

■ 報 文 ■

氷山の漂流を利用した海水中のウラン回収法について

Extraction of Uranium from Seawater Using the Drift of Icebergs

西山 孝*

Takashi Nishiyama

1. はじめに

海水中に溶けているウランの総量は40億tに達すると見積られ、古くからその潜在価値が高く評価されている。しかしながら、海水中のウラン濃度は3ppb (3×10^{-9})と極めて薄く、海水ウラン採取を実現するためには解決しなければならない種々の問題が存在している。なかでも現在直面しているもっとも大きな課題は優れたウラン吸着剤の開発と多量の海水と吸着剤とをいかにして接触させるかということであろう。

そこで、本報告では、海水と吸着剤を接触させる方法として、冰山と連続バケット法とを組合せた新しい海水中のウラン採取法を考案した。冰山は南極海や北極海に多数漂流しており、連続バケット法は深海底のマンガン・ジュールの採掘のために研究されているものである。従来海水と吸着剤の接触方法にはポンプアップ方式、潮流利用方式、海流利用方式など多くの提案がなされているが、どのようにして少ないエネルギーと安い建設費でウラン回収装置を作り、運転するかが鍵となっている。

以下にまず冰山漂流利用方式を考えるための基礎的事項を述べ、その後には冰山の漂流と連続バケット法を組合せた海水中のウラン回収法について検討する。

2. 冰山漂流利用方式の基礎的事項

2.1 海水中の化学資源としてのウラン

海洋はいろいろな化学元素を含有する溶液であるにもかかわらず、ウラン回収がとくに注目されるのは、エネルギー資源として価値が高いとともに海水が比較的ウランを濃集しているからである。

まず海水中に含まれるウランなどの微量元素の濃度分布についてみると、ナトリウムや塩素のような主成分元素の濃度の比率はどこの海水でもほとんど変わらないが、微量成分濃度になると、場所や時によりかなり大幅に変動する。たとえば南極海（太平洋）の海水のCo, Ni, Agの含有量は他の海洋に比べてきわめて低く、太平洋中部の $\frac{1}{10}$ 以下になっている。そこで、ウランの海水中の濃度分布¹⁾をみると、インド洋-南極海では3.0~3.8 $\mu\text{g/l}$ となっており、海洋による差はほとんどなく、世界の海水の平均的なウランの濃度と一致している。垂直分布では、昭和基地のあるリュツォホルム湾では塩分量との相関性がみとめられ、表層水では融氷水で薄められるため2.8~3.0 $\mu\text{g/l}$ と低いが500~600mをすぎると3.0~3.5 $\mu\text{g/l}$ に増加している(図-1)。

ないが、微量成分濃度になると、場所や時によりかなり大幅に変動する。たとえば南極海（太平洋）の海水のCo, Ni, Agの含有量は他の海洋に比べてきわめて低く、太平洋中部の $\frac{1}{10}$ 以下になっている。そこで、ウランの海水中の濃度分布¹⁾をみると、インド洋-南極海では3.0~3.8 $\mu\text{g/l}$ となっており、海洋による差はほとんどなく、世界の海水の平均的なウランの濃度と一致している。垂直分布では、昭和基地のあるリュツォホルム湾では塩分量との相関性がみとめられ、表層水では融氷水で薄められるため2.8~3.0 $\mu\text{g/l}$ と低いが500~600mをすぎると3.0~3.5 $\mu\text{g/l}$ に増加している(図-1)。

2.2 冰山

(1) 冰山の形態と寿命

南極海や北極海には、大小さまざまな冰山が浮遊している。その数は24万個をこえて分布面積は世界の海洋の18.7%に達している。形態もさまざま卓状型、円頂型、傾斜型などに便宜的に分類され、170kmを越えた巨大冰山も記録されている²⁾(表1)

