

JAERI - M

89-057

放射性廃棄物の発生とその後始末

1989年5月

中村 治人

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター
(〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内) で複写による実費頒布をおこなって
おります。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura,
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1989

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 球高野高速印刷

放射性廃棄物の発生とその後始末

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部
中村 治人

(1989年4月18日受理)

放射性廃棄物の発生とその特徴及び処理処分について、大学の教養部の学生に講義するためまとめた。詳しい技術的な事柄よりも考え方方に力点を置いた。まず、原子力エネルギー及び放射能とは何かについて簡単に述べ、将来の世代の人類の負担を減らすにはどうすればよいかとの観点を中心に廃棄物問題を論じた。

本稿は筑波大学で時間講師として3回にわけて講義した内容をまとめたものである。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

Generation of Radioactive Wastes and the Management

Haruto NAKAMURA

Department of Environmental Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 18, 1989)

This paper is prepared for the lecture on radioactive waste generation, their properties and waste management to students of university in educational grade. The lecture was emphasized more on the philosophical points than on technical details.

The atomic energy and radioactivity were explained briefly and problems of waste management are discussed on the reduction of the burden to future generations.

Keywords: Philosophy of Waste Management, Atomic Energy, Radioactivity, Burden to Future Generation

This is the summary of lectures at Tsukuba University which the author presented into 3 parts as a visiting lecturer.

目 次

はじめに.....	1
1. 放射性廃棄物の発生とその特徴.....	1
2. 長半減期核種を含む廃棄物の処分対策.....	4
3. 各種放射性廃棄物の処理処分.....	6
参考文献.....	8

Contents

Introduction	1
1. The radioactive waste generation and their properties	1
2. Strategy of disposal of the waste containing long-lived radioactive nuclides	4
3. Waste management of various radioactive wastes	6
References	8

はじめに

これから放射性廃棄物について説明する。皆さんにはいろいろな分野の人かいと聞いてるので、こまかに技術的な事柄は専門書を読んでいただくとして、考え方及び基本的な方針の説明に重点をおいて話す。考え方は、話す人の経験や立場でかなり違う。まず、私の経験を紹介する。昭和32年に工学部応用化学科を卒業し、日本原子力研究所に就職し、放射性汚染の除去の研究に2年、ラジオアイソotopeの製造研究に約20年、高レベル廃棄物の処理分の研究に約10年携わってきた。即ち、社会に出てからずっと放射能と付き合ってきた。放射能との関係では、かなり特殊な環境で過ごしてきた。そのような立場の人間の考え方であることを心にとめて、話を聞いてもらいたい。

1. 放射性廃棄物の発生とその特徴

今からおよそ10年前、廃棄物の仕事を始めた頃、一寸したきっかけで、プラトン全集全15巻¹⁾を読み下し、般若心経の解説書²⁾に夢中になったことがある。いずれも、わかり難い文章で、読み続けることは苦痛であった。それでもかかわらず読み続けた。プラトンの「イデア」、仏教の「空」の概念を少しでも理解したかったからである。「見方により、ものごとは異なって見える。人は「真理」を知り尽くすことはできない。」とでも理解したらよいのではなかろうか。

「原子力エネルギーを使えば、放射能が将来の世代に重大な悪影響をもたらす。」との見方がある一方、次のような見方もある。

「核反応によるエネルギーは化学反応エネルギーに比べて桁違いに大きい（表1参照）³⁾。石炭石油は長い間の太陽のエネルギーの蓄積によって出来た貴重な資源である。多くの合成材料や薬品の原料として、熱よりも遙かに高度な利用ができる。この貴重な資源を我々の世代で使ってしまうのは将来の世代に対し身勝手なことである。また、大量の化石エネルギーを使い、炭酸ガスの温室効果で、地球の温暖化を招き、極地の氷が解け、海面が上がり、貴重な陸地を海の底に沈める。原子力エネルギーの利用はそれを救う。」

原子力エネルギーを使へば、放射性廃棄物が残る。将来の世代に迷惑を掛ける潜在的な可能性を秘めていることは確かである。我々の祖先が火災という大きな危険性を秘めた火を使いこなすことにより、我々人類が発展したことでも確かである。火と上手につきあってきたように、放射能とも上手につきあっていきたいものである。危険性を持った物を上手に使いこなし、人類に役立たせるのが文明の本質ではなかろうか。

原子核は中性子と陽子（核子）から出来ている。 ^{16}O を構成する核子の重さを基準に、種々の元素を構成している核子の重さを調べて見る（図1参照）⁴⁾。鉄、ニッケルの付近の重さの元素を構成する核子は軽い。それより重い元素も、軽い元素も、構成核子が相対的に重い。これは、原子核を形造っている結合の強さが違うためである。軽くなっているのはそれだけの質量が原子核

は　じ　め　に

これから放射性廃棄物について説明する。皆さんにはいろいろな分野の人かいと聞いてるので、こまかに技術的な事柄は専門書を読んでいただくとして、考え方及び基本的な方針の説明に重点をおいて話す。考え方は、話す人の経験や立場でかなり違う。まず、私の経験を紹介する。昭和32年に工学部応用化学科を卒業し、日本原子力研究所に就職し、放射性汚染の除去の研究に2年、ラジオアイソotopeの製造研究に約20年、高レベル廃棄物の処理分の研究に約10年携わってきた。即ち、社会に出てからずっと放射能と付き合ってきた。放射能との関係では、かなり特殊な環境で過してきた。そのような立場の人間の考え方であることを心にとめて、話を聞いてもらいたい。

1. 放射性廃棄物の発生とその特徴

今からおよそ10年前、廃棄物の仕事を始めた頃、一寸したきっかけで、プラトン全集全15巻¹⁾を読み下し、般若心経の解説書²⁾に夢中になったことがある。いずれも、わかり難い文章で、読み続けることは苦痛であった。それでもかかわらず読み続けた。プラトンの「イデア」、仏教の「空」の概念を少しでも理解したかったからである。「見方により、ものごとは異なって見える。人は「真理」を知り尽くすことはできない。」とでも理解したらよいのではなかろうか。

「原子力エネルギーを使えば、放射能が将来の世代に重大な悪影響をもたらす。」との見方がある一方、次のような見方もある。

「核反応によるエネルギーは化学反応エネルギーに比べて桁違いに大きい（表1参照）³⁾。石炭石油は長い間の太陽のエネルギーの蓄積によって出来た貴重な資源である。多くの合成材料や薬品の原料として、熱よりも遙かに高度な利用ができる。この貴重な資源を我々の世代で使ってしまうのは将来の世代に対し身勝手なことである。また、大量の化石エネルギーを使い、炭酸ガスの温室効果で、地球の温暖化を招き、極地の氷が解け、海面が上がり、貴重な陸地を海の底に沈める。原子力エネルギーの利用はそれを救う。」

原子力エネルギーを使へば、放射性廃棄物が残る。将来の世代に迷惑を掛ける潜在的な可能性を秘めていることは確かである。我々の祖先が火災という大きな危険性を秘めた火を使いこなすことにより、我々人類が発展したことでも確かである。火と上手につきあってきたように、放射能とも上手につきあっていきたいものである。危険性を持った物を上手に使いこなし、人類に役立たせるのが文明の本質ではなかろうか。

原子核は中性子と陽子（核子）から出来ている。 $^{16}_0\text{O}$ を構成する核子の重さを基準に、種々の元素を構成している核子の重さを調べて見る（図1参照）⁴⁾。鉄、ニッケルの付近の重さの元素を構成する核子は軽い。それより重い元素も、軽い元素も、構成核子が相対的に重い。これは、原子核を形造っている結合の強さが違うためである。軽くなっているのはそれだけの質量が原子核

を形成する結合力に変わっているためである。地球の大部分は、鉄、ニッケル2元素で占められているのは、結合力の強い原子核であるためである。結合力の小さい原子核の代表的な原子核が水素であり、重い原子核がウランである。水素の原子核もウランの原子核も自然界に安定に存在するが我々の工夫で、より強い結合をしている原子核に変化させることができる。その結合力の差をエネルギーとして取り出して使うのが原子力利用である。水素からヘリウムへの変換が核融合炉であり、ウランを2つの小さな核に分裂させるのが核分裂炉である。

次に原子核を構成する中性子と陽子の割合を調べて見る。質量数（中性子数と陽子数の合計）と陽子の数との関係を、天然に存在する原子核についてプロットして見ると図2が得られる。⁴⁾ 日本列島とは逆向に曲がった曲線状に分布している。質量数が大きくなるほど陽子の数に比べ中性子の数が多いことがわかる。ウランが核分裂すると中性子が過剰となる。その過剰な中性子が次の核分裂に使われ、反応が継続して原子炉ができる。それでも中性子は出切らなく中性子が過剰の原子核、即ち、図2の曲線の下側に位置する不安定な原子核ができる。核分裂で生じた中性子過剰の原子核は、電子（ β 線）を放出することにより中性子が陽子に変り、図2の左上に移動し、安定な原子核に変わる。この過程で、高エネルギーの電磁波（ γ 線）を放出する。これが核分裂反応により $\beta-\gamma$ 線放出核種が生じる理由である。核融合反応に伴う生成物は安定なヘリウム原子核であり、放射線を出さない。核融合炉がクリーンであるといわれる理由はこの点にある。

