

ロシアの原子力産業再編成と濃縮事業

高田 誠*

はじめに

ロシアはソ連邦崩壊後の混乱から原子力産業を守り、将来の発展のため原子力産業の再編成を行い、法律の整備、政府関連組織の再編などを行ってきた。この原子力産業の再編において、ロシアの濃縮産業はそれを財政的に支えるという重要な役割を果たしており、今後のロシアの原子力産業の発展の方向を考える上でも大きな役割を担っている。そこで、以下ではロシア原子力産業の再編の概要とロシアの濃縮事業の経緯と現状を報告する。

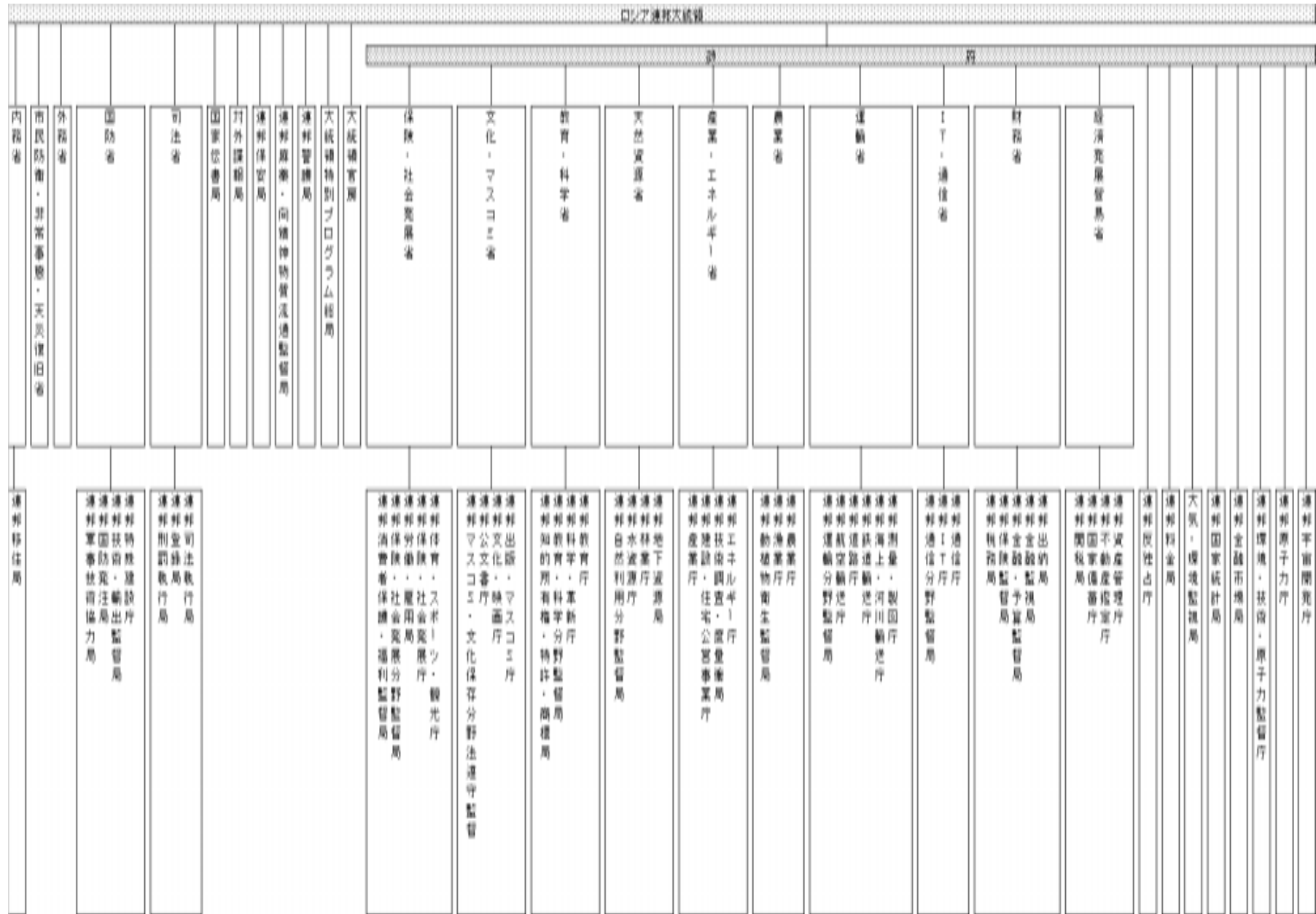
1. ロシアの原子力産業再編を巡る最近の動き

1986年4月のチェルノブイリ原子力発電所の事故までソ連は非常に野心的な原子力開発計画を持っていた。チェルノブイリ事故後には、当時の改革（ペレストロイカ）、情報公開（グラスノスチ）政策とあいまって、放射線に対する恐怖感や原子力反対運動が急速に高まった結果、建設中や計画中のいくつかの原子力発電所が中止あるいは凍結され、原子力開発計画は大きく後退した。さらに1991年12月にソ連が崩壊し、ソ連を構成していた各共和国が独立し、それらの共和国に位置していた原子力発電所、研究所はその共和国に所属することとなり、それぞれの国で原子力開発体制が構成整備されることとなった。