

核兵器利用可能物質の製造技術と民生用技術

日本安全保障貿易学会第8回研究大会

2009.3.21 京都大学

日本原子力研究開発機構
核不拡散科学技術センター
技術開発支援室

堀 雅 人

核兵器利用可能物質

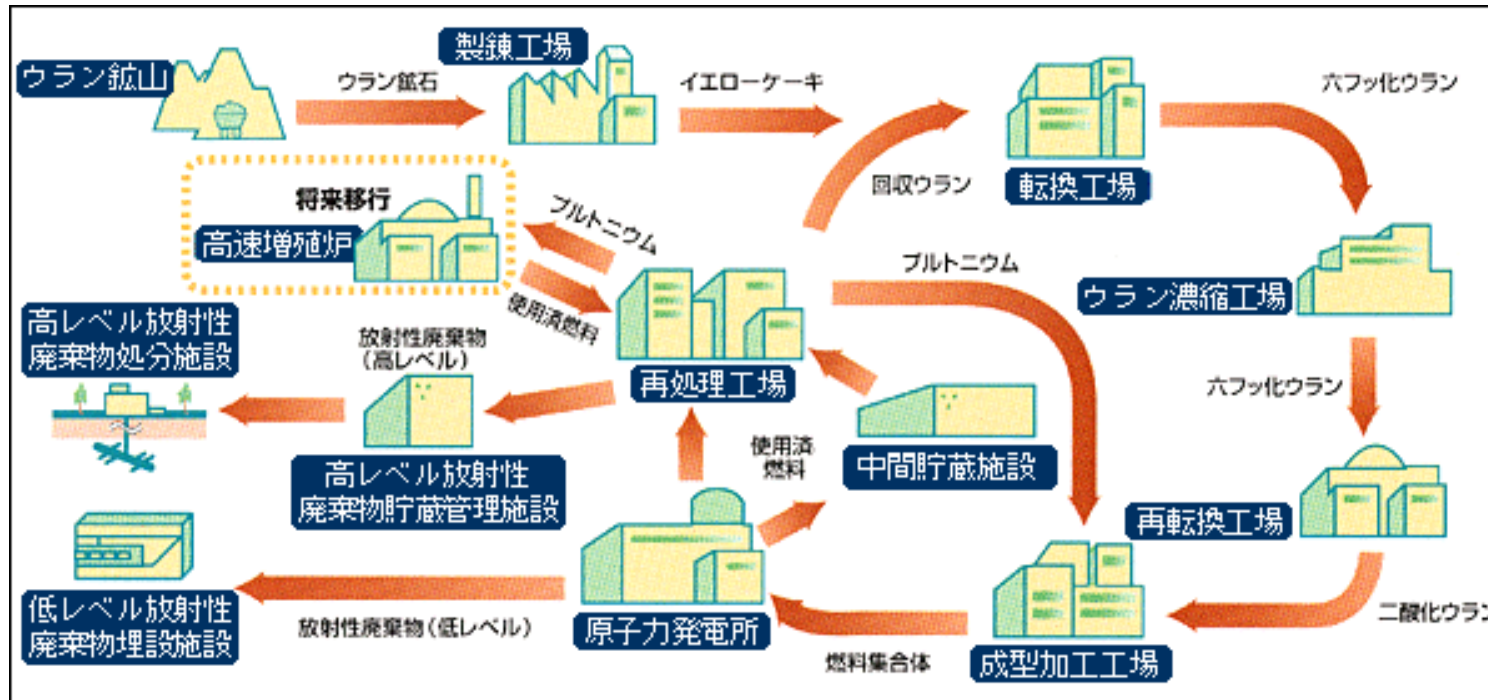
IAEA憲章第20条等に定める、特殊核分裂性物質。

- プルトニウム
- ウラン233
- 高濃縮ウラン

IAEA憲章第20条

「特殊核分裂性物質」とは、プルトニウム239、ウラン233、同位元素ウラン235または233の濃縮ウラン、およびこれらの一または二以上を含有している物質で「原料物質」を除いたものとしている(ただし、理事会が決定すれば、その他の核分裂性物質も含まれることになっている)。これらの中には低濃縮ウラン(濃縮度が20%未満で天然ウラン以上のもの)、高濃縮ウラン(濃縮度が20%以上)、混合酸化物(ウラン酸化物とプルトニウム酸化物の混合物)などが含まれる。

平和利用の核燃料サイクル



ウランは、ウラン鉱石の採鉱から、製錬、転換、濃縮、再転換という工程を経て、最終的に成型加工工場で燃料集合体に加工され、原子力発電所で3～4年程度使用されます。

原子力発電所で使い終わった燃料(使用済燃料)は、原子力発電所内又は原子力発電所外の間蔵施設で一定期間貯蔵された後、再処理工場へ送られ、ここでウランやプルトニウムといった再利用できる物質を分離・回収します(*)。そして回収されたウランやプルトニウムを、再び燃料集合体に加工し、原子力発電所で利用します。

つまり、ウランやプルトニウムといった核燃料が、再処理を行うことによって繰り返し使えるようになります。この一連の流れ(循環)のことを核燃料サイクルといい、核燃料を再利用(リサイクル)することによって、ウラン資源の有効利用を図ることができます。

ウラン濃縮手法

- (1) 遠心分離法
- (2) ガス拡散法
- (3) エアロダイナミクス法(ノズル法とも呼ばれている)
- (4) 電磁法(EMIS、カルトロン法とも呼ばれている)
- (5) 原子レーザー法(AVLIS)
- (6) 分子レーザー法(MLIS)
- (7) 化学法(イオン交換法を含む)
- (8) プラズマ法

