

豊富な海水を水資源に

期待される海水淡水化技術



「水の惑星」と呼ばれる地球にはおよそ14億 km^3 の水があると推定されている。しかしそのうち、人間が利用できる淡水は1%に満たない。無尽蔵に存在する海水の淡水化は、深刻化する水不足問題を解消する有効な手段として注目されている。世界で活躍する海水淡水化装置の技術とそれを支える材料について紹介する。

中東地域の多段フラッシュ海水淡水化プラント

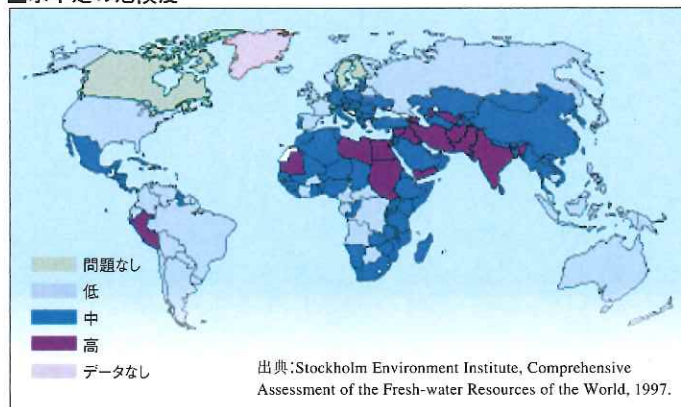
世界的に深刻化する水不足問題

水は生命にとって欠くことのできない資源である。しかし世界の水の約97.5%が海水(塩水)であり、淡水は約2.5%しか存在しない。しかも河川や地下水等の使える水資源は全体のわずか0.8%程度にすぎない。急激な人口増加や産業の発展、水の汚染に伴い、多くの国々で水不足が発生している。1995年の世界の水使用量は約35,700億 m^3 /年(およそ100億 m^3 /日)であるが、国連では2025年の人口を83億人と想定した場合、その1.4倍の水が必要とされ、水不足に直面する人は40億人にのぼると予測している。

さらに、急速な砂漠化も進んでいる。近年では年間約600万ヘクタール(九州と四国の面積の合計に相当)の土地が砂漠化している。砂漠化を防止するには緑化が必要となるが、水が得られない地域で緑化を進めるためには、淡水を確保することが求められる。

このような状況をおもんばかり、国連は2003年を「国際淡水年」と決め、積極的な水不足問題への取り組みを世界に働きかけてきた。

■水不足の危険度



特にアフリカや中東地域などは水不足の危険度が高い (ワールドウォーターフォーラムHPより)

需要量に見合う淡水をいかに確保するか。この課題を解決する手段として、ほぼ無尽蔵に存在する海水を利用する、海水淡水化技術が期待されている。海水淡水化を行えば、季節や気象条件に左右されることなく、淡水を確保できる。これまで世界中に設置された海水淡水化装置の造水容量は、3,000万 m^3 /日を超え、特に中東地域を中心に、上水用水源、工業用水源として普及が進んでいる。中東諸国の多くは、年率3%を超える高

い人口増加に加え、生活水準の向上、都市化の進展、工業の発展等に伴い、水への需要が高まっている。なかでも降雨量の少ないアラビア半島の国々は慢性的な水不足に悩まされ、水資源のほとんどを地下水または海水淡水化による淡水に頼っている。しかも地下水は近年水位が低下し、枯渇の危機に直面しており、サウジアラビアをはじめとした各国は海水淡水化装置による上水供給能力の向上等の施策を打ち出している。このような傾向から、2005年には世界の淡水化造水容量は4,000万 m^3 /日を超え、2010年には5000万 m^3 /日を超えることが予想（（財）造水促進センターによる）されている。

