



## 核燃料サイクル工学概論

Outline of the Nuclear Fuel Cycle

小島 久雄

Hisao OJIMA

東海研究開発センター  
核燃料サイクル工学研究所

Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories  
Tokai Research and Development Center

July 2008

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

## 核燃料サイクル工学概論

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター 核燃料サイクル工学研究所  
小島 久雄

(2008年3月14日 受理)

採掘されたウラン鉱石は、精錬工程により不純物が除去され、ウラン含有率を 60% 程度に高めたイエローケーキとなる。その後、転換工程にて、ウラン濃縮の原料である  $UF_6$  となる。

ウラン濃縮工程では、 $^{235}U$  の割合が高められ、その後、 $UO_2$  に再転換し、ペレット状に成型・加工され核燃料となり、原子力発電所で使用されることとなる。ウラン濃縮法には幾つかの方法があるが、世界的に遠心分離法が主流となっている。

核燃料サイクルとは、原子力発電所からの使用済燃料を再処理し、ウラン、プルトニウムを回収して、燃料として再び使用する一連の流れである。再処理の方法としては、TBP を抽出溶媒とするピュレックス (PUREX) 法が主流である。我が国においては、東海再処理工場の経験を経て、民間の六ヶ所再処理工場が 2008 年の本格操業開始を目指し、試験運転を進めている。再処理の各工程には、前処理工程として、せん断工程、溶解工程、清澄工程があり、また、化学処理工程として、溶媒抽出工程、濃縮・脱硝・混合転換工程がある。その他、硝酸・溶媒のリサイクル利用に関する工程、ガラス固化工程などがある。

高速増殖炉燃料の再処理は基本的に PUREX 法により可能であるが、高いプルトニウム含有率、高い燃焼度および集合体構造の違いなどを考慮した改良が必要となる。さらに一層の経済性向上や廃棄物負担の軽減を目指した新しい技術の採用が検討されている。

保障措置とは、核燃料物質が核兵器に転用されるのを防ぐための活動である。

## Outline of the Nuclear Fuel Cycle

Hisao OJIMA

Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories, Tokai Research and Development Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 14, 2008)

A “yellow cake”, in which the uranium content is about 60%, is obtained from uranium ores by means of chemical refining. Then the yellow cake is converted into  $UF_6$  that is the raw materials of uranium enrichment. The centrifuge is the most popular method for the uranium enrichment in the world. The enriched uranium is used in the LWR plant as  $UO_2$  pellet form.

The uranium and plutonium are recovered from the spent fuel in the reprocessing plant and they are going to be used as nuclear fuel again. Currently, in the world, all reprocessing plants under commercial operation adopt the PUREX process using TBP as extractant. The preprocessing process consists of a mechanical head-end process (such as a shearing process), a dissolution process, a clarification process, a solvent extraction process, and so on. The nitric acid and the solvent (mix of TBP and n-dodecane as diluent) are recycled in the plant and high level liquid waste is finally vitrified into glass form. In Japan, through the experience of the Tokai Reprocessing Plant, the first commercial plant, i.e. the Rokkasho Reprocessing Plant, will start its operation soon.

The spent fuel from FBR can be reprocessed by the PUREX process taking into account of its characteristics such as high plutonium content rate, high burn-up, and the structure of fuel assembly. Currently, the adoption of an innovative technology is examined aiming for further economy improvement and the reduction of the waste load.

The safeguards is the activity to prevent the diversion of nuclear material.

Keywords: Nuclear Fuel Cycle, Mining, Refinement, Conversion, Enrichment, Reprocessing, Safeguards

目 次

1. 採鉱・採鉱	1
2. 製錬・転換	2
3. ウラン濃縮	3
3.1 同位体分離	3
3.2 ウラン濃縮の原料	3
3.3 ウラン濃縮法	4
3.4 濃縮ウランの再転換	7
4. 再処理	8
4.1 再処理技術の歴史	8
4.2 PUREX 法再処理工場の概要	9
4.2.1 前処理工程	9
4.2.2 化学処理工程	12
4.2.3 廃液・廃溶媒の処理	16
4.2.4 材料	17
4.2.5 保守	20
4.3 MOX 燃料の再処理	21
4.3.1 プルサーマル燃料の再処理	21
4.3.2 高速増殖炉燃料の再処理	21
4.3.3 超ウラン元素 (TRU) のリサイクル	22
4.4 保障措置	24
4.4.1 IAEA による保障措置	24
4.4.2 東海再処理工場における保障措置	25
4.4.3 査察と検認	27

Contents

1. Prospecting and mining .....	1
2. Refining and conversion .....	2
3. Uranium enrichment .....	3
3.1 Isotope separation .....	3
3.2 Material of uranium enrichment .....	3
3.3 Uranium enrichment method .....	4
3.4 Re-conversion of enriched uranium .....	7
4. Reprocessing .....	8
4.1 History of reprocessing technology .....	8
4.2 Outline of reprocessing plant by PUREX .....	9
4.2.1 Head-end process .....	9
4.2.2 Chemical process .....	12
4.2.3 Processing of liquid and solvent waste .....	16
4.2.4 Materials .....	17
4.2.5 Maintenance .....	20
4.3 Reprocessing of mixed oxide fuel .....	21
4.3.1 Reprocess of LWR-MOX fuel .....	21
4.3.2 Reprocessing of FBR fuel .....	21
4.3.3 Recycling of TRU elements .....	22
4.4 Safeguards .....	24
4.4.1 Safeguards by IAEA .....	24
4.4.2 Safeguards in Tokai reprocessing plant .....	25
4.4.3 Inspection and verification .....	27

表リスト

Table 3.1	各種ウラン濃縮法の比較	6
Table 4.1	主な装置材料及び運転条件	19
Table 4.2	高速増殖炉照射済燃料と軽水炉照射済燃料の主な比較	22
Table 4.3	計量管理に関する術語	27

図リスト

Fig.1.1	インプレースリーチング法概念図	1
Fig.2.1	製錬・転換フローシート	2
Fig.3.1	カスケード	4
Fig.3.2	遠心分離機内外での混合気体の流れ	5
Fig.3.3	ADU 法による再転換工程	7
Fig.4.1	ピュレック法の主要工程（東海再処理工場の工程例）	8
Fig.4.2	せん断機概要図	9
Fig.4.3	回分式溶解槽概略図	10
Fig.4.4	パルスフィルター概念図	11
Fig.4.5	遠心清澄機概要図	11
Fig.4.6	抽出器の基本フロー	12
Fig.4.7	ミキサ・セトラ概要図	13
Fig.4.8	パルスカラム概略図	13
Fig.4.9	遠心抽出器の概念図	14
Fig.4.10	ガラス熔融炉	16
Fig.4.11	耐硝酸性が要求される主要機器と材料の開発推移	18
Fig.4.12	遠隔保守の概要図	20
Fig.4.13	FBR再処理用連続溶解槽	23
Fig.4.14	日本の保障措置実施体制	24
Fig.4.15	東海再処理工場における物質収支区域の設定	26
Fig.4.16	原子燃料サイクル（FBR 含む）	28

This is a blank page.

1. 探鉱・採鉱

鉱石や鉱物が経済性をもって採掘可能なほど集まっている場所を鉱床という。ウランの探鉱においては他の有用金属の探鉱で用いられている方法に加え、ウランの娘核種であるラドンの放射能を測定する方法が用いられる。

ウランの採鉱にあたっては一般の安全確保に加え、従業員の放射線被ばくに留意しなければならない。

採鉱方法としては、坑内掘や露天掘が行われているが、鉱床内に孔を開け、直接、薄い酸やアルカリ等の浸出液を注入し、鉱石内のウランを浸出させ、ウランを回収するインプレースリーチング (Fig.1.1) という方法も試験された。

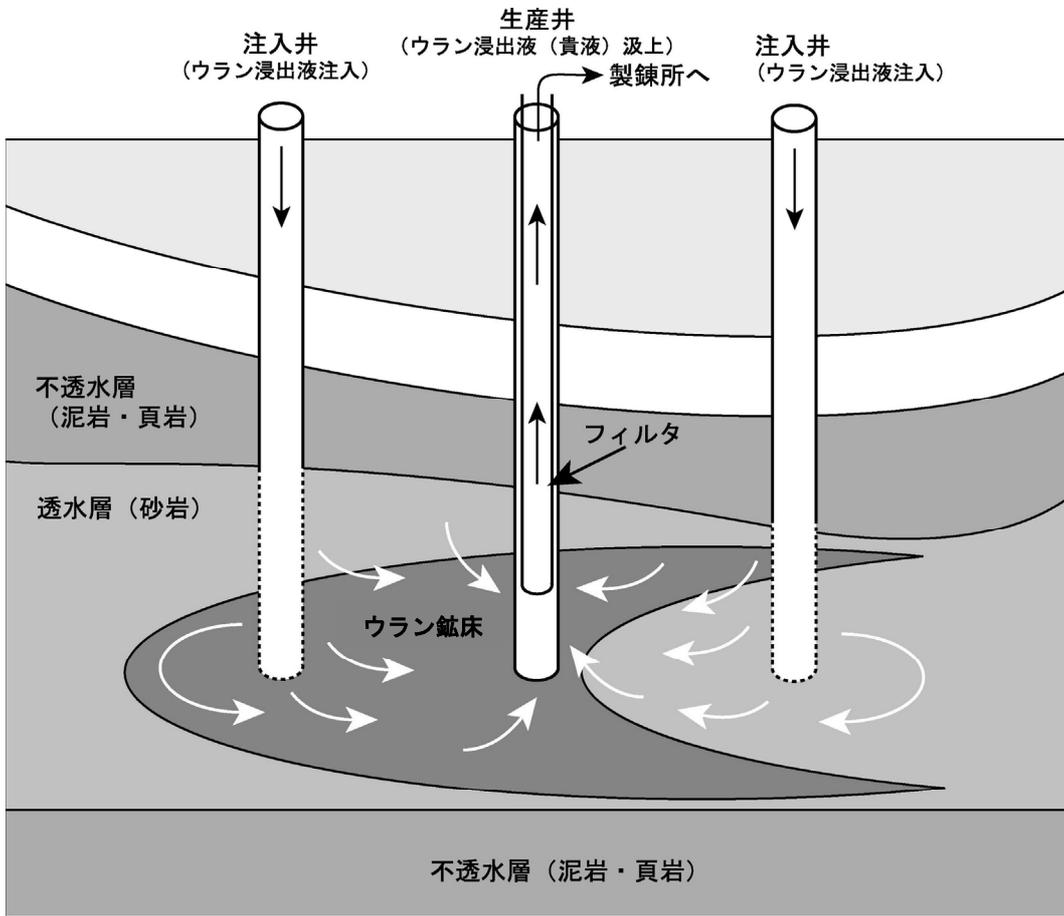


Fig. 1.1 インプレースリーチング法概念図

2. 製錬・転換

ウラン鉱石からウランを溶かし出す際に用いられる酸としては硫酸が一般的である。ウランを含んだ溶液から不純物を除去する方法としてイオン交換法やパルスカラムなどの装置を用いる溶媒抽出法がある。不純物を除去しウラン含有率を 60% 程度に高めたものは総称してイエローケーキと呼ばれる。ここまでの工程を製錬という。

イエローケーキから化学的手法により工業的なウラン濃縮の原料である六フッ化ウラン ( $UF_6$ ) を得る工程が転換である。イエローケーキから焙焼や水素還元などの工程を経て得られた二酸化ウランをフッ化水素 (HF) により四フッ化ウラン ( $UF_4$ ) とし、さらにフッ素 ( $F_2$ ) により  $UF_6$  とする。

