



燃料デブリ処分におけるガス発生とその移行に関する予察的評価

日本原子力研究開発機構 安全研究センター 環境影響評価研究グループ

本研究は、原子力規制委員会原子力規制庁「平成27, 28年度燃料デブリの処理・処分に関する予察的調査」として実施したものである

はじめに

東京電力福島第一原子力発電所（1F）の事故で発生したα核種を多く含む燃料デブリの処分では、水の放射線分解等による発生するガスがバリア性能に与える影響が懸念される。本研究では、燃料デブリの処分環境で発生するガス発生量を評価し、オーバーパック（OP）の閉じ込め機能が腐食によって喪失するまでの期間について、OP内圧の上昇によるOP破損の可能性を評価した。また、OP閉じ込め機能喪失後に発生するガス発生量から緩衝材中のガス及び地下水の移行を評価し、緩衝材間隙水の押出しの影響を検討した。

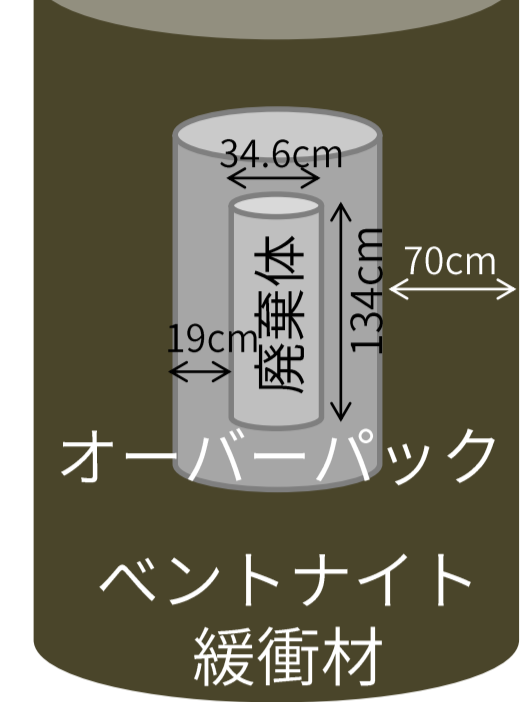
ガス発生量の評価

処分時の燃料デブリの設定

HLWと同様の処分概念を前提

- 燃料デブリ：核燃料が溶融し、被覆管や炉内構造物とともに固化したもののα線を放出する核種を多く有する
- ガラス固化せず直接円筒形の金属容器に収納して処分することを仮定
- 容器中の水分は加熱処理等によって除去されるが、最大1L程度が残存する可能性
- 金属容器のサイズ：TMI-2貯蔵容器、ガラス固化体キャニスタの仕様を参考に設定
- OPは約4000年後に金属腐食により貫通して、内部に地下水が流入

金属容器と人工バリアの設定



ガス発生要因と発生場所

	発生要因	OP内外
放射線分解	燃料デブリ中の使用済み燃料部分から発生するα線、γ線、β線、中性子線による水の放射線分解による水素ガス	内部
腐食	金属の嫌気性腐食に伴う水素ガス	内部・外部

燃料デブリのガス発生速度の評価

①水の放射線分解による水素ガス

$$VM = G \times D \times M \times C$$

VM : ガス発生速度 [m³/y]
 G : ガス発生に係るG値 [molecule/100eV]
 D : 吸収線量率 [Gy/y]
 M : 質量 [kg]
 C : 定数 [2.33×10⁻⁹ 100 eV・m³/Gy/kg/molecule]

