

技術報告

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

玉田 正男^{1,*}, 瀬古 典明¹, 笠井 昇¹, 清水 隆夫²Cost Estimation of Uranium Recovery from Seawater
with System of Braid Type AdsorbentMasao TAMADA^{1,*}, Noriaki SEKO¹, Noboru KASAI¹ and Takao SHIMIZU²¹Quantum Beam Science Directorate, Japan Atomic Energy Agency, 1233 Watanuki, Takasaki-shi, Gunma 370-1292, Japan²Environmental Science Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry,
1646 Abiko, Abiko-shi, Chiba 270-1194, Japan

(Received February 21, 2006 and accepted in revised form July 20, 2006)

Uranium cost in the annual collection of 1,200 t-U from seawater was evaluated by using the recovery system of braid type adsorbents synthesized by radiation-induced graft polymerization. The total cost was calculated by summing those in the processes of adsorbent production, uranium recovery, and elution and purification. When the adsorbent performance increased from 2 g-U/kg-adsorbent (ad) to 6 g-U/kg-ad, the cost of each process decreased in the same way. The increment of adsorbent durability of 6 times to 60 times reduced the process cost of adsorbent production especially. In the current state of 2 g-U/kg-ad and 6 times usage of adsorbent, the uranium from seawater cost 90,000 yen/kg-U. The uranium cost becomes 25,000 yen/kg-U in the promising performance of 4 g-U/kg-ad and 18 times usage of adsorbent.

KEYWORDS: uranium cost, uranium in seawater, braid type adsorbent, radiation-induced graft polymerization, adsorbent production, uranium recovery, elution, purification, varying conditions

I. はじめに

海水には全元素の約7割の種類元素が溶存しており、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tと膨大な量になり、世界の原子力発電所で1年間に消費されているウランの60,000倍にもなる。日本近海では黒潮により運ばれるウラン量は、年間520万t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。エネルギーの長期安定化のためにはウラン資源の確保が必要であり、その選択肢の一つとして、海水中に溶存する膨大なウラン資源を捕集する技術の開発が期待されている¹⁾。

海水中のウラン濃度は3.3 ppbと極めて低く、500万倍のナトリウムやマグネシウムの共存下で、ウランに対して選択性の高い捕集材が必要とされる。そのため、ウランの吸着技術としては現在まで様々な研究が実施され、アミドキシム基を有する捕集材が極めてウランに対して吸着性能が高いことが見出されている²⁾。我々は、汎用の高分子材料に目的とする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³⁾。

この捕集材をむつ関根浜沖合に係留して3年間で12回の浸漬実験を行い、1kgのウランを回収し、グラフト重合により合成した捕集材により、海水からウランが回収可能であることを示した⁴⁾。この実験では積層した布状捕集材を海上の浮体から係留する捕集システムを採用し、このシステムに基づいたコスト試算では、海水ウラン1kgあたり回収コストは5~10万円と試算された⁵⁾。このときの基本諸元は、捕集材の性能が捕集材1kg当たり6g-Uで、20回の繰り返し使用を行って、1年間に2,000tのウランを採取する規模である。

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⁶⁾。このシステムで年間1,200tのウランを捕集するためには134km²の海域面積が必要であるが、沖縄から土佐湾にかけての海域でウランの捕集に適した海域は6,000km²あることがわかっている⁷⁾。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⁸⁾。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℃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

¹ ㈱日本原子力開発機構 量子ビーム応用研究部門

² 電力中央研究所 環境科学研究所

* Corresponding author, E-mail: tamada.masao@jaea.go.jp

倍向上したことになる。

現状の捕集材の捕集性能や繰返し使用耐性を考慮するとともに、モール状捕集材に適合した捕集材製作工程、ウラン捕集工程を検討し、溶離・精製工程については既報⁵⁾の工程を継承してコストの試算を行った。本コスト試算により、現状の技術での捕集コストを明らかにし、さらに、捕集材の性能および繰返し使用回数をパラメータとして、コストへの影響を明らかにし、海水からのウラン回収の可能性と今後の研究開発課題を明らかにした。

