特集2・最新の廃棄物最終処分場浸出水処理技術

最終処分場浸出水中の塩分除去

三角文彦*

1. はじめに

地球環境保護の視点から、資源循環型の社会の構築が国をあげて進められている。その一環として、廃棄物の中間処理が進められ、最終処分場に埋め立てられる廃棄物も変化してきた。中間処理として廃棄物の焼却処理が進み、その結果、可燃物の量が減少し、焼却残渣と不燃物が主体となっている¹⁾。

焼却処理によって発生する残渣は、主灰 (bottom ash) と飛灰 (fly ash) であるが、近年これらの灰中に無機塩類が多く含まれるようになってきた。廃棄物中にはプラスチックが多く含まれており、塩化ビニールを焼却すると、塩化水素 (HCl) ガスが発生する。そのため、焼却炉の排ガス処理方法は消石灰 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) を吹き込み、バグフィルターでばいじんと共に飛灰として捕捉する方法が多く採用されるようになった。飛灰は特定管理廃棄物として、重金属の不溶化処理をされるものの、カルシウム (Ca) や塩素 (Cl) を多く含んでいる。表1に焼却灰のカルシウムと塩素の濃度例を示す²⁾。

このような焼却残渣が最終処分場に埋め立てられると、当然、埋立地から出てくる浸出水にも多くの無機塩類を含むことになる。

浸出水中のカルシウム (Ca) は水処理装置にカルシウムスケールを生成し、障害をおこすことがあり、近年はカルシウム除去プロセスを水処理に組み込むことが多くなった。しかしこのプロセスは、カルシウムイオンがナトリウム (Na) イオンに代わっただけのことで、塩類の濃度が低減されるわけではない。最終処分場浸出水はさまざまなプロセスを経て処理される。しかし、浸出水中の無機塩類はほとんど除去されることなく放流されているのが現状で

表1 灰の成分の例

成分	ストーカ炉灰	流動床炉灰
CaO (%)	18.5	28.7
T-Cl (%)	1.85	6.49

ある。

現在では、浸出水の塩類濃度が10,000 mg/Lを超え、20,000 mg/Lに達する処分場もめずらしくなっている。放流水に関する塩類濃度に対する法的規制はないものの、浸出水処理水の放流先の水環境への影響や、農業用灌漑用水として利用される場合の影響が懸念され、一部では水稻への被害も仄聞される。こうした状況のなかで、浸出水処理において、無機塩類を除去する脱塩プロセスを設けた最終処分場も建設されるようになった。以下に最終処分場浸出水の脱塩処理について述べる。

2. 脱塩処理技術

脱塩処理は、文字どおり塩類を含む水から塩類を除去することであるが、逆に言い換えれば塩類を濃縮する操作でもある。脱塩方法には対象液の濃度に応じた方法があり、イオン交換も脱塩の方法のひとつであるが、ここで対象としている溶解固形分濃度が10,000～20,000 mg/Lに達するような場合には適用できない。高濃度液の脱塩処理に適用可能な方法としては逆浸透法 (RO)、電気透析法 (ED)、蒸発法等がある。

ここでは主に逆浸透法と電気透析法について述べる。

2.1 逆浸透法 (RO)

2.1.1 原理・構造

水は透過できるが塩は透過できない半透膜に処理対象水の持つ浸透圧よりも高い圧力をかけて供給す

*ユニチカ(株)環境事業本部環境技術開発部
Fumihiko MISUMI

ると、希薄液と濃厚液に分離できる。これを「逆浸透」という。このような現象を利用して分離操作に使用される膜を逆浸透膜という。

逆浸透膜は、海水の淡水化、純水の製造をはじめ、各種の分離・濃縮操作に利用されている。逆浸透膜は、食塩のような低分子の透過を阻止するが、水分子だけは容易に透過させるような相反する性質を有している。膜の素材としては、ポリアミド系の複合膜が多く採用されている。

逆浸透膜の膜面積当たりの透過水量は非常に小さいので、一定の容積の中に、膜面積を大きくする工夫がなされ、所定の処理水量が確保できるようになっている。膜はベッセルと呼ばれる円筒形の容器に収納できるようになっている。このような形のものをエレメントと称し、容器（ベッセル）には複数のエレメントが収納できるようになっている。逆浸透膜の収納形状によって、逆浸透膜の種類としてスパイラル型、中空糸型（ホロファイバー型）、チューブラー型、平膜型に区分される。

2.1.2 特性

逆浸透膜には対象水の濃度に応じた製品が用意されていることが多く、純水製造の低濃度領域から海水レベルの濃度まで適用できる。一般に対象水の濃度が高くなるにしたがって、操作圧力も増大する。

