

# 苫小牧CCS実証試験を通じた CO<sub>2</sub>貯留技術に関する考察

2022年2月10日  
日本CCS調査株式会社  
萩原 利幸

## 日本CCS調査（株）の概要、事業の実施体制

2

### 当社の概要

設立：2008年（平成20年）5月26日

資本金：2.4億円（資本準備金2.4億円）

株主：34社

電力、都市ガス、石油、プラント設計・建設、商社等

事業内容：

二酸化炭素の分離・回収、利用、輸送及び  
地中貯留(CCUS)技術の調査、研究開発、  
事業化調査、実証試験

従業員：97名（2021年10月現在）

### 受託事業（事業名と略称）

#### ① 苫小牧実証試験

2012～2020年度「苫小牧におけるCCS大規模実証試験」

略称：苫小牧CCS実証試験

2021年度～「苫小牧におけるCCUS大規模実証試験」

略称：苫小牧CCUS実証試験

#### ② 貯留適地調査

2014年度～「二酸化炭素貯留適地調査事業」

#### ③ CO<sub>2</sub>船舶輸送実証試験

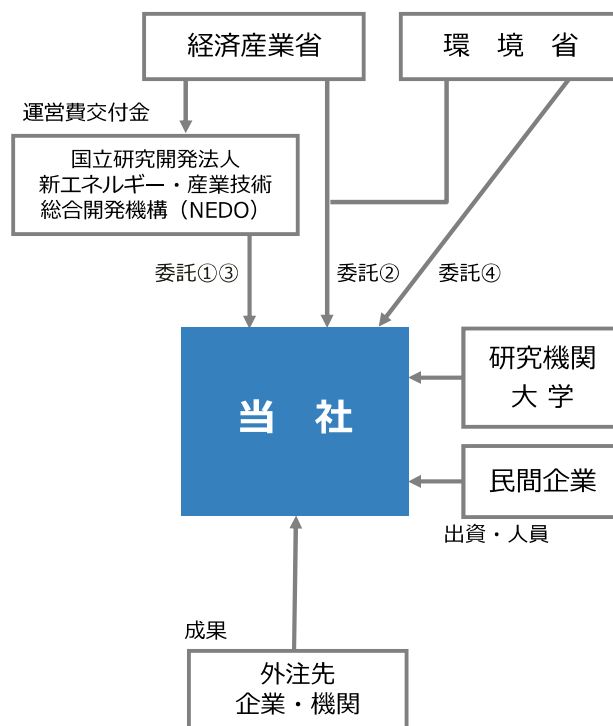
2021年度～「CO<sub>2</sub>輸送に関する実証試験」（4社共同受託）

#### ④ 「令和3年度二酸化炭素の資源化を通じた 炭素循環社会モデル構築促進事業」

2021年度～（6社共同受託）

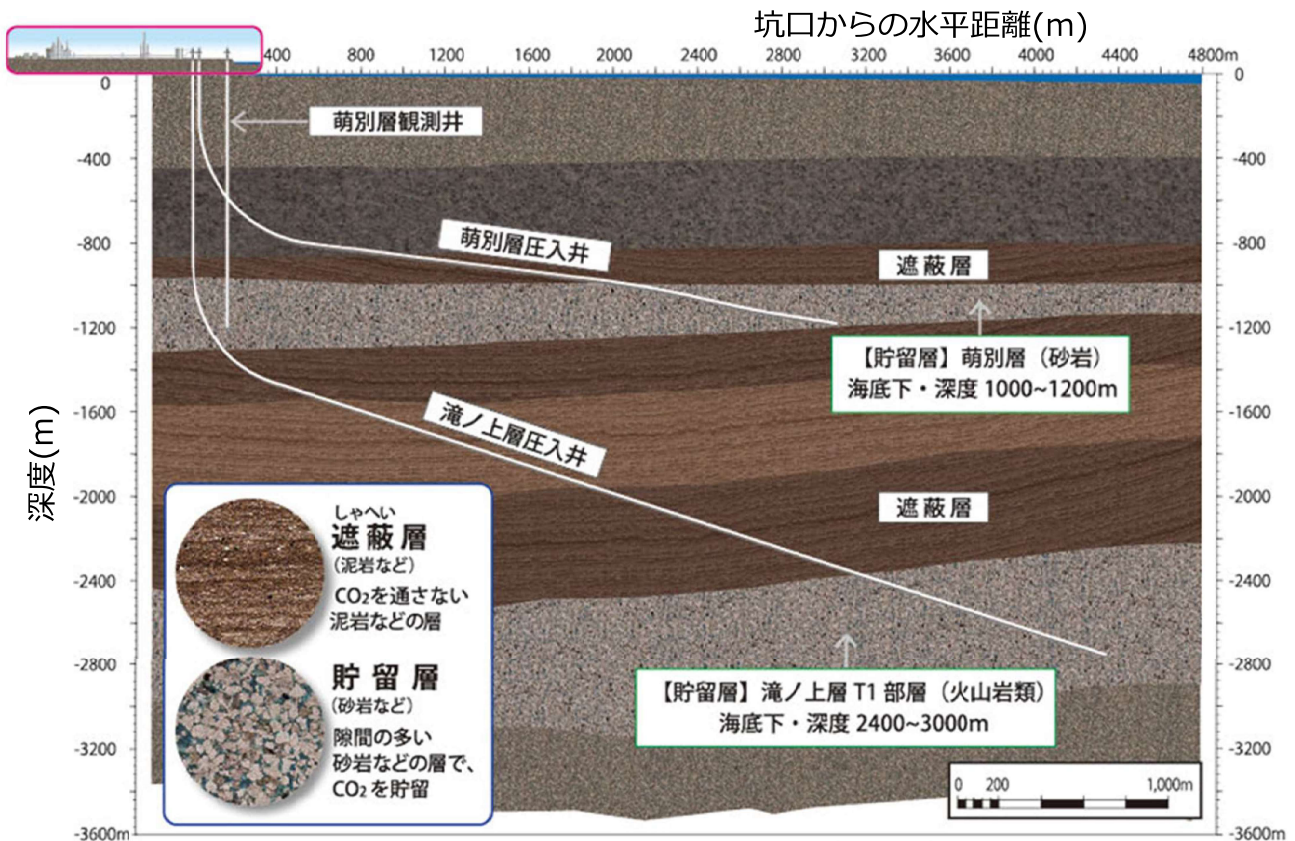
※「」内、正式事業名

### 事業の実施体制



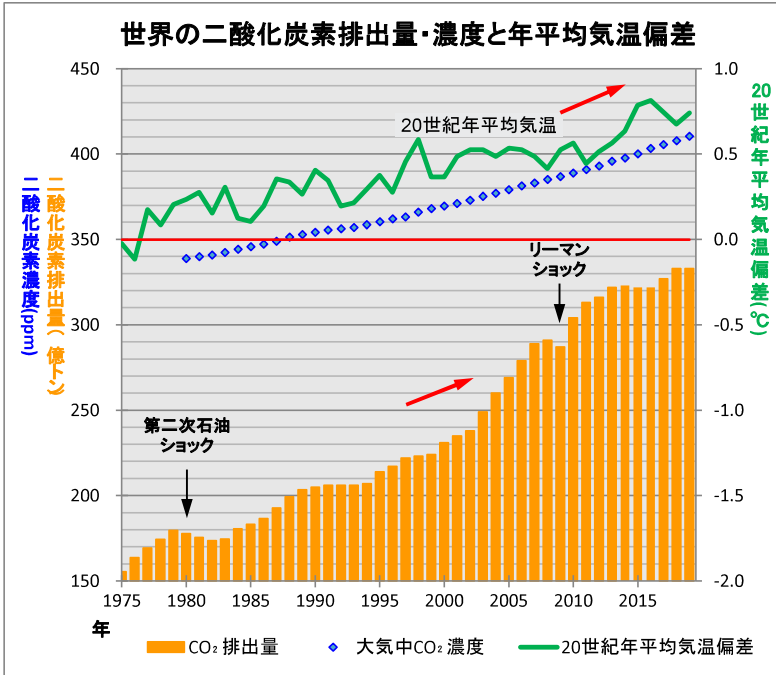
- 温室効果ガス削減に対してなぜCCSが必要か
  - CCSとは
  - 地球温暖化の現状
  - 温室効果ガス削減目標
- 苫小牧におけるCCS大規模実証試験
  - プロジェクト概要（動画にてご紹介）
  - 圧入・貯留・モニタリング
- 貯留能力に関する考察
  - 貯留レート（年間何万t圧入可能か）
  - 貯留可能量（累計何億t圧入可能か）
- 今後の取り組み
  - 国内の貯留適地
  - 社会実装に当たっての課題

