

ロシアのウラン濃縮容量とその活用方法についての検証

2007.3.14

日本原子力研究開発機構

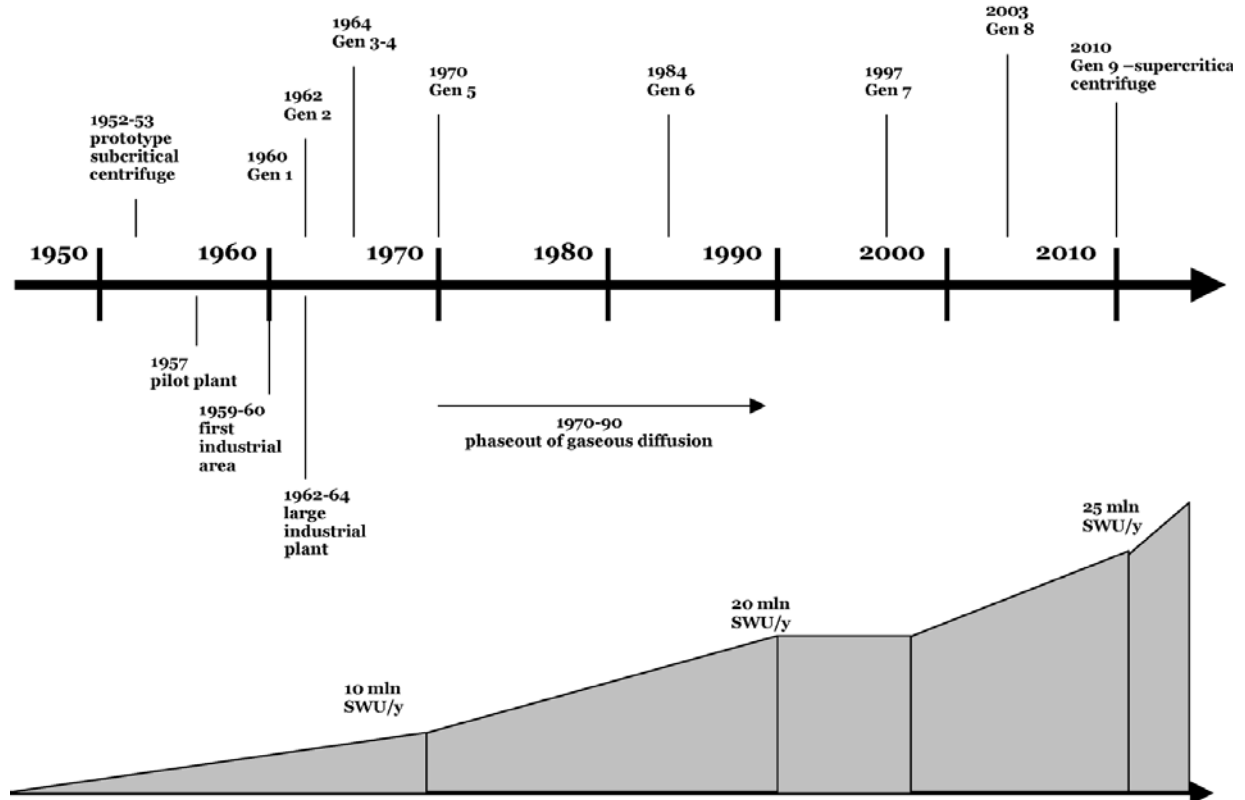
戦略調査室 小林孝男

ロシアのウラン濃縮に関しては、昨年のレポートにも何度か報告してきたが、最近入手した文献“Understanding Russia’s Enrichment Complex” (Bukharin, 2004¹⁾) から新しい知見を得たので、ロシアの巨大な濃縮容量の活用のされ方について他の情報も参考にしながら内容を検証してみたい。

1. ロシアの遠心分離技術開発の歴史

Bukharin,2004 によると、ロシアの遠心分離技術開発は 1930 年代の中期にヒットラー政権のドイツから逃れてきた技術者によって開始された。1952 年にロシアの技術者が短胴型の遠心機理論を提案し、重要なブレークスルーとなり、これがサブ・クリティカル (subcritical ; 共振点を越えない) 遠心機の原型となった (図 1)。1955 年には Novouralsk にパイロットプラントが建設され、これは 1960 年からの第 1 世代 (Gen 1) 遠心機による最初の産業規模の操業につながった。

