

水質浄化技術の新潮流 —ミューミキシングエレメント[®]を 用いた水質浄化技術—

小嶋 久夫* 池田 潤**

1. 水質環境汚染の現況

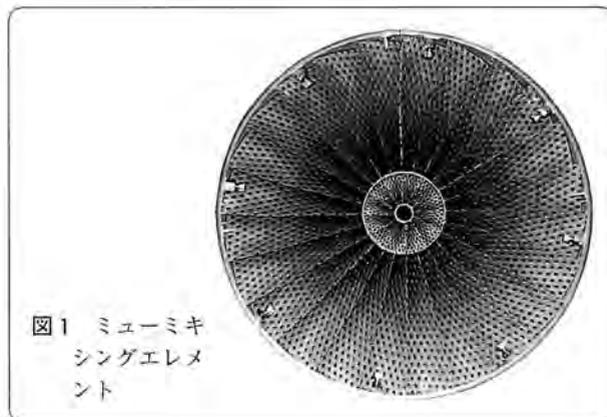
近年、著しい工業化やそれに伴う人口増などによって、世界各地で水の循環しにくい湖沼や閉鎖性海域などでの水質環境汚染が問題化している。特に開発途上国や経済発展地域において問題は顕著であり、例えば、中国の名勝地である太湖周辺（江蘇省、浙江省）では急速な都市化や産業化が進行している影響で湖水の水質環境が急激に悪化し、公害が発生して大きな社会的問題になっている。

日本においても近年、環境保全の視点から河川などの水質改善は進んできたが、湖沼を始めとした閉鎖的な広い水域での水質改善に関しては、依然、多大なエネルギーコストを必要とすることなどから効果的で有効な方法が確立されるまでには至っていないのが現状である。また、工業排水および生活排水処理用曝気装置の省エネルギー化、高効率化も要望される場所である。

2. ミューミキシングエレメントについて

ミューミキシングエレメント[®]を用いた水質浄化装置は、このような湖沼やダム湖や閉鎖性海域などの広域水質浄化に有効な装置として開発されている。

ミューミキシングエレメントは当社独自開発の水質浄化技術として利用できる。構造的には攪拌動力を必要としないスタティックミキサー（静止型流体混合器）であり、その機能性および効率性の良さから、従来のスタティックミキサーの概念を越えた革新的なスーパースタティックミキサーと呼ぶことが



できる（図1）。

ミューミキシングエレメントは右回転または左回転の螺旋状の多孔体の攪拌翼を交互に配置してミューミキサーを構成している。成分、濃度、温度、粘度等の異なる複数種類の流体がミューミキシングエレメント内を連続的に通過する時、流体はミューミキシングエレメント内を連続的に通流する度に、分割・回転・反転・合流および管軸・半径方向でのせん断作用を繰返しながら、無動力で完全に混合・攪拌される。

水質浄化を目的として使用する場合には、水と気体（酸素）がミューミキシングエレメント内を通流するたびに、連続的に微細化されながら気液接触しあうことによって効率的な混合を行うことができる。ミューミキシングエレメントは、この混合・攪拌効率が従来品に比べて飛躍的に優れたものとなっている。

3. ミューミキシングエレメントを用いた水質浄化装置の種類

次に、ミューミキシングエレメントを用いた水質浄化装置の一覧を紹介する。

図2はそれぞれの水質浄化装置の利用状況をイメージ化したものである。ミューミキシングエレメントを用いた水質浄化装置には「ミューアクアタ

*Hisao KOJIMA: (株)ミューカンパニーリミテド 代表取締役
米国化学会会員

E-mail: 01150324kojima@mu_company.com

**Jun IKEDA: 同社顧問

E-mail: qgyt8b99k@festa.ocn.ne.jp

〒110-0007 東京都台東区上野公園 18-8-306

TEL: 03-3828-7090, FAX: 03-3823-2890

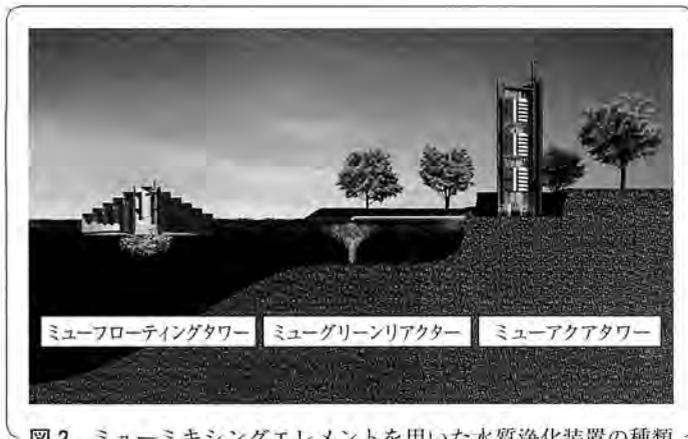


図2 ミューミキシングエレメントを用いた水質浄化装置の種類

「ミューグリーンリアクター」®, 「ミューフローティングタワー」® の3種類がある。

「ミューアクアタワー」は、複数個のミューミキシングエレメントを積層してタワー状に組み立て、そこに循環水ポンプによって湖などから汲み上げた水を自然落下させて「人工の滝」を作り、効率的に水質浄化を行う装置である。このメカニズムなどについては後で詳しく説明する。なお設置場所としては湖岸など水質改善域の周辺部に設置するケースが多い。

