# 「$CO_2$輸送・貯留に関する技術動向と今後の課題」報告会

開催期日：2018(平成 30)年 01 月 26 日(金) 13:00～17:00
開催場所：土木学会 講堂（東京都新宿区四谷一丁目 外濠公園内 公益社団法人土木学会）
主催者名：土木学会エネルギー委員会 二酸化炭素回収・貯留（CCS）における調査・研究小委員会
開催趣旨：
本委員会では，二酸化炭素回収・貯留(CCS)に関する最新の情報収集と，土木分野の貢献が期待される二酸化炭素貯留についての技術開発に関する基礎的調査と研究を行うことを目的に活動を行って参りました．今般，委員会活動の成果を報告書に取り纏めることができたことから，この内容を広く紹介する場を設けるとともに，CCS に関わる有識者の講演も加えた報告会を企画し，CCS に関する理解を深めたいと考えております．

プログラム：
1. はじめに

2. 基調講演 1「CCS に関わる政策の現状」
経済産業省 産業技術環境局 地球環境連携室長 松村　亘様
3. 基調講演 2「世界の CCS の現況と苫小牧 CCS プロジェクト」
日本 CCS 調査株式会社 顧問 国際部長　　澤田 嘉弘様
4. 報告書のトピックス
   1) 国内外の主要な CCS 実証プロジェクト

   2) CCS 海外政策およびコスト試算の事例調査

   3) $CO_2$輸送技術

   4) $CO_2$貯留サイト評価技術

   5) $CO_2$地中貯留シミュレーション技術

   6) $CO_2$化学的影響評価技術

   7) $CO_2$モニタリング技術

5. おわりに

以上

# 「CO2輸送・貯留に関する技術動向と今後の課題」
報告会

土木学会　エネルギー委員会
二酸化炭素回収・貯留(CCS)
における調査・研究小委員

---

地球の平均気温は，ここ100年余り上昇傾向にある.

⇒原因はCO2（二酸化炭素）の排出

CO2の大気中への放出削減が必要

# 東日本大震災後の原子力発電の停止により火力発電が増加

| | 2010年 | | 2014年 | 2015年 |
|---|---|---|---|---|
| 原子力 | 29 % | → | 0 % | 1 % |
| 火　力 | 62 % | → | 88 % | 85 % |

わが国のCO2のうち

火力発電所から排出量される割合

約 30 % → 約 40 %



CO2を火力発電所・製鉄所・セメント工場などの集中発生源で分離回収

このCO2を石油の採掘跡などの安定地層に入れて大気中への放出量を減らす.

⇒地中貯留(CCS):

Carbon dioxide Capture and Storage

地球温暖化の緊急避難的な現実的方策として有望

## 世界の大規模（年100万トン以上）CO2地中貯留プロジェクト

| | |
|---|---|
| ノルウェー | Sleipner |
| カナダ | Weyburn |
| アルジェリア | In Salah |
| オーストラリア | Gorgon |

## CCS小委員会

2014.9 土木学会エネルギー委員会に設置

CCS＝CO2の分離回収＋輸送・地中貯留

本小委では，輸送と地中貯留に絞り，
技術動向と土木分野における
課題の調査検討を実施.

委員長　石田 毅　京都大学 工学研究科
幹　事　末永 弘　電力中央研究所 地球工学研究所

委員

| | |
|---|---|
| 小俣　明 | 千代田ユーテック |
| 海江田 秀志 | 電力中央研究所 地球工学研究所 |
| 梶田 直揮 | 大林組 技術本部 |
| 加藤 光義 | 東北電力 土木建築部 |
| 徂徠 正夫 | 産総研 地圏資源環境研究部門 |
| 高橋 亨 | 深田地質研究所 |

委員

| | |
|---|---|
| 竹島 淳也 | 応用地質 エネルギー事業部 |
| 本江 誠治 | 電源開発 技術開発部 |
| 山田 英司 | 中部電力 土木建築部 |
| 山本　肇 | 大成建設 土木技術研究所 |

オブザーバ

| | |
|---|---|
| 岡島 拓郎 | 経済産業省 産業技術環境局 |
| 永澤 剛 | 国際連合工業開発機関 |
| 松村 亘 | 経済産業省 産業技術環境局 |

報告書　目次

1.　はじめに　(石田 毅　京都大学)
2.　気候変動対策としてのCCS
2.1　気候変動問題
2.2　気候変動枠組条約に基づく取組
2.3　国内における政策
(岡島 拓郎 経済産業省)
(永澤　剛　国際連合工業開発機関)
2.4　海外における政策事例
(本江 誠治 電源開発)
2.5　国際的枠組み等における動向
(田中 良三 地球環境産業技術研究機構（RITE）)

（赤字は執筆委員）

3. CCSの実証実験事例
3.1 これまで実施された主な実証実験
(海江田 秀志 電力中央研究所)
3.2 近年開始された・今後実施予定の主な実証実験
(末永 弘　電力中央研究所)
3.3 我が国が参画するモニタリング研究プロジェクト事例
(海江田 秀志 電力中央研究所)
(高橋　亨　深田地質研究所)

4.　CCSコスト試算の事例調査

4.1　はじめに

4.2　CCSのコスト構造

4.3　コスト試算事例

4.4　大きなコスト感応度を有する要素の例

(本江 誠治　電源開発)

5.　これまでに開発されたCCSに関わる技術

5.1　CO2輸送技術

(小俣　明　千代田ユーテック)

5.2　CO2貯留サイト評価技術

(末永 弘　電力中央研究所)

5.3　CO2地中挙動シミュレーション技術

(山本 肇　　大成建設)

5.4　CO2化学的影響評価技術

(徂徠 正夫　産総研)

5.5　CO2モニタリング技術

(高橋　亨　深田地質研究所)

6.　CCSにおいて今後貢献できる土木技術

6.1　貯留層評価のための物理探査技術

(竹島 淳也　応用地質)

6.2　リスク評価技術(山本 肇　大成建設)

6.3　CO2漏洩評価技術 (末永 弘　電力中央研究所)

6.4　船舶海上輸送におけるインフラ構築技術

(山本 肇　大成建設)　(小俣　明　千代田ユーテック)

(鈴木健一郎　大林組　技術研究所)

6.5　溶解型CO2貯留技術

(鈴木健一郎　大林組　技術研究所)（赤字は執筆委員）

6.6　石油・天然ガス・地熱分野におけるCO2利用技術

(石田 毅　京都大学)

7.　おわりに

# 本日のプログラム　(1)

13:00-13:15　はじめに　　小委員会委員長　石田　毅

13:15-14:00　基調講演1

「CCSに関わる政策の現状」

経済産業省 産業技術環境局

地球環境連携室長　松村　亘　氏

14:00-14:45　基調講演2

「世界のCCSの現況と苫小牧CCSプロジェクト」

日本CCS調査(株) 顧問 国際部長　　澤田 嘉弘　氏

# 本日のプログラム (2)

## 報告書のトピックス

15:00-15:15 国内外の主要なCCS実証プロジェクト (海江田委員）

15:15-15:30 CCS海外政策およびコスト試算の事例調査 (本江委員)

15:30-15:45 CO2輸送技術 (小俣委員)

15:45-16:00 CO2貯留サイト評価技術 (末永委員)

16:00-16:15 CO2地中貯留シミュレーション技術 (山本委員)

16:15-16:25 CO2化学的影響評価技術 (徂徠委員)

16:25-16:40 CO2モニタリング技術 (高橋委員)

16:40-17:00 総合討論

## おわりに

# ＣＣＳに関わる政策と
# 土木技術への期待

平成３０年１月
経済産業省
地球環境連携室

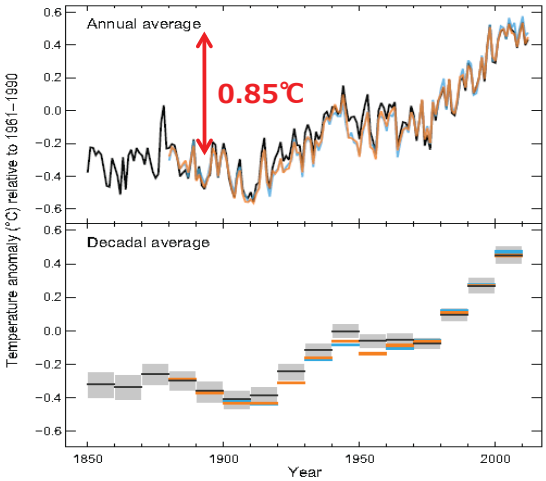
## 目次


１．気候変動問題と我が国の環境政策
２．CCSとは
３．我が国のCCS政策
４．苫小牧CCS実証試験
５．CCSの技術開発・調査
６．国際連携

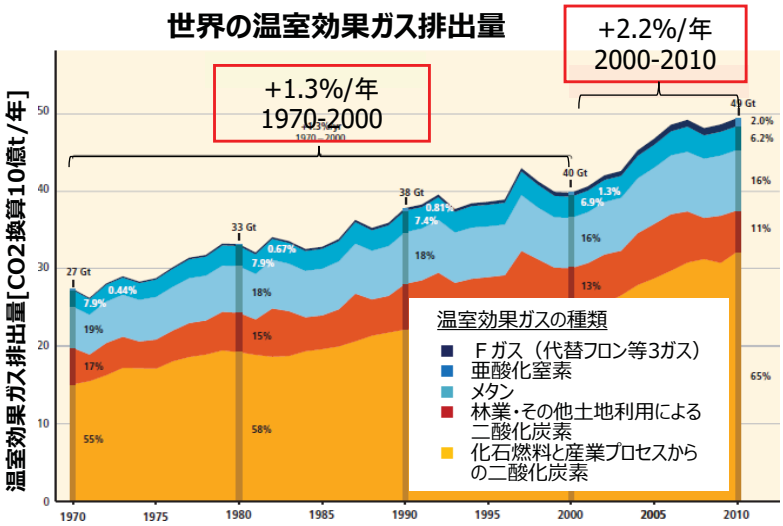
# 気候変動問題

- IPCC第5次評価報告書(2014)によると、
- 「気候システムの温暖化には疑う余地がなく、1950 年代降、観測された変化の多くは、数十年～数千年間で前例のないもの」
- 「1880～2012年に、0.85℃の上昇（90%信頼区間では0.65～1.06℃）。」
- 「20世紀半ば以降に観測された温暖化の主な要因は、人間活動であった可能性が極めて高い（95–100%程度の確率）。」
- 世界的に人為起源の温室効果ガス排出量は、増加傾向が継続。

**世界平均地上気温の偏差**




**世界の温室効果ガス排出量**




【出典】:IPCC 第5次評価報告書 WG3報告書 政策決定者向け要約 内図を編集



# 国際交渉の大きな流れ

**・国連気候変動枠組条約（国連加盟国全てが参加）の下で、温室効果ガス削減の取組みを実施。具体的な国際取決めについて話し合うため、国連気候変動枠組条約締約国会議（Conference of the Parties）を1995年から毎年末に開催。**

## 国連気候変動枠組条約

（1992年採択、1994年発効、196ヶ国・地域が参加。日本は1993年に批准）

○究極の目的 ⇒ 大気中の温室効果ガス濃度の安定化。
○全締約国の義務 ⇒ 温室効果ガス削減計画の策定・実施、排出量の実績公表。
○先進国の追加義務 ⇒ 途上国への資金供与や技術移転の推進など。

→ **条約の実効性を高めるために**

## 京都議定書

（1997年に京都で開催したCOP3で採択、2005年発効。日本は2002年に批准）

○先進国のみが条約上の数値目標を伴う削減義務を負う。

**第一約束期間** 2008年～2012年

【第一約束期間】
・日本(▲6%(90年度比))、EU、ロシア、豪州等が参加。
・米国は不参加、カナダは2012年に脱退。

**第二約束期間** 2013年～2020年

【第二約束期間】
・EU、豪州等が参加。
・日本、ロシア、ニュージーランドは不参加。

## パリ協定

（2020年以降の将来枠組）

（2015年11月30日～12月13日 COP21@仏・パリで合意）
（2016年11月4日 パリ協定 発効）

COP15（2009年デンマーク・コペンハーゲン）
→合意不採択

COP16（2010年、メキシコ・カンクン）
・各国が自主的に2020年の目標を登録することに合意
日本は、▲3.8%（05年度比）を登録（2013年11月）
※原発を含まない現時点での目標

COP17（2011年、南ア・ダーバン）
・2020年以降の将来枠組に向けた検討開始に合意

約束草案（2020年以降の削減目標）を提出（2015年7月）
・2030年度に2013年度比▲26.0%

COP22（2016年11月7日～18日、モロッコ・マラケシュ）
・パリ協定の実施方針等を2018年までに策定することを合意

## パリ協定のポイント

COP21(2015年12月)においてパリ協定が採択され、2016年11月4日に発効。

**●長期目標（２℃目標）**

・世界の平均気温上昇を**産業革命以前に比べて2℃より十分低く保つとともに、1.5℃に抑える努力**を追求。

・出来る限り早期に世界の温室効果ガスの排出量をピークアウトし、今世紀後半に人為的な温室効果ガスの排出と吸収源による除去の均衡を達成。

◆先進国、途上国を問わず、特定年次に向けての世界の削減数値目標は合意されなかった。

**●プレッジ＆レビュー**

・主要排出国を含む全ての国が自国の国情に合わせ、**温室効果ガス削減目標（ＮＤＣ：Nationally Determined Contribution）を策定し、5年ごとに条約事務局に提出・更新。**

・各国は目標の達成に向けた進捗状況に関する情報を定期的に提供。提出された情報は、専門家によるレビューを受ける。

◆先進国、途上国を問わず、特定の排出許容量をトップダウンで決める方式は採用されなかった。
また、目標が未達の場合にクレジットを購入してオフセットするペナルティも導入されなかった。

**●長期低排出発展戦略**

・全ての締約国は、**長期的な温室効果ガスの低排出型の発展のための戦略**を作成し、及び通報するよう努力すべきであるとされた。

◆COP21決定において、長期低排出発展戦略について、**2020年までの提出が招請**されている。



## 各国の約束草案の比較

- 京都議定書では先進国のみが削減目標を負っていたが、パリ協定では、途上国を含め、全ての国が削減目標を設定。
- 途上国は、約束草案の中で先進国からの国際支援を期待。

### 主要排出国の約束草案

| 国名 | 1990年比 | 2005年比 | 2013年比 |
|---|---|---|---|
| 日本 | ▲18.0%（2030年） | ▲25.4%（2030年） | ▲26.0%（2030年） |
| 米国 | ▲14～16%（2025年） | ▲26～28%（2025年） | ▲18～21%（2025年） |
| EU | ▲40%（2030年） | ▲35%（2030年） | ▲24%（2030年） |
| 中国 | 2030年までに、2005年比でGDP当たりの二酸化炭素排出を-60～-65%（2005年比）2030年頃に、二酸化炭素排出のピークを達成ほか | | |
| 韓国 | ＋81%（2030年） | ▲4%（2030年） | ▲22%（2030年） |

◆ 米国は2005年比の数字を、ＥＵは1990年比の数字を削減目標として提出
◆ 韓国は「2030年（対策無しケース）比37%削減」を削減目標として提出

### 途上国の約束草案

| | |
|---|---|
| フィリピン | 2030 年までにGHG 排出量を 2000 ～2030 年のBAU比70%削減を目指す。削減は入手可能な**技術開発・移転及びキャパビルを含む資金源の度合いによる**。 |
| メキシコ | 2030年にGHG及び短寿命気候汚染物質の排出量をBAU比25%削減（うち、GHGのみでは22%削減）。ただし、**技術協力、低コスト資金源へのアクセス等に対応するグローバルな合意次第**では、最大40%（うち、GHGのみでは36%）まで削減可能。 |
| インドネシア | 2030年までにGHG排出量をBAU比29%削減。ただし、**技術開発・移転や資金提供等の二国間協力も含むグローバルな合意を条件**に、最大41%まで削減可能。 |
| バングラデシュ | 2030年までに電力、交通、産業分野でGHG排出量をCO2換算でBAU比1200万トン（5%）削減。ただし、**追加的な国際支援を条件**に、CO2換算で3600万トン（15%）まで削減。 |
| イラン | 2030年にBAU比で4%削減。**国際的な資金援助や技術移転、炭素クレジットの交換等を条件**として、さらに８％（合計12%）の削減ポテンシャルがある。 |
| インド | 2030年までにＧＤＰあたり排出量を2005年比33-35%削減。ただし成功裏の実施は、**先進国によって提供される実施手段**を含む野心的なグローバル合意次第と付記。 |

# 長期目標について

## 地球温暖化対策計画における長期目標への言及

第1章
第1節
２．長期的な目標を見据えた戦略的取組

我が国は、パリ協定を踏まえ、**全ての主要国が参加する公平かつ実効性ある国際枠組みの下、主要排出国がその能力に応じた排出削減に取り組むよう国際社会を主導し、地球温暖化対策と経済成長を両立させながら、長期的目標として2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減を目指す**。このような大幅な排出削減は、従来の取組の延長では実現が困難である。したがって、**抜本的排出削減を可能とする革新的技術の開発・普及などイノベーションによる解決を最大限に追求する**とともに、**国内投資を促し、国際競争力を高め、国民に広く知恵を求めつつ、**長期的、戦略的な取組の中で大幅な排出削減を目指し、また、世界全体での削減にも貢献していくこととする。

## 各国の長期目標

【】は長期低排出発展戦略の提出状況

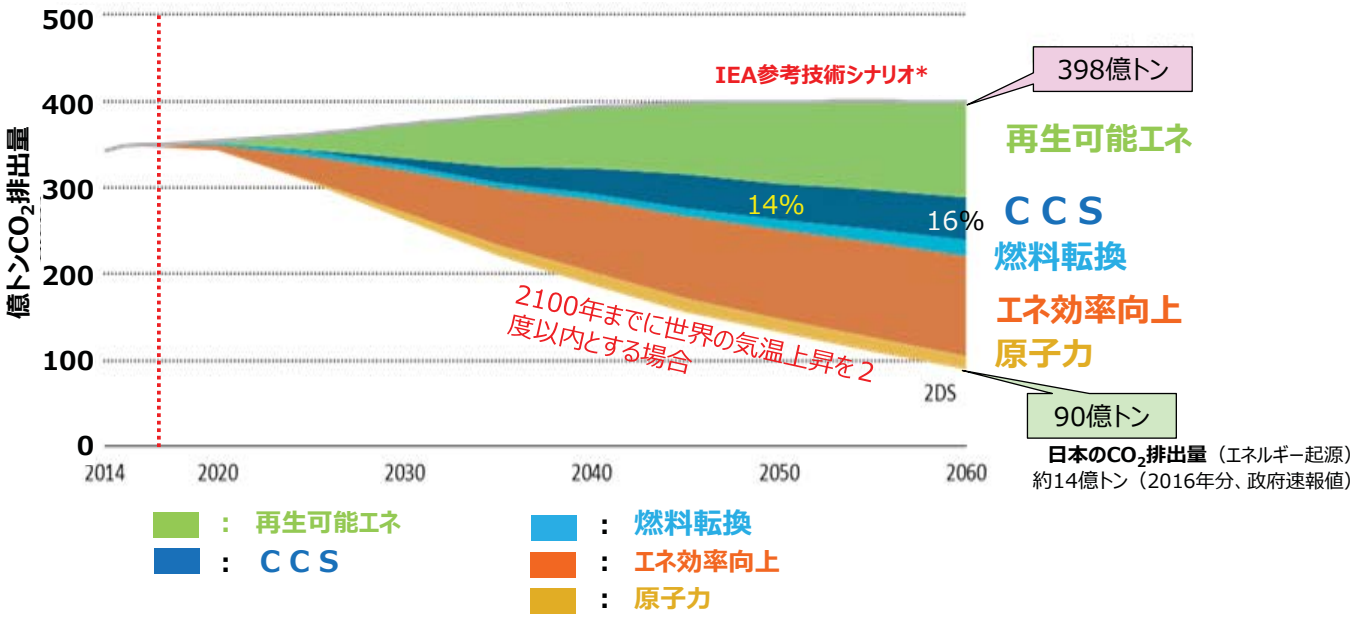
| 国名 | 長期目標への言及 |
|---|---|
| アメリカ【提出済】 | オバマ政権時の2016年11月16日に提出した長期低排出発展戦略で、2050年に温室効果ガス排出量**2005年比80%以上**削減を明記。 |
| イギリス | 2050年に1990年比で温室効果ガス排出量を**80%**削減することを気候変動法2008に位置付け。 |
| フランス【提出済】 | 2050年に1990年比で温室効果ガス排出量を**75%**削減することを緑の成長のためのエネルギー移行法及び長期低排出発展戦略に位置づけ。 |
| ドイツ【提出済】 | 2050年に1990年比で温室効果ガス排出量を**80-95%**削減することをエネルギー計画及び長期低排出発展戦略に位置付け。 |
| ＥＵ | 2050年に1990年比で温室効果ガス排出量を**80-95%**削減することを目指す（約束草案、2030年気候変動・エネルギー政策枠組等）。 |



# 気候変動対策とCCS

- IEA（国際エネルギー機関）報告書によると、2060年までの累積$CO_2$削減量の14%をCCSが担うことが期待されている。（2060年時における$CO_2$削減量の16%、49億トン／年）

## 2060年世界のＣＯ$_2$削減量見通し




*パリ協定に基づくCO$_2$排出の抑制とエネルギー効率の改善に向けた各国の現在の削減目標を考慮

出典：IEA (“Energy Technology Perspectives 2017” から転載)

