

報 告

[1087] 電気防食法による港湾コンクリート構造物中の鋼材の防食

正会員○川俣孝治（住友セメント株式会社 技術開発センター）
 正会員 峰松敏和（住友セメント株式会社 技術開発センター）
 川田秀夫（財団法人 東京港埠頭公社）
 高橋久衛（化 工 建 設 株 式 会 社）

1 まえがき

塩害によるコンクリート構造物中の鋼材の腐食は、構造物の安全性の面からも非常に重要な問題であり、現在、その補修対策としては、樹脂系材料やポリマーセメントモルタル等によるコンクリート表面の被覆や断面修復等が実施されている。しかしながら、これらの補修方法では、完全な防食対策となり得ない場合もあり、再腐食の可能性も存在している。

一方、欧米においては、コンクリート中の鋼材の腐食対策としての電気防食法の研究が比較的早くから進められており、かなりの数の施工実例が報告されている。

我国においても、近年、この電気防食に関する研究^{1) 2)}が活発に行われ、その有効性が確認されるとともに、実際の補修工事への適用を目的とした開発^{3) 4)}も行われている。

本報告は、これらの研究・開発の成果に基づき、このコンクリート中の鋼材の電気防食法を、塩害による劣化の進行が問題と成りつつある港湾コンクリート構造物に適用することを目的とした試験施工を実施することとし、本工法の施工性の確認、通電試験における実構造物と実験レベルの試験結果との比較検討並びに防食効果の追跡調査等を行い、その実用性を確認することとした。今回は、これらのうち、施工方法および通電試験結果等について報告する。

なお、今回の施工において使用した陽極（アノード材）は、基礎研究の結果を参考とし、防食電流密度の均一性に比較的優れ、塩素ガス発生の危険性がなく、陽極自体の耐久性に優れている酸化金属被覆処理を施したチタンメッシュである。

2 補修構造物の概要

2. 1 補修対象構造物

今回の電気防食法による補修工事を実施した港湾コンクリート構造物は、図-1に示す構造のコンテナ埠頭で、昭和45年から4年間で建設された直ぐい式横棧橋である。補修対象とした部位は、鉄筋コンクリート（以下、RC）構造の前棧橋部における床版下面2面とこれに隣接する桁の下面と両側面及び杭頭上部の側面（総施工面積約125m²）並びにI型鋼格子状床版（以下、GR）構造である中棧橋部の床版下面2面（総施工面積約25m²）である。

2. 2 補修前調査結果

防食の対象とする構造物の劣化状況の把握並びに電気防食法の施工方法を決定することを目的として、以下の項目についての補修前調査を実施し、図-2及び図-3に示す結果を得た。なお、図-2には、本施工時に設置するモニタリング用の機器の位置も併記した。

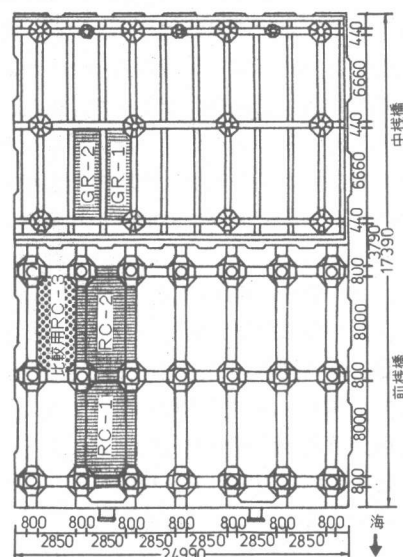


図-1 補修構造物の概要

① 目視観察および叩き点検：

〔RC部〕 RC-1の桁側面及びRC-2の梁隅角部に剥落が認められ、いずれもかぶり厚さが1～2cmと小さかった。また、叩き点検の結果、RC-1の桁側面の剥落部周辺、桁下面及びRC-2の杭頭上部側面に剥離部が確認できたが、鋼材腐食に起因すると考えられるひびわれは構造物全体を通じて認められなかった。なお、床版部のコンクリート表面には鉄筋が、桁側面には金属スペーサが露出していた。

〔GR部〕 下面の鋼板は、全てが完全に腐食しており、一部には鋼板の欠落も認められた。さらに、鋼板除去後のI型鋼の下面は全面が腐食しており、最大5mm程度の腐食層を有していた。また、GR-1のI型鋼間及びGR-2のハンチ部にジャンカが存在した。

