

# MU-SSPW エLEMENTの CCS 等への応用

小嶋 久夫\*<sup>1)</sup>, 鈴木 照敏\*<sup>2)</sup>, 竹林 昌洋\*<sup>3)</sup>, 小嶋 真慈\*<sup>4)</sup>, 伊藤 吉晃\*<sup>5)</sup>, 池田 潤\*<sup>6)</sup>

## 1. はじめに

わが社ミューカンパニーリミテドは、MU-SSPW エLEMENT (MU-Static Spiral Perforated Wings : ミュー静止型らせん状多孔翼) をインターナルとして装備した環境改善用の多くの装置を上市してきた。

この原理を応用した装置として小型は排水処理用の MU-AERATOR から大容量の排ガス処理用の MU-SCRUBBER まで多種の装置のラインナップがある。

これらの中には顧客からの要望でテストにより応用が可能になったものが多々ある。今回は以下の内容で CCS 設備の湿式 CO<sub>2</sub> 回収装置への MU-SSPW エLEMENT の応用を中心に、最近の応用事例とテストからのスケールアップ事例を紹介したい。

MU-SSPW エLEMENT のトレイや従来の充填物がない特長を認識していただけたら幸いである。

- 1) MU-SSPW エLEMENT について
- 2) CCS への応用
- 3) 最近の応用例
- 4) スケールアップ事例について

## 2. MU-SSPW エLEMENT について

(1) MU-SSPW エLEMENT 内を重力で落下するらせん状の液体が左右に旋回し、ELEMENT 全体を洗浄する自浄作用のため汚れや詰まりがない。液体はその系で使用される吸収液や還流液である (図 1 参照)。

(2) 液体が ELEMENT 全体をまんべんなく旋回し流下するのでデッドスペースがない。さらに流下する液体にはマイクロバブルが含有されており、フォーミングの傾向はなく気液接触効率をより向上させている。従来のインターナルとの気液接触機構の比較を参照していただきたい (図 2, 表 1 参照)。

(3) インターナルは高性能を追求することで構造は緻密化し高性能化するほど汚れには弱くなる。どうしても高性能化と汚れにくさは両立しない。唯一 MU-SSPW エLEMENT はこれを両立可能にするインターナルである。特に並流操作が可能であるというのが大きな特徴である。これが反応、除塵、ガス冷却への応用に大きく道を開いた。

わが社は多くの操作に適合するテスト装置を準備しており、まず実ガスでテストをして性能を確認し

\*<sup>1)</sup> KOJIMA Hisao : (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  
〒110-0007 東京都台東区上野公園 18-8  
TEL : 03-3828-7090 (代)  
FAX : 03-3823-2890  
URL : <https://www.mu-company.com/>  
e-mail : 01150324kojima@mu-company.com

