

<概要>

世界では、過去半世紀の間に約20の再処理施設が建設されてきた。原子力発電の黎明期に天然ウラン金属燃料を使用したイギリスおよびフランスでは、発電量当たり多量に排出される使用済燃料の再処理のために大型再処理施設を建設・運営した。しかし、世界的に軽水炉が主流になるにつれて、その燃料再処理が計画され、米国、イギリス、フランス、日本、ドイツ、ベルギーで実証プラントが建設、運転され、商業規模施設への発展の基礎が築かれた。こうした中で、米国では再処理を行わない政策に転換したが、イギリス、フランスおよび日本が第2世代の大型商用酸化燃料再処理工場を計画し、THORP（イギリス）、UP3（フランス）、UP2-800（フランス）、日本の六ヶ所再処理工場が建設された。UP3、UP2-800およびTHORPはすでに稼働中であり、六ヶ所工場は2010年操業開始を予定して、最終試験段階に入っている。

<更新年月>

2010年05月

<本文>

1. 世界の再処理工場

2010年現在で、国内に再処理施設を持ち、原子力発電所の使用済燃料を再処理している国は、日本、フランス、イギリス、ロシア、インド、中国などがあるが、このうち大型の商業再処理工場があり、国際再処理市場で本格的に事業展開をしている国は、フランスとイギリスの2か国のみである。しかし世界中には、この半世紀間に約20の再処理施設が建設されてきた。それらの中には、既に運転を中止したものや稼働中のもの、改造等により当初の目的の変わったもの、完工したもののホット運転には至らず閉鎖されたもの等がある。表1にこれらの工場を国別に表示する。またOCED諸国における使用済燃料発生量の現状と今後の見通しを表2に示す。

再処理工場は使用済燃料を処理する施設であるため、使用済燃料を発生する炉型の種類に応じて、その設計が異なってくる。数種の燃料を処理できるような汎用性の高い工場も考えられるが、歴史的に利用炉型の種類が整理されるなかで、専用化していった。現在使用されている発電炉を大別すると、以下のように分類される。カッコ内は開発された発電炉の具体例を示す。

イ) 天然ウラン金属燃料黒鉛減速ガス冷却炉（イギリスのマグノックス炉、フランスのNUGG（総称してGCR、改良型がAGR））

ロ) 天然ウラン酸化燃料重水減速・冷却炉（カナダのCANDU）

ハ) 低濃縮ウラン酸化燃料黒鉛減速軽水冷却チャンネル炉（ロシアのRBMK（LWGR））

ニ) 低濃縮ウラン酸化燃料軽水減速冷却炉（米国その他のPWR、BWR、ロシアのVVER）

表3に世界における炉型別原子力発電所の稼働状況を示す。

このうち使用済燃料の再処理が工業化の段階まで進んだ炉型は、イ)とニ)である。イ)のガス冷却炉は炉型としては既に古典的であり新設計画はないが、まだ稼働中のものが排出する使用済燃料を引き続き再処理しなければならない。ニ)の米国型軽水炉は広く世界各国で用いられており、軽水炉（酸化燃料）を対象にする再処理工場としては6工場が操業している。

2. 天然ウラン燃料（炭酸ガス冷却炉燃料）の再処理工場

イギリスおよびフランスは、第二次大戦末期から軍事用のプルトニウム生産を目的に研究を開始し、やがてプルトニウム生産炉とプルトニウム回収工場をウインズケール（イギリス：現在セラフィード）およびマルクール（フランス）に建設した。発電を主とする実用炉としては、イギリスのコールダーホール炉で始まる一連のマグノックス被覆燃料炉が開発され（世界で37基建

設)、輸出も行われた。フランスでは、フランス電力庁(EDF)が同系列の炉型(アルミニウム系被覆)を開発し、シノンに発電炉を建設して以来、数サイトにガス冷却炉が建設された。

