

(24-56③) 平成 24 年度
海水中レアメタル等捕集可能性調査
報告書

平成 25 年 3 月

一般財団法人エンジニアリング協会



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

<http://ringring-keirin.jp>

序

平成 24 年度海水中レアメタル等捕集可能性調査補助事業（以下 本事業）は JKA の補助事業として、一般財団法人エンジニアリング協会に海水中レアメタル等捕集可能性調査委員会（玉田委員長（独立行政法人日本原子力研究開発機構））を設置して調査を実施したものである。

省エネルギーや I T 等の最先端技術の発展に伴い、レアメタル等の需要が飛躍的に増加している。また、資源ナショナリズムが台頭し、これらレアメタル等の素材の安定供給確保が困難になりつつあり、価格が高騰している。海洋中には膨大な量のレアメタル等が溶存しているが、これら有用資源を捕集する技術の実用化は進展しておらず、レアメタル等の需給逼迫により、我が国が得意とする先端産業の事業活動に大きな支障を及ぼしつつある。

本補助事業により、海水中のレアメタル等を捕集する技術に対する技術開発のインセンティブを高め実用化を図ることで、我が国の将来を支える最先端技術に必要不可欠なレアメタル等の安定供給確保を図り、もって我が国の先端的な機械産業の発展に寄与するとともに持続的な経済成長を促進させる。

具体的には、関連する捕集技術を調査し分析を行い、海水中レアメタル等の捕集に関する技術の実用可能性を検討した。また、調査結果の分析、実用可能性の評価には、捕集技術、吸着技術等の学識経験者、関連企業等の有識者からなる委員会を組織し検討を行い、報告書として取りまとめを行った。

平成 25 年 3 月

一般財団法人 エンジニアリング協会

委員名簿

海水中レアメタル等捕集可能性調査委員会

	氏名	会社名	所属役職
委員長	玉田 正男	独立行政法人日本原子力研究開発機構	高崎量子応用研究所 所長
委員	佐藤 康士	川崎重工業株式会社 プラント・環境カンパニー	エネルギープラント総括部 火力・原子力プラント部 原子力設計課 課長
委員	清水 隆夫	一般財団法人電力中央研究所	赤城試験センター 副所長
委員	近沢 孝弘	三菱マテリアル株式会社 エネルギー事業センター	那珂エネルギー開発研究所 主任研究員
委員	大井 健太	独立行政法人産業技術総合研究所	評価部 審議役
委員	池田 知司	株式会社環境総合テクノス	環境部 担当部長

平成 24 年度
海水中レアメタル等捕集可能性調査報告書
目 次

序	i
委員名簿	ii
第 1 章 調査の概要	1
1.1 調査目的	1
1.2 調査の方法	2
1.3 調査内容と調査結果	2
1.4 実施体制	5
第 2 章 レアメタル資源	6
2.1 金属資源の将来予測	6
2.2 レアメタルの国家備蓄	9
2.3 排他的経済水域における海洋資源の開発	11
2.4 海水中資源開発の必要性	12
2.5 海水中のレアメタル資源量	13
2.6 海水からの回収の可能性	14
2.7 リチウム	15
2.7.1 世界の資源量と産出国	15
2.7.2 日本のリチウム粗原料の輸入	16
2.8 ウラン	17
2.8.1 ウラン資源の予測	17
2.8.2 ウラン価格の推移	18
第 3 章 海水中レアメタルの捕集技術に関する ENAA 調査の概要	19
3.1 ENAA 調査の概要	19
3.2 陸上と海水中からの生産の違い	20
3.2.1 リチウムの精錬	20
3.2.2 ウランの精錬	21
3.3 ENAA が提案するハイブリッド吸着システム	23
3.4 沖ノ鳥島と西表島における希少金属捕集実験	32
3.4.1 実験概要	32
3.4.2 実験結果と考察	35
3.4.3 今後の研究に向けて	38

第4章 海水中レアメタル捕集技術の開発動向	40
4.1 海水ウラン捕集研究	40
4.1.1 日本原子力開発機構・電力中央研究所グループのアミドキシム基研究	40
4.1.2 電力中央研究所の天然由来成分を用いた捕集技術研究	45
4.2 海水リチウム捕集研究	47
4.2.1 産業技術総合研究所四国センターによる海水リチウム捕集研究	47
4.2.2 平成 15, 16 年度地域新生コンソーシアム研究開発事業によるリチウム研究	49
4.2.3 北九州市立大学、佐賀大学	52
4.2.4 富山県工業技術センターのリチウム研究	52
4.2.5 関西電力のリチウム他	53
4.2.6 海底泥火山の希少金属資源	53
4.3 海外における研究	54
4.3.1 米国	54
4.3.2 インド	55
4.3.3 中国	55
4.3.4 欧州	56
4.3.5 韓国	56
第5章 海水中レアメタルの捕集に関連した技術に関する聞き取り調査／現地調査	57
5.1 海水淡水化施設	58
5.1.1 沖縄県企業局の海水淡水化センター	58
5.1.2 沖縄北谷自然海塩株式会社	61
5.2 沖縄電力吉の浦 LNG 火力発電所	62
第6章 海水中レアメタルの捕集技術の実用へ向けて	63
6.1 海水中レアメタル等の捕集技術の評価	63
6.2 資源量の観点から	63
6.3 回収技術の観点から	63
6.4 実用化に向けて	65

第1章 調査概要

1.1 調査目的

省エネルギーやIT等の最先端技術の発展に伴い、レアメタルやレアアースの需要が増加している。しかし、陸域レアメタル資源の埋蔵は地域的に偏在しており、更に生産国は政情不安定な国を含めて海外の少数国に限定されていることから、供給構造は極めて脆弱となっている。そのため、レアメタルは価格面では世界経済の影響を受けて不安定な状況にあり、希少であるがゆえに今後とも需給の逼迫や価格の急激な上昇が懸念される資源である。なお、日本ではレアメタルを「地球上の存在量が稀であるか、技術的・経済的な理由で抽出困難な金属のうち、現在工業用需要があり、今後も需要があるものと、今後の技術革新に伴い新たな工業用需要が予測されるもの」と定義している。本報告書では海水中レアメタルを対象として調査を行うに当たり、31 鉱種のレアメタルに、資源の偏在性と確保政策の観点から重要とされるウランを加えた総称としてレアメタルと定義する。

一方、海水中には低濃度ではあるが多くのレアメタルが溶存している。このレアメタルは海洋中にほぼ均等に分布しており、これまでの研究でその資源量はほぼ明らかにされている。海水中レアメタルの回収に関しては、ウラン及びトリチウム回収研究が世界最先端の位置にある研究開発であって、国際的にも高い評価を得ており、日本は海水中レアメタル回収研究が最も進んでいる国とすることができる。

本調査はレアメタル資源の将来展望、国内外の海水中レアメタル回収技術の現状や取り組みを調査することにより、実用化に向けた課題と展望を取りまとめることを目的とする。

1.2 調査の方法

海水中に溶存するレアメタル捕集技術の実用可能性を評価するため、関連する吸着技術、脱着技術等について、文献、web 情報等の情報を収集するとともに、関連技術の研究者から、技術内容、実用可能性等についての聞き取り調査を行い、取りまとめる。

調査を効果的・効率的に行うため、関連する技術に関する文献調査及び web 情報等の情報収集については、「海水中レアメタルの捕集等に関する実用可能性基礎調査」として、委託により調査を行う。

更に、海水中レアメタル捕集研究の現状を明らかにして実用可能性を評価するため、エンジニアリング協会（以下「ENAA」という）に、捕集・吸着技術等の研究者、技術者、海洋開発関連の有識者、レアメタル等のユーザー等からなる「海水中レアメタル等の捕集技術に関する実用可能性調査研究委員会」を組織し、海水中レアメタル捕集技術に関する基礎調査、聞き取り調査、委員会の議論等を踏まえて、実用に向けた課題を整理し、検討結果を報告書として取りまとめる。

1.3 調査内容と調査結果

本調査は、海水中レアメタルの捕集技術の動向と実用化に向けた課題を調査するが、レアメタルの中でも、日本が研究開発で世界をリードする研究であるウランとリチウムの2種を中心として調査を行った。調査の構成と調査結果を以下に示す。

1) レアメタル資源

(独)物質・材料研究機構の金属の使用量と経済成長の関連の解析によると、2050年の段階で現有埋蔵量(経済的に採掘が成立する資源量)を使い切る金属が続出する。プラチナのほか、コバルト、モリブデンなどがそれに当たり、ニッケル、マンガン、リチウムなどは累積使用量が埋蔵量の2倍に達する。日本は世界第6位の排他的経済水域(EEZ)を持ち海底や海水中にはレアメタルやベースメタルが大量に賦存している。海水中には微量ではあるが多くのレアメタルが溶存している。全海水量では、ウランは45億トン(1年間に世界で消費される量の約6万倍)、リチウムは2,330億トン(同約1千万倍)、コバルトは1億トン(同約1,700倍)、モリブデンは150億トン(同約6,000倍)などである。日本近海に流れる黒潮は、秒速2m、幅100kmの大きな海流であるため、1年間に鉱石ウランの発見資源量に匹敵する520万トンのウラン、リチウムでは27,000万トンを日本に運ぶ。この資源量は、日本の年間ウラン需要量*(8,000トン)の約650倍、年間リチウム需要量(2万トン)の13,500倍であり、日本は海水ウランの捕集に適した位置に存在すると言える。

2) 海水中レアメタルの捕集技術に関するENAA調査の概要

ENAAでは平成14年度から同19年度まで「海洋石油等開発技術動向調査」において、大水深油ガス開発技術、海底鉱物資源開発技術、海水中有用金属開発技術等の技術調査を行った。この中で日本原子力研究開発機構・電力中央研究所グループのグラフト重合による繊維状アミドキシム型ウラン捕集材の研究開発、産業技術総合研究所四国センターのイオンふるいリチウム吸着剤の研究開発の詳細を調べ、両機関の協力を得て沖ノ鳥島と沖縄西表島において、産総研のリチウム捕集材と原研のウラン捕集材を同時に海中に設置し、捕集効率に対する設置期間、設置水深、捕集材の充填密度の影響を明らかにし、更に捕集材設置方法の検討を目的として実験を行った。また、複数のレアメタルを吸着できるハイブリッド型吸着システムの提案を行った。

3) 海水中レアメタル捕集技術の開発動向

海水中からレアメタルを回収するための捕集技術については、日本が捕集材の開発、海水からの捕集システム、実海域試験を進め、研究開発及びノウハウの蓄積により、世界をリードしてきた。近年、米国はウラン鉱山からの採掘に伴う環境汚染の回避やウラン資源の恒久的な供給の可能性を見出すため、日本の研究開発への追従を開始した。日本独自の国内資源の生産技術を持つことによって、長期の需要に対する供給を保証する施策を実行すべきであり、これまでの日本の研究開発で培われた成果を世界に先駆けて、日本が進めるべき重要な資源開発技術である。表1.3-1に示す国内研究の詳細と表1.3-2に示す海外の研究動向を述べた。

表 1.3-1 日本国内の海水レアメタル捕集技術研究

種 類	研究機関	特徴的な捕集材
ウラン	日本原子力研究開発機構・電力中央研究所グループ	グラフト重合による繊維状アミドキシム型捕集材
	電力中央研究所	天然由来成分（タンニン）
リチウム	産業技術総合研究所四国センター	鋳型法によるイオンふるい吸着剤
	北九州市立大学・佐賀大学グループ	酸化マンガン系リチウム吸着材
	富山県工業技術センター	吸着剤の微細化による吸着表面積の増大
	関西電力	原子力発電所の温排水利用

表 1.3-2 海外の海水レアメタル捕集技術研究

国	研究機関
米 国	大学：The University of Texas at Austin、Hunter College、University of Tennessee、The University of Alabama、University of Idaho、University of Maryland、University of North Carolina 国立研究機関：Oak Ridge National Laboratory、Lawrence Berkeley National Laboratory
インド	Bhabha Atomic Research Centre(Mumbai)
中 国	上海応用物理研究所(Shanghai Institute of Applied Physics)
欧 州	フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、イタリア、ポーランドスウェーデン、英国が研究を進めているが、ドイツが最も進んでいる。
韓 国	KIGAM (Korea Institute for Geoscience and Mineral resources)、POSCO

4) 海水中レアメタルの捕集に関連した技術に関する聞き取り調査／現地調査

本調査では、日本原子力研究開発機構・電力中央研究所グループが海水中ウラン回収の実海域実験を行ったことがある沖縄を対象に、那覇市の海水淡水化施設と沖縄電力吉の浦 LNG 火力発電所において海水中レアメタル研究の可能性について聞き取り調査を行った。

① 沖縄県企業局の海水淡水化センター

海水中レアメタルの捕集のために淡水化施設を利用する利点としては以下が挙げられる。

- ・ 海水を淡水化したあとに大量に海に放出される濃縮海水を安定的に利用できることから、捕集効率を高めることができる。
- ・ 回収施設を陸上に設置できることから、捕集材を海中に設置するよりも効率的で作業性が高く、経済性を追求できる。
- ・ 淡水化施設と海水からのレアメタル回収施設を隣接または同施設内に設置することで、

設置コストや運用コストを抑えることができる。

同施設では最大 100,000 m³/日の海水の取水が可能であり、その内 40,000 m³/日が淡水として生産され、レアメタル成分が約 1.7 倍に濃縮された海水 60,000 m³/日が放流される。その動力・配管含めたインフラが既に整備・運転されている点から、それを利用してレアメタル捕集に関するデータ取得の目的で基礎実験を実施する意義は大きい。このサイトで基礎実験を実施することで、これまでに実施例のない濃縮された海水による吸着データ、常に一定方向・一定流量で流れる海水からの吸着データを取得できる可能性がある。

② 沖縄北谷自然海塩株式会社

海水淡水化センターからの濃縮海水を原料として、蒸発濃縮処理により 1 ヶ月あたり 14 ton 程度の天然塩を製造しているプラントである。海水淡水化センターからの濃縮海水から更に数倍に濃縮され、その高濃縮海水が 65℃の高温となっている処理槽が在り、この条件においてレアメタル捕集に関する基礎実験が実施できれば、今後、熱水鉱床の検討等を行う上でも、吸着データの拡充の点で意義は大きい。

③ 沖縄電力吉の浦 LNG 火力発電所

火力発電所の温排水を利用する利点としては以下が挙げられる。

- ・ 海水流動に動力を必要としないためエネルギーコストを低く抑えることができる。
- ・ 冷却水に用いられた海水の排水量が非常に大きく、大規模実証システムに使用する流量を確保できる。
- ・ 発電所からの排水時には海水温度が数度上昇しているため、捕集材の吸着効率が良い。

同発電所の排水量は 24 m³/sec と大きく、また排水口も比較的陸地に近いことから、レアメタル捕集場所としては期待が持てる。特に、排水として+7℃程度の上昇も有利となる。

5) 海水中レアメタルの捕集技術の実用へ向けて

海外では、ウランの捕集について、米国、インド、中国、欧州、韓国で研究開発が進められ、近年は米国、中国、韓国で積極的に研究開発が進められている。米国では、エネルギー省 (DOE) が予算を計上して主導し、7 大学、2 国立研究機関で研究開発が開始されている。また、中国の上海応用物理研究所においても、アミドキシム型のウラン捕集材の開発が開始された。韓国では国土交通海洋省が中心となってリチウム回収の研究が進められている。

日本では、海水からのレアメタル捕集に関する技術開発において、捕集材の吸着能力の向上や海域での捕集システムの改良が重ね続けられた結果、国際的にも最先端の捕集材や捕集システムに関する技術を日本が有している。したがって、海水からのレアメタル捕集の実用化は、これまでの日本の研究開発で培われた成果を活用し、世界に先駆けて日本が進めるべき重要な資源開発である。

平成 24 年 7 月に発表された日本再生戦略の中の重点施策として「グリーン・イノベーションによる海洋の戦略的開発・利用」が謳われている。海水中レアメタルの捕集は、資源量、地理的位置、研究成果において、日本は優位にあり、海水ウランやリチウムなどの海水中レアメタルの捕集技術の開発は、日本が進めるべき重要な戦略技術である。資源エネルギーの安全保障の観点からも、海水中レアメタルの開発には国の資金が投入されることが望ましい。また、

これまで得られた研究開発や海域試験に係わるノウハウの継承などに向けて、研究開発を進める研究者の連携を強化することも継続して行かなければならない。

1.4 実施体制

「海水中レアメタル等の捕集技術に関する実用可能性調査研究委員会」（委員長 独立行政法人日本原子力研究開発機構 高崎量子応用研究所長 玉田正男）を組織し、当研究委員会の指導助言を踏まえつつ、調査・検討・評価を行い、報告書にとりまとめた。当研究委員会の委員は、外部有識者とし、大学・独立行政法人等、民間団体・企業等とする。事業の統括責任者（1名）は ENAA 事務局長とし、運営責任者（1名）には海洋開発室長をあてる。また、委員会の運営、委託調査業務の指導監督等の業務担当者（2名）には、海洋開発室所属の研究員をあてる。図 1.4-1 に実施体制を示す。

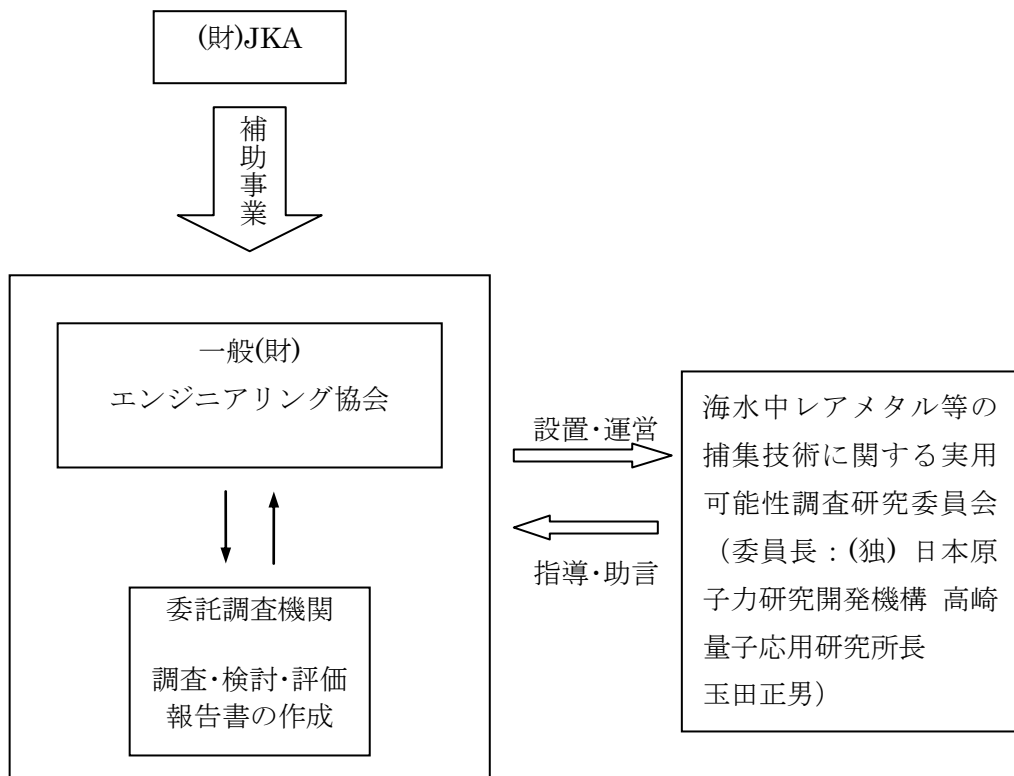


図 1.4-1 実施体制

第2章 レアメタル資源

レアメタルとは「地球上の存在量が稀であるか、技術的・経済的な理由で抽出困難な金属のうち、安定供給の確保が政策的に重要」（経済産業省）で、産業に利用されるケースが多い希少な非鉄金属を指し、構造材料へ添加して特性を向上させ、また電子材料・磁性材料などの機能性材料などに使用されている。レアメタルのうち、スカンジウム、イットリウム、ランタンからルテチウムまでの17元素のグループはレアアースと呼ばれる。

本章では、代表的なレアメタル（レアアースを含む）とベールメタルの将来予測を示し、続いて海中からの捕集研究で日本が世界をリードするリチウムとウランの需給動向を示す。

2.1 金属資源の将来予測

(独)物質・材料研究機構は、これまでの金属の使用量と経済成長の関連の解析をもとに、日、英、独、仏、伊、米およびBRICs諸国の2005年から2050年までの経済成長モデルに当てはめて、各種金属資源の将来予測を行った¹。それによると、2050年の段階で現有埋蔵量（経済的に採掘が成立する資源量）を使い切る金属が続出する。プラチナのほか、コバルト、モリブデンなどがそれに当たり、ニッケル、マンガン、リチウムなどは累積使用量が埋蔵量の2倍に達する。銅、鉛、亜鉛、金、銀、スズ、ニッケル、アンチモンなどは埋蔵量ベースと呼ばれる技術的には採掘可能だが経済的理由などで採掘対象とされていない資源の量までも超過してしまう。

図2.1-1に現有埋蔵量に対する2050年までの累積需要量の予測結果、表2.1-1に金属名を示す。

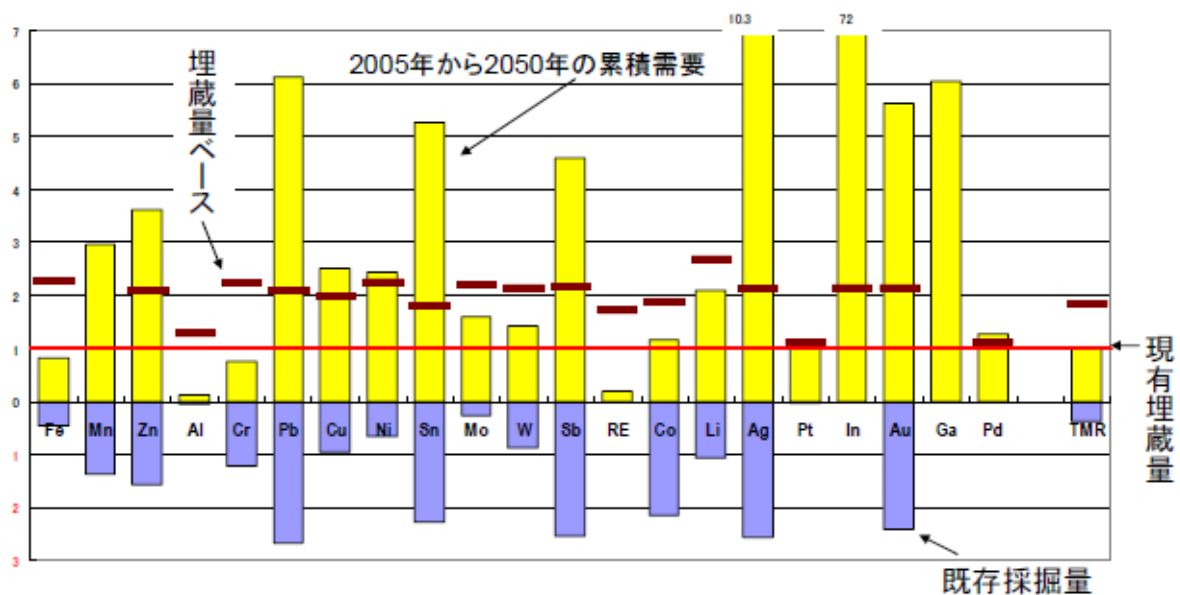


図 2.1-1 現有埋蔵量に対する 2050 年までの累積需要量の予測

¹ 「2050年までに世界的な資源制約の壁」、2007年2月15日、(独)物質・材料研究機構

以下、(独)物質・材料研究機構の報告書での図2.1-1の説明の抜粋を掲載する。

2050年での状態をわかりやすく見るために、現有埋蔵量を1としてそれぞれの金属の累積使用量を表わすと図2.1-1のようになる。縦軸で1となっている赤のラインが、それぞれの金属の現有埋蔵量であり、黄色の棒が2005年から2050年までの累積需要量である。Mnの場合は黄色の棒が3の位置に達しており、2050年までの累積需要量は現有埋蔵量の3倍に達することを表している。

また、茶色のバーは、埋蔵量を一とした時の埋蔵量ベースの量である。亜鉛の場合、2.2の位置に茶色のバーがあり、黄色の棒は3.6まで伸びているが、これは、亜鉛の埋蔵量ベースは亜鉛の埋蔵量の2.2倍の量存在しているが、亜鉛の2050年までの累積需要は埋蔵量ベースの量も超えて、埋蔵量の3.6倍に達する、ことを意味している。埋蔵量ベースとの関係で言えば、白金やパラジウムの白金族元素は、一見他の金属資源ほどの深刻さはないようにも見えるが、埋蔵量と埋蔵量ベースの差が小さいため、累積消費量が現有埋蔵量に接近してくると深刻な供給不安に陥るケースも想定されうる。

そして、同報告書は金属資源の将来予測として次のように結論づけている。

- ① 独立行政法人物質・材料研究機構は、これまでの金属の使用量と経済成長の関連の解析をもとに、成長過程にありこれから大幅な金属の使用が予想されるBRICs諸国を中心に2050年までの累積金属使用量の予測を行なった。その結果、2050年までに多くの種類の金属が現有の埋蔵量ではまかないきれなくなり、中には埋蔵量の数倍の使用量が予想される金属もあることがわかった。
- ② 2050年までの累積で現有埋蔵量の数倍の使用量が予想される金属は、銅、鉛、亜鉛、金、銀、錫、ニッケル、マンガン、アンチモン、リチウム、インジウム、ガリウムである。このうち、銅、鉛、亜鉛、錫、金は経済成長がある段階に達すると一人当たりGDPの増加に対して減少する傾向が現れているが、それでもBRICs諸国の使用量の増大は大きく現有埋蔵量を突破してしまう。
- ③ 銅、鉛、亜鉛、金、銀、錫、ニッケル、アンチモン、インジウムは埋蔵量ベースと呼ばれる技術的には採掘可能だが経済的理由などで採掘対象とされていない資源の量までも超過してしまう。
- ④ 特に、金、銀、鉛、錫の累積使用量は2020年の時点で現有埋蔵量を超えることが予想される。
- ⑤ 資源が比較的豊富とみなされている鉄や白金についても、2050年までには、白金は現有埋蔵量を超過し、鉄も現有埋蔵量に匹敵する量の消費が予想される。また、モリブデン、タングステン、コバルト、パラジウムも現有埋蔵量を超過した累積消費が予想される。

表2. 1-1 2050年までの需給状況と金属名

2050年までの需給状況	金属名
<p>2050年に現有埋蔵量をほぼ使い切るもの (埋蔵量: 正確には埋蔵鉱量(reserves)。探索などで知られた鉱物資源量で、現時点で経済的に採掘が成り立つものの量。探索や経済状況により増加させることができる。)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄 Fe ・モリブデン Mo ・タングステン W ・コバルト Co ・白金 Pt ・パラジウム Pd
<p>2050年までに現有埋蔵量の2倍以上の使用量となるもの</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ニッケル Ni ・マンガン Mn ・リチウム Li ・インジウム In ・ガリウム Ga
<p>2050年までに埋蔵量ベースをも超えるもの (埋蔵量ベース: 米国鉱山局の統計で埋蔵量とともに使用されている鉱物資源量の概念。埋蔵量が経済的に採掘可能量に対し、埋蔵量ベースは、現時点では経済的に採掘困難なものや、経済限界下のものまでも含んだ資源量。埋蔵量ベースを増加させるには資源技術の大幅な転換や従来にも増して徹底的な探索しかなく、現有の技術で埋蔵量ベースを超える需要に応えるのは容易ではない。)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・銅 Cu ・鉛 Pb ・亜鉛 Zn ・金 Au ・銀 Ag ・スズ Sn

