チタン膜を用いた海生生物付着防止装置*

矢 島 秀 治** 大 庭 忠 彦**

Marine Anti-biofouling System Using Titanium Film

Hideharu YAJIMA and Tadahiko Ooba

The new anti-biofouling system, which utilizes titanium film to prevent the deposition of marine life on various surfaces of the sea equipment, can keep its superior antifouling effect for extended periods of time eliminating the need for repainting of antifouling paint as well as decreasing marine life fouling which is treated as industrial waste. This system has a catalyzed surface on the titanium film acting as an electrode connected to an external electric power supply. The active oxygen generated on the electrode surface oxidizes and degrades organic matters in seawater electrochemically when they make contact with the catalyzed surface. Since organic matters are nutrients for bacteria, bacterial growth and the subsequent slime formation can be inhibited. Thus, the consequent attachment of seaweeds and the fouling of larger marine organisms can be prevented.

1. はじめに

海生生物付着防止対策として、これまで種々の研究開発が進められているが、環境に優しく、低コストで長期に渡り確実に防汚効果を発揮する技術は、いまだ実用化されていない。このため発電所では、フジツボやイガイなどの海生生物が海水系機器内で付着・繁殖し、その定期的な清掃作業の実施が必要とされている。また、取り除いた海生生物を産業廃棄物として処理するのに多大な労力と費用を要している。付着防止対策としては、塩素注入や防汚塗料の塗布が行われてきたが、環境問題や長期効果が得られない等の課題を抱えている。

当社はこのような課題に対し、塩素不要とする環境への配慮や防汚塗料の塗替え周期を考慮した長寿命化および LCC の低減に主眼を置き、電気化学的手法に基づく付着防止装置を開発した。当該装置は、触媒をコーティングしたチタンシートから微弱な電流を流すことで、海生生物の付着防止を図るものであり、海水熱交換器においてはチタンシートを電極とすることで電気防食機能を兼ね備えるものである^{a)}。本報告では実証試験や火力発電所の海水熱交換器および LNG 気化装置 ORV トラフに実機適用した概要を紹介する。

a) 特許第 3769394 号、第 4028169 号

2. 付着防止原理

海生生物の付着メカニズムを図 1 に示す。はじめに、

*原稿受付 平成 24 年 6 月 22 日

** 株式会社 ナカボーテック (東京都中央区新川 2-5-2)

海水に接する構造物の表面に有機物が付着し、この有機物を足掛りとして、バクテリアが着生・繁殖し、スライム層を形成する。ここまでに有機物が付着してからほぼ数時間で完結する¹⁾。続いてスライム層の上に藻類が着生し、藻類を足掛りとしてフジツボやイガイ類など海生生物の稚貝(幼生)が付着・繁殖・成長する。一方、対象物表面から発生する活性酸素は、バクテリアの着生および繁殖に優れた抑制効果を持つことが知られている²⁾。本システムはこの酸素の抑制効果に着目し考案したもので、上述のメカニズムの初期段階で進行を断ち切ることで、バクテリアの繁殖を抑制しスライムの形成とそれに伴う藻類の付着を防止することで海生生物の付着・繁殖を防止するものである。また停電等でフジツボが電極表面に一旦付着した場合でも、再通電することで電極表面が酸性になり、フジツボ底盤の炭酸カルシウムを溶解して脱落させることができる。

図1 海生生物の付着メカニズム

3. システム構成

海生生物付着防止装置について、例として海水熱交換器に適用した概要を図2に示す。本システムは、触媒をコーティングしたチタンシート、陰極部用電極、照合電極および直流電源装置で構成される。管板面に貼り付けたチタンシートは、絶縁シートを貼り合わせたもので、機器本体と絶縁されている。また、チタンシートの接着には、海水温度 50℃まで安定した接着強度を持つ接着剤を選定した。

図2 海生生物付着防止装置の概要

図3 電位制御範囲の概念

海水熱交換器に貼り付けたチタンシートを陽極として電流を陰極に流し、海水の電気分解反応により、チタンシート表面において酸素を継続的に発生させることで付着を防止する。この時のチタンシートの制御電位を 1.2V

