



## 8. 放射性廃棄物の処理と処分

(1)

原子力発電所、研究用原子炉、放射性同位元素使用施設、核燃料の製造あるいは再処理施設などのいわゆる原子力施設からは、もはや利用価値がなく、あるいは放射能物質により汚染されて、どこかに片づけねばならない、すなわち処分 (disposal) をしなければならぬ放射性廃棄物が出てくる。ごく低い放射能レベルの廃棄物は、この中の放射性物質が人間の生活に還元してきたときに、人体に何らの影響もおよぼさない程度にまで環境中で十分に希釈・分散されることが明らかな場合には、そのまま環境に放出処分することができる。しかし一般には、これら廃棄物をそのまま野放図にわれわれの環境に捨てることは、容易に環境の汚染問題を惹起してしまうことになるので、安全処分に適する形にまでこれらの廃棄物を区分けしたり、加工したり、process したりする、すなわち処理 (treatment) することが必要となる。

人間が放射性物質からの放射線により悪影響を受けることを防止するという大きな命題への解決の努力の一つとして、放射性物質による環境汚染防止のため、また環境の安全管理や、飲料水中の放射性物質の除去などのために必要になってくる engineering の分野は、上下水道、都市塵芥処理などを主体とする従来からの衛生工学の知識はもとより、まず直接的な放射線障害の防止から出発した保健物理 (Health Physics) の知識を、また放射性物質の挙動に関連して気象学、水文学、水理学、粘土鉱物学等の知識を、処理装置のプロセス設計、機器設計には、化学工学、化学機械の知識を必要とするなど、広汎な関連科学・技術の知識を必要とする。この新技術分野は、今や放射線衛生工学として原子力産業推進には欠くことのできない存在となり、特に環境汚染防止のた

め、放射性廃棄物の処理と処分の計画ないしはその実施に際しては、安全性の確保と経済性の問題解決にその大きな貢献が期待されている。

後述のごとく、廃棄物の最終処分のための地中埋没保管や海中投棄には、地下コンクリート・パンカやコンクリート容器の問題、河川、海水中への希釈放流には、水理学、海岸・海洋工学からみて研究すべき問題があるなど、土木工学界が取上げるべき研究課題が、最近の原子力発電所建設進展とともに、現実問題としてクローズアップされてきている。

(2)

放射性廃棄物の特殊性は、言うまでもなく、その持つ放射能にある。放射能 (radioactivity) とは、ある核種 (nuclide) が自発的にエネルギーの粒すなわち放射線 (ray, radiation) を出して他の核種に壊変 (decay, disintegration) する性質を言うのであって、現在のわれわれの知識をもってしては、その核種特有の自発的壊変現象を制御し得ない以上、われわれは廃棄物中の放射性核種を適切な方法で集めて何らかの濃縮した形にし、残りをそれだけ希薄になった形にする (汚染除去または除染と言う) ことが処理であって、あとは貯留により、さらに自然減衰をはかるしか方法がない\*。もちろん一般産業からの廃棄物に対すると同様、物理的、化学的、生物学的性質上での害毒除去を決して忘れてはならないが、この場合われわれが第一義的に取り組まねばならないのは放射線障害問題である。したがって、処理後の濃縮分については、放射線の遮蔽設備のある場所、あるいはわれわれの手の届かない場所へ運ぶなどの隔離処分を、また希薄分については、さらに希釈を行なって許容値以下にして環境へ安全な放出分散処分を行なうことになる。

しかしながら、この許容値が一般廃棄物の場合と違ってけた違いに厳しい。たとえば、われわれの飲料水中の共存物質許限度でも通常 ppm のオーダー、すなわち 1 ml 中数マイクログラムのものであるのに、放射性核種では、排出口での廃液 1 ml 中  $10^{-6}$  μg 程度以下でないと放流処分を許されないのが普通である。非放射性的の銅の飲料水中の最大許容濃度は、1 μg/ml であるのに対して、 $^{64}\text{Cu}$  の場合は、 $0.5 \times 10^{-10}$  μg/ml で、前者の約 200 億分の 1 の量が問題視される (表-12 参照)。

これは、放射性物質を飲用・呼吸などにより人体内に取込んでも放射線障害を蒙らないような水中・空気中の最大許容濃度に基づいて放出規制が行なわれているため

\* 7 半減期経過すれば、はじめの放射エネルギーの約 0.8% の放射エネルギーに減衰してしまうので、短半減期の放射性核種には、貯留はきわめて経済的な「除染」の有効な手段である。