ロシアでは1992年1月にソ連原子力発電産業省（MAPI）が廃止され、その後継機関としてロシア原子力省（MINATOM）が発足した。

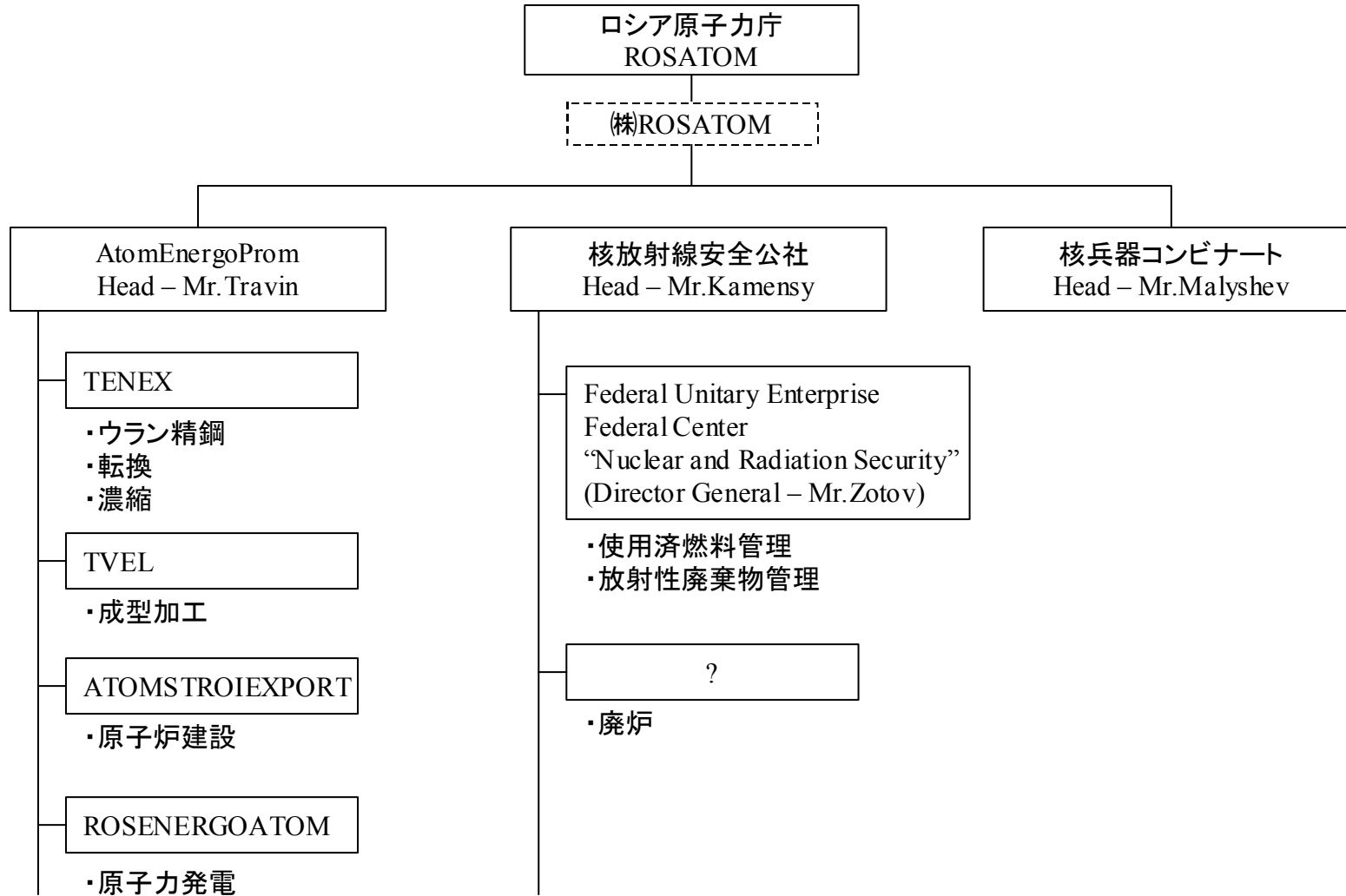
1991年のソ連崩壊から10年以上経過し原子力産業が安定してきた2003～4年になって、ロシアの国家指導部において、原子力産業の発展のため産業の再編成が必要との認識がもたれるようになった。2004年3月連邦大統領令に基づきロシア連邦原子力省（MINATOM）はロシア連邦原子力庁（ROSATOM）に改組された。これは特に省から庁に格下げにされたわけではなく、より効率的な組織にしようというものであり、産業・エネルギー省の傘下のひとつの庁として位置づけられた。その後さらに図表1のように2004年5月20日付けのロシア連邦大統領令により、ロシア連邦政府直轄の庁となった。この原子力庁ROSATOMの下に原子力関係機関がどのように組織されるかはまだ未定であり、年内には決定されると予想されているが、現時点で推測されているのは図表2のようにROSATOMの傘下に3社の公社が設置されるという構成である。

