

# 地震との関係について

(独)産業技術総合研究所

平成23年11月28日

(注)本資料は、第3回検討会における委員からのご指摘を踏まえ、当日の配付資料から一部修正しています。

# 説明内容

1. 目的
2. CO<sub>2</sub>圧入による地震誘発の可能性についての評価
  - 2-1. 文献調査：誘発地震の種類と、検討すべき誘発地震のタイプ
  - 2-2. 苫小牧実証試験における地震誘発の可能性についての検討
  - 2-3. 地震観測網の提案
  - 2-4. 検討結果のまとめ
3. 自然地震が貯留性能に及ぼす影響についての評価
  - 3-1. 長岡における中越・中越沖地震での貯留層への影響の事例検討
  - 3-2. 苫小牧実証試験候補地における既存断層による影響の検討
  - 3-3. 検討結果のまとめ
4. まとめ

# 1. 目的

- (1) 本報告では、CCS大規模実証試験の候補地点の内、北海道・苫小牧地点の調査データ等を踏まえ、本地点でCO<sub>2</sub>を圧入した場合に、地層に影響を及ぼしうるか等、以下の項目について調査・検討を実施する。
- (2) CO<sub>2</sub>の圧入による地層への影響等の検討・評価
  - ・想定される圧入レートにより地震が誘発される可能性はないか
- (3) 自然地震が貯留層に与える影響等の検討・評価
  - ・近隣の断層が、万が一地震を引き起こした場合、貯留層へ影響を与えるか

## 2. CO<sub>2</sub>圧入による地震誘発の可能性についての評価

### 2-1. 文献調査(1): 誘発地震の種類

#### (1) 意図的に発生させた地震

- ・高圧で多量の流体の圧入による。
- ・孔周りの透水性の改善や原位置応力測定などのための水圧破碎に伴うものなど、一般に孔の近傍に発生する。
- ・規模は小さい張力型の破壊様式を示す。

#### (2) 間隙圧の上昇に伴って誘発される地震

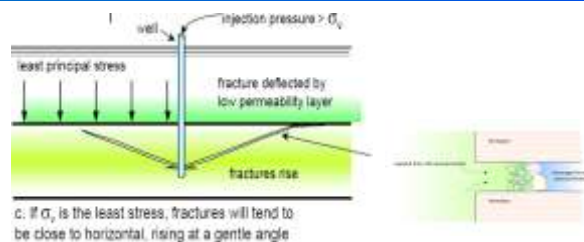
- ・空隙中の流体圧の上昇により有効封圧が減少するため、亀裂面などの破壊(すべり)が誘発される。
- ・一般に圧入点から遠くなるにつれ、発生する確率は小さくなる。
- ・圧入圧力を下げることで、多くの場合制御することが可能。

#### (3) その他 メカニズムが明らかでないが誘発が疑われる地震

- ・圧入のタイミングや圧入場所などの近くで発生したということから誘発の可能性が指摘される例がある。しかし、誘発されたものではないケースが多く混ざっている可能性がある。

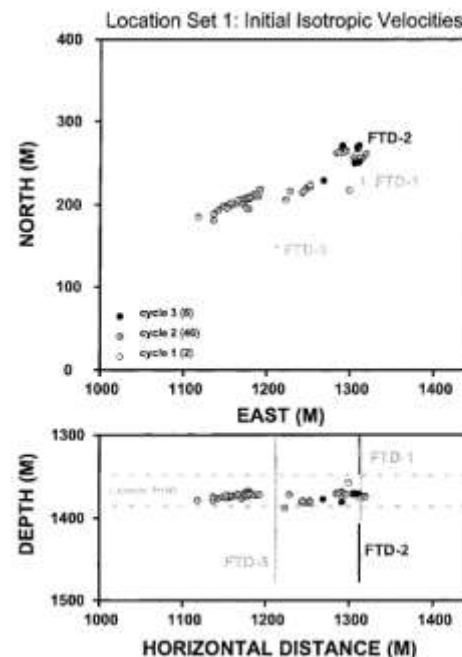
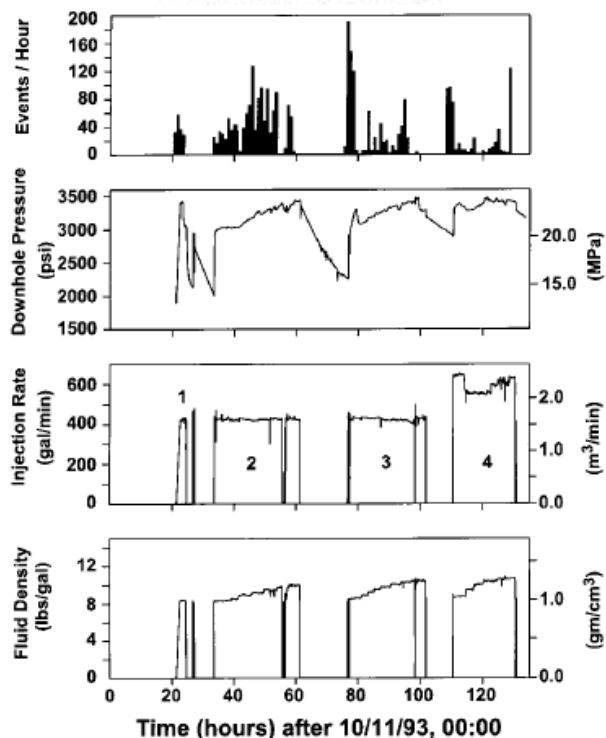
地震誘発のメカニズムが明らかな赤字で示した2種の地震のうち、間隙圧上昇に伴う地震誘発の可能性について検討した。

## 2-1. 文献調査(2): 意図的に発生させた地震の例



テキサス州 Jasper County

上からイベント数  
孔底圧 圧入量、  
圧入流体の密度  
の時間変化



イベントの震源分布  
上は水平面上の分布  
下は断面図  
FTD1~4は観測孔

1993年10月、テキサス州Beaumontの近くで、水圧破砕技術を利用して固体廃棄物(スラリー)を地下1,300~1,400mの下部Frio層に圧入する技術の実証試験が実施された。約3,000個のイベントが検出され、54個のイベントの震源が求まった。震源は、圧入孔から広がるように分布し、水圧破砕によって生じた破壊が、少なくとも350mの長さに伸長したことが確認された。

(出典: House and Flores, *Pure and Applied Geophysics*, 2002)

## 2-1. 文献調査(3): 間隙圧の上昇に伴って誘発される地震の例

コロラド州 Rocky mountain Arsenal (出典: Wikipedia)