世界で活躍する多段フラッシュ法と逆浸透法

それでは、海水淡水化はどのような仕組みで、海水を淡水に変えるのだろうか。

海水は、地域により異なるが一般には約96.5%の水と約3.5%の塩分で構成されている。この海水中の塩分を除去することが、

■海水淡水化方法の種類

方 法		原 理
蒸発法	多重効用法	効用缶中で発生した蒸気を次の効用缶の海水の加熱に使い、これを繰り返して蒸発させる。蒸気の凝縮は海水加熱に伴う潜熱放出により起こる。
	多段フラッシュ法	加熱した海水を順次送り込んでフラッシュ蒸発させる。発生した蒸気は、熱交換器内の冷却海水により凝縮され、順次これを繰り返す。
	蒸気圧縮法	多重効用法において、効用缶から発生する蒸気を圧縮し、高温にして使用する方法。
膜 法	逆浸透法	海水の浸透圧より高い圧力を海水にかけ、半透膜を用いて、海水中の水のみを透過させる。
	電気透析法	陰・陽の2電極間に、交互に配置した陽イオン交換膜と陰イオン交換膜の間に海水を流し、海水中のイオンを分離・除去する。
冷凍法		海水を冷却して氷を析出させ、冷却に付随して発生する冷媒蒸気または水蒸気を圧縮して昇温させ、氷の融解に用いる。

淡水化の目的である。

海水の淡水化には蒸発法、逆浸透法、電気透析法、冷凍法等の各種の方法がある。原理的に大別すると、水の相変化（水から蒸気へ、または水から氷への変化）を利用する方法（蒸発法や冷凍法等）と、特殊な膜を利用した方法（逆浸透法や電気透析法等）に分かれる。ここでは、最も普及している蒸発法の一つである多段フラッシュ法と、近年普及しつつある逆浸透法について説明する。

多段フラッシュ法は、フラッシュ蒸発と呼ばれる現象を利用する。フラッシュ蒸発は、減圧下の容器内に加熱した液体を入れると、その液体が自己蒸発する現象である。この現象を用いて、加熱した海水を減圧した多数の蒸発室でフラッシュ蒸発させて、淡水を得る。

蒸発室には、上部に熱交換器があり、下部に海水が流れる構造となっている。この蒸発室は減圧状態に保たれており、加熱された海水が蒸発室に入り順次蒸発をしていく。蒸気は上部の熱交換器の伝熱管内を流れる冷却海水で冷却され、凝縮する。この凝縮水を集めて淡水がでる。

蒸発により生まれた淡水は純水に近い真水のため、飲料用にするにはさらにカルシウム等のミネラルを添加したり、殺菌する等の後処理が行われる。

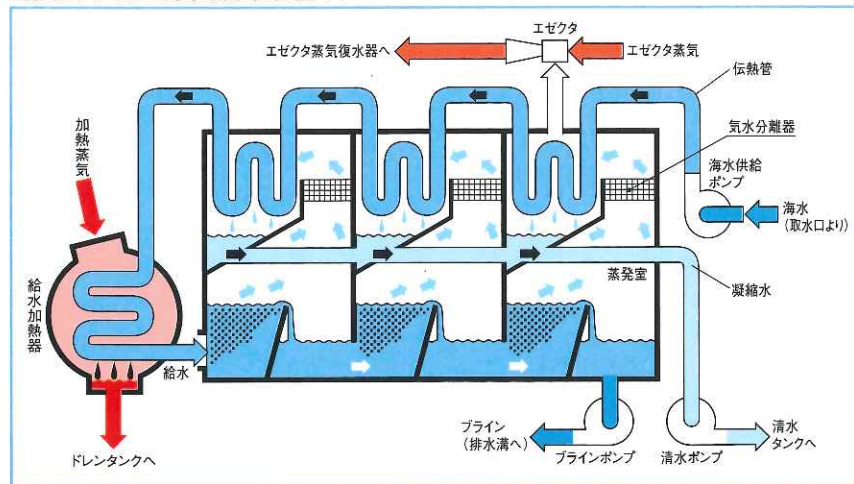
一方、逆浸透法は、水は通すが水に溶解している塩類は通しにくい性質を持つ半透膜を用いて淡水を得る方法である。通常、