II. 基本諸元

海水ウラン捕集のための基本諸元を **Table 1** に示す。年間のウラン捕集規模を金属ウラン換算で 1,200 t/年と設定した。これは、100万 kW 級原子力発電所 6 基分の核燃料の年間必要量に匹敵する値である。捕集材のウラン捕集性能は 2 g-U/kg-捕集材とし、捕集期間として海水に浸漬する日数を 60 日とした。この値は沖縄での海洋試験で得られている 30 日浸漬での 1.5 g-U/kg-捕集材の性能を 60 日に換算したものである⁹⁾。捕集材は 6 回のウラン吸着・溶離を繰り返して使用し、そののちに焼却して廃棄することとした。1 年間当たり 6 サイクルの捕集を行い、年間稼働率は 360 日とした。装置および設備の償却については、建屋は 30 年間、設備は 15 年間とし、金利は 3% とした。補修費および維持費は設備費の 3%/年とした。電気代は 10 円/kWh、工業用水は 120 円/m³、純水は 150 円/m³ とした。以上の条件で、捕集材製作工程、ウラン捕集工程、溶離・精製工程について、おのおのの工程でのコストを試算した後、積算してウランの捕集コストを見積もった。

また、将来のウラン捕集材および捕集性能の向上を想定し、変動条件として、ウラン捕集材性能が 4 g-U/kg-捕集材、6 g-U/kg-捕集材、捕集材の繰返し利用回数が 12 回、18 回、30 回、60 回の場合のコストを試算した。

III. 捕集材製作

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は 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。モール状捕集材は **Fig. 1** に示すように、フロートを内蔵した芯部の周りに 10 cm の捕集部を有し、1 m あたりの重量は 1 kg である。モール状捕集材は 1 本の長さを 60 m としているため、167 万本を作製することになる。

Fig. 2 にモール状捕集材の製造工程を示す。モール状捕集材はポリエチレンビーズからグラフト用の基材となる糸を紡糸し、その後、電子線を照射した後、水に分散したアクリロニトリルモノマーをグラフト重合する。海水ウランの吸着には 100% のグラフト率(グラフト重合前後の重量増加から算出した反応百分率)が必要であるので、紡糸するポリエチレン糸の重量は 5 万 t となる。

Fig. 2 のプロセスでは、ポリエチレンビーズ(100円/kg,

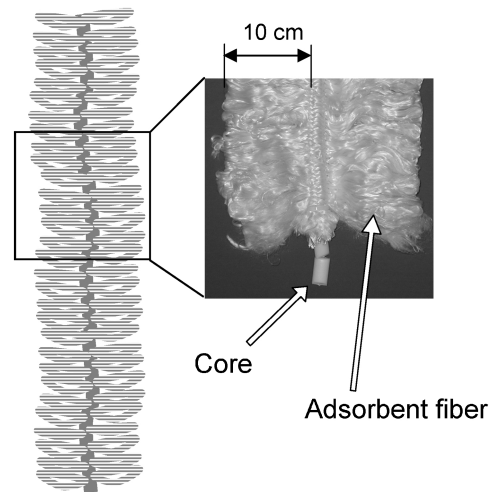


Fig. 1 Braid type adsorbent

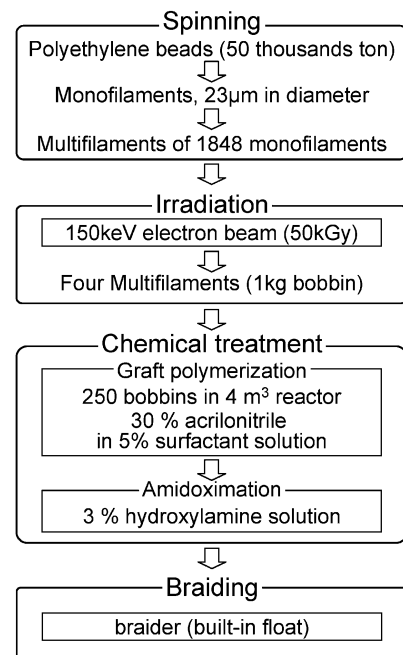


Fig. 2 Production process for braid type adsorbent

Items	Conditions
Recovery amount of U	1,200 t/yr (in terms of metal uranium)
Adsorbent performance	2 g-U/kg-adsorbent
Adsorption period	60 d
Number of adsorption	6 times
Days of operation	360 d
Number of repetition usage of adsorbent	6 times

