

<概要>

ウランが、原子力発電所において核燃料として利用される際には、エネルギーを放出すると同時に、その内部において新たな核燃料物質（プルトニウム）が生成される。使用済燃料を再処理し、含有している核燃料物質を取り出して、軽水炉で再度利用する（軽水炉サイクル）ことにより、ウラン使用量を節約できる。さらに、高速増殖炉で利用する（高速増殖炉サイクル）ことにより、ウランの利用率を飛躍的に増大することが可能となる。

わが国の核燃料サイクル政策は、当面、民間事業として軽水炉サイクルを確立し、将来の高速増殖炉サイクルを目標とする。

<更新年月>

2009年01月

<本文>

1. 核燃料リサイクルの概要

ウランは、鉱石の製錬、核分裂性のウラン-235の濃縮、加工等の工程を経て、原子力発電所で核燃料として利用される。その際、核燃料は核分裂反応によりエネルギーを放出すると同時に、その内部において新たな核分裂性物質（プルトニウム）を生成する。このため、発電所で使用された使用済核燃料には、プルトニウムや燃え残りのウラン等、再度核燃料として利用できる物質が含まれている。

使用済燃料の中に含まれる核燃料物質を化学的な方法で抽出・分離することを再処理と呼ぶ。再処理により取り出された核燃料は、成形加工して再度原子力発電所で利用される。

図1に示すように、現在の軽水炉または将来の高速炉を巡って循環利用されることから核燃料サイクルと呼び、前者を軽水炉サイクル、後者を高速増殖炉サイクルと区別している。なお、使用済燃料を再処理せずそのまま処分するのを直接処分（ワンス・スルー）と呼んでいる。わが国の原子力政策では、民間事業として軽水炉サイクルを確立し、次いで研究開発を進めつつ高速増殖炉サイクルを確立することを目指している。

軽水炉サイクルでは、再処理により分離・回収されたプルトニウムは、ウランと混ぜて混合酸化燃料（MOX燃料）に加工し、現在のわが国で利用されている軽水炉の燃料として使用することができる。この方式をプルサーマルと呼んでいる。プルサーマルは、1960年代から約40年以上にわたって、フランス、ドイツ、ベルギー、スイスなど各国で安全に行われており、2007年12月現在、合計で57基、6,018体のMOX燃料装荷実績がある（わが国の関西電力・美浜発電所1号機および日本原子力発電・敦賀発電所1号機における実証試験で利用された合計6体を含む）。わが国では、上記、美浜発電所および敦賀発電所における実証試験の実施とともに、原子力研究開発機構（旧核燃料サイクル開発機構）新型転換炉（ATR）「ふげん」においても、772体のMOX燃料を装荷した実績がある（1基あたりのMOX燃料装荷本数では世界最高）。また、回収されたウランについては、天然ウランと同様に濃縮し、燃料として再利用することが可能である。

軽水炉サイクルでは、ウランの利用効率がリサイクルを行わない直接処分に比べて、理想的な場合、5割程度向上する（同じ発電量に対して天然ウランの必要量が数割減少する）と試算されている。直接処分とプルサーマルにおけるウラン利用量の試算例をそれぞれ図2および図3に示す。

高速増殖炉の内部では、燃焼（核分裂）に利用されるプルトニウムの量よりもウラン-238が中性子を吸収して新しく生まれるプルトニウムの量が多いことから、消費したプルトニウム以上の

プルトニウムを回収することができる。このため高速増殖炉サイクルでは、ウランの利用効率が理論的には60%程度となり、プルトニウムを利用しない直接処分の場合に比べて100倍以上と飛躍的に利用効率を高めることが可能である。このことから、高速増殖炉サイクルの確立が究極的な目標と考えられている。

2. 核燃料リサイクルの目的と意義

石油、天然ガス等の化石燃料に限られた埋蔵量であることはいうまでもない。ウラン鉱石の可採年数についても、燃料の直接処分による利用では85年程度といわれている。また、地球温暖化ガス排出抑制の観点から、原子力発電は石炭火力発電等の各種電源と比較して、単位発電量当たりの炭酸ガス排出量も極めて少ないと評価されている。既に述べた高速増殖炉サイクルの完結は、エネルギー確保と地球環境保全からも究極の目標といえる。さらに、当面の軽水炉サイクルを含め、核燃料サイクルには、次のような意義がある。