これらのガス冷却炉はいずれも数千MWd/tの**燃焼度**であり、発電量当たりの使用済燃料発生量が多い(ウラン量で軽水炉の10倍)ので、必要な再処理工場の規模(ウラン取扱量)は大きくなる。イギリスのセラフィールド第2工場(B-205)、およびフランスのラ・アーグのUP2はいずれも千トンウラン/年級の処理能力をもっている。しかし、取り扱う核分裂性物質(ウラン-235、プルトニウム等)および**核分裂生成物**の量と濃度は、後述の高燃焼度の軽水炉使用済燃料に比べてはるかに低いので技術的難度は低いと言える。B-205はなお稼働中であり、UP2はUP2-400として1987年から軽水炉燃料処理専用に改造されている。

再処理の基本プロセスは、燃料を硝酸に溶解した後、**溶媒抽出**でウラン、プルトニウム、核分裂生成物を分離・精製する工程であり、これは、ガス冷却炉燃料でも軽水炉燃料でも類似したプロセスである(図1参照)。ガス炉燃料処理のこれら大型工場は、軽水炉燃料の再処理工場のよい先駆者となったといえる。技術の伝承という意味でも、サイトの定着という意味でも重要であった。

3. 軽水炉燃料再処理工場の展開(第一期)

濃縮ウラン利用を前提として米国で開発された軽水炉が、世界的に大規模な市場を獲得して建設されていくにつれて、軽水炉使用済燃料の再処理技術の開発が開始された。

開発の要点は、

a) **プルトニウム生産炉**、金属燃料ガス炉等での低燃焼度燃料再処理で培った溶媒抽出法を軽水炉の燃焼度レベルまで適用可能とするプロセス、装置等の改良

b) 軽水炉燃料集合体の燃料部分を露出させて硝酸溶解液にする**前処理工程**の確立

c) **放射性物質**の取扱量の増大に配慮して環境影響の低減化を図る等である。

米国では、オークリッジ国立研究所が中心となって技術開発が進められ、NFS社のウェストバレー工場(WVRP)として結実し、燃料集合体剪断・溶解(チョップアンドリーチ方式)+ピューレックス法溶媒抽出という軽水炉燃料再処理方式の原型を確立した。

一方、1957年にヨーロッパ連合としてユーロケミック社が設立され、1955年のジュネーブ国際会議で公開された米国の再処理技術の発展と実用化が図られた。米国からの技術援助(情報提供等)もあり、同社はベルギーのモルに工場を計画し1966年に完成した。1974年までの運転を通して、ヨーロッパの再処理技術に貴重な経験が加えられた。モル工場は、その後ベルギーが中心になって材料試験炉燃料等の多目的工場としての存続も計画されたが、主なパートナーであるフランス、ドイツがそれぞれ自国に再処理工場建設計画を持ち、サイトの大規模化にも限界があったので、運転は中止された。

米国では、1960年代から70年代にGE社によって新しい設計概念のミッドウェスト工場(MFRP)が建設されたが、コールド試運転中、ウランの脱硝フッ素化工程での技術的難点を解決できずに計画は1974年に中止になった。

4. 軽水炉燃料再処理工場の展開(第二期)

1960年代中頃より、発電炉の大部分が酸化物燃料に移行するのが明瞭になったことで、イギリスおよびフランスでは金属燃料ガス炉路線で構築されていた燃料サイクル関連技術の見直しが必要になった。再処理では特に前項b)の前処理技術の開発は、a)、c)とは異なり、従来技術の延長ではないので、イギリスは稼働中のB-205工場に、またフランスはUP2工場の前段部に付加するかたちで、酸化物燃料前処理施設(イギリスでは退役したB-204工場の建屋に前処理施設等を設置、フランスはHAOを新設)を自国技術で建設し、運転した。HAO(高放射性酸化物のフランス語頭文字)は幾多の改良を経て、UP2-400工場の前処理施設として1995年まで活躍した。

