

原子力発電について

～発電炉の固有安全性、核燃料サイクル、高レベル廃棄物処理処分～

— 鹿児島大学・大学院理工学研究科工学専攻 —
機械工学プログラム

日本原子力学会SNW対話会への基調講演（1）

2023年6月29日（木）

工学部共通棟202番講義室

日本原子力学会シニアネットワーク連絡会（SNW）

古藤 健司

プロフィール

古藤 健司 工学博士（九大）

1949年8月30日生

日本原子力学会フェロー

日本原子力学会・SNW連絡会運営委員
同上SNW九州副会長

同位体科学会評議員

（元）九州大学大学院

（所属）工学研究院エネルギー量子工学部門

（担当）工学府エネルギー量子工学専攻

（併任）工学部エネルギー科学科

（兼務）工学研究院附属環境システム科学研究センター

（兼務）大学本部環境安全推進室エネルギー資源管理部門

その他

（元）企業・技術顧問

日頃はテニス三昧
の日々を楽しんで
います！

学部担当講義

- ・ エネルギー環境論（B.2-3）
- ・ 原子力/原子炉工学概論（B.4）
- ・ 核融合概論（B.4）

工学府担当講義

- ・ 原子炉システム工学 I・II
- ・ 原子力化学工学
- ・ 核融合基礎工学
- ・ 原子炉物理学特論および実験（京大炉）
- ・ 核エネルギーシステム学論究 A（D.C）

環境システム工学専攻

- ・ Microscopic Aspects of Energy Science and Engineering（Int.C）

再生可能エネルギーとは自然エネルギー！

自然エネルギーとは太陽エネルギー！

太陽エネルギーとは？

<講演の内容>

◎ 導入として：地球の環境・エネルギー・資源について

● 原子力発電の仕組み：固有の安全性（自己制御性）

● 核燃料サイクル：ウラン資源(プルトニウム)の有効利用

● 高レベル放射性廃棄物：深地岩盤への埋設処分の安全性

◎ トピックス：福島原発の処理水の海洋放出／トリチウム問題

“持続可能なエネルギー社会環境”
を構築するために解決していかなければならない
“エネルギー・地球環境問題”

・環境
・エネルギー
・経済
+ 安全安心!

“気候変動”による大規模自然災害(台風・ハリケーン・集中豪雨などの大型化や多発)による生活住環境の悪化や農水産への被害

原因

化石燃料の消費による
温室効果ガス: CO_2
大気への排出

解決

エネルギー源の
脱炭素化

“限りある化石燃料”
有機材料資源としての
有効利用

経済・生産活動の低迷

飢餓・貧困による
地域・国際紛争

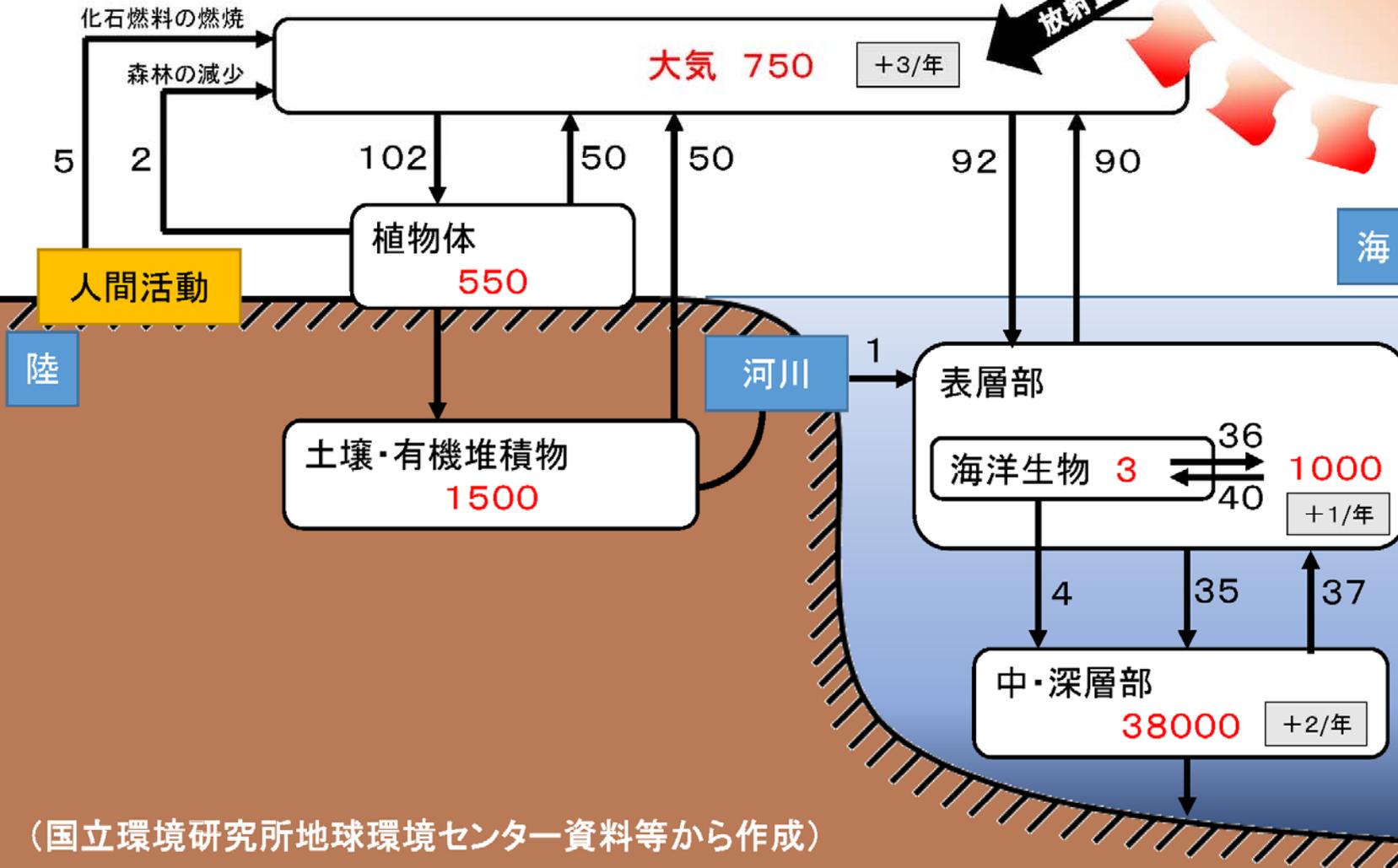
カーボンニュートラル政策

詳細は基調講演2
を参照

2015年国連気候変動枠組条約締約国会議(COP21)での「パリ協定」
に基づく2050年に向けた脱炭素化エネルギー政策

地球の炭素循環モデル

(単位:10億トン/年 (炭素ベース))



放射量の変化

陸上の植物系は大気中のCO₂の“シンク”にはなっていません！
 何もしていません！
 $102 - 50 - 50 - 2 = 0$

ジャングルやタイガは“CO₂のシンク”ではありません！
 現在はむしろCO₂の発生源となっています！

大気中CO₂の“シンク”は海！
 $92 - 90 = 2$

炭酸イオンとして存在し、中深部海底では炭酸化合物として堆積！
 サンゴとしての寄与はわずか？

**海水温度が
 上がれば
 CO₂の供給源！**

(国立環境研究所地球環境センター資料等から作成)

大気中の二酸化炭素を減らすには

(1) 二酸化炭素の吸収量を増やす

- 成熟した森林(ジャングル)はCO₂の吸収源ではない。CO₂を吸収もしないし吐出もしない。
森林をCO₂の吸収源とするには、森林を成長させ続けなければならない。

(2) 二酸化炭素の排出量を減らす

- エネルギーを効率よく使う！
省エネルギー、コジェネレーション
- CO₂の排出量の少ない燃料を使う！
石炭 → 石油 → 天然ガス(メタン)
- CO₂を出さないエネルギー源を利用する！

- 自然エネルギーの直接利用： 地熱、水力、風力、潮力、太陽熱、太陽光など
- 再生可能なエネルギー源： バイオマス
- 原子力エネルギー： 原子力発電

原子力発電は安全か？安心できるか？

原子力発電のメリットについては、大方の人々が「安価な電気料金」という恩恵をもって認知されていると思います（福島第一原発事故の後処理・補償・地域復興事業への膨大な資金投入は別にして）。しかしながら、原子力については「原爆・水爆」の途轍もない破壊力の脅威への先入観があり「原子力発電は危険なものだ」との認識が根底にあるのが一般的だと思います。ですから、経済的であっても「安全で環境に負荷が掛からない発電システム」でなければ大衆は原子力発電を安心して受け入れることはできないでしょう。

