

塩分濃度差エネルギー利用淡水化システムの構築

比嘉 充^{1,2}, 堀 憲次¹, 遠藤 宣隆^{1,2}, 安川 政宏^{1,2}, 垣花 百合子^{1,2}

¹ 山口大学大学院創成科学研究科, ² 山口大学ブルーエネルギーセンター (BEST)

概要

濃度の異なる塩溶液間では塩分濃度差エネルギー (SGE) が存在し, 1 トンの海水と 1 トンの河川水の混合で約 1.7 MJ のエネルギーが得られるとの報告がなされている。本研究ではこの SGE の有効利用技術として, 電力供給で淡水化を行う ED 流路部と SGE を電力に変換する RED 流路部を 1 つのスタック内に内包させたシステムを構築した。そしてこのシステムに模擬海水 (0.5 M NaCl) と, 模擬かん水 (0.018 M NaCl) を供給し, 海水とかん水の SGE を利用して供給されるかん水の一部を淡水化することを検討した。まず理論式に基づいたシミュレーションを用いて種々の RED 部と ED 部との対数比における本システムの脱塩性能を評価した。その結果, RED 部と ED 部との対数比が 7 対 3 のとき最も淡水化速度が大きいことが判明した。

実際に市販陽イオン交換膜と陰イオン交換膜を用い, 全対数を 10 に固定した条件で ED 部数 1, 2, 3 で構築した RED/ED システムにおけるかん水脱塩実験と, このシステムでのシミュレーション結果を図 1 に示す。この図よりシミュレーション予測通りに ED 部数が 3 のとき最も高い脱塩速度を示し, 模擬海水と模擬かん水間の塩分濃度差エネルギーを利用することで 2,000 ppm のかん水が, 約 100 分で飲料水レベルの塩濃度まで脱塩できることが示された。またこれより今回提案したシミュレーション方法が RED/ED システムの脱塩を定量的に予測することが確認できた。

ここには示していないが, このシミュレーションにより RED/ED システムで発生するシステムの運転時間 (0 分 ~ 100 分) における総発生エネルギーと ED 部数との関係を計算した結果, ED 部数が 1, 及び 2 において, それぞれ約 700 J, 約 400 J のエネルギーが得られた。同時に RED/ED システムでは ED 部数が 1 から 4 の場合は塩濃度が約 2 mM と飲料水として低い値まで脱塩するという計算結果が得られた。これより RED/ED システムは設置場所などの条件により, 外部エネルギーを得ることなく海水とかん水の供給だけでかん水の一部を脱塩することが可能であることが示された。

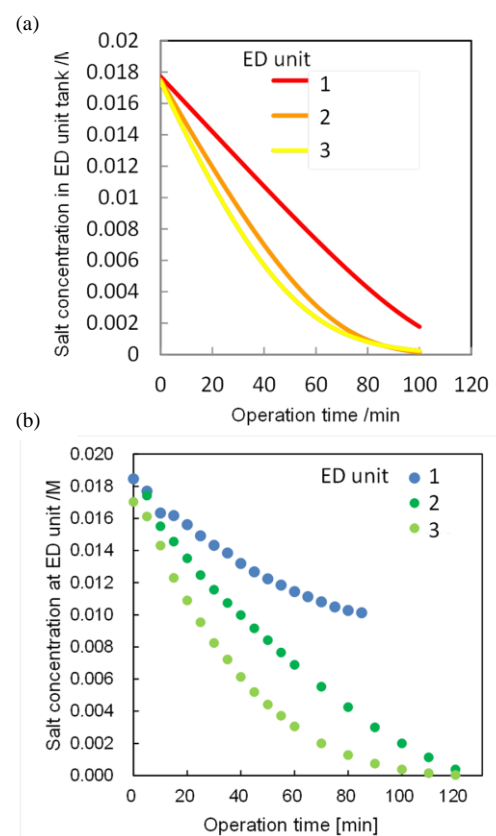


図 1. Salt concentration at ED unit as a function of operation time. (a) simulations, (b) experiments.

1. 研究目的

低コスト・低エネルギー淡水化技術の必要性:

ケネディ大統領は1962年に「塩水から真水を低コストで造る技術はどのような科学的業績よりも人類に大きく貢献する」との演説を行い、これを契機に淡水化技術の研究が加速した。50年以上経た現在でもこの演説の重要性は増すばかりであり、世界的な水不足は人類の大きな問題である。現在、逆浸透(RO)膜法は最も低エネルギーな淡水化技術であるが、特に発展途上国における水不足問題を解決するためには、現行RO膜法に変わる革新的な淡水化技術が求められている。

かん水淡水化の必要性:

世界中の島国や湾岸地域、また大陸の内陸部においてかん水と呼ばれる飲料水や農業用水には適さない塩分濃度(1,000 ~ 7,000 ppm)の地下水や表流水が多く存在する。海水よりも塩濃度が低いかん水は淡水化が容易であるため、これらのかん水を低エネルギーで淡水化することが出来れば、島々や湾岸地域に存在する発展途上国の水問題の解決だけでなく、塩害で農作が困難な地域を緑化することが可能であり、世界の食料問題の解決にも大きく貢献することが期待できる。

塩分濃度差エネルギー(SGE):

濃度の異なる塩溶液間では塩分濃度差エネルギー(SGE)が存在することが知られている(Fig. 1)。このエネルギー量は理論上、①供給溶液の水温 ②両溶液間の塩濃度差に依存しており、完全混合系においてはギブスの自由エネルギーとして次式において算出される¹⁾。

$$\Delta G = 2RT \left(V_{\text{Low}} C_{\text{Low}} \ln \frac{C_{\text{Low}}}{C_M} + V_{\text{High}} C_{\text{High}} \ln \frac{C_{\text{High}}}{C_M} \right) \quad (1)$$

$$C_M = \frac{V_{\text{Low}} C_{\text{Low}} + V_{\text{High}} C_{\text{High}}}{V_{\text{Low}} + V_{\text{High}}} \quad (2)$$

