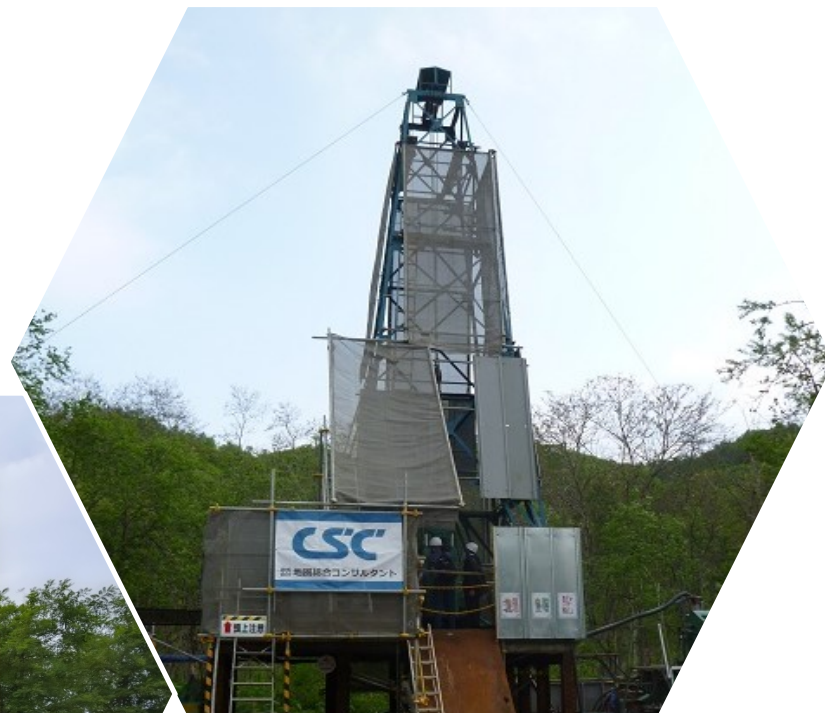


第13回 三笠市石炭資源活用研究会
三笠市未利用エネルギー活用フォーラム
2023年3月14日 於三笠市民会館

弥生双葉町における CO₂地下固定実験の成果



室蘭工業大学客員教授
NPO法人地下資源イノベーションネットワーク
理事長 出口 剛太

三笠市CO₂地下固定研究業務の背景・目的

- 木質バイオマスと未利用石炭の石炭地下ガス化によるCO₂フリー水素の生産と利活用。
 - ➔ ゼロカーボンシティへの挑戦
- 石炭地下ガス化や水素精製の段階でCO₂が発生。
 - ➔ CO₂を分離・回収・貯留・利用するCCS/CCUSの適用
 - ➔ 石炭の採掘跡を利用する「CO₂地下固定」の可能性を検討
- **試掘・地層評価**：実際にボーリングを実施して地下の状況を確認。
 - 注入性：CO₂注入が容易な空隙率の大きな地層の存在
 - 漏洩防止：貯留層上部が泥岩などの低浸透率の地層で覆われている
- **注入実験**：水、CO₂マイクロバブル水、CO₂と反応して固化するスラリーの注入。
 - 注入圧力・注入量の評価
- 最適なスラリー材の開発（CO₂反応量、固化反応速度、注入性等）。
- 将来的な事業の概略設計を行うための、機材や施工方法に関する基礎資料の収集。

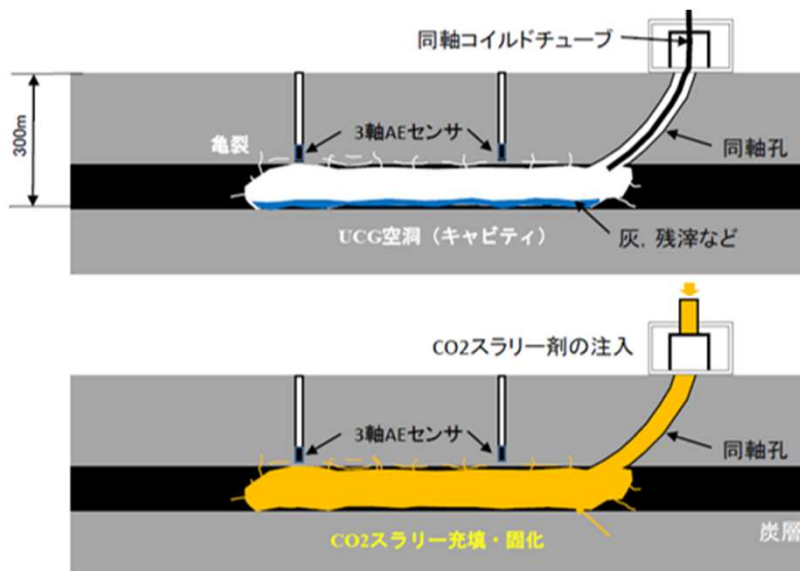
CCS/CCUSとは？

1. CCS

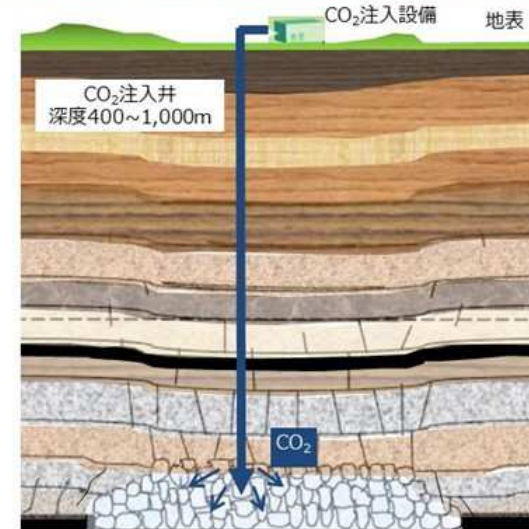
(Carbon dioxide Capture and Storage)

CO₂は水に溶ける、石炭に吸着する性質がある。石炭地下ガス化の過程で発生するCO₂を分離・回収して地下に送り込み、採掘跡の坑内水への溶解や未採掘石炭への吸着により、CO₂を地下に封じ込める。

幌内炭鉱/奔別炭鉱採掘跡の
CCS/CCUSポテンシャルは1,200万t-CO₂以上



地下深部に存在する石炭採掘跡や坑道跡に地表からのボーリング孔を介してCO₂を注入する



石炭の直上層は破壊され採掘跡に崩落する。その影響で上部の岩石層まで多くの亀裂が入り、全体として空隙率の大きな区域を形成する

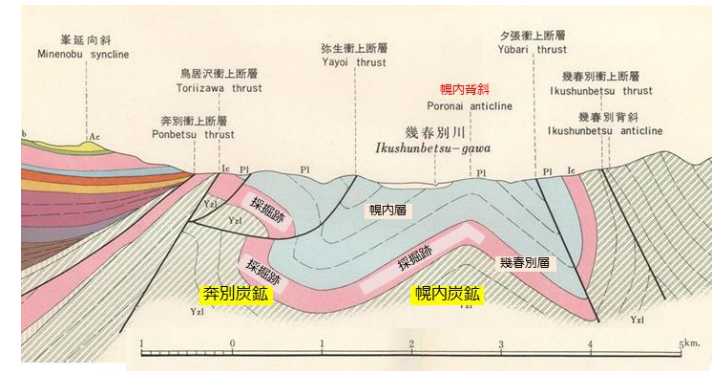
2. CCUS

(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)