吸収線量率の算出方法

$$D[Gy/s] = \frac{q[Bq]}{m[kg]} \times I[(崩壊/s)/Bq]$$

α・β線 $\times E[MeV/崩壊] \times 1.6 \times 10^{-13} [J/MeV]$

放射線分解によるG値			
G値	γ線・β線	中性子線	α線
H ₂	0.5	1.12	1.5

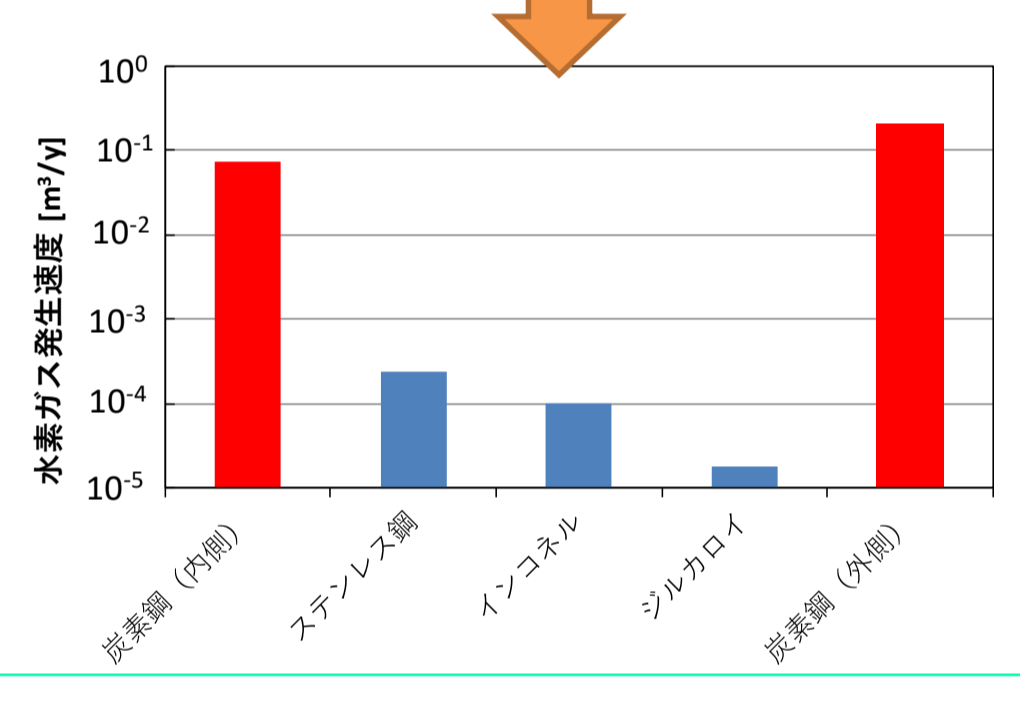
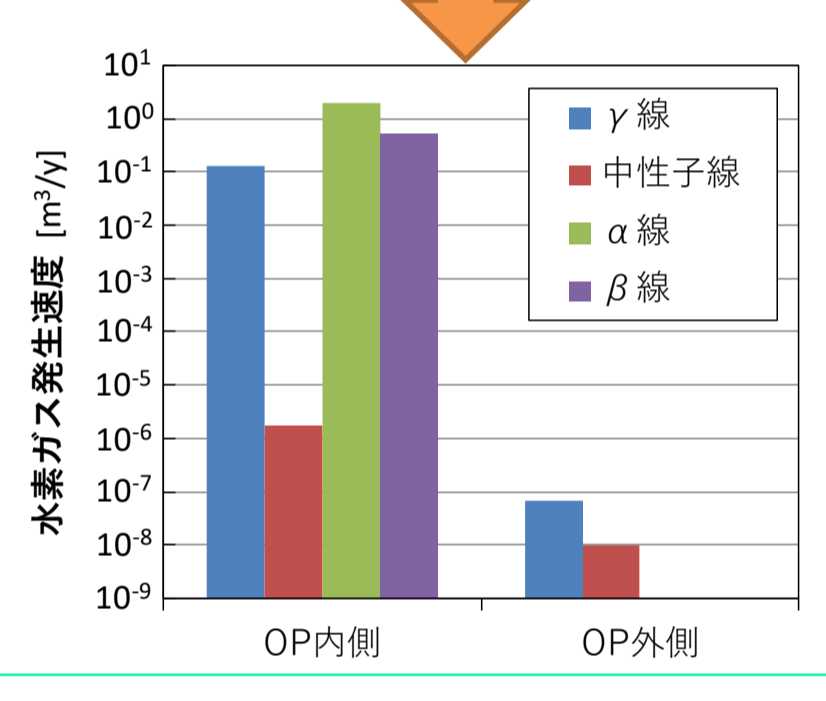
②金属腐食に伴う水素ガス

$$R_{H_2} = A_{mi} C_{mi} \rho_{mi} \frac{r_{mi}}{M_{mi}} \times \frac{22.4}{1000}$$

