



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

低炭素水素（ブルー水素）製造に向けて：CO₂地下固定（石炭採掘跡への圧入）

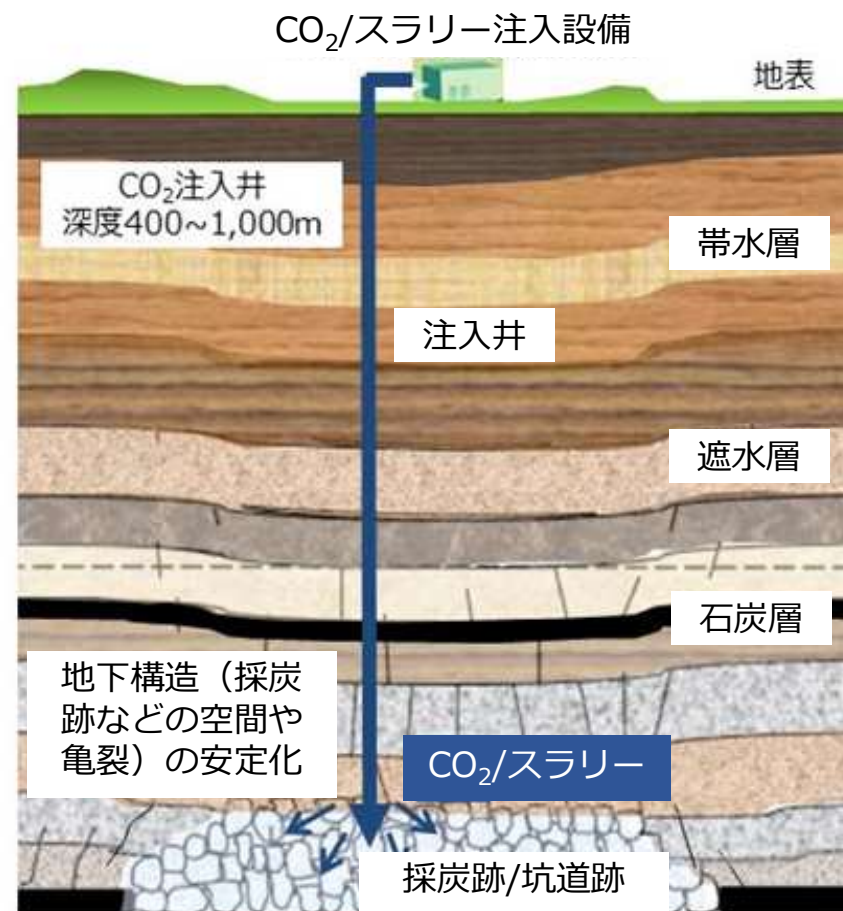
- 三笠市は、地域資源の石炭と木質バイオマスを用いた**ブルー水素（低炭素水素）サプライチェーン構築実証事業**に取り組んでいる
- 低炭素水素を実現するには、水素製造過程で排出される**CO₂を分離・回収**し、処理する必要がある
- 三笠市内に存在する**石炭採掘跡**にCO₂やCO₂と反応して固化するスラリーを圧入することで**CO₂を地下に貯留/固定**

CO₂の圧入（CCS）

- CO₂マイクロバブル水（MB水）の圧入
- CO₂固定メカニズム
 - ・ 地層水への溶解/鉱物化
 - ・ 未採掘石炭への吸着
 - ・ 微細亀裂/空隙内への残留

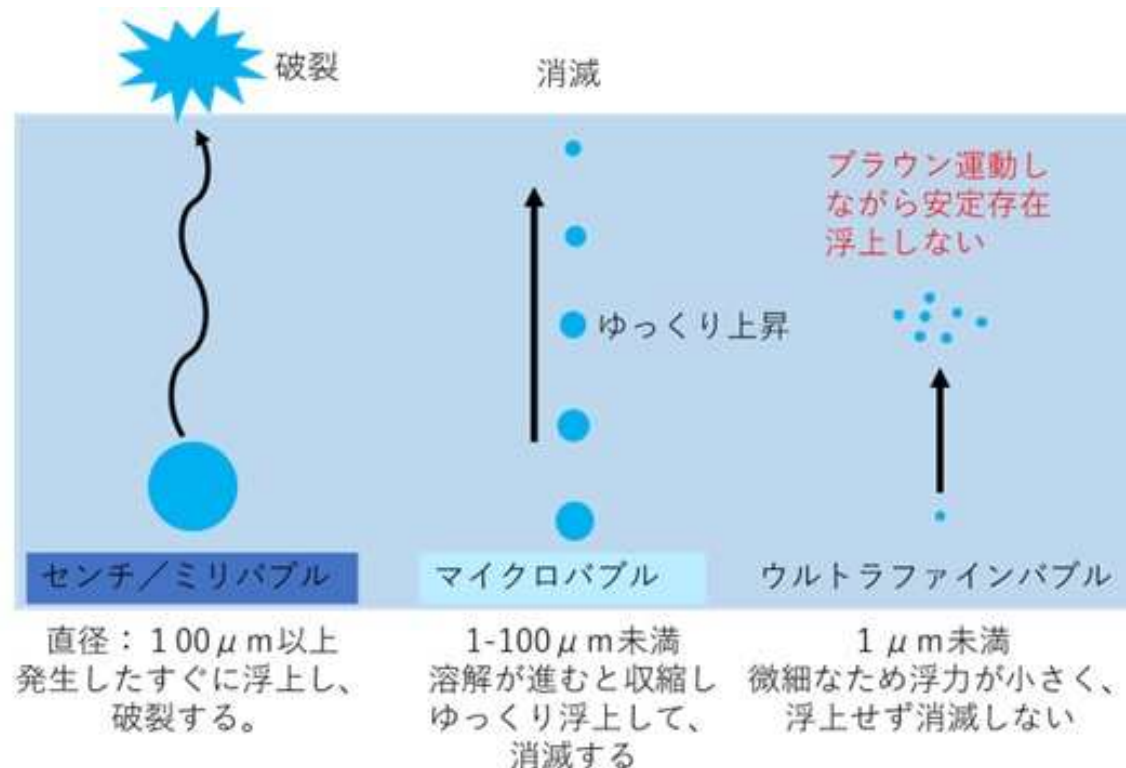
CO₂固化スラリーの圧入（CCUS）

- CO₂と反応して固化するスラリー（高炉スラグ(BFS)・フライアッシュ(FA)など）
- 鉱物化による固定メカニズム
- 坑道跡等地下空洞の安定化
- 地表近傍の空洞安定化にも適用可



マイクロバブル水の特徴

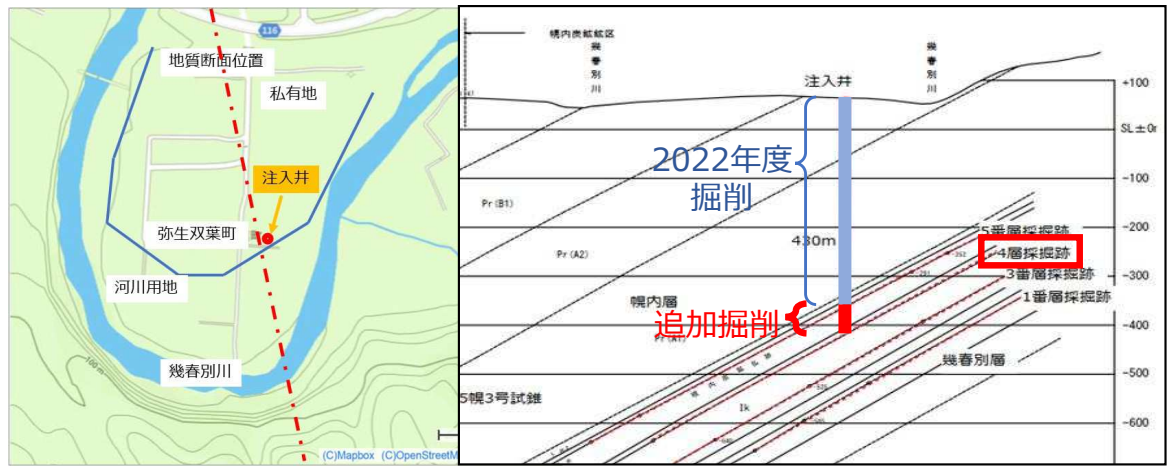
- CO₂マイクロバブル水：直径が100 μ m (1/1000mm) 未満の気泡としてCO₂を混ぜ込んだ水。
- 通常の気泡 (cm～mmオーダー) は浮力で上昇し、水面上で破裂する ➡ 地表に漏れる可能性。
- マイクロバブルは縮小しながらゆっくりと上昇することで水に溶解する ➡ CO₂が溶解した水は重いいため沈降。
- さらに小さなウルトラファインバブル (1 μ m未満) は浮力の影響を受けずにその場に留まる。
- 使用したマイクロバブル発生装置 (ファインバブル発生装置) は、マイクロバブルとウルトラファインバブルの両方を発生。
- 低圧でCO₂を地下に圧入する有力な方法 ➡ 低コストでの圧入が可能 (大量の水を必要とする)。