## CCSとは



※圧入井坑跡に沿った模式断面図（縦・横=1:1）

## 世界の二酸化炭素濃度は観測史上最高を更新、年平均気温は高い状態



・CO<sub>2</sub>排出量「IEA, Global CO<sub>2</sub> emissions in 2019」に基づいてJCCSが図を作成  
<https://www.iea.org/articles/global-co2-emissions-in-2019>  
 ・大気中CO<sub>2</sub>濃度「気象庁、二酸化炭素濃度の経年変化」に基づいてJCCSが図を作成  
[https://ids.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/gchap/co2\\_trend.html](https://ids.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/gchap/co2_trend.html)  
[https://gaw.kishou.go.jp/publications/global\\_mean\\_mole\\_fractions#content1](https://gaw.kishou.go.jp/publications/global_mean_mole_fractions#content1)  
 ・20世紀年平均気温偏差「気象庁、世界の年平均気温」に基づいてJCCSが図を作成  
[http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an\\_wld.html](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_wld.html)  
[http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/list/an\\_wld.html](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/list/an_wld.html)

### (1) 世界の二酸化炭素濃度の上昇理由

主として化石燃料の燃焼とセメント生産及び森林伐採とその他の土地利用変化からの放出による結果である。

### (2) 地球の大気中の二酸化炭素濃度

- ① 2019年は**410.5±0.2ppm** (1ppmは100万分の1) で、**過去最高**となり、毎年増え続けている。
- ② 2100年にCO<sub>2</sub>換算濃度が**約450ppm** 又はそれ以下となる排出シナリオは、工業化以前の水準に対する気温上昇を21世紀にわたって**2°C未満**に維持できる可能性が高い。

### (3) 20世紀年平均気温偏差

2019年の世界の平均気温の基準値 (1981～2010年の30年平均値) からの偏差は**+0.43°C**で、1891年の統計開始以降、2番目に高い値となった。

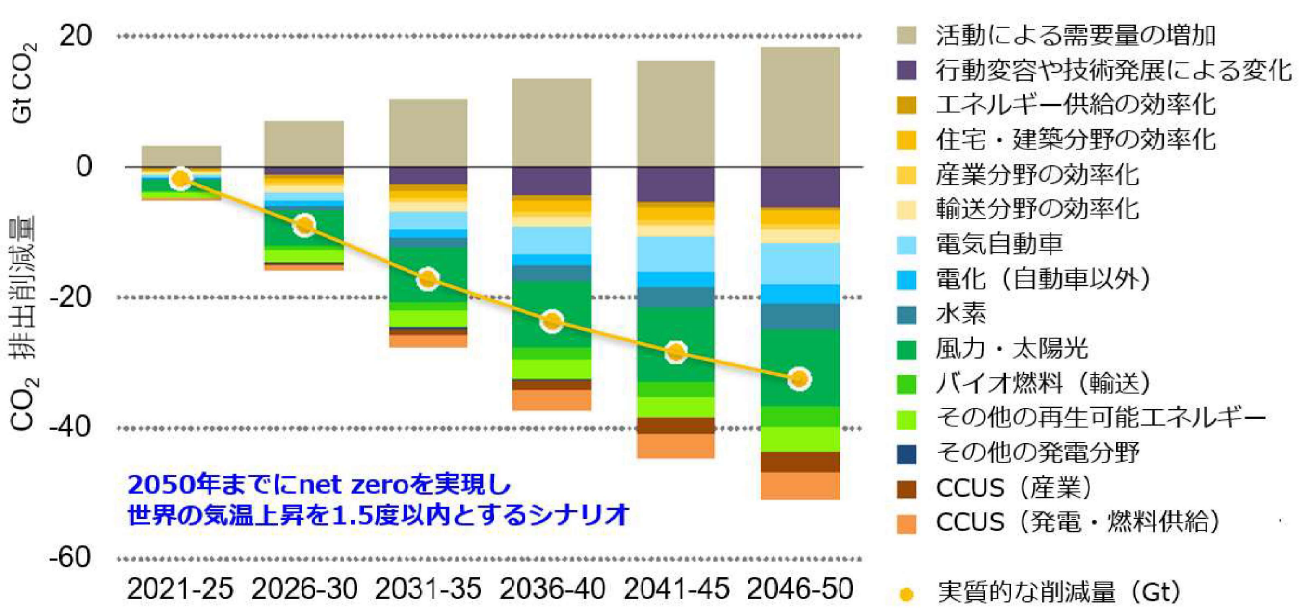
(1)、(2)①「WMO 温室効果ガス年報(抜粋)第16号(気象庁版)」よりJCCSが抜粋して作成  
[https://www.data.jma.go.jp/env/inf/ivdcdg/GHG\\_Bulletin-16\\_j.pdf](https://www.data.jma.go.jp/env/inf/ivdcdg/GHG_Bulletin-16_j.pdf)  
 (2)② IPCC AR5 SYN SPM <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/synthesis-report/>  
 「文部科学省、経済産業省、気象庁、環境省ウェブ公開 日本語版」よりJCCSが抜粋して作成  
[http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/jp/pdf/ar5\\_syr\\_spmj.pdf](http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/jp/pdf/ar5_syr_spmj.pdf)  
 (3) 気象庁「世界の年平均気温偏差(°C)」よりJCCSが抜粋して作成  
[http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an\\_wld.html](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_wld.html)



# 温室効果ガス削減目標①

国際エネルギー機関 (IEA) はCCUSによるCO<sub>2</sub>削減量を、2030年までに全世界で年間16億トン (1.6Gt)、2050年にはその約5倍の年間76億トン (7.6Gt) にまで増やすことを見込んでいます。  
 出典：資源エネルギー庁ホームページ ([https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteiky/asiaccusnetwork.html?ui\\_medium=enecho\\_mailmag](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteiky/asiaccusnetwork.html?ui_medium=enecho_mailmag))

## 2020年を基準としたCO<sub>2</sub>削減量 (年平均) の内訳

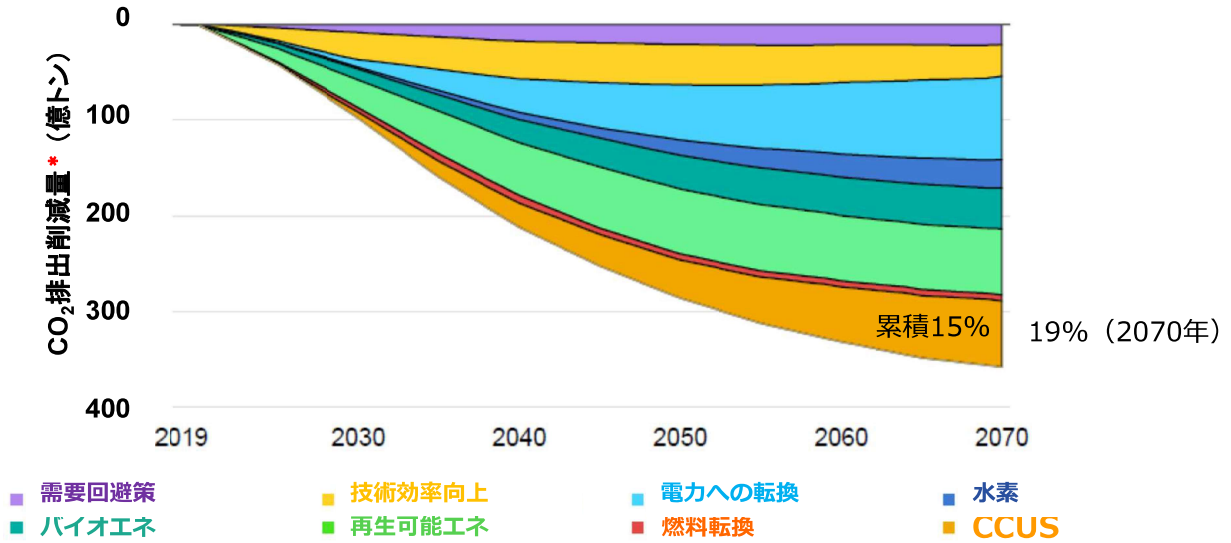


**2050年までにnet zeroを実現し  
 世界の気温上昇を1.5度以内とするシナリオ**

出典：IEA (2021) Net Zero by 2050: a Roadmap for the Global Energy Sector. IEAがすべての権利を保有、加工および日本語訳はJCCSによる。



「公表政策シナリオ (Stated Policies Scenario)」と「持続可能な開発シナリオ (Sustainable Development Scenario)」の間のギャップを埋めるために必要な、世界のエネルギー部門のCO<sub>2</sub>排出削減の取り組みとその貢献度 (2019-70年)



Source: IEA 2020, Energy Technology Perspective 2020. All rights reserved; as modified, and translated into Japanese, by Japan CCS Co., Ltd.

