

# 原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT CENTER TOPICS

1993.1.NO.25

目次

再処理廃棄物の処理・貯蔵・処分技術の現状 ..... ①  
 センターのうごき ..... ⑧

## 再処理廃棄物の処理・貯蔵・処分技術の現状

### 1. はじめに

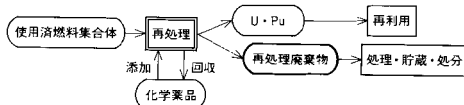
再処理工場では、原子力発電所で燃焼した使用済燃料から、再利用に供するためウランとプルトニウムを分離する。世界的に豊富な実績がある溶媒抽出法の全体フローを第1図に示す。処理の対象である使用済燃料は、第1表の様に新燃料1トン当たり約31.6PBq (8.54×10<sup>6</sup>Ci) の放射能を持っており、その殆どが放射性廃棄物となる。再処理工程では、燃料の溶解剤 (硝酸)、ウラン、プルトニウムの抽出剤 (TBP)、有機希釈剤 (ドデカンなど)、希釈剤の洗浄剤 (炭酸ソーダなど) の化学薬品が使用されている。それらの一部は循

環再使用されるが、いずれは放射性廃棄物となる。また、再処理の各工程に於ける主要装置、支援装置、浄化装置などの補修交換物品も放射性物質が付着、混入しており放射性廃棄物として排出される。

第1表 使用済燃料集合体の仕様 (PWRの一例)  
 炉取出し後3年冷却した33000MWD照射燃料  
 についての新燃料ウラン1トン当たりの諸元

燃 料	重 量 (kg)	ウラン	957
		プルトニウム	9
		核分裂生成物	34
	放射能 (PBq)	α核種	4.0
βγ核種		27.4	
発熱量 (kW)	全量	2.96	
燃 料 集 合 体 構 成 物	重 量 (kg)	ジルカロイ	292
		ステンレス鋼	106
		インコネル	24
		アルミナ	2
放射能 (PBq)	放射化核種	0.2*	

\* 炉取り出し後10年時の値



第1図 燃料再処理と再処理廃棄物の関係

本報では、すでに本格的な軽水炉燃料の再処理に十数年の実績を持ち、かつ、軽水炉専用プラントも数年にわたり操業し、そこでの発生廃棄物についても整理して公表しているフランスCOGEMA社のラ・アーク再処理工場からの廃棄物を中心に、再処理廃棄物の処理・貯蔵・処分技術の現状について報告する。

## 2. 再処理廃棄物の種類と発生量

一般に、放射性廃棄物は、主に管理上の理由から種々の方法で分類されている。即ち、放射性濃度（高レベル廃棄物、低レベル廃棄物など）、放出放射線の線質（ $\beta\gamma$ 廃棄物、 $\alpha$ 廃棄物など）、放射性元素の種類（FP廃棄物、TRU廃棄物など）、放射能の寿命（長寿命廃棄物、短寿命廃棄物など）、発熱性（発熱性廃棄物、非発熱性廃棄物）、固化方法（ガラス固化体、セメント固化体など）などを尺度として分類されている。本報では、便宜的に高レベル廃棄物、TRU廃棄物、低レベル廃棄物と分類して報告を進める。

第2表は、フランスCOGEMA社のラ・アーク再処理工場からの放射性廃棄物の分類と発生量である。固化体の種類によって廃棄物を分類しているが、ガラス固化体が高レベル廃棄物であるのは間違いのないとして、ハル・エンドピースセメント固化体とアスファルト固化体は概ねTRU廃棄物であり、アスベストセメント固化体とファイバークンクリート固化体は、TRU廃棄物か低レベル廃棄物に分類されることになろう。