ここで、 R は気体定数(= 8.31) [J/(mol・K)], T は絶対温度[K], V_{Low} は低濃度溶液側の体積[m³], C_{Low} は低濃度溶液側のモル濃度[mol/m³], V_{High} は高濃度溶液側の体積[m³], C_{High} は高濃度溶液側のモル濃度[mol/m³]である。例えば1トンの海水と河川の混合で約1.7 MJのエン

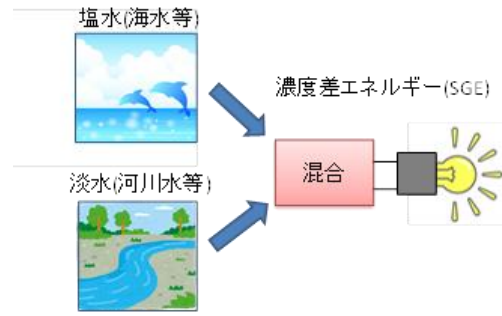


Fig. 1. Concept of salinity gradient energy (SGE).

ルギーが得られる²⁾。このSGEの電力変換技術に浸透圧発電(PRO)や逆電気透析発電(RED)がある³⁻⁷⁾。

RED / ED ハイブリッドシステム:

SGEから電力を得るREDと電力を加えて塩水を濃縮・脱塩する電気透析(ED)を組み合わせることで外部電源を必要としない脱塩技術の研究はいくつか報告されている。F. Luoら⁸⁾はFig. 2に示す模式図のようにRED部とED部の電極を接続し、RED部の対数を一定としてED部の対数を変化させて脱塩性能の比較を行っている。Man Chenら⁹⁾はED部を装置内のRED部を内包させることにより、省エネルギーかつ持続的な淡水化が可能であると、RED部とED部を外部的に接続した系(RED+ED)およびED部にRED部を内包させた系(RED/ED)(Fig. 3)の比較検討を行った。結果としてRED/ED系はRED+ED系と比較して高い脱塩性能を示した(RED/ED: 0.43 ~ 2.6 mol/(h・m²), RED+ED: 0.1 ~ 0.15 mol/(h・m²))と報告している。

本研究の目的:

一般に、地下水や費用流水の塩濃度が高い地域には海水や塩湖水など、かん水よりも高濃度の塩水が存在する。電力を使用して海水を淡水化する電気透析(ED)システムと、海水とかん水から電力を得る逆電気透析(RED)発電システムはほぼ同じスタック構造を示す。本研究ではFig. 4に示すようにEDとREDを内包させたシステムにおいて海水とかん水のSGEを利用して淡水化するシステムを作製する。そしてこのシステムにおける発電性能と脱塩性能を予測するシミュレーション法を確立する。この作製したシステムにおいてED部とRED部の対数比と脱塩性能との関係性を評価し、得られたシミュレーション結果と実験結果により装置条件を最適化することでゼロエネルギー淡水化の実用化を検討する。

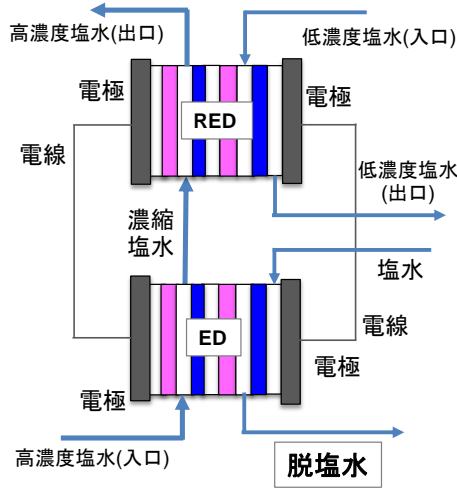


Fig. 2. ED/ RED system by F. Luo et al.

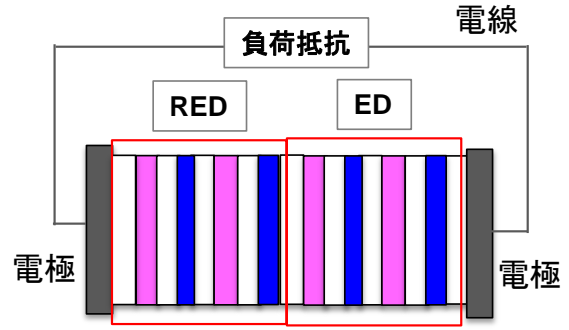


Fig. 3. Internal-integrated RED/ED hybrid system.

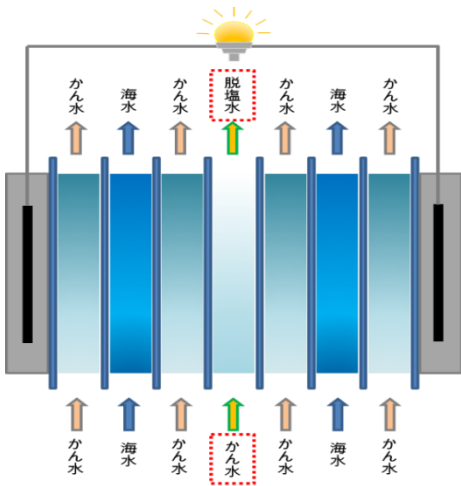


Fig. 4. The RED/ED hybrid system proposed in this study.

