

Seeps企画セッション（20180908）  
高レベル放射性廃棄物（HLW）の最終処分をめぐる  
社会的受容性と可逆性  
第4報告

## 「日本の地層処分研究と社会的受容性」

平成30年9月8日（土）

竹内 真司（日本大学 文理学部）  
師岡 慎一（早稲田大学 理工学術院）  
勝田 正文（早稲田大学 理工学術院）  
於 上智大学四谷キャンパス 415 教室

## 内容

- 地層処分の概念と技術的成果
- 地層処分の技術的受容性を妨げる要因
- 地層処分の代替案（長期管理・回収可能性）
- 今後の課題（放射性廃棄物処分の受容のために）

## 背景

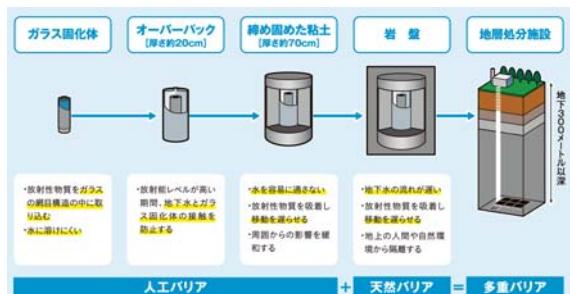
- 1992／1999：地層処分研究の成果の取りまとめ（動燃事業団／サイクル機構）
- 2000：実施主体（NUMO）設立
- 2017：科学的特性マップ公表

- ◆多様かつ専門的な内容+処分場の受容性  
→トランスサイエンス



- ✓地層処分の技術的受容性を阻害する要因は？  
✓解決策は？

## 地層処分の概念 ～多重バリアシステム～

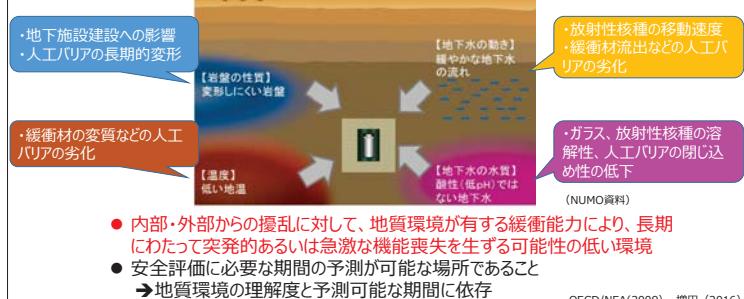


資源エネルギー庁 ([http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/nuclear/rw/hlw/hlw01.html#h04](http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/hlw/hlw01.html#h04))

## 地層処分の概念 ～地層処分の経緯～

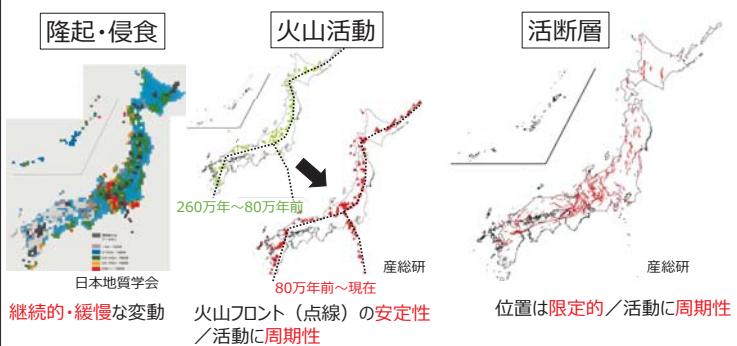
- 全米科学アカデミー（1957）：岩塩層中への処分の有効性
- OECD/NEA（1977）：複数オプションのうち、地層処分を推奨。地上での貯蔵の有効活用も。
- 全米科学アカデミー（1983）：放射性核種は廃棄物周辺で崩壊、漏出した核種の地下水による希釈。岩種による適否判断は適当でない。
- 原子力委員会（1976）：当面地層処分研究を推進
- 動燃事業団（1984）：可能性のある地層の調査（中間報告）

