



JAEA-Review

2025-043

DOI:10.11484/jaea-review-2025-043

ロシアの核エネルギー—民生利用方法に関する分析研究

An Analytical Study on Russia's Civilian Nuclear Energy Utilization

川崎 信史

Nobuchika KAWASAKI

大洗原子力工学研究所

戦略推進部

Strategy and Management Department

Oarai Nuclear Engineering Institute

October 2025

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section, Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: ird-support@jaea.go.jp

ロシアの核エネルギー民生利用方法に関する分析研究

日本原子力研究開発機構 大洗原子力工学研究所 戦略推進部

川崎 信史

(2025年8月28日受理)

ロシアは、民生分野における核エネルギー利用において、世界の最先端を行く先進国であるが、その内情の把握は、種々の理由により難しいものとなっている。そこで、ロシアの核エネルギー利用、核燃料供給、燃料製造能力、再処理・燃料サイクルの考え方について、その意図と成果に関する歴史的な整理を行い、そこから得られる知見を抽出した。また、本知見から見えてくる戦略を、「開発・実証の戦略的多様性と連続性」及び「技術活用・展開方法の多様性」として整理し、日本にとっての示唆も含めて以下のように考察した。

ロシアの核エネルギー政策は、多様な原子炉型式と燃料サイクル技術を戦略的に活用し、国内外での原子力発電の拡大を目指すものである。現在、軽水炉（VVER シリーズ）を中心に、原子力発電は国内の電力発電量の約 20%を占めており、2045 年までにこれを 25%に引き上げる計画が進められている。

ロシアでは、大型炉から中型・小型モジュール炉まで、さまざまなタイプの原子炉の建設が進められており、高速炉技術の開発や、使用済み燃料の再処理・リサイクルにも注力している。国際的には、VVER-1200 などの原子炉を複数の国で建設中であり、高速炉分野では中国との協力も深まっている。特筆すべき点は、ロシアが原子炉の導入から燃料の供給、再処理、廃棄物管理、さらには放射性同位体（RI）の提供に至るまで、これらすべてを一体的、あるいは部分的に選択可能な技術サービスとして、国際的に提供している点である。単なる製品の輸出や技術の供与にとどまらず、相手国の状況やニーズに応じた柔軟な対応を通じて、持続的な関係の構築と信頼の醸成を図っている。

このような国際展開を可能にするために、ロシア国内では将来的に海外での展開が見込まれる分野において先行的に技術開発を進め、対象となる技術やサービスを選定し、計画的に展開を図っている。このような「技術の多様性」と「戦略の一体性」を兼ね備えた柔軟な展開は、さまざまな地政学的背景を持つ国々との協力を可能にしており、日本にとっても、単に技術を輸出するのではなく、燃料サイクル全体を見据えた包括的な国際協力のあり方や、高速炉や RI 供給などを組み合わせた多角的なアプローチとして参考になる。

An Analytical Study on Russia’s Civilian Nuclear Energy Utilization

Nobuchika KAWASAKI

Strategy and Management Department, Oarai Nuclear Engineering Institute

Japan Atomic Energy Agency

Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received August 28, 2025)

Russia is one of the most advanced countries in the civilian use of nuclear energy. However, understanding the internal mechanisms of its nuclear program remains difficult due to various reasons. Therefore, this study presents a historical overview of Russia’s nuclear energy utilization, fuel supply, fuel manufacturing capabilities, and concepts regarding reprocessing and the nuclear fuel cycle. From this overview, insights have been extracted and analyzed. These insights are then organized under two strategic perspectives: “Strategic diversity and continuity in developments and demonstrations” and “Diversity in utilizations and deployments,” with considerations of implications for Japan, as below.

Russia’s nuclear energy policy strategically utilizes a variety of reactor types and fuel cycle technologies to expand nuclear power generation both domestically and internationally. Currently, nuclear power—centered on light-water reactors (VVER series)—accounts for about 20% of Russia’s electricity supply, and there are plans to increase this share to 25% by 2045.

A wide range of reactors, from large-scale to medium and small modular reactors, are being constructed in Russia. Russia is also actively developing fast reactor technologies, and focusing on the reprocessing and recycling of spent fuel. Internationally, VVER-1200 reactors are under construction in several countries, and cooperation with China is deepening in the field of fast reactors. Notably, Russia offers an integrated—or selectively customizable—package of nuclear technology services on the international stage. These include not only reactor deployment, but also fuel supply, reprocessing, waste management, and even the provision of radioisotopes. Rather than simply exporting products or technology, Russia fosters long-term relationships and trust by flexibly responding to the conditions and needs of partner countries.

For this reason, Russia promotes the technology developments in advance within the country in areas anticipated for future overseas deployment. It carefully selects target technologies and services and systematically rolls them out. This flexible strategy—combining “technological diversity” and “strategic consistency”—enables cooperation with countries across various geopolitical contexts. For Japan, this strategic approach offers valuable lessons on how to engage in comprehensive international nuclear cooperation, not merely through technology exports, but through integrated approaches that encompass the entire fuel cycle, and by combining elements such as fast reactors and RI supply.

Keywords: Russia, Rosatom, TVEL, MCC, SCC, Civilian Nuclear Energy Utilization, Fuel Cycles, Technology Options, Fuel Supply, Reactor Construction, Nuclear Energy Policy

目 次

はじめに-----	1
1. 核燃料供給の観点からみたロシアの核エネルギー利用の歴史-----	2
1.1 ロシアの核燃料供給の歴史-----	2
1.2 ウクライナにおける燃料供給多様化の歴史-----	6
1.3 フィンランドにおける燃料供給多様化の歴史-----	7
1.4 スウェーデンにおける燃料供給多様化の歴史-----	7
1.5 チェコにおける燃料供給多様化の歴史-----	8
1.6 第1章のまとめ-----	9
2. ロシアの核燃料製造能力-----	10
2.1 ロシアのウラン1次生産量-----	10
2.2 ロシアの転換能力の変遷-----	11
2.3 ロシアの濃縮能力-----	12
2.4 UO ₂ 燃料の特徴及び燃料集合体の形状-----	13
2.5 ロシアにおける主要なUO ₂ 燃料製造拠点-----	16
3. ロシアの核燃料再処理・核燃料サイクルの考え方-----	18
4. ロシアの核エネルギー政策とその戦略-----	31
4.1 現在のロシアの核エネルギー政策と原子炉の建設状況-----	31
4.2 開発・実証の戦略的多様性と連続性-----	34
4.3 技術活用・展開方法の多様性-----	36
4.4 第4章のまとめ-----	38
参考文献-----	39
付録1 ロシアの核エネルギー開発の歴史に関するまとめ（要旨と所見）-----	65

Contents

Introduction -----	1
1. History of Nuclear Energy in Russia from the Perspective of Nuclear Fuel Supply	
Utilization (VVER Reactors) -----	2
1.1 History of Russia's Nuclear Fuel Supply -----	2
1.2 History of Fuel Supply Diversification in Ukraine -----	6
1.3 History of Fuel Supply Diversification in Finland -----	7
1.4 History of Fuel Supply Diversification in Sweden -----	7
1.5 History of Fuel Supply Diversification in the Czech Republic -----	8
1.6 Summary of Chapter 1 -----	9
2. Russia’s Nuclear Fuel Fabrication Capabilities -----	10
2.1 Primary Uranium Production -----	10
2.2 Conversion Capacity -----	11
2.3 Enrichment Capacity-----	12
2.4 Characteristics of UO ₂ Fuel and Fuel Assembly Designs -----	13
2.5 UO ₂ Fuel Fabrication Facilities in Russia -----	16
3. Russia’s Approach to Nuclear Fuel Reprocessing / Fuel Cycle -----	18
4. Russia’s Nuclear Energy Policy and Its Strategy -----	31
4.1 Current Nuclear Energy Policy and Reactor Construction Status in Russia -----	31
4.2 Strategic Diversity and Continuity in Developments and Demonstrations -----	34
4.3 Diversity in Technology Utilizations and Deployments -----	36
4.4 Summary of Chapter 4 (Takeaways of this report) -----	38
References -----	39
Appendix 1 History of Nuclear Energy Development in Russia (Summary and Key Takeaways) --	65

表リスト

Table 1	スウェーデン及びフィンランドで稼働中の原子力発電所	41
Table 2	スウェーデン・ヴェステロース核燃料製造工場の製造ライン	42
Table 3	ロシアと中国の核燃料製造に関する協力関係	43
Table 4	核燃料供給の観点からみたロシアの核エネルギー利用	44
Table 5	ウクライナにおける燃料供給多様化の経緯	46
Table 6	フィンランド・ロヴィーサ原子力発電所における燃料供給の変遷	47
Table 7	スウェーデンにおけるロシア製燃料 (TVS-K) 試験の経緯	48
Table 8	チェコ・テメリン原子力発電所における燃料供給の経緯	49
Table 9	UO ₂ 燃料の特徴	50
Table 10	UO ₂ 燃料の出荷形態と工程	51
Table 11	燃料集合体 TVS-2M (TBC-2M) の特徴	52
Table 12	燃料集合体 TVS-K (及び改良型 TVS-Kmp) の特徴	53
Table 13	ロシアから中国への HEU 燃料の供給 (MSZ での HEU 燃料の製造)	54
Table 14	プルトニウム生産炉 ADE-2 の経緯	55
Table 15	ロシアにおける再処理技術と核燃料開発の年表	56
Table 16	REMIX 燃料の開発経緯	58
Table 17	窒化物燃料の開発経緯	60

図リスト

Fig. 1	ロシアの核エネルギー国内政策	62
Fig. 2	ロシアの核エネルギー国外政策	63
Fig. 3	原子炉開発に見る戦略的多様性	64
Fig. 4	技術活用・展開方法の多様性	64

List of Tables

Table 1	Nuclear Power Plants Operating in Sweden and Finland -----	41
Table 2	Production Lines at the Vasterås Nuclear Fuel Fabrication Plant in Sweden -----	42
Table 3	Cooperation between Russia and China in Nuclear Fuel Fabrication -----	43
Table 4	Utilization of Nuclear Energy in Russia from the Perspective of Nuclear Fuel Supply-----	44
Table 5	Fuel Supply Diversification in Ukraine -----	46
Table 6	Fuel Supply at the Loviisa Nuclear Power Plant in Finland -----	47
Table 7	Russian-Made Fuel (TVS-K) in Sweden -----	48
Table 8	Fuel Supply at the Temelin Nuclear Power Plant in the Czech Republic -----	49
Table 9	Characteristics of UO ₂ Fuel-----	50
Table 10	Shipment Forms and Processing Steps of UO ₂ Fuel -----	51
Table 11	Features of the TVS-2M (TBC-2M) Fuel Assembly-----	52
Table 12	Features of the TVS-K and TVS-Kmp Fuel Assemblies -----	53
Table 13	HEU Fuel Supply from Russia to China (Fabrication of HEU Fuel at MSZ)-----	54
Table 14	Background of the Plutonium Production Reactor ADE-2 -----	55
Table 15	Chronology of Reprocessing Technology and Nuclear Fuel Development in Russia-----	56
Table 16	Development History of REMIX Fuel-----	58
Table 17	Development History of Nitride Fuel-----	60

List of Figures

Fig. 1	Domestic Nuclear Energy Policy of Russia -----	62
Fig. 2	International Nuclear Energy Policy of Russia -----	63
Fig. 3	Strategic Diversity in Reactor Developments-----	64
Fig. 4	Diversity in Technology Utilizations and Deployments -----	64

はじめに

ロシアは、民生分野における核エネルギー利用において、世界の最先端を行く先進国である。一方で、ロシアに関する情報は、不明瞭さや伝聞、宣伝や反発的内容を含むことが多く、正確な把握が難しい。また、施設の改良・稼働率の変化に伴い正確な仕様予測も難しい面がある。こうした事情から、仕様にのみ着目すると、かえって本質を見誤るおそれがある。

そこで本レポートでは、第1章から第3章において、ロシアの核エネルギー利用、核燃料供給、燃料製造能力、再処理・燃料サイクルの考え方について、その意図と成果を歴史的に整理した（表4 核燃料供給の観点からみたロシアの核エネルギー利用や、表15 ロシアにおける再処理技術と核燃料開発の年表等）。そのうえで、これらの歴史的経緯から見えてくる知見を付録1として抽出し、これらを踏まえて、第4章として「現在のロシアの核エネルギー政策と原子炉の建設状況」を再整理した。また、そこから見えてきた戦略を、「開発・実証の戦略的多様性と連続性」及び「技術活用・展開方法の多様性」として抽出し、日本にとっての示唆も含めて考察した。

第3章までの範囲では、各活動の意図を読み取るために、ロシア要人の発言やエピソードを交えたため、やや冗長な情報もあるが、これは付録1及び第4章の前提として盛り込んだものである。こうした意図をご理解いただき、本レポートをご活用いただければ幸いである。なお、本レポートは、ロシアの民生核エネルギー利用における工夫や戦略を分析したものであるが、当然ながら、これをもって、ロシアの活動すべてに対する正当性や妥当性を主張するものではない。特定国や人の個々の行為には、それぞれの行いに従った評価や対応がなされるべきあることを蛇足ながら付け加えておく。

1. 核燃料供給の観点からみたロシアの核エネルギー利用の歴史

1.1 ロシアの核燃料供給の歴史

ロシア（旧ソビエト連邦）は、1954年にオブニンスク原子力発電所（5MWe 黒鉛減速水冷却型）を稼働させたことに始まり、初期の原子力燃料（集合体）の設計・製造において世界的に先行していた（燃料集合体は当時チェリャビンスク-65と呼ばれていた現在のマヤークで製造）。1960年代から1970年代にかけては、VVER型（加圧水型）及びRBMK型（黒鉛減速沸騰軽水冷却型）原子炉に対応する燃料集合体の標準化と量産体制が確保され、エレクトロスタリ機械製造工場（MSZ）の燃料集合体組み立てラインも整備された（ロシアの核燃料製造能力については、第2章に記す）。

なお、VVER-440初号機の建設開始・運転開始は、それぞれ1967年、1972年である（以下、VVER-440の呼称は、V-179型、V-213型、V230型、V270型すべてを包含する呼称として使用する）。

英国のガス炉AGR（600MW級）の初建設・運転は、それぞれ1967年、1976年であり、米国のGE-BWR-2（600MW級）は1964年、1969年、米国のWH-PWR（500MW級）は1966年、1973年である。ロシアのVVER-1000初号機は1975年建設開始、1981年運転開始であり（VVER-1200は、2008、2016）、米国のGE-BWR-4（1,065MW：1966、1974）、ドイツのシーメンス製PWR（1,200MW級：1969、1974）が初めて1,000MWを超えた軽水炉であることを考えると、炉の出力増加においては、ロシアは欧米に後れを取った（VVER-440、VVER-1000、VVER-1200が国際的輸出炉）。

〔冷戦及び旧ソビエト連邦圏へのVVER輸出期〕

ソビエト連邦は、1970年代後半から1980年代にかけて、VVER炉（VVER-440）をブルガリア（1974年グリッド接続運転開始）、アルメニア（1976）、チェコスロバキア（1978）、ウクライナ（1980）、ハンガリー（1982）などの旧ソビエト連邦圏国に輸出しており、これに伴い燃料、燃料集合体の輸出も本格的に開始された（後述するNPCCでの燃料ペレットの製造能力拡大もこの時期実施されている）。これらの燃料供給は一貫して国家主導の体制下で実施され、東欧圏におけるソビエト連邦のエネルギー的影響力の中核を成していた。

なお、フィンランドは、旧ソビエト連邦圏ではなく中立非同盟国であるが、2基のVVER-440を導入し、それぞれ1977年、1980年に運転を開始している（制御系や安全系は、ドイツやスウェーデン製であり、正確にはハイブリット型）。これは、「軍事的中立」を保ちながらも、外交・経済政策ではソビエト連邦の影響を一定程度受け入れるフィンランド化（Finlandization）事例であり、西側技術でそれを補完する技術的・政治的折衷案と呼ばれている（1979年運転開始のオルキルオトは、スウェーデン製860MWe級BWR-3）。

またルーマニアは、東欧のなかでは比較的独立した外交路線（チャウシェスクの自主独立政策）であり、ウラン鉱山も保有していたため、カナダからCANDU-6（約700MWe）を導入（1983年建設開始、1996年運転開始）した。なお、フランスは、1978年以降の10年で15基の900～1,545MWのPWRの運転開始に成功し、原子炉開発においては、大きなアドバンテージをもった。

〔同盟関係の再編、技術互換性確保期〕

1991年のソビエト連邦崩壊後も、燃料集合体の供給事業はロシア国営の TVEL 社が継承し、旧ソビエト連邦構成国及び東欧諸国への供給を継続した。1990年代には、商業的な競争環境に対応するため、TVEL 社は燃料製品の性能向上と供給体制の安定化に注力した。

EU 発足から2年遅れた1995年に、中立非同盟の立場をとっていたスウェーデン及びフィンランドが EU に加盟した。スウェーデン及びフィンランドで稼働中の原子力発電所を表1に示す。BWR、PWR、西側炉、ロシア炉入り混じって建設されているが、スウェーデン及びフィンランドの BWR については、すべてスウェーデン企業である ASEA-Atom (のちの ABB-ATOM) によって、設計・建設されている。なお、フィンランドのオルキルオト BWR-3 (710MWe) は、運転開始時の初期燃料より ASEA-Atom 製の燃料を使用していたが、ロヴィーサの VVER-440 は TVEL 社燃料を使用しており、フィンランドは、EU 加盟後も VVER-440 に対しては、この燃料を継続して使用した。

スウェーデンは、エネルギー政策の多様化等の観点からウェスチングハウス社製 PWR も導入しているが、その初期燃料は、米国ウェスチングハウス社が供給していた。ウェスチングハウス社が、2000年に ASEA-Atom を買収したこともあり、元来 BWR 燃料を製造していた ASEA-Atom のヴェステロース核燃料製造工場(表2参照)は、このころから PWR 燃料も製造するようになった。2000年前後に行われたといわれているこの製造ラインの整備・改造と技術移転は以下の項目を含んでいたといわれている。

- ▶ PWR 用燃料集合体の製造に必要な加工設備の設置・更新
- ▶ 燃料棒の製造ラインの拡充(被覆管の製造・加工技術)
- ▶ 燃料集合体組立工程の自動化及び品質管理強化
- ▶ 技術移転による PWR 燃料設計技術の導入、CAD/CAM システムの共有
- ▶ 技術移転による核燃料性能解析、熱流体解析技術の習得

この2000年ごろから変化した燃料集合体の供給問題が、以降、拡大していくこととなった(本工場では、2005年に既に、南ウクライナ原子力発電所向けの VVER-1000 用燃料の試験製造を行っている)。

2004年及び2007年にあらたに12カ国が EU に加盟した。このうちチェコ、スロバキア、ハンガリー、ポーランド、エストニア、ラトビア、リトアニア、ブルガリア、ルーマニアの9カ国が旧ソビエト連邦圏であり、チェコ、スロバキア、ハンガリー、ブルガリアが VVER 導入国である(リトアニアは旧 RBMK 導入国。ルーマニアは CANDU 導入国)。これらの国では、西側基準への適合が要求されたが、TVEL 社は、品質・安全認証を強化し、燃料契約継続を確保した。

またこの時期、ロシアは西側市場への参入を模索し、PWR 向けの新型燃料「TVS-K」の開発に着手した。2004年にはスウェーデンのリングハルス原子力発電所で TVS-K の試験的な装荷が行われている。

一方で、ウクライナでは、ウェスチングハウス社製 VVER-1000 用燃料の試験装荷が2005年に実施されている。ウェスチングハウス社の VVER-1000 向け燃料装荷は、2000年にチェコの

テメリン発電所で実施されたが、その後、照射湾曲が生じたため、2010年に再度 TVEL 社燃料に戻っていた。そのため、ウクライナにおける VVER-1000 向け装荷が、結果的に本格的な試用となった（商用規模での定常使用は 2016 年）。

中国では、TVEL 社の設計ライセンスの下、中国田湾（タイシャン）の VVER-1000 が、2007年に稼働した（初期燃料は、TVEL 社製）。2009年には、中国国内で VVER 用 UO_2 燃料製造ラインが稼働している。ロシアと中国の核燃料製造に関する協力関係を表 3 に示す。

〔地理的距離を超えた戦略的提携と包括的核燃料サイクル支援パッケージ〕

2007年にロスアトムが国家公社化され、原子力輸出体制が国家戦略の一部に昇格する。2010年代には、ロシアの原子力外交戦略において原子炉・核燃料供給は重要な柱となり、ロスアトム及びその燃料製造部門である TVEL 社は、アジア（中国・インド）、中東（イラン）へ供給先を拡大する、中国（2007～2018年運転開始）、イラン（2011）、インド（2014、2017）へ VVER-1000 を輸出。なお、ラテンアメリカでの VVER 導入実績はなく、PWR あるいは CANDU が導入されている。

旧ソビエト連邦圏以外への原子力輸出競争力を強化するため、ロスアトム及び TVEL 社は、技術供与あるいは包括的な核燃料サイクル支援パッケージの提供を本格的に推進し始めた。このパッケージには、燃料供給、運転支援、使用済燃料の回収までが一体化されており、パートナー国に対する包括的かつ信頼性の高い支援体制を形成した。

燃料供給体制の強化としては、ノボシビルスク化学濃縮工場（NPCC）における燃料ペレット製造能力が、従来の年間 500 トン規模から最大 800 トン規模へと拡張された。また、2015年には、ジェレズノゴルスクの鉱業化学コンビナート（MCC）にて、ナトリウム冷却型高速炉である BN-800 向けの MOX 燃料の製造が開始されるなど、MOX 燃料（ UO_2 と PuO_2 の混合酸化物燃料）の製造体制も本格化した。従来は、マヤーク及びドミトロフグラードの RIAR（ロシア原子炉科学研究所）が主にこの任を担っていたが、MCC による製造開始により、供給能力が大幅に拡充された。

使用済燃料の回収は、核不拡散の観点からも利点があり、イランにおいては、2011年に運転を開始したブーシェフル原子力発電所の燃料は、IAEA の監視下でロシアによって回収されている。この方式は、トルコ、バングラデシュ、エジプトなどでも採用されているが、いずれの発電所も現時点ではまだ建設中の状態である（現時点で実際に適用実績があるのはイランのみ）。次に適用されるとみられるのは、トルコのアックユ原子力発電所であり、同施設では、使用済燃料の回収オプションとして、TUK 137T.A1 型輸送コンテナの納入も契約に含まれている。

一方で、中国及びインドは、自国内に貯蔵施設及び再処理施設を保有あるいは建設中であり、使用済燃料を戦略物質として位置付けている。そのため、ロシアはこれらの国に対しては燃料回収オプションを提供していない。なお、中国の再処理施設はパイロット施設のみであり、フランスの支援を受けて中国核工業集团公司（CNNC）が建設を進めている商業規模の再処理施設は、2030年ごろの運転開始を目指している。

〔欧州での核燃料供給の脱ロシア、ロシアのインド・中国との協力強化〕

一方、2014年のクリミア併合以降、ウクライナや東欧諸国ではロシア製燃料からの脱却が進み始め、ТВЕЛ社は価格面や供給安定性を武器に巻き返しを図るも、後述するVVER炉に関し、西側製燃料（特にウェスチングハウス社）との競争が激化した。さらに2022年2月のロシアによるウクライナ侵攻は決定的な転機となり、ロシア製燃料の利用見直しや代替化の動きが顕著になった。こうした状況下でも、ТВЕЛ社は、ベラルーシ（VVER-1200×2基、2022年及び2023年運転開始）、スロバキア（VVER-440×5基）、ハンガリー（VVER-440×4基。現在50年運転が承認。70年までの延長を計画）、チェコ（VVER-440×4基）、アルメニア（VVER-440×1基）、イラン（VVER-1000、2011年運転開始）、インド（VVER-1000×2基）、中国（VVER-1000×4基）への燃料集合体供給を継続している。

ただし、2000年代初頭からヴェステロース燃料製造工場に燃料を製造していたVVER-1000に関しても、チェコ、ブルガリアは、ウェスチングハウス社以外にも、フラマトム社とも核燃料供給契約自体は結んでいる。VVER-440を有するチェコ、スロバキア、ハンガリーに関しても、スロバキアは、2024年7月にフラマトム社とも核燃料供給契約を結び、2027年からの装荷を目指す一方で、ウェスチングハウス社のヴェステロース工場からの供給に関しても、協力の合意をするなど両者との関係維持を図っている。ハンガリーも自国のVVER-440について、2027年よりフラマトム社から燃料供給を受ける予定である（ТВЕЛ社との契約も2034年まで残っており、VVER-1200の建設も続いている）。