また、逆浸透膜は、塩類以外にコロイドや有機物などを阻止することができるので、透過水として非常に良好な水質が得られる。

逆浸透法は濃縮操作でもあり、供給水のすべてを希薄液として回収できるわけではない。供給水に対する透過水（希薄液）の比を回収率としてあらわす。実際の逆浸透装置は、回収率を上げるために複数のベッセルを組み合わせで構成する。

2.1.3 計画設計上の留意点

スパイラル型や中空糸型の逆浸透膜のエレメントの膜の間隙は非常に狭く、供給水中にSS成分をはじめ微細なコロイド等によって閉塞させることがないように前処理でこれらの不溶性物質は除去しておく必要がある。一般的にはFI値（Fouling Index）を管理指標としており、少なくともFI値は4以下としなければならない。しかしチューブラー型や平膜型のもののなかには濁質に強く、前処理として凝集沈殿処理だけで済むものもある。

逆浸透膜の表面では、水が膜を透過して透過水側に移動し、供給水側は塩類が濃縮されることになる。

溶解度が小さい物質が存在すると、膜面で飽和溶解度を上回り、膜表面に結晶を生じ、膜面を閉塞させることになる。したがって溶解度が小さい化合物を生成するような成分は前処理であらかじめ除去しておくか、脱塩工程に結晶防止剤などを添加する必要がある。特に、カルシウム、鉄、マンガン、シリカ（珪酸塩）等には注意を要する。

また、処理対象水に有機物を含む場合、エレメント内に微生物が発生し、透過水量が減少することもある。

2.1.4 最終処分場浸出水への適用

逆浸透装置は上述のように汚染物質の影響を避けるために、できるだけきれいな水を供給したい。最終処分場の浸出水に適用する場合には一般的に、水処理プロセスの最終段に設置する。すなわちカルシウム除去、生物処理、凝集沈殿処理、ろ過、活性炭吸着処理、重金属除去処理を経た後に逆浸透装置を設置する。

しかし、平膜型のエレメントを利用する場合には、前処理として凝集沈殿処理のみで十分な場合もある。

2.1.5 適用事例

例1：図-1は実際の最終処分場の浸出水処理水（凝集沈殿、生物処理したもの）を対象に、スパイラル型膜を用いて脱塩実験をしたときの、供給水、透過水、濃縮水の電気伝導度をプロットしたものである。供給水の電気伝導度は11～14.5mS/cmに対して透過水は130～280 μ S/cmで推移した。実験規模は供給水は100L/hrであり、回収率は70%である。

例2：表2に、最終処分場浸出水処理水（カルシウム除去、生物処理、酸性凝集沈殿、濾過、活性炭吸着処理したもの）を対象に、逆浸透膜で処理した例を示す。前処理にはMF膜による精密濾過を実施している³⁾。

例3：表3には、浸出水を平膜型の「DTモジュール」と呼ばれる逆浸透膜を利用して、脱塩処理をしている2つの処分場の脱塩処理の水質状況を示す。最終処分場浸出水処理施設の、脱塩部分の運転結果を示す。この膜は、高い回収率と脱塩率を有している。また、塩類だけでなく、有機物や窒素なども高い除去率が得られている。しかも、前処理は、2ヶ所とも凝集沈殿処理のみで運転されている。それぞれの処分場の概要は次のとおりである⁴⁾。

図－１ スパイラル型RO膜による脱塩状況

表 2 逆浸透膜脱塩処理水質³⁾

項 目	単 位	活性炭吸着 処 理 水	逆浸透膜供給水	脱塩水 (透過水)	濃縮水
電気伝導度	(mS/cm)	12～20	25～45	0.1～0.2	30～62
塩化物イオン	(mg/L)	5,000～ 9,000	11,000～ 20,000	40～80	13,000～ 25,000
COD _{Mn}	(mg/L)	7～28	16～50	0.5～1.1	20～65
全窒素	(mg/L)	3～6	7～10	< 2	9～14

表 3 平膜型逆浸透装置運転実績水質⁴⁾

水質分析項目		「クリーンパーク・きぬ」			「九の尾苑」		
		原 水	処理水	除去率 (%)	原 水	処理水	除去率 (%)
電気伝導率	(mS/cm)	4,540	15.0	99.7	338	15.0	95.6
COD _{Mn}	(mg/L)	226	<1.0	>99.6	25.5	<1.0	>96.1
Cl	(mg/L)	26,300	50.8	99.8	754	12.3	98.4
BOD5	(mg/L)	176	<2.0	>98.9	<2.0	<2.0	—
T-N	(mg/L)	103	1.0	99.0	12.1	<1.0	>91.7
SS	(mg/L)	114	—	—	3	< 1	>66.7
ダイオキシン類	(pg-TEQ/L)	2.35	0.0028	99.9	—	0.00034	—