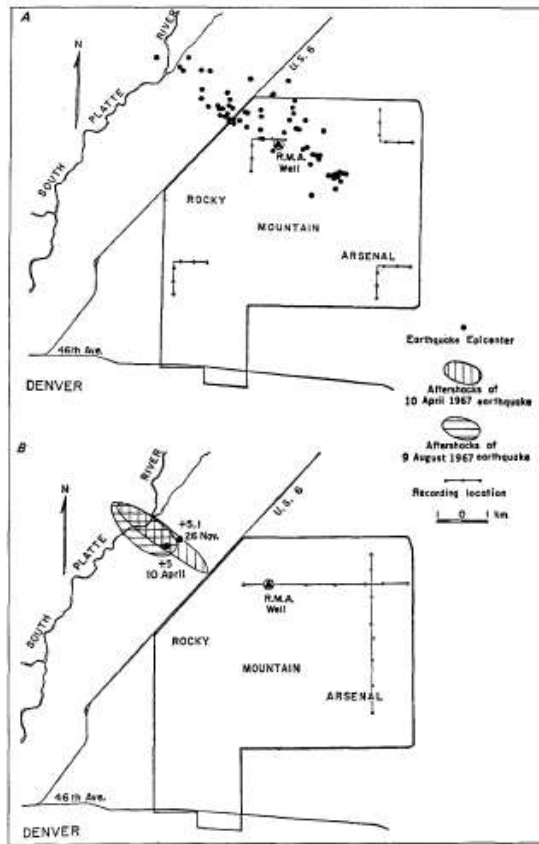
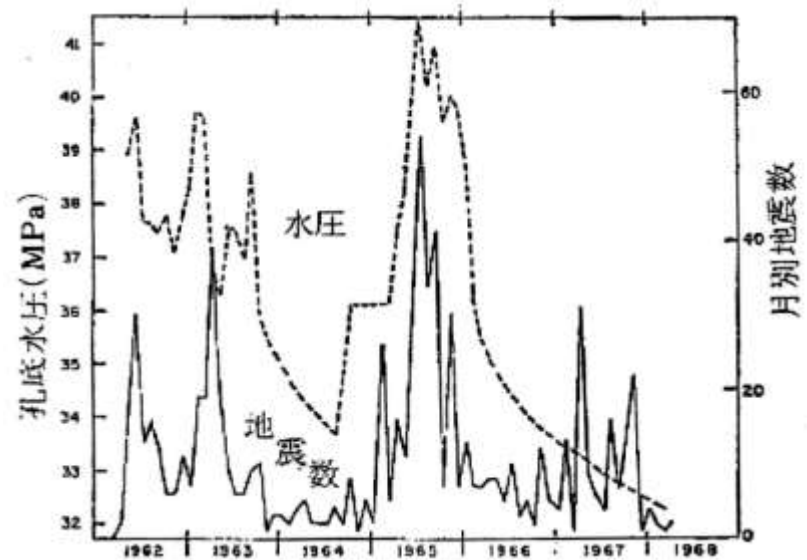


Figure 3  
Earthquake activity near the Rocky Mountain Arsenal waste-disposal well, Colorado. (A) Epicentral distribution of earthquakes during January and February 1966. (B) Aftershock distributions of the large 1967 earthquakes. Reprinted with permission from HEALY *et al.* (1968).

1962年からコロラド州デンバーの兵器廠の深井戸から流体廃棄物を地下3,800mに圧入したため、地震が誘発された。圧入時の孔底圧は最大41MPaと推定されている。流体圧入による間隙圧上昇が地震を誘発することが初めて認知された。

(出典: Healy *et al.*, *Science*, 1968)



深井戸の孔底圧と月別地震発生頻度(M1.5以上)

(出典: Healy *et al.*, *Science*, 1968)

## 2-1. 文献調査(4): 結論

- (1) 文献調査の結果、意図的な地震や間隙圧上昇に伴う誘発地震が発生した事例があった。
- (2) ただし、圧入圧を制御することで(誘発地震の原因となる間隙圧が下がるので)、誘発地震の発生を制御することができると考えられることから、実証試験においては、この点を十分に踏まえることが必要である。
- (3) 事業者はALARA (As Low As Reasonably Achievable) で対処する。
  - ・サイト選定で地震誘発の可能性を評価する
  - ・圧入開始前から地震を観測する
  - ・圧入オペレーションに観測結果を反映させる
  - ・観測結果を公開する

## 2-2. 苫小牧実証試験における地震誘発の可能性についての検討

### 方針

すべり傾向係数(すべり面上のせん断応力/すべり強度)の空間分布の時間変化を見積もり、いつ・どこで地震が誘発される可能性が高くなるかを推定する。

### すべり傾向係数見積りの手順

間隙圧の推定  $p$

長期挙動予測シミュレーション結果に基づく

現場応力の推定  $\sigma$

リークオフ試験結果に基づく

地層の静摩擦係数・すべり面の粘着力の推定  $\mu, C$

コアを用いた室内実験に基づく

すべり傾向係数が  
1を超えるとすべりが生じる

すべり傾向係数の空間分布

$$T = \frac{\tau}{C + \mu(\sigma_n - p)}$$

$T$  : すべり傾向係数

$\tau$  : すべり面にかかるせん断応力

$C$  : すべり面の粘着力

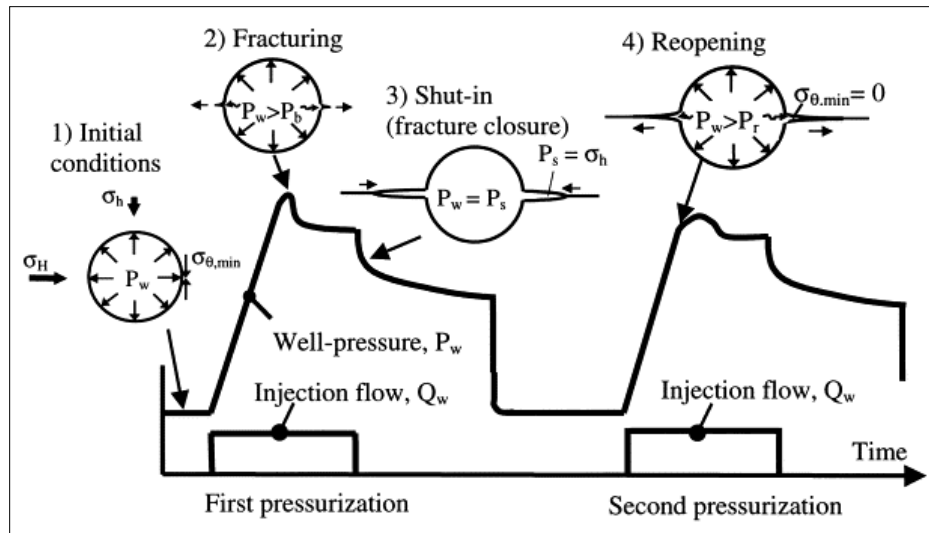
$\mu$  : 静摩擦係数

$\sigma_n$  : すべり面に垂直な応力

$p$  : 間隙圧

## 2-2. 苫小牧実証試験における地震誘発の可能性についての検討

### 現場応力の推定



リークオフ試験の圧力記録の模式図

(出典: Rutqvist et al., *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2000)

