

令和 4 年度原子力の利用状況等に関する調査 (海外における核燃料サイクル関連動向等調査) 報告書

目次

1. はじめに.....	1
1.1 事業目的	1
1.2 実施内容	1
2. 調査の視点	3
2.1 潮流から検討すべき事項の抽出.....	3
2.2 要検討事項から調査の視点の抽出	3
3. 諸外国調査結果.....	5
3.1 米国.....	5
3.1.1 米国の原子力・核燃料サイクル政策の概要	5
3.1.2 ウクライナ侵攻のサイクル政策への影響.....	17
3.1.3 使用済燃料の処理・処分、回収・劣化ウラン及びプルトニウムの利用方針・実績	21
3.1.4 原子力・核燃料サイクル関連施設、事業主体	24
3.1.5 ウクライナ侵攻の役務取引動向等への影響	41
3.1.6 原子力・核燃料サイクル関連の研究開発動向	46
3.1.7 革新炉開発におけるフロントエンド／バックエンド分野の政策・技術開発動向	64
3.1.8 フロントエンドに係るサプライチェーン.....	86
3.2 英国.....	89
3.2.1 原子力・核燃料サイクル政策の概要	89
3.2.2 ウクライナ侵攻のサイクル政策への影響.....	91
3.2.3 使用済燃料の処理・処分、回収・劣化 U 及び Pu の利用方針・実績	91
3.2.4 原子力・核燃料サイクル関連施設、事業主体	93
3.2.5 ウクライナ侵攻の役務取引動向等への影響	100
3.2.6 原子力・核燃料サイクル関連の研究開発動向	100
3.2.7 革新炉開発における FE/BE 分野の政策・技術開発動向	106
3.3 仏国.....	112
3.3.1 原子力・核燃料サイクル政策の概要	112
3.3.2 ウクライナ侵攻のサイクル政策への影響.....	117
3.3.3 使用済燃料の処理・処分、回収・劣化 U 及び Pu の利用方針・実績	118
3.3.4 原子力・核燃料サイクル関連施設、事業主体	127
3.3.5 ウクライナ侵攻の役務取引動向等への影響	141
3.3.6 原子力・核燃料サイクル関連の研究開発動向	145
3.3.7 革新炉開発における FE/BE 分野の政策・技術開発動向	147
3.4 ロシア.....	152

3.4.1	原子力・核燃料サイクル政策の概要	152
3.4.2	ウクライナ侵攻のサイクル政策への影響	156
3.4.3	使用済燃料の処理・処分、回収・劣化 U 及び Pu の利用方針・実績	157
3.4.4	原子力・核燃料サイクル関連施設、事業主体	166
3.4.5	ウクライナ侵攻の役務取引動向等への影響	171
3.4.6	原子力・核燃料サイクル関連の研究開発動向	173
3.4.7	革新炉における FE/BE 技術開発動向	175
3.5	中国	180
3.5.1	原子力・核燃料サイクル政策の概要	180
3.5.2	ウクライナ侵攻のサイクル政策への影響	188
3.5.3	使用済燃料の処理・処分、回収・劣化 U 及び Pu の利用方針・実績	188
3.5.4	原子力・核燃料サイクル関連施設、事業主体	192
3.5.5	ウクライナ侵攻の役務取引動向等への影響	198
3.5.6	原子力・核燃料サイクル関連の研究開発動向	198
3.5.7	革新炉開発における FE/BE 分野の政策・技術開発動向	202
4.	各調査視点における整理	206
4.1	ウラン燃料需給	206
4.2	回収ウランの利用	218
4.3	Pu 利用	221
4.4	革新炉の燃料供給／再処理	226
5.	おわりに	234
6.	参考文献	235

図 目次

図 2.1-1 世界的な潮流を踏まえ着目する核燃料サイクル関連項目を導出.....	3
図 2.2-1 着目する核燃料サイクル関連項目から調査の視点を導出	4
図 3.1-1 ウラン価格の推移(スポット、長期契約).....	43
図 3.1-2 長期契約締結状況の推移	45
図 3.1-3 ARPA-E 研究開発プログラムの位置づけ	51
図 3.1-4 再処理費用推定の報告表(CURIE FOA).....	55
図 3.1-5 Silex 技術プロセス図.....	61
図 3.1-6 米国で開発中の幅広い先進炉設計.....	69
図 3.1-7 ARPA-E 研究開発プログラムの位置づけ(再掲)	73
図 3.2-1 英国における核燃料サイクル事業構造.....	94
図 3.2-2 英国における SMR、AMR の TRL およびサプライチェーン能力.....	109
図 3.3-1 世界における Orano 社の採鉱活動.....	115
図 3.3-2 回収ウランの転換・濃縮に係る 2018 年契約の作業フロー	121
図 3.3-3 フランスにおける放射性廃棄物の分類と管理方法.....	127
図 3.3-4 フランスにおける原子力産業の資本関係(2022 年末現在)	128
図 3.3-5 仏 Orano グループの組織体制	129
図 3.3-6 フランスにおけるウラン転換 - 濃縮プロセス.....	131
図 3.3-7 フランスにおける使用済燃料のリサイクルプロセス	132
図 3.3-8 フランス国内における核燃料サイクル体制	133
図 3.3-9 世界の 4 大ウラン濃縮事業者の濃縮設備占有率(2021 年時点)	142
図 3.3-10 トリカスタンサイトと Georges Besse II プラント拡張部分の配置.....	144
図 3.3-11 燃料集合体における燃料棒の配置	145
図 3.3-12 石炭火力発電プラントを 34 万 kW の SMR でリプレイスした場合のレイアウト	148
図 3.3-13 UO ₂ 燃料ペレットのボロキシデーション処理.....	150
図 3.4-1 ロシアの原子力関係機関.....	154
図 3.4-2 ロシアの使用済燃料の流れ.....	161
図 3.4-3 OAO MSZ での回収ウランの製造実績(縦軸は燃料集合体数)	162
図 3.4-4 2 種類の MOX 燃料、及び熱中性子炉と高速炉の両炉を活用したクローズドサイクル.....	164
図 3.4-5 集中型核燃料サイクル	165
図 3.5-1 中国において原子力事業の規制等に関わる主要な政府機関	181
図 3.5-2 主要国におけるウランの生産量と原子炉関連のウランの必要量(2019 年 1 月 1 日時点)	182
図 3.5-3 中国の原子力発電設備容量とウラン鉱山及び濃縮施設の生産能力の経時変化	184
図 3.5-4 中国における国内産及び輸入ウランの採掘から発電に至るフローの概略図.....	184
図 3.5-5 「エネルギー技術革命重点創新行動ロードマップ」におけるバックエンドの研究ロードマップ	199

図 4.1-1 各年におけるウラン製造量と要求量[4-1]	206
図 4.1-2 ウラン製造量と要求量の累計[4-1].....	207
図 4.1-3 ヨーロッパにおける脱ロシア・継続ロシアの動向を示す国々	211
図 4.1-4 VVER からの燃料切り替えに関する動向	213
図 4.1-5 2040 年までの原子力発電設備容量増加の見込み[4-1]	214
図 4.1-6 2040 年までの天然ウラン需要の見込み[4-1].....	215
図 4.1-7 2040 年までの濃縮ウランの需要と供給の関係[4-7].....	215
図 4.1-8 現時点での濃縮ウラン供給の関係図	216
図 4.1-9 ロシア産燃料からの脱却が生じた際の濃縮ウラン供給の関係図	217
図 4.3-1 2 種類の MOX 燃料、及び熱中性子炉と高速炉の両炉を活用したクローズドサイクル(再掲)	223
図 4.3-2 集中型核燃料サイクル(再掲)	223
図 4.4-1 現在開発されている革新炉一覧(各国別の開発状況)[4-3].....	226
図 4.4-2 現在開発されている革新炉一覧(出力と開発段階)[4-3]	227
図 4.4-3 既存の PWR に関する知見と溶融塩炉検討における関係性	232
図 4.4-4 溶融塩炉導入による HLW 量と放射能低減に関するシナリオ検討	232

表 目次

表 2.2-1 3章における調査整理項目と4つの調査の視点との対応性	4
表 3.1-1 原子力サプライチェーンの評価テーブル(燃料関係)	12
表 3.1-2 国家ウラン備蓄の初回成約状況	15
表 3.1-3 米国の核燃料サイクル関連施設(IAEA/NFCIS、操業中施設)	25
表 3.1-4 米国の発電所使用済燃料の独立貯蔵施設	40
表 3.1-5 ウラン燃料の契約タイプ別購入量(2021 年)	42
表 3.1-6 国家ウラン備蓄の初回成約状況(再掲)	44
表 3.1-7 DOE の燃料サイクル研究開発(FCRD)予算	49
表 3.1-8 CURIE 選定プロジェクト一覧	53
表 3.1-9 米国で開発中の代表的な革新炉	68
表 3.1-10 ARDP 選定プロジェクト一覧	70
表 3.1-11 ONWARDS 選定プロジェクト一覧	74
表 3.1-12 ONWARDS 選定プロジェクト	77
表 3.1-13 主要先進炉設計で必要とされる FE/BE 技術開発	83
表 3.1-14 米原子力発電事業者が購入したウラン(2021 年供給、 U_3O_8 換算トン)	87
表 3.1-15 起源国別に見た米発電事業者のウラン購入量(2021 年供給、 U_3O_8 換算トン)	87
表 3.1-16 濃縮国別に見た米発電事業者によるウラン供給／濃縮役務購入量(2021 年供給)	87
表 3.1-17 濃縮国・ウラン起源国別に見た米発電事業者によるウラン供給量(2021 年供給)	88
表 3.2-1 AFCP 開始時から 2021 年までの各研究開発項目の TRL	101
表 3.2-2 AFCP における燃料サイクル技術開発ロードマップの概観	102
表 3.2-3 モジュール型原子炉の特性	110
表 3.2-4 AMR の TRL、今後の開発ニーズ及び課題	111
表 3.3-1 1972～1976 年までに締結された契約に基づく再処理実績	119
表 3.3-2 1977 年以降に締結された契約に基づく再処理実績	120
表 3.3-3 フランスのプルトニウム保有量	122
表 3.3-4 フランス国内の使用済燃料のストックの推移	124
表 3.4-1 ロシアの財務状況	155
表 3.4-2 ロシアの海外受注額ポートフォリオと収益総額	155
表 3.4-3 ロシア国内の使用済燃料貯蔵量(2017/1/1 時点)	158
表 3.4-4 ロシア国内での使用済燃料量	158
表 3.4-5 ロシアの濃縮施設	167
表 3.4-6 ロシアの燃料加工施設	168
表 3.4-7 鉱業化学コンビナート(MCC)における貯蔵施設の貯蔵方式	169
表 3.4-8 ロシアにおける再処理施設	170
表 3.4-9 FTP2010 の目標指数と指標	177
表 3.4-10 FTP の支出分野と資金源	177

表 3.4-11 ロシア国内の高速炉の運用状況.....	178
表 3.5-1 中国の原子力発電設備容量とウラン鉱山及び濃縮施設の生産能力の経時変化	183
表 3.5-2 中国国内におけるウラン採掘の状況	185
表 3.5-3 中国が出資している海外の鉱山におけるウランの生産等の状況	187
表 3.5-4 中国における高速炉の建設・運転現状.....	203
表 4.1-1 EU、米国におけるウランインベントリ(在庫)[4-1].....	207
表 4.1-2 2021 年における天然ウラン製造量[4-2]	208
表 4.1-3 商業 UF ₆ 転換施設[4-2]	208
表 4.1-4 商業ウラン濃縮施設[4-2]	209
表 4.1-5 ヨーロッパにおける各国のロシア燃料供給の動向.....	212
表 4.2-1 各国の回収ウラン利用実績と今後の方針	220
表 4.3-1 フランスのプルトニウム保有量(再掲).....	222
表 4.3-2 各国の Pu 利用実績と今後の方針	225
表 4.4-1 開発されている革新炉の燃料情報[4-3].....	228

1. はじめに

1.1 事業目的

2021年10月に閣議決定した「エネルギー基本計画」において、優れた安定供給性と効率性を有するほか、運転コストが低廉で変動も少なく、運転時には温室効果ガスの排出もないことから、安全性の確保を大前提に、長期的なエネルギー需給構造の安定性に寄与するとして、原子力は「重要なベースロード電源」と位置づけられている。この中で、核燃料サイクルについては、資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減等の観点から、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム等を有効利用する核燃料サイクルの推進が我が国の基本の方針としている。また、今後これまでの経緯等も十分に考慮し、引き続き関係自治体や国際社会の理解を得つつ取り組むこととし、再処理やプルサーマル等を推進することとしている。

昨今の核燃料サイクルをめぐる動向としては、一昨年に日本原燃の六ヶ所再処理工場・MOX 燃料工場等の核燃料サイクル関連施設が原子力規制委員会の規制審査に適合し事業変更許可を取得したほか、電気事業連合会が新たなプルサーマル計画を公表する等、核燃料サイクルに関する取り組みが大きく前進している。

一方で、国外に目を向けると、エネルギー安全保障やカーボンニュートラル等の文脈において、原子力・核燃料サイクルをめぐる環境、位置づけは大きく変化している。我が国において、引き続き原子力・核燃料サイクル政策を進めるにあたっては、国内だけでなく、海外の原子力・核燃料サイクルをめぐる現状と各国の方針を体系的に理解することが重要である。

このような状況を踏まえ、本事業は、エネルギー安全保障やカーボンニュートラル等の側面に着目しつつ、海外における原子力・核燃料サイクルの状況と政策方針について調査・分析することにより、今後の我が国の原子力・核燃料サイクル政策の企画・立案に資することを目的として実施した。

1.2 実施内容

諸外国における原子力・核燃料サイクルの現状・現在の基本方針・将来の動向を把握した。

【主な調査項目】

- ・ 原子力・核燃料サイクル政策の概要（政府と民間企業の役割分担、制度概要、方針等）と、使用済燃料の処理・処分方法、回収・劣化ウラン及びプルトニウムの利用方針・実績。
- ・ 原子力・核燃料サイクル関連施設（放射性廃棄物の処理・貯蔵・処分等を含む）の概要、稼働状況、実績、取組方針（海外受託を実施している、または実施する方針の国については、役務取引の実績と方針についても調査した）。
- ・ 諸外国における原子力・核燃料サイクル事業の主要な事業主体の概要、採用している

技術、それらの役務取引の動向、事業に対する政府等公的機関の関わり方、経営状況、今後の方針・戦略等。

- ・ 原子力・核燃料サイクル関連の研究開発動向（原子炉、再処理、燃料製造、放射性廃棄物の貯蔵・処分等）。
- ・ 特に公的研究開発の方針とプログラムの概要（予算規模、事業期間、事業者・公的機関等関連組織の役割、国際協力の有無等）、民間事業者の研究開発動向と開発技術の特徴等。

【調査対象国】

米国、英国、仏国、ロシア、中国

2. 調査の視点

2.1 潮流から検討すべき事項の抽出

諸外国における核燃料サイクル関連動向を調査するにあたり、調査の視点を検討した。

昨今の世界的な情勢を概観すると、カーボンニュートラルの達成を目指す潮流とエネルギー安全保障の向上を目指す潮流が存在していると言える。それらの潮流によって原子力発電が期待されることとしては、「原子力発電利用の伸張」があり、我が国においては、「既存軽水炉の最大活用」、「革新炉開発の加速」、「燃料供給の多角化・自給率向上」が望まれる。

その際、検討すべき事項としては、「再稼働の加速」、「再処理工場の運転開始」、「最終処分の立地選定」、「革新炉の選択」、「革新炉のフロントエンド／バックエンド」、「燃料供給体制の確立」がポイントになると考えられる。

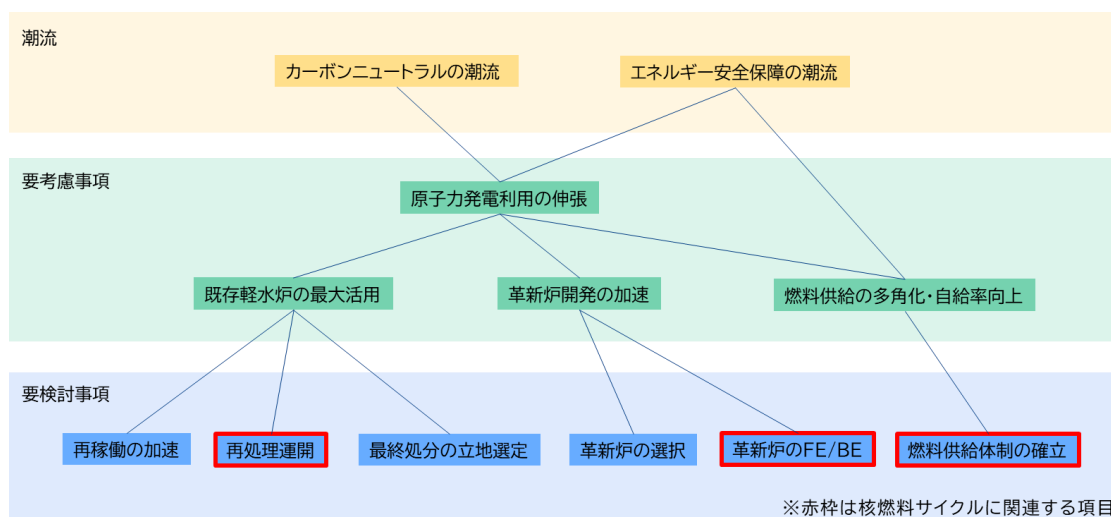


図 2.1-1 世界的な潮流を踏まえ着目する核燃料サイクル関連項目を導出

2.2 要検討事項から調査の視点の抽出

要検討事項として挙げた6つの項目の内、「再処理工場の運転開始」、「革新炉のフロントエンド／バックエンド」、「燃料供給体制の確立」が、特に核燃料サイクルに関連する項目と言える。それら3つの項目名称をより一般化し、「再処理技術」、「革新炉技術」、「燃料製造」とした上で、図 2.2-1 に示すとおりベン図を描いた。3項目をベン図で描いた理由は、各々の項目は互いに関連し合うためであり、その関連領域（重なり合う領域）にこそ、重要な論点（すなわち調査の視点）が存在していると考えたためである。

図 2.2-1 に描いたとおり、「燃料製造」からは「ウラン燃料供給」という視点を、「燃料製造」と「再処理技術」の関連領域からは「回収ウランの利用」という視点を、「燃料製造」と「革新炉技術」の関連領域からは「革新炉の燃料供給」という視点を、「革新炉技術」と「再処理技術」の関連領域からは「革新炉再処理」という視点を、全てが関連する領域からは

「Pu 利用」という視点を抽出した。

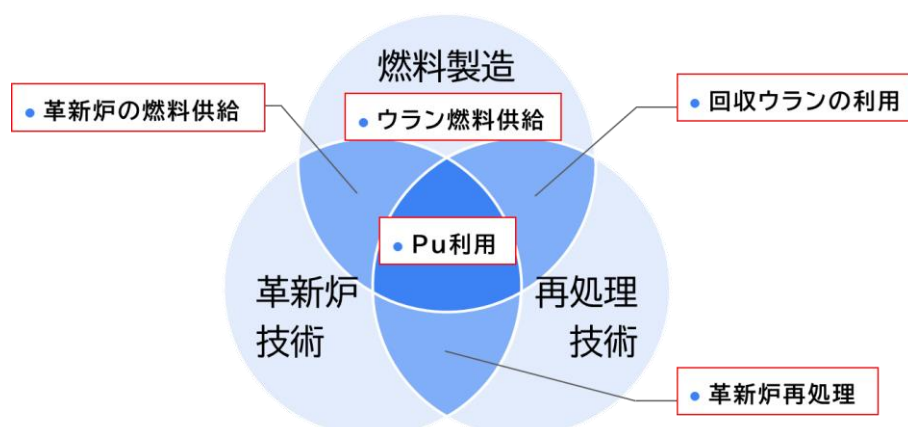


図 2.2-1 着目する核燃料サイクル関連項目から調査の視点を導出

調査の視点を改めてまとめると、「ウラン燃料供給」、「回収ウランの利用」、「Pu 利用」、「革新炉の燃料供給/再処理」の4点である。

3章で述べる5か国(米国、英国、仏国、ロシア、中国)の調査は、これらの4つの視点を取り込んで調査したものである。(表 2.2-1)

また、4章では、4つの視点毎に調査結果をまとめている。

表 2.2-1 3章における調査整理項目と4つの調査の視点との対応性

3章における各国調査整理項目	4つの調査の視点との対応関係
原子力・核燃料サイクル政策の概要	全般（基本情報）
ウクライナ侵攻のサイクル政策への影響	全般（基本情報）
使用済燃料の処理・処分、回収・劣化 U 及び Pu の利用方針・実績	特に「回収ウランの利用」、「Pu 利用」
原子力・核燃料サイクル関連施設、事業主体	特に「ウラン燃料供給」
ウクライナ侵攻の役務取引動向等への影響	特に「ウラン燃料供給」
原子力・核燃料サイクル関連の研究開発動向	特に「ウラン燃料供給」、「Pu 利用」
革新炉開発における FE/BE 分野の政策・技術開発動向	特に「革新炉の燃料供給/再処理」

3. 諸外国調査結果

3.1 米国

3.1.1 米国の原子力・核燃料サイクル政策の概要

(1) 核燃料サイクル政策の概要・経緯

1) 再処理方針から直接処分体制へ

米国の原子力利用は、第2次大戦中の核開発を継承して国に限定されていたが、1950年代に Atoms for Peace 政策及び1954年原子力法の制定により、原子力技術・事業の民間への移転が進んだ。原子力産業が民間事業として確立していく中で、再処理についても民間参入が奨励され、複数の建設プロジェクトが起ち上がった。再処理への民間参入の背景には、当時は将来のウラン不足が予測され、再処理も商業化可能との見通しがあった。なお、核燃料サイクルの中で、機微な技術である濃縮はその後も国有／国営が続いた。[3.1-1][3.1-2][3.1-3]

1960年代後半～1970年代前半には、ウェストバレー再処理施設が操業を開始し、他にもバーンウェル等複数の再処理施設の建設が進められたが、1969年国家環境政策法（NEPA）制定等環境規制が厳しくなる中で、再処理施設でも包括的な環境影響評価（EIS）が必要とされ、進行中だった許認可審査にも大きな影響を与えた。許認可審査に当る原子力委員会（AEC、当時）は、再処理で発生するプルトニウムの利用に係る「混合酸化物燃料（MOX）に関する一般環境影響評価（GESMO¹）」の策定に取りかかったが、訴訟も含めて難航し、バーンウェル等の許認可審査は遅延した。

そして、インドが核実験を行う中で、米国ではプルトニウムを生成する再処理について核拡散の懸念が指摘され、1976年にはフォード大統領の声明において、再処理の民営化は、プルトニウム非分離の技術、直接処分の研究、GESMO 補完のサイクル政策評価等核不拡散の検討を行うまで保留する方針が打ち出された。さらに1977年4月には、カーター大統領の核不拡散声明により民間再処理事業の無期限延期等が打ち出され、AEC 後継の原子力規制委員会（NRC）によるバーンウェル等の許認可審査もその後に停止された。カーター声明によって民間再処理が直接的に禁止された訳ではなく、また1981年にはレーガン大統領が再処理の無期限延期を解除したが、バーンウェル計画は政府補助がなければ経済的に成立しないとの判断から、中止された。

こうして米国における商業再処理が断念された理由としては核不拡散の問題が挙げられるが、その背景には、ウラン資源は潤沢にあり、使用済燃料の直接処分も技術的に可能

¹ “Generic Environmental Impact Statement on the Use of Recycled Plutonium in Mixed Oxide Fuel in Light Water Cooled Reactors”と題する一般的環境影響評価。

とされ、再処理／再利用が無くても原子力発電が可能との認識が広がったこと等がある。

1982 年には放射性廃棄物政策法(NWPA)が制定され、再処理を除外はしないが、使用済燃料の直接処分を前提としたバックエンドサイクルの枠組みが基本となった。使用済燃料は、連邦政府(具体的にはエネルギー省(DOE))が引き取って処分する責任体制が確立されたことで、再処理事業を行うには処分に向けて受容可能な廃棄体及びコストについて DOE と交渉が必要となる等の課題も生じることとなった。

NWPA の下での使用済燃料／高レベル放射性廃棄物(HLW)の地層処分場の開発については、処分場候補地として調査が続けられたネバダ州ユッカマウンテンにおける処分場計画は遅延したが、ブッシュ政権下で 2001 年にはサイト選定決議、2008 年には許認可申請書提出に至り、許認可手続が開始された。しかし、2009 年に誕生したオバマ政権がユッカマウンテン計画中止を決定し、廃棄物問題等を検討するブルーリボン委員会(BRC)で代替策が勧告される等したが、必要な法改正は実現せず使用済燃料管理政策は膠着状態が続いている。[3.1-4]

NWPA は、1987 年の改定でネバダ州ユッカマウンテンを唯一の処分場候補地と指定しており、BRC 提案にもあった同意に基づくサイト選定プロセスの確立等ユッカマウンテン計画の代替方策を進めるには NWPA 改定が必須となるが、実現していない。また、同じく BRC が勧告した集中中間貯蔵施設の早急な実現についても、NWPA では特定条件下で 1995 年まで実施された監視付回収可能貯蔵(MRS)施設²の開発以外では集中中間貯蔵施設の建設は処分場プログラムの進展に応じてのみ認めることとしており³、連邦政府による中間貯蔵施設の建設は NWPA 改定なしには進められない。オバマ政権下でユッカマウンテン許認可手続を停止した NRC 決定は違法とされ、許認可審査は再開されたが、連邦議会による予算配賦が行われないため、許認可手続も膠着状態で停止している。共和党が多数党となっていた 2017～2019 年の連邦議会では、ユッカマウンテン計画の再開等を規定した NWPA 修正法案が検討され、下院で可決されるに至ったが、最終的に両院合意の法案は可決されず、膠着状態に戻っている。処分場開発が膠着化する中で、使用済燃料の集中中間貯蔵施設建設を支持する気運が高まっているが、処分場プログラムが停止したまま連邦政府による中間貯蔵施設の建設を進めるには NWPA 改定が必須のため、現在はその準備的活動に留まっている。[3.1-5][3.1-6]

なお、2000 年以降においても、例えばブッシュ政権で再処理の可能性が探られた国際原子力パートナーシップ(GNEP)等の動きもあったが、結果として研究開発段階に留まるものとなっているため、3.1.6 の研究開発動向の中で報告する。

2) 米国の核燃料サイクル事業

米国では、Atoms for Peace 政策により民間原子力事業が奨励されてからは、核兵

² NWPA の規定により任命された廃棄物交渉官による自発的なサイト選定が試みられたが、サイト選定には至らず、期限とされた 1995 年 1 月で同プログラムは終了した。

³ 廃棄物交渉官によるものを除き、MRS(集中中間貯蔵施設)のサイト選定は処分場のサイト承認勧告後、MRS の建設は処分場の建設許可発給後までできないこととされている。

器開発にも直結する機微な技術である濃縮を除き、民生用原子力発電に係るフロントエンド分野は民間事業者によって担われてきた。また、濃縮事業についても 1998 年に USEC が民営化され、民間事業に移行した。米国ではフロントエンド産業について特に保護する体制はなく、後述するように国外依存が進み、特に近年はウラン採掘を中心として米国フロントエンド産業は衰退傾向にあった。[3.1-7]

バックエンドについては、1982 年放射性廃棄物政策法(NWPA)により使用済燃料の引取り・処分は連邦政府が行う体制となっている。使用済燃料の再処理は禁止されていないが、バーンウェル再処理施設が 1980 年代に廃止されて以降、経済性等の理由により再処理事業の取組はない。民間の原子力発電で発生した使用済燃料はサイト内等で乾式貯蔵されているが、本来は NWPA の規定に基づく契約により DOE が使用済燃料の引取義務を負っている。1998 年までに開始とされていた処分に向けての使用済燃料引取が行われないため、事業者からの訴訟により中間貯蔵費用相当の賠償金が連邦政府から支払われている。[3.1-6] DOE による処分場開発が遅れる中で集中中間貯蔵施設を建設する動きが官民で見られるが、政府による貯蔵開始には NWPA 改正が必須と考えられ、不透明性が高い⁴。[3.1-4][3.1-5]

3) 先進炉開発と核燃料サイクル政策—全米アカデミーによる評価

全米科学・工学・医学アカデミー(NASEM)は、2022 年 11 月末に「先進炉の様々な燃料サイクル及び技術オプションと廃棄物問題に係るメリットと可能性」と題する報告書(NASEM 報告書)[3.1-8]を公表し、政策オプションに係る勧告を行った。この NASEM による評価は、2020 会計年度⁵(FY20)及び FY21 包括歳出法における議会指示により DOE 契約の下で実施された。NASEM の評価委員会は 12 名で構成され、核セキュリティが専門の元 NRC スタッフの Lee 氏が委員長、2013 年までローレンス・リバモア国立研究所(LLNL)に在籍した Baisden 氏が副委員長を務めた。委員には、元民間放射性廃棄物管理局(OCRWM)局長の Chu 氏、元 NRC 委員長でブルーリボン委員会の委員でもあった MacFarlane 氏も名を連ねている。[3.1-8]

NASEM 報告書では、既存軽水炉(LWR)の燃料サイクルについて概観した上で、先進炉の状況・見通しと DOE プログラム、先進炉燃料サイクルオプションの評価、代表的先進炉(高温ガス炉(HTGR)、Natrium 炉、熔融塩炉(MSR))を中心とした廃棄物と処分オプションの評価、核セキュリティ関連の評価等が行われている。NASEM 報告書では、燃料サイクルに直接的に関連するものとして、以下の勧告が示されている⁶。

- ・ DOE は、2017 年原子力革新能力法(NEICA)[3.1-9]の規定に従って、2050 年までに実現可能な 2～3 の確実性高い先進炉技術・燃料サイクルの開発を支援すべ

⁴ 民間の集中中間貯蔵施設建設の動きについては、3.1.4(5)で報告する。

⁵ 米国の会計年度は、前年 10 月から当年 9 月までの 1 年間となる。(FY20 は、2019 年 10 月 1 日～2020 年 9 月 30 日)

⁶ この他に、処分・貯蔵・輸送に関する勧告が 6 件、核不拡散及びセキュリティに関する勧告が 3 件あり、全部で 15 件の勧告が出されている。

き

- ・ 先進炉支援のためには、議会と DOE は、材料試験及び燃料性能認定 (fuel qualification) 能力へのアクセスを確保する必要がある、そのためには DOE の原子力 (NE) 局及び科学局等の調整が必要
- ・ 外国からの HALEU⁷ 供給は不確実であり、DOE は、遅延、遅延時の政府の支援、DOE 保有の高濃縮ウラン (HEU) からのダウブレンド等の不足時対応計画を策定すべき
- ・ 既存 LWR 使用済燃料のワンスルーサイクルは当面継続すべきだが、クローズドサイクルのためのリサイクル／核種変換の可能性を評価する DOE 基礎研究は継続すべき
- ・ 議会及び DOE は、燃料サイクルにおける安全性改善へのインセンティブを設定すべき
- ・ 議会及び DOE は、先進炉技術及び関連の燃料サイクル要素の様々な実現シナリオの費用推定について独立的評価を手配すべき

(2) フロントエンド海外依存とサプライチェーン強化策、事業者救済措置

本項では、米国のフロントエンド部門の海外依存の状況及びその対応の経緯について報告した上で、バイデン政権が発足直後から取り組んでいたサプライチェーン強化の検討におけるフロントエンド事業の取扱い、さらには海外依存が進む中で検討・実施されてきた事業者救済の取組について報告する。

1) フロントエンド海外依存の概要・経緯

米国では、旧 CIS 諸国 (ロシア、カザフスタン、ウズベキスタン) 国有企業による低価格でのウラン供給が増加し、国内ウラン生産者や労組の申立てを受けた商務省 (DOC) 及び国際貿易委員会 (ITC) の調査でダンピングが認定され、1992 年 10 月に輸入割当を設定する協定が締結された。米国のウラン供給については、1987 年時点では民生需要の約半分が輸入であったのが、2018 年には約 93% が輸入に依存する状況となっていた。[3.1-10][3.1-11]

このダンピング問題の調査、協定締結交渉と並行して、1991 年 7 月の戦略兵器削減条約 (START) 締結を受けてロシアの HEU 及び余剰プルトニウムを米国が購入し、ダウブレンド等により民生利用する HEU 購入協定が米ロで締結されている。最終的に 1994 年に USEC (United States Enrichment Corporation、現セントラス・エナジー社に移行) とロシアの TENEX 社間で契約が締結され、1994 年～2013 年の 20 年間に 500t のロシア HEU が LEU (Low Enriched Uranium、U235 濃縮度 3～5% 未満の低濃

⁷ High-Assay, Low Enriched Uranium、U235 濃縮度 5～20% の低濃縮ウラン

縮ウラン⁸⁾にダウンブレンドして供給された。[3.1-12]

ダンピング停止協定は数次に亘り改定・更新されており、2020 年締結の改定協定では、2040 年までの期間延長とともに、輸入枠の減少が合意された。輸入枠は、2021 年は米国内濃縮需要の 24%、2028 年以降は 15%が上限に設定されている。その前の 2008 年改定では、HEU 協定の 2013 年終結を念頭に、2014～2020 年について米濃縮市場の 20%相当まで輸入枠が増やされていた。さらに、2008 年 9 月に連邦議会で可決された USEC 民営化法修正条項⁹⁾では、ロシアが HEU ダウンブレンドに合意する場合には追加的に 5%相当の輸入を認めることが規定されていた。これに対し 2020 年改定協定の修正内容も、USEC 民営化法 3112A 条の修正として FY21 包括歳出法 (PLaw-116-260) で規定され、輸入枠の減少が反映されている。[3.1-10][3.1-13][3.1-14][3.1-15]

こうした輸入枠増減の動きの背景として、以下のような状況が挙げられる。

- ・ 2008 年改定時は、米国では原子炉新設計画が相次ぎ「原子カルネサンス」と喧伝された状況であり、原子力発電事業者を代表する米国原子力協会 (NEI) は、HEU 協定終結を迎える中では広く国際ウラン・濃縮市場へのアクセスが認められるべきと主張していた。
- ・ これに対し 2020 年改定時は、米国における原子力発電の経済性悪化等により既存原子炉も多く閉鎖に追い込まれる状況となっており、燃料需要想定は 2008 年当時と大きく異なるものとなっていた。
- ・ また、中国の台頭が脅威と位置づけられる中で、国家安全保障を掲げて米国第一主義を唱えるトランプ政権下では、海外依存の低下と国内産業の強化が目指された。
 - ウランの海外依存が高まっていたこともあり、トランプ政権では国家安全保障の観点から検討が開始され、フロントエンド部門の海外依存脱却が必要とするワーキンググループ勧告も出された。

2020 年の協定改定における輸入枠削減に繋がったものとして、2018 年 1 月のウラン採掘・生産企業の申請を機に実施されていた DOC の調査がある。DOC は、輸入ウランが 93%を占める現状は米国の国家安全保障の脅威であるとの結論を 2019 年 4 月に大統領に報告した。トランプ大統領は、通商拡大法第 232 条規定の国家安全保障上の脅威との DOC 見解は斥けたが、ウラン燃料のサプライチェーン全体を検討対象とした国家安全保障に関する検討が必要として、ワーキンググループ設立を指示した。2020 年 4 月に公表された核燃料ワーキンググループ (NFWG) 報告書では、ウラン採掘の支援にとどまらず、フロントエンドや原子力産業の復活と強化、技術やスタンダードによる世界における主導的地位の確保、及び輸出競争力強化の 4 点について勧告等が示されていた。[3.1-16]

こうした中で連邦議会は、FY20 歳出法において、NE 局の燃料サイクル研究開発プログラムの下に、ウラン採掘時の廃水処理等の研究開発を行う「採鉱 (Mining)、転換及び

⁸⁾ 一般に濃縮度 20%未満のものを単に LEU と言う場合もあるが、本報告では HALEU と区別するため、既存の軽水炉用の燃料 (通常は 4.95%以下) を LEU としている。

⁹⁾ 2009 年セキュリティ・災害支援・継続予算包括歳出法 (H.R.2638, Pub.L 110-329) の第 8118 条で規定され、USEC 民営化法 (Public Law 104-134) に 3112A 条「ロシアからの追加的 HEU ダウンブレディングへのインセンティブ」が追加された。

輸送」サブプログラム(採鉱等サブプログラム)を新設し、2 百万ドルの予算を計上するとともに以下を DOE に指示した。なお、本サブプログラム予算は、DOE 要求にはなかった。[3.1-17]

- ・ 米国における採鉱・転換能力の再構築の主要課題を同定するため、連邦資金研究開発センター(FERDC)または独立機関と契約して議会に報告させる
- ・ HALEU の需要見通し及びその対応について評価する専門家チームを設置
- ・ HALEU 輸送の課題を同定し、議会に報告
- ・ 米航空宇宙局(NASA)の商業軌道輸送システム(COTS)のような官民パートナーシップ、成果報酬アプローチを濃縮能力開発に適用する上での法的制約等について議会に報告

その後 FY21 予算では、DOE は、ウラン供給に関わる予算として、採鉱等サブプログラムの 2 百万ドルに加え、国家ウラン備蓄プログラムを開始するための予算として 150 百万ドルも要求した。これに対し連邦議会は、予算金額は DOE 要求の半額となる 75 百万ドルでウラン備蓄プログラムの新設は認めたが、プログラムの所管は DOE/国家核安全保障庁(NNSA)に移された。[3.1-13][3.1-18]

フロントエンド部門については、2021 年に誕生したバイデン政権でも引き続きその重要性が認識されている。特に、後述するように 2022 年 2 月のロシアによるウクライナ侵攻後は、ロシアへの依存が高いフロントエンド部門の脆弱性の解消が急務として、DOE も NRC 規制情報会議(RIC)においてフロントエンドの国内化が必要との認識を表明している¹⁰。ただし、政権発足直後の FY22 予算要求では、採鉱等サブプログラムは継続されたものの、ウラン備蓄については NNSA と NE 局が準備中であるとして、さらなる予算は要求されなかった。[3.1-19]

一方、バイデン政権では、中国を主要な脅威と位置づける中で、経済全般に亘るサプライチェーンの脆弱性解消、強化が急務として、政権発足から間もない 2021 年 2 月 24 日にサプライチェーン強化の大統領令を発行した。この大統領令で対象として明示的に示されていたのは、DOE 関連ではバッテリーのサプライチェーンであり、他でもレアメタルや半導体等¹¹が列挙されていたものの、天然ウランや濃縮等のフロントエンド燃料サイクルについて、特に中心的な課題としては位置づけられていなかった。大統領令では、さらに、エネルギー部門等産業基盤のサプライチェーンについて 1 年以内に報告することが求められており、DOE のサプライチェーン報告書は 2022 年 2 月 24 日に発行された。また、報告書本体とは別に、原子力を含む 13 の領域について、詳細評価(Deep-Dive Assessment)レポートも公表されている。[3.1-20]

2) 政府のサプライチェーン強化政策とフロントエンド事業

DOE サプライチェーン報告書では、米国エネルギー部門のサプライチェーンに共通する

¹⁰ 2022 年 3 月 9 日開催の NRC 規制情報会議(RIC)に寄せたビデオメッセージで表明。

¹¹ これらのサプライチェーンについては、100 日以内に報告書提出が指示された。

リスク、脆弱性への戦略的な対応項目として以下の 7 点が示された。[3.1-21]

- ・ 天然資源の国内生産能力増強
- ・ 国内の製造能力拡張
- ・ 多様で信頼性高く、社会的責任を果たす海外サプライチェーン構築への投資・支援
- ・ クリーンエネルギーの採用・調達
- ・ エネルギー関連の最終廃棄物管理の改善
- ・ クリーンエネルギー移行のための熟練労働者の誘引・支援
- ・ サプライチェーンに係る知見及び意思決定の強化

その上で報告書は、連邦政府の取組における横断的／技術固有の政策戦略として 40 項目を挙げ、連邦議会による法的措置が必要な項目として 22 項目を勧告している。このうち横断的な戦略では、鉱山規制の効率化等一般的な記述が多く、特に原子力に係る記述は認められない。技術固有の戦略では、連邦政府／議会合わせて 24 項目の内 5 項目が原子力関連となっているが、いずれも先進炉開発等の研究開発、廃棄物問題に係るものであり、フロントエンド関連の直接的な言及はない。「ウラン」及び「濃縮」への言及は、それぞれ天然資源、国内製造能力拡張の例として挙げられているのみで、その対応に係る言及はない。

DOE サプライチェーン報告書の基盤となっている深掘り評価レポートの原子力版(以下「NE レポート」)では、先進炉の調達、及びその燃料の解決策に焦点が当てられている。NE レポートは、原子力サプライチェーンの強さは、原子力部門の強さ・成長に密接に絡むとして、ウラン等直接的な物の供給のみでなく、運転延長や早期廃止、国有企業との競争、省庁間合意、長期戦略等も扱うものとなっている。具体的には、直接的な燃料供給に係るフロントエンド関連のみでなく、炉やコンポーネントのベンダー、材料、サイバーセキュリティ等を含め、原子力利用を継続・発展させるためのサプライチェーン全般が評価されている。[3.1-22]

NE レポートでは、サプライチェーンを構成する要素は 10 項目の評価基準で評価され、国内供給力強化の取組の優先度が評価されている。表 3.1-1 はフロントエンドの核燃料に係る評価テーブル抜粋したものであるが、天然ウラン／転換／HALEU 濃縮／先進燃料製造については国内供給能力の強化が必要とされた一方、LEU 濃縮と燃料製造については強化の取組は必ずしも必要ではないとの評価結果が示されている。こうして DOE サプライチェーン報告書は、NE 局の詳細評価レポートを含め、ウランの国外依存等の脆弱性、リスクは指摘しつつ、全体的には先進炉開発を含めた原子力事業の拡大自体の重要性を強調するものとなっている。

表 3.1-1 原子力サプライチェーンの評価テーブル(燃料関係)

最終製品需要を満たすための SC セグメント	相当量の国内供給者	相当量の国内需要	相当量の国内需要見通し	大きな世界市場	大きな世界市場の見通し	国内供給者におけるコスト競争力	米国供給者の他国供給者とのコスト競争力	外国からの供給は十分に確実か	環境懸念に対応する取り組みは十分か	人権懸念に対応する取り組みは十分か	本製品/部品の国内供給力構築は合理的か
Raw Uranium and Milling	No [most is imported]	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Maybe	Maybe	?	Yes
Uranium Conversion	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Maybe	Maybe	?	Yes
Enrichment LEU	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	N/A	N/A	N/A	No
Enrichment HALEU	Not currently, but will ramp up	Not currently	Yes, for advanced reactors	Not currently	Yes, for advanced reactors	N/A currently	N/A	N/A	N/A	N/A	Yes
LWR Fuel Fabrication	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	N/A	N/A	N/A	No
Advanced Nuclear Fabrication	Not currently, but will ramp up	Not currently	Yes, for advanced reactors	Not currently	Yes, for advanced reactors	N/A currently	N/A	N/A	N/A	N/A	Yes

出所)DOE/NE, “Nuclear Energy – Supply Chain Deep Dive Assessment” [3,1-22]から引用

3) フロントエンド事業者の救済措置

米国のフロントエンド産業については、濃縮部門において、1990 年代に民営化された USEC に対して研究開発プログラム等の形で支援が行われてきた。近年では、ウラン燃料の外国依存が高まる中で、ウラン採掘業者から支援を求める声も上がっており。国家安全保障の観点等からフロントエンド産業の強化が必要として対応の動きが見られる。

前述のとおり米国では、2018 年 1 月のウラン採掘・生産企業の申請を機に DOC の調査が行われ、トランプ政権下で、燃料のサプライチェーン全体を検討対象とした国家安全保障に関する検討が行われた。2020 年 4 月に公表された NFWG 報告書では、ウラン採掘の支援にとどまらず、フロントエンドや原子力産業の復活と強化等の 4 点について勧告等が示された。トランプ政権では、具体的な対応として、ダンピング停止協定改定によるロシアからのウラン輸入枠の削減の他、NFWG 報告でも勧告された国家ウラン備蓄を創設するための予算要求も行われた。

続くバイデン政権では、中国の台頭に対する懸念等から、広範なサプライチェーン強化方針を打ち出し、前述のとおり原子力分野についてもフロントエンドを含むサプライチェーン強化の必要性が認識されたが、サプライチェーン報告は、特にフロントエンド産業の危機を強調するものとはなっておらず、事業者救済等の具体的な対応策も示されていない。国家ウラン備蓄についても、FY22 予算要求では追加予算も要求されず、2021 年 8 月になって制度設計のための情報要求(RFI)が行われたのみとなっていた。本調査では具体的な確認はできていないが、民主党議員には環境問題や先住民等を考慮した環境正義(environmental justice)の問題等からウラン採掘事業には慎重な意見も多いことが、国家ウラン備蓄に対する消極的とも見られる政策対応に繋がっていた可能性もある。¹²

そのバイデン政権においても、前述のとおり 2022 年 2 月のロシアによるウクライナ侵攻後は、ロシアへの依存が高いフロントエンド部門の脆弱性の解消が急務として、DOE もフロントエンドの国内化が必要との認識を表明する等一変している。ウクライナ侵攻のサイクル政策への影響については次項 3.1.2(1)で報告するが、以下ではウラン採掘を始めとするフロントエンド事業の分野別に、事業者救済措置の概要、経緯等について報告する。

a. ウラン採掘

米国におけるウラン採掘事業は、前述のとおり DOC による調査及びその後の NFWG での検討において危機的な状況と認識されており、以下で報告するように NFWG からウラン備蓄が勧告されたのに加え、DOC によるロシアとのダンピング停止協定の 2020 年 10 月の改定において、輸入枠の漸減が合意されている。ウラン採掘について、NFWG 報告書では、ウラン産業の支援及びフロントエンド部門の脆弱性の回復策として、国家によるウラン備蓄が取るべき戦略の 1 つとして勧告された。ウラン備蓄については、トランプ政権が NFWG 報告書公表の 2 カ月前に提出した FY21 予算要求書においても、150 百万ドル

¹² 後述するように、国家ウラン備蓄については、連邦議会においても民主党・共和党で判断が分かれていた。

が要求されていた。これに対し連邦議会は、2020 年 12 月に成立した FY21 歳出法において、最終的に DOE 要求の半額の 75 百万ドルの予算を認めたが、これは要求された DOE/NE 局ではなく国防活動関連の NNSA 予算として計上されている。[3.1-13][3.1-23][3.1-24]¹³

バイデン政権に移行後は、FY22 及び FY23 予算ともに国家ウラン備蓄プログラムの予算要求は行われていないが、FY21 予算の配賦を受けて DOE/NNSA は、会計年度終了も近い 2021 年 8 月に、国家ウラン備蓄の制度設計について意見を求める RFI を発行し、産業界からのインプットも含めて検討が開始された。NNSA による最終的な調達手続は遅れ、ロシアによるウクライナ侵攻から 4 カ月後となる 2022 年 6 月 30 日付で、国産ウラン購入の見積要請(RFP)を発行して国家ウラン備蓄のための調達手続が開始された。2022 年 12 月には複数のウラン採掘事業者から契約受注が報告されている。[3.1-25][3.1-26][3.1-27][3.1-28]

国家ウラン備蓄向けの受注契約の詳細・全貌について公式発表は示されていないが、調達のための RFP では、全体で 100 万ポンド(約 454 トン)の国産ウランを最大 4 社程度から購入すること、1 社からの購入量は 10 万～50 万ポンド(45～227 トン)とすること等が示されていた。なお、入札可能な事業者は、2009 年以降に米国内でウラン生産の実績を有する必要があるが、現時点では生産を行っている必要はなく、ウランの引渡しは、ハネウェル社の転換施設における在庫に対して帳簿上で行われることとされた。事業者は、受注から 14 日以内に在庫の持ち込みが必要とされた。

DOE は、バイデン政権下となった FY22 及び FY23 については国家ウラン備蓄の予算を要求していなかったが、2022 年 9 月 2 日にホワイトハウスが連邦議会に提出した「FY23 継続予算決議における歳出問題」において、ウラン調達のための予算として 1,500 百万ドルが要求されている。1,500 百万ドルの要求は、「ウクライナのための不可欠な要求」の 1 つとして計上され、ロシアからの供給減少を相殺するためにウランを確保するものとされている。具体的には、既存炉のための LEU 及び先進炉のための HALEU を獲得する等して、米国や友好国のロシア等の不安定なソースへのウラン燃料依存を減少させるための予算とされているが、詳細は示されていない。[3.1-29]

なお、NNSA プレスリリースでの発表はないが、2022 年 12 月には以下の 5 社からウラン備蓄向け受注情報が伝えられている。[3.1-30][3.1-31][3.1-32][3.1-33][3.1-34]

¹³ FY21 歳出法の検討過程では、民主党優位の下院版法案では国家ウラン備蓄の創設を否認、共和党優位の
上院で検討された法案では(一部 NNSA への配分替えはあるものの)全額承認と、明暗が分かれていた。下院
法案付随の報告書では、商業目的の備蓄創設が市場に与え得る影響や備蓄の正当性への疑問等を懸念してい
ることが、予算否認の説明の中で示されていた。

表 3.1-2 国家ウラン備蓄の初回成約状況

受注発表事業者名	受注量(千ポンド)	価格(\$/ポンド)
Uranium Energy Corp (UEC)	300	59.50
Strata Energy (Peninsula Energy)	300	不明
Energy Fuels Inc.	18.5 百万ドル*	不明
Ur-Energy Inc.	100	64.47
enCore Energy Corp.	100	70.50

*Energy Fuels 社は受注金額のみを発表¹⁴

出所)各社プレスリリースから作成

b. 転換

米国で唯一の転換施設であるハネウェル社の Metropolitan Works(MTW)転換施設は、市場環境悪化から 2017 年に停止状態となっており、NFWG 報告書では、ウラン採掘と並んで脆弱な事業として対策の必要性が指摘されていた。NFWG が勧告し、トランプ政権下で予算が確保された国家ウラン備蓄は、転換施設の再稼働のためにも有効な短期的措置と位置づけられている。[3.1-16]

こうした政府の対応が進む中で、ハネウェル社は、2020 年のダンピング停止協定の改定でロシアからのウラン、転換役務輸入に歯止めが掛かるようになったこと、ウラン国家備蓄の開始により一定の転換需要が見込まれることになったこと、そうした中で 2020 年に米電力業界顧客から長期契約の意向が得られたこと等から、2023 年からの転換施設の操業再開を決定するに至っている。ハネウェル社は、2021 年 2 月に NRC に操業再開の予定を通知し、人員の確保等準備作業を開始することを伝えている。なお、ハネウェル社の MTW 転換施設の操業に係る NRC 許認可は、2020 年 3 月に 40 年間の延長が NRC に承認されており、このことも操業再開のリスク低減に繋がったとされている。[3.1-8]

c. 濃縮

米国では、2000 年代に入って原子力カルネサンスの動きが見える中で、濃縮分野においてもプラント新設を含め濃縮能力の拡張が見込まれていたが、原子力発電を取り巻く環境悪化とともに発電プラント新增設プロジェクトの殆どが中止されて濃縮需要見通しも変わったことで濃縮能力増強の動きの多くも凍結／中止され、順調に稼働したプラントは Urenco USA のガス遠心分離濃縮プラントのみとなっていた。

米国の濃縮事業については、マンハッタン計画以来の国有の濃縮事業が民営化された USEC も、ガス遠心分離方式の米国遠心分離プラント(ACP)について、2007 年に NRC 許認可を取得して開発を進めてきた。USEC の ACP 開発については、DOE の研究開発プログラムの枠組みを通して度重なる支援が行われていたが、事故等もあって開発は遅れ

¹⁴ エナジー・フューエルズ社の受注量は不明だが、3 社が発表している価格等から考えると、300 千ポンド程度の受注量ではないかと推測される。

た。USECは、資金難等から2013年12月に再建計画を発表し、破産裁判所の承認を得て、2014年9月にセントラス・エナジー社として事業を再開することとなった。DOEは、オークリッジ国立研究所(ORNL)の委託運営者を通じてセントラス・エナジー社とACP技術のRD&D継続を目的とした契約を2014年5月に締結する等支援し、ACP開発が続けられてきた。

DOEは、2019年には、HALEUの生産実証試験をACPで実施する契約をセントラス・エナジー社と締結し、3年間で16台のACP建設が進められた。本契約では、ACPを建設した上で2022年6月までに200kg～600kgのHALEUを生産することとされていたが、新型コロナウイルス感染症の拡大を受けたサプライチェーンへの影響等から費用・スケジュール上の問題が発生し、2022年1月時点での完成度が92%と、期限内の実証設備の完成、実証運転は不可能となった。DOEは、未了となる実証設備の完成及びHALEUの生産について、セントラス・エナジー社との契約に続く契約調達のRFP案を、2022年2月と3月の情報要請(sources sought)で公表した上で、2022年6月28日にRFPを発行した。このRFPでは、設備完成とその後10年後までのHALEU生産について、段階的に分割した調達公募の形が示された。セントラス・エナジー社への指名発注には批判も寄せられており、本RFPでは競争的公募の形態が取られているが、対象事業は現行のACP設備建設を引き継ぐものであり、従業員を最大限に活用すること等の条件が付されていた。DOEは2022年10月に、セントラス・エナジー子会社への発注決定を発表し、セントラス・エナジー社によるHALEU実証プロジェクトの継続実施が決定している。[3.1-8][3.1-35]

連邦議会では、セントラス・エナジー社支援の側面も併せ持つACPによるHALEU実証プログラムを含め、広くHALEUの確保を図るための積極的な予算確保が行われており、米国濃縮事業者を支援するものとなっている。特に、ウクライナ侵攻後の2022年8月16日に成立した2022年インフレ抑制法(Inflation Reduction Act, H.R.5376)では、HALEU確保のために700百万ドルの予算が、通常の歳出法の枠外の予算として計上された。このうち500百万ドルは、2020年エネルギー法¹⁵で規定されたHALEU確保策を実現するものであり、DOEの在庫または濃縮によるHALEUの調達・提供のための活動等の予算とされている他、100百万ドルは広く「HALEU確保を支援するための活動」としてDOEの裁量が可能な予算として計上されている¹⁶。このインフレ抑制法における予算配賦に対し、セントラス・エナジー社は、「HALEUの生産・輸送のためのインフラ構築には数年に亘る官民の投資が必要であり、インフレ抑制法における700百万ドルは、こうした取組への重要な第一歩(down payment)である」等と表明している。また前述のとおり、2022年12月29日に成立したFY23包括歳出法では、ウクライナ特別追加予算として、さらに100百万ドルがHALEU確保のための先進燃料利用可能性プログラムとして承認

¹⁵ Energy Act of 2020。2021年包括歳出法(Consolidated Appropriations Act, 2021, Public Law 116-260)の一部(Division Z)として制定されている。

¹⁶ 2020年エネルギー法では、DOEまたは事業者による濃縮の他、DOE保有のHEUのダウブレンドも含めて迅速にHALEUを確保する方策を検討することをエネルギー長官に指示している。

されている。なお、DOE 予算の HALEU 確保プログラムの中心的な活動は、ACP における HALEU 生産実証プログラムであるが、連邦議会両院は DOE に対し、プログラムを競争的に進めることを指示している。[3.1-36][3.1-37][3.1-38][3.1-52]

その他、連邦議会ではロシアへの燃料依存を解消するために LEU や HALEU の支援を図る法案が数多く提出されている¹⁷。[3.1-39]

d. 燃料加工

前述のとおり、2020 年 4 月の NFWG 報告書では、燃料加工を含むフロントエンド部門全般で競争力を強化し、海外依存の解消が重要とされている。燃料加工に係る具体的な勧告としては、「国家安全保障の目的から、ロシアまたは中国で加工された核燃料の輸入を否認する権限を原子力規制委員会(NRC)に付与する」ことが謳われた。しかし、その後バイデン政権では燃料加工に関する具体的な対応策は示されていない。また、本勧告を実現するための法案も一部議員から提出されているが、本会議での実質的な審議には至っていない。[3.1-16][3.1-39]

なお、ロシアからの加工燃料輸入を禁止するものではないが、2021 年 11 月に制定された「インフラ投資・雇用法」(Infrastructure Investment and Jobs Act, H.R.3684)では、経済上の理由から閉鎖の危機にある既存原子力発電所を支援する「民間原子力クレジット(CNC)プログラム」において、DOE による支援対象プラント選定時の優先項目として、「米国において生産、転換、濃縮、及び燃料集合体に加工されたウランを、可能な限り最大限使用する原子炉に優先権を与える」ことが規定されている。2022 年 11 月に CNC プログラムの第 1 ラウンドで選定されたカリフォルニア州の Diablo Canyon プラントは、最も直近で閉鎖危機にあることが主な選定理由とされており、国内加工燃料優先規定の実質的な効果は確認できる段階ではないが、今後の CNC プログラムの運用、及び発電事業者の対応が注目される形となっている。[3.1-40][3.1-41]

その他連邦議会では、ロシアへの燃料依存を解消するため、ロシアで加工された燃料の輸入を禁止する法案も、ウラン産出州の議員から提出されている¹⁸。[3.1-39]

3.1.2 ウクライナ侵攻のサイクル政策への影響

前述のとおり、近年の米国では燃料加工以外のフロントエンド分野の殆どを国外に依存する状態となっていた。ウラン採鉱施設の多く及び転換施設は操業停止、濃縮施設も 1 カ所のみが操業という状況に、国家安全保障上の危機との認識も強まり、トランプ政権下でウラン国家備蓄が創設される等フロントエンド産業を立て直すための対応策が 2020 年頃から取られ始めていた。しかし、2021 年からのバイデン政権への移行も挟み、その後の動きは必ずしも迅速ではなかった。ウラン及び濃縮役務の一大供給国であるロシアによる 2022 年 2 月のウクライナ侵攻は、米国政府におけるフロントエンド問題対応の優先度を

¹⁷ 具体的な法案の例は次項(3.1.2)に記載

¹⁸ 具体的な法案の例は次項(3.1.2)に記載。

高めるものとなっているが、具体的な対策が完全に出揃ったとは言えない状況である。

以下では、ウクライナ侵攻後の米国政府・議会の反応、対応の概要について既述の救済施策等を含めて再整理、報告するとともに、大きな焦点となっているロシアからのウラン輸入問題に深く関わるダンピング停止協定についても、経緯情報を含めて報告する。

(1) ウクライナ侵攻後の核燃料サイクル政策を巡る動き

ロシアによるウクライナ侵攻後は、ロシアに対する安全保障上の懸念も高まり、フロントエンドの内製化を目指す動きが政権・議会の双方で見られるが、その直後に公表された FY23 予算等では、必ずしも明確な方策は打ち出されていなかった。2022 年 3～4 月にかけて議会に提出された FY23 予算要求資料では、サプライチェーン大統領令への対応としてサプライチェーン関連の予算は要求されているものの、特にウクライナ関連の言及はない。FY23 予算要求はウクライナ侵攻以前に実質的に策定済であったと思われるが、ウラン備蓄等フロントエンドの内製化のための新たな予算要求や言及も見られなかった。また、ウクライナ侵攻当日の 2022 年 2 月 24 日に公表された DOE サプライチェーン報告書では、前述のとおりウランのロシア依存度の高さ等リスクは指摘されていたものの、FY23 要求で具体的にそのリスクに対応する予算は要求されなかった。FY23 予算要求では、核燃料サイクル及びサプライチェーンを支援するプログラムと位置づけられた採鉱・転換等プログラムの予算は減額、国家ウラン備蓄は要求無しと、フロントエンド分野の特段の対応は想定されていなかった。[3.1-25][3.1-26]

また、FY23 予算要求におけるエネルギー関連サプライチェーンの要求内容についても、以下が示されているのみとなっている。これらは原子力関連も対象となると考えられるが、特段の具体的な言及はされていない。

- ・ 「サイバーセキュリティ、エネルギーセキュリティ及び緊急時対応」プログラム予算で、サプライチェーン・リスク管理の予算要求を大幅に増額(本プログラムは、トランプ政権下で FY19 から開始されていたが、FY23 ではサプライチェーンが大きな焦点)
- ・ 「製造業・エネルギーサプライチェーン局 (Office of Manufacturing and Energy Supply Chains)」を設置し、技術者養成を含めたサプライチェーン強化活動を実施

このようにバイデン政権の FY23 予算要求は、本来の提出期限の 2 月から遅れてウクライナ侵攻から 1 カ月後に公表されたにも拘わらず、ウラン等フロントエンド関連の特別な言及や対策は表明されず、ウラン備蓄等を提案したトランプ政権の予算要求から後退するものとなっていた。これに対し、ウクライナ侵攻後は、ロシアを非難し制裁強化を訴える声が連邦議会でも高まる中で、DOE もロシアからのウラン燃料の輸入を見直す方針を明らかにしている。2022 年 3 月 9 日の NRC の規制情報会議(RIC)に寄せたコメントで、エネルギー長官は、ロシアによるウクライナ侵攻を受け、「米国の原子炉の燃料を敵に依存するわけにはいかない」として、ウラン採掘・精錬、転換、濃縮の燃料サイクルの国内供給の重要性を強調した。[3.1-42]

ウクライナ侵攻後は、連邦議会の共和党議員からは石油・ガス国内生産増加に消極的で

エネルギー危機を招いている等として政権を非難するとともに、ウランについてもロシア依存解消を訴える声が多く見られる。特に上院エネルギー天然資源委員会少数党最上席議員(ranking member)の Barrasso 議員(ワイオミング州選出)は強硬で、ロシアからのウラン輸入禁止やウラン戦略備蓄構築のための法案も提出している。他議員提出分も含め、ウクライナ侵攻前の 2021 年以降に連邦議会で提出された法案の例を以下に示す¹⁹。

- ・ 原子力の隆盛(prosperity)とセキュリティ法案(H.R.1351)＜2021 年 2 月 15 日提出＞[3.1-43]
ウラン国家備蓄の創設と運用開始(ロシア・中国が所有／管理する事業者は除外)
[Latta 下院議員(共和党、オハイオ州)]
- ・ 未来のための核分裂法案(S.3428)＜2021 年 12 月 16 日提出＞[3.1-44]
LEU 及び HALEU の米国内での生産を増加するための核燃料セキュリティプログラムの創設等を規定
[Manchin 上院議員(民主党、ウェストバージニア州)]
- ・ ロシア連邦からのウラン輸入禁止法案(S.3856、H.R.7222)＜2022 年 3 月 16 日提出＞[3.1-45]
ロシアからのウラン精鉱や濃縮ウラン等の輸入を禁じる法案
[Barrasso 上院議員(共和党、ワイオミング州)、Stauber 下院議員(共和党、ミネソタ州)]
- ・ 2022 年-米国におけるウラン供給サービス回復の国家的機会法案(“NO RUSSIA Act”, S.3978、H.R.7403)＜2022 年 3 月 31 日提出＞[3.1-46]
ウラン戦略備蓄の予算を DOE/NE 局に移管して即時の実施、米国内でのウラン生産／転換／濃縮能力確保のプログラム実施等
[Barrasso 上院議員、Latta 下院議員]
- ・ 2022 年-米国の原子力の将来への燃料供給法案(S.4066、H.R.8723)＜2022 年 4 月 7 日提出＞[3.1-47]
民間事業者による HALEU 生産の加速及び DOE 保有 HEU 希釈による HALEU 確保等
[Barrasso 上院議員、Luria 下院議員(民主党、バージニア州)]

また、2022 年 4 月 27 日には、下院エネルギー商務委員会の共和党幹部が、ウラン備蓄の進捗について問い質すとともに、ロシアからのウラン／濃縮供給停止時の対応等フロントエンド・サプライチェーンの脅威への対応について質す書簡をエネルギー長官に送っている。[3.1-39][3.1-48]

エネルギー長官は、上院エネルギー・天然資源委員会の 2022 年 5 月 5 日の聴聞会で、ウランその他のエネルギーのためにロシアに資金を送るべきではないとして、包括的なウラン戦略を策定中であることを明らかにした。エネルギー長官は、ロシアからの輸入を直

¹⁹ 両院で同内容の法案が提出されているものについては、提出日は先に提出された法案の日付を記載している。(参考文献についても先に提出の法案のみを記載)

ちに停止する場合には、HALEU 供給のみでなく運転中の民間原子炉の燃料供給に支障がないことも確保する必要があるとして、DOE 内で検討が行われているとしている。5 月 27 日には、エネルギー長官が上院エネルギー天然資源委員会の Manchin 委員長に宛てた書簡で、ロシア輸入依存の脆弱性を認識した上で、LEU の国内生産のための資金を要求する書簡を出したことが報道されている。[3.1-49][3.1-50]

DOE は、FY22 及び FY23 については国家ウラン備蓄の予算を要求していなかったが、2022 年 6 月 30 日に備蓄のためのウラン購入の RFP を発行して調達手続を開始した。さらに、2022 年 9 月 2 日にはホワイトハウスが連邦議会に提出した「FY23 継続予算決議における歳出問題」において、ウラン調達のための予算として 1,500 百万ドルが要求²⁰されている。1,500 百万ドルの要求は、「ウクライナのための不可欠な要求」の 1 つとして計上され、ロシアからの供給減少を相殺するためにウランを確保するものとされている。具体的には、既存炉のための LEU 及び先進炉のための HALEU を獲得する等して、ロシア等の不安定なソースへの米国や友好国のウラン燃料依存を減少させるための予算とされている。[3.1-19][3.1-26][3.1-29]

なお、9 月 30 日に成立した FY23 継続予算・ウクライナ補正歳出法(H.R.6833、Public Law 117-180)では、ウクライナ対応として DOE/NNSA に 35 百万ドルが計上されているが、議会資料では「核・放射線事象への準備・対応」が例示されているのみで、ウラン備蓄等の言及はなかった。一方、12 月 29 日に成立した FY23 包括歳出法(H.R.2617、Public Law 117-328)において HALEU のための先進燃料利用可能性プログラムとして 100 百万ドルが配賦されている。前述のとおり 8 月 26 日成立のインフレ抑制法で既に 700 百万ドルの歳出予算が HALEU 確保のために特別に承認されており、合わせて 800 百万ドルの予算が配賦されたこととなる。FY23 包括歳出法では、国家ウラン備蓄のために明示された予算は配賦されていない。[3.1-36][3.1-51][3.1-52]

(2) ロシア産ウラン輸入禁止議論と反ダンピング調査停止協定の関係

以上のようにウクライナ侵攻後は、経済制裁の観点も含めてロシアからの核燃料輸入禁止の議論が続いているが、一方で、米国はロシアとの間で反ダンピング協定を締結し、DOC が設定する輸入枠までのウラン及び濃縮役務の輸入を認めている。以下では、両者の関係について報告する。[3.1-16]

- ・ DOC による輸入枠設定は、ロシア起源の天然ウラン(イエローケーキ等を含む)及び濃縮ウランに対するものであるが、NFWG 報告書において NRC による輸入否認権限が勧告されたのはロシア・中国で成型加工された加工燃料に対してであり、対象が異なる。
 - DOC による輸入枠設定は、ロシア産ウランに対する反ダンピング関税調査を停止する 2 国間協定で設定されたもので、ウラン採掘・濃縮等の米フロントエンド産

²⁰ FY23 予算要求は 2022 年 2 月に議会に提出されているが、ウクライナ問題への対応等で、「FY23 継続予算決議における歳出問題」として緊急に追加の予算を要求したものの。

業が損なわれるとの懸念に対応するもの

- 一方、NRC へのロシア産燃料の輸入否認権限付与勧告は、ロシア・中国が加工燃料の米国市場展開を図った場合に輸入を制限／禁止する対応を、トランプ政権下で設置された NFWG が勧告したもの

NRC への輸入否認権限付与に係る NFWG の勧告は、米燃料加工産業の保護を目的としたものであり、ロシア産ウランの輸入が DOC 設定の枠内に収まっている状態でも、ロシア／中国製燃料の米市場進出が脅威となった場合には必要とされる措置と位置づけられている。NFWG 勧告では、ロシア国有企業の TVEL が 2008 年から米国で運転中の原子炉の燃料市場に進出するプロジェクトを開始しており、現状ではその動きはないものの将来にはあり得ることと指摘した上で、「仮にそうした事態が生じる場合には、ロシアや中国で加工された燃料の輸入を制限／禁止する大統領令による迅速な行動を支持する」とした。

一方で DOC による輸入枠設定について NFWG は、ダンピング調査停止協定は米濃縮産業壊滅を防ぐ唯一の方策である等として、協定の延長及び更なる輸入枠減少に向けた DOC の取組に支持を表明していた。

DOC 設定の輸入枠、及び加工燃料輸入制限勧告は、何れもロシア等海外依存によるフロントエンド産業衰退を懸念したものでウクライナ侵攻以前からの動きであり、連邦議会においても、ウクライナ侵攻以前から同様の輸入否認権限を NRC に与える法案が提出されていた²¹。これに対しウクライナ侵攻後は、さらに対ロシア経済制裁の観点も加わり、ダンピング調査停止協定で設定された輸入枠に関わらず、ロシアからのウラン自体の輸入を差止める法案が連邦議会で提出され、ウラン輸入禁止に向けた議論が、政権及び連邦議会で多く見られるが²²、具体的な施策は示されていない。前述のとおり、DOE は、ロシアからのウラン輸入等が消失した場合に米国電気事業者向けの供給に支障が出ることがないように、包括的なウラン戦略を立案中としている。[3.1-39][3.1-14][3.1-53]

3.1.3 使用済燃料の処理・処分、回収・劣化ウラン及びプルトニウムの利用方針・実績

(1) 使用済燃料の処理・処分

1) 概要

3.1.1(1)で示したように、米国では当初、使用済燃料は再処理を行うことが前提とされていたが、核拡散リスクへの懸念等から 1970 年代後半に方針が変更され、使用済燃料の

²¹ ワイオミング州選出の Barrasso 上院議員が 2020 年 11 月 16 日に提出した 2020 年米国原子力インフラ法案(S.4897)では、ロシア・中国政府が所有／管理する事業者が製造した核燃料の保有には特別な許可が必要なこと、エネルギー長官及び国務省長官との事前の協議で国家安全保障への脅威が懸念される場合には NRC が特別許認可発給を否認すること等が規定されていた。

²² 連邦議会で提出された法案例については、3.1.2 参照。

直接処分を想定した NWPA が 1982 年に制定され、地層処分場の開発が進められた。1987 年には NWPA が改定され、サイト候補地の中からネバダ州ユッカマウンテンが唯一のサイト候補地に指定された。当初予定から大幅に遅れて 2008 年にユッカマウンテンにおける処分場建設・操業の許認可申請書が提出され、許認可審査が進められたが、オバマ政権がユッカマウンテン計画中止を決定したこと等を受け、停止状態にある。オバマ政権では、ユッカマウンテン計画に代わる代替方策が、BRC の設置を含めて検討されたが、連邦議会での法改正は実現せず膠着状態が続いている。[3.1-5][3.1-6]

米国では、連邦政府(DOE)が使用済燃料の引取・処分の責任を持つが、処分場開発の遅れから引取は実現しておらず、各発電所のサイト内等で乾式貯蔵(ISFSI)が行われている。ISFSI での貯蔵は、既に廃止措置済みの発電所サイトでも継続しており、集中中間貯蔵施設の実現が重要課題となっている。DOE による中間貯蔵施設開発の取組とともに、民間での中間貯蔵施設の開発が進み一部 NRC 許認可も発給済みであるが、民間貯蔵施設も連邦政府による貯蔵を想定していること等から建設予定は具体化していない。

2) 処理・処分の実績

米国では、Atoms for Peace 政策の一環として使用済燃料の再処理についても民間移行が奨励され、ニュークリア・フューエル・サービス(NFS)社のウェストバレー再処理プラントにおいて 1966～1972 年に 625.7 トンの再処理が実施された。しかし、1970 年代に入って環境規制の強化、採算性悪化、核拡散の懸念等から連邦政府も再処理停止方針に転じ、他の建設中プロジェクトも含めて民間再処理事業はすべて廃止されている。[3.1-1][3.1-3][3.1-54]

米国の民間原子力発電所からの使用済燃料の発生量は、2017 年末までの累計で約 79,825 トンとなっている。また、現行の稼働中プラントから今後発生する使用済燃料を含めた合計の処分想定量は、約 140,179 トンと推定されている。米国では、軍事活動起源の DOE 保有の使用済燃料及び HLW もあり、その処分総量は約 14,000 トンとされている。[3.1-6][3.1-55]

(2) 回収・劣化ウラン及びプルトニウムの利用方針・実績

1) 概要・利用方針

(回収ウラン、プルトニウム)

米国において、民生部門では、使用済燃料の再処理は 1970 年代を最後に以後は実施されておらず、回収ウラン及びプルトニウムも発生しない。

(劣化ウラン)

米国において劣化ウランは、1954 年原子力法の規定では「原料物質」(source material)に当たり、保有者がそれを不要と判断するまでは資源として扱われ、不要と判断された時点で低レベル放射性廃棄物(LLW)となる。米国では濃縮事業が 1998 年まで国営だったため劣化ウランは DOE が最大の保有者となっている。DOE は、保有する劣化

ウランを再転換するプロジェクトを開始しており、劣化ウランの処分や利用は行っていないが、2016 年にはグローバル・レーザー・エンリッチメント(GLE)社と劣化ウランの売買契約を締結しており、GLE 社が 40 年間の期間で約 300 千トンの劣化ウランを再濃縮し、天然ウランとして販売する予定となっている。なお、GLE 社は 2030 年までに濃縮施設を建設する条件となっており、実際の売買は未だ実現していない。[3.1-56][3.1-57]

最終的に不要と判断された劣化ウランは LLW として処分されるが、米国では民間濃縮施設で発生した劣化ウランについても、事業者が要求した場合には DOE が処分のために引き取ることが USEC 民営化法で規定されている。劣化ウランが処分可能な民間 LLW 処分場としては、エナジーソリューションズ社のユタ州 Clive 処分場、ウェスト・コントロール・スペシャリスト(WCS)社のテキサス州 WCS 処分場がある。なお、劣化ウランを大量に保有する DOE は、劣化ウランを廃棄物と決定した場合には、これら民間処分場、またはネバダ州の DOE サイト(ネバダ国家安全保障サイト、NNSS)で処分を行うことを決定しているが、短期的には民間処分場を利用する方針を発表している。[3.1-56][3.1-58]

また米国では、インターナショナル・アイソトープ(INIS)²³社が、民生原子力分野では初となる劣化ウランの再転換施設を建設・運転する許認可を 2009 年に申請し、2012 年には NRC から許認可が発給されたが、施設の建設には至っていない。INIS の再転換施設は、Urenco USA 濃縮施設に近いニューメキシコ州ホップスが建設予定地とされ、Urenco USA と劣化ウラン供給契約を締結していたが、Urenco USA 濃縮施設の拡張計画が先送りとなったことから、INIS 再転換施設の建設も見送られている。INIS 再転換施設の許認可では最大で約 3,400MT/年の UF_6 が処理可能とされ、その後の第 2 フェーズでは最大 9,800MT/年の処理能力に拡張される計画であった。INIS 再転換施設は、フッ素抽出設備を有し、AHF(無水フッ化水素)、 SiF_4 及び BF_3 が製品として生産され、発生する酸化劣化ウラン(DUO_2)は基本的に LLW として処分が想定されている。[3.1-57][3.1-59][3.1-60]

2) 実績

Urenco USA 濃縮施設の 2015 年時点の環境アセスメント(EA)に拠れば、Urenco USA 社の拡張前施設での劣化ウラン発生量は 7,800MT/年(627 シリンダ)とされている。Urenco USA 社は、劣化ウランは廃棄物ではなく再処理の価値が残る副生成物と見なしているが、濃縮施設の寿命を超えて保管することはなく、未処理の劣化ウランは最終的に転換施設に送られ、酸化ウランまたはウラン金属に転換される予定である。DOE のパデューカ及びパイクトンの転換施設は 1,600km 以上離れており、Urenco USA 施設の環境アセスメントでは、INIS での転換が想定されていた。前述のとおり、INIS の転換施設は NRC 許可は得たものの、建設されていない。[3.1-57][3.1-60][3.1-61]

なお、1970 年代半ば以降には再処理は行われていないため、回収ウラン・プルトニウムは発生していない。

²³ 正確には INIS 子会社の International Isotopes Fluoride Products 社が許認可保有者。

3.1.4 原子力・核燃料サイクル関連施設、事業主体

表 3.1-3 は、米国の核燃料サイクル関連施設について、IAEA の NFCIS に操業中として示されている施設である。

本項では、これら施設のうち主要なものについて、施設の稼働状況や実績、取引・取組状況、及び事業者の概要、資本関係や経営状況、今後の方針・戦略等について表形式で報告する²⁴。なお、IAEA の NFCIS 情報は、必ずしも最新の正確な情報が反映されていないものもあるため、主要施設の個別報告では、事業者や政府機関から最新情報が確認できたものについてはそれを反映しており、表 3.1-3 と整合しない場合がある。

²⁴ 施設情報は、施設ごとに 2022 年末～2023 年 1 月 20 日時点までにインターネットで確認できた情報を反映している。

表 3.1-3 米国の核燃料サイクル関連施設(IAEA/NFCIS、操業中施設)

分類	施設名	立地場所	運用者	操業開始	設計能力	その他特記事項
ウラン採 鉱・製錬	Alta Mesa	Brooks County, Texas	Uranium Resources, Inc.	2005 年	385 tU/年	In-Situ Leaching 法
	Crow Butte	Crawford, Nebraska	Cameco Corporation/Crow Butte Resources, Inc.	1991 年	385 tU/年	In-Situ Leaching 法
	Hobson	Karnes County, Texas	Everest Minerals Corporation	1979 年	385 tU/年	In-Situ Leaching 法
	Kingsville Dome	Kleberg County, Texas	Uranium Resources, Inc.	1988 年	385 tU/年	In-Situ Leaching 法
	La Palangana	Texas	-	2010 年	385 tU/年	
	Moore Ranch	Wyoming	-	2010 年	770 tU/年	In-Situ Leaching 法
	Shootering Canyon	Ticaboo, Garfield County, Utah	Plateau Resources Ltd.	1982 年	380 tU/年	Acid Leaching 法
	Smith Ranch	Southern Powder River Basin, Wyoming	Cameco Corporation	1988 年	2,116 tU/年	In-Situ Leaching 法
	Vasquez	Vasquez, Texas	Uranium Resources Inc (URI)	2004 年	308 tU/年	In-Situ Leaching 法
	White Mesa Mill	Blanding, Utah	International Uranium (USA) Corporation	1980 年	1,200 tU/年	Acid Leaching 法
再 転 換 (UF ₆)	Metropolis	Metropolis, Illinois	Converdyn	1959 年	7,000 tHM/年	
濃 縮	Urenco USA	Lea County, New Mexico	Louisiana Energy Services	2010 年	4,700 MTSWU/年	遠心分離法
燃料加工	Columbia (Westinghouse)	Columbia	Westinghouse Electric Corporation	1969 年	1,350 tHM/年	

	Lynchburg - FC Fuels	Lynchburg	AREVA NP	1982 年	400 tHM/年	
	Richland (ANF)	Richland	AREVA NP	1972 年	700 tHM/年	
	Wilmington (GNF)	Wilmington	GE Nuclear Energy	1982 年	1,200 tHM/年	
使用済燃料貯蔵	別表参照					
放射性廃棄物処分	Richland facility	Richland, Washington	US Ecology	1965 年	処分容量： 約 170 万 m ³	クラス A/B/C の LLW を対象 既処分量：約 40 万 m ³ (2020 年 12 月時点)
	Chem-Nuclear Site	Barnwell, South Carolina	EnergySolutions Barnwell Operations	1971 年	処分容量： 約 88 万 m ³	クラス A/B/C の LLW を対象 既処分量：約 80 万 m ³ (2020 年 12 月時点)
	Clive disposal facility	Clive, Utah	EnergySolutions Clive Operations	1971 年	処分容量： 約 882 万 m ³	クラス A の LLW、11e.(2) 副生成物 廃棄物を対象 既処分量：約 562 万 m ³ (2020 年 12 月時点)
	Texas WCS	Andrews, Texas	Waste Control Specialists (WCS)	2011 年	処分容量： 約 435 万 m ³	クラス A/B/C の LLW、11e.(2) 副生成物 廃棄物を対象 既処分量：約 3.7 万 m ³ (2020 年 12 月時点)

出所) IAEA の NFCIS 情報[3.1-62]による (放射性廃棄物処分施設については、資源エネルギー庁「諸外国における放射性廃棄物関連の施設・サイトについて」[3.1-63]による)

(1) ウラン採鉱・製錬施設

米国ではウラン市場の低迷からウラン採鉱施設の多くはスタンバイ状態にあり、2020～2021年には殆ど生産が行われていないが、ここでは米国で唯一操業中のウラン製錬施設となる Energy Fuel 社の White Mesa、及び他事業者の主要ウラン採鉱施設の例としてカメコ社の Crow Butte、UR-エナジー社の Lost Creek について報告する。

施設	
施設名称	White Mesa 製錬所[3.1-64][3.1-65]
施設概要	● ユタ州所在の米国で唯一稼働中の伝統的ウラン製錬施設 ● La Sal、Pinyon Plain 鉱山等近隣の鉱山からのウラン粗鉱を製錬 ● 複数ラインにより様々な金属の処理が可能で、バナジウムやレアアース等の製錬も行っている
技術	伝統的製錬法
能力	800 万ポンド(約 3,600 トン)／年以上
稼働状況	● 操業中だが、2019 年以降はバナジウムやレアアース生産に傾注し、ウラン回収はゼロ～少量の生産に留まっている。
稼働実績	● 1980 年にエナジー・フューエルズ・ニュークリア²⁵社が建設した伝統的精錬所で、1980～2019 年の生産量は 17,000 トンと報告されている。 ● エナジー・フューエルズ社が 2012 年に Denison Mines 社から取得して以降は 600 トン弱～400 トンレベルの生産量だったが、2015 年以降は市場環境悪化から生産は抑制されている。 ● 2021 年も出荷される量のウラン生産は行われず、レアアース生産の取組が中心となった。
役務取引 取組方針	● 市場低迷のため 2020～2021 年はウラン販売停止方針を採ったが、2022 年のウクライナ侵攻後は積極的に長期契約の交渉に入っている。 ● 2022 年 12 月には NNSA のウラン備蓄向け販売を 18.5 百万ド

²⁵ 米国の代表的なウラン生産事業者だったが、現エナジー・フューエルズ社と名称は似ているものの無関係の別会社。

		ル²⁶受注しており、MTW 転換施設で保有の在庫から供給される予定 ● ウラン市場低迷期には、ウランのスポット購入により生産を抑制する対応も
事業主体		
事業者名称		エナジー・フューエルズ・リソースズ社(EFRC)
事業者概要		● EFRC は、カナダのウラン・バナジウム鉱山開発会社 VME 社²⁷が 2006 年に買収して 100%子会社とした米国法人 ● エナジー・フューエルズ社は、その後 M&A 等を経て拡大し、2012 年にはカナダの Denison Mines 社の White Mesa を含む米国資産を取得し、翌年には NYSE 上場等主要ウラン生産事業者の 1 つとなった。 ● 2019 年にはバナジウム生産再開、2020 年にはレアアース生産開始等、コアの製錬事業をウラン以外に広げている。
資本関係 経営状況		● NYSE American(シンボル:UUUU)及びトロント証券取引所(TSX)(シンボル:EFR)上場 ● 直近の経営状況は、生産抑制によりコスト削減を図るも、減損処理も重なる等赤字状態が続いており、2021 年にはユタ州・コロラド州の非中核ウランプロジェクトをコンソリデーター・ウラニウム社(CUR)社に売却した。
政府との 関係		● 政府との資本関係や特別な支援プログラムは、ウェブサイトで確認した範囲ではない ● 2022 年 12 月に DOE のウラン備蓄向けに 18.5 百万ドルの契約を受注
今後の方 針・戦略		● ウラン生産については、長期契約獲得を睨みながら生産拡大ができるよう準備を継続する方針 ● 会社全体としては、レアアース事業で優位性を活かし、拡充の方針

²⁶ Uranium Energy 社が発表した受注単価(59.5 ドル/ポンド)から計算すると、約 300 千ポンド

²⁷ Volcanic Metals Exploration Inc.で、トロントのベンチャー市場上場のカナダ企業。2006 年 1 月に EFRC を取得した後、6 月に VME からエナジー・フューエルズ社(Energy Fuels Inc.)へと名称変更した。

施設	
施設名称	Lost Creek ウラン採鉱施設[3.1-66][3.1-67][3.1-68]
施設概要	ワイオミング州のウラン採鉱施設
技術	In-Situ Leaching 法
能力	220 万ポンド(約 1,000 トン)／年 ※Lost Creek は周辺区域も含めた複数プロジェクトの複合体であり、上記はその合計能力(Lost Creek プロジェクト単体の能力は 120 万ポンド(約 544 トン)／年)
稼働状況	● 操業中(全 12 ユニットが計画されている施設で、2021 年迄は最初の 2 ユニットののみが操業) ● ウラン市場低迷により、2020 年後半～2021 年は施設維持に必要なレベルまで生産を抑制 ● ウクライナ侵攻後の状況変化を受け、2022 年 12 月に 60 万ポンド(約 272 トン)／年への増産を決定
稼働実績	● 2013 年に操業開始 ● 2013～2021 年に 270 万ポンド(約 1,200 トン)の U_3O_8 を生産 ● 2021 年の生産量は 251 ポンド(約 0.11 トン)のみ(2021 年のウラン販売はゼロ)
役務取引 取組方針	● 生産されたウランは電気事業者等に販売されてきたが、ウランの購入も行われている ● ロシアのウクライナ侵攻後、2022 年 4 月には米電気事業者向けの 20 万ポンド(約 91 トン)／年の 6 年契約を獲得 ● 2022 年 12 月には、30 万ポンド(約 136 トン)／年の 5 年契約、及び NNSA のウラン備蓄向けに 10 万ポンド(約 45 トン)販売を受注 ● ウラン備蓄向け販売は、転換施設で保有の 32 万ポンド(約 145 トン)の在庫から供給
事業主体	
事業者名称	Lost Creek ISR 社(Ur-エナジー社の 100%子会社)
事業者概要	● 2004 年にカナダで設立されたウランの探鉱・鉱山開発・生産企業。 ● 米国では 100%子会社の UR-エナジー USA 社(コロラド州)及びその子会社 3 社(Lost Creek ISR 社(ワイオミング州)等)を通じ