出典: IEA 2020. Technology Perspectives 2020. IEAがすべての権利を保有、加工および日本語訳はJCCSによる。

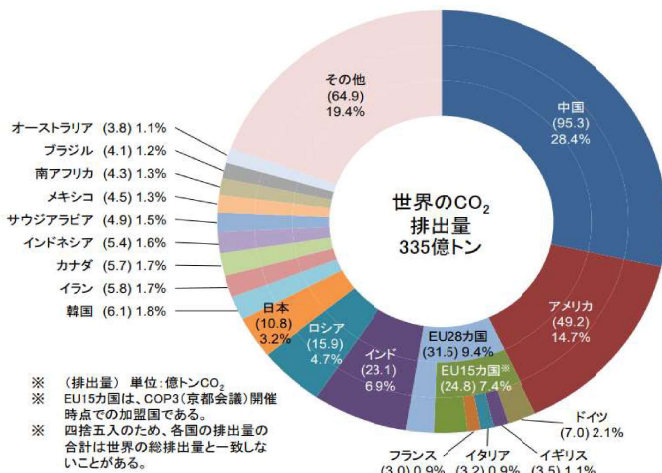
\* CO<sub>2</sub>排出削減量: パリ協定に基づいて各国が現在表明している削減目標に基づく排出量からの削減量

# 温室効果ガス削減目標③

国名	目標年	1990年比	2005年比	2013年比
米国	2025年	▲14~16%	▲26~28%	▲18~21%
中国	2030年		▲60~65%*	
欧州連合	2030年	▲40%	▲35%	▲24%
インド	2030年		▲33~35%以上*	
ロシア	2030年	▲25~30%	-	-
日本	2030年度	▲18%	▲25.4%	▲26%

出典: COP21の結果と今後の課題 (経済産業省、平成28年1月20日)、青色太文字は基準年。 (\*): GDP当たりのCO<sub>2</sub>排出量

世界のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量 (2018年)



主要国のエネルギー起源二酸化炭素排出量の多い国 (2018年)

国名	排出量 (億トン)
中国	95.3
米国	49.2
欧州連合 (28カ国)	31.5
インド	23.1
ロシア	15.9
日本	10.8
ドイツ*	7.0
カナダ	5.7
ブラジル	4.1
イギリス*	3.5
イタリア*	3.2

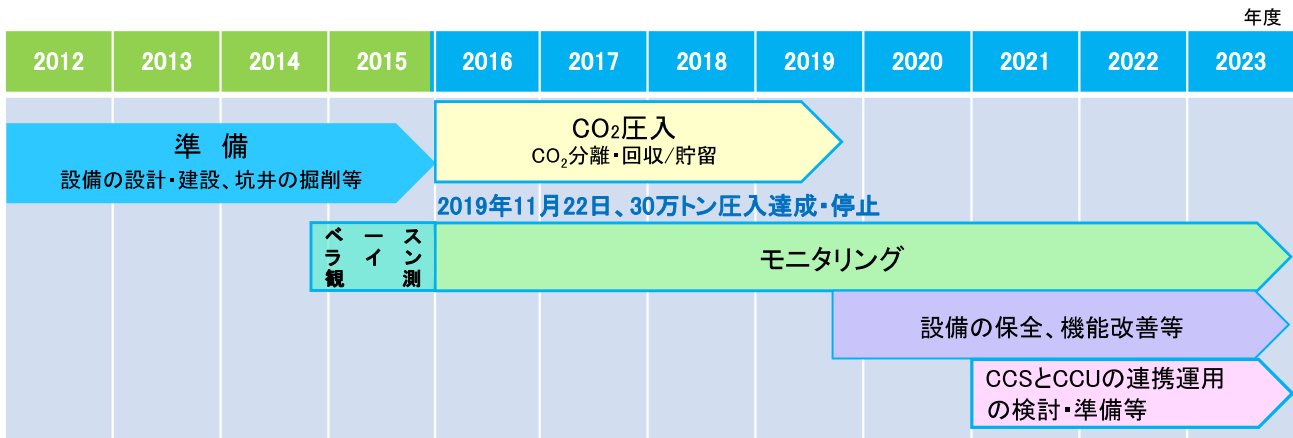
\*EU28カ国に含まれる。

出典: 環境省HP「[http://www.env.go.jp/earth/201222\\_co2\\_emission\\_2018.pdf](http://www.env.go.jp/earth/201222_co2_emission_2018.pdf)」を元に作成

出典: IEA「CO<sub>2</sub> EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION」2020 EDITIONを元に環境省作成

## 委託契約期間 2012～2023年度

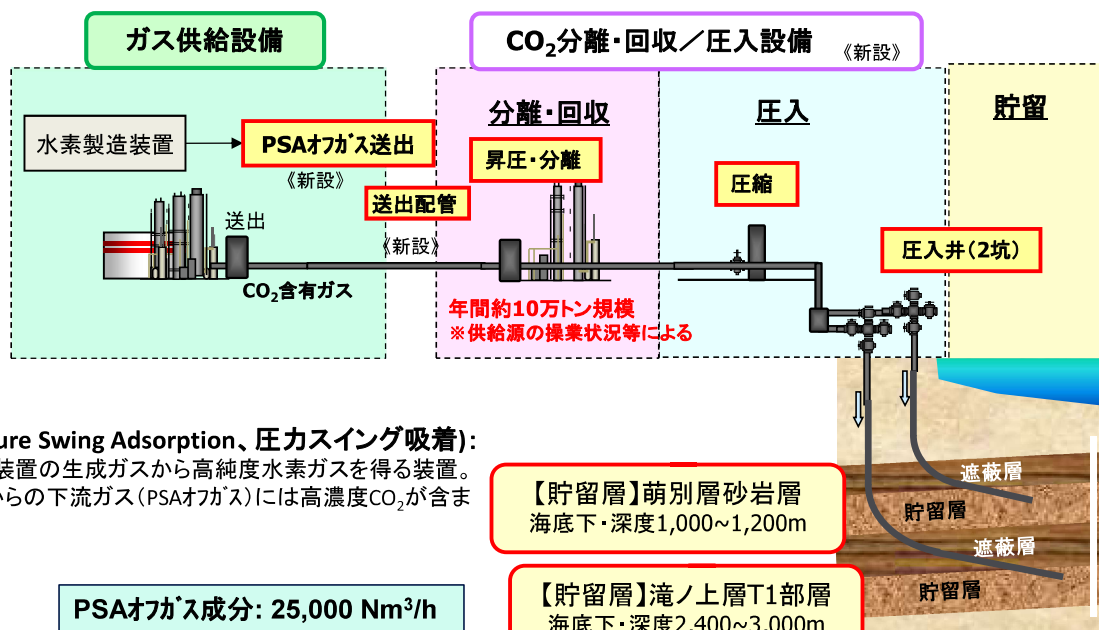
- 2012～2015年度、準備期間  
設備の設計・建設、圧入井の掘削、実証運転の準備等を実施
- 2016年4月～2019年11月、CO<sub>2</sub>圧入（2019年11月22日、30万トン達成・停止）
- 2016年度～モニタリング<sup>(\*)</sup>、継続中
- 2019年11月～設備の保全、機能改善等
- 2021年度～CCSとCCUの連携運用の検討・準備等



