環境動態解析学野外実験II

「放射性廃棄物の地層処分に関わる研究開発の最前線」

2021年2月15日

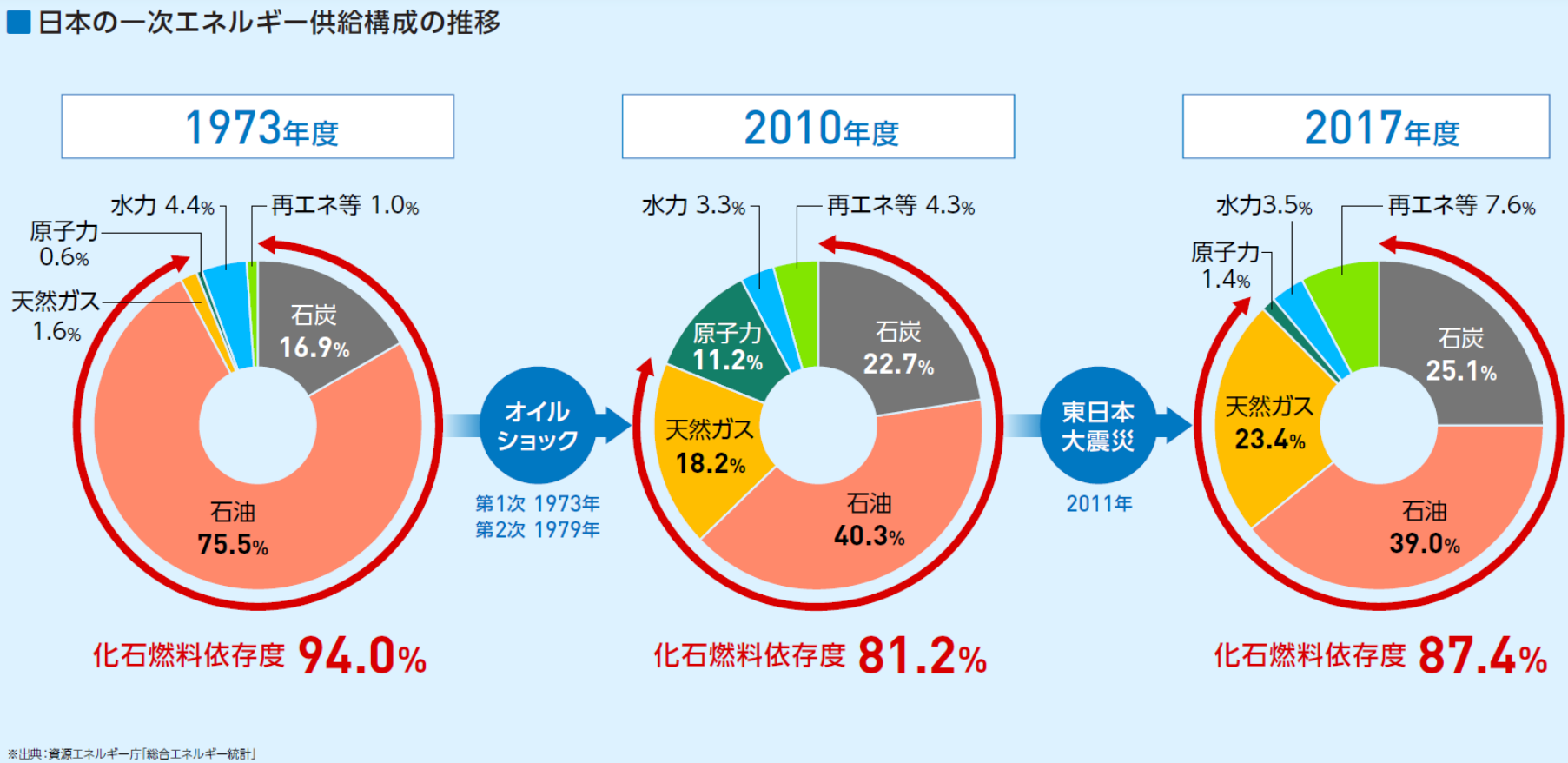
幌延深地層研究センター 深地層研究部

岩月輝希

講義の概要

1. 日本のエネルギー事情と課題
2. 原子力で発生するゴミの問題
3. 地層処分とは？
4. 地下研究所での研究・技術開発の現状

日本の一次エネルギー構成の推移



オイルショック、東日本大震災という大きな変換点を経て、化石燃料の構成が主となっている。また、近年は再エネの割合が増えている。

エネルギーを取り巻く大変化

➢ 国内のエネルギー供給体制の変化

たび重なる大災害による電力供給停止により、「供給者が供給の一義的責任を負う時代から、需要者も供給のバランスに役割を担う時代」へ

➢ 原子力のモラトリアム化

2010年の電源構成に占める原発の割合は32％だった。東日本大震災以降、原子力の安全管理に関わる新規性基準ができ、原発は数％に減少。

➢ シェールガス革命など非在来型化石エネルギーの出現

2011年以降、日本の電力構成は、化石燃料の火力が9割、そのうち輸入LNGの火力が5割を占める。ガス価格の高騰で、従来、採算が取れなかった非在来型の化石エネルギーの開発が進み、潜在的資源量が大きく変化。

➢ 気候変動対策（パリ協定など）の必須化

2015年12月に世界で合意されたパリ協定により、エネルギー消費と環境保全の両方の目標を達成する政策が明確化。日本は、2013年度から2030年度までに26％の炭酸ガスを排出量削減する必要がある。

シンプルに言えば・・・

４つの視点の優先順位の考え方（コストとリスク）が重要

- **供給の安定性**

  エネルギー資源のない日本ではどうしたらいいのか？戦略物資としてのエネルギーをどう確保するか？

- **経済性**

  世界の政治・経済状況に応じて価格が大きく変動するエネルギーに社会はどう対応するのか？

- **環境負荷**

  低炭素エネルギーへのシフトをどう達成するか？

- **安全性**

  原子力の技術的安全性をどう担保するか？

欠かすことのできない地政学的視点

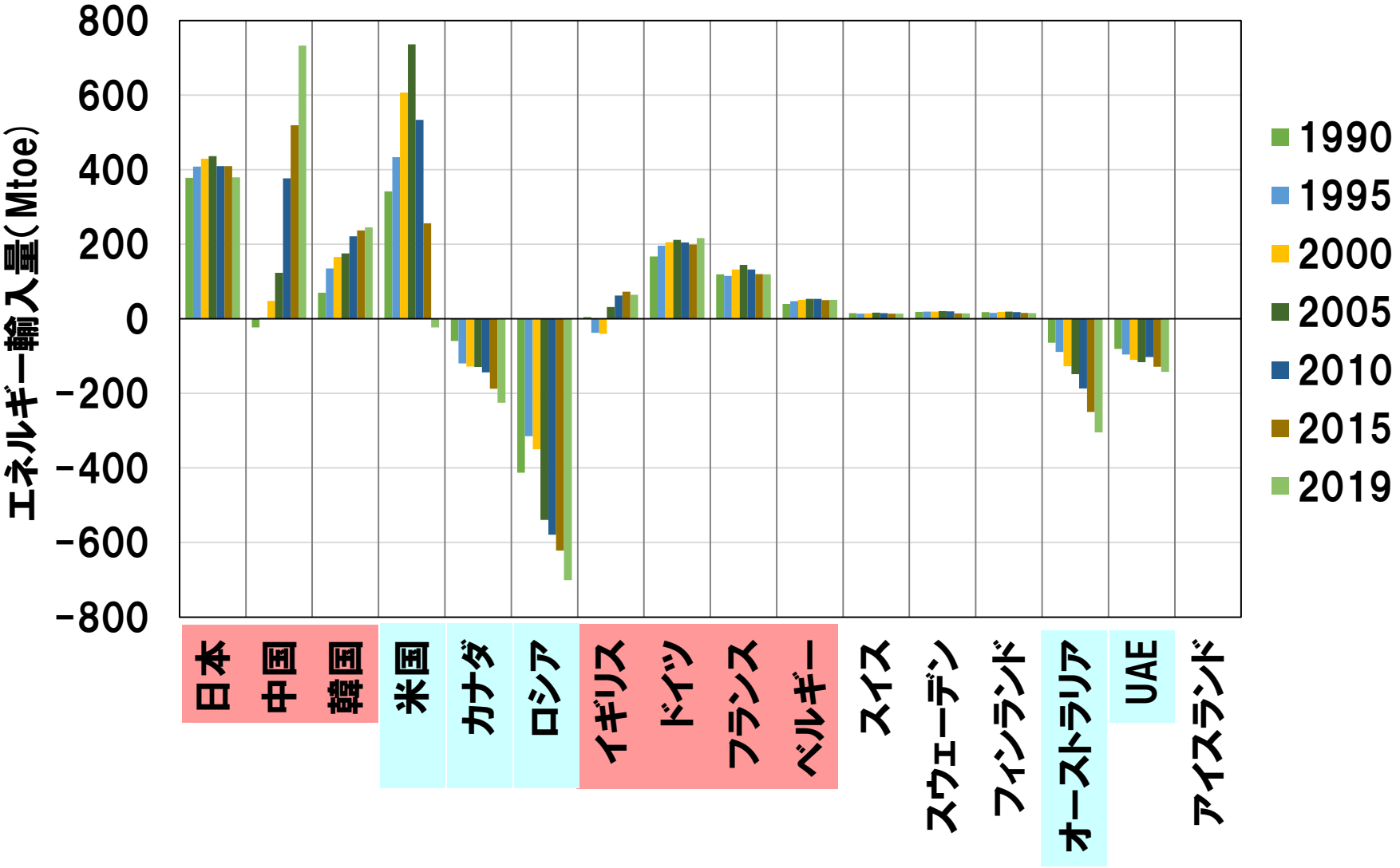
日本では、毎日大型タンカー2隻分（約6億リットル）必要。タンカーの約8割はホルムズ海峡を通ってやって来る。

2019年6月13日、ホルムズ海峡近くで日本の船舶を含む2隻のタンカーが、何者かの攻撃を受けて炎上。原油相場は即座に4%ほど上昇

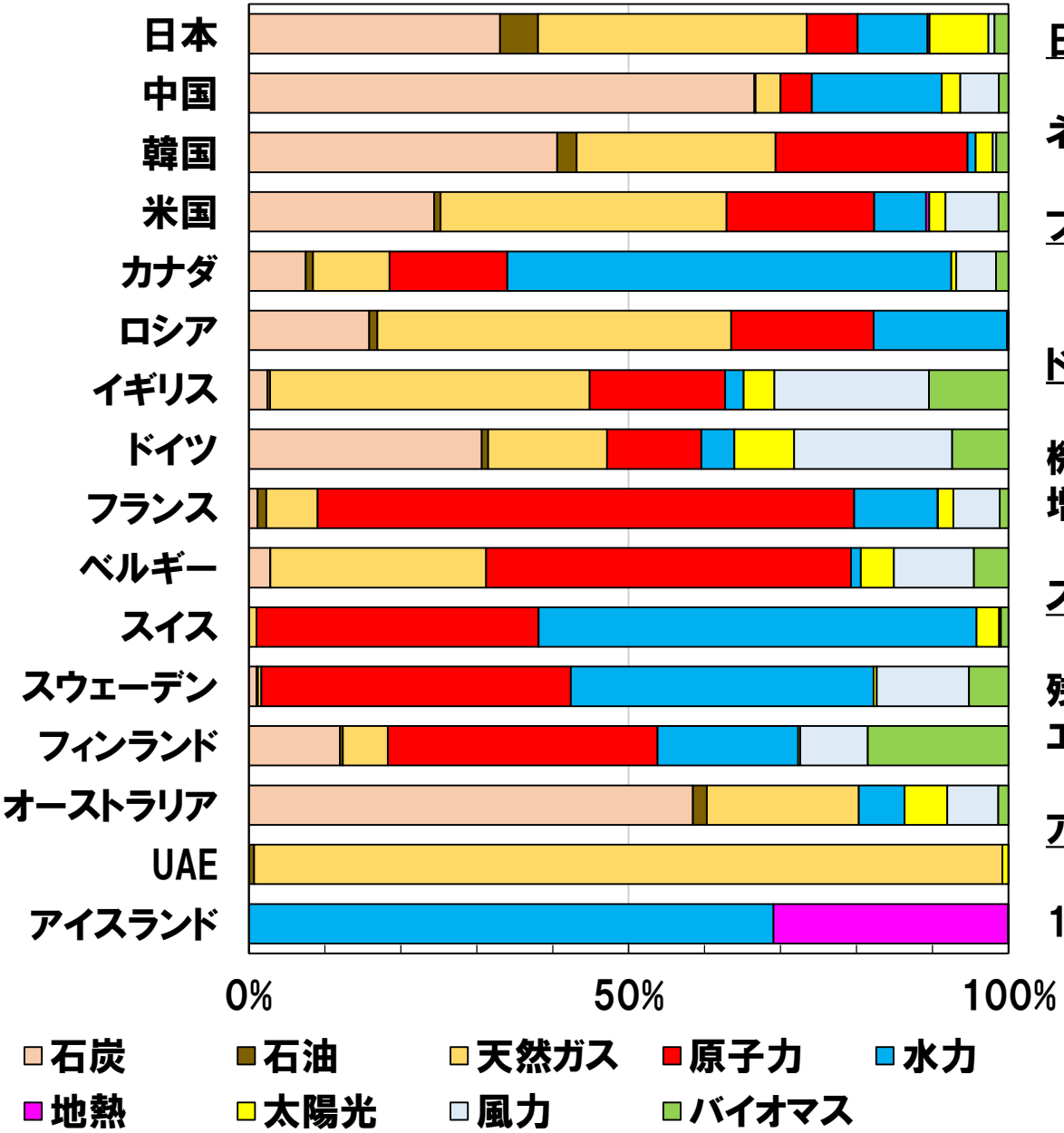
中国の海洋進出により第1列島線まで政情不安定化すると、タンカーがマラッカ海峡を通行できなくなる。第1列島線の東側航路を遠回りする場合、経済的損失は、年間約300億円増加する。

中国は、南沙諸島に人工島を作り着々と海洋進出を進めている。

各国のエネルギー需給


エネルギー輸入量(Mtoe)
800
600
400
200
0
-200
-400
-600
-800
1990
1995
2000
2005
2010
2015
2019
日本
中国
韓国
米国
カナダ
ロシア
イギリス
ドイツ
フランス
ベルギー
スイス
スウェーデン
フィンランド
オーストラリア
UAE
アイスランド

2019年の発電用エネルギー割合



日本、中国、韓国

石炭、石油、天然ガスといった化石エネルギーが7割前後を占める。

フランス、ベルギー

原子力発電の占める割合が高い。

ドイツ

2011年の東電福島第一原発事故を機に原子力発電の割合が低下、風力が増加

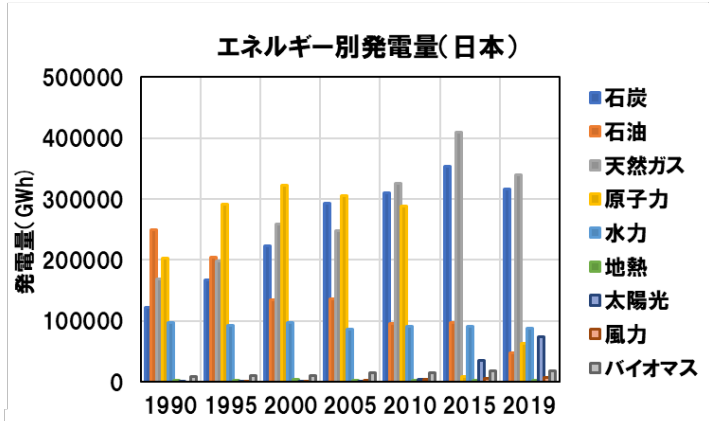
スイス、スウェーデン、フィンランド

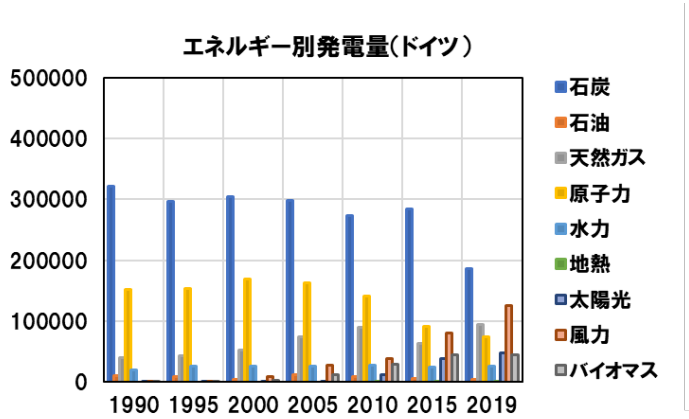
原子力発電で3～4割の電力を賄い、残りを水力、風力、バイオマスなどの自然エネルギーと一部を石炭で賄う。

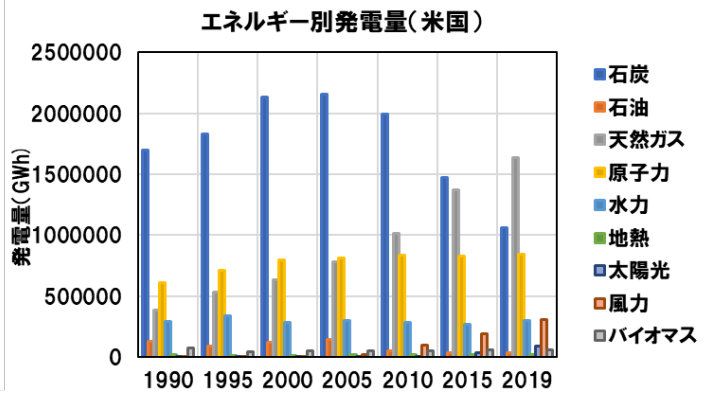
アイスランド

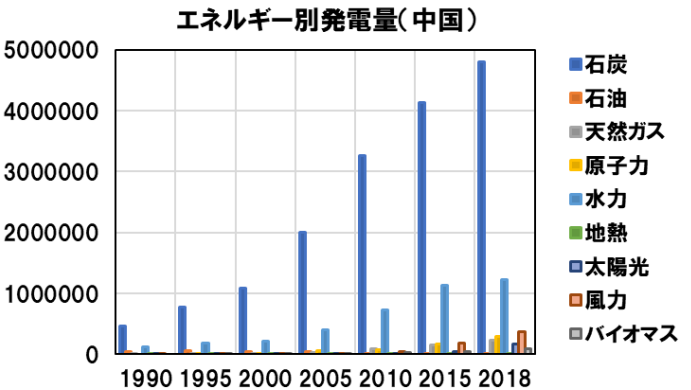
水力と地熱の自然エネルギーのみで100％の電力を得ている。

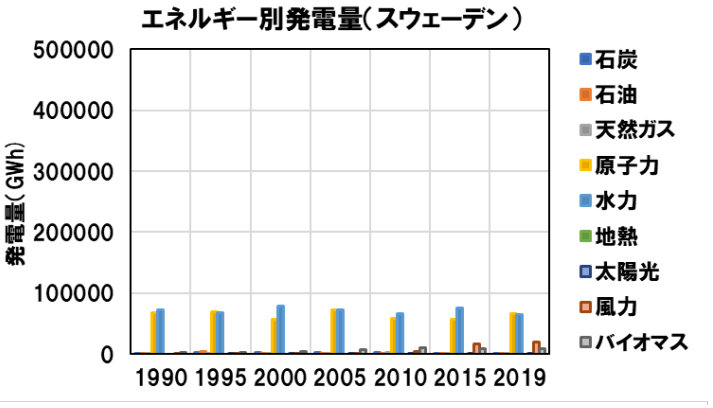
各国の発電用エネルギーの推移

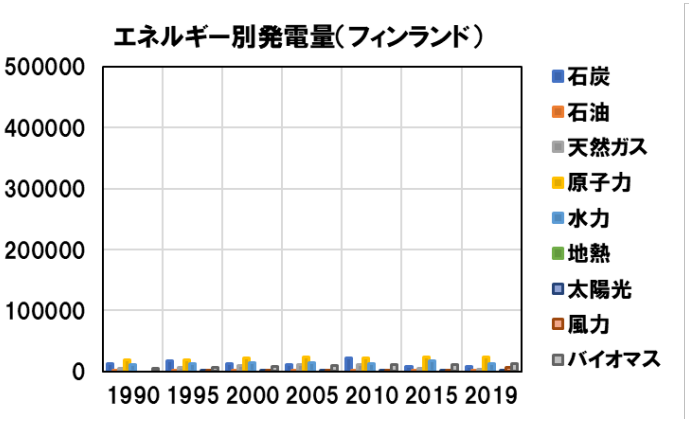












日本では、2011年以降、原子力発電が激減し、一時的に天然ガスによる発電量が増加したが、2019年には石炭と天然ガスによる発電量が2010年と同等になっている。

省エネが進んだことや太陽光発電が増えたことで、原子力発電の減少分を相殺している。

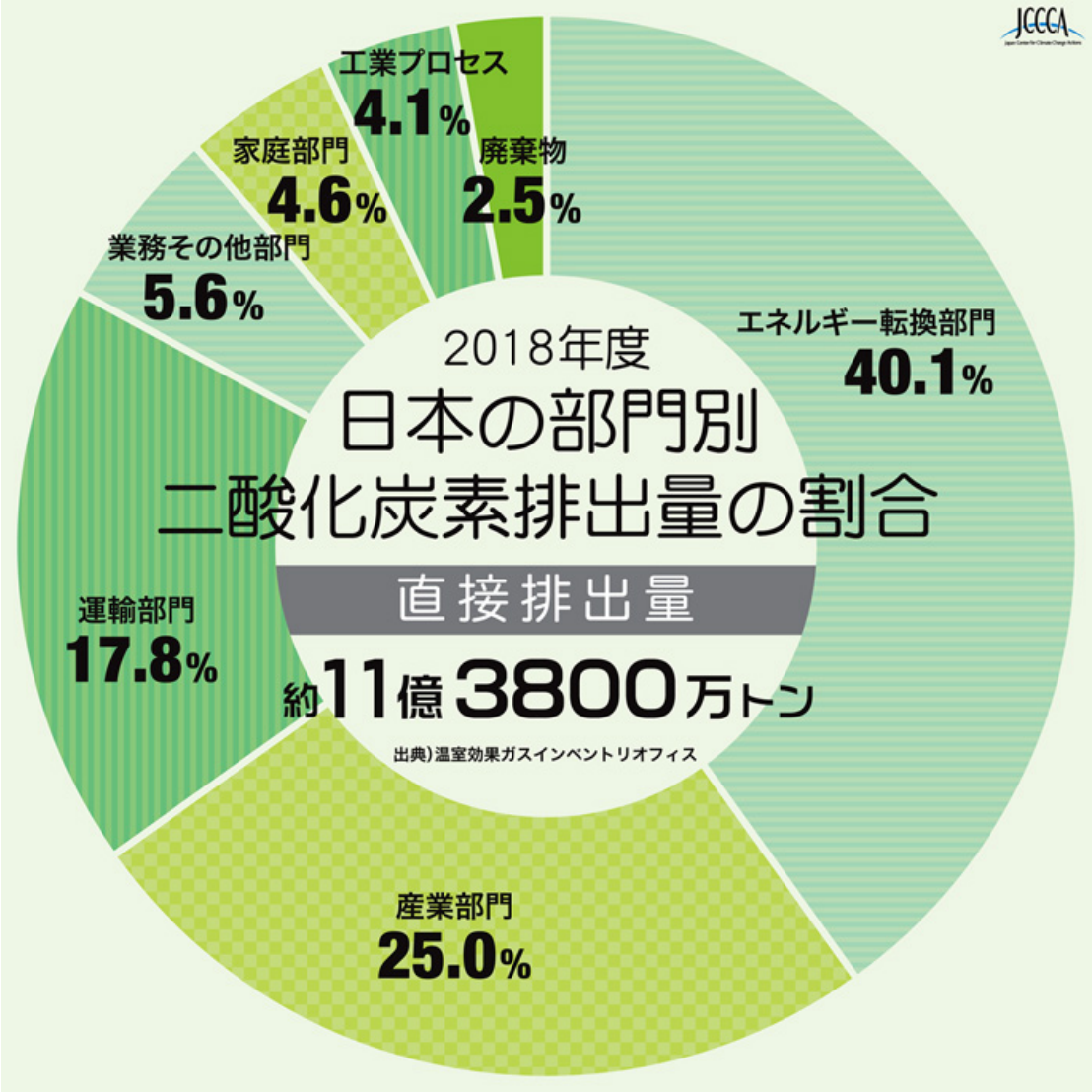
パリ協定に関わる各国の二酸化炭素排出量削減目標

国名	1990年比	2005年比	2013年比
日本	▲18.0%	▲25.4%	削減目標 ▲26.0% (2030年までに)
米国	▲14～16%	削減目標 ▲26～28% (2025年までに)	▲18～21%
EU	削減目標 ▲40% (2030年までに)	▲35%	▲24%
中国	・2030年までに2005年比でGDP当たりの二酸化炭素排出を60～65%削減 ・2030年頃に二酸化炭素排出のピーク達成		
韓国	・2030年までに、対策を講じなかった場合の2030年比で37%削減		

（出典）主要国の約束草案（温室効果ガスの排出削減目標）の比較（経済産業省作成）

世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保ち1.5℃に抑える。
日本の中期目標は、「2030年までに温室効果ガスの排出を2013年度比で26％削減すること」であり、2050年までに二酸化炭素の排出量を実質0にするために、電力業界、運輸業界、家庭のそれぞれに変革が求められている。

日本の部門別CO_2排出量

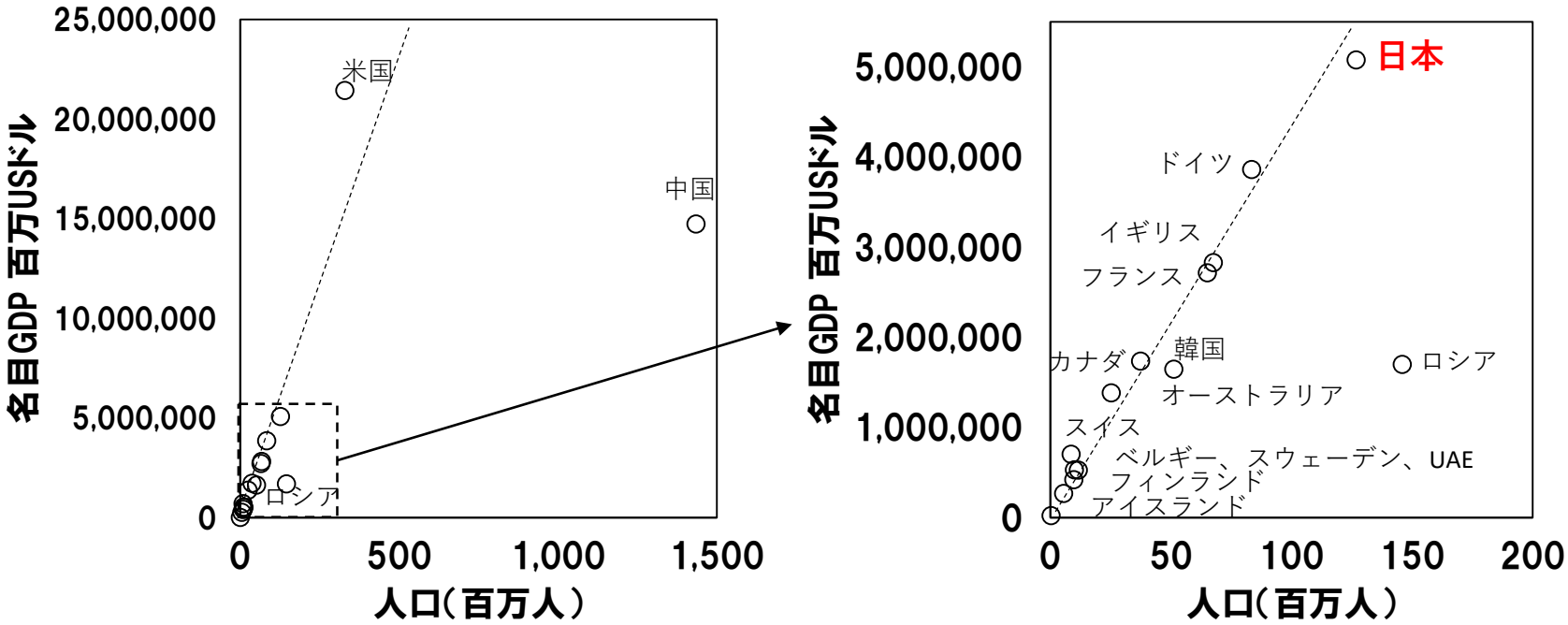


部門別CO_2排出量の割合を見ると、発電部門、産業部門、運輸部門が大半を占めている。

温室効果ガス発生量を抑制するためには、これらの部門におけるエネルギー消費をできるだけ効率的にして、CO_2排出量を少なくすることが必要

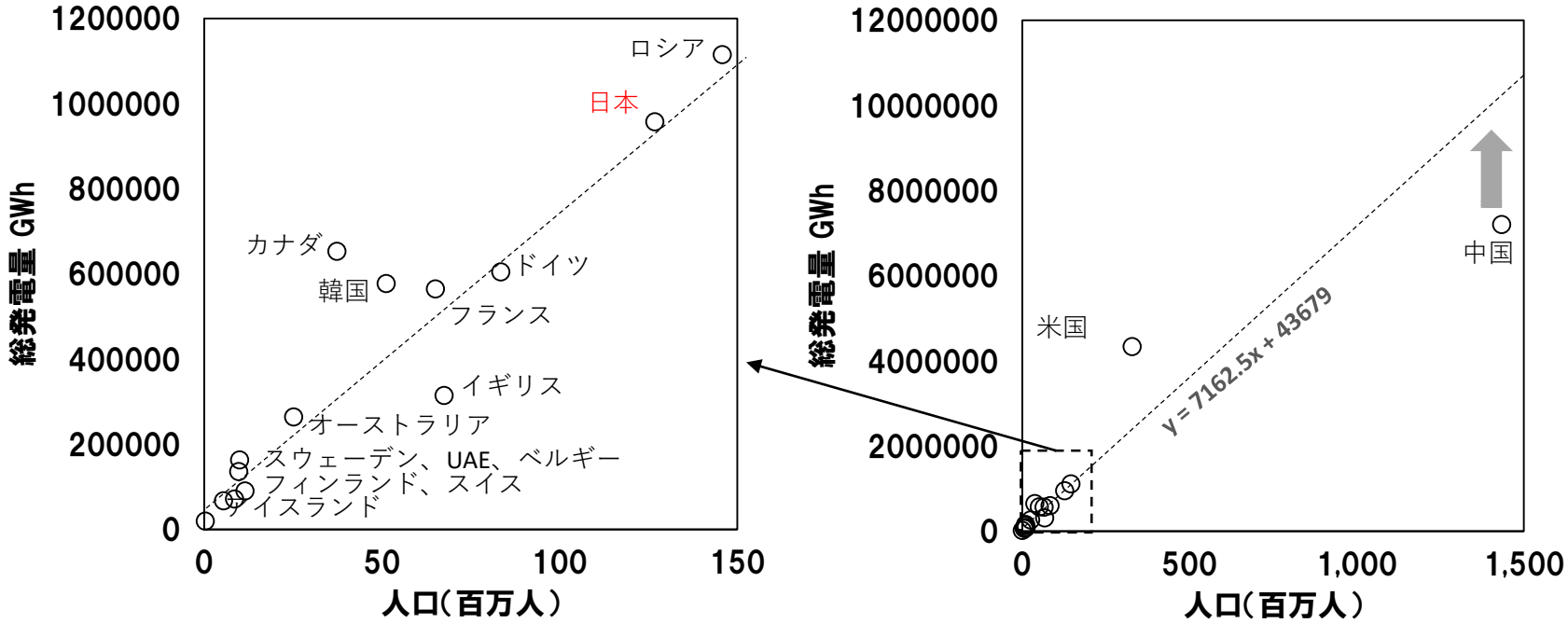
出典）温室効果ガスインベントリオフィス

人口に対して必要な電力量について
各国の人口と名目GDP



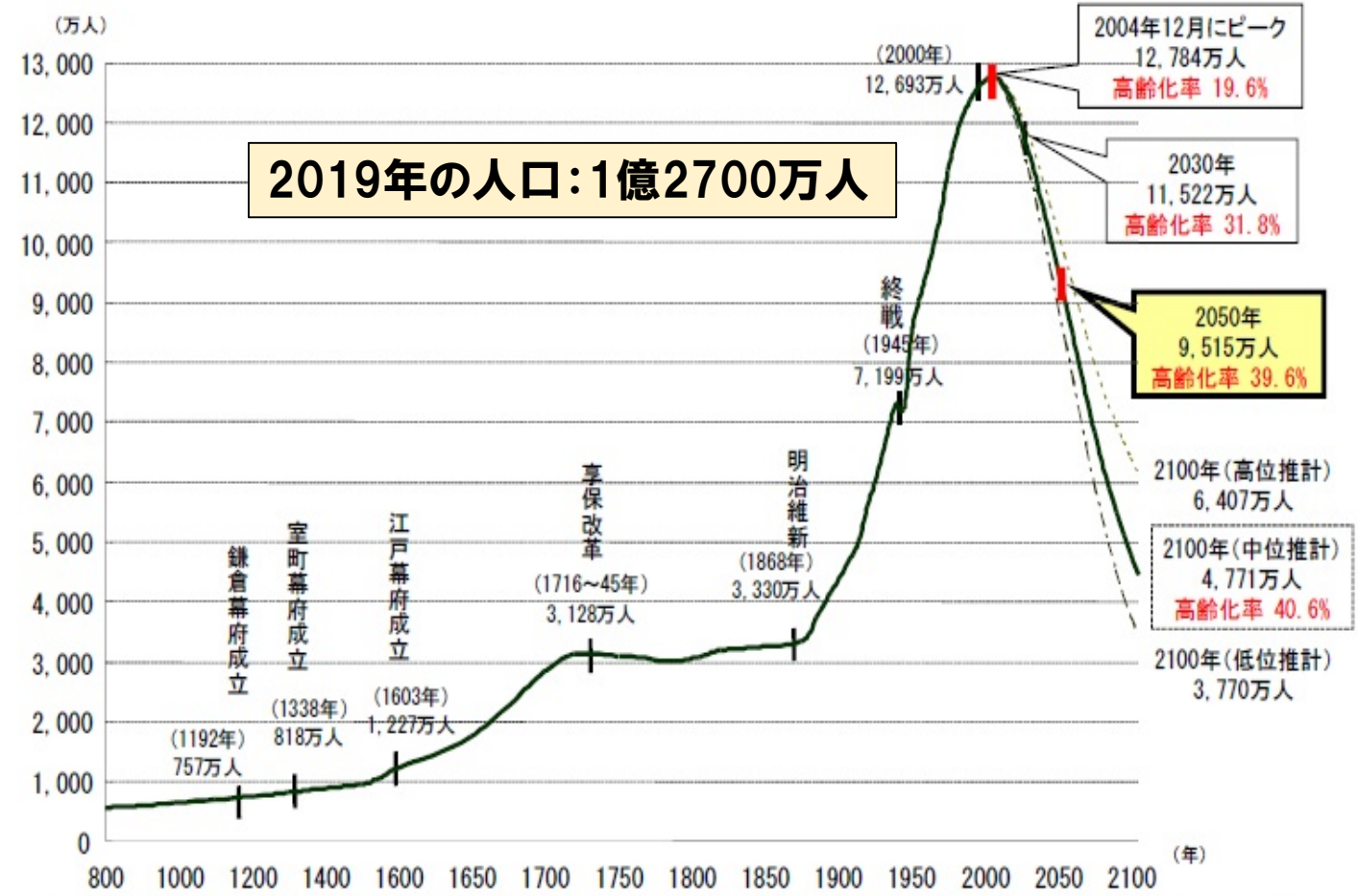
各国の経済生産性の違いを人口当たりの名目GDPで見てみると、
中国を除いて人口と名目GDPには良い相関が見られ、人口が増えればGDPが増加する。
中国は人口に対するGDPが他国より低く、今後更に発展する余地がある。