精錬・転換工程の代表的なフローシートを Fig.2.1 に示す。

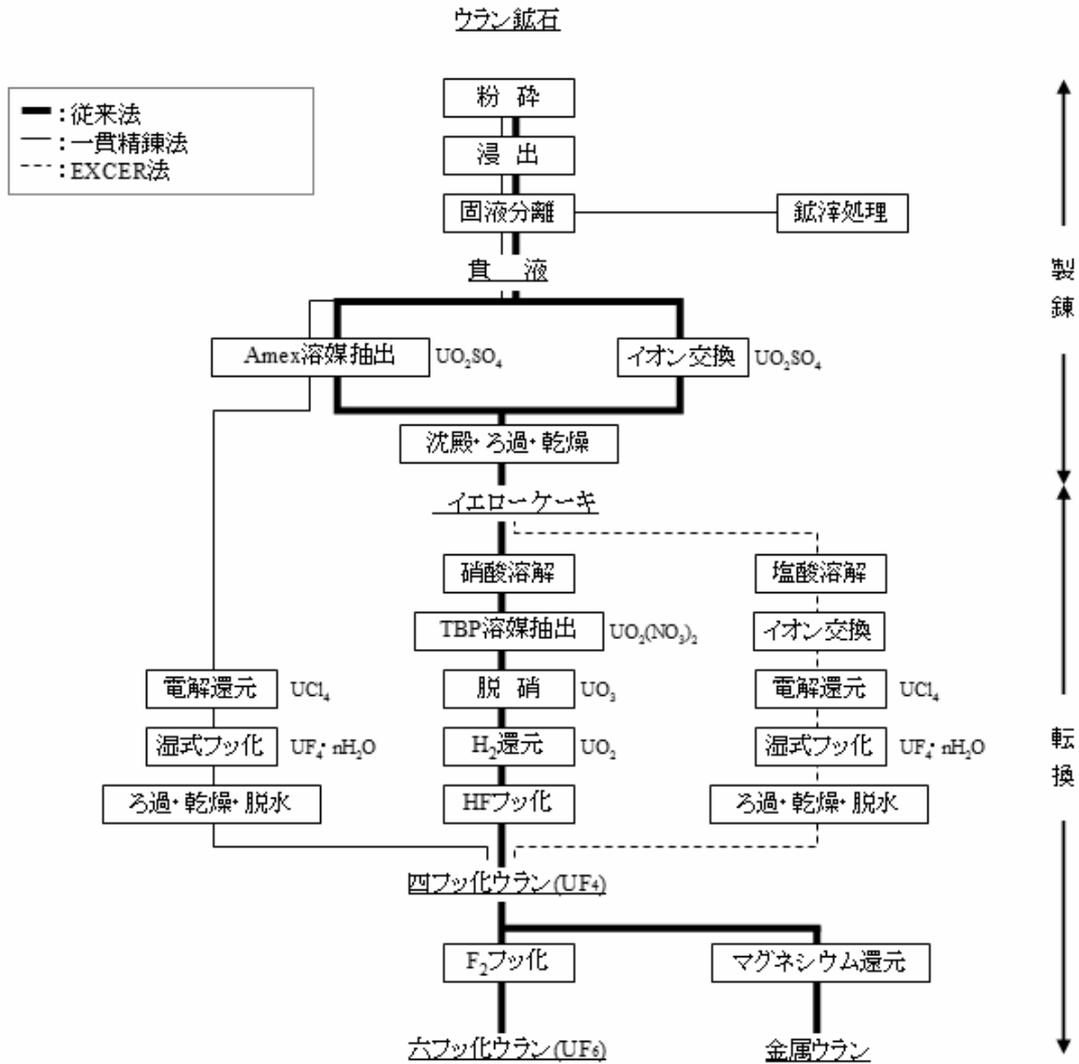


Fig. 2.1 製錬・転換フローシート

### 3. ウラン濃縮

#### 3.1 同位体分離

同位体分離は同位体の質量の相違によって生じる物理的・化学的効果（これらを「同位体効果」という）を利用して行う。同位体効果は原子番号の小さい元素ほど著しい。核燃料サイクルにおける同位体分離は  $^{235}\text{U}$  の濃縮が代表的である。そのほか原子炉の制御棒や遮蔽体中での中性子吸収剤として用いられる  $^{10}\text{B}$  の濃縮の例などがある。

#### 3.2 ウラン濃縮の原料

現在工業化されているウラン濃縮法では、原料として  $\text{UF}_6$  を用いる。物理的に安定であり、蒸気圧が比較的高い物質であることに加え、フッ素 (F) の同位体は質量数 19 のものが唯一であることなどがその理由である。

$\text{UF}_6$  は  $56.5^\circ\text{C}$  に昇華点を持つ。常温でシリンダに保管されている状態では安定な固体であるが、水分とは激しく反応し、気体の  $\text{HF}$  と固体の  $\text{UO}_2\text{F}_2$  を生成し、吸入した場合には人体障害を起こすため、注意が必要である。 $\text{UF}_6$  の取り扱いにおける事故事例の原因としては、水分との接触のほか、通常の有機物とはすべて反応すること、固体から液体への相変化において体積膨張があることなどが上げられる。

$^{235}\text{U}$  の濃縮において、天然ウランに替わって、使用済み燃料の再処理で回収されたウラン（回収ウラン）を利用する場合には、天然ウランに含まれないウラン同位体の存在に留意しなければならない。たとえば  $^{233}\text{U}$  は線量率を上昇させる原因となるので注意が必要である。また、 $^{238}\text{U}$  よりも質量数の小さい  $^{236}\text{U}$  は  $^{235}\text{U}$  の濃縮効率を妨げる要因となる。

### 3.3 ウラン濃縮法

一般的に大量の濃縮ウランを得るには、Fig.3.1 のように複数の分離ユニットからなるカスケードを組む必要がある。分離ユニットの台数や配置の仕方は、1 回の操作で注目成分がどの程度濃縮されるかの度合いを示す分離係数、および原料の供給量に対して得られる製品の割合を示すカットなどから決まる。ウラン濃縮工場の能力（規模）は製品である濃縮ウランの重量でなく、分離作業量（SWU）で示されるのが一般的である。

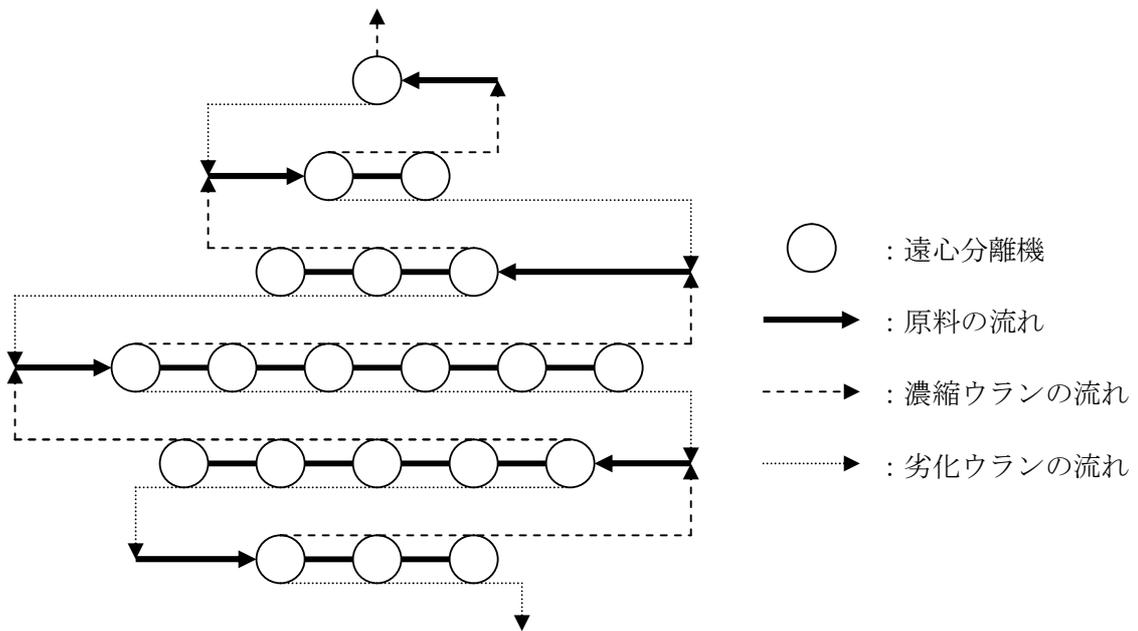


Fig. 3.1 カスケード

ウラン濃縮法については多くの方法が開発の対象となった。初期に工業化され現在も米国や仏国で行われている方法はガス拡散法であるが、今後は日・英・独などで既に工業化されている遠心分離法が主流になるものと予想される。このような傾向は分離係数の大小、濃縮作業に必要とされるエネルギー、分離ユニットやカスケードなどを構成する要素技術の難易度などを総合的に判断した結果と考えられる。

