

放射性廃棄物処分技術の最新動向に関する総合シンポジウム
Comprehensive Symposium on Latest Trends in
Radioactive Waste Disposal Technology

TRU廃棄物の地層処分におけるガス発生の影響に関する研究開発
R&D on influences of gas generation on geological disposal of TRU waste

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター
Radioactive Waste Management funding and research Center (RWMC)
地層処分バリアシステム研究開発部
Geological disposal barrier system R&D division

藤井 直樹 Naoki FUJII
八木 翼 Tsubasa YAGI

発表内容

1. TRU廃棄物の概要
2. 背景及び目的
3. TRU廃棄物処分場でのガス発生量の評価
4. 廃棄体パッケージ充填材を対象としたガス発生量の低減対策
5. 人工バリアのガス移行挙動とそのモデル化

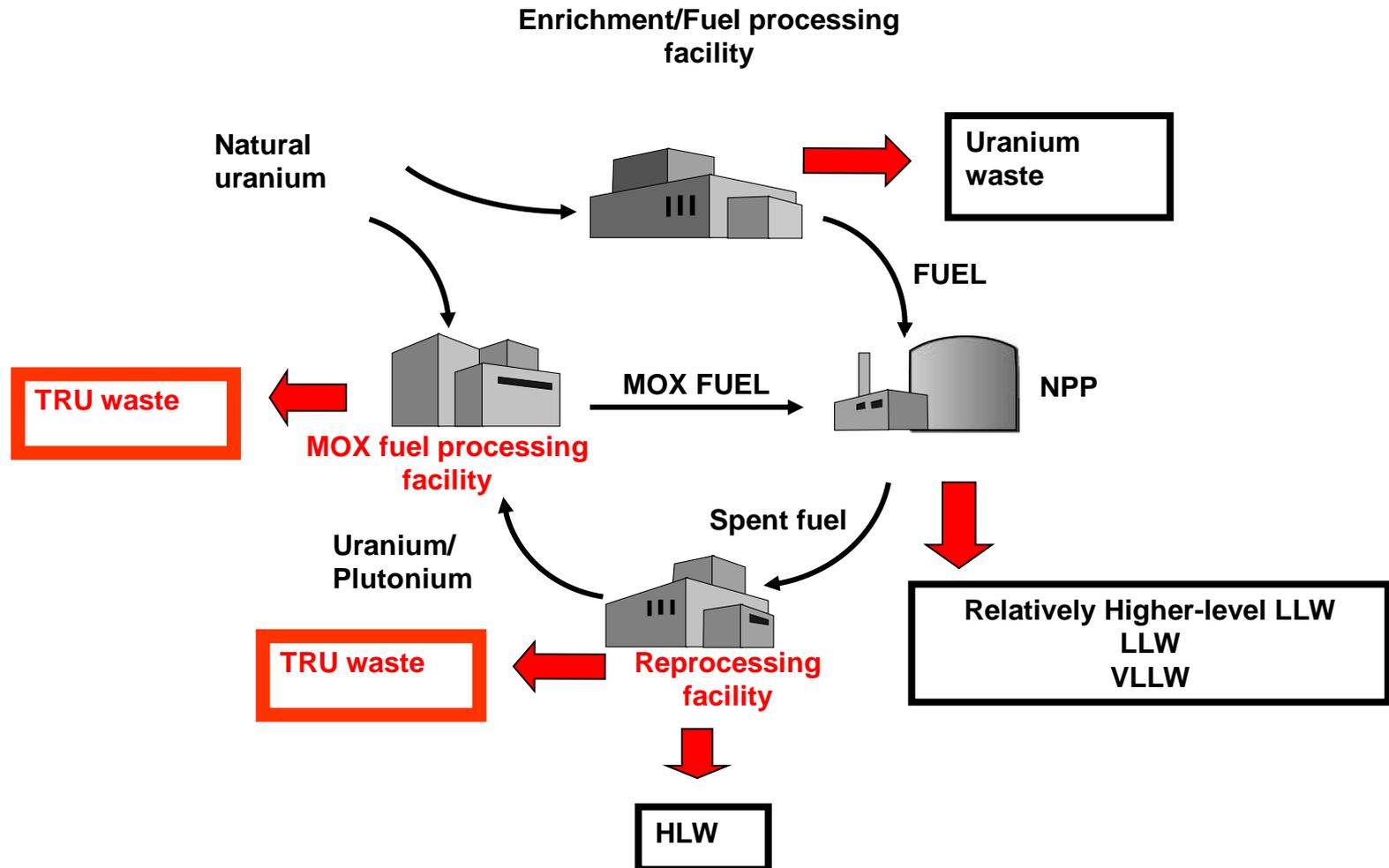
本日の内容は、経済産業省資源エネルギー庁から受託して実施した以下の各研究開発等に基づく成果です。

- 平成19年度～平成24年度地層処分技術調査等委託費 TRU廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発（5. の内容）
- 平成25年度～平成28年度 地層処分技術調査等事業 T R U廃棄物処理・処分技術高度化開発（5. の内容）
- 平成29年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（JPJ007597） T R U廃棄物処理・処分技術高度化開発（5. の内容）
- 平成30年度～令和2年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（JPJ007597） T R U廃棄物処理・処分技術高度化開発（3. 4. 5. の内容）

1. TRU廃棄物の概要

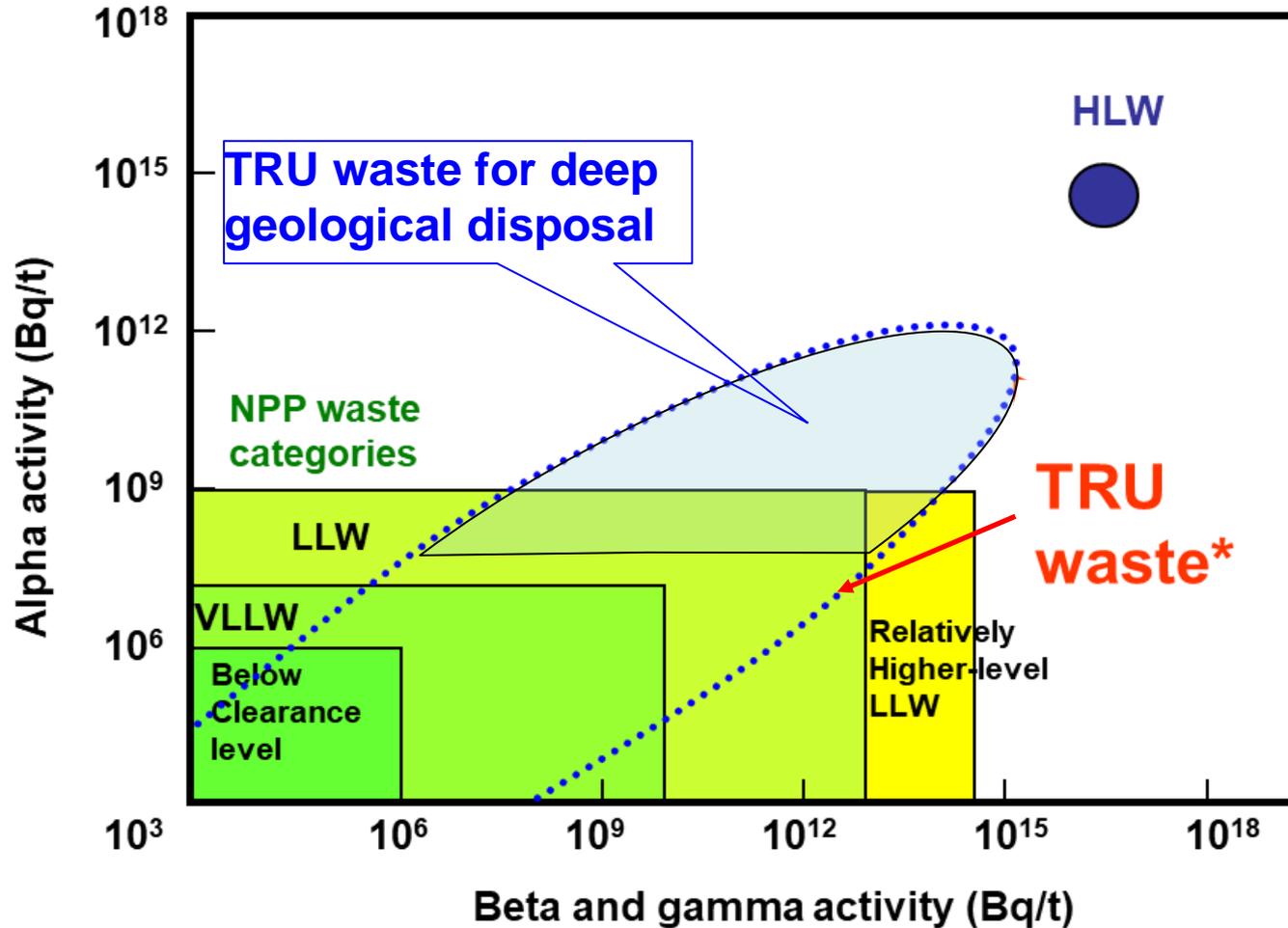
Radioactive waste in Japan

(excluding medical, research, industrial wastes)



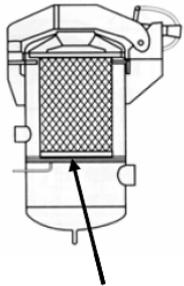
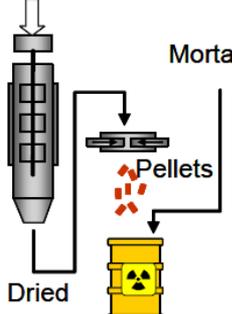
1. TRU廃棄物の概要

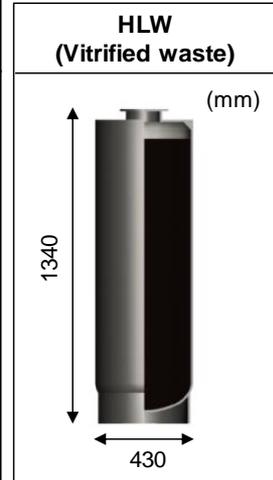
Radionuclide concentration of TRU waste in Japan



1. TRU廃棄物の概要

Various types of TRU waste

	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 4 H
Content	<p>Spent silver absorbent</p>  <p>Iodine absorber</p>	<p>Hulls</p>  <p>End-pieces</p> 	<p>Solidified concentrated liquid waste</p>  <p>Mortar</p> <p>Pellets</p> <p>Dried</p>	<p>Poorly combustible waste</p>  <p>e.g. rubber gloves</p> <p>Non-combustible waste</p>  <p>E.g., tools, metal pipes</p>	<p>Vitrification furnaces etc.</p> 
Waste package	E.g. 	E.g. 	E.g. 	E.g.  	E.g. 
Features	<ul style="list-style-type: none"> • Radioiodine (I-129) 	<ul style="list-style-type: none"> • Heat generating • Radiocarobon (C-14) 	<ul style="list-style-type: none"> • Includes nitrates from PUREX reprocessing • Solidified waste with mortar or bitumen 	<ul style="list-style-type: none"> • Incineration ash • Non-combustibles • Solidified waste with mortar, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Includes heat generating glass melter wastes • Solidified waste with mortar, etc.



Total TRU waste : more than 19,000 m³ Co-disposal was studied.

TRU廃棄物はガス発生源となる金属、セメントを多く含む

2. 背景

地層処分において想定されるガスの発生要因

1. 放射線分解によって発生するガス (Radiolysis)

- ・周囲の地下水や廃棄体パッケージ容器内の水の分解で発生する水素ガス
- ・アスファルトの分解によって発生するガス

廃棄物を定置し、パッケージ周辺を充填した段階から発生する。

セメント系材料に含まれる自由水 (Free water in mortar) も発生源になるため、設計によっては容器内での発生も考慮する必要がある。

2. 還元雰囲気での金属の腐食にともなって発生する水素ガス (Metal corrosion)

処分坑道内が冠水し、還元環境となった後に発生する。

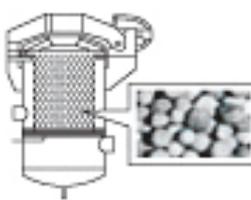
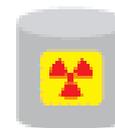
腐食にともなって発生するため、**ガス発生速度、量を算出するためには、還元環境での腐食速度を知る必要がある。**

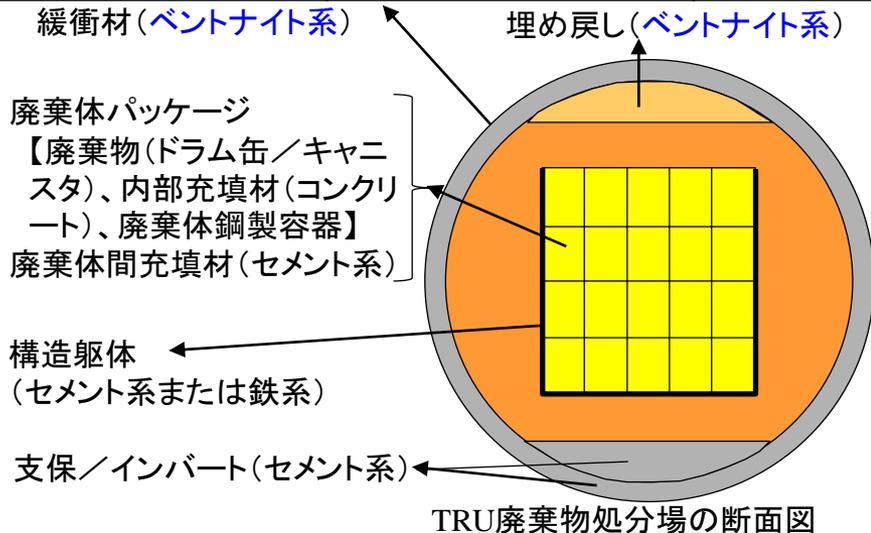
3. 微生物活動によって発生するガス (Microbial activity)

アスファルトやセルロースなどの有機物の微生物分解によってCO₂、N₂、CH₄ガスが発生すると推定されているが、処分場周囲の環境によって微生物の種類、活動が異なるため、ジェネリックに設定することは難しい。