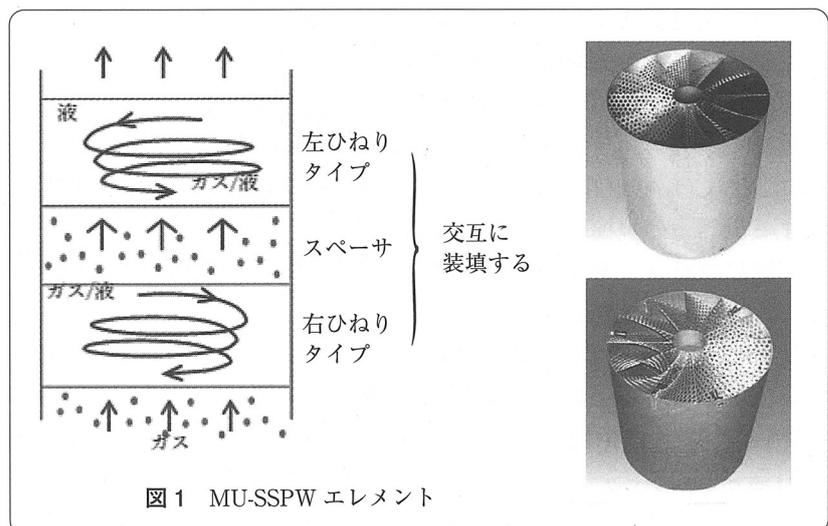
\*<sup>2)</sup> 鈴木 照敏 同社 技術部長

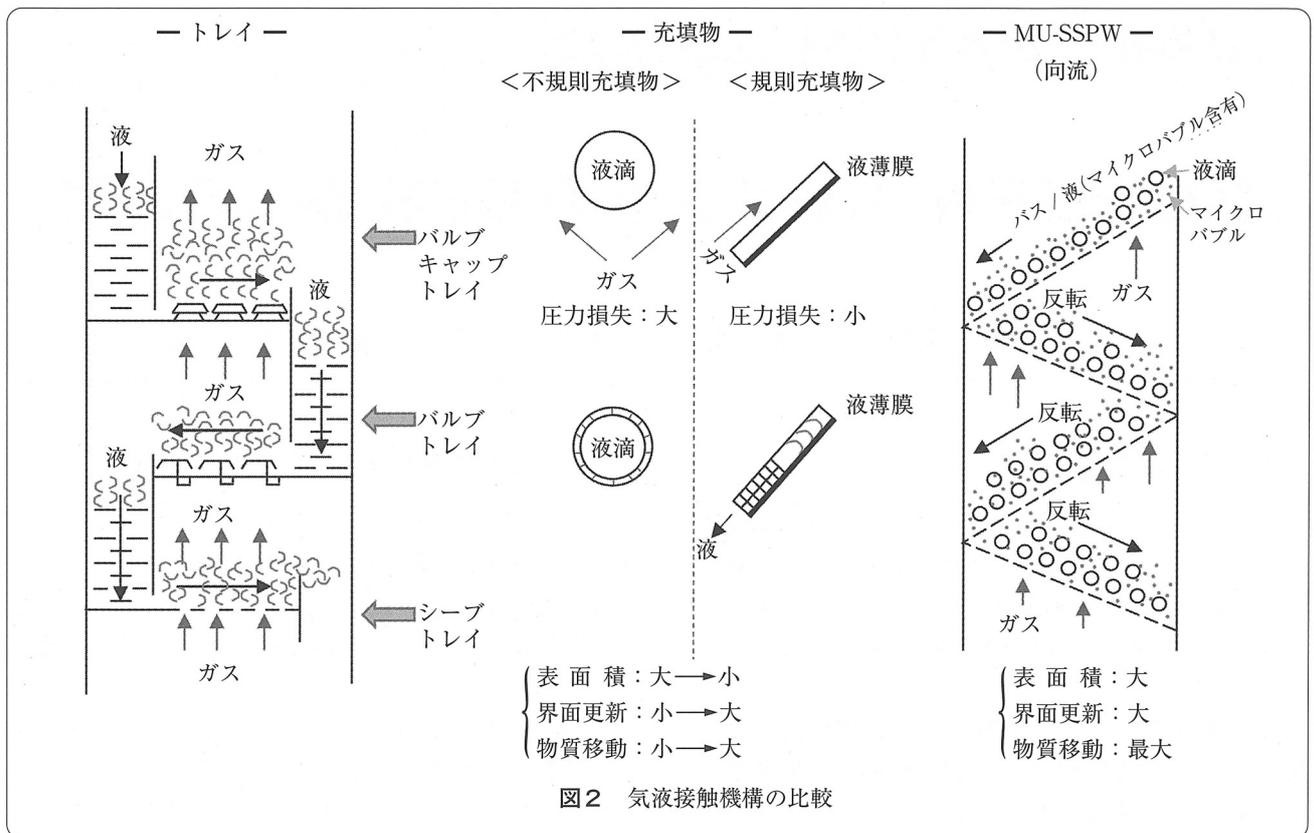
\*<sup>3)</sup> 竹林 昌洋 同社 工事課長

\*<sup>4)</sup> 小嶋 真慈 同社 技術課長 1級建築  
施工管理技士

\*<sup>5)</sup> 伊藤 吉晃 同社 顧問 1級建築士

\*<sup>6)</sup> 池田 潤 同社 顧問 1級建築士





MU-SSPW エLEMENTのコンセプトに納得していただき実プラントに採用していただくという地道な手順を踏んできた。半導体や汚れの多いセメント、パルプ、合成ゴム等の化学メーカーの心臓部に採用され40年間に多くのリピーターを獲得し満足してもらっている。この事例については後述する。

### 3. CCS への応用

2012年10月にカナダのサスカチュワン州にあるサスクパワー社のバンダリーダム火力発電所で建設中のCCS BD-3プラントを見学した。これは1系列のプラントでアミン溶剤によるCO<sub>2</sub>を100万トン/年回収する世界一の規模であった。現地で実際にプラントを目の当たりにしてその大きさに驚かされた。特に前処理塔とCO<sub>2</sub>吸収反応塔は通常の間筒型の塔ではなく巨大なビルを思わせる四角柱の塔であった。

2014年10月に稼働を開始し2015年10月に福岡で開催されたCCSフォーラムで社長のマイケル氏と再会した。彼は11億ドルを投じたCCSプロジェ

表1 従来型気液接触装置との比較

気液接触装置	充填塔		MU塔	
	トレイ塔	不規則充填物		規則充填物
インターナル	従来型トレイ	不規則充填物	規則充填物	MU-SSPW ELEMENT
1. ガス相・液相の分類	連続相	ガス		区別なし
分散相	ガス	液		
2. 気液接触機構	液中へのガスバブルの通過	液滴へのガスの衝突	液薄膜を通じてのガスの接触	反転を伴う気液(マイクロバブル含有)混合
3. 二重境界膜説に基づく物質移動評価				
1) 比表面積	大	中	小	大
2) 界面更新頻度	小	小	大	大
3) 物質移動速度	小	中	大	大
4. 特徴				
1) 処理能力	小	中	大	大
2) 圧力損失	大	中	小	* 1) 小
3) 汚れ、詰まりに対する耐性	大	中	小	* 2) 大
4) 並流操作	不可	向流操作が支配的		* 3) 可

備考)

\* 1) 概ね規則充填物の1/3-1/4程度 \* 2) メンテナンスフリー特性 \* 3) フラッディングの制約がないためコンパクト化が可能

クトの経緯を発表した。フォーラム後にプライベートで話をする機会があり実情を知ることができた。最大の課題は汚れと詰まりであった。このため長期運転ができず充填物の清掃と交換それにアミン溶剤の交換が必要で対策を検討中ということであった。