## 地層処分の概念 ～安定な地質環境～

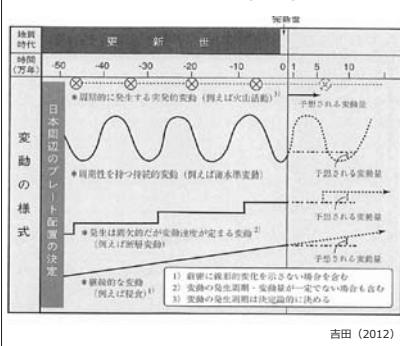


OECD/NEA(2009)、増田(2016)

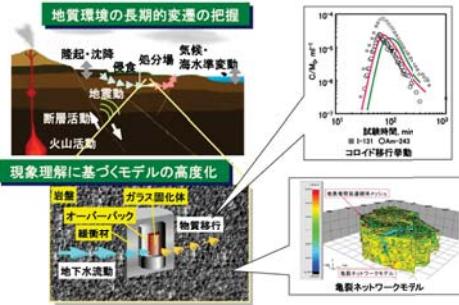
## 地層処分の概念 ～地質環境の変動性～



## 地層処分の概念 ～将来予測の考え方～



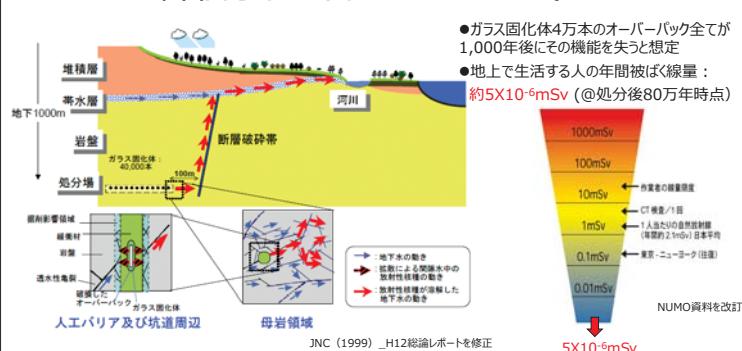
## 地層処分の概念 ～閉鎖後長期の安全評価の考え方～



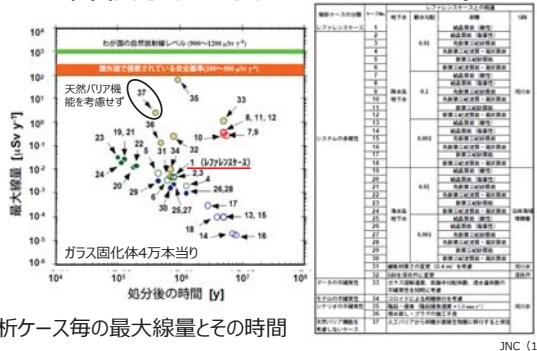
## 地層処分の概念 ～閉鎖後長期の安全評価の考え方～

- “言い当て”ではなく、システムにより安全が確保されるか否かの判断材料
- 保守性を考慮 = 解析の前提条件や使用するデータを安全側（結果が厳しくなる側）に見積もる
- 安全評価の妥当性
  - シナリオ／モデル／データの妥当性・信頼性
  - 数値計算の手順や実施の適切性

