

B. 回収ウラン利用技術開発委託費に係る事業

目 次

1. 事業の目的・政策的位置付け.....	1
1-1 事業の目的.....	1
1-2 政策的位置付け.....	2
1-3 国の関与の必要性.....	3
2. 研究開発目標.....	4
2-1 研究開発目標.....	4
2-1-1 全体の目標設定.....	4
2-1-2 個別要素技術の目標設定.....	5
3. 成果、目標の達成度.....	7
3-1 成果.....	7
3-1-1 全体成果.....	7
3-1-2 個別要素技術成果.....	7
3-1-3 特許出願状況等.....	24
3-2 目標の達成度.....	25
4. 事業化、波及効果.....	28
4-1 事業化の見通し.....	28
4-2 波及効果.....	29
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等.....	30
5-1 研究開発計画.....	30
5-2 研究開発実施者の実施体制・運営.....	31
5-3 資金配分.....	32
5-4 費用対効果.....	33
5-5 変化への対応.....	33

1. 事業の目的・政策的位置付け

1－1 事業目的

我が国では、核燃料資源の有効利用の観点から、使用済燃料を再処理し、回収されるウラン、プルトニウムを有効利用する核燃料サイクルの推進を基本方針としており、六ヶ所再処理工場の本格操業後には年間８００トンの使用済燃料が再処理され、年間７００トン以上のウランが回収される。

原子力政策大綱等では、使用済燃料の再処理により回収されるウランは、核分裂性ウランの含有率が天然ウランよりも高く備蓄効果も高いことから、将来のウラン需要に備えた戦略的備蓄と位置付けられているが、国内での回収ウランの利用にあたっては、転換施設（酸化物状態で回収されるウランを濃縮するためにふっ化物に転換するための施設）の導入に要する期間、費用の見積もり、既存のウラン濃縮施設の対応可能性等について検討が必要とされている。

また、回収ウランは、微量の核分裂生成物や超ウラン元素が含まれるとともに、天然ウランと同位体組成が異なることから、ウランの子孫核種等による作業員の被ばくや原子炉の中性子利用効率の低下等の影響についても考慮が必要と考えられている。

本プロジェクトでは、六ヶ所再処理工場から回収されるウランを再び軽水炉で利用するため、既存のウラン濃縮施設、再転換施設、成型加工施設での回収ウラン取扱いへの影響や原子炉の炉心特性に与える影響等を調査した。また、高性能で安全性、経済性に優れた転換プロセス、濃縮プロセス、再転換プロセスを検討し、回収ウラン利用の技術開発の概念検討を実施した。

ルトリウム、ウラン等を有効利用することを基本的方針とする。

「原子力立国計画」（平成 18 年 8 月）

第 3 節戦略的産業分野を支える分野

4.回収ウラン

国内における再処理の結果得られる回収ウランは、国内利用を第一目標とするが、現在ウラン価格は上昇しているもののウラン調達自身に困難は見出されていないこと、ウラン濃縮度が高く備蓄効果も高いことから、当面は将来のウラン需要に備えた戦略的備蓄と位置付けることが合理的である。

その一方で、電気事業者及び日本原燃は、回収ウラン利用への機動的な対応可能性を明らかにするため、日本原子力研究開発機構の協力も得つつ、回収ウランの国内利用を想定した転換施設の導入に要する期間、費用の見積もり、新型遠心分離機の対応可能性等に関する検討を進めることが不可欠である。

「エネルギー基本計画」（平成 19 年 3 月 9 日、閣議決定）

第 2 章第 3 節 1.原子力の開発、導入及び利用

原子力発電については、安全確保を大前提に、今後とも基幹電源として位置付け推進する。その際、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム、ウラン等を有効利用する核燃料サイクルは、供給安定性に優れる原子力発電の特性を一層向上させるものであり、国の基本的方針として、核燃料サイクルを推進する。

1－3 国の関与の必要性

原子力発電はエネルギーの安定供給に資するほか、地球温暖化対策の面で優れた特性を有するため、我が国では原子力発電を基幹電源として位置付けるとともに、使用済燃料の再処理に伴い回収されるプルトニウム、ウラン等を有効利用することを国の基本的方針とし、その確立に向けた研究開発を推進している。

六ヶ所再処理工場で回収される回収ウランは国内に保管されることから、準国産燃料と位置付けることができる。

一方、中国、インドにおける電力需要の急増、米国、欧州における地球温暖化対策等から原子力発電所の建設が推進されており、その結果、天然ウラン価格が高騰し、中長期的な需給逼迫も懸念され、国際的なウラン権益獲得競争が激化する中、天然ウランの調達が困難になる可能性がある。天然ウランの供給を海外に依存している我が国においては、その代替として回収ウランを利用することが不可避となる。

このため、六ヶ所再処理工場の本格操業にあたり、回収ウラン利用への機動的な対応可能性を確保しておく必要がある。

2. 研究開発目標

2-1 研究開発目標

2-1-1 全体の目標設定

本プロジェクトは、六ヶ所再処理工場からの回収ウランを再び軽水炉で利用するにあたり、既存の核燃料サイクル施設への影響等を把握し、転換プロセスを中心とした高性能で安全性、経済性に優れた回収ウラン利用技術を開発することを目的とするものである。表1に全体の目標を示す。

表1. 全体の目標

目標・指標	設定理由・根拠等
➤ 六ヶ所再処理工場からの回収ウランを再び軽水炉で利用するにあたり、既存の核燃料サイクル施設への影響等を把握し、転換プロセスを中心とした高性能で安全性、経済性に優れた回収ウラン利用技術を開発する。	➤ 将来の回収ウラン転換の事業化に備え、その事業の成立性を評価するため、準国産燃料と見なされる回収ウランの特性を検討し、回収ウラン転換プロセスを中心とした回収ウラン利用技術を構築することが必要である。

2-1-2 個別要素技術の目標設定

個別要素技術ごとの開発目標及びその妥当性を表 2 に示す。

表 2. 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
(1) 国内外の回収ウラン取扱実績等に関する調査	各国の核燃料サイクル施設、原子炉等における回収ウランの取扱実績及び回収ウランの取扱いに関する技術的課題を調査する。	将来の事業化に備え、既に明らかとなった課題を把握した上で検討を行うため、これまでの国内外の回収ウラン取扱実績等に関して調査を行うことが必要である。
(2) 既存施設における回収ウランの受入条件に関する調査	既存の国内外の主要な転換、濃縮、再転換、成型加工、原子炉、各種輸送設備における取扱核種、線量等の受入条件等を調査する。	将来の事業化に備え、回収ウラン利用の各段階での施設の安全性担保の条件を検討するため、既存施設における回収ウランの受入条件に関して調査することが必要である。
(3) 炉心特性に与える影響に関する調査	回収ウランに含まれる U-236、核分裂生成物(FP)、マイナーアクチニド(MA)、 α 線放出核種等が炉心特性に与える影響を調査する。	将来の事業化に備え、回収ウランを用いた炉心の成立性を確認するため、不純物の核種が炉心特性に与える影響の有無に関して調査することが必要である。
(4) 国内外の転換プロセスに関する調査	回収ウラン酸化物を UF ₆ に転換する国内外のプロセス技術を調査する。	将来の事業化に備え、最新の技術動向を把握するため、国内外のプロセスに関して調査し、先行事例を把握することが必要である。
(5) 転換プロセスの検討	現状の調査結果を反映して、六ヶ所再処理工場からの回収ウランを六フッ化ウランに転換するプロセスの検討を行う。	将来の事業化に備え、最新の調査事項を反映した合理的な転換プロセスを実現するため、六ヶ所再処理工場からの UO ₃ に焦点を当てた UF ₆ へのふっ化転換プロセスの検討を行うことが必要である。

(6) 回収ウラン濃縮プロセスの検討	国内の既存のウラン濃縮施設（六ヶ所ウラン濃縮工場）で回収ウラン UF ₆ を取扱う場合の課題を検討する。	将来の事業化に備え、六ヶ所ウラン濃縮工場で回収ウランを取扱う場合の課題を把握するため、濃縮プロセスを検討することが必要である。
(7) 回収ウラン再転換プロセスの検討	濃縮された回収ウラン UF ₆ を国内の既存の再転換施設で取扱う場合の課題を検討する。 また、劣化ウラン(UF ₆)の酸化固形化を新たに実施する場合のプロセスを検討する。	将来の事業化に備え、国内既存の再転換施設で回収ウランを取扱う場合の課題を把握するため、再転換プロセスを検討することが必要である。また、劣化ウラン転換の課題を把握するため、濃縮施設から発生する劣化ウラン(UF ₆)の酸化固形化プロセスの検討を行うことが必要である。
(8) 転換プロセスの事業化の概念検討	回収ウラン酸化物を UF ₆ に転換する回収ウラン転換プロセスの事業化に対する概念検討を行う。	将来の事業化に備え、回収ウラン転換事業の成立性を評価し、我が国の核燃料政策への影響を明確化させるため、回収ウラン酸化物を UF ₆ に転換する回収ウラン転換プロセスの事業化に対する概念検討を行うことが必要である。

3. 成果、目標の達成度

3-1 成果

3-1-1 全体成果

本研究開発は、平成 21 年度において国内外の回収ウラン取扱実績等、既存施設における回収ウランの受入条件、炉心特性に与える影響、国内外の転換プロセスの調査を実施し、その上で、平成 22 年度には、事業化すると仮定した場合におけるプラントイメージを策定し、全体として、いずれも当初目標どおりの成果が達成された。各項目の成果については以下に記載するとおりである。

3-1-2 個別要素技術成果

(1) 国内外の回収ウラン取扱実績等に関する調査

軽水炉での回収ウラン燃料利用はフランスとドイツで定常的に行なわれている。そのための回収ウラン転換と再濃縮はロシアに委託され、成型加工、組み立てがフランス、ロシア、ドイツで行われている。また、日本、ベルギー、スイス等の原子炉において、2003 年までに各々300～500tU 程度の回収ウラン再濃縮燃料が利用された。各国の軽水炉での回収ウラン利用実績を表 3 に示す。いずれも安全上の大きな問題は特に報告されていない。フランスでは、遠心分離法による新ウラン濃縮工場の建設が進んでおり、その一部を回収ウランの再濃縮用とするため、回収ウラン転換プラントの更新増強が検討されている。

