

報告 アルミニウム-亜鉛系溶射膜を用いた流電陽極方式による鉄筋コンクリート構造物のカソード防食

竹谷正造*1・松田史朗*2・渡辺邦夫*3・山岸浩一*3

要旨：金属溶射膜を用いた流電陽極方式による鉄筋コンクリート構造物の電気防食法の確立を目的として、溶射材料の開発、試験体規模での溶射膜の防食効果の評価、および実構造物への適用について試験を実施した。その結果、本研究で開発されたAl-Zn-In系合金の溶射膜は、コンクリート中の鉄筋に対して十分な防食性能を有することが、試験体規模における評価試験、および実構造物での適用性試験によって明らかになった。

キーワード：鉄筋コンクリート、腐食、電気防食、流電陽極、溶射膜

1. はじめに

最近、塩害で劣化を受けたコンクリート構造物の補修対策の一つとして、電気防食法が我国においても注目されてきており、すでに実構造物の補修工事への適用を目的とした検討も行われている[1]。さらに新設構造物へ適用される事例も報告されている[2]。

コンクリート構造物に対する電気防食法については、外部電源方式および流電陽極方式による各種の方式が提案されている。

流電陽極方式の電気防食は外部電源方式に比較して、施工の簡便性や維持管理に要する労力が大幅に低減されるという利点を有していると思われる。また、鉄筋と陽極の短絡による防食性能の低下の心配が全くなく、過度の電流が流れて構造物を破損させる過防食の危険性も極めて少ない。このため、高性能の陽極材料の開発と陽極の設置に関する工法が確立されるならば、この方法は今後極めて有効になり得るとと思われる。我々は陽極の設置方法として、比較的簡便に工事ができる溶射法[3]に着目し、この方法によって得られた金属溶射膜の防食性能について検討した。

本報においては、金属溶射膜を用いた流電陽極方式による鉄筋コンクリート構造物の電気防食法の確立を目的として、①溶射材料の開発、②試験体規模における溶射膜の防食効果の評価、③実構造物への適用、について良好な結果が得られたので、これらについて報告する。

2. 流電陽極合金の開発

2.1 Al-Zn合金の流電陽極特性

AlにZnを0~90wt%添加したAl-Zn二元合金を作製し、コンクリート模擬液中において流電陽極特性の合金組成による変化を調べた。表-1に使用したコンクリート模擬液の組成を示す。測定方法は(社)腐食防食協会による流電陽極特性の測定方法[4]に準拠したが、電流密度 10A/m^2 、通電期間10日間とした。解析項目は、発生電気量(合金の単位減少量当たりの通電電気量:電流効率に相当する値)と自然電位とした。

*1 住鋳防蝕(株) エンジニアリング部 (正会員) *2 住鋳防蝕(株) 技術部

*3 住友金属鋳山(株) 中央研究所

表-1 コンクリート模擬液の組成

| 化合物 | 濃度 (kmol·m ⁻³) |
|---------------------|----------------------------|
| KCl | 0.431 |
| NaOH | 0.613 |
| KOH | 0.178 |
| Ca(OH) ₂ | 0.013 |

試験結果を図-1に示す。純Alの自然電位は低いが、発生電気量も極めて低い。これはAlが通電しなくても自己腐食により減量するためである。しかし、Znの添加によって自己腐食が抑制されて、発生電気量は、ある程度まで増加するようになる。しかし、Zn含有量が50wt%越えると自然電位が大幅に上昇して不安定となる。これは、高Zn含有量領域では試料表面に不働態皮膜が形成されて、アノード溶解し難くなったためと考えられる。以上の結果からコンクリート環境中においてAl-Zn二元合金ではどのような組成においても、発生電気量が大きく、かつ自然電位が十分に低いという良好な流電陽極特性は得られなかった。

2.2 Al-Zn-In合金の流電陽極特性

前節の結果をふまえて、Znの組成範囲を10~50wt%とし、これにInを0.05~0.5wt%添加したAl-Zn-In三元合金を作製して、前節と同様の流電陽極特性試験を行った。結果を図-2および図-3に示す。