5万t)から、直径23 μ mのモノフィラメントを紡糸し、1,848本のマルチフィラメントにして、加速電圧150kVの電子加速器で電子線を50kGy照射したのち、さらに7,400本を撚糸してマルチフィラメントとして、1kgごとにポビンに巻き取り、4m³の反応槽内に250個ずつセットする。グラフト重合は、5%の界面活性剤(43万円/m³, 3,415m³/年)で30%のアクリロニトリル(43万円/m³, 43,953m³/年)を水に分散して60°Cで3時間反応で1日3回行う。ジメチルホルムアミド(23万円/m³, 68,300m³/年)で洗浄の後、3%ヒドロキシルアミン(72万円/m³, 22,164m³/年)の水/メタノール(4万円/m³, 66,592m³/年)溶液でアミドキシム化する。合成したポビン状のアミドキシムマルチフィラメントは、製紐装置にて芯部にフロートを内蔵させてモール状捕集材に加工する。作製したモール状捕集材は、係留治具を取り付け、海水中へ係留されるまで一時保管される。捕集材製作工程におけるユーティリティは電力が6.2億kWh/年、工業用水が1,074,960t/年、純水が443,880t/年となる。

設備仕様として、紡糸装置(16億円)が2ライン、電子加速器(1.4億円)は12台、反応槽(2,200万円)が186基、製紐装置(88万円)が1,275基必要となる。建屋敷地面積は143,215m²となる。設備建設費は257億円、建屋建設費は72億円となる。

Table 2に示すように、モール状捕集材製造に関わる費用は年間727億円で、82%がポリエチレン基材、グラフト用モノマーなどの試薬物品費が占める。

IV. ウラン回収

60mのモール状捕集材167万本は、Fig. 3に示すように係留した。モール状捕集材は芯部にフロートを内蔵しているため、一端をチェーン(直径44mmチェーン)などの重りに結束することで係留が可能である。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。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。列

の間隔をモールが絡まない距離として、70mとすると、係留面積は1,031km²となる。なお、設定したチェーンは、室内模型実験⁶⁾と現地実物実験⁷⁾に基づいて検証された係留力算定式を用いて、毎秒0.6mの潮流と波高12m、周期15秒の高波浪が同時に作用したとしても安定で、その安全率は1.1である。そのときの捕集材に係る張力は約120kgであり、強度に問題はない。

モール状捕集材は60日の浸漬の後、作業船により交換する。作業船のチェーンの巻揚げ速度を4m/minとすると、1日当たり9時間の作業時間で1本のチェーン巻上げ、捕集材を新しいものに交換することができる。60日の浸漬期間の間にすべてのモール状捕集材の交換を行うためには、116隻の載貨重量1,000t作業船(1.4億円/隻)が必要となる。なお、作業船は交換用のモール状捕集材を搭載しておくため、2年間の海水ウランの捕集に使用するモール状捕集材は前もって製造しておく必要がある。