# 目次


1．気候変動問題と我が国の環境政策

2．CCSとは

3．我が国のCCS政策

4．苫小牧CCS実証試験

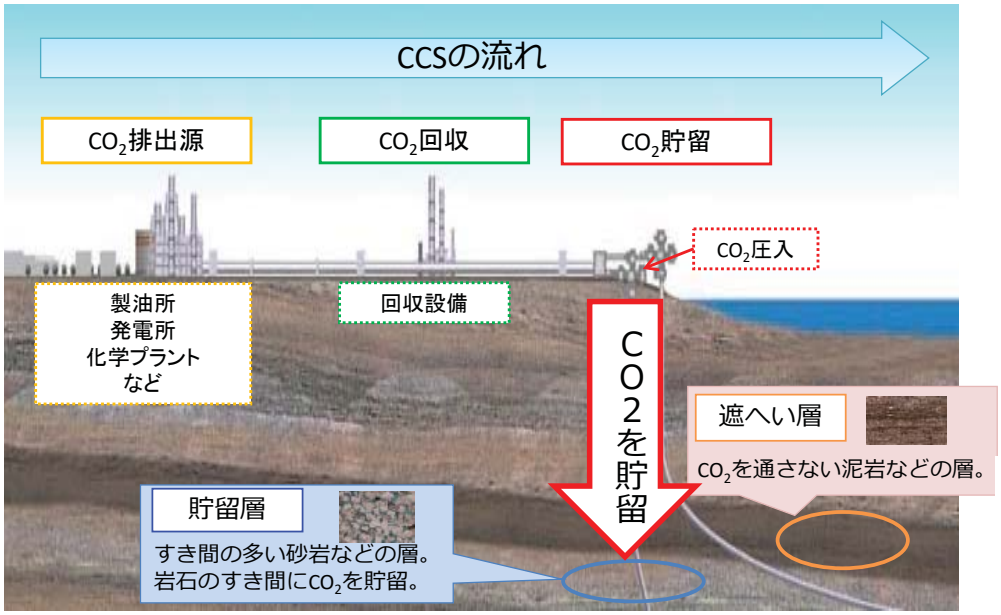
5．CCSの技術開発・調査

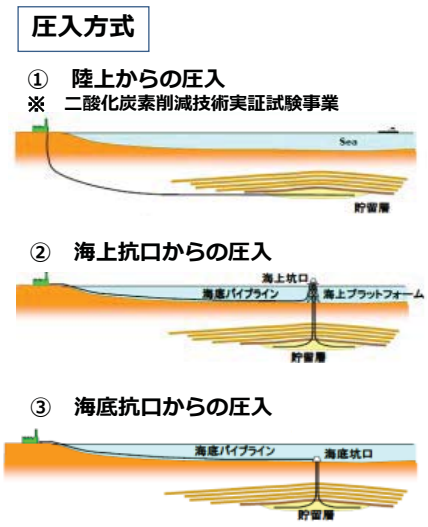
6．国際連携




## CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) とは

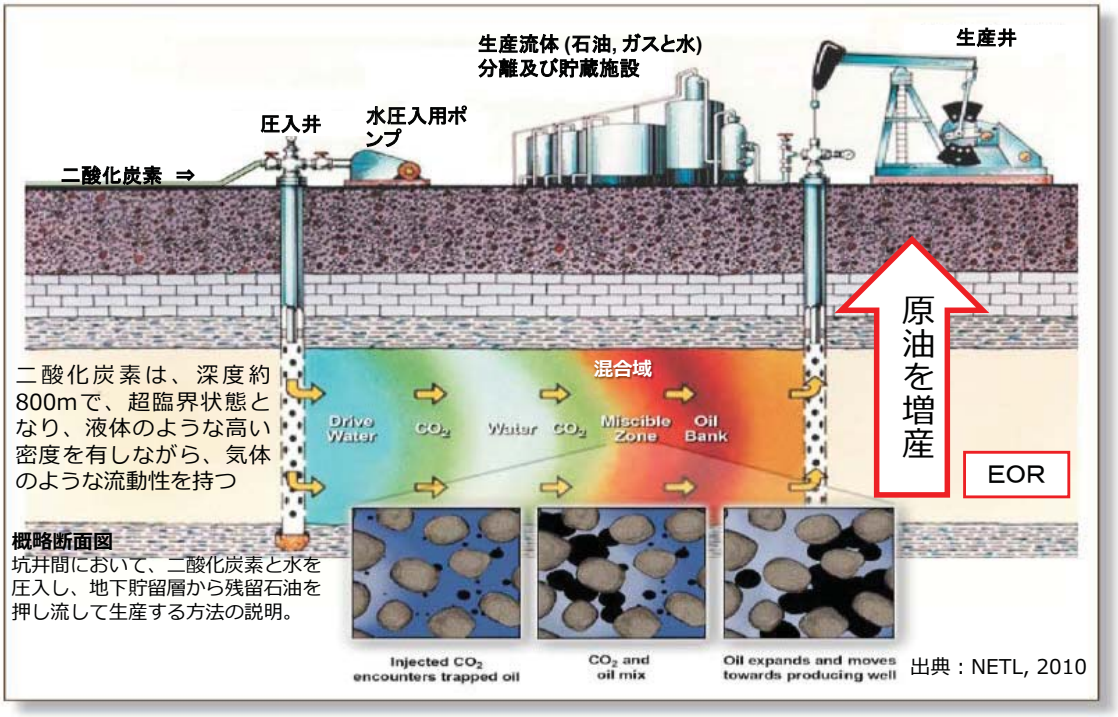
- CCS（二酸化炭素回収貯留）とは、工場や発電所等から排出される二酸化炭素（Carbon dioxide）を大気放散する前に回収し（Capture）、地下へ貯留（Storage）する技術。
- CO2排出源や貯留地点により、排出ガスの圧力やCO2濃度、輸送方式が異なるため、それぞれの事業の条件に適した回収・輸送・貯留プロセスを選択する必要がある。



# EOR(Enhanced Oil Recovery:石油増進回収法)

- $CO_2$EORは、$CO_2$を既存の油田へ圧入することで、地層中の原油の流動性を向上させ、原油の生産量を増大させる手法。
- 増油による経済性が見込まれるため、北米の一部の事業では、既に商業規模で実施。




二酸化炭素は、深度約800mで、超臨界状態となり、液体のような高い密度を有しながら、気体のような流動性を持つ

**概略断面図**
坑井間において、二酸化炭素と水を圧入し、地下貯留層から残留石油を押し流して生産する方法の説明。

出典：NETL, 2010



# 目次


1．気候変動問題と我が国の環境政策

2．CCSとは

3．我が国のCCS政策

4．苫小牧CCS実証試験

5．CCSの技術開発・調査

6．国際連携

# 日本の政策的位置付け

● **東京電力の火力電源入札に関する関係局長級会議取りまとめ（平成25年4月25日）**

（2） 2050 年目標との関係

（ア） 国は、当面は、火力発電設備の一層の高効率化、2020年頃のCCS商用化を目指したCCS等の技術開発の加速化を図るとともに、CCS導入の前提となる貯留適地調査等についても早期に結果が得られるよう取り組む。

● **攻めの温暖化外交戦略（ACE）（平成25年11月15日）**

（『イノベーション』項にて、2050年世界半減に必要な技術として位置づけ）
CCS（CO2回収・貯留技術）：火力発電等から排出されるCO2を回収し地下に貯留。日本はCCS普及の鍵となる分離回収技術の高効率化で世界に貢献。

● **エネルギー基本計画（平成26年4月11日閣議決定）**

2020年頃の二酸化炭素回収貯留(CCS)技術の実用化を目指した研究開発や、CCSの商用化の目処等も考慮しつつできるだけ早期のCCS Ready導入に向けた検討を行うなど、環境負荷の一層の低減に配慮した石炭火力発電の導入を進める。

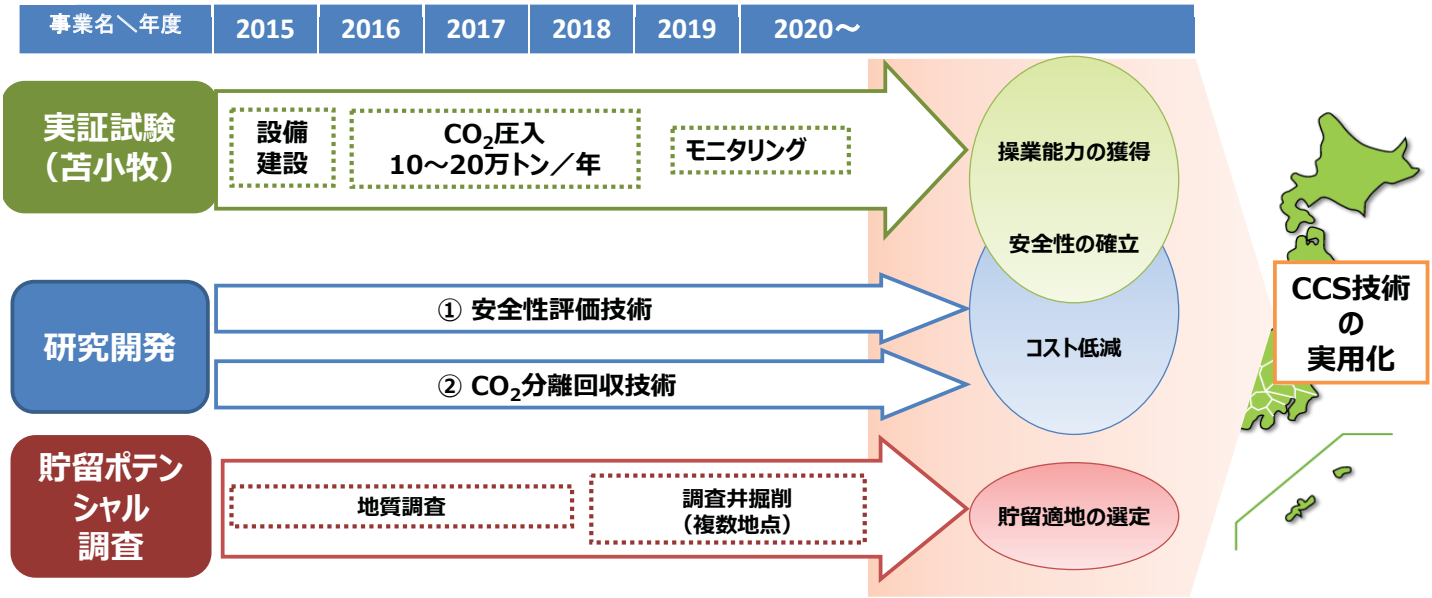
● **地球温暖化対策計画（平成28年5月13日閣議決定）**

2030年以降を見据えて、ＣＣＳについては、「東京電力の火力電源入札に関する関係局長会議取りまとめ」や「エネルギー基本計画」等を踏まえて取り組む。



# 我が国のCCS政策

エネルギー基本計画に従い、2020年頃のCCS技術の実用化を目指した取組を実施。
- CCSトータルシステムの実用規模での実証に向けた、苫小牧でのCCS実証事業
- コスト低減、操業効率の向上に向けた、要素技術の研究開発事業
- 日本近海でのCO2貯留候補点の選定に向けた、貯留適地の調査事業




**国際協力**

**多国間の取組：炭素隔離リーダーシップフォーラム（CSLF）**

2015年（平成27年）11月、CSLF閣僚級会合がサウジアラビアのリヤドにて開催。クリーンエネルギー技術の1つにCCSを位置づけるべき等、CCSの重要性に言及した共同声明を発出。

**二国間での取組：経済産業省と米国エネルギー省との研究協力**

2015年（平成27年） 4月に、経済産業省と米国エネルギー省との間で、「二酸化炭素回収・貯留分野に係る協力文書（MOC）」を署名。2017年10月、具体案件の形成などビジネスベースの協力も含むべく、MOCを改訂。

# 目次


1．気候変動問題と我が国の環境政策

2．CCSとは

3．我が国のCCS政策

4．苫小牧CCS実証試験

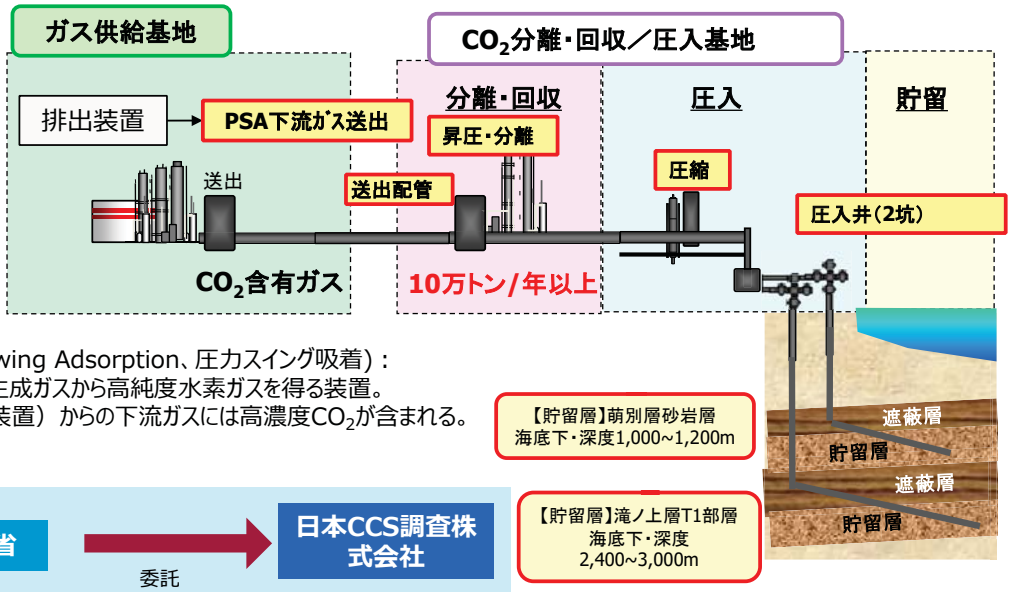
5．CCSの技術開発・調査

6．国際連携




## 苫小牧CCS実証試験の全体像

- 実用規模のCCSトータルシステムの実証を目的とした、我が国初の大規模CCS実証事業。
- 商業運転中の製油所を排出源として、$CO_2$を分離・回収し、圧入に必要な圧力に昇圧、 年間１０万トン以上の$CO_2$を、苫小牧沖の２つの貯留層に圧入する。
- 2012～2015年度は、CCSに係る地上設備の設計・建設、圧入井の掘削、モニタリングシステムの構築とベースライン観測等、準備作業を行った。2016年4月より、$CO_2$圧入を開始。



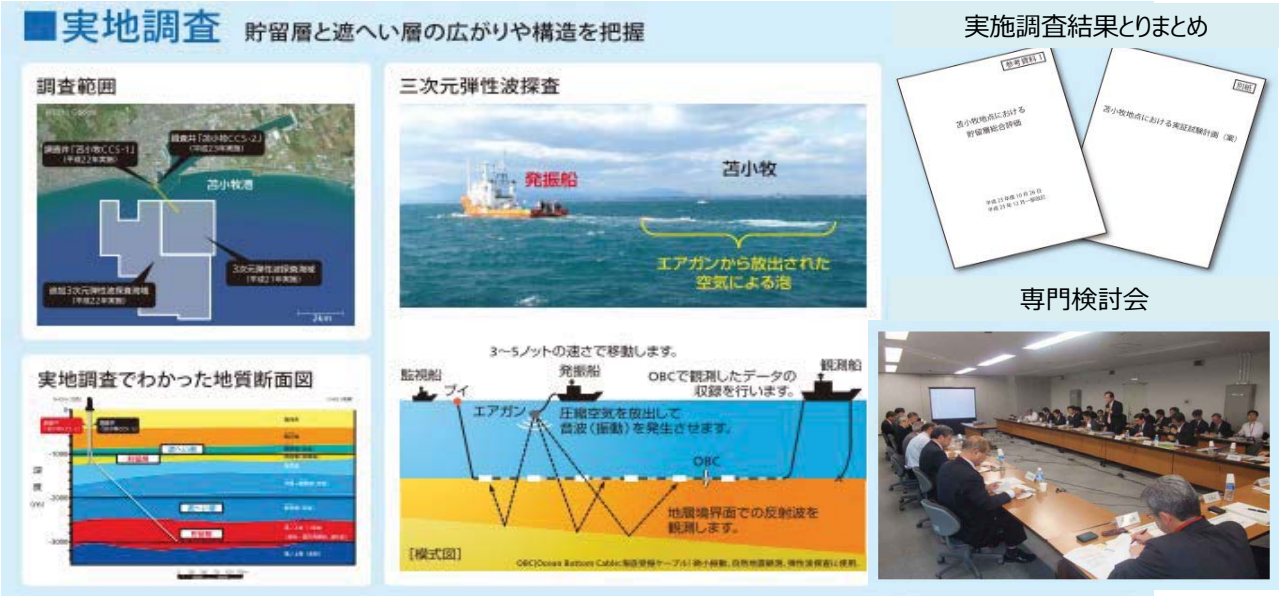

**PSA**(Pressure Swing Adsorption、圧力スイング吸着)：
水素製造装置の生成ガスから高純度水素ガスを得る装置。
PSA装置（排出装置）からの下流ガスには高濃度$CO_2$が含まれる。

**事業実施体制**

経済産業省 → 委託 → 日本CCS調査株式会社

# 苫小牧に決定した経緯

- 全国115ヵ所の候補地点から、国内石油・ガス開発で取得された豊富な既存データの活用と、新たな実地調査により、絞り込みを実施。
- 苫小牧の地質構造や貯留性状がCCSに適していることを確認。
- CCS実証試験の実施に向けた専門検討会における、技術的な観点からの確認と評価を経て、平成24年2月に苫小牧での実施を決定。






# 目次


1．気候変動問題と我が国の環境政策

2．CCSとは

3．我が国のCCS政策

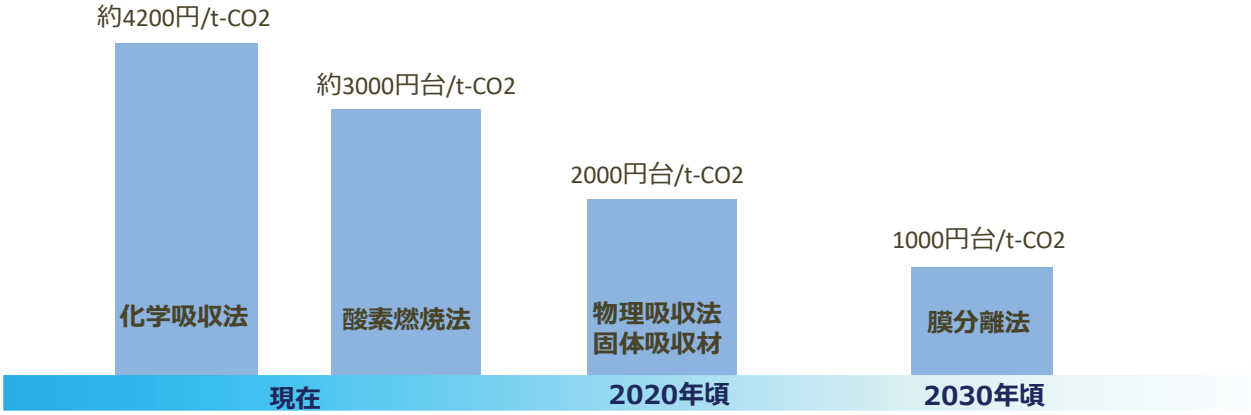
4．苫小牧CCS実証試験

5．CCSの技術開発・調査

6．国際連携

## 次世代技術によるCO2回収コスト低減の見通し

- 実際のCO2分離回収設備導入・拡大に至るには低コスト化が大きな課題。分離回収設備の設置・稼働はコストを大きく押し上げるとともに、設備稼働に伴う電力消費により、全体の発電効率が大幅に低下する。
- この点、石炭火力の分野を中心にCO2の分離回収に係る技術開発が進められており、今後、次世代技術が実用化していくことで、2020年～2030年頃にかけて大幅なコスト低減の可能性。




※ 上図中の試算は様々な仮定を基に行われており、将来の分離回収コストを予断するものでは無い

出典:「次世代火力発電に係る技術ロードマップ　技術参考資料集」に基づいて作成



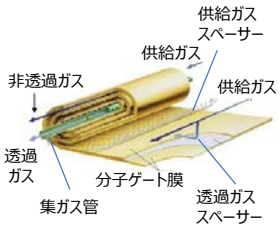
## 2030年頃までに技術確立が見込まれるCO2回収技術

出典:「次世代火力発電に係る技術ロードマップ　技術参考資料集」に基づいて作成

# CO２分離回収技術研究開発

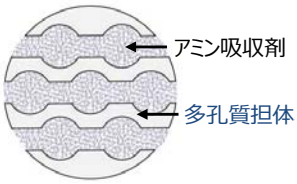
- CCSの実用化にはコスト削減が課題。CCSコストの6割以上を占める$CO_2$の分離・回収について、コスト削減のための技術高度化を図ることが重要。
- 現行のアミン溶液を用いた分離回収技術では、吸収した$CO_2$を分離する際に、多くのエネルギーを要し、コストが高くなる。このため、平成26年度までに開発した分離膜及び固体吸収材を用いて、新たな$CO_2$分離回収技術の実証試験等を行い、平成31年度までにコストが低い$CO_2$分離回収手法を確立。