遠心分離機の構造および機内での気体の流れを模式的に Fig.3.2 に示した。

Table3.1 に各種ウラン濃縮法の比較を示した。

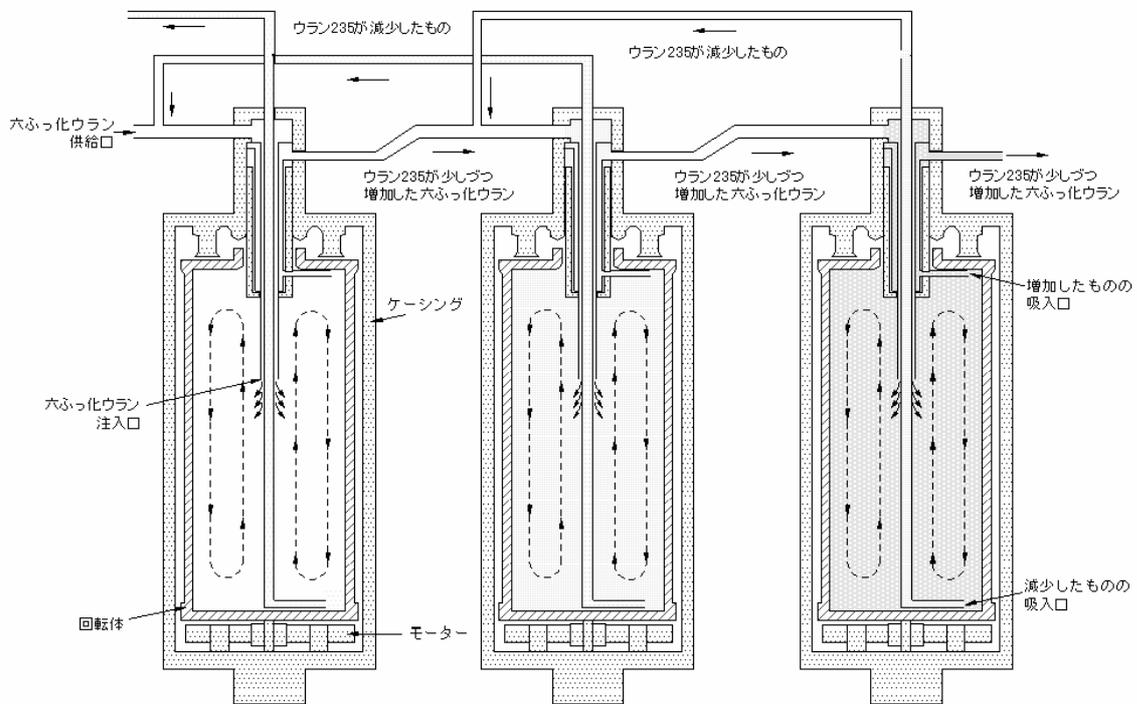


Fig. 3.2 遠心分離機内外での混合気体の流れ

出典：動力炉・核燃料開発事業団パンフレット「ウラン濃縮」（1997年5月）、p.3より

Table 3.1 各種ウラン濃縮法の比較

濃縮方法 (名称)	原理	使用物質	実績/規模	構成要素技術 技術の進歩	分離係数	必要なエネルギー	その他
電磁法	イオンを電磁場を通すことにより質量の異なるイオンを分離する方法	UF <sub>6</sub>	マンハッタン計画時代の米国プラント(Y-12)	UF <sub>6</sub> イオン化(イオン源);フライマントから発生した電子流を衝突させ元素から電子を弾き飛ばす 電磁分離部;運動方向に垂直に磁場をかける イオン捕集部	軍事的に機密であるため不明		
熱拡散法	混合流体中に熱が流れると拡散流が起これば軽い成分は上流方向に流れる	UF <sub>6</sub>	マンハッタン計画時代の米国プラント(S-60)	2重円筒状の内筒を加熱し外筒を冷却する「熱拡散管」		消費エネルギーに対して分離効率が極めて悪い	
ガス拡散法	分子の運動速度の差を利用。真空下で圧力差がある隔膜を通するUF <sub>6</sub> では軽い <sup>235</sup> Uが早く通過する。 クヌーセンの法則;隔膜を拡散する速度は分子質量の平方根に反比例。	UF <sub>6</sub>	米国、フランスにて50年以上の運転経験	金属製隔壁 圧縮機	1.0043	電力消費量大(コンプレッサ)	
遠心分離法	高速回転中の中空円筒内部の遠心力場では軽い成分は回転中心側に、重い成分は内壁側に移動する。 分離作業量は V に比例	UF <sub>6</sub>	ウレニコ(英独)、日本、ロシア 次期フランス、次期米国	遠心分離機 循環向流を作るガス供給方法	1.1~2	ガス拡散法の1/10以下(モーター)。 8750t-SWUで100MWの動力、ガス拡散法の4%	プラント分割建設が可能
ノズル法	局半径が小さい静止壁面に沿って高流速で気体を流すと軽い成分は局壁中心側に集まる	UF <sub>6</sub>			1.015	電力消費量大	
化学交換法	ウラン溶液と樹脂等の交換反応が同位体間でわずかに異なることを利用	UO <sub>2</sub> NO <sub>2</sub> 、 U(NO <sub>2</sub> ) <sub>4</sub>	研究開発;旭化成にて3%まで濃縮、17kgを得るのに2ヶ月	イオン交換樹脂	1.001~1.002		高濃縮ウランの生産可能性が小さい
レーザー法 (原子法)	ウラン蒸気にレーザー光を照射しスペクトルの同位体シフトを利用して <sup>235</sup> Uのみをイオン化(電離)し分離。高真空。	U (金属)	研究開発;原研/電力中心のレーザー濃縮技術研究開発組合、米、仏	銅レーザー(ポンプレーザー) ダイヤモンド(選択励起、中間励起、電離)	きわめて大	使用エネルギーの1/1000程度 (レーザー発振、ウラン気化など)	
レーザー法 (分子法)	冷却されたUF <sub>6</sub> ガスにレーザー光を照射し、 <sup>235</sup> Uのみを解離し粉体のUF <sub>6</sub> として回収	UF <sub>6</sub>	研究開発;理研/動燃、ドイツ、南ア	断熱膨張用ノズル レーザー(炭酸ガス)	7.5~15		UF <sub>6</sub> サイクルと整合

### 3.4 濃縮ウランの再転換

ウラン濃縮で得られた  $\text{UF}_6$  を  $\text{UO}_2$  に化学形態を変えることを再転換という。

一般的な再転換プロセスは Fig.3.3 に示す ADU 法とよばれるもので、 $\text{UF}_6$  を水および水酸化アンモニウムと反応させて得られた黄橙色の重ウラン酸アンモン (ADU ;  $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$ ) を焙焼後、還元して  $\text{UO}_2$  を得る。

なお、再転換工程においては濃縮 U を取り扱うこととなることから、特に臨界安全への対策や配慮が必要となる。

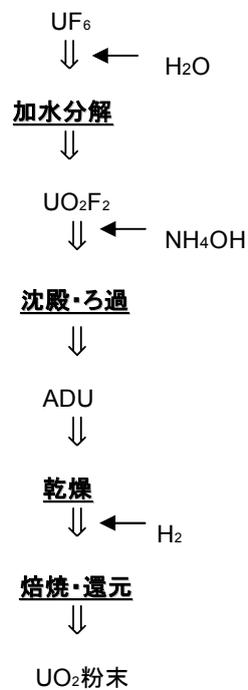


Fig. 3.3 ADU 法による再転換工程



## 4.2 PUREX 法再処理工場の概要

### 4.2.1 前処理工程

#### (1) せん断工程

使用済燃料集合体はせん断機により長さ 3cm 程度にせん断される。軽水炉燃料再処理プラントでは Fig.4.2 に示すような水平せん断方式（押し切り型）の実績が豊富である。

マガジンに装荷された燃料ピン束は、マガジン内部の燃料送り出し装置によってせん断機本体へ一定長さで押し出され、ピン束を燃料押さえ機構（ギャグ）で拘束した状態で、階段状のせん断刃でせん断される。せん断片はせん断機下部に設置されたホッパを經由して重力落下で溶解槽へ投入される。

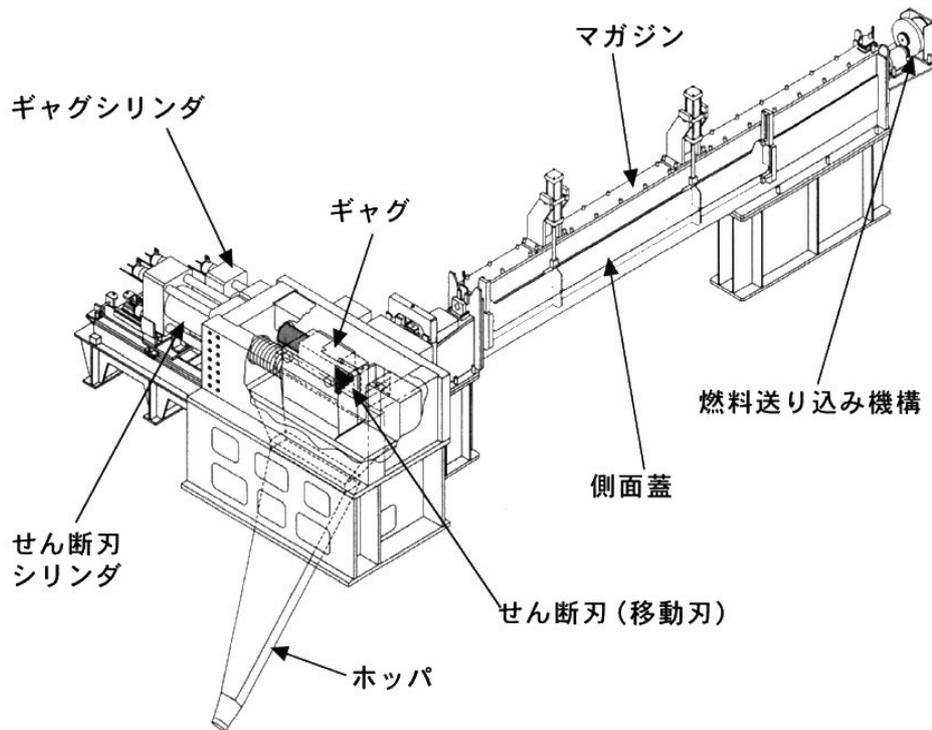


Fig. 4.2 せん断機概要図

(2) 溶解工程

せん断片の燃料部分を加熱した硝酸（HNO<sub>3</sub>）にて溶解する工程で、そのための装置は溶解槽と呼ばれる。燃料の供給および溶解後に残留する被覆管（「ハル」と呼ばれる）の回収、ならびに硝酸の供給と溶解液の回収をバッチ（回分）式で行うかあるいは連続式で行うかにより、バッチ式溶解槽（Fig.4.3 に示す東海再処理工場の例など）あるいは連続式溶解槽に分類される。

バッチ式溶解槽は複雑な機械的駆動部分を有さないが、臨界管理制限の観点から大型化が難しく、商業規模の処理量を得るためには多系列化が必要となる。このため、商業用の大型再処理工場では連続式が採用されており、将来の高速炉使用済燃料の再処理においても連続式が有望である（Fig.4.13 参照）。

燃料中の二酸化ウラン（UO<sub>2</sub>）、二酸化プルトニウム（PuO<sub>2</sub>）および大部分の FP が HNO<sub>3</sub> に溶解する。しかしながら HNO<sub>3</sub> に溶けにくいルテニウム（Ru）、パラジウム（Pd）、ロジウム（Rh）等の白金族系元素を主成分とする不溶解残渣や、せん断時に発生した金属粉が溶解液に懸濁している。

主たる溶解反応式を次に示す。

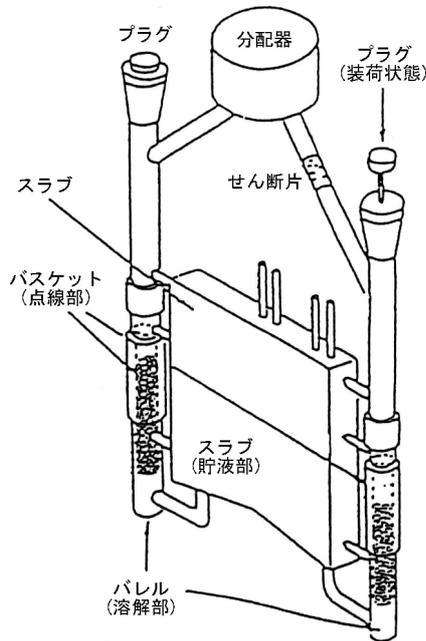
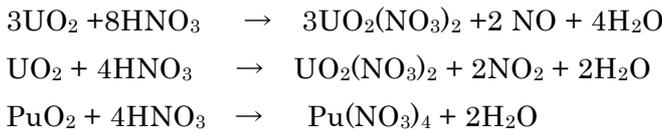