滝ノ上層におけるリークオフ試験のシャットイン圧力、リ・オープン圧力を読み取って、水圧破碎で応力を求める式に代入し、最大および最小主応力の値を求めた。

#### <圧力と応力との関係式>

$$P_s = \sigma_h$$

$$P_r = 3\sigma_h - \sigma_H - P_p$$

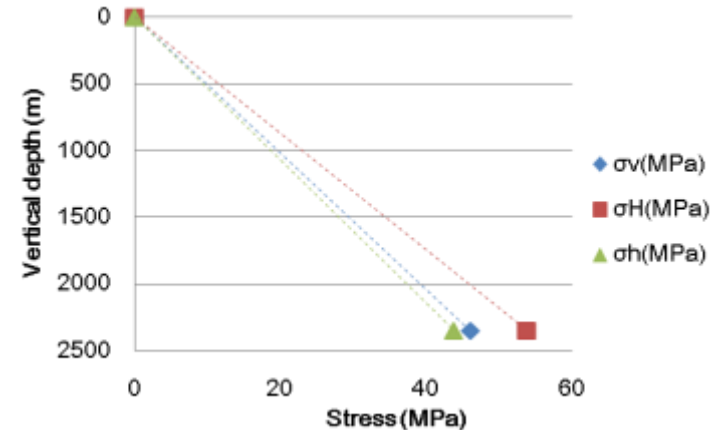
$P_s$ : シャットイン圧

$P_r$ : 亀裂開口圧

$\sigma_h$ : 面内最小主応力

$\sigma_H$ : 面内最大主応力

$P_p$ : 間隙圧



現場応力の推定結果

リークオフ試験深度	2,352m
坑井傾斜	43度
亀裂開口圧 $P_r$	44.58MPa
亀裂閉合圧 $P_s$	43.79MPa
間隙圧	33MPa
垂直応力 $\sigma_v$	46MPa

