



The Canon Institute for Global Studies

CIGS Working Paper Series No. 22-001J

海水ウラン技術開発推進の提言

キャノングローバル戦略研究所 研究主幹 杉山大志

2022.8

※Opinions expressed or implied in the CIGS Working Paper Series are solely those of the author, and do not necessarily represent the views of the CIGS or its sponsor.
※CIGS Working Paper Series is circulated in order to stimulate lively discussion and comments.
※Copyright belongs to the author(s) of each paper unless stated otherwise.

General Incorporated Foundation

The Canon Institute for Global Studies

一般財団法人 キャノングローバル戦略研究所

Phone: +81-3-6213-0550 <https://cigs.canon/>

要旨

海水ウラン技術はかつて日本がリードし、発電コスト上昇を kWh あたり 2 円程度に抑える可能性があるところまで進歩していた。だが 2011 年の福島第一原子力発電所の事故によって研究開発が途絶えてしまった。

いま世界ではウクライナ戦争を受けてエネルギー危機が勃発しており、安価で安定しており、かつ有力な温暖化対策手段である原子力発電が内外で再評価されている。原子力発電の価値をいっそう高めるために、日本はいまこそ海水ウラン技術の研究開発への投資を再開すべきである。

目次

1 はじめに.....	1
2 2011 年までの技術進歩	2
3 無尽蔵かつ安定したエネルギー源.....	4
4 温暖化問題の「バックストップ技術」	6
5 エネルギー政策および温暖化防止政策の再編成.....	7
6 海外の最新動向.....	8
7 これから何をなすべきか	8

1 はじめに

海水ウランを回収する技術は、かつては、採算性が極めて悪い夢物語とされた。しかし、その後の技術進歩と、地球温暖化という新しい問題の登場によって、その位置づけは大きく変わることとなった。

2011 年までの先駆的な試験結果とコスト試算によれば、鉱山ウランよりは未だコストが高いものの、発電コスト上昇を kWh 当たり 2 円程度に抑える可能性が示唆されていた。もしもこれが実用化するならば、次のような重要な政策的意味を持つことになる。

1. すでに確立された原子力技術（軽水炉技術）が、可採年数6万年という、事実上「無尽蔵のエネルギー源」となる。
2. 低コストの「バックストップ温暖化対策技術」（＝温暖化対策の最終手段）が確立されることになる。
3. エネルギー政策および温暖化防止政策の根本的な見直しができる。これは、経済成長、安全保障、および温暖化対策の調和の、実現可能性を高める。

この果実を現実を得るためには、まず基礎研究の大幅な強化、そして、それに引き続く実証試験の実施が望まれる。以下に、詳しく見ていこう。

2 2011年までの技術進歩

海水ウラン技術は、かつては、採算性が極めて悪かった。しかし技術進歩によって、実用化が視野に入ってきた ([JAEA 解説](#))。

旧金属工業事業団は、香川県仁尾町で海水からのウラン捕集プロジェクトを行ったが、これは、1987年に中止された。中止理由は、吸着剤である含水酸化チタンの性能が低く、ポンプで海水をくみ上げる方式であったため、コスト競争力が無かったことによる。

しかし、世界的に競争が下火になった後も、日本の研究者は活動を続け、玉田らは、含水酸化チタンの性能を約100倍に高めた。高性能のアミドキシム型の高分子吸着剤を開発した。

この吸着剤のウラン吸着の性能は目覚ましかった。長さ60メートルのモール状捕集材を沖縄海域恩納村沖合100メートルの深さの海域に係留し、30日後に回収して吸着性能を評価したところ、吸着剤1Kg当たり1.5gのウランが回収された。この結果、この吸着材は、60日間海水に浸すならば、吸着材1Kg当たり2gのウランが回収できると評価された。

この試験に基づき、技術開発目標を探るために、玉田らは感度分析を行った。その結果、吸着剤の性能が倍になって、1キログラム当たり4gのウランが回収できると想定し、かつ、8回吸着剤を繰り返し使用するならば、ウラン回収コストは3万2000円/Kgになると試算された（図1）。さらに、18回吸着剤を繰り返し使用するならば、ウラン回収コストは2万5000円/Kgになると試算された。これは、96ドル/ポンド U_3O_8 であり、ここまで来ると、過去の鉱山ウランのスポット価格の最高値（図2）と同水準になる。