商業的に実用化、または、兵器級ウランの製造に実際に用いられた手法は、上記の(1)~(4)その他の技術は、原理的に実証されていても、実験室レベルまたは工学規模レベルの研究にとどまっている。

上記以外に、熱拡散(thermal diffusion)、質量拡散(mass diffusion)法といった方法が知られている。

SILEX(レーザー励起による同位体の分離(Separation of Isotopes by Laser EXcitation))の開発も行われている。

ウラン濃縮手法の比較

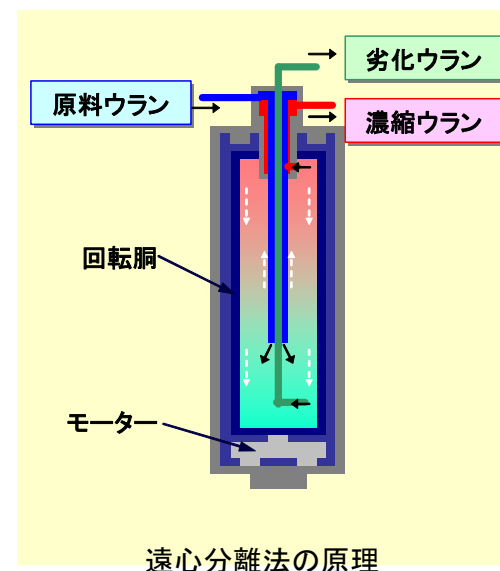
	遠心分離法	ガス拡散法	エアロダイナミクス法	電磁法
ウラン濃縮の原理	²³⁵ Uと ²³⁸ Uの質量差を利用し、高速回転体のなかで生じる遠心力及び重力を利用して濃縮。	質量差による運動速度の差を利用し、隔膜を通過する比率により濃縮。	質量差を利用し、湾曲壁で生じる遠心力により濃縮。	質量差を利用し、高電圧場における湾曲軌道の違いにより濃縮。
原料・製品物質	UF ₆ 、UF ₆	UF ₆ 、UF ₆	UF ₆ 、UF ₆	UCl ₄ 、U化合物
分離係数	1.1～1.5	1.003～1.005	1.01～1.02	5～10
商業運転に必要な段数	8～30	500～1000	100～300	1～2
消費電力 (kWh/kgSWU)	100～400	2,000～3,000	3,000～4,000	10,000
開発の現状	商業規模運転： ロシア、URENCO、日本、中国 準商業規模技術： 米国、パキスタン、ブラジル、イラン、インド 開発を放棄：イラク、リビア	商業規模運転： 米国、英国、ロシア、中国、フランス 準商業規模技術： アルゼンチン 開発を放棄：イラク	準商業規模技術： ドイツ、ブラジル 開発を放棄： 南ア(過去に兵器級ウランを製造)	HEU製造レベル技術： 米国、ロシア、フランス、中国、イスラエル、英国 実験規模技術：イラン 開発を放棄：イラク
兵器級ウランの濃縮に必要な供給回数	3～5	3～5	3～5	2～3
兵器級ウラン製造に必要な原料ウラン(tU)	10	>15	>12	<10
核不拡散上の特徴	短時間で、兵器級ウランの濃縮が可能。遠心分離機的设计・製造技術が流出。	平衡到達時間が長く、工程内在庫も大。大規模施設が必要。幅広く技術が公開。	平衡到達時間が長い。大規模施設が必要。幅広く技術が公開。	大型の電源設備、電子部品等の調達が必要。少ない段数で兵器級ウランが得られる。

遠心分離法の原理

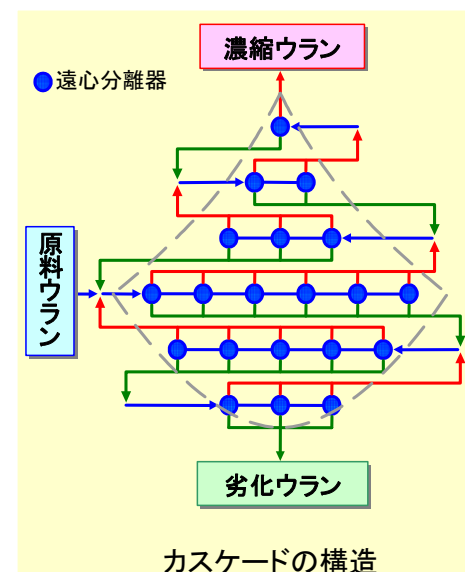
遠心分離法は、高速回転体のなかで生じる遠心力及び重力を利用した同位体分離を行う手法である。

原料 UF_6 ガスは、遠心分離機のなかの縦方向に設置された回転胴の中心近くの軸に沿った1つの点に供給される。回転胴の中で、 $^{238}UF_6$ ガスに比べて $^{235}UF_6$ に対しては僅かに異なった圧力がかかる。温度の違いや、内部摩擦を利用することによって、回転胴内でガスの循環が引き起こされる。 UF_6 ガスは、回転胴壁付近で軸に平行な1つの方向に動き、中央軸付近で逆の方向に動く。これら2つの流の間で、ウラン同位体の濃縮度の勾配が確立される。最大の濃縮度の勾配は、回転胴の両端で生じ、そこから濃縮された UF_6 ガスと劣化された UF_6 ガスを、スクープによって取出す。