2.2 レアメタルの国家備蓄

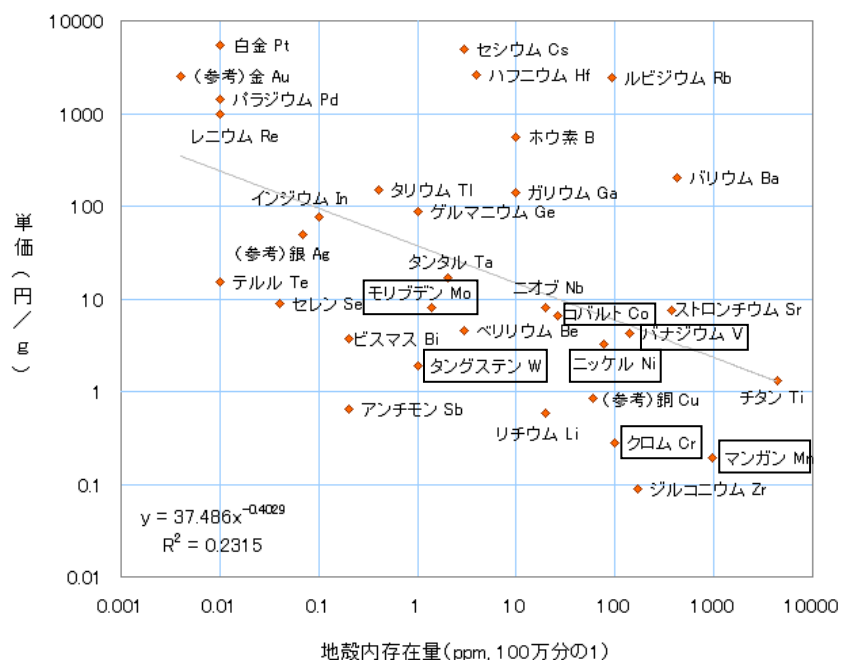
前項で示したように、レアメタルとベースメタルの多くの鉱種において 2050 年時点で需要が供給を上回ることが予想される。

現状において、さらには上述のように将来予測において資源確保が問題となっているレアメタルについて、日本ではその数種について国家備蓄が行われている。レアメタルは合金や化合物の形で利用され、強度や耐熱性、耐摩耗性、耐蝕性などが高く、また特殊な電気特性や触媒作用を有していることから超電導材料や形状記憶合金、水素吸蔵合金として、更に IT 機器、環境保全機器、メガエレクトロニクス、原子力、航空、宇宙、そして海洋などの先端産業分野で広く利用されている。また、特殊鋼等の原材料として鉄鋼業、機械工業には必須の資源である。図 2.2-1 にレアメタルの地殻内存在量と価格を示す。地殻内存在量が多いものほど単価が低くなる傾向に有るものの、バラツキは大きい。存在量が多いものの需要が多い鉱種、将来的に需給のギャップが生じると考えられる鉱種については、必ずしも上述の傾向が見られない。

日本はレアメタルの大消費国である。しかし、そのほとんどを海外からの輸入に頼っている。レアメタル資源の埋蔵は地域的に偏在しており、更に生産国は政情不安定な国を含めて海外の少数国に限定されていることから、供給構造は極めて脆弱となっている。このため資源保有国の事情によっては、日本への資源の供給が大きく左右されてしまいかねないのが現状である。このように日本は、レアメタル資源の確保において常に不安定さを背負っているためレアメタル 7 鉱種について国家備蓄を行っている。

国家備蓄 7 鉱種、備蓄対象とはされていないが要注視対象として指定されているもの、日本で海水中からの回収の研究が進んでいるウランとリチウムの利用分野を表 2.2-1 に示す。備蓄対象 7 鉱種は、供給構造脆弱 16 鉱種の中から「資源量豊富」、「副産物回収」、「代替可能」、「供給不安国への依存度小」の分類の基に選定されたものである。

レアメタルの存在量と価格



(注) 存在量は地殻内存在量。希土類は省略。x軸、y軸ともに対数目盛。価格は化合物の場合もある。
(資料) 小谷太郎「宇宙で一番美しい周期表入門」2007年

図 2.2-1 レアメタルの地殻内存在量と価格 (2007 年) (国家備蓄 7 鉱種を線で囲んだ)

表 2.2-1 国家備蓄 7 鉱種、要注視 7 鉱種およびウランとリチウムの利用分野

	鋼 種	利用分野
備蓄対象 7 種	ニッケル	油ガス井用特殊鋼パイプ、アンテナ、蓄電池、発電装置、重油・灯油・ガソリン・軽油の低硫黄化 (SO _x 低減)
	クロム	油ガス井用特殊鋼パイプ、蓄電池、発電装置、排出ガスの浄化 (自動車排気ガス・化学装置排気ガス)
	モリブデン	油ガス井用特殊鋼パイプ、重油・灯油・ガソリン・軽油の低硫黄化 (SO _x 低減)
	タングステン	ダイオキシンの分解、触媒、油ガス掘削用ビット
	コバルト	スピーカー・マイクロフォン、バッテリー、蓄電池、発電装置、重油・灯油・ガソリン・軽油の低硫黄化 (SO _x 低減)
	マンガン	バッテリー、蓄電池
	バナジウム	ダイオキシンの分解
要注視 7 鉱種	プラチナ	宝飾品、電極、るつぼ、白金耳、度量衡原器、排気ガスの浄化触媒、点火プラグや排気センサー、燃料電池
	レアアース	17 元素からなるグループ (希土類元素)、水素吸蔵合金、二次電池原料、光学ガラス、強力な希土類磁石、蛍光体、研磨材などの材料、光ディスク、石油精製触媒、自動車用排気ガス浄化触媒
	インジウム	液晶やプラズマ、フラットパネルディスプレイ
	ニオブ	自動車用鋼板、高屈折率レンズ、光学薄膜、光触媒、超伝導磁石、コンデンサ
	タンタル	パソコンや携帯電話、人工骨や歯のインプラント、宝飾品や高級時計
	ストロンチウム	カラーテレビブラウン管、高温超伝導体の材料、花火や発煙筒
	ガリウム	マイクロ波集積回路、発光ダイオード、半導体レーザー、合金、燃料電池
他	ウラン	原子力発電
	リチウム	リチウムイオン電池

2.3 排他的経済水域における海洋資源の開発

日本は世界第6位の排他的経済水域（EEZ）を持ち、海洋にはレアメタルやベースメタルが大量に賦存している。従って、長期的には海洋資源回収技術を確立することにより、この広大な EEZ を活用して、海外の不安定要因に影響されない安定した資源供給源を国内に持つ戦略を立てることを考えるべきである。ここで、EEZ および大陸棚の定義を確認する。国連海洋法では海図に記載された低潮線（干潮の時の海岸線）や直線基線等を領海の基線として、内水は湾内や内海など基線の内側、領海は基線から 12 海里までである。

- ・ 排他的経済水域は基線から 200 海里までの海域としている。
- ・ 大陸棚については、原則として基線から 200 海里までであるが、条約が自国について発効してから 10 年以内に国連大陸棚限界委員会に科学的技術的資料を提出して大陸縁辺部であることを証明すれば最大 350 海里まで延長できるとしている。大陸棚においては探査および天然資源開発について排他的な主権的権利を行使できる。
- ・ ここでの天然資源とは、海底および海底下の鉱物および定着性生物をいい、石油やマンガング塊だけでなくカニや貝なども大陸棚の資源になる。
- ・ 大陸棚は、堆積岩の厚さが大陸斜面脚部からの距離の 1%以上ある海域または大陸斜面脚部から 60 海里先まで延長でき、限界は基線から 350 海里または 2,500m 等深線から 100 海里までである。
- ・ 国連海洋法条約によると、沿岸国の優先的権利が EEZ では海上、海中、海底、および海底の下の資源であるのに対し、大陸棚では海底および海底の下の資源である。従って、海水中のレアメタルは日本の優先的な権利であり、日本は海中に膨大な資源を有すると考えることができる。

図 2.3-1 に国連海洋法条約による排他的経済水域と大陸棚の概念図²を示す。

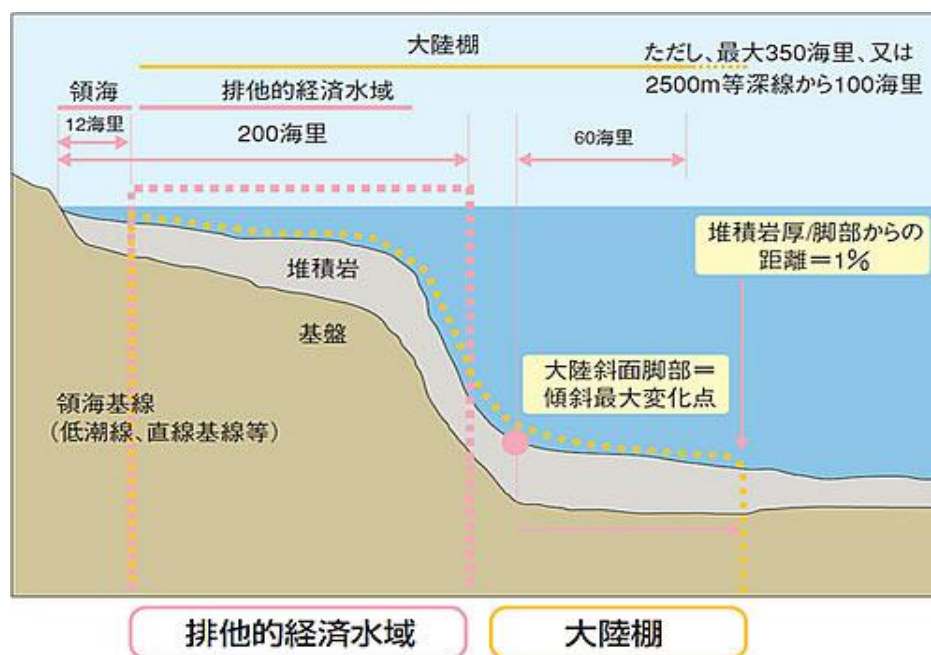


図 2.3-1 国連海洋法条約による排他的経済水域と大陸棚の概念図

² 海上保安庁ホームページ <http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/books/report2006/tokushu/p042.html>

2.4 海水中資源開発の必要性

日本は六千八百あまりの島からなる四方を海に囲まれた島国であり海洋国家と自称しているにもかかわらず、海洋資源開発、海洋調査、海域利用技術などの海洋産業は米国および欧州の海洋先進国に比べ後れを取っている。しかし、日本は世界第6位の排他的経済水域（EEZ）を持ち海底や海水中にはレアメタルやベースメタルが大量に賦存している。また、レアメタル、主にリチウムとウランについては、海水中からの回収において世界をリードする技術を有している。従来は陸上資源の価格に比べて海水から資源を回収した場合、価格が陸上の数倍になると言われていた。しかし、リーマンショック以前には希少金属価格の急騰により、海水からの回収資源の経済性は陸上資源に大きく近づきつつあると言われた。リーマンショック以後、価格は下がったものの、長期的に見た場合価格の再上昇を考慮する必要がある。日本は海水中資源回収の技術開発を進め、長期的には海洋からの資源回収技術を確立することによる、海外の不安定要因に影響されない安定した資源供給源を国内に持つ戦略を立てるべきである。

図 2.4-1 に希少金属資源をめぐる日本国内と外的要因を示す。

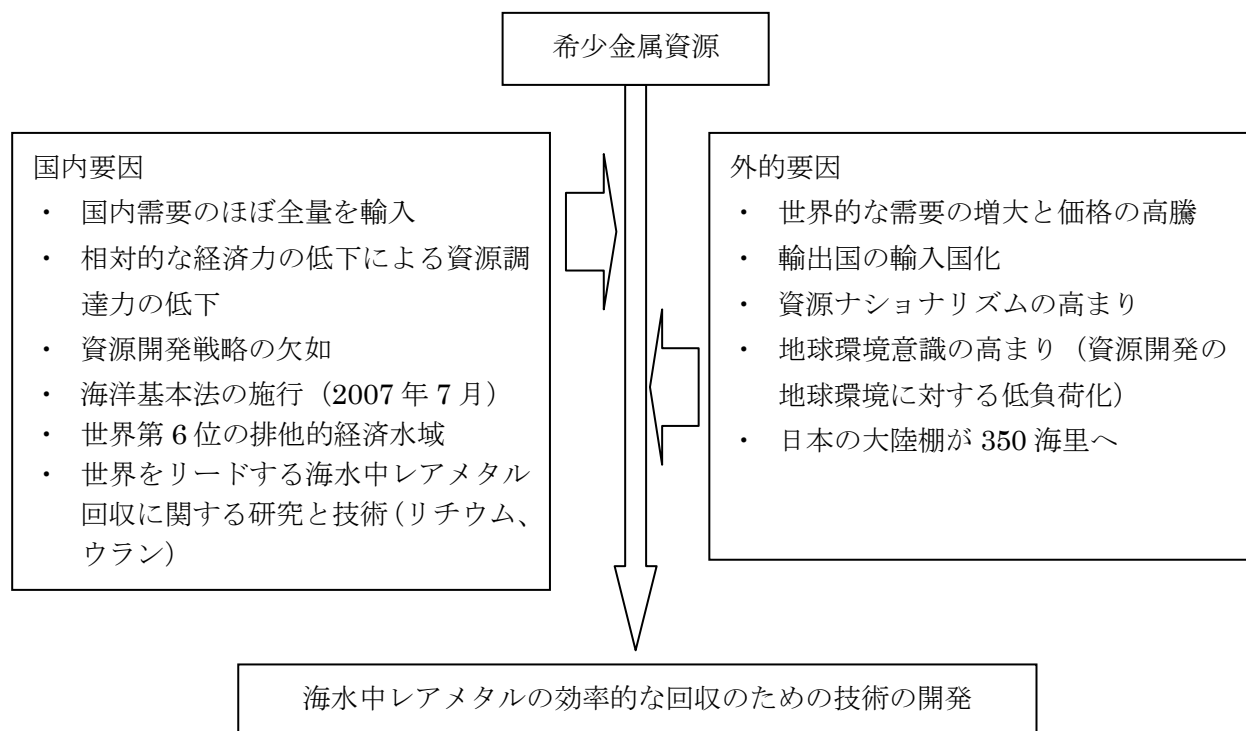


図 2.4-1 日本における海水中資源開発の必要性

2.5 海水中のレアメタル資源量

海水には全元素の約7割の種類が溶存しており、ウランやバナジウムなどの有用希少金属の宝庫となっている。ウランについては、溶存濃度に海水全量を掛け合わせると約45億トンとなり、世界の原子力発電所で一年間に消費されているウランの60,000倍になる。日本近海では黒潮により運ばれるウラン量は、年間520万トンと試算されており、陸ウランの経済的に採掘が可能とされる総埋蔵量に匹敵する。

ウランやバナジウムの他にもコバルト、チタン、マンガン、リチウムなど多くの有用金属が海水中に溶存している。表2.5-1に海水中に含まれ代表的な有用希少金属と海水中賦存量³、表2.5-2に黒潮が運ぶ資源量⁴を示す。

表 2.5-1 海水中に含まれ代表的な有用希少金属と海水中賦存量

希少金属資源名	海水中濃度 (mg/トン)	推定溶存総量 (億トン)	日本の海外依存量 (%)
コバルト (Co)	0.1	1	100
イットリウム (Y)	0.3	3	100
チタン (Ti)	1	15	100
マンガン (Mn)	2	30	90
バナジウム (V)	2	30	100
ウラン (U)	3	45	100
モリブデン (Mo)	10	150	100
リチウム (Li)	170	2,330	100
ホウ素 (B)	4,600	63,020	100
ストロンチウム (Sr)	8,000	109,600	100

表 2.5-2 黒潮が運ぶ資源量

希少金属資源名	年間輸送料	
	総量 (万トン)	黒潮断面当たり (トン/m ²)
コバルト (Co)	16	0.005
チタン (Ti)	170	0.059
バナジウム (V)	340	0.119
ウラン (U)	520	0.182
モリブデン (Mo)	1,580	0.553
リチウム (Li)	27,000	9.450
黒潮平均流速：1.75m/s、黒潮流速：5000万 m ³ /s		

³ 理科年表より計算

⁴ 日本原子力研究開発機構ホームページ

2.6 海水からの回収の可能性

海水からのレアメタルの回収に関しては、多くの研究が行われており、その評価も様々である。以下、「リチウム資源の供給と自動車用需要の動向」⁵でのリチウムの回収に関する評価を紹介する。

図 2.6-1 に海水に含まれる主なレアメタルの濃度とそれらの粗原料輸入価格の関係を示す。一般に、レアメタルの市場価格が比較的安くても、海水中のレアメタル濃度が高い方が海水から回収するプロセスの経済性が成立すると見られており、金属リチウムはその限界領域付近にあるとされている。長期的視点になるが、エネルギーをそれ程投入しないで海水中のリチウム化合物を高濃度できる分離できるプロセスが開発されるならば、海水からリチウム資源を工業レベルで獲得することも考えられる。

佐賀大学海洋エネルギー研究センターでは、小規模ではあるが実用化を目指した施設例としては世界初の実験プラントの稼働を始めており、約1カ月間で海水14万リットルから塩化リチウム約30gを得ることに成功している。しかし、吸着された金属リチウムを酸性溶液で脱着する際の調製・操作の条件設定が煩雑であることから、現在の回収方法では大量処理が困難である。今後は生産コストを下げ、期間短縮化を達成していくことが求められる。また、溶媒抽出により金属リチウムの分離・濃縮・精製を行うプロセスも知られているが、高価な溶剤を用いて抽出操作を多数回繰り返す必要があり、エネルギー消費も大きいため、このリチウム回収プロセスは実用化に至る可能性は低いと考えられている。

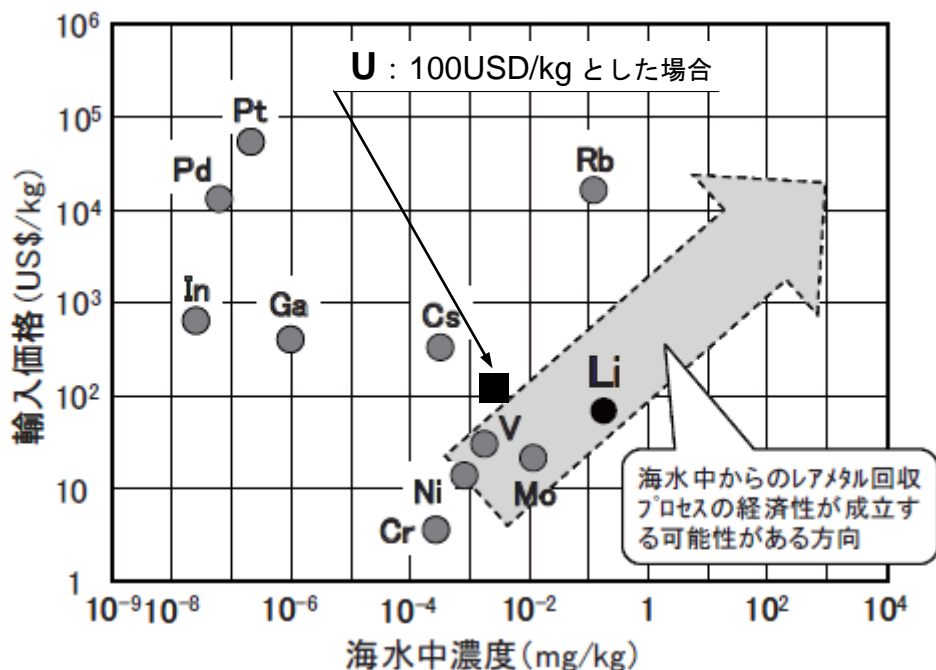


図 2.6-1 海水に含まれる主なレアメタルの濃度とそれらの粗原料輸入価格の関係
(図中のウランUは本報告書で記入)

⁵ 河本 洋、玉城わか(2010):「リチウム資源の供給と自動車用需要の動向」、科学技術動向、2010年12月号

2.7 リチウム

2.7.1 世界の資源量と産出国

金属リチウムは31 鉱種のレアメタルの一鉱種とされているが、レアメタルのなかでは比較的豊富な資源である。このため、供給面・価格面などの視点でリスクの高い金属として認識されていなかった。しかし、リチウム資源は、限られた地域で需要のほとんどが生産されるという偏在性によるリスクと、独占的供給による需給のアンバランスや価格変動が懸念されている。リチウム資源の埋蔵量は十分にあったとしても、資源の偏在、供給会社の寡占化、指標価格がないことなどに起因する供給不安は今後も続くと思われる。すでに金属リチウムを多く使用する二次電池搭載車の生産が活発化しつつあり、急速な需要増による供給不足傾向が懸念されており、その不安が価格見通しを一層不透明にしているとも言える。世界中で二次電池搭載車が増加すれば、リチウム粗原料の生産量の漸増ではもう賄いきれなくなり、資源争奪戦が激化する可能性がある。図 2.7-1 に世界の金属リチウム粗原料の埋蔵量、表 2.7-1 に世界の金属リチウム粗原料の生産量の推移を示す。埋蔵量ではチリが世界全体の75%強となっており、世界全体の生産量は増加している。

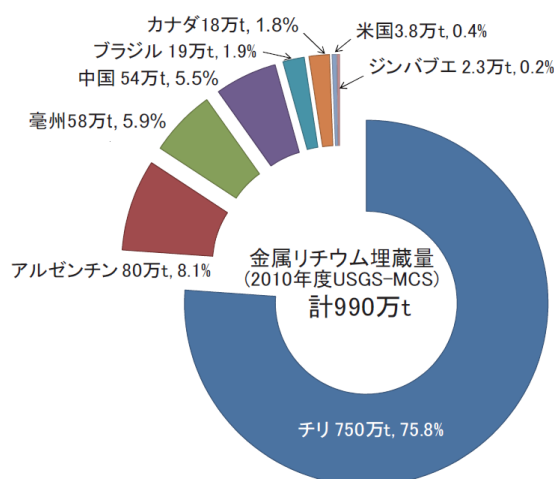


図 2.7-1 世界の金属リチウム粗原料の埋蔵量⁵

表 2.7-1 世界の金属リチウム粗原料の生産量の推移⁵

産出国	年度別金属リチウム粗原料の生産量 (純分t)			
	2005年	2006年	2007年	2008年
チリ	8,270	8,200	11,100	12,000 (44%)
豪州	3,770	5,500	6,910	6,900 (25%)
中国	2,820	2,820	3,010	3,500 (13%)
アルゼンチン	1,980	2,900	3,000	3,200 (12%)
カナダ	707	707	707	710 (3%)
ブラジル	242	242	180	180 (1%)
ロシア	2,200	2,200		(0%)
ジンバブエ	260	600	300	300 (1%)
その他	351	331	593	610 (2%)
合計	20,600	23,500	25,800	27,400 (100%)

2.7.2 日本のリチウム粗原料の輸入

日本の輸入量は2008年および2009年とも世界一であるが、その輸入価格は世界の平均輸入価格より常に高いと言われている。図2.7-2に水酸化リチウムの貿易価格の推移を示す。2005年以降、リチウム資源価格が全体的に上昇している。表2.7-2に日本のリチウム粗原料輸入量の推移を示す。日本は、主たる粗原料である炭酸リチウムを主にチリからの輸入に頼っており、一部を水酸化リチウムまたは金属リチウムの形で米国などから輸入している。

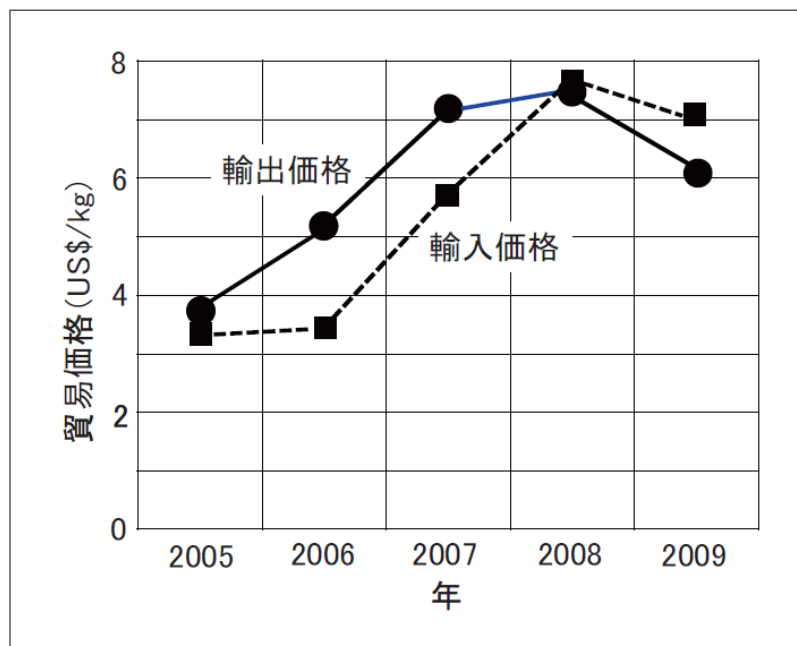


図 2.7-2 貿易統計から見た水酸化リチウムの国際的流通量⁵

表 2.7-2 日本のリチウム粗原料輸入量の推移⁵

リチウム粗原料	財務省貿易統計・年度別輸入量(t)				主な輸入相手国 (2008年)	主な用途
	2005年	2006年	2007年	2008年		
炭酸リチウム	10,001	14,521	13,553	13,194	チリ 83% 米国 9% 中国 5%	二次電池電極・電解質材、耐熱ガラス添加材
水酸化リチウム	1,503	2,138	2,747	2,408	米国 92% 中国 5% チリ 4%	二次電池電極・電解質材（高純度リチウム原料）、グリニッチ添加材
金属リチウム	162	153	142	134	米国 54% 中国 32% ロシア 11%	一次電池電極材、合成ゴム製造触媒、金属還元剤

2.8 ウラン

2.8.1 ウラン資源の予測

2010年11月の日本原子力研究開発機構によるウラン資源予測⁶では、Uranium 2009の長期需給予測について以下のように述べられている。

- ・ 2008年のウラン消費率(59,065tU/y)であれば、発見資源量だけで115年間供給可能。
- ・ 未発見資源を含めれば300年を越えて供給可能。
- ・ 莫大な非在来型資源も含めれば現在の軽水炉技術でもさらに長期間供給可能。
- ・ ただし十分なウラン鉱山開発投資が必要。
- ・ 地表においてウラン(クラーク数0.0004%)より多く存在するトリウム(クラーク数0.0012%)の利用を含めればさらに長期間供給可能。
- ・ 先進的な核燃料サイクル技術を導入すれば数千年まで供給可能。
- ・ 2030年頃までのウラン需給予測は、今後ウラン鉱山開発への投資が継続されなければ供給不足に陥る可能性がある。
- ・ 長期的なウラン資源の見通しは、未探査の国、地域が多く、開発投資を行えば資源発見の可能性は高い。しかし、ウラン資源の少ない国にとって、ウラン資源枯渇リスクへの備えを行うことは必要。

ウラン資源耐用年数の推移を図2.8-1⁶に示す。ウラン鉱山の開発活動の活発化によりウランの消費量以上にウラン資源が増加し、ウラン資源耐用年数は増加しているものの、上記予測の中では、ウラン資源の少ない国のウラン資源枯渇リスクに対する備えの必要性が示されている。