この発生量の統計で注目する点は、設計値より実績が、さらに1991年実績より将来計画が遙かに少量になっている点であり、これは経験に基

づく技術の習熟と処理技術の開発によって発生廃棄物の大幅な減量が可能なことを示唆していると思われる。

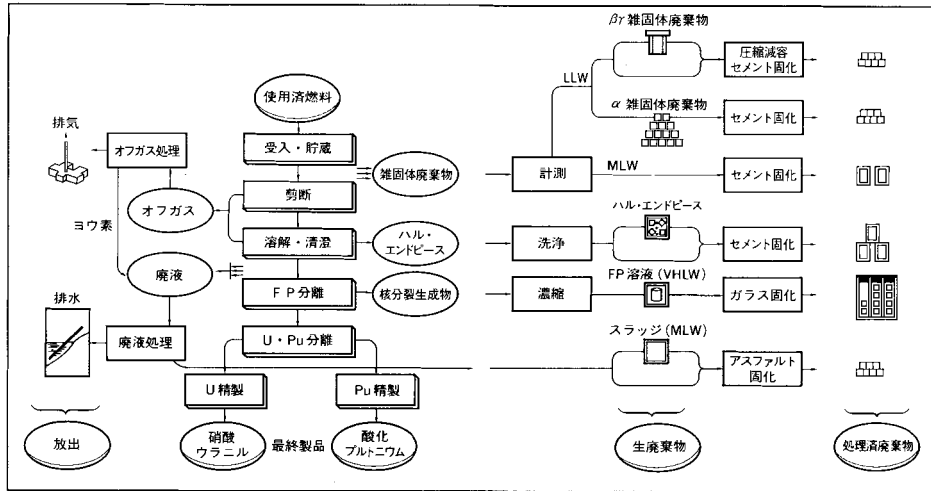
また、このCOGEMA社の統計は、ピュレックス法による再処理によって発生する放射性廃棄物に関する代表例であり、使用済燃料の仕様、再処理工程、処理能力などの違いによって異なった統計になると考えられる。

第2図は、ラ・アーク再処理工場における各工程で発生する生廃棄物とその処理の経路を示したものである。使用済燃料は、プール中で湿式貯蔵されたのち再処理工程に取り込まれ、切断工程、溶解・清澄工程を経て溶液に溶解した燃料とハル・エンドピース（被覆管切断片と燃料集集体断片）が分離される。ハル・エンドピースは、洗浄されたのちセメント固化される。燃料溶解液は、FP分離工程でウラン・プルトニウムが抽出され、抽出残渣がFP廃液となる。FP廃液は、蒸発濃縮して硝酸を回収し、高レベル廃液として貯蔵されたのちガラス固化される。抽出分離されたウランとプルトニウムは、U・Pu分離工程でウランを抽出してプルトニウムと分離され、各々の精製工程を経て最終製品となる。

これらの工程において、使用される各種装置・機器の運転保守によって発生する補修・交換部品は雑固体廃棄物となり、付着放射能が計測されたのち、放射能と形状に応じて区別されセメント固化される。また、洗浄液などの廃液は、蒸発処理され、蒸発残渣のスラッジは現在アスファルト固化されている。COGEMA社では、このアスファルト固化に供するスラッジを高レベル廃液と一緒にガラス固化する方法を開発中であり、1995年に

第2表 COGEMA社ラ・アーク再処理施設からの放射性廃棄物

固化体の種類		ガラス固化体	セメント固化体	アスファルト固化体	アスベストセメント固化体	ファイバークンクリート固化体
廃棄物		主に核分裂生成物	ハル・エンドピース	蒸発濃縮スラッジ	運転保守廃棄物（圧縮減容なし）	運転保守廃棄物（圧縮減容あり）
全放射能比%	設計値	$\beta\gamma$	98.4	1.5	0.05	—
		$\alpha$	99.7	0.1	0.05	0.07
	実績（除トリウム）	$\beta\gamma$	97.6	2.3		0.1
		$\alpha$	99.5	0.4		0.1
発生量 m <sup>3</sup> /tU	設計値	0.15	0.7	0.7	1.7	3.8
	1991年実績	0.115	0.6	0.45	0.2	1.4
	1995年計画	0.115	<0.6	0	0.2	1.4
	2000年目標	0.115	0.15	0	<0.2	<1.4