* （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 研究主幹

図表-1 ロシア連邦大統領令(2004年5月20日付け)に基づくロシアの新行政機構図



図表-2 ロシア原子力産業組織図(予想)



この 3 社は原子力産業を担当する AtomEnergoProm と安全規制部門の核・放射線安全公社と核兵器コンビナートであるが、この 3 社の上にこれらを束ねる公社が作られ Joint Stock Company すなわち株式会社 ROSATOM が設立されるとの予想もある。

この原子力庁 ROSATOM と(株)ROSATOM はかなりの人員が重複することになると推測されている。これは意思決定を迅速に行い世界の原子力ビジネスで競合していけるようにしようとの方針と思われる。要するにフランスの AREVA に対抗できるような組織にしようという考えであるとも推測される。ただしこの原子力産業の再編は、まだ調整が加えられており流動的であり、最終的な形はまだ固まっていない。

2. ロシアの濃縮産業の現状

(1) 濃縮産業の発展の経緯と現状

ロシアのウラン濃縮産業は 1940 年代末にソ連の核兵器開発計画のための高濃縮ウラン(HEU: Highly Enriched Uranium)の生産のため発足した。その後 1950 年代からは船舶用原子炉(原子力潜水艦・砕氷船等)の HEU また研究炉用に、さらに原子力発電所用の濃縮ウランの生産が始められた。その後、高濃縮ウランの生産は冷戦が終わったため、核兵器向けの需要がなくなり 1980 年代末に停止された。

ロシアのウラン濃縮施設は現在、以下の 4 ヶ所にある。

- * ウラル電化コンビナート(UEKhK: URAL ELECTROCHEMICAL COMBINE), (Novouralsk: ノボウラルスク)
濃縮能力: 9.8 百万 SWU¹, 全ロシアの 49%
- * 電気工場 (Ekhz: ELECTROCHEMICAL PLANT), (Zelenogorsk: ゼレノゴルスク)
濃縮能力: 5.8 百万 SWU, 全ロシアの 29%
- * シベリア化学コンビナート(SkhK: Siberian Chemical Combine), (Seversk: セベルスク、以前のトムスクー7)
濃縮能力: 2.8 百万 SWU, 全ロシアの 14%
- * アンガルスク電解化学コンビナート(AEKHK: Angarsk Electrolytic Chemical Combine), (Angarsk: アンガルスク)
濃縮能力: 1.6 百万 SWU), 全ロシアの 8%