「ミューグリーンリアクター」は湖底などに沈め

て設置するタイプの水質浄化装置である。新鮮な加圧空気をルーツブロー、コンプレッサーなどによって水中に設置した装置底部に送り込み、マイクロバブルを発生させることで水質の酸素富化および活性化を行う。装置底部に圧送された空気は浮力で水面へと浮き上がってくるが、その途中に何段にも配置されたミューミキシングエレメントを通過するたびに気泡が細かく砕かれ、マイクロバブルを生成して水中に酸素を溶け込ませやすくしている。

「ミューフローティングタワー」は、これらの装置をさらにコンパクトにして水上に浮遊させるタイプのものである。小型化した「ミューアクアタワー」を搭載したタイプのものと、水中ケーシング内に「ミューグリーンリアクター」を併設したタイプのものの2種類がある。両者とも船のように水上に浮かべることができるので、装置自体の移動が簡単で広い範囲の水質浄化への対応が可能である。

図3には、それぞれの水質浄化装置の性能比較表を提示した。3種類の装置とも水の自然落下や気泡の浮力上昇など自然の力を最大限利用しているため、無駄なエネルギー負荷を極力排除することが可能に

	ミューグリーンリアクター	ミューアクアタワー	ミューフローティングタワー
名称			
構造	発振素子と複数枚の螺旋状の羽根体を内設した高性能散気筒。	ミューミキシングエレメントを配置した浄水塔上部から循環液を供給し、落下エネルギーを利用して大気吸引し、気液混合・接触を行う散気塔。	液体によって水面に浮いた状態で本体中にミューアクアタワー、あるいはミューグリーンリアクターを併設した散気塔。太陽光発電により自家発電を行う。
方式	エアリフトで吸引した液体と加圧空気とをミキシングエレメント内で強力に混合・搅拌させて種霧状の気液混相流を作る散気方式。水中設置型。	液体の位置エネルギーを利用した新しい散気方式。ダムの放水及び滝を連想されたい。地上設置型。	アクアタワー型、ケーシング型、エアリフト型、グリーンリアクター型の各種あり。水上浮体型。
型式	MGR-300~MGR-1800	MAQ-500~MAQ-1800	
気泡状態	超微細	微細	超微細・微細
酸素移動効率 EA [%]	8~16	2~5	
酸素移動動力効率 [kg・O ₂ /kWh]	1.0~1.8		
長所	<ul style="list-style-type: none"> 閉塞に強い。 搅拌力およびせん断力は強力。 設置工事が簡易。 マイクロバブルを生成する。 液体用加圧ポンプは不要。 	<ul style="list-style-type: none"> 閉塞に強い。 循環液量は大容量です。 地上設置工事が簡易です。 加圧空気用ブローアは不要です。 マイナスイオンが生成できます。 	<ul style="list-style-type: none"> 閉塞に強い。 循環液量は大容量です。 水上での移動が可能です。 水深の深い所の水質浄化が可能です。
短所	特になし	特になし	特になし
備考	<ul style="list-style-type: none"> 供給空気量は2~100m³/hです。 ガス質量速度は3.2×10kg/m³/hです。 材質はSS, SUS, TL, ハステロイ, P.P, PVC等です。 ガス吸収, ガス放散等に使用可能です。 	<ul style="list-style-type: none"> 液質量速度は2.5~4.5kg/m³/hです。 循環液量は50~1,000m³/hです。 材質はSS, SUS, P.P, PVC, FRP等です。 モニュメンタルな造形と水浄化のコラボレーションに最適です。 	※ミューグリーンリアクター、ミューアクアタワー欄を参照。

図3 水質浄化装置の比較表

なっている。世界的なエネルギー不足が深刻となっ
てきているこれからの時代に即した未来的な水質浄
化装置であるといえる。同時に、いずれの装置の場
合もコンパクトな設計が施されており、省スペース、
省エネルギー、メンテナンスフリーであり、また生
態系にも影響を及ぼさないものになっている。

4. ミューアクアタワーのメカニズム

4-1. 何故滝は白く観えるのか

図4は和歌山県熊野地方にある「那智の滝」の写
真である。水は本来透明なものであるが、滝を勢い
よく流れ落ちる水は真っ白に変色して観える。これ
は一体何故なのだろうか。その原理を読み解くこと
が「ミューアクアタワー」のメカニズムの解明につ
ながる。

滝の水が白く変色して観えるのは、滝の水粒が落
下する際に周辺から多くの空気（以下酸素と言う）
を取り込んでいることによるものである。またその
際同時に、滝を流れ落ちる水は岩肌につつき細か
く砕け散る。この時、水粒が小さく砕かれるためそ
の表面積が増加し、空気との気液接触面積も増え



