

# 土木建築における腐食に関する研究（その16）

——鋼製プールの腐食原因調査と防食塗料の選定事例——

喜 田 大 三      守 屋 正 裕

## Study on Corrosion in Civil Engineering and Building Construction (Part 16)

——Investigation of Corrosion in Steel Swimming Pool and  
Tests of Anti-corrosive Coatings as Countermeasures——

Daizo Kita      Masahiro Moriya

### Abstract

Premature corrosion and leakage in steel and aluminum swimming pools can be very serious problems. This report summarizes the authors' investigations of the causes of corrosion occurring recently in steel pools. It also reports on the results of anti-corrosion and durability tests of coatings used on metallic swimming pools. The investigations proved that the main factors of corrosion were, i) blisters caused by moisture diffused into the anti-corrosive film, and ii) galvanic action of two SUS 304 ladders that had been installed. Tests of coatings used for steel pools proved that a zinc-rich base coat, an epoxy resin second coat, and a polyurethane finish had the best performance, and that thick polyester resin glass flake lining or ultra-thick rubber lining coats did not have the performance expected. As seen from these results, ions, moisture diffusion, and permeability greatly influence the performance of the anti-corrosive coating.

### 概 要

鋼製やアルミニウム製のスイミングプールにおいて、缶体に異常腐食が発生し、錆や漏水が問題となる場合がある。この報告では、最近発生した鋼製プールの特異な腐食についての原因調査結果と市販のプール用防食塗料6種類についての性能試験結果を取りまとめた。

調査した腐食事例では、防食塗膜中への水蒸気拡散によるブリストアの発生や、2箇所に取り付けられているステンレス鋼製ラダーのガルバニック作用が腐食促進要因になっていた。プール用防食塗料の試験結果では、下塗りにジンクリッチ塗料、中塗りにエポキシ樹脂塗料、上塗りにポリウレタン樹脂塗料を組み合わせた塗装系が、総合的に最も良好な性能を示した。超厚膜のゴムライニングやガラスフレークポリエステルは、イオンや水蒸気の遮断性が劣った。

#### 1. はじめに

一般に、スイミングプールは、鉄筋コンクリート(RC)、金属(アルミニウム合金、炭素鋼、ステンレス鋼)、FRP(繊維強化プラスチック)のいずれかで造られる。RC製は、腐食の心配はないが躯体重量が大きくなるので、屋外プールで実績が多い。それに対して、金属製は軽量のため、屋内のしかも上層階に設置されるような場合に適する。この場合には、防食塗装に十分な配慮が必要となる。FRP製は、軽量でかつ腐食しないという特長を有するが、かなりのコストアップとなり、大型のプールではまだ実績が少ない。このように、それぞれ一長

一短があり、ケースバイケースで選択されているのが実状である。

室内プール用として実績の多い金属製の中では、アルミニウム合金製および鋼板製(炭素鋼)が特に多く、エポキシ樹脂系を主体としたプール用防食塗料を塗装して供用される。金属製プールの場合、施工に十分注意をしても時折予期せぬ腐食が発生し、美観が損なわれたり、漏水などの問題が生ずる例がある。

ここに報告するのは、某ホテルの上層階の室内に設けられた鋼板製スイミングプールの腐食事例である。腐食原因の調査を行なうとともに、改修工事に使用する防食塗料を選定するための塗料の性能試験を行なった。

## 2. プールの概要

### 2.1. 構造, 規模

鋼板製溶接構造, 25×9×1.2 m, 総水量約 260 m<sup>3</sup>

### 2.2. 防食塗装 (内面)

- ①素地調整: ショットプラスト処理 (工場)
- ②下塗り (1): ジンクリッチプライマー  
170~200 g/m<sup>2</sup> (工場塗装)
- ③下塗り (2): エポキシ樹脂系プライマー  
200~220 g/m<sup>2</sup> (現場塗装, 以下同じ)
- ④中塗り : エポキシ樹脂系塗料 140~160 g/m<sup>2</sup>
- ⑤上塗り (1): エポキシ樹脂系塗料指定色 //
- ⑥上塗り (2): // //