		てワイオミング州でウラン鉱山を開発・操業。 ● ウラン生産企業としては新興となるが、操業コストは約 16 ドル/ポンドで、低コスト生産者と評価されている。
	資本関係 経営状況	● NYSE American (シンボル:URG) 及びトロント証券取引所 (TSX) (シンボル:URE) 上場 ● 直近の経営状況は、生産抑制によりコスト削減を図るも 2019 年以降連続して赤字状態だが、2022 年に複数の長期契約、DOE のウラン備蓄の受注成功が発表されている。
	政府との 関係	● 政府との資本関係や特別な支援プログラムは、Ur エナジー社ウェブサイトで確認した範囲ではない ● 2022 年 12 月に DOE のウラン備蓄向けに 10 万ポンド(約 45 トン)の契約を受注
	今後の方 針・戦略	● ウラン市場の好転を睨み、Lost Creek 鉱山における生産能力拡充を図る方針 ● DOE ウラン備蓄向けの 10 万ポンド(約 45 トン)供給後も約 23 万ポンド(約 104 トン)の在庫を転換施設に保有しており、長期契約で販売する方針

施設	
施設名称	Crow Butte ウラン採鉱施設[3.1-57][3.1-69][3.1-70][3.1-71][3.1-72][3.1-73]
施設概要	● ネブラスカ州初のウラン採鉱施設で、1986 年に Wyoming Fuel 社によって開発され、その後 1994 年に Ferret Exploration 社、1995～2000 年にかけてカメコ社によって買収されている。(2000 年にカメコ 100%子会社となる前は、韓国電力(KEPCO)が 10%を保有していた)
技術	In-Situ Leaching 法
能力	200 万ポンド(約 907 トン)/年
稼働状況	● 操業停止中 ● ウラン市場低迷により、2016 年 4 月に、Crow Butte を含む米国における操業縮小、新規ウラン井掘削中止が決定され、2018 年には生産量がゼロとなり、操業が停止されている。

	稼働実績	● 1991 年に操業開始 ● カメコ社が 100%取得した 2000 年以降に 11.8 百万ポンド(約 5,350 トン)の U_3O_8を生産 ● 2006 年には全米ウラン生産量の約 18%となる 700 千ポンド(約 320 トン)以上を生産していた
	役務取引 取組方針	● 生産されたウランはカメコ社の取引ウランの一部として米国電気事業者向けに販売されていたと考えられるが、詳細は不明
事業主体		
	事業者名称	Crow Butte Resources(CBR)社(カメコ社の 100%子会社)
	事業者概要	● カメコ社は、1988 年にカナダで王立企業 2 社の合併により設立された世界トップクラスのウラン生産企業。 ● Crow Butte 施設を直接保有し、NRC 許認可を保有するのは 100%子会社の米国法人である CBR 社 ● CBR 社は 1994 年に Crow Butte 鉱山を取得した Ferret Exploration Nebraska 社が後に CBR に名称変更し、その後カメコ社の子会社となったもの。 ※以下はすべてカメコ社について記載
	資本関係 経営状況	● トロント証券取引所 (TSX) (シンボル: CCO) 及び NYSE American(シンボル: CCJ) 上場 ● 弱い市場環境から生産抑制状態が続いており、直近の年次報告書(2021 年)では、収入は前年比 18%の減少で、赤字額が約 103 百万カナダドルと膨らんでいる。 ● S&P 格付けでは、無担保社債 BBB-、見通しは「安定」の評価
	政府との 関係	● 王立企業としてスタートしたが、1991 年に政府株式売却によりトロント市場に上場し、2002 年にはすべての政府株式が売却されている。 ● 元株主であり、カメコ社の本社が所在するサスカチュワン州は 1 株のクラス B 株式を保有しており、同州外に本社を移転する提案についてのみ投票権を有している。 ● 米国政府との特別な関係は、年次報告書等で確認する限りない。
	今後の方	● 気候変動対応等で堅調な需要が見込まれる原子力発電、不確実性

針・戦略	を増したウラン供給等市場環境が変化する中で、燃料サイクル全体で強みを持ち、生産能力維持を図ってきた同社には好機と評価 ● ウラン市場のリスクは供給側から需要側に転じたとして、長期契約確保を進めながら生産回復を見込む ● 柔軟性を確保しながら操業準備体制を整え、市場・契約状況に応じて増産を図る ➢ 2024 年には生産能力の 60%レベルまで回復(2021 年は 25%レベル)
------	--

(2) 転換施設

米国における転換施設は 1 カ所のみで、現在は停止中であるが、施設を保有するハネウェル社は、操業再開決定を表明し、再稼働に向けて準備中であるため、以下で報告する。

施設	
施設名称	メトロポリス・ワークス (MTW、Metropolis Works) [3.1-57][3.1-74][3.1-75][3.1-76][3.1-77]
施設概要	イリノイ州メトロポリスに立地する米国唯一の民間転換施設
技術	フッ化物揮発法
能力	7,000tU/年(2017 年に 15,000tU/年から縮小したが、需要に応じて復帰可能)
稼働状況	● 国内転換需要の低迷から 2017 年 11 月から停止しているが、2023 年にフル操業復帰に向けて準備中。 ● NRC 許認可は 2060 年 3 月まで 40 年間延長されている。
稼働実績	● 1958 年に建設され、1959 年から AEC との契約で UF₆ 生産が開始された。 ● AEC 契約の終了後の 1964 年に停止したが、1968 年から商業転換サービスを開始し、これまでに 500 千 tU 以上の UF₆ を供給
役務取引 取組方針	● コンバーダイン(Converdyn)社が生産された UF₆ の独占販売権を持つ。 ● 契約の多くは委託生産(toll processing)方式によっており、顧客指定の濃縮施設に輸送する。 ● MTW は世界的なウラン取引プラットフォームともなっており、1.3 億ポンド(約 59,000 トン)の U₃O₈ が取引されている。MTW では世

		界の殆どのウラン鉱山からウランを受け入れている。
事業主体		
事業者名称		ハネウェル(所有者、操業者) コンバーダイン(UF ₆ 販売)
事業者概要		● ハネウェル社は、航空宇宙向け、業務・産業向け制御技術等、技術により産業ソリューションを提供するコングロマリットで、フォーチュン 100 にリストされる企業である。 ● 1958 年に建設された転換施設等原子力関連の施設は、ハネウェル社の前身の一つであるアライド・ケミカル(Allied Chemical)社の事業が継承されたもの。バーンウェル再処理施設もアライド社の合併企業が手掛けていた。 ● コンバーダイン社は、ハネウェル社とゼネラル・アトミック(GA)社の折半出資により 1992 年に設立され、MTW の製品の排他的販売権を有する。
資本関係 経営状況		● Nasdaq 上場(シンボル:HON) ● フォーチュン 100 企業であり、大手格付け機関による見通しは安定(Stable)、長期信用格付けは A(S&P、フィッチ)～A2(Moody's)
政府との 関係		● MTW は、当初は連邦政府(AEC)との契約役務を実施する施設として建設されたが、現在は民間向け事業であり、年次報告書でも原子力関連の政府との特別な関係への言及は確認できない。 ● 米国内で唯一の転換施設という特性からと考えられるが、新たなウラン備蓄では MTW が受け渡しサイトとして指定され、転換役務も発注されている。
今後の方 針・戦略		● MTW は、米国内唯一の転換施設として、2023 年フル操業を目指して再開準備中である。 ● 企業としてのハネウェル社は、技術革新を軸に ESG(環境・社会・ガバナンス)パフォーマンス進展を掲げているが、転換施設を含む原子力事業の比率は低く、年次報告書でも言及はされていない。

(3) 濃縮施設

米国で操業中の濃縮施設は、Urenco グループの Urenco USA 施設の 1 カ所のみとなっている。他に、セントラス・エナジー社が DOE との契約により ACP 施設で HALEU の実証試験を実施している他、GLE 社が DOE との契約により劣化ウラン濃縮施設の建設を進める予定である。なお、AREVA 社のイーグル・ロック濃縮施設についても 2011 年に NRC の許認可が発給されたが、2015 年に AREVA 社の申入れにより許可は終了している。セントラス・エナジー社及び GLE 社の動向については、3.1.6(4)で報告する。

施設	
施設名称	Urenco USA 施設 ※当初名称は「国家濃縮施設」(NEF:National Enrichment Facility)[3.1-57][3.1-78][3.1-79]
施設概要	Urenco 社の米国子会社のルイジアナ・エナジー・サービス(LES)社がニューメキシコ州で保有・操業する濃縮施設で、現在米国で商業運転中の唯一のウラン濃縮施設
技術	ガス遠心分離法
能力	● 4.8 百万 SWU/年 ➢ 2012 年に 3 百万から 10 百万 SWU/年までの増強が申請され 2015 年に承認されたが、市場環境悪化から増設は第 3 段階で停止されている
稼働状況	稼働中(約 5 百万 SWU/年ペースで操業中)
稼働実績	● 2009 年末に最初のカスケードで施設の操業を開始し、2015 年 12 月にはフル能力で操業を開始 ● 濃縮ウランの生産は 2010 年 6 月から始まり、2012 年 3 月に最初の出荷が行われた ● 現在は 64 カスケードで約 5 百万 SWU/年を生産(全米需要の 1/3)
役務取引 取組方針	● Urenco USA は、米国 LEU 需要の約 1/3 を生産する唯一の濃縮施設であり、基本的に米国電気事業者から濃縮役務を受注し、米国内燃料加工施設に出荷していると考えられるが、詳細は不明。 ● Urenco 社全体の売上の過半が北米向けであることを考えても、Urenco USA の濃縮役務の顧客は米国/北米電気事業者と考えられる。

事業主体	
事業者名称	ルイジアナ・エナジー・サービス(LES)社(Urenco USA として活動)
事業者概要	● LES 社は Urenco 社(Urenco Limited)グループが100%保有する米国法人で、Urenco USA 施設の許認可保有者であるが、現在は Urenco USA として活動している²⁸。 ● 当初はルイジアナ州での濃縮施設建設が計画されたため LES 社の名称となったが、Urenco USA 施設所在のニューメキシコ州を本拠としている。
資本関係 経営状況	● LES 社は、Urenco USA, Inc.及び Urenco USA Holdings Ltd.を通じて Urenco 社(Urenco Limited)が100%保有している。 ● Urenco 社株式は英・蘭政府、及び独電力会社²⁹が各々1/3 を保有している。 ● Urenco 社の信用格付けは以下(2022/3～5 月) Moody's:Baal(安定的) S&P :BBB+(安定的)
政府との関係	● 米国政府との特別な関係は、年次報告書等で確認する限りない。
今後の方針・戦略	● コア事業の濃縮サービスが今後も鍵だが、補完するものとして先進燃料等への取組も実施 ● ウクライナ侵攻等に対応して戦略を調整しており、能力増強も評価中だが、増強投資には顧客との長期契約が必要との基本的立場 ● 先ずはフル操業での対応と、在庫による供給を 2022 年 3 月から実施している

(4) 燃料加工施設

米国では、商業用原子燃料を製造する燃料成型・加工施設は、3 カ所が稼働中である。なお、2011 年 3 月までは AREVA 社のリンチバーグ燃料加工施設も稼働していたが、現在は廃止措置中である。

²⁸ 従って、本稿では、特に峻別する必要がある場合を除き LES 社を Urenco USA 社として記述している。

²⁹ 正確には、E.ON 子会社の PreussenElektra 社と RWE 電力社の合弁会社が株式を保有。

施設	
施設名称	GNF Wilmington 燃料加工施設 [3.1-57][3.1-80][3.1-81][3.1-82][3.1-83]
施設概要	● ゼネラル・エレクトリック(GE)社が 1960 年代から操業するノースカロライナ州所在の燃料加工施設で、GE グループ BWR 向けの燃料等を製造 ● 現在はグローバル・ニュークリア・フュエル(GNF)社が受け継ぎ、GNF2、GNF3 等の燃料を製造している。
技術	—
能力	● 1,200tHM/年
稼働状況	● 稼働中
稼働実績	● 1969 年 1 月に AEC から許認可が発給され、程なく燃料製造が開始された ● NRC 許認可は、2009 年に 40 年間更新され、2049 年 5 月まで有効。
役務取引 取組方針	● GNF 社は日本に工場を有している他、スペインで JV により燃料製造を行っており、Wilmington 工場で生産された燃料は、基本的に米国電気事業者向けと考えられるが、詳細は不明
事業主体	
事業者名称	GNF- Americas 社
事業者概要	● GNF America 社は、GE 社が主導する日立との合弁会社 GNF ホールディング社の 100%子会社で、米国 Wilmington で燃料加工施設を保有、操業する。 ● GNF ホールディング社は、GNF-Americas 社の他に GNF ジャパンを保有する持ち株会社で、その管理会社として GNF 社がある。
資本関係 経営状況	● GNF America 社を 100%保有する GNF ホールディング社は、GE 社が 60%、日立製作所が 40%を出資。 ➢ 2017 年までは東芝が 14%出資していたが、日立に移転
政府との 関係	● 米国政府との特別な関係は、年次報告書等で確認する限りない。

今後の方針・戦略	● GNF ウェブページでは今後の方針・戦略として明記された情報は確認できないが、GNF3 等 BWR 向け燃料について経済性を含めた性能向上を図る他、先進燃料への取組も行われている。 ● 2022 年 10 月には、テラパワー社と Natrium 燃料工場建設で合意する等、GNF 社と GE 日立ニュークリアエナジー(GEH)社は 5 年間で約 500 人の増員を図る計画
----------	---

施設	
施設名称	ウェスティングハウス Columbia 燃料加工施設[3.1-57][3.1-69][3.1-84][3.1-85]
施設概要	ウェスティングハウス・エレクトリック(WH)社が 1969 年から操業するサウスカロライナ州所在の燃料加工施設で、同社の PWR 向け燃料等を生産。
技術	—
能力	● 1,350tHM/年[3.1-62]
稼働状況	稼働中
稼働実績	● 1969 年以降の生産量等は確認できていないが、2021 年には米国内発電所に約 2,500 体の燃料集合体が出荷されている。
役務取引 取組方針	● WH 社は欧州にも燃料加工施設を有しており、Columbia 工場は基本的に米国電気事業者向けの燃料加工と考えられるが、取引や取組方針の詳細は不明 ● Columbia 工場は、2022 年 9 月に NRC から 40 年間の許認可更新を承認されているが、近年は相当額の設備改善投資が行われており、長期に操業継続の予定
事業主体	
事業者名称	ウェスティングハウス・エレクトリック(WH)社
事業者概要	● WH 社は PWR のトップベンダーであり、米国原子力発電炉の 6 割が同社 PWR とされている。 ● 原子力産業界きっての知的財産権、技術者等を擁するトップクラスの企業と言える
資本関係 経営状況	● WH 社については、2022 年 10 月に、ブルックフィールド・リニューアブル(BR)社とカメコ社のコンソーシアムが、WH 社取得に合意し

		ている。 ● 出資比率は BR 社グループが 51%、カメコ社が 49% ● 2018 年に経営破綻の WH 社を取得した投資会社は、積極的な投資、経営改善に取り組み、収益力は 4 年間で倍増したとしている
	政府との関係	● 米国政府と資本関係や法律による特別な関係はないが³⁰、米国では軍事活動起源の DOE サイト修復を含め、政府発注の活動が多いことから、2017 年にワシントン DC の政府サービス事務所を再開している。
	今後の方針・戦略	● WH 社は、BR 社とカメコ社による買収は、BR 社の再生可能エネルギーやエネルギー貯蔵等、及びカメコ社のフロントエンド分野の能力が加わることで、WH 社のプレゼンス強化に繋がると歓迎している

施設	
施設名称	Richmond 燃料加工施設 [3.1-57][3.1-86][3.1-87][3.1-88]
施設概要	● DOE のワシントン州 Hanford サイトに隣接して Jersey Nuclear 社(後に Exxon Nuclear)が 1969 年に操業を開始した燃料加工施設 ● 運営者は、その後シーメンスに変わり、AREVA 再編等名称は変遷したが、PWR/BWR の 10 種を超える多様な燃料を製造し、最も柔軟性ある燃料加工施設と言われている
技術	—
能力	● 700tHM/年[3.1-62]
稼働状況	稼働中
稼働実績	● 1969 年に操業を開始し、2019 年に 50 周年を迎えた時点で 60,000 体以上の燃料集合体を製造
役務取引 取組方針	● 同社ウェブサイト等では Richland 工場に限定した取引情報等は確認できないが、フラマトム社全体として燃料設計から製造に亘る技術力、体制を備えていることが強みとして示されている。 ● ニュースケール社の小型モジュール炉(SMR)VOYGR 向けの燃

³⁰ WH 社ウェブサイト(www.westinghousenuclear.com)で確認

		料、及び燃料取扱い機器等もフラマトム社が受注している ● 2021 年 11 月には米国で初めて事故耐性燃料(ATF)100%の燃料集合体を納入した
事業主体		
事業者名称	フラマトム社(Framatome, Inc.)	
事業者概要	● フラマトム社(Framatome, Inc.)はフランスのフラマトム SAS の 100%子会社の米国法人	
資本関係 経営状況	● 2018 年に AREVA 社の組織変更により AREVA, Inc.社から社名が変更された	
政府との 関係	● 米国政府との資本関係や法律による特別な関係は年次報告書等で確認する限りない ³¹	
今後の方 針・戦略	● 同社ウェブサイトでは、燃料加工に係る今後の方針・戦略として明確に示された情報は確認できないが、フラマトム社は、全軽水炉設計向けの燃料をカバーし、燃料設計から製造に亘る技術力、体制を備えていることが強みとして示されている。	

(5) 使用済燃料中間貯蔵施設

米国では、1982 年放射性廃棄物政策法(NWPA)により、連邦政府(具体的には DOE)が 1998 年以降に民間の原子力発電事業者から使用済燃料を引き取ることが規定されているが、ネバダ州ユッカマウンテンを候補地として進めてきた処分場建設が停止状態にあるため DOE は使用済燃料引取義務を果たせずにより、各事業者が発電所内の独立使用済燃料貯蔵施設(ISFSI)で乾式貯蔵を行っている。このため貯蔵施設の数是非常に多く、また態様も、基本的には発電事業者によるサイト内での乾式貯蔵と共通であるため、以下で施設一覧を示すのみに留めている。[3.1-6]

なお、イリノイ州 Morris の ISFSI は、表中で唯一の湿式貯蔵施設となるが、これは GE 社が 1960～70 年代に建設を進めていた中西部燃料回収施設(MFRP:Midwest Fuel Recovery Plant)の計画が途中で断念され、既に貯蔵が開始されていた使用済燃料等のための貯蔵施設として続いているものである。[3.1-1]

その他、民間の集中中間貯蔵施設プロジェクトとして、ユタ州スカルバレーで計画された中間貯蔵施設が NRC の許認可発給も受けていたが、先住民族や州等の反対もあって遅延する中で、サイト内中間貯蔵のための費用は DOE から賠償金として得られることが確定して事業者側の中間貯蔵施設建設の必要性も減り、最終的に計画は断念された。また、

³¹ フラマトム社ウェブサイト(www.framatome.com)で確認

現在テキサス州とニューメキシコ州の 2 カ所で民間の中間貯蔵施設プロジェクトが進行中で、テキサス州プロジェクトでは NRC 許認可も発給済であるが、両件とも連邦政府による貯蔵を想定した施設であり、建設の具体的な予定は立っていない。[3.1-5][3.1-6]

表 3.1-4 米国の発電所使用済燃料の独立貯蔵施設

項番	貯蔵方法	施設名	貯蔵能力 (tHM)	操業開始
1	乾式	Arkansas Nuclear No:1 NPP Site ISFSI	150	1997
2		Big Rock Point NPP Site (shutdown) ISFSI	0	
3		Browns Ferry NPP Site	190	2004
4		Brunswick NPP ISFSI		
5		Byron NPP Site		
6		Calvert Cliffs NPP Site	1,112	1992
7		Catawba NPP ISFSI		
8		Columbia Generating Station NPP Site ISFSI	190	2000
9		Cooper Station ISFSI		
10		Davis Besse NPP Site ISFSI	360	1995
11		Diablo Canyon NPP Site ISFSI		2008
12		Dresden NPP Site	70	2001
13		Duane Arnold NPP Site	0	2004
14		Farley NPP Site	190	2006
15		FitzPatrick NPP Site	190	2002
16		Fort Calhoun NPP Site ISFSI		
17		Fort St. Vrain NPP Site ISFSI	15	1992
18		Ginna NPP ISFSI		
19		Grand Gulf NPP Site ISFSI		
20		H.B. Robinson NPP Site ISFSI	26	1986
21		Haddam Neck NPP Site	190	1996
22		Hatch NPP Site	190	1998
23		Hope Creek/Salem (combined) ISFSI		
24		Humboldt Bay		
25		Indian Point ISFSI		
26		Kewaunee NPP ISFSI		
27		Lacrosse NPP (shutdown) ISFSI		
28		LaSalle County ISFSI		
29		Limerick NPP ISFSI		
30		Maine Yankee NPP Site (shut down) ISFSI	190	1997
31		McGuire NPP Site ISFSI	0	2000
32		Millstone NPP Site	190	2004
33		North Anna NPP Site ISFSI	840	1998
34		Oconee NPP Site ISFSI	380	1990
35		Oyster Creek NPP Site	190	2000
36		Palisades NPP Site ISFSI	233	1993
37		Palo Verde NPP Site	190	2003
38		Peach Bottom NPP Site ISFSI	0	2000

39		Point Beach NPP Site ISFSI	447	1995
40		Prairie Island NPP Site ISFSI	724	1994
41		Quad Cities NPP Site	190	2004
42		Rancho Seco NPP Site	190	1989
43		Rancho Seco NPP Site ISFSI	202	1989
44		River Bend NPP Site	190	2006
45		San Onofre NPP Site	190	2007
46		Seabrook ISFSI		
47		Sequoyah NPP Site ISFSI	190	2004
48		St. Lucie NPP Site		
49		Surry NPP Site ISFSI	808	1986
50		Susquehanna NPP Site ISFSI	343	1998
51		Trojan NPP Site (shutdown) ISFSI	359	
52		Vermont Yankee NPP ISFSI		
53		Yankee Rowe NPP Site (shutdown) ISFSI	190	1991
54	湿式	Morris Reprocessing Plant Site (Wet)	750	1984

出所) IAEA の NFCIS から引用 (LaCrosse は湿式とされているが乾式に修正。その他施設の能力・開始年も一部最新情報と一致していないと思われるが、IAEA データをそのまま表示している)

(6) 使用済燃料の再処理／ガラス固化施設等

米国では 1960～70 年代に使用済燃料の再処理施設が民間で建設・操業されたが、カーター政権による再処理停止方針の決定、経済性悪化等から全施設は廃止あるいは建設が断念され、現在は民間の再処理施設、ガラス固化施設は存在しない³²。[3.1-1]

(7) 使用済燃料等の処分施設

米国ではネバダ州ユッカマウンテン・サイトが処分場候補サイトとされ、2008 年から NRC で処分場建設・操業の許認可審査が行われているが、オバマ政権がユッカマウンテン計画廃止方針を決定した後、許認可審査のための予算も計上されず計画は停止状態にあり、米国には使用済燃料、HLW の処分施設は存在しない。[3.1-6]

3.1.5 ウクライナ侵攻の役務取引動向等への影響

米国のフロントエンド部門は、ロシアのウクライナ侵攻以前から国外依存が進み、事業者救済や国家安全保障の観点から対応の議論、動きが見られていたが、ウクライナ侵攻後は対ロシア経済制裁の観点も加わり、特にロシア依存からの脱却に向けた動きが見られる。

本項では、先ずウクライナ侵攻前の取引動向を概観した上で、ウクライナ侵攻後の役務取引動向や方針・検討の動きについて報告する。

³² 民間原子力発電所からの使用済燃料の処理分も含むウェストバレー再処理施設で発生した高レベル放射性廃液について、ガラス固化施設が建設されたが、これは廃止措置に責任を持つこととなった DOE が「実証プロジェクト」として実施したものであり、特殊なため対象としていない。

(1) ウクライナ侵攻前の役務取引の概況

米国の原子力発電事業者が調達するウランは、1990年代から次第に海外依存が進んでおり、2021年の外国起源ウランへの依存率は約95%に達し、濃縮役務も8割以上が国外に依存する状況となっていた³³。米国では、ウラン生産業者の多くが操業停止、唯一の転換施設も操業停止となっており、さらに濃縮施設も新增設計画は見送られ、運転中の施設はUrenco USAの1プラントのみとなっている。

原子力発電事業者が調達するウランは、表3.1-5にあるように、約8割が中長期契約に拠るもので、特に転換・濃縮役務が含まれる天然／濃縮UF₆の調達では1年以内の短期取引は殆ど見られず、数年先まで相当量の供給が契約済となっている。[3.1-89]

表 3.1-5 ウラン燃料の契約タイプ別購入量(2021年)

単位: U₃O₈ 換算トン

	ウラン精鉱	天然 UF ₆	濃縮 UF ₆	天然・濃縮 UF ₆ 計	合計
スポット	3,921			154	4,075
長期	7,439			9,681	17,120
合計	11,360	4,567	5,268	9,835	21,195

注) 空白欄はデータ非開示、斜字は差引による計算値。

出所) EIA-ウラン市場年報 2021[3.1-89] (Table 17 を基に作成)

ロシアからの輸入については、USECとTENEXが2028年までの濃縮役務(SWU)輸入契約を締結済みであり、特に2023～2027年についてはU235ベースで約1万kg/年(LEUベースで約230トン)の濃縮役務輸入が行われる予定となっている。[3.1-14]

ウランの国外依存低減を図るためFY21予算で国家ウラン備蓄創設が承認され、2021年8月には備蓄制度構築に向けてRFIが行われたものの、具体的な備蓄開始の動きは2022年初頭時点では開始されていなかった[3.1-13][3.1-28]。ただし、ハネウェル社は2021年2月にMTW転換施設の操業再開を決定している。ダンピング調査停止協定延長によりロシアからの輸入枠が削減され、及び国家ウラン備蓄創設が歳出法で承認されたことにより、市場や顧客の認識にも変化が現れていたものと考えられる。

なお、ウラン市場は長らく低迷が続いていたが、2021年から多くのウラン探鉱会社がスポット市場等でウラン精鉱等の戦略的購入を行っており、スポット市場価格は堅調に上昇しており、長期契約価格も上昇を見せていた。(次項の図3.1-1の価格推移グラフ参照)[3.1-90]

(2) ウクライナ侵攻の役務取引動向等への影響

3.1.2項で示したように、ロシアによるウクライナ侵攻後、米国政府はロシアへの核燃料

³³ EIA 統計による具体的な数字は、「3.1.8 フロントエンドに係るサプライチェーン」で後述。

依存を解消する方針を明確にし、連邦議会においてもロシアからのウラン燃料輸入禁止法案が提出される等しているが、ウクライナ侵攻以前から決定されていた国家ウラン備蓄（後述）以外では、政策の具体的な実施段階には至っておらず、濃縮・転換役務の具体的な取引動向に顕著な動きは確認できない³⁴。原子力発電事業者は、一般に、濃縮役務は中長期契約により調達していること、余裕を持って在庫を保持していると考えられること、またそもそも装荷燃料の使用期間の長さ等から、ウクライナ侵攻及びその後の市場価格上昇を受けて直ちに行動する必要性に迫られる状況にはないと考えられる。しかし、市場価格も上昇する中で、ウランも対ロシア制裁の品目に加わる可能性への警戒感もあり、ロシア以外からの長期契約の検討が行われているものと考えられる。

なお、ウラン市場価格は、ウクライナ侵攻直後の急騰は落ち着いたものの、その前からの上昇基調は継続しており、スポット価格に続いて長期契約価格も1年間で5割近い上昇となって2017年以降の底値から急速に回復しているが、歴史的な高値には未だ及ばない状況となっている。（図 3.1-1）



図 3.1-1 ウラン価格の推移（スポット、長期契約）

出所）UEC 2023 年 1 月プレゼンテーション資料[3.1-91]から引用

ウラン燃料については、現時点では対ロシア制裁品目には含まれておらず、政府の公式の指示がない限りは既存契約自体の変更や解消は困難な選択となる。但し、ウラン燃料購入がロシアの戦争遂行を助けているとの批判の高まりや発電事業者の企業理念、ウラン市場価格の上昇、さらにはウラン燃料も制裁対象に加えられることへの警戒感等から、ヘッジ

³⁴ ハネウェル社の MTW 転換施設は、2023 年の操業再開に向けて準備活動を続けており、その背後には顧客との契約交渉や市場好転の見通し等があると考えられるが、上で示したように操業再開の決定はウクライナ侵攻から 1 年前の 2021 年 2 月になされており、ダンピング調査停止協定延長によるロシア輸入枠の減少や、ウラン国家備蓄の創設が契機になったものと考えられる。

のための長期契約締結等の検討が進められていることは考えられる。ウラン採鉱事業者からは、網羅的な情報の確認はできないが、例えば以下のような米国内顧客との長期契約締結の情報も見られるようになっている。[3.1-66]

長期契約成約情報の例(Ur-エナジー社)

- ・ 2022 年 8 月:2023 年後半から 6 年間の 200 千ポンド／年契約を受注
- ・ 2022 年 12 月:300 千ポンド／年の 5 年契約、及び既契約 100 千ポンド／年の増量

国家ウラン備蓄については、3.1.1(2)で示したように、NNSA が 2022 年 6 月 30 日付で国産ウラン購入の RFP を発行し、12 月には表 3.1-6 に示す成約情報が伝えられているが、基本的にはウクライナ侵攻前から決定されていた政策となる。備蓄のためのウランの引渡しは、ハネウェル社 MTW 転換施設に在庫の持ち込みが必要とされており、MTW 操業再開により転換役務取引に繋がることとなる。NNSA はコンバーダイン社と 5 年間で 14 百万ドルの転換役務契約を 12 月 30 日に締結したことが報道[3.1-92]で伝えられている。[3.1-28][3.1-30][3.1-31][3.1-32][3.1-33][3.1-34]

表 3.1-6 国家ウラン備蓄の初回成約状況(再掲)

受注発表事業者名	受注量(千ポンド)	価格(\$/ポンド)
Uranium Energy Corp (UEC)	300	59.50
Strata Energy (Peninsula Energy)	300	不明
Energy Fuels Inc.	18.5 百万ドル*	不明
Ur-Energy Inc.	100	64.47
enCore Energy Corp.	100	70.50

*Energy Fuels 社は受注金額のみを発表³⁵

出所)各社プレスリリースから作成

バイデン政権は、「ウクライナのための不可欠な要求」の 1 つとして 2022 年 9 月 2 日に 1,500 百万ドルを要求し、ロシアからの供給減少を相殺するためにウランを確保している。また、連邦議会の一部にはロシアからの輸入の即時停止を訴える声もあるが、DOE は、稼働中の原子炉の運転に支障が出ないようウラン燃料供給の総合的対策を検討中としており、具体的な役務取引への影響は今後浮上してくるものと思われる。[3.1-29][3.1-49]

なお、ロシアによるウクライナ侵攻は、濃縮役務を含むウラン市場が長期の低迷から回復の動きを見せていた局面で発生した。特に米国では、フロントエンド産業崩壊への危機感等からロシアからの輸入枠削減、ウラン国家備蓄の創設という政策対応も取られて需給構造が大きく変化する局面を迎えていた。ウクライナ侵攻は、ウラン市場の自律的回復が既に

³⁵ エナジー・フューエルズ社の受注量は不明だが、3 社が発表している価格等から考えると、300 千ポンド程度の受注量ではないかと推測される。

見られていた中で、加速度的に需給をタイト化させる大きな影響力を持つものとなっており、さらに需給をタイト化させるウラン国家備蓄向けの調達が始まったことで、ウラン市場は大きな変化の局面を迎えていると言える。ウラン・エネルギー社(UEC)の投資家向け資料で示された UX-C 市場見通しに拠ると、今後は電力会社における未手当の需要は順調に増加が予想される中で、長期契約の歴史的なサイクルでは多くの契約更改が必要なタイミングを迎えており、2035 年までに 13 億ポンド(約 590 千トン)の契約が必要と見られることが示されている。

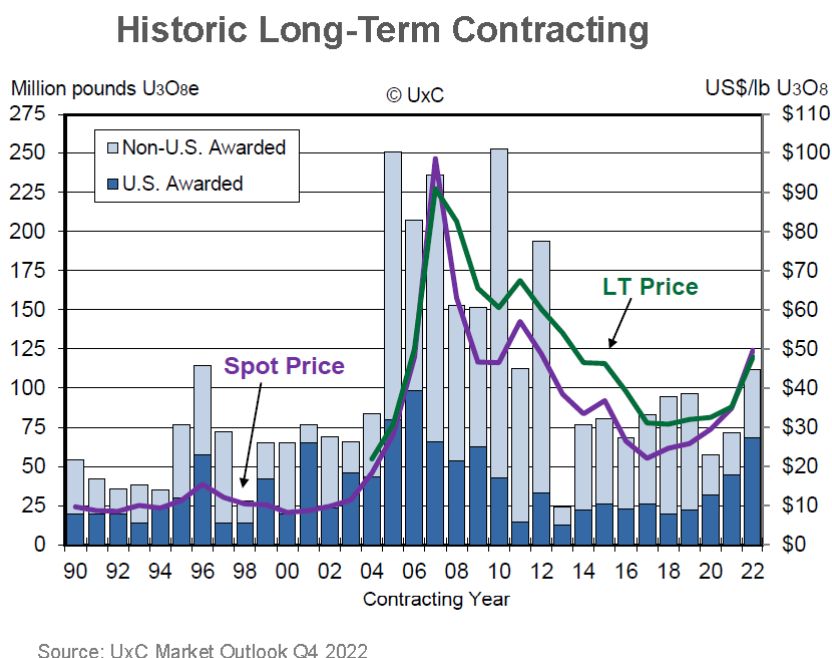


図 3.1-2 長期契約締結状況の推移

出所)UEC2023 年 1 月プレゼンテーション資料[3.1-91]から引用

つまり、通常の市場サイクルとして、長く続いた低迷市場で供給力が低下している中で、長期契約の需要が増加して需給がタイト化する局面と考えられるが、このタイミングでウクライナ侵攻を受けてロシア産ウラン及び濃縮・転換役務が西側市場から消えた場合の影響は甚大と見られる。特に濃縮・転換では世界市場におけるロシアのシェアが高いため、仮にロシアからの供給遮断を想定する場合には、米国を含む西側諸国での増産には設備の増設が必要となる。その場合、リードタイムと在庫の関係が問題となる他、設備投資の決定には確実な長期的見通しが不可欠であり、ロシア排除枠組みの持続性、制裁非参加国を含めた世界的需給等に係る不確実性を払拭できるような政策対応が鍵になると考えられる。ウランについても生産回復には一定のリードタイムが必要であるが、西側諸国での増産余力も大きく、既に米国事業者の動きでも一部見られるように脱ロシアを前提とした対応が進むものと考えられる。

本調査では網羅的な情報の把握はできていないが、ウラン市場の急速な回復、ロシア産ウラン・濃縮役務等の輸入禁止措置の可能性等を睨み、ウラン生産を始めとする米国のフ

ロントエンド産業では以下のような供給力回復／増加の具体的な動きも見られ始めている。

- ・ エナジー・フューエルズ社は、2022 年 11 月に、Alta Mesa 鉱山を enCore エナジー社に売却し、その資金で以下を含む増産等を実施
 - White Mesa、Nichols Ranch を始めとする鉱山で最大 2 百万ポンド(約 900 トン)／年の増産
 - ワイオミング州 Sheep Mountain、ニューメキシコ州 Roca Honda 等の大型鉱山の許認可活動及び開発を加速化
 - 鉱石購入プログラムを起ち上げ、再開の動きがある周辺の鉱山からのウラン鉱を処理し、White Mesa 製錬能力の最大活用を図る
- ・ ペニンシュラ・エナジー社は、2022 年 11 月にウラン生産再開を決定し、ワイオミング州 Lance 鉱山(ISR 方式)における生産を 2023 年から再開
- ・ 2023 年 1 月 23 日、カナダのウェスタン・ウラニウム&バナジウム社(WUC)は、ユタ州にウラン・バナジウム・コバルトを回収する製錬所サイトを取得し、製錬所の建設に向けて許認可活動を開始した。なお、サイト選定・獲得の取組は 1 年以上前から行われていた。
- ・ Ur-エナジー社も、Lost Creek 鉱山等で増産に向けて工事中
- ・ 濃縮についても、GLE 社は、2022 年 10 月に、ロシアの次を懸念する米電気事業者等に対応するため商業化スケジュールの加速を検討中と表明(2～3 年前倒しを検討)
※ただし、ロシアからの供給制約に係る長期的な明確性、政策的な投資支援等が重要

3.1.6 原子力・核燃料サイクル関連の研究開発動向

本項では、米国における核燃料サイクル関連の研究開発動向について報告する。なお、先進炉関連の燃料サイクルに係る具体的な研究開発動向については、3.1.7 項において、様々な先進炉開発の状況を概観した上で改めて報告を行う。

(1) 米国における核燃料サイクル関連の研究開発方針、意図

1) 米国の核燃料サイクル研究開発体制

米国における核燃料サイクル関連の研究開発は、DOE の NE 局が中心的役割を担っているが、他に国防関連のプログラムについては NNSA、また基礎科学的研究については科学局で、研究開発が進められている。例えば濃縮についても、後述するように NE 局で ACP による HALEU 生産の実証が進められている一方で、NNSA においても国産濃縮技術の開発が ORNL で行われており、異なる目標の取組ではあるが、調整等改善が必要との指摘がなされることもある。実際の研究開発活動は、アイダホ国立研究所(INL)や ORNL 等、DOE 傘下の国立研究所で主に行われている。[3.1-93][3.1-94]

原子力分野については、歴史的に民主党と共和党のスタンスには違いがあり、研究開発についても政権交代により方針が転換されることも多い。さらに、最終的な予算決定は基本的に連邦議会に委ねられており、政権の方針、予算要求とは異なる予算が決定されることも常であるため、予算の理解には留意が必要となる。なお、年度ごとに制定される歳出法で予算が承認されない場合は、新たなプログラムの実施はできない。例えば国家ウラン備蓄プログラムのように、歳出法では DOE 要求とは異なる部局に予算が配賦されることもあり、DOE 内の実施体制も影響を受けることがある。

DOE／国立研究所以外では、DOE 等からの資金援助を含めて大学での研究開発は行われているが、民間の EPRI では、燃料サイクル自体に関する研究開発プログラムは、ウェブサイトで 2010 年以降のプロジェクトを検索する限りでは確認できない³⁶。[3.1-95]

2) 近年の米国における核燃料サイクル関連の研究開発方針

2001 年に誕生した共和党ブッシュ政権では、新規原子炉開発を積極的に支援して原子力カルネサンスと喧伝される情勢であったが、核燃料サイクルについても、GNEP を起ち上げ、単なる研究開発に留まらず、米国内での再処理施設建設も視野に入れた取組みを見せていた。研究開発プログラムとしては先進燃料サイクルイニシアチブ(AFCI)で再処理技術の開発を進めることが GNEP 政策の一環として目指された。遅れていた地層処分取組についても、ユッカマウンテン計画を進め、2008 年には NRC への許認可申請を実現した。

これに対し 2009 年に誕生した民主党オバマ政権では、All-of-the-Above 路線を掲げて原子力発電は必要としつつも、その利用拡大には廃棄物問題の解決と核不拡散懸念への対応が不可欠として、核燃料サイクル関連の研究開発についてもこれらの課題解決を図る長期的なプログラムに重点が置かれた。現行技術での燃料サイクル推進には強い抵抗を示し、AFCI／GNEP は廃止され、長期的に廃棄物減容と核拡散抵抗性の改善を図る燃料サイクル研究開発(FCRD)プログラムを新設し、大きな予算が配賦された。廃棄物処分については、ユッカマウンテン計画の中止を決定し、BRC により核燃料サイクル政策全般を含めた検討が行われ、同意に基づくサイト選定等が勧告された。しかし、連邦議会とのねじれ構造もあって具体的な政策構築は進まず、処分についても一般的な研究開発活動が主流となった。

2017 年に誕生した共和党トランプ政権では、原子力発電を支持して既存原子力発電の支援等が目指された一方、総予算規模縮小の大方針の下で、FCRD を含め、オバマ政権時代の研究開発プログラムの大幅縮小が要求された。ユッカマウンテン計画の復活も目指された。連邦議会はこれらトランプ政権の要求を認めず、オバマ政権時代と大きく変わらない予算が決定され、FCRD の多くの活動が継続された。

2021 年に誕生したバイデン政権では、廃棄物問題と核不拡散は引き続き核心的なテー

³⁶ EPRI ウェブサイトで”fuel cycle”、”reprocessing”等のキーワード検索で確認。

マと位置づけつつも、気候変動対応が最優先と位置づけられる中で、既存原子力発電の支持とともに、先進炉開発等実証段階の研究開発プログラムへの積極的な支援が行われている。FCRD での研究開発に加え、トランプ政権末期に議会が制定した 2020 年エネルギー法を受けて、ARPA-E における研究開発プログラムも開始された。

政策の振れ幅の大きい政権に対し連邦議会では、ブッシュ政権が起ち上げた GNEP 等現行技術での燃料サイクル推進には抵抗も見られたが、気候変動対応が急務と認識される中で、原子力利用を積極的に支持する姿勢が継続的に見られる。高い安全性に加えて廃棄物・核不拡散上の懸念が相対的に少ない先進炉への支持は、継続的に強い。連邦議会における原子力研究開発への強く安定した支持の背景には、エネルギー関連の委員会には国立研究所等 DOE 施設の立地州の選出議員が多いことも背景として挙げられる。歴史的に見られた USEC への支持、近年特に強まっているウラン生産への支持等についても、関連州の選出議員の影響も考えられる。また、原子力発電事業者等を代表する NEI は強力なロビー団体であり、議会等に強い影響力を持っていると言われる。

バックエンドについては、ユッカマウンテン処分場計画を巡る動きが燃料サイクル分野の研究開発プログラムにも大きな影響を与えてきた。同計画中止を決定したオバマ政権では、新設した FCRD プログラム等でバックエンド分野の長期的・一般的な研究開発プログラムが拡充されたが、同計画復活を目指すトランプ政権ではこれを否定する姿勢が見られた。バイデン政権では、後述の ARPA-E での取組等、問題解決に向けた新たな拡がりが見られる。バックエンドに係る政権の振れ幅は大きいですが、連邦議会は膠着状態で新たな決定ができず、オバマ政権以来の研究開発プログラムが継続されてきた。その中で一部議員のバックエンド政策硬直への危機意識は強く、2020 年には ARPA-E でバックエンド関連のプログラムを可能とする 2020 年エネルギー法も制定されている。

(2) 燃料サイクル研究開発(FCRD)プログラム

DOE の研究開発プログラムでは、オバマ政権時代に新設された FCRD プログラムにおいて、フロントエンド／バックエンドの研究開発プログラムが実施されている。政権によりプログラムの重点は変化しているが、直近のプログラム及び予算額は以下のとおりとなっている。

表 3.1-7 DOE の燃料サイクル研究開発(FCRD)予算

単位:千ドル

サブプログラム名	歳出法で決定された予算			FY23 DOE 要求
	FY21	FY22	FY23	
採鉱・転換・輸送	2,000	2,000	2,000	1,500
先進燃料利用可能性*		45,000	0 +700,000 +100,000	95,000
民生用濃縮	40,000			0
フロントエンド燃料サイクル計	42,000	47,000	2,000	96,500
物質回収・廃棄体開発	25,000	30,000	45,000	38,000
事故耐性燃料	105,800	115,000	114,000	113,900
TRISO 燃料・グラファイト性能認定	36,000	37,000	32,000	27,000
先進燃料計	141,800	152,000	146,000	140,900
燃料サイクル実験室研究開発**	20,000	23,150	29,000	46,500
使用済燃料処分 (UNFD) 研究開発	62,500	50,000	47,000	46,875
統合放射性廃棄物管理 (IWMS)	18,000	18,000	53,000	53,000
燃料サイクル研究開発合計	309,300	320,150	322,000 +700,000 +100,000	421,775

TRISO 燃料: HALEU を用いた酸化ウラン (UCO) に三重被覆 (TRISO) をした被覆粒子燃料

* DOE の FY23 予算要求では「HALEU 利用可能性」

FY23 歳出予算は、通常の歳出予算ではなく、2022 年インフレ抑制法の 700 百万に加え、FY23 歳出法のウクライナ追加補正予算 (Division M) において 100 百万が配賦された。

**DOE の FY23 予算要求では「燃料サイクル核心研究開発 (Fuel Cycle Core R&D)」

出所) FY22～FY23 予算要求資料及び歳出法から作成[3.1-13][3.1-25][3.1-36][3.1-38][3.1-52]

「フロントエンド燃料サイクル」として計上された予算では、民生用濃縮 (Civil Nuclear Enrichment) サブプログラムで実施されてきた USEC による 3 年間の HALEU 生産実証プログラムの遅延を受けた継続活動が、FY23 予算では HALEU 利用可能性プログラムとして DOE から要求され、議会により先進燃料利用可能性プログラムとして、2022 年インフレ抑制法で 700 百万ドル、及び FY23 歳出法のウクライナ追加補正予算において 100 百万ドルが承認されている。[3.1-25][3.1-38][3.1-36]

DOE 予算要求資料における FCRD プログラムの記述では、特に転換・濃縮技術に係る研究開発活動は確認できない。DOE の FCRD には「採鉱、転換、輸送」(Mining, Conversion and Transportation) サブプログラムがあり、米国におけるウラン採鉱、転換、輸送能力に係る技術進歩を可能とする研究開発活動を費用折半で支援することとされているが、FY21～FY22 予算及び FY23 予算要求ではウラン採鉱技術の研究開発に予算が配賦されているのみとなっている。「採鉱、転換、輸送」サブプログラムは、FY20 予算において、連邦議会の指示により新設されたプログラムで、初年度の FY20 には米国

のウラン採鉱・転換能力を再構築するための課題が評価された。FY21 以降は、水使用量の削減／抽出効率改善等ウラン採鉱技術の研究開発のみが実施されており、転換に係る研究開発の言及はない。[3.1-17][3.1-18][3.1-19][3.1-25][3.1-38]

先進燃料として計上された予算では、事故耐性燃料の研究開発が予算の多くを占めているが、他では TRISO 燃料に係る照射試験、照射後試験(PIE)、安全性試験や燃料挙動モデリング等の研究開発活動が 2002 年から継続されている。[3.1-25]

燃料サイクル実験室研究開発は、バイデン政権では燃料サイクル核心研究開発(Fuel Cycle Core R&D)、トランプ政権では単に燃料サイクル研究開発として要求されていた研究開発活動で、様々な燃料サイクル技術及び核不拡散関連技術について、革新的変化をもたらし得る初期段階の技術に係る研究開発活動を行うものである。トランプ政権下では最小限の予算要求となっていたが、議会制定の歳出法では安定的な予算が計上されている。バイデン政権では、先進炉燃料関連等で大幅な増額が要求されていた。[3.1-18][3.1-19][3.1-25][3.1-13][3.1-38]

バックエンド分野では、使用済燃料処分(UNFD)研究開発プログラムにおいて、3 種の母岩における一般的な地層処分関連の研究開発活動が継続されるとともに、中間貯蔵等喫緊の使用済燃料管理に係る活動準備のための統合放射性廃棄物管理(IWMS)プログラムが実施されている。米国ではオバマ政権によりユッカマウンテン計画廃止方針が打ち出されたが、法律上は NWPA によりユッカマウンテンが唯一の処分場候補地として指定されており、他の使用済燃料管理方策を具体的に進めることは出来ない中で、一般的な研究開発活動が行われている。トランプ政権初期では UNFD 予算は廃止／縮小し、ユッカマウンテン計画進展のための予算が要求されていた。民主党政権では、ブルーリボン委員会の 2012 年勧告等を受けた一般的な研究開発活動予算が要求されている。

IWMS では、中間貯蔵プログラムの開始等、特にオバマ政権下ではユッカマウンテン計画に代わる使用済燃料管理方策の実現に向けた予算も要求されたが、NWPA 改正が実現しない中で、現行の法的枠組みの中で可能な準備的な活動のみに限定されている³⁷。中間貯蔵プログラムの予算は、FY22 までの歳出法では、政権が要求した IWMS(研究開発予算)ではなく、かつてユッカマウンテン計画の予算が計上されていた「放射性廃棄物処分(Nuclear Waste Disposal)」の一部として配賦されていたが、FY23 予算歳出法では、政権要求通りに IWMS の一部として配賦された。従って、FY23 の IWMS 予算の実質的な増額幅は 15 百万ドルとなるが、DOE 予算要求資料では、同意に基づくサイト選定プロセスに係る活動の加速(コミュニティ等の参画拡大のための資金提供公募(FOA)の 10 百万ドルを含む)、使用済燃料輸送計画の取組進展等が増加要素として示されている。

³⁷NWPA では連邦政府による中間貯蔵施設の建設は、処分場プログラムの進捗とリンクする形でのみ認められている。

(3) CURIE

1) 概要・背景

CURIE(Converting UNF Radioisotopes Into Energy,「使用済燃料の放射性物質をエネルギーに変換」)は、その名の通り軽水炉の使用済燃料の再処理等により廃棄物を減容し、エネルギーの効率的利用を図るための革新的技術の開発を目指す ARPA-E の官民コストシェア・プログラムである。後述する ONWARDS は、CURIE と同様に HLW 量を最小化する革新技術を求めるものであるが、ONWARDS が将来の先進炉廃棄物の最小化を目指すのに対して、CURIE は既存 LWR 発電所からの使用済燃料に焦点を当てたものであり、先に開始された ONWARDS を補完するよう設計されている。[3.1-96]

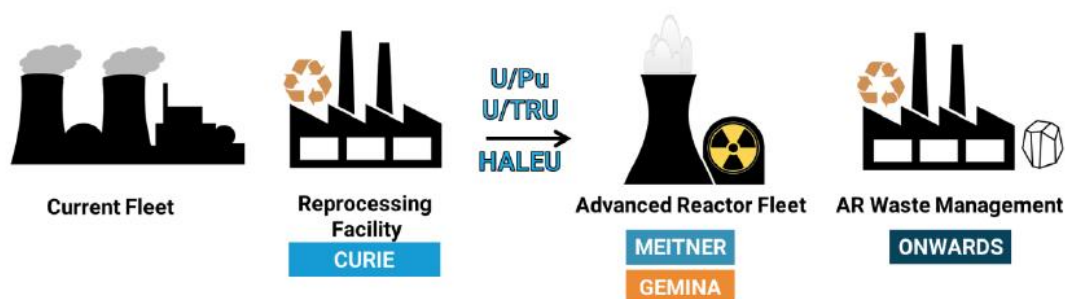


図 3.1-3 ARPA-E 研究開発プログラムの位置づけ

出所) CURIE FOA[3.1-97]から引用

CURIE の FOA は、2022 年 3 月 15 日に発行された。申請書は 7 月まで受け付けられ、2022 年 10 月には 1 つまたは複数のプロジェクトが選定される予定が示され、1 プロジェクト当りの提供資金は 250 千ドル～10,000 千ドルとされた。ARPA-E は、2021 年 5 月 11 日に” Cleaning Up RadioIsotope Enventories” (CURIE)と題する RFI を発行し、2021 年 6 月 14 日迄の期間で、使用済燃料の効果的な管理を可能とする技術開発に焦点を当てた ARPA-E 研究開発プログラムの可能性について意見を募集した。また、翌月には CURIE のワークショップもオンラインで開催された。その後 ARPA-E は、2022 年 2 月 10 日に、名称を現在の” Converting UNF Radioisotopes Into Energy” (CURIE)に変更した上で再度 RFI を発行し、CURIE の FOA を発行する際の技術的内容案に対して意見を募集した。[3.1-97][3.1-98][3.1-99]

ARPA-E で対象とするプログラム分野については、従来はバックエンド分野のプログラムは明示されていなかったが、2020 年 12 月に制定された 2020 年エネルギー法によって ARPA-E の目標に「放射性廃棄物と使用済燃料の管理、クリーンアップ、処分の改善の

ために革新的な解決策を提供する」が追加された³⁸。FY22 予算要求においても、これが ARPA-E の任務の 1 つとして初めて明記された。FY22 予算要求では、ARPA-E の新規プログラムの候補となる技術領域が 15 示されており、その 1 つとして「高レベル放射性廃棄物の劇的な削減技術」が挙げられている。DOE の FY22 予算要求資料では、安全性及びセキュリティの面で放射性廃棄物に内在するリスクを除去する革新的な技術・プロセスを通じて、現存する HLW の処分に係る喫緊の必要性に対応することが重要な要素である等としている。[3.1-13][3.1-19]

2022 年 10 月 21 日には、CURIE の資金提供先として表 3.1-8 に示す 12 プロジェクトが選定され、DOE から 38 百万ドルの資金が提供されることが発表された。(各プロジェクトの概要については後述)[3.1-100]

³⁸ 2020 年エネルギー法は、2021 年度包括歳出法(H.R.133、Public Law 116-260)の一部(Division Z)として成立した。ARPA-E の目標(goals)の変更は同法 10001 条で規定されている。

表 3.1-8 CURIE 選定プロジェクト一覧

選定先	プロジェクト名	金額(ドル)
GE Research	Monochromatic Assays Yielding Enhanced Reliability (MAYER) (高信頼性をもたらす単色アッセイ:MAYER)	6,449,997
University of Alabama at Birmingham	Group Hexavalent Actinide Separation: A Single-Step, Proliferation-Resistant Approach to Nuclear Fuel Reprocessing (六価アクチニドの群分離: シングルステップの核拡散抵抗性ある再処理アプローチ)	1,844,998
NuVision Engineering	Modular Power Fluidics and Online Optical Spectroscopy for Reprocessing Plant Control and Accountancy (再処理プラント計量管理のためのモジュール式パワー・フルイディクス及びオンライン分光法)	4,715,163
University of North Texas	Self-Powered Wireless Hybrid Density-Level Sensing with Differential Pressure Sensors for Safeguarding and Monitoring of Electrochemical Processing of Nuclear Spent Fuel (使用済燃料の電気化学的処理の保障措置・監視のための圧力差センサー付きの電源内蔵型無線式ハイブリッド密度レベル検知)	2,711,342
Argonne National Laboratory (ANL)	Radioisotope Capture Intensification Using Rotating Packed Bed Contactors (回転固定層接触器を使用した放射性同位元素捕捉の補力(intensification))	1,520,000
University of Colorado, Boulder	Achieving 1 % Assay of Special Nuclear Materials in 2 Minutes with Microcalorimeter-Array Gamma-Ray Spectroscopy (マイクロ熱量計配列でのガンマ線分光法により2分間で特殊核物質の1%検定を達成)	1,994,663
University of Utah	Pyrochemical Dissolution of LWR Spent Fuel with Actinide Recovery for Advanced Reactors (先進炉向けのアクチニド回収が可能な軽水炉使用済燃料の乾式溶解)	1,454,074
Curio	Closing the Cycle with NuCycle™ (NuCycle™によるクローズドサイクル)	5,000,000
Argonne National Laboratory (ANL)	Highly Efficient Electrochemical Oxide Reduction for U/TRU Recovery from LWR Fuel (軽水炉燃料からのウラン/TRU 回収のための高効率な電気化学的酸化物還元)	4,900,000
Idaho National Laboratory	Development of Robust Anode Materials for the Electrochemical Recovery of Actinide Elements from Used Nuclear Fuel (使用済燃料からのアクチニド元素の電気化学的回収のためのロバストな陽極材の開発)	2,659,677
EPRI	Establishing an Advanced Reactor Fuel Cycle Enterprise (先進炉燃料サイクル事業の確立)	2,796,545
Mainstream Engineering	Improved Volatile and Semi-volatile Radionuclide Off-Gas Management (揮発性及び準揮発性の放射性元素オフガス管理の改善)	1,580,774

2) CURIE プログラムの目標

CURIE プログラムの目標は、既存の LWR 発電所からの使用済燃料について、再処理技術、プロセス監視、及び施設設計における主要なギャップ／障壁を解決することにより、使用済燃料再処理を商業的に可能なものとする 것과されている。使用済燃料中のアクチニドは、理想的には先進炉の燃料と出来るよう再処理し、他の商業的価値がある物質につ

いても産業・医療分野で活用が考えられるとした上で、CURIE で資金提供されるプロジェクトは、再処理技術の経済性やプロセス監視を劇的に改善するとともに、処分が必要となる使用済燃料中の HLW の量を劇的に削減するような、革新的な分離技術、プロセス監視技術や装置設計を開発するものとされている。[3.1-97]

具体的には、CURIE が対象とする技術は、以下の全体的プログラム・メトリクス(global program metrics)の1つ以上を満足し、他のプログラム・メトリクスにマイナスの影響を与えないものとされている。

- ・ 最終処分が必要な LWR の HLW 量を劇的(最低1桁以上)に削減する
- ・ 処分費用を 0.1 セント/kWh³⁹の範囲に維持する
- ・ 200MTHM⁴⁰/年の施設で燃料コスト1セント/kWh を達成する⁴¹
- ・ プロセス後の計量管理を 1%以内の誤差で予測可能な、特殊核物質の原位置プロセス監視アプローチを可能とする
- ・ プルトニウムを単離しない使用済燃料の(核種)分離を可能とする

3) 技術的関心カテゴリ

CURIE の技術的関心領域としては、以下の4つのカテゴリが示されている。ARPA-E は、2つ以上の技術カテゴリに括がる提案を強く期待するとしている。[3.1-97]

- ① 再処理技術
- ② 統合的な監視・計量管理
- ③ システム設計・評価
- ④ その他

CURIE の FOA では、カテゴリ①または②の技術を提案する際には、以下を明示することとされている。

- ・ 提案する技術が、対象となるユニット運転のコスト低減をどのようにもたらすのか
- ・ その技術が、再処理施設の他の部分の資本費・運転費に与える影響
(例えば、核種分離はプロセス廃棄物を最小化し、結果として施設の廃棄物処理という下流のコストを減少させる)
- ・ その技術のため、施設及び燃料サイクルの全般にどのような技術的調整が必要となるか(例えば、提案する分離技術のために上流では従来以上の選定プロセスが必要)
- ・ 発生する廃棄物の数・量の最先端レベル(SOTA: State of the Art)技術との比較

また、資本費や運転費、燃料費等への影響を評価する際は、CURIE FOA 付属の再処理コスト推定ワークブックを使用して以下の表(図 3.1-4)を示すことが必要とされている。

³⁹ 米国では NWPA において、発電事業者らが支払う処分費用の拠出金が 0.1 セント/kWh と規定されている。(但し、現在はユッカマウンテン計画のトン挫により拠出停止中)

⁴⁰ 重金属換算トン(Metric Ton of Heavy Metal)

⁴¹ 再処理施設からの燃料コストの評価は、ARPA-E の再処理コスト推定ワークブックを使用するものとされている。

Category	Upstream Impact	Direct Impact	Downstream Impact
Capital Expenditure (% savings)			
Operational Expenditure (% savings)			
Anticipated total ¢/kWh fuel cost			

図 3.1-4 再処理費用推定の報告表(CURIE FOA)

4) CURIE プロジェクトの概要

CURIE プログラムで選定されたプロジェクトについては、以下のとおりその概要が公表されている。[3.1-101]

a. GE リサーチ

GE リサーチが開発する「高信頼性をもたらす単色アッセイ:MAYER」は、湿式再処理施設の革命的な保障措置方策であり、小型で調整可能なコンプトン散乱(Compton scattering)レーザー放射線源により、高放射線環境における核分裂性元素の元素及び同位体濃度について、高い正確性(不確実性<1%)及び低遅延(<2 分)での原位置計測を可能とする。

GE リサーチは、データの統合性及び透明性を強化するためのデジタル式帳簿技術を推進する、再処理施設保障措置管理のデジタル式バーチャル・パイロット・モデル(virtual pilot digital twin)も構築する。このデジタルモデルは、物質インベントリの標準誤差を低下させる能動的防御を提供して有害事象を予測するためのオンデマンドの連続的な AI 訓練を可能とし、施設の停止が必要となる前に緩和策を可能とする。

b. アラバマ大学バーミングハム校(UAB)

UAB は、硝酸塩溶融後の第 1 ステップとして、酸化 TRU と硝酸ウラニル六水和物の共晶析により、ウラン及び TRU の相当量を回収可能なシングルステップの使用済燃料リサイクル技術を開発する。このシングルステップのアクチニド群分離により、以下が達成される。

- ・ 最終処分が必要な軽水炉の HLW の量を大幅に減少
- ・ U/TRU を単一の製品ラインで結合した燃料フィードを提供
- ・ 生成物中の核分裂性物質を 0.1%未満に削減
- ・ オンライン監視技術との親和性

c. NuVision エンジニアリング

湿式再処理プラントについて、処理後の物質計量管理で不確実性 1%以内の予測を目指す統合的な計量管理試験プラットフォームの設計、建設、運転を行う。

この計量管理プラットフォームは、モジュール式のパワー・フルイデックス(PF)及びオンライン分光法(OOS)システムを、再処理プラントの寿命を通じて利用できるよう槽内に組み込む形で製作される。PF 部には、高レベル放射性溶液を混合、サンプリングしてリアルタイムの液レベルや密度が計測可能な機器があり、OOS システムはウラン及びプルトニウムのリアスタイム・モニタリングを可能とする。

d. ノース・テキサス大学(UNT)

UNT は、使用済燃料の電気化学的処理の保障措置・監視のために、高温溶融塩の密度及びレベルについて長期に原位置でリアルタイムに監視するための革新的な電源内蔵無線式圧力差センサーを開発する。センサー及び無線機器への連続的な電源供給のため、熱発電機(thermoelectric generator)が電解精製室に直接「印刷」される予定である(壁面等に熱発電素子をインクジェット方式の印刷法により形成する技術が使用され则认为られるが、CURIE プロジェクト概要ではこれ以上の情報は示されておらず、詳細は不明)。

e. アルゴンヌ国立研究所(ANL)

ANL は、使用済燃料の再処理のために、「放射化学分離のための遠心力機器パック」(PACER:PACked Centrifugal Equipment for Radiochemical separations)と呼ばれるコンパクトな回転充填層(RPB:Rotating Packed Bed)の開発、製造、試験を行う。

PACER 技術は円筒状の充填層(ガラス・ビーズ)から形成され、液体が通ると、遠心力場により噴射される。これにより、充填層の効率が上がり、最先端の分離間と比較して50%以上も必要とされる充填剤が削減される。PACER は、現行の CO₂ 及び I₂ のオフガス洗浄システム、パルスカラム、イオン交換カラムという、気体-液体、液体-液体及び固体-液体の分離方法を置き換えることが可能である。PACER ユニットは、材料、製造及び遮へい要件が減少することから、充填カラムより設置コストも低くなる。

f. コロラド大学ボルダー校(CU-Boulder)

CU-Boulder は、核物質の計量を改善する新しいツールである極低温のマикроカロリメータ・アレイを使用して、高解像度のガンマ線分光法を開発する。

マイクロカロリメータは、CURIE プログラムの不確実性 1%以下との目標はクリアするものの、速度目標には届かないため、現行機器の 20 倍の 200 カウント/秒のマイクロカロリメータ・ピクセルを製造し、それを 4,000 個使用するシステムにより、プルトニウム同位体の量を 2 分で計測可能とする。この能力により、HALEU の濃縮度、再処理及び廃棄物生成に至る核分裂性物質の量、高精度のプルトニウム同位体アッセイや、ウラン/TRU 生産物における主要なウラン/プルトニウム同位体比率についても、測定することが可能となる。

g. ユタ大学

ユタ大学は、使用済燃料を、SFR や MSR に適したウラン／TRU 製品に効率的に転換するパイロケミカル・プロセスを開発する。このプロセスは、単一の反応槽で可能な 2 つの重要な分離ステップ(①塩化リチウム(LiCl)-塩化カリウム(KCl)溶融塩における酸化使用済燃料の溶解、②電極におけるウラン／TRU 金属の電気化学的回収)に基づいている。

本プロセスが実現した場合は、厳格な保障措置を支援する入量計量タンクを持つ初めてのパイロケミカル・プロセスとなる。全体として、燃料バスケット廃止、処理ユニットの統合、及び単一の溶媒塩(LiCl-KCl)の使用により、従来よりも物質のハンドリングが少なく必要空間も小さいパイロケミカル・プロセスが実現可能で、高スループットで経済性が高いパイロケミカル・プロセスに繋がり得るものとなる。

h. キュリオ(Curio)

キュリオ社のプロジェクトでは、NuCycle™と呼ばれる使用済燃料再処理プロセスを実験室規模で開発、実証する。NuCycle は、従来プロセスと比較して、純粋なプルトニウム生産を回避し、劇的に廃棄物量が減少可能な設計とされており、経済性に優れ設置面積が小さく、既知の化学的プロセスを独特な形で利用し、様々な種類の使用済燃料(溶融塩、窒化物燃料等)に対応する。NuCycle は、使用済燃料を資産に変えるパラダイムシフトを実現し、米国における使用済燃料再処理が商業的に成立することを実証するとしている。

i. アルゴンヌ国立研究所(ANL)

ANL のこのプロジェクトでは、商業規模パイロプロセス施設に対する CURIE プログラムのコスト及び廃棄物の基準に適合する、電気化学的酸化物還元(OR)プロセスを開発する。

電気化学的酸化物還元は、使用済酸化物燃料を金属に変換する単一ステップのプロセスであるが、現在は効率が低く、金属への変換が不均一・不完全、処理時間が長い、廃棄物量が多い等の問題があるため、ANL は以下により 97%の変換率の高効率の酸化物還元プロセスを実証する。

- ・ 酸化物から金属への変換を監視するセンサー導入
- ・ 安定的で高効率の次世代電極材を使用
- ・ 空間的に均一な金属変換を達成するため電解槽設計を最適化

j. アイダホ国立研究所(INL)

INL は、使用済燃料におけるアクチニド／核分裂性物質酸化物を電気化学的に還元するロバストな電極材を設計、製造、試験する。使用済燃料の電気化学的還元は、電解精錬によるアクチニド回収が可能となるパイロプロセス工程において、重要なステップとなる。

プラチナや黒鉛製の現行の電極は、コストが高い、劣化が速い、生成金属による汚染、脱炭素社会にマイナス等の問題があるため、INL は、産業利用に向け、イリジウムとルテニウ

ムのバイメタルをコートした電極を製造し、性能を評価する。ロバストな電極材の開発は、温暖化ガス発生やプルトニウム分離なしに酸化物使用済燃料を処理する、革新的な解決策に繋がるとしている。

k. 電力研究所(EPRI)

EPRI は、核燃料サイクル管理と先進炉燃料供給という 2 つの繋がった課題への対応を目指して、統合的な燃料サイクルの企画を構築する。

溶融塩高速炉(MCFR)等の先進炉の燃料を生成するリサイクル施設のためのオプションと併せ、投入される軽水炉燃料の原料オプションについて、キャラクターゼーション、及び経済的実現性の評価を行う。EPRI は、この情報を活用して、多数の多様なオプションについて互換性や効率を評価する、再処理施設最適化ツールを開発する。そのツールから得られる情報は、運転中の軽水炉サイトにおける可能性も含め、マルチサイクル施設と併設されるリサイクル施設の設計に資するものとなる。

l. メインストリーム・エンジニアリング社

メインストリーム・エンジニアリング社は、揮発性放射性核種を分離・捕捉するためのバキューム・スイング分離ユニットの連結運転を開発する。使用済燃料の湿式再処理施設操業時のオフガスから揮発性放射性核種を捕捉し貯蔵するために、現行の資本費の 10% 以上、及び操業費の相当部分を要しており、その解決を目指す。

バキューム・スイング吸着ユニットには、全体的なプロセスの効率性を最大化してライフサイクル資本費・操業費を低下させるために、放射性核種を除去・集中する固有の吸着剤が入っており、貯蔵すべき廃棄物を最小化する。このコンパクトなユニットにより、揮発性放射性核種を 99.9% 以上確実に捕捉しつつ、遮へいが必要なエリアの減少、オフガスのロジスティクス単純化、必要エネルギーの削減が実現する。

(4) 米国の転換、濃縮、再転換に係る最新技術動向

米国におけるフロントエンド分野の技術開発の取組は、転換・濃縮事業者の他、DOE 国立研究所を含む研究所、大学等で行われている。以下では、転換・濃縮技術の開発について、各事業者及び民間研究所(EPRI)における情報を確認するとともに、国立研究所と大学の研究開発活動については、主な発注元となる DOE の予算要求資料等の文書を中心として調査した。

1) 転換・再転換

米国で唯一の転換施設を持つハネウェル社は、2023 年の操業再開を目指して準備中であるが、操業再開時あるいは再開後における新たな転換技術開発に関する情報は、同社年報／ウェブサイト、NRC 提出文書、DOE 主催会議での資料を確認する限り、示されていない。ハネウェル社は、MTW の再開に技術的課題はなく、需要さえあれば元の能力

(15,000 トン／年)に復帰することは可能で、モジュール方式で建設されているため全装置が入替え可能で工場に設計寿命はないとしている。[3.1-74][3.1-77][3.1-76][3.1-102]

また、2012 年に NRC 許認可を取得し、ニューメキシコ州で再転換施設の建設を計画していた INIS 社は、事業環境が好転すれば施設の建設・操業を行う意向を示している。同社の年次報告書では、商業規模再転換施設に併設されるフッ素抽出技術は、初めての試みであり不確実性があるとしつつも、特に更なる技術開発を行っているとの情報は示されていない。INIS 社プラントでは、抽出した高純度のフッ素を主製品として位置づけている。[3.1-103]

事業者以外の取組として、DOE の研究開発プログラムでは、3.1.6(1)で報告したように、オバマ政権時代から FCRD プログラムにおいてフロントエンド／バックエンドの研究開発プログラムが実施されているが、DOE 予算要求資料では、特に転換・濃縮技術に係る研究開発活動は確認できない。特に、FCRD の「採鉱、転換、輸送」(Mining, Conversion and Transportation)サブプログラムは、米国におけるウラン採鉱、転換、輸送能力に係る技術進歩を可能とする研究開発活動を費用折半で支援することとされているが、FY21～FY22 予算及び FY23 予算要求ではウラン採鉱技術の研究開発に予算が配賦されているのみで、転換に係る研究開発の言及はない。[3.1-104]

その他、DOE 支援が適用された大学の研究開発活動、EPRI 等については、下記によりウェブサイト情報で確認した範囲では特に転換・濃縮に係る技術の研究開発活動は確認できない。

- ・ DOE には大学の研究開発活動の支援 (NEUP: Nuclear Energy University Program) があるが、NEUP ウェブサイトでの検索では、ウラン濃縮技術及び転換技術に関する研究プログラムは確認されなかった⁴²。[3.1-105]
- ・ 民間の研究機関である EPRI についても NEUP と同様のプロジェクト検索を行ったが、ウラン濃縮技術及び転換技術に関する研究プログラムは 2020～2022 年度には確認されなかった。
- ・ また規制機関の NRC でも先進炉の許認可審査に向けた対応の中でワークショップ等が開催されており、12 月 8 日には「先進炉燃料活動の概要」と題する会議が行われたが、燃料設計関連の情報が多く、燃料加工への言及は一部見られるものの、濃縮・転換に関する議論は確認できない。[3.1-106]

2) 濃縮

a. 概況

米国におけるウラン濃縮事業については、2000 年代～2010 年代初期にかけて原子力

⁴² 濃縮については、“enrichment+centrifuge”、転換については“conversion UF6”で検索し、ヒットした論文・報告書を確認した。

ルネサンスが喧伝される中で、NRC の許認可発給も得て多くの濃縮施設の建設が計画されていた。事業環境の悪化に伴ってこれらプロジェクトは何れも凍結や廃止されることとなったが、商業規模での操業が実証されていないセントラス・エナジー社の ACP、及び GLE レーザー濃縮については、開発のスピードは鈍化したものの開発活動が継続されている。

また米国では、国防活動向けに米国起源のウラン及び濃縮技術が必要とされることから、DOE の NNSA が、国産濃縮技術の調達を検討する中で、濃縮技術の開発・実証プログラムを実施している。

b. セントラス・エナジー社の ACP

セントラス・エナジー社の ACP 技術については、最終的には 2019 年開始の HALEU 生産実証プロジェクトを含め、USEC 時代から DOE の費用折半等による研究開発／実証プロジェクトが続けられ、技術的には商業化プラント建設が可能な段階に達しているものと考えられる⁴³。

HALEU 生産実証プロジェクトは、当初予定された 2022 年 6 月までのプラント操業、HALEU 生産には至らなかったが、これは DOE 調達のサプライチェーンの問題とされており、セントラス・エナジー社はプロジェクトのマイルストーンを順調に達成していたと報告されている。[3.1-115][3.1-116]

セントラス・エナジー社は、HALEU 生産実証プロジェクトの継続契約が 2022 年 10 月に決定され、プラントの完成、操業、HALEU の実証生産へと進む予定であり、このプロジェクトが成功すれば、LEU を含めて ACP が実用化段階にあることを実証できると考えられる。こうした状況から、セントラス・エナジー社の ACP 技術については、カスケード実証運転を継続する中で、メンテナンスや耐久性等の検証が活動の中心となっていると考えられる。

c. GLE レーザー濃縮

GLE 社のレーザー濃縮技術は、2012 年に NRC の許認可を得たが、事業環境の悪化の中で開発プロジェクトは減速され、GEH 社撤退による事業体制再構築で、51%を豪 Silex 社、49%を加カメコ社が保有する状況となっている⁴⁴。GLE のレーザー濃縮技術は、U235 の分離能力に優れ、遠心分離技術よりも効率性が高い第 3 世代の濃縮技術であり、プラントも大幅に小型化が可能とされる。GLE 社レーザー濃縮技術の開発状況については、以下の通り報告されている。[3.1-107][3.1-108][3.1-109]

- ・ 米 Wilmington プラントは、2009 年に運転を開始した試験ループで 10 年以上の運転実績を達成しており、分離装置の技術成熟度レベル(TRL:Technology Readiness Levels)は 2020 年 4 月段階で 4~5 とされ、スケールアップが計画さ

⁴³ セントラス・エナジー社の ACP 技術開発については、改めて次項で報告する。

⁴⁴ カメコは、2023 年 1 月から TRL-6 達成後 30 カ月まで 26%買い増しのオプションを有する。

れている。

- ・ 豪 Lucas Heights の Silex 社施設で開発されていたフルスケールのレーザー・制御システムは、2020 年 4 月段階で TRL5 にあったが、試験プログラムを完了して 2022 年中に Wilmington の試験ループ設置に向けて輸送される予定である。追加のレーザーモジュールも建設中で、2023 年に搬送される予定とされている。

GLE は、DOE 保有の劣化ウラン濃縮をパデューカサイトで行うプロジェクトを 2016 年に受注しており、2020 年代後半にパデューカ・レーザー濃縮施設(PLEF)を建設し、レーザー濃縮技術の商業化を実証する計画である。DOE との契約は、DOE 劣化ウランを再濃縮して天然ウラン(UF_6)を生産するもので、2025 年迄に商業化パイロットプラントでの実証試験を完了し、PLEF のフィージビリティ調査と許認可審査を経て 2027 年に設計・調達・建設(EPC)契約、2030 年から商業運転開始の計画となっている。なお、現在、2027 年に商業運転が開始できるよう計画前倒しが検討されている。PLEF では、 U_3O_8 換算で 500 万ポンド(約 2.27 トン)／年の天然ウランを 30 年に亘って生産する計画である。原料(劣化ウラン)も製品(天然ウラン)も UF_6 となるため、転換コスト分の低減にも繋がる。

2022 年 10 月の Silex 社資料に拠れば、ロシアによるウクライナ侵攻を受け、パデューカでは、上記の天然ウラン生産プロジェクト(PLEF I)に加え、LEU 及び LEU+ の生産(PLEF II)、HALEU の生産(PLEF III)の可能性も検討されている。[3.1-110]

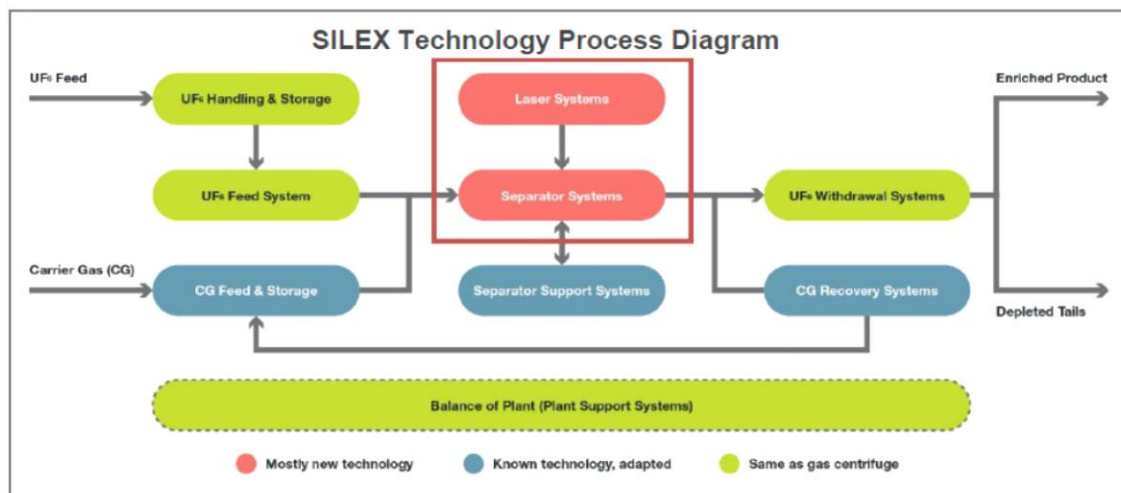


図 3.1-5 Silex 技術プロセス図

出所)Silex 社、2022 年 8 月 31 日付ニュースリリース[3.1-108]

d. ORNL の小型遠心分離技術(NNSA 国防予算での研究開発)

DOE/NE の下で進められている HALEU 生産実証プロジェクトと並行して、DOE の NNSA においても国産濃縮技術の確保に向けた検討が ORNL で行われている。NNSA は DOE で国家安全保障関連の活動を行う機関で、LEU から兵器用のトリチウム生産を行っているが、USEC がパデューカガス拡散濃縮プラントを閉鎖したことにより、国防活動

用の LEU を確保することが必要となり⁴⁵、代替案分析(AOA)実施が 2016 年 10 月に決定された。[3.1-94]

唯一の米国技術の濃縮施設である USEC のパデューカプラントが 2013 年に閉鎖されたことを受け、連邦議会はトリチウム・濃縮ウラン確保オプションの分析を行うよう 2014～2015 年に NNSA に指示し、NNSA は 2015 年 10 月に「2060 年までのトリチウム・濃縮ウラン管理プラン」を策定していた。同プランでは様々なオプションから 6 つの選択肢が同定されていたが、パデューカ再開等多くのオプションは非現実的で、ACP 及び「小型遠心機設計」の 2 つが最も実現可能なオプションとして位置づけられていた。NNSA は、同位体製造等で ORNL に蓄積されていた遠心分離技術をベースとして、「国内ウラン濃縮遠心分離実験(DUECE)」プロジェクトを 2016 年に開始した。

ORNL は、DUECE プロジェクトについて、ORNL における専門能力を活かして行われるものであり、その目標は 2040 年代に NNSA が必要とする LEU を供給する技術を開発・実証することとしている。ORNL ウェブサイトでは、電磁濃縮同位体施設(EIEF)や濃縮安定同位体パイロットプラント(ESIPP)、安定同位体生産施設(SIPF)等アクチニド濃縮の情報は確認できるが、ウラン濃縮の DUECE プログラム固有の情報については上記以外には確認できない。DUECE は、ORNL において、安定同位体プロジェクトと同じ濃縮科学工学プログラム(ESEP)担当部門で実施されており、開発される小型遠心分離技術は ESIPP/SIPF で使用されている小型遠心分離機を発展させたものと考えられるが、ウェブサイト公表情報を確認した範囲では詳細は不明である。なお、ORNL で開発中の SIPF は、ESIPP をベースに能力強化した施設で、ORNL において過去 8 年間で開発された電磁同位体分離(EMIS)技術と伝統的なガス遠心分離技術を組み合わせて、効率的に安定同位体を生産するものとされている。[3.1-111][3.1-112][3.1-113]

安定同位体生産は、DOE の科学局(Office of Science)予算で行われており、FY23 予算要求では、ESIPP での実験規模の同位体製造継続とともに、SIPF の開発、更に規模を拡大した安定同位体生産・研究センター(SIPRC)の実現に向けた予算が要求されている。米国における安定同位体生産能力は、ESIPP 稼働まで途絶えた状況で国外依存状態にあったが、SIPRC により十分な生産能力が確保されると見込まれている。DOE の FY23 予算要求資料に拠れば、DUECE の小型遠心分離設計はウランガスでの実証カスケード試験に成功しており、FY23 には人員規模も拡大して実証カスケード 2 (DCAS2)を建設することが提案されている。DCAS2 は、ORNL 研究施設に約 650 m² の 2 階建施設を追加して、小型のウラン濃縮遠心分離機の可能性をカスケード状態で検証する試験施設となる。[3.1-114]

⁴⁵ 軍事目的の利用には米国産の資源、技術による LEU が必要となる。なお、DOE/NNSA は、TVA と協定を締結し、NNSA がワッツバー原子力発電所に持ち込んだ LEU 燃料を使用して、トリチウム生産可燃吸収棒(TPBAR)を挿入して発電を行うことによりトリチウム生産を行っている。

3) セントラス・エナジー社の濃縮技術と今後の戦略

Urenco 及び Orano の濃縮技術は、既に複数の施設で豊富な運転実績を有する成熟度の高い技術であるが、セントラス・エナジー社の ACP (American Centrifuge Plant) は、実証プラントでの運転が確認されているのみで商業生産には至っておらず、不確実性があり、Urenco/Orano 技術と比較して成熟度は相対的に低いと言える。

大型の遠心分離技術の ACP は、1980 年代まで DOE が開発していた技術を基盤として、USEC 時代から DOE の支援プログラムの下で開発・実証プログラムが進められ、技術的な実証は基本的には達成された段階と考えられる。2015 年時点の DOE/NNSA の評価では、実証プログラムは成功し、TRL7~8 を達成したとされ、2016 年時点では 2~5 年で商業規模生産が可能と評価されていた。[3.1-94]

ただし、大型機で課題と考えられるメンテナンスの問題、実証プログラム打ち切り後に解体されたサプライチェーン、熟練技術者の流出等、商業運転に向けての課題は大きいことが 2018 年の政府説明責任院(GAO)による評価で指摘されており、不確実性も高いと思われる。さらに、大型遠心分離プラントの ACP の商業化のためには、大きな投資額が必要となるため、連邦政府の全面的な支援無しには実現は困難と考えられ、連邦政府・連邦議会が、巨額の支援を決定できるかが鍵となる。ACP 設備完成のための費用は、2016 年 10 月時点の NNSA 評価で 7,500~14,000 百万ドルとされ⁴⁶、2018 年の GAO 評価ではこれが過小評価と指摘^{47, 48}される等、巨額に上る[3.1-94]。

セントラス・エナジー社の ACP 技術は、USEC 破綻を含めて様々な困難を経験し、商業化には政府支援が不可欠と考えられるものの、基本的には商業規模での技術が実証され、NRC 許認可も保有する、商業運転に最も近い国内技術であると言える。特に、HALEU についても米国内で唯一 NRC 許認可を保有する企業であり、先進炉開発に向けて調達方針が決定された HALEU 生産を足掛かりに、LEU 生産も含めた濃縮事業復活を図る戦略と考えられる。

セントラス・エナジー社は、2022 年 11 月には HALEU 生産実証カスケードの完成及び最大 10 年に延長される可能性がある運転契約も受注したが、DOE との HALEU 生産実証契約は、濃縮事業復活への重要な一歩と位置づけている。今回の受注は、各 30 百万ドルの折半出資で ACP100 の完成・操業開始と 20kg の HALEU 生産を 2023 年末までに行うフェーズ 1、2024 年に 900kg の HALEU を生産するフェーズ 2 の 2 段階に分かれた契約となっている。契約では、更に 9 年間に亘って HALEU 生産を発注するオプションが DOE に与えられている。フェーズ 2 以降の 900kg/年の HALEU 生産は、議会により歳出予算が配賦されることが条件となる。[3.1-115][3.1-116]

⁴⁶ これは NNSA がトリチウム生産のための国防用の濃縮設備の調達を検討する際の代替案評価プロセス(AOA)で行った費用想定である。

⁴⁷ セントラス・エナジー社が 2013 年からオハイオ州パイクトンで運転していた商業化実証カスケードは、DOE 支援打ち切りにより 2016 年からサプライチェーンを含めて解体されたが、NNSA 評価では解体前の状態からの費用が見積もられていた。

⁴⁸ 実証プラント解体から 10 年後に再開するシナリオ(2014 年のセントラス・エナジー社見積)によると、2,600 百万ドルの費用増が見込まれると GAO は指摘している。

セントラス・エナジー社は、HALEU は将来有望な市場と見ており、また HALEU 生産は ACP 技術者やパイクトン施設の維持も図れることから、TENEX からの輸入枠による SWU 等を利用して米電気事業者等に濃縮役務を販売することで収益を確保しながら⁴⁹、HALEU 生産能力の確立に重点的な投資を行ってきている。[3.1-115]

NNSA による ORNL との取組で報告したように、米国では、海外資源・技術・資本に依存しない軍事目的の濃縮能力の確保も必要となる。商業運転に最も近い国内技術を持つセントラス・エナジー社は、歴史的経緯等から DOE との絆が強いこともあり、優位にあると見られる。セントラス・エナジー社の 11 月 8 日の記者会見でも、HALEU 生産の許認可を保有する米国唯一の企業であること、調達可能な濃縮技術を持つ唯一の国内企業であることを、その優位性として挙げている。[3.1-117]

更に足元では、ロシアのウクライナ侵攻を受け、ロシアからの資源・役務輸入を排除する動きが政権・議会で広く支持され、巨額の予算も確保される流れとなっている。セントラス・エナジー社としても、HALEU 生産と併せ、ACP 商業化の実現を果たす好機と捉えていると考えられる。ただし、仮にロシアの濃縮役務が米国市場で排除された場合においても、米国市場価格の回復により、Urenco や Orano 等との競争は HALEU 燃料を含めて想定される。