Fig. 4.3 回分式溶解槽概略図

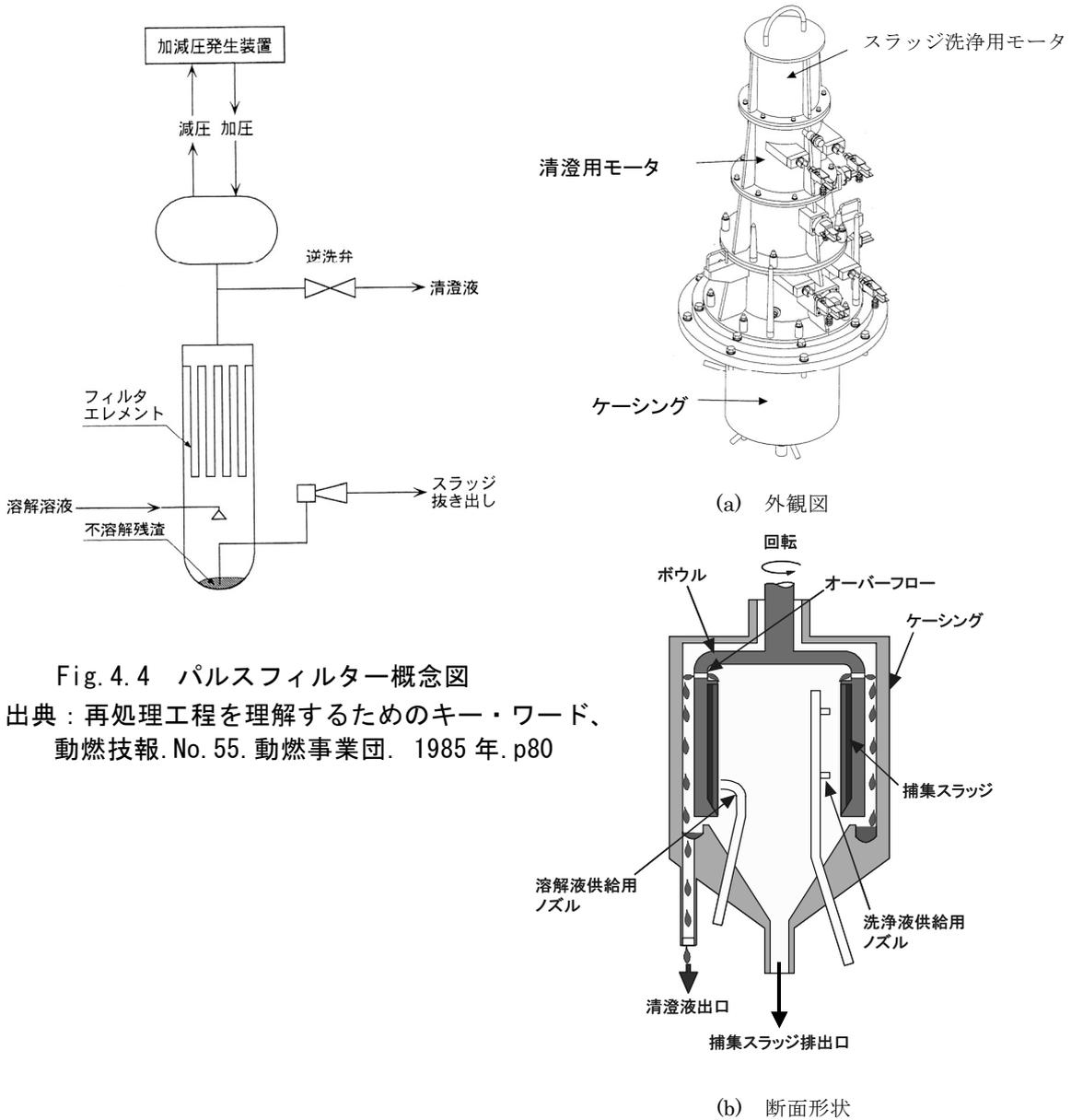
出典：再処理工程を理解するためのキー・ワード.

動燃技報. NO. 55. 動燃事業団. 1985 年. p80

(3) 清澄工程

溶解液中に懸濁している不溶解残渣は配管の閉塞や次工程の化学処理工程の安定な運転を妨げる原因となる。清澄工程は溶解液中から不溶解残渣を効率的に除去する工程で、パルスフィルター (Fig.4.4) あるいは遠心清澄機 (Fig.4.5) が採用されている。

回収された不溶解残渣を含む廃液は高レベル廃液貯槽へ送られ、最終的にはガラス固化体となる。清澄後の溶解液は調整槽へ送られ、核物質量が計量されるとともに、後続の化学処理工程に適した核物質濃度や酸濃度に調整される。

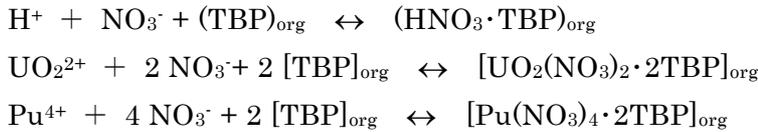


4.2.2 化学処理工程

(1) 溶媒抽出工程

溶解液より FP を除去し、U と Pu を必要な純度まで精製する方法としては、TBP を抽出溶媒として用いる PUREX 法が最も一般的である。

これは TBP をノルマルドデカン (n-C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>) で希釈した溶媒(30% TBP が一般的)を用い、溶解液中に存在する元素と TBP との親和性はその原子価、HNO<sub>3</sub> 濃度、あるいは温度の違いにより変化することに着目し、溶媒への抽出および溶媒から HNO<sub>3</sub> 溶液への逆抽出を繰り返すことで、核物質の分離と必要な純度までの精製を行うものである (Fig.4.6 参照)。主な反応は次の通りである。



U と Pu の相互分離は Pu の原子価の違いによる溶媒との親和性の変化を利用して行われる。具体的には 4 価の Pu を抽出されにくい 3 価に還元することで溶媒中から Pu のみを逆抽出させる。還元剤としては硝酸ウラナス(U(NO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>)あるいは硝酸ヒドロキシルアミン (HAN ; hydroxylamine nitrate NH<sub>3</sub>OHNO<sub>3</sub>)などの化学試薬の添加が一般的であり、また電解法なども検討されている。

相互に分離された U と Pu はそれぞれ必要な純度まで溶媒抽出により精製される。

溶媒抽出を連続的に行うための装置としてはミキサセトラ (Fig.4.7)、パルスカラム (Fig.4.8) および遠心抽出器 (Fig.4.9) がある。いずれも水相と有機相とを向流で接触させ、目的とする成分を抽出し、その後、二相の比重差を利用して分離する。

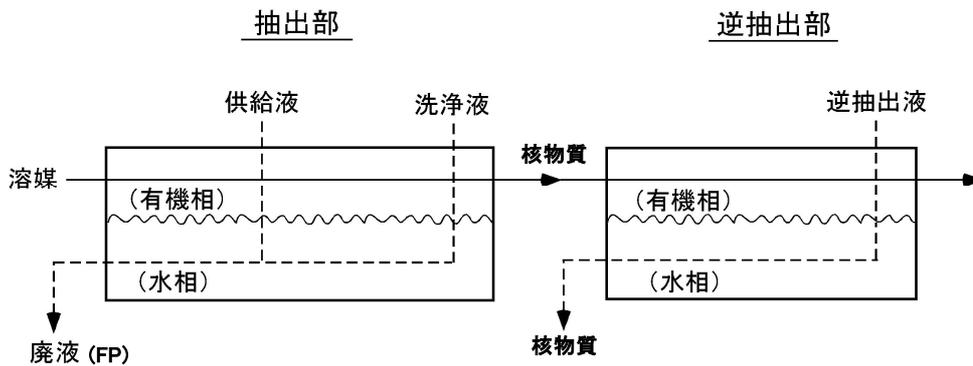


Fig. 4.6 抽出器の基本フロー

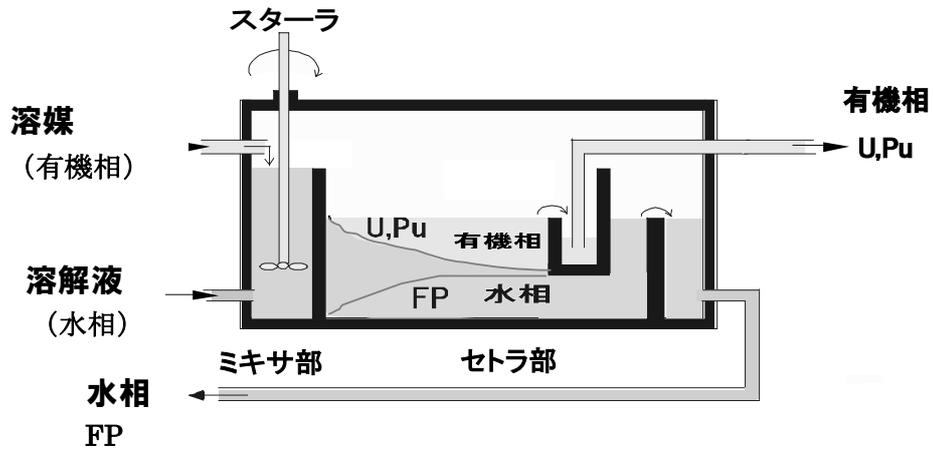


Fig. 4.7 ミキサ・セトラ概要図

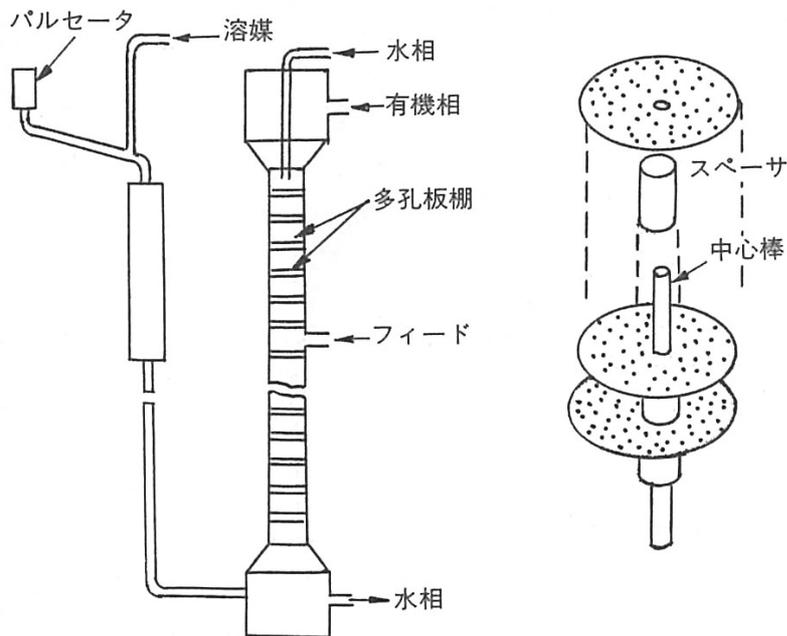
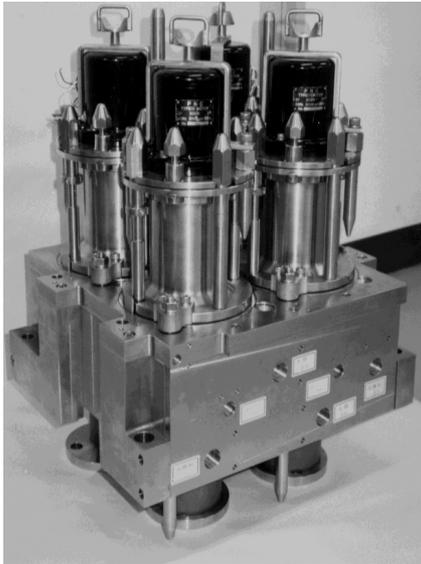
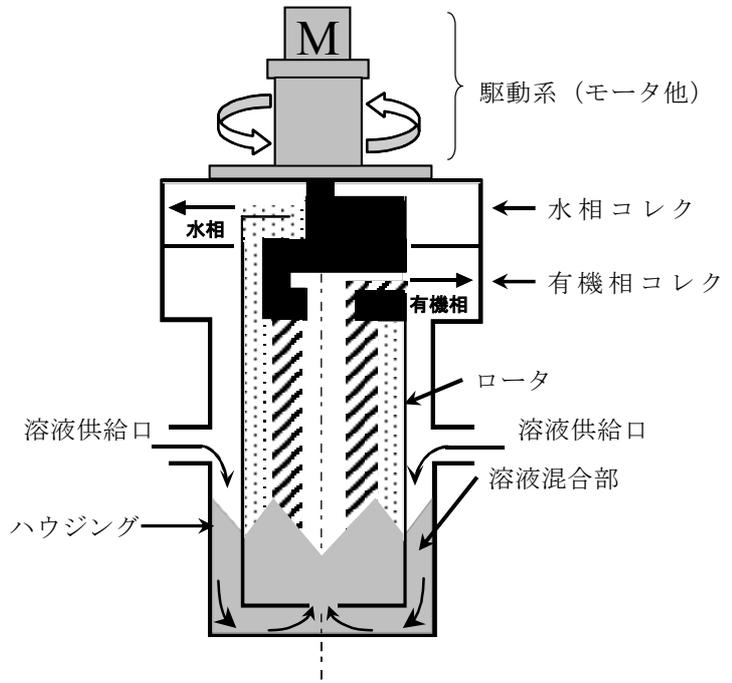


