

# 「プロメテウスの火」の後始末 —高レベル放射性廃棄物処分の4W1H

## 第1部

WHAT? (それはなに?)

WHICH? (どんなもの?)

WHERE, NOW? (いまどこに?)

WHO? (誰が出しているの)

HOW? (どうするの) その1



動力炉・核燃料開発事業団(現日本原子力研究開発機構)  
元理事・環境技術開発推進本部長

坪谷隆夫

1705地層処分学習会@坪谷

## WHAT? それはなに?

炭酸ガス

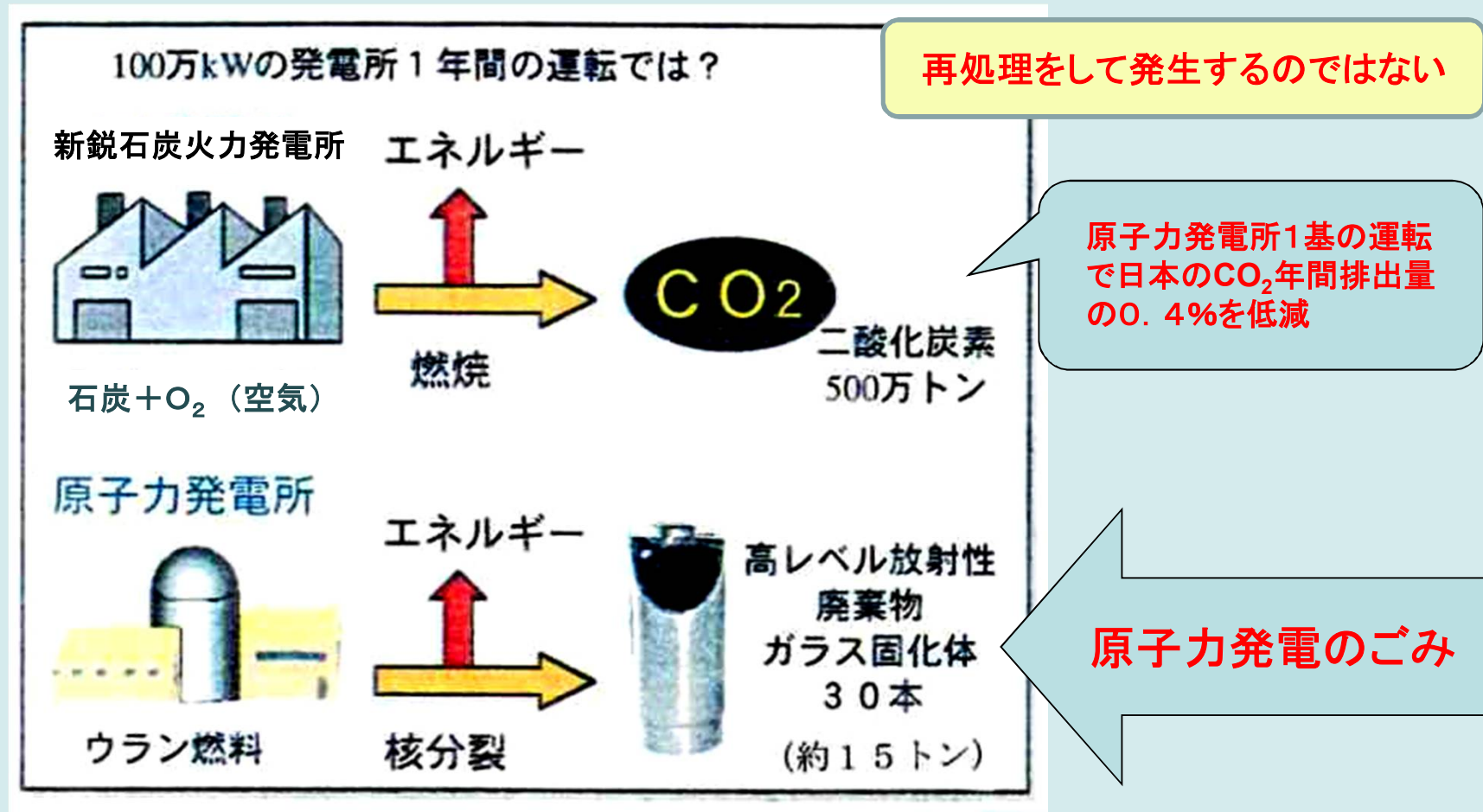
○火力発電に伴い必ず発生

○発生量は膨大

高レベル放射性廃棄物

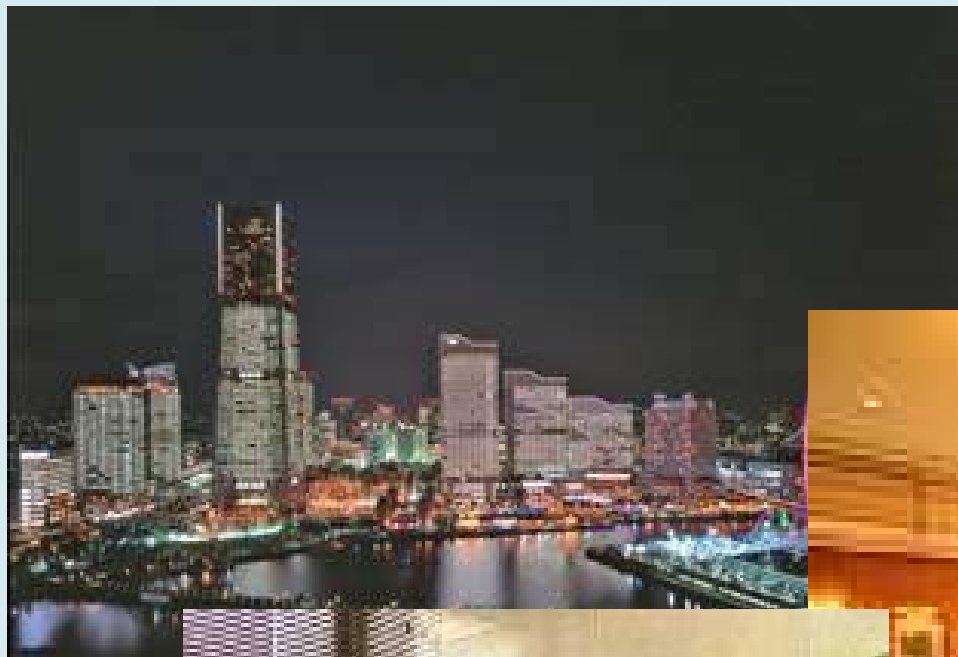
○原子力発電に伴い必ず発生

○発生量が僅少



WHAT? それはなに?

使うところではごみは出ません



## WHAT? それはなに?

■ 日本人1人あたりの年間廃棄物発生量

廃棄物の種類	廃棄物発生量 (kg / 年・人)		備考
①一般廃棄物	主に家庭から出る生ゴミ、粗大ゴミやオフィスから出る紙くずなど	623	平成17年度（2005年度）実績
②産業廃棄物	事業活動に伴って出る廃棄物のうち、廃油、廃プラスチック、廃酸、廃アルカリなどの19種類	3,276	平成16年度（2004年度）実績
③放射性廃棄物	原子力施設の運転、保守などによってもって出る放射能のある廃棄物	③-1 高レベル	平成12年（2000年）～平成18年（2006年）実績の平均
		③-2 低レベル 0.005 0.18	平成18年度（2006年度）実績

出典：①環境省廃棄物・リサイクル対策部「日本の廃棄物処理」平成17年度版、②環境省廃棄物・リサイクル対策部「産業廃棄物排出・処理状況調査報告書」平成16年度 実績、③-1 総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会放射性廃棄物小委員会（平成19年12月18日）参考資料、③-2 経済産業省原子力安全・保安院「平成18年度 原子力施設における放射性廃棄物の管理状況及び放射線業務従事者の線量管理状況について」、文部科学省科学技術・学術政策局「文部科学省所管原子力施設における放射線業務従事者の被ばく管理状況及び放射性廃棄物管理状況について（平成18年度）」

発生量は僅少

総合資源エネルギー調査会ベストミックス小委員会（2015年4月）のデータに基づいて筆者が算定



## WHICH? どんなもの?

○高レベル放射性廃棄物はガラスをステンレス鋼の容器に封じ込めたもの(ガラス固化体)

○セラミックスの1種であるガラスは

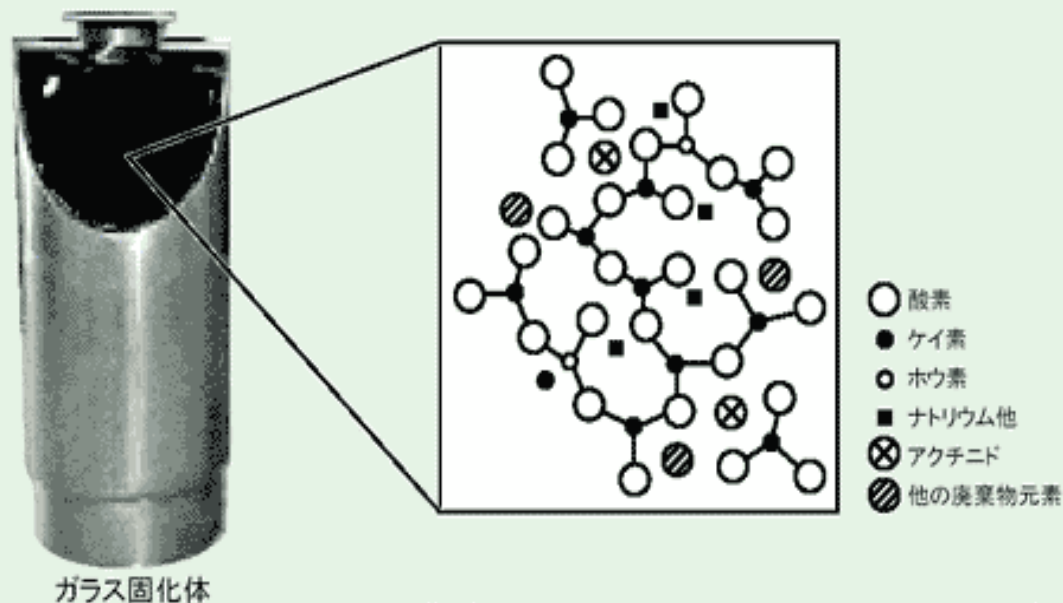
- ①多様な元素や物質を取り込む性質
- ②長い期間にわたって安定である性質
- ③成分が地下水に溶けにくい性質

ガラス



黒曜石(霧ヶ峰自然保護センター)

