



解説

海水からのリチウム回収

吉塚和治, 近藤正聡¹⁾

北九州市立大学国際環境工学部, ¹⁾東海大学工学部

(原稿受付: 2011年 8月31日)

リチウムイオン電池や合金材料の原料としてリチウムの需要が確実に増加すると予測されている。さらに、核融合炉では燃料の増殖材としてリチウムが不可欠である。リチウム資源の確保のために、海水やかん水など身の回りにある未利用資源からのリチウムの回収が注目されている。リチウムの需要と供給の現状や将来の核融合で用いられる場合の需要予測とともに、海水からリチウムを回収する技術とその実証試験の成果を解説する。

Keywords:

Lithium, recovery, seawater, nuclear fusion

1. はじめに

1.1 リチウムの資源量と需要

リチウムは、携帯電話やパソコンなどで用いられる二次電池やガラス原料、アルミニウム軽合金の材料として用いられている。その中でもリチウムイオン電池は、高エネルギー密度を有することから、電気自動車 (EV) やプラグインハイブリッド車 (PHV) に搭載されるなど、技術開発の進展とともに、リチウムの需要が急速に拡大している。

リチウム資源は主に、1億年~6500万年前の大陸移動と隆起に伴って陸地に形成された塩湖かん水と鉱石の2種類に大別され、両者を合わせた資源量は、金属リチウム換算で約3,400万トンと試算され、その比率は2:1である。また、塩湖かん水全体の資源量2,100万トンのうち、チリ、ボリビアおよびアルゼンチンの3か国で80%を占め、鉱石資源量1,200万トンのうち、米国が47%を占めている(図1)。

2009年の世界のリチウム生産量は、塩湖かん水および鉱石合わせて約12万トン(炭酸リチウム換算(LCEと略記)、金属リチウムの5.3倍に相当)であり、その生産比率は、3:2となっている[1]。

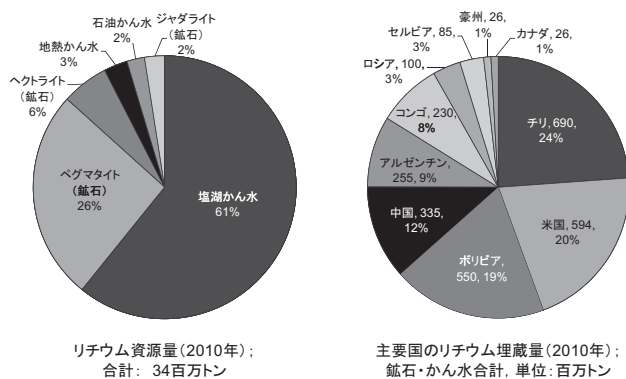


図1 リチウム資源量と主要国の埋蔵量.

塩湖かん水からのリチウムを生産しているビッグ3は、SQMとChemetall, FMCであり、この3社で世界の73%を生産している。特に、SQMとChemetallは、チリ第2州のアタカマ塩湖のかん水を利用して炭酸リチウムや水酸化リチウムを生産しており、2社合わせて炭酸リチウムとして1年間に7万トンに達する。

主なりチウム化合物の用途として、その製品別では炭酸リチウムが40%、用途別では電池材料として21%を占めている。世界のリチウム需要は全体で、2004~2008年間の年平均伸び率は5~7%であるのに対し、二次電池用のリチウム需要が20~22%と著しい伸びを示している。2009年のリチウム化合物全体の需要のうち、日本、中国等アジアが世界のリチウム需要の53%を占め、最大の市場となっている[1]。

今後の需要予測として、イリノイ工科大学では、ハイブリッド/電気自動車1台あたり10ポンド(4.5kg)の炭酸リチウムが必要で、2015年には250万台が生産されると仮定すると、1.1万トンが必要になると試算している。また、SQMとChemetallでは、2020年時点でのハイブリッド/電気自動車用のリチウムイオン電池の需要は、控えめに見積もって2~3万トン、多めに見積もって5.5~6.5万トン(ともにLCE)と試算しており、その他の需要と合わせると現在開発中のプロジェクトを含めても、2017~2018年にはリチウム不足が生じると懸念されている。

1.2 核融合分野でのリチウムの需要

燃料として重水素(D)とトリチウム(T)を用いるDT核融合炉の設計研究が進められている。燃料として使用される重水素は、海水中の水素の0.015%程度も含まれており、地球上の資源量としてはほぼ無尽蔵である。これに対してトリチウムは、天然にはほとんど存在しないため、核融合炉内で生産しなければならない。炉心の核融合反応により