これらは全て最初はガス拡散工場であったが、現在はより効率が高く電力消費の少ないガス遠心分離工場になっている。

¹ SWU: Separative Work Unit、濃縮作業量を表す物理的に定義された単位で分離作業単位と呼ばれる。ここでは Kg Separative Work Unit をあらわす

SKhK と AEKhK には UF₆² の転換工場もあり、他の濃縮工場に UF₆ を供給している。これら濃縮施設は、前出の 2004 年 3 月の再編前は原子力省 (MINATOM) の管轄下にあり、1990 年代のソ連崩壊後の社会経済混乱期には、後述するように濃縮事業を通して外貨を稼ぎ MINATOM・原子力産業の崩壊を防いだ。

(2)ロシアにおける遠心分離技術発展の経緯

ロシアにおけるウラン遠心分離技術³ の開発は、1930 年代半ばにヒットラー・ドイツからの亡命者 Fritz Lange によって始められた。本格的な研究開発は、1940 年代末からドイツ人学者とソ連の学者グループにより進められた。1952 年に臨界前遠心分離技術⁴ のブレークスルーがあり、最新の遠心分離機が実現した。これが、ロシアの遠心分離機の標準技術となり、現在の第 8 世代の遠心分離機の開発まで繋がってきている。

ソ連政府は、1955 年 10 月にパイロットプラントをノボウラルスクに建設することを決定した。これに続き、同じノボウラルスクのガス拡散プラントの建屋に第 1 世代の遠心分離機の実用プラントを建設、さらに 1962-64 年に第 2 世代と第 3 世代の遠心分離機を導入した大規模プラントの稼働を実現した。その後 50 年代から 70 年代にかけてさらに遠心分離機の研究開発が進められ、1970 年代に全ての 4 つの濃縮工場においてガス拡散技術より遠心分離技術への転換が行われた。その背景には遠心分離法がガス拡散法に比べて必要電力量が数十分の一と少なく、将来の価格競争力が圧倒的に高いという原理的な差があった。転換のベースとなったのは、第 5 世代遠心分離機であり、1971～1975 年に導入された。また、1984 年ころには第 6 世代が導入された。1990 年代末には濃縮施設での第 5 世代と第 6 世代の遠心分離機の台数はほぼ同数になってきたが、第 5 世代は 1970 年代前半に導入され、設計寿命は 12.5 年であり、実際の寿命は 25 年以下である。

したがって、第 5 世代の遠心分離機は、2010 年までに全て置き換えないと濃縮能力は 40%減少するという計算になる。こうした中、1997 年ならびに 1998 年に MINATOM は UEKhK と Ekhz の近代化を行い、第 5 世代の遠心分離機から第 7 世代の遠心分離機への置き換えを開始した。

また、1998 年には、2003/4 年頃の実用化を目指し第 8 世代の遠心分離機の開発をス

² UF₆ : 六フッ化ウラン、ウランの化合物で気体になるもの、通常濃縮はこの UF₆ のガスで行う

³ ウラン遠心分離技術 : ウラン濃縮の技術で U-235 と U-238 のわずかな質量の違いを利用して脱水機のように重いものほど遠心力で外側に飛ばされる原理を応用して U-235 と U-238 を分離する技術。

⁴ 臨界前遠心分離技術 : 濃縮能力は回転胴の回転速度と長さに依存するが、回転胴は、その長さ・材質・弾性により固有の回転速度 (臨界速度) で共鳴振動を起こす。それより低い速度で分離する技術を臨界前遠心分離技術という。それより高い速度で分離する遠心機を超臨界遠心分離機という。

スタートした。なお、遠心分離機の新世代への置き換えに伴い、濃縮能力の拡大も計画されている。例えば、第5世代から第7世代への置換では25%、第8世代への置換では34%の能力上昇が期待されている。また、臨界前遠心分離機としては第8世代が最終であり、これ以上の能力拡大には超臨界遠心分離機（前出 脚注4を参照）が必要とされている。これは第9世代と呼ばれており、2004年に生産を始め、第6世代の遠心分離機の置き換えとなる計画となっている。