EU域内のVVER保持国のうち、チェコ（2024）、ブルガリア（2022）、ウクライナ（2019）、フィンランド（2024）は既に西側燃料を装荷している。インドと中国は、ロシアの協力のもと、自国内でVVER型燃料を製造する体制を構築中である。

なお、現在、欧州にある軽水炉向け燃料加工工場は、ウェスチングハウス社のヴェステロース工場（スウェーデン）、スプリングフィールド工場（英国）、フラマトム社のロマン工場（フランス）、フラマトム傘下ANFのリンゲン工場（ドイツ）、ENUSAのフスバド工場（スペイン）である（ウラン濃縮工場は除く）。

スウェーデンのヴェステロース工場は、2016年に、VVER-1000用燃料の製造ラインを含む、大規模なPWR燃料製造能力の拡張を実施した。

ウェスチングハウス社とENUSAは、1974年より協力関係にあり、PWR燃料を共同開発している。さらにENUSAは2023年、VVER-440燃料製造ラインの整備も実施した。なお、ウェスチングハウス社は、2000年よりVVERでの炉内試験や実装荷などを通し、経験を積んでおり、ウェスチングハウス社製VVER燃料は、ТВЕЛ社の設計ライセンスではなく、独自設計である（フラマトム社が炉内試験等を実績した記録は見つけれなかった）。

ANF（Advanced Nuclear Fuels／フラマトム傘下の燃料製造会社）は、ドイツ政府の脱原発法において例外扱いとなっている施設である。そのため、ANFの濃縮や燃料製造施設は、脱原発法の閉鎖対象外となっており、現在もPWR・BWR向けの燃料棒及び燃料集合体が日常的に製造されている（400名弱の従業員が従事している）。2023年3月にフラマトム社とТВЕЛ社は共同で、European Hexagonal Fuel S.A.S.を設立した（フラマトム社75%、ТВЕЛ社25%の出資）。

これは、ТВЕЛ 社の設計ライセンスの下で、フラマトム社（ANF）が VVER 用（特に VVER-1000）燃料を製造するための設立であり、同月 ANF での製造許可申請がなされている（許可後すぐに製造を始める予定であるが、異議申し立ても多く、公聴会が開催され、判断待ちの状態である）。

2000 年ごろからその予兆は見せていたものの、欧州における VVER 燃料製造体制は、2010 年代に入り、急激に変化した。その一方で、ロシアは、トルコ、バングラデシュ、エジプト、ハンガリーなどでの VVER-1200 建設プロジェクトにおいて、燃料供給を含むパッケージ提案を継続している（中国は、国産の HPR1000×11 基と ACP100 と並行し、VVER-1200 を 4 基建設中）。このように、欧州で影響力を低下させ、インド、中国との協力を強化している様子が見て取れる。ここまでの経緯を、表 4 に「核燃料供給の観点からみたロシアの核エネルギー利用」として示す。

ロシアは長年にわたり、自国製原子炉向け燃料集合体の技術開発と輸出拡大を国家戦略の柱として位置づけてきた。しかし、その輸出戦略が直面しているのは、単なる技術的競争だけでなく、政治的・安全保障上の複雑な課題でもある。特に東欧や北欧諸国では、ロシア製燃料への依存からの脱却や供給多様化を志向する動きが顕著となっており、それぞれの国で異なる対応策が模索されている。特に、ウクライナ、フィンランド、スウェーデン、チェコは、このような動きに翻弄された国家でもあり、これらの 4 カ国については、核燃料供給の変遷を補足して説明する。

1.2 ウクライナにおける燃料供給多様化の歴史

ウクライナは旧ソビエト連邦時代から VVER 型原子炉を保有・運用しており、独立後も長らくロシア ТВЕЛ 社による燃料供給に依存していた。特に 1991 年のソビエト連邦崩壊後、ロシアとの技術的・契約的な連続性を維持する形で燃料供給が継続され、2000 年代前半までは ТВЕЛ 社が事実上の単独供給者であった（ウクライナは、世界の確認済みウラン埋蔵量の約 2% を保有する欧州最大の資源保有国であるが、ウラン生産量は 2022 年に約 100 トン、世界全体の 0.2% と低い水準にある）。

この状況に変化が生じたのは 2005 年以降である。ウクライナは、エネルギー安全保障上の観点から燃料供給の多様化を国家戦略として打ち出し、米国のウェスチングハウス社と VVER-1000 炉向け燃料の試験供給に関する覚書を締結した。これにより、2005 年から南ウクライナ原子力発電所において同社製燃料集合体の試験装荷が開始された。

この取り組みは、当初は限定的な範囲にとどまっていたものの、2014 年のロシアによるクリミア併合が決定的な転機となった。ウクライナ政府は、ロシアによる地政学的な脅威を受けて核燃料の脱ロシア依存を加速。ウェスチングハウス社との協力を本格化させ、2016 年には同社製燃料が商業ベースで複数の原子力発電所で使用されるようになった。また、2021 年にはウェスチングハウス社の技術を導入し、燃料集合体用部品（上部ノズル及び下部ノズル）の製造を開始した（ウクライナアトムエネルギー工場）。

2022 年 2 月のロシアによる侵攻後、ウクライナ政府は VVER-440 型炉への適用も視野に入れたウェスチングハウス社製燃料の導入を正式に決定し、翌 2023 年にはロシア製燃料の全面的

な排除を目標とする国家方針が打ち出された。2023 年末には、これまでロシア製燃料が独占していた VVER-440 型炉（リヴネ原子力発電所）に、ウェスチングハウス社製代替燃料が初めて装荷された。

こうしてウクライナは、旧ソビエト連邦圏国家としては初めて、VVER 炉すべてにおいてロシア以外の供給者による燃料運用を本格化させた国家となった。これは単なるエネルギー技術の転換ではなく、国家主権・安全保障を担保する戦略的なインフラ転換の象徴であり、他の東欧諸国に対しても大きな影響を与える事例となっている。表 5 に「ウクライナにおける燃料供給多様化の経緯」を年表形式で示す。

1.3 フィンランドにおける燃料供給多様化の歴史

表 1 に示したようにフィンランドは西側諸国の中で特異な原子力導入経緯を持つ国であり、その象徴がロヴィーサ原子力発電所である。同発電所は 1977 年と 1980 年にロシア製の VVER-440 型炉を導入したが、その運転・規制は一貫してフィンランド国内の厳格な西側基準に基づいて行われた。特に、設計段階から米国（当時）のウェスチングハウス社をはじめとする西側企業が計測・制御・安全系統に深く関与したことで、東側製炉型でありながら西側仕様で運用されるという稀有な事例となっていた。

燃料供給については、1977 年の商業運転開始以来、一貫してロシア（旧ソビエト連邦）製の燃料集合体を使用されてきた。ソビエト連邦時代には独占的な供給体制が続いていたが、ソビエト連邦崩壊後もロシア国営 TVEL 社が供給を継続。フィンランドとロシアの間には、比較的安定した供給関係が築かれていた。

しかし、2014 年のクリミア危機以降、フィンランド国内でもエネルギー安全保障の観点から「脱ロシア依存」の機運が徐々に高まるようになった。とはいえ、ロヴィーサ原子力発電所（VVER-440）の燃料は炉型に特化した設計であり、短期的な代替供給は困難とされていたことから、脱ロシア化は慎重に検討されるにとどまっていた。

転機が訪れたのは、2022 年 2 月のロシアによるウクライナ侵攻である。これを受け、フィンランド政府及び運営事業者 Fortum 社は、ロシアとのエネルギー分野における依存関係の見直しを加速させた。そして 2023 年、Fortum は TVEL 社との燃料供給契約の延長を見送る方針を公表し、代替燃料の開発と供給に向けてウェスチングハウス社と正式契約を締結した。この契約により、ウェスチングハウス社はフィンランド向け VVER-440 炉用の新設計燃料集合体を開発・製造し、2027 年の初装荷を目指すこととなった。

フィンランドのロヴィーサ原子力発電所は、ロシア製炉心を西側規制の下で数十年にわたり運用してきた稀有な先行事例であり、その運用経験と規制ノウハウは、今後ウクライナや中東欧諸国が進める脱ロシア燃料戦略においても重要な技術的参照点となる可能性を秘めている。表 6 に「フィンランド・ロヴィーサ原子力発電所における燃料供給の変遷」を年表形式で示す。

1.4 スウェーデンにおける燃料供給多様化の歴史

スウェーデンは欧州でも有数の原子力利用国であり、国内の原子力発電所はすべて西側 PWR または BWR で構成されている。BWR はスウェーデン企業 ASEA-Atom が設計・建設。PWR は

ウェスチングハウス設計ライセンスの ASEA-Atom 建設（ASEA-Atom は、のちにウェスチングハウス社に買収され、ウェスチングハウススウェーデンとなる）。その中でリングハルス原子力発電所は、スウェーデン南西部に位置し、4 基の商用炉を擁して運転されてきた。そのうちリングハルス 3・4 号機は PWR であり、これまで一貫して西側供給者（主にフラマトム社＝旧アレバ社、ウェスチングハウス社）による燃料が使用されていた。

2000 年代初頭、ロシアの核燃料企業 TVEL 社は、ソビエト連邦・東欧圏以外の新規市場開拓を模索し、特に PWR 炉向けの燃料集合体「TVS-K」シリーズを開発した。これは、ロシアの VVER 用燃料設計をベースとしつつ、米国型 17×17 配置の PWR 炉燃料に対応させたもので、ロシアにとって初の西側仕様燃料参入の試みであった。この動きに応じて、スウェーデンの原子力事業者 Vattenfall 社は 2004 年、TVEL 社製 TVS-K 燃料集合体（原型）の試験装荷をリングハルス原子力発電所にて実施した。TVS-K はリングハルス 3 号機の炉内に一部の燃料集合体として装荷され、数サイクルにわたる動作試験が行われた。これは西側規制環境下でロシア製燃料が初めて実運転に入った画期的な事例であった。

試験結果は技術的には一定の成功を収め、燃料性能や互換性についてはおおむね合格点が与えられたものの、事業者側はその後、ロシアとの長期的な契約には踏み切らなかった。その主因としては、以下の点が挙げられる：

- ◇ 西側規制機関によるライセンス承認・運転認可のハードルの高さ
- ◇ 供給体制の冗長性や契約の透明性への懸念
- ◇ 西側企業（ウェスチングハウス社、フラマトム社）との既存の取引関係と信頼性
- ◇ 地政学的リスクの顕在化（特に 2014 年以降）

そのため、TVS-K は商業装荷には至らず、最終的にスウェーデンでの TVEL 社燃料の導入は試験的な段階にとどまった。これ以降、TVEL 社はチェコ、スロバキアなど既存の VVER 炉保有国への供給維持に注力し、PWR 炉向け燃料の西側市場への本格展開は停滞した。

スウェーデンにおける TVS-K 導入の試みは、ロシア製燃料が西側市場に入り込もうとした数少ないケースであると同時に、地政学的要因や規制障壁がその拡大を阻んだ象徴的な事例となった。この経験は、燃料供給の多様化やエネルギー安全保障を考える上で、供給元の技術的能力だけでなく、制度的・政治的信頼性が不可欠であることを改めて浮き彫りにした。表 7 に「スウェーデンにおけるロシア製燃料（TVS-K）導入の経緯」を年表形式で示す。

1.5 チェコにおける燃料供給多様化の歴史

チェコ共和国は、ドイツの東側に隣接した旧ソビエト連邦圏の国家であり、東側と西側の影響が混在した経緯を持つ。原子炉自体、1985 年から 2002 年までの間に 6 基の VVER が導入されたものの、現在、2029 年建設予定のドウコヴァニ 5 号機は、EPR1200 あるいは APR1000 が想定されている。2000 年に運転が開始されたテメリン 1 号機（VVER-1000）は、初期燃料がウェスチングハウス社製（ヴェステロース工場）であるが、燃料集合体に照射湾曲が発生したため、2010 年からの 10 年間は、TVEL 社が燃料集合体を供給した。エネルギー安全保障強化の観点から、2016 年には再度、西側製燃料の評価が始まり、2019 年には、6 体の燃料集合体の試験照射が開始された。本評価を受け、2022 年に供給契約（15 年）を締結、2025 年には、ウェス

チングハウス社が 30 体の燃料集合体を納入した。

このように、燃料集合体は、集合体あたりの単価設定をした燃料として、長期契約の下で供給される。また導入にあたっては、技術認証と規制認可が必要となる。表 8 に示した「チェコ・テメリン原子力発電所における燃料供給の経緯」においては、評価開始から納入まで 10 年かかっており、15 年の供給契約を実施している。

なお、自国内で PWR・BWR 用燃料集合体（PWR である VVER を含む）を製造できる国は、仏米露日韓中である。仏米露は、輸出も含めた供給国であり、韓国は UAE、中国はパキスタンへの供給実績を持つ。インドは加圧重水炉の燃料集合体は自国で製造しているが、VVER の燃料集合体は TVEL 社が供給している（国産化計画は進行中）。

1.6 第 1 章のまとめ

ロシア製燃料集合体に対する各国の対応は、原子炉型式や導入経緯のみならず、地政学的背景、規制制度、技術的互換性といった複数の要因が複雑に絡み合った結果である。ウクライナのように迅速かつ全面的な脱ロシア化を進めた国もあれば、フィンランドのように慎重な技術移行を模索する国、あるいはスウェーデンのように西側の中で試験導入にとどまった国もある。スウェーデンにおける TVS-K 導入の試みは、ロシア製燃料が西側市場に入り込もうとした数少ないケースであると同時に、地政学的要因や規制的障壁がその拡大を阻んだ象徴的な事例となった。この経験は、燃料供給の多様化やエネルギー安全保障を考える上で、供給元の技術的能力のみならず、制度的・政治的信頼性が不可欠であることを改めて浮き彫りにした。

規制制度や技術的互換性の観点からも、燃料集合体は重要な戦略的中核技術と位置づけられる。原子炉燃料は、燃料集合体単位で設計認可や型式認証（あるいは設計認証）を受け、また出荷されるため、燃料集合体の仕様選定及び照射試験を含む実証は、技術的自律性と戦略的優位性の確保という観点からも極めて重要である。

2. ロシアの核燃料製造能力

2.1 ロシアのウラン1次生産量

ロシアにおける一次ウラン生産量は、2013年から2020年まで年間およそ3,000トンで安定している。鉱山でのウラン生産コストにはばらつきがあり、40～130ドル/kgの範囲に分布している。国内において130ドル/kg相当で採掘可能とされるウラン資源量は約50万5,900トンである。

2023年の世界全体のウラン生産量は90,700トンであり、主な産出国としてはカザフスタンが21,112トン、カナダが7,400トン（2022年）、オーストラリアが4,553トン（2022年）であるが、2024年上半期には半年で、同国で5,797トンの生産が確認されており、オーストラリアで急増している。

これと比較すると、ロシアの生産量は決して少ないわけではないが、突出して多いとも言えない。むしろ、ロシアはウラン資源国としてよりも、カザフスタンに存在するウラン資源を活用し、国内に存在する大規模な転換・濃縮能力を基盤として、フロントエンドや再処理から生じる劣化ウラン、回収ウランの再濃縮を含むウラン供給体制を確立している国と捉える方が妥当である（ここで、劣化ウランとは、濃縮工程で生じる通常約0.2～0.3%のウランのこと、回収ウランとは、再処理工程で生じる通常約0.6～0.8%のウランのことと定義する）。ウクライナ侵攻以降、一次ウラン供給元を多様化する動きが加速している。しかし、ロシアがこれまで一次ウラン供給において大きなシェアを占めていたことは周知の事実であり、また濃縮あるいは単なるダウブレンド（高濃縮ウランの低濃縮化）にとどまらず、再濃縮の分野においても極めて重要な役割を果たしてきた。

たとえば、1997年以降、劣化ウラン（U-235濃度0.25～0.40%）が年間1万～1万5,000トン規模でロシアに輸送され、約0.7%まで再濃縮されていた。この再濃縮に関する契約は、ウレンコ社（Urenco）及びアレバ社（現オラノ社）との間で結ばれており、2010年に終了したが、当時は、劣化ウランをロシアが受け取り、（六フッ化ウラン形式で受領し）、再濃縮後、UF₆形式で納品していた。なお、この再濃縮プロセスで生じた約0.10%まで低下したテイルウランは、ロシアの資産としてロシア国内に保管された。

なお、カザフスタンにおけるウランの主要な輸出先は、ロシアが46%、中国が36%を占めており、これにカナダ（7%）、フランス（5.4%）、米国（2.3%）が続いている。日本とカザフスタンの間にも原子力協定が締結されているが、過去にはこの協定が不十分と評価された時期があり、日本国内ではウラン輸入を制限する動きがあった。そのため、現時点で日本はカザフスタンからウランを輸入していない。日本の基本的な方針は、平和利用・再輸出禁止などの条件が明確に定められた原子力協定を有する国からのみウランを調達するというものである。また、日本は長期輸入契約を通じて、数年分に相当する天然ウラン在庫（約8,000～10,000トンU）を確保する体制をとっている。主な供給国は、カナダ、オーストラリア、ナミビア、ウズベキスタン、米国である。製錬や濃縮といった工程については、日本国内で一部の濃縮能力を維持していれば十分とする立場であり、コスト的に優位な同盟国の製錬・濃縮サービスを活用することで、全体の供給体制を構築している。このため、リスクの高い転換工程に日本が直接関与す

る必要はないとこれまでは、考えられている。

2.2 ロシアの転換能力の変遷

ロシアにおいて、歴史的に大きなウラン転換能力を有していたのが、アンガルスク電気化学コンビナート（AECC）である。1957年に稼働を開始したAECCは、かつてロシア最大の商業用UF₆転換施設であり、公称最大転換能力（UF₄→UF₆）は年間25,000トンUに達していた。なお、2010年代には実際の稼働量はもっと少なく、年間10,000トンU程度にとどまっていると、世界原子力協会（WNA）などは推定している。

こうした中、2011年にTVEL社はロシア国内の転換能力を一部の施設に集約する方針を打ち出し、その結果、AECCの転換設備は2014年に停止された。なお、2024年に再稼働を目指す動きも見られていることから、この停止理由は、施設の老朽化とインフラの更新を目的とした政策的判断が主因であると考えられる。

転換設備の停止後、AECCは新たな役割として、劣化ウランからのU-235回収（再濃縮）を実施している。そして2024年からは、シベリア化学コンビナート（SCC）で転換されたUF₆を再び受け入れ、濃縮を再開する計画となっている。ただし、2023年9月12日時点では、再稼働はまだ実現していない。

IAEAのNFCISデータベース上では、アンガルスク、チェペツキー、エカテリンブルクに所在していたウラン転換施設はいずれも廃止されたものとされている。このため、現在稼働可能な施設は、シベリア化学コンビナート（SCC）に属するセヴェルスク国家化学企業（SGChE）のみであるように見受けられる。同施設では、新規ウランの六フッ化ウラン（UF₆）への転換、及び回収ウラン（RepU）の濃縮と再転換を実施可能であり、その処理能力は年間約10,000トンUに達するとされている。

しかしながら、エレクトロスタリの転換工場においても、AECC（アンガルスク電気化学コンビナート）の1/10程度の規模ながら、古くから国外向けの転換事業や、VVER型炉の使用済燃料から回収したウランの再転換を行ってきた実績がある。（本来、AECCは新燃料向けのUF₆転換を担い、エレクトロスタリはVVER-440の使用済燃料からの転換を担うという役割分担がなされていた。）

ウラン活用方法の多様化は、関連施設の新設内容にも影響を及ぼしている。ジェレズノゴルスク（MCC-ECP）においては、2005年、ロシアの核燃料製造企業TVEL社が、当時のアレバ社（現オラノ社）と「W1-ECP」と呼ばれる六フッ化ウラン（UF₆）脱フッ素化装置（DUHF Reconversion Facilities）の技術移転契約を締結した。この装置は、UF₆を三酸化ウラン（U₃O₈）へ再転換する脱フッ素化処理を行うものであり、これにより、劣化ウランをウラン酸化物として長期貯蔵することが可能となる。また、この工程の中で、生成されるフッ化水素（HF）は、精製すると、無水フッ化水素が副産物として生産される（UF₆→U₃O₈+ HF）。無水フッ化水素は、化学工業の幅広い分野で基幹原料として使われる化学製品であり、市場価値が高い。このフランスのピエールラッテにあるオラノ社（フランス）のW2プラントに類似したW1-ECPプラントは、主に西欧製の設備を使用しており、2009年に商業運転を開始した（無水フッ化水素

処理能力は 2011 年以降年間 10,000 トン)。さらに 2019 年 12 月には、オラノ社（フランス）が TVEL 社との間で、MCC ジェレズノゴルスク工場における第 2 装置「W2-ECP」の供給契約を締結し、その契約額は約 4,000 万ユーロに達した²⁾。主要装置は 2021 年末より、フランスからロシアへの輸送が開始され、ロスアトム/TVEL 社の 2022 年の業績報告によると、輸入機器の納入は 2022 年に完了している。これにより、無水フッ化水素処理能力は年間 20,000 トンになる見込みである。この脱フッ素化装置の導入は、後述する濃縮施設であるウラル電気化学統合プラント（UEIP）でも検討されている。

すなわち、ロシアはシベリア化学コンビナート（SCC）の SGChE 施設において、新規ウラン及び回収ウランの六フッ化ウラン（UF₆）への転換能力を年 10,000 トン U 程度維持しつつ、国外向け案件については、別途エレクトロスタリの転換工場にて処理を行っている。

また、アングルスク電気化学コンビナート（AECC）の再稼働についても、依然として選択肢から排除されているわけではない。さらに、使用済み燃料の増加を踏まえ、ジェレズノゴルスクの MCC において UF₆脱フッ素化工程を新設し、U₃O₈で保管する能力を高めつつ、副産物として無水フッ化水素を製造するなど、従来のように転換工程のみの過剰な能力を保持する方式から、転換と再転換の能力を柔軟に構成し、活用する方針を採っていると考えられる。なお、米国などは、かつてロシアに転換能力の大部分を依存していた経緯を持つことから、現在、自国内での転換インフラの整備を進めている。

2.3 ロシアの濃縮能力

ロシアの濃縮能力については、比較的多くの情報が公開情報でアクセスできる。ウラル電気化学統合プラント（UEIP）、ジェレズノゴルスク鉱業化学コンビナート（MCC）の電気化学プラント（ECP）、シベリア化学コンビナート（SCC）の SGChE（訳すとすればシベリア国家化学実験プラント）、アングルスク電気化学コンビナート（AECC）の 4 か所が中大規模濃縮工場である。このうち、MCC は軽水炉等の燃料の再処理及び MOX 燃料の製造、SCC は同一サイト内でのクローズドサイクル概念の実証をコンビナート内で行っている。

ウラル電気化学統合プラント（UEIP：年間能力 10,000 トン SWU）では、第 6 世代から最新の第 9 世代プラスに至る 5 世代にわたるロシア製ガス遠心分離機が稼働している。UEIP は、ウラン 235 を最大 30%まで濃縮可能であり、これは研究炉及び BN 型高速炉向けの仕様である。他方、他の濃縮工場では、原則として濃縮度 5%までに制限されている。第 8 世代機器の設置はすでに完了しており、これらの機器は 2004 年から 2012 年にかけて供給されたものである。2016 年には、第 10 世代機器の試験運転も実施された。なお、第 6 世代機器については、現在も中国向け輸出用として生産が継続されている。

なお、ロスアトムは 2016 年、UEIP 内のウラルガス遠心分離機工場（UZGT または UGCP）において、遠心分離機的设计及び製造機能を統合する方針を決定している（新世代遠心分離機の耐用年数は最大 30 年とされる）。

ジェレズノゴルスク鉱業化学コンビナートの電気化学プラント（MCC-ECP：年間能力 8,700 トンから 12,000 トン SWU へ）は、第 9 世代の遠心分離機の稼働を開始しており、2021 年には 3 台目のカスケードが稼働した。その結果、年間約 12,000 トン SWU の処理能力に達したと判断されている。新しい遠心分離機の約 90%をこの工場に設置し、今後は MCC-ECP を主要な濃縮工場とする計画である³⁾。新設されたラインでは、高濃縮ウランも取り扱っており、また濃縮ウランから三酸化ウラン (U_3O_8) を生成する新たな転換施設も併設されている（2012 年に稼働を開始）。なお、ロシアは 1988 年に兵器級ウランの生産を一時停止し、高濃縮ウラン (HEU) 生産も一時中断した。その後、2012 年以降に各種の新設・増設ラインが稼働を開始し、2019 年には CFR-600 向けの高濃縮ウラン/HEU 生産ラインも増設されている。