卓上型冰山では、高さ平均40~50m、長さ576mで、

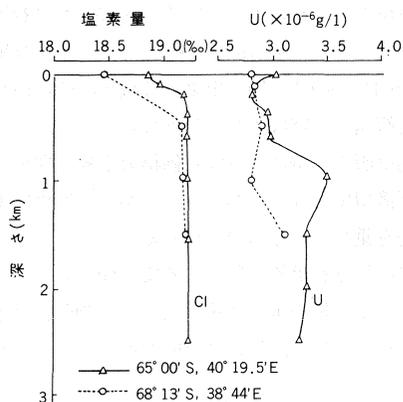


図-1 リュツォ・ホルム湾におけるウランの鉛直分布¹⁾

* 京都大学工学部資源工学科講師

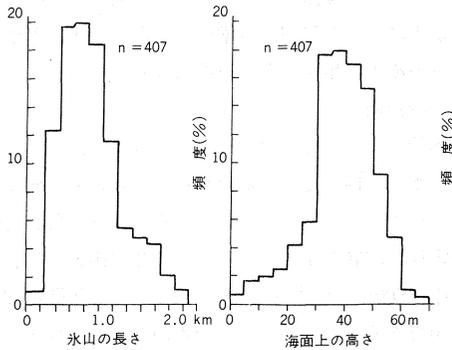
〒606 京都市左京区吉田本町

(注) 本研究会第3回研究発表会 (59/4/26) で講演
原稿受付日 (59/9/28)

表1 氷山の形態

形態	高さ(海面上)		長さ		高さとの比	海面上の高さの比
	平均(m)	最大(m)	平均(km)	最大(km)		
卓上棚水型	20-35	45	—	170	—	1/5-1/6
卓上型	40-50	130	576	12.8	1:13	1/5-1/7
円頂型	50-65	123	850-1500	3.84	1:20	1/6
傾斜型	45-70	121	286	0.656	1:5	1/3
破砕型	30-50	127	210	1.612	1:5	1/2-1/3

(出典: V. I. シリニコフ)



(出典: Nazarov, 1962)

図-2 南極の小氷山の長さ(左)と海面上の高さ(右)の頻度分布

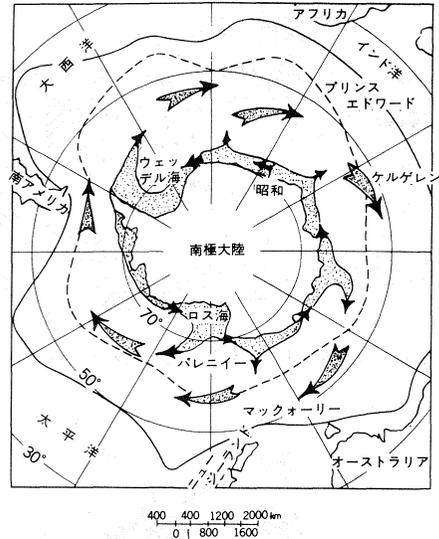
海面上の部分と海面下の部分の比は1/5~1/6である。また、小型の氷山について一般的な大きさは最大頻度が長さ0.9km、海面上の高さ40m、厚さ220m程度という報告もある⁴⁾(図-2)。また、氷山が大陸水床や棚水から生れ、消滅するまでの寿命は、南半球では12~14年、北半球では2~4年と推測されている。

(2) 氷山の漂流

氷山や海水は、風と海流の力によって漂流している。氷山は吃水が深いために風よりも海流の影響を強く受け、1957年と1958年のソ連の観測によると中型氷山の漂流は海水よりも1.5~2倍おそいと報告されている。南極海では氷山は主にウェッデル海、シャックルトン棚水沖合、ロス海から沖合へ向って流出し、沿岸部は西向きに、沖合は東向きに流れ、海流の方向とほぼ一致している(図-3)。漂流速度は沿岸部では風が強くなければ0.1~0.2ノット、強風時に0.4~0.8ノットに達し、沖合いの東向き漂流域では1~2ノットとなっている²⁾。

(3) 南極海の海流

南極海の海水は水温と塩分の違いによって、表層水、南極周極水、南極低層水に分けられている。表層水は水温-1.40℃~-1.85℃、塩分34.1~34.3‰で、水温がもっとも低い層(100~300m)より上の部分で、周極水は表層水の下にあり、塩分34.6‰以上、水温0.5~1.5℃の均質な水で、数百mから2,500mまでの間に存在