1台の遠心分離機の処理量が小さいため、遠心分離機を直列及び並列に、相互に結合したカスケードを形成。通常、一つのカスケードは、数百台または数千台の遠心分離機で構成される。



遠心分離法の原理



カスケードの構造

遠心分離法の主要機器

- 遠心分離機 (gas centrifuge)

1台の遠心分離機の分離能力は、その遠心分離機の高さ、その周速度の2乗の関数に近い。

遠心分離機は、通常、真空環境におかれ、300m/秒またはそれ以上の速度(音速以上)で回転する回転胴で構成されている。このスピードを達成するために、回転要素部品の構成材は密度比に対して高張度である必要がある。

スクープ(scoops)、回転胴(rotor)、リング(rings)、ベローズ(bellows)、調節板(baffles)及びエンド・キャップ(end-cap)、モーター(motor stators)、ハウジング(housings)、ヘッダ配管システム(machine header pipings system)

- 原料供給、製品及び劣化ウラン回収システム(Feed systems/product and tails withdrawal systems)
- 周波数変換器(Frequency changers)
- UF6質量分析装置・イオン源(UF6 mass spectrometers/ion sources)



遠心分離機のカスケード
(URENCO)

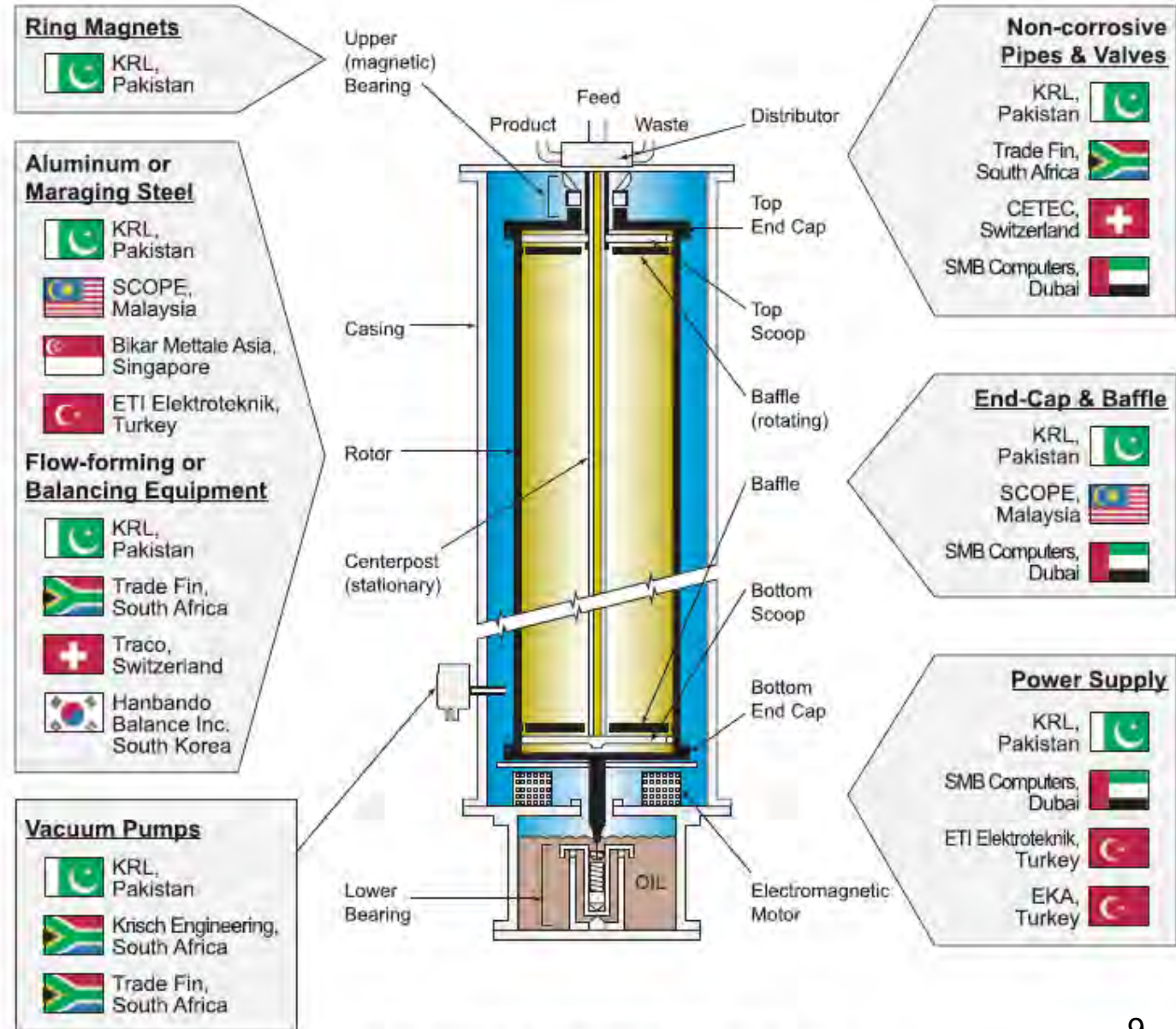


イラクで押収されたスクープ等

遠心分離機の部品調達

リビアの遠心法
機器の調達先及
び調達予定先補
して報告されてい
る企業

Center for
Nonproliferation
Studiesホーム
ページより



Source: Center for Nonproliferation Studies, January 2005

保障措置の適用されているウラン濃縮施設

(Table A28. Facilities under Agency Safeguards or Containing Safeguarded Material on 31 December 2007, IAEA)