発生電気量は、いずれのZn含有量においてもInを0.05wt%以上添加することによって急激に増加するが、さらに添加量を増してもあまり大きな変化はない。Zn含有量が20wt%以下の合金において自然電位は、In含有量が0.1wt%まではIn添加によって低下し、それ以上添加量を増してもあまり変化せず約-1600mVで一定となる。Zn含有量30wt%以上の合金では、比較的自然電位が高く、また測定値の再現性が悪い。

以上の結果を総合して、コンクリート環境中において良好な流電陽極特性を示す合金の組成範囲は、Znが10~30wt%、Inが0.05~0.3wt%であることが分かった。

3. 鉄筋に対する溶射膜の防食効果の評価

3.1 試験方法

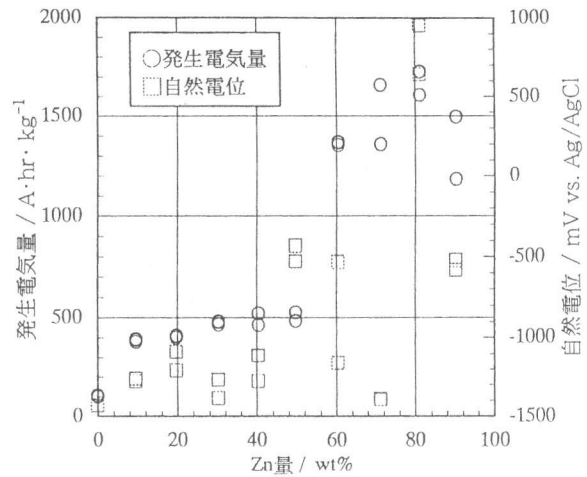


図-1 Al-Zn合金の流電陽極特性

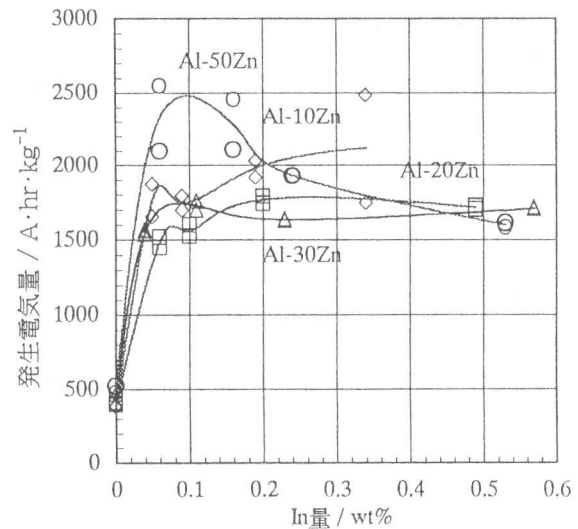


図-2 Al-Zn-In合金の発生電気量

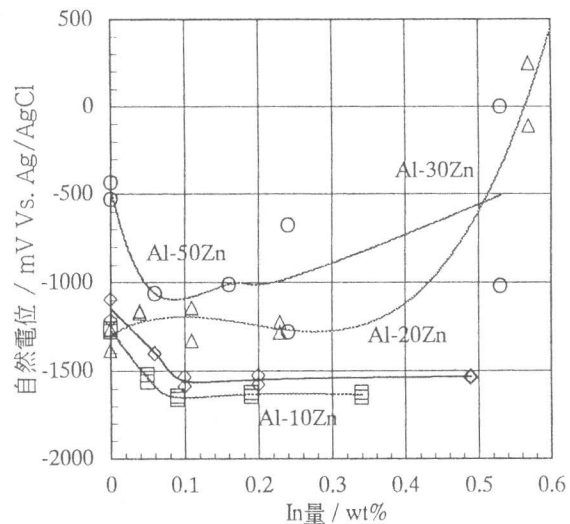


図-3 Al-Zn-In合金の自然電位

開発された合金の溶射膜が、実際のコンクリート中の鉄筋に対して流電陽極としての防食性能を有する否かを評価するため、図-4に示す鉄筋コンクリートの供試体を作製して防食試験を行った。コンクリートの配合は表-2に示す通り、 Cl^- 濃度 10kg/m^3 とした。この供試体表面に5号珪砂を空気圧590 kPaで吹き付け、プラスト処理を行った後に、Al-20wt%Zn-0.2wt%In合金の線材をガス溶射して、厚さ $200\mu\text{m}$ の溶射膜を形成させた。