ウランの回収に関わるチェーン、作業船などの設備建設費は1,529億円となる。Table 3に示すように、ウランの

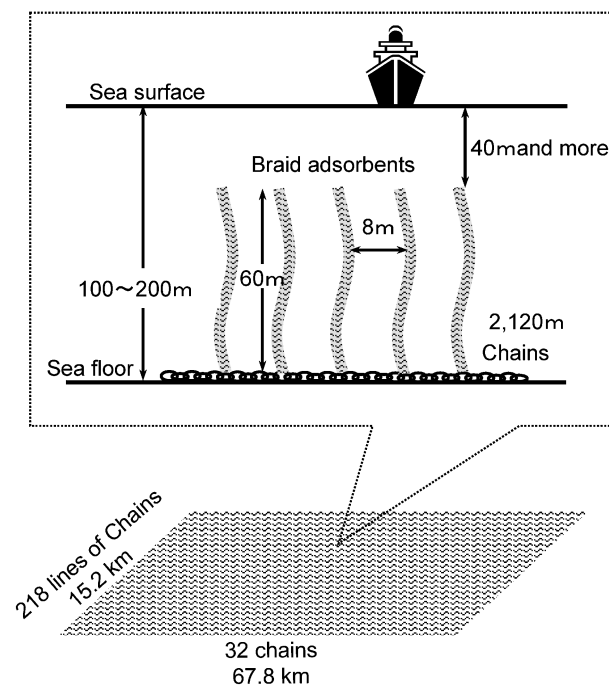


Fig. 3 Mooring system for braid adsorbents

Table 2 Cost for production of adsorbent

Items	Cost (10 ² million yen/yr)	Percentage (%)
Depreciation expenses	20	2.8
Interest of seed money	5.7	0.8
Land rent	0.1	0.01
Cost of labors	28	3.9
Utility cost	64	8.8
Chemicals and materials	599	82.4
Maintenance for plant	7.7	1.1
Maintenance for building	2.2	0.3
Sum	727	100

Table 3 Cost for mooring system and adsorption of uranium

Items	Cost (10 ² million yen/yr)	Percentage (%)
Depreciation expenses	117	38.0
Interest of seed money	30	9.7
Cost of labors	81	26.3
Chemicals and materials	27	8.8
Maintenance for system	53	17.2
Sum	308	100

回収費用は、年間308億円で、設備建築費の減価償却が38%、次いで直接労務費が26.3%となった。

V. ウラン溶離・精製

溶離・精製対象物はウランのみとし、同時に吸着されるバナジウム等のその他の金属は回収しないものとし、コスト評価の対象外とした。

溶離・精製工程のプロセスフローを Fig. 4 に示す。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、0.01 M 塩酸溶液(19円/kg, 382.5 t/年)でアルカリおよびアルカリ土類金属を溶離する。その後、0.1 M 硝酸溶液(55円/kg, 54 t/年)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(85円/kg, 450 kg/年)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られるピューレックス法¹⁰⁾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。溶離槽は 642 m³ が 2 槽となる。ウラン溶離・精製工程におけるユーティリティーは電力が

121万 kWh/年、工業用水が 2,520 t/年、純水が 183,600 t/年となる。

Table 4 に示すように、建屋建設費は462億円、設備建設費は953億円であり、ウラン溶離・精製には年間20.1億円が必要になる。このうち、減価償却費が39.3%、次いで直接労務費が24.4%となった。

VI. コスト評価

1. 現状の海水ウランコスト

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。Fig. 5 にその内訳を示す。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。

2. 捕集性能の影響

捕集材の海水ウランの捕集性能が向上した場合のウラン回収コストへの影響を検討した。捕集材の捕集性能を 2 g-U/kg-捕集材から、4 g-U/kg-捕集材、6 g-U/kg-捕集材と変化させ、パラメータサーベイを行った。溶離・精製工程はウランの総捕集量が同じため、捕集性能により設備規模は変わらない。捕集材製作工程および捕集工程については、設備容量を捕集性能に合わせて見直し、コストを試算した。Fig. 6 に、捕集材の繰返し使用回数を 6 回に固定して、捕集材の性能が、2 g-U/kg-捕集材から 4 g-U/kg-捕集材、6 g-U/kg-捕集材へと向上した場合の海水ウランの価格を示す。回収コストは87,774円から30,979円まで下がるが、内訳は、6 g-U/kg-捕集材のとき、製作工程 66%、ウラン捕集工程29%、溶離精製工程 5%となり、2 g-U/kg-捕集材とほとんど変わらない。これは、捕集材の