Fig. 4.8 パルスカラム概略図

出典：使用済燃料再処理における溶媒抽出. 動燃技報. No. 63. 動燃事業団. 1987年. p57



(a) 多段遠心抽出器の概観



(b) 遠心抽出器の原理

Fig. 4.9 遠心抽出器の概念図

## (2) UおよびPuの濃縮・脱硝・転換

## ① U濃縮・脱硝

U精製工程からの硝酸ウラニル ( $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ ) 溶液 (約  $50 \text{ g/dm}^3$ ) は約  $1000 \text{ g/dm}^3$  まで加熱濃縮する。約  $1000 \text{ g/dm}^3$  に濃縮された溶液は、約  $300^\circ\text{C}$  の流動床中で熱分解して三酸化ウラン ( $\text{UO}_3$ ) 粉末とする。



## ② Pu溶液濃縮

Pu精製工程からの硝酸プルトニウム ( $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ ) 溶液(約  $12 \text{ g/dm}^3$ ) を約  $230 \text{ g/dm}^3$  まで加熱濃縮する。

## ③ U/Puの混合転換

核拡散抵抗性強化の観点から混合転換技術は有効な技術の一つである。東海再処理工場で開発されたマイクロ波加熱直接脱硝法は六ヶ所再処理工場でも採用されている。この方法は、上述②で得られたPu濃縮液に  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$  溶液を添加し所定濃度の混合溶液(通常は Pu:U = 1:1)とした後、 $2450\text{MHz}$  のマイクロ波で加熱し、蒸発、濃縮および脱硝を一度に行うものである。

### 4.2.3 廃液・廃溶媒の処理

#### (1) 硝酸のリサイクル

溶媒抽出工程からの FP 等を含む  $\text{HNO}_3$  溶液（「ラフィネート」と呼ばれる）、あるいは溶解工程や U 脱硝工程等で発生する  $\text{NO}_x$  を水で吸収して得られる  $\text{HNO}_3$  は蒸発処理し、リサイクル利用する。

蒸発処理の基点となるのが酸回収蒸発缶である。ここで  $\text{HNO}_3$  は 8 M 程度に、また大部分の FP も濃縮され、濃縮液は高レベル廃液濃縮缶へ送られる。一方、蒸気は酸回収精留塔に導かれ、およそ 10 M 程度の濃度の  $\text{HNO}_3$  として回収し、再利用に供する。

#### (2) ガラス固化

高レベル廃液は最終処分に向けてガラス固化される。FP やアクチニド、腐食生成物等を含む安定な組成のガラスとしてホウケイ酸ガラスが選定された。これは熔融温度が低く、耐浸出率が良好で、廃棄物含有量を高くすることができると言った特徴を有する。ガラス固化体には重量比で 5～15%程度まで FP を添加することができる。また、ガラス熔融温度は 1100～1200℃である。

東海再処理工場で開発された「液体供給式直接通電型セラミック溶融炉方式（LFCM 方式；Liquid Fed Ceramic Melter）」と呼ばれる方法は、ガラス自体が導電性を有することを利用しており、ガラスが充填されている溶融炉内に挿入された電極間に電流を通じ、ジュール熱でガラスを直接加熱する方式である。なお、溶融炉は耐火レンガで構築されており、外部のステンレス容器で閉じ込めを確保している（Fig.4.10 参照）。

この方法は六ヶ所再処理工場でも採用された。

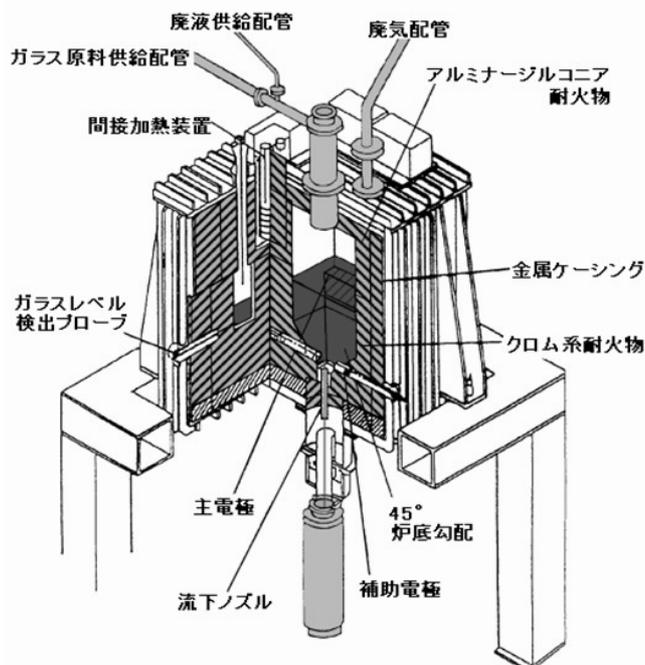


Fig. 4.10 ガラス溶融炉

### (3) 溶媒のリサイクル

抽出工程で使用された溶媒には硝酸根( $\text{NO}_3^-$ )のほか、リン酸ジブチル ( $\text{H}(\text{C}_4\text{H}_9)_2\text{PO}_4 = \text{DBP}$ ; Di-Butyl Phosphoric Acid)などの放射線による TBP の劣化生成物などが残留する。このため、溶媒をリサイクル利用するためには、試薬を用いてこれらを洗浄除去しなければならない。これが溶媒洗浄工程であり、一般的には使用済溶媒を炭酸ナトリウム( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )、水酸化ナトリウム( $\text{NaOH}$ )、 $\text{HNO}_3$ 、および  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  の各溶液で計 4 回洗浄する。

一方、このようなアルカリ系の試薬は多量の塩廃棄物を発生させ、廃液処理の負担を増加させる原因となる。このため、塩を発生させない改良プロセス(ソルトフリープロセス)として、硝酸ヒドラジン( $\text{N}_2\text{H}_5\text{NO}_3$ )などのソルトフリー試薬を使用する方法が開発されてきている。

#### 4.2.4 材料

再処理溶液を保持する機器や配管類に使用する材料には、十分な耐食性が求められる。母材そのものの耐食性に加え、溶液の組成や温度などの使用環境および溶接などの加工方法も考慮し、合理的な材料の選定が求められる。また経済的な合理性も必要である。

SUS304L などのオーステナイト系ステンレス鋼は  $\text{HNO}_3$  溶液中では、材料表面に高耐食性の皮膜を形成(すなわち不働態化)することで、優れた耐食性を示す。しかしながら、U や Pu などのアクチノイド元素あるいは多種の FP が溶存しそれらが複合的に影響するような溶解槽や酸回収蒸発缶などにおいては、高温の条件下で材料表面の皮膜が溶解してしまう強い酸化状態(過不働態化)となるため、腐食が全面的に促進される場合がある。また、材料の溶接部分においては溶接時の熱や雰囲気の影響により、合金成分の一部が偏析を起こし、粒界腐食が発生するし易くなる。すなわち溶接部が母材に比べ耐食性が劣化することにつながるため注意が必要である。

SUS304L は比較的低温の再処理用の装置および配管の大部分に利用されている。一方、溶接部の粒界腐食に対する抵抗性を高めるために、オーステナイト系ステンレス鋼中の炭素含有量を極めて低く抑え、さらにニオブ(Nb)などの炭素安定化元素を添加する改良が行われた。

オーステナイト系ステンレス鋼では過不働態域となるようなより厳しい腐食環境においてはチタン合金やジルコニウムなどの耐硝酸性の非鉄金属が用いられてきている。これらはこのような条件でも安定な酸化皮膜を形成するためである。

腐食抑制には材料の改良だけでなく、環境条件の緩和、言い換えれば再処理の運転条件の見直しも重要な項目である。たとえば、蒸発缶を減圧状態で運転することにより溶液の沸点を下げるような方式が採用されている。

Fig.4.11 に耐食性が要求される主要機器と材料開発の推移を示した。

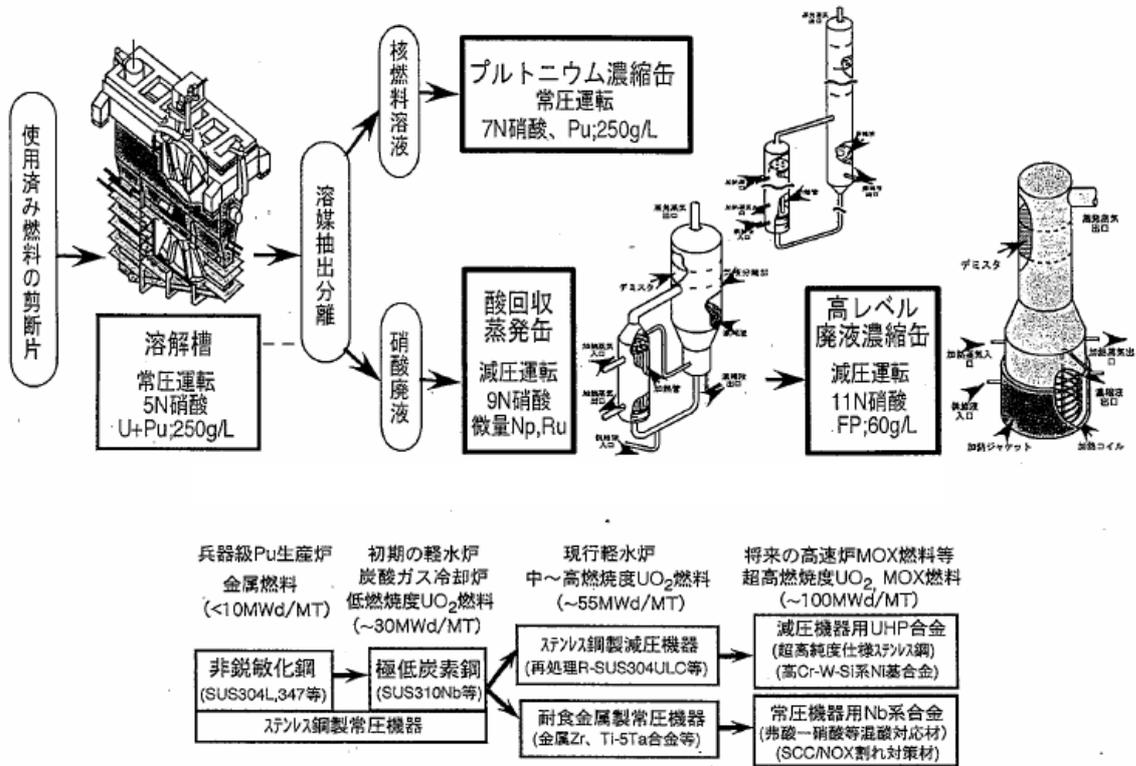


Fig. 4.11 耐硝酸性が要求される主要機器と材料の開発推移  
出典：木内、湿式再処理における材料技術開発

Table 4.1 主な装置材料及び運転条件

機器	仕様		装置材料及び運転条件	
			東海再処理工場 <sup>1)</sup>	六ヶ所再処理工場 <sup>2)</sup>
溶解槽	装置材料		Uranus65 (R10,R11) NAR310Nb (R12) (NAR310Nb製溶解槽は Uranus65製溶解槽の腐食故 障を受けて追加製作)	Zr
	溶液条件	溶液組成 <sup>3)</sup>	(溶解後濃度) 硝酸濃度：約3N Pu濃度：約4g/L Ru濃度：約1g/L	(溶解後濃度) 硝酸濃度：約3N 各種金属濃度は不明
		温度	約104℃	約110℃ (沸点)
酸回収蒸発缶	装置材料		Ti-5%Ta	ステンレス鋼 (304系)
	溶液条件	溶液組成 <sup>3)</sup>	硝酸濃度：8N Pu濃度：0.1~1mg/L Ru濃度：0.1~1mg/L Np濃度：10~20mg/L	硝酸濃度：約8.4N 各種金属濃度は不明
		温度	約110℃ (沸点)	約70℃ (減圧蒸発条件)
Pu溶液蒸発缶	装置材料		塔部 Ti-5%Ta 加熱部 Ti	Zr
	溶液条件	溶液組成 <sup>3)</sup>	(濃縮前~濃縮後) 硝酸濃度：5~7N Pu濃度：0~220g/L	硝酸濃度：約7N 各種金属濃度は不明
		温度	約110℃ (沸点)	約110℃ (沸点)