Enrichment plants

国	施設名	場所
Argentina	Uranium enrichment plant	Pilcaniyeu
Brazil	Isotopic enrichment laboratory	Iperó
	Laser spectroscopy laboratory	São José dos Campos
	U-235 centrifuge enrichment plant	Resende
	Uranium enrichment pilot plant	Iperó
China	Shaanxi uranium enrichment plant	Han Zhang
Germany	UTA-1	Gronau
Japan	Rokkasho enrichment and disposal office centrifuge test facility	Kitakami-gun, Aomori-ken
	Rokkasho uranium enrichment plant	Kamikita-gun, Aomori-ken
	Uranium enrichment plant	Tomata-gun, Okayama-ken
Iran	Fuel enrichment plant	Natanz
	Pilot fuel enrichment plant	Natanz
Netherlands	URENCO SP4, SP5	Almelo
United Kingdom	URENCO A3, E22 and E23	Capenhurst

ウラン濃縮に関する基本情報

分離作業量(SWU)

同位体を分離する際の仕事量の単位が「分離作業量(separative work unit: SWU)」である。これは濃縮に必要な仕事量を、同位体混合物の価値(価値関数)で表したものである。ウラン濃縮施設の分離作業量の単位としては、一般的にkgSWU/年、または、tSWU/年単位が用いられる。

例) 天然ウラン(0.711%)を濃縮し、3.5%の濃縮ウラン 1tUを得る場合、劣化ウラン濃縮度を0.25%とすると、必要な原料天然ウランは7.0tUであり、この場合の分離作業量は4.8tSWUである。

また、1000tSWU/年のウラン濃縮施設は、100万KW級の原子力発電所8から9基に必要な核燃料を供給する能力を持つ。

兵器級ウランを製造するために必要なSWU

核兵器1発を製造するのに合理的に必要な兵器級ウラン量を $25\text{kg}^{235}\text{U}$ (IAEA憲章に定められている有意量)とし、この量の93%以上の濃縮ウランを取得することを目標とする。

この場合に、理想的なカスケードを用いて、濃縮を行うと、必要な分離作業量は、概ね5.4tSWU。

兵器級ウラン $25\text{kg}^{235}\text{U}$ を得るために必要な天然ウランの量は、おおざっぱに計算して、5~10tU程度である。

イランのウラン濃縮 Natanz FEP

2007年2月 操業開始。

2009年2月 24カスケードへのUF6供給を確認(GOV/2008/59)

164 × 24 = 3,936台のP-1遠心機にUF6を供給

2008年11月までに、9,956kgUF6を供給し、
839kgUF6の製品を回収(濃縮度は3.49wt%)

2009年1月末までに更に171kgUF6を製造。

低濃縮ウランの製造量 1,010kgUF6

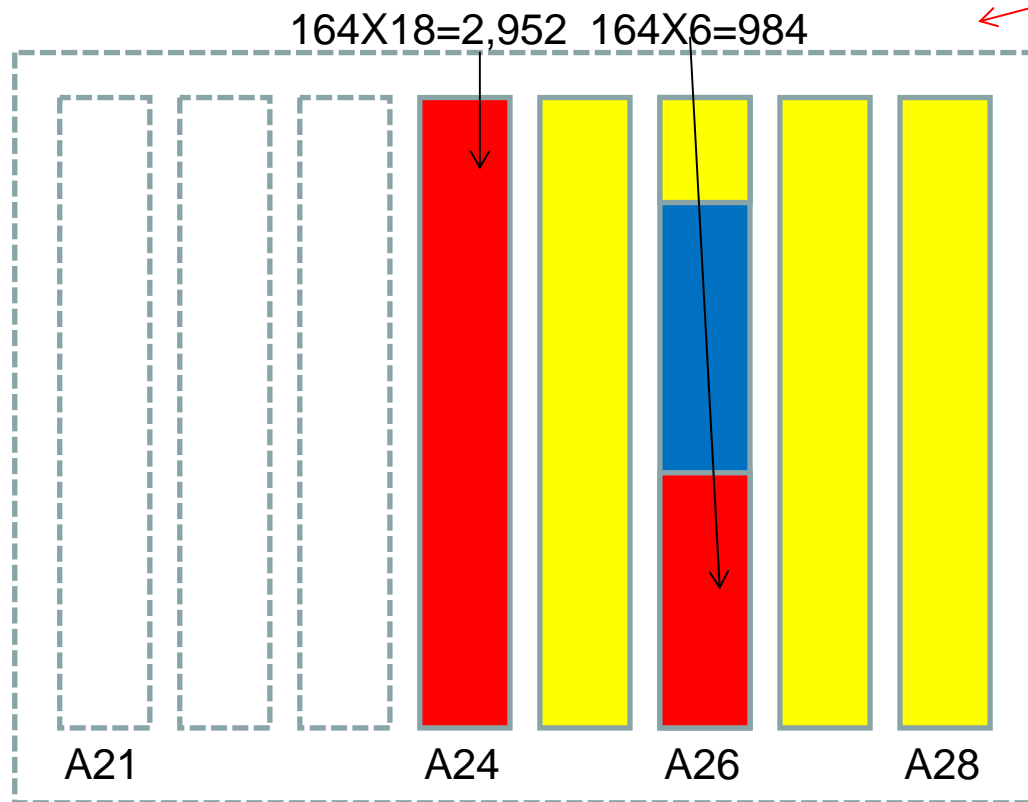


イランのウラン濃縮 Natanz FEP

- IAEA報告GOV/2009/8等によると、FEPには、2つのカスケードホール、Production Hall AとProduction Hall Bがあり、2009年2月1日現在、Hall Aの3,936機の遠心分離機がUF₆供給運転中