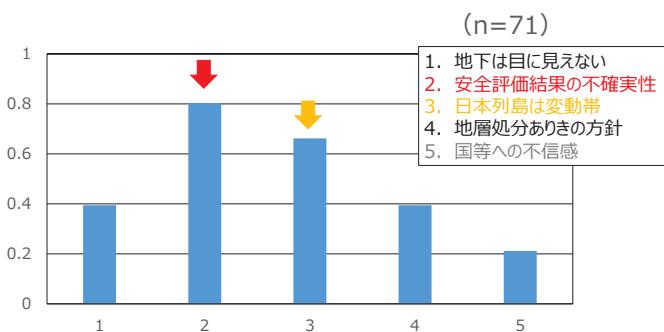
## 地層処分の技術的成果 ～評価事例（第2次とりまとめ）～



## 地層処分の技術的成果 ～評価事例（第2次とりまとめ）～



## 地層処分の技術的受容性を妨げる要因



## 地層処分の技術的受容性を妨げる要因

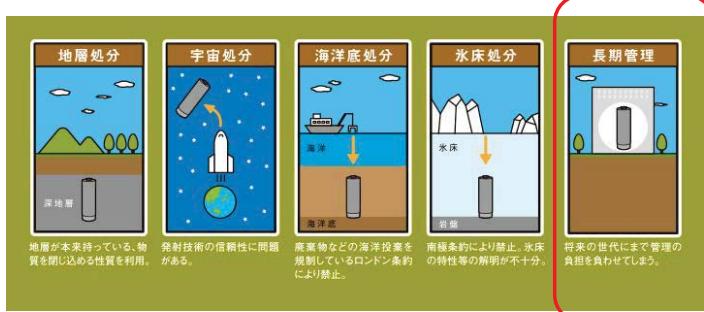
### 2. 安全評価結果の不確実性

➢安全評価は将来を言い当てるもの！？

### 3. 日本列島は変動帯

➢日本列島の広い範囲で安定（動かない）でなければならない！？

## 地層処分の代替案



## 長期管理（地上管理）

- 社会構造が遠い将来まで変わらない、あるいは、技術は進展し続けるという想定を置かず、制度的管理に依存しない対策（受動的な安全確保）を目指すべき（OECD/NEA,1982）

➢戦争、侵略、テロなど



防衛省資料 ([http://www.mod.go.jp/jiji/approach/kokusai\\_heiwa/hokyushien/pdf/tatakai\\_katsudou.pdf](http://www.mod.go.jp/jiji/approach/kokusai_heiwa/hokyushien/pdf/tatakai_katsudou.pdf))

## 地層処分の代替案の検討 ～フランスの例～

### 1991年 放射性廃棄物管理研究法

- 分離変換
- 長期貯蔵
- 地層処分



- 上記方策に対する研究の実施
- 15年を超えない期間内で研究成果を取りまとめ

## 地層処分の代替案の検討 ～フランスの例～

### 2006年放射性廃棄物等管理計画法

- 分離変換
  - 高度分離と変換によりさらに進める
  - 放射能の毒性をゼロにすることはできない（廃棄物は残る）
- 長期貯蔵
  - 廃棄物の管理に柔軟性を与えるもの
  - 永続的な管理方法ではない
- 地層処分
  - 可逆性を確保（100年<）
  - 最終的な管理方策

## 回収可能性（フランスの例）

- 廃棄体は埋め戻さずに定置
- 回収は定置時と逆動線（Andra, 2016）



- ✓技術の進展、将来世代に選択の自由度
- ✓長期開放による廃棄体などの化学的変質
- ✓施設の維持管理
- ✓作業員の被爆リスクの評価（閉鎖前の安全性評価）
- ✓モニタリング項目とその方法

## 今後の課題 放射性廃棄物処分の受容のために

- 自由闊達なコミュニケーション：フラットかつ冷静な議論
- 公文書館の設置：全ての関連資料の閲覧（松本, 2012）
- Point of departure: 地層処分 → 放射性廃棄物
- 代替オプションの検討
  - 長期管理
  - 直接処分
  - 回収可能性（再取り出し）
  - 深孔処分
  - 減容・有害度低減技術（分離・変換技術）
- 技術継承・人材育成：2つの地下研（瑞浪・幌延）の積極的活用

## 参考資料

### 高レベル放射性廃棄物の放射能量の減衰

高レベル放射性廃棄物の放射能は、非常に高い  
時間とともに放射能量は低下し、数万年後にウラン鉱石と同レベルに



エネ庁 ([http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/nuclear/rw/rhw/qa/syo/syo03.html](http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/rhw/qa/syo/syo03.html))

