

## はじめに

原子力発電は、日本の発電量の約3割を占めており、エネルギー確保のうえで重要な役割を担っています。原子力発電にとって残された課題のひとつは、放射性廃棄物の地層処分を安全確実に進めることです。このため、原子力発電環境整備機構(略してNUMO)<sup>注1)</sup>が、高レベル放射性廃棄物の地層処分を実施する組織として法律<sup>注2)</sup>に基づき2000年10月に設立されました。

2008年には、法律が改正され低レベル放射性廃棄物のうち発熱は小さいものの半減期が長い放射性核種を含む「TRU廃棄物<sup>注3)</sup>」の一部も地層処分を行うこととなりました。

NUMOは、地層処分という事業を進めていくためには、地層処分についてのみなさまの疑問や不安に応えていくことが一番重要なことと考えております。

本冊子では、高レベル放射性廃棄物および地層処分低レベル放射性廃棄物<sup>注4)</sup>の地層処分に関心をお持ちの方々を対象に、地層処分の安全性を考えるうえでの基本的な技術事項についてまとめてみました。

本冊子によって多くのみなさまが、地層処分の安全性について関心を持ち、考え、理解を深めていただければ幸いです。

注1) NUMOの解説は資料編(158ページ)をご覧ください。

注2) 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律(最終処分法)。

注3) 本冊子では地層処分を行うTRU廃棄物を特に必要な場合を除き「地層処分低レベル放射性廃棄物」と呼びます。

注4) 本冊子では高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の両方について説明するときは「高レベル放射性廃棄物等」と呼びます。

## 本冊子の読み方

- この冊子は、大きく本編と資料編で構成されています。本編は、高レベル放射性廃棄物等の地層処分の安全性に関する基本的事項を解説した1章から7章で構成されています。また資料編は、本編の内容に関連して基本的な事項をより深く知っていただくために科学技術的な内容を解説しています。
- 各ページにおいては見開きページでひとつの技術内容が完結されています。本編では、質問と回答、イラストの博士の台詞によってそのページの大体の内容がつかめるように構成してあります。
- 各章は、それぞれ独立していますので、どの章から読み始めていただいても構わないような内容構成となっています。地層処分の技術的な内容については、4章、5章、6章にまとめてあります。
- 1章から7章には、文章の中に(➡)があり、その見開き右ページに関連するさらに詳しい技術情報が資料編にあることをお知らせしています。
- 巻末には、用語集と参考文献を掲載しています。

# 目次

はじめに	2
本冊子の読み方	3
目次	4
序章	6
1章 放射線の基礎知識	8
1-1 放射性物質は、なぜ、放射線を放出するのか	10
1-2 放射線は特別なものなのか	12
1-3 放射線はどのように利用されているのか	14
1-4 放射線を止めることはできるのか	16
2章 放射性廃棄物とはどのようなものか	18
2-1 発電にともない廃棄物は発生するのか	20
2-2 「地層処分を行う放射性廃棄物」とはどのようなものか	22
2-3 高レベル放射性廃棄物はなぜガラスで固めるのか	24
2-4 ガラス固化体には、どのような特徴があるのか	26
2-5 地層処分低レベル放射性廃棄物には、どのような特徴があるのか	28
3章 なぜ、地層処分なのか—検討されたさまざまな方法—	30
3-1 なぜ、貯蔵ではいけないのか	32
3-2 放射能をなくす方法はないのか	34
3-3 地下は安定していると言えるのか	36
3-4 わが国では地層処分はどのように決められたのか	38
3-5 地層処分は国際的に認められている方法なのか	40
3-6 地層処分が大切なことは	42
4章 日本列島の地殻変動	44
4-1 火山が突然噴火して処分場を破壊しないのか	46
4-2 地震の揺れで処分場が破壊されないのか	48
4-3 活断層が突然できて処分場を破壊しないのか	50
4-4 隆起・沈降や侵食によって処分場が影響を受けないのか	52
4-5 処分に適した場所を選ぶことはできるのか	54
5章 地層処分の安全のしくみ	56
5-1 地層の役割は何か	58
5-2 人工バリアの役割は何か	60
5-3 ガラス固化体の役割は何か	62
5-4 オーバーバックの役割は何か	64
5-5 緩衝材の役割は何か	66
5-6 充填材の役割は何か	68
5-7 処分場に人間が侵入することはないのか	70
5-8 廃棄物の輸送のときに事故が起こるのではないのか	72
5-9 建設・操業中の周辺環境への影響は	74

6章 遠い将来の安全性を確かめることができるか	76
6-1 遠い将来を予測できるのか	78
6-2 将来の不確実なことをどのように考えるのか	80
6-3 何万年もかかる現象をどうやって調べるのか	82
6-4 安全評価結果から何がわかるのか	84
6-5 放射性廃棄物の放射線は生活圏に影響を及ぼすか	86
7章 地層処分に関する海外の状況	88
7-1 候補地が決まった国では	90
7-2 候補地が決まっていない国では	92
7-3 各国の地層処分の開発状況一覧	94
終章	96
資料編	99
① いろいろな放射性物質の半減期	100
② 放射能／放射線の単位	102
③ 放射性廃棄物	104
④ 処分場	106
⑤ 高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の併置	108
⑥ 自然に学ぶ—カナダ・シガーレイクウラン鉱床—	110
⑦ 地球の内部構造	112
⑧ 地殻変動のメカニズム	114
⑨ 火山噴火のメカニズム	116
⑩ プレート配置の変遷	118
⑪ 地震のメカニズム	120
⑫ 活断層の動き	122
コラム：活断層をとらえる—活断層調査技術—	124
⑬ 気候変動による海水準変動(海面高度の変化)	130
⑭ 地下水の流動	132
コラム：地下深部の地下水の流れをとらえる—地下水調査技術—	134
⑮ 地層の物質移行遅延メカニズム	138
⑯ 地下水の化学的な性質	140
⑰ ガラスの溶解メカニズム	142
コラム：研究の最前線—ガラスの溶解—	144
⑱ オーバーバックの腐食メカニズム	146
コラム：研究の最前線—鉄の腐食—	148
⑲ ベントナイトの物質移行遅延メカニズム	150
⑳ セメント系材料による人工バリアシステムへの影響	152
㉑ 地下水シナリオに基づく安全評価結果	154
コラム：地層処分による放射線の影響	156
NUMOとは	158
用語集	160
参考文献一覧	166

# 序章

「地層処分」と聞くと、「地下に放り込んで後は知らん顔」というイメージをお持ちの方もいらっしゃるのではないのでしょうか。しかし、地層処分は深い地層が持っている特性を活かし、さまざまな分野の科学技術を総動員して初めて完成するシステムなのです。

期間が限られていれば、人間の管理により安全性を確保することが可能ですが、寿命の長い放射性物質が含まれている廃棄物については、数万年以上にわたる有効な対策を考える必要があります。

地下深くには、一部の石炭や鉱石のように1億年以上にわたりほとんど地層中で位置を変えずに存在しているものがあるという例が示すように、地表に比べて超長期にわたって安定である深い地層の環境に地層処分では着目します。私たちや私たちの子孫が廃棄物からの放射線と地下水に溶け出す放射性物質による影響を受けないよう、長期にわたって安定し、物質を閉じ込める性質を有する岩盤と人工的な複数の障壁との多重の障壁により、廃棄物を長期にわたって人間の生活環境から隔離する方法が地層処分です。このようにすることによって、長期にわたって管理することなく安全性が確保されるのです。

この考え方は、人間の管理によって安全性を確保するというこれまでの考え方とは異なるので、なかなかなじめないかもしれませんが、この自然の力を利用するという考え方は地層処分の安全性を理解するうえで鍵となるものなのです。

1章では、まず、最初に放射線の基礎知識について述べます。2章以降が地層処分についての説明です。2章で地層処分を行う放射性廃棄物とはどのようなものかを述べ、地層処分を選択するのに至った理由を3章で解説します。わが国には火山や地震が多くありますので、4章では地層処分における日本列島の地殻変動への対応について解説します。5章では地層処分による安全確保のしくみを、6章では地層処分の安全性を確かめる評価の方法について説明します。最後に、7章で海外ではどの程度地層処分事業が進んでいるかについて紹介します。

## 地層処分とは



# 1章

## 放射線の基礎知識

放射性廃棄物という言葉  
を耳にすると、まず、放射線  
や放射能を思いうかべる方  
が多いと思います。そして次  
に、放射線や放射能は何か  
恐ろしそうなもので、自分か  
らは遠ざけておきたい、と思  
ってしまうのではないでしょ  
うか。また、少し積極的に、

放射線や放射能について知ろうと本を開いてみても、分子や原子といったミクロの世界の話は感覚では理解しにくく、「やっぱり、放射線や放射能は難しいものだ」と思って本を閉じてしまうことが多いかもしれません。

放射線は、1896年、パリ理工科大学の教授だったベクレルが、ウラン化合物を写真乾板の上に置いていたところ、その部分だけが感光している、と気づいたことよって偶然に発見されました。また、1898年、キュリー夫人は、ウラン鉱物から放射線を放出する元素(ポロニウムとラジウム)を分離することに成功し、放射線の原因が小さな原子の中に潜んでいるという結論に達しました。

その後、多くの研究者によって、放射線や放射能の持ついろいろな性質が明らかにされています。1章では、放射線や放射能の基本的な性質について説明します。



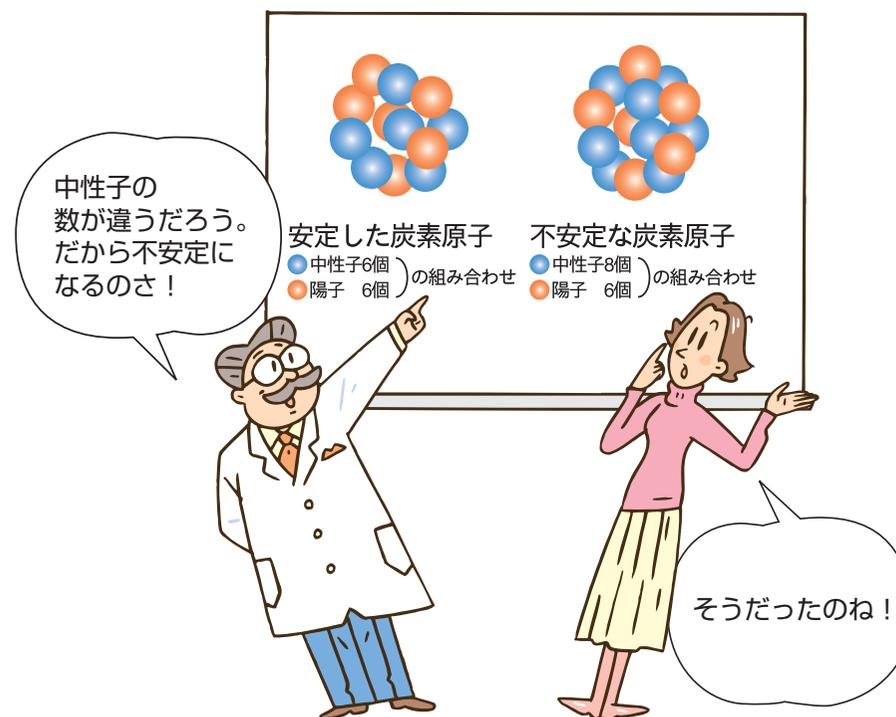
# ? 放射性物質は、なぜ、放射線を放出するのか。

**不安定な物質がエネルギーを放出して安定な状態へ変化しているのです。**

万物はみな原子でできています。この原子は、陽子と中性子からなる原子核と原子核の周りを回る電子でできています。水素原子では、1個の陽子からなる原子核の周りを1個の電子が回っており、炭素原子では6個の陽子と6個の中性子からなる原子核の周りを6個の電子が回っています。

この陽子と中性子の組み合わせによっていろいろな原子ができています。組み合わせの中には安定なものもありますが、不安定なものも多く存在します。不安定な原子は、安定になろうとして放射線を放出します。この変化を繰り返すことによって、最後は安定な原子となります。この変化する現象を放射性崩壊と言います。このような放射線を放出する能力(放射能)を持った物質を放射性物質と言います(➡①)。

## 放射性物質とは



➡ 詳しくは資料編 ① 「いろいろな放射性物質の半減期」(100ページ参照)

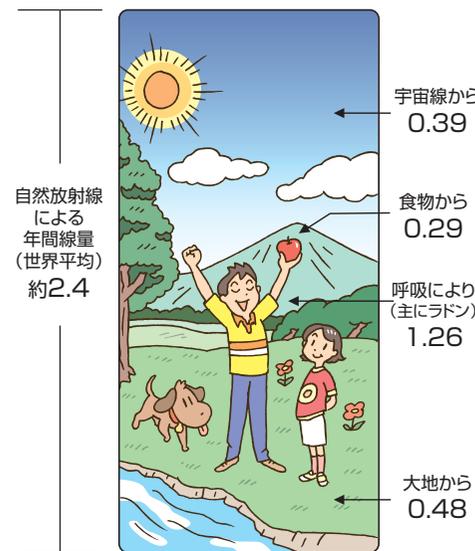
# ?放射線は特別なものなのか。

私たちは、日常生活で自然環境から常に放射線を受けています。

私たちをとりまく自然環境の中には、さまざまな放射性物質が存在しています。土(大地)の中にも、海水の中にも、空気の中にも、そして私たちの体の中にも…。私たちは生まれてからずっと放射線がある環境の中で生活しています。宇宙からは、主に銀河系の中で発生した放射線と、それらの放射線が地球の大気中の物質と衝突したときに発生する放射線の2種類のものが地上にやってきます。また、温泉には、ラドンなどの放射性物質を普通の水よりも多く含んでいるものもありますし、大地の養分で育った農作物にも放射性のカリウムなどが含まれています。大地に含まれる放射性物質の種類や濃度は地域によって差がありますが、私たちは1年間でおよそ2.4ミリシーベルトの放射線を自然環境から受けています。ここで言うシーベルト(⇒②)とは放射線による人体への影響を表す単位です。

私たちを含め生物を形作るもとである細胞に放射線があたると、細胞の機能が低下したり、大量の放射線にさらされると、場合によっては細胞が機能しなくなることもあります。私たちは遠い昔から、常に自然からの放射線の中で生活しており、それが健康に影響を及ぼすものではないということは、私たちの経験からも明らかです。このように考えると、放射線は特別なものではなく、その量が少なければ健康に影響を及ぼすものではないと言えます。

## 日常生活と放射線



単位:ミリシーベルト



➡詳しくは資料編 2 「放射能/放射線の単位」(102ページ参照)

# ? 放射線は どのように利用 されているのか。

## 医療・工業・農業

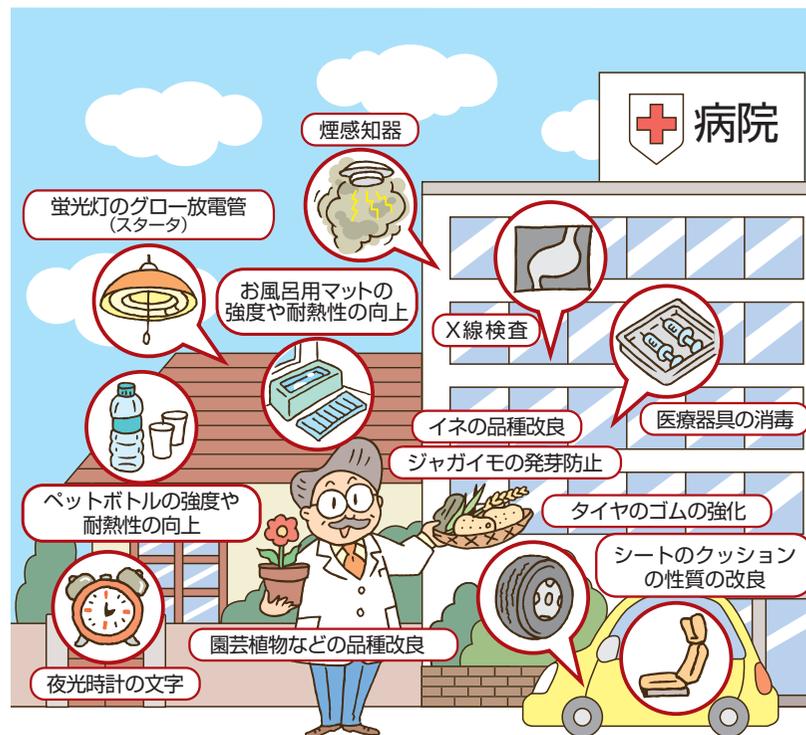
### いろいろと使われています。

みなさんは、病院でレントゲン検査(エックス(X)線検査)を受診したことがあることでしょうか。検査で使われるX線も放射線の仲間です。X線検査は、体の内部の状態を知ることができ、病気の早期発見に役立っていますが、1回当たり0.6ミリシーベルト(胃のレントゲン検査の場合)の放射線を浴びることになります。また、放射線をあてることによってがん細胞だけを死滅させ、ほかの正常な細胞にほとんど影響を与えずに治療することも行われています。さらに、放射線には殺菌作用があり、医療器具などの滅菌にも使われています。例えば、注射器や注射針、手術用器具などを密封してから放射線をあてることによって滅菌し、使用のときまで無菌状態に保つことができます。

放射線は、医療のほかに工業や農業でも利用されています。例えば、放射線を利用した化学反応によってゴムやポリエチレンなどの強度を高めたり、耐熱性を向上させたりすることができます。この技術を利用して、自動車のラジアルタイヤやシートクッションなどが作られています。このほかにも、さまざまな新しい機能を持つ材料が放射線を利用して開発されています。農業では、ジャガイモの発芽防止や、イネや園芸植物などの品種改良に放射線が利用されています。

このように放射線は私たちの身の回りでいろいろと使われていますが、その際には十分に注意して取り扱われているため、私たちの健康に影響を与えることはありません。

#### 放射線のいろいろな利用



# ?放射線を止めることはできるのか。

放射線は性質にあわせて、止めることができます。

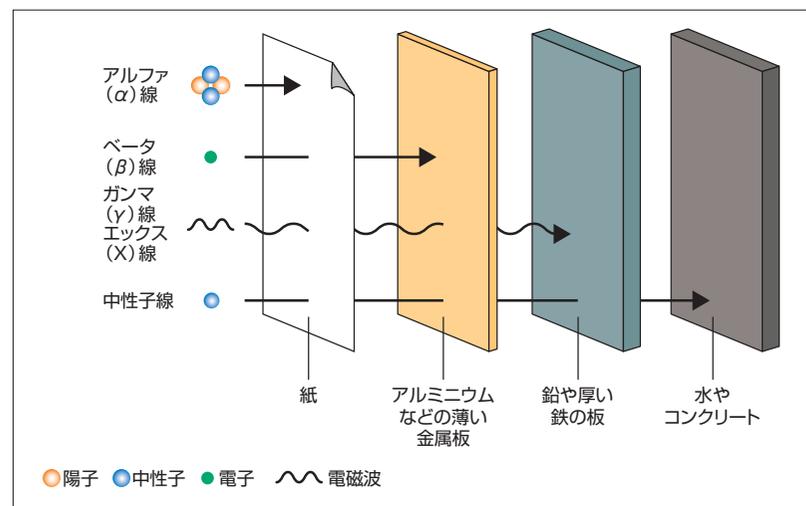
放射線には、アルファ( $\alpha$ )線、ベータ( $\beta$ )線、ガンマ( $\gamma$ )線、エックス(X)線、中性子線など、いくつかの種類があり、それぞれ特徴を持っています。特徴のひとつに、放射線は物質の中を透過し、物質に吸収されるという性質があります。これは放射線が物質の中を通り抜けるときに、物質を構成する原子中の電子や原子核に衝突しながら進んでいくため、自らのエネルギーが電子や原子核に吸収されて放射線は止まってしまう、ということです。

$\alpha$ 線はヘリウムという原子の原子核で、物質を透過するときに原子に衝突してエネルギーを失いやすく、すぐに止まってしまいます。このため $\alpha$ 線は紙でも止めることが可能です。 $\beta$ 線は $\alpha$ 線よりもかなり小さい電子なので、物質を透過する力は $\alpha$ 線より強くなりますが、アルミニウムなどの薄い金属板で止めることが可能です。 $\gamma$ 線は電磁波の一種で、X線も $\gamma$ 線と同じ仲間です。物質を透過する力は強く、止めるためには鉛板、厚い鉄板などが必要です。中性子は電荷を持たないので電子の影響を受けにくいのですが、原子核とは衝突します。しかし、原子核はきわめて小さいため中性子は原子核となかなか衝突せず物質の中を透過してしまいます。中性子を止めるには衝突したときに効率よくその運動エネルギーを奪う、水や厚いコンクリート壁などが必要です。

このように、放射線はそれぞれの性質にあわせて止めることができます。その性質

を利用して、原子力施設から放射線を遮へいしています。

## 放射線の種類と透過力



放射線はそれぞれの性質にあわせて止めることができます。私たちはその性質を考慮して、放射線から身を守ることができるのです。

# 2章

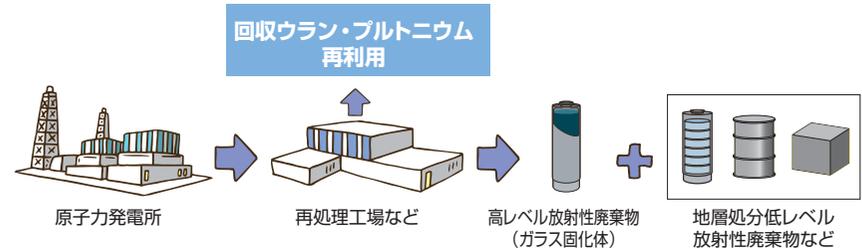
## 放射性廃棄物とは どのようなものか

人間が何らかの活動をすると、必ず廃棄物が発生します。一般の家庭からは台所などからごみが出ます。私たちは、そのごみを分別

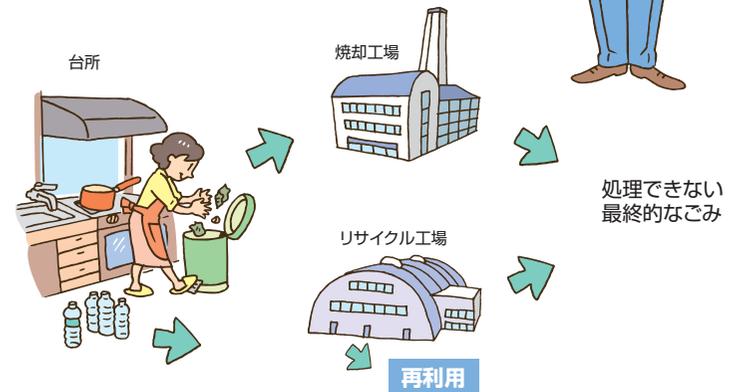
して有用なものごみとを分け、有用なものはリサイクルします。発電の場合も例外ではありません。

2章では、放射性廃棄物をどのように処理するのか、それはどのような特徴を持ったものかについて説明します。(→③)

人間が活動すると廃棄物が発生します



家庭のごみをきちんと分別しリサイクルするように  
原子力発電から出る廃棄物も  
きちんと分別し  
リサイクルします。



詳しくは資料編 ③ 「放射性廃棄物」(104ページ参照)

# 発電にともない 廃棄物は発生するのか。

火力発電では二酸化炭素が、  
原子力発電では放射性廃棄物が  
発生します。

スイッチひとつでつく蛍光灯、冷蔵庫、炊飯器、洗濯機、エアコン、これらによって私たちは毎日を快適に過ごすことができます。また、24時間営業しているコンビニエンスストア、エレベータ、電車なども私たちの生活を便利にしています。普段はあまり気にすることはありませんが、これらは主として電気に頼っています。発電所では電気を起こす際に、火力発電の場合には二酸化炭素が、原子力発電の場合は放射性廃棄物が発生します。(➡③)

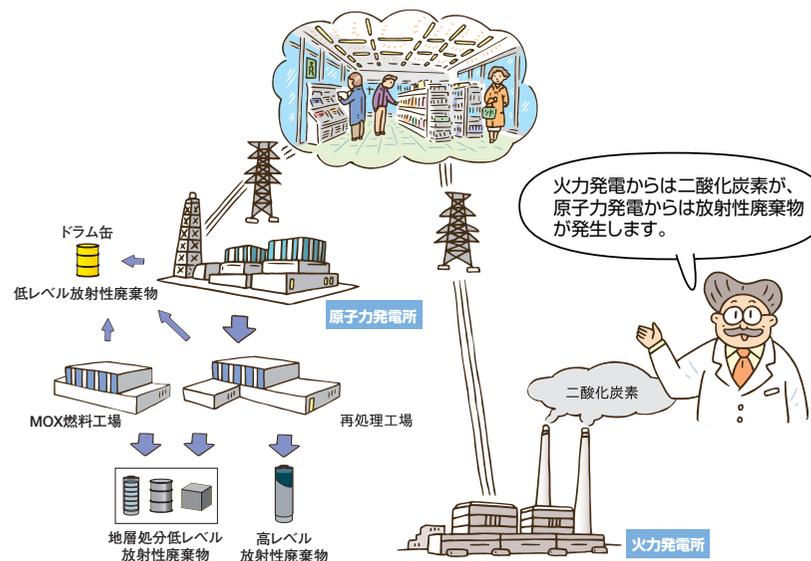
原子力発電所では、ウランを燃料として使いますが、使い終えた燃料は「使用済燃料」と呼んでいます。しかし、この中にはまだ燃料として使えるウランや燃料となるプルトニウムとともに、ウランの核分裂などにより新たに生成された使い道のない放射性物質(核分裂生成物など)が含まれています。

再処理工場では、再び燃料として使えるウランなどを化学的に分離し、回収します。このとき、使用済燃料から放射能の強い放射性物質を含んだ高レベル放射性廃液が発生します。これをガラスに融かし固めます。このガラス固体体を日本では「高レベル放射性廃棄物」と呼んでいます。

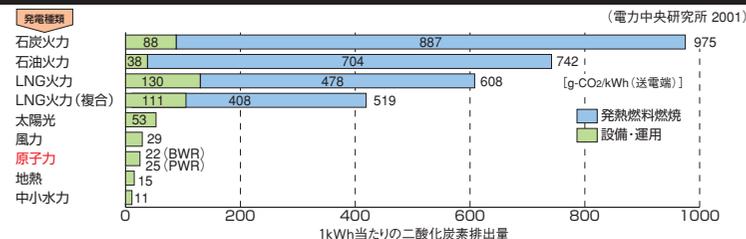
また、このほかに再処理工場などでは、高レベル放射性廃棄物よりも放射能が低く発熱が小さいものの、半減期の長い放射性核種を一定量以上を含む、「地層処分低レベル放射性廃棄物」などが発生します。

なお、海外では使用済燃料の再処理を行わない国もありますが、その場合は、使用済燃料そのものが高レベル放射性廃棄物となります。

## 発電と廃棄物



## 各種電源別の二酸化炭素排出量



➡ 詳しくは資料編 3 「放射性廃棄物」(104ページ参照)

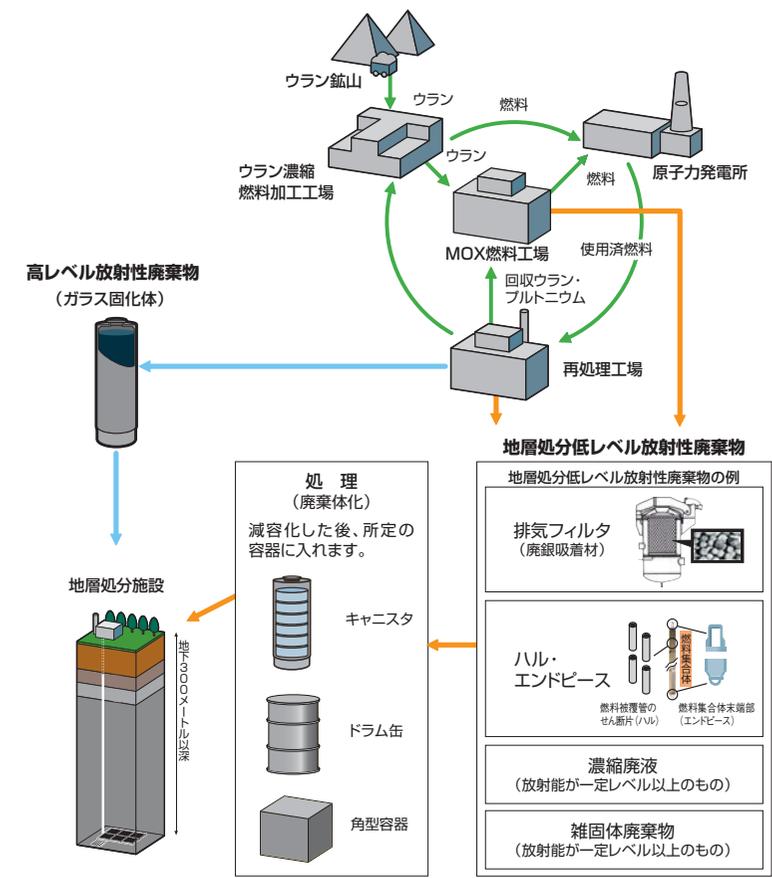
# 「地層処分を行う放射性廃棄物」とはどのようなものか。

「高レベル放射性廃棄物」と「地層処分低レベル放射性廃棄物」のふたつに分類されます。

「高レベル放射性廃棄物」は、再処理工場において使用済燃料を溶解した後、ウランとプルトニウムを再利用のために抽出した後に残る核分裂生成物などを含む廃液を、ガラスと融かし合わせて固化したものです。放射能が高く、発熱も大きいため、処分場に安置するのに適した温度に下がるまでの間、貯蔵施設で冷却しながら貯蔵します。青森県六ヶ所村には高レベル放射性廃棄物のための貯蔵施設があり、すでにフランスから返還された高レベル放射性廃棄物を冷却しながら貯蔵しています。

再処理工場や、MOX燃料工場の操作中や解体時に、高レベル放射性廃棄物に比べて放射能が低く発熱が小さいさまざまな放射性廃棄物が発生します。この廃棄物の一部は半減期の長い放射性核種が一定量以上含まれることから、高レベル放射性廃棄物と同様に地層処分します。

ここでは、この廃棄物を「地層処分低レベル放射性廃棄物」と呼びます。これらの廃棄物は処分に適した形状に加工（廃棄体化）されて、廃棄体として処分場に搬入されます。(➡④)



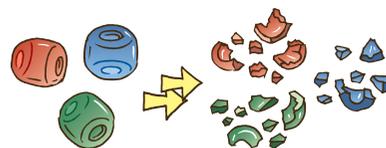
# 高レベル放射性廃棄物はなぜガラスで固めるのか。

ガラスが放射性廃棄物を取り込む能力に優れているからです。

2章-2で説明しましたように、使用済燃料を再処理すると高レベル放射性廃液が発生します。これは、放射性物質を含んでいる液体ですから、こぼれて散らばってしまったり、容器に穴があいて漏れたりしては危険です。そのため、固めることが必要です。さらに固体であっても、すぐに溶けたり、ぼろぼろに崩れたりしては困ります。長い期間にわたって安定な状態を維持できることが必要です。高レベル放射性廃液は、高温で融かしたガラス原料とともにキャニスタと呼ばれるステンレス製容器の中で冷やして固めます。これをガラス固化体と言います。

では、なぜガラスで固めるのでしょうか？ガラスにいろいろな核種を融かし込むとその核種特有の色を持つ色ガラスを作ることができます。古代エジプト時代に作られた色ガラスは、割れても、何千年たっても色が抜けることはありません(5章-3)。高レベル放射性廃液とは、実は、さまざまな放射性物質(放射性核種)が水に溶けたもので、それらを色ガラスの原理でガラスに融かし込んで固めたものがガラス固化体です。つまり、色ガラスから色が抜けないように、放射性物質が外に漏れ出ることはありません。

## ガラス固化体のイメージ



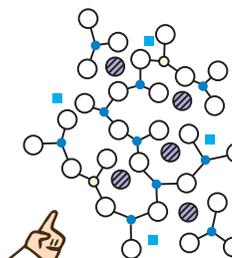
色ガラスの管玉 割れた色ガラスの管玉

色ガラスの管玉は割れても色は外に出ることはありません。ガラスにはこのように封じ込める能力があるのです。

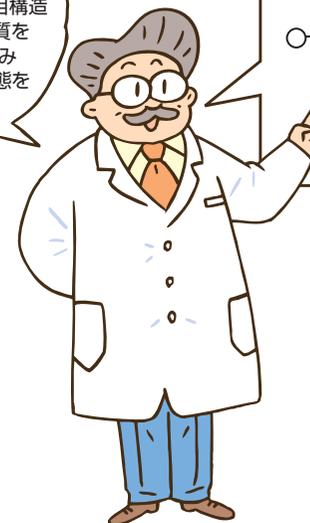


## ガラスの閉じ込め能力

なぜガラスで固めるかというと、ガラスはその網目構造の中に放射性物質をきっちりと取り込み長期間安定な状態を保つからです。



- 酸素
- ケイ素
- ホウ素
- ナトリウム他
- ◐ 放射性物質



# ? ガラス固化体には、 どのような特徴が あるのか。

## ガラス固化体の放射能と発熱量は 次第に減衰します。

ガラス固化体は、高レベル放射性廃液をガラス原料とともに高温で融かしたものを、キャニスタと呼ばれるステンレス製容器の中で冷やし、固めたものです。

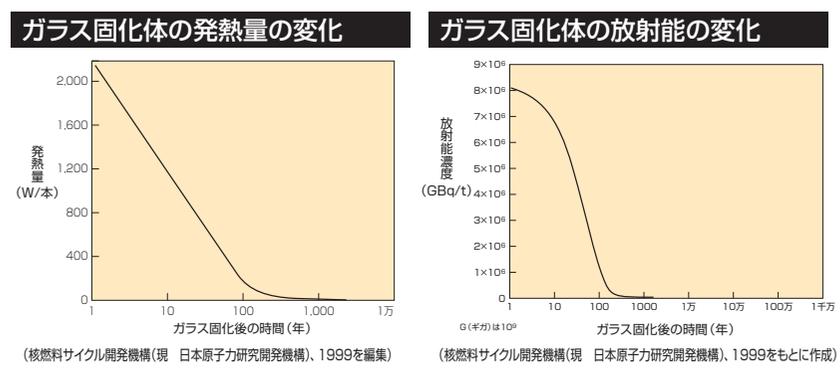
ガラス固化体には、ウランの核分裂によりできたさまざまな放射性物質が含まれています。その半減期は長いものから短いものまでさまざまです。ガラス固化体製造直後には半減期の比較的短い放射性物質(セシウム137、ストロンチウム90。半減期は約30年と約29年)によって、人間が近づくとできないほど高い放射能を持っています。そのため、容器や壁などによる遮へいや遠隔操作が必要になりますが、現在、青森県六ヶ所村で安全に保管されているように、十分安全に取り扱うことができます。