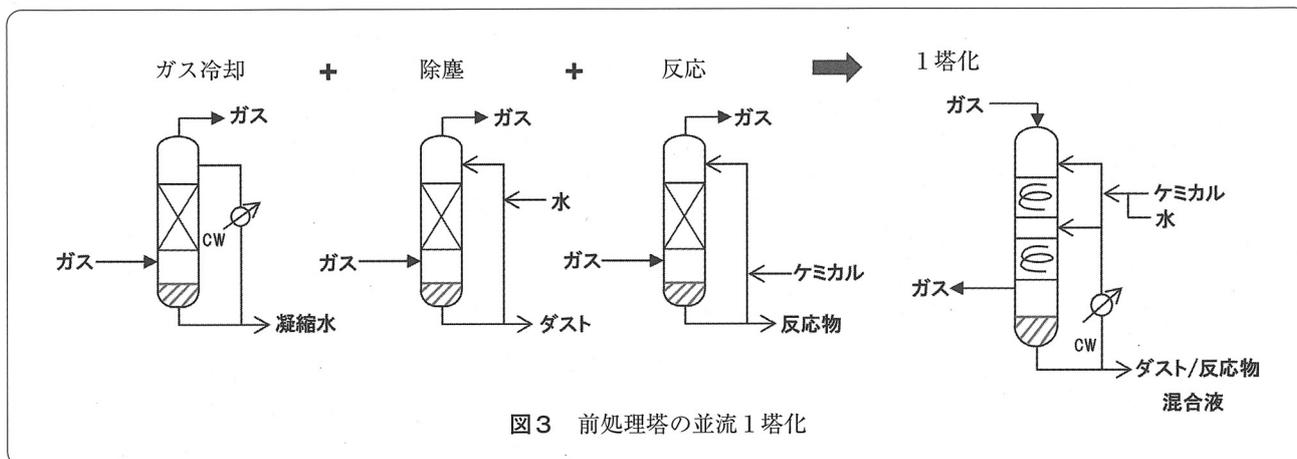


図3 前処理塔の並流1塔化

ミューカンパニーとしての見解を述べさせていただいた。

2021年4月の報告書によればCO<sub>2</sub>の累積回収量は400万トンを達成したとあった。稼働開始以来7年目の成果であるので、まだ完全に詰まりは解決されていないと推測される。バンダラーダム以外のCCS設備を見学する機会があり、やはり課題は塔のサイズと汚れであることを再認識させられた。以前のCCSプラントは汚れれば停止し清掃すればよい、その間は元の煙突で放出すればいいという感覚であった。しかし、最近はメンテナンスおよびユーティリティ費用の高騰と回収CO<sub>2</sub>も立派な製品(CCUS)であるということが認識されてきて、大手エンジニアリング会社がCCSプラント建設に参入し競争が激化している。さらにCCSプラント

は火力発電所だけでなく製鉄所、セメント工場、ゴミ焼却設備に展開されつつある。

CCSプラントは排ガスの前処理塔/CO<sub>2</sub>吸収反応塔/CO<sub>2</sub>放散塔から成り立っている。

排ガスには10~20vol%の低濃度のCO<sub>2</sub>が含まれているので前処理塔とCO<sub>2</sub>吸収反応塔の負荷はCO<sub>2</sub>放散塔に比べて大きい。CO<sub>2</sub>回収量が多くなればなるほど2塔は大型化する。それに排ガスに含まれてくるダスト、H<sub>2</sub>Sを除去する前処理塔の性能が非常に重要である。排ガスの前処理が不十分であるとダストやH<sub>2</sub>Sが次工程のアミン溶剤中に蓄積し、やがてシステム全体が汚染される。

図3は除塵、H<sub>2</sub>Sの反応除去とガスのダイレクト冷却の3つの機能をコンパクトな1塔で実施可能なMU-SSPWエレメントを装備した装置である。これは

小型であるが、わが社が長い実績を有する並流操作に特化した装置である。同様に大型のCCSには図4と表2のようにCO<sub>2</sub>吸収反応塔を並流操作としてコンパクト化することも可能である。

#### 4. 回収システム

MU-SSPW (ミュー静止型らせん状多孔翼) エレメントを充填する並流と向流の塔を組み合わせた装置で多くの種類の排水および排ガスを処理している実績を紹介してきた。今回は最近需要の増えてきた2種類の回収システムについて紹介したい。

まず最初に液体アンモニアの大型の貯槽タンクの安全弁が作動した時にフレアに放出されるアンモ

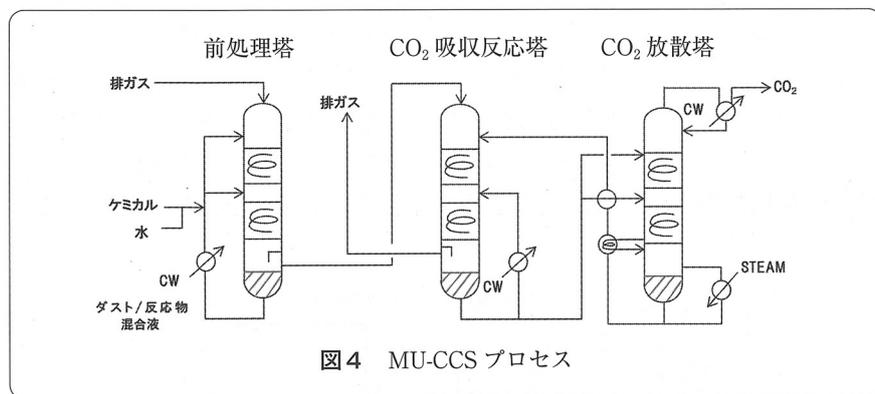


図4 MU-CCS プロセス

表2 CCS能力 [CO<sub>2</sub>回収量 t/y] と塔径

塔	前処理塔		CO <sub>2</sub> 吸収反応塔			CO <sub>2</sub> 放散塔	
	既設向流 (m □)	MU 並流 (m φ)	既設向流 (m □)	MU 向流 (m φ)	MU 並流 (m φ)	既設向流 (m φ)	MU 向流 (m φ)
50 万 t/y	7.7	3.9	7.7	5.7	3.9	3.4	2.2
100 万 t/y	11.0	5.5	11.0	8.0	5.5	4.8	3.1
150 万 t/y	13.4	6.8	13.4	10.0	6.8	5.9	3.7
200 万 t/y	15.4	7.8	15.4	11.0	7.8	6.8	4.3
300 万 t/y	18.9	9.6	18.9	14.0	9.6	8.3	5.2