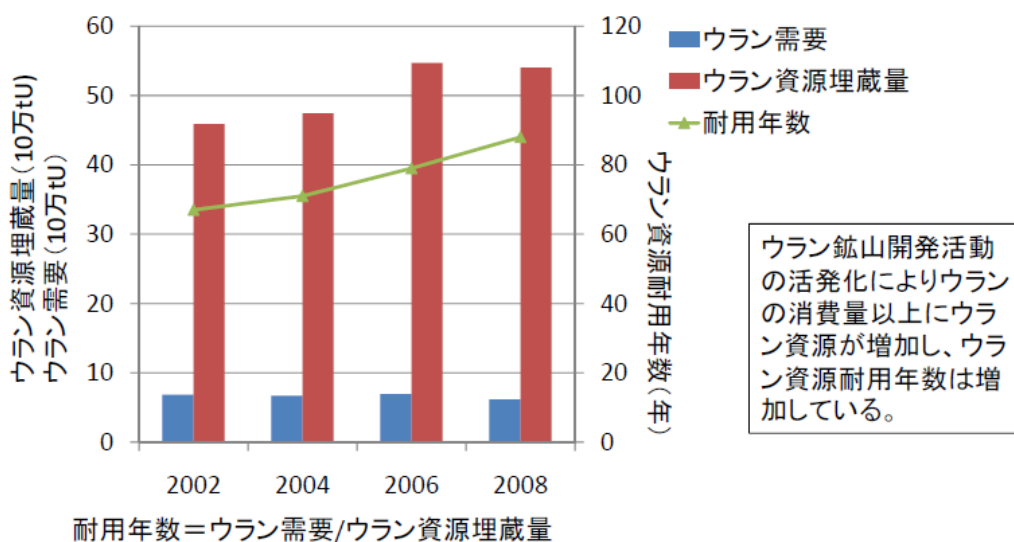
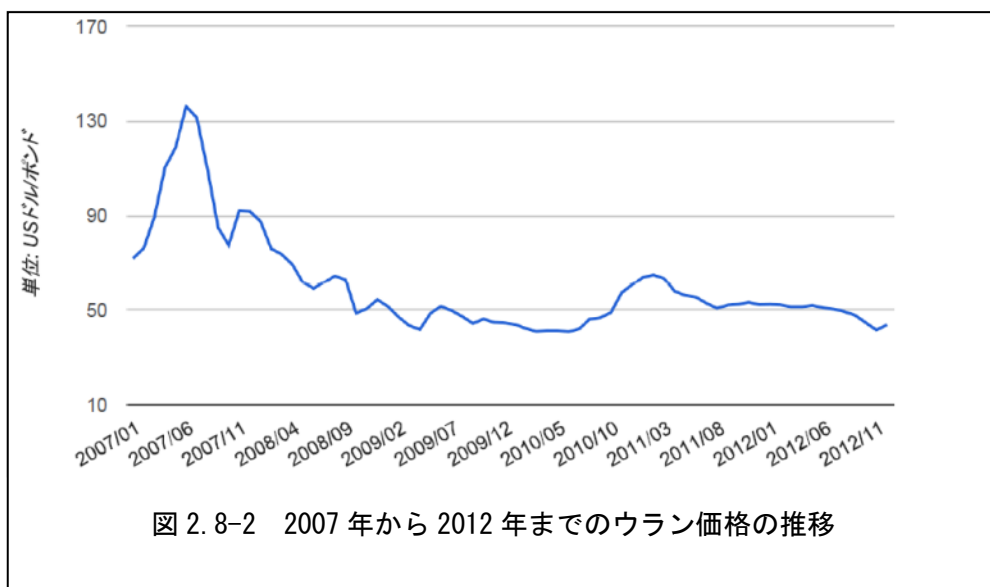


図 2.8-1 ウラン資源耐用年数の推移

⁶ 須藤 収(2010)：「ウラン資源に関する最近の動向」、研究会資料 S10-5、2010年11月5日。

2.8.2 ウラン価格の推移

2007年から2012年までのウラン価格の推移⁷を図2.8-2に示す。ウランの価格は1974年の第一次石油ショック以前はウラン(U₃O₈)ポンド当たり6米ドル前後であったが、石油ショック以後急激に上昇し一時45米ドルとなった。しかし1979年3月の米国スリーマイル事故を境に下落し、2000年11月には10米ドルを下回ることもあった。その後、インドや中国などの新興経済大国での原子力発電計画により価格は再度上昇し、2007年6月には最高値の136米ドルに達したが、2007年後半に急落し現在は50米ドル前後となっている。しかし、2011年時点でアジアでは新たに原子力発電所を中国で26基、インドで6基、韓国で6基建設中のほか、インドネシアやベトナムでもそれぞれ4基の建設が計画中であることから、再度の価格の上昇が予測されている。



⁷ ウラン価格の推移 http://ecodb.net/pcp/imf_usd_puran.html

第3章 海水中レアメタルの捕集技術に関する ENAA 調査の概要

3.1 ENAA 調査の概要

ENAA では平成 14 年度から同 19 年度まで「海洋石油等開発技術動向調査」において、大水深油ガス開発技術、海底鉱物資源開発技術、海水中有用金属開発技術等の技術調査を行った。その中から海水中有用金属開発技術について、過年度調査の概要を図 3.1-1 に示す。

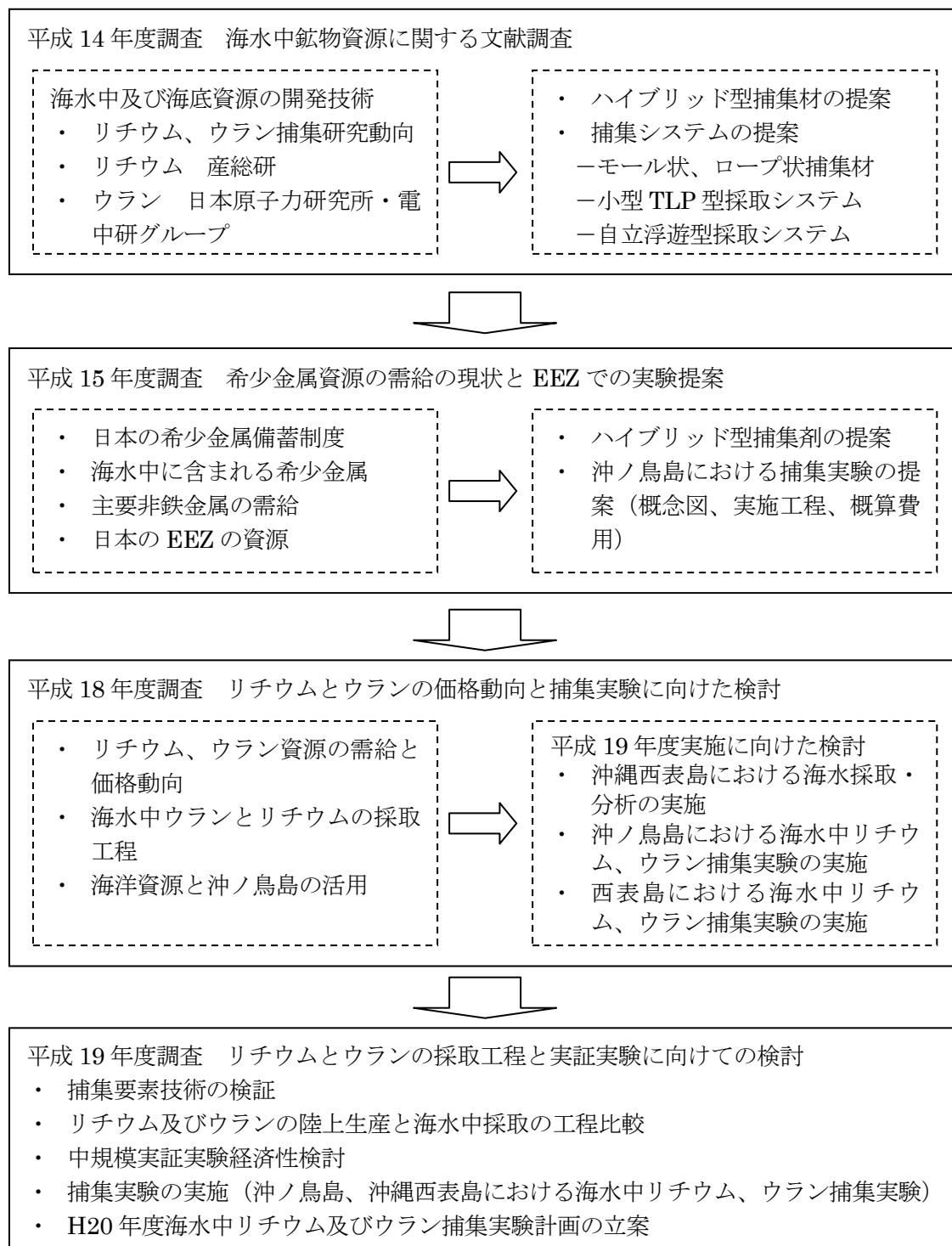


図 3.1-1 海水中レアメタルに関する ENAA の調査

3.2 陸上と海水中からの生産の違い

3.2.1 リチウムの精錬

① 鉱石からの回収法

リチウム金属やその化合物は、現在主としてスポジューメン (Li_2O 含有量 4~7%)、アンブリゴナイト (同 7~9%)、ペタライト (同 3.5~4.5%)、レピドライト (同 3~4%) などのリチウム含有鉱石から硫酸法で抽出される。硫酸法でスポジューメンを硫酸と反応させて硫酸リチウムとして抽出する。この抽出液にソーダ灰を加え炭酸リチウムとして回収する。

② かん水からの回収法

かん水中のリチウムは通常塩化リチウムの形で含有されている。このかん水を太陽熱を利用して蒸発池で濃縮する。蒸発の途中で食塩 (NaCl)、シビルナイト (NaCl と KCl) が晶出する。次いで、石灰を添加するとマグネシウムが水酸化物として沈殿し、最終的にソーダ灰を添加してリチウムを炭酸リチウムとして回収する。日本の主要輸入元であるチリのアタカマ湖 (Atacama) の湖水はリチウム平均含有量が 1,300ppm (0.13%) である。

③ 海水からの回収法

海水中リチウムの吸着後、吸着剤から酸によりリチウムを脱着する。酸としては一般に塩酸が使用される。脱着されたリチウム溶液にアルカリ (水酸化ナトリウム) を加え中和するとともに不純物を析出除去する。この溶液は濃縮装置で濃縮され、その後、炭酸塩を加え結晶化沈殿させ、炭酸リチウムの形で採取する。図 3.2-1 に陸上、かん水、及び海水中からの炭酸リチウム生産までの工程比較を示す。⁸

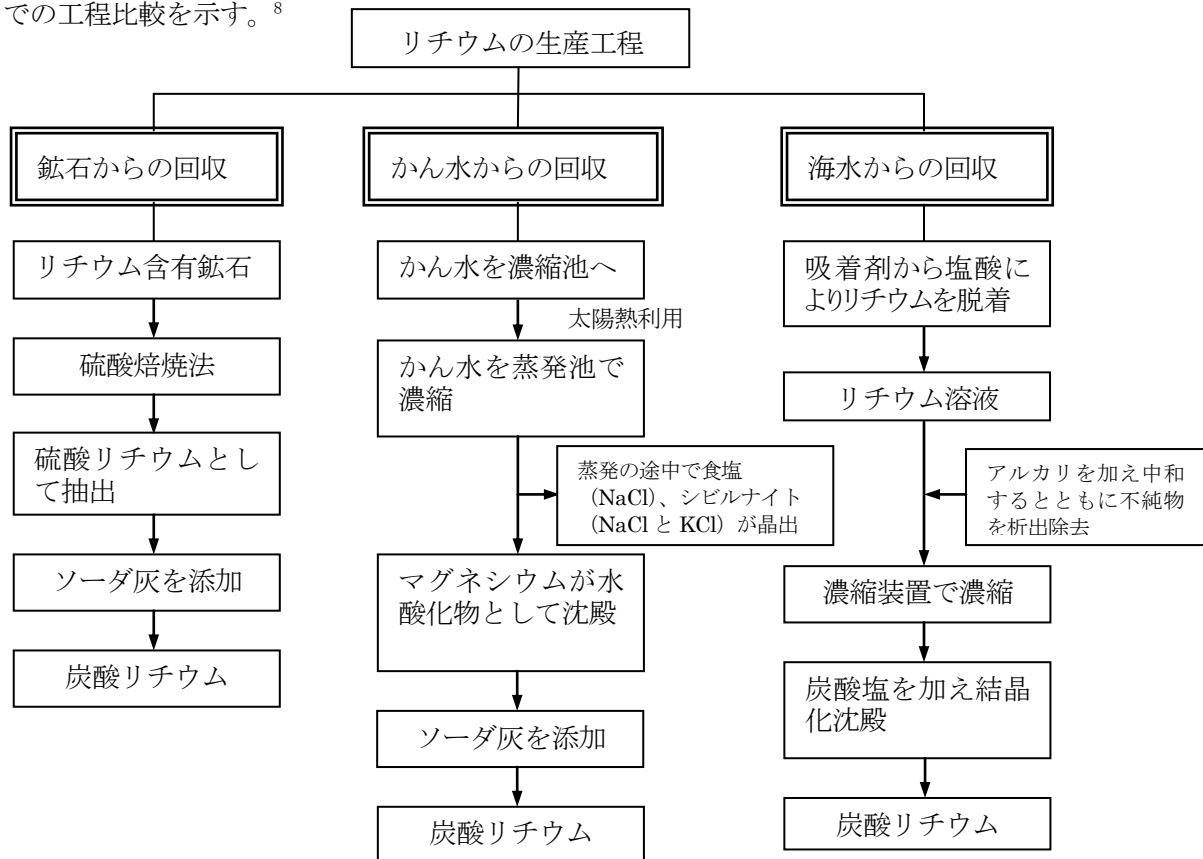


図 3.2-1 陸上、かん水、及び海水中からの炭酸リチウム生産までの工程比較

⁸ 「海洋エネルギーを利用した浮体式海水中リチウム採取システムの開発」、海上安全技術研究所報告、第 4 巻第 5 号、平成 16 年度

3.2.2 ウランの精錬

陸上ウランは鉱山からのウラン鉱石の採掘に始まり、鉱石を精錬所まで運搬する。ウラン鉱石中には通常0.1~0.2%位しかウランが含まれていない。このため、まず採掘されたウラン鉱石を細かく粉砕し、硫酸か炭酸アルカリ溶液に浸けてウランを溶かし出し、貴液（高濃度の金属を含む浸出液）と呼ばれるウラン溶液にする。このウラン溶液からイオン交換法、または溶媒抽出法によってウランの純度を高めた後、アンモニア、苛性ソーダまたは酸化マグネシウムを加えてウランを沈殿させ、それをろ過、乾燥して、イエローケーキと呼ばれる黄色のウラン化合物の粉末とする。ウラン鉱石から不純物を取り除きイエローケーキ（ウラン精鉱）を作るまでの工程を製錬（粗製錬）と言う。この工程により、 U_3O_8 換算で70~90%程度までウランの純度が高まる。イエローケーキは、重ウラン酸アンモニウムという化合物で、採取したウラン鉱石からいろいろな不純物を取り除いていった結果である。

イエローケーキ（ウラン精鉱）から六フッ化ウラン（ UF_6 ）を製造する工程を転換という。六フッ化ウランを作るのは、後のウラン濃縮の工程でガス状の化合物が必要なためである。その工程には幾つか方法があるが、基本的には、溶媒抽出法などによりイエローケーキに含まれる不純物を取り除き、これを還元してウランの純度の高いウランの酸化物（ UO_2 ）にした後、フッ化水素ガス（ HF ）と反応させて四フッ化ウラン（ UF_4 ）とし、更にフッ素ガスを加えて六フッ化ウラン（ UF_6 ）という気体にして濃縮し（核分裂性のウラン 235 が占める比率を高めること）する。そして最終的に二酸化ウランの焼結体にしたものが核燃料ペレットである。図 3.2-2 にイエローケーキと六フッ化ウランを示す。

これに対し海水からの吸着によるウラン回収工程は、海水中への捕集材の設置に始まる。設置期間経過後、捕集材を海水中から回収する。作業船により回収したモール状捕集材は、陸上の溶離・精製施設で、まず、0.01M塩酸溶液でアルカリおよびアルカリ土類金属を溶離する。その後、0.1M硝酸溶液によってウランが硝酸溶液中に回収される。ウランを含んだ硝酸溶液は、アンモニア沈殿法により硝酸溶液中から分離され、粗重ウラン酸アンモニウム(粗ADU)として回収される。回収された粗ADU は、再び硝酸溶液にて溶解され、使用済燃料の再処理で用いられるピューレックス法のように中性塩としてトリブチルリン酸(TBP)によりウランを抽出し、精製工程で重ウラン酸アンモニウム(ADU)として単離する。⁹

図3.2-3に陸上及び海水中からのイエローケーキ生産までの工程の比較を示す。¹⁰

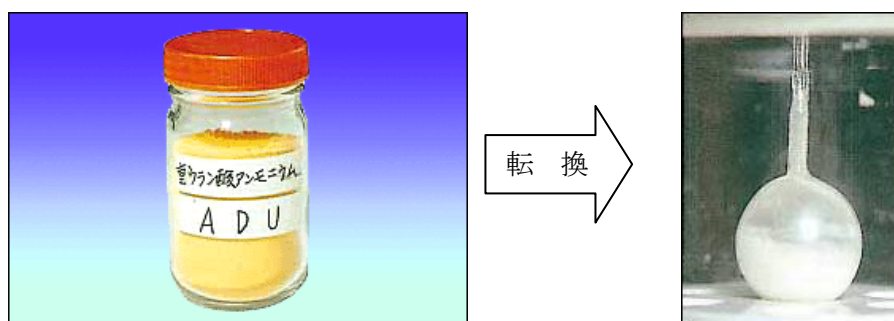


図 3.2-2 イエローケーキ（図左）と六フッ化ウラン（図右）

⁹ 資源エネルギー庁ホームページ

¹⁰ (独)日本原子力研究開発機構資料

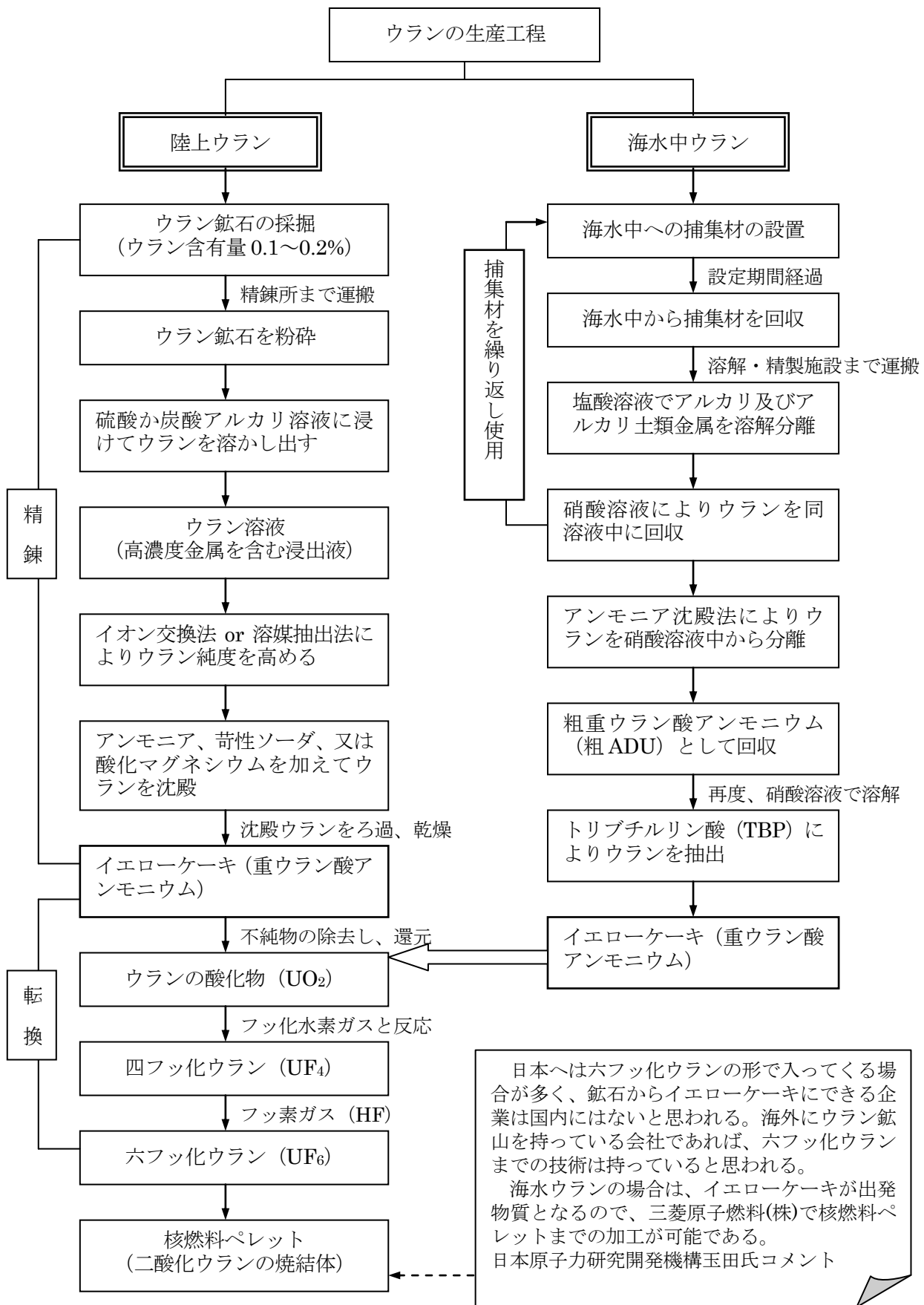


図 3.2-3 陸上及び海水中からのイエローケーキ生産までの工程比較

3.3 ENAA が提案するハイブリッド吸着システム

1) ハイブリッド吸着システム開発の利点

海水中有用資源の回収においては、吸着装置、吸着処理技術のコストが最も大きな割合を占める。したがって、その部分を共通化し、できるだけ多くの有価元素を回収する方が経済性の観点からメリットがある。個々の元素については、今後とも吸着性能の高い材料の開発が望まれるが、更に吸着剤をハイブリッド化し、多種類の有用金属を同時に吸着させることができれば吸着コストを軽減することが可能となる。

2) ハイブリッド吸着剤

ハイブリッド化については以下の2つの方法が考えられる。

- ・吸着剤そのものをハイブリッド化する
- ・係留施設に単一吸着剤を数種類組み合わせる

そのためには、以下の技術開発が進められなければならない。

- ・粉末吸着剤と膜状吸着剤を効率よくハイブリッド化する技術
- ・海水との効率的な接触技術
- ・層状吸着剤の係留技術
- ・安価で効率的な吸着装置の設計
- ・吸着剤の海から回収と脱着技術
- ・濃縮液からの有価元素回収技術
- ・ハイブリッド吸着剤の効率的な海水との接触日数の設定（通常、ウランは120日程度、リチウムは20日前後であるが、ハイブリッド剤としての適切な接触日数に関する研究が必要である。）

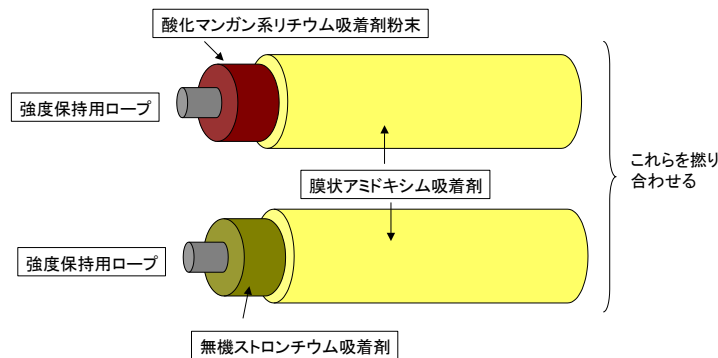
3) ハイブリッド吸着素材の概略形状

ハイブリッド吸着素材の形状としては、**図 3.3-1** に示すような繊維状吸着剤を撚り合わせてロープ状、膜状或いはモール状などの吸着剤を生成する構造と**図 3.3-2** に示すような粒状吸着剤をメッシュ状の袋に入れ束ねる構造の2つが考えられる。

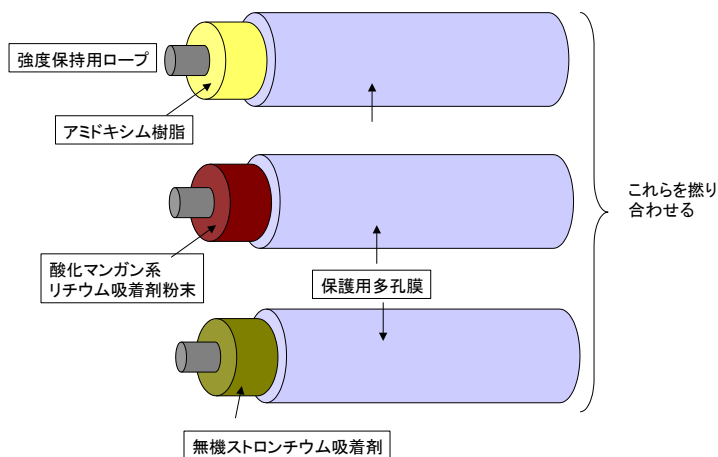
最終的に構造様式を選定するためには、吸着装置、係留システム、吸着剤の揚集、脱着方法、濃縮及び有価元素の回収装置など全体システムの採算性や耐久性などに関する総合的な検討を行う必要がある。

ロープ状の吸着剤においては、ポリエチレンなどの強度保持用ロープ芯を設けて吸着剤に荷重が直接負荷しない構造とする。膜状アミドキシム吸着剤は海水が浸透しやすい構造であり、従って案1に示すようにロープの芯側にリチウム或いはストロンチウム吸着剤を配列することも可能である。ただし、吸着剤トータルとしての吸着性能を保持するためには、表層の膜を短冊配列する様式についても検討する必要がある。

粒状吸着剤は1個当たりの吸着性能は高いが、ネット内に多数格納した場合には海水との接触面積が減少して吸着性能が低下する。従って、トータルとしての吸着性能を向上できる効率的な格納量及び吸着剤ネットの配列方法などが検討課題である。



(a) 2種類の捕集材を撚り合わせる方法



(b) 3種類の捕集材を撚り合わせる方法

図 3.3-1 繊維状吸着剤を撚り合わせる構造

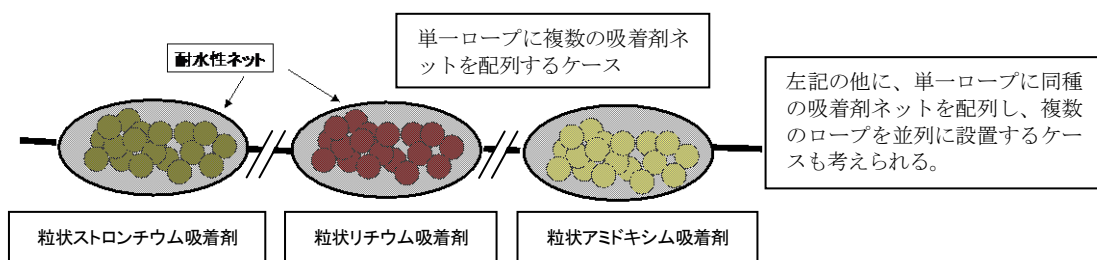


図 3.3-2 粒状吸着剤をメッシュ状の袋に入れ束ねる構造

4) ハイブリッド型吸着システム概念図

大規模な海水中レアメタル吸着システムを構築するためには、環境問題、漁業補償や海上輸送に関連する既存産業や自治体との協力体制の確立、地域産業促進への貢献、さらには法制度などに関する幅広い検討が必要となるが、これらについては将来の課題とし、ここではハイブリッド吸着システムの洋上展開に関する概念的な検討を行う。

海水と吸着剤とを接触させる方法としては、(独)産業技術総合研究所四国センターが表 3.3-1 に提案するような、i) 採取船を使ってポンプにより海水を流動させる方法、ii) 発電所の温排海水を利用する方法、iii) 自然エネルギーを利用する方法がある。

ここでは経済性を追求するために、自然の流れを利用する吸着システムの可能性について検討する。ウラン回収システムの課題においても述べられているとおり、捕集材を係留するシステムの施設費がウラン回収コストの約 80%¹¹⁾に達することに注目して、係留コスト削減を主たる目的として検討する。

なお、システムの設置海域については、吸着システムの機能を発揮できる最低の自然流速、すなわち最低 0.2~0.3 kt 程度の流れがある海域が選定されることを前提とする。

また、吸着システムの構造様式は使用する吸着剤の様式によって異なるが、ここでは、以下に示す 3 ケースに分けて検討を行う。

- ・ モール状或いはロープ状吸着成形剤の場合 (図 3.3-3、図 3.3-4、図 3.3-5)
- ・ 粒状吸着剤の場合 (図 3.3-6)
- ・ 膜状吸着成形剤の場合 (図 3.3-7)

表 3.3-1 産総研四国グループが提案するリチウム採取システム

採取システム	採取方法の課題
採取船	採取船 (バージ) による沿岸沖合での採取システムである。このシステムでは採取船に取り付けられた排水ポンプによって海水を汲み上げる。ポンプ代や燃料費、維持費が過大となる。
発電所の温排海水利用	水頭差が小さく、低負荷型採取装置の開発必要
自然エネルギー利用による採取システム	自然の流れ、圧力、洋上風力などを利用するシステム開発が必要

¹¹⁾ 玉田正男他(2006):「モール状捕集システムによる海水ウラン捕集のコスト試算」、日本原子力学会和文論文誌、Vol. 5, No. 4, pp358-363.