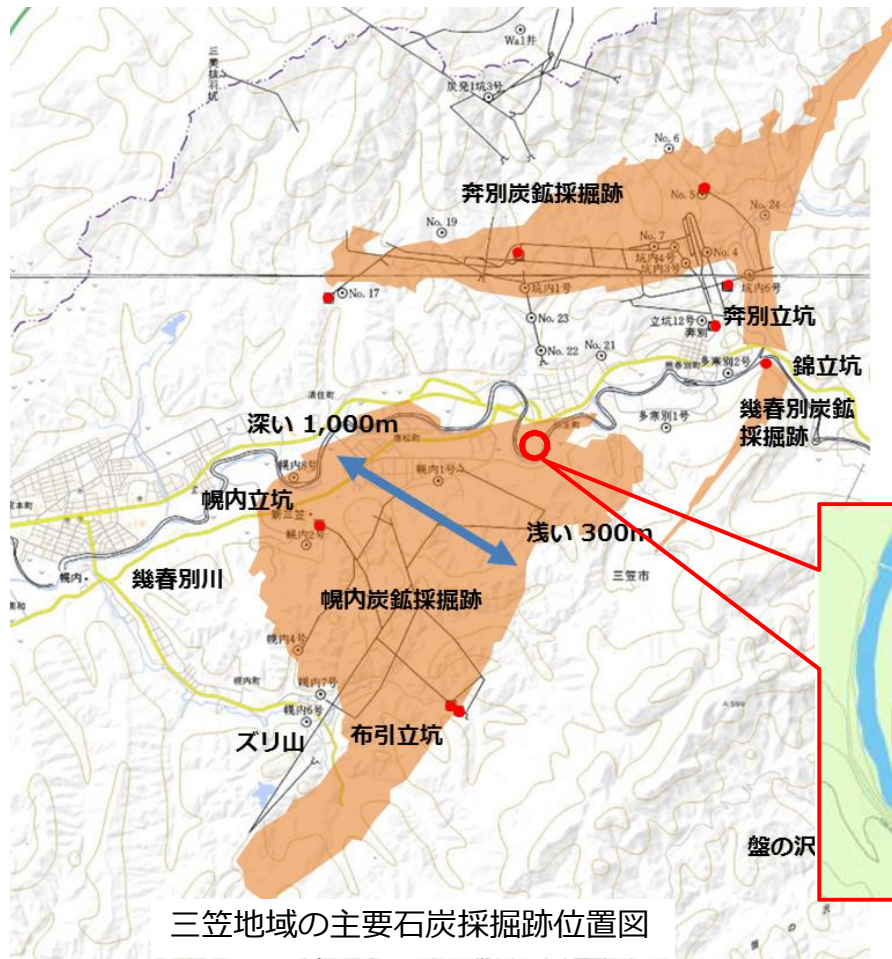
CO₂と反応し固化するスラリーをUCG終了後の空洞や採掘跡に送り込み、地下に送り込まれたCO₂と反応させて固化させる。これにより、CO₂を安定的に地下に固定する。地盤の安定化にもつながる。

実施現場

- 2021年度に複数のサイトを調査し、三笠市弥生双葉町（元住友奔別炭鉱住宅跡地）に決定。
- 地表下400m程度に幾春別層5番層の採掘跡（炭層傾斜約30度）。
- 採掘炭層上部には泥岩を主体とする幌内層が厚く賦存。（幾春別層最浅部は背斜構造を形成）



