

■ 技術報告 ■

オゾンによる水管路の生物付着防止

Biofouling Control of Cooling Water Circuits by Ozonation

池田 彰*

Akira Ikeda

1. はじめに

冷却水系、排水系など水使用環境では、熱交換器表面や水管路内壁に微生物が付着し、熱交換効率の低下、送水量低下、配管閉塞などを生じ、その保守に多大の労力を費やすとともに、大量のエネルギー損失が発生している¹⁾。このような生物付着を防止するために、塩素系殺菌剤を大量に投与する方法が一般的に行われてきた。しかし、この方法は残留塩素系殺菌剤の流出による環境汚染などの副次的な問題が派生している。このような状況から、塩素代替法としてオゾン法が有望視されている。オゾンは塩素よりも強力な殺菌剤であり、しかも水中で比較的短時間に無害な酸素分子に分解されるため、生物付着防止剤として優れたものである。しかし、オゾンの生成コストは塩素に比べて高価であることから、その実用化が遅れている。

筆者らは付着防止は付着バクテリアの初期段階により防止でき、高濃度のオゾンを1日1～2回、各5分間の短時間で間欠注入することにより達成できることを見出し、この目的に合った新しい発想の間欠オゾン供給装置を開発した²⁾。この装置は、小容量のオゾナイザーで大量のオゾンを供給でき、これまでに製鉄工場冷却水系や下水利用ヒートポンプ熱交換器などの生物付着防止装置として実用化されている^{3,4)}。

本報では、高濃度のオゾンを間欠的に短時間で供給する間欠オゾン供給システムの概要を説明し、一例として小型実験装置を用いて淡水が流れるモデル水管路(約300m)の生物付着防止効果などを調べた実験結果⁵⁾について紹介する。また、これらの結果をもとに、実用規模の冷却水系に適合する場合の間欠オゾン供給装置の仕様について検討した結果を示す。

2. 間欠オゾン供給装置の概要と特長

図-1および写1は間欠オゾン供給装置の構成および外観を示したものである。図-1に示したように、この装置はオゾナイザー、シリカゲル吸着塔、冷凍機およびエゼクタから構成されている。オゾナイザーで無声放電により生成されたオゾンは、循環エアポンプにより吸着塔に送られ、 $-30\sim-40^{\circ}\text{C}$ に冷却されたシリカゲルに吸着・蓄積される。一方、吸着塔から排出された酸素は再びオゾナイザーに戻され、一定時間(約12時間または24時間)吸着過程が繰り返される。吸着過程が終了すると、被処理水の一部を駆動水とするエゼクタが駆動され、吸着されたオゾンは減圧下で短時間(5～10分程度)に脱着され、数+%の高濃度のオゾンが被処理水に溶解される。

表1は一例として250g/回の間欠オゾン供給装置の主な仕様を示したものである。この装置は25g/hrのオゾナイザーを使用し、最大1日2回、各5分間で約250g/回のオゾンを間欠的に供給することができる。例えば被処理水量に対する5分間の平均オゾン濃度を $5\text{g}/\text{m}^3$ (ppm)とする場合、約 $600\text{m}^3/\text{hr}$ の冷却水系の生物付着を防止することができる。

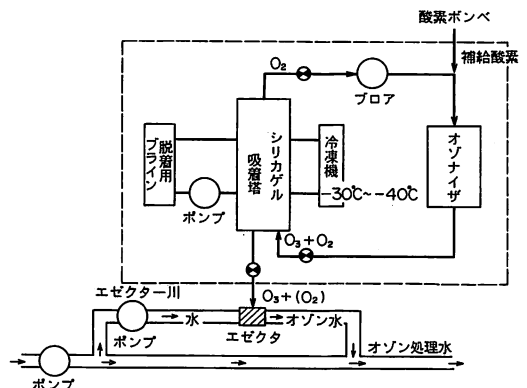
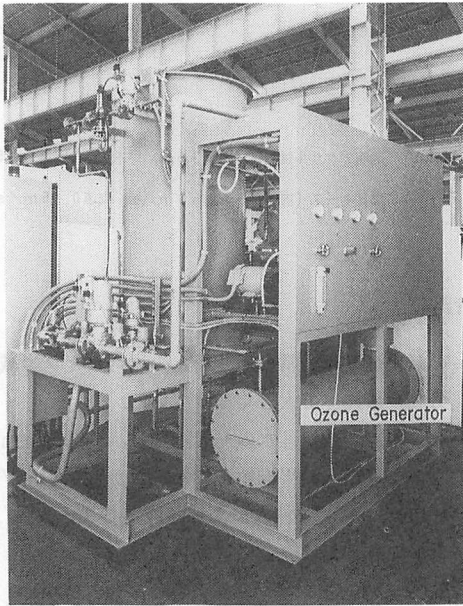