① モール状又はロープ状吸着成形剤を使用する直列型自立浮遊採取システム案

i) 特徴

モール状吸着剤を用いた採取システムについてはすでに原研および電中研が海水ウランの捕集システムとして海上実験を実施しており、従来の不織布状補修剤に比べて約2倍の捕集性能を達成している。本方式は、細長吸着生成剤を連結し、一本の細長浮遊体として海中に自立浮遊させる様式であり、係留システムのコスト削減を目指している。自立浮遊するモール状吸着剤のイメージ図を以下に示す。

ii) 構造

浮きと強度材としての機能を持つ芯材、その周囲に巻き付けられた海水とほぼ同じ比重を持つモール状繊維吸着剤或いはロープ状吸着剤、細長吸着システムの流失を防ぐための重り（シンカー）、並びに必要なに応じて予備の浮力体などによって構成される。

吸着成形剤は、バージによって複数のリールに揚収し、陸上の施設に輸送して脱着する。

iii) 経済性

吸着剤を保持するための浮体構造や係留システムが不要となり、吸着コスト削減が期待される。

iv) 検討課題

環境問題、長大な専有面積と既存産業との関係、重りをつり上げるためのロープ材としての強度、吸着成形剤と重りとの結合部分の疲労強度、構成要素の耐久性、ROVなどの支援による安価な揚収並びに再設置方法の開発などが主な検討課題である。

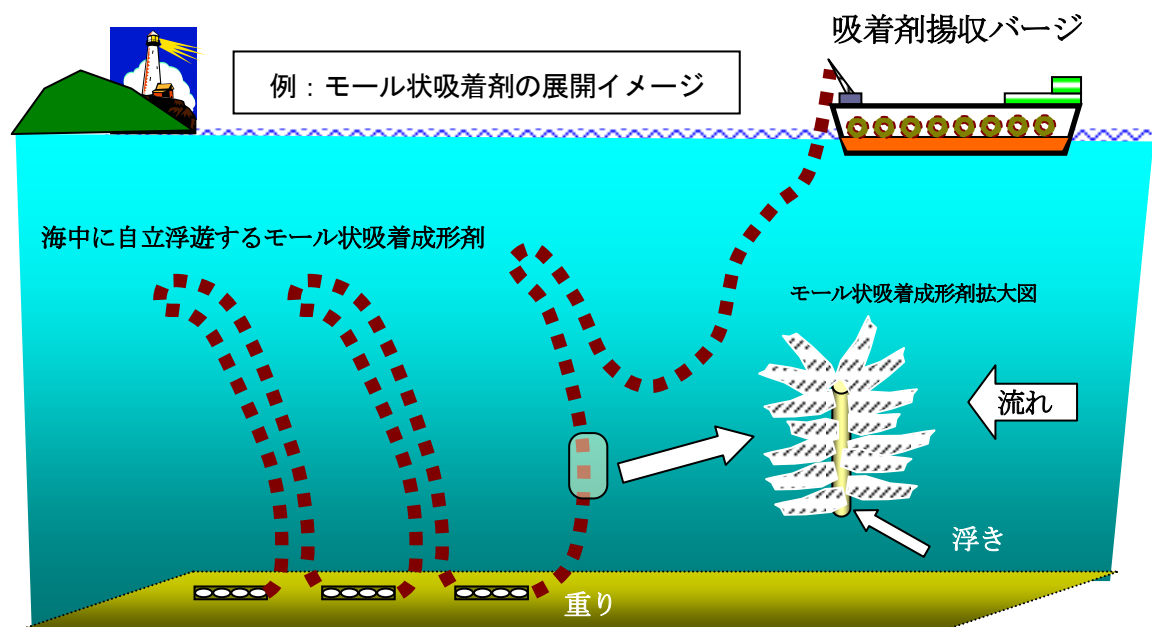


図 3.3-3 モール状又はロープ状吸着成形剤を使用する直列型自立浮遊採取システム案

② モール状又はロープ状吸着成形剤を使用する並列型自立浮遊採取システム案

i) 特徴

本方式は、適当な長さを持つ複数の自立浮遊吸着成形剤をセンターブイに結合した様式であり、洋上専有面積を設定された範囲内に集約することができる。

ii) 構造

吸着成形剤の構成要素は、直列型自立浮遊採取システムと同じであるが、各成形剤の長さは短い。各吸着成形剤の一端はセンターブイに結合され、他端はそれぞれの独立した端末ブイに結合される。揚収、輸送、脱着処理方法は直列型自立浮遊採取システムと同じである。

iii) 経済性

複数の吸着成形剤を保持するセンターブイ及び端末ブイが必要となり、係留システムのコストは直列型自立浮遊採取システムよりも割高になるが、専有面積の範囲が狭められ、漁業補償や既存産業との関係が緩和される可能性がある。

iv) 検討課題

環境問題、既存産業との関係を考慮した適切な占有面積の設定、隣接ラインとの接触問題、重りをつり上げるためのロープ材としての強度、吸着成形剤と重りとの結合部分の疲労強度、構成要素の耐久性、ROV などの支援による安価な揚収並びに再設置方法の開発などが主な検討課題である。

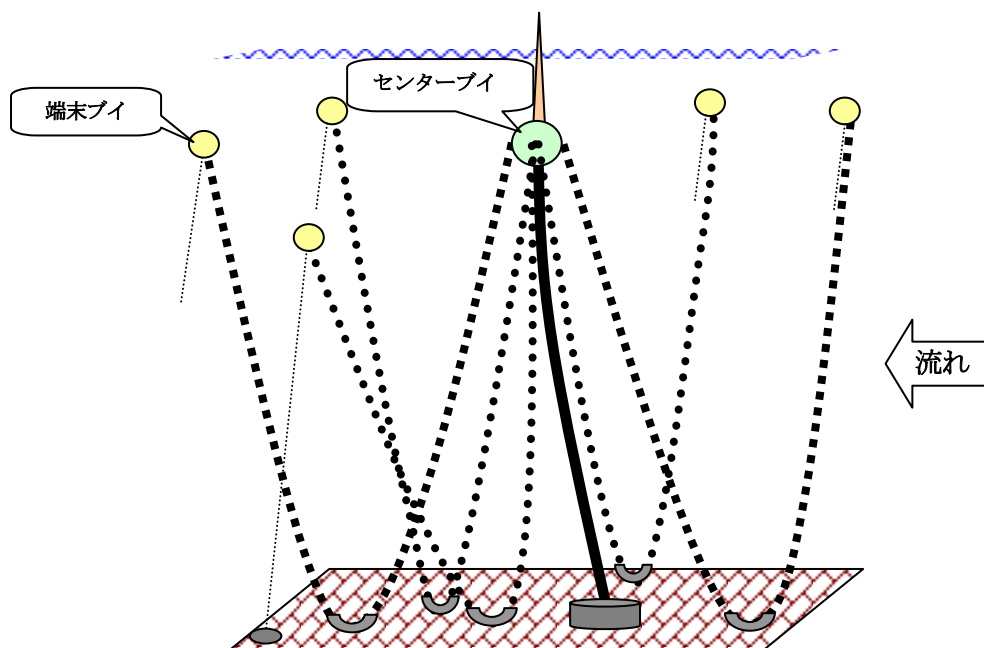


図 3.3-4 モール状又はロープ状吸着成形剤を使用する並列型自立浮遊採取システム案

③ モール状あるいはロープ状吸着成形剤を使用する小型 TLP 型採取システム案

i) 特徴

本方式は、最低 0.2~0.3 kt 程度の流れがあり、比較的深い海域に設置された安価な小型 TLP (Tension Leg Platform、垂直緊張係留プラットフォーム) に細長吸着成形剤を並列に配列する様式であり、洋上専有面積を限定された範囲内に集約することができる。

ii) 構造

小型 TLP については、様々なコラム本数やポンツーン配列を持つ浮体形状が実現されているが、ここでは据付工事や曳航時の安定性を重視して、4 本のコラムを持つ形状案を以下に示す。TLP は浮体、テンドン (垂直緊張係留ライン、ジャケット付きワイヤーロープ或いはポリエステルなど) 及び重力式アンカーによって構成され、テンドンに並行して複数の細長吸着成形剤を配列する。揚収、輸送、脱着処理方法は前述した様式と同じである。

iii) 経済性

複数の吸着成形剤を直立に並列設置する TLP のコストは前述した採取システムよりもかなり割高になるが、専有面積が限定され、漁業補償や既存産業との問題を緩和できる。また、浮体の動揺が少なく安定した操業が可能となる。

iv) 検討課題

適切な流れのある海域の設定、環境問題、既存産業との関係、吸着成形剤のロープ材としての強度、吸着成形剤の上下結合部分の疲労強度、構成要素の耐久性、ROV などの支援による安価な揚収並びに再設置方法の開発などが主な検討課題である。

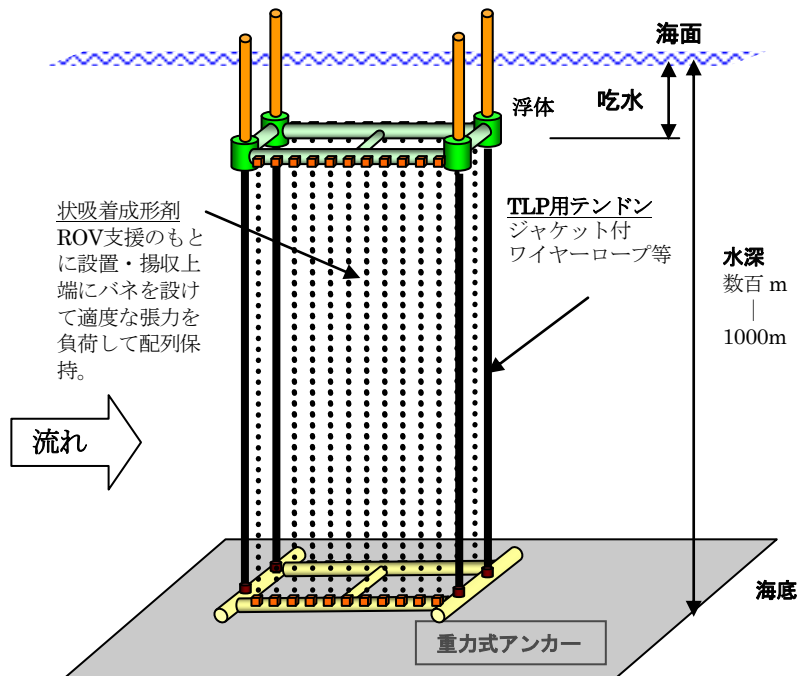


図 3.3-5 モール状あるいはロープ状吸着成形剤を使用する小型 TLP 型採取システム案

④ ネット収納した粒状吸着成形剤を使用する採取システム案

i) 特徴

粒状吸着剤を格納する耐水性ネットをロープに短冊配列した細長吸着ラインの採取システムについては、図 3.3-3 から図 3.3-5 に示した各様式に類似するシステムが採用される。

ii) 構造

全体システム構成は、図 3.3-3 から図 3.3-5 に類似したシステムになると予想されるが、ネットのサイズ及び格納される粒状吸着剤の重量に応じて、ロープの仕様及び浮力の配列などを設定する必要がある。

iii) 経済性

採取システムのコストは、以下に示すイメージ図のうちいずれの様式を採用するかによって異なる。個々の粒状吸着剤の吸着性能は高いが、ネット内に多数の粒状を格納した場合には粒状間への海水の流れが抑制されるために吸着性能が低下する。従って、トータルとしての吸着性能と採取システムコストとの相関データの構築が必要である。

iv) 検討課題

適切な流れのある海域の設定、環境問題、既存産業との関係、粒状吸着剤の格納方法、適切な浮力配列、ロープの強度、ロープ上下端結合部分の疲労強度、構成要素の耐久性、ROV などの支援による安価な揚収並びに再設置方法の開発などが主な検討課題である。

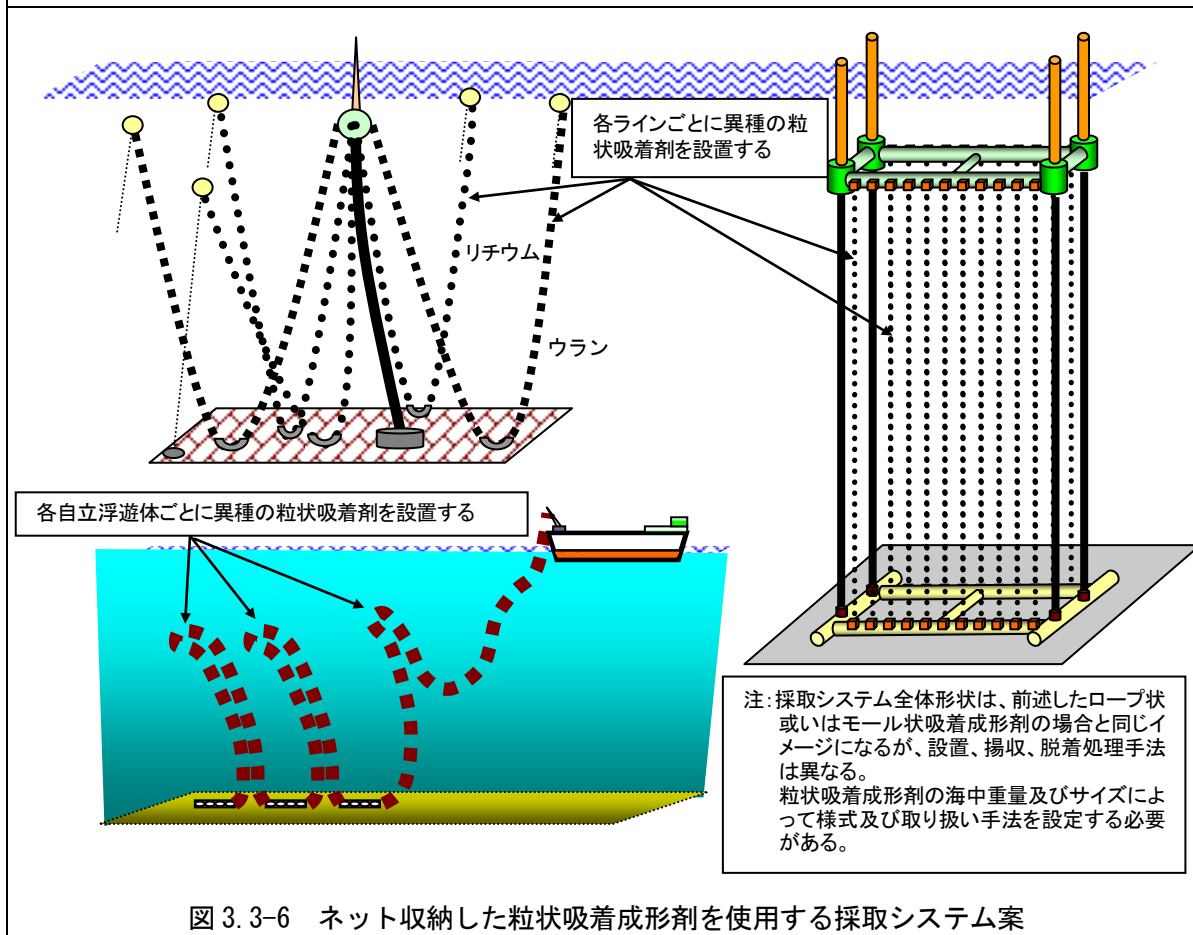


図 3.3-6 ネット収納した粒状吸着成形剤を使用する採取システム案

⑤ 膜状吸着成形剤を使用する採取システム案

i) 特徴

膜状吸着剤をカセット内に格納して洋上に設置する方式については、原研および電中研において海上実証実験が行われており、係留施設費が約 80%に達するという結果が報告されている。膜状吸着成形剤を流れのある海域に係留するコストを大幅に削減することは困難であるが、以下に示す案は、大量の連続膜状吸着剤の一体係留、回収専用船による容易な揚収作業、1回の回収工程による吸着量の増大などの特徴を持つ回収システムである。

ii) 構造

膜状吸着成形剤を水平又は縦に配列する吸着剤格納浮体と係留システム、並びに複数の吸着剤格納浮体を収納するドライック型船艙、静穏海域への輸送、大量の膜状吸着剤の連続ハンドリング機能、海水中有用資源の連続脱着・回収機能などを持つ専用船などによって構成される。

iii) 経済性

本案は採取システムの初期投資は大きく、実現性は有用資源の将来動向に依存するが、大量の有用資源の供給が可能である。

iv) 検討課題

適切な流れのある海域の設定、環境問題、既存産業との関係、膜状吸着成形剤の効率的な配列、大量膜状吸着剤の連続ハンドリング技術などが主な検討課題である。

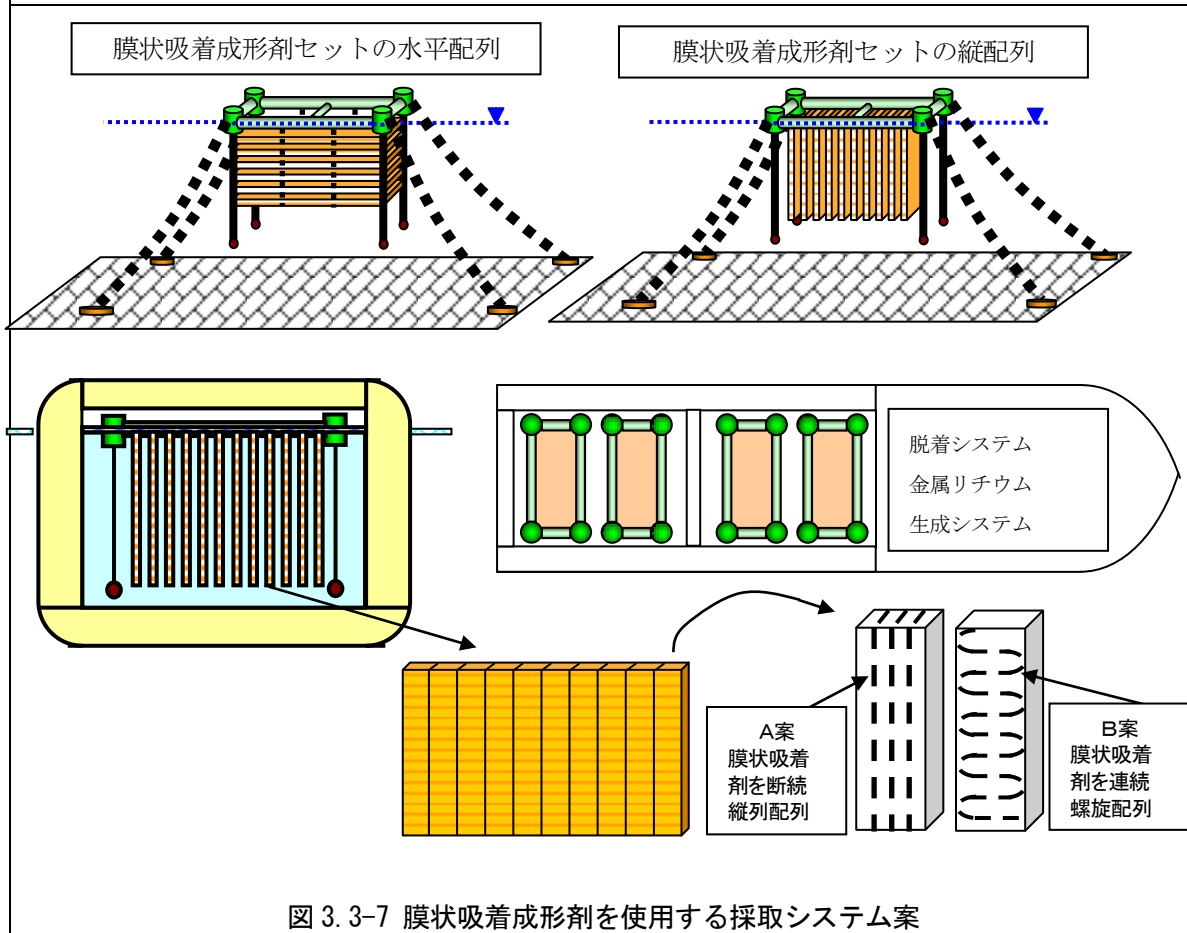


図 3.3-7 膜状吸着成形剤を使用する採取システム案

5) 吸着システム開発に向けた課題

海水中有用資源の回収を経済性の面から考えた場合、採取コストの削減技術の開発が行われなければならない。海水中有用資源採取コストは、吸着剤の価格のみならず、吸着装置、吸着処理技術などのコスト削減が重要である。従って、モリブデン（備蓄対象鉱種）、ストロンチウム（注視鉱種）、ウラン、バナジウムおよびリチウムなどの有用金属を共通吸着装置・処理技術によって採集できるハイブリット吸着システムが開発されれば、経済上大きなメリットがある。更に、ハイブリット吸着システムの開発により、供給構造が脆弱な一部のレアメタルの備蓄にも貢献できると考えられる。表 3.2-2 に採取コストの削減技術の開発に向けた課題を示す。

表 3.3-2 海水中レアメタル採取コストの削減技術の開発に向けた課題

項目	具体的目標
① 高性能吸着剤の開発	・リチウム、ウラン、バナジウム吸着剤の高性能化に加えて、開発が遅れているモリブデン及びストロンチウム吸着剤の開発を促進する必要がある。
② 大量成形化技術開発	・粉末吸着剤の吸着性能に近い性能を持つ膜状、モール状及びロープ状吸着剤の大量成形化技術の開発
③ 採取システムの採算性向上	・海水と吸着剤との経済的な接触システム ・効率的な脱着法と濃縮分離法の開発
④ 多種レアメタル採取のためのハイブリット吸着システム開発	・ウラン、バナジウム、リチウム、モリブデン及びストロンチウムなどの希少金属を同時に吸着できる経済的なハイブリッド吸着システムの開発

3.4 沖ノ鳥島と西表島における希少金属捕集実験

海水にはリチウム、ウラン、バナジウム、コバルト、チタン、マンガンなど多くの有用金属が溶存していることから、これらを選択的に海水から回収できれば、希少金属のほぼ全量を海外からの輸入に依存している日本にとって、長期間安定した資源を国内に持つことが出来る。海水中から有用希少金属を回収するための捕集技術は、リチウムは(独)産業技術総合研究所四国センター・広島大学グループ、ウランは(独)日本原子力研究開発機構・電力中央研究所グループにより研究が行われてきた。これらの研究により捕集材の吸着能力の向上や捕集方法の改良が重ねられた結果、現時点では国際的にも最先端の成果が得られている。

海水中のリチウム及びウランの資源量は、総量としては膨大であるが、その濃度は海水1トン中にリチウムで0.17グラム、ウランで0.0033グラム程度と極微量であることから、捕集効率の高い捕集材の開発と、大量の海水と捕集材との効率的な接触が必要となる。

本研究は、我が国最南端の沖ノ鳥島と沖縄西表島において、産総研のリチウム捕集材と原研のウラン捕集材を同時に海中に設置し、捕集効率に対する設置期間、設置水深、捕集材の充填密度の影響を明らかにし、更に捕集材設置方法の検討を目的として実験を行ったものである。¹²

3.4.1 実験概要

1) 実験目的

リチウムとウランについて、海底固定方式による捕集材係留方法の検討の他に、捕集材の海水中設置期間、捕集材設置水深、リチウム捕集材封入密度などが吸着量に与える影響について検討すべく実海域実験を実施した。海水中希少金属の経済性向上のためには、捕集材の係留方式を簡素にすることによって、捕集金属の生産コストを低減する必要性が既往研究により指摘されている。西表島での実験ではこのための方法として捕集材の海底固定方式を採用し、基礎的実験を行った。

2) 実験海域

日本最南端の沖ノ鳥島と沖縄西表島において、リチウムとウランの捕集材を海中に設置した。前出の既往研究から、海水温度が高いほど捕集効率が高いということが明らかになっている。従って、実験海域は、日本 EEZ 内で高い海水温が期待できる沖ノ鳥島と実験の利便性を考慮して西表島とした。図 3.4-1 に両島の位置を示す。沖ノ鳥島環礁と捕集材設置場所を図 3.4-2、西表島における捕集材設置地点を図 3.4-3 に示す。沖ノ鳥島では SEP (Self-elevated Platform) の支柱の水際(水深 3m)、西表島では西表島綱取地区沖合 150m、水深約 12m 地点に設置した。



図 3.4-1 日本の EEZ と沖ノ鳥島、沖縄西表島の位置

¹² 黒川 明他(2008):「海水中希少金属の捕集実験」、海洋開発論文集、pp.309-314.