## 地層処分の概念 ～地層処分の選択（世界の動向）～

- 全米科学アカデミー（1957）：岩塩層中への処分の有効性
- OECD/NEA（1977）：複数オプションのうち、地層処分を推奨。地上での貯蔵の有効活用も
- OECD/NEA（1982）：将来世代への負担の軽減。回収は可能。
- 全米科学アカデミー（1983）：放射性核種は廃棄物周辺で崩壊、漏出した核種の地下水による希釈

## 地層処分の概念 ～地層処分の選択（日本の動向）～

- 原子力委員会（1976）：当面地層処分研究を推進（ロンドン条約発効（1975）による）
- 原子力委員会（1980）：研究開発5段階
  1. 可能性のある地層の調査 → 中間報告（1984）
  2. 有効な地層の調査
  3. 模擬固化体現地試験
  4. 実固化体現地試験
  5. 試験的処分
- 動力炉・核燃料開発事業団（1984）：中間報告
  - 有効な地層は広く考え得る（特定の岩種によらない）
  - 人工バリアシステムによる安全確保の見通し
  - 客観的判断基準の欠如、現地調査の合意形成難航→次段階以降、中止

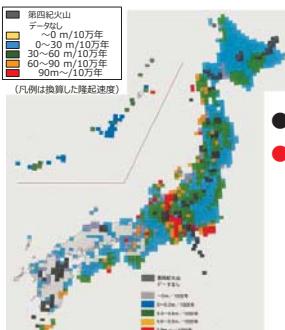
### 【参考】可逆性・回収可能性に関する諸外国の制度整備状況に関する整理結果一覧(1/2)

国	可逆性・回収可能性の維持等を要求する制度の有無				制度整備状況に関する概要
	審査制 統合	安全規制 統合	内閣審査 会議	(撤退権 等)の有無	
フィンランド	△ (回収可能) × (回復可能)	×	×	○	● サイトの決定に関する原則決定に際して、環境影響評価(EIA)における論議も考慮して、回収可能性の維持を規定(政府が制定した1999年の一般安全規制、及び2000年の政府の原則決定文書)。 ● 例、2008年の安全規制(改定)に伴い、安全規制修正上の問題規定は廃止(原則決定が既存にも存続)。 ● ハイ遮断技術(削除決定権までににおける地域の遮断権を付与)によって制度化。 ● 可逆性の維持を図るため、建設許可申請段階における審査を実施する。 ● ハイ遮断技術による建設許可申請段階での審査を実施する。 ● 可逆性の維持を図るため、建設許可申請段階でハイ遮断技術を規定する。 ● 可逆性の維持を図るため、建設許可申請段階でハイ遮断技術を規定する。
スウェーデン	×	×	○	○	● 実業主体(PIB)が1992年の研究開発計画より、実施段階の前から5年間の定期監査期間(実証定期分、全体の5%が定期監査の対象)における調査資源を提供(併せて、実証定期分の定期監査期間)。 ● 可逆性の維持を図るため、建設許可申請段階における審査を実施する。 ● ハイ遮断技術による建設許可申請段階での審査を実施する。 ● 可逆性の維持を図るため、建設許可申請段階でハイ遮断技術を規定する。
フランス	○ (可逆性)	×	○	×	● 実業主体(PIB)が1992年の研究開発計画より、実施段階の前から5年間の定期監査期間(実証定期分、全体の5%が定期監査の対象)における調査資源を提供(併せて、実証定期分の定期監査期間)。 ● 可逆性の維持を図るため、建設許可申請段階における審査を実施する。 ● ハイ遮断技術による建設許可申請段階での審査を実施する。 ● 可逆性の維持を図るため、建設許可申請段階でハイ遮断技術を規定する。
ドイツ	×	○ (回復可能)	○	×	● 実業規制(事業者規制)の観点から、現在検討中(2011年のサイドラインにて審議会で検討中)。 ● 安全規制(2010年の安全規制)では、採用規制においては個別可逆性の維持を要求、併せて、問題解決の回復の可逆性に備えて、実業主体(PIB)が定期監査であることを要求。 ● 小企業に向けた2011年までの実業規制(2010年の安全規制)では、採用規制における個別可逆性の維持を要求、併せて、問題解決の回復の可逆性に備えて、実業主体(PIB)が定期監査であることを要求。
スイス	○ (回復可能)	○ (回復可能)	○	×	● 2004年に改訂した電子カルテ(電子カルテ、および安全規制(2009年の安全規制)の力で、易燃性の削除により建設許可を要求(多種の資源を要する回収が可能な方法で高濃度物の貯蔵を要求)。 ● 地域の遮断などがないが、サイト決定後に(地下式調査施設の建設前)、審査規定に基づき、条件を満たせば国民投票を行うことができる。