2. 研究方法

2. 1 理論計算

2. 1. 1. 塩濃度比の算出

かん水淡水化に寄与する部分を ED 部, 発電に寄与する部分を RED 部と定義する。RED 部と ED 部内の塩水の濃度比 R_{RED} , R_{ED} は次式で表せられる。

$$R_{RED} = \frac{\gamma_s \times C_0}{\gamma_r \times C_r} \quad (3)$$

$$R_{ED} = \frac{\gamma_r \times C_r}{\gamma_w \times C_w} \quad (4)$$

ここで, γ_s は海水の活量係数(-), γ_r はかん水の活量係数(-), γ_w は淡水の活量係数(-), C_0 は海水の濃度 (mol/dm^3), C_r はかん水の濃度 (mol/dm^3), C_w は淡水の濃度 (mol/dm^3) であり, 今回活量係数を 1 と仮定している。また, 溶液濃度を C_s (mol/dm^3) と置くと, 溶液抵抗 S ($1/(\Omega \text{ cm})$) は次式で表せられる。

$$S = 0.1407 \times C_s^3 - 0.1187 \times C_s^2 + 0.1159 \times C_s + 0.00002 \quad (5)$$

$(C_s < 0.5)$

$$S = -10.307 C_s^2 + 88.801 C_s + 3.6333 \quad (6)$$

$(C_s \geq 0.5)$

2. 1. 2. スタックの総電圧, 抵抗, 電流の算出

総電圧 V_{oc} (V) は RED 部の電圧 V_{RED} と ED 部の電圧 V_{ED} を足した値となるので

$$V_{oc} = V_{RED} + V_{ED} \quad (7)$$

ここで,

$$V_{RED} = N_{RED} \times \frac{RT}{F} \times t_{RED} \times \log(R_{RED}) \quad (8)$$

$$V_{ED} = N_{ED} \times \frac{RT}{F} \times t_{ED} \times \log(R_{ED}) \quad (9)$$

N_{RED} は RED 部のユニット数(-), t_{RED} は RED 部の平均的輸率(-), N_{ED} は ED 部のユニット数(-), t_{ED} は ED 部の平均的輸率(-)である。

RED スタックの全抵抗を $R_{all}(\Omega)$ とした時、全抵抗は RED 部の抵抗 R_{RED} と ED 部の抵抗 R_{ED} を足した値

$$R_{all} = R_{RED} + R_{ED} \quad (10)$$

となる。ここで、

$$R_{RED} = R_{el} + \frac{N_{RED}}{A} \times \left(R_m + \frac{d_{sea}}{S_{sea}} + \frac{d_{riv}}{S_{riv}} \right) \quad (11)$$

$$R_{ED} = R_{el} + \frac{N_{ED}}{A} \times \left(R_m + \frac{d_{riv}}{S_{riv}} + \frac{d_w}{S_w} \right) \quad (12)$$

また R_{el} は電極抵抗 (Ω), A は有効膜面積 (cm^2), R_m は陽イオン交換膜と陰イオン交換膜の膜抵抗の和 ($\Omega \text{ cm}^2$), d_{sea} はユニット内の海水流路部の膜間距離 (cm), d_{riv} はかん水流路部の膜間距離 (cm), d_w は ED 部の膜間距離 (cm)である。

オームの法則より電流 I は次式で表せられる。

$$I = \frac{V_{oc}}{R_{all}} \quad (13)$$

2. 1. 3. スタックの濃度変化の算出

膜一枚当たりのイオンの移動量 M_i (mol)は次式で表せられる。

$$M_i = \frac{I}{F} \quad (14)$$

k 秒時における溶液濃度を $C_{s, k}$ とおくと $k+1$ 秒後の溶液濃度 $C_{s, n}$ (mol/dm^3)はそれぞれ次式で表せられる。

$$C_{s, k+1} = \frac{C_{s, k} \times V_s - \Delta M_{cell} \times N_{RED} \times \Delta t}{V_s} \quad (15)$$

$$C_{r, k+1} = \frac{C_{r, k} \times V_r + \Delta M_{cell} \times N_{RED} \times \Delta t}{V_r} \quad (16)$$

$$C_{w, k+1} = \frac{C_{w, k} \times V_w - \Delta M_{cell} \times N_w \times \Delta t}{V_w} \quad (17)$$

ここで、 V_s は総海水溶液量 (dm^3), V_r は総かん水溶液量 (dm^3), V_w は総淡水溶液量 (dm^3)である。また Δt は測定点の時間間隔 ($\Delta t = t_{k+1} - t$)である。この(15), (16), (17)式を用いて、各溶液中の塩濃度の時間変化を計算機によるシミュレーション行う。

また、システムの RED 部と ED 部の比の最適な組み合わせを検討するために、これらを変えてシミュレーションと脱塩実験を行う。

後述する脱塩試験では Neosepta® CMX (Astom Co, Japan), Neosepta® AMX (Astom Co, Japan)を用いた。シミュレーションに使用したこれらの膜の特性を **Table 1** に、また RED 部と ED 部の比の組み合わせを **Table 2** に示す。その他の条件を以下に示す。

有効膜面積: 88 cm^2 膜間距離: 0.75 mm
 模擬海水: 初期濃度, 0.5 M NaCl ; タンク容量: 1 L
 模擬かん水: 初期濃度, 0.018 M NaCl ; タンク容量: 1 L
 ED 用かん水: 初期濃度, 0.018 M NaCl ; タンク容量: 0.5 L
 流量: 海水側 (0.016 L/sec), かん水側 (0.016 L/sec), ED 側 (0.005 L/sec)
 温度: 25°C

Table 1 Characteristics of cation-exchange membrane (CEM) and anion-exchange membrane (AEM) using simulation and experiments.