(1) わが国エネルギー・セキュリティ確保への寄与

わが国は、エネルギー自給率が極めて低く（国際エネルギー機関（IEA）の推計によると2004年のわが国のエネルギー自給率は水力、地熱、太陽光などわずか4%である）、エネルギー資源の96%以上を海外からの輸入に依存している。ウランも全量を海外からの輸入に頼っているが、カナダやオーストラリアなど比較的政情の安定した国から輸入しており、埋蔵量も世界に分散されていることから、石油より供給の安定性に優れたエネルギー源である。原子燃料サイクルを確立することで、ウランの輸入量が減少するため、供給安定性がさらに強化される（わが国の総合エネルギー統計によると、2005年度の自給率は6.2%であるが、原子燃料サイクルを確立すると、原子力は資源の海外依存度の低い準国産エネルギーと考えられ、準国産エネルギーを含めたわが国のエネルギー自給率は17.5%となった）。

(2) 高レベル廃棄物の発生量の低減

使用済燃料を直接処分する場合（ワンス・スルー）は、ウラン、プルトニウム、核分裂生成物等を含んだままの使用済燃料全部を高レベル放射性廃棄物として処分しなければならず、多量の廃棄物となり、処理に必要な空間も広大となる。これに対し、再処理を行うと、高レベル放射性廃棄物の量を減らすことができ、放射能の影響度合いを10分の1程度に低減させることが可能となり、放射性廃棄物の処分に関する負担も軽減される。また、高速増殖炉サイクルが確立すれば、使用済燃料中の半減期の長い超ウラン元素（ネプツニウム、アメリシウム、キュリウム）を高速増殖炉で燃焼させることが可能であり、廃棄物処分の環境負荷の低減も期待できる。

(3) 余剰プルトニウムの非保有

「原子力の利用は平和利用に限る」とする日本は、余剰のプルトニウムをもたないことを国際的に表明している。原子力発電によって生成されたプルトニウムを再び核燃料として利用する核燃料サイクルは、プルトニウムの消費においても非常に大きな意義があるといえる。

3. 核燃料サイクルを巡る国際動向

国際的にも再処理やプルトニウムの利用を継続している国は、日本、イギリス、フランスなど一部の国に限られ、またフランスでは、高速増殖炉の実証炉である「スーパーフェニックス」が廃炉になった。なぜわが国だけが核燃料サイクルに固執しているのかという意見がある。いずれの国もエネルギーの安定供給の確保を重要な政策課題としているものの、各国それぞれのエネルギー事情などに応じて独自のエネルギー政策および核燃料サイクル政策を立案している。各国の核燃料サイクルに係わる最近の動向を表1と表2に示す。

核燃料サイクル政策を選択しない国がある一方で、フランス、ロシアおよび中国のように高速増殖炉の開発を進めている国や、米国のように核燃料サイクルに再び着目している国もある。フランスは「スーパーフェニックス」を国内の政治情勢、経済性の観点から廃炉にしたものの、原型炉である「フェニックス」による研究開発は継続している。一方、米国は、次世代原子力システムの研究開発のための国際的な枠組み（GIF：Generation IV International Forum）を提唱し、研究開発の重点対象として選んだ6つの原子炉型式のうち、3つは高速炉である。さらに、2003年1月に「先進燃料サイクル・イニシャティブ」を取りまとめ、高速炉サイクルの開発を提言している。わが国のエネルギー供給構造が極めて脆弱であるといった事情を考えれば、ウラン資源の有効利用に寄与する核燃料サイクルは、わが国において重要かつ妥当な選択であるといえる。

<参考文献>

- (1) 原子力委員会：“核燃料サイクルについて”、平成15年8月19日（2003年）、http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryu2003/kettei/kettei030819/cycle_full.pdf
- (2) 原子力委員会：“原子力政策大綱”、平成17年10月11日（2005年）、<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/taikou/kettei/siryu1-3.pdf>

- (3) 電気事業連合会ホームページ：原子燃料サイクル、
 - (4) 電気事業連合会編「原子力・エネルギー」図面集-2008年版-
 - (5) 資源エネルギー庁ホームページ：施策情報、核燃料サイクル、
 - (6) 経済産業省編「エネルギー白書」2007年版
-

表1 各国における核燃料サイクルに係わる最近の動向(1/2)