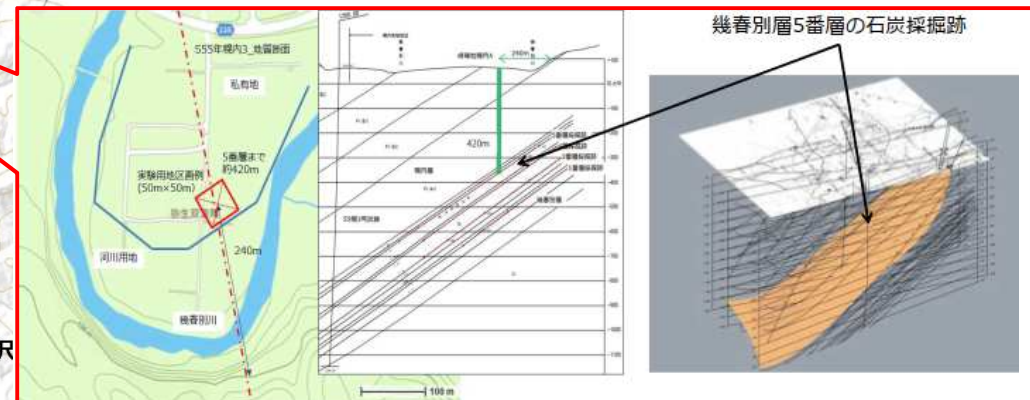
三笠地域の典型的な地質断面図



三笠地域の主要石炭採掘跡位置図

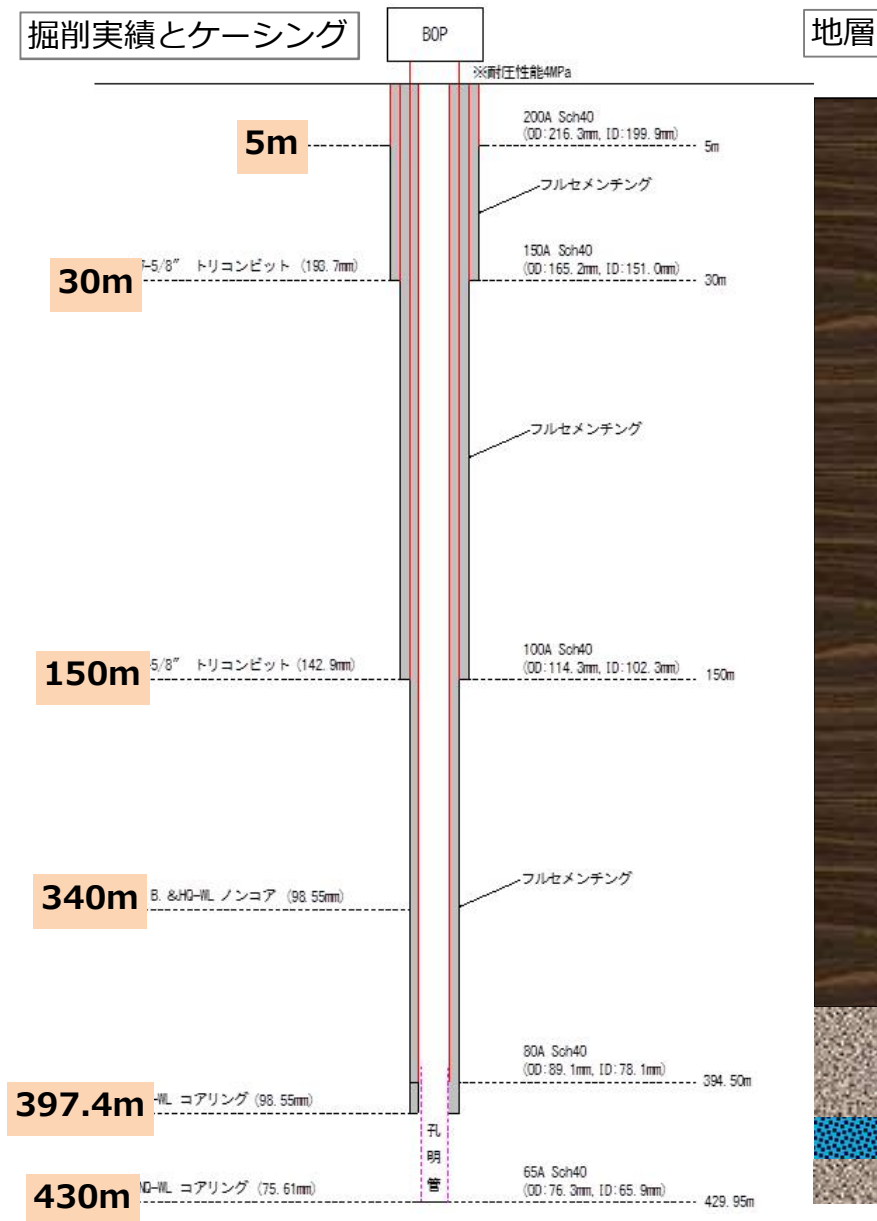
CCS実験候補地の最適条件

- 地表下400m程度に採掘跡
- 上位幌内層厚200m以上
- ガストラップ構造（背斜構造）
- 市有林内or市有地内
- 地表アクセスと作業領域確保



注入井掘削位置と予想地質断面図

注入井掘削



幌内層
(泥岩)

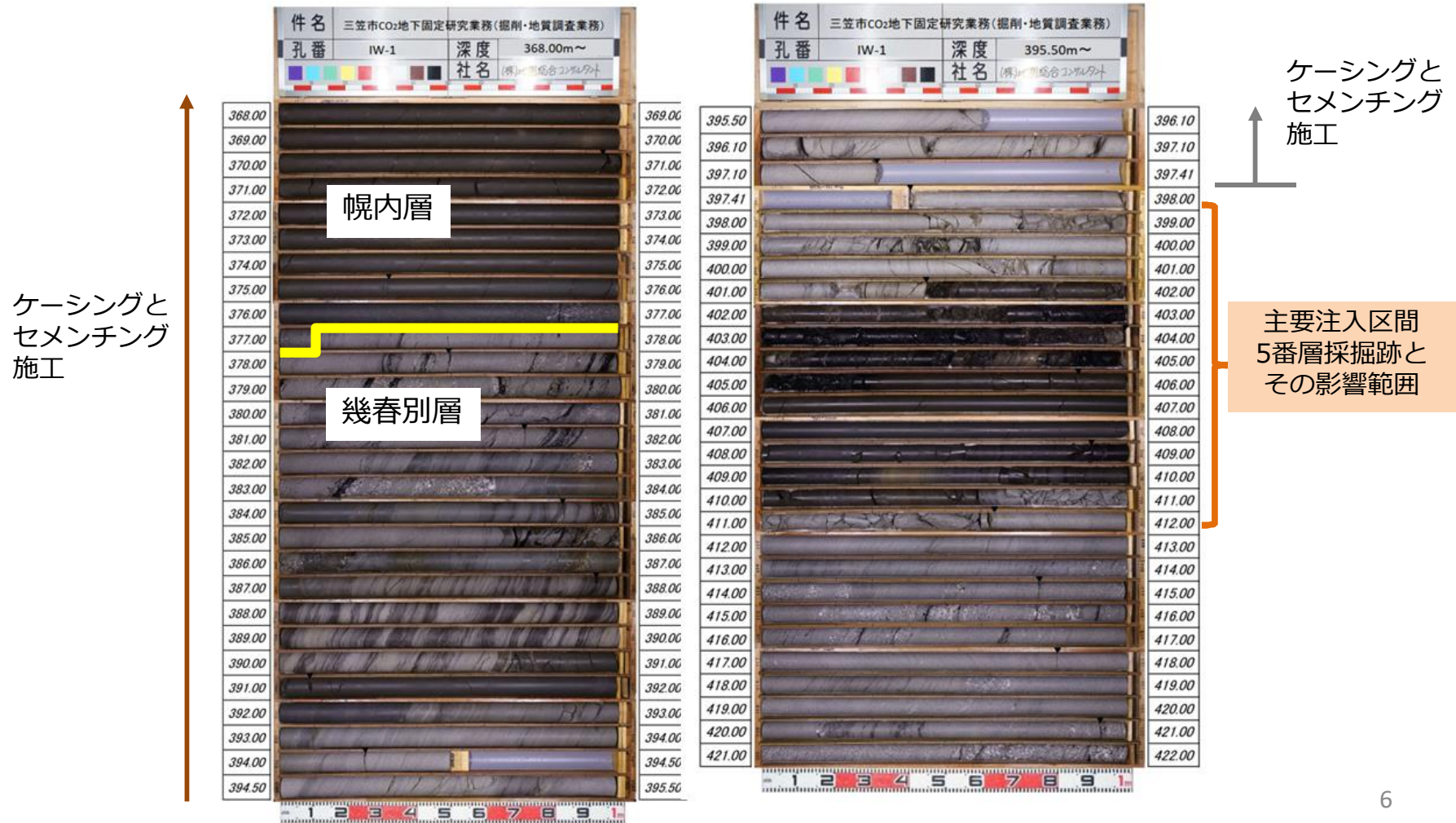
幾春別層
(砂岩・泥岩・石炭)

5番層採掘跡

CO₂注入井掘削工事
(2022年5月19日撮影)

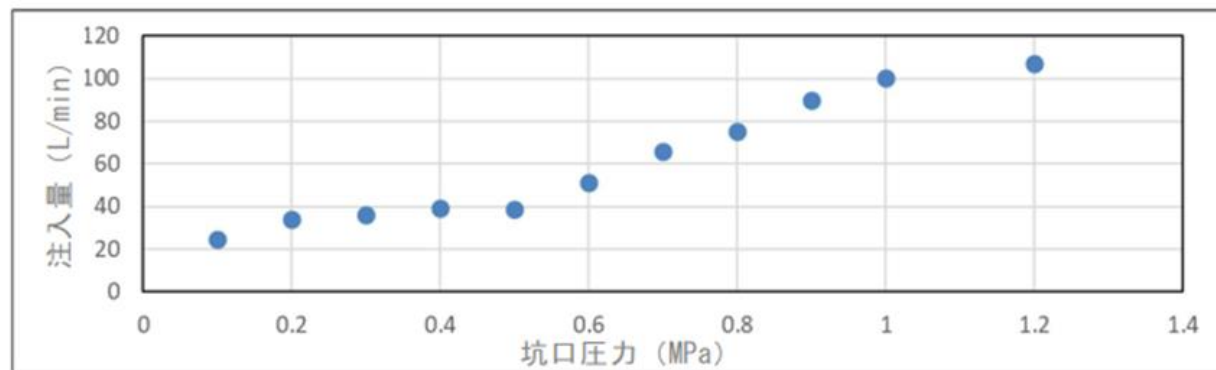
コア採取結果

- 計画通り深度430mの注入井を掘削し、402~405mの深度に幾春別層5番層の採掘跡を確認。
- 深度6mから377mにキャップロックとなる厚さ300m以上の均一な泥岩層（幌内層）を確認。
- 検層（電気検層、温度検層、ガンマ線検層）に加え、コア調査（観察、X線回折）や岩石試験を実施し、地質状況に関する基礎情報を収集。