■主な海水淡水化法の消費エネルギーの比較

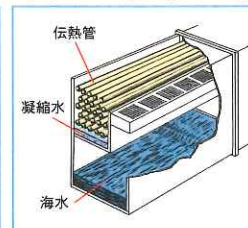
分離法	必要動力(kWh/m ³)
理想仕事	0.7
逆浸透法	3.5
同(動力回収装置付)	1.8
電気透析法	2.4
多段フラッシュ法	10.9

((財)造水促進センター資料より)

■多段フラッシュ海水淡水化装置のフロー

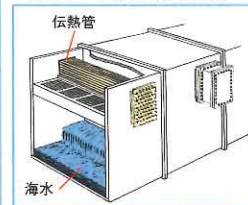


■蒸発室の構造(長管式)



蒸発室の構造は、上部に伝熱管のある熱交換器があり、下部に海水が流れる。伝熱管内には冷却海水が通っている。淡水化のしくみは、蒸発室の下部の海水が蒸発し、蒸気が伝熱管に冷やされ、凝縮水ができる。

■蒸発室の構造(短管式)

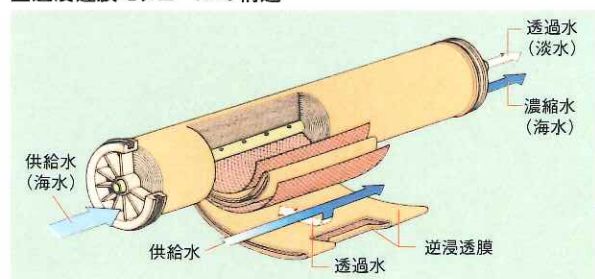


伝熱管の配列により、蒸発室は長管式(上)と短管式(下)に分かれる。現在、大容量の装置では、短管式が一般的に使用されている。

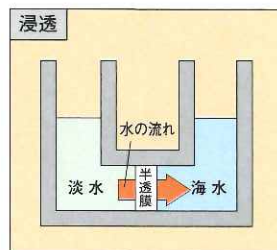
濃度の異なる2種の液体、例えば淡水と海水を半透膜を仕切りにして双方に入れたら、同じ濃度になろうとして淡水が半透膜を通過する。このときに発生する浸透圧(約25kg/cm²)より大きい圧力を、逆浸透法では海水側に加える。すると海水中の水が淡水側に押し出される「逆浸透現象」を起こし、淡水が得られるのである。

この半透膜には、ポリアミドやアセチルセルロースなどの材料が使用され、これをスパイラル型や中空糸型に成形したものを逆浸透膜モジュールと呼んでいる。逆浸透法の海水淡水化装置は、高圧ポンプを駆動し、この逆浸透膜モジュールに60~70kg/cm²の高圧海水を供給して淡水化を行う。

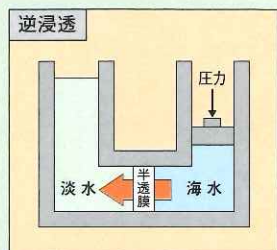
■逆浸透膜モジュールの構造



■逆浸透現象



淡水と海水を半透膜を仕切りにして双方に入れたら、同じ濃度になろうとして淡水が半透膜を通過する。この現象を「浸透」と呼ぶ。このときの浸透圧は、3.5%の塩分を含む海水の場合約25kg/cm²になる。



逆に、海水側に浸透圧より大きい圧力を加えると、海水側から半透膜を通じて淡水が押し出されてくる。この現象を「逆浸透現象」と呼ぶ。



1997年沖縄県北谷町に建設された国内最大の逆浸透膜設備

多段フラッシュ法は、加熱蒸気用とポンプ駆動用の電力エネルギーを多く消費するのに対して、逆浸透法は、ポンプ駆動用の電力のみで淡水化が行え、エネルギー消費量が小さいという特徴がある。しかし逆浸透法には、海水のろ過や海水水質調整等の十分な前処理が必要であることや、稼動数年で半透膜の劣化による逆浸透膜モジュールの性能低下が起こるため、逆浸透膜モジュールの交換が必要などの欠点がある。中東地域の大規模なプラント等では、まず信頼性、安全性を重視するため、実績の豊富な多段フラッシュ法が多く採用されている。