	Membranes	Resistance [Ωcm^2]	Thickness [mm]	Transport number [-]
CEM	Neosepta® CMX	3	0.15	0.98
AEM	Neosepta® AMX	3	0.17	0.98

Table 2 Number of pairs at RED unit and ED unit in the RED/ED hybrid system.

RED unit	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
ED unit	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

2. 2. 実験

シミュレーションの妥当性を確認するために、Table 3 の RED/ED 部数で下記の条件で脱塩実験を行った。

下記に記載以外の条件は、理論計算において示したのと同じである。

(a) 全対数:10

(海水側ガスケット:8, かん水側ガスケット:10, ED 部ガスケット:1)

⇒ED 部ガスケット設置位置は 5 対目

(b) 全対数:10

(海水側ガスケット:7, かん水側ガスケット:10, ED 部ガスケット:2)

⇒ED 部ガスケット設置位置は 3, 7 対目

(c) 全対数:10

(海水側ガスケット:6, かん水側ガスケット:10, ED 部ガスケット:3)

⇒ED 部ガスケット設置位置は 3, 5, 7 対目

模擬海水: 10 L

模擬かん水: 10 L

ED 部用かん水: 0.5 L, 1 L

Fig. 5 にそれぞれの ED 部数の場合における、ED 部の位置の概略図を示す。

3. 研究結果

3. 1. シミュレーション結果

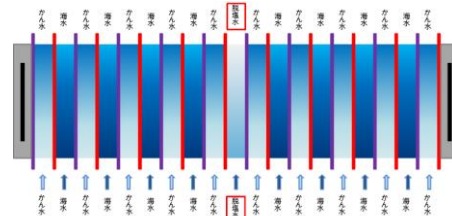
3. 1. 1. ED 部タンクの塩濃度時間変化と ED 部数との関係

Fig. 6 に種々の ED 部の対数を有する RED/ED システムにおける ED 部タンク濃度の時間変化を示す。ここで RED と ED の部数の総和は 10 であるので、RED 部数は 10 から ED 部数を引いた値になる。また ED 部数 0 は比較のための計算結果であり、ED 部がないので、一切脱塩が行われない。そのため ED 部タンク濃度は初期濃度 (0.018M, 1,000ppm) のままで一定である。その他の計算結果は、ED 部数を 1~9 まで変化させた場合を示す。この結果から分かるように、1, 2, 3 と ED 部数が増えると共に、脱塩がより顕著に起こり、ED 部タンクの濃度の減少が大きくなっている。しかし、4 以降は ED 部数の増加に伴い ED 部タンクの濃度減少の割合が小さくなる、つまり脱塩率が低下している。これは ED 部数が増えると RED 部数が少

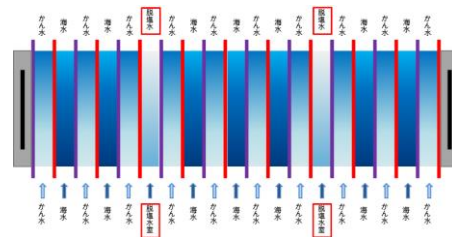
Table 3 Number of pairs at RED unit and ED unit in the RED/ED hybrid system using the desalination tests.

RED unit	9	8	7
ED unit	1	2	3

(a)



(b)



(c)

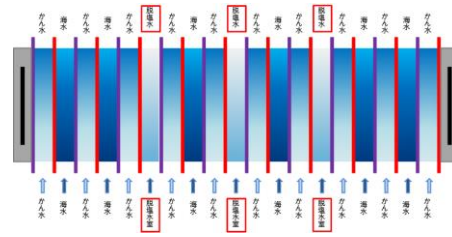


Fig. 5. Stack configuration of the desalination test. The number of pairs for ED unit: (a) 1 pair; (b) 2 pairs; (c) 3 pairs.

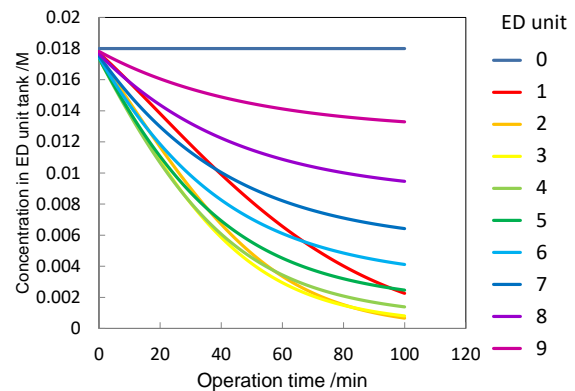


Fig. 6. Salt concentration at ED part at various ED units as a function of operation time.

なくなるため、(1)脱塩の駆動力となるシステム全体の起電力が低下すること、またED部は海水部や河川水部と比較して溶液抵抗が高いため、(2)ED部の増加はシステム全体の抵抗増加となる、ということからシステムに流れる電流が低下するためであると考えられる。これ結果よりRED/EDシステムではRED部とED部の比が7対3の場合、RED部の発電とED部の淡水化の組み合わせが最適になることが判明した。

3. 1. 2. RED/ED システムの総電圧および電流の時間変化とED部ユニット数との関係

上記に示したED部数がED部タンクの時間変化に与える影響についてより詳細に検討するためにRED/EDシステムにおける発生電圧と電流の時間変化を計算した。

RED/EDシステムで発生する初期の電圧はFig. 7に示すようにED部数が0(RED部のみ)の場合、約1.75Vであるのが、RED部数の減少と共に減少し、RED部とED部の対数が1対9の場合ではその約10分の1の値に低下している。これはこのシステムのRED部の起電力が今回の条件では1ユニットあたり、約0.175Vとなるからである。また電圧は時間経過と共に低下している。これは後述するように海水側塩濃度が減少し、かん水側塩濃度が増加して、両側の塩濃度差が低下するためである。