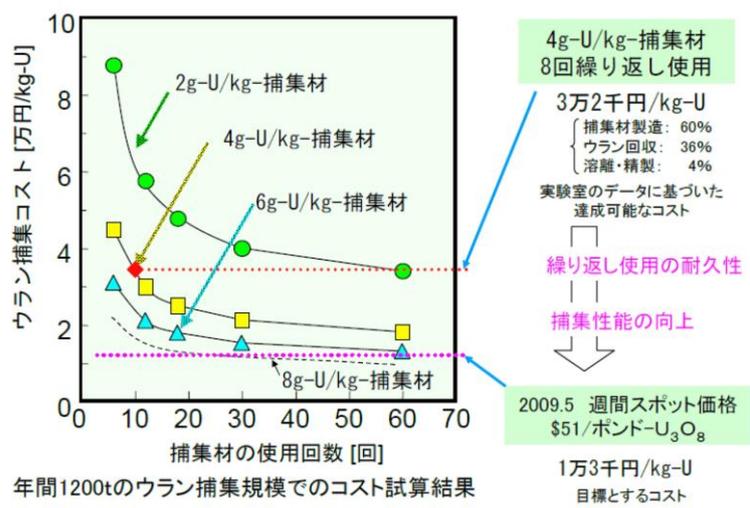


図8 モール状捕集システムによるコスト評価

【出所】日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門 玉田 正男:海水ウランの捕集技術
 ---ウラン捕集材の観点から--- 第20回原子力委員会資料第1-1号(平成21年6月2日)、
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/linkai/teirei/siryu2009/siryu20/siryu1-1.pdf>

図1 モール状捕集システムによるコスト評価 (JAEA)

ウラン価格の推移 (1982~2019年)

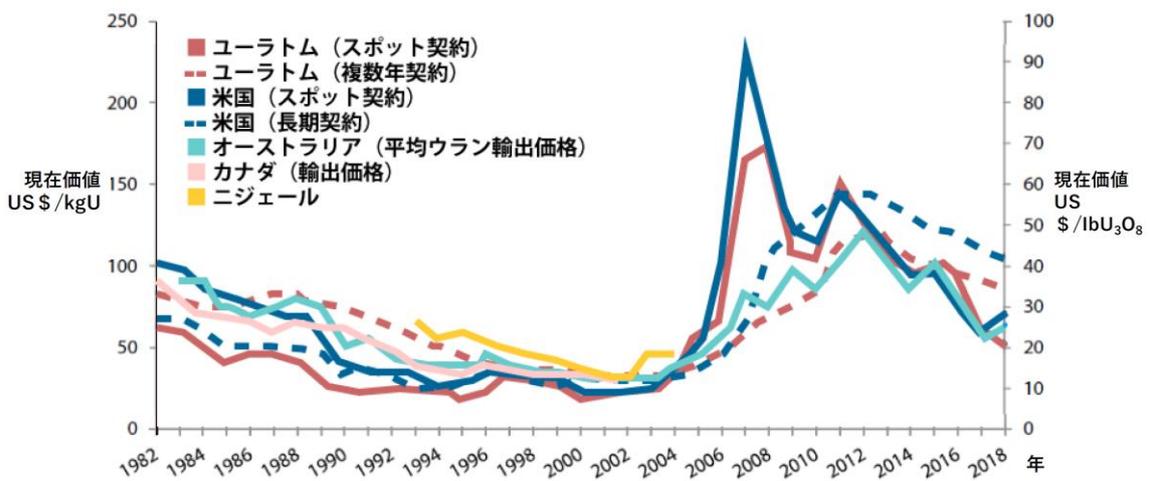


図2 ウラン価格の推移 (JAIF)

ただし、この試算については注意点がある。現在のところ、4g および 6g の吸着性能を持つ吸着剤は確認されていないし、繰り返し利用についての実証試験結果は報告されていない。図1では、吸着剤の繰り返し利用は最低で6回を想定しているが、その回数が可能か、さらに回数を増やせるかは未知である。吸着剤については、吸着性能および繰り返し性能を上げ、コスト低減を図る研究が必要である。

ここで筆者が指摘したいことは、コスト目標はもっと緩めてよい、という点である。このコスト試算の上限値であっても、実は、十分に魅力のある技術になる。表1に示すように、

吸着剤の性能が 2gU/kg と試験で実現された値のままに留まり、繰り返し利用が 6 回に留まると想定しても、発電コスト上昇は 2.36 円/kWh となる。発電コスト上昇がそれほど大きくなるのは、原子力発電は、もともと、発電コストに占める燃料費の割合が低いためである。