＜分離膜：高圧ガス向け＞



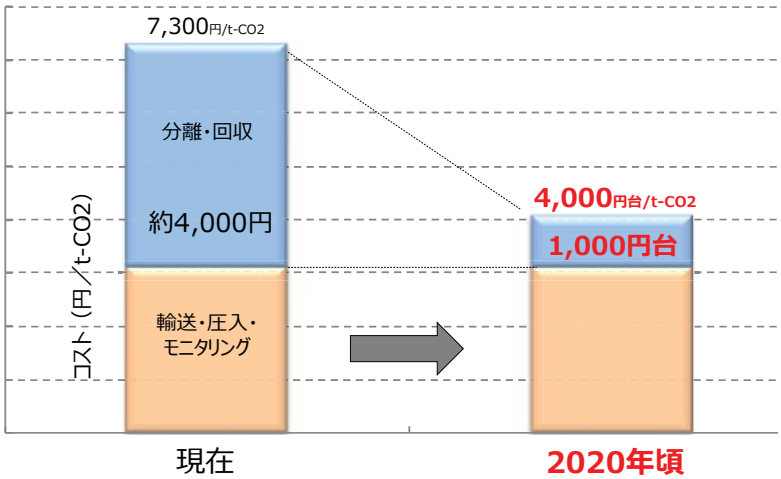

$CO_2$だけが通り抜けやすい特殊な分離膜を用いて、効率的に分離・回収する技術

＜固体吸収材：常圧ガス向け＞




$CO_2$吸収剤を固体に付着させることにより、少ないエネルギーで$CO_2$を分離する技術

＜CCSコスト＞




出典：(公財)地球環境産業技術研究機構(RITE)資料,2005に基づいて作成

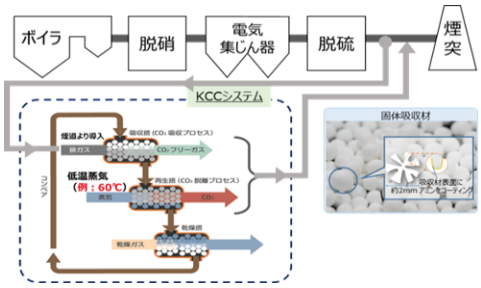
（注）　上記試算は様々な仮定を基に行われており、将来のCCSコストを予断するものではない。

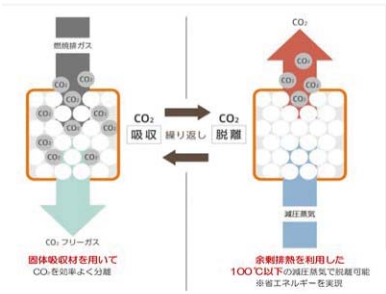


# CO２分離回収技術研究開発

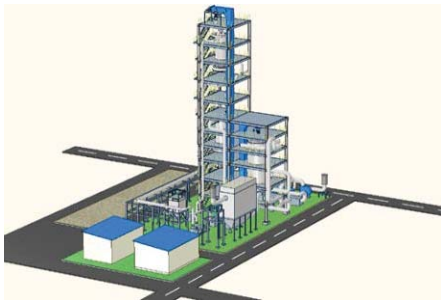
- 今後経済産業省が開発支援した固体吸収材を用いて、「省エネルギー型二酸化炭素分離・回収システム」の実用化試験を関西電力株式会社舞鶴発電所にて実施予定。
- 発電所からの煙道から排出ガスを抜き取り固体吸収材を活用してCO２分離・回収（４０トンCO2/日）を実施予定。

（実用化試験設備の仕組み）




（実用化試験設備のイメージ）



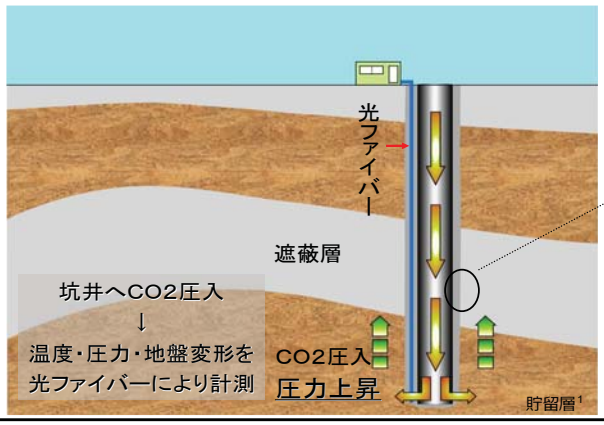
本事業関連プレスリリース
ＲＩＴＥ　　（http://www.rite.or.jp/news/press_releases/pdf/press20170919.pdf）
川崎重工(株)（https://www.khi.co.jp/pressrelease/detail/20170919_1.html）
関西電力(株)（http://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2017/0919_2j.html）

# 二酸化炭素大規模地中貯留の安全管理技術開発

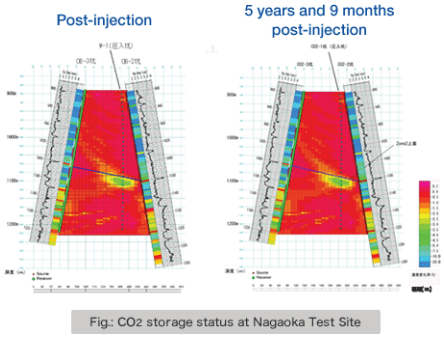
- CCS技術の実用化に向け、CCSの安全な実施に必要な基盤技術として、地下深部に圧入されたCO2の挙動解析やCO2貯留時の挙動モニタリング技術を開発。
- CO2長期挙動予測シミュレーション技術、光ファイバーを使用したモニタリング技術など、現在主流の弾性波探査を補完する低コストで高精度のモニタリング技術を開発。
  ※弾性波探査とは、人工的に強い振動を発生させ、地下を伝わる振動の変化を観測することで、地下の構造を把握する作業。
- 本事業で確立した技術は、苫小牧での実証事業で活用し、その有用性を確認。

事業イメージ

**地中埋設型光ファイバーモニタリングシステムの開発等**



**坑井間弾性波トモグラフィによる CO2分布状況評価**






# CCS研究開発・実証関連事業

産業技術環境局　地球環境連携室
03-3501-1757

**平成30年度予算案額 93.0億円（93.0億円）**

## 事業の内容

**事業目的・概要**

**（1）苫小牧におけるCCS大規模実証試験事業**

- 二酸化炭素回収・貯留(CCS)技術の実用化のため、我が国初の実際の大規模排出源を利用したCCS実証試験を苫小牧で実施します。平成27年度に完成した実証試験設備を用いて、平成28年度から平成30年度にかけ、年間10万トン規模のCO2を地中に圧入・貯留します。併せて、CO2の海底下貯留の許認可を規定する海洋汚染防止法に準拠すべく、圧入CO2の分布を監視します。

**（2）CO2分離回収技術の研究開発事業**

- CCS技術の実用化にはコスト低減が課題です。本事業ではCCS全コストの6割以上を占めるCO2の分離回収のコスト低減を目的に、CO2分離回収エネルギーを低減させるべく、研究開発を実施します。

**（3）安全なCCS実施のためのCO2貯留技術の研究開発事業**

- 平成32年度頃のCCS技術の実用化に向けて、実用規模でCCSを実施する際のCO2漏出等を防ぐため、CO2地中貯留に関する安全管理技術の確立等を目指します。

**成果目標**

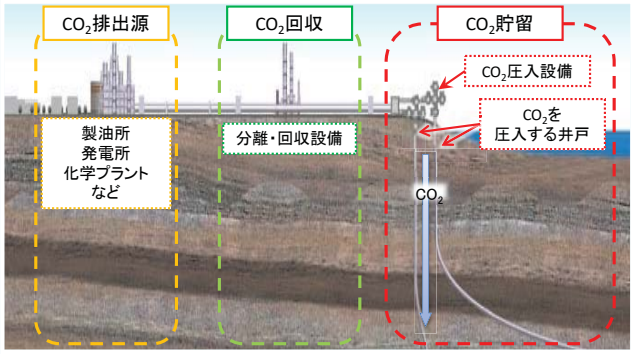
（1）平成32年度までのCO2回収・貯留の実証試験を通じた、CCSトータルシステムの技術確立
（2）平成31年度までに分離回収コストの低減(現状4200円/トン-CO2から1500～2000円/トン-CO2以下相当)
（3）平成32年度までにCCS実証サイトへのCO2貯留・モニタリング技術の導入を通じた、安全管理技術の確立

**条件（対象者、対象行為、補助率等）**

国 → 交付金 → 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO） → 委託 → 民間企業等

## 事業イメージ

（1）製油所の排出ガスから分離回収したCO2を年間10万トン規模で苫小牧沖の地中（地下1,000m程度及び3,000m程度の2つの層）へ貯留し、地下のCO2をモニタリングする技術の実証試験を行います。
（2）①高効率な回収が可能なアミン吸収材を含む固体吸収材に係る、実用規模のプラント試験設備での実用化研究
②石炭ガス化発電などの比較的高圧のガスからのCO2分離回収に有効な分離膜技術に係る、実ガスを用いた実用化研究
（3）①安全かつ効率的にCO2を圧入・貯留する技術の開発（光ファイバーを用いたモニタリング技術、CO2溶解促進技術等）
②CCSの安全管理技術の開発（CO２の挙動把握のためのモニタリング技術等）

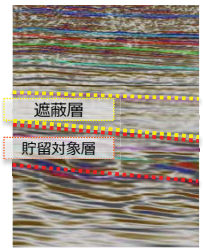



※CCS(Carbon dioxide Capture & Storage)は、工場や発電所などから発生するCO2を大気放散前に回収し、貯留に適した地層へ圧入し、長期的、安定的に貯留する技術。

# CO2貯留適地の調査

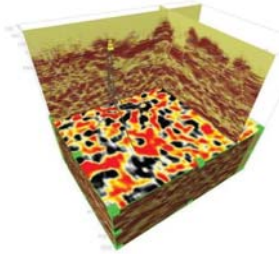
- 国内においてＣＣＳを実用化するには、技術開発のみならず、実際に貯留することができる地点（貯留地）を把握することが不可欠。本事業においては、国内の海域における有望なＣＯ２貯留可能地点の特定及び特定方法の確立のため、大きなポテンシャルを有すると期待される地点を対象として、弾性波探査や掘削調査等を実施する。
- 本事業は、2014年度より、環境省との共同事業として開始。苫小牧での二酸化炭素削減技術実証試験事業の終了時期を考慮し、2021年度頃までにCO2を貯留可能な地点を３ヶ所程度、特定することを目指す。

| 年度 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|



＜２Ｄ弾性波探査データ＞

2D弾性波探査　及び　データ解析
15地点程度


＜３Ｄ弾性波探査データ＞

3D弾性波探査　及び　データ解析
9地点程度

＜調査井掘削＞

調査井掘削、貯留層総合評価
5地点程度

産業技術環境局　地球環境連携室
03-3501-1757

# CO2貯留適地の調査事業

**平成30年度予算案額 5.5億円（5.5億円）**

## 事業の内容

**事業目的・概要**

- 二酸化炭素回収・貯留(CCS)技術はCO2排出削減ポテンシャルが高く、地球温暖化対策の重要な選択肢の一つとして、平成32年頃の実用化が期待されています。
- 国内には約1,460億トンのCO2貯留ポテンシャルがあると推定されていますが、不十分な基礎データに基づく推定であり、個々の候補地点の貯留ポテンシャルには大きな不確実性があります。
- このため、大きな貯留ポテンシャルを有すると期待される貯留地点において、弾性波探査※１やボーリング調査※２等を行い、貯留層のポテンシャル評価を実施します。
- なお、本事業は、経済産業省と環境省の連携事業であり、両省共同で事業を実施します。

※１弾性波探査とは、人工的に強い振動を発生させ、地下を伝わる振動の変化を観測することで、地下の構造を把握する作業。
※２ボーリング調査とは、実際に地下を掘削し、土や岩のサンプルを分析することで、地下の構造を把握する作業。

**成果目標**

- 平成26年度から平成33年度までの8年間の事業であり、本事業を通じて、CO2を貯留可能な地点を3ヶ所程度選定することを目指します。

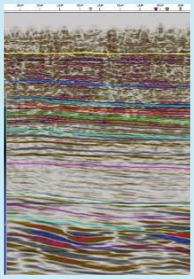
**条件（対象者、対象行為、補助率等）**

国 →（委託）→ 民間企業等

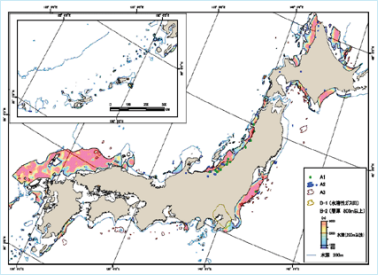
## 事業イメージ

エアガン発振で生じた水泡

海底下地層の弾性波探査


弾性波探査による
地層断面図

ボーリング調査


全国貯留層賦存量調査（2005, RITE）

| | 平成26年度 | 平成27年度 | 平成28年度 | 平成29年度 | 平成30年度 | 平成31年度 | 平成32年度 | 平成33年度 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 弾性波探査 | ← | — | — | — | → | | | |
| 調査井掘削 | | | | | | ← | — | → |
| 貯留層総合評価 | | | | | | ← | — | → |

# 目次


1．気候変動問題と我が国の環境政策

2．CCSとは

3．我が国のCCS政策

4．苫小牧CCS実証試験

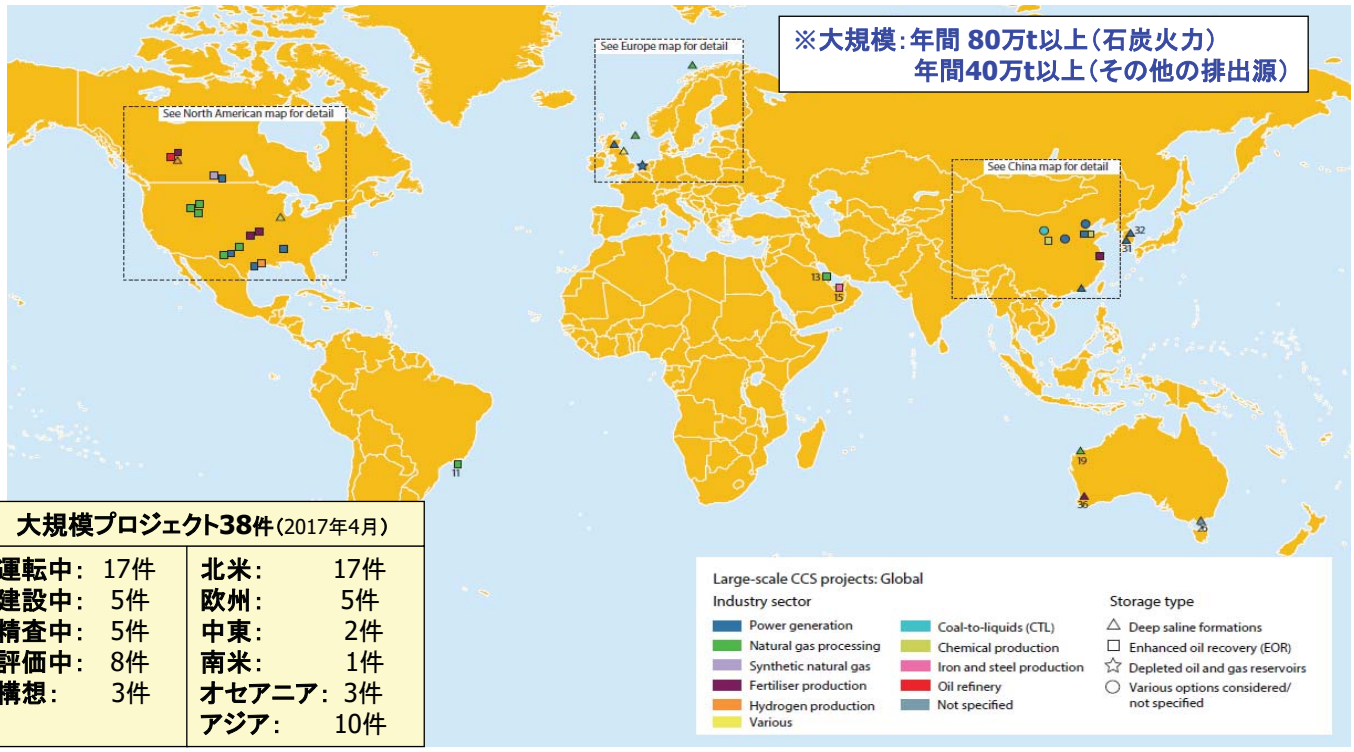
5．CCSの技術開発・調査

6．国際連携




## CCS／$CO_2$-EOR：世界の大規模プロジェクト

- 稼働中の事業の大半はCO2EORであり、帯水層での大規模CCSは４件のみ(2017年)。
- 北米で多くのプロジェクトが先行している一方、アジアでのプロジェクト数も増加傾向。




| 大規模プロジェクト38件（2017年4月） | |
|---|---|
| 運転中： 17件 | 北米： 17件 |
| 建設中： 5件 | 欧州： 5件 |
| 精査中： 5件 | 中東： 2件 |
| 評価中： 8件 | 南米： 1件 |
| 構想： 3件 | オセアニア： 3件 |
| | アジア： 10件 |

出典：Global CCS Institute, “The Global Status of CCS 2016” に基づいて作成。

# 世界の大規模CCS事業①（2017年に稼動中）

- １７件の大規模事業のうち、**13**件は油田にCO2を圧入し石油の増産を目指すCO2-EOR。CO2の圧入のみを目的とする帯水層貯留は**4**件。
- 比較的事業性が確保し易いＥＯＲプロジェクトは特に北米で先行しており、昨年末に運転開始したペトロノヴァには日本企業が参画（MHI、JX）。
- 他方、帯水層貯留は、ノルウェーは炭素税、カナダはクレジット取得がＣＣＳ事業の誘因。

| | 名称 | 開始年 | 国 | 貯留 | 処理量　トン/年 | 排出源 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Val Verde Natural Gas Plants | １９７２ | 米国 | EOR | １３０万 | 天然ガス |
| 2 | Enid Fertilizer | １９８２ | 米国 | EOR | ７０万 | 肥料生産 |
| 3 | Shute Creek Gas Processing Facility | １９８６ | 米国 | EOR | ７００万 | 天然ガス |
| 4 | Sleipner | １９９６ | ノルウェー | 海底下帯水層 | ８５万 | 天然ガス |
| 5 | Weyburn | ２０００ | カナダ | EOR | ３００万 | 合成天然ガス |
| 6 | SnØhvit | ２００８ | ノルウェー | 海底下帯水層 | ７０万 | 天然ガス |
| 7 | Century Plant | ２０１０ | 米国 | EOR | ８４０万 | 天然ガス |
| 8 | Air Products | ２０１３ | 米国 | EOR | １００万 | 水素製造 |



# 世界の大規模CCS事業（2017年に稼働中）

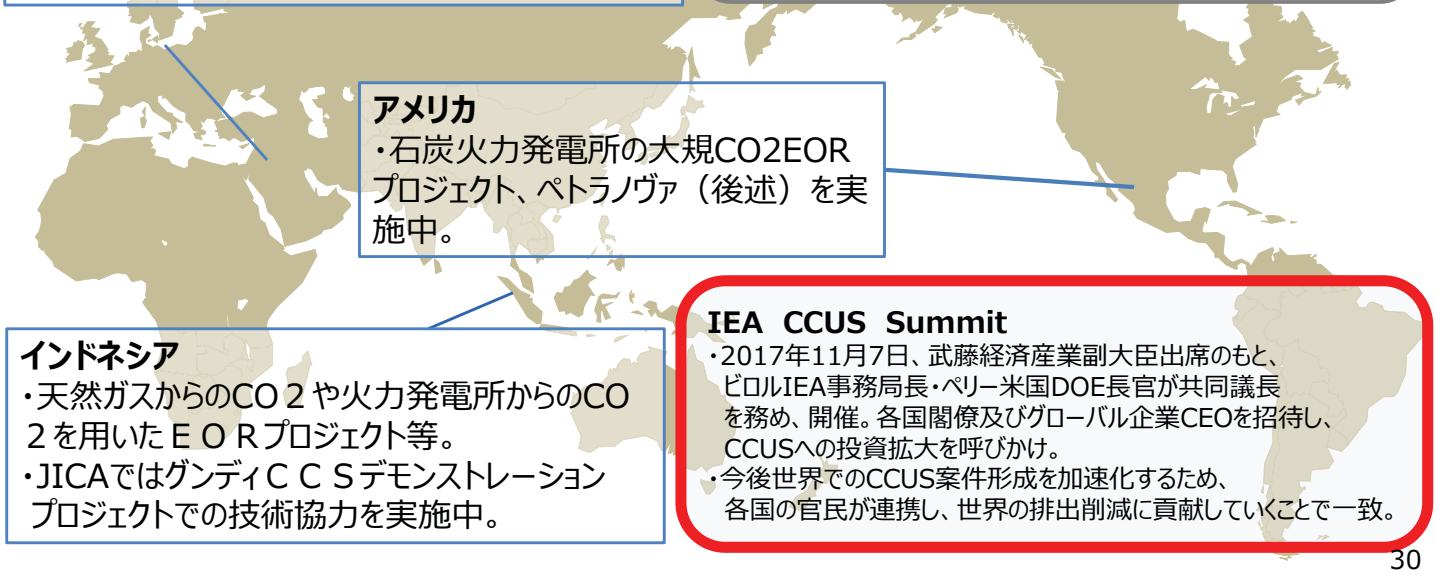
| | 名称 | 開始年 | 国 | 貯留 | 処理量 トン/年 | 排出源 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 9 | Coffeyville Gasification Plant | ２０１３ | 米国 | EOR | １００万 | 肥料生産 |
| 10 | Lost Cabin Gas Plant | ２０１３ | 米国 | EOR | ９０万 | 天然ガス |
| 11 | Petrobras Lula | ２０１３ | ブラジル | EOR | 約１００万 | 天然ガス |
| 12 | Boundary Dam | ２０１４ | カナダ | EOR | １００万 | 発電所 |
| 13 | Uthmaniyah | ２０１５ | サウジアラビア | EOR | ８０万 | 天然ガス |
| 14 | Quest | ２０１５ | カナダ | 陸上帯水層 | １０８万 | 水素製造 |
| 15 | Abu Dhabi | ２０１６ | UAE | EOR | ８０万 | 製鉄所 |
| 16 | Petra Nova | ２０１６ | 米国 | EOR | １４０万 | 発電所 |
| 17 | Illinois Industrial | ２０１７ | 米国 | 陸上帯水層 | 100万トン | 化学品生産（エタノール） |