実線: 18世紀末から現在までの12~3月における氷山の北限界
点線: 航海期(1947~1962年)の氷山の北限界

図-3 氷山の漂流図²⁾

している²⁾。この表層水と周極水の動きについてはくわしい報告はみあたらないが、スベルドラップ⁵⁾によって描かれた南極海の海流の模式図は図-4のようになっている。図-4では中間の部分は深層水と表現されており、全体として表層水と低層水は南から北に流れているのに対し、深層水はそれらを埋めるような形で北から南に流れている。

(4) マンガンノジュール採掘における連続バケット法

水深数千mの海底に存在するマンガンノジュールには、少量のニッケル、コバルト、銅が含まれているために近い将来の金属資源として注目を集めている。このマンガンノジュールの採掘方法の1つとして連続バケット法が研究されている^{6)~8)}(図-5)。この方法は長いロープを用いるはえなわ漁法からヒントを得たもので、原理は簡単でバケットのついたロープを海底までおろし循環させるものである。1972年に行われた実験では、ハワイ沖水深6,000mの海域でマンガンノジュール10tを採取することに成功している。この他にも工業技術院公害資源研究所を中心に数回の海洋実験が行われている。これらの実験を通して、この採取法の欠点はロープの長さの割に間隔がせまいために、海水の中でロープの絡みがしばしば起こることであったが、その他の欠点は報告されていない。

3. 氷山漂流を利用したウラン回収システム

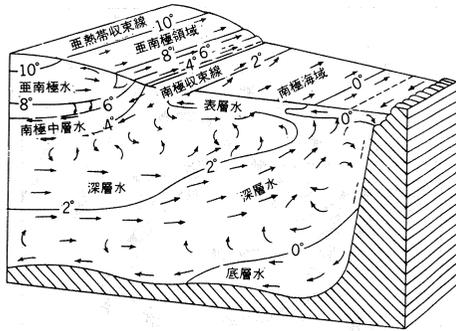


図-4 南極海上における海水の流動の模式図⁴⁾

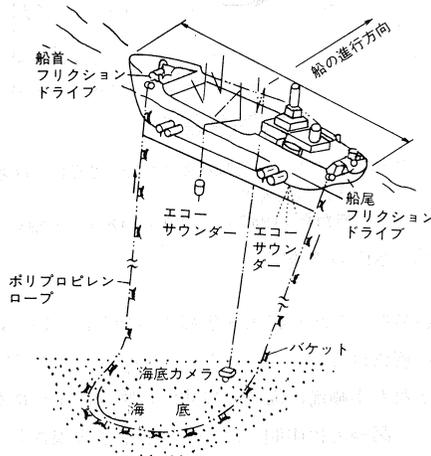


図-5 連続バケットシステムによるマンガンノジュールによる採掘

3.1 吸着システムと氷山の選定

マンガンノジュール採掘の連続バケット法と氷山の漂流を組合せると、多量の海水とウラン吸着剤とを経剂的に接触させることが可能になる。すなわちバケットのかわりに多数のウラン吸着剤を入れた箱を吊り下げたロープを循環させ、氷上を通過する時にウランを回収し、同時に吸着剤を再生させるもので、海水とウラン吸着剤の接触に必要なエネルギーは氷山の漂流の力を利用する。この装置をとりつける氷山としては、漂流速度が大きく、氷上の凹凸が少なく、かつ安全で寿命の長いものが好ましい。一般に、南極海では氷山は卓状で凹凸が少なく、種々の大きさのものが漂流しているが、北極海では氷山は小さく、凹凸の大きいものが多い。したがって海水ウラン採取を行う場合は距離的には遠くなるが、北極海より南極海の氷山の方が望ましい。また漂流速度については人工衛星の画像を用いれば外洋にでてきた氷山の中から目的に合った氷山を選び出すことはそれ程困難な作業ではないである

う。

次に氷上に設置する装置については、ロープの長さ、数、バケットの吊り方、大きさなどによりいくつかの方法が考えられる。もっとも簡単なものは等間隔にバケットをつけた1本のロープを回転させるものであるが、これでは吊り下げられる吸着剤の量は少ない。そこでロープを複数にしバケットを2方向から吊り下げると何列にも増やすことができ、多量の吸着剤を海中に吊すことが可能になる。