1) 榎：東海再処理施設の腐食環境と機器の腐食速度評価、サイクル機構技報、14、39-63(2002)

2) 和田：再処理プラントにおける信頼性向上技術、材料と環境、48、771-775(1999)

3) 腐食に影響する化学種の濃度のみを記載

機器	材料種	発生年	運転時間	腐食故障事象	腐食箇所
溶解槽 (242R10)	Uranus65	1982	約3100時間	腐食による貫通孔	加熱部の溶接線
溶解槽 (242R11)	Uranus65	1983	約4100時間	腐食による貫通孔	加熱部の溶接線
酸回収蒸発缶	Uranus65	1978	約6000時間	腐食による貫通孔	伝熱管と管板の溶接部
	CRONIFER2520Nb	1983	約13000時間	腐食による貫通孔	伝熱管 (2本)
Pu溶液蒸発缶	塔部 SUS304L 加熱部 Ti	1982	約11000時間	腐食による貫通孔	計装配管の接続部

機器	材質
溶解槽	Uranus65⇒NAR310Nb
酸回収蒸発缶	Uranus65⇒CRONIFER2520Nb⇒NAR310Nb (加熱部のみ交換) ⇒Ti-5%Ta
Pu溶液蒸発缶	塔部SUS304L⇒Ti-5%Ta (加熱部はTi製で変わらず)

4.2.5 保守

再処理工程機器の保守の方法として、作業員が直接対象物に接触する直接保守方式と、セル壁等を隔てて専用の工具類を用いて行う遠隔保守方式とがある。遠隔保守の概要を Fig.4.12 に示した。

せん断機などの前処理工程機器については機械的駆動部を有することから点検保守の頻度が高くなることが予想されるため、マスタースレーブマニプレータやインセルクレーンなどを専用を用意し、遠隔保守方式で対応するのが一般的である。

溶媒抽出や廃液処理の工程では機械的駆動部分が少ないため、保守の頻度は極めて小さい。このため、一般に直接保守方式で対応する。作業員の被ばく低減のために当該機器は予め必要な除染を行う。なお、直接保守の場合には、保守対象外の機器からの放射線による被ばくを避けるため、工程機器はそれぞれ個別のセルに設置することを基本とする。

これに対し、大型セル方式は工程全体を遠隔保守の対象とする概念である。複数の工程機器を大型のセルに設置し、共通の電動式マニプレータやインセルクレーンなどを用いて保守・補修を行う。セル内の機器の故障や保守の状況などの情報はセル内に設置したテレビカメラを通して把握する。電動式マニプレータには力帰還機能を持たせ、操作性の向上を図る。これらのマニプレータやテレビカメラは耐放射線性に優れた電子部品から構成されなければならない。必要に応じてセル内の塔槽類は取り外しあるいは再設置されることがあるため、マニプレータなどの遠隔操作で着脱可能な密封性を有する配管継手などが必要となる。

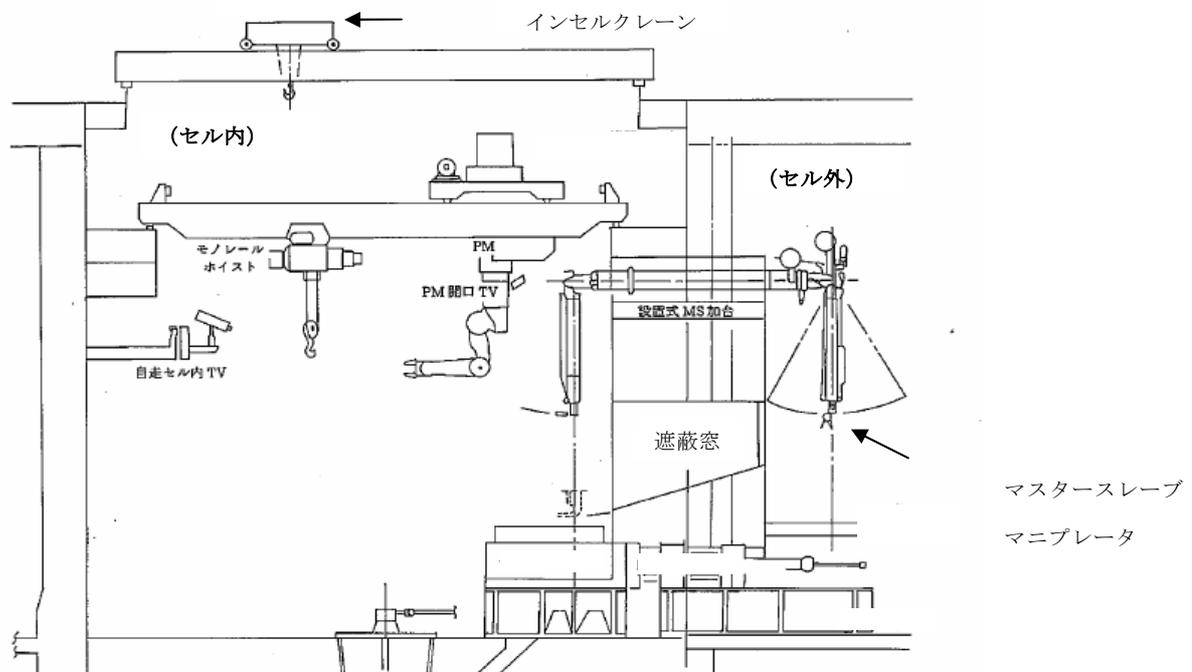


Fig. 4.12 遠隔保守の概要図

### 4.3 MOX 燃料の再処理

再処理で回収された Pu は U との混合酸化物 (MOX) 燃料として、軽水炉 MOX 燃料 (いわゆるプルサーマル燃料)、あるいは高速増殖炉燃料として利用される。また、国内においては新型転換炉(ATR)で利用されてきた実績がある。

#### 4.3.1 プルサーマル燃料の再処理

使用済のプルサーマル燃料の再処理は、Pu 含有量が多くなる点に留意すれば、通常の U 燃料を対象とする軽水炉再処理工場で処理することが可能である。

溶解工程以降の化学的な処理工程においては、Pu の濃度が高くなることから、なんらかの臨界安全のための対策が求められる。ガドリニウム(Gd)などの可溶性中性子毒を添加する方策もあるが、フランスでは、U と Pu の比を軽水炉燃料 (U 燃料) とほぼ等しくなるよう、U を添加して処理を行った例がある。Pu 濃度の希釈に用いる U は回収ウランか、あるいは使用済軽水炉燃料 (U 燃料) そのものを用いる。

#### 4.3.2 高速増殖炉燃料の再処理

MOX を用いた高速増殖炉燃料の再処理は基本的に PUREX 法により可能であるが、高い Pu 含有率、高い燃焼度および集合体構造の違いなどを考慮した改良が必要となる。さらに一層の経済性向上や廃棄物負担の軽減の達成を目指した新しい技術の採用が検討されている。また、高速増殖炉は Pu のリサイクル利用が前提であるため、核不拡散性に十分配慮されたシステムとすることが求められる。

再処理の技術的困難さを示す指標として燃焼度や Pu 濃度が考えられる。高速増殖炉燃料と軽水炉燃料の特徴を Table 4.2 に示した。

高速増殖炉の燃料集合体は、ステンレス鋼製のラップ管で覆われた構造となっているため、燃料ピンのせん断に先立ち、ラップ管を除去するための解体工程が必要となる。機械的あるいはレーザを用いた切断方法の適用が検討されている。

溶解や溶媒抽出などの化学処理工程ではいくつかの配慮が必要となる。

まず、臨界安全への配慮として、形状管理あるいは濃度管理との組み合わせで臨界安全を担保するため、機器の大型化は困難である。高い処理能力を確保するためには、プロセス条件の見直しや機器構造の原理に立ち戻っての検討が必要となる。このため、たとえば、高速増殖炉燃料再処理用として開発された連続溶解槽 (Fig.4.13) は回転ドラムの中心に中性子吸収体として炭化ホウ素 (B<sub>4</sub>C) を配置するとともに、ドラムの直径を制限する形状管理を併用することで、臨界安全を担保している。

PuO<sub>2</sub> と UO<sub>2</sub> とが十分に固溶している MOX 燃料の HNO<sub>3</sub> への溶解性は問題ない。しかしながら、PuO<sub>2</sub> 単体では HNO<sub>3</sub> には溶けにくい性質を有している。このため燃料溶解条件は燃料製造条件までさかのぼって検討することが望ましい。

Table 4.2 高速増殖炉照射済燃料と軽水炉照射済燃料の主な比較

	原 子 炉	
	高速炉	軽水炉
冷却材	ナトリウム	水
被覆材	ステンレス合金	ジルカロイ
燃料棒直径(cm)	0.6-0.8	1.0-1.2
燃焼度(MWd/MT)		
炉心	94,000	55,000
軸方向ブランケット	4,700	
半径方向ブランケット	8,000	
炉心・ブランケット平均	37,000	
150日冷却後の炉心 燃料組成(w/o)		
ウラン	85.6	95.4
ネプツニウム	0.025	0.075
プルトニウム	10.3	0.90
アメリシウム	0.035	0.014
キュリウム	0.0011	0.0047
核分裂生成物	3.9	3.1

広瀬 勉, 土居 荘一, 核燃料工学の基礎—軽水炉燃料を中心に 第2回 軽水炉燃料 (1)  
日本原子力学会誌. Vol. 46. No. 6 (2004) p42, p44 及び原子力化学工学(第IV分冊)を基に作成

また、溶媒抽出工程においては $\alpha$ 放射線量が増大することにより溶媒の劣化が促進されるため、より短時間で抽出分離を行うことのできる遠心抽出器の採用が検討されている。さらに高燃焼度化に伴い、FPとして $\text{HNO}_3$ に不溶性の白金族元素等が増大し不溶解残渣となるため、効率的な清澄工程機器が求められる。