原子力発電を正しく理解しなければ“安全”であるかわかりませんし“安心”は生まれません。

原子力発電には安全性を担保する原理・仕組みがあることを知っていますか？

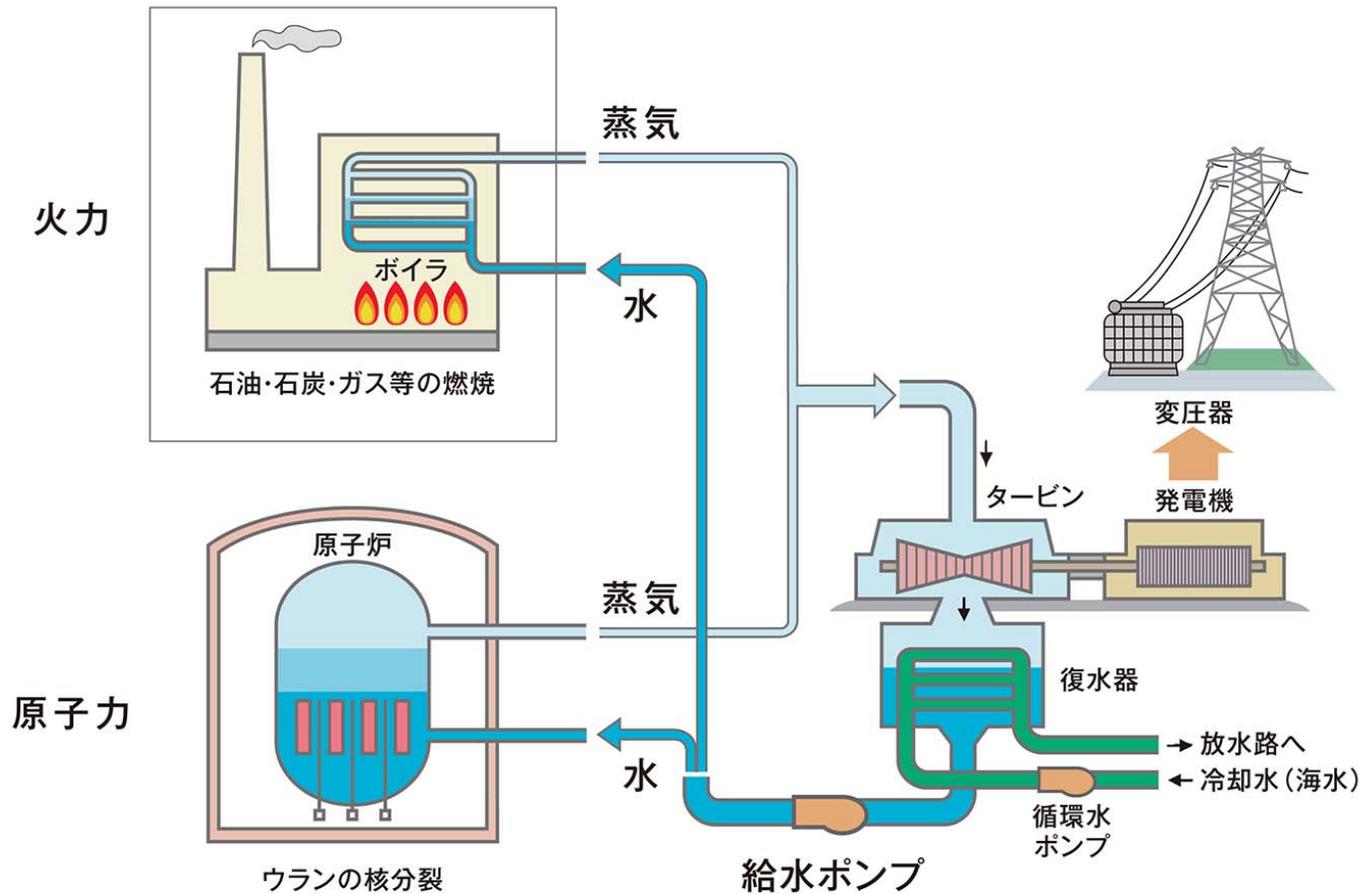
- 受動的制御性： 制御棒駆動装置や冷却水循環・供給装置など
- 能動的制御性： 熱中性子吸収核分裂反応の自己制御性

原子炉の固有の安全性

原子力発電と原子爆弾の違い

	ウラン235とウラン238の割合と核分裂連鎖反応	核分裂数の制御の方法
原子力発電の場合	<p>天然ウラン: U-235 (0.7%)</p> <p>ウラン235 (3~5%) ウラン238 (95~97%)</p> <p>ウラン235の割合が低く、中性子がウラン238に吸収される等の理由により核分裂が一定の規模で継続する</p> <p>1回目 2回目 3回目</p>	<p>核爆発は起こりません!</p> <p>制御棒が多数設置されており、また自己制御性があるため急激に核分裂数が増加することはない</p> <p>ウラン濃縮技術が必要</p> <p>フッ化水素が不可欠!</p> <p>韓国の横流し疑惑!?</p>
原子爆弾の場合	<p>火薬</p> <p>ウラン235 (ほぼ100%)</p> <p>ウラン235の割合がほぼ100%と高いため、中性子が他の物質に吸収されず、核分裂が次々に起こり、一瞬のうちに爆発的なエネルギーが放出される</p> <p>1回目 2回目 3回目</p>	<p>圧縮閉込め技術がなければ爆弾にはなりません!</p> <p>制御棒が設置されておらず、自己制御性がないため、急激に増加する核分裂を止めることはできない</p> <p>プルトニウム型原爆は プルトニウム239(ほぼ100%)</p> <p>商用原発の使用済燃料からのプルトニウムは爆薬にはならない(低純度)</p> <p>どのようにして生産するの?</p>

火力発電と原子力発電の違い



火力発電は“瞬間湯沸型”

耐高圧構造なので臨界圧を超える高温・高圧で運転可能。
(超)超臨界圧石炭火力発電(600°C以上225気圧以上)で熱効率が約45%

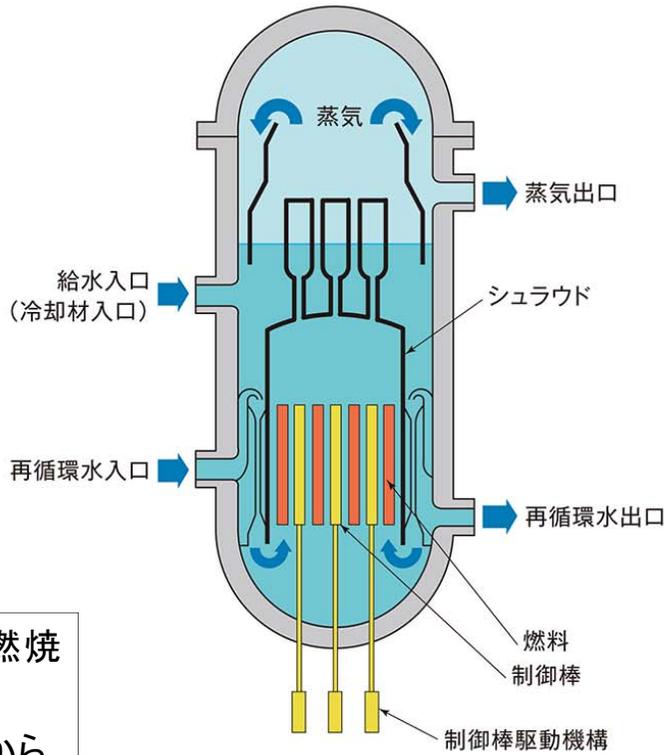
原子力発電は“投込ヒーター型”

大口径の圧力容器が必要。
PWR型1次系(320°C160気圧)
2次系(277°C62気圧)
BWR型(280°C70気圧)
熱効率が32%程度

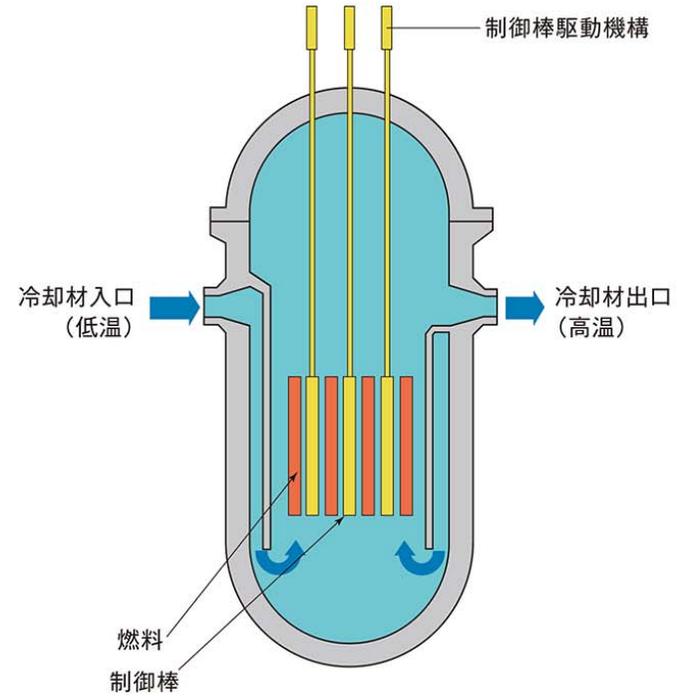
高温ガス炉や高速増殖炉
の開発が必要

原子炉压力容器断面図

沸騰水型原子炉 (BWR)



加圧水型原子炉 (PWR)