事項	日本	米国	カナダ	フランス	ロシア	ドイツ	イギリス
原子力プラント基数、総発電量	55基、4758.7万kW	104基、9828.8万kW	18基、1262.1万kW	59基、6336.3万kW	31基、2207.9万kW	17基、2047.0万kW	19基、1022.2万kW
概観	<ul style="list-style-type: none"> ●核燃料サイクルの完結を目指し、現在は軽水炉でのPu利用を推進。 ●高速炉は将来の非化石エネルギーの有力な選択肢の一つとして研究開発を実施。 	<ul style="list-style-type: none"> ●運転中の原子力発電所の運転実績向上などを図るとともに、2002年2月、エネルギー省(DOE)は2010年までに新規原子力発電所の建設・運転開始を目指す「原子力2010」計画を発表。 	<ul style="list-style-type: none"> ●2002年に使用済燃料の長期管理を目的とする非営利の廃棄物管理機構(WMO)設立を盛り込んだ使用済燃料法案を可決。 	<ul style="list-style-type: none"> ●1972年以来、プルサーマルを実施。これまでに21基の原子炉で実施。 ●2004年6月議会はエネルギー政策法案を審議中。法案は2020年まで原子力の選択肢を残しておくことを国家の優先事項とし、EPR建設を支持する旨を含む。 	<ul style="list-style-type: none"> ●総発電電力量に占める原子力発電の割合を今後、2020年には23%まで引き上げる予定。 	<ul style="list-style-type: none"> ●社民党と緑の党の連立政権は、原発32年間の累積運転期間等政策合意成立。 ●1966年以来14基のプラントでプルサーマル実施。 	<ul style="list-style-type: none"> ●2050年まで視野にいたしたエネルギー白書には、原発の具体的な建設計画はないが、CO2排出削減の目標を達成するために、将来において新設を必要とする可能性は排除せず、選択肢としてオープンとしている。
サイクル	<ul style="list-style-type: none"> ●日本原燃(株)、六ヶ所村に商用プラント(800tHM/年)を建設、平成21年1月現在(2009年)試運転中。 ●東海処理工場は停止中。 ●日本原燃(株)は、六ヶ所村に、MOX燃料加工工場(130tHM/年)の建設・事業許可申請中。 	<ul style="list-style-type: none"> ●使用済燃料は、再処理せず直接処分する政策。放射性廃棄物政策法により、エネルギー省(DOE)が引き取ることを義務付けられている。 ●第4世代国際フォーラム(Generation IV International Forum: GIF)2002年第4世代原子炉の6概念が決定。 ●DOEは、2003年に使用済燃料の先進処理研究と核変換研究の将来的道筋を議会に提出。 	<ul style="list-style-type: none"> ●使用済燃料は再処理しない方針で、発電所サイト内でコンクリートキャニスタに収納され、湿式または乾式貯蔵されている。 ●WMOは使用済燃料の長期管理は、深地層処分、発電所サイト貯蔵、地表または浅地層での集中貯蔵の中から最適な方法を提案し、連邦政府の承認を経てWMOが実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> ●使用済燃料を再処理する核燃料サイクル政策。 ●ラアグで2基の商用再処理工場(UP2及びUP3)を操業中(年間処理能力併せて1700tU)。これまで19400トン余りを再処理。2003年に高燃焼度燃料やMOX燃料等の再処理の許可取得。 ●長期中間貯蔵を含めた使用済燃料管理オプションについて比較検討を実施。 	<ul style="list-style-type: none"> ●高速増殖炉を中核とした核燃料サイクルの確立を原子力開発の基本政策として推進している。 ●高速実験炉及び大型原型炉が運転中。実証炉は1990年の建設中断後2001年より建設を再開。 ●再処理施設RT-1が運転中、RT-2は資金難で建設中断中。 ●使用済燃料の輸出入等を可能とする関連国内改正法令成立。 	<ul style="list-style-type: none"> ●国外再処理は2005年7月をもって終了。それ以降の使用済燃料は直接処分。 ●カールスルーエで再処理パイロットプラントを操業し1990年に停止。 ●国外における再処理で回収したプルトニウムを軽水炉で利用。 ●ゴアレーベンとアーハウスで中間貯蔵施設を操業中。さらに発電所サイト内中間貯蔵施設が2005年までに整備される予定。 	<ul style="list-style-type: none"> ●使用済燃料を再処理するかどうかは所有者の判断に任せる方針。 ●1992年に完成した英国原子力燃料公社(BNFL)のセラフィールドの酸化燃料再処理プラントにおいて、海外からの使用済燃料再処理を実施。
廃棄物処分	<ul style="list-style-type: none"> ●日本原燃(株)、六ヶ所村に、高レベルおよび低レベル放射性廃棄物貯蔵センターを建設済。 ●高レベルについては、ガラス固化、貯蔵後、地層処分する方針。 	<ul style="list-style-type: none"> ●DOEは、ネバダ州ユッカマウンテンサイトを放射性廃棄物処分場とする行政手続を行い、2002年7月に立地承認に関する合同決議が法律として成立。 	<ul style="list-style-type: none"> ●処分地は未定。 ●ホワイトシェル地下研究所あり。 	<ul style="list-style-type: none"> ●短寿命(半減期30年未満)の中低レベル放射性廃棄物は、ラマンシュ(操業終了)及びローブの貯蔵センター(操業中)で処分。 ●長寿命(半減期30年超)の低レベル廃棄物処分については研究中。長寿命中レベル廃棄物は最終処分場開設まで中間貯蔵。 ●高レベル廃棄物については、廃棄物法により、ピュールに深地層処分の地下研究所を建設中。 	<ul style="list-style-type: none"> ●高レベル放射性廃棄物及びRBMK-1000の使用済燃料の処分については、深地層処分を含めて、多くの潜在的サイトを調査している段階。 	<ul style="list-style-type: none"> ●再処理より発生した高レベル廃棄物と再処理しない使用済燃料の処分については、ゴアレーベン処分場の扱いをどうするかを含め、サイト選定の状況は未定、なお、処分場の操業は2030年頃とされている。 	<ul style="list-style-type: none"> ●中高レベル放射性廃棄物については、処分方針未定、低レベル放射性廃棄物は、ドリッグ処分場にて浅地中埋設処分中。 ●原子力デコミッションング公社:NDAは、過去の施設やマグノックス炉とそこで発生した廃棄物の廃止・処分に関する過去の債務を引き継ぎ、クリーンアップに必要な全般の管理・指導を行う。
その他	<ul style="list-style-type: none"> ●高速実験炉「常陽」運転中、平成21年1月現在(2009年)高速原型炉「もんじゅ」、運転準備中。 	<ul style="list-style-type: none"> ●2002年1月、DOEは、解体核兵器からのプルトニウム34トン全量をMOX燃料に加工して、米国内の軽水炉で利用することを決定、サウスカロライナ州サンナリバーサイトに核弾頭解体転換施設及びMOX燃料加工施設を建設する計画。 		<ul style="list-style-type: none"> ●高速増殖実証炉スーパーフェニックスは1998年に閉鎖。原型炉のフェニックスについては廃棄物法に定められた核種変換の実験のため2008年まで運転継続。 	<ul style="list-style-type: none"> ●軍縮の進展により近年解体核のプルトニウムをMOX燃料として燃料処理する案が有力となっている。日本とロシアの共同研究のもと、MOX燃料を照射する計画が現在進行中。 		

