

2030年までの世界の原子燃料需給展望

一天然ウラン及びウラン濃縮役務の需要変動要因とその影響に関する分析一

村上 朋子*

1. はじめに

世界の原子力発電設備容量・発電電力量は、アジアを中心とした電力需要の増加やエネルギー安定供給及び地球温暖化対策等の観点から、2030年まで緩やかに伸び続けると予測されており、それに伴い天然ウラン需要も2004年の年間約6.7万tU(ウラン換算トン)から、2030年には8万~10万tU前後まで伸びるものと予測されている¹。今後の世界の原子力発電の進展を考える上で、増大する天然ウラン需要に対応して、原子燃料の需給全体がどうなっていくのかを検討することは極めて重要である。

原子燃料の需給全体を見る場合、天然ウラン採鉱から原子力発電所への装荷までには、天然ウランの転換・濃縮・再転換・成型加工という数段のステップがあり、いずれの過程が欠けても原子力発電の需要を満たすことはできないという点を考慮する必要がある。中でも濃縮過程は高度な技術力を必要とすることから特に重要であり、濃縮役務の供給能力という観点から原子燃料の需給を検討することも必要である。更に、濃縮役務の需要動向が天然ウランの需要に影響を及ぼすこと、具体的には濃縮の際のテイル濃度²の変動により天然ウラン需要が大きく変動することを、本論文では重要な論点として指摘したい。上述した世界の天然ウラン需要見通しは、テイル濃度を現在の標準的な値である0.3%として算出されたものであるが、現状でも0.2%程度までテイル濃度を下げている事例も存在する。テイル濃度を0.3%から0.2%に下げることにより、単位重量あたりの天然ウランから得られる濃縮ウランが増加するため、同じ発電電力量に対する天然ウラン需要は約20%低減するが、その場合は濃縮役務単位(SWU)³が約24%増加する。すなわち、天然ウラン需要と濃縮役務需要とは、テイル濃度を介するトレードオフの関係にある。

どの程度のテイル濃度がコスト的に最適であるかは、そのときの天然ウラン価格及び濃縮役務価格により異なるため、天然ウラン需要及び濃縮役務需要の展望にあたっては、天然ウラン価格及び濃縮役務価格見通しの様々な組み合わせを検討し、どのテイル濃度が事業者に選択されやすいかを分析することも重要である。

以上の認識に基づき、本論文では、新しい試みとして⁴、テイル濃度の変化を織り込んだ分析をもとに、第1章では2030年までの天然ウラン需要量及びウラン濃縮役務量の予測を行い、第2章では天然ウラン価格及び濃縮役務価格の変動による需要への影響の分析を行う。併せて、第3章では回収ウラン⁵が天然ウランの代替となり

* (財)日本エネルギー経済研究所 戦略・産業ユニット 原子力グループ グループリーダー

¹ 長期的なウラン需要量予測については文献により幅がある。"The Global Nuclear Fuel Market – Supply and Demand 2005-2030" (World Nuclear Association, 2005年)では2030年における需要量を6万~14万tU, "Uranium 2005: Resources, Production and Demand" (OECD/NEA, IAEA, 2006年)では2025年における需要量を8万~10万tU, 『2030年、2100年に向けた世界の原子力発電、ウラン需給の超長期シナリオ』(小宮山涼一・柿木達朗、(財)日本エネルギー経済研究所、2007年2月)では2030年における需要量を8.7万~10.0万tUと予測している。

² テイルとは、天然ウラン中に0.7%含まれるウラン235を、濃縮により4%前後にまで高めた結果生じる、天然ウランよりウラン235濃度の低いウランのことであり、劣化ウランとも呼ばれる。この劣化ウランに含まれるウラン235の濃度を「テイル濃度」と呼ぶ。

³ 濃縮役務単位 (Separating Work Unit, SWU): 濃縮する際に必要となる仕事量を表わす単位で、原料の天然ウラン・製品である濃縮ウラン及び劣化ウランの流量の合計値から計算される。単位の表記はkgSWUまたはtSWU(重量)。

⁴ 先行研究である『2030年、2100年に向けた世界の原子力発電、ウラン需給の超長期シナリオ』(小宮山涼一・柿木達朗、(財)日本エネルギー経済研究所、2007年2月)においては、テイル濃度・燃焼度・濃縮度等のパラメータを全て固定して2030年までの天然ウラン需要を算出している。本論文ではそれらのうちテイル濃度を変動パラメータとして、トレードオフにある濃縮需要と天然ウラン需要との関係を分析している点が異なる。

⁵ 使用済燃料を再処理(ウラン及びプルトニウムを使用済燃料から分離する工程)した結果生じるウランで、通常、天然ウランより

得る可能性に着目し、回収ウラン利用率をパラメータとした予測も行う。以上の分析を統括して、第4章では天然ウラン及び濃縮役務の安定確保に関する原子力発電事業者へのインプリケーションを述べることとする。

1-1 天然ウラン需給変動要因の抽出とテイル濃度による感度解析

天然ウラン需要を左右する要因には以下のようなものがある。

- テイル濃度、濃縮度、転換ロス率、成型加工ロス率などウラン燃料加工過程の技術に関わるもの
- 平均取出燃焼度など炉心管理技術に関わるもの
- プルサーマルや高速増殖炉など、ウラン燃料軽水炉の代替によるもの
- 軍用高濃縮ウランの希釈、回収ウランなど、天然ウランの代替によるもの

本論文では、の要因のうち最も天然ウラン需要量への影響が大きいテイル濃度の変化、及び、のうち2030年までに最も実現性が高いと考えられる回収ウランの利用について取り上げる。回収ウランは天然ウランより高い濃度（通常1%程度）の核分裂性ウラン（ウラン235）を含むため、回収ウラン1tUは天然ウラン約1.4tUに相当し、天然ウラン需給緩和の有効な手段の一つとされる。本論文ではこの回収ウランの利用も天然ウラン需要予測上の変動パラメータとして分析を行うこととする。

1-2 2030年までの天然ウラン需要量及びウラン濃縮役務量予測

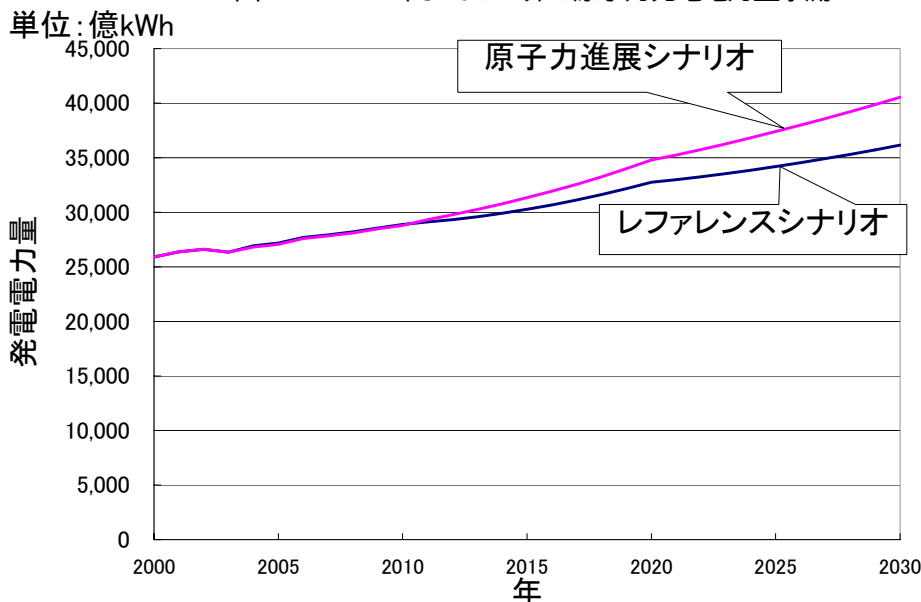
『2030年、2100年に向けた世界の原子力発電、ウラン需給の超長期シナリオ』（小宮山涼一・柿木達朗、（財）日本エネルギー経済研究所、2007年2月）では、2030年までの世界エネルギー需給展望から、2030年まで世界の総原子力発電設備容量及び原子力発電電力量を予測しており、更にそれに基づいて、2030年までの天然ウラン需要量も予測している。