Fig. 8にRED/EDシステムにおける電流の時間変化を示す。電流はED部数が増加する(RED部数が低下する)と共に低下している。これは上述したように、ED部の抵抗がRED部の抵抗よりも高いためである。またED部数が0, 1, 2の場合においては電流の値が最初上昇して最大値を取り、その後低下している。これは時間経過と共に後述するように、電流を生じる元となるイオンの流れによりかん水側の濃度が増加し、その結果システム全体の抵抗が低下して電流が増加するためであると考えられる。そして時間が経過すると海水側と河川水側の濃度差が低下するために、Fig. 7に示すように電圧が急激に低下し、これに伴い電流も低下すると考えられる。

3. 1. 3. システムの海水側塩濃度とかん水側塩濃度の時間変化

Fig. 9(a)とFig. 9(b)にそれぞれRED/EDシステムの海水(SW)側塩濃度とかん水(BR)側塩濃度の時間変化を示す。海水側の塩濃度は時間経過と共に減少し、一方かん水側の塩濃度は増加している。またED部数が増加す

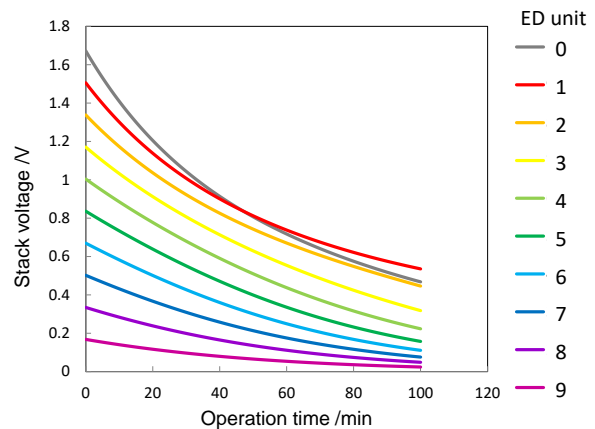


Fig. 7. Stack voltage change at various desalination units as a function of operation time.

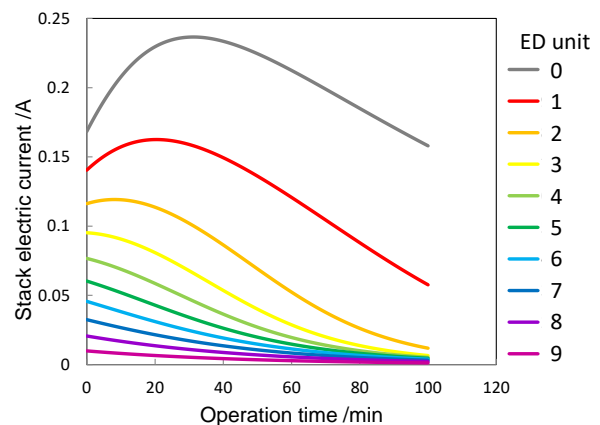


Fig. 8. Stack electric current change at various desalination units as a function of operation time.

るとこの濃度変化の度合いは低下している。この濃度変化はRED部において濃度勾配により海水側からかん水側へイオンが移動することで発生している。そのためRED部数が減少、つまりED部数が増加すると、RED部におけるイオン移動量が少なくなるため濃度変化が少なくなると考えられる。

またFig. 7において、ED部数0の電位が40分以降、ED部数1の場合と逆転しているが、これはED部数0の場合、電気抵抗が大きいED部がないため、システム全体の抵抗が小さく、そのためFig. 8に示すように電流は他の場合よりも大きな値となる。この結果Fig. 9(a)とFig. 9(b)に示す海水側の濃度低下、河川水側の濃度上昇がED部数0以外の場合に比べてより顕著になり、起電力の駆動力となる濃度差が急激に低下するためである。

3. 1. 4. 発生エネルギー及び最終脱塩濃度と ED ユニットの数との関係

Fig. 10 (a)に RED/ED システムで発生するシステムの運転時間(0分 ~ 100分)における総発生エネルギーと ED 部数との関係を示す。ここで ED 部数 0 の場合は、比較となる RED 発電システムであるが、この場合、トータルとして 1,100J 以上のエネルギーを発電している。一方、ED 部数 1, ED 部数 2 においても、それぞれ約 700 J, 約 400 J のエネルギーを発電している。

Fig. 10 (b)は RED/ED システムにおける運転時間(0分 ~ 100分)での ED 部タンクにおける最終塩濃度と ED 部数との関係を示す。ED 部数が 0 の場合は ED 部がないため ED 部タンクの塩濃度は変化しない。ED 部数 1 から 4 の場合は塩濃度が約 2 mM と飲料水として低い値まで脱塩されている。またこの条件では ED 部数 2 において脱塩部の最終塩濃度が最少となっている。これらの結果より、RED/ED システムは今回 1 L の 0.5 M NaCl(模擬海水)と、1 L の 0.018 M NaCl(模擬かん水)を駆動力として発電と同時に 0.5 L の 0.018 M NaCl の脱塩を行えることが判明した。