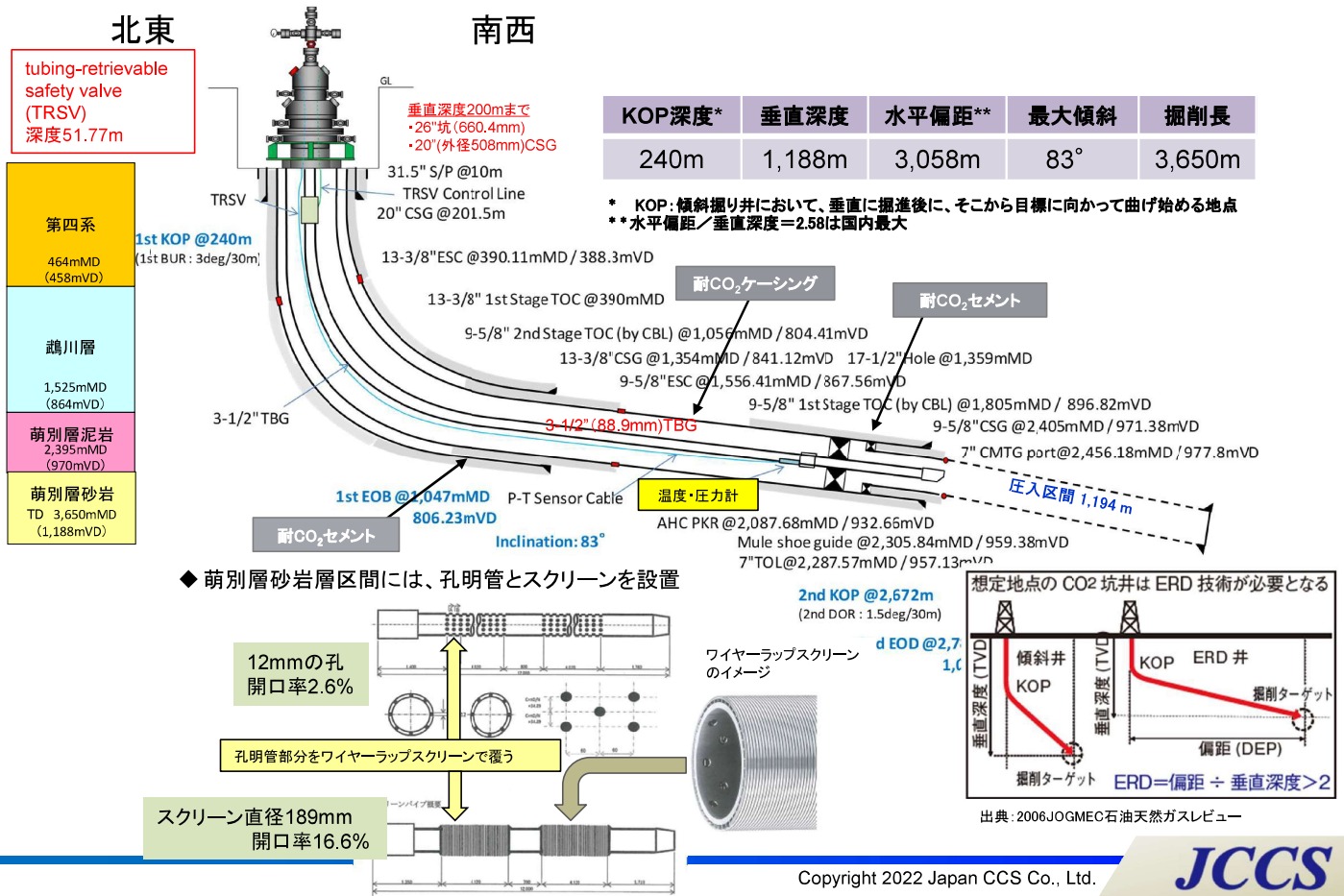
(\*) 圧入したCO<sub>2</sub>の挙動(移動、広がり)を把握し、微小振動、自然地震を常時観測し、海洋環境調査を通じてCO<sub>2</sub>の漏れがないか監視。

## 苫小牧CCS実証試験設備

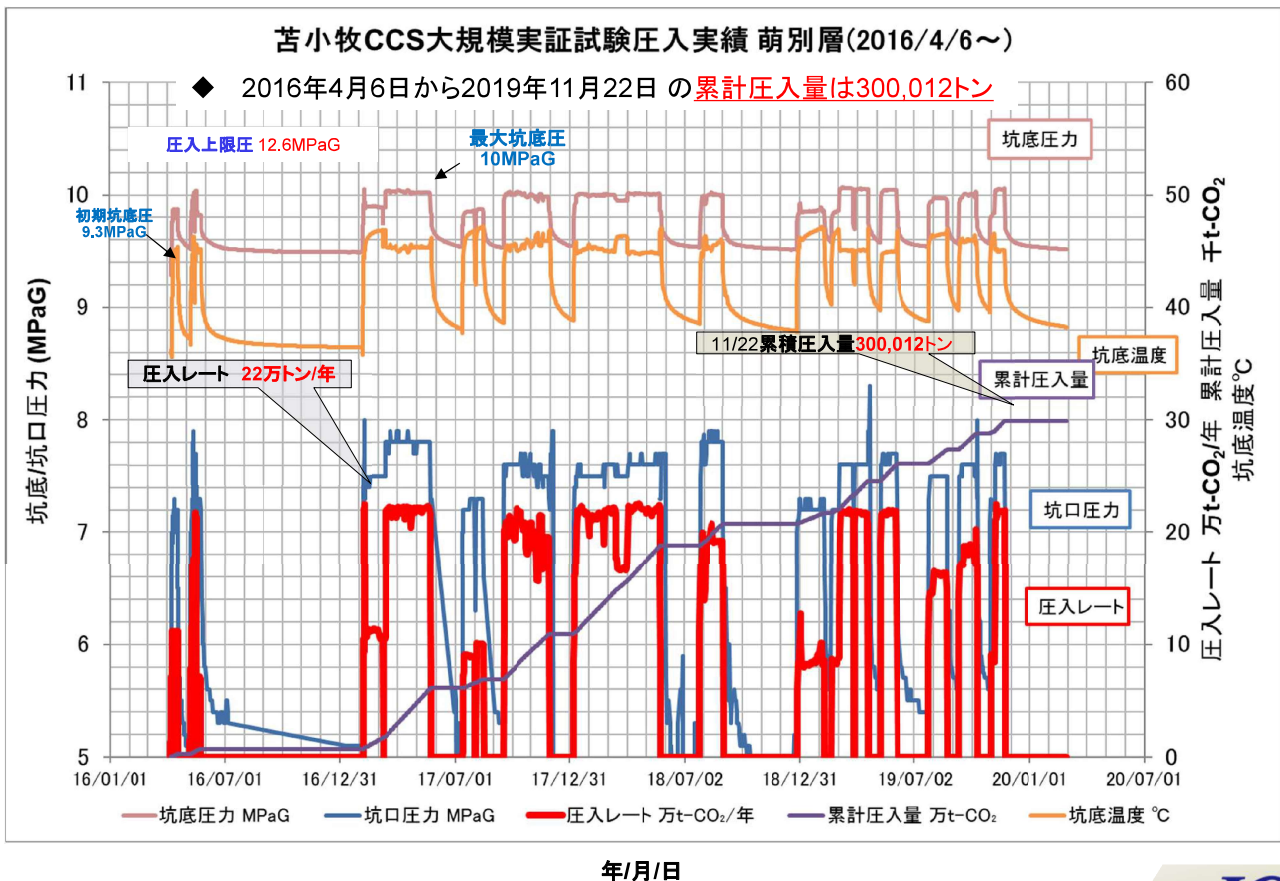
商業運転中の製油所の水素製造装置から生成されるCO<sub>2</sub>を含むガスから、CO<sub>2</sub>を分離・回収し、圧入に必要な圧力まで昇圧(最大23MPa)して、年間約10万トン規模のCO<sub>2</sub>を苫小牧沖の2層の貯留層に圧入し貯留しています。



注：滝ノ上層は圧入性が悪かったため、本日は萌別層にのみ言及



## 萌別層圧入実績





①設備能力（圧入コンプレッサ）

- 圧力 9.3MPa
- 温度 31.1～40℃
- 流量 25.3t/h (22万tpa)