シベリア化学コンビナートの化学プラント（SCC- SGChE：3000 トン SWU/年）は、欧州産を含む再処理から回収されたウランの再濃縮に特化している。

アンガルスク電気化学コンビナート（AECC：年間能力 2,600 トン SWU）は、シベリアに所在する 3 つの濃縮施設の中で最も小規模である。2011 年 7 月、TVEL 社は同施設の拡張計画がないことを正式に発表した。主な活動内容は、廃液（テイルズ）濃縮である。具体的には、敷地内に保管されている廃液から生じる六フッ化ウランを、天然六フッ化ウランと同等の濃度まで濃縮する業務を行っている。

ロシアの合計ウラン濃縮能力は 27,600 トン SWU に達し、これは天然ウラン約 35,650 トン (UF_6 換算で約 42,245 トン) から、約 3,450 トンの 5%濃縮ウランを生産可能な規模である。なお、副産物として、0.25%ウランを含むウランが約 32,200 トン発生する。つまり、スペック上では、100 基以上の原子力発電所を稼働（低燃焼度炉心で 20 トン/年、高燃焼度炉心で 30 トン/年相当）させることができる非常に大きな能力を持つ。一方で、ユーザーが存在しない場合は、逆に過剰なインフラとなる可能性がある。

2.4 UO_2 燃料の特徴及び燃料集合体の形状

ロシア及び世界において、最も広く製造・使用されている核燃料は、二酸化ウラン (UO_2) 燃料である。これは主に軽水炉、すなわちロシアにおける VVER-440、VVER-1000、VVER-1200 型原子炉に使用されており、その製造は国家原子力公社ロスアトム (Rosatom) 傘下の TVEL 社が担っている。

表 9 には、 UO_2 燃料の主な特徴を示している。表に示されているとおり、本燃料は製造コストが比較的低廉であり、国際的なサプライチェーンが確立されている点に大きな利点がある。

しかしながら、 UO_2 を燃料集合体として組み立て、長期間にわたり他国へ信頼性の高い核燃料集合体を安定的に供給する能力を有する企業は、現在のところフラマトム社 (フランス)、ウェスチングハウス社 (北米)、及び TVEL 社 (ロシア) の 3 社に限られている。このような供給構造の背景には、前章で述べたとおり地政学的な要因が存在しており、各国は供給手段の確保をめぐって模索と駆け引きを繰り返しているのが現状である。

ウラン鉱石は比較的安定して入手可能な資源であり、転換・濃縮・焼結の各技術を有する国や企業も複数存在している。かつては、ウランの転換能力は主にロシアに集中していたが、フランス・トリカスタンにおいてUF₄からUF₆への転換施設が2018年に稼働を開始したほか、米国のConverDyn/Metropolis Worksも再開が予定されており、転換能力についても国際的な供給体制が整いつつある。このような状況を受け、国際原子力機関（IAEA）や世界原子力協会（WNA）などの国際機関は、低濃縮ウラン（LEU）の国際的な供給体制は十分整備されていると評価している。

しかしながら、実際にどの国の核燃料を使用するかという選択は、原子炉の長期運用に直結するエネルギー安全保障の問題である。ゆえに、燃料供給においては、自国の事情に応じた柔軟かつ安定的なサプライチェーンの確保が不可欠である。このことが、自国において核燃料製造技術の確立を目指す動機の一つとなっている。

表10に示すように、UO₂粉末は、化学的に還元された後、円柱状のペレットに成形される。その後、これを金属製の被覆管に封入し、複数の燃料棒として束ねた上で、最終的に燃料集合体として各原子炉へと出荷される。

工程としては、

・UO₂粉末 → 焼結 → ペレット → 燃料棒 → 燃料集合体 → 出荷、という順に進められる。

ペレットの形状は、熱的・構造的・中性子的な観点から最適化されており、炉心設計により若干の差異はあるものの、一般的には直径8～12mm、高さ10～15mm程度である。また、ウラン235の割合（すなわち濃縮度）は、UO₂粉末に還元される前の段階、すなわちUF₆のガス状態において調整される。

燃料集合体の型式は、PWR、BWR、VVERといった炉型によって異なるが、同一炉型内においては、基本的にほぼ同一の設計が採用されている。集合体レベルでの大きな違いとして、西側のPWR及びBWRが四角形格子配置を採用している点が挙げられる。具体的には、PWRは旧式を除き17×17格子、BWRは同様に10×10格子が主流であるのに対し、VVERは三角格子六角形状を採用している。

VVER-440では、1集合体あたりの燃料棒本数は約126本、VVER-1000及びVVER-1200では約312本となっている。

この格子構造の違いは、設計思想及び技術的系統の相違に起因する。西側の原子炉は、もともと原子力艦艇の開発技術を基盤として発展した経緯があり、四角形格子は機械加工や整備の容易さ、ならびに炉心管理上の利点から選定された。具体的には、集合体の製造及び整備が簡便であること、制御棒の配置が単純かつ制御性が高いこと、さらに集合体間のギャップ調整が容易であることなどが挙げられる。

一方、VVERは当初から民生用原子炉として設計されたものであり、中性子の利用効率向上（燃料配置の密度向上）、冷却材の流れ及び温度分布の均一性、さらには集合体の機械的剛性の確保といった観点から、三角格子六角形状が採用されている。

ТВЕЛ社は、年間約3,000トン（燃料質量ベース）以上の UO_2 燃料を製造している。同社の主力燃料集合体は、VVER-1000及びVVER-1200向けのTVS-2M（ロシア語表記ではTBC-2M）である。一方、VVER-440用にはTVSA-12型燃料集合体が採用されている。

TVS-2Mは、高燃焼度及び長期使用に対応した設計となっており、ロシア国内のみならず、国外の原子炉においても広く使用されている。VVER-1000型原子炉は1980年代以降に多数建設され、現在、世界において30基以上が運転中である。これに対して、VVER-1200型原子炉は、ロシア国内（ノヴォヴォロネジ、レンゴイ、その他各地）及びベラルーシにおいて約10基が稼働しているにとどまる。このため、個々の炉心あたりの集合体数はVVER-1200の方が多いものの、燃料の保守・交換需要という観点からは、依然としてVVER-1000向けが中心であると考えられている。

なお、ウランの装荷量の増加や、濃縮度5%への引き上げ、さらには事故耐性燃料（ATF）の採用といった技術的進展を踏まえ、第4世代TVS（TVS-4）及び第5世代TVS（TVS-5）と呼ばれる燃料集合体も開発されている。これらは燃料仕様において一定の違いを有するものの、集合体構造としての基本スペックはTVS-2Mを踏襲している。

中国で使用する製品は、TVS-2M-Kと呼ばれるが、これは燃焼度バランス、製造方法、認証・検査方法が異なるだけで、形状や性能は同じである。ロシア・エレマシュで燃料ピン等が製造され、四川省宜賓市にあるТВЕЛ社からの技術移転を受け建設された中国核工業集団（CNNC）傘下の宜賓（Yibin）核燃料工場で組み立てられる。2009年からТВЕЛ社の技術ライセンスに基づきVVER-1000用燃料の製造試験が行われており、2014年以降TVS-2M（-K）燃料集合体の製造が開始されている⁴⁾。

表11及び表12に、TVS-2M及びTVS-K⁵⁾⁶⁾の燃料集合体の主な特徴を示す。TVS-2MはVVER-1000向けに開発された燃料集合体であり、材料としてZr-1Nb合金であるE110を使用し、直径約9.5mmの燃料被覆管で構成される六角形形状（いわゆるVVER配置）を有している。この集合体は、VVER-1200における燃料サイクルの長期化（18ヶ月または24ヶ月）、高濃縮ウラン（5%超）の利用及び事故耐性燃料（ATF）の導入といった将来的な運用目標に沿って設計されており、燃焼度60GWd/tUを超える運用が計画・試験されていると推定される。

一方、TVS-K及びその改良型であるTVS-Kmpは、西側の加圧水型原子炉（PWR）への供給を想定して開発された燃料集合体であり、フランスや米国ウェスチングハウス社のPWRに対応する。これらは、17×17の正方形配列という西側PWRで一般的な構造を採用している。TVS-KはTVS-2Mと同様にE110を被覆管材料としており、その直径は西側PWRに準じた9.1mmである。改良型のTVS-Kmpでは、Zr-1.2~1.5Nb-Fe-O系合金であるE125など、より高性能なZr-Nb系材料が使用されているとされる。

このような材料選定や設計上の違いは、VVERと西側PWRの間に存在する照射条件、一次冷却材の化学環境の差異、さらには材料基準や安全基準の相違に起因するものであり、それぞ

れに適した燃料集合体の設計思想が求められている。

2.5 ロシアにおける主要な UO_2 燃料製造拠点

ロシアにおける主要な UO_2 燃料製造拠点（機械加工含む）には、以下の TVEL 社施設がある。

- ◇ ノボシビルスク化学濃縮工場（NPCC： UO_2 燃料ペレット製造）
- ◇ チェペツク機械工場（ChMZ：特殊合金製の製管・圧延）
- ◇ エレクトロスタリ機械製造工場（MSZ：通称エレマシュ、ペレットの製造から燃料集合体の最終組立てまで実施。海外顧客向け製品。）

ノボシビルスク化学濃縮工場（NPCC）は、ノボシビルスク市（モスクワから約 2,800km 東）に所在する化学濃縮工場であり、軽水炉向けの 2～5%濃縮 UO_2 燃料ペレット（VVER-440 及び VVER-1000/1200 向け）の主力製造拠点である。加えて、MOX 燃料や REMIX 燃料の開発支援、医療・産業用放射性同位体の製造も行っている。

かつては、限定的ながら BN-600 高速炉向けの初期 MOX 燃料の製造も実施されており、MCC の MOX 燃料製造工場が本格稼働するまでの間、マヤークや本工場が MOX 燃料製造を担っていたとみられる。同工場の UO_2 ベースの燃料ペレット製造能力は、年間 1,200～1,500 トン U に達し、これは VVER-1000 型原子炉の数十炉心分に相当する規模である。

燃料集合体の組み立ては限定的であり、基本的には燃料ペレットを出荷している。他の施設と同様に、ペレットの製造能力については諸説あるが、VVER-1200 型原子炉の炉心は 163 体の燃料集合体で構成されており、全体で約 80 トン U（1 集合体あたり 0.5 トン U 相当）の燃料を必要とする。ロシア国内における VVER 用燃料ペレットの製造能力は、ノボシビルスク化学濃縮工場（NPCC）が年間約 1,200 トン U、エレクトロスタリ機械製造工場（MSZ）が約 1,100 トン U と推定されており、両者を合算すると（1,200+1,100）トン U ÷ 80 トン U = 約 29 炉心分に相当する。

ロシア国内には VVER 型炉が 30 基存在し、そのうち年間でおおよそ 3 分の 1～4 分の 1 が燃料をリロードすると仮定すると、年間の需要は 1,500～1,800 体程度と推定される。これに国外向けの製造分を加味すれば、年間 2,000～3,000 体（18 炉心分程度）の燃料集合体が製造されているとみられる。

したがって、ロシアには少なくとも年間 20 炉心分以上の燃料製造能力が存在すると考えられ、NPCC=1,200 トン U、MSZ=1,100 トン U という数値は妥当な推定であると言える。

チェペツク機械工場は、グラゾフ市（モスクワから約 1,200km 東）に所在する製管工場であり、チタン、ニオブ、ジルコニウムなどの特殊合金の加工能力を有している。年間数千トン規模のジルコニウム合金を処理する能力を持ち、燃料被覆管としては年間約 10 万～20 万本の製造能力を有する。また、航空、医療、宇宙用途向けの製品も取り扱っている。

同工場で製造された燃料被覆管は、NPCC や MSZ 等へと出荷される。現在、セヴェルスクの SCC-ODEK 施設において、サイト内で核燃料サイクルがクローズするように施設インフラ整備が進められているが、その場合であっても、燃料被覆管及び集合体部品については、引き続き

チェペツク機械工場及びMSZから輸送される計画である。

エレクトロスタリ機械製造工場（MSZ）は、機械製造工場の名称のとおり、燃料集合体の各種部品の機械加工を行っている点に特徴がある。一方で、未使用ウラン及び回収ウランを用いた燃料ペレットの製造から、燃料集合体の最終組立てまで、燃料製造の全工程を一貫して担っている。とりわけ、中国を含む海外顧客向けの製品は、主に本工場で製造されている。MSZは、VVER-440、VVER-1000、RBMK-1000、BN-600、BN-800、さらにはVK-50やEGP-6といった原子炉向けの燃料集合体に加え、国外顧客向けの粉末燃料及び燃料ペレットの製造も行っているとされる。

なお、BN-600及びBN-800向けに関しては、初期段階の高濃縮ウラン燃料が対象であり、中国向けの高濃縮実験炉CEFR（濃縮度64.4%U）及び商用高速炉CFR（濃縮度17～31%Uとされる）のHEU燃料も、本工場にて製造された実績がある（ただし、2019年以降は、MCC-ECP施設の高濃縮ウラン濃縮ラインも併用）。なお、ロシアから中国へのHEU燃料供給の詳細については、表13で補足する。

3. ロシアの核燃料再処理・核燃料サイクルの考え方

1940年代半ばから1970年代末まで、ソビエト連邦（当時）の目標は、核弾頭数を米国と同等の水準に引き上げることであった。著しく劣っていた弾頭数の比率をアメリカと同等の水準にまで接近させることに成功したのは、1970年代末であったとされている。

この目標を達成するため、兵器級プルトニウムを分離する施設として、黒鉛炉が3つの主要施設群に設置された。それが、No. 817（マヤーク生産組合、オジョルスク）、No. 816（シベリア化学コンビナート、セヴェルスク。ロスアトム広報資料などではSCPあるいはSCCとも称される）及びNo. 815（鉱業化学コンビナート、ジェレズノゴルスク。略称MCPまたはMCC）である。これらは現在、それぞれマヤーク、SCC、MCCとして知られている。

この呼称は、ソビエト連邦時代には、プルトニウム製造施設（ウラン鉱石処理・地下坑道を含む）を「鉱業化学コンビナート（ロシア語略称GKhK/MCC）」、ウラン濃縮工場を「電気化学コンビナート（ロシア語略称EKhK/ECC）」、再処理工場を単に「化学コンビナート（ロシア語略称KhKあるいはXK）」と呼称するなど、機能に応じた分類名称が意図的に用いられていたことによる。

文献7の著者であるMCC所属のKolupaer氏によれば、ソビエト連邦においては、最初の原子力潜水艦及び原子力発電所の登場に伴い、防衛用途及び民間用途の両分野において閉鎖型核燃料サイクル（Closed Nuclear Fuel Cycle, CNFC）を採用する方針が決定されたという。以後、ロシア連邦はこの方式を基本方針として堅持してきたと、同氏は説明している。なお、その他の初期に関する歴史的な見解も、同氏の所見に基づいている。

〔マヤーク〕

発電用原子炉及び輸送関連施設から発生する使用済み燃料（SNF）を再処理するための施設RT-1プラントをマヤークに建設するとの決定は、1960年代初頭に下された。1971年には、マヤーク生産組合におけるSNF貯蔵施設が稼働を開始し、1977年からはRT-1再処理工場の操業が始まっている。RT-1プラントの当初の任務は、VVER-440型原子炉及び船舶用動力装置から発生する照射済み燃料の再処理であった。RT-1プラントにおいて、VVER型（軽水炉）、RBMK型（黒鉛炉）、BN型（高速炉）を含む多様な原子炉からの使用済み燃料の再処理が行われた実績がある。さらに船舶用、研究炉用燃料、ならびに損傷した使用済み燃料の再処理も実施されたことがある。たとえば、ロシアのサイダ湾施設に輸送された、砕氷船の使用済み燃料集合体は、部分的に破損しており、これら破損燃料の再処理を実施した²⁾。

RT-1は、ロシアにおいて最初に建設された再処理施設であり、年間400トンの使用済み燃料（重金属換算）を処理する能力を持つ。セラフィールド（1964年初期稼働）、ラ・アーク（1966年稼働）、東海再処理施設（1981年稼働）同様に歴史的再処理施設である。なお、今日では、RT-1は再処理能力を有しつつも、パイロット規模での燃料製造機能も併せ持つ試験・研究的性格の強い再処理施設として位置づけられている。試験照射自体は、基本的にディミトロフグラードのRIAR（ロシア原子炉科学研究所）などで実施されている。なお、ラ・アーク再処理施設の処理能力は、RT-1の約4倍にあたる1,700トン/年規模（公称値。各々800トン級のUP-2と

UP-3 の合計処理能力であり、サイトとしての上制限値) である。

MOX 燃料に関しても、MOX 燃料導入初期段階では、BN-350 及び BN-600 の燃料用ペレットがマヤークの燃料製造施設で製造されていた (年間 40 体の MOX 燃料集合体を製造)。また、BN-800 の始動用として使用された初期 MOX 燃料についても、マヤークが供給を担い、燃料集合体自体は RIAR で製造された²⁾。その後、MCC において PDC (使用済燃料再処理の実証試験センター) が 2015 年に稼働し、また、SCC において ODEK (実証エネルギー複合体) の MFR (燃料製造モジュール) が 2021 年に稼働している。これらの施設の稼働により、RT-1 施設は将来的に閉鎖される可能性があるとも指摘されている。しかしながら、MCC において当初予定されていた商業用再処理施設 RT-2 (初期設計 1,500 トン/年規模。その後 700 トン+800 トンの 2 段階構成に変更) や、SCC の再処理モジュールは、未だ設計値とおりには建設されておらず、この点から見ても、RT-1 は今後も試験研究・開発用途を中心に稼働を続けるものと考えられる。

〔MCC〕

1970 年代から 1980 年代にかけて、VVER-1000 使用済燃料 (SNF) の再処理を目的とした RT-2 プラントの設計が進められ、1992 年に RT-2 プラントの最終設計図面は完成した。これに先立ち、1985 年には RT-2 プラントの第 1 段階として、使用済燃料の湿式貯蔵施設が稼働を開始した。なお、VVER-1000 の最初の稼働は、1980 年に運転を開始したノヴォヴォロネジ原子力発電所 5 号機であり、1990 年までに計 10 基稼働している。

なお、VVER-440 型原子炉は、1990 年までに計 32 基稼働しているが、当時のソビエト連邦領内においては、アルメニア及びウクライナに各 2 基を除けば、ロシア国内ではわずか 4 基の建設にとどまっている。1974 年に運転を開始したコラ原子力発電所 2 号機が、ソビエト連邦内で建設された最後の VVER-440 であり、それ以降に建設された同型炉は、フィンランドの 2 基を含め、すべてソビエト連邦国外に立地している。中でもチェコスロバキアの 8 基が最多であり、次いで東ドイツの 6 基がこれに続いていた (当時)。

設計時においては、RT-2 プラントは、ウラン換算で年間 1,500 トンの処理能力を予定していた (この時点で、フランスのラ・アーグ再処理施設はすでに稼働していた)。同プラントにおける再処理の生成物は、さらなる濃縮のために他施設へ送られる硝酸ウラニル六水和物の溶液、及び VVER-1000 原子炉用の燃料集合体の形をしたウラン・プルトニウム混合酸化物 (MOX) 燃料である (1992 年の段階で、MOX 燃料の製造が想定されていた)。

高レベル及び中レベルの液体放射性廃棄物 (HLW 及び ILW) の地下処分は RT-2 の計画に含まれておらず、これらは蒸発処理を経て、底部残渣をガラス固化またはセメント固化により処理する方針であった。一方、トリチウムを含む低レベル放射性廃棄物 (LLW) については、地下処分が実施される計画であった。

開発当時は、放射性廃棄物の管理に関して解決の見込みのない課題が存在していたこと、ならびに 1990 年代のその他の客観的事実により、RT-2 プラントの建設は当初の計画どおりには完了しなかった。MCC 所属の Kolupaer 氏は、短寿命の高レベル放射性廃棄物 (HLW) を分離・留出する必要性に言及しつつ、RT-2 プラントの構想は過大な生産能力の設定を見直し、使用済

燃料の再処理工程と新燃料の製造を一体化させたモジュール型プラント（replicable module）として再解釈されるべきであり、現在でもその構想は有効であるとの見解を示している。この「その他の客観的事情」は、1991年のソビエト連邦崩壊に伴い中央政府からの資金供給が途絶えたこと、プルトニウム分離に対する国際的な監視の強化ならびに国内における環境保護運動の高まりが挙げられている。加えて、当時の RT-2 プラントの設計では自動化・ロボット化が不十分であり、高線量環境下における作業の安全性確保が困難であった可能性も指摘されており、また、RT-2 の建設を日本やフランスといった再処理技術を有する国々との協力のもとで進める構想も存在していたことも要因の一部と言われている。

この再構想に基づく場合、Kolupaer 氏は、必要な再処理能力を年間約 600～800 トンの使用済燃料（SNF）の処理能力と見積もっている（実際、第一段階の処理能力は、700 トンに修正された）。後述する MCC の MOX 燃料製造拠点である MFFF（Modular MOX Fuel Fabrication Facility、あるいは Commercial MOX Fuel Fabrication Facility 等とも呼ばれる）は、モジュール型プラントとして設計されており、現在、PDC における再処理機能も、年間処理能力約 100 トン、燃料集合体にして約 200 体規模のパイロットプラントとして部分的に稼働しているものと考えられている。なお、PDC は、最近では、再処理実験・実証センター（EDC）とも呼称され、2024 年末には、第 2 複合施設の建設が完了したと報告されている。この第 2 複合施設が稼働すると、年間処理能力約 200 トンになるとロスアトムは述べている⁸⁾。

〔ウラン供給に関する政治的思惑と変遷〕

1993 年には、「Megatons to Megawatts」プログラム、正式には「U.S.-Russian Highly Enriched Uranium Purchase Agreement」が開始され、2013 年までの 20 年間にわたり実施された。冷戦終結後の大量の余剰核兵器を平和利用に転換することを目的とし、ロシアが保有していた核兵器由来の高濃縮ウラン（HEU）を民生用の原子力燃料である低濃縮ウラン（LEU）へと変換し、米国がそれを商業用原子炉の燃料として使用するという枠組みで構成されていた。具体的には、ロシアは退役核兵器を解体して得られた約 500 トンの高濃縮ウランを、核兵器に転用できない濃度（通常は 3～5%）にまでダウブレンドし、その低濃縮ウラン（約 14,000 トン。天然ウラン換算で 15 万～18 万トン。当時の世界のウラン需要の 3 年分）を米国側が購入した。このウランは米国内の商業用原子力発電所で使用され、期間中、米国全土で消費された原子力由来電力のおよそ 10%（全電力の約 5%）をこのプログラムによって供給したといわれている。これにより、ロシアにとっては軍縮の進展と経済的利益の獲得、米国にとっては安定した核燃料の供給源の確保という相互利益がもたらされた。なお、米国側の低濃縮ウランの購入者は、USEC つまり、現セントラス社である。本プログラム終了後は、通常の商業的枠組みでの供給契約へと移行し、商業ベースの契約（通称「Transitional Supply Agreement」）が結ばれた（当時、米国のウラン濃縮インフラは、USEC のガス拡散施設の閉鎖など衰退していた。一方、ロシアはこれまで述べてきたように、大規模な転換、濃縮/希釈、再転換能力を保持していた）。2013～2022 年まで、USEC は年間 300 万～500 万 SWU と推定される量の低濃縮ウランを TENEX（ロシア）から輸入している（なお、この契約にはスワップ条項が含まれており、IAEA のトラッキングの下で、柔軟な供給体制の確保が行われていた。スワップの本来の目的は、輸送の合理化/安全確

保、時期調整、コスト削減であり、輸入割当の制限の回避は副次的なものである)。ウクライナ侵攻を受け、米国は「Prohibiting Russian Uranium Imports Act」(H.R.1042)を2024年8月11日に施行した。この法律は、ロシアまたはロシアの法人が製造した未照射低濃縮ウラン及び天然ウランの米国への輸入を禁止するもので、また、これらのウランがロシア由来であることを回避するために交換やスワップされた場合も禁止対象となっている。ただし、2028年1月1日までは、輸入禁止を解除する特例(ウェイバー)条項が付帯している。これは、米国の原子炉または原子力企業の継続的な運転を維持するために、ロシア以外の低濃縮ウランの供給源が利用できない場合や、ロシアからの低濃縮ウランの輸入が、米国の国家の利益にかなうと判断される場合は禁止を免除される条項である。

ロスアトムは、このような状況に対し、以下のような見解を2024年3月のロスアトムニュースレター(#275, March 2024, Russian Atoms in 57 Countries)の中で述べている。

『フランスは、10年間の中断を経て、再生ウランから作られた核燃料の生産と使用を再開した。この再開は、2つの問題を解決する。1つは、再生ウランの在庫量(ひいては貯蔵コスト)を削減すること、もう1つは、燃料の新たな部分を製造するのに必要な天然ウランの量を最小限に抑えること。これは、ウラン不足とそれを克服したいという意欲の表れと言えるかもしれない。核燃料分野では、一部の政府がロシアの国際市場へのアクセスを困難にし、自国の限られた生産能力を拡大しようとする行動を続けている。こうした動きの中で最も活発なのは米国である。2023年12月下旬、米国下院は2028年からロシアの濃縮ウラン製品の輸入を禁止する法案を可決した。法案が成立すれば、90日以内に発効し、2040年末まで効力を維持する。しかし、この法案には抜け穴がある。ロシア以外にウランの供給源がない場合、米国エネルギー省は国務長官及び財務長官と協議の上、輸入許可証を発行できる。