図4 那智の滝

るため、より水中に酸素を取り込みやすい状況が生
み出されることになる。

この滝の「落下」と「破碎」の2つの効果は「滝
効果」とも呼ぶことができるが、ミューキシング
エレメントはこの「滝効果」を最大限に利用した水
質浄化装置であるといえる。このミューキシング
エレメントを積層して人工的な滝を構成したものが

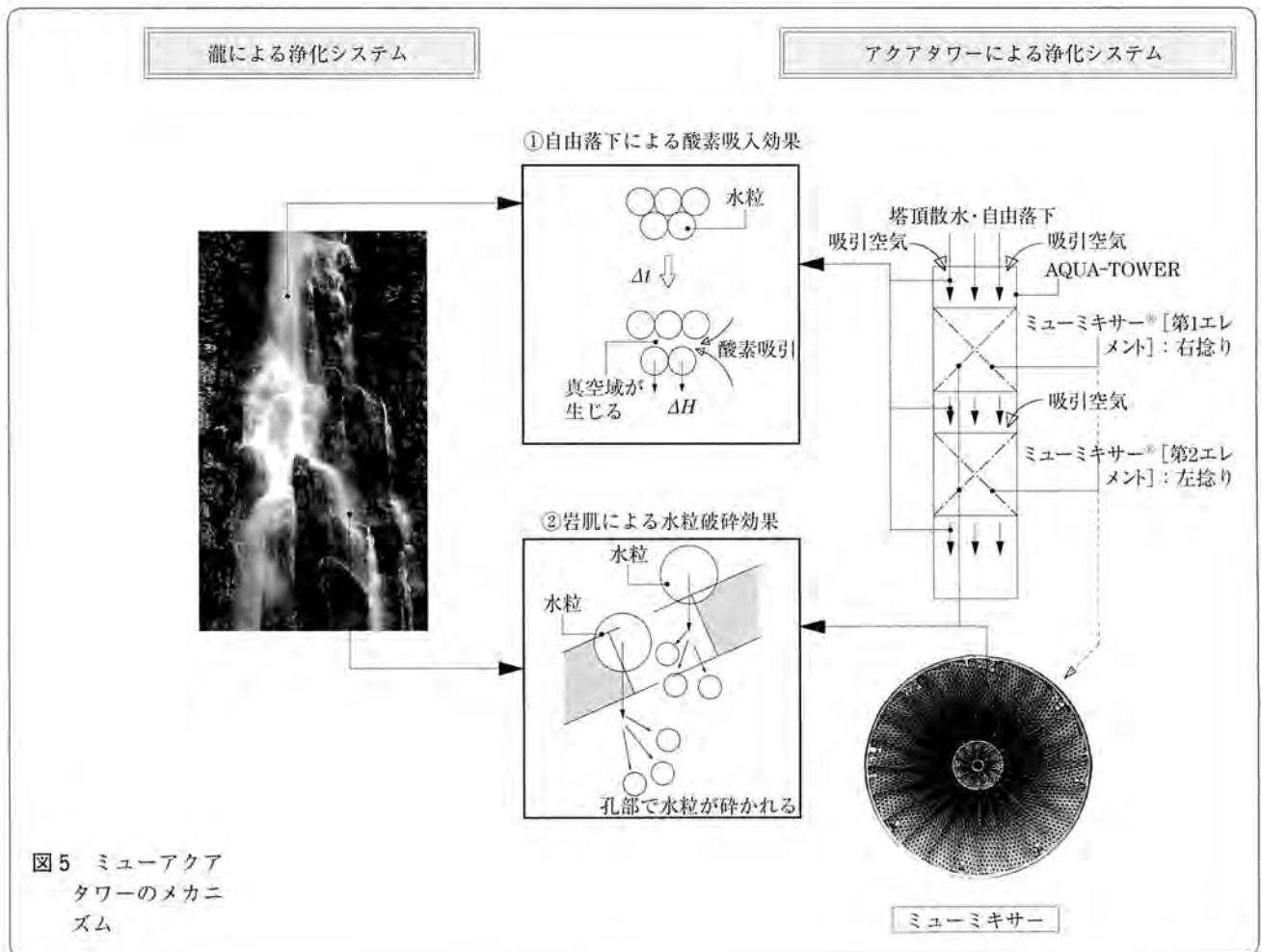


図5 ミューアクア
タワーのメカニ
ズム

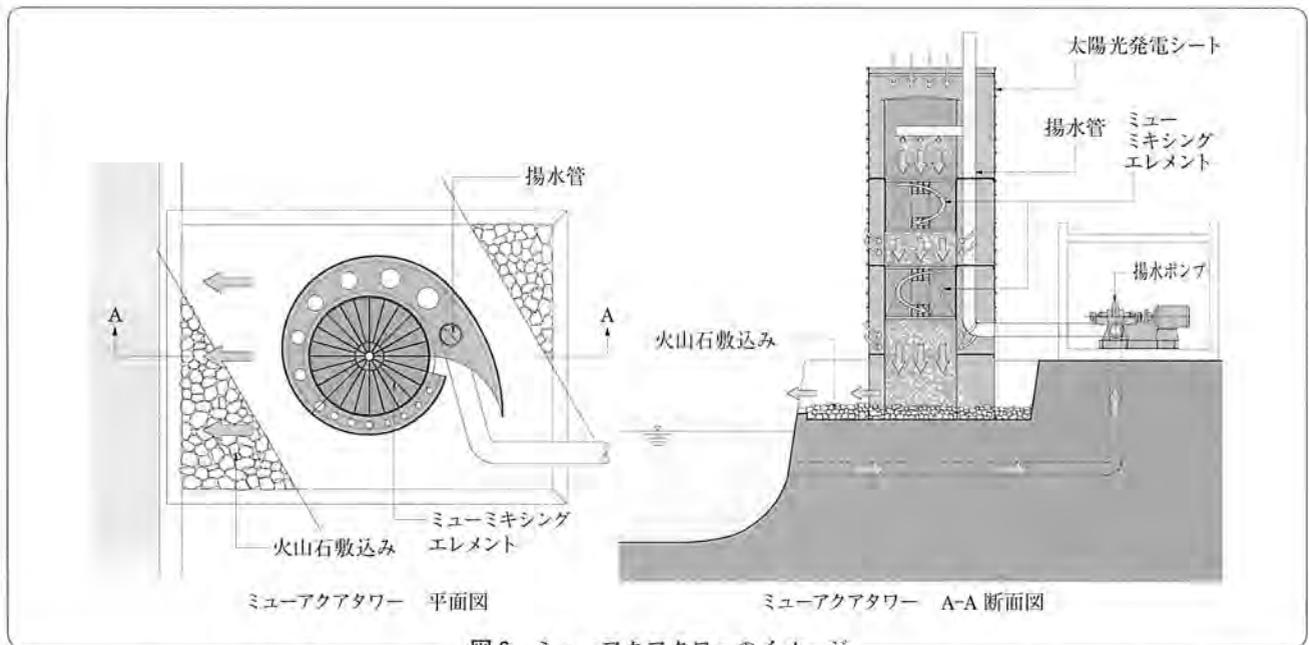


図6 ミューアクアタワーのイメージ

「ミューアクアタワー」である。

4-2. ミューアクアタワーの原理

ここで滝の原理と重ね合わせながら、もう少し詳しく「ミューアクアタワー」のメカニズムを説明する。「ミューアクアタワー」における「滝効果」とは具体的には次に示す2つの酸素溶存効果を指している。

①水の自由落下による酸素溶存効果

一つ目が水の自由落下による酸素溶存効果である。滝や堰などの落差がある場所では、水の落下に伴い、水の色が白く変色して観える。この時、微細空間において図5-①に示したような事象が生じている。

水が落下する時にはニュートンの原理が働き、落下距離に応じて水の落下速度が加速される。その際、図に示すように水の粒は Δt 秒後、 ΔH の距離を落下した時に、加速度による速度差が生まれ、水粒と水粒の間に真空域が生み出されることになる。すると、落下する水のまわりから空気が真空域に向かって流れ込み、そこで空気と水粒が気液接触することによって混合され、水粒の中に酸素が取り込まれる。落下域で水が白く観えるのは酸素を取り込んだ水の粒が過飽和状態になっていることを意味している。このように「ミューアクアタワー」では水の自由落下による酸素溶存効果を最大限に利用している。