図1-1に、上記論文による2030年までの世界の原子力発電電力量予測を示す⁶。同論文によれば、2003年には2兆6,353億kWhであったのが、2030年にはレファレンスシナリオで3兆6,148億kWhと約37%増加、原子力進展シナリオでは4兆550億kWhと約54%増加するものと見込んでいる。

天然ウラン必要量は、前述のように様々なパラメータにより変動するが、逆に言うと上述のパラメータを全て定数と仮定すれば発電電力量に応じ一意的に決まる⁷。

本論文では、テイル濃度以外

図1-1 2030年までの世界の原子力発電電力量予測



（出所）『2030年、2100年に向けた世界の原子力発電、ウラン需給の超長期シナリオ』（小宮山涼一・柿木達朗、（財）日本エネルギー経済研究所、2007年2月）

わずかに高い濃度のウラン235を含んでいる。

⁶ レファレンスシナリオ、原子力進展シナリオにおける原子力発電電力量予測は、いずれも『アジア/世界エネルギーアウトック2006』、伊藤浩吉・森田裕二・小宮山涼一、第35回定例研究報告会、2006年9月、（財）日本エネルギー経済研究所を参照。

⁷ 厳密に言えば、CANDUやGCRは天然ウラン燃料を用いており濃縮を必要としないので発電電力量と天然ウラン需要・濃縮役務は1:1対応ではない。しかし、世界の商業用原子炉は現在9割以上が濃縮ウランを用いる軽水炉であること、今後2030年にかけて建設されるのはやはりほとんど軽水炉であろうことを考慮し、本論文では以降「原子炉は軽水炉である」と設定する。

のパラメータについて、平均取出燃焼度 45GWd/t、熱効率 34.5%、濃縮度 4.0%、転換ロス率 0.5%、成型加工ロス率 1%と設定するものとする。

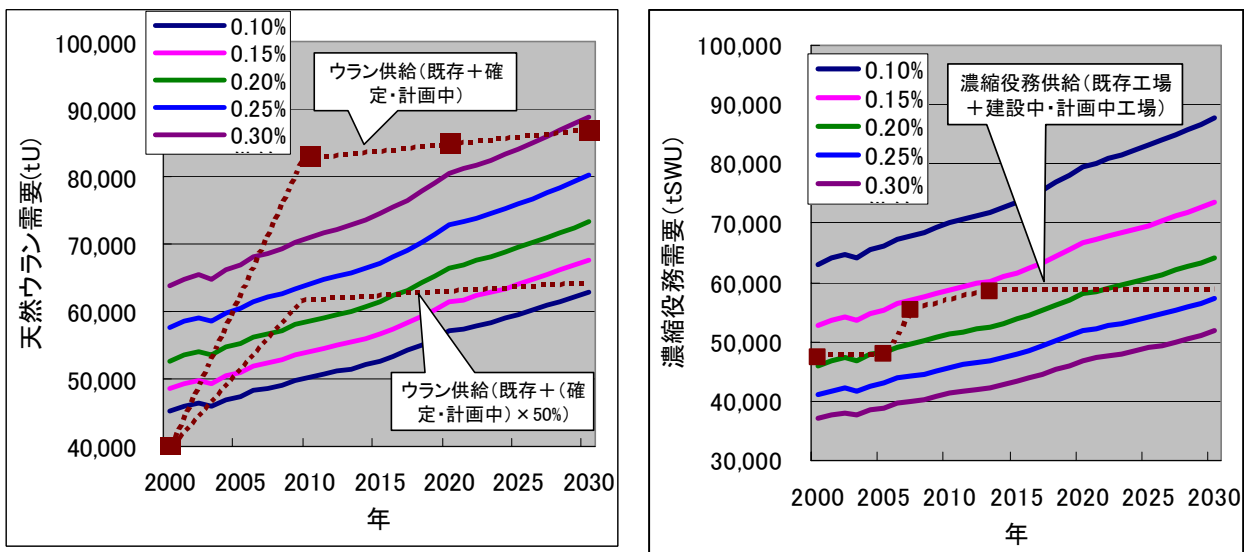
テイル濃度が 0.3% のとき、発電電力量 1 億 kWh あたりの必要天然ウラン (U₃O₈、ウラン精鉱) は約 2.5tU、必要な濃縮役務単位は約 1.4tSWU であるが、テイル濃度が 0.10% のときはこれらがそれぞれ約 1.7tU、約 2.4tSWU となる⁸。その条件で 2030 年の天然ウラン需要及び濃縮役務需要を計算すると、天然ウラン需要は多くても年間 7 万 tU 程度であるが、濃縮役務需要は現在の 2 倍近くになる。

一方、天然ウラン生産量の見通しについては、OECD/NEA 及び IAEA の予測 (Uranium 2005) によると、現在計画中のウラン鉱山開発が順調に進展しなければ 2010 年の約 7 万 tU をピークに以降ピークアウトし、2025 年には約 6.5 万 tU まで減少する見通しである。現在計画中のカザフスタン・オーストラリア・カナダ・アメリカ・南アフリカ等におけるウラン鉱山開発が順調に進展すれば、2010 年には約 8.3 万 tU、2020 年には約 8.5 万 tU、2025 年には約 8.7 万 tU まで増大する見通しとのことである。供給側の予測に関しては本来、非常に不確実性が大きいことを考慮し、本論文では以降、開発が計画通り進展する場合と、開発が 50% 進展する場合とを想定することとする。

また、ウラン濃縮施設の設備容量の見通しについては、IAEA の核燃料サイクル施設データベース⁹によると、2004 年現在、世界の商業規模濃縮施設の総設備容量は約 4.8 万 tSWU であり、フランスの Georges Besse II (設備容量：7,500tSWU/年) が 2007 年に、アメリカの National Enrichment Facility (設備容量：3,000 tSWU/年) が 2013 年に操業開始予定となっている。よって本論文では以降、世界のウラン濃縮役務供給量予測は、2007 年には約 5.5 万 tSWU、2013 年には約 5.8 万 tSWU となるものと想定する。

テイルを 0.1% から 0.3% まで変化させた場合、図 1-1 で示した発電電力量で必要となる天然ウラン需要量及び濃縮役務量の変化及び上述の供給量予測を図 1-2、図 1-3 に示す。

図 1-2 2030 年までの天然ウラン需要量及び濃縮役務需要量 (レファレンスシナリオ)

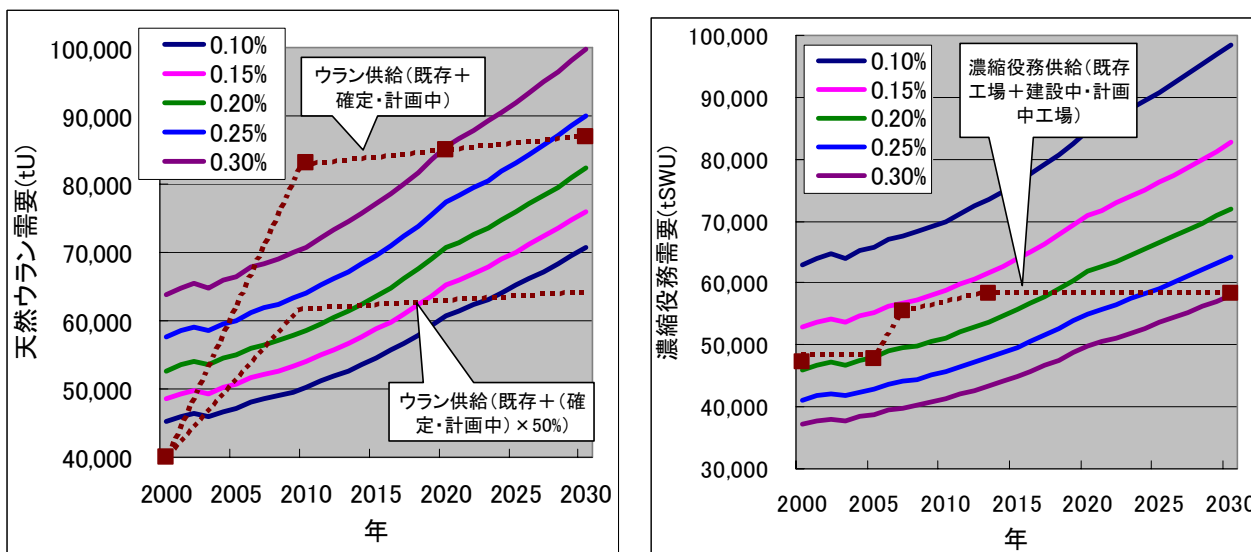


(出所) 需要予測、供給予測ともに(財)日本エネルギー経済研究所作成
 (注) 0.10%~0.30%はテイル濃度を示す。

⁸ “Nuclear Fuel Material Balance Calculator”、World Information Service on Energy、<http://www.wise-uranium.org/nfcm.html> を計算の根拠に用いている。