人口に対して必要な電力量について
各国の人口と総発電量



米国と中国を除いて人口と総発電量にも相関が見られる。
**　気候条件や経済レベルの異なる国々において、人口と総発電量に相関が認められる。**
基本的に、社会が必要とする電力量は人口の推移に基づいて想定できる。
**　米国、中国を除いた国で人口と総発電量の相関を計算すると、100万人当たりおおよそ7200GWhの電力が必要となる。**
中国との資源争奪戦は、今後避けて通れない。

日本の人口推移

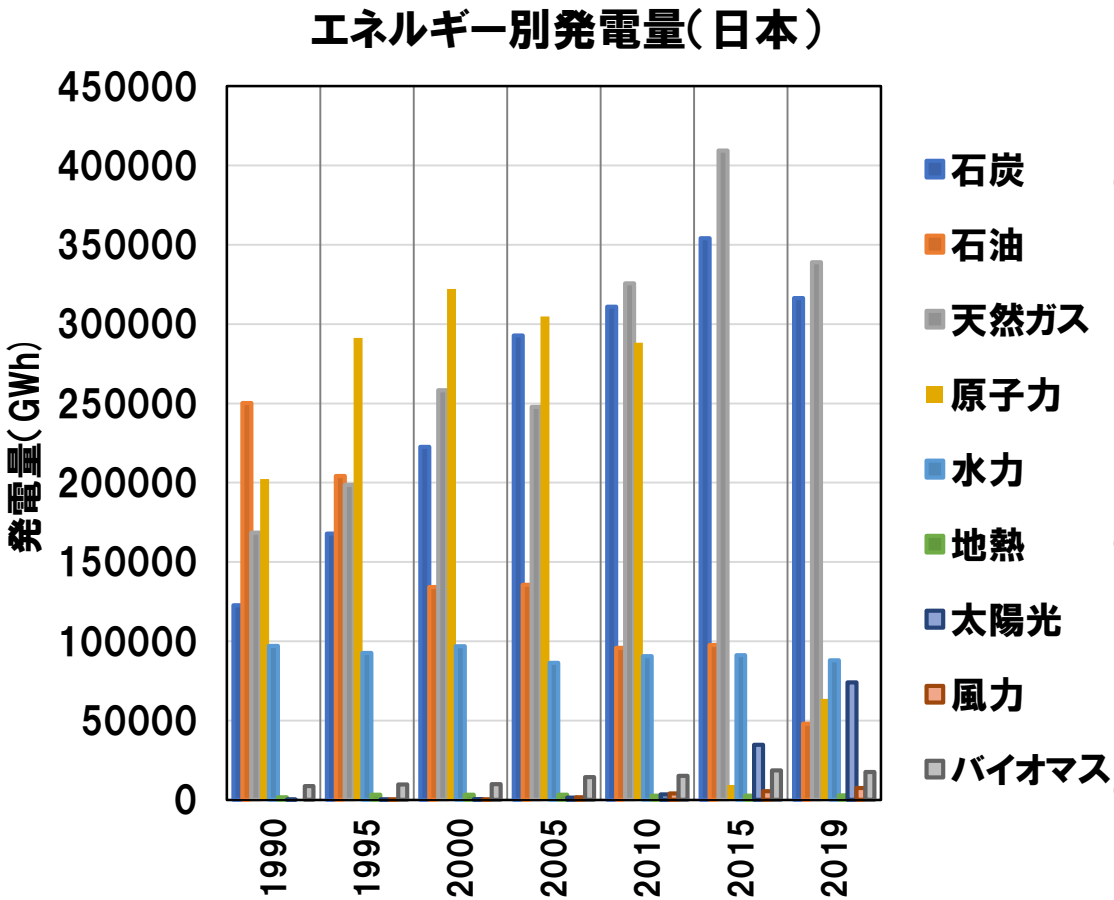


(出典)総務省「国勢調査報告」、同「人口推計年報」、同「平成12年及び17年国勢調査結果による補間推計人口」、国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口(平成18年12月推計)」、国土庁「日本列島における人口分布の長期時系列分析」(1974年)をもとに、国土交通省国土計画局作成

日本の人口は今後急激に減っていき、必要なエネルギー量も同様に減少する。
高コストのエネルギー、環境負荷の高いエネルギー、安全性が相対的に低いエネルギーが、経済的・社会的に淘汰されていく。エネルギー構成の転換にはリードタイムが必要。
数十年後の人口を見据えてエネルギーを取捨選択していく必要がある。

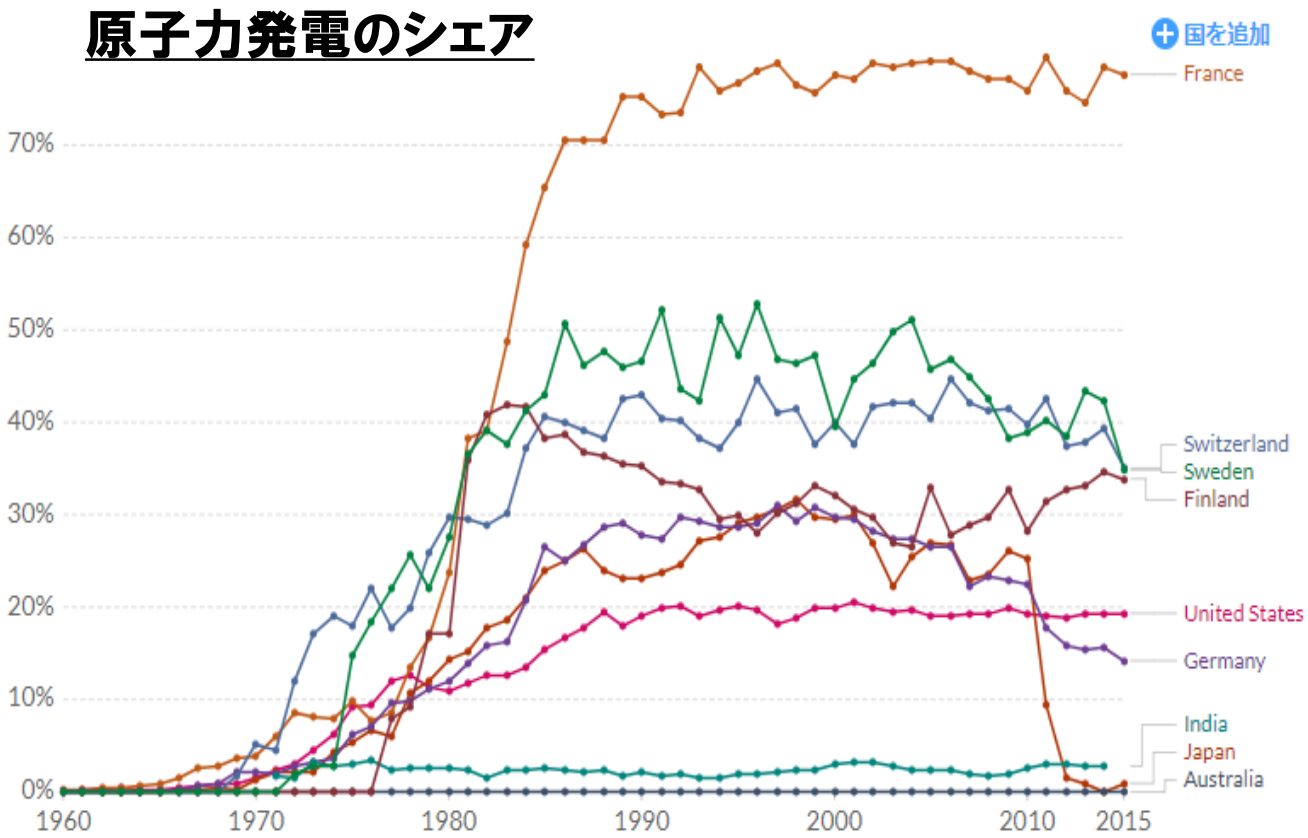
パリ協定は遵守できるのか？

2030年までに2005年比で25.4% or 2013年比で26%削減は可能か？



- 天然ガスは、石炭や石油に比べて相対的にCO_2排出が少ない。石炭を100とすると、石油は80，天然ガスのCO_2排出量は57程度
- 2005年から2019年の石油、石炭、天然ガス構成比の変化に伴うCO_2排出量の増減を計算すると、石油の割合が減少したことにより、2019年のCO_2排出量は2005年に比べて約10%減となっている。
- 2030年にかけて人口が1億1500万人程度まで減少し、必要な総電力量は、2019年に比べて1～2割減少していく。
- 現行のエネルギー構成でも、発電効率の改善と人口の自然減によりパリ協定の2030年目標を達成することは可能
- では、2050年のCO_2排出量実質0は、達成できるのか？

2030年までのパリ協定目標は達成できる見込みはある。2050年のCO_2排出量実質0は達成できるか？



https://ourworldindata.org/energy-access

- 東電福島第一原発事故前は54基の原発が稼働していた。事故後、21基が廃止された。再稼働した原発は9基。現在は、総発電量の6％程度。
- 原子力発電所の建て替え（リプレース）は、社会的に難しい状況。このままだと、残る33基の運転期間を60年間に延長したとしても、2050年末に18基、

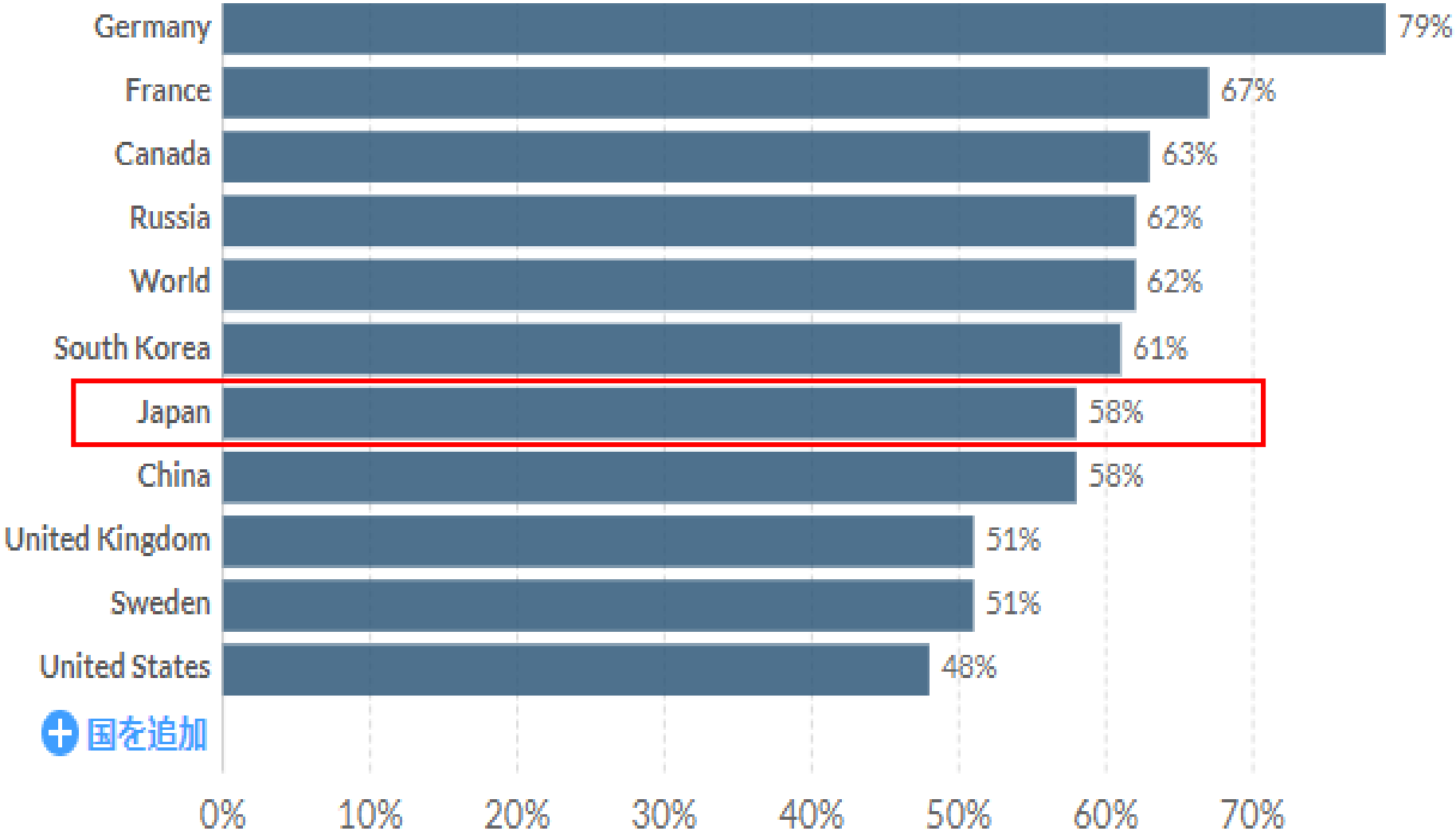
  2060年末に5基、

  2065年末に2基となり、

  2069年末に、泊3号機が停止して、原子力発電所は完全に無くなることになる。

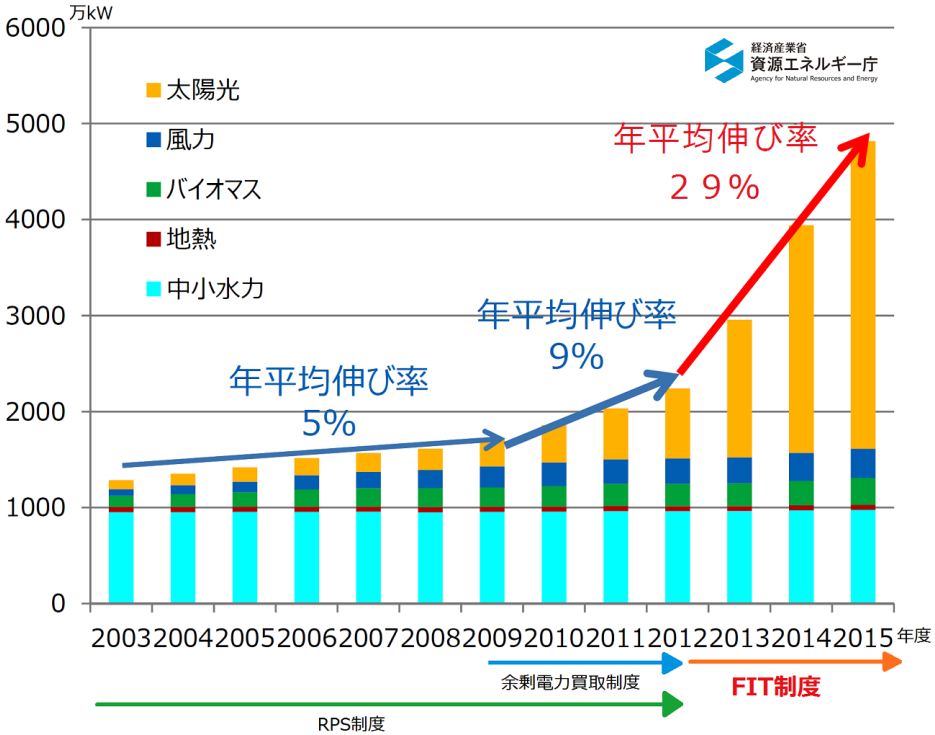
原子力発電に反対する国民の割合

福島の震災後、発電手段として原子力に反対する国民の割合
「やや反対」または「強く反対」と述べた回答者の合計



https://ourworldindata.org/energy

CO_2フリーの自然エネルギーでどこまでいけるか？



2050年の日本の人口：9,500万人

現在のドイツの1.1倍に相当。

ドイツと同等の産業規模だとすると、

→66万GWh程度の電力が必要

2019年時点の自然エネルギー由来電力は17万GWh程度。

残り約50万GWhを、自然エネルギーのみで賄えるようになるか？

	IEA 2019年統計	環境省 導入可能発電量の推計
中小水力	88,005	17,400～22,600
地熱	2,816	30,800～42,200
太陽光	74,114	47,300～504,100
風力（陸上・洋上）	7,502	967,700～2,012,300

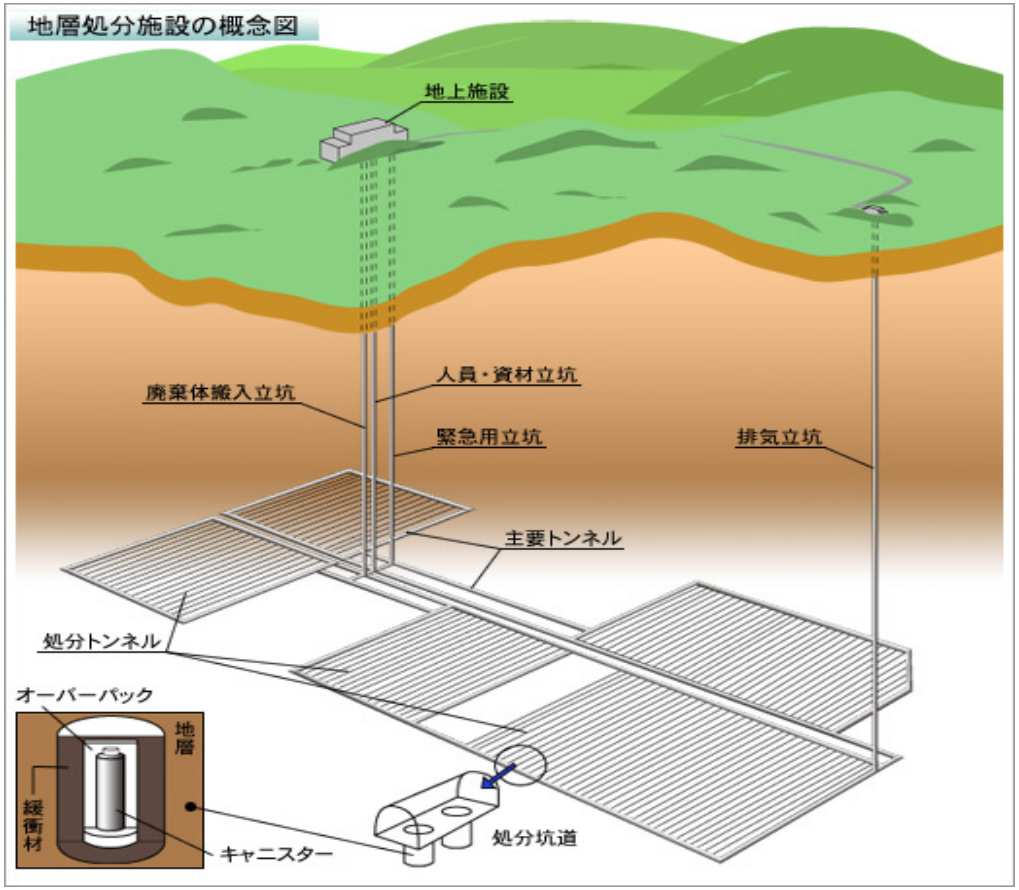
（GWh/年）

出典：環境省 令和元年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開等に関する委託業務報告書

放射性廃棄物問題

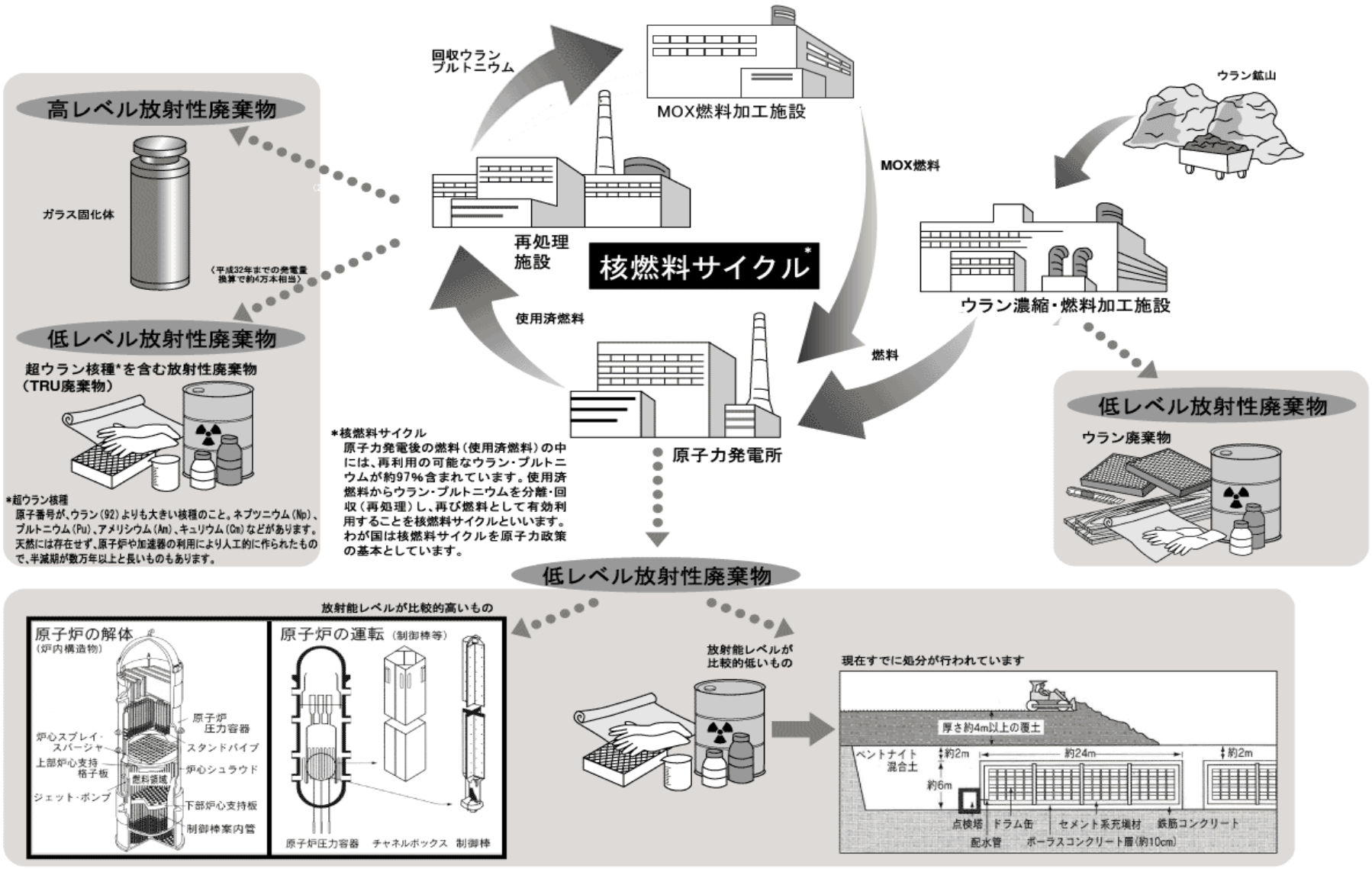
出力100万kwの原子力発電所を1年間運転した場合、高い放射能を持つ核のゴミが発生する(ガラス固化体として約30本)。2020年頃までに蓄積したガラス固化体は，約26,000本相当。

　高レベル放射性廃棄物はすでに存在しており，原子力を利用して恩恵を得た世代が責任を持って処分しなければならない。



核のごみとは何か？

核燃料サイクルと放射性廃棄物



放射性廃棄物にはどんなものがあるか？

廃棄物の種類				廃棄物の例	発生源	処分の方法（例）
低レベル放射性廃棄物	発電所廃棄物	低↑放射能レベル↓高	放射能レベルの極めて低い廃棄物	コンクリート、金属等	原子力発電所	浅地中トレンチ処分
			放射能レベルの比較的低い廃棄物	廃液、フィルター、廃器材、消耗品等を固形化		浅地中ピット処分
			放射能レベルの比較的高い廃棄物	制御棒、炉内構造物等		余裕深度処分
	ウラン廃棄物			消耗品、スラッジ、廃器材	ウラン濃縮・燃料加工施設	余裕深度処分、浅地中ピット処分、浅地中トレンチ処分、場合によっては地層処分
	超ウラン核種を含む放射性廃棄物（TRU廃棄物）			燃料棒の部品、廃液、フィルター	再処理施設、MOX燃料加工施設	地層処分、余裕深度処分、浅地中ピット処分
高レベル放射性廃棄物				ガラス固化体	再処理施設	地層処分

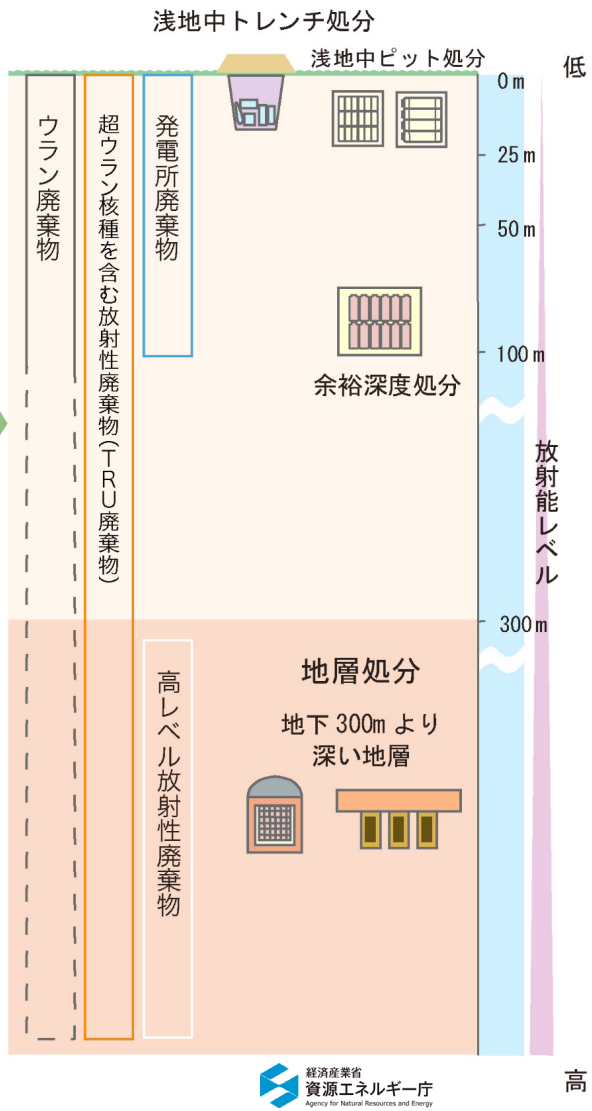
クリアランスレベル以下の廃棄物	原子力発電所解体廃棄物の大部分	上に示した全ての発生源	再利用/一般の物品としての処分

経済産業省 資源エネルギー庁 Agency for Natural Resources and Energy

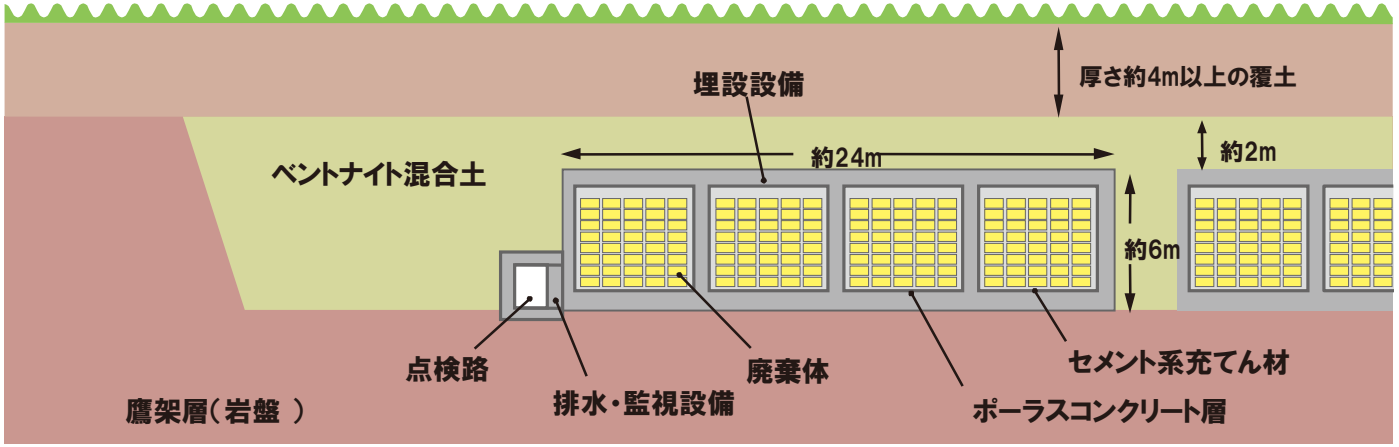
放射性廃棄物はどうやって処分するのか？

発生源	廃棄物の種類		
原子力発電所	低レベル放射性廃棄物	発電所廃棄物	放射能レベルの極めて低い廃棄物
			放射能レベルの比較的低い廃棄物
			放射能レベルの比較的高い廃棄物
ウラン濃縮・燃料加工施設		ウラン廃棄物	
MOX燃料加工施設		超ウラン核種を含む放射性廃棄物（TRU廃棄物）	
再処理施設	高レベル放射性廃棄物		

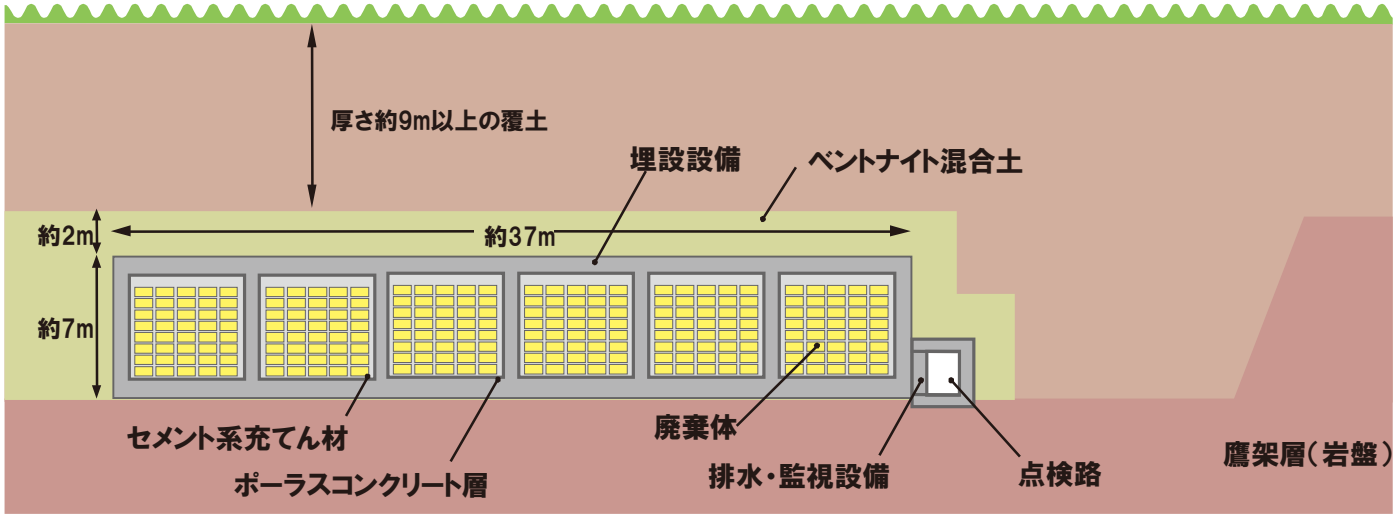
処分方法



低レベル放射性廃棄物の浅地中埋設設備



1号埋設設備　埋設地断面図



2号埋設設備　埋設地断面図

出典：日本原燃（株）

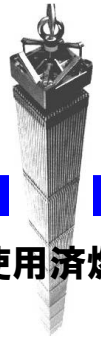
低レベル放射性廃棄物を埋めた後の管理

<table>
<tr><th></th><th>第1段階</th><th>第2段階</th><th>第3段階</th></tr>
<tr><td>終了予定時期</td><td>埋設開始後
1号：30～35年
2号：25～30年</td><td>第一段階終了後
30年</td><td>第一段階終了後
300年</td></tr>
<tr><td>考え方</td><td>埋設設備により閉じ込め</td><td>埋設設備と周辺土壌等
により移行抑制</td><td>主に周辺土壌等
により移行抑制</td></tr>
<tr><td rowspan="3">管理の内容</td><td colspan="3">・埋設保全区域の設定、廃棄物埋設地の巡視、覆土の修復
・環境モニタリング</td></tr>
<tr><td colspan="2">・周辺監視区域の設定
・地下水中の放射性物質濃度の監視
・排水・監視設備により排水</td><td>・掘削等の制約</td></tr>
<tr><td>・漏出のないことの監視
・埋設設備の修復等</td><td>・漏出の状況の監視</td><td></td></tr>
</table>