防食評価試験は、供試体の鉄筋と溶射膜をリード線で接続して、温度 20°C 、相対湿度95%の恒温・恒湿環境に置き、鉄筋-溶射膜間の電流値、鉄筋電位の分極量および鉄筋の自然電位を測定することにより行った。

3.2 試験結果

溶射膜による鉄筋の防食評価試験の結果を図-5および図-6に示す。図-5によると鉄筋と溶射膜間に流れる防食電流は、試験初期には $42\sim 46\text{mA/m}^2$ 、200日経過後においても 20mA/m^2 を示している。これらの値は防食電流として十分な値と考えられる。なお、外部電源法における防食電流値は通常 20mA/m^2 である[1]。このような防食電流の鉄筋への流入に対応して、鉄筋電位の分極量は試験初期には 360mV 、200日経過後においても 270mV という防食性能を十分に有する大きな値を示している。また、このような溶射膜の防食効果により、図-6に示すように溶射膜と接続させた鉄筋の自然電位は試験後直ちに上昇し、200日経過後には初期電位から約 200mV 上昇した。なお、防食していない鉄筋の自然電位は低く、かつ経時変化も小さかった。以上の結果により、開発された流電陽極合金の溶射膜は、コンクリート中鉄筋に対して十分な防食性能を有することがわかった。

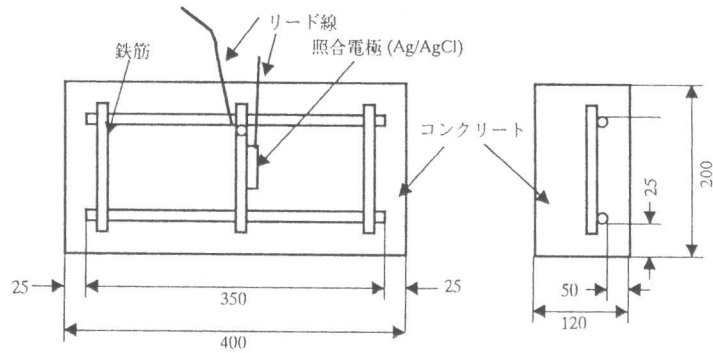


図-4 鉄筋コンクリート供試体

表-2 コンクリートの配合表

| 骨材 寸法 (mm) | 目標 スランプ° (cm) | 目標 空気量 (%) | 水セメ ント比 (%) | 細骨 材比 (%) | 単位数 (kg/m ³) | | | | |
|------------------|---------------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------------------|------|-----|-----|------|
| | | | | | 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | 混和剤 |
| 15 | 8 | 4.5 | 60 | 47 | 180 | 30 | 838 | 954 | 0.03 |