⁹ “Integrated Nuclear Fuel Cycle Information Systems”、IAEA

図 1-3 2030 年までの天然ウラン需要量及び濃縮役務需要量 (原子力進展シナリオ)



(出所) 需要予測、供給予測ともに(財)日本エネルギー経済研究所作成
 (注) 0.10%~0.30%はテイル濃度を示す。

1-3 天然ウラン需給及び濃縮役務需給に及ぼすテイル濃度の影響の分析

図 1-2、図 1-3 より、テイル濃度の変動は天然ウラン需要及び濃縮役務需要に大きく影響を及ぼすことがわかる。天然ウラン需給及び濃縮役務需給に及ぼすテイル濃度の影響を説明するため、テイル濃度の変化による天然ウラン及び濃縮役務需要の変化を図 1-4、図 1-5 に示す。

なお、図 1-4、図 1-5 における「天然ウラン供給上限」「濃縮役務供給上限」とは、上記図 1-2、図 1-3 における 2030 年での供給量である。

1-3-1 レファレンスシナリオ

テイル濃度が 0.3% の場合、ウラン鉱山開発が順調に進んだとしても 2020 年を過ぎるころから天然ウラン需要量が供給上限に近づき、2030 年には不足となる。一方、濃縮役務需給は、需要に比べて供給量に余裕がある。

テイル濃度を下げていった場合、上記とは逆に天然ウラン需要には余裕が生じ、濃縮役務需要は逼迫する。テイル濃度 0.25% にすると濃縮役務は 2020 年にはまだ余裕があるが、2030 年には供給上限を超える。テイル濃度 0.15% では現在でも濃縮役務需要が供給を上回り、上記計画以外に設備が建設されなければ恒常的に需給逼迫である。

以上より、天然ウラン・濃縮役務の両方とも 2030 年まで供給の範囲内で収まるテイル濃度は、この条件下では存在せず、テイル濃度 0.3% を想定するならウラン鉱山の更なる開発が、テイル濃度 0.25% 以下を想定するなら濃縮設備の更なる増強が必要である。

1-3-2 原子力進展シナリオ

このシナリオはレファレンスに比べて、2020 年には約 6%、2030 年には約 12%、発電電力量が多いシナリオである。天然ウラン及び濃縮役務需要もそれに依じて多くなり、需給状況はレファレンスシナリオより更に厳しくなる。

テイル濃度が 0.3% では、2020 年に既に供給上限にほぼ匹敵する天然ウラン需要があり、2030 年には供給上限を大幅に上回る需要があるのみならず、濃縮役務需要もほぼ供給上限と等しくなる。テイル濃度を 0.25% としても、2030 年には天然ウランが不足するだけでなく濃縮役務需要も供給上限を大幅に上回る。テイル濃度を 0.20%

図1-4 テイル濃度の変化による天然ウラン及び濃縮役務需要の変化 (レファレンスシナリオ)

とすれば、天然ウランは開発が順調に進展すれば供給上限内であるが、濃縮役務は2020年より前に逼迫する。テイル濃度0.15%以下では、天然ウラン開発が順調に進めば余裕あるものの、開発が遅れるようなことがあれば逼迫し、濃縮役務にいたっては恒常的に需給逼迫となる。

以上より、天然ウラン・濃縮役務の両方とも2030年まで供給の範囲内で収まるテイル濃度はこの条件下では存在せず、2020年を過ぎる頃には現在ある計画以上のウラン鉱山開発及び濃縮施設増強が必要である。また、世界平均でテイル濃度が0.20%以下となるようならば、濃縮施設の増強は早期に図られなければならない。

本章においては、テイル濃度の変動により、同じ発電電力量に対する天然ウラン需要・需要とも大きく変動することを定量的に示し、更なるウラン鉱山開発ないしは濃縮施設増強が必要となる時期を示した。次章においては、実際に事業者を選択され得るコスト最適なテイル濃度を価格から設定し、その際の需給動向を分析する。

2. コスト最適となるテイル濃度の選択に係る考察

2-1 天然ウラン価格及び濃縮役務価格の変動とテイル濃度の関係

天然ウランが採鉱されて原子炉に装荷されるまでには、精錬・転換・濃縮・再転換・成型加工の各プロセスを経る必要がある。原子力発電事業者は、精錬された天然ウラン（ウラン精鉱・通称イエローケーキと呼ばれる）を購入し、転換・濃縮・再転換・成型加工の各役務をそれぞれの事業者者に委託する。発電電力量あたりのコスト（発電コスト）は、天然ウラン購買についてはウラン精鉱価格が95\$/lbU₃O₈の場合で約0.73円/kWhであり、濃縮役務は100\$/SWUの場合で約0.17円/kWhである。転換・再転換・成型加工の各役務にかかる発電コストは、天然ウラン購買と濃縮役務とに比較すれば少なく、これらはいずれも前工程から出る生産量に応じて一意に決まるものであって、天然ウラン需要と濃縮役務需要のようにトレードオフの関係にあるものではない。よって、原子力発電事業者としては、天然ウラン精鉱価格と濃縮役務価格の相対的な関係から、両者の合計が最小となる、すなわちコスト最適となるテイル濃度を決め、それに基づいて天然ウラン購買及び濃縮役務委託を行うことが望ましい。

天然ウラン購買費と濃縮役務費用との合計が最小となる「コスト最適なテイル濃度」は、天然ウラン価格、濃縮役務価格により異なる。天然ウラン価格が高ければ、発電事業者はテイル濃度を下げて、濃縮役務を増やして