表 3. 各国の回収ウラン利用状況

	2003年までに得た回収ウラン量 (tU)	2003年までの軽水炉利用回収ウラン量 (tU)	2004～2010年の軽水炉利用予定回収ウラン量 (tU)	備考
ベルギー	643	525	—	大半が再濃縮利用
	再処理はフランスに委託。回収ウランの利用は1989年に天然ウラン起源の濃縮ウランと混合利用。1994年から軽水炉の再濃縮利用が開始される。再濃縮はウレンコにて実施。ベルギーは現在再処理政策を止めており、今後の利用の予定はない。			
フランス	9600	2900	400～2800	大半が再濃縮利用
	1980年代に再濃縮利用に係る試験が実施され、1994年から商業規模の回収ウラン利用が開始。転換はピエールラット、再濃縮は当初ウレンコにて実施。1992年からは転換、再濃縮の一部がロシアに委託された。現在は全てロシアで実施。新規転換工場建設の予定あり。			
ドイツ	5078	2696	2467	大半が再濃縮利用
	再処理はフランス、イギリスに委託。1970年代にMOX母材として利用され、その後は試験的に軽水炉で再濃縮利用され、現在では定常的に利用されている。当初は、転換はフランスに委託、再濃縮はウレンコで実施。現在は、全てロシアで実施。			
日本	6060	335	未定	再濃縮利用
	海外への再処理委託で得た回収ウランのうち150tUがウレンコで再濃縮され国内で再転換・加工され発電所に装荷された。国内では人形峠の転換施設、濃縮施設を使用して回収ウランが処理され利用された。			
オランダ	270	270	60	混合利用
	再処理はベルギー（現在は廃止）、フランス、イギリスに委託。利用法は、ロシアの高濃縮ウランとの混合で用いられる。			
スイス	565	365	328	混合利用
	再処理はフランスとイギリスに委託。利用法は、ロシアの高濃縮ウランとの混合で用いられる。			

回収ウランの再濃縮利用では、天然ウランと同様の処理工程（転換、濃縮、再転換、成型加工）を経る。天然ウランの場合と比較し、処理過程の回収ウランの取扱いの問題点として以下の３点が上げられる。

- ・ U-232 の子孫核種による高エネルギー γ 線
- ・ U-234 の濃度増による α 比放射能の上昇
- ・ 微量含有する TRU, FP

回収ウランの γ 線は、回収ウランに含まれる U-232 の子孫核種である Tl-208 及び Bi-212 の影響により増加する。両核種の半減期が短いことから、その生成量は親核種である U-232 及び Th-228 の半減期により支配される。U-232 の崩壊系列を図 2 に示す。Th-228 は、再処理でウランから除去される他、UF₆ のガス化の際にも不揮発性のため除去される。この精製された回収ウランでは、Th-228 の濃度は徐々に上昇して U-232 の存在量と平衡になるまで約 10 年を要する（その後は U-232 の半減期に従って減少する）。図 3 に Th-228 の生成量の経時変化を示す。

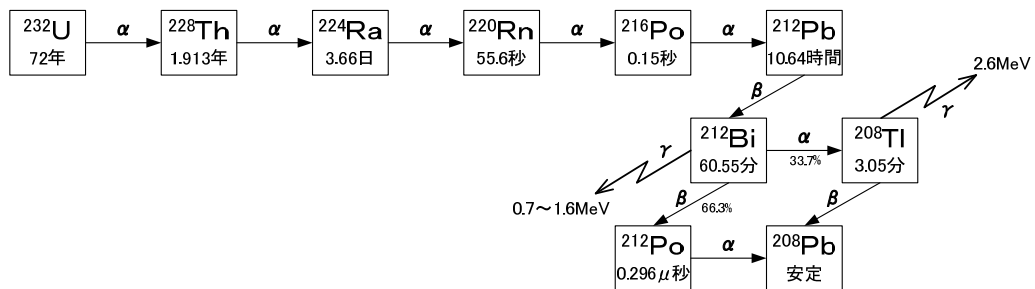
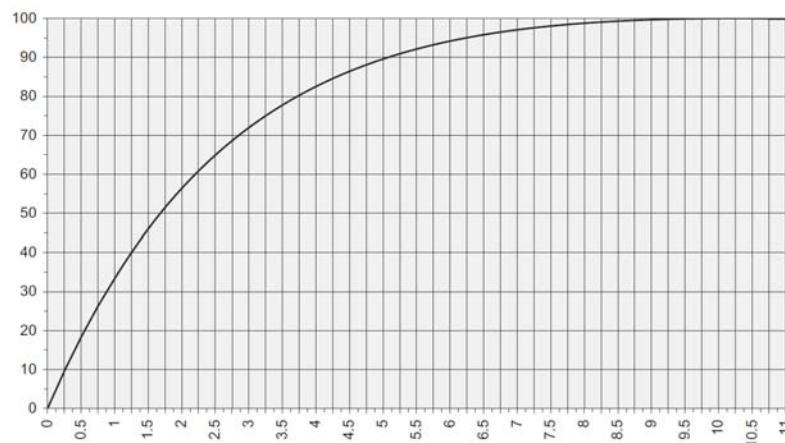


図 2. U-232 の崩壊系列



IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-4.4

“Use of Reprocessed Uranium: Challenges and Options”

図 3. Th-228 の生成量の経時変化

再処理施設におけるウラン精製直後やウラン濃縮施設、再転換施設における UF_6 の気化直後であれば γ 線の影響はないが、精製から時間を経た回収ウランは外部被ばくへの影響が大きくなる。回収ウラン転換工程ではウランがふっ化されて UF_6 （ガス）になる部分で残渣にトリウムの子孫核種が沈着し周囲の γ 線線量率が上昇する。人形峠における回収ウラン転換工程の転換反応炉周囲の γ 線線量率は天然ウラン転換時の約 6 倍の値となった報告がある。また、回収ウランの成型加工においても、日本の加工事業者の回収ウランの燃料集合体からの γ 線線量率は、天然ウランの場合と比較して有意に高い結果が得られたが、従事者の外部被ばく線量は各事業所とも 5mSv を超える実績はなかった。これは回収ウラン転換量が少量だったこと、回収ウランの再転換から入荷までの期間が短く線量の増加が小さかったこと、予め被ばく低減のための設備対策を施すことや作業時間の短縮などの配慮のためと考えられる。

回収ウランの α 比放射能は、U-234 の濃度が高いため天然ウランに比べ高いという特徴を持つ。特にウラン濃縮を経た再転換、成型加工の工程では U-234 の濃度が増加し、加工事業者の受入仕様によれば通常ウランより 2 倍強の α 比放射能を持つ。しかし、加工事業者が回収ウランを取扱った時期における内部被ばく結果は全て記録レベル未満であり通常ウランを取扱った年度と比較して大差はなかった。これは、回収ウラン取扱いに際しての従業員への教育、ウラン飛散防止の観点からの対策、回収ウラン取扱量が少なかったこと等によると考えられる。

回収ウランの TRU,FP は、再処理工程の精製度により存在量が決まるが、転換プロセス内の F_2 フッ化工程でウランと概ね分離されることが知られている。人形峠における試験では、元々原料 UO_3 中の存在量が少なく、転換プロセスのフィルタや吸着剤に対し精密な分析を行っても、多くが分析の下限値を下回った。また、回収ウラン取扱時における排気、排水実績も濃度管理目標値を十分に下回る結果であった。

（２）既存施設における回収ウランの受入条件に関する調査

国内では、既存施設の回収ウランの受入条件としては、安全上と燃料品質上のものがあり、ウラン同位体組成と TRU 濃度、FP 濃度、その他の項目について定められている。安全上のは、事前の評価で回収ウランを扱う際の放射線安全が確保され環境への影響に問題がないことを確認した際の前提条件であり、その条件に基づいて法令上の取扱許可を得たものである。表 4 に一例として、人形峠の製錬転換施設とウラン濃縮原型プラント及び国内の再転換施設で回収ウラン実用化試験が行われた際の受入仕様を示す。安全評価に用いた各濃度は、東海再処理工場の処理対象燃料の燃焼条件を基に、初期濃縮度、燃焼度、冷却、貯蔵条件のパラメータを被ばく評価が保守的に

なるような条件で設定された。安全評価への影響が大きな事項として、U-232 濃度、U-234 濃度、TRU 濃度、FP 濃度が上げられる。

表 4. 回収ウラン受入仕様の一例

物質区分		値の種類	実用化試験時の仕様と実績				
元素種類区分	核種	製錬転換施設の原料UO3		ウラン濃縮原型プラントの原料回収UF6		既存再転換施設での濃縮回収ウラン	
		UO3受入仕様 (上限値)	東海再処理施設 UO3製品の 分析結果	受入仕様 (上限値)	平成7年度受入れ UF6原料分析値	受入仕様 (上限値)	平成6年から平成 18年の仕様実績値
ウラン同位体	U-232(ppb/U)	1.8	0.51~1.0	1.2	≤ 0.8	10	≤ 8
	U-234(wt%)	—	0.01468~1.0183	0.027	≤ 0.018	—	—
	U-235(wt%)	1.3	0.7926~1.1649	0.9~1.3	0.937~1.121	—	—
	U-236(wt%)	—	0.2156~0.3295	0.4	≤ 0.315	—	—
	U(α)	—	—	—	—	3.3 × 10 ⁵	2.1 × 10 ⁵
核分裂生成物	Zr-95 (Bq/gU)	37.0	< 2	—	—	—	—
	Nb-95(Bq/gU)	37.0		13	≤ 0.089	—	—
	Ru-106(Bq/gU)	194	< 4	100	≤ 8.9	10	≤ 4.6
	Sb-125 (Bq/gU)	37.0	< 1	—	—	2	≤ 1.2
	Cs-137(Bq/gU)	37.0	< 0.52	—	—	—	—
	Ce-144(Bq/gU)	37.0	—	—	—	—	—
	Tc-99 (Bq/gU)	—	—	—	≤ 0.15	10	≤ 1.8
超ウラン元素	Np-237 (Bq/gU)	66.7	0.0048~0.078	0.096	≤ 0.012	0.1	≤ 0.1
	Pu(α) (Bq/gU)	5.61	0.031~0.048	0.10	≤ 0.0007	0.1	≤ 0.043
	Pu(β) (Bq/gU)	—	1~2.4	—	≤ 1.9	3	≤ 2.1
	Am(α) (Bq/gU)	33.3	—	0.32	≤ 0.038	—	—
	Cm(β) (Bq/gU)	33.3	—	—	—	—	—