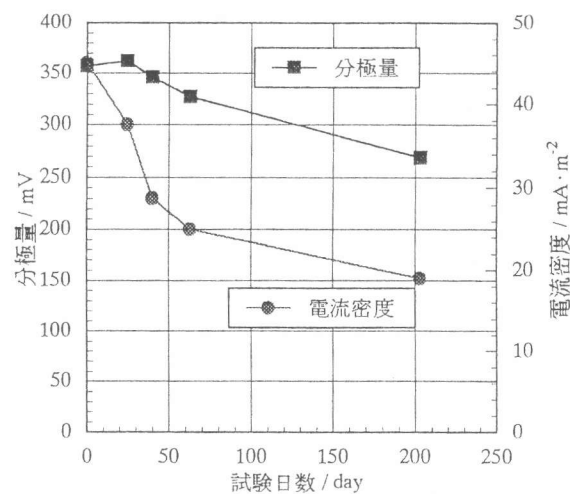


図-5 鉄筋-溶射膜間の電流および鉄筋の分極量

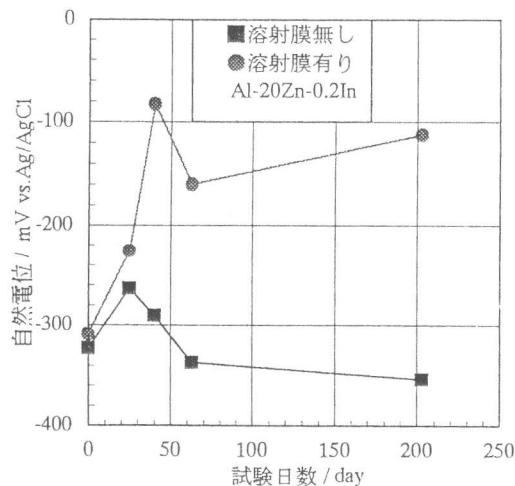


図-6 鉄筋の自然電位

4. 実構造物への適用

室内試験における種々の試験結果をふまえて、Al-Zn系合金の溶射膜を用いた流電陽極方式による電気防食法を実構造物に適用した。

4.1 試験概要

施工場所は、愛媛県の瀬戸内海に面した臨海工場地帯の中で、1995年6月に試験施工を実施した。

表-3に試験施工例の概要、表-4に使用した溶射合金の種類を示す。

これらのAl合金は、直径100mmのビレットから熱間押し出しにより直径4.6mmの線材に加工され、ガス溶射装置を用い現地の対象物へ溶射された。

また、どの対象物にも通電電流および鉄筋の電位が測定できるようにスイッチボックスを設け定期的に測定を行った。

試験工事の作業工程は、図-7の作業フロー図にそって進めた。対象となるコンクリート表面の劣化部、浮き部等の有無を確認後サンドブラストによりコンクリート表面の下地処理を行った。ブラスト処理は6号珪砂を使用し、珪砂の使用量は対象面1㎡当たり約6kgの使用量であった。使用した陽極合金は5種類で、いずれの合金もコンクリート構造物の表面に、厚さ約300μmを目標に溶射した。溶射後、溶射膜表面に陽極端子板を設置して、そこより通電用端子を取り出して対象となる鉄筋に接続した排流端子からの配線と、スイッチボックスで接続させて回路を形成できる構造とした。

試験施工の作業状況を、図-8に示す。溶射作業に際して、コンクリート表面の乾燥の程度が重要と判断されたため、コンクリート水分計によりコンクリート表面の乾燥の程度を確認後、溶射作業を行った。

コンクリート壁部については、1000mm×1000mmの範囲に各合金を吹き付け、鉄筋の電位をモニタリングできるように照合電極(Ag/AgCl)用の測定

表-3 試験施工例

| No | 対象物 | 対象部位 | 建設年月 | 合金の種類 | | | | | 防食面積 |
|----|---------|---------|------|-------|---|---|---|---|------|
| | | | | A | B | C | D | E | |
| 1 | コンクリート壁 | 壁(側面) | 1970 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 5.0㎡ |
| 2 | 栈橋 | 桁(上,側面) | 1962 | | ○ | | | | 1.4㎡ |
| 3 | クレーン基礎 | キ(側面) | 1962 | | ○ | ○ | | | 1.4㎡ |
| 計 | | | | | | | | | 7.8㎡ |

表-4 合金の種類

| 番号 | 合金の組成 |
|----|--------------------------|
| A | Zn 20%, In 0.2%, Al bal. |
| B | Zn 10%, In 0.2%, Al bal. |
| C | Zn 7%, In 0.2%, Al bal. |
| D | Zn 10%, In 0.3%, Al bal. |
| E | Zn 7%, In 0.3%, Al bal. |

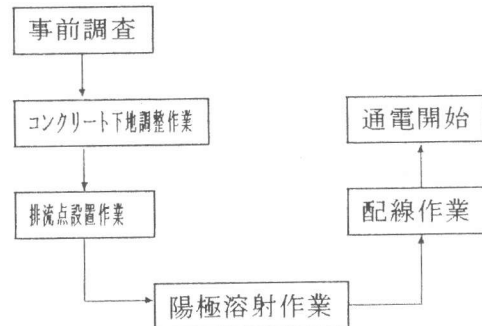


図-7 作業フロー図

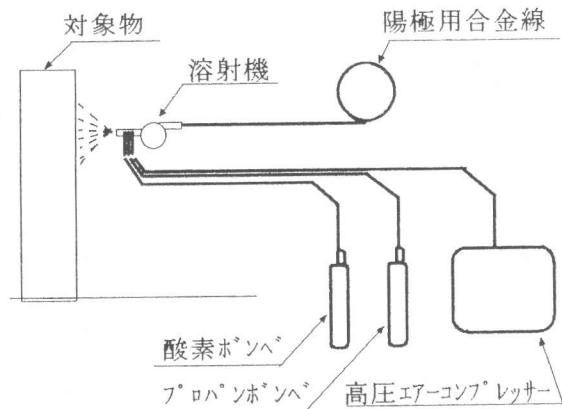


図-8 試験施工の作業状況概要図

孔を図-9のように設置した。またコンクリート壁部における試験構造図を図-10に示す。

溶射膜と配線を接続するための陽極端子板は4種類用意し、その変化を観察できるようにした。材質、形状は、表-5に示す。この陽極端子板を直接プラスチック製の固定釘により溶射膜表面に打ち付け固定させた。