3.2 設計例

具体的なモデルを設定し検討してみよう。氷山の大きさは氷上設備を短くするためには小さい方が望ましいが、小さすぎるとロープのからみが懸念され、寿命と安定性の問題も生じてくる。そこで氷山として、かりに直径500m、漂流速度1~2ノットで5年間は安全に使用できるものとする。この氷山にけるロープの数はすでにのべたように1本では吊す容器の数が少なく、かつロープのからみやねじれを防ぐという点からも複数の方が好ましい。しかし数が増えると扱いが煩雑になり、むらなく回転させるのが困難になってくるので、5本ぐらいを1組にするのが適当と思われる。ロープの長さについてはからみと海の深さを考慮し5.000m(海中の部分4.500m)とし、ロープ間隔を5m離し、3m毎に吸着剤の容器を吊すことにする。したがって吸着剤を入れる容器は2m×2m×5mになり、容器の底面および側面にはソリをつけ、氷上および氷山の側壁ではすべりながら移動できるようにする。

次に容器に入れる吸着剤については現在のところキレート樹脂や含水酸化チタンが優れた吸着剤^{9)~11)}とされているが、さらに効率のよい安価なウラン吸着剤の研究開発がすすめられている。しかし、本報告ではいかにして多量の海水と吸着剤を経済的に接触させるかが主題であり、いずれの接触方式をとるにしても吸着剤と吸着槽は必要である。そこで多少問題は残されるが、ここでは吸着剤と吸着槽についてはふれず比重1.1の吸着剤が25%つまった容器ができる限り多くの海水に接触するように工夫した。

なお、ウランの回収作業は1ヶ月に1回の割合で氷上で行い、輸送距離を考えると氷上または船上でイエローケーキにまで濃集するのがよいであろう。しかし二次回収以後に要する費用は一般に一次回収に比べれば小さいと考えられるので経費については一次回収についてのみ検討することにした。

以上のような仮定のもとに設計されたウラン回収シ

システムを図示すると、図-6、図-7のようになる。

3.3 経費

この装置を建設し、運転するための費用を推測して
みる。

(1) 建設費

建設費は水上設備、ロープ、吸着槽を入れる容器と
脱着槽およびそれらの輸送費が主なものであろう。

水上設備は、ロープを6日で1回転の速さで回し、
容器のそりと氷の動摩擦係数を0.1、静止摩擦係数を
0.3、効率を60%とすると、駆動力は全体として64kw
になり、初期動力は192kw必要である。建設費は具体
的な設計をしないと算出できないが、この装置によく
似たスキーフットから類推すると水上設備はおよそ1.4
億円と見積ることができる。

次に、ロープにかかる張力は、空中で容器をつり下
げている力、水中で容器をつり下げている力、氷上を
すべらす力の3つをあわせると150tになり、さらに安
全率を考慮すると中間のロープは500t、両端のロープ
は300t程度になる。材質をポリエステルにするとロー
プの費用は合計3.7億円と見積られる。