表2 各国における核燃料サイクルに係わる最近の動向(2/2)

事項	スウェーデン	スペイン	ベルギー	スイス	フィンランド	韓国	中国
原子力プラント基数、総発電量	10基、899.5万kW	8基、745.0万kW	7基、576.0万kW	5基、320.0万kW	4基、265.6万kW	20基、1746.6万kW	11基、843.8万kW
概観	<ul style="list-style-type: none"> ●1980年、国民投票の結果を踏まえ、国会は2010年までに12基の原子力発電所閉鎖を決定したが、閉鎖期限は撤回、1999年11月パーセベック1号機を閉鎖、2号機の閉鎖は延期中。 ●ドイツ方式にならない政府と産業界の合意により原子力発電所の段階的閉鎖を検討する予定。 	<ul style="list-style-type: none"> ●新規建設計画はないが、既設発電所については、出力増強や運転期間の延長が進められている。 ●2006年に1基(ホセカブレラ(ソリタ)発電所、PWR)が閉鎖予定。 	<ul style="list-style-type: none"> ●1963年以来、これまでに3基の原子炉でプルサーマルを実施。 ●1999年6月、原子力発電所の運転期間を40年間とし、段階的に原子力発電所を廃止する方針、脱原子力法案が、2003年可決・成立。 	<ul style="list-style-type: none"> ●1990年に国民投票が行われ、10年間新規原子炉の建設は行わないとするモラトリアム案を採択。 ●2003年5月に国民投票を実施し、原子力法案を可決。原子力発電所の新設について任意国民投票の実施を承認、新規再処理を10年間凍結する等が盛り込まれた。 	<ul style="list-style-type: none"> ●1993年9月に国内5基目となるオルキルオト原子力発電所3号機の建設を議会で否決。 ●2002年5月に、再びオルキルオト原子力発電所3号機新設計画を議会にて承認、2003年に1600MWのEPR建設を契約、2009年に運転開始予定。 	<ul style="list-style-type: none"> ●PWRとGANDU炉を高い設備利用率で運転中(2003年平均で94.2%)。 ●さらに8基の新規建設を計画。 	<ul style="list-style-type: none"> ●近年の著しい電力需要の伸びに発電所の建設が追いつかない状況。 ●2020年に総発電設備の4%に相当する3600~4000万kWに拡大することを目指しており、今後16年間で2700万~3000万kW分の原子力発電所を建設することを計画中。
サイクル	<ul style="list-style-type: none"> ●使用済燃料を再処理せず、直接処分する政策。 ●スウェーデン核燃料廃棄物管理会社(SKB)が使用済燃料中間貯蔵施設を1985年より操業中。 	<ul style="list-style-type: none"> ●使用済燃料の再処理オプションは放棄しないが、軽水炉については当面行わず、基本的には、使用済燃料を直接処分する政策。 ●使用済燃料は、各発電サイト内の燃料貯蔵プールに貯蔵。また、2020年以降は、サイト外に中間貯蔵施設を建設する計画。 	<ul style="list-style-type: none"> ●再処理を行っていたが、現在は中間貯蔵に移行。 ●1974年のユーロケミック再処理施設の運転停止以降、仏国のGOGEMAに再処理委託。 ●1998年12月、ベルギー政府の核燃料サイクル政策の見直しにより、1991年に締結したGOGEMAとの再処理契約を破棄。 ●契約破棄以降に発生した使用済燃料については、発電サイト内に貯蔵。 	<ul style="list-style-type: none"> ●使用済燃料は再処理。国外との再処理契約量を超える使用済燃料については再処理せず深地層処分することが可能。 ●英仏との既契約分再処理は実施(2006年末まで)。 ●2001年より使用済燃料も貯蔵可能な中間貯蔵施設を運転開始。 	<ul style="list-style-type: none"> ●使用済燃料を再処理せず、直接処分する政策。 ●当初、フィンランド国内で発生した使用済燃料は核燃料の輸入元であるロシアの再処理施設へ返還されてきたが、1994年原子力法の改正により1996年以降はフィンランド国内で発生した使用済燃料は国内で処分される。 ●使用済燃料はロビーサ発電所等で貯蔵中。 	<ul style="list-style-type: none"> ●1975年に仏国SGN社と再処理技術契約締結するも米国及びカナダの反対で再処理計画を断念。 ●使用済燃料は再処理しない方針。 ●2003年産業資源省は、使用済燃料の集中中間貯蔵施設のサイトとして烟島(ウイド)を選定したが、計画は進んでいない。 ●貯蔵ラックの高密度化等で使用済燃料のサイト内保管期間を2016年頃まで延長。 	<ul style="list-style-type: none"> ●使用済燃料の再処理が基本方針。1998年4月以降、原子燃料サイクルの行政管理部門は、科学・技術・国防産業委員会(COSTIND)、実際の事業責任は、核工業集团公司と中国核工業建設集团公司が分担。 ●再処理パイロットプラントを甘肅省に建設中。また、商業用再処理プラントの建設も計画しており、2020年頃の操業開始を目指す。
廃棄物処分	<ul style="list-style-type: none"> ●発電所で発生する低・中レベル廃棄物の処分場が1988年より操業開始。 ●使用済燃料は地下500mの結晶質岩中に地層処分することを基本方針。 ●SKBが処分サイト選定のための調査を実施中、現在、オスカーシャムとエストハンマルが候補、2006年頃に処分場候補地を選定。 	<ul style="list-style-type: none"> ●全ての放射性廃棄物の処理・処分は、国営である放射性廃棄物管理公社(ENRESA)が担当。 ●中・低レベル放射性廃棄物は、各発電所内の貯蔵施設に一時保管された後、コルトバ州にある、エル・カプリル処分場で処分。 ●高レベル廃棄物については、2025年以降に最終処分を開始を予定。 	<ul style="list-style-type: none"> ●放射性廃棄物の処分は、放射性廃棄物・核物質管理庁(ONDRAF)が担当、廃棄物の処理及び貯蔵についてはONDRAFが100%出資したベルゴプロセス社が実施し、最終処分までの間、集中中間貯蔵施設内で貯蔵。 ●高レベル廃棄物処分場の立地選定は、未着手。低レベル廃棄物処分場のサイト選定を進行中。 	<ul style="list-style-type: none"> ●放射性廃棄物管理協同組合(NAGRA)が廃棄物処分の実現可能性実証のための調査を実施。 ●花崗岩及びオパリナス粘土での地層処分の実現可能性が報告される。 ●国内に処分場を建設する場合には2020年頃にその決定を行い、2050年頃に操業開始する予定。 	<ul style="list-style-type: none"> ●発電所廃棄物については、ロビーサの中・低レベル放射性廃棄物最終処分場が1998年に操業開始。また、1992年よりオルキルオトでも中・低レベル放射性廃棄物処分場が操業開始。 ●高レベル廃棄物処分の実施主体は電力会社による合併会社であるポシバ社、最終処分場は2010年に着工、2020年に操業開始の予定。 	<ul style="list-style-type: none"> ●2003年産業資源省は、中・低レベル放射性廃棄物処分場のサイトとして烟島(ウイド)が優れていると評価したが、計画は進んでいない。 	<ul style="list-style-type: none"> ●低・中レベル放射性廃棄物処分は、アスファルト固化およびセメント固化し、浅地層処分。 ●高レベル放射性廃棄物については、ガラス固化し、深地層処分場に埋設する方針。
その他			<ul style="list-style-type: none"> ●ベルゴニュークリア社によりMOX燃料加工施設が1973年より操業。 			<ul style="list-style-type: none"> ●軽水炉使用済燃料を熱処理加工し、GANDU炉用燃料として供給するDUPIC法を開発中。 ●第4世代炉開発への参画を表明している。超高温ガス炉、超臨界水炉、Na冷却高速炉に高い関心。 	<ul style="list-style-type: none"> ●2006年、高速増殖炉の実験炉(2.5万kW)を運転開始予定。