海水淡水化装置をおびやかす海水腐食

海水は、大量の塩化物イオンを含むうえに、電気伝導度が淡水の100倍以上も高い。高濃度の塩化物イオンは金属材料の表面に作られた不動態皮膜を局部的に破壊する。破壊された領域では、溶け出した金属イオンの加水分解によるpHの低下と塩化物イオンの濃縮によって、その部分の下地金属が継続的に溶け出し、孔食を引き起こす。

また、隙間内外での濃淡電池形成によって引き起こされる隙間腐食も、隙間内部でのpH低下と塩化物イオン濃縮により加速される。

こうして発生する海水腐食は、金属材料にとって長年の大きな課題であり、これを解決するための防食技術の研究が継続されてきた。海水淡水化装置には多くの金属材料が使用されるが、研究開発から生まれた、優れた防食技術が生かされている。

特に多段フラッシュ法の場合は、高温蒸気が発生する工程があるため、他の方法に比べ使用される金属材料が腐食しやすい環境におかれる。そのため使用される材料の選定はきわめて重要になる。

装置内部の蒸発室には、管板と伝熱管からなる熱交換器がある。熱交換器は、大規模プラントでは数万本におよぶ伝熱管が使われ、そのコストは装置全体の30~50%を占めるといわれている。

伝熱管の材質には耐食性、伝熱性、加工性が要求される。このため1970年代まで、ほとんどの伝熱管にはキュプロニッケル(Cu-Ni合金)やアルミニウム黄銅等の銅合金が使用されていた。海水には砂や泥、貝殻、微生物等が混入するため、これの滅菌処理には塩素注入が行われるが、この塩素の影響により銅合金が腐食する事故が多発した。その後、塩素や海水等に対してすぐれた耐食性を持つチタン管を採用する動きが出てきた。

耐食性を発揮する金属材料と防食技術

チタン管が普及する大きな契機となったのは、1977~1981年にかけて建設されたサウジアラビア・アルジュベール海水淡水化

クリーンで省エネルギーな海水淡水化の技術開発

現在、普及している海水淡水化装置は、化石燃料をエネルギー源としているため、二酸化炭素排出等による環境への影響が懸念されている。そのため、環境負荷の低い代替エネルギーを利用した海水淡水化技術の開発が進められている。

太陽エネルギーは、無限に存在し、環境への悪影響がないため、これまで多くの研究がなされてきた。太陽エネルギーを利用した海水淡水化方法は、太陽熱を直接海水の蒸発に利用する直接法と、太陽エネルギーを一般の海水淡水化装置の電力として使用する間接法がある。直接法は構造がシンプルなため、実用化が進んでいるが、天候に左右されるため、効率よく大容量の淡水化を行うことが難しいなどの課題がある。しかし、電力供給等が不十分な発展途上国の島々や海岸の遠隔村落では、外部からのエネルギー補給を必要としない自立型の海水淡水化装置が求められており、太陽エネルギー利用の海水淡水化装置の実用化が望まれている。



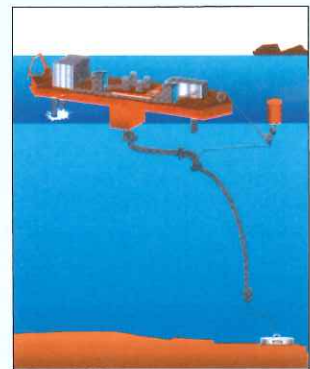
必要なエネルギーのすべてを太陽エネルギーでまかなう自立型海水淡水化装置
(写真提供: (株) 荏原製作所)