三笠市CO₂地下固定研究事業（事業経緯・概要）

事業経緯

- R4年度に地表下約400mの幾春別層5番層採掘跡へのマイクロバブル水/スラリーの注入実験を実施し、技術的な可能性やポテンシャルを評価
- 注入井の再利用の可能性調査 ➡ 1年後に注入井の395m以深の閉塞を確認
- R6年度の閉塞区間の再掘削により、R4年度に注入対象とした区間（深度395～430m区間）はスラリー固化物で閉塞していることを確認
- さらに注入井を50m追加掘削し、5番層採掘跡の下部60mで4番層採掘跡に到達
- 4番層採掘跡を対象として注入実験を実施



試験現場位置図

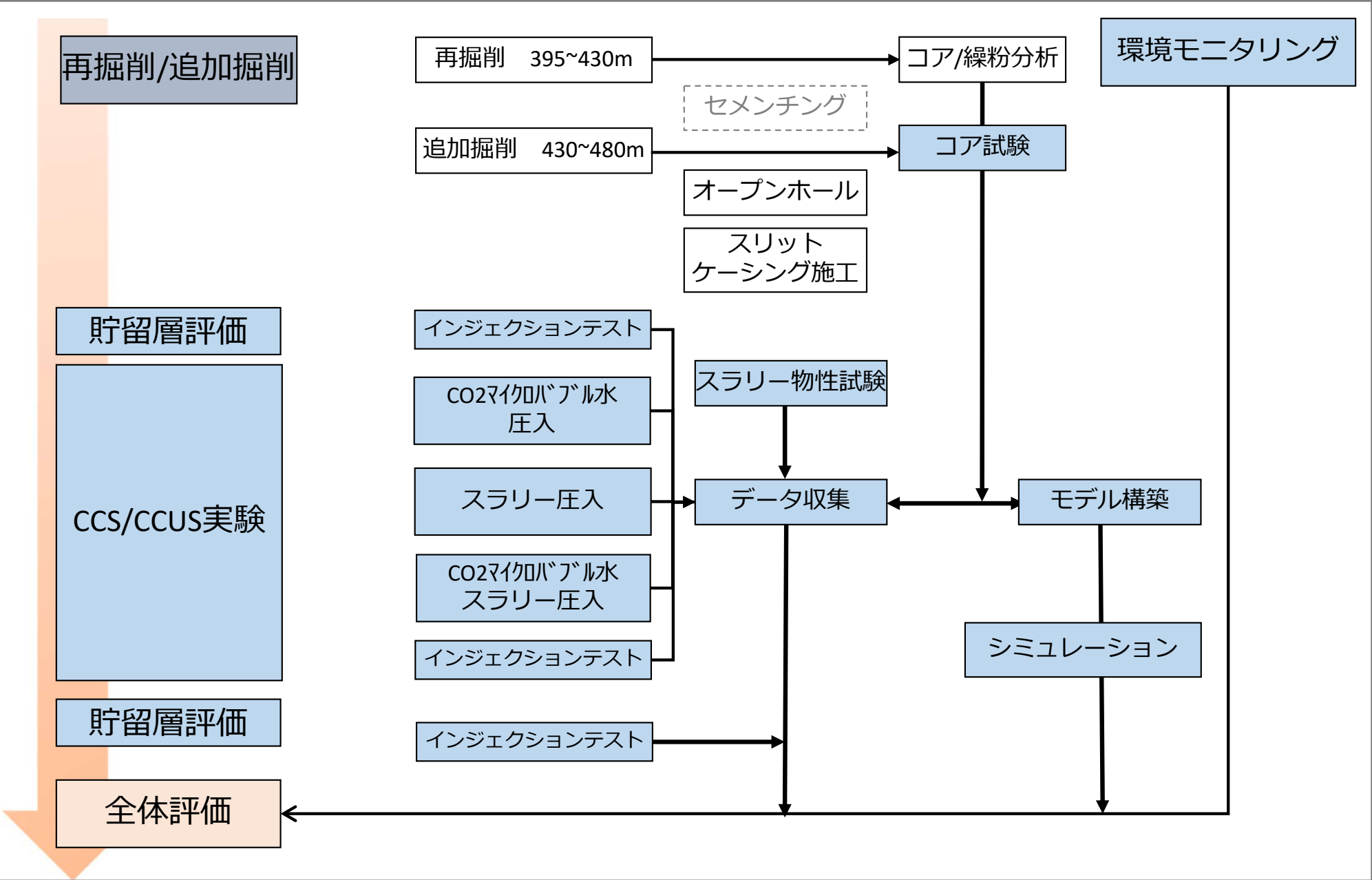
地質断面図と注入井配置

事業内容

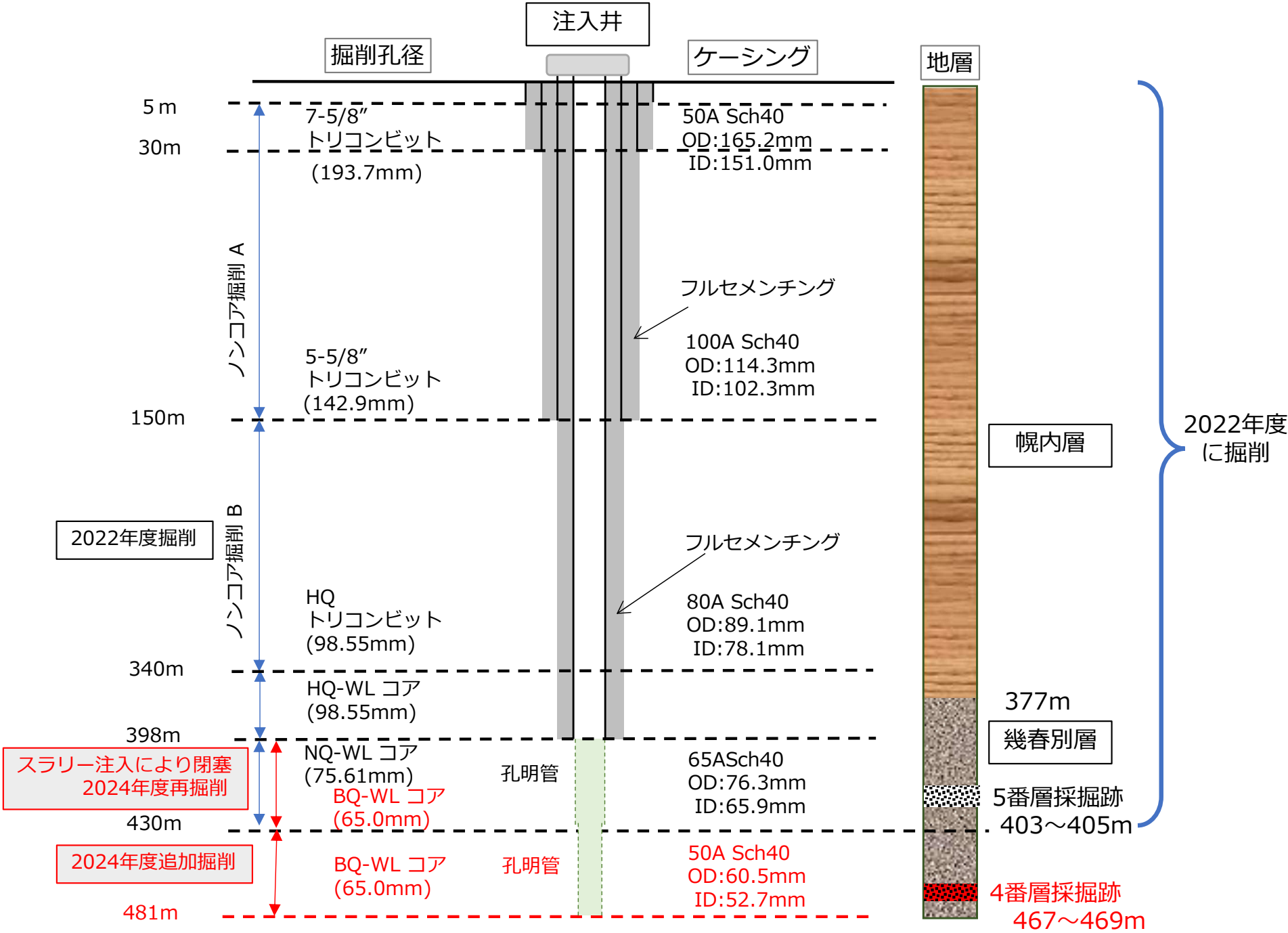
- 4番層採掘跡を対象とし、CO₂マイクロバブル水やCO₂と反応して鉱物化する成分を多く含んだスラリーを注入し、坑内水にCO₂を効率よく溶解させる、あるいはCO₂を固定化する技術の実現性を検証する
- 主な試験項目
 - ・ MB水注入 注入圧を利用したの圧力下でのCO₂MB水製造
CO₂MB水連続製造・注入
 - ・ スラリー注入 BFSにFAを混ぜることによるコスト低減
FAの混合による注入性・固化度・CO₂鉱物化への影響評価