②螺旋状の攪拌翼による水粒破碎効果

二つ目が岩肌等による水粒破碎効果である。滝を流れ落ちる水は岩肌などにぶつくと白いしぶきになる。これは勢いよく落下する水粒が岩肌に当たった際に細かく碎かれ、より小さな水粒になることによって、水粒と酸素の気液接触界面積が増し酸素吸

収効率が上がるためである。

「ミューアクアタワー」では(図5-②)のように、細かな多量の穴のあいた螺旋状の攪拌翼が滝の岩肌に相当する役目を果たし、水粒がそこらぶつかり合うことでさらに細かい水粒を生み出すことができる。そのことが水粒と酸素の気液混合を加速させるのである。

4-3. ミューアクアタワーのデザインコンセプト

酸素を多く含んだ水は生態系にも活性化をもたらす水質の浄化作用につながる。また、この装置においては化学的な処理や動力的な負荷を与えることが一切ないため、自然の生態系にもほとんど影響を及ぼすことがない。

図6は「ミューアクアタワー」のデザインイメージ例である。「ミューアクアタワー」は人工の滝を再現することで、水中に酸素を溶け込ませ溶存酸素量(DO)を増やす。また、硫化水素の発生を防止し、水中のアンモニア量を減らすことも可能である。さらに、池全体の水を動かすことによって、浮遊物質(SS)の改善に効果を発揮する。「ミューアクアタワー」の外周部には太陽光発電シート等を装着して自然エネルギーによる自家発電を行い、その発電電力によって揚水ポンプの稼働電力をまかなう。浄化装置であるミューミキシングエレメントそのものはメンテナンスフリーであるため、将来的にもランニングコストはほとんどかからない。

