1.5% 経過日数 (日)	0.2mA/m ² (mV _{CSE})				1.0mA/m ² (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	14	-9	2	11	6	22	5	12	
2	21	-27	-15	3	-4	23	21	0	
3	49	47	122	62	75	109	74	83	
4	63	-13	1	20	19	-8	29	55	
5	77	11	54	3	33	69	52	105	
6	91	13	65	15	34	45	51	109	
7	105	23	75	0	24	64	71	152	
8	119	6	76	12	25	33	84	150	
9	133	18	90	5	34	53	88	138	
10	147	5	89	7	21	48	75	134	
11	161	-36	79	1		20	64	141	
12	175								
13	189	-27	91	-27		36	54	135	
14	203	-3	107	-11		27	27	144	
15	217	-10	116	-6		51	63	161	
16	231	-53	116	-28		34	75	160	
17	245	32	147	41		139	129	217	
18	259								
19	273	-47	125	-9		-40	110	156	
20	287								
21	301	-5	117	-20		49	58	58	
22	315	-8	146	4		42	44	72	
23	329	-5	-51	16		34	62	70	
24	343	50	172	28		70	70	142	
25	357								
26	371	29	166			78	94		
27	385	28	171			75	100		
28	399	-3	100			59	70		
29	413	3	127			74	95		
30	427	26	160			49	79		
31	462								
32	476	21	20			88	83		
33	490	11	26			87	119		

付表-43 外部電源 2.0mA/m² および 4.0mA/m² の復極量 (1.5%)

復極量 サイクル	塩分濃度1.5% 経過日数 (日)	2.0mA/m ² (mV _{CSE})				4.0mA/m ² (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	14	40	19	-4		53	91	46	109
2	28	54	51	-2		94	192	169	195
3	56	20	91	-11		74	253	220	255
4	70	74	51	9		46	243	196	240
5	84	70	77	98		30	272	209	252
6	98	80	50	101		85	246	213	240
7	112	63	97	211		67	280	228	316
8	126	77	85	116		155	300	245	292
9	140	118	66	101		86	276	206	269
10	154	103	75	132		79	278	224	267
11	168	124	60	108		69	266	218	
12	182	84	89	132		96	282	217	
13	196	102	142	167		135	299	266	
14	210	106	124	167		150	312	273	
15	224	71	72	132		91	294	241	
16	238	73	85	134		87	288	191	
17	252	193	231	276		341	364	349	
18	266	81	75	114		135	269	187	
19	280								
20	294	101	94	159		138	272	210	
21	308	65	97	166		138	268	231	
22	322	105	105	152		153	277	237	
23	336	97	118	131		118	256	202	
24	350	50	117	182		129	341	276	
25	364								
26	378	143	143			175	330		
27	391	169	167			236	365		
28	406	123	142			167	354		
29	420	106	145			207	349		
30	434	112	160			195	341		
31	469								
32	483	98	144			214	376		
33	497	92	118			175	329		

付表-44 外部電源 0.2mA/m² および 1.0mA/m² の復極量 (2.0%)

復極量 塩分濃度2.0%		0.2mA/m ²				1.0mA/m ²			
サイクル	経過日数 (日)	(mV _{CSE})				(mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	10	-5	16	7	-6	133	2	-18	
2	17	-4	-10	2	-14	202	10	-4	
3	45	66	85	59	39	336	68	81	
4	59	-8	-2	12	-3	320	19	-3	
5	73	21	17	21	109	306	11	21	
6	87	-12	-31	-13	-10	364	42	37	
7	101	7	32	19	27	396	30	43	
8	115	6	12	15	7	355	51	57	
9	129	30	6	19	18	346	42	54	
10	143	19	-10	6	19	305	22	46	
11	157	11	-16	4		325	29	53	
12	171								
13	185	-3	-9	-5		303	43	12	
14	199	-7	7	-3		304	-6	29	
15	213	-5	9	-8		343	20	3	
16	227	-29	-51	-12		351	-16	-16	
17	241	23	31	10		584	84	56	
18	255								
19	269	-6	-9	-8		226	-13	3	
20	283								
21	297	-9	6	7		202	22	39	
22	311	-9	3	3		224	16	43	
23	325	3	-11	-10		215	11	18	
24	339	24	15	17		292	45	40	
25	353								
26	367	10	-3			314	37		
27	381	13	32			293	14		
28	395	6	-17			311	-36		
29	409	6	15			275	-20		
30	423	4	-5			321	-11		
31	458								
32	472	22	15			338	-14		
33	486	3	23			423	42		

付表-45 外部電源 2.0mA/m² および 4.0mA/m² の復極量 (2.0%)

復極量 サイクル	塩分濃度2.0% 経過日数 (日)	2.0mA/m ² (mV _{CSE})				4.0mA/m ² (mV _{CSE})			
		①	②	③	④	①	②	③	④
1	10	22	20	-8		28	127	28	37
2	24	35	49	14		38	232	88	80
3	52	61	72	57		79	267	222	100
4	66	133	64	55		67	283	208	102
5	80	61	67	42		83	183	312	146
6	94	61	80	66		89	260	318	108
7	108	197	253	84		111	324	353	192
8	122	111	107	109		111	390	373	217
9	136	57	93	35		84	293	364	181
10	150	36	82	109		98	302	258	203
11	164	21	78	25		91	316	254	
12	178	37	73	73		83	282	273	
13	192	88	91	87		103	284	351	
14	206	90	94	91		88	295	322	
15	220	37	82	53		94	299	348	
16	234	41	64	44		107	269	270	
17	248	119	151	118		264	196	609	
18	262	125	72	62		163	164	205	
19	276								
20	290	60	89	79		107	500	234	
21	304	58	90	66		118	106	240	
22	318	56	99	63		126	154	278	
23	332	55	116	64		108	280	218	
24	346	108	170	86		183	168	271	
25	360								
26	374	138	147			227	457		
27	387	179	170			234	429		
28	402	116	110			203	371		
29	416	115	135			229	386		
30	430	136	128			220	380		
31	465								
32	479	76	48			190	444		
33	493	59	45			184	397		