海外では、フランス、ドイツはロシアに回収ウランの転換、再濃縮を委託しており、ロシアとの間の原料となる回収ウランや再濃縮後の回収ウランのやり取りは ASTM 規格を基本に、施設の特性に応じて ASTM 規格を下回る基準値が適用される例が多い。U-232 濃度については、今後の軽水炉ウラン燃料の高燃焼度化に合わせて比較的高い濃度を許容する代りに、子孫核種によるγ線の影響を抑えるため、子孫核種を除去精製する等の対策も導入されている。

(3) 炉心特性に与える影響に関する調査

六ヶ所再処理工場からの回収ウラン組成等の条件を考慮し、再濃縮後のウラン燃料の組成を設定して、回収ウラン燃料を用いた炉心特性に与える影響を複数の許認可コードによる計算で評価した。その結果、PWR、BWR とも、再濃縮後の回収ウラン燃料を使用した炉心の成立性に問題はないことが確認できた。

なお、いずれも U-236 のために反応度が低下する結果となった。しかし、実際の BWR 燃料集合体では、種々の濃縮度ペレットで濃縮度分布をもたせているので、その調整により U-236 の影響を今回の評価結果よりも抑えることが可能である。PWR の評価では、濃縮度 4.8%の回収ウラン燃料はほぼ濃

縮度 4.1%の通常ウラン燃料と等価であるとの結果だった。図 4 に回収ウラン燃料と通常ウラン燃料の燃料集合体の無限増倍率の比較を示す。

回収ウラン中の FP, TRU の影響は、汎用モンテカルロ計算コード MCNP5 を用いて評価した。現行の加工事業者の受入仕様値内の濃度であれば、U-236 や U-234 による反応度低下の影響に比べて非常に小さいとの結果だった。

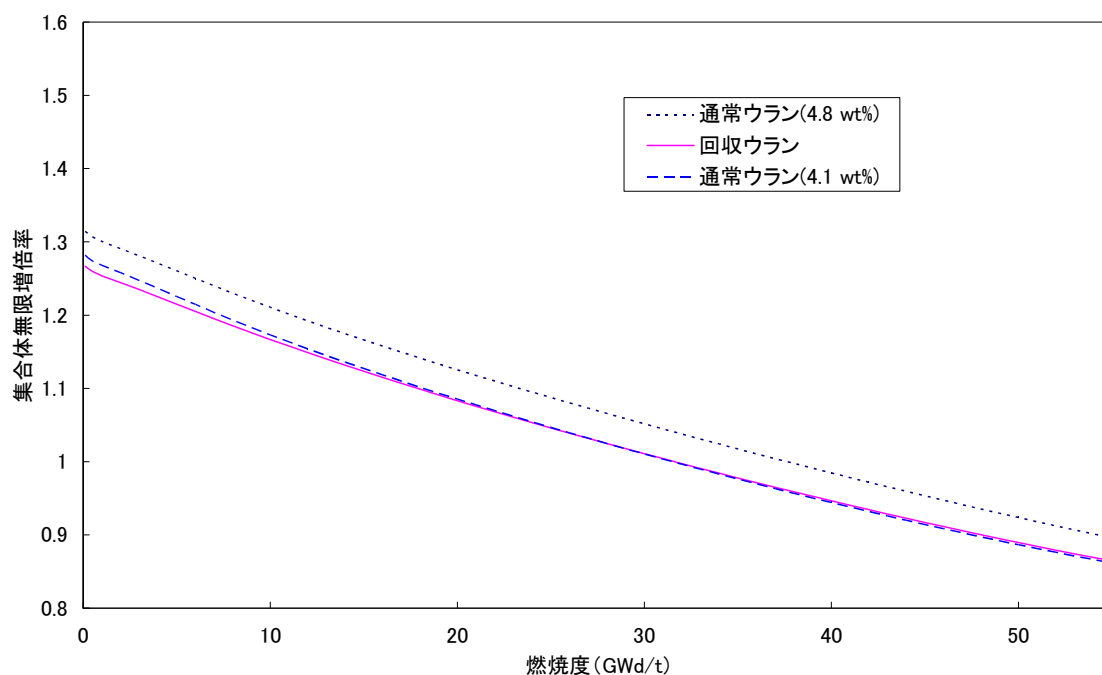


図 4. 燃料集合体無限増倍率 (PWR)

(4) 国内外の転換プロセスに関する調査

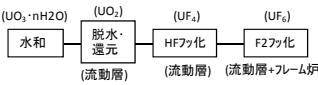
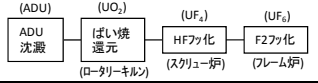
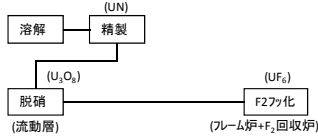
天然ウランと回収ウラン転換を調査した結果、商業施設の多くが UF_4 を経由するプロセスとなっており、 UF_4 を生産するまではフッ化水素でふっ化し、 UF_4 を UF_6 に転換する工程のみ高価なフッ素ガスを使用する 2 段ふっ化法であることがわかった。これに対し、ロシアではウラン酸化物とフッ素ガスとを直接反応させて六フッ化ウランに転換する技術である直接ふっ化法が実用化されており、反応装置はフレーム炉が使われていることがわかった。この転換プロセスは、設備構成は単純だが、フッ素ガスの取扱規模が大きくなる特性を有する。ロシアの経済性の高いウラン濃縮技術と相まって、全体として経済性を維持しているものと見られる。

表 5 に世界の天然ウラン転換工場（一部回収ウラン転換を含む）の概要を示す。表 6 に世界の回収ウラン転換工場の概要を示す。図 5 に 2 段ふっ化法と直接ふっ化法のプロセスの比較を示す。

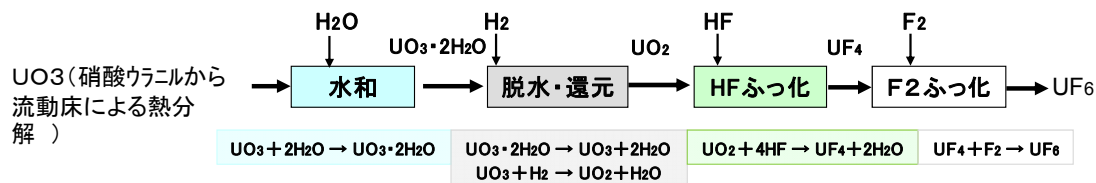
表 5. 世界の天然ウラン転換工場（一部回収ウラン転換を含む）の概要

国名 所有機関	運営会社	施設名	サイト名	操業開始	生産能力 (tU/y)	転換プロセス概要	備考
France AREVA NC	COMURHEX	Malvesi(UF ₄)	Malvesi	1959年	14,000	UOC→粗製UNH→精製UNH→ADU →UO ₃ →UO ₂ →UF ₄	
	COMURHEX	Pierrelatte (UF ₆)	Pierrelatte	1961年	14,000	UF ₄ →UF ₆	
	COMURHEX	INB-105	Pierrelatte	1972年	330	再処理UNH→ADU→UO ₃ →UO ₂ → UF ₄ →UF ₆	軽水炉回収ウラン転換用(稼働停止)
Canada Cameco	Cameco	Blind River Refinery	Blind River	1970年	18,000	UOC→粗製UNH→精製UNH→UO ₃	Port Hopeと Springfieldsへ UO ₃ を供給
	Cameco	Port Hope Conversion Facility	Port Hope	1970年	12,500	UO ₃ →UO ₂ →UF ₄ ・nH ₂ O→UF ₄ →UF ₆	
USA Honywell- GENERAL ATOMICS	ConverDyn	Metropolis / Converdyn	Metropolis	1959年	17,600	UOC→UO ₂ →UF ₄ →粗製UF ₆ → 精製UF ₆	
UK NDA	Westinghouse/UK	NDA Springfields Line 4 Hex Plant	Springfields	1968年	6,000	(UOC→粗製UNH→精製UNH) →UO ₃ →UO ₂ →UF ₄ →UF ₆	Camecoとの 転換契約
RF Rosatom	Atomenergoprom TVEL	Chepetsky Mechanical Plant (ChMP)	Glazov	不明	不明	UOC→(精製)→U ₃ O ₈ →UO ₂ ²⁺ →U ⁴⁺ →UF ₄ ・nH ₂ O→UF ₄	AECC,SCCへUF ₄ を 供給
	Atomenergoprom TENEX	Angarsk Electrolysis Chemical Combine	Angarsk	1954年	17,000	UF ₄ ・U ₃ O ₈ →UF ₆	実能力～9,000tU/y (ロシアIBR社調べ)
	Atomenergoprom TENEX	Siberian Chemical Complex (SCC)	Seversk (Tomsk)	1950年	8,000	UF ₄ ・U ₃ O ₈ →UF ₆	実能力～6,000tU/y (ロシアIBR社調べ)

表 6. 世界の回収ウラン転換工場の概要

国名／機関／規模	原料	転換プロセス	現況	プロセスの特徴・課題	備考
日本／ JAEA(旧PNC)人形峠 事業所／0.8tU/d	UO ₃ (粉) 東海再処理 工場より搬入 (流動層粉)		停止、 解体中	①流動層を多用することで施設のコンパクト化を図る ②HFフッ化を二段とすることにより転換率を高める ③F2フッ化を二段(フレイム炉+流動層)とすることにより転換率を高める ・転換率の向上(流動層反応装置) ・流動媒体が廃棄物化 ・稼働率の安定化と向上(水和、フッ化等) ・プロセス廃棄物の低減 ・リサイクル設備の増強 ・高線量の残渣の取扱いに伴う被ばく	
フランス／ Comurhex Pierrelatte ／350tU/y	UN (溶液) ラアーグ再処理 工場より搬入		停止	①湿式粉末製造による活性粉製造 ・湿式法に伴い廃液発生量が多い ・高線量の残渣の取扱いに伴う被ばく	Pierrelatteにて、1,500t/y 規模の施設 が検討されて いる。
ロシア／ TENEX Siberian Chemical Complex／ 1,500tU/y	U ₃ O ₈ (粉) AREVA社より 搬入		運転中	①溶解・精製工程の導入に伴い、受入れ原料形態が広い(YC, U ₃ O ₈ , UO ₂ , UN溶液等) ②精製を行うことにより、FP, Uの子孫核種の放射線問題を軽減 ③U ₃ O ₈ の直接フッ化 ④F ₂ フッ化を二段(フレイム炉+F ₂ 回収炉)とすることにより転換率を高める ⑤工程のシンプル化により工程内インベントリ小 ・直接フッ化によりフッ素の使用量が多く、電解設備能力大	転換コスト試算例: 8USD/kgU
米国／ Oak Ridge Diffusion Plant／～3U/d	UO ₃ (粉) サバンナリバー、 ハンフォードより 搬入		解体済	①F ₂ フッ化を二段(フレイム炉+F ₂ 回収炉)とすることにより転換率を高める ・高線量の残渣の取扱いに伴う被ばく	