このように、外観デザインを整えることによって、景観を損なわない構築物とすることが可能であり、技術的にも景観的にも自然と調和した水質浄化装置として環境に同化させていくことができる。さらに、

造型美と音楽を融合させたモニュメンタル施設としても活用可能である。

5. ミューグリーンリアクターのメカニズム

「ミューグリーンリアクター」は「ミューアクアタワー」と同様に、ミューミキシングエレメントを装置内部に積層させた構成となっているが、「ミューアクアタワー」が大気中に設置され、水の自然落下によって酸素と気液混合させる構造であったのに対し、装置を水中に設置し空気の浮力によって水の中にマイクロバブル化した酸素を溶け込ませる構造になっている。ミューミキシングエレメントという同じエレメントを用いながら、いわば、水面を基準にして「ミューアクアタワー」を反転させたようなメカニズムでできているとも言える。

水と空気を機械的に攪拌する水中曝気攪拌装置を不要とし、動力としては「ミューグリーンリアクター」底部に空気を送り込むためのルーツブローアもしくはコンプレッサー程度の設置ですむので、大変効率良く水質浄化を行うことができる。

図7は試験終了後に曝気槽から「ミューグリーンリアクター」を取り出した直後の実写写真である。すでに各所で実績を上げており、コストパフォーマンスに優れた水質浄化装置として認知されつつある。強制曝気装置等による無理な機械的、電気的な負荷を加えることなく、図8に見られるような細かなマイクロバブルを瞬時に大量に発生させることができ