2. 背景

TRU廃棄物の地層処分において想定されるガスの発生源

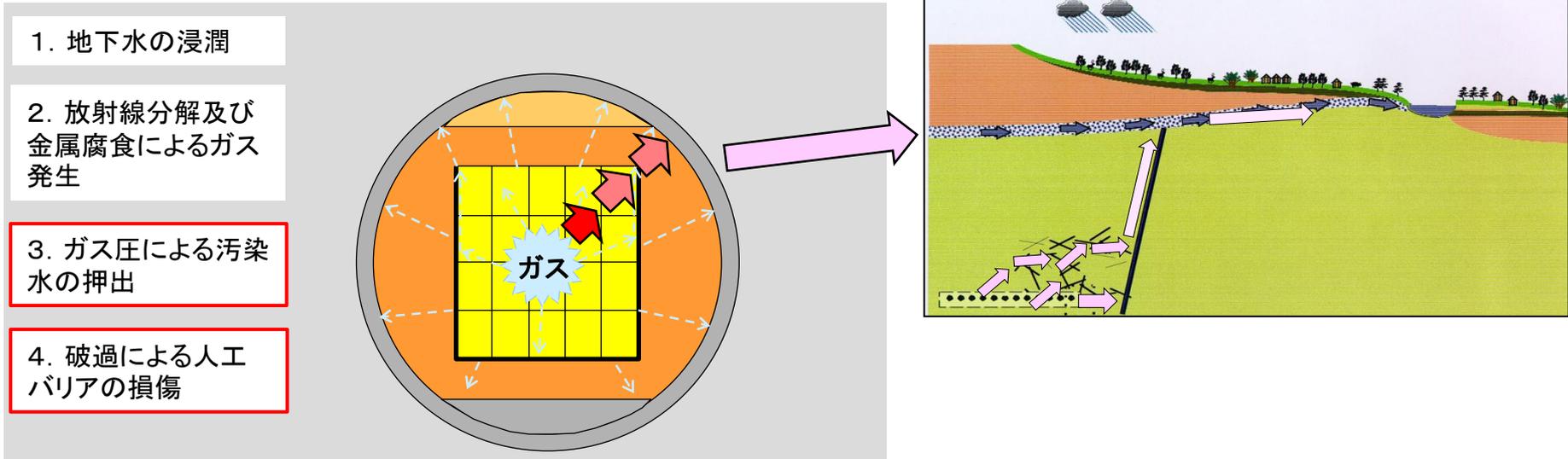
TRU廃棄物				
廃銀吸着材 	ハル・エンドピース  エンドピース ハル	低レベル濃縮廃液 (アスファルト固化体及びモルタル充填固化体等) 	可燃、難燃、不燃廃棄物 (モルタル充填固化体等)  可燃物(紙、布等) 難燃物(ゴム手袋、ビニール等) 不燃物(配管、工具、ガラス等)	
(レファレンスは)セメント固化	【圧縮充填】	モルタル固化、セメント固化及びアスファルト固化	モルタル固化、セメント固化	
グループ1	グループ2	グループ3	グループ4 (低発熱性)	グループ4 (発熱性)



- 放射線分解によって発生する水素ガス
 - 各廃棄物の固化材として使用されるセメント
 - グループ3のアスファルト
 - セメント系の内部充填材や廃棄体間充填材
 - 緩衝材やセメント系の構造材料
- 金属の腐食にともなって発生する水素ガス
 - 廃棄物として持ち込まれる金属
 - 廃棄体の金属容器
 - 金属製の構造材料

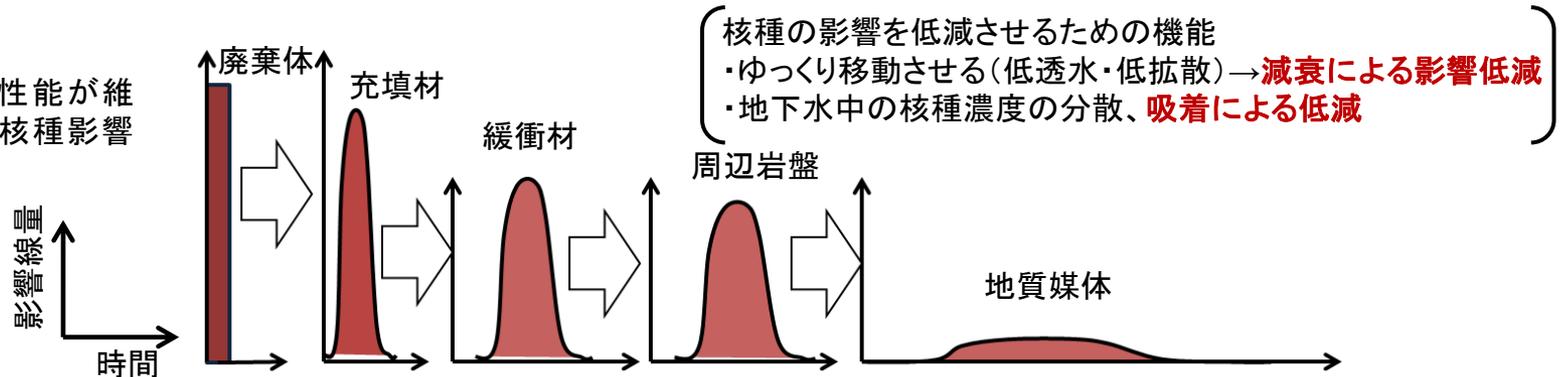
2. 背景

放射性廃棄物（TRU）処分において想定されるガス問題



領域現象	廃棄体放出	充填材収着	緩衝材収着・低拡散減衰	周辺岩盤収着・分散減衰	地質媒体収着・分散減衰
------	-------	-------	-------------	-------------	-------------

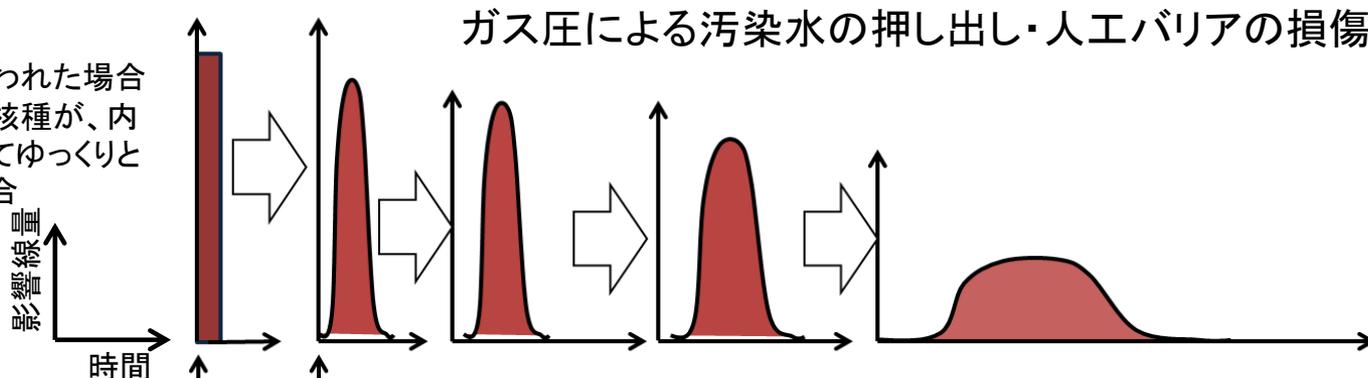
期待するバリア性能が維持される場合の核種影響線量のイメージ



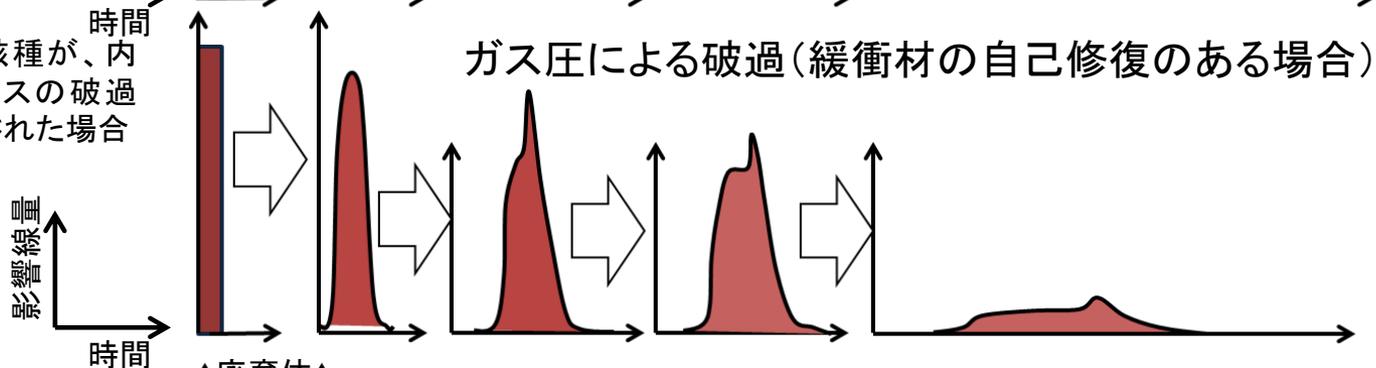
2. 背景

放射性廃棄物（TRU）処分において想定されるガス問題

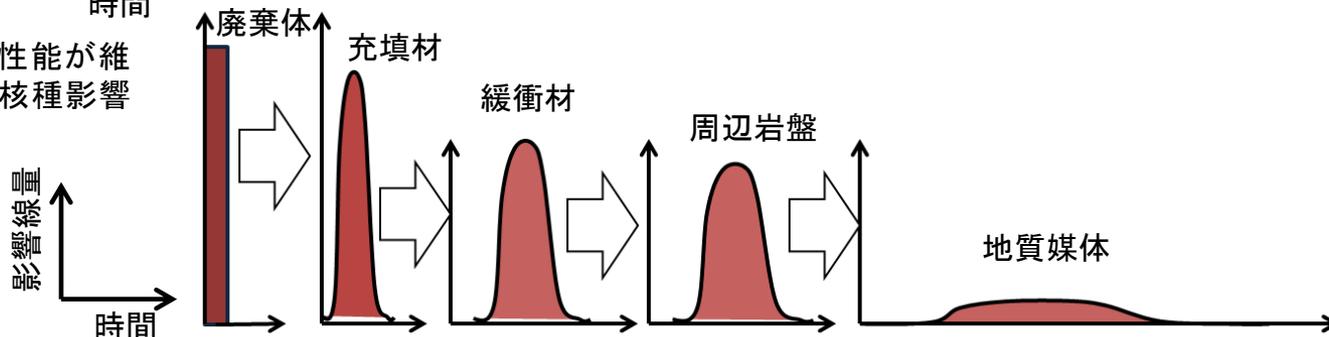
- ・機能が一部失われた場合
- ・緩衝材領域の核種が、内部のガスによってゆっくりと押し出された場合



- ・緩衝材領域の核種が、内部で発生したガスの破過に伴って押し出された場合

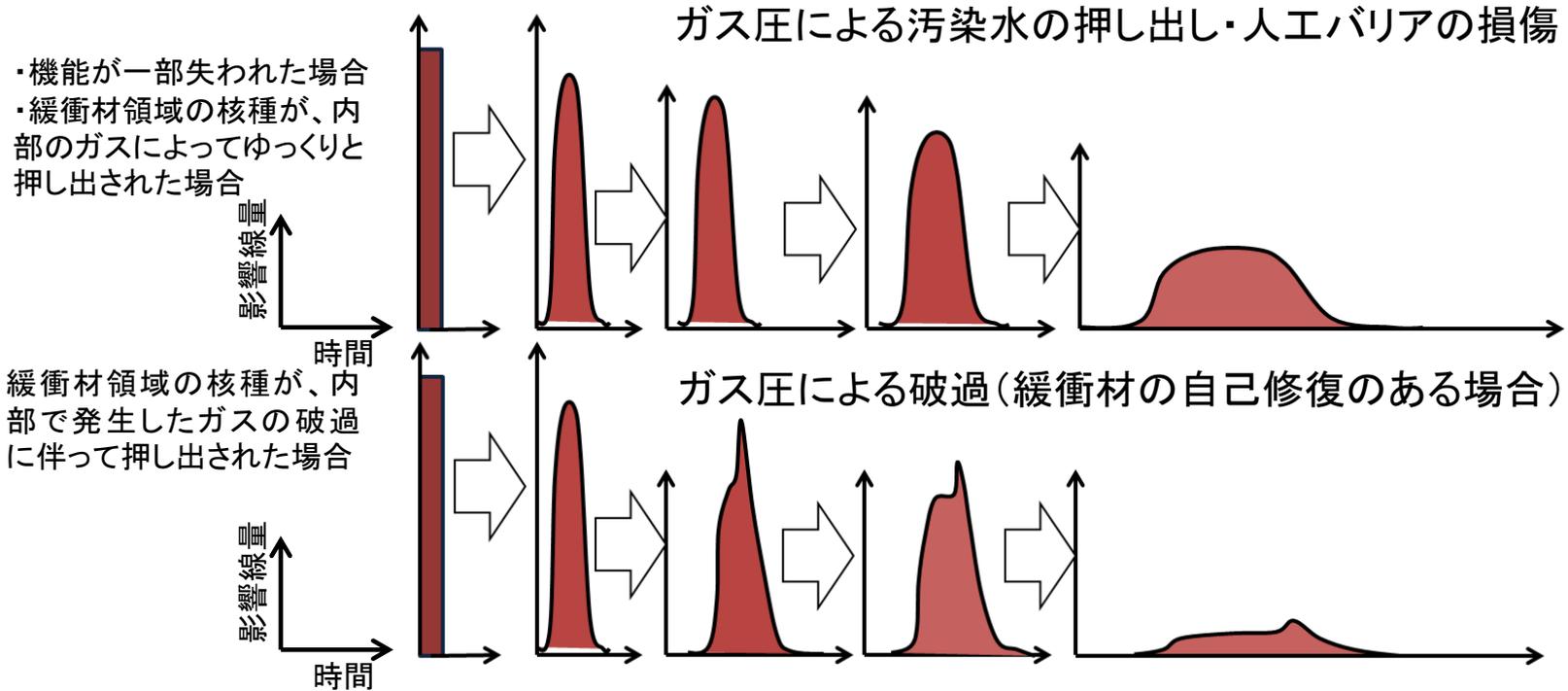


- ・期待するバリア性能が維持される場合の核種影響線量のイメージ



2. 背景

放射性廃棄物（TRU）処分において想定されるガス問題



- ・上記のようにガス発生によって核種移行に影響を及ぼす破過やそれによる人工バリアの（核種移行の抑制機能を低減させるような）損傷等の現象が生じるのか？
- ・ガス発生による移行挙動や破過が生じる場所、時間等が精度良く予測できるのか？

2. 背景

TRU廃棄物の廃棄体パッケージ

➤ 廃棄体パッケージAの形状・概要 【第2次TRUレポート】

- 容器：廃棄体の収納方法、パッケージの強度、製作方法やハンドリング性などを考慮して厚さ5mmの鋼製廃棄体パッケージ
- 廃棄物の閉じ込め性：なし
- 構造健全性：パッケージ内をモルタルで充填固化。充填材の強度により構造健全性を確保。