# CCUSの海外展開の取組状況

- 経済産業省では、民間事業者向けのＦＳ事業や市場開拓に向けた取組を行っている。
- 経済産業省では、ISOにおいてCCSの国際的な推進に貢献すべく取り組んでいる。

**サウジアラビア**
・日・サウジ・ビジョン2030が2017年に合意。
・低炭素エネルギーシステム（CCSや水素など）を見据えた技術に関する共同調査の実施に日本の重工業と石油企業と連携し取り組むことを合意。

**ISO**
・日本の強みのある分離回収技術等でのCCS国際基準の策定に積極的に関与し、海外展開をより進めるためのルール形成に取組中。



**アメリカ**
・石炭火力発電所の大規CO2EORプロジェクト、ペトラノヴァ（後述）を実施中。

**インドネシア**
・天然ガスからのCO２や火力発電所からのCO２を用いたＥＯＲプロジェクト等。
・JICAではグンディＣＣＳデモンストレーションプロジェクトでの技術協力を実施中。

**IEA CCUS Summit**
・2017年11月7日、武藤経済産業副大臣出席のもと、ビロルIEA事務局長・ペリー米国DOE長官が共同議長を務め、開催。各国閣僚及びグローバル企業CEOを招待し、CCUSへの投資拡大を呼びかけ。
・今後世界でのCCUS案件形成を加速化するため、各国の官民が連携し、世界の排出削減に貢献していくことで一致。



# CCSのISO化（ISO/TC265の体制）

- CCS国際基準の策定に積極的に関与。特に、WG1, WG3で我が国がコンビーナとして主導権。
- 規格化作業を通じ、我が国の環境技術を生かした国際貢献と経済成長を目指す。

**ISO/TC265**
Carbon Dioxide Capture, Transportation and Geological Storage(CCS)
（二酸化炭素回収・輸送・地中貯留）

議長国：カナダ
幹事国：カナダ、中国

Pメンバー：１８カ国
Oメンバー：１０カ国
リエゾン　：７機関

2011年10月に設立以降、これまで総会を８回開催

- WG1（回収）　コンビーナ：日本　事務局　：日本
- WG2（輸送）　コンビーナ：ドイツ　事務局　：ドイツ
- WG3（貯留）　コンビーナ：カナダ、日本　事務局　：カナダ
- WG4（Q&V）　コンビーナ：中国、フランス　事務局　：中国
- WG5（クロスカッティングイッシュー）　コンビーナ：フランス、中国事務局　：フランス
- WG6（EOR）　コンビーナ：米、ノルウェー　事務局　：米

**国内の体制**

国内審議団体：RITE
経済産業省に設置されている日本工業標準調査会（ＪＩＳＣ）からの委託

**ISO/TC265 国内審議委員会**
委員長　：佐藤教授（東大）
メンバー　：約２５名

CO2-EOR検討タスク
リーダ：平岡氏（INPEX）

- 回収WG　主査：東井主席研究(RITE)
- 輸送WG　主査：尾崎教授（東大）
- 貯留WG　主査：松岡教授（京大）
- Q&V・クロスカッティングイッシューWG　主査：赤井名誉リサーチャ（産総研）

# 二酸化炭素回収・利用・貯留（CCUS）に係る日米協力

## 概要

- 2015年4月の安倍総理訪米にあわせ、METI-DOE間で、「二酸化炭素回収・貯留分野に係る協力文書（MOC）」に署名。現在、我が国や米国含む実証フィールドにおいて、具体的な共同研究を進行中。
- 2017年10月、日米間の協力範囲をCCUS*へ拡張し、具体案件の形成などビジネスベースの協力も含むべく、MOCを改訂（署名者：柳瀬 経産審×ブルイエット DOE副長官）。
- 麻生副大臣×ペンス副大統領による日米経済対話、およびLNG産消会議における世耕大臣×ブルイット副長官バイ会談において、米国・第三国におけるCCUSに係る日米協力を進めることに合意。

## MOCの概要

*CCUS ; Carbon dioxide Capture, Utilization & Storage(二酸化炭素回収・利用・貯留 )

- 内容：研究成果の共有、実証装置等の交換、ワークショップ開催、案件形成を促進するため官民対話の設立等。
- 協力分野： $CO_2$の分離・回収、輸送、地下貯留、モニタリング、 $CO_2$利用($CO_2$ EOR含む)等 。

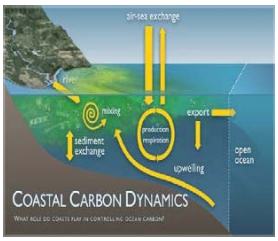
## 日米協力例

### 浅い海底下での$CO_2$流動経路の検出手法についての共同実証

**実施体制：**日本ＣＣＳ調査(株) ～ テキサス大学
**概要：**浅い海底下での潜在的なCO2漏出経路の有無を検証すべく、
苫小牧CCS実証現場の地下構造を分析。
本年８月に物理探査を実施、現在はデータ解析作業へ移行。

### テキサス州ペトロノヴァ$CO_2$ＥＯＲプロジェクト

**実施主体：** JX日鉱日石開発、NRGエネジー社
**概要：**昨年末に運転開始した、米国における石炭火力発電所の大規模CO2EORプロジェクト。石炭火力発電所に三菱重工の$CO_2$回収プラントを導入し、排ガスから140万トン/年の$CO_2$を回収。130km離れたウェスト・ランチ油田でEORに利用。実施主体はウェスト・ランチ油田の50%の権益を保有。総事業費は約10億ドル。DOEから1億9,000万米ドル、JBICとみずほ銀行から計2億5千万米ドルの融資を受けた。



LNG産消会議でのバイ会談@2017.10月
(世耕 経済産業大臣×ブルイエット DOE副長官)

# 世界のCCSの現況と苫小牧CCSプロジェクト

2018年1月26日
澤田　嘉弘
日本CCS調査㈱

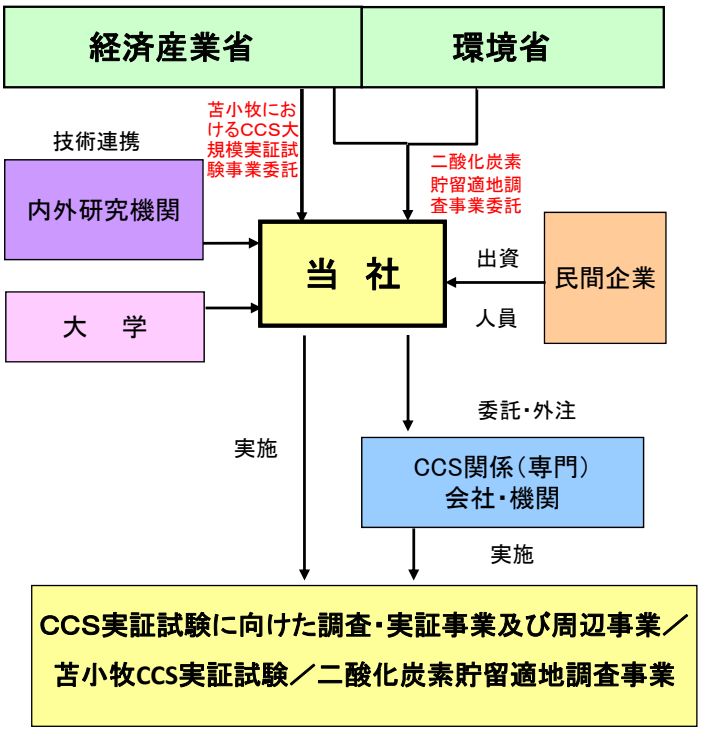
Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.


# 日本CCS調査㈱の紹介

## 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 35社**
  電力、都市ガス、石油、
  プラント設計・建設、商社等
- **設立趣旨**
  $CO_2$ の分離、回収、輸送、地中貯留の実証プロジェクトの調査・実施に一貫して取り組む等
- **従業員**　約100名

## 事業の実施体制




Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.

# 本日のプレゼンテーション

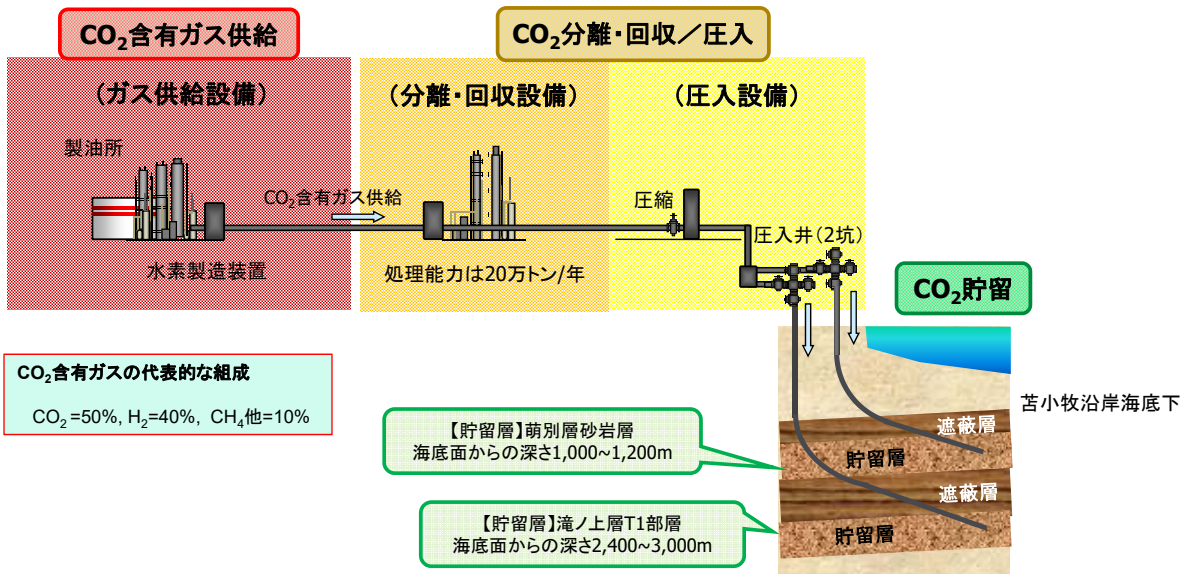
1. 苫小牧プロジェクトの概要
2. 世界のCCSの現況と苫小牧プロジェクトの特徴
3. 国際活動
4. まとめ

Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.


# 1. 苫小牧プロジェクトの概要

Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.

# 苫小牧プロジェクトの全要






# 苫小牧CCS大規模実証の全体スケジュール

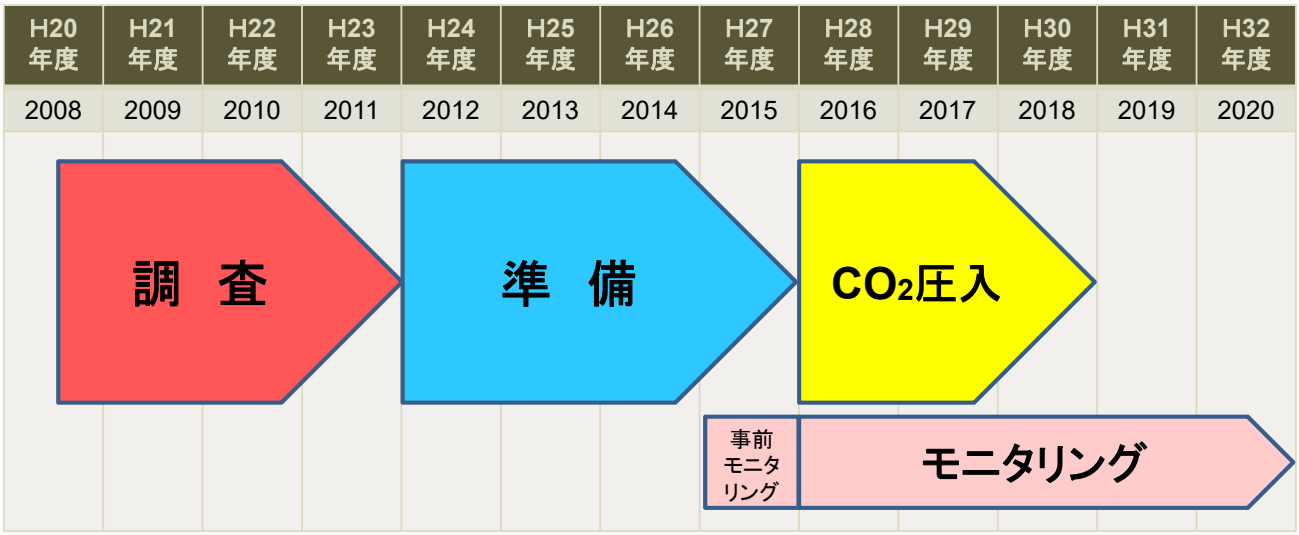
■平成20-23年度は調査期間

■平成24-27年度は準備期間

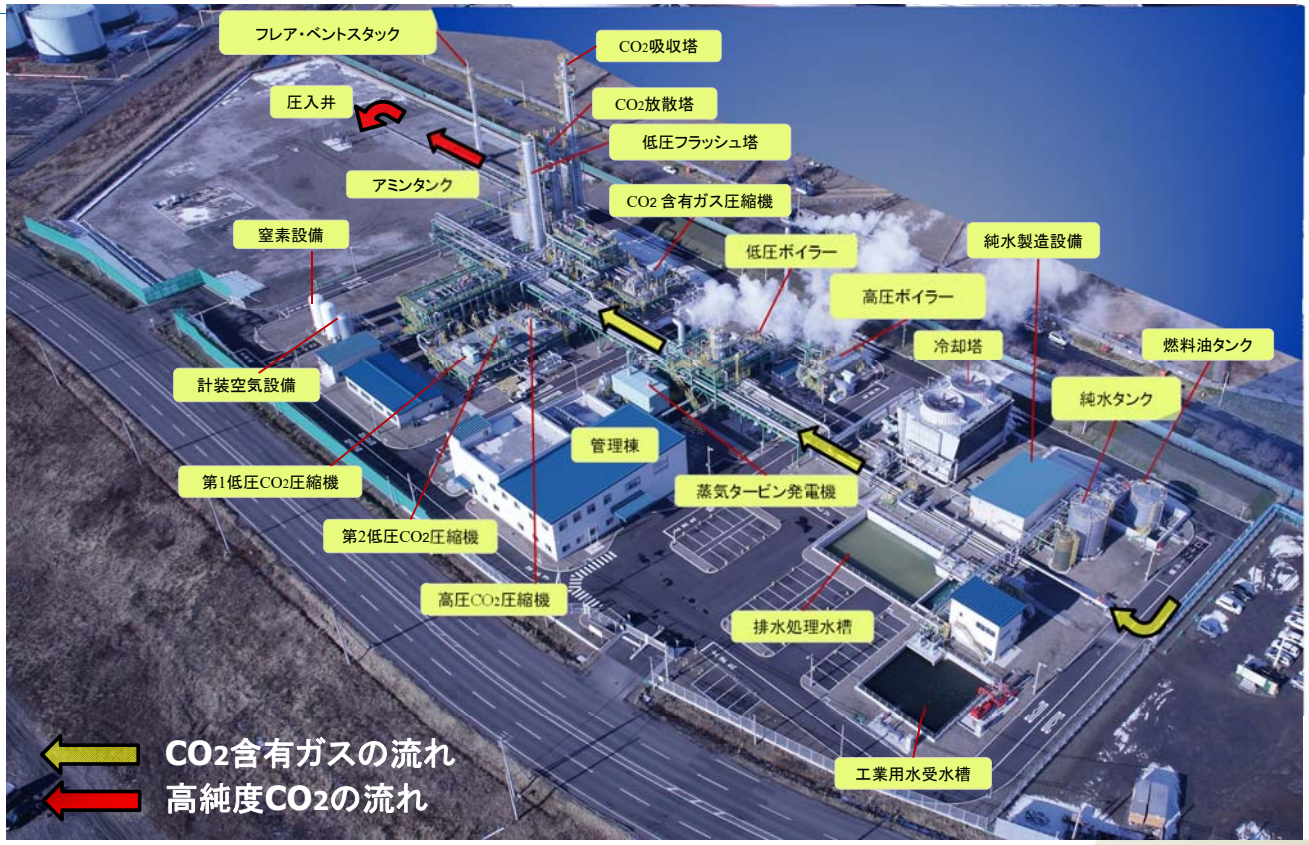
設備の設計・建設、坑井の掘削等の、$CO_2$圧入に向けた準備を実施

■平成28-32年度は$CO_2$ 圧入・モニタリング期間

年間10万トン以上の$CO_2$を3年間（平成28-30年度）圧入



# $CO_2$分離・回収/圧入設備の航空写真




Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.


# $CO_2$分離回収設備及び圧縮設備

**$CO_2$分離回収設備**
：PSAオフガス中の$CO_2$を分離回収

**$CO_2$圧縮設備**
：分離回収した$CO_2$を圧入圧力まで昇圧

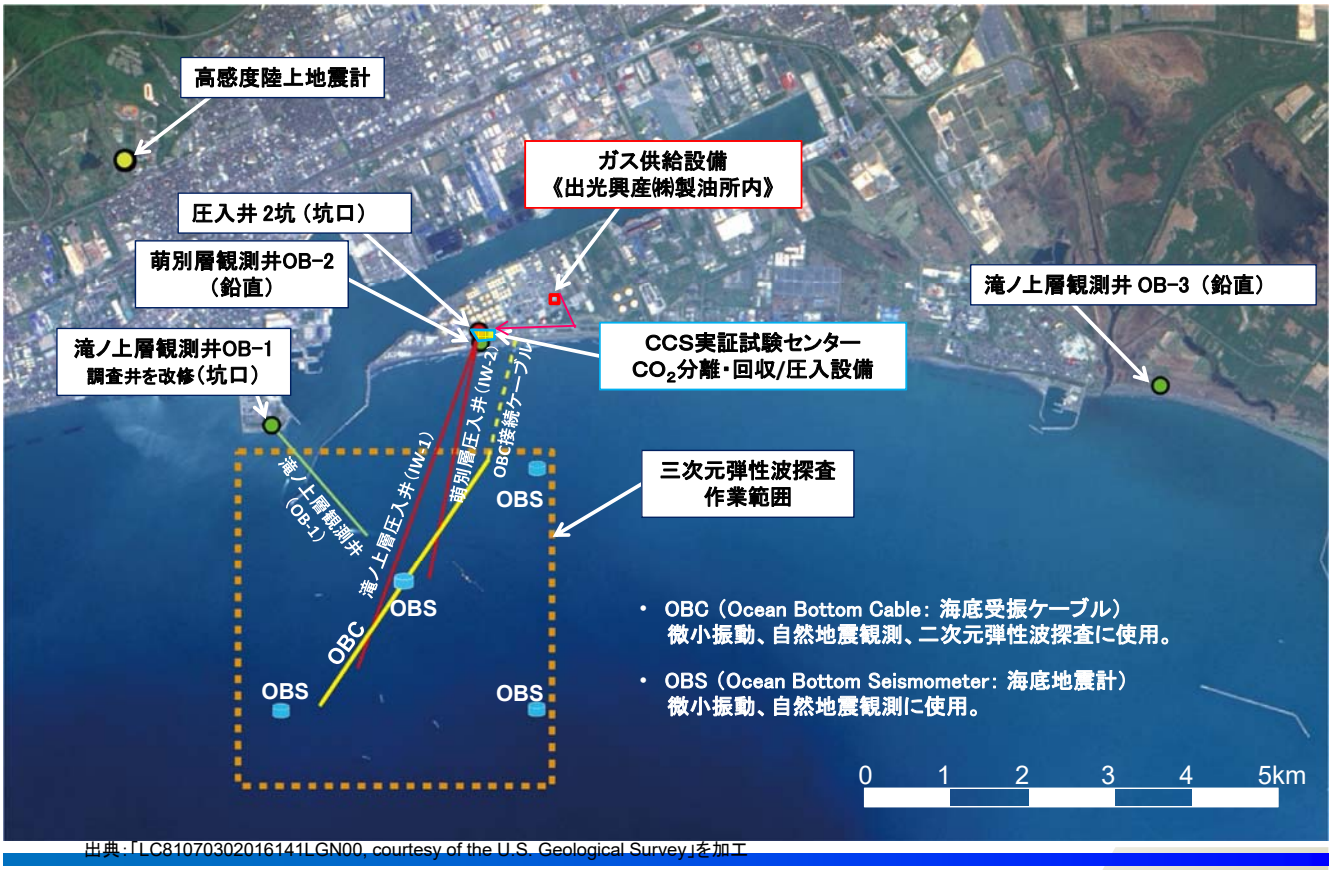
Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.

# 坑口装置

保温施工前

Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.


# 実証試験設備の位置関係




出典：「LC81070302016141LGN00, courtesy of the U.S. Geological Survey」を加工


Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.