第1章で説明しましたように、放射能は時間とともに減衰する性質があります。ガラス固化体の放射能は、半減期の比較的短い放射性物質の影響で比較的早く減衰し、ガラス固化体の放射能は1000年後にはガラス固化体製造直後の約3000分の1、1万年後には約1万分の1、10万年後には約3万分の1になります。

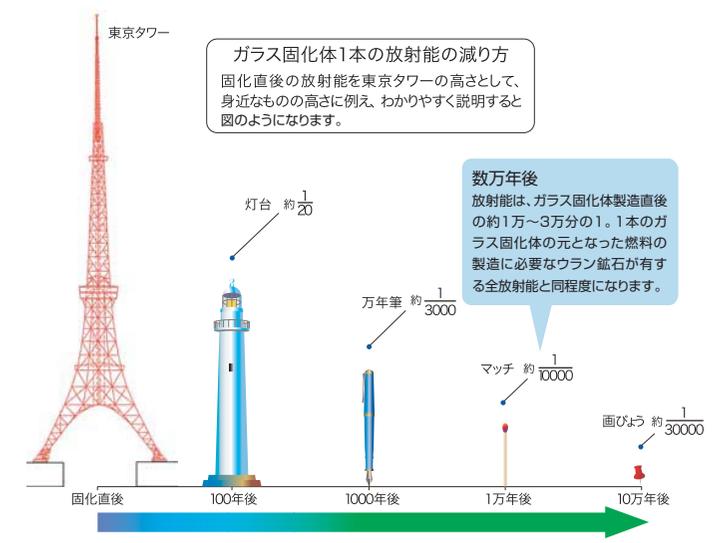
これ以降は、半減期の長い放射性物質(ネプツニウム237、ウラン233、アメリシウム243。半減期はそれぞれ約214万年、約16万年、約7400年)の放射能が大部分となり、ゆっくりと減衰します。

ガラス固化体は放射性崩壊にともなって発熱していますが、放射性物質の減衰とともに、発熱も低下していきます。製造直後の発熱は約2300ワット(2.3キロワット)と、電気ポット2~3個分の発熱に相当しますが、30年後には約560ワット、50年後には約350ワットまで低下します。

なお、ガラス固化体には核分裂する物質がほとんど含まれないことから、原子爆弾のように爆発を起こすことはありません。



### ガラス固化体の放射能を高さと例えると…東京タワー333メートルから画びょう約1センチメートルへ



# 地層処分低レベル放射性廃棄物には、どのような特徴があるのか。

高レベル放射性廃棄物と比較して、放射能も発熱も小さいものです。

地層処分低レベル放射性廃棄物の放射能や発熱は、高レベル放射性廃棄物と比較しても、放射能は高レベル放射性廃棄物の約80分の1、発熱は約130分の1（ハル・エンドピース、処分直後の場合）です。そのため、地層処分低レベル放射性廃棄物は、ガラス固化体のように1体ずつ離して処分する必要はなく、集めて処分することができます。地下施設の広さは高レベル放射性廃棄物に比べて、約30分の1で済みます（➡⑤）。

また、地層処分低レベル放射性廃棄物には、さまざまな種類の放射性物質が含まれているため、それぞれの廃棄物の特徴にあわせて、処分する必要があります。

グループ1は、ヨウ素129を吸着するために使用された排気フィルタです。この廃棄物の発生量は少ないのですが、ヨウ素129は人工バリアや天然バリアに吸着されにくいという特徴があるため、人工バリアには、高レベル放射性廃棄物と同様に水を通しにくい緩衝材を使用します。

グループ2は、燃料集合体の部品であったハル（燃料被覆管のせん断片）やエンドピース（燃料集合体の末端部）であり、高レベル放射性廃棄物ほどではありませんが発熱があります。そのため、発熱を考慮して、ほかの坑道より広めに間隔を取ります。また、ヨ

ウ素のように吸着しにくい炭素14を含むため、グループ1と同様に緩衝材を使用します。

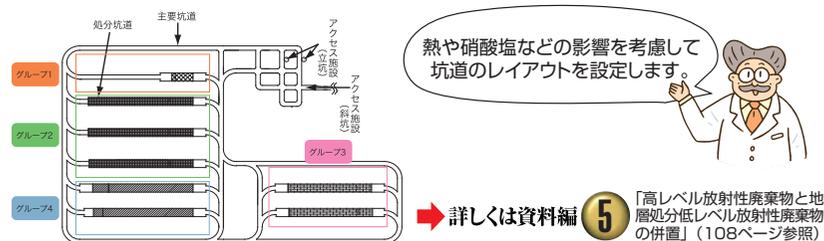
グループ3は、使用済燃料を溶解するために使われた硝酸の廃液を濃縮固化したもので、硝酸塩を多く含むため、人工バリアに影響を与えるという特徴があります。そのため、地下水の流れる方向を考慮して、このグループの処分坑道の場所を決めます。

グループ4は、施設の操業や検査のときに使われ、放射性物質が付着した工具類などの雑固体であり、グループ1から3には含まれないさまざまな放射性物質が含まれています。発生量が多く、地層処分低レベル放射性廃棄物の半分以上を占めます。

地層処分低レベル放射性廃棄物のグループ分けの例

グループ	内容	特徴	処分坑道断面 (凹形坑道の場合)
1	排気フィルタ等 (炭銀吸着材)	●半減期が長く岩盤等に吸着されにくいヨウ素129を多く含む ●発生量が少ない	埋め戻し材、構造躯体、緩衝材、支保
2	ハル・エンドピース 燃料被覆管のせん断片(ハル)、燃料集合体末端部(エンドピース)	●半減期が長く岩盤等に吸着されにくい炭素14を多く含む ●発熱量が比較的大きい	埋め戻し材、構造躯体、緩衝材、支保
3	濃縮廃液等 (放射能が一定レベル以上のもの)	●人工バリアに影響を与える硝酸塩を多く含む	廃棄体パッケージ
4	雑固体廃棄物 (放射能が一定レベル以上のもの)	●グループ1~3のような特徴を持たない	充填材、支保

地層処分低レベル放射性廃棄物の地下施設レイアウト(軟岩系岩盤の例)



# 3章

検討された  
さまざまな方法

## なぜ、地層処分なのか

高レベル放射性廃棄物等には寿命の長い放射性物質が含まれているので、長期にわたって人間とその生活環境に対して放射能の影響が及ばないようにする必要があります。その方法としては、次の3つが考えられます。

- ・人間の生活環境へ影響が及ばないように長期にわたって人間が管理する。
- ・そもその危険性をなくしてしまう。
- ・人間の生活環境から十分離れた場所に長期にわたって隔離する。

最初に挙げた、人間の管理による方法を貯蔵と言っています。貯蔵については、原子力発電所敷地内での使用済燃料の貯蔵をはじめ、青森県六ヶ所村での高レベル放射性廃棄物の貯蔵など多くの実績があります。しかし、貯蔵を将来にわたって続けていくことは、いずれ困難になるかもしれません。

2番目の危険性をなくす方法は核種変換と呼ばれ、高レベル放射性廃棄物等の

中に残留する寿命の長い放射性物質の量を少なくするための技術で、基礎的な研究が進められています。しかし、この技術はまだ研究開発の段階であって、商業規模で実現されるためには多くの時間が必要とされていますし、将来、この技術が実用化されても、放射能の高い放射性物質の量が少なくなるだけですべてがなくなってしまいうけではありません。

最後の人間の生活環境から離れた場所に隔離する方法としては、横方向へ遠ざけると別の人に近づくことになるので、上(宇宙)に隔離する方法と下(地下深く)に隔離する方法が考えられます。このうち、宇宙空間に放出する方法は、ロケットの打ち上げ失敗の例が示すように、技術的な問題、不測の事態における地球規模での影響の広がりや経済性などの問題があり、現在では検討されることもほとんどありません。地下深部に隔離(地層処分)するのは、地層が本来持っている、物質を包み込んで保存するという性質を巧みに利用する方法です。地下には、石油、石炭や鉱石などが1億年以上にわたり移動せずに存在している場所があります。

3章では、高レベル放射性廃棄物の取り扱い方法を中心として地層処分が選定されてきたいきさつや理由について説明します。

### 高レベル放射性廃棄物の処分方法



貯蔵  
継続的な人による管理



核種変換  
基礎研究が必要、実用的？



宇宙への放出  
打ち上げはまだ不安？



地層処分  
火山？地震は？

# なぜ、貯蔵ではいけないのか。

短期的には問題ありませんが、  
長期的にはノーと言わざるを得ません。

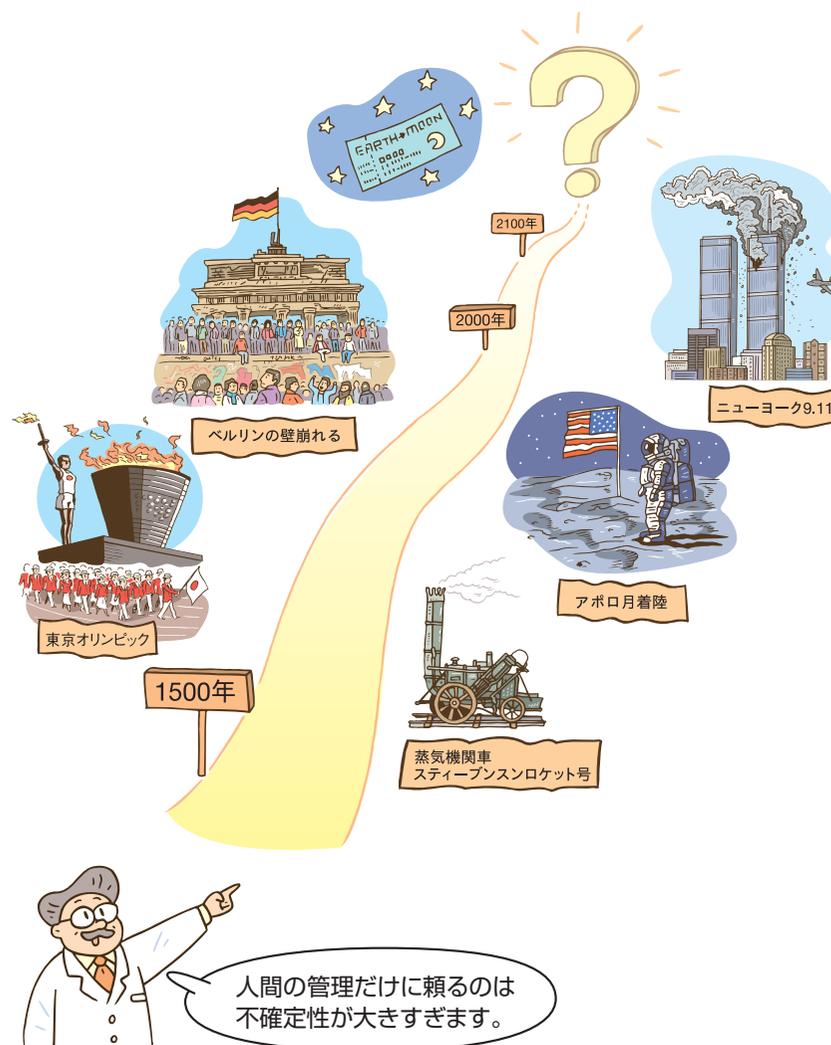
高レベル放射性廃棄物のガラス固化体は、フランスでは1970年代から専用の施設で貯蔵されています。また、日本でも、海外に委託した再処理によって発生したガラス固化体が、青森県六ヶ所村にある貯蔵施設で、2009年1月現在1664本が安全に貯蔵されています。

地層処分低レベル放射性廃棄物は、日本原子力研究開発機構の再処理工場やMOX燃料工場が発生しており、それぞれの施設で安全に貯蔵されています。

この貯蔵技術は完成された技術であり、多くの実績がある方法ですが、貯蔵は人間の管理によって安全を確保する方法であるため、人間による管理を継続することが前提となります。

高レベル放射性廃棄物や地層処分低レベル放射性廃棄物には、ネプツニウム237(半減期約214万年)やジルコニウム93(半減期約153万年)などの半減期の長い放射性物質が含まれているため、人間による管理も恒久的に維持する必要があります。しかし、このような管理を数万年もの長い期間、保証することは大変難しいことです。また、将来の世代に管理の負担を負わせることにもなります。このため、恒久的な人間による管理を行わなくてもよいように、いずれは人間の生活環境から遠い場所にきわめて長い期間隔離することが必要となります。

## 難しい遠い将来の予測



# ? 放射能をなくす方法はないのか。

簡単には  
実現できそうにはないけれど、  
研究は必要です。

2章では、高レベル放射性廃棄物等には半減期の長い放射性核種が含まれていることを説明しました。

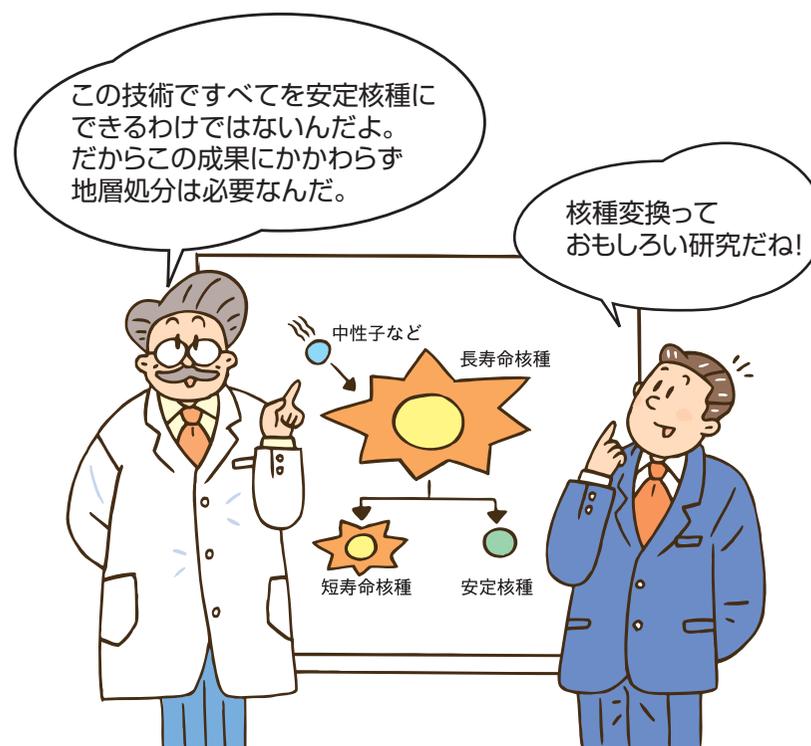
核種には、中性子を吸収するなどして、別の核種に変わるという性質があります。そこで、この原理を利用すれば、高レベル放射性廃棄物等に含まれる半減期の長い放射性核種(長寿命核種)を、半減期が短い核種(短寿命核種)あるいは安定な核種に変えることができるのではないかと考えられました。

具体的には、長寿命核種を化学的に分離し、それを高速炉という原子炉の中や加速器で核反応をさせるというもので、その基礎的研究が、日本を含め、アメリカ、フランスなどいくつかの国で進められています。

この技術は、高レベル放射性廃棄物等に含まれる長寿命核種の量を少なくすることにより、廃棄物問題の解決に貢献できると考えられていますが、まだ研究開発の段階ですので、実用化にあたっては核反応の効率の向上や、長寿命核種を分離する技術の向上など、多くの課題を解決する必要があります。なお、この技術については国の報告書で、高レベル放射性廃棄物の処理および処分の負担を軽減する可

能性を秘めたものとして研究開発を進めることとされています。ただし、高レベル放射性廃棄物等から半減期の長い放射性物質を100パーセント分離すること、あるいは分離したものを100パーセントの効率で変換することは原理的・工学的に不可能なため、この技術が実用化されても地層処分の必要性がなくなるわけではないことに留意する必要があるとも述べられています。

## 核種変換の原理



# 地下は安定していると言えるのか。

地下には過去を閉じ込めた多くの実績があります。

地層処分の基本は、物質を閉じ込めるという地下の環境が本来持つ性質を利用して、地下深くの安定した場所に廃棄物を埋設することにより、数万年以上にわたり高レベル放射性廃棄物等を人間の生活環境から隔離することです。

その考え方は、地下の環境が本来持つ性質を利用して、高レベル放射性廃棄物等の隔離を、人間の管理から自然の手にゆだねるところにあります。地下深くには、一部の石炭や鉱石のように、1億年以上にわたりほとんど地層中の位置を変えずに存在しているものがあることが示すとおり、環境が十分安定した場所があります。

カナダのシガーレイクのウラン鉱床(➡⑥)では、放射性物質であるウランが10億年以上にわたって閉じ込められていたことがわかりました。

また、大昔の生物の骨や貝殻の化石はガラスより水に溶けやすい物質でできていますが、それが溶けずに残っていたということは、一定の条件のもとではきわめて長い時間その場所で保存されているということです。代表的な化石のひとつであるアンモナイトは、約7000万年～約2億年の時を経て私たちの目の前に現われたものです。

代表的な化石の例：アンモナイト(写真提供：日本化石資料館)



デスモセラス科、テトラゴニイテス科  
生息：9040～8850万年前



①、②：デスモセラス科  
③：ディプロモセラス科  
生息：8660～8300万年前



➡詳しくは資料編 6 「自然に学ぶ」(110ページ参照)

# わが国では 地層処分はどのように 決められたのか。

**1960年代から議論が始められ  
1980年代に国の方針として  
決められました。**

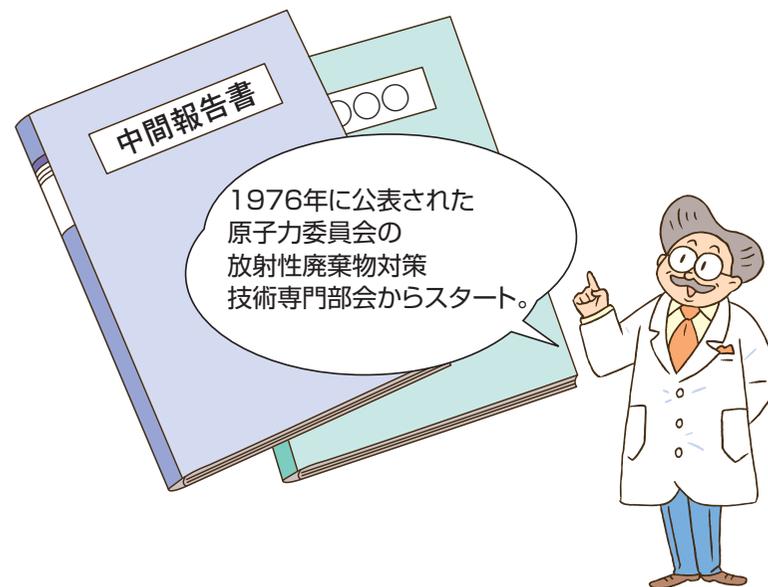
高レベル放射性廃棄物を深い地中に隔離して処分する方法は、1950年代に海外のいくつかの論文で提唱されました。

日本では、1962年の原子力委員会で議論が開始され、1976年には地層処分に重点において処分方法の調査研究が開始されました。1980年には高レベル放射性廃棄物を安定な形態であるガラス固化体にし、冷却のため一定期間貯蔵した後、地層に処分すること(地層処分)を基本にするとの方針が決められました。(➡④)

この方針に基づき、動力炉・核燃料開発事業団(現 日本原子力研究開発機構)や電力および関連機関で研究開発が行われ、1999年には核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)は、高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性を示す報告書を作成しました。一方、1995年には、原子力委員会に、高レベル放射性廃棄物処分懇談会(以下、処分懇)が設置され、制度的、社会的、倫理的側面からの検討が行われました。処分懇においては、幅広い領域の専門家、有識者による議論にあわせて、国民各層からの意見を聞くとともに、全国5カ所で意見交換会が行われました。これらを踏まえて1998年に公表された報告書では、社会的な理解

を得るための検討、処分の制度の検討として実施主体のあり方、事業資金の確保のための制度などが、具体的な施策を含めて示されました。これらの報告書を受け、2000年には特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律(最終処分法)が制定され、高レベル放射性廃棄物は地下300メートル以上の深さの安定な地層中に処分すること、処分実施主体を設立すること、3段階のプロセスで処分地を選定すること、最終処分費用を拠出制度によって確保することとなりました。

そして、同年10月には実施主体として原子力発電環境整備機構(NUMO)が設立され、2002年12月には文献調査を行う調査区域の公募を開始しました。その後、2007年には最終処分法が改正され、NUMOが行う地層処分事業の対象に地層処分低レベル放射性廃棄物が加えられました。(➡⑤)



➡詳しくは資料編 ④ 「処分場」(106ページ参照)

➡詳しくは資料編 ⑤ 「高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の併置」(108ページ参照)

# 地層処分は国際的に認められている方法なのか。

すでにいくつかの重要な国際的合意があります。

1960年代から80年代にかけて、各国あるいは国際的枠組みで行われた研究開発および専門家の間での地層処分概念の確認作業を経て、80年代後半以降には、処分事業の実現化に向けた動きがスウェーデン、アメリカ、フィンランドなどの国で見られるようになりました。

国際原子力機関(IAEA)は、地層処分の実現に向けて必要とされる安全規制の考え方や基準類の整備に着手し、処分場設計のための、国際的に合意された原則と基準を1989年に取りまとめました。

また、経済協力開発機構の原子力機関(OECD/NEA)は1991年に取りまとめた長期の安全評価に関する報告書で、注意深く設計された放射性廃棄物処分システムに関して、放射線が人間と環境に与える長期にわたる潜在的な影響を適切に評価する方法、すなわち安全性を事前に評価する方法が確立されたことを専門家の合意として表明しました。

さらにOECD/NEAは、国際的な環境問題への取り組みに対応し、環境保護と世代間と世代内の倫理の観点から地層処分の是非について検討しました。1995年に「長寿命放射性廃棄物の地層処分の環境的および倫理的基礎」と題する報告書を公表

し、環境保護の面からも倫理的な面からも、数百年以上にわたって生物圏から隔離される長寿命放射性廃棄物の地層処分場の開発を継続することは正しいという結論を出しました。



# ? 地層処分 大切なことは。

## 地下の環境を よく知ることです。

地層処分の安全性は、物質を閉じ込める地下の環境に大きく依存することになるため、その場所特有の地質特性や自然現象を考慮、検討することが必要になります。

特に日本は、火山が多い、地震がよく起きるなどの特徴を持っています。このような国土の中で、地層処分を安全に実施できるような場所がはたしてあるのか、という疑問を多くの方がお持ちになると思います。地下深くに処分した廃棄物が人間の生活環境に影響を及ぼす可能性としては、火山活動や断層活動などの自然現象により廃棄物が地表に接近する場合や、地下資源の採掘などのため人間が廃棄物に接近する場合があります。

このため地層処分においては、火山活動や断層活動などの影響を受けない安定な場所を選ぶとともに、人間が廃棄物に接近しないように経済的価値の高い鉱物資源が存在していない場所を選び、かつ人間の生活圏から離れた深いところに隔離することが重要となります。

そのような安定な場所であっても、地層中には地下水があります。この地下水によって廃棄物中の放射性物質が溶かし出され、さらに地表に運ばれ、人間に影響を及ぼす可能性を考えておかなければなりません。したがって、安全性を確保するためには、地下水の動きが大きい場所を避けて好ましい地下水条件を持つ場所を選ぶとともに、地下水に対する対策を考えることが重要になります。

次の4章では、日本列島の火山や地震などの地殻変動について、5章では、地層処分の安全のしくみとして、地層の閉じ込め能力、地下水対策、人間が廃棄物に接近しない対策などについて説明します。



# 4章

## 日本列島の地殻変動

日本列島は、世界的に見て火山や地震が多く、火山国・地震国などと呼ばれることがあります。そのような日本で地層処分を行う場合、どのような問題があるのでしょうか。

地層処分を安全に行うためには、まず第一に地層処分の場となる地下の環境が

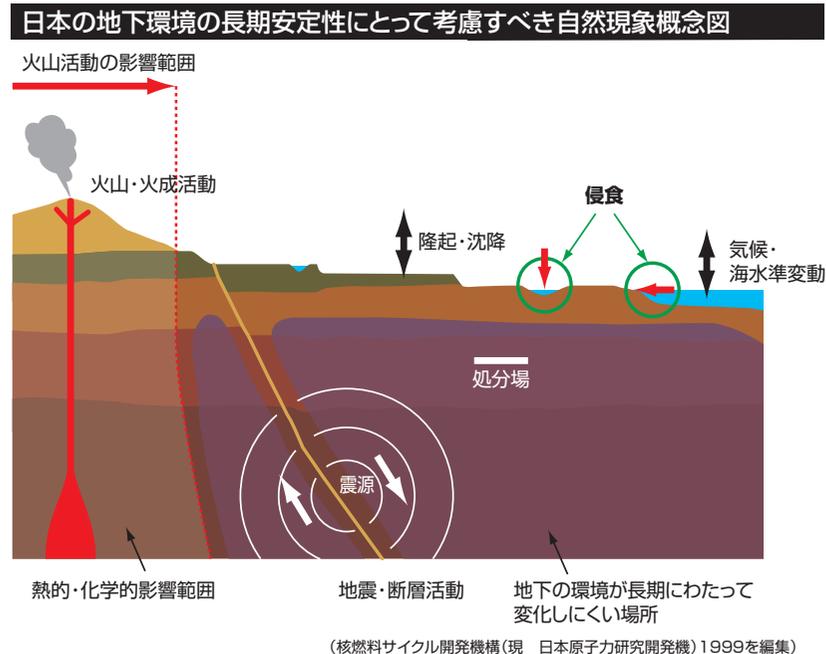
長期にわたって大きく変化しないことが重要です。逆に言えば、地下の環境を大きく変えてしまう自然現象(地殻変動)についての十分な検討が必要となります。なお、本冊子では地下300メートル以深を地下深部と呼ぶこととします。

では、地下深部の環境に影響しそうな自然現象とはどのようなものがあるのでしょうか。洪水や津波、あるいは地すべりや斜面崩壊などによる影響は地表付近に限られますので、検討対象からははずせますが、火山活動、地震・断層活動、隆起・侵食などは、地下深部にも影響を及ぼすことが考えられます。そのうち、火山活動および地震・断層活動は、局地的ではあっても繰り返し地下深部から地表にわたって起き、地下の環境に大きな影響を与える可能性があるため、これらの活動の範囲や特徴(癖)を把握し、避ける必要があります。一方、隆起・侵食などは、より広い地域にわたってゆっくりと継続的に起きる現象ですから、時間スケールとの関係で考慮することが必要です。

詳しく調べてみると、日本列島には火山活動や断層活動による影響を長期に

わたってほとんど受けていない地域が広く存在しています。

では、地下の環境に影響を及ぼす可能性がある、これらの自然現象の発生のしくみや分布の特徴などはどうなっているのでしょうか。4章では、そのことについて説明します。



# ? 火山が突然噴火して 処分場を 破壊しないのか。

火山は限られた地域にしかなく、  
現在ないところに突然できて処分場が  
破壊されることはありません。

日本列島には多くの火山が分布しています。しかし、日本中どこにいても、火山を間近に眺めることができるわけではありません。わが国に分布する火山は、例えば東日本火山帯という呼び名があるように、まとまった地域に集中して分布していますが、その面積は国土の2割程度です。また、この分布は、第四紀更新世以降、すなわち約170万年前から現在まで大きく変化していません。火山の多くは、その分布地域の中で噴火の仕方や噴出物の性質がある傾向を持って変化して、活動が収まっていくことがわかっています。

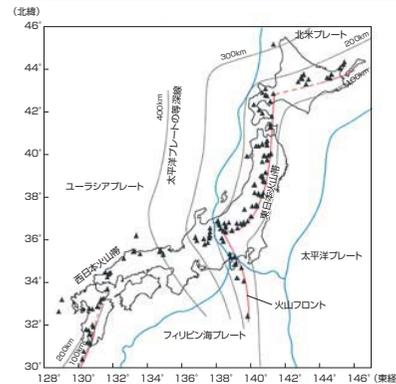
火山の分布を見ると、日本列島沿いの海溝と平行に分布していることがわかります。このような分布になるのは、海洋プレートが日本列島の地下約100キロメートルまでもぐり込んだときにマグマが発生し、ゆっくりと上昇して最終的に地上で噴出しているからです(→7⑧⑨)。

火山帯の太平洋側の縁を火山フロントと呼んでいます。火山フロントより太平洋側には火山がありません。一方、その反対側、火山フロントの日本海側には火山が分布していますが、一様にどこでも分布するわけではなく、ある限られた範囲に分布してい

ます。さらに、地表踏査や地震波を用いた解析などを行うことによって、火山を確実に把握することができます。

このようなことから、日本では第四紀更新世以降大きな変化がなく、しかもプレート運動はその変化に100万年単位の時間を要することから、10万年程度の将来、突然火山ができて処分場が破壊されるようなことはないと言えます(→⑩)。

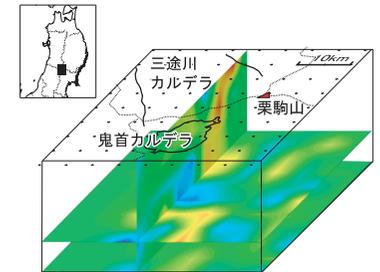
## 日本列島周辺のプレート配置と第四紀火山分布



(核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)、1999を編集)

## 調査で見出された地下のマグマ

赤色は低速度部(周囲に比べて高温)、青色は高速度部(周囲に比べて低温)を示しており、赤色はマグマの存在を表わしています。



遅い 速い  
-20 P波速度の偏差(%) +20

(阿部ほか、2003を編集)



火山活動との関連性を  
検討することができます。

- ➡ 詳しくは資料編 **7** 「地球の内部構造」(112ページ参照)
- ➡ 詳しくは資料編 **8** 「地殻変動のメカニズム」(114ページ参照)
- ➡ 詳しくは資料編 **9** 「火山噴火のメカニズム」(116ページ参照)
- ➡ 詳しくは資料編 **10** 「プレート配置の変遷」(118ページ参照)

# 地震の揺れで 処分場が 破壊されないのか。

処分場は地震による揺れの影響を受けにくい地下深くに設置します。

地震国と言われる日本では、頻度に多少の差があるものの地震の揺れから逃れられる地域はありません。例えば、日本列島およびその周辺の1985～2007年の間に生じたマグニチュード5以上の地震の分布を見ると、全国いたるところで地震が発生していることがわかります。日本付近で発生する地震には、ふたつのプレート境界面で起きる地震、海洋プレート内部で起きる地震、内陸の地殻内（陸域の浅部）で起きる地震があります（➡⑪）。

ここで大切なことは、地下では岩盤全体が一緒に動くので、地震の揺れは地表に比べ非常に小さいということです。例えば、2000年に起きた鳥取県西部地震の観測結果を見ると、地表での揺れに比べて地下200メートルではその数分の1しか揺れていません。なお、地震の揺れが小さい地下であっても、揺れの大きさを適切に評価し、それに耐えられる十分な強度を持たせて施設を作ります。

地震によるそのほかの影響として、地下水の流動状況や水質の変化が知られています。例えば、地下水の流動変化については、釜石鉱山において1990年2月～98年3月までに発生した344回の地震に対する水圧変化の観測がありますが、その結果は344回の地震のうち18回が地震の揺れによると思われる水圧変化を示しました。地

震前後の水圧変化の最大幅は35kPaでしたが、これは季節変化による水圧変化の最大値100kPaのほぼ3分の1です。また、地震の揺れによる水圧変化は、数週間程度でもとに戻ること、水質はほとんど変化しないことがわかりました。

このように、地下深部は、地震による揺れ、それにとまう地下水の流動や水質の変化を受けにくい環境であると言えます。

## 日本列島および周辺の地震活動

1985～2007年、マグニチュード5以上、震源100キロメートル以内の地震活動



(気象庁「地震・火山月報(カタログ編)」から編集)

地表に比べて地下の揺れは数分の1、地震による地下水圧の変化も年変動に比べてはるかに小さいのです。



## 鳥取県西部地震で観測された地震波形



(原子力発電技術機構、2002を編集)

➡ 詳しくは資料編 11 「地震のメカニズム」(120ページ参照)

# 活断層が突然できて 処分場を 破壊しないのか。

活断層は限られた地域にしかなく、  
現在ないところに突然できて  
処分場が破壊されることはありません。

日本列島は大陸プレートに属していますが、その岩盤は海洋プレートのもぐり込み  
にもない、常に力を受け歪<sup>ひずみ</sup>が蓄積されています。この歪を蓄積させた力が岩盤の破  
壊強度を超えたとき、岩盤は急激に破壊され断層が生じます(→⑧⑩)。

有史以来、国土に大きな被害をもたらした地震のうち、内陸地殻内地震(その大部  
分は深さ20キロメートル程度より浅いところで発生)は内陸の地殻で活動した断層に  
よるものです。少なくとも約100万年前以降、プレート運動に大きな変化はないので、  
一度できた断層は弱面となってそこで繰り返し活動することとなります(→⑩)。活断  
層とは、過去、数十万年前以降に繰り返し活動した痕跡を地表付近に残し、将来も  
活動する可能性がある断層のことです。例えば、1995年に起きた阪神淡路大震災  
(兵庫県南部地震)における淡路島の野島断層もその一例で、新聞やテレビでも報  
道されました。