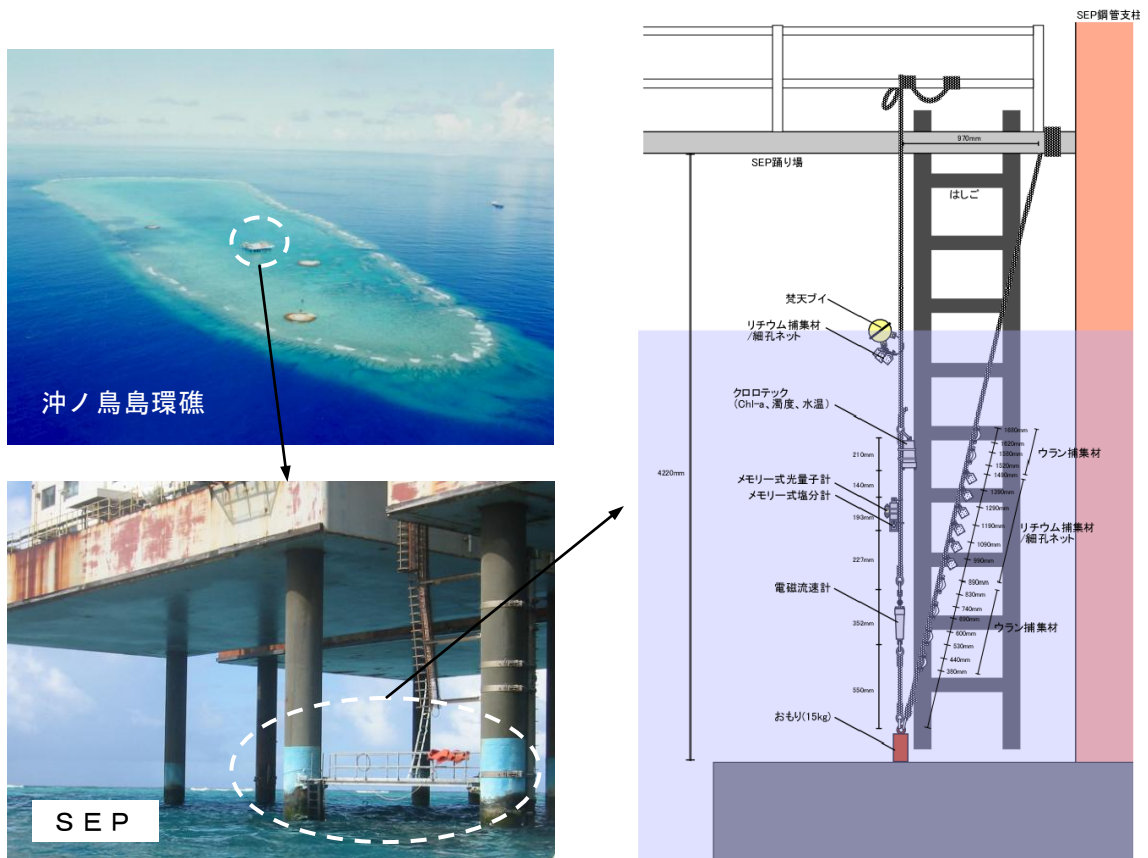


図 3.4-2 沖ノ鳥島の実施場所と捕集材設置係留系

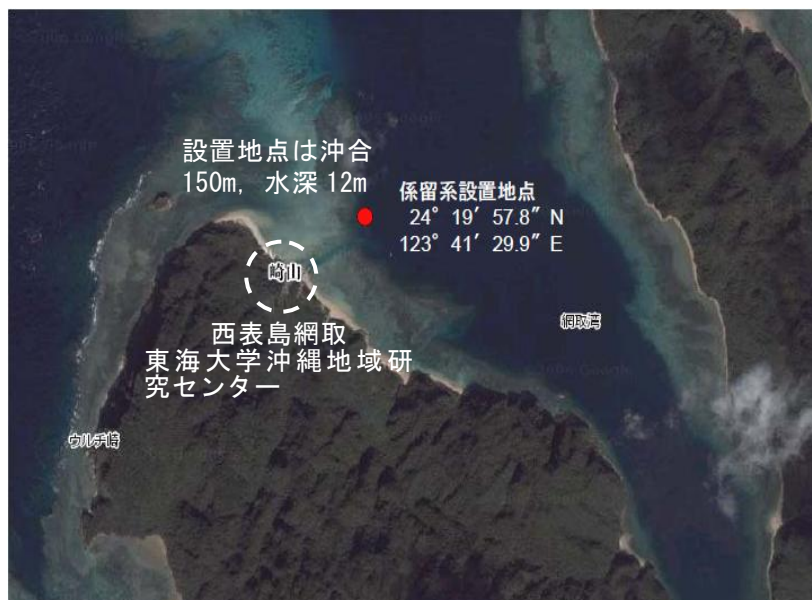


図 3.4-3 西表島における捕集材設置地点西表島網取には東海大学海洋学部の研究施設があることから、実験海域として選定した。

3) 捕集材と係留方法

本実験に使用したのは、リチウム捕集材（産業技術総合研究所四国センター提供）とウラン捕集材（日本原子力研究開発機構提供）である。図 3.4-4 に西表島に設置したウラン捕集材とリチウム捕集材を示す。

- ① リチウム捕集材：マンガン化合物を材料とするイオンふるい捕集材（図左）
- ② ウラン捕集材：ポリエチレンを基材とするアミドキシム型捕集材（図右）、厚型不織布（繊維径 $13\mu\text{m}$ 、目付 $50\text{g}/\text{m}^2$ 、厚み 1mm ）

リチウム捕集材は 10mL 、 40mL 、 160mL の粒状捕集体をそれぞれ同一容量のナイロンメッシュ製のバッグに封入した捕集バッグを係留索に固定した（図左）。ウラン捕集材は、結束バンドを用いて布状捕集材の上部と下部を係留索に固定した（図右）。

西表島の水深 12m 地点に設置した係留系を図 3.4-5（写真）と図 3.4-6 に示す。吸着効率に及ぼす水深の影響を調べるためにリチウム捕集材とウラン捕集材を表層、中層、底層の水深別に 3 セット設置した。



図 3.4-4 西表島に設置したリチウム捕集材（左）とウラン捕集材（右）



図 3.4-5（写真） 海底から立ち上がった捕集材設置係

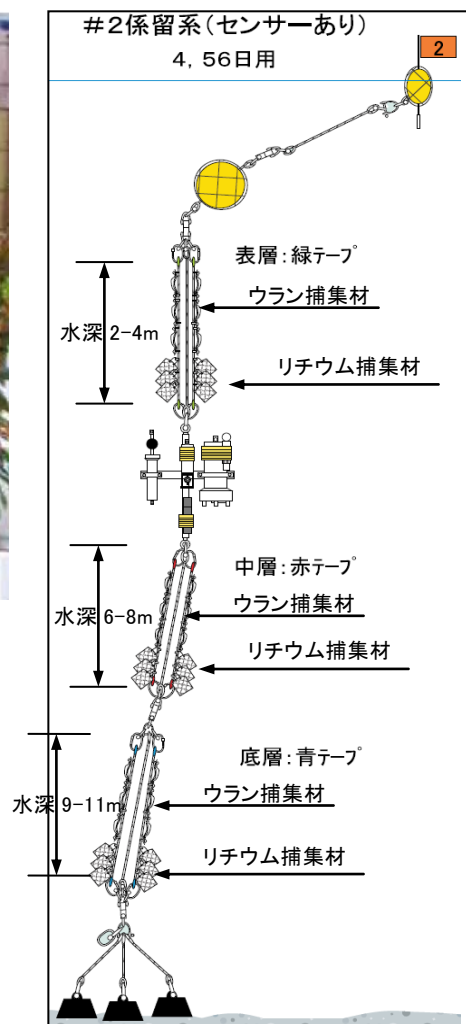


図 3.4-6 西表島の水深 12m 地点に設置した係留系

4) 実験条件

沖ノ鳥島と西表島における実験条件を表 3.4-1 に示す。

a) 西表島

- ① 設置期間：設置期間を 4 日、8 日、14 日、28 日、58 日（当初予定は 56 日間であったが、波浪のため引き上げを 2 日延期した）に分けて捕集材を回収し、設置期間と吸着量の関係を調べた。
- ② 設置水深：最大水深 12m の海域において、海水面から鉛直下方に表層（3～4m）、中層（6～8m）、底層（9～11m）の 3 段階に捕集材を設置し、設置水深が吸着量に与える影響を調べた。
- ③ 水温：水深 1.5m と 6.5m 地点において水温は 22～26℃の間で変動し、双方に大きな差は見られなかった。
- ④ 流速：水深 5m での流速を計測した。従って、表層、中層、底層で流速が捕集量に与える影響は不明。

b) 沖ノ鳥島

- ① 設置期間：2007 年 5 月 26 日から 4 日間海水中に設置した。
- ② 設置水深：最大水深 3m の地点において、水深 1～2m に捕集材を設置した。
- ③ 流速と水温：水深 1m での流速と水温を計測。

表 3.4-1 西表島と沖ノ鳥島における海水中希少金属捕集の実験条件

設置場所	実験期間	設置地点最大水深	水温	流速
西表島	最大 58 日間 2007 年 11 月 21 日 ～2008 年 1 月 18 日	12m（表層 3-4m、 中層 6-8m、底層 9-11m）	22～26℃ （計測は水深 1.5m と 6.5m）	水深 5m での平均 2.5 cm/sec、最大 31.6 cm/sec
沖ノ鳥島	4 日間 2007 年 5 月 26 日 ～2007 年 5 月 30 日	3m（水深 1～2m に捕集材を設置）	27～29℃ （計測は水深 1m）	水深 1m での平均 9.7cm/sec、最大 39.1cm/sec
捕集材	リチウム捕集材：マンガン化合物を材料とするイオンふるい捕集材（産総研提供） ウラン捕集材：ポリエチレンを基材とするアミドキシム型捕集材（原研提供）。			
計測項目	海水温度、塩分濃度、クロロフィル、濁度、海水流速・流向			

3.4.2 実験結果と考察

1) 捕集材の係留方式

捕集材の海底固定の設置と回収はほぼ計画通りに実施することができた。海底固定用の錘の重量、先端ブイと中間ブイの容量と設置位置については、水深 12m の海域において想定した固定機能を発揮した。捕集材の固定方式についてはリチウムとウランともに、ロープへの直接固定であったが損傷は生じなかった。捕集材への海藻などの生物付着の影響については明らかにすべき今後の課題であるが、モール状捕集材に対する生物付着は水深により異なるという報告がある。¹³

¹³ 清水隆夫他(2002)：「モール状捕集材を用いた海水ウラン捕集システムの提案」、海洋開発論文集、第 18 巻、pp.737-742.

2) 海水中設置期間の影響

西表島におけるリチウム吸着量と海水中設置期間の関係を図 3.4-7 に示す。a) 表層、b) 中層、c) 底層について、それぞれ 10mL、40mL、160mL の粒状リチウム捕集材を同一容量のナイロンメッシュ製のバッグに封入している。従って、160mL が最も密な状態である。縦軸はリチウム捕集材 1g 当たりのリチウム吸着量、横軸は海水中設置日数でそれぞれ 4 日目、8 日目、14 日目、28 日目、58 日目に引き上げたものである。

表層、中層、及び底層のいずれにおいても設置期間が長いほどリチウム吸着量は増加している。ただ、中層と底層において、吸着量がほぼ直線的に増加しているのに対して、表層の 14 日目までの吸着量の増加率は他の 2 層と比べて大きい。これは、表層においては波浪の影響により、捕集材と新鮮な海水の接触が促進されることによると考えられる。最大設置日数 58 日の吸着量については、各層の 10mL 数値は捕集材 1g 当たり 14–15mg であり、大きな違いは認められない。

西表島におけるウラン吸着量と海水中設置期間の関係を図 3.4-8 に示す。リチウムと同様に設置期間が長いほどウラン吸着量は増加するが、28 日間までは急激に増加し、それ以後 58 日までは微増となっている。設置期間の増加に従って吸着量が増加する傾向は日本原子力研究開発機構の実験結果と同様であるが、吸着量の絶対値は本結果が 58 日でウラン捕集材 1kg 当たり約 1,000mg であるのに対し、図 3.4-9 に示すように日本原子力研究開発機構の実験値は 60 日で約 1,900mg となっている。バナジウムについても同様の傾向が見られる（後出図 3.4-10 との比較）。これは捕集材の形状・厚さ、グラフト率、アミドキシム基密度、設置海域の流速・波浪状態等の違いによるものと考えられる。ウランについては表層、中層、底層別で吸着量の大きな違いは見られない。これはウラン捕集材が布状であることから、波浪の影響を粒状のリチウム捕集材ほど大きく受けにくいことによると考えられる。

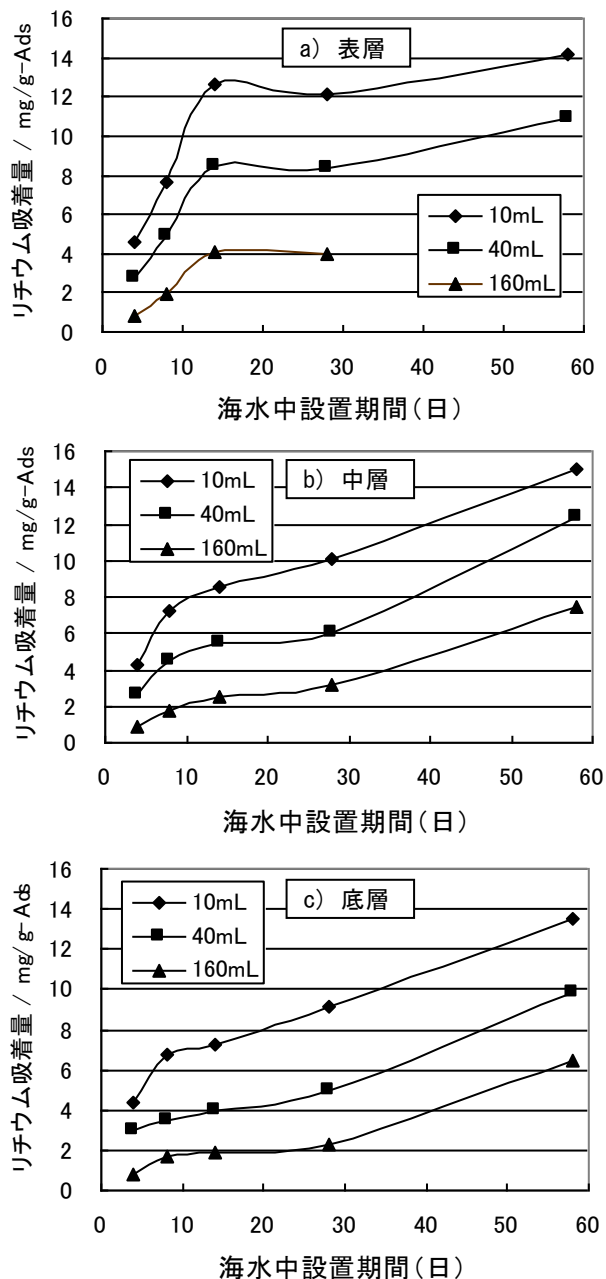


図 3.4-7 西表島のリチウム吸着量と海水中設置期間の関係: 上から a) 表層、b) 中層、c) 底層

3) リチウム捕集材封入密度の影響

図 3.4-7 によると、すべての層においてリチウム捕集材が「粗」に詰まっている 10mL の捕集材 1g 当たりの吸着量が最大で、「密」の 160mL が最低となっている。これは粗に詰まっていることにより、捕集材と新鮮な海水の接触が促進されることによると考えられる。これは、表層、中層、底層において同様の傾向である。捕集効率を上げるためには、小分けする捕集材の最適密度（最適封入量）を明らかにすることが重要となる。

4) ウラン捕集材によるその他の希少金属捕集結果

日本原子力研究開発機構が開発したウラン捕集材は、多くの希少金属の捕集に有効であることがこれまでの研究から明らかにされている。本研究においてもウラン、バナジウム、モリブデン、マンガン、チタン、イットリウム、コバルト、リチウムの 8 種類について吸着量と濃縮率の評価を行った。その結果、ウラン、バナジウム、モリブデン、イットリウム、コバルトについては設置期間の増加に伴い吸着量は増加している。図 3.4-10 にバナジウム、図 3.4-11 にモリブデンの結果を示す。ウランについては 58 日の海水中設置で捕集材 1kg 当たり最大 1.26g 吸着し、海水中の濃度 $3\mu\text{g/L}$ に対して 40 万倍に濃縮されたことになる。また、最も高い吸着量を示したバナジウムでは、58 日の設置で最大 1.57g であり、濃縮率は 79 万倍であった。マンガン、チタン、リチウムについては、14 日目まで

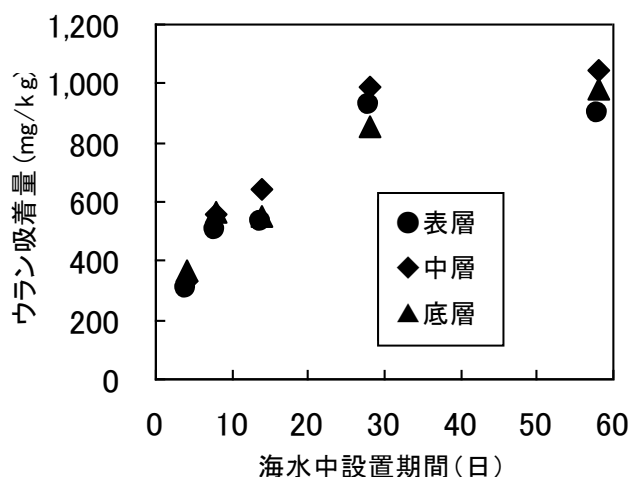


図 3.4-8 西表島のウラン吸着量と海水中設置期間の関係

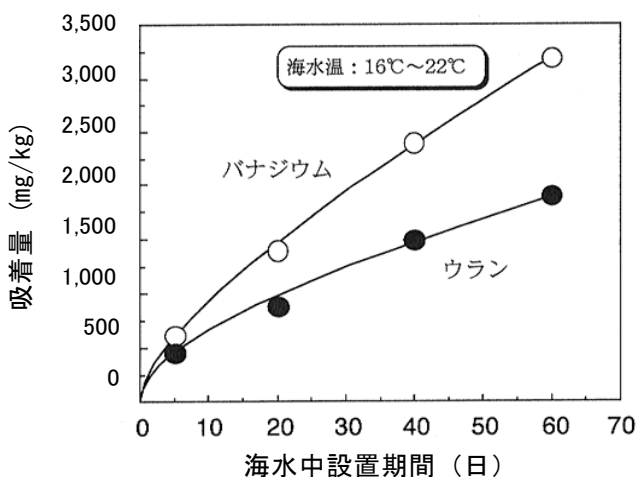


図 3.4-9 日本原子力開発機構の実験によるウランとバナジウム吸着量と海水中設置期間の関係

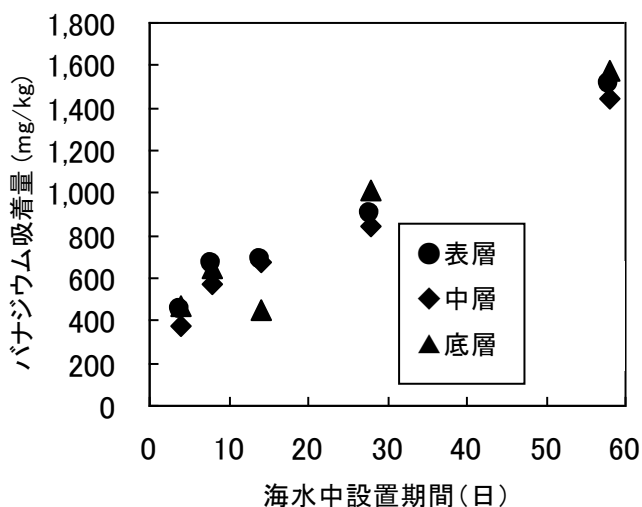


図 3.4-10 西表島のウラン捕集材によるバナジウム吸着量と海水中設置期間の関係

は吸着量が増加したもののその後減少に転じる結果となった。減少に転じる原因については、これらの金属種の吸着力が弱いため波浪により離脱する、他種の吸着力の強い金属種によりふり落とされることなどが考えられるが、今後のデータの蓄積により明らかにしたい。

5) 沖ノ鳥島と西表島における吸着量の比較

沖ノ鳥島と西表島の実験条件の違いは、表 3.4-1 に示すように、水温で沖ノ鳥島が平均で 4℃ほど高いこと、流速も若干ではあるが沖ノ鳥島の方が大きいことが挙げられる。海水温が高いほど吸着効率が高いことは既往研究で述べられている。

本研究の沖ノ鳥島と西表島における 4 日間の吸着量の比較をリチウム（リチウム捕集材結果）、ウランとバナジウム（ウラン捕集材結果）について図 3.4-12 に示す。図に示す数値は、両者の水中設置条件をできるだけ近づけるために、沖ノ鳥島については全サンプルの平均値（水深 1~2m）、西表島については表層（水深 3~4m）の平均値で示した。3 種類について沖ノ鳥島の数値が西表島を上回っている。特に、リチウムとバナジウムでは沖ノ鳥島の数値が顕著に大きい。沖ノ鳥島における高い海水温が影響因子として考えられる。

3.4.3 今後の研究に向けて

西表島及び沖ノ鳥島における捕集実験は、既往研究により開発されているリチウム及びウラン捕集材を使って捕集実験を行ったもので、日本最南端の海域における実験の実施、同一捕集材を使っての 2 海域における吸着量の比較、新たな係留系の開発などを主目的として実施した。多くの実験結果は前出 2 研究（産総研のリチウムと原研のウラン）の追認の傾向を示している。以下に今後の研究課題を示す。

- ① 捕集期間：本実験では最大 56 日間の捕集であった。捕集期間が長くなるほど捕集量が増加していることから、より長期間の捕集を行うことにより最適捕集期間を明らかに

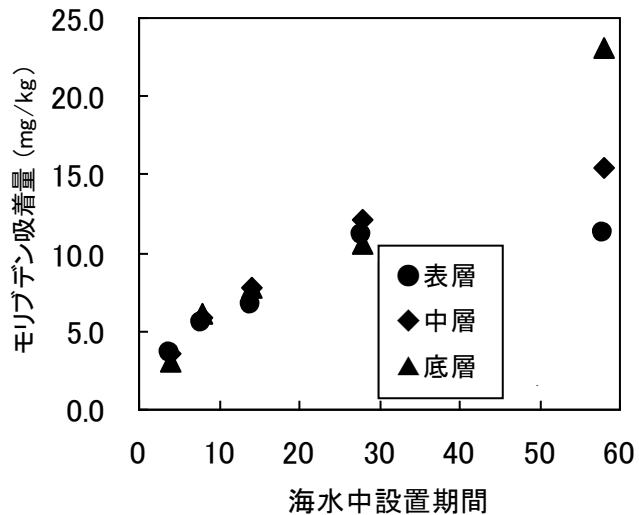


図 3.4-11 西表島のウラン捕集材によるモリブデン吸着量と海水中設置期間の関係

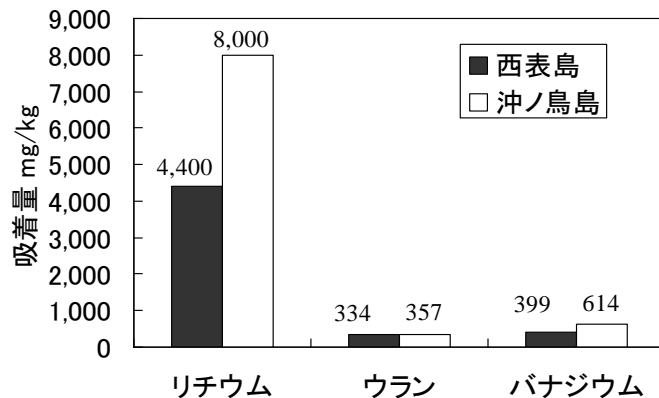


図 3.4-12 沖ノ鳥島と西表島における 4 日間の吸着量の比較

する。

- ② 水深：本実験の設置最大水深は約10mであった。大量に捕集する場合は、より大きな水深への捕集材の設置を考えなければならない。
- ③ 係留方法：本実験では一本ロープに数個の捕集材をくくりつける方法を採用した。大量捕集を行う場合に向けて、係留方法の改良が必要となる。
- ④ 流速：設置地点の流速は、沖ノ鳥島では平均流速は9.7cm/sec、西表島では2.54cm/secであった。捕集材と海水の接触を促進するために、流速がより大きな海域での実験を行い、流速が捕集量に与える影響を明らかにする必要がある。
- ⑤ レアメタル回収プラント：海水中レアメタルの捕集効率を上げるためには、海水淡水化施設から排出される高塩分濃度の海水の利用が考えられる。そのためには淡水化施設と一体となったレアメタル回収プラントのような陸上での回収施設の検討が必要である。図3.4-13に海水淡水化施設と一体となったレアメタル回収プラントの概念図を示す。

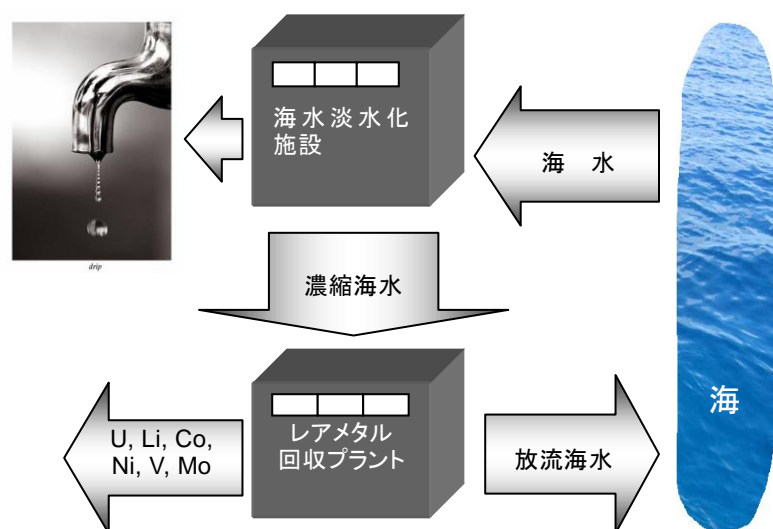


図 3.4-13 海水淡水化施設と一体となったレアメタル回収プラントの概念図

第4章 海水中レアメタル捕集技術の開発動向

4.1 海水ウラン捕集研究

4.1.1 日本原子力開発機構・電力中央研究所グループのアミドキシム基研究

日本原子力開発機構・電力中央研究所グループ（以後、原研・電中研グループ）は平成8年から海水中ウランの捕集研究を行っている。汎用の高分子材料に官能基を導入できる放射線グラフト重合技術を用いて、ポリエチレン不織布からアミドキシム基を有する布状の捕集材を合成した。この試算から明らかになったコスト低減化の課題は、捕集システムを軽量化することであった。そのため、積層した布状の捕集材を充填するために用いる金属製の吸着床を必要としない捕集システムが相応しいため、捕集機能と係留機能を合わせ持つモール状捕集材を用いるシステムを考案した。沖縄海域での捕集実験では、30日の浸漬で捕集材1kg当たり約1.5gのウランが回収できた。むつでは30日の浸漬でモール状捕集材1kg当たり約0.5gのウランが捕集されており、沖縄では海水温が10°C高いことから約1.5倍捕集速度が速くなり、布状からモール状への形状の改良で捕集効率が約2倍に向上した。^{14, 15} 図4.1-1に原研・電中研グループが開発した2種のウラン捕集材と海域実験を示す。¹⁶

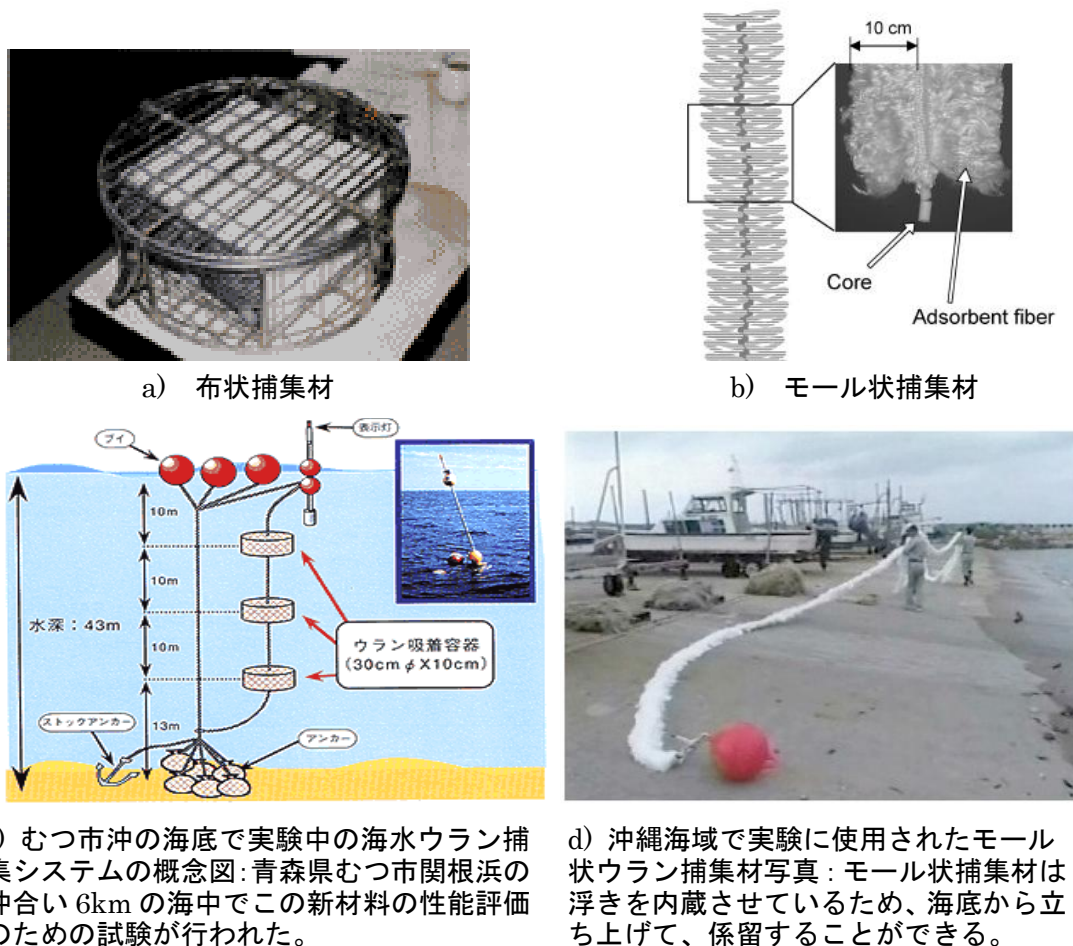


図4.1-1 原研・電中研グループが実施した海水中ウラン捕集の海域実験

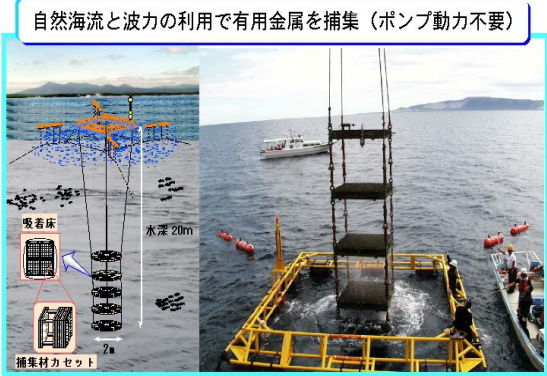
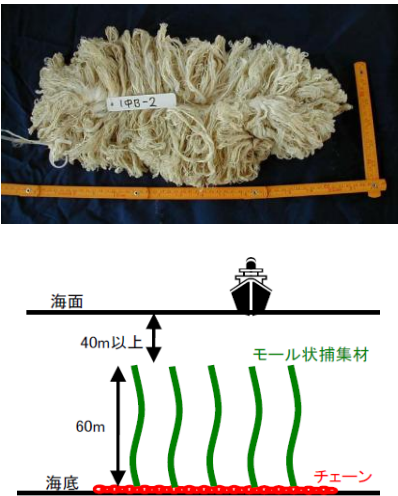
¹⁴ 玉田正男他(2006)：「モール状捕集システムによる海水ウラン捕集のコスト試算」、日本原子力学会和文論文誌, Vol. 5, No. 4, pp. 358-363.