#### 現場応力の推定結果

$$\sigma_H = 53.79\text{MPa}$$

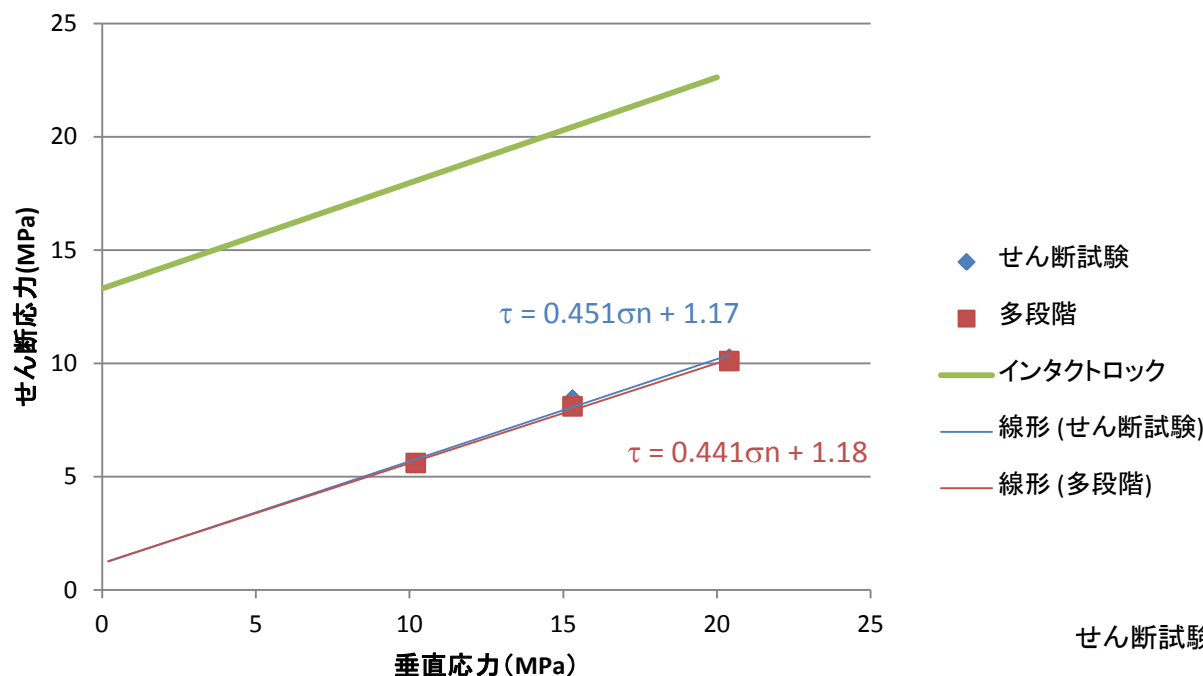
$$\sigma_h = 43.79\text{MPa}$$

$$\sigma_v = 46.00\text{MPa}$$

## 2-2. 苫小牧実証試験における地震誘発の可能性についての検討

### 地層の静摩擦係数とすべり面の粘着力の推定

#### 摩擦試験結果



#### 滝ノ上層

深度(m)	3,045~3,045.3
岩相	砂質凝灰岩
試験方法	一面せん断試験
垂直応力	10MPa, 15MPa, 20MPa

垂直応力 (MPa)	T max (MPa)	
	3試験	多段階
10.2	5.6	5.6
15.3	8.4	8.1
20.4	10.2	10.1

	C (MPa)	静摩擦係数
せん断試験	1.17	0.451
多段階	1.18	0.441
三軸試験	13.3	0.466

せん断試験: すべり面を人工的に作り 垂直応力を変化させる毎に試料を代えて行った試験

多段階試験: すべり面を人工的に作り 同じ供試体で垂直応力を変化させて行った試験

三軸試験: すべり面のない試料を封圧下で破壊させる試験

三種類のコア試験とも静摩擦係数は一致したので、その値を使用。  
すべり面の粘着力として、人工的なすべり面を用いた試験の結果を使用する。

## 2-2. 苫小牧実証試験における地震誘発の可能性についての検討:

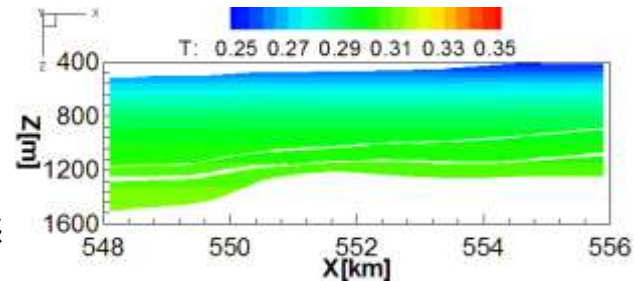
### 結果: 萌別層におけるすべり傾向係数の空間分布

萌別層における圧力上昇 $\Delta p$

萌別層におけるすべり傾向 $T$

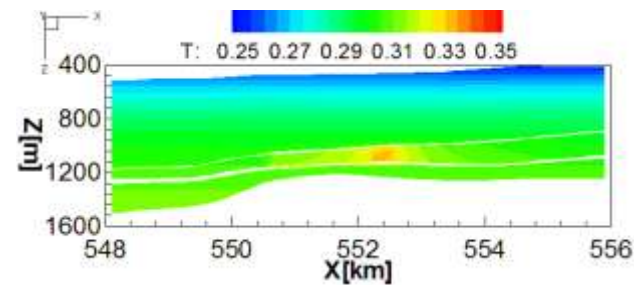
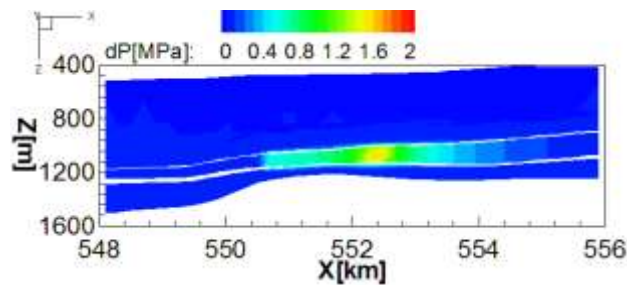
リークオフ・コア試験結果	
$\sigma_h/\sigma_z$	1.2
岩石固着力 $C$ (MPa)	1.1
摩擦係数 $\mu$	0.45

初期状態



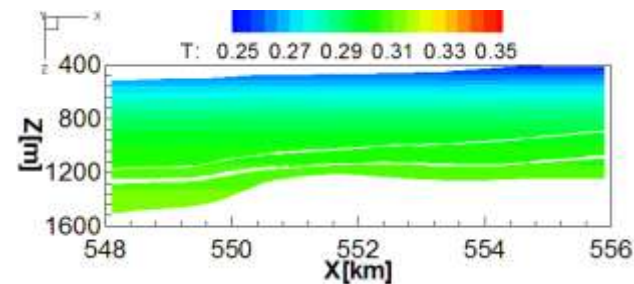
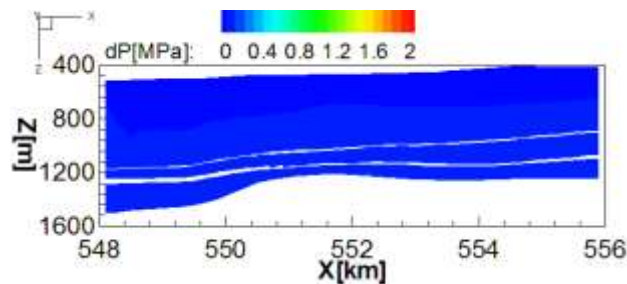
25万トン/年で行われた3年間の実証試験終了時では、圧入点周辺のすべり傾向係数がやや高い値を示すが、1を超えることはない(20年間の最大値で0.33である)。

3年後(圧入終了時)



圧入開始から20年経過すると、ほぼ圧入前の状態に戻る。

20年後



## 2-2. 苫小牧実証試験における地震誘発の可能性についての検討:

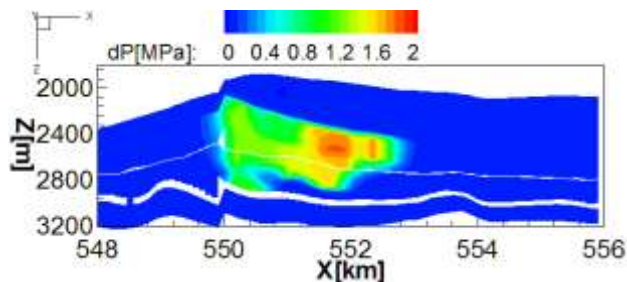
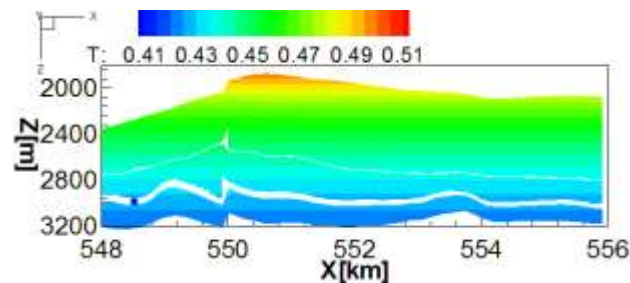
### 結果: 滝ノ上層におけるすべり傾向係数の空間分布

滝ノ上層における圧力上昇 $\Delta p$

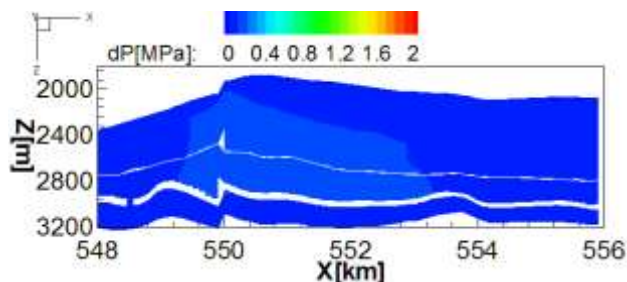
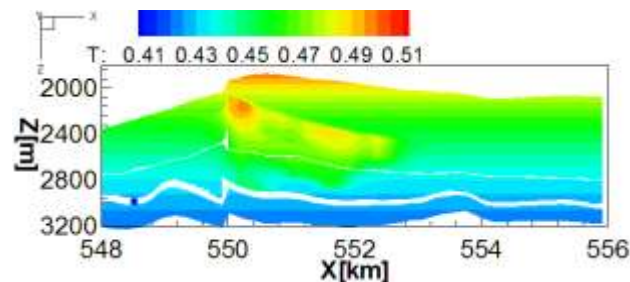
滝ノ上層におけるすべり傾向 $T$

