

シンビオ研究会 (2020, 10, 29)

地層処分に資する岩盤工学に 係る基礎技術開発

京都大学大学院工学研究科

都市社会工学専攻

岸田 潔

京都
大学

KYOTO UNIVERSITY



目次

1. 試験空洞建設（処分空洞設計施工特別委員会：2003年度から2005年度）と調査研究
2. 大土被り地下空洞の開発に係る技術的課題
3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築

1. 試験空洞建設と調査研究

- ▶ 処分空洞設計施工特別委員会：2003年度から2005年度
- ▶ 余裕深度処分のための試験空洞の建設
- ▶ 廃棄物処分の基本的な考え方

地下水による放射性物質の移動

放射性物質が地下水を介して移動し、飲料水や食物として生活環境にあらわれることにより発生する影響

人間活動による放射性核種への接近

管理期間終了後、一般的な地下利用により、放射性物質と人間が接触することによる影響

次期埋設の対象となる廃棄物

一般的な地下利用に十分余裕を持った深度に処分することの効果

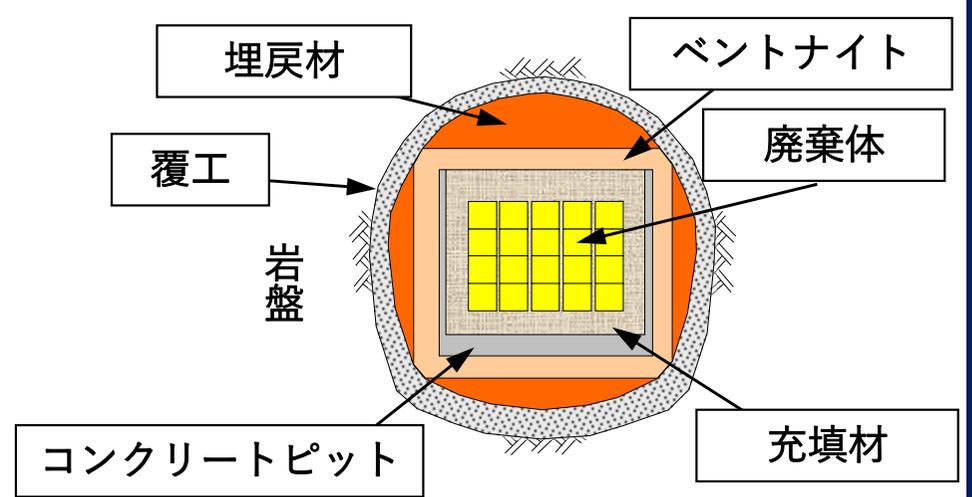
地下水が動きにくい場所を選び、人間の生活環境にあらわれるまでの時間と距離を十分にとることで、放射能の減衰を待つことができる

高層ビルや地下鉄建設などの一般的な地下利用は50m程度までの深さであるので、これより深いところに処分することで、人間との接触を防ぐことができる

安全性の確保

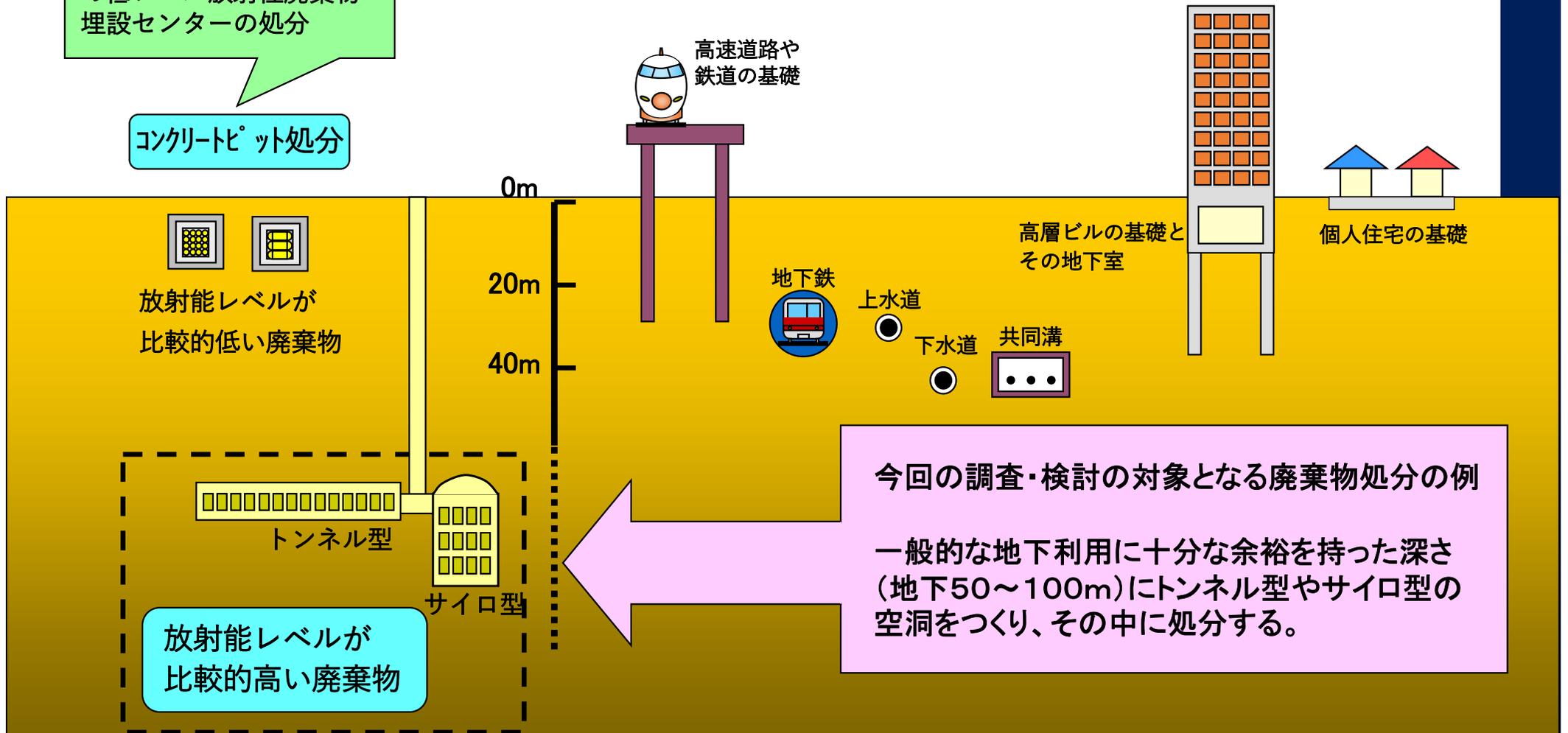
1. 試験空洞建設と調査研究

➤ 処分場の概念と試験空洞断面図



現在、六ヶ所村で作業中の低レベル放射性廃棄物埋設センターの処分

コンクリートピット処分



1. 試験空洞建設と調査研究

➤ 地下施設の要求性能と技術的課題

地下施設の要求機能

[空洞安定性評価]

- 多くの廃棄物を収納でき、人工バリアを構築できる地下空洞を設けること。

[人工バリア性能評価]

- 人工バリアが高い遮水性能を発揮し、長期に亘って安定であること。

[天然バリア性能評価]

- 周辺岩盤の天然バリアとしての性能[核種移行遅延性能]を適切に評価できること

土木工学に関する主要技術課題

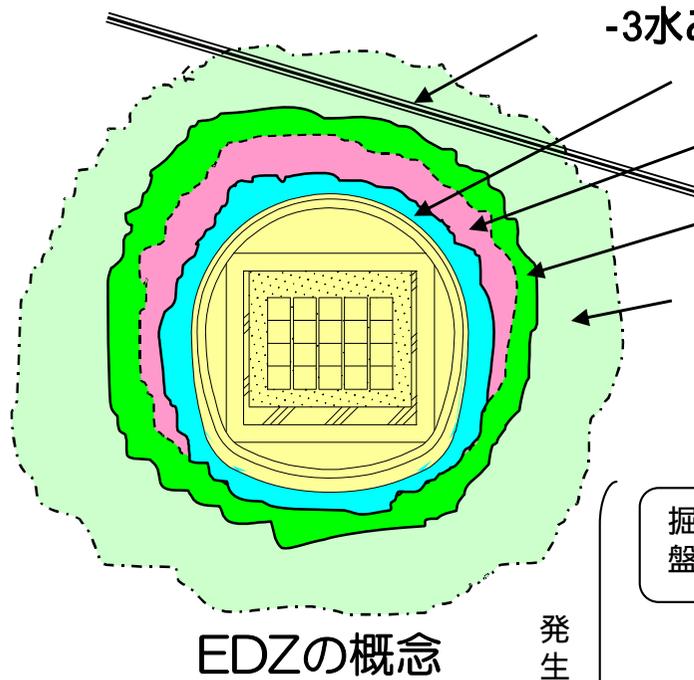
- 大断面の地下空洞の設計・施工
- 長期空洞挙動予測手法の確立および検証
- 掘削影響領域の力学特性評価

- 遮水性能に優れ、長期間安定な材料の開発
- 長期安定性評価手法の確立
- 合理的な施工方法(高線量下での施工を含む)