令和6年度の追加掘削工事



注入井の状況：掘削実績（令和4年度・令和6年度）



注入井の状況： 令和4年度掘削岩石コア

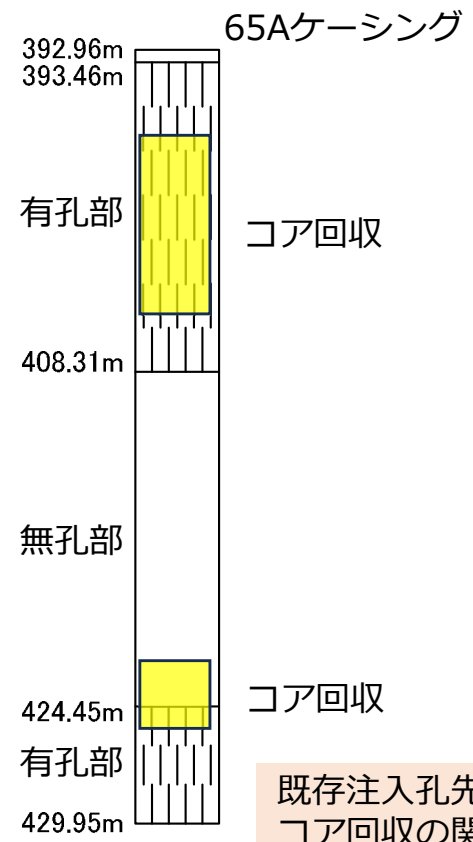


注入井の状況：閉塞箇所での再掘削-コア（固化スラリー）の回収

- R4.11：注入実験の2か月後の注入井採水時には注入区間での透水性を確認
- R5.10：の検層時に395m付近で注入井の閉塞を確認
- R5.11：清水による洗浄実施 ➡ 閉塞は改善せず
- R5.11：インジェクションテストの実施 ➡ 注入井が固化物で充填されている状況を示唆
- R6.8：閉塞部の再掘削/追加掘削を実施 ➡ 充填物質の特定・新たな採掘跡への到達



回収したコアはスラリーが固化したものの



既存注入孔先端部の構造と
コア回収の関係

注入井の状況：閉塞箇所再掘削-コアの物性

- 注入井の390m以深の閉塞区間を再掘削しコア試料を採取
- 回収したコアの調査
- 強度試験、X線回折分析（成分調査）、CO₂固定量分析（熱重量分析） ➡ 標準サンプルと比較
 - BFSが固化した際の濃い緑色を呈する
 - 地表で固化した標準試料の数倍の強度 ➡ 地下深部で固化した影響？
 - CO₂固定量も確認
- 孔の閉塞は注入したスラリーが固化したことによると判断