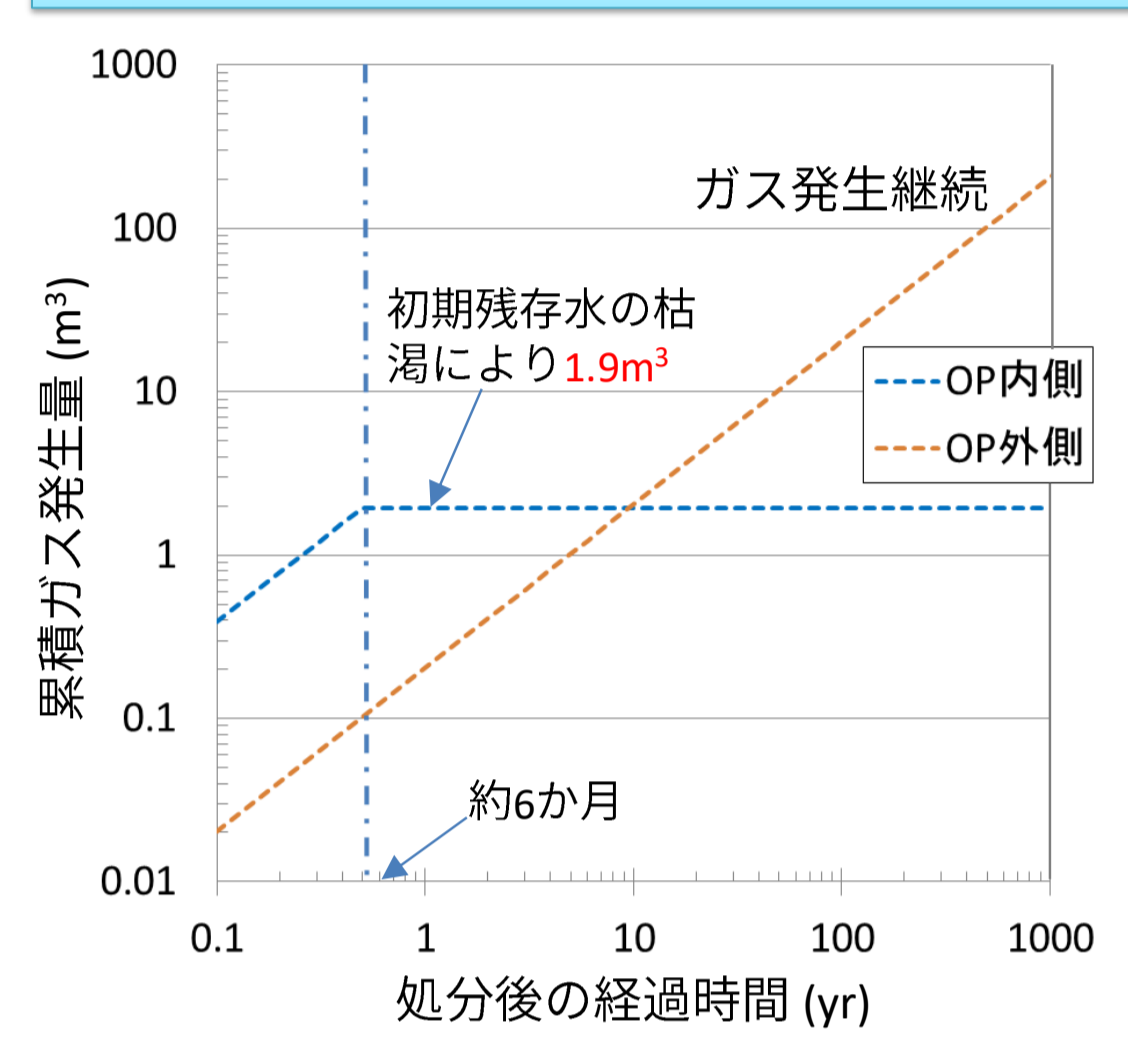
R_{H₂} : 金属iによるH₂ガス発生速度 [m³/y]
 A_{mi} : 金属iの表面積 [m²]
 C_{mi} : 金属iのガス発生等価腐食速度 [m/y]
 ρ_{mi} : 金属iの密度 [kg/m³]
 M_{mi} : 金属iの原子量 [g/mol]
 r_{mi} : 金属iからのH₂発生mol比 [-]