付録 2

第 5 章にて使用したモニタリングデータを示す。

付表-46 供試体 A 個別データ (0.8%)

サイクル	経過日数 (日)	供試体 番号	電流密度 (mA/m ²)	オン電位 (mV _{CSE})	インスタント オフ電位 (mV _{CSE})	オフ電位 (48時間後) (mV _{CSE})	復極量 (mV)
1	15	①	0.582	-265	-263	-220	43
		②	0.963	-247	-236	-131	105
		③	0.742	-246	-244	-105	139
2	29	①	0.783	-350	-349	-268	81
		②	0.742	-232	-221	-244	-23
		③	0.762	-199	-198	-216	-18
3	43	①	0.762	-357	-356	-241	115
		②	0.762	-313	-307	-173	134
		③	1.003	-339	-338	-251	87
4	57	①	0.783	-343	-341	-203	138
		②	0.762	-299	-290	-170	120
		③	0.682	-290	-289	-217	72
5	71	①	0.742	-292	-291	-237	54
		②	0.742	-275	-270	-256	14
		③	0.783	-293	-292	-235	57
6	85	①	0.762	-274	-273	-212	61
		②	0.783	-244	-243	-217	26
		③	0.803	-280	-279	-239	40
7	98	①	0.863	-211	-210	-155	55
		②	0.803	-259	-258	-166	92
		③	0.823	-205	-204	-228	-24
8	113	①	0.702	-294	-293	-141	152
		②	0.702	-291	-283	-126	157
		③	0.943	-307	-306	-211	95
9	127	①	0.943	-255	-254	-102	152
		②	0.903	-300	-293	-92	201
		③	0.943	-259	-258	-129	129
10	142	①	0.823	-268	-267	-128	139
		②	0.803	-267	-258	-141	117
		③	1.044	-294	-293	-179	114
11	155	①	0.783	-257	-256	-126	130
		②	0.762	-278	-221	-133	88
		③	0.803	-246	-245	-168	77
12	169	①					
		②	0.722	-254	-246	-238	8
		③	0.963	-270	-269	-228	41
13	182	①					
		②	0.783	-303	-300	-177	123
		③	0.702	-322	-321	-203	118
14	196	①					
		②	0.863	-228	-227	-123	104
		③	0.702	-279	-278	-178	100
15	211	①					
		②	0.803	-253	-252	-164	88
		③	0.682	-253	-252	-174	78
16	224	①					
		②	0.762	-252	-251	-139	112
		③	0.562	-287	-286	-142	144
17	238	①					
		②	0.742	-231	-230	-123	107
		③	0.602	-256	-255	-137	118
18	253	①					
		②	0.642	-260	-259	-54	205
		③	0.562	-272	-271	-97	174
19	267	①					
		②	0.642	-205	-204	-71	133
		③	0.602	-240	-239	-89	150
20	280	①					
		②	0.602	-187	-186	-62	124
		③	0.542	-234	-223	-99	124
21	296	①					
		②	0.441	-210	-209	-94	115
		③	0.542	-265	-264	-129	135
22	309	①					
		②	0.481	-166	-165	-35	130
		③	0.522	-208	-207	-59	148

付表-47 供試体 A 個別データ (1.5%)

サイクル	経過日数 (日)	供試体 番号	電流密度 (mA/m ²)	オン電位 (mV _{CSE})	インスタント オフ電位 (mV _{CSE})	オフ電位 (48時間後) (mV _{CSE})	復極量 (mV)
1	15	①	0.542	-382	-381	-300	81
		②	0.662	-385	-384	-338	46
		③	0.702	-400	-398	-401	-3
2	29	①	0.722	-350	-349	-330	19
		②	0.722	-353	-352	-347	5
		③	0.722	-393	-391	-376	15
3	43	①	0.722	-343	-341	-311	30
		②	0.742	-377	-376	-336	40
		③	0.702	-396	-392	-333	59
4	57	①	0.622	-343	-342	-292	50
		②	0.722	-353	-352	-328	24
		③	0.722	-319	-314	-262	52
5	71	①	0.622	-310	-309	-252	57
		②	0.742	-340	-339	-312	27
		③	0.702	-344	-340	-235	105
6	85	①	0.622	-298	-287	-268	19
		②	0.742	-328	-327	-300	27
		③	0.803	-305	-301	-278	23
7	98	①	0.622	-303	-302	-317	-15
		②	0.783	-330	-329	-347	-18
		③	0.762	-356	-352	-288	64
8	113	①	0.522	-321	-320	-286	34
		②	0.702	-368	-367	-304	63
		③	0.682	-374	-366	-239	127
9	127	①	0.722	-319	-318	-261	57
		②	0.903	-342	-341	-281	60
		③	0.903	-368	-362	-224	138
10	142	①	0.582	-338	-337	-312	25
		②	0.783	-355	-354	-326	28
		③	0.762	-370	-367	-262	105
11	155	①	0.562	-310	-309	-327	-18
		②	0.742	-326	-325	-333	-8
		③	0.702	-311	-304	-270	34
12	169	①					
		②	0.702	-349	-348	-408	-60
		③	0.702	-350	-338	-318	20
13	182	①					
		②	0.722	-378	-377	-351	26
		③	0.562	-388	-381	-311	70
14	196	①					
		②	0.783	-287	-283	-265	18
		③	0.501	-354	-348	-291	57
15	211	①					
		②	0.762	-335	-332	-304	28
		③	0.501	-354	-354	-311	43
16	224	①					
		②	0.682	-340	-334	-279	55
		③	0.461	-362	-355	-292	63
17	238	①					
		②	0.702	-339	-335	-271	64
		③	0.481	-344	-339	-270	69
18	253	①					
		②	0.642	-352	-348	-198	150
		③	0.441	-343	-336	-215	121
19	267	①					
		②	0.642	-289	-283	-195	88
		③	0.522	-317	-310	-197	113
20	280	①					
		②	0.562	-279	-276	-200	76
		③	0.461	-311	-308	-178	130
21	296	①					
		②	0.321	-303	-299	-212	87
		③	0.401	-339	-333	-212	121
22	309	①					
		②	0.321	-263	-259	-171	88
		③	0.401	-247	-246	-151	95