原子炉の中で、ウランは核分裂反応以外に、更に中性子を吸収して、重い原子核（超ウラン元素）に変る反応も起こる。そうして出来た核は一般に大き過ぎて不安定である。それが証拠に天然にはほとんど存在しない。このような大きな原子核は電子（ β 線）の代わりに結合力の強い原子核であるヘリウム核（ α 線）を放出して順次軽い原子核に変わっていく（崩壊系列）。最後に安定な核である鉛に落ち着く。原子核を回る電子の軌道には決まった席（エネルギーレベル）があり、最外殻軌道が全部埋まっているネオン、ヘリウム、クリプトン、キセノンが化学反応を起こし難い安定な元素であるように、原子核も殻構造をしており、構成する中性子及び陽子にも原子核が安定になる数（Magic number）が決まっている。その数は陽子数28, 50, 82, 中性子数50, 82, 126である。その代表的な核が鉛（陽子数82）である。超ウラン元素は質量数4の安定核、ヘリウム核を放出して変化するので、4つの崩壊系列に整理される（図3）⁵⁾。いずれも、陽子数82の鉛又は中性子数126のビスマスの原子核まで変化した状態で安定化することがわかる。

ここで少し横道にはずれ、自然界の現象にしばしば現われる3つの面白い現象、「安定化現象」「循環現象」「自己相似性」について触れておきたい。

「安定化現象」：高い所から低い所へ、集中から分散へと、物事は進行する。面白いのは不安定な状態を越えないと移行しない例外があり、一気に安定な状態に移らないことがあることがある。この例外が原子力エネルギーの利用を可能にし、放射能を産む。

「循環現象」：雨が降り、川に流れ、海で蒸発して、また、雨になる。地球は太陽をまわり、季節ができる。なぜか、氷河期が繰り返しやって来る。元素には周期律があり、原子核にはMagic numberがある。

「自己相似性」：太陽のまわりに地球がまわり、地球のまわりに月がまわり、原子核のまわり

に電子がまわる。地下の岩盤には断層があり、岩盤には割れ目がある。割れ目と割れ目の間には、小さな割れ目がある。岩石には結晶粒界があり、鉱物の結晶の中には微小間隙がある。小さな部分を見ると、元と同じ性質に支配されている世界の一部である。そう考えると、これらの性質を定量的に知ることができれば、経験出来る世界での値から経験出来ない世界についての値の推察が可能になる。

さて、原子炉の中での放射能の生成の問題にもどる。核分裂で生じた中性子は次の核分裂反応や超ウラン元素成生反応に使われても余る。この中性子は燃料被覆材や冷却水中の元素に吸収される。天然の元素も中性子を吸収すると質量数が安定領域からずれ不安定な原子核（放射化生成物）になる。放射化生成物も中性子が過剰となるので、 β 線放出原子核となる。

以上、原子炉内で生じる放射性核種は核分裂生成物、超ウラン元素及び放射化生成物の3種類である。

核分裂反応によりエネルギーを取り出すシステムとして、図4^⑥の核燃料サイクルがとられている。即ち、鉱石からウランを取り出し、燃料として原子炉内で核反応を起こさせる。原子炉で核反応に使われるのは僅かであり、大部分のウランは残るので、溶解して、燃料として使えるプルトニウムと一緒に回収する。

それぞれの過程で次の放射性物質を含む廃棄物が出る。

- ①ウラン精錬：天然のウランの α 崩壊生成物であるラジウムを含む鉱滓がウランを抽出した後に残る。
- ②原子炉：原子炉材料から冷却水に溶け出した成分が中性子を吸収した放射化生成物が主体であり、主な核種を表2^⑦に示す。半減期と生成量から見ると取扱いの点から ^{60}Co 、処分の点から ^{14}C が重要である。その他、燃料棒表面の汚染ウランの核分裂や僅かな被覆管のピンホールからのもれによる核分裂生成物が含まれる。廃棄物中の核分裂生成物の量は加工技術の進歩とともに少なくなっている。
- ③再処理：核分裂生成物の殆ど全部と超ウラン元素（T R U）が廃棄物に含まれる（表3参照^⑧）。主な核種は半減期約30年の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs と超ウラン元素の ^{237}Np 、 ^{241}Am 、 ^{243}Am 、 ^{244}Cm である。また、燃料の精製過程からはプルトニウムを含む廃棄物が出る。

これまでの話をここまでまとめてみる。原子力利用は結合力の小さい原子核を結合力の大きい原子核に変へることにより得られるエネルギー利用である。一気に安定化するもの以外に、準安定状態の原子核ができ、長々と放射線を出し続ける放射性核種となる。放射性核種はいずれ安定化するので、その期間、生態圈から隔離すればなんの影響もないである。しかし、その期間が非常に長い核種がある。その大部分は、再処理工程の第一抽出廃液（高レベル廃棄物）中に含まれる。次にその対策について紹介する。

2. 長半減期核種を含む廃棄物の処理対策

先日近所の床屋に行ってこんな会話を交わした。「今日はお休みですか？原子力もいろいろ大変ですね。廃棄物なんて日本で捨てる所はないんでしょうね。」

「そんなことないですよ。もれないようにして地面の中に入れればそう簡単には出できませんからね。」

原子力と言えば原子爆弾か、原子炉の話題であったのが、今や廃棄物の問題も日常の話題にのぼるようになった。しかし、研究を担当している者としては、自分達の仕事を分かりやすい言葉で説明することの難しさをつくづくと感じる。その難しさの原因は、多くの人々が心配していることと研究している内容とに隔たりがあるからではないかと思う。多くの人は放射能が何十万年も、何百万年も残るというと、絶望的だと思う。地殻変動のないところ、地下水のないところとなると、日本では無理だと思う。研究を担当している我々は処分後の放射性核種の動きを見積って、日本での処分について決して悲観的には考えていない。

高レベル廃棄物の処分は、世界中を探してもこれまでに何処でも実施されたことがなく、我々の生存している期間から見ると、遙か遠い将来のできごとを議論しているからである。処分の方式がどのようか、処分した廃棄物がどのようになると考えるかは、昔、月の世界の様子を自由に想像したのと同じように各人の自由である。そこに各人の心配の仕方の相違が生じる理由がある。しかし、月の世界の様子は多くの科学者が推定したのと大きな相違はなかった。高レベル廃棄物の処分についても、科学的に推定できるはずである。それが現在の我々の仕事である。

いろいろな考え方の出来る廃棄物処分の仕事を進めるには、見方、考え方を整理するのが先決である。米国では関連省庁検討グループが膨大なレポートをまとめ⁹⁾、それに基づいて、次の廃棄物処分の基本原則¹⁰⁾が出来た。

- 1) 核分裂生成物の減衰期間内は、隔離施設は実質上完全であること。（短半減期核種の工学的閉じ込め）
 - 2) 少なくとも1万年間、環境からの隔離は有効であること。合理的に予想される事象による影響は自然放射能による通常の変動値を越さないようにすること。（現世代の環境の継続性確保）
 - 3) 廃棄物処分システムの運転は他の核燃料サイクル施設と同程度に安全であること。（現代人の安全確保）
 - 4) 環境への影響は合理的に可能な限り低くすること。（A L A R Aの原則）
 - 5) 廃棄物処分における不確定要素を補うため、安全側の設計及び評価を行なうこと。（不確定要素への配慮）
 - 6) 合理的に可能な手法で行ない、将来に対して、不合理な期間の保守及び監視の続行に頼ってはならない。（次世代への依存禁止）
 - 7) 手法を選定する際の概念は企業の意向を離れて、国の政策と一致させること。（国の責任）
- この基本原則のうち廃棄物固有の重要な原則は 6) である。「自分達が出した廃棄物は自分達

の時代に始末すること。」「将来、技術が進むであろうから、今は貯めておこう」とか、「伊勢神宮の遷宮のように順番に貯蔵所を建て変えて廃棄物を移していくべき」というような将来の世代に頼る考え方は止めようとのことである。また、1)と2)は放射能の特性に関連した重要な点である。高レベル廃棄物に含まれる大部分の放射能は半減期約30年の⁹⁰Sr及び¹³⁷Csである。この2核種が減衰するまで(約1000年間)は完全に人工構造物で閉じ込めよう、その後にも超ウラン元素等長半減期核種が残るので、少なくとも1氷河期程度の間(約10,000年)は自然の放射線レベルと変わらないようにする。上記7原則は国の事情により多少の違いはあるものの、各国の廃棄物処分の基本思想となっている。

ここで我々の高レベル廃棄物の処理処分の研究内容を中心に、もう少し具体的に長い半減期の廃棄物の処理と処分について述べる。

高レベル廃棄物は、使用済の核燃料を再処理したときに出てくる。最も放射能濃度の高い廃液である。使用済燃料に入っている放射能の大部分がこの廃液に入る。ガラス素材と一緒に乾かし高温で溶融して、ガラスを構成する珪酸の網の中に均一に廃棄物元素を溶かし込み一種の色ガラス(図5参照)にする。高温でどろどろの状態でステンレスの容器に流し込み、密封する。(図6参照)¹⁰⁾。それを地下数百メートル地層に埋める(図7参照)¹¹⁾。これが現在考えられている高レベル廃棄物の処理処分の方式である。

まず、ガラスがガラスのままでいるかが心配になる。ガラス構造を変えてしまう原因として最も考えられるのは、 α 崩壊の反動で原子の配列が変わってしまう現象である。 α 放射体には半減期の長いものが多く、直接その影響を調べることができない。しかし、同じ数の α 崩壊を起こさせてみればある程度その影響を推定できる。幸いにして短い半減期の α 放射体があるので、これを加えることにより、2年間程度で約1万年に廃棄物中で起きると同じ数の α 崩壊を起こさせることができる。この方法は α 加速試験と呼ばれ、多くの研究者がこの方法で実験し、ガラスの性質を根本的に変えるような影響は起きないと確かめている。原研でも模擬の廃棄物で試験し、顕微鏡で見た外観に変化はなく、溶け易さの変化も僅かであることを確かめた。現在W A S T E F(廃棄物安全試験施設)では、動燃事業団から実際の廃液を運んできて、それに²⁴⁴Cmを加えて、ガラス固体化を作製し同様の実験を実施している。