②チュービング能力（3.5in TBG）

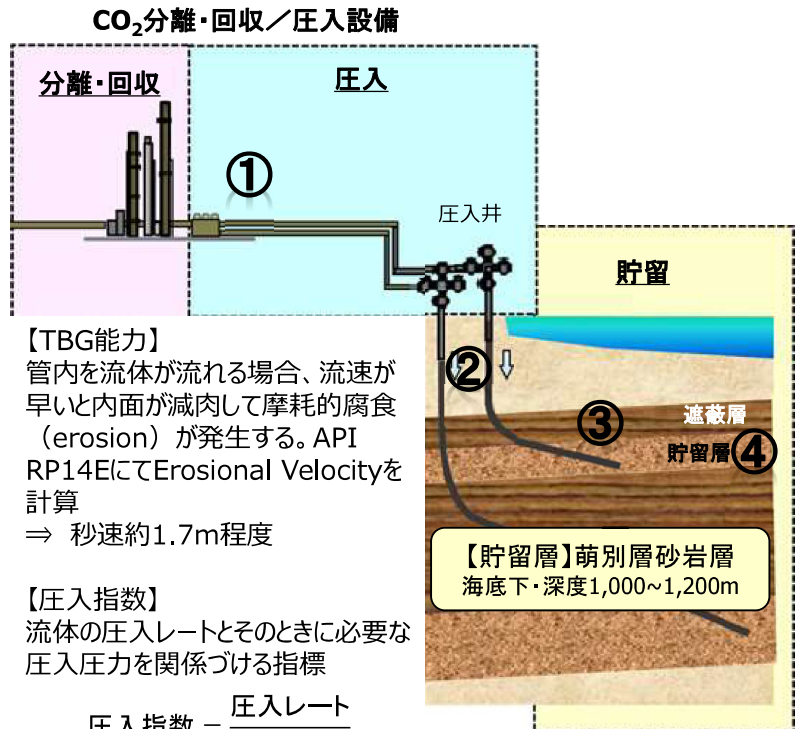
- 坑口圧入圧力9.3MPa  
→ 48万tpa by API RP14E  
(坑底圧入圧力 10.9MPa)  
TBGサイズ大で増加、ただし坑井作業の難易度が高まる。

③遮蔽層を破壊しない圧力

- 坑底圧入圧力 12.63MPa  
(圧入指数が悪くなると制約となる可能性あり)

④貯留層の圧入し易さ

- 圧入指数  
(貯留層性状による。圧入を続ける過程で変化する。)



【TBG能力】  
管内を流体が流れる場合、流速が早いと内面が減肉して摩耗的腐食（erosion）が発生する。API RP14EにてErosional Velocityを計算  
⇒ 秒速約1.7m程度

【圧入指数】  
流体の圧入レートとそのときに必要な圧入圧力を関係づける指標

$$\text{圧入指数} = \frac{\text{圧入レート}}{\text{差圧}}$$

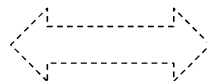
$$\text{差圧} = (\text{圧入圧力}) - (\text{地層圧力})$$

圧入性把握のための圧入パターンの検討、最適化が重要

## 貯留レート：エロージョナルベロシティと圧入指数の算定式

【エロージョナルベロシティ（Erosional Velocity）】

$$V_e = \frac{c}{\sqrt{\rho_m}}$$



- $V_e$  エロージョナルベロシティ (ft/s)
- $c$  定数 (100～250)
- $\rho_m$  密度 (lb/ft<sup>3</sup>)

参考：ベルヌイの式（Bernoulli's Eq）

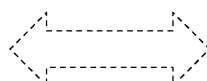
$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z = \text{一定}$$

- $v$  流速
- $g$  加速度
- $p$  圧力  $\Delta P$
- $\rho$  密度
- $z$  高さ

•  $V_e$  は経験則であり使用環境で定数が異なる目安である。

【圧入指数（Injectivity Index）】

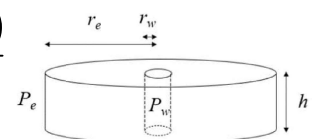
$$II = \frac{Q_i}{P_{wf} - P_r}$$



- $II$  圧入指数
- $Q_i$  圧入レート
- $P_{wf}$  圧入坑底圧力
- $P_r$  貯留層圧力

参考：ダルシーの式（Darcy's Eq）

$$q = \frac{2\pi kh(P_e - P_w)}{\mu \ln \frac{r_e}{r_w}}$$



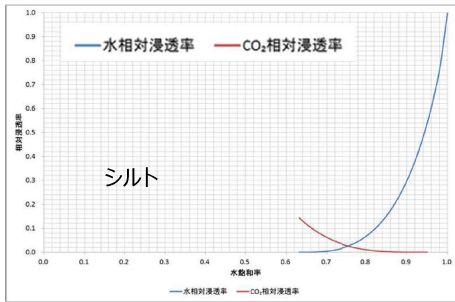
- $q$  流量
- $k$  浸透率
- $h$  有効層厚
- $\mu$  粘性
- $r$  半径
- $P$  圧力

• 圧入指数は貯留層性状に依存し、高浸透性であるほど（ $kh$ が大きいほど）大きな値を示す。

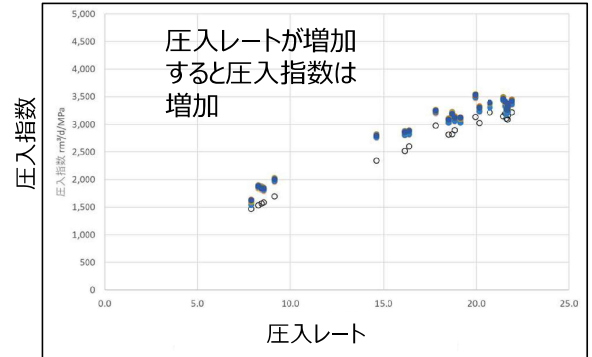


圧入指数は、圧入に伴い変化する。

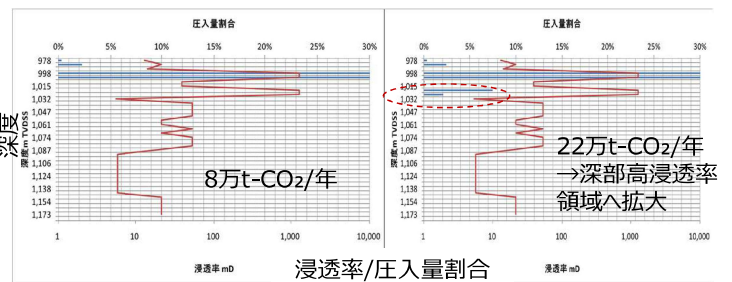
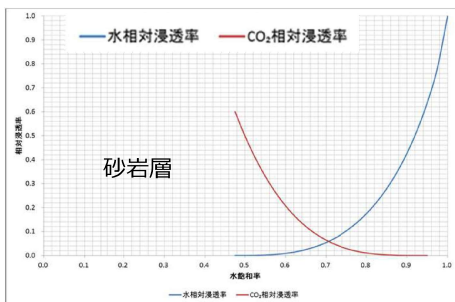
- ・ 圧入流体の飽和率上昇に伴う相対浸透率の増加 ⇒ 二酸化炭素有効浸透率  $k$  の増加
- ・ レートアップによる圧入領域の拡大 ⇒ 有効層厚  $h$  の増加



シルトでは、CO<sub>2</sub>相対浸透率は小さい。

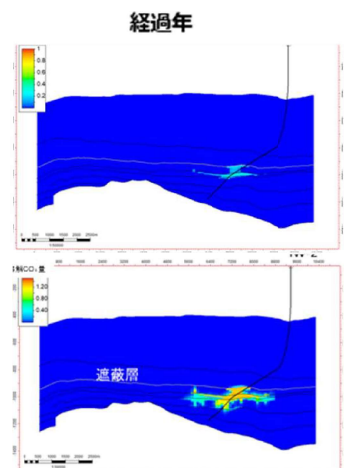
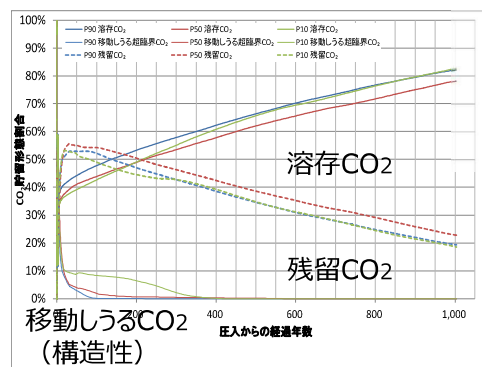
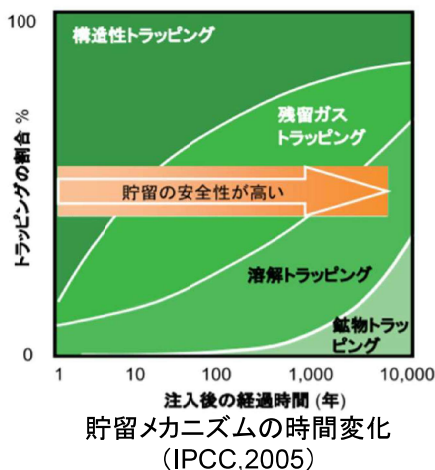
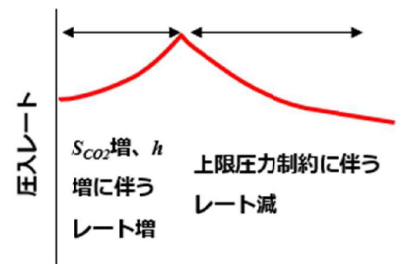