3.1.7 革新炉開発におけるフロントエンド／バックエンド分野の政策・技術開発動向

本項では、先ず革新炉開発に係る米国の政策・方針について概観した後、米国で開発されている主要な革新炉プロジェクトについて示した上で、DOE で進められている革新炉に係る研究開発プログラムの先進炉開発プログラム (ARDP) 及び ARPA-E の ONWARDS プログラムについて報告する。最後に、これらプログラムにおけるプロジェクトを含め、革新炉におけるフロントエンド／バックエンド技術の研究開発動向について再度整理して報告する。⁵⁰

(1) 革新炉開発における国の方針

バイデン政権下で DOE は、先進炉は米国及び世界の炭素削減目標達成のために不可欠な技術と位置づけており、先進炉及びその燃料サイクル技術に関する研究開発を継続していく姿勢を示している。米国では、以前の政権及び連邦議会においても先進炉開発への支持は強い。原子力発電は不可欠なエネルギー源であるとの認識とともに、核兵器開発とも密接に関連する技術として国家安全保障の観点からも重要な問題と位置づけられており、先進的な原子力技術についても米国が世界を主導すべきとの認識が広く共有されてい

⁴⁹ 2020 年の改定でロシアからの輸入枠は 2028 年には 15% へと漸減するが、そのかなりの部分はセントラス・エナジー社の TENEX からの輸入枠として確保されている。

⁵⁰ 本稿では、特に燃料サイクルの側面に注目していることもあり、NRC における分類と同様に非軽水炉の革新炉を「先進炉 (advanced reactor)」として焦点を当てて報告する。

と言える。特に、近年は世界の原子力市場において米国起源技術のシェアが低下傾向にあり、中でもロシア・中国が台頭する状況に、米国の影響力低下による核拡散リスクも含め、国家安全保障上の懸念も示されている。[3.1-16][3.1-25][3.1-49]

現在の米国では、政府が直接的に特定の民生用原子炉等を開発する取組はないが、DOE 傘下の国立研究所の参画を含め、官民パートナーシップにより先進炉等の開発を目指す方針が採られ、その支援のための先進炉開発プログラムが多重的に進められている。DOE 傘下の国立研究所の多くでは、マンハッタン計画以来、原子力技術の研究開発活動が継続されており、試験設備を含めたインフラ、研究体制が整備されている。民間向けの先進炉開発についても、革新的原子力技術支援(GAIN)や原子炉イノベーションセンター(NRIC)等積極的に国立研究所のハード・ソフトの資産を活用する取組が進められている。GAIN では、事業者の原子炉実現加速を支援するための資金提供プログラムがある他、技術／規制支援、国立研究所等の研究データベースや先進計算ツール、専門家等へのアクセスが提供される。GAIN では、HALEU や高速炉、SMR 等のテーマのワークショップも開催されている。NRIC は、GAIN 同様に INL 主導で DOE 国立研究所の能力を活かして先進炉システムの建設・実証を支援するプログラムで、国立研究所・DOE による事業者の支援のみでなく、規制機関である NRC との技術的知見の共有等も図るべく、NEICA で創設された。DOE/NE 局の先進炉技術研究開発プログラムでは、2030 年代に先進炉の実現を目指す方針が示されている他、大学の研究開発活動を支援するプログラムも継続されている。[3.1-25][3.1-93][3.1-105]

DOE/NE 局は、2021 年 1 月に「戦略ビジョン」[3.1-118]を公表し、先進炉及びその燃料サイクル開発について以下の目標を設定している⁵¹。[3.1-8]

- ・ 先進炉技術実現に係るリスク・時間を削減し、原子力の市場機会拡大、資源利用改善を可能とする炉設計開発を支援する。2028 年までに 2 件、2035 年までに更に 2 件の先進炉設計を実証するとともに、2025 年までのマイクロ炉実証を目標とする。
- ・ 国産燃料サプライチェーン及び先進炉燃料サイクルのギャップに対応し、統合放射性廃棄物管理システム確立のオプションを評価する。具体的には、2021 年にウラン備蓄調達プロセスを開始、2022 年までに HALEU 国産を実証して 2023 年までに 5 トンの HALEU を生産、2030 年までに先進炉燃料サイクルを評価する。

また、主要 3 設計における DOE/NE の主な研究領域としては、以下が示されている。

- ・ 高速炉
先進システム及びコンポーネント技術の実現可能性実証、手法・計算コードの検証、金属高速炉燃料の性能データの性能認定(qualification)
- ・ ガス冷却炉
改良合金・黒鉛材料の性能認定、小スケールの統合実験、TRISO 被覆粒子燃料の開発と性能認定
- ・ 熔融塩炉

⁵¹ この NE 局の戦略ビジョンは、2021 年 1 月 8 日に公表されたもので、トランプ政権の下でのビジョンとなっていることには留意が必要である。

塩の基本的特性の調査、及び溶融塩冷却／溶融塩燃料炉の材料、モデル、燃料、技術

米国では、炉設計の研究開発とは別に、多くの炉設計で採用される HALEU 燃料の確保も重要な課題となっており、DOE で取組が進められている他、連邦議会でも積極的な予算配賦等が行われている。3.1.1 項や 3.1.6 項で報告したように、DOE の資金提供プログラムで ACP による HALEU 生産実証が進められているが、実証生産開始の遅れもあり、HALEU 確保が遅れる場合には Sodium 炉のスケジュールが最低 2 年は遅れる見込みとも伝えられている。テラパワー社は、連邦議会の積極的対応は評価しつつも、短期的には DOE 保有の HEU のダウブレンドが必要と訴えている。[3.1-119][3.1-127]

DOE は、2022 年 12 月 7 日に、HALEU 需要想定や HALEU 調達、HALEU 利用プロジェクトの実施等により DOE と事業者が協力して HALEU 利用実現に取り組む HALEU コンソーシアムを公式に起ち上げた。HALEU コンソーシアムは、燃料サイクルに関連する米国事業者は参加可能とされている。HALEU コンソーシアムの起ち上げは、2020 年エネルギー法で規定されていたものであり、DOE は HALEU を確保してコンソーシアムのメンバーによる利用を可能とすることが必要とされている。[3.1-13][3.1-93]

既に示しているように、米国政府の原子力研究開発に係る支援の重点方針は政権により差が認められるが、連邦議会においては先進炉開発への継続した支持が見られる。2017 年 NEICA(原子力革新能力法)、NEIMA(原子力革新・近代化法)[3.1-120]、2020 年エネルギー法等、先進炉開発を促進する取組が法制化されている他、FY20 歳出法で ARDP 新設が指示される等、政権の予算要求に無かったプログラムが議会主導で開始されている。HALEU についても、2020 年エネルギー法において、HALEU 利用実現のためのプログラムや HALEU コンソーシアム設立が規定され、DOE 保有の HEU ダウブレンドによる HALEU 確保策の検討も含め、HALEU 利用実現のための様々な対応が DOE に指示されてきた。3.1.1 項で報告したように、2022 年 8 月に制定されたインフレ抑制法では、2020 年エネルギー法で規定された HALEU 利用実現のための DOE 活動に 700 百万ドルの予算が配賦されている。[3.1-9][3.1-13][3.1-17][3.1-36]

一方、様々な先進炉技術の開発が進められる中で、例えば ARDP 対象プロジェクトのすべてに対してフルに資金を提供するのは巨額の予算を要するため困難であり、DOE/NE による支援についても予算制約の中で優先付が迫られると見られている。そうした中で、廃棄物減少等に繋がる燃料サイクルの研究開発継続の重要性は認識されつつも、現時点における再処理コストは高いため、(研究開発支援)コストの削減は避けられないとの DOE 幹部の見解も示されている。[3.1-8]

DOE は、以上のような様々な革新炉開発支援プログラムと併せ、民間事業者も利用可能な多目的試験炉(VTR)の建設に向けたプロジェクトを 2019 年から開始している。VTRについては、2018年に制定のNEICAで、高速中性子が利用できるVTRを2025年末までに完成することが指示され、DOEは2019年2月にVTRプロジェクトを起ち上げた。DOEは、環境影響評価を実施した上で、2022年7月にはINLにおけるVTR建

設の正式決定を行っている。しかしながら予算確保のハードル等もあり、現在は VTR と類似技術であり ARDP で支援が行われているテラパワー社 Natrium 炉の建設を優先し、官民共同で試験能力の確保を目指す計画となっている。[3.1-8][3.1-25]

また、先進炉実現に向けては、多様な非軽水炉の許認可審査を初めて実施する規制側の対応能力も課題として認識され、特に 2019 年制定の NEIMA では、DOE の協力も得る形で、リスク情報活用・パフォーマンススペースの審査等先進炉を対象とした新たな規制プロセス構築、迅速で効率的な許認可審査実現に向けた対応が要求され、NRC で取組が進められている。[3.1-120]

(2) 開発されている革新炉の概要

米国で開発中の先進炉は数多く、図 3.1-6 に示すように幅広い炉設計の開発が行われている。使用する燃料も多様であり、TRISO 燃料を使用する炉設計も多い。また、図 3.1-6 では、幅広い炉設計について DOE の ARDP における支援先が選定されていることもわかる。これら開発中の先進炉の代表的なプロジェクトとして、NRC で許認可手続／事前協議(Pre-Application)が進行中、または DOE の ARDP で実証プロジェクトとして選定⁵²された炉設計を表 3.1-9 に示す。なお、非軽水炉技術の先進炉として初めて NRC に受理されていたオクロ社 Aurora 炉の建設・運転一括許認可(COL)申請は、2022 年 1 月に否認されたが、2022 年 9 月に許認可プロジェクトプランの更新版を NRC に提出しており、再び許認可審査に向けた協議が再開されている。[3.1-121][3.1-122][3.1-123][3.1-124]

⁵² ARDP において、「先進炉実証(ARD)」または「将来的な実証のリスク低減」プロジェクト選定先を示した。詳細は次項で報告する。

表 3.1-9 米国で開発中の代表的な革新炉

原子炉名	炉型	出力 (熱/電気) (千 kW)	燃料	設計者	DOE の ARDP 選定	開発段階
Aurora	LFMR	4.0/1.5	HALEU (12-19.75%)	オクロ		詳細設計、許認可申請否認、再準備中
Hermes / KP-FHR	MSR (FHR)	35/- 320/140	TRISO (HALEU19.7 5%)	ケイロス・パワー	ARDP (リスク低減)	概念設計、許認可申請前協議中 ⁵³ ※Hermes は試験炉 許認可審査中
EM2 (Energy Multiplier Module)	GFR	500/250	LWR-UNF (始 動 は 12%HALEU)	ゼネラル・アトム ミクス(GA)		許認可申請前協議中
Natrium	SFR	840/339	HALEU (10-18.5%)	テラパワー、 GEH	ARDP (ARD)	許認可申請前協議中
eVinci	ヒートパイプ	/4.5	TRISO (HALEU 19.75%)	ウェスティン グハウス	ARDP (リスク低減)	概念設計完了、許認可申請前協議中
IMSR	IMSR	400/195	LEU/HALEU	テレストリアル・エナジー		許認可申請前協議中
Xe-100	HTGR	200/80	TRISO (HALEU 15.5%)	X エナジー	ARDP (ARD)	基本設計、許認可申請前協議中
MCFR	MCFR	/500 ~ 1200	HALEU(12%) /劣化 U	テラパワー	ARDP (リスク低減) ⁵⁴	許認可申請前協議中
FMR	GFR	112/50	HALEU	ゼネラル・アトム ミクス(GA)	ARDP (ARC20)	概念設計、許認可申請前協議中
BANR	HTGR	50/17	TRISO (HALEU- 19.75%)	BWX テクノロジー(BWXT)	ARDP (リスク低減)	予備設計
VOYGR	LWR	250/77	LEU	ニュースケール		設計認証(DC)発給、製造段階
SMR-160	LWR	16		ホルテック	ARDP (リスク低減)	予備設計完了、許認可申請前協議中
BWRX-300	LWR	30		GEH		詳細設計、許認可申請前協議中

注) MSR: 溶融塩炉、FHR: フッ化物塩冷却高温炉、LFMR: 液体金属冷却高速炉、GFR: ガス冷却高速炉、SFR ナトリウム冷却高速炉、IMSR: 一体型溶融塩炉、HTGR: 高温ガス炉、MCFR: 溶融塩高速炉、MiMR: マイクロ炉

出所) NRC ウェブサイト、DOE ウェブサイト、IAEA ARIS[3.1-125]、NASEM 報告書[3.1-8]、各事業者ウェブサイト情報等から作成

⁵³ 「申請前活動」(Preapplication Activities)として、NRC と申請書提出前段階で事前の検討・協議を行っているもの。

⁵⁴ ARDP 対象のプロジェクトはサザン社の MCRE(詳細は次項で報告)であるが、これは MCFR 実験炉の建設等を行うものであり、実質的に MCFR が対象と見なして記載。

Broad Landscape of Advanced Reactor Designs

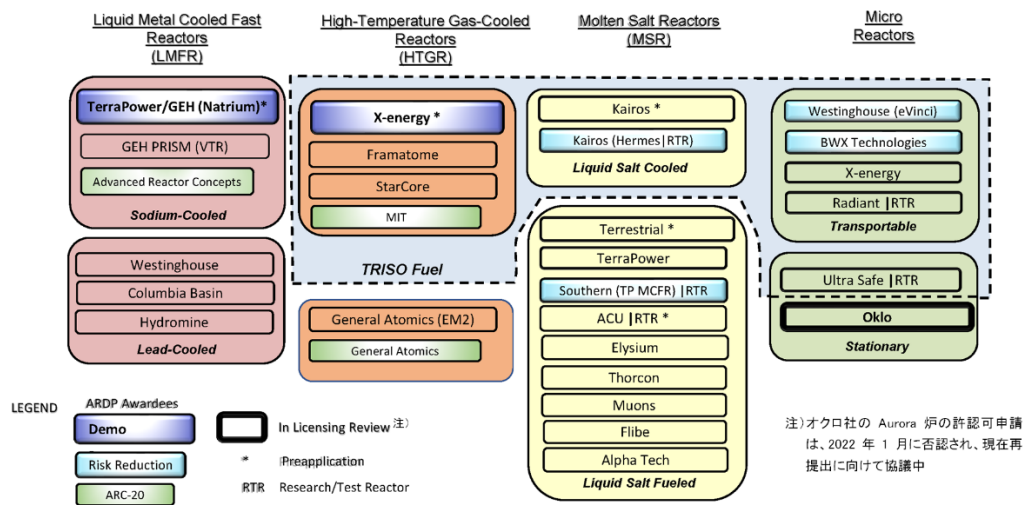


図 3.1-6 米国で開発中の幅広い先進炉設計

出所) NRC パブリックミーティング資料(2021 年 5 月)から引用(背景等編集)

(3) ARDP

1) ARDP の概要

ARDP は、トランプ政権下で、FY20 歳出法における連邦議会指示、予算配賦により創設されたプログラムである⁵⁵。ARDP は、官民コストシェアをベースとして以下の 3 経路で成熟度の異なるプロジェクトを選定し、資金を提供するものとなっている。[3.1-93][3.1-126]

- ・ 先進炉実証 (ARD)
 - 7 年間で先進炉を実現
- ・ 将来的な実証のリスク低減
 - 将来の実証に向けて技術面、操業面、規制面の課題を解決
- ・ 先進炉概念 2020 (ARC20)
 - 2030 年代半ばに商業化の可能性がある革新的・多様な設計を支援

DOE は、2020 年 5 月に ARDP の FOA を開始し、同 10 月に ARD 枠の 2 プロジェクトの選定を発表し、12 月にはリスク低減枠と ARC20 枠の選定プロジェクトが順次発表された。表 3.1-10 は、ARDP で選定されたプロジェクトの一覧について、各プロジェクトの総金額と実施期間を示したものである。[3.1-126][3.1-93]

⁵⁵ DOE の FY20 予算要求には含まれていなかった。

表 3.1-10 ARDP 選定プロジェクト一覧

	選定先	プロジェクト名	金額(千ドル) *()内は DOE 分	期間
A R D	TerraPower	Natrium 炉	約 4,000 (DOE と折半)	7 年
	X-Energy	Xe-100	約 2,500 (DOE と折半)	7 年
リ ス ク 低 減	Kairos Power	Hermes Reduced-Scale Test Reactor	629 (303)	7 年
	Westinghouse	eVinci . Microreactor	9.3 (7.4)	7 年
	BWXT Advanced Technologies	BWXT Advanced Nuclear Reactor (BANR)	106.6 (85.3)	7 年
	Holtec	Holtec SMR-160 Reactor	147.5 (116)	7 年
	Southern	Molten Chloride Reactor Experiment (MCRE)	113 (90.4)	7 年
A R C 20	Advanced Reactor Concepts	Inherently Safe Advanced SMR for American Nuclear Leadership	34.4 (27.5)	3.5 年
	General Atomics	Fast Modular Reactor Conceptual Design	31.1 (24.8)	3 年
	MIT	Horizontal Compact High Temperature Gas Reactor	4.9 (3.9)	3 年

(出所:DOE/NE、ARDP ウェブページ情報から作成)

2) ARD 枠のプロジェクト

ARD は、7 年間で操業が可能なプロジェクトを支援するものである。ARD 枠の選定プロジェクトでは燃料の調達計画も必要とされており、選定された 2 プロジェクトは、Natrium 炉/Xe-100 で、それぞれ使用する燃料の開発及び初期製造施設の建設も含まれている。[3.1-93][3.1-126]

テラパワー社の Natrium 炉は、GEH 社と共同で開発されたナトリウム冷却の高速炉で、溶融塩によるエネルギー貯蔵システムを持ち、再生可能エネルギー比率の高い電力系統でも対応可能とされる。Natrium 炉では金属 HALEU 燃料が使用されるが、テラパワー社は 2020 年 9 月に、セントラス・エナジー社と協力して HALEU を確保する計画を発表している。2019 年から開始されたセントラス・エナジー社による HALEU 製造実証プロジェクトの完了後、テラパワー社はセントラス・エナジー社と協力して Natrium 炉に必要な HALEU 製造のための設備拡張を実施する計画である。テラパワー社は、ARDP の要件として必要とされる負担割合の 50%の資金負担シェアを超える投資を行い、HALEU 製造インフラを建設する予定が発表されている。テラパワー社と GEH 社は、HALEU 製造に加え、Natrium 炉での試験装荷分も含む新型金属燃料の加工施設も建設する予定が示されている。[3.1-93][3.1-127]

テラパワー社の Natrium 炉は、ワイオミング州の石炭火力発電所サイト近傍に建設される予定で、2020 年代の操業開始が予定されていたが、HALEU 燃料が利用可能とならないことからスケジュールが最大 2 年間遅れることを発表している。新たな操業開始予定は 2023 年に発表される予定となっている。[3.1-128]

X-Energy 社の Xe-100 炉は、第 4 世代原子炉(Gen-IV)イニシアチブで開発され

てきた高温ガス炉技術をベースとした SMR で、Xe-100 炉では HALEU を用いた UCO の TRISO 燃料である TRISO-X 燃料が使用される。Xe-100 炉は、負荷追従運転も可能で運転中の燃料交換が可能等の特徴を持つ。燃料については、X-Energy 社は 2018 年にセントラス・エナジー社と先進炉燃料製造施設の設計に係る契約を締結しており、X-Energy の ARDP では、TRISO-X 燃料の商業規模の製造施設の設置も含まれている。[3.1-93][3.1-129]

X-Energy 社は、TRISO-X 燃料の製造に当る子会社 TRISO-X 社を 2021 年 8 月に設立しており、TRISO-X 社は 2022 年 4 月に、TRISO-X 燃料加工施設(TF3)の建設・操業に係る申請書を NRC に提出している。許認可審査は 2～3 年間と見込まれており、この間の許認可活動は ARDP の枠組み内で実施される。TRISO-X 燃料製造施設は、テネシー州オークリッジの ORNL 近傍のホライズン・センター工業団地に建設される予定である。同施設では、当初は Xe-100 炉 12 基分に相当する 8MT/年の生産能力でスタートし、2030 年代早期には 16MT/年への拡張が目指されている。[3.1-130][3.1-131]

3) リスク低減枠のプロジェクト

リスク低減枠のプロジェクトでは、フロントエンド／バックエンドに直接的に関わる研究開発が注目される代表的なものとして、サザン社の MCRE、BWXT 社の BANR 開発プロジェクトが挙げられる。[3.1-93]

サザン社の MCRE プロジェクトは、テラパワー社の MCFR の開発を共に進めてきたサザン社が、INL で MCFR の実験炉を建設し、MCFR の設計、許認可、運転の鍵となるデータを提供するもので、MCFR 開発を大きく進めることが期待されている。テラパワー社の MCFR は、溶融塩を燃料・冷却材に使用する溶融塩高速炉であり、使用済燃料集合体は発生せず、廃棄物量が従来炉と比較して少ない。また、劣化ウラン、天然ウラン、使用済燃料等も燃料として利用可能であり、フロントエンド／バックエンドの課題解決に繋がるメリットを有している。MCRE プロジェクトでは、2022 年から 20 百万ドルをかけて試験施設での試験を開始する予定であり、そこで収集されたデータは MCFR の熱水力学及び安全解析コードの検証に使用される。[3.1-132][3.1-133]

BWXT 社の BANR は、高温ガス炉技術による輸送可能なマイクロ炉である。ARDP で選定された BANR プロジェクトでは、BANR 設計において使用する、SiC マトリックスを採用した UN(窒化ウラン)TRISO 燃料を開発することが目標とされている。BANR プロジェクトでは、INL の先進試験炉(ATR)を利用して UN TRISO 燃料の照射試験を実施し、照射後の検証等が行われる。なお、BANR は、国防省(DOD)のプロジェクトでも採用されている(後述)。

その他のリスク低減プロジェクトでは、ケイロス・パワー社の Hermes 実証炉、WH 社の eVinci マイクロ炉の二者において TRISO 燃料が使用されることになるが、ARDP で実施される活動としてはフロントエンド／バックエンドに関する研究開発課題は挙げられてい

ない。⁵⁶

4) ARD 枠のプロジェクト選定の背景・経緯・位置づけ

選定されたテラパワー社と X-Energy 社以外でも、ARD の対象となり得る先進炉プロジェクトは複数あるが、DOE から具体的な選定理由(不選定理由)は示されていない。

NRC と申請前活動(Preapplication Activities)を開始している炉設計は、オクロ社の Aurora 炉を始めとして、ケイロス・パワー社、WH 社の eVinci マイクロ炉、テレストリアル・エナジー USA 社の iMSR 炉、GA 社の高速モジュール炉等、2022 年 8 月末現在で 10 件に上る[3.1-122]。プロジェクト選定の具体的な理由や経緯は不明であり、またプロジェクトの成熟度が最大の前提条件となるのは言うまでもないが、選定されたプロジェクトの特徴として、選定された 2 社の炉設計は、負荷追従運転が可能なることをメリットとして挙げており、電源構成に占める再生可能エネルギーの更なるシェア増加が進む中で、優位な点として考慮された可能性はある。

米シンクタンクの Third Way も、ARD 枠のプロジェクトの選定に対して、気候変動に対応するためには、先進炉設計が再生可能エネルギーと親和性が高く、経済性に優れた真に先進的な技術が必要として、DOE 決定を評価する見解を示している。[3.1-134]

米国では再生可能エネルギーが高いシェアを占める地域も多く、安定的な電力系統維持という面で負荷追従運転は重要な要素となっているが、風力発電が多い自由化電力市場では、経済性改善のためにも負荷追従運転は有効と考えられる。

なお、ARDP の FOA では、ARD 枠に申請して選定されなかったプロジェクトについては、申請書がそのままリスク低減枠で審査されることとされていた[3.1-126]。従って、リスク低減枠で選定されたケイロス・パワー社、WH 社等は、元々 ARD 枠に申請していた可能性もある。

米国における先進炉の先行グループの有力な炉設計には、オクロ社の Aurora 炉もあるが、オクロ社は、2020 年 3 月に NRC に Aurora 炉建設・運転の許認可申請書を提出し、NRC も同 6 月に受理していた[3.1-123]。こうした状況が ARDP の選考に影響した可能性も考えられる。オクロ社については、ARDP の条件はオクロ社の革新的開発モデルに制約を与えるかもしれないため、リスク低減枠を選択したとの話も報道されている。[3.1-135]

(4) ONWARDS

1) 概要・背景

ONWARDS は、“Optimizing Nuclear Waste and Advanced Reactor Disposal Systems”(放射性廃棄物と先進炉処分システムの最適化)の略で、将来の先

⁵⁶ その他、Holtec 社の SMR-160 では既存の 17×17 燃料集合体をベースとした燃料がフラマトム社から供給される予定となっている。

進炉からの放射性廃棄物量の最小化を目指す ARPA-E の官民コストシェア・プログラムである。ARPA-E で放射性廃棄物の削減を目指す同様のプログラムとして 3.1.6(3)で報告した CURIE があるが、再掲した図 3.1-7 にあるように、CURIE は既存 LWR 発電所からの使用済燃料に焦点を当てたものに対し、ONWARDS は先進炉における放射性廃棄物減少を目指すものとなっている。[3.1-136]

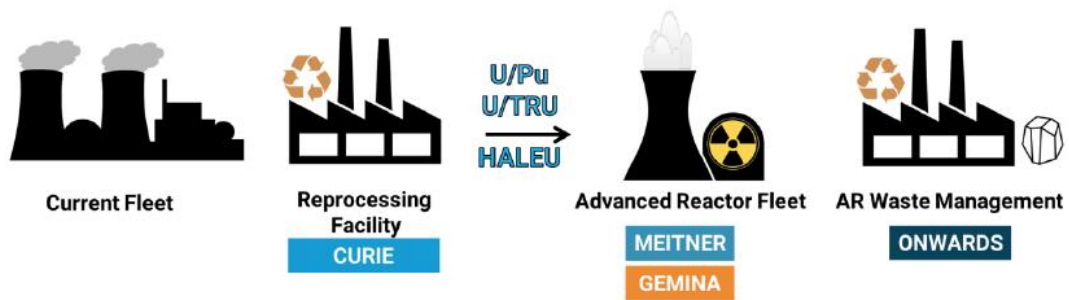


図 3.1-7 ARPA-E 研究開発プログラムの位置づけ(再掲)

出所) CURIE FOA[3.1-97]から引用

ONWARDS の FOA は、2021 年 5 月 19 日に発行された。先進炉からの廃棄物発生量を抑制する新しいプログラムの ONWARDS を通じて 40 百万ドルを提供し、クリーンエネルギーの信頼できるソースとして原子力発電の調達・利用を増加させることが狙いとして示された。ONWARDS FOA では、10～15 のプロジェクトを選定し、1 プロジェクト当たり 250～10,000 千ドルの資金提供が予定された。プロジェクト開始は原則として 2022 年 4 月で、36 カ月以内に完了することが求められている。ARPA-E の裁量により、追加資金を提供しての延長もあり得るものとされている。[3.1-136][3.1-137]

CURIE の項でも示したように、従来はバックエンド分野のプログラムは ARPA-E の対象とされていなかったが、バイデン政権の 2021 年 5 月の予算教書(FY22 予算要求)において、初めて ARPA-E における FOA の対象として明示された。これは、2020 年 12 月に制定された 2020 年エネルギー法によって、ARPA-E の目標に「放射性廃棄物と使用済燃料の管理、クリーンアップ、処分の改善のために革新的な解決策を提供する」が追加されたことを受けてのことである。FY22 予算要求では、ARPA-E の新規プログラムの候補となる技術領域が 15 示されており、その 1 つとして「高レベル放射性廃棄物の劇的な削減技術」が挙げられている。DOE の FY22 予算要求資料では、安全性及びセキュリティの面で放射性廃棄物に内在するリスクを除去する革新的な技術・プロセスを通じて、現存する HLW の処分に係る喫緊の必要性に対応することが重要な要素である等としている。[3.1-13][3.1-19]

2022 年 3 月 10 日には、ONWARDS の資金提供先として以下の 11 プロジェクト⁵⁷

⁵⁷ ARPA-E の ONWARDS プログラムのページ(<https://arpa-e.energy.gov/technologies/programs/onwards>)では、現時点ではプロジェクト数は 10 と記され、Orano Federal Services 社が受注先リストに掲載されていない状態となっている。ARPA-E 及び Orano USA 社のプレスリリースでは関連情報は発表されておらず、詳細は確認できていない。

が選定され、DOE から 36 百万ドルの資金提供を得ての研究開発プロジェクトが始動している。(各プロジェクトの概要については後述)

表 3.1-11 ONWARDS 選定プロジェクト一覧

選定先	プロジェクト名	金額(ドル)
General Electric (GE) Global Research	Resonance Absorption Densitometry for Materials Assay Security Safeguards (RADMASS)(保障措置総量測定のための核共鳴濃度計)	4,499,463
TerraPower	Chloride-Based Volatility for Waste Reduction and/or Reuse of Metallic-, Oxide-, and Salt-Based Reactor Fuels (廃棄物減容や金属／酸化／塩ベース燃料再利用のための塩素ベース揮発性 (CBV))	8,550,000
Citrine Informatics	Novel Phosphate Waste Forms to Enable Efficient Dehalogenation and Immobilization of Salt Waste (塩廃棄物の脱ハロゲン化及び固定化を可能とするリン酸塩廃棄物)	3,103,770
Rutgers University	Pioneering a Cermet Waste Form for Disposal of Waste Streams from Advanced Reactors (PACE-FORWARD)(先進炉廃棄物の処分のためのサーメット廃棄体開発)	4,000,007
Rensselaer Polytechnic Institute	Metal-Halide Perovskites as Innovative and Cost-Effective Fluoride Salt Waste Forms(革新的で費用対効果が高いフッ化物塩廃棄体としての金属ハロゲン化物ペロブスカイト)	607,505
Orano Federal Services*	Off-Gas Treatment Process for Conditioning and Recycling Facilities(コンディショニング／リサイクル施設のためのオフガス処理プロセス)	2,249,573
Brigham Young University	Two-Step Chloride Volatility Process for Reprocessing Used Nuclear Fuel from Advanced Reactors(先進炉使用済燃料の再処理のための二段階塩化物揮発法)	900,217
Idaho National Laboratory	Traveling Molten Zone Refining Process Development for Innovative Fuel Cycle Solutions(革新的燃料サイクルソリューションのための移動溶融精製プロセスの開発)	2,076,343
Oklo	Enabling the Near-term Commercialization of an Electrowinning Facility to Close the Metal Fuel Cycle(金属燃料のクローズドサイクルのための電解精錬施設商業化の早期実現)	4,000,000
Stony Brook University	MATRICY: Matrix Engineered TRISO Compacts Enabling Advanced Reactor Fuel Cycles(先進燃料サイクル実現のための TRISO 燃料の加工)	3,400,000
Deep Isolation	UPWARDS: Universal Performance Criteria and Canister for Advanced Reactor Waste Form Acceptance in Borehole and Mined Repositories Considering Design Safety(ボアホール／地層処分場での先進炉廃棄体受入れのための普遍的な性能基準／キャニスタ)	3,608,399

*Orano 社は、2022 年 9 月時点では ONWARDS の選定先リストに掲載されていない

出所) ARPA-E ONWARDS プロジェクト概要[3.1-138]から作成

なお、先進炉のバックエンド領域の研究開発については、トランプ政権時代の 2020 年 12 月 2 日に、「先進炉からの使用済燃料の影響の低減」と題したワークショップが ARPA-E で開催されており、検討が開始されていた[3.1-136]。このワークショップは、ARPA-E

に放射性廃棄物管理・処分のための革新技術を目標として追加した 2020 年エネルギー法成立前のタイミングとなるが、連邦議会内での本条項に係る合意状況が考慮されていたものとも考えられる。

2) ONWARDS プログラムの目標

ONWARDS プログラムの目標は、先進炉のバックエンド燃料サイクルにおける大きな課題に対応することにより、先進炉燃料サイクル及び先進炉による原子力発電の成長を促進するブレークスルー研究開発を支援することとされている。具体的には、ONWARDS は以下を可能とする技術の開発支援を目指している。[3.1-137]

- ・ 現行の保障措置基準を弱めることなく、廃棄物量の削減または処分場面積を桁違い (order of magnitude) に削減
- ・ 現時点では経済的にも技術的にも有効解決策が確立していない、先進炉使用済燃料処理の保障措置技術の開発
- ・ 新たな先進炉燃料の原料とするためのウラン及び TRU の核拡散抵抗性の高いリサイクル
- ・ 様々な処分環境において耐性が高い、先進炉使用済燃料の廃棄体 (TRISO 燃料、金属燃料や溶融塩炉燃料の廃棄物)
- ・ 全体的な処分コストが 1 ドル/MWh の範囲

先進炉バックエンドサイクルの特性は、先進炉が今後導入されていく中で決定されていくため、ONWARDS では、複数の先進炉燃料サイクル、処分概念及び環境に適用可能な技術を求めている。また、既存 LWR の使用済燃料に適用可能な技術にも関心が示されている。ONWARDS で対応すべき最も重要な領域として ARPA-E が同定したのは、以下の 6 領域である。

- ・ 経済性 (燃料サイクル全体の経済性にどんな影響を与える技術か)
- ・ 既存のインフラ (既存インフラの活用はできるか、言い換えればどんな投資が必要か)
- ・ 規制要件 (現行の NRC 規制枠組みと適合性があるか)
- ・ 資源利用 (資源保護、天然資源消費の削減はどうか)
- ・ 保障措置・セキュリティ (特殊核物質等の保障措置への影響はどうか)
- ・ サイト選定オプション及び要件 (処分場や中間貯蔵施設のサイト選定に与える影響)

3) ONWARDS プログラムの技術的関心カテゴリ

ARPA-E は、現在は 3 つの先進炉燃料サイクル概念が有望と考えているが、ONWARDS では革新的な燃料サイクル技術も提案可能とするため「その他燃料サイクル」という項目も設定されている (ONWARDS の FOA では、オープン (ワンスルー) / クローズド両方の燃料サイクルとも対象とすることが記載されており、示された 3 方式の「燃料サイクル」は必ずしも再処理を伴うものではない)。

- ・ TRISO 燃料サイクル
- ・ 金属燃料サイクル

- ・ 溶融塩燃料サイクル
- ・ その他燃料サイクル

ONWARDS の FOA では、この 3 つの先進炉燃料サイクルにおいて処分への大きな改善が最も見込める技術領域として、以下の 3 領域を考えている。

- ・ プロセスの解決策
廃棄物量を最小化し、アクチニド分離の内在的核拡散抵抗性を改善し、資源の利用効率を向上し、商業化を促進する
- ・ 保障措置の解決策
核物質の正確・安全・タイムリーな計量を可能とするセンサー、解析、情報融合(data fusion)の技術を改善
- ・ 廃棄体の解決策
特に使用済燃料のパイロプロセスによる廃棄物、及び金属燃料や溶融塩燃料の使用済燃料の廃棄体の解決策
- ・ その他
上記 3 カテゴリに明確には該当しないが、本プログラムの全体的な目標を達成する可能性があるもの

4) ONWARDS プロジェクト選定の背景・経緯・位置づけ

前述のとおり ARPA-E は、2022 年 3 月 10 日に、ONWARDS プログラムにおける資金提供先として 11 プロジェクト、合計 36 百万ドルの資金提供先を選定した。ARPA-E ウェブサイトでは、各プロジェクトの選定理由、選定に至った経緯等の情報は公表されていないが、プロジェクト選定における審査基準、考慮事項が以下のように示されている。

[3.1-137]

- ・ コンセプトペーパー審査基準(最終申請書提出を奨励するか否かの審査)
 - ONWARDS FOA の目標に関する影響(impact) :50%
 - 全体的な科学・技術的なメリット :50%
- ・ 最終申請書の審査基準(プロジェクト選定のための審査)
 - 提案された技術の影響(impact) :30%
 - 全体的な科学・技術的なメリット :30%
 - プロジェクトチームの適格性・経験・能力:30%
 - 管理計画の確実性 :10%

また、上記審査基準以外に考慮する事項として、プログラム方針に係る要因も示されている。

- ・ ARPA-E ポートフォリオ上のバランス
- ・ ARPA-E の任務推進への関連性
- ・ 官民の取組のシナジー
- ・ 他からの資金提供可能性の低さ
- ・ 連邦政府資金に対する高いレバレッジ

- ・ 高い費用対効果
- ・ 認定オポチュニティゾーン(Qualified Opportunity Zone)⁵⁸

表 3.1-12 は、ONWARDS 選定プロジェクトについて、その主目標、主に対象とする燃料サイクル概念と技術領域、プロジェクト代表の組織について、ONWARDS ウェブサイト情報からまとめたものである。対象とする燃料サイクル概念や技術領域については、バランスが取れた結果となっていることが窺える。プロジェクト実施主体についても(例外的と考えられる国立研究所等を除き)偏りが無い結果と言えるが、各プロジェクトは各国立研究所も含まれるチームで推進される体制となっている点には留意が必要である。[3.1-138]

表 3.1-12 ONWARDS 選定プロジェクト

実施主体	主目標	燃料サイクル概念				技術領域				組織		
		TRISO	金属燃料	溶融塩	その他	プロセス	保障措置	廃棄体	その他	民間	大学	国等
GE グローバルリサーチ	保障措置	○	○	○			○			○		
テラパワー	廃棄物減少、ウラン利用		○	○		○				○		
Citrine Informatics	廃棄体の減容			○				○		○		
Rutgers 大学	廃棄体の減容	○	○	○				○			○	
Rensselaer 大学	廃棄体の減容?			○				○			○	
Orano Federal Services	廃棄物(ガス)減少	○	○	○				○	○	○		
Brigham Young 大学	廃棄物減少、リサイクル	○	○	△		○					○	
INL	核種分離		○			○						○
オクロ	リサイクル		○			○				○		
Stony Brook 大学	燃料有効利用	○				○		○			○	
Deep Isolation	廃棄体	○	○	○				○		○		
該当数(○)		6	8	7		5	1	6	1	6	4	1

注) ONWARDS の各プロジェクト概要記述で確認できる範囲で整理を行った。網掛けのセルは、同概要記述で対象燃料の直接的な言及はないが、論理的に想定されるもの等。

(出所：ARPA-E, ONWARDS Project Descriptions, 2022 年 3 月[3.1-138]の情報を基に作成)

ONWARDS プロジェクトの選定においては、当然ながら技術的な成熟度、経済性、申請企業・チームの評価等が審査の基本になったと考えられるが、一定の基準を満たした申請の中では、廃棄物の減容(処分場負荷の低減)や核拡散抵抗性が重要なファクターと

⁵⁸ トランプ政権下で 2017 年減税・雇用法で導入された制度で、経済的に抑圧された地域への投資や雇用の促進、減税による支援等を図る制度。

なった可能性も考えられる。廃棄物問題の解消(改善)と核不拡散は、元々原子力発電に積極的ではなかった民主党議員の支持を得るためには重要な要素になるものと考えられる。

5) ONWARDS 選定プロジェクトの概要

ARPA-E ウェブサイトに掲載された ONWARDS 選定プロジェクトの概要を示す。
[3.1-138]

a. General Electric (GE) Global Research 社

高線量下において、速い応答で正確(不確実性 1%以下)に核分裂物質の総量計測を可能とする革新的な核共鳴濃度計の技術(Resonance Absorption Densitometry for Materials Assay Security Safeguards, RADMASS)を開発する提案である。ONWARDS プログラムでは、非放射線環境下で RADMASS 技術の実証を行う予定で、高線量の再処理施設ホットセルでの RADMASS 運用についてもシミュレーション等で検証する。

b. テラパワー社

高温塩化物塩の揮発性を利用して使用済燃料からのウラン回収を行うもので、塩素ベースの揮発性(CBV)パラメータ調整により高いウラン回収率を達成し、廃棄物量を減少させることが目標とされている。検証は代用物から開始し、最終的に実際の酸化使用済燃料での実証を行う。CBV プロセスは金属/酸化/塩ベースの使用済燃料に適用可能であることを実証する。

これまでの研究で照射済酸化燃料から 99%以上のウラン回収が実証されており、処分場への負荷を 1/10~1/20 に減少できる可能性がある。

テラパワー社は、気候変動の緩和、電力需要増加、貧困への対応等のためには民間での先進原子炉の開発が必要として、2008年にBill Gatesらによって設立されたベンチャー企業である。同社はワシントン州 Bellevue に本社を置き、従業員は約 340 名と報告されている。進行波炉(TWR)のほか、ARDP で選定された Sodium 炉等積極的に先進炉開発を手がけ、2022年8月には韓国 SK グループから 750 百万ドルの出資も受けている。[3.1-139]

c. Citrine Informatics 社

溶融塩炉からの塩廃棄物について、最先端の AI と物理学ベースのシミュレーション手法により、リン酸塩の廃棄体(ガラス、セラミクス、その複合物を含む)を迅速に開発し、脱ハロゲン化及び高い固定化を可能とする提案。本プロジェクトでは、kg スケールの概念実証の廃棄体を完成させ、廃棄体容積を既存技術より 80%減少し、廃棄体プロセスに係る資本費・運転費を 60%削減することが目指されている。

Citrine Informatics(以下”CI”)社は、2013 年 2 月に設立され、ビッグデータの分析・活用、AI やマシンラーニングを強みとするベンチャー企業である。同社はカリフォルニア州 Redwood にあり、従業員は 11 名と報告されている。Crunchbase に拠れば、CI 社は 13 の投資家の出資で約 48 百万ドルを調達しており、Prelude Ventures、Innovation Endeavors 等が主投資家とされている。[3.1-140]

CI 社は、物理的製品を製造するあらゆる組織に対し、研究開発や製造、サプライチェーン・オペレーションを効率化するため、材料・化学物質・機器に関する大量の技術的データを収集・解析するソフトウェア・プラットフォームを構築している。CI 社プラットフォームは、材料・化学分野向けに特別に開発された AI を搭載しており、高性能な材料をより早く見つけることができるとされている。[3.1-141][3.1-142]

CI 社は、マテリアル・インフォマティクス(MI)のリーディング企業と位置づけられ、AI やスタートアップ分野で数々の賞も受けており、Panasonic や Lyondellbasell 等の大手企業が顧客に名を連ねている。CI 社の Citrine Platform については、日本においても SCSK 社(旧住商データシステム、CSK)が 2022 年 7 月に販売代理店契約を締結し、オンラインセミナー開催等国内向けの販売活動も展開されている。SCSK 社は、化学材料、金属、電池、触媒をはじめとした幅広い材料分野の顧客に向けてサービスを提供し、2027 年度までに国内で 50 社への導入を目指すとしている。[3.1-143]

d. Rutgers 大学

先進炉から発生するあらゆる廃棄物(金属、塩、カーボン)を単一の高密度で耐性あるサーメット(cermet⁵⁹)廃棄体として、複数の廃棄物の固定化を単純で規模の拡大が可能な方法で実現することが目指されている。本技術により、以下が可能になるとされている。

- ・ 廃棄物の処理を大幅に最小化し、廃棄物種類ごとに複数の廃棄体開発が不要に
- ・ LWR と比較して処分場面積を一桁減少
- ・ 複数の処分環境に適合
- ・ 製造・操業・維持費用を現行技術比で最大 50%削減

e. Rensselaer 工科大学

先進炉燃料サイクル及び先進炉技術の持続的な開発のために重要となるフッ化物塩廃棄物の効果的な管理方法を提供するもので、金属ハロゲン化物ペロブスカイト(Metal Halide Perovskite, MHP)を先進的な塩廃棄物の廃棄体とすることを目指す。本プロジェクトでは、大量の MHP を低費用で合成する際の、低温・液相プロセスの大規模化も試みる。

⁵⁹ 耐熱性のあるセラミクスと金属の複合物

f. Orano Federal Services

様々な先進炉使用済燃料の再処理施設のオフガスを処理するモジュラー式オフガス処理システムを開発する提案である。提案システムは、ルテニウム、トリチウム、ヨウ素、炭素、希ガス及び粒子用のモジュラーを 2 つ以上組み合わせて設置することが可能とされる。各モジュールで発生する廃棄物について、処分／減衰貯蔵に適した最終廃棄体となるための処理プロセスを同定する。

g. Brigham Young 大学

模擬使用済燃料のウラン/TRU 塩化物の揮発性を定量化し、ウラン/TRU 抽出のプロセスパラメータを最適化することにより、二段階塩化物揮発法(TSCV)のリスク・不確実性を削減することを目指すプロジェクトである。TSCV は、使用済燃料からウラン/TRU を抽出して廃棄物を減容する溶液不使用の分離スキームで、高レベル放射性廃液が発生せず、塩化水素ガス・塩化物ガスはプロセス内でリサイクルされる。TSCV 開発の課題として、特に熔融塩炉等先進炉燃料における塩混合物において、塩相互の反応がウラン/TRU 塩化物の揮発性に与える影響に関するデータが限られている点が挙げられている。

h. アイダホ国立研究所(INL)

金属燃料リサイクルの商業化の可能性を大きく高め得る、既存の熱分離技術をベースとした金属燃料リサイクルの革新的で単純なプロセスを開発することが目指されている。使用済金属燃料を熔融・凝固すると、アルカリ金属の凝縮相の他に、アクチニド、ランタニド及びアルカリ・アースメタルの 3 層の不混和相が形成されることを確認することが目標とされている。

本プロジェクトでは、移動熔融ゾーンシステムにより、使用済金属燃料からアクチニドを迅速に抽出する熱処理プロセスの開発を行う。使用済金属燃料に対し熔融ゾーンを一度移動させることで、不混和層が予想通り形成され、核種分離データを効果的・明確に提供することが期待されている。

i. オクロ社

オクロ社は、数年内に最先端のリサイクル施設を商業化することを目指しており、その施設ではオクロ社の金属燃料炉の燃料を生産し、クローズドサイクルを実現するものとなる。ONWARDS における本プロジェクトでは、以下に焦点が当てられる。

- ・ 核燃料リサイクル施設で使用される電解精錬施設の主要プロセスを工業化・自動化し、主要ユニットの運転、最終的には模擬燃料で連続した(end-to-end)統合プロセスを実証する
- ・ リサイクル施設の NRC 許認可の準備を進める
- ・ 発生する廃棄物の最終処分計画を策定する

本技術では、再処理を行わない場合と比較して一桁以上の廃棄物減少が見込まれる。

本プロジェクトには、ANL、INL の他、Deep Isolation 社も参加しており、超深孔ボアホール処分に適した廃棄体の同定や、処分関連の費用削減枠組みの構築も行われる。

オクロ社は、2013 年に設立され、信頼性が高く経済的なエネルギーを提供可能なクリーンエネルギー・プラントの Aurora 炉開発を目指すベンチャー企業である。同社はカリフォルニア州 Sunnyvale にあり、従業員は 50 名以下と報告されている。オクロ社の創業者は、MIT 在学中に起業を決意し、MIT の起業家コンペ(MIT \$100K)及び MIT クリーンエネルギー賞を獲得する等してオクロ社をスタートさせた。2013～2014 年にはスタートアップ支援の MassChallenge、Y Combinator から出資、支援を受けている。2015 年には OpenAI の CEO で Y Combinator 前社長の Sam Altman 氏が出資して取締役会会長に就いており、ベンチャー経営の支援とともに、NRC のライセンス申請を含めて財務的基盤を提供している。[3.1-140][3.1-144][3.1-145][3.1-146]

オクロ社は、GAIN のバウチャー等 DOE の複数の研究開発支援プログラムで選定されてきており、2020 年 3 月には NRC に Aurora 炉の COL 申請書を提出し、同 6 月に非 LWR 炉として初めて受理された。2022 年 1 月に情報不足により NRC から申請を否認されたが、今後も再申請が可能な状態となっており、2022 年9月には許認可審査に向けた NRC との協議を再開している。[3.1-123][3.1-124]

j. Stony Brook 大学

燃料利用率の改善とウラン装荷量の減少により、小型原子炉の廃棄物負荷を大幅に削減する包括的なシステムズアプローチが提案されている。基盤技術は、廃棄物が少なく処分場にも適合する、酸化マグネシウムを使用した TRISO ベースの燃料であり、これを未燃焼の TRISO 粒子が脱密(deconsolidation)可能となるよう加工し、最終処分の廃棄体としても評価を行う。本プロジェクトでは、新燃料の製造、性能理解を行う原子炉解析も併せて実施し、他の最先端技術との比較でも一桁以上の廃棄物減少となることを確認する。

k. Deep Isolation 社

Deep Isolation 社は、基本的な廃棄体コンポーネントを考案し、貯蔵・輸送・処分間の相互依存的な制約を解消する、先進炉廃棄物のための革新的なユニバーサル・キャニスタ・システムを開発する計画である。本アプローチでは、再パッケージ化無しに乾式貯蔵・輸送・処分で使用可能な小型キャニスタの利用により、使用済燃料・廃棄物管理の長期コストを最小化することを目指す。

Deep Isolation 社は、2016 年 10 月に設立され、石油・ガスのフラッキング技術に応用した超深孔ボアホール処分で特許を取得しているベンチャー企業である。同社はカリフォルニア州 Berkeley にあり、従業員は 50 名以下と報告されている。Deep Isolation 社は、UC-Berkeley の研究者親子が創立したスタートアップであるが、2018 年には WCS 社前社長を COO に迎え、元エネルギー長官の Chu 博士を顧問団に迎える等体制を整備し、モックアップ・キャニスタの定置・回収試験も成功させている。2019 年には放射性廃棄物容器大手の NAC International 社が出資して筆頭株主となっており、取締役

も1名派遣している。[3.1-140][3.1-147]

米国では処分関連法制が膠着状態のため同社の公的プログラムへの参画もないが、欧州の小国等で同社技術への関心もあり、フィージビリティ調査の受注例もある。ONWARDS プロジェクトは、同社として初めての DOE からの直接受注となる。[3.1-147]

(5) 当該革新炉に係るフロントエンド／バックエンド技術開発動向

ニュースケール社の VOYGR 等早期実現が見込まれる LWR の SMR を除き、多くの先進炉では従来とは異なる先進燃料の利用が想定されているほか、一部の先進炉では使用済燃料の燃料フィードが想定される等燃料サイクルに変革をもたらす技術も目指されている。言い換えれば、こうした燃料サイクル関連の研究開発が進むことがこれら先進炉の開発には不可欠となる部分もある。また、新たな廃棄体の開発は、貯蔵・処分等バックエンド分野に変化をもたらし得る。

先進炉の代表的なプロジェクトについては、多くが ARDP を始めとする DOE 支援プログラムの対象となっているため重複もあるが、以下ではその一部再掲を含め、先進炉におけるフロントエンド／バックエンド技術開発動向の概要について報告する。

1) 開発中の先進炉で必要とされるフロントエンド／バックエンド技術開発

2022 年 11 月末に公表された NASEM 報告書では、主要な先進炉設計のタイプ別に、必要とされる燃料サイクル関連の研究開発課題が表 3.1-13 のように示されている。

表 3.1-13 主要先進炉設計で必要とされる FE/BE 技術開発

炉型	燃料サイクル研究開発の主要課題、留意点等	炉設計例
HTGR	● TRISO 燃料の成形加工、認定及び処分	Xe-100、SC-HTGR、BANR
GFR	● UC/UN 燃料及び被覆材の成形加工、認定 ● UC/UN 燃料からのアクチニド・リサイクルが可能な再処理システムの開発(AIROX プロセス等) ● AIROX プロセス採用時の地層処分設計(高温使用済燃料)	EM2
SFR	● 燃料の成形加工、認定 ● 採用燃料に応じた再処理プロセスの検討	Natrium 炉、ARC-100
MSR	● クローズドサイクルを実現するためには、塩の処理やオフガスの処理が重要な研究課題 ● 適切な廃棄体生成のための塩化物／フッ化物処理等の廃棄物管理	IMSR-400、MCFR
FHR	● TRISO 燃料使用で熔融塩冷却のため、HTGR と MSR(クローズドサイクル以外)と共通	Hermes/KP-X
LWR-SMR	● 既存 LWR と同様であり、特別の研究ニーズはなし	VOYGR、SMR-160、BWR-300

UC:ウラン・カーバイド、UN:窒化ウラン

出所) NASEM 報告書[3.1-8]情報から作成

この表でも示されているように、先進炉設計の一部はクローズドサイクルが可能な設計概念となっているが、NASEM 報告書では、燃料サイクル技術が利用可能となるには「産業的に持続可能」(industrially sustainable)であることが必要であり、現状のワンススルーサイクルと異なる燃料サイクルでは、その全要素が個別及び組み合わせた状態で完全の実証される必要があることが指摘されている。今回 NASEM が評価した炉設計では、オクロ社と GA 社はリサイクルを前面に打ち出しているが、他の殆どすべてが、少なくとも当面、恐らく 30 年はワンススルーサイクルを計画していると回答している。テラパワー社の Natrium 炉でも再処理リサイクルが可能とされるが、「Natrium 炉は再処理を必要とはせず、兵器拡散リスクの限定的なワンススルーサイクルで運転する」ことがウェブサイトで示されている。なお、オクロ社はリサイクルを目指すとしているが、同社計画ではリサイクルの実現は 20 年以上先になると見られ、近い将来での再処理の実現はないと想定されている。[3.1-8][3.1-128]

2) 主要先進炉プロジェクトにおけるフロントエンド／バックエンド技術開発動向

以下では、ARDP や ONWARDS プログラムの報告との重複もあるが、フロントエンド／バックエンドに係るポイントを中心として、主な先進炉プロジェクトの概要について報告する。

a. X エナジー社 Xe-100 炉向けの TRISO 燃料の開発

X-Energy 社の Xe-100 炉では TRISO-X 燃料が使用されることから、TRISO-X

の商業規模の製造施設の設置も炉の開発活動と並行して進められている。X-Energy 社は、TRISO-X 製造に当る子会社 TRISO-X 社を 2021 年 8 月に設立し、TRISO-X 社は 2022 年 4 月に、TRISO-X 燃料加工施設(TF3)の建設・操業に係る申請書を NRC に提出している。許認可審査は 2～3 年間と見込まれており、この間の許認可活動は ARDP の枠組み内で実施される。[3.1-93][3.1-130]

TRISO-X 製造施設は、テネシー州オークリッジの ORNL 近傍のホライズン・センター工業団地に建設される予定である。同施設では、当初は Xe-100 炉 12 基分に相当する 8MT/年の生産能力でスタートし、2030 年代早期には 16MT/年に拡張が目指されている。商業規模の製造施設の設置に向けて 2022 年 10 月には起工式が開催されており、早ければ 2025 年に TF3 の操業が可能とされている。X-Energy 社燃料製造施設では、セントラス・エナジー社をパートナーとして、15.5%濃縮の HALEU が使用される。[3.1-8][3.1-129][3.1-130][3.1-131]

b. BWXT のマイクロ炉向けの TRISO 燃料開発

BWXT 社の BANR は、高温ガス炉(HTGR)技術による輸送可能なマイクロ炉であり、DOD のプロジェクト Pele⁶⁰における可搬式マイクロ炉プロジェクトでも採用され、INL における原型炉の建設・実証が決定されている。BANR 設計において使用する、SiC マトリックスを採用した UN(窒化ウラン)TRISO 燃料の開発プロジェクトも ARDP で採用されている。BWXT は、DOE 保有の HEU を希釈して HALEU 燃料とし、同社のリンチバーク施設で TRISO 燃料の製造を開始したことを、2022 年 12 月 7 日に発表している。[3.1-8][3.1-148][3.1-149]

ARDP の BANR プロジェクトでは、INL の先進試験炉(ATR)を利用して UN TRISO 燃料の照射試験を実施し、照射後の検証等が行われる。

c. テラパワーNatrium 炉向けの金属 HALEU 燃料開発

テラパワー社と GEH 社は、セントラス・エナジーと協力して HALEU 製造に取り組むことに加え、Natrium 炉での試験装荷分も含む新型金属燃料の加工施設も建設する予定である。燃料製造施設は、19.75%までの濃縮ウランを扱う初めてのカテゴリ II 燃料加工施設として NRC の許認可が必要となる。この燃料製造施設は、GE グループの GNF アメリカ社と共同で建設されるもので、2022 年 10 月に起工式も行われており、2023 年から建設が開始される予定である。[3.1-8][3.1-93][3.1-128]

HALEU については、セントラス・エナジーによる HALEU 実証プログラムの完了後に、テラパワー社も投資して濃縮施設の拡張を行うことが、テラパワー社の ARDP プロジェクトで計画されている。

⁶⁰ DOD が遠隔地を含めて使用する運搬可能な第 4 世代マイクロ炉の開発プロジェクトで、1～5MWe の設備容量で 3 年以上フル稼働が可能、運搬可能で搬送後 3 日以内で運転可能、7 日以内で撤去が可能等のマイクロ炉開発が目指されている。最終候補として BWXT 社と X-Energy 社が残っていたが、2022 年 6 月 9 日に BWXT 社の選定が発表されている。

d. テラパワー／サザン社の MCFR における燃料サイクル

テラパワー社の MCFR は、溶融塩を燃料・冷却材に使用する溶融塩高速炉であり、使用済燃料集合体は発生せず、廃棄物量が従来炉と比較して少ない。また、劣化ウラン、天然ウラン、使用済燃料等も燃料として利用可能であり、フロントエンド／バックエンドの課題解決に繋がるメリットを有している。[3.1-8][3.1-132][3.1-133]

サザン社が ARDP プログラムで進める MCRE プロジェクトでは、2022 年から 20 百万ドルをかけて試験施設での試験を開始する予定であり、そこで収集されたデータは MCRE の熱水力学及び安全解析コードの検証に使用される。

e. ケイロス・パワー社 Hermes 炉向けの TRISO 燃料開発

ケイロス・パワー社は、NRC で審査中の Hermes 試験炉向けの TRISO 燃料の製造について、ロスアラモス国立研究所(LANL)と契約を締結し、LANL の低濃縮燃料製造施設(LEFFF)において Hermes 向けの TRISO 燃料製造を行うことを 2022 年 12 月に発表した。LEFFF は、核燃料開発に係る知見と設備を有する LANL において、TRL4～7 段階にある燃料の商業化を支援するために導入された施設で、ケイロス・パワー社が最初の顧客となる。[3.1-150][3.1-151]

LANL では従来、TRL1～3 段階にある燃料の開発支援を行ってきたが、LEFFF では研究開発段階から商業規模へのギャップを埋めることに焦点が当てられている。LEFFF は 2023 年 4 月稼働予定で、HALEU までの濃縮度の燃料システムについて、原型炉から試験装荷までの技術実証に必要な量の燃料開発を支援する。

f. オクロ社による Aurora 炉、燃料リサイクル

オクロ社は、HALEU の液体金属燃料を使用する Aurora 炉の許認可取得を目指しているが、ARPA-E の ONWARDS プログラムにおいて、軽水炉使用済燃料の利用を含めてクローズドサイクル実現を目指す研究開発プロジェクトに対する支援を獲得している。本技術では、再処理を行わない場合と比較して一桁以上の廃棄物減少が見込まれており、ONWARDS における本プロジェクトでは、以下に焦点が当てられる。[3.1-8][3.1-138]

- ・ 核燃料リサイクル施設で使用される電解精錬施設の主要プロセスを工業化・自動化し、主要ユニットの運転、最終的には模擬燃料で連続した(end-to-end)統合プロセスを実証する
- ・ リサイクル施設の NRC 許認可の準備を進める
- ・ 発生する廃棄物の最終処分計画を策定する

本プロジェクトには、ANL、INL の他、Deep Isolation 社も参加しており、超深孔ボアホール処分に適した廃棄体の同定や、処分関連の費用削減枠組みの構築も行われる。

g. GA 社の EM2(Energy Multiplier Module)炉の燃料サイクル

GA 社の EM2 は、ガス冷却の高速炉で、SiC 被覆の HALEU 燃料(UC)を使用し、核拡散抵抗性が高く、リサイクルも可能で廃棄物が大幅に削減され、低コストの炉設計とされている。EM2 の燃料サイクルでは、UC/SiC 燃料の開発とともに、アクチニドのリサイクルが可能な再処理システムの開発も目指されている。GA 社は、EM2 使用未燃料のリサイクルとして、初装荷炉心の後には濃縮が不要で核分裂性物質のみが廃棄物となる循環式の乾式再処理プロセス AIROX(Atomics International Reduction Oxidation)法の採用を考えている。[3.1-8]

3.1.8 フロントエンドに係るサプライチェーン

米国内の 2021 年のウラン生産量は、 U_3O_8 ベースで約 21 千ポンド(約 9.5 トン)と殆どゼロに近く、稼働していた施設は ISL 方式の 3 カ所のみと報告されている。2010 年のウラン生産量は 4,237 千ポンド(約 1,922 トン)であり、激減している。[3.1-152]

また、DOE のエネルギー情報局(EIA)統計に拠れば、米原子力発電事業者が購入したウラン(2021 年供給分)は約 95%が外国起源となっている(表 3.1-14)。購入ウランの形態は、半分強がウラン精鉱(イエローケーキ)で、残りが濃縮・転換役務を含めた UF_6 での購入となっている。表 3.1-15 は購入先を国別に見たもので、カザフスタンが約 35%で 1 位、次いでカナダ、オーストラリア、ロシアが 14~15%となっている。DOC に拠れば、ウラン精鉱の輸入は主にオーストラリア、カナダ、カザフスタン及びウズベキスタンから、LEU の輸入は主にロシア、英国、ドイツ、フランス及びオランダからとなっている。[3.1-11][3.1-152]

表 3.1-16 は濃縮役務の購入先を国別に示したもので、ロシアが 3 割弱でトップ、次いで英国、ドイツ、オランダが 17~11%となっており、約 8 割が国外に依存している。ただし、濃縮国別に見たウラン購入量を見ると、濃縮役務トップのロシアからのウラン購入量は殆どない。これは、ダンピング調査停止協定の輸入枠の下でのセントラス・エナジー社によるロシアからのウラン輸入については、セントラス・エナジー社から原料ウラン相当量が返還される形となるためとも考えられるが、EIA 統計で具体的な記載は確認できず、不明である。

また、米発電事業者が米国内での濃縮向けに提供したウランについて、その起源国を見ると、7 割以上がカナダ、オーストラリア、カザフスタン起源であり、米国起源のウランの持ち込みは約 15%となっている。(表 3.1-17)

現在の米国では天然ウランが殆ど国外依存、濃縮役務も国外依存が高く、唯一の転換施設も 2017 年から停止している状況であり、転換役務も国外で調達されていることになるが、EIA 統計では転換役務のデータは示されておらず、詳細は不明である。

表 3.1-14 米原子力発電事業者が購入したウラン(2021 年供給、U₃O₈ 換算トン)

	ウラン精 鉱	天然 UF ₆	濃縮 UF ₆	天然・濃 縮 UF ₆ 計	合計
米国起源	-	-	-	-	1,122
外国起源	-	-	-	-	20,074
合計	11,360	4,567	5,268	9,835	21,195

出所) EIA, 2021 年ウラン市場年報[3.1-89]

表 3.1-15 起源国別に見た米発電事業者のウラン購入量(2021 年供給、U₃O₈ 換算トン)

起源国名	2021	構成比
オーストラリア	3,044	14%
カナダ	3,133	15%
カザフスタン	7,509	35%
ナミビア	1,458	7%
ロシア	2,863	14%
その他 ⁶¹	2,067	10%
外国起源計	20,074	95%
米国起源	1,122	5%
合計	21,195	100%

出所) EIA, 2021 年ウラン市場年報

表 3.1-16 濃縮国別に見た米発電事業者によるウラン供給／濃縮役務購入量(2021 年供給)

単位:ウランは U₃O₈ 換算トン、濃縮役務は千 SWU

濃縮国名	ウラン提供				濃縮役務	構成比
	米国起源	外国起源	合計	構成比		
ドイツ			1,930	12%	1,825	13%
オランダ			1,544	10%	1,583	11%
ロシア		280	280	2%	3,953	28%
英国			1,342	9%	2,366	17%
その他			3,732	24%	1,754	12%
外国計		8,611	8,828	57%	11,481	81%
米国	970	5,692	6,662	43%	2,736	19%
合計	1,186	14,303	15,490	100%	14,217	100%

注) 空白欄はデータ非開示。斜字は原典では非開示だが開示データの差引により求めた計算値

出所) EIA, 2021 年ウラン市場年報 (Table 13/16 から作成)

⁶¹ 「その他」は個別事業者情報保護のため非開示の国で、チェコ、マラウィ、ニジェール、南アフリカ、ウズベキスタン、不明をまとめたもので、数量はデータ明示の 5 カ国と外国起源合計の差分を記載している。

表 3.1-17 濃縮国・ウラン起源国別に見た米発電事業者によるウラン供給量(2021 年供給)

単位:U₃O₈換算トン

濃縮国	米国起源	外国起源	(内オーストラ リア)	(内カナダ)	(内カザフス タン)	(その他)	合計
外国	217	8,611	1,644	1,929	3,591	1,447	8,828
米国	970	5,692	1,229	2,273	1,378	812	6,662
合計	1,186	14,303	2,873	4,202	4,970	2,259	15,490

注) 空白欄はデータ非開示。斜字は原典では非開示だが開示データの差引により求めた計算値

出所) EIA, 2021 年ウラン市場年報 (Table 13/16 から作成)

3.2 英国

3.2.1 原子力・核燃料サイクル政策の概要

英国では 1950 年代半ばから、軍事利用プルトニウム製造のため、セラフィールドサイトにおいて再処理が実施されてきた。その後 1964 年には商用炉であるマグノックス炉から発生する使用済燃料の再処理プラントが操業を開始した。ただし、マグノックス炉の使用済燃料が再処理されたのは、マグノックス炉の燃料被覆管(マグノックス合金：主にマグネシウム、少量のアルミニウム・ベリリウム等の組成)が水と反応する性質を持つために、使用済燃料を水中で長期間安全に貯蔵することが困難であるとの理由からである。さらに、改良型ガス冷却炉(AGR)の使用済燃料がセラフィールドサイトの軍事用施設で再処理されていたが、再処理事業の実施主体として 1971 年に設立された国有企業の英国核燃料会社(BNFL)が海外からの再処理契約を複数受注することとなった。1973 年には軍事用再処理プラントが閉鎖されることとなり、契約済みの再処理役務を全て提供するため、政府は 1976 年に酸化物燃料再処理プラント(THORP)を建設する計画を発表、1978 年に計画が許可された。また海外顧客向けに、MOX 実証施設(MDF)とセラフィールド MOX 燃料製造プラント(SMP)が 1990 年代に操業を開始した。

THORP は 2004 年に発生した漏洩事象により 2005 年に操業停止し、再処理事業運営は 2005 年 4 月に政府が国内の原子力レガシー施設の管理・処理に取り組む公的機関として設立した原子力廃止措置機関(NDA)に移管され、再処理事業を含め、所有権や事業方針の決定権は政府に移った。THORP はその後も操業の不調が続き、NDA は 2012 年 6 月、既存の国内外向け再処理契約が完了する 2018 年に操業停止する方針を発表した。また、SMP も 2011 年の福島第一原子力発電所事故を受けて、日本向けのサービスが縮小する見込みとなったことから、NDA は同年 8 月に同プラントの閉鎖も決定した。さらに、セラフィールドサイトのマグノックス炉使用済燃料の再処理プラントは 2022 年 7 月に操業を終了した。

英国政府は、使用済燃料に含まれるプルトニウム等を再利用することの有用性を認識するとしながらも、使用済燃料の再処理を行うかどうかは、当該使用済燃料の所有者の判断に委ねるとしており、国として核燃料サイクル政策を推進する方針は掲げていない。国内で PWR 等の軽水炉の使用済燃料再処理を行う施設が存在しない現状で、現在英国において発電事業を行う EDF エナジー社も、運転中の原子炉や今後建設する EPR の使用済燃料の再処理を行う方針は示していない。なお、過去に実施した再処理によって回収したプルトニウムに関しては、MOX 燃料としての利用等、英国政府が検討を行っている。

英国政府は 2050 年のカーボンニュートラル目標を掲げており、その達成に向けたエネルギーシステムの低炭素化施策をまとめたエネルギー白書を 2020 年 12 月に公表している。同白書では、現在建設中のヒンクリーポイント C 原子力発電所(EPR2 基)以外に、新たな大型炉新設プロジェクトに少なくとも 1 件投資する方針とともに、2030 年代初頭までに小型モジュール炉(SMR)や先進モジュール炉(AMR)開発を推進する方針が示された。

なお、英国政府は 2021 年 10 月に従来のスケジュールから 15 年前倒しの 2035 年までにネットゼロを達成する目標を発表した[3.2-1]。本目標の実現のために、再エネ、SMR や AMR を含む新規原子力発電所等で構成される電力システムを構築することで、自動車や家庭暖房等の脱炭素化を促進するとともに、化石燃料市場の変動に伴うエネルギー価格高騰から消費者を保護できるとしている。

さらに 2022 年 4 月、英国政府は「エネルギー安全保障戦略(BESS)[3.2-2]」を発表した。これはコロナ禍からの復興による需要増加及びウクライナ情勢に伴うエネルギー価格高騰を受けて、エネルギー安全保障とネットゼロの両立及び推進を目指すものである。同戦略では、原子力を信頼性と規模を兼ね備えた唯一の低炭素電源と位置づけ、2030 年までに一年に 1 基のペースで最大 8 基の原発を新設し、2050 年までに現在の 3 倍超となる 2,400 万 kW(需要比 25%)を導入する方針が示されている。さらに、早いペースでの原子力発電所新設に向け投資準備や建設を援助する政府機関「Great British Nuclear(GBN)」を 2022 年中に設立し、2023 年までに更なるプロジェクトの選定を開始するとしている。しかし、財務省と BEIS の間では資金調達に関する論争があり[3.2-3]、またGBNの今後の計画(いつ、どれくらい、どのような開発をすべきか)や資金調達といった包括的戦略についての明確性の欠如が指摘されている[3.2-4]。このような状況の中、2023 年 2 月現在、GBN の設立は完了しておらず、GBN 設立の進展の行き詰まりと政府による投資の必要性を指摘する首相宛の公開書簡がプロスペクト労働組合(エンジニア、科学者等専門的な職種の労働組合)より発表されている[3.2-5]。

また、英ビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS)は現在以下の 3 つのプログラムを運営している。

- AMR 研究開発・実証(RD&D)プログラム
2030 年代初頭までに AMR の実証を行うことを目標に、約 330 万ポンド(約 5 億 3,000 万円)の予算のもと研究開発への投資を行う(詳細を 3.2.7 項に記載)。
- 将来の原子力開発を可能にするための基金(Future Nuclear Enabling Fund)[3.2-6]
SMRやAMRを含む新規の原子力関連技術の開発を支援するための 1.2 億ポンド(約 180 億円)の補助金制度。2023 年 1 月に公募が締め切られ、採用プロジェクトが発表される。2021年のネットゼロ戦略で発表され、2022 年のBESSで定められたうち最初の政府介入となる。投資対象は 2050 年までの英国での電力供給拡大に貢献するプロジェクトである必要があり、すなわち原子力による発電技術が対象となっている。「水素製造等は二次的な考慮事項」との記載も公募要領にあり、発電に直接的に関わらない再処理技術は本プログラムの対象外と考えられる。
- 燃料の国内生産量拡大を目的とした「原子燃料基金(NFF)[3.2-7]」
BESS(エネルギー安全保障戦略)に基づき、英国内のフロントエンド技術を維持するために最大 7500 万ポンドの助成金を提供する。2022 年 7 月設立。軽水炉(LWR)燃料、HALEU 燃料、AMR 用燃料の生産・サプライチェーンの強化に向けた開発等が対象となる。

英国政府が主導する開発プログラムでは核燃料サイクルのフロントエンドから原子炉技術までがフォーカスされ、再処理技術の開発は支援の対象外となっている。再処理技術の開発に関しては、2022 年の再処理工場の閉鎖を受けてどのような技術を維持していくか今後検討していくものと考えられる。

3.2.2 ウクライナ侵攻のサイクル政策への影響

英国政府は 2022 年 12 月、ロシアのウクライナ侵攻とそれによる世界のエネルギー価格への影響を受けて、英国でのクリーンエネルギー生産を支援するための新しい投資を発表した[3.2-8]。

これに含まれる原子力分野への投資は 7,700 万ポンドであり、以下の投資を行うとしている。

- スプリングフィールドの転換工場の燃料生産能力強化
現在ロシア以外で行われない回収ウラン転換を行うため、ランカシャーのウェスティングハウス社スプリングフィールドサイトの燃料工場へ最大 1300 万ポンドの設備投資を行う。さらに、天然ウランからの燃料製造能力の開発にも資金を役立てるとしている。核燃料の海外依存を下げ、さらに英国を核燃料および燃料サイクルサービスの主要な国際供給者として位置づける事を狙う。
- 高温ガス炉 (HTGR) 開発
2030 年代初頭に稼働する可能性のある HTGR について最大 6000 万ポンドの投資を行い、化石燃料への依存度低減、英国のエネルギー主権と安全保障の強化を狙う。この投資は AMR D&D プログラムからの資金提供を受けて行われ、今後 10 年間で工学設計の実証プロジェクトを行う事を目標とする。さらに、AMR D&D プログラムの補完プロジェクトである AMR Knowledge Capture プロジェクトからも 400 万ポンドの資金提供を受けている。

さらに、2023 年 1 月のグラハム・スチュアート・エネルギー・気候担当国務大臣の声明 [3.2-9]では、ロシア製燃料の代わりとなる燃料の開発を支援するため、ウラン処理、転換能力の強化を前述の原子燃料基金 (NFF) により行うとしている。声明では、これはウランと核燃料の生産能力をロシアから多様化するという G7 のコミットメントを果たすための政策であるとしている。

3.2.3 使用済燃料の処理・処分、回収・劣化 U 及び Pu の利用方針・実績

英国における使用済燃料の処理・処分、回収・劣化 U 及び Pu の利用方針・実績を以下に記載する。なお、2023 年 1 月に放射性廃棄物管理委員会 (CoRWM) が公開した第 18 回年次報告書 [3.2-10]では、プルトニウム、ウラン、使用済燃料の在庫、再利用、管理、処分について情報収集や NDA、Urenco 等との意見交換を 2022 年から 2023 年にかけて

て行い、CoRWMのアドバイスを含むレポートを作成するとしており、2023年にウラン、プルトニウム、使用済燃料の処分・利用について今後の方針が示されると予想される。

(1) 国内再処理／海外再処理委託／海外再処理受託

前述のとおり、セラフィールドに立地する再処理プラント THORP において国内外向け再処理を行っていたが、2018年に同プラントは閉鎖された。さらに、セラフィールドサイトのマグノックス炉使用済燃料の再処理プラントは2022年7月に操業を終了し、現在英国内では再処理は行われていない。本再処理プラントで処理され、燃料サイクルに戻されたウランは合計15,000トン以上である[3.2-11]。また、海外向けの主な再処理実績は、日本、ドイツ、スイスである[3.2-12]。

(2) 使用済燃料の再処理方策

英国では、使用済燃料の再処理に関して政府レベルでの政策方針はなく、再処理を実施するか否かは使用済燃料の所有者である事業者の判断に委ねられている。過去の契約に基づくマグノックス炉や AGR については再処理が実施されてきたが、運転中の PWR や、今後新設される EPR の使用済燃料については、運転者であり使用済燃料の所有者である EDF エナジー社は、再処理を行う方針は示していない。しかし、後述の研究開発ロードマップにおいては、将来のオプションとして再処理研究を続ける方針が示されている。

(3) 使用済 MOX 燃料の再処理方策

英国ではプルサーマルは実施されておらず、使用済 MOX 燃料は発生していないため、使用済 MOX 燃料の再処理は実施されていない。前述のとおり、英国政府は、マグノックス炉や AGR の使用済燃料から回収したプルトニウムを MOX 燃料として再利用することを検討しているが、この結果発生する使用済 MOX 燃料の取り扱い方針については不明である。一方、LWR(軽水炉燃料)については、後述の研究開発ロードマップにおいて MOX 燃料の再処理技術が開発対象に含まれている。

(4) 回収・劣化ウランの利用方法・実績

英国では、マグノックス炉の使用済燃料の再処理によって回収されたウランを再濃縮して AGR 燃料として再利用した実績がある。再利用された回収ウランは15,000トンにのぼるが、この再利用は経済的理由から1990年代に終了している[3.2-13]。回収ウラン、劣化ウランは2013年時点で17万tU存在している(このうち、未照射の劣化ウランが10万8500tU、回収ウランが5万4000tU)[3.2-14]。前述の通り、ロシアのウクライナ侵攻を受けて回収ウラン転換を英国内で行うための設備投資をするとしており、今後は回収ウランの再利用を再開する方針と考えられる。

(5) プルトニウムマネジメント

これまで英国で行われた再処理は、過去の契約に基づき実施されたマグノックス炉、AGRの使用済燃料のみであるが、過去の契約に基づく再処理の完遂後には、国内に140トンのプルトニウムストックが存在することになると見込まれている。これらのプルトニウムの管理方針については、政府は2011年12月に取りまとめた報告書において、①MOX燃料として利用、②固化したうえで直接処分、③貯蔵を継続という3つの方針を検討した結果、①MOX燃料として利用するのが最適なオプションであると結論している[3.2-15]。なお、MOX燃料として再利用する炉としては、軽水炉だけでなく、Nuscale 小型モジュール炉や CANDU 炉、PRISM 炉等での再利用も検討されている[3.2-15][3.2-16]。

一方で、プルトニウム管理の責任を負っている NDA は 2016 年に仏 Orano 社と 5 年契約を締結し、プルトニウムストックを MOX 燃料に加工するソリューションの検討を行っている[3.2-17]。2019 年 11 月には、英国からフランスに数百グラムの酸化プルトニウムサンプルが輸送されている[3.2-18]。さらに、2022 年 6 月には新興企業ニュークレオ社⁶²が鉛冷却高速炉(LFR)で用いる MOX 燃料製造工場建設の資金調達に成功したと発表しており、今後英国内では引き続き MOX 燃料としてのプルトニウム利用を行う方向性と考えられる[3.2-19]。

3.2.4 原子力・核燃料サイクル関連施設、事業主体

英国における核燃料サイクル事業者はウェスティングハウス(Westinghouse/UK)社、ウレンコ(Urenco)社であるが、運転終了した THORP 再処理プラントとマグノックス再処理プラントは NDA の完全子会社であるセラフィールド社が保有しており、産業構造は図 3.2-1 のとおりである[3.2-20]。

⁶² 2021 年に創立し、英国、フランス、イタリアに拠点を置く新興企業。資本関係は不明であるが、ベンチャーキャピタルから投資を受けている。

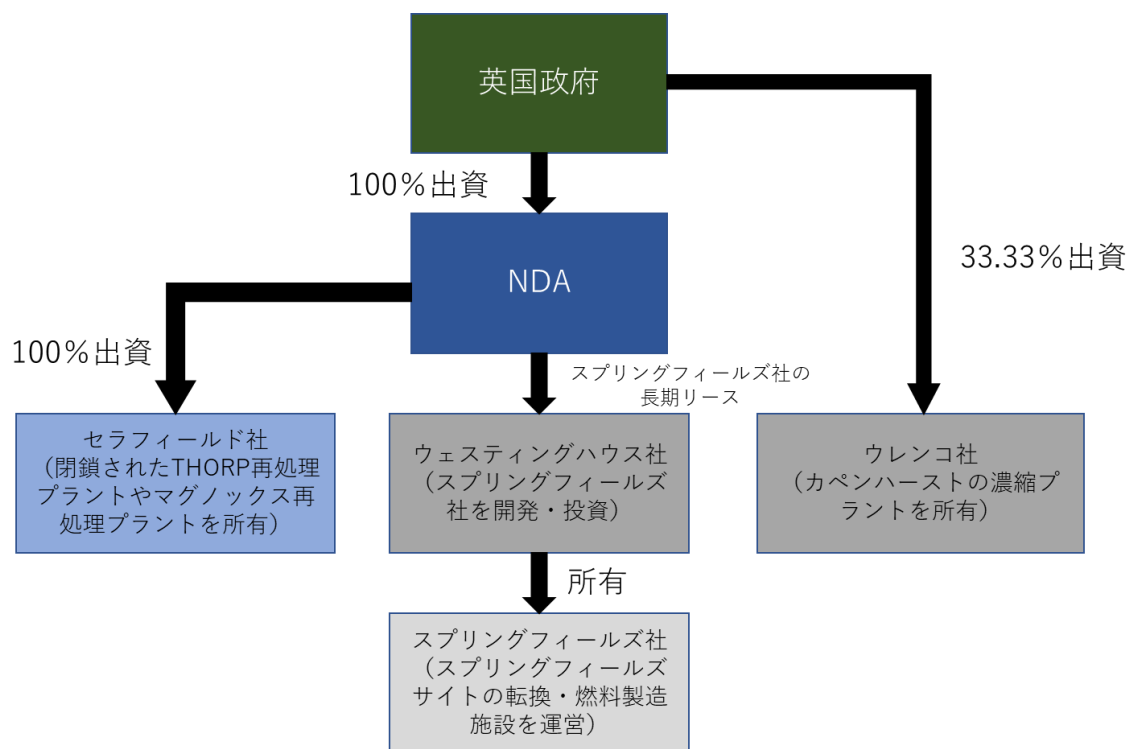


図 3.2-1 英国における核燃料サイクル事業構造

以下、IAEA の NFCIS[3.2-21]の情報に基づき、イギリスの核燃料サイクル施設について、稼働中のフロントエンド・バックエンド施設の情報を整理する。

【濃縮】

施設		
	施設名称	カペンハースト濃縮工場
	施設概要	六フッ化ウラン(UF ₆)の濃縮を行う。
	技術	遠心分離法
	能力	4500 MTSWU/年
	稼働状況	稼働中
	稼働実績	1972 年稼働開始。
	役務取引 取組方針	海外から濃縮事業を受託しているという情報は無く、納入先は国内のみであると思われる。
事業主体		
	事業者名称	Urenco Limited
	事業者概要	英国、ドイツ、オランダの合併会社。英国、ドイツ、オランダ、米国でウラン濃縮プラントを運営する。英国に本社を置く。
	資本関係	英国政府、オランダ政府がそれぞれ 1/3

	経営状況	ずつ株式を所有する。残りの 1/3 はドイツの企業 E.ON S.E.と RWE AG が 50%ずつ所有する。
	政府との関係	英国政府より株式の 1/3 の投資を受けている。
	今後の方針・戦略	英国内での濃縮事業の方針・戦略を変更するという情報は得られておらず、今後も濃縮事業を続けると考えられる。

【転換】

施設		
	施設名称	Springfields (Hex Conversion)
	施設概要	ウラン鉱石を UF ₆ へ転換
	技術	溶媒抽出法
	能力	6000tHM/年
	稼働状況	稼働中
	稼働実績	1993年稼働
	役務取引 取組方針	ウラン鉱石は主にオーストラリアから輸入され、UF ₆ に転換される[3.2-22]。
事業主体		
	事業者名称	Westinghouse/UK
	事業者概要	米国ペンシルバニア州に本社を置く多国籍原子力関連企業。
	資本関係 経営状況	Westinghouse 社が 2010 年からスプリングフィールズサイトを NDA より長期リースし運営している[3.2-23]。
	政府との関係	政府による投資のもと設備増強が行われている。
	今後の方針・戦略	回収ウラン転換、天然ウランからの燃料製造に最大 1300 万ポンドの設備投資を行うとしている。

施設		
	施設名称	Springfields Main Line Chemical Plant
	施設概要	イエローケーキ・UO ₃ を UF ₄ へ転換
	技術	不明

	能力	10000 tHM/年
	稼働状況	稼働中
	稼働実績	1960 年稼働
	役務取引 取組方針	主にオーストラリアから UO ₃ を輸入している。経済・環境の観点から、スプリングフィールドズではイエローケーキの溶媒抽出を行っていない[3.2-22]。
事業主体		
	事業者名称	Westinghouse/UK
	事業者概要	米国ペンシルバニア州に本社を置く多国籍原子力関連企業。
	資本関係 経営状況	Westinghouse 社が 2010 年からスプリングフィールドズサイトを NDA より長期リースし運営している。
	政府との関係	政府による投資のもと設備増強が行われている。
	今後の方針・戦略	回収ウラン転換、天然ウランからの燃料製造に最大 1300 万ポンドの設備投資を行うとしている。

施設		
	施設名称	Springfields Line 4 Hex Plant
	施設概要	UF ₄ を UF ₆ へ転換
	技術	不明
	能力	6000 tU/年
	稼働状況	稼働中
	稼働実績	1960 年稼働
	役務取引 取組方針	Springfields Main Line Chemical Plant から UF ₄ を受け取り、UF ₆ へ転換していると思われる。
事業主体		
	事業者名称	Westinghouse/UK
	事業者概要	米国ペンシルバニア州に本社を置く多国籍原子力関連企業。
	資本関係 経営状況	Westinghouse 社が 2010 年からスプリングフィールドズサイトを NDA より長期リースし運営している。

	政府との関係	政府による投資のもと設備増強が行われている。
	今後の方針・戦略	回収ウラン転換、天然ウランからの燃料製造に最大 1300 万ポンドの設備投資を行うとしている。

【再転換】

施設		
	施設名称	Springfields (UO ₂ Conversion)
	施設概要	フィード燃料として UF ₆ を受け入れ、UO ₂ を製造。
	技術	IDR 法
	能力	900 tU/年
	稼働状況	稼働中
	稼働実績	1993 年稼働
	役務取引 取組方針	カペンハースト濃縮工場より UF ₆ を受け入れ、UO ₂ に再転換したのちスプリングフィールドの燃料製造工場に納入していると思われる。
事業主体		
	事業者名称	Westinghouse/UK
	事業者概要	米国ペンシルバニア州に本社を置く多国籍原子力関連企業。
	資本関係 経営状況	Westinghouse 社が 2010 年からスプリングフィールドサイトを NDA より長期リースし運営している。
	政府との関係	政府による投資のもと設備増強が行われている。
	今後の方針・戦略	回収ウラン転換、天然ウランからの燃料製造に最大 1300 万ポンドの設備投資を行うとしている。

施設		
	施設名称	Springfields Enr. U Residue Recovery Plant(EURRP)
	施設概要	ウラン濃縮で生じた固体残留物から濃縮ウランを回収する。