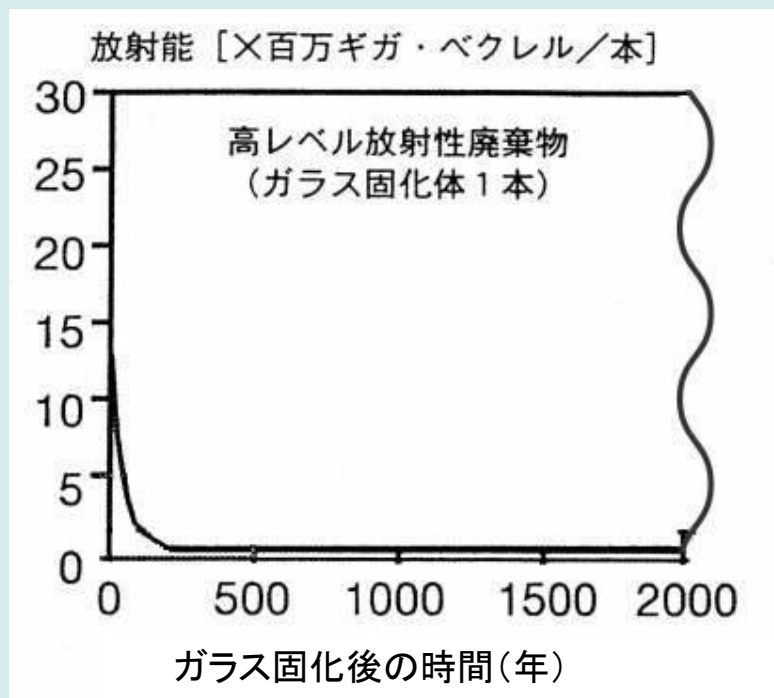
●分子構造レベルでみたガラス網目構造中の廃棄物元素の存在状態●



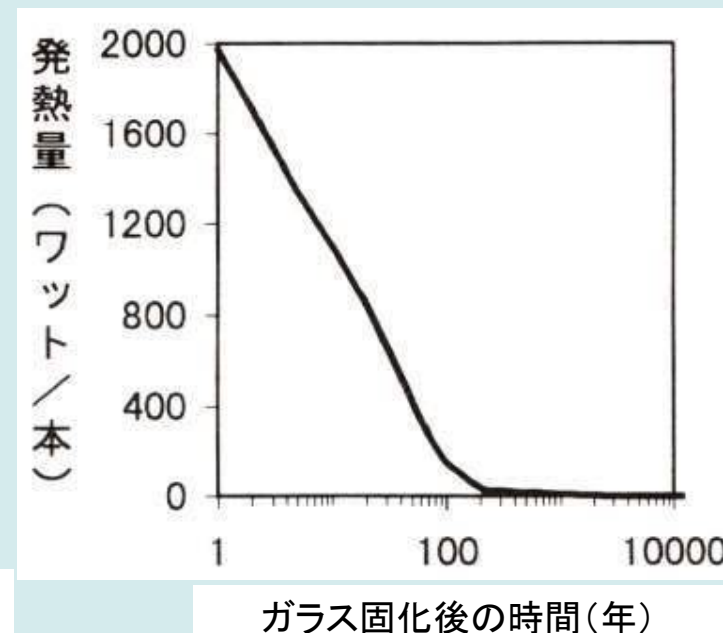
(原子力委員会高レベル放射性廃棄物処分懇談会, 1998 を一部修正)

## WHICH? どんなもの?

- 寿命の短い放射性物質がもたらす放射能は当初非常に高いが、数百年間で急激に減少
- 寿命の長い放射性物質がもたらす放射能は 長い時間をかけて徐々に減少



(1) 放射性物質の量の経時変化

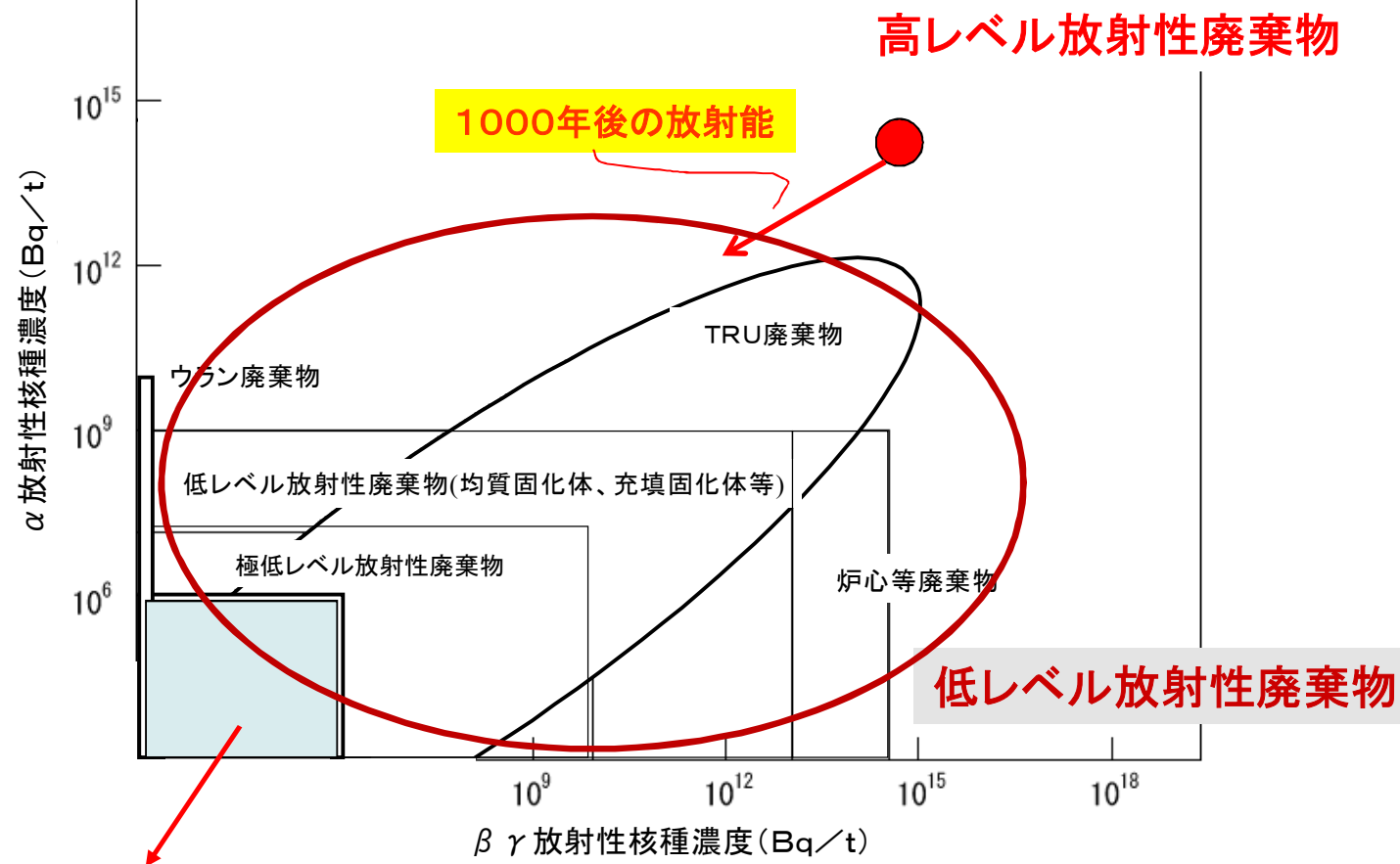


(2) 発熱量の経時変化

WHICH? どんなもの?

## 放射性廃棄物の濃度区分

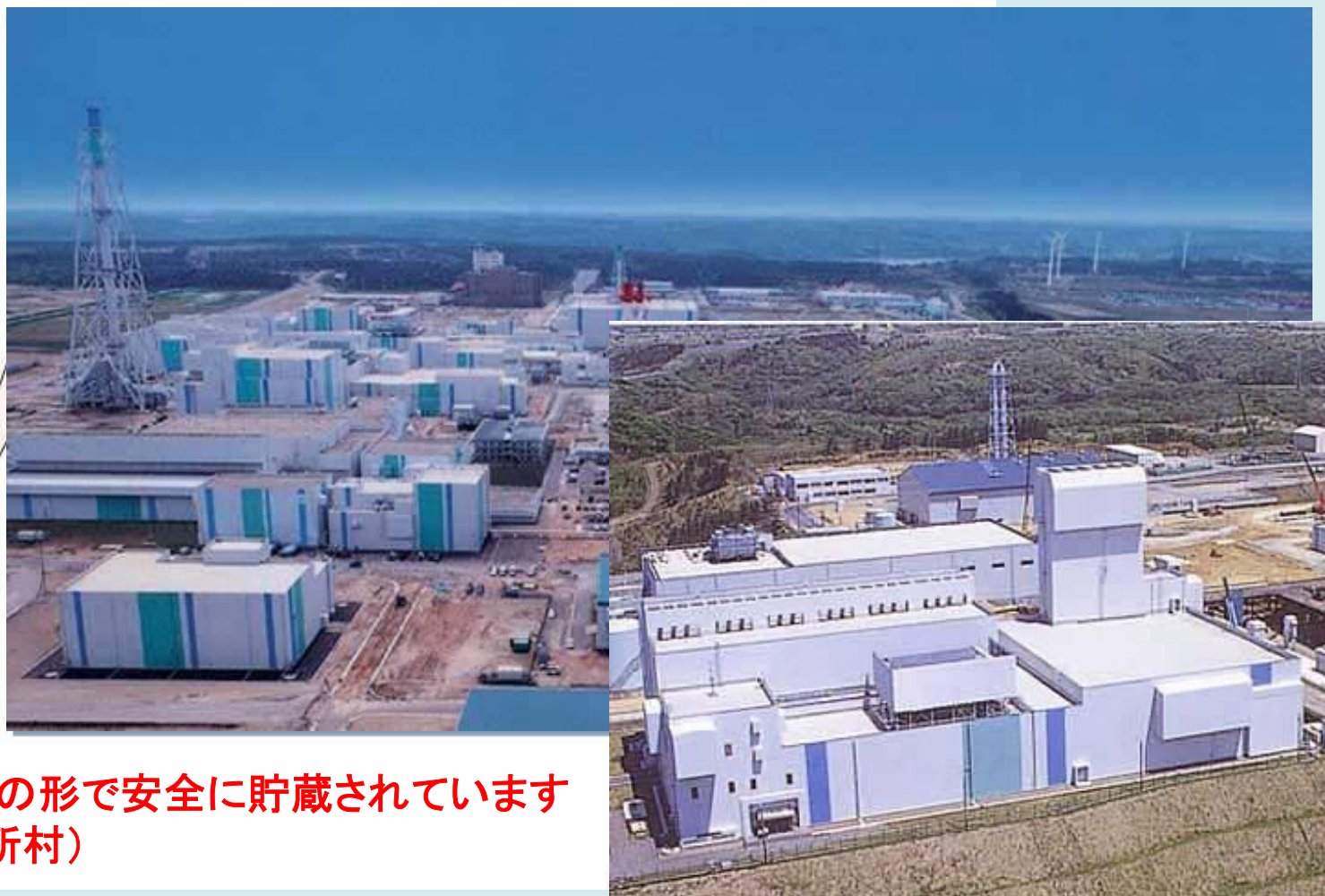
600年ほどで銅の毒性と同程度に放射能は低減する(バーナード・コーエン(1994))



放射性廃棄物として扱う必要がないもの  
(クリアランスレベル以下の廃棄物)

WHERE, NOW ? いまどこに？

## 原子燃料サイクル施設の位置



ガラス固化体の形で安全に貯蔵されています  
(青森県六ヶ所村)

日本原燃HPほか



## WHERE, NOW ? いまどこに？

### 高レベル放射性廃棄物とは

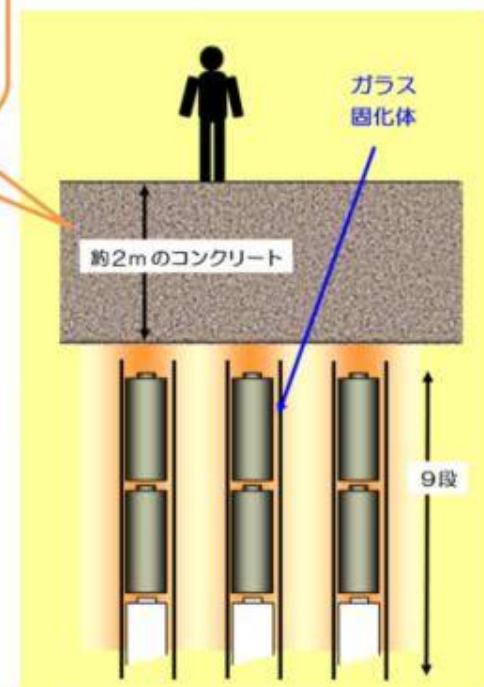
安全に処分できる発熱量に下がるまで、高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター等に保管しています。

ガラス固化体からは強い放射線が出ますが、約2mのコンクリートで十分遮蔽できます。



日本原燃㈱ 高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター（青森県六ヶ所村）  
※写真は2014年12月24日（水）週刊誌の取材で訪問した舞の海氏（掲載誌「週刊新潮」）

このセンターで30～50年貯蔵します。この間に放射線量は1/10、発熱量は1/3～1/5程度まで減少します。



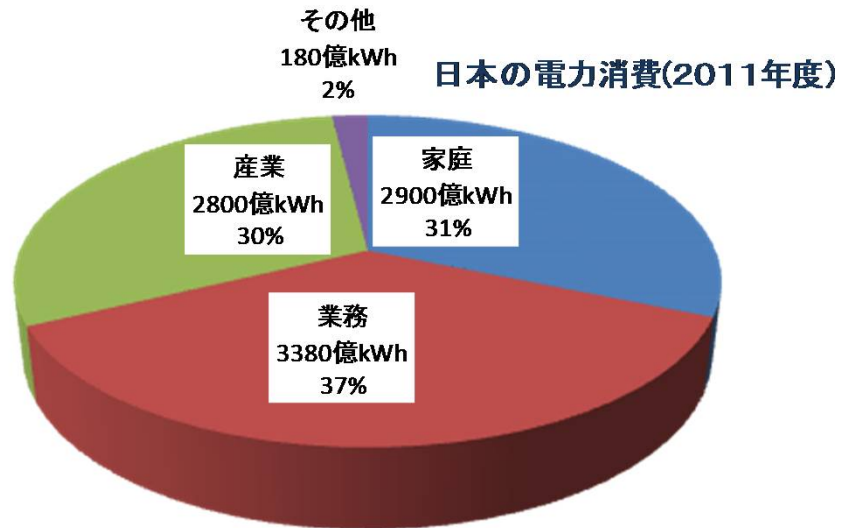
※構造を簡略化した図です。

（2016年9月現在）

地層処分意見交換会（2016, NUMO）

WHO?