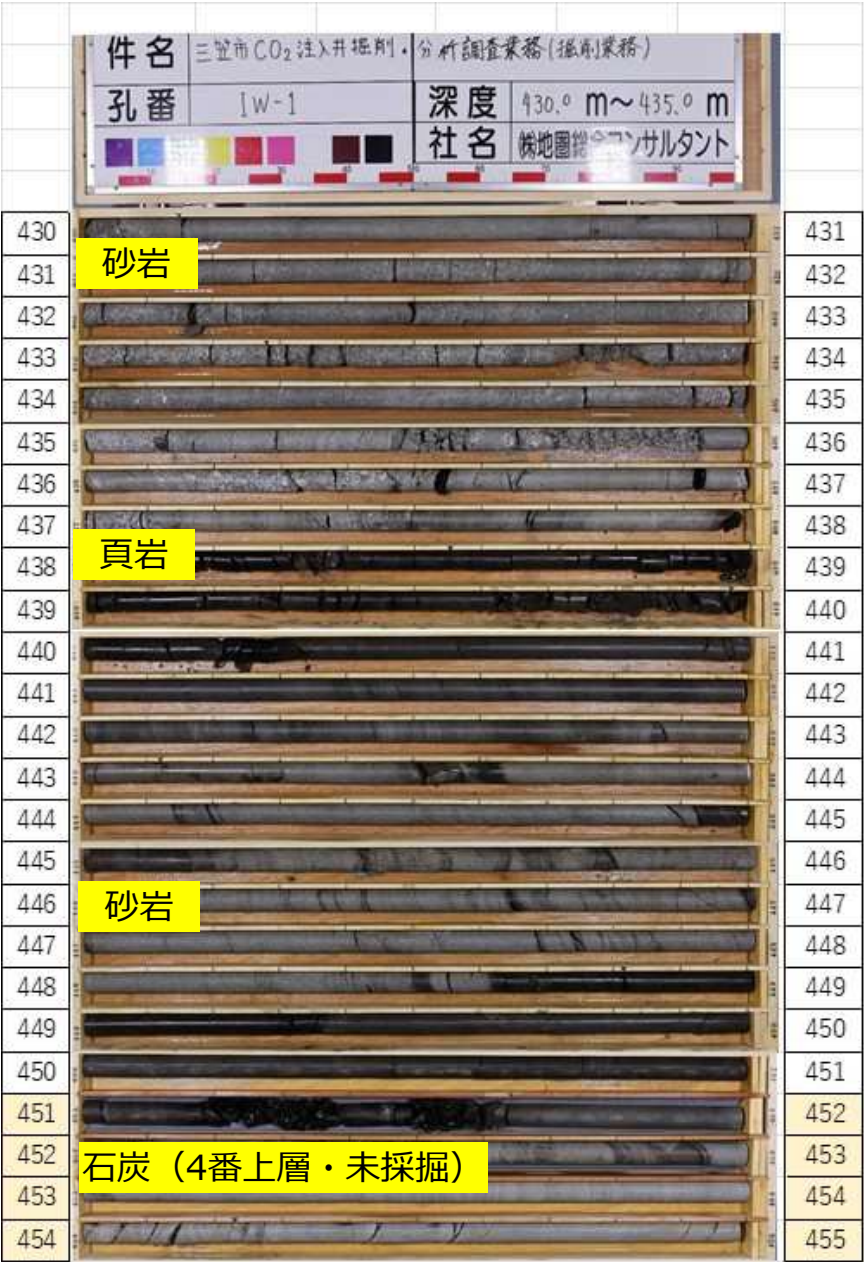
回収したコア試料



コア試料の圧縮強度とCO₂固定量

注入井の状況： 令和6年度追加掘削岩石コア

■ 既存注入井の追加掘削（50m） ➡ 5番層採掘跡の下方60m付近に4番層採掘跡を確認



: スリット区間（50Aケーシング）



主要注入区間
4番層採掘跡

木片（支保？）

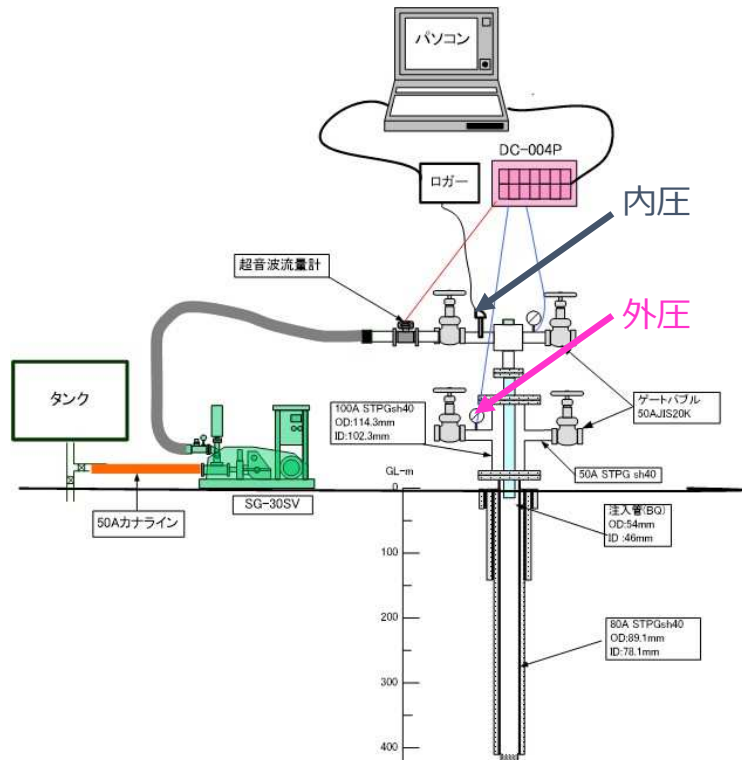
砂質頁岩

コアなし（空洞？）

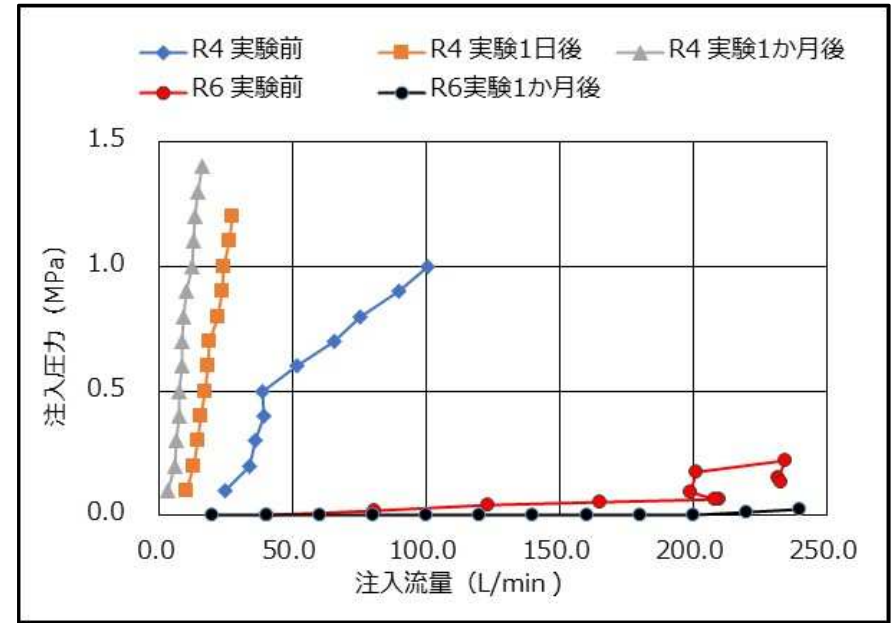
主要注入区間
採掘影響圏
坑道跡(?)

掘削終了

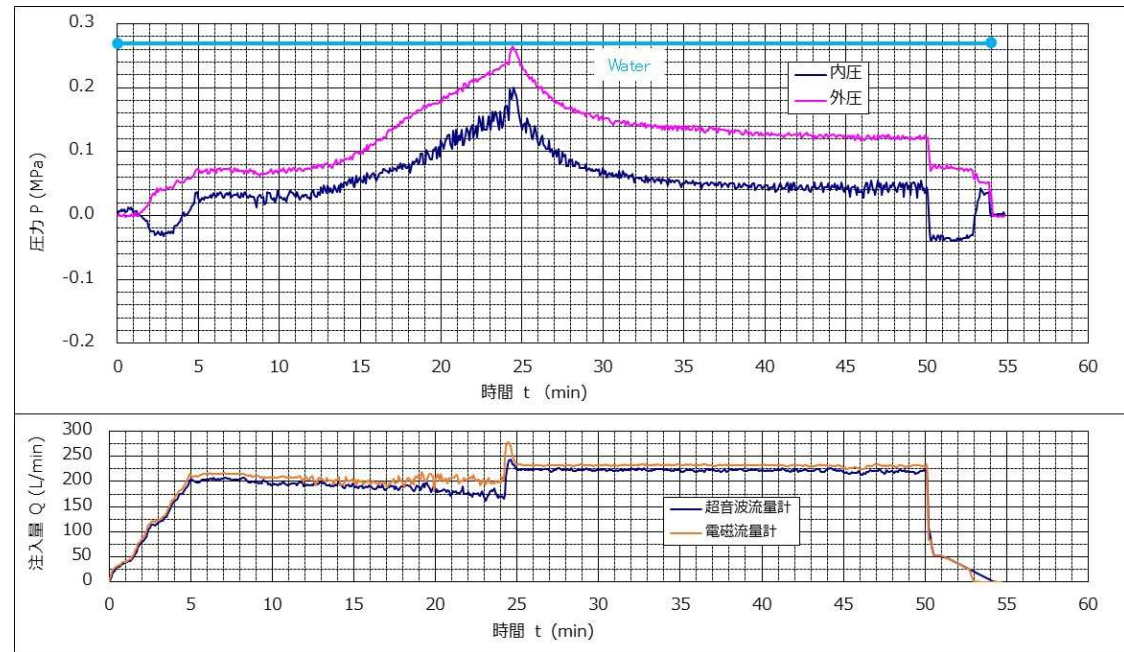
- R6実験前の注入性は非常に高い
 - R4：100L/minで1.0MPa
 - R6：100L/minで0.03MPa
- 注入実験後
 - R4：注入性低下
 - R6：注入性向上
- R6の結果は坑口装置の内圧（注入管内）と外圧（注入管とケーシングの間）に圧力差が生じる