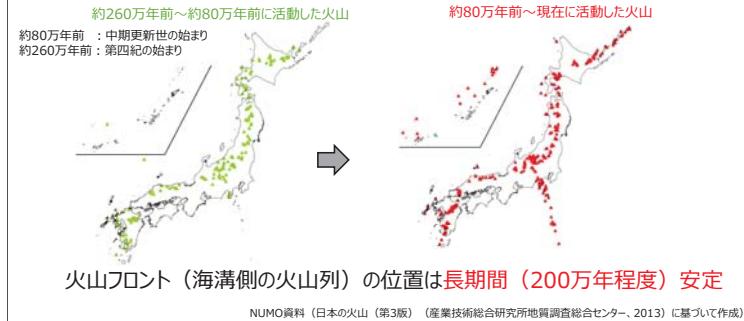
### 【参考】可逆性・回収可能性に関する諸外国の制度整備状況に関する整理結果一覧(2/2)

国	可逆性・回収可能性の維持等を要求する制度の有無				制度整備状況に関する概要
	審査制 統合	安全規制 統合	内閣審査 会議	(撤退権 等)の有無	
英国	×	×	;	○	● 法規制制度(サイドラインに係る2014年の政府白書や安全規制に係る2009年のガイダンス)では、接収段階において回収を行なうことができるとしているが、回収可能性の維持は要求していない。 ● ハイ遮断技術(詳細は、現在検討中ににおける地域の遮断権を、サイト遮断手続きを規定する政府白書(2014年)に記載)。 ● 法規制文書としては、可逆性・回収可能性に関する規定はない。
カナダ	△ (回復可能)	×	;	○	● 法規制文書としては、可逆性・回収可能性に関する規定はない。 ● 2005年に実業主体(NWMO)が策定した、回収可能性を維持した「過活性のある放射性の管理」(IPG)においては、建設許可申請段階における審査を実施する。 ● NWMOが2010年に策定したサイドライン計画(段階からなるプロセス)において、地下式実証施設の建設段階における許認可プロセスの前段(第6段階)、地域が撤去されることを示している。 ● 可逆性のある段階の管理(サイドライン)と中止延長等を組合せて最大40年の間、回収のためのアクセスを維持する概念が可逆性のある概念として示されている。
米国	○ (回復可能)	○ (回復可能)	;	×	● コンカラマウンテンの嵩上げに至るサイドラインへの手段段階より、事業規制(事業者規制)(1982年NWPA)および安全規制制度(1981年のIPG規制)の双方で、接収段階に対する回収可能性の維持を要求。 ● 安全規制が要求する回収可能性の維持については、その目的と期間が特記されている(安全性の観点からNRC審査判断中ににおける正治置場等の可能性を審査)。 ● ハイ遮断技術(大統領が各州のためのサイドラインを審査議会に提出する際に、サイドラインの州の知事が不承認を提出する。ただし、連邦議会上下院の決議による立地承認決議により不承認を覆すことが可能)。