誰が出しているの？



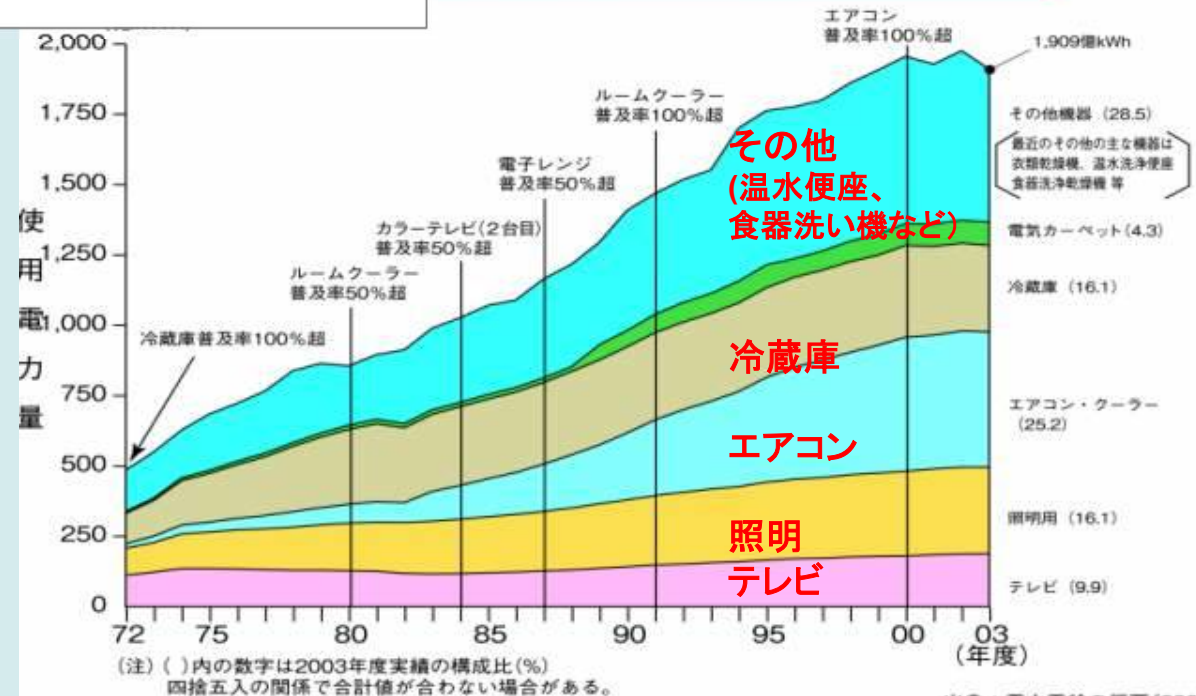
エネルギー白書2013(資源エネルギー庁HP)より編集

ガラス固化体



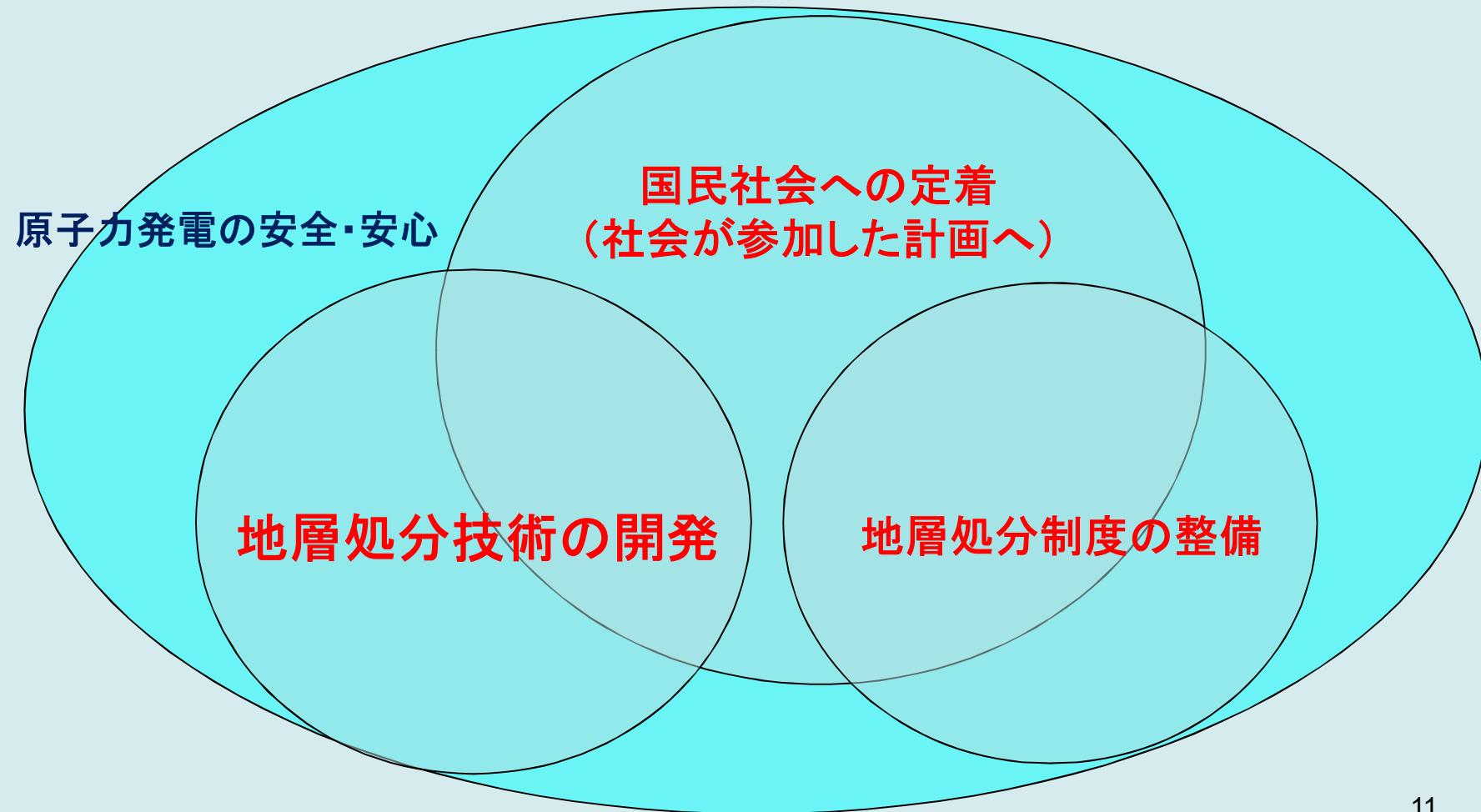
1705地層処分学習会@坪谷

## 家庭電力の伸び



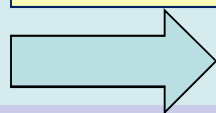
## HOW? どうするの？

高レベル放射性廃棄物の地層処分：社会への定着に向けて

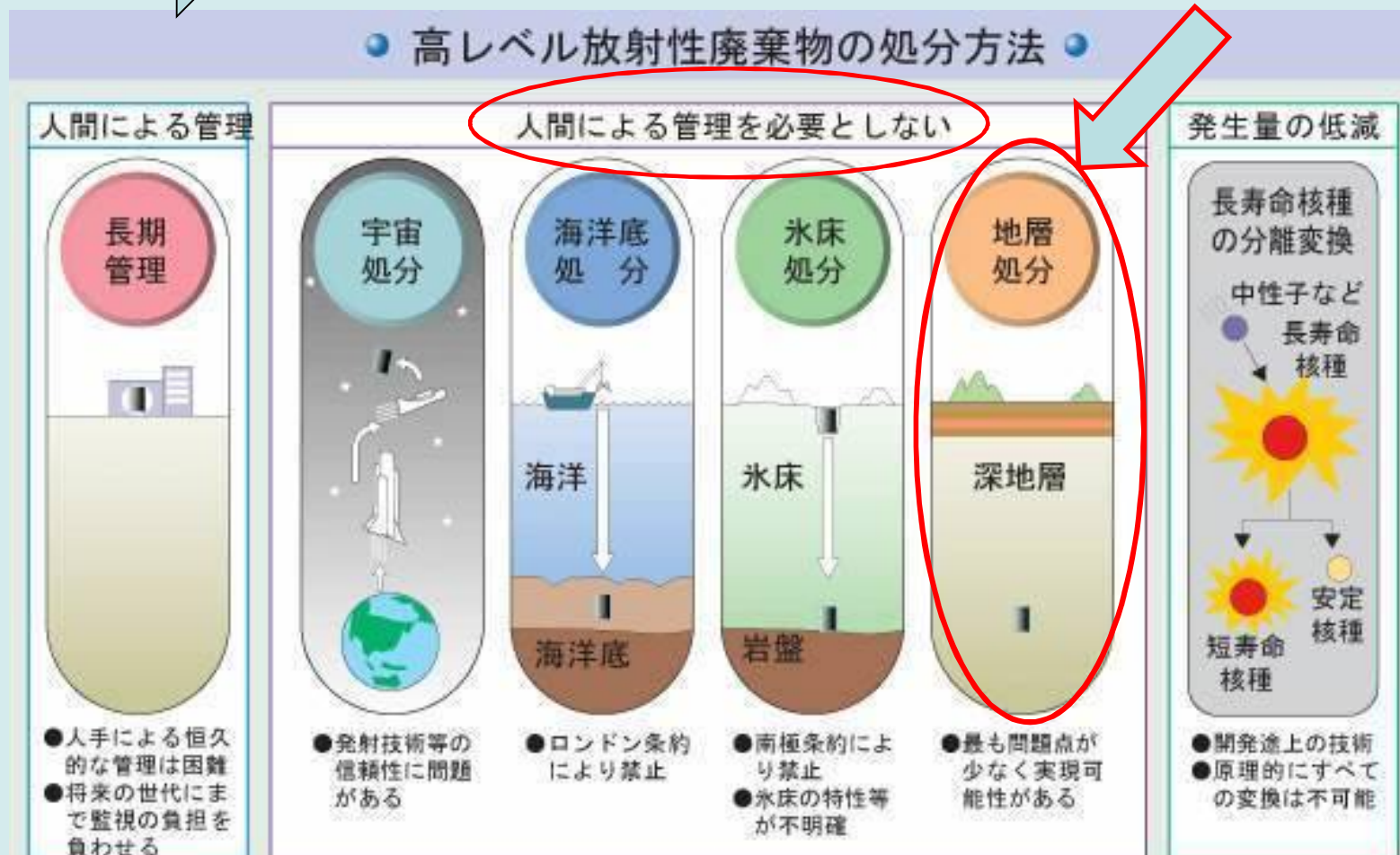


## HOW? どうするの?(その1)

技術の目標: 長い時間、人間の生活環境から安全に隔離する



安定な地下深部を利用 地層処分方式の選択



世代を超えて長い間放射能を持ち続けるので人の手を借りて保管し続けることは望ましくない



## HOW? どうするの?

### 2つの機能を支える地下深部の特徴

●地下深部には、地層処分に必要な2つの機能を支える3つの特徴があります。

#### 地下深部の特徴

①酸素が少ないため、ものが変化しにくい

②ものの動きが非常に遅い

③人間の生活環境から隔離されている

閉じ込め機能

隔離機能

## HOW? どうするの?

### 地層処分技術の開発

- 1957 全米科学アカデミー(NAS)・研究評議会(NRC)が高レベル放射性廃棄物の岩塩層における地層処分概念を推奨する報告書を米国原子力委員会に報告
- 1983 スウェーデン核燃料管理会社(SKB)が帯水層(地下水のある)結晶質岩における地層処分概念KBS-3開発・公表
- 1985 スイス・NAGRA が帯水層・結晶質岩における地層処分概念「保証プロジェクト(Project Gewaehr 85)」発表
- 1992 NAGRAが帯水層・堆積岩地層処分概念についてOpalinous Clay Project として取りまとめ発表
- 1999 核燃料サイクル開発機構が帯水層・結晶質岩および堆積岩における地層処分技術を第2次取りまとめとして原子力委員会に報告・公表