第2図 使用済燃料再処理によって発生する廃棄物（フランスCOGEMA社の例）

降はアスファルト固化体は発生しない計画となっている。

これらの廃棄物を収納する容器は、廃棄物の施設内取扱、貯蔵及び施設外輸送の安全性、効率性を考慮した材料及び形状となっている。第3図にCOGEMA社の容器の例を示した。

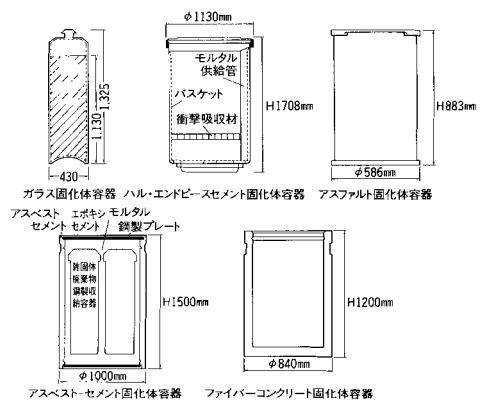
### 3. 再処理廃棄物の処理技術

#### (1) 高レベル廃棄物

高レベル廃棄物には、使用済燃料の放射能のうち、核分裂生成物、TRU元素の99%以上、抽出残のウラン、プルトニウムなどが含まれている。その結果として、40種類以上の元素、110以上の $\beta\gamma$ 核種及び70以上の $\alpha$ 核種が存在し、その放射能は経時的に減衰するが、長期にわたって潜在的危険性は大きい。初期の5、6百年の潜在的危険性には $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ などの $\beta\gamma$ 核種が主要な放射性物質であり、それ以降は $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Am}$ などのTRU元素が主要な核種となる。

高レベル廃棄物は、代表的溶媒抽出法のピュレックス法による再処理では、使用済燃料1トン当たり0.5~1.0 $\text{m}^3$ の硝酸酸性水溶液として排出されるので、安全管理及び効率的管理の上から物理的・化学的に安定な固形物にするのは不可避である。

高レベル廃棄物固化の技術開発の歴史は、1950年代までさかのぼることが出来、アメリカ、カナダ、イギリス、フランス、旧ソ連、旧西ドイツ、インド、ベルギー、日本、オーストラリア等にお



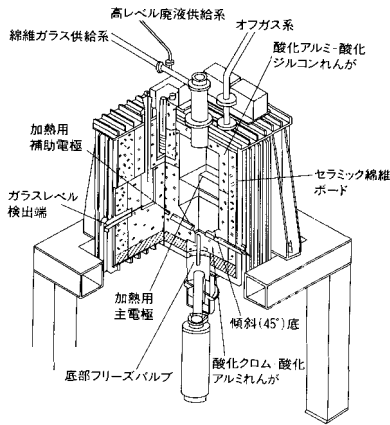
第3図 フランスCOGEMA社の廃棄物容器の例

いて、それぞれの技術的背景の基に多くの固化法が開発された。

一般に、固化法は固化体組成と固化方法によって特徴付けることが出来る。組成は非晶質と結晶質に大別され、将来技術の一つとしてのシンロック固化法が結晶質固化体として開発中であるが、現在の世界的主流は非晶質固化体であるホウケイ酸ガラス固化体とする方法である。一方、固化技術についても多くの方法が研究開発された。フランスで開発されたAVM（マルクルのガラス固化施設）方式では、ロータルキレン型仮焼炉を用いて廃液を蒸発、仮焼して粉体とし、誘導加熱方式の金属製溶融炉中でガラスと混合、溶融したの