ちなみに第5世代を第7及び第8世代で置き換え、かつ第9世代の遠心分離機を開発するのに12億ドルの費用が必要と推測されている。この費用は、後述する米国への低濃縮ウランの輸出収入で賄われることになっている。

3. 1993年の米ロ HEU 協定と低濃縮ウラン輸出事業

ソ連崩壊後、旧ソ連が保有していた核弾頭から解体された高濃縮ウラン（HEU）を低濃縮ウラン（LEU：Low enriched Uranium）として米国電力会社に原子力発電燃料として供給する事業はロシアの濃縮産業にとって重要な中心的活動となった。

そもそもロシアの解体核弾頭の兵器級の濃縮ウランを低濃縮ウランに変換し原子力発電燃料として購入するとの提案は1991年米国のMITの物理学者、Thomas Neff教授より1991年10月に米国政府に持ち込まれたものである。1992年夏に両国政府による正式交渉が始められ、1993年2月18日、両国政府は協定の目的と範囲の枠組みを定める包括契約に調印した。この協定に基づき米国はロシアの核弾頭からのHEUを、20年間で少なくとも500tU購入しLEUとして受け取るようになった。

契約調印後、協定を履行する代理会社として米国ではUSEC(US Enrichment Corp. 米国濃縮会社)、ロシア側はMINATOMの子会社TENEXが指名された。両社は協定の履行契約、及び透明性契約⁵の交渉を開始した。1993年の協定調印から年末までと、1994年いっぱいがこの二種類の契約交渉・関連機関・経済性・政治・技術等の問題解決に費やされた。

なお、この協定の主目的は、核兵器削減より生じる高濃縮ウランを安全且つ速やかに処分し、さらにそれを平和目的（原子力発電燃料）のために利用することである。一方で、この協定はロシアの原子力産業に後述するように多額の収入をもたらし、原子力産業の崩壊を防ぎ、原子力技術者の海外流出を防いだ。

たとえば米口のHEU契約に基づくHEUの売却代金は100%ロシアの国庫に入るが、そのうち80%はMINATOMに分配され、そこからHEU契約に携わる企業に対して、必要コストに20-25%の手数料を上乗せして支払われた。HEU契約で米USECが1993年にロシア政府に支払った金額は4.5～5.0億ドルであり、このうち80%がMINATOMの収入となった。またHEUの希釈作業に従事した人員は1998年には8000人であっ

⁵ 透明性契約： HEU契約で供給されるLEUが本当に核兵器を解体したHEUを希釈したものであること、数量に間違いがないことなどを担保する為の契約。

た。また2001年の収入は、7億2800万ドルであった。

米ロ HEU 協定の下、最初の船積みは1995年5月に行われ低濃縮ウラン (LEU) で156トン(HEU6.1トンより生産)であった。1996年には12トンのHEUを希釈、1997年には18トン、1998年には24トンでありその後は年間30トンHEU処理した。2002年USECとTENEXの契約が延長され年間30トンの割合で2013年まで行われることとなった。

ただしこの契約対象は濃縮役務のみであり、天然ウランコンポーネント⁶の支払いが問題であったが交渉の結果最終的にはウランコンポーネントは西側の Cameco と Cogema と Nukem⁷ が優先買取権を得てある一定量を引き取ることとなり、その後USECが使用した天然ウランコンポーネント部分をロシアに返却しこれはTENEXが販売することとなった。

供給が加速するにつれ生産インフラは拡張され、1996年にはゼレノゴルスクとセベルスク工場にてフッ化処理と希釈施設が導入され、1997年にはオゼルスク工場にてHEUメタルの酸化・純化工程がスタートした。1998年には処理能力は年間HEU15トンとなりセベルスクと同規模となり、全体の処理能力は年間30トンとなった。1998年時点でこのHEU希釈作業には8000人が従事した。現在、HEUの希釈に関連した作業は前述した4つの濃縮施設及びオゼルスクのマヤーク生産公団でおこなわれている。オゼルスクとセベルスクの化学工場と冶金工場はもともと核弾頭のHEUとプルトニウムを生産する為に建設されたものであるが、ここでメタルHEUの機械切断とHEUの加熱酸化作業をしている。HEUの粉末酸化物のフッ化はゼレノゴルスクとセベルスクでおこなわれている。また4つの濃縮施設のそれぞれで1.5%の低濃縮ウランを生産している。