- 天然バリア性能の調査・評価手法の確立および検証
- 掘削影響領域の水理・地化学特性評価

1. 試験空洞建設と調査研究

➤ 空洞掘削に伴う掘削影響領域の評価



-3水みちとなる割れ目の開閉

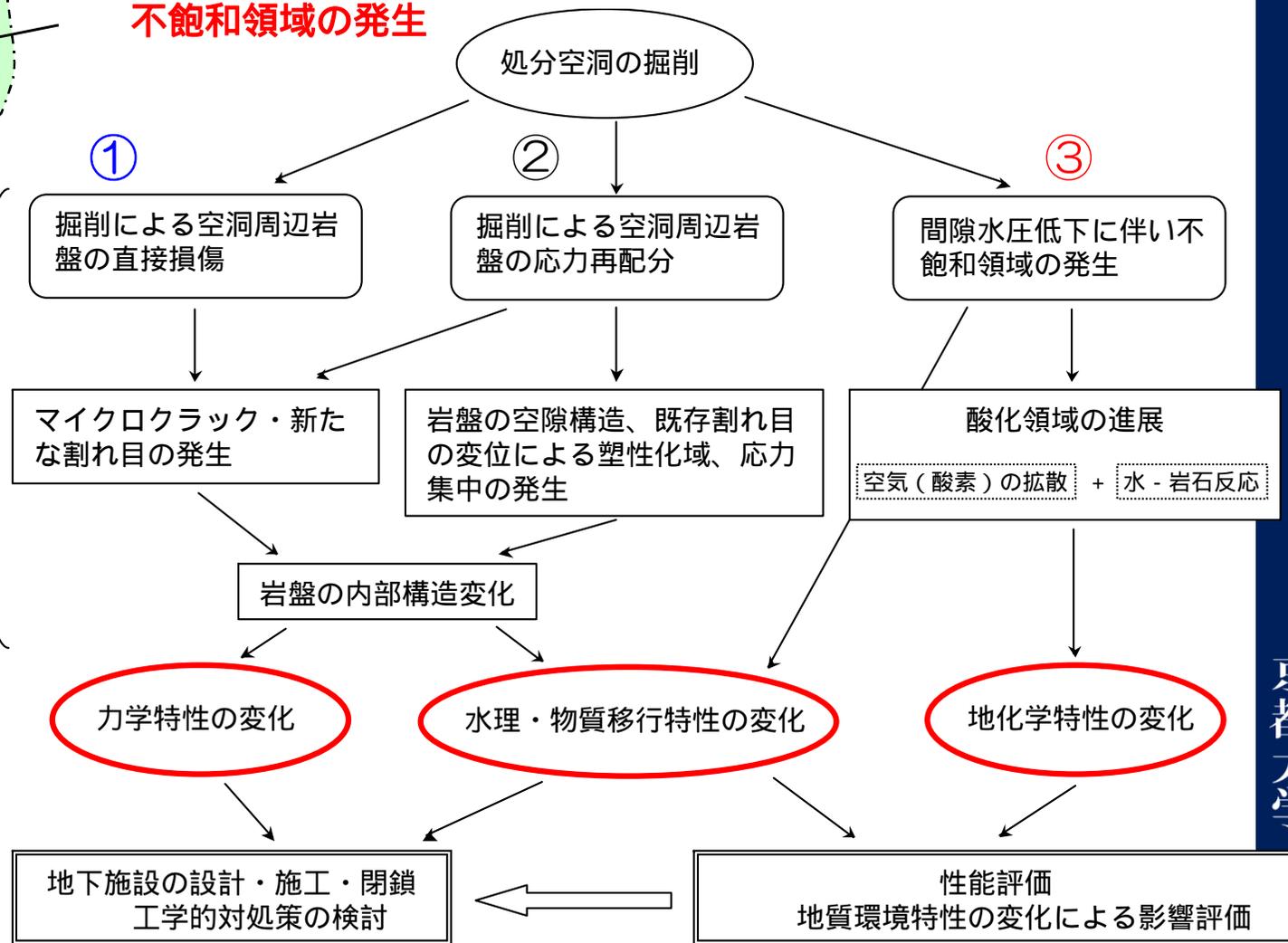
掘削時の衝撃による岩盤の損傷領域

-1応力再配分による岩盤の塑性変形領域

-2応力再配分による岩盤の弾性変形領域

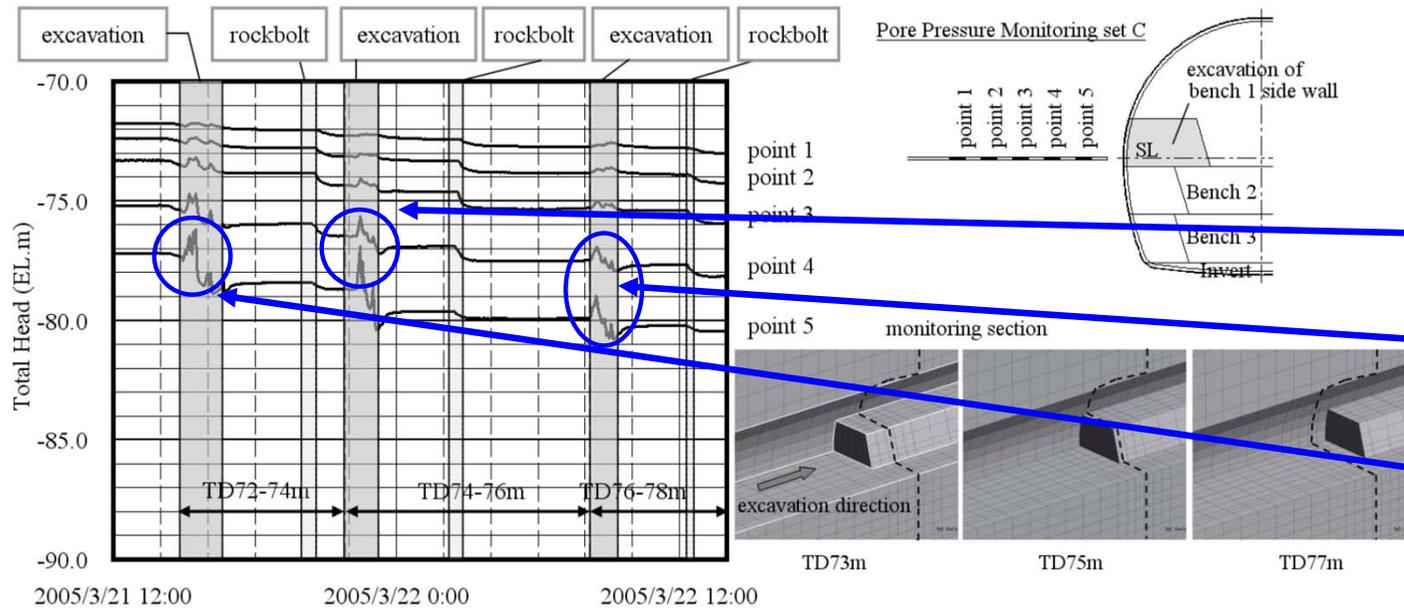
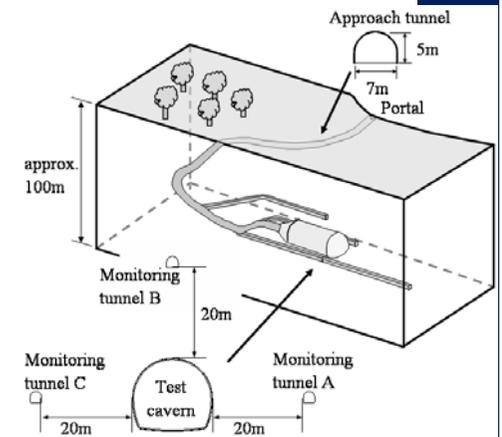
不飽和領域の発生

発生する事象



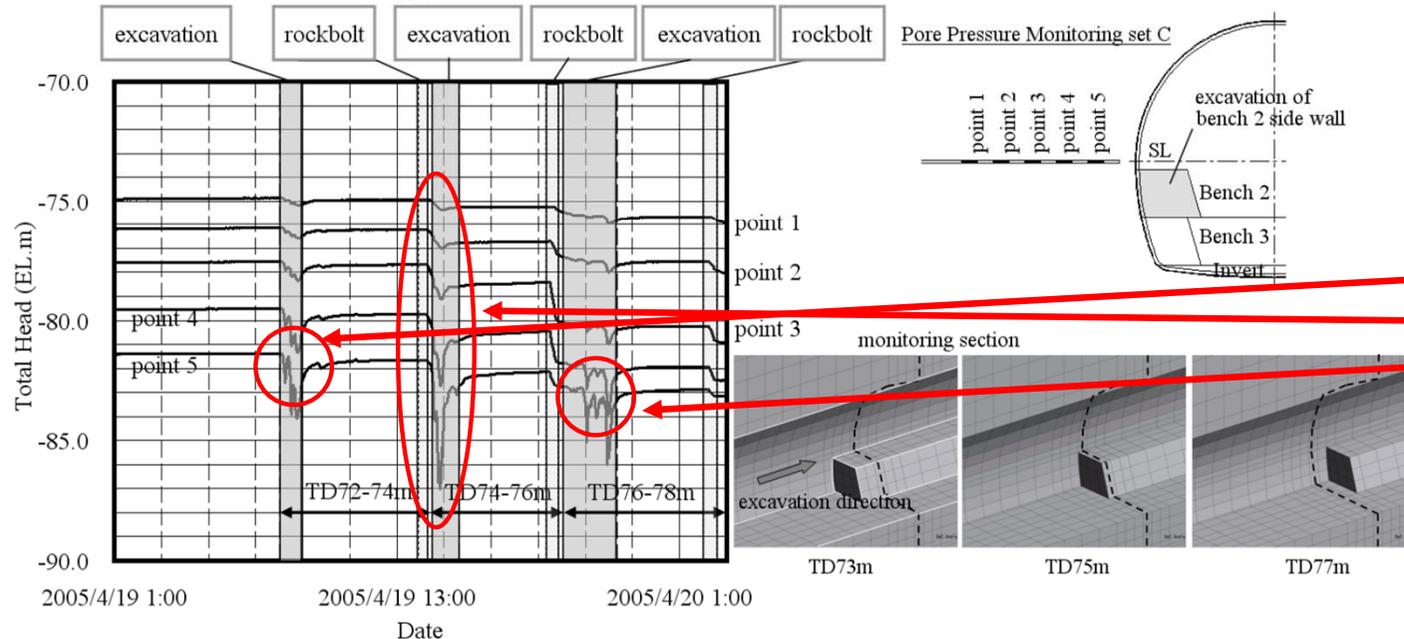
1. 試験空洞建設と調査研究

▶ 試験空洞掘削時の間隙水圧の計測



Bench 1を掘削すると間隙水圧が一時的に上昇。すぐに間隙水圧は徐々に減少。掘削終了時には、掘削前よりやや低下。

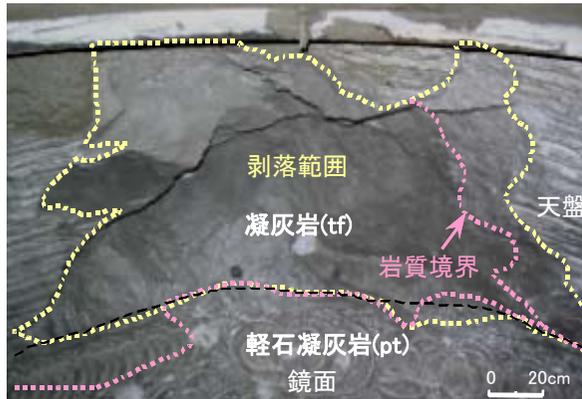
土-水連成解析



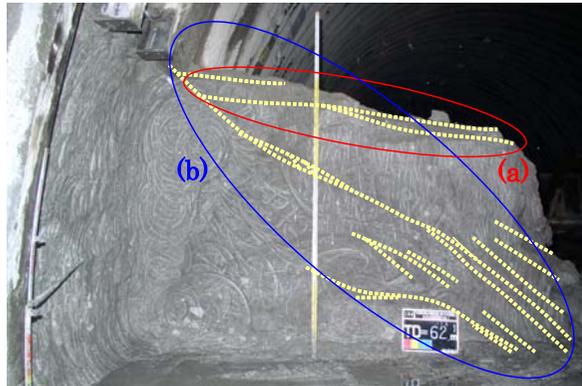
Bench 2を掘削すると間隙水圧が一時的に低下する。すぐに間隙水圧は回復。掘削終了時には、掘削前よりやや低下。

1. 試験空洞建設と調査研究

➤ 低拘束圧下での堆積岩の挙動

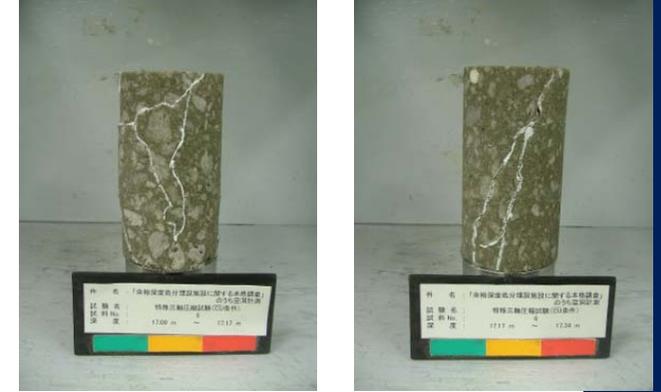


天端付近の剥落状況



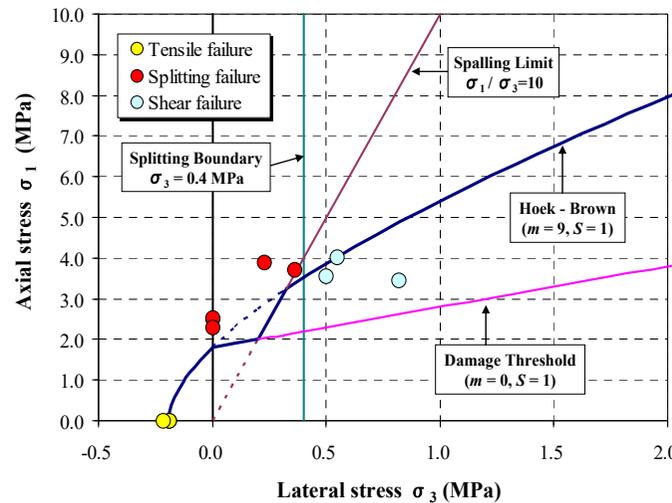
側壁ブロックのき裂

- ① BTVや弾性波による掘削影響領域の調査
- ② 周辺応力の測定
- ③ 材料試験による破壊規準の検討
- ④ 空洞周辺の応力状態と破壊規準



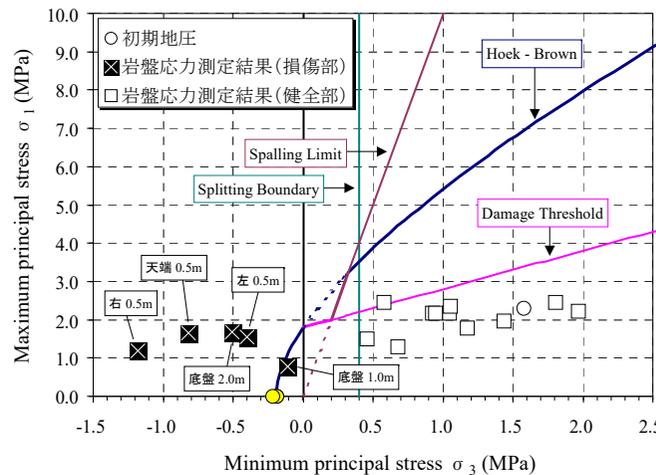
Splitting破壊
($\sigma_3 = 0.23\text{MPa}$)

せん断破壊
($\sigma_3 = 0.82\text{MPa}$)



室内実験より

- Hoek-Brownの破壊規準を援用
- マイクロクラックの発生の閾値を $m = 0.0, s = 0.11$ とする。
- 低拘束圧条件では、最大主応力方向に沿ってき裂が発生し、それらが結合してSpalling破壊を生じている。

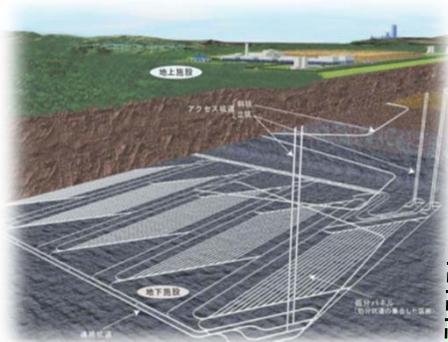


計測データをプロット

- 多くの計測地点でマイクロクラックの発生限界以下
- 破壊地点は引張で破壊。
- BTV観察では、アーチ部で1.0 m, 側壁で0.4 m, インバート部で1mまではクラックを観察