「クリーンパーク・きぬ」の概要

埋立物：焼却残渣，不燃破碎ごみ

浸出水量：70 m³/日

水処理：凝集沈殿処理＋逆浸透膜処理

濃縮水：逆浸透膜濃縮＋蒸発固化処理

(濃縮水は塩類濃度20 %まで濃縮)

「九の尾苑」の概要

埋立物：焼却残渣，ガラス陶器等不燃ごみ

浸出水量：10 m³/日

水処理：凝集沈殿処理＋逆浸透処理

濃縮水：蒸発固化処理

濃縮液量1.5 m³/日

図-2 電気透析法の原理

2.2 電気透析法（ED）

2.2.1 原理・構造

電気透析法は、陽イオン交換膜と陰イオン交換膜を交互に配置し、その両端に電極を設け、直流電圧を印加し、電解質を移動させる方法である。陽イオン交換膜は水中の陽イオンは透過できるが、陰イオンは透過できない性質を持っており、陰イオン交換膜は逆の性質をもっている。両方の膜の間に電解質を含む水を流すと、印加された電圧により、水中のイオンが移動し、膜の間には希薄液と濃厚液の流れが交互にできる。このような操作を行って脱塩あるいは濃縮を行うことができる。図-2に電気透析法の原理図を示す⁵⁾。

実際の装置は、陽イオン交換膜と陰イオン交換膜を数百対組み合わせ、膜の間には連通孔を有したガスケットを設け、希薄液と濃厚液が混じり合わないような構造になっている。膜と膜の間には膜同士が接触しないようにスペーサが設けられている。膜の有効面積は1～2 m²程度で、膜の間隔は0.5～0.75 mm程度である。また電極部分には、電気分解によるガス発生を避けるために、他の液とは独立した電極液を循環する⁶⁾。

2.2.2 特性

電気透析法は各種の濃縮プロセスの他、海水淡水化に適用され、近年は最終処分場の浸出水処理にも

適用されている。一般的には濃度が高い溶液に適用するほうが効率が良く、濃厚溶液を、飽和濃度まで濃縮するような場合に多く適用される。電気透析法は、水中のイオン化している電解質だけがファラデーの法則にしたがって移動するので、逆浸透膜のように、有機物やコロイドなどは分離できない。

電気透析装置には対象処理液の供給方法により、回分式、部分循環式、一過流通（ワンパス）連続式の3方法がある。回分式は小規模向きで、運転時間と共に印加電圧も変化する。一過流通式は大規模向きであり、一般的に浸出水処理においては部分循環方式が適している。この方法は処理対象水に濃縮液の一部を戻して電気透析槽を循環させ、供給水と同量の脱塩水を取り出す方法である⁶⁾。

図-3に部分循環式のフローを示す。

2.2.3 計画設計上の留意点

電気透析装置の緒元は、供給水量、供給水の塩濃度とその組成、脱塩水の回収率、脱塩水の塩濃度などによって決まる。

電気透析槽は逆浸透装置と同様に、狭い間隙に通水するので、流路の閉塞や膜面の汚染を防ぐために、供給液中の濁質成分は極力除去しておく必要がある。また、COD成分などの有機物も同時にできるだけ少なくするのが望ましい。

電気透析槽には直流電圧を印加しているにもかか

図-3 電気透析装置フロー例

わらず、脱塩水と濃縮水の濃度差が非常に大きくなると、濃縮水側から脱塩水側に電解質が移動する逆拡散が起こることがある。それを避けるため濃度比率は一般的に150：1以下に設定する⁷⁾。

供給水中にカルシウムが多い場合には、濃縮水側で炭酸カルシウムのスケールが発生し、障害を起こすことがある。浸出水中の炭酸濃度は比較的小さく、また最近の浸出水処理工程にはカルシウム除去が行われることが多く、問題となることは少ないが、注意が必要である。計画時に濃縮水側の予測水質から、ランゲリア指数などを検討し、ある程度スケールの発生を予測することも可能である。また炭酸カルシウム以外の硫酸カルシウムの生成についても留意しなければならない。

このようなスケール障害を防ぐ方法として、極性変換法がある。これは電気透析槽の電極の極性を一定時間（15～20分）毎に反転させる方法で、脱塩水室を濃縮水室に、濃縮水室を脱塩水室として運転するもので、一定時間内に生成したスケール成分を系外に排出し、障害を防ぐことができる⁷⁾。

2.2.5 適用事例

例1：適用事例の1つとして、焼却残渣と不燃物主体の最終処分場の例をあげる。電気透析装置によ

る浸出水脱塩設備が稼働している。浸出水は、カルシウム除去、生物処理、凝集沈殿、砂濾過、活性炭吸着、キレート樹脂吸着の処理工程を経て、脱塩設備に供給されている。脱塩設備の前処理は精密濾過膜により濁質成分を除き、電気透析装置へ供給されている。電気透析槽入り口の塩素イオン濃度は8,000～10,000 mg/Lで推移しているが、脱塩水の塩素イオン濃度は130～290 mg/Lであり、計画値の300 mg/L以下であった。