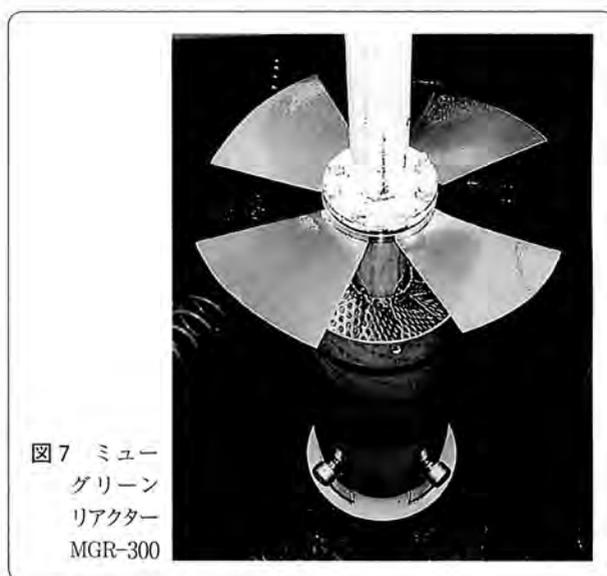


図7 ミューグリーンリアクター MGR-300

る。直径1,800mmで、空気量6,000m³/hが可能である。この大型の曝気装置を利用して、太湖の水を清浄化するのが筆者らの夢である。

6. ミューグリーンリアクターの応用例

農業集落排水処理施設を利用して回分式曝気試験を行い、回分式曝気槽装置として実用可能か試験を実施した。この試験は、太陽環境(株)と共同で実施した。

1) 試験条件

- 原水量：350m³/日
- 曝気槽容量：165m³×2槽
- 曝気槽形状寸法：5.8×5.8m

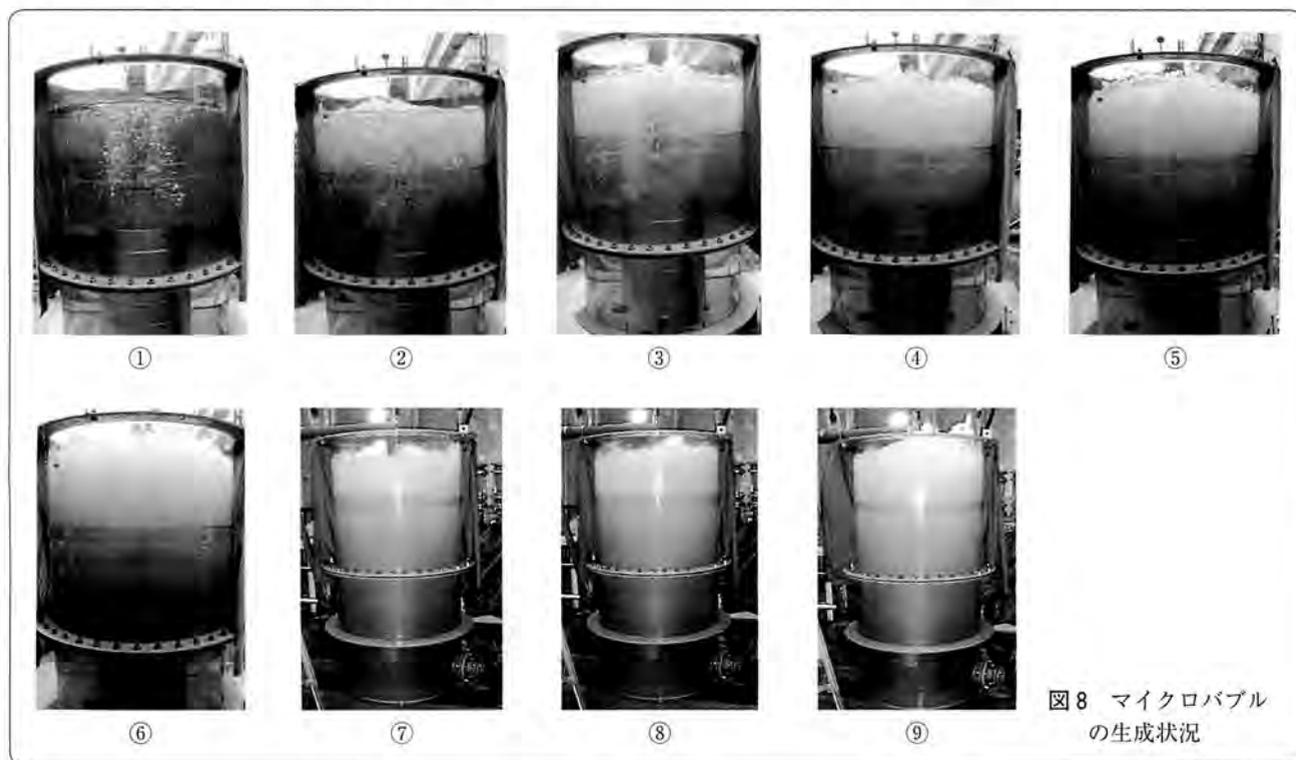


図8 マイクロバブルの生成状況

表1 回分式汚水処理（汚水温度 15.5℃ MLSS3,300mg/L）

既設水中曝気攪拌装置	曝気用		攪拌用		動力 [kW]		合計 [kW]	酸素溶存効率 [%]
	供給空気量 [m ³ /min]	ブロー [kW]	水中エアレータ [kW]	水中ポンプ	好気	嫌気		
	1.0	2.64 (定格3.7)	2.2	不要	4.84	2.2	7.04	12.1
ミューグリーンリアクター MGR-300	1.0	2.64	不要	0.75	2.64	0.75	3.39	9.7

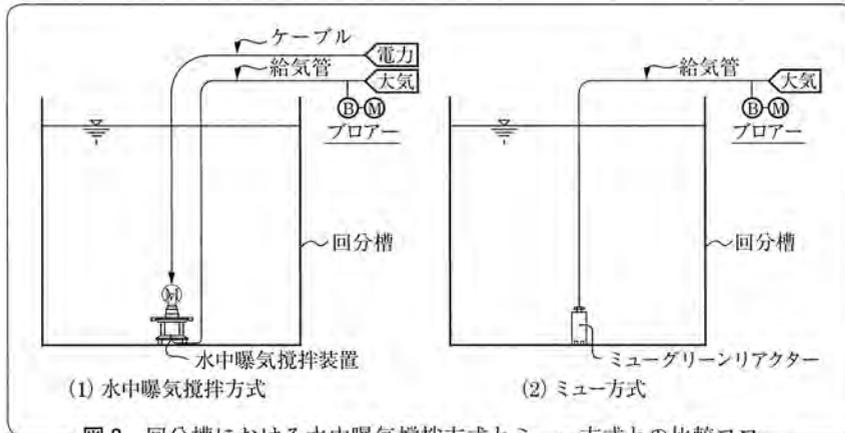


図9 回分槽における水中曝気攪拌方式とミュー方式との比較フロー

水深：5.03m
MLSS：3,300mg/L

2) 性能比較表

- 性能比較および比較フローを表1, 図9に示す。
この試験結果から、
- ①電力量は48%減の省エネルギーになる。
 - ②MGRは動力部分（回転体）がないため、メンテナンス費用はかからない。
 - ③MGRは漏電、磨耗などの機器故障がない。

などの長所が判明した。

7. ミューフローティングタワーのメカニズム

「ミューフローティングタワー」は船のような構造を持った浮体の一部に、小型化した「ミューアク



タワー」や「ミューグリーンリアクター」を組み込んだ水質浄化装置である。「ミューグリーンリアクター」を組み込む場合には水中に二重管を挿入し、エアリフト効果によって水の循環とマイクロバブルを生成させる。

図10に「ミューフローティングタワー」の設置イメージを示している。自在に水面に浮かばせることができるので、特に水深の深いダム湖や湖、広域の閉鎖海域などでの設置が容易で、広範囲での利用が期待できる。また、本体部分に太陽光発電装置を併設することによって電力の自家発電を行い、水の揚水や空気の圧送を行うことも検討している。今後これを実現させることによって、半永久的な