砂岩では、CO<sub>2</sub>相対浸透率はCO<sub>2</sub>飽和率増加に伴い大きくなる。



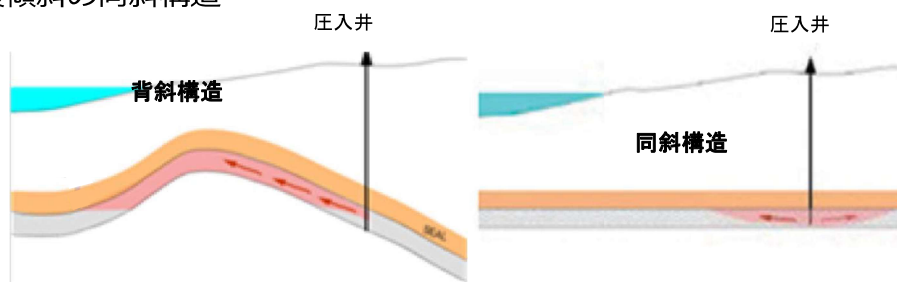
## 流動シミュレーションから見られる貯留特性

- 挙動予測シミュレーションによる一般的な貯留レート概念図
- 圧入に伴い圧入性が増加、地層圧が高くなることから遮蔽層上限圧力に近づき圧入レート抑制  
(苫小牧ではLOTに基づく上限圧力に将来予測でも達さないのが異なる)
- LOTが無い場合、地質データから推定するスレッシュホールド圧を上限とするも評価にて遮蔽層にCO<sub>2</sub>が浸透しても上部には達しないことも示唆  
⇒ スレッシュホールド圧を上限圧力とする是非検討中
- 貯留後の二酸化炭素の挙動
  - 超臨界CO<sub>2</sub>は上へ、溶存CO<sub>2</sub>は下へ
  - 溶存CO<sub>2</sub>の割合が増え、安全な貯留状態へ



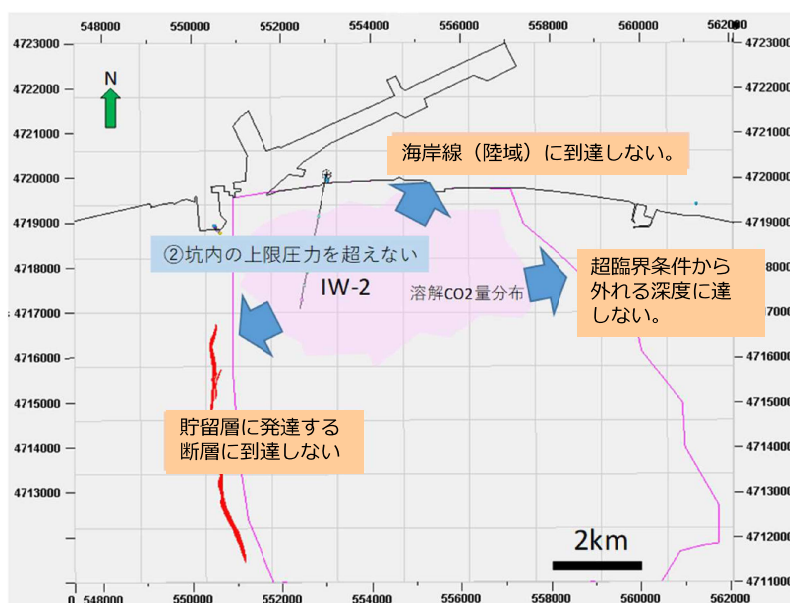
苫小牧IW-2 1000年後将来予測 (左: 割合、右上: 超臨界、右下: 溶存)

- ✓ 貯留層に十分な貯留能力がある。
  - ・ 圧力上昇を吸収する十分な広がり・連続性を持つ貯留層
- ✓ 遮蔽層が貯留層を覆っている。
  - ・ CO<sub>2</sub> が遮蔽層の上に漏出しない十分な厚さを持つ遮蔽層
  - ・ CO<sub>2</sub> 圧入圧力により破壊されない十分な強度を持つ遮蔽層
- ✓ 二酸化炭素が地下に留まるような地質構造となっている。
  - ・ 背斜構造や緩傾斜の同斜構造
  - ・ 適切な深度



- ✓ 二酸化炭素が漏洩する断層などの経路がない。
- ✓ 過去に周辺で地震が集中して発生していない。

## 貯留可能性を決める制約：苫小牧の場合



- ◆ 苫小牧は安定的な貯留適地として選定
- ◆ 遮蔽層を破壊しない上限圧入圧力を設定

さらに

- ・ CO<sub>2</sub>が、西部断層に到達しない。
  - ・ CO<sub>2</sub>が、深度750mに到達しない（超臨界条件を満たす）。
  - ・ CO<sub>2</sub>が、海岸線に到達しない。
- ことを安定的な貯留条件とする。

注：図中ピンクの線はモデル範囲を示したものであり制約ではない。

- ・ これらの制約条件のもと、地層の不均質性や不確実性も加味した貯留層モデルを用いた流動シミュレーションによる将来予測により貯留可能性を評価
- ・ 萌別層圧入井(IW-2)での坑井当り貯留可能性評価として約600万tが可能と評価

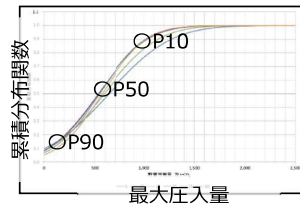
## ◆ CO<sub>2</sub>圧入長期挙動予測シミュレーションを用いた萌別層最大圧入可能量推定

### 【試算前提】

- 現状の圧入設備を利用して萌別層圧入井 (IW-2)への圧入を再開する。諸条件 (仕様) は現状通りとする。
- 圧入CO<sub>2</sub>は、溶解分含めて海防法申請時の海底下廃棄範囲内に収まる量までを圧入可能量とする。
- 岩相の不確実性を表現するため地質推計学を利用した確率的評価を行い、10%以上、50%以上、90%以上の確率で達成される圧入可能量を、それぞれP10、P50、P90の最大圧入可能量とする。

### 【試算結果】

P90 約100万 t  
P50 約600万 t  
P10約1000万 t



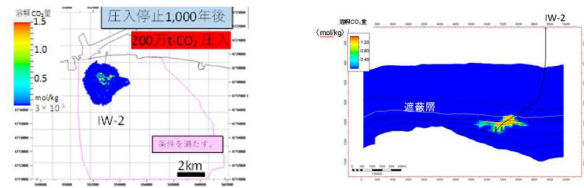
### 【圧入量増加のために考えられる策】

- 圧入井数の増加及び適正配置
- 圧入パターン最適化
- 必要に応じて物理的制約条件改善 (圧力、管内流速など)

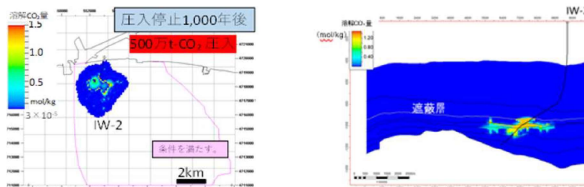
### 【溶解CO<sub>2</sub>賦存領域評価結果の例】

左：平面図、右：断面図 いずれも圧入停止1000年後

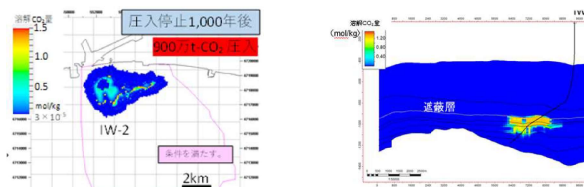
P90相当具現像の一例



P50相当具現像の一例



P10相当具現像の一例



高浸透率領域よりも下部に圧入することで貯留可能量が増加する可能性がないか

# 萌別層圧入井(IW-2)最大圧入量の試算：下部圧入

## ◆ 圧入量増加のため、途中からCO<sub>2</sub>を下部に選択圧入した場合の最大圧入可能量推定

### 【試算前提】

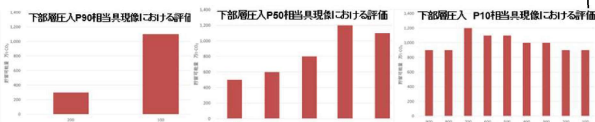
- 上部にて圧入再開、途中で下部に圧入を切り替える。切替時期についてはセンシビリティスタディを行う。