② かぶり厚さ（ハツリおよび鉄筋探査計調査、RC部のみ）：

剥落部のかぶりは1～2cm程度、剥離部は3～4cm程度、その他の測定箇所では、6.5～8cm程度となっており、劣化現象の生じている箇所は、かぶり厚さが十分でなく、それ以外では、ほぼ設計通りのかぶり厚さが確保されていた。

③ 含有塩分量試験（電位差滴定法）：

ハツリ取ったかぶり部コンクリートを試料とし、含有塩分量を測定した結果、0.33～0.57% (C1-)とかなり多量の塩化物を含んでおり、また、海面に近いものほど多量の塩分を含有していた。なお、GR部の含有塩分量は、0.1%程度で、RC部よりかなり小さく、これは鋼板による遮塩効果が作用していたためと考えられる。

④ 自然電位（鉛電極使用）：

〔RC部〕 図-3の結果を、ASTM C 876に従って判断すると、RC部では、床版部及び桁上部で、-200mV (vs. CSE 換算、以下同じ)より貴で、腐食の可能性は小さいが、桁下面では、-200～-350mVの範囲にあり、不確定領域であった。なお、腐食領域である-350mVより卑な電位は認められなかった。また、RC-1と2を比較すると海側にあるRC-1の方が腐食程度が大きいようである。

〔GR部〕 測定値は、床版の両端部1m程度が-200～-350mVの範囲内にあり、中央部は-350mVより卑で、RC部よりも全体的に卑な電位であった。

2.3 調査結果の判定

上記の調査結果に基づくと、本構造物におけるRC部は、かぶり不足による剥離、剥落が一部に認められるが、他の部位は比較的健全で、腐食もあまり進行していないようである。しかしながら、含有塩分量や自然電位の測定結果によると、桁下面からの腐食の進行が推察され、現時点で、補修を行うことは、構造物の安全性の面から非常に有効と判断できる。

一方、GR部は、コンクリート中の含有塩分量は比較的小さいが、I型鋼の底面の腐食がかなり進行しており、出来るだけ早急に対策

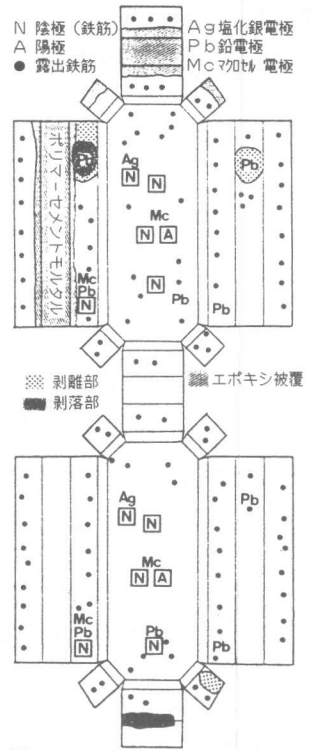


図-2 外観観察及びモニタリング用機器設置位置

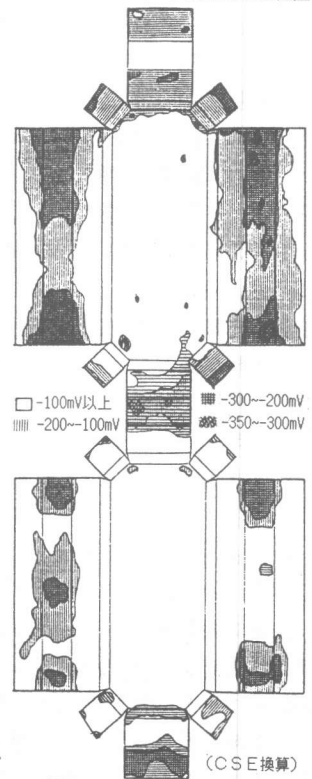


図-3 自然電位測定結果

を講じる必要があると判断できる。

3. 電気防食工法の施工

3.1 施工方法の選定

補修前調査の結果に基づき、本構造物に対して、コンクリート中の鋼材の腐食対策を中心とした補修工事を実施することとし、現状、防食効果が最も確実で、再補修等のメンテナンスの可能性が最も少ない外部電源法による電気防食法を検討することとした。また、防食電流を供給する陽極には、目開き 3.5×7.0cm のチタンメッシュに酸化金属の被覆処理を施したものをを用いることとした。電気防食法によるコンクリート構造物の防食工事は諸外国においては多数の施工例があるが、我国では、実験レベルでの検討及び小規模の試験施工例が存在するのみで、今回の施工で、実際規模の施工における施工性や防食効果の確認を行うこととした。