なお、対象となるコンクリート構造物の含有塩分化物量は、コンクリート壁部で $3.18 \sim 6.13 \text{ kg/m}^3$ 、栈橋桁部で $1.04 \sim 6.13 \text{ kg/m}^3$ 、クレーン基礎部で $0.68 \sim 1.27 \text{ kg/m}^3$ であった。また鉄筋のかぶり厚さは、コンクリート壁部で $30 \sim 80 \text{ mm}$ 、栈橋桁部で $94 \sim 120 \text{ mm}$ 、クレーン基礎部で $56 \sim 70 \text{ mm}$ である。また、鉄筋の腐食グレーディングは、II～IIIであった。

3.2 試験結果

1995年6月から測定を2ヵ月おきに3回行った。各対象物ごとの鉄筋の1時間復極量の変化を表-6から表-7に示し、また、鉄筋の1時間までの復極試験結果を図-11から図-12に示した。

コンクリート壁部の復極量の値は、 49 mV から 149 mV の間で推移しており夏季の8月の測定では、10分間程度で復極が完了しているという結果であった。また、クレーン基礎部の復極量の推移は、 189 mV から 267 mV で、どの測定時点でも 100 mV 復極量は確保されていた。8月の測定では、約3週間ほど快晴が続いていた状態での測定で、壁厚が 25 cm のコンクリート壁部は、表面の両側とも完全に乾燥しきった状態であった。

一方、クレーン基礎部の方は直径 4 m のコンクリート躯体部の表面とい

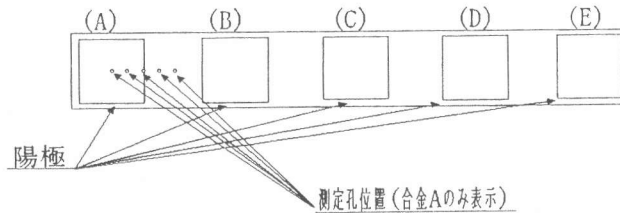


図-9 陽極配置正面図(コンクリート壁部)

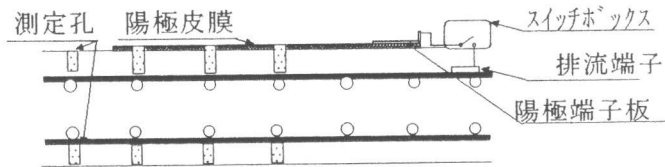


図-10 構造図

表-5 陽極端子板の材質形状

| | 材質 | 長さ | 幅 | 厚さ | 穿孔 |
|---|------|-------|------|-----|----|
| A | 純Al製 | 100mm | 50mm | 2mm | 無 |
| B | 純Ti製 | 100mm | 50mm | 1mm | 無 |
| C | Al合金 | 100mm | 50mm | 2mm | 無 |
| D | Al合金 | 100mm | 50mm | 2mm | 有 |

表-6 コンクリート壁部復極量の変化(合金B)

(単位mV vs Ag/AgCl)

| 測定孔1 | 鉄筋自然電位 | | | 復極量 | | |
|----------|--------|------|------|-------|-----|-----|
| | 1995年 | | | 1995年 | | |
| | 8月 | 10月 | 12月 | 8月 | 10月 | 12月 |
| 自然電位 | -403 | -345 | -517 | -- | -- | -- |
| インスタントオフ | -383 | -322 | -469 | -- | -- | -- |
| 1時間後 | -334 | -256 | -320 | 49 | 66 | 149 |