また、容器と脱着槽の価格についても算定規準がな
いが、南極で使われている藤製そりやピロータンクを
参考にして推定すると7億円になる。

輸送費は日本と南極海を往復するためには2ヶ月か
かり、輸送費は特別に考えなければならない。全装置
を輸送するためには5万tクラスの船2隻をチャーター

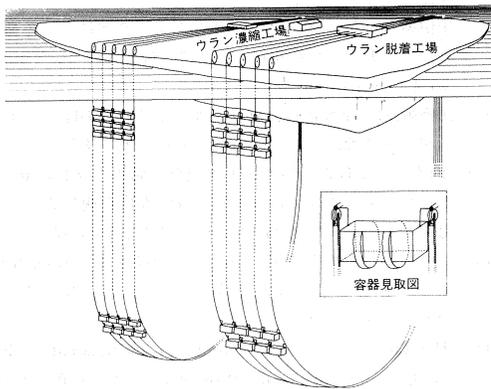


図-6 氷山を利用した海水中のウラン回収システム

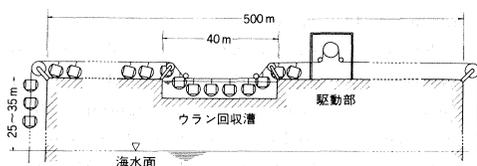


図-7 氷上施設

する必要があり、その他にヘリコプターが必要で、こ
れらをあわせると輸送費はおよそ4.6億円となる。

以上の他に人件費、食料、装備などを含めると、図
-6のようなウラン回収装置を作るには、吸着剤と吸着
槽の経費を除いて、およそ30億円かかるであろう。

(2) 運転費

運転費は軽油、人件費、輸送費などがあるが、機構
が簡単なために維持費は少なく、輸送費がほとんどを
しめ、全体として1.7~0.75億円程度と見積られる。た
だしこの場合も吸着剤の補充は考慮していない。

3.4 ウラン回収量

次にこの装置でどの程度のウラン回収が期待でき
るのかについて検討してみる。吸着量は、吸着剤の種類、
吸着槽の形態、海水の温度などの条件によって異なる。
実験データをみると、アミドオキシム樹脂では流速0.3
cm/sec、25°Cで10日間あたり200 μ gの報告があり、
水酸化チタンでは25°Cで150 μ g/g/10日程度¹²⁾であ
る。南極では温度が低く吸着率の低下が予測される
が、低温での吸着特性についての報告がみあたらない
ので、Ogata¹³⁾の15~30°Cのデータを外挿すると0°C
では25°Cの吸着率の40%程度になる。そこでかりに80
 μ g/g/10日の吸着槽ができたとして計算すると1年間に
吸着するウランの量は190tとなり、脱着率を90%とす
れば、約170tのウラン回収を見込むことができるであ
らう。ウランの価格を1kgについて12,000円とすれば、
20億円になる。

3.5 安全性について

(1) 氷山の安定

氷山の利用はこれまでに水資源としての利用⁴⁾が考
えられてきた。この計画はオーストラリアや南米まで
氷山をタグボートで曳航し、これらの国に多量の淡水
を供給しようというもので、いくつかの試算がなされ
ている。ここで問題にされているのは氷山の融解と崩
壊である。ある計算では水温10°Cの海を100日曳航す
ると、厚さ120mが融け、15°Cならば200日で300m融
けるという。また外洋にでてくるとバラバラになって消
滅するという説もある。事実南極海では氷山の北限界
近くに浮かぶものの中には上下が逆になっているもの
がしばしば観測される。したがって氷山の崩壊はウラ
ン回収の場合もっとも注意されなければならない。

一方、このような氷山の観測については南極に比べ
ると北極海の方がすすんでいる。たとえばアメリカは
氷島T-3と名付けられた北極海に浮かぶ氷山に1952
年から観測基地を設け科学的調査を行った。その結果、

氷島T-3は北極海を回りながら20年も浮遊した。またソ連でも氷山にステーションを作り観測しているが、いままでに作った30近くのステーションの中でもっとも長期間の観測記録はSP-22の9年間で最後は暖水海域に近づき、観測は中止されている。

これらのことを考え併せると、ウラン回収装置を氷上に設ける前に、まず人工衛星や航空機による氷山の探査や基地による詳細な観測を行い、南極の氷山の漂流、融解、崩壊について明らかにする必要がある。しかしながらもっとも注意すべき氷山の崩壊については、急激におこるものではなく、まず小さい割れ目ができ、それが発達し、形がいびつになったのちに起ると考えられるので、アイスレーダーなどによってたえず氷山を監視しておれば氷山の崩壊はあらかじめ予測できると思われる。

(2) 装置の安全性

装置の安全性としては強風と波浪によるロープの破断、吸着容器の破損、建物の破損などが考えられるが、これはまず氷山漂流域を設定しないと考えにくい。しかしながら日本の南極観測も30年近くになり、この間蓄積された知識を活用すれば、安全な装置をつくることは十分に可能であろう。また、氷山が異常に速い海流に出会い、ロープの張力が増加することも考えられるが、この場合は一定以上になるとロープが自然に回転し始めるので危険はない。