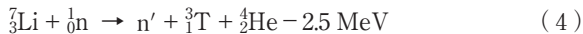
生じた中性子を、ブランケットのリチウムにあて、核変換を起こしてトリチウムを生産する。この時、トリチウムの生産能力が消費量を十分に上回り、トリチウムに関するマスパランスが成立する必要がある。

核融合炉で燃料増殖材として使用するリチウムの量は、自己冷却型ブランケットの場合は、300トン程度になる見積もりがされている[2]。1回のDとTの核融合反応では(1)式に示すように、 $17.6 \text{ MeV} (= 2.82 \times 10^{-12} \text{ J})$ のエネルギーを取り出せる。核融合炉の炉心出力を仮に1GWとすると、1年間で使用されるトリチウムの量は、(2)式から求めることができる(M:トリチウムの原子量、A:アボガドロ定数。ここでは、1年間連続して運転するとして計算)。



$$1 \text{ 年間で使用されるトリチウム量 [g]} = \frac{1 \times 10^9 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 \times M}{2.82 \times 10^{-12} \times A} = 55729 \quad (2)$$

1GWの炉では、1年間におよそ55.7kgのトリチウムが消費されることがわかる。世界各国で核融合炉の設計が進められているが、日本の核融合科学研究所が設計しているFFHR2m2の出力は3GWで、米国で設計が進められているARIES-CS[3]の出力は2.436GWである。これらはおおよそ150kg程度のトリチウムを1年間で消費することとなる。燃料の自己充足性を保つには、この分のトリチウムを、リチウムの核変換により生産しなければならない。同時にトリチウムに変換されて消費した分のリチウムを補充する必要がある。1個のリチウム原子は(1)式により発生した中性子との反応により、(3)、(4)式に示すような核変換を生じる。



ここで、(4)式の ${}^7\text{Li}(n, n\alpha)\text{T}$ 反応は、吸熱反応であるため、反応にしきい値が存在する。トリチウム原子1個の反応により、1個の中性子が発生し、リチウム1個が核変換で消費されて、1個のトリチウムが生産される。天然のリチウムは1モルあたり、トリチウムの6.941/3.016倍の質量を持つため、1年間で350kg程度のリチウムが消費されることになる。トリチウム経済の観点から、トリチウムを増殖するためにBe等の中性子増倍材の使用やリチウムの同位体比の調整などが検討されている。この場合、トリチウム増殖率(Tritium breeding ratio: TBR)が係数としてかかり、現在TBRは1.1程度である。そのため、年間385kg程度のリチウムが、トリチウムを生産するために消費されることになる。さらに、リチウムの同位体の存在比は、 ${}^6\text{Li}$ が7.4%、 ${}^7\text{Li}$ が92.6%であるため、 ${}^6\text{Li}$ を濃縮したものを燃料増殖材として使用する場合には、上で評価した消費量の何倍ものリチウムが必要になる可能性がある。

2. 海水からの様々な資源の回収

海中には、様々な鉱物資源が溶存しており、その絶対

量の大きさから、資源枯渇問題解決の手法の一つとして注目されてきた。海水の総面積は3億6千万 km^2 以上で、実に地球表面の約70%を占めている。海洋の平均深さは3.8kmであるので、海水の総量は14億 km^3 にも達する。そのうち水は96.5%で残りは海水に溶け込んでいる物質で占められており、実に様々な物質が溶け込んでいる。海水中に溶存する元素とその平均濃度を表1に示す[4]。これらの鉱物資源量は大部分において、海水中の方が陸上の推定埋蔵量より大きい。海水中に存在する元素の濃度は希薄であり、経済的にかつ高純度に回収することがきわめて困難である。さらに、海洋の特殊性から陸上資源の回収技術をそのまま適応することは困難である。

現在、実用的に回収・利用されている海水中の成分は、比較的濃度が高い塩化ナトリウム(食塩)、塩化マグネシウム(にがり)、臭素、ヨウ素などに限定されている。

海水からのホウ素の回収法としては溶媒抽出法や吸着法があり、かん水のようなホウ素含量が極めて高い場合には経済的観点から、溶媒抽出法を用いた研究が数多く行われてきた。しかしながら、海水のような希薄資源の場合は、吸着法が効果的であるためキレート樹脂を用いたホウ素回収が行われている[5]。