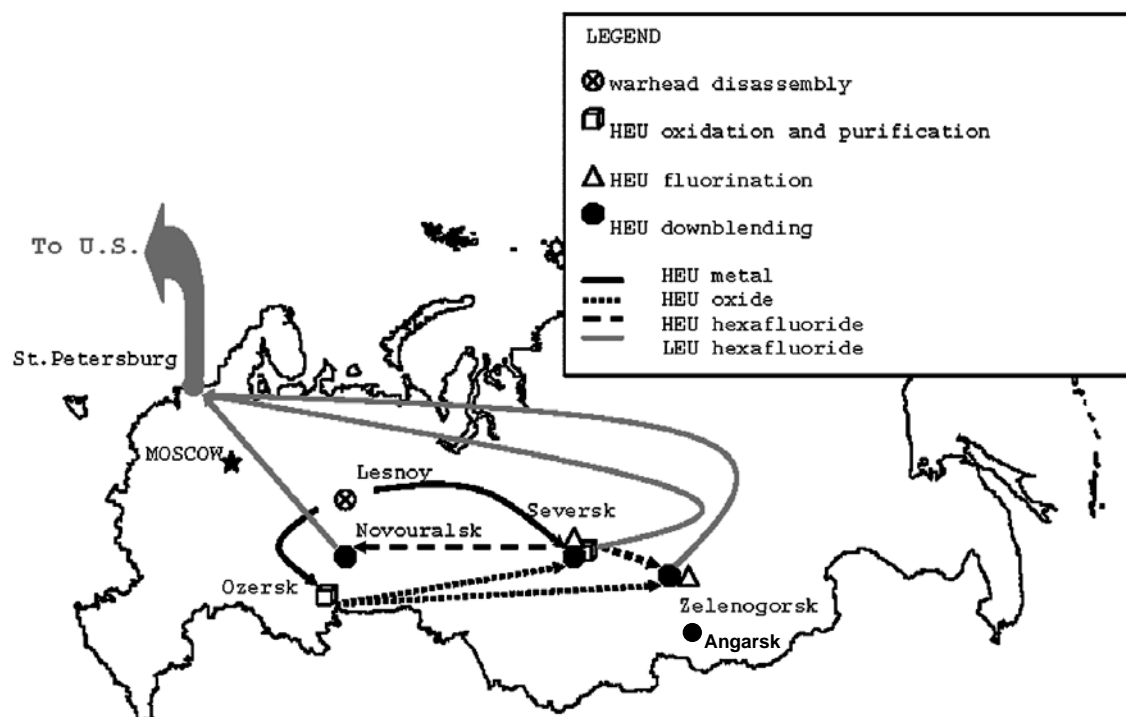
図 1 遠心分離技術開発と濃縮容量成長のタイムフロー



出典 : Bukharin,2004

1962～1964年には、マルチプルレイヤー（集合型？）の Gen 2、Gen 3 が生産され、これまでのガス拡散プラント内に多数の遠心機が設置されることになった。1960年代～1970年代には、原子力複合体（Complex）による総合的な技術開発が進み、Gen 3、Gen 4、Gen 5へと遠心機の最適化が図られ、1970年代にはロシアのすべての4つの濃縮施設（図2；Novouralsk、Zelenogorsk、Seversk および Angarsk）において、ガス拡散技術から遠心分離技術への転換が開始された。

図2 ロシアのウラン濃縮関連施設とHEUからLEU生産フロー



出典：Bukharin,2004

Gen 5 と Gen 6 の開発により、1980 年代末～1990 年代初頭にはガス拡散技術の使用は終わり、電力消費量は桁のオーダーで減少、一方濃縮容量は 2～3 倍に増大し、1980 年代末までに濃縮容量はおよそ 20,000tSWU/年に達した。

1990 年代末までに、濃縮複合体にはほぼ同数の Gen 5 と Gen6 の遠心機が設置されたが、多数が 1970 年代初～中期に設置された Gen 5 は寿命（設計寿命は 12.5 年であったが実質寿命は 25 年以内）が尽きるまでに交換されなければならない。Minatom（現 Rosatom）は、1997 年および 1998 年からそれぞれ Novouralsk と Zelenogorsk の複合体で、Gen 5 を Gen 7 の遠心機で交換することによるプラント近代化を開始した。

1998 年からロシアは Gen 8 の開発を開始した。すべての Gen 5 が Gen 7 に交換されれば 2010 年までに濃縮容量は 25,000tSWU/年に、また、開発された Gen 8 で交換されると、容量は 26,000～27,000tSWU/年に達する見込みである。

しかし、サブ・クリティカルモデルによる改良は Gen 8 までが限界であり、更なる容量の拡

大のためにスーパー・クリティカル（supercritical；共振点を越える）遠心機の開発が計画されている。この計画では、(a) 伸縮性鋼鉄ジャバラ（bellows）に連結された固定ローター、(b) 複合ジャバラを用いた複合ローターおよび(c) 金属ベースの強化固定ローターの3つのオプションの設計が検討されている。最良の設計は2004年に決定され、この計画によって開発される新型遠心機 Gen 9 は2010年から生産されて、Gen 6の交換に用いられる見込みである。これらのすべての近代化および技術開発予算として、2000年時点で、36.7b.ルーブル（\$1.2b.；約1,500億円）が計画されており、この予算はRosatomの輸出収入から捻出されることになっている（Bukharin,2004）。

2. 濃縮複合体の経営的変遷

Bukharin,2004によると、冷戦時代の間、4つの濃縮複合体は統一組織として、ソビエト政府の強い管理の下で、生産量や原料の調達が分配されていた。Novouralsk、ZelenogorskおよびSeverskの施設はHEUを生産し、AngarskはLEUのみを生産し他の3施設に供給していた。