野島断層は、兵庫県南部地震以前からその存在が知られていました。地震後、野  
島断層を横切る溝(トレンチ)を掘ってその活動履歴を調査した結果、1800~2500  
年に1回の活動間隔で1995年の活動も含めて過去3回活動しており、兵庫県南部地

震では右横ずれ約2メートル、上下のずれ約1メートル変位したことも確認されまし  
た。

野島断層を含め、国内の活断層は、空中写真による地形判読、地質調査、トレン  
チ調査などによって分布位置や活動履歴などが明らかにされています。しかし、まだ  
存在位置が知られていない活断層もあると考えられますが、このような活断層につい  
ても最新の調査手法によって、その場所を見出し、活断層の特徴(癖)を評価するこ  
とは可能です(→⑫)。なお、活断層は数万年から数十万年以上の時間をかけてゆっ  
くりと成長することもわかっています。

以上のことから、活断層の分布地点を避ければ、10万年程度の将来に処分場が活  
断層の活動によって破壊されることはないのです。

## 野島断層保存館の断層の様子



野島断層の調査風景  
(中田・岡田編、1999)

## 活断層分布図



(中田・今泉、2002を編集)



主要な活断層の位置は  
すでに特定されています。

- ➡ 詳しくは資料編 **8** 「地殻変動のメカニズム」  
(114ページ参照)
- ➡ 詳しくは資料編 **10** 「プレート配置の変遷」  
(118ページ参照)
- ➡ 詳しくは資料編 **11** 「地震のメカニズム」  
(120ページ参照)
- ➡ 詳しくは資料編 **12** 「活断層の動き」  
(122ページ参照)

# 隆起・沈降や侵食によって 処分場が影響を 受けないのか。

処分場はこれらの現象による影響を受けない地下深くに設置します。

地質構造は10万年、100万年という長い時間をかけて変化することが知られており、それにとまって非常にゆっくり、継続的に地盤の隆起・沈降・侵食が起こります。隆起・沈降は、地盤が広い範囲にわたって上がる、あるいは下がる現象です。侵食は、風化、崩壊および流水などによって山地や丘陵地が削りとられ地形が変化する現象です。したがって、大きな隆起が起きていない場所や沈降地域では、大きな侵食は起きません。

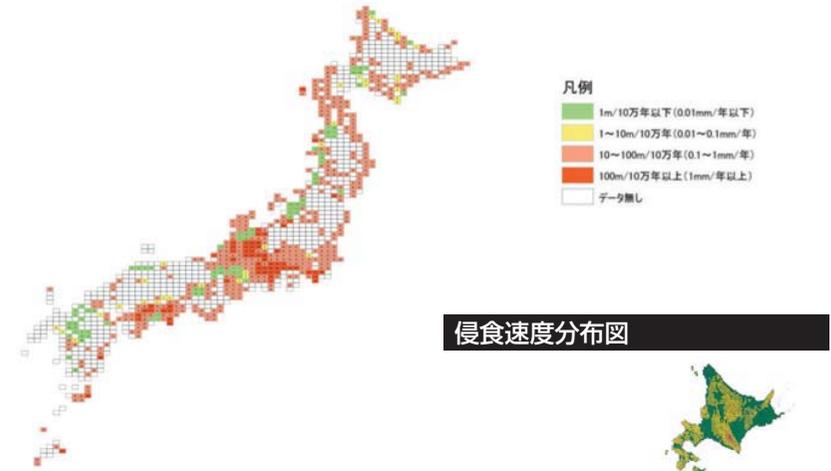
地盤の隆起や侵食が地下の処分場に与える影響としては、地下深部に建設した処分場が地表に近づくこと、および地形の変化によって地下水の流れ方などが変わることが考えられます。一方、沈降地域では、処分場をより地下深部に遠ざけることとなります。

わが国の隆起の状況は、地域ごとに一定の傾向と速度で数十万年間継続していることが多いことがわかっています。隆起地域の中で、10万年当たり100メートル程度を超える大きな隆起速度を示す地域は、一部の山岳地域や関東以西の太平洋側と北陸以東の日本海側の海岸地域に限られます。隆起速度の違いは地域ごとの広域的な力のかかり方の違いを反映したものと考えられ、その傾向は将来10万年

程度では変わらないものと考えられています。また、侵食速度については、10万年程度では隆起速度とほぼ同等かそれより小さいことがわかっています。

このようなことから、地層処分を行う際には、長い期間に予想される隆起・侵食量と、その影響の程度を事前に把握・評価し、施設や設備の設計・施工に適切に反映します(➡⑬)。

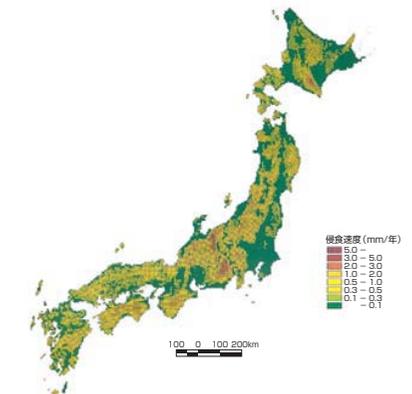
過去10万年程度の隆起・沈降量分布図



(原子力発電環境整備機構, 2004)



侵食速度分布図



(藤原ほか, 1999)

➡ 詳しくは資料編 ⑬ 「気候変動による海水準変動」(130ページ参照)

# ? 処分に適した場所を選ぶことはできるのか。

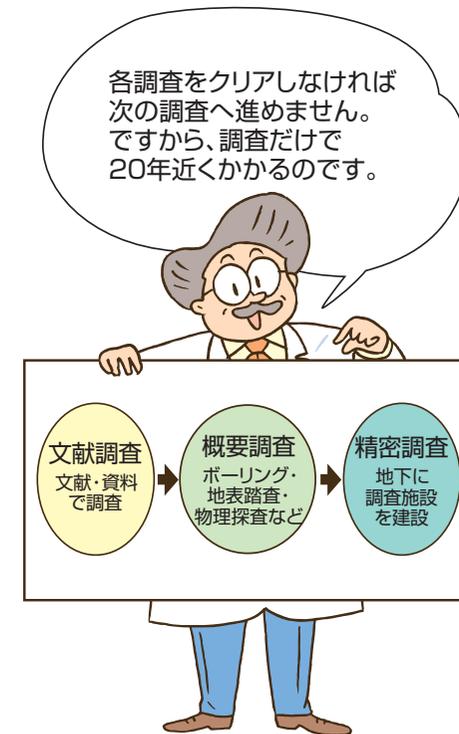
さまざまな調査をすることで  
確実に選ぶことができます。

日本は火山や活断層の多い国であることは世界的にも有名ですが、それらを避けて処分に適した場所を選ぶことが重要です。

そこで法律でも、火山や活断層の存在の記録がなく、数万年先の将来にわたって、それらが生じるおそれが少ないと見込まれることなどが処分場候補地の要件として決められています。

安全な地層処分の実現のためには、こうした場所を避け安定な場所を選ぶことがまず第一に必要で、調査は3段階に分けて慎重に進めます。初めの文献調査の段階では、公開されている文献や資料に基づいて、明らかに処分場として適切でない場所は除きます。そして、文献調査に基づいて選定された場所で、2番目の段階である概要調査を行います。この段階では、地上からボーリング調査、地表踏査、物理探査などを行い、活断層がないことを調べたり、地下水の流れやすさや岩盤の強さなどの調査を行います。3番目の精密調査の段階では、地下に調査用のトンネルを建設して、地質や地下水などの特性についてより詳細に調査します。これらの結果に基づき、処分場としての性能や安全性について総合的に評価し、処分施設の建設地を選定します。

このように、3段階の調査を行うことにより処分に適した場所を確実に選ぶことができます。



# 5章

## 地層処分の安全のしくみ

地層処分を安全に行うためには、高レベル放射性廃棄物等を人間の生活環境から隔離して長期間閉じ込めておき、そして私たち人間が高レベル放射性廃棄物等に近づかないようにすることが求められます。この章では、地層処分の安全性がどのように確保されているのか、その安全のしくみについて説明します。

自然界には、ウラン鉱床に見られるように放射性物質を長期間閉じ込めていた

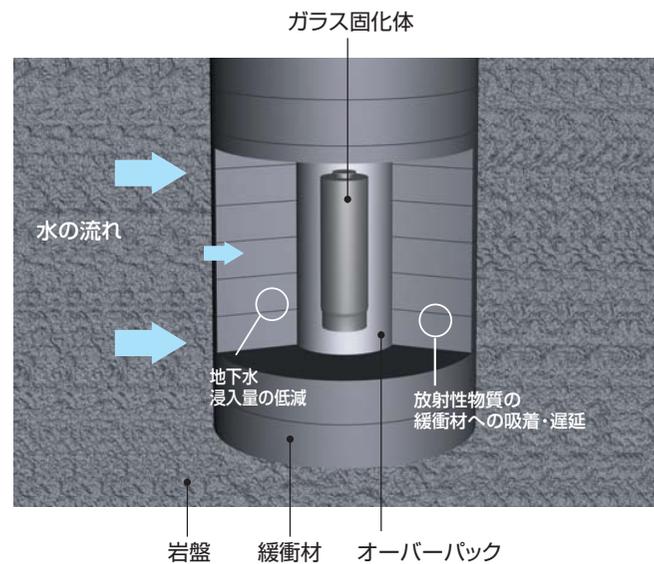
地層が存在します(➡⑥)。このことからわかるように地層処分の舞台となる地層には、そもそも物質を閉じ込めておく能力があり、地層処分にとって優れた天然のバリアとして機能しますが、そのためには火山活動や断層活動などの影響を受けない場所を選ぶ必要があります。また、場所によっては、経済的に価値の高い鉱物資源が存在することもあり、そのために人間が地下に侵入する場合もあるので、そのような資源が存在しない場所を選ぶことも大切になります。

また、地下水の影響も地層処分の安全性を考えるうえで重要です。地下水は、物質をどこかに運んでしまうだけでなく、物を腐食させるなど、地層処分による高レベル放射性廃棄物等の閉じ込め性能に影響を与える可能性があります。このため、地下水が豊富な日本において地層処分の安全性を考える場合には、どうしても地下水の影響を考慮しないといけません。これまでに、多くの人々によって、どうしたら地下水

の影響を防ぎ、安全に地層処分を行えるかについての研究が行われ、地下水との接触を防ぎ、あるいは接触したとしても地下水への溶け出しや移動を小さくするためのいくつかの人工的な対策が考え出されています。

天然のバリアとして機能する地層と、私たち人間が考え出した人工的なバリアを組み合わせたものは、多重バリアシステムと呼ばれており、この多重バリアシステムによって安全に地層処分を行うことができると考えられています。5章では、多重バリアシステムを構成するそれぞれのバリアの役割について説明します。

### 処分場と地下水の関係（高レベル放射性廃棄物の例）



➡詳しくは資料編 6 「自然に学ぶ」(110ページ参照)

# ? 地層の役割は何か。

**地層には放射性物質を閉じ込める  
いろいろな機能があります。**

地層処分とは、地層が本来持っている閉じ込め能力を利用し、長期にわたって安全に放射性物質を人間の生活環境から隔離しようというものです。ここでは、地層処分を行う場合に重要な、天然バリアとしての役割を負っている地層の閉じ込め能力について説明します。

まず、放射性物質を移動させてしまうと考えられている地下水ですが、その動きは地下深部では非常に遅く、場所によっては、1年間でわずか数ミリメートル程度しか動かないと言われています(➡14)。さらに地層には、地下水に溶けている物質を吸着する能力があります。そのことによって、放射性物質は地下水の何十分の1、場合によっては何千分の1にも満たない速度で移動することになります(➡15)。そして、その間にも、放射性物質は放射性崩壊により減衰していきます。また、地下深部は、酸素がきわめて少ない環境ですので、金属が腐食するような反応は起こりにくいのです(➡16)。このことは、オーバーバックによる放射性物質の閉じ込め機能の点でも適していると言えます。

このような地層の閉じ込め能力を示す例としては、古代ローマ時代の遺跡の地下数メートルのところから発見された2000年前の原形をとどめている釘、のこぎりで切れるほどの木としての状態を保ったイタリアの粘土層から発見された約200万年前の巨木などがあります。このように、地層には、条件さえ整えば物質を長期間閉じ

込めておくことができる能力があるのです。

また、私たちは建物や地下鉄などによって地下を利用していますが、それでも、人間が利用している深度はせいぜい数十メートル程度です。地層処分では300メートル

よりも深く埋設しますので、放射性物質を人間の生活環境から隔離することができるのです。

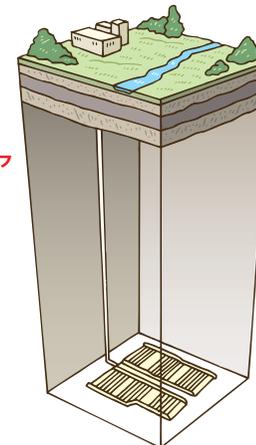
地層はさまざまな機能で放射性物質から私たちを守ってくれる、天然のバリアなのです。

## 多重バリアシステム

多重バリア

天然バリア  
(地層)

人工バリア



## 地層によって長期間保存されていた古代遺物



ローマ時代(紀元前約85年頃)の釘

古代の遺物が地層から発見されることからわかるように、地層は優れた閉じ込め能力を持った天然のバリアです。



イタリアで発見された約200万年前の木  
(写真提供: Elsevier Science Ltd.)

- ➡ 詳しくは資料編 14 「地下水の流動」(132ページ参照)
- ➡ 詳しくは資料編 15 「地層の物質移行遅延メカニズム」(138ページ参照)
- ➡ 詳しくは資料編 16 「地下水の化学的な性質」(140ページ参照)

# ?人工バリアの役割は何か。

## 放射性物質の隔離をより確実なものにします。

ここでは、天然バリアと人工バリアからなる多重バリアシステムのうち、人工バリアの役割について説明します。

5章のはじめで説明したように、地層処分では、地層が持っている閉じ込め能力をさらに確実にするため、さまざまな人工的な対策が施されます。この人工的な対策のことを人工バリアと呼んでいます。

人工バリアの役割は大きくふたつに分けて考えることができます。いずれも、環境から放射性物質を確実に隔離するための役割です。

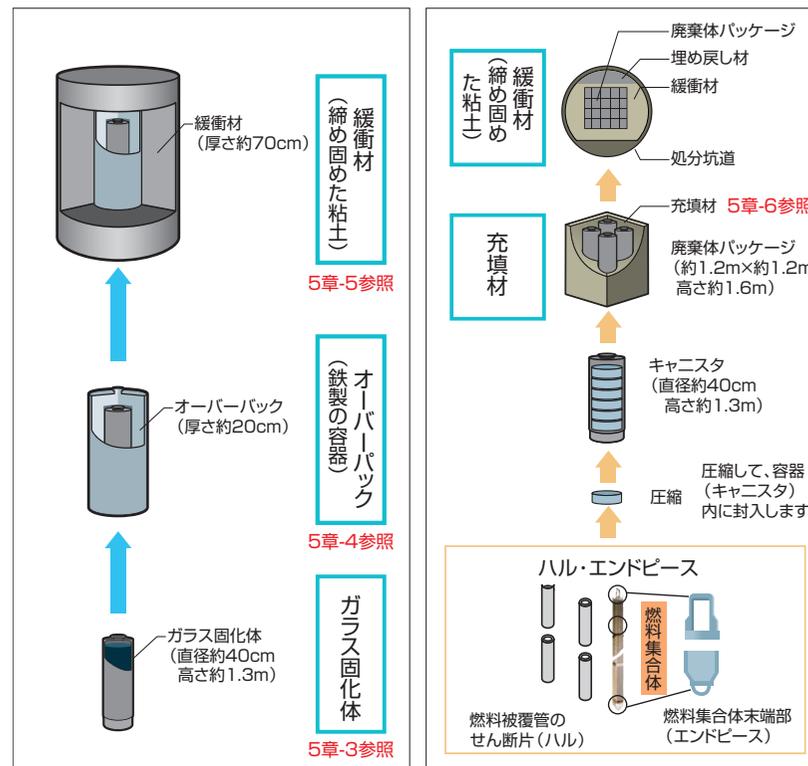
まずひとつは、処分場を閉鎖した後の安全性に関する役割です。この役割には、放射性廃棄物に地下水が接触することを防ぐ機能、また、万一放射性物質が地下水へ溶け出したとしても、その移動を遅くしたり、放射性物質を取り込んで(吸着して)地下水の中から放射性物質を取り除く機能などがあります。この役割を担う人工バリアとして、高レベル放射性廃棄物の場合はオーバーバックと緩衝材が、地層処分低レベル放射性廃棄物の場合は充填材と緩衝材があります。

ふたつ目は、処分場操業中の安全確保に関する役割です。この役割には、放射性廃棄物を処分場に埋める際に壊れない十分な強度を持つこと、放射性物質が漏れ出さない閉じ込め性能を持つことなどがあります。

このように、人間の知恵を使って作り出された人工バリアと地層が持つ閉じ込め能

力を利用した天然バリアを組み合わせ、多重バリアシステムは構成されます。それでは、人工バリアのそれぞれのバリアの役割について詳しく説明します。

### 人工バリアシステム



高レベル放射性廃棄物

地層処分低レベル放射性廃棄物 (ハル・エンドピースの例)

# ? ガラス固化体の 役割は何か。

ガラスの中に  
放射性物質を閉じ込めて  
地下水に溶けにくくします。

日頃、私たちは、ガラスのコップが水に溶けるなんて考えません。古代遺跡から、しばしばガラス製品が非常に良好な状態で発掘されることや、地層中に天然のガラスが存在することからもわかるように、ガラスは地下水にも溶けにくく、またガラスの性質は時間がたってもほとんど変わりません。

例えば、ガラス固化体に用いられているガラスと化学組成が類似している天然の火山ガラスが、時間の経過とともにどのくらいの速さで変質してきたかについての研究も行われています。この研究によれば、変質速度は1000年間で、せいぜい数ナノメートル(1ナノメートルは100万分の1ミリメートル)程度と非常に遅いことが確かめられています(➡⑰)。

このように、ガラスは長期にわたって水に溶けにくく、安定した性質を持っていますが、一方、割れやすいという性質があります。しかし、ガラスが割れたとしても、2章-3で述べたように、放射性物質はガラスの網目構造にしっかりと取り込まれて、ガラスの一部となっているので、ガラス固化体中の放射性物質がガラスの外に出ていくようなことはありません。

発掘された古代エジプト時代(B.C.2900年頃~B.C.300年頃)のガラス工芸品



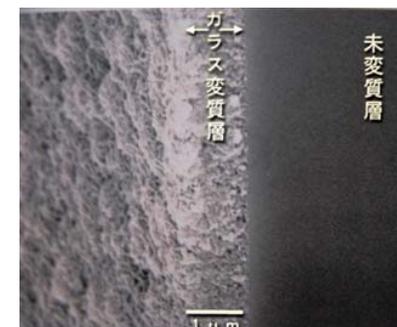
(写真提供: PPS通信社)

自然界のガラス (写真提供: 核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構))

火山ガラスの研究から、ガラスが変質する速度は1000年間で数ナノメートル程度であり、非常に遅いことがわかりました。



富士山で見つかった火山ガラス



ガラス変質層の顕微鏡写真

ガラスはほとんど水に溶けることなく、  
放射性物質を閉じ込めます。



➡詳しくは資料編 17 「ガラスの溶解メカニズム」(142ページ参照)

# ？オーバーパックスの役割は何か。

放射能の高い比較的初期の段階で  
ガラス固化体が地下水と  
接するのを防ぎます。

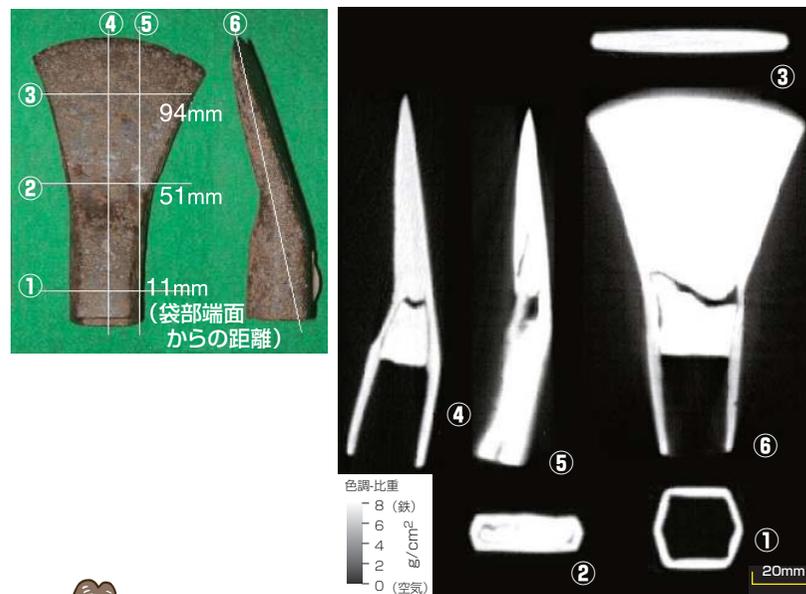
次に、ガラス固化体を封入しているオーバーパックについて説明します。ガラス固化体は、地下水に溶けにくく、非常に安定していることを説明しました。しかし、安全性をより確かなものにするために、放射能が比較的高い期間、ガラス固化体と地下水の接触を完全に遮断してしまうのがオーバーパックの主な役割です。ただ、オーバーパックは金属でできているので、金属と地下水が接触すれば、金属は腐食する心配があります。現在、オーバーパックの材料には、炭素鋼が考えられており、1000年間はガラス固化体と地下水を接触させないように設計されています。

地下の深部では、腐食に必要な酸素がきわめて少ないために、腐食はゆっくりと進むことが知られています。これまでの研究から、地下深部の環境で1000年の間にどのくらい腐食するのか、またそのメカニズムもずいぶんわかってきました(➡18)。島根県の出雲大社境内の遺跡からは、約750年前の鉄斧が出ました。この鉄斧は粘土で覆われた状態で発見され、その表面が薄いさびで覆われていましたが、完全な形を残していました。さびの厚さの測定値から、鉄斧が埋っていた環境での鉄の腐食量は1000年間で2ミリメートルを超えないことがわかりました。このように、1000年間でも腐食に十分に耐え、ガラス固化体と地下水の接触を防ぐようにオーバーパックを設計することは可能なのです。また、オーバーパックがガラス固

化体と地下水の接触を阻んでいる期間、ガラス固化体中では、放射能は約3000分の1程度まで低下し、これとともに、ガラス固化体の温度も低下します。

一方、地層処分低レベル放射性廃棄物は十分に放射能が低く発熱が小さいことから、廃棄体をオーバーパックに収納しません。

730～750年前の出雲大社境内遺跡から出土した鉄斧の写真とX線CT画像



写真提供: 核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)



地下水とガラス固化体の接触を  
1000年間防ぐようなオーバーパックを  
設計することは可能なのです。

➡詳しくは資料編 18 「オーバーパックの腐食メカニズム」  
(146ページ参照)

# ? 緩衝材の役割は何か。

**粘土である緩衝材は地下水の流れを遅くし、さらに放射性物質の移動も抑制します。**

ここでは、緩衝材について説明します。緩衝材には、ベントナイトと呼ばれる天然に産出される粘土が用いられ、オーバーパックと地層の間にオーバーパック全体を取り囲むように設置します。ベントナイトは、そもそも水を非常に通しにくいという性質を持っており、緩衝材の内部では、地層中と比べると地下水の動きは非常に遅くなり、ほとんど止まっていると言ってもいいでしょう。

このベントナイトは、1970年、大阪万博が開催された際、地下約15メートルに埋められたタイムカプセルを地下水から守るためにも使われています。このタイムカプセルは、5000年後の西暦6970年に開封されることになっています。2000年に発掘された際には、地下水がベントナイトの周辺部分にしか浸入していないことが確認され、ベントナイトが地下水を通しにくいことが証明されました。このように、ベントナイトを用いることで、地下水の動きをほとんど止めてしまい、オーバーパックなどの腐食を遅らせるだけでなく、高レベル放射性廃棄物等から放射性物質が出てきたとしても、地下水によって外部へ運ばれるのを著しく遅らせることができるのです。

また、ベントナイトには、浄水器のように、水に溶けている物質(不純物)を吸着する性質があります(ただし、吸着の強さは、吸着される物質によって異なります)。ですから、溶け出した放射性物質が緩衝材中を移動している間にも、その一部の放射性

物質は緩衝材に吸着されるため、地層へ到達するまでには、地下水の動きと比べてもさらに長い時間を要します。そして、この間にも、放射性物質は放射性崩壊により減衰していきます。(→19)

## 1970年に大阪で埋設されたタイムカプセル



(写真提供: 日本万国博覧会記念協会)

## タイムカプセル埋設の様子

白いのがベントナイト



(写真提供: 榎ホーجون)

大阪万博のタイムカプセルは、今でも、ベントナイトによって地下水から守られているのです。



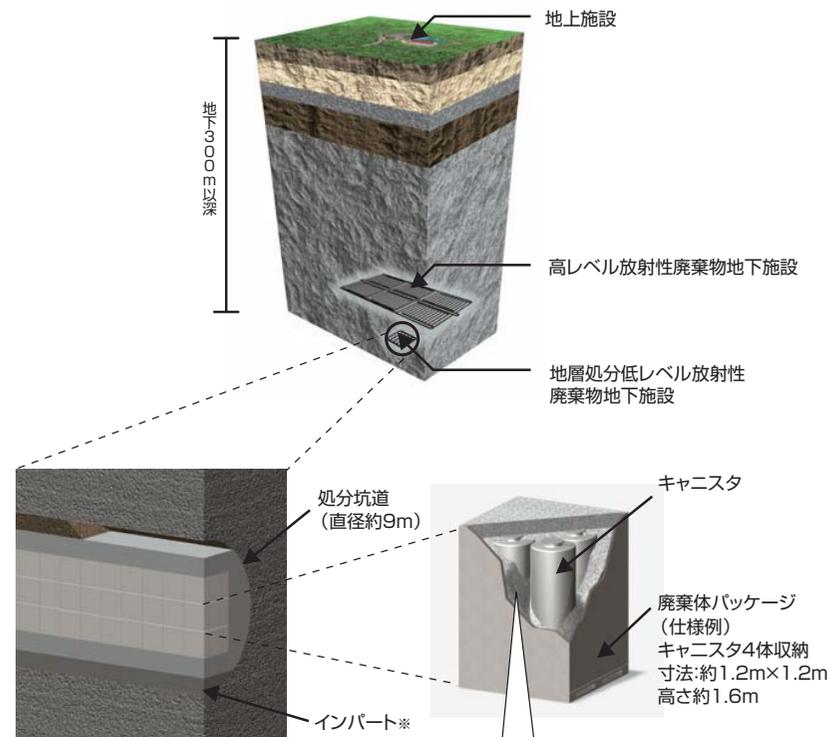
# ? 充填材の役割は何か。

廃棄体パッケージの中でキャニスタを固定するとともに放射性物質を吸着しその移動を遅くします。

地層処分低レベル放射性廃棄物のうち、ハルやエンドピースはガラス固化体の容器と同様なキャニスタに封入された状態で処分場に搬入されます。このキャニスタを4体ずつ廃棄体パッケージに入れ、充填材で固定します。また、廃棄体パッケージを処分坑道に定置した後、廃棄体パッケージ同士や廃棄体パッケージと処分施設の構造体との隙間を埋めるためにも充填材が使われます。

セメント系の充填材には、放射性物質を吸着する働きがあるため、充填材の長期間の役割として、将来、放射性物質がキャニスタから漏れ出したとしても、放射性物質を吸着し動きを遅くする働きが期待されます。

さらに、廃棄物の輸送の際に、容器が固定されていることも重要で、廃棄体パッケージの中でキャニスタを固定する役割も充填材にはあります。(➡20)



この図はハル・エンドピースの例です

※インパート:コンクリートなどにより構築される坑道の底盤

**充填材**  
 廃棄物を封入したキャニスタは、金属製などの箱に入れられ、充填材で隙間を埋め、動かないように固定されます。充填材は放射性物質を吸着してその移動を遅くする働きをします。充填材としてセメント系材料を用います。

# 処分場に人間が侵入することはないのか。

人間の生活環境から隔離された地下深部に処分場を設置し、  
 鉱物資源が存在する地域を避けることにより、  
 処分場に人間が侵入する可能性を低くします。

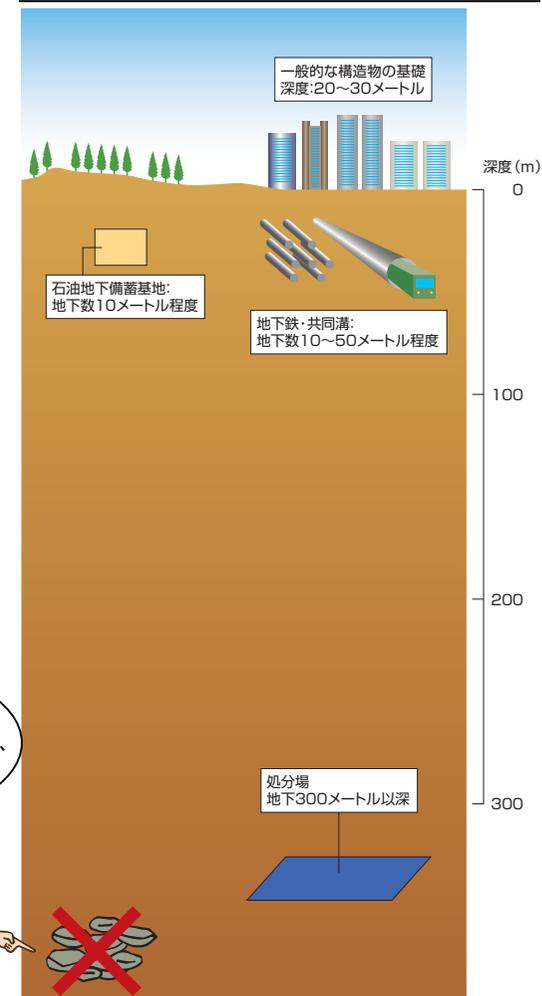
私たち人間は、産業革命以降、劇的に活動範囲を広げてきました。地上の開発のみならず、その活動の場を空や地下へと広げ、現在では宇宙空間へ足跡を残すようにまでなっています。

特に、地下に関しては、限られた地表面での開発が手狭になるにつれて浅い部分から順次開発が進み、現在では新しく設置される施設の深度は年々深くなってきています。また、私たち人間を地下深くまで誘うもうひとつの動機としては、鉱物資源の採取が挙げられます。鉱物資源の代表的なものとして、石油や石炭などのエネルギー資源、金属や非金属鉱物などの材料資源が挙げられます。

地層処分を考える場合、火山や断層などの自然現象や地下水によって地下深部のものが地表へ運び出される可能性だけでなく、人間が処分場に侵入する可能性を検討することが重要です。人間の処分場への侵入に関しては、次のような対策をとることにより、将来、処分場に人間が侵入する可能性をきわめて低くすることができると考えられます。

- 地下の坑道をすべて埋め戻すこと
- 鉱物資源が存在する地域を避けること
- 記録を永久に保存すること
- 処分場の敷地などを保護区域として指定すること

## 人間の地下利用



# 廃棄物の輸送のときに事故が起こるのではないか。

万一の場合を想定してしっかりした安全対策をとっています。

廃棄物は、青森県六ヶ所村にある貯蔵施設で輸送容器に収納され、処分場の場所に応じて海上または陸上から輸送されます。

輸送容器は、右に示すように万一の場合を想定しても放射能を閉じ込めることができるように設計され、その機能は、高さ9メートルからの落下試験、800度の耐火試験、深さ200メートルの水圧に耐える浸漬試験などにより確認されます。また、輸送容器には複数の遮へい材が使用されており、放射線を閉じ込める機能があります。

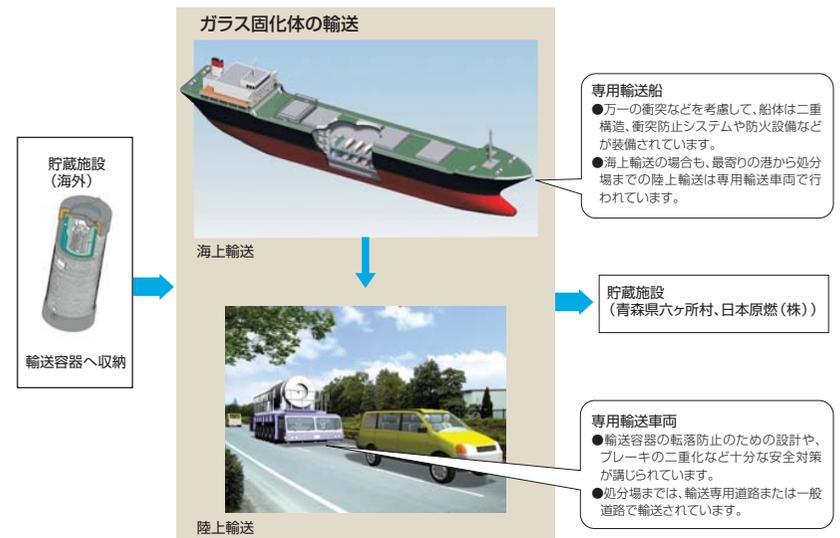
このような頑丈な輸送容器は、海上輸送の際には専用輸送船で輸送されます。専用輸送船についても万一の場合を想定して、船体を二重構造とするとともに、衝突防止システムや防火設備などが装備されます。陸上輸送の際には、専用輸送車両で輸送され、輸送容器の転落防止のための設計やブレーキの二重化など十分な安全対策が講じられます。

高レベル放射性廃棄物については、海外の再処理工場より輸送される際には、海上輸送と、青森県六ヶ所村での陸上輸送の実績があり、いずれも事故の経験はありません。

わが国同様、ドイツ、ベルギー、スイスなど、フランスの再処理会社へ使用済燃料

の再処理を委託している国々は、フランスの再処理工場から返還されるガラス固化体を受け入れており、それらは道路や鉄道を利用して各国の貯蔵施設に安全に輸送されている実績があります。また、放射性物質の輸送にあたっては、テロを含め外的な要因による事故をも想定した輸送方法がとられています。