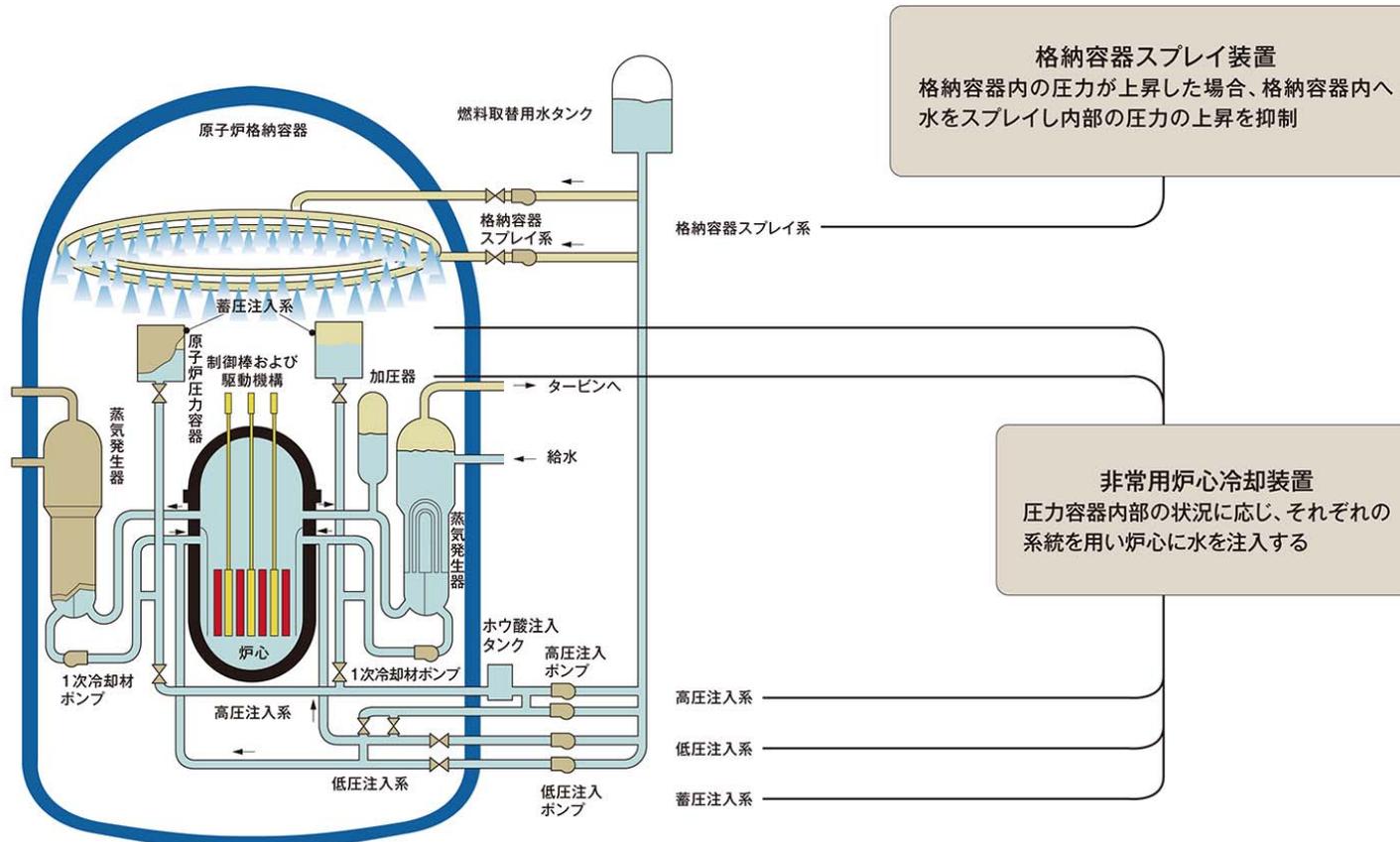


気液二相による燃焼分布の問題と炉内構造の問題から

制御棒は炉底からのジャンプアップ式

制御棒は重力落下式

非常用炉心冷却装置等の例 (PWR)



格納容器スプレイ装置
格納容器内の圧力が上昇した場合、格納容器内へ水をスプレイし内部の圧力の上昇を抑制

非常用炉心冷却装置
圧力容器内部の状況に応じ、それぞれの系統を用い炉心に水を注入する

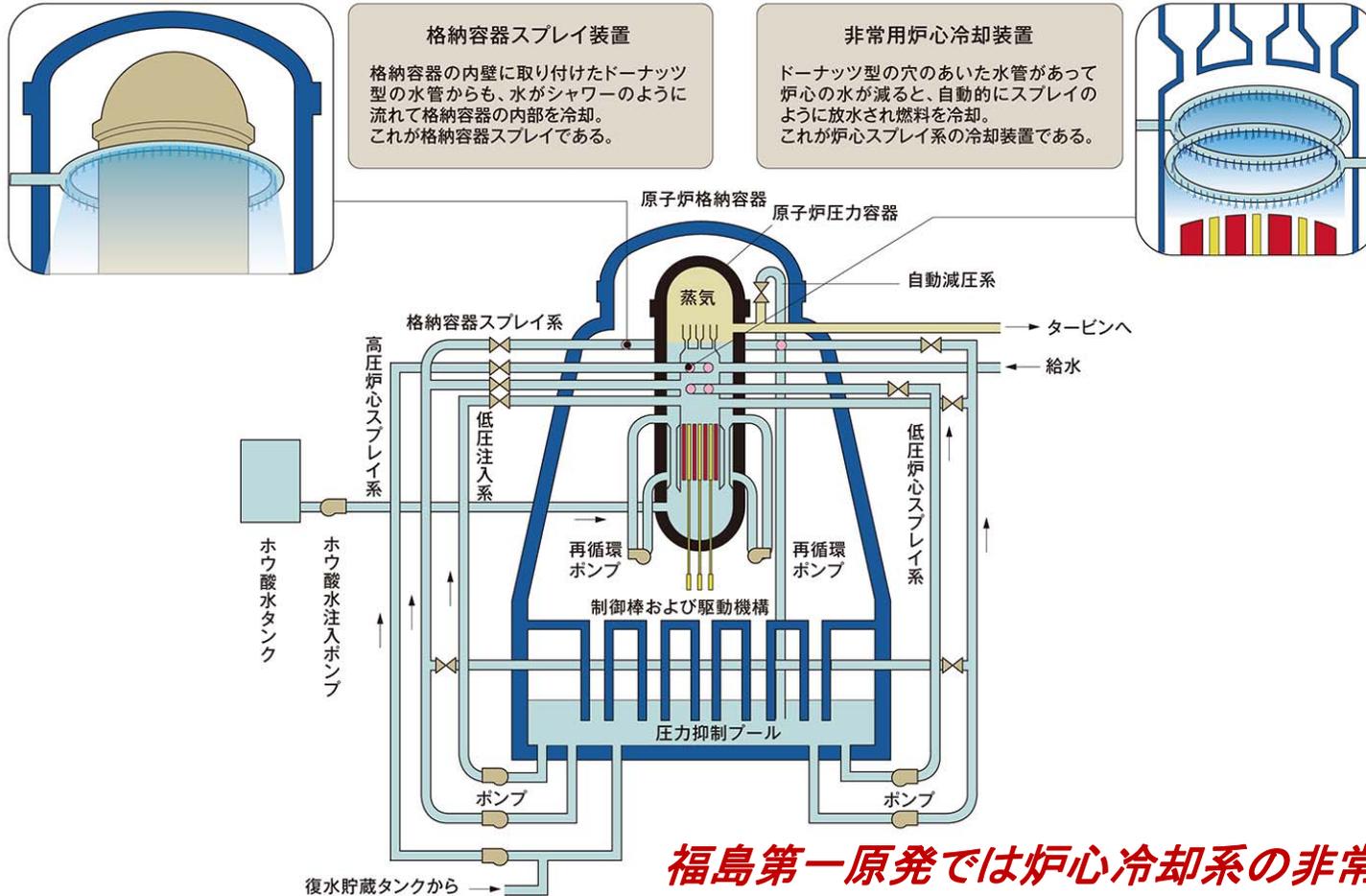
原子炉の炉心は核分裂反応が終わっても核変換反応が継続して起こっていますので崩壊熱が発生しています。従って、水で冷やし続けなければいけません！



多重の非常用炉心冷却系が組み込まれています。

受動的制御装置

非常用炉心冷却装置等の例 (BWR)