地下に埋める際、廃棄物を入れた容器は更に厚い鉄板等で囲うと考えられている。しかし、容器はいずれ腐食して穴が開く。地下水が入ってくれば廃棄物ガラスはゆっくりと溶け始める。しかし、ガラスが溶ければそこに含まれる放射性核種が総て地下水に溶け込むわけではない。丁度、地球を構成している岩石が雨水にさらされても、多くの元素は表土となって残り、溶け易い元素だけが海に移行するのと同じように、ガラスを溶してみるとかなりの元素はガラスの表面に水あかの様に残っている(写真1参照)。まず、固めた廃棄物は溶け難いことが大切であるが、溶けた後、表面に付着して残りやすい環境を選ぶことも大切である。そこで、残った放射能性核種の溶解度がどのようにして決まるか、その理屈を研究している。今や、ガラスの組成をどうするかの研究から、地下水との関係で何が残るかの研究が主な研究対象になっている。

具体的には、種々の成分の水を種々の速さで流し、ガラスから溶け出す成分を分析している。だんだん流す速さを遅くしていくとガラスの主成分であるケイ酸の飽和溶液になり、溶け出す速さは何桁も下がる。また、表面変質層に残った物質も粘土鉱物等に変わり、溶け難くなることが

分かってきている。更に、何十万年何百万年先のこの変化の様子を推察するため、自然の状態で、同じように長い期間水に漬かっていた天然のガラスの表面の鉱物の生成、変化の様子を調べている。合成廃棄物ガラスの表面層と同じ系統の鉱物ができていることがわかつてきた。これは将来、ガラスから地下水に移る放射能の濃度を推定する有力な手掛かりとなる。幸いにして問題の超ウラン元素は地下深い酸素の不足している地下水中では大部分が表面変質層に残ることが推定できる。一方、ガラス以外に天然の安定な鉱物を参考にして、安定な合成鉱物（SYNROC、図8参照）にする研究もオーストラリアと協力して行なっている。

次の問題は、日本のような火山国で処分できる安定な地層があるかどうかである。ここで、大切なことは、どれだけの期間安定であればよいか？どのような変化があつてはならないか？である。このような定量的議論抜きに、絶望的判断を下す人がいることは非常に残念である。先ずは、処分した廃棄物の放射能がなくなるまでの数百万年安定であれば十分である。放射性核種が地表へ漏出するのは水が動くためである。従って、新しく割れ目ができるても水が動き易くなればよい。

数百万年という期間は地質学ではほぼ第四紀に相当し、最も詳しい研究がされている新しい期間であり、大体の動きは推定できる。鉱山や地下発電所等の建設時の調査や各国のボーリング調査データによると、岩石の自重で深くなればなる程岩盤が締まって水が通り難くなるし、地表面の高低差による水の流れは地表近くを流れているので、深い地層の水は殆ど動いていない。この辺りのことが定量的に説明できるよう計算コードの開発も進めている。

水が動いてもすべての放射性核種が水と同じように動くわけではない。原研では、地下水中での放射性核種の動き方を決める理屈を知るための研究に力を入れている。一つは自然の地層の中で水に溶けた成分がどのような機構で岩石の中に固定されるかについての地球化学的研究である。花崗岩の割れ目のまわりが地下水で変質していく様子や超ウラン元素に似た動きをすると考えられる鉄が岩石を構成する鉱物の小さな間隙に沈澱する様子を電子顕微鏡等を使って研究している（図9参照）¹²⁾。今一つは超ウラン元素の溶液中での存在状態の研究で、²³⁷Npの溶解限度や粒子状で存在する量について研究している。一方、約30年前にカナダで放射性ガラスを埋めた実験場まわりの汚染区域の地下水や土壤を調べた結果を解析したり、地下研究施設での放射性核種の移行実験を行って、基礎研究の成果と比較検討している。

以上のような研究により、我々の世代では絶対に体験でき得ない将来の地層中のできごとを推察する手掛かりを得て、将来の世代に迷惑をかけないようにすることが我々研究者の願いである。
(本章は所内報「原研」の原稿に一部追加し、講義した部分である。)

3. 各種放射性廃棄物の処理処分

ウランの精錬はわが国では殆ど実施されていない。また、燃料加工施設からの廃棄物は量的にも少ないし、危険性も少ない。原子炉廃棄物と燃料再処理施設からの廃棄物が主であり、この2種類にわけて考えられことが多い。実際には医療や研究施設で使われる放射性物質の廃棄物もある。この廃棄物の放射性核種の量は少なく、半減期の短い核種が多い。従って、技術的なむずか

分かってきている。更に、何十万年何百万年先のこの変化の様子を推察するため、自然の状態で、同じように長い期間水に漬かっていた天然のガラスの表面の鉱物の生成、変化の様子を調べている。合成廃棄物ガラスの表面層と同じ系統の鉱物ができていることがわかつてきた。これは将来、ガラスから地下水に移る放射能の濃度を推定する有力な手掛かりとなる。幸いにして問題の超ウラン元素は地下深い酸素の不足している地下水中では大部分が表面変質層に残ることが推定できる。一方、ガラス以外に天然の安定な鉱物を参考にして、安定な合成鉱物（SYNROC、図8参照）にする研究もオーストラリアと協力して行なっている。

次の問題は、日本のような火山国で処分できる安定な地層があるかどうかである。ここで、大切なことは、どれだけの期間安定であればよいか？どのような変化があつてはならないか？である。このような定量的議論抜きに、絶望的判断を下す人がいることは非常に残念である。先ずは、処分した廃棄物の放射能がなくなるまでの数百万年安定であれば十分である。放射性核種が地表へ漏出するのは水が動くためである。従って、新しく割れ目ができるても水が動き易くなればよい。

数百万年という期間は地質学ではほぼ第四紀に相当し、最も詳しい研究がされている新しい期間であり、大体の動きは推定できる。鉱山や地下発電所等の建設時の調査や各国のボーリング調査データによると、岩石の自重で深くなればなる程岩盤が締まって水が通り難くなるし、地表面の高低差による水の流れは地表近くを流れているので、深い地層の水は殆ど動いていない。この辺りのことが定量的に説明できるよう計算コードの開発も進めている。

水が動いてもすべての放射性核種が水と同じように動くわけではない。原研では、地下水中での放射性核種の動き方を決める理屈を知るための研究に力を入れている。一つは自然の地層の中で水に溶けた成分がどのような機構で岩石の中に固定されるかについての地球化学的研究である。花崗岩の割れ目のまわりが地下水で変質していく様子や超ウラン元素に似た動きをすると考えられる鉄が岩石を構成する鉱物の小さな間隙に沈澱する様子を電子顕微鏡等を使って研究している（図9参照）¹²⁾。今一つは超ウラン元素の溶液中の存在状態の研究で、²³⁷Npの溶解限度や粒子状で存在する量について研究している。一方、約30年前にカナダで放射性ガラスを埋めた実験場まわりの汚染区域の地下水や土壤を調べた結果を解析したり、地下研究施設での放射性核種の移行実験を行って、基礎研究の成果と比較検討している。

以上のような研究により、我々の世代では絶対に体験でき得ない将来の地層中のできごとを推察する手掛かりを得て、将来の世代に迷惑をかけないようにすることが我々研究者の願いである。
(本章は所内報「原研」の原稿に一部追加し、講義した部分である。)

3. 各種放射性廃棄物の処理処分

ウランの精錬はわが国では殆ど実施されていない。また、燃料加工施設からの廃棄物は量的にも少ないし、危険性も少ない。原子炉廃棄物と燃料再処理施設からの廃棄物が主であり、この2種類にわけて考えられことが多い。実際には医療や研究施設で使われる放射性物質の廃棄物もある。この廃棄物の放射性核種の量は少なく、半減期の短い核種が多い。従って、技術的なむずか

しさは少ない。以下原子炉廃棄物と再処理廃棄物について、少し定量的に説明する。

原子力発電所の廃棄物処理系のフローシートの例を図10に示す^⑧。気体廃棄物に含まれる放射性核種の主なものは希ガスとヨウ素の同位体である。いずれも半減期が短く活性炭に吸着しやすい性質を持っているので、活性炭の粒子の間を通すと空気より遅れて出て来る。この遅れの間に減衰して放射能が殆ど減衰してしまう。

最も多くの放射能が含まれるのは、原子炉の循環水及び燃料貯蔵プールの水である。この水はイオン交換樹脂カラムとフィルターで精製する。樹脂の再生廃液を含め大部分の廃液は蒸発濃縮器で濃縮され、セメントかアスファルトと一緒にドラム缶の中に入れて固められる(図11参照)^⑨。布や紙等燃えるごみは消却し、灰にしてセメントで固める。

床排水や洗濯排水等非常に放射能の薄い排水は濃度を確認した上で、放流される。これらの廃棄物発生量の概数を表4^⑩に示す。

使用済燃料のピュレックス法による再処理プロセスの概略を図12^⑪に示す。ウランを溶解する前処理、ウラン、プルトニウムの抽出及び精製工程に大別される。核分裂生成物の大部分は抽出工程で廃液側に分離される。この処理処分については前章で述べた。前処理工程では⁸⁵Krが空気中に出て来る。また、強い放射能を持つ燃料被覆管(ハル)が溶けないで残る。溶解液では細かな不溶物(ファイン)が沈殿する。精製工程ではプルトニウムを含むいわゆる α 廃棄物が生じる。高レベル廃棄物以外は主にセメントで固化化される。再処理工程から生じる廃棄物の量を表5^⑫に示す。

現在保有されている、廃棄物の大部分は原子力発電所からの廃棄物であり、その量を表6^⑬に示す。これらの放射能の比較的少ない廃棄物(低レベル廃棄物)の処分の仕方については、図13^⑭のように考えられている。廃棄物ドラム缶はコンクリートの構造物の中に入れ、ドラム缶の間にはコンクリートや粘土を詰める。