2段フッ化プロセスフロー(日本)



直接フッ化プロセスフロー(ロシア)

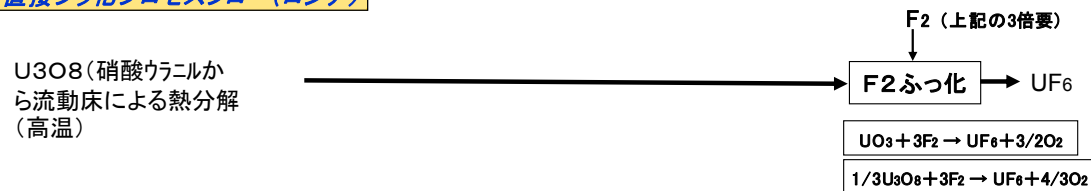


図 5. 2 段ふっ化法と直接ふっ化法のプロセスの比較

(5) 転換プロセスの検討

六ヶ所再処理工場からの回収ウランをウラン濃縮の原料である UF₆ に転換する転換プロセスの検討を行った。

まず、六ヶ所再処理工場の使用済燃料受入仕様に基づき、回収ウランの同位体組成の変動等を検討し、転換プロセスで扱う回収ウランの受入仕様を検討した。特に外部被ばくへの影響が大きい U-232 の生成量に着目して設定した。表 7 に回収ウランの受入仕様の検討結果を示す。過去の人形峠等で行われた技術開発時の燃料より燃焼度が高いこと等により、U-232 濃度は約 3ppb/U と高い数値になり、その後の回収ウラン燃料の製造過程における従事者の外部被ばくへ大きな影響を与えることが明らかになった。

表 7. 回収ウランの受入仕様

物質区分		値の種類	転換プロセス (検討案)	実用化試験時の人形峠製錬転換施設の原料 UO ₃	
元素種類区分	核種		UO ₃ 受入仕様	UO ₃ 受入仕様 (上限値)	東海再処理施設 UO ₃ 製品の分析結果
ウラン同位体	U-232(ppb/U)		3.13 (*1)	1.8	0.51~1.0
	U-234(wt%)		特に規定せず	-	0.01468~1.0183
	U-235(wt%)		1.6 (*2)	1.3	0.7926~1.1649
	U-236(wt%)		特に規定せず	-	0.2156~0.3295
	U(α)		特に規定せず	-	-
核分裂生成物	Zr-95 (Bq/gU)		≒ 0 (*3)	37.0	< 2
	Nb-95 (Bq/gU)		≒ 0 (*3)	37.0	-
	Ru-106 (Bq/gU)		1.04 × 10 ⁴ (*3)	194	< 4
	Sb-125 (Bq/gU)		3.06 (*3)	37.0	< 1
	Cs-137 (Bq/gU)		104 (*3)	37.0	< 0.52
	Ce-144 (Bq/gU)		30.8 (*3)	37.0	-
	Tc-99 (Bq/gU)		208 (*3)	-	-
超ウラン元素	Np-237 (Bq/gU)		128 (*3)	66.7	0.0048~0.078
	Pu(α) (Bq/gU)		128 (*3)	5.61	0.031~0.048
	Pu(β) (Bq/gU)		3.52 × 10 ³ (*3)	-	1~2.4
	Am(α) (Bq/gU)		0 (*3)	33.3	-
	Cm(α) (Bq/gU)		0 (*3)	33.3	-

(*1) ウラン同位体組成の変化の検討結果による (*2) 六ヶ所再処理工場の仕様 (*3) 六ヶ所再処理工場の脱硝工程の FP・TRU 移行率による計算結果

六ヶ所再処理工場では、最終工程であるウラン脱硝工程で流動層式反応装置を用いた熱分解反応方式を用いているため、回収ウラン（ UO_3 ）は緻密で固い球状粒子であり、粒径も $150\sim 300\mu\text{m}$ の比較的粒の大きいものである。回収ウラン転換プロセスに関し、採用し得る直接ふっ化法と2段ふっ化法の2つの方法について、六ヶ所再処理工場からの UO_3 の特性に適した方式を検討した。

2段ふっ化法では、緻密な UO_3 粒子を原料とする場合、 UO_3 粒子と反応ガスの反応性を向上させるために、 UO_3 の水和前処理を行う必要がある。水和反応により結晶水を付加することで UO_3 粒子にクラックを生じさせ比表面積を増加させることで反応性を上げる。その後脱水還元工程、HF ふっ化工程、 F_2 ふっ化工程を経て UF_6 を生成する。

直接ふっ化法では、ロシアでは原料の U_3O_8 を硝酸ウラニル溶液から高温で熱分解して得ているため、 U_3O_8 が活性であり、これをそのままフレイム炉での F_2 ふっ化反応に供給している。六ヶ所再処理工場の緻密で粒径の大きい UO_3 を原料とする場合には、フレイム炉での処理前に、焙焼及び粉碎によって UO_3 を微粉化することが必要である。なお、直接ふっ化法では、2段ふっ化法に比べて3倍の F_2 ガス量が必要となる。

図6に六ヶ所再処理工場の回収ウラン（ UO_3 ）に適用する場合の2段ふっ化法と直接ふっ化法のプロセスフローの比較を示す。

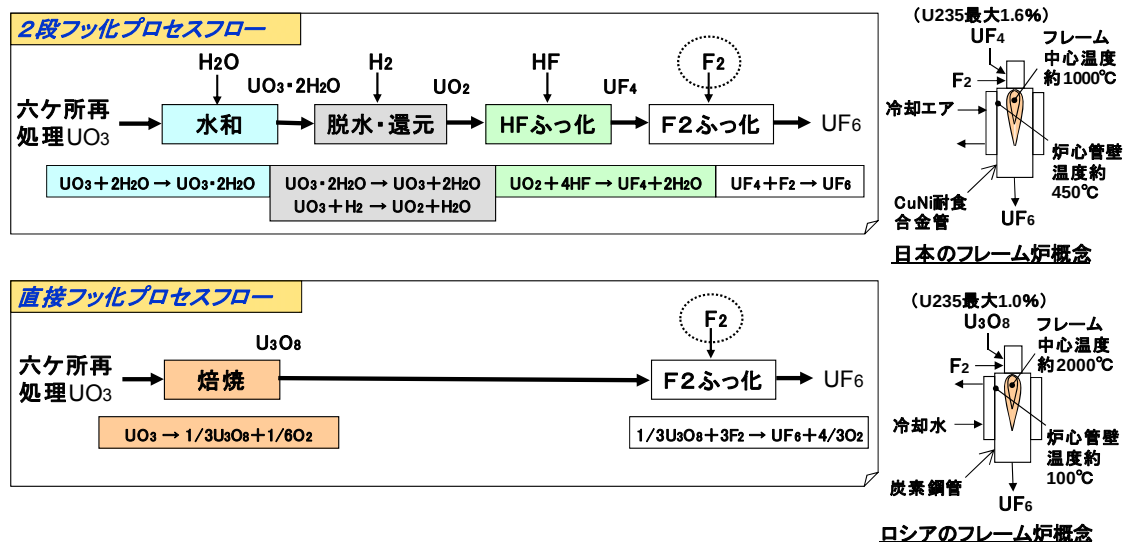


図6. 2段ふっ化法と直接ふっ化法のプロセスフローの比較
 （六ヶ所再処理工場の回収ウラン（ UO_3 ）に適用する場合）

表 8 に適用プロセスを考えるにあたっての検討事項のまとめを示す。主工程の設置エリア、運転に関する項目では、2 段ふっ化法がウランを取扱う工程が多いことに対し、直接ふっ化法は単純な工程構成となる。一方、F₂ 電解工程は直接ふっ化法の F₂ 使用量が 2 段ふっ化法の 3 倍である。主工程のユーティリティでは、2 段ふっ化法の水和前処理工程、脱水・還元工程、HF ふっ化工程の反応器の加熱等に要する電力と、直接ふっ化法の粉碎、焙焼炉の加熱等に要する電力が差異として現れ、2 段ふっ化法の消費電力量が若干多くなる。一方、F₂ 電解工程では 2 段ふっ化法の方が F₂ 電解の電力が少なくなる。