出典：日本原燃（株）

高レベル放射性廃棄物とは？

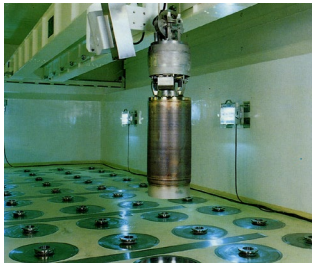
原子力発電所



使用済燃料

1MkWの発電所を1年間運転すると約30t発生

ウラン採掘



貯蔵
（30～50年程度）

再処理工場

再処理

約95～97%

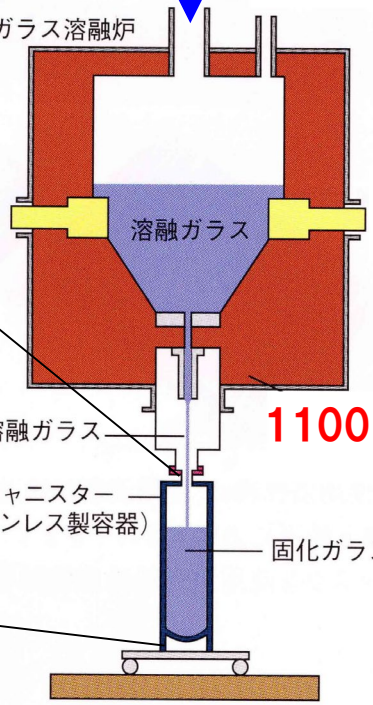
ウランとプルトニウムを回収

約3～5%

核分裂生成物等を含む高レベル放射性廃液

ガラス原料

ガラス固化体
高さ：1.34m
外径：43cm
重さ：約500kg



1100～1200℃

高レベル放射性廃棄物

既に存在する高レベル放射性廃棄物

	輸送船名	返還ガラス固化体数 （会社の内訳）	到着地年月
第1回 返還輸送	パシフィック・ピンテール号 （輸送容器1基）	28本 （東京、関西、四国、九州）	1995年４月26日 むつ小川原港入港
第2回 返還輸送	パシフィック・ティール号 （輸送容器２基）	40本 （東京、関西、四国、九州）	1997年３月18日 むつ小川原港入港
第3回 返還輸送	パシフィック・スワン号 （輸送容器３基）	60本 （東京、関西、中部、九州）	1998年３月13日 むつ小川原港入港
第4回 返還輸送	パシフィック・スワン号 （輸送容器２基）	40本 （関西、中部、原電）	1999年４月15日 むつ小川原港入港
第5回 返還輸送	パシフィック・スワン号 （輸送容器４基）	104本 （関西、東京、中部、中国、九州）	2000年２月23日 むつ小川原港入港
第6回 返還輸送	パシフィック・スワン号 （輸送容器8基）	192本 （関西、東京、中部、九州、原電）	2001年２月20日 むつ小川原港入港
第7回 返還輸送	パシフィック・サンド・バイパー号 （輸送容器6基）	152本 （関西、東京、中部、九州、中国、四国）	2002年1月22日 むつ小川原港入港
第8回 返還輸送	パシフィック・スワン号 （輸送容器6基）	144本 （関西、東京、中部、四国、九州）	2003年7月23日 むつ小川原港入港
第9回 返還輸送	パシフィック・サンド・バイパー号 （輸送容器5基）	132本 （関西、東京、中国、東北、四国）	2004年3月4日 むつ小川原港入港
第10回 返還輸送	パシフィック・サンド・バイパー号 （輸送容器5基）	124本 （関西、中部、中国、東北、四国、九州）	2005年4月20日 むつ小川原港入港
第11回 返還輸送	パシフィック・サンド・バイパー号 （輸送容器7基）	164本 （北海道、東京、中部、関西、九州、原電）	2006年3月24日 むつ小川原港入港
第12回 返還輸送	パシフィック・サンド・バイパー号 （輸送容器6基）	130本 （東京、中部、北陸、関西、九州）	2007年3月27日 むつ小川原港入港
第13回 返還輸送	パシフィック・サンド・バイパー号 （輸送容器1基）	28本 （東京、関西、四国、九州）	2010年3月9日 むつ小川原港入港
第14回 返還輸送	パシフィック・グリーブ号 （輸送容器3基）	76本 （関西、四国、九州）	2011年9月15日 むつ小川原港入港
第15回 返還輸送	パシフィック・グリーブ号 （輸送容器1基）	28本 （中部、関西、中国）	2013年2月27日 むつ小川原港入港
第16回 返還輸送	パシフィック・グリーブ号 （輸送容器5基）	132本 （中部、関西、中国、四国、九州）	2014年4月22日 むつ小川原港入港
第17回 返還輸送	パシフィック・グリーブ号 （輸送容器5基）	124本 （東京、関西、九州）	2015年9月16日 むつ小川原港入港
第18回 返還輸送	パシフィック・グリーブ号 （輸送容器5基）	132本 （東京、関西、原電）	2016年10月20日 むつ小川原港入港

日本は原発の使用済燃料の再処理を、イギリス、フランスに委託してきた。

これまでに 1,830 本のガラス固化体が返還されている。

現時点で、ガラス固化体約26,000本分の高レベル放射性廃棄物が存在する。

出典：日本原燃（株）

各原子力発電所の使用済燃料の貯蔵量

電力会社	発電所名	1炉心(tU)	1取替分(tU)	2018年9月末現在	
				使用済燃料貯蔵量(tU)	管理容量(tU)
北海道電力	泊	170	50	400	1,020
東北電力	女川	260	60	420	790
	東通	130	30	100	440
東京電力	福島第一	580	140	2,130	2,260
	福島第二	520	120	1,120	1,360
	柏崎刈羽	960	230	2,370	2,910
中部電力	浜岡	410	100	1,130	1,300
北陸電力	志賀	210	50	150	690
関西電力	美浜	70	20	470	760
	高浜	290	100	1,250	1,730
	大飯	360	110	1,670	2,100
中国電力	島根	100	20	460	680
四国電力	伊方	120	40	710	1,080
九州電力	玄海	230	80	910	1,130
	川内	150	50	980	1,290
日本原子力発電	敦賀	90	30	630	910
	東海第二	130	30	370	440
合　計		4,780	1,260	15,260	20,890

(注1)管理容量は、原則として「貯蔵容量から1炉心+1取替分を差し引いた容量」。なお、運転を終了したプラントについては、貯蔵容量と同じとしている。
(注2)福島第一については、廃炉作業中であり、第一回推進協議会時点(2015年9月末値)を参考値とし、その後の廃炉作業に伴う乾式キャスク仮保管設備拡張は除外している。
(注3)浜岡1,2号炉は廃止措置中であり、燃料プール管理容量から除外している。
(注4)四捨五入の関係で合計値は、各項目を加算した数値と一致しない部分がある。

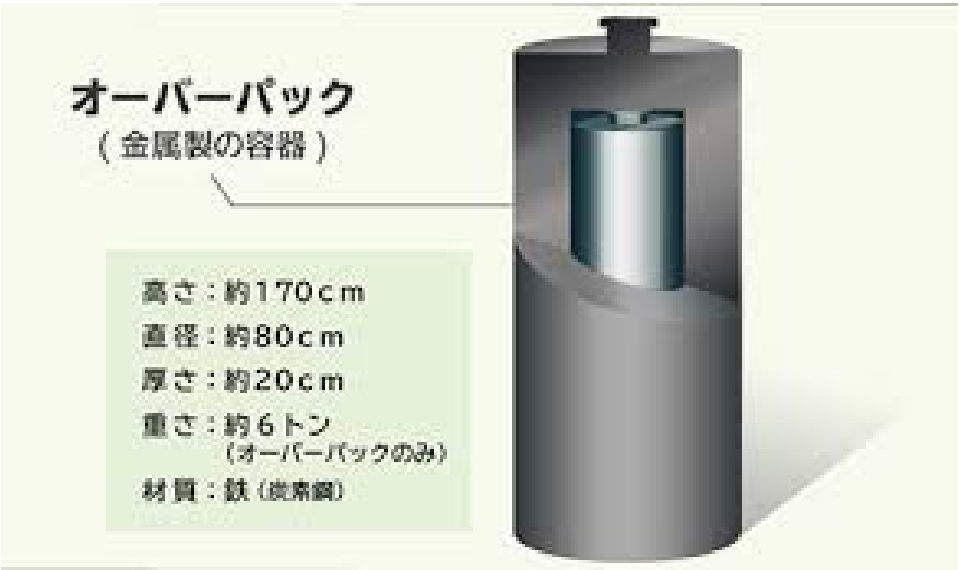
7-7-1

出典:電気事業連合会調べのデータより作成

現在、原子力発電所には、大量の使用済み燃料が溜まっている。

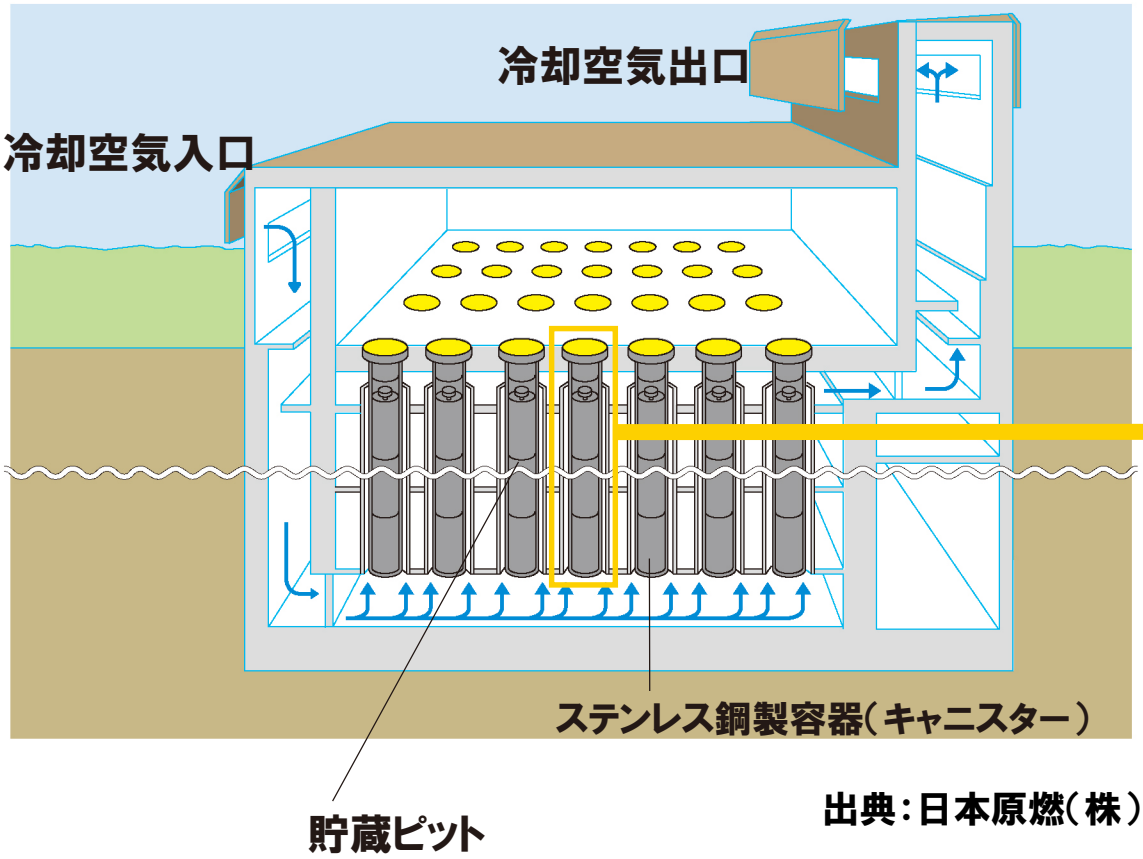
海岸沿いの原発に置いておいて安心なのはどっち？

原子力発電所でプールに保管されている使用済み燃料（冷却し続けなければいけない）



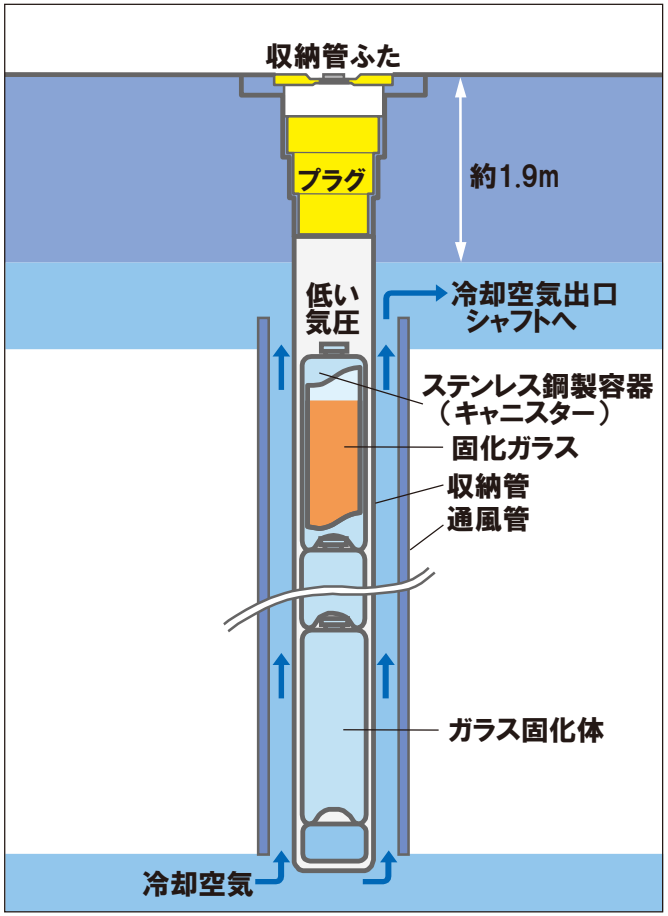
地層処分のために形成したガラス固化体と金属容器

高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の貯蔵概念図



出典：日本原燃（株）

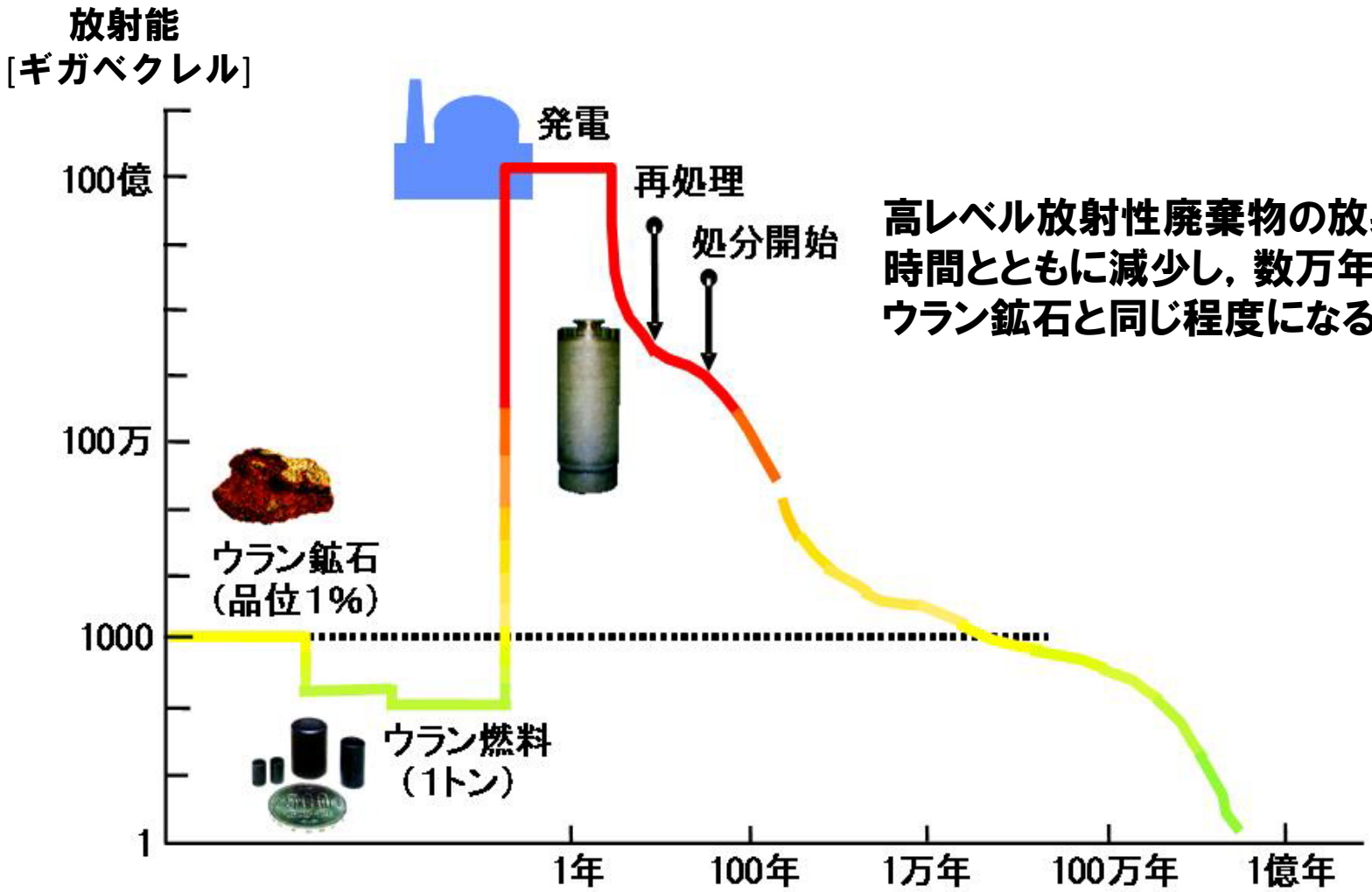
貯蔵ピット拡大図



ガラス固化体は30年間から50年間程度、冷却のための貯蔵を行う。
ガラス固化体を冷却する空気は収納管の外側を通り、ガラス固化体本体には直接接触しない構造になっている。
貯蔵区域は厚さ1.5～2mの鉄筋コンクリートで放射線を遮蔽する。

地層処分とは何か？

ウラン燃料1トンあたりの放射能

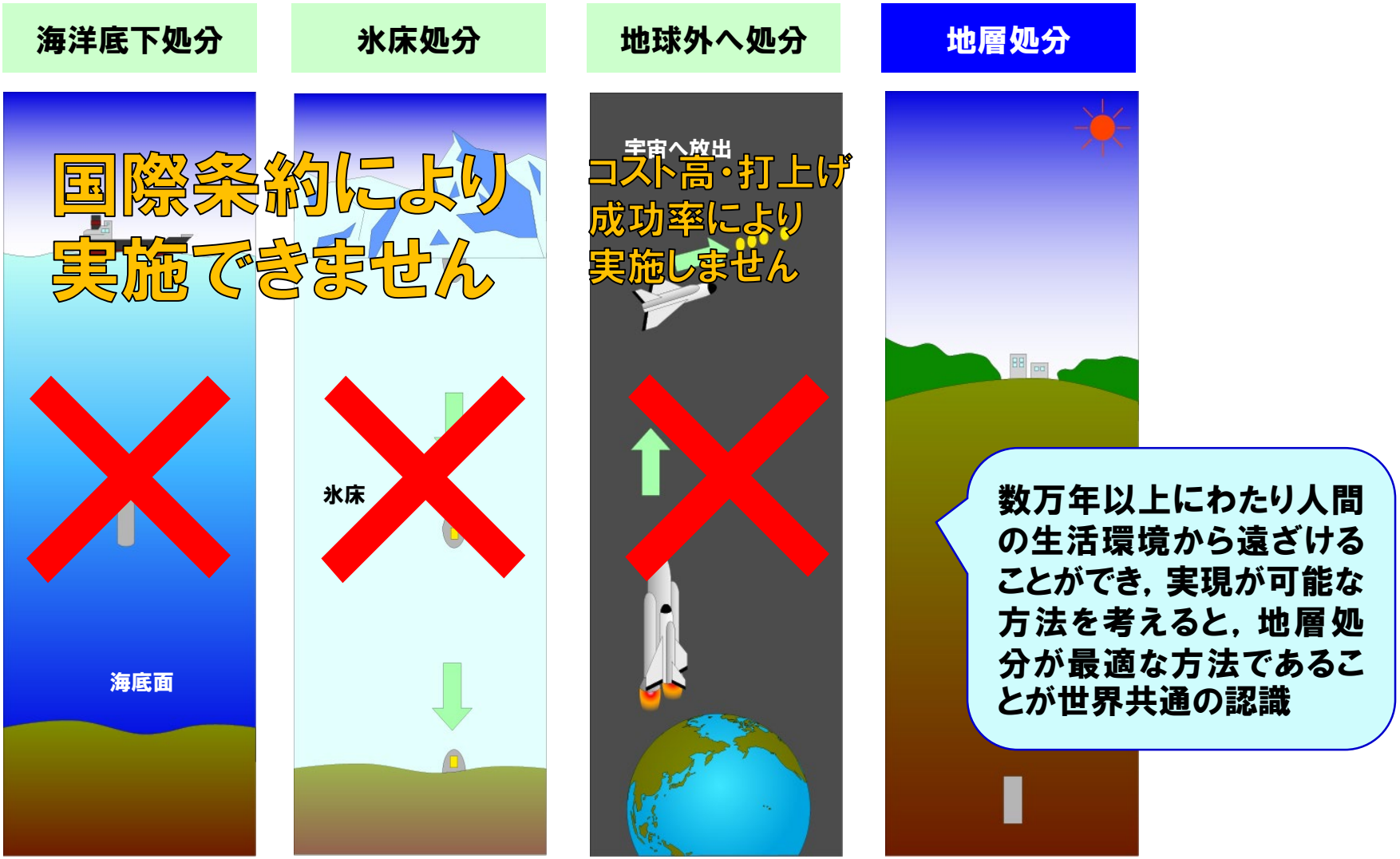


高レベル放射性廃棄物の放射能は、時間とともに減少し，数万年後にウラン鉱石と同じ程度になる。

燃料の装荷を基準とした時間

※ウラン燃料1トン≒ガラス固化体1本

高レベル放射性廃棄物の処分方法



高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全原則（1998.IAEA）

地下深部の隔離能力

十分な距離 ⟷ ・地上に比べて天然現象や人間活動の影響が及びにくい

十分な時間 ⟷ ・地上に比べて物質の動きが遅い

十分な信頼性 ⟷ ・人間の関与なしに自発的に機能を発揮
・地層は過去の活動履歴を記録

- 人間の継続的関与なしの長期的安全性
- 長期的安全性を科学的に予測できる見通し
- 自国の領土内において処分の実現が可能
- 現有の技術，知見が利用可能
- 何らかの必要性が生じた場合に，処分された廃棄物の回収が不可能でない

オクロの天然原子炉

オクロ鉱床：
約20億年前、原子炉として活動した痕跡を残す鉱床。

原子炉ゾーン付近では岩石が熱により黒く変質している。

原子炉ゾーンの一部を保存

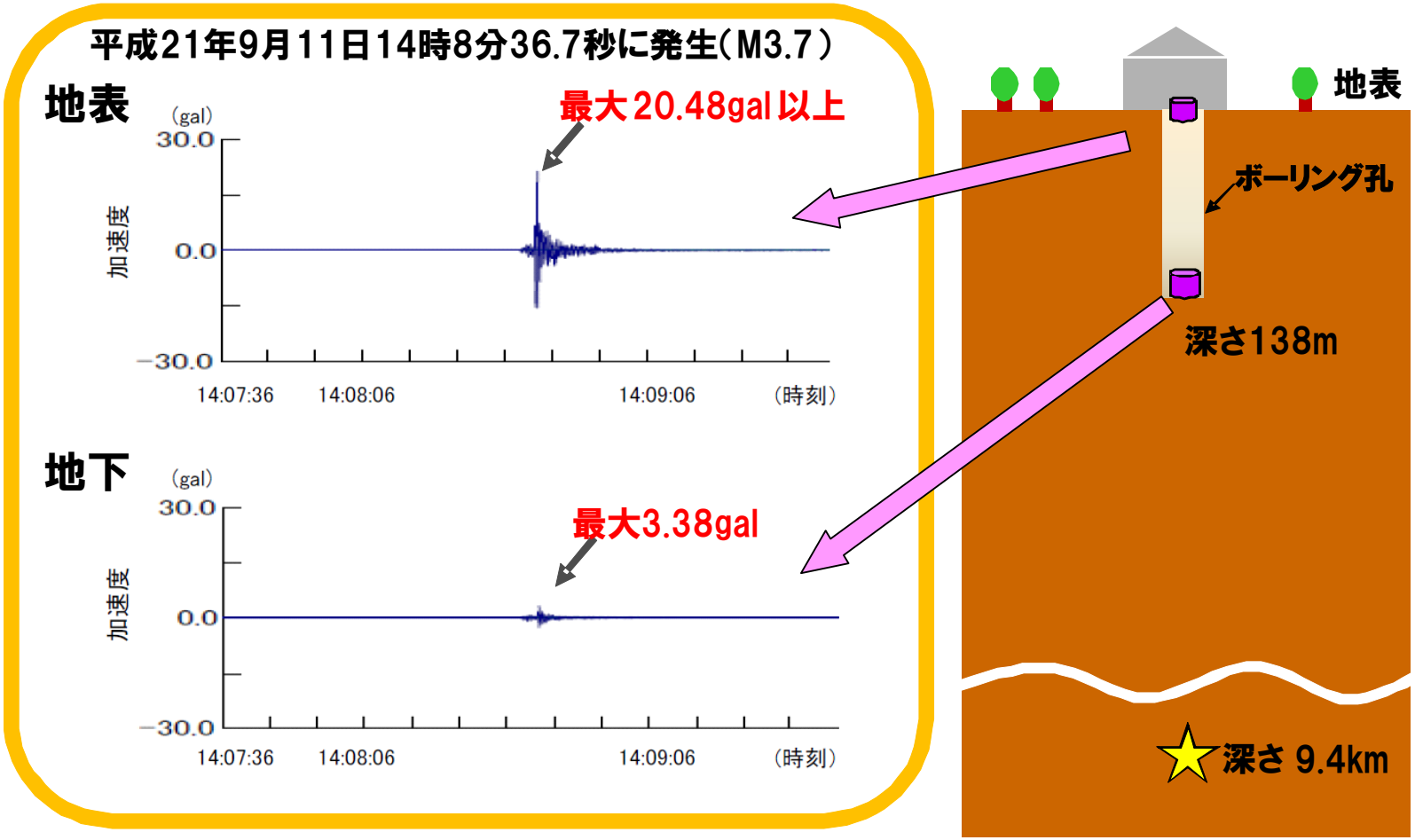
公益財団法人環境科学技術研究所
Institute for Environmental Sciences

今から約20億年前、現在のアフリカ、ガボン共和国のオクロ地区で、造山運動などによってウランが集積し、ウラン鉱床が形成された。

当時、天然ウランには、核分裂しやすいウラン235が、4～5％含まれていた(これは現在の原子炉で使う濃縮ウランとほぼ同じ割合)。
　天然ウランが濃集し、自然に核分裂連鎖反応が起こった。

　20億年前の”原子炉“が地面に埋まって、長期にわたって保存されていた。

地下は地上に比べて様々なインパクトに強い



地層処分システム概念の考え方

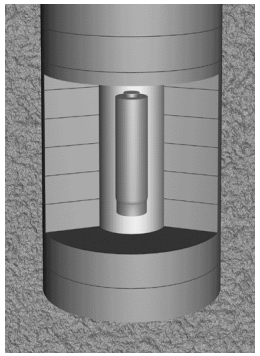
深部地質環境が本来的に有する包蔵性

廃棄物と人間の接触を困難にする受動的な隔離性能
- 地表における自然現象による擾乱を受けない
- 厚い岩盤により接近が抑制される

廃棄物中の放射性核種が地下水を介して人に影響を及ぼさないように働く受動的な閉じ込め性能
- 深部の地下水は動かない
- 深部地下水の還元性
- 溶解度限界により核種の溶出が抑制される

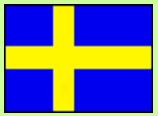
地層処分システムによる安全の保証

接近シナリオに対する隔離性能をさらに確実にするために、適切な条件を持つ地質環境を処分の場所として選定する。



地下水シナリオに対する閉じ込め性能をさらに確実にするために多重バリアシステムを構築する

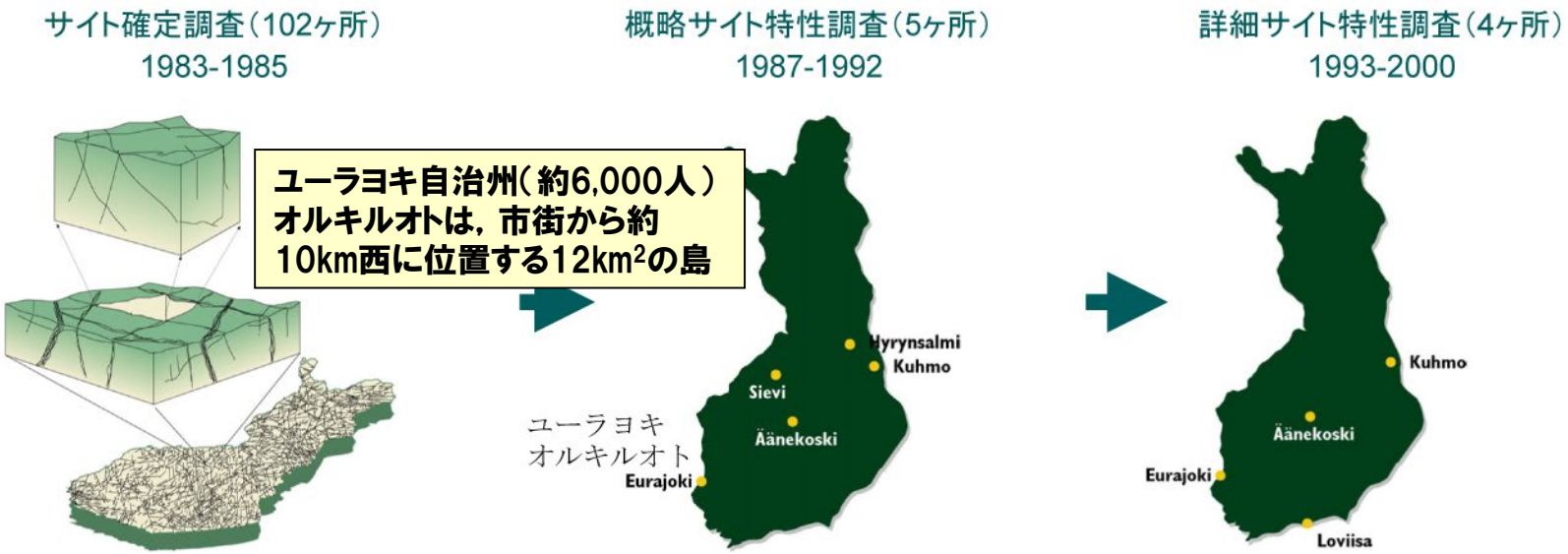
諸外国の地層処分事業の現状

国　名	処分サイト	岩種	処分施設の深さ	対象廃棄物
日本	未定 （2002年末公募開始）	未定	300m以深	ガラス固化体
フィンランド	ユーラヨキ自治体オルキルオト ※世界で初めて最終処分地が決定	結晶質岩	約400m	使用済燃料
スウェーデン 	エストハンマル自治体フォルスマルク （建設許可申請） ※実施主体が処分場候補地として選定	結晶質岩	約500m	使用済燃料
フランス	候補サイト区域を特定 （ビュール地下研究所の近傍）	粘土層	約500m	ガラス固化体

その他，スイスやドイツ，イギリス，アメリカ，カナダ等で，地層処分の実施に向けたサイトの選定作業や研究開発が進められています。

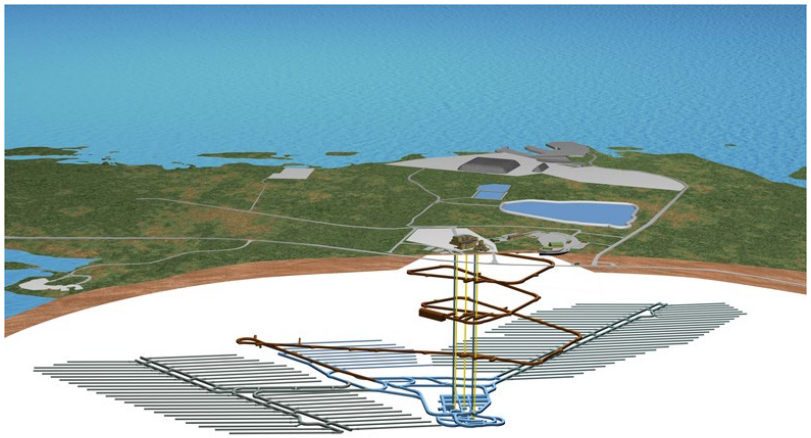
参考文献：「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について」経済産業省資源エネルギー庁

フィンランドにおける処分場の選定



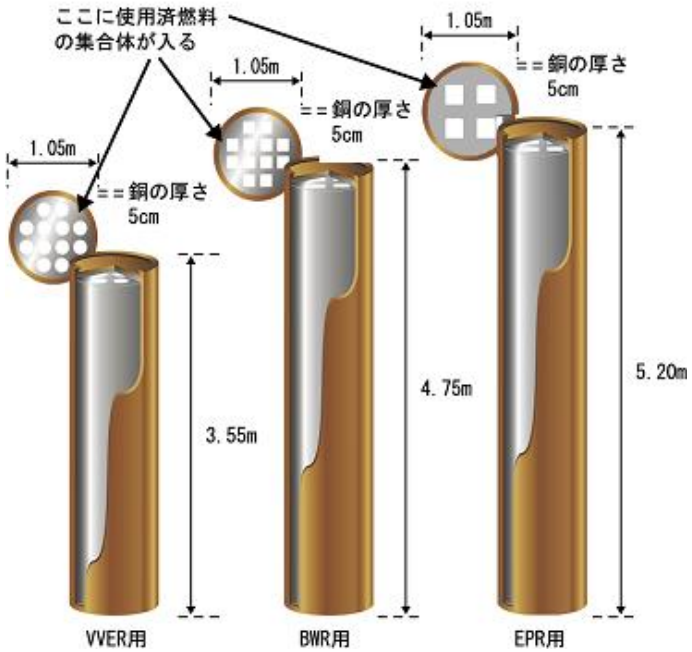
1983 年～：文献等による調査により102ヶ所の地域を選定しサイト確定調査を実施
1987 年～：5 ヶ所についてボーリング等による概略サイト特性調査を実施
1993 年～：コンギンカンギャス，クーモ，オルキルオト，ロヴィーサの4地点で詳細調査
1998 年　：地元及び国民の支持はオルキルオト，ロヴィーサが高い
2000年　：処分場建設予定地として精密調査を行う地区に，オルキルオトが選定される
（土地面積が広く建設の自由度が高い，輸送の必要性が小さい，地元との良好な関係）
2004 年　：地下岩盤特性調査施設（ONKALO）の建設開始
2012 年　：処分場の建設許可申請
2020 年　：処分場・施設の操業開始