付表-48 供試体 A 個別データ (2.0%)

サイクル	経過日数 (日)	供試体 番号	電流密度 (mA/m ²)	オン電位 (mV _{CSE})	インスタント オフ電位 (mV _{CSE})	オフ電位 (48時間後) (mV _{CSE})	復極量 (mV)
1	15	①	0.662	-368	-367	-417	-50
		②	0.783	-306	-298	-236	62
		③	0.662	-439	-438	-414	24
2	29	①	0.682	-441	-440	-428	12
		②	0.742	-328	-319	-298	21
		③	0.722	-418	-414	-418	-4
3	43	①	0.662	-427	-426	-404	22
		②	0.682	-353	-348	-258	90
		③	0.622	-409	-408	-397	11
4	57	①	0.682	-430	-429	-392	37
		②	0.662	-375	-367	-251	116
		③	0.682	-443	-442	-393	49
5	71	①	0.662	-430	-425	-358	67
		②	0.642	-367	-360	-238	122
		③	0.642	-403	-402	-346	56
6	85	①	0.662	-380	-379	-374	5
		②	0.642	-332	-326	-332	-6
		③	0.642	-357	-356	-335	21
7	98	①	0.702	-387	-386	-384	2
		②	0.722	-350	-349	-348	1
		③	0.702	-392	-390	-406	-16
8	113	①	0.642	-389	-388	-360	28
		②	0.702	-343	-342	-292	50
		③	0.923	-428	-426	-349	77
9	127	①	0.682	-400	-398	-334	64
		②	0.883	-370	-367	-288	79
		③	0.843	-415	-414	-335	79
10	142	①	0.542	-407	-406	-376	30
		②	0.742	-402	-397	-357	40
		③	0.803	-372	-369	-328	41
11	155	①	0.963	-380	-378	-393	-15
		②	0.742	-347	-346	-340	6
		③	0.803	-350	-349	-352	-3
12	169	①					
		②	0.722	-375	-374	-391	-17
		③	0.943	-376	-375	-402	-27
13	182	①					
		②	0.702	-410	-409	-390	19
		③	0.722	-426	-425	-404	21
14	196	①					
		②	0.722	-365	-364	-360	4
		③	0.783	-358	-357	-354	3
15	211	①					
		②	0.742	-351	-350	-364	-14
		③	0.762	-357	-355	-377	-22
16	224	①					
		②	0.662	-350	-349	-351	-2
		③	0.702	-381	-379	-377	2
17	238	①					
		②	0.722	-327	-326	-320	6
		③	0.963	-330	-329	-344	-15
18	253	①					
		②	0.702	-339	-338	-288	50
		③	0.742	-408	-406	-346	60
19	267	①					
		②	0.722	-307	-306	-295	11
		③	0.702	-358	-357	-341	16
20	280	①					
		②	0.722	-306	-305	-300	5
		③	0.722	-367	-366	-353	13
21	296	①					
		②	0.722	-348	-346	-348	-2
		③	0.722	-380	-379	-373	6
22	309	①					
		②	0.742	-279	-278	-274	4
		③	0.762	-312	-311	-329	-18

付表-49 供試体 C 個別データ (0.8%)

サイクル	経過日数 (日)	供試体 番号	電流密度 (mA/m ²)	オン電位 (mV _{CSE})	インスタント オフ電位 (mV _{CSE})	オフ電位 (48時間後) (mV _{CSE})	復極量 (mV)
1	15	①	1.003	-391	-388	-264	124
		②	0.803	-287	-286	-217	69
		③	0.783	-301	-298	-226	72
2	29	①	1.003	-279	-278	-339	-61
		②	1.003	-292	-288	-256	32
		③	0.963	-338	-329	-162	167
3	43	①	0.762	-324	-323	-233	90
		②	0.963	-288	-287	-217	70
		③	0.963	-296	-295	-226	69
4	57	①	1.023	-320	-319	-251	68
		②	1.003	-319	-318	-237	81
		③	0.963	-325	-324	-181	143
5	71	①	1.023	-302	-301	-239	62
		②	0.762	-270	-267	-189	78
		③	0.963	-300	-299	-155	144
6	85	①	0.823	-252	-251	-244	7
		②	0.843	-303	-302	-248	54
		③	0.803	-289	-288	-156	132
7	98	①	0.762	-191	-190	-226	-36
		②	1.023	-168	-167	-180	-13
		③	0.742	-172	-170	-125	45
8	113	①	0.662	-244	-243	-190	53
		②	0.943	-201	-200	-119	81
		③	0.642	-197	-196	-55	141
9	127	①	0.883	-218	-217	-191	26
		②	0.883	-195	-194	-172	22
		③	0.803	-258	-252	-100	152
10	142	①	0.823	-332	-331	-221	110
		②	0.883	-315	-314	-210	104
		③	0.762	-308	-301	-177	124
11	155	①	0.762	-227	-226	-298	-72
		②	0.823	-211	-210	-250	-40
		③	0.722	-248	-243	-247	-4
12	169	①					
		②	0.923	-247	-246	-247	-1
		③	1.044	-216	-214	-146	68
13	182	①					
		②	0.722	-332	-331	-179	152
		③	0.903	-208	-207	-129	78
14	196	①					
		②	0.783	-221	-220	-148	72
		③	0.682	-252	-251	-59	192
15	211	①					
		②	0.783	-193	-193	-109	84
		③	0.662	-229	-229	-31	198
16	224	①					
		②	0.943	-258	-256	-92	164
		③	0.923	-293	-292	-63	229
17	238	①					
		②	0.923	-203	-202	-98	104
		③	0.823	-233	-232	-15	217
18	253	①					
		②	0.662	-181	-180	-24	156
		③	0.783	-269	-264	-130	134
19	267	①					
		②	0.963	-234	-233	-58	175
		③	0.883	-287	-277	-139	138
20	280	①					
		②	0.722	-162	-161	-17	144
		③	0.762	-240	-235	-122	113
21	296	①					
		②	0.963	-216	-214	-53	161
		③	0.843	-300	-286	-167	119
22	309	①					
		②	0.762	-184	-183	-17	166
		③	0.622	-209	-208	-103	105