低レベル廃棄物の処分の安全性確保については、4期間に別けて考えられている。

- ① コンクリートやドラム缶で閉じ込める。モニタリング及び巡回点検を行なうことにより異常が見つかれば補修する。(工学的バリアによる安全確保)
- ② 人工バリアと天然バリアにより、放射性核種を生活圏から隔離する。巡回点検とモニタリングを続ける。(積極的管理による安全確保)
- ③ 主に天然バリアに頼って、廃棄物を隔離する。標識等で特定の利用を禁止する。(消極的管理による安全確保)
- ④ 放射能がほとんどなくなり、処分場の管理が必要でなくなる。300年以上経過すればこの状態になるよう、廃棄物中の放射能の含有量を制限する。(自然環境選択による安全確保)

次に、学生諸君との質疑討論の内容の一部を紹介して本稿を閉じる。

Q：宇宙に打ち出すとか人工的に放射能を無くす方法は無いのですか？

A：宇宙への処分については米国でかなり具体的に検討され詳しい報告が出ている。現在のロケット技術から考え、確実性に問題があるとの結論である。消滅処理については現在日本の提案で国際協力研究を始められようとしている。これらの方法を考える場合、現代人へのリスクの増加と将来の人類のリスクの減少のバランスを考えることが大切である。

Q：最近新聞に出ている原子炉事故をどう思いますか？

A：これまでの事故を見る限り、自動車事故や飛行機事故による被害より遥かに少ない。自動車や飛行機は自分の意志で乗らないですむ。乗らい場合は殆ど被害を受けない。原子炉利用は個人の意志で原子力か火力かを選択する事はできない。したがって、原子力を利用することによる利益と損失の価値判断は、社会の合意によるものでなければならない。交通の便、景観いずれも良くても、お墓の隣には住みたくない人は多い。

私個人は、現時点の技術によっても、利益の方が遥かに大きいと考える。大切なことは、原子力発電を止めることではなく、更に安全性を高める工夫を続けることである。

Q：現在の知識で将来を予測できるとの考え方は楽観的すぎる。色々な機構の組み合わせで自然現象は決まる。一つ一つの機能が分かっても重ねあった場合は違ってくるのではないか？

A：実験室での基本機構についての研究を進めると同時に、自然界で同じ機構で長期に起きた現象を研究し、裏付けを取る。例えば、ガラスが浸出された表面層と自然界で長期間水に晒された鉱物の表面層を結晶学的に比較し、同じ過程で表面層の化学形態が変化することを確認する。

このように基本機構に分解して、自然現象を使って確認するだけでなく、気象観測のように、自然現象を大つかみに捕える手法も平行して行なうことが大切である。その場合、循環現象、安定化現象、自己相似性（スケールの大小を越えて通用する規則性）等自然現象が持つ規則性を見出し、物事を上手に整理することが大切である。

最後に学生諸氏の前で、廃棄物処理処分について話をする機会を与えて下さった、筑波大学の成合英樹先生及び原研環境安全研究部の平野見明部長に深く感謝する。

参考文献

- 1) 今林、他、訳：“プラトン全集” 岩波書店 (1975)
- 2) 橋本：“般若心経講話” 誠信書房 (1962)
- 3) 山本：“原子力工学” 日刊工業新聞社 (1976)
- 4) G. Friedlander and J. W. Kennedy：“Nuclear and Radiochemistry” John Wiley & Sons, Inc. New York (1955) 齊藤、他、訳 丸善 (1966)
- 5) KBS：“Handling of Spent Nuclear Fuel and Final Storage of Vitrified High Level Reprocessing Waste” (1987)
- 6) 科学技術庁：“より安全に、より確実に—放射性廃棄物の処理処分” (1987)
- 7) 日本原子力研究所：原子炉研修所講義テキスト (1982)
- 8) 鈴木、清瀬：“核燃料サイクル” 日刊工業新聞社 (1981)
- 9) US IRG：“Report to the president by the interagency review group on Nuclear Waste Management” TID 29442 (1979)
- 10) US NRC：“Proposed Rulemaking on the Storage and Disposal of Nuclear Waste” DOE/NE 0007 (1980)
- 11) SKBF/KBS：“Final Storage of Spent Nuclear Fuel” KBS-3 (1983)
- 12) 日本原子力研究所：“原子力安全性研究の現状” (1988)

A：これまでの事故を見る限り、自動車事故や飛行機事故による被害より遥かに少ない。自動車や飛行機は自分の意志で乗らないですむ。乗らい場合は殆ど被害を受けない。原子炉利用は個人の意志で原子力か火力かを選択する事はできない。したがって、原子力を利用することによる利益と損失の価値判断は、社会の合意によるものでなければならない。交通の便、景観いずれも良くても、お墓の隣には住みたくない人は多い。

私個人は、現時点の技術によつても、利益の方が遥かに大きいと考える。大切なことは、原子力発電を止めることではなく、更に安全性を高める工夫を続けることである。

Q：現在の知識で将来を予測できるとの考え方は楽観的すぎる。色々な機構の組み合わせで自然現象は決まる。一つ一つの機能が分かっても重ねあった場合は違つてくるのではないですか？

A：実験室での基本機構についての研究を進めると同時に、自然界で同じ機構で長期に起きた現象を研究し、裏付けを取る。例えば、ガラスが浸出された表面層と自然界で長期間水に晒された鉱物の表面層を結晶学的に比較し、同じ過程で表面層の化学形態が変化することを確認する。

このように基本機構に分解して、自然現象を使って確認するだけでなく、気象観測のように、自然現象を大つかみに捕える手法も平行して行なうことが大切である。その場合、循環現象、安定化現象、自己相似性（スケールの大小を越えて通用する規則性）等自然現象が持つ規則性を見出し、物事を上手に整理することが大切である。

最後に学生諸氏の前で、廃棄物処理処分について話をする機会を与えて下さった、筑波大学の成合英樹先生及び原研環境安全研究部の平野見明部長に深く感謝する。

参考文献

- 1) 今林、他、訳：“プラトン全集” 岩波書店 (1975)
- 2) 橋本：“般若心経講話” 誠信書房 (1962)
- 3) 山本：“原子力工学” 日刊工業新聞社 (1976)
- 4) G. Friedlander and J. W. Kennedy：“Nuclear and Radiochemistry” John Wiley & Sons, Inc. New York (1955) 齊藤、他、訳 丸善 (1966)
- 5) KBS：“Handling of Spent Nuclear Fuel and Final Storage of Vitrified High Level Reprocessing Waste” (1987)
- 6) 科学技術庁：“より安全に、より確実に—放射性廃棄物の処理処分” (1987)
- 7) 日本原子力研究所：原子炉研修所講義テキスト (1982)
- 8) 鈴木、清瀬：“核燃料サイクル” 日刊工業新聞社 (1981)
- 9) US IRG：“Report to the president by the interagency review group on Nuclear Waste Management” TID 29442 (1979)
- 10) US NRC：“Proposed Rulemaking on the Storage and Disposal of Nuclear Waste” DOE/NE 0007 (1980)
- 11) SKBF/KBS：“Final Storage of Spent Nuclear Fuel” KBS-3 (1983)
- 12) 日本原子力研究所：“原子力安全性研究の現状” (1988)

表1 反応に伴って放出されるエネルギー

核 分 裂	^{235}U	X + Y	約 200 MeV
核 融 合	D + D	$^3\text{He} + \text{n}$	3.2 "
	D + T	$^4\text{He} + \text{n}$	17.6 "
炭化水素の燃焼			
メ タ ン			9.22×10^{-6}
プロパン			23.0×10^{-6}
ペ ン ゼ ン			33.9×10^{-6}

$$1 \text{ MeV} (10^6 \text{ eV}) = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$1 \text{ kWh} (= 860.1 \text{ kcal}) = 3.600 \times 10^6 \text{ J}$$

表2 原子炉冷却水中における放射化反応と生成核種

核種	核 反 応	半減期	生 成 源
^{17}N	$^{17}\text{O} (\text{n}, \text{p}) ^{17}\text{N}$	4.14 sec	溶存酸素
^{14}C	$^{14}\text{N} (\text{n}, \text{p}) ^{14}\text{C}$	5,760 yr	溶存空気, 燃料中の N, O
	$^{17}\text{O} (\text{n}, \gamma) ^{14}\text{C}$		
^{16}N	$^{16}\text{O} (\text{n}, \text{p}) ^{16}\text{N}$	7.4 sec	溶存酸素
^{18}F	$^{18}\text{O} (\text{n}, \text{p}) ^{18}\text{F}$	1.87 hr	溶存酸素
^{41}Ar	$^{40}\text{Ar} (\text{n}, \gamma) ^{41}\text{Ar}$	1.82 hr	Ar
^{24}Na	$^{23}\text{Na} (\text{n}, \gamma) ^{24}\text{Na}$	14.5 hr	水中の Na
^{54}Mn	$^{54}\text{Fe} (\text{n}, \text{p}) ^{54}\text{Mn}$	303 day	鋼材またはインコネル中の Fe
^{56}Mn	$^{55}\text{Mn} (\text{n}, \gamma) ^{56}\text{Mn}$	2.58 hr	鋼材またはインコネル中の Mn
^{187}W	$^{186}\text{W} (\text{n}, \gamma) ^{187}\text{W}$	24.0 hr	ステライト中の W または Zr 合金 の溶接部
^{55}Fe	$^{54}\text{Fe} (\text{n}, \gamma) ^{55}\text{Fe}$	2.7 yr	鋼材またはインコネル中の Fe
^{59}Fe	$^{58}\text{Fe} (\text{n}, \gamma) ^{59}\text{Fe}$	45.6 day	
^{63}Ni	$^{62}\text{Ni} (\text{n}, \gamma) ^{63}\text{Ni}$	92 yr	鋼材またはインコネル中の Ni
^{59}Ni	$^{58}\text{Ni} (\text{n}, \gamma) ^{59}\text{Ni}$	8×10^4 yr	
^{94}Nb	$^{93}\text{Nb} (\text{n}, \gamma) ^{94}\text{Nb}$	2×10^4 yr	炉心被覆材中の Nb
^{95}Zr	$^{94}\text{Zr} (\text{n}, \gamma) ^{95}\text{Zr}$	65.0 day	炉心被覆材
^{58}Co	$^{58}\text{Ni} (\text{n}, \text{p}) ^{58}\text{Co}$	71.3 day	鋼材またはインコネル中の Ni
^{60}Co	$^{59}\text{Co} (\text{n}, \gamma) ^{60}\text{Co}$	5.26 yr	鋼材, インコネルまたはステライ ト中の Co
^{64}Cu	$^{63}\text{Cu} (\text{n}, \gamma) ^{64}\text{Cu}$	12.8 hr	水は 耗生成物中の 銅