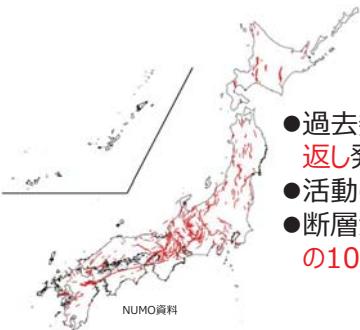
### 隆起速度の分布



### 火山の分布の変化



### 活断層の分布



### 地層処分の概念 ～閉じ込めと隔離～

地下深くの安定した岩盤に閉じ込め、人間の生活環境や地上の自然環境から隔離する

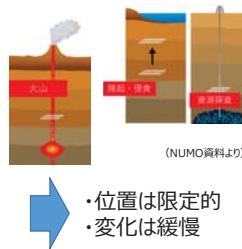
- 隔離
  - 人間の生活環境、自然環境の影響を受けにくい
- 閉じ込め
  - 酸素が少ない／無い（化学反応の進行抑制）
  - 流速が遅い（物質移行の抑制）



## 地層処分の概念 ～安定な地質環境を乱す要因～

### ●隔離性

- ▶隆起・侵食（緩慢な深度減少プロセス）
- ▶火山噴火（放射性核種の噴出）
- ▶人間の掘削行為（鉱物資源探査等）



### ●閉じ込め性

- ▶断層による地下水・核種移行経路の短絡
- ▶熱水・深部流体の流入
- ▶海水準変動による酸化性地下水の流入

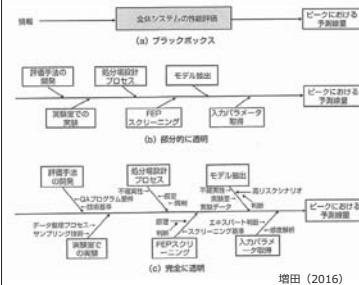
## 地層処分の概念 ～透明性の確保～

- 安全評価の妥当性は、シナリオ／モデル／データの信頼性に依存
  - ▶シナリオの十分性、モデル・コードの妥当性
  - ▶数値計算の手順や実行の適切性などの検討結果を提示

### ●透明性の確保

- ▶第三者に理解される程度
  - (a)中身はブラックボックス
  - (b)何をやったかは分かる
  - (c)プロセスも含めて分かる

(a) << (c)



## セーフティーケース (Safety Case)

- 安全評価結果だけでなく、安全性の確保に関する様々な論拠や証拠を統合し、地層処分システムの安全性を説明 (IAEA, 2012)
- 最大限の努力を払って証拠を集め、議論を尽くして処分システムの安全性を説明
- 地層処分計画を進める中で技術の進歩や地質環境に関する知見の蓄積を反映しながら繰り返し作成、恒常に信頼性を向上

## まとめ

- 地層処分は隔離（地下深部）と閉じ込め（多重バリアシステムによる）が基本
- 人工バリア近傍（ニアフィールド）に初期の高い放射能が継続する期間、放射性核種を閉じ込め、その後は天然バリア（地質環境）で移行を抑制
- 地層処分にとって好ましい地質環境（安定した地質環境）とは、地質環境が有する緩衝能力により、擾乱に対して長期にわたって突然的・急激な機能喪失を生ずる可能性の低い、廃棄体周辺の地質環境を指す（岩種に依らない）（→日本列島全体におよぶ広域の安定性は求められない）
- 閉鎖後長期の安全評価は、保守性を考慮した数値解析により予測し、安全が確保されるか否かを判断する材料を提供するもの（→そこに評価に至るプロセスの透明性・信頼性が重要）
- 地質環境の安定性に関する将来予測は過去の変動の規則性から外挿可能（科学的客観性が重要）