4. 1993年の米ロHEU協定における高濃縮ウラン希釈の技術的問題について

米ロ間の交渉の中では、ロシアのHEUの大半はプルトニウム生産計画での再処理よりプルトニウムを抽出した後の再処理回収ウランを使用して生産されているため、放

⁶ 天然ウランコンポーネント

濃縮ウランの生産には天然ウランと濃縮作業が必要なので、ある濃度のある数量のLEU製品を評価する場合、その濃度まで濃縮するのに必要な濃縮作業とそれを作る為の原料として必要な量の天然ウランの二つの作業と原料が必要となる。この原料となる天然ウランの数量を天然ウランコンポーネントと呼び、また必要な濃縮作業量を濃縮コンポーネントと呼ぶ。

⁷ Cameco : カナダのウラン生産会社。ウランの探鉱開発生産、さらにウランの転換を行っている世界最大級のウラン生産会社。
Cogema : フランス AREVA 社の原子燃料部門。ウランの探鉱・生産・転換・濃縮・再処理を行う大手原子燃料会社。
NUKEM : ドイツ電力 RWE の子会社。ウラントレーダーとして世界最大。

放射性核種やウランの同位体が混入し汚染されており、米国電力向けの仕様を充たさない事がわかった。

そこで、この問題に対処するため、MINATOM より提案された方法は、まず HEU の不純物濃度は放射化学的処理で低減させるというものであった。また、同位体については U-232、U-234、U-236 が問題となった。U-232 の娘核（放射性原子の崩壊後にできた核種）の Bismuth-212 と Tellurium-208 が強いガンマ線核種であること、また U-236 は中性子吸収断面積が大きく炉心で反応度を減少させること、U-234 は天然の同位体であるが濃縮の過程で濃度が高まっており、強いアルファ線核種であるため濃度に制限があること、等が問題であった⁸ これらの問題は、HEU と、ウラン濃縮で出てくる廃棄ウラン（テール）のように U-234 が減少しているウランとを混合し解決することとされた。具体的には U-234 の減少したテールを 1.5% の濃度まで再濃縮した低濃縮ウランを作り、それを HEU と混合することによって、仕様を満足させつつ最終製品の量も十分確保し最適化できるとして解決することとした。最初の希釈生産⁹ はセベルスク工場で酸化と純化、ノボウラルスク工場でフッ化、混合を行う設備が作られ、1994 年秋より工業規模で生産が開始された。

⁸ 米国電力に販売する場合、米電力が入手した HEU を成型加工会社に持ち込む時成型加工会社の受け入れ仕様を満たさねばならない。これは成型加工会社の従業員の放射線被爆管理上の問題で上述のように U-232 と U-234 はガンマ線とアルファ線の問題があり、U-236 は中性子吸収断面積があるため反応度が落ちるので濃度補償をする必要がでてくる。

⁹ 核弾頭から解体された HEU はまず細断したうえ、酸化して HEU のウラン酸化物とした上で溶媒抽出で不純物を除去し、次にフッ化し、HEU の液体 UF₆ とする、一方廃棄ウラン（テール）を濃縮し U-235 が 1.5% の低濃縮ウランを生産し液体 UF₆ として、この両者を T 型パイプで混合することにより製品の HEU を生産する。

実際の希釈作業は以下のようにおこなわれている。

HEU希釈

0.25%劣化ウラン 8555 トン + 534 万 SWU・・・1.5%LEU916.6 トン / (0.1%テール)

93%HEU 30 トン+ 1.5%LEU916.6 トン・・・4.4%LEU946.6 トン
= 552 万 SWU + 天然ウラン 9000 トン

すなわち現在年間 30 トンの HEU が LEU に希釈されているが、これは上記のごとくまず 0.25%濃度の廃棄ウラン（テール）8555 トンを濃縮（必要濃縮作業 534 万 SWU）して、1.5%濃度の低濃縮ウラン 916.6 トン生産する。これに核弾頭からの 93%濃度の HEU を 30 トンと混合すると、軽水炉で一般的に必要なとされる 4.4%の LEU が 946.6 トン生産される。これを通常の天然ウランから普通に生産すると、