中略

ロスアトムは今のところ HALEU の唯一の商業供給業者であることを忘れてはならない。さらに、様々な製造段階でロシア製の核燃料部品なしに作業を進めることは極めて困難である。

米国のハネウェルは、2028年までロシアに濃縮用天然ウラン8,500トンを提供するための輸出許可を申請している。ウレンコ・ネダーランド B.V.は、同社に2027年2月まで供給される濃縮六フッ化ウランの輸送許可を取得した。最後に、VVER-440 原子炉を保有する欧州の原子力発電所の運営者は、供給源の多様化に取り組んでいるものの、ロシア産燃料を放棄することを急いではいない。』

このようにウランに関しては、サプライチェーンの復活/維持と供給源の多様化が急速に進んでいる。一方、プルトニウムに関しては、アプローチの段階からロシアと米国では意見の相違がある。

〔プルトニウム利用に関する政治的思惑と変遷〕

2000年に締結されたプルトニウム管理・処分協定(Plutonium Management and Disposition Agreement, PMDA)は、冷戦終結後の核軍縮及び不拡散の流れを受けて、米国とロシアが結んだ二国間協定である。本協定は、両国が保有する兵器級プルトニウム計34トンを不可逆的に処

分することを義務づけている。

兵器級プルトニウムの処分方法としては、まず MOX 燃料への転換を行い、その後に軽水炉や高速炉で燃焼させることによる消費が想定された。協定においては、これらの処分活動は国際原子力機関（IAEA）などの保障措置のもとで実施され、プルトニウムの不可逆の処分が保証されることが前提とされた。さらに、ロシア側の処分インフラ整備を支援するため、G7 諸国が財政的及び技術的支援を行う国際的な枠組みも用意することになっていた。

しかし協定履行の実際には困難が伴った。米国ではサウスカロライナ州のサバンナ・リバー・サイトにおいて MOX 燃料製造工場（MFFF）の建設が開始されたが、技術的困難や建設費の大幅な超過に直面し、最終的には 2016 年にオバマ政権が MOX 方式を放棄し、「希釈埋設（Dilute and Dispose）」と呼ばれる代替的な処分方式への転換を決定した。この方式は、プルトニウムを不活性物質で希釈し、地層処分場に埋設することによって不可逆性を確保するというものであった。

ロシアはこれを PMDA で合意された「原子炉での燃焼による処分」に反すると見なし、2016 年 10 月、プーチン大統領が PMDA の履行を停止する大統領令に署名した。ロシア側は、米国が一方的に処分方式を変更したこと、協定の保障措置が損なわれたこと、さらにウクライナ問題や NATO の東方拡大などによって悪化した米露関係を背景に、協定の実施がもはや信頼に足るものではなくなったと主張した。ロシアは、2014 年に BN-800 高速炉が稼働し、マヤーク再処理工場などで製造された MOX 燃料を用いたプルトニウムの燃焼が行われるなど、協定の精神に則った実質的な処分は継続されていると主張した。

〔MCC- MOX 燃料製造工場〕

G7 諸国が技術的支援を行う国際枠組みによって建設されたのが、ジェレズノゴルスクの鉍業化学コンビナート（MCC）内にある MOX 燃料製造工場（MFFF）である（約 200m の深さの岩石トンネル内に建造）。

MCC では、1985 年に使用済み燃料の湿式貯蔵施設が稼働したのち、2011 年及び 2015 年には、RBMK-1000 用の乾式貯蔵施設が設置され、2015 年には VVER-1000 用の乾式貯蔵施設が加わった。また、同年には、燃料再生プラント（Fuel Regeneration Plant）内に、VVER-1000 の使用済み燃料を再処理するためのパイロット実証センター（Pilot Demonstration Center, PDC）が正式に稼働し、2023～2024 年にはその能力が拡張された。さらに、同じく 2015 年には、既存の放射化学プラントを基盤として、BN-800 向けの MOX 燃料を製造するための MOX 燃料製造工場（MFFF）が建設された⁷⁾。

世界原子力協会（WNA）によれば²⁾、この MOX 燃料製造工場は、建設費約 96 億ルーブルで建設され、年間 60 トンの燃料製造能力を有していた。使用された機器のうち約半数は輸入品で構成されていたと WNA は考えている。

当初期待された G7 による財政的支援は最終的に実施されなかったが、技術的支援は提供された。ロスアトムは 2011 年 6 月、MOX 燃料の製造を含む MCC 全体に対して、2030 年までに 350 億ルーブルを投資する計画を発表した。その後、2012 年 2 月には、この投資額は最低でも 800 億ルーブルに達する見通しが示された。ロスアトムによれば、MFFF の建設は 2011 年に着

工され、2014年に完了したとされている。

ロシアのトップは、2015年9月、大統領に次のように報告している。「新たな MOX 燃料製造工場の工業生産が開始されました。これは史上初の工場です。米国のパートナー企業は、建設中の工場を未だ完成させていません。既に 77 億ドルを費やしており、議会の報告によると、今後どれだけの費用がかかるか分からないため、プロジェクトを中断する予定です。私たちは2年半かけて、2億ドル強（96億ルーブル）の費用をかけて工場を建設しました。工場は稼働しており、現在、産業生産能力に達しています。」

MCC に設置された MOX 燃料製造工場 (MFFF) は、BN-800 及び将来の BN-1200 高速炉向けに、焼結ペレット型の MOX 燃料集合体を年間 400 体製造する能力を有している。MOX 燃料中のプルトニウム含有率は最大で 30% に達することが可能であり、その生産能力は、BN-800 炉 5 基分、またはそれに相当する BN-1200 炉の需要に対応できるように設計されている。

この工場では、2015年にベロヤルスク原子力発電所4号機 (BN-800) 向けに最初の燃料集合体 20 体を生産し、2017年にはフル生産体制に移行した (BN-800 は、毎年約 190 トンの使用済み VVER 燃料から再処理によって回収された 1.84 トンの原子炉級プルトニウムを必要とする)。ベロヤルスクサイトでは、2018年12月に最初の量産バッチが受入試験に合格した²⁾。

〔プルトニウムの民生利用に対する各種見解〕

2016年、ロシア (VNIIMN 無機材料研究所) で開催された原子力発電所向けの新世代核燃料の開発、運転経験、将来の方向性に関する国際会議にて、「MOX 燃料は、2000年に米国と軍事用プルトニウムの処分について締結された協定の結果として登場したことを思い出すべきだ」と、ロシアの核燃料サイクルの完結を目指す「ブレイクスルー」プロジェクトの科学監督、エフゲニー・アダモフ氏は説明し、MOX の開発経緯を語っている。「当時、我が国にはウラン・プルトニウム燃料はありませんでしたが、世界ではすでに使用されていました。フランスは1967年から高速炉で使用しています。しかし、当時、ロシアの高速炉はウラン酸化物を使用していました。熱中性子炉にも高速炉にも MOX 燃料を使う意味はないと我々は考えていましたが、世界に他に混合燃料はなく、合意は履行されなければなりません。西側諸国は技術移転だけでなく、30億ドル以上の補助金も提供してくれると想定されていました。結局、補助金は支給されなかったものの、ロシアは合意に沿って MOX 燃料開発を進めました。米国が2018年に自国の MOX 燃料開発計画を中止した時点で、ロシアの MOX 燃料開発は相当進んでおり、高速炉を基盤とする核燃料サイクルの完結に向けた統合的な取り組みの妥当性に気づいたのは2011年になってからでした。その後、BN-800 の建設計画を見据え、MOX 燃料の生産作業を完了するために多額の資金が割り当てられました。」

WNA は、原子燃料サイクルの概要 (2025年更新)⁹⁾の中で、「再処理から回収されたウランには、通常、自然界に存在するものよりわずかに高い濃度の U-235 が含まれており、転換及び濃縮後に燃料として再利用できます。プルトニウムは、ウランとプルトニウムの酸化物を混合した混合酸化物 (MOX) 燃料を直接製造することができます。MOX 燃料を使用する原子炉では、プルトニウムが通常のウラン酸化物燃料中のウラン 235 の代替として使用されます。アレ

バ社によると、約 8 体の燃料集合体を再処理すると、MOX 燃料集合体 1 体、濃縮ウラン燃料集合体の 3 分の 2、約 3 トンの劣化ウラン（濃縮残渣）に加え、約 150 キログラムの廃棄物が生じる。これにより、鉱山から約 12 トンの天然ウランを購入する必要がなくなります。再処理から得られるプルトニウムとウランをリサイクルするもう一つの方法は、ロシアの REMIX ですが、まだ商業化されていません。この方法では、プルトニウムとウランを分離せずに混合し、低濃縮ウラン（ウラン 235 が 17%）を加えて、プルトニウム 239 が約 1%、ウラン 235 が約 4% の燃料を生成します。通常の原子炉では、U-238 が偶発的にプルトニウムに変化する以外は、U-238 は今日の燃料サイクルでは利用できません。しかし、高速中性子炉では核分裂性があり、さらに（より重要な点として）プルトニウムを生成するため、潜在的に価値があります。今日使用済みの燃料は、廃棄物ではなく、将来の資源として認識されるようになってきています。」と説明している。

米国のナショナルアカデミーオブサイエンスは、2023 年に発行した「Merits and Viability of Different Nuclear Fuel Cycles and Technology Options and the Waste Aspects of Advanced Nuclear Reactor¹⁰⁾」の中で、米国が現在採用している「ワンスルー燃料サイクル（使用済燃料を直接地層処分する方式）」という政策は、当面の間、継続すべきであると主張している。これは、クローズド核燃料サイクルには、潜在的利益があるものの、そのためには巨額かつ継続的な投資が必要（十分な訓練された労働力の確保を含む）。米国には再処理施設、燃料製造施設、非軽水炉型先進炉、地層処分場といったインフラが現時点で存在していない。また、核拡散リスク、セキュリティ上の懸念、安全性の確保といった課題に対応する必要があることから選ばれた政策であり、高速炉によるプルトニウムの多重リサイクルやマイナーアクチニドの分離・核変換を含む完全に閉じた核燃料サイクルを実現した国は、現時点では存在していないと判断していることが前提にある。

そのため、提言においては、以下の事項にも触れている。

DOE は、今後数年間にわたって、産業界との費用分担のもと、2050 年までに展開可能な有望な先進炉技術及び燃料サイクルの開発を選定・支援すべきである。この意思決定基準には、以下のような項目を含める必要がある：

1. 既存の軽水炉（LWR）と比較して、燃料利用の改善と廃棄物発生量の削減が科学的根拠に基づいて見込まれること
2. 受け入れ可能な廃棄物形態と処分オプションが開発されていること
3. 原子炉の設計・運用に求められるのと同様に、燃料サイクル全体にわたる強化された安全性が確保されていること
4. LWR のワンスルーサイクルと同等レベルの核拡散抵抗性を備えていること

さらに DOE は、先進的燃料サイクルの確立に要する取り組みの規模やコスト見積もり、またそれを支えるために必要な製造基盤やサプライチェーン・インフラの構築についても、意思決定に含めるべきである。ただし、米国市場で商業展開される原子炉については、主たる責任は産業界が負うべきである。（提言 A 抜粋）

先進炉技術の開発及び展開を支援するために、連邦議会及び米国エネルギー省（DOE）は、これらの技術の進展に不可欠な「材料試験」及び「燃料認証」のための能力を提供または確保する必要がある。（提言 B 抜粋）

米国が現在採用している、「ワンスルー燃料サイクル」という政策は、当面の間、継続すべきである。ワンスルー燃料サイクルは基準となる方式であり、新たな燃料サイクルを導入するには、現行方式に対する明確な優位性が必要とされる。

しかしながら、将来的な選択肢を排除しないように、米国エネルギー省（DOE）は、「リサイクル」や「核変換」による燃料サイクル閉鎖の可能性を評価するための基礎研究を継続すべきである。具体的には、DOE は以下を目的とした段階的かつ長期的な研究開発プログラムを策定・実施すべきである：

- ・ 先進的な分離技術（advanced separations technologies）
- ・ 核変換技術（transmutation technologies）

ここから読み取れるのは、米国は、暫定的なワンスルー燃料サイクルという政策（米国の繁栄の観点からの政策色が濃いものの、米国の立場としての合理性はあるようにみえる）のもとでも、産業界の燃料製造施設・非軽水炉型先進炉建設の支援を行い、現在蓄積された核廃棄物の管理に加え、将来の先進炉から発生する廃棄物にも対応し、数十年にわたり廃棄物を効果的に管理する。また、2050年までに展開可能な有望な先進炉技術及び燃料サイクルの開発を選定・支援し、軽水炉を基準としたうえで、燃料利用の改善、廃棄物発生量の削減、受け入れ可能な廃棄物形態、処分オプション、燃料サイクル全体にわたる強化された安全性、ワンスルーサイクルと同等レベルの核拡散抵抗性を評価していくというスタンスである。

これは、現在米国が保持しているインフラ能力、米国が調達可能なウラン資源を踏まえれば、分離・核変換技術の基礎研究さえ実施しておけば、核燃料サイクルを実現した国は、現時点では存在していないのだから、米国の優位性は確保できる。もちろん、産業界ドリブンのインフラ投資、材料試験及び燃料認証の能力提供等を継続し、技術力向上は努めていく、というスタンスと考えられる。つまり、フランス及びロシアの動向次第で、政府の支援度合いは変わり得るし、そのための暫定的な政策であり、核燃料サイクルの選択は将来的に行うという考え方である。そのためにフランスの動向に着目しており、ロシアに依存しない（そしてロシアが弱体化する）政策をとっているものと考えられる。

そのため、核拡散防止型の新たなリサイクル技術を開発は、米国においても、長年実施されており、GNEP（2006年）プログラムでも取り上げられた UREX+プロセスや、COEX 水性プロセス、TALSPEAK 法、Super-DIREX 法等々の先進的な使用済み燃料の処理方法が世界各国において研究されている。これらの状況は文献 11 に記載されている。

【MCC-PDC 稼働、そして現在の MOX 製造状況】

さて、MCC に設置されたパイロット実証センター（Pilot Demonstration Center/PDC）の建設経緯にも言及しておく。なお、セヴェルスクにあるシベリア化学コンビナート（SCC）に関しては、ODEK が稼働するまでの間、特筆すべき活動は確認されていない。このため、SCC については、BN-600 における照射試験とあわせて、窒化物燃料（ODEK で製造された）の文脈で言

及することとした。なお REMIX 燃料の開発も、当初は PDC において行われ、その後、量産体制へ移行する過程で SCC-ODEK に製造ラインが整備されたと考えられる。このため、REMIX 燃料についても PDC の項目において扱う。

そもそも、MCC の設立目的の一つは、プルトニウムを回収するための再処理（PUREX 法）にあり、RT-2 再処理施設の計画はその中核を成していた。RT-2 の最終設計図は 1992 年に完成しており、ソビエト連邦の崩壊（1991 年 12 月 25 日）の直後の時期である。マヤークの RT-1 再処理施設が稼働を継続する一方で、RT-2 は建設が中断され、湿式及び乾式貯蔵施設へと方向転換がなされた。

もっとも、この方針転換は単に経済的あるいは技術的な問題によるものではなく、国際的な政治的合意も影響していた。たとえば、1994 年の米露間協定では、プルトニウム生産炉を用いた兵器級プルトニウムの新規生産が禁止されたものの、同炉を用いた地域暖房、電力供給、さらには原子炉級プルトニウムの生産は引き続き認められていた（詳細は表 14 を参照）。したがって、MCC における再処理と燃料製造に関する活動は、冷戦後の国際的枠組みと国内エネルギー政策の双方の影響を受けつつ、段階的に進められてきたものである。

PDC の稼働は 2015 年とされているが、同施設での活動の背景には、使用済燃料の再処理技術の発展と、それに伴う REMIX 燃料の開発が存在する。REMIX 燃料とは、再処理によって得られたウランとプルトニウムをそのまま混合し、新たな燃料として再利用する方式であり、その研究開発は 1990 年代後半には既に始まっていた。2000 年代には、PDC において REMIX 燃料の製造及びパイロット試験が実施されており、燃料製造設備の一部は REMIX 燃料への対応に向けた改造が施されていた（これは試験規模でのピン封入レベルにとどまっていたが、使用済燃料の有効活用を模索する中で生まれた取り組みであった可能性もある）。

PDC のインフラ整備が本格化したのは、2006 年から 2010 年ごろに構想された「ブレイクスルー（Proryv）」プロジェクトが起点と考えられる（このプロジェクトは 2011 年に正式に始動し、ロシアの国家プロジェクトとして推進されたものであり、MCC での構想だけでなく、SCC での構想も含まれている）。

ブレイクスループロジェクトにおいて MCC で構想された施設は、使用済燃料再処理施設（Fuel Reprocessing Facilities/FRF。呼称にばらつきがあるため、以下では MCC-FRF と記す）、燃料製造施設（MOX Fuel Fabrication Facilities/MFFF。FPF、FFP、ZFT など複数の呼称が存在する）及び原子炉から構成される統合型核燃料施設である。ロシア語略称では ZFT と呼ばれることもあるが、ロスアトム広報資料などでは、単に MCP とされている。なお、日本語資料においてはコンバインの C を用いて MCC と表記されることが多いため、本レポートでもそれに倣って MCC の名称を用いている。

この統合型施設は、PDC において蓄積されたホットセル等を用いた小規模での再処理・燃料製造の経験を基礎とし、適正規模の再処理施設及び燃料製造施設へと発展させた概念的拡張施設である。

建設動機等については、前述した文献 7 の著者 MCC 所属の Kolupaer 氏が詳しく紹介しているので、それに沿いつつ各種ニュースでの情報で補足する。

2000年代初頭のPDCの設計段階で、RT-1とRT-2の関係が断絶したため、PDC技術の開発者は、以前に確立されたRT-1の方法を踏襲せずに、PDC技術に新しい方法を実装することを選択した。施設設計の段階では、施設の最終製品〔八酸化三ウラン(U₃O₈)粉末、ウラン・プルトニウム・ネプツニウム混合酸化物粉末〕の仕様も決定されていなかった。状況を踏まえ、運転中のBN-800炉及び建設中のBREST-OD-300及びBN-1200M向けの燃料供給に対応するために、使用済燃料再処理の最終生成物に関しPDC施設設計の再検討を実施した。2022年には、高速中性子炉及び熱中性子炉における再生核物質の利用ニーズに応えるため、PDCの基本技術における再処理のターゲット生成物として、「未濃縮ウラニル硝酸(U₂NH)」及び「二酸化プルトニウム(PuO₂)」を確立するという決定がなされた(この決定に基づき2023年から改造を行う予定)。この対象には、使用済燃料の切断及びボロキシデーション(揮発性処理)、SNFの溶解及び清澄化(遠心分離機による)、高レベル廃液の濃縮及びガラス固化、アクチニド含有MOX粉末の製造、ウラニル硝酸の脱硝(脱硝酸塩)、使用済み抽出剤の貯蔵が含まれている。

このように施設及びターゲット生成物の改変を経ながらも、ターゲット生成物の製造を継続し、同敷地内のMFFF(製造能力:集合体400体/年)は、2019年8月にBN-800高速中性子炉向けMOX燃料の連続生産を開始(高濃縮ウラン燃料はMSZで製造)、2023年12月には、ネプチニウム-237とアメリシウム-241を含むMA-MOX燃料を製造した(このラインは手動生産ライン)

MA含有燃料の製造技術の開発は、2020年以降、VNINM(原子炉材料科学研究所)とMCCが進めており¹²⁾、MOX燃料の量産と同等のスケールでマイナーアクチニド(MA)を扱うには、手作業をほぼ完全に排除し、生体防護を強化し、自動化を進める必要があると彼らは考えている。

PDCの再処理能力は、当然RT-2で計画された1500トン/年には及ばない。関係者によって意見は分かれるものの、現在、200~250トンへの増設を目指している年間処理能力100トン級のパイロットプラント(燃料集合体約200本規模)であると、REMIXやMOX燃料の製造実績から考えられている(MFFFでのMOX燃料製造に使われる燃料粉末は、貯蔵分からも使用されると思われる)。

ここまで、意図も含めて記載したロシアにおける再処理技術と核燃料開発について、マイルストーンとなる出来事の年表を表15としてまとめる。

なお、REMIX燃料及び窒化物燃料の開発経緯については、表16及び表17に示す。

REMIX燃料は、MOX燃料(プルトニウム濃度10~30%)に比べてプルトニウム濃度が低く、2~5%程度である。このため、臨界には、19%濃縮ウランの補充が必要となり、また、REMIX燃料はプルトニウム含有率が低いため、同量の燃料に対するプルトニウム消費量はMOX燃料より少なくなる。

ロシアは、REMIX燃料の製造に対応するため、クラスノヤルスクのSCCに新たな燃料生産ラインを設置する方針を採っており、MOX燃料とREMIX燃料の製造ラインの共通化に向けた技術開発にも取り組んでいる。

また、中国は CFR-600 を当初は高濃縮ウラン燃料で運転する計画¹³⁾であるが、将来的には MOX 燃料への切り替えを予定している。そのため、20 MWe 級の実験炉 CEFR において MOX 燃料を照射する計画を有しているが、現段階において、照射試験が実施された記録は確認されていない。

CFR-600 用 MOX 燃料に必要なプルトニウムは、甘粛省酒泉市近郊の金塔地区に建設中の再処理施設群において分離される見込みである。金塔では、年間 200 トンの処理能力を持つ再処理工場の建設が 2015 年に開始され、さらに同処理能力を有する第二の再処理工場も 2020 年後半または 2021 年初頭に着工されたと見られている。これらの再処理施設には、MOX 燃料製造施設の併設も計画されている。

これらの再処理・燃料製造インフラの整備は、2007 年に締結された中国とフランス（オラノ社）との間の核協力協定に基づき、オラノ社が保有する PUREX 法を含む再処理技術を基盤として進められている。

〔まとめ〕

一般的にロシアは、高速炉（BN 型）と MOX 燃料を用いたクローズド燃料サイクルを志向している国との印象が強いが、実際には、それを支える技術・製造インフラと開発技術群が国家としての強さの本質的な存在である。具体的には、大規模なウラン濃縮・再転換能力、特殊鋼製燃料被覆管の製造能力、燃料集合体や大型構造物の精密機械加工能力、100 年にわたる長期間の使用済燃料の保管技術、破損燃料を含む再処理によるウラン・プルトニウムの回収能力、再転換等の工程を含む二次ウランの戦略的備蓄・移送能力を備えている。

さらに、回収したウラン及びプルトニウムに 19%濃縮ウランを補填することで再利用する REMIX 燃料の製造能力、MOX 燃料（焼結ペレット型及び振動充填型）の製造能力（通常、プルトニウム濃度は 17~30%、BREST 炉用では 30%を超える場合もある）、窒化物燃料の製造技術も保持している。

このようにロシアは、核エネルギーの多様な利活用を可能とする技術体系を構築しており、核エネルギー先進国として、原子炉本体の輸出にとどまらず、他国のニーズに応じた燃料、技術、サービスを包括的に提供している。

日本は、濃縮能力を保持しているが、再処理工場の通常ライン以外の転換／再転換能力は有しておらず、本機能に関しては、コストの低い他国のサービスを利用する設計となっている。具体的には、ウラン濃縮の出発点は、0.2~0.7%の UF₆（固体）を気化させて 3~5%に濃縮する工程であり、これは日本原燃株式会社（JNFL）六ヶ所の第 4 世代相当の遠心分離技術によって行われている。その後、JNFL 再処理工場では、5%以下の UO₂粉末及び 4~9%Pu を含む MOX 粉末として製品化される。濃縮能力については、最終的に 1,500tSWU/年（国内濃縮自給率 3 割程度）を目標としており、ロシアのように大量の機器・設備導入を通じたコストダウンを志向するというより、日本全体の需要の一部を自国で確保するというエネルギー安全保障上の位置づけが強い。

そのため、長期輸入契約によって保持している数年分の天然ウラン在庫（8,000~10,000 トン

U) に関しても、燃料として利用するためには、転換能力を持つ諸外国に移送し、転換処理を受ける必要がある。これは、現時点では日本がまだ技術開発の段階にあり、戦略的に核燃料物質を保管・備蓄し、安全保障上協力可能な同盟国との協定の下で、定常的にエネルギーへと転換できる体制を構築する段階までは至っていないことを意味する。