貯留層評価 - インジェクションテスト (注入実験前) -

- 貯留層（注入領域）の透水性を評価するためにインジェクションテストを実施。
- 送水ポンプを使用して徐々に圧力を上げて注入流量の変化を計測。
- 孔底付近にも圧力センサと温度センサを挿入し、データを記録。
- 貯留層圧力（孔底圧）は4.0MPa，孔底温度は22.8℃。
- 注入圧1.2MPaで100L/min（60m³/h）以上の注入が可能 → 良好な透水性を確認。



インジェクションテストの結果（注入圧力-注入量グラフ）



孔底に設置した圧力センサ/温度センサ



インジェクションテスト実施状況



使用した送水ポンプ 7

CCS/CCUS実験 - 注入実績 -

- 注入区間に設定した5番層採掘跡に、**水**、**CO₂マイクロバブル水 (MB水)**、**スラリー**を交互に注入し、それぞれの流体の注入性を確認。

水： **84m³** (インジェクションテスト含む)

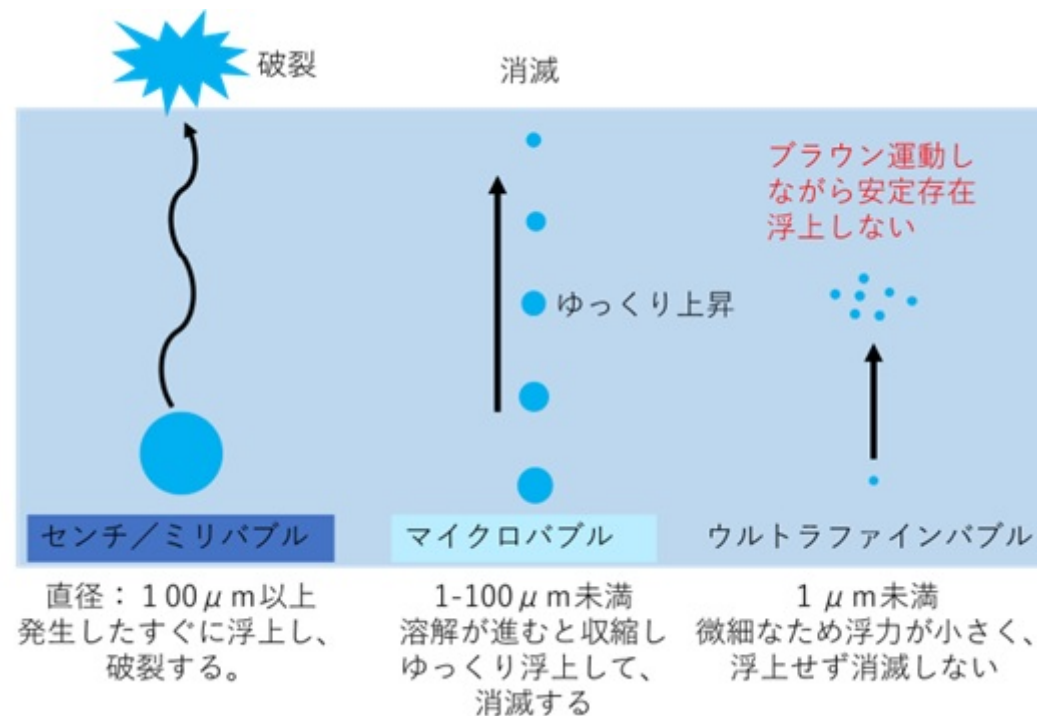
MB水： **23m³** (CO₂:320kg CO₂/水重量比 平均1.4%)

スラリー： **78m³** (高炉スラグ39トン)

月日	時間		水		MB				スラリー		備考
	from	to	注入総量	注入流量	注入総量	注入流量	CO ₂ 注入総量	CO ₂ 注入流量	SL注入総量	SL注入流量	
			L	L/min	L	L/min	kg	kg/h	L	L/min	
7月23日			5,000	50							孔内洗浄
7月25日	10:30	13:30	6,030	40~130							インジェクションテスト1回目
8月23日	14:15	14:45			2,800	100	19.4	44.8			MB水1回目
8月24日	9:30	10:20	5,880	100~175							清水注入
8月25日	13:10	13:30			2,700	150	50.4	168.1			MB水2回目
8月26日	8:50	9:08			2,740	150	74.5	245.1			MB水3回目
8月27日	9:05	12:30	30,000	150							清水注入
8月29日	9:25	9:30	250	50							清水注入
	9:30	10:08							1,800	48	スラリー予備注入
	10:08	10:52	2,040	46							清水注入
	10:52	12:20	4,550	50							清水注入
	12:20	14:11			5,630	50	52.6	44.8			MB水4回目
	14:12	14:31	1,000	55							清水注入
	14:30										スラリー連続1回目 (W/B=2.0)
8月30日		6:42							53,830	45~100	
	6:43	11:08	12,780	50							清水注入
	11:10	12:57			5,380	50	94.4	52.9			MB水5回目
	12:58	15:46	8,850	50							清水注入
	15:49	16:02	655	50							清水注入
	16:02	20:05							16,480	50~100	スラリー連続2回目 (W/B=1.5、1.25)
	20:08	21:39			4,230	60	25.9	0.3	5,400	60	スラリー&MB水
	21:39	22:52	4,080	60							清水注入
9月1日	9:05	10:10	1,740	10~27							インジェクションテスト2回目
10月26日	9:30	10:45	1,240	3~18							インジェクションテスト3回目
		合計	84,095		23,480		317.2		77,510		
		最大流量		175		150		245.1		100	

CO₂マイクロバブル水の特徴

- CO₂マイクロバブル水：直径が100 μ m (1/1000mm) 未満の気泡としてCO₂を混ぜ込んだ水。
- 通常の気泡 (cm~mmオーダー) は浮力で上昇し、水面上で破裂する。
- マイクロバブルは縮小しながらゆっくりと上昇することで水に溶解・消滅する。
- さらに小さなウルトラファインバブル (1 μ m未満) は浮力の影響を受けずにその場に留まる。
- 使用したマイクロバブル発生ノズル (ファインバブル発生ノズル) は、マイクロバブルとウルトラファインバブルの両方を発生。
- 低圧でCO₂を地下に圧入する有力な方法 ➡ 大量の水を必要とする。

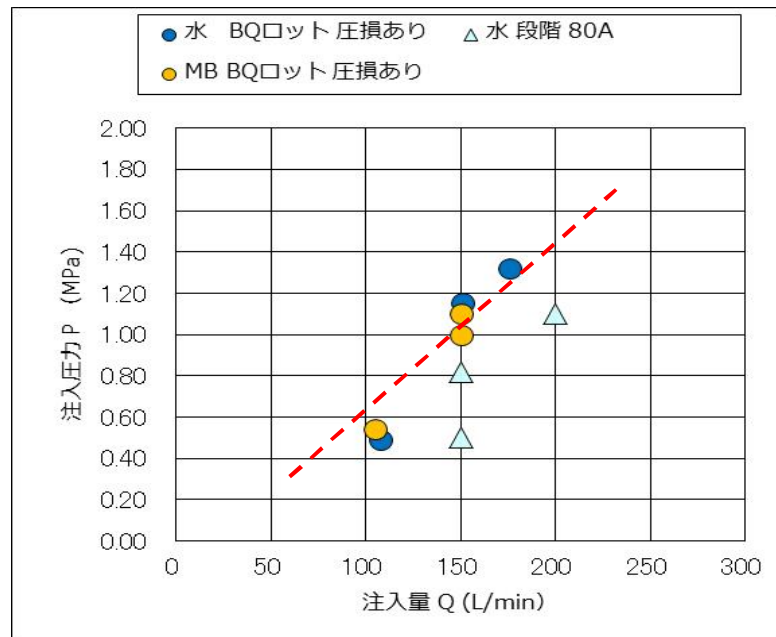


CCS実験 (CO₂マイクロバブル水)