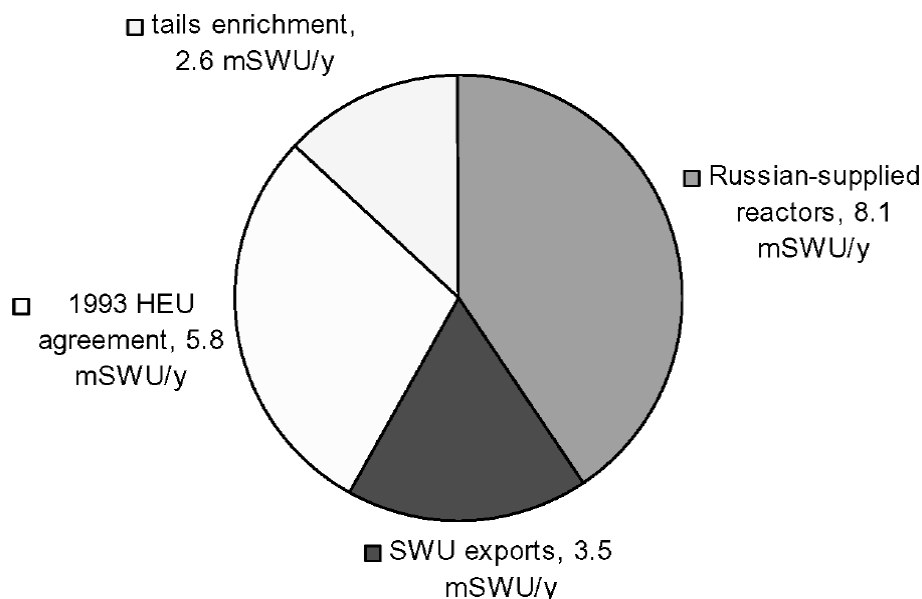
冷戦が終了し、ソビエト連邦が1991年に崩壊し、ロシアが社会的・経済的に変身したことは原子力産業に大きな危機をもたらした。濃縮複合体にとってもそれは例外ではなかった。HEUの生産が1988年以来終了したこと、ガス拡散技術の終了に伴い多くの関連産業が閉鎖されたこと、チェルノヴィリ・東ドイツ・ブルガリアの原子炉閉鎖による原子炉用需要の減少などにより、1990年代初期に、濃縮複合体の生産量は生産容量の半分近くまで落ち込み、自動計測・制御装置などの生産も大幅に減少し、関連支援組織は重大な人材流出を余儀なくされ、技術開発のレベルは低下した。

状況は1990年代中頃から変化し始めた。1993年に米ロHEU契約が締結されたことにより、ロシアのウラン濃縮産業は長期的かつ安定的な生産規模と収入が確保されることとなり、ソビエト連邦崩壊後の厳しい時代に生き残ることができたばかりでなく、世界の核燃料市場における重要なプレーヤーとなることができた。しかし、これを可能にさせたのは、\$20/kgSWUオーダーの低コストでかつ大容量のロシアの遠心分離技術が、世界でもきわめて競争力の高いものに成長していたことにあった。

3. ロシアの濃縮容量の活用方法

ロシアの濃縮複合体は、およそ20,000tSWU/年の公称容量どおりの規模で操業しているとされており、その主な用途は(1) ロシアが供給する原子炉用のウラン濃縮、(2) 西側ユーティリティーへの濃縮輸出、(3) 米ロHEU契約履行のためのブレンドストック生産、および(4) 劣化ウランの再濃縮の4つである。それらの生産容量の正確な分配割合を推定することは困難で、また年により変化すると考えられるが、2000年のMinatomの公式データは図3に示すとおりである（Bukharin,2004）。

図3 2000年のロシア濃縮容量の活用（合計を20,000tSWU/yと仮定した場合）



出典：Bukharin,2004（元データはV.Shidlovsky,2000）

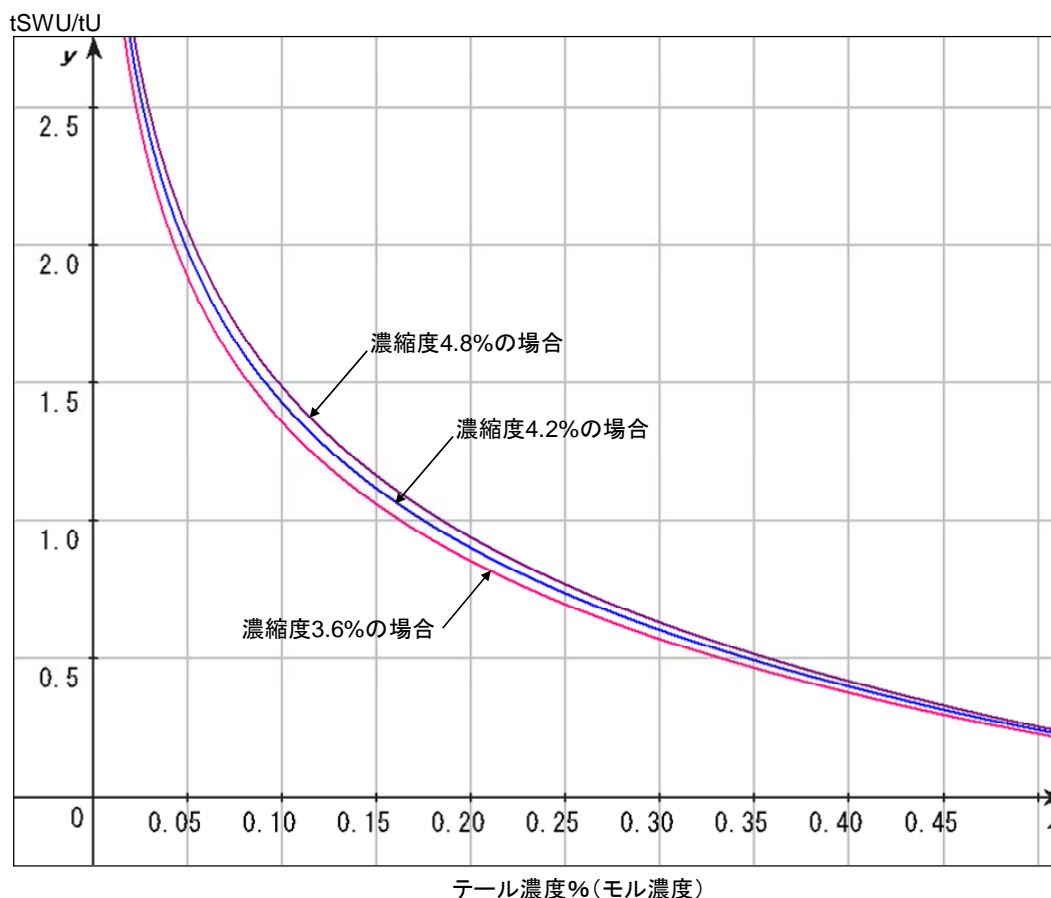
4. ロシア濃縮容量の活用方法についての検証

上述の濃縮容量のそれぞれの活用方法について、WNA の”The Global Nuclear Fuel Market,2005²⁾（以下、WNA,2005）、OECD/NEA-IAEAのレッドブック2005³⁾他の情報と照らして検討してみることにする。