## 海外からの返還ガラス固化体の輸送の例



## 輸送容器の安全性の確認試験

### 落下試験

固い鉄板の上に9メートルの高さから輸送物を落下させ、十分な対衝撃強度があることを確認しています。衝撃力は、輸送物を積んだトラック同士が80km/hで正面衝突した際に、輸送物に加わる衝撃力の数倍にも相当します。



9メートルの高さから落下

### 耐火試験

800度の環境温度での耐火性能を確認しています。800度は、トンネル内での自動車火災事故のような厳しい条件に相当します。



800度の環境温度

### 浸漬試験

深さ200メートル相当の水圧下でも放射性物質が漏れ出ないことを確認しています。



200メートルの水中に浸漬

# 建設・操業中の 周辺環境への 影響は？

「自然環境の保全」と「放射線影響の防止」  
の観点で万全の対策を行います。

地上の施設は約1キロメートル四方の敷地を必要としますので、処分場の建設工事や閉鎖までの処分場操業にともなう自然環境への影響についても十分に配慮する必要があります。

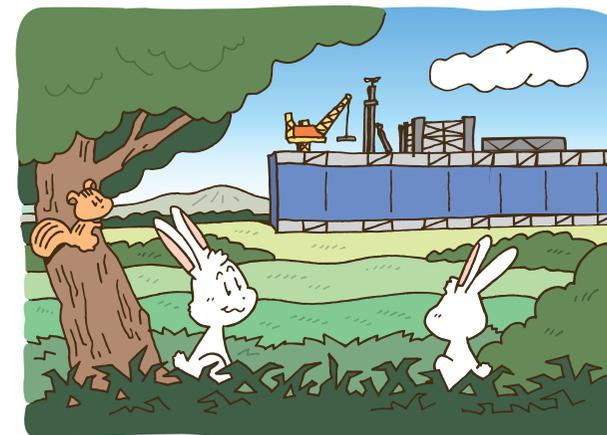
そのため、建設工事の開始前に周辺環境への影響に関する調査と予測評価を行い、影響を回避・低減できるよう適切な環境保全対策を講じます。騒音・振動、動植物、生態系、景観など、一般的な環境調査項目に加え、地層処分事業で特徴的と考えられる地下岩盤の掘削にともなう掘削残土の処理や地下水のくみ上げにともなう周辺河川などへの放流などの影響についても、適切に対策を行って工事を進めます。

一方、操業中は、放射性廃棄物が海上もしくは陸上から輸送されるとともに、処分場の地上や地下の施設で取り扱われるため、周辺環境への放射線の影響や放射性物質の漏えいを防止することが必要です。

処分場までの輸送時については、前項で示した対策により安全に実施できます。また、廃棄物の人工バリアへの封入と地下への搬送・定置(埋設)においても、放射線の遮へいを考慮した施設および装置の設計を行うとともに、放射線管理区域を

設定した適切な放射線管理により周辺環境への放射線影響と放射性物質の漏えいを防止します。

このような環境保全対策や安全対策に加え、建設・操業期間中には、これらの対策が有効に働いていることをモニタリングによって確認し、そのデータは公表していきます。



# 6章 遠い将来の安全性を確かめることができるか。

## 遠い将来の 安全性を確かめる

ここまででは、地層処分の安全性をどのようにして技術的に確保することができるかについて説明してきました。火山や断層活動などの影響を受けない場所を選び、処分に適した地層に人間が考え出した人工バリアを加えて処分すれば、放射性物質を長期にわたって閉じ込めて、人間の生活から隔離することが可能です。

地層処分は、さまざまな現象の変化がきわめてゆっくりで、長期間にわたって環境が安定した地下深部の地層を活用するものですが、この方法が本当に安全なものであるかどうかを判断するためには、遠い将来の安全性を確かめる必要があります。そこで、私たちの経験や歴史をはるかに超えた時間スケールの中で安全性を判断するという、新たな挑戦が必要になります。これが、地層処分の安全評価の目指すところです。

それでは、どのようにして安全性を確かめるのでしょうか。

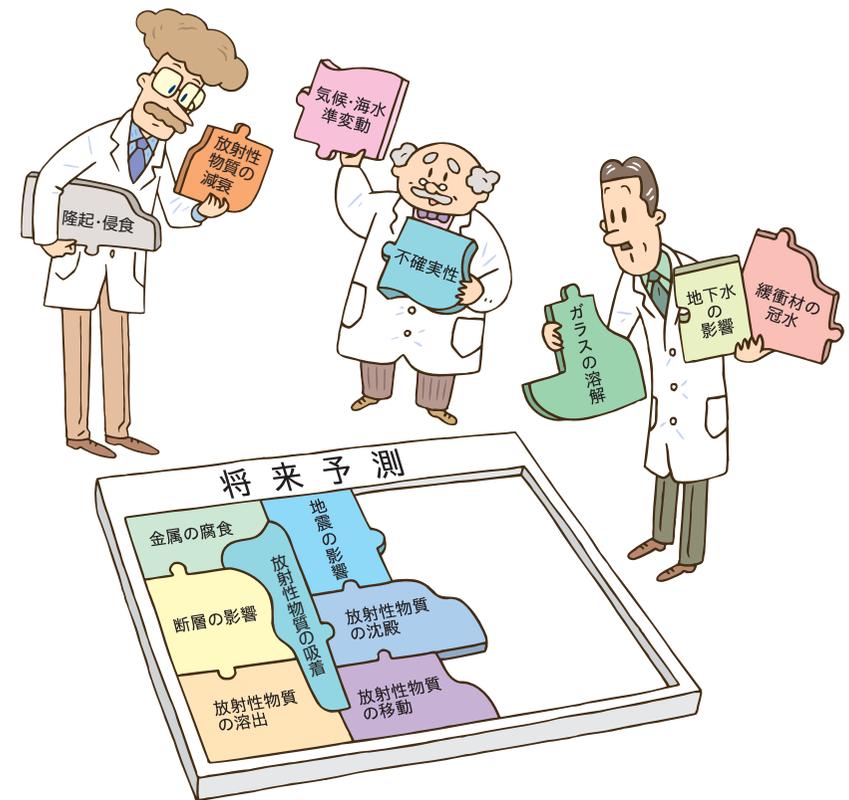
再処理工場や原子力発電所の安全性は、実物大模型などを使った実験や実プラントの運転により直接的に安全性を確認することができるのですが、地層処分は広

大な天然の地層をバリアとして含み、数万年以上の長期にわたる安全性を確かめる必要があるため、直接的に確認することはできません。このため、その評価は将来の予測に基づいた数学的な解析による間接的なものになります。ここでの予測とは、将来を完全に言い当てるのではなく、不確実な部分も含めて幅を持って将来を示すことなのです。

6章では、将来予測と安全評価について、説明します。

### 将来予測

地層処分の将来予測とは、不確実な部分も含めて、幅を持って将来を示すことなのです。この際には、多くの分野の異なる専門家が十分な議論を行います。



# ? 遠い将来を 予測できるのか。

**地下の環境については  
長期予測が可能です。  
また、人工バリアの挙動についても  
より正確な予測のための研究が  
行われています。**

地層処分の安全評価は遠い将来の安全性を確かめることから、将来を予測する必要があります。それでは、私たちの経験や歴史をはるかに超えた時間スケールの中で、将来をどのように予測するのでしょうか。

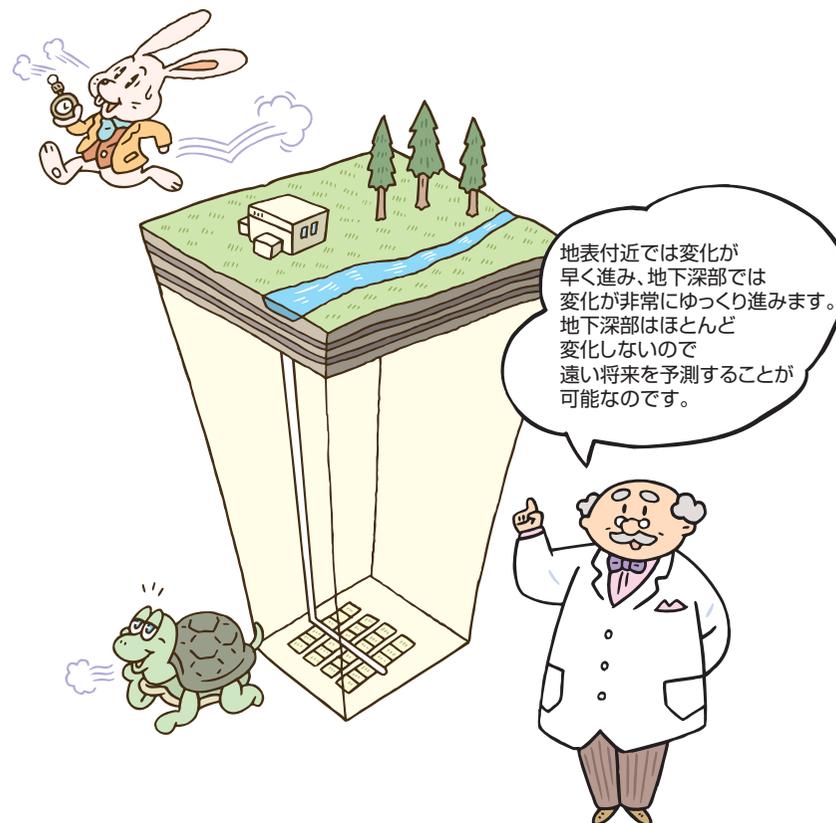
まず、地層についてですが、地下深部での地層の変化は、数万～数十億年間にも及ぶ地球規模の動きを反映しています。この動きは、過去から現在まで非常にゆっくりとしたものであり、その傾向が未来にも続くと考えられていることから、比較的長期にわたる将来の地下の環境を予測することは可能だと考えられています。

それでは、私たち人間が作り出す人工バリアについてはどうでしょうか。

人工バリアとそのほかの人工物(ビルや橋など)との大きな違いはそれが置かれる環境です。私たちの作り出すほとんどのものは地表に設置されます。地表で起こることは多種多様でその変化も早く、将来予測は大変困難です。しかし地下深部では、前に述べたようにすべての変化はきわめてゆっくりとしていることから、私たちが作り出した人工バリアも地下深部に埋設することにより、その変化は非常にゆっくりとした

ものと考えられます。地下の環境を想定した基礎的な実験を行うことによって、人工バリアで生じる現象を理解して将来予測ができるのです。安全評価では、私たちの知見をもとにして、こうなるかもしれないといういろいろな筋書き(シナリオ)を考えて、将来の予測が行われます。

## 地表と地下深部の違い



# ? 将来の不確実な ことをどのように 考えるのか。

**慎重のうえにも慎重に、  
予測しがたいことは安全性に対して  
悪い影響を与えるように仮定して  
評価します。**

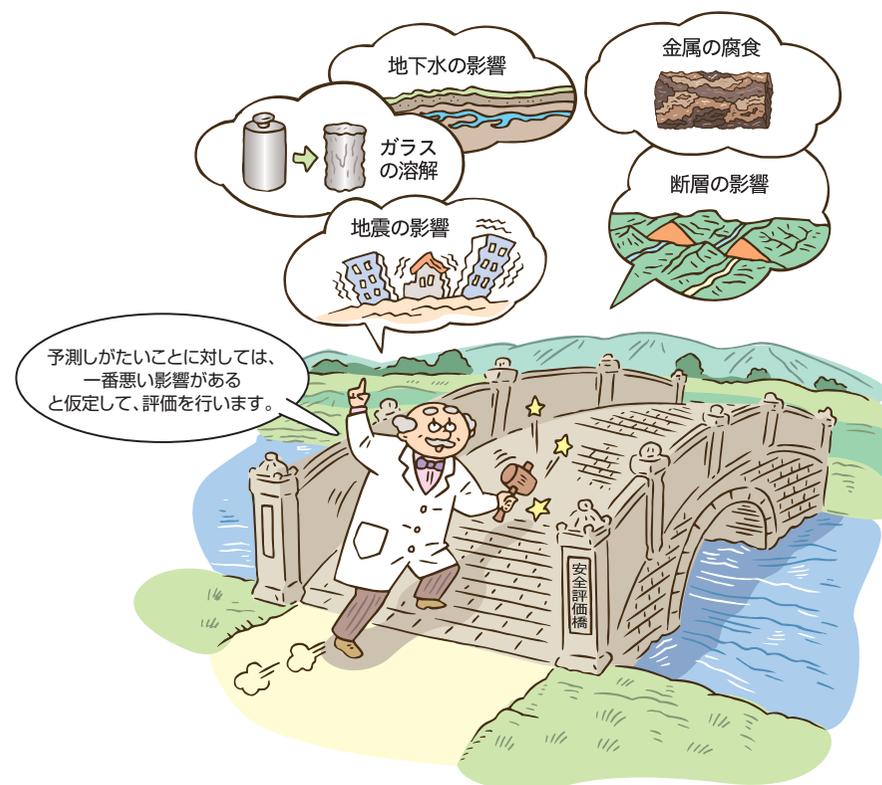
それでは、地層処分の将来を予測するにあたり、地層処分に係わる多くの現象のすべてを想定し、遠い将来を予測することが可能なのでしょうか。

将来予測のためにシナリオをなるべく網羅的に考えるためには、まずは、地層処分の安全性に影響を与えるかもしれない現象を、地質学、原子力工学、材料工学や土木工学など関連するすべての分野の科学的な知見や専門家の意見を総動員して洗い出します。次に、これらの現象が本当に起こる可能性があるのかどうか、また起こった場合には、地層処分に与える影響がどの程度なのかを、ひとつひとつ検討していきます。

しかしながら、すべての現象について、遠い将来の状態を予測することは最新の技術を持ってしても困難なこともあります。ですから、それぞれのシナリオに基づく安全評価では、わからないことについては、地層処分の安全性に悪い影響を与えるような仮定をして安全評価を行います。

このように、地層処分の将来予測は必ずこうなるという予測ではなく、予測しがたいことを含めたうえでも、評価結果はある定まった範囲の中に収まるという予測なのです。そして予測の範囲については、海外も含めて、最新の研究成果をもとに幅広い専門家によって議論されます。また、新たな科学技術的な知見は積極的に評価に取り込み、予測の妥当性を常に確認していきます。

## 念には念を入れた安全評価



# 何万年もかかる現象をどうやって調べるのか。

小さな現象に分割して実験し、  
数学モデルでつなぎ合わせます。  
また自然からも学びます。

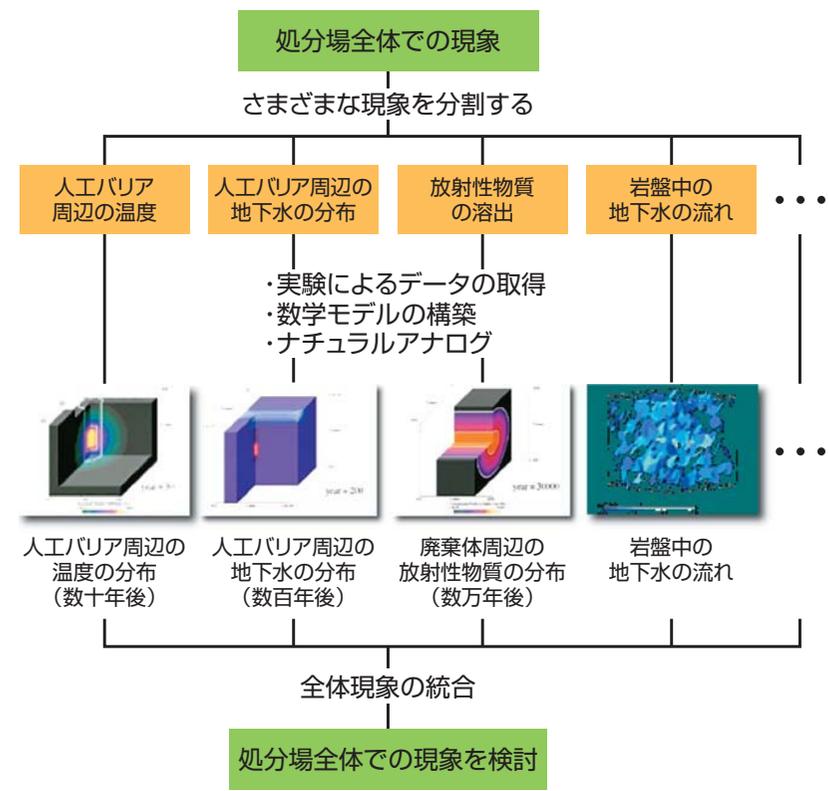
6章の冒頭で、地層処分の安全性は直接確認できないために、数学的な解析により間接的に確認すると述べましたが、それではどのように行っているのでしょうか。

例えば、処分場から地表まで、放射性物質が地下水によって非常に長い時間をかけて移動する可能性が想定されます。このような長期的でスケールの大きい現象の全体を私たちが経験することはできません。しかし、この現象を、人工バリア周辺の温度変化や地下水の流れ、ガラス固化体からの放射性物質の溶出、そして岩盤中の地下水の流れというように個々の現象に分割すれば、それぞれを実験的に再現して観察しデータを取ることもできますし、また、それぞれの現象について、長い時間継続しているように似た自然現象(ナチュラルアナログ)を観察することによっても確認できます。(➡⑥)

ここで、それぞれの現象を数学的なモデルとして表現し、実験的なデータに基づいて入力する値を決めれば、個々の現象を計算することができます。これらの計算結果の妥当性は、より大きな規模の実験や複数の現象についての実験と比較することによって確かめることができます。さらに、実験の結果や自然現象の観察などに基づき、地層処分システムの性能を遠い将来までシミュレーションしたり、複数の現

象についての個別のシミュレーションを統合したりという方法で、時間的にも空間的にもスケールの大きな処分場全体の現象について評価することができます。

## 数学モデルを用いたシミュレーション



(核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)ホームページを一部参照)



➡詳しくは資料編 6 「自然に学ぶ」(110ページ参照)

# ? 安全評価結果から何がわかるのか。

**処分場の性能がわかります。  
また、結果は基準値などと比較され、  
安全性が確認されます。**

安全評価は、地層処分という大きなシステムが、私たちが期待する性能を発揮するかどうかを確かめるために行うものです。性能を判断する尺度として、被ばく線量(単位はシーベルト)(→②)が多く用いられます。これは、放射線による私たちの体への影響の程度を示すものですが、安全評価の結果で注意しなくてはいけないのは、このような人体への放射線影響が実際に必ず生じるということを意味しているのではないという点です。

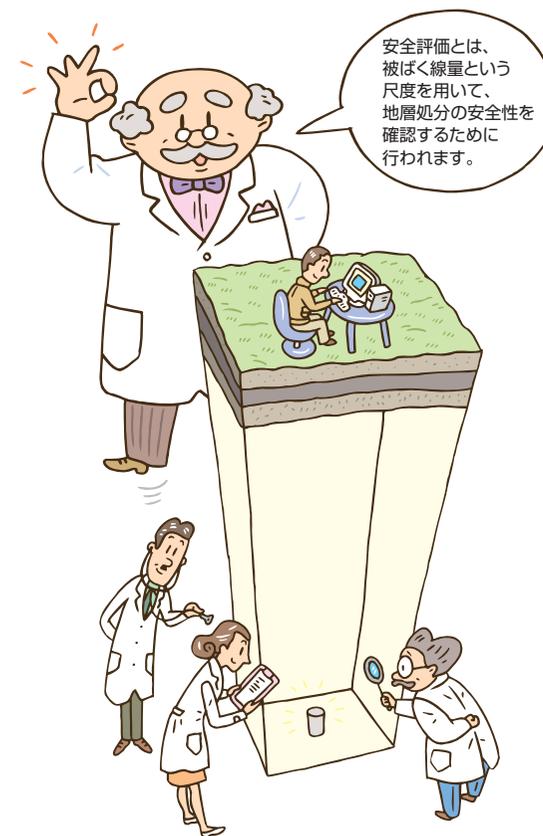
安全評価は、地下深くにある放射性物質がもし将来人間に影響を及ぼすとしたらどういったシナリオがあるかをまず考えて、そのシナリオに基づいて行われます。このシナリオでは地層処分の安全性に悪い影響を与えるような仮定をあえて考えることにより評価を行います。この意味から、安全評価の結果は、将来人間が受ける線量を予測しているのではなく、地層処分の安全性を確かめるための材料を提供しているのです。

では、その安全性を判断するための基準はどのように決めているのでしょうか？

何万年先の人類は、体の作りや生活習慣も変化しているかもしれませんが、将来

の世代も現在の私たちと同じ体で同じ生活習慣だと仮定し、現在の世代と同じレベルで放射線から防護されるべきであるという考え方が国際的に合意された原則です。この原則に基づいて安全基準は制定されます。そして、評価結果をこの基準と比較することによって、地層処分システムの安全性が確認されるのです(→②)。

## 安全評価



→ 詳しくは資料編 2 「放射能/放射線の単位」(102ページ参照)

→ 詳しくは資料編 21 「地下水シナリオに基づく安全評価結果」(154ページ参照)

# 放射性廃棄物の 放射線は生活圏に 影響を及ぼすか。

**影響は自然放射線よりも  
はるかに小さく  
無視できる程度のもので**す。

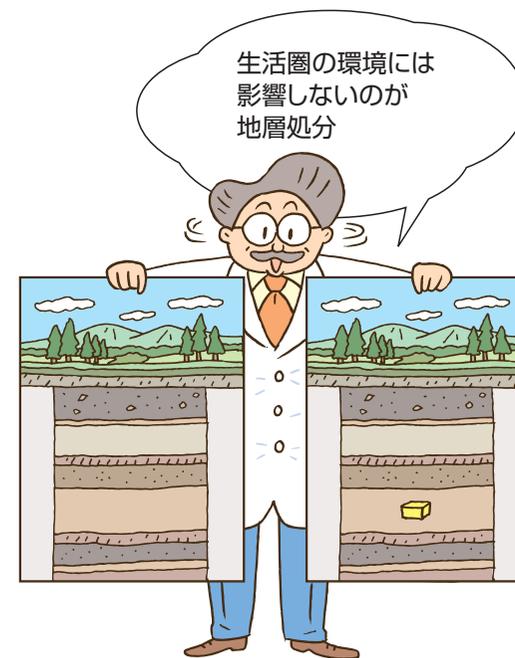
放射性物質を取り扱ったり、原子力利用により発生する放射性廃棄物の安全な取り扱いのために、どの程度の被ばく線量までなら許容してよいかという基準値の設定は重要なことです。世界各国はそれぞれの基準を作成していますが、国際放射線防護委員会（ICRP）は、各国における基準の作成のための国際共通的な考え方を示しています。

地層処分を行う放射性廃棄物の中にはさまざまな放射性物質が含まれていて、それらが放出する放射線が人間の生活環境へ影響を及ぼさないようにすることが地層処分の安全確保の中心的課題となっています。

地層処分の場合には、放射性物質は、地下300メートルより深い地層中に人工バリアと天然バリアからなる多重バリアシステムの中にしっかりと閉じ込められます。また、将来的に放射性物質が処分場から出たとしても、ゆっくりとした地下水の流れの中を途中で地層中に吸着されながら移動し、その間にも放射性崩壊により減衰するため、最終的に生活環境に到達する放射性物質の量はわずかです。

地層処分による放射線の影響は、そのような極々少量の放射性物質からの放射線

による被ばくを考えることになります。その被ばく線量は、自然放射線による被ばく線量に比較してかなり低い値になっているため、私たちを含め環境への影響は無視できる程度のものであります。(→21)



➡ 詳しくは資料編 **21** 「地下水シナリオに基づく安全評価結果」  
(154ページ参照)

# 7章

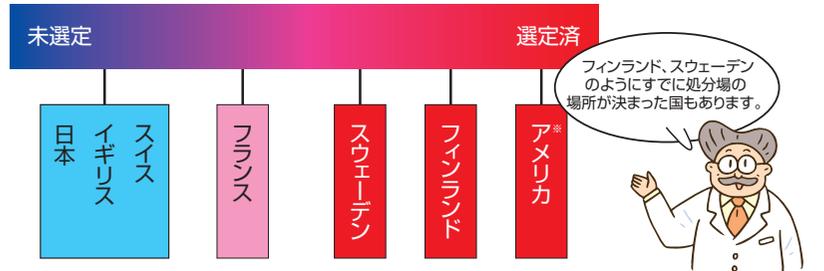
## 地層処分に関する 海外の状況

高レベル放射性廃棄物の地層処分場はまだ世界中のどこにも建設されていませんが、処分場の候補地が決まった国はすでにあります。地層処分計画を進めている国のうち比較的進んでいるフィンランド、スウェーデン、アメリカ、フランス、スイス、日本、イギリスの7カ国の状況は次のとおりです(2009年8月現在)。

- ・処分場の候補地が選定された国：フィンランド、スウェーデン、アメリカ
- ・地下研究所での調査が進められ、その近くで候補地の選定がされようとしている国：フランス
- ・実施主体が提案した地域を対象に今後選定が行われる国：スイス
- ・候補地を募集している国：日本、イギリス

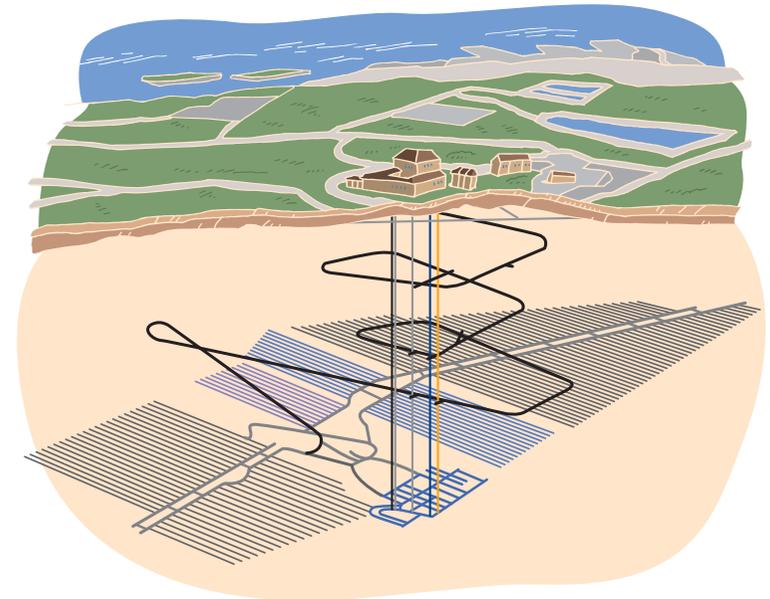
一方、アメリカでは国防活動から発生するTRU廃棄物の処理施設として廃棄物隔離パイロットプラント(WIPP)が1999年より操業を開始しています。

### 処分地の選定



\*アメリカは処分場の場所が決まり、処分場建設のための許認可申請が規制当局に提出されたものの、計画見直しのための議論がなされている。

### フィンランドの処分場概念図



(フィンランドPOSIVA社のホームページをもとに作成)

# ? 候補地が決まった国では。

フィンランド、スウェーデン、  
アメリカ※では、  
着実に進められています。

フィンランドでは、ポシバ(POSIVA)社が処分実施主体として、地層処分場の立地とその開発を実施しています。処分対象は使用済燃料です。1983年から処分場選定のための3段階の調査が行われ、2000年に政府がオルキルオトに最終処分場を建設することを原則決定し、世界で初めて高レベル放射性廃棄物の処分場候補地が決まりました。

スウェーデンも処分対象は同じく使用済燃料です。実施主体であるスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社(SKB)は、1993年から2000年にかけて全国を対象とした立地調査と8自治体を対象としたフィジビリティ調査を行い、2002年からはふたつの自治体で地表からのボーリングを含むサイト調査と環境影響評価を実施しました。その結果をもとに2009年6月に、エストハンマル自治体のフォルスマルク村内に処分場候補地を選定しました。

アメリカでは、エネルギー省(DOE)を処分実施主体として、商用原子炉からの使用済燃料と軍事用施設などからの使用済燃料およびガラス固化体を対象に地層処分の計画を進めています。2002年に、放射性廃棄物政策法に基づく手続きにより、処分場はユッカマウンテンに決定しました。2008年6月には原子力規制委員会(NRC)に処分場建設許可申請を行い、同年9月にはNRCが許認可申請書を正式に受理し

ました。しかし、2009年の政権交代によりDOE長官によるユッカマウンテン計画の中止の方針が表明され、計画見直しのための議論がなされています。

※アメリカは現在計画見直し中です。

## フィンランド、スウェーデン、アメリカの処分場(候補地)



# ? 候補地が決まってい ない国では。

フランス、スイスでは、  
このように進められています。

フランスでは、放射性廃棄物管理機関 (ANDRA) が実施主体として、地層処分の計画を進めています。処分対象はガラス固化体です。ANDRAは地層処分研究に係わる地下研究所の公募によるサイト選定を進め、1999年にビュールへの地下研究所の設置が許可された後、同地点での建設と研究を行ってきました。2006年度の放射性廃棄物管理計画において、処分場はビュール周辺の研究対象地区となっている約250平方キロメートルの区域に限られることが決められ、2009年にはANDRAは調査区域の中から4つの区域 (30平方キロメートルの制限区域) を1次案として選定したことを公表しました。今後さらに調査を進め、2015年に処分場の設置許可の申請を行う予定となっています。

スイスでは、放射性廃棄物管理共同組合 (NAGRA) が、実施主体として、ガラス固化体と商用原子炉からの使用済燃料を対象に地層処分計画を進めています。2008年にサイト選定や基準を定めた特別計画「地層処分場」が策定され、同年、処分場の候補地域3カ所 (チュルヒャー・ヴァインラント、北部レゲレン、ベツベルク) がNAGRAにより提案され、サイト選定が開始されました。今後、詳細な検討が行われ処分場候補地が決定されることになっています。

フランス、スイスのサイト予定地



# 各国の地層処分の開発状況一覧



注:地層処分低レベル放射性廃棄物を含むカテゴリー

	フィンランド	スウェーデン	アメリカ	
廃棄物形態	使用済燃料	使用済燃料	使用済燃料 ガラス固化体	TRU廃棄物 <sup>注</sup>
候補地層	結晶質岩	結晶質岩	凝灰岩	岩塩層
処分深さ	約400~500メートル	約400~700メートル	約200~500メートル	約655メートル
実施主体	POSIVA	SKB	DOE	DOE
処分事業の進展とサイト選定に関する実績と計画	<ul style="list-style-type: none"> <li>●1983年:閣議決定により使用済燃料処分計画策定、全国調査を開始</li> <li>●1983年-1985年:サイト確定調査</li> <li>●1986年-1992年:概略サイト特性調査</li> <li>●1993年-2000年:詳細サイト特性調査</li> <li>●1999年:実施主体POSIVA社が4サイトを対象に安全評価書、環境評価書を作成公表</li> <li>●2001年:オルキオを処分地に決定</li> <li>●2004年:地下特性調査施設(ONKALO)建設開始</li> <li>●2012年:建設許可申請予定</li> <li>●2020年:操業開始予定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●1970年代頃:スウェーデン全土の一般的な立地調査</li> <li>●1990年:エスボ岩盤研究所建設開始(1995年操業開始)</li> <li>●1990年代-2000年:全国を対象とした総合立地調査と8自治体におけるフィージビリティ調査を実施</li> <li>●2002年:同意2自治体でサイト調査</li> <li>●2009年:環境影響評価を経てエストハンマル自治体のフォルスマルク村を処分候補地として選定</li> <li>●2009年:建設許可申請予定</li> <li>●2011年:サイトの詳細特性調査・処分場の建設開始</li> <li>●2020年代前半:本格操業開始予定</li> <li>●2060年代:閉鎖</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●1987年:核廃棄物政策法修正法でユッカマウンテンを処分場候補サイトに選定</li> <li>●1998年:実現可能性評価報告書作成</li> <li>●2001年:科学・工学報告書作成</li> <li>●2002年:処分地決定</li> <li>●2008年:NRCはDOEの建設認可申請を受理</li> <li>●2009年:政権交代により足踏み状態</li> <li>●操業開始年未定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●1970年代:処分場としての適性等の調査開始</li> <li>●1979年:議会による研究と安全実証用施設として承認</li> <li>●1981年:縦坑掘削開始</li> <li>●1985年:環境保護庁によるTRU廃棄物処分規制制定</li> <li>●1999年:操業開始</li> </ul>

フランス	スイス	日本
ガラス固化体 カテゴリーB廃棄物 <sup>注</sup>	ガラス固化体 使用済燃料 長寿命中レベル廃棄物 <sup>注</sup>	ガラス固化体 地層処分低レベル放射性廃棄物
粘土層	堆積岩	未定
未定	堆積岩:約650メートル	300メートル以深
ANDRA	NAGRA	NUMO
<ul style="list-style-type: none"> <li>●1991年:放射性廃棄物管理研究法を制定し、長期貯蔵、地層処分、核種分離変換の3つの研究を推進</li> <li>●実施主体ANDRAは地下研究所計画を中心に処分研究を推進</li> <li>●2000年:ビュール地下研究所(堆積岩)掘削開始</li> <li>●2005年:最終研究報告書を作成</li> <li>●2006年:放射性廃棄物等管理計画法が制定され、可逆性のある地層処分が基本方針となる。さらに、処分場はビュール周辺の研究対象地方に限ることを規定</li> <li>●2009年:ANDRAはビュール周辺から候補サイトを複数選定</li> <li>●2015年:設置許可申請予定</li> <li>●2025年:操業開始予定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●1978年:NAGRAは放射性廃棄物管理計画を作成</li> <li>●1985年:保証プロジェクト報告書作成</li> <li>●1994年:「クリスタリン-I」報告書を作成</li> <li>●グリムゼル試験場(1984年設置)、モン・テリ岩盤研究所(1996年設置)での調査研究</li> <li>●2002年:「処分の実現可能性実証プロジェクト」報告書を作成</li> <li>●2005年:現行の原子力法および原子力令が施行</li> <li>●2006年:連邦評議会が「処分の実現可能性実証プロジェクト」を承認</li> <li>●2007年:特別計画「地層処分場」の策定</li> <li>●2008年:地層処分場3候補地域を公表</li> <li>●2018年頃:概要承認発給予定</li> <li>●2050年頃:操業開始</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●1986(昭和61)年:動力炉・核燃料開発事業団(PNC)は岐阜県東濃において地層科学研究を開始</li> <li>●1996(平成8)年:核燃料サイクル開発機構(JNC)超深地層研究所計画を開始</li> <li>●1999(平成11)年:核燃料サイクル開発機構(JNC)は高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性を示す報告書を作成</li> <li>●2000(平成12)年:特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律に基づき、実施主体として原子力発電環境整備機構を設立</li> <li>●概要調査地区、精密調査地区、最終処分施設建設地を段階的に選定</li> <li>●平成40年代後半:操業開始予定</li> </ul>