ISISホームページ



- UF₆供給運転中のカスケード
- 真空運転中のカスケード
- 設置作業中



イラン大統領府ホームページ



Production Hall A

P1 (IR-1) 型遠心機 の能力

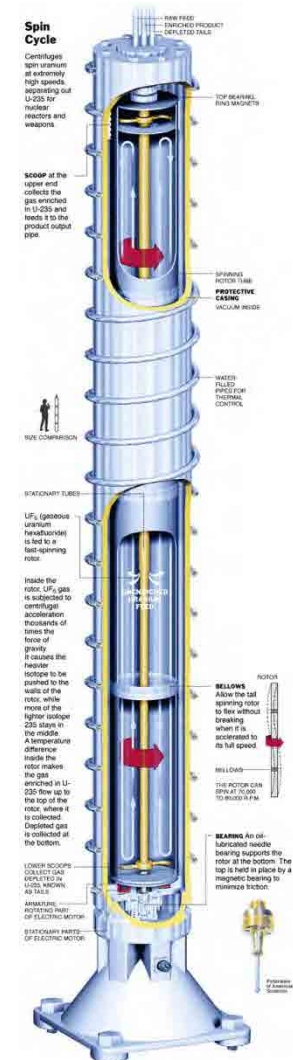
- URENCO の初期型遠心機
- 回転胴 : アルミニウム
- 分離能力 : 2-3kgSWU/y (各種報道)
- 高さ : 1.8m
- 周速 : 350m/s
- 回転速度 : 6500rpm (2006年4月のイラン国内ニュースにおける報道)



オークリッジ国立研究所に保管されているリビアで発見されたP1型遠心分離機



イラン大統領府ホームページ



New York times
March 23, 2004

Natanz FEPのウラン濃縮能力

- P1型遠心機2,952機のカスケードにおいて、遠心機の分離能力を2.7kgSWU/y、理想カスケードと仮定すると、約18カ月で93wt%の高濃縮ウラン25kgUの製造が可能。
- 2006年4月のイラン国内ニュースにおける報道(遠心分離機 164台、供給流量 70g/hr、製品量 7g/hr、製品濃縮度 3.5%)に基づく、カスケードの能力は以下のとおり。

廃品濃縮 0.401% (F・Nf = P・Np + W・Nwより計算)

上記の条件で、164台のカスケードの能力(ΔU)を逆算すると

$$\Delta U = 223 \text{kgSWU/y}$$

理想カスケードとして遠心分離機の分離作業量(δU)を計算すると

$$\delta U = 223/164 = 1.36 \text{kgSWU/y}$$

P1型の能力を2.7kgSWU/yとすると、効率は $1.36/2.7=50\%$

効率が50%の場合は、高濃縮ウラン25kgUの製造に約3年要する。

イラン新型遠心機の開発

2008年1月 4タイプの遠心機(2タイプのサブクリティカル、ベローズ付クリティカル、さらに新型)のR&Dに関する情報提供 (GOV/2008/4)。

IR-1、IR-2及びIR-3型遠心機の開発・試験を継続 (GOV/2009/8)



新型遠心機の開発

分離能力の向上

イランは、P1型遠心機の開発で培った技術を用いて、炭素繊維のサブクリティカル機、スーパークリティカル機の開発を進めているものと推測される。

URENCO等で開発されている、炭素繊維胴の遠心分離機の能力から推測すると、イランが、スーパークリティカル機を開発すると、P1型遠心機の2～10倍程度の分離能力を持つ可能性がある。



URENCO等の遠心分離機の能力(推測値)

P1(G1)	2-3kgSWU/y	URENCOの初期型(回転胴がアルミニウム)
P2(G2)	5kgSWU/y	URENCOの第2世代(回転胴はマレージング鋼)
TC-11	30kgSWU/y	URENCOの炭素繊維の回転胴タイプ
TC-12	40kgSWU/y	URENCO現行機
TC-21	100kgSWU/y?	URENCO次世代機(米、仏に導入予定)
American Centrifuge	300kgSWU/y	開発中