天然ウラン 9000 トンを原料として 552 万 SWU の濃縮作業で生産するも、匹敵することになる。

ロシアによれば実際には希釈用の劣化ウランは 0.25%以下を使っているため、使用している濃縮役務は 578 万 SWU とのことである。

そうすると、この濃縮事業は 0.25%濃度の劣化ウランを使い 1.5%に濃縮した LEU（テールは 0.1%）で HEU 30 トンを希釈し、4.4%の LEU を 946.8 トン生産することになるが、これは天然ウラン 9000 トンを使い 552 万 SWU の濃縮役務を利用した場合と同じ結果を生み出すこととなる、また別の見方をすれば、HEU を利用することで、テールの劣化ウランが天然ウラン 9000 トン/年に変わったことともなる。簡単に言い換えると、西側ではほとんど無価値に評価されていた劣化ウランと 578 万 SWU 分の濃縮役務を用いることで、552 万 SWU 分の濃縮役務と 9000 トンの天然ウランとにかわったことになる。

注目すべきは高濃縮ウランを希釈したといいながらも天然ウランを濃縮して LEU を生産するより多くの濃縮役務を使用している（578 万 > 552 万 SWU）ことである。しかしそれでもロシアにとっては普通の濃縮契約を獲得して濃縮ビジネスを実現したのと同様の効果を生んでおり、その収入でロシアの濃縮産業は潤ったことになる。

5. ロシアでのテールの劣化ウランの再濃縮事業の意味

ロシアでのテールの再濃縮は、もともと、ロシアの濃縮コストが安いこと、ロシアに過剰濃縮能力があること、さらに MINATOM の専門家がテールはウランの戦略在庫と見做していたこと、等より再濃縮が行われていた。しかし、これに加え、1993 年の米口 HEU 契約により希釈用のウラン生産のためより重要な意味を持つこととなった。

さらに 1990 年代の中ごろ以降、ロシアは西側濃縮会社 URENCO¹⁰ と COGEMA のために廃棄ウラン(テール)の再濃縮を行ってきたが、これは URENCO と COGEMA にとっては負担であったテールの貯蔵問題が解決できる有利な方法であった。つまり URENCO と COGEMA にとって他の濃縮会社との競合上、テールは無料で引き取らねばならないが貯蔵にはコストがかかる状況であったが、ロシアで濃縮して天然ウラン相当まで濃縮してもらえれば天然ウランとして売れるし、そこから出てくるテールはロシアに引き取ってもらえるので一石二鳥の契約であった。一方ロシアにとっては天然ウランからのクリーンな(不純物を含まない)テールを只で入手できて希釈用に使える、という利益の大きな契約であった。

この契約で URENCO と COGEMA の 2 社は 5000 ~ 7000 トンの劣化ウランをロシアに輸出して天然ウラン相当の 0.711% のウラン 1100 トンの返却を受けている。COGEMA はそれに加えて 3.5% の濃縮ウラン 130 トン受け取っている。すなわちこの取引はロシアと西側 2 社双方にメリットのある取引だった。

6. ロシアの濃縮技術の輸出

1990 年代のロシア政府の財政逼迫状況に直面して、MINATOM はロシアの遠心分離技術の輸出にも直接関与し、ビジネス拡大を図ることとなった。例えば 1992 年 12 月 18 日、ロシアと中国の両政府は「中国における原子力発電用遠心分離ウラン濃縮プラント建設の協力協定」を調印した。これに基づき 1993 年 3 月、陝西省漢中に年間 50 万 SWU の濃縮役務能力を持つ遠心分離プラント建設の基本契約が締結された。1996 年 12 月両国は同プラントの年産能力を 100 ~ 150 万 SWU に拡張し、蘭州に年産 50 万 SWU の新規プラントを建設することも合意した。1997 年 3 月 26 日、陝西プラントの第 1 回工事分(20 万 SWU/年)が予定より 1 年早く操業を開始した。陝西プラントの第 2 期工事分(30 万 SWU/年)は 1998 年 8 月に操業を開始した。また蘭州の(50 万 SWU/年)プラントは 2001 年に操業に入り、将来は能力を倍増する計画とされている。