格納容器スプレイ装置
格納容器の内壁に取り付けたドーナツ型の水管からも、水がシャワーのように流れて格納容器の内部を冷却。これが格納容器スプレイである。

非常用炉心冷却装置
ドーナツ型の穴のあいた水管があって炉心の水が減ると、自動的にスプレイのように放水され燃料を冷却。これが炉心スプレイ系の冷却装置である。

原子炉の炉心は核分裂反応が終わっても核変換反応が継続して起こっていますので崩壊熱が発生しています。従って、水で冷やし続けなければいけません！



多重の非常用炉心冷却系が組み込まれています。

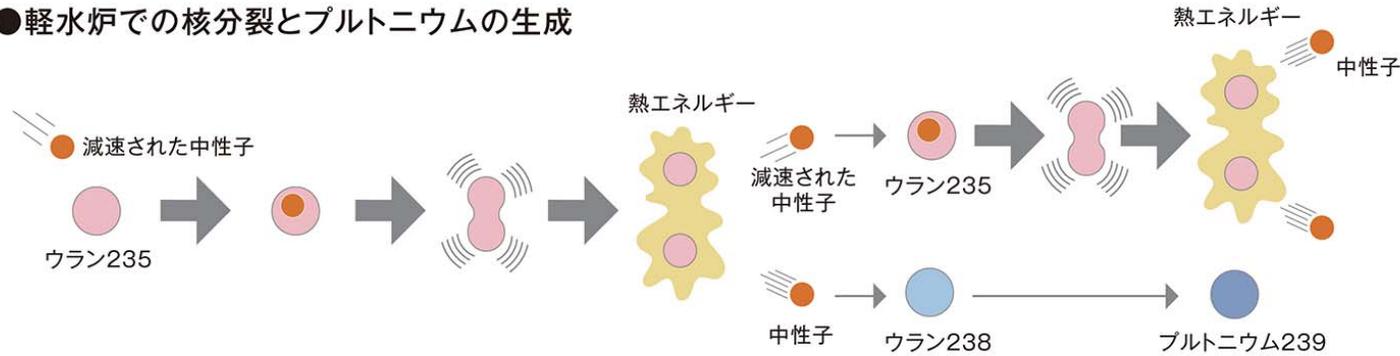
受動的制御装置

福島第一原発では炉心冷却系の非常用電源を喪失してしまった！

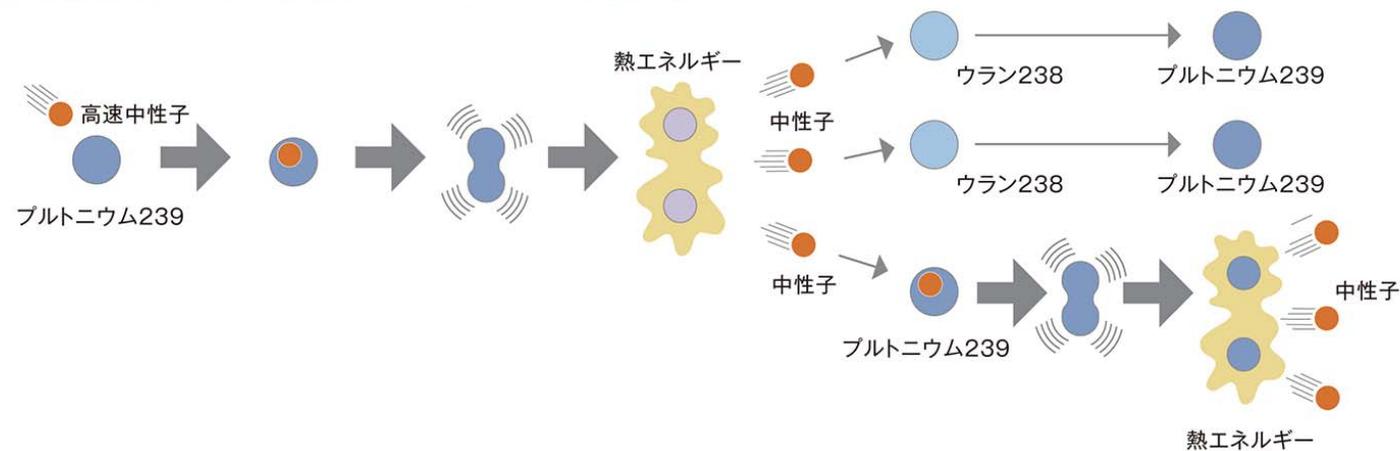
地震には耐えたが 想定外？ の津波！

ウランの核分裂とプルトニウムの生成・核分裂

●軽水炉での核分裂とプルトニウムの生成



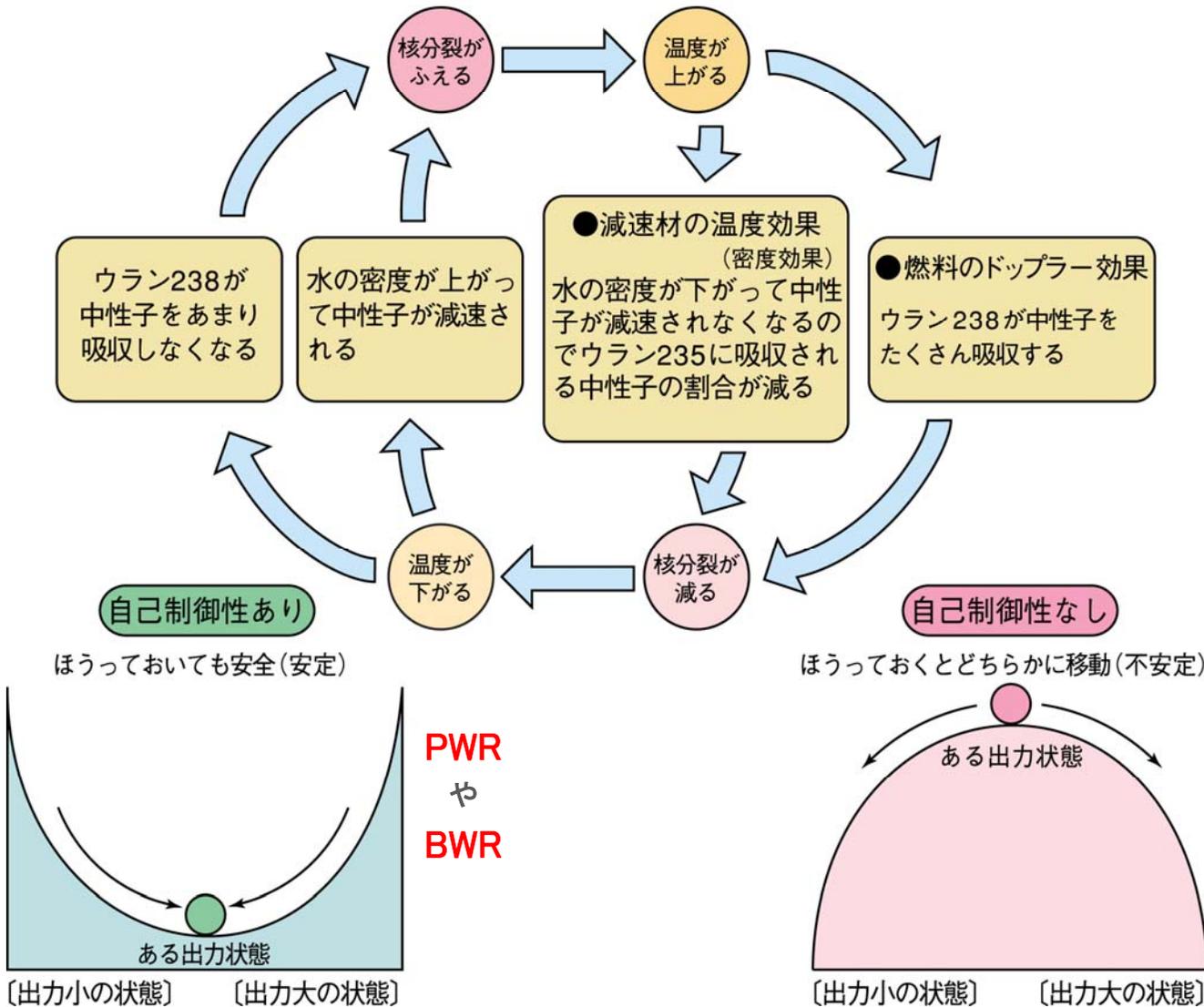
●高速増殖炉での核分裂とプルトニウムの生成(増殖)



核分裂によって2~3個の即発中性子が放出されますが、1秒から数10秒遅れて核分裂片の崩壊によっても中性子が放出されます：**遅発中性子**。その割合は**0.72%**です。

原子炉の中では、この遅発中性子を含めて臨界が保たれています。従って、**核分裂連鎖反応がゆっくりと進行していきます。**

原子炉の固有の安全性(自己制御性)



軽水炉は核分裂性ウラン235の中性子吸収が減速された中性子に対して反応しやすくなります。

減速材の温度効果とは
水温が上がると密度が減少し(あるいはボイド率が上昇し)中性子の減速が低下する。

燃料のドップラー効果とは
熱中性子とウランとの衝突吸収反応は両者の相対速度に依存します。温度が上がれば燃料のウランの熱振動が活発になり、中性子との相対速度の分布が広がります。ということは、中性子の共鳴吸収される確率が増すこととなります。

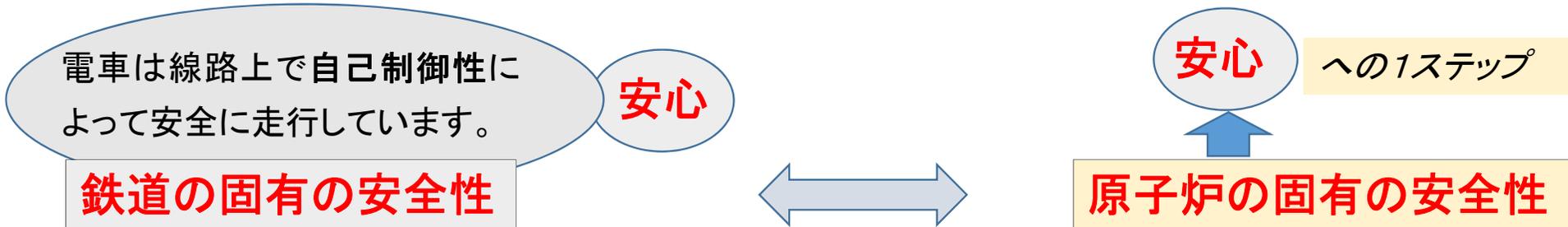
自己制御性とは“起き上がり小法師”や“弥次郎兵衛”の原理

ここで質問

旅客機の主翼はV字型になっています。進路を安定化するためですね(自己制御性)。しかし、戦闘機などの軍用機の主翼はH字になっています。どうしてですか？

鹿児島市内には路面電車が走っていますよね。皆さん安心して乗っておられますが、電車にはハンドルがありませんよね。<そら線路がアツでよ！> 電車の車輪は一体物で右輪と左輪は同じ回転をしますが、どうやってカーブを曲がるんですか？ <ジャツでキィキィ言いながらヒン曲がチヨロが！> ゆっくりやから安全・安心????かあ?!