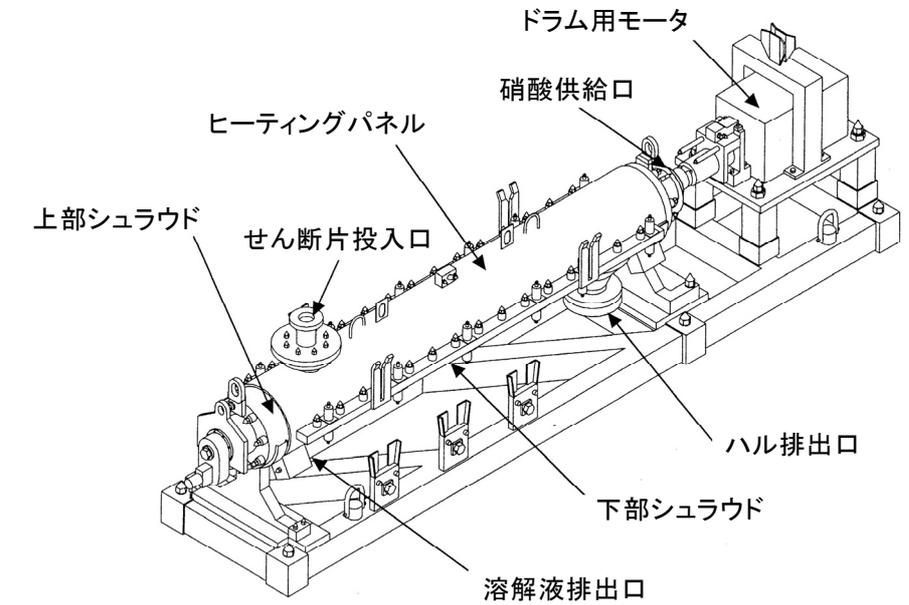
#### 4.3.3 超ウラン元素(TRU)のリサイクル

Puのリサイクル利用に伴い、ネプツニウム(Np)やアメリシウム(Am)、キュリウム(Cm)などのTRU(これら3元素を総称してマイナーアクチニド; MA)の量が増加する。特に、使用済のプルスーマル燃料中のMA量は多くなる。

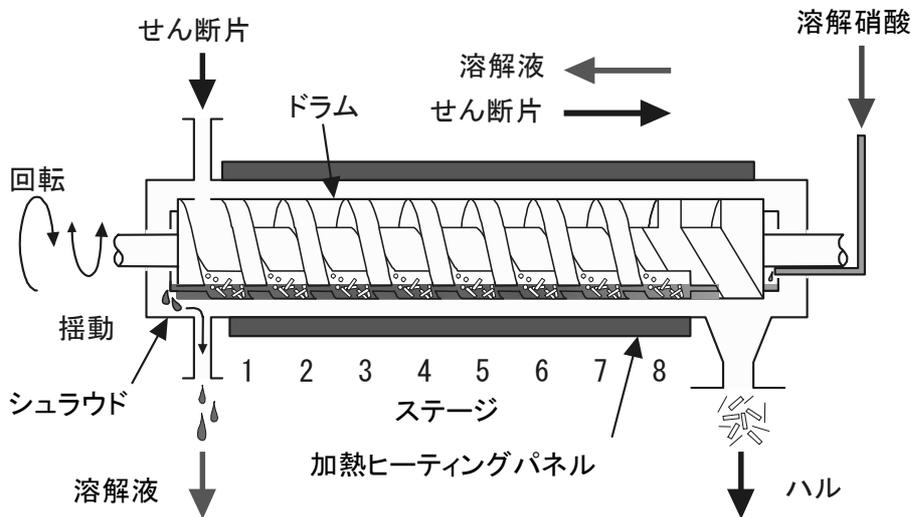
現行のPUREX法ではこれらMAの大半は高レベル廃液に移行し、最終的にFPとともにガラス固化体として安全に地層処分される。一方、ガラスの健全性を保つ観点から、ガラス固化体の総発熱量には一定の上限値が定められる。ここでMAは発熱性であるため、MAを回収しなければ、ガラス固化体の発生量が増加することとなる。また、たとえば半減期が約432年の $^{241}\text{Am}$ は長期にわたる発熱源となり、廃棄物管理の負担を増大させる。

一方、高速増殖炉でMAはPuと同様に燃料として有効に利用することが可能である。

すなわち、環境負荷の低減や資源有効利用の観点から、MA の分離回収が求められることとなる。



(a) 外観図



(b) 断面形状

Fig. 4.13 FBR再処理用連続溶解槽

4.4 保障措置

4.4.1 IAEA による保障措置

核燃料物質は核兵器の原料となりうるため、いかなる場合でも、核兵器その他の核爆発装置の製造や使途不明の目的のために転用されないよう管理する必要がある。転用を抑止するために、このような行為を適時かつ早期に探知する活動が保障措置と呼ばれるものである。

日本は 1976 年に「核兵器の不拡散に関する条約」(Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons ; NPT) を批准した。NPT に基づき国際原子力機関(IAEA)との間で保障措置協定を締結した。

核兵器製造等に転用されないよう国際的に管理することが求められている原子力関連資材を国際規制物資と呼ぶ。核原料物質、核燃料物質、原子炉その他の資材又は設備が含まれ、我が国は国内のすべての国際規制物資について保障措置の適用を受けている。

IAEA による保障措置の実施にあたっては、まず、対象施設がどのような機能や性能を有するか等の施設に関する設計情報が把握される。また施設内の核物質の計量管理に関する報告が徴収される。書類上の検査に加え実際に施設の状況等を立ち入り調査することがある。これが査察であり、員数勘定、非破壊測定、試料採取、封印取付・確認、帳簿検査、必要な試料の収去などが行われる。

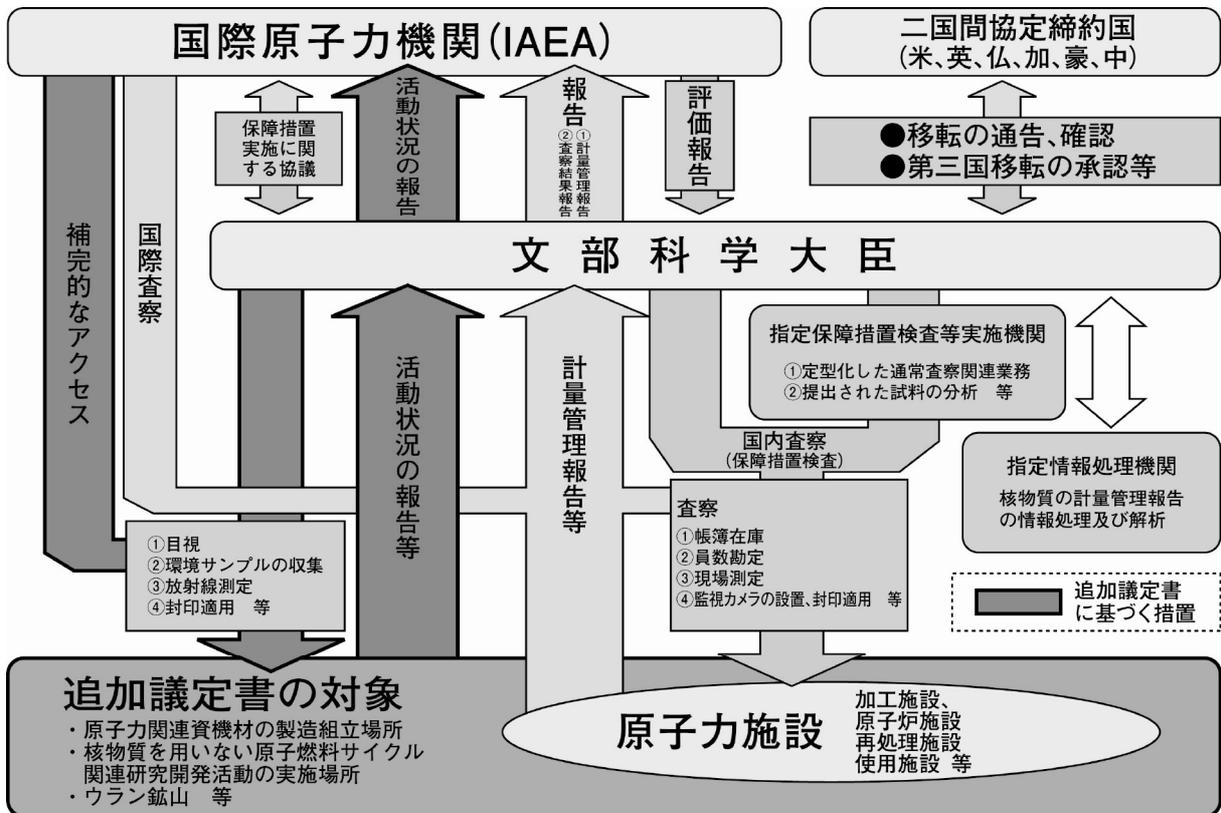


Fig. 4.14 日本の保障措置実施体制

出典：核物質管理センターパンフレット

#### 4.4.2 東海再処理工場における保障措置

再処理施設に搬入される使用済み燃料中の核物質量は炉側での燃焼計算に基づくものである。このため、再処理施設において破壊分析などにより細心の計量管理(Material Accountancy)を行い、核物質量を確定する。

再処理施設には、物質収支区域(MBA : Material Balance Area)が設定される。MBAの境界にはMBAごとの核物質の受払い量を計測する主要測定点(KMP ; Key Measuring Point)が設けられる。核物質がKMPを通過するごとに、核物質の量を確定するとともにその記録及び報告が必要となる。このため、MBAを小さくする、言い換えれば一つの施設内に多数のMBAを設定するとこのような手続きが煩雑となる。一方、MBAを大きくしすぎると、きめ細かな管理ができなくなる。サンプリングや分析の誤差などの積み重ねにより、帳簿上の在庫量と実在庫量の差、すなわち在庫差(MUF ; Material Unaccounted For)が生じる。MUFを適切な値とするためにはMBAの規模を適切に設定する必要がある。

なお、KMPは核物質の移動に着目した流れの主要測定点(FKMP; Flow Key Measure Point)とMBA内の在庫量を測定する在庫の主要測定点(IKMP; Inventory Key Measure Point)とからなる。