臭素の回収は、工業排水から水酸化リチウムを媒体としてイオン交換法によって臭化リチウムを回収する方法がある。この方法を用いた場合の臭素の回収率は、82%と極めて高い[6]。

その他にも需要の高いウランや金などの回収技術の研究が盛んに行われてきたが[7-10]、海水中のウラン濃度は $3.3 \mu\text{g/L}$ であり、金については 0.03 ng/L とさらに低い。これらの金属資源の回収は、大量に存在しているナトリウム(10780 mg/L)やマグネシウム(1280 mg/L)などにより阻害されるため、実用化には至らず、研究自体も下火になった[7]。

図2に、海水成分回収の経済性予測を示す。海水成分の中で今後の回収技術開発の進展や市場価格の上昇次第では、リチウム、ストロンチウム、ルビジウム、セシウム、モ

表1 海水中の主な元素とその平均濃度[4].

元素	平均濃度[mg/L]	元素	平均濃度[mg/L]
Cl	19,360	Rb	0.12
Na	10,780	P	0.062
S	2,710	I	0.058
Mg	1,280	Ba	0.016
Ca	417	Mo	0.011
K	399	U	0.0032
Br	67	V	0.002
C	26	As	0.0017
N	8.27	Ni	0.00047
Sr	7.8	Zn	0.00039
B	4.5	Cs	0.00031
Si	3.1	Cr	0.00026
O	2.8	Sb	0.00024
F	1.3	Kr	0.00023
Ar	0.48	Fe	0.00016
Li	0.17	Au	0.03×10^{-6}

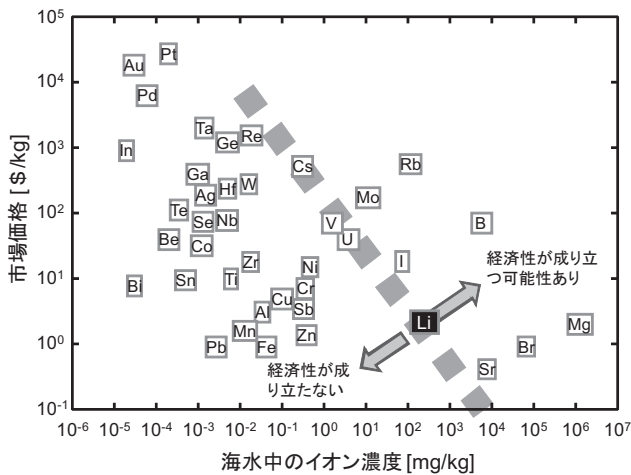


図2 海水成分回収の経済性予測(海水の科学と工業[4]を改良).

リプデン、ウランなどのレアメタルの回収の可能性が出てくる。特に、海水中のリチウム濃度は平均 0.17 mg/L と比較的濃度が高いため経済性が成り立つ可能性が潜在しており、効率的な回収技術の開発が期待されている[8]。

3. 海水からのリチウム回収技術

3.1 リチウム吸着剤の開発

吸着法は、固体吸着剤に目的物質を吸着させて回収する方法であり、海水中のリチウムのような希薄な資源を回収する場合、経済性、操作性、採取効率などの面から最も有望である。海水のような希薄資源からの回収に用いる吸着剤としては、以下のような条件を満たす必要がある[8]。

- ① 大きな吸着容量
- ② 速い吸・脱着速度
- ③ 目的元素に対する高い選択性
- ④ 繰り返し使用の耐久性
- ⑤ 簡単な大量製造方法
- ⑥ 安価
- ⑦ 原材料が豊富で、安定供給可能

リチウム吸着剤としては有機系、無機系および有機無機のハイブリッド吸着剤が提案されている。その中で、有機系吸着剤は一般的に、リチウム選択性や吸着容量が低いことから、報告例がほとんどない。一方、無機吸着剤を用いた海水やかん水、温泉水からのリチウム吸着に関する報告は数多く行われており、吸着剤の原料母体から、アルミニウム型、複合アンチモン型、層状化合物型、イオン形状記憶型などに分類される[8, 11, 12]。これらの中でも特に、イオン形状記憶型吸着剤はリチウム吸着能と選択性が最も高いことが明らかにされており、実用化への期待も高い。

イオン形状記憶型吸着剤の合成は、二段階の反応によって行われる(図3)。最初に無機化合物の中に溶融インターカレーション法によってターゲットイオンを挿入したあと、焼結処理によって結晶化させることによってイオンが通過できるトンネルやイオン吸着サイトの層間距離を制御した吸着剤の元(前駆体)ができる。これを、ターゲットイオンの鑄型構造を保持したままでトンネル内や層間の吸・脱着可能なイオンをうまく取り除いてやることによ