フィンランドにおける地層処分の概念

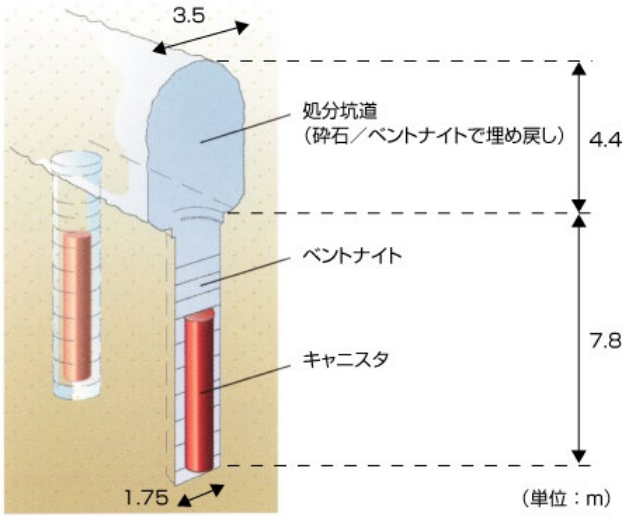


処分場のレイアウト

深度：400m，面積：3km^2，坑道総延長：42km



使用済燃料のキャニスタ



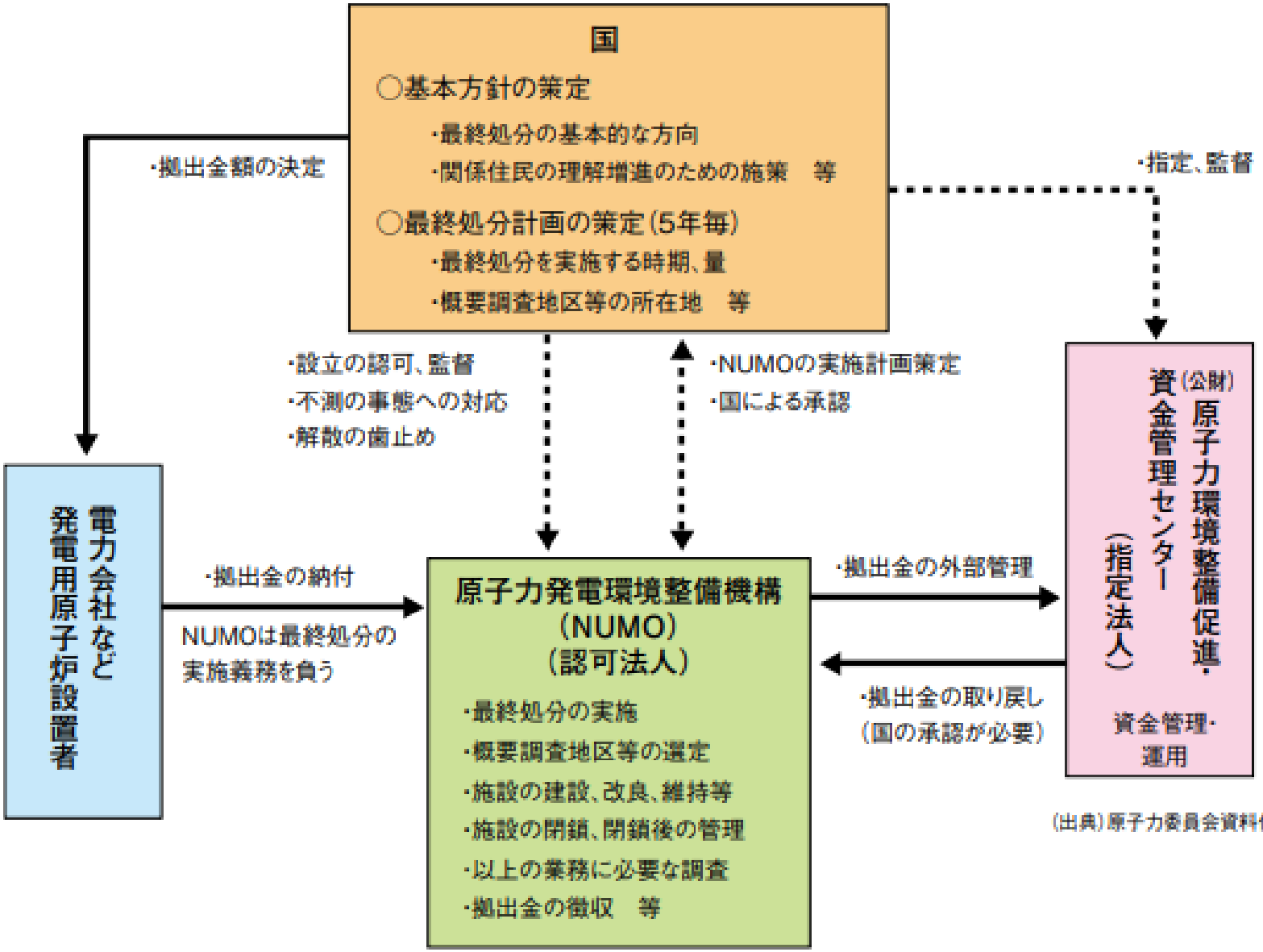
キャニスタの定置イメージ

日本における地層処分の制度的しくみ

地層処分場とはどんなものなのか？

地層処分に係る国の体制

●高レベル放射性廃棄物処分の取り組み体制基本スキーム



（出典）原子力委員会資料他

特定放射性廃棄物最終処分法

法律の内容

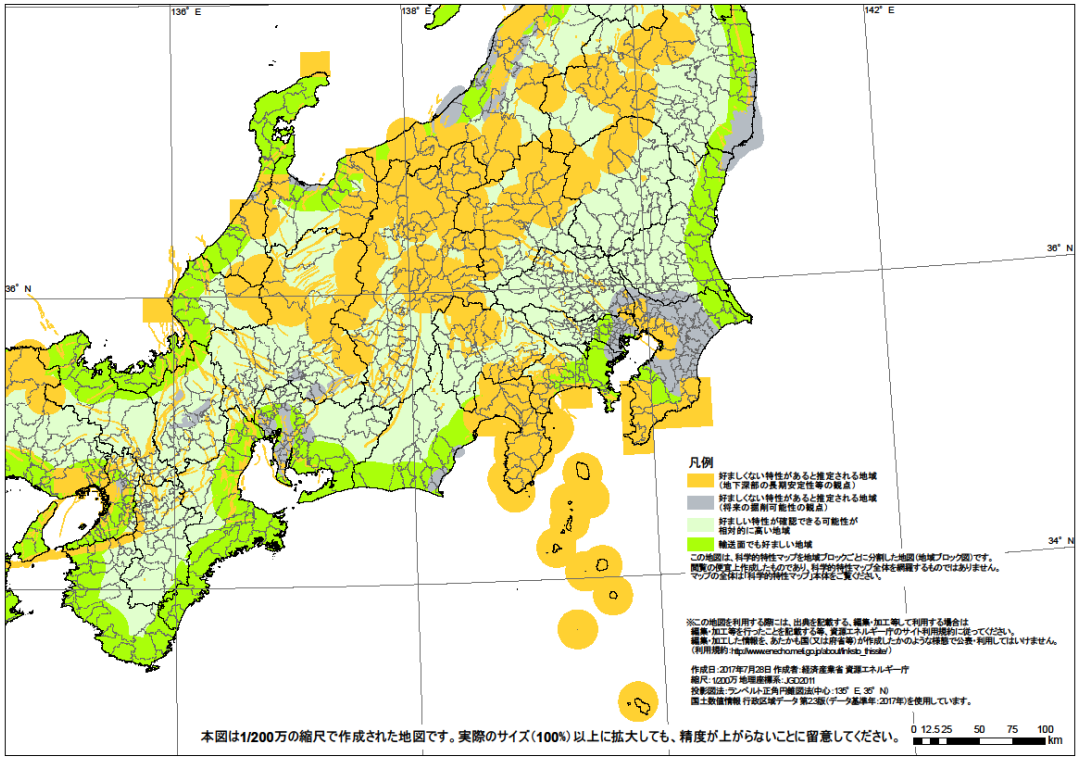
- 特定放射性廃棄物の最終処分について、基本方針、最終処分計画を経済産業大臣が定める。
- 概要調査地区を定める際には、当該地区を管轄する都道府県知事、市町村長の意見を聴き、十分に尊重しなければならない。
- 処分実施主体（現NUMO）は、原子炉設置者が納付する拠出金で運営される。国の出資はない。拠出金は、前年に行った原子力発電に相当する拠出金
- NUMOは①最終処分施設建設地の選定、②処分施設の建設・維持・管理、③最終処分業務、④処分終了後の施設の閉鎖・管理、⑤拠出金の徴収などを行う。
- 立地選定手続きについては、「概要調査地区の選定」、「精密調査地区の選定」、「最終処分施設建設地の選定」の3段階のプロセスを経なければならない。
- 最終処分が終了したときは、経済産業大臣の承認を受けて処分施設を閉鎖する。経済産業大臣は記録を永久に保存する。
- 経済産業大臣は、最終処分施設を保護するための立体的な区域を保護区域とし、掘削を制限し鉱業権の取り消しを行うことができる。

➢ 電気事業者の発生者責任や国による管理責任が明記されている一方で、地域指定と同時に行われるべき損失補償についての規定が存在しない。

日本における最終処分地選定プロセス

- 最終処分地を決定するステップについて、日本では2000年に成立した「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（最終処分法）という法律で、高レベル放射性廃棄物の処分施設の建設場所を選ぶために、段階的な調査を行うことなどが定められた。

- 2017年に、地層処分を実現する上で国民の議論の土台となる「科学的特性マップ」を国が公表し、現在は国民理解を得るための対話活動が進められている。



科学的特性マップの要件・基準

好ましくない要件・基準

- ✕ 火山の近傍
- ✕ 活断層の近傍
- ✕ 隆起・侵食が大きい範囲 など

一つでも該当する → **地下深部の長期安定性等（オレンジ）**

- ✕ 油田、ガス田、炭田が存在する範囲

該当する → **将来の掘削可能性（シルバー）**

好ましくない特性があると推定される

いずれも該当しない → **好ましい特性が確認できる可能性が相対的に高い（グリーン）**

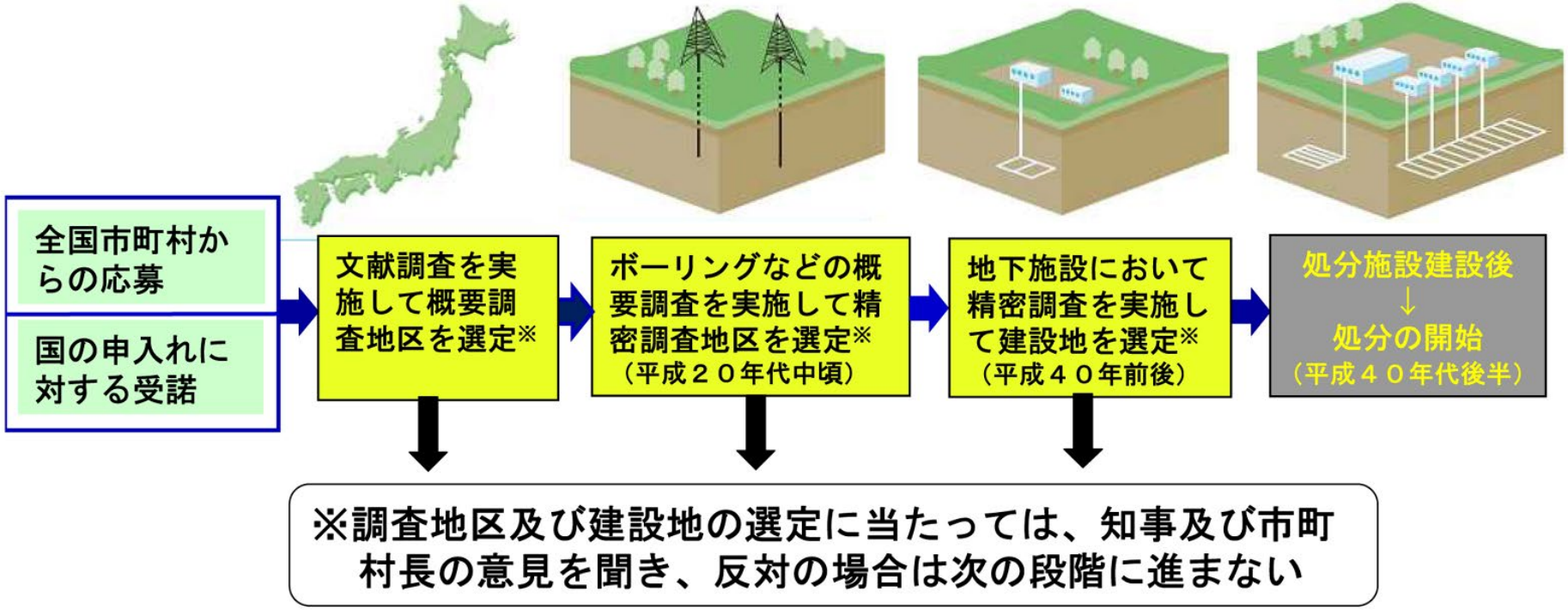
好ましい要件・基準

- ○ 海岸からの距離が短い範囲

該当する → **輸送面でも好ましい（グリーン沿岸部）**

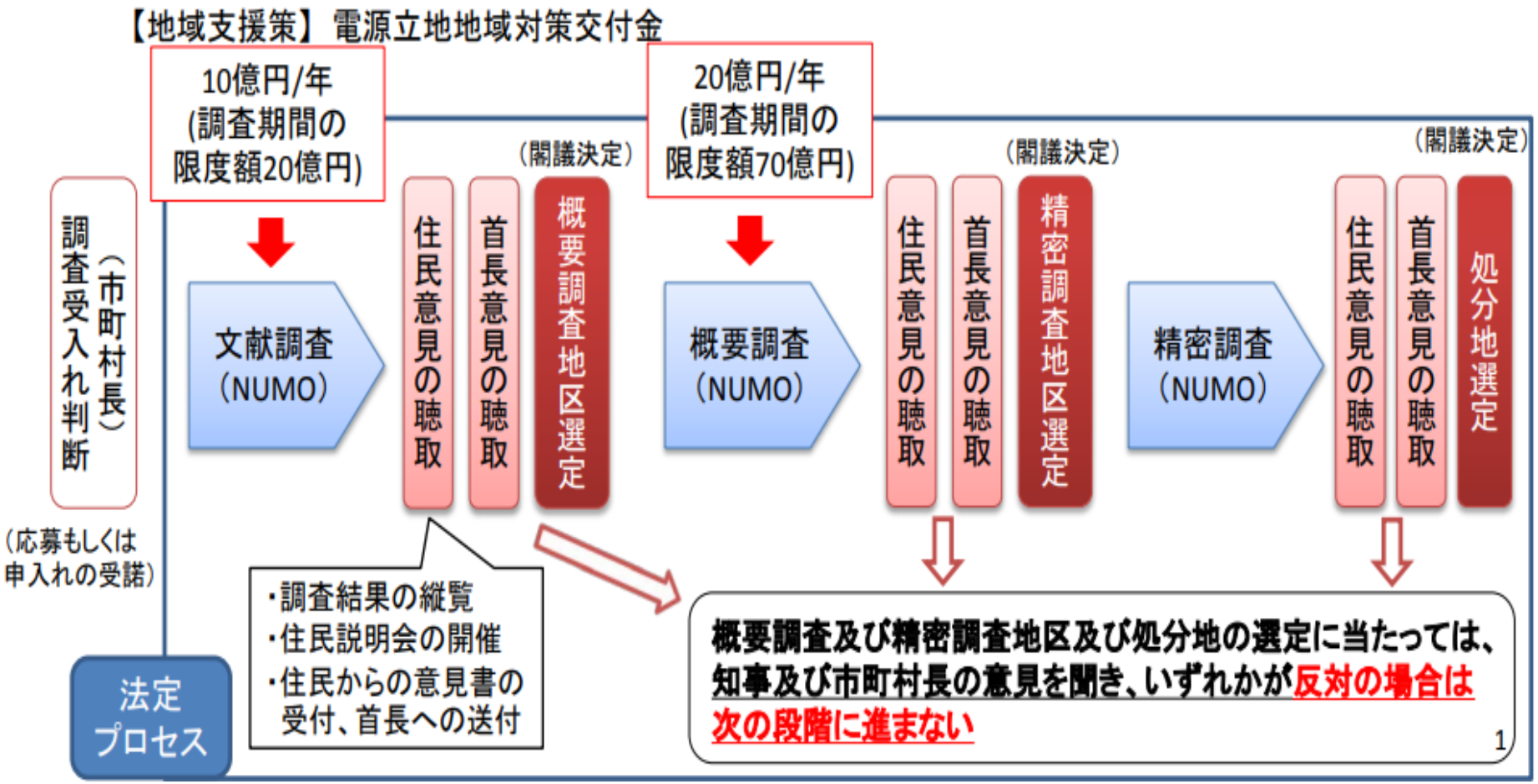
経済産業省 資源エネルギー庁 Agency for Natural Resources and Energy

特廃法に基づく処分場の立地選定プロセス

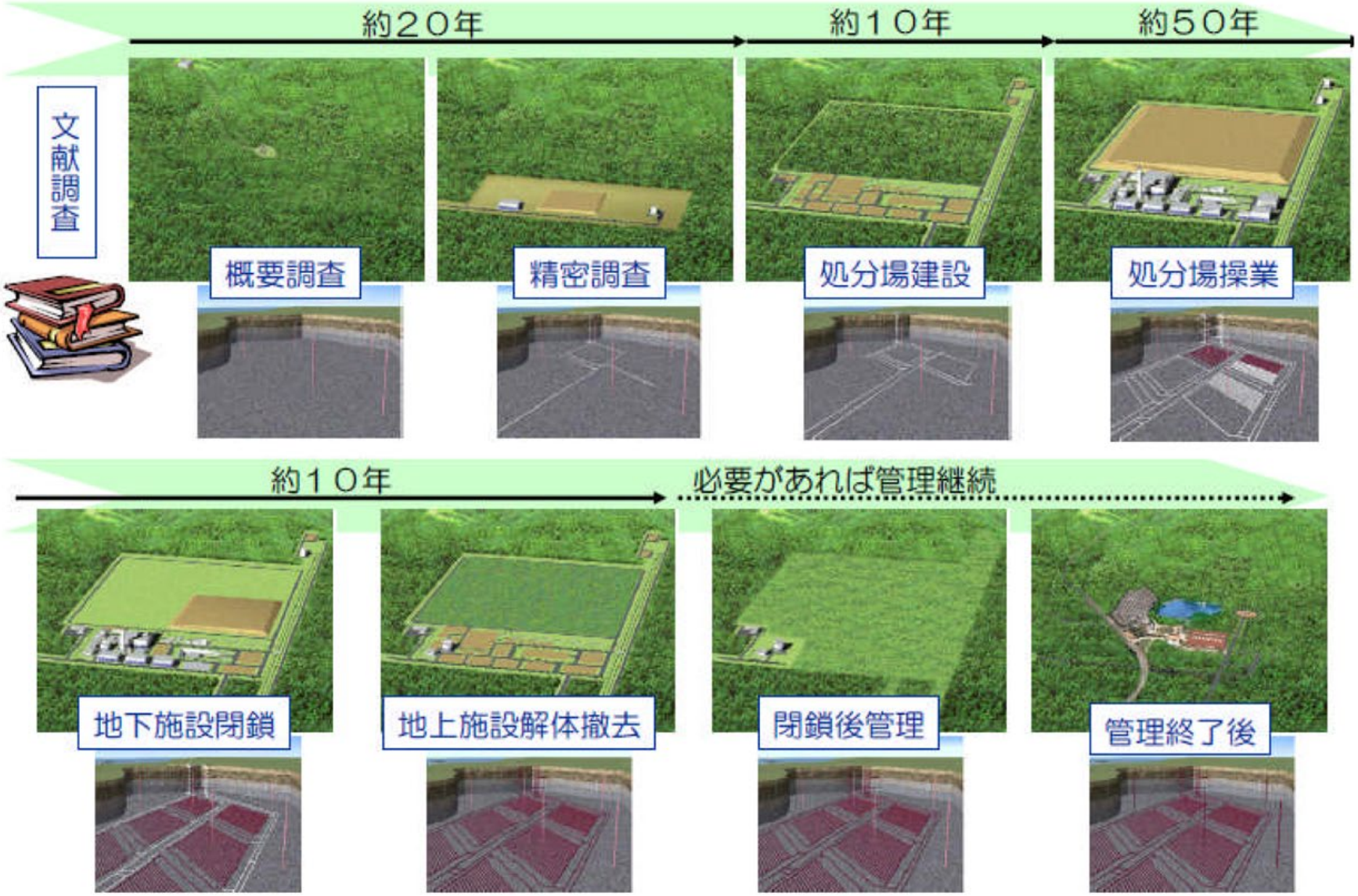


- 2002年から、原子力発電環境整備機構（NUMO）が，処分施設の設置可能性を調査する区域の公募を開始。
- 「可逆性：放射性廃棄物の管理において，一旦なされた意思決定を逆戻りさせること」は，担保されている。
- 現在は，当初の想定から20年遅れの状態。国からの申し入れも含めて国が前面に立って事業を推進する方向になっている。

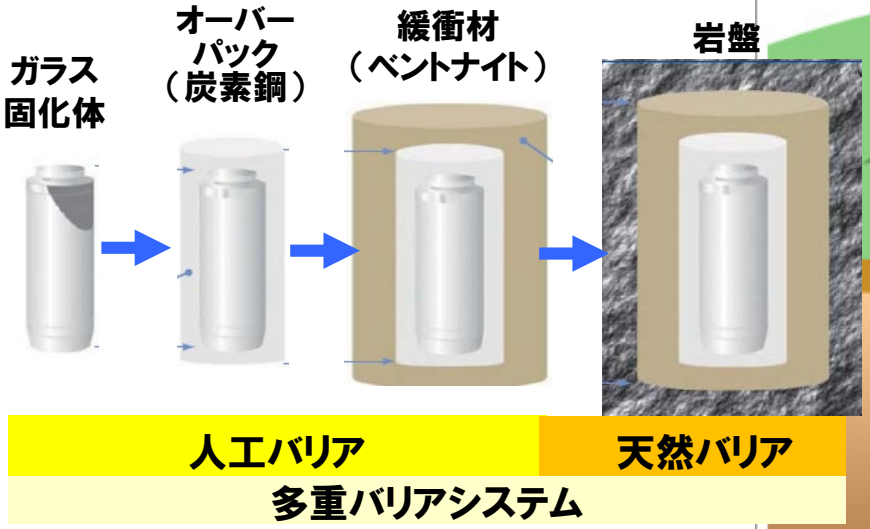
電源立地地域対策交付金

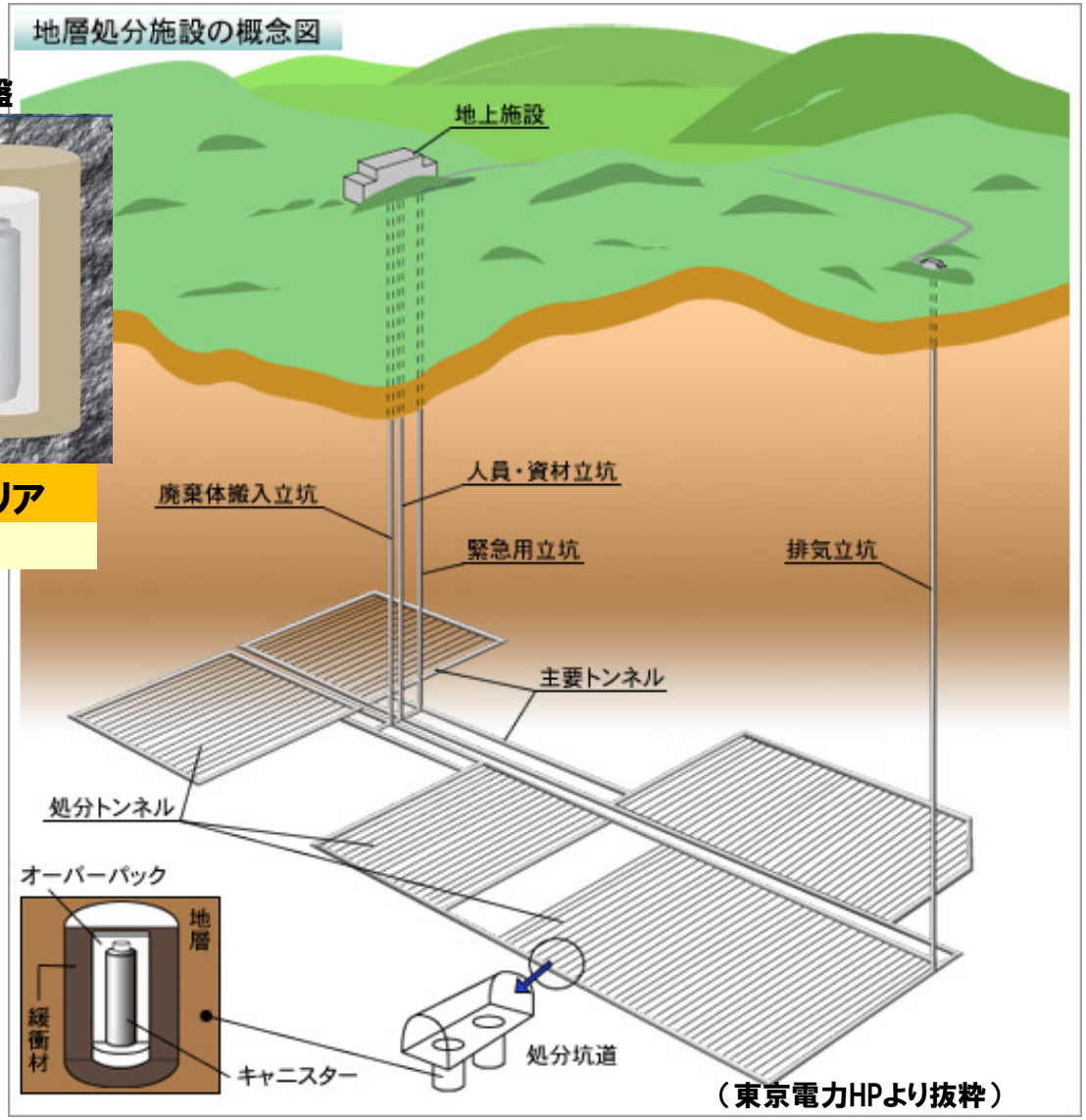


地層処分事業の時間スケール



地層処分場の概念



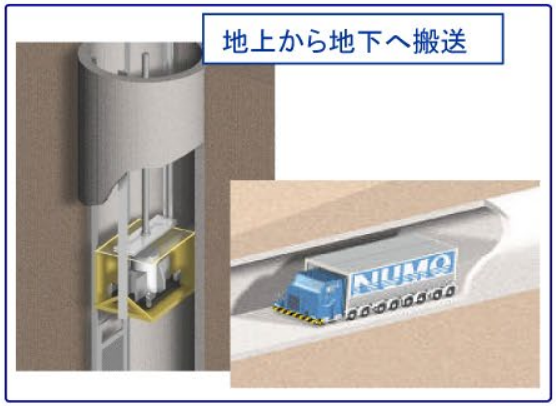


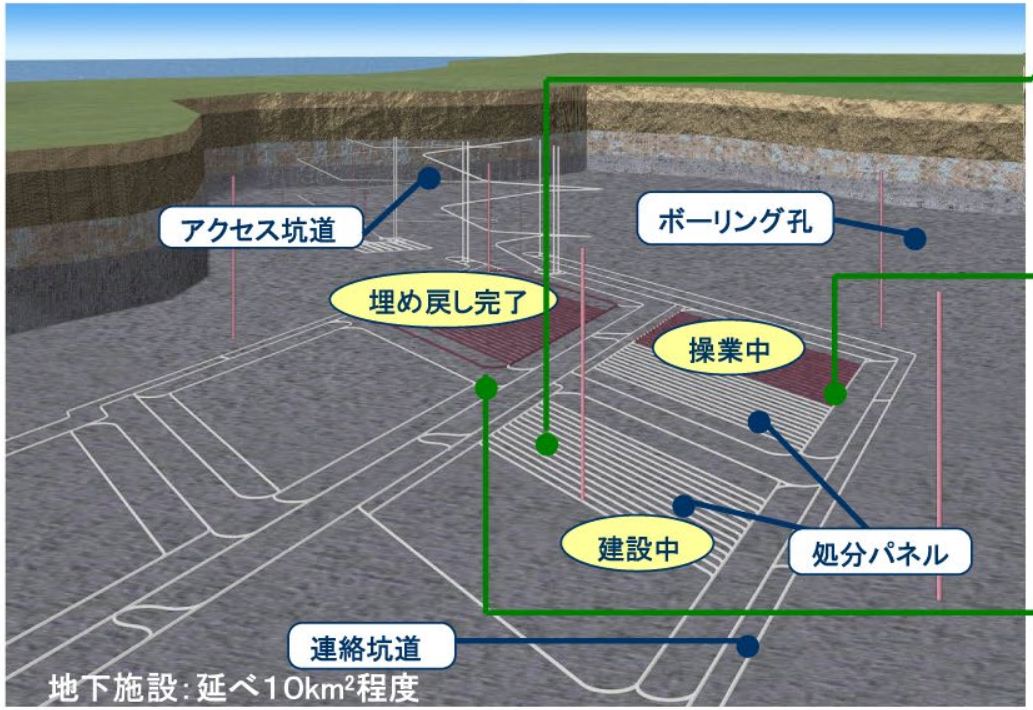
（東京電力HPより抜粋）

地下深部の多重バリアシステムの利点

- 廃棄物と地下水が触れにくい。
- 放射性元素が溶けにくい。
- 放射性元素が移動しにくい。
- 人間の生活環境に達するのに膨大な時間がかかる。

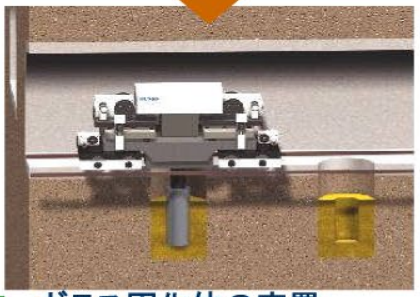
処分場の建設・操業イメージ





建設から操業までの流れ

地下坑道の建設



ガラス固化体の定置

処分坑道の埋め戻し

地層処分場は実現するか？

処分場の公募に関する報道がなされた自治体

報道開始時期	自治体	動機	検討期間
2003.4	福井県和泉村	財政再建、地域振興	6日
2003.12	高知県佐賀町	（不明）	約9ヶ月
2004.4	熊本県御所浦町	議会からの要請	1日
2005.1	鹿児島県笠沙町	財政再建、地域振興	2日
2005.7	長崎県新上五島町	（不明）	（不明）
2005.10	滋賀県余呉町	（不明）	約4ヶ月
2006.8	鹿児島県宇検村	財政再建、地域振興	4日
2006.8	滋賀県余呉町（再）	財政再建、地域振興	約3ヶ月
2006.9	高知県津野町	財政再建、地域振興	約2ヶ月
2006.9	高知県東洋町	財政再建、地域振興	約9ヶ月
2006.12	長崎県対馬市	（不明）	約1ヶ月
2007.2	福岡県二丈町	（不明）	（不明）
2007.3	鹿児島県南大隅町	財政再建、地域振興	（不明）
2007.7	秋田県上小阿仁村	財政再建、地域貢献	5日

日本原子力学会　2009年春の年会　古川匡ら

高知県東洋町の事例

◇高知県東洋町

- 人　　口　3,578人
- 面　　積　74.09㎢
- 財政力指数　0.14
- 歳入総額　約24億円

（数字は全て平成16年度）

主な経緯

H18.8～	勉強会・説明会を実施
H19.1.25	東洋町が全国初の応募
〃　3.28	応募に伴う事業計画変更認可（19年度から文献調査開始可能）
〃　4.　5	民意を問うために町長が辞職し、出直し選挙への出馬を表明
〃　4.22	出直し町長選挙において、反対立場候補が当選（1,821票：761票）
〃　4.23	東洋町が応募取下げ
〃　4.26	応募取下げに伴う事業計画変更認可（文献調査取り止め）

国が前面に立った直接申し入れ方式で，最終処分場を選定する考え方に転換

社会的モラトリアム 「地層処分」か「長期保管」か？

長期保管の場合，地上に保管するのか，地下に保管するのか？

地上と地下はどちらが安全か？
「安全」と「安心」はイコールではない。

人は，台風で川が増水して危険と判っていても，それを見に行って確認することで安心したい生き物。危険な物でも，目に見える場所に置いておきたい？

地下に「長期保管」する場合は，「長期保管」と「地層処分」の違いは何か？
⇒ 監視できるか否か，再取り出しを前提とするか否か

世界的には，再取出し可能な形で地層処分を行うという考え方もある。

- ✓ 数十年～数百年単位のモニタリング
  - モニタリングの結果
  - 維持管理費の社会的インパクト（年間数億円×モニタリング期間）
  - 管理状態から得られる安心感の醸成具合

などに基づいて，再取出しやモニタリングの継続について判断

- ✓ 安全でないなら再取出しする
- ✓ 安全なら，モニタリングの頻度を落としてもう少し継続する
- ✓ 安心できたら，モニタリングを終了し，保管から処分へ移行する

地上に数万年間「長期保管」する以外は，地下の環境を調査し，理解する技術が不可欠となる。

東電 福島第一原発は、ある意味で地上保管

原発を鉄やコンクリートで固めて数百年管理するという方法も提案された。

「石棺方式」と呼ばれたことで、チェルノブイリと同じようなイメージを持たれ、福島県知事ほか地元の人々が強く反発。
当時の経産省副大臣は説明責任を果たせず、「石棺方式は考えていない。全量撤去の方針は変わらない」と返答。撤去搬出先は未だない。

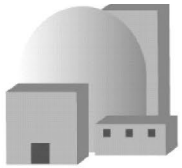
北海道を眺めて社会の成熟度を考える

1989年から稼働した泊原子力発電所は、北海道で唯一の原子力発電所。
発電設備容量の合計は207万kWで、**北海道の電力需要の約40％を賄う電源**となっている。

30年間、北海道各地に電力を供給した結果、
2020年までに使用済燃料として981体の燃料集合体が“北海道内で”発生

地層処分だけでない将来の問題

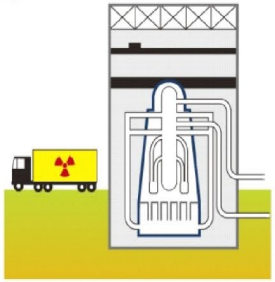
原発の廃止措置



運転終了

●廃止措置の標準工程（注）：沸騰水型原子炉（BWR）

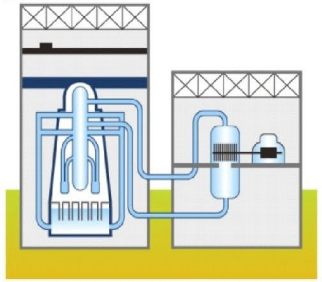
①



使用済燃料の搬出

使用済燃料や未使用の燃料等を、再処理工場や貯蔵施設等に搬出します。搬出先において、使用済燃料等は適切に管理・処理されます。

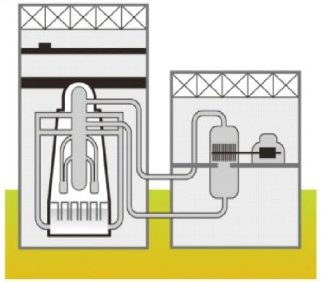
②



系統除染「洗う」

後の解体撤去作業等を行いやすくするために、施設の配管・容器内に残存する放射性物質を、化学薬品等を使って可能な限り除去します。

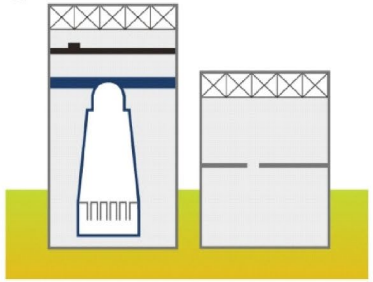
③



安全貯蔵「待つ」

適切な管理のもと施設を必要に応じた期間、安全に貯蔵し、放射能の減衰を待ち、後の解体撤去作業等を行いやすくします。

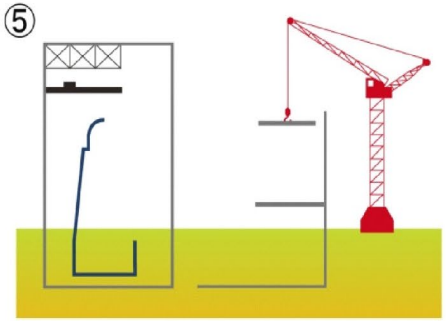
④



解体撤去(1)「解体する(内部)」

放射性物質を外部に飛散させないように、まず建屋内部の配管・容器等を解体撤去します。その後、建屋内の床や壁面等の放射性物質の除去作業を行います。

⑤

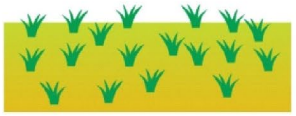


解体撤去（2）「解体する（建屋）」

建屋内の放射性物質を目標どおり除去したことを確認したうえで、その後は通常のビル等と同様に建屋の解体作業を行います。

廃棄物処理・処分

廃棄物は、放射能のレベルにより区分し、それぞれ適切に処理・処分します。



跡地利用

跡地は、法的な手続きを経て、安全性が確認されれば、さまざまな用途に活用できます。

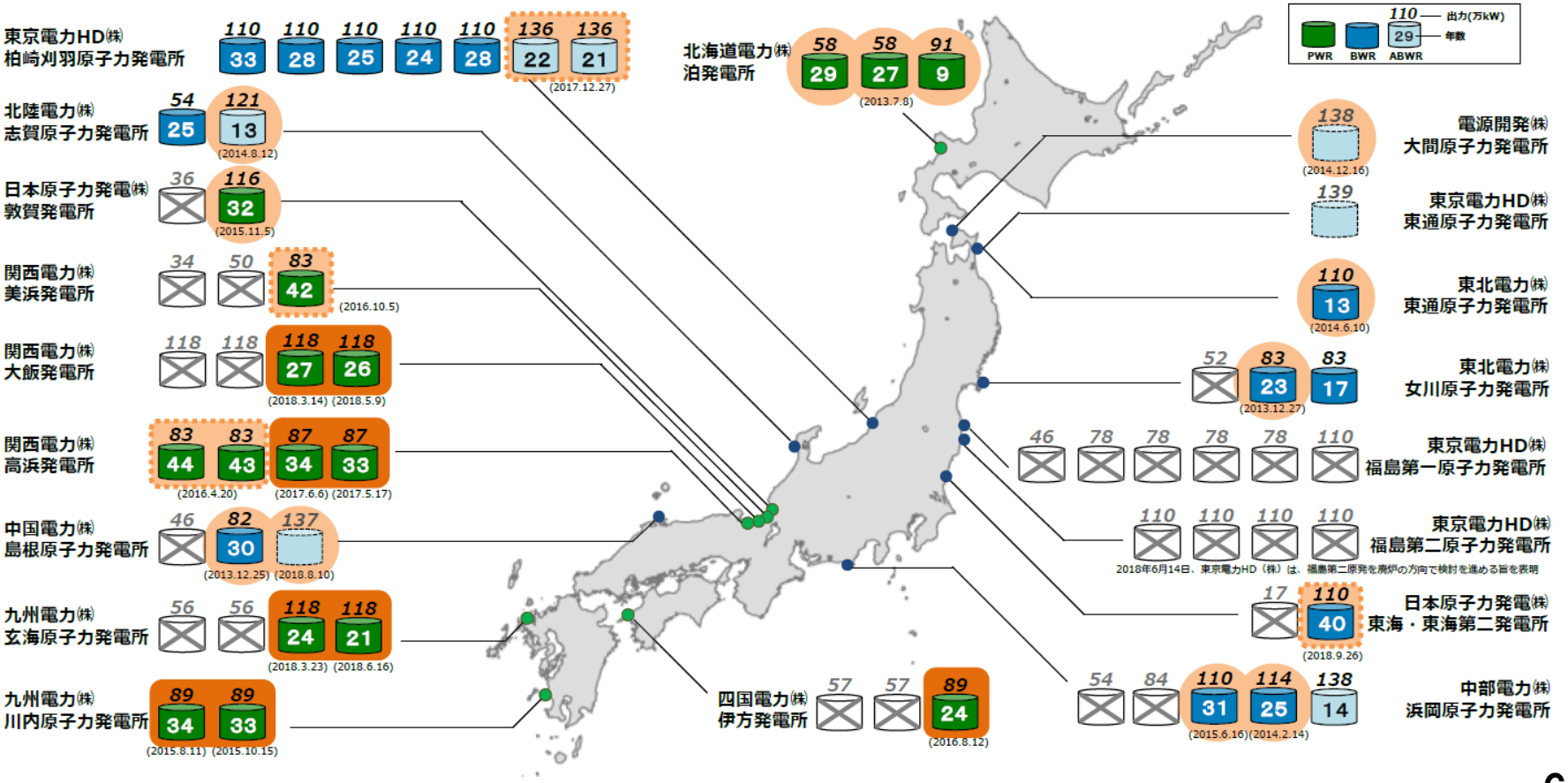
また現在一つの案として、地域社会との協調を取りながら、引き続き原子力発電用地として有効に利用することも考えられています。