この塗料および塗装仕様は, 鋼板プール用として比較の実績が多い。

## 3. 腐食発生の経緯と応急処置

塗装工事完了後約 2 箇月して供用が開始され, 数箇月後に, 底板面を主体に小さな点錆が約 50 箇所発生し, 塗膜に小さな膨れも無数に発見された。プールの営業に支障がないよう, 夜間の休止時間内に水中接着剤 (エポキシ樹脂系) で発錆箇所の部分的な補修が行なわれたが, 補修すると別の箇所に新たな点錆がまた発生するという状況が繰り返された。このような状態が 1 年数箇月続き, この間に, 水を抜いての補修塗装も 1 回行なわれたが, 十分な効果が得られなかった。

## 4. 腐食原因の調査

### 4.1. 調査内容と調査結果

**4.1.1. 塗膜外観と発錆状況の目視調査** プール営業への影響を配慮して, 営業時間外の夜間に, 水を張ったままの状態で一連の調査を行なった。

目視調査の結果, 塗膜は, 変色やチョーキング, 硬化不良の様子はなく, 外観的には健全であった。水中補修した箇所からの錆の再発はほとんどないものの, 新たな発錆がかなりの箇所で認められた。既補修箇所を含めて発錆箇所の分布を見ると, プールの 2 箇所に取り付けられているステンレス鋼製のラダー (はしご) の周辺に比較的多く集中している傾向にあった。

**4.1.2. 塗膜厚** 電磁式膜厚計を使い, 側板面で測定するとともに, 補修時に底板面で採取された小片について断面を顕微鏡で調査した。

塗膜厚さは 200 μm 前後で, 同塗料メーカーの標準的な塗装仕様による膜厚とほぼ一致した。色の違いによって判別できる各塗装工程ごとの膜厚もほぼ仕様どおりであった。

**4.1.3. 迷走電流の調査** 迷走電流による腐食, いわゆる電食は, 電車の軌道などから漏洩した直流電流が, 金属体へ流入し, 再び腐食環境 (土中や水中) へ流出する場合に, その流出部に発生する腐食である。

当プールの場合, 仮に何らかの迷走電流が建屋躯体の鉄骨等を伝わって缶体に流入したとしても, その電流がプールの内側 (水中) へ流出するような電気回路は考え難く, 迷走電流の影響の可能性は小さかったが, 念のため簡易な調査を行なった。

缶体の電位を一晚連続測定し, 電位の変動状況を調査し, 迷走電流の有無を判定した。迷走電流の影響を受けているとすれば, 発生源の電流の変動に応じて測定電位に変化が現われる。

調査の結果, 缶体の電位は, Ag/AgCl (銀/塩化銀電極) を基準として -100~-90 mV で一定値に安定しており, 経時的な変動は認められなかった。従って, 迷走電流の影響は受けていないと判断した。

**4.1.4. ガルバニック腐食の調査** 当プールでは, ステンレス鋼 (SUS304) 製のラダーが缶体の鋼板に溶接されて 2 箇所に取り付けられており, その表面は塗装されていない。そこで, このラダーと缶体の塗装欠陥箇所との間に, 異種金属間のガルバニック腐食の影響が関与している可能性が考えられた。この点について幾つかの方法で調査した。

(1) 電位測定 用意した炭素鋼と SUS304 の試験片を現地でプール水に一晚浸漬し, ある程度表面状態が安定したところでそれぞれの電位 (自然電位, 単極電位) を測定した。

炭素鋼は一晚ですでに顕著な腐食が認められ, 電位は -595 mV (vs. Ag/AgCl) を示した。一方, SUS304 は, 浸漬直前に表面を研磨した場合に -126 mV, 脱脂洗浄のみで研磨しなかった場合に +75 mV を示した (この両データの違いは表面の酸化皮膜の状態に起因すると考えられる)。

この結果から, 当プール水に浸った条件下で, 炭素鋼と SUS304 との間にはおよそ 0.5 V 前後の電位差が生ずると判明した。

次に, ラダーと缶体腐食箇所に照合電極 (Ag/AgCl) を近付けてそれぞれの示す電位を数箇所で測定した (図 -1 a)。その結果, ラダーの電位は -25~-14 mV, 缶体腐食箇所は -105~-52 mV を示した。ラダーに対して缶体が明らかにアノードとなっており, しかも, 相対的にアノードの分極が大きく, ラダーのカソードとしての作用が大きく機能している様子が伺われた。