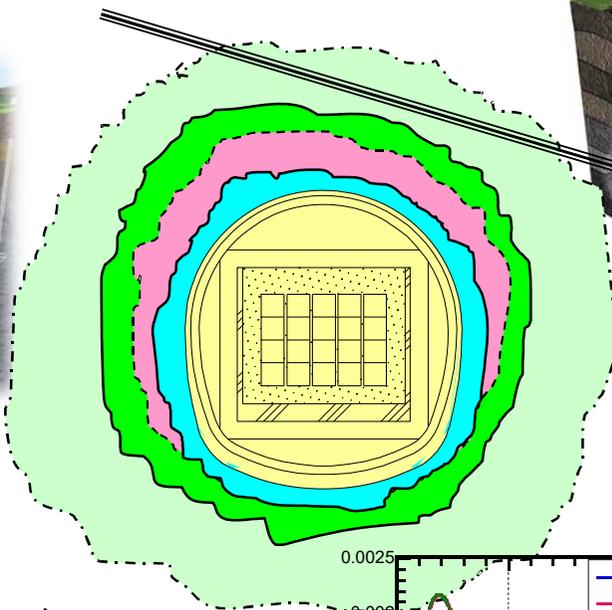
2. 大土被り地下空洞の開発に係る技術的課題

放射性廃棄物
地層処分

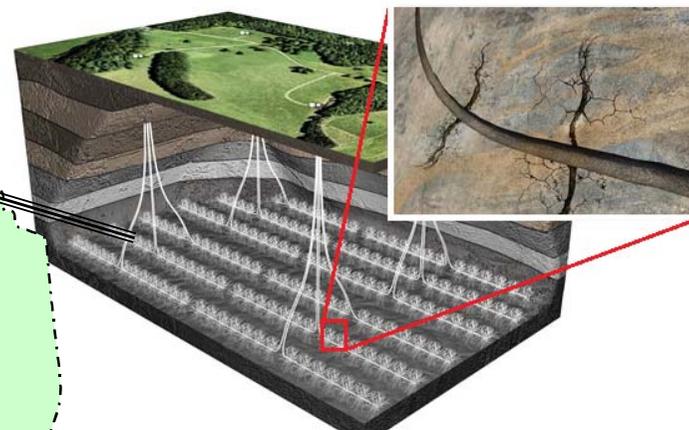


出典：NUMO

CO₂地中貯留



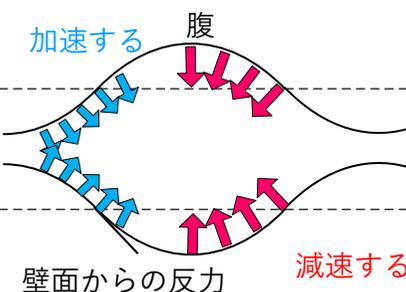
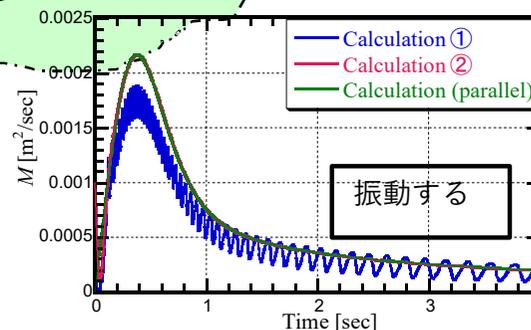
出典：statoil



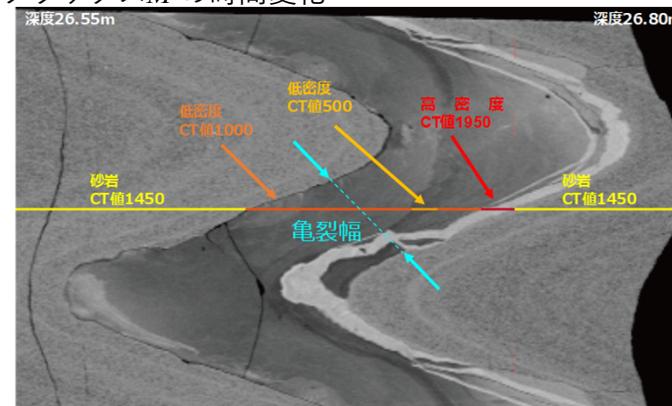
地熱EGS

シェールガス採取

- ① 不連続性岩盤の構成モデル
- ② 熱・拘束圧条件下での不連続面における透水性の長期評価
- ③ THMC連成解析シミュレータの開発
- ④ トンネル掘削問題
- ⑤ グラウト浸透挙動



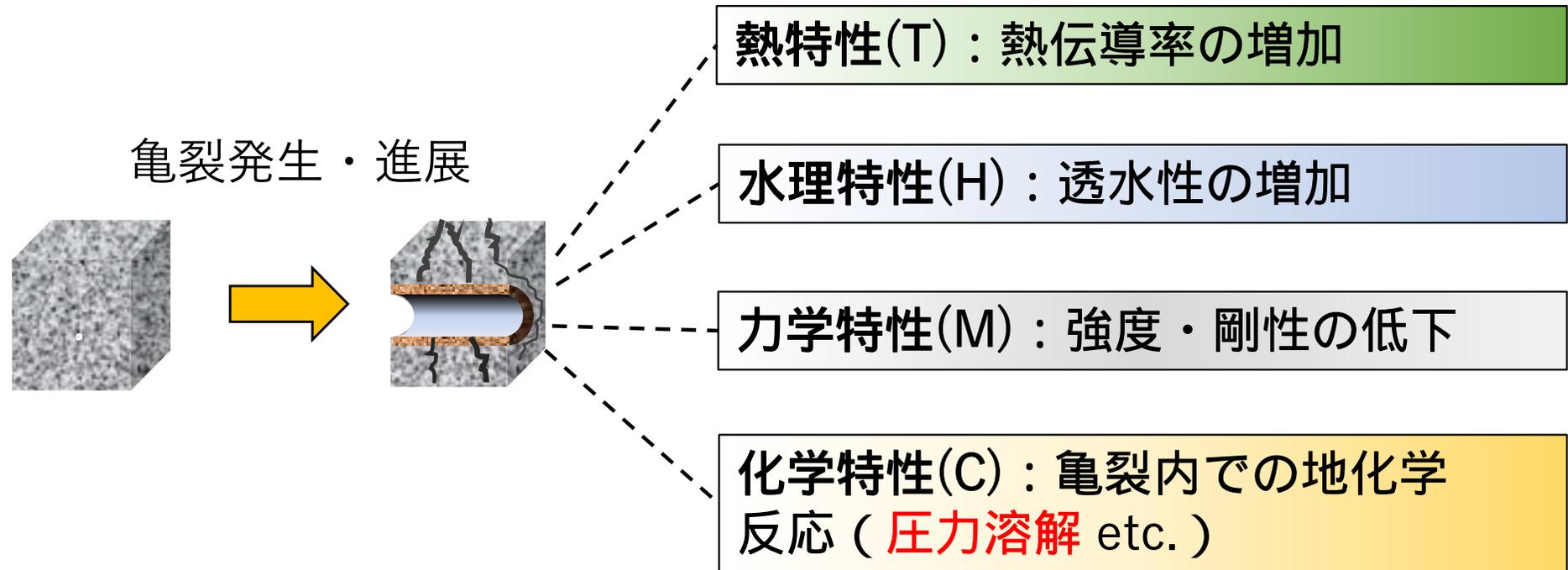
運動量フラックスMの時間変化
 $M=UD$



3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築 研究背景

岩盤内に亀裂が発生・進展した場合……

⇒ 岩盤内で生じる熱・水・応力・化学に関する種々の現象の挙動が変化



☞ **亀裂発生・進展**の影響を考慮可能な熱・水・応力・化学 (THMC) 連成モデルが必要

✓ 亀裂進展解析モデルの導入(損傷理論,DEM, XFEM)

✓ 亀裂進展による各物性変化を記述する構成則の導入

3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築 研究背景

既往のTHMCモデル

➤ 亀裂発生・進展挙動をTHMC連成と絡めた事例は少ない

亀裂発生・進展 ⇒ THM(力学・透水・熱物性特性)の変化を考慮
[Wei et al., 2016]



亀裂発生 ⇒ C(亀裂内での地化学反応) は考慮されていない

亀裂接触部における圧力溶解 ⇒ 岩盤の透水性への影響大

圧力溶解の影響により, 数百時間で1オーダー透水性が低下 [Yasuhara et.al, 2006, 2011]

現在進行中

- 亀裂発生・進展を考慮したTHMC連成解析モデル
- 亀裂発生・進展に伴う鉱物反応発生(圧力溶解)を考慮
 - ・ 実環境における岩盤の長期力学・透水特性変化予測
 - ・ 不連続面での圧力溶解による影響評価

3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築

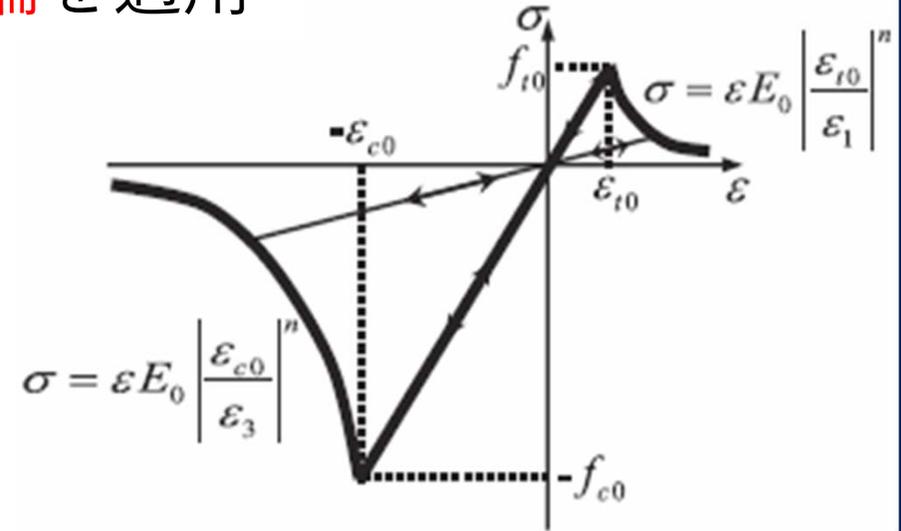
➤ 亀裂発生・進展解析には**損傷理論**を適用

破壊判定式

引張破壊： $F_1 = \sigma_1 - f_{t0}$

せん断破壊： $F_2 = -\sigma_3 + \sigma_1 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} - f_{c0}$

σ_1 ：第1主応力 [Pa], σ_3 ：第3主応力 [Pa], ϕ ：内部摩擦角 [°]
 f_{t0} ：一軸引張強さ [Pa], f_{c0} ：一軸圧縮強さ [Pa]



参考文献：C.H. Wei et al.(2015)

損傷変数

$$D = \begin{cases} 0 & F_1 < 0 \text{ and } F_2 < 0 \\ 1 - \left| \frac{\epsilon_{t0}}{\epsilon_1} \right|^n & F_1 = 0 \text{ and } dF_1 > 0 \text{ (引張)} \\ 1 - \left| \frac{\epsilon_{c0}}{\epsilon_3} \right|^n & F_2 = 0 \text{ and } dF_2 > 0 \text{ (せん断)} \end{cases}$$

ϵ_1, ϵ_3 ：最大主ひずみ [-], ϵ_{t0} ：最大引張ひずみ [-]
 ϵ_{c0} ：最大圧縮ひずみ [-], n ：構成係数 [-]

力学特性変化

ヤング率変化	$E = (1 - D)E_0$
	E ：ヤング率 [Pa] E_0 ：初期ヤング率 [Pa]
引張強度変化	$f_t = (1 - D)f_{t0}$
圧縮強度変化	$f_c = (1 - D)f_{c0}$

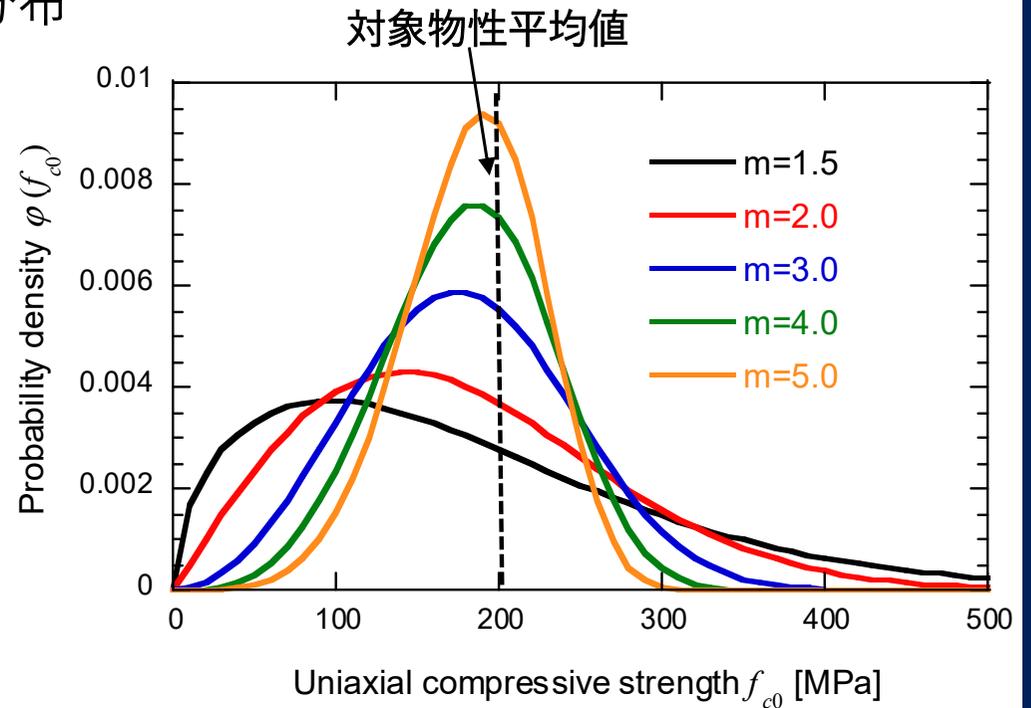
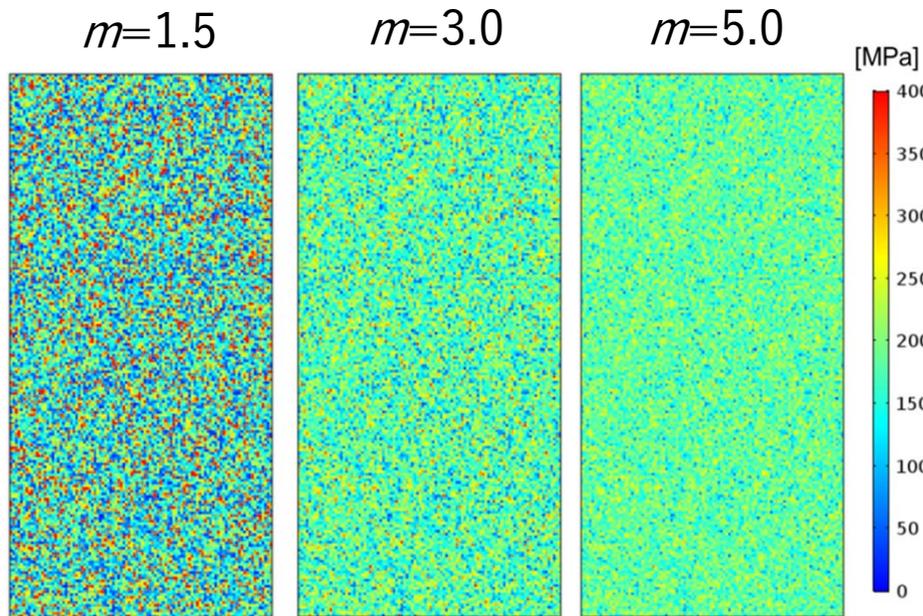
3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築 損傷理論を導入したモデルの概要