表-12 最大放出許容濃度の例

種類	核種	半減期	比放射能 (Ci/g)	最大放出許容濃度	
				放射能単位 による ( $\mu$ Ci/cc)	重量単位に 換算 ( $\mu$ g/cc)
水中	$^{226}\text{Ra}$	1622年	0.98	$1 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-8}$
	$^{137}\text{Cs}$	30.2年	$0.87 \times 10^2$	$2 \times 10^{-4}$	$2.3 \times 10^{-6}$
	$^{90}\text{Sr}$	27.4年	$1.46 \times 10^2$	$4 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-9}$
	$^{131}\text{I}$	8.06日	$1.23 \times 10^5$	$2 \times 10^{-6}$	$1.6 \times 10^{-11}$
空中	$^{64}\text{Cu}$	12.8時	$3.83 \times 10^6$	$2 \times 10^{-4}$	$0.5 \times 10^{-10}$
	$^{85}\text{Kr}$	9.4年	$4.99 \times 10^2$	$3 \times 10^{-7}$	$6.7 \times 10^{-10}$
空気中	$^{131}\text{I}$	前出	前出	$3 \times 10^{-10}$	$2.4 \times 10^{-15}$
	$^{222}\text{Rn}$	3.83日	$1.54 \times 10^5$	$1 \times 10^{-9}$	$6 \times 10^{-15}$
	$^{210}\text{Po}$	109分	$4.22 \times 10^7$	$4 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-15}$

注) 放射能単位キュリー (c または Ci): 1 キュリーとは、原子核が毎秒  $3.7 \times 10^{10}$  個の割合で壊変する放射性物質の量をいう。  
 $1 \mu\text{Ci}$  は毎分約 2 崩壊するような量、したがって計数効率 が 50% の測定器を使用する場合は、毎分 1 カウントを与えるような量と記憶すると便利である。

であって、このような微量性のゆえに、除染処理には高度の技術が必要とし、除去対象核種に応じて、それぞれ適切な処理方法を選び、または組合わせて、効率的にかつ経済的に行なう必要がある。要は、まず、廃棄物の発生源における分別貯留、閉じ込め (confinement) の思想を適用して液量をいたずらに増さないとか、せつかく分かれている長、短半減期の核種の混合を避ける努力など

図-4 放射性廃棄物の管理

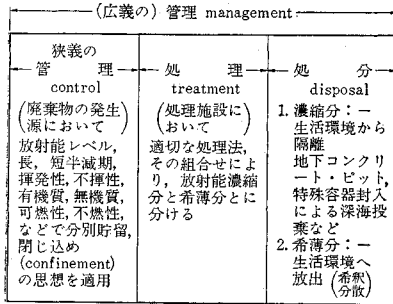
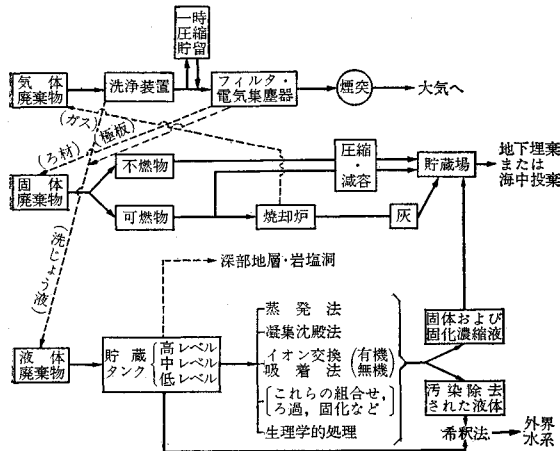


図-5 廃棄物の処理と処分の概要



の廃棄物の管理から始め、放射線の種類やそれに対する遮蔽や微量性に考慮を払い、濃縮減容と希釈分散と自然減衰によって、最終的な処分の措置を講ずることである。

このように廃棄物の発生源における control から、最終処分、永久保管に至るまでのわれわれの努力を広義の廃棄物管理と言ひ (図-4 参照)、処理方法を中心に、処理過程で生ずる二次廃棄物、処分などの相関関係を入れて処理と処分の大要を図示すると図-5 のごとくなる。また、中規模処理施設での処理処分費の一例を表-13 に示す。凝集沈殿法は、処理の費用は安い、放射能

表-13 廃棄物処理処分費

処理法	単価	処理法	単価 (円/l)
1. 焼却処理	23 円/l	固化処理費 (貯蔵用)	50
2. 凝集沈殿処理	1270 円/m <sup>3</sup>	海洋投棄費	180
3. 蒸発濃縮処理	30000 円/m <sup>3</sup>	貯蔵費	100
4. 圧縮処理	3.2 円/l	固化貯蔵費	250