リークオフ・コア試験結果	
$\sigma_h/\sigma_v$	1.2
岩石固着力 $C$ (MPa)	1.1
摩擦係数 $\mu$	0.45

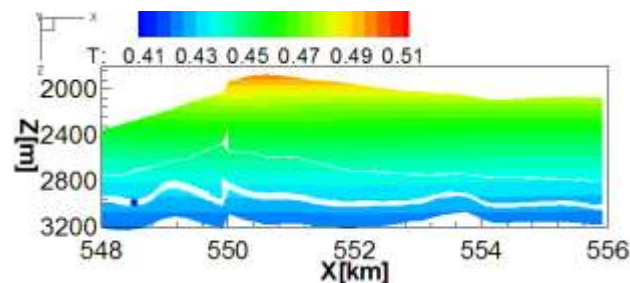
初期状態



3年後(圧入終了時)



200年後



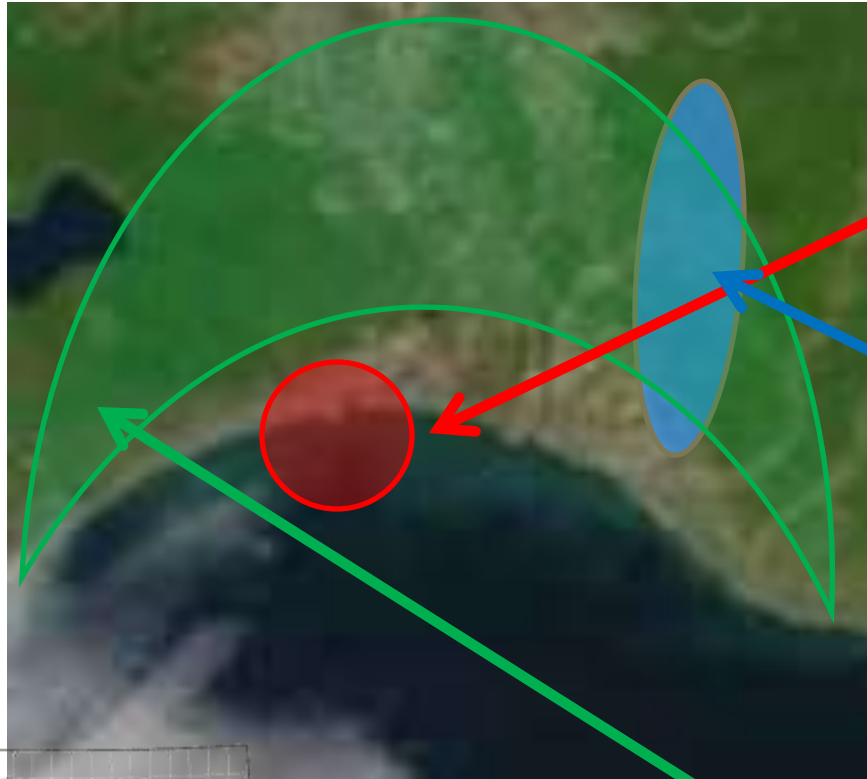
25万トン/年で行われた3年間の実証試験終了時では、圧入による間隙圧上昇の領域で、すべり傾向係数が増加するが、1を超えることはない(200年間の最大値で0.50である)。

圧入開始から200年経過すると圧入の影響範囲でも、すべり傾向係数は圧入前の状態に戻る。

遮蔽層のすべり傾向係数が浅いほど大きいのは、被圧しているため。

## 2-3. 地震観測網の提案

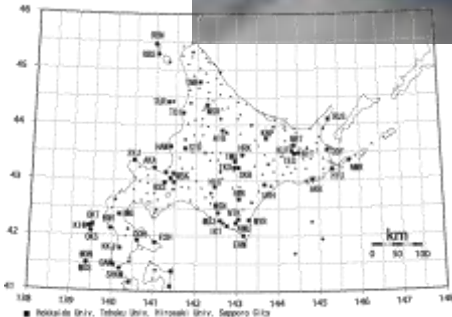
地震観測網の概念図 (NASA衛星画像に加筆)



観測結果を圧入オペレーションに反映することを目的とした観測網。  
このため、リアルタイムでの観測が必要。  
実証試験場における観測網は、地震計  
間隔の密な高感度の観測網により、ごく  
微小の地震(微小振動音)まで観測でき  
るようなデザイン(高周波数までとれる・  
高サンプリング速度・三次元の観測網)  
であること。

周辺に起こった被害地震と圧入事業  
との関係を検討できるためのデータ取  
得を目的として、石狩低地東縁断層帯  
南部の微小地震をモニターするた  
めの観測を行うこと。  
石狩低地東縁断層帯南部については  
地震調査研究推進本部が長期の地  
震発生確率を出しており、内陸地震と  
して、長期発生確率はやや高いグ  
ループに属すると評価されている。

実証試験場周辺の地震活動の  
モニターをおこなうため、既存  
観測網と連携を取ること。



北海道の既存観測網 (北海道大学地震火山研究観測センター ホームページ <http://hkdrcep.sci.hokudai.ac.jp/graphics/station.html> )

## 2-4. 検討結果のまとめ

- (1) 本検討においては、すべり傾向係数が1になるような場所は検出されなかった。すなわちCO<sub>2</sub>圧入により、すべりが生じる(微小地震が発生する)可能性はないと考えられる。
- (2) 萌別層のほうが滝ノ上層よりもすべり傾向係数が小さい。
- (3) すべり傾向係数が高いところをターゲットとして地震のモニタリングをし、圧入オペレーションに反映することが重要である。
- (4) 石狩低地東縁断層帯南部は、地震発生確率がやや高いと予想されているので、圧入試験と地震との因果関係を明らかにする上でも、石狩低地東縁断層帯南部周辺を対象とした観測を実施することが重要である。
- (5) 周辺の地震活動をモニターするため、既存観測網と連携を取ることが重要である。