濃縮水の塩濃度は10％程度であり、さらに蒸発感想装置により、乾燥塩として取り出されている⁸⁾。

例2：表4に、浸出水量40 m³/日の最終処分場に納入された電気透析装置の運転結果を示す。浸出水は、カルシウム除去、生物処理、凝集沈殿、砂濾過、

表4 浸出水脱塩運転結果

	塩素イオン濃度 (mg/L)		
	調整槽	脱塩原水	脱塩処理水
データ1	15,000	16,000	9.2
データ2	16,300	15,400	66.7
データ3	14,700	—	90.1
データ4	11,100	12,300	116
データ5	14,700	13,700	148

表5 乾燥固
化塩の成分(%)

項目	含有率
Na	30
K	6.4
Cl	58
Hg	N.D
Pb	N.D
Cd	N.D
水分	2.3

活性炭吸着，重金属処理を経て脱塩装置に供給されている．濃縮水の塩素イオン濃度は110,000 mg/L程度になり，例1と同様，蒸発乾燥固化されている．脱塩水の目標塩素イオン濃度は200 mg/L以下である．乾燥固化された塩の成分を表5に示す⁹⁾．

3. 蒸発法

蒸発法は塩分を含む水を蒸発させ，その蒸気を凝縮させて蒸留水，すなわち脱塩水を得る方法である．蒸発法は種々の工業プロセスや，海水淡水化に適用されている．蒸発法には多重効用法，多段フラッシュ法，蒸気圧縮法等があるが，いずれも熱源として蒸気を利用するもので，最終処分場の浸出水の脱塩処理には採用実績はない．しかし，一般廃棄物焼却設備と最終処分場が併設されるような場合には，焼却炉の熱が利用できるメリットはある．

4. その他の脱塩方法

この他，脱塩処理方法としては，冷凍法，透過気化法がある．冷凍法は塩濃度が高い水を凍結させ，その水を解凍して脱塩水を得る方法である．凍結過程で水は塩を含まずに凍結する性質を利用するものである．

透過気化法は，水蒸気は透過できるが，液体の水は透過できない透過気化膜を利用するものである¹⁰⁾．

5. 最終処分場における脱塩処理の課題

最終処分場の浸出水の脱塩処理は，逆浸透法か電気透析法のいずれかが採用されている．脱塩処理することで，高濃度水による環境への悪影響を防止している．一方で濃縮された塩は蒸発乾燥固化されて回収される．問題はこの回収された塩である．

回収塩の成分は処分場によって多少異なるが，NaCl主体で，K，Caを含んでいる．このような回収塩は再利用するのが望ましい．回収塩の用途として考えられるのは，ソーダ原料，道路凍結防止剤，金属精錬剤，皮なめし剤などがある．しかし，成分比率の問題や，コストを考慮すると，経済ベースでは流通しないのが現状である．脱塩処理，並びに濃縮液の蒸発固化処理のいっそうのコスト低減が望まれるが，容易には実現できない課題である．そこで，回収塩を再利用するための国家的制度の整備が是非とも必要である．そのためにも今後，関係機関のいっそうの研究と開発が期待される．

参考文献

- 1) 花嶋正孝，古市徹：日本の最終処分場2000，最終処分場技術システム研究会，p 9
- 2) 三角文彦，花嶋正孝，樋口壯太郎ら：洗浄灰と未洗浄灰からの有機物，無機塩類の溶出調査，第12回廃棄物学会研究発表講演論文集II，p993
- 3) 山田亮一：最終処分場浸出水からの無機塩類除去技術，資源環境対策 38 (2) p198-199 (2002)
- 4) 田路明宏：逆浸透法による浸出水中の塩類除去技術，資源環境対策 38 (2)，p201-203 (2002)
- 5) 厚生省生活環境部水道整備課：水道における膜ろ過法Q&A付水道膜濾過用語集，(財)水道技術研究センター，p161
- 6) 酒井清孝：膜分離プロセスの理論と設計，アイビーシー，p73-74
- 7) 中垣正幸，清水博ら：膜分離技術大系下巻，フジテクノシステム，p60-61
- 8) 吉沢崇，安澄正三郎：最終処分場浸出水処理における脱塩処理への電気透析法の適用例，資源環境対策 38 (2) p189-191 (2002)
- 9) 堀井安雄，古矢祐一ら：電気透析法による最終処分場浸出水の脱塩処理，資源環境対策 38 (2)，p194-195 (2002)
- 10) 花嶋正孝，樋口壯太郎：浸出水処理ガイドブック，WOWシステム研究会 水処理技術研究部会，p89