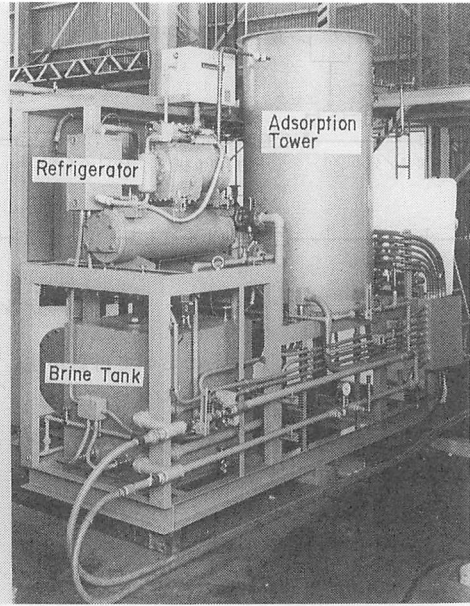
図-1 間欠オゾン供給装置の構成

* 三菱電機(株)中央研究所エネルギー環境研究部
第6グループマネージャー、農学博士

〒661 尼崎市塚口本町8-1-1



FRONT VIEW



REAR VIEW

写1 間欠オゾン供給装置 (250g/日) の外観

表1 間欠オゾン供給装置 (250g/日) の主な仕様

項目	仕様
オゾン注入量	250g/日
注入回数	2回/日, 各5分間
注入濃度	5 ppm (5分間の平均濃度)
被処理水	約600m ³ /hr
消費電力	25kWh/日
酸素消費量	1.2m ³ /日
外寸法	1.8m(L)×1.8m(W)×2.2m(H)
概算重量	1,550kg
電源	AC 3相200V, 10kVA

本間欠オゾン供給装置の特長は以下の通りである。

- ① オゾナイザーは、連続的にオゾンを注入する場合の約1/100程度に小さくなり、設備コストを従来のオゾン法よりも大幅に低減できる。
- ② オゾン注入量および電力消費量は、従来の塩素法(1ppmを連続注入)の場合に比べて、1/10以下に低減できる。
- ③ 残留性のないオゾンを用い、かつその使用量が少ないので、環境汚染が少ない。

3. 間欠オゾン注入による水管路の生物付着防止

3.1 モデル水管路の生物付着防止実験

本実験では小型の間欠オゾン供給装置(オゾナイザー;

os-1型, 1.8g/hr)を使用し, 1日1~2回, 各5分間, 水中オゾン濃度5~10ppmでオゾンの間欠的に注入した。

モデル水管路は, 図-2に示したように, オゾン系列およびコントロール系列から構成した。各配列には付着防止効果の有効距離を調べるために, 前段(注入地点), 中段(水管路約150m相当, 滞留時間100秒)および後段(水管路約300m相当, 滞留時間200秒)に透明アクリル試験管を設置した。なお, 被処理水量は100ℓ/分とし, アクリル試験管は内径35mm, 長さ1mで管内の流速は約1.5m/sである。一方, 300m相当の水管路長(滞留時間200秒)を確保するために使用した塩ビホースは, 内径65mm, 長さ100m(1巻50m)で, 塩ビホース内の流速は0.5m/sである。

3.2 実験方法

実験は, 9月から11月の約3ヶ月間にわたり実施した。この間, 3回に分けてテストを行った。第1回テストでは, 付着防止効果を予備的に把握するために, 1日1回, 5分間で平均オゾン濃度が約5ppm(被処理水量100ℓ/分に対する5分間の平均オゾン濃度)となるようにオゾンを注入した。この場合, 35日後に後段でわずかであるが付着が認められたので, 第2回テストでは, 全長にわたり付着を完全に防止できるように1日2回, 各5分間, それぞれオゾン濃度が10ppmとなるようにオゾン注入量を増加した。さらに,