表 1

	コスト	コスト(\$/kg-U)	発電コスト(円/kWh)
a)2004 年のスポット価格	\$20/ポンド U ₂ O ₈	52	0.15
b)歴史的なスポット価格上昇	\$130/kgU	130	0.37
c)図 1 の下限値	13187 円/kgU	126	0.36
d)図 1 の上限値	87734 円/kgU	838	2.36

注：a)、b)はウラン鉱山由来のイエローケーキ (U₃O₈) 価格。c)、d)は[玉田 2008](#)による海水ウラン捕集コストの上下限。為替レートは\$1=¥110 とした。ウランのコストから発電コストへの換算は([長野 2008](#) p4)によった。なお、c)、d)は吸着剤の繰り返し利用を 6 回以上想定しているが、このような繰り返し利用についての実証試験結果は未だ報告されていない。

出典：([玉田 2008](#))などをもとに筆者作成。

海水ウランにとって、従前は、鉱山ウランのコストが唯一にして絶対の技術開発目標であった。そう考えると、吸着剤の性能については、まだまだハードルが高く見える。しかし、この目標が仮に達成されず、そのために原子力発電のコストが現状より 2 円/kWh 程度上昇するとしても、この程度の発電コスト上昇で海水ウランが入手できるということは、巨大な政策的価値を持つ。これを、以下に述べていこう。

3 無尽蔵かつ安定したエネルギー源

まずは、人類が、無尽蔵かつ安定したエネルギー源を確保するということである。

鉱山ウランは、すぐに枯渇するというわけではないが、無尽蔵でもない。[JAEA](#) は鉱山ウランの資源量について以下のように解説している：

“国際機関 IEA (2019 年) の報告では、2035 年頃までのウラン需要とこれを満たすための新たな供給の予測が示されている。この予測では、世界の原子力発電設備容量は 2035 年までに 3 億 3,100 万 kW(低需要ケース)~5 億 6,800 万 kW(高需要ケース)になるとしており、高需要ケースの場合には、実績に基づいた供給施設の設備利用率(85%)を考慮すると、ウラン供給が不足する可能性がある事を示している。

ウラン需要が高まれば、これまで採掘していなかった鉱山の探鉱や未確認の資源の採掘

への投資が増える事が予想されるが、資源の需要に対してタイムリーにこのような投資が行われるのか、また、経済的な価格で採掘が可能で資源として供給可能かどうかが問題となる。“

以上に対して、海水ウランはどうか。まず、その資源量は莫大であり、事実上無尽蔵といってよい。海水中のウランの濃度はわずか3.3ppbであるが、海水量が膨大であることから、海水ウランの資源量は45億トンとなる。1年間で世界全体の原子力発電の消費するウランの総量を約7万トンとすると、可採年数(R/P)は6万年となる。仮に世界の発電電力量の100%を原子力で賄ったとしても、可採年数は9千年となる。また、ウランは海水中に均質にまじっており、この推計はかなり確実性の高いものであるし、採集場所も選ぶことができるので、利権や政治情勢などにも左右されにくく、安定した供給が望めるだろう。日本の領有する広大な海洋を活用するという意義もある。

また、このような技術開発をする意思を見せることは、鉱山ウランの価格を抑制するためにも有効である。なぜならば、資源国は、彼らが鉱山ウランについて高い価格を維持することで、海水ウラン研究が進んでしまい、資源国の地下資源の長期的価値が目減りすることを恐れるためである。類似の構造が石油市場には存在してきた。すなわち、長い間にわたって、産油国は、あまりに高い石油価格になることを望んでこなかった。省エネルギー技術や代替エネルギー技術の進展を恐れたためである。海水ウラン技術開発を進めることは、ウラン資源国に対する牽制の役目を果たす。

のみならず、国産資源として海水ウラン回収技術を育てることは、エネルギー安全保障上の重要な意義がある。ウランの資源量と生産量のランキングを表2に示す。いまウランはカザフスタンで多くが生産されているが、ウクライナでの戦争を受けて、ロシアの影響力が強いカザフスタンからの供給の安定性には不安が生じている。他方でカナダ、オーストラリアなどの先進国にも多くの埋蔵量があり、ここからの供給にはそのような不安はない。しかし、民主主義先進国においても、政治状況によっては反対運動によって原子力開発が停滞することもありうる。従ってウランを国産するに越したことはない。