インジェクションテストの 実施方法



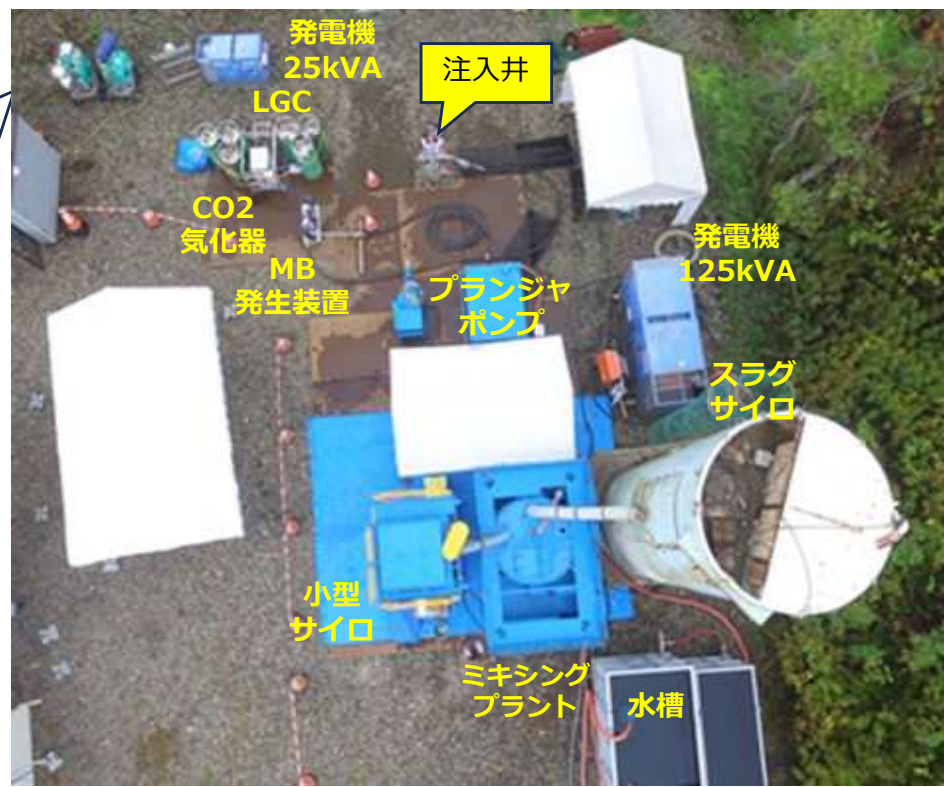
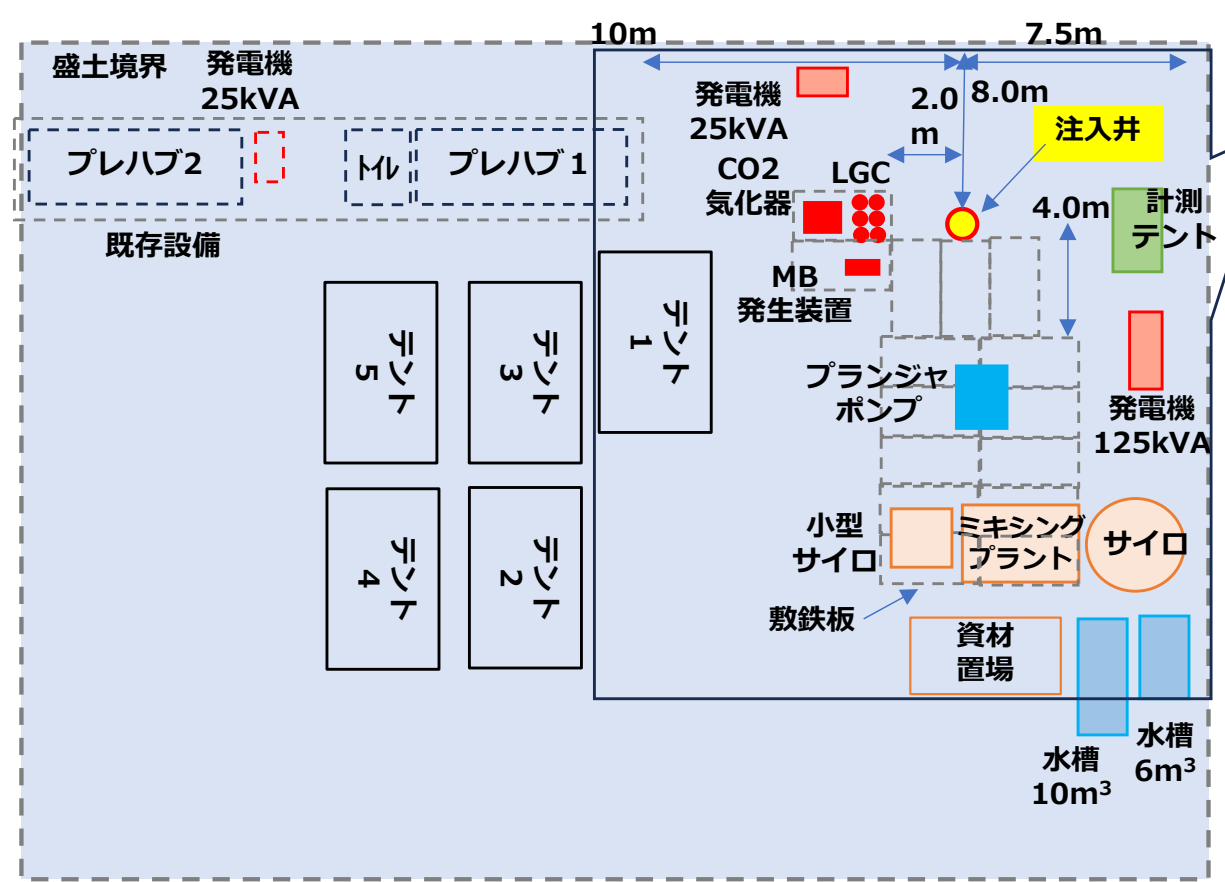
インジェクションテストの結果



R6実験前のインジェクションテストの結果

現場レイアウト

- MB水注入：CO₂MB発生装置, 液化CO₂ (LGC), CO₂気化器, プランジャポンプ, 水槽（共通）
- スラリー注入：スラグサイロ, 小型サイロ(FA用), ミキシングプラント, プランジャポンプ, 水槽
- MB水/スラリー注入：水槽にMB水を製造・貯蔵 ➡ MB水を用いてミキシングプラントにてスラリー製造 ➡ 注入



CO₂地下固定実験現場レイアウト

使用した主な機器



ミキシングプラント(左) とFA用サイロ (右)



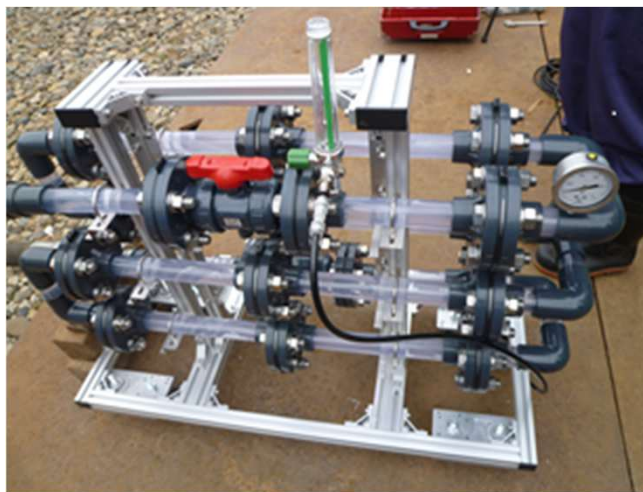
BFS用大型サイロ



FA用サイロへのFAの投入



プランジャーポンプ



マイクロバブル発生装置



液化炭酸ガスと気化器

使用機器（マイクロバブル発生装置）

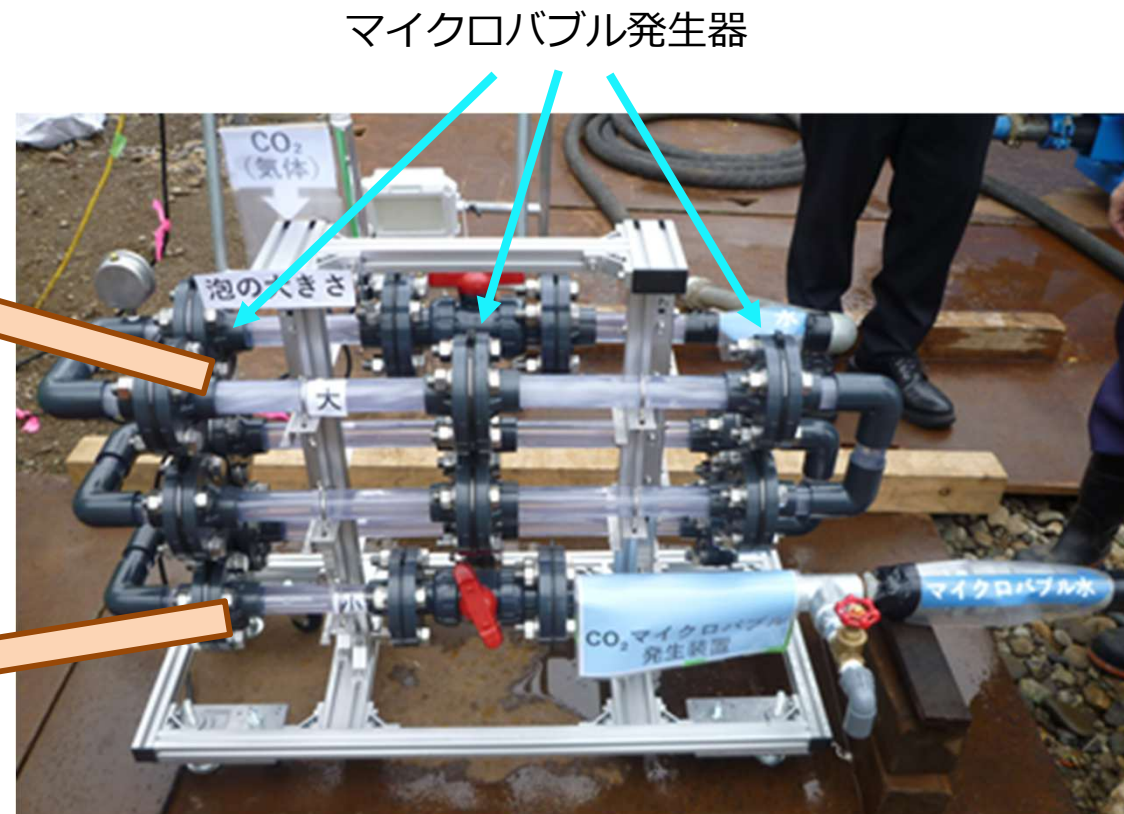
- 複数のマイクロバブル発生器を組み合わせ
- マイクロバブル発生器を通過するごとにCO₂がマイクロバブルに
- 最終的に透明なCO₂マイクロバブル水を製造
- 水50L/minに対してCO₂110L/minをマイクロバブル化 ➡ 24時間連続注入