# 3. 自然地震が貯留性能に及ぼす影響についての検討

## 方針

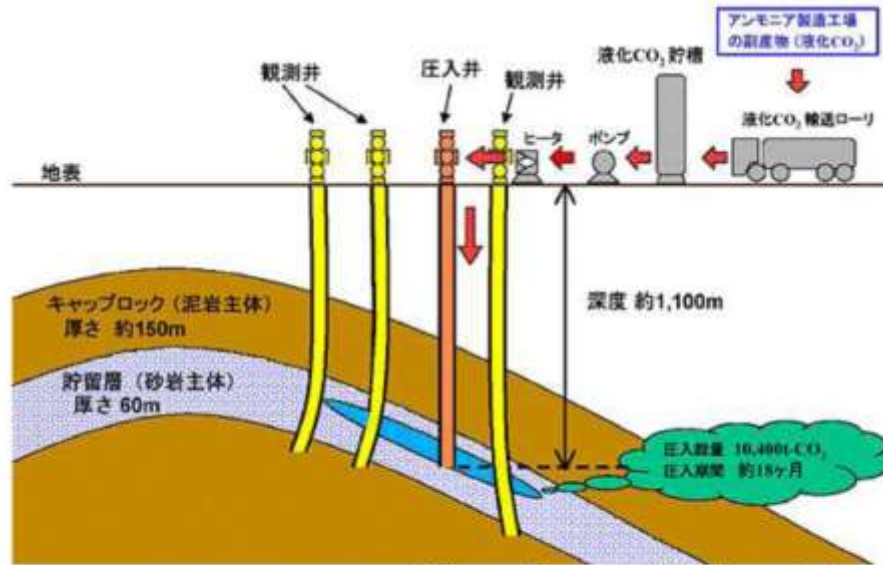
### 3-1. 長岡における中越・中越沖地震での貯留層への影響の事例検討

長岡のCCSサイトは、世界で唯一強震動に見舞われた例であるため、中越・中越沖地震の際の孔底圧記録結果について検討した。

### 3-2. 苫小牧実証試験候補地における既存断層による影響の検討

長岡での経験では、地表で大きな被害を起こすような地震でも、地下での影響は大変小さかったが、念のための検討として、苫小牧の実証実験サイトにある既存断層について、強震動で浸透率が大きく変化した場合の貯留性能への影響についてシミュレーションにより検討を行った。

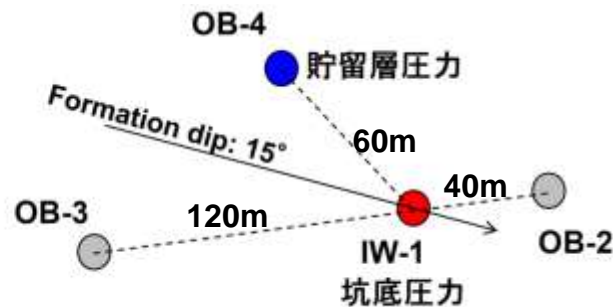
### 3-1. 長岡における中越・中越沖地震での貯留層への影響の事例検討



出典: エンジニアリング協会ホームページ

長岡CO<sub>2</sub>圧入実証試験全体概要

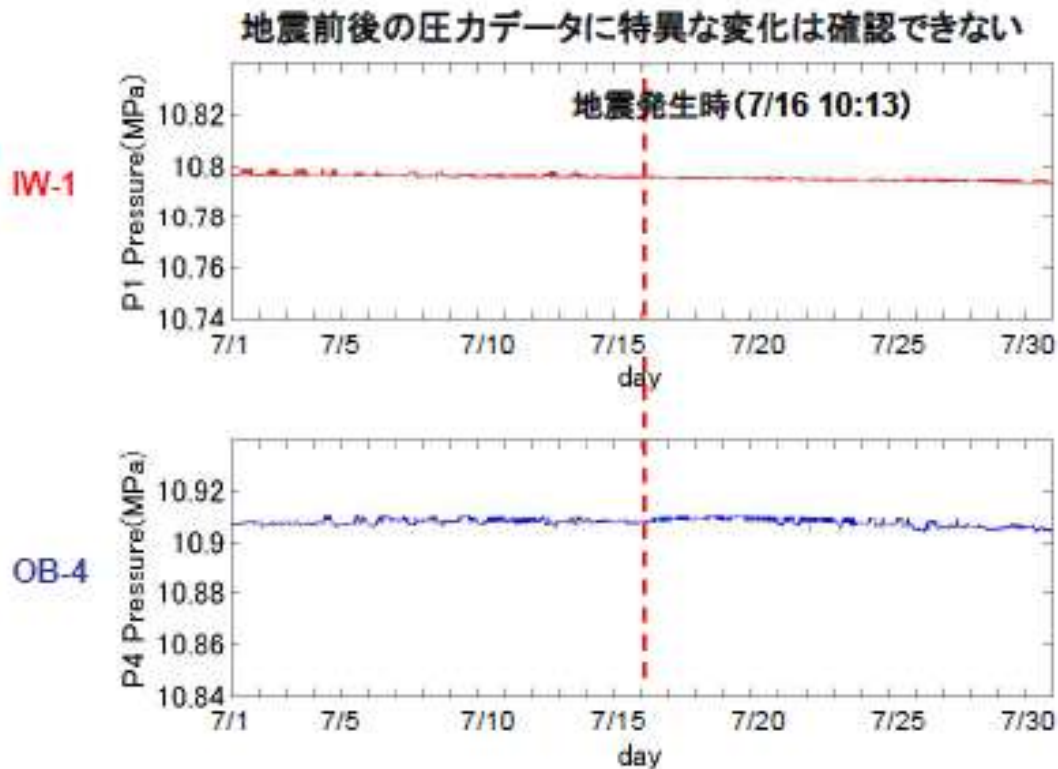
長岡サイトでは、  
 圧入井 (IW-1: 1,072.46mMD) と  
 観測井 (OB-4: 1,090.83mMD) に  
 圧力センサが設置されている。



長岡CO<sub>2</sub>圧入実証試験の坑井配置 (提供: RITE)

### 3-1. 長岡における中越・中越沖地震での貯留層への影響の事例検討 (続き)

中越沖地震(2007/07/16 10:13)が起きた7月分のデータ (提供:RITE)