### 【試算結果】

P90 300~1,100万 t  
P50 500~1,200万 t  
P10 900~1,200万 t

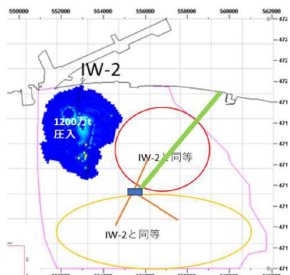
下部に圧入を切り替える時期により、最大圧入量は大きく変化する。

左よりP90、P50、P10、X軸は切替時圧入量



複数坑井による萌別層全体開発概念図 (一例)

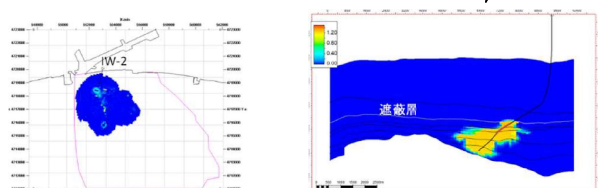
沖合にWellhead Platformを設置



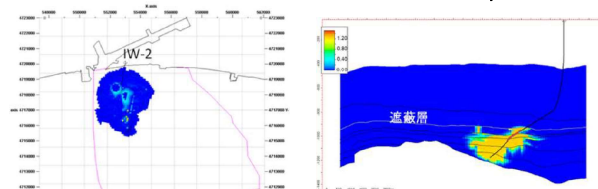
### 【溶解CO<sub>2</sub>賦存領域評価結果の例】

左：平面図、右：断面図 いずれも圧入停止1000年後

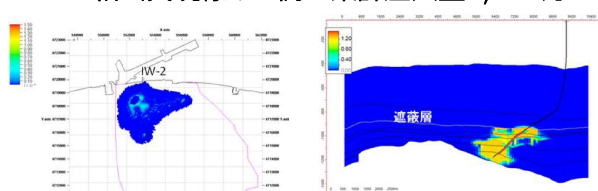
P90相当具現像の一例：累計圧入量1,100万t



P50相当具現像の一例：累計圧入量1,200万t



P10相当具現像の一例：累計圧入量1,200万t



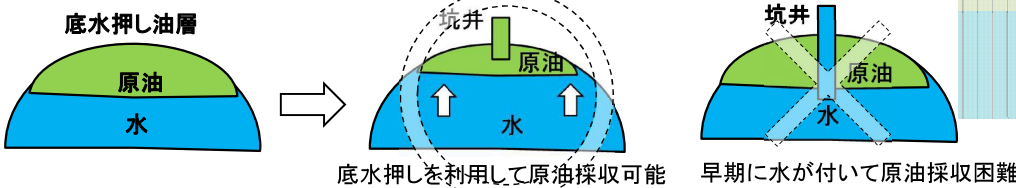
適切な時期に下部に圧入切替することで貯留可能量が増加する可能性あり

◆油ガス田は通常複数枚の油層、ガス層から成るため、採取層の選択を行うことが一般的

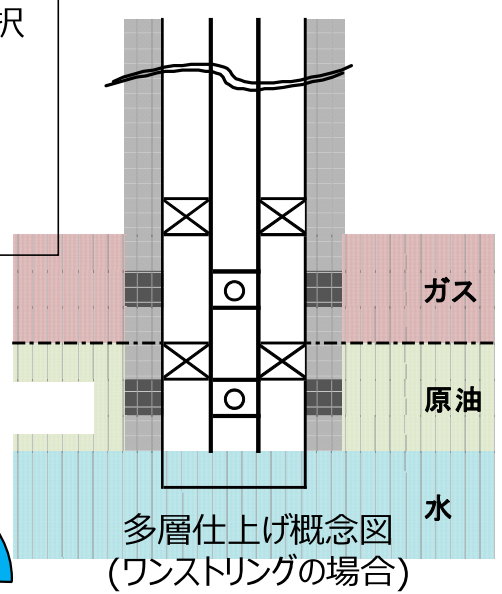
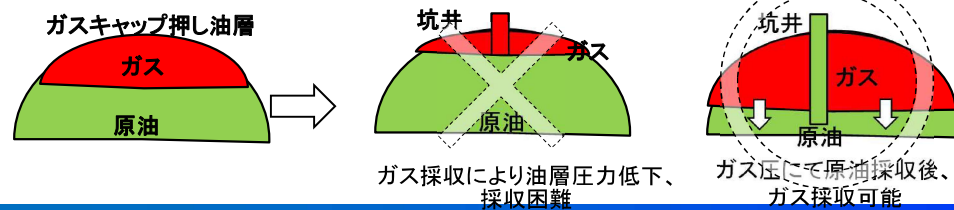
- スライディングサイドドアによる採取のオンオフ
  - フローコントローラーによる流量調整・制御
- ⇒ CCSにおいても圧入区間の切り替え・調整は既存技術にて可能
- ◆油回収率最適化のため、上部のみ/下部のみ仕上げも一般的

- 販売可能量・水処理能力などに合わせた原油・ガス・水生産計画  
⇒ 全体計画に合わせた油採取井・ガス採取井の開発、高ガス油比井・高水量率井の稼働（右図参照）

- 上部のみから採取したほうが良い場合の例（排油機構が底水押し型）



- 下部からのみ採取したほうが良い場合の例（排油機構がガスキャップ押し）



- 貯留層のどの部分に圧入するかは選択は可能
- 圧入区間の切り替え、流量制御も可能

Copyright 2022 Japan CCS Co., Ltd.



ご参考：苫小牧CCS実証試験における貯留コスト考察

【苫小牧実証試験に基づく試算：実用化モデル100万tケース】 単位：円/t

	分離・回収・圧入	圧入井・貯留	合計
設備コスト	590	369	959
運転コスト	4,079	1,148	5,227
小計(Captured)	4,669	1,517	6,186
同 (Avoided)			7,261

注：輸送費含まず。  
圧入井・貯留にはモニタリング含む。

参考：Quest CCS  
Captured 5,501円/t  
Avoided 6,946円/t  
(P/L除く)

- 石油天然ガス開発における操業費との比較

坑井維持管理、生産施設、輸送・出荷施設、海洋設備の場合は陸域に比べて割高、などは類似  
運転コスト、人件費、燃料費、維持管理費、設備更新/補修費、なども類似

参考まで原油換算1バレル当たりの生産コスト 10 \$/BOE とすると、  
単位質量当り：原油密度0.8t/m<sup>3</sup>として、79\$/t-crude  
(CO<sub>2</sub>容量補正：0.4639kg/L@7.351MPaa,30℃ ⇒ 135\$/CO<sub>2</sub>-t)