¹⁵ 清水隆夫、玉田正男(2004)：「モール状捕集材を用いた海水ウラン捕集の実規模システムの検討」、海洋開発論文集、第20巻, pp. 617-622.

¹⁶ (独)日本原子力研究開発機構ホームページ <http://www.jaea.go.jp/>

原研・電中研グループは、放射線グラフト重合法といういわゆる接木法によって高性能で実用的な捕集材を開発した。これは丈夫なポリエチレンの基材に放射線を当てて生じたラジカル活性種を出発点として重合反応を開始し、アミドキシム基というウランやバナジウムを選択的に吸着する枝を取り付けたものである。吸着されたウランを分離するときは塩酸をかけて溶かし出し、捕集材は中和処理して再使用できる。当初、不織布状に成型捕集材を網状のスペーサーで挟むように積層したカセットを作り、円盤形のステンレス製の籠に収納して吸着床とする方式を採用したが、係留コストが総コストの8割を占め、海水ウランのコストが鉱山ウランの価格の5~10倍となったことから係留コストを大幅に軽減するモール状捕集材を開発した。モール状捕集材は捕集材の繊維をモール状の組紐にしたもので、組紐の中に浮きを内蔵させるものである。原研・電中研グループのステンレス製籠捕集材収納方式と新たに開発されたモール状捕集材¹⁷を表4.1-1に示す。

表 4.1-1 ステンレス製籠捕集材収納方式と新たに開発されたモール状捕集材

<p>ステンレス製籠捕集材収納方式</p>	 <p>自然海流と波力の利用で有用金属を捕集 (ポンプ動力不要)</p> <p>有用金属捕集システム (青森県むつ関根浜沖合7km) 青森県関根浜沖で行われた海域試験</p>	<ul style="list-style-type: none"> 吸着床を直径 10m の円筒形ブイから 1m 間隔で 100 床吊り下げる。海水ウラン 1kg の捕集に成功。 捕集剤 125kg を収納する籠 1 個が 685kg、円筒形ブイが 50ton、チェーンが 21ton、シンカーが 320ton となり、捕集材 1kg あたりで 37kg もの係留資材が必要となった。 係留コストが総コストの 8 割を占め、海水ウランのコストが鉱山ウランの価格の 5~10 倍となった。
<p>新たに開発されたモール状捕集材</p>	 <p>モール状捕集材(上)と係留方法の概念図(下)</p>	<ul style="list-style-type: none"> モール状捕集材単位重量あたりのウラン捕集量は不織布状捕集材とほぼ同等、単位容積あたりでは不織布状捕集材の 2 倍の捕集量を達成。 捕集材 1kg あたりのシンカー等の所用重量は約 8kg。

¹⁷ 清水隆夫(2009) : 「コスト評価を行った年間 1,200 トンの海水ウランを捕集するモール状捕集材係留回収システム」、第 20 回原子力委員会資料第 1-2 号、平成 21 年 6 月 2 日、原子力委員会定例会

図 4.1-2 に糸状のアミドキシム型捕集材を製紐装置で加工して製作したモール状捕集材¹⁸、図 4.1-3 に放射線グラフト重合法によるアミドキシム型捕集材の合成工程¹⁸、図 4.1-4 に海水中からのウラン捕集工程と鉱山からのウラン採取工程の比較¹⁸を示す。海水中からの捕集と鉱山採掘は、溶媒抽出以降の過程は同じである。

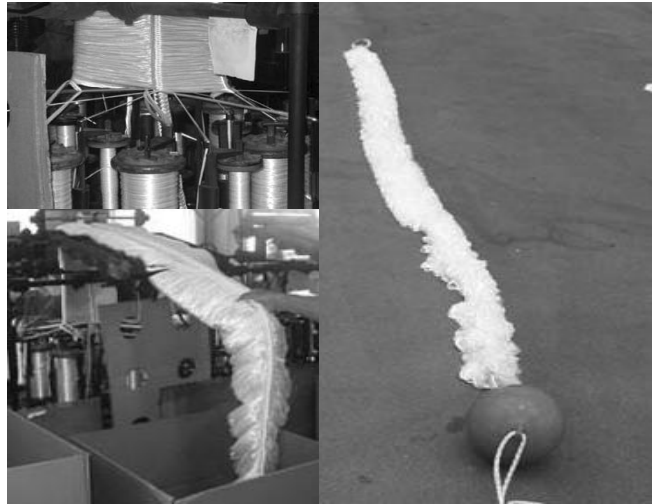


図 4.1-2 糸状のアミドキシム型捕集材を製紐装置で加工して製作したモール状捕集材

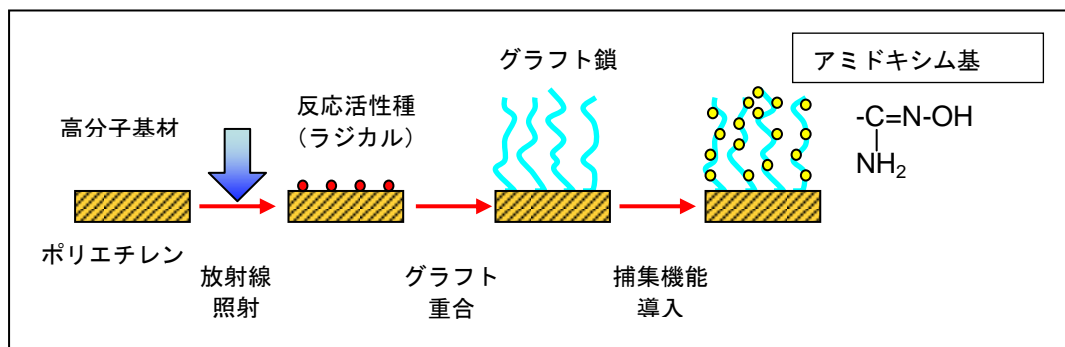


図 4.1-3 放射線グラフト重合法によるアミドキシム型捕集材の合成工程

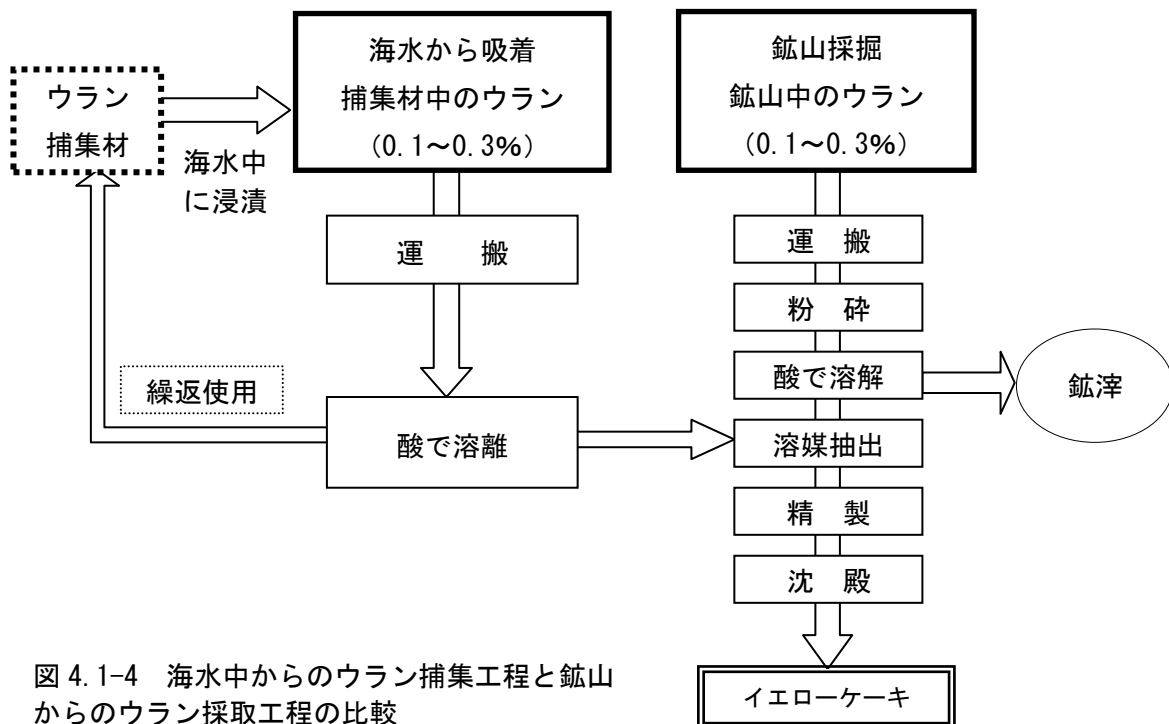
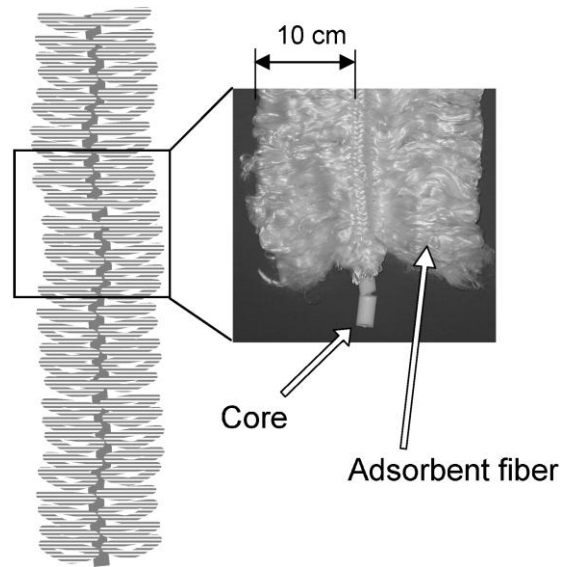


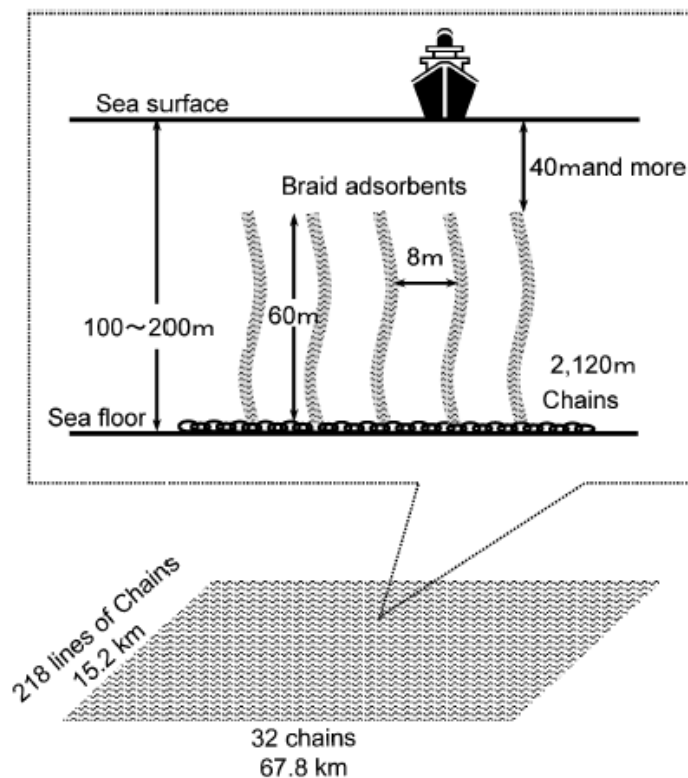
図 4.1-4 海水中からのウラン捕集工程と鉱山からのウラン採取工程の比較

¹⁸ (独)日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 環境・産業応用研究開発ユニット 金属捕集・生分解性高分子研究グループ 提供

日本原子力開発機構では図 4.1-5 に示す大量生産のための係留システムを提案し、表 4.1-2 に示すコスト試算を行っている。¹⁴ 捕集材の生産容量は、1年間で1,200 t のウランを捕集できる捕集材製造の設備容量とし、各プロセス設計因子を決定した。すなわち、年間1,200 t のウランを6回の浸漬で回収する場合、捕集材のウラン捕集性能が2 g-U/kg 捕集材では1年間に必要な捕集材量は10万 t となる。捕集材の海水ウラン捕集性能が2 g-U/kg 捕集材、捕集材の繰返し使用回数が6回でのコストは捕集材の製造、ウランの回収、ウランの溶離・精製を合計すると1,053 億円/年となる。この経費をウランの年間捕集量1,200 t で割ると、ウラン1 kg あたりの価格は87,774 円となる。ウラン1 kg あたりの内訳としては捕集材製作工程69%、ウラン捕集工程29%、溶離精製工程2%となる。また、初期投資額は2,224 億円となる。



a) 大規模ウラン捕集システムの捕集材：2 g-U/kg 捕集材では1年間に必要な捕集材量は10万 t



b) 大規模ウラン捕集システムの捕集材係留概念図：2,120m のチェーン両端100m を残し、8m 間隔で60m のモール状捕集材を240本取り付ける。32本、218列に配置して、6,976本のチェーン(18万円/t、1,129億円)を水深が100~200mの海域に浸漬することにより167万本が係留できる。

図 4.1-5 日本原子力開発機構が提案した大規模ウラン捕集システムの概念図

表 4.1-2 日本原子力開発機構による海水ウラン捕集のコスト試算

諸 元	計画値及び費用
年間生産量	1,200 t/yr
ウラン捕集性能	2 g-U/kg-捕集材
一回当たりの浸漬日数	60 日
セット回数	6 回
生産期間	360 日
同一捕集材の繰り返し浸漬回数	6 回
捕集材製作費 ・ 建屋建設費 ・ 設備建設費 ・ 年間捕集材製造費用	72 億円 257 億円 727 億円/年
ウラン回収費 ・ チェーン、作業船などの設備建設費 ・ 年間ウランの回収費用	1,529 億円 308 億円/年
ウラン溶離・精製 ・ 建屋建設費 ・ 設備建設費 ・ 年間ウラン溶離・精製費	462 億円 953 億円 20.1 億円/年
コスト評価	
初期投資額	2,224 億円
年間経費	1,053 億円/年
ウラン単価	87,774 円/kg

4.1.2 電力中央研究所の天然由来成分を用いた捕集技術研究

1) 研究の概要

電力中央研究所では天然由来成分であるタンニンなどが淡水や海水中のウランを短時間で特異的に吸着することに着目し、5種のタンニンと3種の吸着材作製法の組み合わせを比較研究している。^{19, 20} タンニンとしてはチェスナット、ブラチョ、ミモザ、柿渋、五倍子である。吸着材の作製法は化学法、電子線グラフト重合法、伝統的染色法を採用している。図4.1-6に電中研の吸着材作製法を示す。

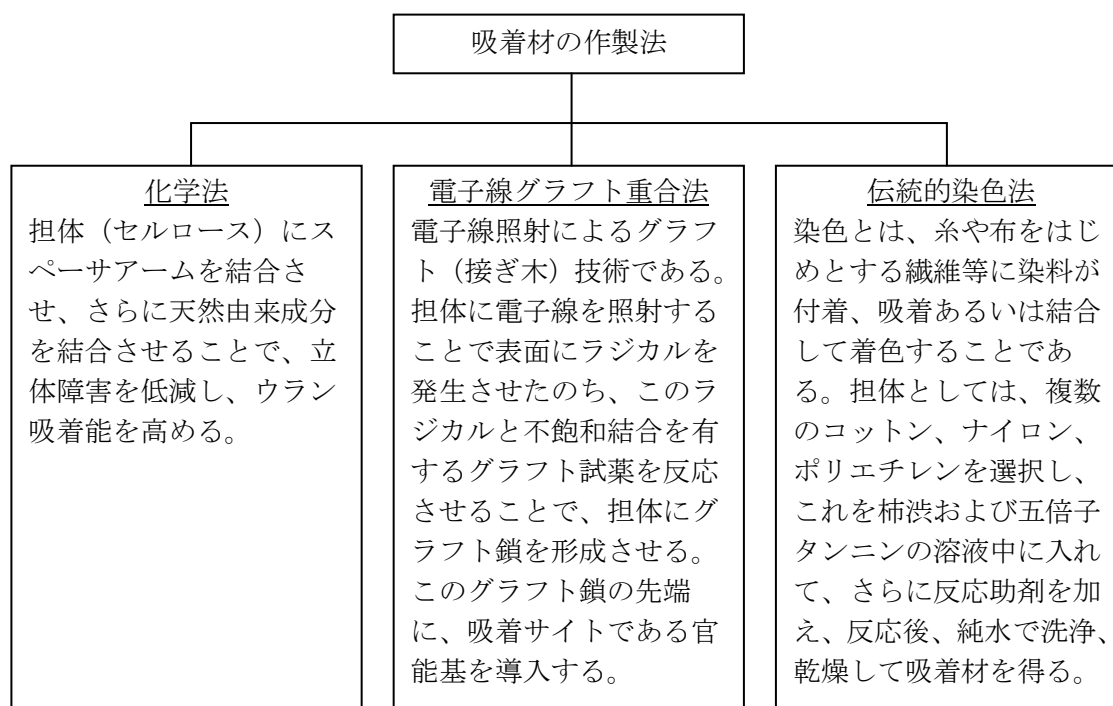


図 4.1-6 電中研が比較した吸着材作製法

2) 吸着材作製方法の評価

化学法、電子線グラフト重合法、および伝統的染色法により作製したタンニン吸着材 100mg をウラン濃度 3.3 μ g/L の天然海水 100mL に室温（ $\sim 25^{\circ}\text{C}$ ）で 24 時間浸漬後、吸着したウラン量を測定した。その結果、タンニンとして倍子を選択して、伝統的染色法にて作製した吸着材について、アミドキシムと同程度（試料海水に含まれる全ウランの $\sim 65\%$ ）のウランを吸着することを見出した。

図 4.1-7 に伝統的染色法で作製された吸着材の吸着率をアミドキシムとの比較で示す。

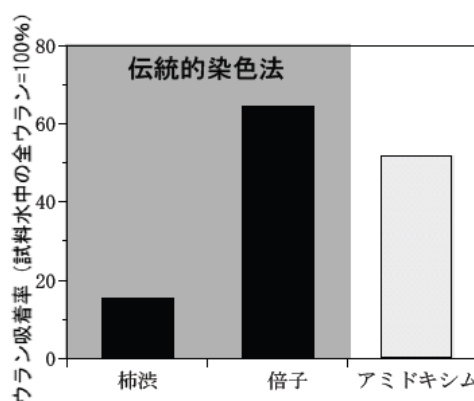


図 4.1-7 伝統的染色法で作製された吸着材の吸着率

¹⁹ 田中伸幸他(2010)：「天然由来成分を用いた海水ウランの捕集技術の検討」、電力中央研究所報告、研究報告 V09020、平成 22 年 6 月

²⁰ 田中伸幸、正木浩幸(2012)：「天然由来成分を用いた海水ウランの捕集技術の開発 ―ウラン吸収能の向上策の評価―」、電力中央研究所報告、研究報告 V11042、平成 24 年 8 月

3) 吸着材作製のコスト評価

化学法、電子線グラフト重合法、および伝統的染色法により作製したタンニン吸着材の原材料コストの評価によると、年間1,200トンのウランを捕集する際に必要とされる10万トンの吸着材の原材料は、最も高いウラン吸着率が確認された伝統的染色法において、アミドキシムのおよそ三分の一となった。図4.1-8に化学法、電子線グラフト重合法、および伝統的染色法による吸着材原材料コストの比較を示す。

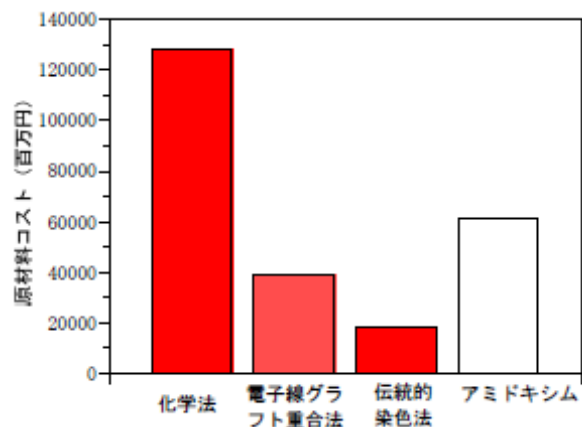


図4.1-8 化学法、電子線グラフト重合法、伝統的染色法による吸着材原材料コストのアミドキシムに対する比較（吸着材10万トンを作製する場合）

4) ウラン吸着能の向上策

五倍子の担体への担持量を増やすために、吸着材作製時に染色技術において色素担持の促進剤として使用されるアルカリ金属塩を助剤として添加した結果、ウラン吸着能を最大で3.5倍程度向上できた。これはアルカリ金属がセルロースの水酸基と五倍子の水酸基の中間に配位して、両者の結合を促すためと考えられた。また、担体の比表面積とウラン吸着能の関係から、担体の比表面積が大きくなるに従い、ウラン吸着量が増加する傾向が認められた。

5) ウランの吸着に有望な天然由来成分

一般に入手可能な天然由来成分（13種類）をセルロース担体にほぼ同量、担持させた吸着材について、海水ウランの吸着能を評価した結果、五倍子において最も高いウラン吸着量が認められた。図4.1-9に各天然由来成分のウラン吸着能を示す。

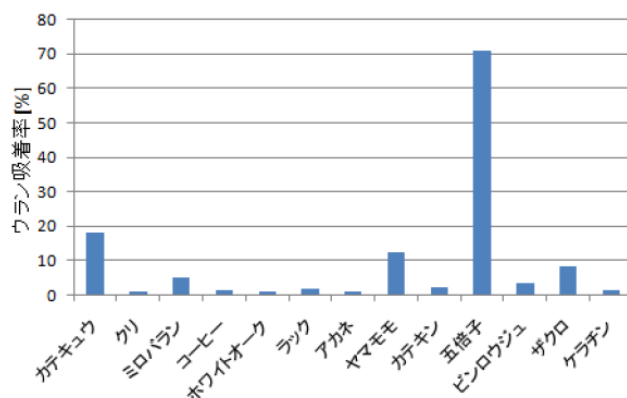


図4.1-9 各天然由来成分のウラン吸着能

6) 今後の課題

電力中央研究所の研究は、ピーカースケールのスクリーニングを終えた段階であり、今後の課題は以下のとおりである。

- ① タンニンによるウラン吸着のメカニズムを解明するとともに、伝統的染色法について最適な吸着材作製条件を見出す。
- ② 得られた知見に基づき改良した吸着材を作製して、実海域における実証実験を実施する。
- ③ 吸着材からのウランの溶離技術を確立する。
- ④ コストを評価する。

4.2 海水リチウム捕集研究

4.2.1 産業技術総合研究所四国センターの海水リチウム捕集研究

これまでの研究により海水からのリチウム回収では、得られるリチウム化合物のコストが市場価格の数倍となっていた。この問題を解決するために、産総研グループにより、①リチウムを選択的に大容量採取できる高性能吸着剤の開発、②経済的な採取システムの開発に対する研究が行われ、従来の吸着剤の2倍の吸着性能を有する、リチウムイオンを選択的に吸着する「イオンふるい吸着剤」が開発された。

イオンふるい吸着剤は、リチウムイオンを選択的に吸着するものである。リチウムイオンに適合する鑄型が内部に形成され、その鑄型にリチウムだけが特異的に取り込まれるものである。あらかじめマンガン化合物にリチウムを添加して加熱することによって、リチウムマンガン酸化物を合成する。酸で処理することによりマンガン酸化物骨格の構造を保ったままで選択的にリチウムのみを抜き出し、リチウムにピッタリの穴(アトムホール)を形成することが出来る。このようにリチウムイオンを鑄型とするためイオン鑄型法と呼ぶ。こうして形成された穴には、より大きなナトリウムイオンやカリウムイオンは多量に存在してもその穴に入ることが出来ないためほとんど吸着されない。数としてはナトリウムの2万分の1以下のリチウムが選択的にその穴に入ることから、イオンをふるいにかけてのように分離できる。