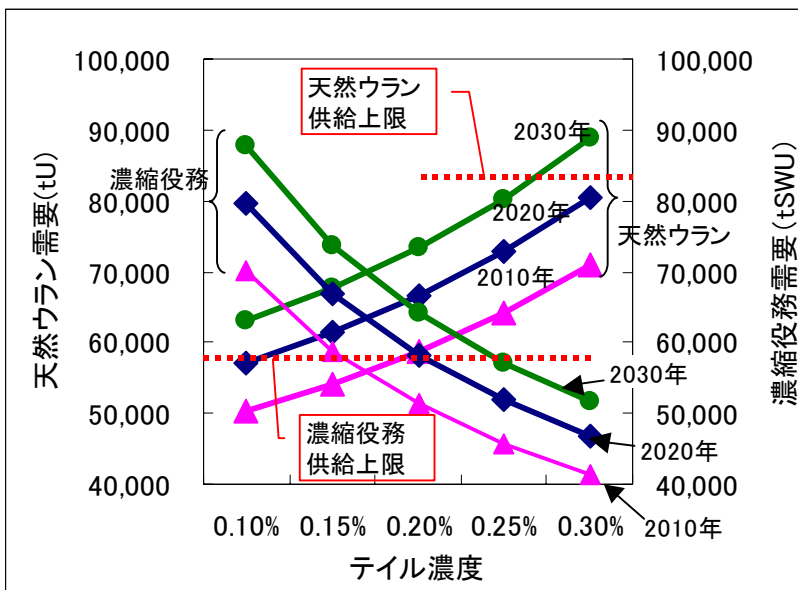
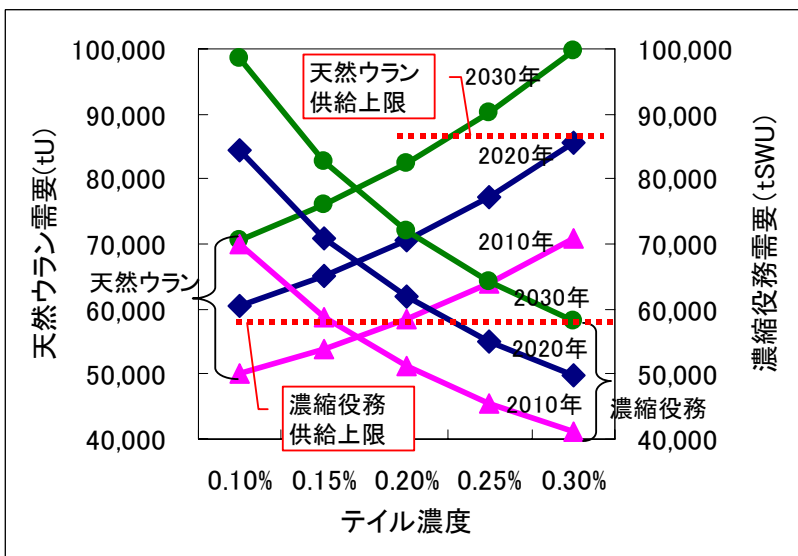


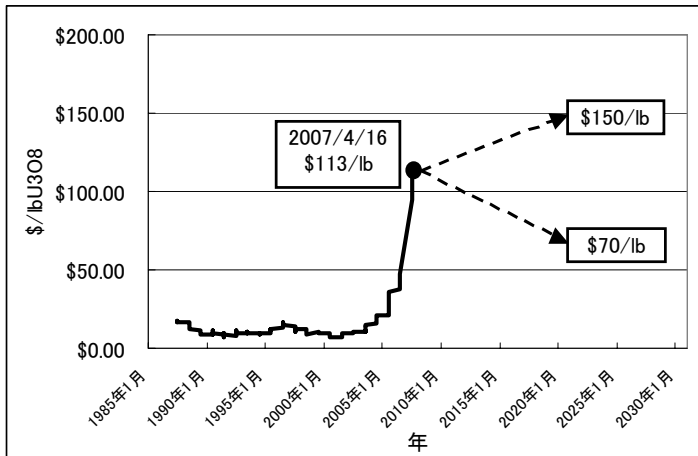
図1-5 テイル濃度の変化による天然ウラン及び濃縮役務需要の変化 (原子力進展シナリオ)



(出所) 需要予測、供給予測ともに(財)日本エネルギー経済研究所作成

天然ウラン購買量を少なくしたほうが得であるし、逆に濃縮役務価格が高ければ、発電事業者はテイル濃度を上げて天然ウランを多く購買し濃縮役務量を少なくしようとする。2007年4月16日現在、天然ウラン価格は\$113/lb、濃縮役務価格は\$138/SWUであり、このときコスト最適なテイル濃度は0.15%である。

図 2-1 天然ウラン価格の推移 (1987年1月～2007年4月) 及び今後の価格想定例



(出所) 価格データは Ux Consulting Company, LLC ホームページより取得

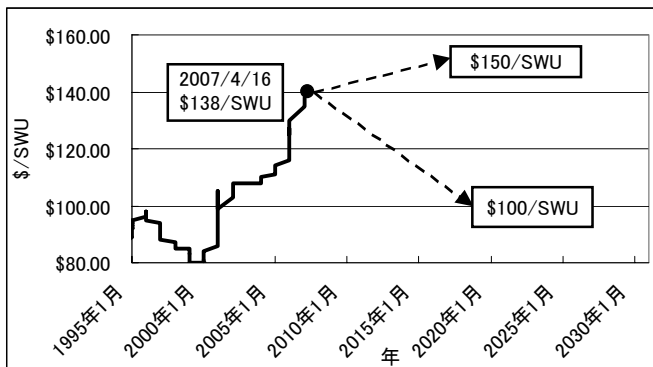
2006年3月には\$40/lbを、2007年1月には\$70/lbを超え、2007年4月には\$113/lbに達し、10年前の約10倍にもなっている。このような上昇は3年前さえ予測困難だったものであり、今後も更に上昇するのか、あるいは下降して落ち着くのか、様々なパターンが考えられ一意的な予想は難しい。ここでは、採掘コスト\$130/kgU (約\$50/lbU₃O₈)で回収可能なウラン鉱山が今後多く開発される予定であること、一方で開発中断や予想外の事故等

天然ウラン及び濃縮役務の価格がある値の時にコスト最適なテイル濃度がどのくらいになるかを分析するには、価格の予測が必要である。天然ウラン価格、濃縮役務価格とも、近年急激な上昇を続けており、今後の価格の正確な予測は非常に難しい。図 2-1 に天然ウラン価格の推移を、図 2-2 に濃縮役務価格の推移をそれぞれ示し、今後の価格変動の上限値及び下限値を想定する。

天然ウラン価格は1980年代から1990年代にかけて概ね\$10/lb前後で推移し、高くても\$15/lb程度であった。ところが2004年頃から急激に上昇し、2004年9月には\$20/lbに達し、その後2006年から更に上昇速度が速くなり、

により一時的な需給逼迫もあり得ることから、今後の価格について、上限を\$150/lb、下限を\$70/lbと想定する。

図 2-2 濃縮役務価格の推移 (1995年1月～2007年4月) 及び今後の価格想定例



(出所) 価格データは Ux Consulting Company, LLC ホームページより取得

昇は、アメリカの濃縮事業者 USEC 社のガス拡散式濃縮プラントが、電気料金の負担回避のため稼働率を下げていることが一因ではないかと言われており、そうであるならば今後とも大量の電力を消費するガス拡散式プラントも採算に乗るくらいまで濃縮役務価格が上昇しなければ同様の傾向が続く可能性が高い。また、濃縮施設の操業を安定的に高い稼働率で続けるには、非常に高い技術力が必要であり、世界でもこのような高い技術力を有する濃縮事業者は限られている。一方で、現在多く選択されている0.25%～0.30%のテイル濃度では、将来にわたり濃縮役務需要には余裕があるという現実もある。

以上より、今後の価格について、上限を\$150/SWU、下限を\$100/SWUと想定する。

天然ウラン購買と濃縮役務委託とのトレードオフにおけるコスト最適なテイル濃度を設定するため、今後の価格予測としては、以下の3通りを想定する。

現状維持 (天然ウラン価格、濃縮役務価格) = (\$113/lb、\$138/SWU)

天然ウラン低下、濃縮役務上昇 ((天然ウラン価格、濃縮役務価格) = (\$70/lb、\$150/SWU))

天然ウラン上昇、濃縮役務低下 ((天然ウラン価格、濃縮役務価格) = (\$150/lb、\$100/SWU))

それぞれの価格ケースにおいて、発電電力量 1 億 kWh あたりに必要な天然ウラン購買費と濃縮役務費との合計を、テイル濃度毎に計算した結果を表 2-1 及び図 2-3 に示す。