最終処分の目標に対して地層処分は技術的に課題が少なく実現性が高い方法として各国で計画が進む

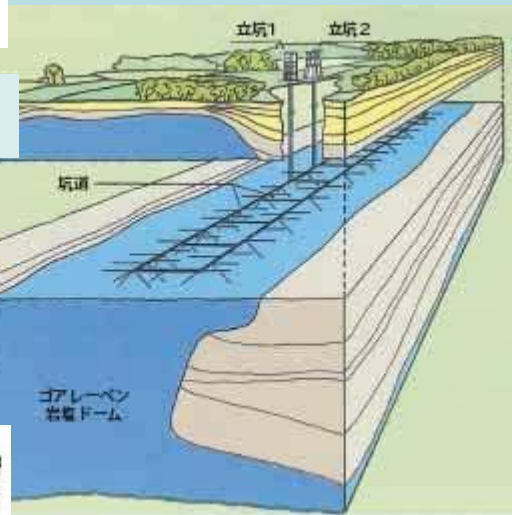
HOW? どうするの?

地層処分技術の開発

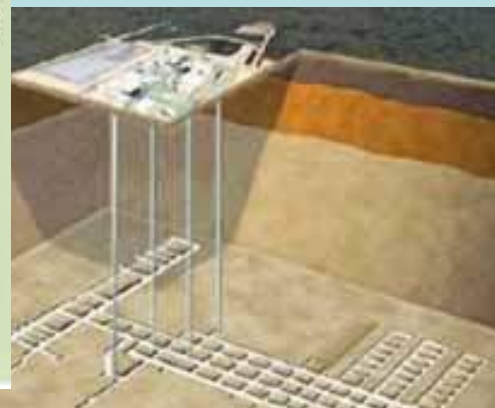
地下水のない  
環境



堆積岩・結晶質岩の利用



岩塩層の利用



世界初の地層処分施設WIPP(操業中、米国)



地下水のある環境  
(帯水層)





穂村弘さん 歌人  
“1000年前から続く日本一文系な職業”



文系と理系 専門家と一般人  
「ミルクが火を使って温められることは分かる。  
しかし、電子レンジで温めることは不安だ。めちゃくちゃに分子が振動させられたミルクは大丈夫なのか」



# HOW? どうするの? 地層処分技術の開発

人工バリア周辺で放射能が  
消滅していく

## 地層処分の基本構成



地下水のある環境(帯水層)

## <処分の概念>



## 安全確保の三要件

### 地下水接触の抑制

- ・ 初期の高い放射能を確実に減衰させる

### 放射性核種の溶出・移動の抑制

- ・ 放射性核種を確実に人工バリア内にとどめる

### 環境安全の確認

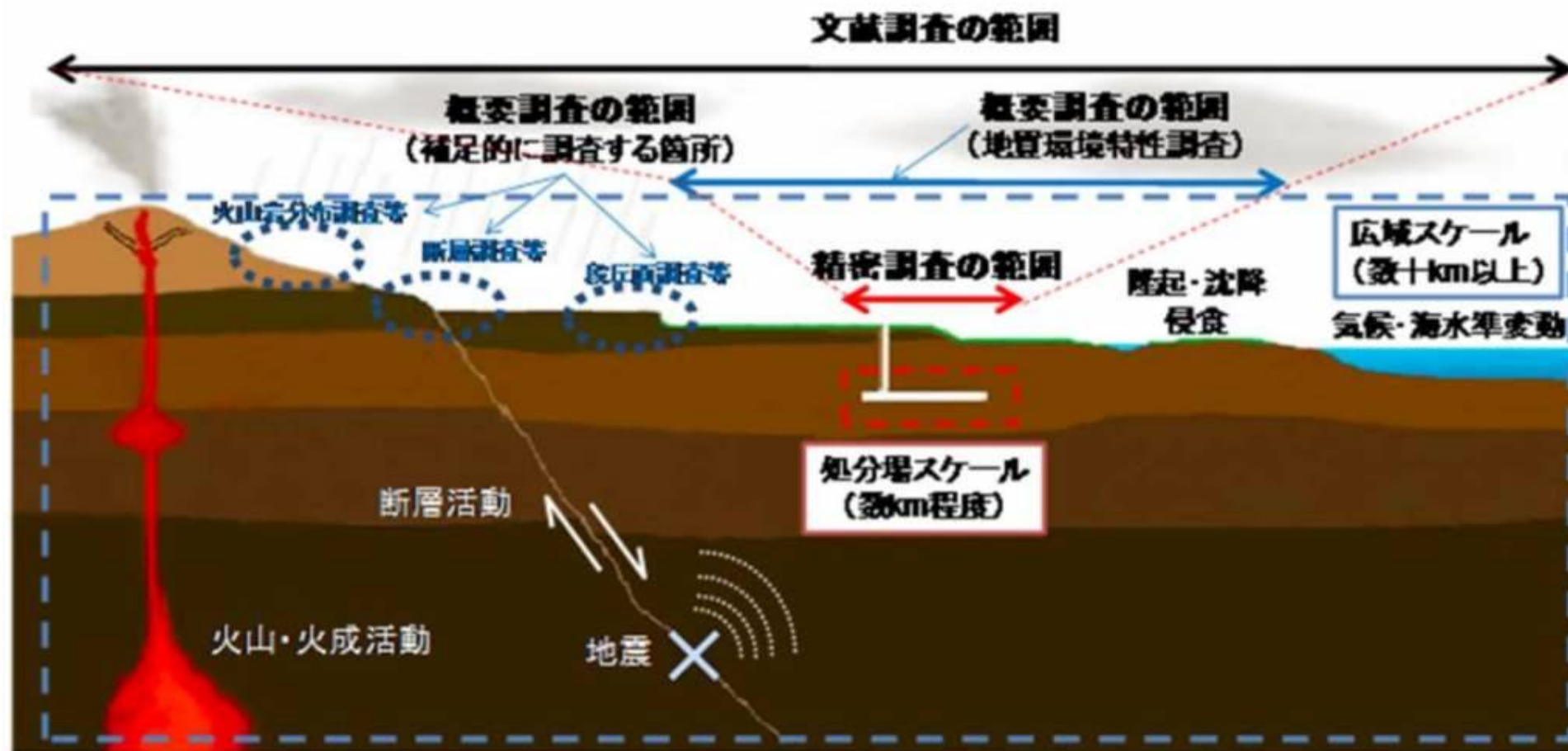
- ・ 人間に影響を及ぼさないことを更に確かなものとする

## HOW? どうするの?

技術の目標: 長い時間、人間の生活環境から安全に隔離する

今までの知識 人工バリアの設置で考慮する地質環境

第四紀学



総合資源エネルギー調査会・地層処分技術ワーキンググループとりまとめ(2014年5月)  
18

# HOW? どうするの?

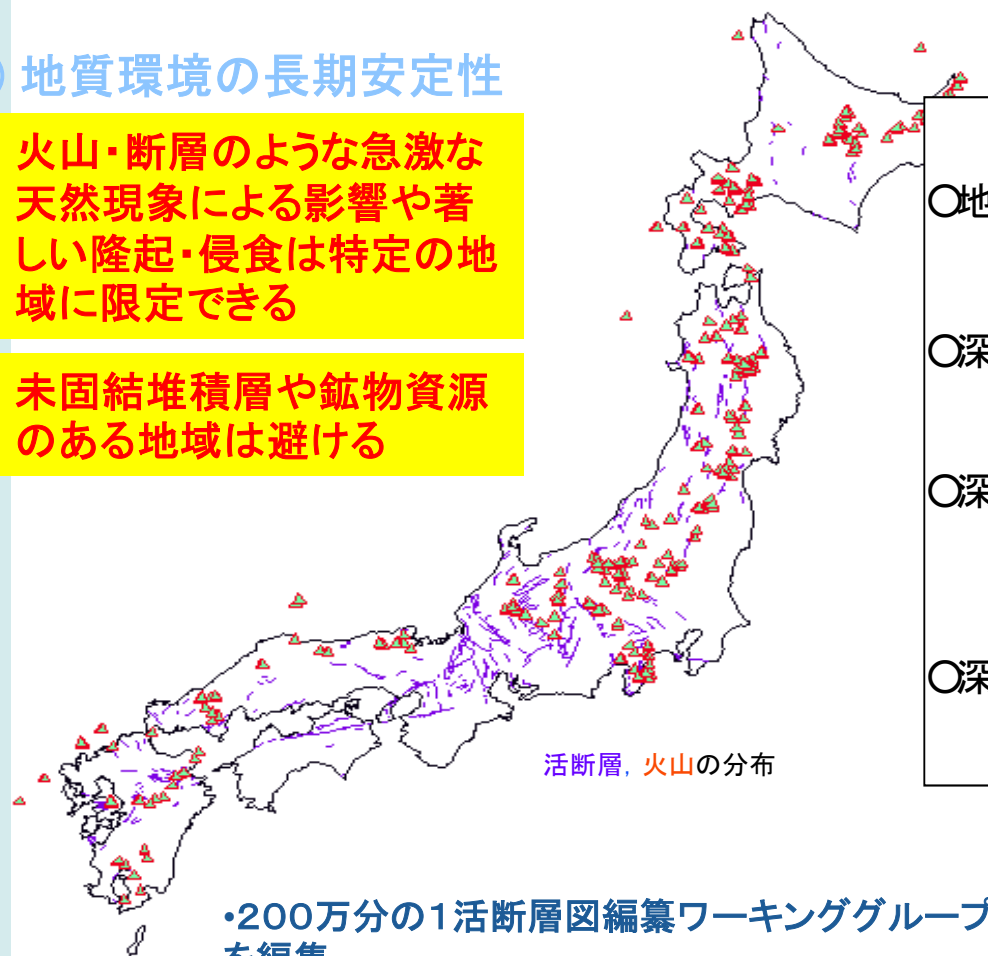
技術の目標: 長い時間、人間の生活環境から安全に隔離する

今までの知識 地層処分に適した地質環境(1/2)