第3表 COGEMA社ガラス固化施設(R7)と動燃事業団TVFの仕様

仕様項目	動燃のTVF	COGEMA社のR7	
前処理	なし	ロータリキルンで仮焼	
溶融	溶融炉材料	セラミック	
	加熱方法	直接通電	
	溶融温度	1100~1200°C	
溶融温度	1100~1200°C	~1100°C	
オフガス処理方式	一列処理	循環+一列処理	
固化体の主要組成 %	SiO <sub>2</sub>	43~47	45.1
	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14	13.9
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.5~5	4.9
	Na <sub>2</sub> O	10	9.8
	CaO	3	4.0
	EP酸化物	10	11.1
	TRU酸化物	0.8	0.9
	その他	11~14.5	10.3
処理能力(高レベル廃液換算)	0.35m <sup>3</sup> /日	一系統当たり 0.60m <sup>3</sup> /日	

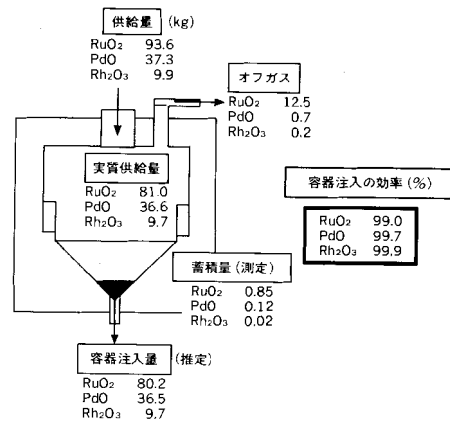


第4図 高レベル廃液ガラス固化溶融炉(動燃事業団TVFの例)

ち、溶融ガラスを容器に注入してガラス固化体を作製するもので、COGEMA社のラ・アーク再処理工場のガラス固化施設R7、T7及びイギリスBNFL社セラフィールド再処理工場のガラス固化施設WVP(ウィンズケールガラス固化プラント)で採用されている。動燃事業団東海のTVF(東海ガラス固化施設)では、廃液を仮焼せずに直接供給し、電極による直接通電加熱方式のセラミック製溶融炉で蒸発溶融して容器に注入する。この二つの方式が現在の世界を代表する実規模技術である。

第3表に、動燃事業団のTVFとCOGEMA社のR7の主な仕様をまとめた。高レベルガラス固化法は、高濃度の放射性核種を含む多元素混合の廃棄物を高温溶融して、すべて安定なガラス固化体とする技術であり、多くの開発要素が含まれる技術であるが、多年の技術開発によって実用段階に到達したものである。

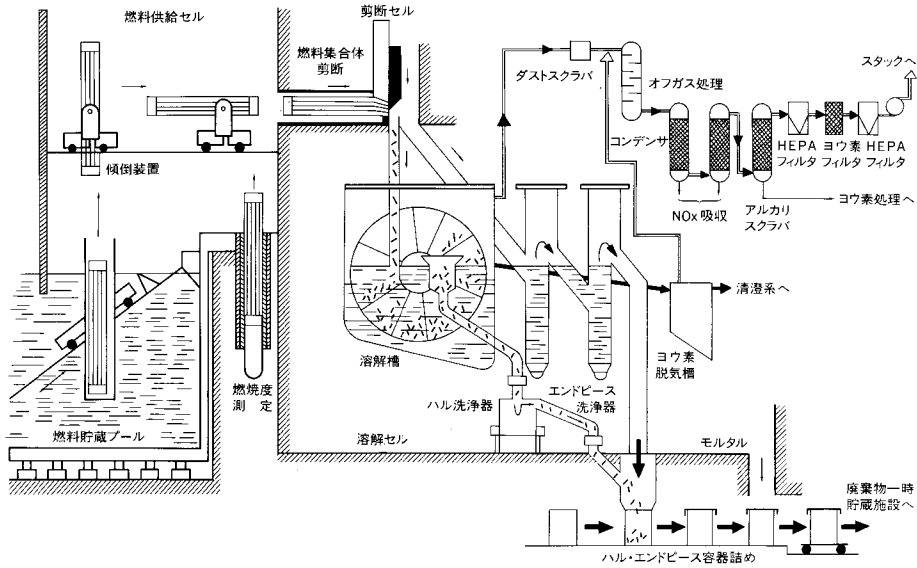
第4図は、TVFの心臓部であるセラミック溶融炉の鳥瞰図である。廃液を繊維ガラスに含浸させて供給し、オフガス系への放射性物質の飛散を低減させるとか、溶融炉の底部に傾斜を付けて均質な溶融ガラスが流出するようにするなどの工夫がされている。また、第5図は、廃棄物に含まれる白金族元素がガラス溶融中にどのような挙動をどるかを示している。元来、ルテニウムは揮発性元素としてオフガス処理系に負荷をかける元素である一方、パラジウム、ロジウムとともに溶融ガ