# 終章

高レベル放射性廃棄物等の地層処分の安全性について解説してきましたが、人間が管理しなくても安全性が確保されるという地層処分の考え方をご理解いただけたでしょうか。

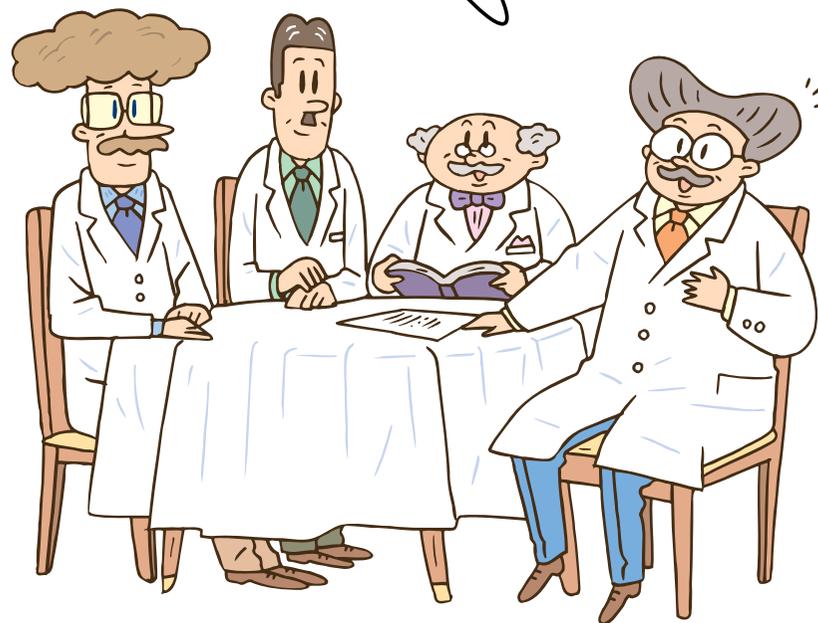
遠い将来に至るまでの安全性に自信を持って地層処分を実施するためには、処分する場所に固有の地層の性質を評価する技術や多重バリアシステムを作り、その性能を評価する技術が重要です。

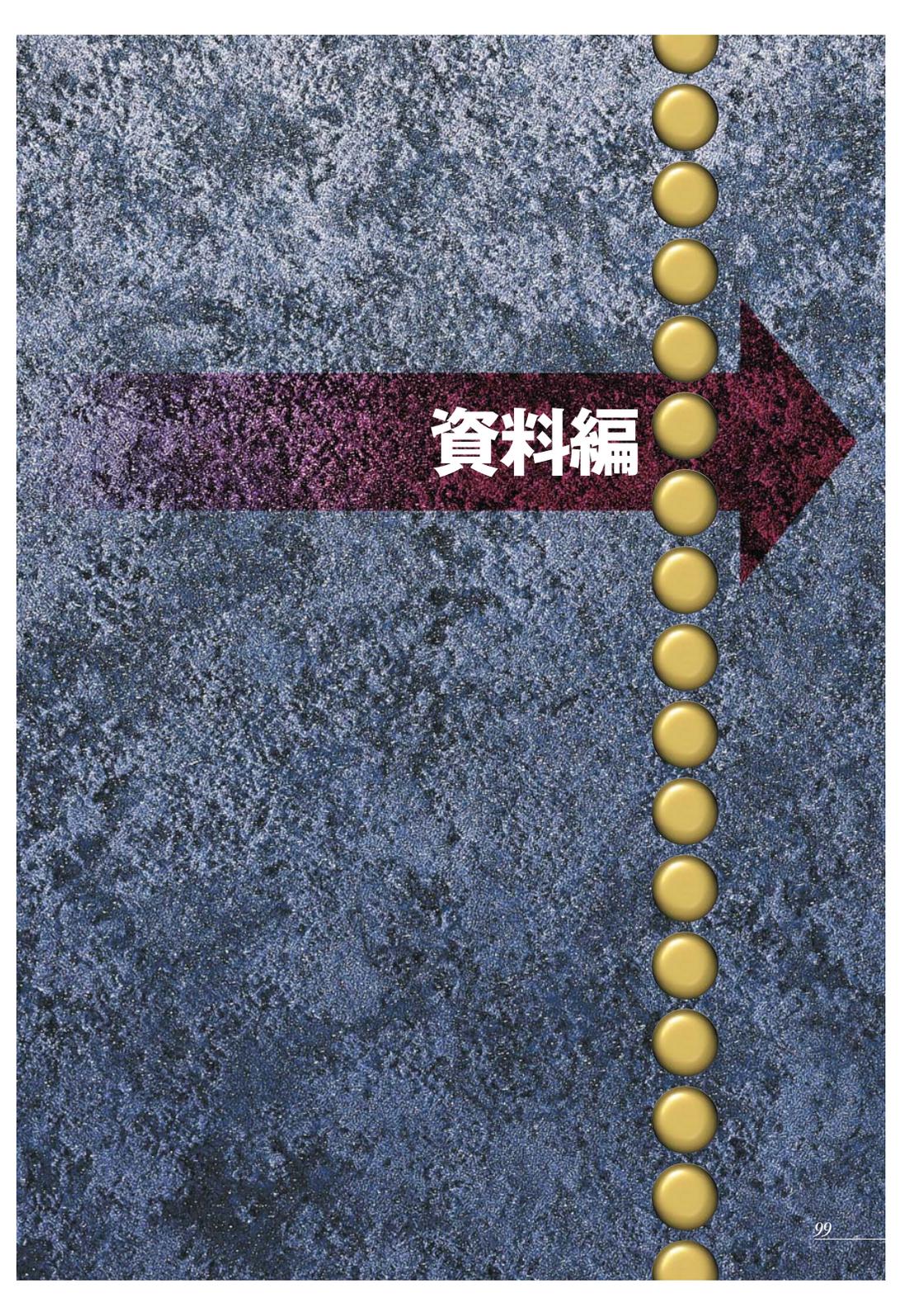
これらの技術は、海外のみならず、日本においても国を中心に30年以上の時間をかけて研究がなされ、すでに技術的基盤は整備されています。

NUMOニューモは、これらの技術を基に、地層処分の安全性に関する科学的根拠を段階的に確認し、その技術的信頼を積み上げながら、一步、一步、慎重に事業を進めてまいります。

エネルギー利用にあたっては、環境に負担をかけない、しっかりとした廃棄物対策が不可欠です。エネルギー利用の恩恵を受けた私たちの世代がこの問題を先送りすることなく責任を持って実行していくことが、今求められているのではないのでしょうか。

エネルギー利用にあたっては、  
しっかりとした廃棄物対策が  
不可欠です。





# 資料編

## 資料編

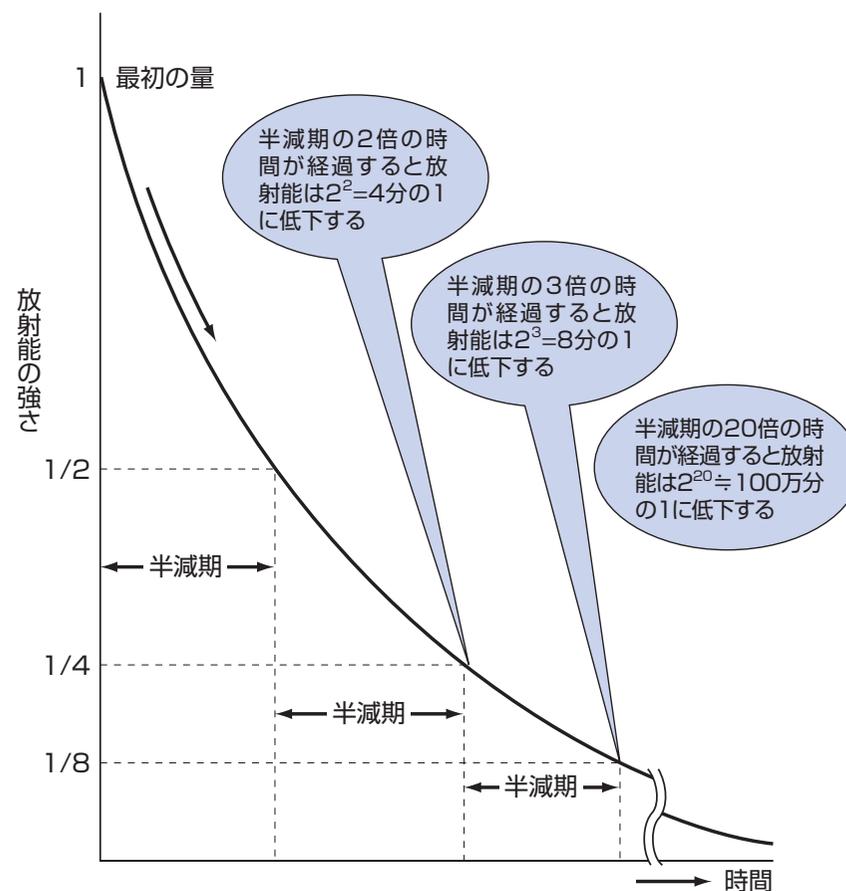
# 1 いろいろな放射性物質の半減期

放射性物質は、放射性崩壊を繰り返して安定な物質へ変化すると放射線を放出しなくなります。放射能の強さは、ある一定の時間が経過すると半分に低下し、さらに一定時間が経過すると、またその半分に低下します。放射能の強さがもとの半分になるまでの、この時間を「半減期」と呼んでいます。

半減期の長さは、放射性物質ごとに異なり、数秒の短いものからウラン238のように45億年と長いものまでさまざまです。放射性物質の持つ放射能の強さは、徐々に小さくなって、半減期の10倍の時間がたつと約1000分の1、さらに、半減期の20倍の時間が経過すると約100万分の1に低下します。

### いろいろな放射性物質の半減期

放射性物質	半減期
ラドン220	55.6秒
ラドン222	3.8日
ニオブ95	35日
ストロンチウム90	29年
セシウム137	30年
アメリシウム241	430年
炭素14	5715年
アメリシウム243	7400年
プルトニウム239	2.4万年
ウラン233	16万年
テクネチウム99	21万年
ジルコニウム93	153万年
ネプツニウム237	214万年
ヨウ素129	1570万年
カリウム40	約13億年
ウラン238	約45億年

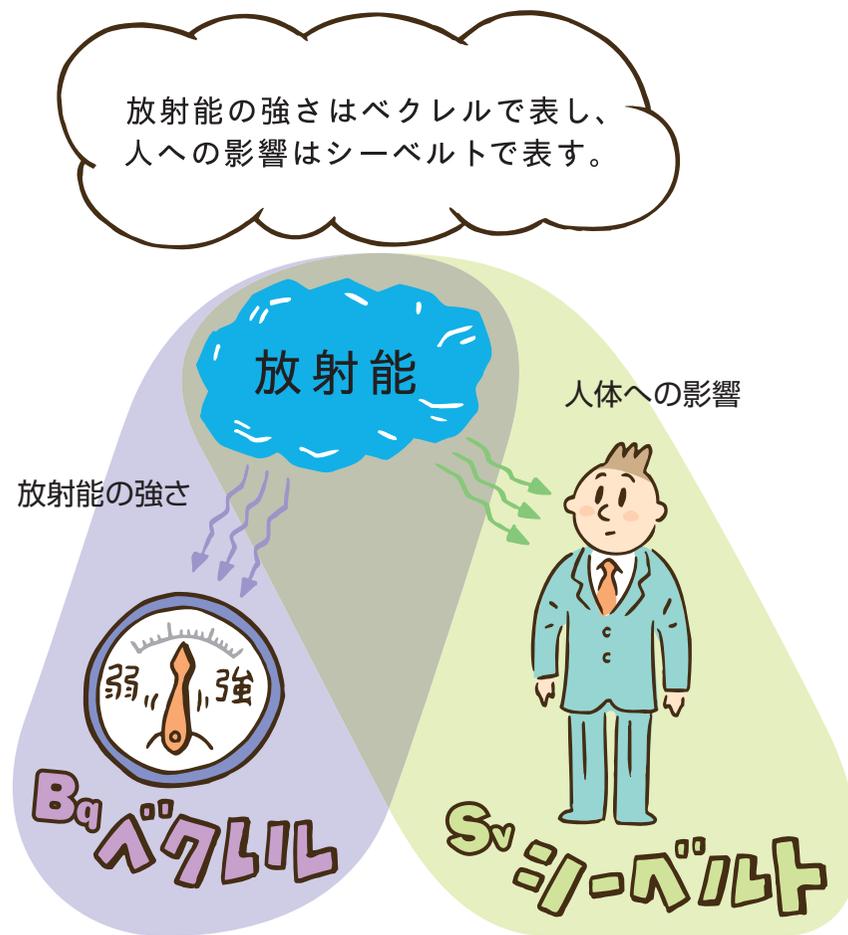


## 2 放射能 / 放射線の単位

放射性物質が持っている放射能の強さを表す単位は、1秒間の放射性崩壊の数で定義されています。ある放射性物質が1秒間に1個の原子が壊れて放射線を出すとき、この放射性物質の放射能を1ベクレル (Bq) と言います。

このベクレルという単位は、放射能の発見者であるベクレルの名前にちなんでつけられた名称です。

ベクレルの数値が同じであっても、放射性物質の種類が異なると、放出される放射線の種類とエネルギーが違います。放射線の種類やエネルギーによって物質を透過する力が違うように、これらが異なると、人体に対する影響は異なります。また、人体は臓器ごとに放射線に対する感受性が違います。シーベルト (Sv) という単位は、放射線の種類やエネルギーの大きさ、臓器などの違いを考慮して、放射線の人体への影響量 (実効線量) を表すものです。この影響量は人体が放射線から吸収したエネルギーをもとに、放射線の種類や臓器への影響の大きさを補正して求められます。



## 資料編

# 3 放射性廃棄物

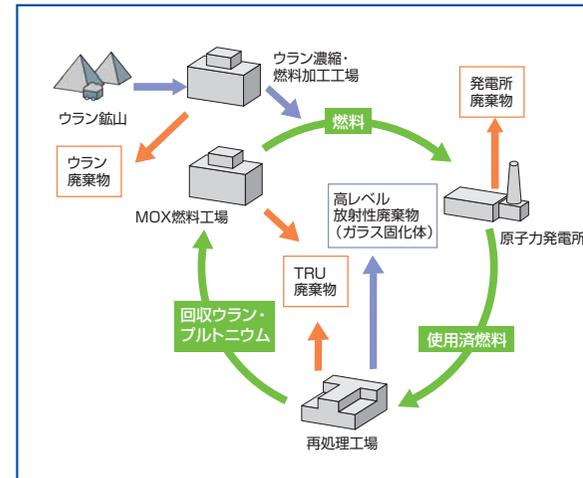
エネルギー資源に乏しい日本では、ウラン資源を有効利用するため、原子力発電で使い終えた燃料を再処理して、ウランやプルトニウムを取り出し、再び燃料として利用する核燃料サイクルを進めています。核燃料サイクルを構成する原子力発電所、再処理工場やMOX燃料工場などを操業すると放射性廃棄物が発生します。また、原子力施設の廃止措置による解体の際にも放射性廃棄物は発生します。放射性廃棄物は、放射性物質によって汚染されたもののうち処分するもののことを言います。放射性廃棄物の特徴は、主に放射能、発熱、含まれる放射性核種によって決まります。

高レベル放射性廃棄物は、再処理工場における使用済燃料の処理の過程で発生する放射能の高い廃液、またはそれを固化したガラス固化体のことを言います。

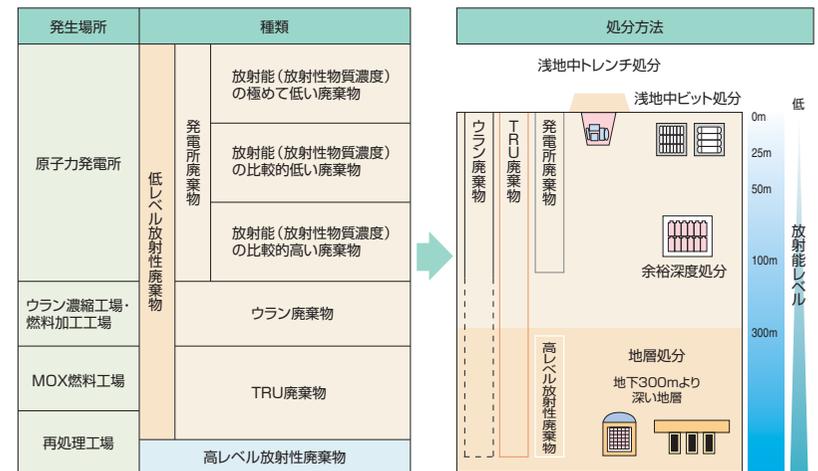
核燃料サイクルに含まれる施設で発生する放射性廃棄物のうち高レベル放射性廃棄物以外のものを低レベル放射性廃棄物と呼んでいます。これには、原子力施設の運転中や施設の点検、補修時に発生する古い作業着、使用済のペーパータオルや消耗品など比較的放射能の低いものから、原子炉の炉心構造物などのように比較的放射能の高いものまで、さまざまな種類のものが含まれます。低レベル放射性廃棄物のうち、再処理工場やMOX燃料工場の操業中や解体時に発生するTRU廃棄物の一部は、半減期の長い放射性核種を含むため、地層処分します。これを地層処分低レベル放射性廃棄物と呼びます。

このような放射性廃棄物の特徴を考慮して、それぞれの特徴に応じた適切な処分方法が実施、または検討されています。

## 使用済燃料を再利用する核燃料サイクル



## 放射性廃棄物の種類と処分の概要



(経済産業省資源エネルギー庁編 2005をもとに作成)

## 資料編

# 4 処分場

処分場は、長期間にわたり物質を安定的に閉じ込める地層の性質を利用して、放射性物質を閉じ込め、私たちの生活環境から非常に長い期間にわたり、隔離する場であると言えます。処分場周辺の環境が現在の変化の割合で推移すると仮定すると、非常に長期にわたり私たちを含め環境への影響は無視できる程度のものなのです。

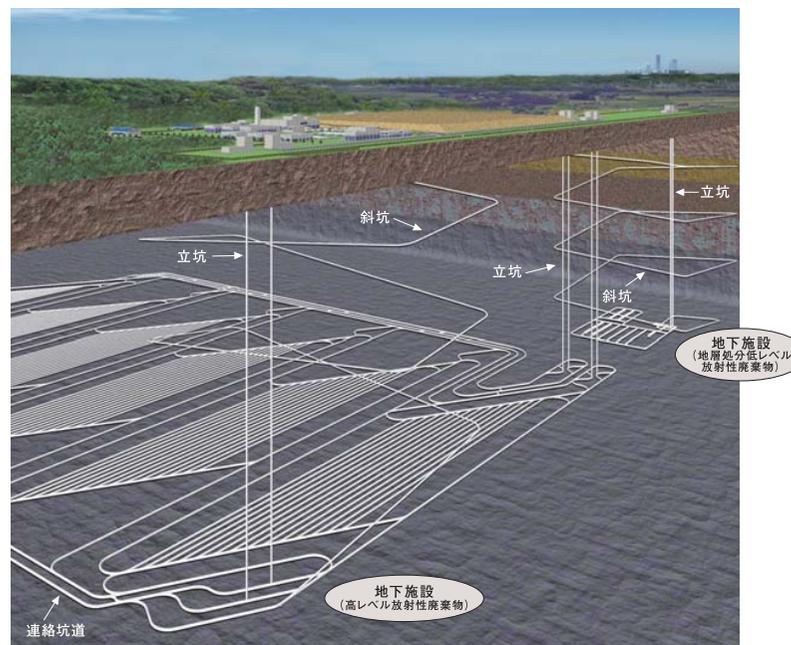
処分地を選定する際には、処分の安全性に影響を与える可能性のある場所は排除したうえで、処分予定の廃棄物が処分できるだけの広がりを持った地層が存在することを確認し、さらに処分場やその周辺で起きるかもしれないさまざまな自然現象を想定して、それでも安全であることを確認します。

処分場は、放射性廃棄物を受け入れて、オーバーパックや廃棄体パッケージに封入するための建物や緩衝材を製造する建物などの地上施設と、廃棄体を定置するために必要となるさまざまな坑道からなる地下施設で構成されます。

廃棄物が処分場に定置され、操業を終了すると、安全の確認などの法的な手続きを経て、最終的に処分場は埋め戻されます。なお、調査開始から廃棄物の処分を終えるまでには約100年の期間がかかる長期的な事業です。

### 地層処分施設のレイアウト例(結晶質岩、深度1000メートルの場合)

高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の地層処分施設を併置した例。



#### 仕様の一例(結晶質岩、深度1000メートルの場合)

地上施設	高レベル放射性廃棄物の地下施設	地層処分低レベル放射性廃棄物の地下施設
敷地面積: 1~2平方キロメートル	大きさ(平面): 約3キロメートル×約2キロメートル	大きさ(平面): 約0.5キロメートル×約0.3キロメートル

## 資料編

# 5

## 高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の併置

高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物を同じ処分施設建設地で処分することを「併置処分」と呼びます。

高レベル放射性廃棄物の地下施設は、約3キロメートル×約2キロメートルほどの広さ(結晶質岩、深度1000メートルの例)となります。

これに対し、地層処分低レベル放射性廃棄物は、高レベル放射性廃棄物と比べて発生量は多いですが、発熱が小さく集中的な処分が可能のため、地下施設の広さは標準的なレイアウトで長さ約0.3キロメートル、幅約0.5キロメートルとなり、高レベル放射性廃棄物の地下施設の約30分の1程度となります。

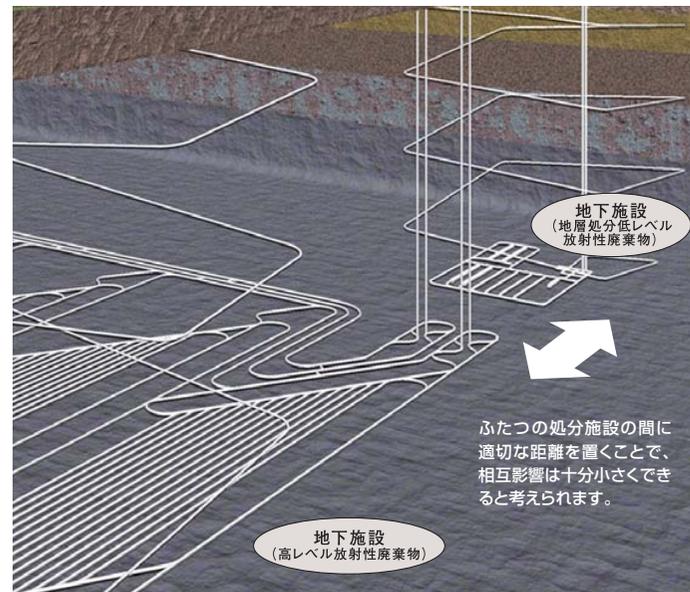
同一の処分施設建設地で併置処分する場合には、地質調査の量を減らすことができ、地上の施設が一部共通で使えるなど、コストの低減が見込めます。なお、長期安全性の観点から両施設間の相互影響について評価を行い、それぞれの地下施設間の距離を約300メートル離すことによって、相互影響を十分小さくできると考えられます。

### 地上施設のレイアウト例



高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の地層処分施設を併置した例です。地上施設の敷地面積は1~2平方キロメートルが必要です。

### 地層処分施設のレイアウト例(結晶質岩、深度1000メートルの場合)



ふたつの処分施設の間に適切な距離を置くことで、相互影響は十分小さくできると考えられます。

## 資料編

# 6

## 自然に学ぶ

### —カナダ・シガーレイクウラン鉱床—

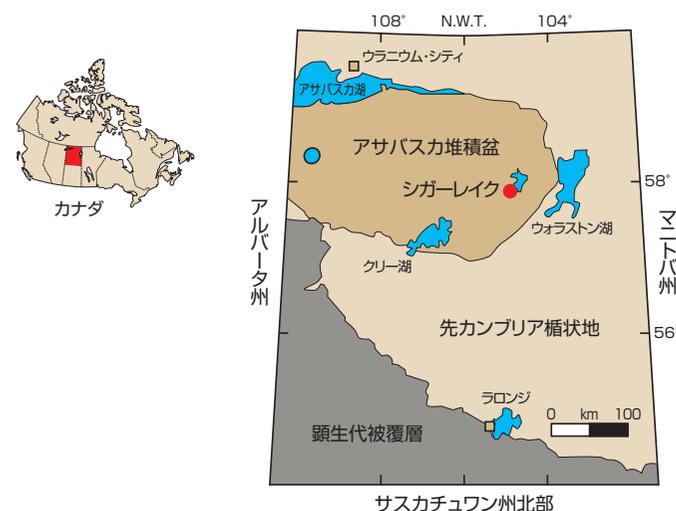
地層処分は、実際に影響がある時間をかけて安全性を実証することはできませんが、自然には地層処分に似た状況が多くあり、多くのことを学ぶことができます。これをナチュラルアナログ（自然類似現象）と呼んでいます。ここでは、ナチュラルアナログのひとつの例である、カナダのシガーレイクウラン鉱床について紹介します。

カナダのシガーレイクウラン鉱床は、約13億年前に鉱床が形成された後、長期間ウランおよびウランの壊変によって生成した放射性物質が当初の場所から移動しなかったことが知られており、鉱床の形成過程や構造についての研究が盛んに行われています。

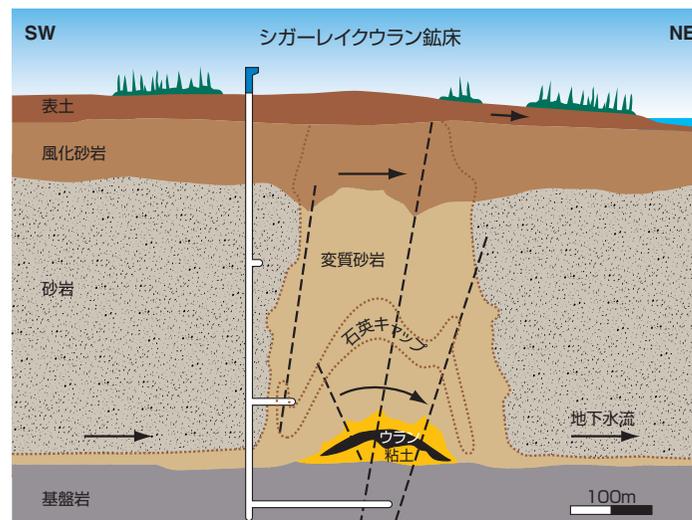
研究の結果、濃集したウランの周りに、温度の高い地下水と周りの岩盤との反応の影響で、粘土の層が形成され、この粘土層が地下水の流れを遅らせていたということがわかっています。この粘土層がウランを取り囲むように存在しており（右下図の黄色部分が粘土層、黒い部分がウランに相当します）、ウランが地下水と接触するのを防ぎ、また地下水によってウランが流れ出てしまうことも防いでいたのです。

この粘土層は、ウラン鉱床が形成されたのと同様、約13億年前に形成されたと考えられています。ですから、粘土層は大昔から現在に至るまでウランを守り続けていることとなります。粘土層は現在でも、その機能を発揮していて、地表からでは地下にウラン鉱床が存在していることを示す兆候が認められていません。

### シガーレイクウラン鉱床の位置



### シガーレイクウラン鉱床の地層のしくみ



(Atomic Energy of Canada Limited 1996を編集)

## 資料編

# 7

## 地球の内部構造

私たちが暮らす地球は、半径約6400キロメートルの大きさで、ほぼ球状をなしています。その内部構造や構成物質は、地震波が伝わる速度の分布状況や、岩石・鉱物・金属などを高温高压状態にしたときの变化を調べる室内実験結果などから推定することができます。地表付近ではトンネルやボーリングで地面に孔を開けて直接観察できますが、地表(地球の表面)から約10キロメートルより深い部分は、これまで誰も直接見たことがないので、地球全体のほとんどの部分は理論的に推定されています。

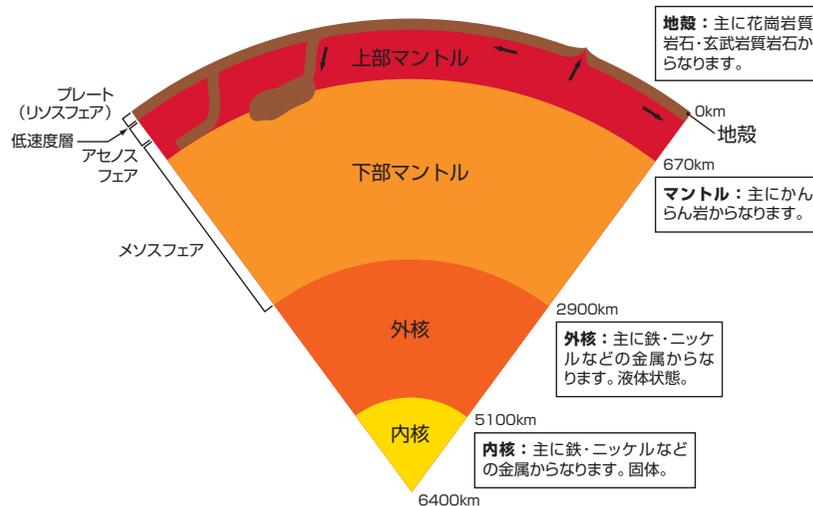
地球の内部は、右図に示すように、いくつかの層に分かれた構造になっています。地球の一番外側の地殻と呼ばれる部分については、大陸地殻の上部は花崗岩質岩石、大陸地殻の下部と海洋地殻は玄武岩質岩石からなり、大陸地殻で約30キロメートル、海洋地殻で約6キロメートルの厚さがあります。その下には、カンラン岩を主体とするマントルと呼ばれる層が深さ約2900キロメートルまで続いています。マントルは、深さ約670キロメートル付近で密度の違いにより上部マントルと下部マントルとに分けられています。核もふたつに分けられ、外側約2200キロメートル(深さ約5100キロメートルまで)が鉄・ニッケルなどの金属からなる液体状態の外核、内側の地球中心まで約1300キロメートルが鉄・ニッケルなどの金属からなる固体の内核と呼ばれています。

以上は、地震波速度・密度・圧力分布などから推定される構成物質の違いによって分けられたものです。この区分方法とは別に、剛体であるか、ないかという力学的な違いによって、地球表層付近では剛体であるリソスフェアと剛体ではないアセノスフェアとに分けられています。これらの境界には、低速度層というわずかに融解した薄い層があって、この上にある硬い層をプレート(リソスフェア)と呼んでいます。プレートと呼ばれる部分は、約60~100キロメートルの厚さなので、地殻と上部マントルの一部を足した

部分に相当します。

低速度層の上にあるプレートは、その下のアセノスフェアとは独立に動くことができると考えられていて、この考えがプレートテクトニクスの基本的な考え方のひとつとなっています。このようなプレート運動が、普段私たちが目にする地震や火山などの地殻変動の源泉となっています。

### 地球の内部構造



## 資料編

# 8 地殻変動のメカニズム

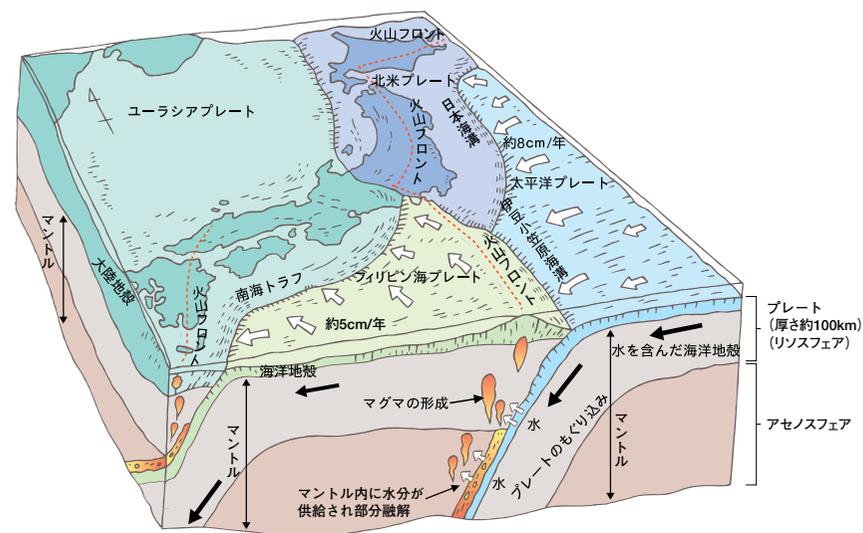
日本列島周辺の火山活動、地震活動、断層活動などの地殻変動は、プレート運動が原動力と考えられています。

地球の表面は、厚さ約60~100キロメートルのリソスフェアと呼ばれる硬い層に覆われています。リソスフェアは地殻とマントル最上部からなっており、これをプレートと呼んでいます。このプレートは、ちょうど卵の殻が卵を包んでいるように、地球表面を覆っています。