日本の原発における「廃炉」の現状

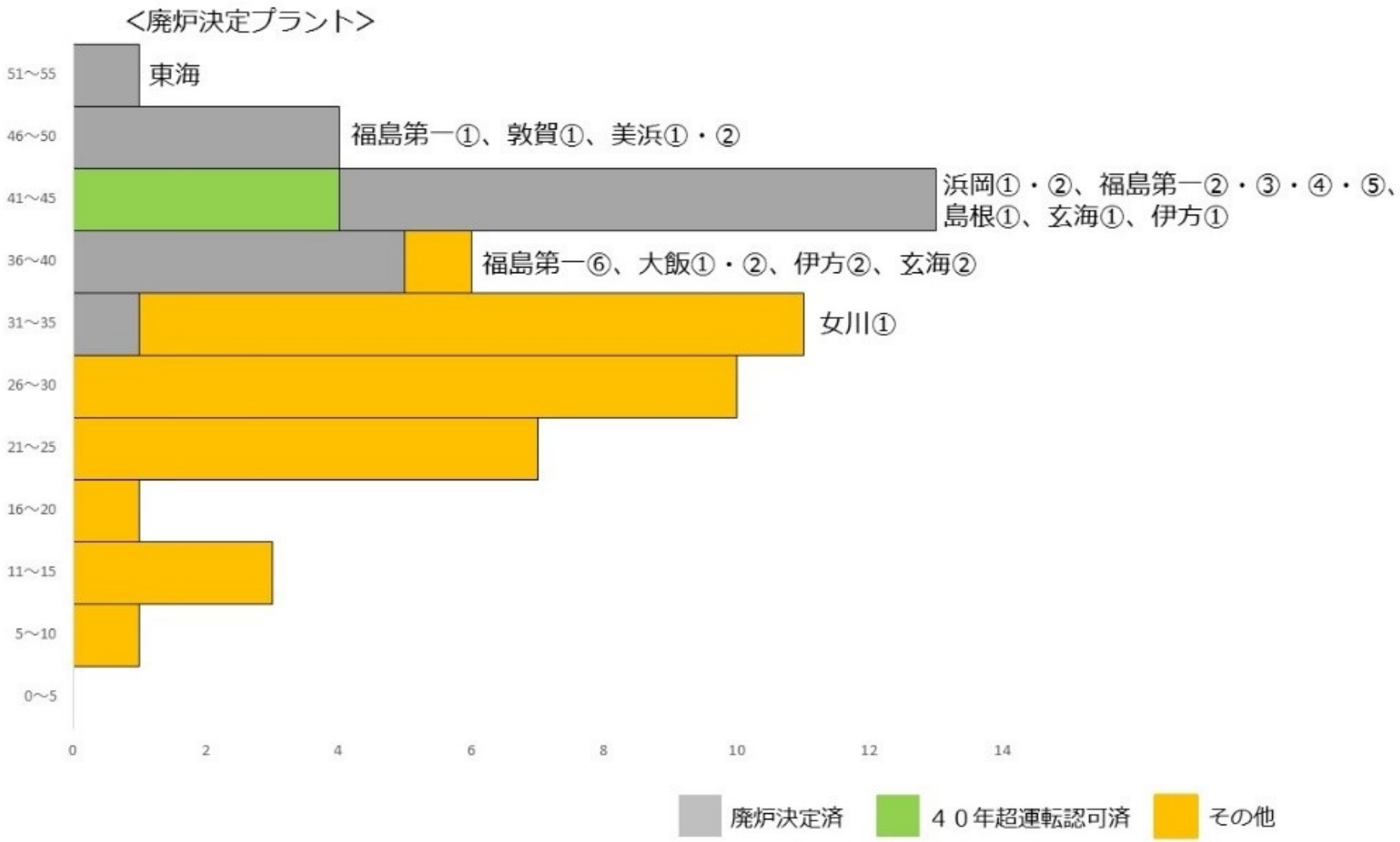
原子力発電所の現状

2019年3月15日時点

再稼働	設置変更許可	新規制基準 審査中	未申請	廃炉 決定済・検討中
9基	6基	12基	9基	24基
稼働中 9基、停止中 0基 (起動日)	(許可日)	(申請日)		



各プラントの運転年数と廃炉決定状況



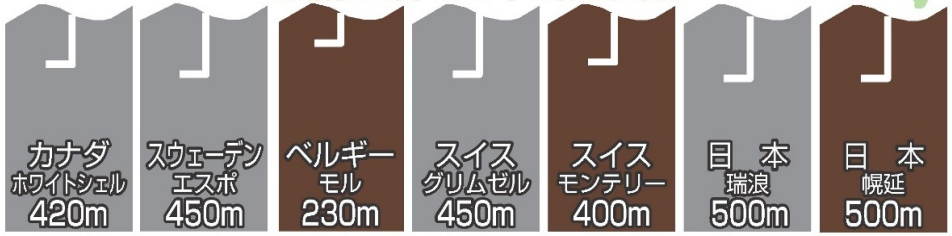
地層処分に関わる研究開発の現状

世界の地下研究施設

結晶質岩系
堆積岩系

Site-specific URL：
最終処分候補地の適性を見定める地下研究施設

Generic URL：
最終処分場として使用しない場所で技術を磨く地下研究施設



●出典：*The Role of Underground Laboratories in Nuclear Waste Disposal Programmes OECD/NEA, 2001*
（一部、加筆・修正）

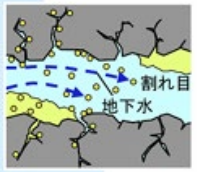
わが国における深地層の研究施設

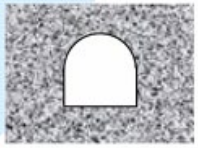
超深地層研究所計画（岐阜県瑞浪市）

花崗岩（結晶質岩）

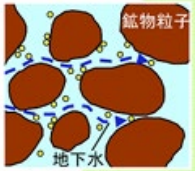
淡水・塩水系

硬　岩





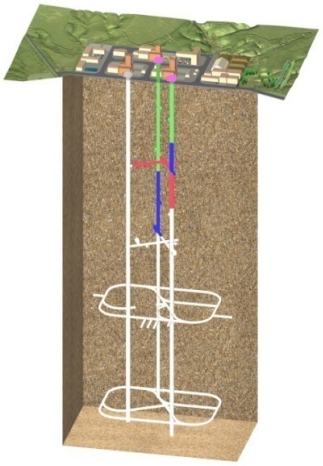
幌延深地層研究計画（北海道幌延町）



泥　岩（堆積岩）

塩水系

軟　岩



地質環境に期待する役割

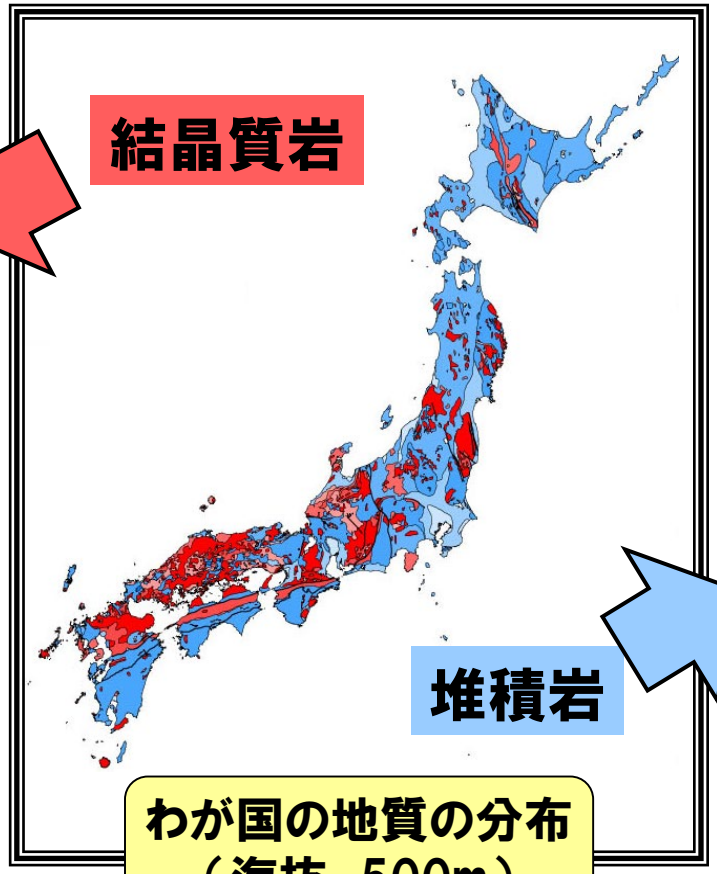
- 対象とする岩盤が十分な空間的広がりを有すること。
- 対象とする岩盤が地下施設を建設できる力学的安定性，人間が安全に作業できる温度環境を有すること。
- 地下水流速が遅く地下水が還元的であり，放射性核種の十分な遅延効果が期待できることこと。
- 人間の生活圏までの地下水の流動距離が長く，対象とする岩盤に核種の希釈効果が期待できること。

↓

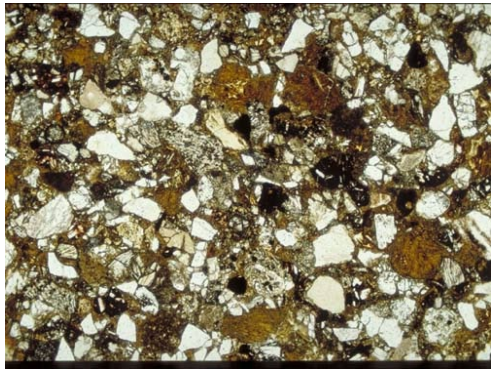
地質環境調査で、以上の要件を提示する必要がある。

日本の地質環境のイメージ

地質の特徴（工学的視点）



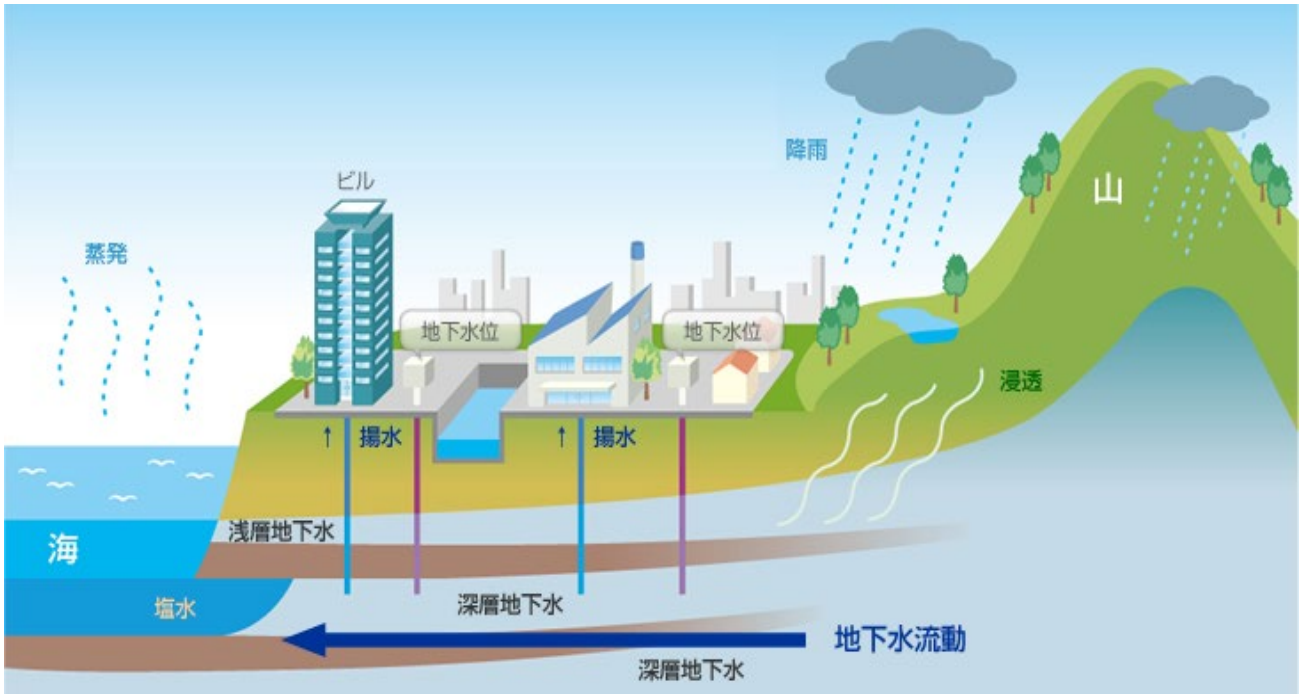
わが国の地質の分布
（海抜-500m）

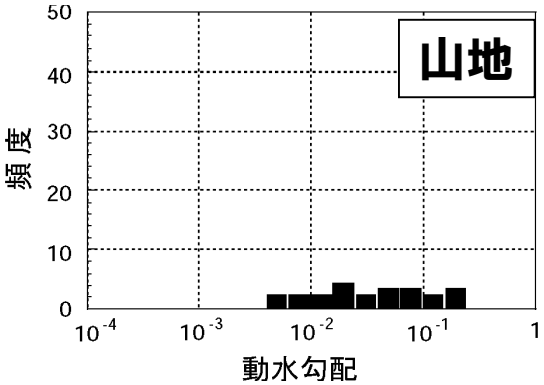


地下水の流動特性

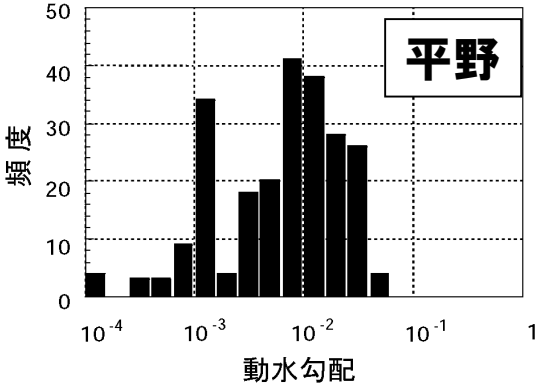
ダルシーの法則：Q＝k･i･A
Q：断面Aを流れる流量（cm^3/sec）
k：透水係数（地下水の流れやすさ→地層に依存）
i：動水勾配（ポテンシャル→地形に依存）

	透水係数（cm/sec）
砂岩（Sandstone）	$3\times10^{-3}\sim8\times10^{-8}$
頁岩（Shale）	$10^{-9}\sim5\times10^{-13}$
石灰岩，苦灰岩	$10^{-5}\sim10^{-13}$
玄武岩（Basalt）	10^{-12}
花崗岩（Granite）	$10^{-7}\sim10^{-11}$
片岩（Schist）	10^{-8}
き裂性片岩（Fissured schist）	$1\times10^{-4}\sim3\times10^{-4}$



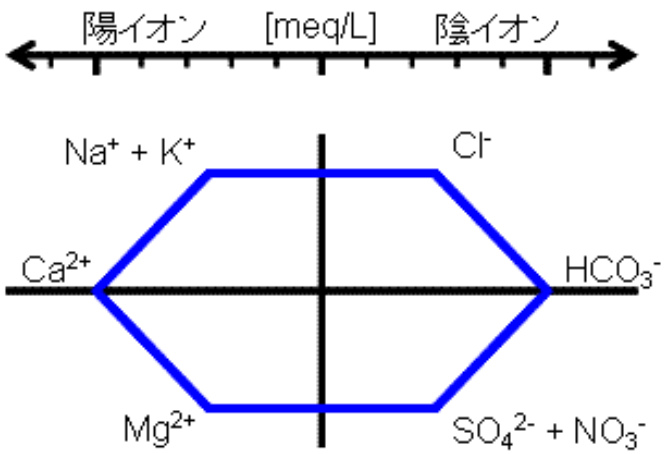


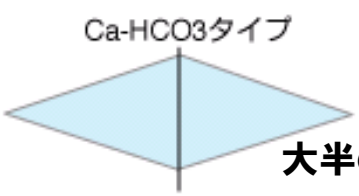
（N=234）



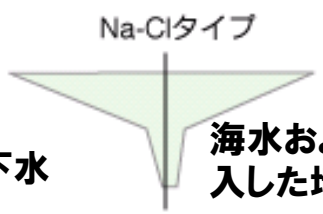
地下水の流れる速さは，岩盤の種類や動水勾配により0.003nm～30m／年

地下水の地球化学特性（水質）

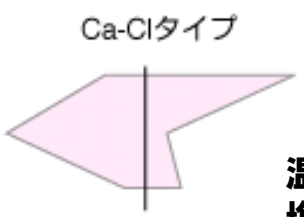


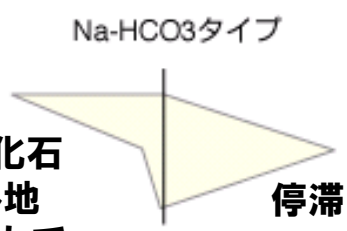


大半の循環性地下水



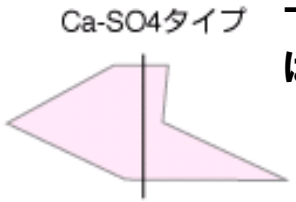
海水および海水が混入した地下水や温泉水

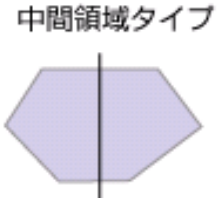




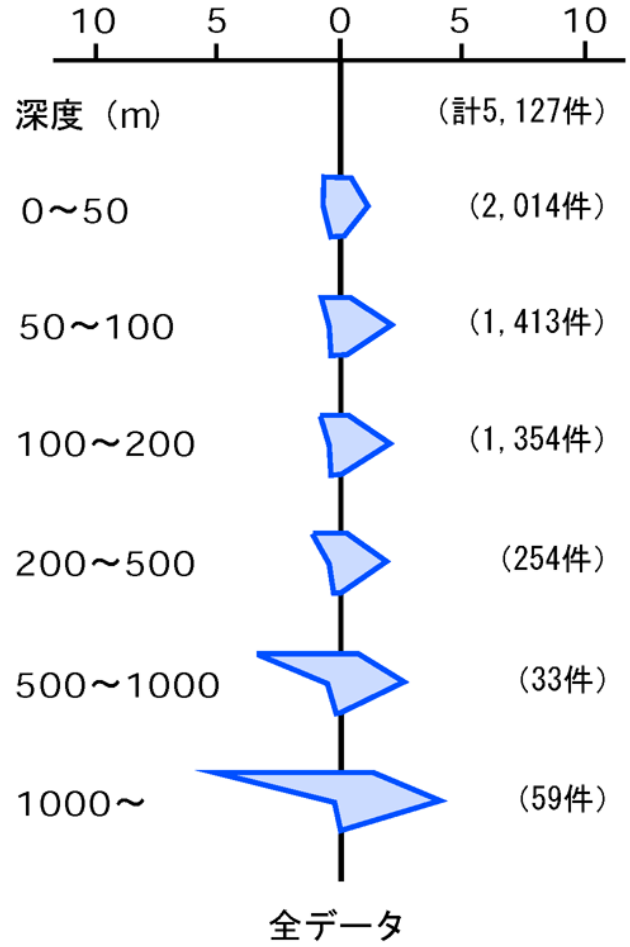
停滞的環境の地下水

温泉水，鉱泉，化石塩水等に相当し地下水や河川水としては特殊なケース



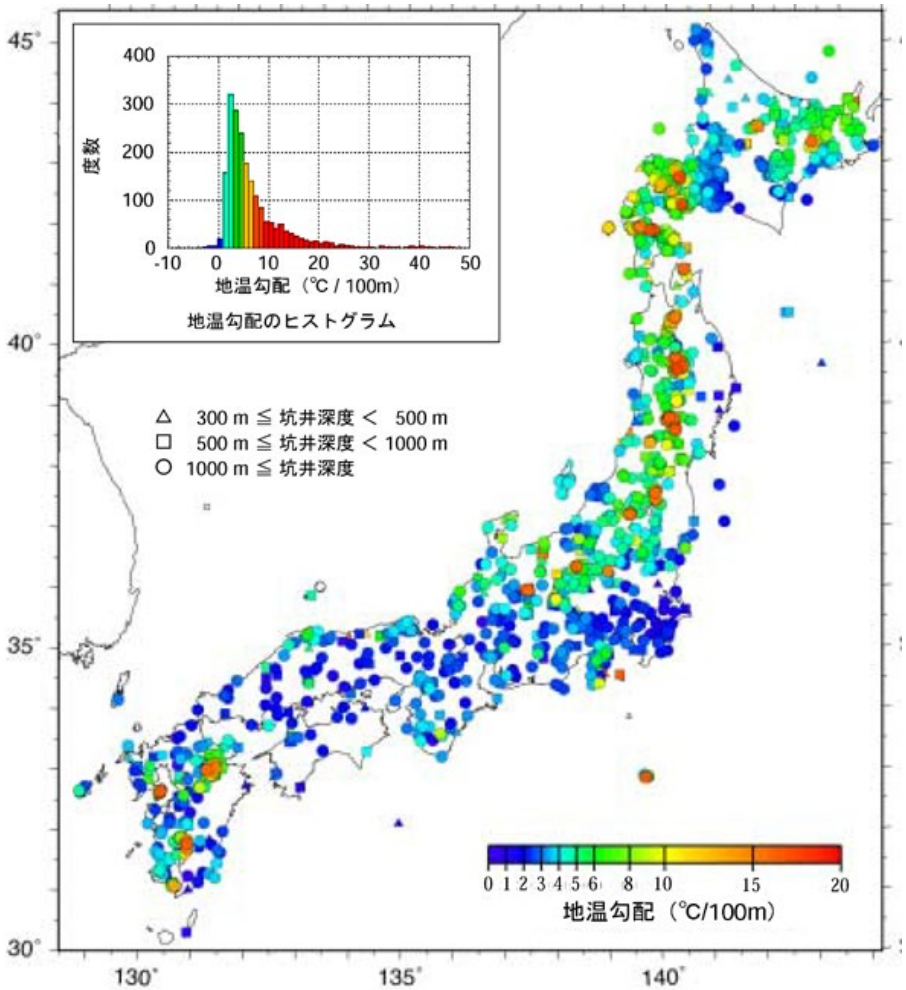


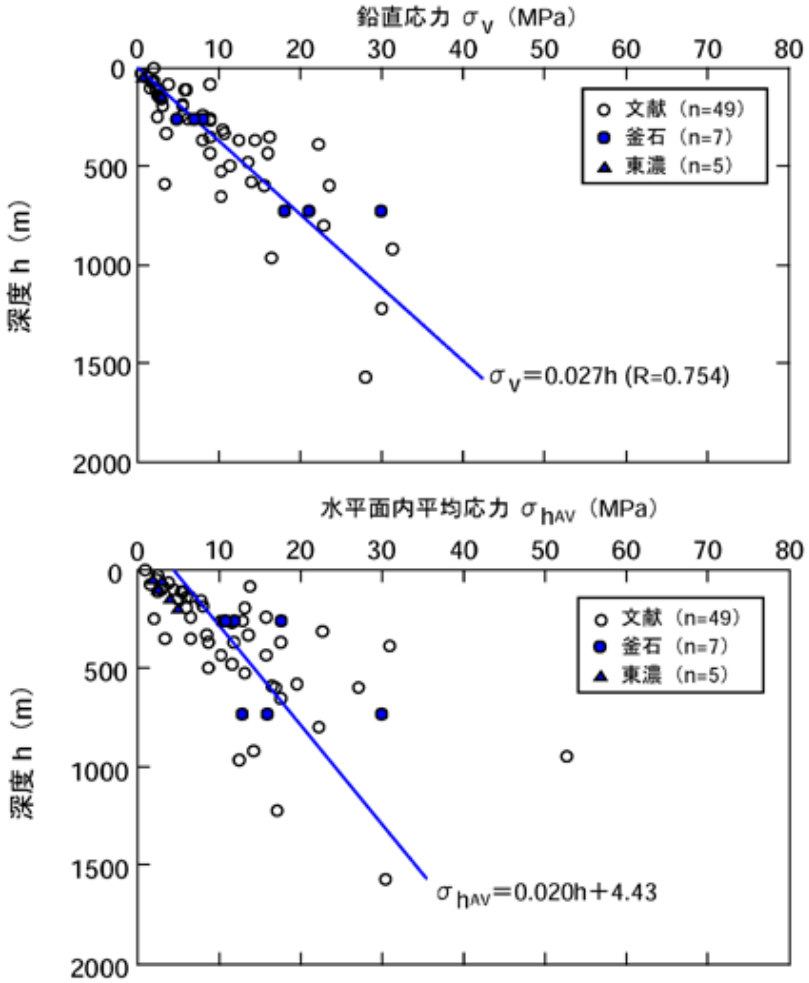
日本の地下水の深度ごとのヘキサダイアグラム



深度とともに停滞的環境の水質になる。

岩盤の温度・力学特性





日本の地温勾配分布

地温は1000mで30～50℃程度

深度ごとの水平および鉛直応力

応力は1000mで20～30MPa程度

幌延町の概要

北緯45°
札幌から列車，バス，車で約4時間半
人口　約2600人（人口密度4.5人／km^2）
主要産業　酪農など
観光　サロベツ原野，トナカイ牧場，
　　オトンルイ風力発電所等

地層処分に必要な地質環境調査技術

1. 場所を選定する。
   - 将来にわたり地殻変動や火山活動などの自然現象によって，地層処分場が破壊される恐れのない場所を選ぶための技術

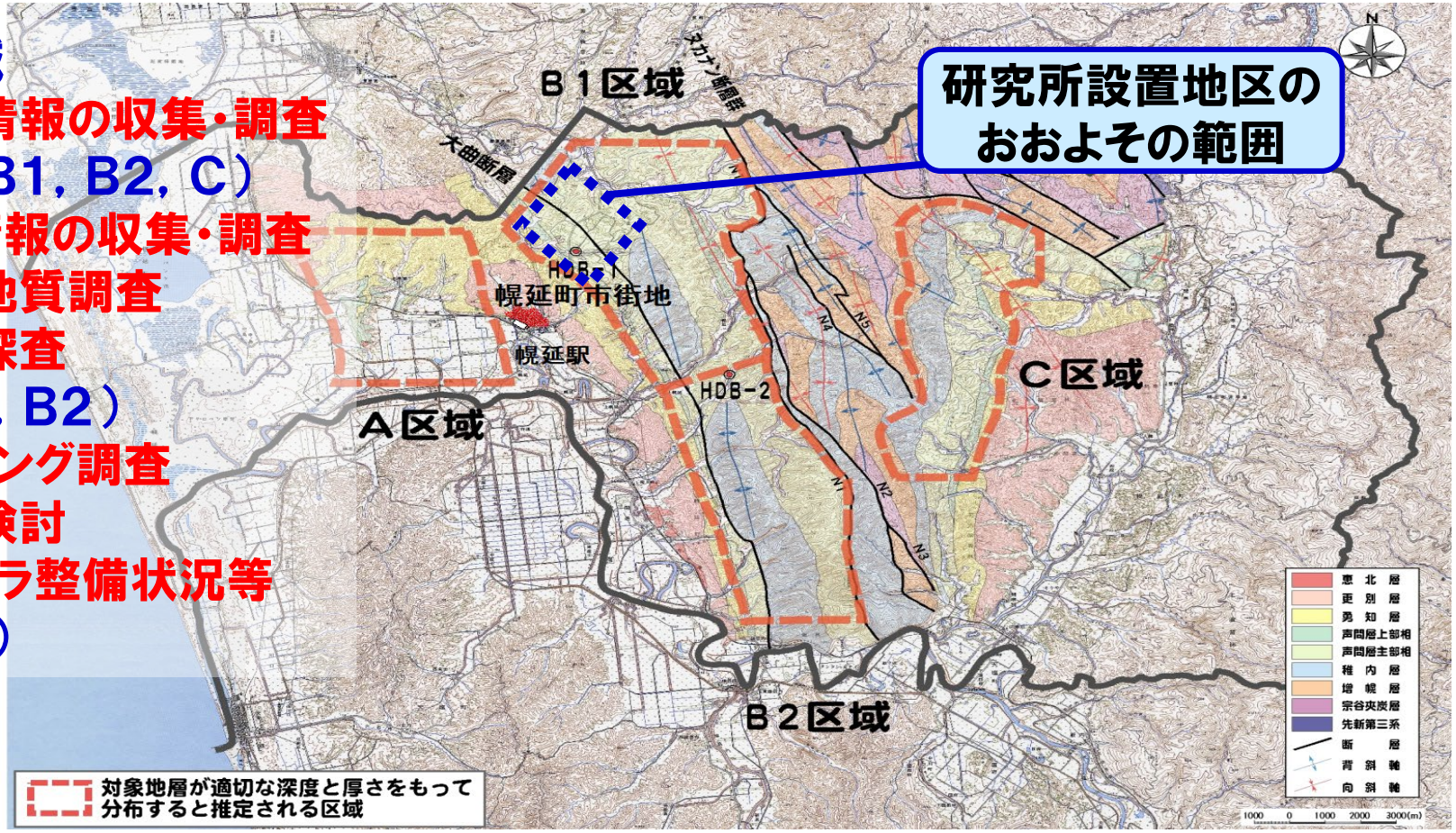
2. 選定した場所の地質環境やその長期変遷を理解する。
   - 数km四方×深さ300m以深の地質・地質構造，地下水の流動状態，化学的性質，力学特性などを調査するための技術

3. 大規模地下施設を設計・建設・操業・閉鎖する。
   - 地下坑道の建設や維持・管理，廃棄物の搬入，坑道を閉鎖するための技術

4. 将来にわたって安全であることを示す。
   - 放射性元素が漏れ出してから，地表に至るまでの時間，放射線量を計算して，生活環境が安全であることを示すための技術

研究所設置地区の選定

幌延町全域
↓　既存情報の収集・調査
4区域（A, B1, B2, C）
↓　既存情報の収集・調査
　　地表地質調査
　　物理探査
2区域（B1, B2）
↓　ボーリング調査
　　詳細検討
　　インフラ整備状況等
1区域（B1）