動燃事業団(核燃料サイクル開発機構を経て現在は日本原子力研究開発機構)の東海工場は時間軸ではフランスのUP2-400に相当する。共にフランスのSGN社によって設計された。燃料集合体剪断と回分式溶解方式の前処理施設が採用されているが、両者の機器、配置、工程設計はかなり異なっている。

この時期、米国では、NFS社のWVRPの拡張・更新計画(3トン/日)があり、またAGNS社のバーンウェル工場(BNFP、5トン/日)の建設があったが、共に稼働には至らなかった(1977年、カーター政権により核不拡散政策の一環として商業再処理禁止が策定された)。上述のc)項については、海洋放射能放出の低減化は東海工場において実現され、高放射性廃液のガラス固化技術の一方がフランスにおいて確立された。マルクールガラス固化施設(AVM)がその実証プラントである。

ドイツ(当時西ドイツ)では、カールスルーエ原子力研究所に隣接してWAK工場を建設し、小規模ながら広範囲に再処理技術の高度化研究に努力が傾注された。

5. 軽水炉燃料再処理工場の展開（第三期）

軽水炉から排出される使用済燃料の再処理の受託を目的として、再処理事業の国際合弁会社としてユナイテッドリプロセッサーズ（URG）社が1971年に設立された。URG社は、英国BNFLのTHORP工場とフランスCOGEMA（現AREVA NC社）のUP3を使用したか、後に合弁は解消され、BNFL、COGEMAとの個別契約となっている。

THORPは、本来自国の改良型ガス冷却炉（AGR、低濃縮ウラン酸化物燃料、炭酸ガス冷却炉）の使用済燃料を対象にするが、上記の軽水炉燃料の受託分を考慮して、規模を1200トン/年とし、コストの低減を図った。1992年に建設を完了、1994年1月に操業を開始し、2001年までの累積再処理量は3,900トンである。

COGEMA社のUP3（800トン/年）は、国外から受注した使用済燃料の処理が建前であるが、1989年末より部分的ホット試運転を開始し、1990年夏より全面的なホット運転に入っている。引き続き自国内の使用済燃料の処理を目的とするUP2-800が1994年に運転を開始し、2002年までの累積再処理量は両施設あわせて18,000トンに達する。

また、日本国内では軽水炉の使用済燃料再処理について、上記のイギリスおよびフランスの再処理工場に委託する一方、増加する再処理需要に対応するため、日本原燃（株）が青森県六ヶ所村に再処理工場（800トン/年）を建設中で、2010年の運転開始が予定されている。

THORPおよびUP3工場は、今までの再処理技術の集大成としての商用施設として、特に[安全設計](#)に留意して慎重に企画設計されているが、後発の六ヶ所工場は対象燃料の燃焼度等に対応してより高度な仕様であり、フランスのUP3に続くUP2-800と比肩するものである。

ドイツでは、WAW（WA-350）という再処理工場をバックースドルフに建設することになっていたが、経済的理由により、この計画は1989年に中止になった（ATOMICAデータ<14-05-03-10>バックースドルフ再処理工場建設計画の放棄参照）。

中国は、商業再処理用多目的パイロットプラント（RPP）を甘粛省の蘭州核燃料サイクル施設に建設中である。使用済燃料400kg/日の規模である。この建設にはフランスが協力している。また、次の段階として、400～800トン/年規模の商業再処理施設を2010年代に完成の予定と報じられている。

（前回更新：2004年10月）

<関連タイトル>

[再処理技術開発の変遷（歴史） \(04-07-01-04\)](#)

[東海再処理工場 \(04-07-03-06\)](#)

[六ヶ所再処理工場 \(04-07-03-07\)](#)

[フランスの再処理施設 \(04-07-03-08\)](#)

[イギリスの再処理施設 \(04-07-03-09\)](#)

[アメリカの再処理施設 \(04-07-03-11\)](#)

[中国の再処理施設 \(04-07-03-12\)](#)