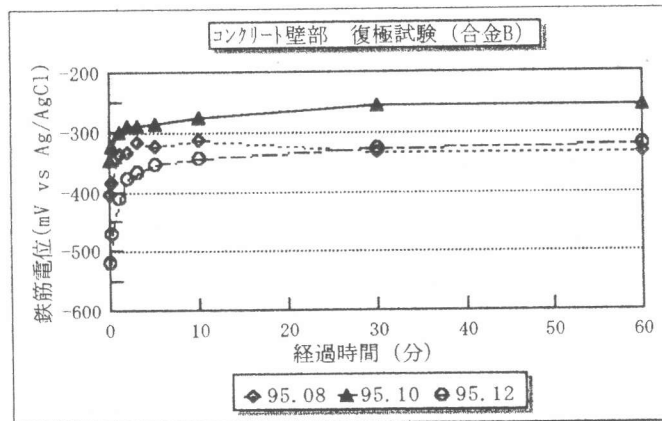


図-11 コンクリート壁部復極量の経時変化(合金B)

うこと、また、鉄筋のかぶり厚さがコンクリート壁部より大きいこともこのような測定結果につながった要因と考えられるが、その原因についてはもう少し測定を継続してから考察する必要があると思われる。

今回の試験施工では、溶射膜に封孔処理をしたものとそうでないものとの、陽極の表面状態を観察しているが、封孔処理していないところでは溶射1週間後から溶射膜が若干変色し始めている。一方、封孔処理（シラン系塗料）を行ったところでは、6ヶ月経過した時点で変色、変状は認められない。

4. まとめ

金属溶射膜を用いた流電陽極方式による鉄筋コンクリート構造物の電気防食法の確立を目的として、溶射材料の開発、試験体規模における溶射膜の防食効果の評価、および実構造物への適用について試験を実施した。結果は以下のようにまとめられる。

- (1) コンクリート環境中において良好な流電陽極特性を示すAl-Zn-In系合金の組成範囲は、Znが10~30wt%、Inが0.05~0.3wt%であることがわかった。
- (2) 試験体規模における防食性能評価試験において防食電流、鉄筋電位の分極量および自然電位のいずれもが良好な値を示した。すなわち、開発された流電陽極合金の溶射膜は、コンクリート中の鉄筋に対して十分な防食性能を有していることがわかった。
- (3) 実構造物における防食性能評価試験においても、6ヶ月間経過時点で良好な結果を示している。

参考文献

- [1] 峰松敏和ほか：コンクリート中の鋼材の電気防食に及ぼす各種要因の影響、コンクリート工学年次論文報告書、vol. 15, No. 1、pp761~766、1993
- [2] 竹谷正造ほか：新設プレストレストコンクリート構造物への電気防食法の適用、コンクリート工学年次論文報告書、vol. 15, No. 1、pp755~760、1993
- [3] 武若耕司ほか、：亜鉛およびアルミニウム金属溶射被覆による流電陽極方式電気防食の可能性、コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集、pp169-176、1994. 10
- [4] 流電陽極試験法、腐食防食協会、1993.

表-7 クレーン基礎部復極量の変化

(単位mV vs Ag/AgCl)

| 測定孔 1 | 鉄筋自然電位 | | | 復極量 | | |
|----------|--------|------|------|-------|-----|-----|
| | 1995年 | | | 1995年 | | |
| | 8月 | 10月 | 12月 | 8月 | 10月 | 12月 |
| 自然電位 | -670 | -769 | -624 | -- | -- | -- |
| インスタントオフ | -647 | -670 | -605 | -- | -- | -- |
| 1時間後 | -458 | -403 | -441 | 189 | 267 | 164 |

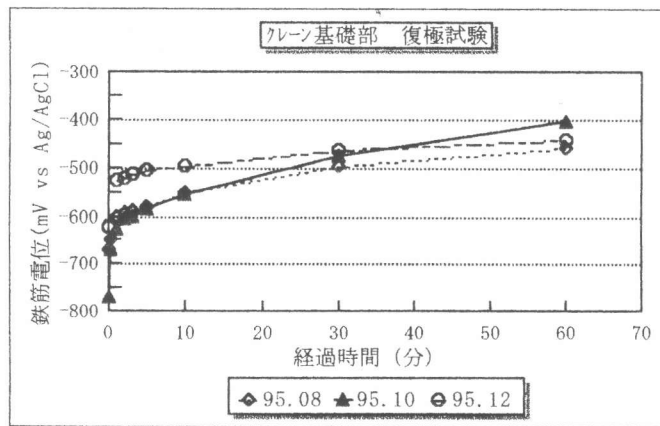


図-12 クレーン基礎部復極量の経時変化