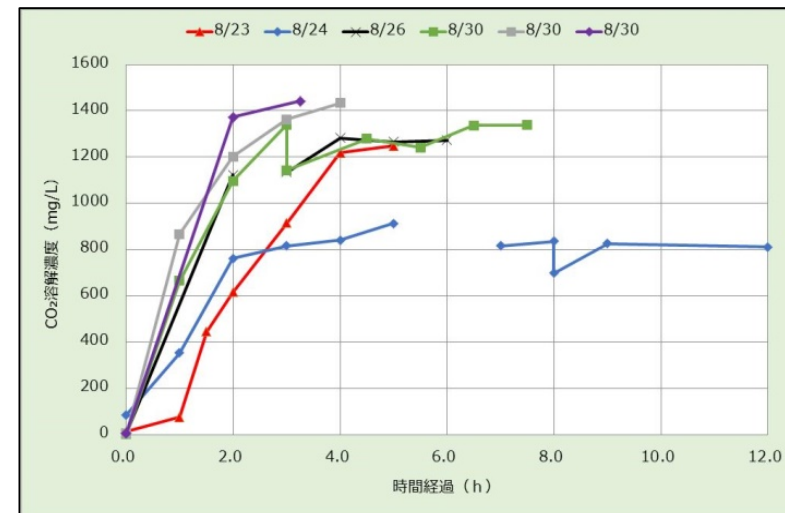
- MB水は、3m³水槽内にファインバブル発生器を設置し、水槽内の水を発生器内に循環させることで製造。
- 水に溶解したCO₂は濃度計にて計測可能。
- 水中にMBとして存在するCO₂賦存量の計測は現状では難しい。今回の実験では、MB水に送り込んだCO₂量を賦存量と想定して評価。
- 水との重量比で最高2.7%のCO₂賦存量のMB水が製造可能。
- 注入圧1MPaで150L/minの注入が可能。管径を太くし、圧力損失を下げることで、2.0MPaで400L/minの注入も可能性有り。
- CO₂注入能力としては1日当たり約6トンのCO₂注入が可能。
- 循環式でのMB水製造には時間を要する。より効率よく大量のCO₂マイクロバブルを混入できるMB水製造法を導入する必要がある。



MB水製造水槽内部の機器配置



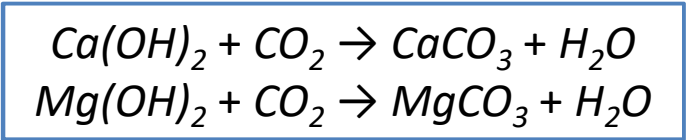
水/MB水注入状況



MB水へのCO₂溶解量

CCUS実験（スラリー注入）

- 事前にCO₂マイクロバブル水を注入 ➡ その後CO₂と反応して固化するスラリーを注入。
- スラリー：**水+高炉スラグ（BSF）+ 混和剤**の混合材。
- BFSはCO₂と反応して固化するCaOやMgOを多く含む。
- 基本50L/min程度の注入速度 ➡ 100L/minまで注入量を段階的に増加させる実験も実施。
- W/B（水/BSF：重量比）=1.0のスラリー：注入井の内圧が急上昇したため注入中止。
- W/B=1.25~2.0の配合比のスラリー：いずれも注入可能 ➡ 総合計で78m³のスラリーを注入。
- MB水とBSFの混合スラリー（W/B=1.25）6m³の注入も実施 ➡ 急速に固化することなく注入可能



スラリーとCO₂の主要反応



P-ポート試験とサンプル採取

バインダー	化学組成(%)					
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
ポルトランドセメント	64.25	21.37	5.5	2.79	2.06	1.9
高炉スラグ (BSF)	43.36	34.03	14.36	0.83	6.51	-
フライアッシュ	3.75	57.75	23.65	5.75	1.1	1.05

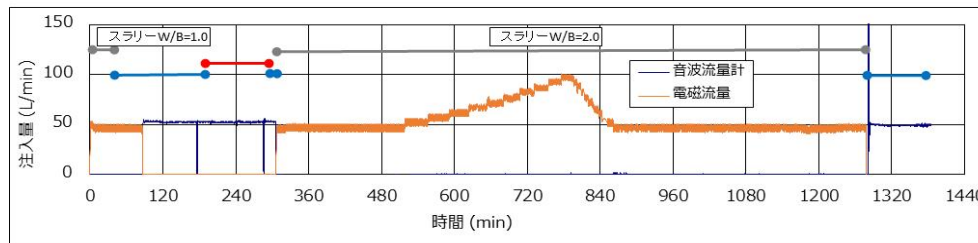
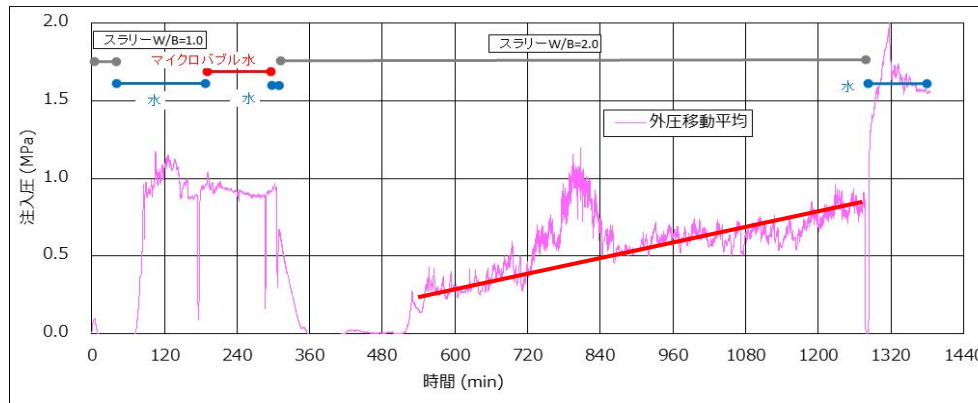
BSFの代表的な化学組成

配合比		1m ³ 当たりの配合			比重
W/B	混和剤 W%	BSF kg	水 kg	混和剤 g	
1.00	0.05	744	744	740	1.489
1.25	0.05	627	784	623	1.412
1.50	0.05	542	813	539	1.356
2.00	0.05	427	854	424	1.281

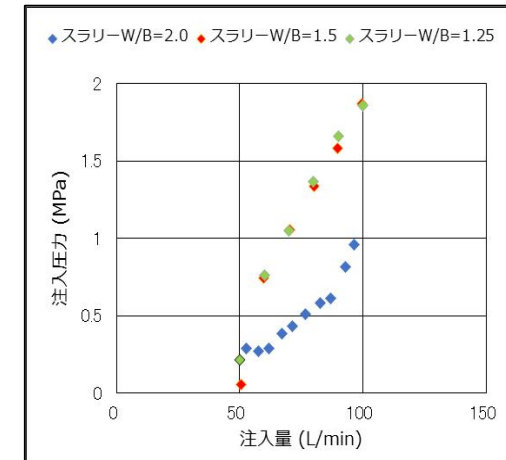
スラリー配合比一覧

CCUS実験 (スラリー注入量と注入圧)