[ロシア連邦の再処理施設 \(04-07-03-18\)](#)

[バックースドルフ再処理工場建設計画の放棄 \(14-05-03-10\)](#)

<参考文献>

- (1) 内藤 奎爾（監訳）：原子力の技術、核燃料サイクル下、筑摩書房、p.344～378（1987）
- (2) Nuclear Power Technology, Vol.2 Fuel Cycle, UKAEA Oxford Press（1983）
- (3) 小泉 忠義：“転機を迎えた熱中性子炉燃料再処理”、原子力工業 p.37～46、Vol.31、No.12（1985）、日刊工業新聞社
- (4) （社）火力原子力発電技術協会：やさしい原子力発電（1990年6月）
- (5) （社）火力原子力発電技術協会：原子燃料サイクルと廃棄物処理（1986年）
- (6) （社）日本原子力産業会議：原子力ポケットブック2009年版（2009年8月）、p.245～246
- (7) （社）日本原子力産業会議：原子力年鑑 平成9年版（1997年10月）、p.153～154、p.341～342、p.284～285
- (8) （社）日本原子力産業会議：原子力年鑑 2004年版（2003年11月）、p.131
- (9) 住谷 寛ほか：再処理工場開発の現状-六ヶ所再処理工場施設の概要と安全性を探る-、原子力工業、38（10）、p.10～32（1992）
- (10) 資源エネルギー庁公益事業部原子力発電課（編）：原子力発電便覧1999年版、電力新報社

(1999年10月)、p.181～183

(11) Proceedings of 5th International Nuclear Conference on Recycling, Conditioning and Disposal, (RECOD 98), 1998, in Nice, France, p.19～26, p.27～33