(2) 水中の電界強さ ラダーと缶体間に発生しているであろうガルバニックセルの腐食電流を検出する目的

で、プール水中の電界強さと電流の向きを調査した。

Ag/AgCl の同じ電極 2 本を使用し、電極間距離を 40 cm として、水面下約 10 cm の深さで 2 極間の発生電圧を測定した (図-1 b)。

図-2 に測定箇所 (①~⑧) と結果を示す。それぞれの測定箇所、電極の向きを動かし、電圧 (電界強さ) の最大値とその時の電流の向き (電極の方向) を記録している。また、次式で求めた電流密度も図に併記した。

$$i = E \cdot K$$

$i$  = 電流密度 (mA/cm<sup>2</sup>)  
 $E$  = 電界強さ (mV/cm)  
 $K$  = 水の比電導度 (Ω<sup>-1</sup>cm<sup>-1</sup>)

図-2 によると、④と⑧のポイントを除いて、検出された電流はラダールの方向に向いている。④と⑧は、その近くにやはり SUS304 製の給排水配管が側面に取り付けられており、電流がそれへ向かっている。これらの状況から、検出された電流は缶体と SUS ラダールもしくは SUS 配管との間のガルバニックセルで発生している腐食電流に相違ない。

(3) プロブ電流の測定 表面を研磨して脱脂した鋼板をプール水に一晩浸漬しておき、それをプロブとして、SUS ラダールと短絡した際に発生するプロブ電流 (鋼板の腐食電流) を測定した (図-1 c)。プロブは、小さな鋼片にリード線を取り付けて10個用意し、リード線の継ぎ替えて順次プロブ面積を変えられるようにした。

図-3 に、プロブの浸漬位置と電流の測定結果を示した。測定された電流の極性は、炭素鋼板のプロブがアノード、SUS ラダールがカソードで、プロブとラダールとの間で予想どおりガルバニックセルが形成された。従って、測定された電流はプロブ (鋼板) の腐食電流である。プロブ面積を増やしていくと、ラダール近傍で最大およそ 2 mA の電流が測定された。電流量とプロブの面積から、プロブの腐食量および腐食速度を求めると図-3 のようである。この結果から、SUS ラダールのカソードとしての作用はかなり大きいと判断される。

**4.1.5. 水質調査**  
 プール水を採取し、水質を調査した結果、PH=6.5、電気伝導度=175 μs/cm、塩素イオン濃度=30 mg/l であった。

**4.2. 腐食原因の推定**

水を抜いての調査ができなかったため、塗膜の状態に関しては十分な判

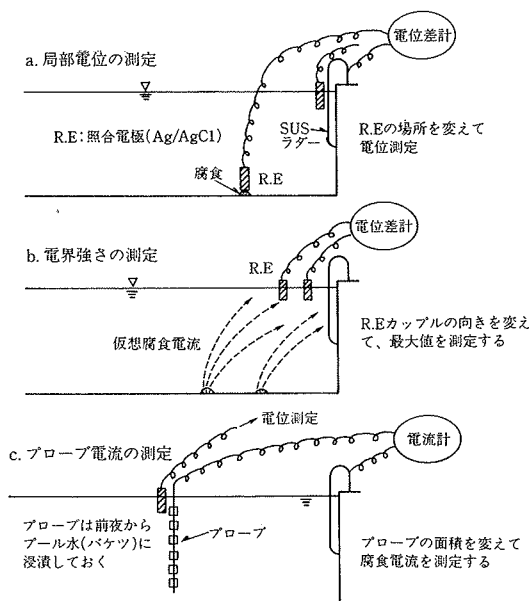


図-1 ガルバニック腐食の調査

断資料が得られなかった。しかし、トラブルの発生経過とその状況から、塗膜の状態が必ずしも良好ではなかったと判断される。

施工工程について聞き取り調査の結果、工場でジンクリッチプライマーを塗装して現場へ搬入、組立て後、エポキシ樹脂プライマー塗装までのオープンタイムが、工程の都合上数箇月間に及んでいる。その間、雨水が滞留し、塗膜に欠陥を残した可能性がある。