CO₂の泡が見える状態



CO₂の泡が消えマイクロバブル化された状態



注入実績

- 注入テストの結果 ➡ 注入圧力を加えることなく水やCO₂MB水の注入が可能
(R4年度の圧入試験では100L/min の注入におよそ1MPa (10気圧) の注入圧が必用)
- 空洞部に選択的に流入していると推定 ➡ ほぼ抵抗なく注入可能
- スラリー約28m³を先行注入 ➡ 注入特性に変化なし (抵抗なく注入可能な状態)
- MB水 24時間連続注入 (77m³、CO₂ 310kg) 、MB水/スラリー (20m³、CO₂ 66kg) を注入
➡注入特性に変化なし (空洞が大規模に広がっている可能性)

CO₂地下固定実験注入実績一覧

注入テスト

スラリー注入

注入テスト

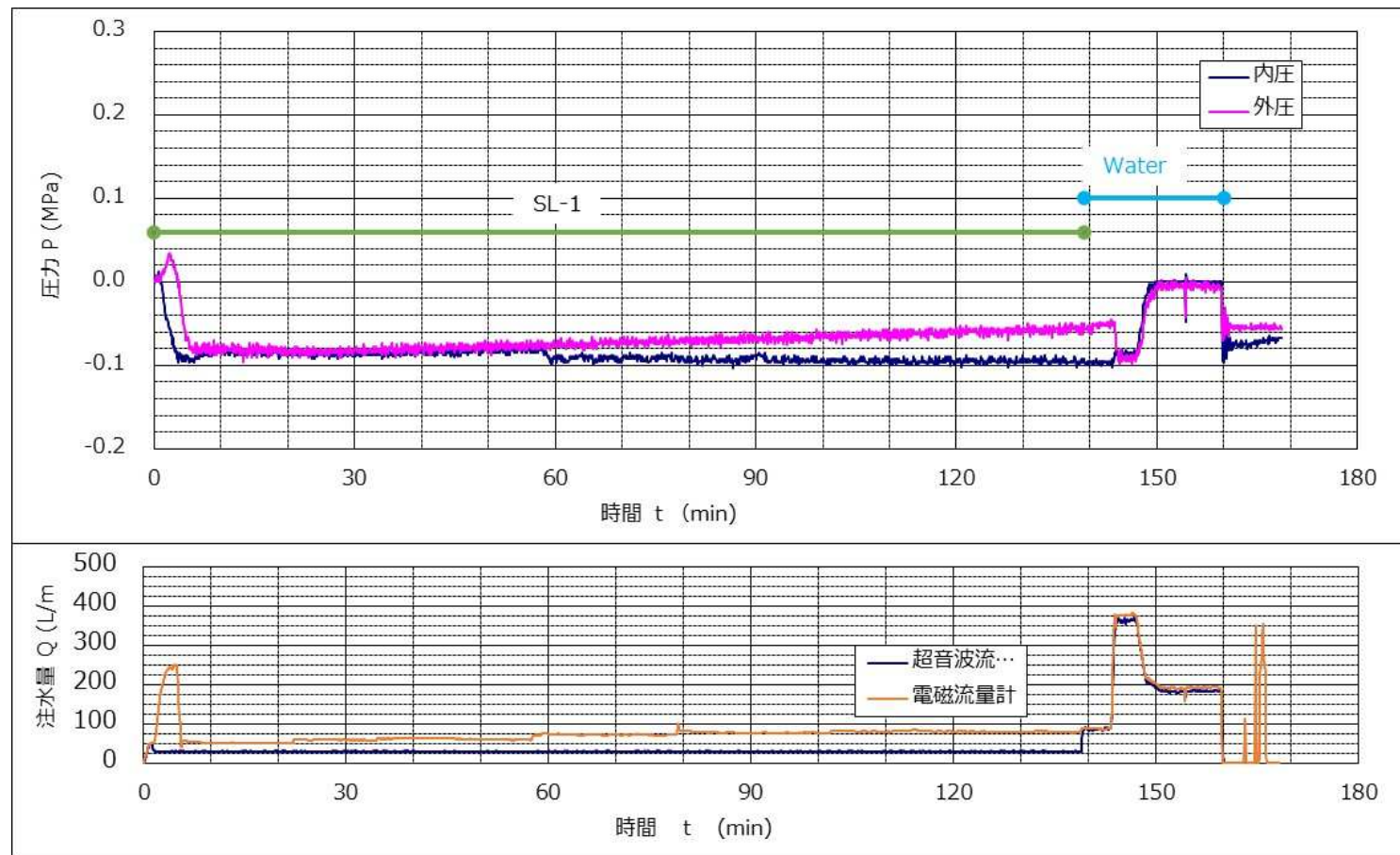
MB水連続注入

MB水/スラリー注入

月日	時間			試験名	水		MB水				スラリー		
					注入量	注入総量	注入量	注入総量	CO ₂ 注入量	総CO ₂ 量	W/B	注入量	注入総量
	開始	終了	(min)			(L/min)	L	(L/min)	L	L/min	L		(l/min)
10月3日	9:10	10:03	53	IJテスト	200.0	10,600							
	14:40	15:15	35	MB-T-1			80.0	2,800	33.0	1,155			
	15:15	15:40	25				90.0	2,250	42.0	1,050			
	15:40	16:00	20				100.0	2,000	33.0	660			
10月4日	14:21	14:41	20	SL-1							2.00	50.0	1,021
	14:41	14:58	17								2.00	60.0	1,021
	14:58	15:13	15								2.00	70.0	1,021
	15:13	16:43	90								2.00	80.0	7,147
	16:43	17:03	21	清水注入	200.0	4,200							
10月5日	9:11	11:11	120	SL-2							1.50	70.0	8,256
	11:11	13:20	129	SL-3							1.00	80.0	10,000
	13:20	13:51	30	清水注入	130.0	3,900							
	14:06	14:30	24	MB-T-2			110.0	2,640	44.9	1,078			
	14:30	14:42	12				110.0	1,320	40.5	486			
	14:42	14:55	13				110.0	1,430	68.9	896			
	14:55	15:10	15				110.0	1,650	87.7	1,316			
	15:10	15:25	15				110.0	1,650	112.2	1,683			
	15:46	15:55	9				50.0	450	36.7	330			
	16:05	16:07	2				70.0	140	46.0	92			
10月6日													
10月7日	8:30	17:00	630	MB-1			60.0	37,800	111.0	69,930			
	17:00	8:00	780				50.0	39,000	110.0	85,800			
10月8日	14:05	18:29	264	SL-MB						33,000	1.00	70.0	20,000
	18:29	19:05	36	清水注入	100.0	3,600							
11月7日	12:00	13:04	64	IJ テスト	10~240	8,886							
合計						31,186		93,130		197,475			48,466