(12) Nuclear Energy Data 2008, OECD/NEA, Table 8.2 Spent Fuel Arisings

(13) Nuclear Power Reactors in the World, 2009 Edition, IAEA, p.12

表1 世界各国における再処理施設一覧

国名	工場名	設置者	所在地	処理能力	操業開始 ()は着工	備考
アメリカ	ニュークリア・フューエル・サーヴィシズ・プラント	ニュークリア・フューエル・サーヴィシズ (NFS) 社	ウェストバレー・ニューヨーク州	濃縮ウラン 300tU/年	1966 (1963)	1972年運転中止 拡張改良工事のため許可申請を行っていたが、 1976年断念し、閉鎖
	ミッドウエスト・フューエル・リカバリー・プラント	ゼネラル・エレクトリック(GE)社	モーリス・イリノイ州	" 300tU/年	(1968)	1974年技術的理由により断念。以降、燃料貯蔵 施設として使用中
	バーンウェル・ニュークリア・フューエル・プラント	アライド・ゼネラル・ニュークリア・サーヴィシズ(AGNS)社	バーンウェル・サウスカロライナ州	" 1,500tU/年	(1971)	1976年にほぼ建設完了したが、核不拡散政策により事業中止。1983年封鎖
イギリス	B204	英国原子燃料会社(BNFL)	セラフィールド	天然ウラン 500tU/年	1952	1964年閉鎖
	B205	"	"	" 1,500HM/年	1964	操業中
	前処理施設(HEP) - B205	"	"	濃縮ウラン 400tU/年	1969	1973年閉鎖、前処理施設はB204を改造したもの
	THORP	"	"	" 850tU/年	1994	操業中、海外顧客LWR燃料用、AGR燃料用
	MTRプラント	英国原子力公社(UKAEA)	ドーンレイ	MTR燃料 0.1tU/年	1958	MTR燃料用、1996年閉鎖
	DFRプラント	"	"	高速炉燃料 10tU/年	1960	1975年に停止、PFR用へ改造
	PFRプラント	"	"	" 6tU/年	1981	1998年閉鎖
フランス	UP1	フランス核燃料会社(COGEMA)	マルクール	天然ウラン 400tU/年	1958	1997年9月運転終了
	UP2	"	ラ・アーグ	" 800tU/年	1966	1987年1月停止、天然ウラン用前処理施設を閉鎖
	UP2-400 (UP2-HA0)	"	"	濃縮ウラン 400tU/年	1976	UP2-800に移行
	UP2-800	アレバNC	"	" 800tU/年	1994	運転中、UP2-400の前処理施設等を増強 MOX燃料、高燃焼度燃料も処理を予定
	UP3	"	"	" 800tU/年	1989	1989年11月一部運開、1990年8月全面運開 海外顧客用
	AT1	フランス原子力庁(CEA)	"	高速炉燃料 1kg/日	1969	1979年閉鎖
	APM(TOP)	"	マルクール	" 10~20kg/日	1974	1983年停止、APM(TOR)へ改造
	APM(TOR)	"	"	" 5tU/年	1988	1997年6月運転終了
ドイツ	WAK	DWK	カールスルーエ	濃縮ウラン 35tU/年	1971	1990年末に運転終了
	WA-350	"	バッカーズドルフ	" 350~500tU/年	-	1989年に建設中止
ベルギー	ユーロケミック・プラント	ベルゴプロセス	モル	天然ウラン 400kg/日 濃縮ウラン 250kg/日	1966	1974年に停止、1987年閉鎖を決定
日本	東海再処理施設	日本原子力研究開発機構	茨城県東海村	濃縮ウラン 0.7 t/日	1981	操業中
	六ヶ所再処理工場	日本原燃(株)	青森県六ヶ所村	" 800tU/年	2010(予定)	建設中
ロシア	RT-1	国家会社「ロスアトム」 (生産合同マヤク)	チェリャビンスク州オゼ ルスク	濃縮ウラン 400tU/年 (実質250)	1971	運転中(VVER-440用、NB-600、研究炉、 原子力砕氷船用炉)
	RT-2	" (鉾山化学コンビナート)	クラスノヤルスク州ゼレ ズノゴルスク	" 1,000~1,500 tU/年	未定	建設中断(VVER-1000用) 1984年着工も、ソ連崩壊後の経済危機で中断
インド	トロンベイ再処理工場	バーバ原子力センター	トロンベイ	加圧重水型原子炉用燃料 30tU/年	1964	操業中
	タラプール再処理工場	"	タラプール	酸化ウラン 150tHM/年	-	操業中
	カルパッカム再処理工場	"	カルパッカム	加圧重水型原子炉用燃料 100tU/年	1998	操業中

[出典] (社)日本原子力産業会議(編):原子力ポケットブック2009年版(2009年8月)、p.245,246 (一部修正)

表2 世界(OECD諸国)の使用済燃料発生量の推移

(単位 発生量:tHM/年 貯蔵中:tHM積算)