# 圧入地点

沖合いに見えるシーバースの右端（陸から3km）の地下1.2kmに萌別層圧入井の坑底が位置し、
さらに沖合い1km（陸から4km）の地下2.8kmに滝ノ上層圧入井の坑底が位置する



# 2. 世界のCCSの現況と苫小牧プロジェクトの特徴

# 地下への天然ガス、$CO_2$の圧入

## 1. 天然ガスの地下貯留

・天然ガス需給調整の地下貯留は1915年にカナダで開始

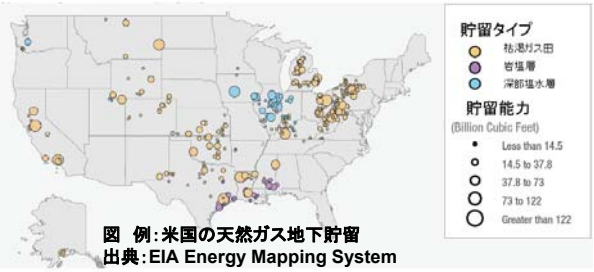



図 例：米国の天然ガス地下貯留
出典：EIA Energy Mapping System

## 2. $CO_2$-EOR[1)]

・$CO_2$- EORは、1972年米国で開始
・過去40年間の圧入$CO_2$総量は、約10億トン
・約3/4は、天然の$CO_2$利用
・約1/4は、産業起源の$CO_2$利用
⇒大気中の$CO_2$ 排出量削減のため、CCSと同効果
⇒広義のCCS（結果的貯留）

図 例：米国の$CO_2$-EOR

## 3. 酸性ガスの地下圧入

・硫黄分の拡散防止のため、1989年以降、カナダと米国で酸性ガスを、深部塩水層と枯渇ガス油田に圧入

注：酸性ガス= 天然ガスから除去した$CO_2$及び$H_2S$

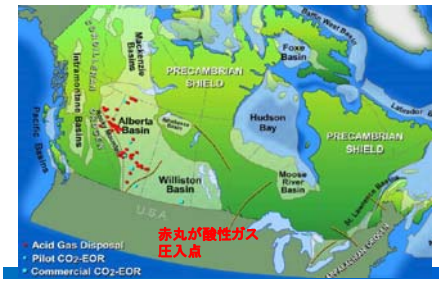
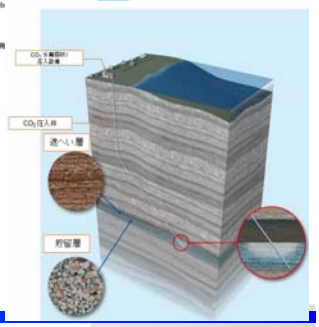



図 例：カナダの酸性ガス地下貯留
出典：Stefan Bachu et al.

## 4. CCS

・産業起源の$CO_2$を深部塩水層に貯留
・1996年にノルウェーSleipnerで開始

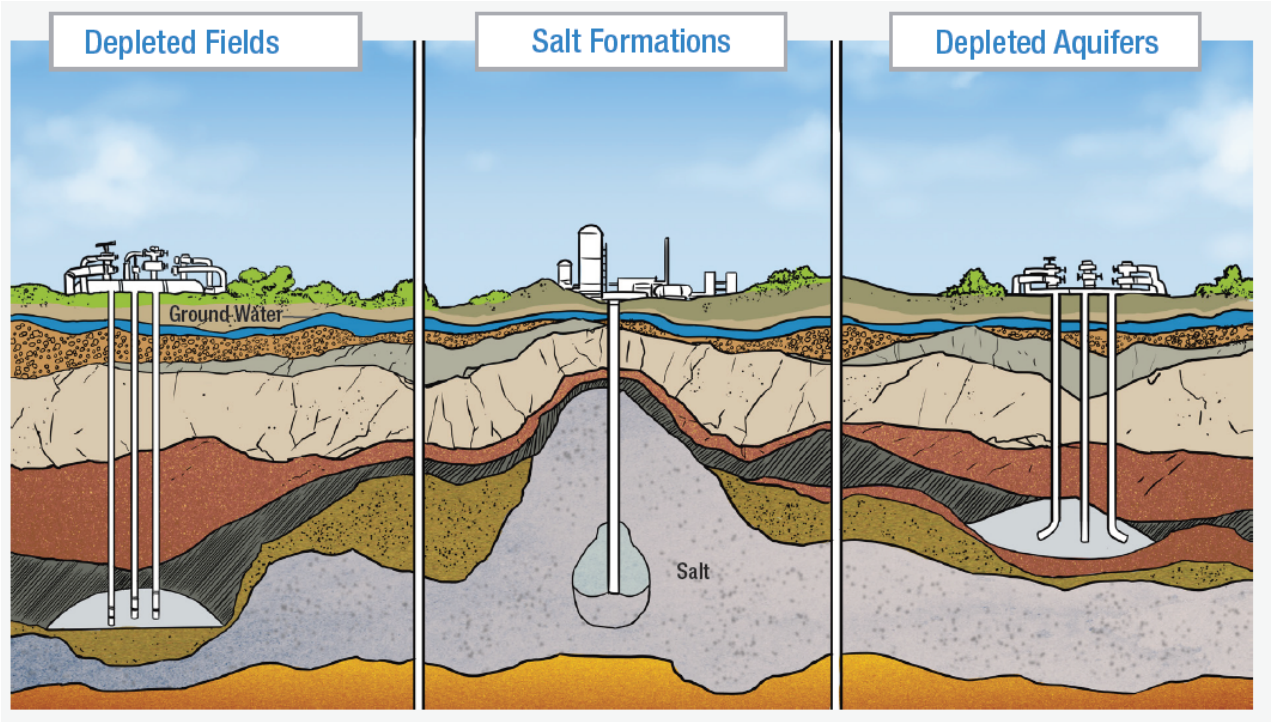


Source: 1)GCCSI

Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.


# 天然ガスの地下貯留概念図

枯渇田への地下貯留　　岩塩層への地下貯留　　深部塩水層への地下貯留

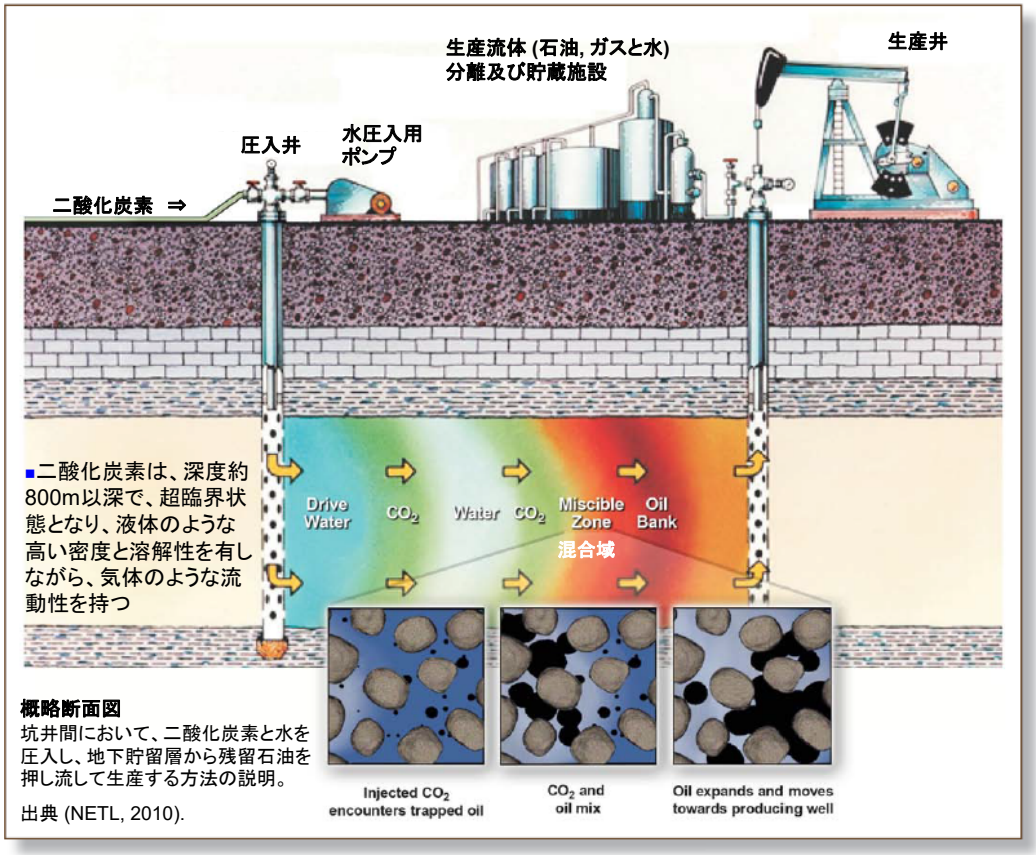



米国の地下貯留は約400箇所。 8割が枯渇田、1割が岩塩層、1割が深部塩水層に貯留

Source: American Gas Association

Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.

# $CO_2$-EOR概念図




- 二酸化炭素は、深度約800m以深で、超臨界状態となり、液体のような高い密度と溶解性を有しながら、気体のような流動性を持つ

**概略断面図**
坑井間において、二酸化炭素と水を圧入し、地下貯留層から残留石油を押し流して生産する方法の説明。
出典 (NETL, 2010).

米国の
$CO_2$-EOR
プロジェクト
数：138

Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.


# 酸性ガス処理プラント例

酸性ガスから回収された硫黄

酸性ガス処理プラント例
カナダ/アルバータ州

Source : Stefan Bachu

酸性ガスの地下圧入箇所
カナダ：50箇所以上
米国： 20箇所以上
（GCCSI）

Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.

# CCSプロジェクトのインセンティブについて（推定）

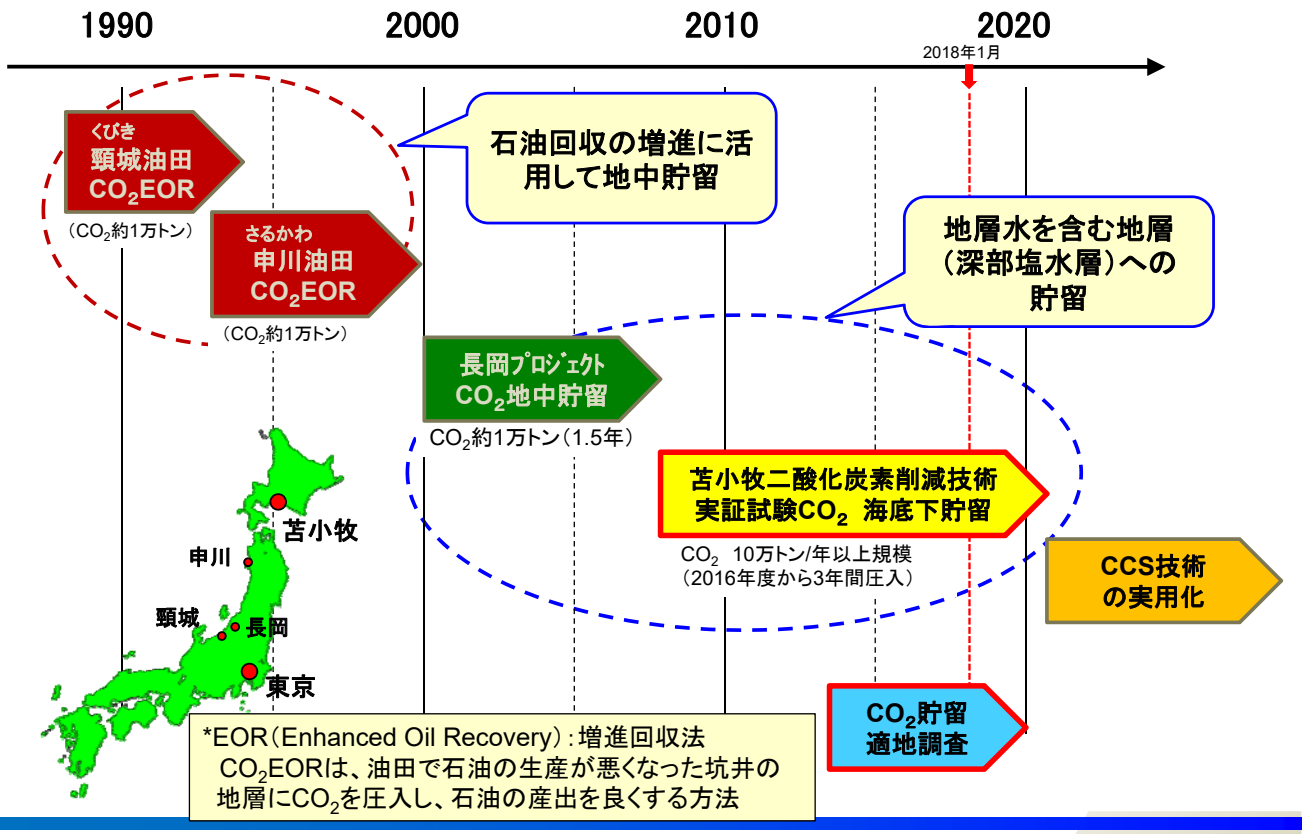
- ほとんどのプロジェクトはEORのインセンティブを有する（赤字箇所参）
- 多くのプロジェクトは補助金（又は＋税額控除）のインセンティブを有する（緑字箇所参）
- いくつかのプロジェクトは炭素税対策のインセンティブを有する（青字箇所参）

| | プロジェクト名 | 国名 | 操業開始 | 分離・回収能力（/年） | 貯留 | $CO_2$削減以外のインセンティブ（推定） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 操業中 | Val Verde | 米国 | 1972 | 130万トン | EOR | EOR |
| | Enid Fertilizer | 米国 | 1982 | 70万トン | EOR | EOR |
| | Shute Creek | 米国 | 1986 | 700万トン | EOR | EOR |
| | Sleipner | ノルウェー | 1996 | 90万トン | 深部塩水層 | 炭素税対策 |
| | Great Plains | カナダ | 2000 | 300万トン | EOR | EOR |
| | Snøhvit | ノルウェー | 2008 | 70万トン | 深部塩水層 | 許可条件 +炭素税対策 |
| | Century Plant | 米国 | 2010 | 840万トン | EOR | EOR |
| | Air Products | 米国 | 2013 | 100万トン | EOR | 補助金 /税額控除 + EOR |
| | Coffeyville | 米国 | 2013 | 100万トン | EOR | EOR |
| | Lost Cabin | 米国 | 2013 | 90万トン | EOR | EOR |
| | Lula | ブラジル | 2013 | 100万トン | EOR | EOR |
| | Boundary Dam | カナダ | 2014 | 100万トン | EOR | 補助金 + EOR |
| | Quest | カナダ | 2015 | 100万トン | 深部塩水層 | 補助金 + 炭素クレジット収入 |
| | Uthmaniyah | サウジアラビア | 2015 | 80万トン | EOR | （調査中） |
| | Abu Dhabi | アラブ首長国連邦 | 2016 | 80万トン | EOR | （調査中） |
| | Illinois Industrial | 米国 | 2017 | 100万トン | 深部塩水層 | 補助金 /税額控除 |
| | Petra Nova | 米国 | 2017 | 140万トン | EOR | 補助金 /税額控除 + EOR |
| 建設中 | Gorgon | 豪州 | 2017 | 340－400万トン | 深部塩水層 | 炭素税を予想した事前対策 |
| | ACTL Agrium | カナダ | 2017 | 30-60万トン | EOR | 補助金 + EOR |
| | ACTL Sturgeon | カナダ | 2017 | 120－140万トン | EOR | 補助金 + EOR |
| | Yanchang | 中国 | 2018 | 40万トン | EOR | （調査中） |

出典：GCCSI,ADM,JX,MITEI,J.P.Price等から作成

Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.


# 日本における$CO_2$ 圧入プロジェクト




*EOR（Enhanced Oil Recovery）：増進回収法
$CO_2$EORは、油田で石油の生産が悪くなった坑井の地層に$CO_2$を圧入し、石油の産出を良くする方法

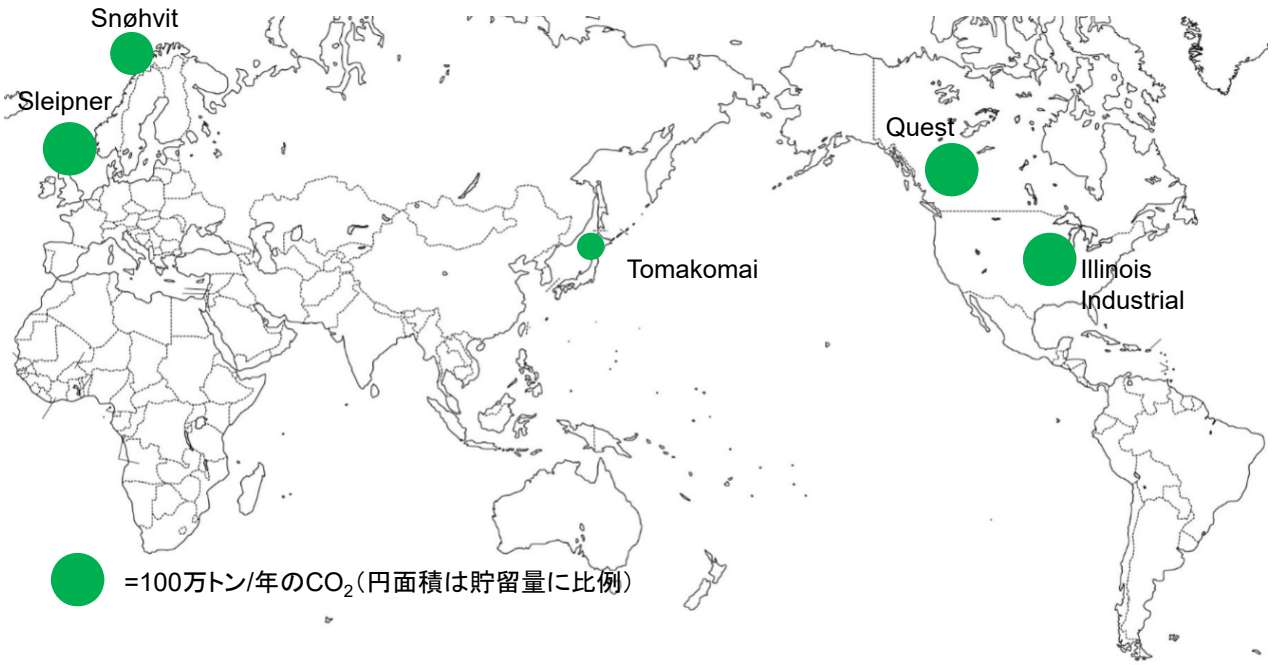
Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.

# 特徴 1

# 産業起源$CO_2$の深部塩水層への圧入

Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.


## 特徴1　産業起源$CO_2$の深部塩水層への圧入～CCS

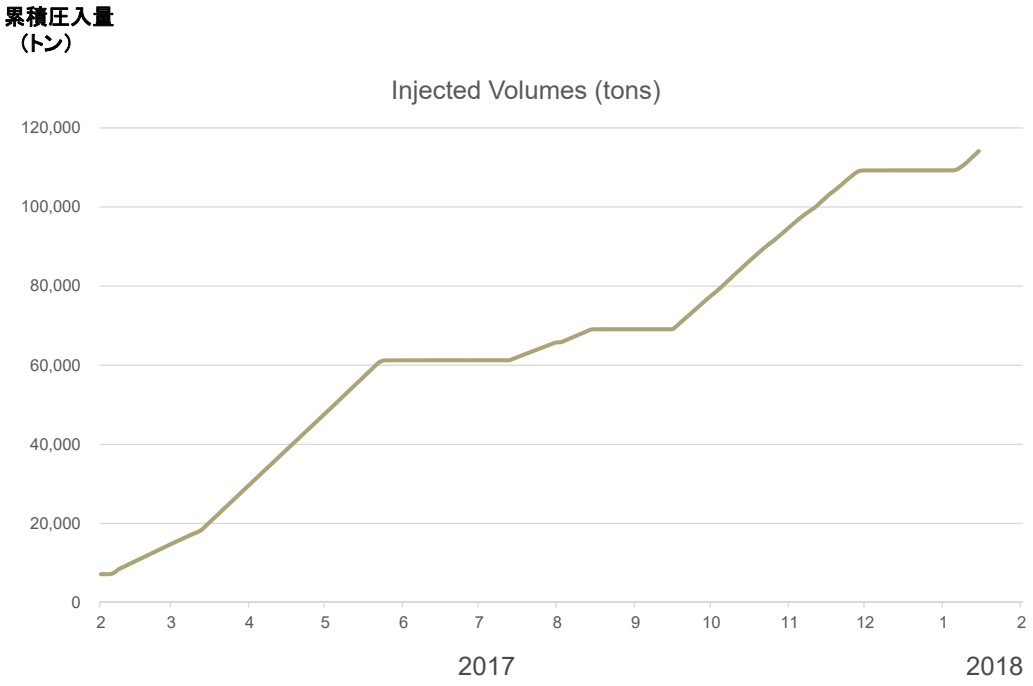



**現在、深部塩水層に産業起源の$CO_2$の圧入大型プロジェクトは、ノルウェーのSleipnerとSnøhvit、カナダのQuest、米国のIllinois Industrialプロジェクトのみ　⇒　苫小牧も深部塩水層に産業起源の$CO_2$を圧入**

**⇒深部塩水層（砂岩層、火山岩層）への$CO_2$圧入の貴重な知見の取得**

Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.

# 圧入記録（萌別層）




注：貯留層の初期圧　9.2 MPaG
　　最大圧入レート時の貯留層圧　10.0 MPaG

Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.


# 特徴 2

# 地震多発国でのCCS実証

Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.