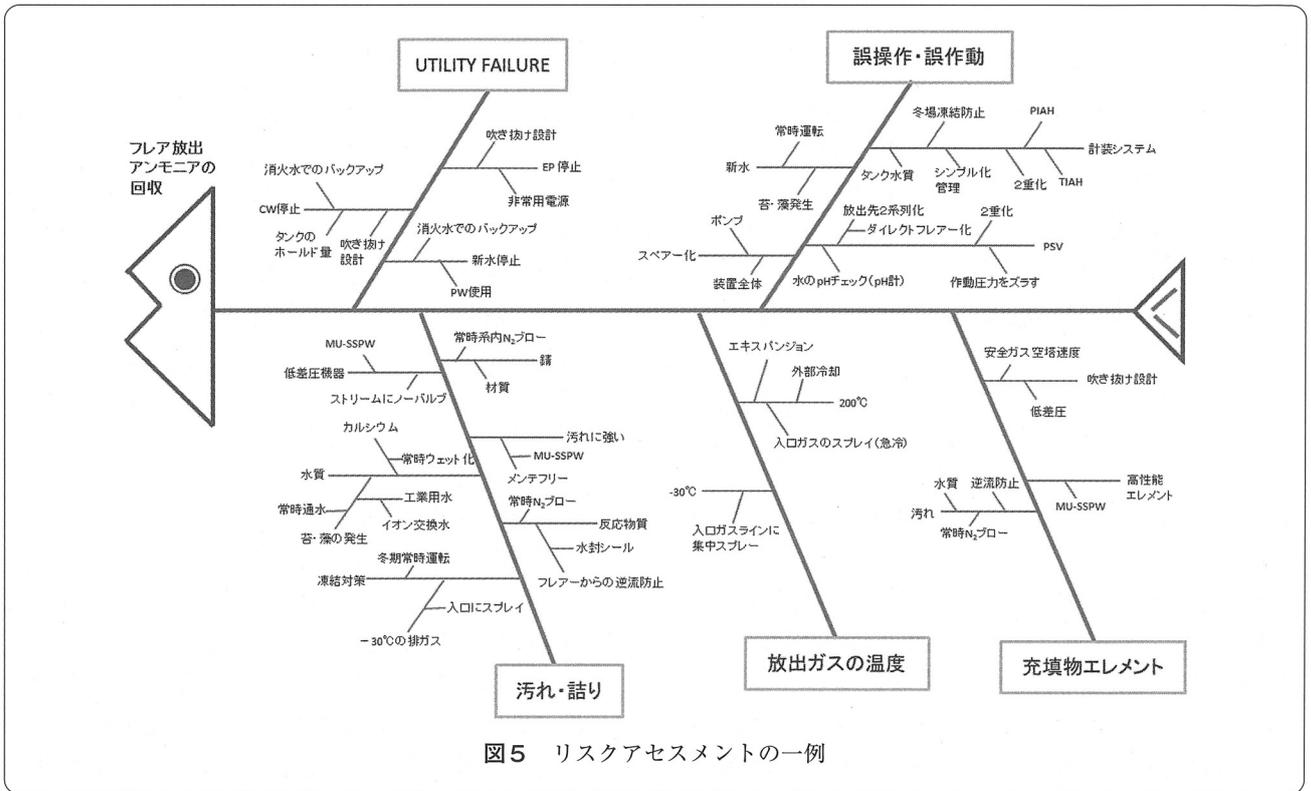


図5 リスクアセスメントの一例

ニアガスの回収システム例について記述する。

このシステムはタンクの異常な圧力上昇の防止を担保している最後の砦である安全弁から放出されたガスの回収である。安全弁の出口に何らかの装置を設置することは、この装置が上流のタンクの圧力を上昇させる要因とならないような対策を考慮したシステムの設計をしなければならないということがポイントである。吹き出しの条件により放出されるガス温度が $-30^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ と幅が広いのも特徴である。これらを踏まえてフェイルセーフ、フルプルーフ、シンプル化等の観点からアプローチした安全の危険予知設計が重要である。

次のフィッシュボーン・チャートは設計の初期段階でのリスクアセスメントの一例である(図5)。システムの担当課、環境保安部門、技術部門等を招集し幅広く討議し早期に危険の芽をつぶしておくことに役立つ。

今回の概略フローは図6のごとくである。

第一塔(並流操作)でアンモニアガスを多量の水と混合させ吸収させる。ここで90%以上のアンモニアガスが吸収され塔底液として回収される。同時に吸収熱でシステムの温度が上昇するが循環水を

外部冷却することによりコントロールする。この循環水量は吸収による発熱量によって決定される。

第二塔(向流操作)ではシステムのコントロール温度における気液平衡分のガス中のアンモニアを新水により完全に吸収し回収する。塔の構成は並流+向流操作である。

この二本の塔に低差圧、高い気液接触効率のMU-SSPWエレメントを採用する。特に第一塔はガス流速が $5\text{ m/sec}$ 以上の並流操作で処理が可能である。塔の直径を小さくできるのでアンモニアガス放出量が多量の場合、塔をコンパクト(直径を $1/2$ 以下)にできMU-SSPWエレメントの採用は設備費を低減でき非常に有利である。またアンモニアガス