再処理技術 ピューレックス法

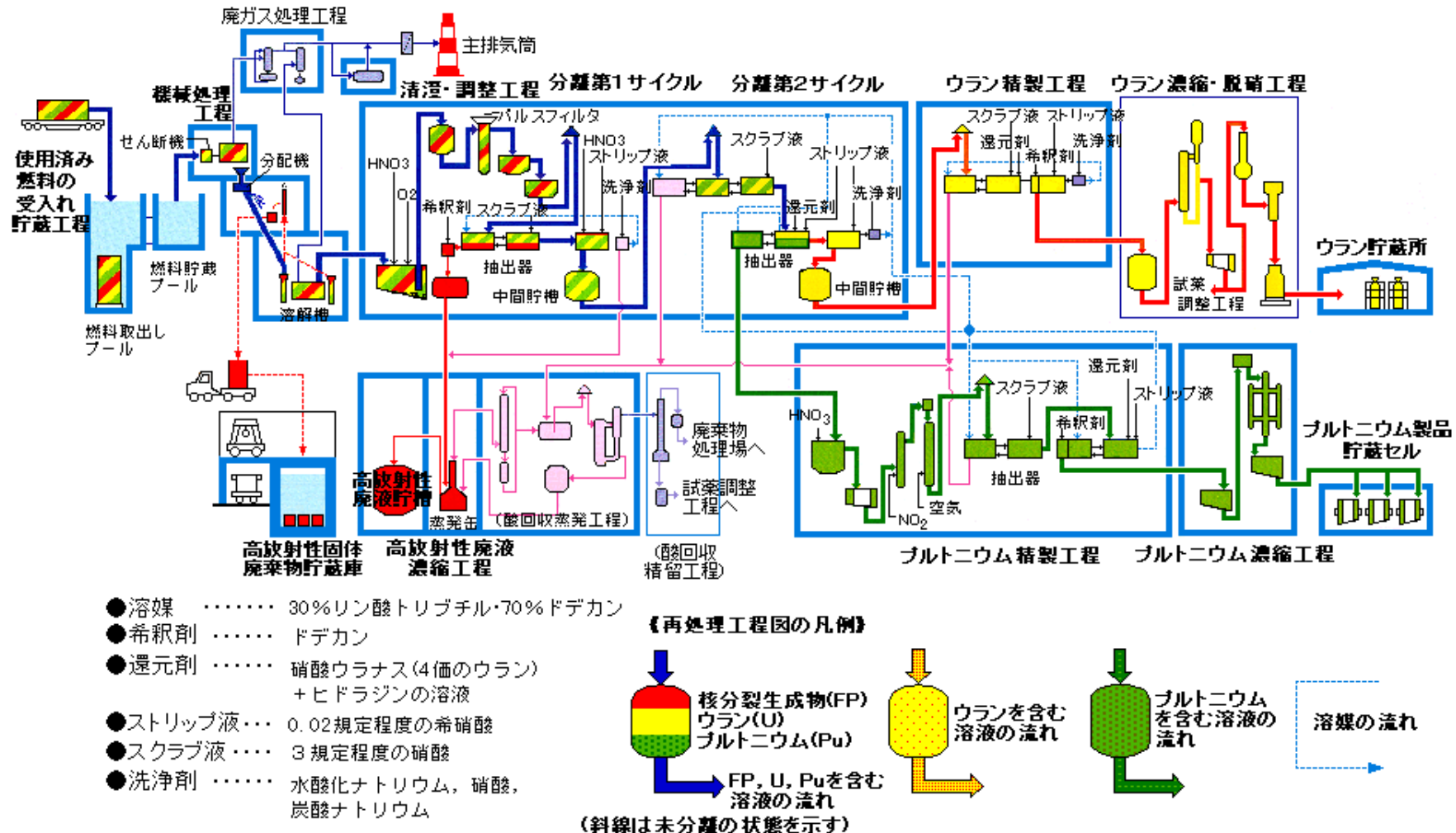


図2 PUREX法による再処理工程(東海再処理施設)