# 特徴2　地震多発国でのCCS実証

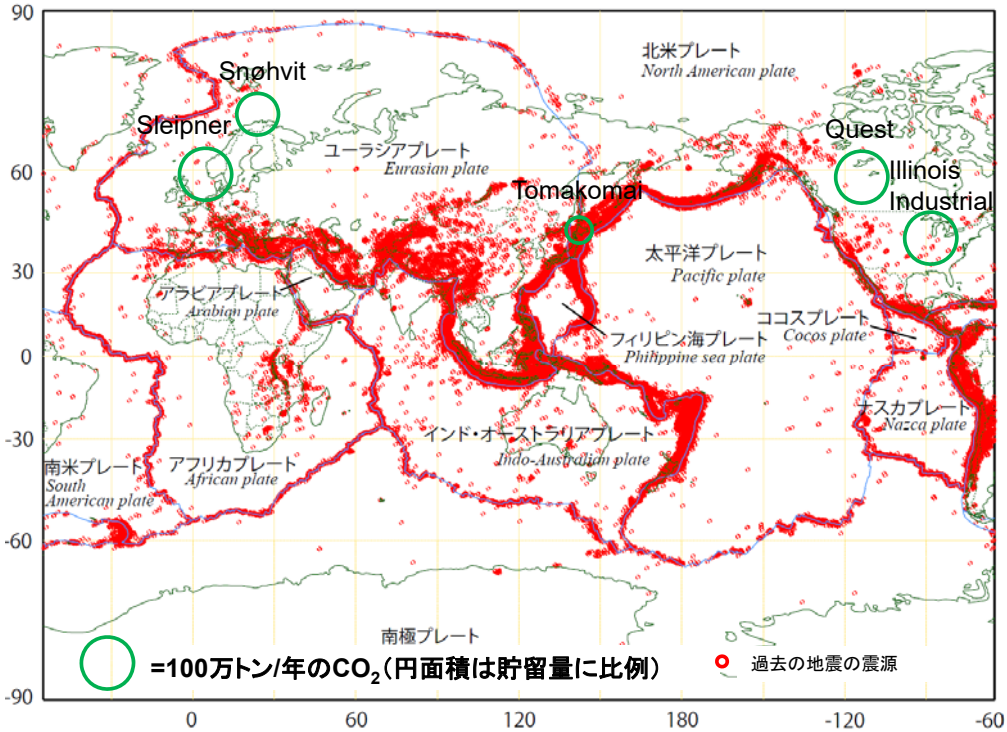
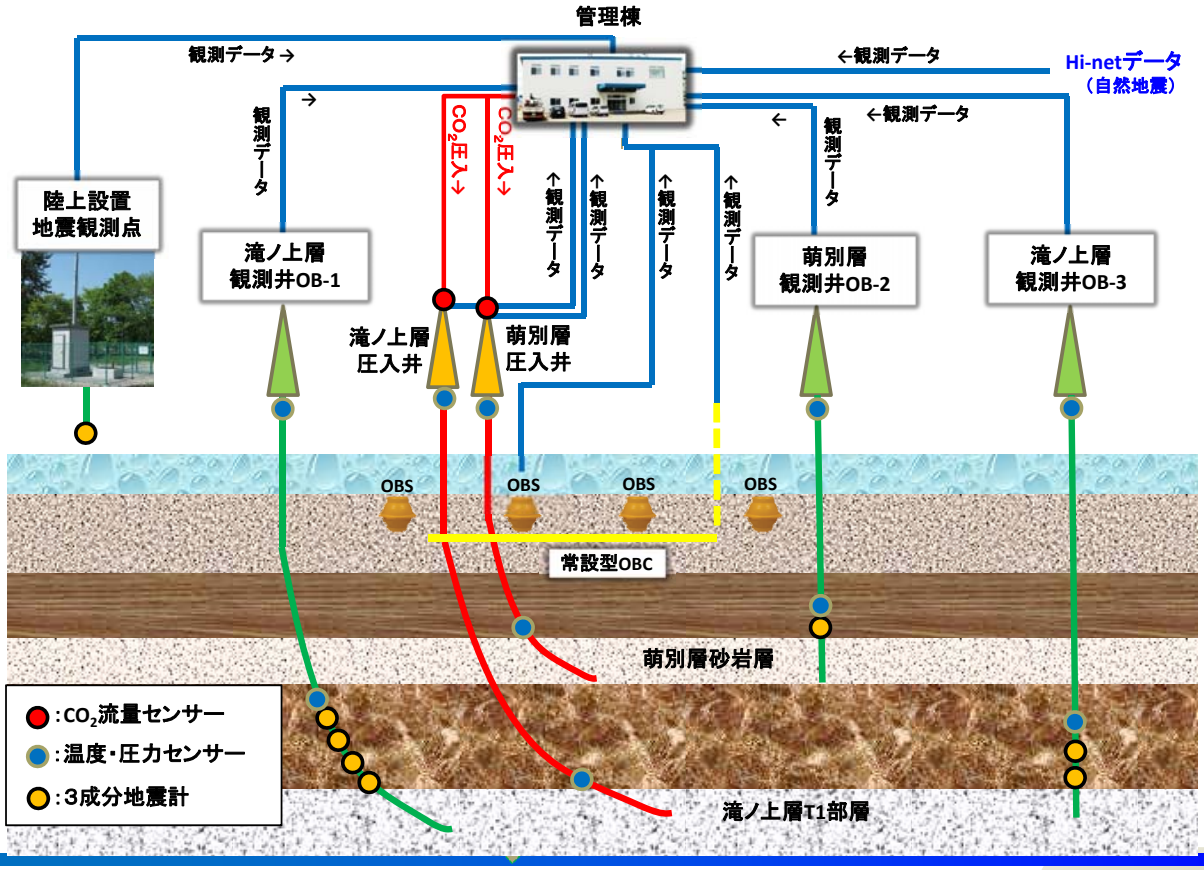



**図　世界の地震の分布とCCSプロジェクト**
気象庁公表資料にCCSプロジェクト位置を追記

苫小牧プロジェクトは、地震多発国におけるCCS実証試験 ⇒ 充実したモニタリングシステム
⇒ ①自然地震の発生でも、貯留$CO_2$に影響がない立証 ②$CO_2$圧入により、地震が発生しない立証
⇒ CCSの地震に関する不安を払拭

Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.

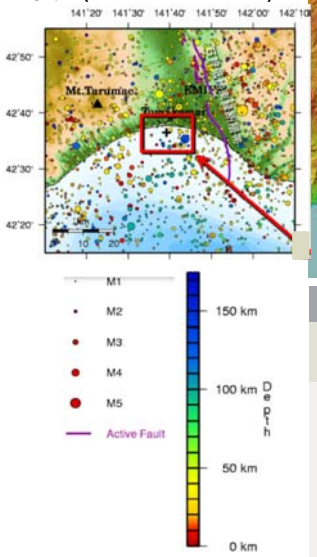

# モニタリングシステムの概要

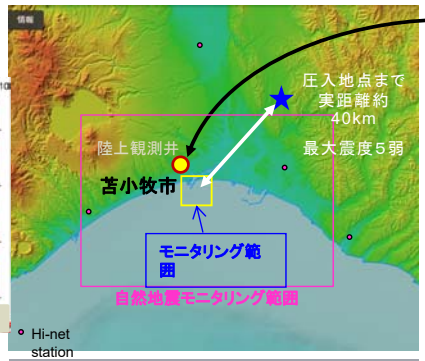



Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.

# 自然地震の発生と坑内状況

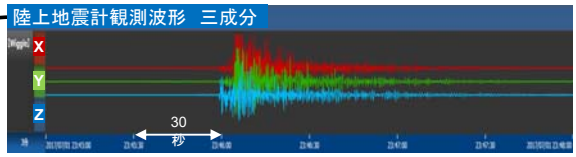
苫小牧周辺での自然地震発生状況 (1998.1.1-2008.11.08)

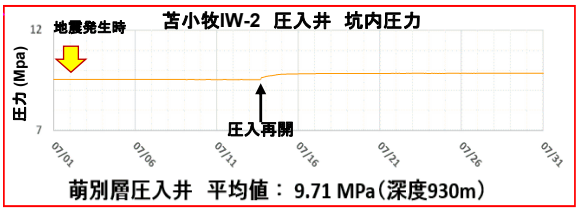


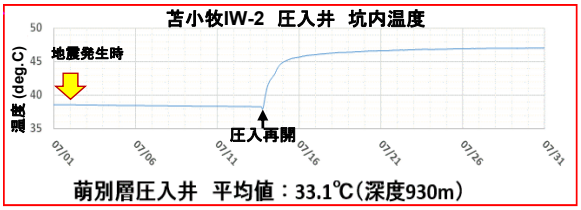




| 震源情報　気象庁発表 | |
|---|---|
| 発生時刻 | 2017年7月1日<br>23:45:52.9 |
| 震源位置 | 緯度<br>42°　47.2'<br>N<br>経度<br>141°　51.5'<br>E<br>深度　27km |
| 地震の規模 | マグニチュード　5.1 |
| 苫小牧市での震度 | 3 |

陸上地震計観測波形　三成分



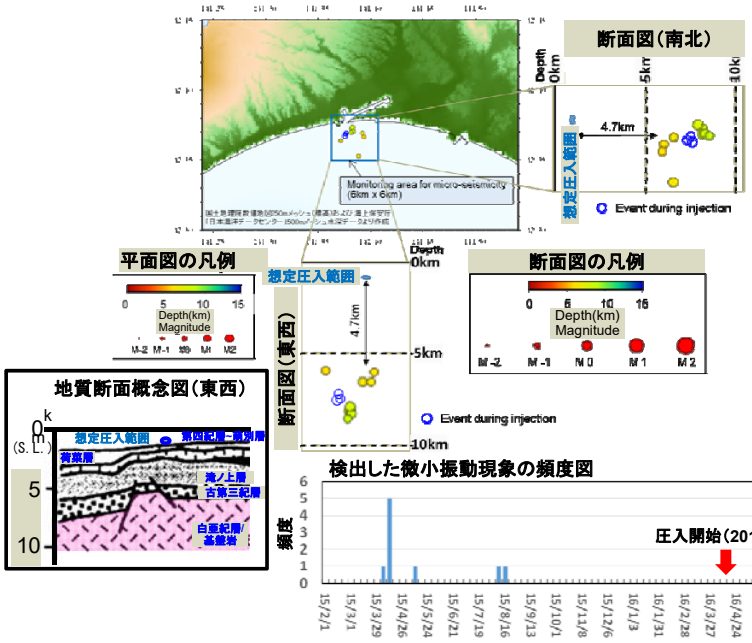




◆ 圧入井では、本自然地震の発生に伴い貯留層直上の温度と圧力に変化はなし。



# モニタリング　微小振動




◆ 圧入前から現在まで、$CO_2$圧入貯留層の内部および周辺の深度範囲では、微小振動 (マグニチュード > -0.5)の検出はなし。

**検出結果**

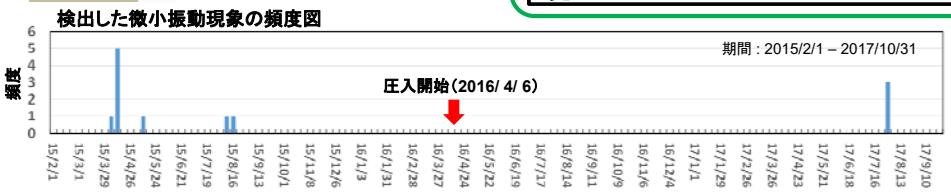
**圧入前の期間**

合計９ 回
深度: 5.9km - 8.6km
マグニチュード: -0.09～0.24

**圧入開始後**

合計 ３ 回（青丸）
深度: 7.4km – 7.7km
マグニチュード: 0.31～0.52
発生日: 2017/ 8/ 2

検出した微小振動現象の頻度図

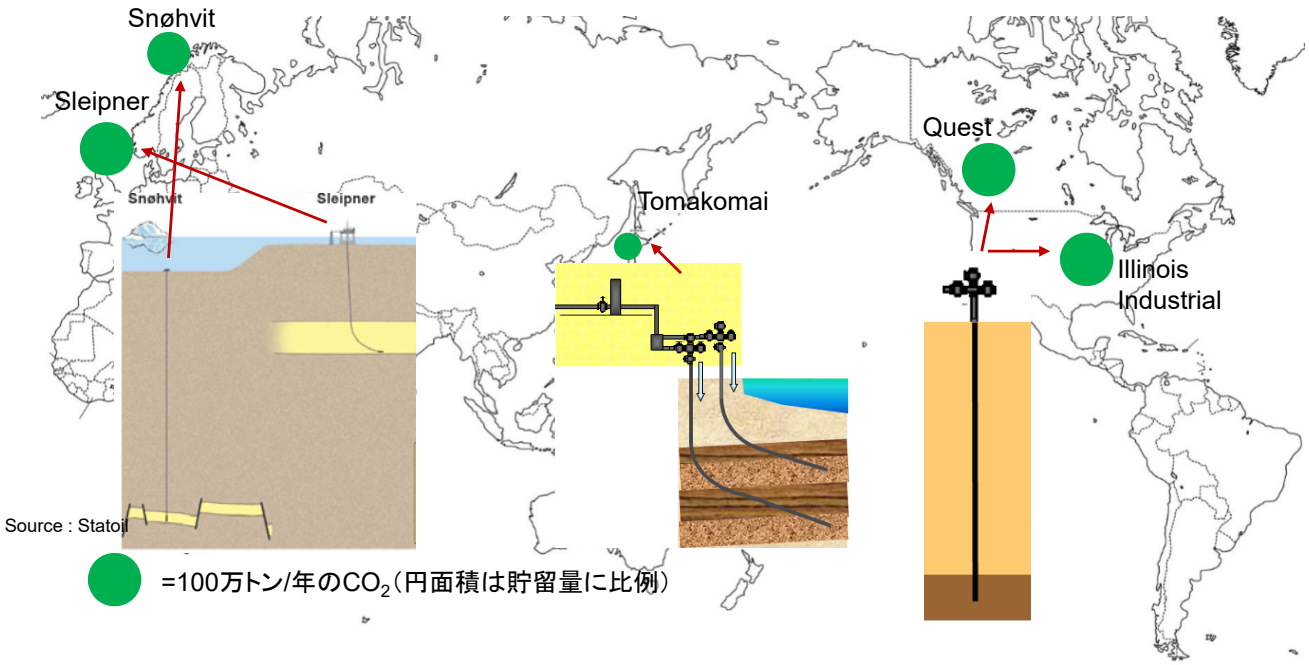


# 特徴 3

# 陸上から沖合海底地下貯留層への圧入井

Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.

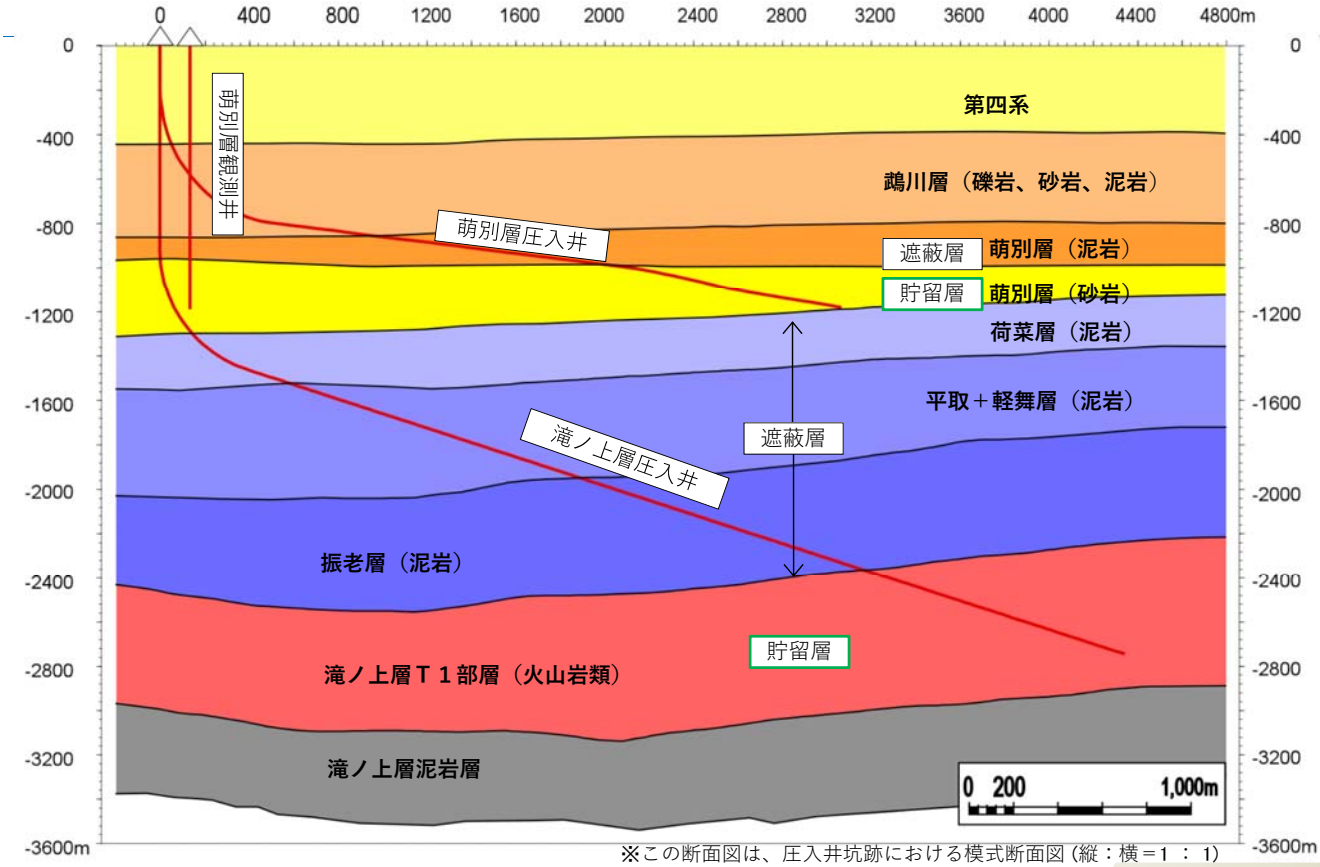

## 特徴3　陸上から沖合海底地下貯留層への圧入井




**苫小牧は、陸上から沖合海底地下貯留層へ高傾斜井を掘削し、$CO_2$を圧入**
**⇒　掘削、操業、保守・維持費用の大幅削減、長距離圧入区間の確保**

Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.