また、供用開始後まもなく、塗膜に小さな膨れが多数認められている状況から、塗膜中への水蒸気浸透が急速に進行したと考えられ、鋼板表裏の温度差がそれを促進した可能性がある。

さらに、調査結果で判明したように、SUS ラダールと缶体鋼板との間に電位差の大きいガルバニックセルが形成され、それによる発生電流がジンクリッチプライマーの亜鉛の消耗を著しく促進するとともに鋼板の発錆を早め、発錆箇所を部分補修しても次々と新たに発錆するという

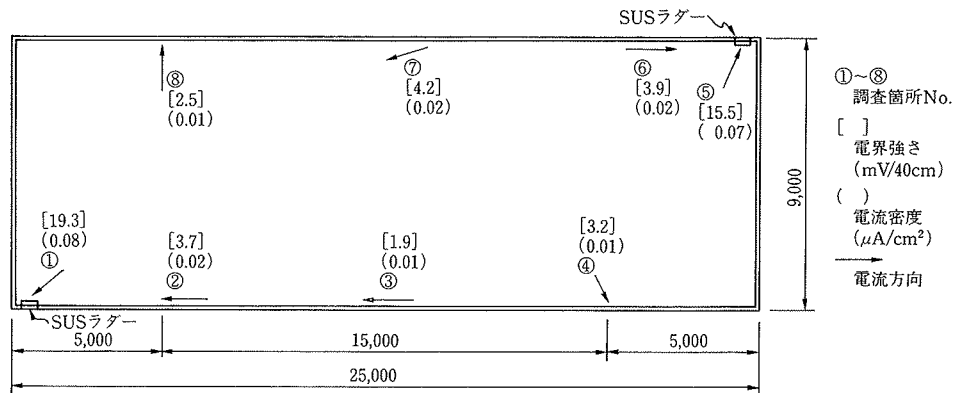


図-2 電界強さの調査結果

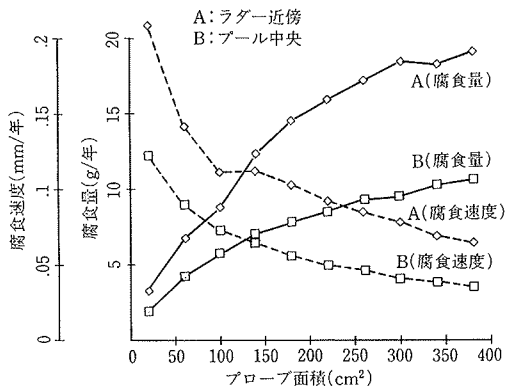


図-3 プローブ電流から換算した腐食度

状況を生み出したものと考えられる。発錆箇所がラダーの近傍に多く分布していた点もそれを裏付けている。

### 5. 改修用塗材の選定試験

対策の基本方針として、新設時の塗膜をすべて除去し、全面的に塗り替えることになった。そこで、トラブルの再発を防ぐために、防食塗料についても十分に吟味し、より性能の良好な塗装系を選択すべく、試験検討を実施した。

#### 5.1. 供試塗材と塗装系

鋼板プール用として実績のある市販塗材を調査し、その中から6社6種類を選定して供試した。塗装系を表-1に示す。同表の、記号PCが、新設時に適用されたものである。

テストピースは、用意したプラスト処理鋼板(200×200×3.2 mm)に、メーカー各社推奨の標準仕様に基づいて、各塗材メーカーに塗装を依頼した。

#### 5.2. 試験概要

図-4に試験概要を示す。

#### 5.3. 試験方法と試験結果

(1) 外観、ピンホール検査 テストピースの全数について、塗装むらや傷の有無を調べ、ピンホール検査(放電式2000V)を行ない、異常の有無を確認した。いずれも良好であった。

(2) 膜厚測定 テストピースの全数について、1枚につき25ポイントで、電磁式膜厚計による測定を行なった。結果を図-5に示す。

各社標準仕様の膜厚と比べて、PA、KCが僅かに下回り、他の4種類はいずれもかなり厚塗りで、PC、NFは、標準の約1.5倍であった。

(3) 初期付着力試験 アタッチメント(4×4 cm)を塗膜面に接着し、プルオフ法で試験した。数値は省略するが、いずれも付着強さは良好であった。ただし、NFだけは、鋼板表面と塗材との界面で剥離する兆候が明らか