日本列島周辺には、大陸プレートと呼ばれているユーラシアプレートと北米プレート、海洋プレートと呼ばれている太平洋プレートとフィリピン海プレートの4つのプレートがあり、それらが衝突したり、もぐり込んだりしています。例えば、太平洋プレートは北米プレートとフィリピン海プレートの下にもぐり込み、フィリピン海プレートはユーラシアプレートの下にもぐり込んでいます。これらのプレートとプレートとが接する境界付近で起きる火山活動、地震活動、断層活動などの地殻変動は、プレート同士の相対運動で説明することができます。例えば火山活動は、海洋プレートが大陸プレートの下にもぐり込み、約100キロメートルの深度で海洋プレート直上付近のマントルが溶けてマグマが発生することで生じます。また、日本列島は、海洋プレートのもぐり込みにとまなう力を常に受け、歪が蓄積しています。この歪を蓄積させた力が岩盤強度の限界を超えたときに、岩盤がずれて断層活動が起き、地震が発生します。

現在、太平洋プレートは年間約8センチメートルの速さで日本列島の下にもぐり込んでいます。今、日本海溝で日本列島にもぐり込んでいる太平洋プレートは、恐竜が繁栄していた約1億年前に約1万キロメートル離れた太平洋の中央海嶺で生まれたものです。このことから、プレート運動がいかに長い時間をかけてゆっくりと継続しているかがわかります。

### 日本列島周辺のプレート



(全国地質調査業協会連合会ホームページをもとに作成)

## 資料編

# 9 火山噴火のメカニズム

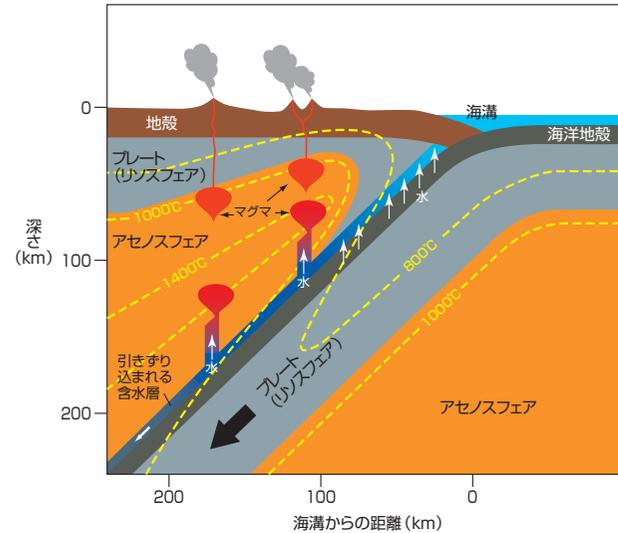
日本列島付近では、火山活動の源であるマグマは、プレート運動に関連して発生し、上昇するものと考えられています。マグマ発生モデルに関しては、さまざまなモデルが提案されていますが、その代表的なモデルを説明しましょう。

日本列島付近では、大陸プレートの下に海洋プレートがもぐり込んでいます。この海洋プレート上部の岩石にはたくさんの水分が含まれています。海洋プレートが日本列島の下にもぐり込むと、水分を取り込んだ岩石が海洋プレート直上付近に形成されます。この岩石が海洋プレートのもぐり込みにもなると引きずり込まれ、日本列島の地下約110キロメートルと約170キロメートルの深さに達すると、温度・圧力の影響により、脱水して水分を放出します。

放出された水分は、その直上のマンツルの融点を下げる働きをします。このために、マンツルは基本的には固体ですが、もぐり込む海洋プレートから放出された水分の影響でその一部が溶けてマグマとなります。こうして発生したマグマは、周囲のマンツルに比べて密度が小さいために浮力によって上昇を始め、最終的には地表へと噴出し、火山として活動します。

第四紀火山(ここでは、約200万年前以降に活動したもの)の分布を見ますと、日本列島に沿う海溝(トラフ)に平行に、あるまとまった帯状の分布をしていることがわかります。このことは、上述のようにマグマがプレート運動に関連して発生することと、約100万年前以降、プレート運動様式に大きな変化がないことを資料編⑩で説明できます。

## マグマ発生モデル



日本列島の地下約110キロメートルと約170キロメートルで、海洋プレート直上付近の水分を取り込んだ岩石から水が放出され、マンツルの部分融解が生じ、マグマが発生します。

(巽 1995を編集)

## 第四紀火山分布

火山分布は、過去約200万年間ほとんど変化していません。



(第四紀火山カタログ委員会編 1999を編集)

## 資料編

# 10 プレート配置の変遷

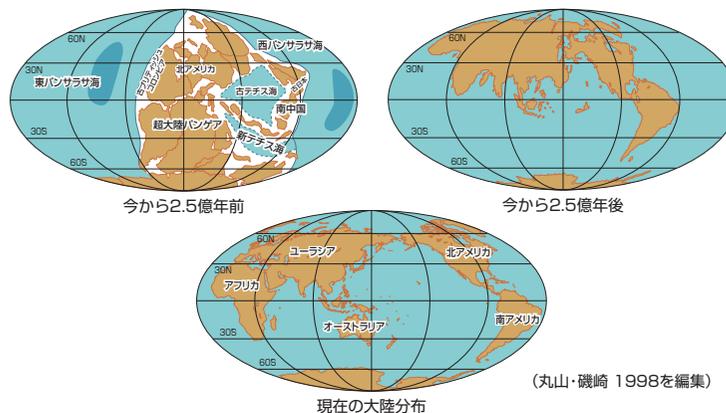
地上にある最古の岩石は、ほぼ40億年前の年代を示す花崗岩で、その頃に原始海洋や硬い岩盤の層ができて、プレートテクトニクスが機能するようになったと考えられています。それ以降、現在の地殻やマントルの組成・規模になるまでにさまざまな現象、すなわち超大陸の形成やその分裂、そしてプレートがもぐり込む境界での大陸の成長などが繰り返されてきました。超大陸は、約19億年前に初めて誕生し、初期においては超大陸の再形成に3~5億年かかったとされますが、約10億年前以降では約8億年を要するとされています。このことは地球が次第に冷却してプレート運動が次第に遅くなりつつあることを示す、との考え方があります。

日本列島周辺では、約1000万年前に現在とほとんど同じプレート配置ができあがり、約200万~100万年前頃には各プレートの配置および運動方向が現在と同様になったと考えられています。海洋プレートが大陸プレートの下にもぐり込むプレートの運動は、海洋プレートの年代・地磁気の日誌やGPSを利用した測地データから、少なくとも最近約200万年間は年間5~8センチメートルの一定速度であることが確認されています。火山や地震などの地球上で起きるさまざまな地殻変動の原動力はプレート運動によると考えられており、その発生の仕方や場所は、プレートの運動の変化に応じて変化することになります。

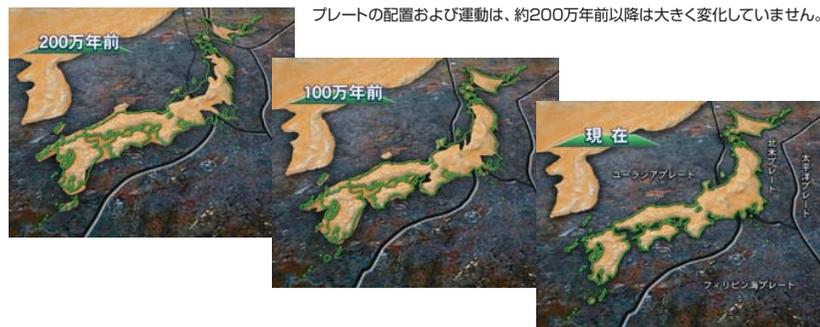
地球誕生から現在に至るまでの地球で起きたさまざまな現象の発生時期について、地球の年齢46億年を人間の生涯80年に例えてみましょう。そうすると、日本列島周辺で現在のプレート配置ができあがった1000万年前は約2カ月前、日本列島周辺のプレートの運動形態が現在と同じになった100万年前は約1週間前、10万年前は約15時間前に相当することになります。つまり地球史にとって10万年、100万年という時間は、

ごく短い時間にすぎないというとらえ方もできます。

### 2.5億年前、現在および2.5億年後の大陸分布



### 日本列島周辺の約200万年前、約100万年前および現在のプレート配置



## 資料編

# 11 地震のメカニズム

日本列島とその周辺で発生する地震の震源分布を見てみると、例えば東北地方では、太平洋側から日本海側へ向かって徐々に深くなる地震や、陸域の浅いところで発生する地震があることがわかります(右上図)。

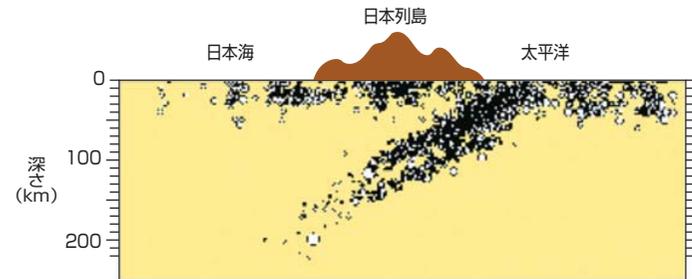
海溝(トラフ)付近では、海洋プレートのもぐり込みにもよって大陸のプレートの端が引きずり込まれ歪が蓄積され、やがてそれが両プレート間に働くすべり抵抗を上回ったときに大陸のプレートが跳ね上がり、地震が起きます。このタイプの地震は、ふたつのプレート境界面で発生するプレート間地震と呼ばれています。1854年の安政東海地震・安政南海地震、1923年の関東地震、1968年の十勝地震など、マグニチュード8クラスの巨大地震が発生しています。

沈み込む(沈み込んだ)海洋プレートの内部で発生する地震は、海洋プレート内地震と呼ばれています。このタイプの地震は、海溝軸付近ないしその沖合で起こる地震と、海溝軸付近から陸域で起こる地震があります。

また、海洋プレートのもぐり込みによって生じる力により大陸プレートに蓄積された歪エネルギーを解放する際に、内陸の地殻内(陸域浅部)で岩盤のずれ破壊(断層活動)が生じて地震が発生します。陸域では、地震を発生させる硬い岩盤は、地下15~20キロメートル程度までで、それより深いところでは、温度が高いため岩盤に力がかかっても急激な破壊は起こさず流動的に変形してしまうと考えられています。このため、このタイプの地震は、内陸地殻内地震と呼ばれ、震源が20キロメートル程度より浅く、マグニチュード7程度以下のものがほとんどですが、1891年の濃尾地震のようにマグニチュード8程度の例もあります。なお、歪を蓄えるスピードがプレート間地震と比べて1桁から2桁遅いため地震の発生間隔は1000年程度~数万年と言われています。

## 震源分布図(東北地方)

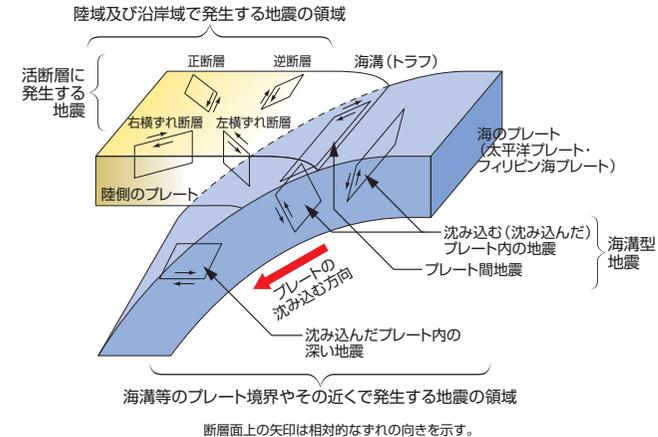
震源分布は太平洋側から日本海側へ向かって徐々に深くなる様子がよくわかります。陸域には、内陸地殻内(陸域浅部)で発生する地震も見られます。



(防災科学技術研究所ホームページをもとに作成)

## 地震のタイプ

プレート境界面で発生する地震(プレート間地震)、沈み込む(沈み込んだ)海洋プレート内部で発生する地震(海洋プレート内地震)と内陸地殻内(陸域浅部)で岩盤がずれて発生する地震(内陸地殻内地震)に大別できます。



(内閣府地震調査研究推進本部「全国を概観した地震予測地図」)

# 12 活断層の動き

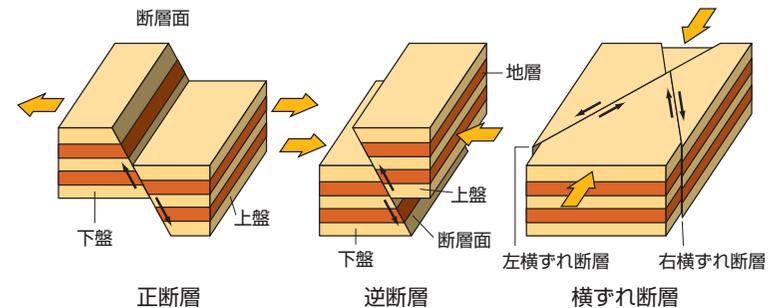
海洋プレートのもぐり込みが継続することにより、海洋プレートと大陸プレートは互いに強い力を受け、時間の経過とともにその内部に歪<sup>ひずみ</sup>が蓄積されていきます。その間、地下の岩盤は歪<sup>ひずみ</sup>をため込んでいきますが、蓄積された歪<sup>ひずみ</sup>が岩盤の強度を超えて、岩盤がその歪<sup>ひずみ</sup>に耐えられなくなったとき、岩盤は破壊して破断面を境に急激にずれます。これが断層活動で、破断面は断層面と呼ばれます。断層はズレの向きによって、正断層、逆断層および横ずれ断層の3つのタイプに区分されます。これらのズレの向きは、岩盤が受ける力の向きに対応します。

断層が生ずることにより、岩盤内に蓄えられた歪<sup>ひずみ</sup>は一時的に開放され、地震が発生しますが、プレート運動は継続するので、地震の発生後も断層に再び歪<sup>ひずみ</sup>が蓄積され続けます。断層は一度形成されると、その部分は周りの岩盤と比較して強度が弱くなっており、次の破壊も既存の断層に沿って発生する傾向にあります。物に力を加えたとき、傷のない部分より傷のある部分のほうが壊れやすいのと同じです。

日本国内で過去に繰り返し活動したことが確認されている活断層は、岩盤内に生じている弱面(傷)に相当するということになります。現在の状態がこのまま続く限り、活断層に沿う断層活動は、同じ向きで繰り返し起こると考えられます。また、力のかかり方が地域的または局所的に多少変わって、仮に新しい断層が発生したり、分岐した断層が発生するとしても、数十万年かけて徐々に成長するので、断層がない岩盤に突然大きな断層が現れることはないと考えられています。

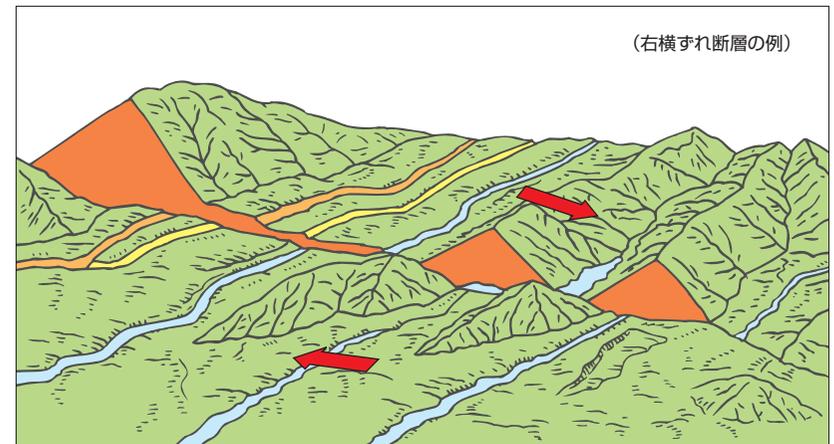
## 断層のタイプ

岩盤が受ける力の向きにより、正断層(引張力)、逆断層(圧縮力)および横ずれ断層(圧縮力)に分けられます。



## 活断層に沿った地形的特徴

断層活動による変位が累積されると、活断層に特有の地形(尾根や谷筋、河川の流路などの食い違い)が生まれます。



(活断層研究会編 1991を編集)

# 活断層をとらえる

## —活断層調査技術—

活断層は、地表に変位を残した地震断層の痕跡で、地表に現れない地下深部の震源断層とは区別されます。活断層が動くと、しばしばその痕跡が地形や地表付近の地質構造に残ります。このような痕跡を変動地形と言います。「活断層をとらえる」とは、空中写真を使って変動地形を調査したり、地表踏査などを行って活断層の詳しい位置や活動履歴を調査し、断層の将来の活動性を評価することにほかなりません。

活断層の認定や評価はまず地表で行われるため、主要な研究対象は、かつては地形や地表地質に限定される傾向がありました。ところが、断層活動の原因は言うまでもなく地殻内部にあるので、今日では研究対象が地下深部に広がり、地球物理学的なデータと地形・地質データとが融合され、異なる複数の調査データを組み合わせて総合的に検討することにより、活断層をとらえる時代になっています。

地層処分においても、広域的な地質構造の中で位置づけられる、処分場周辺の地下構造を詳細に把握し、仮に断層がとらえられた場合、過去から現在の地震活動との関連を考察することが求められるので、この総合的な検討はとりわけ重要です。ここでは、地下深部の情報を得るための地球物理学的である反射法地震探査、微小地震観測および測地学的手法である汎地球測位システム(GPS観測)が、活断層調査にどのように活用されているか説明します。

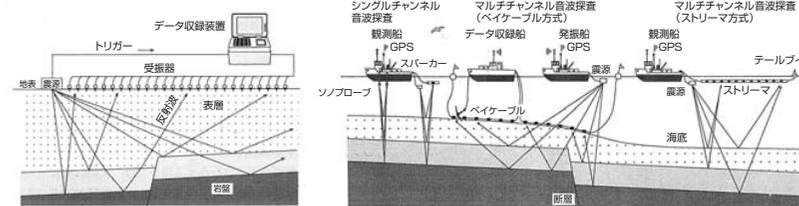
### 1. 反射法地震探査(または音波探査)

反射法地震探査は、地表(または水面)で発生させた弾性波が地下のさまざまな地層境界面で反射し、地表に戻ってきたときの時間差に着目して地下構造を調べる手法です。この手法は、石油・天然ガスなどの資源探査で活用されてきた方法ですが、1980年代後半から活断層調査に積極的に適用されています。海域で行われるものを特に

音波探査と言います。この手法によって、地質構造の解釈が大きく変わって地史が再構築されたり、地表データだけでは認定されていなかった場所に新たな活断層が発見された事例(下図の奈良盆地の帯解断層)が報告されています。

### 反射法地震探査および音波探査

反射法地震探査(音波探査)により地下構造(地層分布や断層の分布)が可視化されます。



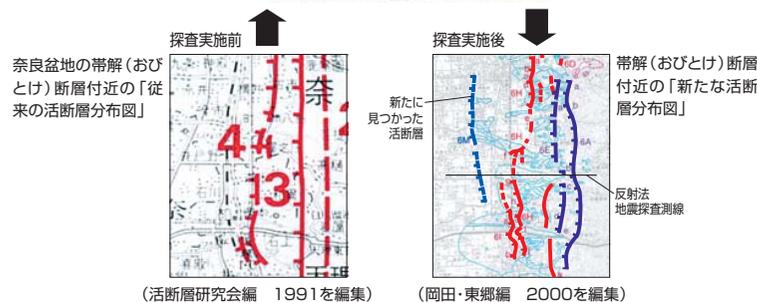
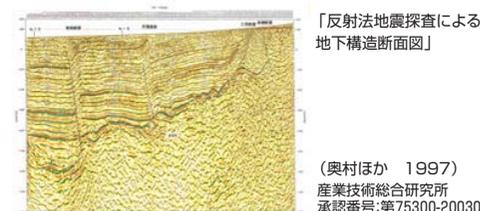
陸域で行われる反射法地震探査の概要

海域で行われる音波探査の概要

(岡田ほか 2002)

### 活断層の発見例

反射法地震探査により新たな活断層が発見された例



## 2. 微小地震観測

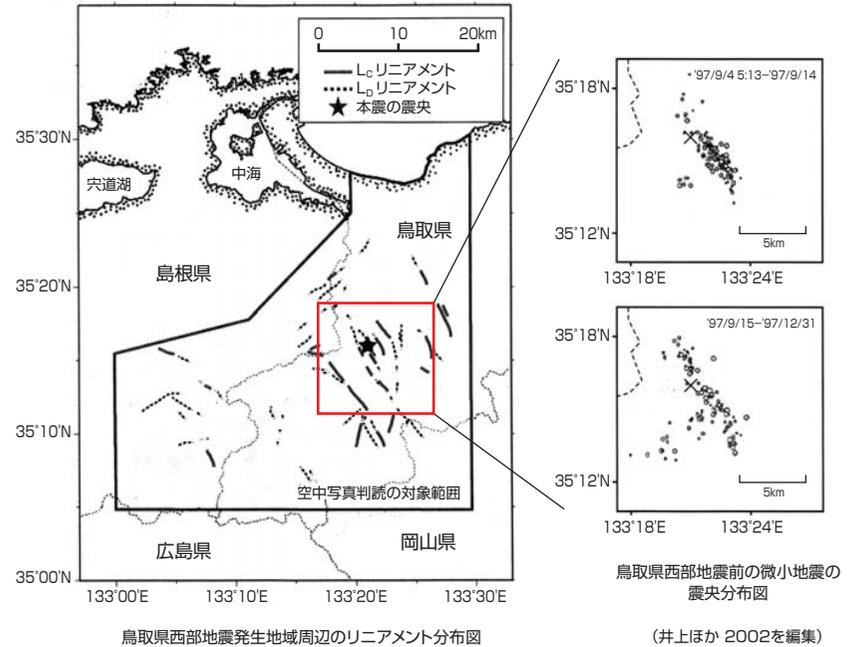
地震の震源決定精度の向上および発震機構解明のための微小地震観測ネットワークが、1970年代以降、全国に整備されています。微小地震は、マグニチュードが3未満の地震を言います。前ページ「1. 反射法地震探査(または音波探査)」で既述した反射法地震探査は、人工的な地震波を利用して地層や岩盤あるいは断層の情報を得ることを目的としているのに対し、微小地震観測は、震源の情報を得ることを重要な目的としています。地震は、言うまでもなく地殻内部で起きる急激な運動(断層活動、岩盤の破壊)の結果発生する現象で、大きな地震に比べて発生頻度の多い微小地震の観測とその解析により、地表に達しない地下深部の震源断層の広がり、すなわち地震の規模に関する情報を得ることができます。

地表近くで確認できる活断層と微小地震観測からわかる震源断層とは、一連の断層である場合があり、これらの関係を解明することは、特に活動度の低いまたは不連続・不明瞭な活断層の危険度評価に対して有効です。

これまでの研究で、活断層にそって微小地震が観測された例を右図に示します。

### 2000年10月6日の鳥取県西部地震

鳥取県西部地震の震央付近では、河川・尾根の系統的な屈曲など、資料編⑫に示す活断層によってできた可能性のある地形(下記研究では、これをリニアメントと呼んでいる)が直線状に並んでいる様子を空中写真で見ることができます。これらの地形に沿って、同地震の本震が発生する前における微小地震の震源が分布しています。



### 3. 汎地球測位システム (GPS観測)

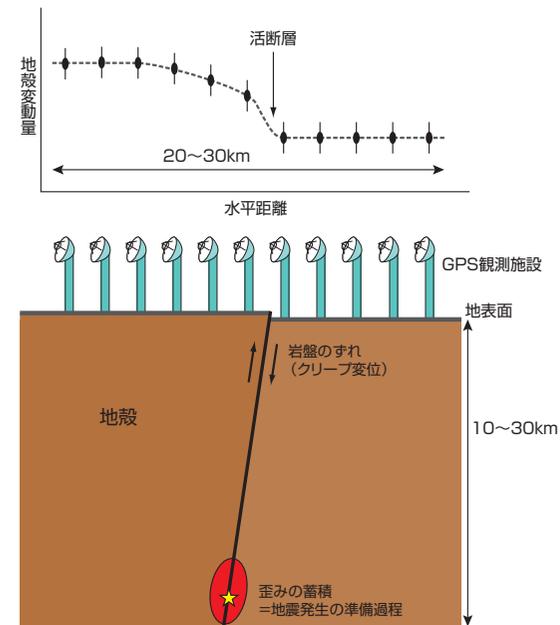
汎地球測位システム(Global Positioning System=GPS)は、1980年代にアメリカ国防省が開発した人工衛星を利用して、目標物の地球上の位置を求める測位システムで、もともと軍用目的で開発されました。このシステムの本格的な完成は1995年で、人工衛星から送られてくる電波信号を受信して目標物の3次元の位置座標が高精度(最小センチメートル単位以下)で求められます。現在、これを利用した産業や科学へのさまざまな応用研究が行われており、活断層調査への活用もそのひとつです。

日本では、一般に活断層の断層面が通常固着しており、常に活断層に沿って岩盤がズルズルとずれて(クリープ変位)いる可能性は低いと考えられていました。しかし、最近のGPSを利用した地殻変動観測データによると、海洋プレートと大陸プレートの境界で、まさに岩盤がプレート境界面に沿ってズルズルとずれている様子がとらえられています。また、日本列島の測地学的な歪(変位)の状況も得られるようになっていきました。このことから、高密度のGPSを利用した地殻変動観測データと活断層の過去の活動履歴とを組み合わせることにより、精度の高い活断層の活動予測シミュレーションができるものと期待されています。右図は、GPS観測により、活断層の動きを調べるイメージ図です。

### GPS観測の活断層調査への活用

活断層を横断して設定されているGPS観測測線によって活断層による地表の変動状況が観測できると期待されています。

高密度GPS群列観測による地殻変動の検出(イメージ図)



資料編

13

# 気候変動による 海水準変動 (海面高度の変化)

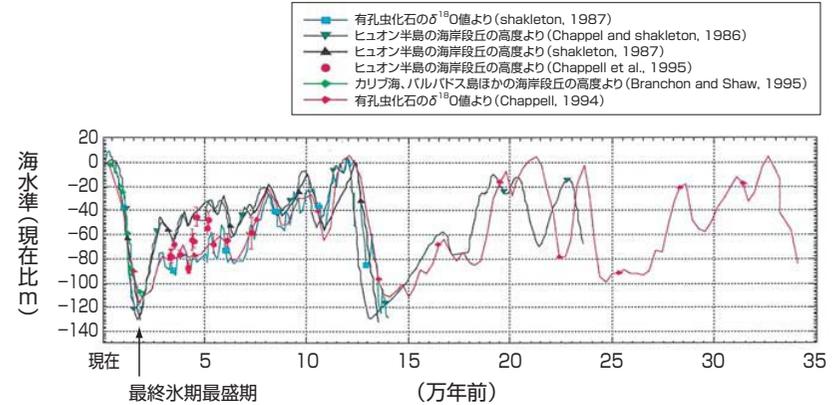
過去約170万年間（第四紀更新世以降）を見てみると、世界各地で大規模な氷河に覆われた時期が何度もあったことがわかります。気候変動によって氷河が周期的に拡大と縮小を繰り返し、それにともなって海水準が上下に変動しています。

右上図には、世界各地で得られた数種類のデータによる海水準変動曲線が示されていますが、過去約35万年間の海水準はおおむね現在より+5メートル～-120メートルで変化してきたことが読み取れます。この図で、著しく海面が低下した約2万年前、約14万年前、約25万年前のそれぞれを最盛期とする数万年間を氷期と呼び、それらの間を間氷期と呼びます。現在は、最も至近の氷期（最終氷期）の後の時期ということで、特に後氷期と呼ばれています。右下図は、海水準が現在より約120メートル低下した最終氷期最盛期の日本列島の様子を描いた図です。これによると、日本でも北海道の日高や中部山岳地域などごく一部に氷河が存在した可能性があることが読み取れます。

海水準の変動は、侵食量や地下水流動に変化をもたらす可能性があることから、地層処分を行う際には、地殻変動による隆起とそれにともなう侵食や地下水流動状況などに、気候・海水準変動による影響を考慮し、地下施設を設置する深度を決めることとなります。例えば、日本の隆起地域における隆起量は、ほとんどの地域で10万年当たり数十メートル～100メートル程度なので、これに海水準変動量の最大値（約120メートル）をあわせて侵食量を見積もります。

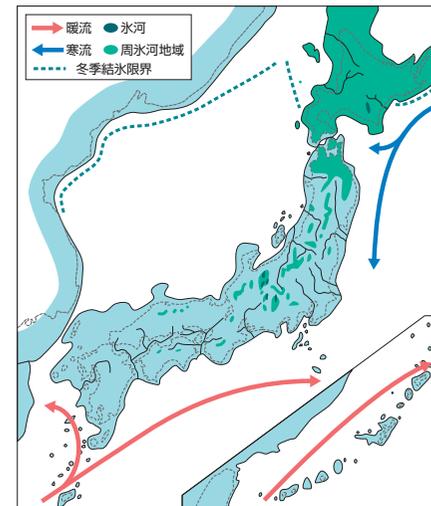
## 過去約35万年間の海水準変動曲線

ほぼ10万年周期の海水準の変化が認められます。



(核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構) 1999)

## わが国の最終氷期最盛期(約2万年前)の古地理図



(米倉ほか 2001を編集)

海岸線や海流の位置、氷河の影響範囲が示されています。



# 地下深部の 地下水の流れをとらえる

## —地下水調査技術—

地層中の地下水の流向・流速をとらえる方法として、資料編⑭で述べたダルシー則に基づき、ボーリング孔を利用して比較的広い範囲の大局的な地下水の流速を間接的に求める方法と、限られた範囲で直接的に地下水の流速を測定する方法について説明します。

### 1. 流速を間接的に求める方法

地下水の流速は、ダルシー則から動水勾配と地層の透水係数の積によって求めることができます。ここで求められる地下水の流速は、地層中の岩石の固体部分をも含めた単位断面を流れる平均的な流速(ダルシー流速)になります。実際の地下水は、地層中の間隙の中だけを流れるため、上記の流速を地層中の間隙率で割ることにより、地層中の直線的な移行経路を仮定した間隙中を流動する平均的な流速(間隙流速)を求めることができます。したがって、地下水の流速を求めるためには、地層の動水勾配、透水係数および間隙率を調査・測定することが必要となります。

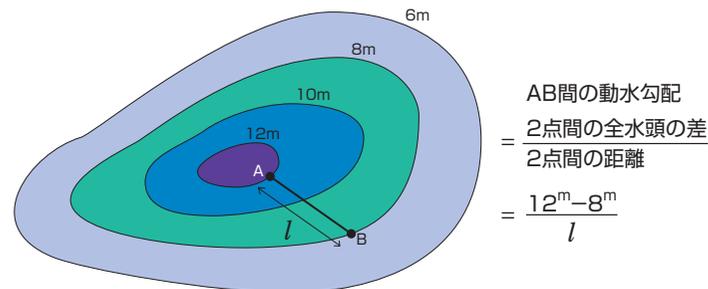
動水勾配は、地層中の全水頭(地下水面の標高(位置水頭)+圧力水頭=水柱の高さで表したものを)を多数点で測定することにより、全水頭分布と2点間の距離をもとに求めることができます(右上図)。間隙水圧を測定するためには、まずボーリング孔を掘削し、流速を測定した深さの上下に止水パッカーを設置してボーリング孔内を区切ります。そして、圧力計により、孔内の区切られた区間の水圧を測定します(右下図左)。

地層の透水係数を測定する方法としては、ボーリング孔を利用する方法があります。間隙水圧の測定と同様に止水パッカーを設置し、測定区間内への注水もしくは同区

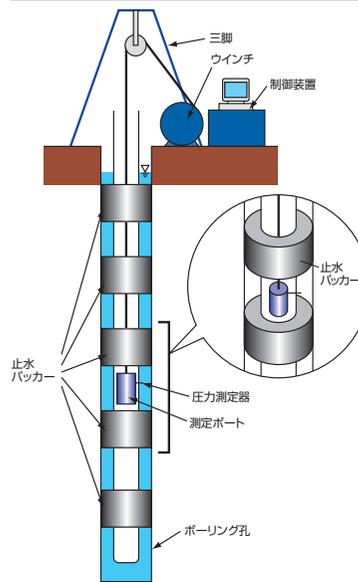
間からの地下水の揚水による水位変化を測定することにより透水係数を求めます(下図右)。

また、間隙率はボーリングコアを用いて室内で測定することができます。

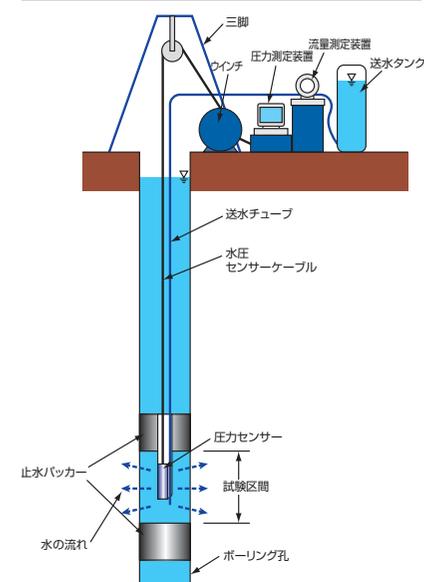
全水頭分布図



間隙水圧測定装置



透水試験装置



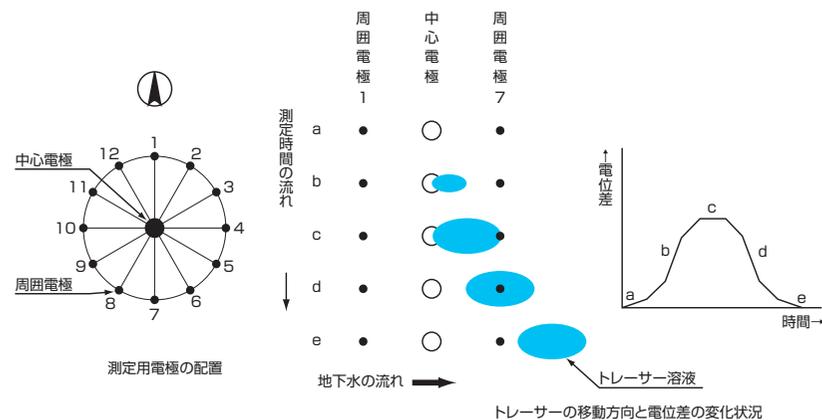
## 2. 流速を直接測定する方法

ボーリング孔を利用して直接的に地下水の流向と流速を測定する方法としては、単孔と複数孔による方法があります。

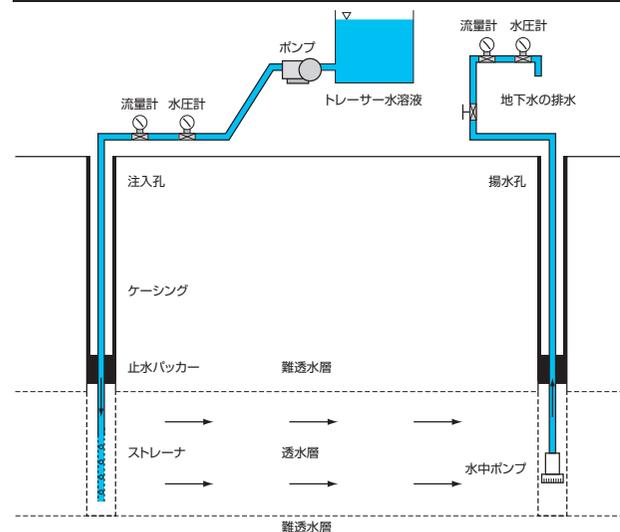
単孔による方法は、電気抵抗や温度の異なる水をトレーサーとしてボーリング孔内に注入し、孔内の電気抵抗や温度の変化を計測する方法や浮遊性微細粒子の移動の様子を測定することで、地下水の流向と流速を求めるものです。右上図は、ボーリング孔の中心に中心電極を、その周囲に12個の周囲電極を設置し、トレーサーとして精製水を孔内の中心電極から流したときのトレーサーの移動と電位差の変化を示しています。この電位差の変化と反応した電極(12電極)の位置から、地下水の流向と流速を知ることができます。なお、トレーサーとは地下水の流向、流速を測定するために利用する物質(温水も含まれます)のことを言います。