第5図 ガラス固化溶融炉における物資収支の例

ラスから析出しやすい性質のために溶融炉内で分相して蓄積する可能性を持っており、ガラス溶融技術開発の課題の一つになっていたものである。この図から、ルテニウムが若干揮発するものの溶融炉からの流出効率はすべて99%以上という良い結果を示している。

作製されたガラス固化体は数十年間の冷却貯蔵ののち、地層深く処分される計画である。その環境下において、含有廃棄物を閉じ込めている固化体の性能がどの程度であるかを調べる試験、例えば地下水にガラス固化体中の放射性物質がどの程度溶け出るかを調べる浸出試験など、及び固化体



第6図 再処理フロントエンドの廃棄物処理 (COGEMA社ラ・アーク工場の例)

からの放射性物質の漏洩に関連した諸物性の測定についても試験研究が進んでおり、貯蔵時、処分時の安全評価に必要なデータが蓄積されている。

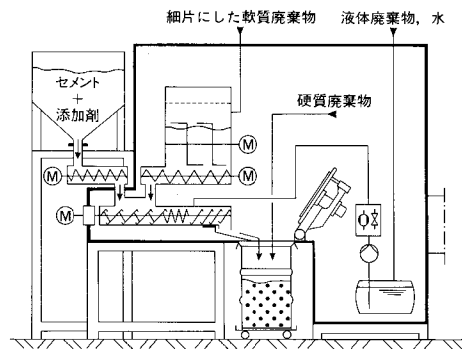
## (2) TRU廃棄物

使用済燃料には、第1表に示したように放射能で10%以上の長寿命の $\alpha$ 放射体を含んでおり、この $\alpha$ 放射体が重要な混入放射性物質であるような放射性廃棄物は、TRU廃棄物 ( $\alpha$ 廃棄物) として管理したほうが安全上効率的である。

再処理廃棄物のうちTRU廃棄物となる可能性のあるものは、ハル・エンドピース、洗浄液などを蒸発濃縮したスラッジ、廃液浄化系からの廃樹脂、抽出剤の希釈剤として使用したドデカンなどの廃溶媒、運転保守時に発生する装置・機器の交換部品、フィルタ、衣類、紙などの雑固体廃棄物などがある。

TRU廃棄物を固形化する方法としては、現在セメント固化が主流である。セメント固化には、液体とか粉体を均質に混合して固化体とするセメント均質固化と固体廃棄物の表面をセメントで被覆してしまうセメント充填固化とがある。第6図は、COGEMA社ラ・アーク再処理工場のフロントエンドのフローを図示したものである。この中にハル・エンドピースのセメント固化及びオフガス処理系統など廃棄物処理関連装置も示されている。

セメント固化技術においても、各国でいろいろ



第7図 セメント固化技術の一例

な方法が開発され使用されている。第7図はドイツで開発された軟質・硬質固体廃棄物と液体廃棄物をエクストルーダの中でセメントと連続的に混合セメント固化する装置の例である。