	技術	ADU 法
	能力	65 tHM/年
	稼働状況	稼働中
	稼働実績	1985 年稼働
	役務取引 取組方針	より低い濃度のウランを含む可能性が高い海外からの固体残留物を処理できるよう開発が行われている。
事業主体		
	事業者名称	Westinghouse/UK
	事業者概要	米国ペンシルバニア州に本社を置く多国籍原子力関連企業。
	資本関係 経営状況	Westinghouse 社が 2010 年からスプリングフィールドサイトを NDA より長期リースし運営している。
	政府との関係	政府による投資のもと設備増強が行われている。
	今後の方針・戦略	回収ウラン転換、天然ウランからの燃料製造に最大 1300 万ポンドの設備投資を行うとしている。

【燃料製造】

施設		
	施設名称	Springfields OFC AGR Line
	施設概要	AGR 用燃料の製造工場
	技術	不明
	能力	290tU/年
	稼働状況	稼働中
	稼働実績	1996 年稼働
	役務取引 取組方針	スプリングフィールドズで再転換された UO ₂ を受け入れ、燃料として加工し英国内の AGR に供していると考えられる。
事業主体		
	事業者名称	Westinghouse/UK
	事業者概要	米国ペンシルバニア州に本社を置く多国籍原子力関連企業。
	資本関係 経営状況	Westinghouse 社が 2010 年からスプリングフィールドサイトを NDA より長

		期リースし運営している。
	政府との関係	政府による投資のもと設備増強が行われている。
	今後の方針・戦略	回収ウラン転換、天然ウランからの燃料製造に最大 1300 万ポンドの設備投資を行うとしている。

施設		
	施設名称	Springfields Oxide Fuel Complex (PWR)
	施設概要	PWR 用燃料の製造工場
	技術	ADU 法
	能力	200tU/年
	稼働状況	稼働中
	稼働実績	1993年稼働
	役務取引 取組方針	スプリングフィールズで再転換された UO ₂ を受け入れ、燃料として加工し英国内の PWR に供していると考えられる。
事業主体		
	事業者名称	Westinghouse/UK
	事業者概要	米国ペンシルバニア州に本社を置く多国籍原子力関連企業。
	資本関係 経営状況	Westinghouse 社が 2010 年からスプリングフィールズサイトを NDA より長期リースし運営している。
	政府との関係	政府による投資のもと設備増強が行われている。
	今後の方針・戦略	回収ウラン転換、天然ウランからの燃料製造に最大 1300 万ポンドの設備投資を行うとしている。

3.2.5 ウクライナ侵攻の役務取引動向等への影響

英国はウラン資源を主にオーストラリアから輸入している[3.2-22]。転換、濃縮、再転換、燃料成型加工のフロントエンドプロセスは国内で遂行する能力があり、現在ロシアのウクライナ侵攻による役務取引動向への影響は無いと考えられる。

また、英国では 2050 年に 2400 万 kW の原子力発電量を目指しているが、これは燃料にして年間約432トンが必要となる(燃焼度 50Gwd/THM、設備利用率 85%を仮定)。3.2.4 にて示した通り、フロントエンドの各プロセスにおける年間処理能力は現在から 2050 年までの原子力発電量に応じた燃料必要量を満足するため、燃料供給における海外依存度は小さく、ウクライナ侵攻が今後の役務取引に大きく影響を与える可能性は低いと考えられる。

3.2.6 原子力・核燃料サイクル関連の研究開発動向

前述の通り、2022 年 7 月に燃料の国内生産量拡大を目的とした原子燃料基金(NNF)が設立された。NNF の設計にあたり情報要求(RFI)が行われ、その結果 NNF で資金提供される分野は軽水炉(LWR)燃料、HALEU 燃料、AMR 用燃料の生産・サプライチェーンの強化に向けた開発等とされた。また、本基金では再処理技術およびウラン燃料以外の核燃料(MOX 燃料等)の開発は対象外としている。[3.2-24]

また、国立原子力研究所(NNL)は 2021 年 6 月、次世代燃料及び燃料サイクル技術の研究開発ロードマップとして、レポート「Fuelling Net Zero: Advanced Fuel Cycle Roadmaps for a Clean Energy Future」[3.2-25]を発表した。本ロードマップは NNL が英国政府(BEIS)の協力・投資のもと主導する先進燃料サイクルプログラム(Advanced Fuel Cycle Programme=AFCP)を通して作成されたものである。本ロードマップでは、次世代燃料の製造と使用済燃料管理にフォーカスされている。

AFCP は 2016 年に開始され、軽水炉用の事故耐性燃料(ATF)もしくはその他先進技術燃料、高温原子炉(HTRs)用被覆粒子燃料(CPF)、高速炉用燃料、湿式再処理、溶融塩炉燃料再処理についての技術開発が行われた。AFCP において、2016 年の AFCP 開始時および 2021 年時点での各分野のTRLは表 3.2-2 のように判断されている。

表 3.2-1 AFCP 開始時から 2021 年までの各研究開発項目の TRL

AFCP(2016～2021 年)での研究開発項目		TRL (2016 年)	TRL (2021 年)
軽水炉(LWR)の事故耐性燃料(ATF)もしくは先進技術燃料	高密度燃料	1	3
	コーティングされた Zr 合金被覆	2	6
	SiC 被覆	2	3
高温原子炉(HTRs)の為の被覆粒子燃料(CPF)	核(Kernels)	3	4
	被覆	3	3
高速炉燃料		3	3
先進的な湿式再処理技術		2	4
溶融塩再処理技術		2	2

また、AFCP で開発された各分野について、2020 年から 2050 年までのロードマップが示されている。表 3.2-2 にロードマップの全体観を示す。

表 3.2-2 AFCP における燃料サイクル技術開発ロードマップの概観

短期(2020～2025年)	【先進技術燃料(ATF)】 コーティングされた Zr 合金被覆技術を用いた先進技術燃料(ATF)が国内外の軽水炉燃料市場に供給される
	【再処理技術】 再処理時に商業的に価値のある同位体(例:医療用)を回収するため分離科学技術を適用する
中期(2025～2035年)	【先進技術燃料(ATF)】 革新的な先進技術燃料(ATF)コンセプトを国内外の軽水炉/AMR 市場に供給する
	【被覆粒子燃料(CPF)】 英国開発の被覆粒子燃料(CPF)を高温原子炉(HTR)実証機に供給する。 また、CPF を使用済燃料管理オプション付きで新興の国内外商業用HTR市場に供給する
	【再処理技術】 信頼性があり、軽水炉(およびMOX)使用済燃料の高度な再処理のための技術オプションを構築する
	【アメリシウム 241 供給】 宇宙用電源等のための Am-241 の生産
長期(2035～2050年)	【高速炉燃料サイクル】 実証炉用燃料製造・供給と使用済燃料再処理技術を実証する
	【ATF再処理技術】 信頼性と競争力のあるATF使用済燃料の再処理技術オプションを構築する
	【溶融塩燃料】 実証炉への溶融塩燃料の供給および使用済燃料管理の技術実証
ビジョン (2050年～)	Generation III+ (改良型第三世代炉)およびその他先進的な原子炉に燃料サイクル技術を供給し、英国におけるネットゼロの達成と持続可能な未来への原子力の貢献を可能にする
	英国の産業は、燃料の濃縮と製造から再処理と廃棄物の減容化、保管、処分まで、強力な国内能力を持っている

以下に各分野のロードマップ概要を示す。

(1) 先進技術燃料(ATF)

現行軽水炉の燃料は性能と経済性の観点から革新の焦点となっており、事故耐性燃料(ATF)開発が AFCP にて推進されている。AFCP での ATF 開発は、Westinghouse Encore 社の子会社 Springfields Fuels Limited と連携している。これは、同社が英国で運用可能な燃料製造拠点を持つ唯一の燃料ベンダーであるためである。ATF の技術ロードマップは英国の独立した見解を表しており、燃料ベンダー固有のものではない。AFCP で行われた研究開発に基づいて構築された 3 つの技術分野に焦点を当てている。

【短期目標】

- ・ コーティングされた Zr 合金被覆
(Cr 等で Zr 合金をコーティングし事故耐性を高めた被覆)

【長期的な「革命的」オプション】

- ・ 高密度燃料 (例:窒化ウラン)
- ・ 高度な被覆(例:炭化ケイ素 (SiC) 複合材料)

【ロードマップの概要】

- ・ 商業用被覆被覆材と先進技術燃料は、今後 10 年から 15 年以内に英国で製造される可能性があり、成長する可能性のある英国および国際的な LWR 市場に供給する。
- ・ 今後 3～5 年間は、照射試験、炉外試験、使用済燃料管理評価を含む燃料の適格性確認が重要な焦点となる。
- ・ ロードマップによって特定された経路を介してこれらの ATF 製品を供給することは、英国の潜在的収益を開拓しながら、英国の燃料製造能力を確保するのに役立つだろう。
- ・ 国際的な提携、照射と照射後試験 (PIE) 施設へのアクセス、新しい燃料の認定のための核データ要件等のイネーブラーが特定されている。

(2) 被覆粒子燃料(CPF)

高温原子炉(HTRs)の関連技術として、被覆粒子燃料(CPF)への関心は高まっており、軽水炉やマイクロ炉、宇宙用原子炉への応用も検討されている。これらの技術には安定的な燃料供給が必要であり、英国は AFCP を通して核(Kernel)製造およびコーティング技術、成型技術の確立を目指している。

- ・ 核(Kernel)製造
マンチェスター大学が主導する UK Nuclear Fuel Center Excellence(NFCE)[3.2-26]の枠組みのもと、CPF の核(Kernel)の製造装置の設置、試運転がスプリングフィールド敷地内の NNL プレストン研究所で行われる。

- ・ 核(Kernel)のコーティング
Sir Henry Royce Institute の枠組みのもと、マンチェスター大学でコーティング装置の設置と試運転が行われる。

【ロードマップの概要】

- ・ 2030 年代初頭での試運転における燃料装荷、その後の商業規模の燃料製造・供給に焦点を当てる。
- ・ これは英国エネルギー白書で掲げられた 2030 年代初頭までの AMR 実証および国内外での HTR 市場での成長を目的としている。
- ・ 実証炉での適格性確認、ライセンス取得に向けた燃料、被覆とカプセル化技術の開発を短期的目標とする。
- ・ 燃料パフォーマンスと炉物理のモデリング、照射試験、通常時・事故時を想定した炉外試験、使用済燃料マネジメントも本ロードマップに含まれる。
- ・ CPF 技術確立のイネーブラーとして、高純度低濃縮ウラン(HALEU)の供給確保、国際協力、照射試験および照射後試験施設(PIE)へのアクセス、核データの整備等が明示されている。

(3) 高速炉燃料サイクル

高速炉燃料については、カンブリア州セラフィールドNNL中央研究所内で、高速炉燃料ペレット製造の研究を行っている。さらに、高速炉燃料の再処理技術はGENIORSプロジェクト[3.2-27]のような欧州の共同研究開発プログラムに基づきAFCPの一部として研究されており、ウラン、プルトニウム、MAのリサイクルのためグループアクチニド抽出(GANEX)プロセスに基づく再処理プロセスが開発されている。

本ロードマップはスチール被覆を用いたウラン燃料(ワンススルーサイクルを想定した場合のオプション)、プルトニウム・MA 燃料、再処理可能な被覆を対象にしている。

【ロードマップの概要】

- ・ スチール被覆材を用いた次世代ウラン燃料開発は英国エネルギー白書で示された 2030 年代初頭までの AMR 実証目標に基づく。HTR はベースライン技術として現在想定されているが、高速炉の経済的利益と先進的な燃料サイクルに焦点を当てる事を排除するものではない。
- ・ 高速炉のプルトニウムおよび MA 燃料についての広範な研究は国内外での高速炉市場の拡大に焦点を当てている。
- ・ 実証炉に向けての適格性確認とライセンス取得に向けた燃料試作品の開発を短期的な目標とし、使用済燃料マネジメント評価、燃料挙動と炉物理モデリング、照射試験、炉外試験が含まれる。
- ・ プルトニウムおよび MA 燃料の製造にはインフラと燃料再処理技術の開発が必要である。

- ・ 使用済燃料マネジメント試験の為の高線量セルへのアクセス、国際連携、照射および照射後試験（PIE）施設へのアクセス、共通の研究開発インフラを開発するための（プルトニウム処分プログラムに関する）NDA との緊密な協力を含むイネーブラーがロードマップ内で特定されている。

（４）LWR 燃料の再処理高度化

使用済燃料再処理については、コスト・環境影響の削減、安全性・セキュリティ・核不拡散性の強化に向けた新技術として研究が行われている。再処理技術は直接処分サイクルの代替手段として並行して研究されるとしている。AFCP では先進的な PUREX プロセスが研究されており、英国、フランス、ロシア等において産業規模で利用されているような現行の PUREX アプローチを縮小する事を目的としている。また、ロードマップでは、セラフィールド再処理工場の稼働終了により再処理技術が英国内から失われる前に、短期間の間に次なる研究開発を行い、経験を得る事が必要とされている。主要な技術開発ニーズは以下の通りである。

- ・ UOX、MOX 燃料のせん断、溶解等
- ・ HLW からの MA 分離
- ・ ウラン、プルトニウム（Np 含む） 分離プロセス強化によるプルトニウム単独の流れの回避
ウラン、プルトニウムの共転換
- ・ 高度な減容化・固定化（ガラス固化しての地中埋め立て）技術に基づく統合・最適化された二次廃棄物管理戦略
プロセス監視、制御、保護のための革新的なオンライン分析ツールの応用

【ロードマップの概要】

- ・ 今後 10 年から 15 年以内に燃料再処理のための信頼できる技術的選択肢を持つことを目標とする。
- ・ プルトニウム処分、MOX 再処理の研究により地層処分施設の規模と埋設量を低減する。また、将来の ATF 市場の可能性も本研究の推進力となる。
- ・ 信頼できるオプションに関する決定を下支えするために、技術開発では短期から中期での TRL 6 に向けた技術向上に焦点を当てている。これは、例えば、照射済燃料の溶解研究、統合されたエンドツーエンドのプロセステストを必要とする。
- ・ 試験の為のインフラとなる施設、国際連携、高度なモデリングおよびシミュレーションツール等のイネーブラーがロードマップ内で特定されている。

（５）先進技術燃料(ATF)の再処理

先進技術燃料の再処理については、今後の燃料コンセプトに大きく依存するが、前述の LWR 燃料再処理技術開発におけるロードマップと重複する。

【ロードマップの概要】

- ・ ATF製品の開発・認可、英国での核計画の展開、ATFを利用したAMRの展開可能性等が本研究開発の推進力となる。
- ・ 英国における将来の再処理の要件に関する決定を可能にする、信頼性のある技術的選択肢を10年から15年の間に持つことに焦点を当てている。
- ・ LWR酸化物燃料の再処理ロードマップに記載されている研究開発が本ロードマップの一部として進行しており、一般的な再処理技術の多くを本ロードマップにも適用する事が想定されている。本ロードマップにおいて追加で開発される技術としては、窒化ウランATF構想が進展した場合の¹⁵Nの回収等がある。
- ・ イネーブラーとして、模擬燃料製造能力、国際連携、アクティブ試験のためのインフラへのアクセス等がある。

(6) 熔融塩再処理

熔融塩再処理は湿式再処理に対する補完的アプローチであり、燃料の電気分解に基づく技術である。AFCP では、金属燃料の熔融塩再処理の他、酸化物燃料への展開や熔融塩炉との横断的課題等が検討されている。また、排ガスの捕獲や塩の取り扱い、固化体化が重要な要素とされている。

【ロードマップの概要】

- ・ 今後10～15年以内に信頼できる技術的選択肢を持つことが求められる。
- ・ 電解還元と電解精錬のTRL向上に焦点を置く。電解還元は電解精錬に適した形に燃料を調整する事に着目する。電解精錬は使用済燃料のうちリサイクル可能な部分と廃棄物を選択的に分離する。MAを分離する能力は、高レベル廃棄物の処理負担を減らし得る。
- ・ 廃棄物管理の開発には、再処理プロセスからの塩のクリーンアップ、適切な廃棄物形態への加工技術が含まれる。
- ・ イネーブラーとして、国立研究所、産業界、学術界との連携、国際連携、サポート体制の構築、アクティブ試験の為にインフラ構築等が挙げられている。

3.2.7 革新炉開発における FE/BE 分野の政策・技術開発動向

英国において、SMR は電気出力 1,000MWe 以下の小型軽水炉を意味し、軽水以外を冷却材として利用するものは先進モジュール炉 (Advanced Modular Reactor: AMR) として分類し、区別している。

(1) AMR 開発に対する政府支援(AMR RD&D プログラム)

前述の通り、政府は 2020 年 11 月に「グリーン産業革命に向けた 10 ポイント計画」

[3.2-28]を、2020 年 12 月に「エネルギー白書：ネットゼロ未来の原動力」[3.2-29]を発表し、2030 年代初頭までに SMR の設計開発及び AMR 実証炉の建設を行うとした。さらに BEIS は 2021 年 7 月、これらの声明に基づき、2030 年代初頭までに AMR の実証を行う AMR 研究開発・実証(RD&D)プログラム[3.2-30]を発表した。2021 年 12 月、BEIS は最も有望な AMR として高温の熱利用が可能な高温ガス炉を選定、実証までのスケジュール概要を公開し、2022 年 4 月、RD&D プログラムの公募を開始した。本プログラムの予算は約 330 万ポンド(約 5 億 3,000 万円)となる。

AMR RD&D プログラムは3つのフェーズに分かれており、初期のフェーズで得られた成果を用いて後続フェーズでの実施内容の詳細が決定される。また、後段のフェーズになるにつれ採用 PJ 数は少なくなっていく。各フェーズでの実施内容は以下のようになっている。

1) フェーズ A

基本設計に先立つ予備調査フェーズであり、2023 年初頭に完了予定。原子炉(HTGR)に関する 4 プロジェクトと被覆粒子燃料(CPF)に関する 2 プロジェクトが選定された。これらに対し、330 万ポンドのうち計約 250 万ポンド(約 4 億 200 万円)、プロジェクトあたり最大 50 万ポンドを交付する方針となっている[3.2-31][3.2-32]。各プロジェクトの概要を以下に示す。

【HTGR に関する技術開発】

- EDF Energy Nuclear Generation Limited
EDF は、2030 年代の HTGR 試運転に最も適した原子炉設計特性を決定するためエンドユーザーの要件に着目しており、英国初の HTGR 試運転のサイトとして 2 基の原子炉が立地するハートリバプールを提案している。
- National Nuclear Laboratory(NNL)
日英チーム(NNL、日本原子力研究開発機構(JAEA)、ジェイコブス)を組織し、日本での HTGR 研究成果を土台として設計、建設、運用において革新的なアプローチを行う。本プロジェクトは国内外のサプライチェーンをまとめながら、エネルギーユーザー主導のエンドツーエンドソリューションを提供することを目的としている。
- U-Battery Developments Ltd
U-Battery 社の AMR 試運転に最適なサイズ、炉型、コスト、輸送方法を決定する。化石燃料と代替可能な低炭素エネルギーとして熱と電力の供給源を提供することを目的とする。
- Ultra Safe Nuclear Corporation UK(USNC UK)
USNC の既存のマイクロモジュール炉(MMR)設計を土台として、英国内の産業における将来のエネルギー需要に対応した MMR + 設計を開発・実証する。水素および持続可能な航空燃料(SAF)の生産が含まれる。

【被覆粒子燃料(CPF)に関する技術開発】

- ・ National Nuclear Laboratory(NNL)
HTGR実証炉での燃料初装荷から国内の商業用燃料の供給を実現することを目的とする。英国のエネルギー安全保障および将来の燃料輸出に向け、NNL、Urenco、JAEAがCPFの商業化を目指し共同開発を行う。
- ・ Springfields Fuels Limited
CPFの安全かつ信頼性の高い供給ルートを決定し、将来の英国で実現し得る様々なHTGR技術をサポートする事を目的に Urenco と共同研究を行う。本プロジェクトでは HTGR での標準的な CPF タイプとして UCO-kernel TRISO 燃料(二酸化ウランと炭化ウランを核とした TRISO 燃料)[3.2-33]に着目しているが、幅広いバリエーションの燃料製造のため最大限の柔軟性を備えた施設を設計するとしている。

2) フェーズ B

規制面からのレビューや関連研究、開発を可能にし、フェーズ C の実行計画を設計するのに十分な成果を得るためのフェーズ。最大2プロジェクトに最大2,750 万ポンドの投資が行われる。公募は 2023 年 3 月まで行われ、プロジェクトは 2025 年 2 月に完了予定。

3) フェーズ C

2025 年の政府歳出見直しでの意思決定に基づいて行われるフェーズ。フェーズCが行われる場合、詳細設計や建設、試運転で構成され、2030 年代初頭に完了すると想定されている。

(2) AMR サプライチェーン・技術開発の現状

2020 年 2 月、NNL は報告書「Identification of potential opportunities for development of UK R&D capability and strategic UK supply chain to the deployment of Advanced Modular Reactors(先進モジュール炉の展開に向けた英国の研究開発能力および戦略的サプライチェーンの開発機会の特定)」[3.2-34]を発表した。この報告書は、2050 年のネットゼロ目標に向けた将来の AMR 配備を支える英国内の原子力研究開発組織とサプライチェーンの現在の能力と発展の方向性を示すものである。本報告書では、英国の研究開発組織とサプライチェーンには、将来の目標に向けて満たすべき多くの開発ニーズがある事が明らかになった。

1) 英国内の AMR 製造サプライチェーン

英国内サプライチェーンについて、AMR 製造の為に必要な制御棒、燃料、原子炉容器、バルブ等機器材料を生産できる国内施設の能力は現在低く、原子炉構成要素の最大2

0%が現在製造可能であると評価された。SMR・AMR (HTGR、SFR(ナトリウム冷却高速炉)、LFR(鉛冷却高速炉)、MSRs(溶融塩原子炉))のサプライチェーン能力及び TRL を評価した図を図 3.2-2 に示す。図 3.2-2 において、グラフの青は現在部品を生産する能力があると評価されるもの、緑は近い将来生産能力・容量を確保できると期待されるが現在はわずかに不足しているもの、黄色はいくつかの主要な生産能力・容量に不足があるもの、赤は生産能力を評価する情報が不足しているもしくは生産能力が不足していると評価されるものである。

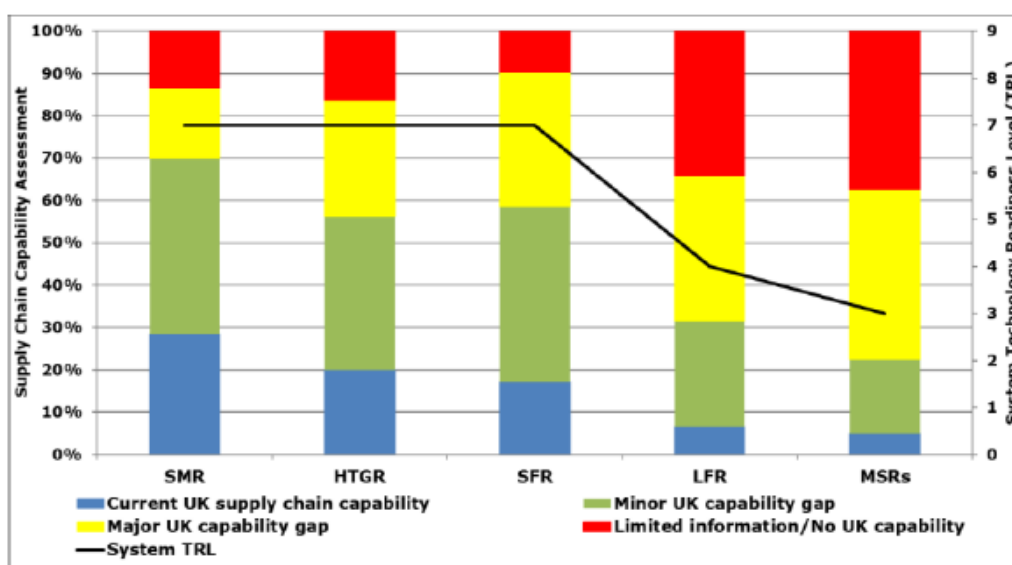


図 3.2-2 英国における SMR、AMR の TRL およびサプライチェーン能力

現在、英国のサプライチェーンは、原子炉の新設よりもイノベーションの機会が少ない廃棄物管理に焦点を当てており、AMR 部品製造の受注は何年も先になる可能性がある事が AMR 市場への中小企業参入の障壁となっている。

AMR 技術の開発と展開をサポートし得る今後の政府支援として以下が挙げられている：

- ・ 英国のネットゼロ法を支えるため、AMR 導入を実現する国内政策環境を継続する
- ・ 資源をプールし、横断的な研究開発を行い、規制・製造のニーズを共同で解決するために、類似の方向性の国との国際的なプログラムまたは施設を特定する
- ・ 英国の AMR ハブへの研究開発とイノベーションのための資金提供を行う。これには、材料と機器の冷却材テストループ、モジュール式の組み立てと試験施設、または実証炉が含まれる
- ・ 英国の基本的な技能とインフラを開発する手段として、原子力イノベーションプログラム[3.2-35]等の原子力研究開発プログラムを継続する
- ・ 英国のサプライチェーンを支援し、最先端の技術やプロセスの導入、他部門からの技術移転を通じて、重要で価値の高い部品や設計システムを作る新しい方法を実証す

る

- ・ イノベーションを促進するために、中小企業や技術ベンダー、Tier 1 サプライヤーとの関わりを促進する。

2) 英国内の AMR 開発の状況

英国では複数のモジュール型原子炉の概念がある。各炉型の特性を表 3.2-3 に示す。

表 3.2-3 モジュール型原子炉の特性

炉型	中性子スペクトル	冷却材	燃料サイクル	出口温度	圧力
高温ガス炉 (HTGR)	熱中性子	ヘリウム	オープン	<800℃	7MPa
超高温ガス炉 (VHTR)	熱中性子	ヘリウム	オープン	>800℃ (約 950℃)	7MPa
熔融塩熱中性子炉 (MSThR)	熱中性子	熔融塩	クローズ	700℃	0.1MPa
熔融塩高速炉 (MSFR)	高速中性子	熔融塩	クローズ	700℃	0.1MPa
鉛冷却高速炉 (LFR)	高速中性子	鉛	クローズ	500℃	0.1MPa
ナトリウム冷却高速炉 (SFR)	高速中性子	ナトリウム	クローズ	550℃	0.1MPa
軽水冷却小型モジュール炉 (SMR)	熱中性子	軽水	オープン	300-350℃	8-16MPa

また、AMR の各炉型の現在の TRL、今後の開発ニーズおよび課題を表 3.2-4 に示す。英国内における AMR の研究開発組織やサプライチェーンに存在する開発ニーズ・課題は必ずしも炉型固有のものではなく、複数の AMR・SMR に適用できるものもある。例えば、全ての AMR について、モデリング・シミュレーションの研究、燃料サイクル・廃棄物管理の研究が必要となっている。また、核コードと設計基準等の不足を含む規制対応も包括的な課題となっている。

表 3.2-4 AMR の TRL、今後の開発ニーズ及び課題

炉型	TRL	開発ニーズ	課題
高温ガス炉 (HTGR)	7	モデリング・シミュレーション (特にペブルベッドリアク ター)、燃料サイクル・廃棄物 管理	TRISO 使用済燃料 の取り扱い経験の 不足、規制対応、サ プライチェーンのオ フサイト組み立て施 設不足
超高温ガス炉 (VHTR)	5	モデリング・シミュレーション (特にペブルベッドリアク ター)、材料開発、機器・計装 制御の実証、発電用ブレイト ンサイクル、燃料サイクル・廃 棄物管理	ブレイトンサイクル の開発施設の不足、 廃棄物・使用済 燃料管理の経験不 足、規制対応、サブ プライチェーンの燃 料・容器等製造施設 および経験の不足
ナトリウム冷却高速 炉(SFR)	7	モデリング・シミュレーション、 原子炉設備(ポンプ、熱交換 器)、計装制御、燃料サイクル・ 廃棄物管理	ナトリウム テスト ループ施設の不足、 規制対応、サプライ チェーンの燃料製 造施設不足
鉛冷却高速炉 (LFR)	4	モデリング・シミュレーション、 材料開発、計装制御、原子炉 設備(燃料集合体、ポンプ、熱 交換器)、燃料サイクル・廃棄 物管理	施設および経験豊 かな人材の不足、規 制対応
熔融塩炉(MSR)	4(熱)、 3(高速)	モデリング・シミュレーション、 材料開発、計装制御、原子炉 設備(ポンプ、熱交換器)、燃 料サイクル・廃棄物管理	施設および経験豊 かな人材の不足、規 制対応

3.3 仏国

3.3.1 原子力・核燃料サイクル政策の概要

(1) 原子力政策

フランスはオイルショックを契機として、当時のメスマール首相が 1974 年に「全電化-原子力化」の方針を打ち出した。このメスマール計画に基づき、1980 年代には原子炉の建設ラッシュを迎え、米国に次ぐ世界第 2 位の原子力発電大国に成長した。

歴代政権はほぼ一貫して原子力発電を支持してきた。しかし、福島第一原子力発電所事故を受け、当時の野党・社会党は電源を多様化するために原子力発電を縮減する必要性を主張した。2012 年に実施された大統領選挙では同党のオランド氏が当選し、議会下院総選挙でも社会党が勝利した。オランド大統領(当時)は選挙公約の中で、電源構成に占める原子力の割合を 2025 年までに現状の 75%から 50%に縮減する方針を掲げ、この目標は「グリーン成長のためのエネルギー転換に関する 2015 年 8 月 17 日の法律 n°2015-992(エネルギー転換法)」に明記された。さらに同法では、原子力発電の設備容量の上限を現状維持の 6,320 万 kW とすることも規定されている。

現政権も前オランド政権の方針を引き継いでいるが、マクロン大統領は 2018 年 11 月、2025 年までに原子力の割合を 50%に縮減することは実行不可能との判断から、期限を 10 年先送りして 2035 年とする決定を発表した[3.3-1]。この期限変更を反映した原子力政策は「エネルギー及び気候に関する 2019 年 11 月 8 日の法律 n° 2019-1147(エネルギー・気候法)」により法制化され、2020 年 4 月に発表された現行の多年度エネルギー計画(PPE)[3.3-2]にも明記されている。

PPE では、フランスにおけるエネルギーに係る政府の 10 年間の優先行動が、5 年ずつの連続する 2 期に分けて定められる。PPE は 5 年ごとに改定され、その際に第 2 期の 5 年については内容の見直しが行われ、また、新たに 5 年間の計画が追加される。現行 PPE は 2019 年から 2028 年まで(第 1 期:2019~2023 年、第 2 期:2024~2028 年)を対象期間としている。

現行 PPE における原子力政策に関する主な記載内容を抜粋すると以下ようになる。

- ・ 政府は、電源構成に占める原子力の割合を 50%に縮減するという目標を追求する。しかし電力供給が途絶するリスクを冒すことなく、あるいは火力発電プラントの建設を再開することなく、原子力の割合を 2025 年を目途に 50%に縮減するとの当初の目標を達成することは不可能と考えられる。そこでエネルギー・気候法では、原子力の割合を 2035 年の時点で 50%に縮減するとの目標をあらためて設定した。
- ・ 原子力の割合を 2035 年の時点で 50%に縮減するために、90 万 kW 級原子炉を 14 基閉鎖する。その中には、後段の理由から早期に閉鎖するフェッセンハイム原子力発電所の 2 基も含まれる。

- ・ フランスにおける原子力発電設備容量の上限は 6,320 万 kW である。この上限は 2015 年のエネルギー転換法により「ある発電施設が運開することにより、原子力発電設備に許可された総容量 6,320 万 kW を超える場合、当該施設の運転許可を発出することはできない」と定められている。原子力発電設備容量の上限を遵守し、かつフラマンビル 3 号機として建設中の欧州加圧水型原子炉(EPR)の運開を可能にするため、フェッセンハイム原子力発電所の 2 基については 2020 年上半期に閉鎖する。
- ・ フェッセンハイムの 2 基を除く 12 基の 90 万 kW 原子炉の恒久停止は、原則として第 5 回の 10 年期総合検査の際、すなわち 2029 年から 2035 年にかけて行う。ただし、(フェッセンハイムの 2 基とは別の)2 基の原子炉のみ第 5 回 10 年期総合検査を待たずに 2027 年と 2028 年に閉鎖する。また、特定の状況(近隣諸国がフランスの発電能力に頼らずに電力安定供給を確保できるようになる、電力の市場価格が低い水準で推移する等)が同時に発生した場合、さらに 2 基の原子炉を 2025 年と 2026 年に閉鎖する。
- ・ 今回の PPE の対象期間(2019～2028 年)における課題は 2 つある。まず、①地域レベルでも国レベルでも、廃止措置産業の発展を支援すること、また、②小型モジュール原子炉(SMR)の開発プロジェクトにおいて、PPE の次回の改定までに先行研究に着手し、SMR 技術の潜在性をよりよく評価するとともに、専門能力を開発できるようにすることである。

PPE に基づき、2020 年にはフェッセンハイム原子力発電所の 2 基の原子炉が閉鎖された。2022 年末現在、フランスで運転中の商用原子炉 56 基はすべて PWR であり、その内訳は 90 万 kW 級が 32 基、130 万 kW 級が 20 基、145 万 kW 級が 4 基である。また、フラマンビル原子力発電所 3 号機として 165 万 kW の EPR の建設が進められている。

さらに、マクロン大統領は 2021 年中頃から原子力再興に積極姿勢を示している。2021 年 10 月 12 日、大統領は技術革新やエコロジー転換を目的とする大規模投資計画「France 2030」を発表し、2030 年に向けて 10 の目標を示した[3.3-3]。第 1 に掲げられた目標は「国内で SMR を実現し、廃棄物管理を改善する」というものであり、そのための投資予算額は 10 億ユーロとされている。

また、マクロン大統領は現在二期目であるが、大統領選挙期間中の 2022 年 2 月 10 日に遊説先のベルフォール(Belfort)で行った国家エネルギー戦略に関する演説[3.3-4]において、今後 30 年で国内のエネルギー消費量を 40%低減し、電力による化石燃料の代替を念頭に発電電力量を最大 60 %増量するとともに、電力の脱炭素化を推進する意向を表明した。大統領は再生可能エネルギーと原子力を国家エネルギー政策の基軸としており、原子力については次のような展望を示している。

- ・ 既存の原子炉の寿命を延長する。
- ・ 2050 年までに原子力発電設備容量を 2,500 万 kW 増強する。具体的には、国内

において改良型 EPR(EPR 2)を 6 基建設し、さらに 8 基の増設を検討する。

- ・ France 2030 計画の枠内で、SMR 及び革新的原子炉の開発に 10 億ユーロを充当する。

しかし、この大統領の方針が法的裏付けを得るには、次期 PPE により有効性が認められなければならない。先述のとおり、PPE の対象期間は第 1 期 5 年間、第 2 期 5 年間の合計 10 年間であり、5 年ごとに改定される。現行 PPE の内容は 2020 年 4 月に最終化されたことから、既存炉の寿命延長も複数の EPR 2 の新設も想定されていない。

マクロン大統領はベルフォールでの演説の中で、EPR 2 の新設に関する公開討論を 2022 年下半年に実施し、原子力開発に関する議会討論を 2023 年に行うことを予告していた。公開討論は 10 月 27 日に開始され[3.3-5]、2023 年 2 月 27 日まで行われる。原子力開発に関する議会討論は、PPE の改定作業の一環として 2023 年に行われる見込みである[3.3-6]。

一方、政府はすでに原子力再興に必要な行政手続きに着手しており、2022 年 11 月 2 日には「既存の原子力サイトに隣接した新たな原子力施設の建設ならびに既存の施設の運転に係わる手続きの迅速化に関する法律案」が閣議で承認された[3.3-7]。この法律の目的は、EPR 2 の早期実現に向けて「時間を節約すること」とされている。政府は、EPR 2 の最初の 2 基を、2035～2037 年にパンリー原子力発電所サイトにおいて運開させたいと考えている。3 基目以降の候補地としては、グラヴリーヌサイトが挙げられている。これらのサイトにはすでに原子炉が立地しているため、法律が成立すれば、EPR 2 の建設については都市計画許可の取得手続きが免除されることになる。また、放射性物質を受け入れない建物に関しては、設置許可の発給要件である公衆意見調査(enquête publique)が完了する前に建設することが可能になる。

いずれにしても、マクロン大統領の原子力開発政策の成否は 2023 年の議会討論の結果次第ということになる。国民議会(下院)はマクロン大統領が率いる与党・共和国前進が掌握しているが、上院は中道右派の野党・共和党グループが過半数を押さえている。ただし、フランス上院放送局 Public Sénat は、再生可能エネルギーでは与野党で意見が割れる可能性があるものの、原子力政策に関しては合意形成は難しいものと予測している[3.3-8]。

このように、2023 年には EPR 2 の新設に関する公開討論が終了し、議会討論が開始される。2023 年を通じて PPE の改定に関する討論と法案審議が進められることになるわけであるが、これらの作業は EPR 2 の新設を軸に連動しており、原子力政策の将来に関する議会討論の 2 つの側面と見ることもできる。

(2) 核燃料サイクル政策

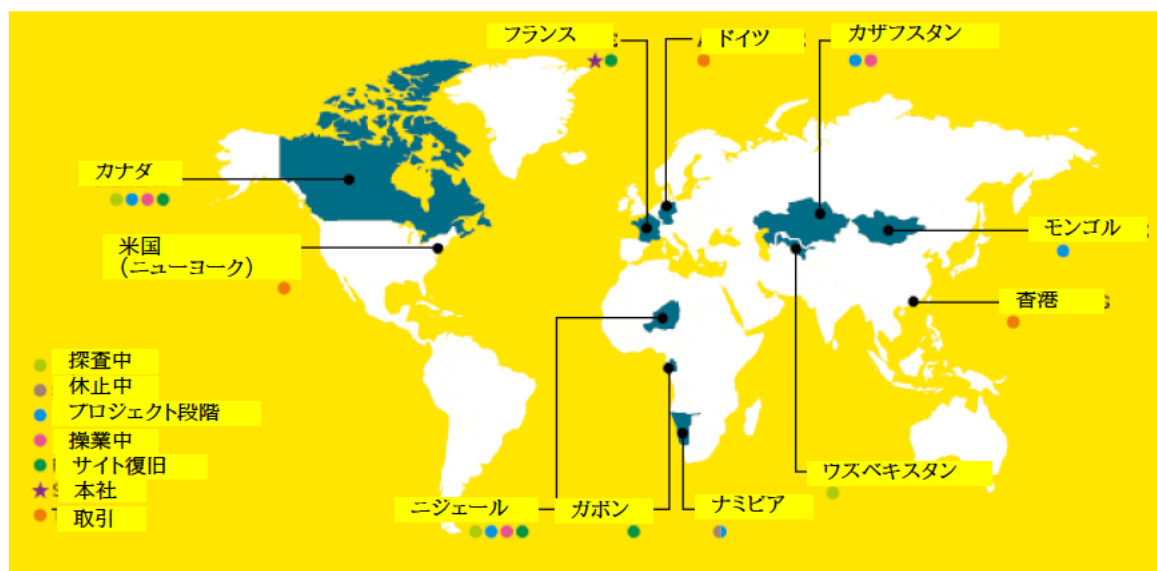
フランスではウランの転換、濃縮、使用済燃料の再処理、混合酸化物(MOX)燃料の製

造を Orano 社が担っており、 UO_2 燃料の成型加工を Framatome 社が担当している。

ウラン資源に関しては、オート＝ヴィエンヌ県のジュアク(Jouac)ウラン鉱山が 2001 年に閉山され、以後、仏国内では採掘が行われていないため[3.3-9]、輸入に依存している。現行の多年度エネルギー計画(PPE)[3.3-10]によれば、フランスの原子力発電所のために年間約 8,000 トンの天然ウランが消費されており、これは世界の消費量の約 13 %に相当するが(2017 年データ)、ウラン資源は地理的に広く分布しているため、供給途絶リスクは比較的低い。また、福島第一原子力発電所事故以降ウラン市場は停滞しており、1 ポンド当たり約 25 ドルと低価格で推移している(2019 年時点)。さらに、PPE によれば、フランス電力(EDF)は次のような手段により供給安定性を確保している。

- ・ 燃料サイクルの各段階(ウラン資源の採掘、転換、濃縮及び燃料の製造)に係わる調達元を地理的・商業的に多様化する。ウラン資源の確保は特に重視されており、EDF は主にニジェール、カザフスタン、カナダ、オーストラリア及びロシアからウランを輸入している。
- ・ 主な供給者と 10 年単位の長期契約を締結する。
- ・ ストックを管理する。EDF は天然ウラン、転換・濃縮段階のウラン、新燃料、炉内燃料等の形態で大量のウランを備蓄していることから、仮に供給途絶が発生したとしても、原子炉の運転を数年間継続することができる。

ウラン資源の調達は Orano グループが担っている。同グループは、図 3.3-1 に示す地域で採算性の高い鉱床の探査や開発を行っている[3.3-11]。



Orano 社は、フランス国内において核燃料サイクルフロントエンドのバリューチェーンを掌握している。イエローケーキの状態でフランスに輸送されたウランは同社のマルヴェジ (Malvesi) サイトで四フッ化ウラン (UF_4) に転換された後、トリカスタン (Tricastin) サイトで六フッ化ウラン (UF_6) に転換され、さらに同サイトで濃縮される (詳細は 3.3.4 (2) を参照)。なお、マルヴェジとトリカスタンが比較的近い位置⁶³にあることから、核物質の輸送等の負荷を軽減することが可能になっている [3.3-12]。

2022 年末現在、フランスにおける燃料サイクルは単一リサイクル (モノリサイクル) を基本としている。つまり、濃縮ウラン使用済燃料は一回だけリサイクルされ、そこからプルトニウムとウランが回収されて、リサイクル燃料、すなわち混合酸化物 (MOX) 燃料及び回収ウラン (URE) 燃料の製造に利用されている。長期的には、高速中性子炉におけるマルチリサイクルによる完全に閉じた核燃料サイクルも視野に入れられている。再処理や回収プルトニウムを MOX 燃料に加工する事業は Orano 社が担っている。

現行の PPE における核燃料サイクルバックエンド政策に関する主な記載内容を抜粋すると以下ようになる。

- ・ 現在までの研究では、第 4 世代のナトリウム冷却高速中性子炉 (SFR、仏語表記では RNR-Na) の開発に注力してきた。「放射性物質及び放射性廃棄物の持続可能な管理に関する 2006 年 6 月 28 日の計画法 n°2006-739」の枠内で、2010 年には技術実証炉 ASTRID の設計研究が開始された。研究は現在も継続中であり、2016-2019 年は詳細設計フェーズとなっている。しかし、天然ウラン資源が豊富で安価に入手できる以上、少なくとも 21 世紀の後半までは、高速中性子炉の実証炉や商業規模での展開に有益性はない。したがって、高速中性子炉に係わる研究については方向性を見直す必要がある⁶⁴。
- ・ 短期的な時間枠では、PWR におけるマルチリサイクルにより、モノリサイクル以上に分離プルトニウム及び使用済燃料のストックを安定化させることができるであろう。したがって、このソリューションの実行可能性は検証されるべきである。
- ・ PWR におけるプルトニウムのマルチリサイクルを実施するためには新型燃料 (MOX 2) を開発する必要がある。MOX 2 の使用条件は、詳細な研究・開発 (R&D) プログラム及びエンジニアリング研究を通じて満足される。また、PWR におけるマルチリサイクル戦略は、新たな燃料サイクル・インフラストラクチャーの開発 (ラ・アーグ再処理プラント及び MOX 燃料加工プラント Melox の施設の改造) を必要とするであろう。
- ・ したがって事業者は、マルチリサイクルの数値化された開発計画を、原子炉と燃料サイクルの両面で、今後 5 年間については詳細に、さらに商業展開までを視野に入れて策定するべきである。その計画は、原子炉安全、運転条件の変化、工場での製造、ロジ

⁶³ マルヴェジ (Aude 県) とトリカスタン (Drôme 県と Vaucluse 県の県境) はいずれも南仏に位置し、直線距離で約 200 km の距離にある。

⁶⁴ 後述のとおり、ASTRID の開発は 2019 年をもって中止となった。その理由は PPE に記述されたとおりである。

スティクス等に係る様々なソリューションの利点に関する研究を可能にする R&D プログラムに基づいて策定される。2040 年頃の商業展開を見据え、2025～2028 年を目途に試験燃料集合体を原子炉に装荷することを目指すべきであろう。

- ・ 長期的な時間枠での閉じた核燃料サイクルの見通しは、高速中性子炉の物理及び関連のサイクルプロセスの知識に係る専門能力の強化・維持を目的とするプログラムへと R&D の努力を方向付けることによって明らかになるであろう。そのプログラムは、デジタルシミュレーションの能力開発及びテーマをしぼった実験プログラムに依拠することになるであろう。このプログラムの内容は、本 PPE の発表から最初の数カ月間で詳細かつ数値化された形で明確になる見込みである[3.3-13]⁶⁵。さらに、世界で推進されている第 4 世代炉に関するプロジェクトの成果を蓄えるために国際的な戦略を構築しなければならない。
- ・ 原子力発電設備容量の縮減は核燃料サイクルにも影響を及ぼす。特に使用済燃料の再処理-リサイクル戦略は、最終廃棄物の総量を削減する上で主要な課題である。したがって、この戦略は、本 PPE の対象期間中ではもとより、ラ・アーグ再処理プラントの施設の大部分が供用期間を終える 2040 年代まで保持される。そのために、MOX 化された 90 万 kW 級原子炉が閉鎖されることを前提に、これらを補填し、フランスのサイクル管理を永続化させるために、十分な基数の 130 万 kW 級原子炉の MOX 化が計画されるであろう。
- ・ フランス電力(EDF)は、130 万 kW 級原子炉を MOX 化する上で決定的な技術的障害はないと判断している。したがって、実施に先立つ準備期間や許可手続きを考慮すれば、一部の原子炉の MOX 化は 2030 年頃に行われるかもしれない(最初の装荷目標は 2028 年)。
- ・ 政府と事業者は、2040 年以降の核燃料サイクル政策の方向性を、中期的には既存の商用原子炉におけるマルチリサイクルに関する R&D に、長期的には第 4 世代原子炉の展開を見据えた R&D に基づいて決定する。

3.3.2 ウクライナ侵攻のサイクル政策への影響

3.3.1 項で述べたとおり、マクロン大統領は 2022 年 2 月 10 日にベルフォールで行った演説の中で、既存原子炉の寿命延長、複数基の改良型 EPR(EPR 2)の建設、小型モジュール原子炉(SMR)の開発等、積極的な原子力再興政策を打ち出した。このベルフォール演説から 2 週間後の 2 月 24 日、ロシアがウクライナへの軍事侵攻を開始した。

⁶⁵ 現時点で個別のプログラムとしては特定できていないが、第 4 世代炉に関する R&D の実施主体はフランス原子力・代替エネルギー庁(CEA)である。CEA の公式ウェブサイトの 2021 年 1 月 6 日の記事では、第 4 世代炉に関する同庁の研究の軸は、①炉物理の理解・モデル化ならびにデジタルシミュレーションツールにおける知識の資本化、②テーマをしぼった技術開発、及び③代替技術(例:溶融塩炉)に関する予備的研究とそのフォローであり、ASTRID プログラムの成果を活用していくとされている。ASTRID は当面実現しないことが決定されたが、CEA はナトリウム冷却高速中性子炉(RNR-Na)に関する研究を継続する方針である。

ロシアの侵攻が続く中、フランス議会科学技術選択評価局(OPECST)は 5 月 17 日、規制当局であるフランス原子力安全機関(ASN)の 2021 年報「2021 年のフランスにおける原子力安全・放射線防護の状況に関する ASN の報告書」に関して ASN のベルナール・ドロズック(Bernard DOROSZCZUK)代表への質疑を行った[3.3-14]。その質疑への応答の中で、ドロズック代表はフランスの原子力セクターの“二重の脆弱さ”を指摘している。二重の脆弱さとは、すなわち、①EPR 建設の遅れと既存炉の 10 年期総合検査に加え、一連の応力腐食割れ事象により、十分な基数の原子炉の可用性が確保できていないこと、また、②核燃料サイクル施設でもトラブルが続いていること(この点については 2.3.3(3)の 5)で詳述する)である。ドロズック代表はまた、フランス送電系統運用株式会社(RTE)が 2021 年 10 月 25 日に公表した報告書「将来のエネルギー 2050」[3.3-15]に基づき、運開から 50 年を超えた原子炉の運転を継続できる確証がまだ得られていないと指摘し、今後 5 年以内に運転延長が可能であることを確認しなければならないとしている。

ウクライナ状況についてはドロズック代表の質疑応答でも言及されているが、この質疑応答において問題となっているのはウクライナにおける原子力発電所のセキュリティのみであって、フランスの原子力・核燃料サイクル政策への影響は論点となっていない。また RTE も、2022 年 9 月 14 日に公表した報告書「2022～2023 年の秋と冬の電力システムに関する見通し」[3.3-16]において、ロシア産天然ガスの供給量が激減していることを欧州全体にとっての深刻なリスクと捉えつつ、フランスに関しては、ロシアの天然ガスへの依存度が元々低いことから影響は限定的であるとの認識を示している。

現時点で、ロシアのウクライナ侵攻によりフランスの原子力・核燃料サイクル政策がなんらかの抜本的な変更を迫られるような兆候は認められない。

3.3.3 使用済燃料の処理・処分、回収・劣化 U 及び Pu の利用方針・実績

(1) 使用済燃料の再処理の方針・実績

1) 使用済燃料の再処理方針

先述のとおり、フランスでは使用済燃料から回収されたプルトニウムを混合酸化物(MOX)に加工して再利用する方針がとられており、フランス電力(EDF)は使用済燃料の再処理を Orano 社に委託している。EDF は使用済燃料の発生者として、再処理及び高レベル放射性廃棄物管理の資金(処分費用を含む)を確保する義務を負っている[3.3-17]。

使用済 MOX 燃料の再処理については、2022 年時点では実施されていない。仏政府は、ウラン資源価格の高騰等を想定したエネルギー安全保障の観点から、長期的には使用済 MOX 燃料から回収したプルトニウムを高速炉で再利用するマルチサイクルを目指しているが、2050 年頃まではウラン資源は潤沢かつ低価格で調達できるとの判断から、当初

2040 年頃の実用化を目指していた高速炉の開発計画を 2100 年頃に先送りした。

一方で政府は、使用済 UO_2 燃料及びプルトニウムのストックを一定水準以下に抑制するため、130 万 kW 級 PWR でのプルサーマルと、第 3 世代炉である欧州加圧水型原子炉(EPR)におけるプルトニウムのマルチリサイクルを検討している。ただし、マルチリサイクルを実施するためには、新たな MOX 燃料(MOX 2)の開発や、再処理や燃料加工を行うサイクル施設の改修も必要となり、これに向けた技術面や安全面での研究が必要となる。先述のとおり、現行の多年度エネルギー計画(PPE)では、2025～2028 年頃にマルチリサイクル用の新たな燃料の原子炉への試験装荷を実施し、2040 年頃にマルチリサイクルの実用化を目指す方針が示されている[3.3-18]。

2) 使用済燃料の再処理実績

フランス国民議会(下院)の資料[3.3-19]によれば、同国では 2018 年末時点で 58 基の商用炉(すべて PWR)が運転中であり、約 1,200 トン/年の使用済燃料(使用済 UO_2 燃料が 1,080 トン、使用済 MOX 燃料が 120 トン)が発生していた⁶⁶。

仏国内で発生した使用済燃料はすべて、Orano 社のラ・アーグ(La Hague)再処理プラントで処理されており、2021 年には 1,021 トンの使用済燃料が再処理された。また、表 3.3-1 と表 3.3-2 に示すとおり、同プラントでは 1970 年代以降、日本、ドイツ、ベルギー、イタリア、オランダ等、海外由来の使用済燃料の再処理も、Orano 社と電気事業者との個別契約に基づき実施された[3.3-20]。

表 3.3-1 1972～1976 年までに締結された契約に基づく再処理実績

国名	再処理した使用済燃料の量	再処理の実施期間
ドイツ	172 トン	1977-1995 年
オランダ	79 トン	1979-1984 年
日本	151 トン	1982-1986 年
ベルギー	40 トン	1980-1981 年
スイス	70 トン	1976-1984 年

⁶⁶ ただし、2020 年にフェッセンハイム原子力発電所の 2 基(いずれも 90 万 kW 級 PWR)が閉鎖されたので、現在運転中の PWR は 56 基である。したがって、発生する使用済燃料も 1,100 トン/年程度に減量しているものと推定される。

表 3.3-2 1977 年以降に締結された契約に基づく再処理実績

国名	再処理した使用済燃料の量	再処理の終了年
ドイツ	5,310 トン	2008 年
オランダ	247 トン	2006 年
日本	2,793 トン	1999 年
ベルギー	631 トン	2001 年
スイス	701 トン	2016 年

2021 年末時点でラ・アーク再処理プラントに存在している海外の使用済燃料は、イタリア、ベルギー及びオーストラリア(研究炉)由来のものであり、イタリア由来が 25.86 tHM、ベルギー由来が 40.8 tHM、オーストラリア由来が 553.7 tHM となっている[3.3-21]⁶⁷。

(2) 回収・劣化ウラン及びプルトニウムの利用方針・実績

1) 回収・劣化ウランの利用方針・実績

フランスでは再処理により発生した回収ウランも燃料として再利用されている。回収ウランの濃縮には遠心分離技術が必要であったが、フランスでは当初ガス拡散法が採用されていたため、回収ウランの濃縮はロシアの TENEX 社に委託されていた。この回収ウラン燃料は 1994～2003 年にかけて合計 600 トン、クリュアス原子力発電所の 4 基の 90 万 kW 級 PWR において装荷された実績がある。ただし、2013 年以降、ウラン価格の下落と、TENEX 社のプラントにおける回収ウラン濃縮によって発生する廃液処理が EDF の環境・技術基準に適合しないことに起因する EDF と TENEX 社との間の対立が原因で中断された。このため回収ウランはトリカスタンの Orano 社サイトにおいて貯蔵されているが、2023 年頃に貯蔵容量の逼迫が予想されることから、EDF は回収ウラン燃料のクリュアス原子力発電所における装荷を再開する方針である。現在は Orano 社の Georges Besse II 濃縮プラントにおいて、遠心分離技術が採用されていることから、国内での濃縮・燃料加工が可能となっており、燃料製造は 2022 年頃から開始される見込みである[3.3-22]⁶⁸。

一方、EDF は 2018 年、TENEX 社及び URENCO 社と回収ウランの転換・濃縮に関する契約を締結した。TENEX 社が自社プラントの状態を EDF の環境・技術基準に適合させたことを確認した上で、EDF は 2021 年 11 月、U₃O₈ 形態の回収ウランをロシアに向けて搬出した。この第 1 回委託分の回収ウランは TENEX 社のセヴェルスク(Seversk)

⁶⁷ なお、2019 年末時点でオランダ由来のものが 20 tHM 程度あったが、2021 年末時点ではゼロ。

⁶⁸ なお、この国家評価委員会(CNE)の第 14 回評価報告書に続き 2021 年に公表された第 15 回評価報告書と 2022 年の第 15 回評価報告書では、仏国内における回収ウラン燃料の利用再開については主題化されていない。

プラントで転換され、次いでオランダのアルメロ(Almelo)にある URENCO 社のプラントで濃縮された後、フランスに返還されて Framatome 社のロマン＝シュル＝イゼール(Romans-sur-Isère)のプラントで PWR 用の燃料集合体に成型加工される。この回収ウラン燃料は 2023 年にクリュアス発電所の PWR に装荷される予定である。EDF はさらに、2027 年以降、130 万 kW 級 PWR においても回収ウラン燃料を装荷していく計画である[3.3-23]。

EDF と TENEX 社及び URENCO 社との 2018 年の契約に基づく作業フローは図 3.3-2 に示すとおりである。

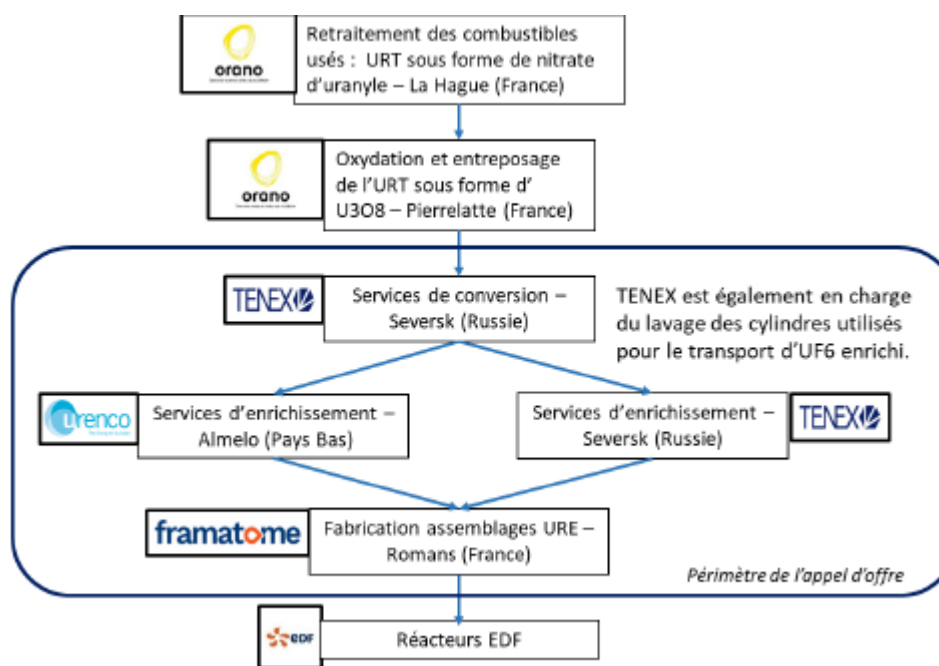


図 3.3-2 回収ウランの転換・濃縮に係る 2018 年契約の作業フロー

【出所】EDF の 2022 年 3 月 18 日のプレゼン資料

2) プルトニウムの利用方針・実績

フランスでは使用済燃料の再処理を行い、回収したプルトニウムを MOX 燃料に加工して再利用している。同国は、プルトニウムのストック量が増加することを避けるために、プルサーマルを行うのに必要な分の再処理しか行わない方針である。現在、国内で MOX 燃料の装荷が許可されているのは全 56 基の商用炉のうち 24 基[3.3-24]であるが、2019 年末時点で実際にプルサーマルが行われているのは 22 基(いずれも 90 万 kW 級 PWR) [3.3-25]である。

海外由来の使用済燃料の再処理によって回収されたプルトニウムは、フランスにおけるプルトニウム需給バランスにおいては考慮されない。再処理を委託した国は、国際原子力機関(IAEA)のプルトニウム国際管理指針に基づき、国外に存在する自国のプルトニウム

管理状況に関するデータを報告している。フランスも同指針に基づき、自国が保有するプルトニウムの量を IAEA に毎年報告している。そのデータによれば、フランスの民生用プルトニウムの保有量は 2011 年末から 2021 年末にかけて表 3.3-3 に示すとおり推移した [3.3-26]。なお、未照射プルトニウムのうち、再処理プラントの貯蔵施設にストックされたプルトニウムの量は 40～50 トン程度で推移している。

表 3.3-3 フランスのプルトニウム保有量

単位:tPu

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
未照射の Pu ⁶⁹	80.3	80.6	78.1	78.8	79.7	81.7	80.9	83.2	90.3	95	99.9
使用済燃料中の Pu	253.2	261.4	268.9	275.6	281.7	287.8	295.0	299.6	299.8	299.7	302

【出所】IAEA、INFCIRC/549「Communication Received from Certain Member States Concerning Their Policies Regarding the Management of Plutonium」に基づき作成

マルチサイクルに関しては、先述のとおり、長期的には使用済 MOX 燃料を再処理して回収したプルトニウムを高速炉で再利用することが目指されているが、短・中期的には第 3 世代炉である欧州加圧水型原子炉(EPR)で再利用することが検討されている。

(3) 使用済燃料中間貯蔵の状況

1) 貯蔵に関する沿革と概況

フランスにおいて発生した使用済燃料は原子力発電所の使用済燃料プールにおいて 1～2 年程度貯蔵された後、ラ・アーグ再処理プラントに輸送され、再処理までにさらに 8 年間、同プラント内の使用済燃料プールに貯蔵される。使用済燃料は、原子力発電所においては使用済燃料プールで、炉心から取り出された燃料集合体の形で貯蔵される。その後、発電所からラ・アーグ再処理プラントに輸送された後も、燃料集合体をラックに整理してプール内で貯蔵され、貯蔵用の容器は用いられない [3.3-27]。同国で湿式貯蔵方式が採用された理由は、原子力発電や使用済燃料の再処理が行われ始めた 1970～1980 年代にかけて、乾式貯蔵技術の開発が十分に進んでいなかったためとされている [3.3-28]。

2) 貯蔵に関する規制

規制の面では、原子力発電所における貯蔵期間中は、原子力発電所に係わる安全規制の対象となり、ラ・アーグ再処理プラントへの輸送後は、燃料サイクル施設に係わる安全規

⁶⁹ 再処理プラントでストックされている回収プルトニウム、燃料への加工中のプルトニウム、未照射の MOX 燃料中のプルトニウム。

制の対象となる。原子力発電所も燃料サイクル施設もフランスにおいては原子力基本施設 (INB) という位置づけであることから、基本的な規制要件は同一であり、次の基本法令が適用される。

- ・ 環境法典
- ・ 原子力基本施設に関する一般的な規則を定める 2012 年 2 月 7 日の省令[3.3-29]

これに加えて、事業者の活動等に関するフランス原子力安全機関 (ASN) の検査等が実施され、必要に応じて、個別の施設に関する ASN の決定 (法的拘束力を有する) が策定される。

安全性向上に関しては、原子力発電所と再処理プラントは 10 年ごとの定期安全レビューの対象となっており、その一環として規制要件への適合状況が確認されるとともに、国内外の知見や経験のフィードバックを踏まえた安全性向上が図られる。定期安全レビュー以外では、2011 年の福島第一原子力発電所事故後に実施されたストレステストの結果に基づく安全強化が実施されており、発電所における使用済燃料プールに影響を及ぼすようなシビアアクシデントの防止策や、シビアアクシデント発生時の影響を最小限に留めるための対策を講じることがフランス電力 (EDF) に対して義務付けられている。具体的には、シビアアクシデント発生時の影響を緩和 (使用済燃料プールの冷却水の喪失回避) する上で重要な役割を果たす構造物・系統・機器 (SSC) を特定し、これらの SSC の外部事象に対する構造的耐性を証明すること等が求められている[3.3-30]。

燃料サイクル施設も発電所と同様にストレステストの対象となっている。ラ・アーグ再処理プラントに関しては、ASN は使用済燃料プールの冷却水の喪失を回避するための対策を Orano 社に義務付けている[3.3-31]。

3) ストックの推移と現状

放射性廃棄物管理機関 (ANDRA) が 2022 年に公表した「放射性物質及び放射性廃棄物インベントリ」の主要データ[3.3-32]によれば、2020 年末時点における使用済燃料のストックは以下のとおりである。

使用済 UO_2 燃料及び使用済回収ウラン燃料: 11,700 tHM

使用済 MOX 燃料 (高速炉使用済 MOX 燃料を含む): 2,350 tHM

歴年の「放射性物質及び放射性廃棄物インベントリ」に基づく使用済燃料のストックの推移は表 3.3-4 に示すとおりである。

表 3.3-4 フランス国内の使用済燃料のストックの推移

単位:tHM

	2007	2010	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
使用済 UO ₂ ・回収 ウラン燃料	11,75 5	12,32 4	12,00 0	12,27 0	12,08 2	12,00 0	12,10 0	12,00 0	11,90 0	11,70 0
使用済 MOX 燃料	1,132	1,287	1,700	1,763	1,873	1,960	2,030	2,140	2,270	2,350

【出所】ANDRA 放射性物質・放射性廃棄物インベントリ主要データに基づき作成

これらの使用済燃料は、各原子力発電所サイトまたはラ・アーク再処理プラントにおいて貯蔵されているが、貯蔵状況に関する詳細は確認できない。

ただし、Orano 社は 2021 年末時点で、ラ・アーク再処理プラントにおいて再処理前の使用済燃料が 10,088 トン存在しており、その 99.7 %がフランス由来のものであるとのデータを示しているため[3.3-33]、使用済燃料のストックのうち約 10,058 トンはラ・アークに存在しているものと考えられる。

4) 貯蔵容量逼迫の問題

大半の使用済燃料が貯蔵されているラ・アーク再処理プラントに関しては、2035 年までに電源構成に占める原子力の割合を 50%に縮減する政策との関連で、近い将来に貯蔵容量が不足する問題が指摘されている。原子力安全機関(ASN)の 2018 年 10 月 18 日付の見解書では、プルサーマルを実施している 90 万 kW 級 PWR が閉鎖された場合、プルトニウム需給バランスを取るために再処理量が減少し、貯蔵される使用済燃料が増大することにより、2030 年頃までにラ・アークの貯蔵容量が逼迫することが指摘されている[3.3-34]。

これに対し、フランス電力(EDF)が開発している中央貯蔵プール⁷⁰が利用可能になるのは早くても 2034 年である。したがって、2030 年から 2034 年まではラ・アーク再処理プラントの既設プール内のラックの稠密化によって対応することになる。Orano 社は 2020 年 10 月、この稠密化計画の安全オプション文書を ASN に提出した。ASN は 2021 年初め、「放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する国家計画(PNGMDR)」に関するワーキンググループの活動の一環として、同安全オプション文書に関する分野横断サブワーキンググループ(ラ・アークの地域情報委員会:CLI のメンバーを含む)を設置した。その後 ASN は 2022 年 2 月 14 日付の書簡において、Orano 社が提示した安全オプションが総じて満足のいくものであるとの見解を示した。しかし、同プラントでは、核分裂生成物の蒸発濃縮器の腐食が想定を超える速度で進行しており、2021 年 9 月には予防的措置として使用が中断されたため、再処理のペースが落ちている。また、MOX 燃料加工プラント

⁷⁰ フランスでは 2021 年 11 月 22 日から 2022 年 2 月 2 日まで、さらに中断をはさんで 2022 年 6 月 20 日から同年 7 月 8 日まで、EDF がラ・アークサイトに建設を計画している中央貯蔵プールに関する公開討論が実施された。

<https://projet-piscine.edf.fr/>

Melox の加工プロセスの問題により、大量の MOX スクラップが発生していることから、プルサーマルが行われてきた 90 万 kW 級の原子炉の一部において MOX 燃料を利用できない状況(démoxage)が生じている(この問題については次項 5)で詳述)。ASN は 2021 年 9 月、ラ・アーグ再処理プラントの貯蔵プールの飽和問題に関し Orano 社に質疑を行った際、Melox の操業状況に関する悲観的なシナリオに基づき対策を強化することを求めた[3.3-35]。

5) Melox プラントにおける MOX スクラップの問題

ASN の 2021 年報「2021 年のフランスにおける原子力安全・放射線防護の状況に関する ASN の報告書」[3.3-35]には、Orano 社の MOX 燃料加工プラント Melox で発生したトラブルに関する記載がある。ASN のドロズック代表も、先述の議会科学技術選択評価局(OPECST)による 2022 年 5 月 17 日の質疑応答(2.3.2 を参照)[3.3-37]の中で同じトラブルに言及している。また、民間調査機関の世界エネルギー情報サービス(WISE)も、この問題を重視している[3.3-38]。ドロズック代表の発言と WISE の報告に基づき問題の要点をまとめると以下のようになる。

- ・ Orano 社が Melox プラントの MOX 燃料加工プロセスを変更したことにより、大量のプルトニウム含有物質(MOX スクラップ)が発生している。これらの MOX スクラップは同社のラ・アーグ再処理プラントで貯蔵されているが、貯蔵容量が当初の想定よりも早く飽和状態になりつつある。また、Melox は比較的古いプラントであるため、頻繁に保守作業を行う必要がある。これらの要因が相まって、MOX 燃料の製造ペースが大幅に落ちている。
- ・ 当面の課題としては、ラ・アーグ再処理プラントにおいて MOX スクラップの新たな貯蔵区域を確保しなければならない。また、Melox プラントにおける MOX 燃料の製造ペースを当初予定された水準に押し上げるためには、MOX 燃料加工プロセスを変更前に戻す必要があるが、そのためには 3～4 年を要する。

根本的な原因は MOX 燃料加工プロセスが変更されたことであるが、その背景事情をまとめると以下のようになる。

- ・ Melox プラントは 2014 年まで、仏 Tricastin サイトの Comurhex-Pierrelatte プラントの回収ウラン処理施設から供給された劣化ウランを加工し、その一部を EDF に供給していた。しかし、同施設の閉鎖により、2015 年以降、仏国内由来の劣化ウランはフランス電力(EDF)向けの MOX 燃料に使用されておらず、ストックされている。
- ・ 現在、EDF 向けの劣化ウランは、ANF 社(Framatome 社の子会社)の独 Lingen プラントとスウェーデンウエスティングハウス社(WSE)の Vasteras 燃料加工プラントから調達している。
- ・ 劣化ウランは、Comurhex-Pierrelatte プラントの回収ウラン処理施設では湿式プ

プロセスで製造されていたが、独 Lingen プラントでは乾式プロセスで製造されている。乾式プロセスでは、湿式プロセスと粒径が異なり、粒子が細かく、容易に分散するため、様々な問題を引き起こしている。このことが主に造粒しづらさを招いていると考えられる。さらに、MOX 燃料の製造では均質性が重要であるが、乾式プロセスからの劣化ウランは均質でないため、MOX スクラップが多く発生してしまう。

- ・ 再処理から発生したプルトニウムは MOX 燃料に加工する必要があるが、このような事情から MOX 燃料加工のスループットをあげられない状況にあるため、再処理を通常のペースで実施できなくなっている。また、プルサーマルが行われてきた 90 万 kW 級の原子炉の一部において MOX 燃料を利用できない状況(démoxage)が生じている。

Orano 社は、問題の根本解決のために、仏 Malvési サイトに“新湿式プロセス(NVH)”を用いる新施設を建設中であり、2023 年に劣化ウランの製造を開始する予定である。

Malvési サイトが立地しているオード(Aude)県の Basses Plaines 郡を拠点とする環境保護団体 Rubresus は 2019 年 3 月 1 日、NVH プロジェクトの環境影響に関する報告書[3.3-39]を公表した。この報告書の主内容は、NVH からの放出物の影響に関する評価ならびに許可手続き上の不備に対する告発であるが、プロセスの方法についても若干の記載がある。

同団体によれば、NVH は主に次の 2 つのフェーズで構成されるという。

- ・ 第 1 フェーズ：劣化ウランまたはウラン濃縮物を硝酸により溶解し、次いで硝酸ウラニルを抽出する。
- ・ 第 2 フェーズ：硝酸ウラニルを高温のアンモニアと水素にさらして二酸化ウランに還元する。次いで二酸化ウランを粉末状に加工する(噴霧乾燥、ふるい分け、パッケージング)。

(4) 廃棄物処分

フランスにおける放射性廃棄物の管理・処分方針は、放射性核種の寿命と放射能レベルによって以下の図 3.3-3 のとおり分類されている[3.3-40]。

寿命 ↙ 放射能 ↘	極短寿命 (VTC) ↙ < 100 日 ↘	主に短寿命 (VC) ↙ 31 年以下 ↘	主に長寿命 (VL) ↙ 31 年超 ↘
極低レベル (TFA) ↙ < 100 Bq/g ↘	VTC 放射性崩壊 ↙ による管理 ↘	TFA	分別・貯蔵・処分施設 (CIRES) ↙ において浅地中処分 ↘
低レベル (FA) ↙ 数 100 ~ 100 万 Bq/g ↘		FMA-VC	FA-VL 浅地中処分を検討 ↘
中レベル (MA) ↙ 100 万 ~ 10 億 Bq/g ↘		浅地中処分 (l'Aube または ↙ La Manche の処分場) ↘	MA-VL 地層処分 ↙ (Cigéo プロジェクト) ↘
高レベル (HA) ↙ 数 10 億 Bq/g ↘	該当なし ↘		HA

図 3.3-3 フランスにおける放射性廃棄物の分類と管理方法

【出所】ANDRA 放射性物質・放射性廃棄物インベントリ主要データ 2022 年版

フランスでは使用済燃料は再処理されており、直接処分は想定されていない。再処理により発生する高レベル放射性廃棄物については、フランスにおける放射性廃棄物管理を行っている放射性廃棄物管理機関(ANDRA)によりガラス固化され、将来的には地層処分場 Cigéo に処分される。Cigéo は、ムーズ県とオート＝マルヌ県の境界域の地下 500 m にあるカロボ・オックスフォーディアン粘土層に建設される予定である。

TRU 廃棄物は中レベル長寿命放射性廃棄物として地層処分が想定されており、ウラン廃棄物等低レベル放射性廃棄物は、地表に近い浅地中処分を行う方針である。

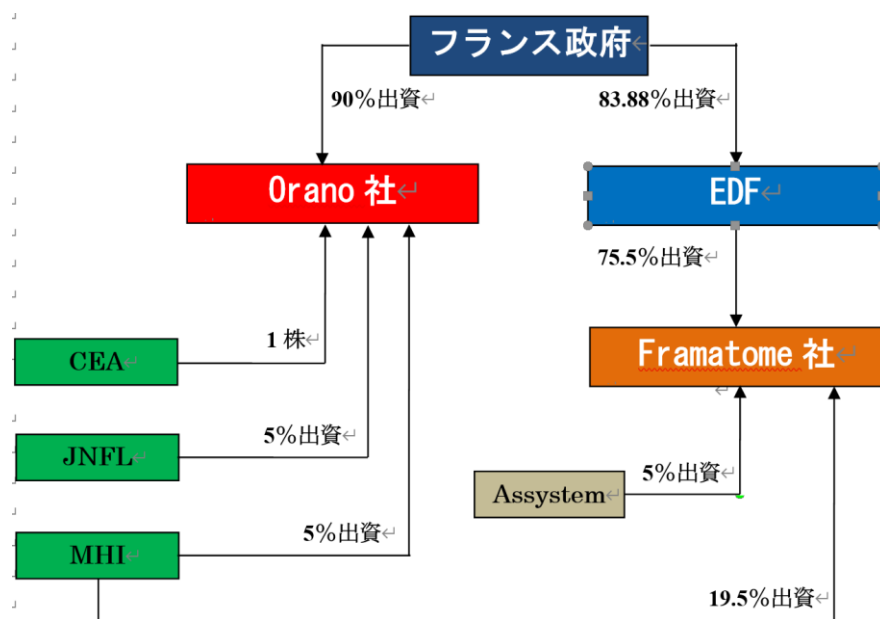
3.3.4 原子力・核燃料サイクル関連施設、事業主体

(1) フランスにおける原子力産業体制

フランスはウラン資源をカナダ、カザフスタン、ニジェール等からの海外輸入に依存しているが、国内では転換、濃縮、使用済燃料の再処理、MOX 燃料の製造を Orano 社が担っており、UO₂ 燃料の成型加工を Framatome 社が担当している。

1) 産業体制と資本関係

フランスでは、図 3.3-4 に示すとおり、主要な原子力産業の株式の大半を仏政府が直接・間接に保有している。



EDF:フランス電力

CEA:フランス原子力・代替エネルギー庁

Assystem:フランスの大手エンジニア会社

JNFL:日本原燃株式会社

MHI:三菱重工業株式会社

図 3.3-4 フランスにおける原子力産業の資本関係(2022 年末現在)

【出所】Orano 社、Framatome 社、EDF 資料等に基づき作成

仏政府は 2022 年 7 月、Orano 社の株式のうち AREVA SA 社の保有分(全体の 0.01 %相当)を取得し[3.3-41]、Natixis 社の保有分(全体の 10 %相当)を 6 億 3,800 万ユーロで購入した[3.3-42]。これにより、Orano 社への政府の出資率は 90 % となった。また、ボルヌ首相は同年 7 月 6 日の国会における所信表明演説の中で仏政府が Orano 社株を 100 %取得する意向であると述べ[3.3-43]、経済・財務・産業及びデジタル主権省も 7 月 19 日のプレスリリースで同じ政府方針を表明しており[3.3-44]、今後の動向が注目される。

2) Orano 社

Orano 社の前身は AREVA グループである。同グループの経営悪化を受け、燃料サイクル事業部門を分社化して設立されたのが Orano 社である。同社は、フロントエンドからバックエンドまで一貫したサービスを提供するビジネスモデルを採用している。

Orano 社の出資構成(2022 年末現在)は下記のとおりである[3.3-45]。

- ・ 仏政府:90%
- ・ フランス原子力・代替エネルギー庁(CEA):1 株

- ・ JNFL:5%
- ・ 三菱重工業:5%

Orano グループは図 3.3-5 に示すとおり、ウラン資源開発から再処理まで子会社を擁し、包括的な事業展開を行っている。

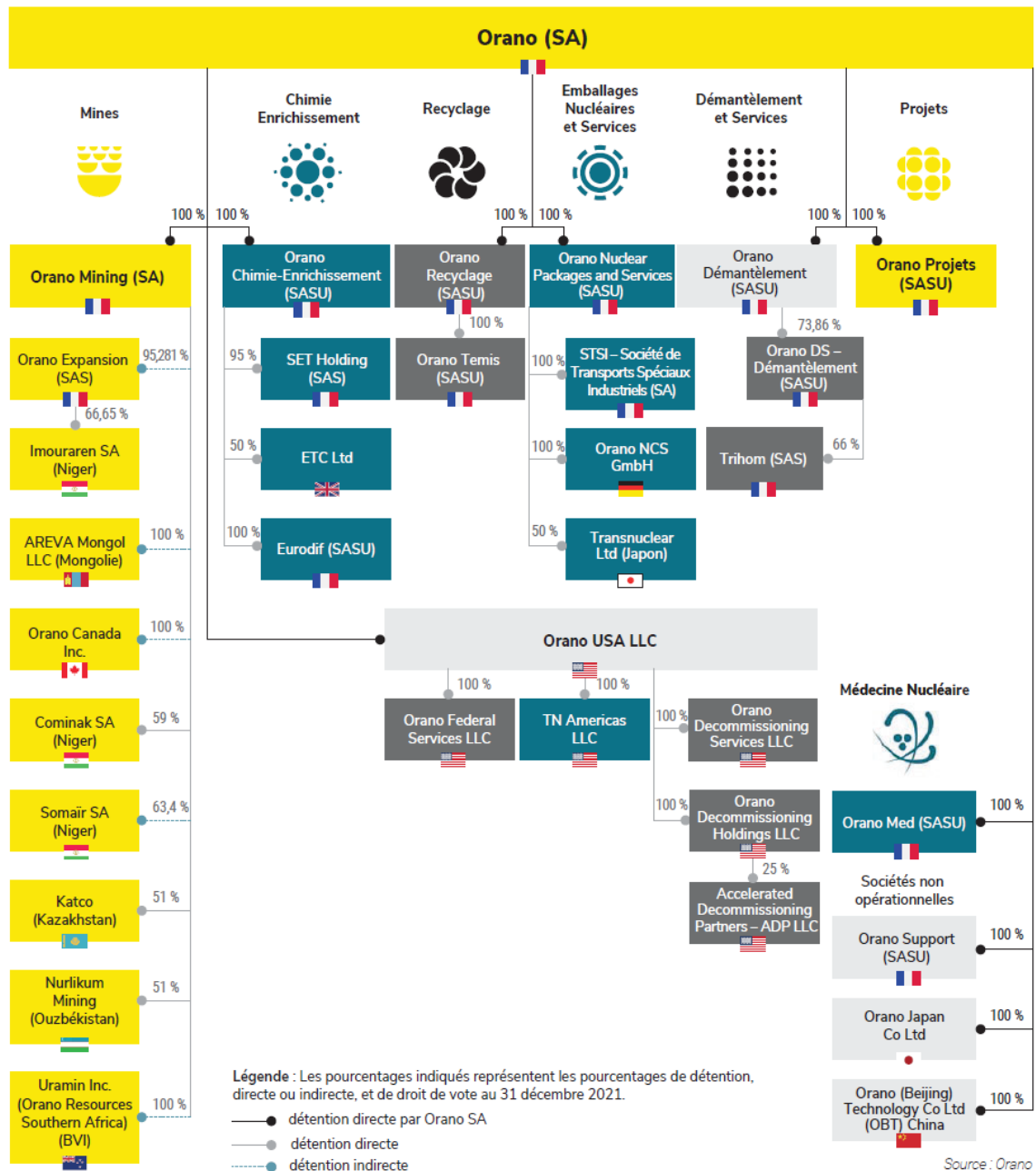


図 3.3-5 仏 Orano グループの組織体制

【出所】Orano 社の 2021 年報

3) Framatome 社

Framatome 社の事業分野は次のとおりである。[3.3-46]

- ・ 原子炉の設計・エンジニアリング
- ・ 原子力蒸気供給システム(NSSS)の供給
- ・ 機器及び燃料の設計・製造
- ・ 計装制御システムの開発
- ・ 原子炉の管理・保守

燃料サイクルの領域では、Framatome 社は研究・開発、燃料成型加工及び完全に統合されたロジスティックスの組織を有し、そのサイトはフランス(サプライチェーンの順に、ジャリ、ユジーヌ、モントルイユ＝ジュニエ、ルグル、パンブフ、ロマン及びリヨン)、ドイツ(カールシュタイン、リンゲン及びエアランゲン)及び米国(リッチランド及びリンチバーグ)に立地している。燃料サイクルに係わる同社の事業活動とその能力は以下のとおりである。[3.3-47]

- ・ 燃料集合体の開発・設計：製品設計、中性子・熱水力学・熱機械・機械計算のコード・方法、データベース
- ・ ジルコニウムとその合金の製造：化学・冶金技術、技術移転
- ・ 燃料集合体の製造・商業化：反応化学・固体化学、粉末冶金、組立、溶接、非破壊検査、安全・放射線防護解析、プログラミング、技術移転
- ・ 金属ウランの生産を含む研究炉用の燃料要素の製造、研究・開発、プロトタイピング：核燃料研究センター研究・イノベーションラボ(CRIL)
- ・ 燃料関連役務：原子力発電所サイトにおけるエンジニアリング、製造、支援

Framatome 社の出資構成(2022 年 12 月時点)は下記のとおりである。[3.3-48]

- ・ フランス電力(EDF)グループ：75.5 %
- ・ 三菱重工業株式会社：19.5 %
- ・ 仏エンジニア大手 Assystem 社：5 %

(2) 主要な核燃料サイクル施設

フランスはカナダ、カザフスタン、ニジェール等からウラン資源を調達している。現地で精錬されたイエローケーキは、仏マルヴェジ(Malvesi)サイトの Comurhex II- Malvesi プラントで四フッ化ウラン(UF_4)に転換された後、トリカスタン(Tricastin)サイトに立地している Comurhex-Pierrelatte プラントの Philippe Coste 転換施設で六フッ化ウラン(UF_6)に転換される[3.3-49]。なお、これらのプラントは、ウラン 235 を 0.7 %程度しか含まない天然ウランを扱っていることから、法令上のカテゴリは原子力基本施設(INB)ではなく環境保護指定施設(ICPE)となる。 UF_6 は、さらに同じトリカスタンサイトの

Georges Besse II プラントで超遠心分離法により 3～6 %に濃縮される。同プラントは INB である。

ここまでのウラン転換-濃縮プロセスは図 3.3-6 に示すとおりである。

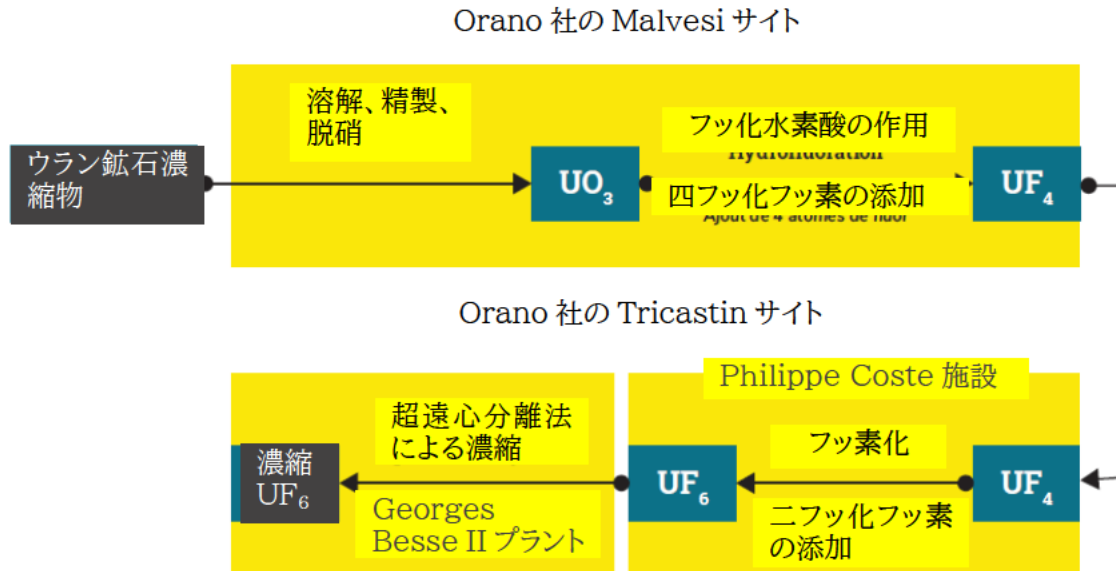


図 3.3-6 フランスにおけるウラン転換-濃縮プロセス

【出所】Orano 社の 2021 年報

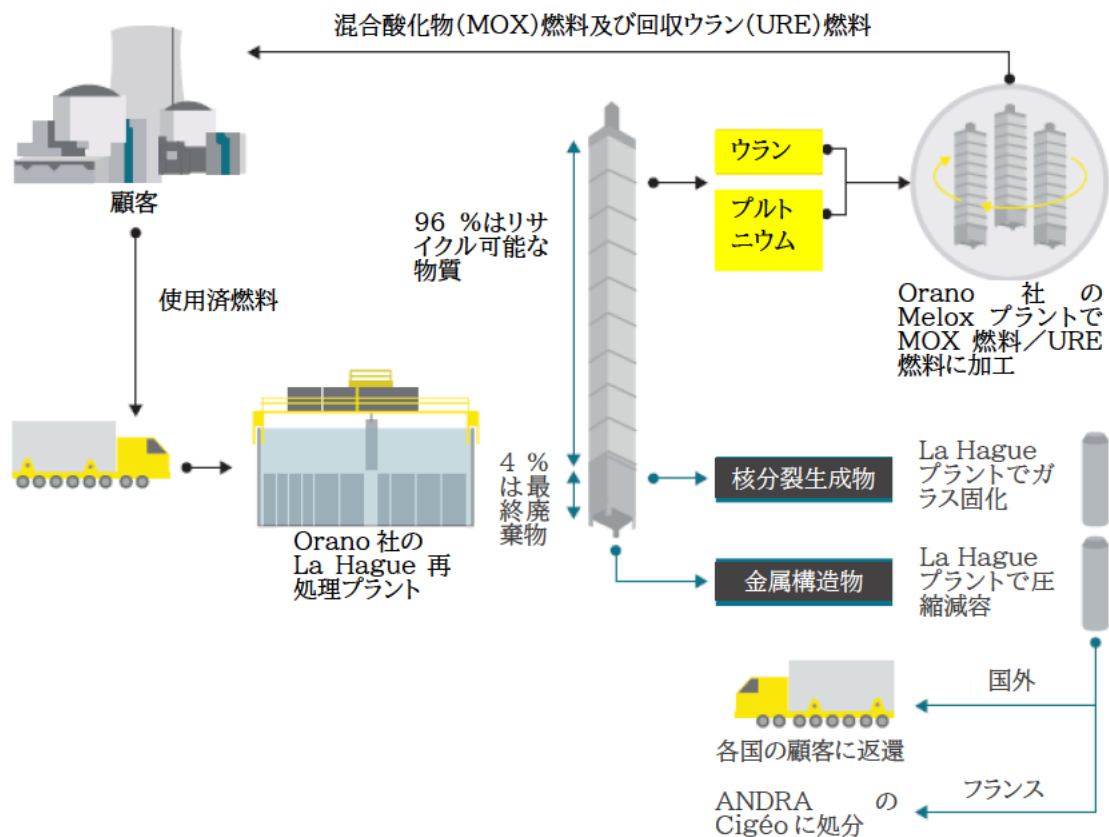
なお、トリカスタンサイトの W プラントでは、濃縮作業で生成した劣化ウランが安定な八酸化三ウラン(U_3O_8)形態に転換され(脱フッ素)、同サイトの TU5 プラントでは、ラ・アーグ (La Hague)再処理プラント由来の再処理回収ウランが U_3O_8 形態に転換され(脱硝)、それぞれコンディショニングを経て貯蔵されている[3.3-50]。