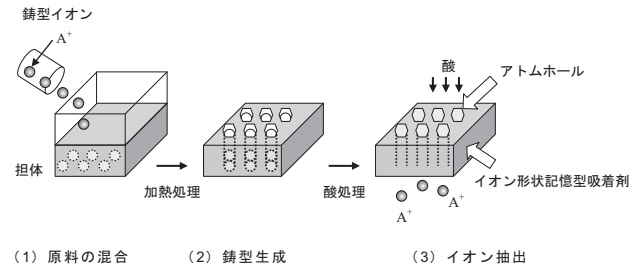


図3 イオン形状記憶型吸着剤の合成法。

てイオン欠陥を有する多孔結晶型の吸着剤を得ることができる。得られた吸着剤は、そのイオンを記憶しているかのように特異的な選択吸着性を示す[11, 12]。リチウムイオンはアルカリ金属の中でも最も小さなイオン半径 (0.73 Å) を持ち、結晶格子内を比較的自由に動き回ることができるため、合成は比較的容易であり、リチウムマンガン酸 (LiMn₂O₄)、リチウムチタン酸 (Li₂TiO₃)、リチウムアンチモン酸 (LiSbO₃)、リチウムニオブ酸 (LiNbO₃)などを前駆体としたリチウムイオン記憶型吸着剤が合成されてきた。リチウムチタン酸を酸処理することによって得られる酸化チタンは、リチウムイオンに対して高い選択性を有するが、吸着容量はマンガン酸化物の20%以下と低いため実用化には問題がある。一方、斜方晶系のリチウムアンチモン酸を濃硝酸で酸処理することによって得られる単斜晶系の酸化アンチモンは、地熱水からのリチウム吸着量は、吸着剤1gあたり20mgに達するが[13]、アンチモンは高い毒性を持っており、実用化には大きな壁がある。酸化チタン系、酸化アンチモン系吸着剤と比較して、スピネル型酸化マンガン系吸着剤は、リチウム吸着能、選択性ともに高く、比較的原料も豊富に存在することから、実用化に最も近い吸着剤として、多くの研究が行われてきた。

マンガンは立方最密充填した酸素原子間の八面体型空隙の1/2を占め、リチウムは四面体型空隙の1/8を占めている。この物質を塩酸によって処理し、リチウムを溶出してもスピネル構造は保たれ(トポ化学反応)、水素イオンで置換されたマンガン酸化物をリチウム吸着剤として用いることができる。様々なリチウム化合物とマンガン酸化物の原料からの固相反応法を用いて、海水から吸着剤1gあたり40mg以上の高いリチウム吸着能を有する吸着剤の合成に成功している[14]。我々のグループは、Mn₃O₄とLiOHの混合粉体から溶融インターカレーション法を用いて、高いリチウム含有量を有する単一相の吸着剤の開発に成功した[12]。

一方で、酸化マンガン系吸着剤を用いた場合、酸を用いたリチウムの溶出の際にマンガンイオンが同時溶出する重大な欠点がある。リチウムイオンの吸着・脱着プロセスは、酸化還元反応とイオン交換反応という二つの異なるメカニズムが並列で進行し、リチウムイオンの吸着は酸化還元サイトとイオン交換サイトの両方で起こる[15]。これらのプロセスの中で、リチウムの吸・脱着に伴う酸化還元反応が、マンガンの溶出に関係していると考えられることから、マンガンの溶出を抑え、吸着剤の耐久性を向上させる

目的で、コバルト、マグネシウム、アルミニウムのような異種金属ドーブを試みた例もあるが、マンガンの溶出に対して大きな改善には至っていない[16].