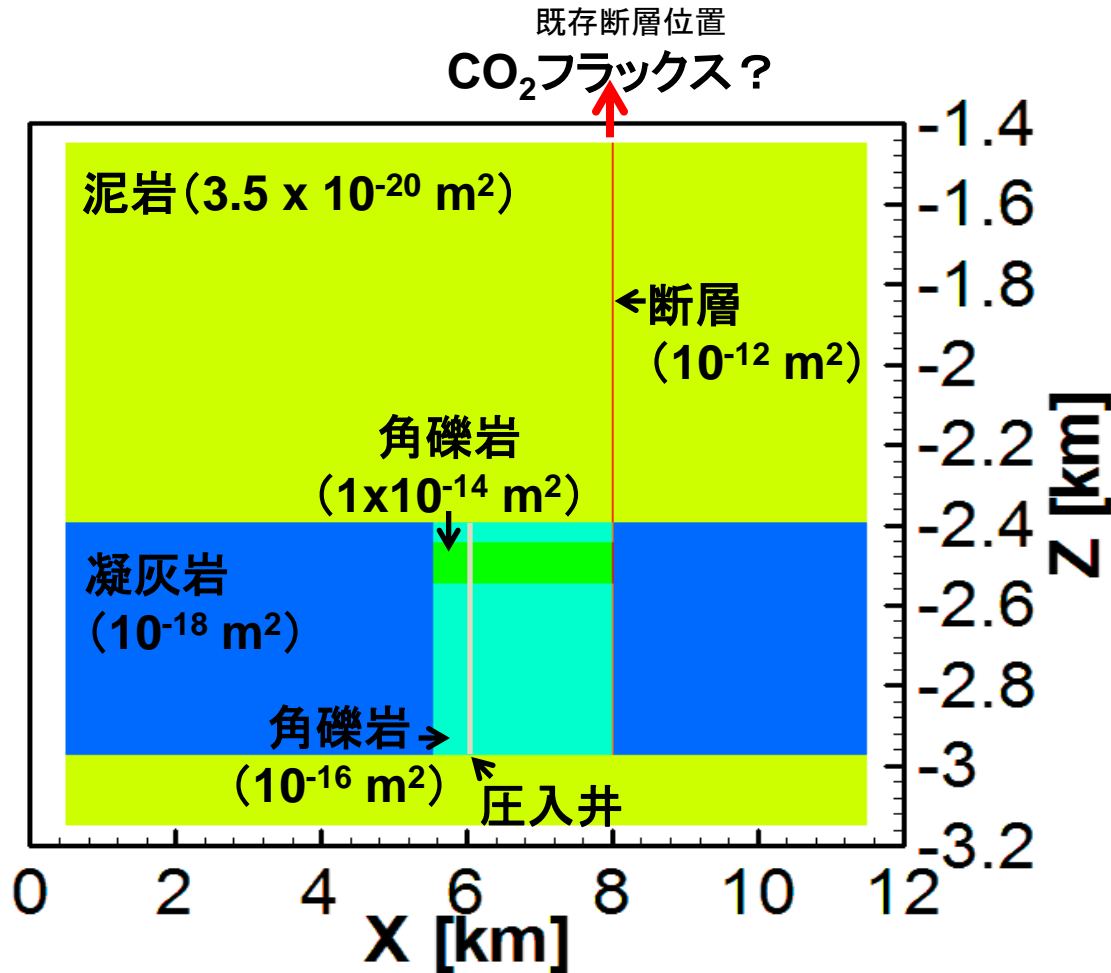


中越地震・中越沖地震では長岡の実証試験サイトで震度6弱に見舞われたが、貯留層からのCO<sub>2</sub>漏出は認められなかった。上図は、中越沖地震の際に観測された孔底圧の時間変化であるが、貯留層の間隙圧には変化が見られなかった。

長岡のサイトは、強震動がおそった世界唯一のCCSサイトであり、この知見をもとにすれば、圧入事業が適切に行われていれば、地震動により、キャップロックに開口性の亀裂が生じ、CO<sub>2</sub>が漏えいするということは生じないと判断される。



### 3-2. 苫小牧実証試験候補地における既存断層による影響の検討: 断層発生による貯留性影響の検討シミュレーションモデル



断層モデル概念図

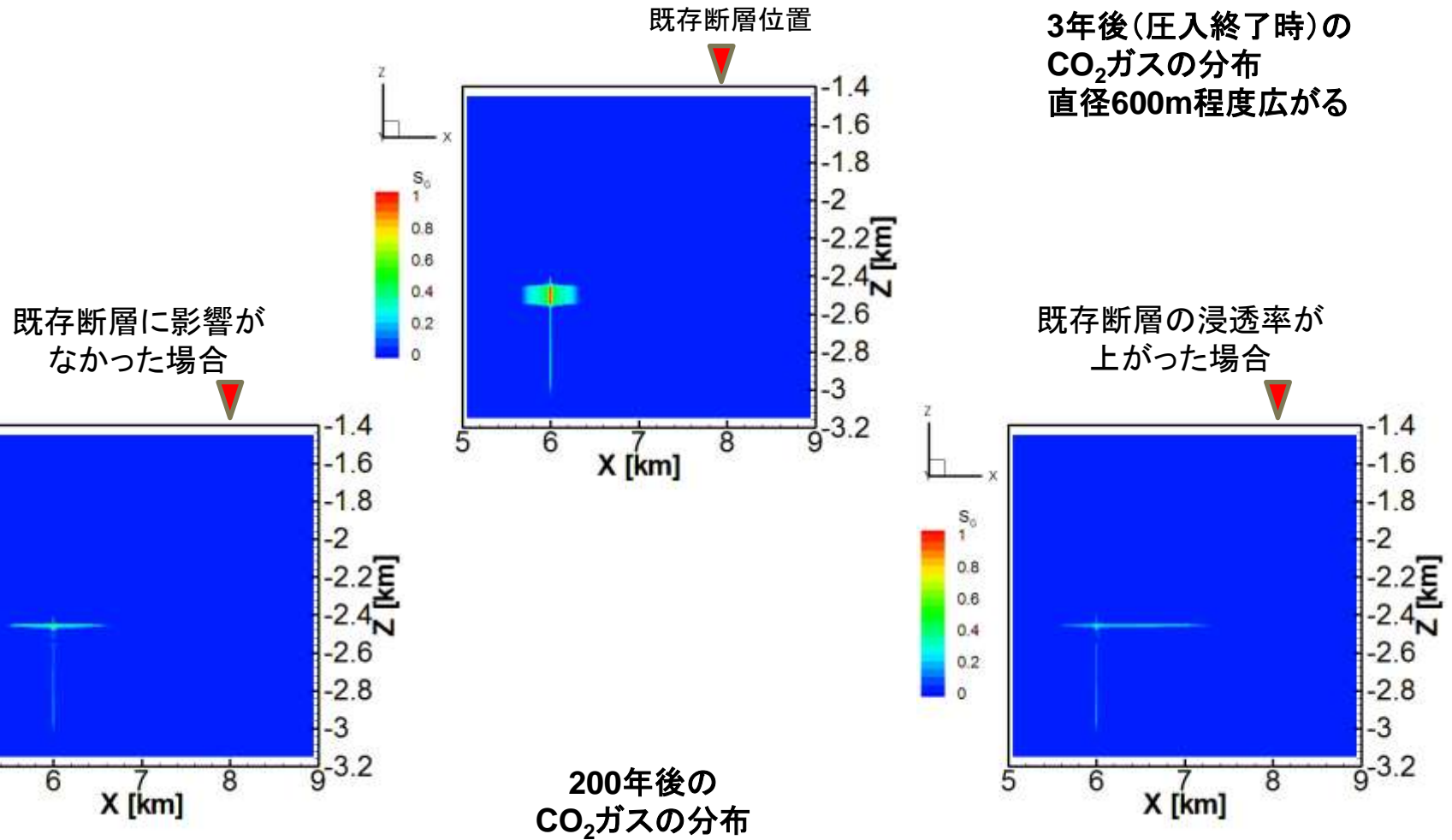
図は三次元モデルのZX断面図である。

圧入点から2km遠の非活断層が、外部の大規模地震によりすべり、浸透率が上がった場合(1ダルシー:  $10^{-12} \text{ m}^2$ 、幅0.1m)を仮定する。