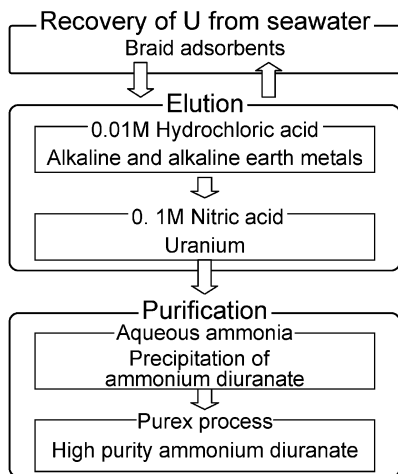


Fig. 4 Process flow of elution and purification

Table 4 Cost for elution and purification

Items	Cost (10 ² million yen/yr)	Percentage (%)
Depreciation expenses	7.9	39.3
Interest of seed money	2.4	11.9
Land rent	0.02	0.1
Cost of labors	4.9	24.4
Utility cost	0.4	2.0
Chemicals and materials	0.2	1.0
Maintenance for plant	2.9	14.4
Maintenance for building	1.4	7.0
Sum	20.1	100

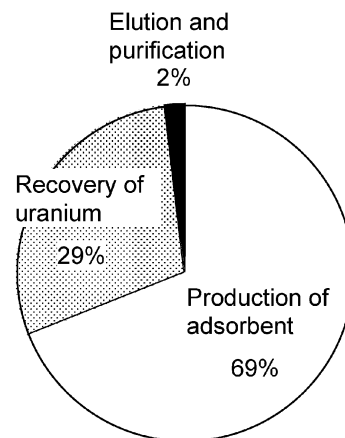


Fig. 5 Breakdown of current recovery cost of uranium

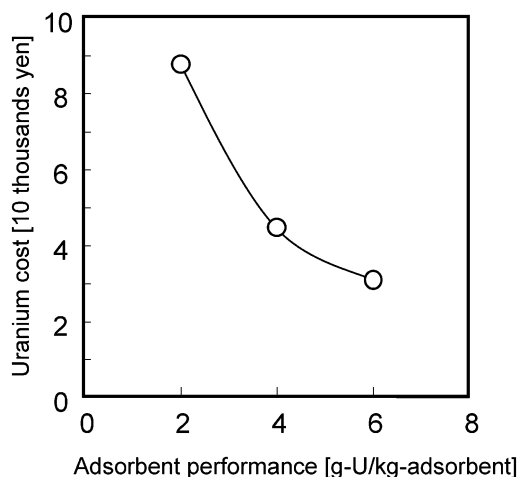


Fig. 6 Effect of adsorbent performance on recovery cost

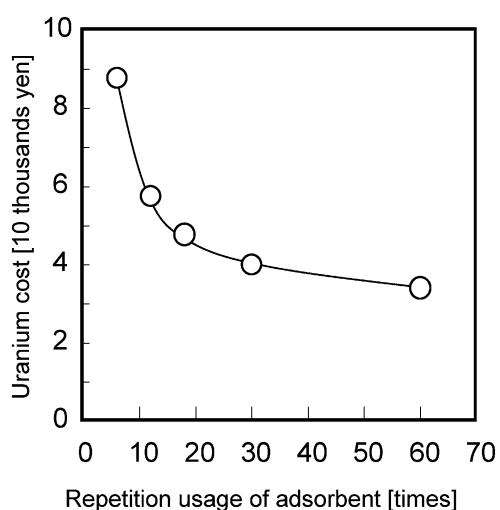
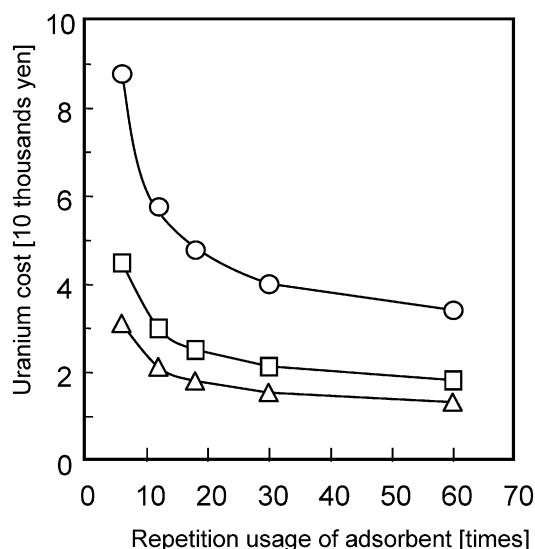