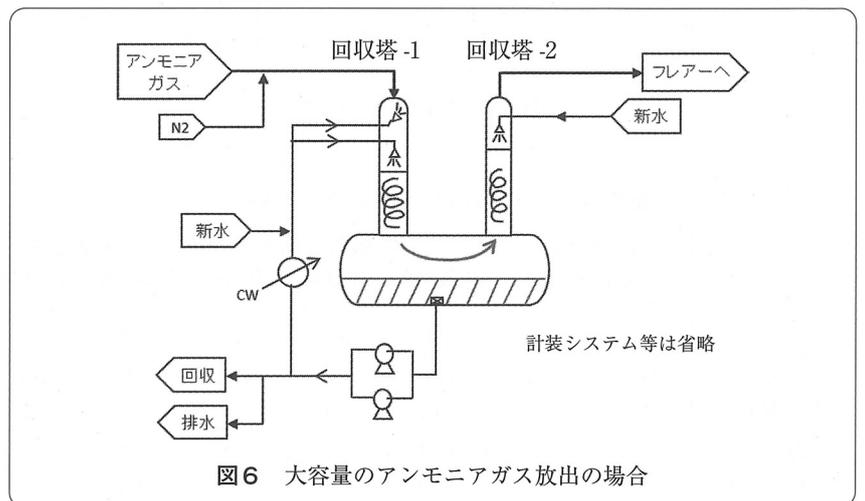


図6 大容量のアンモニアガス放出の場合

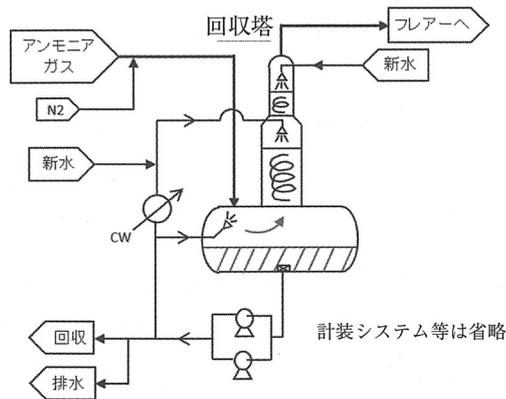


図7 小容量のアンモニアガス放出の場合

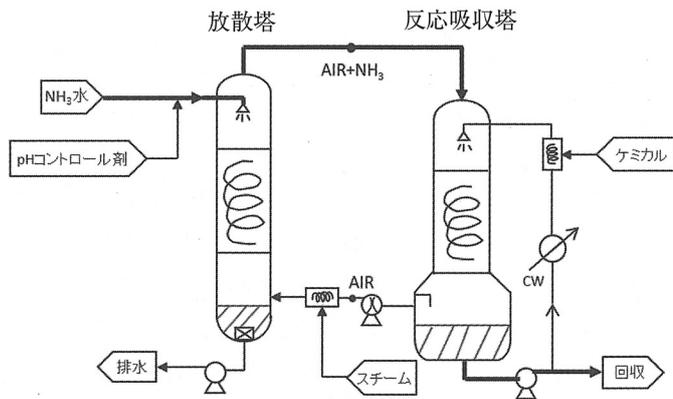


図8 クローズドシステムのアンモニア回収

放出量が少量の場合には図7のように向流塔1塔で処理する方法が経済的である。

この方式は一般的な1塔での向流操作で放出量が小容量の場合に適している。分岐点は設計条件により判断している。

## 5. 排液中の溶解物質を回収するシステム

次に排液中の溶解物質を回収するシステム例を紹介する。第一塔（向流操作）で排液中に溶解している物質を空気やチッソ等のイナートガスを塔底から吹き込み塔頂に放散させる。塔頂のガスは第二塔（並流操作）でケミカルと反応し有用な製品として回収される。前述図6のシステムとは逆の向流+並流という塔の構成になっている。

ポイントは第一塔目の放散塔では溶解している物質をイオン状態から分子状態にしないと放散しないのでpHコントロールが必須になってくる。例えばアンモニアの放散であればアルカリ性側に、かん水からのヨウ素の放散であれば酸性側にコントロールする等である。

第二塔は並流での反応、吸収操作であり塔内のガス流速を5 m/sec以上で運転できるので塔径を小さくできシステムのコンパクト化が可能である。このシステムは放散用のガスをブローアーで循環し再利用できるので完全なクローズドループで運転できるのも大きな特長である。

### 5-1. 設計上のポイント

① 第一塔目の放散塔には気液接触効率の高いエレメントを選定し循環ガスの流量が低減すること。これは塔のさらなるコンパクト化による設備費の低減とブローアーの省エネルギーが可能であるということである。

② 同時に循環ガスの低減は第二塔のコンパクト化に直接に関係する。

③ 廃液やかん水の処理なので塔内が汚れやすい。汚れに強いエレメントを選定すること。

④ 第二塔目の吸収反応塔には並流に適したエレメントを選定すること。

これは第一塔にも共通することであるが初期投資が安くてもメンテナンス費用が高くなればシステムとしては将来の運転に禍根を残すことになる。

⑤ 第二塔の吸収反応で発熱が大きければ循環ラインに冷却器を設置する外部除熱方式を採用すればよい。

⑥ また第一塔の放散条件に高温が最適ならばシステムの加温も可能である。

これは生蒸気を直接吹き込むかフィードを加温する。ただし、これは第二塔での製品の水分の影響度合いを考慮すること。

一例として上記の条件を踏まえてMU-SSPWエレメントを採用したクローズドシステムのアンモニア回収の事例を図8に示す。

以上述べてきたような特殊な条件下で顧客の満足を得てMU-SSPWエレメントは着実に実績を積み重ねてきた40年である。MU-SSPWエレメントは海外でも卓越した能力が認められ日本の技術書<sup>1~4)</sup>ばかりでなく海外の大気汚染防止技術の検定の技術書<sup>5)</sup>にも紹介され幅広く知られるところとなっている。