付表-50 供試体 C 個別データ (1.5%)

サイクル	経過日数 (日)	供試体 番号	電流密度 (mA/m ²)	オン電位 (mV _{CSE})	インスタント オフ電位 (mV _{CSE})	オフ電位 (48時間後) (mV _{CSE})	復極量 (mV)
1	15	①	0.501	-349	-348	-355	-7
		②	0.983	-393	-388	-340	48
		③	0.923	-385	-384	-301	83
2	29	①	0.582	-380	-379	-398	-19
		②	0.963	-346	-340	-333	7
		③	0.963	-356	-356	-362	-6
3	43	①	0.501	-368	-367	-372	-5
		②	0.923	-326	-324	-283	41
		③	0.863	-377	-376	-350	26
4	57	①	0.461	-395	-394	-341	53
		②	0.943	-338	-337	-301	36
		③	0.662	-400	-399	-324	75
5	71	①	0.441	-352	-351	-315	36
		②	0.943	-318	-317	-279	38
		③	0.682	-347	-346	-305	41
6	85	①	0.501	-376	-375	-338	37
		②	1.003	-339	-338	-287	51
		③	0.762	-383	-382	-376	6
7	98	①	0.461	-262	-261	-344	-83
		②	0.762	-260	-259	-275	-16
		③	0.702	-299	-298	-345	-47
8	113	①	0.401	-283	-282	-281	1
		②	0.742	-288	-287	-242	45
		③	0.682	-298	-297	-280	17
9	127	①	0.582	-298	-297	-254	43
		②	0.883	-287	-286	-230	56
		③	0.883	-335	-334	-272	62
10	142	①	0.501	-345	-344	-282	62
		②	0.803	-356	-355	-268	87
		③	0.803	-387	-386	-321	65
11	155	①	0.501	-263	-262	-375	-113
		②	0.803	-295	-294	-329	-35
		③	0.762	-317	-316	-306	10
12	169	①					
		②	0.742	-298	-297	-277	20
		③	0.682	-356	-352	-262	90
13	182	①					
		②	0.622	-292	-291	-257	34
		③	0.702	-330	-324	-241	83
14	196	①					
		②	0.702	-275	-274	-211	63
		③	0.702	-295	-292	-197	95
15	211	①					
		②	0.682	-260	-259	-213	46
		③	0.662	-298	-295	-226	69
16	224	①					
		②	0.702	-281	-280	-233	47
		③	0.642	-314	-308	-198	110
17	238	①					
		②	0.783	-273	-272	-226	46
		③	0.823	-298	-294	-219	75
18	253	①					
		②	0.762	-266	-264	-156	108
		③	0.662	-320	-311	-176	135
19	267	①					
		②	0.742	-259	-258	-141	117
		③	0.883	-307	-299	-147	152
20	280	①					
		②	0.742	-255	-254	-162	92
		③	0.742	-296	-290	-184	106
21	296	①					
		②	0.622	-292	-291	-174	117
		③	0.843	-346	-337	-214	123
22	309	①					
		②	0.742	-238	-237	-117	120
		③	0.682	-281	-279	-164	115

付表-51 供試体 C 個別データ (2.0%)

サイクル	経過日数 (日)	供試体 番号	電流密度 (mA/m ²)	オン電位 (mV _{CSE})	インスタント オフ電位 (mV _{CSE})	オフ電位 (48時間後) (mV _{CSE})	復極量 (mV)
1	15	①	0.742	-464	-463	-403	60
		②	0.421	-433	-432	-454	-22
		③	0.441	-538	-536	-496	40
2	29	①	0.662	-437	-435	-514	-79
		②	0.421	-457	-466	-496	-30
		③	0.582	-499	-497	-432	65
3	43	①	0.562	-445	-431	-418	13
		②	0.381	-427	-417	-445	-28
		③	0.562	-408	-397	-377	20
4	57	①	0.622	-380	-379	-356	23
		②	0.441	-427	-426	-409	17
		③	0.522	-418	-417	-389	28
5	71	①	0.622	-354	-351	-327	24
		②	0.441	-384	-383	-372	11
		③	0.562	-361	-357	-359	-2
6	85	①	0.863	-326	-323	-282	41
		②	0.461	-439	-429	-381	48
		③	0.963	-395	-394	-329	65
7	98	①	0.602	-294	-291	-294	-3
		②	0.481	-396	-395	-399	-4
		③	0.742	-339	-338	-319	19
8	113	①	0.642	-361	-356	-256	100
		②	0.501	-415	-414	-379	35
		③	0.702	-341	-340	-305	35
9	127	①	0.903	-372	-367	-255	112
		②	0.702	-437	-436	-385	51
		③	0.843	-378	-377	-303	74
10	142	①	0.783	-463	-463	-270	193
		②	0.582	-466	-415	-406	9
		③	0.742	-413	-412	-348	64
11	155	①	0.742	-361	-359	-363	-4
		②	0.642	-421	-420	-435	-15
		③	0.662	-311	-310	-372	-62
12	169	①					
		②	0.401	-424	-423	-430	-7
		③	0.903	-388	-387	-359	28
13	182	①					
		②	0.522	-405	-404	-389	15
		③	0.702	-369	-368	-333	35
14	196	①					
		②	0.642	-374	-373	-373	0
		③	0.682	-328	-327	-317	10
15	211	①					
		②	0.602	-359	-358	-374	-16
		③	0.702	-325	-324	-322	2
16	224	①					
		②	0.421	-375	-373	-376	-3
		③	0.682	-353	-352	-299	53
17	238	①					
		②	0.542	-364	-363	-379	-16
		③	0.602	-341	-340	-323	17
18	253	①					
		②	0.501	-375	-374	-358	16
		③	0.481	-345	-344	-296	48
19	267	①					
		②	0.762	-348	-347	-336	11
		③	0.421	-311	-310	-318	-8
20	280	①					
		②	0.501	-341	-340	-348	-8
		③	0.321	-325	-324	-349	-25
21	296	①					
		②	0.522	-372	-371	-370	1
		③	0.281	-353	-352	-350	2
22	309	①					
		②	0.582	-330	-329	-325	4
		③	0.301	-318	-317	-309	8