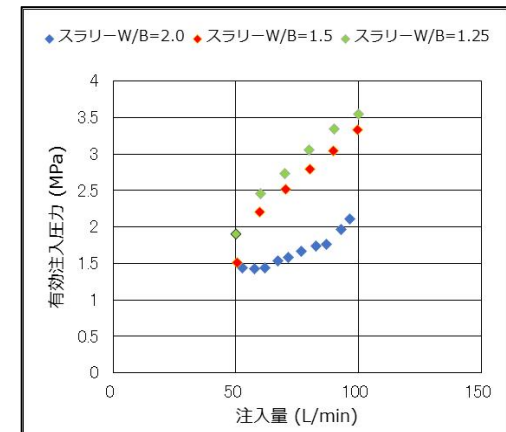
- 水やMB水の注入と比較するとスラリー注入では2倍以上の注入圧が必要。
- 注入量や累積注入量が増加する程より高い注入圧が必要。
- スラリーの濃度が高い程より高い注入圧が必要。
- スラリー注入の場合、水と比べて比重が高いため、坑底では水との比重差に応じた圧力が加算される（有効注入圧）。



スラリー連続注入（1回目）の注入圧（上）と注入量（下）



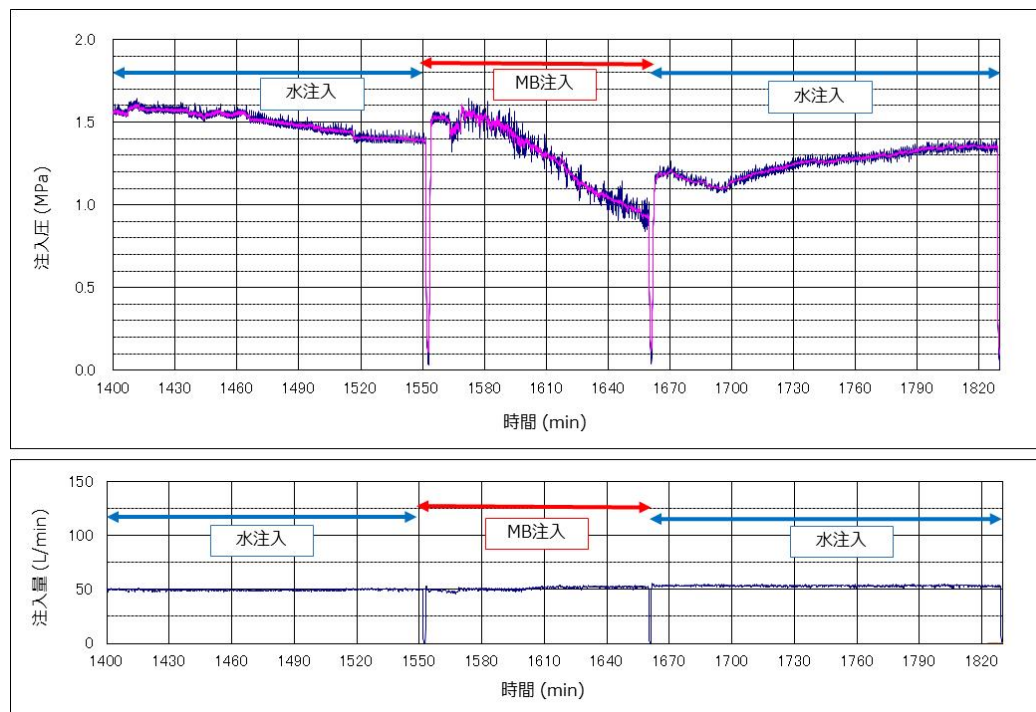
注入量と注入圧力（ポンプ圧）



注入量と注入圧力（有効注入圧）

CCS実験 (CO₂マイクロバブル水)

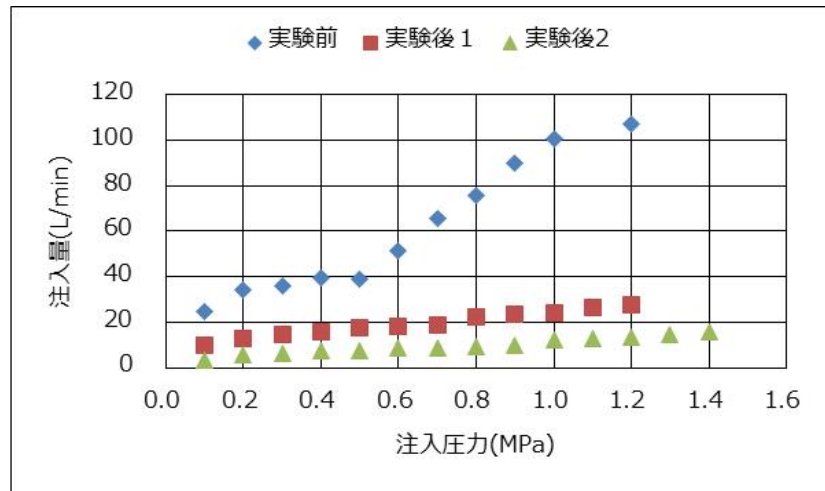
- 連続16時間、W/B=2.0のスラリーを約55m³注入後に水、MB水、水を50L/minで7時間注入。
- スラリー注入の影響で注入開始時の注入圧は高い（浸透性が低下）が、徐々に注入圧は低下傾向（浸透性の回復）。
- 注入圧の低下量は水よりもMB水で大きいことから、浸透性の回復効果は水よりもMB水が高い。



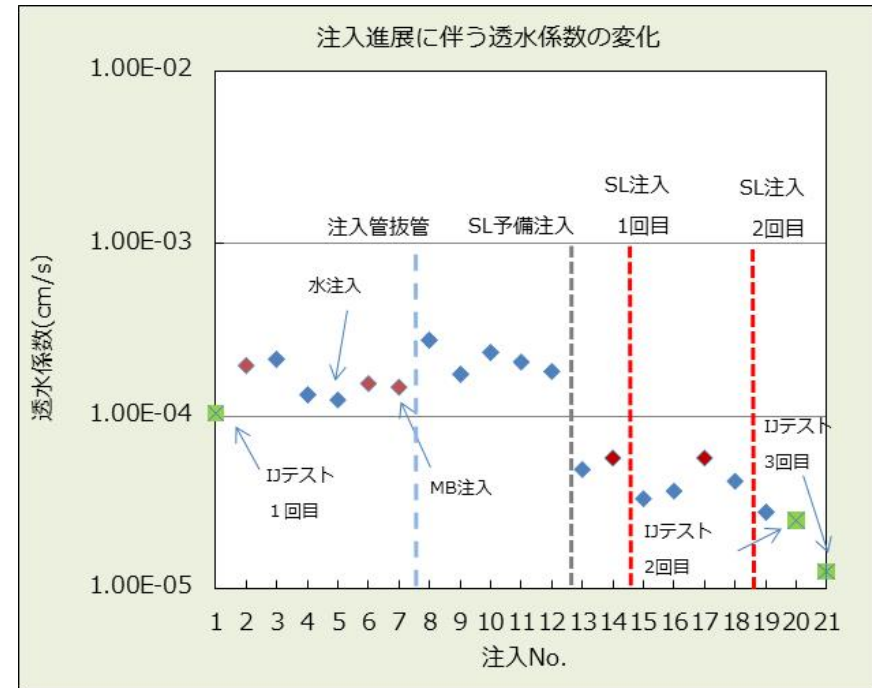
水/マイクロバブル水注入時の圧力（上）と流量（下）（8/30 50L/min）

貯留層評価 (CCS/CCUS実験の影響)