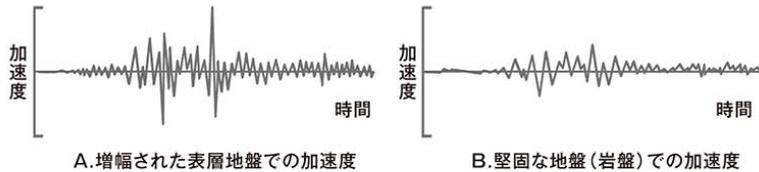
新幹線も同じです。300 km/hでカーブどうやってスムーズに曲がっているのですか？ 左右の車輪は同じ回転をしていますよね？ キィキィ言いながら曲がっているのなら、いつ脱線するやら！危険・不安!!!????



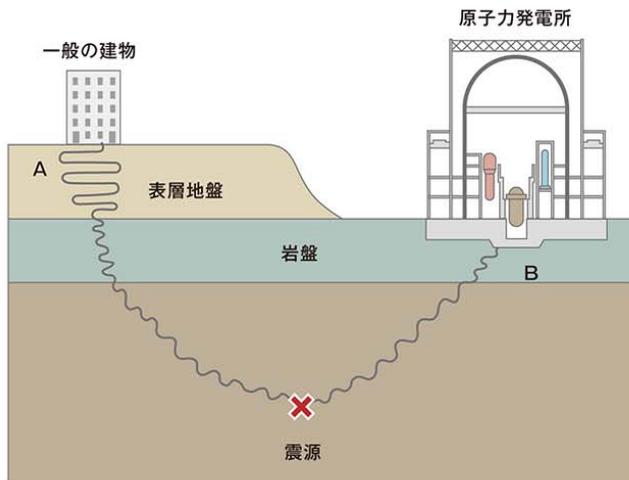
原子力発電所と一般建築物の揺れの差

原子力発電
安全・安心？

堅固な地盤(岩盤)上に設置した原子力発電所と一般の建物の揺れの伝わり方

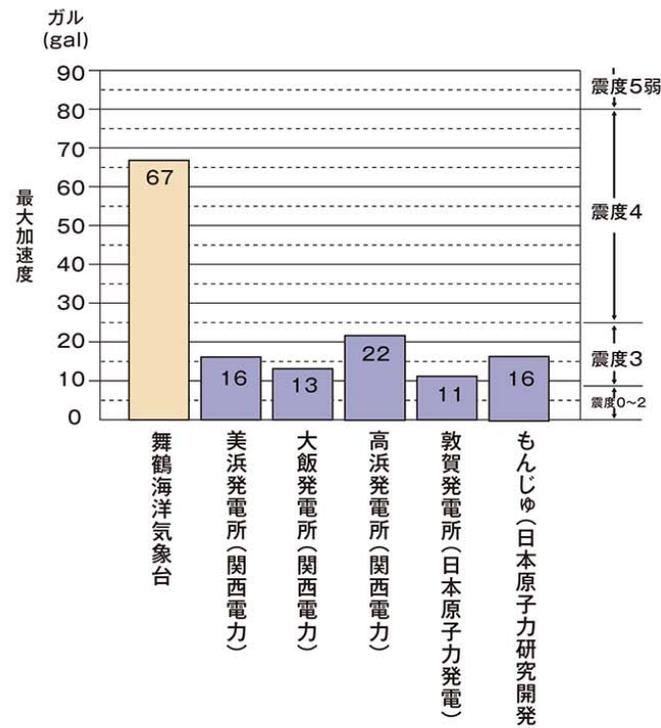


(注) 地震波形は模式図



堅固な地盤(岩盤)での揺れは表層地盤に比べ1/2~1/3程度

1995年兵庫県南部地震による若狭湾周辺の最大加速度観測値



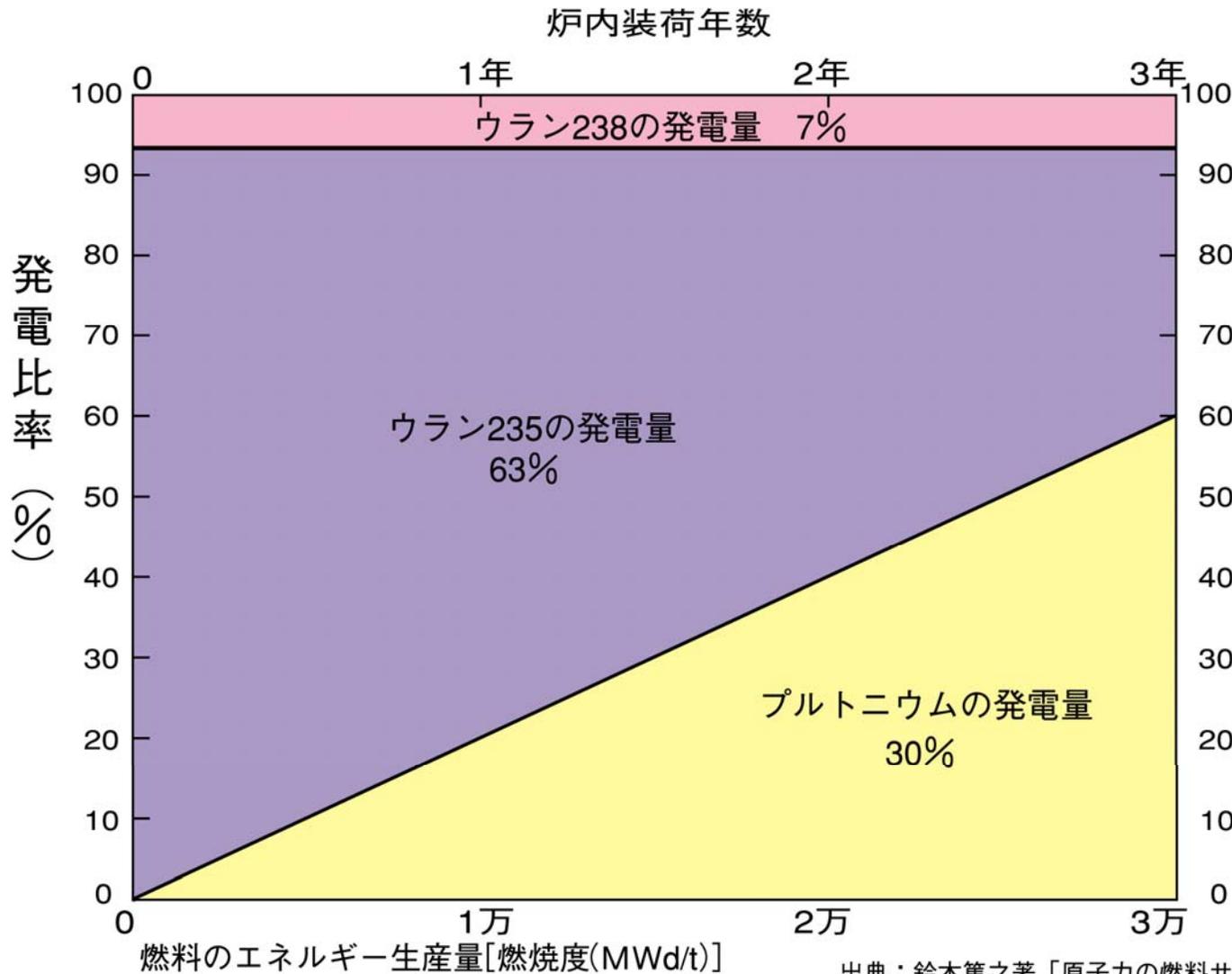
東日本大震災において複数の原子力発電所が被害を被りましたが、心臓部である“原子炉”は全て基本的に健全性を維持することができました(福島第一原発は2次的災害)。つまり、ある意味では、原子炉構造の耐震性が立証されたことになると”私“は考えますが、皆さんはどう考えますか？