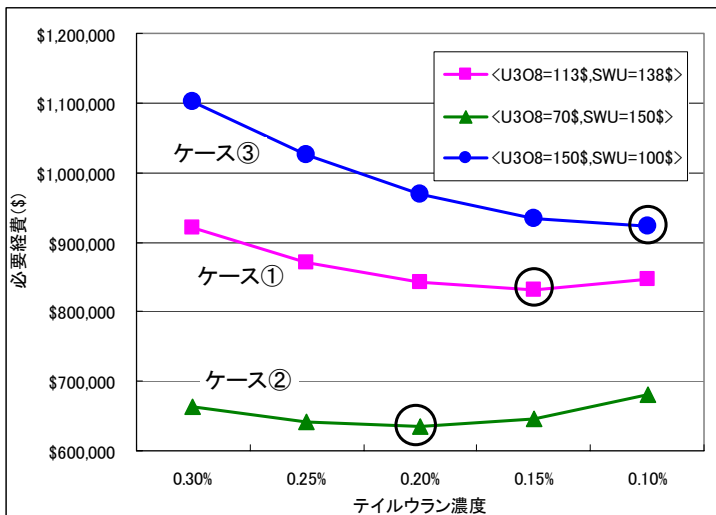
ケース ①、すなわち価格が現状維持の場合には、コスト最適なテイル濃度は 0.15% である。天然ウラン価格が下がり濃縮役務費が上昇するケース ② においては、事業者はテイル濃度を下げて濃縮役務を増やすより、天然ウランを多く購買したほうが得になるので、コスト最適なテイル濃度はケース ① より高くなり、0.20% となる。逆に天然ウラン価格が更に高くなり、濃縮役務費用が相対的に低いケース ③ では、事業者は天然ウランを多く購買するより濃縮役務を増やしたほうが得なため、コスト最適なテイル濃度は 0.10% と低くなる。

実務上は、発電事業者 (濃縮事業者からみた顧客) がテイル濃度を自由に選択できるとは限らず、契約によっては濃縮事業者が指定する場合もあれば、濃縮事業者が指定した範囲の中から発電事業者が選択する場合もある。また 0.10% までのテイル濃度が可能かどうか、各濃縮施設の仕様次第である。現在日本が濃縮を委託している濃縮事業者では、事業者が選択できるテイル濃度の下限は 0.20% 程度のものであるが、技術的にはより低いテイル濃度も十分可能であり、現在の価格状況下では世界平均で 0.15% 前後のテイル濃度が適用されている可能性も高い。いずれにせよ、発電事業者はそれぞれの状況で常に自社にとってコスト最適となるテイル濃度を選択しようとして行動するであろうから、天然ウラン・濃縮役務の価格動向は今後の天然ウラン需要及び濃縮役務需要展望にあたり、非常に重要である。

表 2-1 発電電力量 1 億 kWh あたりに必要な天然ウラン購買費と濃縮役務費用の合計一覧

天然ウラン価格(\$/lb)	113	70	150	
濃縮役務価格(\$/SWU)	138	150	100	
テイル濃度	0.30%	\$919,976	\$662,288	\$1,102,073
	0.25%	\$870,990	\$641,681	\$1,024,492
	0.20%	\$841,510	\$635,876	\$969,298
	0.15%	\$831,536	\$646,686	\$934,279
	0.10%	\$847,030	\$681,448	\$922,272

図 2-3 発電電力量 1 億 kWh あたりに必要な天然ウラン購買費と濃縮役務費用の合計のテイル濃度による変動



2-2 天然ウラン価格及び濃縮役務価格の変動による需要への影響の分析

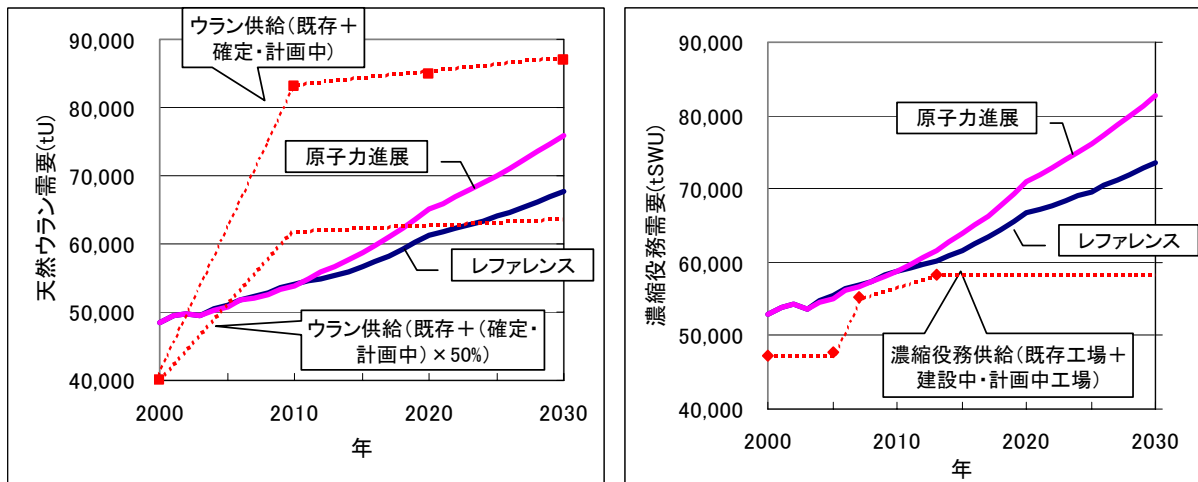
前項より、天然ウラン価格及び濃縮役務価格が異なる時、それぞれコスト最適となるテイル濃度が異なるため、発電事業者がコスト最適なテイル濃度を選択しようとして行動した結果、天然ウラン需要及び濃縮役務需要量が価格により異なってくる可能性が抽出された。本項ではそれに基づき、2-1 で想定した 3 通りの価格ケースについて、2030 年までの天然ウラン及び濃縮役務の需給を展望する。

2-2-1 ケース ① における 2030 年までの天然ウラン及び濃縮役務需給展望

ケース ① (現状維持: 天然ウラン価格\$113/lb、濃縮役務価格\$138/SWU) におけるコスト最適なテイル濃度は 0.15% である。これは、事業者がこの価格条件下においてできるだけコスト最適となるよう行動した結果、

世界平均でこれに近いテイル濃度が選択されることとなり、それに伴う需要はどうかを予測するものである。レファレンス・原子力進展の各シナリオでの天然ウラン及び濃縮役務需要と供給量の関係を図2-4に示す。

図2-4 現状維持ケース（\$113/lb、\$138/SWU）における天然ウラン及び濃縮役務需給展望（テイル濃度：0.15%）

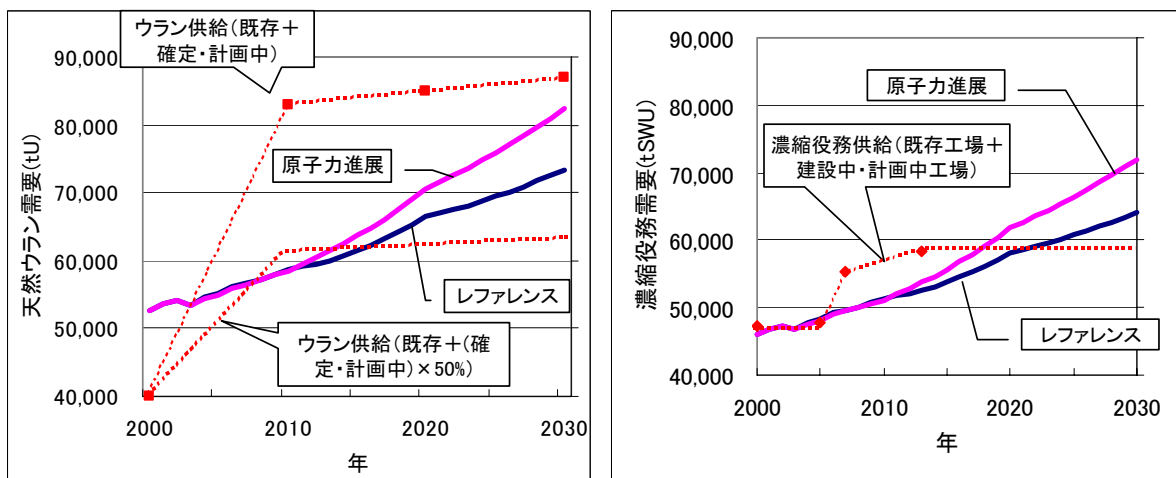


本ケースでは、天然ウラン需要は開発が順調に進めば原子力進展ケースでも余裕があるが、濃縮役務のほうが早期に逼迫することとなる。従って濃縮役務事業者にとっては増設へのインセンティブが高く、ウラン生産事業者にとっては更なる増産へのインセンティブが低い。発電事業者としては、天然ウラン確保もさりながら、濃縮役務確保のほうがセキュリティ上より重要となってくるので、濃縮役務提供を安定的に受けられる自前の濃縮施設を保有する等の対策が必要となる。