[出典] 動力炉・核燃料開発事業団：よみがえるエネルギー「使用済核燃料の再処理」(1994年11月) p. 4-5

再処理技術 剪断・溶解工程

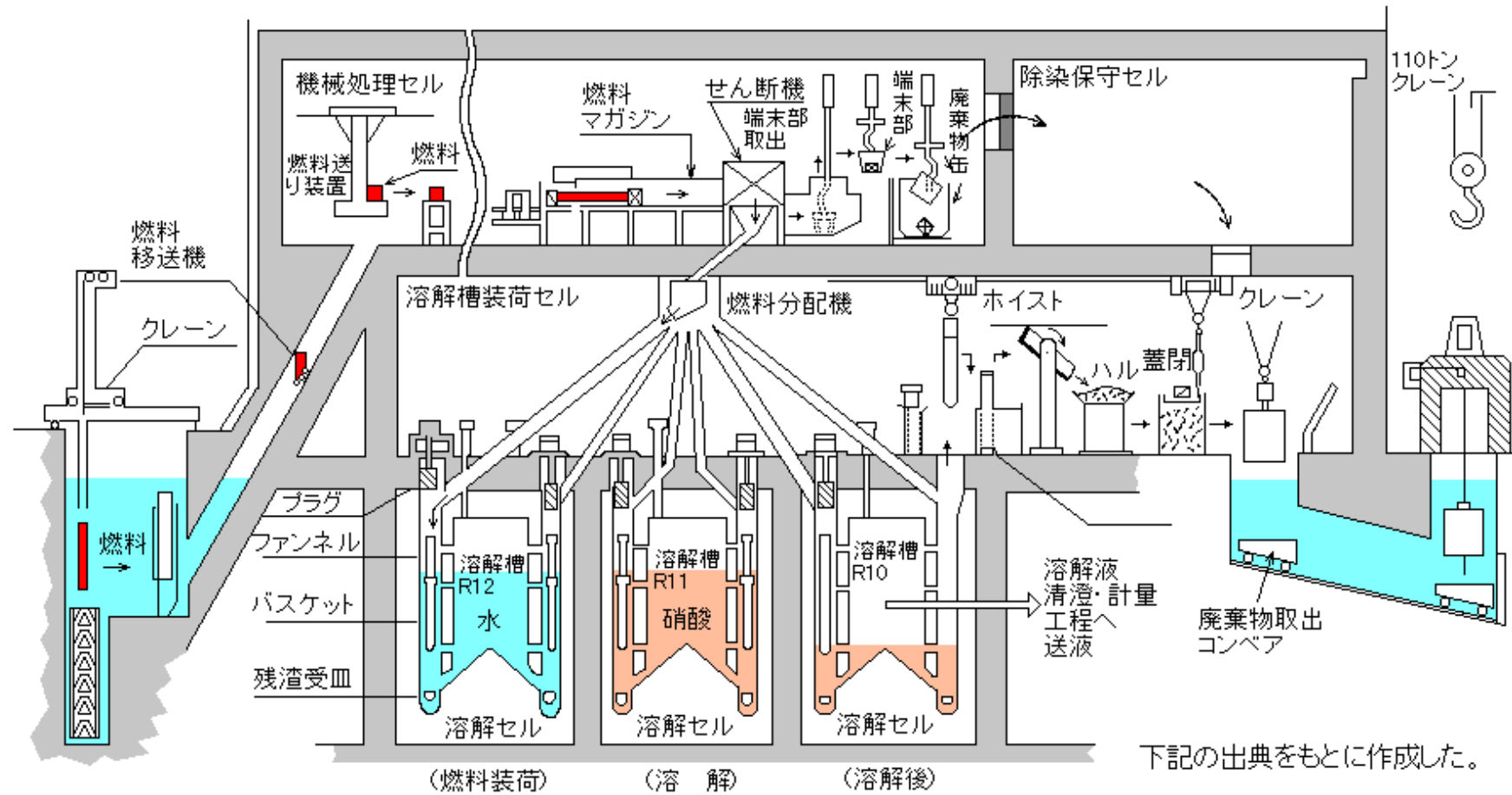


図3 東海再処理工場の前処理工程概要図

[出典] 動力炉・核燃料開発事業団: 動燃技報 No.55(1985.9)、p.13

再処理技術 分離・抽出工程

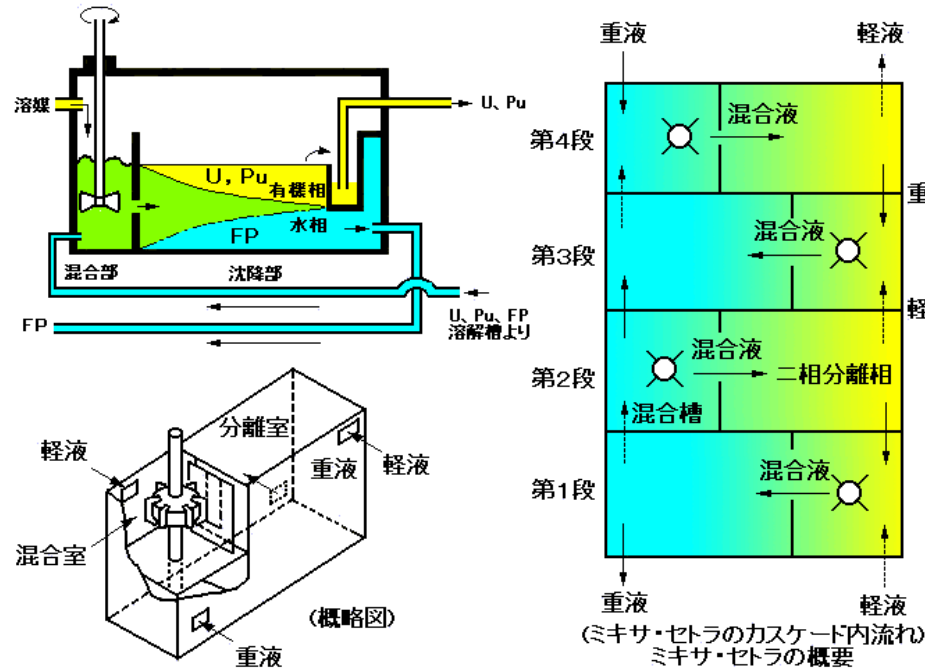
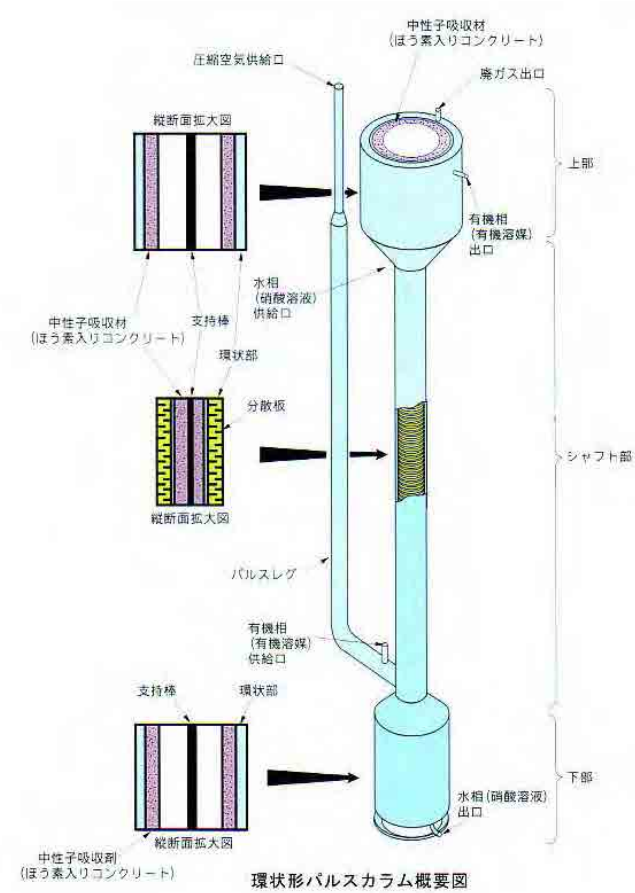