ここまで、MU-SSPWエレメントを利用した高濃度NH<sub>3</sub>ガスの吸収について述べてきた。

## 6. スケールアップについて

次に、MU-SSPWエレメントのスケールアップの容易性として実施例を表3に纏めた。これを例に、

表3 スケールアップの容易性（確実性）のテスト機と実機との比較

	気流の流れ方向	MU-SSPW エレメントの直径 [mm]		機 能				備 考			
		テスト機	実機	除 塵		ガス吸収		放散効率	除塵効率	吸収効率	参考写真
				入口 [mg/Nm <sup>3</sup> ]	出口 [mg/Nm <sup>3</sup> ]	入口	出口				
A 社	並流	140	1,800	0.13 ~ 0.26	0.013 ~ 0.0026	—	—	—	90%以上	—	1, 2
B 社	向流	216	1,500	—	0.011	—	—	93 ~ 96%	—	—	3
C 社	向流	140	1,800	0.200	0.004	—	—	—	95 ~ 98%	—	4
D 社	並流	200	900	0.2 ~ 0.4	0.01 ~ 0.005	—	5ppm 以下	—	95 ~ 99%	5ppm 以下	5, 6, 7
E 社	並流 / 向流 2塔方式	114	900/900	2 ~ 5 kg/hr	95%以上 除去	1,800Kg/hr	5ppm 以下	—	95%以上	5ppm 以下	8
F 社	並流 / 向流 2塔方式	125	250/150	—	—	90 ~ 95%	5ppm 以下	—	—	5ppm 以下	—
G 社	並流液 - 液	流動回折シミュレーションによる	500 × 2 基	直径 20 m の球形反応槽（内容積 4,000m <sup>3</sup> ）				—	—	—	20分間で完全混合する。 9, 10, 11, 12

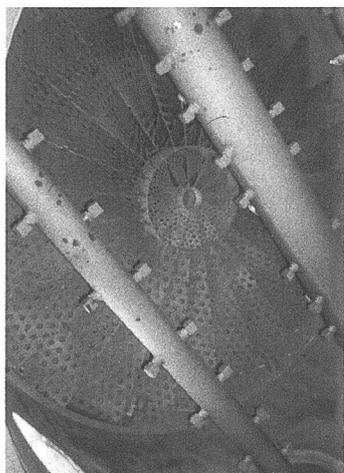


写真1 メンテナンス前の内部写真

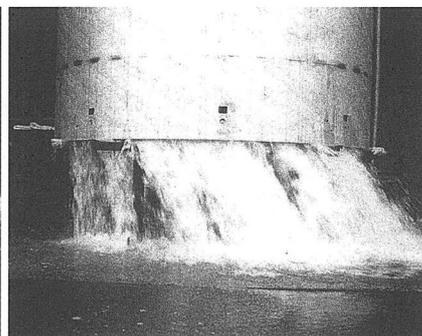
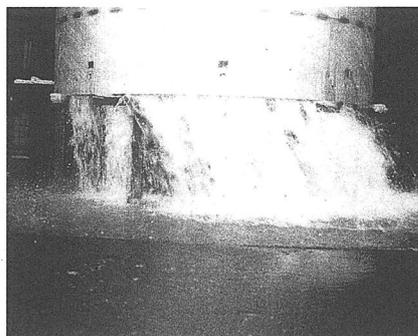
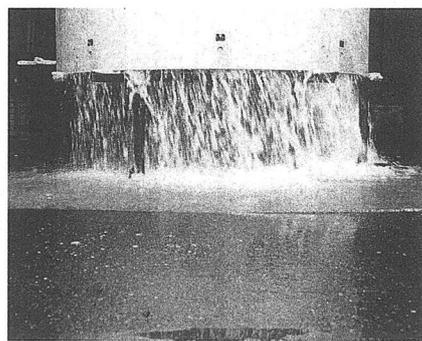


写真2 自然落下によるエレメント通過後の気 - 液混合状態 (上, 右上, 右下)



プラント設計において重要な視点となるスケールアップについて簡単に述べることにする。

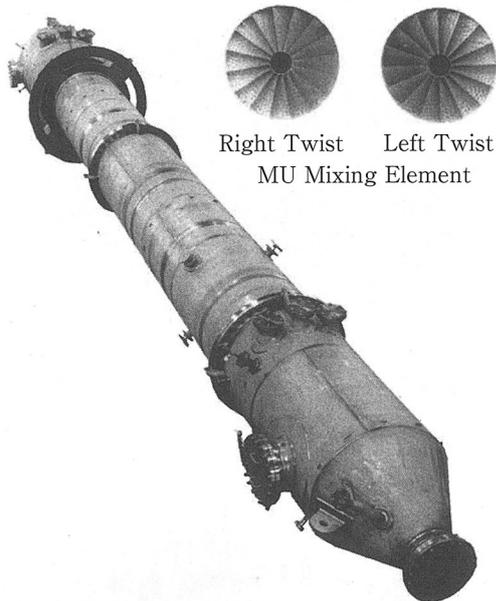
A 社に納入したスクラバーは、Fume 状のゴム劣化防止剤から成る粉塵と悪臭成分を含む排ガスである。テスト機は直径 140 mm のミュースクラバーでテストを実施し、その結果をもとに、実機は直径 1,800 mm にスケールアップをして納入した。その実機は、処理ガス量 50,000m<sup>3</sup>/hr で入口粉塵濃度 0.1 ~ 0.2wtppm (0.13 ~ 0.26mg/Nm<sup>3</sup>)、出口粉塵濃度 0.01 ~ 0.002wtppm (0.013 ~ 0.0026mg/Nm<sup>3</sup>) である。年に一度のメンテナンスの前のエレメントの状態を写真1に示した。

羽根への付着・成長は全くなく、従業員をがっかりさせている。

この MU-SSPW エレメントを使用して、自然落

下によるエレメント通過後の気 - 液混合状態を写真2に示した。滝のように周囲の空気を巻き込みながら気 - 液混相流となって白濁しているのがはっきりと認識できる。マイクロバブルの生成とマイナスイオンおよび超音波の発生は、除塵効率、反応効率の向上に寄与している。

ニュートンのりんごではないが、自然の落下エネルギーを利用したミュースクラバーの誕生であり、「滝理論」と「MU-SSPW」との合作である。混合機能を有する充填物であり、2重境膜説を凌駕する新しい充填物である。その特徴は、メンテナンスフ