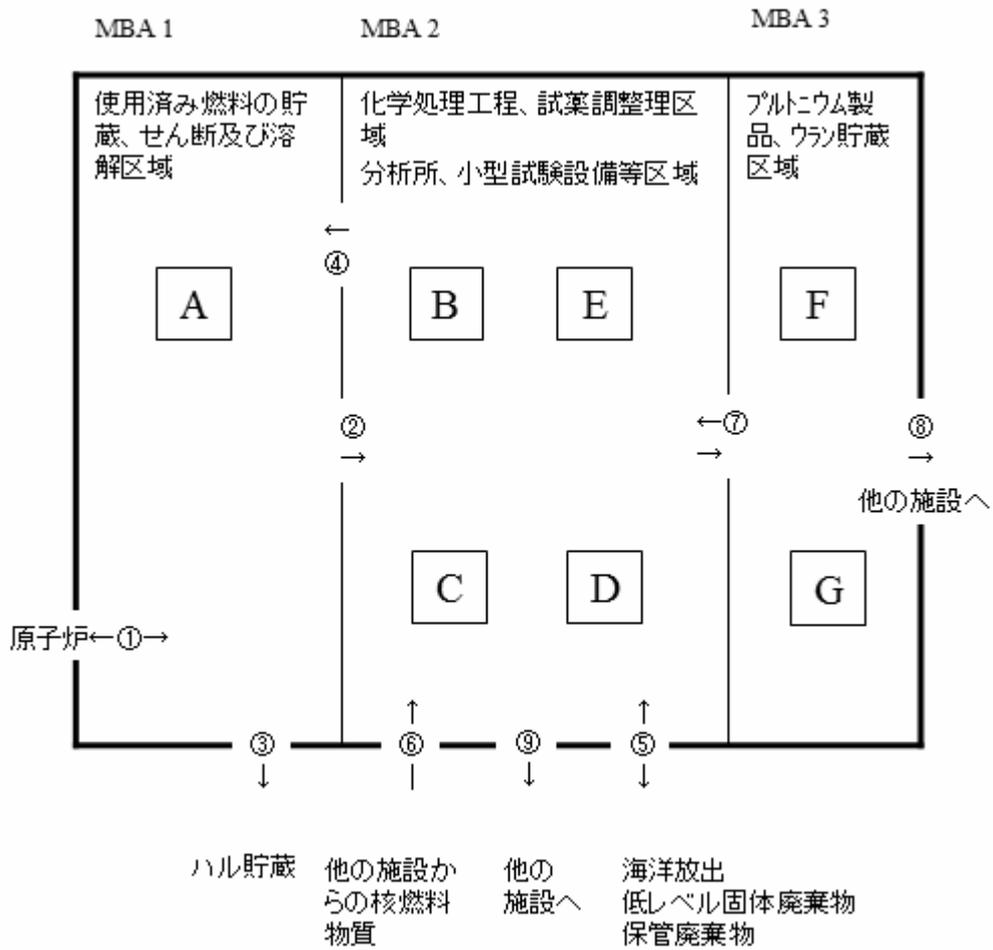
東海再処理工場の場合を例に再処理施設の計量管理の実際を述べる。東海再処理工場は3つのMBAで構成される(Fig.4.15)。

MBA 1は使用済み燃料貯蔵区域であり、ここには燃料貯蔵プールのほか、せん断、溶解工程などが含まれる。通常は使用済み燃料集合体1体を1バッチとして取り扱い、集合体の員数と刻印番号を確認する。その後使用済み燃料集合体をせん断、溶解し、さらに不溶解残渣を除去した後、溶解液は入量計量槽へと送られる。この入量計量槽は予め較正されたものであり、ここで溶解液の容量を確認するとともに溶解液を分取し精密な分析を行い、核物質量を確定する。これにより再処理施設に持ち込まれた核物質量が初めて確定する。この値と炉側の燃焼計算データとの差異および核的損耗(崩壊による消滅分)を考慮し、受払い間差異(SRD ; Shipper Receiver Difference)が算定される。

MBA2は主に溶液で取り扱う工程の部分で、工程区域と呼ばれる。製品となるPuは較正されたPu計量槽で計量される。なおウラン(U)は脱硝され粉体の重量として計量される。また他施設とやりとりされる核物質、さらには廃棄物として施設外へ放出される量などが測定される。

MBA 3は製品貯蔵区域であり、U貯蔵所やPu製品貯槽が含まれる。粉末のU製品については重量測定および化学分析とともに、貯蔵容器(1個を1バッチ)の員数確認が行われる。Pu製品は溶液のままであるため、工程区域の計量と同様の手法で確認される。

計量管理は一方で再処理施設の操業においても重要である。すなわち、臨界安全を確保する上で重要な核物質の量、物理および化学形態に関する情報を与える。また、使用済み燃料という原料から核物質という製品を生産していくための工程管理および経理上の確認のためにも必要な数値である。



**流れのKMP(FKMP)**

- ①使用済み燃料の受入れ及び返送
- ②機械処理セル、溶解槽及び調整槽での計量と払出し
- ③溶解済ハル等の廃棄
- ④JR1Aに対するリワーク工程等からの溶液の戻り
- ⑤保管廃棄物の移動と戻し、又は、測定済廃棄物の廃棄
- ⑥使用済み燃料集合体を除く核燃料物質の受入れ
- ⑦貯蔵庫へのウラン及びプルトニウム製品の移動と戻し
- ⑧他の施設へ製品等の払出し
- ⑨他の施設へ製品を除く核燃料物質の少量払出し及び轉換物質への硝酸ウラニルの払出し

**在庫のKMP(IKMP)**

- A 貯蔵プール、機械処理及び溶解区域の在庫
- B 工程内在庫
- C 分析所在庫
- D 小型試験設備在庫
- E 試薬調整区域在庫
- F ウラン貯蔵所在庫
- G プルトニウム製品貯蔵所在庫

Fig. 4.15 東海再処理工場における物質収支区域の設定

## 4.4.3 査察と検認

再処理施設内に存在する核物質の量と状態については施設設置者により年 1 回の頻度で確認される。これは実在庫確認（PIT；Physical Inventory Taking）とよばれ、工程区域においては全工程を洗浄し較正された貯槽等で量を確定する。これに基づき施設設置者は実在庫明細表や在庫変動報告書等の記録を作成し IAEA に報告する。IAEA は年 1 回の実在庫検認（PIV；Physical Inventory Verification）を行い、整合性を確認する。

PIV で検認されない核物質量は核物質の種類ごとに 0.3SQ（SQ；Significant Quantity=有意量）を超えないことが求められる。ここで有意量とは 1 個の核爆発装置の製造の可能性を排除できない核物質のおおよその量であり、たとえば Pu の場合で 8Kg、<sup>233</sup>U は 8Kg、<sup>235</sup>U の濃縮度が 20 %以上である U については <sup>235</sup>U の量として 25Kg などと定められている。

保障措置の目的の一つに、核物質を転用しようとする行為を適時かつ早期に探知することが上げられる。このために、適時性の確保を目的とした中間査察が行われ、使用済み燃料集合体については年 4 回、溶液状態の Pu については年 12 回の査察が行われている。工程内各所に存在する核物質の在庫検認方法の一つとして近実時間計量管理（NRTA；Near Real Time Material Accountancy）の手法が用いられている。

Table 4.3 計量管理に関する術語

和文	英文	英文記号
計量管理	Material Accountancy	MA
転用	Diversion	
国際原子力機関	International Atomic Energy Agency	IAEA
保障措置	Safeguards	SG
核拡散防止条約	Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons	NPT
物質収支	Material Balance	
物質収支区域	Material Balance Area	MBA
物資収支期間	Material Balance Period	MBP
主要測定点	Key Measuring Point	KMP
在庫	Inventory	
実在庫	Physical Inventory	PI
帳簿在庫	Book Inventory	BI
在庫差（不明物質 量）	Material Unaccounted For	MUF
在庫変動	Material Inventory Change	IC
受払間差異	Shipper / Receiver Difference	SRD
誤差	Error	
近実時間計量管理	Near Real Time Material Accountancy	NRTA
閉込め監視方式	Containment & Surveillance	C/S

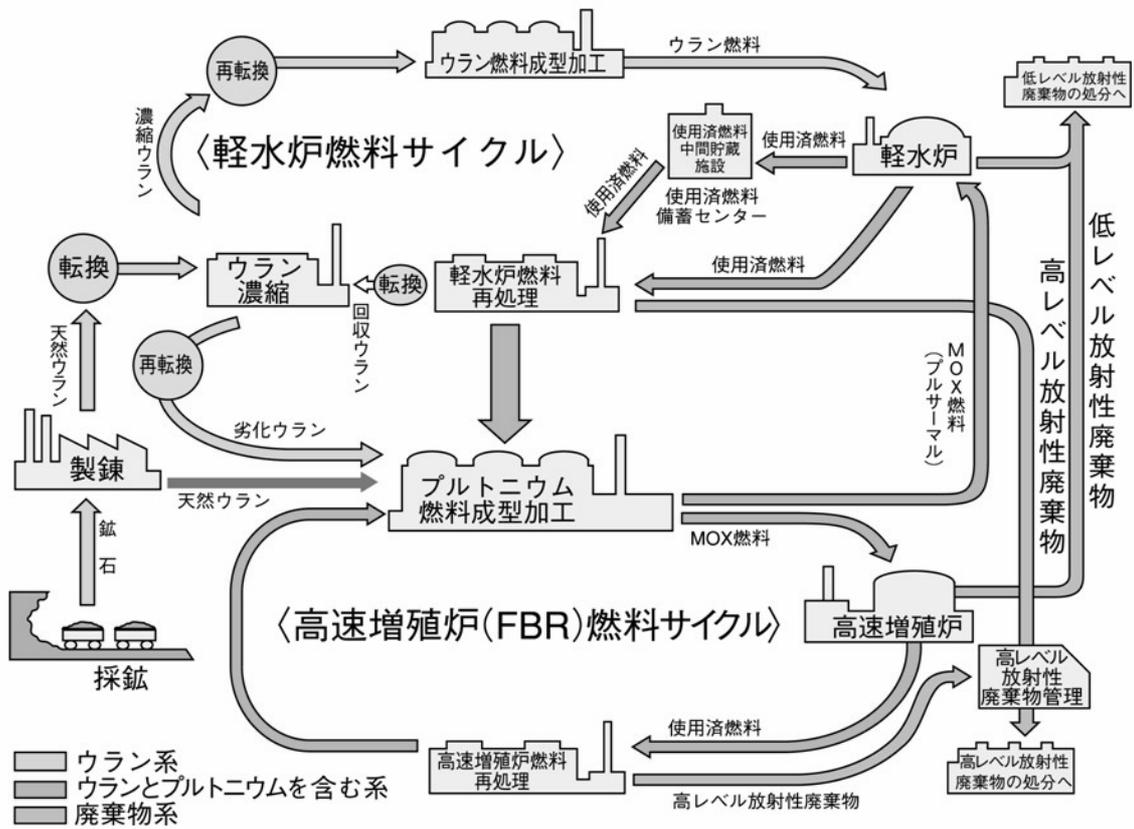


Fig. 4.16 原子燃料サイクル (FBR 含む)

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	メートル毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率	(数の)	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エタ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad		m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> =1 <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>		m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> =1 <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s <sup>2</sup> ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup> ・A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>4</sup> ・A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup> ・A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>-2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>3</sup> ・A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C		K
光束	ルーメン	lm	cd・sr <sup>(c)</sup>	m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> ・cd=cd
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> ・m <sup>-4</sup> ・cd=m <sup>-2</sup> ・cd
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作る際のいくつかの用例は表4に示されている。
- (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を併せて用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa・s	m <sup>-1</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-1</sup>
力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m <sup>2</sup> ・m <sup>-1</sup> ・s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> ・m <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup>
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup>
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup>
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup> ・K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup> ・A <sup>-1</sup>
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> ・s <sup>2</sup> ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> ・s <sup>2</sup> ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>-3</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>4</sup> ・A <sup>2</sup>
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・mol <sup>-1</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup> ・mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> ・s <sup>2</sup> ・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup>
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> ・sr)	m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup> =kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup>

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 <sup>-19</sup> J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 <sup>-27</sup> kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 <sup>11</sup> m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam <sup>2</sup> =10 <sup>2</sup> m <sup>2</sup>
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 <sup>5</sup> Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 <sup>-10</sup> m
バール	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm <sup>2</sup> =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> /s=10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s
ガウス	G	1 G ≙ 10 <sup>4</sup> T
エルステッド	Oe	1 Oe ≙ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≙ 10 <sup>-8</sup> Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> cd/m <sup>2</sup>
ホト	ph	1 ph=10 <sup>4</sup> lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s <sup>2</sup> =10 <sup>-2</sup> m/s <sup>2</sup>

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
X線単位	X unit	1 X unit=1.002×10 <sup>-11</sup> m
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 <sup>-26</sup> W・m <sup>-2</sup> ・Hz <sup>-1</sup>
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ = 1μm=10 <sup>-6</sup> m