図3 ミキサセトラの概念図



小型のミキサセトラ (JAEA)

(上から見た図)



パルスカラムの概念図 (出典:六ヶ所再処理工場の概要)

再処理技術 試薬

薬品名	使用目的	入手の容易性
硝酸	燃料溶解、液性調整	易；アンモニアから合成可能
水酸化ナトリウム	化学脱被覆、槽類換気系洗浄液	易；食塩の電解により製造可能
炭酸ナトリウム	溶媒洗浄	易；自然界にも存在。入手は容易
TBP	ウラン及びプルトニウム抽出	難；
ケロシン	TBPの希釈、硝酸からのTBP除去	易；灯油レベルのもので十分
水和ヒドラジン	Pu還元剤の安定化	易；尿素法等によりおそらく製造可能
硝酸ナトリウム	化学脱被覆	易；硝酸と水酸化ナトリウムより生成
スルファミン酸鉄（Ⅱ）	Pu還元剤	易；一般工業界で使用。おそらく製造可能。
シュウ酸	Pu沈殿回収	易；植物に含まれる。おそらく製造可能
亜硝酸ナトリウム	Pu酸化剤	易；製造可能

東海再処理工場実績

保障措置の適用されている再処理施設

(Table A28. Facilities under Agency Safeguards or Containing Safeguarded Material on 31 December 2007, IAEA)

Reprocessing plants

国	施設名	場所
Germany	WAK	Eggenstein-Leopoldshafen
India	PREFRE	Tarapur
Italy	Eurex ITREC	Saluggia Rotondella
Japan	Chemical processing facility Rokkasho reprocessing plant Solution critical facility of NUCEF Tokai reprocessing plant	Tokai-mura, Ibaraki-ken Kamikita-gun, Aomori-ken Tokai-mura, Ibaraki-ken Tokai-mura, Ibaraki-ken

Other Facilities

Argentina	Radiochemical facility laboratory	Ezeiza
Brazil	Reprocessing project	São Paulo
ROK	Advanced spent fuel conditioning process demonstration facility	Taejon

大学・研究機関における安全保障貿易管理に関連する原子力研究

輸出令別表第1の中欄に掲げる貨物		キーワード	論文ヒット数
(1)	核燃料物質又は核原料物質	plutonium OR uranium	2,333
(2)	原子炉若しくはその部分品若しくは附属装置又は原子炉用に設計した発電若しくは推進のための装置	nuclear reactor	124
(5)	放射線を照射した核燃料物質若しくは核原料物質の分離用若しくは再生用に設計した装置又はその部分品若しくは制御装置	mixer settler OR pulsed column OR centrifugal contactor	34
(6)	リチウムの同位元素の分離用の装置又は核燃料物質の成型加工用の装置	lithium AND Isotope separation AND NOT laser	26
(7)	ウランの同位元素の分離用の装置若しくはその附属装置又はこれらの部分品	gas centrifuge, separation nozzle	4
(10)	重水素若しくは重水素化合物の製造に用いられる装置又はその部分品若しくは附属装置	(tritium OR hydrogen) AND isotope separation NOT laser	67
(10の2)	三酸化ウラン、六ふっ化ウラン・・・若しくは金属プルトニウムの製造用の装置若しくはその附属装置又はこれらの部分品	flow forming AND gas centrifuge	37
(23)	ハフニウム若しくはハフニウム合金の地金若しくはくず若しくはハフニウム化合物又はこれらの半製品若しくは一次製品	hafnium metal OR hafnium alloy	3
(31)	ウランの同位元素の分離に用いられるガスレーザー発振器、固体レーザー発振器又は色素レーザー発振器	(pulsed carbon dioxide laser OR alexandrite laser OR turnable pulsed single-mode dye laser) AND uranium AND isotope separation	69
		(copper vapor laser OR argon ion laser OR neodymium-doped laser) AND uranium AND isotope separation	7
(35)	ウランの同位元素の分離用の装置に用いられる真空ポンプ	vacuum pump AND UF6	6
(37)	電子加速器又はフラッシュ放電型	electron accelerator AND X ray	6
(39)	機械式若しくは電子式のストリークカメラ若しくはフレーミングカメラ又はこれらの部分品	electronic streak camera OR electronic framing camera	3
(40)	流体の速度を測定するための干渉計、マンガニンを用いた圧力測定器又は水晶圧電型圧力センサを用いた圧力変換器	(Manganin AND pressure sensor) OR (interferometer AND fluid velocimetry) OR (crystal pressure sensor AND pressure transducer)	7
(41)	核兵器の起爆又はその試験に用いられる貨物であつて、次に掲げるもの 1 三個以上の電極を有する冷陰極管・・・6 キセノンせん光ランプの発光装置	nuclear AND trigger AND pulse	3
(44)	放射線被ばくの防止のために用いられる遠隔操作のマニピュレーター	photoelectron multiplier AND proton pulse	1
(45)	放射線を遮へいするように設計した窓又はその窓枠	radiation shield AND window	2
(46)	放射線による影響を防止するように設計したテレビカメラ又はそのレンズ	radiation hardness AND camera	3
(48)	トリチウムの製造、回収又は貯蔵に用いられる装置	tritium production OR production of tritium	60

論文検索「ISI Web on Science」を用いて、上記キーワードで、2003～2007年の国内の大学・研究機関の論文を検索。