また、施工手順としては、調査結果に基づき、RC部は、剥離及び剥落部近傍のハツリ、露出鋼材の除去、モニタリング用の電極等の取付け、断面修復、プラスト処理、陽極取付け及び超速硬ポリマーモルタルの吹付けによる陽極のオーバーレイを行うこととした。

一方、GR部においては、鋼板除去後、I型鋼がむき出しとなるため、がぶりとするモルタル層を形成することとし、①ポリマーモルタルによるグラウト、②超速硬モルタルによる吹付けの2種類を比較することとした。なお、このかぶり層形成以外の施工方法は、RC部とほぼ同様にすることとした。

3.2 施工工程

施工手順のフローチャートを図-4に、RC部及びGR部の施工断面図を図-5に示す。また、使用材料及び使用機器の一覧を表-1に示す。

各々の施工工程の概略を以下に紹介する。

④ 足場工：足場は、電気防食施工面に金属片を残さず、施工面全面に一体化した施工を行うため、杭頭部に鋼製のバンドを取付け、これにH型鋼及び足場板を固定する構造とし、床版下面と足場の距離を1.8mとした。

⑥ ハツリおよび金属除去：RC部における剥離部及び剥落部近傍並びにGR部のジャンカ部をハツリ、劣化コンクリート部を除去した。また、コンクリート表面に露出した金属片を除去した。なお、この金属片の除去は、陽極と防食する鋼材が直接接触しないようにするため、接触した場合には、電気防食法が成立しないこととなる。

③ モニタリング用機器取付：モニタリング用の機器として、埋込み型の参照電極（鉛及び塩化銀電極）、マクロセル及び鉄筋からの排流を取付け

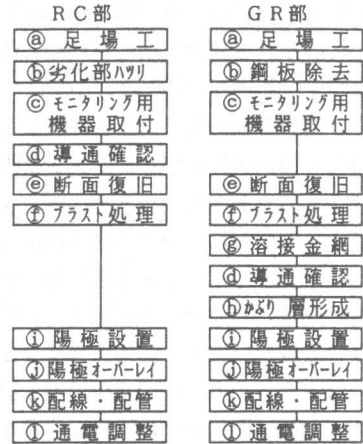


図-4 施行手順のフローチャート

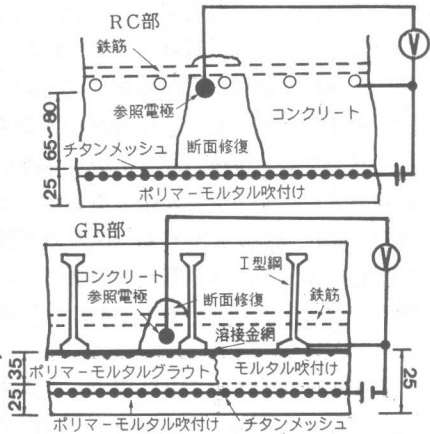


図-5 施工断面図

表-1 使用材料及び使用機器

陽極材	チタンメッシュ 3.5*7.0cmメッシュ
接続バー	チタン製バー B=12mm, t=1mm
メッシュ固定材	プラスチック製釘
断面修復材	早強セメントモルタル
かぶり層形成材	アクリル系リマスターモルタル注入材(グラウト)
オーバーレイ	超速硬セメントモルタル(吹付け)
参照電極	アクリル系リマスター添加超速硬セメントモルタル吹付け
モニター	鉛電極及び塩化銀電極
電源	直流電圧計 入力抵抗 = 100MΩ
	定電圧定電流電源 出力 16V, 5A 4台

表-2 使用材料の配合

施工法	セメント	ポリマー	W/C	S/C	P/C
断面修復	早強	-	50%	3	-
かぶり層形成材	普通	アクリル系	-	(KC71ル22)	-
吹付け	超速硬	-	50%	4	-
吹付け	超速硬	アクリル系	50%	4	12.5