将来的には、以下のような多層的な対応が求められている。すなわち、0.2～0.7%の UF₆ を入手する上流供給網（エネルギー安全保障サプライチェーン）の整備、特殊鋼管など材料素材の製造と加工を可能とする国家基幹製造インフラの維持、安全保障政策の下での核エネルギー物質の戦略的在庫管理とそれを保有活用するための外交交渉能力の構築、核不拡散型の再処理技術に関する国際共同開発、安定化・保管・固定といった核物質管理技術の米国等との共通化、コスト競争に直面する電力会社が担当すべき核燃料開発・利用の範囲の特定、多様なオプションを確保するための戦略的な開発技術の選定と国際協力の推進、軽水炉と非軽水炉の技術共通化及び国内製造インフラの維持、同盟関係下における照射炉の確保と多様な燃料の照射試験データの取得、高濃縮ウラン燃料や高濃縮ウランを用いた MOX 燃料等の安全保障の観点からも考慮が必要となる可能性がある燃料の取り扱い方法の検討である。

これらの課題を整理した上で、民間が主体的に参入可能な産業分野を特定するとともに、国家が主導して整備すべきインフラ投資対象を選定することが求められる。その上で、安定的かつ過度に他国に依存することなく、国内で産業界が必要とするエネルギーを自律的に産出できる手段を確保する必要がある。

2024年9月のロスアトムニュースレター（#281, September 2024, Necessary Balance）では、バランス型核燃料サイクルは、ロスアトムの新しい製品ラインであり、顧客向けに提供されるパッケージ製品だとして、**1. 使用済み核燃料の再処理及び高レベル放射性廃棄物の分離（分別）、2. ウラン・プルトニウム燃料の製造、3. マイナーアクチニド（Np, Am, Cm など）の高速炉による消滅処理、4. 使用済み核燃料及び高レベル廃棄物の長期保管・輸送システムを含むパッケージ製品**と紹介された。顧客は、個別サービスを選択することも、すべてのサービスを包括的に受けることも可能で、これらのサービスは、VVER、PWR、BWRなどの各種型式に対応して設計されており、顧客のニーズや制約に応じた個別設計も可能と説明されている。ロスアトムは、自社のサービスに関し、顧客から使用済み核燃料の長期的な扱いに関する不安を、ロスアトムが包括的に解消するという評価を得ているとアピールしている。

また、このサービスは以下の特徴を持っている。

- 原子力発電所の運転事業者は、使用済み核燃料から回収された物質を用いた燃料の製造を発注することができる。中性子炉では、再生ウランを用いた燃料や、ウランとプルトニウムの混合物である REMIX 燃料を使用することができる。
- 顧客がこのオプションを選ばない場合、再生されたウランとプルトニウムはロシア国内の原子炉用燃料として加工・使用される。
- このサービスは、バランス型核燃料サイクルに含まれる中で最も特異で他に類を見ない。ロスアトムは、マイナーアクチニド（長寿命で高放射性的の超ウラン元素）を高速中性子炉で燃焼・変換するという構想を実現した唯一の企業。

- 再処理・再利用サービスを発注する顧客は、**輸送容器、高容量保管オーバーパック、それらを収容する施設**もあわせて購入することが可能。これらの装備により、燃料の取り扱い、保管、輸送はより安全かつ確実になる。
- トルコのアックユ原子力発電所は、このサービスを初めて発注した発電所。2024年2月、ロスアトムは試作輸送・取り扱い容器「TUK-137T.A1」を現地に納入した。
- バランス型 NFC サービスを発注した顧客に対して、ロスアトムは**短寿命の高放射性廃棄物を約 30 年間保管し、その後、顧客の国へ輸送し、中レベル放射性廃棄物とともに浅地中処分施設に最終処分**する。
- 別の選択肢としては、この短寿命高放射性廃棄物を顧客国内のサイトで高容量オーバーパックに収納し、30年間保管することで、放射能レベルが処分に適した段階に低下するまで保持することも可能。
- Balanced NFC を導入することで、顧客は発生する廃棄物の量を大幅に削減できる。専門家による初期推計によれば、**VVER-1200 型炉を 2 基備えた原子力発電所では、60 年間の運転で約 7,000 立方メートルの使用済み核燃料(容器込み)が発生**するとされている。
- これを再処理すれば、最終的に残る使用済み燃料の体積は**7 分の 1 に削減**される。中レベル放射性廃棄物（固化マトリクスを含む）は、30 基の高容量オーバーパックにすべて収納できる。一時保管と最終処分にかかるインフラコストは約 23%削減される。
- さらに、バランス型核燃料サイクルは最新の持続可能性基準を満たしており、「グリーンファイナンス（環境配慮型投資）」の対象となる可能性がある。総合的にみて、Balanced NFC の導入と広範な活用によって、使用済み核燃料の蓄積を減少させ、原子力をクリーンで再生可能なエネルギー源として再評価することが可能になる。

4. ロシアの核エネルギー政策とその戦略

本章では、第3章までに記載したロシアの核エネルギー開発・利用の歴史を踏まえ、「現在のロシアの核エネルギー政策と原子炉の建設状況」を概観し、そこから抽出されたロシアの戦略を「開発・実証の戦略的多様性と連続性」と「技術活用方法/展開方法の多様性」として、日本に対する意味合いを含め、整理した。

4.1 現在のロシアの核エネルギー政策と原子炉の建設状況

ロシアの現在の原子力発電シェアはおおよそ 20%（ロスアトム公称）だが、これを 2045 年までに 25%にする目標を立てている。具体的には、総発電容量 33.5GW の大型、中型、小型のモジュール炉 42 基を建設する（2042 年までに 38 基、29.3GW、1,200MW を 8 基、1,255MW を 7 基、1,000MW を 2 基、600MW を 5 基と述べる時もある）。ウラル地方に新たな発電設備を導入し、その後、電力消費が最も急速に増加すると予想されるシベリアと極東地域へと進出する。ロスアトム（アレクセイ・リハチュフ総裁）は、モンゴルの北西に位置するザバイカリエ地方南部とアムール州ティンダ市管区を進出する地域例として挙げている（なお、ロシア極東沿海フォキノでも 2 基の建設計画があり、「発電所立地計画 2042」では、ロシア極東地域、沿海地方、ハバロフスク地方に新しい原子炉を建設することが規定されている）。また、高速炉開発を強力に推進しており、そのメリットとして、1) 備蓄されているウラン 238 同位体を燃料生産サイクルに組み込むことで、燃料備蓄量が無制限になること、2) 核燃料サイクルを閉じることにより、使用済み燃料の蓄積に対する解決策を与えることを強調している（いわゆる放射能等価原理が満たされ、天然ウランの採掘時に持ちだされた放射能と同量の放射能が環境に戻される。ロシアは、2023 年末の時点で高濃縮ウランを約 680 トン、民生用分離プルトニウムを 64.9 トン保有。分離プルトニウムは軍事用と合わせて約 193 トン保有¹⁴⁾。ウラン 238 同位体は、軽水炉燃料の濃縮過程で使用されないウランとして大量に分離され、ロシアには数十万トン規模で保管されている。これも高速炉用燃料として使用することが可能となる。ロシア国内の使用済み燃料総量は約 25,000~30,000 トン（重元素換算）と見積もられており、総容量 約 5,000~10,000 トン程度と言われているジェレズノゴルスク MCC の中間貯蔵施設や、各原子力発電所敷地内等に蓄積している）。ロスアトムは今後 10 年間、この燃料サイクル技術を用いてロシア国内に大規模な原子力発電施設を建設する予定であり、また、この技術を国際的なパートナーにも提供していく予定。ロスアトムは、この分野では競合他社より少なくとも 10 年は先行しているが、競合他社がすぐ後ろに迫っているため、革新的なプロジェクトをより迅速に進めていくべきと考えている（ロスアトムニュースレター #275 Russian Atoms in 57 Countries 参照）。

実際、この目標の下で、ロスアトムは、クルスク II -1 号、2 号（VVER-TOI のロシア初号）、レニングラード 7 号（VVER-1200）、スモレンスク II-1 号（VVER-TOI）の建設に既に着手している。TOI はロシア語の Standard Optimized and Digital Design の略であり、VVER-TOI/V-510 は、標準設計による建設期間の短縮・コスト低減を行った 1255MW 設計の VVER-1200（V-392M/AES 2006 等）後継炉のこと。クルスク II の 1 号は最終段階を迎え、臨界期を迎える準備

が進められている。また、2号は建設中である。2025年3月には、レニングラード7号の基礎に最初のコンクリートが打設され、スモレンスクIIでは、最初のコンクリート打設（2027年の予定）の準備が進行中である。クルクスIは、4基のRBMK-1000が設置されていたが、既に2基が稼働停止、残り2基も2030年前後に停止する予定であり、新設するVVER-TOI-4基によってその電源を代替する。レニングラードは5号以降、既にVVER-1200が稼働しており（そのため、レニングラード5号をレニングラードII-1号と呼称する場合もある）、7号機も運用合理性の観点からVVER-1200を建設する。スモレンクIの3基のRBMKの稼働停止は2027年以降であり、スモレンクIIは2基のTOIが計画されている。RBMKの3号は、1990年運転開始であり、2034年まで運転延長許可済み（ロスアトムニュースレター#285、#286参照）。

また、コラ発電所用の中容量VVER原子炉の設計は最終段階にあり、2027年着工予定のコラ1号は、水減速炉ながら、高燃焼度・長サイクル運転を目指すため若干中性子スペクトルを硬め（ウラン-238の有効利用やFPの毒性低減）に設計し、MOX燃料のフル装荷にも対応したVVER-S/600（V-498）となる（既存VVER-440炉と比べて燃料消費が約30%削減される設計。コラ発電所では、4基のVVER-440が稼働中。1号は、1973年運転開始であり、60年の運転許可がおりている。そのため、2033年まで運転可能であるが、2038年まで延長する可能性も検討されている。2024年1月に行われた研究炉MIRでのMOX燃料棒の照射試験は、VVER-S/600用）。

ロシアの原子力開発に懐疑的なレビューのなかには、ロシアの原子力発電所の発電量とエネルギーミックスに占める割合は、原子炉群の老朽化と代替施設の稼働開始の遅れにより低下していると主張する意見もあり、実際、2024年の発電割合は、約18%まで低下している。一方で、寿命延長措置の実施、RBMK-1000及びVVER-440の代替計画は進行中であり、VVER-1200及びVVER-TOIの建設も進行中である。2018年に運転開始したレニングラード5号は、2008年建設開始の建設期間約10年（2010年建設開始の6号も建設期間11年）。2019年に運転開始したノヴォヴォロネジII-2号は、2009年建設開始の建設期間約10年である。ロシア国外であるが、トルコのアックユ原子力発電所1号は、建設開始が2018年4月、燃料装荷（式典）が2023年4月、2025年7月時点では試運転段階であり、商業運転が2025年中の予定である。つまり、約7年の建設期間となる見込み。このような着実なプロジェクト進行は、強力な製造能力・インフラ設備によって支えられている。なお、2025年4月に、環境審査・設計準備承認が完了したナトリウム冷却高速炉BN-1200Mに関しても、コンクリート打設2027年、運転開始2034年の約7年の建設計画が立てられている（BN-800は途中中断しているが、建設期間は実質おおよそ10年。BN-800の運転開始及び、ジェレズノゴルスクMCCにおけるMOX燃料の製造開始は、2015年）。

国際的には、VVER-1200を展開中である。VVER-1200は、ロシア国内で4基、ベラルーシ共和国で2基の計6基が稼働中であるが、トルコ（アックユ1号）、バングラデシュ（ルプール1号、2号）、エジプト（エル・ダバア1~4号）、中国（天湾7、8号、徐宝3、4号）の11基が建設中である（インドVVER-1000であるクダングラム3~6号×4基とスロバキアで運転開始間近のVVER-440×1基を含めれば16基）。ハンガリー（パクシュII-5号、6号）は建設開始直前、フィンランドのハンヒキヴィ1号は建設撤回。ロスアトムは、海外で22基あるいは25基が建

設中とアピールするが、これは、カザフスタンの VVER-1200×2 基やウズベキスタンの RITM-200 型 55MWe モジュール×6 基など交渉中、計画中のものも含まれている。なお、高速炉に関する協力は、表 3 に示したように中国との協力が中心となっている。CFR-600 の 1 号機は 2017 年に、2 号機は 2020 年に建設に着工しており、1 号機はまだ系統接続はされていないものの、低出力での運転は実施しているともいわれている¹⁵⁾。表 13 に示すようにロシアは、1 号機に対し HEU 燃料を供給するほか、中国での MOX 燃料製造に関する技術協力を実施している（中国は、2 号機に対し、国産 MOX 燃料を使用する予定）。

本節のまとめとして、「ロシアの核エネルギー国内政策」を図 1 に、「ロシアの核エネルギー国外政策」を図 2 に、それぞれ図示する。

4.2 開発・実証の戦略的多様性と連続性

ロシアの原子炉開発は、その戦略的構造において「多様性」と「連続性」を同時に達成していることに特徴がある。これは単なる技術選択の多様化にとどまらず、運転経験の蓄積／共有、製造能力の維持、次世代炉への段階的移行、国内外市場への適応を総合的に組み合わせた長期的な原子力政策の帰結といえる。現行の軽水炉においては、旧ソビエト連邦時代から運用されてきた VVER-440 をはじめ、国際市場でも主力となっている VVER-1000、そして現行の標準炉である VVER-1200 が並行して建設・運転されており、特定区分ごとの選定炉型の展開という、単一炉型への集約とは異なる柔軟な展開がなされている。

特に、VVER-440 はその安定した設計と地域におけるエネルギー需要への適合性から、現在でも近隣諸国を中心に根強い需要があり、スロバキアでは、ヴォフニツェ 1 号機を 2006 年に、ヴォフニツェ 2 号機を 2008 年に廃止する一方、中断していたモホフツェ 3 号機、4 号機の建設を 2008 年に再開、3 号機は 2023 年に運転開始、4 号機も建設が進んでいる（90%以上）。いまだ世界で 20 基以上の VVER-440 が稼働しており（ロシア 5、スロバキア 5、ハンガリー 4、チェコ 4、ウクライナ 2、フィンランド 2、アルメニア 1）、多くの国が、代替となる電源が確保されるまで、原子力発電所の運転期間を延長したいと考えている。ロシア国内には、コラ発電所で 4 基の VVER-440 が稼働しているが、前述したように、ロシアは後継機として、600MW の VVER-S を投入しようとしている。同様に老朽化した RBMK-1000 の代替としては、VVER-TOI あるいは VVER-1200 を投入済みであり、軽水炉に関しては、VVER-TOI 及び VVER-S/600 での代替が進んでいる（基本的に VVER-TOI で代替。同サイトにすでに VVER-1200 が稼働している場合、VVER-1200）。

このように、VVER-1200/TOI 及び VVER-S/600 の投入により、かつての RBMK-1000 や VVER-440 に依存していた地域にも、安全性と経済性を両立する新型炉を導入することが可能となり、ロシア国内のエネルギー安定供給に大きく貢献することとなる。

ロシアの原子力戦略のもう一つの柱は、高速炉の導入である。ロシアは早くから高速炉技術に取り組んできた国の一つであり、BN 型（ナトリウム冷却高速炉）を中心とした研究開発が進められてきた。まず BOR-60 及び BN-350 の設計・建設知見を経て、BN-600 が 1980 年から運転され、長期にわたる照射試験、材料研究、運転データの蓄積がなされた。これに続き、次世代実証炉として建設された BN-800 では、フル MOX 燃料炉心による運転を実現し、実証と商業試運転の両機能を担っている。BN-800 の成果は、ロシアにおける使用済み燃料再処理とプルトニウム消費を柱とするクローズド核燃料サイクルの中で極めて重要な位置を占めており、この技術的・運用的な蓄積をもとに、より高出力・高経済性を目指す BN-1200M の開発へとつながっている。

つまり、ロシアの原子炉開発は、出力規模、技術体系、建設立地、燃料政策といった多面的な観点から、柔軟かつ計画的に進められている。VVER-440 の延命と後継炉の開発、VVER-1200 から VVER-TOI への進化、高速炉 BN 系の段階的拡張など、各炉型は過去の経験を踏まえた「連続性」を保ちつつ、中型炉と大型炉、軽水炉と高速炉といった「戦略的多様性」をもって展開されている（もちろん、ロシアは、船舶用の炉やモジュール炉も開発している。ここでの文脈上は、多様性が単に高いことではなく、役割の異なる炉型ごとに代表的な炉型を開発するとい

う戦略的多様性のことを指している)。これは、単に多くの炉型を保有するという意味ではなく、国内外の政治的・経済的状況が時として不安定になる中で、長期的に安定した原子力開発・利用の継続を追求するロシア独自のアプローチといえる。結果として、技術的信頼性と戦略的柔軟性を両立させるという意味で、ロシアの原子炉開発は他国には見られない強靱な構造を備えていると評価できる。

図3に戦略的多様性として整理した、このアプローチは、ロシアのような全体国家だからできたのではなく、他国の開発動向に過度に左右されずに、複数の戦略的オプションを残しつつ、1歩ずつ開発を継続したから可能となったものであり、この「炉型の集約ではなく、用途・立地・技術継承に応じた多様性の維持」という考え方は、日本にとっても参考にできる開発戦略と思われる。

4.3 技術活用・展開方法の多様性

ロシアは、原子力技術の国際展開において、包括的なパッケージサービスを通じて他国との協力関係を構築する独自の戦略を展開している。その中核にあるのは、単なる軽水炉の輸出にとどまらず、燃料供給からバックエンド、さらには高速炉技術やアイソトープ（RI）供給に至るまで、原子力利用のライフサイクル全体を対象とするサービス体系である。

第一に、軽水炉の導入においては、既に複数の国に VVER 型炉を提供しており、これに伴い、ウラン燃料の供給体制や運転保守支援が（原子炉提供との）パッケージとして提供されている。これに加え、使用済み核燃料の回収・再処理というバックエンド領域についてもロシアは明確な対応策を示しており、使用済み燃料から高レベル放射性廃棄物と再利用可能な核物質（ウラン・プルトニウム）を分離し、後者を再び燃料として用いるクローズド燃料サイクルの提案を行っている。

第二に、再処理で得られたウランやプルトニウムを活用して、MOX 燃料や REMIX 燃料といった燃料を製造する施設と能力を備えており、これらを利用することで資源の有効活用が可能となる。さらにロシアは、核燃料中に含まれるマイナーアクチニド（MA）の処理にも取り組んでおり、高速中性子炉（BN-800 など）を通じて、それらを短寿命核種へ変換するアフターバーニング技術の取得に着手している。これにより、放射性廃棄物の長期的な負荷を軽減しつつ、持続可能な核燃料サイクルを構築することが可能となっている。

第三に、廃棄物管理の観点からは、使用済み燃料や高レベル放射性廃棄物の長期貯蔵や輸送システムの整備もパッケージに含まれており、安全かつ国際的な基準に則った処分・管理体制の整備を支援する。これらの施設と連携して、濃縮サービスの提供や研究用 RI（放射性同位体）の供給など、医療・産業用途への展開も進めている。さらに、軽水炉の発電機能に加えて淡水化プラントを併設可能（既にトルコアックユ発電所で適用）であることもロシア型原子力発電所の特徴の一つであり、水資源の確保に課題を抱える国々にとっては大きな利点となる。

このように、ロシアは自国で開発・実証してきた原子力技術の多様な活用方法を組み合わせ、各国のニーズに合わせた柔軟なパッケージ（部分的にも利用可能）を提案することによって、協力関係の構築を容易にしている。この戦略は、単なる設備の導入ではなく、核燃料サイクル全体を視野に入れた包括的支援を通じて、相手国にとっても長期的かつ安定的な原子力利用を可能にするものである。その結果、相互利益にもとづくプロジェクト化が現実のものとなり、国際的なパートナーシップの形成において重要な基盤となっている。

包括的パッケージ戦略の本質は、単なる技術や設備の「輸出」ではなく、「関係性」の構築にある。ロシアは、燃料供給から廃棄物管理までを一体的に担うことで、相手国に対して長期的な関与の枠組みを提示し、継続的な技術支援と制度整備のサポートを通じて、関係性の深化を促す。これは、国家間の信頼醸成とともに、エネルギー安全保障・技術自立といった相手国の戦略的課題にも対応するものである（当然、良い面も悪い面もある）。

さらに、ロシアの原子力戦略は、軽水炉だけに依存するのではなく、高速炉や再処理技術、RI 供給といった多様な技術基盤を活用することで、相手国にとっての選択肢の幅を持たせている。これにより、導入国の政策的・経済的状況に応じて最適な技術構成を提案する柔軟性を持つ。この柔軟性こそが、地政学的に多少異なる複数の国々と協力関係を築きうる基盤となって

おり、ロシアの原子力戦略における「技術的多様性」と「戦略的一体性」が融合したモデル（図4）と言える（少なくともロシアの軍事力が地政学的な脅威となるまでは、このモデルは機能していた）。

このようなロシアの戦略は、日本にとっての示唆も含んでいる。第一に、原子力技術を単体で提供するのではなく、燃料供給から廃棄物処理までの領域で選択可能なパッケージ型の国際協力の枠組みは、日本が原子力技術の海外展開を進める上でも重要な視点である。特に、再処理技術や高レベル廃棄物管理といった「バックエンド」分野での信頼性と実績を活用し、技術の「輸出」ではなく「信頼関係の輸出」へと転換することが求められる。これは、開発途上国との協力のみならず、日米関係や日仏関係の再構築に関しても当てはまる。「バックエンド」分野での協力は、単に経済的な関係性のみならず、安全保障関係の構築につながるため、対等な信頼関係を関係するという目的からも、本分野での協力は重要である。

ロシアのように軽水炉のみならず、高速炉、RI 供給、淡水化などの周辺技術を組み合わせて相手国に応じた柔軟な提案を行うことで、日本の強みである高信頼・高品質な技術力を、日本の調整力をもって、活かすことができる。こうした「技術的選択肢の広さ」と「関係性重視」の戦略を併せ持つことが、日本が世界的に長期的な存在感を発揮するためのカギとなるだろう。

4.4 第4章のまとめ

ロシアの核エネルギー政策は、多様な原子炉型式と燃料サイクル技術を戦略的に活用し、国内外での原子力発電の拡大を目指すものである。現在、軽水炉（VVER シリーズ）を中心に、原子力発電は国内の電力発電量の約 20%を占めており、2045 年までにこれを 25%に引き上げる計画が進められている。

ロシアでは、大型炉から中型・小型モジュール炉まで、さまざまなタイプの原子炉の建設が進められており、高速炉技術の開発や、使用済み燃料の再処理・リサイクルにも注力している。国際的には、VVER-1200 などの原子炉を複数の国で建設中であり、高速炉分野では中国との協力も深まっている。

特筆すべき点は、ロシアが原子炉の導入から燃料の供給、再処理、廃棄物管理、さらには研究用放射性同位体（RI）の提供に至るまで、これらすべてを一体的、あるいは部分的に選択可能な技術サービスとして、国際的に提供している点である。

単なる製品の輸出や技術の供与にとどまらず、相手国の状況やニーズに応じた柔軟な対応を通じて、持続的な関係の構築と信頼の醸成を図っている。

このような国際展開を可能にするために、ロシア国内では将来的に海外での展開が見込まれる分野において先行的に技術開発を進め、対象となる技術やサービスを選定し、計画的に展開を図っている。

このような「技術の多様性」と「戦略の一体性」を兼ね備えた柔軟な展開は、さまざまな地政学的背景を持つ国々との協力を可能にしており、日本にとっても、単に技術を輸出するのではなく、燃料サイクル全体を見据えた包括的な国際協力のあり方や、高速炉や RI 供給などを組み合わせた多角的なアプローチとして参考になる。

参考文献

- 1) A. Radostin et al., Confirmation of the Design Characteristics of the TVS-K Design After Operation in the PWR Reactor at Ringhals-3 NPP, WRFPM 2023, SPPHY 299, pp. 214–223, 2024, https://doi.org/10.1007/978-981-99-7157-2_22
- 2) WNA, country profiles: Russia's Nuclear Fuel Cycle, Updated Thursday, 6 January 2022, <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-fuel-cycle> (accessed 28 August 2025).
- 3) NEI, New generation centrifuges installed at Russia's Electrochemical Plant, September 14, 2021, <https://www.neimagazine.com/news/new-generation-centrifuges-installed-at-russias-electrochemical-plant-9077917> (accessed 28 August 2025).
- 4) World nuclear news, TVEL delivers new equipment for Chinese VVER-1000 fuel production, 17 May 2023, <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/TVEL-delivers-kit-for-Chinese-VVER-1000-fuel-produ> (accessed 28 August 2025).
- 5) NUCNET, Russia / Tvel Begins Operation Of Manufacturing Facility For TVS-K PWR Fuel, 28 December 2021, <https://www.nucnet.org/news/tvel-begins-operation-of-manufacturing-facility-for-tvs-k-pwr-fuel-12-2-2021> (accessed 28 August 2025).
- 6) World nuclear news, TVEL puts case at conference for TVS-K performance, 24 July 2023, <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/TVEL-tells-conference-of-TVSK-fuel-plans> (accessed 28 August 2025).
- 7) D. N. Kolupaev & G. A. Apalkov, Development and Tasks of Radiochemical Technologies: History and Modern Challenges, Springer Nature Link, Vol.65, pp. 132–140, 2023, <https://link.springer.com/article/10.1134/S1066362223020017> (accessed 28 August 2025).
- 8) ROSATOM, The second stage of the Experimental and Demonstration Center for Reprocessing Irradiated Nuclear Fuel was launched in Zheleznogorsk. (in Russian), 25 July 2025, <https://www.rosatom.ru/journalist/arkhiv-novostey/v-zheleznogorske-sostoyalsya-zapusk-vtoroy-ocheredi-opytno-demonstratsionnogo-tsentra-po-pererabotke/> (accessed 28 August 2025).
- 9) WNA, Nuclear Fuel Cycle Overview, Updated Friday, 21 March 2025, <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview> (accessed 28 August 2025).
- 10) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Merits and Viability of Different Nuclear Fuel Cycles and Technology Options and the Waste Aspects of Advanced Nuclear Reactors, Washington, DC: The National Academies Press, 2023, <https://doi.org/10.17226/26500>
- 11) WNA, Processing of Used Nuclear Fuel, Updated Friday, 23 August 2024, <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/processing-of-used-nuclear-fuel> (accessed 28 August 2025).
- 12) MCC, Unique fuel assemblies with minor actinides, manufactured at the Mining and Chemical

- Combine, have successfully passed acceptance tests and are ready for shipment to the Beloyarsk NPP, (in Russian), 2025, <https://www.sibghk.ru/news/view?id=170> (accessed 28 August 2025).
- 13) International Panel on Fissile Materials, Russia launches production line to supply uranium fuel for China's CFR-600 reactor, 3 March 2021, https://fissilematerials.org/blog/2021/03/russia_launches_productio.html (accessed 28 August 2025).
- 14) International Panel on Fissile Materials, Countries: Russia, May 22, 2025, <https://fissilematerials.org/countries/russia.html> (accessed 28 August 2025).
- 15) International Panel on Fissile Materials, China started operation of its first CFR-600 breeder reactor, 15 December 2023, https://fissilematerials.org/blog/2023/12/china_started_operation_o.html (accessed 28 August 2025).
- 16) Sustainability-times, "Russia's New Nuclear Fuel Breakthrough" – This innovation slashes waste and skyrockets reactor efficiency, 21 March 2025, <https://www.sustainability-times.com/energy/russias-new-nuclear-fuel-breakthrough-this-innovation-slashes-waste-and-skyrockets-reactor-efficiency/> (accessed 28 August 2025).