付表-52 外部電源 0.2mA/m² 個別データ (0.8%)

サイクル	経過日数 (日)	供試体 番号	オン電位 (mV _{CSE})	オフ電位 (48時間後) (mV _{CSE})	復極量 (mV)
1	15	①	-208	-168	40
		②	-218	-192	26
		③	-188	-175	13
2	29	①	-242	-183	59
		②	-196	-198	-2
		③	-214	-179	35
3	43	①	-291	-196	95
		②	-282	-187	95
		③	-242	-176	66
4	57	①	-266	-195	71
		②	-243	-363	-120
		③	-232	-164	68
5	71	①	-276	-202	74
		②	-217	-137	80
		③	-188	-125	63
6	85	①	-256	-192	64
		②	-206	-186	20
		③	-203	-189	14
7	98	①	-176	-169	7
		②	-135	-162	-27
		③	-117	-139	-22
8	113	①	-231	-225	6
		②	-186	-186	0
		③	-164	-188	-24
9	127	①	-327	-219	108
		②	-195	-195	0
		③	-234	-252	-18
10	142	①	-256	-185	71
		②	-161	-150	11
		③	-185	-196	-11
11	155	①	-187	-88	99
		②	-142	-132	10
		③	-146	-167	-21
12	169	①			
		②	-243	-175	68
		③	-247	-197	50
13	182	①			
		②	-143	-110	33
		③	-149	-165	-16
14	196	①			
		②	-147	-73	74
		③	-149	-138	11
15	211	①			
		②	-139	-55	84
		③	-115	-122	-7
16	224	①			
		②	-263	-125	138
		③	-210	-157	53
17	238	①			
		②	-218	-68	150
		③	-210	-152	58
18	253	①			
		②	-209	-86	123
		③	-150	-151	-1
19	267	①			
		②	-157	-52	105
		③	-146	-119	27
20	280	①			
		②	-136	-61	75
		③	-134	-133	1
21	296	①			
		②	-169	-75	94
		③	-207	-206	1
22	309	①			
		②	-109	-12	97
		③	-141	-136	5

付表-53 外部電源 0.2mA/m² 個別データ (1.5%)

サイクル	経過日数 (日)	供試体 番号	オン電位 (mV _{CSE})	オフ電位 (48時間後) (mV _{CSE})	復極量 (mV)
1	15	①	-359	-385	-26
		②	-372	-269	103
		③	-340	-288	52
2	29	①	-348	-503	-155
		②	-264	-278	-14
		③	-332	-333	-1
3	43	①	-382	-384	-2
		②	-352	-270	82
		③	-354	-316	38
4	57	①	-395	-352	43
		②	-308	-259	49
		③	-390	-318	72
5	71	①	-361	-333	28
		②	-315	-242	73
		③	-343	-261	82
6	85	①	-318	-294	24
		②	-310	-283	27
		③	-317	-291	26
7	98	①	-269	-273	-4
		②	-261	-266	-5
		③	-265	-264	1
8	113	①	-326	-316	10
		②	-297	-294	3
		③	-305	-315	-10
9	127	①	-315	-276	39
		②	-336	-325	11
		③	-351	-365	-14
10	142	①	-322	-331	-9
		②	-290	-286	4
		③	-299	-316	-17
11	155	①	-298	-329	-31
		②	-273	-265	8
		③	-288	-297	-9
12	169	①			
		②	-330	-259	71
		③	-355	-300	55
13	182	①			
		②	-250	-233	17
		③	-255	-264	-9
14	196	①			
		②	-244	-226	18
		③	-233	-251	-18
15	211	①			
		②	-237	-212	25
		③	-244	-257	-13
16	224	①			
		②	-334	-220	114
		③	-346	-266	80
17	238	①			
		②	-250	-176	74
		③	-295	-251	44
18	253	①			
		②	-264	-188	76
		③	-277	-248	29
19	267	①			
		②	-248	-159	89
		③	-247	-217	30
20	280	①			
		②	-248	-191	57
		③	-246	-253	-7
21	296	①			
		②	-263	-183	80
		③	-288	-280	8
22	309	①			
		②	-197	-130	67
		③	-232	-220	12

付表-54 外部電源 0.2mA/m² 個別データ (2.0%)

サイクル	経過日数 (日)	供試体 番号	オン電位 (mV _{CSE})	オフ電位 (48時間後) (mV _{CSE})	復極量 (mV)
1	15	①	-398	-396	2
		②	-432	-388	44
		③	-463	-443	20
2	29	①	-403	-402	1
		②	-423	-394	29
		③	-454	-463	-9
3	43	①	-391	-396	-5
		②	-408	-411	-3
		③	-397	-418	-21
4	57	①	-444	-400	44
		②	-461	-407	54
		③	-474	-429	45
5	71	①	-415	-371	44
		②	-401	-360	41
		③	-390	-358	32
6	85	①	-384	-388	-4
		②	-393	-358	35
		③	-386	-367	19
7	98	①	-343	-346	-3
		②	-326	-357	-31
		③	-299	-322	-23
8	113	①	-377	-376	1
		②	-384	-395	-11
		③	-345	-348	-3
9	127	①	-408	-406	2
		②	-380	-406	-26
		③	-376	-387	-11
10	142	①	-384	-388	-4
		②	-366	-340	26
		③	-357	-362	-5
11	155	①	-372	-342	30
		②	-346	-362	-16
		③	-347	-343	4
12	169	①			
		②	-413	-374	39
		③	-393	-343	50
13	182	①			
		②	-337	-349	-12
		③	-322	-328	-6
14	196	①			
		②	-340	-343	-3
		③	-326	-328	-2
15	211	①			
		②	-316	-332	-16
		③	-313	-323	-10
16	224	①			
		②	-397	-342	55
		③	-392	-321	71
17	238	①			
		②	-357	-340	17
		③	-367	-334	33
18	253	①			
		②	-331	-318	13
		③	-344	-325	19
19	267	①			
		②	-350	-311	39
		③	-325	-294	31
20	280	①			
		②	-301	-313	-12
		③	-362	-293	69
21	296	①			
		②	-380	-352	28
		③	-340	-333	7
22	309	①			
		②	-295	-280	15
		③	-297	-286	11