表 8. 適用プロセスを考えるにあたっての検討事項のまとめ

	直接ふっ化（改良）	2 段ふっ化
プロセスフロー	焙焼、粉碎 → F ₂ ふっ化 ・六ヶ所再処理工場の UO ₃ に対応するため原料の微粉化が必要（改良） ・フッ素分は全量 F ₂ 形態で供給	水和 → 脱水還元 → HF ふっ化 → F ₂ ふっ化 ・フッ素分は 2/3 を HF 形態、1/3 を F ₂ 形態で供給
技術的な観点	・ F ₂ ふっ化工程での微粉の取扱いは国内技術は無い ・ ロシア等の設計、運転関連の情報が少	・ 国内で開発された方法 ・ 各工程での反応効率の向上が基本となるが、最適運転条件による長期運転の確証データは少
設備・（建屋） +は負荷の程度を半定量的に示す	・ 焙焼工程（粉碎） ++ ・ F₂ふっ化工程（UF₆捕集） + *1 ・ 電解工程 ++++++	・ 水和工程 +++++ ・ 脱水・還元工程 + ・ HF ふっ化工程 + ・ F₂ふっ化工程（UF₆捕集） ++ ・ 電解工程 ++
運転 +は負荷の程度を半定量的に示す	運転員（保守含） ++	運転員（保守含） +++
	副原料 無水 HF ガス *2 ++	副原料 水素ガス（H ₂ ） + 無水 HF ガス *2 ++
	電力・ユーティリティ +++++	電力・ユーティリティ +++++
	廃棄物 未反応 F ₂ 固定化 + 排気中 UF ₆ 固定化 + 不純物吸着剤 + 使用済流動媒体 +	廃棄物 水素ガス（H ₂ ） 燃焼し排気 + 未反応 F ₂ 固定化 + 排気中 UF ₆ 固定化 + 不純物吸着剤 + 使用済流動媒体 +
運転性、メンテナンス性など	・ 粉碎後は微粉末（装置への供給）又は F ₂ ふっ化反応残渣のハンドリング性に問題あり。 ・ F ₂ ふっ化工程のフレームタワーが高温化するため耐久性に問題あり。 ロシアは以下の方策により保守時の外部被ばくを減少させている。 ① 転換直前に脱硝し U-232 子孫核種の影響を排除 ② 天然ウランとの混合処理	・ UO ₃ の流れ性は良好であるが、UF ₄ 生成までは原料 UO ₃ の粒径を維持すると考えられる。

*1: 臨界管理上、第 1 コールドトラップの基数は直接ふっ化法の方が多い。

*2: HF 使用量は両法で F₂ 電解を含めほぼ同量を使用するため差異はほとんどない。

回収ウラン転換プロセスの構築にあたっては以下の点に留意が必要である。

- ・ 国内における 2 段ふっ化法の技術は、最適な運転条件の下での長期間の稼働による実証には至っていないが、国内に 2 段ふっ化法の技術実績が豊富である。
- ・ 直接ふっ化法は、日本で経験のない技術的要素の多いことが問題として上げられるが、今後の研究開発による確証で対応が可能と考えられる。

回収ウラン転換プロセスの概念検討では、国内の技術実績を活用した検討

が可能となる2段階法によるものとした。

転換工程における回収ウラン特有の不純物の除去プロセスについては国内外の研究、転換運転時の実績等を調査検討し、人形峠における開発においても使用したフッ化マグネシウム (MgF_2) を吸着剤としこれに UF_6 ガスを通気することで FP、TRU 等を除去するプロセスとして選定した。

(6) 回収ウラン濃縮プロセスの検討

既存の六ヶ所ウラン濃縮工場にて回収ウランを取扱う場合、最も留意すべきは U-232 子孫核種に起因する放射線の影響に伴う種々の課題である。作業頻度の高い UF_6 シリンダ類の取扱いにおける従事者被ばく線量は約1桁増加することから、被ばく線量低減のために線源となる U-232 の子孫核種の生成期間短縮や廃棄物の保管場所、設備の遮へい等の対策を行う必要がある。また、一般公衆の線量も増加するため、線源となるウランや廃棄物の保管場所への考慮、貯蔵中の UF_6 シリンダ類に遮へい等を講じる必要がある。

図7に発生回収室、均質室、ウラン貯蔵庫における1人あたり年間の従事者の被ばく量を評価した結果を示す。

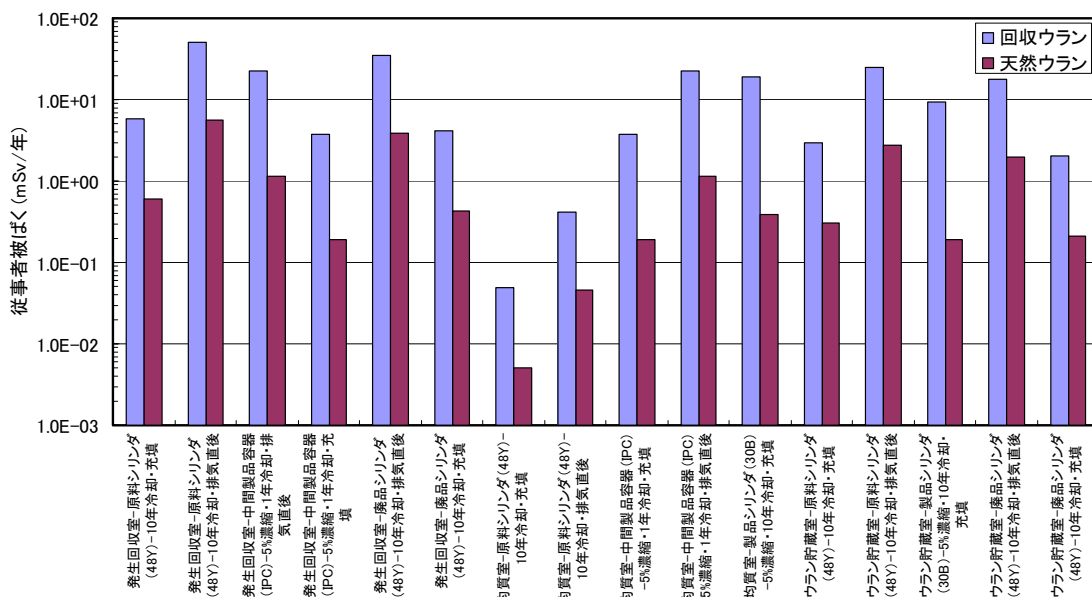


図7. 従事者被ばく線量推定結果

従事者の被ばく線量を低減させる方策案を以下に示す。

- ・ U-232 子孫核種の多くは不揮発性で、濃縮工場で回収ウランの原料 UF_6 を発生させた後にはシリンダに残留する。このため、空となった原料シリンダに残留する子孫核種の影響を最小限にする措置が必要である。原料シリンダの詰め替え（空シリンダは転換工程への返却）及び転換工場から短期間で濃縮工場へ運び、短時間で濃縮することで子孫核種の生成

を極力抑える運転計画が考えられる。

- ・ UF₆ シリンダ類搬送設備の遠隔自動化、UF₆ シリンダの配管接続時の自動脱着化、排気処理の NaF トラップの充填物の遠隔交換システム化などが必要である。
- ・ 濃縮 UF₆ を冷却捕集する製品コールドトラップ内には、次第に不揮発性の U-232 子孫核種が蓄積していくため、装置回りに遮蔽措置を講じられるよう、設置間隔を離したりする等の配置設計が必要である。
- ・ 廃品 UF₆ シリンダは、保管中の U-232 子孫核種の生成を極力抑制するため、原料 UF₆ の空シリンダ（子孫核種が残留）を転用せずに、廃品専用シリンダを使用する必要がある。
- ・ 濃縮 UF₆ を充填した履歴のある中間貯蔵容器を洗浄した洗浄廃液には、U-232 子孫核種が多く含まれているためその取扱に注意する必要がある。

図 8 に従事者被ばく低減措置適用案を図示した。

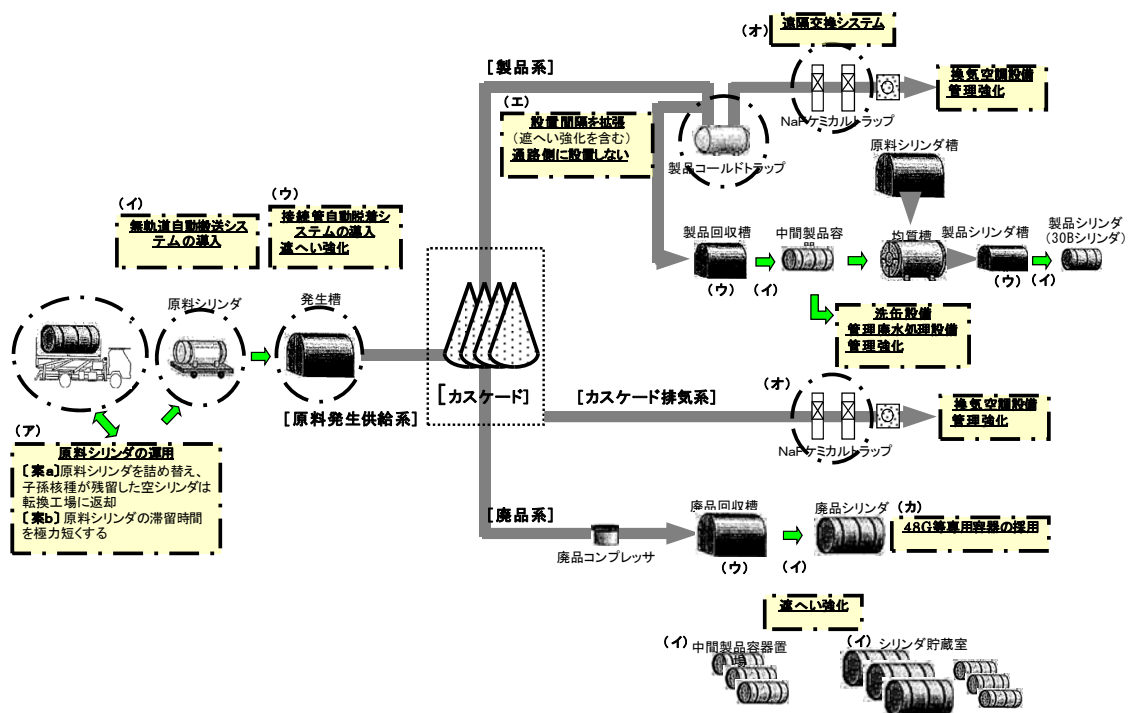


図 8. 従事者被ばく低減措置適用案

なお、回収ウラン取扱いにおける臨界管理上の制約については、従来の天然ウラン取扱い時並の管理で対応可能である。外部放射線に対する影響への対策の他に、設備的には回収ウランの U-235 濃度が天然ウランより高いことを考慮した最適なカスケード設備設計が必要となるが、現在のウラン濃縮工場を大幅に変更することなく回収ウランの再濃縮は可能であると判断される。

(7) 回収ウラン再転換プロセスの検討

回収ウラン再転換プロセスについては、現行の再転換工場で回収ウランを取り扱う場合、現行許可量に対し最大 7.5 倍の処理能力を必要とし特に外部放射線の影響が大きくなる。U-232 濃度が最大 20ppb/U と現行の受入仕様値の約 2 倍になる。