還元環境での金属腐食反応

金属	反応式	腐食速度 [m/y]
炭素鋼		1×10 ⁻⁵
ステンレス鋼	3Fe + 4H ₂ O → Fe ₃ O ₄ + 4H ₂	2×10 ⁻⁸
インコネル		
ジルカロイ	Zr + 2H ₂ O → ZrO ₂ + 2H ₂	5×10 ⁻⁹



累積ガス発生量とOP早期破損可能性の検討



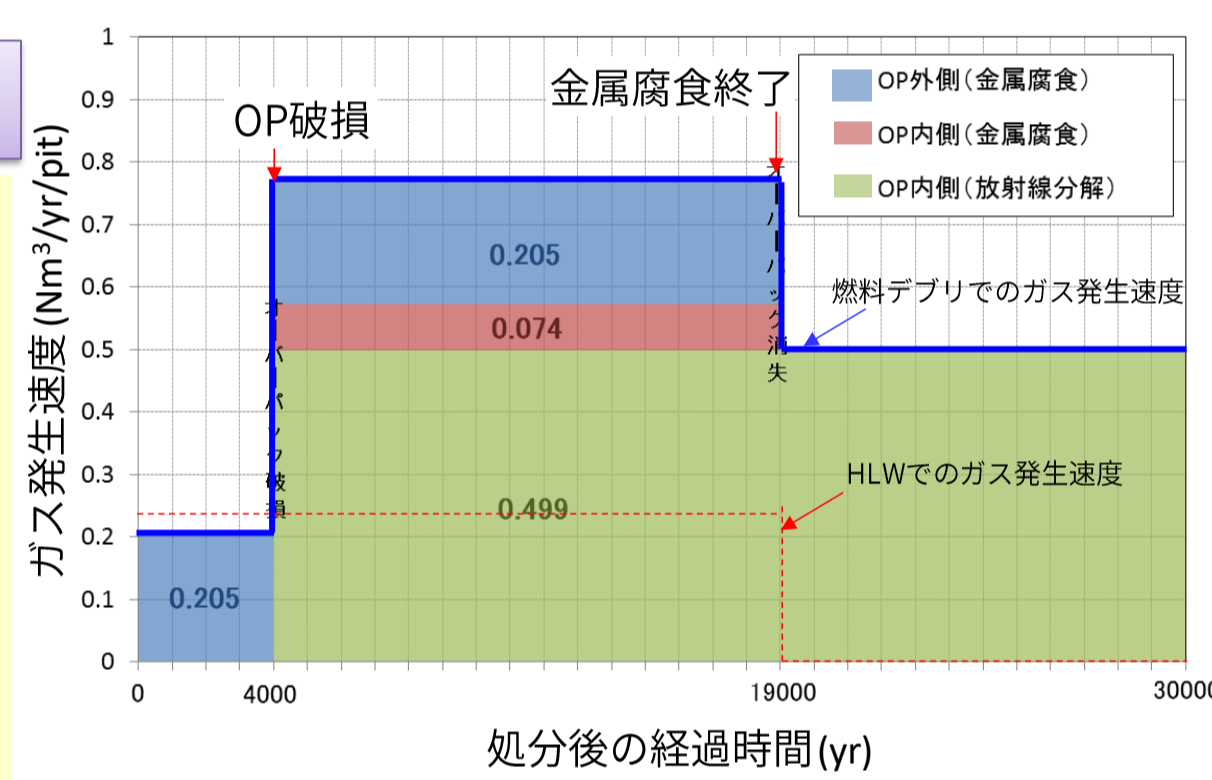
OP内圧 累積ガス量：1.9m³
 ↓ 燃料デブリ充填率：90%
 ↓ ガス蓄積圧力：約14MPa