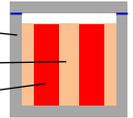
【構成と用語】

廃棄体パッケージ

容器

内部充填材

廃棄体

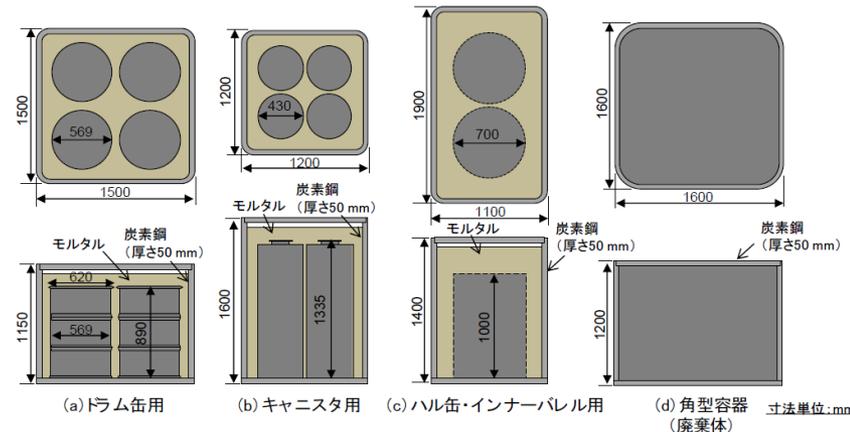


※廃棄体パッケージ容器は、「容器」と略記

➤ 廃棄体パッケージBの形状・概要 【NUMO包括的技術報告書(NUMO SC)】

- 容器：SM400Aを対象とし、操業時の耐食性、荷重(吊下げ、積上げ)を考慮して50mm厚
- 廃棄物の閉じ込め性：万が一の落下時の放射性物質の漏洩を防ぐため上蓋は溶接して廃棄体を封入する構造
- 落下時の健全性：落下高さの制限(<8m)を設け、見通しを得ている
- 閉鎖後長期の安全性の評価：300年の平均腐食厚さ0.3mm (最大5.3mm)、10MPa(静水圧1000m)でひずみは限界に達せず、容器が開口することはないとして構造健全性を担保

※容器厚さ50mm



廃棄体パッケージBの概略図

(NUMO 包括的技術報告書(レビュー版)より)

- 発生ガスによる内圧の上昇が廃棄体パッケージの閉じ込め性に影響しないか？
- 必要なガス発生抑制対策とこれらを反映したガス発生量評価は？

2. 目的

TRU廃棄物処分場でのガス発生量の評価

NUMO-SC等の最新知見に基づく処分条件と現実的な人工バリアの状態設定を反映した**ガス発生挙動（発生量の経時変化）**の評価

廃棄体パッケージ充填材を対象としたガス発生量の低減対策

操業期間中の安全性の向上に加え、閉鎖後数百年程度の放射性物質の閉じ込め性能が期待できる廃棄体パッケージBについて、**放射性分解による**水素ガスの発生要因を踏まえ、**水素ガス発生抑制**が可能な**セメント系内部充填材**の仕様と施工方法の提示。

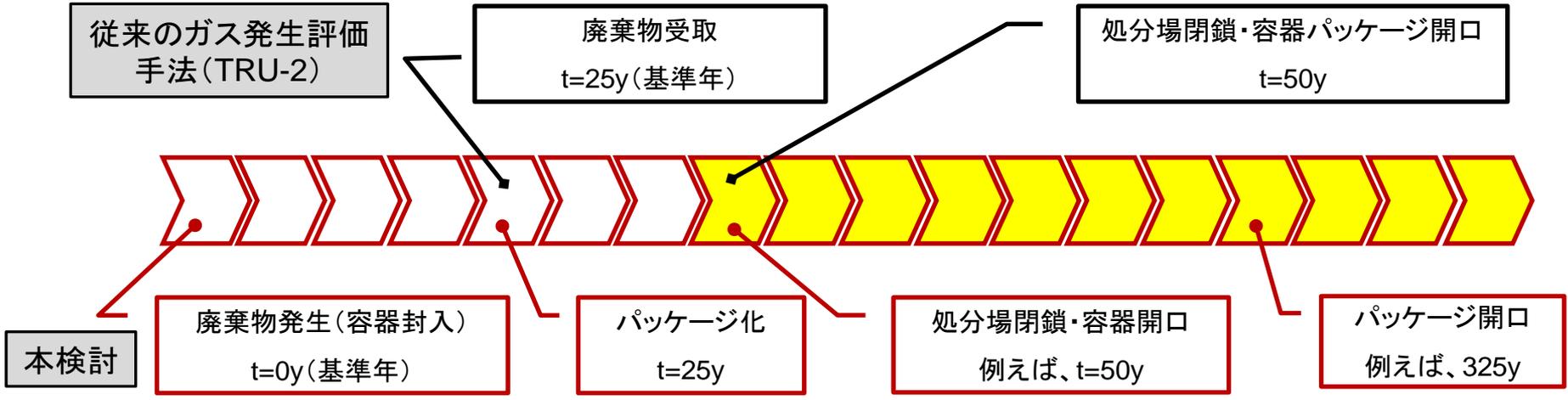
人工バリアのガス移行挙動とそのモデル化

ガス影響評価に不可欠な長期の人工バリア（特にベントナイト緩衝材）中のガス移行解析に必要な二相（ガス相及び水相）流の移行特性について、**小規模モックアップ試験**によるガス移行挙動の現象理解と3次元の実規模スケールに適用するための現象解析モデルの高度化。

3. TRU廃棄物処分場でのガス発生量の評価

TRU廃棄物処分場でのガス発生量の評価

より現実的なガス発生挙動の経時的な定量評価



項目	TRU-2	例：TR14-03 (NUMO)	本検討
インベントリ	廃棄物受取時 (t=25y)	廃棄物受取時 (t=25y)	廃棄物発生後 (t=0y)
ガス発生開始	(おそらく) 処分場閉鎖時	廃棄物受取時 (t=25y)	廃棄体発生時 (t=0y)
水 (放射線分解)	閉鎖後直ちに開口し、地下水が常に豊富に存在	開口 (500y) するまでは、内部の水を消費してガス発生反応が進行	開口 (300y) するまでは、内部の水を消費してガス発生反応が進行

◆ 廃棄体パッケージの寿命までの期間の様々なイベントを考慮して、各々の水素ガス発生モードで競合的に消費する水の量を(枯渇の可能性を含め)考慮し、①金属の嫌気性腐食及び②水の放射線分解によるガス発生量とその経時変化の評価

金属の嫌気性腐食によるガス発生量の評価

評価条件の設定

部材	種類	腐食モデル	CR : 腐食速度 [m/y]	金属量[Mg]	S: 評価上の表面積[m ²]	厚さt/直径[mm]
エンドピース	SUS	平板	2.0 E-8 (※1)	1584.0 (※2、※6)	49.6 (※1、※4)	0.34 (※1)
ハル	ジルカロイ	平板	5.0 E-9 (※1)	3168.0 (※2、※6)	221.4 (※4)	0.71 (※7)
キャニスタ	SUS	平板	2.0 E-8 (※1)	858.0 (※2、※6)	1.8 (※4)	5 (※1)
廃棄体パッケージ	炭素鋼	平板	1.0 E-7 (※1)	6341.8 (※2、※6)	10.56 (※5)	50 (※1)
ロックボルト	炭素鋼	円筒	1.0 E-7 (※1)	28.9 (※2、※3、※6)	568.9 (※6)	Φ 25 (※3)
鉄筋 (構造躯体)	炭素鋼	円筒	1.0 E-7 (※1)	337.6 (※2、※6)	鉄筋径毎に算出 (※6)	D16,22,25,29 (※2)

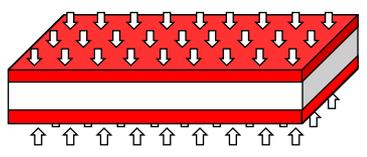
- ※1 TRU-2参照
- ※2 NUMO包括参照
- ※3 国交省標準参照
- ※4 1キャニスタ毎
- ※5 1パッケージ毎
- ※6 1坑道毎
- ※7 原子力安全研究協会

【嫌気性腐食の反応式】



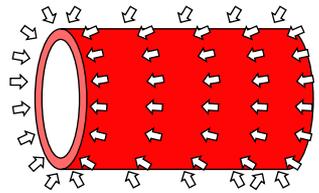
【平板モデル】

廃棄体(ハル・エンドピース、キャニスタ)
廃棄体パッケージ容器



【円筒モデル】

鉄筋、ロックボルト



【水素ガス発生速度】

$\Delta HR = K \times S \times CR$ [mol/y]

ΔHR : 水素ガス発生速度

K : 換算係数[mol/m³]

S : 評価上の表面積[m²]

CR : 金属の腐食速度[mol/y]

$K = ST \div \rho \div A \times 10^6$ [mol/m³]

ST : 腐食金属当たりの水素ガス発生の化学量論

ρ : 換算係数[mol/m³]

[mol・H/mol・M]

A : 金属の原子量[g/mol]

水の放射線分解によるガス発生量の評価

評価条件の設定

$$\text{水素ガス発生量} = \text{G値} \times \text{放出エネルギー} \times \text{エネルギー付与率}$$

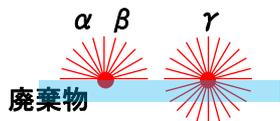
【G値の設定（暫定値として初期設定）】

ターゲット	G 値 [molecules/100eV]			出典
	α線	β線	γ線	
水	1.3	0.45	0.45	Christensen and Bjergbakke (1983), Bjergbakke et al. (1991)

【エネルギー付与率の設定】

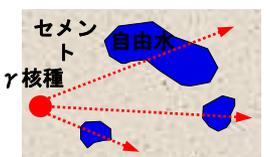
各線種ごとに、『核種の賦存状況』、『混合率（水の割合）』、『透過率』の積として表現される。

核種の賦存状況



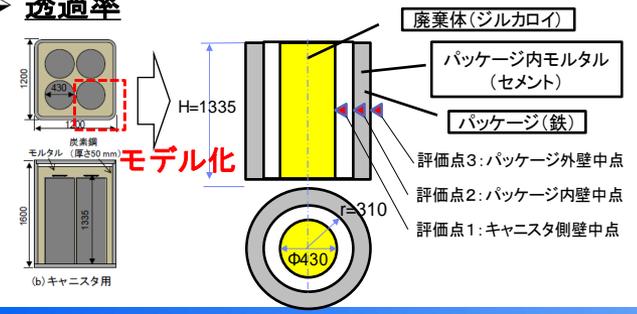
ターゲット	核種賦存状況による放射線エネルギー付与割合		
	α線	β線	γ線
廃棄体内水	0.5		1
パッケージ内モルタル自由水	評価対象外		

混合率（水の割合）



ターゲット	充填材混合率による放射線エネルギー付与割合		
	α線	β線	γ線
廃棄体内水	0 (開口前)		0 (開口前)
	1 (開口後)		1 (開口後)
パッケージ内モルタル自由水	評価対象外		0.21 (開口前) 0.22 (開口後)

透過率



名称	廃棄体領域 (評価点1)	パッケージ内モルタル (評価点2)	パッケージ部材 (評価点3)	人工バリア材
物質	ハル等圧縮体 (ジルカロイ及び SUS)	セメントモルタル	炭素鋼	セメント、ベントナイト、炭素鋼、等
水の放射線分解の有無	地下水が流入するまでは発生しない	○	×	冠水した状態であれば発生する
透過率 [-]	0.693	0.281	0.0226	0.00344

遮蔽計算ツール：点減衰積分法コード QAD-CGGP2R

水の放射線分解によるガス発生量の評価

評価条件の設定

$$\text{水素ガス発生量} = \text{G値} \times \text{放出エネルギー} \times \text{エネルギー付与率}$$

評価位置	キャニスタ内			廃棄体パッケージ			人工バリア		
	α	β	γ	α	β	γ	α	β	γ
線種									
付与率 (0y ≤ T ≤ 325y)	0.5	0.5	0.693	0	0	0.059	0	0	0.001
付与率 (325y ≤ T)	0.5	0.5	0.693	0	0	0.062	0	0	0.001

- ※ **キャニスタ内**で水の放射線分解が進行するのは**T=25y以降**
- ※ **廃棄体パッケージ**で水の放射線分解が進行するのは**T=25y以降**
- ※ **人工バリア**で水の放射線分解が進行するのは**T=50y以降**

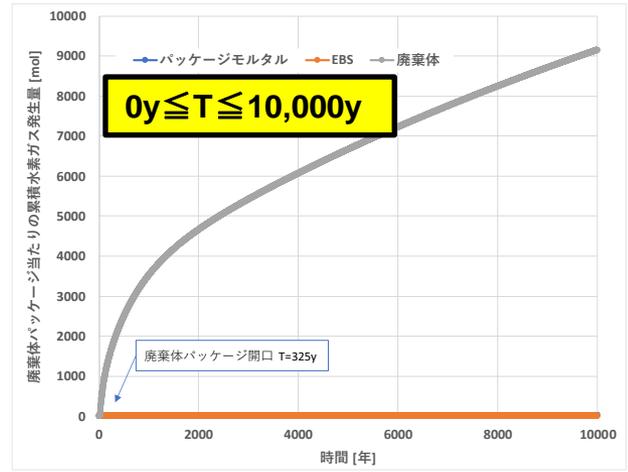
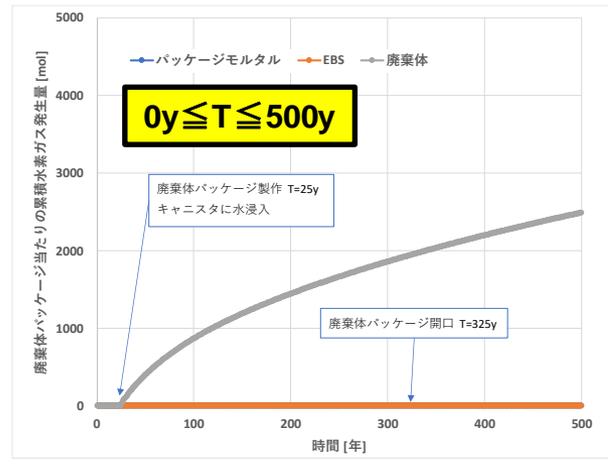
評価位置	キャニスタ内			廃棄体パッケージ			人工バリア		
	α	β	γ	α	β	γ	α	β	γ
線種									
付与率 (0y ≤ T ≤ 325y)	0	0	0	0	0	0.059	0	0	0.001
付与率 (325y ≤ T)	0.5	0.5	0.693	0	0	0.062	0	0	0.001

- ※ **キャニスタ内**で水の放射線分解が進行するのは**T=325y以降**
- ※ **廃棄体パッケージ**で水の放射線分解が進行するのは**T=25y以降**
- ※ **人工バリア**で水の放射線分解が進行するのは**T=50y以降**