国 名	2006		2007		2010		2015		2020	
	発生量	貯蔵中(a)	発生量	貯蔵中(a)	発生量	貯蔵中(a)	発生量	貯蔵中(a)	発生量	貯蔵中(a)
OECD(米州)	3,809	95,739	3,714	99,353	3,643	111,237	3,816	129,397	3,723	149,145
カナダ	1,587	36,912	1,571	38,483	1,589	43,250	1,589	51,195	1,696	59,675
メキシコ	22	427	43 (b)	470 (b)	54	587	27	802	27	1,070
米国 (c)	2,200	58,400	2,100 (b)	60,400	2,000	67,400	2,200	77,400	2,000	88,400
OECD(欧州)	3,380	32,585	2,929	29,071	3,649					
ベルギー	134	2,478	96	2,573	120	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
チェコ	69	1,033	105 (d)	1,138	134	1,400	70	1,774	70	2,124
フィンランド	63	1,515	64	1,579	61	1,768	93	2,201	93	2,666
フランス	1,100	10,100 (b)	1,100	10,200 (b)	1,100	10,700	1,108	11,500	828	12,000
ドイツ (e)	360	5,060	360	5,420	600	6,750	400	9,000	200	10,000
ハンガリー	44	1,138	47	1,185	47	1,326	47	1,561	47	1,796
オランダ	12	485	12 (e)	497 (e)	12	533	12	593	12	653
スロバキア	51	1,131	49	1,180	77	1,419	61	1,672	60	1,974
スペイン	128	3,497	207	3,721	138	4,140	187	4,959	101	5,621
スウェーデン	310	4,598	N/A	N/A	215	N/A	215	N/A	215	N/A
スイス	68	924	63	987	56	1,056	56	1,444	50	1,749
英国	1,042	389	826	361	1,089	>372	1,039	>516	94	>624
OECD(アジア)	1,520	20,144	1,490	21,804	1,579-1,679	24,589-24,889	1,857-1,957	29,443-30,243	2,061-2,161	35,550-36,850
日本	810	11,884	740 (b)	12,384 (b)	900-1,000	13,131-13,431	1,100-1,200	14,200-15,000	1,200-1,300	16,000-17,300
韓国 (f)	710	8,260	750	9,420	679	11,458	757	15,243	861	19,550
合計	8,709	148,468	8,133	150,228						

(a) サイト貯蔵とサイト外貯蔵の合計

(b) 暫定値

(c) 最新データは2002年12月末時点のRW-859核燃料データサーベイによるもの。2002年以降のデータはなく、予想値である。

(d) Temelin 1号機の初期炉心排出燃料の約1/3が再装荷されると仮定した。

(e) Nuclear Energy Data 2007年版のデータ

(f) 軽水炉と重水炉を含む

(g) 事務局推定値

[出典] Nuclear Energy Data 2008, OECD/NEA, Table 8.2 Spent Fuel Arisings

表3 世界における炉型別原子力発電所の稼働状況

(2008年12月末現在)

国 名	PWR		BWR		GCR		PHWR		LWGR		FBR		その他	
	基数	MWe	基数	MWe	基数	MWe	基数	MWe	基数	MWe	基数	MWe	基数	MWe
アルゼンチン							2	935					2	935
アルメニア	1	376											1	376
ベルギー	7	5824											7	5824
ブラジル	2	1766											2	1766
ブルガリア	2	1906											2	1906
カナダ							18	12577					18	12577
中国	9	7138					2	1300					11	8438
チェコ	6	3634											6	3634
フィンランド	2	976	2	1720									4	2696
フランス	58	63130									1	130	59	63260
ドイツ	11	14013	6	6457									17	20470
ハンガリー	4	1859											4	1859
インド			2	300			15	3482					17	3782
日本	23	18420	32	28858									55	47278
韓国	16	14925					4	2722					20	17647
リトアニア									1	1185			1	1185
メキシコ			2	1300									2	1300
オランダ	1	482											1	482
パキスタン	1	300					1	125					2	425
ルーマニア							2	1300					2	1300
ロシア	15	10964							15	10219	1	560	31	21743
スロバキア	4	1711											4	1711
スロベニア	1	666											1	666
南アフリカ	2	1800											2	1800
スペイン	6	5940	2	1510									8	7450
スウェーデン	3	2787	7	6209									10	8996
スイス	3	1700	2	1520									5	3220
英国	1	1188			18	8909							19	10097
ウクライナ	15	13107											15	13107
米国	69	66739	35	33944									104	100683
合 計	264	243159	94	84959	18	8909	44	22441	16	11404	2	690	438	371562