設計圧力 炭素鋼厚さ15cm (腐食しろ4cmを除く)
 ↓ 設計圧力：約55MPa

ガス発生によるOP早期破損の可能性は小さい

総ガス発生速度の時間変化

- OP閉じ込め機能喪失以後、OP内部に地下水が侵入することにより、OP内側で水の放射線分解によるガス発生が再開し、長期間継続する
- OPは19,000年後にすべての金属が腐食しつくして、金属腐食による水素ガス発生が終了



ガス移行評価

- OP機能喪失後に再開するガス発生により、内圧が上昇して緩衝材の機能に与える影響を評価
- ベントナイト中に局所的に空隙が生成されることを考慮したモデルの有無による影響を評価

二相流を対象とした汎用コードGETFLOWSを用いた解析

二相流解析の基礎式

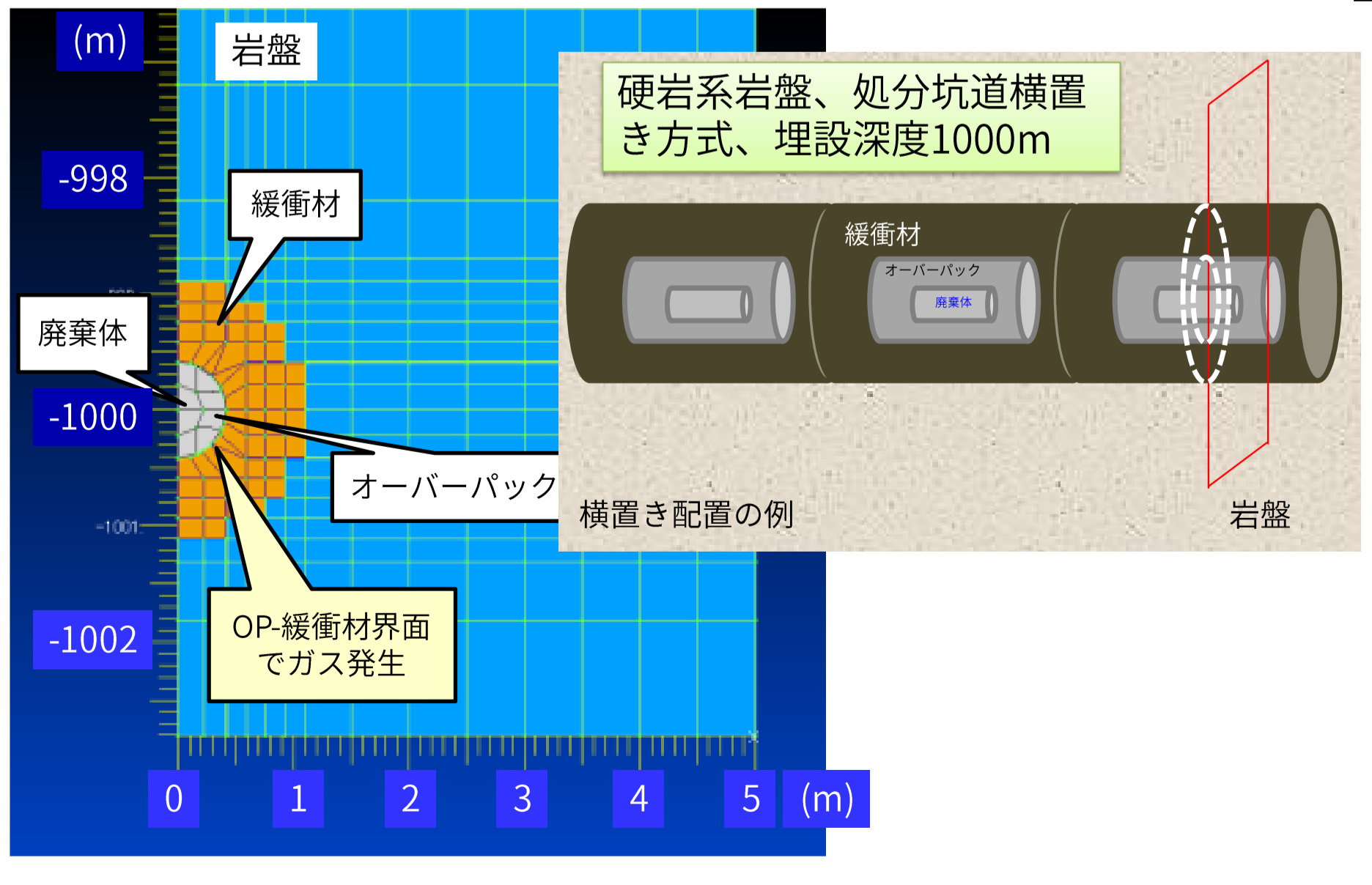
水相w $-\nabla \cdot \left(-\rho_w \frac{K_w k_{rw}}{\mu_w} \nabla \psi_w \right) - \rho_w q_w = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w s \phi S_w)$