複数孔による方法は、少量の色素や微量の同位体元素をトレーサーとして、注入孔から揚水孔への到達時間を測定するものです(右下図)。試験手順は、トレーサーの注入区間(注入孔)と測定区間(揚水孔)を各々止水パッカーによって区切り、両区間の圧力が平衡となっていることを確認後、注入孔からトレーサーを注入し、揚水孔にトレーサーが到着するまで連続的に測定を行います。

### 単孔式流向・流速測定原理図



### 孔間トレーサー試験概要図



## 資料編

# 15 地層の物質移行遅延 メカニズム

地層中の岩石が地下水中の物質の移動を遅らせる(遅延する)メカニズムとしては、大きく分けて、滞留によるものと吸着によるものに分けられます。

地層中の岩石は、さまざまな鉱物が集まったものです。鉱物間には隙間があり、地下水はこの隙間や亀裂の中を移動します。一部の隙間や亀裂には、ほかの隙間や亀裂につながっていないものもあり、この隙間に入り込んだ放射性物質は、滞留されることによって移動できなくなるのです。

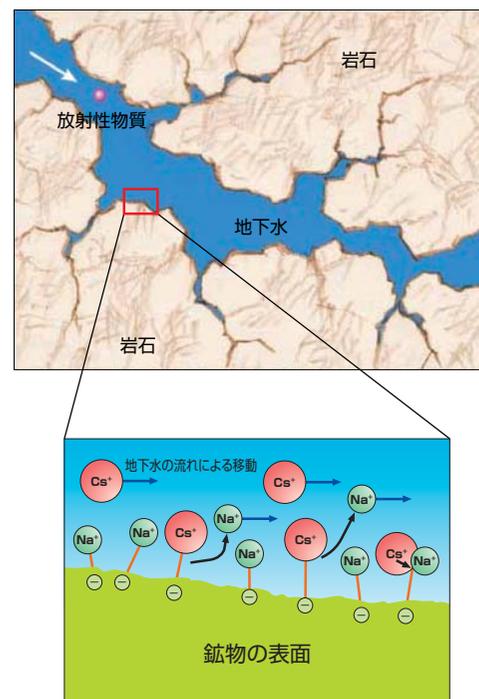
吸着には、物理吸着、静電吸着、特異吸着の3つがあります。物理吸着は、電気的には中性な分子でも、互いに近づけばファン・デル・ワールス力と呼ばれる引力によって互いに引き合い結合する現象です。

静電吸着は、鉱物や物質の電荷の影響で結合する現象のことです。岩石を構成するある種の鉱物は電荷を持っており、そのためにイオン性の分子・原子や極性分子を電気的に吸着してしまうのです。負の電荷を持つ鉱物は、カリウム( $K^+$ )、ナトリウム( $Na^+$ )などの陽イオンを鉱物表面に吸着しています。そこに、別の陽イオンであるセシウム( $Cs^+$ )などが近づくと $Na^+$ と $Cs^+$ が交換され、 $Cs^+$ が鉱物に吸着された状態となります。このような吸着を「イオン交換による吸着」と言います。

また、鉱物に吸着された放射性物質は、条件が変われば再びはずれることもありますが(脱着)、中には金属表面の原子と強く結合し、ほかのイオンと再度交換することなく、場合によってはそのまま鉱物の一部になってしまうものがあります。このような吸着の仕方を「特異吸着」と呼び、鉱物の一部になることを鉱化と言います。

このように、地層には物質を吸着するさまざまな機能があることから、地層中の放射性物質は、地下水よりもさらに遅く移動するのです。

### イオン交換による吸着の模式図



イオン交換による吸着の模式図

## 資料編

# 16 地下水の化学的な性質

高レベル放射性廃棄物等の地層処分では、処分場周辺の地下水が酸素を含まない環境（還元的環境）であることが望ましいと考えられています。これは、酸素が溶け込んだ地下水は、人工バリアであるオーバーパックなどの金属を腐食させやすいためです。

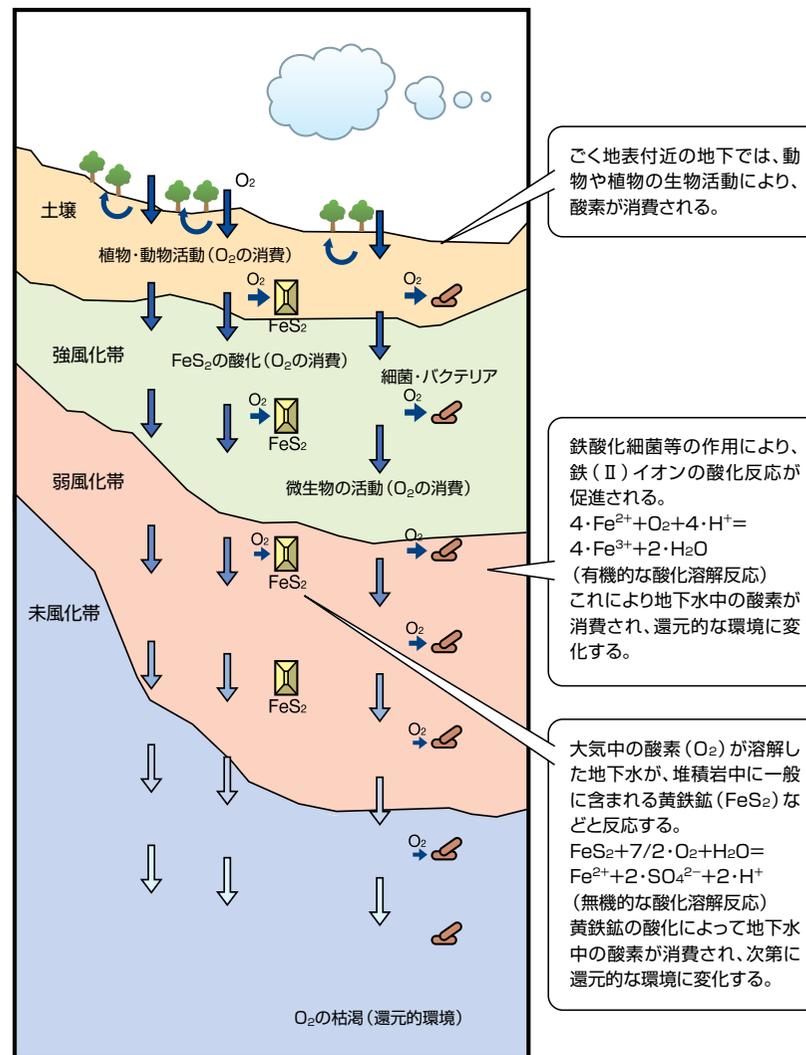
地表に降った雨水は、地表から地下へ浸透していく間に、周囲の土壌や岩盤とさまざまな反応をすることが明らかになっています。地表から地下へ浸透した雨水は、当初は空気すなわち酸素を十分に含んでいます（酸化的環境）が、地下深部へ浸透していくにつれて、土壌中の動物や植物の活動により酸素が消費され、次第に酸素をほとんど含まない還元環境に変化します。

生物活動が盛んな土壌を通った雨水は、さらに地下へ浸透します。浸透した地下水はゆっくり流動しながら、周囲の岩盤とさまざまな反応することによって、異なった水質に変化していきます。例えば、日本に広く分布する堆積岩中どこにでも存在する黄鉄鉱（ $\text{FeS}_2$ ）は、地下水に含まれる酸素と反応し、鉄イオンと硫酸イオンに分解されます。また、バクテリアのような目に見えない微生物は、地表付近から地下深部にわたって広く棲息しており、生物活動にともない酸素を消費したり、鉄イオンなどの酸化反応を促進します。

このように、周囲の土壌や岩盤との反応を繰り返しながら地下深部に向かうに従い酸素は消費され、ほとんど酸素を含まない還元環境で中性から弱アルカリ性の水質が形成されていくと考えられています。還元環境で中性から弱アルカリ性の水質の地下水は、火山地域を除き、日本列島に広く一般的に存在するものと考えられています。ですから、火山活動などに由来すると考えられる強い酸性やアルカリ性を示す地下水が

存在するような地域を事前に注意深く調査し除外することで、地層処分にとって望ましい地下水環境を選定することができます。

### 地下水の化学的性質の変化



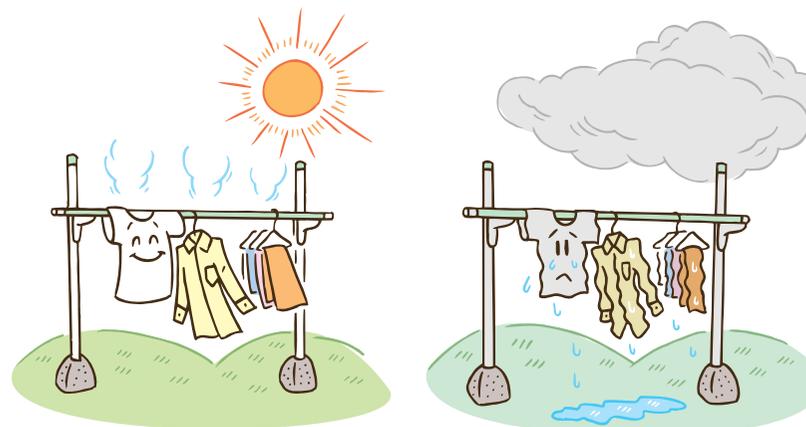
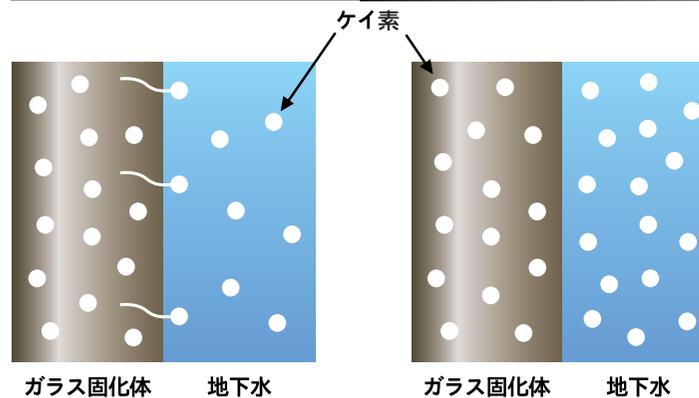
# 17 ガラスの溶解メカニズム

自然界には、数千万年前のガラスが存在していることからわかるように、ガラスは溶解しにくい性質を持っています。

ガラスが溶けるメカニズムはふたつあります。ひとつはガラスを構成する主要鉱物であるケイ素（Si）がゆっくりと地下水に溶ける現象です。この反応は、ガラスに接する地下水中にケイ素がどのくらい含まれるかによります。ガラス固化体周辺の地下水中のケイ素濃度が高ければ、ガラスが溶けるのは抑えられます。ちょうど、湿度の高い環境で、洗濯物がなかなか乾かない状況に似ています。地下水は長い期間、ケイ酸塩鉱物を主成分とする岩と接触しているので、ガラス固化体周辺の地下水の化学的環境は、ケイ素濃度が高い状態だと考えられます。また、地下深部では、もともと地下水の動きが遅く、さらに、オーバーパックの周りの緩衝材が水の動きを抑えています。ですから、ガラス固化体の周辺の地下水はほとんど動かないので、地下水の入れ替えも起こらず、ケイ素濃度が高い状態が長い期間継続します。そのため、ケイ素によるガラス固化体の溶解速度はおのずと抑制されることになります。

もうひとつは、ガラス周辺の地下水がケイ素により飽和している状態でも、ガラスが非常にゆっくりと溶ける反応です。これは、ガラスが地下水と接触している間に、ガラスの骨格であるケイ素以外の原子が溶けて失われ、別のものに変質することにより起こると考えられています。地下の環境では、前者のケイ素による溶解は抑制されることから、地層処分の長期的な安全性には、後者のガラスの変質による非常にゆっくりとした溶解反応のほうが重要だと考えられています。

ケイ素の溶解反応によるガラス溶解メカニズム（模式図）



ケイ素濃度が高い地下水におけるガラスの溶解は、乾燥した天気の良い日には洗濯物が早く乾き、じめじめした日にはなかなか乾かないのと似ています。

# 研究の最前線

## —ガラスの溶解—

ガラス固化体を形成しているホウケイ酸ガラスの溶解速度は、式で表すと次のようになります。

$$\text{ガラスの溶解速度} = \text{初期溶解速度} \times (1 - \text{ケイ素飽和度}) + \text{残存溶解速度}$$

ここで、ケイ素飽和度というのは、地下水中的の実際のケイ素濃度の飽和ケイ素濃度に対する割合です。

この式からもわかるように、ガラス固化体が溶け、周囲の地下水中的のケイ素濃度が飽和濃度に近づくにつれて(1-ケイ素飽和度)の値は0に近づくため、その後は、一定の残存溶解速度に従ってガラス固化体は溶けていくことがわかります。

この残存溶解速度は、ケイ素とは関係なく、ガラス固化体に含まれるホウ素(B)や、ナトリウム(Na)などの可溶性の元素が地下水中に浸出することによって決まると考えられています。ですから、残存溶解速度を把握するためには、ガラス固化体中のこれらの元素がどのように地下水中に浸出するのかを調べるのが重要になります。

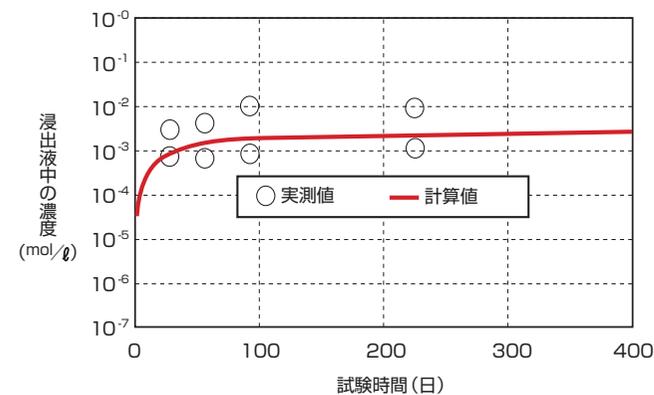
右下の図は、ケイ素濃度が飽和した地下水中的でのガラス固化体からのホウ素の浸出実験の結果です。数百日という長期間の実験から得られた結果などから、温度60℃のガラスの残存溶解速度は $1 \times 10^{-7} \text{g/cm}^2/\text{日}$  (1平方センチメートル当たり、1日に、1万分の1ミリグラム)という値が得られています。この値から直径1センチメートルのビー玉が溶け切るまでの時間を計算すると、約4万年かかることになります。このことから、いかにガラスが水に溶けにくいかがわかります。

### 実際のガラス固化体を用いた溶解実験



(写真提供: 核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構))

### 実際のガラス固化体からのホウ素の浸出実験結果



(動力炉・核燃料開発事業団(現 日本原子力研究開発機構) 1996を編集)

## 資料編

# 18 オーバーバックの腐食メカニズム

オーバーバックに用いられる材料としては、さまざまな金属が検討されていますが、そのひとつに、炭素鋼と呼ばれる鉄を主体とした金属があります。私たちが日頃目にするほかの金属と同様に、炭素鋼も腐食します。しかし、地下深部の腐食の形態は日頃目にするものとはずいぶん異なっているということがわかっています。

処分場が閉鎖された直後は、建設・操業中に大気から取り込まれた酸素 ( $O_2$ ) が緩衝材や埋め戻し材中に含まれており、また地下水にも溶け込んでいます。このため、オーバーバックは最初、この酸素によって腐食が進みます。この腐食は、オーバーバック中の鉄 (Fe) が酸素と反応して、 $Fe(OH)_2$  という物質を表面に生成しながら進行します。これは私たちが日頃目にする腐食と同じで、比較的短期間に腐食が進みます。ただ、この腐食反応のおかげで、取り残された酸素が急速になくなり、最後にはこの反応自体が起きなくなってしまいます。

では、酸素がなくなると腐食は起きないのでしょうか。

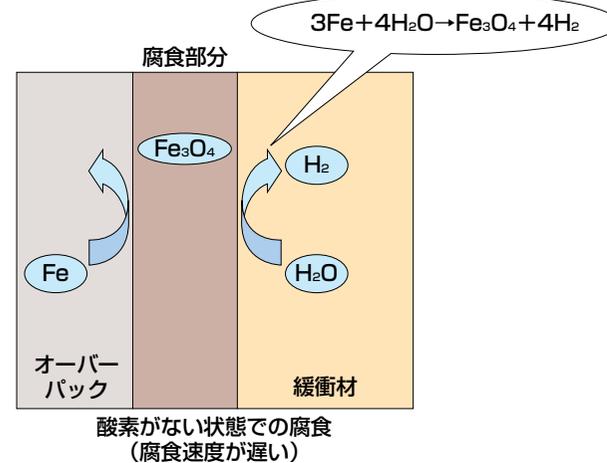
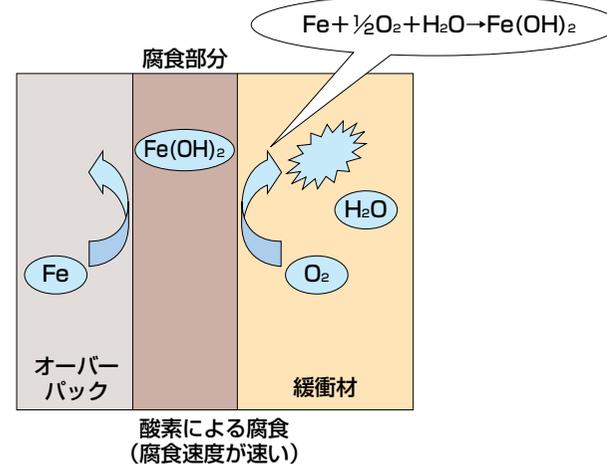
残念ながら、今度は、先ほどとは異なる腐食反応が起きることが知られています。地表から取り込まれた酸素が消費されてしまった後は、周辺の地下水 ( $H_2O$ ) を分解しながら腐食が進みます。これは、オーバーバック中の鉄が、地下水を構成している酸素を無理やり分解し、 $Fe_3O_4$  という物質を表面に作り、地下水中に水素 ( $H_2$ ) を放出する反応です。しかし、地下水を分解して進む腐食は、非常にゆっくりとしか進行しないということが知られています。

これまでの研究から、微生物による影響や腐食厚さのばらつきなど、いろいろな可能性を考えて、1000年間での腐食量は約32ミリメートルだと考えられています。このように、腐食のメカニズムを研究することによって、オーバーバックに1000年の間地下水

をガラス固化体に触れさせないように設計することは、十分に可能なのです。

### オーバーバック腐食メカニズムの模式図

金属の腐食は、酸素がある場合とない場合では異なり、酸素がない状態では、腐食する速度が遅いことが知られています。





## 資料編

# 19 ベントナイトの物質移行遅延メカニズム

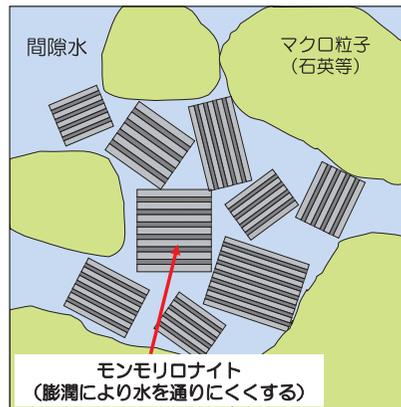
ベントナイトは、モンモリロナイトという鉱物を主成分とする粘土です。このモンモリロナイトは水を吸収することにより膨潤（水を吸ってふくれること）するため、右上図のようにベントナイト中ではとても水が流れにくい状態となります。なお、水の流れやすさを表す値である透水係数（この値が小さいほど水は流れにくい）は、ベントナイトでは $10^{-13} \sim 10^{-11}$  m/s、花崗岩、凝灰岩、砂岩、泥岩等の岩盤では $10^{-10} \sim 10^{-8}$  m/sであり、この値からもベントナイト中での水の流れにくさがわかります。

また、モンモリロナイトは陽イオン交換などにより放射性物質を吸着する能力も有しています。このモンモリロナイトの構造は右下図に示すように結晶が層状になっており、各層はマイナスに帯電しています。そのためともとモンモリロナイトの層と層の間には、マイナスの電荷に引き寄せられているナトリウム ( $\text{Na}^+$ )、マグネシウム ( $\text{Mg}^{2+}$ )、カルシウム ( $\text{Ca}^{2+}$ ) などのプラスの電荷を持つ陽イオンが存在しています。この層間の陽イオンは、電氣的に強く結合しているわけではないので、ほかの放射性物質の陽イオンと置き換わることがあります。これを陽イオン交換と言います。一方、多くの放射性物質はプラス (+) に帯電している状態で移動します。そして、陽イオン交換によってモンモリロナイト層間にとらわれることにより、移動が遅延されるのです。

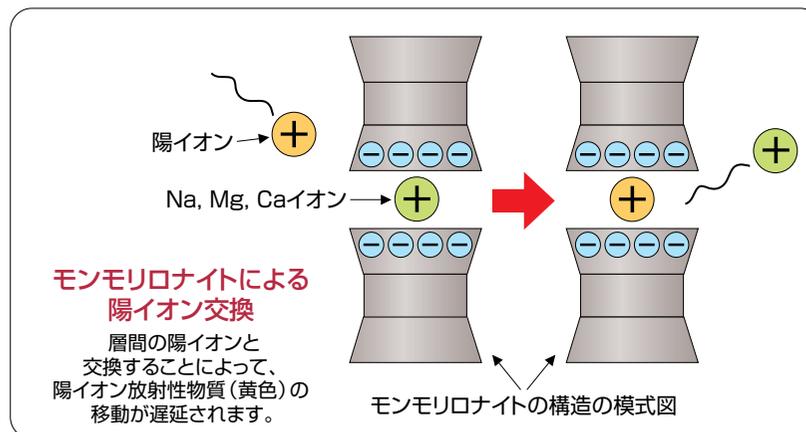
さらに、モンモリロナイトの結晶の端には電荷を帯びた水酸基 ( $\text{OH}^-$ ) があり、この水酸基とイオン化した放射性物質が電氣的に結合して表面に錯体さくたいを形成することによって、放射性物質は吸着されます。このことによっても、放射性物質の移動が妨げられると考えられています。特に、ウラン (U) や、プルトニウム (Pu)、ネプツニウム (Np) などの超ウラン元素と言われる放射性物質は強く吸着され、その移動は非常に遅くなります。

このように、放射性物質がモンモリロナイト結晶の層と層の間などに吸着し拘束されることによって、その移動が遅延されます。

### ベントナイト模式図



### ベントナイト中でのイオンの動きの模式図



## 資料編

# 20 セメント系材料による人工バリアシステムへの影響

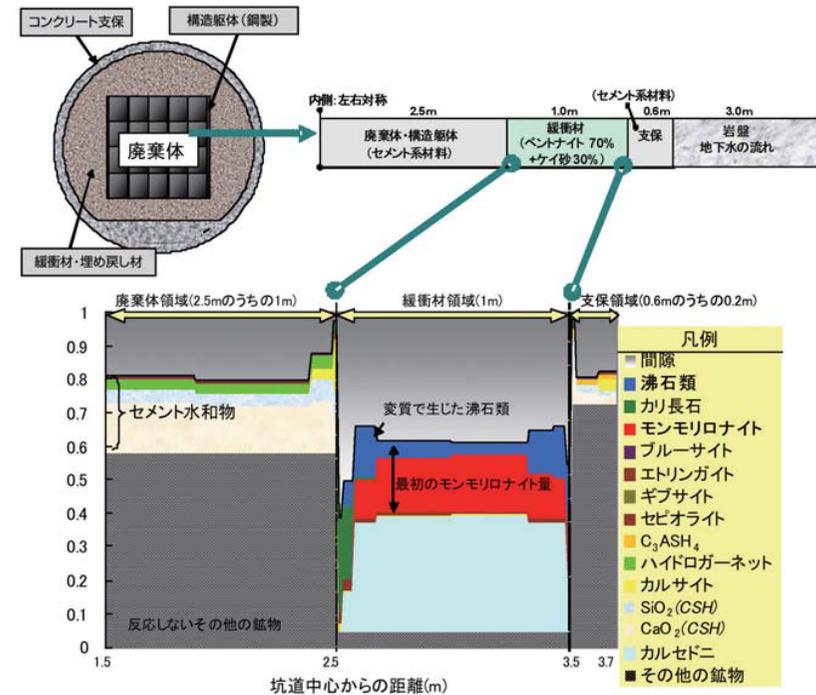
処分場では、処分坑道の支保工、また、廃棄体パッケージ内外の充填材などにセメント系の材料が用いられることが検討されています。

処分場が埋め戻されると、時間が経つに従い、処分場はもとの状態のように地下水で飽和されることが想定されます。そうすると、人工バリア材であるセメントと地下水が接して化学反応を起こし、周辺地下水の組成やpHの変化などが起こる可能性があります。そのような現象がほかの人工バリア材料に及ぼす影響を評価することは、処分の安全性確保の点から重要なことです。特に、緩衝材へ与える影響には着目する必要があります。

例えば、セメント系材料が水と反応すると接触後の水が高アルカリ性になることが分かっています。高アルカリ性の水と緩衝材との相互作用は、緩衝材を変質させ、緩衝材がもともと備えていた止水性や放射性物質の吸着性などの機能に影響を与えることが考えられます。

しかし、緩衝材の長期健全性に係る実験とそれに基づく評価によれば、例えば100センチメートルの厚さの緩衝材の場合、10万年後であっても、緩衝材としての機能を維持できる健全な部分(モンモリロナイト)の大部分は残るとの結果が得られています。

10万年後の人工バリアの鉱物組成(地層処分低レベル放射性廃棄物の解析結果の例)



(日本原子力研究開発機構2007を編集)

## 資料編

# 21

## 地下水シナリオに基づく安全評価結果

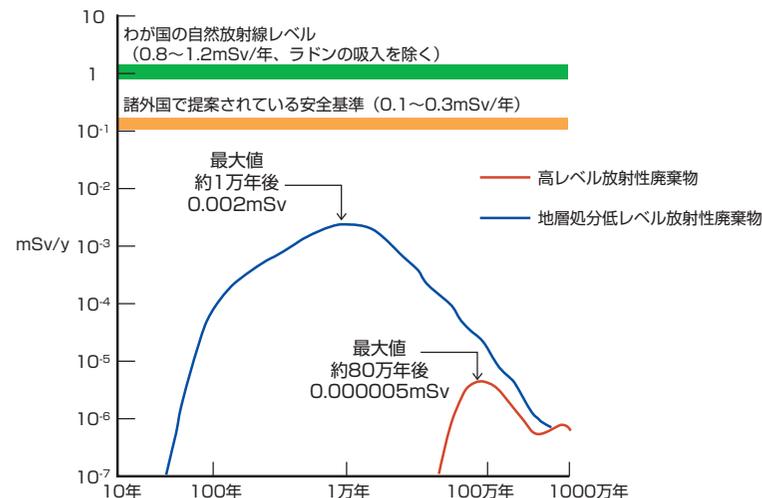
地層処分の安全性を考えるうえで地下水の影響は非常に重要です。地下深くに埋設した廃棄物が人間環境に影響を及ぼす可能性として、地下水シナリオと呼ばれるシナリオが考えられています。高レベル放射性廃棄物の地下水シナリオの基本的な流れを説明します。まず、埋設後、数十年かけて地下水が緩衝材中を浸透し、オーバーパックに到達し、腐食させます。オーバーパックを腐食させた後、地下水はガラス固化体に到達し、少しずつガラスを溶かし、取り込まれていた放射性物質が出てきます。出てきた放射性物質の一部は地下水に溶け、緩衝材中をきわめてゆっくりと拡散しながら移動して地層に至り、地層中の地下水によって地表に出てきます。

地下水シナリオに基づく安全評価結果の例を右図に示します。地層処分低レベル放射性廃棄物の場合ではその最大値は約1万年後で約0.002ミリシーベルト、高レベル放射性廃棄物の場合ではその最大値は約80万年後で約0.000005ミリシーベルトであり、地下水によって放射性物質が最終的に人間の生活環境に運ばれるとしても、それには非常に長い時間がかかります。このことは、地層処分によって、長期にわたって人間の生活環境から放射性廃棄物を隔離できることを示しています。

それでは、その影響の程度(被ばく線量)は、どのくらいなのでしょうか？

図からもわかるように、地層処分低レベル放射性廃棄物と高レベル放射性廃棄物のそれぞれの安全評価結果はともに、諸外国で採用されている基準値より十分に小さく、私たちが日常生活を送っている間に知らずに受けている自然放射線と比べても、数百分の1あるいは数十万分の1とはるかに小さいのです。

### 高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の安全評価結果



(核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構) 1999、  
電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構) 2005をもとに作成)

# 地層処分による放射線の影響

私たちは自然からの放射線の中で生活をしていて、普通に暮らしている分には放射線の健康影響に脅威を覚えるということは全くありません。私たちすべては、生まれてからそのような環境の中で暮らしているから当然のことと言えば当然です。また、私たちは、健康診断の際に胸部や胃部のX線検診により、肺や胃に腫瘍などの異常がないかどうか通常1年に1回の検査を行っています。この検診の際には、私たちの体の一部は放射線にさらされますが、私たちは放射線による潜在的な悪影響のリスクよりも病変の早期発見というメリットを重視して受診しているのです。

地層処分は、それぞれの人にとって直接のメリットは感じられないため、医療被ばくと同じに扱うことはできません。

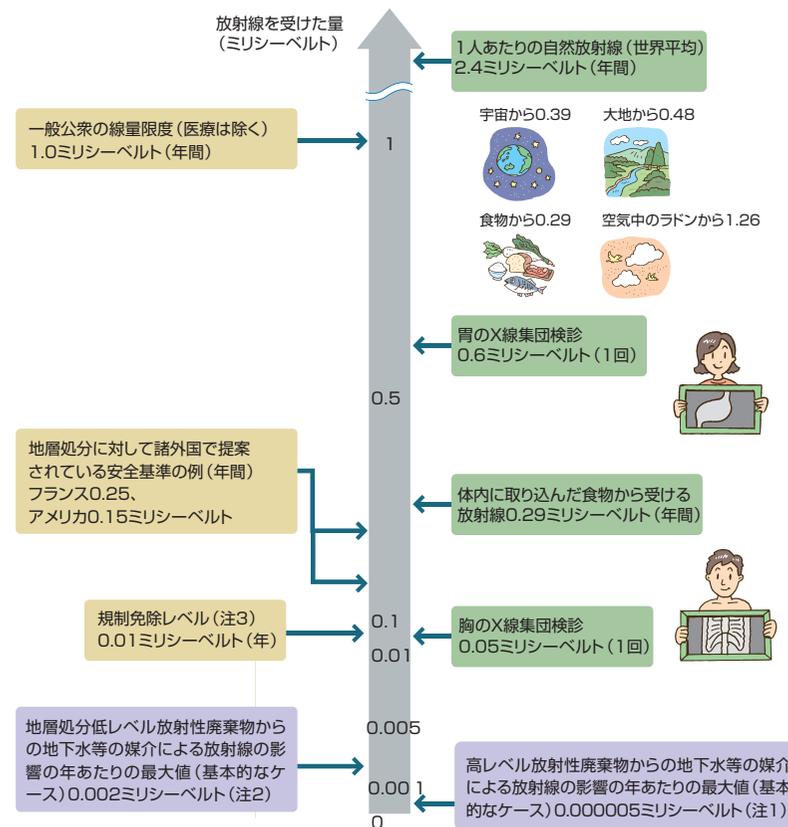
原子力発電や放射線の利用により発生する放射性廃棄物の安全な取り扱いのために、どの程度の被ばく線量までなら許容してよいかという基準値の設定は重要なことです。世界各国はそれぞれの基準を設定していますが、国際放射線防護委員会(ICRP)は、各国において基準を設定するための国際共通的な考え方を示しています。

地層処分を行う放射性廃棄物の中にはさまざまな放射性物質が含まれていて、それらが放出する放射線が人間の生活環境へ影響を及ぼさないようにすることが地層処分の安全確保の中心的課題となっています。