Right Twist Left Twist  
MU Mixing Element

写真3 放散塔の全体写真

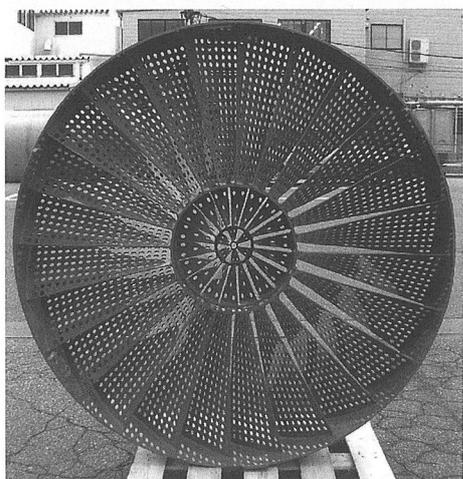


写真4 直径1,800mmのMU SSPW エレメント

りおよび高性能であり、省エネルギー、省スペースを達成していることである。さらに並流と向流で使用できる。

B社は、工業排水中に含まれている有機化合物を水蒸気蒸留塔「ミューリアクター」で放散・回収して連続運転されている。排水中には、微量のCa系化合物が含まれている。従来は、シーブトレイ方式を採用して塔内のメンテナンスをしながら2塔を交互に利用していた。MU-SSPW エレメントを配置した減圧蒸留塔「ミューリアクター」を利用することにより1塔で放散効率95%を達成し、Ca

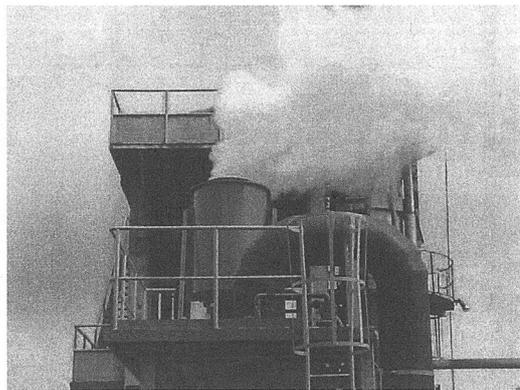


写真5 ミュースクラバー設置前

系化合物はエレメントに付着・成長することなく低圧損2kPa以下で圧力損失の大きな変化もなく連続運転をしている（写真3）。従来の蒸留塔は厳しい垂直度を要求されていたが、ミューリアクターはゆるやかな垂直度で設計ができる。船体が30°傾斜する南極での海水中のラドン測定に実績をもっている。土木建築費が安価になる。

C社に設置されているミュースクラバーは複数の燃焼炉から排出される多種類の金属元素から成る微粒子の除塵に使用されている。写真4に、ミュースクラバー塔に配置されているMU-SSPW エレメント直径、1,800 mmを示した。

D社は、生産工場から排出されるケイ素及びチタン化合物を含む排ガス処理にミュースクラバーが使用されている。写真5はミュースクラバー設置前の大気中への排ガスの放出状態を示した。写真6はミュースクラバー設置後の放出状態を示した。ほと



写真6 ミュースクラバー設置後

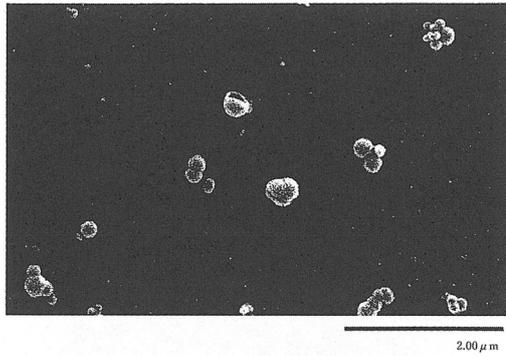


写真7 循環液中のシラン系酸化物のSEM写真

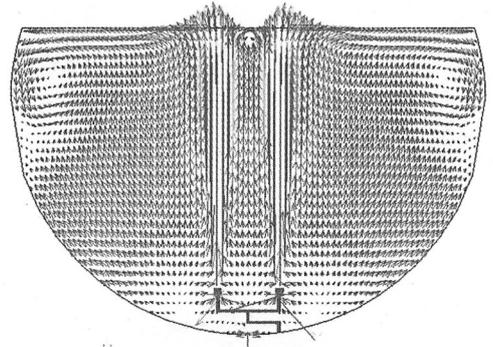


写真9 シミュレーションによる波動回析

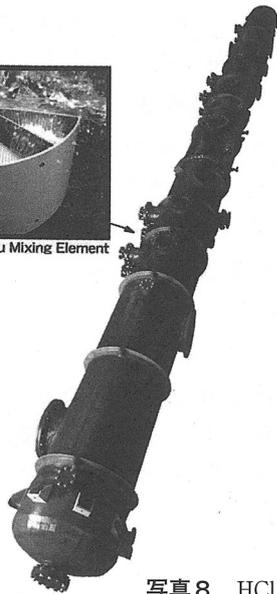
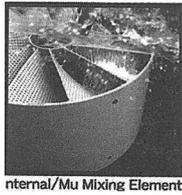


写真8 HCl回収装置



写真10 直径20mの球形反応槽

んど白煙を観察することはない。写真7は、循環液中のシラン系酸化物のSEM写真である。スケールは2.00 μmである。

E社は、排ガス中のHClを吸収して、30%のHCl水溶液で回収している(写真8)。並流で使用する煙霧シリカの除塵塔および30%HClで吸収・回収され、並流で使用する多段の吸収塔から構成されている。除塵塔および吸収塔にミューミキシングエレメントが配置されている。現場の技術者から「ミュースクラバーは、一定濃度以下であれば系内の配管類およびエレメントの内部にシリカが付着・成長して目詰まりのトラブル発生はありません。」という有難い感想をいただいている。これらにより、年間8,000時間の連続運転を保証している。