化学工場などの爆発事故では多くの方が犠牲になる事がしばしばですが、幸いなことに、この原発事故で“放射能・放射線の被曝”でお亡くなりになられた方はおられません。このことをどう考えますか？

洗面器に水を張って左右に揺らしてみてください。水面は激しく揺れるが洗面器の淵は大して揺れませんが、岩盤は洗面器の淵のようなもので、表層地盤に比べて地震の揺れは1/2~1/5程度です。

キバンフレットより作成

軽水炉内のプルトニウムの発電割合



出典：鈴木篤之著「原子力の燃料サイクル」

濃縮ウラン燃料が軽水炉で燃焼する過程でウラン238も核分裂して発電量の7%に寄与しています。

ウラン238の中性子吸収によって生成したプルトニウム239は核分裂性ですので、ウラン235の燃焼に伴ってプルトニウム239も燃焼に寄与していきます。燃焼末期には約60%にもなり、発電量の約30%を賄っています。

結果的にウラン238が燃料として発電量の1/3以上を担っています。

使用済みウラン燃料 はもはや

使用済みMOX燃料

MOX: Mixed OXide fuel

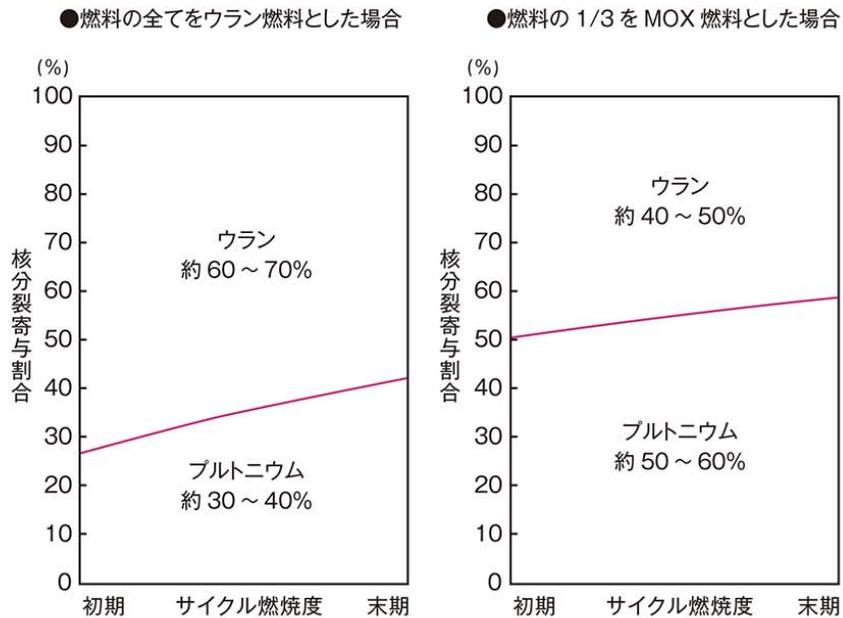
使用済み燃料には未燃焼のウラン235やプルトニウム239が残っています。

再処理

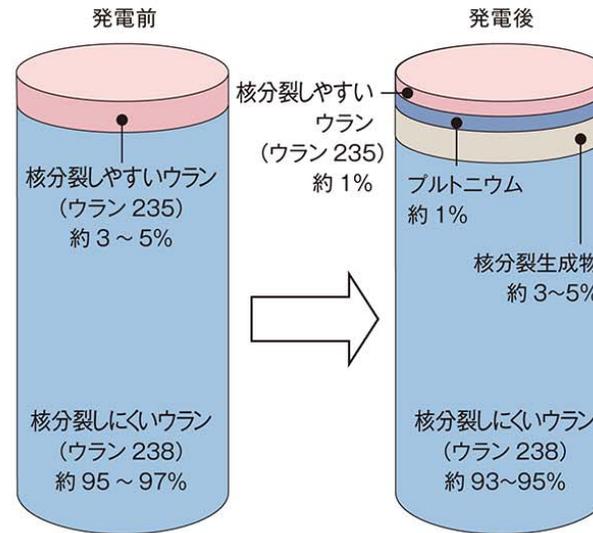
化学的にウランとプルトニウムを回収

軽水炉内でのウラン燃料の燃焼による変化

① 炉心におけるウランとプルトニウム核分裂寄与割合 (BWR平衡炉心の例)



② 発電前後でのウラン燃料の変化 (例)



既存の軽水炉では炉心の1/3程度までMOX燃料を装荷して発電が可能です:

原子炉の安全運転設計条件の範疇にあります。

フルMOX: MOX燃料100%での運転には専用炉が必要

J-Power電源開発 (株)
大間発電所 (建設中)

プルサーマルの目的

- ・余剰プルトニウムの解消
- ・ウラン資源の有効利用

日本で発生する廃棄物の量

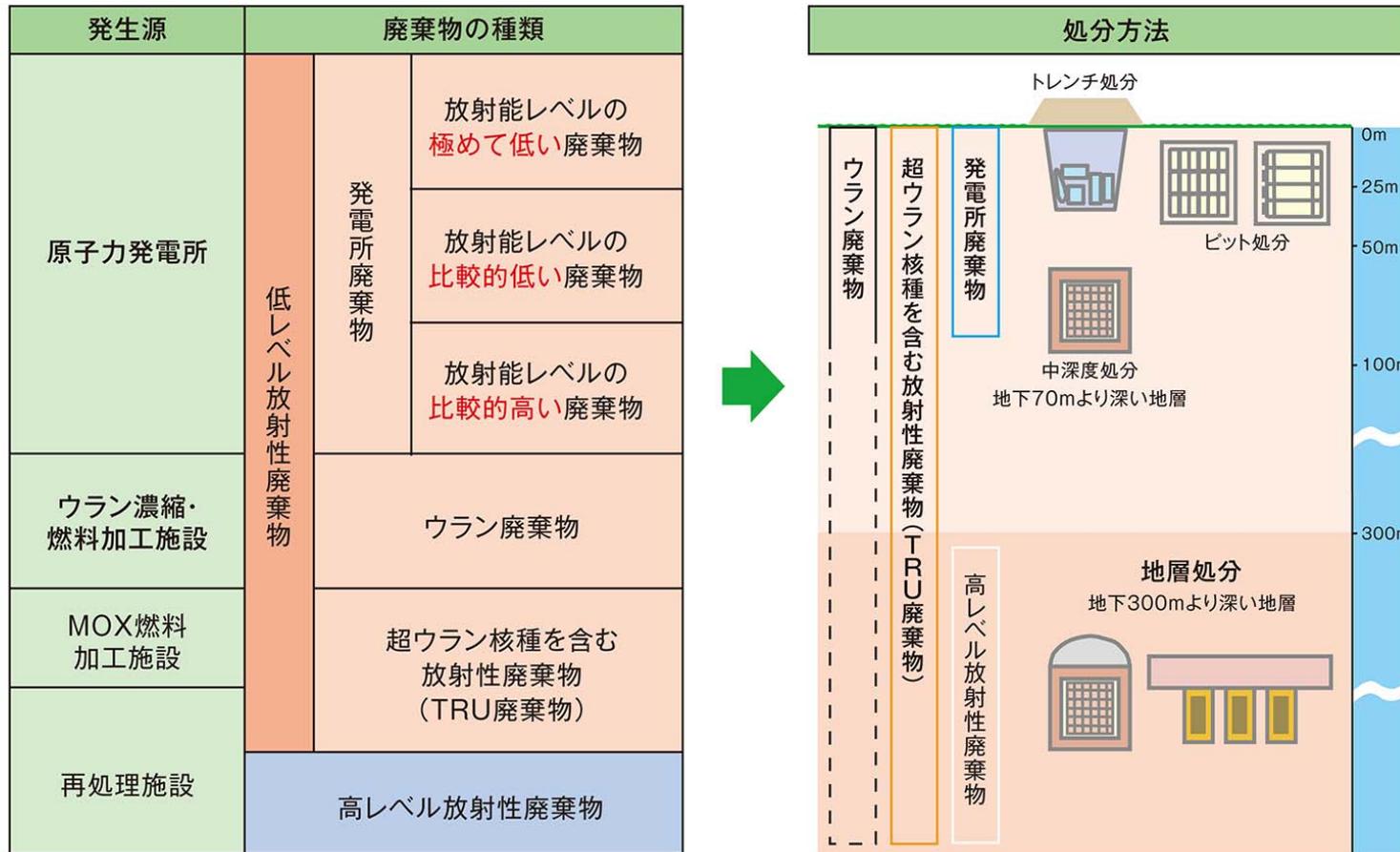
	発生廃棄物量(トン/日)		備考
一般廃棄物	主に家庭から排出される生ゴミ、粗大ゴミ およびオフィスから排出される紙くず等	117,057	平成29年度実績
産業廃棄物	事業活動に伴って生じた廃棄物のうち、 廃プラスチック、廃酸、廃アルカリ等	1,060,274	
放射性廃棄物	原子力施設の運転、保守等に伴って 発生する放射性的の廃棄物	高レベル 1.4	<p>使用済み燃料再処理の利点</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 高レベル廃棄物地層処分の面積が1/3になる。 ② プルトニウム(長期半減期)を埋めないで、放射能毒性が1/10となる。 ③ 将来の核拡散リスクがない。 ④ ウラン資源の節約になる。 ⑤ 中間貯蔵の必要性がミニマムになる。
		低レベル 44	