- ヤング率，引張・圧縮強度等をWeibull分布に従い計算要素毎に不均質に与える

$$\varphi(u) = \frac{m}{u_0} \left(\frac{u}{u_0} \right)^{m-1} \exp\left(- \left(\frac{u}{u_0} \right)^m \right)$$

u : 対象物性値
 u_0 : 対象物性平均値
 m : 形状パラメータ [-]

- ▶ Weibull 分布に基づいた一軸圧縮強さ分布



⇒ 鉱物分を用いたモデルの構築
<https://doi.org/10.2472/jsms.69.236>

3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築

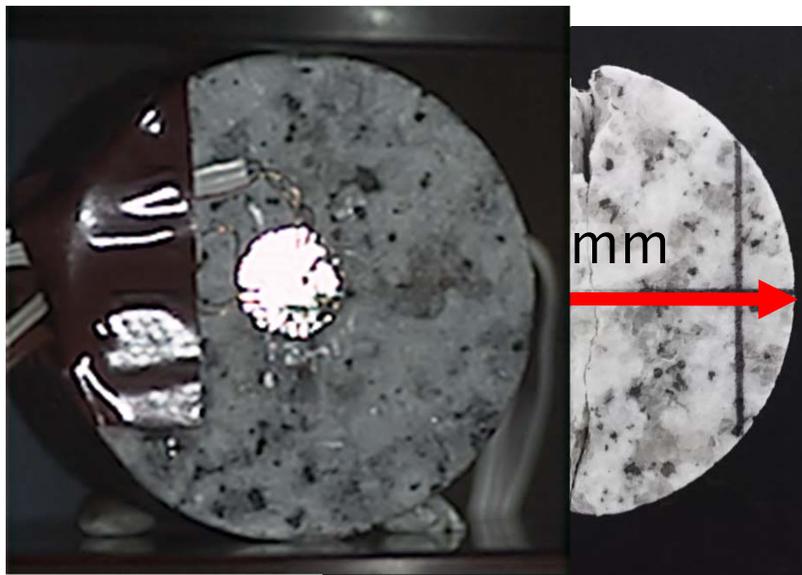
妥当性の検証：再現解析の実施

➤力学試験（圧裂引張試験、一軸圧縮試験）実施 ⇒ 損傷理論で再現解析

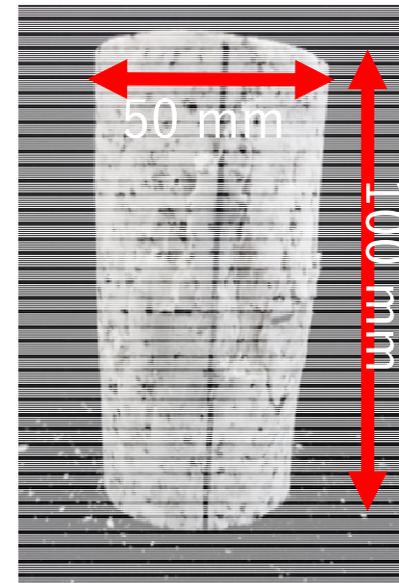


引張・圧縮破壊に対する損傷モデルの妥当性検証

👉 圧裂引張試験 (Brazilian test)



👉 一軸圧縮試験



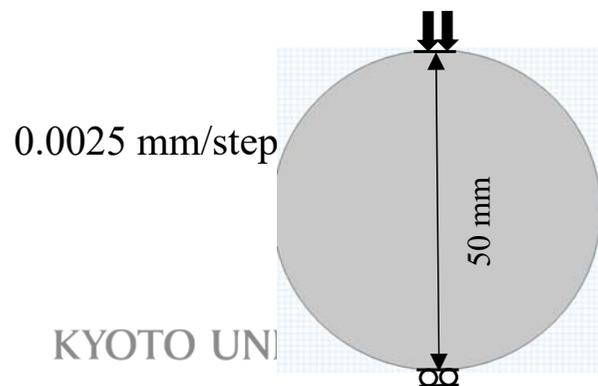
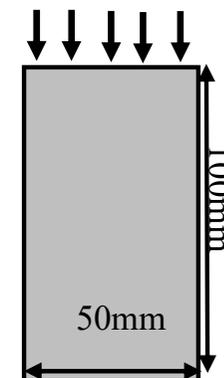
花崗岩供試体