2-2-2 ケース における 2030 年までの天然ウラン及び濃縮役務需給展望

ケース（天然ウラン価格\$70/lb、濃縮役務価格\$150/SWU）におけるコスト最適なテイル濃度は 0.20%である。同様に算出したレファレンス・原子力進展の各シナリオでの天然ウラン及び濃縮役務需要と供給量の関係を図2-5に示す。

図2-5 天然ウラン低下・濃縮役務上昇ケース（\$70/lb、\$150/SWU）における天然ウラン及び濃縮役務需給展望（テイル濃度：0.20%）



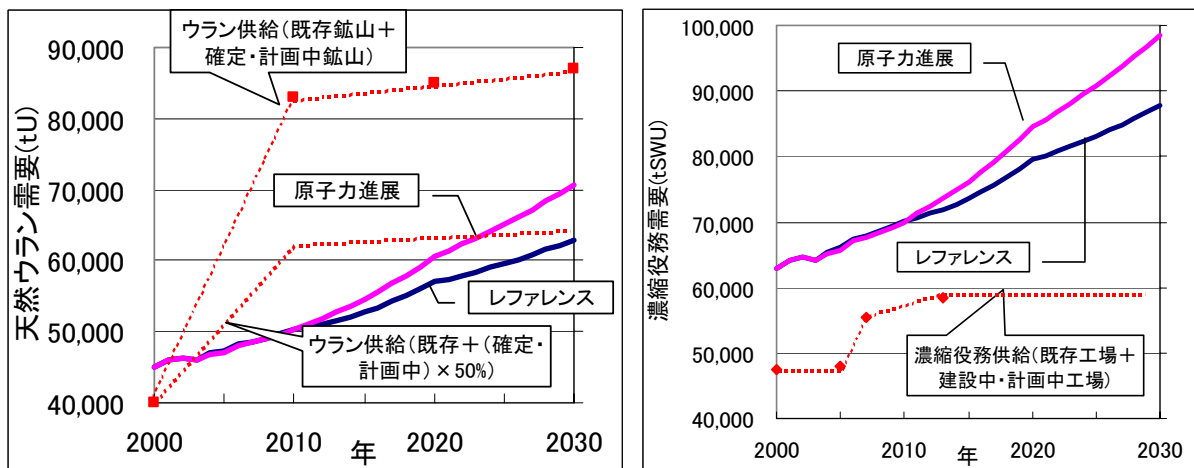
本ケースでは、天然ウラン需要は開発が順調に進めば原子力進展ケースでも余裕があるが、濃縮役務は原子力進展シナリオで2010年過ぎから、レファレンスシナリオでも2020年頃には逼迫することとなる。従ってこれも

ケース 同様、濃縮役務事業者にとっては増設へのインセンティブが高く、ウラン生産事業者にとっては増産へのインセンティブが低い。発電事業者としては、上記同様、濃縮役務提供を安定的に受けられる自前の濃縮施設を保有する等の対策が必要となる。

2-2-3 ケース における2030年までの天然ウラン及び濃縮役務需給展望

ケース（天然ウラン価格\$150/lb、濃縮役務価格\$100/SWU）におけるコスト最適なテイル濃度は0.10%である。同様にして算出したレファレンス・原子力進展の各シナリオでの天然ウラン及び濃縮役務需要と供給量の関係を図2-6に示す。

図2-6 天然ウラン上昇・濃縮役務低下ケース（\$150/lb、\$100/SWU）における天然ウラン及び濃縮役務需給展望（テイル濃度：0.10%）



本ケースでは、天然ウラン需要は原子力進展ケースでも概ね余裕がある一方、濃縮役務は恒常的に逼迫状態にある。このような状況ではいくらコスト最適なテイル濃度であっても、実際には設備容量の絶対的な不足から発電事業者がこのテイル濃度を選択することはほとんど不可能であり、供給可能な濃縮役務の範囲に収まるテイル濃度とせざるを得ない。結果として、発電電力量あたりの天然ウラン購買+濃縮役務費用は、コスト最適な場合より10%程度高くなってしまおう。

以上3ケースより導かれる価格動向の予想としては、天然ウラン価格は現在より下がり、濃縮役務価格は現在より上がるというものである。ケース を除き濃縮役務需給はいずれも早期に逼迫することとなっており、これはまず濃縮役務価格の上昇を誘発すると考えられる。それを見越して早期に濃縮施設の増設に着手した事業者が大きな利益を得るであろうことも予想される。

本章においては、実際に選択され得るテイル濃度の設定及び、その条件下での天然ウランと濃縮役務の需給動向について分析した。次章においては、天然ウランの代替となり得る回収ウラン利用を視野に入れ、その利用率をパラメータとした天然ウラン及び濃縮役務の需給について分析を行う。

3. 回収ウラン利用率の天然ウラン需要への影響分析

回収ウランは、使用済燃料を再処理した際に生じるウランであり、通常、天然ウランより高い1%前後のウラン²³⁵を含んでいる。この回収ウランを濃縮して用いることが出来れば天然ウランの代替となり得るが、継続的に使用するためには再処理施設が順調に稼働していることが前提である。

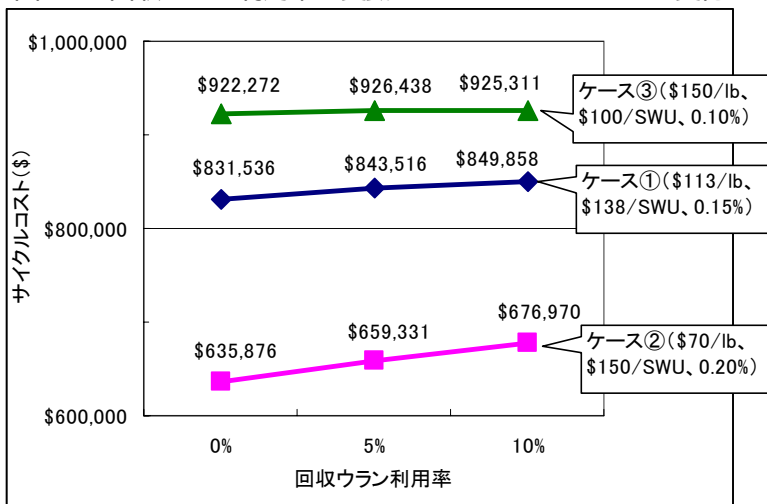
2005年現在、世界で稼働中の商業用再処理施設の設備容量総計は約4,800tHM/年（tHM：ヘビーメタル・トン、ウランとプルトニウムを合計した金属重量トン）である¹⁰。これに、日本の日本原燃（株）六ヶ所再処理工

¹⁰ イギリス・セラフィールド再処理工場（B205及びTHORP）、フランス・ラアーグ再処理工場（UP2-800及びUP-3）、ロシア・

場が操業開始すれば 800tHM/年が加わり、更にロシアの再処理工場 RT-2 が操業開始すれば 800tHM/年が加わる。すなわち 2015 年以降には世界全体で約 6,400tHM/年の再処理設備容量があることとなり、平均稼働率 75% を想定すると、年間約 4,800tU の回収ウランが生じる計算となる¹¹。よって本論文では、利用可能な回収ウランの上限量を 4,800tU/年と仮定し、2030 年に発電に必要な濃縮ウランのうち回収ウランが占める割合を 0%~10% として、天然ウラン需要及び濃縮役務需要にどのような影響があるかを分析する。