ガス相g $-\nabla \cdot \left(-\rho_g \frac{K_g k_{rg}}{\mu_g} \nabla \psi_g \right) - \rho_g q_g = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g s \phi S_g)$

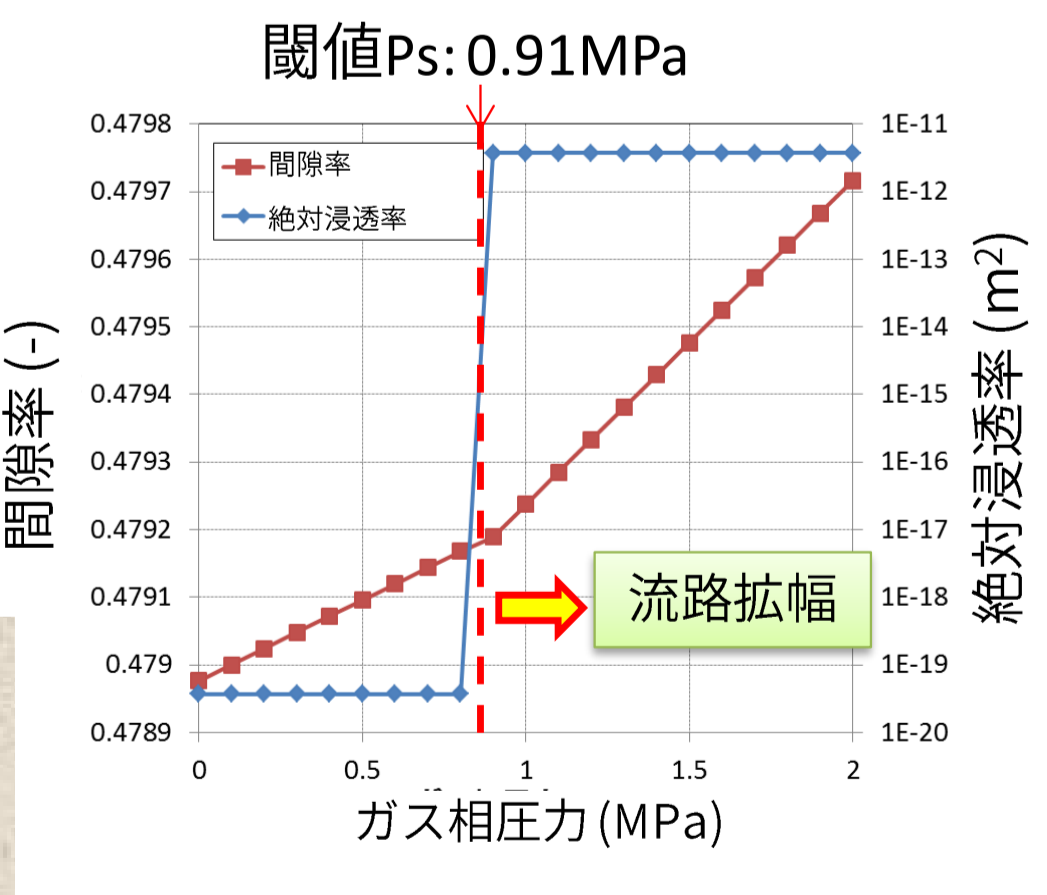
K: 絶対透率 k: 相対透率 S: 飽和度 μ: 粘性係数 φ: 有効空隙率
 ψ: 水理ポテンシャル