表3 再処理過程で重要な核分裂生成物核種

周期表族	核種	^{233}U の核分裂収率 [%]	半減期	親核種
第 0 族	^{85}Kr	1.5	10.7 yr	
	^{133}Xe	6.5	5.25 days	
第 I A 族	^{137}Cs	5.9	30.17 yr	
第 II A 族	^{89}Sr	4.8	50.5 days	
	^{90}Sr	5.8	28.8 yr	
	^{137}Ba	—	2.55 min	
	^{140}Ba	6.4	12.79 days	^{137}Cs
第 III A 族	^{80}Y	—	64.1 hr	^{89}Sr
	^{81}Y	5.8	58.5 days	
	^{140}La	—	40.3 hr	^{140}Ba
(ランタノイド)	^{141}Ce	5.7	32.5 days	
	^{144}Ce	6.0	284.0 days	
	^{143}Pr	6.2	13.58 days	
	^{144}Pr	—	17.3 min	^{144}Ce
	^{147}Nd	2.6	11.01 days	
	^{147}Pm	—	2.62 yr	^{147}Nd
第 IV A 族	^{95}Zr	6.3	64.0 days	
第 V A 族	^{95}Nb	—	35.0 days	^{95}Zr
第 VIA 族	^{99}Mo	6.1	66.02 hr	
第 VI B 族	$^{127\text{m}}\text{Te}$	0.25	109.0 days	
	$^{129\text{m}}\text{Te}$	1.0	33.5 days	
	^{127}Te	—	69.0 min	$^{129\text{m}}\text{Te}$
	^{135}Te	4.3	78.0 hr	
第 VII A 族	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	—	6.02 hr	^{99}Mo
第 VII B 族	^{131}I	2.9	8.04 days	
第 VIII 族	^{103}Ru	2.9	39.34 days	
	^{106}Ru	0.38	367.0 days	
	$^{103\text{m}}\text{Rh}$	—	56.1 min	^{103}Ru
	^{106}Rh	—	29.8 sec	^{106}Ru

表4 原子力発電所 (1000MWe·yr) における放射性廃棄物発生量の概数

		発生量/放出量	放射能濃度	備考
気体廃棄物	希ガス, 1次系 換気系	$\sim 5 \times 10^4 \text{ Ci/yr}$		炉内インベントリの 1/1000 程度がもれものと仮定。 ^{133}Xe , ^{135}Xe , $^{135\text{m}}\text{Xe}$
	ヨウ素, 1次系 換気系	$\sim 1 \times 10^4 \text{ Ci/yr}$		
	放射化生成物, ^{41}Ar	$\sim 3 \times 10^9 \text{ Ci/yr}$		
	放射化生成物, ^{13}N	$\sim 2 \times 10 \text{ Ci/yr}$		
	放射化生成物, ^{13}N	$\sim 1 \times 10 \text{ Ci/yr}$		
液体廃棄物	機器ドレン 床ドレン	$\sim 100 \text{ m}^3/\text{day}$	$\sim 10^{-1} \mu\text{Ci/cc}$	いずれも液体廃棄物処理系へ導かれ、さらに濃度を下げて放出される。腐食生成物の発生量が機器ドレンや再生廃液の放射能濃度を左右する。
	再生廃液	$\sim 20 \text{ m}^3/\text{day}$	$\sim 10^{-2} \mu\text{Ci/cc}$	
	ランドリ・ドレン	$\sim 10 \text{ m}^3/\text{day}$	$\sim 10^{-3} \mu\text{Ci/cc}$	
		$\sim 30 \text{ m}^3/\text{day}$	$\sim 10^{-4} \mu\text{Ci/cc}$	
固体廃棄物	使用済中レベル 樹脂, 低レベル フィルタ・スラッジ	$5 \sim 15 \text{ m}^3/\text{yr}$	$0.5 \sim 2 \text{ mCi/cm}^3$	原子炉浄化系、復水脱塩器、 使用済燃料貯蔵プール系など 廃棄物処理系フィルタ 紙類、布類、木材 プラスチック類、ゴム類 耐用年数 5 年
	濃縮廃液	$100 \sim 150 \text{ m}^3/\text{yr}$	$\sim 2 \mu\text{Ci/cm}^3$	
	雑固体、可燃性 不燃性	$\sim 100 \text{ m}^3/\text{yr}$	$\sim 5 \text{ mCi/cm}^3$	
	使用済制御棒等	$200 \sim 500 \text{ m}^3/\text{yr}$	$10^0 \sim 10^1 \mu\text{Ci/cm}^3$ ($1 \sim 10 \text{ Ci/l}$)	
		$100 \sim 200 \text{ m}^3/\text{yr}$	$10^{-2} \sim 10^{-1} \mu\text{Ci/cm}^3$	
		$150 \sim 200 \text{ m}^3/\text{yr}$		

表5 再処理施設における放射性廃棄物

	種類	形態	TRU含有	処理例	閉じ込め形態	貯蔵例	発生量 [Ci/ MTHM]
前処理工程	ハル ⁸⁵ Kr	固 気	○	圧縮 液化蒸留	セメント ボンベ 金属マトリックス	地上格納室 水中ポンド	10 ⁴ 10 ⁴
	¹²⁹ I, ¹³¹ I	ク		吸収	セメント	地上格納室	0.05
	³ H	ク		水蒸留	ク	ク	
	¹⁴ C	ク		アルカリ洗浄	石灰	ク	0.5
抽出工程	ファイン 高レベル廃液	固 液	○	遠心分離	セメント/ガラス	水中ポンド	
	廃溶媒	液	○	濃縮・煅焼	ガラス	ク	5×10 ⁵
		液	○	姚却	アスファルト/セメント	地上格納室	
廃棄物処理工程	濃縮廃液	液	○	蒸発	アスファルト/セメント	地上格納室	
	スクラッパ	ク		ク	ク	ク	5×10 ²
	廃樹脂	固	○	圧縮	ク	ク	
	フィルタ・ スラッシュ	ク		ク	ク	ク	
	銀ゼオライト	ク		ク	ク	ク	
	雑廃棄物	ク		ク	ク	ク	

表6 低レベル放射性廃棄物の累積保管量

種類	発生施設	昭和62年 9月末 累積保管量	保管能力
低レベル 放射性 廃棄物 <small>(200ドラム缶 換算)</small>	原子力発電施設	45.0(万本)	76.7(万本)
	日本原子力研究所	9.5(万本)	11.9(万本)
	動力炉・核燃料開発事業団	8.3(万本)	13.3(万本)
	核燃料加工施設	2.1(万本)	3.9(万本)
	日本R I 協会	4.5(万本)	5.2(万本)
	計	69.4(万本)	111.0(万本)