注) 1, 2, 3, 4, いずれも灰、スラック、濃縮液などの処理二次産物の固化処理と貯蔵費を含む。これらを含まない場合には、2. の処理費自体は 1 m<sup>3</sup> 当り数百円程度、3. は単効用缶で約 10000 円、大規模施設での自己蒸気圧縮缶で 5000 円程度と考えればよい。

除去率は、一段処理で 90~95% 程度なので、大量の低レベル廃液処理に向き、蒸発濃縮処理は、費用は高いが、除去率は通例きわめて高くとれ、始めの放射能の百万分の一ぐらいにまで清めることができる。イオン交換法は、一般に費用、除去率もこの両者の中間になるが、廃液中の塩類濃度が高いと、イオン交換能がすぐ失われて、結局処理費がきわめて高くなる。技術的に各処理法にはそれぞれ長所、短所があって適用に制限を受けるので、適材を適所に組合わせ、処理後の処分費も安くなるように心がけねばならない。なお、処理装置・施設の新設費を節約するの余り、運転費や処分費がかかりすぎたり、安全性を損なうことがあってはならない。いずれにしても、廃棄物処理・処分の経済性については、常に図-4 廃棄物の管理全般を通じて検討せねばならない。

参考までに、放射能レベル区分と処理法の常識的な関係を表-14 に示すが、これは一つの目安で、一般に各施設ごとに、また目的によって種々の組合せ処理をするのが普通である。

(3)

原子力発電より生ずる放射性廃棄物には、原子炉内で放射化されるために生ずる誘導放射能物質と、核分裂生成物 (死の灰, F.P.) によるものがあるが、後者は、現在の実用で炉は核燃料が被覆材に包まれているので、被覆材の欠陥のため漏

表-14 放射性廃棄物のレベル区分およびその一般的処理方法の例

種類	レベル	濃度	一般的処理方法
固体状	高レベル	1 mc/cm <sup>3</sup> 以上	地下コンクリート・ビット貯蔵
	中レベル	1 mc/cm <sup>3</sup> ~ 1 μc/cm <sup>3</sup>	
	低レベル	1 μc/cm <sup>3</sup> ~ 10 <sup>-3</sup> μc/cm <sup>3</sup>	
	極低レベル	10 <sup>-3</sup> μc/cm <sup>3</sup> 以下	
液体状	極高レベル	100 mc/cm <sup>3</sup> 以上	タンク貯蔵 タンク貯蔵 蒸発濃縮, イオン交換処理 凝集沈殿処理, ろ過 希釈放流
	高レベル	100 mc/cm <sup>3</sup> ~ 1 mc/cm <sup>3</sup>	
	中レベル	1 mc/cm <sup>3</sup> ~ 10 <sup>-3</sup> μc/cm <sup>3</sup>	
	低レベル	10 <sup>-3</sup> μc/cm <sup>3</sup> ~ 10 <sup>-6</sup> μc/cm <sup>3</sup>	
	極低レベル	10 <sup>-6</sup> μc/cm <sup>3</sup> 以下	
気体状	高レベル	10 <sup>-3</sup> μc/cm <sup>3</sup> 以上	フィルタ, 静電除塵器 スグラッパ 希釈放出
	中レベル	10 <sup>-3</sup> μc/cm <sup>3</sup> ~ 10 <sup>-6</sup> μc/cm <sup>3</sup>	
	低レベル	10 <sup>-6</sup> μc/cm <sup>3</sup> ~ 10 <sup>-9</sup> μc/cm <sup>3</sup>	
	極低レベル	10 <sup>-9</sup> μc/cm <sup>3</sup> 以下	