図 3-1 回収ウラン利用率の変動によるサイクルコストの変化

回収ウランを用いる場合、濃縮役務費用に加えて再処理費用も発電事業者の負担となる。再処理費用は、再処理事業者により大きく異なり、過去の契約実績等から推定される範囲では\$400/kgHM から、高いケースでは\$3,000/kgHM に達している。ここでは再処理費用を、実務で多く適用されているといわれる \$750/kgHM (\$750,000/tHM) として、発電電力量 1 億 kWh を得るために必要な天然ウラン購買費 + 濃縮役務費 + 再処理費用の合計 (以下、サイクルコスト) を、前述 2-2 の 3 ケースについて算出した結果を、図 3-1 に示す。



再処理単価がウラン濃縮に比べて割高であるため、一般的には回収ウランを多く用いようとする、その分再処理量が増加し、再処理費用が多くかかるので発電事業者の負担は高くなる。天然ウラン価格及び濃縮役務価格が現状維持であるケース や、天然ウラン価格が低下するケース では、回収ウランを多く用いるほどサイクルコストは高い。しかし、天然ウラン価格が上昇していくと相対的に再処理費用が割安になり、ケース では回収ウラン 10%のほうが 5%の場合よりわずかに安くなっている。これは、天然ウラン価格に対して最適な回収ウラン利用率が存在することを意味する。

この 3 ケースについて、2030 年の天然ウラン需要及び濃縮役務需要を算出した結果を図 3-2、図 3-3 に、テイル濃度 0.20% (ケース) の場合の回収ウラン需要推移を図 3-4 に示す。

いずれのケースでもテイル濃度は 0.10%~0.20%と、1-2 章の予測で用いた 0.30%より低い値が仮定されているため、図 1-2 及び図 1-3 と比較して天然ウラン需要は供給上限まで余裕があり、開発が計画の 50%しか実現しないケースまで想定しても回収ウランの利用を視野に入れれば需給が緩和されるケースも出てくる。濃縮役務需要のほうは供給上限を超えるが、回収ウランを用いることにより、用いない場合よりわずかではあるが濃縮役務需要も低減させることができる。それは、前述の通り回収ウランに含まれるウラン 235 の割合は約 1%と天然ウランより高いため、同量の濃縮ウランを得るために必要な濃縮役務が少なくすむからである。例えば原子力進展シナリオにおいて、天然ウラン価格が低下し濃縮役務価格が上昇するケース でテイル濃度 0.20%が選択された場合、2030 年の天然ウラン需要は約 8.2 万 tU と供給上限に近くなるが、回収ウランを 5%利用すればこれが約 7.8 万 tU、10%利用すれば約 7.4 万 tU となり、供給に対して余裕が生じる。併せて濃縮役務需要も約 7.2 万 tSWU から、約 6.9 万 tSWU とすることができる。

RT-1 再処理工場の設備容量総計である。出所は濃縮施設と同様“Integrated Nuclear Fuel Cycle Information Systems”, IAEA。なお、このほかにインドにも商業用再処理施設が稼働しているほか、中国の再処理工場 500tHM/年が操業開始しているという情報もある。

¹¹ 正確に述べれば、再処理した使用済燃料 1tHM から生じる回収ウランは約 0.99tU であるが (使用済燃料のウラン・プルトニウムのうち、約 1%はプルトニウムであるため。) この差は本論文の趣旨からすれば有意ではないので、ここでは再処理施設の設備容量 × 稼働率 = 得られる回収ウランの上限量 とする。

図 3-2 2030 年の天然ウラン需要 (回収ウラン利用率による変動)

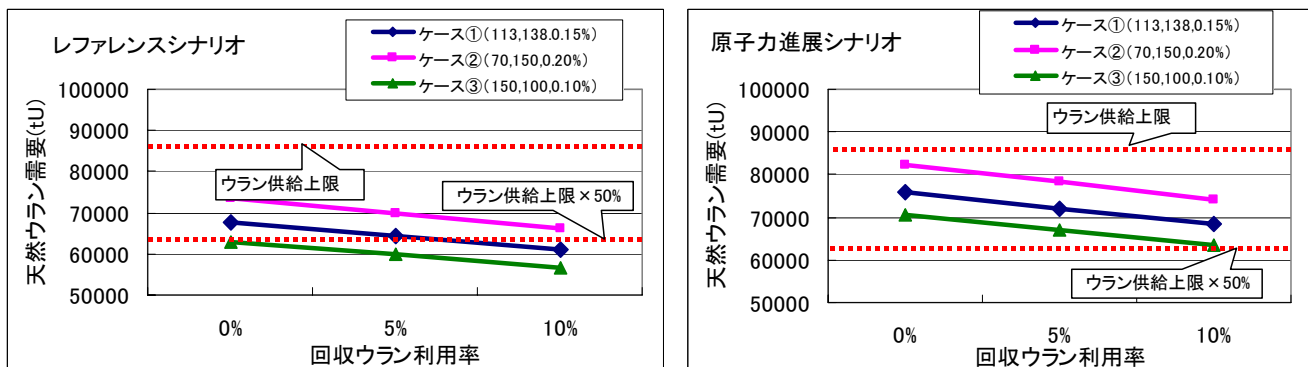


図 3-3 2030 年の濃縮役務需要 (回収ウラン利用率による変動)

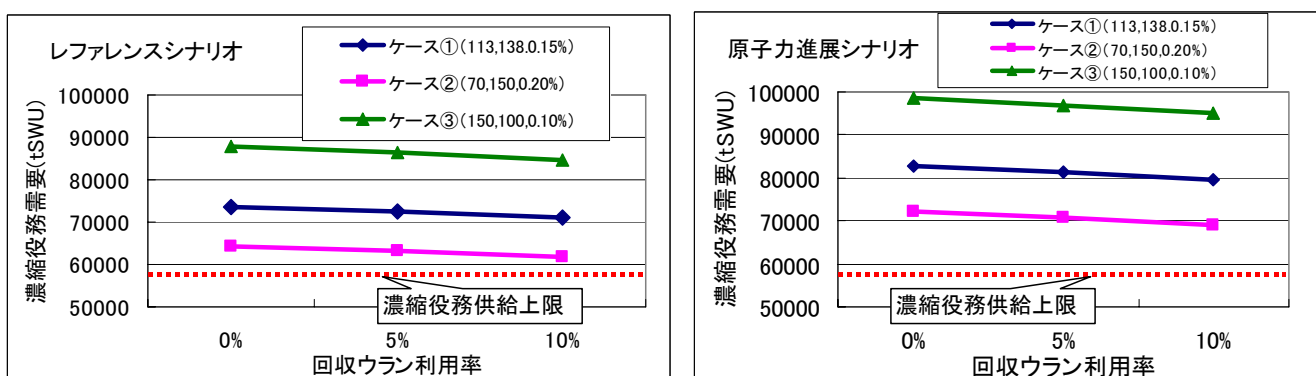
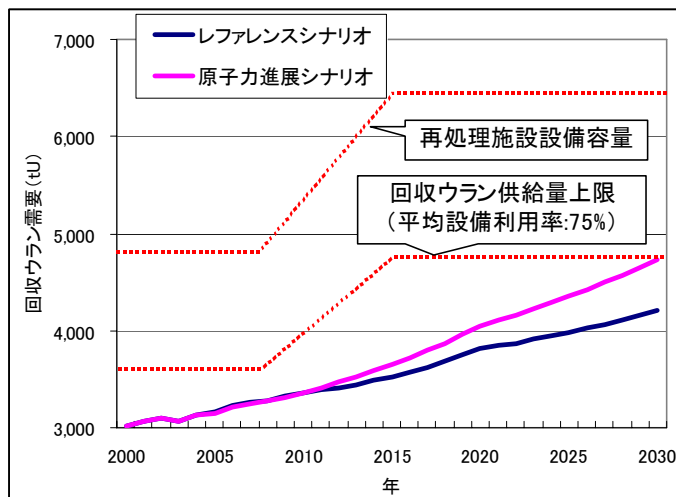


図 3-4 2030 年までの回収ウラン需要 (テイル濃度 0.20%、回収ウラン利用率 10%)