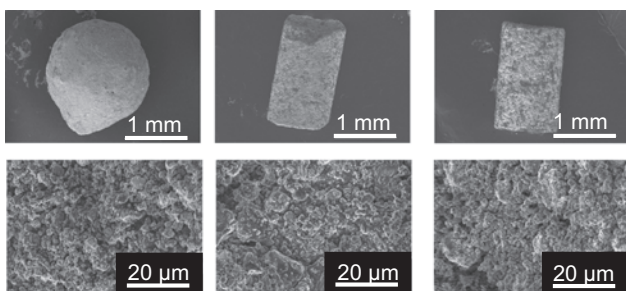
3.2 吸着剤の造粒法の開発

海水から工業的規模でリチウムを採取するためには、大量の海水と効率よく接触させる必要がある。そのような処理法のひとつとして粒状吸着剤を充填したカラムを用いた回収法がある。カラム方式の場合、溶液を通液する際の圧力損失や、吸着剤の漏出、あるいは吸着剤を構成する金属元素の溶出を防止するために、造粒による吸着剤の粒状化を行う必要がある。

一般に、吸着剤の造粒には、有機高分子バインダーと無機高分子バインダーを用いる方法があるが、現在までもっぱら、ポリ塩化ビニル、ポリアクリル酸ヒドラジド、ポリアクリルアミドなどの有機高分子バインダーを用いた吸着剤の造粒が行われてきた[11]。しかしながら、これらのバインダーで粒状化した吸着剤の機械的強度は乏しく、水溶液を通液する際に吸着剤の粒が崩れるなどの問題が頻発した。これらの問題を解決するために我々は、キチンを主成分とするバインダーを開発した。キチンは、海洋甲殻類に含まれている機能性多糖類であり、すでに人工皮膚のような医療材料、健康食品などとしておなじみのものである。また、キチンは生分解性を持つことから、環境に対してほとんど無害であるという利点を持つ。さらに、キチンは、弱アルカリ性である海水 (pH=8.1) では不溶であること、他の有機高分子バインダーなどと比較しても高粘性であり造粒効率も高いことなどから、海水のカラム処理には最適物質といえる。

加えて我々は、アルミナ系およびシリカ系無機バインダーを用いた造粒法の開発も行った。アルミナバインダーあるいはシリカバインダーで造粒した吸着剤は、アルミナバインダーと調製したリチウム吸着剤と少量のイオン交換水を混合させ、押し出し成型機で直径1 mmのペレット状にして焼成することにより調製できる。

図4にキチンバインダー、アルミナバインダーおよびシリカバインダーにより造粒したマンガン系リチウム吸着剤の電子顕微鏡写真を示す。我々が造粒した吸着剤の粒径は1~2 mmであり、かつ、吸着剤を硬く高密度に粒状化することができた。



キチンバインダー アルミナバインダー シリカバインダー
図4 様々なバインダーで造粒した吸着剤の電子顕微鏡写真。

4. リチウム回収技術の工業化

4.1 リチウムの吸着分離・濃縮プロセス

プラントスケールで、海水中の希薄資源を回収する装置を設計するためには、以下のような要件が求められる。

- ① 吸着剤と大量の海水を効率よく接触可能
- ② 吸着剤の損失が少なく、繰り返し使用可能
- ③ 海水の配管内の流動抵抗が小さい
- ④ 装置運転の所要エネルギーが少ない
- ⑤ 建設費が安価
- ⑥ メンテナンスが容易で維持経費が安価
- ⑦ 台風・高波などの災害に対しての安全性や操作安定性

特に、吸着法を用いて海水中のリチウムを実用的規模で回収する場合、優れた吸着剤の開発のみならず、①~④に挙げた操作条件の最適化が最大の課題である。これらの要件を満足する海水の供給方法や吸着剤と海水の接触方法の組み合わせとして、潮力・波力などの自然海流やポンプを利用した固定床方式、流動床・移動床方式が提案されている[11].

自然海流を利用する固定床方式は、実験室レベルの吸着装置が安価に建設でき、かつ、実証データが得やすいため研究によく用いられてきたが、海水中に存在する海水懸濁物や微生物が吸着剤上や配管に付着して増殖し、流路が閉塞しやすいといった問題がある。これを防止するため、海水の限外ろ過や海水取水口でのオゾン処理などの対策が提案されているが、設備費が膨大となるため実用化は困難である。

自然海流を利用した流動床・移動床方式としては、層間平行流吸着装置がある。これらの装置は、“座布団”状の膜状吸着剤を海流中に曝し、海水中からリチウムを吸着分離する。流動床・移動床方式の研究レベルでのリチウム回収量は10日間で10 mg (リチウム) /g (吸着剤) に達しているが、潮力・波力による自然海流を用いているため、稼動状態が不安定になりやすい。また前述と同様に、海水懸濁物や微生物の増殖による吸着性能の急激な低下も発生している。加えて、沿岸から離れて操業されるために、維持管理が困難であり、実用化には不向きであると結論されるに至っている。