※ 合計には、台湾の6基、4949MW(e)を含む

【出典】 IAEA, Nuclear Power Reactors in the World, 2009 Edition, IAEA

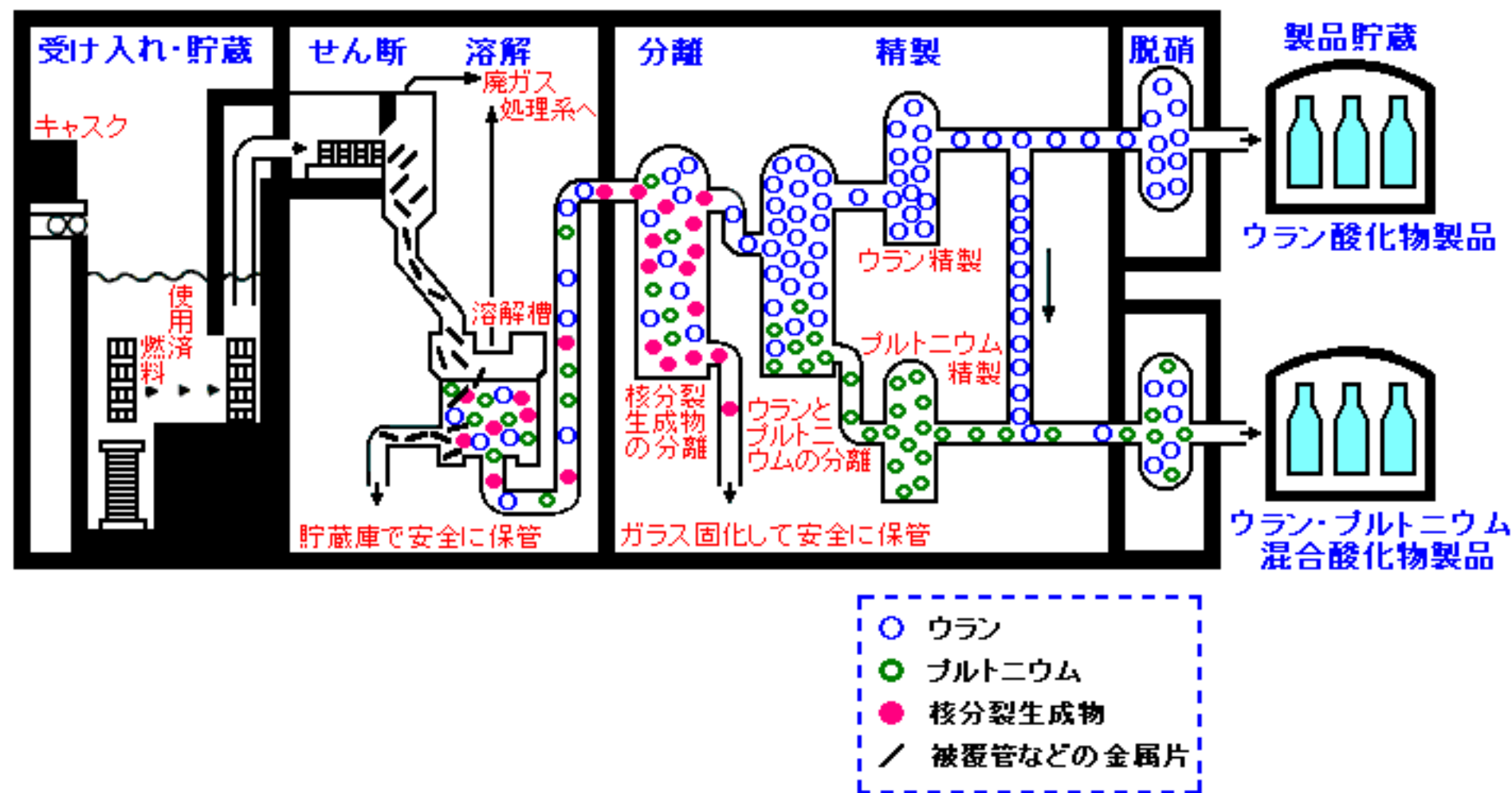


図1 再処理の主要工程

[出典] 通商産業省 資源エネルギー庁 公益事業部原子力発電課(編):原子力発電便覧1999年版、電力新報社(1999年10月)、p.182