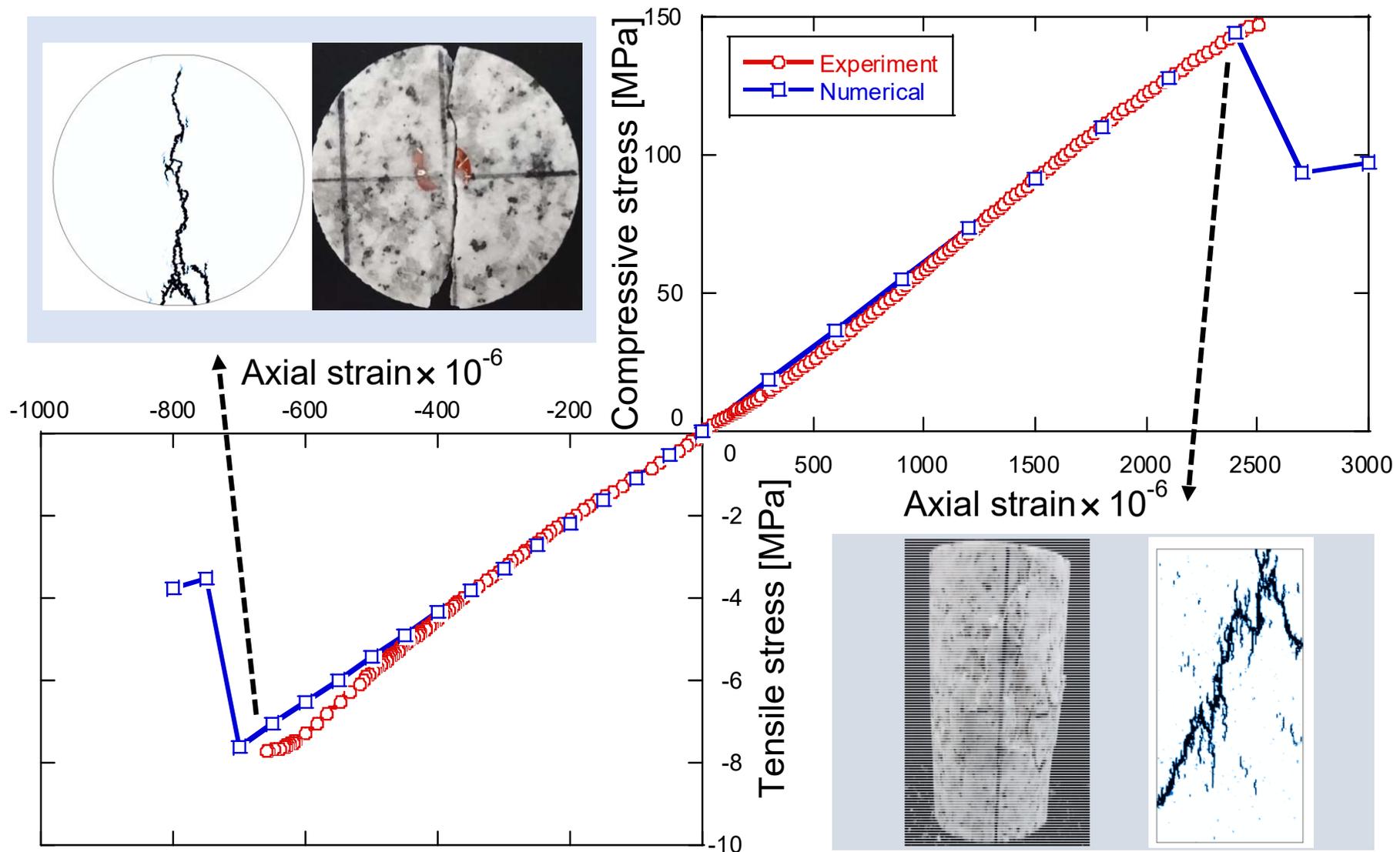
解析で用いた物性

ヤング率 [GPa]	65.3
パラメータ m [-]	5
ポアソン比 [-]	0.25
一軸圧縮強さ [MPa]	147.6
一軸引張強さ [MPa]	7.7

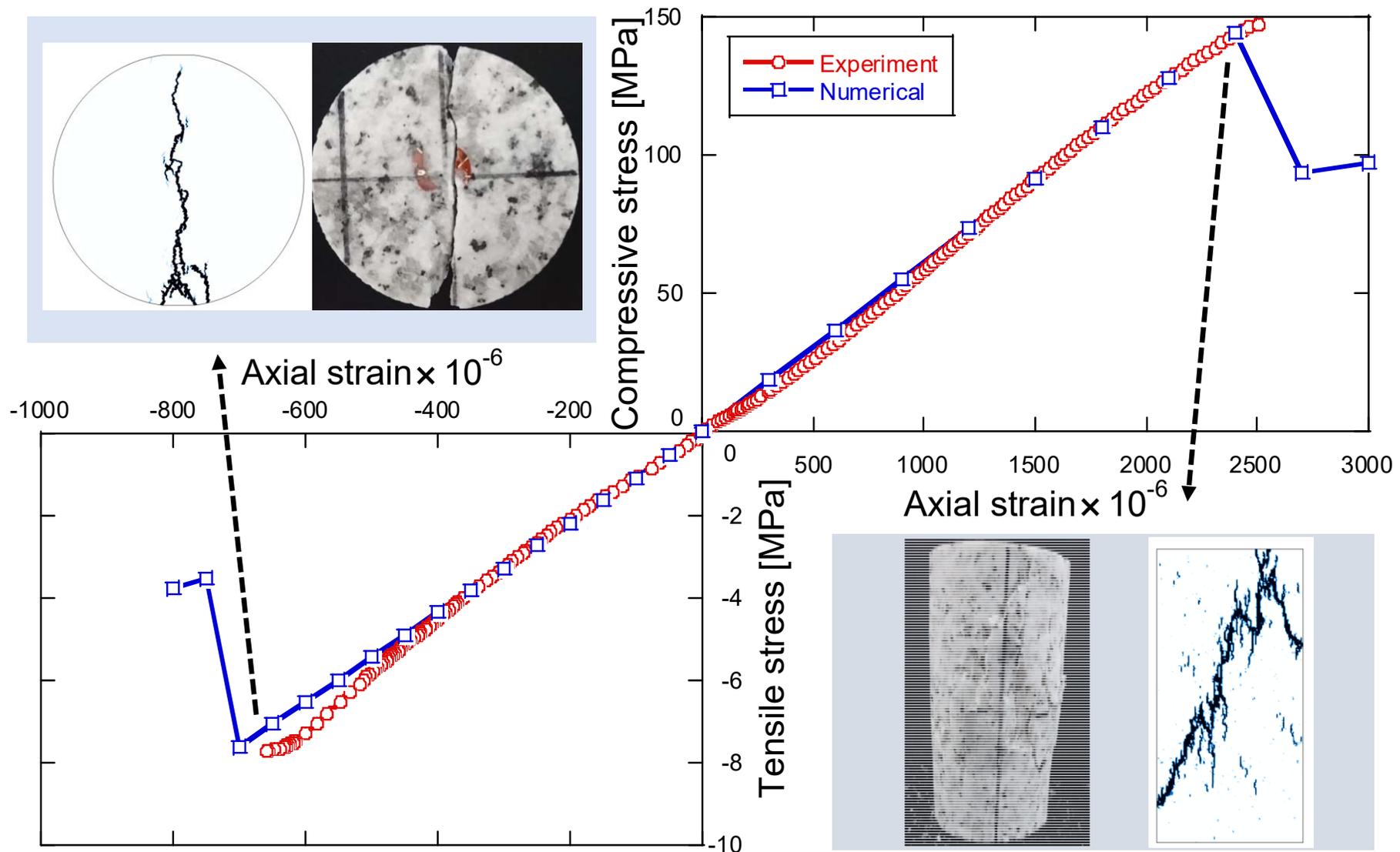
変位 0.03mm/step



3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築 妥当性の検証：再現解析の結果

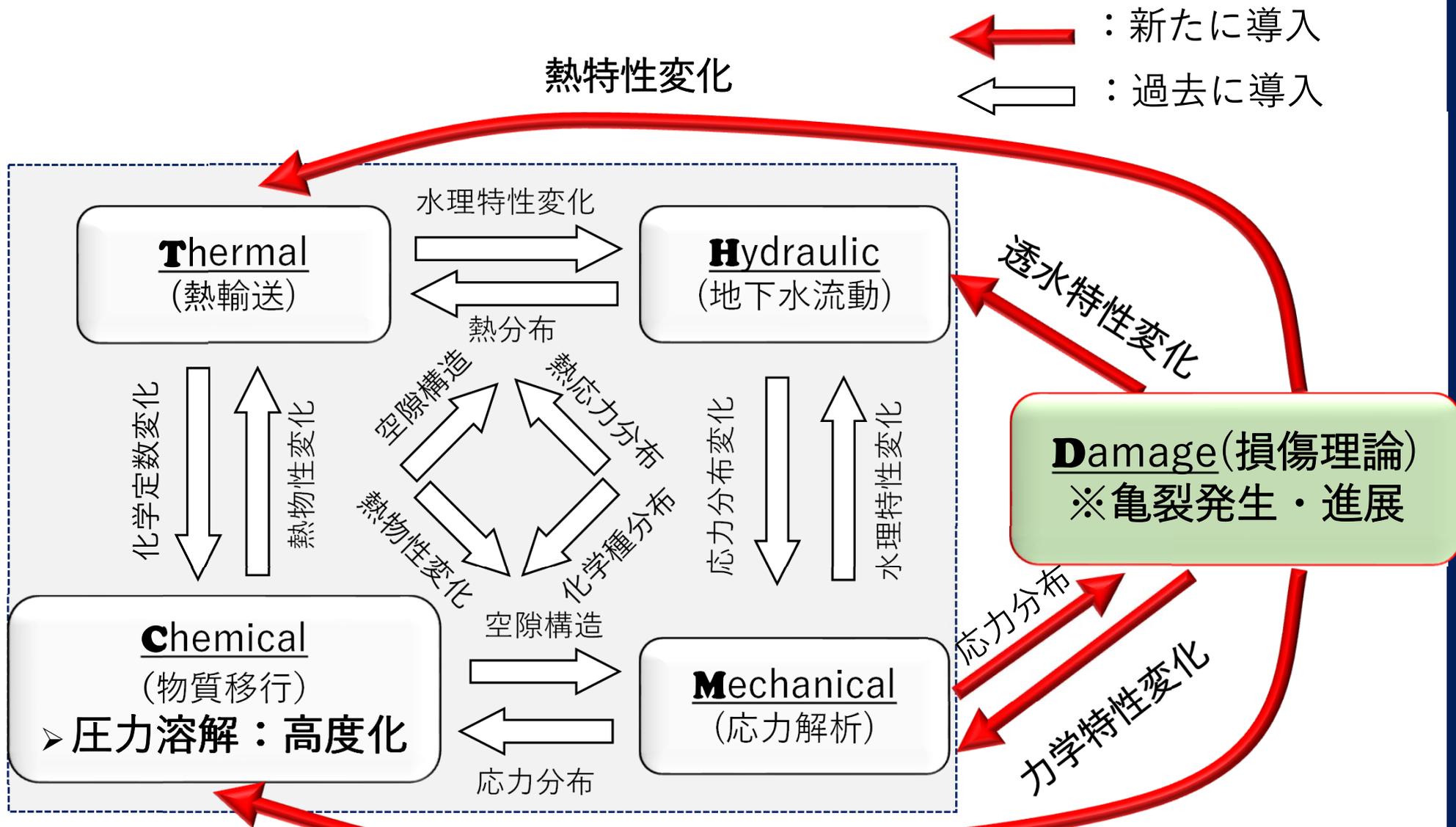


3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築 妥当性の検証：再現解析の結果



3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築

THMCD連成解析



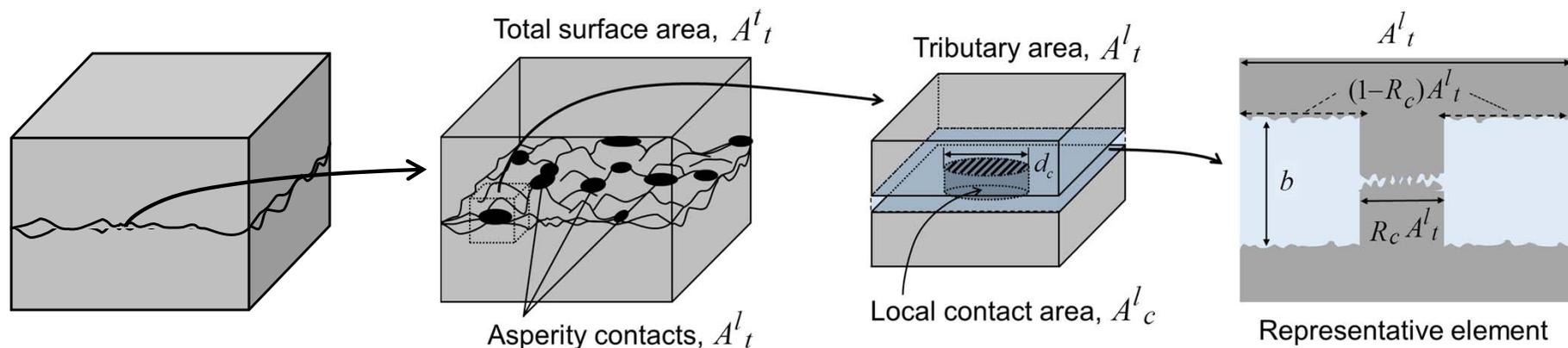
3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築

THMC連成解析の概要

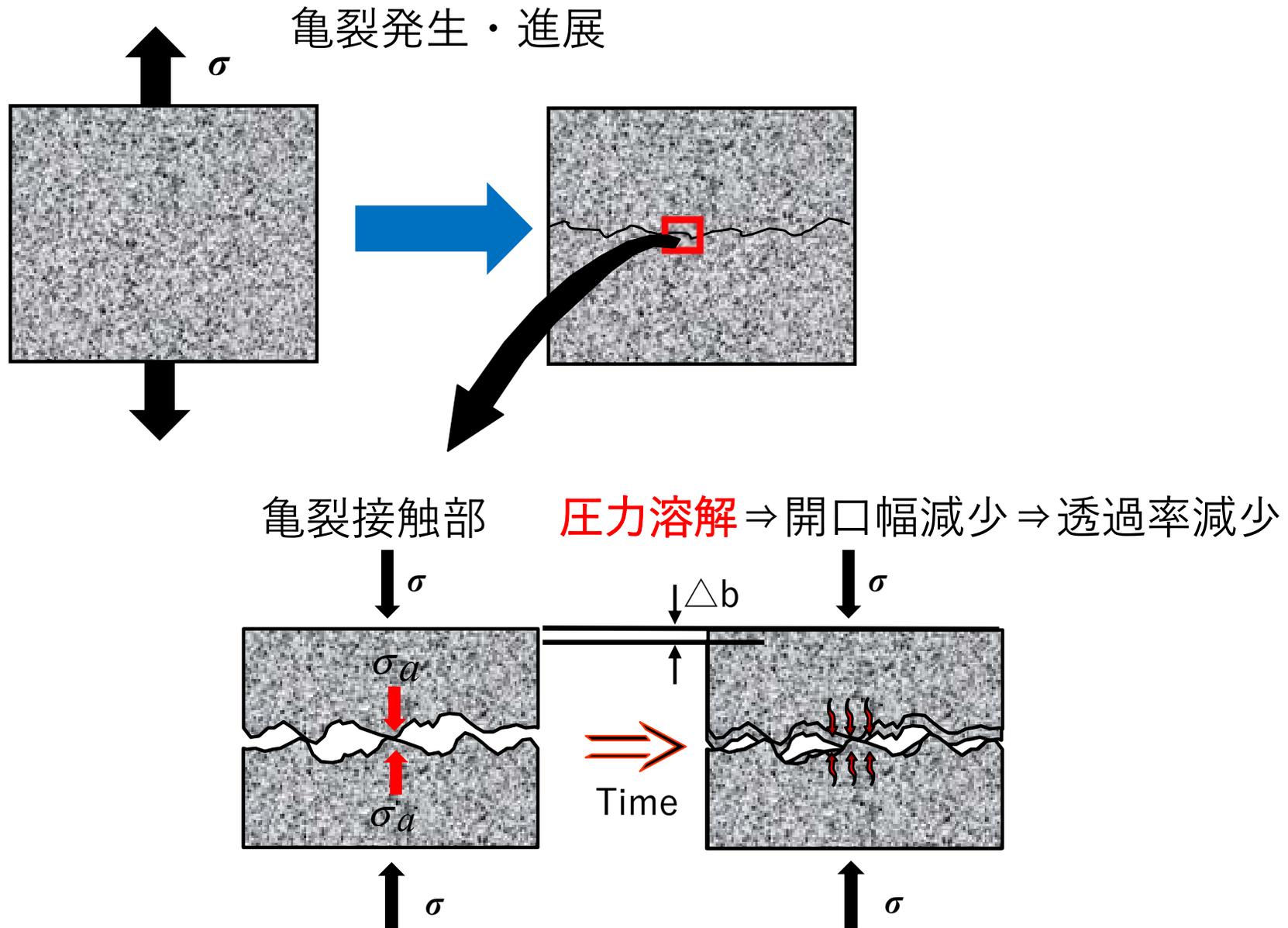
👉 *iPSACC*

(*i*nterface for *P*ressure solution *A*nalysis under *C*oupled *C*onditions)

- ✓ THMC連成に損傷理論 (Damage)を組み込んだ連成シミュレータ
- ✓ 亀裂領域内での圧力溶解を陽な形式で考慮可能
⇒ 損傷-化学の相互作用を初めて導入
- ✓ 亀裂進展、損傷に伴う物性変化、亀裂の透水性経時変化等を一括処理

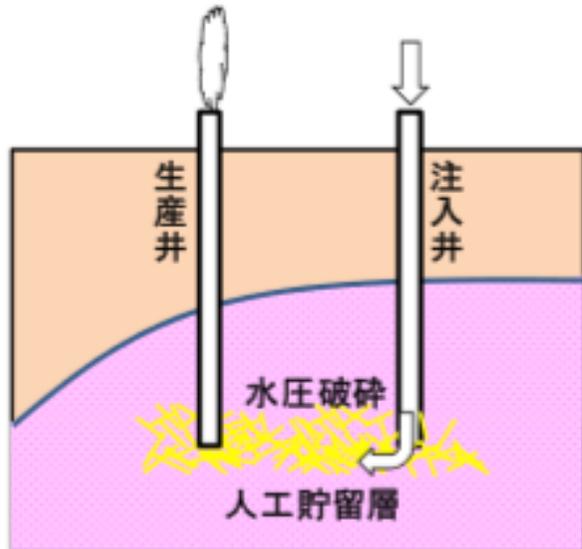


3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築 亀裂進展から圧力溶解プロセス



3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築 THMCD連成解析(水圧破砕)