これに対し、現行の敷地境界外の放射線量は管理目標値 ($50\mu\text{Sv/y}$) に対して余裕がないため、抜本的な外部放射線対策が不可欠であり、既存再転換施設での回収ウラン取扱いは困難であることがわかった。

U-232 の子孫核種の影響を排除するためには、以下の方策が考えられる。

- ・ウラン濃縮工場で充填された原料濃縮回収ウランシリンダは 1 年以内に再転換施設に搬入させるよう輸送
- ・再転換施設に搬入後、1 年以内に再転換、成型加工を終えて出荷
- ・設備の遮へい対策、設備の自動化、成型加工期間短縮のための綿密な工程管理

劣化ウランの酸化固形化については、国内での開発技術を含む採用し得る三つの乾式プロセスについて、技術的な観点、 U_3O_8 製品の品質（純度）、フッ素分回収の容易性、技術の開発度などを検討・整理した。

図 9 に国内の劣化ウラン累積発生量の予測を示す。

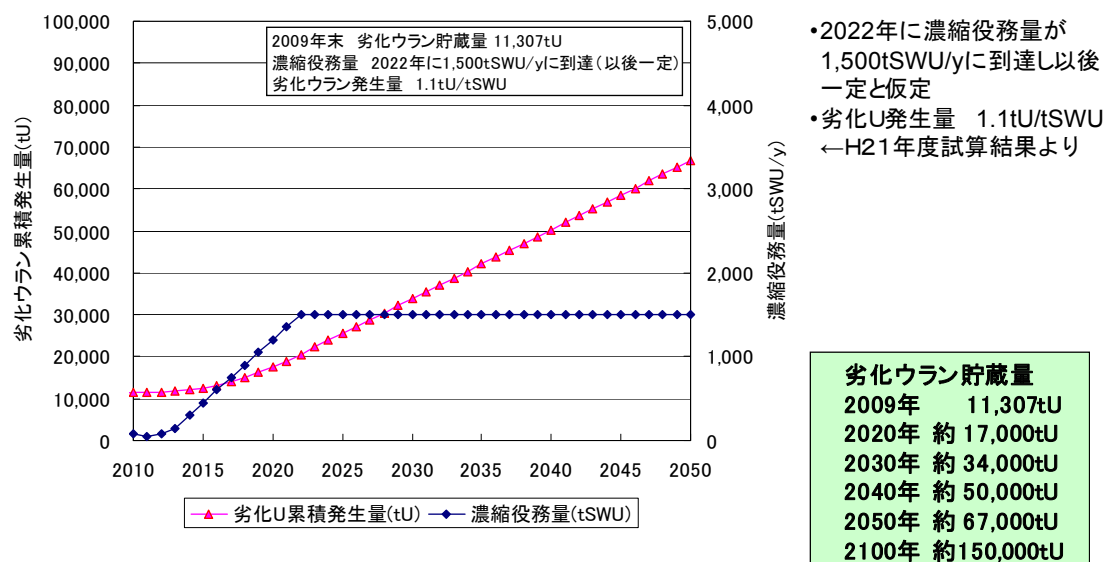


図 9. 国内の劣化ウランの累積発生量の予測

劣化ウランの再転換プロセスの選定においては、酸化固形化の U_3O_8 製品が長期貯蔵に適したものであるかを重要視すべきである。したがって、かさ密

度が高く貯蔵体積が小さくなり、且つ容器への充填等が円滑となるよう流動性の良い製品粉体を得られる技術が求められる。表 9 に劣化ウランの酸化固形化プロセスの特徴を示す。

表 9. 劣化ウラン酸化固形化プロセスの特徴

方法	プロセス概要	粉末形状	特徴	実績
フランス AREVA NC		かさ密度 1g/cm ³ 圧縮後 3g/cm ³ 程度	・燃料用プロセスの応用 ・加水分解反応が高温 ・粉末が微粉で低密度 - フランス法: 圧縮要 ・水素の利用※	・1984年より処理 ・約320,000tUF₆処理(2009年まで) ・ロシアに技術提供(2009年末に竣工) ・イギリスにも導入される見通し
アメリカ UDS		かさ密度 2～3 g/cm ³	・水素の利用※	・約22,000tU/y処理(2施設合計) ・ポーツマス: 2009年9月運転開始 ・バデューカ: 試運転
日本 MMC		かさ密度 4g/cm ³	・貯蔵効率、取出性を考慮し、高密度、高流動性の粉末製造をターゲットに開発 ・加水分解反応が低温 ・副原料はスチームのみ	・パイロットプラント開発のみ

実績の観点からは、フランス方式が先行しているが、この方法では、流動性の良い高密度の U_3O_8 を得ることができず、製品粉体の密度調整のために圧縮処理を必要とする。

アメリカ方式と日本方式は、流動層反応塔を用いることにより流動性の良い高密度の粉体を得られる。アメリカ方式では、1 塔の流動層反応塔で全体の反応を進めるため工程が簡素になるメリットがある。まだ商業運転が始まったばかりであるため今後も注視する必要がある。日本方式はパイロット規模ながら反応ガスに水素を使わない利点がある。

いずれのプロセスも一長一短があるが、国内での実績や経験等を踏まえ、日本方式を採用し施設の検討を行った。処理規模は、1,900～2,000tU/y 程度に設定するのが妥当であるが、より確実な施設運転を目指し、運転開始から 20 年間は 1,000tU/y (5tU/d、確証試験の処理規模の 5 倍) とし、その後 2,200tU/y (11tU/d) に増強することが適当と判断された。処理プロセスは、 UF_6 発生工程、酸化固形化工程、シリンダ洗缶工程、 U_3O_8 貯蔵工程、HF 回収工程、オフガス/廃液処理工程から成る。図 10 に劣化ウランの酸化固形化工程のプロセスフローを示す。

劣化ウラン酸化固形化プロセス及び濃縮 UF_6 再転換プロセスからは希フッ酸が副生するが、フッ素資源の海外への依存度が高い環境下では、これを無水フッ酸として回収ウラン転換に再利用することがフッ素資源の有効利用の観点から合理的と判断された。なお、国内では、希フッ酸を無水フッ酸と

するプロセスはパイロットプラント規模で確立しており、希フッ酸を一般産業界の無水フッ酸製造の原料である固体のフッ化カルシウムに固定化する技術については実験室規模の開発実績がある。

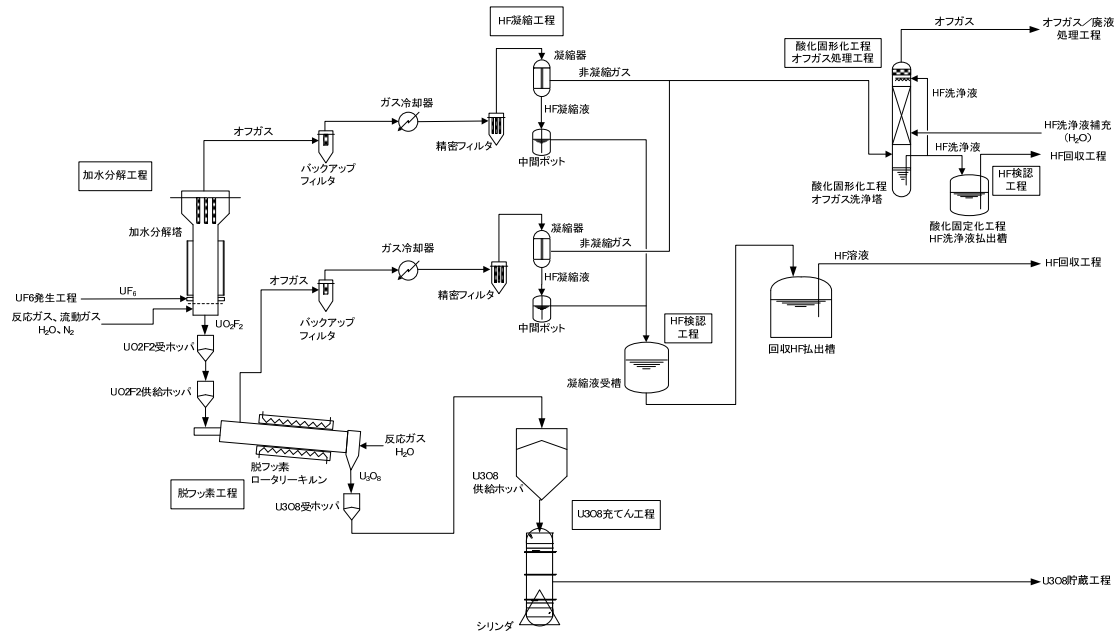


図 10. 劣化ウランの酸化固形化工程のプロセスフロー

（８）転換プロセスの事業化の概念検討

２段ふっ化法プロセスに基づく 800tU/年の処理能力を持つ回収ウラン転換施設について概念検討し、建設費と運転費を試算した。

プロセス設計条件は以下のとおりである。

- ・原料：六ヶ所再処理工場のウラン脱硝施設で生成する三酸化ウラン（ UO_3 ）
U-235 濃度は 1.6%以下
- ・製品：六ふっ化ウラン（ UF_6 ）
- ・処理能力：800t/年
- ・採用技術：２段ふっ化法

回収ウラン転換施設の構成は以下のとおりである。

- ・ウランふっ化施設：原料 UO_3 を水和前処理、脱水還元、HF ふっ化及び F_2 ふっ化を行うことにより UF_6 に転換する各工程設備と廃ガス処理設備、廃液処理設備及び試薬・ユーティリティ設備を設置する。
- ・ F_2 ガス製造施設： F_2 ふっ化に必要な F_2 ガスを製造する電解設備、廃液処

理設備及び試薬・ユーティリティ設備を設置する。

- ・ 六フッ化ウラン貯蔵施設：ウラン六フッ化施設において生成した六フッ化ウラン（ UF_6 ）が充填されたシリンダを1年分貯蔵する。
- ・ ウラン六フッ化施設附属管理棟：プラント内各設備の制御設備を設置するとともに、施設全体の管理事務等を行う。