なお NPT 条約上で中国は核保有国と認識されており、ロシアが中国で遠心分離プラントを建設したことは核不拡散上大きな問題とはならないと解釈されている。更に、ロシア/中国/IAEA で 3 者間協定が結ばれ国際査察下にあり、陝西プラントは IAEA の安

¹⁰ URENCO : 英独蘭 3 国共同開発による遠心分離技術を基礎にしたウラン濃縮会社。

全保障措置下にある。この濃縮工場の査察についての3者間の交渉においてはロシアの濃縮技術では配管が比較的容易に変更できることから、兵器用の高濃縮用に配管が変更されていないことをどのように確認するか、またあるいは中国において予告なしに突然査察をするときの交通手段をどうするか、などの問題がいろいろ議論された。

中国の濃縮工場に携わったのは主にノボラルスク工場とアンガルスク工場である。1995年時点でのこの事業の契約金額（実質的に陝西プラントの価格）は、1億5000万ドルであったとされる。この契約はパッケージ契約であり、中国がロシアのVVER=1000原子炉を購入すること、フランスが建設中の中国の原子炉の燃料の30%をロシアから輸入すること、と抱き合わせになっている。

当時のMINATOMのミハイロフ大臣によれば中国に輸出した遠心分離機は決して最新技術のものではなく15年前の旧式のもので（多分第5世代と想定される）、一方ロシア自身のプラントは2000年までに新世代機（能力は1.5~2.0倍）に切り替える予定とのことである。

中国での成功を受けて、MINATOMは1990年代の初めから中ごろにかけてMINATOMは他の国にも濃縮技術を輸出しようとした。その一環でイランとも交渉を始めたが、MINATOMの計画が一般に知られてから米国の圧力を受け、ロシア政府により中止させられている。

7. まとめ

以上述べてきたようにソ連崩壊後のロシアの原子力産業は危機的な状況にあったが、その中で、ロシアの濃縮産業は、特に米口のHEU契約に基づきロシアの濃縮サービス販売を通してロシアの原子力産業維持・発展に重要な役割をはたした。ロシアの国家としての安定性や国際政治上の問題で、ロシア単独では濃縮販売は難しいが米口HEU契約という核不拡散・核弾頭削減という名目により米国USECを通して販売し、USECの既契約に充当する形で濃縮を販売し外貨を稼げたという意味でロシアにとって非常に重要なビジネスであった。

このことから類推すれば最近ロシアが発表した「核燃料サイクルセンター構想」でロシアが何を期待しているかが伺える。これはロシアのプーチン大統領がサンクトペテルブルグ・サミットの時、打ち出した構想であり、これから原子力発電を進めようとする原子力途上国に対し濃縮ウランを提供し、平和利用のためと称して濃縮技術をもつことのないよう、また使用済み燃料も引き受けて、プルトニウムを所有することもないように国際的に核不拡散を実現しながら核燃料サービスを提供しようという構想である。またIAEAもMNA (Multilateral Approaches to the Nuclear Fuel Cycle)として同様な構想を提案している。

ロシアの狙いと考えられるのは米国のサポートの下でIAEAを窓口にしてロシアの濃縮を国際プロジェクトとして確実に販売することである。そのためにはまず米国の支持を

得ることが必要であり、ついで IAEA と緊密な関係を作り IAEA の MNA 構想に乗って
発展途上国向け濃縮を IAEA を販売窓口として販売していくことであろう。

ロシアの原子力が国際的にめざすものが、発展途上国向け国際的燃料サイクルサービス
構想でのリーダーシップの確保、であるとしたら、自国内でのフューエルサイクル完成
を目指し、米国 GNEP 構想の枠組みに積極的な関与を表明している日本にとっても、
また今後、原子力発電の進展を図り、濃縮役務を大量に必要とするであろう中国や韓国
等にとっても、ロシアの原子力産業の再編と今後の濃縮技術及び事業規模の発展は、
MNA や GNEP の今後の展開と併せて着目すべきものである。

お問合せ：report@tky.jeej.or.jp