浸透率を上げるタイミングは最も圧力が高くなる25万トン/年×3年の圧入が終わった時点とした。

(注)1ダルシーまで上がった浸透率そのまま保持されることは地殻応力の影響などから考えられないが、極端な例として考察した。

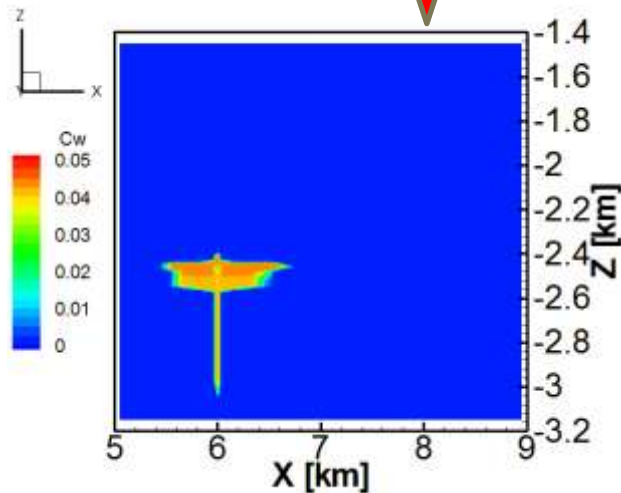
### 3-2. 苫小牧実証試験候補地における既存断層による影響の検討: 地層内のCO<sub>2</sub>ガス分布



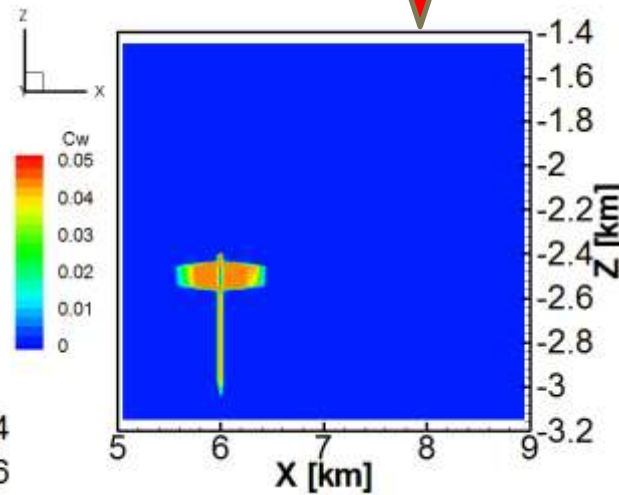
強震動が既存断層の浸透率に影響を及ぼした場合、圧入終了200年経過後の地層内のCO<sub>2</sub>ガスの分布は断層方向に伸びるが、断層に達することはない、断層からの漏出は見られない

### 3-2. 苫小牧実証試験候補地における既存断層による影響の検討: 地層内の溶解CO<sub>2</sub>分布

既存断層に影響が  
なかった場合

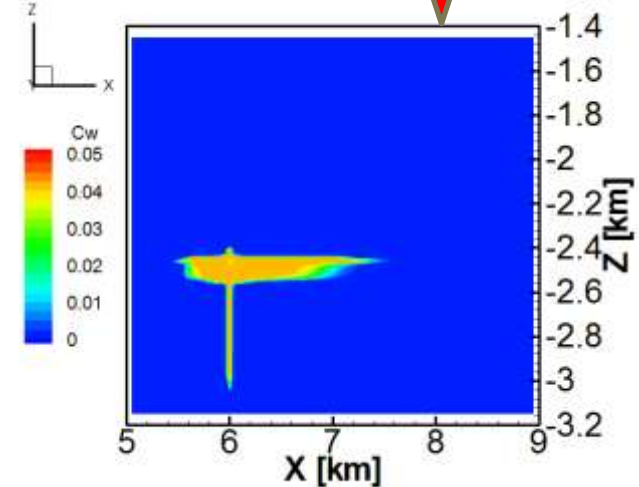


既存断層位置



3年後(圧入終了時)の  
溶解CO<sub>2</sub>ガスの分布  
直径1100m程度広がる

既存断層の浸透率が  
上がった場合



200年後の  
溶解CO<sub>2</sub>分布

強震動が既存断層の浸透率に影響を及ぼした場合、圧入終了200年経過後の地層内の溶解CO<sub>2</sub>の分布は断層方向に伸びるが、断層に達することはなく、断層からの漏出は見られない

### 3-3. 検討結果のまとめ

- (1) 中越・中越沖地震で震度6弱の烈震を受けた長岡CCS実証サイトの、地震時の孔底圧記録などから、地下深部の貯留性能は自然地震の影響を受けていないことが分かった。
- (2) 苫小牧実証試験サイトでは、候補地の西側に滝ノ上層を横切り萌別層の底部に達する既存断層がある。念のため、強震動によって、この既存断層の浸透率が1ダルシーの高浸透率となる場合をシミュレーションしたが、貯留層からの漏えいは認められなかった。

## 4. まとめ

### 1. CO<sub>2</sub>圧入による地震誘発の可能性についての評価

- (1) 本検討では、すべり傾向係数が1になるような場所はなかった。すなわちCO<sub>2</sub>圧入により、すべりが生じる(微小地震が発生する)可能性はないと考えられる。
- (2) 萌別層のほうが滝ノ上層よりもすべり傾向係数が小さい。
- (3) すべり傾向係数が高いところをターゲットとして地震のモニタリングをし、圧入オペレーションに反映することが重要である。
- (4) 石狩低地東縁断層帯南部は、地震発生の確率がやや高いと予想されているので、圧入試験と地震との因果関係を明らかにする上でも、石狩低地東縁断層帯南部周辺を対象とした観測を実施することが重要である。
- (5) 周辺の地震活動をモニターするため、既存観測網と連携を取ることが重要である。

### 2. 自然地震が貯留性能に及ぼす影響についての評価

- (1) 中越・中越沖地震で震度6弱の烈震を受けた長岡CCS実証サイトの、地震時の孔底圧記録などから、地下深部の貯留性能は自然地震の影響を受けていないことが分かった。
- (2) 苫小牧実証試験サイトでは、候補地の西側に滝ノ上層を横切り萌別層の底部に達する既存断層がある。念のため、強震動によって、この既存断層の浸透率が1ダルシーの高浸透率となる場合をシミュレーションしたが、貯留層からの漏えいは認められなかった。