一方、ポンプ流動床やポンプ固定床方式は、流動抵抗を小さくでき、かつ、安定した海水を供給できることから、比較的簡単に安定稼動することが可能である[12]。また、沿岸に立地可能であることから維持管理も容易であり、現在最も実用化が有望な方式である。特に、火力発電所およびそのほかの工業用の冷却水としてポンプアップされた海水を二次利用することによって簡便に安定操業でき、かつ、稼動コストの低減が可能となる。しかし、パイロットプラントレベルへスケールアップする場合の操作効率や、経済性評価、耐久性評価等について定量的に評価する必要があり、実用化にはまだ解決すべき課題が残っている。

4.2 リチウムの吸着分離・濃縮プロセスのパフォーマンス

我々は、佐賀大学海洋エネルギー研究センターにて、“海水リチウム回収パイロットプラント”を建設した[12]。このパイロットプラントを用いて、伊万里湾の海水

中からのリチウム回収の実証試験を行い、回収プロセスの評価、特に、スケールアップを行った場合のリチウムの回収効率について検討した。パイロットプラントのフローダイアグラムと写真を、図5、図6、図7に示す。

伊万里湾の海水を精密濾過ユニットに通して浮遊物などを取り除いた後、造粒した酸化マンガン系吸着剤を60kg充填したカラムに150日間、816 m³ 通液してリチウム吸着操作を行った。吸着後、工業用淡水をカラムへ1 m³ 通液して、海水の追い出しと洗浄を行った。リチウムの溶離は希塩酸を0.4 m³ 通液して行った。溶離液は、蒸発晶析ユニットで晶析を行い、得られた沈殿物を全量回収し、さらに真空乾燥によって蒸発乾固物を得た。

150日間の実証試験でのリチウム吸着操作では、約600 m³ 通液後に供給海水中のリチウム濃度と等しくなり、吸着量が飽和に達した。図8に蒸発晶析後の固形物(自然に析出した固体)および濃縮液の様子を示す。濃縮液をさらに蒸発乾固すると、合計で792 gの固形物が得られた。この固形物の金属分析結果を表2に示した。

この実証試験では、792 gの蒸発乾固物が得られたが、こ

の中の24% (=192 g) が塩化リチウムと計算され、海水からのリチウムの回収率は31%、リチウムの濃縮率は、8,100倍に達した。固形物の中には、ナトリウム、カルシウムなどの海水由来成分は残存しているが、海水からの濃縮率は低く抑えることができた。一方、吸着剤母体成分であるマンガンの含有率は、1.6 wt%となっていた。この問題を解決するために、吸着剤を粒状化する際のバインダーを適宜選択することによるマンガンの溶出抑制が、今後解決すべき課題である。さらに高純度な塩化リチウムを選択的に回収するためには、共存イオンからの分離が大きな課題であるが、吸着工程とカラム洗浄工程の間にスクラビング工程を導入することや、この回収プロセスの後段に更なる高純度化プロセスを組み合わせるなど今後解決すべき課題も明らかになった。

現時点の評価として、例えば100万kW級の発電プラント1基における80 m³/sの海水(海水中のリチウム濃度は

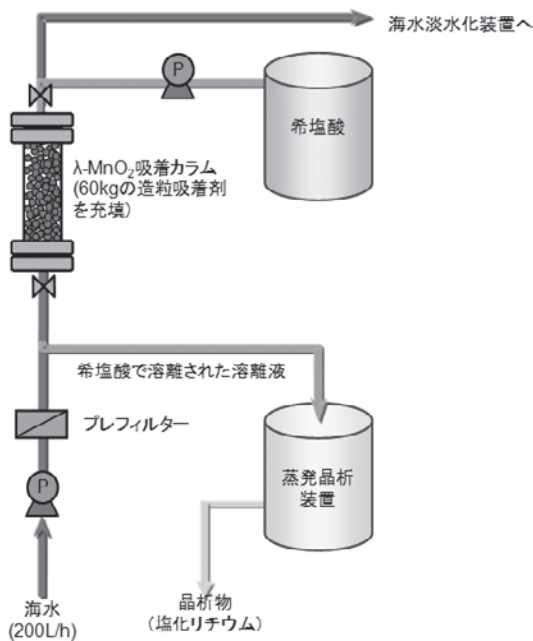


図5 海水リチウムプラントのフローダイアグラム。



図7 海水リチウム回収プラント(塩酸タンク側から望む)。

表2 150日間の実証試験結果—得られた晶析物の組成(塩化物換算)[12].