表 1 スウェーデン及びフィンランドで稼働中の原子力発電所

発電所名	原子炉名	型式	運転開始
Swd フォッシュマーク	F1、F2	BWR-3 (1100)	1980、1981
	F3	BWR-4 (1200)	1985
Swd オスカーシャム	[O1]	[BWR-3 (480)]	1972 運転開始 2017 閉鎖
	O3	BWR-6 (1450)	1985
Swd リングハルス	R3	ウェスチングハウス PWR (1100)	1981
	R4	ウェスチングハウス PWR (1200)	1983
Fin ロヴィーサ	L1、L2	PWR (VVER-440)	1977、1980
Fin オルキルオト	OL1、OL2	ASEA-Atom BWR-3 (710)	1979、1982
	OL3	PWR (EPR-1600)	2022

注：スウェーデンの BWR はすべて ASEA-Atom の製造、PWR はウェスチングハウス社製
 ASEA-Atom (ABB-ATOM) は、1997 年に原子力事業をウェスチングハウス社に売却

表2 スウェーデン・ヴェステロース核燃料製造工場の製造ライン

年	出来事
1960年代後半	ASEA-Atom によってスウェーデン・ヴェステロースに原子燃料製造施設が設立される（主に BWR 燃料製造用）。
1980年代	BWR 燃料の主要供給拠点として拡張、PWR 燃料製造は未対応
1997年	ASEA-Atom が ウェスチングハウス社傘下に入り、社名が「Westinghouse Atom AB」に（のち「Westinghouse Electric Sweden AB」）
1990年代後半	ヨーロッパ市場（特にスウェーデン PWR や欧州 PWR 向け）対応のため、PWR 燃料の設計・製造ラインが整備されるとともに、ウェスチングハウス本社からの技術移転が行われる。
2000年代初頭	リングハルス 3・4号機（PWR）用の補充燃料（リロード燃料）を国内で製造・供給開始 2005年、VVER-1000 用燃料の試験製造・装荷開始（南ウクライナ原子力発電所）
2016年4月	VVER-1000 用燃料の製造ラインを含む、大規模な PWR 燃料製造能力の拡張を発表
2016年後半	拡張された製造ラインが本格稼働（年 5 炉心分）、欧州の PWR/VVER 燃料供給ハブとしての機能を強化
2019年	生産能力の更なる増強。VVER-1000 燃料量増に対応すべくレイアウト改良・高効率ライン稼働
2022年以降	新たに VVER-440 燃料の生産協力も進行（スペイン ENUSA との提携等）

表3 ロシアと中国の核燃料製造に関する協力関係

年	出来事	内容・意義
1990年代後半	UO ₂ 燃料協力開始	田湾原子力発電所 (VVER-1000) 建設契約締結 (1997年)。核燃料供給は TVEL 社
2007年	田湾原子力発電所 1号機 商業運転開始	初の VVER-1000 運転。以後、TVEL 社が燃料供給を継続
2009年	宜賓燃料工場で VVER 燃料のライセンス製造開始	TVEL 社の技術ライセンスで中国 CNNC の宜賓燃料工場が VVER-1000 用燃料製造を開始
2011年	高速実験炉 CEFR (20MWe) 運転開始	40%出力。100%出力は 2014年燃料は、ロシア SCC (ペレット) -MSZ (集合体) で製造
2016年	第13次五カ年計画 (2016-2020年) の国家重大科学技術プロジェクト化「2030年までの核燃料サイクル技術発展戦略ロードマップ」は、CAEA や CNNC が 2015年に発表	高速炉開発と再処理を含むクローズド燃料サイクルの構築が位置づけられるマヤークや SCC と再処理や MOX 燃料に関する協力が開始される。
2017年12月	福建省霞浦県における CFR-600 高速炉の建設開始	2基目の霞浦サイトは、2020年12月建設開始
2018年6月	MOX 燃料のライフサイクル全体にわたる包括的協力合意 (中露首脳会談)	ロシアが中国の CFR-600 建設・燃料供給に協力 (TVEL 社が燃料供給)
2019年1月	TVEL 社と CNNC 傘下 CNLY (中核北方核燃料元件有限公司) 間で CFR-600-1号機の燃料供給契約	初期装荷及び運転初期 7年間の燃料供給契約を締結 (ロシア SCC-MSZ 製造-64% 235U 燃料) 中国は、CFR-600 の 2号機から、国産 MOX 燃料を投入する計画
2025年以降	CFR-600 1号機運転開始 (予定) 甘肅 MOX ライン商業運転 (予定)	200 トン/年の製造ラインを整備中。CFR-2号機向け。TVEL 社から技術提供

表 4 核燃料供給の観点からみたロシアの核エネルギー利用 (1/2)

年	出来事・内容
1954 年	ソビエト連邦、商業用原子力発電所（オブニンスク。5MWe）稼働。 UO ₂ 燃料集合体の国内設計・製造も本格化（マヤーク）
1960～70 年代	ソビエト連邦が VVER（軽水炉）及び RBMK（黒鉛炉）向けの燃料集合体を標準化。供給体制も国家主導で整備（MSZ の燃料集合体組立ラインも稼働）。VVER-1000 のロシア国内での初建設・運転は、それぞれ 1975 年、1981 年と出力増加は欧米と比べ遅れる。
<p>〔VVER 輸出〕</p> <p>1970 年代後半～ 80 年代</p>	<p>東欧諸国（ブルガリア、アルメニア、チェコスロバキア、ウクライナ、ハンガリーなど）に VVER-440 炉を輸出。これに伴い、燃料ペレットの製造能力拡大（NPCC）、燃料集合体の輸出も開始</p> <p>中立非同盟のフィンランドが VVER-440（1977 運転開始）とスウェーデン製 BWR-3（1979）を導入する一方で、ルーマニアは CANDU-6 を導入（1983 建設開始 1996 運転開始）</p> <p>フランスでは、1978 年以降の 10 年で 15 基の 900～1545MW の PWR が運転開始</p>
<p>〔同盟関係再編〕</p> <p>1990 年代</p>	<p>1991 年のソビエト連邦崩壊後も TVEL 社が核燃料供給を継承。旧ソビエト連邦・東欧諸国向け輸出を継続しつつ、商業ベースの供給体制に移行</p> <p>中立非同盟国であったスウェーデン及びフィンランドは 1995 年に EU に加盟</p>
<p>〔技術互換性確保〕</p> <p>2000 年代</p>	<p>チェコ、スロバキア、ハンガリー、ブルガリアの VVER 導入国を含む 12 カ国が EU に追加加盟（アルメニアとウクライナは残る）。TVEL 社は品質・安全認証を強化し、契約継続を確保</p> <p>ロシアは、西側 PWR 向け燃料「TVS-K」の開発を開始。スウェーデン・リングハルスで試験的装荷（2004）</p> <p>ウクライナで、ウェスチングハウス社製 VVER-1000 用燃料の試験装荷が行われる（2005）。</p> <p>TVEL 社の設計ライセンスの下、中国タイシャンの VVER-1000 が 2007 年稼働。2009 年、中国が国内で、VVER-1000 用燃料の製造ラインを稼働</p>

表 4 核燃料供給の観点からみたロシアの核エネルギー利用 (2/2)

年	出来事・内容
<p>[非近隣地域協力、 包括パッケージ化] 2010年代</p>	<p>ロシア、原子炉・核燃料供給を「原子力外交」の柱と位置付け、供給先をアジア（中国・インド）、中東（イラン）へ拡大。中国（2007～2018）、イラン（2011）、インド（2014、2017）へ VVER-1000 を輸出。（仏フラマトム社は 1980 年より 1,300MW を超え、日本も 1996 年に 1,300MW を超える）</p> <p>ロスアトム、ТВЕЛ 社の輸出競争力を強化するため、燃料供給・回収を含む包括的核燃料サイクル支援パッケージを推進。ノボシビルスク（NPCC）の燃料ペレット製造能力が、500 トン HM レベルから最大 800 トン HM レベルへ（MSZ で集合体化）</p> <p>MOX 燃料製造能力を強化（2015 年露ジェレズノゴルスク MCC にて、BN-800 向けの MOX 燃料を製造開始）</p>
<p>2014 年以降</p>	<p>クリミア併合後、ウクライナ・東欧諸国でロシア製燃料からの転換が進行。ТВЕЛ 社は価格競争・技術改善で防戦</p>
<p>2018 年</p>	<p>TVS-K 製品（17×17 格子）を米国 NRC に申請。米国 PWR 市場への参入を狙うが、進展は限定的。（Exelon が NRC に使用許可変更を申請。ブレイドウッド 1,150MW-PWR）</p>
<p>2020 年以降</p>	<p>中国との戦略協力により、高速炉や新型炉向け燃料（MOX、REMIX など）の共同開発を加速（2016 年以降）</p> <p>中国は、VVER 用 UO₂燃料の国産化をほぼ完了し、輸出可能レベルの製造能力を確保（なお、国内での運用は、ТВЕЛ 社燃料と中国 CNNC 燃料の両者を使用）</p>
<p>[脱ロシア] (2014 及び) 2022 年以降</p>	<p>ウクライナ侵攻により、ロシア製燃料の依存見直しが急加速。ТВЕЛ 社の主要市場に地政学的リスクが顕在化。ベラルーシ、スロバキア、ハンガリー、アルメニア、イラン、インド、中国への燃料供給は継続。チェコ、ブルガリア、ウクライナ、フィンランドは既に西側燃料を使用。スロバキア及びハンガリー（両者ともに VVER-440）は 2027 年からの使用を目指している。</p>
<p>2024 年</p>	<p>ロシア製燃料は依然として世界シェアの大部分を占めるが、EU 諸国では急速に代替燃料（ウェスチングハウス社製など）への移行が進行中。2027 年以降、ТВЕЛ 社のみから供給を受けるのは、ベラルーシ、アルメニア、イラン、インド、中国となる見込み（インドと中国は、ロシアの協力のもと、自国内で VVER 型燃料を製造する体制を構築中）。なお、フラマトム社傘下ドイツ ANF には、ТВЕЛ 社が 25%出資しており、フラマトム社の場合、ТВЕЛ 社ライセンスの燃料が、欧州で製造される事になる。トルコ、バングラデシュ、エジプト、ハンガリーなどの市場での VVER-1200 建設プロジェクトにおいては、燃料供給を含むパッケージ提案を継続</p>

表 5 ウクライナにおける燃料供給多様化の経緯

年	出来事・内容
1991 年	ソビエト連邦崩壊により、ウクライナは原子炉 15 基 (すべて VVER 型) を保有する独立国に。燃料供給はロシアの TVEL 社に全面依存
2000 年頃	米国のウェスチングハウス社がウクライナで VVER 燃料の開発・試験を開始 (米国 DOE の支援あり)
2005 年	南ウクライナ VVER-1000 で、ウェスチングハウス社製燃料集合体の試験装荷 (6 本) を実施 (ヴェステロース製造工場で製造)。安全性や互換性の検証段階
2010 年	ウクライナとウェスチングハウス社が長期供給契約を締結 (ただし装荷は限定的)。燃料集合体の寸法や組立部品の微妙な差異により、原子炉内の燃料挿入や取出し時に引っ掛かりやすい箇所が発生。また、燃料仕様の差が冷却材の温度分布に影響。同一炉心内での TVEL 社製と WH 製燃料集合体の混用により、核反応度制御や炉心挙動の予測が難しくなる。
2014 年	クリミア併合とドンバス紛争の勃発により、ロシア依存脱却が加速
2016 年	南ウクライナ VVER-1000 にて商用規模でのウェスチングハウス社製燃料の定常運用 (ヴェステロース製造工場で製造) が始まる。ウクライナ国営エネルギーアトムは西側転換の加速を宣言
2018 年	エネルギーアトムとウェスチングハウス社がすべての VVER-1000 炉への燃料供給拡大を合意。ロシア依存の縮小が本格化
2020 年	リウネ VVER-440 への西側燃料開発プロジェクトが開始 (EU 支援)
2021 年	ウクライナ政府、2035 年までに原子力燃料の完全多様化を達成する方針を発表。ウェスチングハウス社との協力強化 エネルギーアトムのアトムエネルギーマッシュ工場で、燃料集合体用部品 (上部ノズル及び下部ノズル) の製造を発表 (製造開始は 2022 年)
2022 年	ロシアの侵攻を受け、TVEL 社製燃料の使用停止を加速。ウェスチングハウス社はウクライナ全 VVER-1000 炉への供給体制を整備 (ヴェステロース製造工場の拡張)
2023 年	ウェスチングハウス社、ウクライナ国内での燃料組立工場建設計画を発表。将来の完全自立に向けたインフラ構築が進展
2024 年	VVER-440 向けの西側燃料集合体を実炉試験段階へ (リウネ原子力発電所で装荷準備)

表 6 フィンランド・ロヴィーサ原子力発電所における燃料供給の変遷

年	出来事・内容
1970年代前半	フィンランドが原子力発電所建設を決定。ソビエト連邦と契約し、VVER-440型炉を2基（ロヴィーサ1・2号機）建設
1977年	ロヴィーサ1号機が運転開始。燃料供給はソビエト連邦のTVEL社（後のロシア）から
1980年	ロヴィーサ2号機が運転開始。以後、両炉ともロシア製燃料を使用
1990年代	フィンランド政府と運転会社Fortumが、安全規制や運用管理を西側基準に合わせて近代化。ただし、燃料は引き続きTVEL社製
2004年	ロシアのTVEL社と燃料供給契約を長期延長。供給安定性を理由にロシア燃料を継続使用
2014年	クリミア併合を契機に、欧州でロシア製原子力関連機器や燃料への依存リスクが認識される。フィンランド国内でも議論開始
2018年	Fortumが燃料供給多様化を検討開始。TVEL社との契約は続けながらも、代替供給源の技術評価に着手
2022年2月	ロシアのウクライナ侵攻により、FortumはTVEL社との新規契約を行わない方針を決定。現在の契約満了後の転換を発表
2022年後半	ウェスチングハウス社と燃料供給に関する協議開始。特にVVER-440用燃料の開発協力を強化
2023年3月	Fortumとウェスチングハウス社が正式に契約。ロヴィーサ原子力発電所向けのVVER-440燃料を2027年から供給予定と発表。また、定検期間中に、試験用六角形集合体1体（燃料は含まれていない）を試験装荷し、形状や取り回しの確認を実施
2024年	ウェスチングハウス社製VVER-440燃料集合体の試験製造・認可取得プロセスが進行中。2026年の試験装荷、2027年の商用運用開始を目標とする。

表7 スウェーデンにおけるロシア製燃料（TVS-K）導入の経緯

年	出来事・内容
運転開始	リングハルス3号PWR（1981）、リングハルス4号PWR（1982）運転開始 フラマトム社が燃料供給
1998年頃	TVEL社、西側PWR向け燃料「TVS-K」の開発を開始
2000年初頭	ヴェステロース工場製ウェスチングハウス社製燃料に切替（リングハルス）
2001年	TVEL社、TVS-Kの原型設計を完成。欧州市場を意識した燃料集合体であり、西側PWR（特に西欧の標準型炉）への互換性を目指す。
2004年	スウェーデンの原子力事業者 ヴァッテンフォールが TVEL 社と協力し、リングハルス原子力発電所での試験導入を検討開始。リングハルスは、ウェスチングハウス社が設計・ライセンスをもつPWR設計であり、スウェーデンの企業 ASEA-Atom が建設した。
2005年	リングハルス3号機（1,100MW-PWR）にて、TVS-K 原型設計の試験集合体を初めて装荷。西側での初の TVEL 社製燃料の導入事例となる。
2007年	燃料集合体の数を増加し拡張試験へ
2009年頃	TVEL 社、TVS-K の性能・経済性を評価し、西側原子力発電所向け市場展開を開始。リングハルスでの実績をプロモーションに活用 （スイスのベツナウ 365MW-PWR でも TVS-K の詳細な実機照射試験が行われる。フランスなど欧州諸国で小規模の評価試験が実施される）
2010年代前半	安定運転が継続されるが、ロシアと西側の政治的緊張の高まり（2014年のクリミア危機など）を受け、欧州各国がロシア燃料の使用を再検討
2012年	フラマトム社が試験アセンブリ（GAIA 燃料）の照射を開始（リングハルス）
2014年	リングハルス3号機において、TVS-K のリード燃料集合体（LFA）が装荷され、試験運転が開始
2016年	TVEL 社とヴァッテンフォールは、2021年からの商業用燃料供給契約（リングハルス3号機及び4号機）を締結 12月、フラマトム社及びウェスチングハウス社と2018年から2025年の供給契約を締結
2018年以降	スウェーデンではロシア依存のリスクが意識され、TVS-K の新規採用は停止。リングハルスでは西側燃料（フラマトム社、ウェスチングハウス社など）に一本化の方向
2022年	ロシアによるウクライナ侵攻を受けて、TVEL 社との協力は事実上停止。スウェーデン政府はロシア産燃料からの脱却を明言

表 8 チェコ・テメリン原子力発電所における燃料供給の経緯

年	出来事
2000～2002年	テメリン原子力発電所（VVER-1000×2基）が商業運転開始。初期燃料はウェスチングハウス社製（ヴェステロース工場）
2006～2007年	燃料集合体に照射湾曲が発生、1号機は2007年1月に緊急停止（冷却材への放射性物質の漏洩。再起動まで3ヶ月） ТВЕЛ社がVVER-1000用燃料供給契約を獲得（2010年から10年間）
2010年	ТВЕЛ社製燃料の本格供給が開始。以後、テメリンはТВЕЛ社に全面的に依存
2016年	ウェスチングハウス社と試験燃料供給契約を締結。6体の試験燃料集合体を2年間評価。燃料多様化の試みとして開始
2018年	チェコ原子力安全局（SUJB）が、ウェスチングハウス社製試験アセンブリの使用を正式承認。装荷は、2019年4月
2022年4月	CEZがウェスチングハウス社及びフラマトム社をテメリンの新たな燃料供給業者を選定したと発表
2022年6月	CEZと正式な燃料供給契約を締結。納入は2024年から、契約期間は15年間
2025年5月	ウェスチングハウス社製燃料集合体（30体）を初納入。2026年に装荷予定

表 9 UO₂燃料の特徴

理由	詳細説明
軽水炉との高い互換性	PWR・BWR・VVER など、世界の商業炉の約 80% 以上で UO ₂ 燃料が標準採用されている。
成形加工性の良さ	UO ₂ は焼結ペレットとして安定しており、燃料棒への封装・取扱いが容易
高温でも構造安定性が高い	セラミック形状により、炉内での形状保持と核分裂生成物の保持性が良い。
供給インフラの整備	採鉱→転換→濃縮→UO ₂ 製造までの国際的サプライチェーンが確立済み
コストの競争力	他の燃料（MOX、金属燃料等）に比べて製造コストが低く、大量生産に適する。
標準燃料としての国際規格化	IAEA や ISO の規格に沿った品質管理が整備されており、国際流通しやすい。
再処理やリサイクルへの適応性	使用済 UO ₂ 燃料は MOX や REMIX の原料として再利用可能
長期の実績と運用経験	1950 年代から 70 年以上の商業運用実績があり、安全性・信頼性が確立
多様な設計への対応力	高燃焼度燃料や長サイクル燃料など、運転形態に応じた最適設計が可能

表 10 UO₂燃料の出荷形態と工程

段階	形態	説明
① 粉末状態 (UO ₂ powder)	黒色の微粉末	転換工程後、六フッ化ウラン (UF ₆) から UO ₂ 粉末に化学的に還元された状態 この状態で、ウラン濃縮度は決定される。
② ペレット (UO ₂ pellet)	小さな円柱 (PWR の場合、 直径約 8~10 mm、 高さ約 10~15 mm)	UO ₂ 粉末をプレス成形し、焼結して高密度のセラミック体に。表面は滑らかで黒光りする。
③ 燃料棒 (fuel rod)	細長い金属管 (ジルカロイなど)	ペレットを筒状の被覆管に数百個並べて封入し、両端を溶接して密閉。 長さは約 4 m 前後 技術移転の関係上、現地組み立てを実施している場合は、燃料棒の状態で、輸送されることもある。
④ 燃料集合体 (fuel assembly)	複数の燃料棒を格子状に束ねた構造体	炉型により PWR は 17×17 格子、BWR は 10×10 格子、VVER は三角格子六角形状。これが出荷単位となる。

表 11 燃料集合体 TVS-2M (TBC-2M) の特徴

項目	内容
概要	<p>TVSA 型を改良し、経済性と運転安定性を高めた設計</p> <p>VVER-1000 向け。VVER-1200 には、TVS-2M をベースに改良が加え、「TVS-2M 型の技術的継承を受けた燃料」が使われている（例えば燃料棒の数や構造の最適化）。</p>
構造	<p>六角形形状（燃料ピン数 312 本）</p> <p>一体型ヘッド（整流装置付き）、</p> <p>制御棒ガイド付き</p>
利点	<ul style="list-style-type: none"> - 燃焼度向上（60GWd/t 以上を狙う） - サイクル期間の延長（最大 18 ヶ月） - 流量分布の均一化
材料	<p>改良型ジルコニウム合金（E110 または E110M、被覆管直径約 9.5mm）</p>
状況	<p>ロシア、インド、中国、イランの VVER-1000 炉に採用済み</p>