使用済み燃料再処理の利点

- ① 高レベル廃棄物地層処分の面積が1/3になる。
- ② プルトニウム(長期半減期)を埋めないで、放射能毒性が1/10となる。
- ③ 将来の核拡散リスクがない。
- ④ ウラン資源の節約になる。
- ⑤ 中間貯蔵の必要性がミニマムになる。

放射性廃棄物の種類と処分の概要

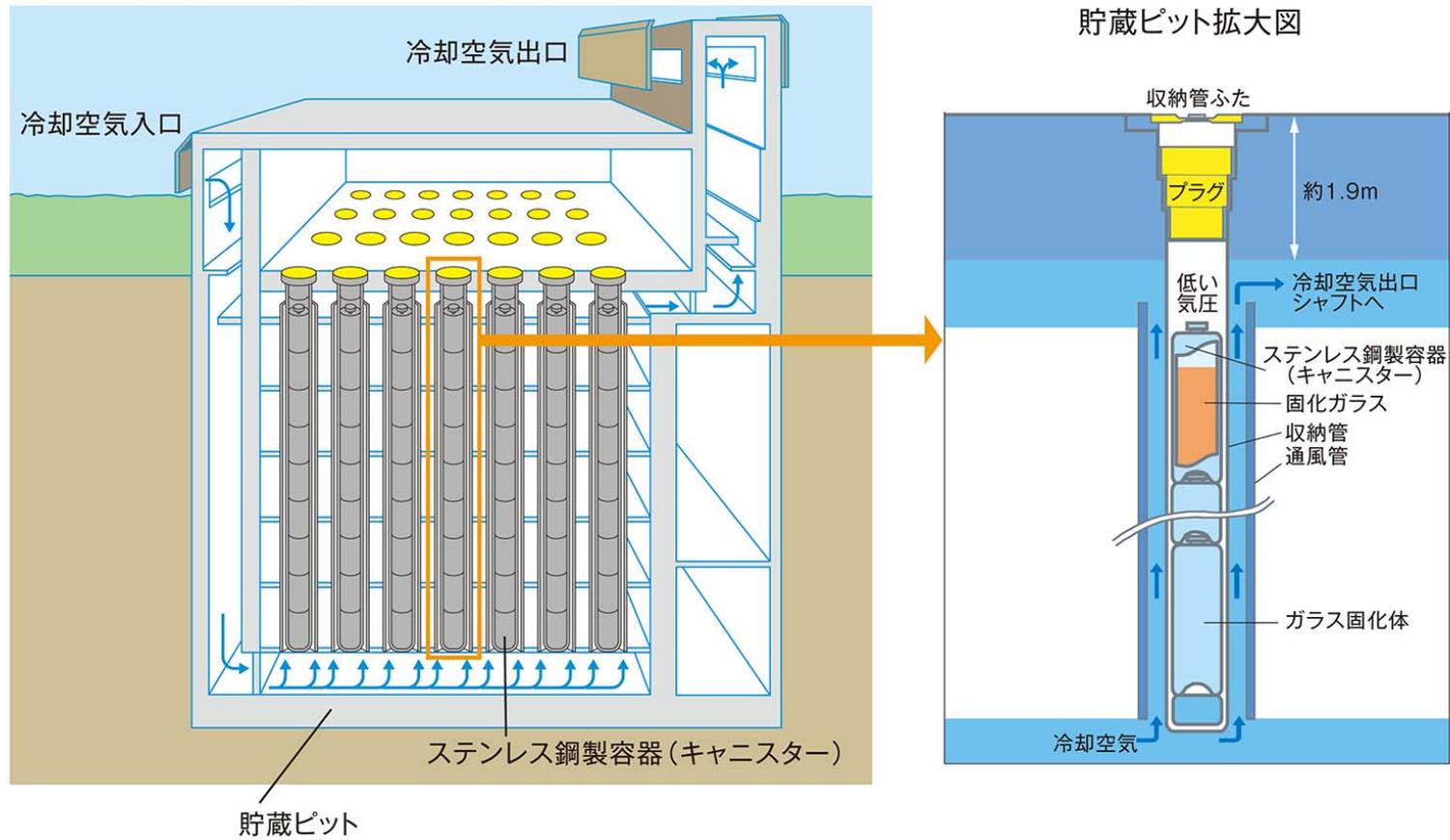
放射能レベルに応じた深度や障壁(バリア)を選び、トレンチ・ピット処分、中深度処分、地層処分に分けて処分が行われる。



トイレ無きマンション問題は解決できる!?

処分場の候補地調査
北海道の2町村で「文献調査」を実施中

高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の貯蔵概念図



高レベル放射性廃棄物の処分方法の検討

人間による恒久的な管理の継続は困難であり、将来世代にも管理の負担を負わせることになるので、最終的には人間による管理がなくなったとしても安全に処分できる方法が検討されてきた。

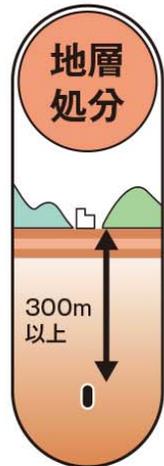
- ・地層中への処分は、地下資源などが長期間保存されてきた多数の実例があり、実現可能性が高い
- ・宇宙空間への処分は、発射技術等の信頼性に問題がある
- ・海の深いところに捨てる海洋投棄は、ロンドン条約により禁止されている
- ・極地の氷床への処分は、南極条約により禁止されている。また、氷床の特性解明が不十分である

北欧や米国など、使用済みウラン燃料を再処理せずに直接地層処分する政策を取っています（フィンランドでは既に地層処分を開始）。

高レベル放射性廃棄物の処理処分に準じます。



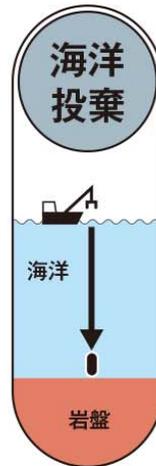
将来、取り出して再処理リサイクルする可能性を残した処分法：
超長期保管貯蔵の意味合い