- スラリー注入後に透水係数が低下する傾向
 - ➔ 亀裂を充填するスラリーの効果。
- 実験の前後で透水係数が概ね1桁低下。
- MB水注入時の透水係数は水注入時の透水係数より高い傾向。
- MB水を注入すると透水係数が回復する傾向。
- 2か月後に3回目のインジェクションテストを実施
 - ➔ スラリー固化による透水係数の更なる低下を確認。
- 透水係数は低下しているが、注入井再利用の可能性あり (1.4MPaで16L/minの注入が可能)。



3回のインジェクションテストの結果
(注入圧力と注入量)



(※1.00E-05=1*10⁻⁵)

透水係数 K, cm/s

$$K = \frac{Q_w \times p_w \times g \times \ln(L/r)}{2\pi \times L \times P_w \times 10^4}$$

P _w	MPa	注入圧
Q _w	m ³ /s	注入量
L	m	試験区間長
p _w	kg/m ³	水の密度
g	m/S ²	重力加速度
r	m	ボーリング半径

環境影響評価（モニタリング）

- CCS/CCUS実験の地表への影響を評価するためにモニタリングを実施。
- 以下の6カ所をモニタリング箇所とし、水質分析、ガス分析、連続CO₂濃度分析を実験前、実験中、及び実験終了後に実施。
- 観測孔には150mの深度に3軸ジオフォンを設置して微小地震を観測。
- 何れの観測箇所、何れの観測項目にも実験の影響と思われる兆候は認められない。

（観測箇所）

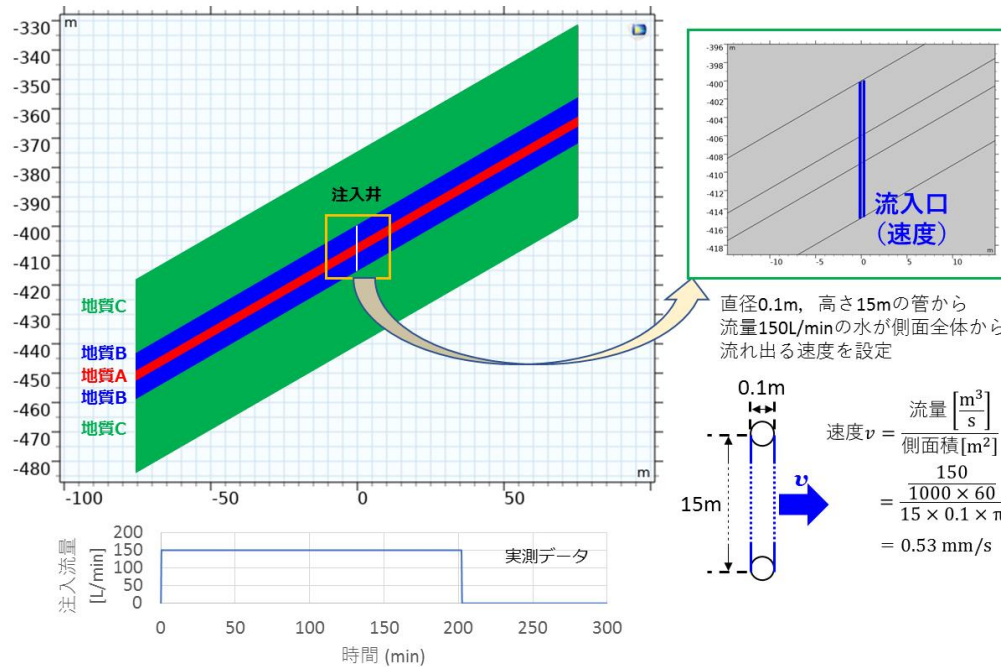
- ① 注入井周囲
- ② 観測孔
- ③ 井戸跡
- ④ 幾春別川上流
- ⑤ 幾春別川下流
- ⑥ 斜坑跡（地表部）



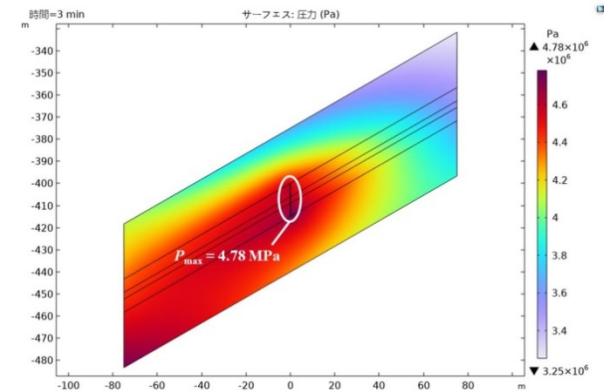
モニタリング箇所とモニタリング項目

シミュレーション

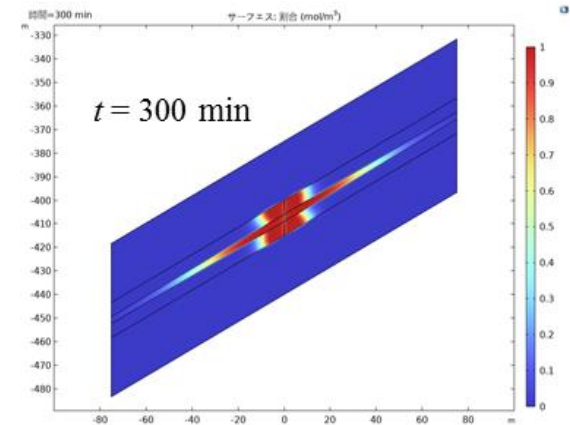
- 汎用有限要素法連成解析ソフトCOMSOL Multiphysics©によりシミュレーションを実施
 - (1) 水注入シミュレーション（多孔質媒体中への水注入における水の流れ）
 - (2) MB水注入シミュレーション（多孔質媒体中のCO₂溶解水の分散）
 - (3) スラリー注入シミュレーション（多孔質媒体中のスラリーの分散）
- 地層は地質A（採掘跡）、地質B（採掘影響域）、及び地質C（地山）
- 注入実験時の注入量・注入圧に一致するような透水係数を想定。