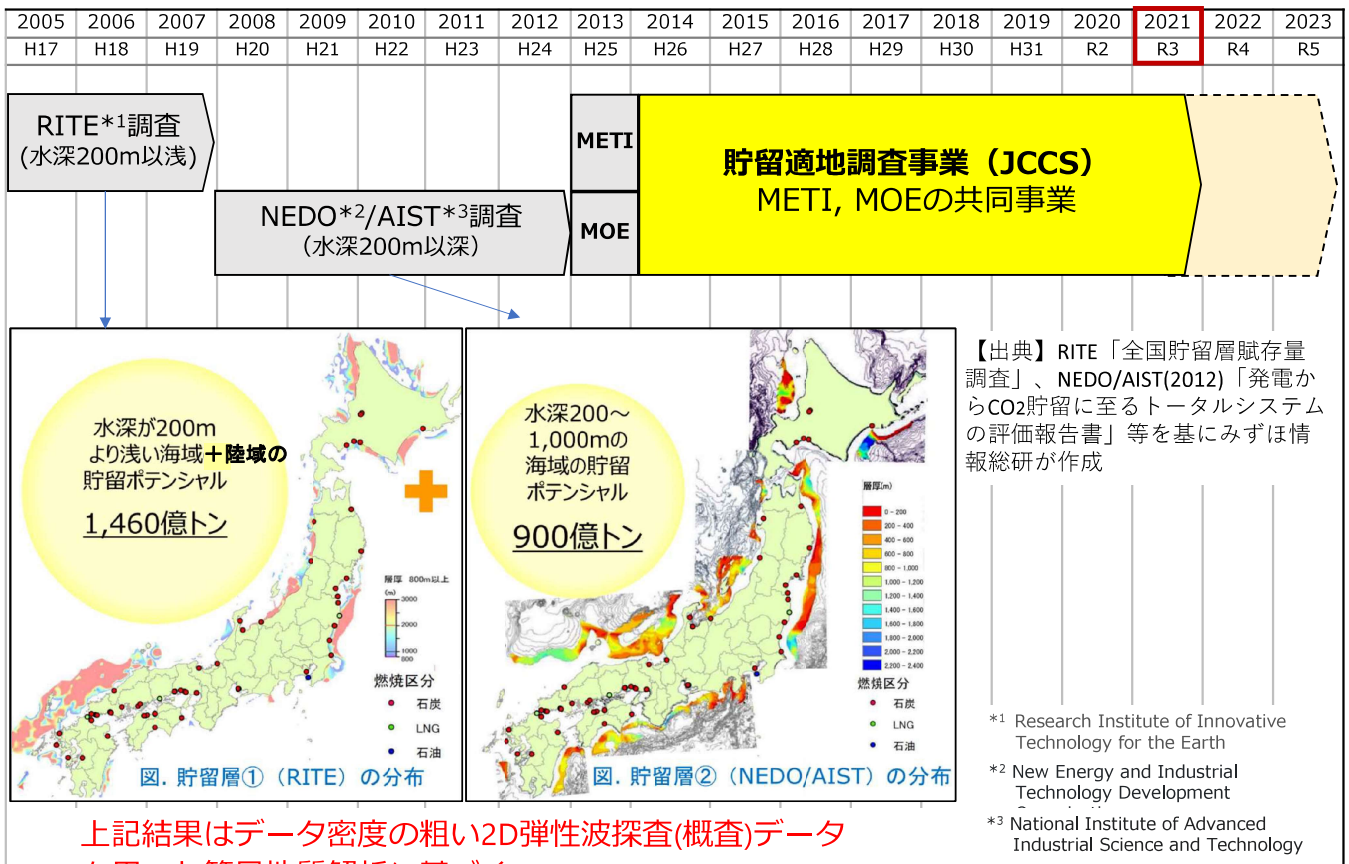
- 米国45Q税制における最大税制控除 50\$/CO<sub>2</sub>-t

これらの単位コストは、石油天然ガス開発における設備コストと運転コストが埋蔵量、生産性に大きく左右されると同様にCCSの場合でも、**圧入可能レートと累計圧入量に大きく依存**する。

⇒ 油ガス田開発同様、圧入性が良好で大規模貯留が見込めるCCSが低コストにつながる。

Copyright 2022 Japan CCS Co., Ltd.



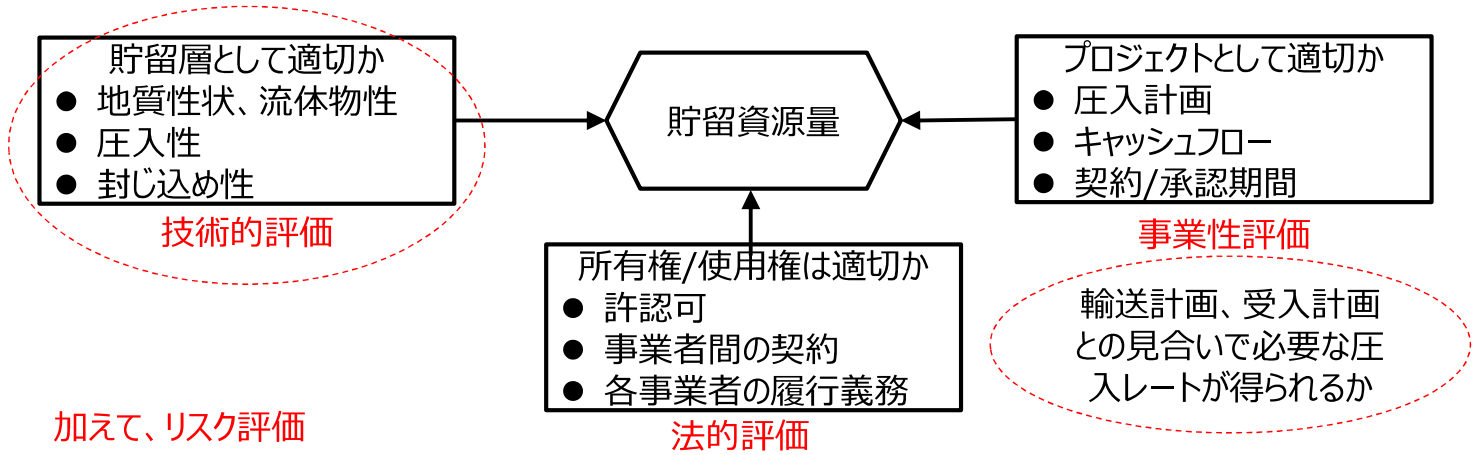


上記結果はデータ密度の粗い2D弾性波探査(概査)データを用いた簡易地質解析に基づく

Copyright 2022 Japan CCS Co., Ltd.



## ご参考：SRMSによる貯留資源量評価



加えて、リスク評価

- 不確実性への対応はできているか
- ✓ 貯留性状評価は、各段階ごと圧入終了まで精度向上する体制ができているか
- ✓ 貯留効率の不確実性は認識されているか
- 意思決定に至る条件は確認されたか
- ✓ 技術的・経済的に実施可能な条件は認識されているか
- ✓ 法順守と政府の許認可・環境保護・社会的受容性は貯留期間内得られるか
- 将来のコスト影響要因は加味されているか
- ✓ 市況、輸送・インフラコスト上昇、操業条件の変化、財務条件・税制の変化、etc.

定期的に見直し、  
計画変更する体制  
が整っているか

Copyright 2022 Japan CCS Co., Ltd.



## ■ 低コスト化

- ・ CCS事業では、CO<sub>2</sub>分離・回収のエネルギーコストの割合が大きいため、将来のCO<sub>2</sub>排出源に応じた様々なCO<sub>2</sub>分離・回収手法の技術開発を継続して、CCS普及に向けて更なる低コスト化を図る必要がある。

## ■ CO<sub>2</sub>輸送手段の確立

- ・ 国内ではCO<sub>2</sub>大規模排出源は沿岸域に比較的広範囲に点在しており、必ずしも排出源とCO<sub>2</sub>の貯留適地が近接しているとは限らない。将来のCCS普及、商用化のためには、大規模CCSを想定した輸送技術の確立が求められ、輸送コスト低減のための実証が必要である。特に液化CO<sub>2</sub>船による輸送は有効な手段となり得る。

## ■ 貯留適地の確保

- ・ 貯留ポテンシャルは莫大であるとの報告はあるが、大規模貯留地点の確保が不可欠であり、2014年度から1億トン以上のCO<sub>2</sub>を貯留可能な地点を複数選定することを目指して貯留適地調査事業（経済産業省と環境省の共同事業）が行われている。

## ■ 事業環境整備

- ・ 事業者がCCSを実施するためには、インセンティブ施策、官民の責任分担を明確化（法整備）のほか、社会的受容性の向上等の事業環境の整備が必要である。

加えて・ステイクホルダーとの社会的合意に基づく事業実施体制の構築と責任主体の明確化

・ 地域社会の理解と協力を得た良好な関係のもとでの事業実施体制の構築

⇒ 継続的なリスクコミュニケーションを通じて、科学的情報を分かり易く発信・共有し、地域との信頼関係の醸成を図る

Copyright 2022 Japan CCS Co., Ltd.

JCCS

Carbon dioxide Capture and Storage

未来につなぐCCS

—— 国内での実用化に向けて ——

## ご清聴ありがとうございました。

日本CCS調査株式会社HPは下記QRコードからアクセスいただけます。