ることとし、取付け位置は、図-2に併記した位置とした。なお、GR部の排流の取付けは、⑤の溶接金網取付け後に実施した。

④ 導通確認：③において取付けた排流点間及び排流と露出させている全ての鋼材との導通を確認し、防食対象全体に防食電流の供給が可能であることを確認した。

⑤ 断面復旧：RC部及びGR部の全ての断面欠損部に対して、腐食鋼材のケレン処理を行った後に、表-2に示す配合のモルタルを用いて欠損部の復旧を行った。なお、モニタリング関係部の断面復旧材は、塩分含有量の測定結果に基づき、等量の海水を添加したモルタルとした。

⑥ ブラスト処理：新旧材料の一体化及びGR部における腐食鋼材のケレンを目的としてサンドブラスト処理を実施した。

⑦ 溶接金網取付〔GR部のみ〕：新たに形成するかぶり層の安全性の向上及び鋼材間の確実な導通を目的として、10cmメッシュの溶接金網を鋼材に溶接した。

⑧ かぶり層形成〔GR部のみ〕：露出鋼材のかぶり層を新たに形成する方法として、①グラウト法、②吹付け法の2種類を検討した。①のグラウトは、型枠取付け後、表-2のアクリル系のポリマーモルタルの注入を行い、②の吹付けは、表-2の超速硬モルタルの吹付けを実施した。その結果、双方とも施工性自体に対する問題は全くなかったが、①のグラウトによる場合には、型枠設置及び養生・解体の作業をとまなうため、②の吹付け法と比較した場合には、工程的に長くなった。一方、②の吹付けは、型枠設置の必要がなく、さらに、超速硬セメントを使用したため、次の潮間には、次工程の作業が可能で、工期の短縮に非常に有効であった。

⑨ 陽極設置：陽極となるチタンメッシュを防食対象とする鋼材のかぶりコンクリート面に、専用のプラスチック釘を用いてを固定した。また、メッシュには、リード線の接続及びメッシュ間の接続用として、幅12mm、厚さ1mmのチタン製のバーを溶接した。なお、RC-1においては、船舶への給水設備固定用の鋼材があり、この回り15cm以内への陽極の設置は実施しなかった。

⑩ 陽極オーバーレイ：陽極から防食電流を確実に供給するため、陽極をコンクリート表面に密着させること、陽極の浮き上がりを防止すること及び陽極自体の防護を目的として、陽極面全体に表-2に示すアクリル系のポリマーを添加した超速硬モルタルを25mm厚さで吹付け施工した。また、吹付け施工に先立ち、厚さ管理用の樹脂製アンカーを3本/m²を取付けた。このポリマー吹付けモルタルおよび⑧-②の吹付けモルタルは、供用中の鉄道高架橋等の補修工事への適用実績を多数有する^{たとえば5)}ものであり、今回の施工において、電気防食工法への適用性にも優れていることが確認できた。

⑪ 配線・配管：陽極と陰極である鉄筋からの排流による通電回路の形成並びにモニタリング回路を形成するため、施工場所から通電装置設置場所までの配管・配線工事を実施した。

4 通電試験結果及びその検討

4.1 防食電位の設定基準

防食電位の設定に関しては、これまでの研究結果³⁾を参考として、E log I試験を行い、防食電流密度を設定することとした。設定する電流密度は、E log I試験における-100mVシフト及び-200mVシフトの2水準を比較・検討することとした。-100mVシフトは、NACE基準⁶⁾に準ずる防食設定電位で、-200mVシフトは、より確実な防食効果を得ることを目的として実施・検討することとした。試験結果の一覧を試験手順に従って表-3に示す。

4.2 E log I試験

図-6及び7にI Rドロップを考慮したE log I試験結果の一例を示す。この結果によると、RC部においては、比較的低電流密度で所定の防食電位を設定することが可能であるが、GR部では、RC部よりも多量の電流密度が必要で、特に、ポリマーモルタルでかぶり層を形成した

表-3 通電試験結果の一覧 (vs. Ag/AgCl)