## (1) 地質環境の長期安定性

火山・断層のような急激な天然現象による影響や著しい隆起・侵食は特定の地域に限定できる

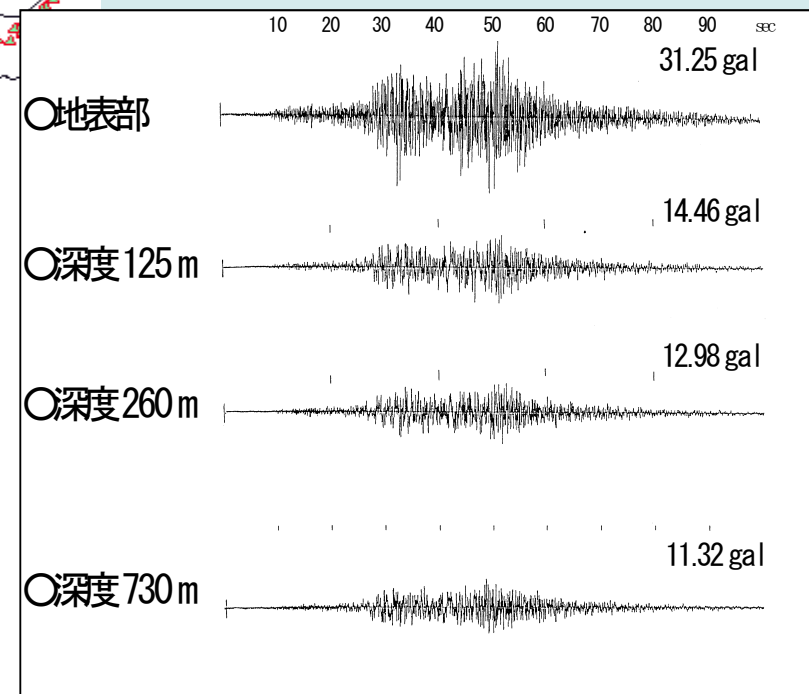
未固結堆積層や鉱物資源のある地域は避ける



•200万分の1活断層図編纂ワーキンググループ(1999)を編集

•第四紀カタログ委員会編(1999)を編集

## 地震による地下深部の振動



三陸はるか沖地震/釜石鉱山坑道内において観測)

核燃料サイクル機構「第2次とりまとめ」(1999) 19より編集

## HOW? どうするの?

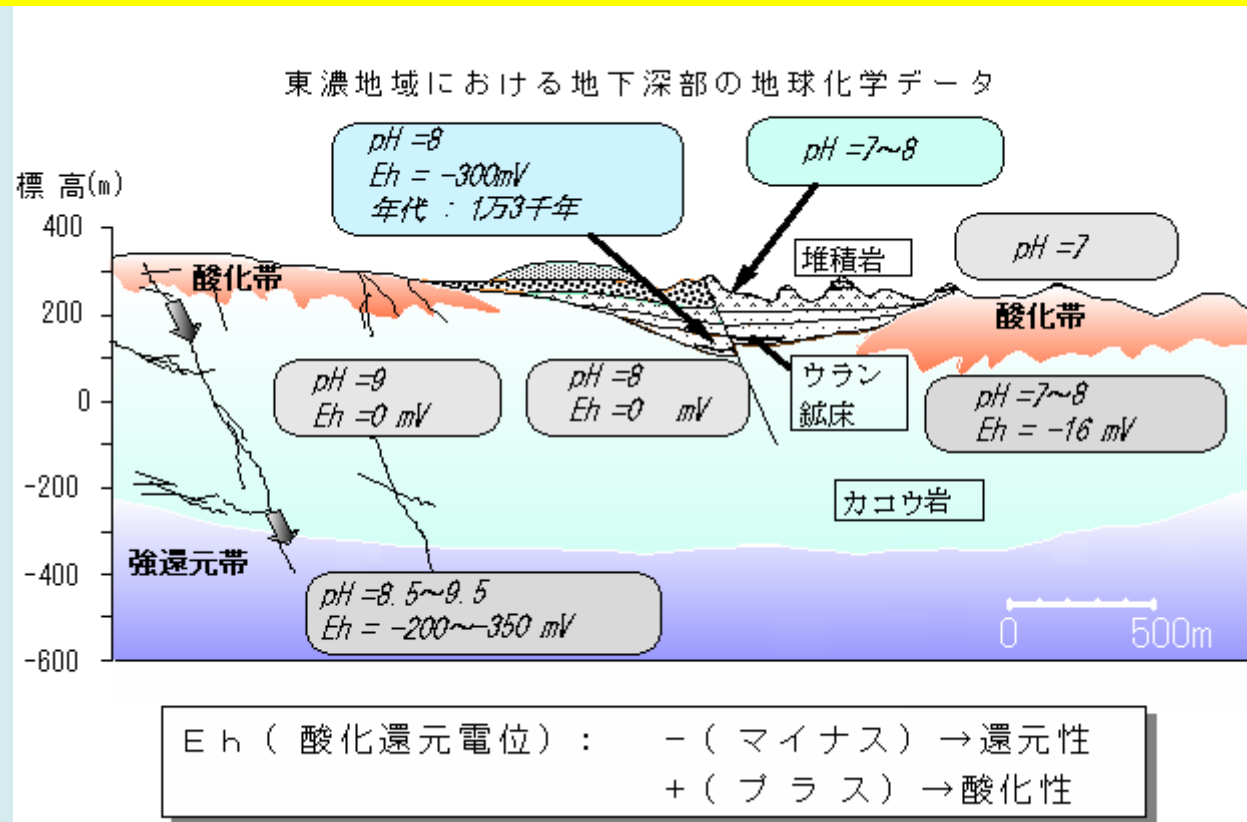
技術の目標: 長い時間、人間の生活環境から安全に隔離する

今までの知識 地層処分に適した地質環境(2/2)

地下水化学・水理学等

### (2) 地下深部における地下水の化学

日本の深部地質環境は地下水が還元性・低透水性であり、処分場を設置したり、多重バリアシステムが正常に機能できる十分な強度や熱物性などを有する



核燃料サイクル機構「第2次とりまとめ」(1999)