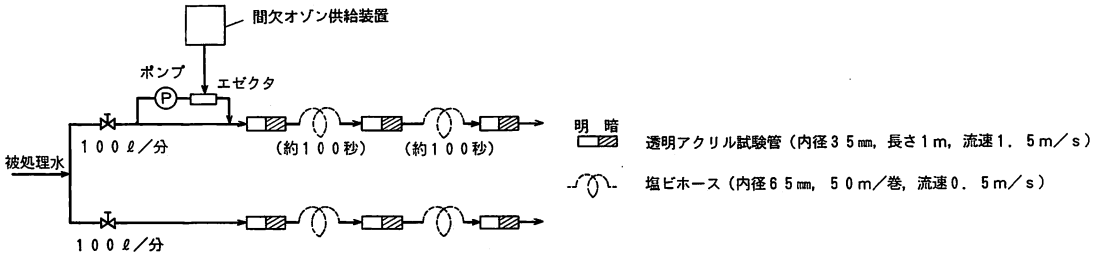


図-2 モデル水管路のフロー

第3回テストでは、第2回テストにおいて付着が生じたコントロール系列にオゾンを注入（第2回テストの注入条件）し、既に付着した水管路に対するオゾンの剥離効果についても調べた。

なお、本被処理の水温およびpHはそれぞれ25~33℃および7.5~8.3であった。また本被処理水は、凝集、ろ過処理により循環使用されているため、表2に示したように、通常の工業用水よりも有機物質や無機イオン濃度が高くなっている。付着量は、実験終了時に、アクリル試験管および塩ビホースに付着した付着物の乾燥重量（110℃、2時間乾燥）および強熱減量（約600℃、1時間強熱）を電子天秤（島津、±0.1g）で測定した。

表2 被処理水の水質

項目	濃度 (ppm)
化学的酸素要求量 (COD)	9.0
全有機炭素 (TOC)	12.0
浮遊物質 (SS)	15.0
鉄イオン	0.9
マグネシウムイオン	9.0
カルシウムイオン	107.0
全窒素	0.6
全リン	0.1
溶存酸素量 (DO)	8.0

3.3 間欠オゾン注入時の水管路内オゾン濃度

図-3は、平均オゾン濃度10ppmで5分間オゾン注入したときの前段（注入地点）、中段（滞留時間100秒）および後段（滞留時間200秒）におけるオゾン濃度の経時変化を示したものである。前段では、オゾン注入約1分後に、最大オゾン濃度約8ppmを示し、5分間の平均オゾン濃度は約5ppmであった。一方、中段および後段での平均オゾン濃度はそれぞれ約2ppmおよび約0.8ppmであった。このように、本被処理水ではオゾン濃度は約80秒で半分に減少し、オゾン

の減衰速度は通常の工業用水の場合（オゾン半減期は数分間）に比べて大きくなっている。

この際、被処理水の一般細菌は、約800個/ml（3回の測定結果の平均値）であったが、平均オゾン濃度10ppmのオゾン注入により各段とも0~2個/mlに低減でき、ほぼ完全に殺菌された。

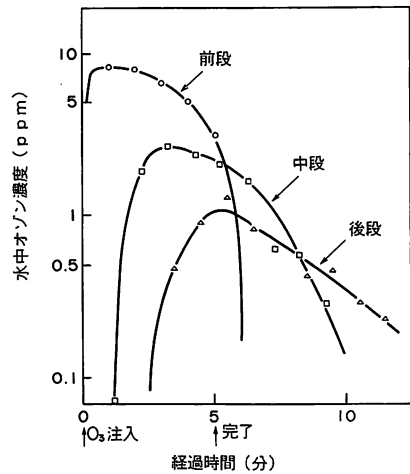


図-3 間欠オゾン注入時の水管路内オゾン濃度の経時変化

3.4 付着防止実験結果

(1) コントロール系列の付着結果

オゾン注入を行わなかったコントロール系列では通水約2週間後にアクリル管の内壁に著しくスライムが付着するのが観察された。特に、光を遮った暗部での付着は著しく、35日後には各段とも管全体が真黒となり、付着量は約5mg/cm²（110℃、2時間乾燥）となった（表3）。このとき、通水圧力は開始時0.1kg/cm²Gであったのが、0.7kg/cm²Gに増加した。このように、水管路内に生物付着が発生すると、通水圧力損失が著しく増大する傾向が認められた。