施工場所	防食前 電位 mV	E log I試験 (-100mVシフト)		通電試験 (通電開始時) (-100mVシフト)			通電試験 (1週間通電後) (-100mVシフト)			分極試験 (-100mVシフト)				
		電流 密度 mA/m ²	使用 電流量 A	設定電 流密度 mA/m ²	使用電流量		通電開 始時鉄 筋電位 mV	使用電 流密度 mA/m ²	使用電流量		1週経 過後鉄 筋電位 mV	インスト off 電位 mV	4時間 後復極 量mV	2日 後復極 量mV
					電流 A	電圧 V			電流 A	電圧 V				
RC-1	-60 ~-130	8 ~10	0.50 ~0.63	10	0.65	2.0	-350 ~-380	7.7	0.48	2.0	-350 ~-410	-230 ~-310	120 ~170	140 ~200
RC-2	-40 ~-110	6 ~8	0.38 ~0.50	8	0.50	1.5	-270 ~-390	5.4	0.34	1.5	-300 ~-410	-210 ~-300	130 ~150	150 ~170
GR-1	-90 ~-150	20 ~25	0.24 ~0.30	25	0.30	1.2	-440 ~-480	20.8	0.25	1.2	-450 ~-490	-320 ~-350	130 ~140	160 ~180
GR-2	-100 ~-190	70 ~80	0.91 ~1.04	80	1.05	5.2	-340 ~-360	62.3	0.81	5.2	-420 ~-460	-390 ~-430	50 ~70	120 ~200
		(-200mVシフト)		(-200mVシフト)			(-200mVシフト)			(-200mVシフト)				
RC-1	-60 ~-130	16 ~22	1.00 ~1.38	22	1.38	3.6	-860 ~-950	17.3	1.08	3.6	-860 ~-970	-390 ~-480	260 ~280	310 ~350
RC-2	-40 ~-110	11 ~15	0.69 ~0.94	15	0.94	2.8	-690 ~-880	12.0	0.75	2.8	-700 ~-900	-420 ~-500	300 ~340	360 ~380
GR-1	-90 ~-150	75 ~80	0.90 ~0.96	80	0.96	2.9	-830 ~-860	70.8	0.85	2.9	-860 ~-880	-340 ~-400	190 ~220	220 ~230

GR-2は、非常に多量の電流の供給が必要である。この原因としては、GR部の鋼材が投影面積でRC部の1.67倍と大きいこと、GR部の埋込み参照電極の位置が鋼材の内側に位置していること及びポリマーによる影響等が考えられるが、これらに関しては追跡調査や室内実験等を実施し、確認する必要がある。

4. 3 通電時の経時変化

図-8に通電時の電位の経時変化の一例として-100mVシフトの場合を示す。RC部及びGR-1における電位の挙動は、通電初期に若干の電位の卑化が認められ、その後は、海側にあるRC-1において、乾湿の影響による電位の変化が若干認められるが、ほぼ安定した電位が保持されている。また、構造形式が異なるRC-2とGR-1の電位の挙動は、絶対値が異なるほかは、ほぼ同様な変化を示していた。

一方、ポリマーモルタルでかぶり層を形成したGR-2は、時間の経過とともに電位の卑化が認められ、通常とは全く異なった挙動を示した。これは、ポリマーの影響により、モルタルの電気抵抗値が通常のコンクリートより大きくなり、防食電流の供給が徐々に行われているためと推察される。なお、この傾向は、このポリマーモルタルをかぶり層とした場合、防食電流密度の管理が通常よりは困難となるが、常時通電を行うことを前提とすると、所定の防食電流

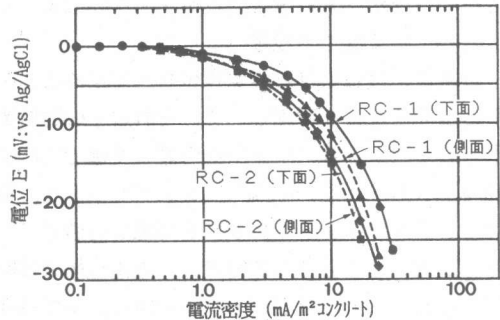


図-6 E log I試験結果 (桁部)

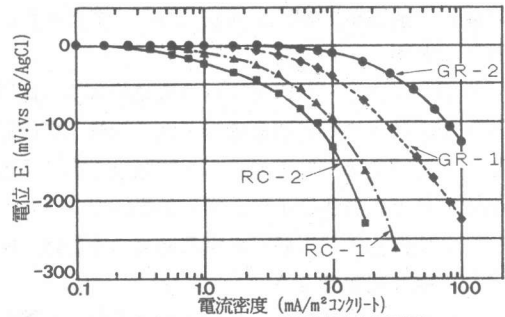


図-7 E log I試験結果 (床版部)