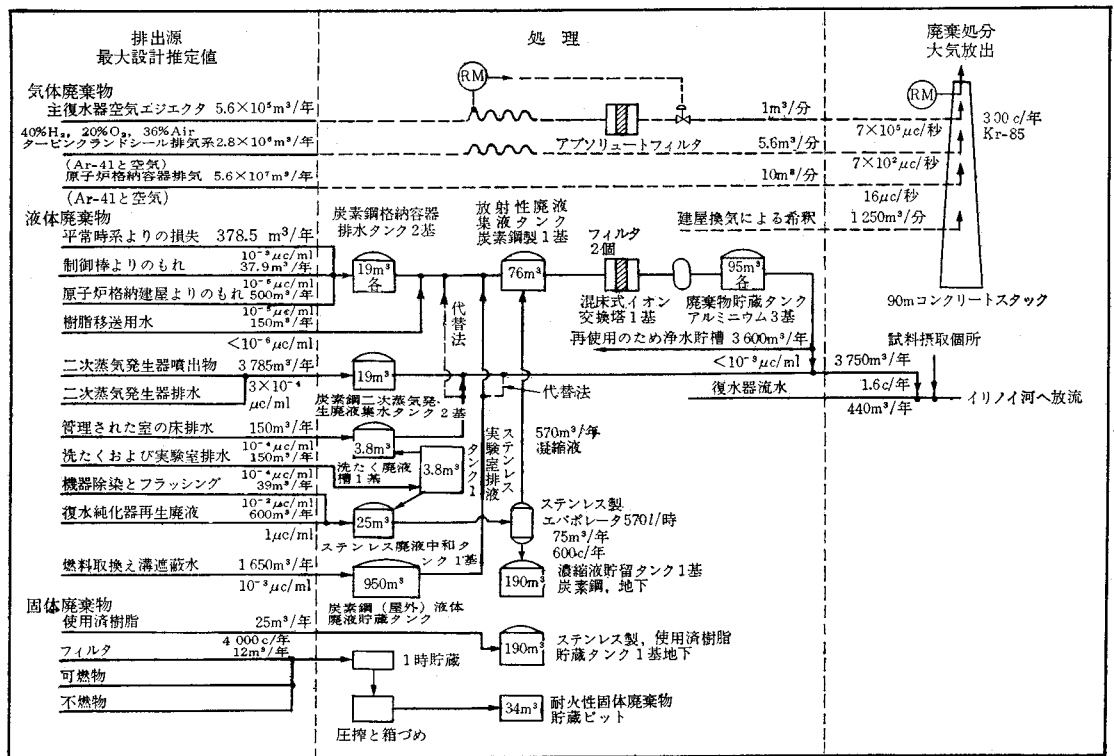
出すか、その表面に付着しているごく微量のウランが核分裂を起して F.P. となり、発電所の廃棄物の中に出てくるだけで、F.P. は使用済核燃料再処理工場においてはじめて多量に取出される。前者については、米国型の軽水炉、特に沸騰水型炉の場合に比較的年間発生放射エネルギーが多く、その主なものは固体、固化体の形でドラム缶などに入れて貯蔵されることになる。すなわち、使用済イオン交換樹脂、フィルタ・スラッジ、蒸発濃縮廃液、その他雑固体廃棄物であるが、電気出力 30~80 万 kW クラスで、運転可能最悪状態として、計算前提条件の想定いかんでは年 10~20 万 Ci、ドラム缶詰として年

間数千本という数字が得られるようであるが、通常時では、はるかに下まわるものと思われる。また同じ軽水炉でも、加圧水型炉の場合は原子炉一次系と熱交換器を介して蒸気タービン二次系とを分けているために、放射エネルギーで 2 けた近く、ドラム缶数で 1 けた近く低くなると想像される。英国型ガス冷却炉では、一次冷却系に CO<sub>2</sub> を使用するの、誘導放射能が少なく、発電所での放射性廃棄物量はさらに一段と低い。ただ東海炉のように腐食し易いマグノックス被覆材を使用する場合には、使用済核燃料冷却池水を、その貯水量の約 3% を 1 日当りの処理量（東海炉では

約 130 m<sup>3</sup>/日）として処理することになっているが、池水の放射能レベルもおおよそ 10<sup>-5</sup> μc/ml 程度以下と推定されていて、廃棄物に関しては、軽水炉より全般的にずっと楽になっている。

実用化されている湿式法の再処理工場においては、脱被覆後処理本工程第一サイクルでまず死の灰の 99% 以上が分けられ、さらに濃縮され、貯留される。この放射能濃度は 1 Ci/cc 前後のごく高レベルで、大ざっぱに言って、使用済燃料 1 t につきおおよそ百万 Ci 程度が保管貯蔵されねばならない。また使用済燃料は、原子力委員会再処理専門部会報告書（昭和 37 年 4 月 11 日）によれ

図-6 合衆国沸騰水型軽水炉ドレステン原子力発電所 No.1 (出力 20 万 kW) の廃棄物処理系



ば、昭和 55 年で約 1000 万 kW 発電設備に対して、約 600 t/年程度が処理対象になると見られており、現在では、原子力発電設備開発がさらにおよそ 2~3 割増加するすう勢にあるので、この量もさらに増加すると考えられる。また現在計画されている動力炉・核燃料開発事業団の 1 日 1 t 処理の再処理工場では、海洋への放出処分に付されると思われる低レベル廃液量は約 300 m<sup>3</sup>/日と想像されるが、必要な除染処理後安全な放流処分が行なわれるように、精力的な努力が重ねられている。