水の放射線分解によるガス発生量の評価

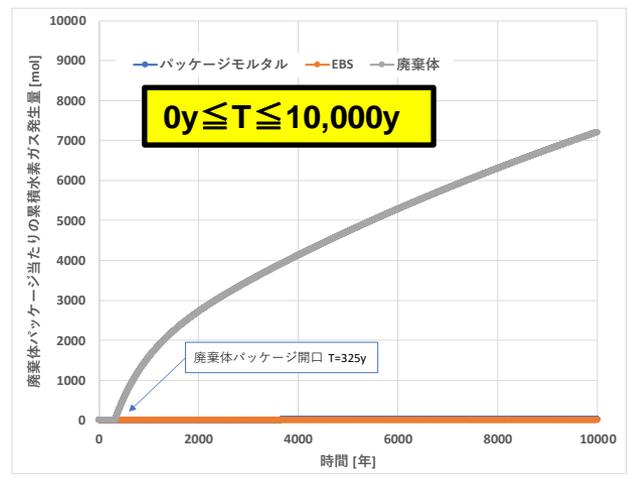
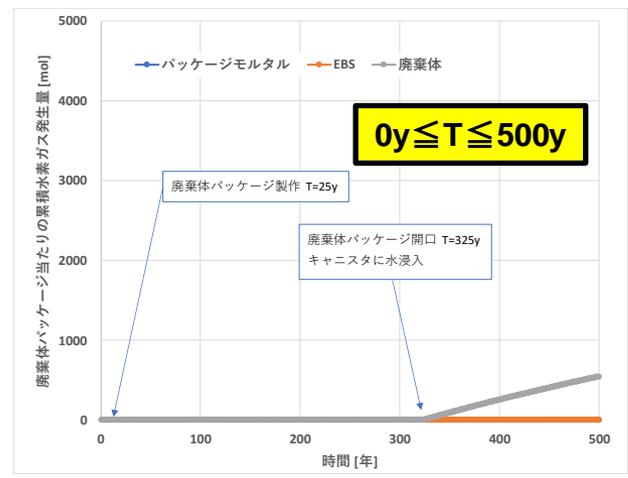
評価結果: 水の放射線分解による廃棄体パッケージ1体あたりの水素ガス発生量

【キャニスタの寿命不考慮】



- 初期(T=25y)から、廃棄物(ハル/エンドピース)からの水素ガス発生が卓越する。

【キャニスタの寿命=パッケージの寿命】

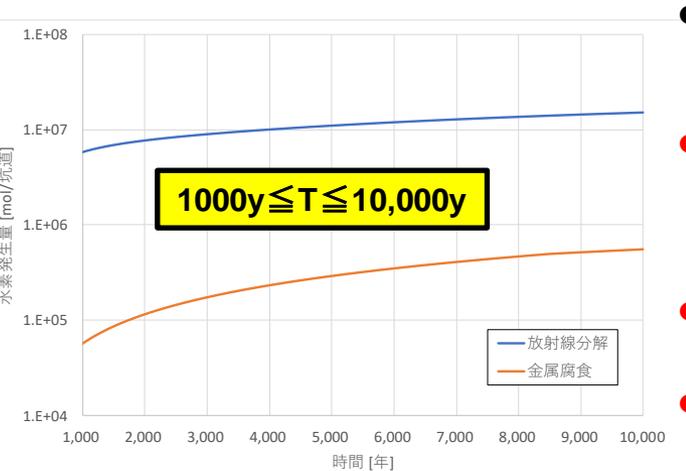
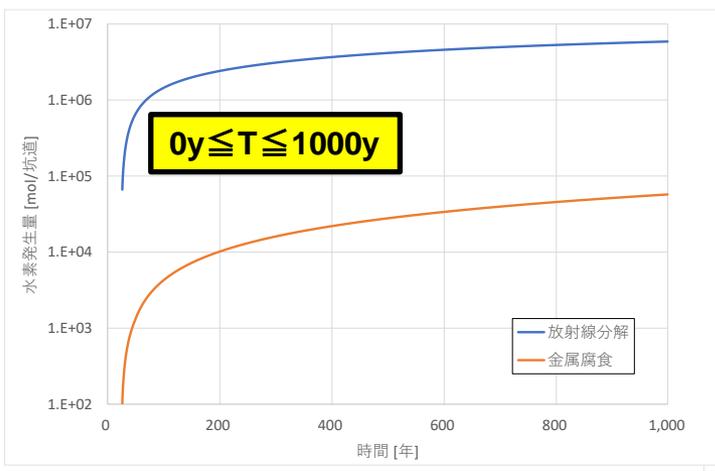


- 25 ≤ T ≤ 325yの間は、廃棄体パッケージモルタルからの水素ガス発生が卓越する。
- T=325y以降は、キャニスタ内にも水が流入し、廃棄物(ハル/エンドピース)からの水素ガス発生が卓越する。

金属の嫌気性腐食及び水の放射線分解によるガス発生量

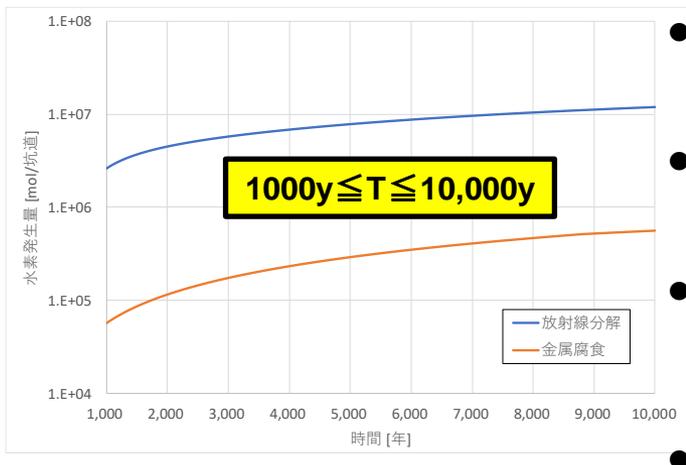
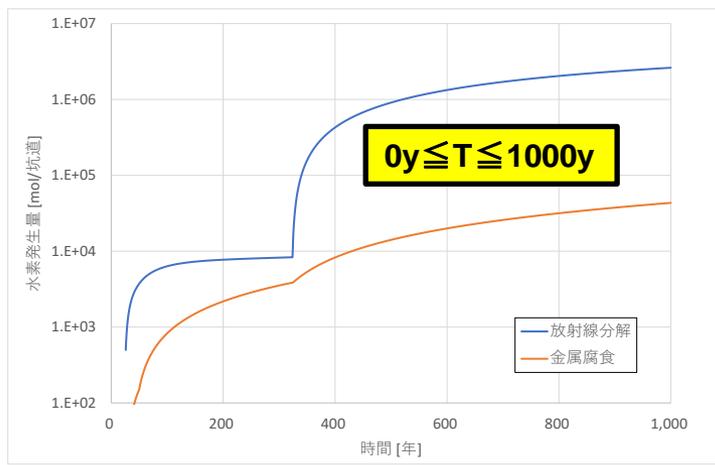
評価結果: 坑道(157.55m)1本あたりの水素ガス発生量(放射線分解/金属腐食統合)

【キャニスタの寿命不考慮】



- 評価期間を通じて、ほぼ、(放射線分解によるガス発生量) > (金属腐食によるガス発生量)
- 廃棄体パッケージ開口 (T=325y) までに水が枯渴することなく、水の放射線分解/嫌気性腐食による水素ガス発生が継続。
- T=325yで廃棄体パッケージが開口し、地下水が流入。
- エンドピースは、8,525yで消失。

【キャニスタの寿命=パッケージの寿命】



- 評価期間を通じて、ほぼ、(放射線分解によるガス発生量) > (金属腐食によるガス発生量)
- 廃棄体パッケージ開口 (T=325y) までに、廃棄体パッケージ内の水分が枯渴することはない。
- T=325yで廃棄体パッケージが開口し、キャニスタ内部にも地下水が流入することで放射線分解/金属腐食が増大。
- エンドピースは、8,825yで消失。

4. 廃棄体パッケージ充填材を対象とした ガス発生量の低減対策

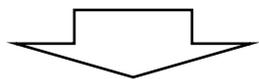
セメント系充填材からの放射線分解による水素ガス発生

閉鎖後数百年程度の放射性物質の閉じ込め性能が必要な廃棄体パッケージBにおける内部充填材の仕様の検討

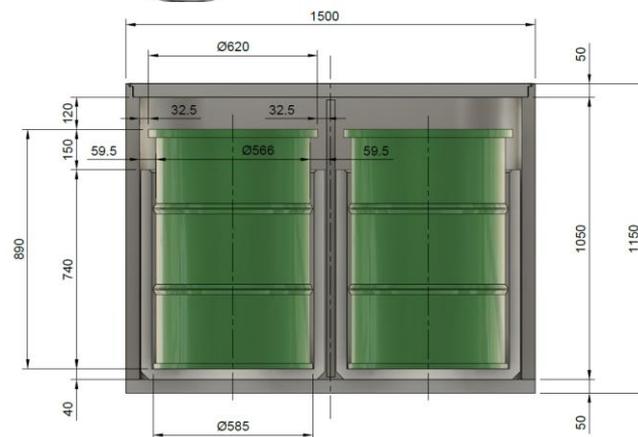
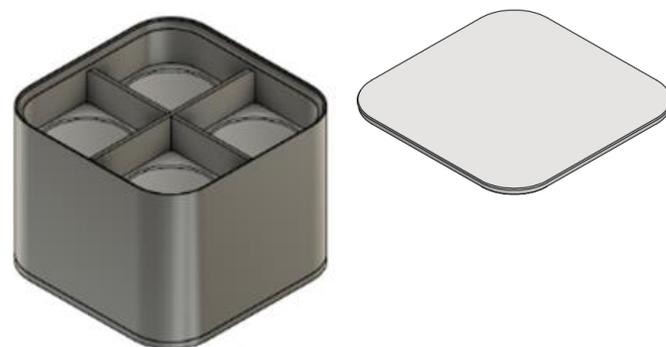
セメント系材料（セメントペースト、モルタル、コンクリート）を対象とする場合、セメント中の水の放射性分解による水素ガスの発生の影響を考慮しなければならない。



- ◆ セメント系充填材からの放射線分解による水素ガス発生量を見積もるために、セメント・骨材の種類、配合、乾燥条件等の異なるセメント系材料の照射試験によりガス発生挙動を把握しG値を評価する。



- ◆ 放射性分解による水素ガスの発生要因を踏まえ、水素ガス発生の抑制が可能なセメント系内部充填材の仕様と施工方法を提示する。



廃棄体パッケージB（ドラム缶用）の概略図

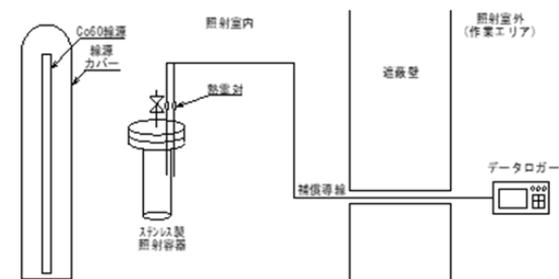
セメント系材料の照射試験

照射試験

項目	条件
線源	コバルト60 (Co-60)
吸収線量	5 kGy (1 kGy/h × 5h)
雰囲気ガス	高純度空気
照射時温度	室温
測定項目	水素

比較項目

- モルタル⇔コンクリート
- セメント・骨材の種類
- 配合 (W/C, S/C)
- 乾燥条件



照射試験での照射イメージ (コンクリート試料)

- モルタル試料 (配合、乾燥条件など)

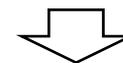
試料名	試料条件						自由水 %	結合水 %	全水分 %
	セメント(C)	骨材	W/C	S/C	養生・材齢	乾燥条件			
OPC-モルタル①	OPC	砕砂	0.45	2	20°C、封緘4W	表乾	10.1	6.3	16.4
OPC-モルタル②	OPC	砕砂	0.45	2		50°C 6h	6.1	6.2	12.3
OPC-モルタル③	OPC	砕砂	0.45	2		80°C 6h	1.4	6.2	7.6
OPC-モルタル④	OPC	砕砂	0.45	2		80°C 24h	1.0	6.1	7.1
OPC-モルタル⑤	OPC	砕砂	0.60	3	20°C、封緘4W	表乾	9.9	5.1	15.0
OPC-モルタル⑥	OPC	珪砂	0.45	2	20°C、封緘4W	表乾	9.0	5.1	14.1
OPC-モルタル⑦	OPC	珪砂	0.60	3		表乾	8.5	4.2	12.7
FAC-モルタル	OPC : FA=7 : 3	砕砂	0.45	2	20°C、封緘4W	表乾	11.2	4.4	15.6
BFSC-モルタル	OPC : BFS=3 : 7	砕砂	0.45	2		表乾	11.6	4.1	15.7

- コンクリート試料 (配合、乾燥条件など)

試料名	目標 スランブ (cm)	目標 空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				養生・材齢	乾燥条件	自由水 %	結合水 %	全水分 %
					W	C	S	G					
OPCコン クリート①	18±2.5	4.5 ±1.5	45	44.0	170	362	769	1001	20°C、封緘 4W	表乾	5.2	2.9	8.1
OPCコン クリート②										80°C、 1W	0.4	2.9	3.3



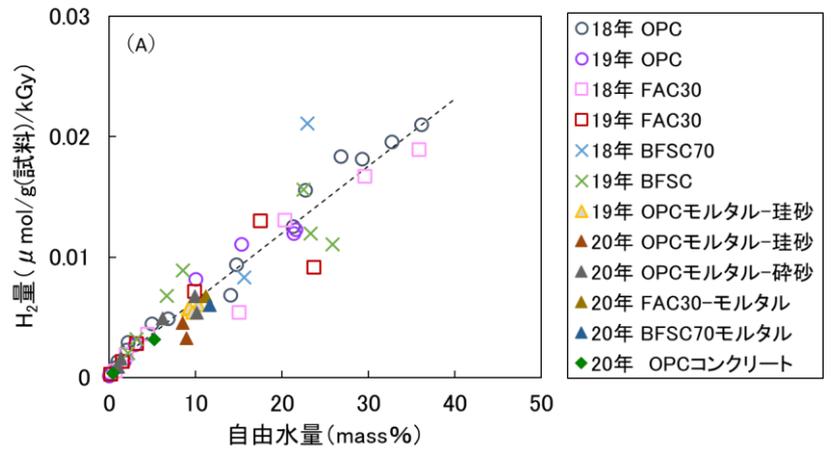
照射試験の状況



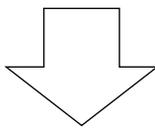
照射試験後に、照射容器内のガスを真空システム系内へ移行させ、ガスクロマトグラフィーによりH₂ガス成分を測定

セメント系材料の照射試験

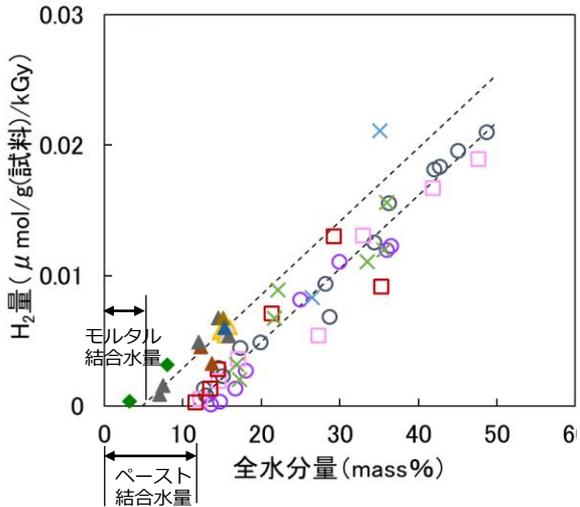
- ⇒セメントや骨材の種類、配合の違いによる水素ガス発生量の明確な差異は認められなかった。
- ⇒モルタル及びコンクリートでもペーストの結果と同様に自由水量の増加に伴い水素発生量が増加し、使用したセメント種類が異なっても概ね同一の直線関係で整理できる。
- ⇒セメント系材料（に含まれる水）のG値（ G_{H_2} (fW)）は、セメント及びモルタルともに、自由水量10mass%以上では水の G_{H_2} 値=0.45にほぼ収まる。