Fig. 7 Effect of repetition usage of adsorbent on recovery cost

性能の向上により、捕集コストの大部分を占める捕集材製造およびウラン回収の費用が捕集性能に合わせて同じように減少するためである。

3. 繰返し使用耐性の影響

捕集材の耐久性の海水ウラン回収コストへの影響をみるために、捕集材の海水への浸漬のち、吸着したウランの溶離する工程の繰返し使用できる回数を6回から、12、18、30、60回へと増加させた。捕集材の性能が、2 g-U/kg-捕集材の場合のウランの価格を Fig. 7 に示す。繰返し使用回数が6回の場合、ウランの価格は87,774円であるが、12、18、30、60回では、それぞれ、57,633、47,761、40,093、34,073円となり、18回の繰返し使用でコストは半減する。内訳は、60回の繰返し使用で、製作工程20%、ウラン捕集工程75%、溶離精製工程5%となり、6回の場合と比較して、製作工程と、ウラン捕集工程の比率が入れ替わる。繰返し使用により、捕集材製造のみの経費が大きく削減され、捕集工程および溶離・精製工程の経費は



○: 2 g-U/kg-adsorbents, □: 4 g-U/kg-adsorbents, and △: 6 g-U/kg-adsorbents

Fig. 8 Effect of repetition usage of adsorbent on recovery cost at various adsorption performances

変化しないためである。

4. 条件変動の影響

捕集材の繰返しの影響について、捕集性能が4および6 g-U/kg-捕集材の場合も加えた結果を Fig. 8 に示す。捕集材のウラン捕集性能および繰返し使用耐久性が高くなるほど、海水ウランの回収コストは低くなる。また、捕集材のウラン捕集性能の向上により、コストはほぼ比例して低下する。しかし、捕集材の耐久性の向上の影響は、繰返し回数が増えるに従い減少傾向が少なくなり、20回以降は2 g-U/kg-捕集材で約4万円、4 g-U/kg-捕集材で2万円、6 g-U/kg-捕集材で15,000円程度となる。

これまで、産出する年間ウラン採掘量よりも発電所等で消費するウラン量の方が大きかったにも関わらず、ウラン価格が最近まで安定した要因は、軍用ウランの転用等の2次供給源が大きかったためである。2次供給源の減少に伴い、ウラン市場価格(スポット価格)は、2004年9月に、20 \$/1 ポンド-U₃O₈と20年ぶりに高値を更新している¹¹⁾。新規ウラン鉱山の開発、生産が採算にのるレベルとしては、2003年版 RED BOOK¹²⁾において、「経済的に回収可能なウラン資源」と定義されている130 \$/kgU未満が妥当である。Table 5 にこれらのウラン価格を同じ単位にして比較リストに示す。なお、ドルとの為替レートは、2005年2月時点の105円/1 \$とした。本試算での、目標値である捕集性能6 g-U/kg-捕集材、捕集材繰返し使用回数60回ではほぼ「経済的に回収可能なウラン資源」に非常に近い価格となった。沖縄海域で行ったウランの捕集試験では、30日の浸漬で3 g-U/kg-捕集材が得られており、この性能を60日に換算すると、4 g-U/kg-捕集材とな

Table 5 Comparison of uranium cost

Uranium	Cost	Cost in \$ (\$/kg-U)
Spot price on Sep. 2004	20 \$/1pound-U ₃ O ₈	52
RED BOOK in 2003 (Maximum price of recovery)	130 \$/kg-U	130
Minimum price in this estimation	13,187 yen/kg-U	126