そこで次にこの RED/ED システムと電気透析(ED)システムまたは極性転換方式電気透析装置(EDR)を用いて同じ濃度の塩溶液の脱塩を比較する。これらの水を揚水して砂ろ過で前処理することを考えて 20 m のヘッド差で運転すると仮定する。ここで溶液の密度 1, ポンプ効率を 85%, また比較として EDR において脱塩対象となる井戸水の揚水と前処理は 10 m と仮定する。揚水と前処理に必要なエネルギー E_1 は

$$E_1 = 20 \text{ m} \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 1.0 \text{ kg} + 10 \text{ m} \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 1.0 \text{ kg} / 0.85 = 347 \text{ J} \quad (18)$$

この結果と **Fig. 10 (a)**, **Fig. 10 (b)**の結果より ED 部数 1 と ED 部数 2 の RED/ED 部数比となる RED/ED システムを用いることで、外部電力を使用せずにかん水の脱塩が可能であることが判明した。また ED 部数 2 以上の RED/ED 部数比においても **Fig. 9 (a)**, **Fig. 9 (b)**に示すように海水側のかん水側の濃度差がまだ使われずに残存しており、濃度差エネルギーの回収が十分には行われていないことからこれらの ED 部数においても、運転条件により

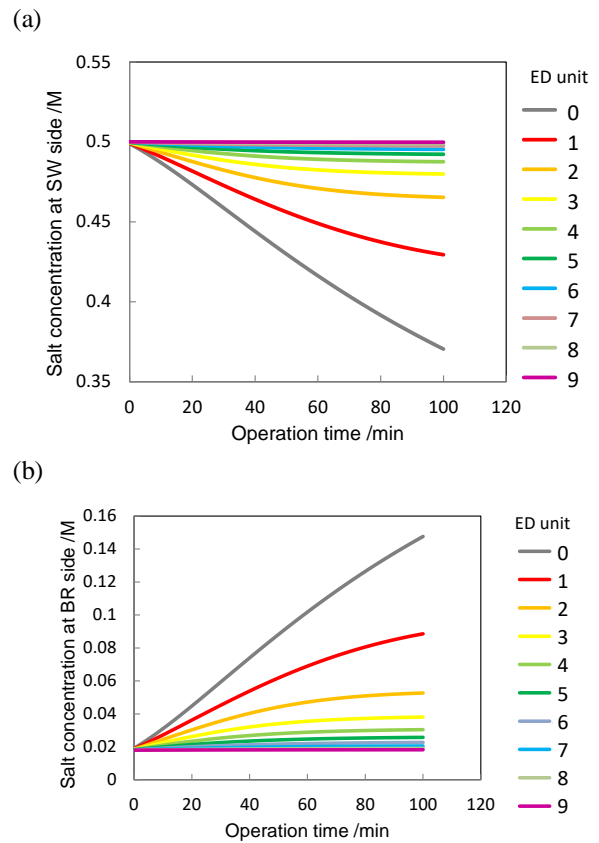


Fig. 9. Salt concentration at various desalination units as a function of operation time. (a) Seawater (SW) side, (b) Brine (BR) side.

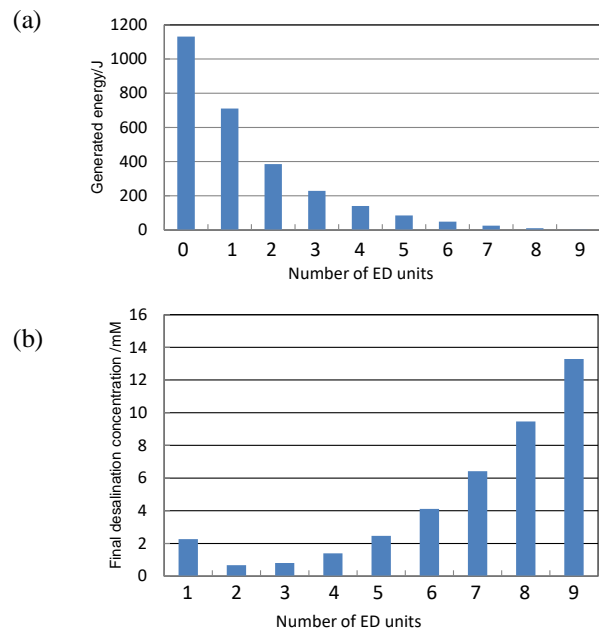


Fig. 10. (a) Generated energy and (b) final desalination concentration at various numbers of ED units.

外部電力無しでの脱塩運転が可能であると予測される。

また電気透析(ED)システムまたは極性転換方式電気透析装置(EDR)を使用して同じ濃度の塩溶液を脱塩する場合におけるエネルギー試算を行った結果、揚水や前処理を含まずEDR本体のみの電力だけで約400 Jのエネルギーが必要と予測される。

これらをまとめるとEDRで上記条件での脱塩を行うのに約400 Jのエネルギーが必要であるのに対して、RED/EDシステムでは同じ脱塩を行う場合でも、逆に400~700 Jの電力が得られるという計算結果が得られた。

3. 2. 脱塩実験結果

3. 2. 1. 種々のED部数における淡水化実験結果

Fig. 11にED部数が1, 2, 3の場合のED部の出口濃度の経時変化のシミュレーション結果と脱塩実験の結果を示す。この図より時間と共に塩濃度は低下し、ED部数が2と3においては約100分以上で2 mM濃度以下になり、この実験結果はシミュレーション結果と殆ど定量的に一致した。これより今回のRED/EDシステムでは0.5 Mと0.018 Mの塩水間の濃度差エネルギーを利用することで、2,000 ppmの塩水が、外部電力を使用せず約100分で飲料水レベルの塩濃度まで脱塩できることが示された。またED部数が1, 2, 3の場合の脱塩速度を比較するとシミュレーションから予測されるようにED部数が3の場合に最も速い脱塩速度を示した。またED部数1における実験結果において、その脱塩速度がシミュレーション結果より緩やかになっている。これは後述するようにシステム内の内部漏れが原因だと予測される。