他にも、風力エネルギー利用や海洋温度差エネルギー利用の海水淡水化の開発実験が行われている。

特に近年、注目されているのが海洋温度差エネルギーである。これは、

海洋の表層部の温海水と深層部の冷海水との温度差(10~30℃)が生み出す熱エネルギーを利用して発電する方法で、二酸化炭素排出がほとんどなく、環境負荷が小さいこと等から実用化が期待されている。これまで、海洋温度差発電はコストがかかり、実現は難しいと言われていた。1994年に前佐賀大学上原春男学長が、作業流体にアンモニア/水混合液を用い、高効率で低コストな「ウエハラサイクル」を発明したことにより海洋温度差発電は再び実現の可能性をおびてきた。現在、佐賀大学ではインド政府と共同でインド洋に海洋温度差発電船を設置し、実証実験のための準備を進めている。

この海洋温度差発電のエネルギーと、発電に使用した海水を利用して、海水淡水化を行う研究が進められている。佐賀大学では、特殊なチタン製プレート式熱交換器を使用し、温度差5℃でも淡水化が行える技術を開発した。現在のところ熱交換器の材料は、海水を用いるためチタンが最も適しており、多量のチタンが使用される。この海水淡水化技術は現在、多くの国々で導入が検討されている。



インド洋での海洋温度差発電の概念図
このプラントで使用される熱交換器には、チタンプレート約3,900m²が使用されている
(佐賀大学海洋エネルギー研究センター資料より)

プラントである。合計約3,000tの日本製チタン管が採用され、腐食に対するチタン管の優位性が高く評価された。

2002年3月、バーレーンで開催された世界海水淡水化大会(International Desalination Association主催)では、20年間操業を経たアルジュベール海水淡水化プラントについての報告があり、チタン管の腐食トラブルが20年間皆無であったことが発表された。

当初、チタン管の採用にあたっては、チタンの水素吸収・脆化と隙間腐食が発生することが懸念された。チタンの水素吸収による脆化は、一般に、温度が高くなり水素濃度が増加するほど起こりやすくなる。多段フラッシュ法の装置内でも高温の蒸発室ほど水素量が多く、チタンの水素吸収現象が起こりやすいことがわかっている。また、隙間腐食は、温度上昇とともに起こり、100℃以上でチタン管とチタン管板との間に発生しやすいことがわかっている。そのため、チタン管が使用される蒸発室(主に熱放出部)内の温度は80℃以下に設定され、これらの現象を防止している。

また、伝熱管を束ねる管板はアルミニウム青銅等の銅合金が使用されることが多く、チタンと銅合金の電位差により、異種金属接触腐食が起こることがあった。そこで、この対策には電位が若干高い9%Ni-Fe合金を犠牲陽極に用いることで、腐食を防止する技術が開発された。この技術は異種金属接触腐食のすぐれた防止技術として、現在、海水熱交換器の電気防食に広く適用されている(開発した(株)神戸製鋼所取締役専務執行役員技術開発本部長佐藤廣士氏は2003年に紫綬褒章を受章)。

アルジュベールプラント以後、熱交換器の伝熱管材料は、低清浄度な海水が流れる熱放出部(前工程にあたる)には塩素注入を行うためチタンを使用し、高清浄度な海水が流れる熱回収部(後工程にあたる)には銅合金を使用するのが一般的になっている。

熱交換器の他にも、装置の各所にわたる金属材料は腐食への対策が取られている。例えば、ポンプは、近年の海水汚染に伴い、ポンプの腐食環境はますます悪化している。従来、ポンプ用にはニレジスト鉄(Ni含有鉄)やステンレス鋼(SUS316など)

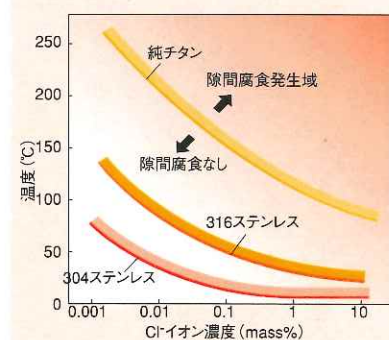


アルジュバル海水淡水化プラントには、約5万本のチタン製伝熱管が使用され、20年間の操業において腐食が皆無であったことが報告されている



世界最大の多段フラッシュ海水淡水化プラント(2003年3月竣工)に使用されたブライン再循環ポンプ

■塩化物溶液中におけるチタンおよびステンレスの隙間腐食発生限界



が使用されていたが、現在では海水環境での耐孔食性、耐隙間腐食性、耐応力腐食割れ性、機械的強度に優れた二相ステンレス鋼が採用されている。特に最近では、さらに耐食性にすぐれた材料、例えばスーパー二相ステンレス鋼などを採用するケースも増えている。