👉 地熱発電における岩石内亀裂の透水性変化を計算

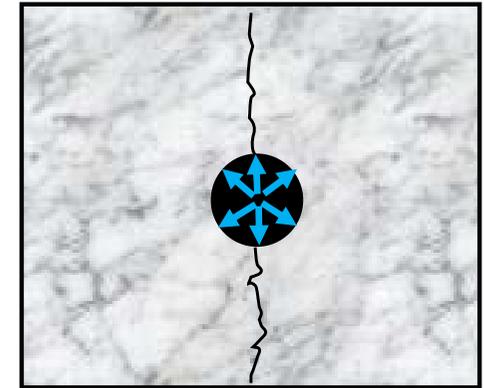


出典：電力中央研究所

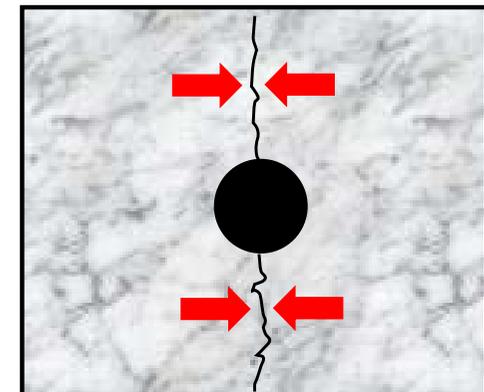
人工亀裂の透水性変化の評価は重要！！

想定されるシナリオ

水圧破砕
⇒ 亀裂生成



亀裂内で圧力溶解
⇒ 亀裂の透水性変化



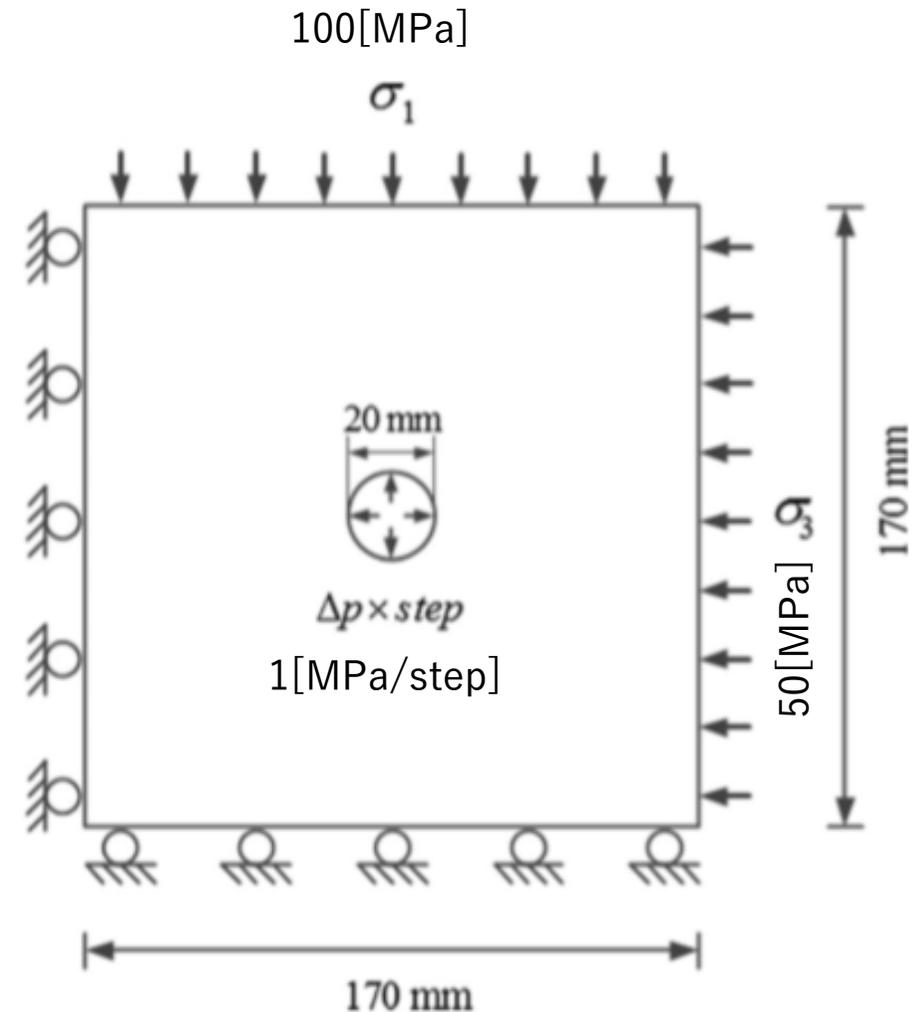
3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築 THMCD連成解析(水圧破砕)

👉 亀裂進展解析 (水圧破砕)

亀裂進展解析パラメータ

ヤング率 [GPa]	65.3
パラメータ m [-]	5
ポアソン比 [-]	0.25
一軸圧縮強さ [MPa]	147.7
一軸引張強さ [MPa]	7.7
内部摩擦角 [°]	30

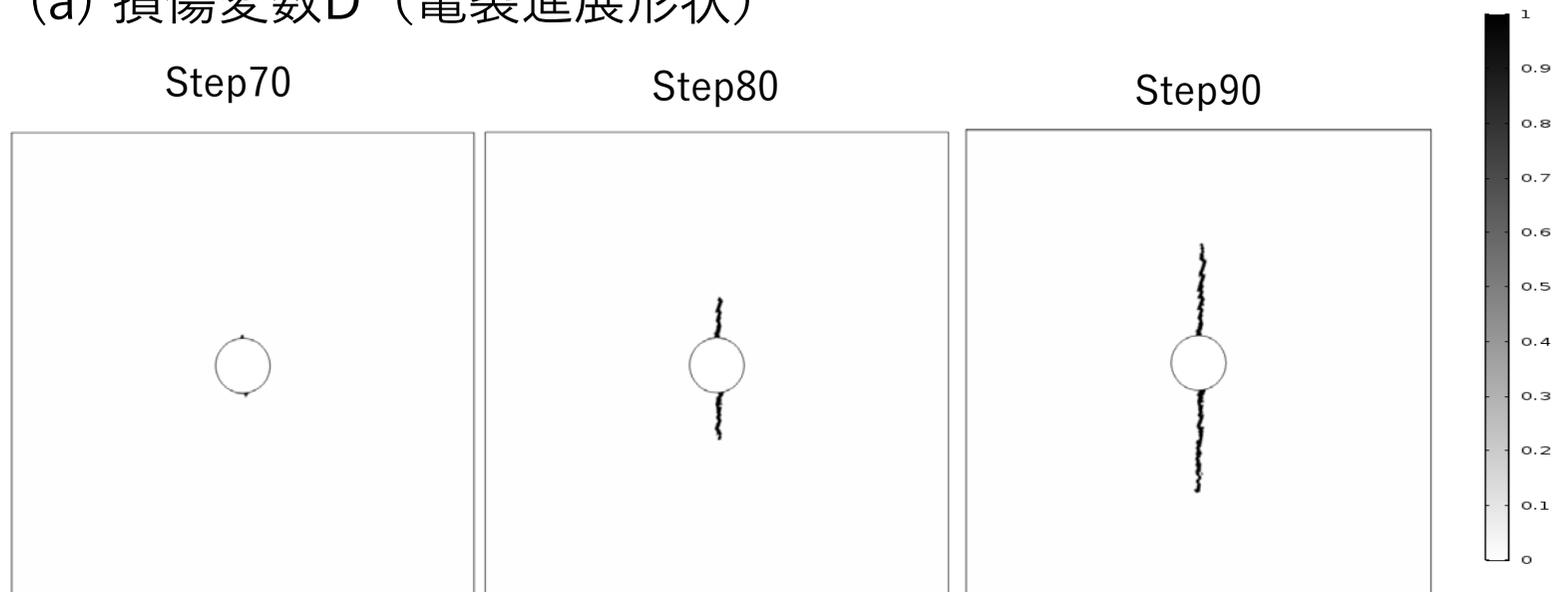
- ・ 初期静水圧の値は20[MPa]
- ・ 水-応力連成解析を実施



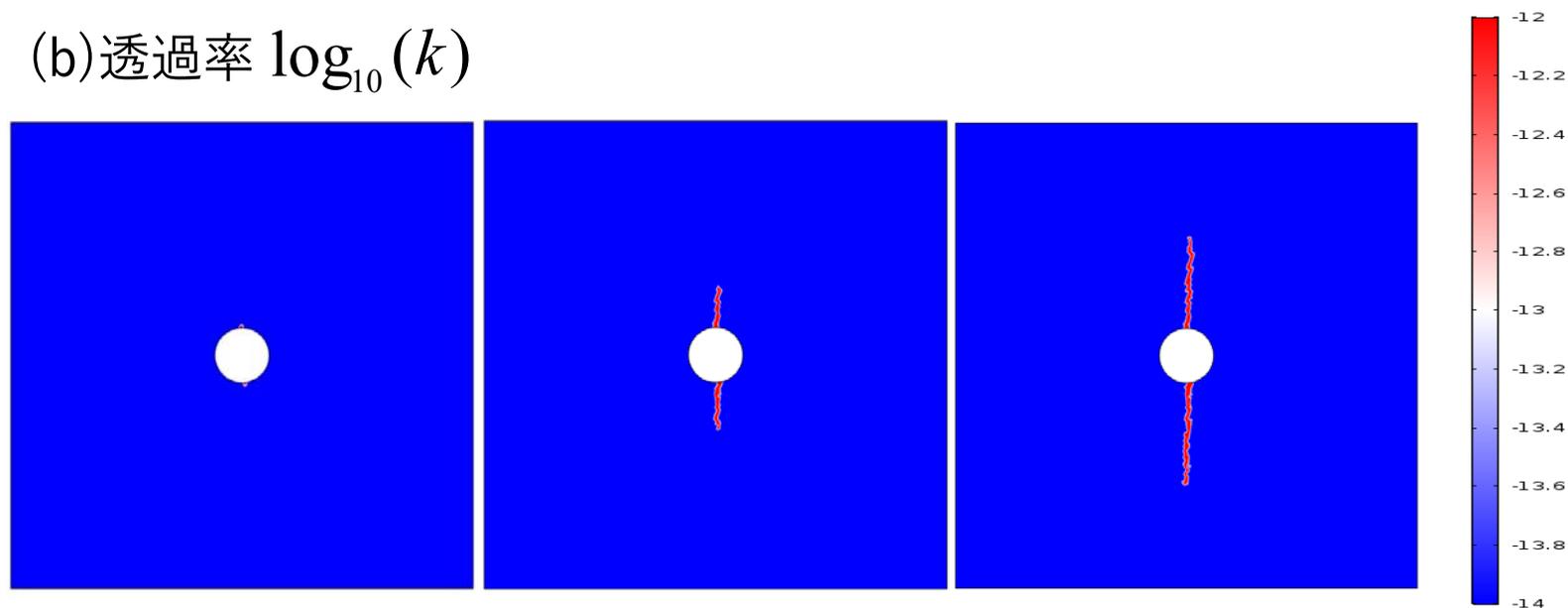
3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築

THMCD連成解析（水圧破砕）

(a) 損傷変数D（亀裂進展形状）



(b) 透過率 $\log_{10}(k)$



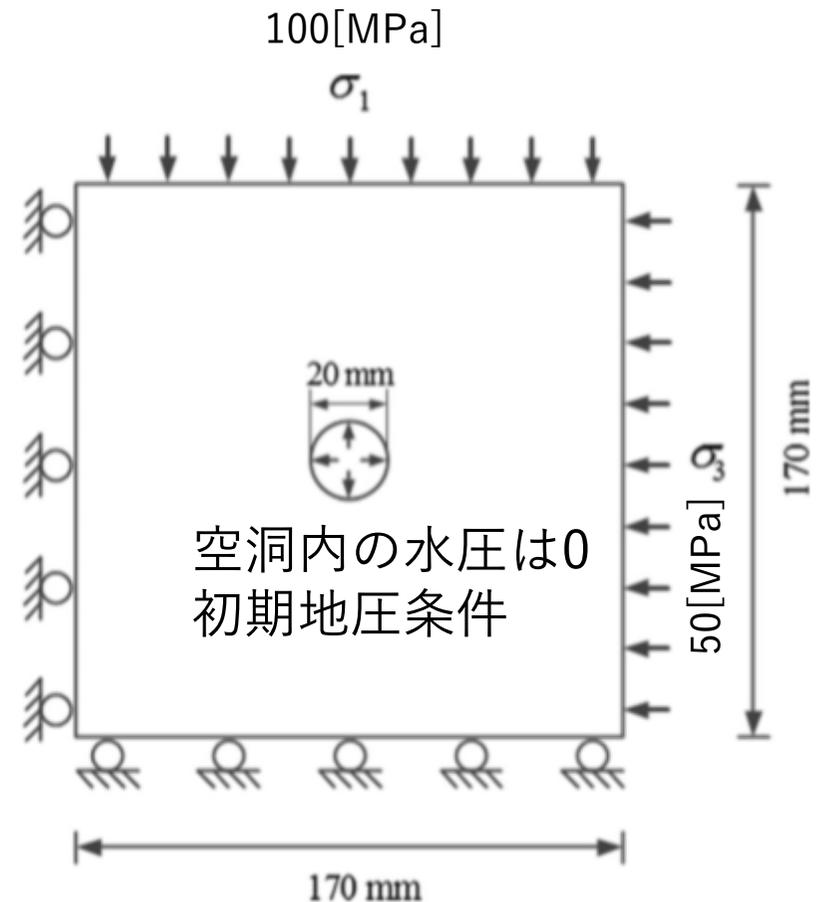
3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築 THMCD連成解析(水圧破砕)