5. おわりに

氷山を燃料の補給もなく何年も航行可能な船と想定し、この氷山と連続バケットを組合せた海水中のウラン回収法について検討した。その結果、この回収法は極地という特殊な場所に設定しなければならないが、機構が単純なために技術的に困難な問題もなく、安価に作れる可能性があることが示唆された。しかし本報告では、1つの目安として経費の算定をしたが、基準にしたものはすべて現在市場で量産されている機材からの類推であり、ウラン回収のために新しく設計をしなければ、もっと高くなるかもしれない。またロープの回転において、0.01m/secという速さは理論的には可能であっても現実にこのような低速度で回転できるかどうかは問題である。温度の低下にともなう吸着率の減少についても実験的に求める必要がある。さらに本報告においては天然界に存在する浮体として氷山を選んだが、この連続バケット法による装置は人工浮体を建設すれば赤道や温暖地域でも可能であり、いずれ

の方法が有利であるかは温度の低下による吸着率の低下と人工浮体の建設経費とにかかっているであろう。今後これらの点についても順次検討し、より実現性の高いものになりたいと思っている。

本報告をまとめるにあたって多くの方々からご教示いただいた。装置全般については京都大学の田伏岩夫教授、小夫家芳明博士、東京大学の菅野昌義教授、極地全体については極地研究所の村越望氏、藤井理行氏、連続バケット法については公害資源研究所の伊藤福夫博士、半田啓二氏、海洋科学技術研究センター益田善雄氏、ロープについては東京製鋼繊維ロープの本田健二氏、にお世話になった。その他の京都大学資源工学科の藤中雄三教授、日下部吉彦助教授、八田夏夫助教授、金属鉱業事業団の土屋春明氏、には折にふれ相談にのっていただいた。これらの方々には深甚の感意を表す。

参 考 文 献

- 1) Torii, T. and Murata, S.; Distribution of Uranium in the Indian and the Southern Ocean Waters, JARE Scientific Reports Series D, No.1 (1964) 1~12
- 2) 楠宏ほか編：南極 (1973), 共立出版
- 3) 樋口敬二；氷山利用計画, 極地, No. 29 (1979), 16~21
- 4) Sverdrop, H. U. et al.; The Oceans Their Physics, Chemistry, and General Biology, (1942), New York Prentice-Hall.
- 5) 海洋資源研究委員会; CLBシステム研究報告(1980), 資源協会
- 6) 山門憲雄；一船縦曳き方式開発のための小規模海域実験, 探鉱と保安, Vol. 27, No. 3 (1981), 15~29
- 7) 半田啓二ほか；連続バケット法の実操業時における循環ロープ所要長と探掘規模について, 探鉱と保安, Vol. 27, No. 4 (1981), 9~16
- 8) 宮崎秀甫；海水からのウラン採取用吸着剤の開発, エネルギー・資源, Vol. 2, No. 5 (1981), 79~83
- 9) 「海水ウラン採取」研究専門委員会；海水ウラン採取技術の進歩「海水ウラン採取」研究専門委員会報告(2), 日本原子力学会誌, Vol. 24, No. 8 (1982), 30~37
- 10) 田伏岩夫, 小夫家芳明；海水ウラン採取のための選択的キレート吸着剤, 日本海水学会誌, Vol. 36, No. 4 (1982) 205~218
- 11) Hirotsu, T. et al.; Dependence of Adsorption Rate for Uranium on Porous Property of Hydrophilic Amidoxime Type Adsorbent, Recovery of Uranium from Seawater 1983, (1983), The Atomic Energy society of Japan, 110~118
- 12) 菅野昌義；わが国における海水ウラン採取研究の現状, 日本原子力学会誌, Vol. 23, No. 1 (1981), 36~43
- 13) Ogata, N.; Absorption Rate of Uranium in Seawater on Granulated Hydrous Titanium Oxide and Its Application for the Plant Design, 日本海水学会誌, Vol. 35, No. 5 (1982), 266~273