付表-55 外部電源 1.0mA/m² 個別データ (0.8%)

サイクル	経過日数 (日)	供試体 番号	オン電位 (mV _{CSE})	オフ電位 (48時間後) (mV _{CSE})	復極量 (mV)
1	15	①	-298	-217	81
		②	-300	-222	78
		③	-306	-228	78
2	29	①	-226	-190	36
		②	-228	-220	8
		③	-275	-229	46
3	43	①	-302	-185	117
		②	-324	-198	126
		③	-303	-212	91
4	57	①	-316	-193	123
		②	-320	-203	117
		③	-357	-236	121
5	71	①	-262	-171	91
		②	-340	-196	144
		③	-309	-214	95
6	85	①	-311	-237	74
		②	-312	-259	53
		③	-328	-257	71
7	98	①	-228	-181	47
		②	-197	-229	-32
		③	-201	-201	0
8	113	①	-255	-171	84
		②	-296	-215	81
		③	-249	-211	38
9	127	①	-297	-142	155
		②	-286	-255	31
		③	-388	-234	154
10	142	①	-239	-163	76
		②	-263	-230	33
		③	-254	-243	11
11	155	①	-194	-87	107
		②	-249	-176	73
		③	-205	-138	67
12	169	①			
		②	-287	-161	126
		③	-252	-160	92
13	182	①			
		②	-254	-113	141
		③	-211	-95	116
14	196	①			
		②	-249	-119	130
		③	-222	-91	131
15	211	①			
		②	-237	-107	130
		③	-203	-66	137
16	224	①			
		②	-295	-103	192
		③	-325	-75	250
17	238	①			
		②	-287	-135	152
		③	-294	-102	192
18	253	①			
		②	-285	-171	114
		③	-284	-141	143
19	267	①			
		②	-265	-105	160
		③	-237	-77	160
20	280	①			
		②	-262	-109	153
		③	-149	-73	76
21	296	①			
		②	-283	-124	159
		③	-284	-129	155
22	309	①			
		②	-239	-67	172
		③	45	-28	-73

付表-56 外部電源 1.0mA/m² 個別データ (1.5%)

サイクル	経過日数 (日)	供試体 番号	オン電位 (mV _{CSE})	オフ電位 (48時間後) (mV _{CSE})	復極量 (mV)
1	15	①	-337	-241	96
		②	-344	-323	21
		③	-454	-389	65
2	29	①	-338	-246	92
		②	-350	-359	-9
		③	-459	-421	38
3	43	①	-353	-217	136
		②	-375	-334	41
		③	-392	-416	-24
4	57	①	-408	-236	172
		②	-466	-362	104
		③	-482	-446	36
5	71	①	-371	-207	164
		②	-395	-334	61
		③	-391	-359	32
6	85	①	-342	-264	78
		②	-364	-370	-6
		③	-395	-397	-2
7	98	①	-324	-215	109
		②	-301	-293	8
		③	-336	-360	-24
8	113	①	-376	-252	124
		②	-357	-289	68
		③	-384	-356	28
9	127	①	-372	-286	86
		②	-394	-325	69
		③	-399	-352	47
10	142	①	-365	-282	83
		②	-343	-375	-32
		③	-365	-396	-31
11	155	①	-327	-372	-45
		②	-322	-328	-6
		③	-324	-322	2
12	169	①			
		②	-353	-324	29
		③	-358	-327	31
13	182	①			
		②	-317	-316	1
		③	-301	-284	17
14	196	①			
		②	-323	-330	-7
		③	-300	-276	24
15	211	①			
		②	-306	-328	-22
		③	-282	-290	-8
16	224	①			
		②	-370	-312	58
		③	-340	-309	31
17	238	①			
		②	-305	-301	4
		③	-313	-314	-1
18	253	①			
		②	-344	-312	32
		③	-324	-324	0
19	267	①			
		②	-350	-265	85
		③	-294	-268	26
20	280	①			
		②	-313	-294	19
		③	-286	-286	0
21	296	①			
		②	-290	-274	16
		③	-310	-311	-1
22	309	①			
		②	-259	-216	43
		③	-261	-255	6

付表-57 外部電源 1.0mA/m² 個別データ (2.0%)

サイクル	経過日数 (日)	供試体 番号	オン電位 (mV _{CSE})	オフ電位 (48時間後) (mV _{CSE})	復極量 (mV)
1	15	①	-479	-446	33
		②	-422	-411	11
		③	-422	-410	12
2	29	①	-481	-476	5
		②	-459	-454	5
		③	-421	-419	2
3	43	①	-445	-417	28
		②	-412	-395	17
		③	-405	-404	1
4	57	①	-490	-402	88
		②	-472	-419	53
		③	-468	-406	62
5	71	①	-413	-370	43
		②	-394	-341	53
		③	-411	-343	68
6	85	①	-411	-410	1
		②	-388	-377	11
		③	-399	-363	36
7	98	①	-372	-393	-21
		②	-358	-368	-10
		③	-332	-345	-13
8	113	①	-428	-397	31
		②	-417	-368	49
		③	-495	-340	155
9	127	①	-452	-426	26
		②	-422	-396	26
		③	-402	-391	11
10	142	①	-423	-431	-8
		②	-413	-431	-18
		③	-393	-393	0
11	155	①	-367	-386	-19
		②	-379	-392	-13
		③	-358	-344	14
12	169	①			
		②	-410	-386	24
		③	-394	-357	37
13	182	①			
		②	-367	-336	31
		③	-344	-321	23
14	196	①			
		②	-386	-355	31
		③	-338	-312	26
15	211	①			
		②	-366	-324	42
		③	-326	-315	11
16	224	①			
		②	-369	-330	39
		③	-410	-320	90
17	238	①			
		②	-381	-364	17
		③	-360	-313	47
18	253	①			
		②	-378	-343	35
		③	-355	-334	21
19	267	①			
		②	-403	-364	39
		③	-347	-303	44
20	280	①			
		②	-374	-361	13
		③	-333	-311	22
21	296	①			
		②	-421	-397	24
		③	-369	-352	17
22	309	①			
		②	-361	-352	9
		③	-292	-300	-8