セメント固化の他に、固化媒体としてアスファルト (ピチューメン)、プラスチック (ポリエステル、エポキシなど)、ガラスを用いた固化法、ケイ酸塩、アルミン酸塩などとアルカリ水で混合し高温高压下で反応固化する水熱固化、1000トンにも達する圧力で圧縮して固化する高压圧縮固化、金属廃棄物を高温溶融して固化する溶融固化等がある。

第4表 代表的なTRU廃棄物固化処理技術  
(開発中も含む)

固化処理方法	適用可能廃棄物の例
セメント均質固化	蒸発濃縮スラッジ 焼却灰
セメント充填固化	ハル・エンドピース 雑固体廃棄物 廃樹脂 ペレット固化物
水熱固化	蒸発濃縮スラッジ 焼却灰
アスファルト固化	蒸発濃縮スラッジ
プラスチック固化	蒸発濃縮スラッジ 廃樹脂 廃溶媒
ガラス固化	蒸発濃縮スラッジ 焼却灰
高圧圧縮固化	ハル・エンドピース 雑固体廃棄物
溶融固化	蒸発濃縮スラッジ ハル・エンドピース 雑固体廃棄物 焼却灰

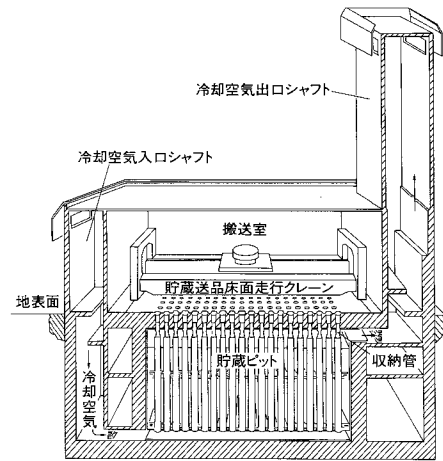
さらに、それらの固化処理をする前処理として、破碎、焼却、ペレット固化などがあり、これらの前処理と組み合わせて固化処理される場合もある。

第4表にTRU廃棄物の代表的な固化処理技術と適用可能な廃棄物の例をまとめた。種々の再処理廃棄物をどの処理法によって処理するかは、処理効率も含めた技術の達成度とともに、処理された廃棄体がその後どのように管理されるかを考慮する必要がある。言い換えれば、固化法の選択は、固化体の貯蔵、輸送、処分の全過程についての安全性、効率性を考慮して選択するのが肝要と考えられる。

### (3) 低レベル廃棄物

再処理廃棄物のうち、 $\alpha$ 核種の混入が無視でき、 $\beta\gamma$ 核種が、主要放射性物質である低レベル廃棄物は、TRU廃棄物と区別して管理することができる。これは、廃棄物の潜在的危険性が持続する期間、測定が容易な $\beta\gamma$ 核種を指標に管理しておけば安全が確保できるからである。実際には、汚染線源の種類と量によって再処理施設内を区域を分け、そこからの発生廃棄物を区別するなどしている。

いずれにしても低レベル廃棄物の発生量と固化処理法は、TRU廃棄物のそれと重複するので、ここでは省略する。



第8図 日本原燃六ヶ所の返還ガラス固化体貯蔵施設

## 4. 貯蔵技術

### (1) 高レベル廃棄物

高レベル廃棄物、即ちガラス固化体の貯蔵技術については、歴史的に水冷式プール貯蔵、空冷式ヴォルト貯蔵、密閉式キャスク貯蔵などが提案されてきた。

第8図に、昨年着工された日本原燃(株)六ヶ所再処理・廃棄物事業所の返還ガラス固化体貯蔵施設の鳥瞰図を示す。この施設は、間接自然空冷方式であり、地下ヴォルトは二系統あり、一系統80本の立て置き二重管ピットがあり、9体のガラス固化体を各ピットに貯蔵できる。冷却空気は二重管の間隙を、固化体中の放射性物質の崩壊熱によるドラフト効果によって下から上に流れ間接的に冷却することになっている。