図 4.2-1 に鑄型法によるイオンふるい吸着剤の構造²¹、図 4.2-2 にイオンふるい吸着剤を用いて(独)産業技術総合研究所と広島大学が行ったポンプ流動式海水リチウム採取装置²²、図 4.2-3 に海水からのリチウム採取工程²²を示す。

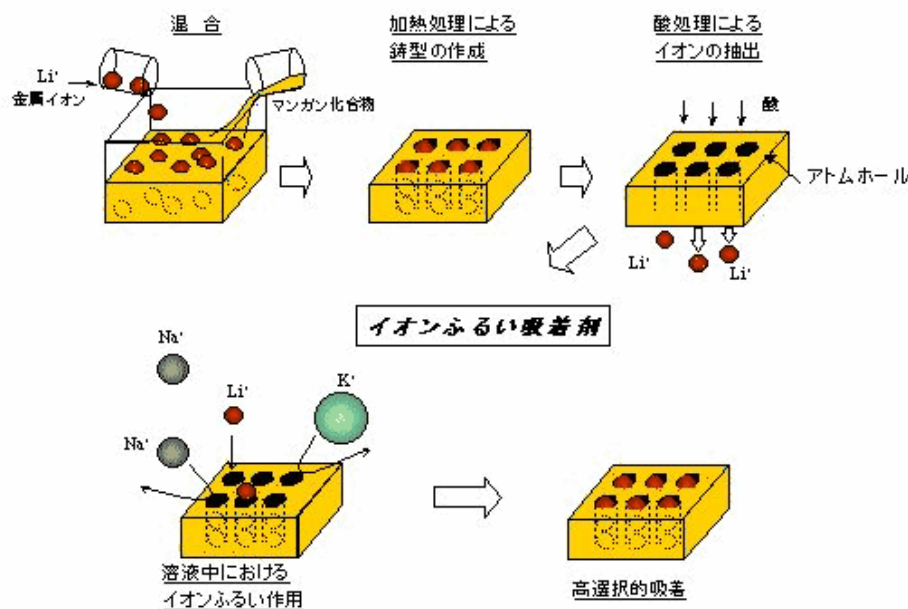


図 4.2-1 鑄型法によるイオンふるい吸着剤の構造

²¹ 産業技術総合研究所四国センターホームページ

²² 産業技術総合研究所四国センター提供

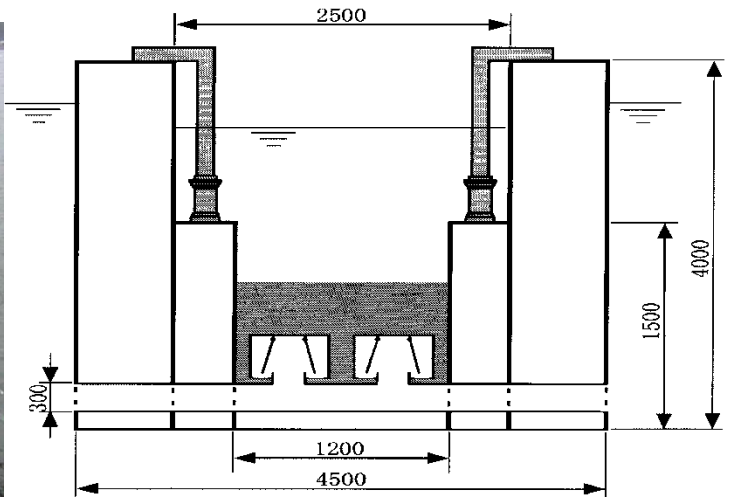


図 4.2-2 ポンプ流動式海水リチウム採取装置

場所：広島県呉市、日時：2000年8～10月、粒状吸着剤：200kg、炭酸リチウム採取規模：100kg/年、共同研究：広島大学、民間企業2社

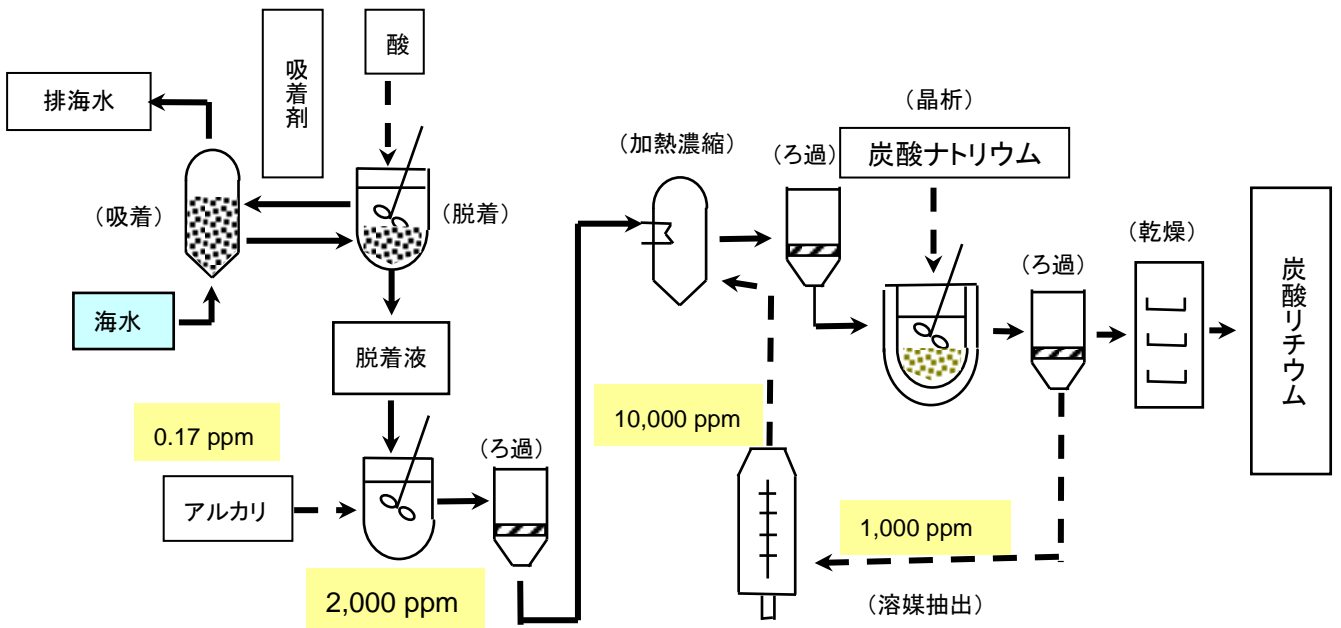


図 4.2-3 海水からのリチウム採取工程

4.2.2 平成 15, 16 年度地域新生コンソーシアム研究開発事業によるリチウム研究

この研究は、経済産業省「平成 15,16 年度地域新生コンソーシアム研究開発事業（海水リチウム採取の実用化技術の研究開発）」の一環として実施されたものである。参加機関は、広島大学、MEC エンジニアリングサービス、(独)産業技術総合研究所、シバタ工業である。この研究の概要を述べる。

1) 研究の概要

本研究では、リチウム資源の国内での安定生産を目的として、産総研四国センターで開発されたリチウム吸着剤技術を利用し、海水からのリチウムの回収からリチウム化合物の生産まで一連の生産システムが可能なパイロットプラントの設計と製作、更にはリチウム化合物の生産を行った。海水リチウム採取の実証実験として、海水中リチウム生産パイロットプラントを火力発電所内に設置し、吸着剤 50L（14kg）に海水を 336 時間（14 日間）通水して採取したリチウムを塩酸で脱着した後、不純物の除去処理を行い、高純度無水塩化リチウム 400g を取り出した。このシステムは火力発電所にパイロットプラントを設置し、温排水からリチウムを吸着して生産する全行程を行うものである。火力発電所の温排水を利用する利点として以下が挙げられる。図 4.2-4 にリチウム生産パイロットプラントシステムの概念図を示す。

- ① 海水流動に動力を必要としないため、エネルギーコストを低く抑えることができる。
- ② 冷却水に用いられた海水の排水量が非常に大きく、システムに使用する流量を確保できる。
- ③ 発電所からの排水時には海水温度が数度上昇しているため、吸着剤の吸着効率が良い。

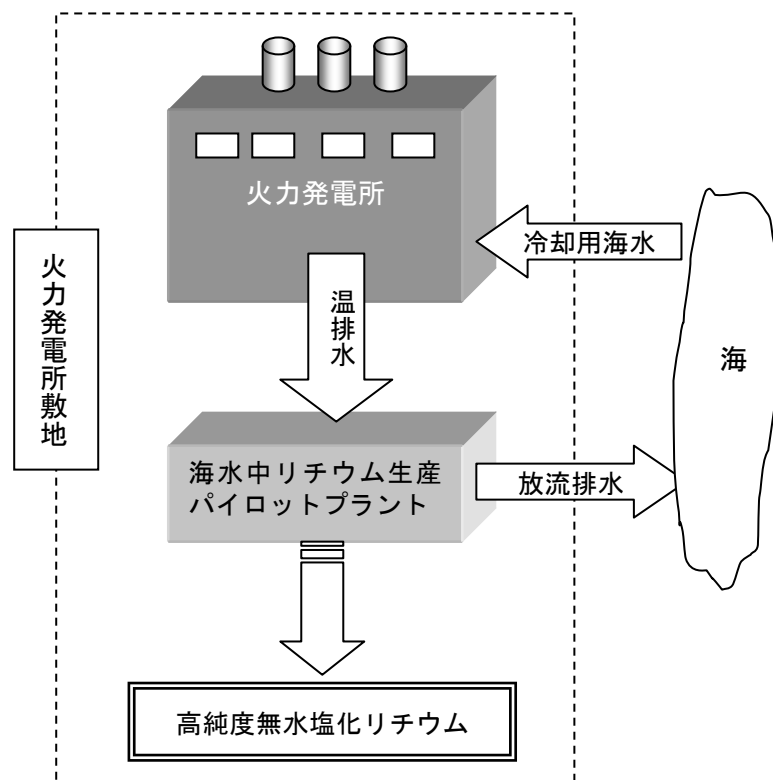


図 4.2-4 リチウム生産パイロットプラントシステムの概念図

2) 無水塩化リチウムの生産工程

本研究では、最終目標として高純度無水塩化リチウムを取り出すために、処理工程の検証を行った。図 4.2-5 にリチウム生産の処理工程を示す。

下記工程の繰り返し試験の結果では、繰り返し使用による吸着量の低下は認められなかった。また、繰り返し5回目の脱着液のリチウム濃度は高いことから、吸着剤と脱着液は繰り返し使用できると判断している。図 4.2-6 にリチウム生産の処理タンク写真、図 4.2-7 に生産された無水塩化リチウムを示す。

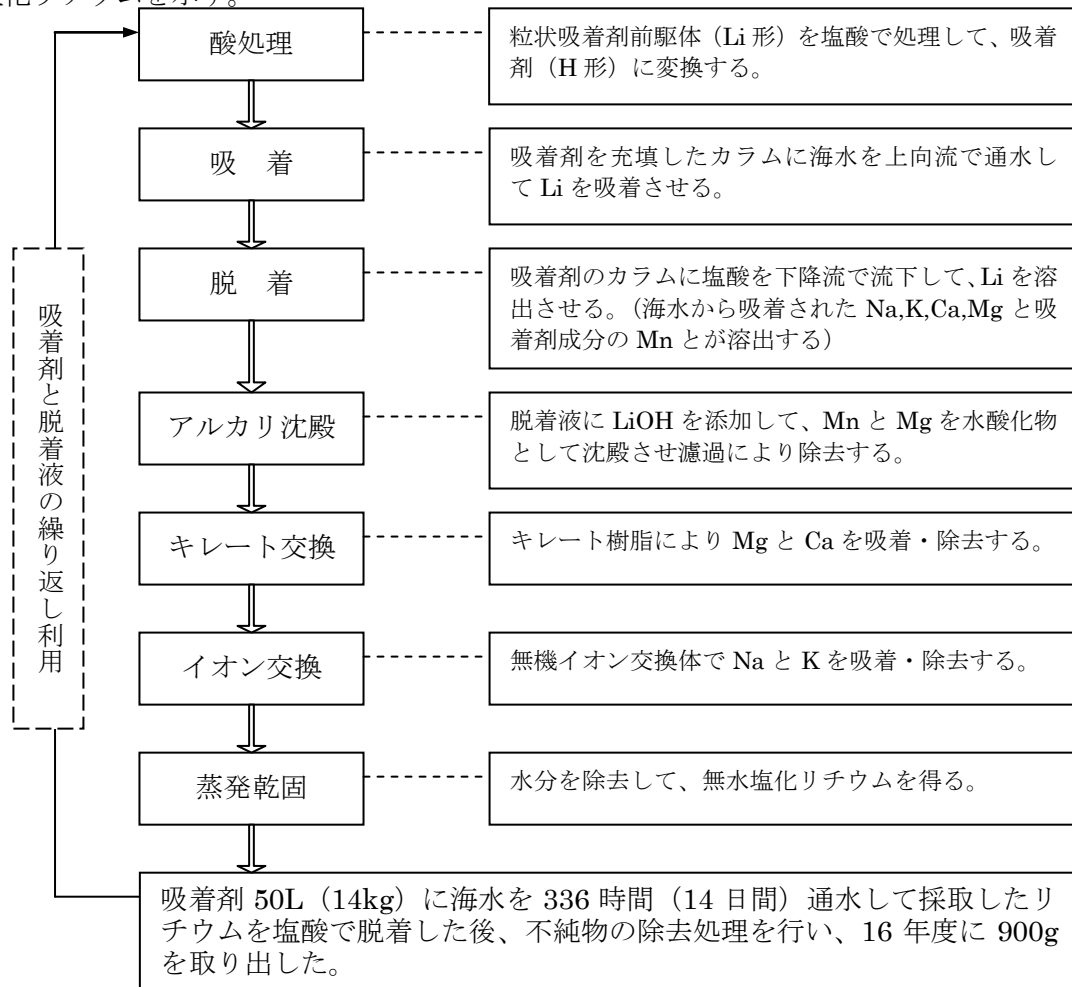


図 4.2-5 無水塩化リチウム生産の処理工程



図 4.2-6 無水塩化リチウム生産の処理タンク写真²⁰



図 4.2-7 生産された無水塩化リチウム²⁰

3) 事業終了時における今後の検討課題

① コスト面

地域新生コンソーシアム研究開発事業における無水塩化リチウム生産のコスト面における問題点を表 4.2-1 に示す。²³ 吸着剤製造費用と電気代がコスト面での改良点となっている。

表 4.2-1 無水塩化リチウム生産のコスト面における問題点

項目	問題点	対策
①吸着剤製造費用	研究開始時には吸着剤の製造コストは 2,000 円/kg を目標としていたが、実績では 8,000～10,000 円/kg となった。	コスト低減の必要あり。
②海水汲み上げ費用	本研究のパイロットプラントを陸上に設置したため、海水を 10m 以上汲み上げる必要があった。電気料金を 10 円/kwh として、塩化リチウム 1kg の生産のためのポンプ運転費用が 6,000 円となった。	流動海水の利用や汲み上げ高さの減少による電気代の低減。
③蒸発乾固費用	電気料金を 10 円/kwh として、塩化リチウム 1kg の生産のための蒸発乾固における電気代が 3,000 円となった。	工場余熱等の利用を考える。

② 利用水源

吸着効率の向上のために、リチウム濃度の高い水の利用を考える必要がある。吸着剤の吸着性能を検証するために海水の 30 倍（リチウム濃度 5ppm）の模擬海水を使用するが、より高濃度の水源を求める。表 4.2-2 に利用可能なリチウム高濃度水源を示す。

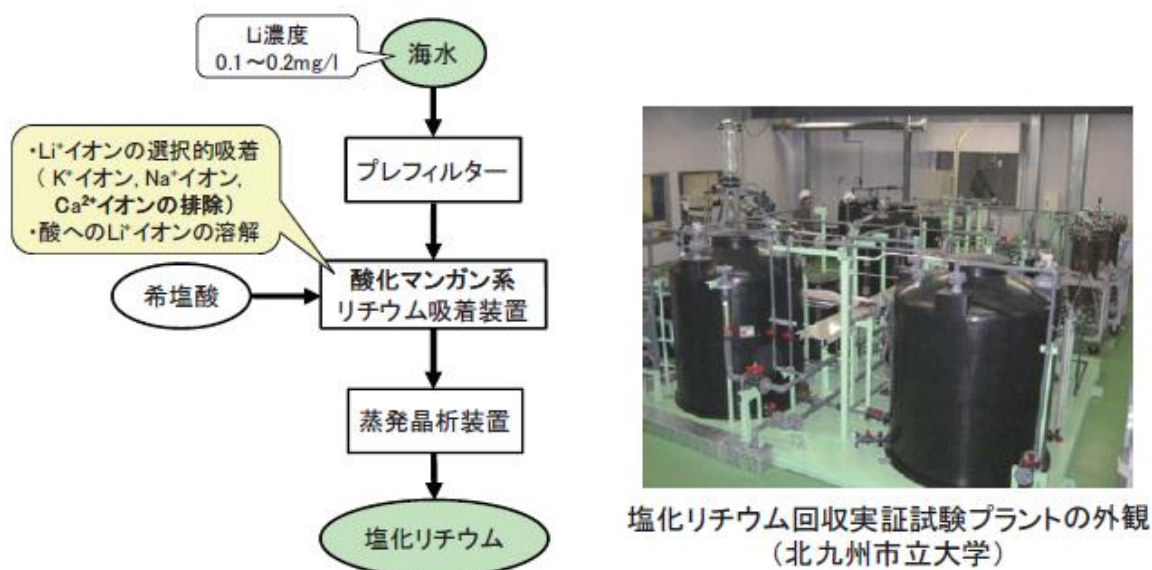
表 4.2-2 利用可能なリチウム高濃度水源

利用可能水種	水 源	考 察
①温泉水	神戸有馬温泉の温泉水は海水の 250 倍のリチウム濃度（43ppm）である。	一ヶ所の温泉水の利用では生産量が小さい。コンソ参加者の試算では、神戸有馬温泉の温泉水の利用で塩化リチウムの可能生産量は 3.6 トン/年、石川県七尾の和倉温泉の湯を全量利用した場合で 11.6 トン/年となる。事業化には一桁小さい数値となる。
②海水淡水化排水	海水淡水化装置で淡水を採った後の排水は高濃度塩水となっていると考えられる。排水過程において流水であることから、処理工程への導入の電気代が低減できる。	沖縄北谷町宮城に海水淡水化施設が完成し全面共用が開始されている。10 万 m ³ /日の海水を取水し、4 万 m ³ /日の淡水を生産し、6 万 m ³ /日を海に戻している。塩分濃度が高くなり（濃縮された）、水温が高くなったこの海水を放流する段階にリチウム捕集材を設置し、リチウムを回収できれば、経済的で効率の良い淡水化及びリチウム生産施設となる。

²³ 平成 19 年度(財)エンジニアリング振興協会 海水中希少金属ワーキンググループにおける討議資料

4.2.3 北九州市立大学、佐賀大学

北九州市立大学と佐賀大学では λ - MnO_2 型のリチウム吸着剤を調製し、その吸着特性について研究を進めてきた²⁴。さらに、佐賀大学海洋エネルギー研究センター (IEOS) にて海水リチウム回収パイロットプラントを完成させ、伊万里湾の海水中からのリチウム回収の実証試験を行っている。小規模ではあるが実用化を目指した施設例としては世界初の実験プラントの稼働を始めており、約1カ月間で海水14万リットルから塩化リチウム約30gを得ることに成功している。図4.2-8に北九州市立大学と佐賀大学による海水からの金属リチウム回収実証試験プロセスの概略を示す。



4.2.4 富山県工業技術センターのリチウム研究

富山県工業技術センターではリチウム吸着剤の吸着効率の向上に向けた研究を行っている²⁵。リチウム吸着剤の吸着速度を高めるために、マンガン酸化物系のリチウム吸着剤を微細化し、吸着表面積を飛躍的に増大させることを試みるとともに、この微細化吸着剤を用いた新規なりチウム捕集材を考案し、深層水を含めた海水からのリチウム回収技術の実用化を目指している。そのために超高压で粒子同士を衝突させ微粒子化する湿式微粒子化法を用いたりチウム吸着剤の微細化の可能性を研究している。図4.2-9に湿式微粒子化法により微細化された吸着剤を示す。

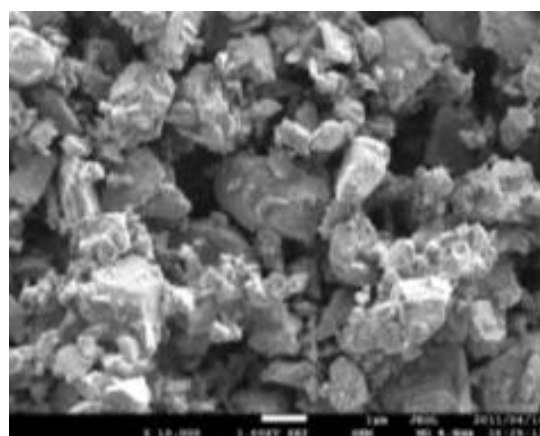


図4.2-9 湿式微粒子化法により微細化された吸着剤

²⁴ 西浜章平、吉塚和治(2008)：「海水中からのリチウムの吸着分離回収プロセスの開発」 OTEC 13, 81-85, 2008-03.

²⁵ 奈須野雅明他(2011)：「海洋深層水からのレアメタル回収技術の開発」、富山県ホームページ http://www.itc.pref.toyama.jp/research/report/2011/r2011_2_027.pdf

4.2.5 関西電力のリチウム他

関西電力（大阪）は、2011年度から原発の温排水を利用し、海水に含まれるリチウムやバナジウムなどのレアメタル（希少金属）を回収する技術の研究に乗り出した²⁶。福井県のエネルギー研究開発拠点化計画の一環としてセーレン（福井市）などと連携し、有効な吸着剤を開発するとともに回収方法の低コスト化を模索し、将来的な事業化を目指している。

4.2.6 海底泥火山の希少金属資源

JAMSTECは2012年6月に紀伊半島の沖合、南海トラフ熊野灘（図4.2-10）にある泥火山の掘削調査を行った。熊野トラフは水深2,000m前後、深海に広がる広く平坦な地形で、ここにおよそ10個の泥火山が見つかった。文部科学省海洋鉱物委員会第11回議事録によると、JAMSTECから以下のようなコメントが出されている²⁷。海水中に溶存しているレアメタルは極微量であるが、このような泥火山周辺の海水はレアメタルの溶存濃度が非常に高いことから、今後の研究開発海域として有望である。図4.2-11に海底泥火山の概念図²⁸を示す。

『「泥火山」。聞きなれない言葉かもしれませんが、ここでは熊野灘泥火山をご紹介します。ここが海底面、そして海底下の断面で、深部からの地殻内流体によって、盛り上がっている様子がわかります。無人探査機「うらしま」による高精度サイドスキャンソナーにより、頂上部、円錐側面の地形調査が行われています。その後、JAMSTECが「ちきゅう」で掘削したところ、これはメタンハイドレートの「柱」だということがわかりました。メタンハイドレートというのは、船上にあげたとたん圧力解放され、気化します。気化をするときに熱を奪うので、サーモグラフィーで見るとコアライナーが冷えて見えます。熊野灘泥火山は、天然のナチュラルパイプラインと表現することができます。一番軽い金属であるリチウム、これも産業的には非常に重要な元素です。非常に密度が軽くて、もちろん水にも浮くような元素で、動きやすい金属の1つです。例えば今商業ベースになっているのは、塩湖の蒸発岩、要は海水が干上がって濃縮されたエバポライトですが、この泥火山のリチウム濃度は、そのような商業ベースのリチウム濃度に比べて、1桁から2桁濃度が高いということがわかっています。』

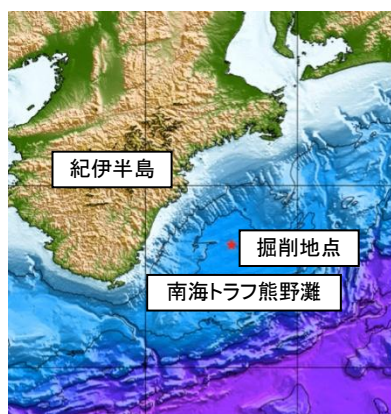


図 4.2-10 南海トラフ熊野灘の位置

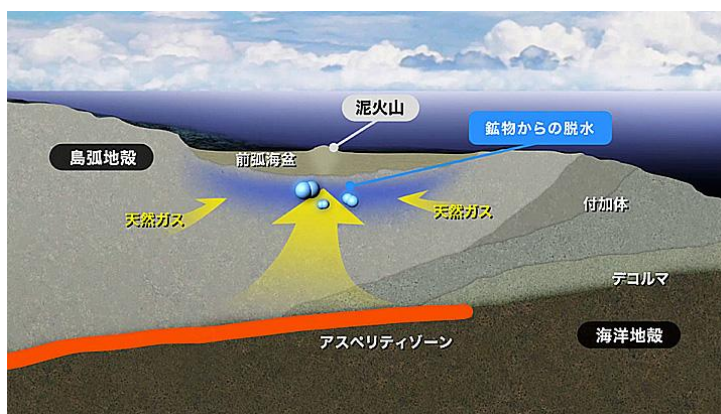


図 4.2-11 海底泥火山の概念図

²⁶ 公益財団法人ふくい産業支援センターホームページ：<http://www.fisc.jp/newspaper/archive/1101/0605.html>

²⁷ 文部科学省ホームページ：http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu5/012/gijiroku/1306782.htm

²⁸ JAMSTEC ホームページ：<http://www.jamstec.go.jp/chikyuu/magazine/j/discover/index.html>

4.3 海外における研究

海水中レアメタルの回収について、海外の研究に関する報道や研究者の発表は、多くの場合日本の研究成果との比較において述べられている。これは日本の研究が世界をリードし、技術的にも進んでいることが国際的に認められていることを示している。以下に米国、中国、インドおよび欧州のウラン回収研究、韓国のリチウム回収研究の動向を述べる。研究機関の数や論文数を見る限り、海外では米国の研究が最も進んでいる。

4.3.1 米国

米国の海水中ウラン回収研究は、既に研究が進んでいた日本のアドキシム基研究を元に始められ、現在では他の捕集材の研究も進められており、回収効率を高めて経済性を高める研究や生物分解性の吸着材の開発を進めている。²⁹

米国では、エネルギー省 (DOE) が主導して以下に示す7大学と3国立研究機関で研究開発が進められている。大学：The University of Texas at Austin, Hunter College, University of Tennessee, The University of Alabama, University of Idaho, University of Maryland, University of North Carolina。国立研究機関：Oak Ridge National Laboratory, Pacific Northwest National Laboratory, Lawrence Berkeley National Laboratory。

2012年8月に開催された科学者の学会としては世界最大の米国化学学会において、海水中からのウラン回収に関するシンポジウムが開催された³⁰。この中では「21世紀の持続可能なエネルギーとして原子力発電の燃料となるウランを海水から回収することは最も確実で経済的方法である」としている。シンポジウムにおいて陸上採鉱と海水中からの回収の経済比較を行ってきたDr. Erich Schneiderは次のようにコメントしている。「ウランの海水中溶存率が非常に低いことから回収コストが高くなっていた。しかし、我々はこの難題に挑んできた。DOEの資金で行われた米国の研究は、1990年代後半に開発された日本の技術に比較して2倍の回収効率にいたったのである。この成果により、海水からのウラン回収が日本の技術では\$560/lbであったのに対し\$300/lbまで下げることに成功した。我々の現在の目標は海水中ウランの経済性を陸上ウランと同等にすることではない。我々科学者は、21世紀、それ以後も原子力発電を支える十分なウラン資源を確保できるという経済的安全装置として海水ウラン回収の技術の確立を目指しているのである。原子力発電所は60年以上操業を続けるとともに多額の投資を必要とする。例えば、2008年にフロリダの電力会社の見積もりでは、2基の原子炉を備えた発電所の新設には\$14 billion (14,000億円、100円/USDとして) の投資が必要であるとされている。このような巨額の投資を前にして、電力会社は1世紀のスパンにおける適正価格でのウラン燃料の確保を望むものである。長期間にわたり陸上ウランが十分に確保され得るかと言うことに対する不確実性が、産業界の意志決定に影響を与えるのである。それは資源に対する不確実性を前にして、長期の研究開発や事業の推進の決定を行うことは非常に難しいことであるからで

²⁹ 米国化学学会におけるアラバマ大学記者会見：USTREAM <http://www.ustream.tv/recorded/24868811>

³⁰ 米国化学学会ホームページ：

http://portal.acs.org/portal/acs/corg/content?_nfpb=true&_pageLabel=PP_ARTICLEMAIN&node_id=222&content_id=CNBP_030551&use_sec=true&sec_url_var=region1&_uuid=ac373297-a931-4ecd-871b-39b9ecf86476

ある。しかるに我々が海水中ウラン回収技術を手に入れることは、このウラン燃料に対する不確実性を取り除くことができる。」

このように米国の研究者は海水中ウランの回収を経済性の追求ばかりではなく、長期の資源の安定供給、国家のエネルギー安全保障の立場から研究を進めている。そして次の研究課題として、吸着システムおよびウランを取り込むプラスチック基盤と化合物の改良を挙げている。また、水産食品業界からエビ殻の提供を受けて、生物分解性の吸着材の開発を進めている。

4.3.2 インド

インドではBARC (Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai)で、主にアミドキシム (amidoxime) 吸着材の研究が行われている。また、フランス原子力庁と共同で、海水淡水化プラントから排出される濃縮塩水からウランを抽出する研究 (RUSWapp: Recovery of Uranium from Sea Water pilot programme) が進められている。淡水化プラントを使うことにより、排出される濃縮塩水の利用による数種のレアメタルの捕集と周辺環境への配慮、淡水化コストの低減が可能であるとしている。このRUSWappで使われている捕集材は、日本原子力研究開発機構が開発したアミドキシム型捕集材 AO membranes (amidoximated macroporous membranes) を基本としている。図4.3-1に濃縮塩水からのウラン捕集パイロットプラントを示す。このプラントで年間100グラムのウラン回収を目指すとしている。³¹



図 4.3-1 濃縮塩水からのウラン捕集パイロットプラント

4.3.3 中国

中国の海水ウラン回収研究は1970年代半ばに始まり、主に上海応用物理研究所(Shanghai Institute of Applied Physics) や海洋科学研究機関で行われている。1970年代から80年代にかけては吸着材として水和酸化チタン(Hydrous titanium oxide)、水酸化アルミニウム (Aluminum hydroxide)、有機樹脂(Organic resins)の研究が行われたが、近年では Polyacrylamidoximeやチタンの研究が行われている。中国では吸着材の試験や吸着機構の研究が主であり、プラント実験や実海域実験などの報告はされていない。³¹

³¹ Linfeng Rao (2010): "Recent International R&D Activities in the Extraction of Uranium from Seawater," Lawrence Berkeley National Laboratory March 15, 2010.