☞ 水圧破砕解析の結果を初期状態に設定
⇒ 亀裂の長期透水性変化予測解析

圧力溶解パラメータ

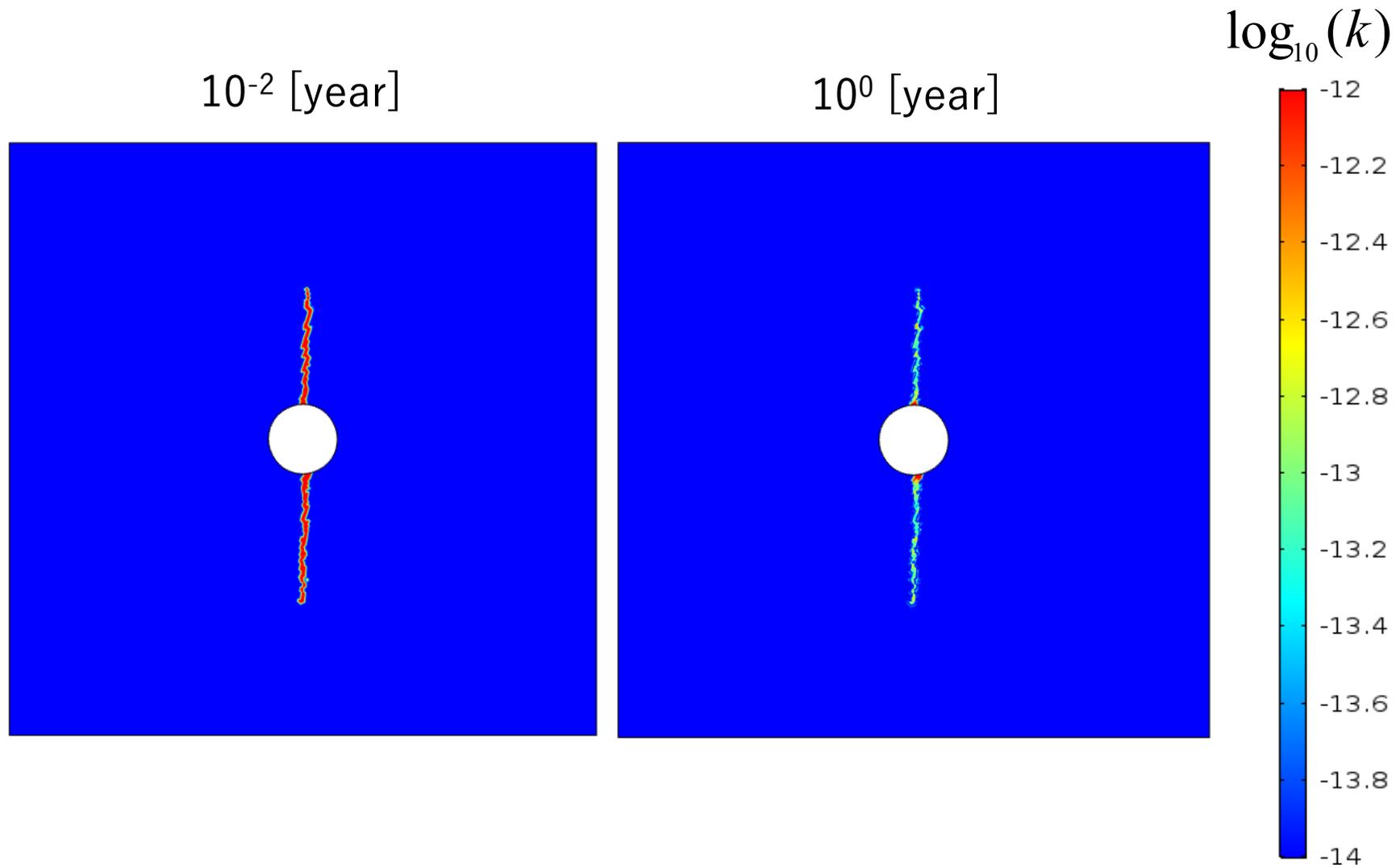
初期不連続面接触率 [%]	5
臨界応力 [MPa]	170
パラメータ a	0.05
残留開口幅 [μm]	0.4

- ・ 静水圧の値は20[MPa]
- ・ 温度は領域均一で設定 (100,200,300°C)
- ・ 水圧破砕後、地圧による圧縮変位により亀裂領域の剛性が10%回復した時点から解析開始



3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築 THMCD連成解析（水圧破砕）

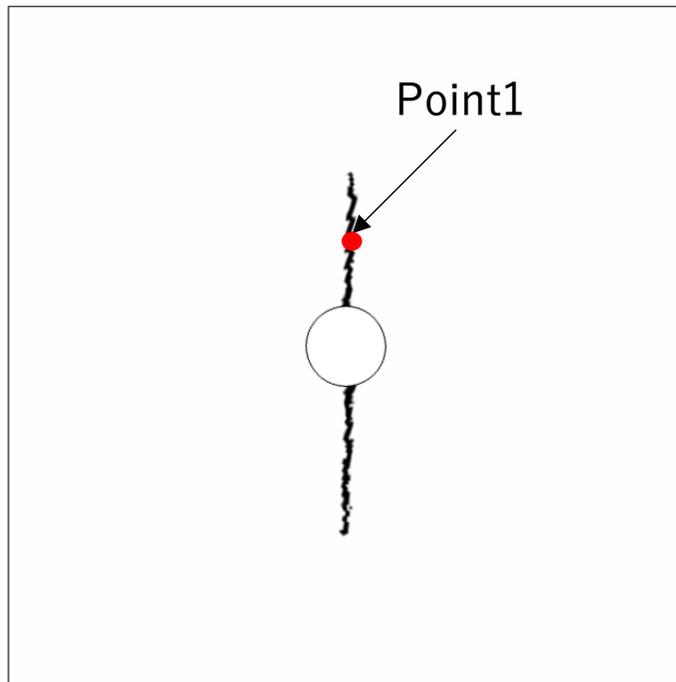
▼ 圧力溶解による亀裂の透過率変化（200°C条件）



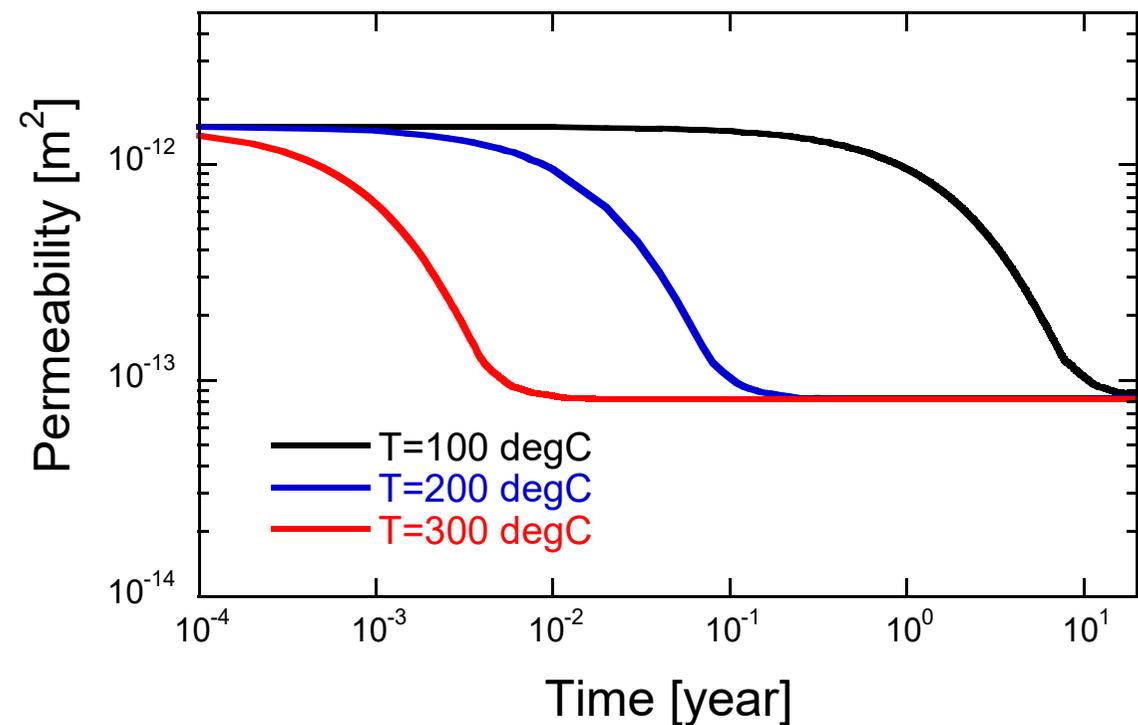
3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築 THMCD連成解析（水圧破砕）

👉 亀裂の透水性経時変化

▼ 亀裂領域内の計測点



▼ 温度条件別のPoint1における透過率変化



3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築 THMCD連成解析（空洞掘削・長期安定解析）

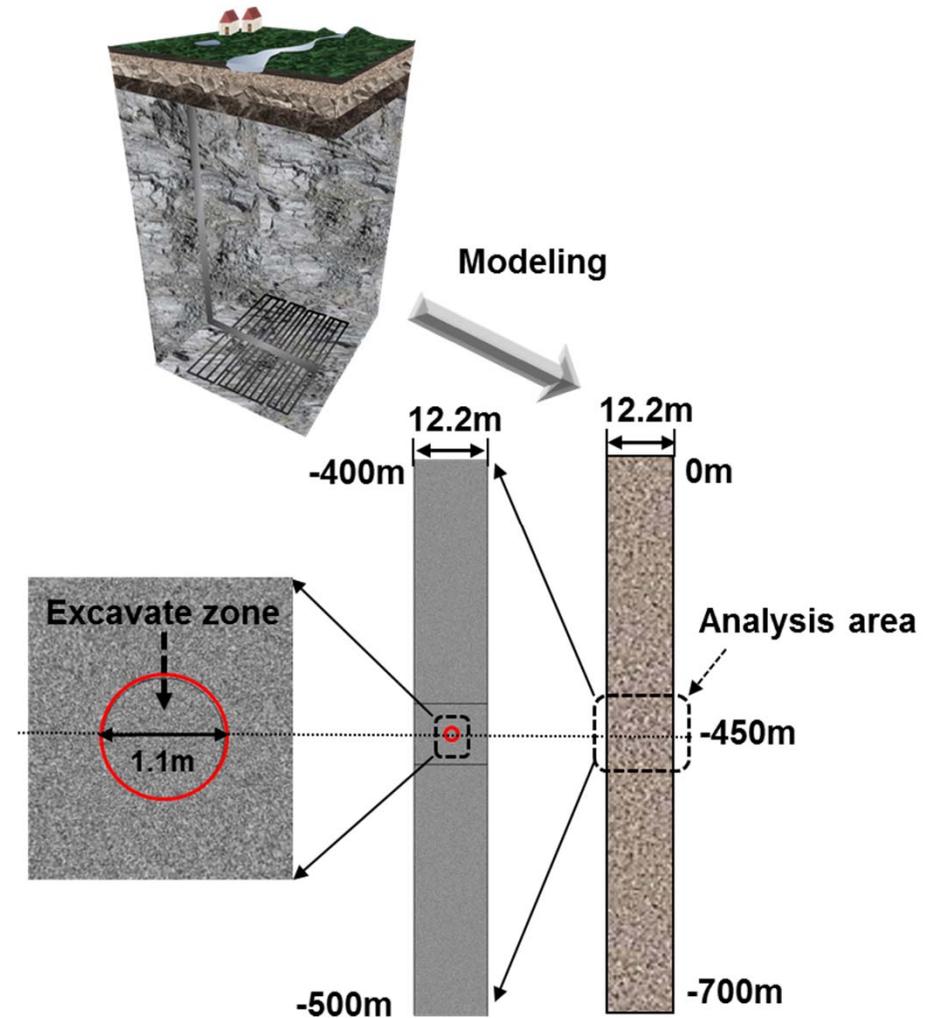
☞ 岩盤内空洞掘削解析および長期挙動予測解析

□ 解析条件

- ・ 想定する岩石は幌延泥岩
- ・ **step1**: 空洞掘削解析
- ・ **step2**: THMC長期連成解析

* 岩石物理特性

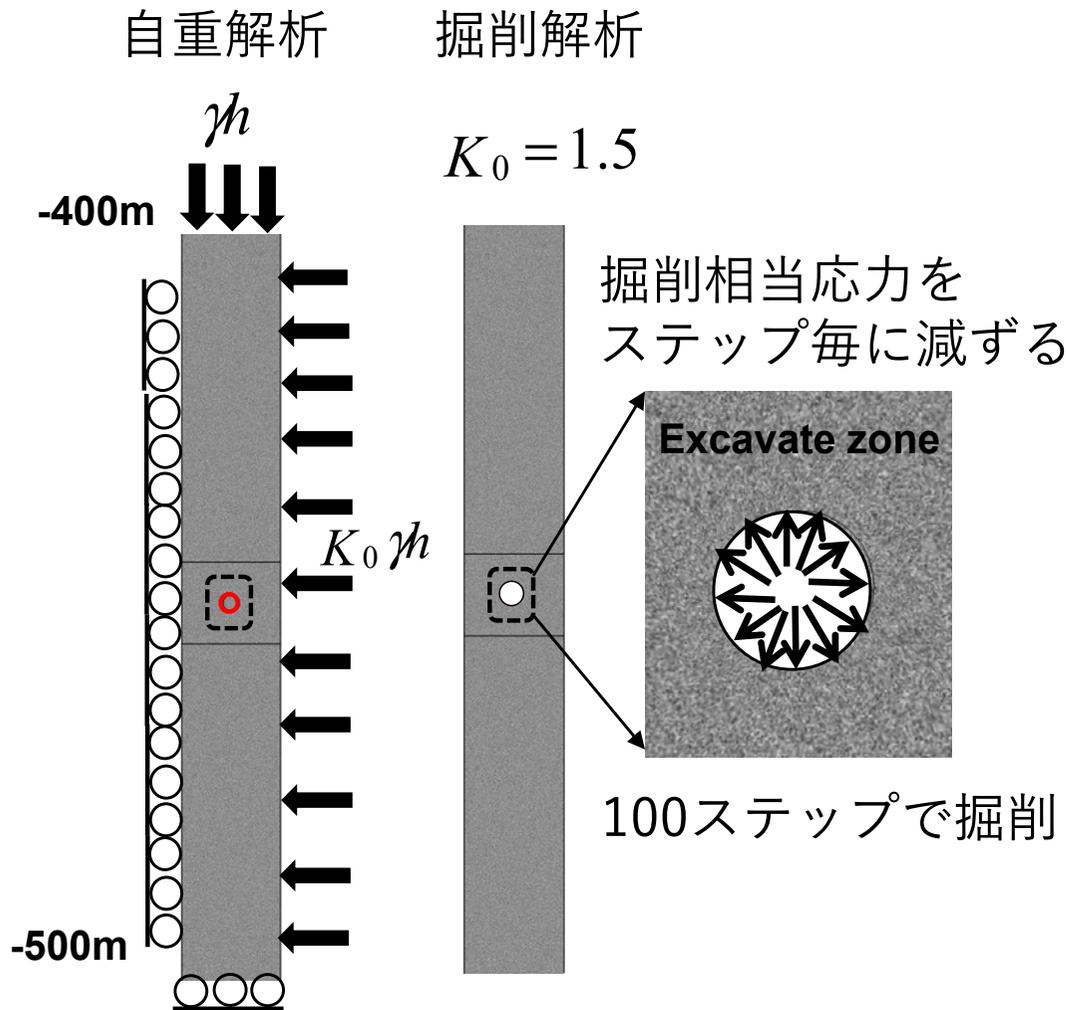
ヤング率 [GPa]	2.5
パラメータ m [-]	5
ポアソン比 [-]	0.3
一軸圧縮強さ [MPa]	20
一軸引張強さ [MPa]	2.0
水平土圧係数	1.5