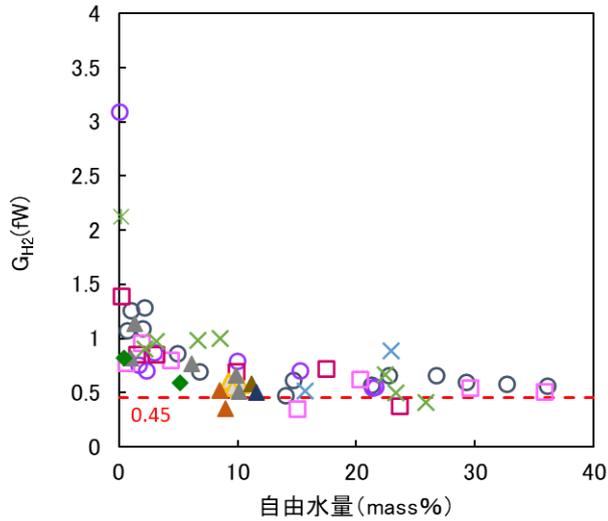
自由水量と水素ガス発生量の関係



- ・乾燥工程で自由水量を減らすことでセメント系材料の水素ガス発生量の低減は可能。
- ・G値との関係を整理し、コンクリートの水素ガス発生量の評価方法の構築に向けてさらに検討を継続。



全水分量と水素ガス発生量の関係

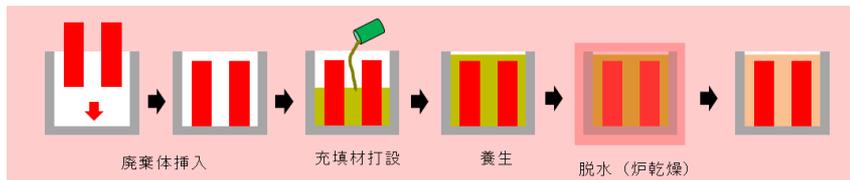


自由水量とG値の関係

内部充填材の施工時のガス発生量低減対策の検討

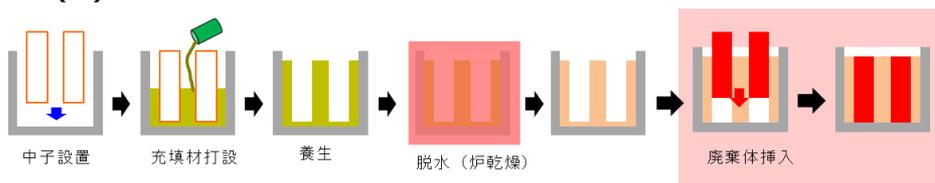
廃棄体パッケージ容器内への、廃棄体と内部充填材の収納

(a) 後打設：容器内部に廃棄体を設置し、充填材を打設



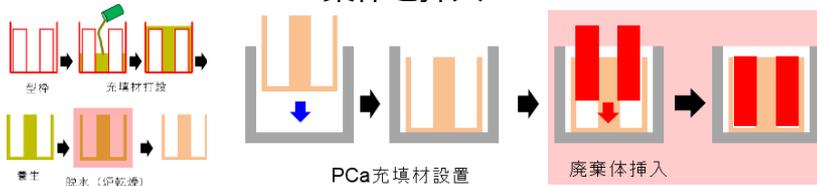
製作時の技術的な観点		長期的な観点	
利点	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体周囲に隙間が生じない。 	利点	<ul style="list-style-type: none"> 容器内は一体化(蓋直下は除く) 核種の収着が期待できる(安全評価)
懸念	<ul style="list-style-type: none"> 全工程が放射線環境下 打設時の廃棄体の浮上り防止 廃棄体とともに乾燥作業 	懸念	<ul style="list-style-type: none"> 短期/長期的な変質(熱的・化学的) 充填部に残存する水分の影響

(b) 先打設：容器内部に予め充填材を打設し、廃棄体を挿入



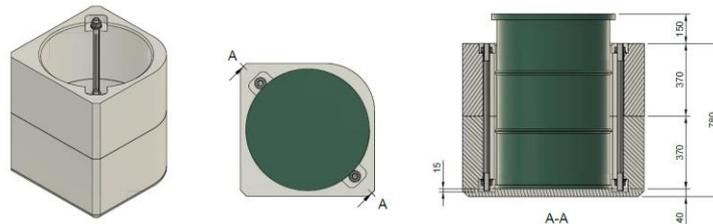
製作時の技術的な観点		長期的な観点	
利点	<ul style="list-style-type: none"> 打設後に乾燥工程可能 打設作業は非放射線環境 	利点	<ul style="list-style-type: none"> 容器と充填材は一体化 核種の収着が期待できる(安全評価)
懸念	<ul style="list-style-type: none"> 炉乾燥の大型化、品質管理 隙間の取合(廃棄体-充填材) 	懸念	<ul style="list-style-type: none"> 短期/長期的な変質(熱的・化学的) 隙間残存(充填材-廃棄体)

(c) プレキャスト：製作済みの充填材を容器に設置し、廃棄体を挿入



製作時の技術的な観点		長期的な観点	
利点	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥作業時の他部材への影響なし 充填体挿入作業は非放射線環境 充填材の乾燥、品質管理が容易 	利点	<ul style="list-style-type: none"> 核種の収着が期待できる(安全評価)
懸念	<ul style="list-style-type: none"> 隙間の取合(容器-充填体、充填材-廃棄体) 	懸念	<ul style="list-style-type: none"> 短期/長期的な変質 隙間残存(容器-充填体、充填材-廃棄体)

プレキャストセメント系充填材の製作時
(乾燥工程)のガス発生対策の確立と実
規模製作試験での確認



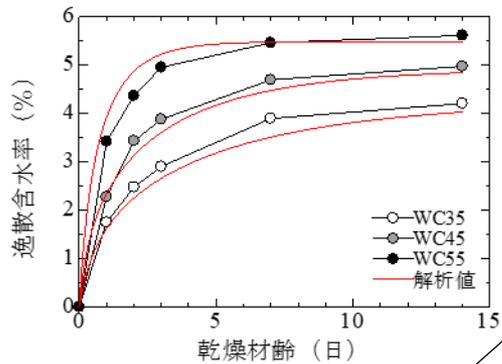
プレキャスト内部充填材完成イメージ図

内部充填材の施工時のガス発生量低減対策の検討

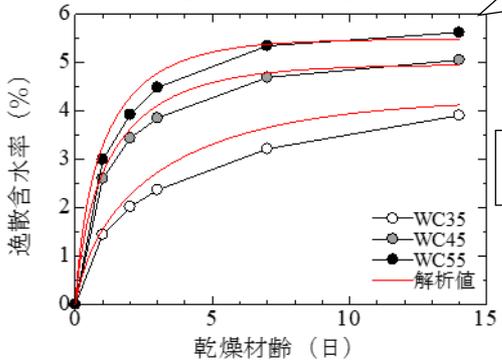
内部充填材の乾燥時の水分逸散量の推定

乾燥工程時の水分逸散量（残存水分量）の推定するために、水セメント比、乾燥条件などをパラメーターとしたコンクリートの要素試験体による水分逸散挙動に関する試験を実施。

- ⇒V/Sが小さいほど乾燥速度が大きい。
- ⇒水セメント比（W/S）が大きいほど乾燥速度が大きい。



試験体A 80°C乾燥



試験体B 80°C乾燥

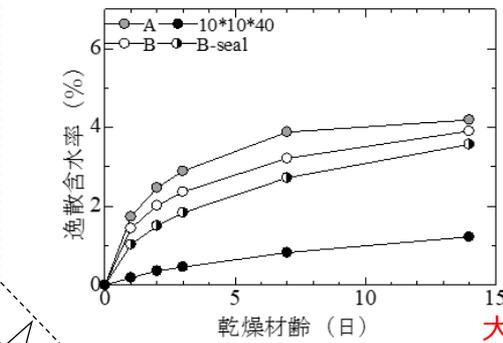


図 W/C=35 80°C乾燥

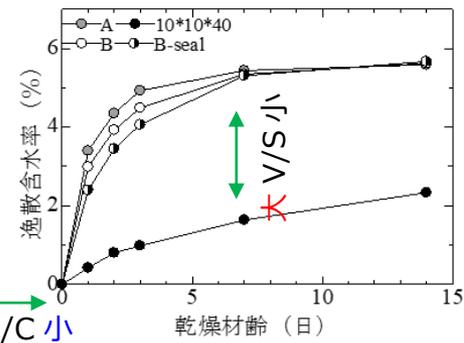
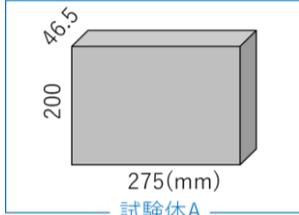


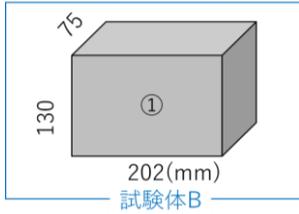
図 W/C=55 80°C乾燥

100*100*400mmの試験体等を使用して一軸のみかけの拡散係数（赤曲線の解析値）を取得することで、現在検討しているパッケージ内充填材の形状のV/Sの範囲の水分逸散量は概ね推定可能。

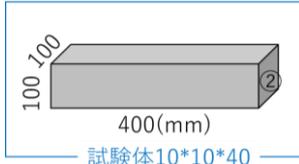
乾燥工程での温度と乾燥時間



試験体A



試験体B



試験体10*10*40

- W/C : 3水準
 - 0.35
 - 0.45
 - 0.55
 - V/S (体積/乾燥表面積) : 4水準
 - 16.6 : 試験体A 全面乾燥
 - 19.2 : 試験体B 全面乾燥
 - 37.5 : 試験体B-seal ①面裏表のみ乾燥
 - 200 : 試験体10*10*40 ②面裏表のみ乾燥
- ※分割した実部材の概算値：底材はV/S=15、中間材はV/S=30程度

水分逸散試験の試験条件

乾燥により自由水量を減らした内部充填材のガス発生量の評価

解析ケースの設定

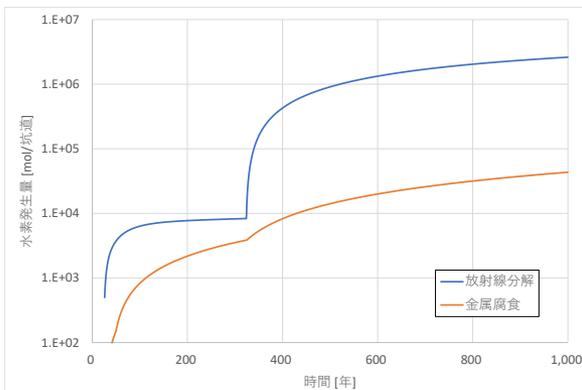
解析ケース	廃棄体パッケージモルタル中の自由水量			自由水のモル数 [mol/package]
	体積割合 [vol %]		重量	
	冠水前	冠水後	[kg/package]	
標準ケース (昨年度実施)	21	22	571	31734.6
解析ケース1-1	15.3	16.3	350	19421.6
解析ケース1-2	10	11	228	12693.9
解析ケース1-3	3.02	4.02	69.0	3833.5
解析ケース1-4	0.1	1.1	2.28	126.9

乾燥により自由水量を減らした内部充填材のガス発生量の評価

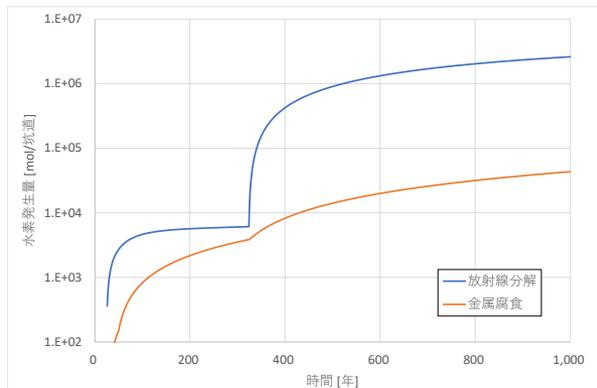
評価結果：坑道(157.55m)1本あたりの水素ガス発生量(放射線分解／金属腐食統合)

【キャニスタの寿命=パッケージの寿命】

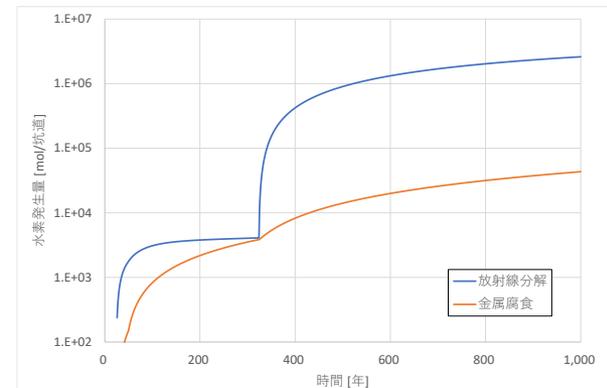
標準ケース (21 vol %)



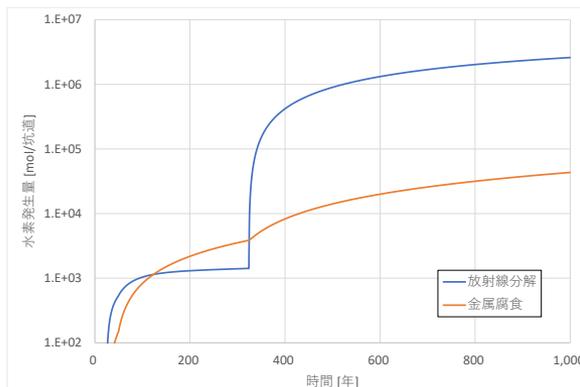
解析ケース1-1 (15.3 vol %)



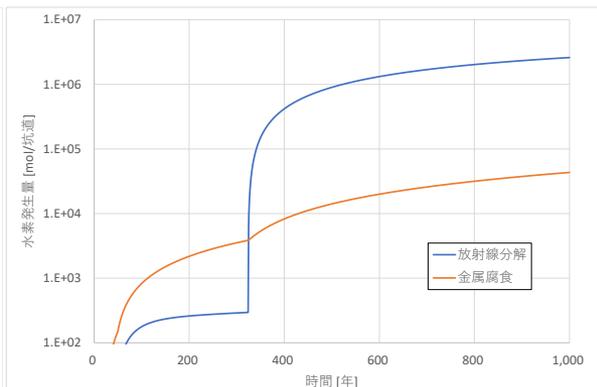
解析ケース1-2(10 vol %)