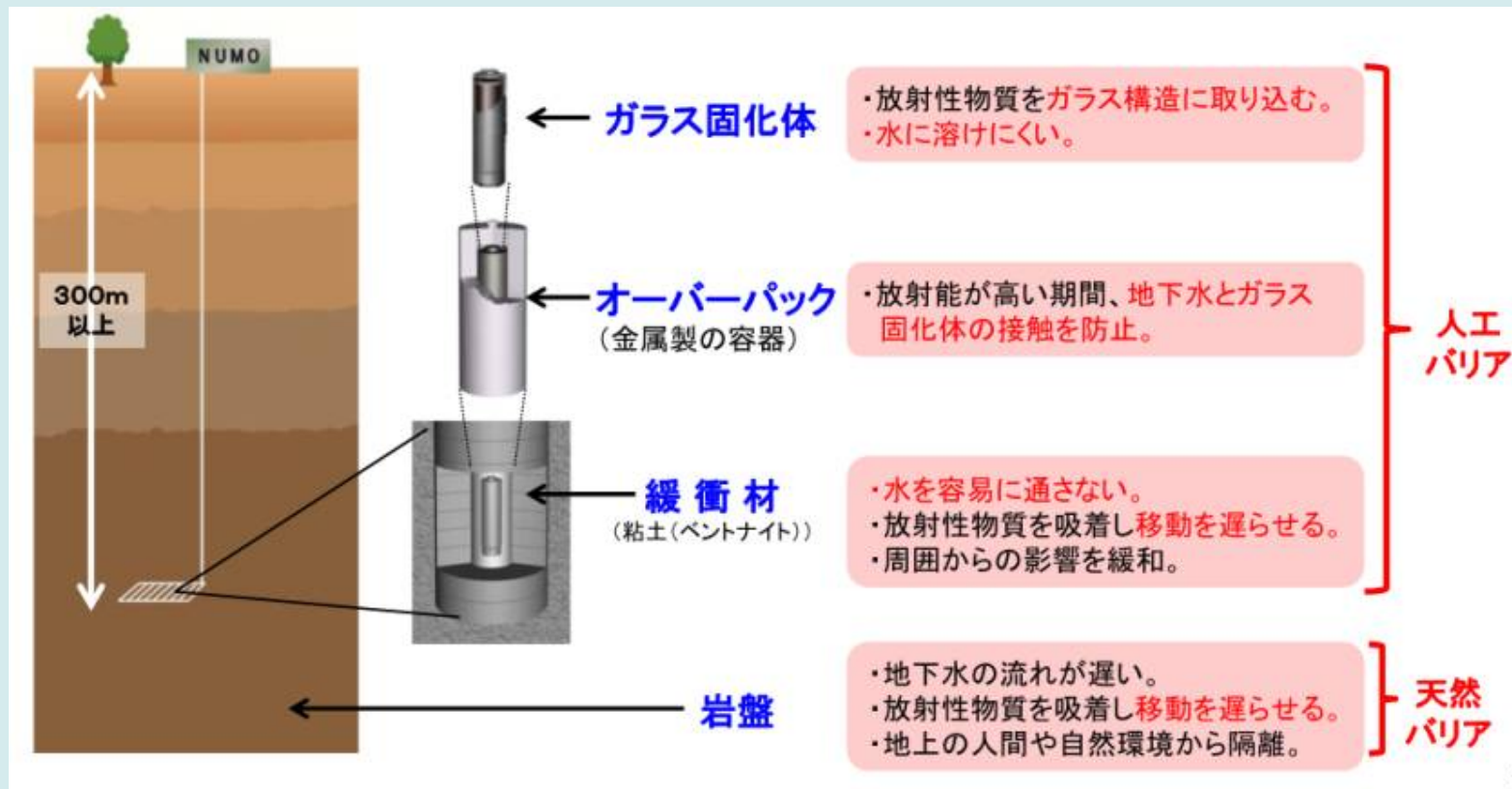


## HOW? どうするの?

技術の目標: 長い時間、人間の生活環境から安全に隔離する

今までの知識 深い岩盤のなかに工学的な対策(人工バリア)を施してガラス固化体を封じ込める

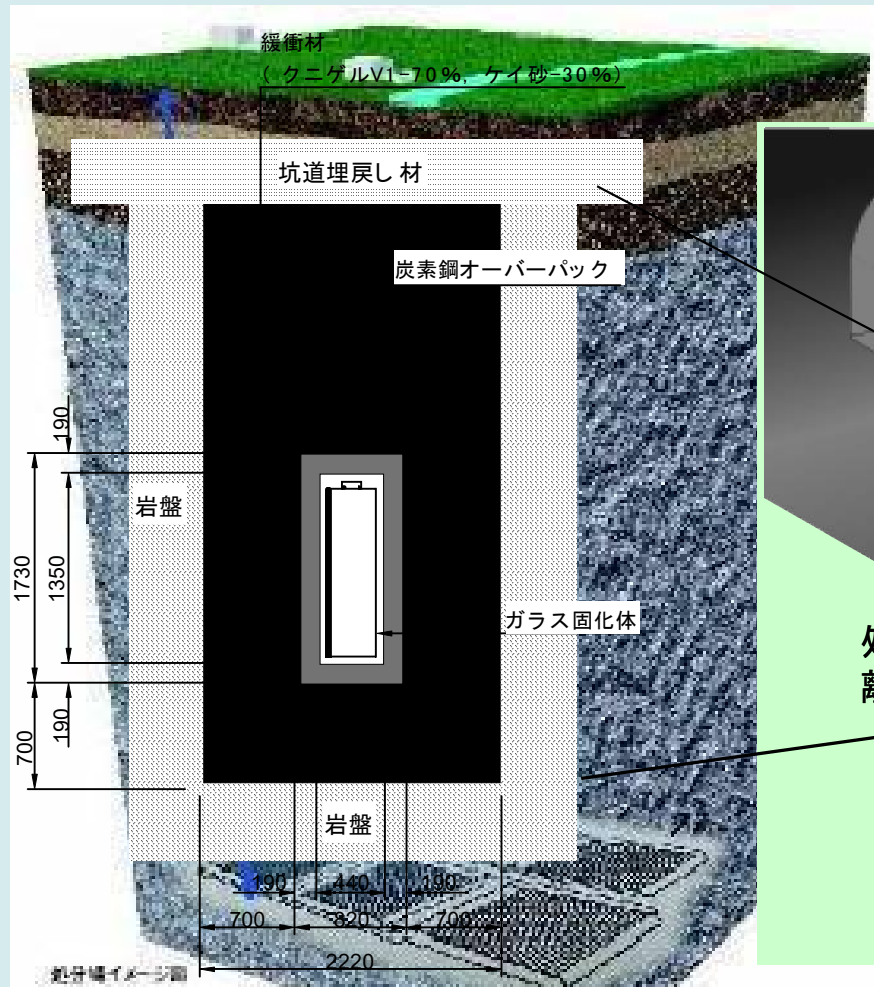
### 岩石力学



## HOW? どうするの?

技術の目標: 長い時間、人間の生活環境から安全に隔離する

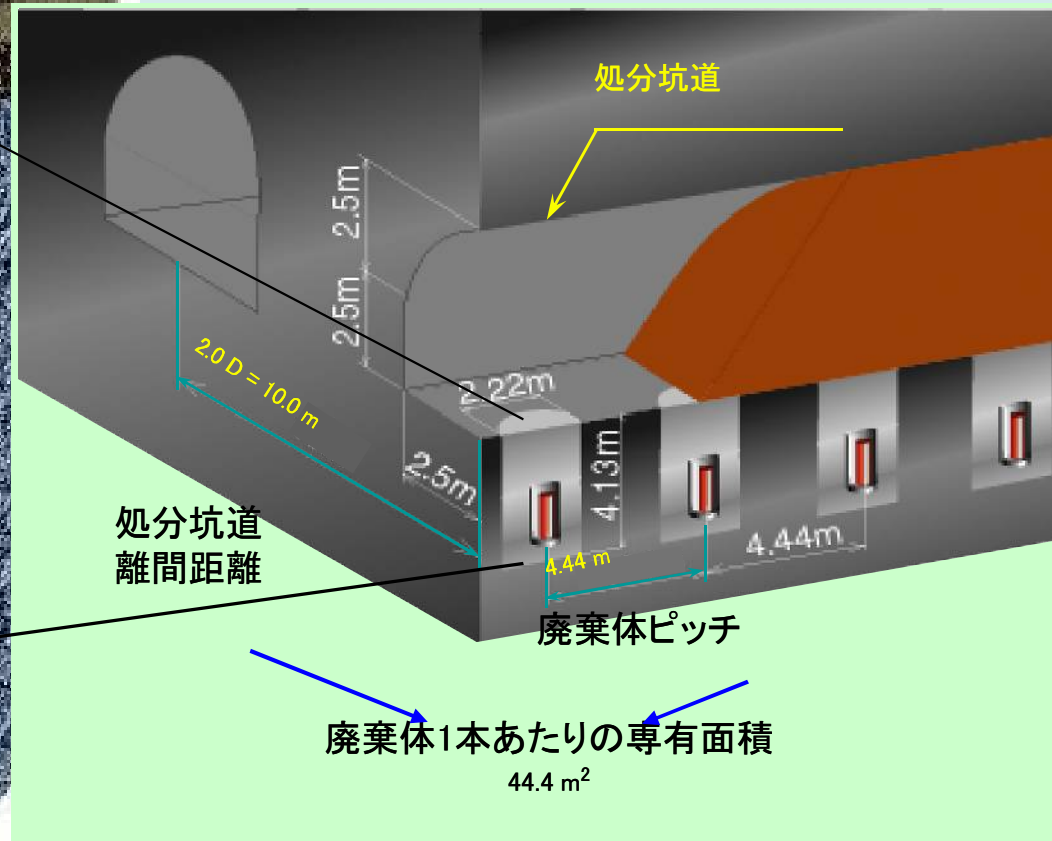
今までの知識 地質環境を考慮した人工バリアと処分技術



人工バリア仕様例

(鉄: 約5.6ton、緩衝材[定置時]: 約24.1ton)

人工バリア材料は天然素材



処分坑道仕様例

(処分孔縦置き方式[硬岩系岩盤])

核燃料サイクル機構「第2次とりまとめ」(1999)

## HOW? どうするの?

技術の目標: 長い時間、人間の生活環境から安全に隔離する

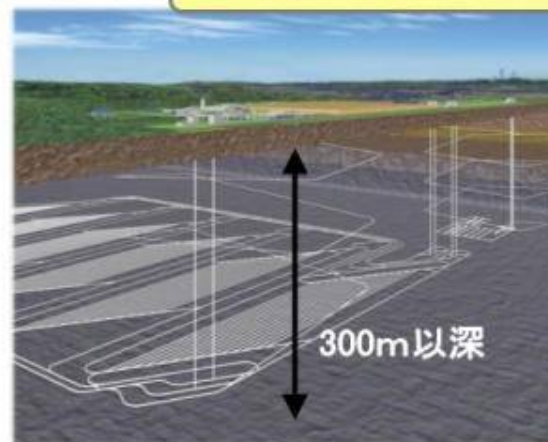
### 地層処分場の規模

- スケールメリットを考慮し、ガラス固化体を4万本以上埋設できる施設を1ヶ所建設することを計画しています。
- 処分施設の規模は、地上施設が1～2km<sup>2</sup>程度、地下施設が6～10km<sup>2</sup>程度、坑道の総延長は200km程度と見込んでいます。
- 国際条約で放射性廃棄物は発生した国内で処分することを前提とされています。日本もこの条約を批准しており、国内で処分する方針としています。

地上施設: 1～2 km<sup>2</sup>程度

【高レベル放射性廃棄物処分施設(イメージ)】

地下施設: 6～10 km<sup>2</sup>程度



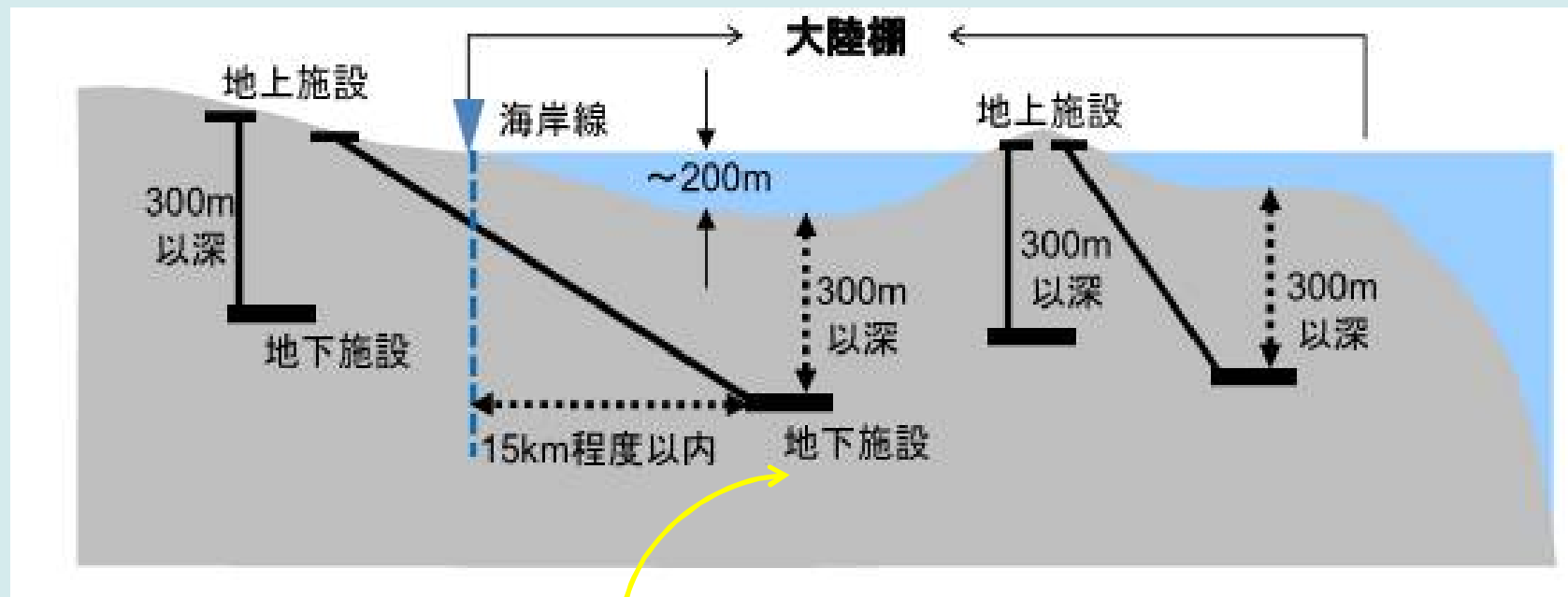
**最終処分事業費: 約3.7兆円**

※費用は原子力発電を行う電力会社が拠出。

※高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)、地層処分を行う低レベル放射性廃棄物(TRU廃棄物)を含みます。

123

## 沿岸部における地層処分のイメージ



総合資源エネルギー調査会・地層処分技術ワーキンググループ(2016. 8)

沿岸海底下処分



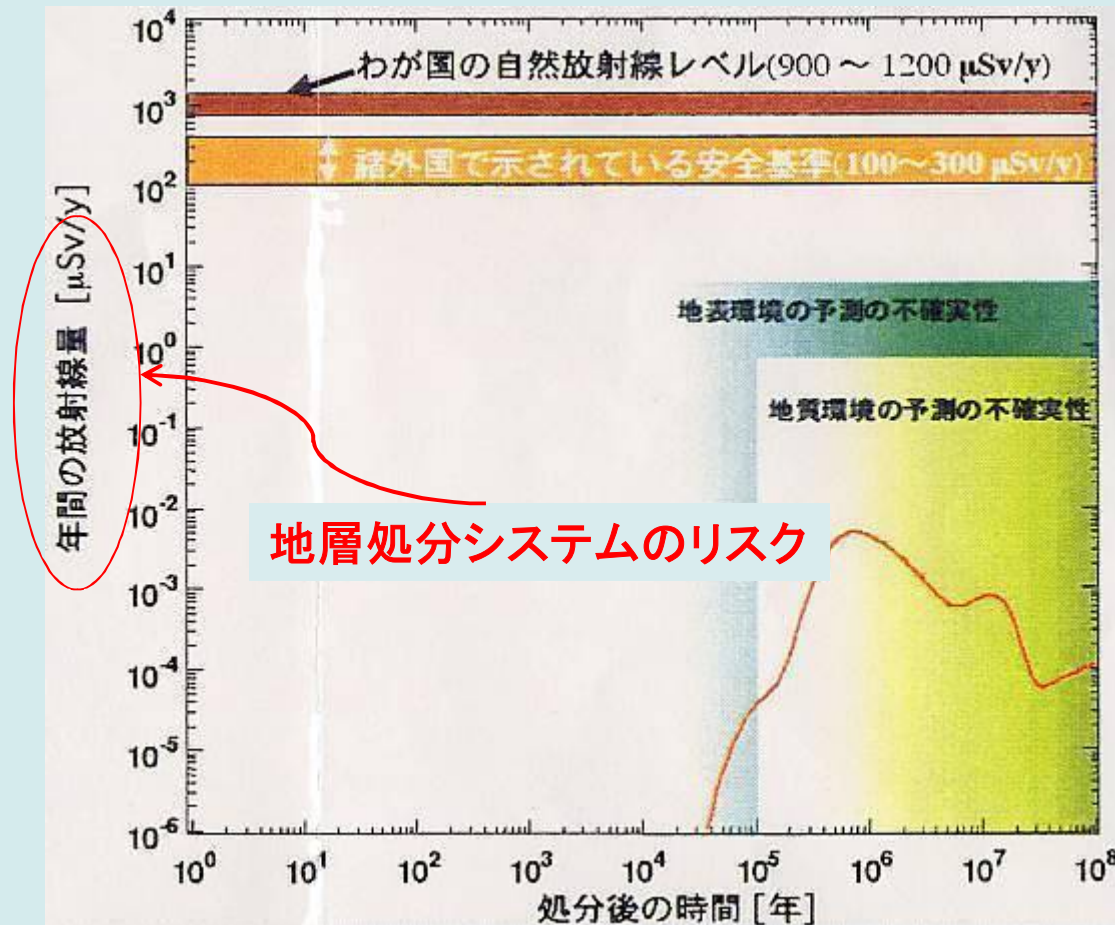
## HOW? どうするの?