スラリー注入時の注入量と注入圧

- スラリー総注入量：48m³（高炉スラグ15トン、フライアッシュ15トン、水37トン）
- 注入圧は負圧：スラリー密度（1.25～1.43g/cc）の影響で自重で注入井内に引き込まれる
- 水の注入に切り替えると圧力上昇（負圧の減少）
- フライアッシュ混合による流動性に大きな変化なし



スラリー注入結果（SL-1：W/B=2.0）



注入前のスラリー



スラリーサンプルの採取

CO₂MB水注入時の注入量と注入圧

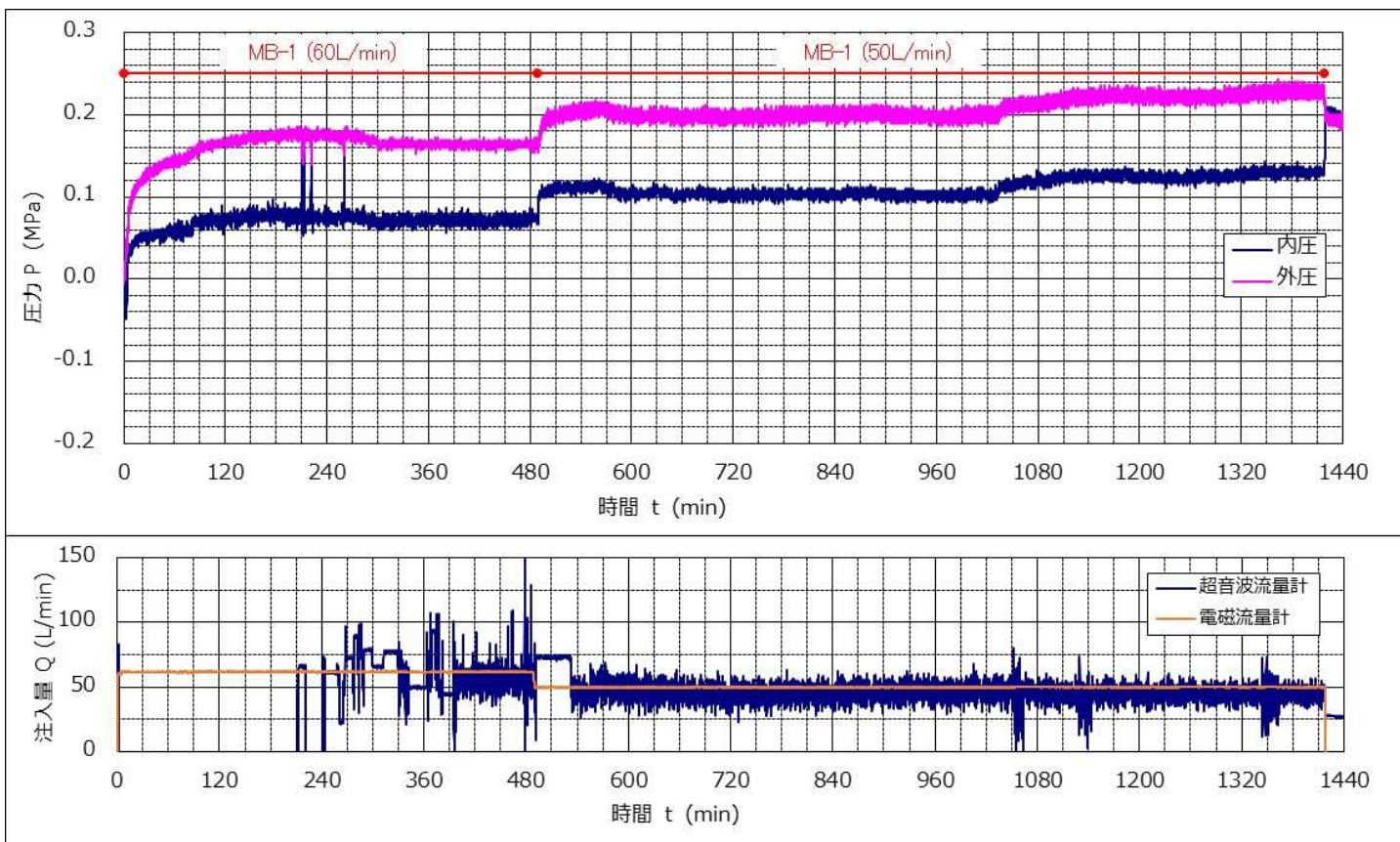
■ MB水の長期間連続注入（24時間）

0～8時間：水 60L/min+CO₂ 111L/min

8時間～24時間：水 50L/min+ CO₂ 110L/min

■ 先にスラリー24m³注入 ➡ 注入圧 0.1MPa～0.2MPa

■ 注入量の減少（60➡50L/min）により注入圧が増加（通常は注入量減少＝注入圧低下）



CO₂MB水注入結果（MB-1:24時間連続注入）

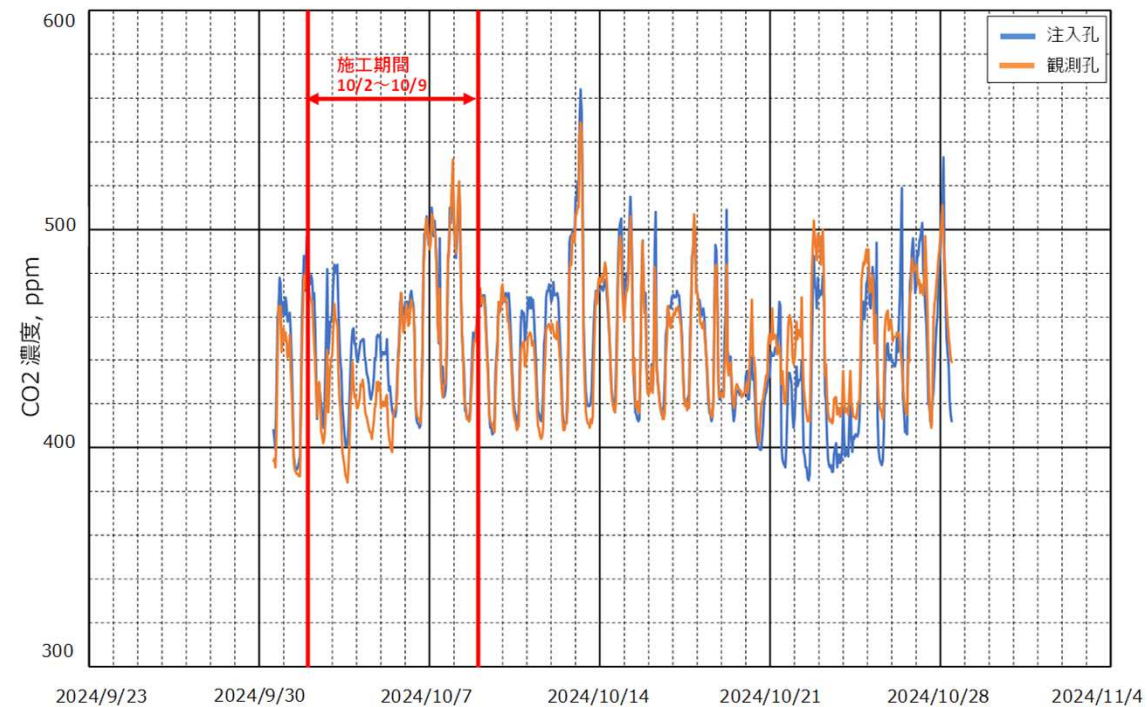


稼働中のCO₂MB水発生装置



注入圧・流量の計測

- モニタリング個所と項目
注入井：CO₂濃度連続計測
観測井：CO₂濃度連続計測、pH計測
井戸跡：pH計測
- 計測期間中、CO₂濃度およびpH値に注入の影響と思われる顕著な変化は確認されていない