より低く維持することにより、塩素の発生を抑制する。なお、酸素は、微弱な電流を通電する極表面（数μm）の界面において発生し消滅しており、目視で確認できない。環境の pH と電位の関係の制御範囲概念を図3に示す。

本システムの特徴は次の通りである。

- ① 海生生物に対する付着防止の効果が極めて優れる
- ② 海生生物付着防止を極表面の酸素によって行うため、環境面に対し非常に優れる
- ③ 防汚効果が長期にわたり持続する
(電極寿命約 20 年以上)
- ④ チタンシート電極は電気防食装置との併用が可能である (海水熱交換器の場合)
- ⑤ メンテナンスが容易
- ⑥ 運転コストが安価

4. 実プラント採用に至るまでの検証

4.1 熱交換器モデル試験装置 熱交換器モデル試験装置を製作し、海生生物付着防止装置の検証試験を 1 年間にわたり実施した。この試験においては、同一仕様の 2 台の熱交換器モデルを製作し、うち 1 台のモデルの入口、出口水室内に海生生物付着防止装置を設置した。海水は揚水ポンプで取水して 2 台並列に通水し、同一条件での運転を行い、両者の海生生物付着状況を比較して防止効果と耐久性を確認した。また熱交換器冷却管の防食に適用される鉄イオン供給装置を導入し、チタンシート上に鉄被膜が形成された環境においても海生生物の付着防止効果があるか確認した。

製作した熱交換器モデル試験装置の外観を図4に示す。水室内には絶縁材を介してチタンシートが貼付けられている。直流電源装置とチタンシート、陰極を結線し、チタンシートの制御電位を約 1.0V に維持することにより活性酸素を発生させ、海生生物の付着を防止する構成とした。海水の流速など通水の条件はできるだけ実機を再現し、1 週間に 1 回の逆洗を定期的の実施して実機の条件に合せる試験を行った。

図4 熱交換器モデル試験装置

4.2 海生生物の付着防止効果 前述の試験装置にて1年間の通水運転を継続した後、水室内に付着した海生生物の種類とその全湿重量を計測するため、水室蓋を取り外して調査した。開放時の比較を図5に示す。

図5 試験開始13ヶ月後比較

付着防止装置を設置しない熱交換器モデルの入口、出口水室には、フジツボ、ムラサキガイ、ヒドロ虫などの海生生物が多量（約6kg）に付着していた。一方、付着防止装置を設置した水室内面には海生生物の付着が全く認められなかった。また、鉄イオン供給装置による鉄被膜の影響に関しては、チタンシート上に鉄被膜が形成されても付着防止効果に影響がないことが確認できた。

5. 環境への影響

熱交換器モデル試験では、海生生物が全く付着しないことが確認された。しかしながら生物が付着しない要因としては、装置から有害な物質が放出されたことによる可能性もあるため、海生生物に対する影響の評価を、JISK102-1998「工場排水試験方法」の項目71「魚類による急性毒性試験」ならびにOECD TG203「魚類急性毒性試験」（経済協力開発機構）に準じて行った。

図6に示す試験では、海水50リットルの止水状態で96時間、マダイ稚魚を飼育し、一方は海生生物付着防止装置の運転状態に、一方には比較のため装置なしにして、マダイ稚魚に死亡や異常行動を取るなど、生体に影響を与えないか評価した。

図6 環境への影響試験装置

試験結果から、マダイ稚魚の生存率は100%であり、急性致死作用の発現は認められず、また残留塩素の濃度も0.01ppm以下と検出限界以下であったことから海生生物付着防止装置の安全性を確認した。

6. 海水熱交換器での実機適用事例

平成20年3月からの発電所定期事業者検査工事において、海水熱交換器1台を対象として、海生生物付着防止装置を設置した。

図7 海水熱交換器チタンシート施工対象位置

本システムは、直流電源装置、チタンシート、陰極、照合電極、陽極引出し金具および配線配管等により構成されている。施工対象位置は図7のとおり、出入口、折返し水室および各水室管板面、マンホール内面、蓋板とした。はじめに、各水室内面および蓋板のゴムライニング部を平滑化処理し、ピンホール検査を実施した。折返し水室の鏡部には、円錐状に加工したFRP成型品を設置し、その上にチタンシートを貼り付けた。また、管板面には絶縁シートを貼り合せたチタンシートを貼り付けた。チタンシート同士はスポット溶接により電気的導通を確保した。図8に施工フローおよび図9～15に施工写真を示す。