種類 記号	下 塗			中・上 塗			標準膜厚 ( $\mu\text{m}$ )
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	
PC	EpZ	Ep	—	Ep	Ep	Ep	177
PA	EpZ	Ep	Ep	Ep	PU	PU	293
NF	Ep	—	—	GFP	GFP	P	400
PE	EpZ	Ep	—	Ep	Ep	—	190
SR	Ep	—	—	Ep	Ep	Ep	410
KC	Ep	Ep	—	—	BR	BR	3000

EpZ:エポキシ系ジンクリッチ Ep:エポキシ系 PU:ポリウレタン系  
GFP:ガラスフレークポリエステル系 P:ポリエステル系 BR:ブタジエンゴム系

表-1 供試塗材

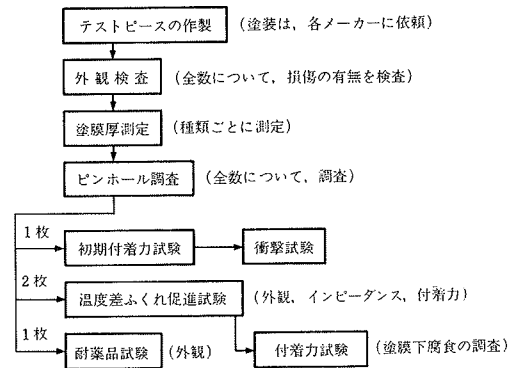


図-4 塗材の試験概要

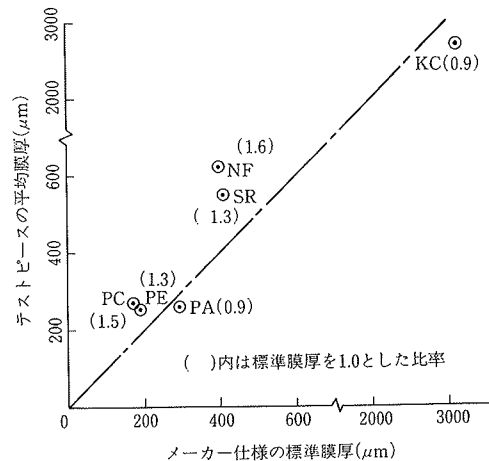


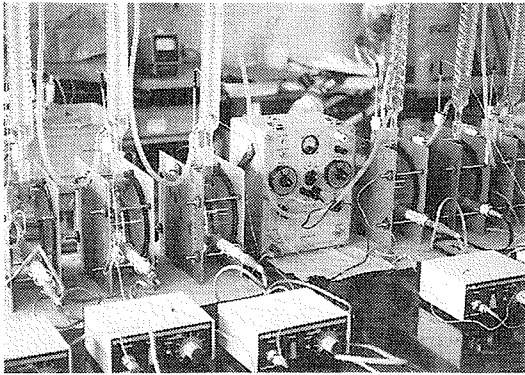
図-5 標準膜厚とテストピースの平均膜厚

に認められた。

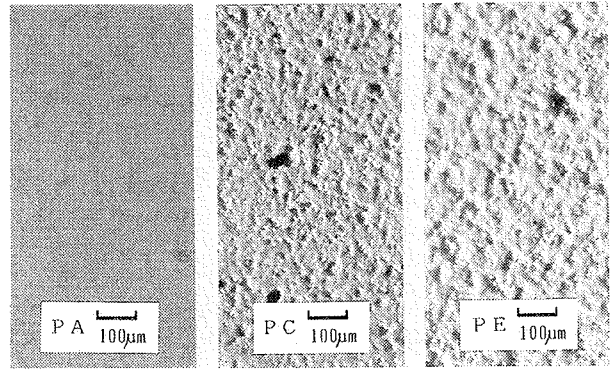
(4) 衝撃試験 JIS K 5400のB法に準じ、撃ち型は半径6.35 mm、おもりの質量500 g、おもりの落下高さ10, 20, 30, 50 cmで試験した。