技術の目標: 長い時間、人間の生活環境から安全に隔離する

今までの知識 地層処分システムの安全評価

最新の計算科学

「もし、地層処分システムがこうなったら…」という一連の現象を想定した「筋書き(シナリオ)」、現象を表す「モデル」および「データベース」に基づき数値解析を行い、その結果を諸外国の安全基準などと比較

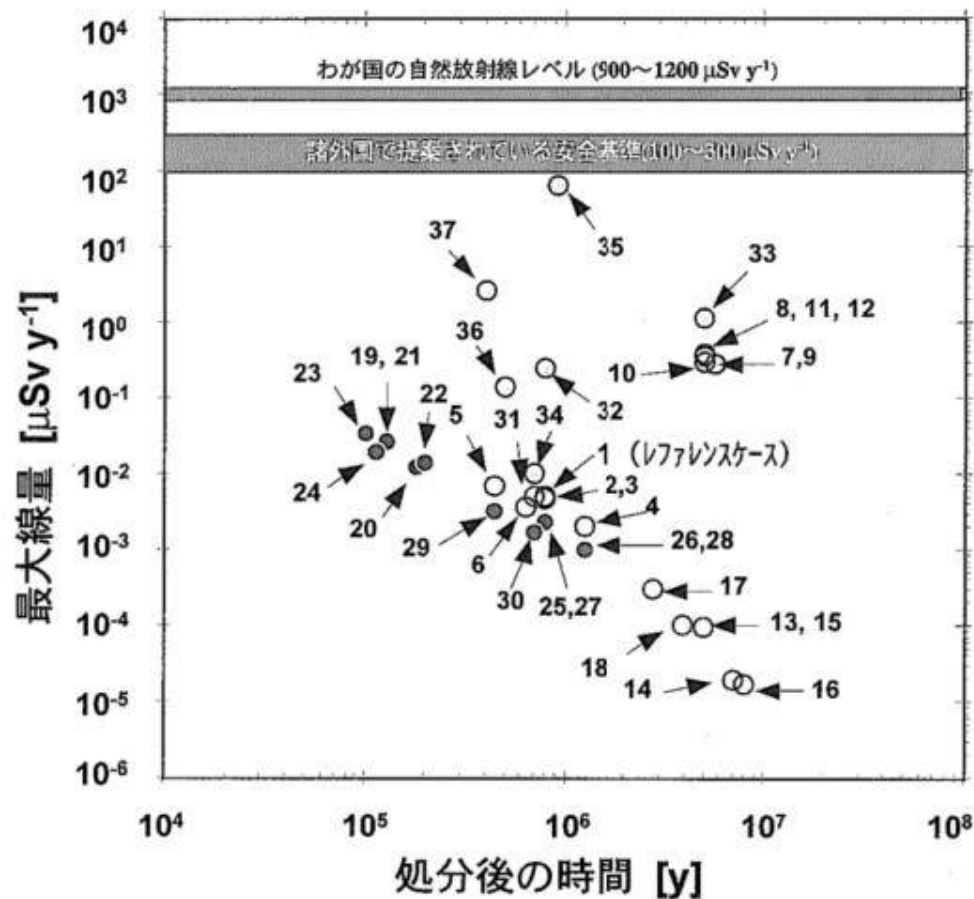


地上に生活する人間の受ける放射線量は将来においても、

最大で自然放射線の1万分の1程度と試算

核燃料サイクル機構「第2次とりまとめ」(1999)を編集

## 不確実性



解析ケースの分類	ケースNo.	レファレンスケースとの相違			GBI	
		地下水	動水勾配	岩種		
レファレンスケース	1	降水系 地下水	0.01	結晶質岩（酸性）	河川水	
システムの多様性	2			結晶質岩（塩基性）		
	3			先新第三紀砂質岩		
	4			先新第三紀泥質・凝灰質岩		
	5			新第三紀砂質岩		
	6			新第三紀泥質岩・凝灰質岩		
	7		0.1	結晶質岩（酸性）		
	8			結晶質岩（塩基性）		
	9			先新第三紀砂質岩		
	10			先新第三紀泥質・凝灰質岩		
	11			新第三紀砂質岩		
	12			新第三紀泥質岩・凝灰質岩		
	13		0.001	結晶質岩（酸性）		
	14			結晶質岩（塩基性）		
	15			先新第三紀砂質岩		
	16			先新第三紀泥質・凝灰質岩		
	17			新第三紀砂質岩		
	18			新第三紀泥質岩・凝灰質岩		
	19		海水系 地下水	0.01	結晶質岩（酸性）	沿岸海域 堆積層
	20				結晶質岩（塩基性）	
	21				先新第三紀砂質岩	
	22				先新第三紀泥質・凝灰質岩	
	23				新第三紀砂質岩	
	24				新第三紀泥質岩・凝灰質岩	
	25			0.001	結晶質岩（酸性）	
	26				結晶質岩（塩基性）	
	27				先新第三紀砂質岩	
	28				先新第三紀泥質・凝灰質岩	
	29				新第三紀砂質岩	
	30				新第三紀泥質岩・凝灰質岩	
		31	緩衝材厚さの変更（0.4 m）を考慮			河川水
	32	GBIを深井戸に変更			深井戸	
データの不確実性	33	ガラス溶解速度、岩盤中分配係数、過水量係数の不確実性を同時に考慮			河川水	
モデルの不確実性	34	コロイドによる核種移行を考慮				
シナリオの不確実性	35	隆起・侵食（隆起侵食速度 = 1.0 mm y <sup>-1</sup> ）				
	36	埋め戻し・プラグの施工不良				
天然バリア機能を考慮しないケース	37	人工バリアから核種が直接生物圏に移行すると仮定				

図 5.7-2 システム性能解析結果における最大線量とその時間  
(ガラス固化体 4 万本あたり：GBI は河川水)

HOW? どうするの?

重要な技術領域

長期安定性  
(第四紀学)

地層科学研究

我が国の地質環境

調査技術

地質環境特性  
(岩石力学、水理学、地下水化学)

安全評価技術

ナチュラルアナログ

社会対応技術  
モニタリング技術  
記録の保存技術

処分技術

遠隔・定置

多重バリアシステム概念

安全の論拠(セーフティ・ケース)

HOW? どうするの?

たゆみない研究開発と人材育成

技術の目標: 長い時間、人間の生活環境から安全に隔離する



地層処分放射化学研究施設—QUALITY—  
(東海村)

## 地層処分関連研究施設(1)

(原子力機構HP)

1705地層処分学習会@坪谷



熱-水-応力-化学連成試験設備  
(COUPLE)

地層処分基盤研究施設—ENTRY—

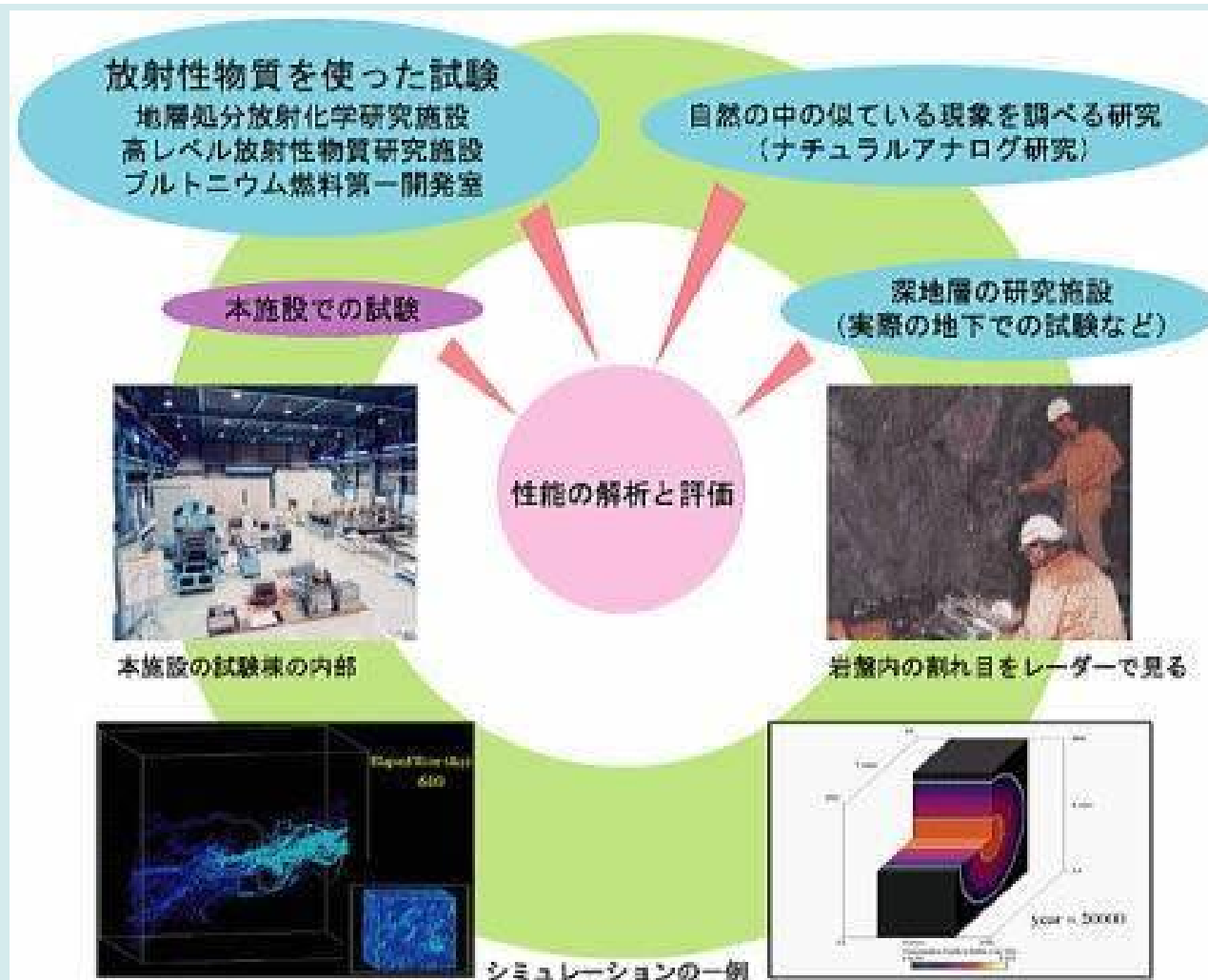


# HOW? どうするの?

## たゆみない研究開発と人材育成

地層処分基盤研究施設  
—ENTRY—(東海村)

技術の目標: 長い時間、人間の生活環境から安全に隔離する



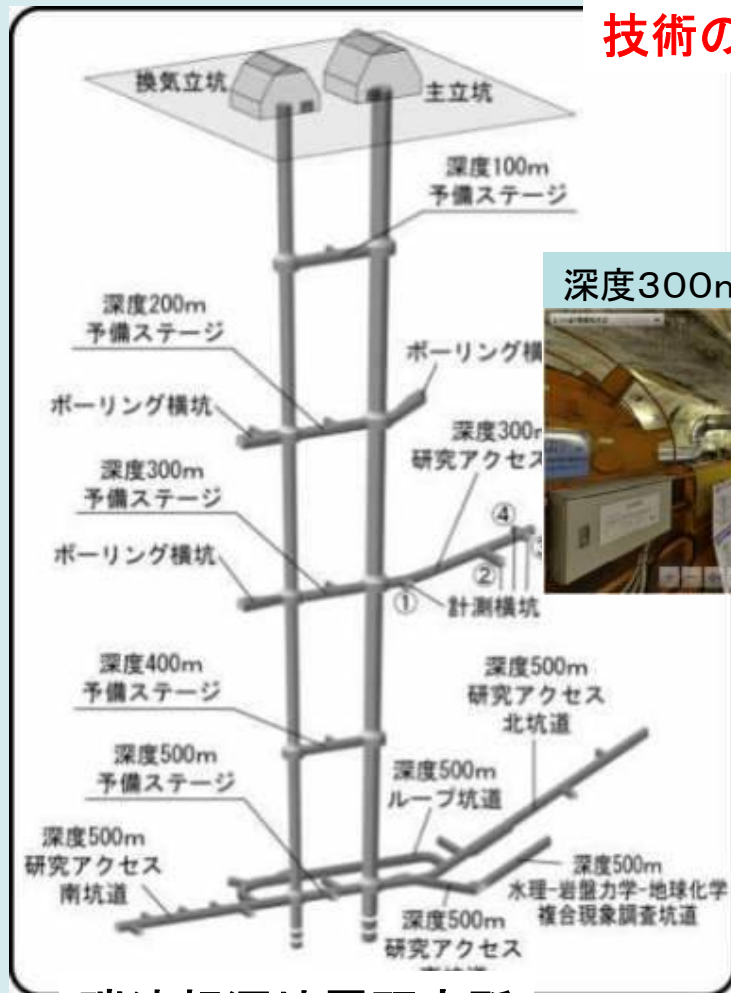
地層処分関連研究施設(2)

(原子力機構HP)

HOW? どうするの?