(1) ロシアが供給する原子炉用のウラン濃縮

ロシアは、ロシア自身の原子炉だけではなくロシアの原子炉を供給しているウクライナをはじめとする東欧諸国（最近ではVVER-1000を輸出している中国、インド、イランにも供給）に対しても核燃料の提供を行っている。2000年にロシアはこれらの国々に対し8,930tUのウランを供給した（レッドブック2001）。通常の西側ユーティリティーの場合、2000年時点ではテール濃度0.3%程度で濃縮を行っており、天然ウラン8,930tUをすべてVVER-1000用の燃料の濃縮度4.2%に濃縮する場合、約5,400tSWUの作業量で足りることになる（図4；作成グラフの計算根拠は別添参照）。しかし、Minatomのデータ（図3）では約8,100tSWUとなっている。この数字が正しいとすれば、ロシアはテール濃度0.3%ではなく、約0.2%で濃縮していたことになる。

図4 天然ウラン (1tU) の濃縮に必要な SWU 量とテール濃度の関係



一方、WNA,2005 (WNA,2003 も同じ) によると、ロシアは VVER 用の燃料はテール濃度 0.1%で濃縮しているとしている。そして、2005 年のロシアの濃縮容量 20,000tSWU/年の用途別分配を表 1 のように推定しており、2005 年のロシア原子炉への濃縮供給量は 50%以上の 10,500tSWU と算定している。

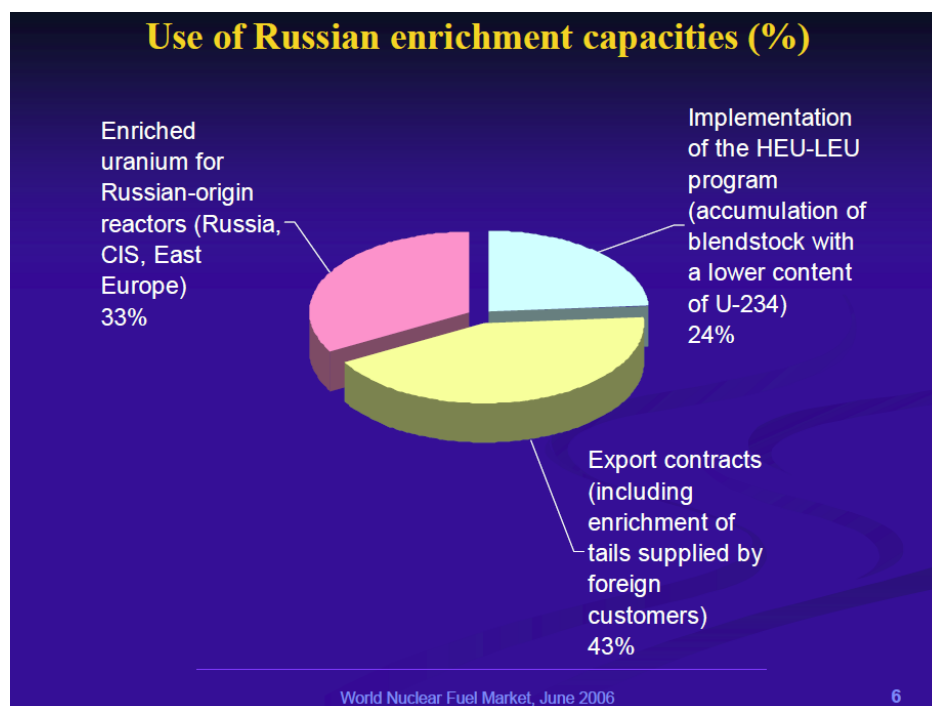
しかし、WNFM (world Nuclear Fuel Market) の 2006 年総会でロシア Tenex が発表した資料 (Mikerin, 2006/6⁴⁾; 図 5) では、ロシア原子炉への SWU 供給量はロシア容量の 33% (ロシア容量を 20,000tSWU と仮定すると、6,600tSWU) となっている。この値から 2005 年のロシア原子炉へのウラン供給量 7,400tU (WNA,2005) に対するテール濃度を図 4 から逆算すると約 0.20%となり、Bukharin,2004 の MINATOM データと Tenex データはほぼ整合している。

表 1 2005 年のロシア濃縮容量の使われ方

	Feed assay %	Product assay %	Residual tails assay %	SWU requirements, m
LEU for Russian reactors	0.71	2.70-4.20	0.1	10.5
LEU for HEU blending	0.3	1.5	0.1	4.5
LEU for export	0.71	4.2	0.1	3.7
Tails re-enrichment	0.3	0.71	0.1	1.3