## 課題

- 安全から安心のための議論
  - ▶ステークホルダーを巻き込んだ透明性の高い合意形成の場
  - ▶分かりやすい説明
  - ▶科学的客観性の確保
- 技術継承
  - ▶100年規模の事業（調査・解析・評価技術などの継承）
- 地下研（瑞浪・幌延）の活用

## 地質環境による長期保存の例

オクロの天然原子炉  
シガーレイクウラン鉱床  
東濃ウラン鉱床  
化石  
鉄斧

## オクロの天然原子炉

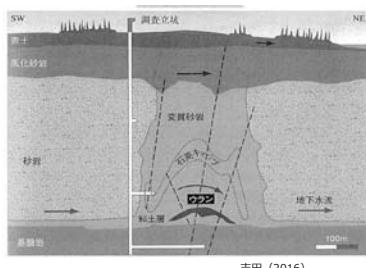


- オクロ（ガボン共和国）の天然原子炉
- 約20億年前のウラン鉱床でのウラン235の自発核分裂の跡

<http://www.s-yamaga.jp/kankyo/genkyo-genpatsu-2.htm>

<http://www.ist.or.jp/atomica/data/pict/04/04020110/05.gif>

## シガーレイクウラン鉱床（カナダ）

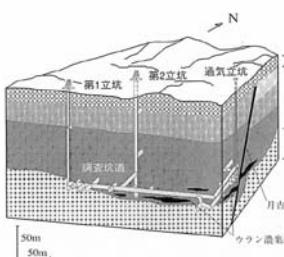


- 粘土層内に約13億年間

粘土に囲まれたウラン鉱床

吉田（2016）

## 東濃ウラン鉱床（岐阜県）



- 花崗岩中のウランが堆積岩中の黒雲母等に吸着
- 断層によって変位するも、ウランの移動はほとんどない

吉田（2016）

断層に切られたウラン鉱床

## 化石



三葉虫  
(カンブリア紀：約5億年前)



アンモナイト  
(ペルム紀（約2.5億年前）～  
白亜紀（約6500万年）)



ツノガイ  
(約2000万年前)

40

## 鉄斧



(NUMO資料より)

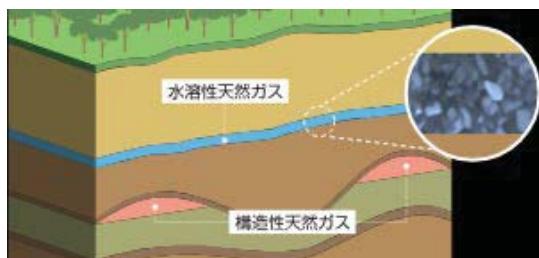
出雲大社境内遺跡から出土した鉄斧  
(730～750年前)

41

## 地質年代表

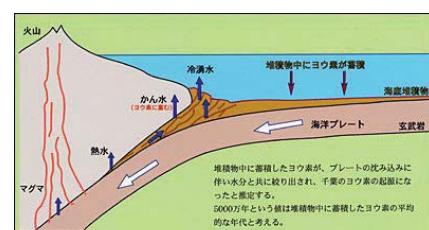


## ヨウ素の保持の事例



<https://www.gas-youso.com/qa.html>

## ヨウ素貯留の例



[http://www.nirs.qst.go.jp/publication/nirs\\_news/200112/hik1p.htm](http://www.nirs.qst.go.jp/publication/nirs_news/200112/hik1p.htm)