再処理施設から回収ウランが得られる見通しについては、原子力進展シナリオ・テイル濃度 0.20% の場合の回収ウラン需要が約 4,700tU であり、これは上述の供給上限以下であるので、その観点から回収ウラン利用に支障は生じないと考えられる。

以上より、回収ウランの利用は、天然ウラン需要低減だけでなく濃縮役務需要低減の観点からも有効であるといえる。回収ウラン利用にあたっては、天然ウラン用とは仕様の異なる専用の転換施設も必要となるなど、電気事業者にとっては負担が大きいことに留意する必要があるが、自国内にウラン資源を持たず、電力の 30%以上を原子力に依存している日本のような国においては、再処理施設の安定的な稼働により、回収ウラン利用のオプションを有しておくことは特に重要であろう。

4. おわりに

本論文においては、テイル濃度の変動による天然ウラン及び濃縮役務需要への影響、回収ウラン利用による需給展望への影響を分析した。以上より導かれた結論を述べ、併せて原子力発電事業者へのインプリケーションを述べて本論文の結びとしたい。

4-1 天然ウラン及び濃縮役務需要のテイル濃度による変動

“Uranium 2005”ははじめ様々な文献で、今後は原子力発電の進展に伴い天然ウラン需要が増加し、2030年には10万tU/年に達し、生産が追いつかず需給逼迫する可能性が指摘されているが、本稿ではその数値はテイル濃度の選択により大きく変動し得ることを定量的に示した。天然ウラン需要は、テイル濃度を0.3%から0.2%とすれば約18%、0.1%とすれば約29%低減できる。テイル濃度ほど大きな影響はないものの、この他にも燃料高燃焼度化など、軽水炉利用でも天然ウラン需給を緩和できる可能性はあり、様々な条件を想定してウラン需給を展望することが必要である。

4-2 濃縮施設の増設について

前述のテイル濃度変動により、濃縮役務需要にも変動が生じる。テイル濃度を0.2%にすれば、0.3%の場合より約24%、0.1%にすれば約70%、濃縮役務が増加する。現在稼動中及び稼動予定の世界の濃縮施設設備容量では、この需要増加に対応することはできない。現在の価格から想定され得る天然ウラン価格及び濃縮役務価格の組み合わせによっては、コスト最適なテイル濃度は0.20～0.10%と、現在選択されているものより低くなるため、天然ウランより先に濃縮役務需給のほうが逼迫する可能性も高い。

現在、世界で大容量商業用濃縮施設が稼動している国は、フランス、英国、ドイツ、オランダ、ロシア、米国、中国、それに日本と、限られた数カ国である。大容量濃縮施設の安定的な稼動には高い技術力が必要であり、これから濃縮技術開発をしようとする国があっても、商業規模の施設の安定的な稼動には数年ないしは10年以上を要するであろう。そもそもウラン濃縮は軍事技術に転用可能なものであり、その適用には厳しい制限とIAEAによる保障措置適用が必須とされ、保障措置対応技術及び体制の無い国が安易に着手することは核不拡散の観点からも望ましくない。

2006年1月にロシアのプーチン大統領が提唱した国際核燃料サイクルセンター構想、及び同年2月に米国DOEが提唱した国際原子力エネルギー・パートナーシップ(GNEP)は、細部は異なるものの、いずれも濃縮・再処理といった機微なサイクル技術を保有する国が、原子力発電エネルギーを必要としてこれらのサイクル技術を有していない国に対してこれらの役務を提供し、原子力エネルギーの利用拡大と核不拡散との両立を図るための枠組みである。国際核燃料サイクルセンター構想実現に向け、ロシアは2007年3月、アンガルスクに国際ウラン濃縮センターを設立するための作業部会設置についてIAEAと合意し、更に3月末にはOECDの原子力機関との間で原子力分野での協力に関する共同宣言に署名している。これによりロシアは、日本を含む諸国の濃縮役務を引き受け、核燃料サイクルの上流部門における国際的なプレゼンス向上と収益の増大を図るものとみられる。

一方、日本政府はロシアとの間で、原子力協定の締結交渉を開始することで合意しており、回収ウランの濃縮事業をロシアに委託する方向で検討中である¹²。日本原燃(株)六ヶ所ウラン濃縮工場(設備容量：1,050tSWU/年)は現在、遠心分離機のうち数基が停止中であり、新型遠心分離機が稼動するのは2010年の予定であり、それから約10年で設備容量1,500tSWUとする計画である¹³ので、当面、濃縮役務の大半は海外に委託せざるを得ない。

しかし自国内にウラン資源の無い日本にとって、核燃料サイクル上流で天然ウラン獲得と並んで最重要ポイントである濃縮役務を海外に依存したままであることは、安定的な原子力エネルギー利用の観点から好ましくない。日本は、保障措置技術に関しては世界トップレベルの水準を有し、IAEAの統合保障措置を世界に先駆けて2004年から適用しており、核拡散の懸念からは世界一遠い国であると言ってもよい。当面はロシアと協力関係を築いて濃縮事業を海外委託するにしても、将来的には上記GNEPや国際核燃料サイクルセンター構想において、先進的な遠心分離機の提供等、日本も貢献できることはあると思われる。六ヶ所ウラン濃縮施設の設備容量増強、更なる濃縮技術力の向上は、日本国内の需要向けのみならず、将来的には国際的な枠組みを通じたアジア諸国等への役務提供の可能性を見通す上でも強く望まれるものである。

¹² 2007年4月5日付日本経済新聞

¹³ 日本原燃(株)ホームページ「新型遠心機の開発状況について」<http://www.jnfl.co.jp/cycle-noshuku/dev-centrifuge.html>

4-3 回収ウラン利用の可能性について

使用済燃料の再処理により生じる回収ウランの利用は、天然ウラン需給緩和のみならず、濃縮役務の節約にもつながる。ただしこのためには再処理施設の安定的な稼働が必須であり、稼働中及び建設中の再処理施設に平均稼働率75%と想定すれば、回収ウランの利用率は発電電力量ベースで10%が上限と考えられる。それでも天然ウラン需要は10%、濃縮役務需要は約4%低減できるので、オプションとして前向きに利用すべきであろう。

再処理施設については役務を利用したい国が必ずしも自国内に施設を保有し運営する必然性は無い。大規模商業用再処理施設を有する国は、フランス、英国、ロシア、中国、日本である。これに米国を加えた6カ国が、米国DOEのGNEPにおける「核燃料サイクルパートナーシップ国」と目されており、核拡散抵抗性に優れた再処理の技術開発及び将来の安定的な役務提供で貢献する役割が期待されている。DOEはGNEP構想の具体化に向け産業界の参画・協力を募集しているが、2007年3月29日、日本原燃(株)は、フランスのAreva社及び米国原子力企業2社(ワシントン・グループ・インターナショナル社及びBWXテクノロジーズ社)とともに原子燃料リサイクル検討チームを組織し、統合燃料サイクルセンターへの参画を図る方針を明らかにした¹⁴。日本原燃は最新の再処理工場の建設等を通じて、保障措置技術・環境技術等にも精通しており、その経験をもとに国際的な原子燃料安定供給に貢献するのみならず、原子燃料サイクル分野における国際的なリーダーシップを取っていくことも視野に入れている。

核拡散抵抗性に優れた先進的な再処理技術の開発及び実用化は、2030年以降の高速増殖炉サイクルの本格的な実現に向けて必須のステップであるが、より短期的にも、回収ウランが安定的に生産され、天然ウラン需給緩和につながることから、日本にとっても世界にとっても極めて重要なことといえる。日本原燃(株)には前述の国際チームへの参画を通じて技術開発に貢献するとともに、2007年11月操業開始予定の六ヶ所再処理工場の安定的な稼働につながる知見と経験とを蓄積することを期待したい。同時に原子力発電事業者も、日本原燃(株)や日本原子力研究開発機構及び国内燃料サイクルメーカー各社との技術情報交流を通し、日本及びアジア諸国の燃料安定供給体制の確立に向けた取り組みが必要である。

お問合せ：report@tky.ieej.or.jp

¹⁴ 日本原燃(株)プレスリリース、2007年3月29日