出典 : WNA,2005

図5 ロシアの濃縮容量の使われ方



出典：WNFM 2006/6 における Tenex の発表資料

これらを総合的に解釈すると、ロシアでは天然ウラン以外に、後述する劣化ウラン再濃縮による擬似天然ウランの他、一定量の回収ウラン*¹や濃縮ウラン在庫（軍事用起源の HEU）が原子炉燃料製造用に供給されているため、結果的に見かけ上の平均テール濃度が 0.2%程度になっているのではないかと推定される。したがって、2005 年時点と言えば、表 1 の WNA の推定は誤っていることになると思われる。

* 西欧のユーティリティー数社は、ヨーロッパの燃料製造事業者を通じて、回収ウランをロシアに輸送しロシアの軍事用起源の HEU とブレンドして生産された EUP（濃縮ウラン製品）を輸入している（ESA,2005；Euratom Supply Agency, Annual Report,2005⁵）。同様のブレンドがロシア原子炉用燃料製造でも行われていると推定される。

しかし、回収ウランの在庫は限られており、そしてロシア原子炉のウラン需要は 2015 年頃には 10,000tU を上回る（WNA,2005 の標準シナリオ）ので、ロシア原子炉の濃縮需要が 10,000tSWU/年を上回るのはそう遠い先ではないと予想される（仮にテール濃度 0.1%で天然ウラン 10,000tU を濃縮する場合の作業量は 14,300tSWU）。

(2) 西側ユーティリティーへの濃縮輸出

ESA,2005 によると、EU15 カ国は、2005 年にロシアから 2,480tSWU の濃縮供給を受けたと報告されている。ESA の標準テール濃度は 0.3%とされているので、これをロシアにおいてテール濃度 0.1%で濃縮した場合、必要な濃縮作業量は 5,850tSWU となる。しかし、ここにお

いてもロシアは EPU の生産の原料として、劣化ウラン再濃縮による擬似天然ウランなどを使っている可能性が高く、正確な作業量を計上することは困難である。上述の Tenex の資料（図 5）では輸出用と劣化ウラン再濃縮に要した作業量が合わせて区分されており、後述するように輸出用の作業量を単独で検証するのは適切でないと思われる。

(3) 米ロ HEU 契約履行のためのブレンドストック生産

Bukharin,2004 は、米ロ HEU 契約履行のためのブレンドのプロセスについて詳しく分析している（表 2）。

ロシアの HEU（濃縮度 93%）は Pu 生産プログラムの中で再処理生産されたことに由来する毒性の高いマイナー・アクチナイドや化学的不純物に汚染されている。また、余計な原子炉生成同位体である U232 および U236、さらに濃縮過程で U235 とともに濃集した厄介な U234 を多く含有している。これらの問題は、HEU を放射線化学的に処理することと、U234 に乏しい劣化ウランを再濃縮して生産された濃縮度 1.5%のブレンドストックで希釈することで解決されることになった（Bukharin,2004）。

表 2 ロシア HEU のブレンドプロセス

Blendstock production

8,555 t 0.25% DU + 5.34 million SWU → 916.6 t 1.5% LEU
(at 0.1% tails assay)

HEU downblending and content

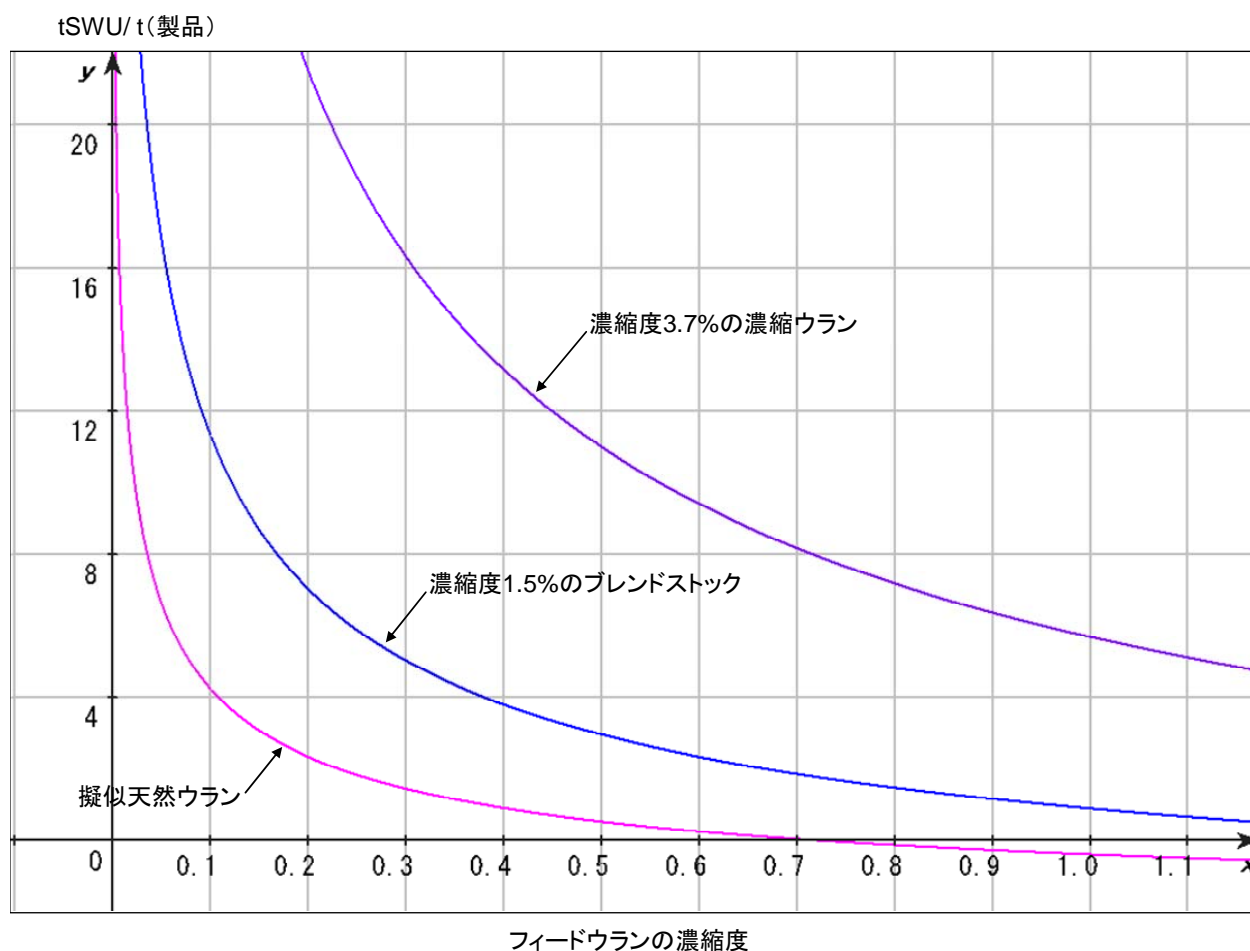
30 t 93% HEU + 916.6 t 1.5% LEU → 946.6 t 4.4% LEU =
5.52 million SWU + 9,000 t NatU