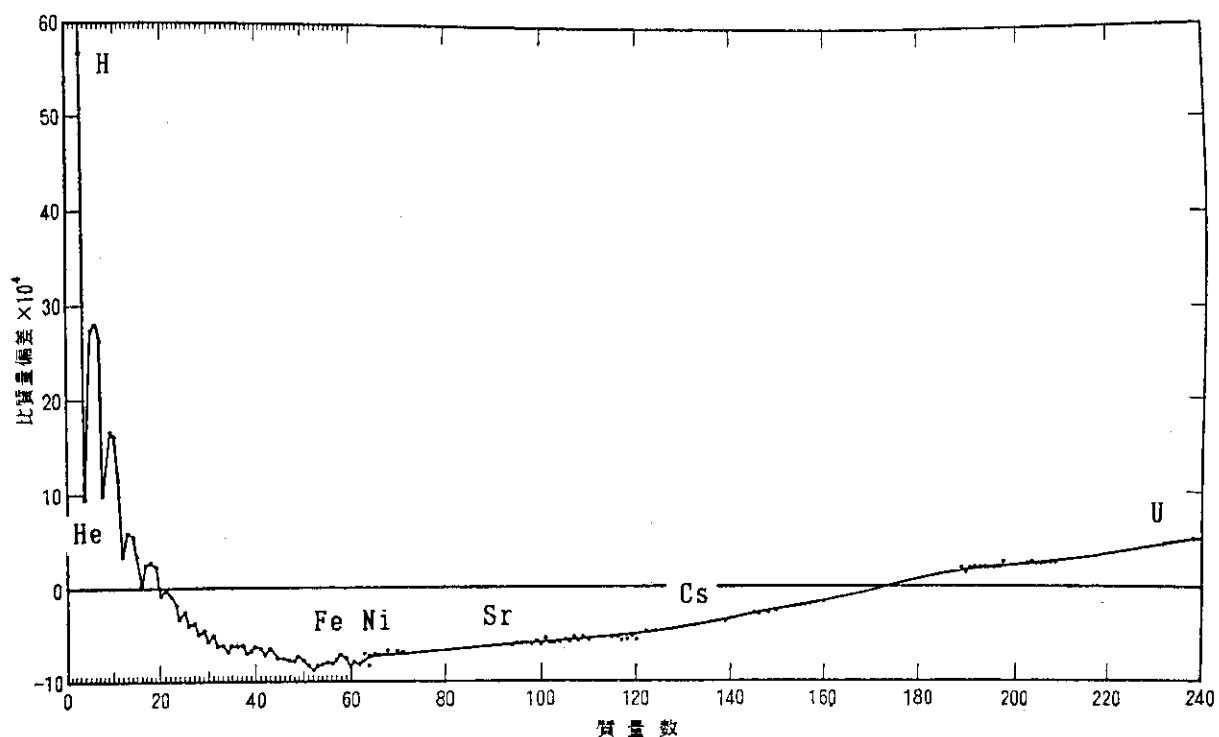


図1 比質量偏差曲線

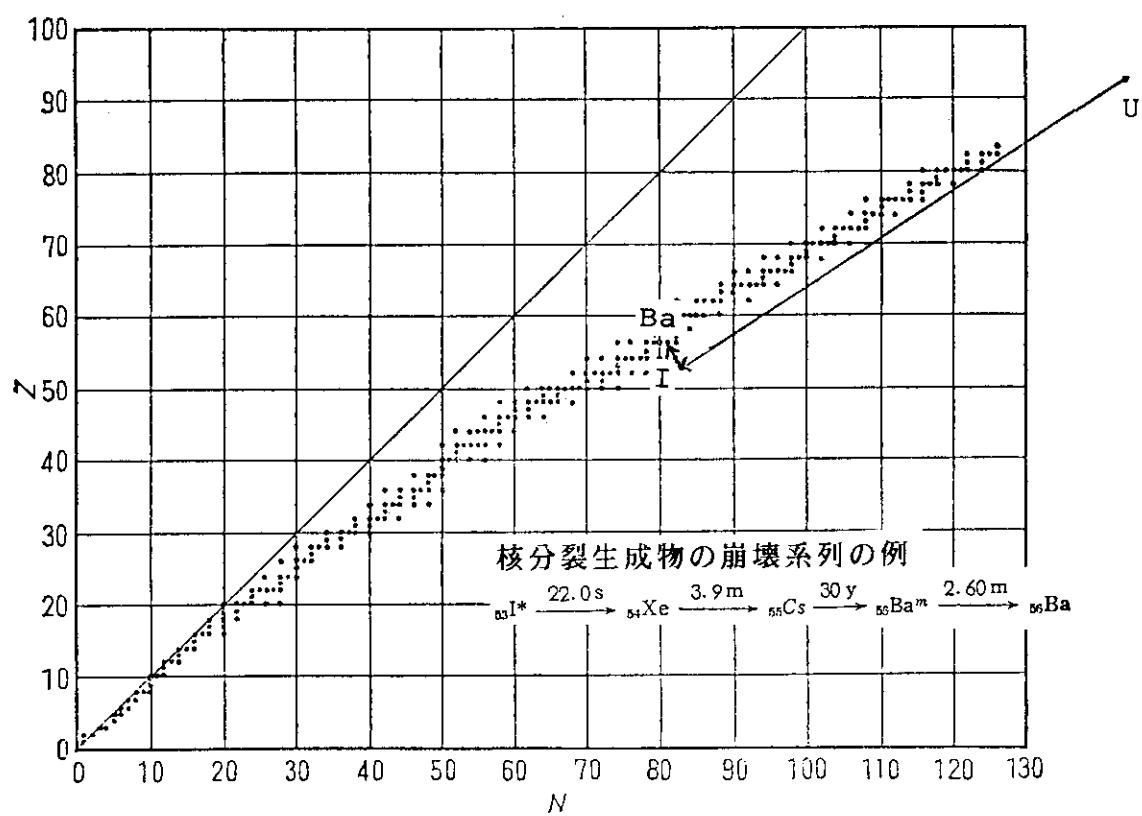
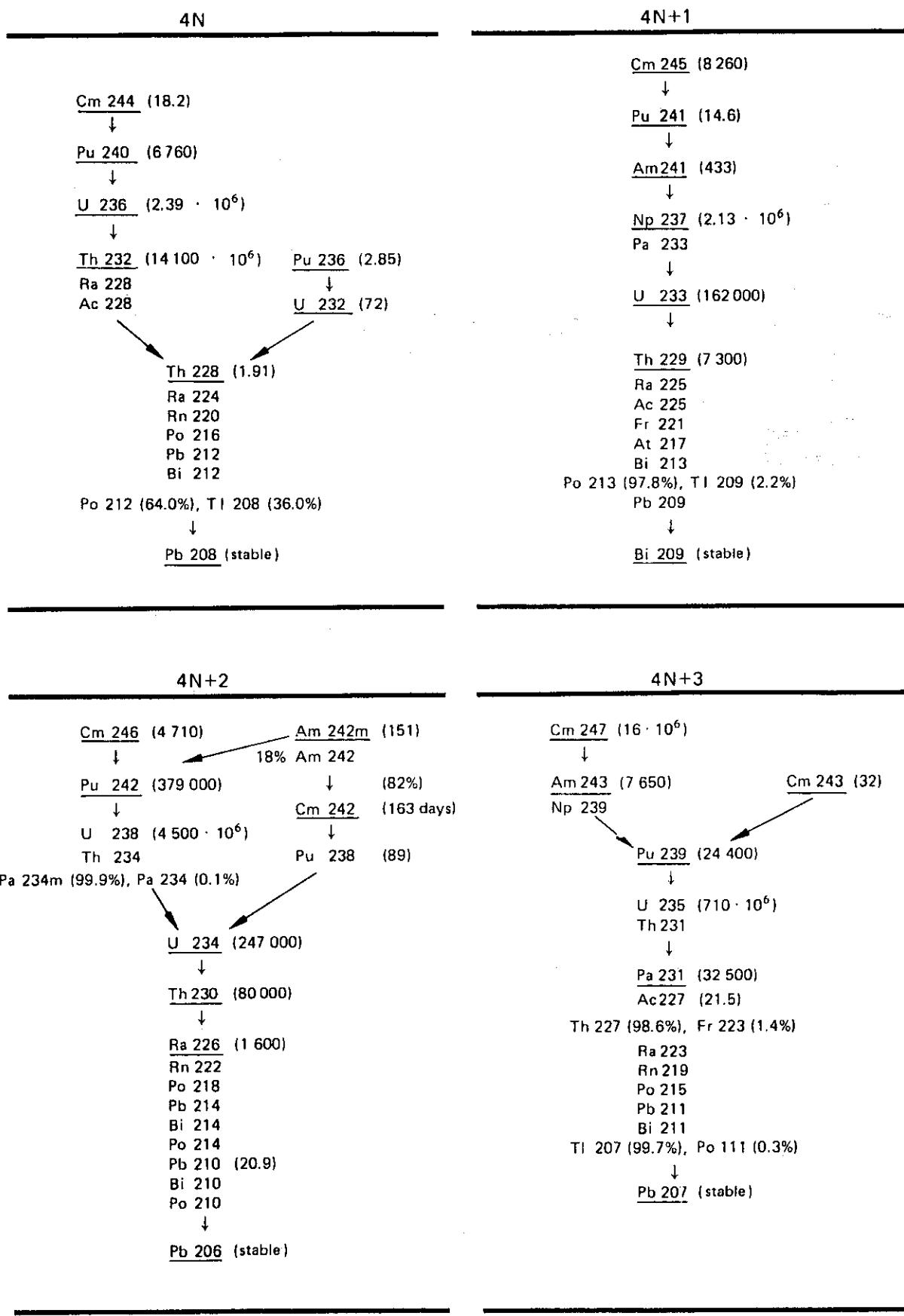