元素	含有率[wt%]	濃縮率[倍]	海水中濃度[wt%]
LiCl	24.3	8,100	0.003
NaCl	24.5	0.3	78.1
KCl	17.8	5.1	3.5
MgCl ₂	2.3	0.2	14.3
CaCl ₂	21.6	6.6	3.26
MnCl ₂	4.7	—	n.q.
SrCl ₂	6.0	150	0.04

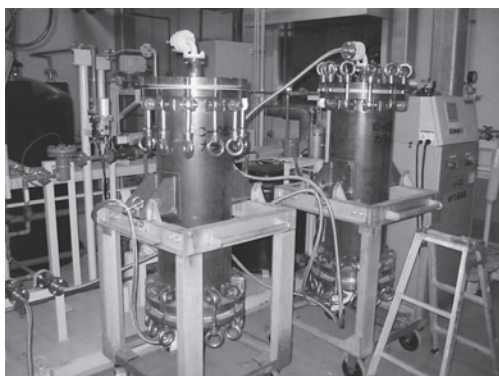


図6 海水リチウム回収プラント(吸着カラム)。

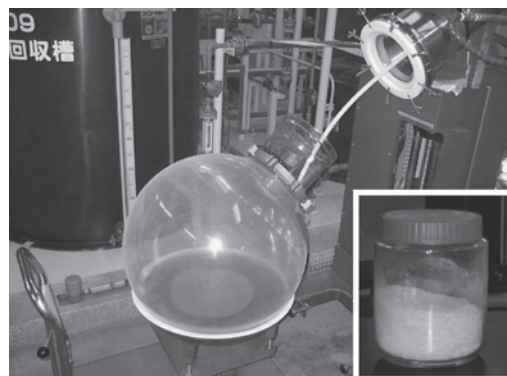


図8 150日間の実証試験後の蒸発晶析物。

0.17 mg/L) の2次利用を想定し、回収効率31%で概算すると、133トン/年の規模でリチウムの回収が可能であると見積もられる。この評価から、核融合炉で使用するリチウムは十分に供給可能であると推測される。

おわりに

四方を海で囲まれた我が国において、海水からの有価資源やエネルギー資源を如何に有効利用できるかは21世紀の重要な課題である。その中でも海水中に存在しているレアメタルの分離・回収は、資源のない我が国独自の“鉱山”を開拓する技術である。

我々のグループのパイロットプラントによる海水からのリチウム回収の実証試験により、きわめて希薄な海水中のリチウムをナトリウム等の障害をほぼ抑制しながら回収可能であることが明らかになった。この吸着分離回収プロセスは、海水中のリチウムのみならず、地熱水、温泉水、工業排水などからの多くのレアメタルの資源確保を可能とする技術でもある。現在設計研究が進められている核融合炉において、リチウムは燃料増殖材として必要不可欠である。本回収技術を用いてリチウムを海水から回収することにより、核融合炉におけるリチウムの消費量を供給することができる見通しである。