水注入シミュレーションモデル



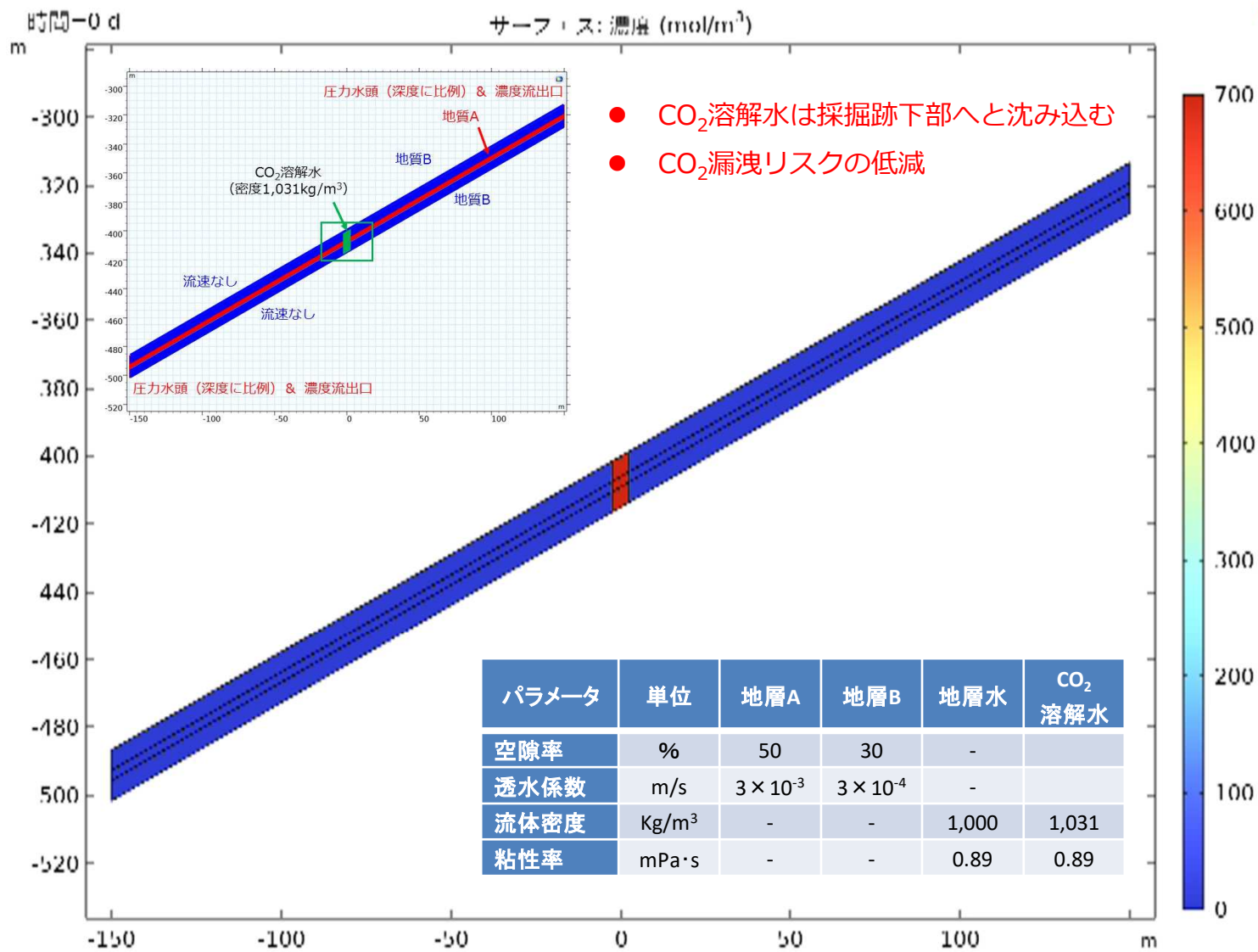
注入時の圧力分布



採掘跡内部での水の移動

シミュレーション

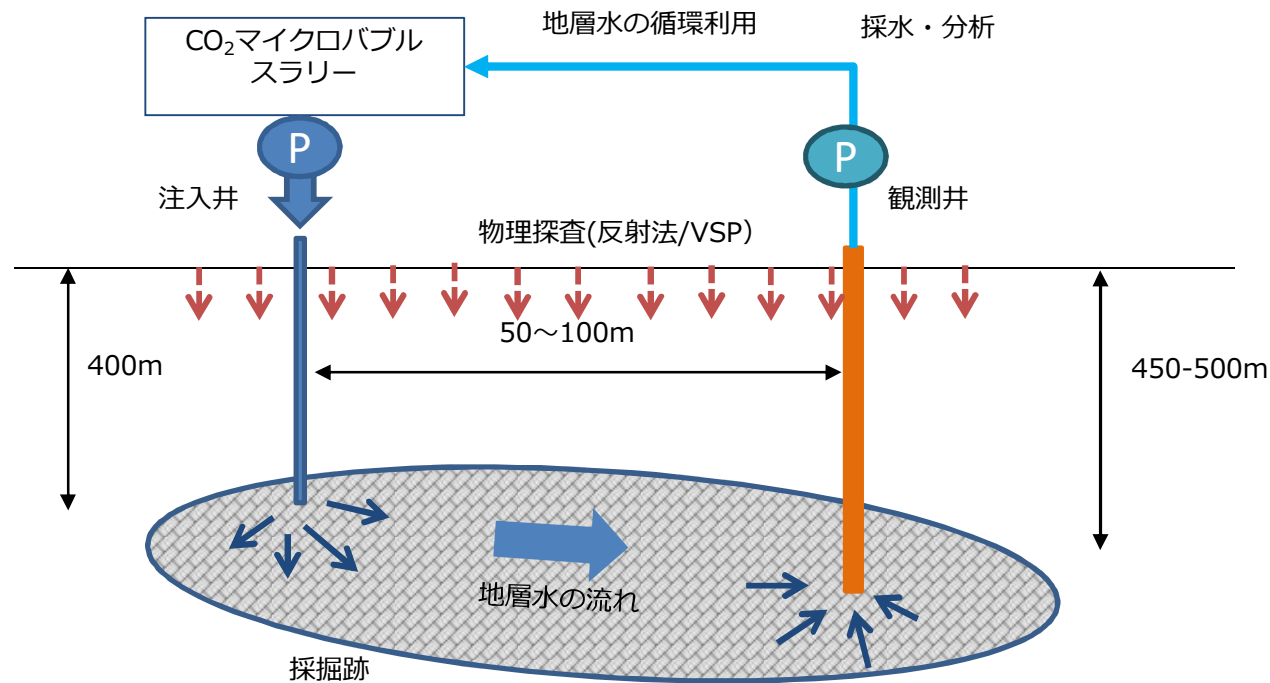
CO₂溶解水の貯留層内挙動シミュレーション結果, 120日間



今後の計画

実験の継続

- 注入井（既存）と観測井（新設）を配置 ➡ 観測井からポンプアップした水の循環利用。
- マイクロバブル水/スラリーの到達範囲と水への溶解範囲/スラリー固化範囲等の特定。
 - ➡ VSP探査による貯留層中のCO₂モニタリング技術の適用。
- マイクロバブル水のCO₂保有量を増加させる技術の開発（現状水重量の1.4%程度） ➡ 目標5倍。
- CO₂の地層水への溶解やスラリーの流動・固化状態をシミュレーションできるモデルの構築。



まとめ

- 地質特性調査、および水、CO₂マイクロバブル水、CO₂と反応して固化するスラリーの注入実験により、それぞれの注入流体の注入条件が把握でき、**石炭採掘跡がCO₂貯留場所として利用できる可能性が高いことを確認。**
- CO₂マイクロバブル水による採掘跡へのCO₂注入は、**より高濃度のマイクロバブル水を製造する技術改良が必要**であるが、漏洩リスクの少ない、より低い圧力でのCO₂注入システムとなる可能性が示された。
- CO₂と反応して固化するスラリー注入により、採掘跡の透水性の低下が認められ、スラリーによる亀裂の充填効果を確認。
- CO₂地下固定実験を継続し、以下の課題を解決する必要がある。
 - ・ 地下でのCO₂やスラリーの挙動モニタリング
 - ・ 水の循環利用
 - ・ CO₂マイクロバブル水の濃度向上
 - ・ シミュレーションモデルの構築
- スラリーとCO₂を利用する採掘跡CCUS技術は、断層、立坑/斜坑跡などの注入したCO₂の漏洩経路を塞ぐ対策としても効果を発揮する。
- スラリーとCO₂注入は、廃止鉱山や廃止トンネル、様々な地下空洞などの充填による地盤の安定化にも貢献できる可能性がある。