4.3.4 欧州

欧州各国における海水中ウラン回収の研究は、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、イタリア、ポーランド、スウェーデン、英国などで行われてきたが、その中ではドイツが研究論文数や特許で最も多い成果をあげている。日本やその他の国と同じように、欧州でも初期の段階においては水酸化チタンをウラン吸着剤として研究を進めていた。しかし、水酸化チタン材は耐摩耗性において劣ることから、チタン材の研究は終息する結果となった。その後1980年代前半にドイツのJülich Nuclear Research Centreにより約200種の海水ウラン吸着材の研究が行われ、実海域実験が北海のヘリゴランド島やメキシコ湾で実施された。1990年代以降、ドイツのアミドキシム基捕集材に関する研究成果を見出すことはできない。³¹

4.3.5 韓国

韓国国土海洋省と KIGAM (Korea Institute for Geoscience and Mineral resources) はナショナルプロジェクトとして2000年から海水中リチウム回収の研究に取り組んでいる。2009年5月には、韓国の海水リチウム回収技術は日本の技術と比較してエネルギー効率が30%程度優れているとしている。2010年3月、韓国政府と韓国最大手の製鉄会社である POSCO は海水中リチウム回収のプラント建設のための研究チームを立ち上げると発表した。これは韓国国土海洋省が KIGAM により建設される海水中リチウム回収プラントに2014年までの5年間に総額300億ウォン (USD25.8百万) を投資するものである。ハイブリッド自動車、電気自動車などに搭載される蓄電池に欠かせない材料であることから、将来的に国内資源として安定供給を目指し、同省によると将来的には海水から100,000トンのリチウムを生産し、リチウムの輸出国となることを目指している。図4.3-2に韓国の研究に関する写真を示す。³²



図 4.3-2 韓国の海水中リチウム回収研究

³² Global Patent & Technology Business ホームページ

第5章 海水中レアメタルの捕集に関連した技術に関する聞き取り調査／現地調査

本調査では、日本原子力研究開発機構・電力中央研究所グループが海水中ウラン回収の実海域実験を行ったことがある沖縄県において、大量の海水を利用したあと温排水を海へ放水している施設として、那覇市にある沖縄県企業局の海水淡水化センター、海水淡水化センターからの濃縮海水を原料として天然塩を製造している沖縄北谷自然海塩(株)、および沖縄電力吉の浦LNG火力発電所を訪問し、海水中レアメタル研究実施の可能性について聞き取り調査を行った。



図 5-1 聞き取り調査機関の位置

5.1 海水淡水化施設

5.1.1 沖縄県企業局の海水淡水化センター

1) 施設概要

沖縄は頻繁に渇水が生じていた歴史から、沖縄県企業局が平成8年に海水淡水化センターを完成させ、最大40,000m³/日の淡水供給を開始した。最大海水取水量は100,000 m³/日、最大海水放水量は60,000 m³/日である。図5.1-1に海水淡水化センター全景、表5.1-1に施設の諸元を示す。³³



図 5.1-1 沖縄県北谷町宮城にある海水淡水化センター

表 5.1-1 海水淡水化センターの諸元

場 所	沖縄県北谷町宮城
敷地面積	約 12,000 m ²
淡水化方式	逆浸透法 (RO 法)
最大海水取水量	100,000 m ³ /日
最大淡水生産量	40,000 m ³ /日
最大海水放水量	60,000 m ³ /日
淡水回収率	約 40%
取水海水塩分量	3.5 %
放水海水塩分量	5.8 % (取水の 1.66 倍)
取水方式	海底取水管方式
放流方式	海中拡散放流方式

2) 海水淡水化システムと逆浸透法

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して、真水が押し出されてくる。この現象を「逆浸透」と呼ぶ。海水淡水化施設の心臓部に当たり、海水から淡水を得

³³ 沖縄県企業局ホームページ <http://www.eb.pref.okinawa.jp/sisetu/suigen/kaisui/>

る装置である逆浸透ユニットは、逆浸透膜エレメントを6本装填した逆浸透膜モジュールによって構成されている。逆浸透モジュール内部では、この原理で海水淡水化が行われる。63本の逆浸透膜モジュールで1ユニットを構成し1ユニット当たり約5,000m³/日の淡水を生産する。図5.1-2に海水淡水化システム³³、図5.1-3に逆浸透膜モジュールを示す。

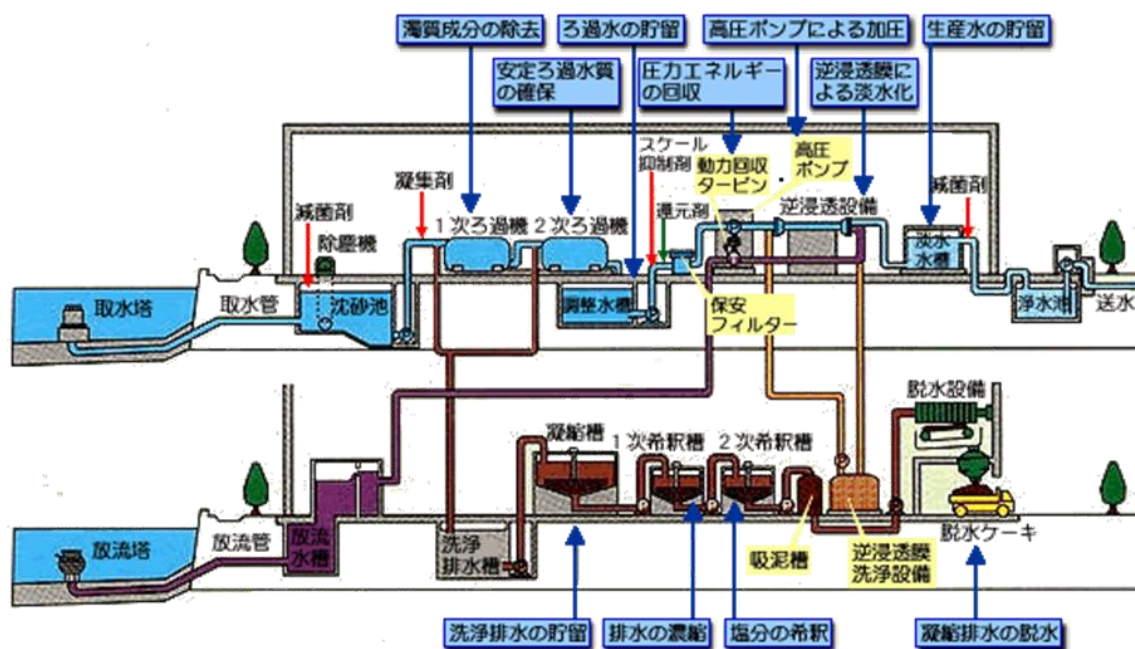


図 5.1-2 海水淡水化システム



図 5.1-3 逆浸透膜モジュール

3) 施設の現状とレアメタル回収実験への利用

沖縄の海水淡水化センターは、完成当初は渇水対策と言う目標を達したものの、その後陸上にダムが建設されたことから、現時点では供給能力を大幅に下回る 5,000 m³/最大 40,000 m³での稼働を行っている。同施設の水単価は 550 円/m³ (2012 年)であり、これに対してダム+浄水場の場合は 150 円/m³程度となっている。単価内訳は、動力費、減価償却でそれぞれ 1/3 程度、その他、薬品費、膜交換費などである。

海水中レアメタルの捕集のために淡水化施設を利用する利点としては以下が挙げられる。

- ・ 海水を淡水化したあとに大量に海に放出される濃縮海水を安定的に利用できることから、捕集効率を高めることができる。
- ・ 回収施設を陸上に設置できることから、捕集材を海中に設置するよりも効率的で作業性が高く、経済性を追求できる。
- ・ 淡水化施設と海水からのレアメタル回収施設を隣接または同施設内に設置することで、設置コストや運用コストを抑えることができる。

同施設では最大 100,000 m³/日の海水の取水が可能であり、その内 40,000 m³/日が淡水として生産され、レアメタル成分が約 1.7 倍に濃縮された海水 60,000 m³/日が放流される。その動力・配管などを含めた施設インフラが既に整備されていることから、それを利用してレアメタル捕集に関するデータ取得の目的で基礎実験を実施する意義は大きい。現時点では稼働していない逆浸透膜ユニットに捕集材ユニットを取り付けたレアメタル捕集試験の実施など、多くの試験を実施できる可能性が高い。このように、本施設で基礎実験を実施することで、これまでに実施例のない濃縮された海水によるレアメタルの吸着データ、常に一定方向かつ一定流量で流れる海水からの吸着データを取得できる可能性がある。

海水淡水化施設と一体となったレアメタル回収プラントの概念図を図 5.1-4 に示す。

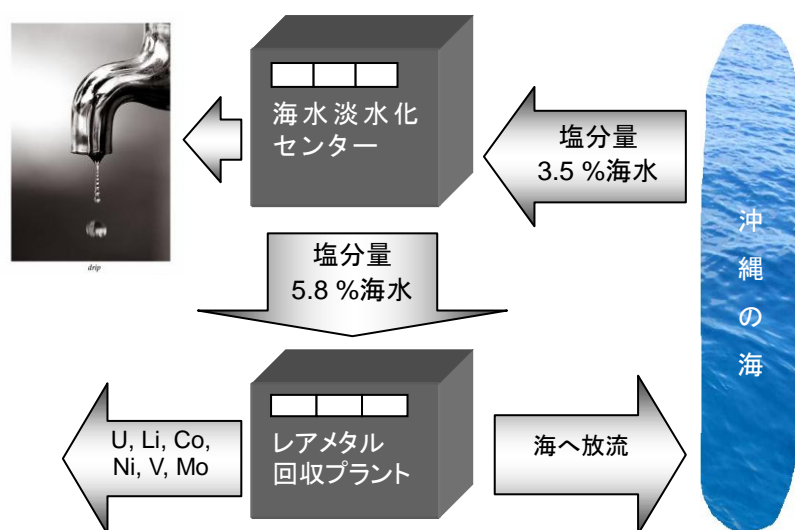
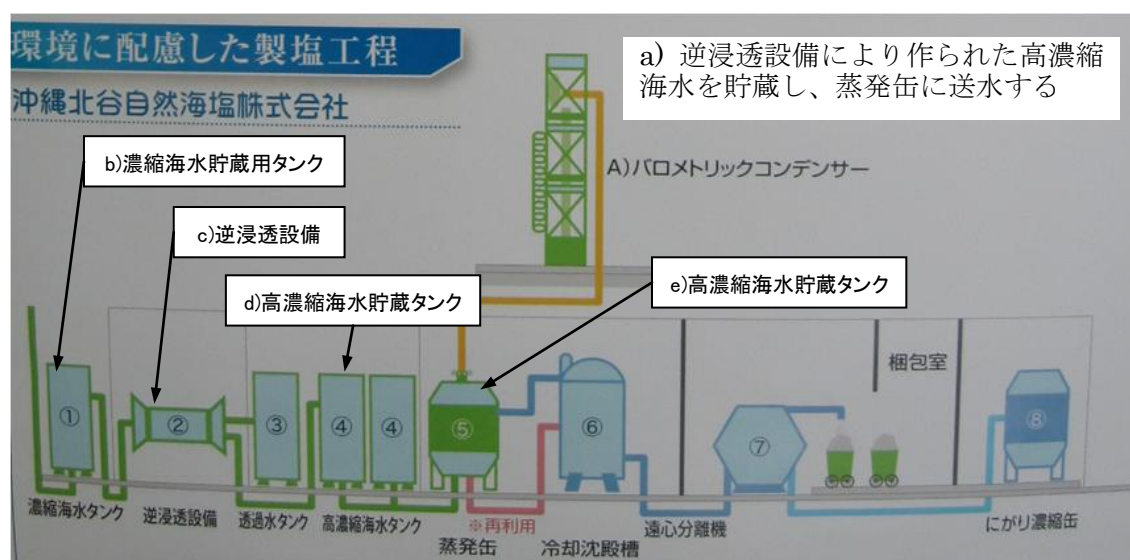


図 5.1-4 海水淡水化施設と一体となったレアメタル回収プラントの概念図

5.1.2 沖縄北谷自然海塩株式会社

海水淡水化センターからの濃縮海水を原料として、蒸発濃縮処理により1ヶ月あたり14 ton程度の天然塩を製造している会社である。海水淡水化センターからの濃縮海水が更に数倍に濃縮され、その高濃縮海水が65℃の高温となっている処理槽があり、この条件においてレアメタル捕集に関する基礎実験が実施できれば、今後、熱水鉱床の検討等を行う上でも、吸着データの拡充の点でも意義は大きい。図5.1-5に濃縮海水からの天然塩製造システムと機材を示す。



b) 淡水化センターからの濃縮海水貯蔵用タンク



c) 濃縮海水をさらに濃縮するための逆浸透設備



d) 逆浸透設備により作られた高濃縮海水を貯蔵するタンク。蒸発缶に送水する。



e) 65℃の低温蒸発可能な濃縮方法により10%の濃縮海水を36%まで濃縮する蒸発缶

図5.1-5 濃縮海水からの天然塩製造システムと機材

5.2 沖縄電力吉の浦 LNG 火力発電所

吉の浦 LNG 火力発電所は沖縄電力初の LNG コンバインドサイクル発電所であり、同規模の石炭火力発電所の1/5程度の敷地面積で施設配置が完結している。発電所の全景を図5.2-1、概要を表5.2-1に示す。

火力発電所の温排水を利用する利点としては以下が挙げられる。

- ・ 海水流動に動力を必要としないためエネルギーコストを低く抑えることができる。
- ・ 冷却水に用いられた海水の排水量が非常に大きく、大規模実証システムに使用する流量を確保できる。
- ・ 発電所からの排水時には海水温度が数度上昇しているため、捕集材の吸着効率が良い。

同発電所の放水量は 24 m³/sec と大きく、また放水口も比較的陸地に近いことから、レアメタル捕集場所としては期待が持てる。特に、排水として+7℃程度の上昇も有利となる。ただし、同発電所では純水を用いて淡水化をおこなっており、海水を用いていない。他の発電所も工業用水を使っており、沖縄電力とレアメタル回収に関する研究を実施する場合は、放水口の利用になると想定される。



図 5.2-1 吉の浦 LNG 火力発電所

表 5.2-1 沖縄電力吉の浦 LNG 火力発電所の概要

発電所の名称	吉の浦火力発電所
所在地	沖縄県中頭郡中城村字泊 509 番地の 2 及びその地先
発電方式	LNG コンバインドサイクル発電方式
発電機出力	251,000 kW × 4 機
LNG タンク容量	140,000 kl × 2 基
バース	配管橋：約 1,350m
運開予定	2 号機 平成 25 年 (2013 年) 5 月 3・4 号機 平成 34 年度 (2022 年度) 以降

第6章 海水中レアメタルの捕集技術の実用へ向けて

6.1 海水中レアメタルの捕集技術の評価

世界経済の拡大、工業のハイテク化、エネルギー需要の増大とともに、機能の特異的な高度化に欠かせないレアメタルの需要は増し、その安定確保は不可欠なものになっている。しかし、陸域レアメタル資源の埋蔵は地域的に偏在しており、更に生産国は政情不安定な国を含めて海外の少数国に限定されていることから、供給構造は極めて脆弱である。したがって、資源保有国の事情によっては、世界の資源の供給が大きく左右されてしまいかねないのが現状である。そのため、レアメタルは価格面では世界経済の影響を受けて不安定な状況にあり、希少であるがゆえに今後とも需給の逼迫や価格の急激な上昇が懸念される資源である。特に、日本はレアメタルの大消費国であるが、そのほとんどを海外からの輸入に依存していることから、供給構造が脆弱で供給障害が起こる可能性の高いレアメタル7 鉱種について国家備蓄を行っている。

日本は世界最大のレアメタル消費国として、国際的な競争力を堅持するため、その安定的な確保と供給に向けた資源政策を推進する必要がある。本報告書で注目したウランおよびリチウムは、それぞれ、エネルギーの確保やIT機器や蓄電池の分野に欠かせない資源であり、安定的な供給技術の開発が不可欠である。そのため、資源量、回収技術の観点から海水中レアメタル回収の実用化の可能性を評価した。

6.2 資源量の観点から

海水中には微量ではあるが多くのレアメタルが溶存している。海水中のレアメタルは、陸域レアメタル資源のように地域的に偏在していることはなく、海洋中にほぼ均等に分布しており、これまでの研究でその資源量はほぼ明らかにされている。全海水量では、ウランは45億トン（1年間に世界で消費される量の約6万倍、鉱山資源量6百万トンの約750倍）、リチウムは2,330億トン（同約1千万倍、鉱山・かん水資源量30百万トンの約8,000倍）、コバルトは1億トン（同約1,700倍）、モリブデンは150億トン（同約6,000倍）などである。このように、陸域レアメタル資源に比較して、海水中には膨大な量のレアメタル資源が溶存しており、ほぼ無尽蔵とも言え、レアメタル資源の源としては、極めて有望である。

日本近海に流れる黒潮は、秒速2m、幅100kmの大きな海流であるため、1年間に鉱石ウランの発見資源量に匹敵する520万トンのウラン、リチウムでは27,000万トンを日本に運ぶ。この資源量は、日本の年間ウラン需要量*（8,000トン）の約650倍、年間リチウム需要量（2万トン）の13,500倍であり、日本は海水中のレアメタル捕集に適した位置に存在すると言える。

*日本のすべての原子力発電所が稼働している場合。

6.3 回収技術の観点から

国内では、海水中からレアメタルを回収するための捕集技術は、ウラン、リチウムを中心に表 6.2-1 に示すように国立研究機関や大学で進められている。

エネルギー分野では原子力発電のためのウランについて、日本原子力研究開発機構・電力中央研究所グループのグラフト重合による繊維状アミドキシム型捕集材の研究開発があり、機械的強度と高い捕集性能を兼ね備えたウラン捕集材の開発、海域での捕集実験による1kgのウラ

ン捕集の実証、海底から立ち上げ係留するウラン捕集システムの提案や同システムでのコスト試算が行われている。また、現時点では試験管規模の研究段階ではあるが、電力中央研究所の天然由来成分を利用した吸着材の研究がある。

I T機器や蓄電池の分野で需要が高まっているリチウムでは、実海域実験が行われ捕集システムの提案やコスト試算が出されている産業技術総合研究所四国センターのイオンふるい吸着剤、実証実験が行われている北九州市立大学・佐賀大学グループの酸化マンガン系吸着材、実験室段階の富山県工業技術センターの吸着剤の改良研究、そして構想段階の関西電力の温排水利用研究などがある。

また、(一財)エンジニアリング協会の調査研究では、世界第6位の日本の排他的経済水域の活用をめざして、沖ノ鳥島と西表島海域でのウランとリチウムの捕集実験が行われた。その結果を受けて、ウランとリチウムを同時に回収可能なハイブリッド吸着システムが提案されている。

表 6-1 日本国内の海水レアメタル捕集技術研究

種 類	研究機関	特徴的な捕集材	節
ウラン	日本原子力研究開発機構・電力中央研究所グループ	グラフト重合による繊維状アミドキシム型捕集材	4.1.1
	電力中央研究所	天然由来成分(タンニン)	4.1.2
リチウム	産業技術総合研究所四国センター	鋳型法によるイオンふるい吸着剤	4.2.1
	北九州市立大学・佐賀大学グループ	酸化マンガン系リチウム吸着材	4.2.3
	富山県工業技術センター	吸着剤の微細化による吸着表面積の増大	4.2.4
	関西電力	原子力発電所の温排水利用	4.2.5

海外では、ウランの捕集について、米国、インド、中国、韓国、欧州で研究開発が進められ、近年は米国、中国で積極的に研究開発が進められている。表 6-2 に示すように、米国では、エネルギー省(DOE)が予算を計上して主導し、7大学、2国立研究機関で研究開発が進められている。また、中国の上海応用物理研究所においても、アミドキシム型のウラン捕集材の開発が開始されている。

表 6-2 海外の海水レアメタル捕集技術研究

国	研究機関	節
米 国	大学: The University of Texas at Austin, Hunter College, University of Tennessee, The University of Alabama, University of Idaho, University of Maryland, University of North Carolina 国立研究機関: Oak Ridge National Laboratory, Lawrence Berkeley National Laboratory	4.3.1
インド	Bhabha Atomic Research Centre(Mumbai)	4.3.2
中 国	上海応用物理研究所(Shanghai Institute of Applied Physics)	4.3.3
欧 州	フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、イタリア、ポーランドスウェーデン、英国が研究を進めているが、ドイツが最も進んでいる。	4.3.4
韓 国	Korea Institute for Geoscience and Mineral resources, POSCO	4.3.5

海水中からレアメタルを回収するための捕集技術については、日本が捕集材の開発、海水からの捕集システム、実海域試験を進め、研究開発及びノウハウの蓄積により、世界をリードしてきた。近年、米国はウラン鉱山からの採掘に伴う環境汚染の回避やウラン資源の恒久的な供給の可能性を見出すため、日本の研究開発への追従を開始した。

日本では、海水からのレアメタル捕集に関する技術開発において、捕集材の吸着能力の向上や海域での捕集システムの改良が重ね続けられた結果、国際的にも最先端の捕集材や捕集システムに関する技術を日本が有している。したがって、海水からのレアメタル捕集の実用化は、これまでの日本の研究開発で培われた成果を活用し、世界に先駆けて日本が進めるべき重要な資源開発である。さらに、日本はレアメタルの大消費国として、国産資源の生産技術として海水からのレアメタル捕集に関する技術開発を世界に先駆けて実用化をめざし、長期の需要に対する供給を保証する施策を実行すべきである。

6.4 実用化に向けて

1) 海水中レアメタル捕集技術

海水中レアメタルの捕集には、個々のレアメタルに対応した吸着性能の高い捕集材の開発が必要であり、そのためには、海水を利用した効率的な吸着性能の評価法の開発を要する。これらの施設では安定して、海水より高濃度のレアメタルを含有することやより高温の海水を利用できることから、捕集材の新たな可能性を評価することができる。また、ベンチスケールまでのレアメタル捕集試験に有用であり、濃縮海水を利用した捕集試験装置を陸域に設置することにより、効率的な捕集実験が可能となる。

海水中レアメタルの回収においては、吸着装置、吸着処理技術のコストが最も大きな割合を占める。捕集材をハイブリッド化し、多種類のレアメタルを同時に吸着させることができれば、捕集システムの共通化による簡略化が期待でき、コストを軽減することが可能な捕集システムの構築ができる。ハイブリッド化については、捕集材そのものをハイブリッド化する、単一捕集材を数種類組み合わせる、などの方法が考えられ、できるだけ多くの有価元素を回収する方が経済性の観点からメリットがある。

経済性について、レアメタルの鉱種毎に信頼できる十分なデータが出されているとはいいがたいが、海水中のウランとリチウムについてはすでにコスト試算が行われている。海水中レアメタル捕集の事業性評価、ビジネスモデルの構築、エネルギー収支試算を進めることが必要である。

2) 研究開発体制

資源エネルギーの長期にわたる安定的確保や工業のハイテク化は、国民生活の向上や経済発展に必要不可欠なものである。海水中レアメタルの実用化をめざした研究開発に不可欠な海域試験は、実験室での研究開発に比較して大きな予算が必要である。そのため、海域試験による実用化をめざした研究開発は、現状ではほとんど進められておらず、国立研究機関や大学で実験室レベルの研究開発が継続されている。企業には、政治的要素や国際価格に影響されるレアメタルの資源の開発は、リスクが大きな分野である。

資源エネルギーの安全保障の観点からも、海水中レアメタルの開発には国の資金が投入され

ることが望ましい。また、これまで得られた研究開発や海域試験に係わるノウハウの継承などに向けて、研究開発を進める研究者の連携を強化することも継続して行かなければならない。

3) 海洋の戦略的開発・利用の推進

平成 24 年 7 月に発表された日本再生戦略の中の重点施策として「グリーン・イノベーションによる海洋の戦略的開発・利用」が謳われている。海水中レアメタルの捕集は、資源量、地理的位置、研究成果において、日本は優位にあり、海水ウランやリチウムなどの海水中レアメタルの捕集技術の開発は、日本が進めるべき重要な戦略技術である。

書名	平成 24 年度海水中レアメタル等捕集可能性調査報告書
発行	平成 25 年 3 月 一般財団法人エンジニアリング協会 〒105-0001 東京都港区虎ノ門三丁目 18 番 19 号 TEL 03-5405-7204
印刷	株式会社 三州社