解析ケース1-3 (3.02 vol %)



解析ケース1-4 (0.1 vol %)



◆ 乾燥による内部充填材中の自由水を減少させる対策により、パッケージの閉じ込め性を期待される期間のガス発生量やパッケージの破損の要因となりうる内圧の上昇を抑えることが可能。

5. 人工バリアとそのガス移行挙動のモデル化

本研究の検討内容とガス影響評価との関連

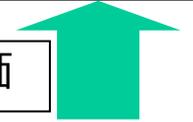
ガスの発生・移行が核種移行挙動に及ぼす影響の程度の把握 Impact assessment of generated gas on the exposure dose

線量評価



ガス移行解析結果に基づく核種移行解析
Radionuclides migration analysis based on the results of gas migration analysis

ガス移行・破過に伴う排水挙動評価



ガス移行解析 Gas(and porewater) migration analysis

ガス発生に伴う汚染水の押出し・破過等による人工バリアの損傷といった影響を考慮

モックアップ試験等の結果をもとにガス移行挙動評価モデルを高度化

二相流モデル
Two-phase flow model

ガス発生量評価
Gas generation

ガス発生量、ガスの発生時期のより現実的な評価を反映

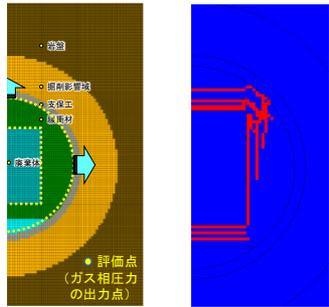
モックアップにおけるガス移行試験 Gas migration test

発生ガスの解析評価

より確からしいガス移行解析モデルの構築



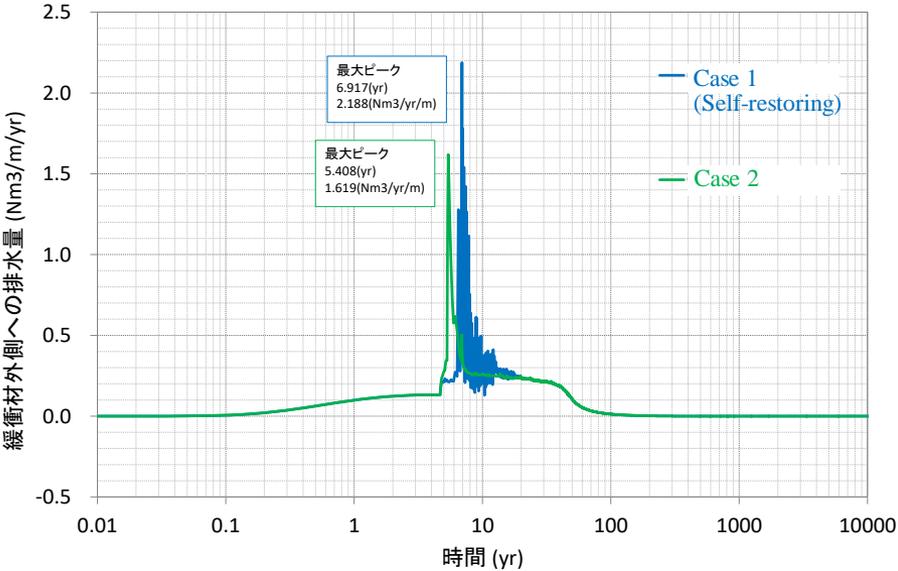
ガス移行解析



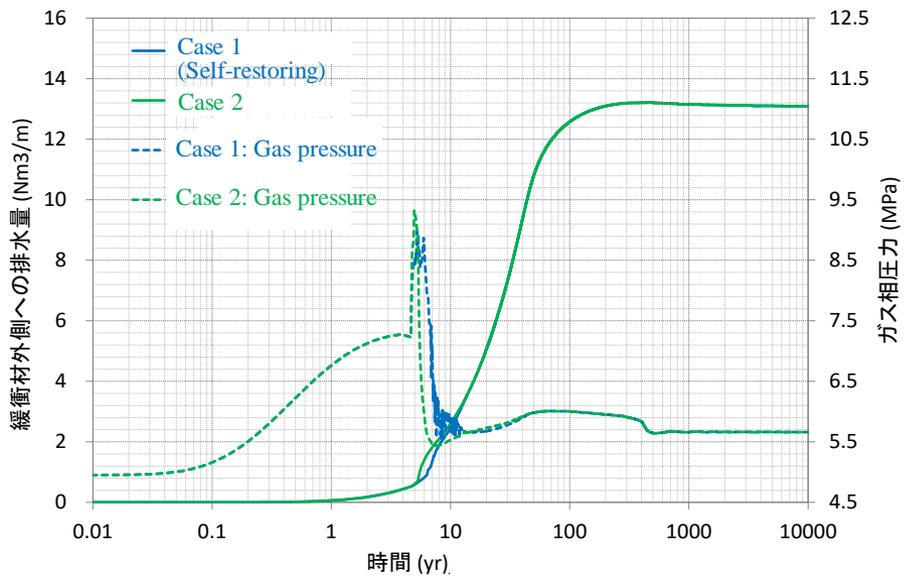
Case1
赤色:ガスによる移行経路拡張領域

Case 1(Self-restoring): 破過後にベントナイトにより自己修復性により、ガス圧低下後にガス相・水相の排水がとまるケース

Case 2: ベントナイトの自己修復性がなく、破過経路が選択的な核種移行経路として残存するケース



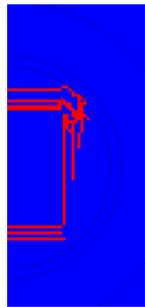
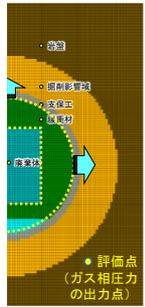
ガス発生・破過に伴う排水量



ガス発生・破過に伴うガス圧と累積排水量

発生ガスの解析評価

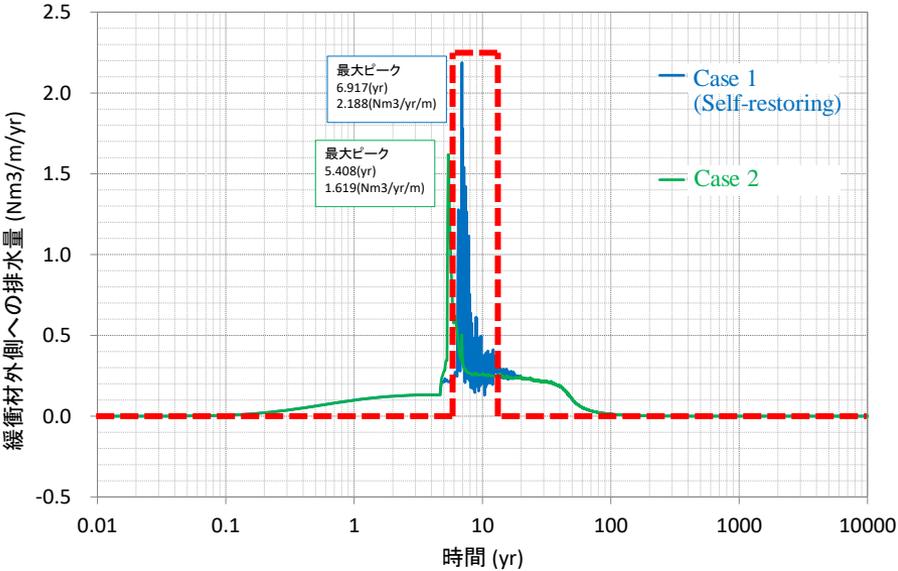
ガス移行解析による排水量の結果に基づき、放射性核種を含む汚染水の排出量を赤破線(2.2 Nm3/m/y outside the buffer for 7 years (from 6 to 13 years).)のように設定し、核種移行解析へ受け渡す。



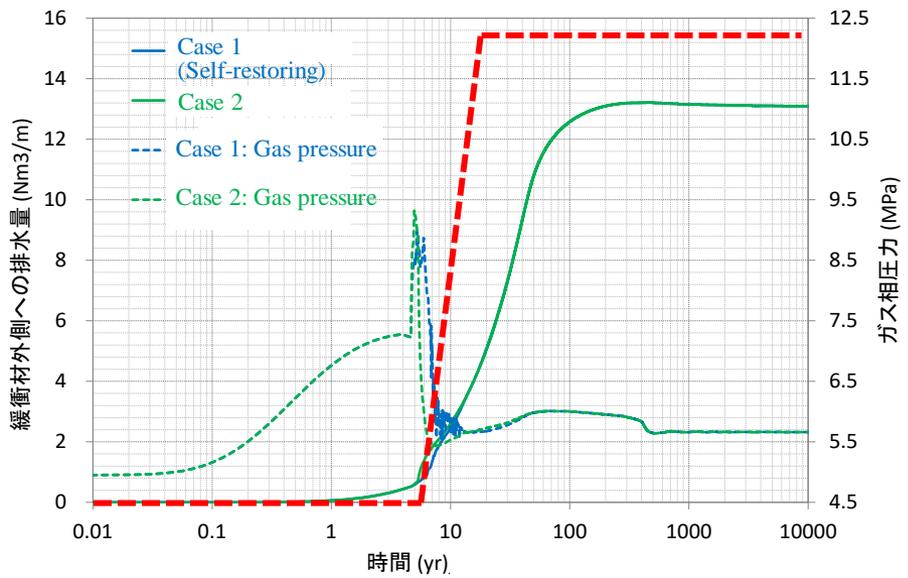
Case1
赤色:ガスによる移行
経路拡張領域

Case 1(Self-restoring): 破過後にベントナイトにより自己修復性により、ガス圧低下後にガス相・水相の排水がとまるケース

Case 2: ベントナイトの自己修復性がなく、破過経路が選択的な核種移行経路として残存するケース



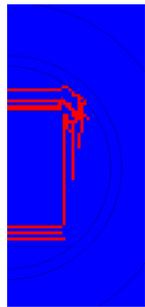
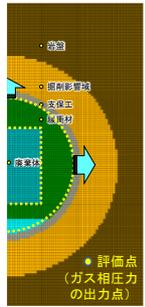
Case1 ガス発生・破過に伴う排水量



ガス発生・破過に伴うガス圧と累積排水量

発生ガスの解析評価

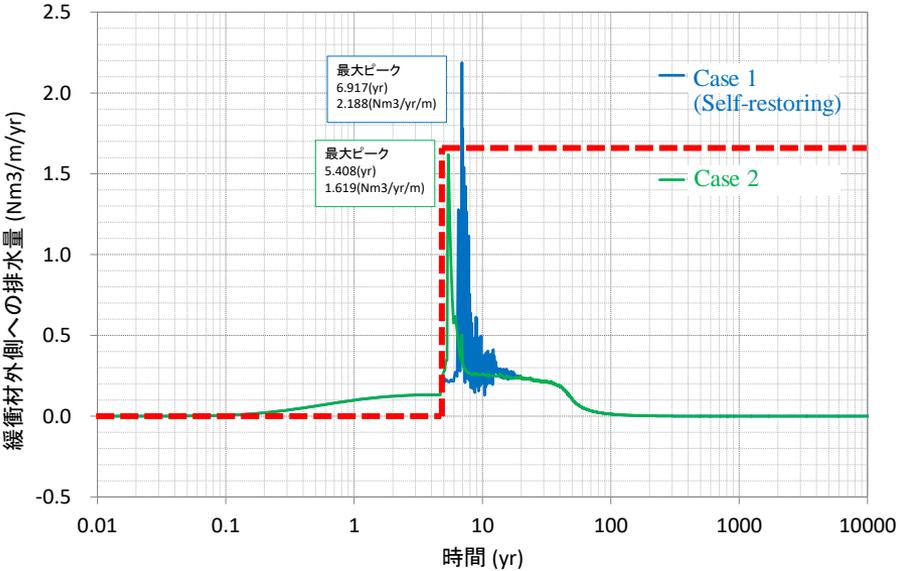
ガス移行解析による排水量の結果に基づき、放射性核種を含む汚染水の排出量を赤破線(1.6 Nm3/m/y outside the buffer after 6th year.)のように設定し、核種移行解析へ受け渡す。