第5表に、ガラス固化体の貯蔵方式とそれを採用している貯蔵施設をまとめた。直接強制空冷方式は、固化体容器の外側に直接接触している冷却空気をフィルタを通してフロアで強制的に排出するものである。また、キャスク貯蔵は、輸送と貯蔵両用の容器(キャスク)に入れたまま貯蔵する方式である。

### (2) その他の廃棄物

TRU廃棄物、低レベル廃棄物の貯蔵は、すでに実用段階であり、作業者の安全を守り、いかに効率よく貯蔵するとの観点から貯蔵施設は設計され、運転されている。

**第5表 ガラス固化体の貯蔵方式と施設の例**  
(計画中也含む)

貯蔵方式	採用施設の例	
直接強制空冷貯蔵	フランス ベルギー 日本	ラ・アーグ貯蔵施設 モル返還廃棄物貯蔵施設 動燃東海一時貯蔵施設
間接自然空冷貯蔵	イギリス 日本	セラフィールド貯蔵施設 六ヶ所返還ガラス固化体貯蔵施設 六ヶ所再処理工場貯蔵施設
キャスク貯蔵	ドイツ スイス	ゴアレーベン貯蔵施設 ビューレンリンゲン返還廃棄物貯蔵施設

**5. 処分技術開発の現状**

低レベル廃棄物については、我が国でも埋設処分が開始された。高レベル廃棄物、TRU廃棄物については、地層深く(300~1000m)処分する地層処分の考えが主流である。スウェーデン、スイス、ベルギーなどにおいて地下実験所を開設し、色々な種類の地層を用いて処分場開設技術及びその安全性に関連した試験研究を行っている。そこ

での主要な研究課題は、地下における固化体と周辺環境との反応、地下水、放射性元素の動き、岩盤の構造強度などについての試験と、それらの試験技術の開発及び測定技術の開発である。しかし、未だ、高レベル廃棄物とTRU廃棄物を本格的に処分している国はない。第6表にIAEAでの関連会議の資料を基に、世界の国々の地層処分場サイト選定の現状をまとめた。これを概観すると本格的な処分は、21世紀にずれ込みそうな気配である。

**6. 再処理廃棄物の管理に関連した今後の課題**

**(1) 廃棄物低減と廃棄物処理技術の高度化**

使用済燃料の再処理工程は、U・Puの分離を目的として開発されたものであることから、発生廃棄物の処理・貯蔵・処分を考慮すれば、工程などに改良する余地はあるものと考えられる。特に、TRU廃棄物の発生量と含有放射能を低減する努力は、COGEMA社などで既になされているが、今後もさらにこの傾向は進むものと思われる。また、発生した廃棄物の処理技術の高度化も、それ以降の効率的管理には重要であろう。

**第6表 各国における地層処分場選定の進捗状況**

国名	廃棄物種類	予備調査	サイト選定作業	サイト名	特性評価	建設	操業開始
ベルギー	LLW ILW/HLW	実施中 終了	実施中 終了(候補サイトと共存)	— Mol	— 実施中(URL)	— —	— —
カナダ	SF <sup>1</sup>						
フィンランド	LLW/ILW SF	終了 終了	終了(共存サイト <sup>2</sup> ) 終了(共存サイト <sup>2</sup> ) 実施中	Olkiluoto Loviisa —	終了 終了 —	終了 — —	1992
フランス	HLW/ILW	終了	実施中 <sup>3</sup> 実施中 <sup>3</sup>				
ドイツ	LLW/ILW LLW/ILW HLW	終了 終了 終了	終了 終了 終了	Asse(URL) <sup>4</sup> Konrad Gorleben	終了 終了 実施中	終了 終了 —	1967 1992 —
日本	HLW	終了 <sup>5</sup>	—	—	—	—	—
スウェーデン	LLW SF	終了 実施中	終了(共存サイト <sup>2</sup> ) —	Forsmark —	終了 —	終了 —	1986 —
スイス	LLW LLW/HLW/SF	終了 実施中	実施中 —	— —	実施中 —	— —	— —
イギリス	LLW/ILW	終了	実施中	Sellafield	—	—	—
アメリカ	L/ILW/TRU HLW/SF	終了 終了	終了 終了	WIPP Yucca	終了 実施中	終了 —	— —