地層処分では、放射性物質は、地下300メートルより深い地層中に人工バリアと天然バリアからなる多重のバリアシステムの中にしっかりと閉じ込められます。

処分場から放射性物質が出たとしても、ゆっくりとした地下水の流れの中を途中で地層中に吸着されながら移動し、その間にも放射性崩壊により減衰するため、最終

的に生活環境に到達する放射性核種の量はわずかです。このわずかな放射性物質による被ばく線量は、もともと体内にある放射性物質や、自然の放射線や医療行為などの人工的な被ばく線量に比べてもかなり低い値になっているのです。



(注1) 「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次まとめ—」(核燃料サイクル開発機構、平成11年)に示された、レファレンス・ケースの値。年あたりの値が最大になるのは処分場の閉鎖の約80年後と評価されています。  
 (注2) 「TRU廃棄物処分技術検討書—第2次TRU廃棄物処分研究開発の取りまとめ—」(電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、平成17年)に示された、レファレンス・ケースの値。年あたりの値が最大になるのは処分場の閉鎖の約17年後と評価されています。  
 (注3) ある放射線源について、それによる健康への影響が無視できるほど小さく、放射性物質として扱う必要がないことから、放射線防護に係る規制の対象としない放射線影響のレベル(国際放射線防護委員会、publication 46)

# NUMOとは

原子力発電環境整備機構 (NUMO、ニューモ)は、2000年6月に公布された特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律 (最終処分法)に基づき、同年10月に通商産業大臣 (現 経済産業大臣)の認可法人として設立されました。

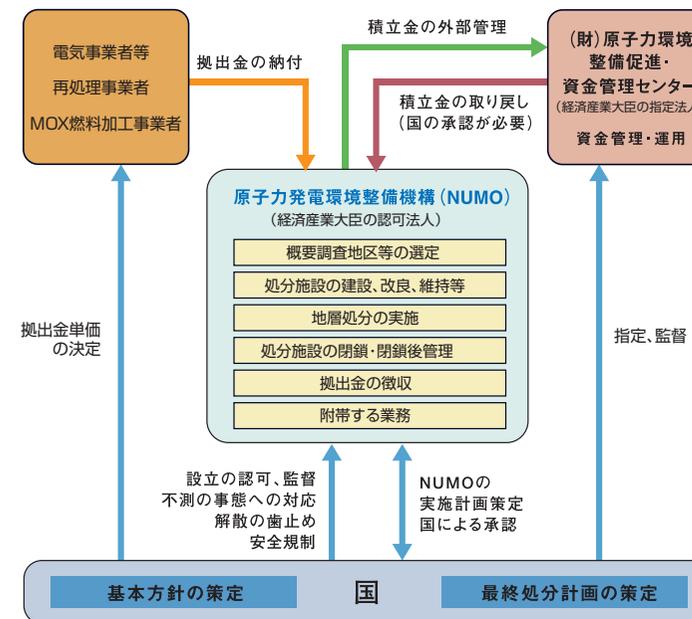
NUMOは、地層処分事業の実施主体として、処分施設の建設地の選定に向けたさまざまな活動を実施してきました。2002年12月からは、処分候補地の公募を全国の市町村から行なっています。

また、2008年4月には、最終処分法の改正にともない、地層処分低レベル放射性廃棄物もNUMOの対象廃棄物に加えられました。

わが国では、NUMO設立以前から地層処分に係わる研究開発が、日本原子力研究開発機構 (JAEA)や電力会社および関連機関で進められており、すでに技術基盤は確立しています。そのような研究開発基盤の上にたち、NUMOは、事業化の観点から今後必要とされる技術開発を計画的かつ効果的に着実に実施し、事業に活用します。

また、地層処分は、原子力発電を行っている世界の国々に共通の推進すべき事業です。このため、研究開発だけでなく、事業化にあたり必要なことについても各国の経験を共有し、NUMOの事業推進に活かす活動にも積極的に取り組んでいます。

NUMOは、処分事業を安全かつ確実に進めていきます。



## 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律

(平成十二年六月七日法律第十七号)

(最終改正：平成一九年六月一三日法律第八四号)

第五条 **原子力発電環境整備機構** (以下「機構」という。)は、経済産業省令で定めるところにより、最終処分計画に従い、特定放射性廃棄物の最終処分の実施に関する計画 (以下「実施計画」という。)を作成し、経済産業大臣の承認を受けなければならない。これを変更しようとするときも、同様とする。

# 用語集

## 2章

### 使用済燃料

軽水炉などの原子力発電所の原子炉内で、ある一定の燃焼（核分裂）を終了した核燃料を使用済燃料と言う。使用済燃料には、核分裂反応によって生成した核分裂生成物や核分裂生成物がさらに変化して生成する崩壊生成物などが含まれる。

### 再処理工場

使用済燃料を、再び燃料として使用できるウランやプルトニウムと、不要物としての高レベル放射性廃棄物に分離し、ウランまたはウラン-プルトニウム混合物を回収する施設。

### MOX燃料工場

使用済燃料などから回収されたプルトニウムをウランと混合して作られる酸化燃料（MOX燃料：Mixed Oxide燃料の略）の成型加工工場。

### 高レベル放射性廃棄物

原子炉の使用済燃料から再処理により有用物質を分離して生じる廃液またはそれを固化したものを言うが、一般には後者の意味でガラス固化体を指して用いられることが多い。本冊子では、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」における「第一種特定放射性廃棄物」という語の代わりに「高レベル放射性廃棄物」を用いている。「第一種特定放射性廃棄物」には、海外再処理により発生するTRU廃棄物と一定の基準に基づき交換され交換されるガラス固化体も含まれる。

### 地層処分低レベル放射性廃棄物

TRU廃棄物の中には、長期間にわたり環境に影響を及ぼすおそれがあるため、高レベル放射性廃棄物と同様に深い地層へ処分する必要のある廃棄物があり、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」では「第二種特定放射性廃棄物」と特定されている。本冊子では、「地層処分低レベル放射性廃棄物」と呼ぶ。

### TRU廃棄物

再処理工場およびMOX燃料工場の操業および解体にともなって発生する低レベル放射性廃棄物。ウランより原子番号が大きい放射性核種（TRU核種：Trans-uranium）を含む廃棄物であることからTRU廃棄物と呼ばれる。

### ハル・エンドピース

使用済燃料集合体をせん断するときに取り除かれる燃料集合体の末端部をエンドピース、燃料棒を束のまま数センチメートルの長さに細断し、内側の燃料を硝酸に溶解した後、後に溶け残った被覆管の断片をハルと言う。

### 吸着

気相または液相中の物質が、その相と接触するほかの相（液相または固相）との界面において、相の内部と異なる濃度で平衡に達する現象。

### 埋め戻し材

放射性物質が漏れにくくするために、処分のために掘削した坑道や立坑（地上施設と地下施設を結ぶトンネル）等を埋めるもの。材料としては粘土などが考えられている。

### 構造躯体

廃棄物を置くために坑道内に設置される構造物。コンクリートや金属の構造躯体が考えられている。

### 支保

地山からの荷重に十分対抗し、地山の崩壊、肌落ちなどを防止して、所定の掘削断面を維持し、かつ能率的に坑内作業が行われるように坑道内に設ける地山支持構造物。

## 3章

### 高速炉

プルトニウムとウランの混合酸化燃料を用い、核分裂連鎖反応が高速中性子によって維持される原子炉。使用した燃料よりもさらに多くの燃料を生み出すため、夢の原子炉とも言われている。この高速炉を用いて長寿命核種を短寿命核種あるいは安定な核種に変換する研究が進められている。ただし、水と激しく反応するナトリウムを冷却材として使用するので、使用に関しては細心の注意と技術が必要とする。

### 加速器

電場や磁場を使って電子や陽子などの荷電粒子を加速する装置。加速器は物理の世界で素粒子を探ることやがんの治療方法として医療の現場でも使われている。また、高速炉と並び核種変換のための装置としての研究も進められている。

## 4章

### 地殻変動

地球内部の原因によって生じる地殻の変位・変形やその過程を言う。造山運動や造陸運動などのきわめて緩慢な現象、地震時に地表に断層が現れる現象や火山噴火などが、地殻変動に含まれる。

### 火山活動

地下深部でできたマグマが地殻に貫入したり、地表に噴出する現象、あるいはマグマにより地下水、岩盤などにさまざまな物理化学的な影響を生じさせる現象などを言う。

### 地震活動

地下の岩盤に力が加わり、それが岩盤の破壊強度を上回った際に生じる急激な破壊現象、およびこれによって生じる大地の揺れ（地震動）を言う。

---

## 断層活動

地下の岩盤に力が加わり、それが岩盤の破壊強度を上回った際に急激な破壊現象(すれ破壊)が生じ、ある広がりを持った岩盤の食い違い面、すなわち断層面が形成される一連の現象を言う。

---

## 第四紀

約260万年前以降から現在までの期間、これまでは約170万年前からとされていたが、2009年に再定義された。このため、本冊子では、従来の「第四紀」を「第四紀更新世以降」と改める。

---

## 地表踏査

地表面で行う現地調査を言う。地表で確認できる事項、例えば、地層・岩石の分布、地質構造、活断層の分布等を調べる。

---

## プレート／プレートテクトニクス／プレート運動

地球の表層部(リソスフェア)が、いくつかのブロック(プレート)に分かれていて、それらがほとんど変形しないで水平運動しているという考えに基づく理論を言う。海嶺で生成された海洋プレートは、アセノスフェアの上を水平に移動し、海溝で沈み込むことによって、地球内の物質は循環すると考えられている。このようなプレートの移動、プレート間の相互運動によって地球上のさまざまな地学現象が説明できるとされる。例えば、日本列島周辺では、海側のプレートが海溝(トラフ)で陸側のプレートの下にもぐり込んでいる。

---

## マグニチュード

地震の大きさ(規模)を表す尺度を言う。地震による揺れ(地震動)の大きさを表す震度とは異なり、岩盤の破壊現象の規模を意味する。

---

## 歪(ひずみ)

物体に力を加えたときの物体の形状変化のことを言い、変形とも呼ばれる。単位長さ当たりの変位で定義される。

---

## 破壊強度

物体が外力によって破壊するまでの(破壊せずに持ちこたえられる)最大応力。破壊強さ、破壊応力とも言う。

---

## 弱面

本冊子では、岩盤内部に存在する微視的な割れ目や、岩盤が破碎されて周囲に比べて力学的な強度が小さくなっている断層・破碎帯を指す。

---

## 地形判読

本冊子では、航空写真や地形図などを用いて、地表の形態(地形)を読み取る作業(地形区分など)を指す。

---

## トレンチ調査

主に、活断層の活動履歴を明らかにすることなどを目的に、細長い溝(トレンチ)を掘って行う地質調査を言う。断層線(面)を横切る方向に溝を掘り、断層による地層のすれ量、地層の年代などを測定して、活断層の活動年代を調べる。

---

## 物理探査

人工的に発生させた地震波や電磁波等を利用して、空中、地上、水上などから地下の状況を間接的に調査することを言う。地質構造の状況、鉱床の有無などを調査することができる。

---

## 5章

---

### 炭素鋼

炭素を2パーセント以下含む鉄。その性質は炭素含有量による。加工が容易で廉価なので、種々の圧延鋼材・ボルト・ナットなどに広く利用されている。

---

### ベントナイト

モンモリロナイトという鉱物を主成分とする粘土の一種で緩衝材に用いる。

---

## 7章

---

### 原則決定

原子力法で定められている政府による原則決定とは、原子炉施設や放射性廃棄物処分場などの重要な原子力施設について、具体的な建設許可手続きに入る前のできる限り早い段階に、施設建設が原則として社会全体の利益に適合することを、判断するものである。なお、原則決定が有効となるためには、議会の承認が必要である。また、実際に原子力施設を建設・操業するにあたっては、それぞれ別個の許可手続きを行う必要がある。

---

## 資料編

---

### 岩石

地球上層部(地殻と少なくとも上部マントル)を構成する物質を言う。鉱物の集合体からなる。堆積岩、火成岩、変成岩に分類される。

---

### 鉱物

天然に産出する非生物で、その固体の中のどの部分もほぼ一樣な形態をなし、一樣な化学的・物理的性質を持つものを言う。岩石を構成する。

---

### リソスフェア

地球の地殻とマントルの最上部の岩盤を覆う厚さ数十キロメートルから200キロメートル程度の硬い層を指すことが多い。岩石圏とも言われる。

---

## アセノスフェア

リソスフェアの下にあり、相対的に高温かつ流動的な層である。アセノスフェアの存在によってプレート間の相対運動が可能になっている。軟弱圏とも言われる。

---

## 第四紀火山

「日本の第四紀火山カタログ」(1999)では、約200万年前以降に活動したことが認められる火山を第四紀火山とし、日本全国で348の第四紀火山が記載されている。なお、第四紀は、一般に約260万年前以降を言うが、この文献では約200万年前以降に活動したものを第四紀火山としている。

---

## 歪エネルギー

物体(弾性体)に歪(変形)を起こさせるためには、外から力を加えなければならない。したがって変形した物体(弾性体)はエネルギーを貯えており、これを歪エネルギーまたは弾性エネルギーと言う。

---

## 地震断層

地震の際、地表に現れたことが歴史的に記録されている断層を言い、地表地震断層とも言う。

---

## 弾性波

弾性体(岩盤)の中を伝わる波を言う。波の進行方向の圧縮・膨張が伝わる縦波と、それに直交する方向のずれが伝わる横波とがある。流体内では弾性波としての横波は起こり得ない。

---

## 変動地形

断層や褶曲など、地殻変動にともなって形成された地形全般を言う。活断層に沿って見られる、河川流下方向と直交する直線上の崖、屋根や河川の系統的な屈曲の連続などは、特に「断層変位地形」と呼ばれる。「リニアメント」を断層変位地形である可能性がある地形を指す用語として使う場合もある。

---

## 震源断層

地下深部において、地震の原因となる岩盤の急激なずれ破壊を起こした断層を言う。地震波動解析や地震に伴う地殻変動から推定される。

---

## 間隙率

岩石や地層に存在する全間隙(すきま)部分の体積の、その間隙を含む岩石や地層の全体積に占める割合を言う。空隙率とも言う。全間隙のうち水が流動できるような径を持つ間隙を有効間隙と称し、その全体積に占める割合を有効間隙率と言う。

---

## ボーリングコア

地下の地質状況などを調べるため、地中に直径数センチメートル~十数センチメートル程度の円筒状の孔を掘るボーリング(試錐)調査で採取される岩石や土の試料を言う。

---

## 止水パッカー

ボーリング孔内において、地下水の移動を遮断するための樹脂・ゴム製の止水装置を言う。

---

## トレーサー

物質の移動を調査するために投入される微量の物質、またはその対象地に含まれる物質を言う。地下水調査に用いられるトレーサー物質は、移動する際に保存されることが必要であるので、地下水あるいは地下水中の物質とは明らかに異なる特徴的な形態や物理化学的な性質を有するものが用いられる。

---

## 精製水

蒸留・濾過・紫外線殺菌・イオン交換などの工程を経て精製された水を言う。

---

## モンモリロナイト

人工バリア材料の候補として検討されているベントナイトの主要構成鉱物であり、スメクタイト族に分類される。スメクタイト族は層状の鉱物であり、層間に水を含むことで膨潤する特性を有し、また陽イオン交換性を有する。

---

## ファン・デル・ワールス力

ふたつの中性の安定な分子の間に働く分子間力、特にその中で遠くまで影響力を持つ弱い引力部分を指す。

---

## 分子

1個の独立の粒子として行動すると考えられる原子の集合体を言う。

---

## 原子

原子は原子核とその周りを回転している電子から構成される。原子の質量の大部分は原子核のものである。

---

## イオン交換

ある種の不溶性の物質を電解質の水溶液中に浸しておくと、その物質中のイオンが溶液中に出て、溶液中のイオンがその物質中に取り込まれる現象。

---

## 水酸基

OH<sup>-</sup>で表される基。無機化合物中ではイオン結合性で、水溶液としたときは電離して水酸化物イオンとなりアルカリ性を呈する。有機化合物中では共有結合性の官能基となり、水溶液はアルカリ性を示さず、中性あるいは水酸基中の水素を電離して微酸性を呈する。

---

## 錯体

中心イオンまたは中心原子に、別種のイオン、分子、多原子イオンが結合した集合体。

# 参考文献一覧

## 1章「放射線の基礎知識」

項目	記載内容	参考文献
1章	史実	日本原子力文化振興財団(1995):放射線のはなし～その発見から,測定方法,身の回りでの利用まで～.
1章-2	自然放射線から受ける線量	日本原子力文化振興財団(2009):「原子力」図面集.
	自然放射線/人工放射線による被ばく量	保健物理, 36(2), 149～158:原子放射線の影響に関する国連科学委員会の2000年報告について. (財)原子力安全研究協会(1992):生活環境放射線(国民線量の算定).
	日常生活と放射線	日本原子力文化振興財団(2009):「原子力」図面集.
1章-3	放射線のいろいろな利用	日本原子力文化振興財団(2009):「原子力」図面集.
1章-4	全般	株式会社岩波書店(1996):理化学辞典第4版11刷 他.

## 2章「放射性廃棄物とはどのようなものか」

項目	記載内容	参考文献
2章-1	各種電源別の二酸化炭素排出量	電力中央研究所(2001):ライフサイクルCO <sub>2</sub> 排出量による原子力発電技術の評価
2章-4	ガラス固化体の含有核種	核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性. JNC TN1400 99-020.
	ガラス固化体発熱量	核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性(別冊). JNC TN1400 99-024.
	放射線の強度	核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性(別冊). JNC TN1400 99-024.

## 3章「なぜ地層処分なのか」

項目	記載内容	参考文献
3章-2	分離変換技術	原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会(平成12年3月31日):長寿命核種の分離変換技術に関する研究開発の現状と今後の進め方.
	国の報告書	原子力委員会(平成12年11月):原子力の研究,開発および利用に関する長期計画.
3章-4	国の報告書	原子力委員会 放射性廃棄物対策技術専門部会(昭和51年6月):放射性廃棄物対策に関する研究開発計画中間報告.  原子力委員会(昭和51年10月):放射性廃棄物対策について.  原子力委員会 放射性廃棄物対策専門部会(昭和55年12月):放射性廃棄物処理処分にに関する研究開発の推進について.  原子力委員会 高レベル放射性廃棄物処分懇談会(平成10年5月):高レベル放射性廃棄物処分に向けての基本的考え方について.
3章-5	IAEAの原則と基準	IAEA(1989):Safety Series No.99, IAEA Safety standard, Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Wastes.
	OECD/NEA, 長期安全性に関する報告書	OECD/NEA(1991):Disposal of radioactive waste, Can long-term safety be evaluated?., An International collective opinion.
	OECD/NEA, 環境と倫理に関する報告書	OECD/NEA(1995):The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-Lived Radioactive Wastes, A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee of the OECD Nuclear Energy Agency.
4章	全般	核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性. JNC TN1400 99-021.

## 4章「日本列島の地殻変動」

項目	記載内容	参考文献
4章	全般	核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性. JNC TN1400 99-021.

項目	記載内容	参考文献
4章-1 火山の面積		原子力発電環境整備機構(2009):概要調査地区選定上の考慮事項.
		中田英二・田中和広(2001):マグマの貫入が岩盤に与える影響—活火山周辺に分布するマグマ噴出跡の分布—. 日本応用地質学会予稿集.
	マグマ発生深度	巽 好孝(1995):沈み込み帯のマグマ学. 東京大学出版会.
	マグマの上昇過程	阿部信太郎・青柳恭平・土志田潔・小田義也(2003):地震波トモグラフィによるマグマ上昇過程の解明—伊豆半島北部箱根火山地域の上層マントルから地殻浅部に至る構造とマグマの供給について—. 電力中央研究所報告, UO3023.
	第四紀火山分布	核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性. JNC TN1400 99-021.
プレート配置の変遷		Jolivet,L.,Tamaki,K. and Fournier,M.(1994): Japan sea,Opening History and Mechanism: A Synthesis.Jour.Geophys.Res.99,22237-22259.
		Seno,T. and Maruyama,S.(1984): Paleogeographic Reconstruction and Origin of the Philippine Sea.Tectonophysics,102,53-84.
		宇都浩三(1995):火山と年代測定:K-Ar, <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar年代測定の現状と将来. 火山, 40,S27-S46.
		鎌田浩毅(1999):西南日本弧と琉球弧の会合部に見られる6Maと2Maの広域テクトニクス転換の重要性. 月刊地球, 21,630-636.
	木村政昭(1990):沖縄トラフの発生と形成. 地質学論集, 34,77-88.	
	瀬野徹三(1993):日本付近のプレート運動と地震. 科学, 63,711-719.	
4章-2 地震分布		文部科学省地震調査研究推進本部地震調査委員会 日本の地震活動—被害地震から見た地域別の特徴—〈追補版〉.  気象庁:地震・火山月報(カタログ編).

項目	記載内容	参考文献
4章-2 鳥取地震記録		原子力発電技術機構(2002):平成13年度原子力発電立地調査に関する報告書その1 地震波伝ば特性評価法調査.
	地下水流動・水質	核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性. JNC TN1400 99-021.
4章-3 地震活動		文部科学省地震調査研究推進本部地震調査委員会 日本の地震活動—被害地震から見た地域別の特徴—〈追補版〉.
	断層の発生	土木学会原子力土木委員会地下環境部会(2001):概要調査地区選定時に考慮すべき地質環境に関する基本的考え方. 土木学会.  Tsuneishi,Y.,Yoshida,S.and Kimura,T.(1975):Fault-forming process of the Komyo fault in central Japan. Bull.Earthq.Res.Inst.,50,415-442.
	活断層の定義	中田 高・今泉俊文(2002):「活断層詳細デジタルマップ」付図 200万分の1日本列島活断層図. 東京大学出版会.
	野島断層	中田 高・岡田篤正編(1999):野島断層【写真と解説】. 東京大学出版会.
	活断層分布	中田 高・今泉俊文(2002):「活断層詳細デジタルマップ」付図 200万分の1日本列島活断層図. 東京大学出版会.
4章-4 隆起特性		核燃料サイクル開発機構(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性. JNC TN1400 99-021.
	隆起・沈降量分布	原子力発電環境整備機構(2004):概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠.
	侵食速度図	藤原 治・三箇智二・大森博雄(1999):日本列島における侵食速度の分布. サイクル機構技報, No.5.

## 5章「地層処分の安全のしくみ」

項目	記載内容	参考文献
5章 全般		核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性. JNC TN1400 99-022.
5章-2 人工バリアの構成図		原子力発電環境整備機構(2009):処分場の概要.
5章-3 ガラスの変質速度		動力炉・核燃料開発事業団(現 日本原子力研究開発機構)(1993):動燃技報 No.85 高レベル放射性廃棄物処分研究特集.
5章-4 1000年間の腐食量		核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性. JNC TN1400 99-022.
	出雲大社出土鉄斧の図	核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)業務委託報告書(2003):土壌中の考古学的金属製品の腐食に関する調査(Ⅲ).
5章-7 全般		原子力発電環境整備機構(2009):概要調査地区選定上の考慮事項.  核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性. JNC TN1400 99-021.
5章-8 全般		原子力発電環境整備機構(2009):処分場の概要.

## 6章「遠い将来の安全性を確かめることができるか」

項目	記載内容	参考文献
6章 全般		核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性. JNC TN1400 99-023.
6章-3 シミュレーションの絵		核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)ホームページ: <a href="http://www.jaea.go.jp/">http://www.jaea.go.jp/</a>

## 7章「地層処分に関する国内外の状況」

項目	記載内容	参考文献
7章-1 使用済燃料処分の安全評価書		Vieno, T. and Nordman, H.(1999): Safety Assessment of Spent Fuel Disposal in Håstholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara, TILA-99, POSIVA 99-07.
	使用済燃料の最終環境影響評価(EIA)報告書	Posiva Oy(1999): The Final Disposal Facility for Spent Nuclear Fuel - Environmental Impact Assessment Report.
	使用済燃料の最終処分施設サイトに関する閣議の原則決定	Decision in Principle of the Council of State on a Final Disposal Facility and Site for Spent Nuclear Fuel, Dec. 2000.
	調査段階に先行する手法, サイト選定, プログラムの補足説明書	SKB(2000): Integrated account of method, site selection and program prior to the site investigation phase.
	放射性廃棄物の管理と処分方法のための研究, 開発, 実証プログラム2001	SKB(2000): Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste, (RD&D-Programme 2001), TR-01-30.
	核廃棄物政策法	Nuclear Waste Policy Act (Public Law 97-425, Jan. 7 of 1983/ Public Law 100-203, Dec. 22 of 1987.12.22/ Public Law 102-486, Oct. 24 of 1992).
	サイト特性の評価・確認報告書	DOE(2001): Yucca Mountain Science and Engineering Report(DOE/RW-0539).
	処分場建設許可申請	DOE Marks Milestone in Submitting Yucca Mountain License Application, FOR IMMEDIATE RELEASE, Tuesday, June 3, 2008
7章-2 放射性廃棄物管理研究に関する法律(1991年制定)		Loi No. 91-1381 du 30 decembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des dechets radioactifs.
	Meuse県Bureへの地下研究所の建設・操業許可に関する政令(1999.8.3)	Decret du 3 aout 1999 autorisant l'Agence nationale pour la gestion des dechets radioactifs a installer et exploiter sur le territoire de la commune de Bure(Meuse) un laboratoire souterrain destine a etudier les formations geologiques profondes ou pourraient etre stockes des dechets radioactifs.

項目	記載内容	参考文献
	候補サイトの選定	<a href="http://www.andra.fr/index.php?id=actualite_1_1_1&amp;art=5292">http://www.andra.fr/index.php?id=actualite_1_1_1&amp;art=5292</a>
	技術報告書93-22:クリスタリン(Kristallin)-I:安全評価報告書	NAGRA(1994):Technical Report 93-22: Kristallin-I: safety assessment report.
	放射性廃棄物管理共同組合(NAGRA)2002年12月20日プレスリリース:処分の実現可能性実証プロジェクト報告書	<a href="http://www.nagra.ch/english/aktuell/f_aktpr esse.htm2002.12.20">http://www.nagra.ch/english/aktuell/f_aktpr esse.htm2002.12.20</a>
	候補地域の選定	nagra annual report 2008

## 資料編

項目	記載内容	参考文献
資料①	全般	日本原子力文化振興財団(1995):放射線のはなし~その発見から,測定方法,身の回りでの利用まで~.
	核種の半減期	(株)岩波書店(1996):理化学辞典第4版11刷.
資料②	全般	日本原子力文化振興財団(1995):放射線のはなし~その発見から,測定方法,身の回りでの利用まで~.
資料③	放射性廃棄物の種類と処分の概要	経済産業省資源エネルギー庁(2005):原子力2005.
資料④	処分場	原子力発電環境整備機構(2009):処分場の概要.
資料⑤	地層処分施設	原子力発電環境整備機構(2009):処分場の概要.
資料⑥	シガーレイクウラン鉱床の地層のしくみ	Atomic Energy of Canada Limited(1996): Underground Research Laboratory.
資料⑦	全般	日本物理学会(1982):地球の物理.丸善.
資料⑧	マグマ発生深度	巽 好孝(1995):沈み込み帯のマグマ学.東京大学出版会.
	プレート配置	瀬野徹三(1995):プレートテクトニクスの基礎.朝倉書店.

項目	記載内容	参考文献
		文部科学省地震調査研究推進本部地震調査委員会 日本の地震活動一被害地震から見た地域別の特徴一<追補版>.
	プレートの速度	瀬野徹三(1995):プレートテクトニクスの基礎.朝倉書店.
	日本列島周辺のプレート	全国地質調査業協会連合会ホームページ <a href="http://www.zenchiren.or.jp/index.html">http://www.zenchiren.or.jp/index.html</a>
資料⑨	マグマ発生メカニズム	巽 好孝(1995):沈み込み帯のマグマ学.東京大学出版会.
		地学団体研究会 新版地学事典編集委員会(1997),新版地学事典,(株)平凡社
	第四紀火山分布	第四紀火山カタログ委員会編(1999):「日本の第四紀火山カタログv.1.0(CD-ROM版)」付図 日本の第四紀火山,日本火山学会.
資料⑩	全般	丸山茂徳・磯崎行雄(1998):生命と地球の歴史.岩波新書.
	大陸分布	丸山茂徳・磯崎行雄(1998):生命と地球の歴史.岩波新書.
	プレート変遷	Jolivet,L.,Tamaki,K. and Fournier,M.(1994): Japan sea,Opening History and Mechanism: A Synthesis.Jour.Geophy.Res.99,22237-22259.
		Seno,T. and Maruyama,S.(1984): Paleogeographic Reconstruction and Origin of the Philippine Sea.Tectonophysics,102,53-84.
		宇都浩三(1995):火山と年代測定:K-Ar, <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar年代測定の現状と将来.火山,40,S27-S46.
		鎌田浩毅(1999):西南日本弧と琉球弧の会合部に見られる6Maと2Maの広域テクトニクス転換の重要性.月刊地球,21,630-636.
		木村政昭(1990):沖縄トラフの発生と形成.地質学論集,34,77-88.
		瀬野徹三(1993):日本付近のプレート運動と地震.科学,63,711-719.

項目	記載内容	参考文献
	プレートの速度	瀬野徹三(1993):日本付近のプレート運動と地震. 科学, 63,711-719.
資料⑪	全般	文部科学省地震調査研究推進本部地震調査委員会 日本 の地震活動—被害地震から見た地域別の特徴—(追補版).
	震源分布図(東北地方)	防災科学技術研究所ホームページ http://www.hinet.bosai.go.jp/
	地震のタイプ	内閣府地震調査研究推進本部:全国を概観した地震 予測地図.
資料⑫	地形的特徴	活断層研究会編(1991):新編 日本の活断層 一分 布図と資料. 東京大学出版会.
	断層の発生・新生	土木学会原子力土木委員会地下環境部会(2001): 概要調査地区選定時に考慮すべき地質環境に関する 基本的考え方. 土木学会.  Tsuneishi,Y.,Yoshida,S.and Kimura,T. (1975):Fault-forming process of the Komyo fault in central Japan. Bull.Earthq.Res.Inst.,50,415-442.
コラム	反射法地震探査	岡田勝也・池田研一・長谷川達也編(2000):活断層 調査から耐震設計まで. 鹿島出版会.  奥村晃史・寒川 旭・須貝俊彦・高田将志・相馬秀廣 (1997):奈良盆地東縁断層系の総合調査. 平成8年 度活断層研究調査概要報告書,地質調査所(現産業技 術総合研究所),51-62.  活断層研究会編(1991):新編 日本の活断層 一分 布図と資料. 東京大学出版会.  岡田篤正・東郷正美編(2000):近畿の活断層. 東京 大学出版会.
	地震観測	井上大栄・宮腰勝義・上田圭一・宮脇明子・松浦一樹 (2002):2000年鳥取県西部地震震源域の活断層調 査. 地震. 2,54,557-573.
	GPS	鷲谷 威(1996):活断層研究とGPS. 活断層研究, 15,117-118.
	活断層のクリープ変位	川崎一朗・島村英紀・浅田 敏(1993):サイレント・アー スケイク. 東京大学出版会.

項目	記載内容	参考文献
資料⑬	海水準変動	核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機 構)1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地 層処分の技術的信頼性. JNC TN1400 99-021.
	古地理図	米倉伸之・貝塚爽平・野上道男・鎮西清高(2001):日 本の地形1総説. 東京大学出版会.
資料⑭	ダルシー	山本荘毅(1992):地下水水文学. 共立出版.
	岩石と透水性の関係	Anderson,M. and Woessner,W.(1996):地下 水モデル 実践的シミュレーションの基礎. 共立出版.
コラム	全般	改訂地下水ハンドブック編集委員会編(1998):改訂 地下水ハンドブック. 建設産業調査会.
資料⑮	全般	核燃料サイクル開発機構(1999):わが国における高 レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性. JNC TN1400 99-023.
資料⑯	全般	笹本圭子(1998):黄鉄鉱の常温酸化溶解に関する実 験地球化学的研究. 鉱物学雑誌,27,2,93-103.  中野政詩著:土の物質移動学 東京大学出版会.
資料⑰	ガラスの溶解速度	動力炉・核燃料開発事業団(現 日本原子力研究開発 機構)1996):地層処分研究開発の現状(平成8年度).  核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機 構)1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地 層処分の技術的信頼性. JNC TN1400 99-023.
コラム	ホウ素の浸出実験結果	動力炉・核燃料開発事業団(現 日本原子力研究開発 機構)1996):地層処分研究開発の現状(平成8年度).
資料⑱	全般(腐食量, 反応式)	核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機 構)1999):わが国における高レベル放射性廃棄物 地層処分の技術的信頼性. JNC TN1400 99- 022.
コラム	腐食した炭素鋼の写真	核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機 構)委託研究報告書(1999):炭素鋼オーバーバック の腐食に及ぼす溶存酸素の影響に関する研究.
	長期腐食実験結果	核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機 構)2008):緩衝材中における炭素鋼の腐食挙動の 実験的検討-1, JAEA-Research, 2008-011.

項目	記載内容	参考文献
資料⑩	全般	核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性. JNC TN1400 99-022.  須藤談話会編:粘土科学への招待 —粘土の素顔と魅力— 三共出版.
資料⑪	10万年後の人工バリア 鉱物組成図	日本原子力研究開発機構(2007):地層処分技術に関する知識基盤の構築(JAEA-Review)2007-050.
資料⑫	安全評価結果	核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性. JNC TN1400 99-023.  電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)(2005):TRU廃棄物処分技術検討書.  原子力安全委員会(2004):放射性廃棄物処理の安全規制における共通的な重要事項について.  原子力安全委員会(2007):低レベル放射性廃棄物埋設に関する安全規制の基本的考え方(中間報告).
	年間の被ばく線量	原子力発電環境整備機構(2009):処分場の概要.
コラム	放射線の影響	原子力発電環境整備機構(2009):処分場の概要.

## 地層処分 その安全性

発行日 2003年 3月 初版発行  
2007年10月 第2版発行  
2009年10月 改訂版発行

編集発行 原子力発電環境整備機構(NUMO)  
〒108-0014 東京都港区芝4-1-23 三田NNビル2階  
TEL:03-6371-4000(代表)  
ホームページ: <http://www.numo.or.jp>