表 12 燃料集合体 TVS-K（及び改良型 TVS-Kmp）の特徴

項目	内容
概要	<p>西側の PWR 型にも対応可能なよう設計した集合体。六角形断面形状ではなく、四角形断面の燃料集合体。主に海外市場向け（特に西側炉、フランスの PWR、米国のウェスチングハウス炉など）を想定</p>
断面形状	<p>四角形（PWR 互換） 17×17 配列（燃料ピン数は 264 本）</p>
利点	<ul style="list-style-type: none"> - 約 45～50 GWd/tU（12 ヶ月相当。西側標準 PWR 燃料 AFA 3G, VANTAGE 5 などと同等） - 改良型の TVS-Kmp では、最大 55 GWd/tU 程度（試験運転ではこの水準を達成。18 ヶ月サイクルに相当）に対応
材料	<p>TVS-K は TVS-2M と同じ E110（Zr-1Nb）。TVS-Kmp は E125（Zr-Nb-Fe-O）など高性能 Zr-Nb 系合金が使用されているとみられる。 輸出用には欧州基準に合わせた材質も適用可能。被覆管直径は、両者とも米国 PWR 準拠の 9.1mm</p>
状況	<p>西側の燃料供給業者に対抗するロシアの市場戦略。ウクライナの VVER-1000 炉（西側規格に近い運用）や一部欧州の炉向けに設計されたロシアの“代替供給戦略”の一環で、供給の多角化と技術的優位性を狙っている。 一部で試験運転中、広範な商業展開は限定的。（政治的事情含む） ロシアのノボシビルスク化学濃縮工場（NPCC）で製造</p>

表 13 ロシアから中国への HEU 燃料の供給（MSZ での HEU 燃料の製造）

年	出来事
1980～1986	BN-600、MSZ 製の 21%と 31%濃縮の HEU 燃料で稼働
1987 年以降	BN-600、炉心の燃料構成を、MSZ 製の 17%、21%、26%濃縮の HEU 燃料に変更 2010 年代に MOX とのハイブリッド化が進むも、HEU の使用は続く。
1996 年 2000 年 (2023 年)	ロシアと中国が 1996 年に「原子力の平和利用の分野での協力に関する協定」に署名。ロシア「ロシアの核物質の輸出入に関する規則」を 2000 年に初発行。2023 年 2 月に改正。核兵器国への HEU のような物質の輸出は、輸出された品目及びそれに基づいて生産された品目が、核兵器その他の核爆発装置の製造またはいかなる軍事目的にも使用されない場合にのみ許可される（第 6 項）。受領国が平和利用の書面による保証を提供することが義務付けられており、その後ロスアトムがそれを評価する（第 8 項）。
2010 年	中国高速実験炉（CEFR）に燃料を供給。濃縮度 64.4%の UO ₂ 燃料 CEFR 原子炉は 2010 年 7 月に初臨界（2011 年 7 月に系統接続） 2013 年 10 月と 2016 年 12 月に供給継続に関する契約を締結（契約額は 6,000 万ドルと報じられている）
2018 年 12 月	燃料供給契約を締結（TVEL—CNLY）。TVEL 社は CFR-600 の初回装填用及びその後 7 年間の運転期間中の再装填用の燃料を供給する（2018 年 6 月の中露首脳会談で包括合意。供給 HEU 燃料は BN-600 と類似と考えられている）
2021 年 3 月	MSZ 工場は、中国の高速中性子炉 CFR-600 用のウラン燃料を製造する生産ラインを設置。この生産ラインは、ロシアの BN-600 原子炉と中国の CEFR 原子炉用の燃料も製造する。 これまで CEFR 用の燃料は、MSZ 社が別の生産ラインで製造
2022 年 12 月	TVEL 社は中国の高速中性子炉 CFR-600 に最初の燃料バッチを納入。この契約を支援するため、2019 年に MCC ジェレスノゴルスクの電気化学工場（EKHz）の高濃縮ウラン生産ラインを拡張し、2021 年にはエレクトロスタリの MSZ 工場に専用の燃料生産ラインを設置した（粉末あるいはペレットは MCC 製造）。

表 14 プルトニウム生産炉 ADE-2 の経緯

年	出来事
1960 年代	<p>1964 年：兵器級プルトニウムの生産を目的として黒鉛減速・水冷炉が稼働 兵器級プルトニウム生産用の照射炉として稼働 → 使用済燃料は再処理（PUREX）でプルトニウムを回収</p>
1994 年	<p>米国政府とロシア連邦政府との間のプルトニウム生産炉の停止に関する協定 ロシア国内の 3 基のプルトニウム生産炉（オジョルスク/マヤーク、セヴェルスク、ジェレズノゴルスク）を順次停止 地域暖房と電力供給に依存する地域住民のため、即時停止せず 米国が資金援助（約 3 億ドル規模）を行い、代替熱源（ガス火力など）を建設することを表明 → この合意により、ADE-2 は「兵器用プルトニウムを生産しない条件で、当面の運転継続」が可能となる。</p>
1994～2000 年代 兵器用から熱供給炉への技術的転換	<p>プルトニウムの生産能力を削減： 照射燃料の滞在時間や燃焼度を調整し、Pu-239 の分離が困難なように、兵器用ではなく「原子炉級プルトニウム」しか生成しないよう変更</p> <p>照射済燃料を再処理せず貯蔵： 兵器級プルトニウム抽出を防止 使用済燃料は貯蔵施設（MCC 乾式貯蔵）へ</p> <p>発電と暖房向けの蒸気供給システム強化： 地域の集中暖房（district heating）や、MCC 構内のエネルギー供給源として活用。 米国 DOE の監視・資金協力の下で進行： 軍民転換の信頼性確保のため、米国エネルギー省（DOE）や IAEA の技術検証・監視システムが導入</p>
2005 年頃より	<p>ロシア政府は、天然ガス火力による熱供給施設の整備を加速</p>
2010 年 4 月	<p>ADE-2 の運転停止を実施。同時に、他のプルトニウム生産炉も完全停止済</p>

表 15 ロシアにおける再処理技術と核燃料開発の年表 (1/2)

年	出来事
1940 年代後半	ソビエト連邦、核兵器用プルトニウム生産のため、No.817 (マヤーク)、No.816 (セヴェルスク SCC)、No.815 (ジェレズノゴルスク MCC) に黒鉛炉とプルトニウム分離施設を建設
1960 年代	RT-1 再処理工場 (マヤーク) の建設決定 高速増殖炉開発と連動して、PuO ₂ と UO ₂ の混合酸化物燃料 (MOX) の研究が始まる。初期は兵器級プルトニウムの民生転用が背景
1971 年	RT-1 の使用済燃料貯蔵施設が稼働
1973 年	BN-350 (カザフスタン) が運転開始 (当初は UO ₂ 燃料のちに MOX 燃料へ)。MOX 燃料の照射試験も開始
1977 年	RT-1 再処理工場が操業開始。VVER-440 や船舶炉などの再処理を実施
1970 年代～1980 年代	MCC で商業用再処理工場 RT-2 の設計開始。VVER-1000 用再処理を想定。MCC の湿式貯蔵施設が 1985 年に稼働。BN-600 (ベロヤルスク 3 号機) が稼働。初期炉心は UO ₂ 燃料で構成され、1980 年代後半から MOX 燃料集合体の試験装荷が開始される。
1990 年代後半 ～2000 年代初頭	Bochvar 研究所 (VNIINM) 及び RIAR (ドミトロフグレード) において、MOX 燃料の設計改良、照射後試験、粉末加工技術などが本格化 REMIX 燃料の研究開始 (VNIINM)。使用済み燃料からのウラン・プルトニウムを直接混合し再利用
2000 年代前半	再処理による Pu 回収と連動した MOX 燃料の製造技術・施設設計 (特に MCC) が進展 MCC において PDC (Pilot Demonstration Center) の設計開始。RT-1/RT-2 とは異なる施設設計となる。
2000 年代中盤～後半	MCC PDC にて REMIX 燃料のパイロット製造・照射試験を開始
2014 年	BN-600 で窒化物燃料集合体の照射試験開始
2015 年	MCC で MOX 燃料製造工場 (MFFF) が操業開始。PDC も稼働

表 15 ロシアにおける再処理技術と核燃料開発の年表 (2/2)

年	出来事
2016 年	SCC で REMIX 燃料棒製造開始。バラコボ 3 号機に REMIX 燃料 (TVS-2M 集合体×3) を装荷
2019 年	REMIX 及び MOX 燃料の共通製造技術 (固溶体化) を MCC で開発
2020 年 8 月	将来的に SCC で REMIX 燃料の生産を行うことを発表
2021 年	SCC-ODEK (実証エネルギー複合体) において MFR (燃料製造モジュール) 稼働開始
2022 年	BN-800 がフル MOX 燃料での運転に移行
2022 年	PDC での再処理生成物を二酸化プルトニウムと未濃縮ウラン硝酸に確定。2023 年から設備改修開始 BN-1200 改良型「BN-1200M」を 2035 年までに建設予定と発表
2023 年	バラコボ 3 号機で使用された REMIX 集合体が、照射後試験 (PIE) のため NIAR に移送
2023 年 12 月	MCC にてネプチニウム・アメリシウム含有の MA-MOX 燃料を手動で製造
2025 年 4 月	ロシアの原子力規制当局 (Rostechнадзор) は、ベロヤルスク原子力発電所の計画中の 5 号機 (高速中性子炉 BN-1200M) の設計準備許可 (a license for installation of reactor plant) を発行 (建設予定地及び基本配置の承認)
2030 年以降予定	SCC-ODEK の再処理施設の本格稼働予定 サイクル完結型施設として BREST-OD300 と連携 BN-1200M 稼働予定 (2035)

表 16 REMIX 燃料の開発経緯 (1/2)

年	出来事
1990 年代後半 ～2000 年代初頭	ロシアは使用済燃料の再処理技術を発展させる中で、再処理ウラン (RU) と再処理プルトニウム (Pu) を直接混合して燃料を作る REMIX 技術の研究を開始。主導は VNIINM (原子炉材料科学研究所) と思われる。
2000 年代中盤～後半	MCC の Pilot Demonstration Center (PDC : 部分的にはこの時代も稼働していた) などで、REMIX 燃料の製造とパイロット試験を実施。燃料製造設備の一部が REMIX 対応に改造され、試験生産と試験炉での照射試験が進められた (試験レベルのピン封入)。(国内濃縮能力は高くどこからでも調達できると思われるが、19%濃縮ウラン粉末をどこから調達したかは不明。スペック的には、ノボウラルスクの UEIP。ロシアは核不拡散性が高いというが、結局、REMIX 工場というインフラを完成させるまでは、19%濃縮ウラン粉末の製造・移送は必要。)
2015 年	PDC 及び BN-800 向けの燃料を製造する MOX 燃料製造工場 (MFFF) が正式稼働 (VVER-1000 等の使用済み燃料を再処理)
2016 年 5 月	セヴェルスクにあるシベリア化学コンビナート (SCC) の化学冶金工場で、REMIX 燃料を含む燃料棒が製造される。残りの燃料棒は、試験とさらなる研究のために国立原子力研究所 (NIAR) に送られた (燃料回収及び集合体製造場所は不明)。 SCC は、REMIX 燃料の製造の中でも特に「化学冶金処理工程」=回収ウランとプルトニウムの混合粉末の調製や化学的処理を得意とする工場
2016 年 6 月	バラコボ 3 号機に REMIX 燃料棒 6 本をそれぞれ搭載した TVS-2M 燃料集合体 3 体を搭載。これらの燃料集合体は 2 サイクルにわたり使用され、2020 年初頭には 3 サイクル目の 18 ヶ月サイクルが開始された。

表 16 REMIX 燃料の開発経緯 (2/2)

年	出来事
2019年3月	MCCの研究者らは、REMIX燃料とMOX燃料の両方を製造するための新技術を開発（水素・アンモニアによる還元プロセスを省略。混合物は固溶体の形）。この技術により、二酸化ウラン、またはウランとプルトニウムの二酸化物を任意の核比率で得ることが可能となる。この技術は既に、実験的な工業条件下でのMOX燃料ペレットの製造に使用されている。
2020年8月	ロスアトムは、VVER-1000原子炉用のREMIX燃料を、2023年からSCCの新生産ラインで生産すると発表
2021年6月	MCC-MFFFのパイロット燃料製造ラインの設備が稼働し始め、年末までに燃料集合体の試験生産が可能になった。MCCで軽水炉使用済燃料からウランとプルトニウムを分離せずに共回収→回収ウラン・プルトニウム溶液を新燃料ウラン（天然または濃縮）と混合→酸化物へ転換→MCCでペレットを製造。SCCでMCCから送られたREMIXペレットを用いて、VVER燃料集合体を製造
2021年	2021年にパラコボ3号機から取り出され、1年半保管プールに移送された後、さらなる研究のために2023年にNIIARに引き渡される。

注：

REMIX燃料（REgenerated MIXture fuel）とは、ロシアが開発した軽水炉（主にVVER型原子炉）向けのリサイクル型核燃料。使用済燃料から回収された再処理ウラン（RepU）と再処理プルトニウム（Pu）に、新たに濃縮されたウラン（U-235濃度最大19%）を加えて混合することで製造される。REMIX燃料の特徴は、従来のMOX燃料（プルトニウム濃度10～30%）と異なり、プルトニウム濃度が比較的低く（2～5%）取り扱いが、通常のウラン燃料に近い点があると主張されている。

表 17 窒化物燃料の開発経緯 (1/2)

年	出来事
<p>2014 年 4 月 25 日 (AtomInfo.Ru、補足 NS Energy) 2010 年代初頭は、ピンレベルでの研究が実施されていた。</p>	<p>シベリア化学コンビナート (SCC/CXK) セヴェルスク工場が、BN-1200 炉向けにウラン・プルトニウム窒化物燃料 (MUPN) の実験用燃料集合体 (ETVS-4 : EK164 鋼被覆管) 製造・出荷準備を完了同年中に BN-600 で照射されたと考えられている。「Нитридные твэлы готовятся к загрузке в БН-600」</p>
<p>2014 年 10 月 22 日 (WNN、補足 NS Energy)</p>	<p>ETVS-5 集合体 (BREST 用 EP823 被覆管) での混合窒化物燃料試験が完了。「Russia completes TVS-5 tests」 (BN-600 で照射、以下 BN-600 で照射)</p>
<p>2015 年 3 月 28 日 (NEI)</p>	<p>SCC が BN-1200/BREST-OD-300 用の ETVS 燃料集合体製造プロセスを最適化。コスト 37%、時間 25%削減。「Russia optimizes fabrication of nitride fuel assemblies」</p>
<p>2016 年 8 月 23 日 (WNN)</p>	<p>MSZ が ETVS-14/15 の部品を製造。組み立ては SCC で行われる「Russia notes progress with fast reactor technology」</p>
<p>2019 年 8 月 (NS Energy)</p>	<p>VNIINM の科学者とモスクワ国立原子力大学工学物理研究所 (NRNU MEPhI) が、ネプツニウムとアメリカシウムを含む MUPN 燃料ペレット製造用の実験的な高電圧電気インパルス圧縮装置 (VEIK) を開発 (加圧と焼結が同時に行う)</p>
<p>2020 年 1 月 22 日 (WNN)</p>	<p>SCC が ETVS-22, -23, -24 の受け入れ試験完了、BN-600 炉での試験を計画。「Russia completes testing of latest fast reactor fuel」</p>
<p>2020 年 6 月 (NS Energy)</p>	<p>ロスアトム国際・科学技術プロジェクト担当特別代表であり、プロロイヴ・プロジェクトの責任者であるヴァチェスラフ・ペルシュコフ氏は「実験バッチの試験は順調に進んでいる、1000 本以上の燃料棒が照射され、8%以上が燃焼し、減圧は発生していない」と総括</p>
<p>2021 年</p>	<p>実験的実証エネルギー複合施設 : Experimental Demonstration Energy Complex (ODEK - Opitno Demonstratsionovo Energo-Kompleksa) の概念を発表</p>
<p>(6 月 8 日の WNN、11 月の ROSATOM NEWSLETTER # 247 等)</p>	<p>燃料製造・再加工モジュール (MFR)、鉛冷却高速中性子炉 BREST-OD 300 (2027 年稼働開始予定)、照射済み燃料の再処理及びリサイクル用のモジュール (ZRT:2030 年稼働開始予定) からなるクローズドサイクル実証施設 (サイクル自体が施設内で閉じる)</p>

表 17 窒化物燃料の開発経緯 (2/2)

年	出来事
<p>2024年12月25日 (ATOM MEDIA 、 ROSATOM NEWSLETTER # 274)</p>	<p>ODEK にて、燃料製造・再加工モジュール (MFR-YaT – Modulya po Fabrikatsii/Refabrikatsii Yadernovo Tolpliva) が稼働</p> <p>回収ウラン窒化物燃料ペレットを用いた BREST-OD-300 炉心設計に基づく最初のモックアップ燃料集合体を既に製造 (完全自動化施設)</p> <p>ウラン・プルトニウム混合窒化物の炭素熱合成、燃料ペレットの製造、燃料要素の製造、そして燃料集合体の組立という 4 つの生産拠点を含む。施設の人員は 250 名</p> <p>併せて、各種金属部品を製造 (ODEK 外) するために、グラゾフのチュペツク機械工場、エレクトロスタリのエレマシュ機械製造工場及びノボシビルスク化学濃縮物工場 (NCCP) の関連施設も整備 (再処理モジュールはまだ稼働していないと思われるため、ペレットの一部の原料等の観点から NCCP が関与している可能性もある)</p> <p>二酸化プルトニウムに関しては、1970 年代から 1990 年代にかけて生成され、マヤーク施設に貯蔵されている在庫を使用する。</p>
<p>2025年1月 (ROSATOM NEWSLETTER # 285)</p>	<p>OS-4 燃料集合体が製造された (ODEK で型番付け替えたと思われる。BREST 用と推測)。BN-1200 サイズの KTEVS-MAK 実験用集合体 3 体も製造される。</p>

注：BN-600 は、1980 年より 21%と 31%の UO₂燃料で稼働、1987 年より 17, 21, 26%の 3 ズーン炉心。2010 年より数十本規模の MOX 燃料を部分装荷 (試験装荷は、運転初期より)。窒化物燃料は、2014 年より試験装荷。振動充填燃料を含め、BN-600 は照射炉としても活用されており (炉心自体も線出力低下/炉心高さ増加、被覆管材料及び集合体材料改良を通じ、運転期間/燃焼度の増加を 2005 年まで模索している)、フル MOX 燃料で稼働している BN-800 と活用方法が異なる。BN-600 の炉心特性は、以下の資料に記載がある。

https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2019-01/gifiv_webinar_pakhomov_19_dec_2018_final.pdf (accessed 28 August 2025)

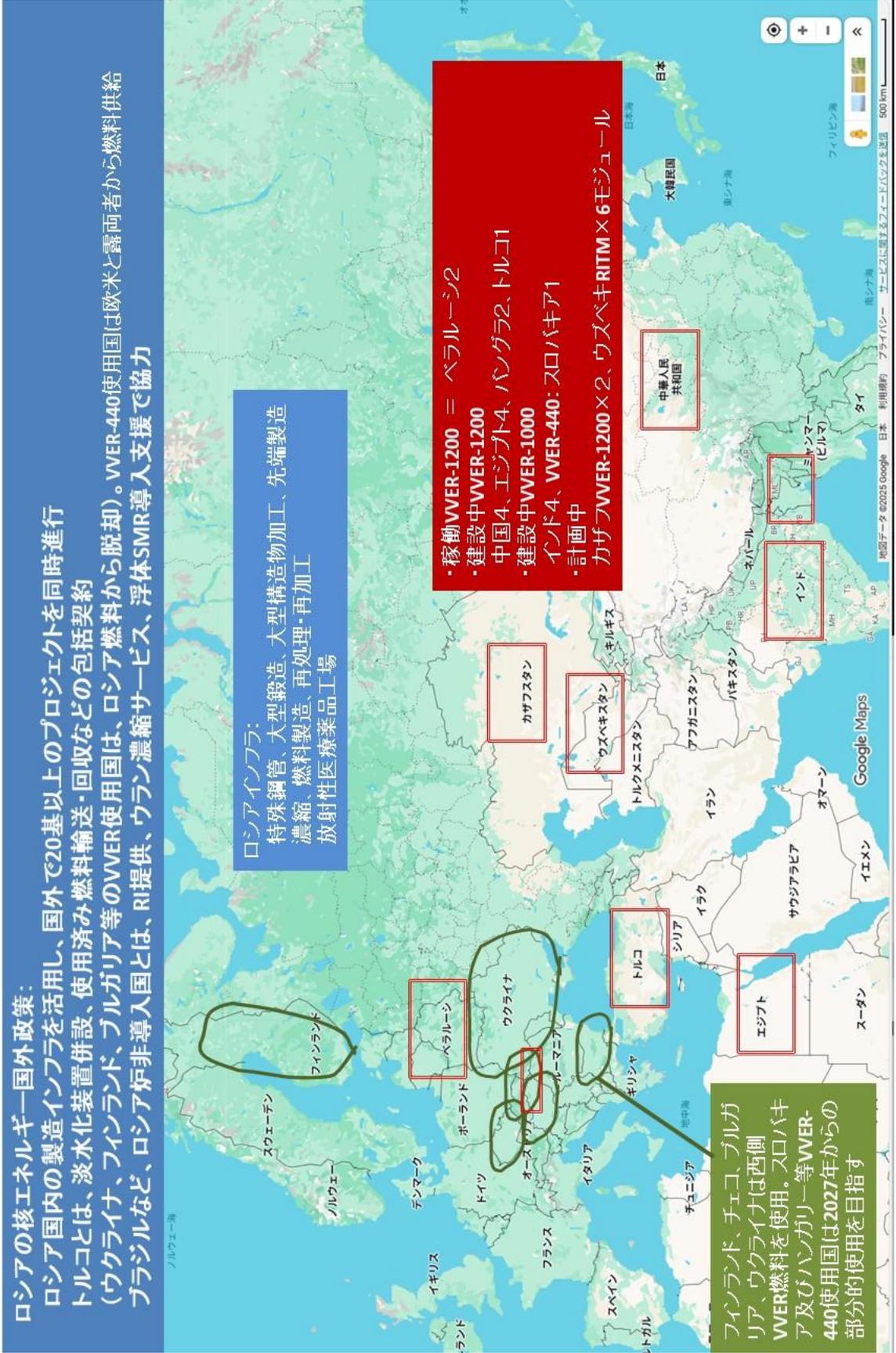


図2 ロシアの核エネルギー国外政策

原子炉開発における戦略的多様性

戦略目標	国家エネルギー安全保障と技術主権/インフラの確保
アプローチ	戦略的開発多様性(性格の異なる燃料/原子炉タイプを戦略的に開発)
手段	<ul style="list-style-type: none"> ● 軽水炉(大規模・中規模)を並行展開(国内、国外) (民生核エネルギー活用大国として、船舶用/移動型用やモジュール炉も開発しているが、エネルギー需要を支えているのはココ) ● 同時に高速炉を段階的に拡充 ● 燃料サイクル施設の長期的な維持/拡充
ロシア事例	<ul style="list-style-type: none"> ● RBMK-1000をVVER-TOIや1200で代替(国内) ● VVER-440をVVER-S/600で代替(国内) ● 地域事情に合わせたVVER-440/1000/1200の並行展開(国外) ● BOR-60/BN-350/BN-600(照射や運転データ蓄積)/BN-800(フルMOX運転)での開発経験蓄積(国内) ● 国内外需要を念頭に置いた再処理/MOX燃料製造インフラの整備 ● 中国CFR-600への技術協力(燃料分野を含む)
メリット (結果としての連続性の確保)	<ul style="list-style-type: none"> ● 運転経験の蓄積/共有 ● 製造能力の維持 ● 次世代炉への段階的移行 ● 国内外市場への適応(地域におけるエネルギー需要への適合性)

図3 原子炉開発に見る戦略的多様性

技術活用・展開方法の多様性

	軽水炉	高速炉	(再)処理	使用済み燃料	放射性同位体
展開方法 (施設建設以外)	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料供給(UO₂, REMIX, MOX) ・運転支援 ・淡水化プラント併設 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料供給(高濃縮UO₂, MOX) ・MA変換サービス 	<ul style="list-style-type: none"> ・使用済み燃料回収 ・再処理サービス ・回収Uの再濃縮/転換等 	<ul style="list-style-type: none"> ・長期貯蔵 ・輸送サービス ・コンテナ提供 	<ul style="list-style-type: none"> ・テクネチウム99mジェネレーター供給 ・キャリア添加型/非添加型ルテチウム177、アクチニウム225、トリウム227等供給
基盤インフラ	共通製造インフラ(他産業とも): 特殊鋼製管、大型鍛造、大型構造物加工/溶接、先進製造技術(ロスアトム積層技術センター)		核再処理工場、燃料製造工場(化学/放射線管理/計測・監視・自動化技術)	湿式/乾式貯蔵施設、連邦管区毎の中レベル廃棄物処分施設、地下高レベル廃棄物処分施設(構想)	放射性医薬品工場
相手国との関係性	主として商業契約に基づく関係性(経済関係)	共通技術開発(技術保障関係)	利用だけの場合は、基本的に商業契約関係 再処理技術の共有、核物質の戦略的保管にまで踏み込んでいくと安全保障関係		友好関係の構築