トリカスタンサイトで生産された濃縮ウランはFramatome 社のロマン＝シュール＝イゼール(Romans-sur-Isère)のプラントで PWR 用の燃料に成型加工される。原子炉に供給される前の新燃料は、フランス電力(EDF)がビュージェイ(Bugey)とシノン(Chinon)に持っている地域間倉庫(MIR)において保管することもできる。

使用済燃料は原子力発電所のプールで冷却された後、ラ・アーグ再処理プラントに移送される。同プラントでは、ウランとプルトニウムが核分裂生成物及びその他の超ウラン元素から分離される。

回収されたウランとプルトニウムは貯蔵されるが、回収ウランは当面は新燃料の製造に使用されることはない。プルトニウムはマルクール(Marcoule)のMelox プラントにおいて混合酸化物(MOX)燃料に加工される。フランスでは、MOX 燃料は一部の 90 万 kW 級 PWR において利用されている。現在、使用済 MOX 燃料の再処理は行われておらず、当面は La Hague 再処理プラントにおいて貯蔵される。

フランスにおける使用済燃料のリサイクルプロセスは図 3.3-7 に示すとおりである。



Cigéo:地層処分場

ANDRA:フランス放射性廃棄物管理機関

図 3.3-7 フランスにおける使用済燃料のリサイクルプロセス

【出所】Orano 社の 2021 年報

使用済 MOX 燃料は将来的には再処理あるいは処分されることになるが、先述のとおり、仏政府は PWR におけるマルチリサイクルを検討している。また、フランス原子力・代替エネルギー庁 (CEA)、仏 Framatome 社、EDF 及び Orano 社は、PWR におけるマルチリサイクルに関する共同研究プログラムを実施している (3.3.7 項参照)。

フランス国内における核燃料サイクル体制は図 3.3-8 に示すとおりである。

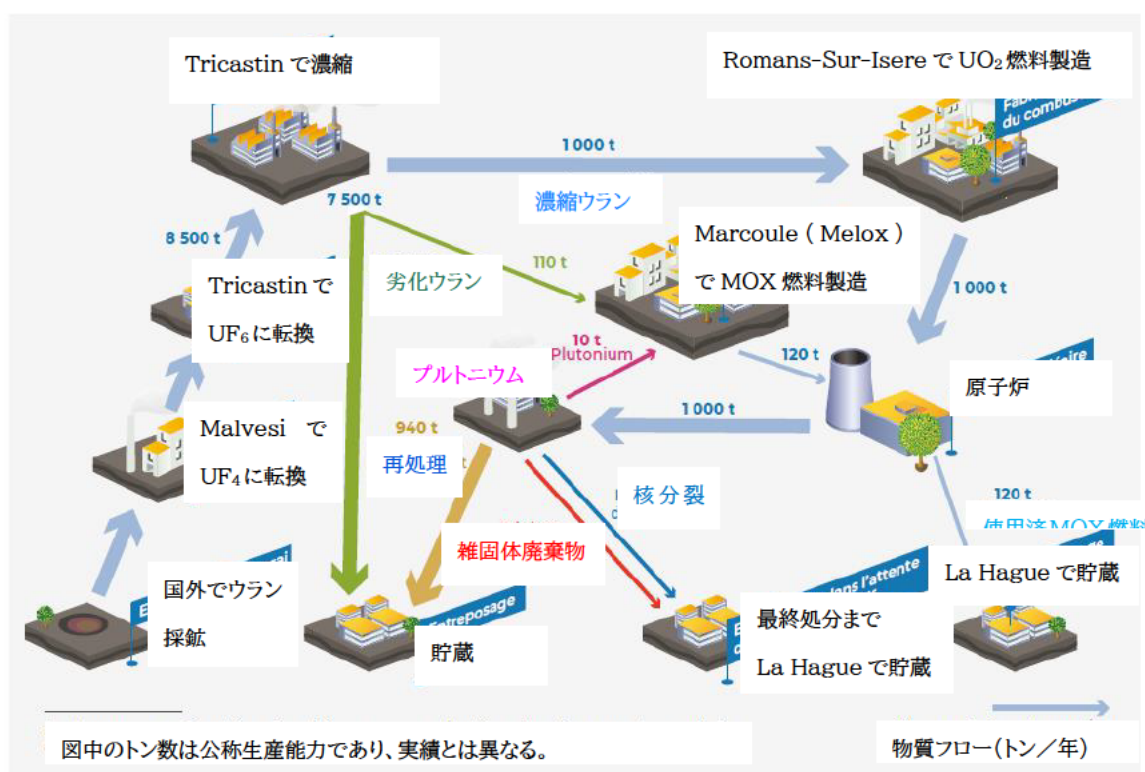


図 3.3-8 フランス国内における核燃料サイクル体制

【出所】ASN の 2021 年報[3.3-51](PPE 等によりサイト名称を補った)

以下、IAEA の NFCIS、ASN の 2021 年報及び Orano 社の 2021 年報の情報に基づき、フランスの核燃料サイクル施設の情報を整理する。

表 2.3-5 Orano 社 Comurhex II- Malvesi 転換プラントの概要
[3.3-52][3.3-53][3.3-54][3.3-55]

施設	
施設名称	Comurhex II- Malvesi
施設概要	仏 Malvesi サイトに立地しており、Orano mining 社が調達したウラン資源(国外でイエローケーキを精製)を四フッ化ウラン(UF ₄)に転換している。生産された UF ₄ は、Tricastin サイトの Comurhex-Pierrelatte プラントに輸送される。
技術	あらゆる起源のウランに対応可能
能力	2018 年 12 月の操業開始時点の処理能力は 7,500 トン/年、公称処理能力は 15,000 トン/年。

	稼働状況	操業中
	稼働実績	未詳であるが、Pierrelatte プラントでは 2021 年の実績として、Comurhex II プラントで生産された UF ₄ を 11,259 トン処理している。
	役務取引 取組方針	自社が操業する Pierrelatte プラントに UF ₄ を供給
事業主体		
	事業者名称	Orano 社
	事業者概要	経営が悪化した AREVA グループから燃料サイクル事業部門が分離され、Orano 社が設立された。フロントエンドからバックエンドまで一貫したサービスを提供するビジネスモデルを採用している。
	資本関係	仏政府：79.99%、AREVA SA：0.01%、CEA：1 株、JNFL：5%、三菱重工業：5%、Natixis：10%（2021 年 10 月時点）
	経営状況	売上高：47 億 2,699 万ユーロ（2021 年実績、前年比 10 億 4,200 万ユーロ増） 総利益：13 億 9,000 万ユーロ（2021 年実績、8 億 600 万ユーロ）
	政府との関係	仏政府は Orano 社の支配株主であり、13 名の取締役のうち 5 名は政府推薦。
	今後の方針・戦略	フロントエンドからバックエンドまで一貫したサービスを提供するビジネスモデルを継続。

表 2.3-6 Orano 社 Comurhex-Pierrelatte 転換プラントの概要
[3.3-56][3.3-57][3.3-58]

施設		
	施設名称	Comurhex-Pierrelatte(Tricastin)
	施設概要	仏 Tricastin サイトに立地しており、Comurhex II-Malvesi プラントで生産された UF ₄ を六フッ化ウラン

	(UF ₆)に転換している。生産された UF ₆ は、同サイトの Georges Besse II プラントで濃縮される。
技術	新たに 2018 年に操業を開始した Philippe Coste 転換施設は最も厳格な安全基準に適合し、密封性にすぐれた設備を有する。
能力	公称処理能力は 14,000 トン/年
稼働状況	操業中
稼働実績	1961 年に操業開始。Malvesi の Comurhex II プラントで生産された UF ₄ を 11,259 トン処理し、12,758 トンの UF ₆ を生産、全量を Georges Besse II プラントに搬送(2021 年実績)
役務取引 取組方針	自社が操業する Georges Besse II プラントに UF ₆ を供給
事業主体:Orano 社	

表 2.3-7 Orano 社 Georges Besse II 濃縮プラントの概要
[3.3-56][3.3-57][3.3-58]

施設		
	施設名称	Georges Besse II
	施設概要	仏 Tricastin サイトに立地しており、同サイトの Comurhex-Pierrelatte プラントで生産された UF ₆ を濃縮している。生産された濃縮ウランは、Framatome 社の Romans-sur-Isère サイトの Romans プラントで PWR 用の燃料に成型加工される。
	技術	超遠心分離法
	能力	750 万 SWU(分離作業単位)/年
	稼働状況	操業中
	稼働実績	2011 年に操業開始。Comurhex-Pierrelatte プラントで生産された 12,758 トンの UF ₆ のうち 10,208 トンを処理し、濃縮ウラン 1,393 トンを生産、全量を Romans プラントに搬送(2021 年実績)。また、2021 年に発生した劣化ウラン 8,644 トンは Orano 社の W プラント(Tricastin)に全量搬送された。
	役務取引 取組方針	Framatome 社の Romans プラントに濃縮ウランを供給。
事業主体:Orano 社		

表 2.3-8 Framatome 社 Romans 燃料成型加工プラントの概要
[3.3-59][3.3-60][3.3-57][3.3-58]

施設		
	施設名称	Romans
	施設概要	仏 Romans-sur-Isère サイトに立地しており、仏 Orano 社の Georges Besse II プラント、Urenco 社（オランダ、ドイツ、英国）及び Tenex 社（ロシア）からの濃縮ウランを燃料集合体に成型加工し、それぞれ仏 EDF、中国の台山原子力発電所、スイスのゲスゲン原子力発電所に供給している。なお、ANF 社（Framatome 社の子会社）の独リンゲン（Lingen）プラント由来の UO_2 燃料棒を粉末状の UO_2 と八酸化三ウラン（ U_3O_8 ）に加工し、Framatome 社の米リッチランドプラント及びフランス原子力・代替エネルギー庁（CEA）に供給している（研究用）。
	技術	商用原子炉用の燃料集合体と研究用の照射ターゲットを製造可能。
	能力	濃縮ウランの処理能力は 700 トン/年
	稼働状況	操業中
	稼働実績	2021 年には、Georges Besse II プラントからの濃縮ウラン 564 トン、Urenco 社の濃縮ウラン 142 トン、Tenex 社の濃縮ウラン 21 トンを処理し、750 トンの燃料集合体を製造、そのうち 710 トン分を EDF に、42 トン分を台山に、2 トン分をゲスゲンに搬送した。
	役務取引 取組方針	Orano 社→Romans→EDF、Urenco 社→Romans→台山、Tenex 社→Romans→ゲスゲン
事業主体		
	事業者名称	Framatome 社
	事業者概要	フランス電力（EDF）傘下で原子炉製造・サービス、燃料の成型加工を担当。
	資本関係	EDF グループ：75.5 %、三菱重工業株式会社：

経営状況	19.5 %、仏 Assystem 社:5 % (Framatome 社ホームページ 2022 年 12 月 16 日閲覧時点) 売上高:33 億ユーロ(2021 年実績)
政府との関係	Framatome 社は EDF の傘下企業であり、その EDF の出資構成の 83.88 %は仏政府が占めている。
今後の方針・戦略	EDF 傘下企業として、①カーボンニュートラルの実現と気候変動対策、②地球資源の保全、③社会の安寧と連帯の確立、④責任ある開発に取り組んでいく。

表 2.3-9 Orano 社 La Hague 再処理プラントの概要
[3.3-61][3.3-62][3.3-57][3.3-58][3.3-63]

施設	
施設名称	La Hague
施設概要	仏 La Hague サイトに立地し、2 つの再処理プラント UP2-800 施設及び UP 3 施設から構成されている。仏 EDF、その他の国の商用原子炉で発生する使用済 UO_2 燃料及び使用済 MOX 燃料の再処理を行い、ウランとプルトニウムを分離している。なお、ベルギーの Mol サイトの試験炉 BR2 の使用済燃料の再処理も行っている。
技術	PUREX 法
能力	UP2-800 施設と UP 3 施設の処理能力は 2003 年の政令により、それぞれ 1,000 トン/年と定められているが、両施設を合わせた処理量は年量 1,700 トン未満に制限されている。
稼働状況	操業中
稼働実績	UP2-800 施設は 1996 年に、UP 3 施設は 1990 年に、それぞれ操業を開始。1996 年に操業を開始し 2004 年に閉鎖された UP2-400 施設で処理された分も含め、2021 年までの再処理実績は約 38,363 トンであり、その内訳は下記のとおりである(括弧内は受託国)。 ・ 5,482 トン(ドイツ)

	・ 2,944 トン(日本) ・ 771 トン(スイス) ・ 673 トン(ベルギー) ・ 450 トン(オランダ) ・ 196 トン(イタリア) ・ 27,847 トン(フランス) 2021 年には、EDF、その他の国の使用済燃料 1,021 トンを処理し、硝酸溶液 997 トンを生産し、そのうち 865 トンを自社の Tricastin サイトに搬送した。また、ベルギーの試験炉 BR2 の使用済燃料 0.01 トンを処理した。なお、この年には BR2 由来の酸化プルトニウム(PuO_2) 12 トンを生産し、そのうち 6 トンを自社の Melox プラントに搬送した。なお、2021 年時点で、La Hague サイトでは未処理の使用済燃料 10,088 トン(再処理委託者は EDF、その他の国の電気事業者)が貯蔵されている。
役務取引 取組方針	仏 EDF を主要顧客とするが、その他の国の電気事業者からも再処理を受託。Orano 社と EDF の間で 2040 年まで再処理役務を継続する誓約(engagement)が成立しており、処理量は個別の協定(accord)により決定される。なお、海外由来の再処理廃棄物を仏国内で処分することは法律で禁じられており、再処理委託国に返還される。
事業主体:Orano 社	

表 2.3-10 Orano 社 Melox プラントの概要
[3.3-64][3.3-65][3.3-66][3.3-58]

施設	
施設名称	Melox
施設概要	仏マルクール(サイト)に立地し、ANF 社(Framatome 社の子会社)の独リンゲンプラント及びスウェーデンウエスティングハウス社(WSE)の瑞 Vasteras プラント由来の劣化 UO_2、ならびに仏 Orano 社のラ・アーク再処理プ

	ラント由来の PuO_2 を MOX 燃料集合体に成型加工し、仏 EDF と日本の関西電力に搬送した(2021 年実績)。 なお、Melox プラントは 2014 年まで、Tricastin サイトの Comurhex-Pierrelatte プラントの回収ウラン処理施設から供給された劣化 UO_2 を加工し、その一部を EDF に供給していたが、同施設の閉鎖により、2015 年以降は海外由来の劣化 UO_2 のみを使用している。
技術	Advanced MIMAS 法
能力	公称生産能力は 195 t HM/年。
稼働状況	操業中
稼働実績	1995 年に操業開始。累積生産量は 2,600 トン以上(2021 年時点)。2021 年の生産実績は MOX 燃料ペレット 51 トン、燃料集合体 106 体。
役務取引 取組方針	フランス、日本、ドイツ、オランダの原子力発電事業者に MOX 燃料を供給。2021 年には、ドイツ由来の劣化 UO_2 を 54 トン、スウェーデン由来の劣化 UO_2 を 6 トン、仏ラ・アーク由来の PuO_2 を 5 トン処理し、51 トン相当の MOX 燃料集合体を生産した。これらの MOX 燃料集合体のうち、38 トン相当を EDF に、7 トン相当を関西電力に搬送した。
事業主体:Orano 社(操業)、出資比率は Orano が 50%、Framatome 社が 50%	

3.3.5 ウクライナ侵攻の役務取引動向等への影響

(1) ロシアとの原子力商取引に対する批判とエネルギー安全保障の問題

環境保護団体グリーンピース・フランスは2022年11月29日付のプレスリリース[3.3-67]で、同日、ロシアから濃縮ウランと天然ウランを積載した貨物船がフランス最北端のダンケルクに入港したことを明らかにし、ウクライナ戦争の渦中においてロシアとの原子力ビジネスを継続することは倫理に悖ると非難した。

フランスで最も発行部数が多い日刊紙ル・パリジャンは2022年12月1日付の記事[3.3-68]で、グリーンピースの主張を引用しつつ、エネルギー安全保障上の問題を以下のように指摘している。

- ・ グリーンピースは、ここ数カ月の間にロシアからフランスへのウランの輸送が複数回あったことを確認している。
- ・ グリーンピースによれば、2000年代の初め以降、フランスで消費されるウラン資源の45%はロシアの影響圏であるカザフスタンから調達されているという。また、欧州原子力共同体(EURATOM)によれば、露 ROSATOM の EU における 2021 年のウラン転換市場と濃縮市場の占有率は、それぞれ 25 %と 31 %であった。
- ・ ウクライナ戦争のさなかにもかかわらず、フランスがロシアから濃縮ウラン等を輸入できているのは、ウランが禁輸措置の対象となっておらず、その予定もないからである。しかし欧州議会は、“核燃料”も含めたロシア由来の一次エネルギー資源に対する“全面的かつ速やかな”禁輸を要請している。

(2) ウクライナ戦争と Georges Besse II 濃縮プラント拡張計画

このような情勢下、Orano 社はトリカスタンサイトの Georges Besse II 濃縮プラントの拡張計画を発表し、2023年2月1日から同年4月9日まで公開討論を実施している[3.3-69]。拡張計画が実現すれば、同プラントの生産能力は現行の750万SWU(分離作業単位)/年から1,100万SWU/年に増大する。

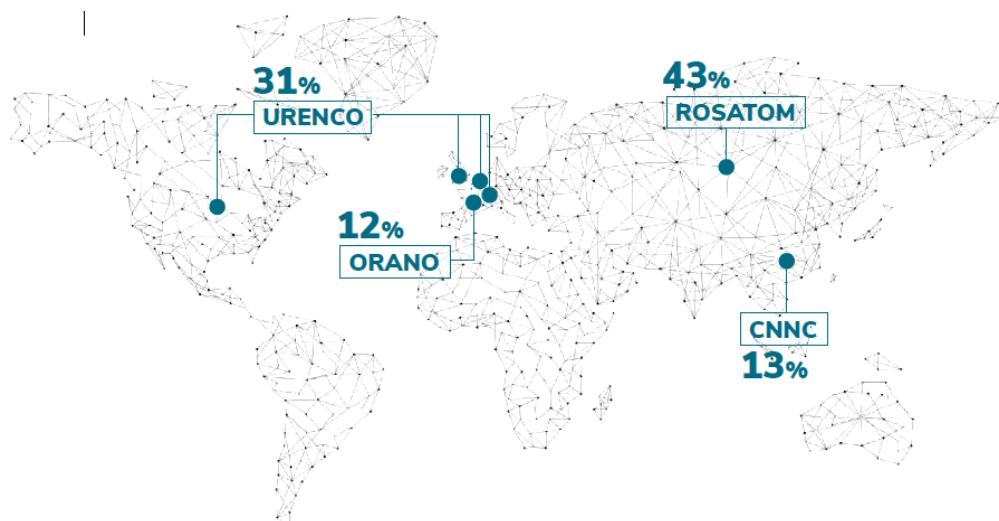
Georges Besse II プラントは2011年に操業を開始した。同プラントの建設に関する2006年の公衆意見調査の時点で、同プラントの生産能力を1,100万SWU/年にまで増大させることは想定されていたが、当時の国際市況を考慮し、設置許可申請では公称能力750万SWU/年にとどめられた。このほどOrano社が同プラントの生産能力を1,100万SWU/年に増大することを決断した背景には、ロシアによるウクライナ侵攻がある。

露 ROSATOM は現在、米国の濃縮ウラン市場の28%、欧州市場の31%を占有している。ウクライナ戦争以前、Orano 社は、世界の濃縮ウラン需要は将来にわたり安定的に推移するものと予測していた。世界の濃縮ウラン需要は年2%のペースで増大していたが、これは主にアジア、特に中国における原子力発電所の増加によるもので、西側の需要は、欧州における原子炉の閉鎖(新規原子炉の建設プロジェクトにより部分的に相殺)、米国の

原子炉の寿命延長、日本の一部の原子炉の再稼働といった要因が相まって安定していた。したがって、Orano 社にとって、核燃料サイクルのフロントエンドに新たに投資するモチベーションはなかった。

しかし、ロシアがウクライナに侵攻したことで濃縮ウランの供給が途絶するリスクが生じたため、西側の多くの原子力関連事業者がロシアへの依存度を縮減することを検討しており、各国政府もこれを後押ししている。米国及び欧州の市場におけるロシアの占有率が低下すれば、現在ロシアが供給している約 500 万～800 万 SWU/年の濃縮ウランを別ルートで調達する必要がある。その場合、濃縮ウラン市場における Orano 社のシェアの変化を決定する要素は次の 2 点である。

- ・ 原子力関連事業者が、市場の均衡を図る上で、URENCO 社と Orano 社の間でどのようにパイを配分することが望ましいと判断するか(図 3.3-9 を参照)。
- ・ 経済協力開発機構(OECD)の経済圏からロシアが完全にあるいは部分的に排除された場合、中国等他の経済圏へのロシア産濃縮ウランの輸出量がどれだけ増加するか。



CNNC:中国核工業集团公司

図 3.3-9 世界の 4 大ウラン濃縮事業者の濃縮設備占有率(2021 年時点)

【出所】Georges Besse II 濃縮プラント拡張計画に関する公開討論用の Orano 社資料[3.3-69]

Orano 社は、西側の濃縮ウラン市場における自社のシェアが 2030 年から 2040 年にかけて 1,100 万 SWU/年に達する可能性があると予測している。

西側の原子力発電事業者は、原子炉の運転を 1.5～4 年間継続できるだけのウランを備蓄しているが、ロシアからの濃縮ウランの供給が途絶した場合、早晚、米国や欧州において原子炉の運転が立ち行かなくなるおそれがある。しかし、化石燃料で原子力を代替すれば、電力価格が高騰し、CO₂ 排出量が増大する。

Orano 社は、仏国内よりもむしろ西側の諸外国、特に米国の電気事業者の需要を賄う

ために、Georges Besse II プラントの生産能力を早急に高める必要があると考えている。実際、フランスでは中期的に新規原子炉により古い原子炉がリプレイスされるが、総原子力発電設備容量が増えるわけではないので、EDF は濃縮ウランの調達量を増量することは検討していない。また、EDF は調達先を分散する方針であり、Orano 社だけに固執してはいない。EDF はさらに、今後数年にわたり、原子炉の燃料調達戦略としてリサイクル燃料の比率を高める方針である。したがって、Georges Besse II プラント拡張計画は EDF の原子炉新設計画とは関係なく、もっぱら地政学的な脈絡の中で、ROSATOM から西側の濃縮事業者へ鞍替えしたいという海外顧客の要望に応えたものである。

Orano 社は、Georges Besse II プラントを拡張するための設置許可変更申請書を 2023 年 6 月末に提出することを予定しており、拡張部分の操業を 2028 年にも開始する方針である。トリカスタンサイトにおける Georges Besse II プラント拡張部分の配置は図 3.3-10 に示すとおりである。

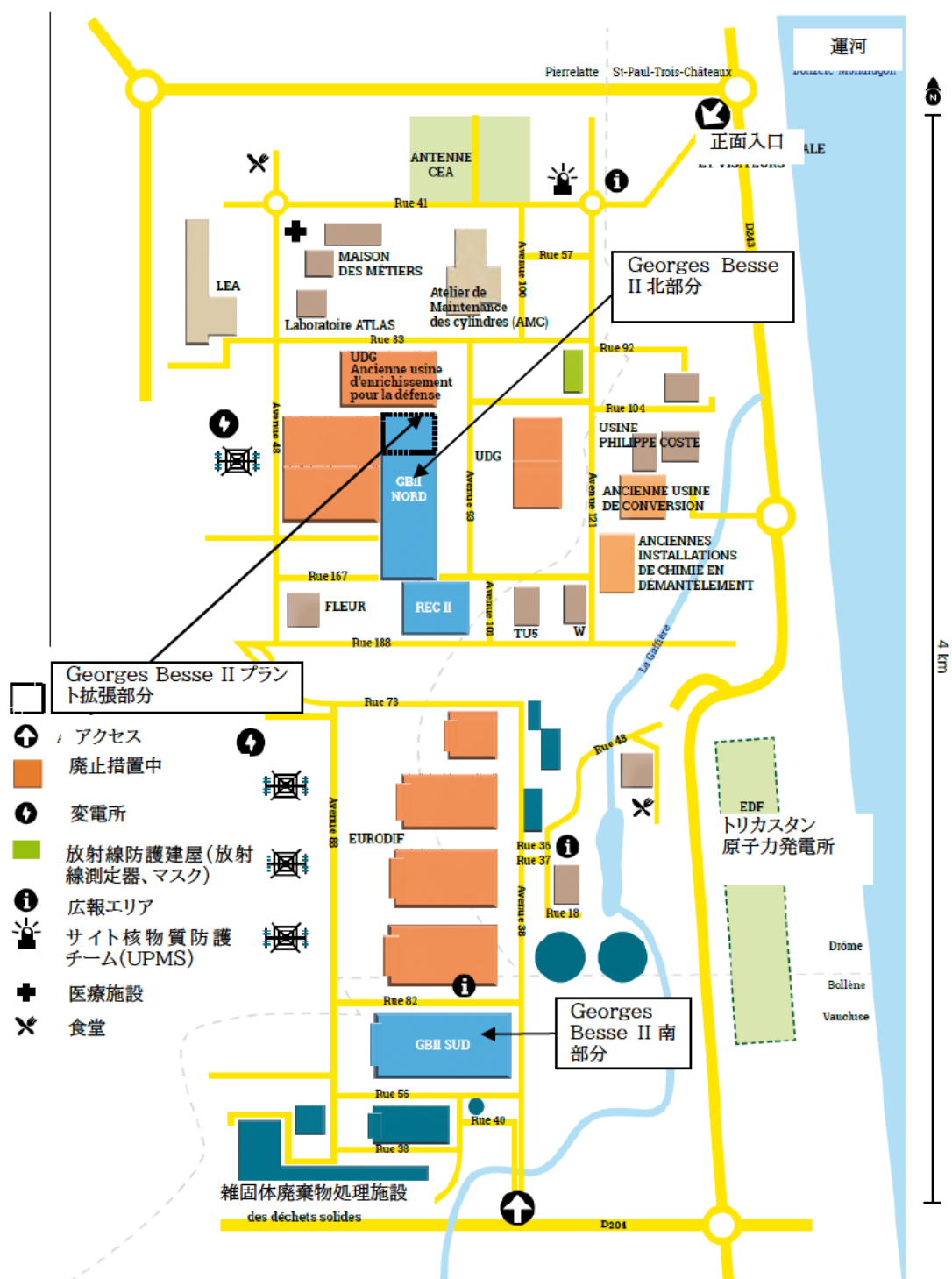


図 3.3-10 トリカスタンサイトと Georges Besse II プラント拡張部分の配置

【出所】Georges Besse II 濃縮プラント拡張計画に関する公開討論用の Orano 社資料[3.3-69]

3.3.6 原子力・核燃料サイクル関連の研究開発動向

フランスにおける原子力分野の研究・開発(R&D)は、原子力・代替エネルギー庁(CEA)⁷¹を中心 to 実施されている。CEA はフランス政府と 3 カ年の R&D 方針も含む運営方針に関する契約を締結しているとされるが、当該契約は公開情報からは確認できない。放射性廃棄物管理に関する R&D については、国家評価委員会(CNE)による毎年の評価が実施されており、R&D 戦略の立案においては CNE の勧告等も考慮されているものと考えられる。

核燃料サイクル施設の安全性向上に関しては、原子力安全規制に鑑みた R&D が実施される。安全規制に関しては燃料サイクル施設を含めて原子力安全機関(ASN)が監督を行っており、安全規制活動や安全性の向上に必要な R&D については、ASN の技術支援機関である放射線防護・原子力安全研究所(IRSN)が担っている。

(1) 新型 MOX 燃料の開発[3.3-70][3.3-71]

フランスでは、マルチリサイクルの実現を見据え、CEA、Framatome 社、フランス電力(EDF)及び Orano 社が共同で CORAIL と MIX という新型 MOX 燃料(MOX 2)を開発している。図 3.3-11 に示すように、CORAIL では標準的にはプルトニウム富化度 11.3 %の MOX 燃料と濃縮度 5.2 %のウラン燃料を集合体として構成され、MIX では一本の燃料棒の中に UO_2 と MOX を組み合わせて利用することが想定されている。

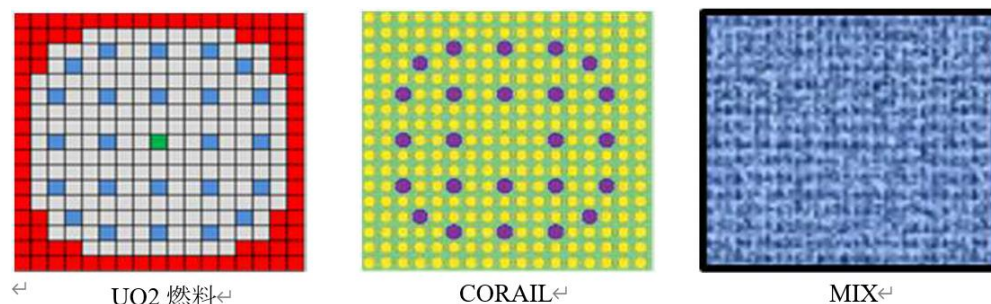


図 3.3-11 燃料集合体における燃料棒の配置

【出所】TENDANCES DE LA R&D NUCLÉAIRE DU CEA DANS LES 10 PROCHAINES ANNÉES, SFEN
Lyon - 19 juin 2019, CEA.

2019 年時点で、試験燃料集合体を 2025 年頃を目途に PWR に装荷し、将来的には欧州加圧水型原子炉(EPR)において本格導入することが計画されている。

⁷¹設立時の名称は「原子力庁(CEA:Le Commissariat à l'énergie atomique)」であったが、2009 年に略称はそのままに現在の名称である「原子力・代替エネルギー庁(Le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives)」に改称された。

(2) 使用済燃料の乾式貯蔵の可能性[3.3-72]

フランスの商用原子炉で使用されている燃料は UO_2 燃料と MOX 燃料である。過去に使用済回収ウラン(URE)燃料が使用されたことがあるが、現在は使用されていない。使用済 UO_2 燃料は再処理されるが、使用済 MOX 燃料と使用済 URE 燃料は当面は再処理されない。同国では現在、使用済燃料は各原子力発電所サイトやラ・アーク再処理プラントにおいて湿式貯蔵されており、乾式貯蔵は行われていない。使用済 MOX 燃料及び使用済 URE 燃料に関しては、IRSN が乾式貯蔵する可能性について検討を行っている。

第 5 版となる「放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する国家計画(PNGMDR)」案に関する公開討論の準備作業の一環として、国家公開討論委員会(CNDP)は 2019 年 2 月 15 日付の書簡により、使用済 MOX 燃料と使用済 URE 燃料の乾式貯蔵の可能性に関する評価を IRSN に要請した。

IRSN は CNDP の要請を受け、次の観点から評価を実施した。

- ・ 現在湿式貯蔵されている特定の使用済 MOX 燃料と使用済 URE 燃料の乾式貯蔵との適合性。
- ・ 使用済燃料の熱出力を考慮した輸送及び乾式貯蔵施設の設計変更の可能性。現状での目安として、輸送可能な使用済燃料の熱出力は 6 kW 未満、既存設計の乾式貯蔵施設において受入可能な使用済燃料の熱出力は 2 kW 未満となる。

現在、EDF の商用原子炉に装荷されている MOX 燃料のプルトニウム富化度は 5.3 %、7.08 %、8.65 %である。使用済 MOX 燃料の熱出力はプルトニウム富化度と燃焼度に比例する。使用済燃料集合体の熱出力を 2 kW 未満とするまでに要する冷却期間が、乾式貯蔵の実行可能性を判断する基準となる。

冷却期間を考慮すれば、プルトニウム富化度が 5.3 %と 7.08 %の MOX 燃料については、現時点で乾式貯蔵を検討することは可能と考えられる。一方、プルトニウム富化度が 8.65 %の MOX 燃料については、乾式貯蔵が可能になるのは 2040 年頃以降と考えられる。既存設計の乾式貯蔵施設において受入可能な使用済 MOX 燃料の熱出力が 2 kW 未満であるとすれば、このタイプの使用済 MOX 燃料は、乾式貯蔵の前に、照射終了後 30 年程度の湿式貯蔵を必要とする。湿式貯蔵の期間を 10 年程度に短縮するためには、熱出力 3 kW 程度の使用済 MOX 燃料を受け入れることが可能な乾式貯蔵を開発しなければならない。

なお、使用済 URE 燃料については、現時点で乾式貯蔵を検討することは可能と考えられる。

以上のように、IRSN は現在湿式貯蔵されている使用済 MOX 燃料と使用済 URE 燃料の一部を乾式貯蔵する上で重大な障壁はないと結論している。IRSN はまた、あらゆる安全・放射線防護要件や産業上の制約を考慮した上で、熱出力 2 kW を超える乾式貯蔵施設を開発することは可能であるとしている。

3.3.7 革新炉開発における FE/BE 分野の政策・技術開発動向

マクロン大統領は、2021 年 10 月に発表した大規模投資計画「France 2030」[3.3-73]において「国内で小型モジュール原子炉(SMR)を実現し、廃棄物管理を改善する」との目標を明示し、2022 年 2 月のベルフォール演説[3.3-74]でも「France 2030 計画の枠内で SMR 及び革新的原子炉を開発する」と明言した。

フランスにおける研究・開発の中核を担っている原子力・代替エネルギー庁(CEA)は、SMR と第 4 世代炉を主軸に革新炉の開発を進めている。CEA は、SMR の最初の 1 基を 2030 年を目途に運開させることを目標としている。より長期的には、CEA は第 4 世代炉、特に高速中性子炉(RNR)に関心を持っている。将来の核燃料サイクルに関する研究は、ウラン資源のより適切な管理、使用済燃料のマルチリサイクル及び廃棄物発生量の低減を可能にするすべてのオプションを評価することを目的としている。CEA は、フランス電力(EDF)、Orano 社及び Framatome 社と共同で、特に PWR におけるマルチリサイクルに関する研究を推進しており、より長期的には第 4 世代炉の導入に伴う核燃料サイクルの変化に関する研究も実施する方針である。[3.3-75]

(1) SMR

CEA 原子力局(DEN)の 2019 年活動報告書[3.3-76]によれば、CEA は 2019 年、次の 3 つのテーマを軸として SMR の研究を強化した。

- ・ CEA、フランス電力(EDF)、Naval Group 及び TechnicAtome のコンソーシアムが取り組んでいる SMR「NUWARD」開発プロジェクトの支援
- ・ 特に都市暖房用の熱源としての併用を想定した SMR の設計に関する研究
- ・ 水素の大量生産を含む多方面のエネルギー需要に対応するマルチ SMR に関する研究

フランスにおける PWR の設計、開発、建設及び約 2,000 炉・年に相当する運転経験に基づき、NUWARD は一体型設計の簡素さとコンパクトさ、建設・運転フェーズにおける柔軟性、世界で最も厳格な安全基準への適合性を特長としている。NUWARD 開発プロジェクトにおいて、CEA は R&D 活動のための施設を提供するとともに、原子炉の設計、計算ツールの開発・実証、安全性評価、系統・機器の性能検証を担当している。

国際的なレベルでは、CEA、EDF 及び米 Westinghouse Electric Company(WH 社)は 2019 年、SMR 開発における協力を目的とする枠組協定を締結した。三者はこの協定に基づき、NUWARD プロジェクトと WH 社の SMR プロジェクトの双方の専門的知見を統合する可能性を検討する。この国際協力の枠組みの中で、SMR の実現にとって必須条件となる規制の調和化や設計規格の標準化が図られる。



図 3.3-12 石炭火力発電プラントを 34 万 kW の SMR でリプレイスした場合のレイアウト

【出所】DIRECTION DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE RAPPORT D'ACTIVITÉ 2019, CEA.

また、CEA の 2021 年報[3.3-77]によれば、CEA は 2020 年に「革新的な脱炭素原子力エネルギーシステム(IDNES)」プロジェクトを開始した。その目的は、SMR の用途を発電以外の分野、特に都市暖房と水素生産に拡大することである。

CEA の IRESNE と Liten⁷²の合同チームは、150 °C の熱と電力を必要とする高温電解槽と SMR とをカップリングさせるために、双方の原子力と再生可能エネルギーに関する専門知識を活用している。合同チームは 2021 年、70～150 °C の熱を供給する熱源としての SMR(熱出力 2 万 kW)の 3 つの素案について、炉心、燃料、熱交換器、原子炉の組み立て及び蓄熱に関するプレサイジングを実施した。これらの初期作業により、NUWARD 型の SMR を水素生産にどのように利用できるかが示され、ハイブリッドシステムの熱力学的効率を最適化する方法も特定された。

(2) 第 4 世代炉

一方、第 4 世代炉に関しては、フランスでは改良型ナトリウム冷却高速中性子炉の技術実証炉 ASTRID の開発プログラムが、「未来への投資プログラム(PIA)」⁷³の支援を受け、2010 年から 2019 年にかけて CEA の主導のもとで実施された。このプログラムでは、第

⁷² IRESNE は CEA 原子力局に属する研究所であり、低炭素エネルギーを製造するための原子炉システムの利用を専門とする。Liten は CEA の技術研究局に属する研究所であり、気候・エネルギー・環境問題に対処するためのソリューションの開発に従事している。

⁷³ PIA はサルコジ大統領(当時)が 2009 年末に発表した研究・イノベーション支援プログラムであり、当初から原子力分野の優先課題として第 4 世代炉開発や放射性廃棄物管理が含まれていた。PIA はその後の政権にも引き継がれている。

4 世代のナトリウム冷却高速中性子炉(SFR、仏語表記では RNR-Na)の実証炉の概念設計や、原子炉本体とその関連の燃料サイクルに関する研究・開発(R&D)が実施された。DEN の 2019 年活動報告書[3.3-78]には、2018 年末の政府決定を受け、2019 年初め、ASTRID を当面は実現しない旨がエネルギー複数年計画(PPE)に記入されたが⁷⁴、RNR-Na に関する研究は継続されるとある。CEA は、フランスのエネルギー戦略に長期にわたり貢献できるように、ASTRID 開発プログラムで得られた知見を保持・発展させる方針である。

また、CEA の 2019 年報[3.3-79]にも「技術実証炉 ASTRID の実現を延期する決定を受け、CEA は第 4 世代のナトリウム冷却高速中性子炉に関する研究プログラムの再編成を行った。プロジェクトのすべての成果を財産としつつ、今後のプログラムは R&D の 3 つの優先分野、すなわち第 4 世代炉のデジタルモデル化・シミュレーション、革新的技術の定義・性能検証、その他のアーキテクチャ・技術に関する素案の研究を軸に編成される。同時に、ASTRID プログラムの 10 年間の研究成果を保存するために協定総括文書が作成された」との記述⁷⁵があるが、他に ASTRID に言及した箇所はない。なお、CEA の 2020 年報にも 2021 年報にも ASTRID に関する記載はない。

(3) 将来の核燃料サイクルバックエンド[3.3-78]

政府とフランスのすべての原子力産業との間で 2019 年 1 月に締結された戦略契約(期間:2019~2022 年)では、同国の核燃料サイクルに関する長期的な戦略が明確化されている。この戦略は次の 3 段階で構成されている。

- ・ 既存の PWR における混合酸化物(MOX)燃料の利用を拡大する。
- ・ PWR における燃料のマルチリサイクルを推進する。
- ・ 高速中性子炉において完全なリサイクルを実現する。

PWR におけるマルチリサイクルに関する研究プログラム

CEA、Framatome 社、EDF 及び Orano 社は、PWR におけるマルチリサイクルに関する共同研究プログラムを構築し、2025~2028 年を目途に試験燃料集合体の照射を実施することを目指している。同プログラムでは、現在の、場合によっては改良された原子炉・燃料サイクル技術において照射された MOX 燃料のリサイクル性が証明される。その最終目標は、2040 年代以降に商業化することである。

このプログラムは次の 5 つのテーマを主軸としている。

- ・ 将来シナリオと経済性確保に関するシミュレーション

⁷⁴ 先述のとおり、現行 PPE には「天然ウラン資源が豊富で安価に入手できる以上、少なくとも 21 世紀の後半までは、高速中性子炉の実証炉や商業規模での展開に有益性はない。したがって、高速中性子炉に係わる研究については方向性を見直す必要がある。」と記されている。

⁷⁵ ほぼ同じ文言の記述は DEN の 2019 年活動報告書にもある。

- ・ 原子炉における商業的実行可能性
- ・ 燃料サイクル施設における商業的実行可能性
- ・ 原子炉における試験的照射の定義・準備
- ・ 先進的な燃料サイクルプロセスに関する R&D

2019 年には、先進的な燃料サイクルプロセスに関する R&D の一環として、使用済 MOX 燃料のボロキシデーション処理プロセス(図 3.3-13 を参照)に関する研究が成果を上げた。このプロセスは、酸化雰囲気中で使用済燃料に熱処理を施すことにより、材料の断片化を促進し、溶解速度を速めるもので、残留プルトニウムを回収するためのより効率的なソリューションを提供できる可能性がある。

最初の試験は UO_2 燃料ペレットを、次いで未照射の MOX 燃料を対象に実施され、所期目標を達成することができた。今後、輪切りにした照射済み MOX 燃料を対象に試験が実施される。実物の照射済み燃料と被覆管の分離に関する貴重なデータを入手することにより、物質フロー図を作成し、新たなプロセスの性能検証が可能になるものと期待されている。

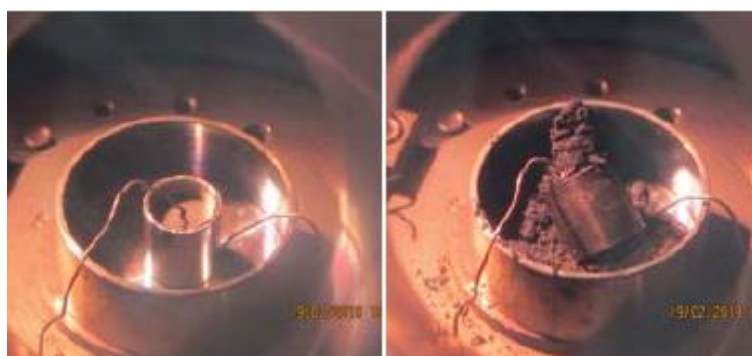


図 3.3-13 UO_2 燃料ペレットのボロキシデーション処理

【出所】DIRECTION DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE RAPPORT D'ACTIVITÉ 2019, CEA.

なお、CEA の 2021 年 7 月 28 日付の情報[3.3-80]によれば、CEA、Orano 社、EDF 及び Framatome 者による PWR におけるマルチリサイクルに関する研究は継続中であり、主な課題としては次の 2 点が挙げられている。

- ・ PWR における(最初の)リサイクルでプルトニウムの質が劣化している(注:原典において詳細は確認できないが、プルトニウムの高次化を指すものと思われる)。また、劣化ウランを使用する従来の MOX 燃料と異なり、新型燃料では濃縮ウランを用いる。これらのことから、新たな燃料集合体を開発する必要がある。
- ・ 燃料サイクルと炉内におけるプルトニウムの量が増加することから、炉の挙動(安全、運転)及び燃料サイクル(処理、製造、移送、貯蔵)への影響を考慮しなければならない。

MELOX プラントにおける高速炉用燃料の実行可能性研究

CEA は第 4 世代高速炉に関する研究の一環として、15 万 kW(電気出力)の高速炉用の燃料集合体製造ラインの実行可能性に関する研究を、Orano 社の MELOX・MOX 燃料加工プラントで行っている。この製造ラインには、燃料ペレット、燃料棒(被覆管、溶接)及び六角管の組み上げが含まれる。

この研究では、「コスト削減を考慮した設計(Design to Cost:DTC)」の概念に基づき、投資コストを最小化し、既存設備を用いて MELOX プラントから燃料集合体を搬送できるようにすることが目指されている。また、この製造ラインは、必要に応じて高速炉用燃料から PWR 用 MOX 燃料の製造へと用途を切り換えることができるリバーシブル構造となる。

3.4 ロシア

3.4.1 原子力・核燃料サイクル政策の概要

(1) 核燃料サイクル政策の概要・経緯

ロシアでは、自国の化石燃料を輸出に回すために、国内の発電部門を原子力等で代替する戦略がとられている。ソ連時代には、原子力の軍事利用と共に平和利用も積極的に展開し、原子力技術の開発当初よりクローズドな核燃料サイクルを目指しており、早くから高速炉や核燃料サイクル技術の研究開発が行われている。特に、高速炉を将来のエネルギー問題解決のカギとして捉えて、再処理によって有益な資源を再利用し、放射性廃棄物の量と毒性を最小化することを目的に開発が進められている。国営総合原子力企業ロスアトムの子会社である TENEX によると、路線を固持する理由は、国内の産業基盤・雇用の維持と放射化学という学問としての価値創出のためでもある。また、技術の波及効果も期待され、すでに月面探査機や火星探査機等への技術転用の例もあるという。また、過年度のロスアトムへのヒアリングによると、核燃料サイクルの実現のための再処理施設等を整備する上で、国内ニーズを基に資金調達を明確に定め、国内のインフラ整備が進められている。

ロシアの主要政策と経済目標の一つに原子力関連製品やサービスの輸出が位置づけられ、2021 年末時点では原子炉 35 基の輸出が決定または計画され、2021 年の海外からの受注額は 1399 億ドルに達している[3.4-1]。ロシアは原子炉輸出では世界首位、世界市場の 67%を占める。こういった海外展開において、ロスアトム社の特徴と言えるのは BOO 方式と呼ばれるパッケージ化されたシステムである。海外においても、ロスアトム社が建設(Build)・保有(Own)・運営(Operate)を行うことで、原発導入におけるハードルを下げ輸出を行っている。政策として原子力関連製品やサービスを輸出する方針自体は、2022 年のウクライナ情勢の変化後も特に公的な声明等はなく不変であると思われる。経済制裁に伴った取引中止や契約キャンセルといった影響は散見されるが、ロスアトムの発表によると 2022 年の原子力輸出額は前年比 15%増加であったとされており[3.4-2]、進行中の新規プロジェクトにより収益は維持されていると見受けられる。現状、中国、トルコ、エジプト、ハンガリー、インド、バングラデシュ、カザフスタン、ウズベキスタンにおいて新規プロジェクトが行われているが、フィンランドにおいて計画されていた新規建設は情勢の影響で中止され、またスウェーデンはロシアとの燃料取引を中止している。関連して、チェコ電力はロシア OMZ 傘下にあった原子力サプライヤである SKODA JS 社を、経済制裁の影響を避けサプライチェーンの安定化を図るためと明示し買収を行った。2021 年の年間原子力発電電力量は 2,084 億 kWh であり、設備容量は 2772.7 万 kW であった。総発電電力量が 10,878 億 kWh であったことから、原子力発電の占める割合は 19%であった。

原子力開発によりロシアのエネルギー需要に応えるとともに、天然ウランと使用済燃料利用効率向上の実現を目指し、新世代の原子力技術の開発目標として次の 2 つを最重要指標としている。

- ・ クローズドサイクルを実現する高速中性子炉の開発
- ・ 原子力エネルギーの新たな利用方法の研究(核融合分野を含む)

ロシア政府は国内の発電電力量に占める原子力の比率を 2045 年までに 25%まで上げることを目標としている。

連邦目標プログラムの下、ロスアトムは 2011 年より「ブレークスルー(Proryv)プロジェクト」を開始している。目標は、「固有安全性を有する高速炉と施設を 2025 年までに開発すること」であり、要求事項として以下の 5 項目を示している。

- ・ 地域住民の退避を必要とするシビアアクシデントの可能性の排除
- ・ ウラン資源の完全利用
- ・ 放射性廃棄物が放射能的に天然ウランと等価になるような処分法開発の進歩(MA の核変換等)
- ・ 核不拡散体制の技術面での強化
- ・ 発電単価で他の発電技術と競合できる経済性

また、上記の目標達成のため、下記の三点を進めるとしている[3.4-3]。

- ・ 混合窒化物燃料の研究開発、燃料製造・再処理・廃棄物処理施設の設計、建設、運転
- ・ 鉛冷却高速炉(BREST-OD-300)の研究開発、設計、建設、運転
- ・ ナトリウム冷却高速炉(BN-1200)の研究開発、設計

なお、ロスアトムは BREST の開発拡大のため、2019 年から 2025 年にかけて追加で 2,000 億ロシアルーブルを割り当てるように政府に要請している。この資金は BREST の開発が焦点となっており、2050 年までの長期戦略の中で、MOX や窒化物燃料を使ったより安全なクローズドサイクルへの移行が念頭にある。高速炉は、2020 年から 2025 年にかけて割合を増やし、高速炉の発電容量を 14GWe 程度(2030 年)、34GWe 程度(2050 年)とする想定である[3.4-4]。

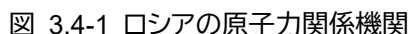
過年度のロスアトムへのヒアリングによると、鉛冷却窒化物燃料を使った高速炉(BREST 等)の研究は、MA 変換、プルトニウム消費や核分裂生成物(FP)の処理までを可能とすることを目指している。冷却材として鉛を使うことで、一部で圧力が低くなり、事故時の放射性物質の飛散リスクがより低くなるというメリットもある。

(2) ロスアトムを主体とした産業構造

ソ連時代、原子力行政は一手に中型機械工業省が担当していたが、チェルノブイリ事故直後の 1986 年 6 月、原子力・産業省に改組された。1991 年のソ連崩壊に伴い、原子力・産業省のロシア担当部分を継承して連邦原子力省が設立され、2004 年に組織改編により連邦原子力庁が設立された。2007 年 12 月、連邦原子力庁の全ての権限を継承し、ま

現在ロシアでは、原子力の推進と保障措置は国営原子力公社「ロスアトム」、安全規制は連邦環境・技術・原子力監督庁(ロステフナドゾル)が担当し、また原子力の安全保障面での取り組みは原子力安全研究所(IBRAE)が担っている(図 3.4-1)。ロスアトムは、行政だけでなく原子力産業、原子力・放射線安全分野や核兵器関連企業の機関も傘下においている。軍事関連の安全規制は、ロステフナドゾルの所掌外となっている。

ロスアトム傘下の企業は、子会社、孫会社、さらには連邦国家単一企業まで合わせると、関連企業は約 350 にのぼる。



1) 基本情報

154

表 3.4-1 ロスアトムの財務状況

	2019 年	2020 年	2021 年
利益	11519[億ルーブル]	12074[億ルーブル]	14476[億ルーブル]
総資産額	42956[億ルーブル]	47224[億ルーブル]	52196[億ルーブル]
無形資産	1709[億ルーブル]	1996[億ルーブル]	1994[億ルーブル]
売上高利益率 (ROS)	11.55	13.00	13.39
総資産利益率 (ROA)	3.10	3.32	3.71
株主資本利益率 (ROE)	5.10	5.58	6.34

また、ロスアトムの、海外受注額ポートフォリオと収益総額の変化は表 3.4-2 のように発表されている。

表 3.4-2 ロスアトムの海外受注額ポートフォリオと収益総額

	2019 年	2020 年	2021 年
海外受注ポートフォリオ 累計額	1350 億ドル	1383 億ドル	1399 億ドル
原子炉建設	930 億ドル	891 億ドル	841 億ドル
サイクル関連	290 億ドル	309 億ドル	340 億ドル
その他	137 億ドル	183 億ドル	218 億ドル
海外収益額	72.28 億ドル	74.75 億ドル	89.79 億ドル
原子炉建設	35.95 億ドル	40.98 億ドル	48.96 億ドル
サイクル関連	30.82 億ドル	28.99 億ドル	33.36 億ドル
その他	5.51 億ドル	4.79 億ドル	7.47 億ドル

2) 経営戦略

ROSATOM 公式 HP には、「世界の核技術市場のリーダー的企業」として、下記の主要指標を掲げている[3.4-1]。

- ・ 海外プロジェクト・ポートフォリオが世界一(12 カ国における 35 基)
- ・ ウラン濃縮分野において世界一(世界市場の 38%)
- ・ ウラン鉱床量、及びウラン採掘量は世界 2 位
- ・ 核燃料の世界市場の 17%を占める
- ・ 傘下企業全体で従業員は計 288,500 人に達する
- ・ 世界唯一の原子力砕氷船が稼働
- ・ 環境保護に対し 211 億ロシアルーブルを拠出
- ・ 人件費 4437.8 億ロシアルーブルにあたる雇用を創出

3) ロスアトム傘下企業

傘下企業 350 社超、従業員 28 万人超

※原子力発電所の設計、建設及び運転、ウラン採掘、転換及び濃縮、核燃料の供給、廃止措置、使用済み燃料の貯蔵及び輸送、並びに安全な放射性廃棄物の処分に関する資産を含む、原子力サプライチェーン全体にわたってエネルギーソリューションを提供する経営資源及び能力を有する[3.4-5]。

※主要企業のうち、核燃料サイクルに関連性の高い事業者として、例えば下記のような企業がある。

- ・ 「アトムエネルギープロム」(核燃料サイクル全行程)
- ・ 「アトムエネルギーマッシュ」(原子力発電関連設備等製造)
- ・ 「トヴェル」(核燃料濃縮・転換・成型加工)
- ・ 「テフスナブエクスポート(テネックス)」(ウラン関連製品輸出入)
- ・ 連邦国家単一企業「ロスラオ」(放射性廃棄物管理)
- ・ 連邦国家単一企業「生産公社マヤク」(再処理)
- ・ 連邦国家単一企業「製錬・化学コンバイン」(再処理)

3.4.2 ウクライナ侵攻のサイクル政策への影響

(1) ウクライナ侵攻後の核燃料サイクル政策をめぐる動き

現状、近年においてサイクル政策に関する方針転換や意思表示は見られておらず、現状の方針が固辞されると見られる。

既存の原子力関連サービス輸出や BOO (Build / Own / Operate) 方式による原子炉輸出に関しても同様であり、2022 年 12 月時点で、ロスアトム事務局長より地元紙に向け、2022 年の輸出金額を 2021 年の 15% 増加と見込む旨の発言がなされた[3.4-6]。

同紙においてリハチョフ氏は、現在の地政学的状況を踏まえても 10 年先まで海外受注高は安定的に推移すると見込んでいるとも発言している。

輸出額増加について、要因としてまず既存の契約の継続に加え濃縮ウラン燃料の供給、変換サービスによる売上が挙げられ、加えて現在 12 カ国 23 基の原子炉建設プロジェクトが進行中であることが同紙で述べられた。

(2) 輸出動向の変化

スウェーデンの大手電力会社であるヴァッテンフォール社は 2022 年 2 月、ロシアによるウクライナ侵攻を懸念した上でロシアからの燃料輸入をストップする声明を発表した[3.4-7]。同社は同発表の中で、燃料供給の独立性と安全性のために複数国からの複数のサプライヤと取引することを調達戦略として改めて挙げている。

フィンランドの原子力企業であるフェンノボイマ社は 2022 年 5 月、フィンランド国内のハンヒキビ原子力発電所におけるロスアトムとのプラント納入契約を解除した。理由として同社は、ロスアトム傘下の建設業者である RAOS 社の大幅スケジュール遅延に加え、ロシアのウクライナ侵攻による経済的リスクの高まりを挙げている。それに対しロスアトムは同年 12 月、契約解除は違法であると主張している[3.4-8]。

チェコ電力(CEZ)は 2022 年 11 月、ロシアの大手重工業会社である OMZ 社から、子会社である SKODA JS 社の買収を完了した。SKODA JS 社はチェコ発の原子力機器サプライヤーであり 2004 年よりロシア OMZ 社の子会社となっていたが、ウクライナ情勢を踏まえた経済制裁等による原子力サプライチェーン維持へのリスクを解消するため、同年 6 月に SKODA JS 社より買収が表明されていた[3.4-9]。

3.4.3 使用済燃料の処理・処分、回収・劣化 U 及び Pu の利用方針・実績

(1) 使用済燃料の処理・処分

1) 貯蔵に係る沿革(規制制度の変化、貯蔵方式の変化、貯蔵方式の採用根拠等)

ロシアにおいては、使用済燃料について再処理を基本方針としており、使用済燃料は放射性廃棄物には分類されない。

原子炉から発生した使用済燃料は主に発電所サイト内にて貯蔵され、一部はマヤク生産合同や鉍業化学コンビナート(MCC)で集中貯蔵されている。

使用済燃料プールが許容量に達したことから、鉍業化学コンビナート(MCC)では RBMK 炉から発生する使用済燃料の乾式貯蔵施設(容量 8,400t)を 2011 年末に建設している。

過去には諸外国からの使用済燃料受入と再処理を実施していた。現在は限定的であるが燃料リース[3.4-10]という仕組みを導入し、海外の使用済燃料の再処理を実施(本項 7)にて後述)している。

2017 年初め時点で、各発電所サイト等において貯蔵されている使用済燃料の量を表 3.4-3 に示す。

表 3.4-3 ロシア国内の使用済燃料貯蔵量(2017/1/1 時点)

事業主体	燃料の種類	使用済燃料貯蔵量(t)
コラ原子力発電所	WWER-440	97.461
ノボロネジ原子力発電所	WWER-440	40.107
	WWER-1000	101.899
バラコボ原子力発電所	WWER-1000	358.34
ロストフ原子力発電所	WWER-1000	211.12
カリニン原子力発電所	WWER-1000	368.727
クルスク原子力発電所	RBMK-1000	4,387.834
レニングラード原子力発電所	RBMK-1000	4,332.007
スモレンスク原子力発電所	RBMK-1000	3,288.358
ペロヤルスク原子力発電所	BN-600、BN-800	26.792
	AMB	190.15
ビリビノ原子力発電所	EGP-6	168.91
マヤク生産合同	WWER-440、AMB	325.44
MCC	WWER-1000	6,670.66
	RBMK	1,820.42
IPPE	AM-1	8.601
RIAR Atomflot	MIR、SM、VK-50、BOR-60	41.279
		11.273

以上 2017 年時点でのロシア国内の使用済燃料貯蔵量は 22,449t に達する。また、設備ごとの詳細は公表されていないものの、国内全体での使用済燃料の蓄積量に加え貯蔵施設への輸送量、また再処理設備への輸送量は 2019 年より表 3.4-4 のように推移していると ROSATOM より発表されている[3.4-1]。

表 3.4-4 ロシア国内での使用済燃料量

	2019 年	2020 年	2021 年
使用済燃料蓄積量	24,669t	25,260t	25,669t
貯蔵施設への輸送	857.4t	947.5t	905.1t
再処理施設への輸送	106.6t	99.7t	81.9t

2) 使用済燃料の特性

VVER-440 は、平均バッチ燃焼度 $\sim 33\text{GW}\cdot\text{d}/\text{tU}$ (最大アセンブリ燃焼度 $\sim 36\text{GW}\cdot\text{d}/\text{tU}$ 、燃料棒平均は $\sim 41.5\text{GW}\cdot\text{d}/\text{tU}$)、3 年サイクルで設計されている。多くの原子力発電所では 4 年サイクル、平均バッチ燃焼度 $\sim 41\text{--}43\text{GW}\cdot\text{d}/\text{tU}$ (最大アセンブリ燃焼度 $\sim 47\text{GW}\cdot\text{d}/\text{tU}$ 、燃料棒平均 $\sim 51\text{GW}\cdot\text{d}/\text{tU}$)で核燃料を利用している。4 年と 5 年の

複合サイクルの核燃料が Kola 原子力発電所で試験されており、その最大燃焼度は～49GW・d/t U、燃料棒平均は～61GW・d/t U そして燃料ペレットでの最大値は～67GW・d/t Uである。

VVER-1000 は、平均バッチ燃焼度～29GW・d/t U(最大アセンブリ燃焼度～36GW・d/t U、燃料棒平均は～40GW・d/t U)2 年サイクルで設計されている。VVER-1000 型の原子力発電所の大半ではすでに 3 年サイクル、平均バッチ燃焼度～44GW・d/tU(最大アセンブリ燃焼度～49GW・d/t U、燃料棒の局所的な最大値は～60GW・d/t U)で利用されている。

VVER-440 型の 5～6 年サイクルと VVER-1000 型の 4 年運転の可能性が検討されている。この実現には、燃料棒の局所的な燃焼度最大値が 65GW・dt/U を超える設計が求められる[3.4-11]。

3) 貯蔵方式・容器

これまで湿式貯蔵が主な貯蔵方式であったが、近年安全性と経済性の観点から、乾式貯蔵方式が採用される傾向にある。原子力発電所で発生した使用済燃料は最低 3 年間、除熱と線量低減のため発電所サイトのプールで保管される。高燃焼度の燃料ほど、移送ができる状態になるまで時間を要する。現在、RBMK と VVER-1000 の原子力発電所の使用済燃料は保管が原則であり、セレノゴルスクの鉱業化学コンビナート(MCC)での大規模な再処理が開始(2022 年予定)されるまでに、貯蔵中の使用済燃料は約 40,000 トンに達すると予想されている。2016 年 8 月に発表された 2020 年までの使用済燃料の管理に関する新プログラムでは、使用済燃料の再処理はマヤクの MT-1、保管は鉱業化学コンビナート(MCC)に委託されている。

原子力発電所の湿式貯蔵施設及び再処理施設は、規制要件を満たすため、以下の基本設計、技術が用いられている[3.4-12]。

- ・ 安全な放射線遮蔽のため、燃料集合体は十分な水中に配置される
- ・ プールの冷却・浄化、基準水位の保持、補充と排出、換気、放射量操作のための装置がプールに備え付けられている
- ・ プールの内面はステンレス鋼で裏打ちされている
- ・ プール水が近隣の部屋や環境に放出されるのを防ぐため、プール下部からのリークは制御され保持される
- ・ 破損した燃料棒を含む燃料集合体は堅牢なキャニスタに保管される
- ・ 貯蔵棟の内外で放射線量の測定が行われている

なお、マヤク生産合同の再処理工場 RT-1 から排出されるガラス化された廃液は、容量 200 リットルのキャニスタ(直径 575mm、高さ 990mm)に詰められる。

4) 処分場の方針

高レベル放射性廃棄物の最終処分場に関しては、コラ半島の花崗岩地質の地域でサイト選定が進行中である。使用済燃料処分場としてチタ州クラスノカメンスク、深地層処分場のサイトとしてクラスノヤルスク州ニジニカンスキーの岩石地帯等が提案されているものの、まだ決定していない。先述した通り、放射性廃棄物発生者からの資金は、特別基金としてロスアトム銀行口座に積み立てられている。2015 年までに設計・地下研究所設置、2025 年までに建設決定、2035 年までに処分場完成の予定である[3.4-13]。

5) 海外再処理委託・受託

セレズノゴルスクの鉱業化学コンビナート(MCC)では、再処理パイロット実証センター(PDC、5 トン/年)が 2016 年から稼働している。将来的には PDC の技術を活用した最新版の RT-2(800 トン/年)の 2025 年の完成を目指している。RT-2 は VVER-1000 だけでなく、RBMK の使用済燃料も再処理できる。ロシアは、これらの貯蔵施設や再処理施設を、海外の原子炉顧客向けの利用にも供する考えである[3.4-10]。

1990 年代でほとんど打ち切られているが、諸外国(アルメニア、ブルガリア、チェコスロバキア、フィンランド、ドイツ、ハンガリー、ウクライナ等)から返送された使用済燃料を受け入れて再処理を実施してきた。また、加工した核燃料を他国にリースし、使用済燃料を回収する燃料リースという仕組みを提唱しており、インドやイランと燃料リースの契約がある。

ロシアでは原子力発電所の輸出に際し、当該国の使用済燃料処理をロシア側で請け負うサービスを提供している。このサービスを利用すると、利用国は使用済燃料処理に必要な施設建設等の検討が不要になる、という利点がある。またロシアでは、諸外国に向けて低濃縮ウラン燃料バンクを IAEA 管轄のもと管理している。これによりロシア国内の政治的情勢をうけることなく、新燃料の供給が可能である。なお、それぞれの相手国との交渉は TENEX が担っている。各国のニーズにあったサービスを提供している。

6) 使用済燃料の再処理に係る方策

ロシア国内における 2013 年時点での使用済燃料の年間発生量は約 880 トンであり、その内訳は、RBMK-1000 炉から 550 トン、VVER-1000 炉(加圧水型原子炉)から 230 トン、その他(VVER-440(加圧水型原子炉)、BN-600 炉(ナトリウム冷却高速炉)、AMB/EGP-6(小型黒鉛減速炉)、研究炉(30 基以上)、潜水艦や砕氷船)から 100 トンとなっている[3.4-14]。多くは主に発電所サイト内で貯蔵されるが、一部は集中貯蔵施設や再処理工場に輸送されて、貯蔵・再処理される。

加えて 2021 年時点においてロシア国内の使用済燃料発生量は 905.12 トンであり、同年に再処理された使用済燃料は 81.88 トンであったとロスアトムより発表されているが、発生量の内訳は公表されていない。

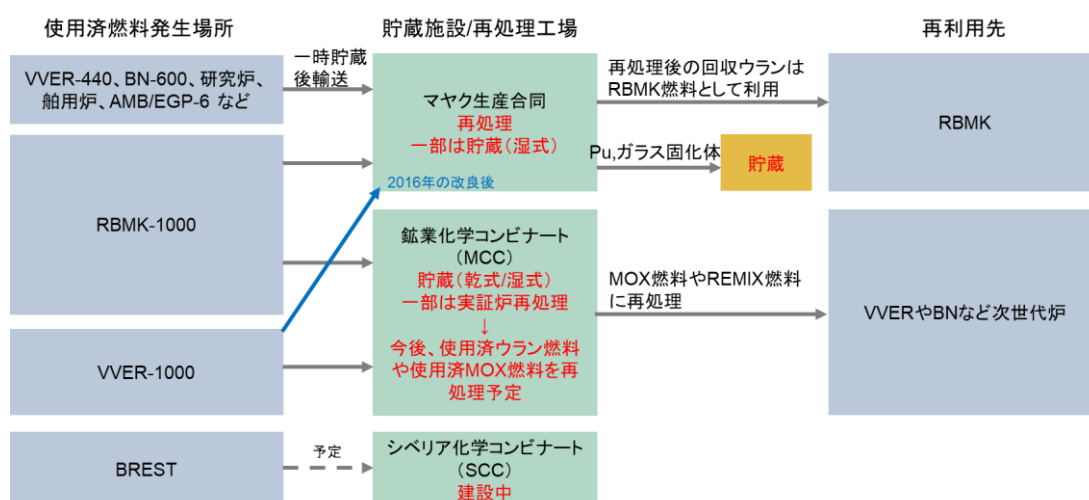
マヤク生産合同の再処理工場 RT-1 は VVER-440、BN-350、BN-600、研究炉、

AMB/EGP-6(小型の RBMK)、原子力破船や原子力潜水艦で使用している輸送用原子炉、プルトニウム生産炉の使用済燃料や RBMK-1000 の破損燃料等を再処理する多目的炉である。2016 年に完了した施設改良により、前述に加えて VVER-1000 で発生した使用済燃料の受け入れも可能となり、同年ロストフ原子力発電所(VVER-1000)の使用済燃料を、2017 年にはバラコボ原子力発電所(VVER-1000)の使用済燃料の再処理を開始している。2015 年に RT-1 で再処理された使用済燃料は 230 トン(2014 年から 35%増)であり、数年で RBMK-1000 の使用済燃料に対応し、処理量も許容容量の 400tHM/年に達すると想定されている。なお、RT-1 での再処理により回収されたウランは、RBMK の燃料として再利用される。

マヤク生産合同での使用済燃料の受け入れ貯蔵能力は 6,000 トンから 9,000 トンに増加しているが、鉍業化学コンビナート(MCC)と比較して貯蔵容量が少なく使用済燃料は通常かなり迅速に処理される。

なお、VVER-1000 及び RBMK-1000 からの使用済燃料の多くは、鉍業化学コンビナート(MCC)の中間貯蔵施設で保管されている。また、2025 年完成予定の再処理工場 RT-2 にて、使用済 MOX 燃料を再処理し、MOX 燃料や REMIX 燃料(ウランとプルトニウム酸化物の再生混合物、後述)に再処理する計画である。

REMIX 燃料は、VVER 燃料の再処理で回収するウランとプルトニウムを分離しない形の混合物質のまま、17%以下の低濃縮ウランと混ぜることによって製造される。低濃縮ウランは重量として全体の 20%を占める。これによって Pu239 が約 1%、U235 が約 4%の燃料が完成し、4 年間の運転で 5 万 MWD/t の燃焼度を維持できる。使用済 REMIX 燃料には Pu239 が 2%、U235 が 1%含有しており、冷却・再処理後に低濃縮ウランと混ぜることで何度でもリサイクルできる。REMIX 燃料サイクルは、回収ウランの蓄積や分離プルトニウムの増加を防ぐ特徴もある。デミトロフグラードの原子炉科学研究所(RIAR)の MIR 研究炉でも試験が行われており、2020 年代半ばでの商業利用が計画されている。



使用済 MOX 燃料の再処理・リサイクルは、ロシアが目指すクローズドサイクルにおいて不可欠であるが、この実現は、高速炉での MOX 燃料利用が可能となることがカギと考えられる。鈹業化学コンビナート(MCC)にて進められてきた実証炉 BN-800 用の MOX 燃料の製造が完了し 2021 年 1 月から BN-800 で燃料が取り換えられ、2022 年には全炉心がフル MOX 燃料に変わった。

また、後継機の商業炉 BN-1200 はベロヤルスク 5 号機(2025 年頃の着工予定)および南ウラル 1 号機として開発が継続中である。

(2) 回収・劣化 U 及び Pu の利用方針・実績

1) 回収

生産合同マヤクの再処理工場 RT-1 は、1971 年に操業を開始して以来、2012 年までに、5000t 程度の使用済燃料処理実績を有する[3.4-15]。

回収ウランについては、RBMK 燃料製造工場で主に利用され、RBMK 用の新燃料として年間約 200t の回収ウランが利用されている。RBMK の燃料の 50%まで回収ウラン装荷が許可されており、実績比率は約 40~50%である(2004 年時点)。なお、二酸化ネプツニウムは Pu238 同位体の生成に利用され、専用のパッケージに入れられた二酸化プルトニウムは貯蔵場所に移される。RBMK 炉用の回収濃縮ウラン燃料の組み立ては、燃料加工施設 OAO MSZ(OAO Mashinostroitelny Zavod にて行われている。

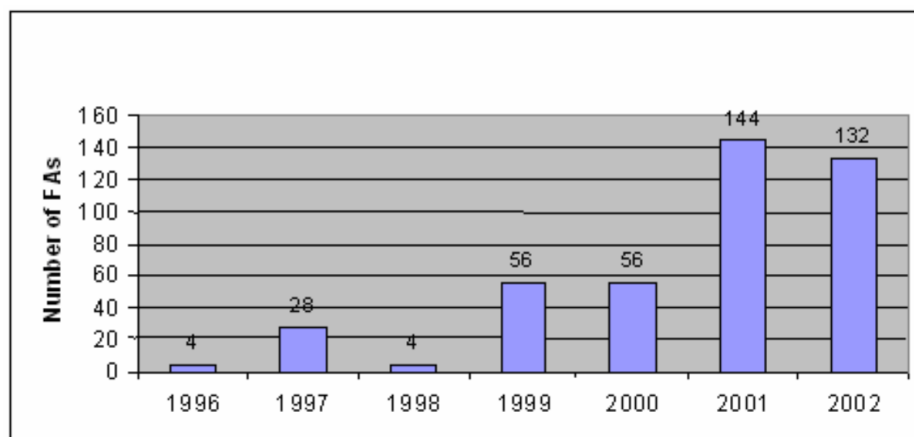


図 3.4-3 OAO MSZ での回収ウランの製造実績(縦軸は燃料集合体数)

また、ドイツ、オランダ、イギリス等、海外からの回収ウランを再濃縮した実績も有する[3.4-16]。

プルトニウムについては、高速増殖炉等に利用することを前提としている。REMIX 燃料

の試験装荷を始めており、試験燃料集合体 3 体がバラコボ原発 3 号機に装荷されている（2016 年 6 月）。今後 2 サイクル、約 3 年間運転後、照射試験が行われる。ロスアトムによると、バラコ原子力発電所では、VVER に 6 体の REMIX 燃料が装荷されている。REMIX 燃料は貯蔵施設やオンサイトの使用済燃料がもう少しで満杯になることに対応する、魅力的な選択肢ということであった。REMIX 燃料の照射後の物質を燃焼する熔融塩炉のパイロットプラントを建設する計画も決まっており、2030 年に初臨界の計画である。

劣化ウランについては、大部分が将来の高速炉用燃料資源として貯蔵されており、現在までのところ積極的な利用計画はない。

2) プルトニウムマネジメント

ロシアでは、計画中の高速炉システムに必要なプルトニウムを再処理により十分に供給できないことが予想されており、現在国内では、増殖率ができるだけ高い炉心設計が検討されている。

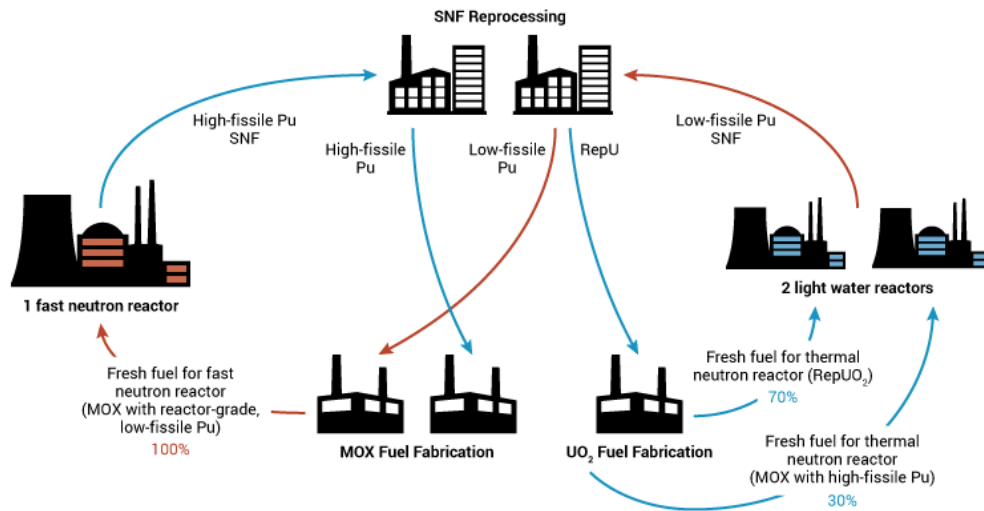
ロシアでは現在総エネルギー供給に対する原子力の寄与は比較的小さいが、今後原子力発電容量の大幅かつ急速な増加が計画されている。計画中の高速炉システムに必要なプルトニウムを使用済燃料の再処理で十分に供給できないと予想されるため、増殖率ができるだけ高い炉心設計を長期的に検討している。なお、世界の原子力の状況を考慮に入れることによって、このようなプルトニウム不足は、多国間アプローチによって緩和することができると考えられている[3,4-17]。

3) マルチリサイクル

ロスアトムは、2 種類の MOX 燃料、及び熱中性子炉と高速炉の両炉を活用したクローズドサイクルを提案し、2027 年頃には BN-1200 を用いてシステムを組み立てたいとしている。

マルチリサイクルの概念は様々な研究がされており、その他にも、集中型核燃料サイクルという、熱中性子炉 VVER と高速炉 BN による集中型核燃料サイクルも提唱されている。

Balanced Arrangement for Dual-Component Nuclear Power System



Source: Rosatom

図 3.4-4 2 種類の MOX 燃料、及び熱中性子炉と高速炉の両炉を活用したクローズドサイクル

この燃料サイクルでは、高速炉使用済燃料から回収した核分裂性プルトニウムの割合が高いプルトニウム（「高核分裂性プルトニウム」）を熱中性子炉に供給し、熱中性子炉使用済燃料から回収した核分裂性プルトニウムの割合が低いプルトニウム（「低核分裂性プルトニウム」）を高速炉に供給し、リサイクルする。

具体的には、熱中性子炉での発電により発生する使用済燃料を再処理して回収されるプルトニウム（使用済ウラン燃料由来か使用済 MOX 燃料由来かに関係なく、回収されるプルトニウムのうち約 1/3 は「低核分裂性プルトニウム」）が主要なプルトニウム源となる。この低核分裂性プルトニウムを劣化ウランと混合し、増殖比 1.2 以上の高速増殖炉用の MOX 燃料として使用することで、「高核分裂性プルトニウム」を含む使用済燃料が発生する。これを再処理して回収される「高核分裂性プルトニウム」は、熱中性子炉用の MOX 燃料に使用される。

この燃料サイクルにおける熱中性子炉の燃料は、上述の MOX 燃料または高濃縮再処理ウラン（U235 が 17%濃縮）であり、それぞれ 3 対 7 の割合で使用される。また、燃料需給量を鑑みると、高速増殖炉 1 基の運転は、熱中性子炉 2 基の運転とバランスする [3.4-14]。

マルチリサイクルの概念は様々な研究がされており、例えば減損ウランや余剰プルトニウムを使った、熱中性子炉 VVER と高速炉 BN による集中型核燃料サイクルも提唱されている [3.4-18]。

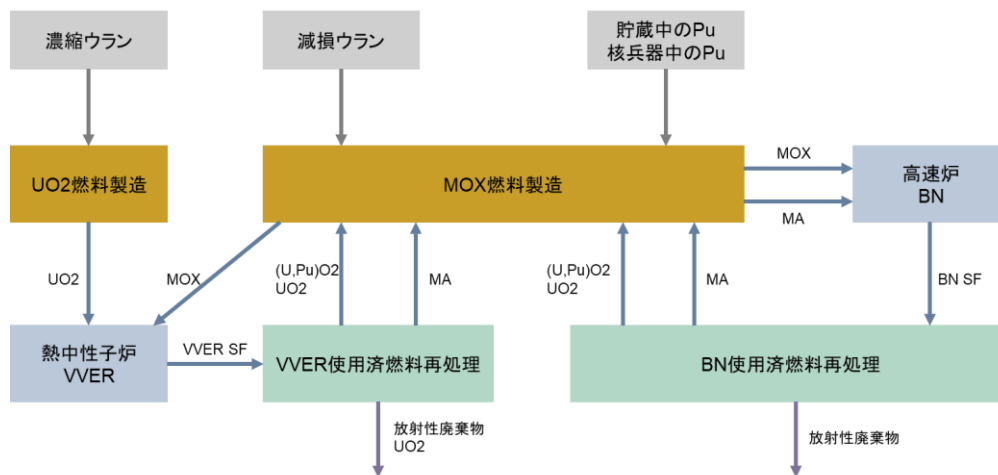


図 3.4-5 集中型核燃料サイクル

この集中型核燃料サイクルはポイントとして、下記が挙げられている。

- ・ 事実上無制限に存在する使用済燃料と天然ウランを利用可能
- ・ プルトニウムの蓄積を回避可能
- ・ リサイクルにより使用済燃料の削減と、使用済燃料管理コストの節約
- ・ MA 削減によるガラス固化体発生量の減少
- ・ 高速炉で増殖したプルトニウム（核分裂性物質の割合が比較的高い）を熱中性子炉で利用可能
- ・ 海外へ輸出した熱中性子炉 VVER の使用済燃料の回収や新燃料の輸出が可能

3.4.4 原子力・核燃料サイクル関連施設、事業主体

(1) ウラン採鉱・精錬、転換施設

ウラン採鉱・製錬は転換、濃縮及び燃料加工と合わせ、ロシア国内で調達されている。

ロシア国内においてウラン採鉱・製錬、転換、濃縮及び燃料加工が行われ、旧ソ連時代に東欧諸国等に輸出した VVER にも燃料を供給している。

ウラン採鉱・精錬施設についてはプリアルグンスク(1968 年-,3500tU/y)、ダルル(2002 年-,800tU/y)、ヒアグダ(2011 年-,1800tU/y)にある施設が操業中、エルコン、ルーンナエでも施設建設が計画されている。以下一例としてダルルについて記載する。

施設		
	施設名称	JSC Dalur
	施設概要	ウラン採掘
	技術	-
	能力	800tU/y
	稼働状況	稼働中
	稼働実績	2002 年～
	役務取引	-
	取組方針	
事業主体		
	事業者名称	JSC Dalur
	事業者概要	ロスアトムの鉱業部門 ARMZ の子会社 TVEL の傘下
	資本関係 経営状況	TVEL、JSVC、Urangeo State Company に より設立
	政府との関係	ROSATOM 傘下
	今後の方針・戦略	ROSATOM 準拠

ロシアは再処理のために他の国から使用済燃料を輸入することを認めており、通常は、再処理された材料及び副産物の廃棄物は原産国に返還される。また、研究炉及びその他の非動力炉で発生した使用済燃料も再処理のためロシアへ返還してきた例が数か国ある。

(2) 濃縮施設

ウラン転換、濃縮及び燃料加工は採鉱・製錬と共にロシア国内で調達されている。

事業主体はすべてロスアトム鉱業部門 ARMZ の子会社である TVEL であり、ロシアが設計した全ての原子炉用のウラン燃料は TVEL により製造されている。

TVELは世界で消費される濃縮ウラン製品の1/3以上を生産している。TVEL生産製品の海外輸送はTENEXによって行われている。

現在ロシア国内で稼働している濃縮施設は以下の4施設である。

表 3.4-5 ロシアの濃縮施設

事業者	施設名	所在地	状態 操業期間	能力(tSWU/y)
TVEL	ウラル電気化学コンビナート	ノボウラルスク	運用中 1949-	10,000
	シベリア化学コンビナート(SCC)	セベルスク	運用中 1953-	4,000
	電気化学プラント	セレノゴルスク	運用中 1964-	8,700
	電解化学コンビナート	アンガルスク	運用中 1954-	2,600

※世界原子力協会(WNA)、原子力年鑑 2020 をもとに作成

処理能力最大のウラル電気化学コンビナートに関し以下にまとめる[3.4-19]。

施設	
施設名称	ウラル電気化学コンビナート (UEIP)
施設概要	UOX 燃料に用いられる濃縮ウランの製造
技術	ガス拡散法(1949)、遠心分離法 (1962-)
能力	10000 MTSWU/year
稼働状況	稼働中
稼働実績	1949 年～
役務取引	
取組方針	
事業主体	
事業者名称	TVEL
事業者概要	ロスアトムの鉱業部門 ARMZ の子会社
資本関係	ロスアトムの子会社
経営状況	
政府との関係	ロスアトム傘下
今後の方針・戦略	ロスアトム準拠

(3) 燃料加工施設

ロシア国内で燃料加工は自給されている。内訳としてウラン燃料は TVEL が生産し MOX 燃料はロスアトム傘下の個別事業者が担当している。

表 3.4-6 ロシアの燃料加工施設

分類	事業者	施設名	所在地	状態 操業期間	燃料の種類	能力 (tHM/y)
ウラン 燃料	TVEL	機械建設工場(エレマッシュ)	エレクトロス タリ	運用中 1953-	VVER 他	1,800
				運用中 1953-	RBMK	460
				運用中 1953-	ペレット	1,450
		化学コンセント レート工場	ノボシビルス ク	運用中 1979-	VVER-1000 他	1,200
				運用中 1979-	ペレット	660
MOX 燃 料	生産合同マヤク	Packet 施設	アジョルスク	運用中 1993-	MOX ペレッ ト	0.5
				運用中 2018-	混合窒化物 燃料	14
	シベリア化学コンビ ナート(SCC)	MOX 工場	セベルスク	運用予定 2017-	MOX	—
				運用予定 2017or2018-	窒化物燃料	—
	原子炉科学研究所 (RIAR)	振動充填燃料製 造施設	ディミトロフ グラード	運用中 1981-	MOX(振動充 填法)	1
	鉍業化学コンビナート MCC	MOX 工場	ゼレズノゴル スク	運用中 2015-	MOX(ペレッ ト法)	60