●地層が本来もっている物質を閉じ込める性質を利用



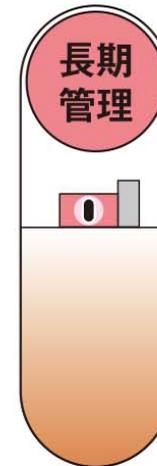
●発射技術等の信頼性に問題がある



●海洋投棄を規制しているロンドン条約により禁止

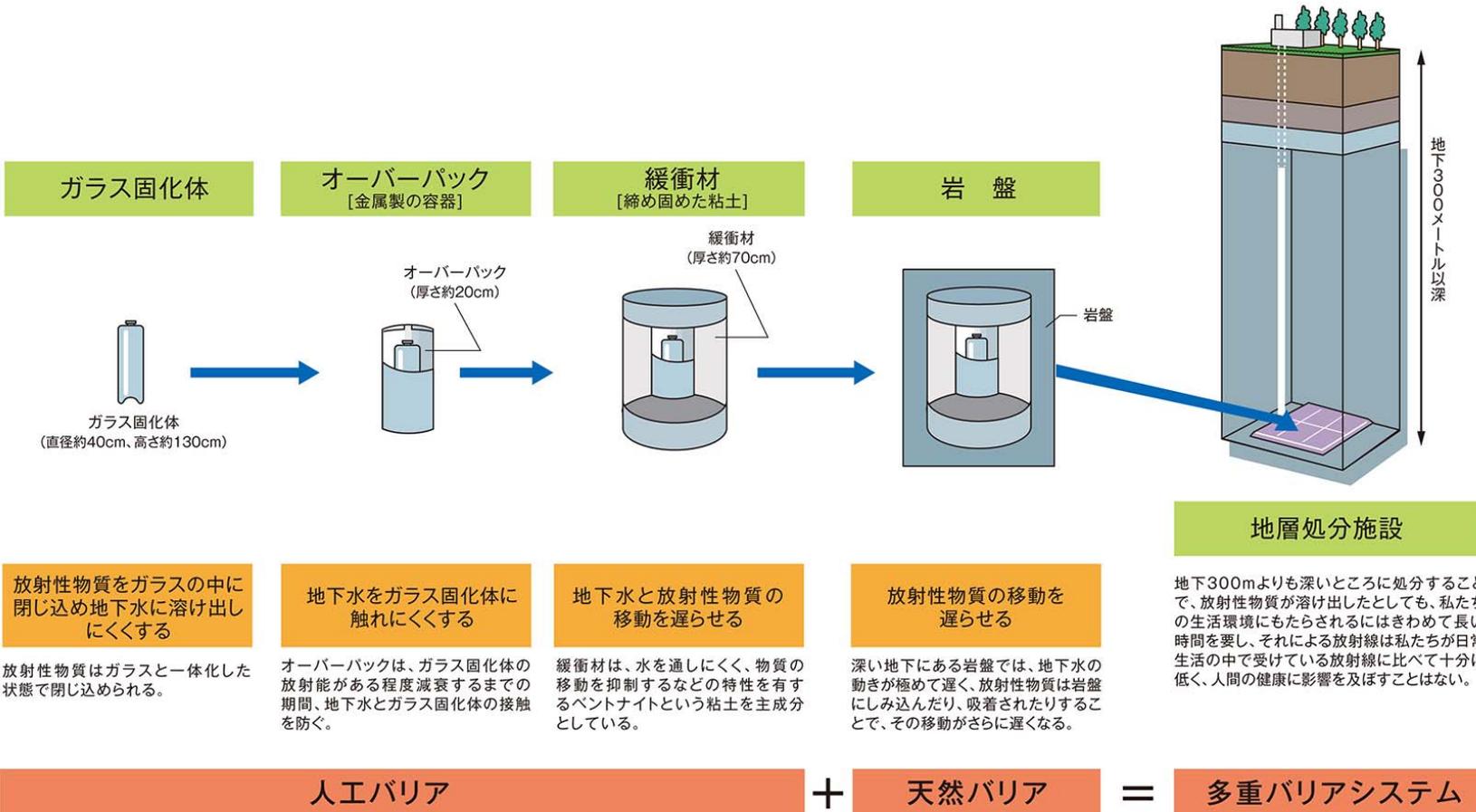


●南極条約により禁止
●氷床の特性等の解明が不十分



●人間による恒久的な管理は困難
●将来の世代にまで監視の負担を負わせる

高レベル放射性廃棄物多重バリアシステム



高レベル放射性廃棄物多重バリアシステムの漏洩シナリオ

- ① 岩盤地層中の地下水が緩衝材に侵入し、
- ② 金属容器(オーバーパック)に達して容器を腐食させ、ガラス固化体表面に達する。
- ③ ガラス固化体を溶解させつつ溶解性の高レベル核種が溶出する。
- ④ 溶解した放射性核種は浸透水中を拡散移動し、深部岩盤層に達する。
- ⑤ 岩盤中の微細水脈中を拡散移動し、地表に達する。
- ⑥ 地表に達した放射性核種のほとんどは旅程で崩壊し非放射性核種へと核変換している。

なぜ深地下300m以上の岩盤地層か？

科学的根拠は

推算には加速度法による実証実験で得られたデータや遺跡・古墳などからの金属やガラスの出土品の保存状態とその分析結果、地盤地質工学からの地下水移行挙動などのデータが参考にされています。

そして、(20億年前)地球上には天然の大型軽水炉が存在していた！

オクロ天然原子炉

調べてみてください！

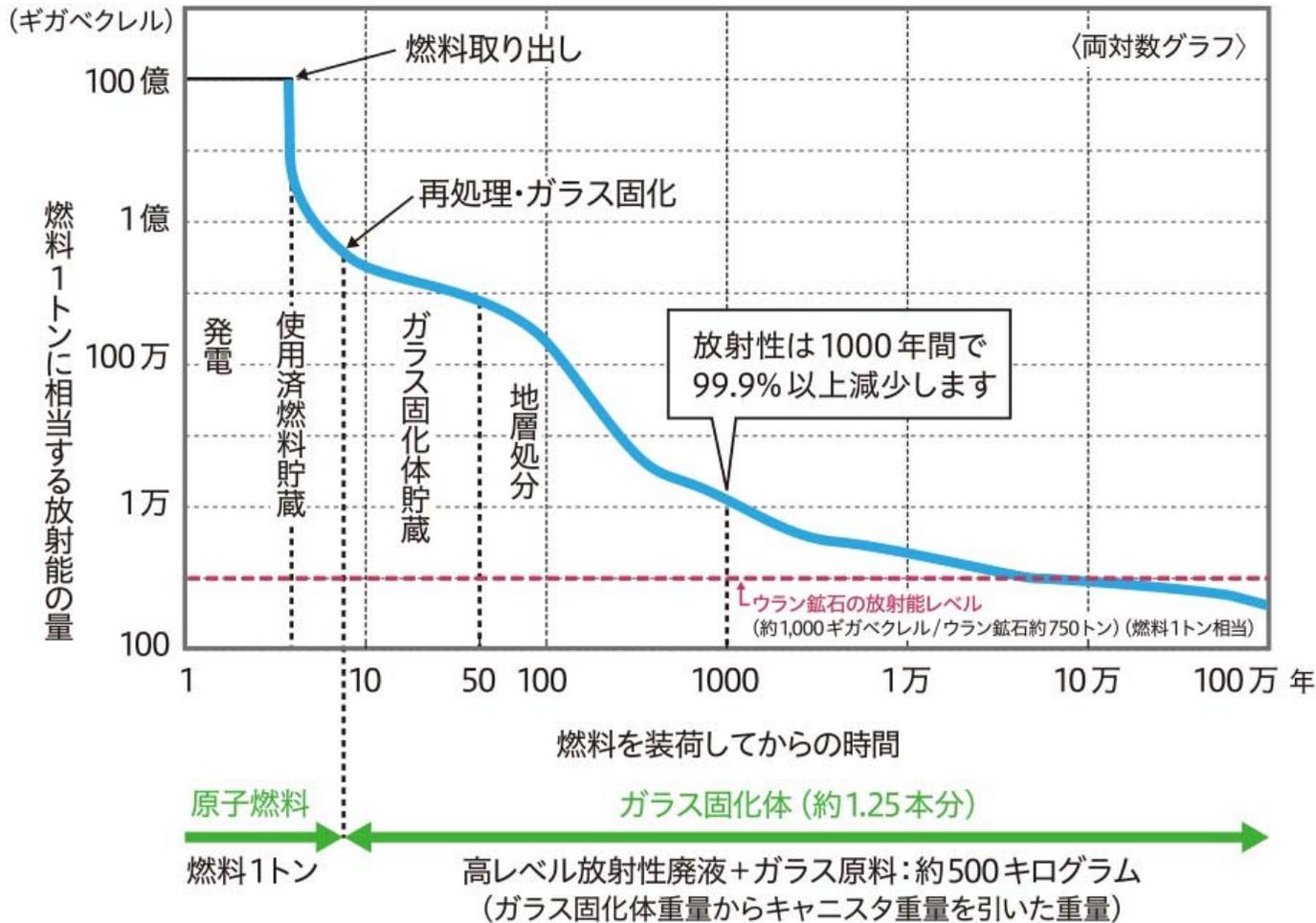
深地下岩盤中の水の移動： 数mm/年

300 m 移動するには約10万年

オーバーパックの腐食速度： 数mm/100年

厚み 20 cmのオーバーパックが腐食されガラス固体表面が暴露されるまで約1万年

ガラス固化体の放射能の経時変化



高レベル放射性廃棄物
ガラス固化体

10万年以上

天然のウラン鉱石の放射能レベル
以下にまで減衰する！

ただし、生態系に取り込まれ易い水溶性の長寿命核種のFP:¹²⁹I (1.5×10⁷y)などの問題が残ります！

安全？
安心？

高レベル廃棄物
処理処分法

福島第一原発の処理水の海洋放出について： 海洋生態系への影響は？

溶融した核燃料等の残損物(デブリ)の冷却などに使われた放射性物質を含む汚染水は、イオン交換や吸着処理によって大部分の放射性核種は除染され“処理水”としてタンクに保管されていますが、2023年春の時点で約137万トンに達しています。ただし、水素の放射性同位体の**トリチウム(半減期は12.3年)**はHTOとして処理水中に存在しています。

トリチウムを分離除染する方法は色々考えられますが“**途轍もないエネルギーを消費**”し、費用対効果が全く期待できない。
また、完全な解決法でもない：**濃縮回収したトリチウム水はどうするのか？**

国の方針は“2年後を目途に**海洋放出**”を選択

- 事故から12年を経ていますので崩壊によって放射能はほぼ半減
- 処理水は放出前に予め海水にて**100倍**以上に希釈：
国の排水中の基準値の**1/40** 程度まで
世界保健機関(WHO)の飲料水水質ガイドラインの**1/7** 程度まで希釈
- トリチウムの年間放出量を事故前の福島第一原発で設定していた目安以下に

**飲料水の水質基準の1/7以下のトリチウム濃度となった希釈処理水を、
更に莫大な水量の海洋中に分散していくわけですから、
海洋生態系への影響はないものと考えられます。**

**安全？
安心？**

まとめ



- 孫やひ孫の時代も豊で平和な世の中であるには、地球の環境を守り、恒久的にエネルギー資源を活用していかなければなりません！
- 限りある貴重な化石資源は、大切に有効に利用していかなければなりません！
- 気候変動・温暖化などの地球環境問題を解決するには、水力・太陽光・風力などの自然エネルギーそして原子力など、非化石燃料を利用するしかありません：*脱炭素化！*
- *我国の“脱炭素化に向けた電源構成”を考えると“原子力”は今のところ切り札と考えられています！*
- 原子力を「安心」して利用するには「安全」が不可欠：*安全性向上の油断なき追及が必須！*
「安全」を知らなければ「真の安心」も得られません！
- “原子炉の固有の安全性”や“高レベル廃棄物処分法の安全設計”など、
原子力発電の「安全」な仕組みを正しく理解しておく必要があります！