図4 技術活用・展開方法の多様性

付録1 ロシアの核エネルギー開発の歴史に関するまとめ（要旨と所見）

第1章の要旨

核燃料供給の観点からみたロシアの核エネルギー利用（VVER 炉）

ロシア（旧ソビエト連邦）は、1954年のオブニンスク原子力発電所の稼働を起点に、加圧水型軽水炉（VVER）の民生利用を開始し、また核燃料集合体の国産化・標準化を進めた。1970年代には旧ソビエト連邦圏諸国にVVER-440型炉を輸出、燃料供給体制を一貫して構築した。燃料ペレット製造（NPCC）や集合体組立（MSZ/エレマシュ）などは、国家主導で実施され、政治的影響力の一環として位置づけられていた。中立国であるフィンランドにもVVER-440が導入され、技術・外交の折衷モデルとして注目された。

1991年のソビエト連邦崩壊後も、ロスアトム傘下のTVEL社（1991年設立）が燃料供給を継承し、旧ソビエト連邦構成国や東欧諸国に対し、商業的な供給体制と性能維持/向上を両立させた。2000年代にはTVEL社の品質・安全認証が強化され、ロスアトムによる中国へのVVER-1000提供、現地燃料製造ライン（宜賓工場）の稼働、イラン・インドへの輸出も展開された。ロシアは、燃料供給から使用済み燃料の回収・再処理までを含む「包括的核燃料サイクル支援パッケージ」を構築し、国家戦略の柱とした。

一方、TVEL社は西側市場への進出も図り、PWR炉向け燃料「TVS-K」を開発。スウェーデンのリングハルス原子力発電所で試験装荷を行ったが、規制認可の難しさや地政学的リスク、西側企業との信頼関係の強さにより、商業化には至らなかった。

2014年のクリミア併合と2022年のウクライナ侵攻は、欧州各国のエネルギー安全保障政策を転換させ、ロシア製燃料からの脱却が加速。ウクライナは2005年からウェスチングハウス社との協力を進め、2016年にはVVER-1000での商用装荷を開始、2024年にはVVER-440の燃料も実炉試験段階へ入り、ロシア製燃料から完全に脱却した。フィンランドもTVEL社との契約を2023年に終了し、2027年からのVVER-440への装荷に向けてウェスチングハウス社と契約した。チェコやブルガリア、スロバキア、ハンガリーでも西側燃料の採用が進行している（スロバキア、ハンガリーはTVEL社とも契約すると思われる）。

結果として、今後TVEL社のみから燃料（集合体）供給を受けるのは、ベラルーシ、アルメニア、イラン、インド、中国に限定される見通しであり、また、インド・中国は自国内でのVVER燃料製造体制の確立も進めている（ウラン粉末やUF₆での供給は除く。またトルコ、バングラデシュ、エジプト、ハンガリーなどの市場でのVVER-1200建設プロジェクトにおいては、燃料供給を含むパッケージ提案をロシアは継続している）。核燃料戦略は、単なる技術供給ではなく、政治的信頼性、規制制度、技術互換性、戦略的インフラとしての側面を有し、各国の対応はそれぞれの地政学的判断に基づくものとなっている。

第 1 章の所見

A) 安全保障を基盤とした原子炉/核燃料導入の意思決定

- ◇ 原子炉の導入は、単なる技術的選択にとどまらず、国家の安全保障に深く関わる戦略的判断である。たとえば、VVER-440 と欧州の PWR 炉、あるいは VVER-1000 と 1300MW 級の西側 PWR を比較すると、ロシア製炉は出力や性能面で劣る面があるものの、フィンランドを含め実際に採用されている。
- ◇ これは、**安全保障、経済的支援、技術移転、核燃料の安定供給**といった自国の総合的メリットを重視し、自国にとってメリットが大きい選択肢として VVER 炉/ソビエト連邦を選んだ結果である。すなわち、原子炉導入の判断は、技術性能だけでなく、供給者との政治的関係や経済的安定性を踏まえた包括的な戦略選択といえる。
- ◇ また、ルーマニアの CANDU-6 導入のように、旧ソビエト連邦圏でありながら、自立政策を模索した国家もあり、同盟国の中でも完全に一枚板ではなく、各国個別の状況を抱えている。VVER-440 向け燃料を西側燃料に変更した国家の中にも、TVEL 社との契約も継続したり、フラマトム社が燃料製造を行う（TVEL 社とのライセンスを模索している）のを待っている国家もある。

B) 供給多様化への戦略的布石

- ◇ 原子炉や燃料の供給体制は、一度構築されると長期的に維持される傾向があるが、これは決して不変ではない。各国は、**計測・制御・安全系統・運転技術**などの一部領域に**自国の関与を取り入れたり、異なる燃料形式の試験装荷、技術移転を通じた国産化、ライセンス取得**などを通じて、外部の体制依存から段階的に脱却しようとする。このような動きは、多くの場合、安全保障上の体制転換よりも前に、**水面下で技術的な多様化として現れる**。また、通常近隣国はこのような先行する動きに敏感であるため、水面下で多様化を進め、状況が変化し、表立って展開できる機会をうかがっている。
- ◇ 試験装荷など先行する活動が国家的な妨害を受ける場合、その障害レベルは非常に高いものになるため、そのアプローチは再考の余地がある。また、事前に、試験装荷に関する共同プロジェクトを立ち上げたり、スイスのような中立的立場を有効に活用している国家を利用し、障害レベルの低下を試みることができる。
- ◇ 特に、**燃料製造工場の建設**は、単なる技術問題にとどまらず、複数国に波及効果をもたらす**地政学的インフラ投資**となる。一方、**設備投資の規模、技術的ハードル、市場参入の障壁**などを考慮すると、一国・一企業では単独で推進することが困難なケースも多い。このような背景から、近年ではフラマトム社と TVEL 社のように、表向きの競争関係を維持しつつも、特定燃料に関する製造・供給での協力を水面下で模索する例も出てきている。これは、ウェスチングハウス社などの第三勢力への対抗策として、企業間あるいは国家間の利害を超えた戦略的連携の一形態と見ることができる。

C) 核燃料供給における戦略的差別化の手法

- ◇ 製品供給だけでは、十分な協力関係が期待できない場合等、協力関係が技術供与へ進む場合もある。遠心分離機の技術供与での事例などのように、通常は自国で使用する技術より低いレベルの技術を供与し、自国の優位性の確保を図る。
- ◇ しかし、優位性は、**安全保障（核を含む戦力）、外交力、技術レベル、市場規模**などで**相対的に決まる**ものであり、**単に技術レベルの差のみで決定されるものではない**。そのため、**包括的核燃料サイクル支援パッケージ**のような形で、サービスの差別化を図る。
- ◇ したがって、技術力の優劣に依存しない形での競争優位を築くには、燃料供給から回収、再処理までを含む「包括的核燃料サイクル支援パッケージ」のような総合的なサービス提供による差別化戦略が必要となる。これは単なる技術輸出ではなく、**供給国の総合力を背景とした政治的・経済的影響力の行使**である。

第2章の要旨

ロシアの核燃料製造能力

第2章では、ロシアの核燃料製造体制がいかに国家戦略として形成・展開されてきたかを概観している。旧ソビエト連邦時代より、核燃料の製造は兵器用と民生用にまたがる広域分業体制のもとで整備され、現在のロスアトム傘下に統合されている。ТВЕЛ社はロシア国家原子力公社（ロスアトム）の燃料部門として機能し、核燃料の製造・販売・供給を担う中核企業である（Bochvar 研究所/VNIINM の理論・材料設計の中核としての燃料設計能力、RIAR の照射試験と高燃焼度燃料開発能力のもとで、実用化可能な製品の最終開発・適用展開を担ってきた）。

核燃料製造は、ペレット（焼結ウラン二酸化物）製造、燃料棒組立、集合体への統合という多段階工程からなり各拠点はそれぞれ得意分野を持つ。たとえば、ノボシビルスク化学濃縮プラント（NPCC）は主要ペレット製造拠点であり、エレクトロスタルの MSZ/エレマシュ工場は集合体の製造・組立と輸出向け製造を得意としている。

ロシアの核燃料製造体制の特徴は、「モジュール化された柔軟な分業」と「一貫した中央管理」にある。各拠点は専門性を発揮しながらも、ТВЕЛ社が製品仕様・品質管理・納期調整を統括し、国内外顧客への供給信頼性を確保している。さらに、輸出市場の拡大に伴い、インドや中国においては、ライセンス生産や技術移転による現地製造体制も整備されており、ロシアは単なる輸出国ではなく、技術支援国としての立場も確立している。

一方で、この分業体制には地政学的なリスクもある。西側諸国がロシア依存を脱却する中で、ТВЕЛ社の国際供給網の再構築や代替市場の確保が急務となっている。その対応として、ロシアは一部製品の現地製造化、MOX 燃料や REMIX 燃料などの高度化製品への移行を進めている（正確には、国際的な協力体制の拡大・安定化を図っているのであり、現地製造そのものが目的ではないと思われる）。特に、MOX 燃料は閉じた燃料サイクル政策との親和性が高く、ロシアの高速炉戦略と連動した重要技術である（これまで、ロシアは、軽水炉での MOX 燃料燃焼を実施しないと思われてきたが、最近では、2035 年運転開始予定の VVER-600S の全炉心に装荷する計画も進んでいる。S は Surplus plutonium 対応の意味）¹⁶⁾。

また、燃料設計面では、既存の VVER-440 や VVER-1000 のみならず、VVER-1200、さらには将来の大型化に備えた燃料開発も進められており、ТВЕЛ社は設計・製造・供給・サービスまでを含む包括的パッケージの提供能力を強化している。これは単なる製品提供ではなく、使用済燃料回収や再処理も含めた、政治的・技術的信頼性に基づく長期的協力の枠組みである。

第2章は以上のように、ロシアの核燃料製造体制が単なる工業インフラではなく、国家の原子力輸出戦略、技術優位、国際影響力確保の中核的構成要素であることを示している。

第2章の所見（一部第3章の知見を含む）

D) 国家主導の一貫体制

- ◇ ロシアの核燃料製造は、旧ソビエト連邦時代からの分業体制を基礎に、ロスアトムを中核とした国家主導の一貫供給体制が確立されている。ペレット製造から集合体組立までが複数拠点に分散されながらも統合的に管理されており、高い生産安定性と技術継承性を保持している。また、ウランテイルから高濃縮ウラン、MOX（ペレット、振動充填）や窒化物まで、転換・濃縮・再転換・保管を視野に入れ、**製造工程を改善あるいは共通化する土壌**がある。このような土壌が、**よりコストが安い生産ラインを提案する能力**をもたらしている。
- ◇ TVEL 社は製造だけでなく、Bochvar 研究所（VNIINM）などの設計・材料系研究機関と連携し、VVER 燃料や高密度燃料などの設計改良・材料評価・照射試験を通じて技術革新を支えている。ただし、研究開発の主導はロスアトム内の各研究機関に分担されており、**TVEL 社単独の成果ではない**。
- ◇ 一方で、海外向けの製品は、MSZ（エレマシュ）で集中的に取り扱ったり、RT-1 と RT-2 の技術協力が断絶していた時期があったり、各コンビナートで**一部重複する製造能力**を有していたりする。このように、高品質を担保する拠点、小規模で試験的な開発をする拠点、大量生産をするラインを、（完全ではなく）余裕代をもって結合している。

E) 戦略分野における製造能力の拡大

- ◇ 核燃料製造に関しては、一律に大規模な能力を有しているわけではなく、転換・濃縮・再転換、そして使用済みウラン/プルトニウムの燃料としての活用など**世界的に差別化を図れる分野へ大きな投資**をしている（特に 30%U の濃縮能力、MOX 燃料製造）。またフランスの協力もあり再転換能力も強化し、**再処理工場のアウトプットを安定した形で保管**し、途中の予算不足や不安定な状況乗り越え、長期にわたり、サイクル事業を破綻させず、維持できるように工夫している。特定の分野に過大な投資を行うと、供給ニーズが減少したときに、インフラ負債を抱えることになるが、保管という形で、長期にわたる在庫調整を行い、リスク管理をしている。
- ◇ **製管及び機械加工**に関しては、製造拠点は核燃料サイクルの外側に位置づけられており、この分野は、**航空、医療、宇宙用の製品**も加工している。（また、TVEL 社は、安定同位体の製造と販売、地域熱供給、水素エネルギー関連事業を実施するほか、原子力由来の高純度金属処理技術を応用した高エネルギー密度型セルの製造も実施している。ロシア政府のエネルギー技術自立戦略の中のリチウム及び電池材料の製造基盤）
- ◇ 一貫であることが**絶対条件**ではなく、**差別化を図れる製品を模索できる多様な R&D と小規模試験施設、強化施設への大規模投資、状況の一時変化に短期的に耐えるリスク戦略/異業種連携が鍵**であり、これは、全体国家でなくても実施可能である。

F) 供給網と燃料種類の多様化

- ◇ 中国（宜賓）やインドなどでは、ライセンス供与や技術移転により現地製造拠点の整備が進められ、ロシア中心の製造体制が地理的・制度的に拡張されている。これは「供給＋技術」の複合輸出戦略の一部を成している（国外拠点との連携による供給網の外延化）。
- ◇ 高速炉路線や使用済燃料の再利用戦略に対応し、MOX 燃料や REMIX 燃料の製造能力が整備されつつあり、製品ポートフォリオの多様化による戦略的優位が図られている。これは脱一次燃料依存・クローズド燃料サイクル政策の一環でもあるが、フランスの MOX 路線への差別化のために、MOX・REMIX など燃料種の多様化を図っている。

第3章の要旨

ロシアの核燃料再処理/サイクルの考え方

第3章では、ロシアの核燃料サイクル政策、特に再処理と再加工に焦点を当て、制度・技術・施設の展開とその背景にある戦略的意図が整理されている。ロシアは「クローズド燃料サイクル」を国家戦略として掲げており、使用済燃料（SNF）の再処理と再生核燃料の利用を通じて、資源自立・核拡散抵抗性・廃棄物管理・国際影響力の確保を目指している。本章では、その開発/発展の裏に存在する展開の工夫、意図の分析を狙った。

再処理の中核施設は、マヤーク（RT-1）とジェレズノゴルスクのMCC（PDC）となっている。RT-1は1970年代から使用済燃料を再処理しており、MCCではMOX燃料工場と連動した「パイロット実証センター（PDC）」が設けられ、軽水炉等由来の使用済燃料の処理・再資源化が進められている（MCCのMOX燃料工場の稼働は2015年。PDCでの民生用再処理は、1990年後半から既に実施）。ロシアでは、従来のPUREX法を応用しつつ、将来的にはREMIX燃料や高速炉用MOX燃料への展開を視野に入れ、再処理・粉末製造・燃料成形までを一体的に扱う体制を構築しつつある（SCC-ODEKでの完全クローズドサイクル施設への挑戦）。

そのため、ロスアトムは、**核燃料サイクル自体を、新しい製品ラインに位置付け、顧客向けに提供されるパッケージ製品として、1. 使用済み核燃料の再処理及び高レベル放射性廃棄物の分離、2. ウラン・プルトニウム燃料の製造、3. マイナーアクチニド（Np, Am, Cm など）の高速炉による消滅処理、4. 使用済み核燃料及び高レベル廃棄物の長期保管・輸送システムを含めた。**顧客は、個別サービスを選択することも、すべてのサービスを包括的に受けることも可能で、これらのサービスは、VVER、PWR、BWRなどの各種型式に対応して設計されており、顧客のニーズや制約に応じた個別設計も可能と説明されている。ロスアトムは、自社のサービスに関し、顧客から使用済み核燃料の長期的な扱いに関する不安（ロスアトムは短寿命の高放射性廃棄物を約30年間保管し、その後、顧客の国へ輸送し、中レベル放射性廃棄物とともに浅地中処分施設に最終処分する）を、ロスアトムが包括的に解消するという評価を得ているとアピールしている。**最終廃棄物の域内処理の原則を維持したうえで、顧客に30年間の時間的余裕を提供し、最終的に残る使用済み燃料の体積を7分の1にすることを提案している。**

一方、MA燃料の照射実績の蓄積はこれからであり、再処理方法、再加工後の燃料の種類/仕様の最適化は現在進行形である（R&Dレベル）、そのため、各国ともに本分野に参入する余地はあり、米国も先進的な分離技術、核変換技術の枠の中で、研究を継続している。

第3章の所見

G) 再処理技術開発の継続と燃料開発の成果

- ◇ **RT-2 施設は過大な設計**であり実現しなかったが、一部その施設を流用しながらも、再処理技術の維持/改良を実施した。
- ◇ 再処理施設の製造が延期された理由の一つには、短寿命の高レベル放射性廃棄物の分留や、一部まだ実施されているとされる低レベル・中レベル廃棄物の深井戸注入など環境への影響が挙げられる。放射性廃棄物を適切に処理する場合は、高コストになるのは当然であり、放射性廃棄物の処理方法に基づき、製品の差別化を行う余地はある。(ただし、ロスアトムは、最新の持続可能性基準を満たしており、「グリーンファイナンス（環境配慮型投資）」の対象となる可能性があると主張)
- ◇ ロシアが核燃料開発を実施している期間も、**かならずしも再処理のターゲット生成物が確定していたわけではない**。燃料の開発と並行し、仕様が決定され、その後、施設の拡張を実施している。使用済燃料の切断及び揮発性処理、SNF の溶解及び遠心分離機による清澄化、高レベル廃液の濃縮及びガラス固化、アクチニド含有 MOX 粉末の製造、ウラニル硝酸の脱硝（脱硝酸塩）、使用済み抽出剤の貯蔵など。ロシアの製造プロセスが**モジュール**と呼ばれるのは、このような基本プロセスの設置と拡張のような手順を繰り返しているからだと思われる。なお、製品や製造プロセスが確定してから、自動化を図る。
- ◇ **MCC の MOX 燃料製造工場（MFFF）**は、年間 400 体の**最大 30%のプルトニウムを含む MOX 燃料集合体製造能力**がある（BN シリーズ 5 基に供給するよう設計）。併設する PDC で再処理も可能であり、かつ二酸化プルトニウムに関しては、1970 年代から 1990 年代にかけて生成された在庫が、マヤーク施設に貯蔵されている。手動ではあるが、ネプチニウム-237 とアメリシウム-241 を含む **MA-MOX 燃料**の製造も可能（2023 年 12 月製造）。
- ◇ **REMIX 燃料は、MOX（10～30%）よりプルトニウム濃度が低く（2～5%）、19%濃縮ウランの補充は必要**。2016 年セヴェルスクにあるシベリア化学コンビナート（SCC）の化学冶金工場で、REMIX 燃料を含む燃料棒が製造される（MCC/SCC 共同製造を経て、将来的には SCC の新生産ラインで製造されることになるとと思われる）。2019 年 REMIX 燃料と MOX 燃料の両方を製造するための新技術を開発（水素・アンモニアによる還元プロセスを省略。混合物は固溶体の形）。2021 年パラコバ 3 号機での 3 燃料サイクルにわたるリード集合体（**燃料棒 6 本をそれぞれ搭載した TVS-2M 燃料集合体 3 体**）試験を終え、PIE のため、NIIAR に引き渡される（2023 年）。
- ◇ 窒化物燃料の BN-600 での燃料集合体照射は、2014 年に始まった。BOR-60、BN-10 等他の照射炉もいれるとこれまでに **1000 本以上の燃料ピンが照射**されている。SCC-ODEK の再処理施設及び BREST-OD300 はまだ完成していないが、**燃料製造・再加工モジュール(MFR)は既に稼働**している（BN-1200 用と BREST 用、両者とも製造）。
- ◇ BN-600 は、1980 年より **21%と 31%の UO₂ 燃料**で稼働、1987 年より **17%、21%、26%の 3 ゾーン炉心**。2010 年より**数十本規模の MOX 燃料を部分装荷**（試験装荷は、運転初期より）。窒化物燃料は、2014 年より試験装荷。振動充填燃料を含め、BN-600 は照射炉として

も活用されており、フル MOX 燃料で稼働している BN-800 と活用方法が異なる。BN-600 の炉心自体も線出力低下/炉心高さ増加、被覆管材料及び集合体材料改良等の設計最適化を通じ、運転期間/燃焼度の増加を 2005 年まで模索していた。

H) 核燃料政策の建前と本音（ウラン確保とインフラ整備）

- ◇ 再生ウランの生産と使用は、コスト的動機のみならず、戦略的な量の再生ウランを保持することを前提とする、再生ウラン管理の一環である。
- ◇ ウランの確保は、あくまで自国の安全保障等上の理由によるもので、そのため、強国は、免除条項等を活用し、国家の利益の確保を行っている（強国においては、建前上の理由は、あくまで建前）。
- ◇ 米国は、軽水炉で使用する燃料の濃縮度を 8%まで上げ、同時に輸送に関する機器等も準備しようとしている。UF₆ の供給は可能であるが、その後の移送や燃料製造については、まだ対応が追い付いていない。
- ◇ 高濃縮ウランやプルトニウムの非軍事/民生利用は、世界的に同意を得ることができる理念である。この理念のためには、**技術移転や資金援助もなされる**。日本においても、プルトニウムに余剰が生じたとしても、その解消には、交渉次第で米国などの協力を得られる余地は残されていると考えられる（米国の望む核不拡散体制の維持の名目）。
- ◇ 米国のワンススルー燃料サイクル政策は、**当面の間継続**すべき、つまり将来的に判断するという政策である。クローズド核燃料サイクルには、潜在的利益があるものの、そのためには**十分な訓練された労働力の確保を含む巨額かつ継続的な投資**が必要。米国には再処理施設、燃料製造施設、非軽水炉型先進炉、地層処分場といったインフラが現時点で存在していない。また、核拡散リスク、セキュリティ上の懸念、安全性の確保といった課題に対応する必要があることから選ばれた政策であり、その中で、優先順位の高いものからインフラ整備・技術整備（まずはフロントエンドのインフラ再生、材料試験、燃料認証。そして**分離、核変換技術の R&D**）をしていると考えられる。
- ◇ 米国において軽水炉は、基準とすべき一つのサイクル像となっており、将来的な核燃料サイクルの判断は、**軽水炉と比較した燃料利用率、廃棄物発生量、安全性と核不拡散性**によるものと考えられている。また、**受け入れ可能な廃棄物形態と処分オプション**が開発されることが条件として挙げられている（米国では、使用済み燃料は、政府責任下のストックとみなされており、ユッカマウンテンで、最終処分場問題の解をなくした連邦政府は、発電事業者に裁判で負け、使用済み燃料を引き取らないことによる違約金を支払い続けている。つまり、廃棄物発生量と形態にセンシティブ）。

I) ロシアの進める核燃料サイクルの製品化/サービス化

- ◇ ロシアは、核燃料サイクル自体を、新しい製品ラインに位置付け、顧客向けに提供されるパッケージ製品として、1. 使用済み核燃料の**再処理及び高レベル放射性廃棄物の分離**、2. ウラン・プルトニウム**燃料の製造**、3. マイナーアクチニド（Np, Am, Cm など）

の高速炉による消滅処理、4. 使用済み核燃料及び高レベル廃棄物の長期保管・輸送システムを含めた。

- ◇ 原子力発電所の運転事業者は、使用済み核燃料から回収された物質を用いた燃料の製造を発注することができ、中性子炉では、再生ウランを用いた燃料か、ウランとプルトニウムの混合物である REMIX 燃料を選択することができる（REMIX は開発中）。顧客がこのオプションを選ばない場合、再生されたウランとプルトニウムはロシア国内の原子炉用燃料として加工・使用される。
- ◇ 再処理・再利用サービスを発注する顧客は、輸送容器、高容量保管オーバーパック、それらを収容する施設もあわせて購入することが可能。トルコのアックユ原子力発電所で導入済み。
- ◇ バランス型核燃料サイクルサービスを発注した顧客に対して、ロスアトムは**短寿命の高放射性廃棄物を約 30 年間保管**し、その後、顧客の国へ輸送し、中レベル放射性廃棄物とともに浅地中処分施設に最終処分する。別の選択肢としては、この短寿命高放射性廃棄物を顧客国内のサイトで高容量オーバーパックに収納し、30 年間保管することで、放射能レベルが処分に適した段階に低下するまで保持することも可能。
- ◇ VVER-1200 型炉を 2 基備えた原子力発電所では、60 年間の運転で約 7,000 立方メートルの使用済み核燃料（容器込み）が発生するとロスアトムは評価。これを再処理すれば、最終的に残る使用済み燃料の体積は 7 分の 1 に削減され、**中レベル放射性廃棄物（固化マトリクスを含む）は、30 基の高容量オーバーパックにすべて収納**できる。一時保管と最終処分にかかるインフラコストは約 23%削減される。
- ◇ ロスアトムは、自社のサービスに関し、顧客から使用済み核燃料の長期的な扱いに関する不安を、ロスアトムが包括的に解消するという評価を得ているとアピールしている。