水質浄化システムを構築していくことも可能であると考えている。

8. 工業排水の処理装置

有機塩素系化合物を含んだ工業排水処理装置「ミューリアクター」として利用されている。図11に全体図を示した。排水中には、塩素系化合物は300~500ppm、カルシウム系化合物は3~5wt%含まれている。処理後、塩素系化合物は20ppm以下である。この連続排水処理装置は、直径1,500mm、塔高は18,000mmであり、塔上部から排水量400~600m³/h、下部から水蒸気を3~5t/h供給して、減圧水蒸気放散装置として利用されている。液の供給方法は、オーバーフロー方式で、ディストリビューターは使用していない。ミキシングエレメントは直径1,500mm、充填高さは12,000mmである。カルシウム系化合物の付着・成長による不都合もなく圧力損失2kPa以下で、10年以上連続運転されている。

9. 排水曝気用散気管「ミューエアレータ」の開発

小型でメンテナンスフリー、高性能、長耐久性、安価なおよび配管工事が容易なエアレータを開発した。ミューエアレータ®は、ミューミキシングエレメントとミュー発振素子®から構成されている。

ミューエアレータ MA-125の全体図を図12に、

図10 ミューフローティングタワー



図 11 ミューリアクター

構造図を図13に示した。ミューエアレータの構造は、筒状の円筒管図13-①と、ミューミキシングエレメント図13-②と、発振現象を励起するミュー発振素子[®]図13-③と、圧縮空気を供給する空気配管図13-④と、排水を導入する開口部図13-⑤とで構成されている。従来の膜レン式とミューエアレータ式との比較を表2に、機能比較を図14に示した。

10. 今後の展開

10-1. 放射性汚染水処理への応用

多核種の高レベル放射性物質を含んだ汚染水の処分方法は、人間の寿命と放射性物質の半減期（10万年以上と言われている）を考えると、気の遠くなる話である。人間が人工元素を生みだした以上、こ

表2 メンブレン式とミュー式の比較

	メンブレン式	ミュー式
◎気泡径	膜の穴径と圧力で決まる。	ガス流速で決まる。
◎酸素溶解効率 [%]	8~16	10~12
◎圧力損失 [kPa]		
取付時	5~8 ¹⁾	4~5 ²⁾
交換時 (洗浄時)	10~13	4~5 (ほぼ一定)
◎汚泥の堆積	あり	なし
◎耐久性	半年~3年	5年以上
◎材質	EPDM, 他	PP

1) 水深: 4.5m, 吹込空気量: 0.05~0.12m³/min

2) 水深: 5m, 吹込空気量: 1m³/min



図 12 ミューエアレータ MA-125

れらを安全に、確実に、効率的に、経済的に、地球上を汚染させることなく、関係者の英知を集めて、革新的な廃棄処分・方法を考えなければならない。

米国においては、稼働中の原子炉 104 基から排出される放射性廃棄物処理には頭を悩ましている。長期間（10 万年以上）安全、安定、確実な処分方法は発表されていない⁵⁾。

一方、中国では、「FUKUSHIMA」の事故を教訓にして、核エネルギーの有効利用に対する積極的な姿勢がうかがえる。安全で、放射能を外部に放出しないことを確実にする原子炉設計を実施し、第3世