図8 施工フロー

図9 水室内面ゴムライニング平滑化加工

図13 チタンシート導通・絶縁確認

図10 水室部チタンシート接着

図14 出入口側水室設置完了

図11 管板部チタンシート接着

図12 チタンシート接続

図15 折返し側水室設置完了

当該装置は電気防食機能を付加した海生生物付着防止装置であり、従来の防食方法は亜鉛犠牲陽極による流電陽極方式であるところをチタンシートによる外部電源方式へ改造したものになる（図16）。直流電源装置は、海生生物付着防止用として定電流式電源装置、電気防食用として定電位式電源装置を設置した。試運転調整において、チタンシートの陽極電位を0.5～1.2V間で設定した。

図16 電気防食機能を付加した海生生物付着防止装置

通水2年後に、水室を開放し、海生生物付着防止効果の状況およびチタンシートの接着状況について点検を行ったところ、海生生物の付着は見られず、またチタンシートの剥がれもなく正常に稼働していることが確認できた（図17、18）。

適用前 適用2年後

図17 付着防止効果比較（出口側水室）

適用前 適用2年後

図18 付着防止効果比較（折返し側水室）

7. 海水取水口での実機検証事例

発電所の機器冷却用海水設備に海生生物付着防止システムを適用した例を報告したが、発電所では海水を取り込む取水路でも海生生物の付着による大きな問題を抱え

ている。次に示すのは、600MW級国内火力発電所の取水路において実機検証した例である。

図19 取水路天井部

図20 チタンシートとその周囲

この装置の特長は、チタンシート間に陰極部を設けている点である。2年間の運転結果を次に示す。

- 1) チタンシートには海生生物の付着は認められず、優れた防汚効果が維持された（図19）。
- 2) 装置の周囲にはムラサキイガイが大量に付着しており、効果の差は歴然であった（図20）。
- 3) チタンシート表面の触媒を分析した結果、消耗が無く、長期耐久性を有することが実機で確認できた。

8. LNG 気化装置での実機適用事例

発電所では海外から天然ガスを液体にして日本に運ぶため、LNG（液化天然ガス）を使用するために再ガス化（気化）する必要があり、この再ガス化装置がLNG気化装置である。その装置の一つにオープンラック・ベーパーライザー（ORV）がある。ORV装置でのLNGをガス化するため

の熱源は、トラフからパネル表面を流れ落ちる海水である。

従来の対策工法としては

①シリコン樹脂系防汚塗料

⇒長期防汚効果が期待できない

②紫外線殺菌

⇒維持管理が困難

③海水電解

⇒放水口で残留塩素濃度の制限がある

等が挙げられる。しかし、海水が ORV パネル表面を均一に流れ落ちることができず、再ガス化するための熱源が不足し問題が生じている。最近、発電所の LNG 気化装置 ORV トラフに海生生物付着防止装置を適用した例を紹介する。

本システムは、直流電源装置、チタンシート、陰極、配線配管等により構成している。チタンシートと陰極は一体化構造とし、ORV トラフ側面に接着剤にて設置した(図 2 1)。

図 21 ORV トラフ設置状況

トラフ内に通水し運転開始から 6 ヶ月経過したが、チタンシート表面には海生生物の付着が見られず、良好な結果が得られている(図 2 2)。

図 22 運転開始 6 ヶ月後

9. まとめ

海生生物付着防止装置に関する 2 件の実機適用および 1 件の実機検証の事例を紹介したが、いずれも海生生物の付着防止対策として、本システムが有効であることが実証された。今後はさらなる機能向上とコストダウンを図り、電気防食と生物付着防止を同時に実施できる環境に優しいシステムとして、広く適用いただけるよう努力していく所存である。

参考文献

- 1) 川辺允志;“海洋生物の付着現象とその本質”, P1-29, 1991-05
- 2) 片山義章, 山家信雄, 大庭忠彦;“海生生物付着防止装置の実機適用”, 平成 20 年度火力原子力発電大会論文集, 2008