※世界原子力協会(WNA)、原子力年鑑 2020 をもとに作成

最大処理能力の UOX 燃料製造工場は以下である。

施設	
施設名称	機械建設工場 (Machine Building Plant)
施設概要	UOX 燃料の製造
技術	—
能力	VVER 他 : 1, 800 (tHM/year) RBMK : 460 (tHM/year) ペレット : 1, 450 (tHM/year)
稼働状況	1953～
稼働実績	稼働中
役務取引 取組方針	研究用および船舶用原子炉用の燃料等 も製造
事業主体	
事業者名称	JSC MSZ (elemash)
事業者概要	TVEL 傘下、国内最大の工業企業
資本関係 経営状況	TVEL 傘下企業
政府との関係	ロスアトム傘下の TVEL 傘下
今後の方針・戦略	ロスアトムに準拠

確認されている、最大処理能力の MOX 燃料工場 MCC のプラントは以下である。

施設	
施設名称	MOX fuel fabrication plant
施設概要	MOX 燃料の製造
技術	ペレット法
能力	60tHM（400elements）/year
稼働状況	2015～
稼働実績	稼働中
役務取引 取組方針	BN-800 向け供給のため 2010 年に稼働に 向け決定
事業主体	
事業者名称	MCC（Mining and Chemical Combine）
事業者概要	ロスアトムの子会社
資本関係 経営状況	ロスアトム管理の FSUE（単一企業）
政府との関係	ロスアトム傘下
今後の方針・戦略	ロスアトムに準拠

(4) 使用済燃料中間貯蔵施設

ロシア国内の使用済燃料の多くは、各発電所プールでの冷却期間を経て、セレノゴルスクの鉱業化学コンビナート(MCC)にて乾式及び湿式で貯蔵されている。鉱業化学コンビナート(MCC)での貯蔵方式と貯蔵容量を次表にまとめる。

表 3.4-7 鉱業化学コンビナート(MCC)における貯蔵施設の貯蔵方式

貯蔵方式	燃料タイプ	貯蔵能力 (tHM)	備考
湿式	VVER-1000	10,500	1985 年に受け入れ開始した大型プール貯蔵施設 RT-2 に併設 受け入れ条件: 燃焼度 30G Wd/t 以上、核分裂性物質の濃縮度 2.6%以下、プルトニウムの濃度 20%以下
乾式	VVER-1000	6,900	経済性・安全性の観点から、上記施設から移行予定
乾式	RBMK-1000	9,200	使用済燃料乾式貯蔵施設(INF DSF2)の第一段階 2011 年末操業開始
乾式	VVER-1000 / RBMK-1000	16,000	使用済燃料乾式貯蔵施設(INF DSF2)の第二段階 —

前項 MOX 燃料製造にて記載した MCC と同設備内である。

現在の湿式貯蔵施設は 2026 年に廃止される予定である。また、乾式貯蔵の貯蔵容量を 37,000 トン(26,510 トン RBMK、11,275 トン VVER)以上に増やす計画がある[3.4-4]。

過年度の TENEX 社へのヒアリングによると、乾式貯蔵に関する具体的な規制要件は、法規のレベルで

はなく、その下のレベル(関係省庁の通達)で規制されている。使用済燃料の貯蔵に関しては、原子力利用法、放射性廃棄物管理法、環境保護法で規制されている。

(5) 使用済燃料の再処理・ガラス固化施設

使用済 MOX 燃料を再処理した実績は確認できない。

2025 年完成予定の再処理工場 RT-2 にて、使用済 MOX 燃料を再処理し、MOX 燃料や REMIX 燃料(ウランとプルトニウム酸化物の再生混合物)に再処理する計画がある。

なお、使用済 MOX は使用済 UO_2 と比べて発熱量や放射線量が高いが、通常の PUREX の技術の範囲内で、硝酸濃度を高くしたり、希釈したり、溶解時間を長くすることによって十分に解決できていると考えられている。問題はプルトニウムの扱い方が最大の課題であり、具体的には、軽水炉で 2 回以上プルトニウムを含む燃料を照射すると、同位体組成が変わる影響が生じる。使用済 MOX 燃料の再処理の際は希釈のため、高速炉用 MOX については、濃縮工場から出てくる劣化ウラン U-235 (0.1%～0.2%)を、REMIX 燃料では、使用済 UO_2 燃料の廃液を用いている。

表 3.4-8 ロシアにおける再処理施設

事業者	施設名	所在地	状態 操業期間	能力 (tHM/y)	備考
マヤク生産合同 (マヤク化学コンビナート)	RT-1	アゾールスク	運用中 1971-	400	VVER-440、研究炉、高速炉燃料対象 回収ウランは RBMK の燃料として再利用
鉱業化学コンビナート(MCC)	パイロット 実証炉 (PDC)	ゼレズノゴル スク	運用中 2015-	100	2015 年に 10tHM/y で 操業開始 2020 年には 250tHM/y に拡大予定
	RT-2		建設中 2025 年 完成予定	700	PDC の技術を活用 VVER-1000、RBMK 対象
シベリア化学コンビナート SCC	窒化物燃料 再処理施設	セベルスク	建設中 2023 年 操業目標	—	鉛冷却高速炉 BREST 用

※世界原子力協会 (WNA)、原子力年鑑 2020 をもとに作成

運用中施設のうち最大生産能力であるマヤク化学コンビナートに関しては、以下のようにまとめられる。

施設		
	施設名称	マヤク
	施設概要	核燃料再処理施設
	技術	PUREX 法
	能力	400tHM/year
	稼働状況	1971～
	稼働実績	稼働中

	役務取引 取組方針	コラ、ノヴォヴォロネジ、ペロヤルスク にサービス提供している
事業主体		
	事業者名称	Mayak Production Association
	事業者概要	ロスアトム子会社
	資本関係 経営状況	ロスアトム子会社
	政府との関係	ロスアトム傘下
	今後の方針・戦略	ロスアトムに準拠

(6) 使用済燃料等の処分施設

1) 直接処分

ロシアでは、核燃料を再処理し、分離された物質をリサイクルする方針を採用している(直接処分の方針はとっていない)。

2) ガラス固化体処分

マヤク生産合同の再処理工場 RT-1 での燃料集合体の再処理により発生する中～高レベル廃液(HLW)の管理方法により、濃縮 HLW を 500L/h で EP-500 セラミック溶融炉によりガラス化する。アルモリン酸塩放射性ガラスは、直接蒸発-焼成-ガラス化技術を用いて製造される。ガラス化された廃棄物は鋼製キャニスタに入れられ、乾式ヴォールト型貯蔵施設で貯蔵されている。高レベル廃棄物分別のための準工業施設は、マヤク再処理工場 RT-1 で 1996 年に世界に先駆けて稼働している[3.4-20]。

3) 放射性廃棄物(TRU 廃棄物、ウラン廃棄物等の低レベル廃棄物)の処理・処分

低・中レベル廃棄物の処分はノオ・ラオの管轄で、ロシアの 7 連邦区域ごとに 1 か所の処分場建設を計画しており、スベルドロフスク州のノボウラルスクやトムスク州のセベルスクでは、処分場の第 1 段階が操業開始した。

なお、医療・産業放射性廃棄物(RI・放射線利用廃棄物)については(株)ラドンが担当しており、16 か所放射性廃棄物貯蔵施設を有する。更に、地表処分施設を計画中である[3.4-10]。

3.4.5 ウクライナ侵攻の役務取引動向等への影響

(1) ウクライナ侵攻前の役務取引の概況

ロシアの主要政策と経済目標の一つには原子力関連製品やサービスの輸出が位置づけられ、2017 年までに 20 基を超える原子炉の輸出が決定または計画されている。また、海外からの注文は 1,330

億ドルに達しており、ロシアは原子炉輸出では世界首位、2020 年時点で世界市場の 67%を占める。

(2) ウクライナ侵攻の役務取引動向等への影響

1) ウクライナ侵攻を踏まえた諸外国の対応

スウェーデンの大手電力会社であるヴァッテンフォール社は 2022 年 2 月、ロシアによるウクライナ侵攻を懸念した上でロシアからの燃料輸入を停止する声明を発表した[3.4-7]。同社は同発表の中で、燃料供給の独立性と安全性のために複数国からの複数のサプライヤと取引することを調達戦略として改めて挙げている。

フィンランドの原子力企業であるフェンノボイマ社は 2022 年 5 月、フィンランド国内のハンヒキビ原子力発電所におけるロスアトムとのプラント納入契約を解除した。理由として同社は、ロスアトム傘下の建設業者である RAOS 社の大幅スケジュール遅延に加え、ロシアのウクライナ侵攻による経済的リスクの高まりを挙げている。それに対しロスアトムは同年 12 月、契約解除は違法であると主張している[3.4-8]。

チェコ電力(CEZ)は 2022 年 11 月、ロシアの大手重工業会社である OMZ 社から、子会社である SKODA JS 社の買収を完了した。SKODA JS 社はチェコの原子力機器サプライヤであり 2004 年よりロシア OMZ 社の子会社となっていたが、ウクライナ情勢を踏まえた経済制裁等による原子力サプライチェーン維持へのリスクを解消するため、同年 5 月にチェコ電力(CEZ)社より買収が表明されていた[3.4-9]。

2) ロシアの対外的な声明等

ウクライナ侵攻による対外的な原子力輸出の方策について、輸出重視の現状より何らかの方向転換がなされる旨の発信はされておらず、引き続きパッケージ化された BOO(Build/Own/Operate)方式による原子炉輸出の方策がとられると考えられる。

また、ウクライナ侵攻による影響が予想された 2022 年の輸出状況に関し、地元紙イズベスチヤによるとロスアトム事務局長アレクセイ・リハチョフ氏は輸出額の 2021 年比 15%増加を見込んでいると報じられた。同紙においてリハチョフ氏は、現在の地政学的状況を踏まえても 10 年先まで海外受注高は安定的に推移すると見込んでいるとも発言している。輸出額増加について、要因としてまず既存の契約の継続に加え濃縮ウラン燃料の供給、変換サービスによる売上が挙げられ、加えて現在 12 カ国 23 基の原子炉建設プロジェクトが進行中であることが同紙で述べられた。

フィンランドのハンヒキビ原子力発電所におけるプラント納入契約の解除についてロスアトムは 2022 年 12 月、契約解除が一方的なものであり違法であるとの主張を行っているが、2023 年 2 月時点で紛争は解決していない。

3.4.6 原子力・核燃料サイクル関連の研究開発動向

(1) ロシアにおける核燃料サイクル関連の研究開発方針・意図

ロシアでは、早くからクローズド燃料サイクルの完結を政策に掲げ、様々な原子力関連法規が制定され、高速炉や核燃料サイクル技術の研究開発を積極的に推進している。クローズドサイクルの実現により、資源の確保と放射性廃棄物の量と毒性の最小化が目指されている。

クローズドサイクル路線の維持により、国内の産業基盤・雇用の維持と放射化学という学問としての価値創出も期待されている。加えて、原子力関連製品やサービスの輸出の拡大が目指されている。

連邦目標プログラムの下、ロスアトムは 2011 年より「ブレークスルー(Proryv)プロジェクト」を開始している。目標は、「固有安全性を有する高速炉とクローズド燃料サイクル施設を 2025 年までに開発すること」であり、要求事項として以下の 5 項目を示している。

- ・ 地域住民の退避を必要とするシベリアアクシデントの可能性の排除
- ・ ウラン資源の完全利用
- ・ 放射性廃棄物が放射能的に天然ウランと等価になるような処分法開発の進歩(MA の核変換等)
- ・ 核不拡散体制の技術面での強化
- ・ 発電単価で他の発電技術と競合できる経済性

また、上記の目標達成のため、下記の三点を進めるとしている[3.4-3]。

- ・ 混合窒化物燃料の研究開発、燃料製造・再処理・廃棄物処理施設の設計、建設、運転
- ・ 鉛冷却高速炉(BREST-OD-300)の研究開発、設計、建設、運転
- ・ ナトリウム冷却高速炉(BN-1200)の研究開発、設計

ロシアでは、熱中性子炉から高速炉を含む原子炉、再処理、MOX 等燃料製造に関して、連邦目標プログラム等のもと、安全性、経済性、効率性向上に係る研究開発が体系的に行われている。特に、より経済性、効率性の高い新型炉導入や再利用を前提とした新燃料導入計画に対応する形で、再処理や燃料製造に関する研究開発が行われている。

過年度のロスアトムへのヒアリングによると、ロシアでは発電所や使用済燃料処分施設等を全て同一敷地内に建設し、当該サイト内で燃料サイクルを完結させる研究が進められている。これによりサイト内へ供給が必要なものは天然ウランのみとなり、等量の核分裂生成物を運び出すという構想である。本システムではウラン濃縮も不要、プルトニウム単体の回収や放射性物質の輸送も不要となる。すでに原型炉を建設するための敷地が決まっている。場所はシベリア、トムスクの近くであり、2024 年に燃料の製造計画があり、2026 年には 300MW 原子炉の初臨界、2029 年に再処理施設の運開を目指している。最終的には海外への技術輸出も考えている。

(2) 再処理

再処理プロセスに係る研究開発として、次のような研究が行われている。

- ・ 高速実験炉 BR-10 及び BOR-60 の高燃焼度燃料(100MWd/kg)を用いた湿式再処理 [3.4-21]

- ・ 乾式再処理法による BOR-60 及び高速増殖原型炉 BN-350 で照射した高速炉 MOX 燃料の再処理試験 [3.4-22]
- ・ プラズマ化学(クロピン研究所)またはアンモニア共沈法(ボフヴァル研究所)による硝酸生成物の UO_2 及び PuO_2 への直接変換の研究 [3.4-23]
- ・ クロピン・ラジウム研究所において、PUREX 法を最適化するための研究開発[3.4-23]
- ・ ホット試験も可能なパイロット実証炉(PDC、2015 年操業、鉍業化学コンビナート(MCC))にて、再処理能力を拡大する実証[3.4-23]

過年度の TENEX 社へのヒアリングによると、ロシアでは使用済 MOX 燃料も再処理する。使用済 MOX 燃料の再処理の際に、最も注力しているのは、プルトニウムの取扱いに関する研究開発である。既に、研究開発は進んでおり、未解決の問題はあまりないというところまで進んでいる。

使用済 MOX は使用済 UO_2 と比べて発熱量や放射線量が高いが、通常の PUREX の技術の範囲内で、硝酸濃度を高くしたり、希釈したり、溶解時間を長くすることによって十分に解決できている。問題はプルトニウムの扱い方が最大の課題であり、具体的には、軽水炉で 2 回以上プルトニウムを含む燃料を照射すると、同位体組成が変わる影響が生じる。使用済 MOX 燃料の再処理の際は希釈のため、高速炉用 MOX については、濃縮工場から出てくる劣化ウラン U-235(0.1%~0.2%)を、REMIX 燃料では、使用済 UO_2 燃料の廃液を用いている。

REMIX 燃料はプルトニウムの濃度が 1%~2%であり偶数の同位体プルトニウムの蓄積量がより少ないものになるため、5 回まで使うことができる。ただ、5 回も燃焼すると、偶数の同位体元素の量が増えるため、その時点で軽水炉での制御が不可能になる。軽水炉以外のもので最終的には燃やすこととなる。したがって技術的な観点から見て、2 回以上軽水炉で燃やすことは避け、高速炉で燃やすことが理想的である。一方で高速炉の数が限られるため(現在全世界で稼働している高速炉は 2 基のみ)、全ての使用済燃料を燃やすことはできず、REMIX 燃料のような技術の開発が必要となる。現在は 5 回までの REMIX 燃料利用を目指しており、2018 年度に REMIX 燃料を初装荷し、2021 年に取り出される予定である。貯蔵用のプールで冷却したのち、再処理を実施する。再処理して作った燃料は 5 回まで再利用を続ける方針である。また、原子力発電を支える核燃料政策として、2020 年までに使用済燃料の年間発生量と年間再処理量を均衡させ、2050 年までに高速炉等を用いて再処理で生じたウラン、プルトニウムを全量燃焼させる、完全なクローズドサイクルに移行する計画である[3.4-13]。したがって理論上は、利用目的のないプルトニウムを保有することはないことになっている。

(3) 廃棄物管理

1) 使用済燃料の湿式／乾式貯蔵

全ての使用済燃料は熱と放射能の崩壊を可能にするために、少なくとも 3 年間原子炉サイトに保管され、輸送の準備がされる。現在、RBMK 原子炉及び VVER-1000 原子炉からの使用済み燃料は(主に原子炉サイトで)保管されており、再処理されていない。鉍業化学コンビナート(MCC)での実質的な再処理が 2022 年頃に開始されるまでに、貯蔵中の使用済み燃料は最大約 40,000 トンに達すると予想されている。

許容貯蔵期間(50 年)、無傷燃料や欠陥燃料の乾式貯蔵の最適条件に関するフィージビリティスタディが検討されている。安全上の理由から、再処理される燃料集合体は密閉缶に収容される。貯蔵形式は、管理、再処理、最終処分等に向けて回収可能性を担保することが求められている。

2) 放射性廃棄物の処理技術

ロシア連邦の放射化学センター(ラジウム研究所、VNIINM 他)は、長寿命放射性核種の核変換(P&T)による廃棄物の減容化に向けた新しい技術開発、既存の再処理技術の改善のための研究開発活動を 2002 年から開始している[3.4-23]。

過年度の TENEX 社へのヒアリングによると、ロシア国内の放射性廃棄物の処理技術に係る研究開発は、MA の回収及び変換、その燃焼に向けての技術開発が主である。放射性廃棄物の中で放射線強度の大きな Am、Cm、Np、Cs、Sr、Tc、Mo、Zr を回収する技術の開発、及びその後に燃料成分として再利用する技術開発が始まっている。Am 含有の燃料製造や、その燃料を燃焼できる原子炉の研究開発が行われている。高速炉 BN-1200 で MA も燃焼できるよう設計されている。

3) 放射性廃棄物の減容化・有害度低減

ロシア連邦の放射化学センター(ラジウム研究所、VNIINM 他)は、2002 年より既存の再処理技術の改善のための研究開発を開始した。この研究は、廃棄物ストリームの物量を減らすこと、長寿命放射性核種管理(P&T)の新しい技術を開発することを目的としている。

過年度の TENEX 社へのヒアリングによると、次の重要な研究開発として BREST-300 があり、使用済燃料処理、REMIX 燃料の製造を同一敷地内で実施することを目指している。また、熔融塩炉にて MA を燃やす技術開発も行われている。有害度の低減及び減容については、プルトニウムをはじめ MA 等を回収しない限り、根本的には達成とはいえず、Pu、Am、Cm を回収して、核燃料として照射していない限りは、廃棄物を最終処分したことにはならないという考え方に基づいている。

3.4.7 革新炉における FE/BE 技術開発動向

(1) 革新炉開発におけるロシアの方針

ロシア(ソ連)は、原子力開発の初期から高速炉の開発を進めてきており、1969 年に実験炉 BOR-60、1973 年に原型炉 BN-350(1999 年に寿命で閉鎖)、1980 年に原型炉 BN-600 が運転を開始している。BN-600 は初期にはナトリウム漏えい・火災等、各種トラブルを経験したが、近年はほぼ順調に運転している。これらの実績を背景に、1980 年代にベロヤルスクと南ウラルに実証炉 BN-800 の着工をしたが、チェルノブイリ事故等の影響で、長らく凍結状態にあった。2000 年代に入ってベロヤルスクで建設が再開されて、BN-800 は 2014 年 6 月に初臨界を達成し、2015 年 12 月には初送電、2016 年 10 月に営業運転を開始している。同機は、2022 年 9 月に MOX 燃料での運転を開始した。また、2018 年 8 月には BN-1200 の建設工程も発表され、初号機をベロヤルスク原発 5 号機として、2021 年にも建設を決定した。2027 年に建設ライセンスを取得、2035 年の建設終了を予定している。

このほか、鉛冷却や鉛・ビスマス冷却の高速炉開発も進められている。鉛冷却高速炉は、セベルスク

のシベリア科学コンビナートに BREST-300 の建設が計画され、2025 年の運転を予定している。

2015 年にディミトロフグラードで着工した多目的高速中性子研究炉(MBIR)は IAEA の国際フォーラム INPRO の枠内で、「MBIR 国際研究センター」としても活用され、注目されている。2023 年 1 月には格納容器が設計位置に設置され、2023 年 2 月時点で建屋のドーム設置に向けて動いている [3.4-24]。

ロスアトムは、連邦目標プログラム(FTP)「Advanced Nuclear Power Technologies 2010-2020」に関連して、2 つの高速炉導入オプションを提案している。1 つ目は鉛冷却高速炉(BREST 等)による燃料サイクルの実現の提案であり、本プログラムの全予算にあたる 1,400 億ロシアルーブル(31 億ドル)を充てる計画であった。2 つ目は 2014 年までに多目的高速中性子研究炉(MBIR)の詳細設計、及び第 4 世代炉と関連する技術設計、2020 年までにその実装を目指す技術開発基盤の整備するオプションであり、本プログラムにおいてはこちらが採用されている。一方で、鉛冷却高速炉自体の開発は並行して進められている。本オプションは、連邦予算とは別により多くの資金調達ができるよう設計されている。

FTP には、高密度燃料を製造するための商業施設の建設と委託、ナトリウム冷却高速炉用燃料を製造するためのパイロット実証火力化学施設の建設の完了、及び技術試験、核融合研究も含まれており、総研究開発予算は 557 億ロシアルーブルであった。

2010 年 1 月、ロシア政府は、高速炉に基づく原子力産業向けの新技术プラットフォームをもたらすことを目的とした連邦目標プログラム(FTP2010)「2010 年から 2015 年及び 2020 年までの新世代原子力技術」(予算:1,283 億ロシアルーブル)を承認している。これは、2020 年までにロシアの原子力産業によって提供されるハイテク機器、作業、及びサービスの輸出を 70%増加させること、及び 2020 年から 2030 年にかけて建設するロシア連邦内向けの新しい高速中性子炉を実用化することが目的である。

FTP2010 は連邦予算から 2020 年までに 1,100 億ロシアルーブルが見込まれていた。ここには、高速炉向けの 600 億ロシアルーブルや、3 タイプ研究開発(BREST、SVBR(現在は廃止)、ナトリウム冷却型)への資金割り当ても含まれている。

2018 年 3 月、FTP2010 はエネルギー需要予測の減少を考慮して修正されている。現在は、窒化物燃料製造モジュールの構築と、ロスアトムが 2022 年までに稼働を開始する予定の燃料再製造施設の第 1 段階に集中する予定である。

ロスアトムによると、ナトリウム冷却炉に関する研究開発のほとんどは終了しており、すでに実証炉の運転を開始している。この分野で進める必要がある研究開発要素は、MOX 燃料利用時の安全性の検証程度であるという。

FTP2010 の主な指標と支出分野を表 3.4-9 と表 3.4-10 に示す[3.4-25]。

表 3.4-9 FTP2010 の目標指数と指標

目標指数と指標	単位	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
目標指数												
プログラムの施策実施により作られた革新的製品およびサービスが当部門全体の製品およびサービス販売に占める比重	%	0,4	0,6	0,8	1,1	1,5	2,5	3,1	4,2	5,6	7,6	10
核燃料サイクルにおける天然ウラン使用効率向上	%	-	-	-	-	4	5	10,7	15,9	20,6	25,5	31,8
原子力発電所出力単位当たりの貯蔵される使用済み燃料と放射性廃棄物の量の削減	%	-	0,8	4,4	8	10,9	13,2	15,3	19,3	22,7	27,3	31,1
指標												
世界的水準に匹敵するあるいはそれを凌駕する原子力技術の開発数（累計で）	数量	2	3	7	11	12	12	15	15	18	20	24
発明に対する特許申請と登録された技術ソリューションの数（100人の研究者と開発者あたり年間）	数量	6,4	6,7	7,3	7,8	8,5	9	9,5	10	10,5	11,5	12
原子力利用分野での世界的に著名な出版物での発表の数（100人の研究者と開発者あたり年間）	数量	5,9	6,6	7,8	8,5	9	10	11	12	13	14	15

表 3.4-10 FTP の支出分野と資金源

支出分野と資金源	2010-2020	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
計	108244,2	4509,78	8038,6	15037,6	15567,8	14798,6	9823,4	14831,8	13091,3	5908,2	5695,5	941,62
内訳:連邦予算	90378,2	3169,98	5792,5	10666,2	13472,1	11994,8	9407,2	12638,2	10897,7	5839,6	5626,9	873,02
他資金源	17866	1339,8	2246,1	4371,4	2095,7	2803,8	416,2	2193,6	2193,6	68,6	68,6	68,6
研究開発全体	46844,1	2080,08	2956,4	8483,8	9234,5	7608,5	5435,4	4194,2	3182,7	1385,6	1494,3	788,62
内訳:連邦予算	42140,8	1167,48	1653	7209,8	8628,8	7412,5	5366,8	4125,6	3114,1	1317	1425,7	720,02
他資金源	4703,3	912,6	1303,4	1274	605,7	196	68,6	68,6	68,6	68,6	68,6	68,6
資金投資全体	61400,1	2429,7	5082,2	6553,8	6333,3	7190,1	4388	10637,6	9908,6	4522,6	4201,2	153
内訳:連邦予算	48237,4	2002,5	4139,5	3456,4	4843,3	4582,3	4040,4	8512,6	7783,6	4522,6	4201,2	153
他資金源	13162,7	427,2	942,7	3097,4	1490	2607,8	347,6	2125	2125	-	-	-

(単位:100 万ロシアルーブル)

(2) 開発されている革新炉の概要

1) 建設済の高速炉の一覧

ロシア国内の主な高速炉等の運用・廃止措置状況を下記にまとめる。なお、現時点ではほとんどが建設中または運用中である。過年度のロスアトムへのヒアリングによると、既存の施設の設計寿命は基本 60 年だが延長も可能であり、実際には平均して 100 年程度となる見込みである。

表 3.4-11 ロシア国内の高速炉の運用状況

分類	原子炉名	炉型	段階	所在地	状態 操業期間	能力(万 kW) 備考
多目的 高速研究 炉	原子炉科学研究所 RIAR MBIR	MBIR	研究炉	デミトロフ グラード	建設中 2027 年稼 働予定	15 鉛、鉛・ビスマス、ナトリウ ム等による冷却可能
鉛冷却 高速炉	シベリア化学コン ビナート SCC BREST-300	BREST- 300	原型炉	セベルスク	建設中 2026-	30
鉛ビス マス冷 却高速 炉	原子炉科学研究所 RIAR SVBR-100	SVBR- 100	原型炉	デミトロフ グラード	計画中	10
ナトリ ウム冷 却高速 炉	原子炉科学研究所 RIAR BOR-60	BOR-60 (ループ 型)	実験炉		運用中 1969-2020	1.2 運転延長 5 年を経て、 2020 年 12 月に MBIR ハ 運転が引き継がれる予定
	BR-5/10	BR-5/10 (ループ 型)	実験炉	オブニンス ク	廃止措置 準備中 1959-2003	(0.8 万 kWt)―
	BN-350	BN-350 (ループ 型)	原型炉	シェフチェ ンコ(カザ フスタン)	廃止措置 中 1973-1999	15 発電/海水淡水化プラント
	ベロヤルスク 3	BN-600 (タンク 型)	原型炉	ザレチニー	運用中 1981-	56 ナトリウム漏えい、火災等 各種トラブルを経験する も、現在は順調に運転 2040 年までの 60 年運転 許可を申請中(2020.7 時 点)
	ベロヤルスク 4	BN-800 (タンク 型)	実証炉		運用中 2016-	78.9
	ベロヤルスク 5	BN-1200 (タンク 型)	商業炉		建設中 2036 年	122
	南ウラル 1	BN-1200 (タンク 型)	商業炉	チェラビン スク	建設中 2033 年完 成予定	122

※世界原子力協会（WNA）をもとに作成

ナトリウム冷却高速炉 BN-600(ベロヤルスク 3 号機)にて、2003 年に使用済 MOX 燃料の装荷実績があり、BN-800 は 2022 年にフル MOX 運転を達成した[3.4-26]。

2) 開発中の革新炉

高速炉に関しロシアは旧ソ連時代から運転経験を有するが、1980 年の原型炉 BN-600 運転開始、2015 年の実証炉 BN-800 に引き続き 2035 年ごろには商用炉 BN-1200 の導入を予定している。

SMR においてもロシアは他国に先駆けた開発を行っており、2020 年には浮体式洋上 SMR であるアカデミック・ロモノソフの商業運転が開始された。2022 年 7 月、ロシア最東端都市ペベクにおいて同機による全世帯への暖房供給が 2022 年中に実現する見通しが示された[3.4-27]。

ロスアトムは 2022 年 5 月、ヤクート砕氷船搭載用の原子炉として RITM-200 を完成させたと発表した。炉は重量 147.5 トン、高さ 7.3 メートル、直径 3.3 メートルのユニットであり、175MW の容量を持つ SMR である。同年 12 月にロスアトムは、RITM-200S 型核燃料の開発を完了したと発表し、近代化浮体式発電所プロジェクト(MPEP)の進展を示した。同燃料は、TVEL より OKBM アフリカントフの開発者に炉心の技術設計が依頼されたものであった。2023 年 2 月、ATOMENERGOMASH 社傘下の AEM-Spetstal 社は RITM-200S 用の特殊鋼材を生産すると発表した。

ロシアのスモレンスク州政府は 2022 年 5 月、同州のスモレンスク 2 原子力発電所のリプレースとなる第 3 世代+炉である VVER-TOI の開発を 2022 年より開始すると発表している。

ロシアのドレジャリエネルギー工学研究設計研究所(Nikiet)は 2023 年 1 月、鉱業化学コンビナート(MCC)の研究用溶融塩炉の基本設計を完了したと発表した。

2023 年 1 月、ロシアのギドロプレス設計局は、第 4 世代のマイクロ炉として小型高速中性子炉 SVET-M を開発中であると述べた。

(3) 当該革新炉における FE/BE 技術開発動向

鉛冷却高速炉 BREST-300 に関し、ロシア ATOMENERGOMASH 社傘下の TsNIITMASH 社は 2022 年 10 月、同炉用燃料の輸送キャスクの開発を完了したと発表した[3.4-28]。また同月、ベロヤルスク原子力発電所においては BREST-300 用の窒化物燃料の試験が実施されている。

ナトリウム高速冷却炉 BN-1200 に関し、2022 年 12 月に同炉用ウラン・プルトニウム混合窒化物(MNUP)燃料の試験が実施された。TVEL JSC の科学技術活動担当上級副社長アレクサンドル・ウグリューモフ氏によれば、BN-1200 の炉心には酸化物燃料と窒化物燃料の両者が検討されている。

2022 年 12 月、TVEL は第五世代の燃料集合体として開発された TVS-5 を用いたパイロット運転を 2023 年に開始すると発表した。TVS-5 燃料の開発は Proryv プロジェクトの一部である[3.4-29]。同燃料は、作業員のいない完全自動化での集合体アセンブリ製造を可能にしている。

3.5 中国

3.5.1 原子力・核燃料サイクル政策の概要

- ✓ 中国では使用済燃料は再処理する方針である。
- ✓ 原子力発電のためのウランは一部自国で採掘しているが、輸入が中心。
- ✓ フロントエンドサイクルを自国で完結させる施設を有している。

(1) 概要

2020 年発行の中国の放射性廃棄物等安全条約国別報告書によれば、中国では使用済燃料は再処理してウランやプルトニウムを回収して利用し、資源を最大限に利用して、また高レベル放射性廃棄物の発生量を減少させることとしている。ただし、商用再処理施設はまだ完工に至っておらず、現状では使用済燃料は発電所サイトまたはオフサイトの貯蔵施設で貯蔵されている[3.5-1]。原子力発電所で、MOX 燃料の装荷は行われていない[3.5-2]。

中国で商用原子力発電所初号機である秦山原子力発電所 1 号機の建設が開始されたのは 1985 年であるが、この時期から既に中国は使用済燃料の再処理を実施するという方針を決定していた。再処理方針の決定及びその理由を示した文書等は確認できないが、大規模な原子力発電の導入が構想されていたため、ウラン資源のひっ迫を考慮してのものではないかと推測される。また、2016 年から 2020 年の時期を対象とした第 13 次五カ年計画では、大型商用再処理施設の建設について検討を進め、推進していくことが規定されている[3.5-3]。

2018 年 9 月に中国政府が公表した原子力法案では、全体で 8 章あるうち、「核物質及び核燃料サイクル」に 1 つの章が割かれており、国が核燃料サイクル体系を確立することや、使用済燃料は再処理することが規定されている[3.5-4]。ただし、2022 年 12 月時点で同法案はまだ成立していない。

フロントエンドに関して、ウラン鉱石は一部を輸入ウランで、一部を自国で採掘されたウランで賄っている。転換から燃料製造に至るプロセスも自国で実施する能力を備えているが、核燃料の輸入も行っている[3.5-5]。

(2) 原子力・核燃料サイクル政策における政府の関与

中国では、核燃料サイクル政策は中央政府が決定している。また、企業との役割分担について、原子力分野の主力企業グループである中国核工業集团公司(CNNC)、中国広核集団(CGN)、国家電力投資集团公司(SPIC)や華能集団、資機材製造を行っている重電の主力企業等は国有企業であり、政府とこれらの国有企業が一体となって原子力・核燃料サイクル政策を推進しているといえる。このため、政府と民間企業の役割分担や責任の境界線は不明確である。

以下に、中国の原子力発電や核燃料サイクルにおける産業構造を整理する。図 3.5-1 に中国で原子力事業の規制・推進に関わる主要な政府機関を図示した。中国では、再処理の実施等原子力政策は、国家原子能機構や国家発展改革委員会等の政府機関が立案し、事業者がそれを遂行する体制となっている。ただし、プラントの研究開発や原子力発電事業を実施する主要な 3 グループ(CNNC、CGN、SPIC)はいずれも国有企業である。このうち、CNNC は原子力発電事業に加えて、ウラン資源の開発

から燃料製造に至るフロントエンドや、バックエンドも手掛けている。また、CGN は、自ら海外でウラン資源権益の確保を行っている。これらの企業は、国有企業であることから経営に関して国有資産管理監督委員会の監督を受け、また環境規制では生態環境部、原子力安全規制においては生態環境部内の国家核安全局の監督を受ける。

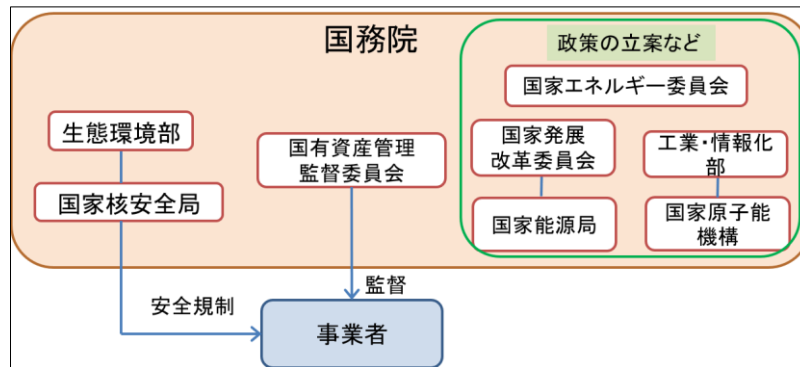


図 3.5-1 中国において原子力事業の規制等に関わる主要な政府機関

出所)原子力安全条約第 7 回締約国会議 中華人民共和国報告書等に基づき三菱総合研究所にて作成

(3) マテリアルバランス

下図は、OECD/NEA と IAEA が共同で作成している「ウラニウム 2020 資源、生産、需給」(以下「レッドブック」)に掲載された、2019 年 1 月 1 日時点における、ウランの生産と消費に関わっている主要国における生産量と原子炉関連のウランの必要量を図示したものである[3.5-2]。

Figure 2.6. **Uranium production and reactor-related requirements for major producing and consuming countries**

(data as of 1 January 2019)

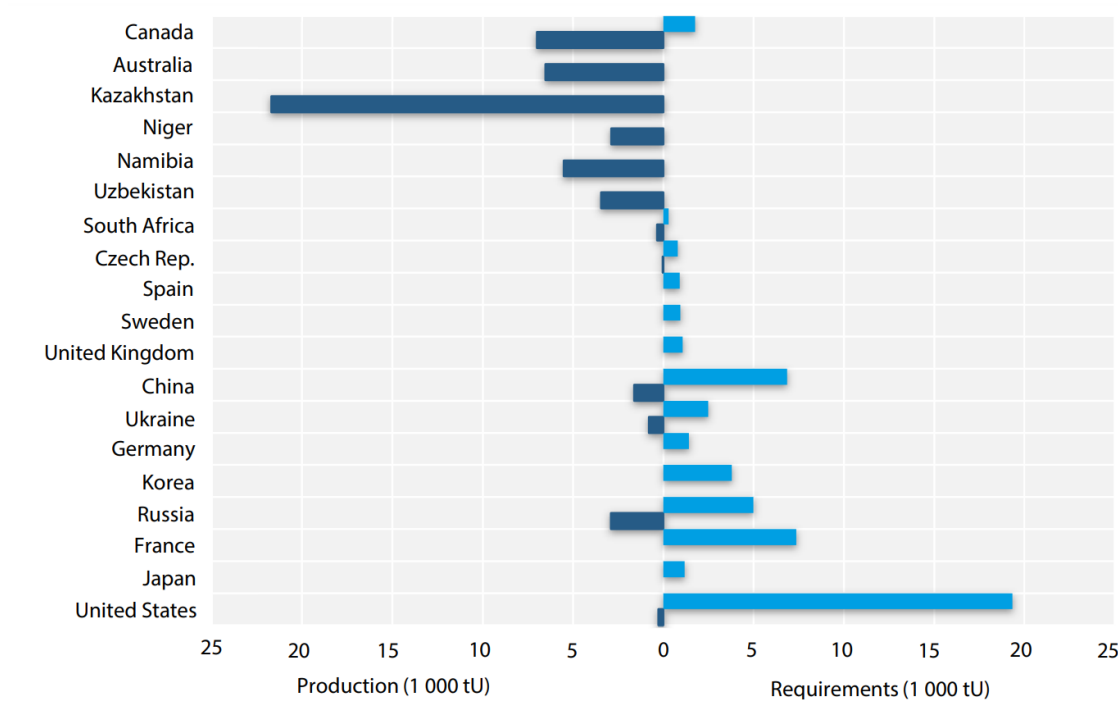


図 3.5-2 主要国におけるウランの生産量と原子炉関連のウランの必要量(2019 年 1 月 1 日時点)

出所)IAEA, OECD/NEA「Uranium 2020: Resources, Production and Demand」(2020 年)

グラフを目視すると、2019 年 1 月 1 日時点における中国のウラン必要量は 7,000tU 程度である。なお、同じくレッドブックによれば、中国における 2020 年のウランの必要量は 9,000tU から 9,400tU と見込まれており、2019 年 1 月 1 日時点以降、新たに運転を開始するプラントの増加でウランの必要量が増加したものと考えられる。中国におけるウランの生産量については、レッドブックの記述によれば 2018 年で 1,620tU であったとのことである[3.5-2]。

ウランの輸入量について、世界原子力協会(WNA)の情報によれば、中国はカザフスタン、ウズベキスタン、カナダ、ナミビア、ニジェール、オーストラリアからウランを輸入しており、輸入量は 2012 年は 12,908tU、2013 年は 18,968tU であった。また、2015 年の必要量は、新設炉に装荷する分を含め、8,160tU であったとのことである[3.5-5]。

これらの情報や、中国における原子炉の新設状況を考慮すると、中国では原子力発電所の運転のために概ね年間 10,000tU 程度のウランを必要とするが、自国の年間生産量はその 2 割程度であり、残りは輸入で賄っていると整理できる。

なお表 3.5-1 は、中国国内の原子力発電設備容量の経時変化と、中国出資の海外ウラン鉱山を含むウラン鉱山の生産能力、及びウラン濃縮施設の生産能力の経時変化を整理したものであり、図 3.5-3 はこのうち原子力発電設備容量、ウラン鉱山の生産能力(中国国内鉱山と中国出資の海外ウラン鉱山の合計)、及びウラン濃縮施設の生産能力の経時変化をグラフにしてまとめたものである。ウラン鉱山やウラン濃縮施設の生産能力等の詳細は後述する。

表 3.5-1 中国の原子力発電設備容量とウラン鉱山及び濃縮施設の生産能力の経時変化

年	原子力発電所の設備容量の年間増量 (MW) ※1	1列目の年末時点での合計設備容量 (MW)	国内のウラン鉱山の生産能力の年間増量 (tU/年) ※2	中国出資の海外ウラン鉱山の生産能力の年間増量 (tU/年) ※3	国内の濃縮施設の生産能力の年間増量 (MTSWU/年) ※4
1990年以前			1,510		
1991	330	330	20		
1993	984	1,314	580		
1994	984	2,298			
1996		2,298	120		
1997		2,298			1,000
2002	3,358	5,656			
2003	728	6,384			
2004	650	7,034			
2005		7,034			500
2006	1,060	8,094			
2007	1,060	9,154	100		
2008		9,154	160	470	
2009		9,154			
2010	1,746	10,900		700	
2011	1,771	12,671			
2012	1,089	13,760			
2013	3,324	17,084			
2014	3,267	20,351		2,030	
2015	8,294	28,645			
2016	5,033	33,678		5,700	
2017	3,301	36,979			
2018	8,964	45,943			
2019	2,836	48,779			
2020	2,268	51,047			
2021	2,448	53,495			
2022	2,269	55,764			
合計	55,764	—	980	8,900	1,500

出所)IAEA, OECD/NEA「Uranium 2020: Resources, Production and Demand」(2020年)やWNA等の情報を基に三菱総合研究所にて作成

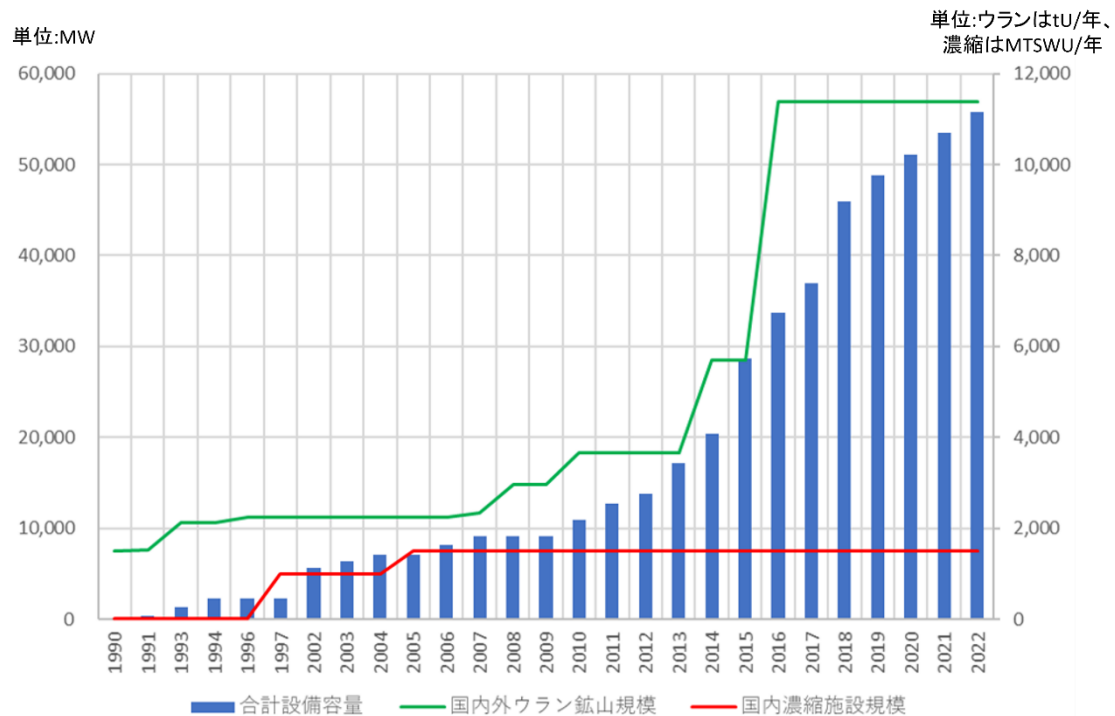


図 3.5-3 中国の原子力発電設備容量とウラン鉱山及び濃縮施設の生産能力の経時変化

(4) フロントエンド

中国は、自国産のウランと輸入したウランの両方を利用して原子力発電を実施しており、そのフローの概略図を図 3.5-4 に示す。

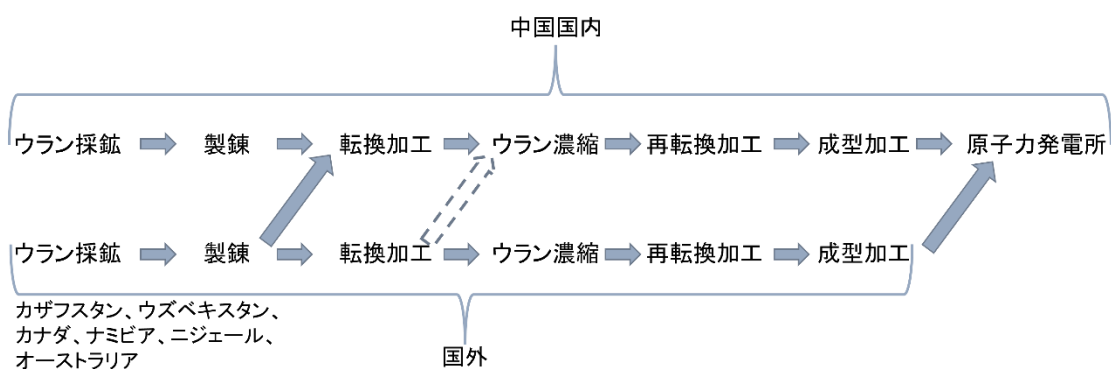


図 3.5-4 中国における国内産及び輸入ウランの採掘から発電に至るフローの概略図

出所) WNA 等の情報を基に三菱総合研究所にて作成

図 3.5-4 において国外から中国国内に向かう矢印のうち、実線の矢印は取引が行われていることが確認できているフロー、点線は取引が行われている可能性があるフローである。

中国は自国で採掘されたウランによって、一部の核燃料を賄っており、自国で採掘されたウランについては濃縮等フロントエンドの役務はすべて中国国内で実施されていると思われる。

一方、海外ウラン由来の核燃料も用いられている。この場合、海外で採掘・製錬されたイエローケーキ、または成型加工の完了した核燃料の完成品を中国に輸入するのが中心になっていると考えられる。中国にウランを輸出している国で転換加工能力を有するのはカナダのみであり、カナダからは六フッ化ウランの形で輸入している可能性がある。また最近では、カザフスタンは自国製のウランをロシアにおいて濃縮を行った上で再度カザフスタンにて核燃料に加工して中国に輸出している。中国に核燃料の輸出を行っている国としては、カザフスタンの他フランスとロシアがある。

以下、まず中国国内で実施されているフロントエンドサイクルの概要について整理する。

1) 国内におけるフロントエンドサイクル

a. ウラン採掘・製錬

中国国内におけるウラン採掘の状況について、レッドブックと IAEA の Nuclear Fuel Cycle Facilities Database (NFCFDB) の情報に基づき表 3.5-2 に整理した[3.5-2][3.5-6]。なお、個々のサイトの詳細については 3.5.4 項にまとめている。

表 3.5-2 中国国内におけるウラン採掘の状況

所在地	生産開始年	生産量 (トン/日)	ステータス
撫州（江西省）	1966 年	1,000	操業中
崇義（江西省）	1979 年	600	操業停止
伊寧（新疆ウイグル自治区）	1993 年	不明	操業中
藍田（陝西省）	1993 年	80	操業停止
晴隆（貴州省）	2007 年	85	操業停止
韶関（広東省）	1967 年	90	操業中
通遼（内モンゴル自治区）	2015 年	不明	操業中
本溪（遼寧省）	1996 年	120tU/年※	操業中

※ 本溪のみ IAEA の NFCFDB から情報を採っており、生産量の単位が他と異なる。

b. 転換加工

転換加工について、IAEA の NFCFDB に中国の転換施設として登録されているのは、湖南省衡陽と甘肅省蘭州の 2 カ所の施設で、いずれも稼働中である[3.5-6]。

中国国内で採掘されたウランは、これらの施設で転換が行われているものと思われるが、2 施設の合計の転換能力が 6,000tU/年ある一方で、上述のとおり中国で採掘されるウランの生産量は 1,620tU (2018 年)であることから、国外で採掘されたウランの転換も実施されているのではないかと推測される。

c. ウラン濃縮

ウラン濃縮について、IAEA の NFCFDB に中国の濃縮施設として登録されているのは、陝西省の漢中ウラン濃縮プラント(陝西省漢中市)と甘粛省の蘭州核燃料コンプレックス(LNFC)甘粛濃縮の 2 カ所の施設であり、いずれも稼働中である[3.5-6]。

なお、中国における自国の濃縮能力の増強について、中国原子力学会が作成した「我が国の核燃料産業発展概況」には以下の記載がある。本文書は 2021 年 12 月ごろに作成されたものと思われる⁷⁶。

- 中国の新世代の自主知的財産権を備えたウラン濃縮遠心分離機の大型商用化実証プロジェクトが完工し、1 機当たりの濃縮効率が顕著に向上した。
- ウラン濃縮工程のモジュール化設計・建設のレベルが向上し、設計から完工に要する期間が 3.5 年になり、ウラン濃縮に対するニーズを満足できるようになった。
- 最近 2 年間に新たに原子力発電所が着工してウラン濃縮ニーズが増加したのに応じて、2020 年に新たにウラン濃縮工程の建設を開始した。
- ウラン濃縮の操業の改善を進め、ウラン濃縮企業の操業の標準化を推進し、製品及び役務のコストを低下し効率性を向上させ、国際競争力を向上させた。

d. 成型加工

3.5.4 項において整理するとおり、中国には自国で PWR や VVER、CANDU 炉、高温ガス炉の燃料を製造する施設が建設されている。

2) 海外で実施されているフロントエンドサイクル

上述のとおり、中国は自国産のウランのみでは需要を賄うことができず、海外から輸入している。イエローケーキや六フッ化ウランといった中間製品を輸入するか、あるいは核燃料の完成品を輸入しているものと考えられる。

a. 中国に対するウラン中間製品の輸出

WNA によれば、カザフスタン、ウズベキスタン、カナダ、ナミビア、ニジェール、オーストラリアが中国にウランを輸出している[3.5-5]。表 3.5-3 は、中国が出資している海外の鉱山におけるウランの生産等の状況を整理したものである[3.5-2][3.5-5]。

⁷⁶ 「我が国の核燃料産業発展概況」は現在、ウェブサイト上で公表されていない模様である。

表 3.5-3 中国が出資している海外の鉱山におけるウランの生産等の状況

企業名	生産国	鉱山	生産量	中国の出資による 生産開始年
China National Uranium Corporation (CNUC)	ニジェール	Azelik	700tU/年	2010 年、現在は 閉鎖
	ニジェール	Imouraren	5,000tU/年	出資は決定される も生産は保留中
	ナミビア	Langer Heinrich	2,030tU/年	2014 年
	ナミビア	Rössing	不明	2019 年
	カザフスタン	Zhalpak	不明	2017 年? ⁷⁷
中広核鈾業 発展有限公 司 (CGN- URC)	ナミビア	Husab	5,700tU/年	2016 年
	カザフスタン	Irkol & Semizbai	470tU (2018 年)	2008 年、2009 年
	ウズベキスタン	Boztau black shales	不明	未定
	カナダ	Patterson Lake	不明	2023 年

また、カナダからは六フッ化ウランを輸入している可能性がある。カナダの Cameco 社のウェブサイトによれば、同社は六フッ化ウランの販売を行っており、販売量の 9%はアジアを対象としたものだが、購入者の国名や企業名は公表されていない[3.5-7]。このアジアの販売先に中国企業が含まれている可能性がある。

b. 中国に対する核燃料の輸出

中国は、核燃料の完成品の輸入も行っている。以下に、確認できた事例について整理する。

ア) フランスからの輸入

2016 年 4 月の広東省江門市税関のプレスリリースによると、江門市税関は EPR が 2 基建設されている台山原子力発電所における核燃料の輸入について、事業者等と検討会を開催したとのことである[3.5-8]。このため、台山原子力発電所の EPR については、核燃料は輸入されたものが使用された実績はあるものと思われる。フランス製の核燃料が輸入されているものと推定される。

イ) ロシアからの輸入

ロシアの ROSATOM は 2022 年 9 月、中国で建設が進んでいる高速実証炉 CFR-600 の核燃料が子会社の TVEL 社のプラントから中国に出荷されたことを公表した[3.5-9]。今後、ロシア製の核燃料によって運転が開始されるものと思われる。

以上のフランスとロシアの事例から、中国における運転実績のない、海外技術を用いたプラントには、

⁷⁷ 「？」は WNA の原典情報に記載されているものであり、WNA としても詳細は不明ということを示しているものと思われる。

プラント輸出国で製造された核燃料が、少なくとも運転開始当初は、使用される事例のあることが確認できる。

ウ) カザフスタンからの輸入

カザフスタンでは CGN が、現地のカザトプロムと協力して、カザトプロムが製造した核燃料を輸入している。カザトプロムは、ロシアの設計による原子炉及びフランスのフラマトム社が設計した軽水炉に装荷される AFA 3G 核燃料を製造している[3.5-10]。AFA 3G 核燃料は、フランス製の原子炉の炉型である M310 をベースとして開発された中国のプラントで利用されている[3.5-11]。カザトプロムは、2022 年 12 月 7 日のプレスリリースにおいて、1 回の燃料交換に必要な量(30t 以上の低濃縮ウラン)を積載したコンテナ 34 基の AFA 3G 核燃料を同社のウルバプラントから CGN のグループ企業に対して発送したことを公表している。

プレスリリースによると、ウルバプラントは AFA 3G の製造技術を持つフランスのフラマトム社から認定を受け、最終顧客である中広核鈾業発展(CGNPC-URC)から核燃料供給者として認められ、2021 年 11 月に操業を開始した。ウルバプラントはカザフスタンで唯一、原子力発電所向けの核燃料を製造しており、20 年先までの販売市場が確保されている。ウランはカザフスタンで採掘されたものであり、核燃料の生産能力は、低濃縮ウラン換算で年間 200t である[3.5-12]。

カザトプロムには濃縮施設はなく、濃縮はロシアで実施されている。ただしウルバでは再転換が実施されている[3.5-13]。なお中国国内で核燃料製造等のフロントエンドサイクル事業実施が認められているのは CNNC グループのみであり、CGN はライバル企業でもある CNNC に対する核燃料の依存を軽減するために、カザフスタンからの核燃料調達を進めたものと考えられる。

3.5.2 ウクライナ侵攻のサイクル政策への影響

中国には、ロシアのウクライナ侵攻に伴う西側諸国のロシアに対する制裁等によるサイクル政策への影響はないと考えられる。

中国とロシアは原子力分野で、ロシアからの軽水炉(VVER)の輸入や高速炉技術の導入等で緊密な協力関係を築いている。中国はウクライナ侵攻を原因とする西側諸国のロシア制裁に加わっていないことから、両国の核燃料サイクルにおける協力関係に変化はないものと考えられる。

3.5.3 使用済燃料の処理・処分、回収・劣化 U 及び Pu の利用方針・実績

- ✓ 中国では、自国技術を用いた再処理施設の建設が進められているほか、フランスとの協力による施設の建設計画もある。
- ✓ 処分に関して、高レベル放射性廃棄物処分のための地下研究所が建設中であり、また低中レベル放射性廃棄物の処分場はすでに建設・操業が進められている。
- ✓ PWR の使用済燃料から回収したウランと劣化ウランを混合した燃料を CANDU 炉に装荷する取組が実施されている。

(1) 使用済燃料の再処理の方針と状況

前述の通り、中国では使用済燃料は再処理してウランやプルトニウムを回収して利用し、資源を最大限に利用している。また高レベル放射性廃棄物の発生量を減少させることとしている。以下に、フランスとの協力による再処理施設建設計画と、自国技術による計画について整理する。

1) フランスとの協力による再処理施設建設計画

中国は、フランス・Orano 社との協力により、大型商用再処理施設を建設することとしている。施設の規模は、年間の処理量が 800t とされ、また、投資額は 150 億ユーロと見積もられている[3.5-5]。中国側で再処理事業の実施主体となる中国核工業集团公司(CNNC)と、Orano 社の前身 AREVA 社は再処理プラント建設契約締結に向けて 2013 年 4 月に基本合意書(LOI)を締結し、2014 年 3 月には中国における再処理プラント建設プロジェクトの遂行に関する協定を締結する等してきた。2018 年 6 月には Orano 社が、CNNC の子会社中核龍安科技公司(CNLA)との間で、中国における再処理工場建設に向けた準備作業を開始することで合意したと発表した[3.5-14]。また 2019 年 11 月には、仏マクロン大統領の中国公式訪問に際して、中国における再処理プラント建設に関する協力覚書(MOU)が締結されている[3.5-15]。しかしながら、2022 年 12 月時点で CNNC と Orano 社は建設契約締結には至っていない。その理由は不明である。

2) 中国の自国技術による再処理施設建設計画

中国では、自国の技術を利用した再処理施設の建設プロジェクトも進められている。その情報は限定的であるが、2022 年に更新された IAEA の Country Nuclear Power Profiles には、「200 トンの大規模商業使用済燃料再処理プロジェクトにおいて建設が開始された」と記載されている[3.5-16]。Country Nuclear Power Profiles にこのプロジェクトに関するこれ以上の情報は記載されていないが、これは甘肅省酒泉市の核技術産業パークにおいて進められている使用済燃料再処理施設の建設について言及しているものと考えられる。

甘肅省酒泉市の核技術産業パークには複数のバックエンド関連施設が建設されることとなっているが、そのうちの一つである金塔極低放射性廃棄物埋設場の環境影響報告書が 2020 年 7 月付で公表されている。それによると、核技術産業パークの一角には「核燃料サイクル再処理核心区」が設置され、再処理施設や MOX 燃料製造施設等が建設されるとのことである[3.5-17]。また、同じく核技術産業パークに建設される龍和浅地中処分場の環境影響報告書が 2022 年 1 月付で公表されている。それによると、核技術産業パークの建設は現在進行中であるとのことである[3.5-18]。

甘肅省酒泉市の核技術産業パークについては、これ以上中国政府や関連企業の一次資料からの情報は確認できていないが、2022 年 5 月 3 日付で中国の証券会社が公表している資料にある情報を以下に整理する。この資料によると、2006 年に甘肅省蘭州市で CNNC グループの中核四〇四が、年間処理容量 50t の使用済燃料再処理パイロットプラントを建設した。2011 年にはホット試験が成功し、2013 年から 2015 年にかけて、約 50t の使用済燃料が再処理された(なおこの再処理パイロットプラントに関しては、研究開発動向について報告する)。これに続き、中国が知的財産権を所有する再処理施設の建設計画と、フランスとの協力で再処理施設を建設する計画が並行して進められることとなって

いる。前者は、中国が知的財産権を所有する年間処理容量 200t の大型商用再処理施設を 2 棟建設する計画であり、1 棟は建設中で 2025 年の操業開始を予定している。後者はフランスとの協力で年間処理容量 800t の再処理施設を建設する計画である。資料によれば、このフランスとの協力による再処理施設は当初 2020 年に建設が開始され、2030 年には操業を開始する予定であった。しかしながら建設サイト選定の問題や候補地の公衆との協力において問題が発生し、プロジェクトは棚上げされた状態になっているとのことである[3.5-19]。

このように、中国では使用済燃料の再処理が基本方針となっている他、回収ウラン・プルトニウムも活用して資源利用の最大化を図るとされている。ただし、放射性廃棄物等安全条約締約国会議の報告書によると、経済性や技術的な観点から、一部の燃料について直接処分の可能性は排除しないものの、直接処分対象となる使用済燃料はまだ決定されていない[3.5-3]。

(2) 放射性廃棄物処分の方針・実績

中国では現状、使用済燃料の直接処分の具体的な計画はない。本項では、放射性廃棄物処分の方針や実績について整理する。

中国において 2018 年 1 月に策定された「放射性廃棄物の分類」⁷⁸では、放射性廃棄物は、極短寿命放射性廃棄物、極低レベル放射性廃棄物、低レベル放射性廃棄物、中レベル放射性廃棄物及び高レベル放射性廃棄物の 5 種類に区分されている[3.5-24]。以下に、「放射性廃棄物の分類」に示されたこれらの区分の定義と処分方法の概要について整理する。

極短寿命放射性廃棄物

含有される主な放射性核種の半減期は短く、長寿命放射性核種の濃度はクリアランスレベル以下のもの。極短寿命放射性核種の半減期は一般に 100 日より短く、最長で数年間の貯蔵・減衰の後、放射性核種の濃度がクリアランスレベルに達したら、クリアランスされる。

極低レベル放射性廃棄物

放射性核種の濃度が免除レベルまたはクリアランスレベルに近い、またはそれよりやや高い場合でも、長寿命放射性核種の濃度は極めて限定的であるもの。限定的な閉じ込めと隔離措置を講じるのみで、地表の埋立施設で処分することが可能であり、または国の固体廃棄物管理規定に従い、産業固体廃棄物埋立施設で処分することができる。

低レベル放射性廃棄物

低レベル放射性廃棄物の短寿命放射性核種濃度は比較的高い場合もあるが、長寿命放射性核種の含有量が限定的である場合、数百年の効果的な閉じ込めと隔離が必要となるものの、その後人工バリアを備えた浅地表処分施設で処分することが可能である。浅地表処分施設の深度は一般に地表から地下 30m である。

中レベル放射性廃棄物

アルファ核種を主として、かなりの量の長寿命核種が含まれており、監視措置によって廃棄物の安全

⁷⁸ 「放射性廃棄物の分類」は、拘束力を持つ規則か、ガイダンス文書かが文書の名称からは不明であるが、過去に策定されたガイダンス文書を置き換えるものとされているので、2017 年 12 月策定の「放射性廃棄物の分類」も拘束力を持たないガイダンス文書であると考えられる。

な処分を行うことができず、浅地表処分よりも高度な閉じ込めと隔離措置が必要であり、処分深度は通常地下数十～数百 m である。「放射性廃棄物の分類」によれば、一般には、中レベル放射性廃棄物はプルトニウム 239 を含む物質の処理過程や、使用済燃料の再処理施設の操業及び廃止措置等において発生するとされている。

高レベル放射性廃棄物

含まれる放射性核種の濃度は非常に高く、減衰の過程で大量の熱を発するか、または大量の長寿命放射性核種を含有している。より高度な閉じ込めと隔離措置が必要であり、除熱の措置を講じ、地層処分方式で処分する必要がある。「放射性廃棄物の分類」では、発生源として使用済燃料の再処理施設で発生するガラス固化体及び再処理を実施しない使用済燃料が示されている。

中国では、高レベル放射性廃棄物の地層処分に向けた研究開発に関して、2006 年に「高レベル放射性廃棄物地層処分の研究開発計画に関するガイド」が策定された。この文書では、21 世紀半ばの処分場建設を目標として、研究開発やサイト選定のスケジュールや目標が、以下のとおり 3 段階に分けて示されている[3.5-20]。

- 実験室研究とサイト選択段階(2006～2020 年)
- 地下研究所での試験段階(2021～2040 年)
- プロトタイプ処分場の検証と処分場建設段階(2041 年～今世紀半ば)

このように中国では、「高レベル放射性廃棄物地層処分に関する研究開発計画ガイド」に基づき研究開発が進められている。具体的には中国各地の計 6 カ所の高レベル放射性廃棄物地層処分場の候補地域において実施された予備的な比較に基づき、国家原子能機構が甘粛省の北山を候補地域として選定した。北山では高レベル放射性廃棄物地層処分場のサイト選定における地質、水文地質条件や、地震学的・地質学的調査及び社会経済条件の調査を実施することとなっている。また、ボーリング調査で深部における岩盤や水理に関連するデータを整備して、花崗岩サイトの予備的な評価方法を確認することとなっている。2016 年 3 月には、CNNC グループの北京地質研究院(BRIUG)が北山において、地下研究所のサイト評価のためのデータ取得を目的としたボーリング孔の掘削を開始した[3.5-21]。また、2020 年 6 月には BRIUG が作成・提出した北山における地下研究所建設プロジェクトの環境影響報告書を、安全規制機関である国家核安全局が公表している[3.5-22]。その後、2021 年 6 月には北山で地下研究所建設が開始されている[3.5-23]。

低・中レベル放射性廃棄物の処分状況について、中国では既に、広東省の北龍、甘粛省の西北及び四川省の飛鳳山の 3 カ所の低・中レベル放射性廃棄物処分場が操業している[3.5-25]。また、2021 年には甘粛省の金塔極低放射性廃棄物埋立場が廃棄物の受け入れを開始している[3.5-26]。

(3) 回収・劣化 U 及び Pu の利用方針・実績

3.5.1 項に記載したとおり、中国では回収ウラン・プルトニウムも活用して資源利用の最大化を図る方針である。

WNA によると、2008 年に CNNC グループの中国核動力研究設計院(NPIC)が、CANDU 炉を

使用しているカナダ原子力公社(AECL)と、PWR の使用済燃料から回収したウランの再利用等の研究開発に関する契約を締結し、回収ウランの再利用に関する両国の協力が開始された。両国の協力で、2 基の CANDU 炉を擁する秦山第三原子力発電所において、PWR の使用済燃料から回収したウランを最大 1.6%まで(通常は 0.9%)高めて再利用した燃料の使用に関する技術開発が進められている。この技術の最初の実証は、秦山第三 1 号機で実施され、通常の CANDU 炉の燃料(0.7%のウラン 235)と同等の濃度にすべく回収ウランを劣化ウランと混合した 12 体の燃料集合体が装荷された。挙動は天然ウランを原料とした燃料と同様であった[3.5-5]。

中国のプルトニウム需給バランスについて詳細は不明である。2017 年 9 月 18 日付で中国の IAEA 常駐代表が IAEA に提出した文書によると、2016 年 12 月 31 日時点で中国には、再処理プラントにおける製品在庫中の未照射分離プルトニウムが 40.9kg あり、これ以外の未照射プルトニウムの存在は報告されていない[3.5-27]。なお、3.5.3 項で報告したパイロットプラントの処理容量や運転状況等に基づき、中国の民生用プルトニウム在庫量は 2019 年までに少なくとも 500kg に達したのではないかと推測が、ハーバード大学核管理プロジェクトの研究者より提示されている[3.5-28]。需要面について、商業レベルでの MOX 燃料の製造・利用は行われておらず、中国実験高速炉(CEFR)の燃料にプルトニウムは含まれていない模様であり、またプルサーマル実施の計画も示されていない。MOX 燃料を装荷する予定の CDFR はまだ建設中であるため、商用原子力発電のためのプルトニウム需要は現時点ではないものと考えられる[3.5-29]。

3.5.4 原子力・核燃料サイクル関連施設、事業主体

- ✓ 中国では、原子力発電事業者として CNNC、CGN、SPIC、華能集団の 4 グループがあるが、中国国内での核燃料サイクル事業の実施を認められているのは CNNC グループのみである。

以下に、IAEA の NFCFDB 等の情報に基づき、中国にある転換、濃縮、燃料製造施設の情報を整理する。

【転換】 6000 t U/年

施設		
	施設名称	衡陽ウランプラント（湖南省衡陽市）
	施設概要	国内または海外で採掘されたウラン鉱石由来の二酸化ウランを六フッ化ウランに転換し、国内の濃縮施設に納入
	技術	NFCIS に記載はないが、規制機関の原子力安全年報 2021 年版によれば、化工転換乾式法と IDR 法の生産ラインがある。
	能力	3000 t U/年
	稼働状況	稼働中
	稼働実績	2016 年稼働開始。累積処理量は不明だが、単純計算で 15,000 tU 程度か。

	役務取引 取組方針	不明だが、CNNC グループ企業からフィード物質を受け入れ、同グループ企業のみを対象として製品を納入していると思われる。
事業主体		
	事業者名称	衡陽ウランプラント。規制機関の原子力安全年報 2021 年版によれば、事業者は中核建中核燃料元件有限公司と思われる。中核建中核燃料元件有限公司は中国原子能工業公司の子会社
	事業者概要	CNNC のグループ会社
	資本関係	詳細は不明も、CNNC のグループ会社で、グループで 100% 所有と思われる。
	経営状況	不明
	政府との関係	親会社の CNNC は 100%国有企業
	今後の方針・戦略	不明。CNNC グループとして方針決定していると思われる。

施設		
	施設名称	蘭州核燃料コンプレックス (LNFC) (甘粛省蘭州市)
	施設概要	国内または海外で採掘されたウラン鉱石由来の二酸化ウランを六フッ化ウランに転換し、国内の濃縮施設に納入
	技術	NFCIS に記載はない。WNA によれば湿式プロセスが採用されている。
	能力	3000 t U/年
	稼働状況	稼働中
	稼働実績	NFCIS には、1980 年稼働開始という記述と、「プラントは 2010 年にホット試運転を実施した」との記述がある。
	役務取引 取組方針	不明だが、CNNC グループ企業からフィード物質を受け入れ、同グループ企業のみを対象として製品を納入していると思われる。
事業主体		
	事業者名称	中国原子能工業公司
	事業者概要	CNNC の子会社
	資本関係	CNNC が 100%所有
	経営状況	不明
	政府との関係	親会社の CNNC は 100%国有企業
	今後の方針・戦略	不明。CNNC グループとして方針決定していると思われる。

【濃縮】

施設		
	施設名称	漢中ウラン濃縮プラント（陝西省漢中市）
	施設概要	国内または海外で採掘されたウラン鉱石由来の六フッ化ウランを濃縮し、国内の再転換施設に納入
	技術	遠心分離法
	能力	1000 MTSWU/年。500 MTSWU/年の建設中。
	稼働状況	稼働中
	稼働実績	1997 年稼働開始。累積処理量は不明だが、単純計算で 14,000 MTSWU 程度か。
	役務取引 取組方針	不明だが、CNNC グループ企業からフィード物質を受け入れ、同グループ企業のみを対象として製品を納入していると思われる。
事業主体		
	事業者名称	NFCIS では Hanzhong Uranium Enrichment Plant。規制機関の原子力安全年報 2021 年版では中核陝西铀浓缩有限公司とある。
	事業者概要	CNNC のグループ会社で、中国原子能工業公司の子会社
	資本関係	詳細は不明も、CNNC のグループ会社で、グループで 100% 所有と思われる。
	経営状況	不明
	政府との関係	親会社の CNNC は 100%国有企業
	今後の方針・戦略	不明。CNNC グループとして方針決定していると思われる。

施設		
	施設名称	蘭州核燃料コンプレックス（LNFC）甘肅濃縮（甘肅省蘭州市）
	施設概要	国内または海外で採掘されたウラン鉱石由来の六フッ化ウランを濃縮し、国内の再転換施設に納入
	技術	遠心分離法
	能力	500 tU/年、2019 年で 3.56MSWU
	稼働状況	稼働中
	稼働実績	2005 年稼働開始。累積処理量は不明だが、単純計算で 3,000 tU 程度か。
	役務取引	不明だが、CNNC グループ企業からフィード物質を受け入

	取組方針	れ、同グループ企業のみを対象として製品を納入していると思われる。
事業主体		
	事業者名称	中国原子能工業公司。規制機関の原子力安全年報 2021 年版には、中核蘭州鈾濃縮有限公司という名称がある。中核蘭州鈾濃縮有限公司は中国原子能工業公司の子会社
	事業者概要	CNNC の子会社
	資本関係 経営状況	中国原子能工業公司是 CNNC が 100%所有 不明
	政府との関係	親会社の CNNC は 100%国有企業
	今後の方針・戦略	不明。CNNC グループとして方針決定していると思われる。

【燃料製造】 2000 t U/年

施設		
	施設名称	CANDU 核燃料プラント（内モンゴル自治区包頭市）
	施設概要	詳細は不明だが、フィード物質として八酸化三ウランを受け取り、PHWR 燃料を製造している。納入先は CANDU 炉 2 基が運転中の秦山第三発電所と思われる。
	技術	不明
	能力	200 t U/年
	稼働状況	稼働中
	稼働実績	2003 年稼働開始。秦山第三由来の使用済燃料の 2016 年末時点貯蔵量は約 2,600tHM で、この大部分は本施設で製造されたものと考えられる。
	役務取引 取組方針	CANDU 炉の核燃料なので、イエローケーキ（八酸化三ウラン）を濃縮せずフィード物質としている。 秦山第三の核燃料を排他的に納入していると思われる。
事業主体		
	事業者名称	Baotou Nuclear Fuel Element Plant
	事業者概要	詳細は不明だが、CNNC のグループ会社
	資本関係 経営状況	詳細は不明も、CNNC のグループ会社で、グループで 100%所有と思われる。 不明
	政府との関係	CNNC は 100%国有企業
	今後の方針・戦略	引き続き秦山第三の燃料を納入していくものと思われる。

施設		
	施設名称	HTR 核燃料プラント（内モンゴル自治区包頭市）
	施設概要	詳細は不明だが、フィード物質として六フッ化ウランを受け取り、高温ガス炉燃料を製造している。納入先は、北京の高温ガス実験炉と、石島湾の高温ガス実証炉と思われる。
	技術	不明
	能力	300,000 tU/年
	稼働状況	稼働中
	稼働実績	2016 年稼働開始。球形ペブル燃料の製造容量は 400t/年に相当し、2020 年までに 800t/年まで拡大する計画があったとのこと（計画の実現状況は不明）。
	役務取引 取組方針	CNNC の 2 カ所の濃縮施設由来の濃縮ウラン（六フッ化ウラン）をフィード物質として、再転換は本施設で行っている模様。 高温ガス実験炉及び実証炉の核燃料を排他的に納入していると思われる。
事業主体		
	事業者名称	Baotou Nuclear Fuel Element Plant
	事業者概要	詳細は不明だが、CNNC のグループ会社
	資本関係	詳細は不明も、CNNC のグループ会社で、グループで 100% 所有と思われる。
	経営状況	不明
	政府との関係	CNNC は 100% 国有企業
	今後の方針・戦略	引き続き中国の高温ガス実験炉及び実証炉の燃料を納入していくものと思われる。

施設		
	施設名称	建中核燃料（四川省宜賓市）
	施設概要	詳細は不明だが、フィード物質として六フッ化ウランを受け取り、PWR と VVER の核燃料を製造している。納入先は、中国の PWR と VVER と思われる。
	技術	不明
	能力	800 tU/年
	稼働状況	稼働中
	稼働実績	1998 年稼働開始。2020 年までに 1000t/年まで拡大する計画があったとのこと（計画の実現状況は不明）。

	役務取引 取組方針	CNNC の 2 カ所の濃縮施設由来の濃縮ウラン(六フッ化ウラン)をフィード物質として、再転換は本施設で行っている模様。
事業主体		
	事業者名称	NFCIS では CNNC となっているが、具体的には中核建中核燃料元件有限公司と思われる。
	事業者概要	詳細は不明だが、CNNC のグループ会社
	資本関係	詳細は不明も、CNNC のグループ会社で、グループで 100% 所有と思われる。
	経営状況	不明
	政府との関係	CNNC は 100% 国有企業
	今後の方針・戦略	引き続き中国の PWR と VVER の燃料を納入していくものと思われる。

施設		
	施設名称	PWR 核燃料プラント (内モンゴル自治区包頭市)
	施設概要	詳細は不明だが、フィード物質として六フッ化ウランを受け取り、PWR の核燃料を製造している。納入先は、中国の PWR と思われる。
	技術	不明
	能力	600 tU/年 (現在は 800 tU/年か)
	稼働状況	稼働中
	稼働実績	2012 年稼働開始。2015 年に製造能力は 400t/年だったが、2017 年に 800t/年まで拡大されたとのこと。
	役務取引 取組方針	CNNC の 2 カ所の濃縮施設由来の濃縮ウラン(六フッ化ウラン)をフィード物質として、再転換は本施設で行っている模様。
事業主体		
	事業者名称	Baotou Nuclear Fuel Element Plant
	事業者概要	詳細は不明だが、CNNC のグループ会社
	資本関係	詳細は不明も、CNNC のグループ会社で、グループで 100% 所有と思われる。
	経営状況	不明
	政府との関係	CNNC は 100% 国有企業
	今後の方針・戦略	引き続き中国の PWR の燃料を納入していくものと思われる。

3.5.5 ウクライナ侵攻の役務取引動向等への影響

中国はウラン資源の確保から核燃料の製造に至るフロントエンドのプロセスは自国で賄える体制を整えているため、ロシアのウクライナ侵攻によってもロシアとの役務取引等に特段の影響は生じていないものと考えられる。

3.5.6 原子力・核燃料サイクル関連の研究開発動向

(1) 国の研究開発方針、意図

中国では、核燃料サイクルの確立は重要な課題と認識されている。国家発展改革委員会と国家能源局が 2016 年 4 月 7 日付けで公表した「エネルギー技術革命創新行動計画(2016-2030 年)」及び「エネルギー技術革命重点創新行動ロードマップ」では、先進的再処理技術とそのための設備、高レベル放射性廃棄物地層処分技術、先進的な廃棄物処理技術、高速炉による変換技術の 4 分野について、研究のロードマップが示されている[3.5-30]。

また、2021 年 12 月に国家能源局と科学技術部は、「第 14 次 5 年計画エネルギー分野の科学技術イノベーション計画」を公表している。これは、「第 14 次 5 年計画」のうちエネルギー分野における技術革新を推進するための計画であり、2030 年を温室効果ガス排出量のピークとし、以降排出量を減少に転じさせ(カーボンピークアウト)、2060 年にはカーボンニュートラルを実現するとの目標等を背景に、原子力や再生可能エネルギー、電力システム等に関して研究課題等を提示するものである。「第 14 次 5 年計画エネルギー分野の科学技術イノベーション計画」では、重点分野として第 3 世代炉の技術向上や SMR 等の先進炉の開発と並んで、「放射性廃棄物の処理・処分、原子力発電所の長期運転・寿命延長等においてカギとなる技術研究、原子力の全産業サプライチェーンのフロント・バックエンドの持続可能な発展」が挙げられている[3.5-31]。その後、2022 年 10 月には国家能源局により「第 14 次 5 年計画エネルギー分野の科学技術イノベーション計画」の重点任務リストが公表されている。本文書では、放射性廃棄物の処理・処分関連の具体的な任務として、以下の 2 点が挙げられている[3.5-32]。

- 放射性廃棄物の総合的な処理等の研究を行い、プラズマ溶融や水蒸気改質等の廃棄物処理技術について研究開発を行う。
- 廃棄物総合処理最適化技術体系及び原子炉の長期運転により発生する廃棄物の処理プランを確立し、中・低レベル放射性廃棄物処分場の建設を進める。

(2) 研究開発プログラムの概要(予算規模、事業期間、事業者・公的機関等関連組織の役割分担、費用分担、国際協力の有無等)

国務院が 2014 年 6 月に公表した「エネルギー発展戦略行動計画(2014-2020 年)」では、AP1000 や CAP1400、高温ガス炉、高速炉と並んで、バックエンドに関する技術開発が重点課題として挙げられている[3.5-33]。また、2016 年 3 月に策定された第 13 次五カ年計画では、同計画の対象期間(2016~2020 年)の重大プロジェクトの一つとして、大型商用再処理施設の建設の実証と推

進が挙げられている[3.5-34]。

国家発展改革委員会と国家能源局は、2016 年 4 月 7 日付けで「エネルギー技術革命創新行動計画(2016-2030 年)」及び「エネルギー技術革命重点創新行動ロードマップ」を公表した。図 3.5-5 は、「エネルギー技術革命重点創新行動ロードマップ」で示されたバックエンドの4つの研究テーマの2030年までのロードマップである[3.5-28]。

なお、本ロードマップの実行における予算規模や費用分担の詳細は不明である。ロードマップは、上述の通り国家発展改革委員会と国家能源局の国の機関が策定し、それを遂行するのは CNNC を中心とした国有企業グループであると考えられる。国際協力に関しては、先述の通り再処理に関しては中国はフランスと協力して再処理施設を建設する計画を有しているが、近年はその進展は伝えられていない。

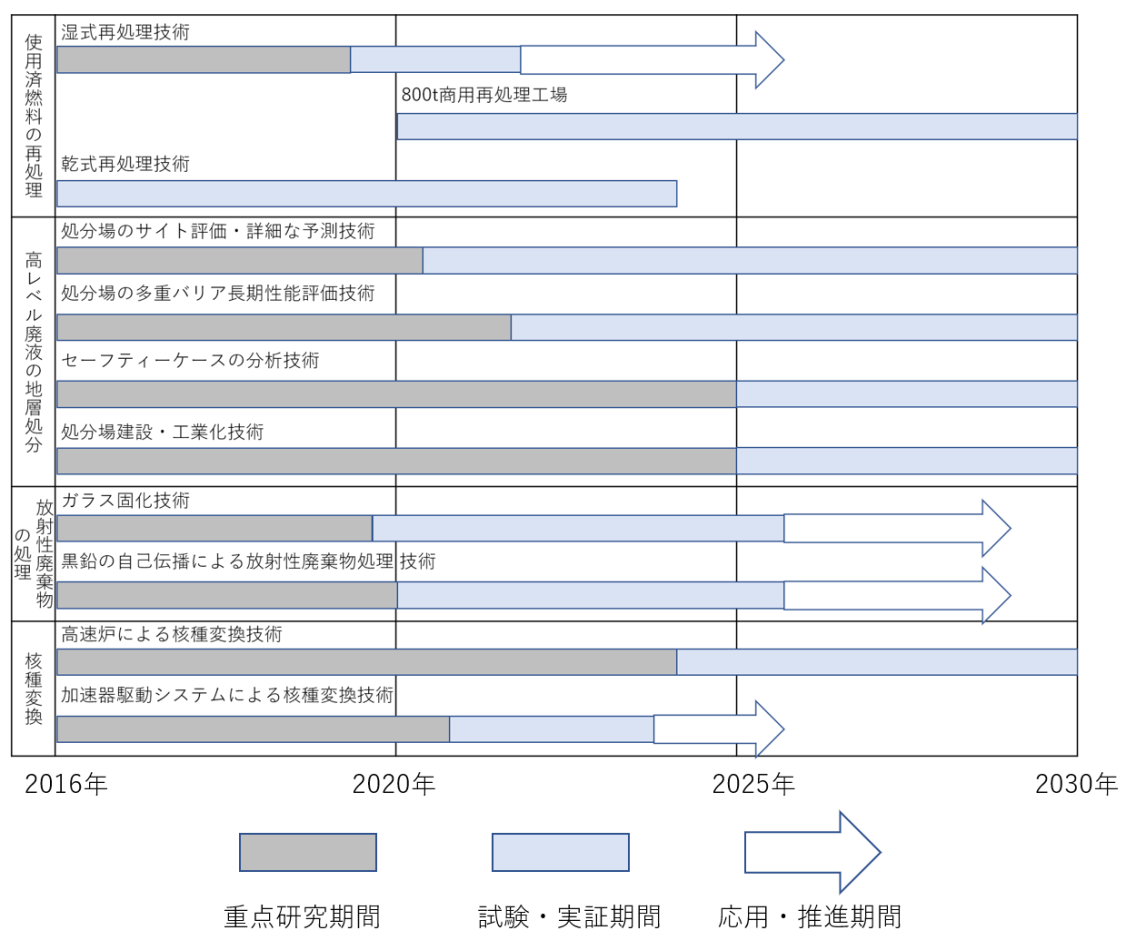


図 3.5-5 「エネルギー技術革命重点創新行動ロードマップ」におけるバックエンドの研究ロードマップ

出所)「エネルギー技術革命重点創新行動ロードマップ」より引用、三菱総合研究所にて翻訳

図 3.5-5 において「使用済燃料の再処理」のうち「乾式再処理技術」の開発予定は 2025 年前の試験・実証期間で中断されているが、この技術の応用・推進期間は 2030 年より後になると思われる。ロードマップでは、バックエンド分野のテーマが以下のとおり、4 つに区分されそれぞれ目標等が示されている[3.5-28]。

1) 先進的再処理技術とそのための設備

- 大型の再処理施設について、前処理工程の技術や新型の無塩試薬を用いた 2 サイクルフロー(ウラン・プルトニウムの分離とプルトニウム精製工程でジメチルヒドロキシルアミン・モノメチルヒドrazinを使用してプルトニウムの還元と分離を行い、ウラン精製工程でアセトヒドロキサム酸を使用してウランからプルトニウムとネプツニウムを同時に除去する方法)[3.5-35]の開発、作業工程のホット試験や検証を実施
- 再処理全フローのデジタル化模擬プラットフォームの構築や、パルスカラムのデジタル化模擬・シミュレーション技術の研究を実施し、主要な大型設備の国産化を実現
- 自動化制御技術、リモート操作システム・設備、大型先進ホットセルの設計、及び先進的な乾式による前処理技術や乾式分離技術の研究開発を実施

2) 高レベル放射性廃棄物地層処分技術

- 地下研究所のエンジニアリング及び現地での試験を実施し、サイト選定に関する研究を進めるとともに、サイト評価の技術体系を完備
- 地下研究所を研究開発のプラットフォームとして、地層処分のエンジニアリング技術や人工バリア、処分概念の設計、掘削技術を開発し、また廃棄体の輸送、定置及び回収技術開発と検証を実施
- 処分場における核種の放出や移行、安全評価及びセーフティーケースの研究を行い、確率論的安全評価の技術を確立
- 処分場バリアシステムの安全特性の変遷に関する試験と評価の実施

3) 先進的な廃棄物処理技術

- 放射性黒鉛の自己拡散処理技術の研究
- コールドクルーシブル誘導溶融炉によるガラス固化技術、有機汚染物質の超臨界水処理技術、高レベル放射性アルカリ廃液の熱耐性セラミック固化技術、廃液のキレート吸着技術の開発

4) 高速炉による変換技術

- 変換ターゲットの設計と製造、変換ターゲットに対する照射試験と試験後の検証、及び照射後の炉心の化学的分析及び分離技術の研究等により、CEFR におけるマイナーアクチニドに対する照射を完遂
- マイナーアクチニドを含有する MOX 燃料の製造技術の研究、マイナーアクチニドを含んだ燃料を大量に使用する高速炉の炉心設計、安全評価及び試験、原子炉の安全な運転技術の研究、及び照射後のマイナーアクチニドを含んだ燃料の再処理技術の研究等による、CDFR における変換ターゲットに対する照射と再処理の完遂