* 解析ジオメトリ

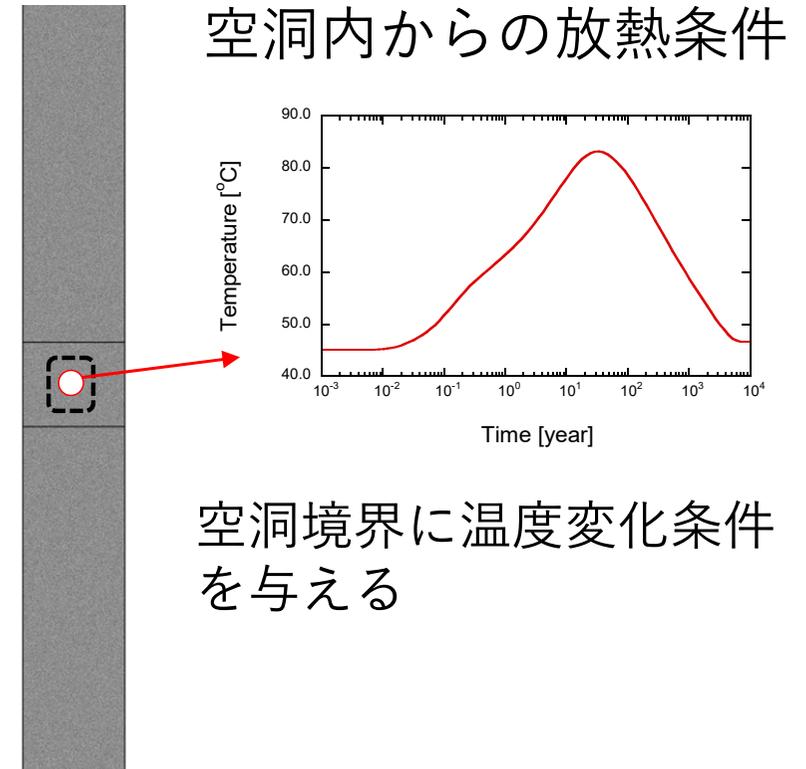
3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築 THMCD連成解析（空洞掘削・長期安定解析）

STEP1 空洞掘削解析



STEP2 長期連成解析

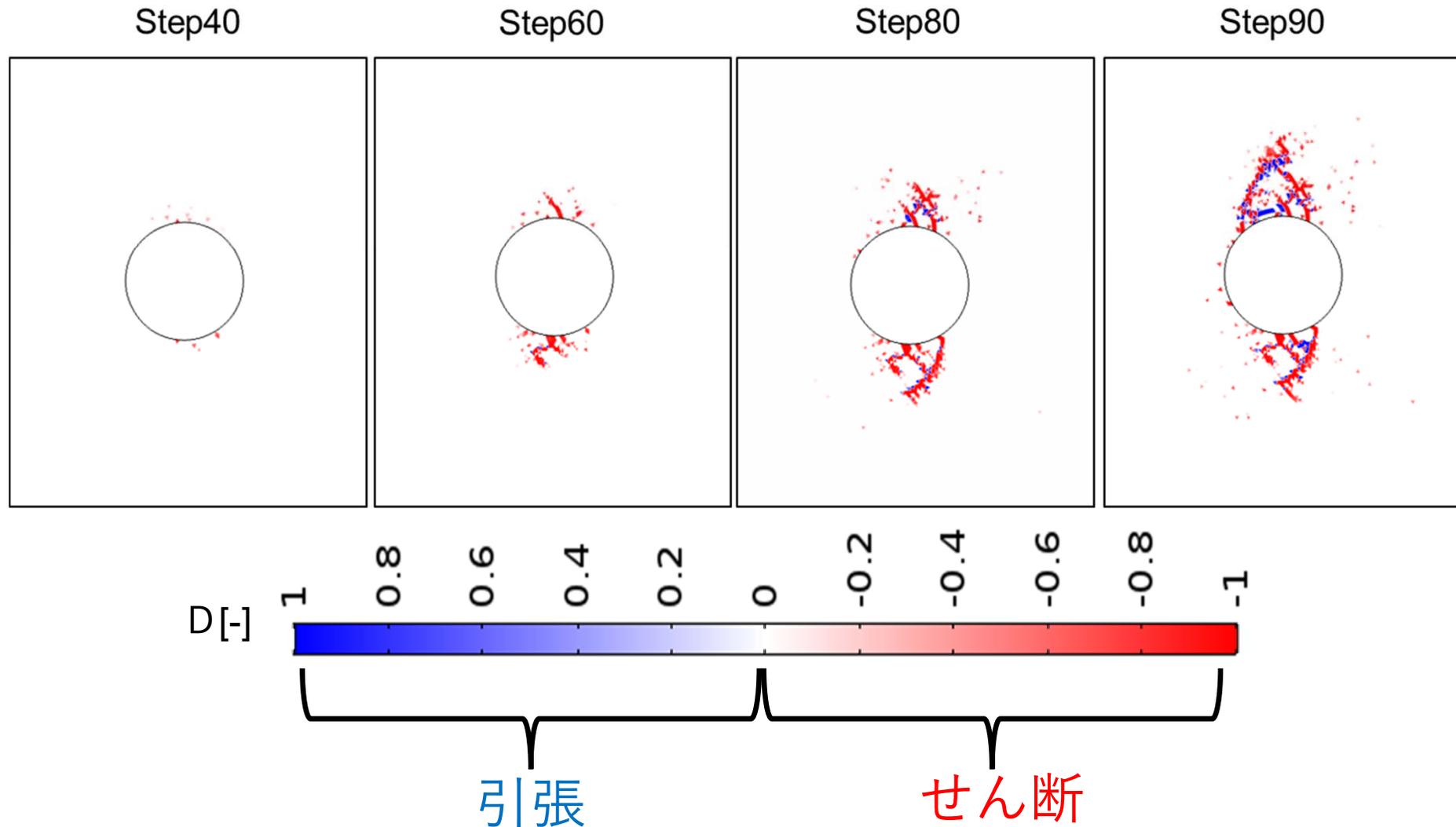
掘削終了時の損傷，剛性，強度，
透過率分布等を初期値に設定



3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築

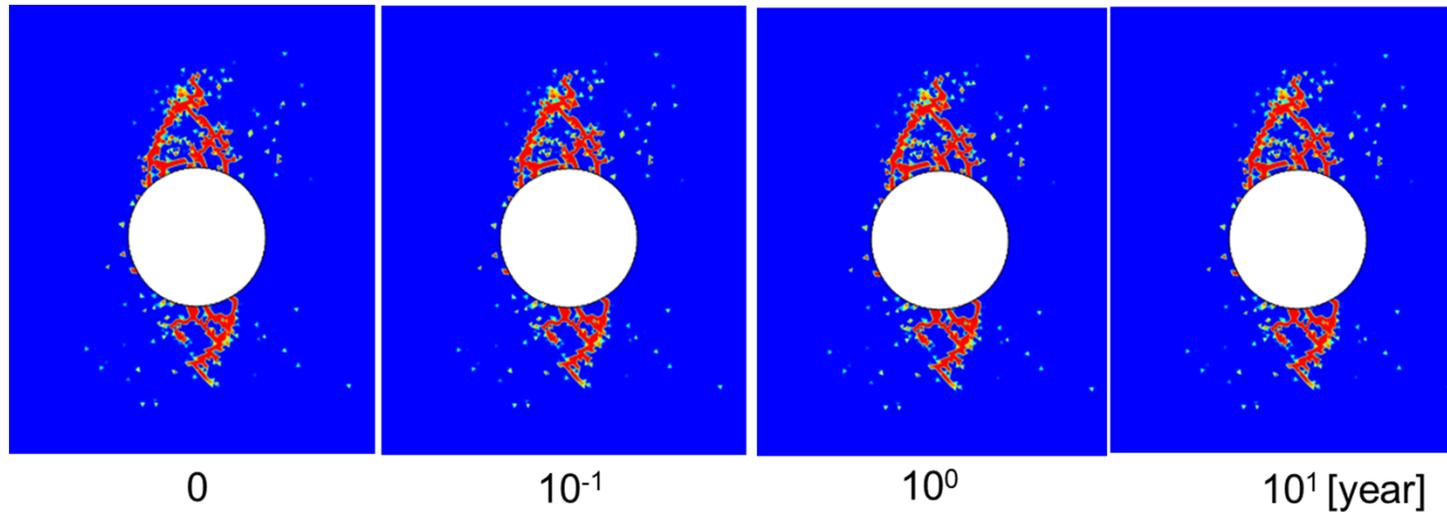
THMCD連成解析（空洞掘削・長期安定解析）

☞ 掘削段階中の亀裂進展挙動

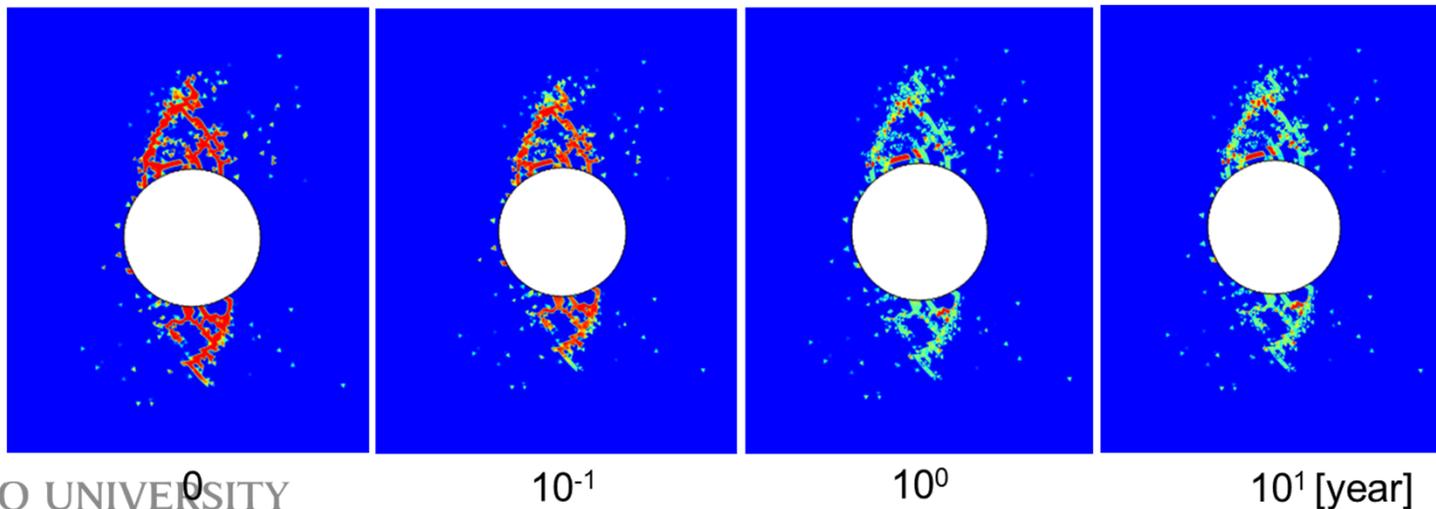


3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築 THMCD連成解析（空洞掘削・長期安定解析）

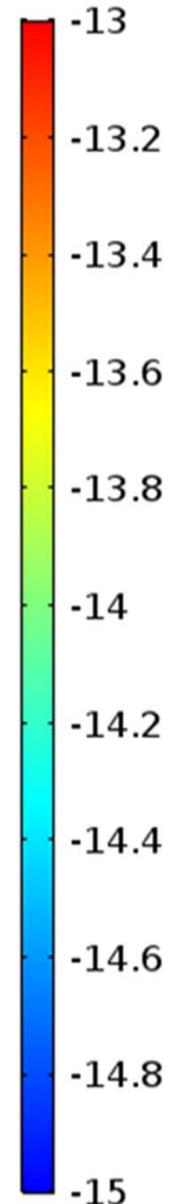
(a) 透過率対数表記（圧力溶解無し）



(b) 透過率対数表記（圧力溶解有り）



$\log_{10} k$



3. 損傷理論を導入した熱・水・応力・化学連成解析モデルの構築 THMCD連成解析（空洞掘削・長期安定解析）

(a) 幌延の現場試験との比較、妥当性検証

(b) 空洞掘削解析についての検討⇒土圧係数等のパラスタ

(c) 力学・化学作用による損傷回復のモデル化

(1) 亀裂進展に伴う透水性変化力学・化学作用による開口幅変化の妥当性検証

(2) 幌延泥岩を用いた力学試験・再現解析実施

(3) 圧縮変位による亀裂閉合に伴う剛性増加の関係式算出