付表-58 外部電源 2.0mA/m² 個別データ (0.8%)

サイクル	経過日数 (日)	供試体 番号	オン電位 (mV _{CSE})	オフ電位 (48時間後) (mV _{CSE})	復極量 (mV)
1	15	①	-298	-177	121
		②	-279	-193	86
		③	-302	-266	36
2	29	①	-318	-178	140
		②	-310	-214	96
		③	-332	-221	111
3	43	①	-340	-170	170
		②	-310	-176	134
		③	-349	-270	79
4	57	①	-342	-165	177
		②	-323	-134	189
		③	-349	-201	148
5	71	①	-295	-139	156
		②	-270	-110	160
		③	-309	-194	115
6	85	①	-257	-104	153
		②	-281	-125	156
		③	-288	-186	102
7	98	①	-209	-81	128
		②	-205	-90	115
		③	-221	-125	96
8	113	①	-265	-145	120
		②	-236	-82	154
		③	-264	-130	134
9	127	①	-202	-85	117
		②	-162	-68	94
		③	-200	-164	36
10	142	①	-246	-82	164
		②	-246	-100	146
		③	-264	-189	75
11	155	①	-238	-98	140
		②	-263	-93	170
		③	-249	-194	55
12	169	①			
		②	-229	-120	109
		③	-305	-249	56
13	182	①			
		②	-242	-107	135
		③	-282	-241	41
14	196	①			
		②	-280	-89	191
		③	-305	-171	134
15	211	①			
		②	-213	-123	90
		③	-270	-166	104
16	224	①			
		②	-365	-141	224
		③	-308	-144	164
17	238	①			
		②	-348	-110	238
		③	-308	-154	154
18	253	①			
		②	-124	-134	-10
		③	-183	-175	8
19	267	①			
		②	-232	-63	169
		③	-257	-128	129
20	280	①			
		②	-244	-61	183
		③	-266	-143	123
21	296	①			
		②	-239	-136	103
		③	-283	-181	102
22	309	①			
		②	-222	-19	203
		③	-253	-132	121

付表-59 外部電源 2.0mA/m² 個別データ (1.5%)

サイクル	経過日数 (日)	供試体 番号	オン電位 (mV _{CSE})	オフ電位 (48時間後) (mV _{CSE})	復極量 (mV)
1	15	①	-415	-373	42
		②	-433	-382	51
		③	-304	-219	85
2	29	①	-367	-355	12
		②	-416	-360	56
		③	-296	-310	-14
3	43	①	-355	-343	12
		②	-340	-328	12
		③	-348	-284	64
4	57	①	-475	-365	110
		②	-410	-323	87
		③	-353	-316	37
5	71	①	-341	-233	108
		②	-343	-250	93
		③	-322	-264	58
6	85	①	-303	-236	67
		②	-289	-247	42
		③	-328	-297	31
7	98	①	-228	-200	28
		②	-281	-241	40
		③	-272	-296	-24
8	113	①	-308	-199	109
		②	-331	-241	90
		③	-335	-296	39
9	127	①	-243	-196	47
		②	-297	-241	56
		③	-299	-311	-12
10	142	①	-280	-220	60
		②	-319	-257	62
		③	-317	-302	15
11	155	①	-280	-241	39
		②	-317	-282	35
		③	-309	-375	-66
12	169	①			
		②	-318	-276	42
		③	-315	-322	-7
13	182	①			
		②	-297	-263	34
		③	-273	-303	-30
14	196	①			
		②	-327	-271	56
		③	-303	-246	57
15	211	①			
		②	-304	-238	66
		③	-253	-280	-27
16	224	①			
		②	-360	-242	118
		③	-355	-280	75
17	238	①			
		②	-332	-322	10
		③	-334	-257	77
18	253	①			
		②	-344	-262	82
		③	-304	-236	68
19	267	①			
		②	-311	-240	71
		③	-273	-235	38
20	280	①			
		②	-272	-220	52
		③	-313	-239	74
21	296	①			
		②	-339	-264	75
		③	-293	-272	21
22	309	①			
		②	-292	-195	97
		③	-240	-184	56

付表-60 外部電源 2.0mA/m² 個別データ (2.0%)

サイクル	経過日数 (日)	供試体 番号	オン電位 (mV _{CSE})	オフ電位 (48時間後) (mV _{CSE})	復極量 (mV)
1	15	①	-259	-180	79
		②	-460	-433	27
		③	-480	-353	127
2	29	①	-366	-348	18
		②	-454	-387	67
		③	-478	-432	46
3	43	①	-420	-364	56
		②	-403	-393	10
		③	-406	-296	110
4	57	①	-411	-358	53
		②	-452	-377	75
		③	-448	-281	167
5	71	①	-384	-315	69
		②	-370	-325	45
		③	-396	-324	72
6	85	①	-398	-328	70
		②	-378	-332	46
		③	-373	-354	19
7	98	①	-306	-318	-12
		②	-314	-332	-18
		③	-330	-327	3
8	113	①	-347	-293	54
		②	-370	-313	57
		③	-393	-294	99
9	127	①	-333	-300	33
		②	-362	-338	24
		③	-359	-349	10
10	142	①	-338	-312	26
		②	-363	-343	20
		③	-383	-310	73
11	155	①	-344	-392	-48
		②	-363	-393	-30
		③	-381	-295	86
12	169	①			
		②	-357	-366	-9
		③	-379	-256	123
13	182	①			
		②	-324	-334	-10
		③	-363	-254	109
14	196	①			
		②	-351	-326	25
		③	-372	-238	134
15	211	①			
		②	-379	-333	46
		③	-453	-242	211
16	224	①			
		②	-410	-332	78
		③	-432	-230	202
17	238	①			
		②	-361	-345	16
		③	-418	-237	181
18	253	①			
		②	-368	-314	54
		③	-244	-211	33
19	267	①			
		②	-339	-318	21
		③	-371	-214	157
20	280	①			
		②	-342	-309	33
		③	-393	-228	165
21	296	①			
		②	-360	-350	10
		③	-400	-269	131
22	309	①			
		②	-313	-301	12
		③	-365	-218	147