図 11 には、上記のうち、ウラン六フッ化施設と F_2 ガス製造設備の概略フローを示す。

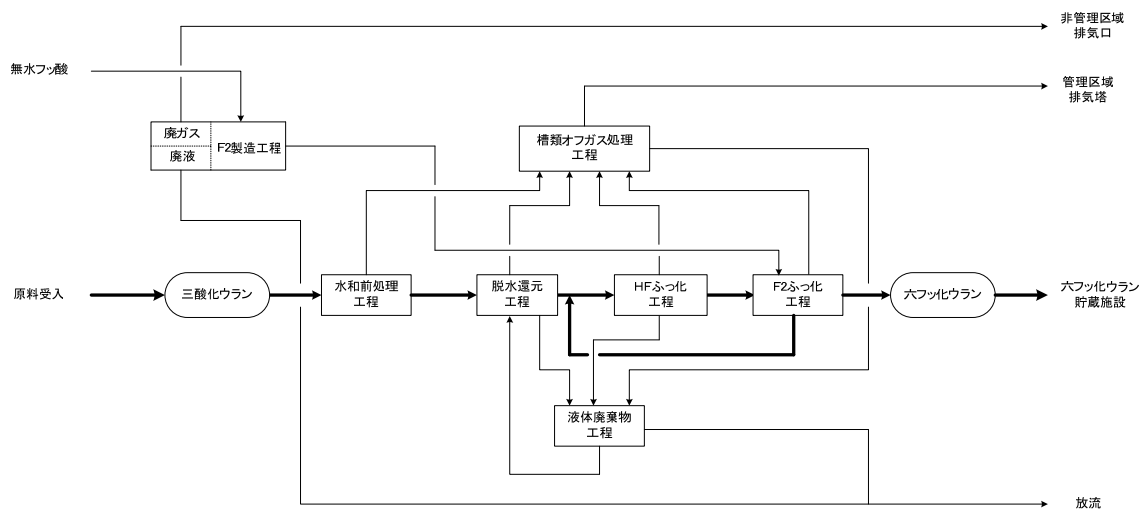


図 11. ウラン六フッ化施設と F_2 ガス製造設備の概略フロー

水和前処理工程は、後続の工程におけるウラン粉末の反応性を高めるため、 UO_3 粉末に純水を添加し、含水ウラン粉末（ $UO_3 \cdot 2H_2O$ ）とする工程である。脱水還元工程は、水和前処理工程から受入れた含水ウラン粉末（ $UO_3 \cdot 2H_2O$ ）を流動層型の脱水還元塔において H_2 ガスで脱水還元し、 UO_2 粉末とする工程である。HF 六フッ化工程は、脱水還元工程より受入れた UO_2 粉末を流動層型の HF 六フッ化塔において HF ガスにより HF 六フッ化し、 UF_4 粉末とする工程である。F2 六フッ化工程は、HF 六フッ化工程より受入れた UF_4 粉末をフレーム炉型及び流動層型の F_2 六フッ化塔にて F_2 ガスにより F_2 六フッ化を行い UF_6 ガスとし、 MgF_2 トラップにて放射性不純物を除去後、コールドトラップにて UF_6 を冷却・捕集する工程である。図 12 に一例として、 F_2 六フッ化工程の工程概略図を示す。また、表 10 に回収ウラン転換プロセスの経済性検討の条件をまとめる。

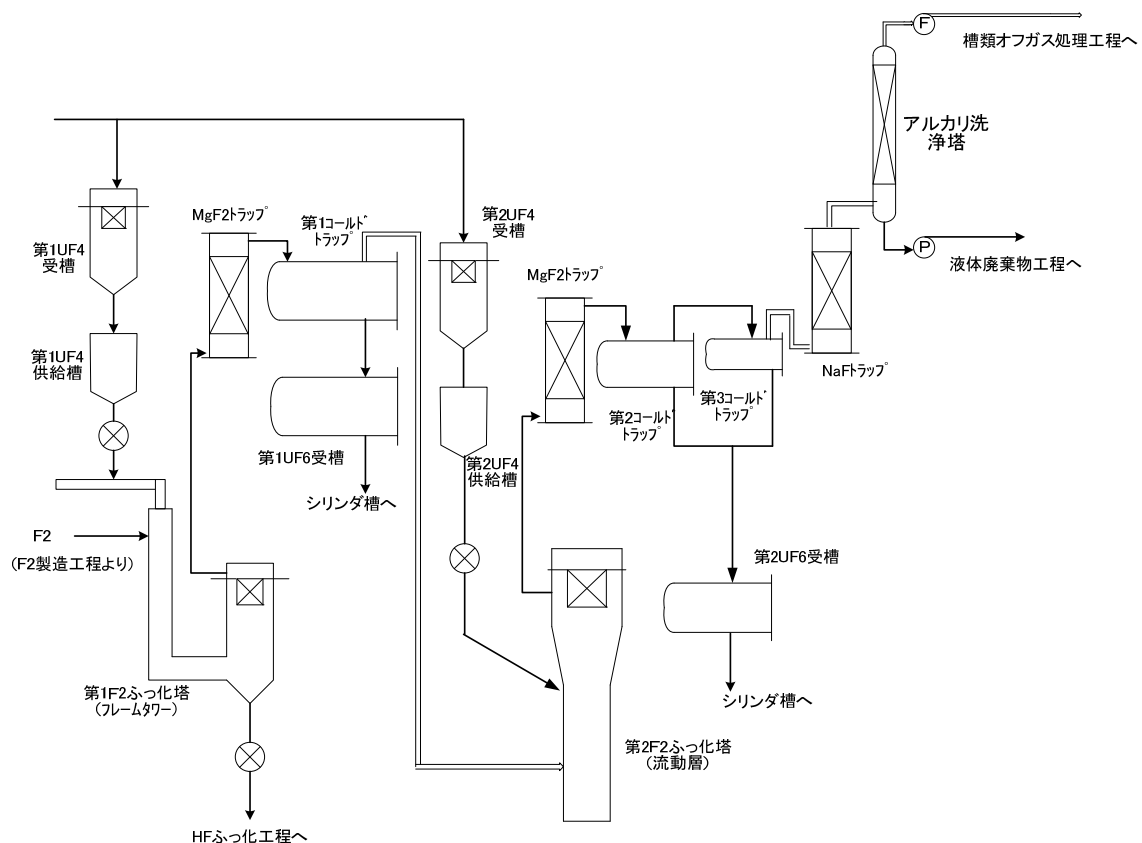


図 12. 回収ウラン転換プロセスの工程概略図（一例：F₂ fluorin 化工程）

表 10. 回収ウラン転換プロセスの経済性検討の条件

事項	内容
機器配置	ウランふっ化施設と F2 製造施設の延べ床面積はそれぞれ、1,670m ² 、1,220m ²
ユーティリティ	運転に必要な試薬、ユーティリティ及び物品を集計
運転人員	運転に必要な人員を検討 ➤ 運転グループ 90 名（5 班 3 交代） ➤ 管理グループ 11 名 ➤ 安全管理グループ 15 名 ➤ 工務グループ 11 名
廃棄物発生量	操業廃棄物を検討

- ・ 建設費：上記施設に関連する設備費は約 330 億円と見積もられた。さらに、ユーティリティ設備、廃液処理設備、管理棟等を含め、建屋建設費は建屋付帯設備（換気、空調、照明等）を含め約 150 億円と試算された。建屋の解体処分費は対象外とした。この結果、建屋費と設備費の合計は

約 480 億円と見積もられた。

- ・ 操業費：操業費は、減価償却費、消耗品（試薬、物品）費、ユーティリティ費、労務費、修繕費、固定資産税、損害保険料、一般管理費、設備資金利子、運転資金利子、操業廃棄物処理処分費の原価要素を集計した。減価償却費は、設備と建屋の税法上の耐用年数を考慮し建設費から算出した。回収ウラン転換施設の操業により発生する操業廃棄物の処分費用は、余裕深度処分相当、浅地中コンクリートピット処分相当、産業廃棄物の処分相当等の種類別に単価を設定し試算した。年間操業費は約 45 億円／年となった。

上記結果より、単位ウラン処理量あたりの単価を計算すると、年間処理量は 800t であるので、約 10 百万円／tU（約 10,000 円/kgU）となった。これに対し、天然ウラン UO_2 価格は約 200\$/kgU である。なお、原子力発電単価 5.9 円/kwh のうち、燃料サイクルに関する内訳（ UF_6 、濃縮、再転換・成型加工の割合）は、各々、3%、5%、5%と小さく、回収ウラン利用の原子力発電コストへの影響は限定的で、今回の検討で得た回収ウラン転換コストを前提にしても回収ウラン利用の事業化に与える影響は軽微である。

3-1-3 特許出願状況等

表 11. 特許・論文等件数

要素技術	論文数	論文の被引用度数	特許等件数（出願を含む）	特許権の実施件数	ライセンス供与数	取得ライセンス料	国際標準への寄与
	0	0	0	0	0	0	0
計	0	0	0	0	0	0	0

表 12. 論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
論文	なし	
投稿	日本原子力学会再処理リサイクル部会「核燃料サイクル」第3章ウラン濃縮, 3-1「ウラン転換」	H25.2
発表	なし	
特許	なし	

3-2 目標の達成度

要素技術ごとに設定した目標・指標について、それぞれの成果、達成度を表5に示す。

各要素技術とも、設定された指標に対し所定の成果を得ており、本プロジェクト全体として目標を十分満足しているものと考えられる。

表 13. 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
(1) 国内外の回収ウラン取扱実績等に関する調査	各国の核燃料サイクル施設における回収ウランの取扱い実績、軽水炉における回収ウランの利用実績及び回収ウランの取扱いに関する技術的課題を調査する。	各国の核燃料サイクル施設における回収ウランの取扱い実績や軽水炉における回収ウランの利用実績について調査・整理した。 回収ウランのγ線に起因する事項、回収ウランの高いα放射能によって影響される事項、回収ウランの微量不純物放射能によって影響される事項など、各国の事例を調査するとともに、回収ウランの特性と関連付けて整理した。	達成
(2) 既存施設における回収ウランの受入条件に関する調査	既存の国内外の主要な転換、濃縮、再転換、成型加工、原子炉、各種輸送設備における取扱核種、線量等の受入条件等を調査する。	既存の国内外の主要な転換（人形峠）、濃縮（人形峠）、再転換・成型加工（4施設）、発電用原子炉、回収ウラン酸化物、UF₆、回収ウラン燃料集合体の輸送設備における取扱核種、線量などの受入条件及び受入上限値を調査した。同様に、海外の転換（仏、露、英）、濃縮（独、英、蘭）、再転換・成型加工（仏、露、独）等における取扱核種、線量などの受入条件及び受入上限値を調査した。	達成