たゆみない研究開発と人材育成

技術の目標: 長い時間、人間の生活環境から安全に隔離する



瑞浪超深地層研究所

(2015. 1現在)  
(岐阜県瑞浪市)

結晶質岩系研究

深度300m研究状況

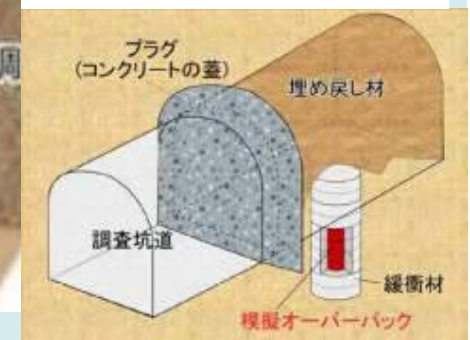


幌延深地層研究センター(2015. 1現在)  
(北海道幌延町)

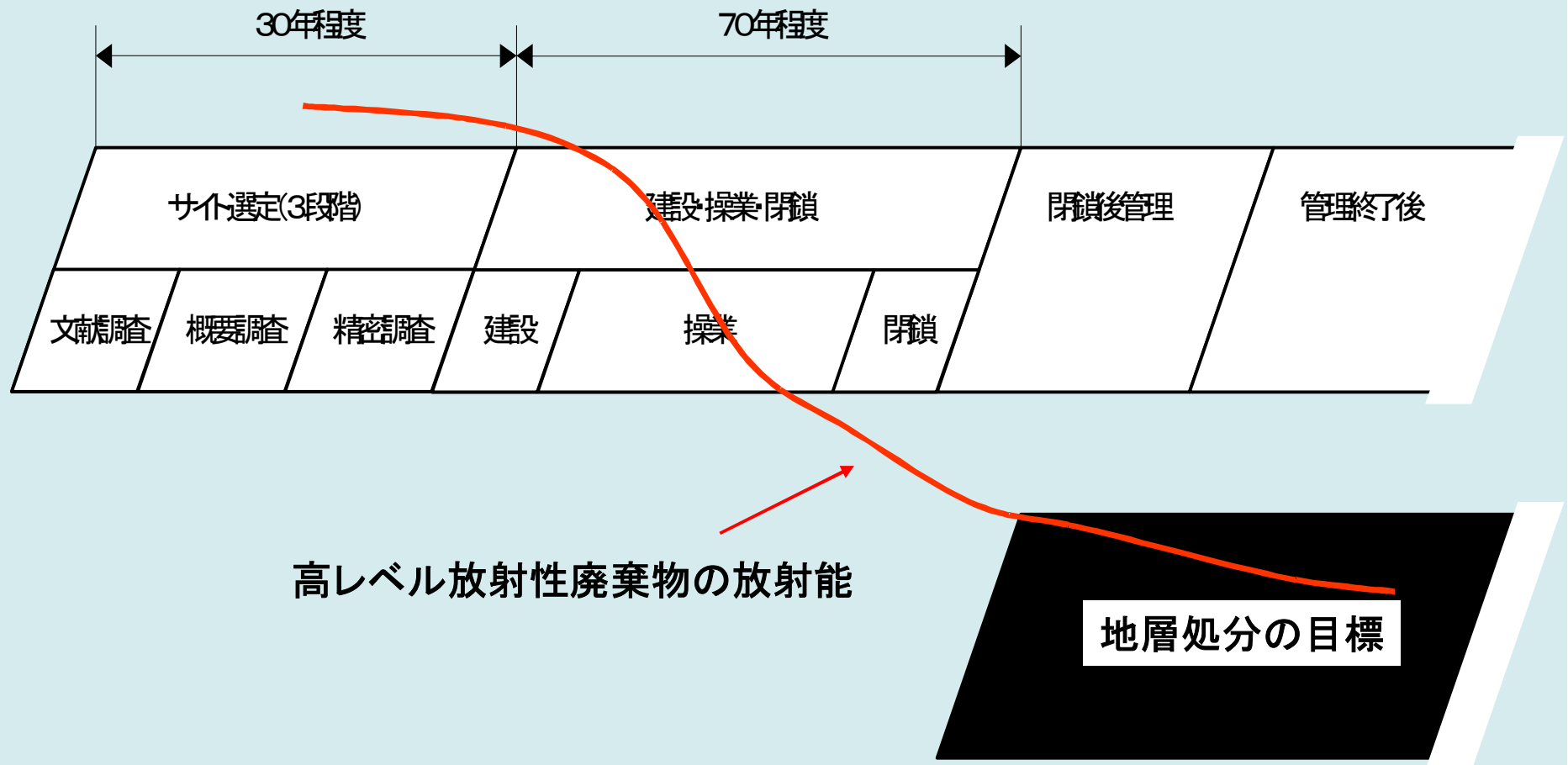


堆積岩系研究

深度350m研究状況



目標: 高レベル放射性廃棄物は長い時間、人間の生活環境から安全に隔離する

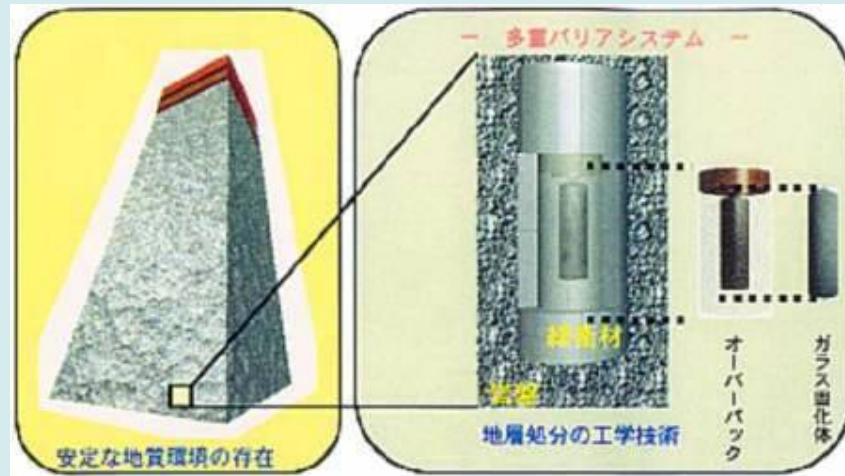


HOW? どうするの?

技術の目標: 長い時間、人間の生活環境から安全に隔離する

今までの知識 自然に学ぶ長期安全性

ナチュラルアナログ(温故知新)



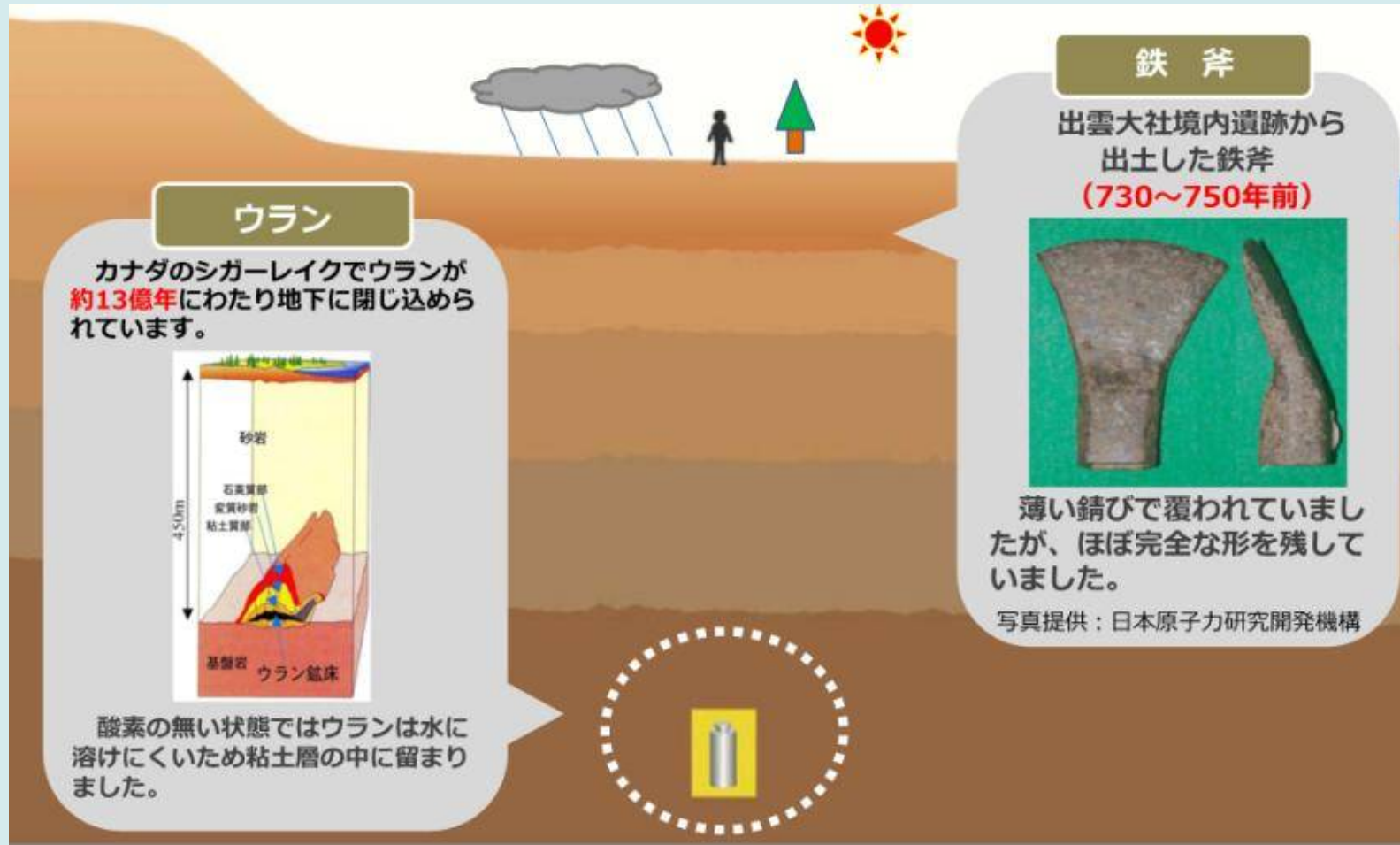


HOW? どうするの?

技術の目標: 長い時間、人間の生活環境から安全に隔離する

今までの知識 自然に学ぶ長期安全性

ナチュラルアナログ(温故知新)



## HOW? どうするの？

### 高レベル放射性廃棄物の地層処分：社会への定着に向けて

世代を超えて長い間放射能を持ち続けるので人の手を借りて保管し続けることは望ましくない



最新の科学と技術を使って管理  
(地層処分)

しかし、



処分に当たっては人々に信頼される仕組み(制度)が必要



NHK連続ドラマ マッサン

ウイスキーづくりの工場立地に山崎(京都府)が向いていることを技術者と経営者が一致  
ー技術者は自然環境(水と霧)の面で  
ー経営者(出資者)はロジステックス(製品の輸送)と売り上げ(市場の認知)の面で

**優れた技術であることは大事だが、  
マーケット(国民)が評価(社会が認知)しなければ技術は消え去る**