図2 既知の安定核のZ対Nのプロット



() 内は半減期

図3 超ウラン元素の崩壊系列

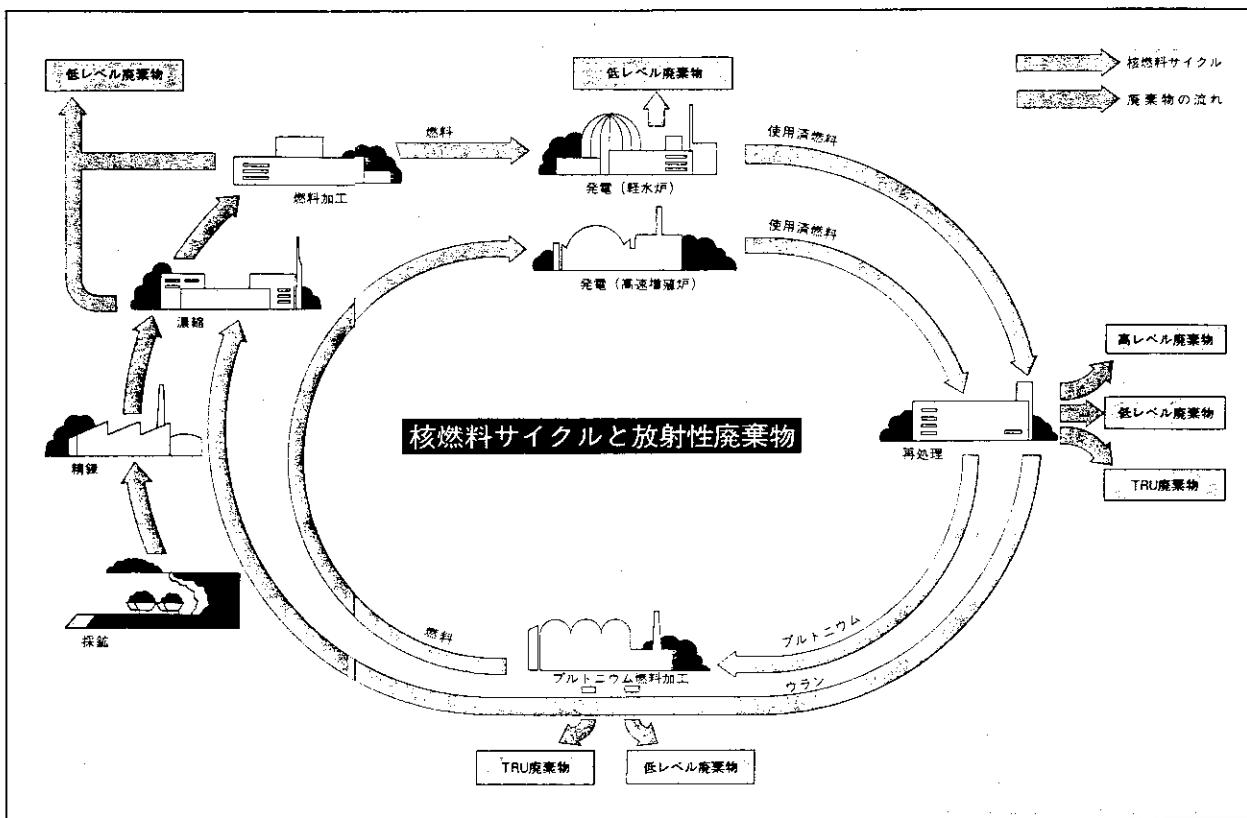


図4 核燃料サイクルと放射性廃棄物

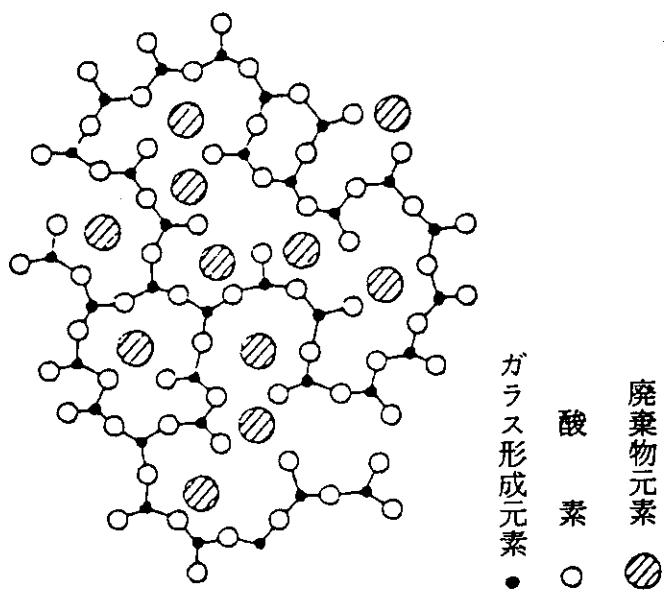


図5 ガラス固体化の二次元モデル構造

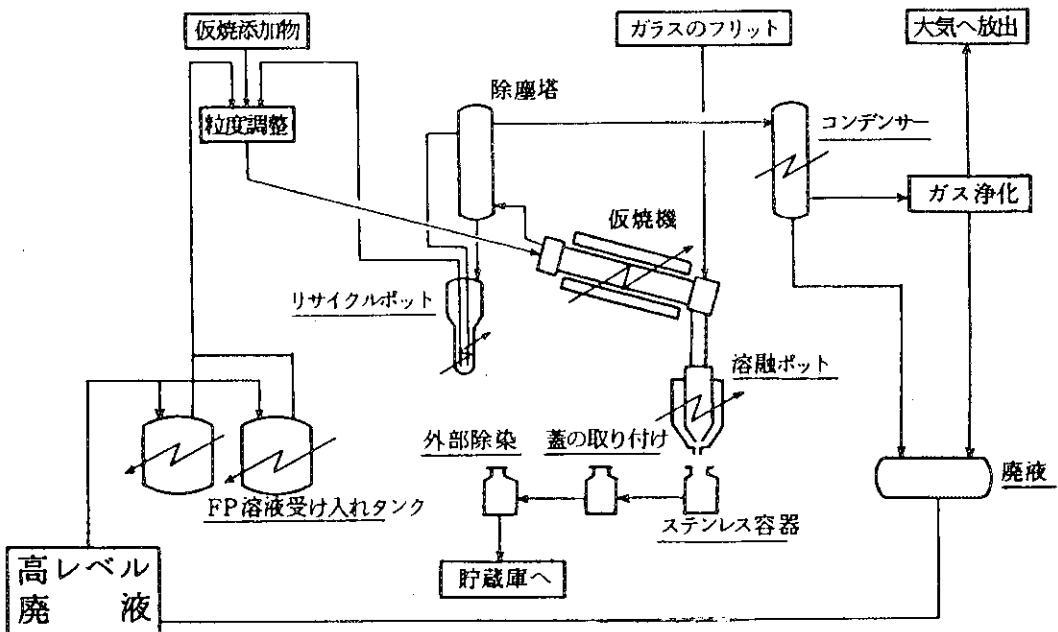


図6 ガラス固化プラントの例

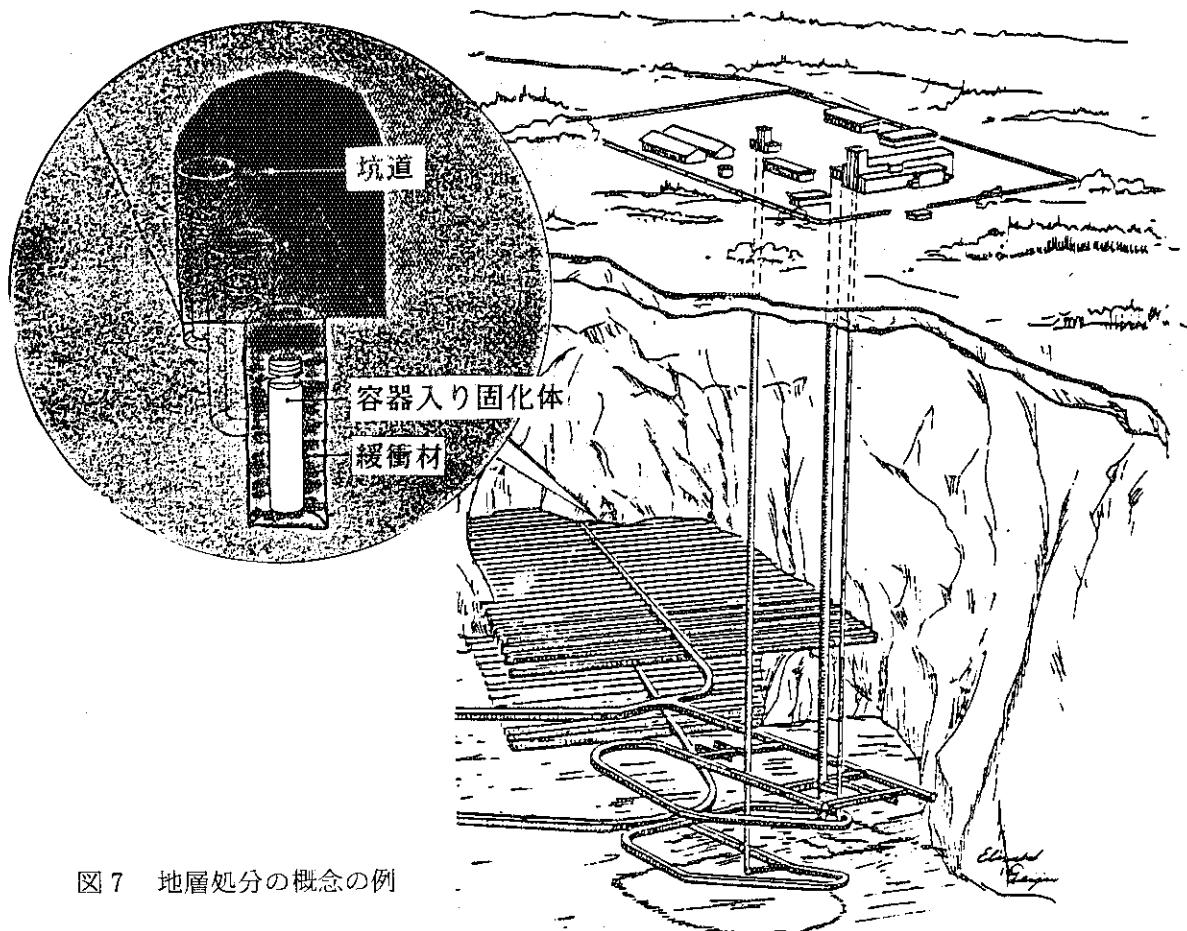


図7 地層処分の概念の例

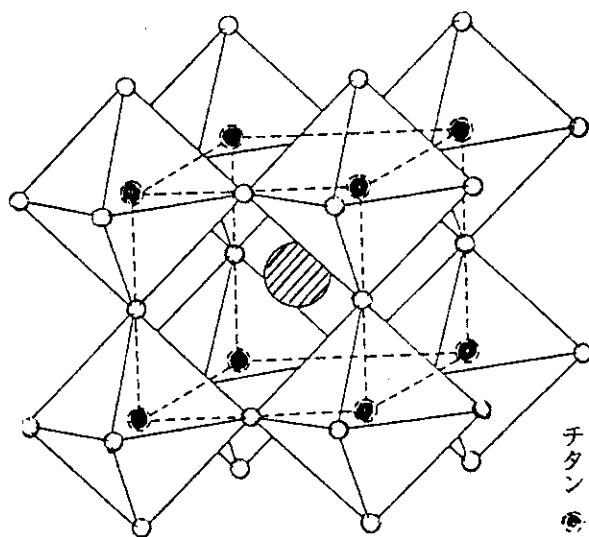


図8 ペロブスカイトの模式的構造図
(S Y N R O C の構成鉱物の一つ)