出典：Bukharin,2004（元データは V.Shidlovsky,2000）

表 2 は、30t の HEU（濃縮度 93%）を希釈する濃縮度 1.5%のブレンドストック生産のために、濃縮度 0.25%の劣化ウランを使用した場合（テール濃度 0.1%で濃縮）、8,555t の劣化ウランと 5,340tSWU の作業量を要することになり、結果として、ほぼ等量の 5,520tSWU の価値（天然ウラン 9,000tU をテール濃度 0.3%で濃縮する場合の価値）を有する LEU 946.6t（濃縮度 4.4%）が生産できることを示している。

図 3 における米ロ HEU 契約履行ために必要な作業量が 5,800tSWU と多めになっていることに対し、Bukharin,2004 は、使用された劣化ウランの濃縮度が 0.25%よりも低かった可能性があることを説明している。逆に Tenex 資料（図 5）の同必要量は、4,800tSWU（2005 年のロシア濃縮容量が 20,000tSWU と仮定した場合）と少なくなっており、これは使用された劣化ウランの濃縮度が 0.3%に近かったことを示している（図 6）。

図6 テール濃度 0.1%で製品 1 t 生産する SWU 量とフィードウラン濃縮度との関係



(4) 劣化ウランの再濃縮

WNA,2005 は、1990 年代の後半から西側濃縮会社は濃縮度 0.3~0.35%の劣化ウラン 10,000 ~15,000t/年をロシアに送り、ロシアはこれをテール濃度 0.1%で再濃縮して擬似天然ウラン (EUP ; 濃縮ウラン製品) および LEU を生産し、1997-1998 年以降、約半分を西側濃縮会社 に送還し残り約半分をロシアが得る契約を締結したとしている。同様に、Nuclear Fuel (2006/7/31) は、Nukem から得た情報として、ロシアはアレバ NC と Urenco に合計 1,100tU の擬似天然ウランを返還、加えてアレバ NC には 130 t の LEU を返還し、3,300tU の擬似天然ウランをロシアが得ていたと紹介している。

しかし、最近になって Urenco の劣化ウラン在庫は米国、カナダ、オーストラリア起源のものに限られ、これらの国々との二国間協定を締結していないロシアでの再濃縮は不可能となっていると述べられている (Nuclear Fuel, 2006/7/31)。この事実は、ESA,2005 のレポートからも確認でき (表 3)、おそらく 2005 年時点で Urenco の劣化ウラン再濃縮は皆無になっているものと推定される。

表3 ロシアから EU15 カ国への天然ウランおよび EUP の供給実績

Year	Deliveries (¹)	Exchanges (²)	Subtotal (¹) (²)	Re-enriched tails (³)	Total (¹) (²) (³)	Total as % of supply
1992	1 800	900	2 700	0	2 700	23
1993	1 700	600	2 300	0	2 300	19
1994	1 700	500	2 200	0	2 200	16
1995	4 300	200	4 500	0	4 500	28
1996	5 100	700	5 800	0	5 800	36
1997	3 900	500		–	4 400	28
1998	3 900	600	4 500	–	4 500	28
1999	3 500	400	3 900	1 100	5 000	34
2000	4 200	0	4 200	1 200	5 400	34
2001	2 850	200	3 050	1 050	4 100	29
2002	3 900	600	4 500	1 000	5 500	33
2003	3 400	0	3 400	1 200	4 600	28
2004	2 400	0	2 400	900	3 300	23
2005	3 800	0	3 800	500	4 300	23
Total	46 360	5 200	51650	6 950	58 600	28

出典：ESA,2005

さらに、ロシア産業筋（役所）の情報によれば、Rosatom は、劣化ウラン貯蔵庫が満杯になっていることから新たな劣化ウランの輸入は行わないとの発表を検討している（Nuclear Fuel,2006/7/31）とのことである。この理由として、輸入劣化ウランの再濃縮は経済的に成り立っていないためとか、Rosatom は西側ユーティリティーとの直接の濃縮契約を計画しているためなどの要因も推測されている。