5) 再処理

「エネルギー技術革命重点創新行動ロードマップ」では、再処理に関して 2020 年と 2030 年時点の目標、及び 2050 年の展望が以下のとおり示されている[3.5-28]。

a. 2020 年の目標

- 再処理に関して、大型商用再処理施設の自主設計、建設及び操業技術の獲得
- 動力炉の使用済燃料の再処理プロセスや設備等、主要技術の開発
- 動力炉の使用済燃料から発生する高レベル放射性廃液の分離技術の確立
- 高速炉の使用済 MOX 燃料の再処理について、中国の使用済燃料再処理パイロットプラントで利用されている湿式処理による処理フローを確立し、実証化に向け前進
- 使用済燃料の乾式再処理技術研究の推進、基礎研究における前進

b. 2030 年の目標

- 再処理に関しては、先進的な湿式再処理技術研究プラットフォームを確立し、中国初となる 800t の大型商用再処理施設を完工
- アクチニド分離一体化先進湿式再処理フローを確立
- 乾式再処理について優先される技術路線を決定
- kg 級の設備能力をもつウラン・プルトニウム溶融塩電解分離実験装置の建設

c. 2050 年の展望

- 乾式再処理について商業利用を実現し、湿式再処理を代替

以上が「エネルギー技術革命重点創新行動ロードマップ」で示された再処理に関する 2020 年と 2030 年時点の目標、及び 2050 年の展望である。「2020 年の目標」で言及されている再処理のパイロットプラントは、甘粛省の蘭州核燃料コンプレックス(LNFC)に建設されている。パイロットプラントの主な役割は以下のとおりである[3.5-36]。

- ホットの条件における使用済燃料の再処理のためのプロセス、機器及び設備の実証
- 将来の商用再処理プラントのための設計、建設、試験操業及び操業のための経験の蓄積
- MOX 燃料製造のためのプルトニウムの供給

このパイロットプラントは改良された PUREX 法を採用しており、最大処理量は一日当たり 400kgHM である。年間を通じた処理量は最大で 100tHM となる予定である[3.5-34]。WNA によると、このパイロットプラントでは 2010 年にホット試験が行われた[3.5-5]。なお、中国では再処理は、先進的な湿式のプロセスを採用してウランとプルトニウムを分離しないことで核不拡散抵抗性を高めることとなっており、また使用済燃料中のマイナーアクチニドの分離も検討されている[3.5-37]。

中国では、MOX 燃料製造施設の開発は初期段階にある。WNA によると、年間製造量 500kg の実験規模の MOX 燃料製造プラントが 2008 年に建設された。また、その後中国はベルギーと協力を進めており、2010 年には旧 GDF-Suez 社(現 ENGIE 社)のベルギー子会社等と CNNC が MOX 燃料製造パイロットプラント建設に関する契約を締結した[3.5-5]。中国原子能科学研究院の院長は 2013 年に、その時点での計画は 5 年間で CEFR、再処理パイロットプラント及び MOX 燃料の試験生産ラインをプラットフォームとするフローを実現できるとの見通しを示していた[3.5-38]。しかしながら 2022 年 12 月末時点では、中国で MOX 燃料製造プラントの建設や操業の状況についての情報は確認でき

ていない。

(3) 上記プログラムとは別の民間事業者の研究開発

中国では原子力分野の主力企業はすべて国有企業であり、民間事業者のみによる研究開発は実質的に行われていないと言えるが、本項では CNNC グループによる「一体化高速炉」研究開発プロジェクトについて整理する。

「一体化高速炉」研究開発プロジェクトとは、ナトリウム冷却高速炉、乾式再処理施設、燃料加工施設、廃棄物処理設備を同一敷地内に建設し、効率的なクローズド燃料サイクルを実現しようとするものである。また、「一体化高速炉」は、現在の中国における主力である PWR と効果的に連動し、PWR の使用済燃料の再処理によって回収した物質や、天然ウラン由来のウラン 238 を運転に使用できるため、ウラン資源の有効利用と炉内燃焼による長寿命高レベル放射性廃棄物の大幅な削減を可能にし、核分裂エネルギー全体の安全性と経済性の向上を図ることができるとされている。

CNNC グループの中国原子能科学研究院が 2022 年 12 月に公表したプレスリリースによると、同研究院は 2021 年に「一体化高速炉」の研究・設計を開始し、CNNC の支援を受けて、2022 年 5 月に「一体化高速炉」の主要な技術研究プロジェクトが正式に承認された。本プロジェクトでは、同研究院の核エンジニアリング設計研究所が放射化学研究所と共同で「一体化高速炉」の概念設計を行い、典型的な利用方法として 1 カ所のサイトに 6 基のナトリウム冷却高速炉と、燃料製造施設、乾式再処理施設、廃棄物の処理設備及びその他の補助施設を建設する方法を特定したとされている。プレスリリースによれば、今後プロジェクトチームは、「一体化高速炉」の予備的な標準設計と重要な技術をさらに発展させ、安全性、経済性、環境への配慮、持続可能性の革新を続け、フルアクチニドサイクル、先進核燃料材料、乾式再処理等の基礎科学と工学技術を革新し、技術成熟度を継続的に向上させることとしているとのことである[3.5-39]。

3.5.7 革新炉開発における FE/BE 分野の政策・技術開発動向

- ✓ 中国では高速炉の実験炉や実証炉の建設・運転が進められており、将来的には PWR の使用済燃料中のプルトニウムを高速炉で燃焼すること等が構想されている。
- ✓ 高温ガス炉も建設・運転が進められており、高温ガス炉で発生した使用済燃料の再処理も計画されている。
- ✓ 高温ガス炉の燃料製造は中国国内で実施

(1) 高速炉開発における FE/BE 分野の政策・技術開発動向

1) 高速炉の開発方針と建設や運転の状況

国家発展改革委員会と国家能源局が 2016 年 4 月に公表した「エネルギー技術革命重点創新行動ロードマップ」では、2030 年までに商用再処理施設を建設して MOX 燃料を製造し、それを商用高速炉で利用するというクローズドサイクルの実現が目標として示されている[3.5-28]。

中国も参加している IAEA の「革新的原子炉及び燃料サイクル国際プロジェクト」(INPRO)が

2010 年に公表した報告書によると、中国では高速炉は、使用済燃料から分離されたマイナーアクチニドを変換することで、地層処分対象となる高レベル放射性廃棄物の分量と毒性を最小化させることができるものと捉えられている。またこの報告書によると、中国では高速炉について実験炉、プロトタイプ炉、実証炉と段階的に開発を進めていく計画であり、当初は濃縮ウランまたは MOX 燃料を用いるが、後に濃縮率向上のため金属燃料を利用する可能性があるとされている[3.5-36]。

中国における高速炉の建設・運転現状について、表 3.5-4 に整理した。北京市にある電気出力 2 万 kW の中国実験高速炉(CEFR)が 2010 年 7 月に初臨界を実現している。なお、先述したハーバード大学核管理プロジェクトの研究者の報告によると、CEFR ではロシアが供給した濃縮度 64.4%の高濃縮ウランが使用されており、のちに MOX 燃料を装荷する計画だが、計画通りには進んでいないとのことである[3.5-28]。また、電気出力 60 万 kW の中国実証高速炉(CDFR⁷⁹、CFR-600 や霞浦 1 号機とも記載される)の建設が福建省霞浦市で 2017 年 12 月に開始されている[3.5-40]。なお、このプラントで抽出されたプルトニウムは、高速増殖炉の MOX 燃料に利用する計画であり、CNNC は高速増殖炉用の MOX 燃料の研究開発を実施する予定である[3.5-41]。また、3.5.1 項で報告したとおり、ロシアの ROSATOM は 2022 年 9 月、CDFR の核燃料が子会社の TVEL 社のプラントから中国に発送されたことを公表しており、CDFR ではロシア製の核燃料によって運転が開始されるものと思われる。

表 3.5-4 中国における高速炉の建設・運転現状

名称	所在地	グロス電気出力(MW)	ステータス	建設開始	運転開始
中国実験高速炉(CEFR)	北京市	25	運転中	2000 年 5 月 10 日	2011 年 7 月 21 日
中国実証高速炉(CDFR (CFR-600)、霞浦 1)	福建省 霞浦市	682	建設中	2017 年 12 月 29 日	—

出所)IAEA PRIS の情報に基づき三菱総合研究所にて作成

2) 再処理した燃料の利用計画

高速炉の開発について、CNNC グループの中国原子能科学研究院が 2017 年 9 月に日本の経済産業省の高速炉開発会議戦略ワーキンググループで行ったプレゼンテーションによると、中国原子能科学研究院が構想している開発は 2 段階に分かれており、第 1 段階は増殖炉の開発で、PWR の使用済燃料中のプルトニウムは、全て酸化物燃料として高速炉で燃焼することが構想されている。2050 年以降の第 2 段階では、増殖や放射性物質の減容等が行われ、リサイクル可能な核変換高速炉の実現が目標とされる。また、本プレゼンテーションによると、CDFR に続いて電気出力 120 万 kW の中国商用高速炉(CCFR)について、2025 年までに概念設計を終え、2028 年に建設を開始し 2034 年に運転を開始することが構想されている。再処理技術的には、MOX 燃料(酸化物燃料)と、湿式再処理をベース

⁷⁹ 電気出力が 60 万 kW であることから、CDFR の略称を「CFR600」としている文献もある。

として考えられているものの、増殖性の観点から将来は金属燃料に移行していくことが構想されているとのことである[3.5-42][3.5-43]。

(2) 高温ガス炉の開発における FE/BE 分野の政策・技術開発動向

1) 高温ガス炉の建設や運転の状況

中国では、高温ガス炉は既に研究炉(HTR-10)と実証炉(HTR-PM)がそれぞれ 1 基ずつ、運転を開始している。

中国政府は、1992 年に HTR-10 の建設を承認した。2003 年には全出力運転が実施されている。HTR-10 の開発や運転は、清華大学の原子力・新エネルギー技術研究院(INET)が行っており、北京市に立地している。炉型はペブルベッドモジュール高温ガス冷却炉であり、冷却材はヘリウムガス、減速材は黒鉛である。熱出力は 10MW(t)となっている。

HTR-10 では、TRISO 型被覆燃料粒子を封入した球形の燃料要素が 2 万 7,000 個炉心に装荷され、運転が行われる。燃料の濃縮度は 17%であり、燃焼度は 80GWd/tとなっている。

HTR-PM は、2012 年 12 月に建設が開始され、2021 年 12 月に発電を開始している。HTR-PM も HTR-10 と同様に、INET が開発を行っており、所有者は大手電気事業者の華能グループであり、運転者は同グループの子会社となっている。HTR-PM は山東省石島湾に立地している。HTR-PM も HTR-10 と同様に、炉型はペブルベッドモジュール高温ガス冷却炉であり、冷却材はヘリウムガス、減速材は黒鉛である。HTR-PM は 1 基の発電プラントが 2 台のモジュールで構成され、モジュール 1 台当たりの熱出力は 250MW(t)、1 基の発電プラントとしての電気出力は 210MW(e)となっている。

燃料に関して、HTR-PM では HTR-10 と同様の燃料要素が 1 台のモジュールに 42 万個装荷される。燃料の濃縮度は 8.5%であり、燃焼度は 90GWd/tとなっている[3.5-44]。

2) 高温ガス炉の使用済燃料の取扱い方針

2020 年発行の IAEA の「小型モジュール炉の技術開発における進展」の情報によれば、HTR-10 では、初めのうちはワンスルーサイクルが実施されるとのことである。また HTR-PM では現在は、ワンスルーサイクルが実施されているとのことである。ただし、使用済燃料が一定量に達し、再処理技術が経済的に利用できるようになった場合におけるクローズドサイクルにも言及されている[3.5-42]。

3) 高温ガス炉の燃料製造

中国では、高温ガス炉の燃料製造は国内で実施されている。CNNC の 2015 年 5 月の情報によると、CNNC グループの中核北方核燃料元件有限公司の高温ガス炉核燃料生産ラインは 2013 年 3 月に建設が開始された。総投資額は 3 億人民元近くだが、全額が国の財政専門プロジェクト資金から拠出されるとのことである。年間製造能力は、球形の燃料要素 30 万個となっている。この情報時点では、2015 年 9 月には HTR-PM 用の燃料の製造が開始されることとなっていた[3.5-45]。

次に、CNNC は 2021 年 1 月に公表したプレスリリースにおいて、同月 9 日に中核北方核燃料元件有限公司が HTR-PM 用の燃料を出荷したことを伝えている。今回出荷されたのは、球形の燃料要素 7

万 8,000 個であり、全体では 87 万個の燃料要素が出荷されることになっている。また、この情報の時点で既に製造が完了し、合格とされた燃料要素は 73 万個であったとのことである[3.5-46]。

(3) 溶融塩炉の開発における FE/BE 分野の政策・技術開発動向

1) 溶融塩炉の開発や建設の状況

溶融塩炉については、中国科学院に属する上海応用物理研究所(SINAP)が開発を進めている。中国科学院は 2011 年 1 月、30 億人民元を投じて現地ではトリウム増殖溶融塩炉(Th-MSR または TMSR)として知られている液体フッ化物トリウム炉(LFTR)の開発プログラムを開始した。熱出力 2MW(t)の原型炉 TMSR-LF1 は 2018 年 9 月に着工し、2021 年 8 月に建設が完了したとのことである。

2) 溶融塩炉における FE/BE 分野の技術開発動向

TMSR-LF1 は、U-235 を 20%以下に濃縮した燃料を使用し、トリウムのインベントリは約 50kg、転換比は約 0.1 である。99.95%の Li-7 を含むフッ化リチウム-ベリリウム(FLiBe)の核分裂性ブランケットを使用し、燃料は UF_4 とする予定である。

プロジェクトはバッチ式で開始され、オンラインで燃料補給とガス状核分裂生成物の除去を行うが、5～8 年後にすべての燃料塩を排出し、再処理と核分裂生成物とマイナーアクチニドの分離保管を行う予定である。その後、塩、ウラン、トリウムを連続的にリサイクルし、核分裂生成物とマイナーアクチニドをオンラインで分離する工程に移行する予定となっている。TMSR-LF1 は、トリウム核分裂率 20%程度から 80%程度まで稼働させる予定である[3.5-47]。

4. 各調査視点における整理

4.1 ウラン燃料需給

現在、世界的にカーボンニュートラルの達成とエネルギー安全保障の向上を同時に目指す中、原子力発電への期待も大きくなっている。一方、ロシアからウラン燃料を輸入していた国の一部においては、ロシア以外の国からの燃料供給を検討している国もあり、ロシアのウラン供給能力依存からの脱却により、ウラン燃料の需給バランスへの影響が懸念される。

本節では、これまでのウラン需給状況を整理するとともに、ウクライナ侵攻後の各国の脱ロシアに関する動向を整理し、将来的にウラン需給がひっ迫するか否かの見通しを検討した。

(1) これまでのウラン需給状況

ウラン燃料の供給においては、大きくウラン採掘能力、転換能力、濃縮能力、燃料製造能力、再処理能力の5つの要素が重要となるが、燃料製造については施設数が多く各国にて製造されていることや、再処理については実施している国が限定的であることから、ウラン採掘、転換、濃縮の三要素に焦点を当てて、これまでの状況を整理した。

1) ウラン採掘

これまでの天然ウランの製造と需要との関係性を図4.4-1及び図4.4-2に、EUと米国でのウラン在庫の状況を表4.1-1に示す。1990年まではウラン製造量が需要を大きく上回っており、1990年以降は、それらの在庫を消費しながら、ウラン燃料が供給されていることが分かる。表4.1-2に、各国の2021年に製造した天然ウラン量を示す。カザフスタンが全世界の約45%の天然ウラン製造を占めており、ロシアは5.5%を占めていることが分かる。

Figure 2.8. Annual uranium production and requirements
(1949-2019)

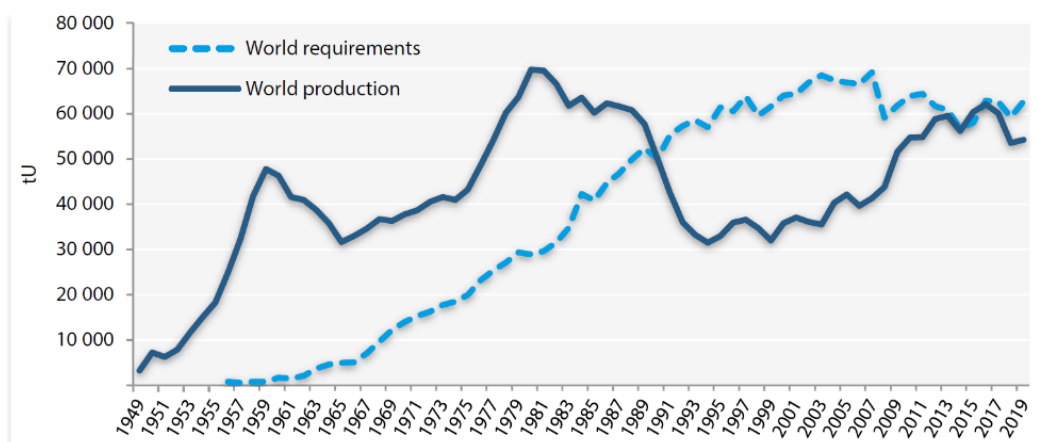


図 4.1-1 各年におけるウラン製造量と要求量[4-1]

Figure 2.9. **Cumulative uranium production and requirements**
(1949-2019)

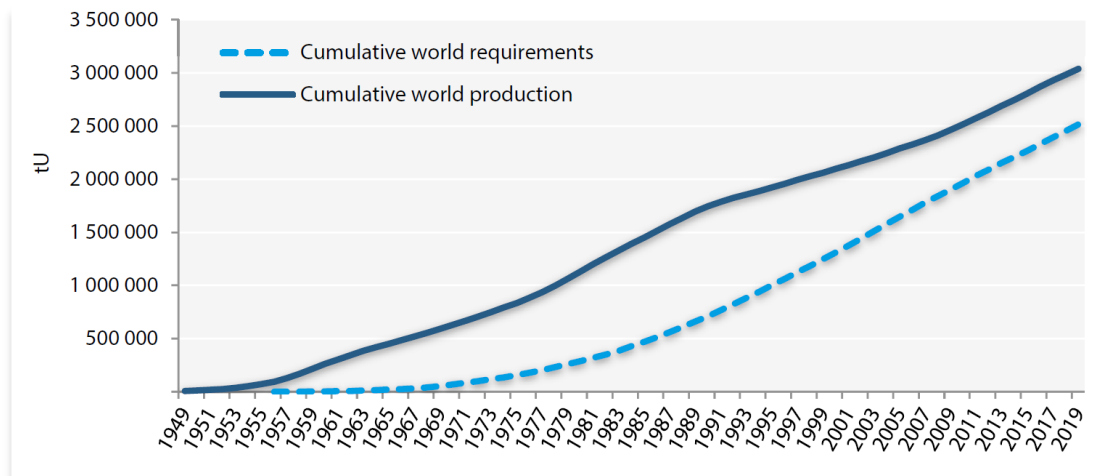


図 4.1-2 ウラン製造量と要求量の累計[4-1]

表 4.1-1 EU、米国におけるウランインベントリ(在庫)[4-1]

Table 2.6. **Uranium inventories held by EU and US utilities**
(tonnes natural U equivalent at the end of the year)

Year	Inventories held by EU utilities (tU)	Inventories held by owners and operators of the US NPPs
2015	51 892	46 589
2016	51 514	49 217
2017	49 004	47 635
2018	45 342	42 759
2019	42 912	43 385 ^(a)

Source: ESA Annual Report, 2019 and 2020; US EIA Uranium Marketing Annual report 2019 and 2020.

a) Preliminary data.

表 4.1-2 2021 年における天然ウラン製造量[4-2]

Table 8. Natural uranium production in 2021 (compared to 2020, in tonnes of uranium equivalent).

Region/country	Production 2021 (estimate)	Share in 2021 (%)	Production 2020 (final)	Share in 2020 (%)	Change 2021/2020 (%)
Kazakhstan	21 819	45.2%	19 477	40.8%	12.0%
Namibia	5 753	11.9%	5 413	11.3%	6.3%
Canada	4 693	9.7%	3 885	8.1%	20.8%
Australia	4 192	8.7%	6 203	13.0%	-32.4%
Uzbekistan	3 500	7.2%	3 500	7.3%	0.0%
Russia	2 635	5.5%	2 846	6.0%	-7.4%
Niger	2 248	4.7%	2 991	6.3%	-24.8%
China	1 885	3.9%	1 885	3.9%	0.0%
Others	730	1.5%	531	1.1%	37.5%
Ukraine	455	0.9%	744	1.6%	-38.8%
South Africa	385	0.8%	250	0.5%	54.0%
United States	8	0.0%	6	0.0%	33.3%
Total	48 303	100	47 731	100	1.2%

Source: Data from the WNA and specialised publications (because of rounding, totals may not add up).

2) 転換

転換施設一覧を表 4.1-3 に示す。ロシア企業の Rosatom は世界のウラン転換能力のうち 20% を占めており、仏国、カナダ、米国の企業の転換能力の合計値は 34,500 tU (UF₆ 状態、UO₂ 換算で約 26,000 tU) であり、世界のウラン転換能力の 55% を占める。また、EU 内においては、Rosatom からの転換サービス受給率は 25.5% (2021 年、3,039 tU) となっている[4-2]。

表 4.1-3 商業 UF₆ 転換施設[4-2]Table 9. Commercial UF₆ conversion facilities

Company	Nameplate capacity in 2020 (tU as UF ₆)	Share of global capacity (%)
Orano* (France)	15 000	24
CNNC** (China)	15 000	24
Rosatom (Russia)	12 500	20
Cameco (Canada)	12 500	20
ConverDyn*** (United States)	7 000	11
Total nameplate capacity	62 000	100

Because of rounding, totals may not add up.

Source: www.world-nuclear.org

* Approximate capacity installed 10 500 tU

** Information on China's conversion capacity is uncertain.

*** Activity suspended since end of 2017.

3) 濃縮

ウラン濃縮施設一覧を表 4.1-4 に示す。ロシア企業の Rosatom は世界の濃縮能力のうち 46% を占めており、英国、独国、蘭国、米国、仏国の企業の濃縮能力の合計値は 22,980 tSW⁸⁰であり、世界の濃縮能力の42%を占める。なお、表 4.1-4 では、日本を含む濃縮能力は 66 tSW となっているが、既設遠心機の一部を生産機能停止しているためである。今後日本としては段階的に新型遠心機の更新工事等を行い、2027 年までに年間 1,500 tSW 規模の濃縮能力を達成する計画となっている[4-3]。また、EU 内においては、ロシアからの濃縮サービス受給率は 31% (2021 年、3,190 tSW) となっている[4-2]。一方、米国においてはロシアからの濃縮サービス受給率は 32% (2021 年、3,953 tSW) となっている[4-4]。

表 4.1-4 商業ウラン濃縮施設[4-2]

Table 10 Operating commercial uranium enrichment facilities, with approximate 2020 capacity

Company	Nameplate capacity (tSW)	Share of global capacity (%)
Rosatom (Russia)	27 654	46%
Urenco (UK/Germany/Netherlands/United States)	18 230	30%
Orano (France)	7 500	12%
CNNC (China)	6 750	11%
Others * (INB, JNFL)	66	0%
Total nameplate capacity	60 200	100%

Because of rounding, totals may not add up.

Source: WNA, The Nuclear Fuel Report - Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2019-2040.

** INB, Brazil; JNFL, Japan*

⁸⁰ SW (Separation Work) は分離作業量の単位であり、ウランを濃縮する際に必要となる仕事量を示す。例えば、天然ウランから 3% 濃縮ウランを 1kg 生成するためには、約 4.3kgSWU の分離作業量が必要[4-3]

(2) ウクライナ侵攻後の脱ロシアに関する動向

ウクライナ侵攻後、特にロシアと距離が近い EU 諸国において、脱ロシアに関する動向が多くあったことから、各国別に以下状況を整理した(図 4.1-3、表 4.1-5)。

ウクライナ

- 既存 15 基はすべて VVER。
- 2000 年代初頭から燃料供給先の多様化に向け、米 WH 社と交渉を開始し、2010 年から VVER-1000 炉にて、米 WH 社製燃料の装荷を開始。
- 2022 年の段階で、8 基で米 WH 社燃料の供給が開始
- 新設炉建設でも脱ロシアが進んでおり、2016 年にフメルニツキ3、4号機の建設契約を破棄、その後 2021 年に米 WH 社と 5 基の建設契約を締結。ウクライナ侵攻後は、2022 年 6 月に 5 基から 9 基への拡大で合意。

チェコ

- 既存 6 基はすべて VVER。
- ドコバニ原子力発電所増設の入札手続きについて、ロシアも関心を表明していたが、2014 年に発生した弾薬庫爆発事件へのロシア情報機関の関与が確認され、安全保障上の理由から 2021 年 4 月にロシアを入札手続きから排除。
- テメリン原子力発電所の VVER 燃料について 2025 年以降は米 WH、仏 Framatome が供給者として選定
- ドコバニ原子力発電所の既存炉については、ロシアのみ適合燃料を提供できるため、運転終了までロシアから供給を受ける見通し。

スウェーデン

- VVER を保有していないが、2016年以降ロシアから PWR 燃料の供給を受ける。
- ウクライナ侵攻後、直ちにロシアからの燃料供給を全面停止。ロシア以外の様々な国から調達する意向を表明。

フィンランド

- ハンヒキビ原子力発電所1号機は VVER-1200 を建設する予定であったが、2022 年 5 月にロシアとの契約を解除し、建設許可申請を撤回。

スロバキア

- 運転中 4 基、建設中 2 基すべてが VVER。
- ウクライナ侵攻後、燃料供給多様化に向けた交渉を米 WH と開始。ただし、現状ではロシアが唯一の供給者であり、当面の燃料を確保する必要があることから、2022 年 3 月にはロシア航空機の EU 領空飛行禁止措置の適用除外を EU に申請し、ロシアからの核燃料特別空輸を手配。

ブルガリア

- 運転中 2 基が VVER(Kozloduy 発電所、VVER-1000)。
- 2025 年までは TVEL と Kozloduy 発電所への供給契約を実施。2025 年以降は Westinghouse/Framatome と 10 年契約で燃料を調達することに合意。

一方、ロシアとの関係を継続する動向については以下の通りである。

ハンガリー

- 中長期的な電力確保、国内消費者への影響への懸念から、パクシュ II 原子力発電所(VVER-1200、2 基)の建設計画は続行。
- 2023 年 1 月に、ハンガリー首相はロシアの原子力組織や企業に課せられる EU 制裁※を拒否する意向を示し、2 月に EU 議会はロシアの原子力部門に制裁を課す計画を中止した。
※ウクライナが EU 加盟国 27 か国に対し ROSATOM を制裁に含めるように求めているもの

トルコ

- アックユで VVER-1200 を 4 基建設する計画が進められており、ウクライナ侵攻前の段階で 3 基の建設が開始済み。ウクライナ侵攻による計画の変更はなく、2022 年 7 月には 4 基目の建設も開始。

アルメニア

- VVER-440(1 基)の燃料供給について TVEL と 2022 年 8 月に契約。
- 2036 年まで稼働予定

ベラルーシ

- 2023 年 1 月に TVEL はベラルシアン1号機に燃料を供給。

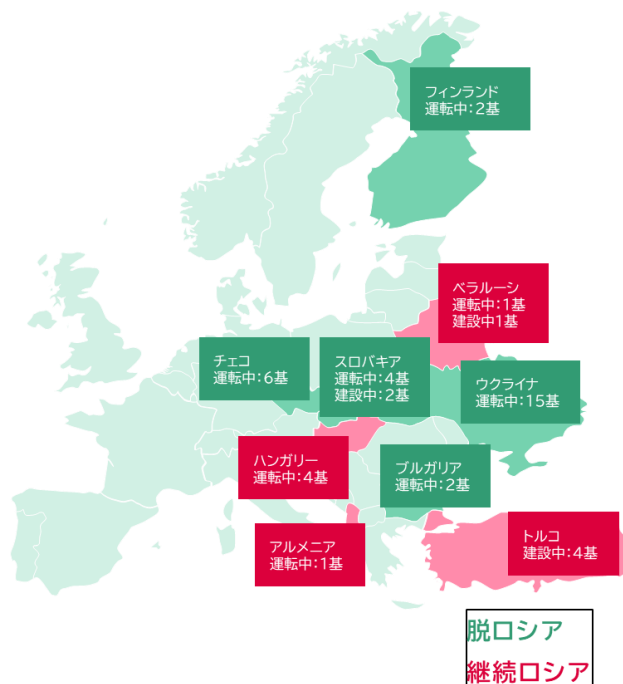


図 4.1-3 ヨーロッパにおける脱ロシア・継続ロシアの動向を示す国々

表 4.1-5 ヨーロッパにおける各国のロシア燃料供給の動向

国	プラント名	モデル	設備容量[MW]	発電開始[年]	燃料供給動向
ウクライナ	KHMELNITSKI-1	VVER-1000	1,000	1987	Westinghouse 社製に変更
	KHMELNITSKI-2	VVER-1000	1,000	2004	
	ROVNO-1	VVER-440	420	1980	
	ROVNO-2	VVER-440	415	1981	
	ROVNO-3	VVER-1000	1,000	1986	
	ROVNO-4	VVER-1000	1,000	2004	
	SOUTH UKRAINE-1	VVER-1000	1,000	1982	
	SOUTH UKRAINE-2	VVER-1000	1,000	1985	
	SOUTH UKRAINE-3	VVER-1000	1,000	1989	
	ZAPORozHYE-1	VVER-1000	1,000	1984	
	ZAPORozHYE-2	VVER-1000	1,000	1985	
	ZAPORozHYE-3	VVER-1000	1,000	1986	
	ZAPORozHYE-4	VVER-1000	1,000	1987	
	ZAPORozHYE-5	VVER-1000	1,000	1989	
	ZAPORozHYE-6	VVER-1000	1,000	1995	
チェコ	DUKOVANY-1	VVER-440	500	1985	2035～2037年 まで稼働し、ロシア から引き続き燃料 を受給
	DUKOVANY-2	VVER-440	500	1986	
	DUKOVANY-3	VVER-440	500	1986	
	DUKOVANY-4	VVER-440	500	1987	
	TEMELIN-1	VVER-1000	1,082	2000	2025 年以降 Westinghouse 社製を使用
	TEMELIN-2	VVER-1000	1,082	2002	
スロバキア	BOHUNICE-3	VVER-440	500	1984	しばらくの間、ロシ アから継続して燃料 を受給
	BOHUNICE-4	VVER-440	500	1985	
	MOCHOVCE-1	VVER-440	500	1998	
	MOCHOVCE-2	VVER-440	500	1999	
	MOCHOVCE-3	VVER-440	471	2022	
ブルガリア	KOZLODUY-5	VVER-1000	1,040	1987	2025 年以降 Westinghouse 社製を使用
	KOZLODUY-6	VVER-1000	1,040	1991	
ハンガリー	PAKS-1	VVER-440	509	1982	ロシアから引き続き 燃料を受給
	PAKS-2	VVER-440	506	1984	
	PAKS-3	VVER-440	506	1986	
	PAKS-4	VVER-440	506	1987	
アルメニア	ARMENIAN-2	VVER-440	451	1980	ロシアから引き続き 燃料を受給
ベラルーシ	BELARUSIAN-1	VVER-1200	1,194	2020	

表 4.1-5 に記載のロシア産燃料からの切り替えを表明している国(ウクライナ、チェコ、スロバキア、ブルガリア)の全てのプラントの設備容量は約 23GW となる。これは、EU 内での設備容量 104GW のおよそ 21%に相当する。EU 加盟国のチェコ、スロバキア、ブルガリアのプラントのみの合計としては、9 GW となり、EU 内での 8.4%相当となる。この23GW の設備容量に対するウラン燃料供給に必要な濃縮能力は、約 2,200 tSW(天然ウラン約 2,600 tU 相当)と算出される⁸¹。これは全世界のウラン濃縮能力の約 3.6%に相当する。なお、本算出は厳密な計算ではなく、あくまである年度の設備容量と濃縮サービスとの比率で簡易的に算出した結果であることに注意する必要がある。燃料の炉心内での燃焼期間などを考慮すると、単年度での算出は適切ではないが、簡易計算のため、このような算出とした。

ロシア産燃料からの切り替えについて、VVER への燃料供給に関する動向を図 4.1-4 と以下に整理した。

- 2014 年のクリミア併合によって、EU および近隣国は VVER 市場における核燃料供給の多様化を開始
- EU のエネルギーセキュリティ戦略 2014 では、EU 外部の供給者への依存を低減することを決定
- VVER 燃料供給においては、ESSANUF(European Supply of SAfe NUclear Fuel) プロジェクトが 2015 年から始まり、西 ENUSA を含むウェスチングハウスリードのコンソーシアムにて進展
- VVER-1000 についてはロシア以外のサプライチェーンがあるが、VVER-440 はロシア以外のサプライチェーンが存在していなかった
- VVER-440 への燃料供給動向については次の通り
 - 2002-2007 年:の間にフィンランドの Loviisa プラントにて 750 体の VVER-440 の燃料集合体を装荷(Westinghouse/ENUSA)
 - 2015-2017 年: ESSANUF にて、Westinghouse/ENUSA で協業
 - 2022 年 9 月:Westinghouse/ENUSA 間で VVER-440 の燃料製造をしていくことで合意
 - 2023 年 1 月:2024 年上期から燃料供給を開始すると発表

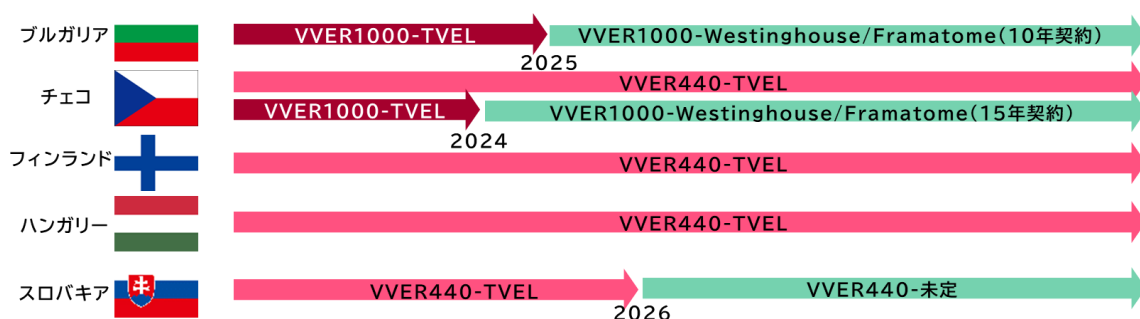


図 4.1-4 VVER からの燃料切り替えに関する動向

⁸¹ EU、104GW の設備容量の原子力発電所に対して、2021 年度に 10,290 tSW(12,176 tU)の濃縮サービスが提供されたことから算出[4-2]。

(3) 今後の原子力発電の伸張予測

OECD-NEAにより出されている2040年までの今後の天然ウラン需要の増減見込みを図4.1-5、図4.1-6に示す。2018年時点では年間59,200 tUの需要量であったのに対し、2040年にかけて56,640～100,224 tUと需要の伸張には幅がある。また、本試算は2020年時点の公表であり、ウクライナ侵攻後の試算結果ではないことから、更なる伸張が予測される。例えば、EUでは2018年時点で117.9GWの原子力発電の設備容量であり、2040年時点の設備容量予測は、高位ケースで108GW、低位ケースで61.1GWであるが、英国(2018年当時はEU)では2050年までに24GWの導入を目指し、仏国では2050年までに6基建設する意向が示されている。

一方、World Nuclear Associationは2035年頃より供給能力を超える濃縮ウラン需要量が8,000 tSW必要と試算している(図4.1-7)。

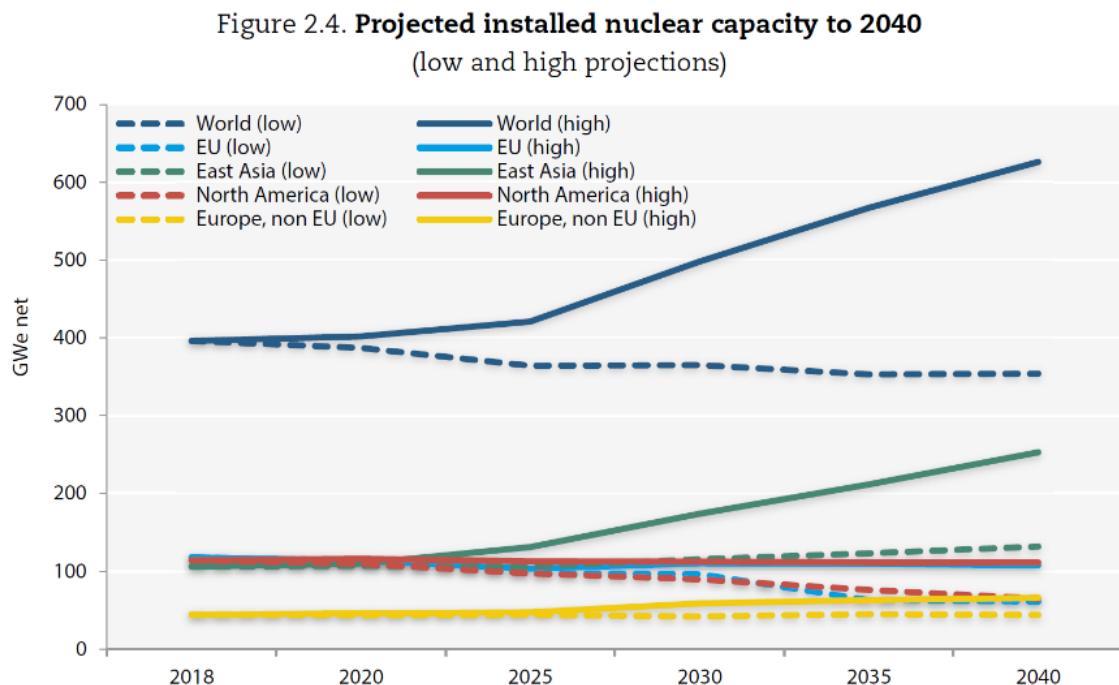


図 4.1-5 2040 年までの原子力発電設備容量増加の見込み[4-1]

Figure 2.5. **Annual reactor uranium requirements to 2040**
(low and high projections)

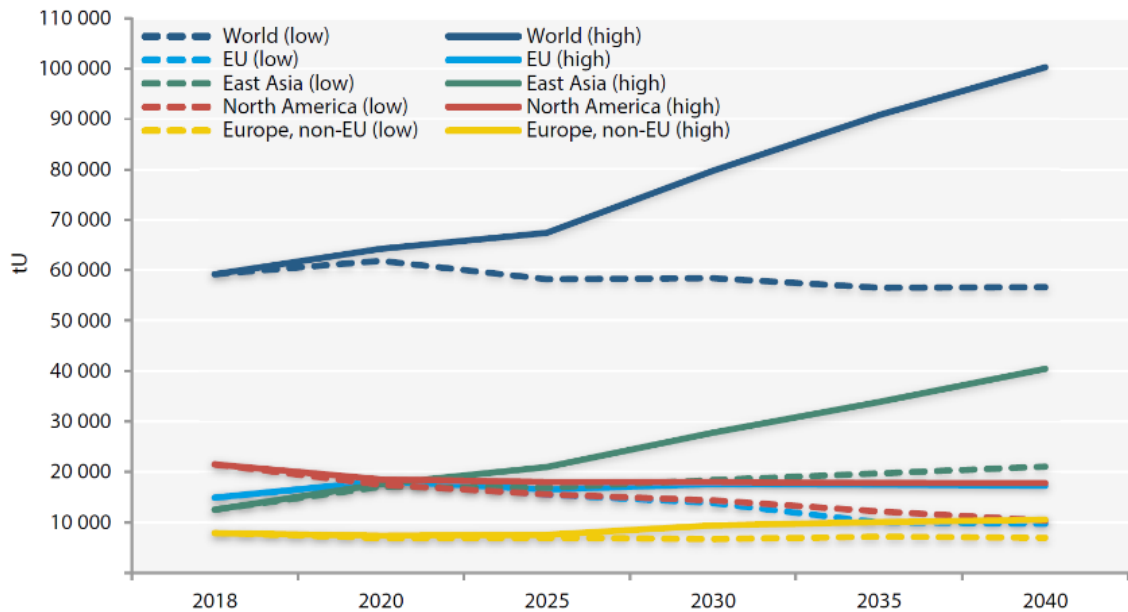


図 4.1-6 2040 年までの天然ウラン需要の見込み[4-1]

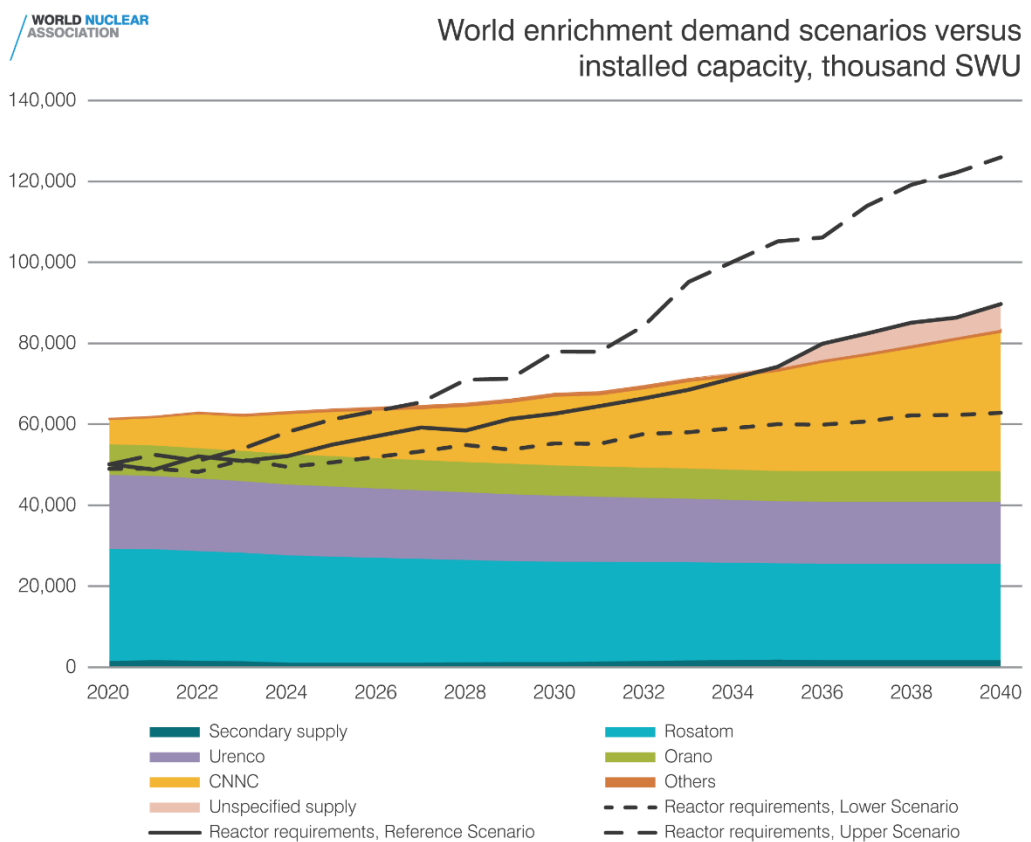


図 4.1-7 2040 年までの濃縮ウランの需要と供給の関係[4-7]

(4) ウラン燃料の需給予測

(1)～(3)項までの調査結果をもとに、ウクライナ侵攻によるロシア産燃料からの切り替えによって、今後の濃縮ウランの需給バランスがどうなるか検討した。図 4.1-8 及び図 4.1-9 に検討結果を示す。なお、図中の枠線なしのボックスについては、当社で試算した結果であることに注意が必要である。なお、当該国の年間発電電力量と米国の年間発電電力量(843TWh、2021年)との比より、濃縮サービス量を算出している。Urenco 及び Orano の現時点での濃縮能力は、25,730 tSW となっている。一方、簡易試算結果を含む濃縮サービス量は、米国、ウクライナ、英国(UK)、EU 合わせて約26,647 tSW であり、この時点で Urenco 及び Orano の濃縮能力合計値を約 1,000 tSW 分上回っている。

このことから、今後 EU 及び米国でロシアからの濃縮サービスをすべて切り替えた際には、濃縮能力が不足することが明らかであり、濃縮能力の増強が求められる。

さらに、将来を見据えた場合、(3)項で示したとおり、世界全体で原子力発電が伸張することが考えられ、その際には必要な濃縮サービス量はさらに増える方向となる。一方、日本の六ヶ所村の濃縮施設は最終的には 1,500 tSW の能力を目指しており、六ヶ所村の濃縮施設の稼働や、日本、仏国における再処理および MOX 燃料利用を想定すると、必要な濃縮サービス量は減る方向となる。トータルとして濃縮能力が足りるか否かは今後も注視が必要と考えられる。

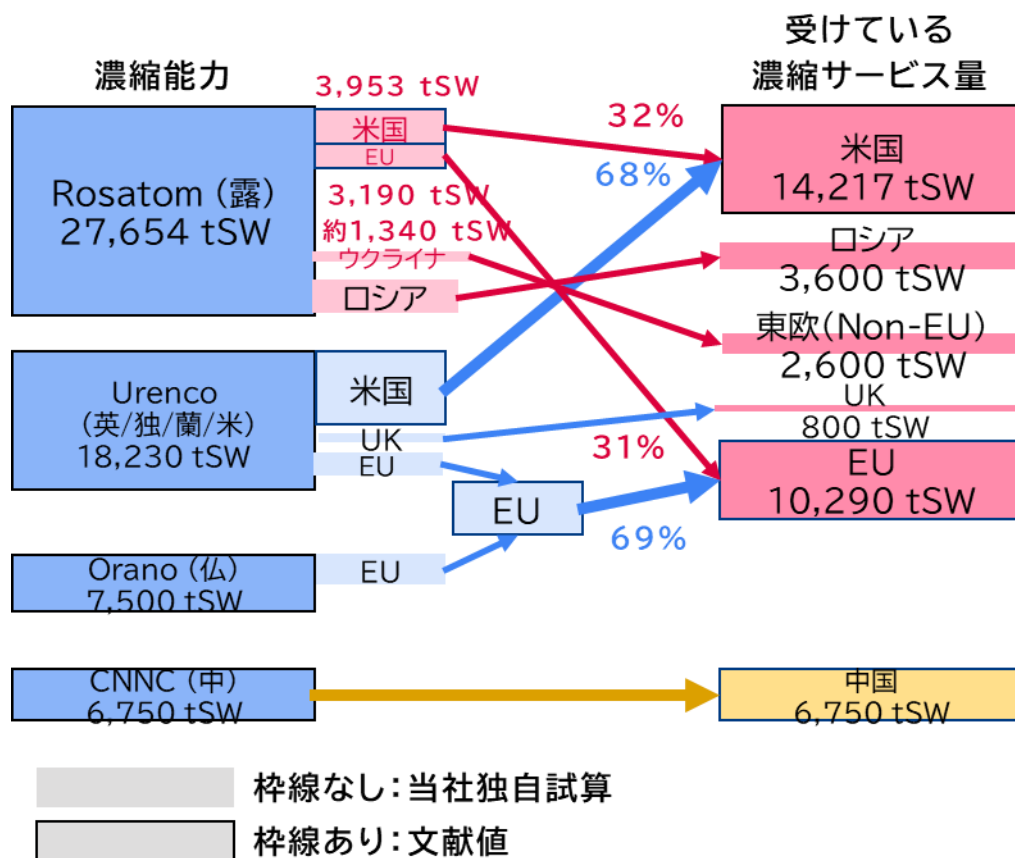


図 4.1-8 現時点での濃縮ウラン供給の関係図

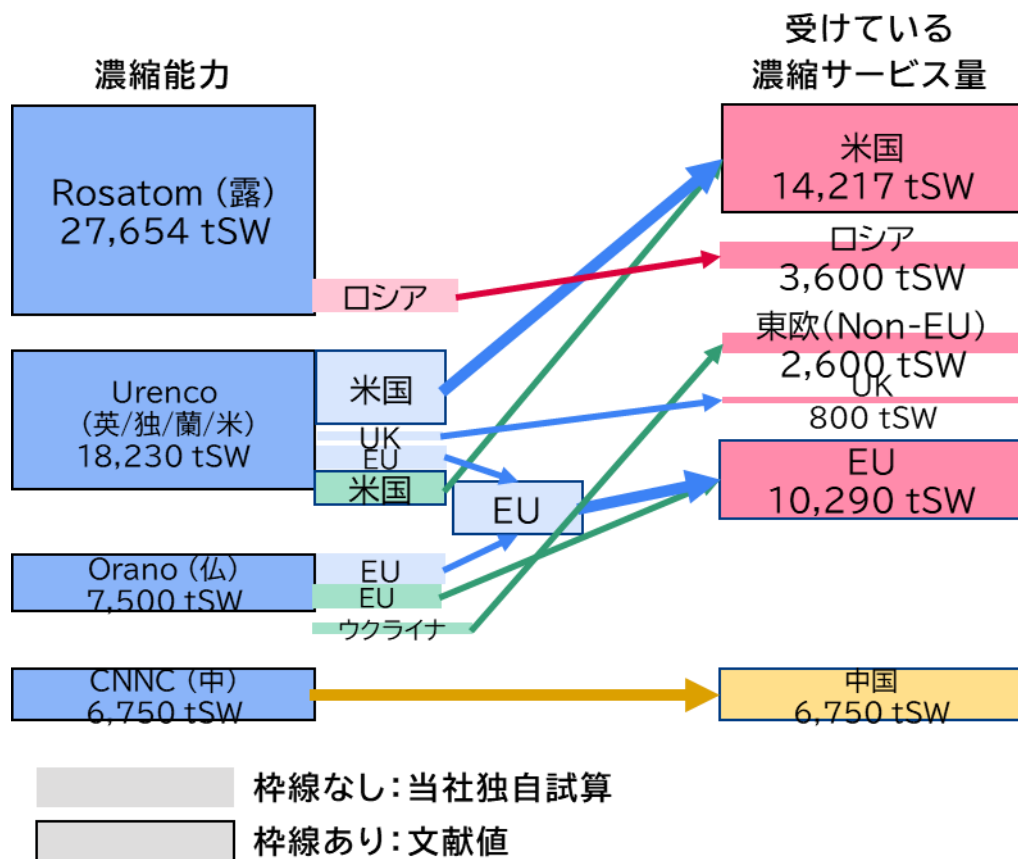


図 4.1-9 ロシア産燃料からの脱却が生じた際の濃縮ウラン供給の関係図

4.2 回収ウランの利用

燃料供給の多角化・自給率の向上により、エネルギー安全保障をより担保することができる。燃料供給の多角化・自給率の向上の一環として、使用済燃料を再処理し、回収ウラン及びプルトニウムを再度燃料として利用することが挙げられる。

プルトニウム利用については 4.3 節で述べることとし、ここでは回収ウランの利用に着目して情報を整理した。

以下、3 章での各国調査結果を再度まとめるとともに、日本における情報も整理した。

米国：

米国において、民生部門では、使用済燃料の再処理は 1970 年代を最後に以後は実施されておらず、回収ウランは発生しないため、回収ウランの利用も行われていない。

英国：

英国では、マグノックス炉の使用済燃料の再処理によって回収されたウランを再濃縮して AGR 燃料として再利用した実績がある。再利用された回収ウランは 15,000 トンにのぼるが、この再利用は経済的理由から 1990 年代に終了している[3.2-13]。回収ウラン、劣化ウランは 2013 年時点で 17 万 tU 存在している(このうち、未照射の劣化ウランが 10 万 8500tU、回収ウランが 5 万 4000tU)[3.2-14]。

ロシアのウクライナ侵攻を受けて回収ウラン転換を英国内で行うための設備投資をするとしており、今後は回収ウランの再利用を再開する方針と考えられる。

仏国：

フランスでは再処理により発生した回収ウランも燃料として再利用されている。回収ウランの濃縮には遠心分離技術が必要であったが、フランスでは当初ガス拡散法が採用されていたため、回収ウランの濃縮はロシアの TENEX 社に委託されていた。この回収ウラン燃料は 1994～2003 年にかけて合計 600 トン、クリュアス原子力発電所の 4 基の 90 万 kW 級 PWR において装荷された実績がある。ただし、2013 年以降、ウラン価格の下落と、TENEX 社のプラントにおける回収ウラン濃縮によって発生する廃液処理が EDF の環境・技術基準に適合しないことに起因する EDF と TENEX 社との間の対立が原因で中断された。このため回収ウランはトリカスタンの Orano 社サイトにおいて貯蔵されているが、2023 年頃に貯蔵容量の逼迫が予想されることから、EDF は回収ウラン燃料のクリュアス原子力発電所における装荷を再開する方針である。現在は Orano 社の Georges Besse II 濃縮プラントにおいて、遠心分離技術が採用されていることから、国内での濃縮・燃料加工が可能となっており、燃料製造は 2022 年頃から開始される見込みである[3.3-22]。

一方、EDF は 2018 年、TENEX 社及び URENCO 社と回収ウランの転換・濃縮に関する契約を締結した。TENEX 社が自社プラントの状態を EDF の環境・技術基準に適合させたことを確認した上で、EDF は 2021 年 11 月、 U_3O_8 形態の回収ウランをロシアに向けて搬出した。この第 1 回委託分の回収ウランは TENEX 社のセヴェルスク(Seversk)プラントで転換され、次いでオランダのアルメロ(Almelo)にある URENCO 社のプラントで濃縮された後、フランスに返還されて Framatome 社の

ロマン＝シュル＝イゼール(Romans-sur-Isère)のプラントで PWR 用の燃料集合体に成型加工される。この回収ウラン燃料は 2023 年にクリュアス発電所の PWR に装荷される予定である。EDF はさらに、2027 年以降、130 万 kW 級 PWR においても回収ウラン燃料を装荷していく計画である[3.3-23]。

ロシア：

生産合同マヤクの再処理工場 RT-1 は、1971 年に操業を開始して以来、2012 年までに、5000t 程度の使用済燃料処理実績を有する。

回収ウランについては、主に RBMK 燃料製造工場において、RBMK 用の燃料として年間約 200t の回収ウランが利用されている。RBMK の燃料の 50%まで回収ウラン利用が許可されており、実績比率は約 40～50%である(2004 年時点)。

また、ドイツ、オランダ、イギリス等、海外からの回収ウランを再濃縮した実績も有する。

中国：

中国では回収ウラン・プルトニウムも活用して資源利用の最大化を図る方針である。

WNA によると、2008 年に CNNC グループの中国核動力研究設計院(NPIC)が、CANDU 炉を使用しているカナダ原子力公社(AECL)と、PWR の使用済燃料から回収したウランの再利用等の研究開発に関する契約を締結し、回収ウランの再利用に関する両国の協力が開始された。両国の協力で、2 基の CANDU 炉を擁する秦山第三原子力発電所において、PWR の使用済燃料から回収したウランを最大 1.6%まで(通常は 0.9%)高めて再利用した燃料の使用に関する技術開発が進められている。この技術の最初の実証は、秦山第三 1 号機で実施され、通常の CANDU 炉の燃料(0.7%のウラン 235)と同等の濃度にすべく回収ウランを劣化ウランと混合した 12 体の燃料集合体が装荷された。挙動は天然ウランを原料とした燃料と同様であった[3.5-5]。

日本：

日本の回収ウラン転換技術開発は、岡山県の旧動燃事業団人形峠事業所において 1978 年ごろから基礎的な試験検討が始まった。その後、回収ウランの再濃縮を含めて、旧核燃料サイクル機構(現日本原子力研究開発機構)と電力 10 社との共同研究として技術開発が進められた。

年間 120tU 処理の設計能力を持つ実用化試験設備を設置し、1994 年から 2000 年ごろまで稼働した。

合計約 335tU の UF_6 が転換された。この回収ウラン UF_6 は、人形峠の施設で再濃縮され、さらに国内で燃料加工され実際に国内発電炉で用いられた。

表 4.2-1 各国の回収ウラン利用実績と今後の方針

国	実績・方針
アメリカ	実施していない
イギリス	過去実績あり／現在は実施していない／今後再開する方針
フランス	実施中
ロシア	実施中(他国の SF も受け入れている)
中国	実施していない／試験実績あり／今後実施する方針
日本	実施していない／試験実績あり

4.3 Pu 利用

燃料供給の多角化・自給率の向上により、エネルギー安全保障をより担保することができる。燃料供給の多角化・自給率の向上の一環として、使用済燃料を再処理し、回収ウラン及びプルトニウムを再度燃料として利用することが挙げられる。

加えて、我が国においては「利用目的のないプルトニウムは持たない」という原則を堅持していることから、再処理により分離したプルトニウムの利用を確実なものとする必要がある。

すなわち再処理する場合は、プルトニウムを「利用できる」とともに「利用しなければならない」という観点も存在すると言える。

以下、3 章での各国調査結果を再度まとめるとともに、日本における情報も整理した。

米国:

米国において、民生部門では、使用済燃料の再処理は 1970 年代を最後に以後は実施されておらず、プルトニウムは発生しないため、プルトニウムの利用も行われていない。

英国:

これまで英国で行われた再処理は、過去の契約に基づき実施されたマグノックス炉、AGR の使用済燃料のみであるが、過去の契約に基づく再処理の完遂後には、国内に 140 トンのプルトニウムストックが存在することになると見込まれている。これらのプルトニウムの管理方針については、政府は 2011 年 12 月に取りまとめた報告書において、①MOX 燃料として利用、②固化したうえで直接処分、③貯蔵を継続という 3 つの方針を検討した結果、①MOX 燃料として利用するのが最適なおプションであると結論している[3.2-15]。なお、MOX 燃料として再利用する炉としては、軽水炉だけでなく、Nuscale 小型モジュール炉や CANDU 炉、PRISM 炉等での再利用も検討されている[3.2-15][3.2-16]。

一方で、プルトニウム管理の責任を負っている NDA は 2016 年に仏 Orano 社と 5 年契約を締結し、プルトニウムストックを MOX 燃料に加工するソリューションの検討を行っている[3.2-17]。2019 年 11 月には、英国からフランスに数百グラムの酸化プルトニウムサンプルが輸送されている[3.2-18]。さらに、2022 年 6 月には新興企業ニュークレオ社が鉛冷却高速炉(LFR)で用いる MOX 燃料製造工場建設の資金調達に成功したと発表しており、今後英国内では引き続き MOX 燃料としてのプルトニウム利用を行う方向性と考えられる[3.2-19]。

仏国:

フランスでは使用済燃料の再処理を行い、回収したプルトニウムを MOX 燃料に加工して再利用している。同国は、プルトニウムのストック量が増加することを避けるために、プルサーマルを行うのに必要な分の再処理しか行わない方針である(日本と同様の方針)。現在、国内で MOX 燃料の装荷が許可されているのは全 56 基の商用炉のうち 24 基[3.3-24]であるが、2019 年末時点で実際にプルサーマルが行われているのは 22 基(いずれも 90 万 kW 級 PWR)[3.3-25]である。

海外由来の使用済燃料の再処理によって回収されたプルトニウムは、フランスにおけるプルトニウム需給バランスにおいては考慮されない。再処理を委託した国は、国際原子力機関(IAEA)のプルトニウム国際管理指針に基づき、国外に存在する自国のプルトニウム管理状況に関するデータを報告している。

フランスも同指針に基づき、自国が保有するプルトニウムの量を IAEA に毎年報告している。そのデータによれば、フランスの民生用プルトニウムの保有量は 2011 年末から 2021 年末にかけて

表 4.3-1 に示すとおり推移している[3.3-26]。なお、未照射プルトニウムのうち、再処理プラントの貯蔵施設にストックされたプルトニウムの量は 40～50 トン程度で推移している。

表 4.3-1 フランスのプルトニウム保有量(再掲)

単位:tPu

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
未照射の Pu	80.3	80.6	78.1	78.8	79.7	81.7	80.9	83.2	90.3	95	99.9
使用済燃料中の Pu	253.2	261.4	268.9	275.6	281.7	287.8	295.0	299.6	299.8	299.7	302

【出所】IAEA、INFCIRC/549「Communication Received from Certain Member States Concerning Their Policies Regarding the Management of Plutonium」に基づき作成

マルチサイクルに関しては、長期的には使用済 MOX 燃料を再処理して回収したプルトニウムを高速炉で再利用することが目指されているが、短・中期的には第 3 世代炉である欧州加圧水型原子炉 (EPR) で再利用することが検討されている。

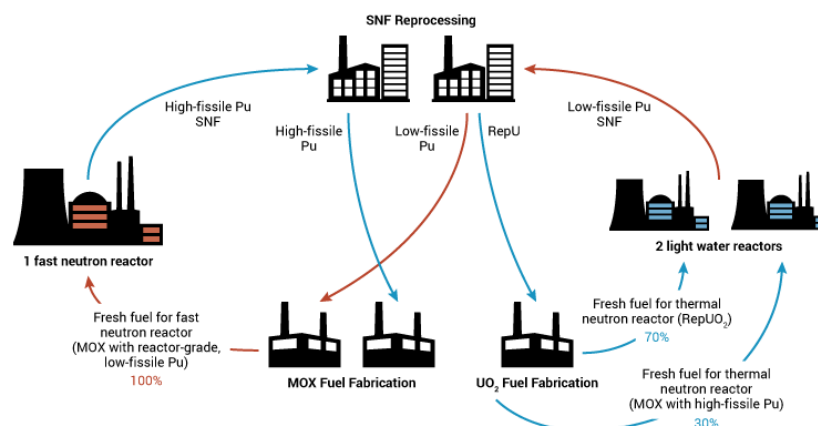
ロシア：

ロシアでは、計画中の高速炉システムに必要なプルトニウムを再処理により十分に供給できないことが予想されており、現在国内では、増殖率ができるだけ高い炉心設計が検討されている。

ロシアでは現在総エネルギー供給に対する原子力の寄与は比較的小さいが、今後原子力発電容量の大幅かつ急速な増加が計画されている。計画中の高速炉システムに必要なプルトニウムを使用済燃料の再処理で十分に供給できないと予想されるため、増殖率ができるだけ高い炉心設計を長期的に検討している。なお、世界の原子力の状況を考慮に入れることによって、このようなプルトニウム不足は、多国間アプローチによって緩和することができると考えられている。

ロスアトムは、2 種類の MOX 燃料、及び熱中性子炉と高速炉の両炉を活用したクローズドサイクルを提案し、2027 年頃には BN-1200 を用いてシステムを組み立てたいとしている(図 4.3-1)。マルチリサイクルの概念は様々な研究がされており、その他にも、集中型核燃料サイクルという、熱中性子炉 VVER と高速炉 BN による集中型核燃料サイクルも提唱されている(図 4.3-2)。

Balanced Arrangement for Dual-Component Nuclear Power System



Source: Rosatom

図 4.3-1 2 種類の MOX 燃料、及び熱中性子炉と高速炉の両炉を活用したクローズドサイクル(再掲)

この燃料サイクルでは、高速炉使用済燃料から回収した核分裂性プルトニウムの割合が高いプルトニウム(「高核分裂性プルトニウム」)を熱中性子炉に供給し、熱中性子炉使用済燃料から回収した核分裂性プルトニウムの割合が低いプルトニウム(「低核分裂性プルトニウム」)を高速炉に供給し、リサイクルする。

具体的には、熱中性子炉での発電により発生する使用済燃料を再処理して回収されるプルトニウム(使用済ウラン燃料由来か使用済 MOX 燃料由来かに関係なく、回収されるプルトニウムのうち約 1/3 は「低核分裂性プルトニウム」)が主要なプルトニウム源となる。この低核分裂性プルトニウムを劣化ウランと混合し、増殖比 1.2 以上の高速増殖炉用の MOX 燃料として使用することで、「高核分裂性プルトニウム」を含む使用済燃料が発生する。これを再処理して回収される「高核分裂性プルトニウム」は、熱中性子炉用の MOX 燃料に使用される。

この燃料サイクルにおける熱中性子炉の燃料は、上述の MOX 燃料または高濃縮再処理ウラン(U235 が 17%濃縮)であり、それぞれ 3 対 7 の割合で使用される。また、燃料需給量を鑑みると、高速増殖炉 1 基の運転は、熱中性子炉 2 基の運転とバランスする。

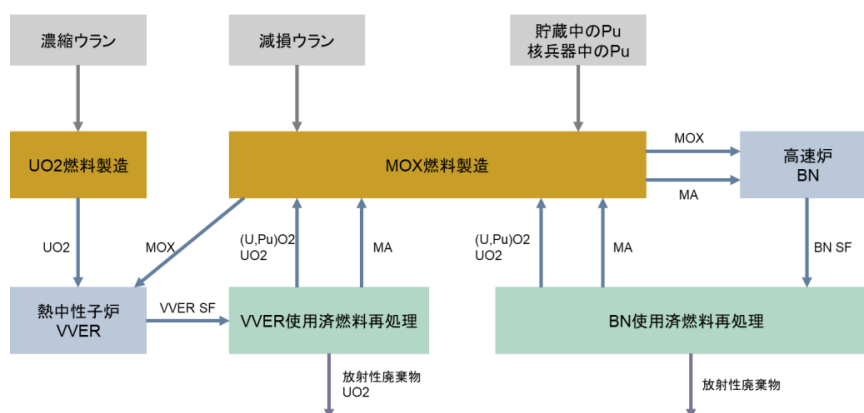


図 4.3-2 集中型核燃料サイクル(再掲)

この集中型核燃料サイクルはポイントとして、下記が挙げられている。

- ・ 事実上無制限に存在する使用済燃料と天然ウランを利用可能
- ・ プルトニウムの蓄積を回避可能
- ・ リサイクルにより使用済燃料の削減と、使用済燃料管理コストの節約
- ・ MA 削減によるガラス固化体発生量の減少
- ・ 高速炉で増殖したプルトニウム(核分裂性物質の割合が比較的高い)を熱中性子炉で利用可能
- ・ 海外へ輸出した熱中性子炉 VVER の使用済燃料の回収や新燃料の輸出が可能

中国：

中国では回収ウラン・プルトニウムも活用して資源利用の最大化を図る方針であるが、中国のプルトニウム需給バランスについて詳細は不明である。2017 年 9 月 18 日付で中国の IAEA 常駐代表が IAEA に提出した文書によると、2016 年 12 月 31 日時点で中国には、再処理プラントにおける製品在庫中の未照射分離プルトニウムが 40.9kg あり、これ以外の未照射プルトニウムの存在は報告されていない[3.5-27]。なお、3.5.3 項で報告したパイロットプラントの処理容量や運転状況等に基づき、中国の民生用プルトニウム在庫量は 2019 年までに少なくとも 500kg に達したのではないかとの推測が、ハーバード大学核管理プロジェクトの研究者より提示されている[3.5-28]。需要面について、商業レベルでの MOX 燃料の製造・利用は行われておらず、中国実験高速炉(CEFR)の燃料にプルトニウムは含まれていない模様であり、またプルサーマル実施の計画も示されていない。MOX 燃料を装荷する予定の CDFR はまだ建設中であるため、商用原子力発電のためのプルトニウム需要は現時点ではないものと考えられる[3.5-29]。

日本：

我が国では、原子力基本法にのっとり、「利用目的のないプルトニウムは持たない」という原則を有している。この考え方に基づき、プルトニウム保有量を減少させようとしている。

国内における Pu 利用実績としては、軽水炉で MOX 燃料を利用するプルサーマル発電の実績がある。また、再処理を行うに当たっては、六ヶ所再処理工場、MOX燃料加工工場及びプルサーマル発電の稼働状況に応じて、プルサーマルの着実な実施に必要な量だけ再処理が実施されるよう認可を行うものとされている。

表 4.3-2 各国の Pu 利用実績と今後の方針

国	利用実績	今後の軽水炉での利用	今後の高速炉での利用
アメリカ	利用実績なし	予定無し	予定無し
イギリス	利用実績なし	今後は軽水炉で利用することが検討されている	左記検討では、高速炉も候補の一つとなっている
フランス	利用実績あり (軽水炉)	今後も軽水炉で利用する方針	予定無し(高速炉の開発計画は 2100 年頃に先送り)
ロシア	利用実績あり (高速実証炉)	今後は軽水炉と高速炉で利用する方針	同左
中国	利用実績なし	今後は軽水炉と高速炉で利用するものと思われるが詳細不明	同左
日本	利用実績あり (軽水炉)	今後も軽水炉で利用する方針	21世紀後半に本格的利用を目指している

4.4 革新炉の燃料供給／再処理

第2章でも述べたように昨今の世界的な情勢を概観すると、カーボンニュートラルの達成を目指す潮流とエネルギー安全保障の向上を目指す潮流が存在しており、原子力発電への期待の1つとして、「革新炉開発の加速」が挙げられる。図2.2-1に示すように、革新炉技術×燃料製造、革新炉技術×再処理の領域において、「革新炉の燃料供給／再処理」が重要項目として浮かび上がったことを受けて、本節では整理した。

以下、3章での各国調査結果を再度まとめるとともに、日本における情報も整理した。

(1) 現在開発されている革新炉概況

現在開発されている革新炉(小型モジュール炉(SMR)、先進炉)について、各国別の開発状況を図4.4-1に、出力と開発段階の関係性を図4.4-2に示す。図4.4-1より、アメリカ、カナダ、ロシア、中国、日本を中心に多数の革新炉が開発されていることが分かる。一方、図4.4-2からは、多くの炉が概念設計、基本設計・詳細設計段階であり、建設完了や運転開始に至っている炉は限定的であることが分かり、詳細設計段階の革新炉が社会実装された際の、燃料供給や再処理については現在の検討状況を整理しておく必要がある。

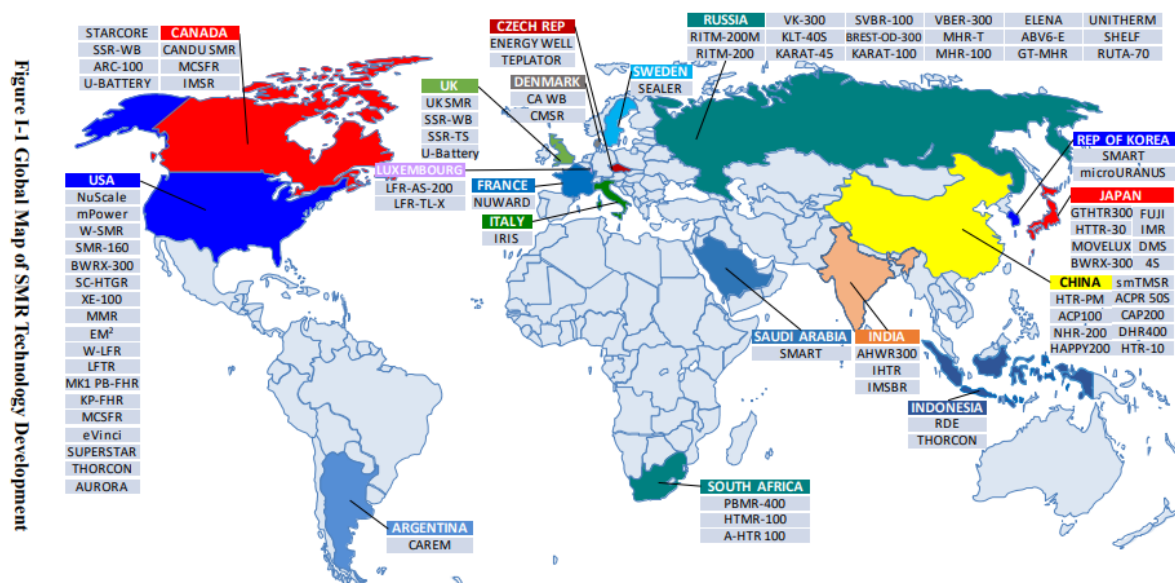


図 4.4-1 現在開発されている革新炉一覧(各国別の開発状況)[4-3]

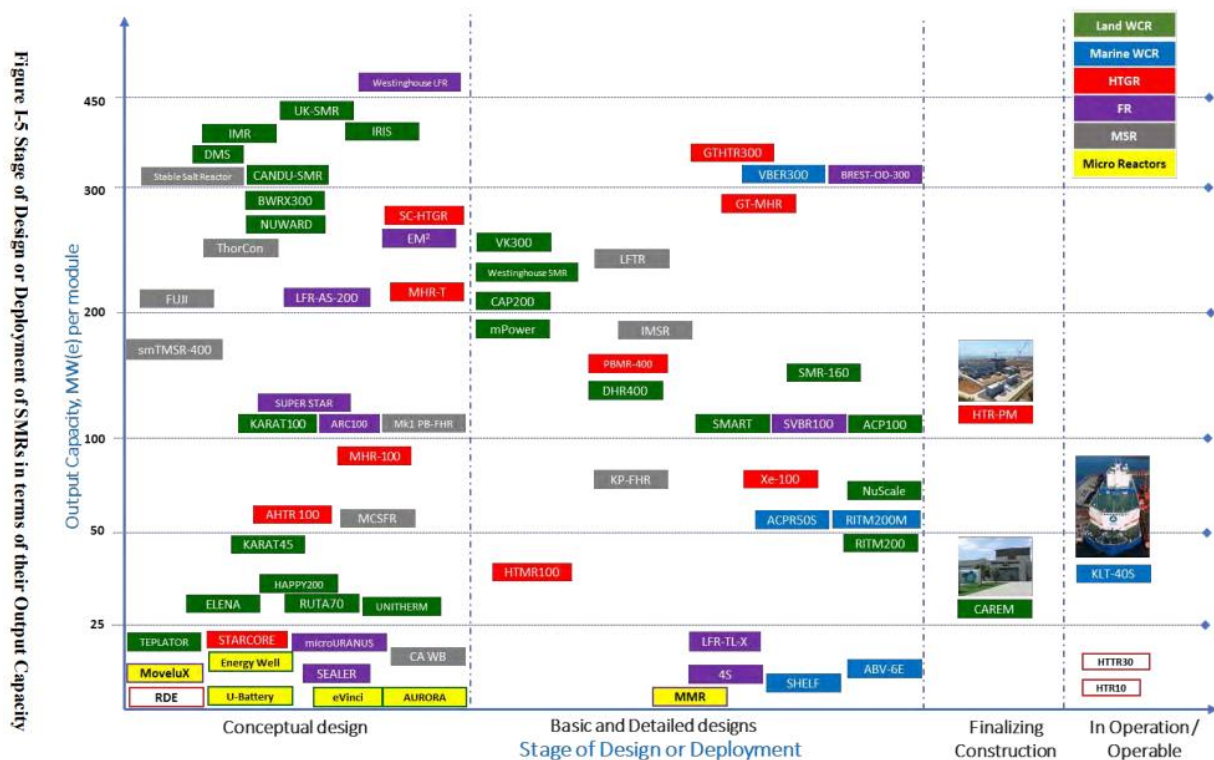


図 4.4-2 現在開発されている革新炉一覧(出力と開発段階)[4-3]

(2) 革新炉の燃料情報

表 4.4-1 に現在開発されている革新炉の燃料情報を整理した結果を示す。燃料に関する情報として、燃料タイプ、冷却材、濃縮度、運転サイクル期間が重要な項目であるため、それらの情報を整理している。濃縮度が 5% を超える炉については、新たな燃料供給が必要となってくることから、表中に赤字で整理している。表 4.4-1 に示すように、濃縮度が高いほど、運転サイクル期間も長期化していることが分かる。

表 4.4-1 開発されている革新炉の燃料情報[4-3]

概要	原子炉名	国	燃料タイプ	冷却材	濃縮度(%)	運転サイクル期間(月)
水冷却 SMR	CAREM	アルゼンチン	UO ₂ 燃料	軽水	3.1	24
	ACP100	中国		軽水	< 4.95	24
	CANDU SMR	カナダ		重水	Natural uranium	連続交換
	NUWARD	フランス			< 5	24
	SMART	韓国、サウジアラビア			< 5	30
	UK-SMR	英国			4.95 (max)	18 - 24
	NuScale	米国			< 4.95	24
	BWRX-300	米国、日本		軽水	3.40 (avg) / 4.95 (max)	12 - 24
浮体式 SMR	KLT40S	ロシア			18.6	30 - 36
	ACPR50S	中国			< 5	30
	RITM-200M	ロシア			< 20	120
	SHELF	ロシア			19.7	160
高温ガス炉	HTR-PM	中国	TRISO	ヘリウム	8.5	連続交換
	GTHTR300	日本			14	48
	GT-MHR	ロシア			14-18% LEU or Weapon grade Pu	25
	PBMR-400	南アフリカ			9.6% LEU or WPu	連続交換
	Xe-100	米国			15.5	連続交換
	SC-HTGR	米国			14.5 (avg)/18.5 (max)	18
液体金属冷却高速炉	BREST-OD-300	ロシア	Mixed uranium plutonium nitride	鉛	up to 14.5	30-50
	4S	日本	U-Zr alloy	ナトリウム	< 20	N/A
	SVBR-100	ロシア	UO ₂ / hexagonal	鉛-ビスマス	< 19.3	84-96
	EM2	米国	UC pellet / hexagon	ヘリウム	14.5 (LEU)	360
	ARC-100	米国	U-Zr alloy	ナトリウム	13.1	240
熔融塩炉	Integral MSR	カナダ	Fluoride fuel salt	Fluoride salt	< 5	84
	CA Waste Burner	デンマーク	LiF-ThF ₄	Fuel salt	Inventory of spent nuclear fuel	連続交換
	ThorCon	インドネシア	UF ₄ , ThF ₄	NaF, BeF ₂	5.0 (min)/19.7 (max)	48
	FUJI	日本	Th and U	Molten fluoride	2.0 (0.24%U233 + 12.0%Th)	連続交換
	Stable Salt Reactor	英国、カナダ	Molten salt fuel	ZrF ₄ /KF/NaF	4.95	150
	KP-FHR	米国	TRISO	Li ₂ BeF ₄	19.75	連続交換
	MCSFR	米国、カナダ	Molten Chloride Salt	NaCl-XCl ₂ -UCl _{3/4} -PuCl ₃ -FPCLy	10% Pu fissile/(Pu+U total) or 15% enriched HALEU	連続交換
マイクロ炉	eVinciTM	米国	TRISO	ヒートパイプ	5 - 19.75	> 36
	MMR	米国	FCM(TRISO)	ヘリウム	9 - 12	連続交換
	U-Battery	米国	TRISO	ヘリウム		不明
	Aurora	米国	U-Zr 金属	液体金属	19.75	240
	MoveluX™	日本	Silicide(U ₃ Si ₂)	ヒートパイプ	4.8 - 5.0	連続交換

(赤字は濃縮度が5%以上のものであり、HALEU 燃料相当の濃縮度が検討されているもの)

(3) 各国の革新炉燃料供給に関する情報

1) 米国

米国における革新炉関連の燃料供給に関する情報を以下に整理した。詳細は、3.1.7 項を参照。

- ONWARDS プログラムや先進的原子炉実証プログラム(ARDP)にて TRISO 燃料の製造や加工に関する事業が行われており、特に ARDP では開発されている X エナジー社の Xe-100 炉や、BWXT 社のマイクロ炉(BANR)、ケイロス・パワー社 Hermes 炉において HALEU 燃料を TRISO 燃料にしての使用が考えられている。
- 米国における HALEU 燃料の供給については、①セントラス・エナジー社からの供給、②DOE 保有の高濃縮ウラン(HEU)の活用、③ロスアラモス国立研究所からの供給等が挙げられる

2) 英国

英国における革新炉関連の燃料供給に関する情報を以下に整理した。詳細は、3.2.7 項を参照。

- 先進炉開発に関する政府支援(AMR RD&D プログラム)にて、高温ガス炉の開発が注力されている。高温ガス炉で用いる被覆粒子燃料に関する技術開発が 2 件採択され、National Nuclear Laboratory・Urenco・JAEA による共同開発と、Springfields Fuels Limited・Urenco による共同開発がおこなわれており、どちらもウラン濃縮を実施している Urenco が参画している。

3) 仏国

仏国における革新炉関連の燃料供給に関する情報を以下に整理した。詳細は、3.3.7 項を参照。

- 仏国では SMR「NUWARD」が開発されているが、燃料については、濃縮度 5%以下とされており、PWR タイプの炉型であることから、従来と同じ燃料供給が想定されており、新たな燃料供給を必要としていない。
- 一方、CEA は第四世代高速炉に関する研究の一環として、15 万 kW の高速炉用の燃料集合体製造に関する研究を Orano 社の MELOX・MOX 燃料加工プラントで実施している。

4) ロシア

ロシアにおける革新炉関連の燃料供給に関する情報を以下に整理した。詳細は、3.4.7 項を参照。

- ロシアでは、鉛冷却高速炉 BREST-300 用の窒化物燃料の試験が開始されているとともに、ナトリウム冷却高速炉 BN-1200 用のウラン・プルトニウム混合窒化物燃料の試験が実施されている。さらには、REMIX 燃料や MOX 燃料を扱う際に、従業員の被ばく線量を抑えるため、作業員を介さない完全自動化での集合体アセンブリ製造を可能としている(TVS-5 燃料と呼称している)。

5) 中国

中国における革新炉関連の燃料供給に関する情報を以下に整理した。詳細は、3.5.7 項を参照。

- 中国では、電気出力 60 万 kW の実証高速炉(CDFR)が 2017 年より建設開始されており、ロシア TVEL 社のプラントから CDFR 用燃料が中国に輸出されたことが公表されており、高速炉用燃料はロシアから供給されている。
- 一方、高温ガス炉の燃料製造は国内で実施されており、年間製造能力は 30 万個の球形燃料要素となっている。

(4) 革新炉の処理技術開発

3 章に記載とは別に革新炉の処理技術開発状況について、以下に整理する。2022 年 11 月にカナダにて、OECD-NEA 主催の SMR や先進炉の放射性廃棄物管理及び廃止措置に係るワークショップ [4-6]が開催され、3 日間のワークショップにて以下のテーマが議論された(赤字が処理に関する部分)。

- Key attributes of SMRs and advanced fuel types, as well as design considerations and implications for decommissioning and radioactive waste management;
- **Technical and economic feasibility of reprocessing radioactive waste**, as well as storage and transport of reprocessed fuel based on the reactor type;
- Licensing and regulatory requirements of spent fuel and waste management for SMRs and advanced reactor technologies;
- Operational and design optimisation related to decommissioning and radioactive waste management for SMRs and advanced reactor technologies;
- Operational feedback on management and disposal of existing waste streams;
- Key considerations for communities and Indigenous peoples.