3. 2. 2. 総電圧、電流と脱塩ユニット数との関係

上述の脱塩プロセスを定量的に解析するためにFig. 12とFig. 13にそれぞれ、脱塩実験時における電圧と電流の時間変化のシミュレーション結果と実験結果を示す。電圧も電流も時間経過と共にその値は低下し、ED部数が増加するほどその値は低くなっている。実験結果におけるED部1の場合での電圧値がシミュレーション結果よりも低くなっており、一方電流は初期においてシミュレーション結果が実験結果よりも高い値を示している。この結果からこれらの差はスタック内で内部漏れが生じたことが原因であると考えられる。この内部漏れがFig. 11(b)においてED部数1での濃度の減少の度合いの実験結果がシミュレーション結果よりも緩やかになった原因であると予測される。

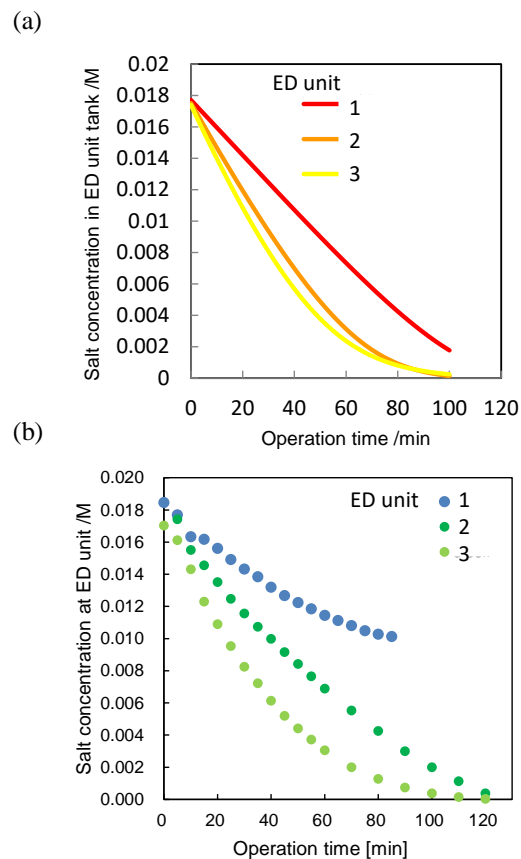


Fig. 11. Salt concentration at ED unit as a function of operation time. (a) simulations, (b) experiments.

いずれにしてもRED/EDシステムでのかん水脱塩実験において実験値はシミュレーションとほぼ定量的に一致したことから、このシミュレーション方法は、本システムの現象を定量的に予測できるということが確認できた。

4. 結論

本研究では海水とかん水などの塩分濃度の異なる2つの溶液間で有する塩分濃度勾配エネルギー(SGE)の有効利用技術として、ED流路部とRED流路部を1つのスタック内に内包させたシステムを構築した。そしてこのシステムに模擬海水(0.5 M NaCl)と、模擬かん水(0.018 M NaCl)を供給し、海水とかん水のSGEを利用して供給されるかん水の一部を淡水化することを検討した。まず理論式に基づいたシミュレーション結果にて種々のRED部とED部との対数比における本システムの脱塩性能を評価した。その結果、RED部とED部との対数比が7対3のとき最も淡水化速度が大きいことが判明した。

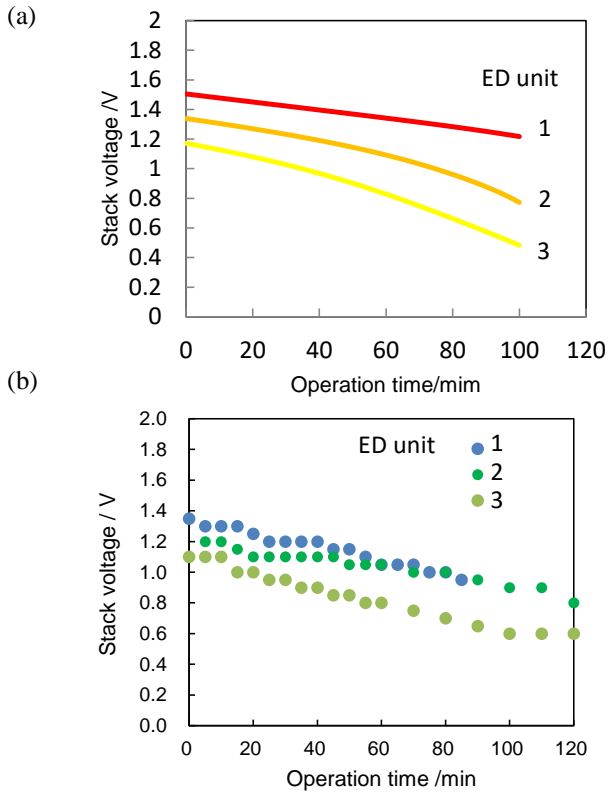


Fig. 12. Stack voltage as a function of operation time. (a) simulations, (b) experiments.