以上の情報を背景に、Nuclear Fuel（2007/7/31）による Nukem 情報が正しいものとして、劣化ウラン再濃縮の量的検証を行うことにする。

従来の西側濃縮企業によるウラン濃縮は一般にテール濃度 0.3%で行われていたとされているが、アレバ NC は効率の悪いガス拡散法で濃縮しているため、オーバーフィードを行い、テール濃度を 0.35%程度に高めていたと推測されている（Nuclear Fuel, 2007/7/31 ; Nukem から得た情報として）。したがって、Urenco とアレバ NC が同量の劣化ウランをロシアに輸出していたと仮定すると劣化ウランの平均濃縮度はおよそ 0.325%であったと推定される。

この場合、図 6 から、返還分の 1,100tU とロシア取得分 3,300tU の合計 4,400tU の生産に必要な濃縮量は 5,630tSWU、さらにアレバ NC に返還された濃縮ウラン（WNA,2005 から濃縮度 3.7%と推定）130t の生産に必要な濃縮量は 2,000tSWU と計算できる。また、U235 の総含

有量の関係式から、再濃縮された劣化ウランの総量は 14,300tU と算出できる。

算出された劣化ウラン再濃縮の総作業量約 7,600tSWU は、2000 年当時の Minatom のデータ（図 3）における 2,600tSWU とまったく整合しない。この理由として最も考えられるのは、劣化ウランを再濃縮して得られる製品のロシアの取り分は、輸出用の濃縮製品（LEU、EUP）やロシア HEU 希釈用のブレンドストック生産用にあてられており、濃縮容量分配もそのように行われているとの解釈である。そのように解釈すると、7,600tSWU のうち、西側返還用（すなわち劣化ウラン再濃縮の区分）には 3,400tSWU が分配、輸出用およびブレンドストック生産用には 4,200tU が分配されたことになり、年度による生産誤差の範囲に収まる。Tenex の資料（図 5）のブレンドストック生産に使われたフィードウランの濃縮度が 0.3%に近いことも説明できる。

5. まとめ

検証の結果、ロシアの濃縮容量の使われ方は極めて多様であり、限られた情報から正確な数値を導き出すことは不可能に近いことがわかった。しかし、総合的に判断して、Tenex,2005 のデータは Minatom,2000 のデータと整合しており、かなりの信頼性が期待できると考えられる。

ロシアの濃縮容量は、今後 2010～2015 年にかけて 25,000～27,000tSWU/年程度に拡大するものと予想されるが、増加分はロシア原子炉の需要拡大（2005 年の 6,600tSWU/年から 2015 年には約 13,000tSWU/年へと倍増；後者は WNA,2005 の標準シナリオ予測）に吸収されるため、将来的にも現在とほぼ同量のロシア原子炉用以外の余剰容量が存在し続けることになる。

2014 年以降、米ロ HEU 契約に基づく軍事用 HEU の希釈が終了し、劣化ウラン再濃縮がなくなった場合は、12,000～14,000tSWU/年程度の余剰容量が純粋な輸出用（西側ユーティリティーとの直接契約等）として活用可能となる。しかし、ロシアは、昨年のレポートで紹介しているように、西側ユーティリティーに SWU（特に EUP）を輸出するために必要な天然ウランが不足すると予想されることから、軍事起源の HEU の希釈や劣化ウランの再濃縮が完全になくなることはないとは予想される。

以上

参考文献・引用資料（News Release や Website 情報は本文中に記してあるので省略）

- 1) Bukharin,2004, Understanding Russia's Uranium Enrichment Complex
- 2) WNA, 2005, The Global Nuclear Fuel Market
- 3) OECD/NEA-IAEA, 2006/6, Uranium 2005
- 4) Mikerin(Tenex), 2006/6, WNFMA Annual Meeting, Shaping the Future : Russia's Impact
- 5) Euratom Supply Agency, Annual Report,2005 (ESA,2005)

別添 濃縮作業量グラフの計算根拠

1. 天然ウラン (1tU) の濃縮に必要な SWU 量とテール濃度の関係

濃縮度 x_0 (%) のフィードウラン量 F (t) を濃縮して得られる製品量を P (濃縮度 : x_p)、劣化ウラン量を W (テール濃度 : x_w) とすると、この場合の濃縮作業量 δU は次式で表現される。

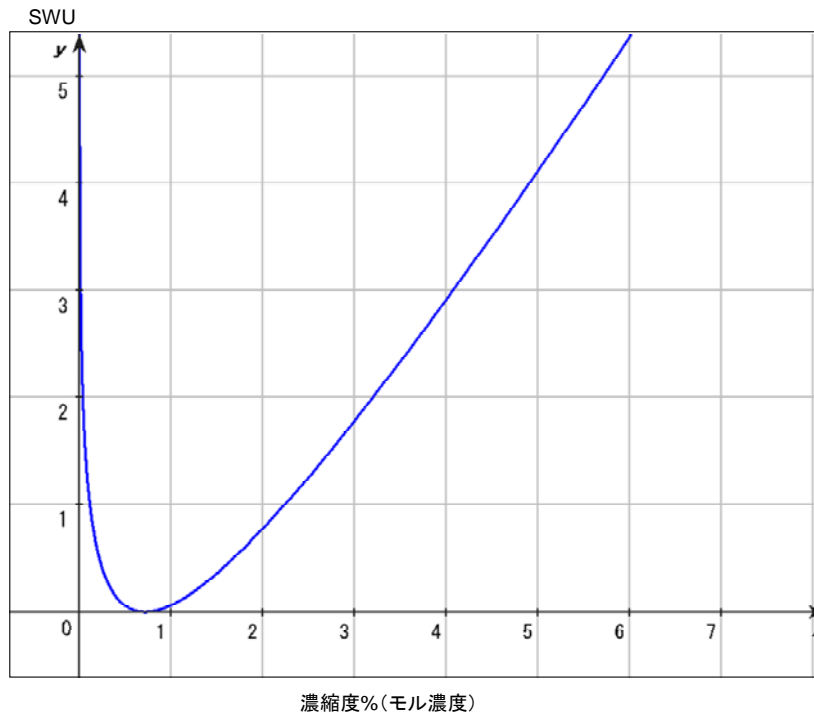
$$\delta U = P \cdot V(x_p) + W \cdot V(x_w) \text{ ----- (1)}$$