付着量は、表3に示したように、アクリル試験管よ

りも塩ビホースの方が多くなった。流速が0.5m/sの塩ビホースでは、付着物の乾燥重量(110°C)は最大30mg/cm²となり、流速が1.5m/sの亚克力試験管の場合の約6倍に増加した。なお、付着物の組成は有機物質(600°C, 2時間強熱減量)が約60%であり、スライムの特性を示すと考えられる。

表3 通水35日後のコントロール系列の付着量

		乾燥付着量 [110°C, 2 Hr] (mg/cm ²)	強熱減量 [600°C, 1 Hr] (mg/cm ²)	
亚克力試験管	前段	明	3.0	2.0
		暗	6.0	3.3
	中段	明	1.4	0.8
		暗	5.5	3.2
	後段	明	2.2	1.2
		暗	4.8	2.8
塩ビホース	前段	22.7	14.1	
	中段	29.5	13.6	
	後段	29.3	17.9	

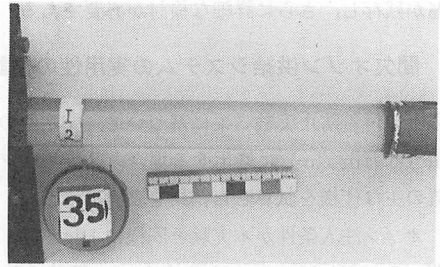
(2) 間欠オゾン注入による付着防止効果

1日1回、5分間、5ppmのオゾンを注入した場合、前段および中段の亚克力試験管では、通水3週間においても付着は認められなかったが、後段ではわずかに付着が観察された。

一方、写2に示したように、1日2回、各5分間、それぞれ10ppmにオゾン注入量を増加した場合、通水35日後において各段とも付着は全く認められなかった。最適なオゾン注入条件については今後の詳細な検討が必要であるが、本被処理水では、1日2回、各5分間、それぞれ10ppmの条件でオゾンの間欠的に注入することにより、約300m相当(オゾン滞留時間200秒)の水管路の生物付着をほぼ完全に防止することができた。

(3) 水管路への間欠オゾン注入による付着物の剥離効果

次に、第2回テストで付着が発生したコントロール系列に、1日2回、各5分間、10ppmでオゾンを注入したときの付着物の剥離効果について調べた。前段の亚克力試験管では、オゾン注入2日後から付着物が剥離する現象が始まり、10日後には中段および後段においても剥離が認められた。写3に示したように、

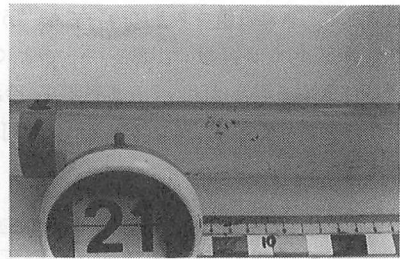


(a) 間欠オゾン処理系列

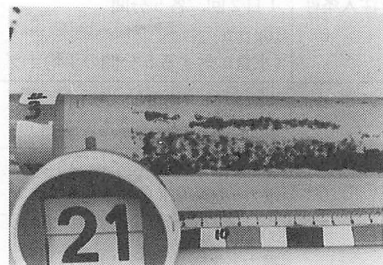


(b) コントロール系列

写2 通水35日後の付着状況



(a) 前段, 中段



(b) 後段

写3 間欠オゾン注入による付着物の剥離状況 (通水21日後)

オゾン注入3週間後には後段でわずかに付着物が残存していたが、前段および中段の亚克力試験管の付着物はほぼ全量が剥離された。しかし、流速が遅い塩ビホース(0.5m/s)の場合、付着物はオゾン注入の日数が経つにつれて次第に剥離されていく傾向にあったが、オゾン注入3週間後においても初期付着量の20~