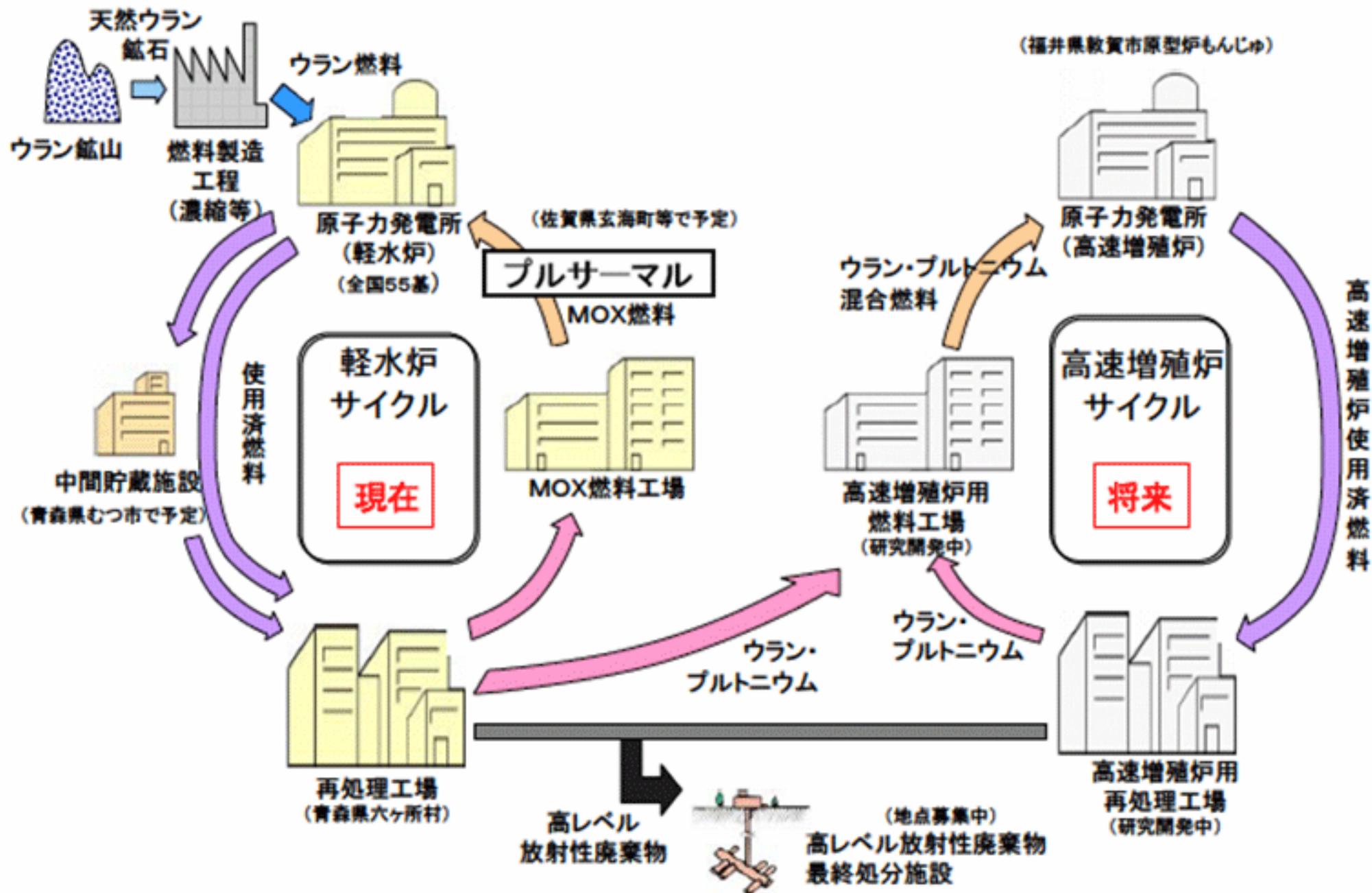


図1 核燃料サイクル

[出典]資源エネルギー庁: 施策情報、原子力政策の現状について、なぜ、日本は核燃料サイクルを進めるのか?、核燃料サイクル、<http://www.enecho.meti.go.jp