国土地理院1/50,000地形図（稚咲内、豊富、上猿払、天塩、雄信内、敏音知）を使用

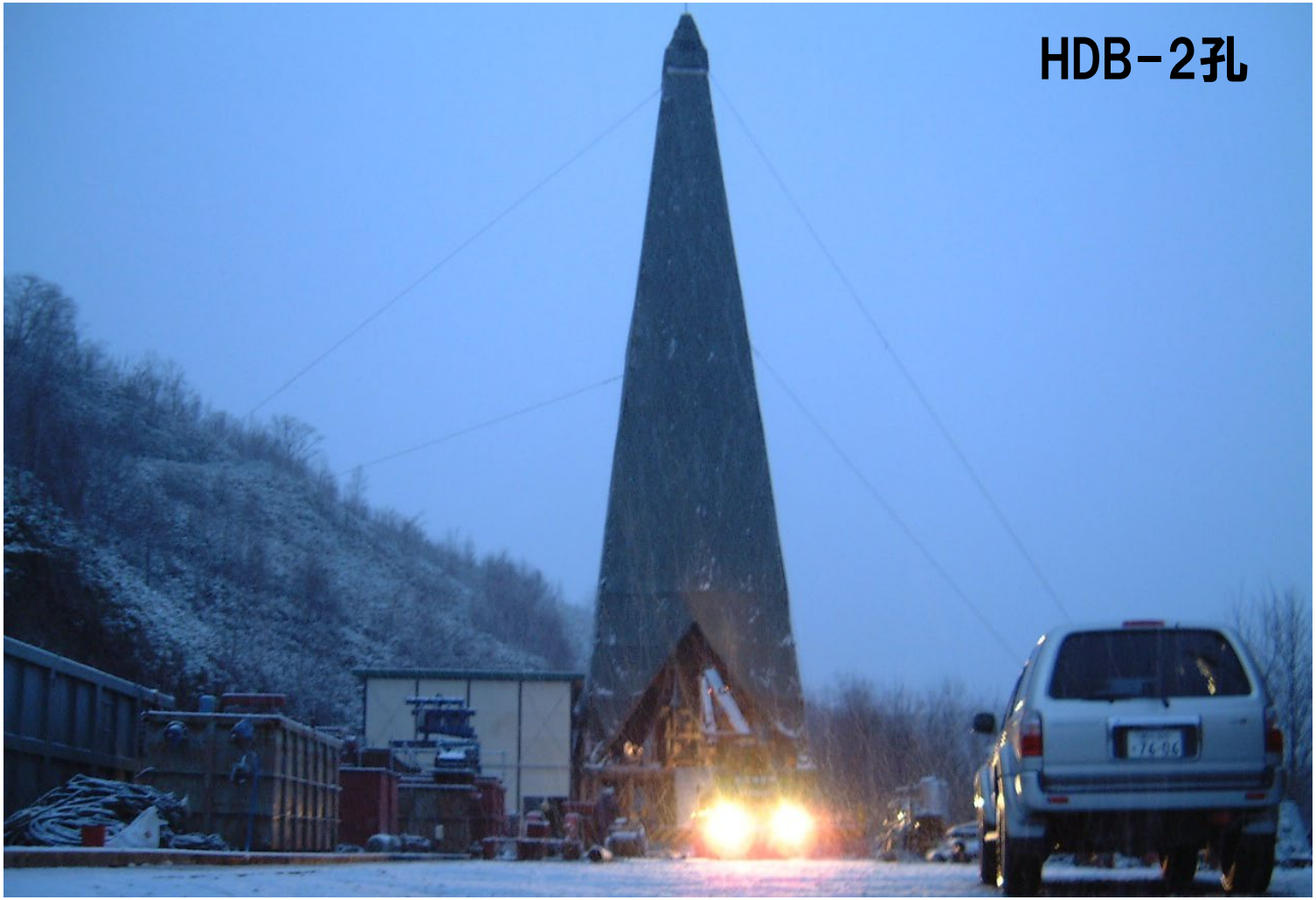
空中物理探査

広域の地質構造分布を概査するためのエアボーン調査

地上物理探査

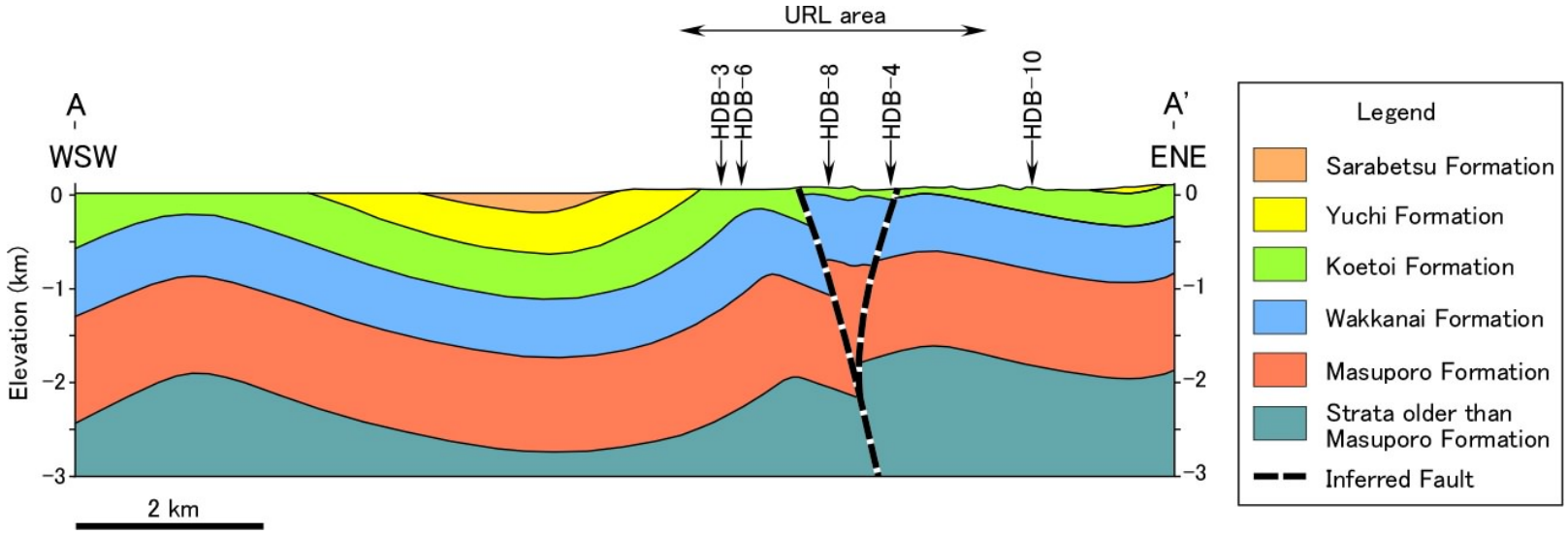
広域から領域を絞り込んで地質構造分布を調査する。

ボーリング調査



ボーリングと物理探査を相互補完して地質構造分布を調査する。

地質環境を理解した上で研究所設置地区を選定



- 幌延町全域において，白亜系から第三系の地層，沖積堆積物が広く分布。
- 沖積層が薄く，道路などのインフラがある場所を研究所設置地区として選定。

研究所設置地区

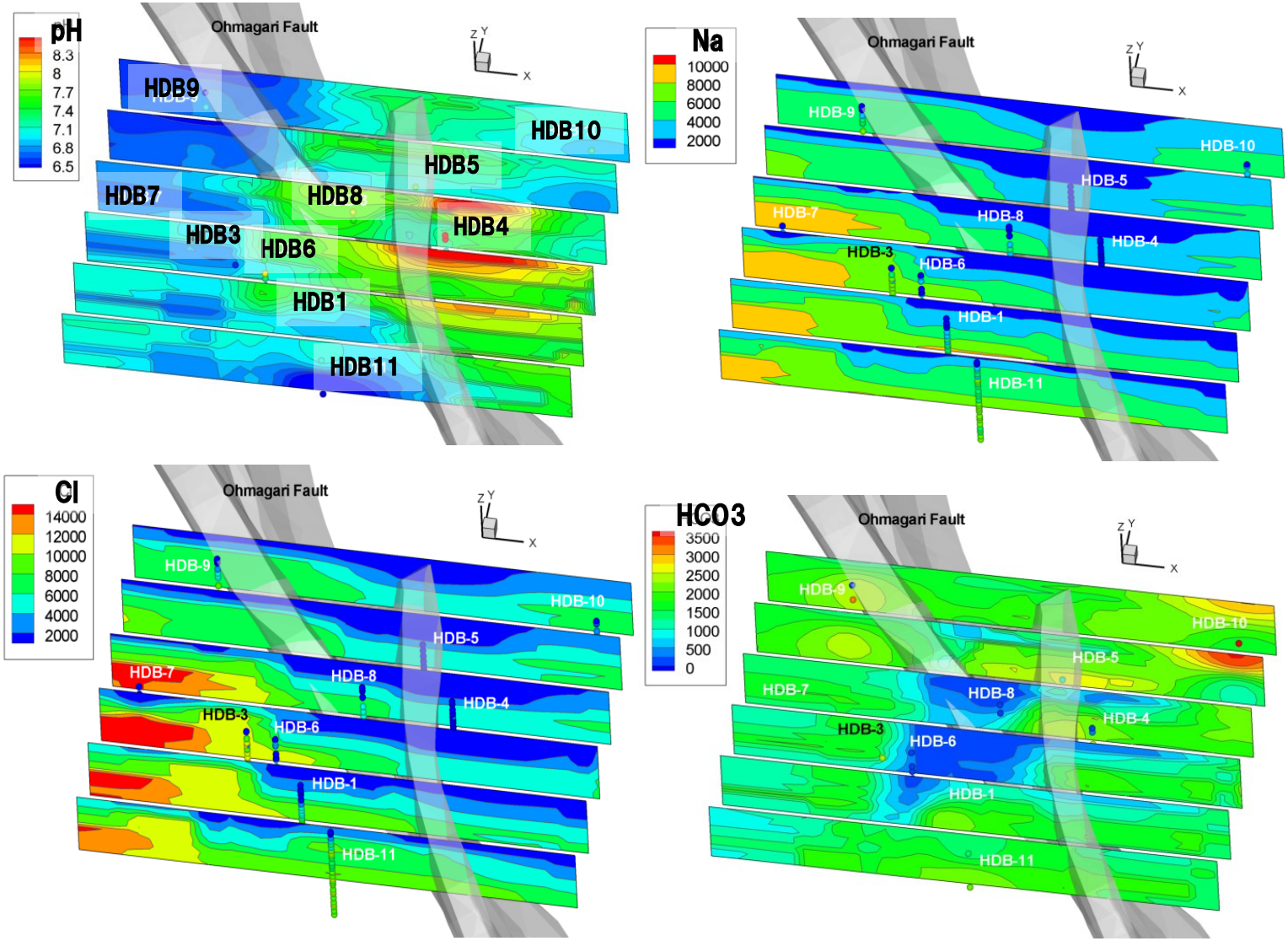
✓中期中新世後半～鮮新世の稚内層及び声問層が分布

✓声問層は塊状の珪藻質泥岩（層厚約400～700m）

✓稚内層は層理不明瞭な珪質泥岩あるいは層理の明瞭な硬質頁岩（層厚約600～1000m）

✓大曲断層は，地表面においては一直線状に交わらずに，相互に逸れあっている。

地質環境を理解した上で研究所設置地区を選定

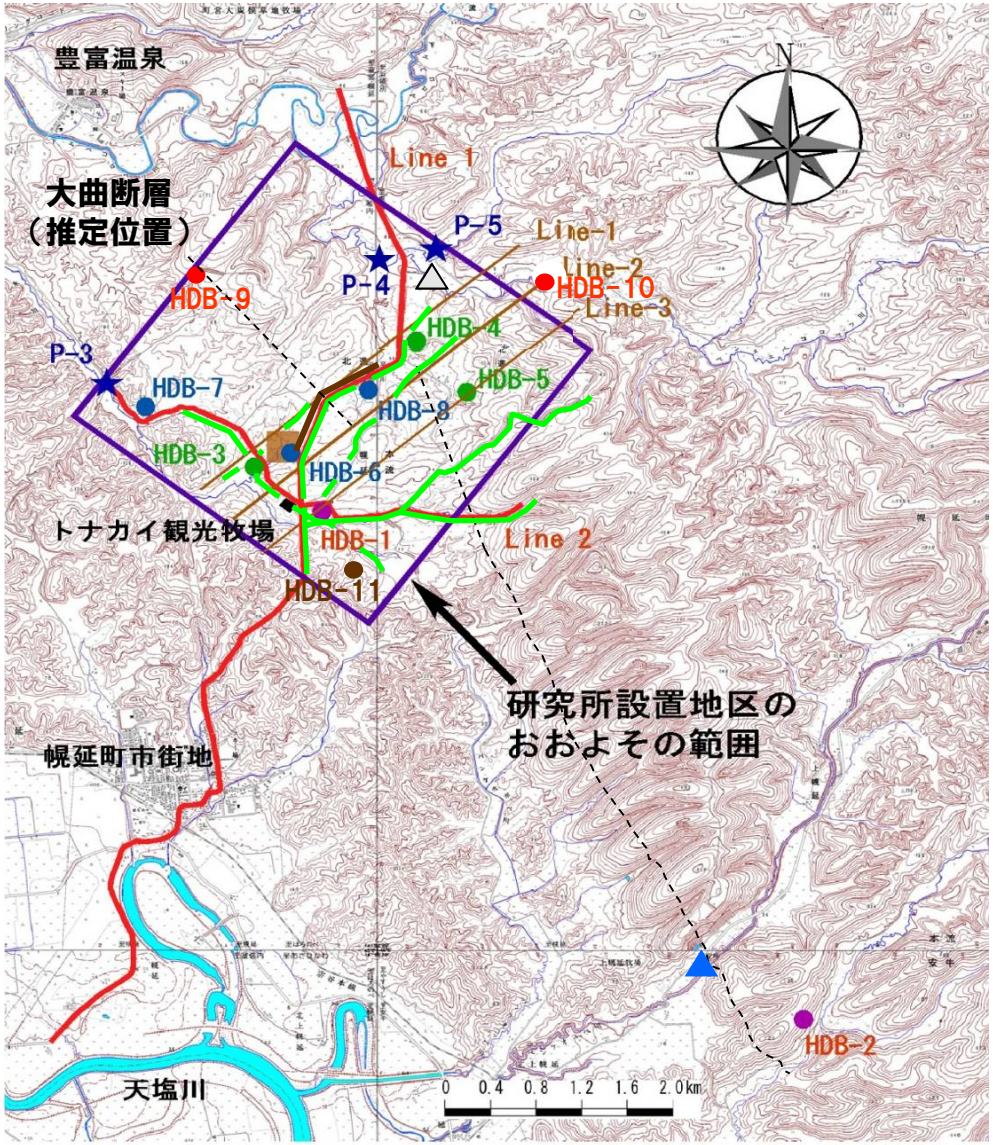


堆積岩中には，浅部の淡水系地下水と深部の塩水系地下水（化石海水）がある。

続成作用や天水による洗い出しにより，長期的に水質が変化している。

研究所設置場所の決定

地表から地下の地質を推測する



国土地理院1/25,000地形図（幌延、本流、豊富、豊幌）を使用

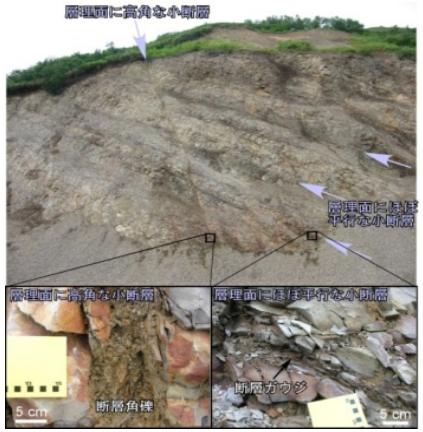
凡例

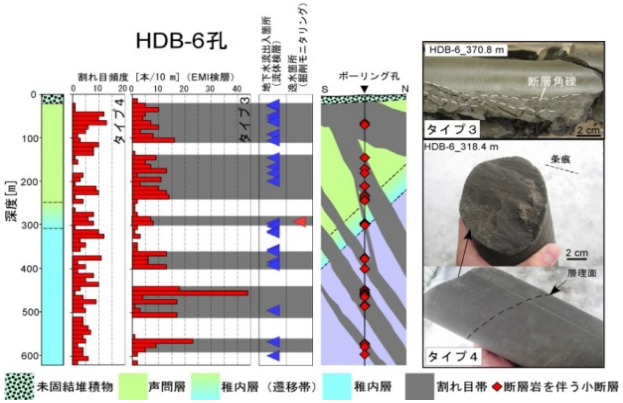
- 平成17年度試錐孔
- 平成16年度試錐孔
- 平成15年度試錐孔
- 平成14年度試錐孔
- 平成13年度試錐孔
- コントロールボーリング②
- コントロールボーリング①

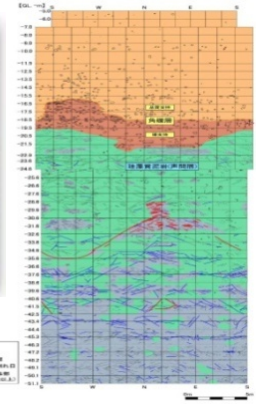
- 反射法地震探査測線（H14）
- 電磁法（AMT法）探査測線（H15）
- 高密度反射法地震探査測線（H16）
- 電気探査測線（H17）
- 河川流量観測システム設置位置
- 研究所設置場所

研究所設置地区周辺で，地表踏査や様々な観測，物理探査，ボーリング調査などを実施

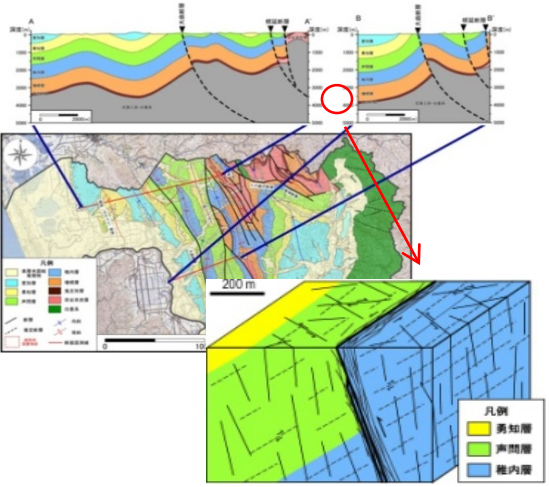
地上からの調査～施設建設までのイメージ

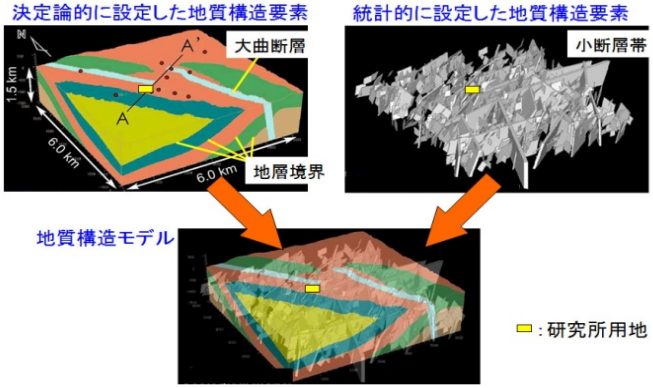


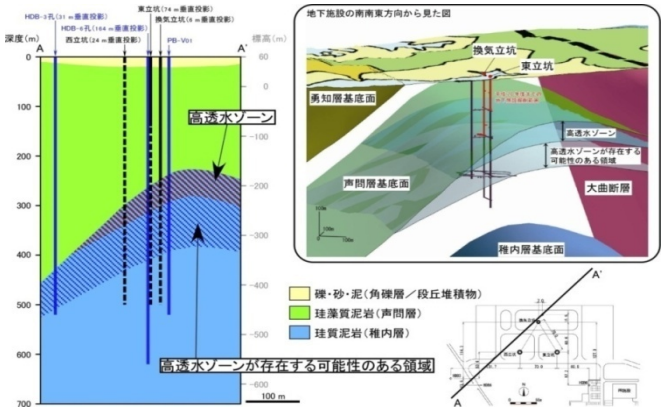




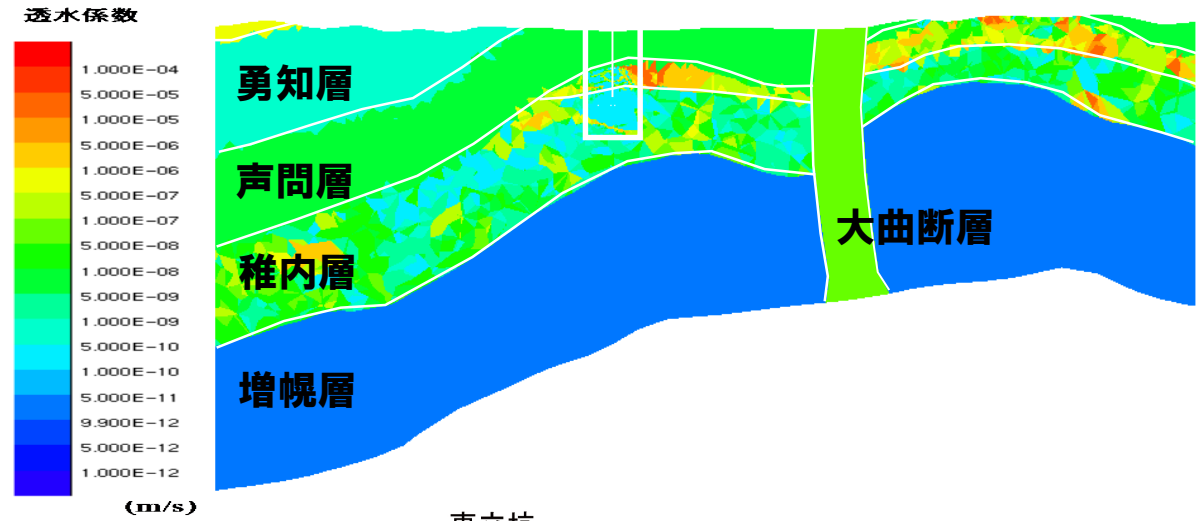
地質や地質構造を調査 ⇨ **力学強度，地下水の流動状態，水質分布を推測する** ⇨ **地下施設のレイアウト設計，地下水湧水量，水質を推測する**

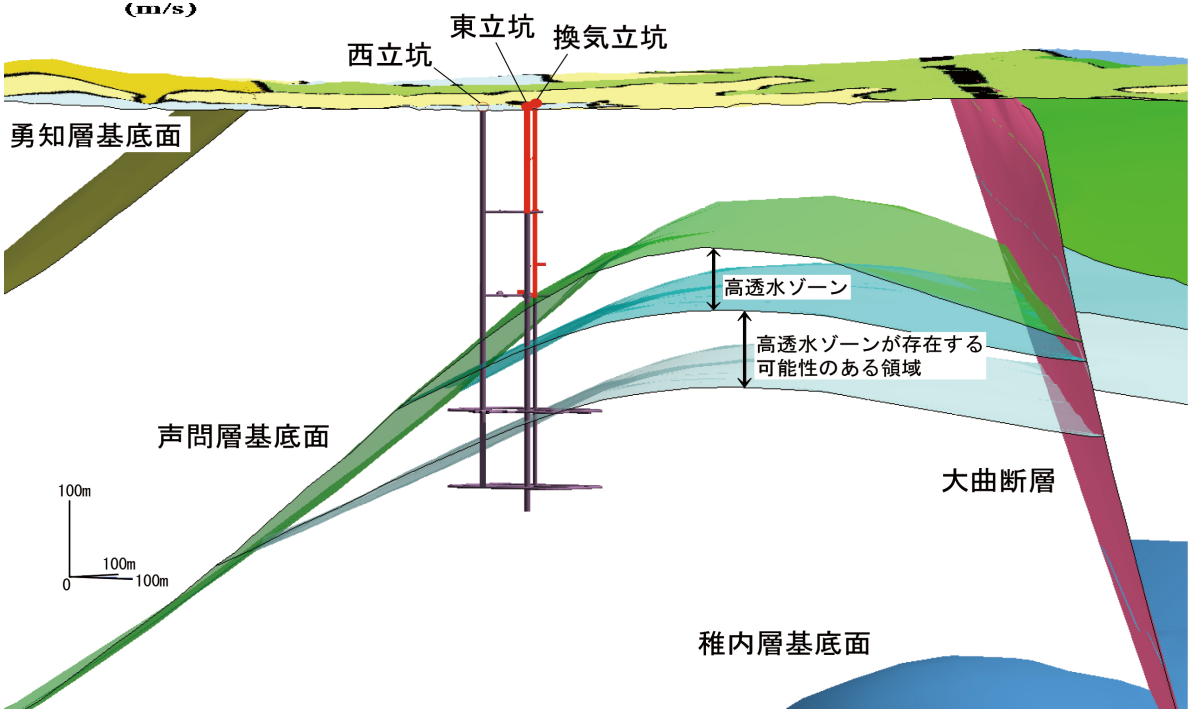






地質環境モデルの構築と地上・地下施設設計





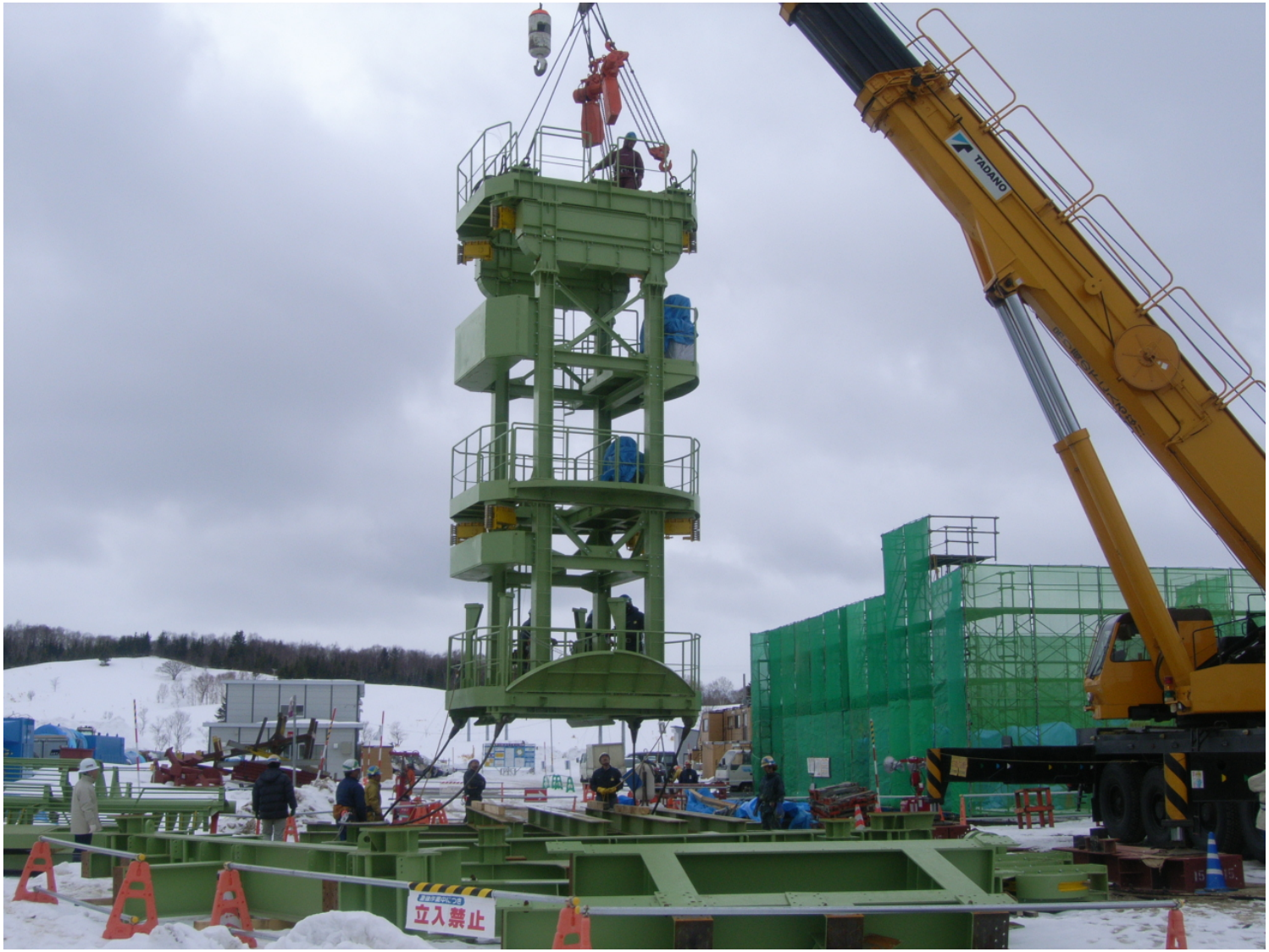
- ➢透水性地質構造の分布と可燃性ガス(メタン)の存在
  - ->250m以深に分布する高透水性構造を避けるため，第2連絡坑道を当初設計の深度(280m)から250mに設計変更
  - ->可燃性ガスに対する安全対策として3本の立坑を設け，通気網解析で安全性を確認
- ➢排水基準を超えるホウ素，アンモニウムイオンの存在
  - ->排水処理施設の設計・設置

研究所施設の概要

至豊富町
N
掘削土（ズリ）仮置場
換気立坑
排水処理設備
東立坑
HDB－6孔
ゆめ地創館
HDB－3孔
試験棟
研究管理棟
道道稚内豊富線
HDB－1孔
トナカイ
観光牧場
国道40号
掘削土（ズリ）置場

地下施設坑口工事（2006.3）

立坑スカフォード（つり櫓）の設置



換気立坑底から坑口

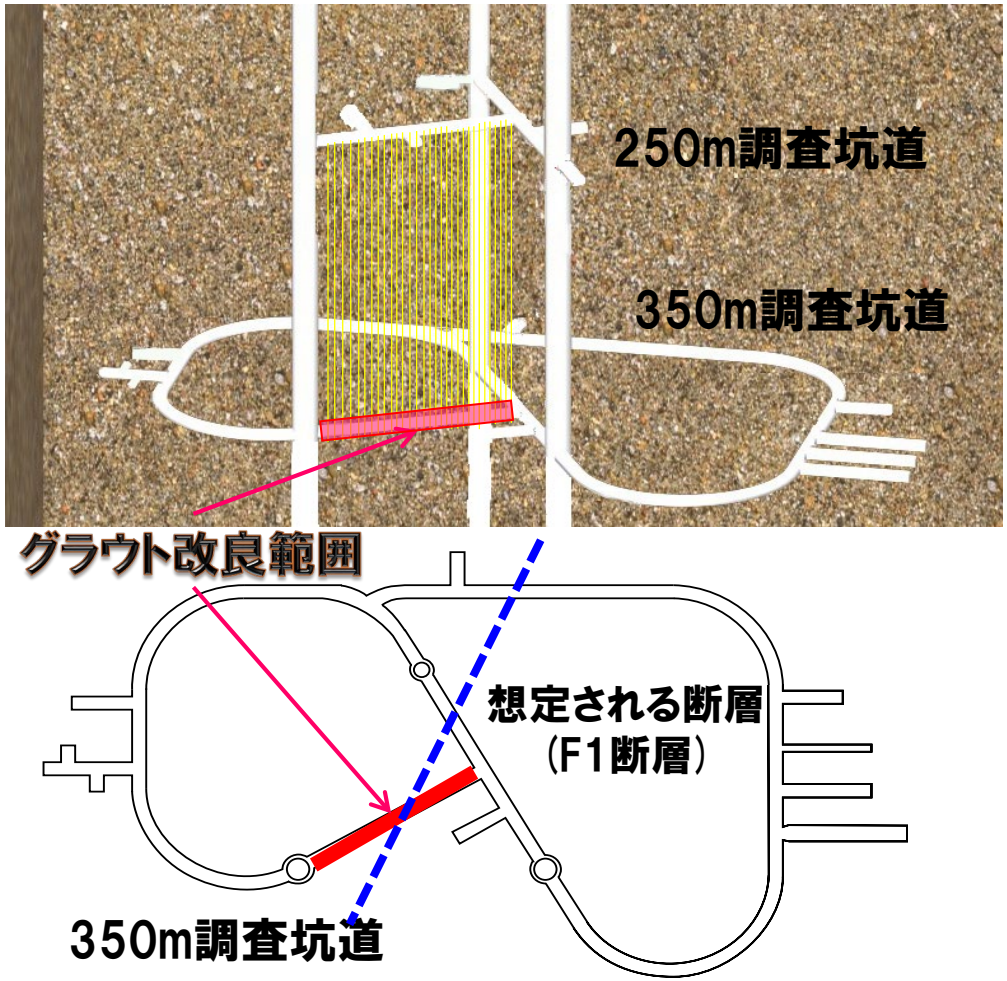
水平坑道の掘削

東立坑140m連接部

140m調査坑道の貫通（2009年5月13日）

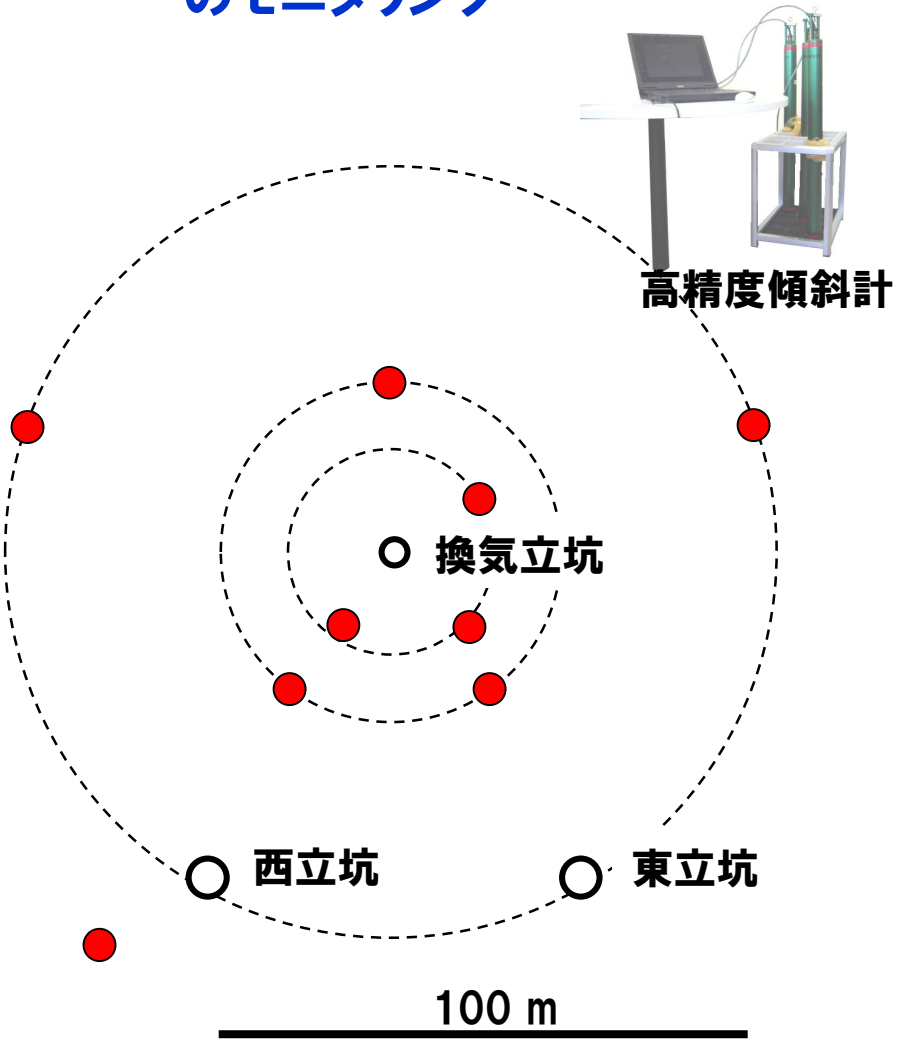
建設時の湧水抑制対策

既往の調査ボーリング結果から想定した高透水層を改良対象として、湧水状況に対応した湧水抑制対策(グラウト)を計画
(改良目標値:0.1Lu ≒1.3×10^{-8}m/sec以下)