実際に市販陽イオン交換膜と陰イオン交換膜を使用し、全対数を10に固定した条件でED部数1, 2, 3で構築したRED/EDシステムにおけるかん水脱塩実験ではシミュレーション予測通りにED部数が3のとき最も高い脱塩速度を示し、模擬海水と模擬かん水間の塩分濃度差エネルギーを利用することで、2,000 ppmのかん水が、約100分で飲料水レベルの塩濃度まで脱塩できることが示された。これより今回提案したシミュレーション方法がRED/EDシステムの脱塩を定量的に予測することが確認できた。

このシミュレーションによりRED/EDシステムで発生するシステムの運転時間(0分~100分)における総発生エネルギーとED部数との関係を計算した結果、ED部数が1, 及び2において、それぞれ約700 J, 約400 Jのエネルギーが得られた。同時にRED/EDシステムではED部数が1から4の場合は塩濃度が約2 mMと飲料水として低い値まで脱塩することが示された。これよりRED/EDシステムは設置場所などの条件により、外部エネルギーを得ることなく海水とかん水の供給だけでかん水の一部を脱塩することが可能であることが示された。

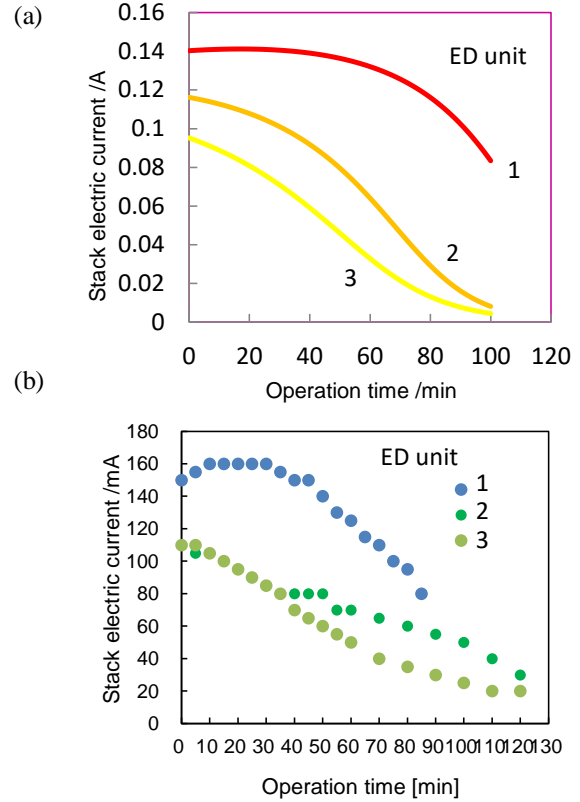


Fig. 13. Stack electric current as a function of operation time. (a) simulations, (b) experiments.

5. 文献

- 1) J. Veerman, M. Saakes, S.J. Metz, G.J. Harmsen, *J. Membr. Sci.*, 327, 136-144 (2009)
- 2) B.E. Logan and M. Elimelech, *Nature*, 488 313 (2012)
- 3) J.W. Post, J. Veerman, H. V.M. Hamelers, G. J. W. Euverink, S. J. Metz, K. Nijmeijer, C. J. N. Buisman, *J. Membr. Sci.*, 288, 218-230 (2007)
- 4) D. A. Vermaas, D. Kunteng, M. Saakes, K. Nijmeijer, *Water Research*, 47, 1289-1298, (2013)
- 5) M. Higa, T. Sakurada, H. Takemura, *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.*, 70, 118-119 (2016)
- 6) T. Abo, M. Kuno, M. Yasukawa, M. Higa, *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.*, 73, 237-238 (2019)
- 7) M. Yasukawa, S. Mehdizadeh, T. Sakurada, T. Abo, M. Kuno, M. Higa, *Desalination*, 491, 114449 (2020)
- 8) F. Luo, Y. Wang, C. Jiang, B. Wu, H. Feng, T. Xu, *Desalination*, 404, 138-146 (2017)

9) M. Chan, Y. Mei, Y. Yu, R. Jianxiong Z., F. Zhang, Energy, 170, 139-148 (2019)

Development of Desalination System Using Salinity Gradient Energy

Mitsuru Higa^{1,2}, Kenji Hori¹, Nobutaka Endo^{1,2}, Masahiro Yasukawa^{1,2}, Yuriko Kakihana^{1,2}

¹Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University, ²Blue Energy center for SGE Technology (BEST), Yamaguchi University

Summary

There is a salinity difference energy (SGE) between salt solutions with different concentrations, and it was reported that 1.7 MJ of energy can be obtained by mixing 1 m³ of seawater and 1 m³ of river water. In this research, as an effective use technology of this SGE, we constructed a system in which the ED flow path part that desalinates salty water by using supplied electric power and the RED flow path part that converts SGE to electric power are integrated in one stack. Then, model seawater (0.5 M NaCl) and model brackish water (0.018 M NaCl) were supplied to this system, and using SGE of the two solutions, it was examined to desalinate a part of the brine supplied. First, by using simulation based on the theoretical equations for ionic flux, the desalination performance of the system was evaluated at various unit ratio of the RED and ED parts. As a result, it was found that the desalination rate was highest when the unit ratio of RED and ED was 7/3.

An experiment in brine desalination using the RED/ED system constructed with 1, 2, and 3 ED parts under the condition that the total unit number was fixed to 10 by using commercially available cation exchange membrane and anion exchange membrane was performed to compare the results with the simulations in the desalination process. The experiments indicate that the highest desalination rate was obtained when the number of ED unit is 3 as predicted by the simulation, and 2,000 ppm of brine was desalinated to the drinking water level in about 100 minutes by using the SGE between the model seawater and the model brine. It was also confirmed that the simulation method proposed in this study quantitatively predicts the experiments in the desalination of the RED/ED system. The simulations also predict that the RED/ED system whose RED/ED unit ratio are 1 and 2 generates about 700 J and 400 J, respectively while the system desalinate brine to 2 mM of salt solution.

In conclusion, it is shown that the RED/ED system can desalinate a part of the brine only by supplying seawater and brine without obtaining external energy..