参考文献

- [1] 舩石油天然ガス・金属鉱物資源機構ウェブサイト：Lithium Supply & Market 2010 講演概要 (http://www.jogmec.go.jp/mric_web/current/10_07.html)
- [2] 相良明男：private communication (2011); A. Sagara et al., Fusion Eng. Des. **83**, 1690 (2008).
- [3] L.A. El-guebaly and S. Malang, Fusion Eng. Des. **84**, 2072 (2009).
- [4] 日本海水学会，ソルト・サイエンス研究財団共編：海水の科学と工業（東海大学出版会，1994）。
- [5] 安田誠二，山内博利：日本化学会誌 **4**, 752 (1987).
- [6] G.A. Tavares, J.A. Bendassolli, G. de Souza, F.R. Nolasco, J.A. Bonassi and H.H. Batagello, Quimica Nova **27**, 320 (2004).
- [7] 片貝秋雄，瀬古典明，川上尚志，齊藤恭一，須郷高信：日本原子力学会誌 **40**, 878 (1998); K.K. Falkner, K.K., J. M. Edmond, Earth Planet. Sci. Lett. **98**, 208 (1990); A.S. Lele, Chem. Eng. World, **31**, 107 (1996); 須郷高信：エネルギー・資源 **23**, 125 (2002); 松葉満江，石井紀明，中原元和，中村良一，渡部輝久，平野茂樹：Radioisotopes **49**, 346 (2003); A.K. Saxena, Indian Chem. Engr., Section C **43**, 231 (2001); J.A. Epstein, E.M. Feist and J. Zmora, Hydrometallurgy **6**, 269 (1981); M. Okumura and Y. Kitano, Geochim. Cosmochim. Acta, **50**, 49 (1986).
- [8] 宮井良孝，加納博文，R. Chitrakar，大井健太：日本海水学会誌 **54**, 189 (2000); 大井健太，宮井良孝，加納博文，馮旗：日本イオン交換学会誌 **8**, 214 (1997).
- [9] 東北経済産業局：我が国における鉱種別需給/リサイクル/用途等資料，<http://www.tohoku.meti.go.jp/kankyoku/ recycle/hokokusyo060710.htm>.
- [10] 西山 孝：鉱物資源の現状（アルム出版社，1989）pp.185; 工業レアメタル（アルム出版社，2007）No.123.
- [11] X. Yang, W. Tang, Z. Liu, Y. Makita, K. Ooi, J. Mater. Chem. **12**, 489 (2002); K. Ooi, Y. Miyai and S. Katoh, Sep. Sci. Technol. **21**(8), 755-766 (1986); 大井健太：日本イオン交換学会誌 **12**, 47 (2001); 古屋伸秀樹：化学工業 **50**, 366 (1999); 大井健太，坂根幸治：日本海水学会誌 **57**, 261 (2003); A. Umeno, Y. Miyai, N. Takagi, R. Chitrakar, K. Sakane and K. Ooi, Ind. Eng. Chem. Res., **41**, 4281 (2002).
- [12] 喜多條鮎子，M. Holba，鈴木 拓，西浜章平，吉塚和治：日本イオン交換学会誌 **16**, 49 (2005); 吉塚和治，喜多條鮎子：エコインダストリー **10**, 25 (2005); M. Holba, A. Kitajou and K. Yoshizuka, CHE Magazin **15**, 29 (2005); 喜多條鮎子，鈴木泰宏，西浜章平，鈴木 拓，吉塚和治：日本イオン交換学会誌 **17**, 7 (2006); K. Yoshizuka, A. Kitajou and M. Holba, Ars Sep. Acta, **4**, 78 (2006).
- [13] M. Abe, R. Chitrakar and M. Tsuji, Water Treatment, **5**, 425 (1990).
- [14] R. Chiteakar, H. Knoch, Y. Miyai and K. Ooi, Ing. Eng. Chem. Res. **40**, 2054 (2001); K.-S. Chung, J.-C. Lee, E.-J. Kim, K.-C. Lee, Y.-S. Kim and K. Ooi, Materials Science Forum **449-452**, 277 (2004); K. Ooi, Y. Miyai, S. Katoh, H. Maeda and M. Abe, Langmuir **5**, 150 (1989); 田中暁生，田村紘基，古市隆三郎：Electrochemistry **67**, 974 (1999); Q. Feng, Y. Miyai, H. Kanoh and K. Ooi, Langmuir **8**, 1861 (1992).
- [15] K. Ooi and Y. Miyai and J. Sakakihara, Langmuir **7**, 1167 (1991); 馮旗，加納博文，大井健太，J. Ion Exchange **8**, 102 (1997).
- [16] 馮旗，大井健太：水熱化学実験所報告 **8**, 29 (1995); 宮井良孝，加納博文，R. Chitrakar，大井健太，Bul. Soc. Sea Water Science, Japan **54**, 189 (2000); Y.S. Kim, K.S. No, K.S. Chung, J.C. Lee and K. Ooi, Materials Letters **57**, 4140 (2003).



よし づか かず はる
吉塚和治

北九州市立大学国際環境工学部 教授。主な研究分野：分離プロセス工学，特に金属を分離するプロセスの開発。炭酸リチウムは医薬品（リーマス錠）としては「気分の浮き沈みをおさえる薬」としてうつ病の治療に使われているらしく，リチウム資源の開発を専門とする者として，元気に前向きにがモットーです。



こん どう まさ とし
近藤正聡

東海大学工学部原子力工学科講師。東京，小石川出身。2006年，東京工業大学原子核工学専攻博士課程を早期修了。博士（工学）。世界原子力大学，第一期フェロー。核融合科学研究所助教を経て，現職。専門は，液体金属工学および溶融塩工学。原子力の化学工学に関する講義や液体金属を応用する研究の指導，原子力発電所の事故に関する教育に取り組んでいます。研究室ホームページ (<http://www.ex.utokai.ac.jp/kondo/index.html>)。