積分型有限差分法による空間離散化

緩衝材円柱断面を円形状に2次元モデル化



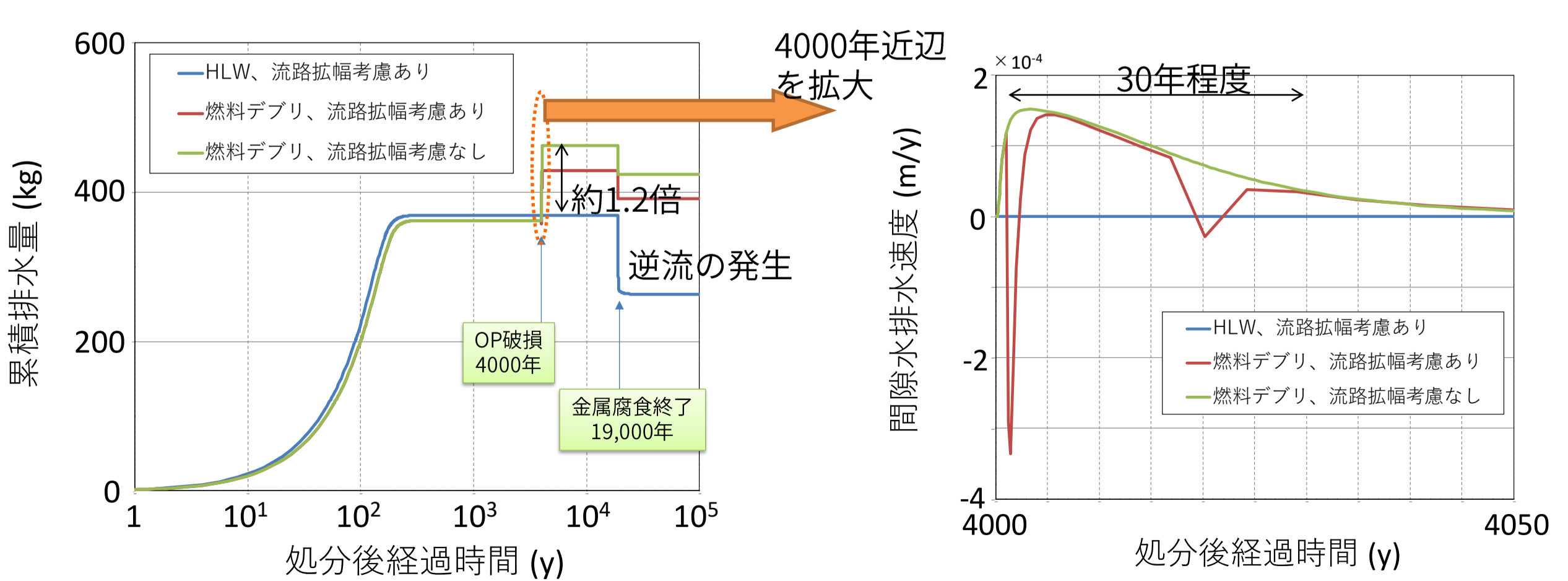
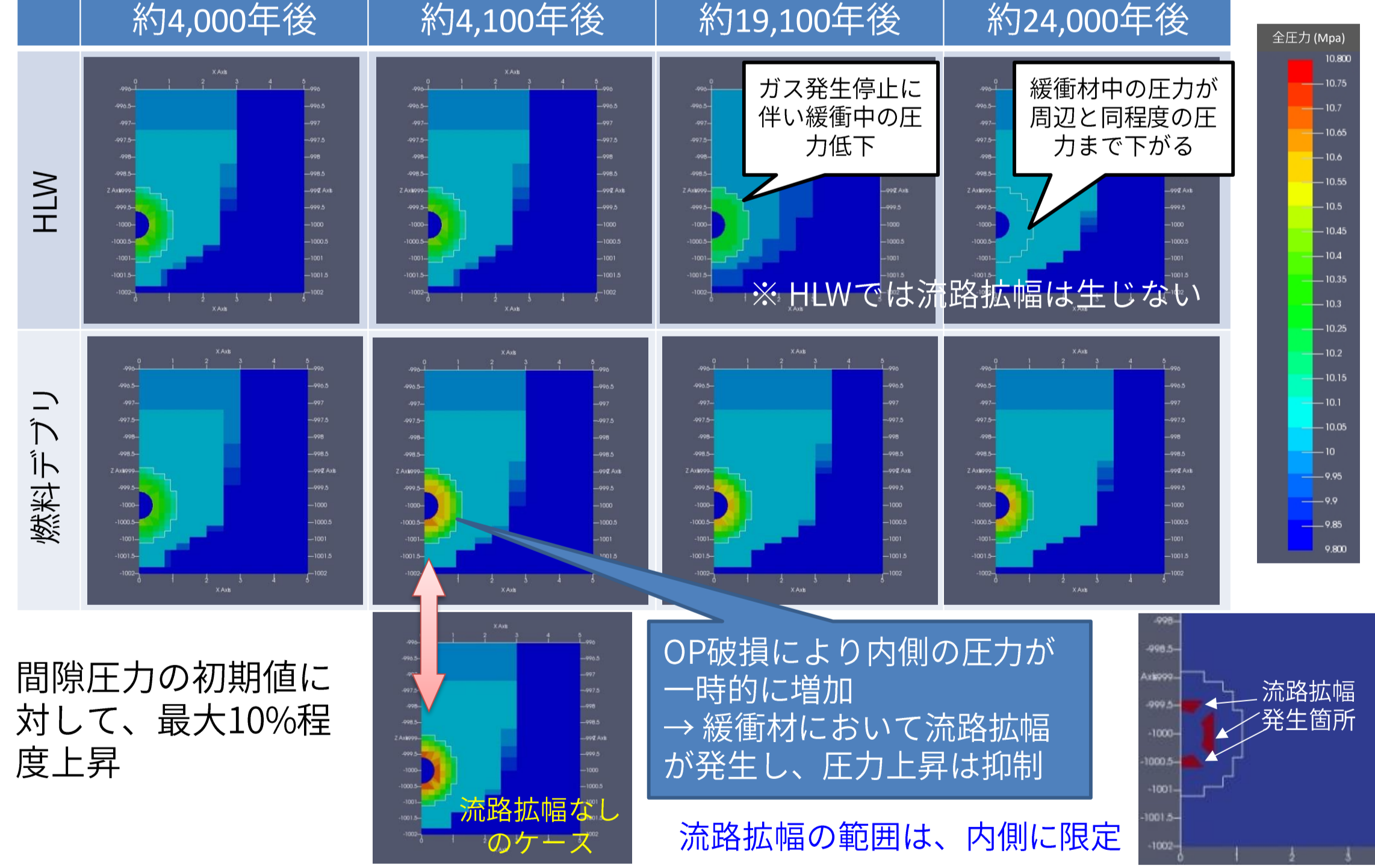
流路拡幅
 内圧上昇が閾値を超えると空隙率と浸透率が急激に上昇



空隙損傷モデルを用いて流路拡幅による空隙率及び透水性の増大を疑似的に評価

解析結果

人工バリア周辺の圧力分布の比較 (HLWとの比較)



まとめ ガス発生

- 放射線分解（特にα線）が主で、金属腐食のガス発生速度に比べて大きい
- 燃料デブリの残存量が限定的であればOP早期破損の可能性は低い
- 約4000年後にOP機能が喪失した後は、地下水が容器内に無制限に流入するため、水素ガスが発生して、緩衝材機能へ影響を与えるおそれ

燃料デブリの残留水を数L以内に抑制すれば、OPは早期に破損しない

ガス移行

- OP機能喪失する4000年近辺で緩衝材からの排水量がHLWよりも1.2倍程度増加
- 流路拡幅の効果を考慮すると増加は1.1倍程度に収まる
- 上昇する排水速度の継続期間はOP機能喪失後30年程度であり、処分の時間スケールと比較して短い

燃料デブリのガス発生に伴う間隙水の岩盤へ押出しの影響は限定的と示唆