図9 花こう岩の割れ目まわりの赤色化現象

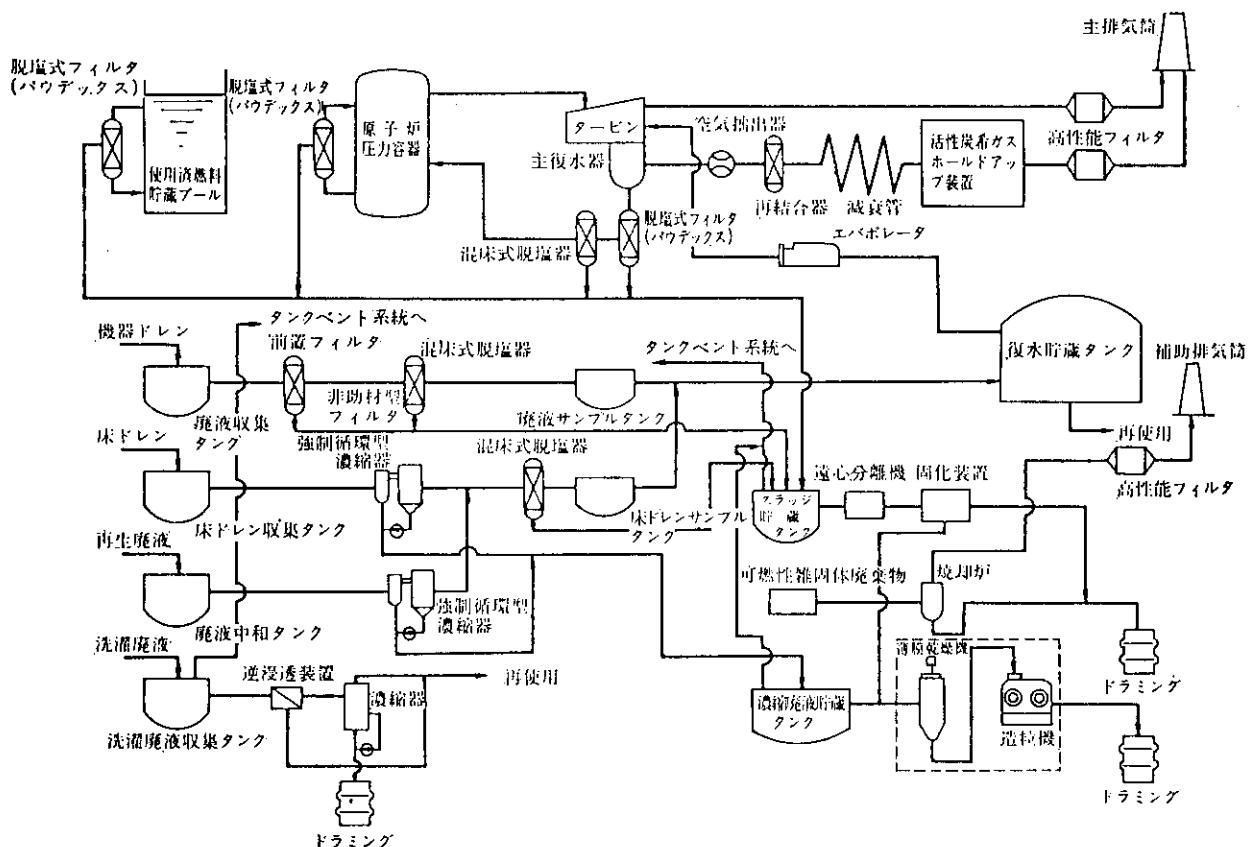


図1.0 原子力発電所における放射性廃棄物処理系フローシート例

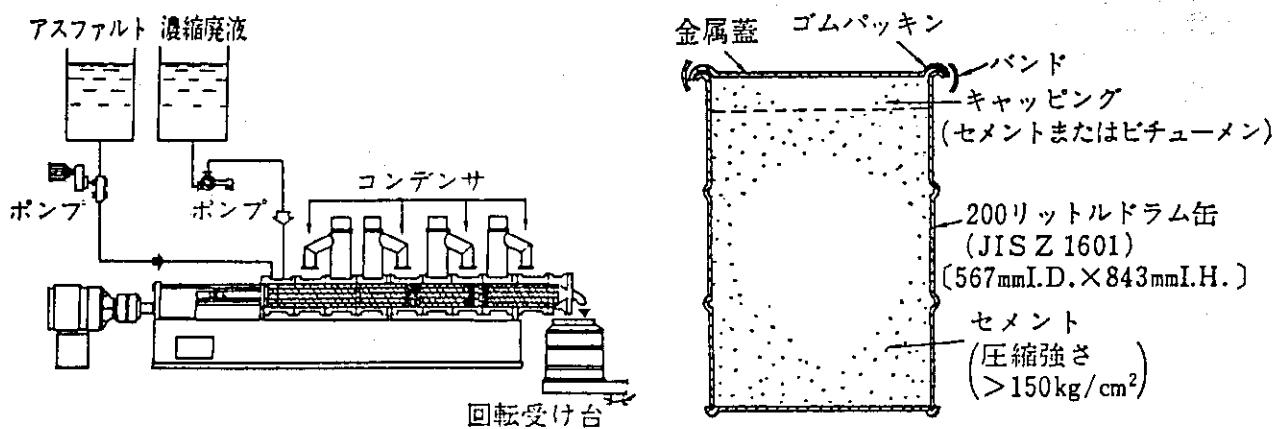


図1.1 低レベル廃棄物パッケージの例

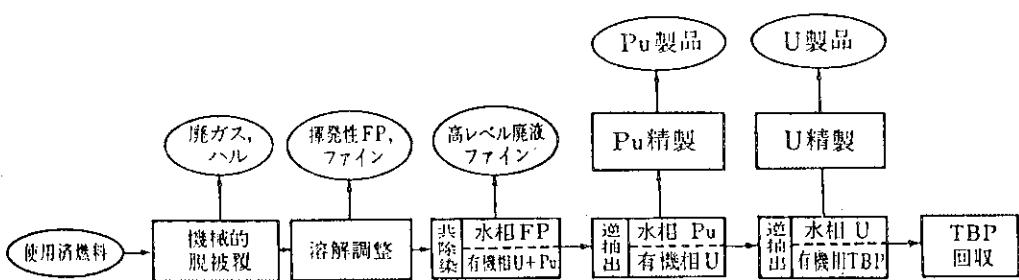


図12 ピュレックス法の概略

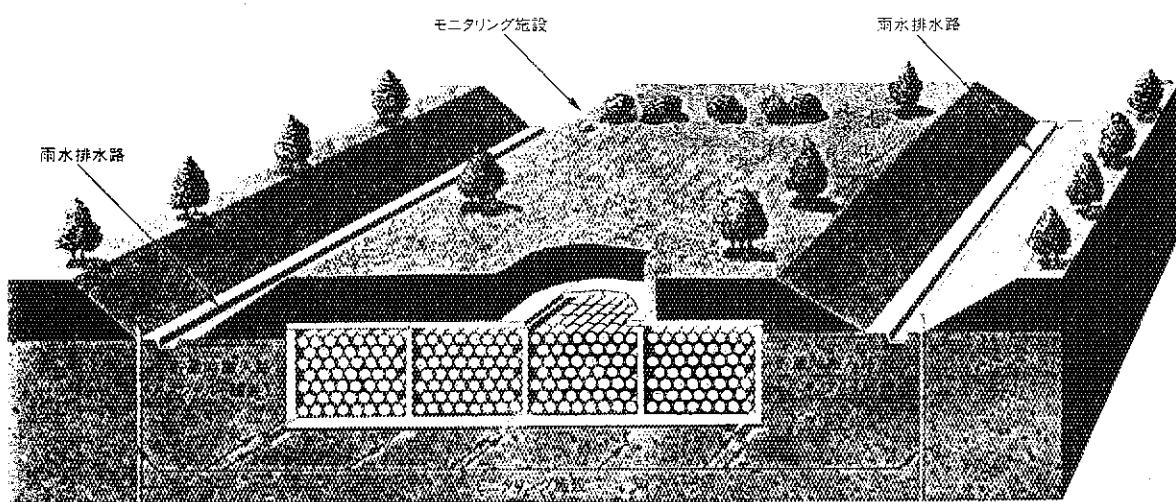


図13 低レベル放射性廃棄物を埋設する施設の概念の一例

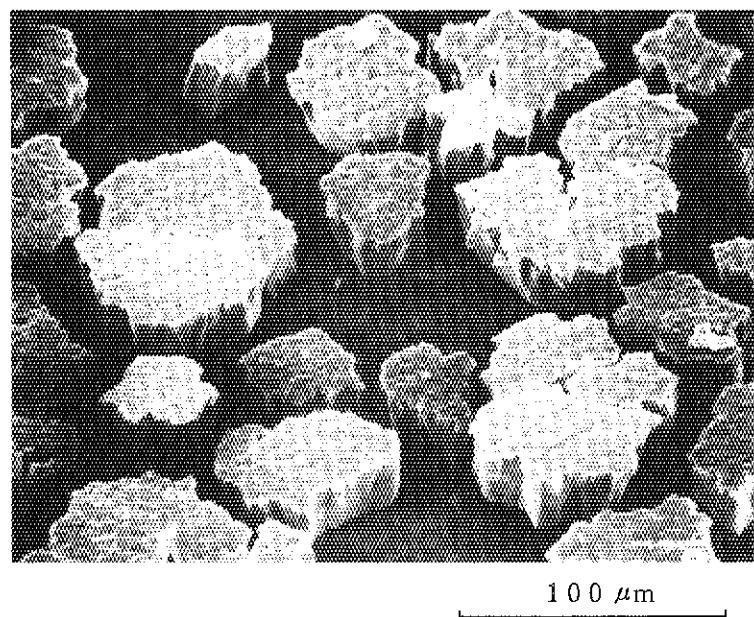


写真1 ガラス固体化を浸出した後の表面層