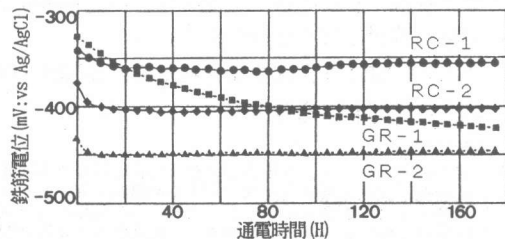


図-8 通電時の鉄筋電位の経時変化

密度を得ることは可能と考えられる。なお、通電1週後の電流密度は、いずれの場合も初期設定値をかなり下まわっており、少ない電流密度で通電が行われていた。

4. 4 分極試験

通電開始後、1週間で通電を停止し、鉄筋電位の復極状況を測定した結果の一例として図-9に-100mVシフトの場合を示す。この結果及び表-3に基づく、RC部及びGR-1においては、いずれも4時間後の電位差で所定の分極量が得られ、防食性は確保されているが、比較的少量の電流密度で-200mVシフトが可能なRC部においては、より確実な防食効果が得られる-200mVシフトを採用する方が得策と考えられる。

一方、GR-2においては、通電時の経時変化と同様に復極も徐々に進行しており、4時間程度の分極では全く不十分で、図-9の測定範囲内においても完全な復極は得られず、約1か月程度を要したが、分極量は所定値をかなり上まっていた。

4. 5 防食電位の設定

本補修工事における防食電位を設定することを目的として実施した通電試験の結果及び陽極自体の長期安定性を考慮し、それぞれ以下の通電量で電気防食を開始することとした。

- ① RC部：IRドロップを考慮した値で-200mVシフトが得られる電流密度とし、RC-1を23 mA/m²、RC-2を15mA/m²（コンクリート表面積当り、以下同様）とした。
- ② GR-1：IRドロップを考慮した値で-100mVシフトが得られる電流密度で、25mA/m²とした。なお、この設定電流密度は、陽極自体の長期安定性を考慮した値である。
- ③ GR-2：IRドロップを考慮した値で-100mVシフトが得られる電流密度で、80mA/m²で通電を開始することとしたが、供給電流密度が非常に大きいため、通電による供給電流量の低下を考慮し、通電量の調整を頻繁に行い、できるだけ少ない電流密度で防食することとした。

5 まとめ

港湾コンクリート構造物への電気防食法の適用を検討するための試験施工として、チタンメッシュを陽極とする方法を栈橋下面の補修工事に適用した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 本工法による施工は、何ら問題なく施工することが可能で、特に、超速硬セメントモルタルの吹付けは、急速施工に非常に効果的であった。
- 2) I型鋼格子状床版への電気防食の適用は、所要通電電流密度が大きくなる傾向にあるが、十分に可能と判断できる。
- 3) ポリマーセメントモルタルによるかぶり層の形成は、防食電流の供給及び通電停止後の復極が徐々に起こり、防食電位の管理に若干問題がある。また、この傾向については、実験レベルでの詳細な検討を行う必要がある。

なお、本施工を実施するにあたり、御指導・御協力を頂いた、鹿児島大学武若助教授及び同大学院馬庭秀司君に謝意を表する。

<参考文献>

- 1) 建設省：コンクリート構造物の電気防食に関する共同研究報告書，1988，8
- 2) 武若他：鉄筋の電気防食法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10，No.2，1988
- 3) 武若他：外部電源法によるコンクリート中の鉄筋の電気防食に関する研究，日本コンクリート工学協会，JCI-C15，1989，1
- 4) 馬庭他：電気防食法のコンクリート構造物への適用に関する研究，土木学会第44回年次学術講演会，1989，10
- 5) 浅野他：超速硬セメントと鋼繊維を用いた吹付けコンクリートによる急速補修工事，コンクリート工学，Vol.23，No.2
- 6) NACE Recommended Practice RP-01-69(84)

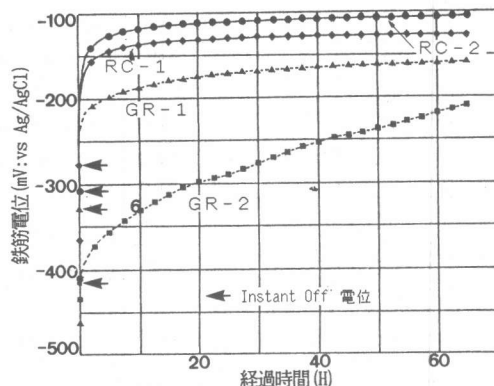


図-9 通電後の分極量測定結果