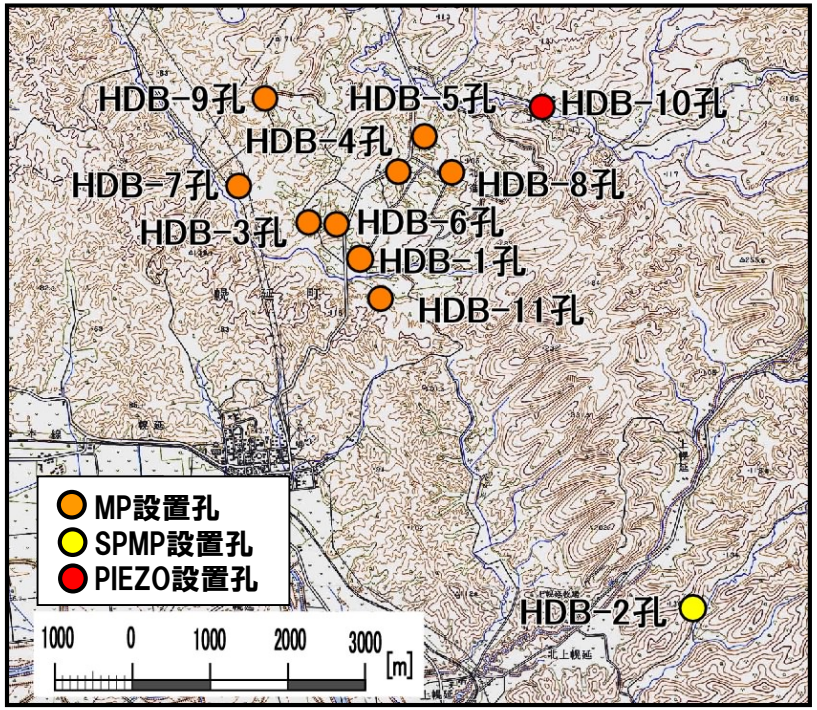
地上での地質環境モニタリング技術の開発

地下施設建設に伴う地盤変形のモニタリング



地下施設周辺の傾斜計設置位置

地下施設建設に伴う地下水の水圧・水質変化のモニタリング



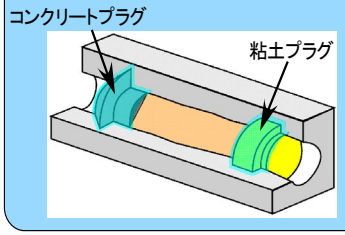
国土地理院発行5万分の1の地形図「豊富」「雄信内」を使用

水圧モニタリング装置設置位置

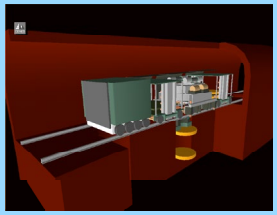
地下施設における研究

地上施設
（実験室イメージ）

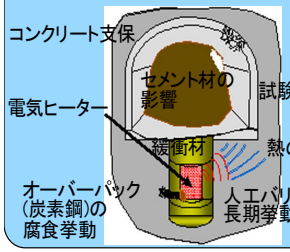
地層処分研究開発
（坑道の閉鎖技術）

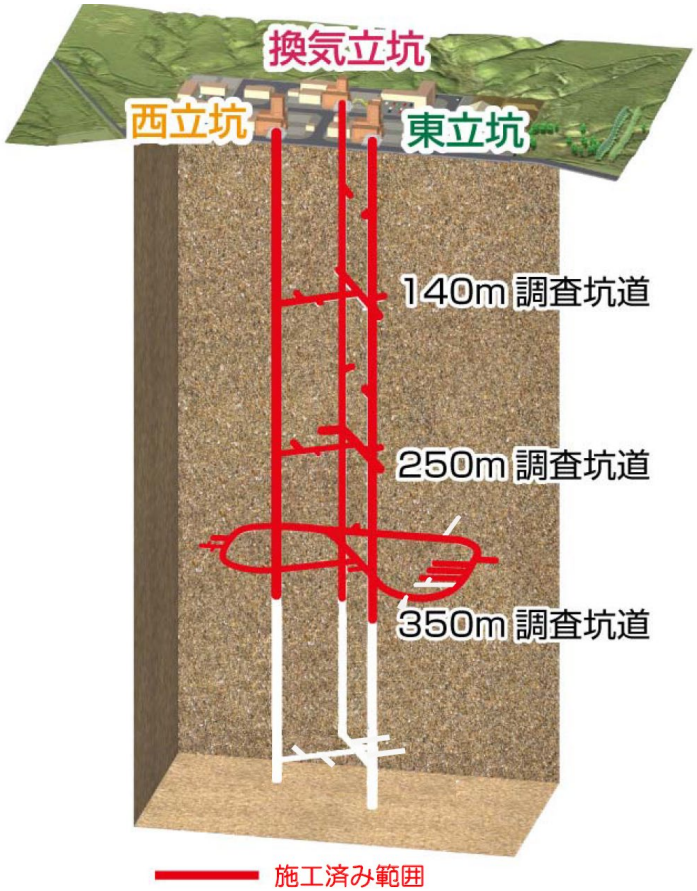


地層処分研究開発
（人工バリア搬送・定置試験）



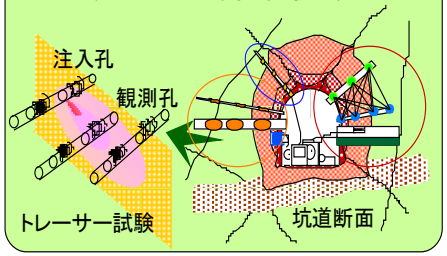
地層処分研究開発
（人工バリアと周辺岩盤の長期挙動）



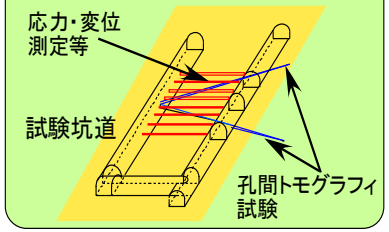


このイメージ図は今後の調査研究の結果次第で変わることがあります。

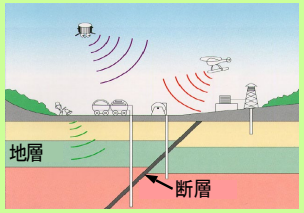
地層科学研究
（坑道における調査試験研究）



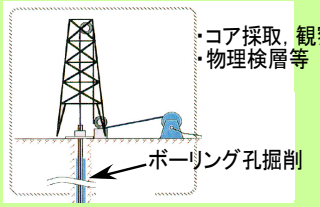
地層科学研究
（坑道掘削影響試験）



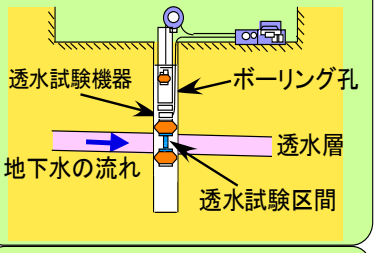
地層科学研究
（物理探査）



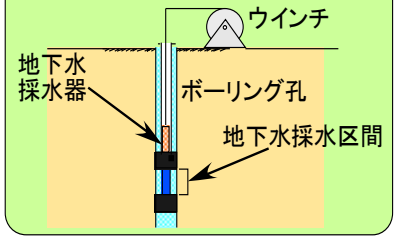
地層科学研究
（ボーリング調査）



地層科学研究
（岩盤の透水試験）



地層科学研究
（地下水の採水）

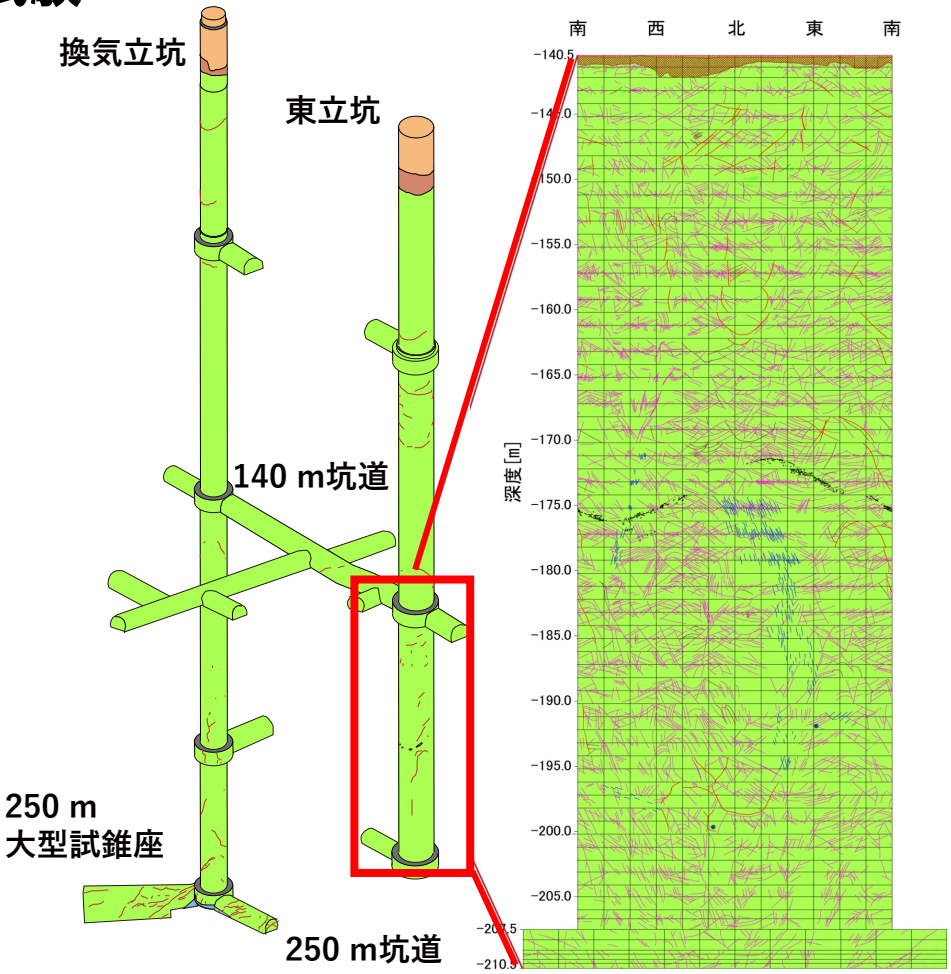


地質や地下水の流れに関わる地質構造の研究

地質環境データの取得：地質構造

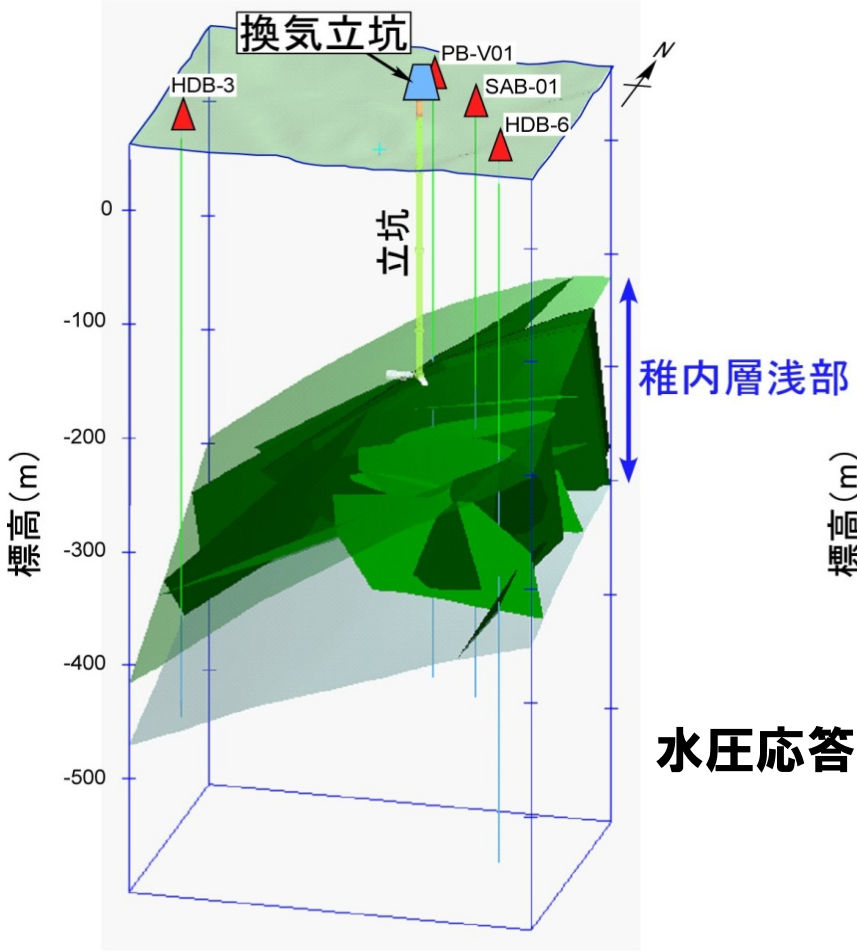
- 地表および坑道での地質観察
- 岩石サンプルの化学分析，鉱物試験
- 先行ボーリング調査　　など

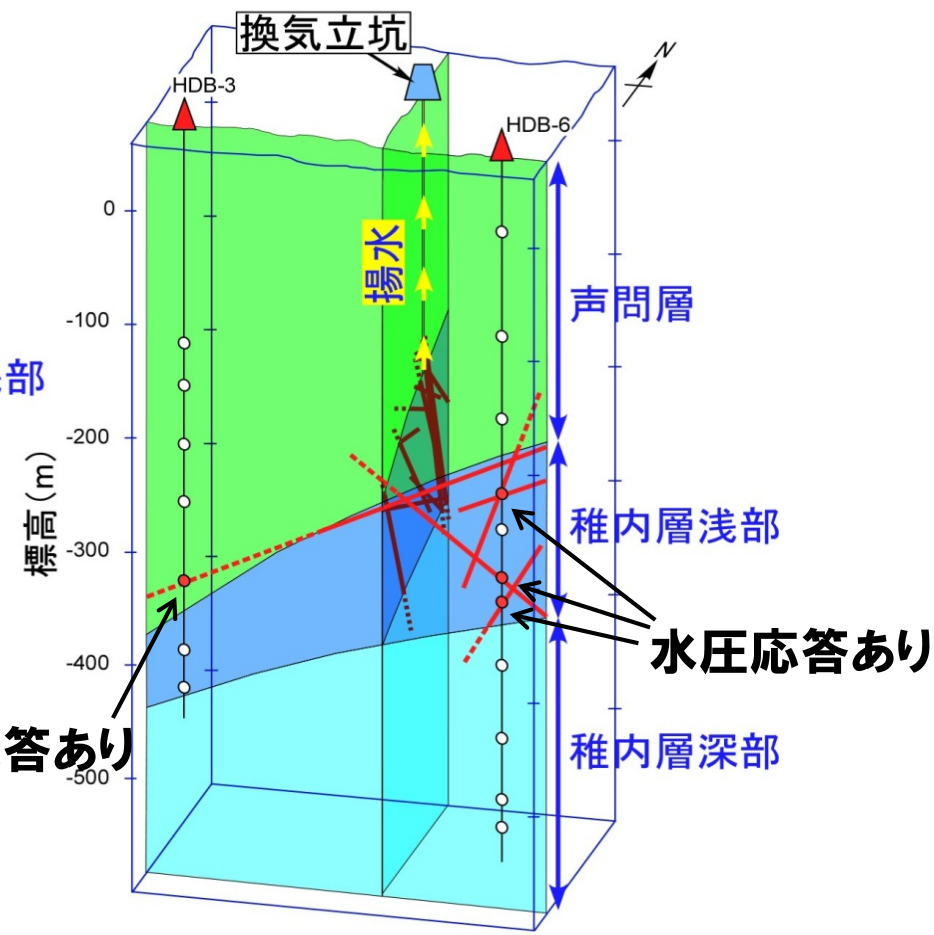
坑道での地質観察の様子（140m水平坑道）



地質や地下水の流れに関わる地質構造の研究

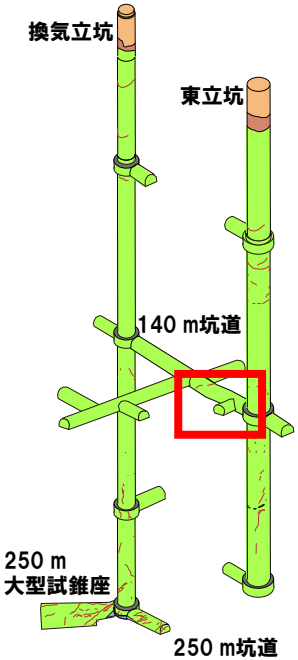
推定した断層のネットワーク構造の三次元的な連続性・連結性と水圧応答





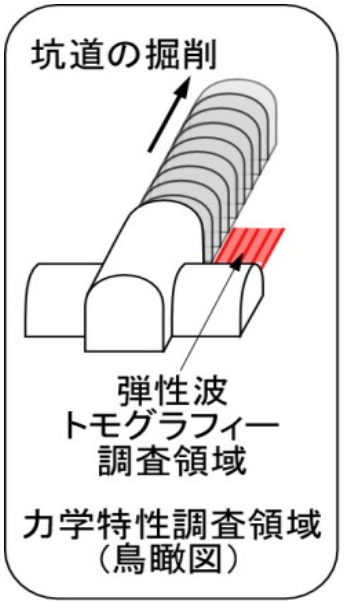
地上ボーリング孔の調査データから推定した断層の三次元的ネットワーク構造を、立坑掘削時の湧水と周辺のモニタリング孔での水圧応答により、概念化する。

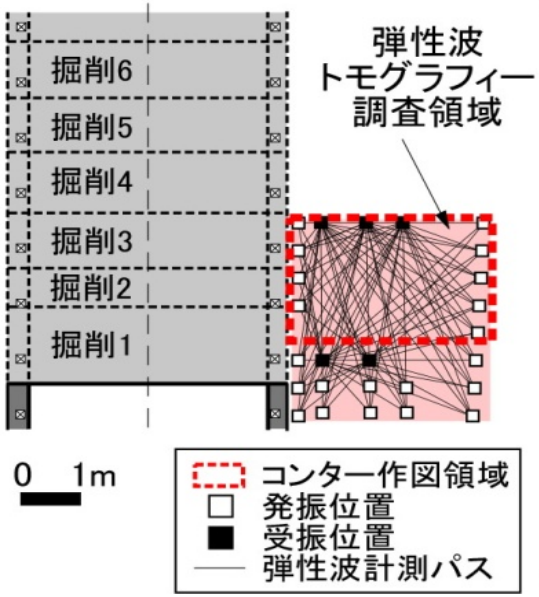
地下での地質環境モニタリング技術の開発

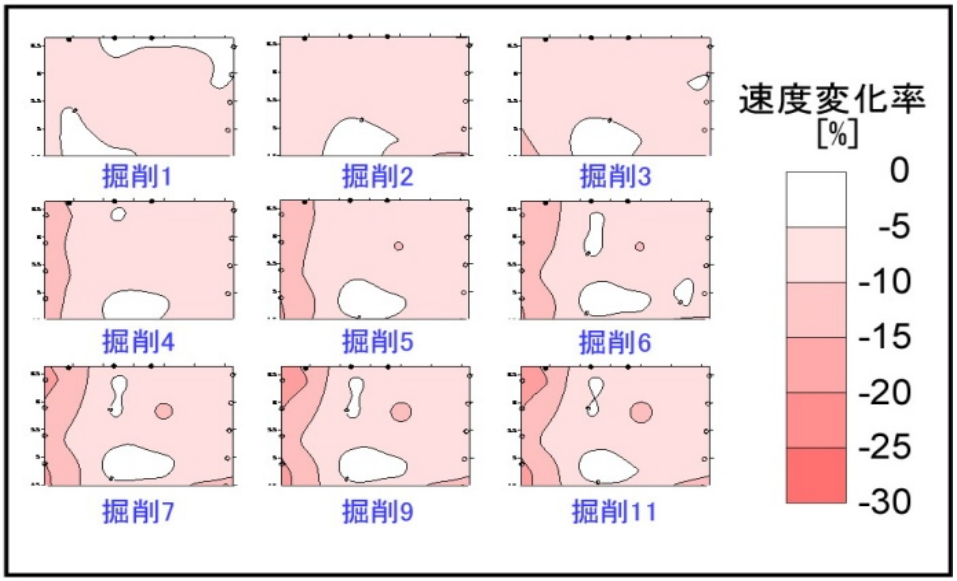


地下坑道周辺の環境条件の変化を調査するための技術開発

- 坑道掘削に伴う岩盤の透水性，水圧，水分量の変化を調べる方法
- 岩盤中の振動の伝わり易さを利用して，坑道掘削に伴う岩盤の“ひずみ”を調べる方法
- 変化をモニタリングする方法







地下での地質環境モニタリング技術の開発

坑道の周りの岩盤変形のモニタリング

光ファイバー式地中変位計の開発

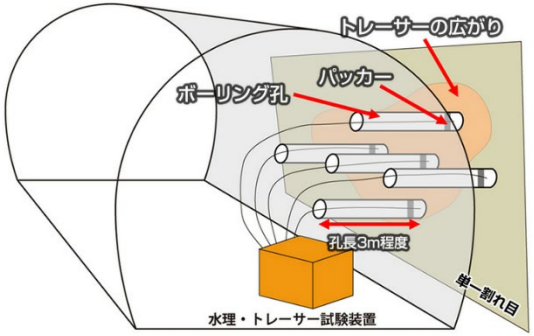
坑道の周りの地下水の水圧・水質変化のモニタリング

観測項目

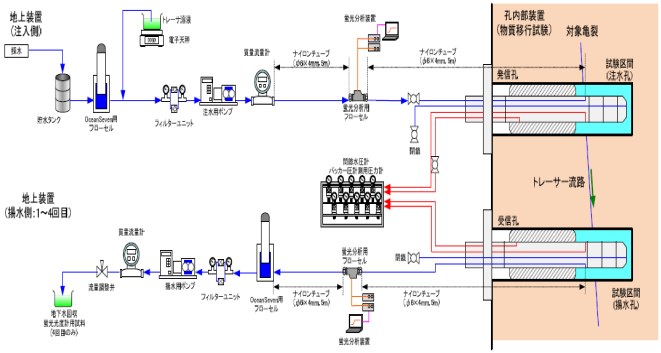
- 水圧・パッカー圧・大気圧
- pH・電気電導度（EC）
- 溶存酸素（DO）
- 酸化還元電位（ORP）・水温

地層中の物質の移動を理解するための試験

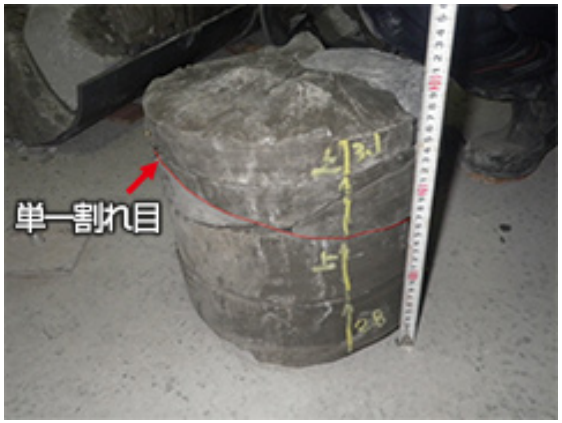
堆積岩中の割れ目に、非収着性トレーサー（蛍光染料：ウラニン）を入れ、その周辺でトレーサーの濃度を計り、物質の移動経路を推測。
次に、収着性トレーサー（Cs、Ni、Eu、等）を入れ、割れ目内での収着・拡散性を把握。