# $CO_2$圧入対象層




※この断面図は、圧入井坑跡における模式断面図（縦：横＝1 ： 1）

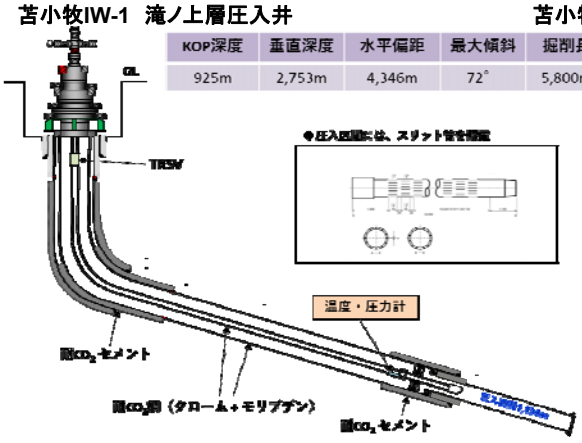


# $CO_2$ 圧入井の概念図

- ◆ **高傾斜$CO_2$ 圧入井を掘削**
  海底下貯留層へ陸域から傾斜井を掘削し、海域作業に比べ掘削費とメンテナンス費用を大幅に削減
- ◆ **孔のある管を使用し圧入区間を1,100m 以上とすることで、圧入効率が向上（萌別層）**
- ◆ **水平距離（偏距）および水平／垂直比率は、国内で最大記録を達成**

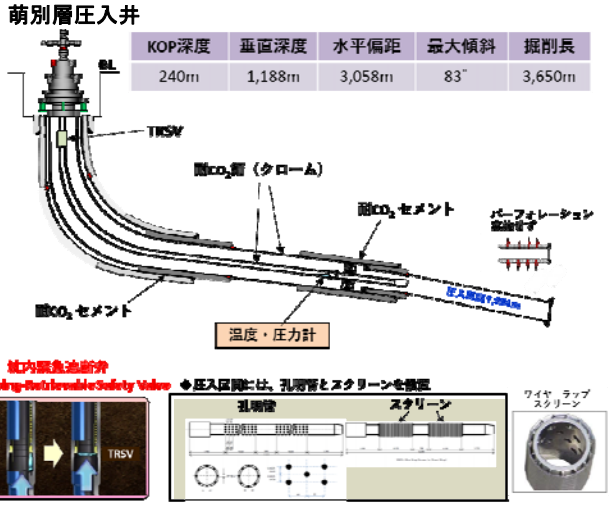
**苫小牧IW-1　滝ノ上層圧入井**

| KOP深度 | 垂直深度 | 水平偏距 | 最大傾斜 | 掘削長 |
|---|---|---|---|---|
| 925m | 2,753m | 4,346m | 72° | 5,800m |




**苫小牧IW-2　萌別層圧入井**

| KOP深度 | 垂直深度 | 水平偏距 | 最大傾斜 | 掘削長 |
|---|---|---|---|---|
| 240m | 1,188m | 3,058m | 83° | 3,650m |

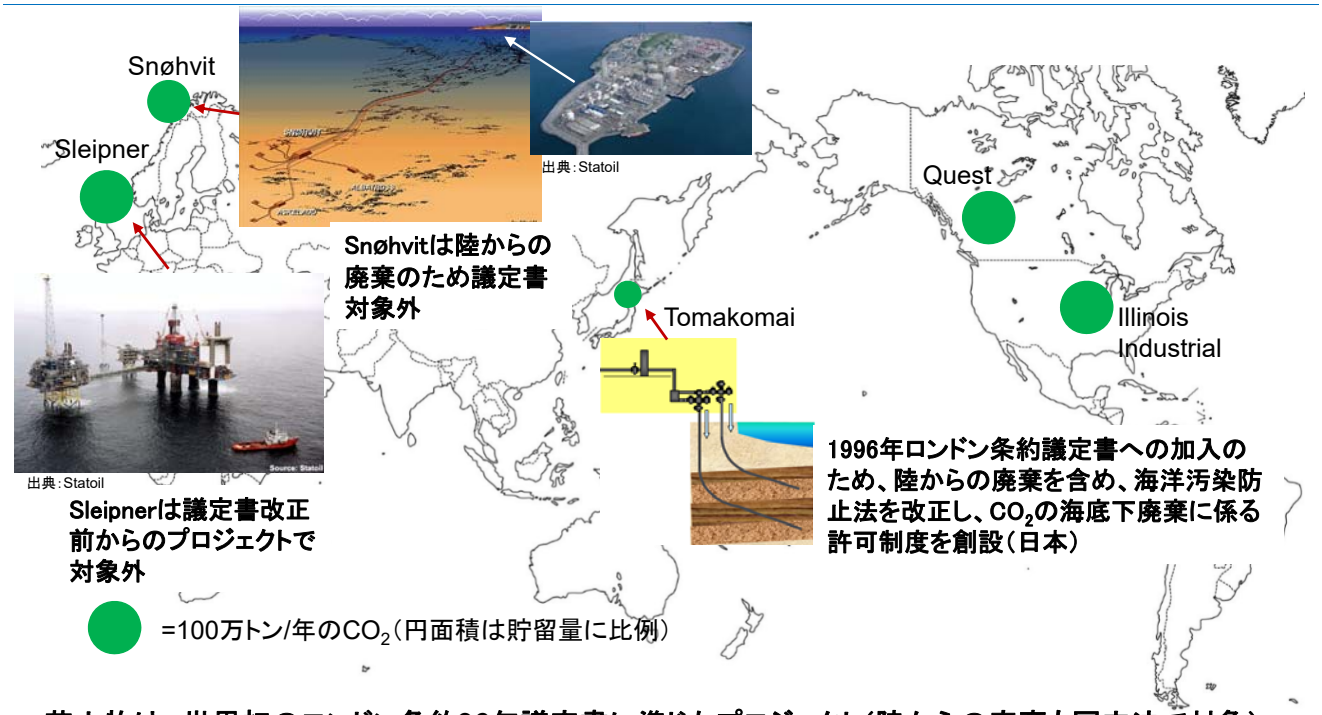


# 特徴 4

# ロンドン条約96年議定書に基づく法律の適用



## 特徴4　ロンドン条約96年議定書に基づく法律の適用




苫小牧は、世界初のロンドン条約96年議定書に準じたプロジェクト（陸からの廃棄も国内法で対象）

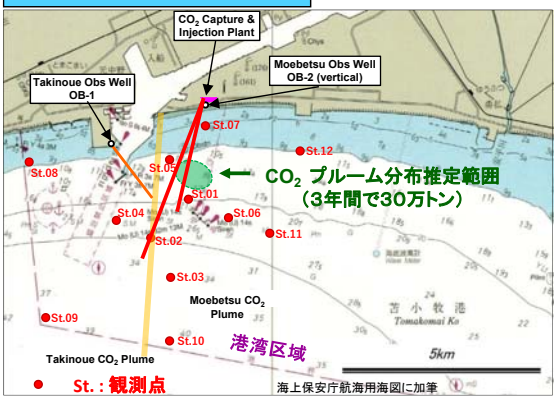
⇒　海洋汚染防止法の改正

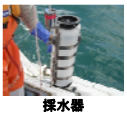
⇒　$CO_2$海底下廃棄には、環境大臣の許可・環境影響評価・海洋環境の監視が義務化

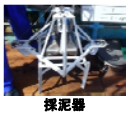
# 海洋環境調査

国際条約であるロンドン条約1996年議定書を反映した「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律（海洋汚染防止法）」に則り、海洋環境調査の実施が求められている。

**海洋環境調査地点**





採水器


採泥器

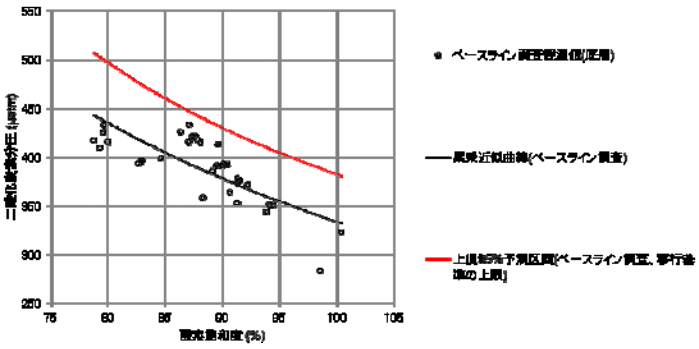
簡易ドレッジ

ROV

◆ 海水の化学分析に基づく移行基準（環境省指導）

- 観測点：8測点（12測点中、沿岸4測点を除く）が対象
- 自然変動の基準の算出：ベースライン調査（H25年8月～H26年5月）で得られた底層（海底面上2m）の酸素飽和度（%）と二酸化炭素分圧（μatm）との累乗近似曲線
- 上側95%予測区間を超えた観測値が得られた場合は監視段階に移行

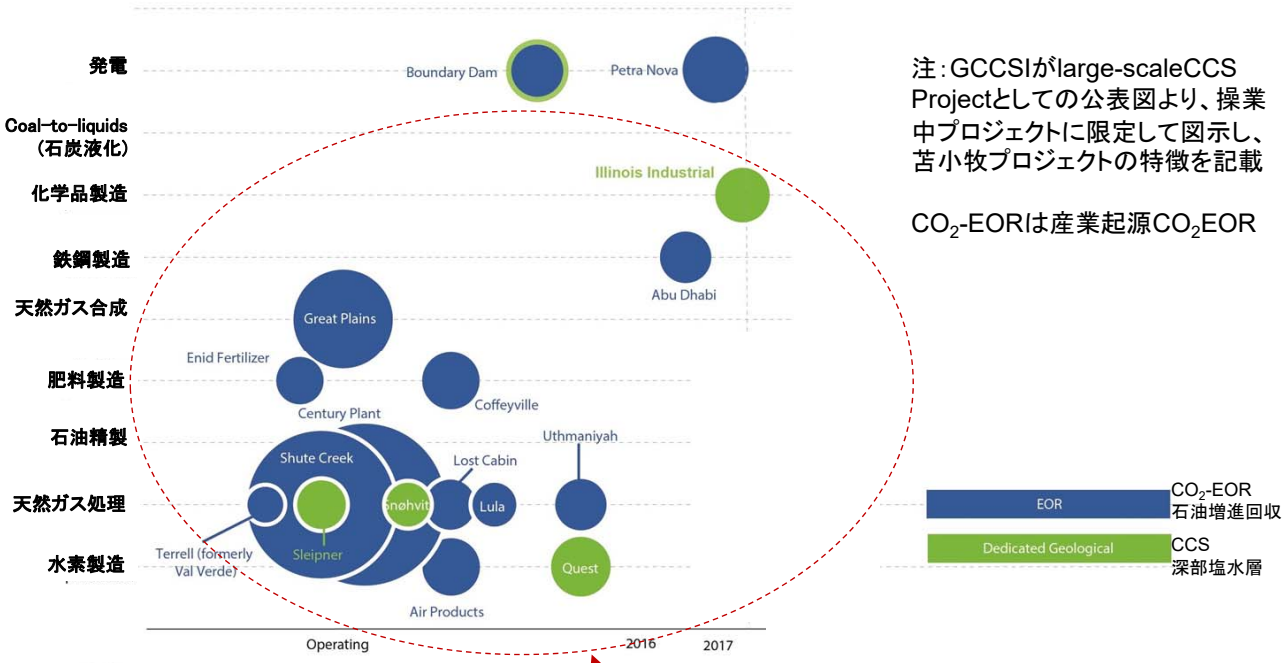
通常時監視 ⇒ 確認調査 ⇒ 懸念時監視 ⇒ 異常時監視






# 特徴5
# $CO_2$分圧が大きいガスからの分離・回収
# ⇒大きい $CO_2$分圧を利用した分離・回収法の採用

# 特徴5　大きい $CO_2$分圧を利用した分離・回収法の採用




注：GCCSIがlarge-scaleCCS Projectとしての公表図より、操業中プロジェクトに限定して図示し、苫小牧プロジェクトの特徴を記載

$CO_2$-EORは産業起源$CO_2$EOR

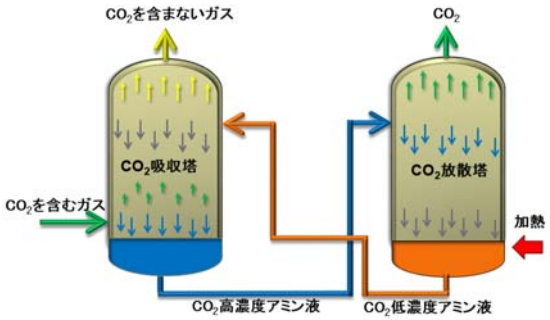
○ = 100万トン／年の$CO_2$（円の面積は貯留量に比例）

**苫小牧プロジェクトは、「$CO_2$を含むガスの圧力及び$CO_2$分圧が大きいガス」のカテゴリーに分類**

**⇒　高い$CO_2$分圧を利用した、低い分離回収エネルギーの分離回収法を採用**



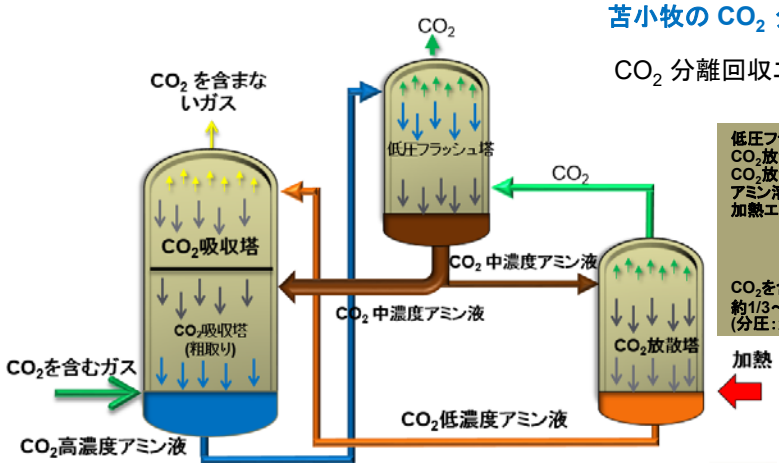
# $CO_2$ 分離回収法




## 通常の $CO_2$ 分離回収法

$CO_2$ 分離回収エネルギー = 2.5~4.0 GJ/t-CO2

注：電力消費を含むトータルの分離・回収エネルギー
分離・回収エネルギー
＝(リボイラー熱量／ボイラー効率
＋分離回収設備電力消費量×電気熱量換算係数／発電効率)
÷回収$CO_2$流量




## 苫小牧の $CO_2$ 分離回収法

$CO_2$ 分離回収エネルギー= 1.20 GJ/t-CO2（実測値）

低圧フラッシュ塔で減圧により$CO_2$を回収
$CO_2$放散塔の水蒸気熱を低圧フラッシュ塔で利用し$CO_2$を回収
$CO_2$放散塔において、低圧フラッシュ塔からの$CO_2$中濃度アミン溶液の一部のみを再生すればよいため、$CO_2$放散塔の加熱エネルギーを低減

↓

$CO_2$を含むガスの圧力及び$CO_2$分圧が大きい場合、通常型フローの約1/3～1/2の分離・回収エネルギーとなる
(分圧：混合気体の各成分気体の圧力)

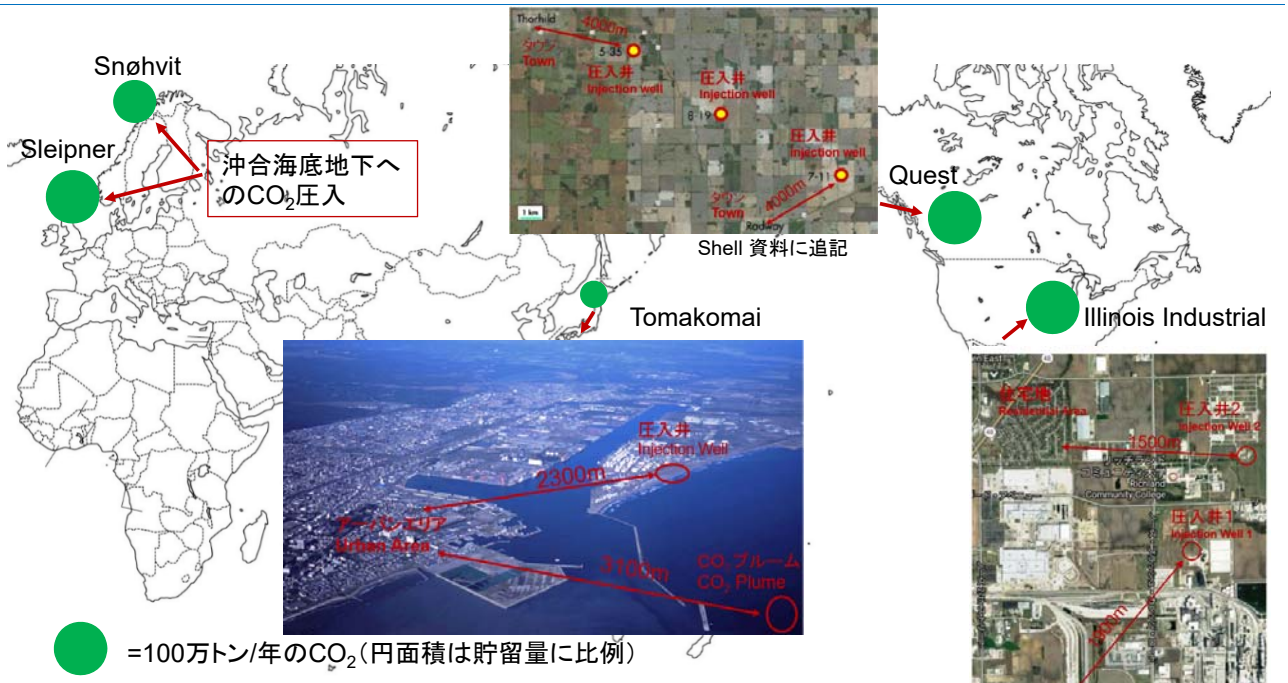
Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.

# 特徴 6

# 大都市部の近接エリアでの$CO_2$圧入



## 特徴6　大都市部の近接エリアでの$CO_2$圧入




**苫小牧は、Illinois IndustrialやQuestと同じく住宅近接エリアであるが、人口17万人ものアーバンエリアに極めて近い$CO_2$圧入プロジェクト**
**⇒多くのステークホルダーの理解が必要**
**⇒充実したパブリック・アウトリーチ活動の展開**

# 苫小牧プロジェクト近隣の都市部風景

苫小牧市人口：17万2千人

https://www.google.co.jp/search?q=%E8%8B%AB%E5%B0%8F%E7%89%A7%E5%B8%82+%E5%86%99%E7%9C%9F&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0ahUKEwiTn_PjpPnXAhWFHpQKHRteB3AQsAQIVw&biw=1536&bih=771

Copyright 2018 Japan CCS Co., Ltd.


# 広報活動実績（平成28年度）

- パネル展　計　5回　（苫小牧市、及び周辺地域）
- ミニ講演会　計　14回　（苫小牧市を含む全国各地）
- 子ども向け実験教室　計　2回　（苫小牧市内）
- 現場見学・視察者　計2013名、154グループ　（うち海外220名）
- 環境系展示会　計　2回　（東京）
- CCS講演会　計　312名　（苫小牧市、平成29年3月5日）

（１）情報公開
- 情報提供をしっかり行うこと。
- CCSをもっと知りたい。広報紙にも載せてほしい。
- 地元に対するこまめで丁寧な対応を望む。

（２）安全・漏れについて
- 経済効果だけでなく安全面にも十分配慮してほしい。
- $CO_2$の漏えいに関するリスクをもう少し詳細に教えてほしい。

（３）若年層への周知
- フォーラムの参加者の８割が５０代以上であり参加者に若い人が少ないのは残念。
- もっと若い人たちが集まるような呼びかけを考えてほしい。

モニタリング計画の策定と公開

**①パネル展の継続・拡充**
事業の進捗にあわせ、より広範囲で開催

**②講演会の継続**
多くの方にCCSを引き続いて良く理解していただくことを目的に開催

**③現場見学会**
センターや観測井の現場を広く公開

**④ライブカメラの設置**
ライブカメラを設置し、リアルタイムでプラントを公開
（日本ＣＣＳ調査(株)のウェブサイト上）

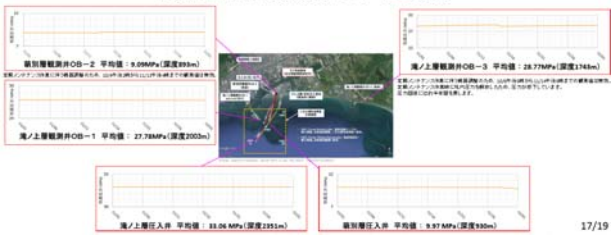
**⑤若者向けミニ講演会**
道内の大学で開催するとともに、全国の大学でも実施

**⑥子ども向け実験教室／現場見学**
主に、小中学生を対象に市内各所で実験教室を開催。$CO_2$の実験を通じて、地球温暖化やＣＣＳの仕組みの理解促進。子どもを対象とした現場見学会実施

Copyright 2017 Japan CCS Co., Ltd.

# ホームページによる情報公開例

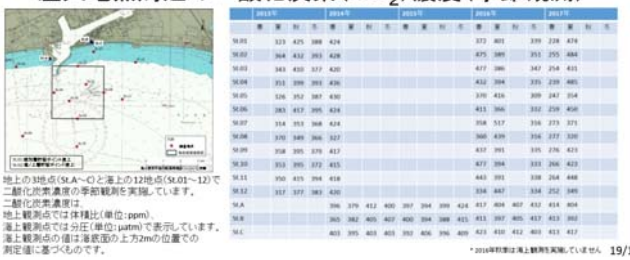
坑井内圧力観測（2017年11月）




地層の圧力観測値を公開

海水中の二酸化炭素濃度を公開

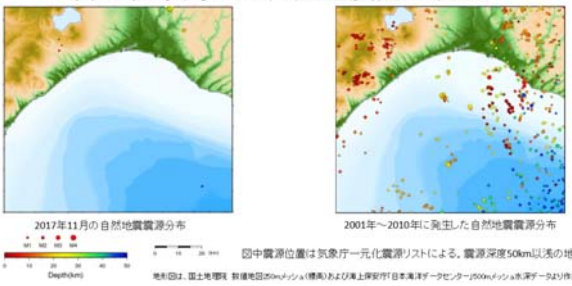
圧入地点周辺の二酸化炭素（$CO_2$）濃度（季節観測）




苫小牧市周辺で発生した地震の震源、マグニチュードを公開

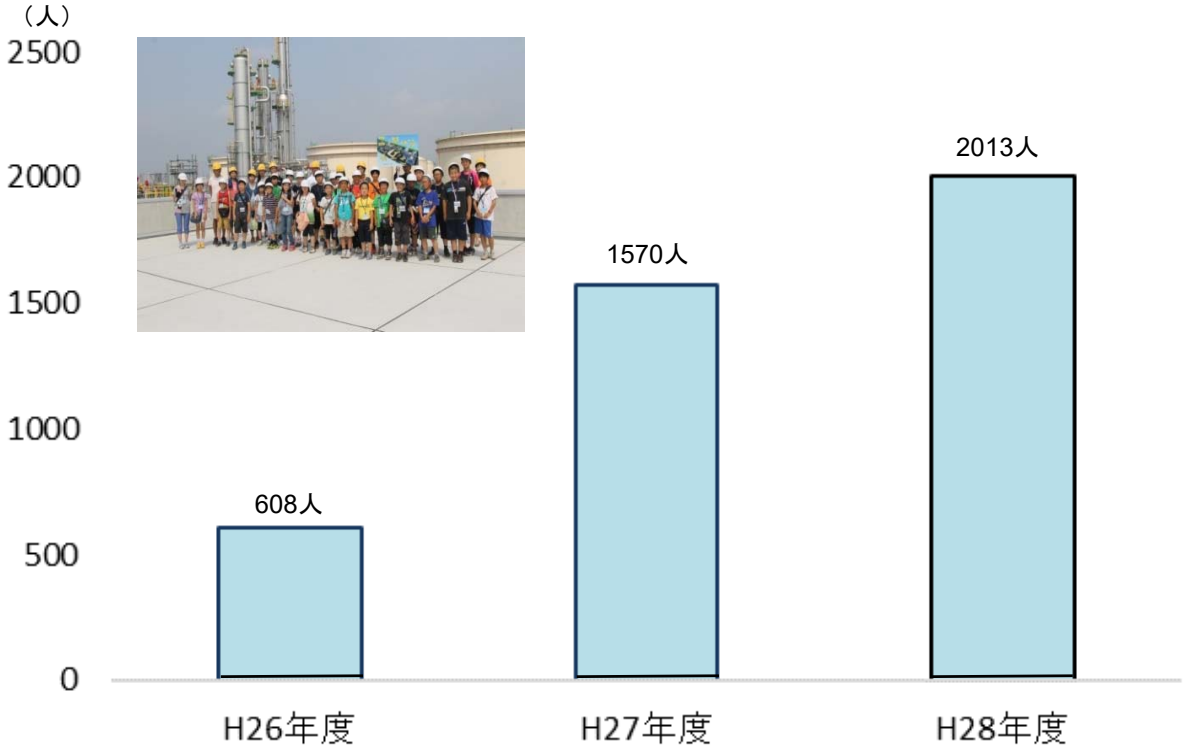
2017年11月 ⬇ 2001~2010 ⬇

苫小牧市周辺の自然地震発生状況






# $CO_2$分離・回収／圧入設備への見学者数



# 若者向けコミック

日本語版、英語版、
中国語版を作成



# 3. 国際活動

# 国際活動- CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum)

**CSLF:** 費用効果がより高いCCS技術開発に焦点をおく大臣級の多国間気候変動イニシアティブ。また、CCSの認知度の向上を促すとともに、前記の技術開発を支持する法律、規制、金融、制度面の環境整備を擁護する。

- **苫小牧実証プロジェクトは、2016年10月年次総会で正式にCSLF認定プロジェクトとして認定。**
- **JCCS は、アジアー太平洋地域におけるCCS事業の普及を主導する立場として、Regional Championに任命された。**