ここで $V(x)$ は濃縮度 x が持つ価値関数で、以下の式で表現される。

$$V(x) = (2 \cdot x - 100) / 100 \cdot \log_e(x / x_0 \cdot (100 - x_0) / (100 - x)) \\ + (2 \cdot x_0 - 100) / x_0 / (100 - x_0) \cdot (x_0 - x) \text{ ----- (2)}$$

フィードウランが天然ウランである場合、 $V(x)$ は図 A1 のとおりとなる。

図A1 天然ウランを基準とした場合の価値関数 $V(x)$



$W = F - P$ 、また、 $F = (x_p - x_w) / (x_0 - x_w) \cdot P$ と置き換えられるので、式(1)は以下ようになる。

$$\delta U = P \cdot \left\{ V(x_p) + (x_p - x_w) / (x_0 - x_w) \cdot \left((2 \cdot x_w - 100) / 100 \right. \right. \\ \left. \left. \cdot \log_e(x_w / x_0 \cdot (100 - x_0) / (100 - x_w)) \right. \right. \\ \left. \left. + (2 \cdot x_0 - 100) / x_0 / (100 - x_0) \cdot (x_0 - x_w) \right) \right\} \text{ ----- (3)}$$

逆に、 $P = (x_0 - x_w) / (x_p - x_w) \cdot F$ と置き換えると、式(1)は以下のように表現される。

$$\delta U = F \cdot \left\{ (x_0 - x_w) / (x_p - x_w) \cdot \left(V(x_p) + (x_p - x_0) / (x_p - x_w) \cdot \left((2 \cdot x_w - 100) / 100 \cdot \right. \right. \right. \\ \left. \left. \log_e(x_w / x_0 \cdot (100 - x_0) / (100 - x_w)) + (2 \cdot x_0 - 100) / x_0 / (100 - x_0) \cdot (x_0 - x_w) \right) \right) \right\} \text{ ----- (4)}$$

ここで、例えば製品の濃縮度を 4.2%、フィードウランを天然ウラン（濃縮度 0.72%）と固定すると、図 A1 から $V(x_p)=3.15$ となり、製品 1 t 当たりの濃縮作業量 δU は、テール濃度 x の関数として表現され、式 (3) は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} \delta U = & 3.15 + (4.2 - 0.72) / (0.72 - x) * ((2*x - 100) / 100 \\ & * \log_e(x / 0.72 * (100 - 0.72) / (100 - x)) \\ & + (2*0.72 - 100) / 0.72 / (100 - 0.72) * (0.72 - x)) \end{aligned} \quad \text{----- (5)}$$

同様に、フィードとなる天然ウラン 1 t を濃縮するのに要する濃縮作業量 δU は、式 (4) から以下のとおりとなる。式 (6) から本文の図 4 が描かれている。

$$\begin{aligned} \delta U = & (0.72 - x) / (4.2 - x) * 3.15 + (4.2 - 0.72) / (4.2 - x) * ((2*x - 100) / 100 * \\ & \log_e((100 - 0.72) / 0.72 * x / (100 - x)) + (2*0.72 - 100) / 0.72 / (100 - 0.72) * (0.72 - x)) \end{aligned} \quad \text{---- (6)}$$

2. テール濃度 0.1% で濃縮する場合の SWU 量とフィードウラン濃縮度との関係

式 (3) において、例えば製品の濃縮度を 1.5%、テール濃度を 0.1% と固定すると ($V(x_p)$ もフィードウラン濃縮度の関数として置き換え)、製品 1 t 当たりの濃縮作業量 δU は、フィードウラン濃縮度 x の関数として表現され、以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} \delta U = & (2*1.5 - 100) / 100 * \log_e(1.5 / x * (100 - x) / (100 - 1.5)) \\ & + (1.5 - x) / (x - 0.1) * (2*0.1 - 100) / 100 * \log_e(0.1 / x * (100 - x) / (100 - 0.1)) \end{aligned} \quad \text{---- (7)}$$

式 (7) と同様に、擬似ウラン（濃縮度 0.72%）および濃縮度 3.7% の濃縮ウラン 1 t 当たりの濃縮作業量 δU はそれぞれ式 (8)、(9) となり、これらから本文の図 6 が描かれている。

$$\begin{aligned} \delta U = & (2*0.72 - 100) / 100 * \log_e(0.72 / x * (100 - x) / (100 - 0.72)) \\ & + (0.72 - x) / (x - 0.1) * (2*0.1 - 100) / 100 * \log_e(0.1 / x * (100 - x) / (100 - 0.1)) \end{aligned} \quad \text{---- (8)}$$

$$\begin{aligned} \delta U = & (2*3.7 - 100) / 100 * \log_e(3.7 / x * (100 - x) / (100 - 3.7)) \\ & + (3.7 - x) / (x - 0.1) * (2*0.1 - 100) / 100 * \log_e(0.1 / x * (100 - x) / (100 - 0.1)) \end{aligned} \quad \text{---- (9)}$$

以上