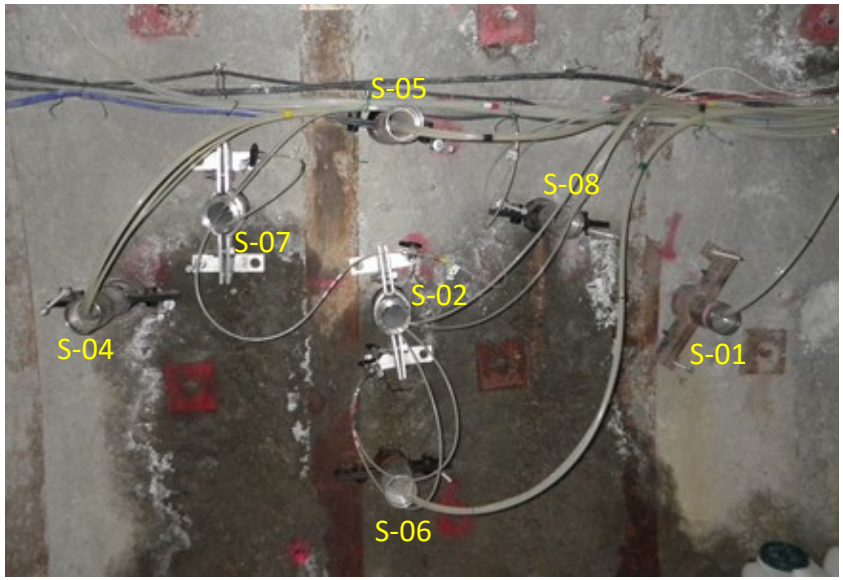
原位置トレーサー試験の概念図



試験装置概要



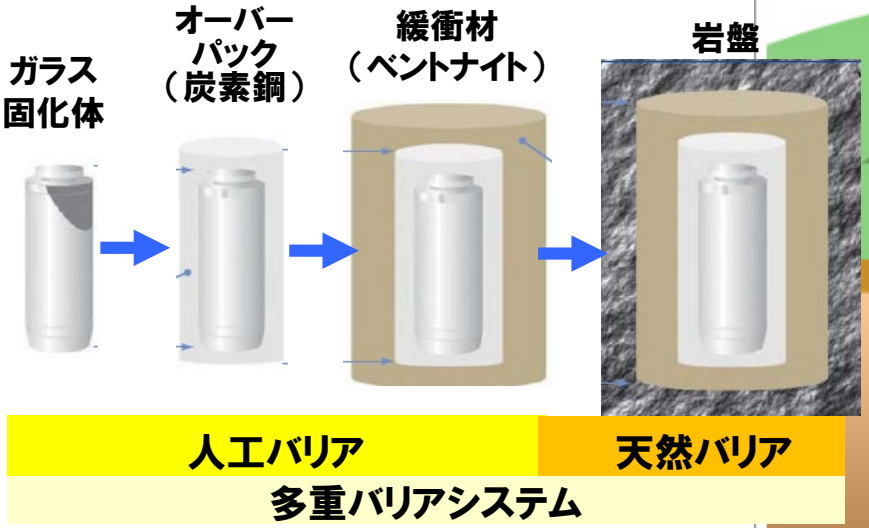
サンプリング後の岩石試料

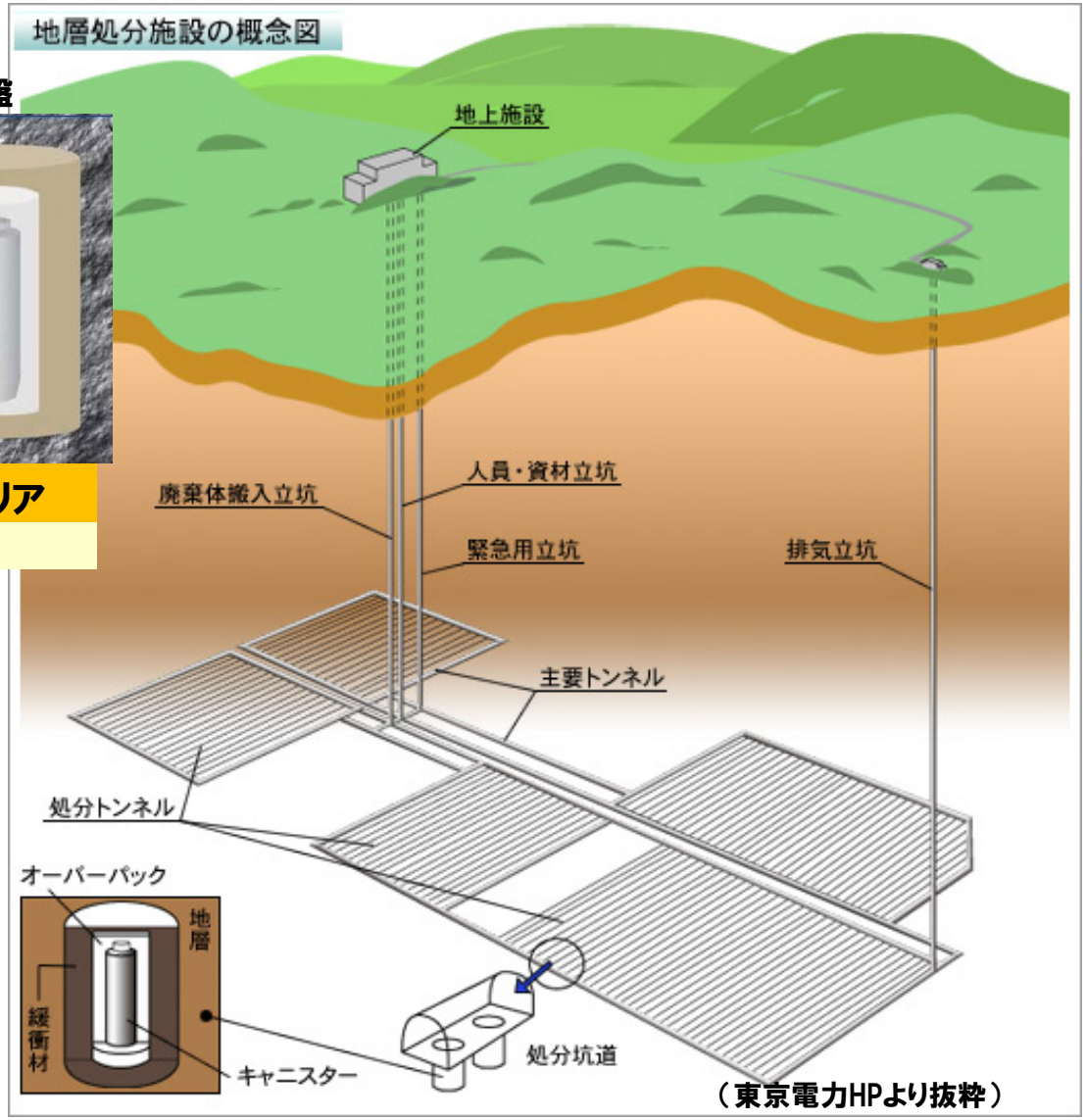


トレーサー試験装置の設置

単一割れ目内の状態

地層処分場の概念





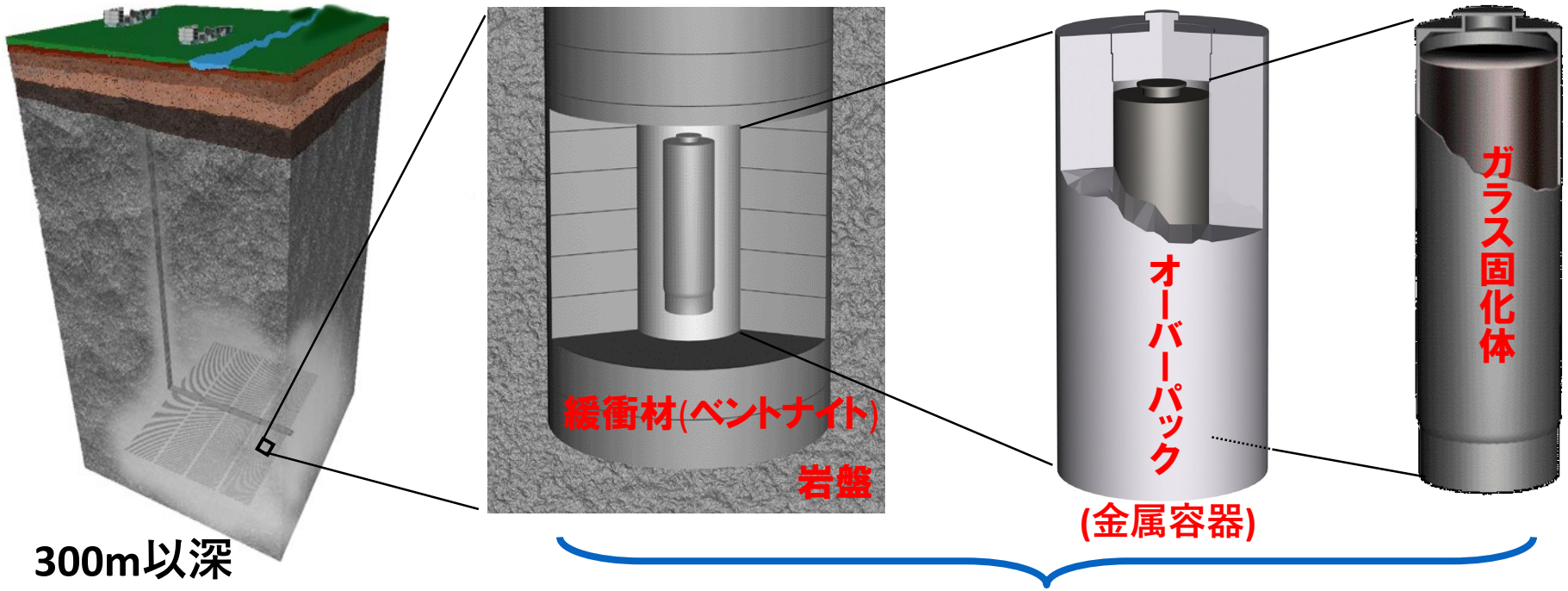
（東京電力HPより抜粋）

地下深部の多重バリアシステムの利点

- 廃棄物と地下水が触れにくい。
- 放射性元素が溶けにくい。
- 放射性元素が移動しにくい。
- 人間の生活環境に達するのに膨大な時間がかかる。

地層処分の概念

生活圏から離れた地下深部の安定な地層に，性能に余裕を持たせた人工バリアを含む多重バリアシステムを構築

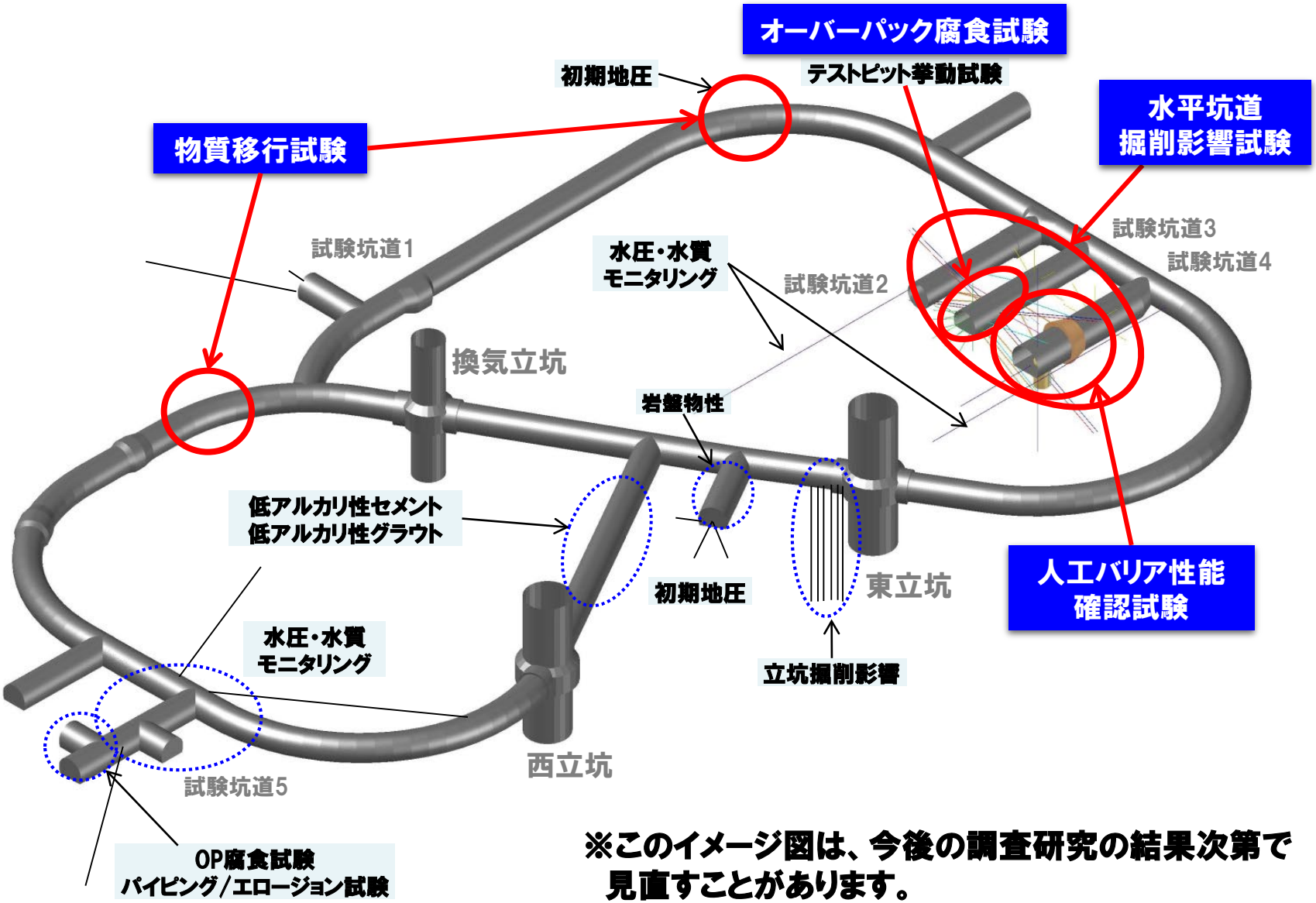


安定な地質環境

人工バリア

多重バリアシステム

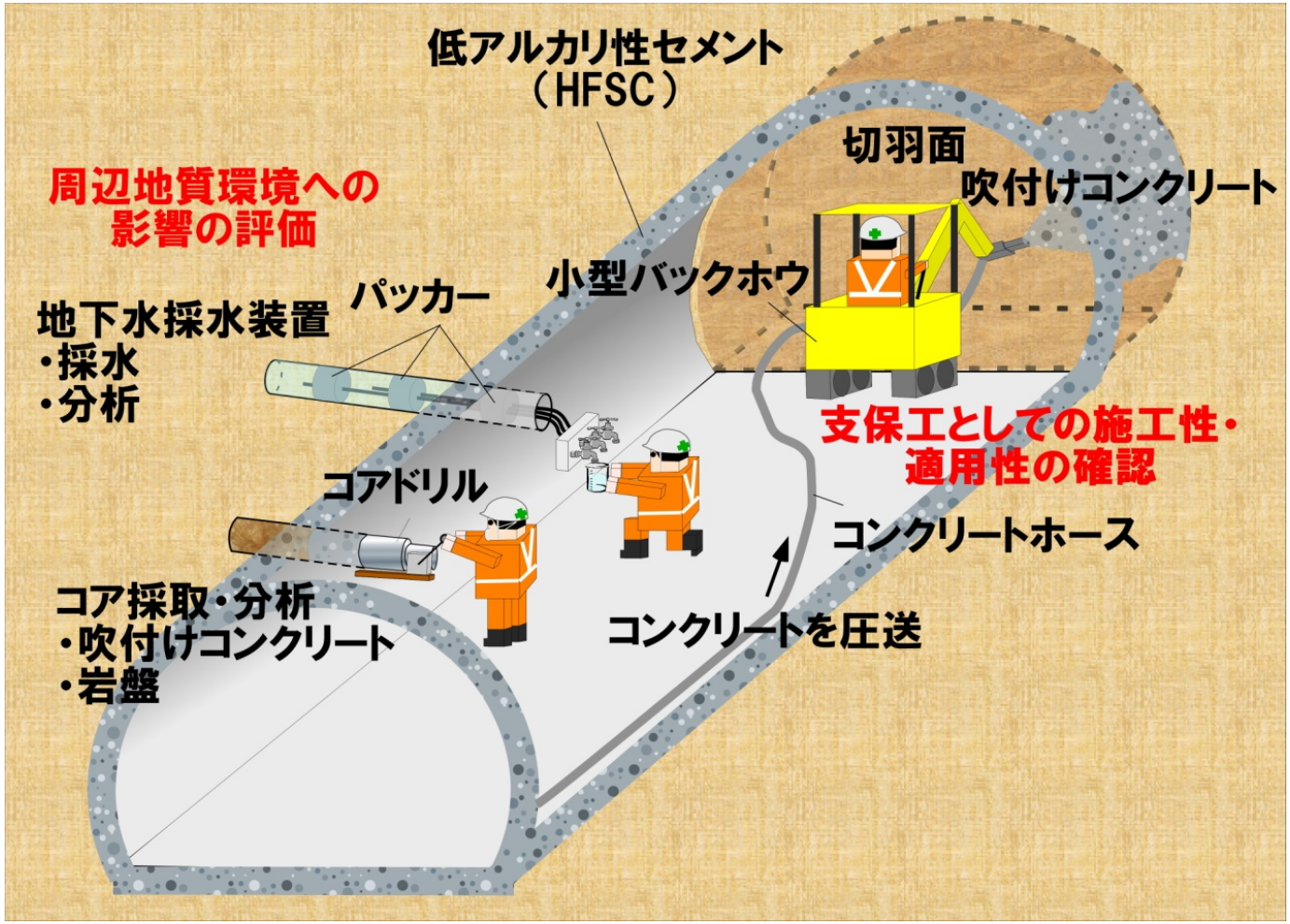
深度350m調査坑道における原位置試験



※このイメージ図は、今後の調査研究の結果次第で見直すことがあります。

低アルカリ性セメント材料の開発

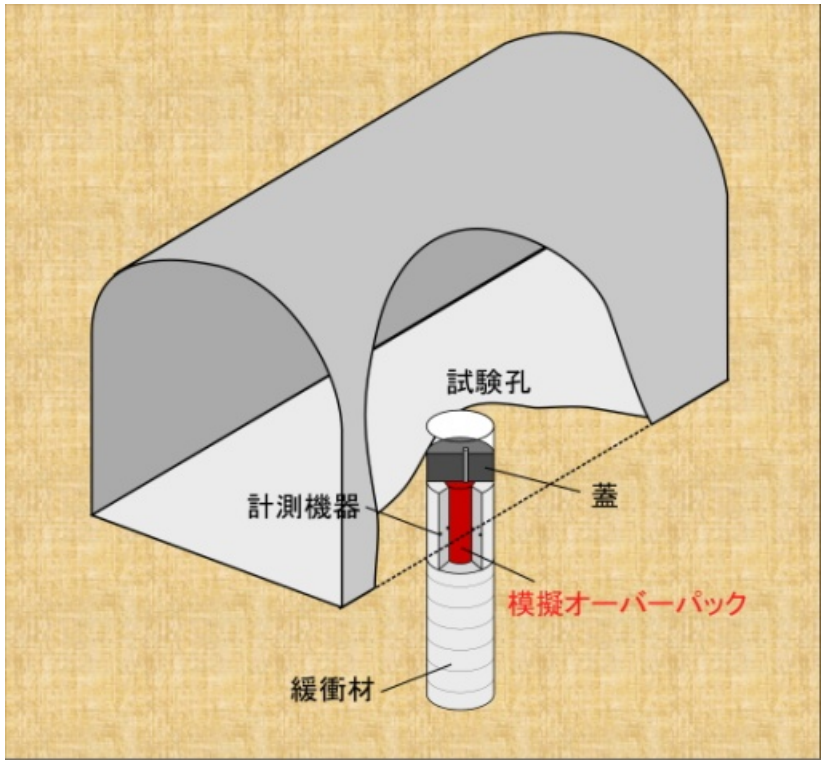
低アルカリ性セメントの施工性（支保工（吹付けコンクリート，覆工コンクリート），グラウトとしての適用性），周辺岩盤および地下水への影響（化学的影響）を把握する。



人工バリアに関わる研究開発

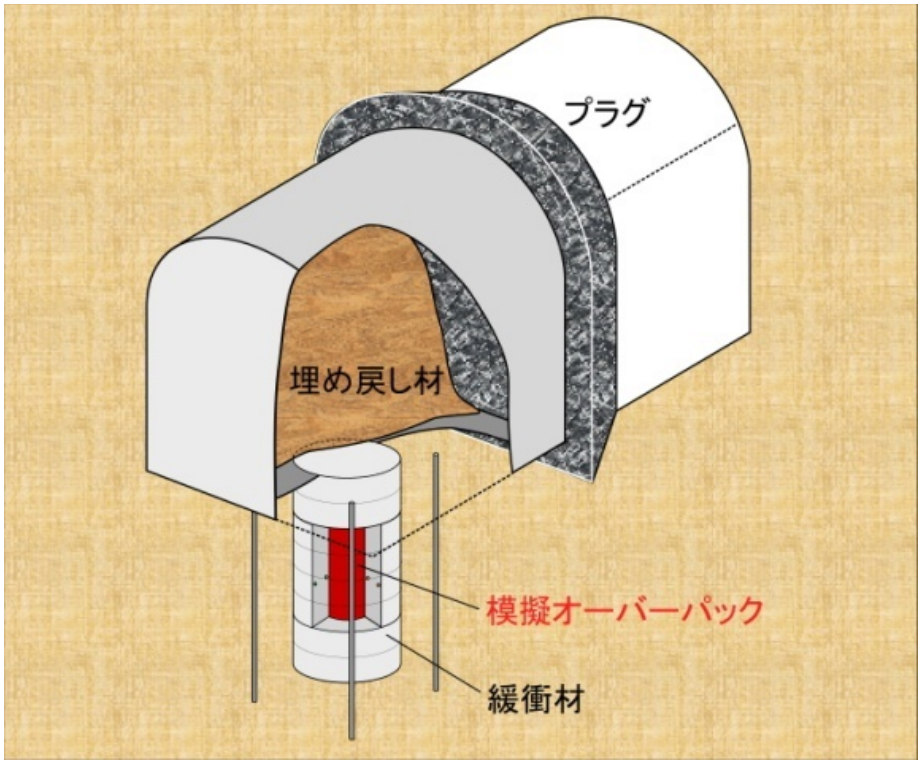
オーバーパック腐食挙動評価

オーバーパックの腐食挙動を把握するため、発熱している廃棄体(ヒーターで温度環境を再現)を模擬して、緩衝材中に埋めて、試験終了後に腐食速度や腐食生成物を分析・評価する。

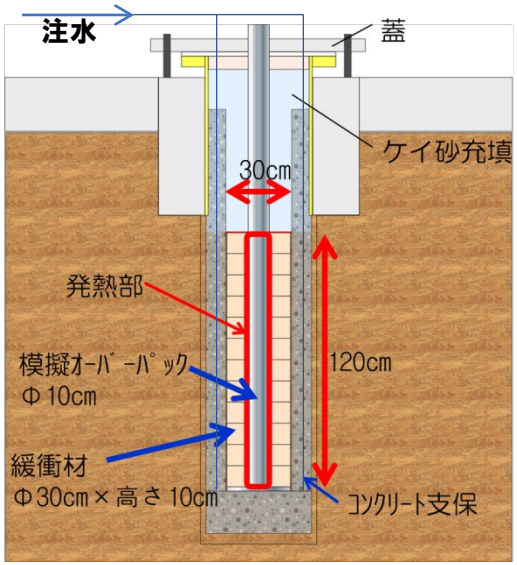


人工バリア性能確認試験

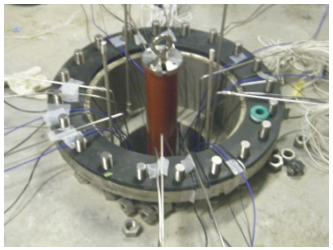
坑道の埋め戻しを実規模で再現して、実際の地質環境条件下で、緩衝材が地下水で飽和する過程の熱-水-応力-化学連成挙動を把握する。



オーバーパックの腐食を理解するための試験



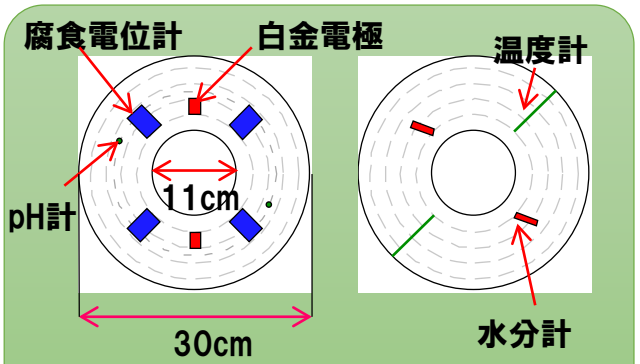
模擬オーバーパック



緩衝材除去後の模擬
オーバーパック外観

計測器：6断面に配置

- 腐食電位計：12点）　・水分計：6点
- pH計：6点　・温度計：6点
- 白金電極：6点

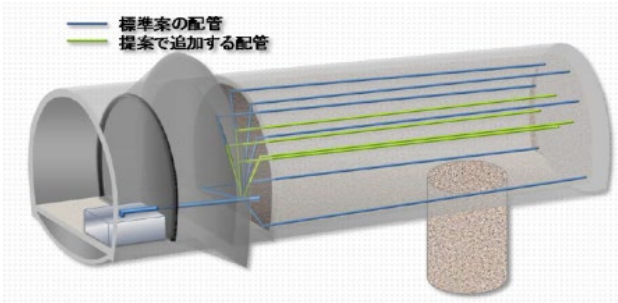


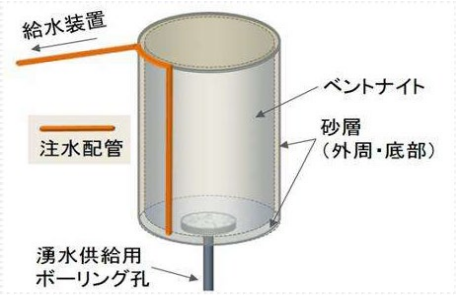
計測器配置の例

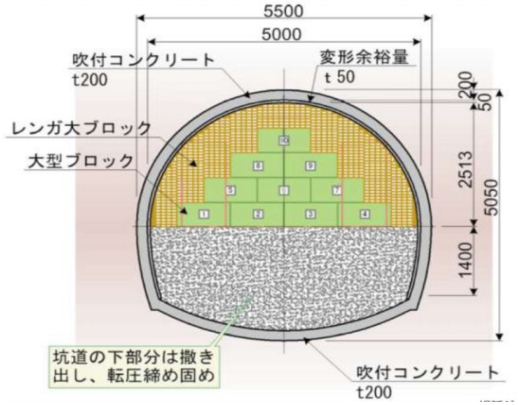
試験実施状況

約3年間にわたる環境条件や腐食挙動のモニタリングデータを取得し、経時的な変化を把握

緩衝材(粘土)の性能を確認するための試験







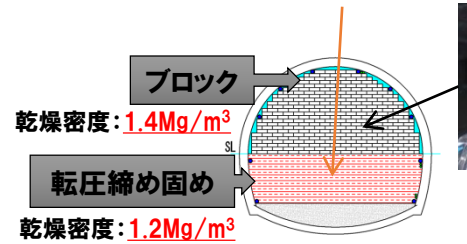
埋め戻し材ブロックの製作

ベントナイト:掘削土(ズリ)(20mm以下)=40%:60%

①材料混練

②埋め戻し材

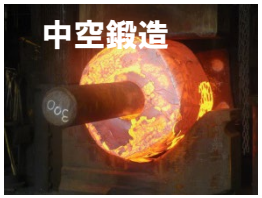
③圧縮成形



④寸法検査

模擬オーバーパックの製作(炭素鋼:JIS G3202 SFVC1)

①炭素鋼素材



②鍛造工程

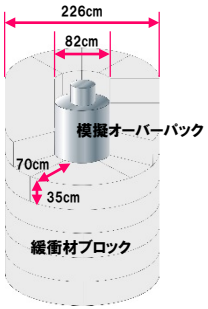
③鍛造完了

④表面仕上げ
(#600)

⑤組立(坑内)

緩衝材ブロックの製作

ベントナイト:ケイ砂=70%:30%　乾燥密度:1.8Mg/m3



緩衝材の定置
イメージ
(7段目まで)

①材料投入

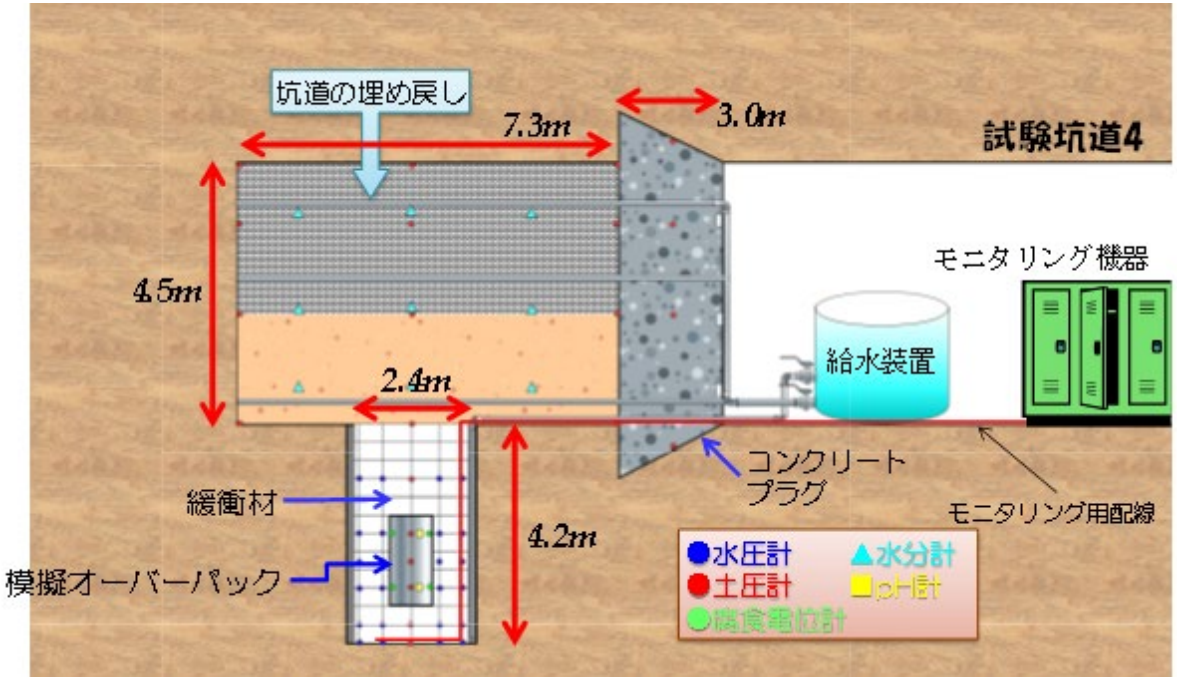
②圧縮成形

③型枠解体

④寸法検査

⑤計測器設置用
切り欠き

緩衝材(粘土)の性能を確認するための試験



試験孔の掘削(処分孔掘削技術の適用事例の提示)

大口径掘削機によるケーシング掘削＋オーガー掘削

直径2.4m×深さ4.2m

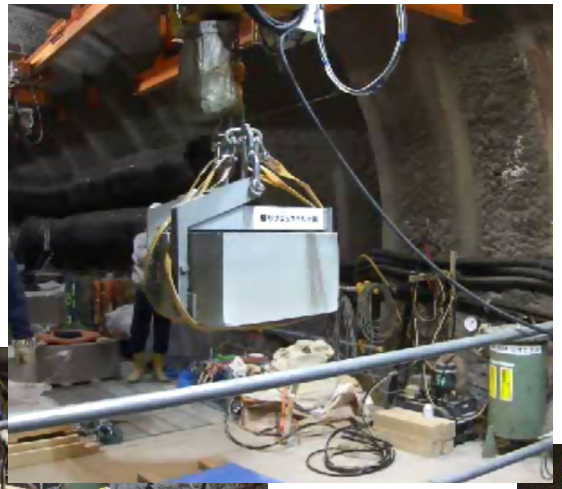
大口径掘削機

試験孔の掘削中の様子

試験孔の状況

緩衝材（粘土）の性能を確認するための試験

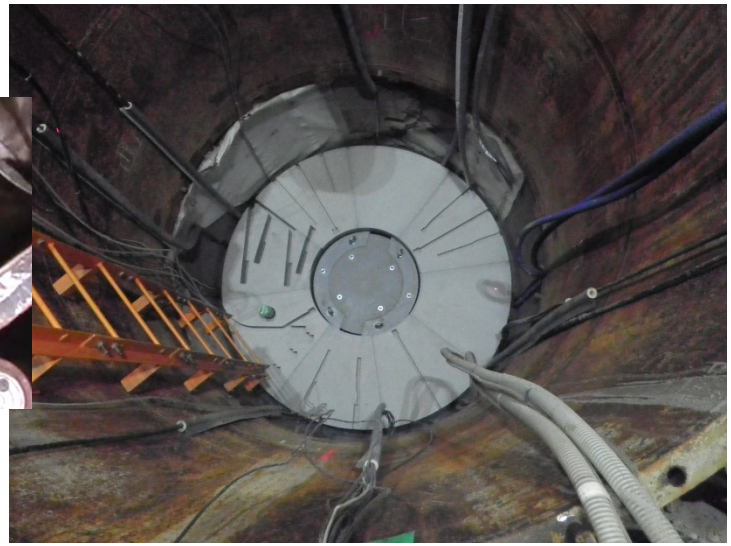
緩衝材の設置



機械式把持

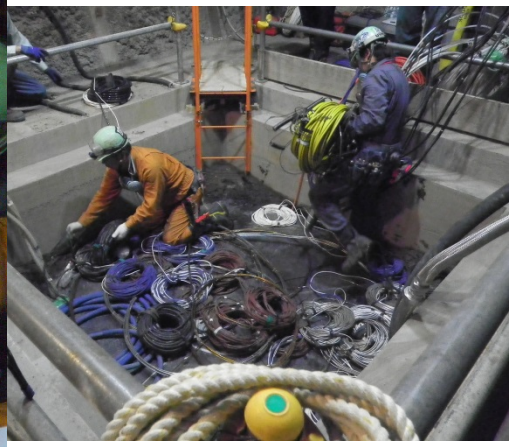
真空把持

試験孔内への定置



5段目定置完了時

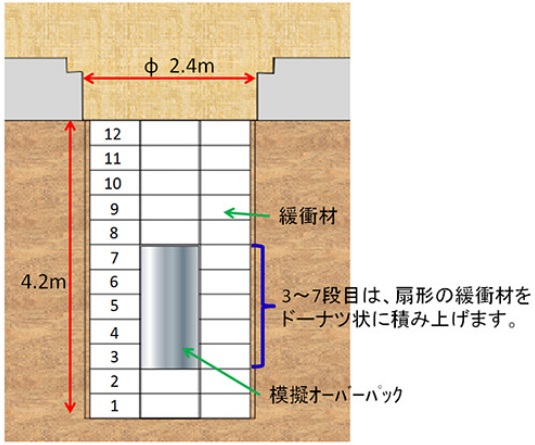
計測器設置状況

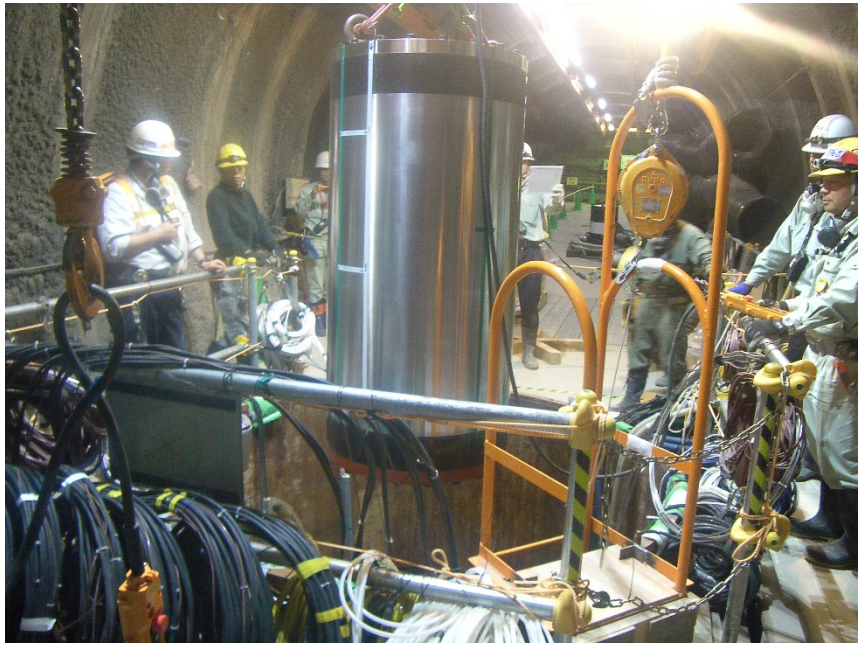


計測ケーブルの状況
（12段定置後）

緩衝材（粘土）の性能を確認するための試験

模擬オーバーパックの設置





坑道の埋め戻し

転圧締め固め

ブロック設置

緩衝材（粘土）の性能を確認するための試験

コンクリートプラグの設置

①鉄筋組立

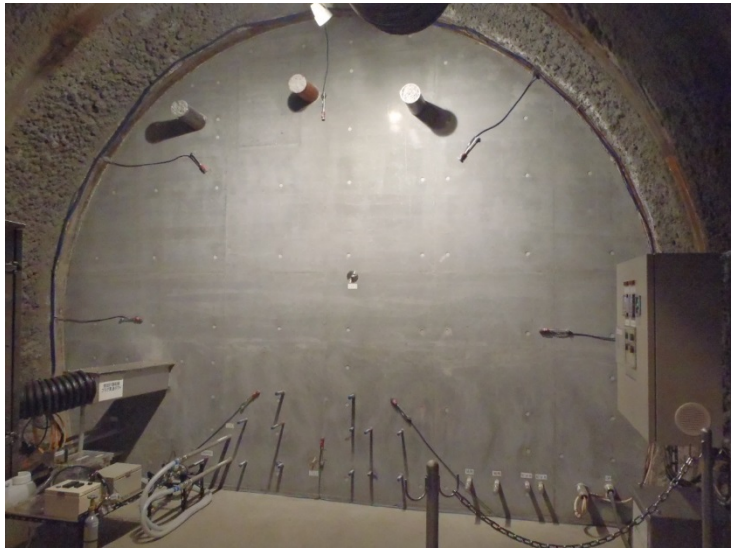
②型枠設置・控え材組立

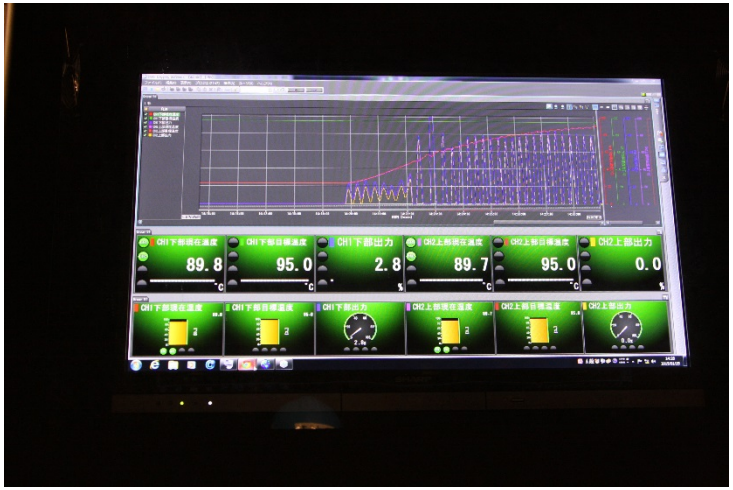
③地上で製造したコンクリートを東立坑350m地点に下ろしコンクリートポンプで試験坑道へ圧送

④打設状況

⑤脱型

緩衝材（粘土）の性能を確認するための試験

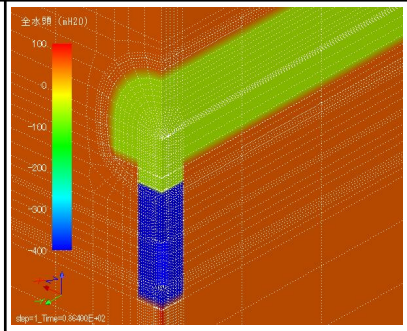
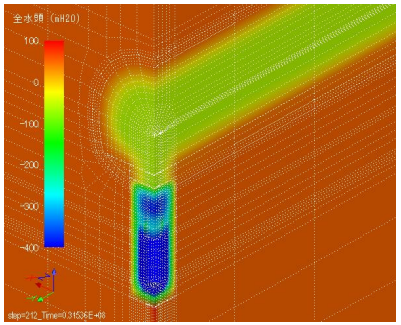
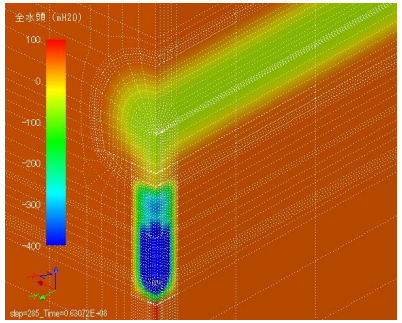
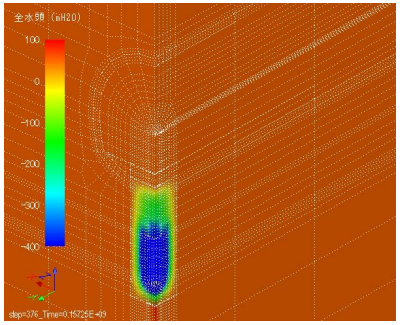
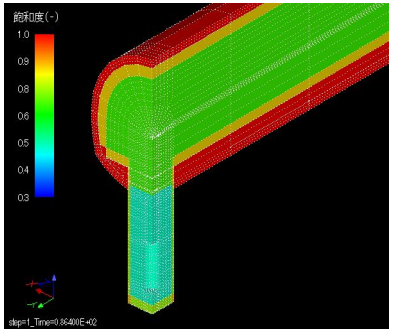
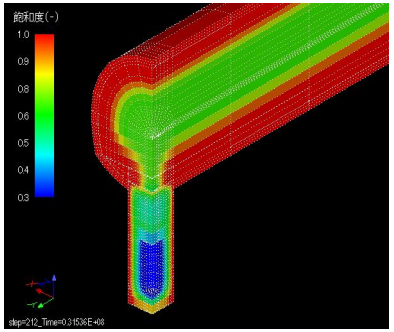
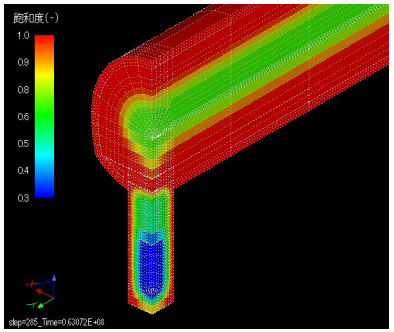
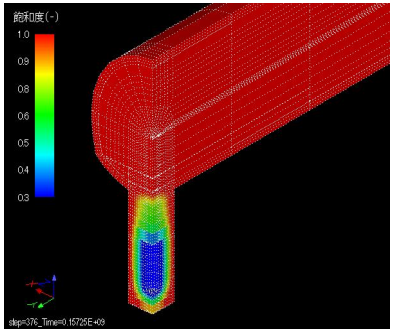
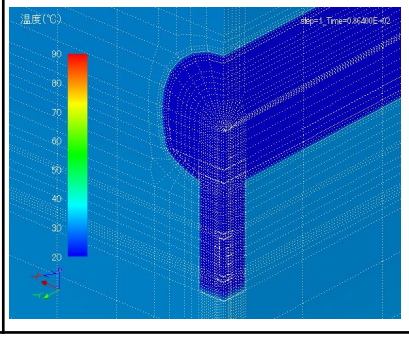
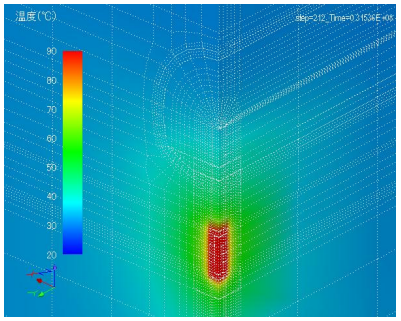
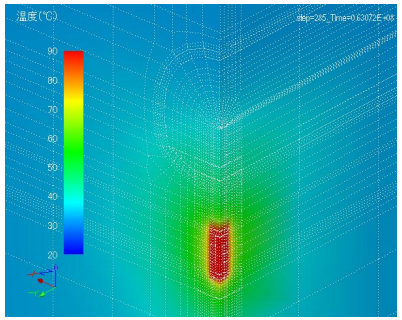
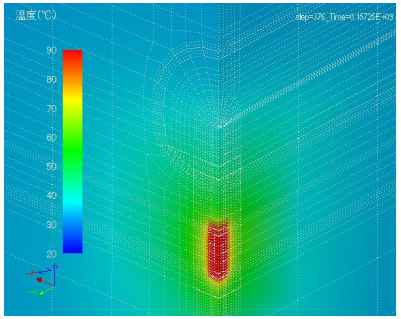




加熱、観測開始

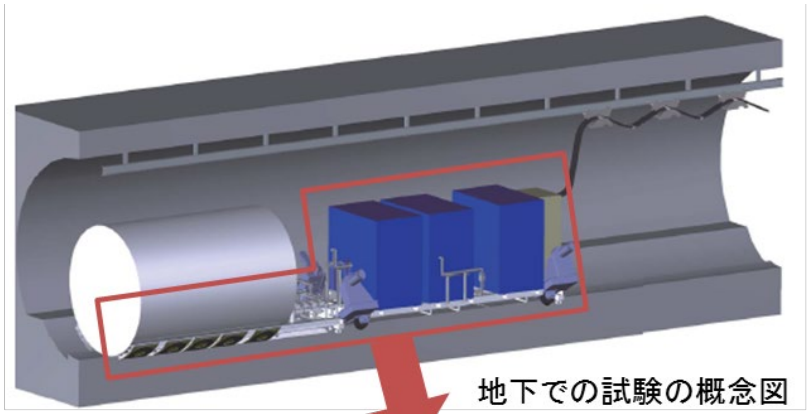
緩衝材（粘土）の性能を確認するための試験

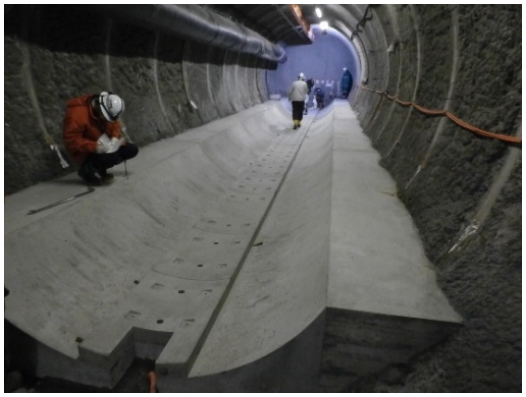
緩衝材中の水圧や水分量などの予察解析

	初期	1年後	2年後	5年後
間隙水圧				
水分 飽和度				
温度				

横置きの廃棄体の搬送定置・回収技術の実証試験

エアベアリング方式を用いたPEM（Prefabricated Engineered barrier system Module）の搬送定置、PEMと坑道の隙間の充填技術および充填材の除去技術のデモンストレーション





模擬PEMの設置状況

まとめ

- 地層処分場に適した地質環境（放射性元素が溶けにくい、放射性元素が移動しにくいなど）を地上や地下から調べるための技術は、ほぼ構築できている。
- 廃棄体と地下水が触れにくくするための人工バリアを製作して、地下坑道に定置する技術も例示された。
- まだ、例示されていない技術
  - ✓ 廃棄体を地上から地下の埋め戻し場所へ搬送する技術
  - ✓ 地下施設全体を埋め戻したときの閉塞性を確認する技術
  - ✓ 安全性を確認するためのモニタリング技術やその終了時の技術　など

- 処分実施主体（NUMO）による、寿都町、神恵内村での文献調査は2022年末まで、その後、ボーリング調査など概要調査に至るかどうかは不透明
- 地層処分事業は、数十年間にわたる事業であり、皆が関心を持ち続けるべき課題

おわり

多彩な分野の人間が活躍する場があります
工学
人文科学
地質学
地質学
地球化学
地球化学
土木
水理学
資源探査
鉱床学
土木工学
資源探査
微生物学
土木工学
岩盤力学
物理探査
土木工学
物理探査
情報科学
岩盤力学
祝
貫
通
＊写真は瑞浪超深地層研究所で撮影されたものです。