F社は、高濃度NH<sub>3</sub>ガスの吸収装置として利用

されている。少量のシリカ化合物を含んでいる。1塔目の並流の吸収塔で高濃度NH<sub>3</sub>ガスをほぼ気・液平衡値の大容量の水で吸収し、その後2塔目の向流の吸収塔で更に、NH<sub>3</sub>を吸収し、および微粒子のシリカ化合物を除塵して、大気放出をしている。反応生成熱は高い液・ガス比により、吸収できる。HClやNH<sub>3</sub>等の高濃度ガス処理に最適な処理装置である。

G社は、台湾の大手化学会社である。本論文に直接関係するものではないが、スケールアップの点から取り上げた。液・液混合器「ミューエダクター」(写真11)は、総投資額約200億円のC5プラントの世界初の主要機器の反応槽として採用された。この球形反応槽(写真10)は直径20m、内容積4,000m<sup>3</sup>である。

「ミューエダクター」設計に際しては、エダクター

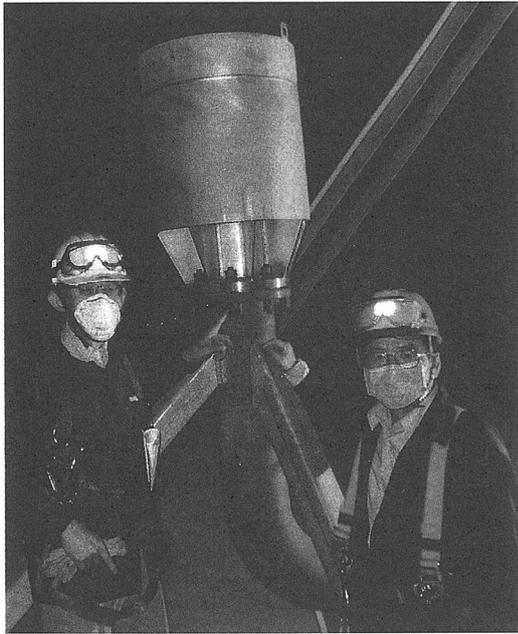


写真11 G社のP.M.とミューエダクター

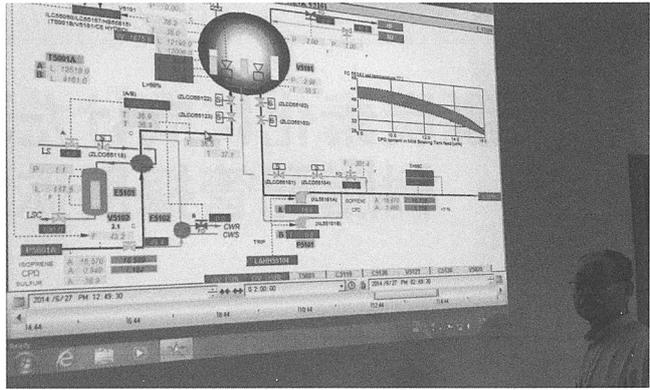


写真12 スタートアップ時に立会えた筆者

への液の供給量および機器本体の周辺からの吸引量と、そして、液体の物性、比重、粘度、圧力、温度等の因子を種々試行して、流動回析(写真9)をシミュレーションして実施設計を実行した。その結果、直径500mm、高さ750mmのミューエダクター2基を球形反応槽内の所定の位置に配置した。写真12は、スタートアップで予想以上に反応時間が短縮できた瞬間に立ち会えた筆者です。現在「ミューエダクター」は、短時間で完全混合を達して、高品質の工業製品を生産している。「ミューエダクター」を、世界で最初にC5プラントの主要機器として採用していただいた経営者、技術者の方々に心から敬意を表します。なお、「エダクター」は、技術トピックスとして、『化学装置』2015年4月号、p4~5で報告されている。

以上、ミューミキシングエレメントおよびMU-SSPWエレメントを利用した、ミュースクラバー、ミューリアクター、ミューエダクターについてのスケールアップの容易性、確実性について簡単に述べた。

今後は、CCS、CCUS、COG、NH<sub>3</sub>ガスおよびCO<sub>2</sub>ガスと海水との気液接触装置「ミューエアレータ」、そして空気中のCO<sub>2</sub>の直接吸収装置などの吸

収塔、放散塔に利用できる直径3m、5m、10mの大型化に備えて鋭意努力していく所存である。

将来問題になるであろう、放射性廃棄物の焼却炉からの放射性微粒子を回収して大気放出を可能な限りゼロにすること、処理水の放射性物質を可能な限りゼロにして海洋に放流することについて、MU-SSPWエレメントとミューエダクターの特徴を融合した新しい革新的な技術を提供できることを目標に夢見ている。

## 7. 終わりに

最後に、自由なくして競争なく、競争なくして進歩なく、進歩なくして進化なく、進化なくして破壊的技術革新は創造できず。データを開示していただいた皆様へ心より感謝申し上げます。

山寺の凝灰岩の壁肌に風化によって空いた無数の孔に吹く風、したたる水に、MU-SSPWエレメントを想起した。

「閑かさや 岩にしみ入る 蟬の声」—芭蕉—

### <参考文献>

- 1) 美谷芳雄, 西野耕司, 「最近の乾式シリカ製造技術と環境対策(2) —環境対策—塩素回収—」, 『化学装置』1995年4月号
- 2) 小嶋久夫, 鈴木照敏, 「ミューミキシングエレメントの化学プラントへの適用」, 『化学装置』2015年7月号
- 3) 鈴木照敏, 「分離浄化技術」2021年7月31日分離技術会発行, 第51巻第4号, p.254~259
- 4) 大江修造, 「蒸留技術・基礎のきそ」, 日刊工業新聞社発行, p.156~157
- 5) 鄭宗岳 鄭有融, 「空気汚染防制.理論及設計」, 第6版2022年7月, 新京京開発出版股份有限公司発行