このワークショップの中で、革新炉の処理技術開発に関する発表内容を以下に整理した。

1) 原子炉メーカーによる発表

a. USNC(Ultra Safe Nuclear 社、米国、高温ガスマイクロ炉)

燃料は、TRISO 燃料をカートリッジ形式にし、黒鉛ブロックの炉心に装荷。“Closed Fuel Cycle Not Currently Under Consideration”と明記されており、直接処分が想定されている。

b. Natrium(Terrapower & GE 日立社、米国、Na 冷却高速炉)

燃料は金属燃料(HALEU)であり、“Simple once-through cycle, no reprocessing”と明記されており、直接処分が想定されている。

c. IMSR(Terrestrial Energy 社、カナダ、溶融塩炉)

燃料は溶融塩であり、再処理に関する言及はない。

d. ARC-100(ARC 社、カナダ、Na 冷却高速炉)

燃料は金属燃料(HALEU)であり、“currently once through with longer term consideration of recycling/reprocessing”と明記されている。

e. Lead Fast Reactor(Westinghouse 社、米国、鉛冷却高速炉)

燃料は酸化物(現時点)、窒化物(将来)としており、基本的にはオープンサイクルであるが、再処理については可能と言及している。

2) 各国の政府機関や再処理事業者による発表

a. DOE(米国)

最適な核燃料サイクル技術の選定においては、多くの要素に依存し、特にリサイクルした後の燃料形態が重要と指摘している。さらに、現在米国では商用の燃料再利用のインフラを備えていないことから、今後の先進炉開発の状況に合わせて、将来の技術の最適化の柔軟性を提供できるとしている。

様々なタイプの燃料から発生する高レベル廃棄物の形態(使用済燃料そのまま or 廃棄体化处理)については、処分場の特性と当該国の実績(Practices)に依るとも指摘している。一方で、溶融塩炉の燃料については、処分前に化学処理して、安定化する必要性も指摘している。

b. Orano(仏国)

Orano では、2019 年以降、溶融塩高速炉について、燃料としての Pu および MA 利用と、顧客に対して、FP 含有のガラス固化体だけが残るオプションとして、検討を継続している(図 4.4-3、図 4.4-4)。

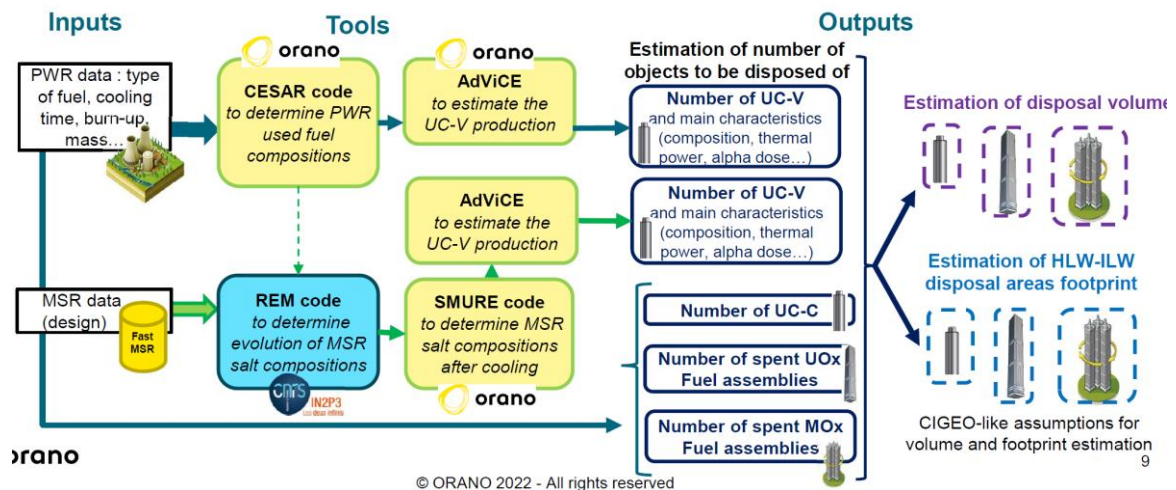


図 4.4-3 既存の PWR に関する知見と溶融塩炉検討における関係性

Estimated waste for 400 TWh _e /y	Scenario 1 Open cycle		Scenario 2 Mono-recycling of Pu		Scenario 3 Multi-recycling of Pu		Scenario 4 Multi-recycling of Pu associated to a MSR MAS burner	
	Direct disposal of UOx fuel assemblies		Storage of MOX spent fuel assemblies and produced UC-V & UC-C from UOx reprocessing		Storage of produced UC-V & UC-C from UOx and MIX reprocessing		Storage of produced UC-V & UC-C from UOx and MIX reprocessing and from MSR MAS burner	
Symbiotic fleet (MWe)	100% UOx-PWR		63% UOx-PWR + 37% MOX-PWR		20% UOx-PWR + 80% MIX-PWR		19% UOx-PWR + 75% MIX-PWR + 6% MAS-MSR	
	#FA / #UC	Stored Vol. m3	#FA / #UC	Stored Vol. m3	#FA / #UC	Stored Vol. m3	#FA / #UC	Stored Vol. m3
UOx used fuel assemblies	1830	2288						
MOX used fuel assemblies			203	1015				
UC-V post reprocessing	With MAS		716	292	1201	490		
	Without MA						668	273
UC-C			813	158	915	178	856	166
UC-V post-MSR	Without MA						47	19
Waste disposal volume (m3)	2288 100%		1465 64%		668 29%		458 20%	
HLW-ILW disposal areas footprint (10 ³ m2)	275 (100%)		223 (81%)		186 (68%)		55 (20%)	

図 4.4-4 溶融塩炉導入による HLW 量と放射能低減に関するシナリオ検討

(5) まとめ

革新炉の燃料供給/再処理については、現在特に革新炉開発が進んでいる米国にて、HALEU 燃料の試験的製造 (Centrus Energy 社) が行われている。一方、Urenco 社や Orano 社においても、HALEU 燃料の製造の検討がなされており、この三社の HALEU 燃料製造の検討状況を以下に示す。

- Centrus Energy (旧 USEC): 年間製造能力 900kg を目指している
- URENCO: HALEU 燃料製造設備の建設の検討が 2019 年に発表されて以来、進展がない
- Orano: 2022 年 3 月の HALEU 燃料に関する RFI に対応している

さらに、米 DOE は 2020 年代末までに必要とされる HALEU 燃料は 40 トン以上と予測している。2022 年 5 月に Euratom Supply Agency [4-2] から出された HALEU 燃料製造に関する検討結

果の中では、「Urenco 社と Orano 社は大きな技術課題なしに HALEU 燃料が目指す 19.75%まで生成できるが、安全性とセキュリティの観点から、別の専用施設での実施が求められ、EU 域内で HALEU 生産施設が商業的に実行可能であるためには、年間 3～8 トンの需要の保証が必要と推定」と言及されており、米国での需要の増加により、今後 Urenco 社、Orano 社も HALEU 燃料を製造していくことが期待される。

燃料供給については、炉の開発に追従する形で検討が進められているものの、再処理に関しては、現状検討されていないケースが大半を占め、直接処分の言及が主となっている。しかし、再処理の可能性については、可能性があるとの記載をしており、再処理が不可能なわけではなく、再処理事業は国家安全保障に大きく関係するため、事業者レベルではなく、国レベルで判断し、それに応じて技術開発がなされると思われる。

5. おわりに

本事業は、エネルギー安全保障やカーボンニュートラル等の側面に着目しつつ、海外における原子力・核燃料サイクルの状況と政策方針について調査・分析することにより、今後の我が国の原子力・核燃料サイクル政策の企画・立案に資することを目的として実施した。

2章では、諸外国における核燃料サイクル関連動向を調査する視点を世界的な潮流を起点として検討し、調査の視点として「ウラン燃料供給」、「回収ウランの利用」、「Pu 利用」、「革新炉の燃料供給/再処理」の4点を抽出した。

3章では、米国、英国、仏国、ロシア、中国を対象に、上記4つの視点も加味し、「原子力・核燃料サイクル政策の概要」、「ウクライナ侵攻のサイクル政策への影響」、「使用済燃料の処理・処分、回収・劣化 U 及び Pu の利用方針・実績」、「原子力・核燃料サイクル関連施設、事業主体」、「ウクライナ侵攻の役務取引動向等への影響」、「原子力・核燃料サイクル関連の研究開発動向」、「革新炉開発における FE/BE 分野の政策・技術開発動向」に係る情報をまとめた。

4章では、2章で抽出した調査の視点で改めて情報を整理した。

これらの情報は、今後の我が国の原子力・核燃料サイクル政策の企画・立案に資することができると考えられる。

6. 参考文献

第3章

3.1 米国

- [3.1-1] Congressional Research Service, “Nuclear Fuel Reprocessing: U.S. Policy Development”, 2008 年 3 月 27 日
<https://crsreports.congress.gov/product/pdf/RS/RS22542>
- [3.1-2] Congressional Budget Office, “Nuclear Reprocessing and Proliferation: Alternative Approaches and their Implications for the Federal Budget”, 1977 年 5 月
<https://www.cbo.gov/sites/default/files/95th-congress-1977-1978/reports/77doc586.pdf>
- [3.1-3] U.S. General Accounting Office, “Status And Commercial Potential Of The Barnwell Nuclear Fuel Plant”, 1984 年 3 月 28 日 <https://www.gao.gov/assets/rced-84-21.pdf>
- [3.1-4] Blue Ribbon Commission on America’s Nuclear Future (BRC), “Report to the Secretary of Energy” (Final Report), 2012 年 1 月
https://www.energy.gov/sites/default/files/2013/04/f0/brc_finalreport_jan2012.pdf
- [3.1-5] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター、放射性廃棄物海外総合情報調査報告書(令和元年度分、平成 30 年度放射性廃棄物共通技術調査事業)、2020 年 3 月
- [3.1-6] U.S. Government Accountability Office, “COMMERCIAL SPENT NUCLEAR FUEL – Congressional Action Needed to Break Impasse and Develop a Permanent Disposal Solution”, GAO-21-603, 2021 年 9 月 <https://www.gao.gov/assets/gao-21-603.pdf>
- [3.1-7] Congressional Research Service, “The Front End of the Nuclear Fuel Cycle: Current Issues”, 2019 年 7 月 29 日更新
<https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R45753>
- [3.1-8] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2022. 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
<https://doi.org/10.17226/26500>
- [3.1-9] 115th Congress, “Nuclear Energy Innovation Capabilities Act of 2017” (S.97, Public Law 115-248), 2018 年 9 月 28 日 <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/senate-bill/97/text>
- [3.1-10] International Trade Commission, “Uranium from Russia”, Investigation No.731-TA-539-C (Third Review), Publication 4307, 2012 年 2 月
- [3.1-11] U.S. Department of Commerce / Bureau of Industry and Security (BIS), “The Effect of Imports of Uranium on the National Security”, 2019 年 4 月 14 日
<https://www.bis.doc.gov/index.php/documents/section-232-investigations/2791-uranium-section-232-report-and-appendices-april-2019-redacted/file>
- [3.1-12] U.S. Department of Commerce/BIS, “The Effects of Imports of Uranium on the National Security”, 2019 年 4 月 19 日
<https://www.bis.doc.gov/index.php/documents/section-232-investigations/2791-uranium-section-232-report-and-appendices-april-2019-redacted/file>

- [3.1-13] Consolidated Appropriations Act, 2021 (Public Law 116-260) 2020 年 12 月 27 日
<https://www.congress.gov/116/plaws/publ260/PLAW-116publ260.pdf>
- [3.1-14] U.S. Department of Commerce/ITA, “2020 Amendment to the Agreement Suspending the Antidumping Investigation on Uranium From the Russian Federation”, Federal Register, Vol. 85, No. 197, 2020 年 10 月 9 日
<https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2020-10-09/pdf/2020-22431.pdf>
- [3.1-15] International Trade Commission, “Uranium from Russia”, Investigation No.731-TA-539-C (Third Review), Publication 4307, 2012 年 2 月
https://www.usitc.gov/publications/701_731/pub4307.pdf
- [3.1-16] U.S. Department of Energy, “Restoring America’s Competitive Nuclear Energy Advantage, A strategy to assure U.S. national security”, 2020 年 4 月
<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/04/f74/Restoring%20America%27s%20Competitive%20Nuclear%20Advantage-Blue%20version%5B1%5D.pdf>
- [3.1-17] “Further Consolidated Appropriations Act, 2020” (H.R.1865), Public Law 116-94 (2019 年 12 月 20 日)
<https://www.congress.gov/116/plaws/publ94/PLAW-116publ94.pdf>
- [3.1-18] U.S. Department of Energy, 2021 会計年度予算要求資料(第 3 巻パート 2),
<https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/04/f73/doe-fy2021-budget-volume-3-part-2.pdf>
- [3.1-19] U.S. Department of Energy, 2022 会計年度予算要求資料(第 3 巻パート 2),
<https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-06/doe-fy2022-budget-volume-3.2-v3.pdf>
- [3.1-20] Executive Order 14017:”Executive Order on America’s Supply Chains”, 2021 年 2 月 24 日
- [3.1-21] U.S. Department of Energy, “America’s Strategy to Secure the Supply Chain for a Robust Clean Energy Transition”, 2022 年 2 月 24 日
<https://www.energy.gov/policy/articles/americas-strategy-secure-supply-chain-robust-clean-energy-transition>
- [3.1-22] U.S. Department of Energy, “Nuclear Energy – Supply Chain Deep Dive Assessment”, 2022 年 2 月 24 日 [https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/Nuclear Energy Supply Chain Report - Final.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/Nuclear%20Energy%20Supply%20Chain%20Report%20-%20Final.pdf)
- [3.1-23] 116th Congress, House of Representatives, “Energy and Water Development and Related Agencies Appropriations Bill, 2021” (H.R.7613), Report 116-449, 2020 年 7 月 15 日
<https://www.congress.gov/116/crpt/hrpt449/CRPT-116hrpt449.pdf>
- [3.1-24] U.S. Senate Appropriations Committee, “Explanatory Statement for Energy and Water Development and Related Agencies Appropriations Bill, 2021”, 2020 年 11 月 20 日
<https://www.appropriations.senate.gov/imo/media/doc/EWRept.pdf>
- [3.1-25] U.S. Department of Energy, 2023 会計年度予算要求資料(第 4 巻),
<https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-04/doe-fy2023-budget-volume-4.pdf>
- [3.1-26] U.S. Department of Energy, 2023 会計年度予算要求資料(第 1 巻),
<https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-05/doe-fy2023-budget-volume-1.pdf>

- [3.1-27] U.S. Department of Energy/NNSA, “Request for Information Regarding Establishment of the Department of Energy Uranium Reserve Program”, Federal Register / Vol.86, No.52, 2021 年 8 月 11 日
<https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2021-08-11/pdf/2021-17145.pdf>
- [3.1-28] U.S. Department of Energy/NNSA, Combined & Synopsis/Solicitation, Uranium Reserve Program 89233122RNA000153, 2022 年 6 月 30 日
<https://sam.gov/opp/09e6cfff33742888cfc4c233662e/view>
- [3.1-29] Whitehouse, “Meeting Critical Needs for the American People in the New Fiscal Year”, 2022 年 9 月 2 日 <https://www.whitehouse.gov/omb/briefing-room/2022/09/02/meeting-critical-needs-for-the-american-people-in-the-new-fiscal-year/>
- [3.1-30] Uranium Energy Corp, “Uranium Energy Corp Wins Award from the U.S. Department of Energy to Supply 300,000 lbs. U3O8 at \$59.50/lb. to the Strategic Uranium Reserve”, 2022 年 12 月 20 日
https://www.uraniumenergy.com/news/releases/index.php?content_id=977
- [3.1-31] Peninsula Energy, “Peninsula Awarded Supply Contract for US Strategic Uranium Reserve”, 2022 年 12 月 16 日
<https://wcsecure.weblink.com.au/pdf/PEN/02613528.pdf>
- [3.1-32] Energy Fuels, “Energy Fuels Awarded Contract to Sell \$18.5 Million of Uranium to U.S. Uranium Reserve”, 2022 年 12 月 16 日
<https://www.energyfuels.com/2022-12-16-Energy-Fuels-Awarded-Contract-to-Sell-18-5-Million-of-Uranium-to-U-S-Uranium-Reserve>
- [3.1-33] Ur-Energy, “Ur-Energy Announces Additional Sales Commitments, Success in its Bid into the Uranium Reserve, and Decision to Ramp-Up Lost Creek Production Operations”, 2022 年 12 月 19 日 <https://www.ur-energy.com/news-media/press-releases/detail/339/ur-energy-announces-additional-sales-commitments-success>
- [3.1-34] enCore Energy, “enCore Energy Awarded \$7 MM USD United States Department of Energy Uranium Reserve Contract; Applies to Join HALEU Consortium”, 2022 年 12 月 20 日 <https://encoreuranium.com/news/encore-energy-awarded-7-mm-usd-united-states-department-of-energy-uranium-reserve-contract-applies-to-join-haleu-consortium/>
- [3.1-35] U.S. Department of Energy, Request for Information (RFI), “High Assay Low Enriched Uranium (HALEU) Cascade Demo Completion and Extended Production”, 2022 年 3 月 19 日
<https://sam.gov/opp/6ca947e3b7574ed3aad609efd78f5cef/view>
- [3.1-36] “Inflation Reduction Act” (H.R.5376), Public Law 117-169, 2022 年 8 月 16 日 <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/5376>
- [3.1-37] Centrus Energy, “Statement: Inflation Reduction Act Makes Critical Investment in HALEU Enrichment”, 2022 年 8 月 19 日
<https://www.centrusenergy.com/news/statement-inflation-reduction-act-makes-critical-investment-in-haleu-enrichment/>
- [3.1-38] Congressional Record – Senate, December 20, 2022, “Explanatory Statement Regarding H.R.2617, Consolidated Appropriations Act, 2023”
<https://www.congress.gov/117/crec/2022/12/20/168/198/CREC-2022-12-20-pt1-PgS7819-2.pdf>
- [3.1-39] Library of Congress, 連邦議会法律情報ウェブサイト(Congress.gov)

<https://www.congress.gov/>

- [3.1-40] “Infrastructure Investment and Jobs Act”, Public Law 117-58, 2021 年 11 月 15 日
- [3.1-41] U.S. Department of Energy, Grid Deployment Office ウェブサイト情報(Civil Nuclear Credit Program) <https://www.energy.gov/gdo/civil-nuclear-credit-program>
- [3.1-42] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Information Conference 2022, <https://www.nrc.gov/public-involve/conference-symposia/ric/past/2022/agenda.html>
- [3.1-43] 117th Congress, “Nuclear Prosperity and Security Act” (H.R.1351), 2021 年 2 月 25 日
<https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/1351>
- [3.1-44] 117th Congress, “A bill to require the Secretary of Energy to establish a Nuclear Fuel Security Program, expand the American Assured Fuel Supply Program, and submit a report on a civil nuclear credit program, and for other purposes” (S.3428), 2021 年 12 月 16 日
<https://www.congress.gov/bill/117th-congress/senate-bill/3428>
- [3.1-45] 117th Congress, “A bill to prohibit the importation of uranium from the Russian Federation” (S.3856), 2022 年 3 月 16 日
<https://www.congress.gov/bill/117th-congress/senate-bill/3856>
- [3.1-46] 117th Congress, “NO RUSSIA Act of 2022” (S.3978), 2022 年 3 月 31 日
<https://www.congress.gov/bill/117th-congress/senate-bill/3978>
- [3.1-47] 117th Congress, “Fueling Our Nuclear Future Act of 2022” (S.4066), 2022 年 4 月 7 日
<https://www.congress.gov/bill/117th-congress/senate-bill/4066>
- [3.1-48] House of Representatives Committee on Energy and Commerce (Republican), Granholm 長官宛の 2022 年 4 月 27 日付の書簡
<https://energycommerce.house.gov/posts/rodgers-upton-call-on-doe-secretary-granholm-to-secure-americas-nuclear-energy>
- [3.1-49] 連邦議会上院エネルギー・天然資源委員会ウェブサイト情報
<https://www.energy.senate.gov/>
- [3.1-50] Bloomberg, “Energy Chief Asks Manchin for Domestic Uranium Enrichment Funds”, 2022 年 5 月 27 日付記事
<https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-05-27/energy-chief-asks-manchin-for-domestic-uranium-enrichment-funds>
- [3.1-51] 117 Congress, “H.R.6833 - Continuing Appropriations and Ukraine Supplemental Appropriations Act, 2023” <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/6833>
- [3.1-52] Consolidated Appropriations Act, FY2023 (Public Law 117-328) 2022 年 12 月 29 日 <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/2617>
- [3.1-53] 116th Congress, “American Nuclear Infrastructure Act of 2020” (S.4897), 2020 年 11 月 16 日
<https://www.congress.gov/bill/116th-congress/senate-bill/4897>
- [3.1-54] U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information (OSTI)ウェブサイト情報
<https://www.osti.gov/opennet/forms?formurl=document/purecov/tab2.html>

- [3.1-55] U.S. Department of Energy, Energy Information Administration, “Table 1. U.S. spent nuclear fuel discharged and stored at commercial sites”, 2021 年 3 月 30 日 https://www.eia.gov/nuclear/spent_fuel/index.php
- [3.1-56] U.S. Government Accountability Office, “Nuclear Waste Cleanup: DOE’s Efforts to Manage Depleted Uranium Would Benefit from Clearer Legal Authorities”, GAO-22-105471, 2022 年 7 月 27 日 <https://www.gao.gov/assets/gao-22-105471.pdf>
- [3.1-57] U.S. Nuclear Regulatory Commission ウェブサイト情報(燃料サイクル施設) (<https://www.nrc.gov/materials/fuel-cycle-fac/new-fac-licensing.html>, 2022 年 11 月 21 日)
- [3.1-58] U.S. Department of Energy, “DOE Issues Decision on Disposal of Depleted Uranium Oxide From Kentucky, Ohio, Plant”, 2020 年 6 月 5 日 <https://www.energy.gov/em/articles/doe-issues-decision-disposal-depleted-uranium-oxide-kentucky-ohio-plants>
- [3.1-59] World Nuclear Association, “US Nuclear Fuel Cycle”, 2021 年 5 月 <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-fuel-cycle.aspx>
- [3.1-60] U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Environmental Impact Statement for the Proposed Fluorine Extraction Process and Depleted Uranium Deconversion Plant in Lea County, New Mexico – Final Report (NUREG-2113)”, 2012 年 8 月
- [3.1-61] U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Environmental Assessment for the Proposed Louisiana Energy Services, Urenco USA Uranium Enrichment Facility Capacity Expansion”, 2015 年 3 月 <https://www.nrc.gov/docs/ML1507/ML15072A016.pdf>
- [3.1-62] IAEA, Nuclear Fuel Cycle Facilities Database (<https://infcis.iaea.org/NFCIS/Facilities>)
- [3.1-63] 資源エネルギー庁、「諸外国における放射性廃棄物関連の施設・サイトについて(2022 年版)」、2022 年 3 月(制作:公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター) <https://www2.rwmc.or.jp/publications:rwmhg2022>)
- [3.1-64] エナジー・フューエルズ社ウェブサイト情報(<https://www.energyfuels.com/>)
- [3.1-65] World Nuclear Association, “US Uranium Mining and Exploration” (Updated November 2021) <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/us-uranium-mining.aspx>
- [3.1-66] Ur-エナジー社ウェブサイト情報(www.ur-energy.com/)
- [3.1-67] Ur-Energy, Corporate Presentation November 2022 (<https://www.ur-energy.com/investors/company-information/presentations>, 2023 年 1 月 3 日確認)
- [3.1-68] Wyoming Department of Environmental Quality ウェブサイト情報 (<https://deq.wyoming.gov/land-quality/uranium/>) (Radioactive Material License WYSUA-1598, Amendment No.8, 2021 年 3 月 18 日)
- [3.1-69] カメコ社ウェブサイト情報(www.cameco.com)
- [3.1-70] U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Crow Butte Uranium Recovery Facility”, 2019 年 4 月
- [3.1-71] Cameco, 2021 Annual Report, 2022 年 3 月
- [3.1-72] Cameco, “Annual Information Form – Exhibit 1”, 2004 年 3 月 19 日

- [3.1-73] Cameco, “Investor Presentation, Q3, 2022”, 2022 年 10 月
- [3.1-74] Honeywell 社ウェブサイト情報(www.honeywell.com)
- [3.1-75] U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Environmental Assessment for the Proposed Renewal of Source Material License SUB-526 Metropolis Works Uranium Conversion Facility”, 2019 年 10 月
- [3.1-76] Converdyn, 2020 年 4 月 28 日の HALEU ワークショップ発表資料
https://gain.inl.gov/HALEU_Webinar_Presentations/10-Critchley,ConverDyn,Rev1-28Apr2020.pdf
- [3.1-77] Honeywell International, 2021 Annual Report
<https://investor.honeywell.com/static-files/0f826f8b-fb20-4adc-ale0-a841597316f1>
- [3.1-78] Urenco 社ウェブサイト情報(www.urenco.com)
- [3.1-79] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Urenco USA Docket(070-1113)情報(<https://adams.nrc.gov/wba/>)
- [3.1-80] GE Hitachi Nuclear Energy 社ウェブサイト情報(<https://nuclear.gepower.com>)
- [3.1-81] U.S. Nuclear Regulatory Commission, “ Environmental Impact Appraisal for renewal of SNM-1097 (GE Wilmington)”, 1984 年 6 月
<https://adamswebsearch2.nrc.gov/webSearch2/main.jsp?AccessionNumber=ML20092M296>
- [3.1-82] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Wilmington 燃料加工施設 Docket (070-3103)情報(<https://adams.nrc.gov/wba/>)
- [3.1-83] 日立製作所、「GE、日立、東芝 三社合弁による国際原子燃料合弁会社「グローバル・ニュークリア・フュエル社」を設立」、2000 年 1 月 6 日付ニュースリリース
<https://www.hitachi.co.jp/New/cnews/0001/0106.html>
- [3.1-84] Westinghouse Electric 社ウェブサイト情報(www.westinghousenuclear.com)
- [3.1-85] U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Environmental Impact Statement for the License Renewal of Columbia Fuel Fabrication Facility”, 2022 年 7 月
<https://www.nrc.gov/docs/ML2220/ML22201A131.pdf>
- [3.1-86] フラマトム社ウェブサイト情報(www.framatome.com)
- [3.1-87] U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Licensee Performance Review” (Framatome Richland-), 2020 年 4 月 7 日
- [3.1-88] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Richland 燃料加工施設 Docket (070-1257)情報(<https://adams.nrc.gov/wba/>)
- [3.1-89] Energy Information Administration, “ Uranium Marketing Annual Report 2021”, 2022 年 5 月
<https://www.eia.gov/uranium/marketing/pdf/2021%20UMAR.pdf>
- [3.1-90] World Nuclear News, “ Uranium companies announce strategic purchase plans”, 2021 年 3 月 16 日 <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Uranium-companies-announce-strategic-purchase-plan>
- [3.1-91] Uranium Energy Corp, “Corporate Presentation – January 2023”, 2023 年 1 月 5 日 https://www.uraniumenergy.com/_resources/presentations/UEC-Corporate-Presentation.pdf
- [3.1-92] S&P Global-Commodity Insights, “ US DOE awards \$14 million to US uranium converter for reserve program”, 2023 年 1 月 5 日

<https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/electric-power/010523-us-doe-awards-14-million-to-us-uranium-converter-for-reserve-program>

- [3.1-93] U.S. Department of Energy NE(Nuclear Energy)局ウェブサイト情報
(<https://www.energy.gov/ne/office-nuclear-energy>)
- [3.1-94] U.S. Government Accountability Office, “Nuclear Weapons-NNSA Should Clarify Long-Term Uranium Enrichment Mission Needs and Improve Technology Cost Estimates”, GAO-18-126, 2018 年 2 月 16 日
<https://www.gao.gov/assets/gao-18-126.pdf>
- [3.1-95] Electric Power Research Institute, ウェブサイト検索
<https://www.epri.com/search#t=research&sort=relevancy>
- [3.1-96] Advanced Research Projects Agency - Energy (ARPA-E)ウェブサイト情報 (CURIE) <https://arpa-e.energy.gov/technologies/programs/curie>
- [3.1-97] Advanced Research Projects Agency - Energy (ARPA-E), Funding Opportunity Announcement (FOA), “Converting UNF Radioisotopes Into Energy (CURIE)”, DE-FOA-0002691, 2022 年 3 月 15 日 <https://arpa-e-foa.energy.gov/FileContent.aspx?FileID=63e43548-ee6d-418c-9318-9da1d9105730>
- [3.1-98] Advanced Research Projects Agency - Energy (ARPA-E), Request for Information, “Cleaning Up Radioisotope Inventories (CURIE)”, 2021 年 5 月 11 日
<https://arpa-e-foa.energy.gov/FileContent.aspx?FileID=e63450fe-3045-402f-94aa-elad625130fb>
- [3.1-99] Advanced Research Projects Agency - Energy (ARPA-E), Request for Information, “Converting UNF Radioisotopes Into Energy (CURIE)”, 2022 年 2 月 10 日
<https://arpa-e-foa.energy.gov/FileContent.aspx?FileID=9bdb19bc-463a-44bf-b87c-2cf3fe7c2614>
- [3.1-100] U.S. Department of Energy, “DOE Awards \$38 Million For Projects Leading Used Nuclear Fuel Recycling Initiative”, 2022 年 10 月 21 日
<https://www.energy.gov/articles/doe-awards-38-million-projects-leading-used-nuclear-fuel-recycling-initiative>
- [3.1-101] Advanced Research Projects Agency - Energy (ARPA-E), “CURIE Project Descriptions”, 2022 年 10 月 [https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/documents/files/CURIE Project Descriptions_FINAL.pdf](https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/documents/files/CURIE%20Project%20Descriptions_FINAL.pdf)
- [3.1-102] U.S. Nuclear Regulatory Commission, ADAMS データベース
(<https://adams.nrc.gov/wba/>)
- [3.1-103] International Isotopes, Inc., 2021 Annual Report (Form 10-K).
<https://intisoid.com/wp-content/uploads/2022/04/INIS-10-K-12-31-21-As-Filed.pdf>
- [3.1-104] U.S. Department of Energy, Congressional Budget Request (FY 2017～FY2023, DOE Budget & Performance, <https://www.energy.gov/budget-performance>)
- [3.1-105] U.S. Department of Energy/INL, Nuclear Energy University Program (NEUP) ウェブサイト情報 (<https://neup.inl.gov>)
- [3.1-106] U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Overview of Advanced Reactor Fuel Activities”, Public Meeting, 2022 年 12 月 7 日

<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/commission/slides/2022/20221208/index.html>

- [3.1-107] Sillex Systems 社ウェブサイト情報(<https://www.silex.com.au/>)
- [3.1-108] Sillex Systems, “ Testing of First Full-Scale Laser System Module Completed for SILEX Uranium Technology”, Investors Announcement, 2022 年 8 月 31 日
<https://www.asx.com.au/asxpdf/20220831/pdf/45djqrwt0v1yy.pdf>
- [3.1-109] Global Laser Enrichment, “ Global Laser Enrichment”, DOE/NEI HALEU Workshop, 2020 年 4 月 28 日
https://gain.inl.gov/HALEU_Webinar_Presentations/16-Owens,Global_Laser_Enrichment,v16nm-28Apr2020.pdf
- [3.1-110] Sillex Systems, “2022 Annual General Meeting”, (株主総会プレゼンテーション資料) 2022 年 10 月 13 日 <https://clients3.weblink.com.au/pdf/SLX/02581539.pdf>
- [3.1-111] U.S. Department of Energy, Office of Science, Oak Ridge National Laboratory Site Office (OSO) ウェブサイト情報(<https://science.osti.gov/oso/Projects>)
- [3.1-112] Oak Ridge National Laboratory (ORNL), “ A Summary of Actinide Enrichment Technologies and Capability Gap”, 2017 年 1 月
<https://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub71321.pdf>
- [3.1-113] Oak Ridge National Laboratory (ORNL)ウェブサイト情報(<https://www.ornl.gov/>)
- [3.1-114] U.S. Department of Energy, 2023 会計年度予算要求資料(第 5 巻),
<https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-05/doe-fy2023-budget-volume-5-science-v2.pdf>
- [3.1-115] Centrus Energy, FY 2021 Annual Report (Form 10-K), 2022 年 3 月
<https://investors.centrusenergy.com/static-files/725397f5-45a4-463b-ae3a-15f5531021f9>
- [3.1-116] Centrus Energy, “ Centrus Energy Finalizes Contract with U.S. Department of Energy to Complete HALEU Cascade Construction and Produce HALEU”, 2022 年 12 月 1 日
<https://www.centrusenergy.com/news/centrus-energy-finalizes-contract-with-u-s-department-of-energy-to-complete-haleu-cascade-construction-and-produce-haleu-for-up-to-10-years/>
- [3.1-117] Centrus Energy, “Centrus Reports Third Quarter 2022 Results”, Press Release, 2022 年 11 月 8 日
<https://www.centrusenergy.com/news/centrus-reports-third-quarter-2022-results/>
- [3.1-118] U.S. Department of Energy, “Office of Nuclear Energy: Strategic Vision”, 2021 年 1 月 <https://www.energy.gov/ne/articles/office-nuclear-energy-strategic-vision>
- [3.1-119] World Nuclear News, “ HALEU fuel availability delays Natrium reactor project : New Nuclear”, 2022 年 12 月 15 日 <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/HALEU-fuel-availability-delays-Natrium-reactor-pro>
- [3.1-120] 115th Congress, “ Nuclear Energy Innovation and Modernization Act”, (S.512, Public Law 115-439), 2019 年 1 月 14 日
<https://www.congress.gov/bill/115th-congress/senate-bill/512/text>
- [3.1-121] U.S. Nuclear Regulatory Commission, “ Advanced Reactor Stakeholder

Public Meeting”, 2021 年 5 月 27 日

<https://adamswebsearch2.nrc.gov/webSearch2/main.jsp?AccessionNumber=ML21146A347>

- [3.1-122] U.S. Nuclear Regulatory Commission ウェブサイト情報(先進炉許認可)
<https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/advanced/licensing-activities.html>
- [3.1-123] U.S. Nuclear Regulatory Commission, “SECY-22-0008 Advanced Reactor Program Status”, 2022 年 1 月 31 日
<https://www.nrc.gov/docs/ML2133/ML21337A376.pdf>
- [3.1-124] Oklo, “ Oklo Submits Licensing Project Plan to Prepare for Efficient and Effective License Application Reviews”, 2022 年 9 月 20 日(Business Wire)
<https://www.businesswire.com/news/home/20220920005595/en/Oklo-Submits-Licensing-Project-Plan-to-Prepare-for-Efficient-and-Effective-License-Application-Reviews>
- [3.1-125] IAEA, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2022 Edition, 2022 年 9 月
https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf
- [3.1-126] U.S. Department of Energy, Funding Opportunity Announcement (FOA), “Advanced Reactor Demonstration”, DE-FOA-0002271, 2020 年 5 月 14 日
<file:///P:/Downloads/Advanced%20Reactor%20Demonstration%20Program%20FOA.pdf>
- [3.1-127] テラパワー社ウェブサイト情報(<https://www.terrapower.com>)
- [3.1-128] テラパワー社 Natrium 炉ウェブサイト情報(<https://natriumpower.com/>)
- [3.1-129] X-Energy, Advanced Reactor Demonstration Program <https://x-energy.com/ardp>
- [3.1-130] X-Energy, “ TRISO-X Submits First Ever High-Assay Low-Enriched Uranium Fuel Fabrication Facility License Application to the Nuclear Regulatory Commission”, News Release, 2022 年 4 月
<https://x-energy.com/media/news-releases/triso-x-submits-first-ever-high-assay-low-enriched-uranium-fuel-fabrication-facility-license-application-to-the-nuclear-regulatory-commission>
- [3.1-131] X-Energy, “ X-energy’ s TRISO-X Selects Oak Ridge Horizon Center for First Commercial Advanced Reactor Fuel Fabrication Facility in North America — X-energy”, News Release, 2022 年 4 月 <https://x-energy.com/media/news-releases/x-energy-triso-x-selects-oak-ridge-horizon-center-for-first-commercial-advanced-reactor-fuel-fabrication-facility-in-north-america>
- [3.1-132] U.S. Department of Energy, “Southern Company and TerraPower Prep for Testing on Molten Salt Reactor”, 2021 年 11 月
<https://www.energy.gov/ne/articles/southern-company-and-terrapower-prep-testing-molten-salt-reactor>
- [3.1-133] TerraPower, “ TerraPower and Southern Company to demonstrate the world’ s first fastspectrum salt reactor at Idaho National Laboratory”, 2022 年 2 月
<https://www.terrapower.com/southern-terrapower-mcre-agreement/>
- [3.1-134] Third Way, “ Third Way Calls Recent Department of Energy Advanced Reactor Demonstration Program Awards “A Very Big Deal””, Press Release, 2020 年 10 月 14 日 <https://www.thirdway.org/press/third-way-calls-recent-department-of-energy-advanced-reactor-demonstration-program-awards-a-very-big-deal>

- [3.1-135] Power Magazine, “ DOE Has Chosen Advanced Nuclear Reactor Demonstration Winners”, 2020 年 10 月 8 日(同 10 月 22 日更新)
<https://www.powermag.com/doe-has-chosen-advanced-nuclear-reactor-demonstration-winners/>
- [3.1-136] ARPA-E ウェブサイト情報(ONWARDS)
<https://arpa-e.energy.gov/technologies/programs/onwards>
- [3.1-137] Advanced Research Projects Agency - Energy (ARPA-E), Funding Opportunity Announcement (FOA), “ Optimizing Nuclear Waste and Advanced Reactor Disposal Systems (ONWARDS)”, DE-FOA-0002530, 2021 年 5 月 19 日
<https://arpa-e-foa.energy.gov/FileContent.aspx?FileID=e8185785-d399-4220-828d-a09b8352bcce>
- [3.1-138] Advanced Research Projects Agency - Energy (ARPA-E), ONWARDS Project Descriptions, 2022 年 3 月 https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/documents/files/ONWARDS_Project%20Descriptions_FINAL.pdf
- [3.1-139] Pitchbook 企業情報(<https://pitchbook.com/>)
- [3.1-140] Crunchbase 企業情報(<https://www.crunchbase.com/>)
- [3.1-141] Citrine Informatics 社ウェブサイト(<https://citrine.io/>)
- [3.1-142] SCSK 社ウェブサイト情報 <https://www.scsk.jp/product/common/citrine/>
- [3.1-143] SCSK 社、「Citrine Informatics 社と「Citrine Platform」の販売代理店契約を締結」、2022 年 7 月 8 日付プレスリリース
<https://www.scsk.jp/news/2022/pdf/20220708.pdf>
- [3.1-144] MIT, “ Commercializing next-generation nuclear energy technology”, MIT News, 2020 年 11 月 13 日 <https://news.mit.edu/2020/oklo-nuclear-energy-1113>
- [3.1-145] オクロ社 Facebook ページ情報(www.facebook.com/okloinc)
- [3.1-146] Oklo, “Oklo Power Combined Operating License Application for the Aurora at INL”, Part I:Company Information and Financial Requirements, 2020 年 3 月 11 日 <https://www.nrc.gov/docs/ML2007/ML20075A002.pdf>
- [3.1-147] Deep Isolation 社ウェブサイト情報(<https://www.deepisolation.com/>)
- [3.1-148] BWX Technologies, “ BWXT to Build First Advanced Microreactor in United States”, 2022 年 6 月 9 日 <https://www.bwxt.com/news/2022/06/09/BWXT-to-Build-First-Advanced-Microreactor-in-United-States>
- [3.1-149] BWX Technologies, “ BWXT Starts Production of TRISO Fuel for First U.S. Generation IV Microreactor”, 2022 年 12 月 7 日
<https://www.bwxt.com/news/2022/12/07/BWXT-Starts-Production-of-TRISO-Fuel-for-First-US-Generation-IV-Microreactor>
- [3.1-150] Kairos Power, “Kairos Power Signs Agreement to Produce Fuel for Hermes at Los Alamos National Laboratory”, 2022 年 12 月 8 日
https://kairospower.com/external_updates/kairos-power-signs-agreement-to-produce-fuel-for-hermes-at-los-alamos-national-laboratory/
- [3.1-151] Los Alamos National Laboratory (LANL), “ Low Enriched Fuel Fabrication Facility (LEFFF) at LANL”, LA-UR-22-20007, 2022 年 1 月 2 日
<https://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-22-20007>
- [3.1-152] U.S. Department of Energy/Energy Information Administration, “2021

3.2 英国

- [3.2-1] https://www.gov.uk/government/news/plans-unveiled-to-decarbonise-uk-power-system-by-2035?utm_medium=email&utm_campaign=govuk-notifications&utm_source=5d0fe388-531f-4b67-a99e-0bbddc72c3b7&utm_content=immediately
- [3.2-2] <https://www.gov.uk/government/news/major-acceleration-of-homegrown-power-in-britains-plan-for-greater-energy-independence>
- [3.2-3] FINANCIAL TIMES, Nuclear industry calls for new UK reactors as ‘matter of priority’, 2023 年 1 月 29 日
<https://www.ft.com/content/86689352-2840-4d76-9bf8-f26fe28a8566>
- [3.2-4] CITY A.M., Great British Nuclear lacks ‘overarching strategy’, warns leading advisor, 2023 年 1 月 18 日
<https://www.cityam.com/great-british-nuclear-lacks-overarching-strategy-warns-leading-advisor/>
- [3.2-5] プロスペクト労働組合, Open letter calls on Prime Minister to launch Great British Nuclear programme, 2023 年 1 月 30 日
- [3.2-6] <https://www.gov.uk/government/publications/future-nuclear-enabling-fund-fnef>
- [3.2-7] <https://www.gov.uk/government/publications/nuclear-fuel-fund-nff>
- [3.2-8] £102 million government backing for nuclear and hydrogen innovation in the UK - GOV.UK (www.gov.uk)
- [3.2-9] Ministers bolster UK nuclear fuel capacity to squeeze out Russian influence - GOV.UK (www.gov.uk)
- [3.2-10] CoRWM: 18th annual report, 2021 to 2022 - GOV.UK (www.gov.uk)
- [3.2-11] NDA Draft Business Plan 2023 to 2026 - html version - GOV.UK (www.gov.uk)
- [3.2-12] 英国議会, Trade and Industry - Ninth Report, 2000 年 5 月 18 日,
<https://publications.parliament.uk/pa/cm199900/cmselect/cmtrdind/307/30711.htm>
- [3.2-13] IAEA, Use of Reprocessed Uranium Proceedings of a Technical Meeting held in Vienna, 29-31 August 2007, 2010 年, https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE_1630_CD/PDF/IAEA-TECDOC-1630.pdf
- [3.2-14] RWM 社, Geological Disposal Summary of factors affecting the disposability of unirradiated depleted uranium tails and Magnox depleted uranium, 2016 年 10 月, <https://rwm.nda.gov.uk/publication/summary-of-factors-affecting-the-disposability-of-unirradiated-depleted-uranium-tails-and-magnox-depleted-uranium/?download>
- [3.2-15] NDA, Separated plutonium: progress on approaches to management, 2014 年 1 月
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/457874/Progress_on_approaches_to_the_management_of_separated_plutonium_position_paper_January_2014.pdf
- [3.2-16] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, Nuclear Power in the United

- Kingdom, 2023 年2月 19 日閲覧
<https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/united-kingdom.aspx>
- [3.2-17] Orano 社ウェブサイト、Leader mondial dans le recyclage des combustibles usés、2020 年 10 月 1 日閲覧
<https://www.orano.group/fr/l-expertise-nucleaire/de-l-exploration-au-recyclage/leader-mondial-dans-le-recyclage-des-combustibles-uses>
- [3.2-18] Orano 社ウェブサイト、Orano transports samples of British nuclear materials to its Melox site、2019 年 11 月 26 日、
<https://www.orano.group/en/news/news-group/2019/november/orano-transport-samples-of-british-nuclear-materials-to-its-melox-site>
- [3.2-19] newcleo announces successful close of €300 million equity raise - newcleo
- [3.2-20] NDA、NDA Annual Report and Accounts 2021 to 2022, 2022 年 1 月 14 日
<https://www.gov.uk/government/publications/nuclear-decommissioning-authority-annual-report-and-accounts-2021-to-2022>
- [3.2-21] IAEA:INFCIS(Nuclear Fuel Cycle Information System)、2020 年 9 月 8 日
[閲覧 https://infcis.iaea.org/NFCIS/Facilities](https://infcis.iaea.org/NFCIS/Facilities)
- [3.2-22] デンマーク国際問題研究所、Governing Uranium in the United Kingdom、2014 年
https://www.diis.dk/files/media/publications/import/extra/rp2014-02_uranium_uk_cve-mfl_web.pdf
- [3.2-23] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION: Nuclear Power in the United Kingdom、2023 年 2 月 17 日閲覧、<https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/united-kingdom.aspx>
- [3.2-24] Nuclear Fuel Fund Application Guidance (publishing.service.gov.uk)
- [3.2-25] AFCP-Advanced-Nuclear-Roadmaps.pdf (nnl.co.uk)
- [3.2-26] <https://afcp.nnl.co.uk/case-study/maintaining-excellence-at-the-nfce/>
- [3.2-27] GENIORS – GENeration IV Integrated Oxide fuel Recycling Strategies project funded by the European Union’s Horizon 2020 programme (Stéphane Bourg, Andreas Geist, Jean-Marc Adnet, Chris Rhodes, Bruce C. Hanson, Partitioning and transmutation strategy R&D for nuclear spent fuel: the SACSESS and GENIORS projects, EPJ Nuclear Sci. Technol. 6 35, 2020)
- [3.2-28] The ten point plan for a green industrial revolution - GOV.UK (www.gov.uk)
- [3.2-29] Energy white paper: Powering our net zero future - GOV.UK (www.gov.uk)
- [3.2-30] Advanced Modular Reactor (AMR) Research, Development and Demonstration Programme: Phase A competition (closed to applications) - GOV.UK (www.gov.uk)
- [3.2-31] £3.3 million boost for next generation nuclear technology - GOV.UK (www.gov.uk)
- [3.2-32] AMR Research, Development and Demonstration: Phase A (2022-2023) successful organisations - GOV.UK (www.gov.uk)
- [3.2-33] <https://triso-x.com/fuel-kernels>
- [3.2-34] NNL、Identification of potential opportunities for development of UK R&D capability and strategic UK supply chain to the deployment of Advanced

Modular Reactors, 2020 年 2 月 21 日

- [3.2-35] GOV.UK, Funding for nuclear innovation, 2016 年 11 月 3 日
<https://www.gov.uk/guidance/funding-for-nuclear-innovation#nuclear-innovation-2016-to-2021>

3.3 仏国

- [3.3-1] Transition énergétique : changeons ensemble, le 28 novembre 2018, Élysée.
<https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2018/11/28/transition-energetique-changeons-ensemble>
- [3.3-2] Programmation Pluriannuelle de l'Énergie 2019-2023 2024-2028.
<https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%20l%27e%CC%81nergie.pdf>
- [3.3-3] 12 OCTOBRE 2021 - SEUL LE PRONONCÉ FAIT FOI, DISCOURS DU PRÉSIDENT DE LA RÉPUBLIQUE À L'OCCASION DE LA PRÉSENTATION DU PLAN FRANCE 2030. <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2021/10/12/presentation-du-plan-france-2030>
- [3.3-4] 10 FEBRUARY 2022 - SEUL LE PRONONCÉ FAIT FOI, REPRENDRE EN MAIN NOTRE DESTIN ÉNERGÉTIQUE ! <https://www.elysee.fr/front/pdf/elysee-module-19285-fr.pdf>
- [3.3-5] Débat public sur les nouveaux réacteurs nucléaires et le projet Penly, Consultation du 27 octobre 2022 au 27 février 2023. <https://www.vie-publique.fr/consultations/286934-debat-public-sur-les-nouveaux-reacteurs-nucleaires-et-le-projet-penly>
- [3.3-6] Nucléaire : le gouvernement veut accélérer la construction des nouveaux réacteurs, LE 28 OCT 2022, Public Sénat. (最終更新:2022 年 11 月 2 日)
<https://www.publicsenat.fr/article/parlementaire/nucleaire-la-construction-de-nouveaux-reacteurs-reste-soumise-a-un-vote-du>
- [3.3-7] PROJET DE LOI (procédure accélérée) relatif à l'accélération des procédures liées à la construction de nouvelles installations nucléaires à proximité de sites nucléaires existants et au fonctionnement des installations existantes, Enregistré à la Présidence du Sénat le 2 novembre 2022. <https://www.senat.fr/leg/pjl22-100.html>
- [3.3-8] Débat public sur les nouveaux réacteurs nucléaires et le projet Penly, Consultation du 27 octobre 2022 au 27 février 2023. <https://www.vie-publique.fr/consultations/286934-debat-public-sur-les-nouveaux-reacteurs-nucleaires-et-le-projet-penly>
- [3.3-9] Bessines-sur-Gartempe, 2019, Orano.
https://cdn.orano.group/orano/docs/default-source/orano-doc/orano-monde/france/plaquette-sib-2019-format-livret-a4.pdf?sfvrsn=c046812e_2
- [3.3-10] Programmation Pluriannuelle de l'Énergie 2019-2023 2024-2028.
<https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%20l%27e%CC%81nergie.pdf>
- [3.3-11] Les activités minières d'Orano, Dossier d'information, Septembre 2022, Orano. https://cdn.orano.group/orano/docs/default-source/orano-doc/expertises/producteur-uranium/32p_dp_orano_mining_fr_sept22_ld.pdf?sfvrsn=33004738_10

- [3.3-12] Rapport Annuel d'Activité 2021, Orano.
https://cdn.orano.group/orano/docs/default-source/orano-doc/groupe/publications-reference/publication-groupe/orano-rapport-annuel-activite-2021eac45271341243c4bc1dd2d3bc7a88551826560399.pdf?sfvrsn=cd611e0_12
- [3.3-13] LES RÉACTEURS DU FUTUR Réacteurs de quatrième génération, LE 6 JANVIER 2021, CEA. <https://www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/energies/energie-nucleaire/reacteurs-nucleaires-futur.aspx?Type=Chapitre&numero=2>
- [3.3-14] Audition de l'Autorité de sûreté nucléaire sur son rapport annuel pour 2021, Mardi 17 mai 2022 - Présidence de Mme Catherine Procaccia, sénateur, vice-présidente de l'Office. https://www.senat.fr/compte-rendu-commissions/20220516/opecst_bul_2022_05_17.html
- [3.3-15] Futurs énergétiques 2050, Principaux résultats, Octobre 2021, RTE. https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-10/Futurs-Energetiques-2050-principaux-resultats_0.pdf
- [3.3-16] PERSPECTIVES POUR LE SYSTÈME ÉLECTRIQUE pour l'automne et l'hiver 2022-2023, RTE. <https://assets.rte-france.com/prod/public/2022-09/Analyse%20passage%20hiver%202022-2023.pdf>
- [3.3-17] 環境法典 L542-12-2 条(「放射性物質及び放射性廃棄物の持続可能な管理に関する 2006 年 6 月 28 日の計画法 n° 2006-739」の第 16 条により同法典に挿入)
- [3.3-18] Programmation Pluriannuelle de l'Énergie 2019-2023 2024-2028. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%201%27e%CC%81nergie.pdf>
- [3.3-19] La 4ème génération et les déchets nucléaires, 18 décembre 2018, Assemblée nationale. <https://www2.assemblee-nationale.fr/15/les-groupes-d-etudes/les-comptes-rendus/comptes-rendus-ge-enjeux-economiques-de-la-filiere-industrielle-energetique/la-4eme-generation-et-les-dechets-nucleaires>
- [3.3-20] Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger dans les installations d'Orano la Hague, Édition 2021. https://www.orano.group/docs/default-source/orano-doc/groupe/publications-reference/rapport-orano-art-8-2021_final.pdf?sfvrsn=bba37c35_8
- [3.3-21] Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger dans les installations d'Orano la Hague, Édition 2021. https://www.orano.group/docs/default-source/orano-doc/groupe/publications-reference/rapport-orano-art-8-2021_final.pdf?sfvrsn=bba37c35_8
- [3.3-22] COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION DES RECHERCHES ET ÉTUDES RELATIVES À LA GESTION DES MATIÈRES ET DES DÉCHETS RADIOACTIFS, RAPPORT D'ÉVALUATION N° 14. https://www.cne2.fr/telechargements/RAPPORT_CNE2_14_2020.pdf
- [3.3-23] Consommation des matières recyclée dans les réacteurs, Réunion plénière du HCTISN 8 mars 2022, Emmanuelle Verger, Directrice Division Combustible EDF. http://www.hctisn.fr/IMG/pdf/08_4_2022_03_18_hctisn_presentation_edf.pdf
- [3.3-24] Le MOX, Publié le 25/06/2013, EDF. EDF ホームページ(2022 年 12 月 16 日 閲覧)<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-mox>

- [3.3-25] Reclassement au niveau 1 de l'échelle INES d'un événement significatif affectant le combustible MOX de certains réacteurs nucléaires de 900 MWe, 23/12/2019, ASN. <https://www.asn.fr/l-asn-controle/actualites-du-controle/installations-nucleaires/avis-d-incident-des-installations-nucleaires/reclassement-au-niveau-1-de-l-echelle-ines-d-un-evenement-significatif-affectant-le-combustible-mox>
- [3.3-26] Communication Received from Certain Member States Concerning Their Policies Regarding the Management of Plutonium, INFCIRC/549, IAEA. <https://www.iaea.org/publications/documents/infcircs/communication-received-certain-member-states-concerning-their-policies-regarding-management-plutonium>
- [3.3-27] Entreposage du combustible nucléaire usé : concepts et enjeux de sûreté, Juin 2018, IRSN. https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/surete/IRSN_Rapport-2018-00003_Entreposage-du-combustible-nucleaire-use.pdf
- [3.3-28] RAPPORT FAIT AU NOM DE LA COMMISSION D'ENQUÊTE sur la sûreté et la sécurité des installations nucléaires, Enregistré à la Présidence de l'Assemblée nationale le 28 juin 2018. http://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/cenucl/l15b1122-ti_rapport-enquete
- [3.3-29] Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000025338573>
- [3.3-30] Décision n° 2014-DC-0402 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 21 janvier 2014 fixant à Électricité de France – Société Anonyme (EDF-SA) des prescriptions complémentaires applicables au site électronucléaire de Dampierre-en-Burly (Loiret) au vu de l'examen du dossier présenté par l'exploitant conformément à la prescription [ECS-1] de la décision n° 2012-DC-0282 du 26 juin 2012 de l'Autorité de sûreté nucléaire. <https://www.asn.fr/content/download/94501/file/2014-DC-0462.pdf> (2022 年 12 月 19 日閲覧)
- [3.3-31] Décision n° 2015-DC-0483 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 8 janvier 2015 fixant à la société AREVA NC des prescriptions complémentaires, relatives au noyau dur et à la gestion des situations d'urgence, applicables aux installations nucléaires de base n°33 (UP2-400), n°38 (STE2), n°47 (Elan IIB), n°80 (HAO), n°116 (UP3-A), n°117 (UP2-800) et n°118 (STE3) situées sur le site de La Hague (Manche). <https://www.asn.fr/content/download/95052/file/2015-DC-0483.pdf> (2022 年 12 月 19 日閲覧)
- [3.3-32] Inventaire national des matières et déchets radioactifs 2022 LES ESSENTIELS, ANDRA. https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/pdf/Andra-MAJ_Essentiels_2022-22_01_25-BDweb_0.pdf
- [3.3-33] Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger dans les installations d'Orano la Hague, Édition 2021. https://www.orano.group/docs/default-source/orano-doc/groupe/publications-reference/rapport-orano-art-8-2021_final.pdf?sfvrsn=bba37c35_8
- [3.3-34] Avis no 2018-AV-0316 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 18 octobre 2018 relatif à la cohérence du cycle du combustible nucléaire en France. <https://www.asn.fr/content/download/160933/file/Avis%202018-AV->

0316%20de%201%E2%80%99ASN%20du%2018%20octobre%202018.pdf

- [3.3-35] RAPPORT DE L'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2021, ASN.
<https://www.asn.fr/content/download/183459/file/Rapport%20de%201%27ASN%202021%20-%20version%20int%C3%A9grale.pdf>
- [3.3-36] RAPPORT DE L'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2021, ASN.
<https://www.asn.fr/content/download/183459/file/Rapport%20de%201%27ASN%202021%20-%20version%20int%C3%A9grale.pdf>
- [3.3-37] Audition de l'Autorité de sûreté nucléaire sur son rapport annuel pour 2021, Mardi 17 mai 2022 - Présidence de Mme Catherine Procaccia, sénateur, vice-présidente de l'Office. https://www.senat.fr/compte-rendu-commissions/20220516/opecst_bul_2022_05_17.html
- [3.3-38] Current Issues: Operating Nuclear Fuel Plants – France (last updated 21 Dec 2022), WISE. <https://www.wise-uranium.org/eopfrf.html>
- [3.3-39] Impacts du projet de production de dioxyde d'uranium (Nouvelle Voie Humide NVH) d'ORANO Malvési Narbonne, Février 2019, Association RUBRESUS. <https://www.rubresus.org/wp-content/uploads/2019/03/NVH-rapport-Rubresus-VF.pdf>
- [3.3-40] Inventaire national des matières et déchets radioactifs 2022 LES ESSENTIELS, ANDRA. https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/pdf/Andra-MAJ_Essentiels_2022-22_01_25-BDweb_0.pdf
- [3.3-41] Arrêté du 4 juillet 2022 décidant l'acquisition par l'Etat d'une participation au capital d'Orano SA.
<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000046026078>
- [3.3-42] Natixis vend à l'Etat 10 % du capital d'Orano, Rédigé le 05/08/2022, FO NPS. <https://www.syndicat-orano-nps.fr/actualites/c/0/i/66333006/natixis-vend-l-etat-10-du-capital-d-orano>
- [3.3-43] EDF bientôt détenue à 100 % par l'État : mode d'emploi, Publié 20/07/2022, Le Gouvernement. <https://www.gouvernement.fr/actualite/edf-bientot-detendue-a-100-par-letat-mode-demploi>
- [3.3-44] COMMUNIQUE DE PRESSE L'Etat annonce son intention de lancer une offre publique d'achat simplifiée sur les titres de capital d'EDF dans l'objectif de retirer la société de la cote, le 19 juillet 2022, Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique.
<https://www.gouvernement.fr/upload/media/content/0001/03/e6c3f4deabeb936596a126730d9096fef476202e.pdf>
- [3.3-45] Rapport Annuel d'Activité 2021, Orano.
https://cdn.orano.group/orano/docs/default-source/orano-doc/groupe/publications-reference/publication-groupe/orano-rapport-annuel-activite-2021eac45271341243c4bc1dd2d3bc7a88551826560399.pdf?sfvrsn=cd611e0_12
Arrêté du 4 juillet 2022 décidant l'acquisition par l'Etat d'une participation au capital d'Orano SA.
<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000046026078>
Natixis vend à l'Etat 10 % du capital d'Orano, Rédigé le 05/08/2022, FO NPS.
<https://www.syndicat-orano-nps.fr/actualites/c/0/i/66333006/natixis-vend-l->

etat-10-du-capital-d-orano

- [3.3-46] Concepteur et constructeur nucléaire. Framatome 社ホームページ(2022 年 12 月 16 日閲覧)<https://www.framatome.com/fr/>
- [3.3-47] Conception et fabrication de combustible Framatome 社ホームページ (2022 年 12 月 16 日閲覧)<https://www.framatome.com/fr/expertise/conception-et-fabrication-de-combustible/>
- [3.3-48] Gouvernance. Framatome 社ホームページ(2022 年 12 月 16 日閲覧) <https://www.framatome.com/fr/a-propos/gouvernance/>
- [3.3-49] Rapport d'information du site Orano Melox, , Edition 2021, Orano. https://cdn.orano.group/orano/docs/default-source/orano-doc/groupe/publications-reference/ora_tsn_melox_2021516640819.pdf?sfvrsn=1331cc0d_10
- [3.3-50] Rapport d'information du site Orano Tricastin, Edition 2021, Orano. https://cdn.orano.group/orano/docs/default-source/orano-doc/groupe/publications-reference/tricastin-2021/oranotricastin_rapporttsn2021.pdf?sfvrsn=7a7d8380_18
- [3.3-51] RAPPORT DE L'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2021, ASN. <https://www.asn.fr/content/download/183459/file/Rapport%20de%20l%27ASN%202021%20-%20version%20int%C3%A9grale.pdf>
- [3.3-52] Malvési, Orano.(2022 年 12 月 20 日閲覧)<https://www.orano.group/fr/l-expertise-nucleaire/tour-des-implantations/transformation-uranium/malvesi-minerai-uf4>
- [3.3-53] Rapport Annuel d'Activité 2021, Orano. https://cdn.orano.group/orano/docs/default-source/orano-doc/groupe/publications-reference/publication-groupe/orano-rapport-annuel-activite-2021eac45271341243c4bc1dd2d3bc7a88551826560399.pdf?sfvrsn=cd611e0_12
- [3.3-54] RAPPORT DE L'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2021, ASN. <https://www.asn.fr/content/download/183459/file/Rapport%20de%20l%27ASN%202021%20-%20version%20int%C3%A9grale.pdf>
- [3.3-55] IAEA:INFCIS(Nuclear Fuel Cycle Information System).(2022 年 12 月 20 日閲覧)<https://infcis.iaea.org/NFCIS/Facilities>
- [3.3-56] Tricastin, Orano. <https://www.orano.group/fr/l-expertise-nucleaire/tour-des-implantations/transformation-uranium/tricastin/expertise>
- [3.3-57] RAPPORT DE L'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2021, ASN. <https://www.asn.fr/content/download/183459/file/Rapport%20de%20l%27ASN%202021%20-%20version%20int%C3%A9grale.pdf>
- [3.3-58] IAEA:INFCIS(Nuclear Fuel Cycle Information System).(2022 年 12 月 20 日閲覧)<https://infcis.iaea.org/NFCIS/Facilities>
- [3.3-59] Romans, Framatome. <https://www.framatome.com/en/implantations/romans/>
- [3.3-60] Concepteur et constructeur nucléaire. Framatome 社ホームページ(2022 年 12 月 20 日閲覧)<https://www.framatome.com/fr/>

- [3.3-61] Leader mondial dans le recyclage des combustibles usés, Orano.(2022 年 12 月 20 日閲覧)<https://www.orano.group/fr/l-expertise-nucleaire/de-l-exploration-au-recyclage/leader-mondial-dans-le-recyclage-des-combustibles-uses#a-lretapeducycletraitementducombustibleus>
- [3.3-62] La Hague, Orano. (2022 年 12 月 20 日閲覧)
<https://www.orano.group/fr/l-expertise-nucleaire/tour-des-implantations/recyclage-du-combustible-use/la-hague>
- [3.3-63] Décret du 10 janvier 2003 autorisant la Compagnie générale des matières nucléaires à modifier l'installation nucléaire de base UP 2-800 située sur le site de La Hague.(2022 年 12 月 20 日閲覧)
<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000776882/>
- [3.3-64] Rapport d'information du site Orano Melox Edition 2021, Orano.
https://cdn.orano.group/orano/docs/default-source/orano-doc/groupe/publications-reference/ora_tsn_melox_2021516640819.pdf?sfvrsn=1331cc0d_10
- [3.3-65] Leader mondial dans le recyclage des combustibles usés, Orano.(2022 年 12 月 20 日閲覧)<https://www.orano.group/fr/l-expertise-nucleaire/de-l-exploration-au-recyclage/leader-mondial-dans-le-recyclage-des-combustibles-uses#a-lretapeducycletraitementducombustibleus>
- [3.3-66] RAPPORT DE L'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2021, ASN.
<https://www.asn.fr/content/download/183459/file/Rapport%20de%20l%27ASN%202021%20-%20version%20int%C3%A9grale.pdf>
- [3.3-67] [Nucléaire] Malgré la guerre en Ukraine, la France se fait livrer une importante cargaison d'uranium naturel et enrichi en provenance de Russie, le 29 novembre 2022, Greenpeace France. <https://www.greenpeace.fr/espace-presse/nucleaire-malgre-la-guerre-en-ukraine-la-france-se-fait-livrer-une-importante-cargaison-d-uranium-naturel-et-enrichi-en-provenance-de-russie/>
- [3.3-68] La France livrée en uranium russe : cinq minutes pour comprendre cette polémique, Le 1 décembre 2022, Le Parisien.
<https://www.leparisien.fr/international/la-france-livree-en-uranium-russe-cinq-minutes-pour-comprendre-cette-polemique-01-12-2022-AWFQZN3FWNCWFL4NA6HW4BRJWI.php>
- [3.3-69] CONCERTATION PRÉALABLE DU 1ER FÉVRIER AU 9 AVRIL 2023, Projet d'extension de l'usine d'enrichissement d'uranium Georges Besse 2, Dossier de la concertation, Orano.
https://cdn.orano.group/orano/docs/extensiongbilibraries/default-document-library/orano-gb2_dossier-de-concertation-vf.pdf?sfvrsn=20e2bc7a_18
- [3.3-70] TENDANCES DE LA R&D NUCLÉAIRE DU CEA DANS LES 10 PROCHAINES ANNÉES, SFEN Lyon - 19 juin 2019, CEA.
https://sfenral.fr/images/Reunions_Debats/2019-06-19_RD_nuc_CEA_bordier.pdf
- [3.3-71] Plutonium Management in the Medium Term, A Review by the OECD/NEA Working Party on the Physics of Plutonium Fuels and Innovative Fuel Cycles (WPPR), OECD 2003. <https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/nea4451-plutonium.pdf>
- [3.3-72] Analyse des possibilités d'entreposage à sec de combustibles nucléaires usés de type MOX ou URE, Avril 2019, Rapport IRSN n°2019-00265.

https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/surete/IRSN_Rapport-2019-00265_Analyse-Possibilites-Entreposage-MOX-URE.pdf

- [3.3-73] 12 OCTOBRE 2021 - SEUL LE PRONONCÉ FAIT FOI, DISCOURS DU PRÉSIDENT DE LA RÉPUBLIQUE À L' OCCASION DE LA PRÉSENTATION DU PLAN FRANCE 2030. <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2021/10/12/presentation-du-plan-france-2030>
- [3.3-74] 10 FEBRUARY 2022 - SEUL LE PRONONCÉ FAIT FOI, REPENDRE EN MAIN NOTRE DESTIN ÉNERGÉTIQUE ! <https://www.elysee.fr/front/pdf/elysee-module-19285-fr.pdf>
- [3.3-75] Les réacteurs du futur, PUBLIÉ LE 6 JANVIER 2021, CEA. <https://www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/energies/energie-nucleaire/reacteurs-nucleaires-futur.aspx>
- [3.3-76] DIRECTION DE L' ÉNERGIE NUCLÉAIRE RAPPORT D' ACTIVITÉ 2019, CEA. https://www.cea.fr/Documents/rapport_activite-nucleaire-civil-2019.pdf
- [3.3-77] Rapport annuel 2021, CEA. <https://www.cea.fr/multimedia/Lists/StaticFiles/rapports/annuel/pdf/CEA-rapport-activite-2021.pdf>
- [3.3-78] DIRECTION DE L' ÉNERGIE NUCLÉAIRE RAPPORT D' ACTIVITÉ 2019, CEA. https://www.cea.fr/Documents/rapport_activite-nucleaire-civil-2019.pdf
- [3.3-79] Rapport annuel 2021, CEA. <https://www.cea.fr/multimedia/lists/staticfiles/rapports/annuel/2019/pdf/CEARA2019FR.pdf>
- [3.3-80] Du multi-recyclage en REP à la fermeture du cycle, LE 28 JUILLET 2021, CEA. <https://www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/energies/energie-nucleaire/dossier-cycle-du-combustible-nucleaire.aspx?Type=Chapitre&numero=4>

3.4 ロシア

- [3.4-1] ROSATOM, Performance of State Atomic Energy Corporation ROSATOM in 2021, https://www.report.rosatom.ru/go_eng/go_rosatom_eng_2021/rosatom_2021_eng.pdf
- [3.4-2] NUCNET, 2023 年 1 月 2 日、Despite 'Geopolitical Situation', Rosatom Expects Exports To Increase 15%、<https://www.nucnet.org/news/despote-geopolitical-situation-rosatom-expects-exports-to-increase-15-12-3-2022>
- [3.4-3] 佐賀山、ロシアの高速炉サイクル開発戦略、高速炉開発会議戦略ワーキンググループ第 5 回会合資料 1、2017 年 10 月 31 日
- [3.4-4] WNA, Information Library, Country Profiles, Nuclear Power in Russia, [https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-power.aspx#:~:text=Total%20investment%20envisaged%20was%20RUR,RUR%201320%20billion%20on%20nuclear.&text=The%20aim%20is%20to%20have,nuclear%20and%20hydro%20by%202030.\(2023 年 1 月 17 日閲覧\)](https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-power.aspx#:~:text=Total%20investment%20envisaged%20was%20RUR,RUR%201320%20billion%20on%20nuclear.&text=The%20aim%20is%20to%20have,nuclear%20and%20hydro%20by%202030.(2023%20年%201%20月%2017%20日%20閲覧))

- [3.4-5] TENEX-JAPAN ROSATOM、2020 年 8 月 NEWS ロスアトムが統一ブランドへ移行—ロスアトムについて、<https://tenex-japan.jp/ja/2020/08/%E3%83%AD%E3%82%B9%E3%82%A2%E3%83%88%E3%83%A0%E3%81%8C%E7%B5%B1%E4%B8%80%E3%83%96%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%83%89%E3%81%B8%E7%A7%BB%E8%A1%8C/>
- [3.4-6] Energynews、2022 年 12 月 27 日、Rosatom,15%growth in 2022、<https://energynews.pro/en/rosatom-15-growth-in-2022/>
- [3.4-7] VATTENFALL、2022 年 2 月 24 日プレス、Vattenfall stops deliveries of Russian nuclear fuel、<https://group.vattenfall.com/press-and-media/newsroom/2022/vattenfall-stops-deliveries-of-russian-nuclear-fuel>
- [3.4-8] ROSATOM、Hanhikivi-1、<https://rusatom-energy.com/projects/hanhikivi-1/> (2023 年 1 月 17 日閲覧)
- [3.4-9] CEZ、2022 年 6 月 17 日、CEZ will acquire Škoda JS, a major Czech company dedicated mainly to nuclear servicing and engineering、<https://www.cez.cz/en/media/press-releases/cez-will-acquire-skoda-js-a-major-czech-company-dedicated-mainly-to-nuclear-servicing-and-engineering-159813>
- [3.4-10] 「原子力年鑑」編集委員会、「原子力年鑑 2021」、日刊工業新聞社、2020 年 10 月
- [3.4-11] IAEA、IAEA Nuclear Energy Series (No.NF-T-3.8) Impact of High Burnup Uranium Oxide and Mixed Uranium-Plutonium Oxide water Reactor Fuel on Spent Fuel Management、2011
- [3.4-12] IAEA、Impact of High Burnup Uranium Oxide and Mixed Uranium-Plutonium Oxide Water Reactor Fuel on Spent Fuel Management、2011 年 6 月、https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1490_web.pdf
- [3.4-13] 国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター、ロシアの原子力開発、https://www.jst.go.jp/crds/report/report10/RU20170426_2.html#sec3
- [3.4-14] WNA、Information Library、Country Profiles、Russia's Nuclear Fuel Cycle
- [3.4-15] WNA、Information Library、Country Profiles、Nuclear Power in Russia (Updated January 2021)、<https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-power.aspx#:~:text=Total%20investment%20envisaged%20was%20RUR,RUR%201320%20billion%20on%20nuclear.&text=The%20aim%20is%20to%20have,nuclear%20and%20hydro%20by%202030.> (2021 年 2 月 25 日閲覧)
- [3.4-16] 日本原子力研究開発機構、平成 29 年度原子力の利用状況に関する調査 核燃料サイクル技術等調査 報告書、2018 年 2 月、p.94、https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H29FY/000460.pdf
- [3.4-17] IAEA:「Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management」、2010 年 1 月

- [3.4-18] Andrey Yu. Petrov et. al, Prospects of creation of the two-component nuclear energy system, NUCET, September 2019
- [3.4-19] UEIP 公式サイト、<http://www.ueip.ru/AboutCompany/Pages/history.aspx>
- [3.4-20] IAEA:「Status and Trends in Spent Fuel Reprocessing」、2005 年 9 月
- [3.4-21] IAEA, Status and Advances in MOX Fuel Technology, Technical Report Series No.415, p.102、https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS415_web.pdf
- [3.4-22] Joint ICTP/IAEA School on Physics and Technology of Fast Reactors Systems, 2009 年 11 月、
<http://indico.ictp.it/event/a08209/session/55/contribution/32/material/0/0.pdf>
- [3.4-23] IAEA, Spent Fuel Reprocessing Options, 2008 年 8 月
- [3.4-24] ROSATOM, 2023 年 1 月 19 日、Rosatom Installs Vessel of MBIR Research Reactor in Design Position、<https://rosatom-mena.com/press-centre/news/rosatom-installs-vessel-of-mbir-research-reactor-in-design-position/>
- [3.4-25] 日本原子力産業協会、連邦目標プログラム 2010 年より 2015 年の期間、さらに 2020 年までの見通しを含めた新世代原子力技術、2010 年、https://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/2010/03/russia_nucl-program100203.pdf
- [3.4-26] ROSATOM, 2022 年 9 月 9 日、BN-800 fast reactor is fully loaded with MOX fuel <https://www.rosatom.ru/en/press-centre/news/bn-800-fast-reactor-is-fully-loaded-with-mox-fuel/>
- [3.4-27] NEI, 2022 年 7 月 26 日,Russia's floating NPP supplies heat to second Pevek district <https://www.neimagazine.com/news/newsrussias-floating-npp-supplies-heat-to-second-pevek-district-9877829>
- [3.4-28] NEI, 2022 年 10 月 21 日、TsNIITMASH completes tests of a transport caskmock-up for Brest used fuel、
<https://www.neimagazine.com/news/newstsnitmarsh-completes-tests-of-a-transport-cask-mock-up-for-brest-used-fuel-10106711>
- [3.4-29] Rosatom to begin pilot operation of TVS-5 fuel、
<https://www.neimagazine.com/news/newsrosatom-to-begin-pilot-operation-of-tvs-5-fuel-10416193>

3.5 中国

- [3.5-1] 「放射性廃棄物等安全条約第 7 回締約国会議 中華人民共和国報告書」、2020 年 9 月
https://www.iaea.org/sites/default/files/china-7rm_english.pdf
- [3.5-2] IAEA, OECD/NEA:「Uranium 2020: Resources, Production and Demand」、2020 年 https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2020-12/7555_uranium_resources_production_and_demand_2020_web.pdf
- [3.5-3] 「放射性廃棄物等安全条約第 6 回締約国会議 中華人民共和国報告書」、2017 年 7 月
https://www.iaea.org/sites/default/files/national_report_of_china_for_the_6th_review

- _meeting_english.pdf
- [3.5-4] 司法部:「中華人民共和国原子力法(パブリックコメント募集用法案)」, 2018 年 9 月
http://www.moj.gov.cn/pub/sfbgw/zlk/201809/t20180920_173878.html
- [3.5-5] WNA:「China's Nuclear Fuel Cycle」, 2021 年 8 月 <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-fuel-cycle.aspx>
- [3.5-6] IAEA:「Nuclear Fuel Cycle Facilities Database」
<https://infcis.iaea.org/NFCIS/Facilities.cshtml>(2022 年 12 月 16 日閲覧)
- [3.5-7] Cameco:「Cameco Customers」
<https://www.cameco.com/invest/markets/cameco-customers>(2022 年 12 月 16 日閲覧)
- [3.5-8] 江門税関:「江門税関が台山原子力発電の輸入核燃料問題検討会を組織し開催」, 2016 年 4 月 5 日
http://www.customs.gov.cn/jiangmen_customs/536573/536574/541195/index.html
- [3.5-9] ROSATOM:「ROSATOM starts supplies of nuclear fuel for China's CFR-600 fast reactor」, 2022 年 9 月 29 日 <https://rosatom-europe.com/press-centre/news/rosatom-starts-supplies-of-nuclear-fuel-for-china-s-cfr-600-fast-reactor/>
- [3.5-10] Kazatomprom ウェブサイト <https://www.kazatomprom.kz/en>(2022 年 12 月 16 日閲覧)
- [3.5-11] Nuclear Engineering International:「Chinese reactor design evolution」, 2014 年 5 月 22 日 <https://www.neimagazine.com/features/featurechinese-reactor-design-evolution-4272370/>
- [3.5-12] Kazatomprom:「First delivery of nuclear fuel from Kazakhstan to NPP of the PRC」, 2022 年 12 月 7 日
https://www.kazatomprom.kz/en/media/view/first_delivery_nfc
- [3.5-13] 日本原子力文化財団:「原子力・エネルギー図面集 世界の主なウラン再転換工場」
<https://www.ene100.jp/zumen/7-3-4>(2022 年 12 月 27 日閲覧)
- [3.5-14] Orano 社:「Orano と CNNC が中国の使用済燃料再処理及びリサイクル工場の準備作業を開始」, 2018 年 6 月 <https://www.euro-energie.com/orano-et-cnnc-lancent-les-travaux-preparatoires-de-l-usine-chinoise-de-traitement-et-recyclage-des-combustibles-uses-n-6834>
- [3.5-15] フランス大統領府:「仏中関係の行動計画」, 2019 年 11 月
<https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2019/11/06/plan-daction-pour-les-relations-franco-chinoises>
- [3.5-16] IAEA:「Country Nuclear Power Profiles CHINA (Updated 2022)」
<https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/China/China.htm>(2022 年 12 月 16 日閲覧)
- [3.5-17] 中核清原環境技術工程有限責任公司:「金塔極低放射性廃棄物埋設場建設プロジェクト環境影響報告書」, 2020 年 7 月
https://www.mee.gov.cn/ywdt/gsgg/gongshi/wqgs_1/202007/W020200727321318115568.pdf
- [3.5-18] 甘肅龍和環保科技有限公司:「龍和浅地中処分場一期一段階建設プロジェクト 環境影響報告書(操業段階)」, 2022 年 1 月
https://www.mee.gov.cn/ywdt/gsgg/gongshi/wqgs_1/202201/W020220126554998341134.pdf
- [3.5-19] 民生証券:「使用済燃料再処理は喫緊の課題、投資機会はどこにある?」, 2022 年 5 月 3 日
https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202205051563618013_1.pdf?1651776098000.pdf
- [3.5-20] 国防科学技術工業委員会、科学技術部、国家環境保護総局:「高レベル放射性廃棄物地

層処分の研究開発計画に関するガイド」、2006 年 2 月。なお、本文書は現在、関係機関のウェブサイト上で公表されていない模様である。

- [3.5-21] BRIUG:「高レベル放射性廃棄物地層処分場地下研究所サイトにおけるボーリング孔の掘削が順調に開始される」、2016 年 3 月。なお、本プレスリリースは現在、関係機関のウェブサイト上で公表されていない模様である。
- [3.5-22] BRIUG:「中国北山地下研究所建設プロジェクト 環境影響報告書」、2020 年 6 月
https://www.mee.gov.cn/ywdt/gsgg/gongshi/wqgs_1/202006/W020200629346584076797.pdf
- [3.5-23] 国家原子能機構:「中国北山地下研究所が着工」、2021 年 6 月 21 日
<https://www.cnecc.com/jx/s/2212-9962-54633.html>
- [3.5-24] 環境保護部、工業情報化部、国家国防科学技術工業局:「放射性廃棄物の分類」、2018 年
<https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201712/W020171212334002017638.pdf>
- [3.5-25] 国家核安全局:「国家核安全局 2016 年報」、2017 年
<http://nnsa.mee.gov.cn/ztzl/haqnb/201707/P020170712499760277634.pdf>
- [3.5-26] 国家核安全局:「2021 年版国家核安全年報」、2022 年 6 月
<http://nnsa.mee.gov.cn/ztzl/haqnb/202206/P020220623505600970403.pdf>
- [3.5-27] IAEA 常駐中国代表団:「Annual Figures for Holdings of Civil Unirradiated Plutonium」、2017 年 9 月 18 日
https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infcircs/1998/inf_circ549a7-16.pdf
- [3.5-28] 張会:「中国のプルトニウムリサイクル計画—現状と問題」、2021 年 12 月
<https://www.belfercenter.org/sites/default/files/files/publication/ChinaPuRecyclingDec2021JP-hzhang.pdf>
- [3.5-29] WNA:「TVEL to supply fuel for China's fast-neutron reactor」、2019 年 1 月
[https://world-nuclear-news.org/Articles/TVEL-to-supply-fuel-for-Chinas-fast-neutron-react#:~:text=TVEL%20and%20CNLY%20have%20signed,County%2C%20in%20China's%20Fujian%20province.\(2022 年 12 月 27 日閲覧\)](https://world-nuclear-news.org/Articles/TVEL-to-supply-fuel-for-Chinas-fast-neutron-react#:~:text=TVEL%20and%20CNLY%20have%20signed,County%2C%20in%20China's%20Fujian%20province.(2022%20年%2012%20月%2027%20日%20閲覧))
- [3.5-30] 国家发展改革委員会、国家能源局:「エネルギー技術革命創新行動計画(2016-2030 年)」、「エネルギー技術革命重点創新行動ロードマップ」、2016 年 4 月
<http://www.gov.cn/xinwen/2016-06/01/5078628/files/d30fbelca23e45f3a8de7e6c563c9ec6.pdf>
- [3.5-31] 国家能源局、科学技術部:「第 14 次 5 カ年計画エネルギー分野の科学技術イノベーション計画」、2021 年 12 月
<http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/03/5683361/files/489a4522clda4a7d88c4194c6b4a0933.pdf>
- [3.5-32] 国家能源局:「第 14 次 5 カ年計画エネルギー分野の科学技術イノベーション計画 重点任务リスト」、2022 年 10 月
<http://www.nea.gov.cn/1310670958.16666616768611n.docx>
- [3.5-33] 国務院:「エネルギー発展戦略行動計画(2014-2020 年)」、2014 年 6 月
http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/19/content_9222.htm
- [3.5-34] 「第 13 次五カ年計画」、2016 年 3 月
http://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content_5054992.htm
- [3.5-35] 李金英等:「我が国の使用済燃料再処理大型施設建設に関する若干の検討」、2011 年 8 月
<http://www.jnrc.org.cn/CN/article/downloadArticleFile.do?attachType=PDF&id=4837>
- [3.5-36] IAEA:「IAEA-TECDOC-1467 Status and trends in spent fuel reprocessing」、2005 年 9 月
https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1467_web.pdf
- [3.5-37] IAEA:「IAEA-TECDOC-1639 Assessment of Nuclear Energy Systems

- Based on a Closed Nuclear Fuel Cycle with Fast Reactors A report of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO)」、2010 年 1 月 https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1639_web.pdf
- [3.5-38] 中国原子能科学研究院:「2013 年両会にて中国人民政治協商會議委員である中国原子能科学研究院の万鋼院長を訪問」、2013 年 3 月
http://www.ciae.ac.cn/newsContent.jsp?RID=199&cid_A=1
- [3.5-39] 中国原子能科学研究院:「一体化高速炉研究開発プロジェクトがマイルストーンとなる成果を達成」、2022 年 12 月 8 日 <https://www.cnnpn.cn/article/34069.html>
- [3.5-40] WNA:「Nuclear Power in China」、2022 年 11 月 <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power.aspx>(2022 年 12 月 27 日閲覧)
- [3.5-41] CNNC:「核燃料」
- [3.5-42] 経済産業省 高速炉開発会議 戦略ワーキンググループ(第 4 回)議事録、2017 年 9 月 14 日
https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/fr/senryaku_wg/pdf/004_gijiroku.pdf
- [3.5-43] 経済産業省 高速炉開発会議 戦略ワーキンググループ(第 4 回)配布資料 The Progress of the Gen-IV Reactor in China、2017 年 9 月 14 日
https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/fr/senryaku_wg/pdf/004_02_00.pdf
- [3.5-44] IAEA:「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 Edition」、2020 年 9 月 https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf
- [3.5-45] CNNC:「最初の高温ガス炉の燃料製造生産ラインが全面完成」、2015 年 5 月
<http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c3796741/content.html>
- [3.5-46] CNNC:「世界初の高温ガス炉の燃料要素が発送される」、2021 年 1 月
<http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/cl6521383/content.html>
- [3.5-47] WNA:「Chinese molten-salt reactor cleared for start up」、2022 年 8 月 9 日 <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Chinese-molten-salt-reactor-cleared-for-start-up>

第 4 章

- [4-1] OECD-NEA、Uranium 2022: Resources, Production and Demand、2020 年、
https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_52718/uranium-2020-resources-production-and-demand
- [4-2] Euratom Supply Agency Annual Report 2021、2022 年 8 月、<https://euratom-supply.ec.europa.eu/system/files/2022-12/Euratom%20Supply%20Agency%20-%20Annual%20report%202021%20-%20Corrected%20edition.pdf>
- [4-3] 経済産業省資源エネルギー庁ホームページ、エネルギー白書、2023 年 2 月閲覧、
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2022/html/2-1-3.html>
- [4-4] U.S. Energy Information Administration、2021 Uranium Marketing Annual Report、2022 年 5 月、
<https://www.eia.gov/uranium/marketing/pdf/2021%20UMAR.pdf>
- [4-5] IAEA:「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments A

Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 Edition」,
2020 年 9 月 https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf

- [4-6] OECD-NEA, Management of Spent Fuel, Radioactive Waste and Decommissioning
in SMRs or Advanced Reactor Technologies, 2022 年 11 月, [https://www.oecd-
nea.org/jcms/pl 69716/management-of-spent-fuel-radioactive-waste-and-
decommissioning-in-smrs-or-advanced-reactor-technologies](https://www.oecd-neo.org/jcms/pl 69716/management-of-spent-fuel-radioactive-waste-and-decommissioning-in-smrs-or-advanced-reactor-technologies)
- [4-7] World Nuclear Association, World enrichment demand versus installed capacity,
2022 年 10 月, [https://www.world-nuclear.org/gallery/the-world-nuclear-fuel-
report-expanded-summary/world-enrichment-demand-versus-installed-
capacity.aspx](https://www.world-nuclear.org/gallery/the-world-nuclear-fuel-report-expanded-summary/world-enrichment-demand-versus-installed-capacity.aspx)

令和 4 年度原子力の利用状況等に関する調査(海外における核燃料サイクル関連動向等調査)

2023 年 2 月

株式会社三菱総合研究所
セーフティ&インダストリー本部
TEL (03)6858-3577

二次利用未承諾リスト

報告書の題名：令和4年度原子力の利用状況等に関する調査
（海外における核燃料サイクル関連動向等調査） 報告書

委託事業名：令和4年度原子力の利用状況等に関する調査（海外における核燃料サイクル関連動向等調査）

受注事業者名：株式会社三菱総合研究所

頁	図表番号	タイトル
12	表3. 1-1	原子力サプライチェーンの評価テーブル（燃料関係）
43	図3. 1-1	ウラン価格の推移（スポット、長期契約）
45	図3. 1-2	長期契約締結状況の推移
51	図3. 1-3	ARPA-E研究開発プログラムの位置づけ
55	図3. 1-4	再処理費用推定の報告表（CURIE FOA）
61	図3. 1-5	Silex技術プロセス図
69	図3. 1-6	米国で開発中の幅広い先進炉設計
73	図3. 1-7	ARPA-E 研究開発プログラムの位置づけ（再掲）
109	図3. 2-2	英国におけるSMR、AMRのTRLおよびサプライチェーン能力
115	図3. 3-1	世界におけるOrano社の採鉱活動
121	図3. 3-2	回収ウランの転換・濃縮に係る2018年契約の作業フロー
127	図3. 3-3	フランスにおける放射性廃棄物の分類と管理方法
129	図3. 3-5	仏Oranoグループの組織体制
131	図3. 3-6	フランスにおけるウラン転換 - 濃縮プロセス
132	図3. 3-7	フランスにおける使用済燃料のリサイクルプロセス
133	図3. 3-8	フランス国内における核燃料サイクル体制
142	図3. 3-9	世界の4大ウラン濃縮事業者の濃縮設備占有率（2021年時点）
144	図3. 3-10	トリカスタンサイトとGeorges Besse IIプラント拡張部分の配置

145	図3. 3-11	燃料集合体における燃料棒の配置
148	図3. 3-12	石炭火力発電プラントを34万kWのSMRでリブレースした場合のレイアウト
150	図3. 3-13	UO ₂ 燃料ペレットのボロキシデーション処理
162	図3. 4-3	OA0 MSZでの回収ウランの製造実績（縦軸は燃料集合体数）
164	図3. 4-4	2種類のMOX燃料、及び熱中性子炉と高速炉の両炉を活用したクローズドサイクル
177	表3. 4-9	FTP2010の目標指数と指標
177	表3. 4-10	FTPの支出分野と資金源
182	図3. 5-2	主要国におけるウランの生産量と原子炉関連のウランの必要量（2019年1月1日時点）
199	図3. 5-5	「エネルギー技術革命重点創新行動ロードマップ」におけるバックエンドの研究ロードマップ
206	図4. 1-1	各年におけるウラン製造量と要求量
207	図4. 1-2	ウラン製造量と要求量の累計
207	表4. 1-1	EU、米国におけるウランインベントリ（在庫）
208	表4. 1-2	2021年における天然ウラン製造量
208	表4. 1-3	商業UF ₆ 転換施設
209	表4. 1-4	商業ウラン濃縮施設
214	図4. 1-5	2040年までの原子力発電設備容量増加の見込み
215	図4. 1-6	2040年までの天然ウラン需要の見込み
215	図4. 1-7	2040年までの濃縮ウランの需要と供給の関係
223	図4. 3-1	2種類のMOX燃料、及び熱中性子炉と高速炉の両炉を活用したクローズドサイクル
226	図4. 4-1	現在開発されている革新炉一覧（各国別の開発状況）
227	図4. 4-2	現在開発されている革新炉一覧（出力と開発段階）
232	図4. 4-3	既存のPWRに関する知見と溶融塩炉検討における関係性
232	図4. 4-4	溶融塩炉導入によるHLW量と放射能低減に関するシナリオ検討