CO₂濃度観測結果

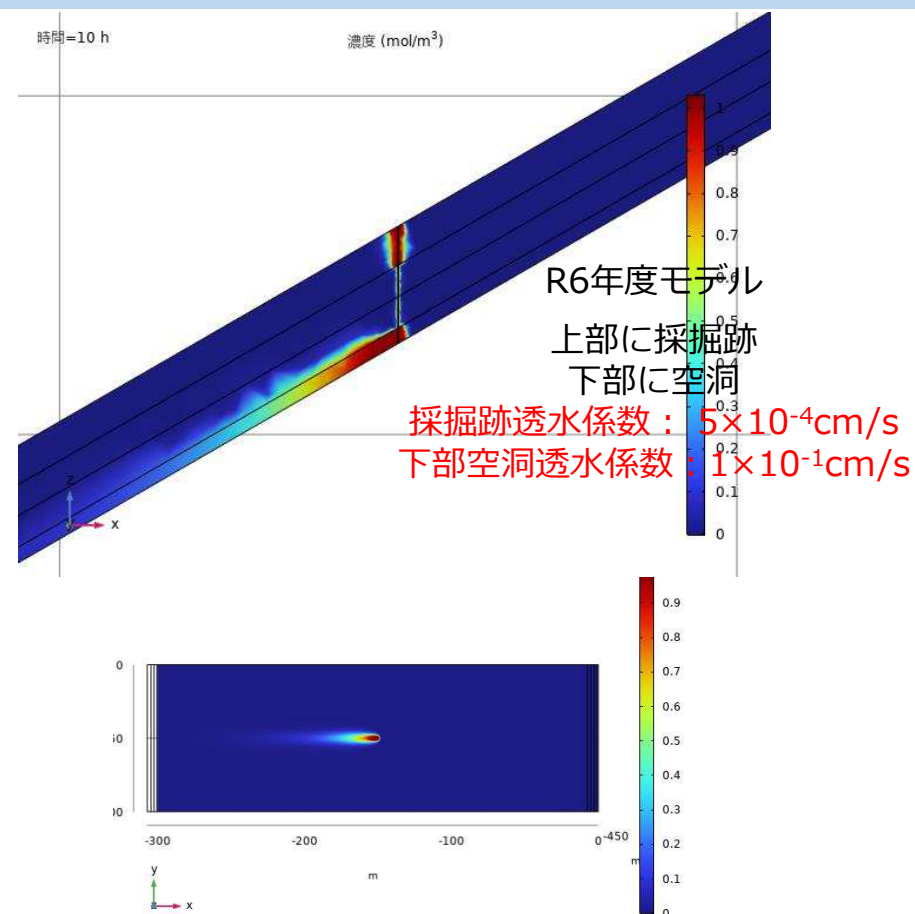
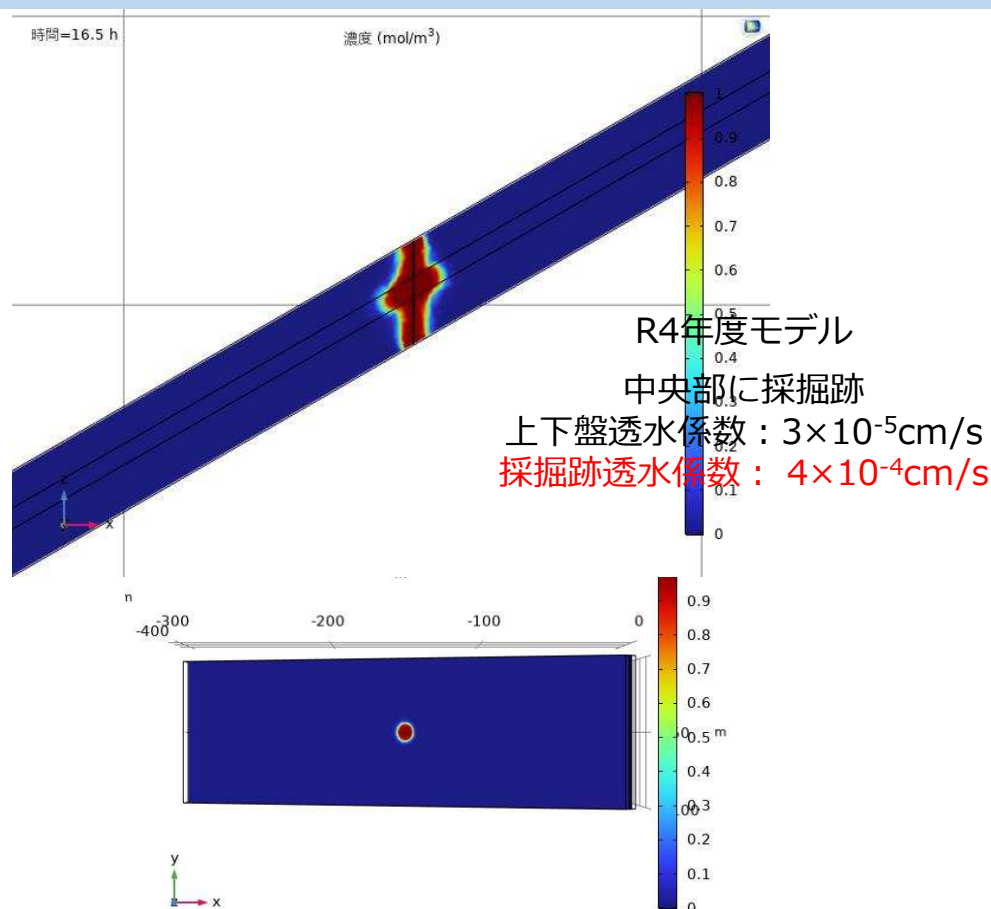


モニタリング個所とモニタリング項目

pH計測結果

地点名	測定日時	時間	水位 (m)	pH	電気伝導度 (mS/m)	水温 (℃)
観測孔	2024/09/30	14:58	5.090	8.88	65.7	12.5
	2024/10/07	10:00	5.925	8.86	63.1	11.7
	2024/10/15	09:40	6.865	8.83	66.7	11.5
	2024/10/21	09:30	7.636	9.00	64.3	10.8
	2024/10/28	11:38	8.631	8.90	62.6	10.6
井戸跡	2024/09/30	15:14		7.65	30.1	16.5
	2024/10/07	10:15		7.71	35.4	15.3
	2024/10/15	10:01		7.62	35.7	14.9
	2024/10/21	09:50		7.85	36.1	13.2
	2024/10/28	11:51		7.78	35.6	13.2

- シミュレーションモデルの改良（汎用有限要素法連成解析ソフトCOMSOL Multiphysics©）
2次元 ➡ 3次元
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） ➡ 圧入を再現
- 令和4年度と令和6年度の比較 ➡ 透水係数の違いによる分散の違い
- スラリーが透水係数の高い層に選択的に注入される状況を反映
- 極端に透水係数が高い領域（空洞）では、注入孔を中心とする同心円状ではなく、直線状に分散
- インジェクションテストにより透水係数が評価できれば、注入範囲推定の可能性



- R4年度の注入井の閉塞部分（深度395m以深）の掘削と430～480mの追加掘削を実施
- 閉塞が石炭採掘跡に注入したスラリーの固化によることを確認
- CO₂と反応して生成した炭酸塩（炭酸カルシウムなど）の存在も確認
- R4年度の注入対象（5番層採掘跡）の下部60m付近に4番層採掘跡を確認
- さらに10m下部には2m程度の高さの空洞(坑内水で満たされた)が存在（コア回収不可）
- 4番層採掘跡へのインジェクションテスト実施
 - ・ 低い圧力で注水可能
 - ➡R4年の結果と比較して1～2桁高い透水係数
 - ➡注入実験実施後はさらに注入性向上（240L/min で0.03MPa）
 - ➡空洞が広範囲に及ぶ？
- CO₂マイクロバブル水注入/スラリー注入実施
 - ・ 水:31m³、CO₂マイクロバブル水:93m³、スラリー:48m³、CO₂:約400kgを注入
 - ・ マイクロバブル水の24時間連続注入
 - ・ スラリー注入後も注入圧力は増加せず（逆に透水係数は高くなっている）
 - ・ 注入井再使用の可能性を示唆（来年度インジェクションテスト実施予定）
- シミュレーションの改良：注入範囲推定の可能性