/policy/nuclear/pptfiles/0201-0.pdf>

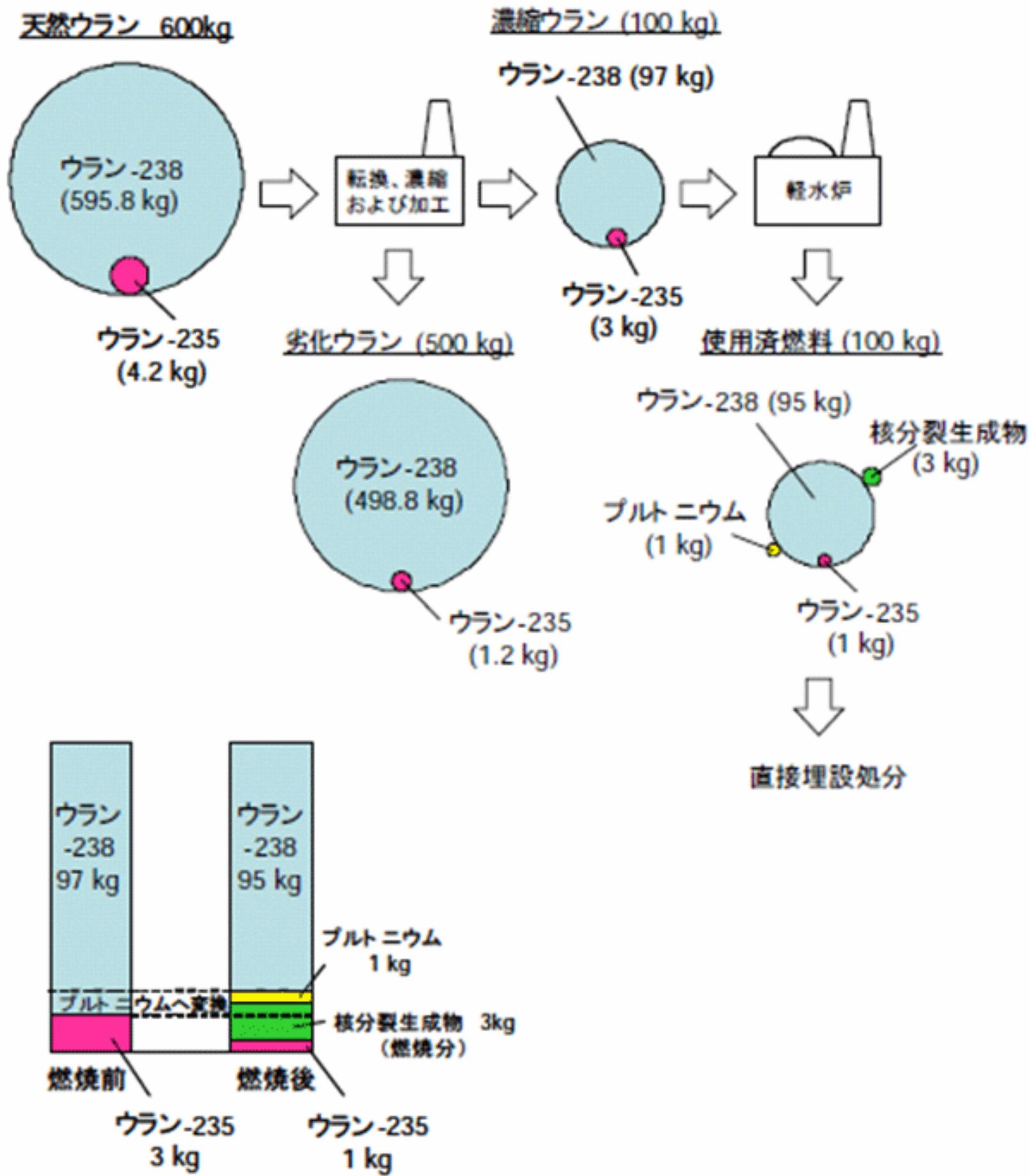


図2 直接処分(ワンス・スルー)におけるウラン利用量

[出典] 原子力委員会、核燃料について、平成15年8月(2003年)