世界のウラン資源量と生産量トップ10

ウラン資源量					ウラン生産量 (順位は2019年を基準)			
順位	国名	2019年1月1日現在、<US\$ 260/kgU 既知資源 (tU) (回収可能)			順位	国名	ウラン生産量 (tU)	
		確認資源	推定資源	合計			2018年	2019年
1	オーストラリア	1,284,800	764,600	2,049,400	1	カザフスタン	21,705	22,808
2	カザフスタン	464,700	504,400	969,100	2	カナダ	6,996	6,944
3	カナダ	652,200	220,800	873,000	3	オーストラリア	6,526	6,613
4	ロシア	256,600	405,300	661,900	4	ナミビア	5,520	5,103
5	ナミビア	320,700	183,500	504,200	5	ウズベキスタン	3,450	3,500
6	南アフリカ	258,000	189,700	447,700	6	ニジェール	2,878	3,053
7	ニジェール	315,500	123,900	439,400	7	ロシア	2,904	2,900
8	ブラジル	155,900	120,900	276,800	8	中国	1,620	1,600
9	中国	122,600	147,100	269,700	9	ウクライナ	790	750
10	ウクライナ	122,100	64,800	186,900	10	インド	400	400
	世界合計	4,723,700	3,346,400	8,070,400		世界合計	53,516	54,224

・既知資源: 発見済みの資源。確認資源と推定資源の合計
 ・確認資源: 鉱床の規模・品位・形状が明らかなもの
 ・推定資源: 鉱床の規模・特性に関するデータが不十分なもの

 © JAPAN ATOMIC INDUSTRIAL FORUM, INC.

表2 世界のウラン資源量と生産量のランキング(JAIF)

4 温暖化問題の「バックストップ技術」

発電コストが2円/kWh程度上昇するというと、「低コスト」とは呼びがたいというのが、通常の電気事業者の感覚であろう。しかしながら、これは、温暖化対策という文脈で見ると、はるかに低コストの部類に入る。

いまの日本の発電電力量は年間で約1兆kWhである。仮にこの全てを原子力発電で賄うこととして、海水ウラン技術による発電コスト上昇が2円/kWhであるとすると、合計2兆円のコスト増分になる。これで日本全体の発電部門のCO₂をゼロに出来るのである。これに対して、いま再生可能エネルギー賦課金はすでに年間2.7兆円に達しているが、再生可能エネルギーによる発電電力量は全電力量の10%程度に過ぎない。コストパフォーマンスは文字通り桁違いである。

このような低コストの温暖化対策手段が無尽蔵に使えるということは、温暖化対策費用に上限が設定されたことになる。

このような、「これ一つあれば、後は要らない」という技術は、一般的に「バックストップ技術」と言われる。バックストップとは、野球のバックネットの意であり、投手がどのような球を投げて捕手が取り損ねても、バックネットに当たれば止まることから、このように命名された。なお蛇足ながら、「バックネット」は、どうやら和製英語らしい。

このバックストップ技術が存在しないことが、温暖化対策が難しい一因とされてきた。他の公害問題では、バックストップ技術で解決されたものが多い。硫黄酸化物については排煙

脱硫技術があった。オゾン層破壊物質については代替フロンがあった。自動車排気ガスについては三元触媒があった。いずれも、その技術単独で、90%程度の排出削減を、受容可能なコスト水準で可能にした。原子力技術は、もともとこれに近いものであったが、海水ウランが利用できるならば、事実上無尽蔵に利用できることとなり、まさにバックストップ技術と呼ぶにふさわしくなる。

5 エネルギー政策および温暖化防止政策の再編成

仮に、海水ウラン技術が2円/kWh程度かそれ以下の原子力発電コスト上昇で実現できることがはっきりするならば、以下のような重大な政策的な変更が検討されるだろう。

●原子力政策の再編成

まず、研究開発活動の重点の変更である。

ウランに資源量の限界があるとみられてきたことから、ウランの資源量を事実上60～90倍¹にする高速増殖炉(FBR)や核融合炉の研究が進められてきた。いずれも魅力があるが、これまで活躍してきた軽水炉技術とはかなり異なるものであり、研究開発の途上である。どの程度のコストになるかを見極めるには、今後の研究開発を待つ必要があるが、海水ウラン利用の軽水炉システムが、現行の軽水炉技術に比べて2円/kWh程度のコスト増分でできるとなると、これは最も強力なライバルとなる。そして、FBRも核融合も、これをコスト目標として研究計画に取り入れることになるだろう。また、技術開発目標年については、時間的余裕を持って進めることができる。

軽水炉技術の研究については、燃料製造から廃棄物処理に至るあらゆる段階で、経済性・安全性・社会的受容性を高める研究がより重視されるようになる。燃料が無尽蔵になることで、燃料の有効利用の優先順位は下がり、上記の3つの要件を改善するか否かで研究の重要性が判断されることになる。