(3) 炉心特性に与える影響に関する調査	回収ウランに含まれる U-236、核分裂生成物(FP)、マイナーアクチニド(MA)、 α 線放出核種等が炉心特性に与える影響を調査する。	六ヶ所再処理工場からの回収ウラン組成等の条件を考慮し、再濃縮燃料の組成を設定して、回収ウラン燃料を用いた炉心特性に与える影響を複数の許認可コードによる計算で評価し、PWR、BWR とも、濃縮回収ウラン燃料を使用した炉心の成立性に問題ないことを確認した。	達成
(4) 国内外の転換プロセスに関する調査	回収ウラン酸化物を UF ₆ に転換する国内外のプロセス技術を調査する。	回収ウラン酸化物を UF ₆ に転換するプロセスについて、日 人形峠、仏 COMURHEX、露 SCC 等のプロセスフローと各工程の要素技術、反応機器の特徴等を調査した。また、海外の主要な天然ウラン転換工場（仏 COMURHEX、加 CAMECO、米 ConverDyn、英 Westinghouse、露 SCC 等）の情報も調査し、それぞれのプロセスの特徴や課題等に関する情報を整理した。	達成
(5) 転換プロセスの検討	六ヶ所再処理工場からの回収ウランを六フッ化ウランに転換するプロセスの検討を行う。	六ヶ所再処理工場の使用済燃料受入仕様にに基づき、回収ウランの同位体組成の変動等を検討し、転換プロセスで扱う原料回収ウランの受入仕様を検討した。原料の運搬と取出し、転換プロセスへの供給も含めて、六フッ化ウラン (UF ₆)ガスの形態にふっ化転換するプロセスを検討し、国内の技術実績の活用の観点から 2 段ふっ化法を選定した。	達成

(6) 回収ウラン濃縮プロセスの検討	国内の既存のウラン濃縮施設（六ヶ所ウラン濃縮工場）で回収ウランUF6を取扱う場合の課題を検討する。	六ヶ所ウラン濃縮工場において、原料として回収ウランUF6を取扱う上で課題となる事項を処理工程毎に抽出し、外部遮蔽対策、濃縮前後の待機時間の短縮等の対策の必要性を明らかにした。	達成
(7) 回収ウラン再転換プロセスの検討	濃縮された回収ウランUF6を国内の既存の再転換施設で取扱う場合の課題を検討する。また、劣化ウラン(UF6)の酸化固形化を新たに実施する場合のプロセスを検討する。	濃縮された回収ウランを国内の既存の再転換施設で再転換する場合の回収ウラン取扱いによる課題について検討し、遮蔽対策、設備の自動化や成型加工時間短縮等の対策の必要性を明らかにした。 劣化ウラン酸化固形化プロセスについて、国内の劣化ウラン貯蔵量、今後の発生量想定から、施設の規模、処理プロセスを検討した。	達成
(8) 転換プロセスの事業化の概念検討	回収ウラン酸化物をUF6に転換する回収ウラン転換プロセスの事業化に対する概念検討を行う。	(5)で選定された転換プロセスによる転換施設の施設規模、機器構成、運転に必要な試薬、人員などの情報を整理し、2段階法に基づく800tU/年の処理能力を持つ回収ウラン転換施設について概念検討した。 回収ウラン利用における転換プロセスの成立性の検討を行うとともに、回収ウランの転換から再濃縮、再転換、成型加工を経て原子炉へ装荷されるまでの全工程について事業化に対する課題を整理した。	達成

4. 事業化、波及効果について

4-1 事業化の見通し

回収ウランは、当面「戦略的備蓄」として位置付けており、喫緊の課題として事業化への見通しはないが、国内利用にあたって、導入に関する諸課題を整理し、課題解決を図っておくことで、今後の回収ウラン利用への機動的な対応可能性を明らかにしておくことが重要である。

表 14. 事業化に対する課題の抽出

事項	内容
転換	年間 800t の回収ウランを UF_6 に転換できる能力を持つ新転換工場が必要である。国内の技術開発経験から 3 倍程度のスケールアップとなり特に困難なものではないが、これまでの国内の技術開発経験などを最大限活用すべきである。
濃縮	800t の回収ウランを全て用いた場合、六ヶ所ウラン濃縮工場のフル稼働時（年間 1,500tSWU）の濃縮能力の 35%程度を占める。貯蔵中の UF_6 シリンダ類に遮蔽対策等を施すことが重要であり、現在のウラン濃縮工場を大幅に変更することなく回収ウランの再濃縮は可能である。
再転換	再転換の部分は、既存施設に対し、6～8 倍の処理能力アップに対する抜本的な外部放射線の遮蔽対策が不可欠である。新たな再転換・成型加工施設を構築する方が有利である。
その他	回収ウランを取扱うプロセスで、回収ウランの滞留時間が必要以上に長くなると、U-232 の子孫核種の生成で γ 線の影響が大きくなる。転換から濃縮を経て成型加工に至る一連の生産システムを回収ウラン燃料装荷計画に合わせて最短で稼働させる体制の構築が必要である。

4－2 波及効果

軽水炉サイクルの早期確立に必要な技術課題、既存施設への影響が明確となり、今後の回収ウラン利用のあり方を方向付けることで、施策の目標達成に大きく寄与する。さらにその中で、回収ウラン利用技術開発の推進によって、我が国において自立性のある核燃料サイクルを確立し、エネルギーの安定供給及びエネルギー・セキュリティの確保に資する。

5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

5-1 研究開発計画

本事業は、平成 21 年度において 4 項目の調査を実施し、その上で、平成 22 年度には、事業化すると仮定した場合におけるプラントイメージを策定することとした。研究開発計画を表 15 に示す。

表 15. 研究開発計画

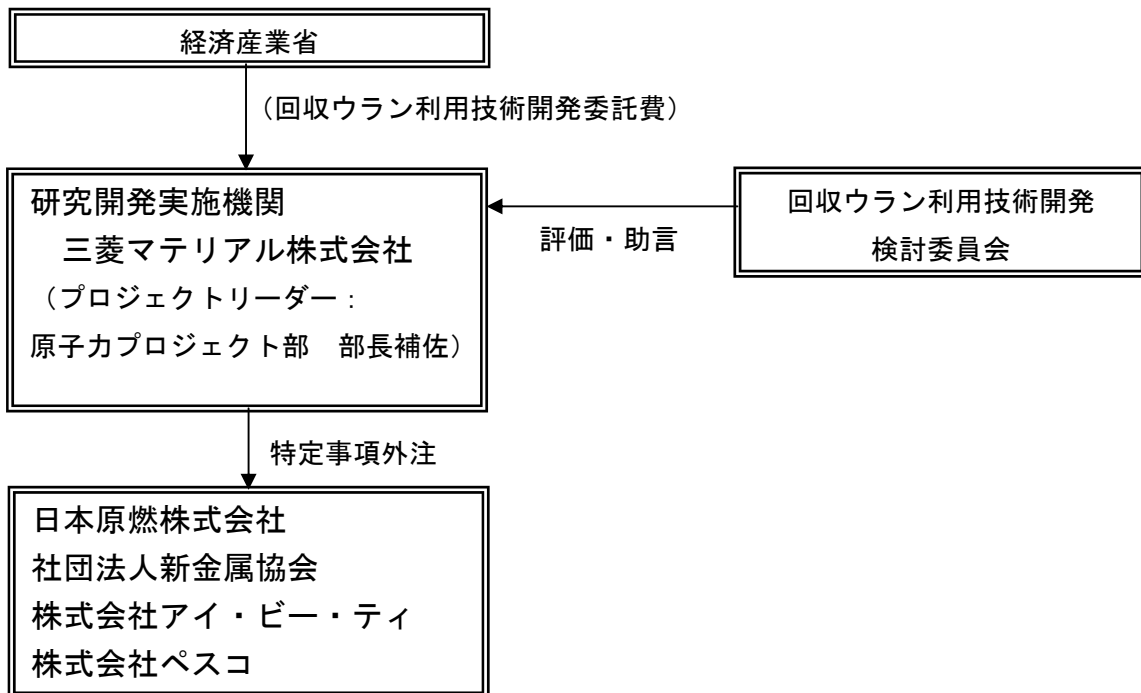
実施項目／年度	H21	H22
(1) 国内外の回収ウラン取扱実績等に関する調査		
(2) 既存施設における回収ウラン受入条件に関する調査		
(3) 炉心特性に与える影響に関する調査		
(4) 国内外の転換プロセスに関する調査		
(5) 転換プロセスの検討		
(6) 回収ウラン濃縮プロセスの検討		
(7) 回収ウラン再転換プロセスの検討		
(8) 転換プロセスの事業化の概念検討		

5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、三菱マテリアル株式会社が経済産業省からの委託を受けて実施した。また、特定事項の外注先として日本原燃株式会社、社団法人新金属協会、株式会社アイ・ビー・ティ、株式会社ペスコが参加した。

また、研究開発の実施にあたっては、研究開発を統括するためのプロジェクトリーダー（原子力プロジェクト部 部長補佐）を設置するとともに、試験計画の策定、実施、評価等において適宜確認、アドバイスを受けるため、学識経験者、電気事業者、加工メーカー等からなる回収ウラン利用技術開発検討委員会を設置した。

図 13. 研究開発実施体制



5－3 資金配分

本プロジェクトに係る概算事業費（年度予算）は表 16 に示すとおりである。

表 16. 資金度配分

（単位：百万円）

年度	H21	H22
回収ウラン取り扱い実績等に関する調査	95	－
プロセスの検討	－	86

5－4 費用対効果

本研究開発は、転換プロセスを中心とした回収ウラン利用技術を開発することで、六ヶ所再処理工場で回収されるウランを再び軽水炉で利用することを目的としており、我が国の既存の核燃料サイクル施設への影響等を把握することで、既存施設の活用が図られ、もって我が国の核燃料サイクルの着実な推進が期待される。

5－5 変化への対応

本研究開発は平成 21 年度から 22 年度の 2 年計画で実施された。技術動向・社会情勢・市場ニーズの変化など、事業に影響を与える情勢変化は特になく、当初計画通りの内容で開発を行った。