付表-61 外部電源 4.0mA/m² 個別データ (0.8%)

サイクル	経過日数 (日)	供試体 番号	オン電位 (mV _{CSE})	オフ電位 (48時間後) (mV _{CSE})	復極量 (mV)
1	15	①	-322	-117	205
		②	-244	-122	122
		③	-294	-117	177
2	29	①	-315	-96	219
		②	-292	-86	206
		③	-322	-77	245
3	43	①	-308	24	332
		②	-295	-62	233
		③	-314	-32	282
4	57	①	-460	-110	350
		②	-410	-95	315
		③	-489	-112	377
5	71	①	-321	-83	238
		②	-320	-110	210
		③	-342	-74	268
6	85	①	-293	-68	225
		②	-313	-88	225
		③	-337	-112	225
7	98	①	-210	-89	121
		②	-240	-77	163
		③	-232	-64	168
8	113	①	-278	-51	227
		②	-284	-89	195
		③	-432	-65	367
9	127	①	-239	-39	200
		②	-249	-67	182
		③	-259	-57	202
10	142	①	-251	-104	147
		②	-282	-124	158
		③	-254	-86	168
11	155	①	-263	-111	152
		②	-277	-112	165
		③	-283	-102	181
12	169	①			
		②	-273	-181	92
		③	-293	-243	50
13	182	①			
		②	-242	-186	56
		③	-273	-197	76
14	196	①			
		②	-292	-182	110
		③	-298	-170	128
15	211	①			
		②	-289	-181	108
		③	-303	-200	103
16	224	①			
		②	-369	-177	192
		③	-443	-180	263
17	238	①			
		②	-360	-186	174
		③	-406	-177	229
18	253	①			
		②	-340	-88	252
		③	-403	-60	343
19	267	①			
		②	-258	-103	205
		③	-278	-79	306
20	280	①			
		②	-315	-69	246
		③	-319	-62	257
21	296	①			
		②	-258	-102	156
		③	-275	-72	203
22	309	①			
		②	-224	-59	165
		③	-227	-46	181

付表-62 外部電源 4.0mA/m² 個別データ (1.5%)

サイクル	経過日数 (日)	供試体 番号	オン電位 (mV _{CSE})	オフ電位 (48時間後) (mV _{CSE})	復極量 (mV)
1	15	①	-346	-342	4
		②	-443	-358	85
		③	-409	-323	86
2	29	①	-348	-259	89
		②	-397	-354	43
		③	-350	-153	197
3	43	①	-322	-319	3
		②	-360	-345	15
		③	-401	-103	298
4	57	①	-382	-320	62
		②	-460	-309	151
		③	-488	-198	290
5	71	①	-355	-274	81
		②	-382	-267	115
		③	-444	-201	243
6	85	①	-327	-242	85
		②	-339	-250	89
		③	-404	-322	82
7	98	①	-271	-265	6
		②	-300	-225	75
		③	-368	-223	145
8	113	①	-395	-251	144
		②	-299	-217	82
		③	-424	-221	203
9	127	①	-291	-232	59
		②	-258	-199	59
		③	-344	-200	144
10	142	①	-315	-278	37
		②	-292	-223	69
		③	-368	-241	127
11	155	①	-295	-276	19
		②	-296	-236	60
		③	-383	-244	139
12	169	①			
		②	-317	-283	34
		③	-389	-301	88
13	182	①			
		②	-276	-288	-12
		③	-352	-268	84
14	196	①			
		②	-302	-249	53
		③	-381	-242	139
15	211	①			
		②	-332	-294	38
		③	-360	-274	86
16	224	①			
		②	-398	-271	127
		③	-459	-253	206
17	238	①			
		②	-435	-259	176
		③	-396	-228	168
18	253	①			
		②	-304	-155	149
		③	-478	-188	290
19	267	①			
		②	-289	-165	124
		③	-390	-191	199
20	280	①			
		②	-424	-166	258
		③	-315	-204	111
21	296	①			
		②	-313	-195	118
		③	-422	-239	183
22	309	①			
		②	-266	-148	118
		③	-350	-190	160

付表-63 外部電源 4.0mA/m² 個別データ (2.0%)

サイクル	経過日数 (日)	供試体 番号	オン電位 (mV _{CSE})	オフ電位 (48時間後) (mV _{CSE})	復極量 (mV)
1	15	①	-394	-282	112
		②	-479	-392	87
		③	-401	-333	68
2	29	①	-490	-326	164
		②	-456	-359	97
		③	-417	-360	57
3	43	①	-412	-352	60
		②	-315	-334	-19
		③	-406	-303	103
4	57	①	-479	-379	100
		②	-371	-282	89
		③	-473	-355	118
5	71	①	-442	-322	120
		②	-312	-234	78
		③	-405	-324	81
6	85	①	-397	-309	88
		②	-368	-307	61
		③	-377	-374	3
7	98	①	-372	-327	45
		②	-336	-293	43
		③	-362	-325	37
8	113	①	-419	-324	95
		②	-355	-299	56
		③	-393	-302	91
9	127	①	-378	-320	58
		②	-340	-301	39
		③	-434	-350	84
10	142	①	-379	-332	47
		②	-348	-314	34
		③	-391	-289	102
11	155	①	-400	-340	60
		②	-345	-327	18
		③	-397	-308	89
12	169	①			
		②	-335	-339	-4
		③	-400	-367	33
13	182	①			
		②	-304	-344	-40
		③	-361	-365	-4
14	196	①			
		②	-353	-324	29
		③	-376	-356	20
15	211	①			
		②	-326	-343	-17
		③	-360	-374	-14
16	224	①			
		②	-416	-334	82
		③	-420	-348	72
17	238	①			
		②	-388	-320	68
		③	-433	-358	75
18	253	①			
		②	-388	-284	104
		③	-412	-320	92
19	267	①			
		②	-340	-276	64
		③	-376	-293	83
20	280	①			
		②	-333	-276	57
		③	-400	-320	80
21	296	①			
		②	-386	-322	64
		③	-384	-344	40
22	309	①			
		②	-305	-271	34
		③	-356	-303	53