#### (4)

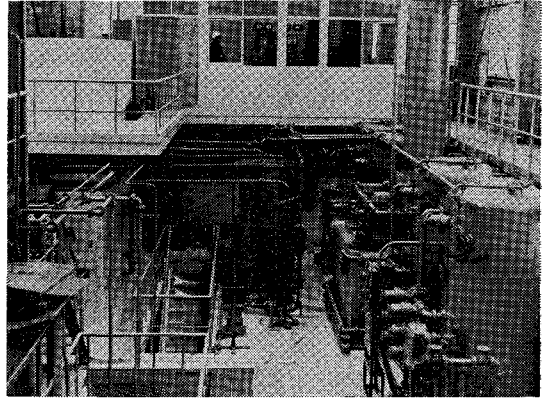
放射性廃棄物の管理については、いわゆる「放射線障害防止法」「原子炉等規制法」、原子力発電所施設関係では「電気事業法」というように、それぞれの管轄省庁、関連事項によって規制が行なわれている。たとえば、海洋投棄処分の場合は、① 封入する容器は、廃棄の際および廃棄後において破損する恐れのない程度の強度を有し、水が浸透せず、かつ、腐食に耐えるものであること、② 容器に封入したときの比重が 1.2 以上であるものとする、③ 投棄する箇所の深さは 2000 m 以上であること。と規制されている。これらの条件を満足させ、十分な強度と耐久性を有し、かつ廃棄物の封入有効空間をできるだけ大きくし、廉価である容器を開発して安全性の確保と経済性を満たすことは、実際は大変な難問題である。

土木学会では、科学技術庁より昭和 38 年度、39 年度、40 年度の海洋投棄用鉄筋コンクリート容器に関する試験研究を委託され、一応その設計および製作方法のおおよその規準を得る成果を上げており、受領した研究費も総額 1400 万円余におよんでいる。この研究では、配筋設計、容器の水密性、耐蝕性、弁構造等の基礎的研究から始め、小型模型実験を経て、球形、卵形、円筒形の 3 種の密閉式と 2 種の弁式および粘性層式鉄筋コンクリート容器の実物大試験体が製作され、水圧試験および落下試験を行なって安全性が検討された。

一方、主として、再処理工場から海洋へ放流処分を安全に行なうために、昭和 41 年度より原子力安全研究協会に海洋放出調査特別委員会が設けられ、さらに海岸工学を中心とした放出方法分科会が設けられて、その実施した一部基礎模型実験結果が昭和 42 年 10 月末に気象庁

写真—6 日本原子力発電(株)東海発電所  
放射性廃液処理場の一部

- ① 核燃料冷却池水処理系 (5.5 m<sup>3</sup>/h)
- ② 雑放射性廃液処理系 (5.5 m<sup>3</sup>/h) よりなる。  
非常時には処理量を倍加する。



講堂で報告された。4~5 年計画で、試算分科会の算出値 1 日最大 1 キュリーまで、安全に海洋へ放流処分するにはどうしたらよいかを当面の想定目標として実施される研究、放出実験、その後の試験放出に、土木学会関係の海岸工学の権威の参加、活躍の成果が期待されている。

また地中埋没保管、海洋投棄処分には水中への放射性核種の渗出が最小であるような、コンクリート固化体、アスファルト固化体が望まれ、原子力平和利用研究の一つとしても、関係者の間で、意欲的な固化処理の開発研究が続けられている。原子力発電実用時代に入り、年間数千本のドラム缶量の廃棄物が各原子力発電センターから出てくることを想定した場合、なまじ海洋投棄または地中埋没に不適当な固化処理をいったん行なってドラム缶詰にしてしまった場合は、地上保管以外の保存処分しなくなるので、早急に対策樹立が望まれている。前出の原安協に固体廃棄物処理処分小委員会が昭和 43 年 1 月より設けられ、放射線衛生工学を中心に関連科学・技術者が意欲的に取込むことになっている。

ごく高レベル再処理廃液の隔離保管には、長寿命核種の分離を行なって、残廃液の貯蔵の安全性と経済性を計る問題、耐震構造をもちかつ数メガ、数千メガ キュリーを相手とする遮蔽貯蔵施設、深部地層への格納または圧入固化、ガラス化、力焼固化等々、土木工学、衛生工学出身技術者の奪斗が望まれる課題が多々ある。