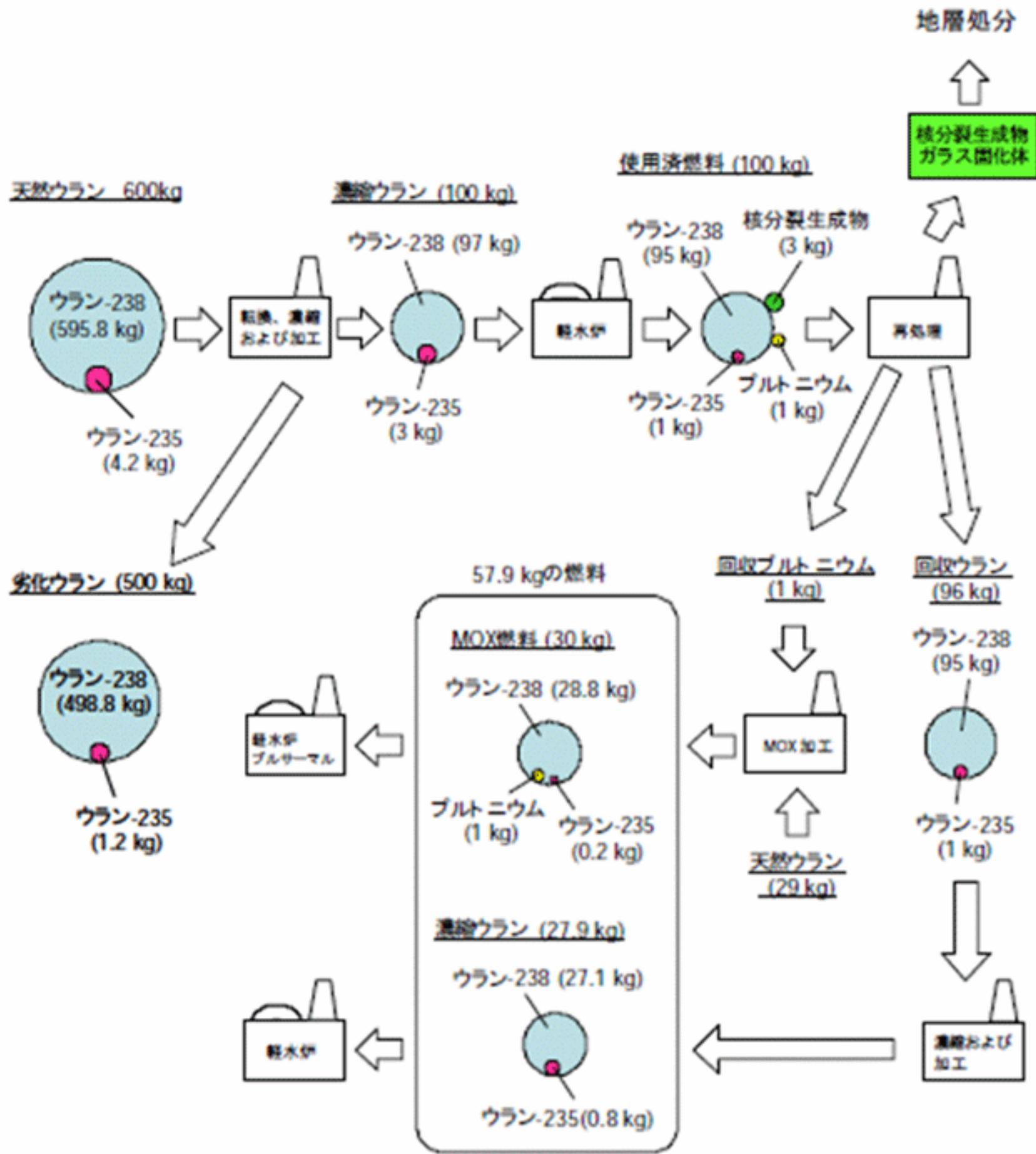


図3 プルスーマルにおけるウラン利用量

[出典] 原子力委員会、核燃料について、平成15年8月(2003年)