LLW；低レベル廃棄物、ILW；中レベル廃棄物、HLW；高レベル廃棄物、SF；使用済燃料

注1；カナダは処分概念の環境評価が完了してからサイト選定作業を始める予定である。

注2；発電所サイトに共存。

注3；フランスは、2サイトの選定を実施中。

注4；ドイツのAsseには地下研究施設として1967年~78年に12.3万本の低レベル廃棄物、1972~78年に1,300本の中レベル廃棄物を廃棄している。

注5；第1段階(有効な地層の選定)を1984年に終了した。

## (2) 廃棄体含有放射能測定技術の高度化

$\alpha$ 放射体によって汚染された廃棄物中の $\alpha$ 放射体含有量は、廃棄物発生工程における測定値などをベースに決められている。しかし、常に品質管理の行き届いた工程からの廃棄物とは限らず、二重チェックの意味からも含有 $\alpha$ 放射体の量を簡便な非破壊測定によって精度良く評価できるようになれば、より効率的な管理が可能となろう。

## (3) 廃棄物処分を取り込んだ効率的燃料サイクルの構築

高レベル廃棄物及びTRU廃棄物の処分に関しては、多方面の課題が多く、それらの検討に予想以上の時間が掛かり、関連の研究開発にもある程度の期間が必要な状況である。しかし、廃棄物処分が実施されてはじめて燃料サイクルは完結するものであるだけに、廃棄物処分を取り込んだ一連

の燃料サイクルとして、国民的合意が得られるように一段と効率的かつ具体的な燃料サイクルの構築が必要と考えられる。

なお、本調査をまとめるに当たって、以下の資料などを参考にした。

○IAEA TRシリーズNo.176 (1977)

○同上 No.187 (1979)

○同上 No.229 (1983)

○同上 No.326 (1991)

○IAEA SM-261/45 (1983)

○M.Bonedict他著、清瀬訳 燃料再処理と放射性廃棄物管理の化学工学 (1983)

○RECOD'91報文集 (1991)

○その他 動燃事業団、日本原燃、COGEMA社発行のパンフレット類など。

(田代晋吾)

# センターのうごき

## 原研・動燃・電中研との業務連絡会議

平成4年10月13日(火)開催し、平成4年度に推進する調査研究の内容等につき説明しました。

## 平成4年度調査研究受託状況

平成4年度の事業として、平成4年9月1日以降12月末までの間に、次の受託契約が行われました。

委託者	調査研究課題	契約年月日
科学技術庁	・低レベル放射性廃棄物最終貯蔵システム安全性実証試験	4.9.17
	・放射性廃棄物発生量低減化システム確立調査	4.9.17
	・放射性廃棄物埋設施設の確率論的評価手法に係る調査研究	4.10.1
	・アルファ廃棄物処分基準整備調査	4.10.5
	・放射性廃棄物の処理処分に関する広報	4.10.19
	・放射性廃棄物の処理処分に関する広報ビデオの作成	4.12.14
電力各社等	・雑固体廃棄物の処分方策に関する研究	4.9.18
	・各種バリア性能への影響要因評価に関する研究	4.9.18
	・金属等廃棄物の再利用基準整備に関する研究	4.10.12
	・低レベル放射性廃棄物の確認に関する研究	4.11.26
日本原子力研究所	・高レベル放射性廃棄物等の海洋底下処分における安全評価の調査	4.9.16
動燃事業団	・放射性廃棄物処分におけるモニタリングの調査研究	4.11.5

編集発行

財団法人 原子力環境整備センター  
〒105 東京都港区虎ノ門2丁目8番10号 第15森ビル  
TEL 03-3504-1081 (代表) FAX 03-3504-1297