るため、この性能は達成可能であるといえる。繰返し使用に関しては、18回目まで達成できるとすると、現状で到達の可能性の高いコストは、2万5千円となる。この場合の初期投資は、1,077億円であり、100万kW級の原子力発電所の建設費の約1/3となる。

VII. 今後の課題

海水ウランのコスト低減化について、今後さらなる捕集材の性能向上が必要であり、そのためには、捕集材単位重量中のウラン捕集官能基の増加、海水への長期浸漬における性能劣化の究明と解決、捕集性能に影響を与えにくい溶離剤の選択、モールの編み込みピッチや密度の最適化などの研究開発を進め、海域での性能評価を行う必要がある。また、モール状捕集材の係留システムについては、係留長さの最適化、係留の安全率を考慮した海中設備のチェーンの軽量化、係留・回収時のモール状捕集材高速巻取り装置、チェーン巻取り装置、海中切り離し装置などは小規模で海域での試験が必要である。

海水中のウランが合理的な価格で捕集でき、原子力発電所の燃料として利用できれば、長期にわたって地球規模の環境問題である二酸化炭素の削減への対応に重要な役割を果たし得る。加えて、FBRの技術開発と導入に時間的余裕を与えることもできるため、海水ウランの捕集コストの低減化に向けた研究開発には期待がかかっている。また、ウランと同時に回収されるバナジウムは、備蓄金属として貴重な資源であり、ウラン価格をさらにコストダウンできる可能性も高い。

海水ウランの捕集のコスト試算において、捕集材の製造装置ならびに捕集システムの構築に関し、多大なる協力をいただきましたカワサキプラントシステムズ(株)の佐藤康士氏、東 達弘氏、川重マリンエンジニアリング(株)の椎野泰生氏に感謝いたします。

— 参考文献 —

- 1) 玉田正男, 瀬古典明, “海水中有用金属捕集の現状と将来展望,” *ISOTOPE NEWS*, **551**, 2-6 (2000).
- 2) S. Katragadda, H. D. Gesser, A. Chow, “The extraction of uranium by amidoximated orlon,” *Talanta*, **45**[2], 257-263 (1997).
- 3) T. Kawai, K. Saito, K. Sugita, A. Katakai, N. Seko, T. Sugo, J. Kanno, T. Kawakami, “Comparison of amidoxime adsorbents prepared by cografting methacrylic acid and 2-hydroxyl ethyl methacrylate with acrylonitrile onto polyethylene,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, **39**, 2910-2915 (2000).
- 4) N. Seko, A. Katakai, S. Hasegawa, M. Tamada, N. Kasai, H. Takeda, T. Sugo, K. Saito, “Aquaculture of uranium in seawater by fabric-adsorbent submerged system,” *Nucl. Technol.*, **144**, 274-278 (2003).
- 5) 須郷高信, 玉田正男, 瀬口忠男, 清水隆夫, 魚谷正樹, 鹿島遼一, “海水ウラン捕集のコスト評価と実用化に向けての技術課題,” 日本原子力学会誌, **43**[10], 1010-1016 (2001).
- 6) 清水隆夫, 玉田正男, 瀬古典明, 坂口 勇, “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, **18**, 737-742 (2002).
- 7) 清水隆夫, 玉田正男, “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, **20**, 617-622 (2004).
- 8) 瀬古典明, 笠井 昇, 玉田正男, 清水隆夫, “海水ウラン採取用のモール状捕集材の作製と評価,” 海洋開発論文集, **20**, 611-616 (2004).
- 9) 瀬古典明, “放射線グラフト吸着材によるヒ素の除去と海水ウラン回収,” 群馬大学博士論文, 第3章海水中有用金属に関する研究(2005).
- 10) 日本原子力学会編, 原子力がひらく世紀, 第7章核燃料とリサイクル(1998).
- 11) 武井 毅, “最近の世界のウラン需給状況と市場動向,” 原子力 eye, **51**[2], 54-59 (2005).
- 12) OECD/NEA, IAEA, *Uranium 2003: Resources, Production and Demand*, OECD (2004).