## 世界のMOX利用の現状

国名	原寸大燃費料	PWR	新規開発		既存開発	原寸大燃費料	PWR	新規開発		既存開発
			2013年実力	新規開発				2013年実力	新規開発	
ブルガリア アントン温泉	PWR	1,055	1995	2023H1	0	ブルガリア カシラード1号機	PWR	202	2003	既存開発
ブルガリア ソルニム熱電	PWR	1,056	1995	2023H1	0	ブルガリア カシラード2号機	PWR	160	1995	既存開発
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー1号機	PWR	956	1997			ブルガリア ゼロ・ソーラー2号機	PWR	160	1995	既存開発
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー3号機	PWR	956	1997			ブルガリア ゼロ・ソーラー4号機	PWR	160	1995	既存開発
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー5号機	PWR	951	1999			ブルガリア ゼロ・ソーラー6号機	PWR	512	2014	32
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー7号機	PWR	951	1999			ブルガリア ゼロ・ソーラー8号機	PWR	600	2005	
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー9号機	PWR	951	1999			ブルガリア ゼロ・ソーラー10号機	PWR	600	2005	124
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー11号機	PWR	337	1990			ブルガリア ゼロ・ソーラー12号機	PWR	300	1984	108
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー13号機	PWR	337	1990			ブルガリア ゼロ・ソーラー14号機	PWR	300	1984	48
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー15号機	PWR	951	1994			ブルガリア ゼロ・ソーラー16号機	PWR	1,200	1994	
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー17号機	PWR	956	1996			ブルガリア ゼロ・ソーラー18号機	PWR	1,200	1996	
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー19号機	PWR	956	1997			ブルガリア ゼロ・ソーラー19号機	PWR	405	1997	
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー20号機	PWR	956	1997			ブルガリア ゼロ・ソーラー20号機	PWR	1,205	1997	
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー21号機	PWR	951	1997	3,530		ブルガリア ゼロ・ソーラー21号機	PWR	1,205	2002	4
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー22号機	PWR	956	1997			ブルガリア ゼロ・ソーラー22号機	PWR	1,205	1995	
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー23号機	PWR	937	1998			ブルガリア ゼロ・ソーラー23号機	PWR	470	165	1995
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー24号機	PWR	937	1998			ブルガリア ゼロ・ソーラー24号機	PWR	1,180	2005	772
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー25号機	PWR	337	1998			ブルガリア ゼロ・ソーラー25号機	PWR	1,180	2005	32
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー26号機	PWR	337	1998			ブルガリア ゼロ・ソーラー26号機	PWR	300	2012	4
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー27号機	PWR	956	1999			ブルガリア ゼロ・ソーラー27号機	PWR	870	2010	24
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー28号機	PWR	956	1999			ブルガリア ゼロ・ソーラー28号機	PWR	754	2010	30
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー29号機	PWR	956	2000			ブルガリア ゼロ・ソーラー29号機	PWR	1,100	2005	
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー30号機	PWR	861	2008			ブルガリア ゼロ・ソーラー30号機	PWR	800	2005	
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー31号機	PWR	861	2008			ブルガリア ゼロ・ソーラー31号機	PWR	812	2005	
ブルガリア ゼロ・ソーラー・ソーラー32号機	PWR	367	1972	78		ブルガリア ゼロ・ソーラー32号機	PWR	1,363	2005	
オランダ オランダハイム	PWR	1,410	1994			オランダ オランダハイム	PWR	1,410	1994	
オランダ フリーホーフ	PWR	1,410	1994			オランダ フリーホーフ	PWR	1,410	1994	
オランダ フリーホーフ2号機	PWR	1,458	1999	239		オランダ フリーホーフ2号機	PWR	1,458	1999	
オランダ フリーホーフ3号機	PWR	1,458	1999	454		オランダ フリーホーフ3号機	PWR	1,458	1999	
オランダ フリーホーフ4号機	PWR	1,440	1998	504		オランダ フリーホーフ4号機	PWR	1,440	1998	
オランダ フリーホーフ5号機	PWR	1,344	1998	537		オランダ フリーホーフ5号機	PWR	1,344	1998	
オランダ フリーホーフ6号機	PWR	1,475	1998	46		オランダ フリーホーフ6号機	PWR	1,475	1998	
オランダ フリーホーフ7号機	PWR	1,406	2004	144		オランダ フリーホーフ7号機	PWR	1,406	2004	

7-5-6

出所: JAEA