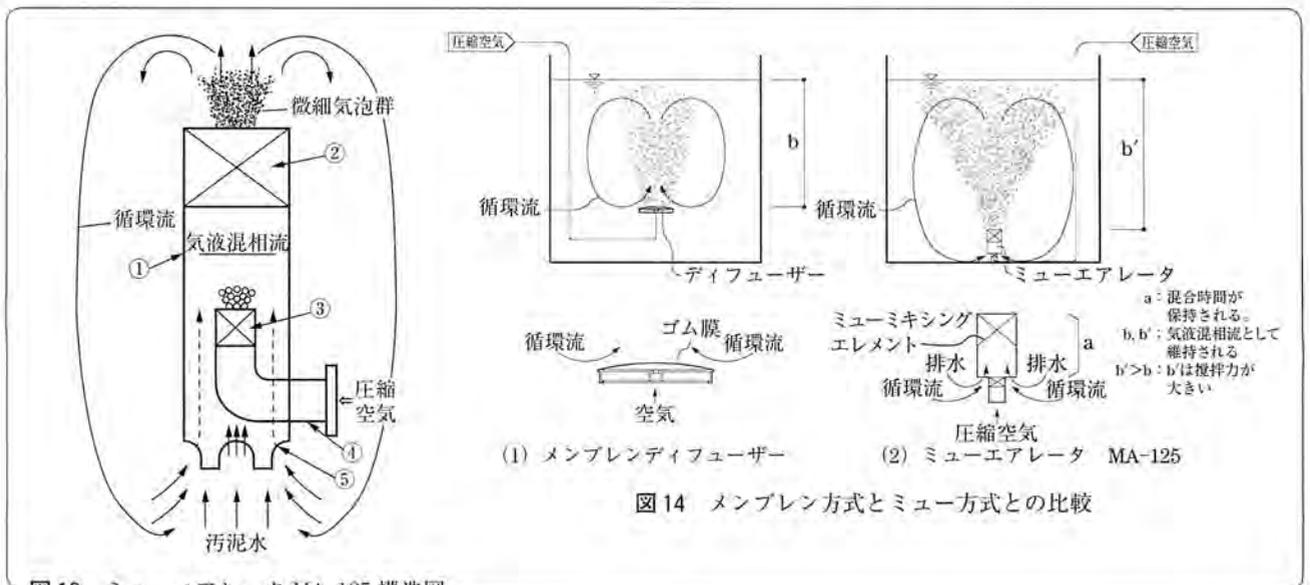


図 13 ミューエアレータ MA-125 構造図

図 14 メンブレン方式とミュー方式との比較

代の新型原子炉「AP1000」を開発している⁶⁾。

たびたび新聞などで報道されている多核種放射性汚染水処理装置のトラブルの原因は、知人曰く、「汚染水中のゴミ、鉄錆、汚泥、ヌメリ、藻などが吸着剤・イオン交換樹脂などに付着・成長して吸着塔、イオン交換樹脂塔および配管内を閉塞させるからですよ」とのことである。考えられない原因ではない。

「原子力」から「原始力」に回帰して、何世代にもわたって、一步一步、時間をかけて蒸発や液-液抽出および焼却などの手段で、最適な減容係数と除染係数をみいだして、処分していくことが望まれる。

ミューミキシングエレメントの放射性汚染水処理および放射性廃棄物の減溶化への応用は、

- (1) 蒸発缶の高性能化と高効率化を図る。
- (2) イオン交換樹脂塔および吸着塔にミューミキシングエレメントを配置して、吸着・洗浄工程を高性能化する。
- (3) 貯蔵汚染水タンクからのベントガスおよび焼却炉からの廃ガスの洗浄工程に「ミュースクラバー」を配置する。

等が考えられる。

10-2. オゾン(O₃)ガスを利用したバラスト水の殺菌、滅菌処理装置への応用

設計条件としては、

- (1) 目詰まりをしない。メンテナンスフリーであること。
- (2) 殺菌力が高性能であること。
- (3) 省スペースであること。
- (4) システムが簡易であること。
- (5) 残存O₃がないこと。

ミューミキシングエレメントは、これらの条件を満足できるものと考えている。

以上の他にも、上・下水のオゾンガスによる殺菌、滅菌処理システムおよび排水中の水銀除去システムにも応用できる。

11. ミューミキシングエレメントの思想

古来より日本における「技術」とは、自然と人間を柔らかくつなぐ性質のものであった。よく知られているように、治水技術における「信玄堤」などの発想は自然の地形を利用しながら水の力を無理なく逃がすことで洪水などの災害を防いできた。そこには人工の力だけで自然をねじ伏せるのではなく、自然に寄り添い自然の力を利用しながら人と自然が共存していく方法「智水」を探るというこの国特有の思想がある。また、オランダの北海に対峙してある

堤防兼道路は「自然石」で構築している。そこには科学・技術と自然（歴史）との融合による人間の叡智が見られる。

ミューミキシングエレメントを用いた水質浄化装置の基本的発想の本質もまさにその部分にある。この国の豊かな自然の中こそ、これからを担う「技術革新」の重要なヒントが隠されている。

以上、ミューミキシングエレメントによる水質浄化技術について簡単に誌した。

芭蕉の「不易流行」を「根」に、A.Einsteinの「 $E=mc^2$ 」を、A.L.Lavoisierの「質量保存則」を、I.Newtonの「慣性の法則」を緯糸に、「らせん」を経糸に、「大甘甘林」(無= MU)を観つつ、一步一步、玉手箱を想像して曼荼羅(マンドラ)を織っていく所存である。

原子力発電所が遺跡にならぬように、一技術者否人間として、使命感を維持しつつ、生命ある限り探求していく覚悟である。

遺跡に頭を垂れて流れる一滴の雫 化石を穿ち 豊穡なる深く澄んだ美の海原に未知なる道を 地図なき道を求めて 不二なる冥王星へ 不死なる宇宙へ。
“なによりも 蝶の現ぞ あはれなる”

松尾芭蕉：「ひさご」花見の巻

“一水の流を参究し、不流を参究するに、万法の究尽たちまちに現成するなり。”

永平道元：「正法眼蔵」山水経

〈参考文献〉

- 1) USP 6,431,528B1, USP 7,264,231B2, USP 7,510,172B2, EP 1716917B1, EP 2095869B1, CNP ZL2004 8 0041707.1
- 2) A. Pasveer, S. Sweerie : 「A New Development in Diffused Air Aeration」, Journal WPCF, September (1965), pp. 1267-1274
- 3) 宗宮功編著：自然の浄化機構, pp. 211-227 (1990.5.25), 技報堂出版
- 4) 宇井純：パスフィーア先生, 新公害原論 (1997.6.25), 朝日新聞コラム
- 5) J.Johnson : 「TALK, NO ACTION ON NUCLEAR WASTE PLAN」, C & EN, October (2012), pp. 44-46
- 6) Z.Ming, C.Li-min, et al. : 「Post-Fukushima Nuclear Power Development in China」, POWER, Vol. 156, No.11, November (2012), pp. 48-52