超厚膜ゴム系のKCは、すべての条件で全く損傷がなく、最も良好な耐衝撃性を示した。相対的な性能順位は、KC>SR>NF>PA, PC>PEであった。

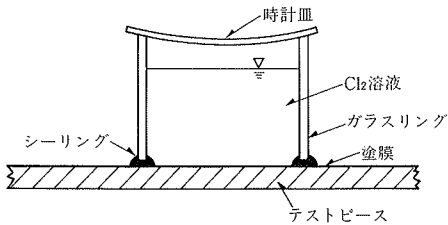
(5) 温度差ふくれ試験 NACE (National Association of Corrosion Engineers) TM-01-74方式で、温度差による塗膜中への水蒸気の拡散浸透を促進した。内部液(腐食液)に3% NaCl水溶液を用い、液温



写真一 温度差ふくれ試験



写真二 耐薬品性試験後の塗膜表面



図六 耐薬品性試験

塗装記号	ピンホール	初期付着力	衝撃	耐薬品	温度差ふくれ試験				総合評価
					外観	tan δ	付着力	塗膜下腐食	
PC	◎	○	△~×	×	◎	○	○	○	△
KC	◎	○	◎	○	×(ふくれ)	△	×	×	×
PA	◎	△~○	△~×	◎	◎	○	○	○	◎
NF	◎	△	△	×	×(ふくれ)	△	×	×	×
PE	◎	○	×	×	△(ちぢみ)	×	△	○	△~×
SR	◎	○	○	△	×(ふくれ)	○	×	×	×

◎ 優れている ○ 良好である △ やや劣る × 劣る

表二 試験結果の総合評価

度を50°Cに保ち、外部温度は室温とした。試験状況を写真一に例示する。

評価項目として、ふくれ、変色、発錆有無の目視観察、およびインピーダンス測定を経時的に行ない、1.5箇月経過後に付着性試験を行なうとともに、塗膜下腐食の有無を調査した。

試験の結果、KC、NF、SRの3種類にふくれが発生し、付着力の低下および塗膜下腐食が見られた。これらは比較的厚膜タイプで、特にKCは超厚膜型である。3種類とも塗膜面にクラックやピンホール等が認められないので、材質的に水蒸気やイオンの拡散抵抗が小さいものと考えられる。インピーダンス測定の結果でもこの3種類は劣化の兆候が認められた。残る3種類の内PEは、塗膜に縮みが発生し、付着力が幾分低下した。結局この試験では、PCとPAが良好であった。

(6) 耐薬品性試験 プール水は、塩素ガスあるいは次亜塩素系薬剤で絶えず殺菌処理が行なわれる。これらの薬剤は酸化力が強く、塗膜に対して、脱色、変色、脆弱化などをもたらす可能性がある。そこで、図六の要領で次亜塩素酸ナトリウム水溶液をテストピースの塗膜面に接触させ、塗膜の劣化状況を調べた。液の有効塩素濃度は、0.01、0.1、1、5%の4種類とし、3週間にわたって調査した。

試験の結果、PCは短期間で褪色し、その後トップコー

トが脆弱化した。またPEは、Cl<sub>2</sub> 5%の条件で塗膜がほぼ完全に分解した。PAは、試験した範囲で外観的な変化が全くなく、最も良好であった。写真二に、劣化した塗膜表面の顕微鏡写真を例示する（有効塩素1%）。

相対的な性能順位は、PA>KC>SR、NF>PE、PCと判定された。

#### 5.4. 総合評価

試験結果に基づく相対評価の結果を表二に示す。総合的にはPAが最も優れていると判断された。PAは、供試した6種類の中で、比較的薄膜タイプであるが、トップコートのパウリウレタン樹脂塗膜が、耐薬品性、水蒸気遮断性などの点で効果的に機能したものと考えられる。

#### 6. まとめ

以上の結果を参考に、当プールは改修工事の具体化が進められている。旧塗膜はサンドブラスト処理で完全に撤去し、前記PAを塗装する予定である。また、予期しなかったステンレス鋼製ラダーによるガルバニックセルの影響についても、ラダー表面を塗装して回避する方針である。

なお、検討過程で明らかとなった、塗材の違いによる水蒸気やイオンの遮断性や耐薬品性の著しい差異は、非常に興味深く、今後さらに掘り下げていく所存である。