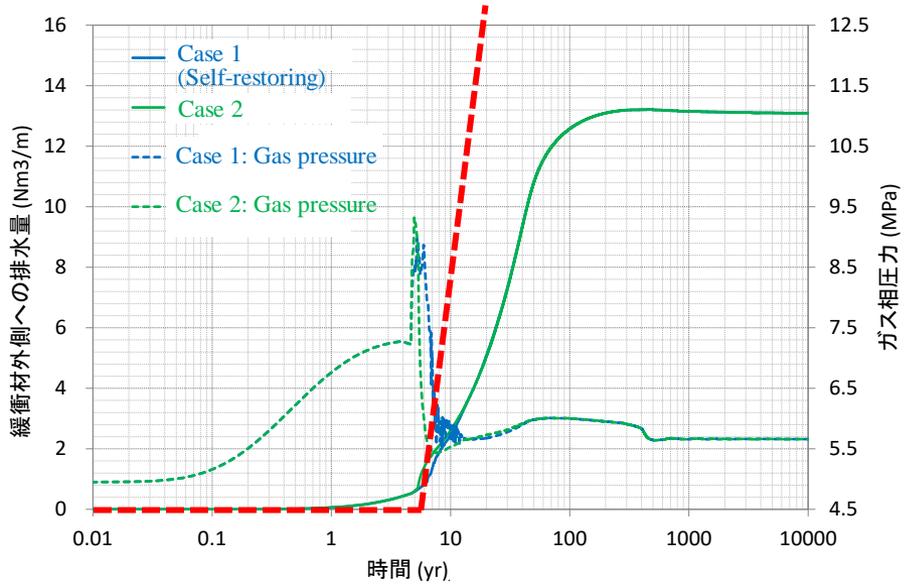
Case1
赤色:ガスによる移行経路拡張領域

Case 1(Self-restoring): 破過後にベントナイトにより自己修復性により、ガス圧低下後にガス相・水相の排水がとまるケース

Case 2: ベントナイトの自己修復性がなく、破過経路が選択的な核種移行経路として残存するケース



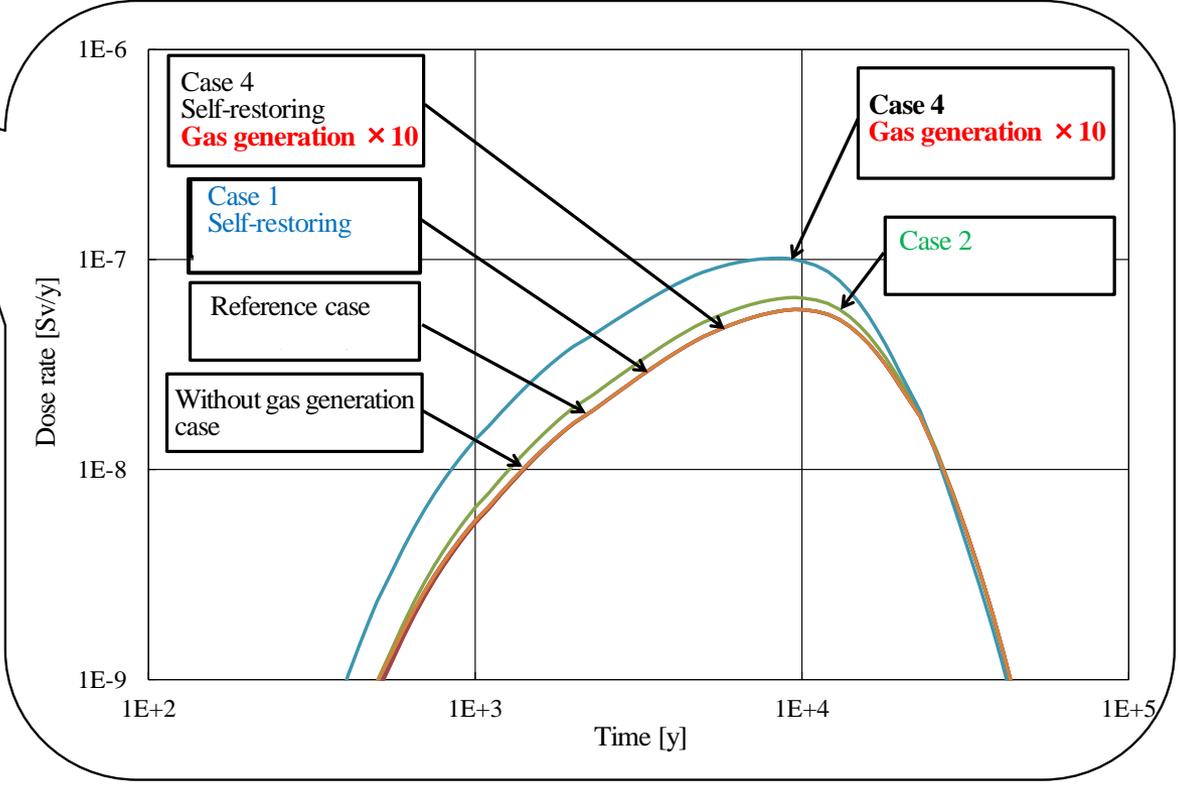
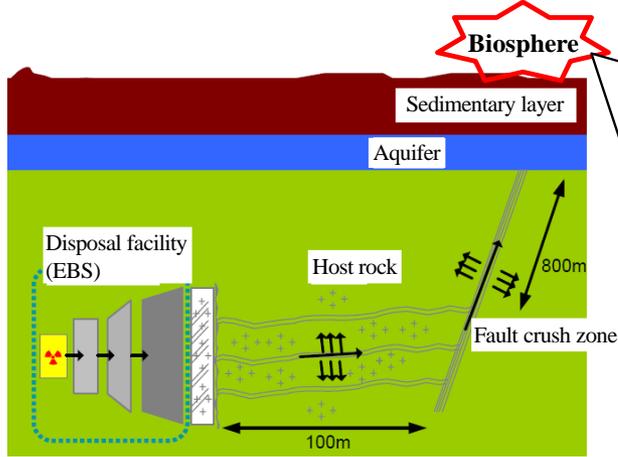
Case2 ガス発生・破過に伴う排水量



ガス発生・破過に伴うガス圧と累積排水量

発生ガスの解析評価

核種移行解析により、生物圏での線量率への発生ガスによる影響を評価。



このような発生ガスの影響評価をより精度良く実施するために、人工バリア中のガス移行(2相流としての移行パラメータ)・破過挙動及び破過後のベントナイトの自己修復性を試験で確認し、モデル化することが重要！

ガス移行挙動とそのモデル化の検討の目的

[発生ガスによる処分安全への影響]

- 施設内からのガスの蓄圧による汚染水の押出しによる核種移行および人工バリア（ベントナイト）の力学的健全性、難透水機能の低下懸念



[影響評価に必要な事項]

- ガス発生時期に対応したガス移行によるガス圧の変化・間隙水の押出し量とそれに伴う核種移行評価

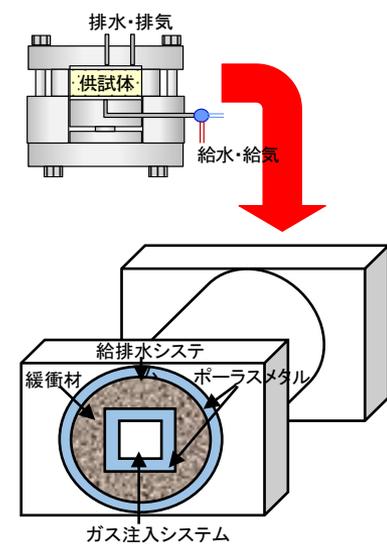
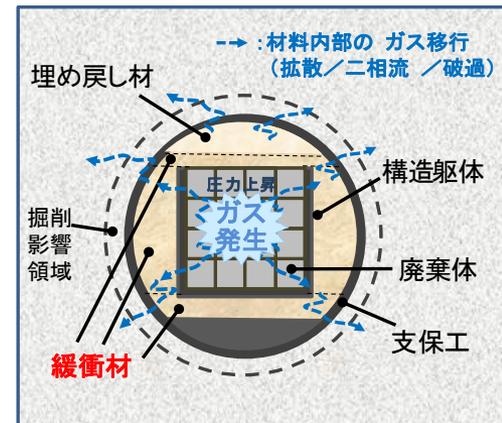


[本検討の目的]

- ◆ 処分施設構成に対応したガス・地下水移行評価モデルの高度化・解析評価
- ◆ ガス・地下水移行評価に基づく汚染水押出し水量の設定と核種移行評価

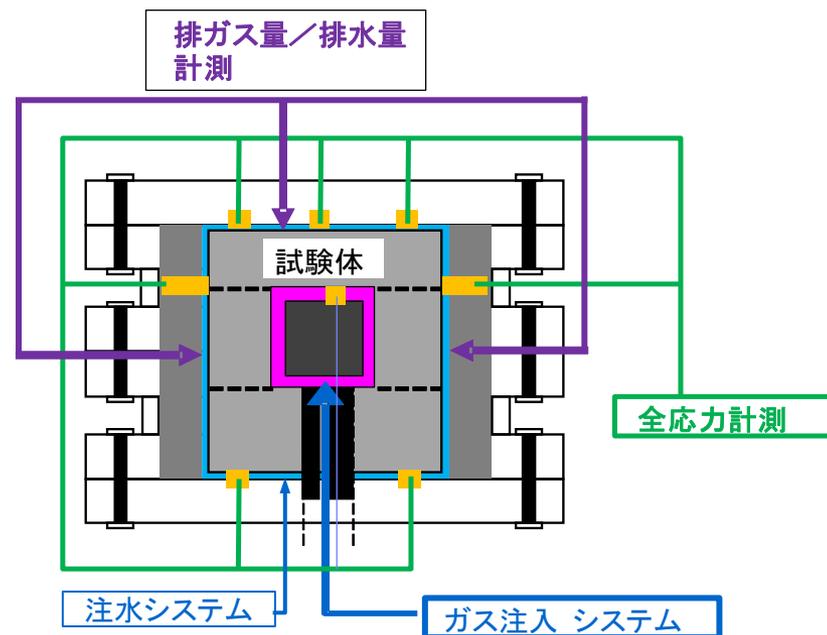
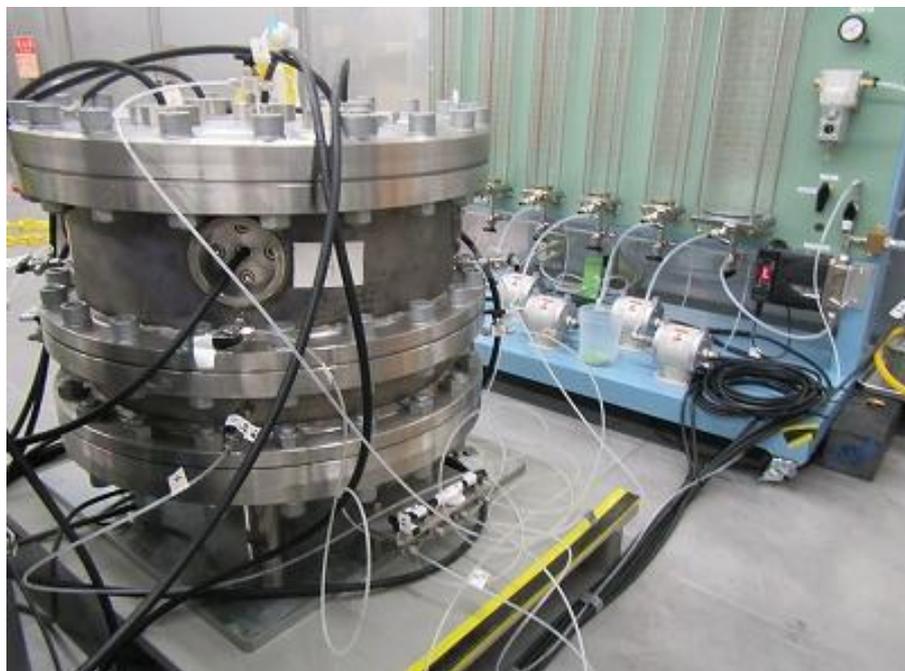
目的に向けての近年の取り組み

過去（～2017）に要素試験で取得した、人工バリア（ベントナイト材料）中のガス・水透過特性データ（二相流パラメータ）の、三次元拡大系におけるガス移行挙動評価への適用性の確認を行うとともに、再破過・自己修復現象発生時の透過特性の変化を確認する。そのために、実処分施設にて想定される透過特性への影響要因を模擬した、モックアップ試験を実施する。



モックアップ装置によるガス移行行政権

- 要素試験より取得した透過特性データ（二相流パラメータ）の、三次元拡大系におけるガス移行挙動評価への適用性の確認
- 三次元的な影響を確認できるように、実処分施設の形状的特徴を有し情報取得のための計測器設置が可能な寸法を有することと再冠水試験（試験体の飽和の確認）およびガス注入試験（ベントナイト中でのガス、水の移行挙動の確認）が、現実的な試験期間内（それぞれ概ね1年以内）で実施できることを考慮した規模で装置を構築



試験装置 高さ：550mm 幅：600mm
試験体 高さ：320mm 幅：300mm

再冠水試験～ガス注入試験における透過特性評価項目の整理

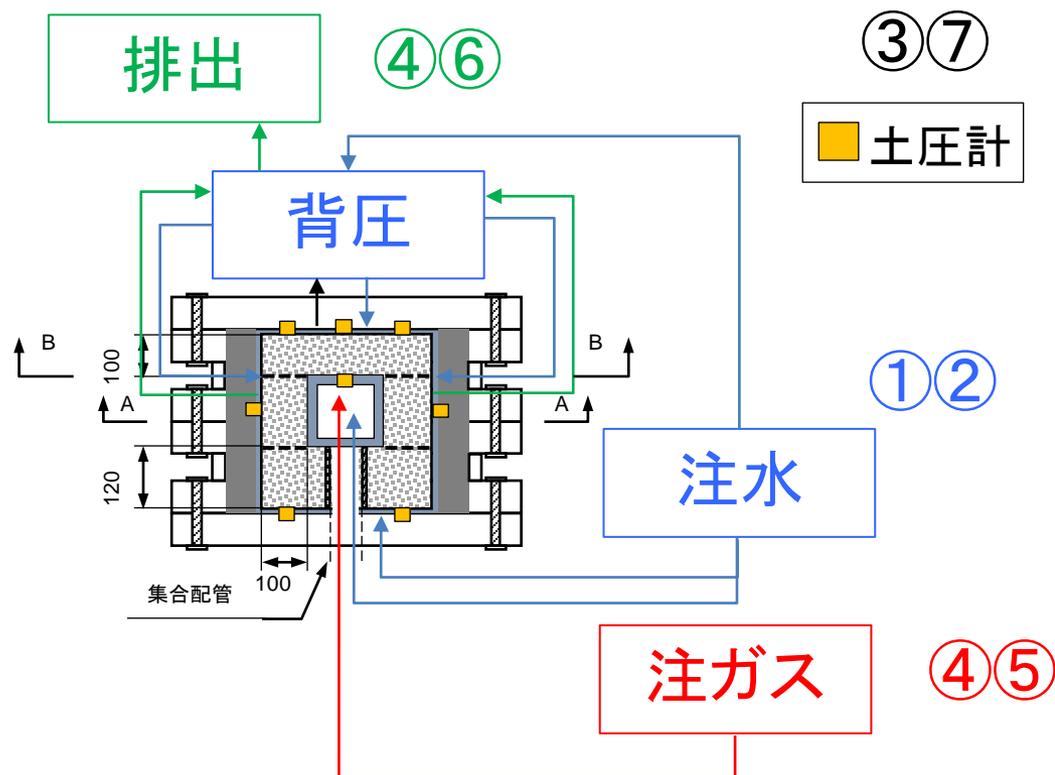
再冠水試験の
評価項目

- ① 供試体への水の注水量、注水圧の経時変化
- ② 緩衝材の飽和度の経時変化
- ③ 緩衝材の膨潤圧の経時変化

ガス注入試験の
評価項目

- ④ ガス注入量、緩衝材からのガス、水の排出量の経時変化
- ⑤ 緩衝材内でのガス圧の経時変化
- ⑥ 緩衝材の飽和度の経時変化
- ⑦ 緩衝材の膨潤圧の経時変化

モックアップ試験装置は実処分施設をもとにスケールダウンした試験となっている。ガスを中央（処分施設の廃棄体エリアに相当）から3次元的に経時的に昇圧しながら放出、背圧（NFの水圧を模擬）を周囲から注水により载荷、6面全ての計測が可能のように土圧計を設置している。