もちろん、海水ウラン技術の導入は、原子力技術が現在直面している問題を全て解決するというものではない。しかし、海水ウラン技術の確立によって、軽水炉技術の他の温暖化対策に対する優位がますます確固となり、FBRや核融合というより高度な課題については、時間的余裕が、技術的にも、政治的にも与えられることになる。

●温暖化防止政策の再編成

海水ウラン技術の確立により、軽水炉が「バックストップ技術」となり、その優位がますます確固となることで、軽水炉の普及拡大への、より強い政治的コミットメントの形成が期

¹数値は(原子力ハンドブック編集委員会2007 P30)によった。

待される。また、太陽光発電はもちろん、バイオマスや CCS などを含めて、あらゆる温暖化対策は、海水ウラン技術とのコスト比較において判断されるようになるだろう。これによって、今後も増大を続けるであろう日本の温暖化対策予算の、大幅な節約が可能になる。

6 海外の最新動向

残念ながら日本では2011年以來研究が途絶えてしまったが、海外では研究が続いてきた。[海外電力調査会の報道によれば](#)、中国政府は海水ウラン回収施設の10年後の稼働を計画している：

【中国】政府、海水ウラン抽出施設の10年後の稼働を計画

2021年5月28日

2021年5月13日付の現地報道によれば、中国政府は約10年後に海水からウランを抽出する施設を稼働させることを計画している。

中国工程物理研究院が中国科学アカデミーなどの支援を受けてプロジェクトを先導し、早ければ2026年にも同施設の建設を開始し、運転が始まれば年間数トンのウランを抽出するという。

中国では2035年までに年間3万5,000tのウランが必要になるが、国内埋蔵量は17万tで輸入を必要とする。

しかし、主に西側諸国が支配するウランのサプライチェーンは、2030年までに世界最大の原子力発電国になるという中国の計画を脅かす可能性がある」と専門家が指摘している。

詳細は明らかにされていないが、清華大学ジャーナル2021年3月号では抽出技術開発の重要性が言及され、同大学の最近の評価でウラン吸着剤の効率が1960年代から30倍以上増加していると現地報道は伝えている。

【情報提供：[一般社団法人海外電力調査会](#)】

[中国では分離膜によって海水中のウラン濃度を高める方法の研究も発表されている。](#)

[他方で米国では、高性能なウラン吸着剤の研究が進められている。](#)

7 これから何をなすべきか

このように、海水ウラン技術の確立によって、軽水炉技術が、なお一層魅力的になる。この可能性を高めるためには、国を挙げた取り組みを強化する必要がある。

第一に、基礎的な研究開発がある。吸着剤については、吸着性能、コスト、耐久性のいずれも、まだ改善の余地があり、集中的な投資が望ましい。

コスト目標を、鉱山ウランではなく、2円/kWhの発電コスト上昇に置くことで、様々な技術が検討対象にのぼると期待される。全く新しい吸着材もありうる。[日本の電力中央研究所では、かつてタンニンなどの天然由来成分による海水ウラン回収も研究していた。これも一つの候補である。](#)極めて安価な吸着剤であれば、繰り返し利用できなくてもよい。

また材料開発だけではなく、実用化に向けて、ウラン回収のためのシステム全体について、様々な課題を検討する必要がある。

第二に、実証試験がある。発電原価上昇が2円以下で収まるという見込みが出た段階で、実際にイエローケーキ(U3O8)を製造し、発電所で使用するまでの流れを一貫して実証試験することが望まれる。これによって、スケールアップに伴う技術的課題や、法的・社会的側面の問題が理解できる。またコストについても、より正確な見通しができるようになる。

この実証試験が成功するならば、先に述べたような大幅な政策の見直しが可能になる。それによって得られるであろう便益は莫大である。資金を重点的に配分して海水ウラン技術の実証試験を行う価値は十分にある。

再生可能エネルギーがそうであるように、希薄なエネルギーを集めて利用する場合に採算性を高めることは、一般には難しい。海水中のウランも希薄であることには変わりないが、しかし、わずかな質量欠損で巨大なエネルギーを生むという原子力エネルギーの特徴があることから、すぐれた吸着剤さえ開発できれば、経済性の高い技術になる可能性を秘めている。この技術の成否を見極めるためにも、また、国民がそれに納得し、推進しようという機運をつくるためにも、研究開発の強化に続いて、一定規模の実証試験が必要であろう。

以上