実際の材料選定では海水成分や運転条件、要求されるプラントの寿命とメンテナンスを考慮した上で材料が採用される。あるプラントで成功した材料が他のプラントでは成功とならない場合もあり、最適な金属材料および防食技術の選定が重要となる。

砂漠に雨をふらす 日本発の砂漠緑化プロジェクト

砂漠に雨をふらす。そんな夢のようなプランがスタートする。文部科学省の人・自然・地球共生プロジェクトに選ばれた「砂漠緑化計画」は、サウジアラビアの紅海沿岸の砂漠に50km²規模の緑地帯を造るものだ。紅海沿岸地域は周囲に湿度の高い大気

が流入しているため、ある程度の規模まで緑化が進めば「森が雲を呼び、雨をもたらす」ことが地球シミュレーター(海洋科学技術センター)を用いた結果わかっている。

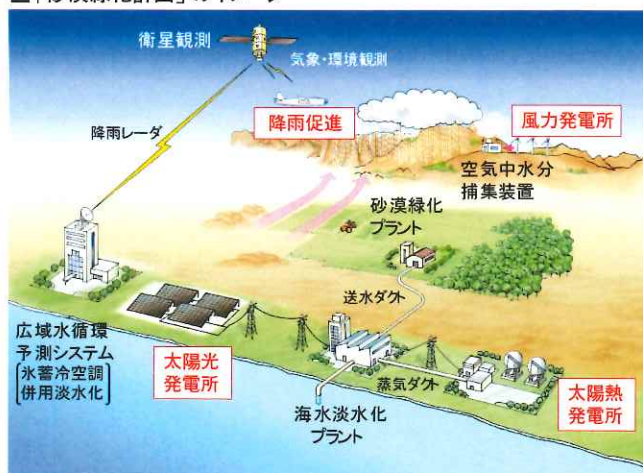
この砂漠緑化計画は、2001年から基礎研究が行われ、翌年から文部科学省のプロジェクトとして、三菱重工、地球フロンティア研究システム、防災科学技術研究所、京都大学、鳥取大学、上智大学など産官学連携による研究が進められている。

植物を生育させるために必要となる淡水は、海水淡水化装置によりまかなわれる。今回の計画では、海水淡水化は逆浸透法が採用される予定である。また、使用するエネルギーは二酸化炭素排出を抑えるため、クリーンな太陽エネルギー等が使われることになっている。予定では2006年に実証プラントが建設され、海水淡水化装置が稼動することになっている。

最近ではサウジアラビア政府をはじめとして、中国、東南アジアおよび欧州にも、研究参加や協力の意思を示す国があり、この計画は国際的なプロジェクトとして動き出すことになる。実際に緑化によって上空に雲が集まり降雨量が増えるのは、20~30年後になる予想だが、しかし、その一歩は確実に踏み出されている。

現在、世界で起こっている水不足問題は、飲料水や生活用水の不足だけでなく、深刻な食料不足や生態系の変化等、地球規模での影響をもたらす。今、世界全体での解決が必要とされているのである。日本の海水淡水化技術は世界のトップレベルであり、上記の砂漠緑化計画のように、水不足問題に対する有効な解決策として貢献することが期待される。

■「砂漠緑化計画」のイメージ



(三菱重工(株)資料より)

- 取材協力 (財)造水促進センター、日立造船(株)、(株)西島製作所、佐賀大学、沖縄県企業局、(株)荏原製作所、三菱重工(株)、(株)神戸製鋼所
- 取材・文 杉山 香里