モックアップ試験の実施内容

再冠水試験（飽和）



ガス注入試験



試験体の破過



再冠水試験（飽和）



再破過試験（ガス注入）



試験体の破過



試験体の解体調査

再冠水試験により、ベントナイト試験体の飽和過程における拳動把握とガス注入試験の初期状態（飽和状態）のセッティングを行う。

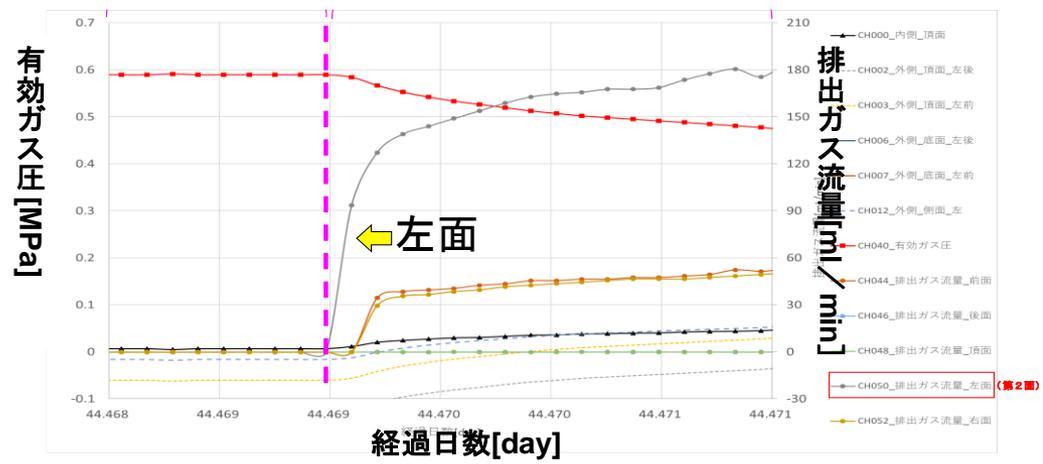
試験体の飽和を確認後、試験体へのガス注入を破過に至るまで経時的に昇圧しながら継続し、透過特性データ（気液二相流パラメータ）を取得、供試体中のガス移行拳動を評価する。

再破過試験では、一度破過を経験した供試体を再冠水させ再びガスを注入する。再冠水に伴う、ベントナイト試験体の自己修復現象の評価も実施する。

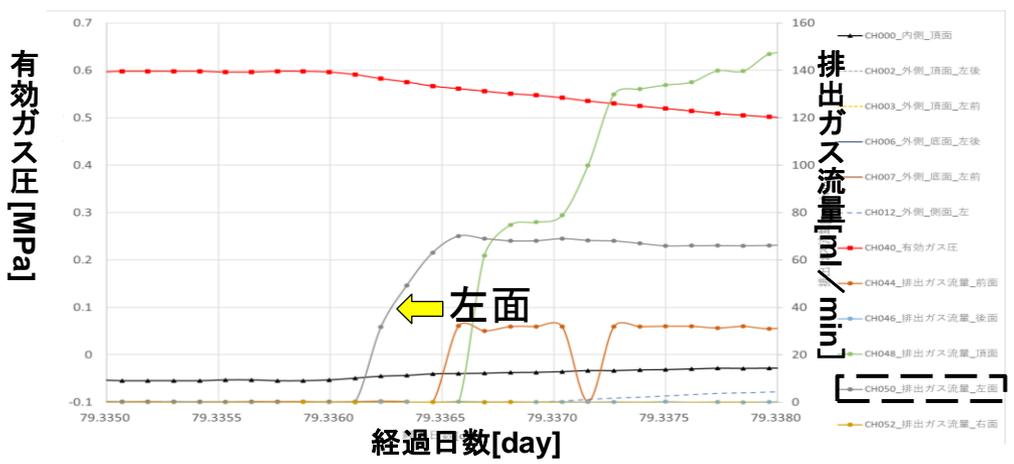
再破過後の試験体の解体調査により、破過あるいはガスの移行に伴うベントナイト試験体の状態の変化、試験体が持つ不均質性等を評価する。



ガス注入試験～再破過試験の結果（水・ガス排出挙動の変遷の整理）



一回目の試験における破過発生前後の注入ガス圧と各面からのガス排出挙動



再破過試験における破過発生前後の注入ガス圧と各面からのガス排出挙動

一回目の試験における試験体からの破過前後のガス排出挙動（上図）と再破過試験における破過前後のガス排出挙動（下図）より、どちらの試験においても、破過発生時に同一方向面（試験体左面）からのガス排出が卓越している。

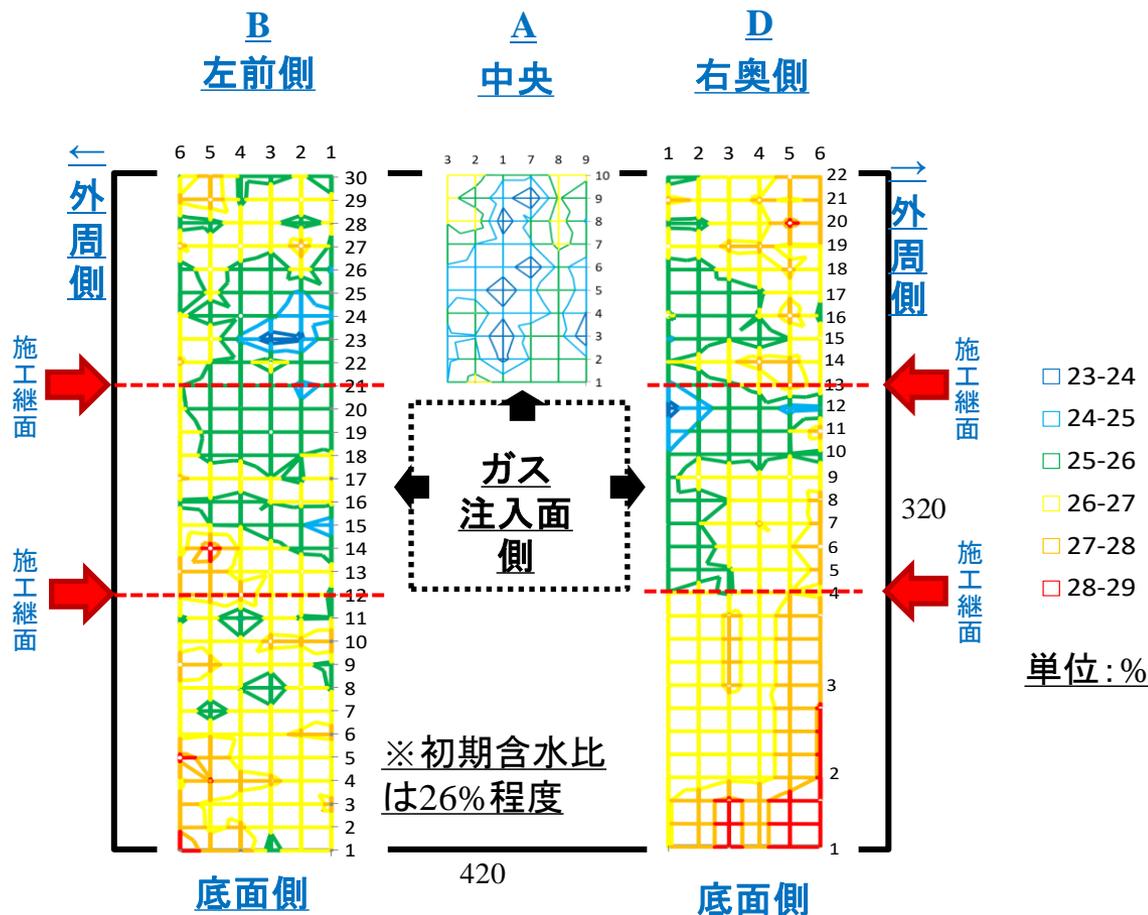
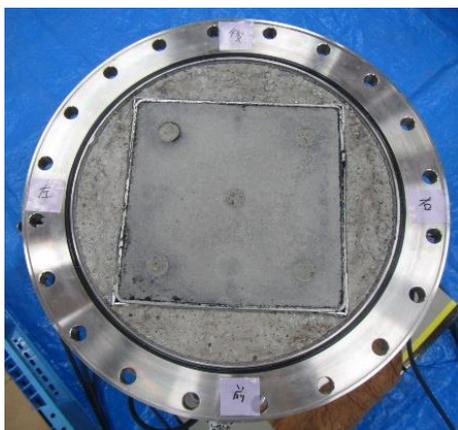
破過現象観測時の注入ガスの有効ガス圧は、要素試験のときのガス圧よりも低い結果となった。（要素試験：1.3MPa、モックアップ試験：0.6MPa）このことから現実的なガス移行挙動の評価のためには三次元的効果を考慮する必要があるといえる。

また、モックアップ試験結果に対して、一次元要素試験から得られた透過特性値をフィッティングすることにより2相流パラメータを同定した結果、一次元要素試験で得られたパラメータより、透気しやすい傾向の2相流パラメータが得られた。

モックアップ試験体の解体調査の結果(試験体の目視観察、含水比調査)

試験体頂面を目視観察し、亀裂が存在しないことを確認。

解体した試験体の含水比調査より、主要なガス移行経路となっていると考察した左面方向の含水比が相対的に小さくなっている。また、試験体下部の含水比は大きくなっている。このような現象は、ガスの移行により押し出された間隙水が重力（浮力）の影響で試験体下部に移動したためだと推定される。



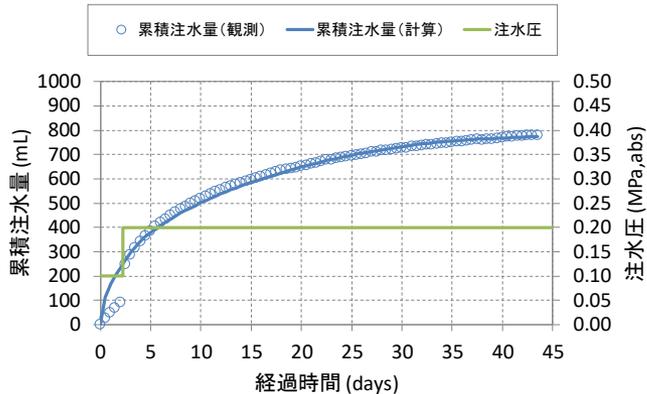
・モックアップ試験により、一次元要素試験の際には見られなかったガスや水の分布や移行挙動への三次元効果による影響が観測された。

モックアップ試験（再破過試験、解体調査）のまとめ

<p>ベントナイトの自己修復機能</p>	<p>○ガス注入試験（1回目）と同じガス圧で再破過したことから、一度破過したことが致命的な欠陥とならず、再飽和に伴うベントナイトの自己修復機能により透過性が回復したと考えられる。</p>
<p>破過の発生方向</p>	<p>○再破過試験においても、ガス注入試験（1回目）と同一の面方向から破過が発生したことから、その方向が他の方向と比較して破過が発生しやすい特性を有していたと考えられる。試験体の有する不均質性や3次元的な応力の分布に伴う透過性の違いが結果に影響していると考えられる。</p>
<p>含水比分布</p>	<p>○ガス注入試験の主要なガス移行経路の方向と解体調査の含水比調査の結果より、ガスの浸入により間隙水が押し出されて含水比が低下した方向から、ガス排出が発生していると考察。</p>

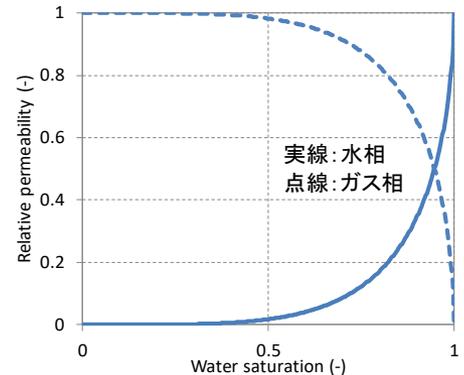
ガス移行挙動とそのモデル化

Saturation phase

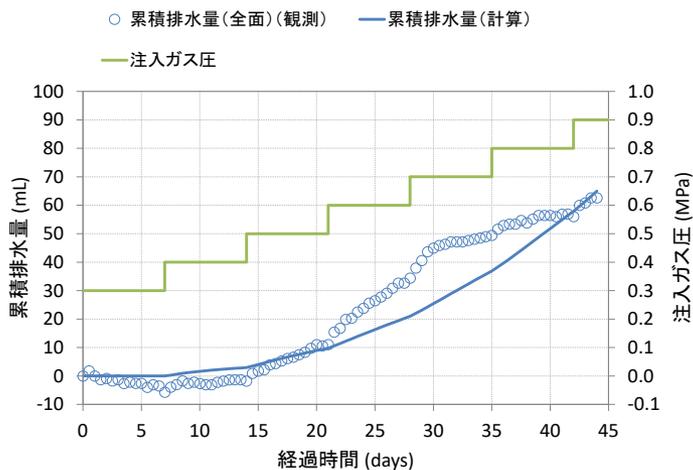


Identification of two-phase model

Relative permeability

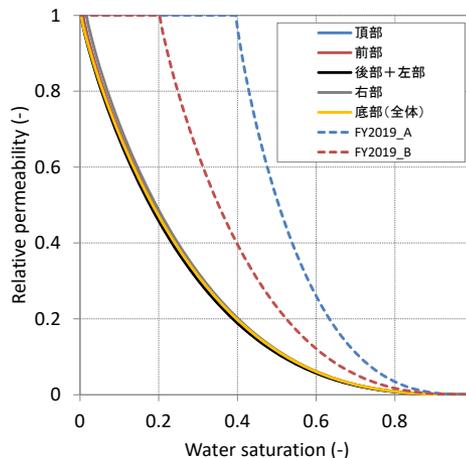


Gas injection phase

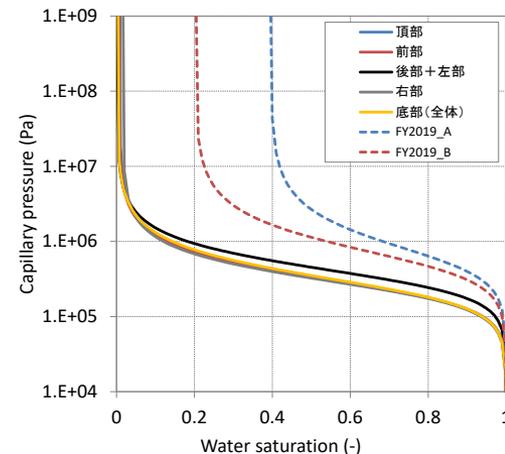


Absolute permeability : $6.36 \times 10^{-20} \sim 1.21 \times 10^{-19} [m^2]$

Relative permeability



Water retention curve



モックアップ試験結果に基づくガス移行モデルに適用する2相流パラメータの異方性については引き続き検討中。

全体のまとめ

◆ TRU廃棄物（グループ2；ハル・エンドピース）処分場でのガス発生量の評価

- 廃棄体1体当たりの放射線分解によるガス発生量は金属腐食によるものよりも多いことが見込まれる。

◆ 廃棄体パッケージ充填材を対象としたガス発生量の低減対策

- セメント系材料の放射線分解による水素ガスの発生量は、セメントや骨材の種類、配合の違いによらず、自由水量と相関があることが明らかになった。
- このことから、セメント系充填材製作の乾燥工程において自由水量を減らすことで水素ガス発生量の低減が可能である。

◆ 人工バリアのガス移行挙動とそのモデル化

- （従来の要素試験に基づく）ガス影響評価からガス発生やそれによるベントナイト自己修復性が線量率のピークに影響することが示唆され、より精度よいガス移行モデルの構築が必要。
- モックアップによるガス移行試験により、1次元要素試験に比べ破過圧が低くなることやガス相と水相の3次元的な移行挙動を確認した。2相流モデルの異方性やこのモデルに基づくガス影響評価は今後実施する予定。また、再破瓜試験では、再飽和によるベントナイト材料の自己修復性を確認した。

ご清聴ありがとうございました