50%が残存し、さらに詳細な検討が必要である。

4. 間欠オゾン供給システムの实用性の検討

以上の付着防止実験結果に基づいて、発電所の冷却水量（5万m³/hr）に適用する場合の間欠オゾン供給装置の主な仕様を試算した結果を表4に示した。例えば、オゾン注入条件が本実験と同様に1日2回、各5分間、それぞれ10ppmとする場合、水管路の生物付着を防止するために必要なオゾン注入量は、約80kg/日、また総電力消費量は525kWh/日と試算される。一方、1ppmの塩素を連続的に注入する場合、塩素注入量は約1,200kg—塩素/日となり、間欠オゾン供給法でのオゾン使用量の約15倍必要となる。また、電気分解法で塩素を生成する（5.5kWh/kg—塩素）場合、電力消費量は約6,600kWh/日と計算され、間欠オゾン供給法の約13倍となる。これらは概算結果であるが、間欠オゾン供給法は塩素法と比較して薬剤の使用量および電力消費量が1/10以下と少ないことがわかる。従って、酸素コストを含めても運転コストは相当に低減できる。また設備コストについても、5万m³/hrでのオゾナイザ容量は1.8kg/hrでよく（1ppm連続注入する場合は50kg/hrが必要）、冷凍機など付帯設備を加えても大幅なコストダウンが可能になると考えられる。

表4 実用規模の間欠オゾン供給システムの主な仕様

冷却水量	50,000m ³ /hr
オゾン注入条件	1日2回、各5分間 10ppm (水量に対する5分間の平均オゾン濃度)
オゾナイザー	1.8kg/hr (濃度60g/Nm ³) 電力：15.2kW (360kWh/日)
冷凍機	45,000kcal/hr (cop=2) 電力：30kW (120kWh/日)
ブローア	30Nm ³ /hr 電力：0.5kW (12kWh/日)
エゼクタポンプ	200m ³ /min (揚程10m) 電力：400kW (33kWh/日)
吸着塔	8.4m ³ (6.6ton—シリカゲル)
液体酸素タンク	800kg
ユーティリティ	電源：500kVA 総電力消費量：525kWh/日 オゾン使用量：80kg/日 酸素使用量：100kg/日 大きさ：径8m、高さ8m

5. おわりに

1日1～2回、5分間の短時間で高濃度のオゾンを用水中に間欠注入することにより、水管路内壁や熱交換器表面に付着する微生物を除去するという新しい発想の生物付着防止装置を開発した。

本報ではこのような間欠オゾン供給装置の概要を紹介するとともに、一例として小型実験装置を用いて約300mにわたる淡水系モデル水管路の生物付着を防止できることを示した。また、発電所の冷却水量（5万m³/hr）に適用する場合の装置仕様を試算した。その結果、設備コストを大幅に低減できるとともに、オゾン注入量および電力消費量を従来の塩素法に比べて1/10以下に低減できる見通しを得た。一方、今後の課題として、生物付着メカニズムにもとづく最適なオゾン注入条件の検討や、海水系への応用など適用分野の拡大といったことが残されている。

本間欠オゾン供給装置は、従来のオゾン法の課題であった設備コストおよび運転コストの問題を解決し、また環境汚染が少ないといった特長を有する。今後、本装置が工業用水系の水管路、貯水槽をはじめ、半導体産業の超純水製造ラインや火力・原子力発電所の冷却水系など幅広い分野での生物付着防止に応用されることを期待している。

参考文献

- 1) 鈴木静夫、辰野高司；冷却水の障害と処理（1986）、コロナ社。
- 2) 中山繁樹、田中正明、山内四郎、田畑則一；オゾンの短時間間欠注入による水管路の生物付着防止システム、PPM、10号（1981）、14-27。
- 3) 松本正次、北村秀樹ら；工業用循環水のオゾンによる水処理技術の開発、川崎製鉄技報、18、3号（1986）、277-283。
- 4) 加藤 晃、大高一博、本間俊輝；大阪市大温室“咲くやこの花館”の空気調和設備、空気調和・衛生工学65、13号（1991）、1009-1022。
- 5) 池田 彰、田中正明、小沢建樹、中山繁樹；オゾンによる水管路の生物付着防止、エネルギー・資源学会第11回研究発表会講演論文集（1992）、301-306。