CSLF代表団（政策・技術グループ）向け現場見学会

認定賞授与セレモニー

# 苫小牧CCSの国際協力及び国際的な評価

## ➢ DOE（米国エネルギー省）

- 2015年4月　経済産業省は米国エネルギー省との間でCCS分野に係る協力文書に署名。
- 2016年7月　苫小牧CCS実証試験フィールドを使用した共同研究として、三次元弾性波探査等データ取得・解析の実施に関し、実施者のテキサス大学へUS$2.5million（≒2.5億円）の提供が決定。
- 2017年8月　苫小牧CCS実証試験フィールドでテキサス大学が浅層調査を実施。

## ➢ GCCSI(The Global Carbon Capture and Storage ）

- オーストラリア会社法に則り設立された非営利法人。全世界から約80組織が加盟。
- 2016年6 月苫小牧実証事業はGCCSI により世界のNotable Project の一つに指定。

世界のCCSの動向　2016　全5分冊のうち3分冊の表紙に苫小牧CCS実証試験センターの写真を採用

# 4. まとめ



## 苫小牧CCS実証試験のまとめ

- 2020年頃のCCS技術の実用化を目指して、苫小牧CCS実証試験を進めており、CCS一貫システム（分離・回収から貯留まで）の操業を開始した。
  - CCSシステムが安全で信頼できることを実証する
  - 地震に対する不安を取り除く
- 苫小牧プロジェクトの特徴
  - 省エネ型の低圧フラッシュ塔+2段吸収法を採用
  - 陸上から沖合海底下の貯留層へ高傾斜井で圧入
  - 充実したモニタリングシステムを実現
- 苫小牧プロジェクトへ、世界から注目が集まっている
- 関係者への多彩な広報活動を行っている
  - 苫小牧市や地元漁協とも緊密なコミュニケーションを継続している

ご清聴ありがとうございました
http://www.japanccs.com/

# 国内外の主要なCCS実証プロジェクト

電力中央研究所　地球工学研究所

海江田　秀志

土木学会エネルギー委員会CCS小委員会　成果報告会

2018年1月26日

電力中央研究所

© CRIEPI 2018





# 報　告　内　容

世界で現在稼働中の大規模CCSプロジェクトの例

◆ノルウェーのSleipnerのプロジェクト

◆カナダのWeyburnプロジェクト

日本が関係するCCSプロジェクトの例

◆新潟県岩野原プロジェクト

◆イギリスのQICSプロジェクト

◆インドネシアのグンディガス田プロジェクト

© CRIEPI 2018

# ノルウェーのSleipnerプロジェクトの概要

天然ガスは$CO_2$も付随して生産されるため、販売する際には$CO_2$の濃度を減らす必要がある。ノルウェーのStatoil社は，北海で開発中の天然ガスから$CO_2$を回収し，大気に放出していたが，ノルウェー政府が地球温暖化への対策として1991年に炭素税を導入したことから，回収した$CO_2$を海底下の地層に圧入することにした．これは世界ではじめての深部帯水層への$CO_2$貯留プロジェクトとなった．

$CO_2$貯留の対象としたUtsira層は海底下800～1,000mにあり，26,000km$^2$の広がりを持ち，間隙率は35～40%程度，透水係数が1Darcyより大きい透水性の高い砂層で，25百万トンの貯留能力があると推定されている．

$CO_2$の注入は深さ1,000mで2,400m偏距した1本の坑井で行われており，1996 年9 月から2015年6月迄に約15.5百万トンの$CO_2$が圧入されている．





# Sleipnerにおける貯留した$CO_2$のモニタリング

CCSを安全に実施するには地下に貯留した$CO_2$の挙動をモニタする必要がある。

Sleipnerでは貯留した$CO_2$の挙動をモニタリングするため，反射法地震探査が実施されている．

$CO_2$圧入開始前の1994年から2006年までに反射法地震探査が繰り返し行われ，1994年の結果と比較して，$CO_2$圧入後の2001年には深度断面図および平面図でも強い反射波を示す領域が認められた．この反射波発生の領域は年を経る毎に北北東—南南西に水平方向に拡大している様子が認められ，この範囲に$CO_2$が貯留されていると評価されている．

なお，反射波発生を示す領域が上方へ拡がっている様子は認められないことから，圧入された$CO_2$が海底や海中に漏洩している可能性はないと推定されている．

## カナダのWeyburn石油増進回収（EOR）における$CO_2$貯留の概要

石油や天然ガスの開発では，生産が衰えてくると油田に水蒸気や$CO_2$を圧入して，生産量を回復させる石油増進回収（EOR: Enhanced Oil Recovery)が適用される場合がある．

カナダのサスカチュワン州にあるWeyburn油田では，2000年より米国ノースダコタ州の石炭ガス化炉で回収された$CO_2$を液化して，約320kmのパイプラインで輸送し，生産が衰えた油田に$CO_2$を圧入することにより，生産量を回復させている．

2015年には年間2.4百万トンの$CO_2$がWeyburn油田に圧入されている．

なお，2013年にはカナダのBoundary Dam 石炭火力発電所で回収された$CO_2$もWeyburnの石油層に圧入し，世界で初めての火力発電所からの$CO_2$放出削減の商業化プラントとなっている．





## Weyburnにおける貯留した$CO_2$のモニタリング

Weyburnにおいても地下に貯留した$CO_2$の挙動評価として反射法地震探査が実施されている．

$CO_2$モニタリングのための繰返し3 次元3 成分反射法地震探査が，1999年のベースライン計測を始め，2001年，2002年，2004年，2007 年に実施された．その結果，$CO_2$を貯留した地層からの反射波の振幅の負の異常域（negative amplitude difference）が$CO_2$注入量の増加（時間の経過）とともに拡大していることが確認された．

これらの反射法地震探査の結果などから，これまで圧入された$CO_2$はほぼ水平に拡がり，地表面付近への$CO_2$の漏洩はないとされている．

# RITEによる岩野原における$CO_2$貯留実証実験の概要

日本国内においては，2000年度と2001年度は国立研究法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託 事業として，2002年度以降は経済産業省の補助金交付事業として，公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）により$CO_2$の地中貯留実証実験が実施された.

実験場所は新潟県長岡市岩野原の既存の天然ガス生産基地で，地下約1,100mに分布する帯水層を対象として$CO_2$の圧入が行われた.

平成15 年7 月7 日に圧入を開始し，平成17 年1 月11 日に最終累計圧入量10,405.2 t-CO2をもって完了した.





# 岩野原における貯留した$CO_2$のモニタリング

$CO_2$圧入井の周囲3ヶ所に観測井を掘削し，これらの観測井を利用して，坑井内計測（比抵抗検層，中性子検層，ガンマ線検層，音波検層）および坑井間の弾性波トモグラフィによる地下の物性データの取得が行われ，貯留した$CO_2$の挙動モニタリングが実施されている.

弾性波トモグラフィの結果では，$CO_2$が貯留された領域が弾性波速度の低下域として検出されることが判った.

なお、$CO_2$の圧入停止後も継続してモニタリングが続けられており，貯留した$CO_2$がほとんど移行していないことが観測されている.

# QICS実験の概要

CCSにおいては貯留した$CO_2$が地表に漏れ出ないように$CO_2$は地下深部に圧入される．しかしながら，安全・安心なCCSの実施のためには，万一貯留した$CO_2$が漏出した場合の周辺への環境影響，および漏出の発生や漏出箇所の検知・特定方法についてあらかじめ検討しておく必要がある．

英国では日本の研究機関と協力して実際の海域での$CO_2$放出実験を計画（QICS：Quantifying and Monitoring Potential Ecosystem Impacts of Geological Carbon Storage)し，英国スコットランド西海岸にあるArdmucknish湾の水深10～12mの海底下約12mから$CO_2$を放出する実験が実施された．

2012年5月17日から$CO_2$の放出が開始され，37日間で総量4,200kg放出された．この結果，人為的な海底下からの$CO_2$漏出による環境への影響は小さく，$CO_2$の漏出が終わると短期間で回復することが示された．





# QICSにおける$CO_2$挙動のモニタリング

弾性波反射法探査の結果（深さ断面図）によると，初期の$CO_2$放出時には堆積岩中に鉛直な煙突（Chimney）のような$CO_2$のパスが海底下2～3mより深部の第3層内に認められた．この煙突は水平面では5～10mに広がる亀裂などで構成される流路になっており，$CO_2$がこのような流路を流動している可能性が示唆された．その後，一部の$CO_2$は低透水性の第2層内を通り海底に漏出し，$CO_2$バブルとなって海中に流出した．$CO_2$の放出流量が増え日量210kgになると，弾性波反射法の深さ断面の第2層や第1層内にも煙突状の異常域が認められ，その異常域付近において$CO_2$が海底に漏出している様子が認められている．これは低透水性の第2層が$CO_2$の放出圧力で破砕され，新たな流路となったものと推定されている．

# インドネシアのグンディガス田CCS実験の概要

インドネシアの天然ガスは$CO_2$の含有量が多いため，天然ガス開発の急増は大気中に放散される$CO_2$の急増につながることが懸念されている．グンディガス田は，インドネシアの中部ジャワ州に位置し，2014年から生産が始まり，1日当たり約60百万立方フィートのガスが12年間生産される予定で，その過程で発生する1日当たり800トンの$CO_2$は大気中に放散される可能性がある．

インドネシア国内では$CO_2$をCCSでEORなどに用いて排出削減に繋げたい期待もあるが，地下に圧入，モニタリングしたという実績がないため，それらの技術の導入・開発に対する強いニーズがある．

国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)と独立行政法人国際協力機構(JICA)の共同研究開発プロジェクトである地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム(SATREPS)により，日本（京都大学等の研究機関）とインドネシア（バンドン工科大学などの研究機関とプルタミナ社）が共同でCCSに関する技術開発を2012年より実施している．

圧入する予定の$CO_2$は2年間で20,000トンで、最終的にはCCS事業を実施する際に参考にできる作業標準書（SOP：Standard Operation Procedures）をまとめることを目的としている．





# $CO_2$貯留対象地域の3次元地質構造モデル

これまでフェーズ1の研究として，圧入井周辺の広域地質データ，既存井で得られた地質，検層，孔内試験データ，ならびに周辺の既往反射法地震探査データ等が収集され，再解析が行われた．また，貯留候補層である砂岩層（Ngrayong層）が地表に現れている露頭で岩石試料を採取して，室内試験により間隙率や透水係数等の物性が求められ，既往井での孔内試験結果も含めて検討され，貯留層パラメータが決定された．

一方，圧入井周辺の多数の反射法断面と検層データをもとに3次元地質構造モデルが作成され，上記物性を加味して3次元の貯留層モデルが作成された．このモデルを用いて貯留層の透水係数と温度，圧入する$CO_2$の量と期間を変えて圧入シミュレーションが行われ，最適な貯留対象層および貯留条件が決められている．

# 「$CO_2$輸送・貯留に関する技術動向と今後の課題」

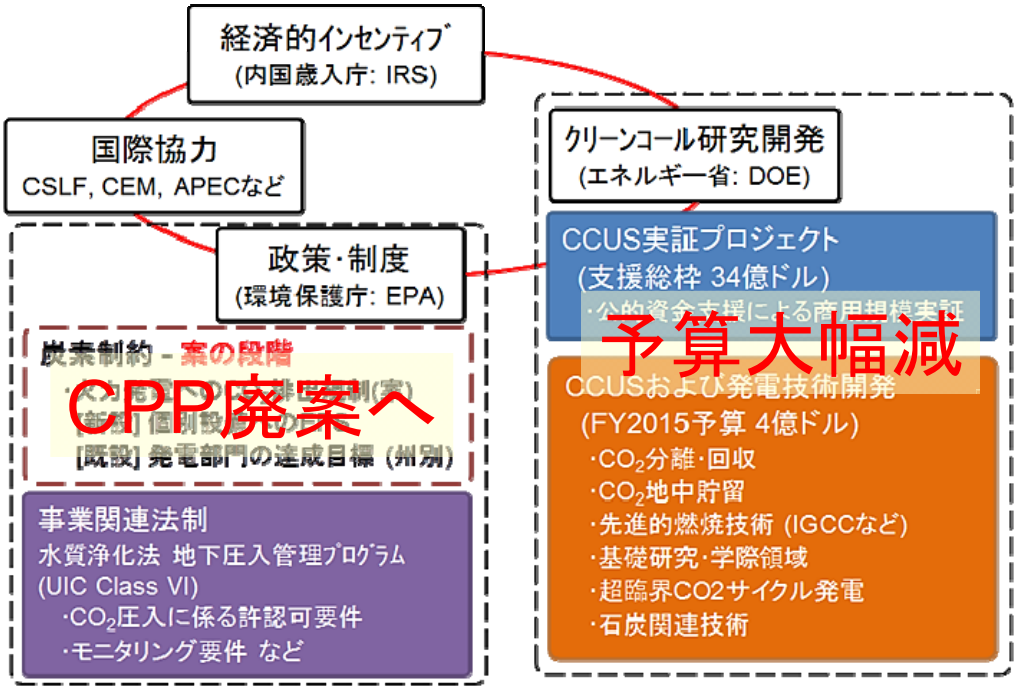
# CCS海外政策およびコスト試算の事例調査

2018年1月26日

土木学会エネルギー委員会
二酸化炭素回収・貯留(CCS)における調査・研究小委員会
担当: 電源開発株式会社 本江

## 米国: 全体像

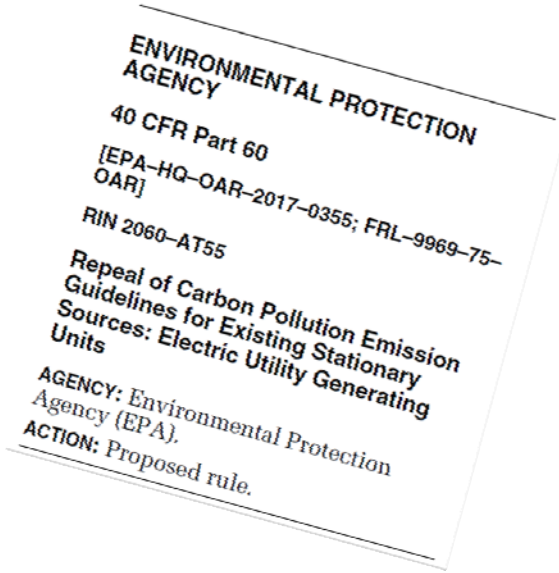
- 全体の骨格はとりあえず維持されているが・・・




各種資料に基づき筆者作成

# 米国: CPP (Clean Power Plan) は廃案へ

- トランプ大統領は選挙公約どおり、オバマ政権時代の$CO_2$排出規制案である「Clean Power Plan」(CPP) を廃案にすべく行動


ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY

40 CFR Part 60

[EPA–HQ–OAR–2017–0355; FRL–9969–75–OAR]

RIN 2060–AT55

Repeal of Carbon Pollution Emission Guidelines for Existing Stationary Sources: Electric Utility Generating Units

AGENCY: Environmental Protection Agency (EPA).

ACTION: Proposed rule.

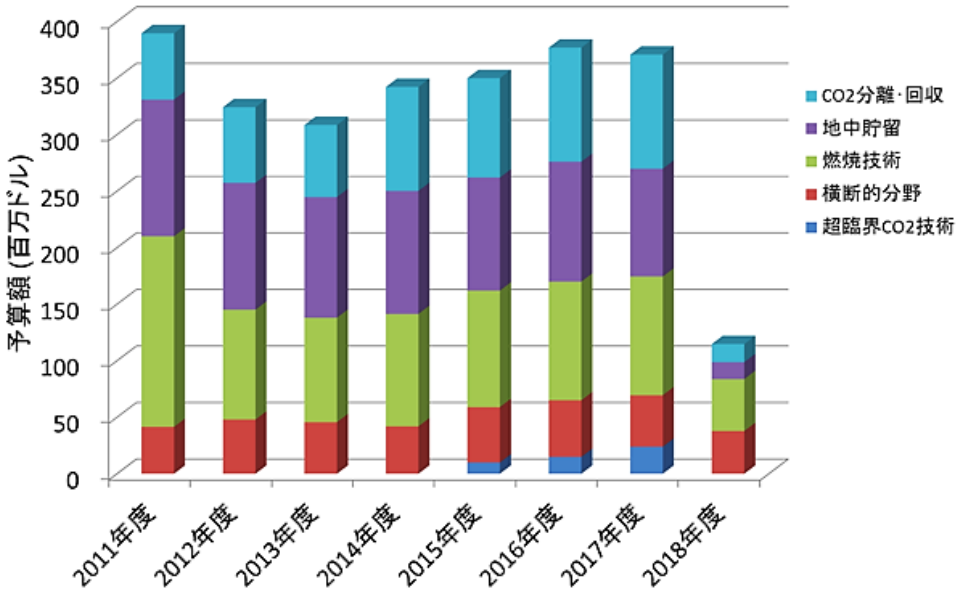
- ✓ 2017年3月28日 トランプ大統領がエネルギーの自立促進に関する大統領令 (Executive Order on Promoting Energy Independence) に署名
  - EPAに対してCPPの見直しと共に、適切な措置をとるよう指示
- ✓ 2017年10月10日 EPAはCPPの廃止案を発表
  - 2017年3月の大統領令を受けてのもの, パブリックコメントは2018年4月26日まで受付

出典: Federal Register /Vol. 82, No. 198, 2017年10月16日



# 米国: 石炭関連のR&D予算は大幅減

- トランプ政権は石炭産業を支援するとする一方で、エネルギー省の石炭関連分野R&D 2018年度予算要求額は前年度の約1/4
- エネルギー省は石炭関連R&Dの重点を高効率化とCCUSに置く




化石燃料エネルギーR&D予算額の推移 (石炭関連分野)

米国議会調査局等の資料に基づき筆者作成

# 米国: 大統領府と議会に隔たり

- 議会は大統領の予算減額に対抗して、CCSを資金支援するための様々な法案を提案している

✓ S.1535 The Furthering Carbon Capture, Utilization, Technology, Underground Storage and Reduced Emission Act
分離・回収, 貯留した$CO_2$量に応じた税額控除 (Tax Credit, Section 45(Q))
控除される額は、帯水層貯留で50 USD/t-$CO_2$, EORで35 USD/t-$CO_2$

✓ S.1068 The Clean Energy for America Act
CCS関連設備に対する投資税額の控除

✓ H.R.2011 and S.843 The Carbon Capture Improvement Act of 2017
$CO_2$分離・回収設備に対する$CO_2$回収率に応じた免税

✓ H.R.2296 The Advancing CCUS Technology Act
エネルギー省長官に対し、CCS R&Dで大きな成果を上げた案件に対して予算増額等の措置をとるよう求めるもの

✓ H.R.2010 and S.1663 The CO2 Regulatory Certainty Act
財務省長官に対し、エネルギー省, 内務省, EPAと協調して地中貯留に関する税務規則の整備を求めるもの



# 英国: CCUSへ重点シフト

- 2017年10月12日に発表された「Clean Growth Strategy」においてCCUSを重点施策の一つとしている

CCUSの普及
コスト低減を前提として2030年代に一定規模のCCUSを英国内に普及させる。

✓ 実施項目1: CCUSの位置付け再確認
CCUS Cost Challenge Taskforceの新設, 普及に向けた道筋(pathway)の検討, CCUS協議会の設置など。より詳細な計画は今年策定される予定。

✓ 実施項目2: 国際協調
ノルウェーなどとの2国間協調およびCSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum)などを通じての多国間協調を強化。Global Carbon Capture Usage and Storage Conference を2018年から開催等。

✓ 実施項目3: 技術開発支援
最大1000万GBPをCCUS研究開発に投じる。具体的な計画は2018年に策定の予定。

出典: Department for Business, Energy & Industrial Strategy (2017) The Clean Growth Strategy

# CCSコスト試算事例について

- 既存の公開文献に基づき、化石燃料発電でのCCSコスト試算におけるコスト構造と大きな感応度を有する要素を整理しようと試みたものです
- CCSコストの数値をまとめたものではありません

## 整理に用いた主な文献

- ✓ GCCSI (2015) The Costs of CCS and other low-carbon technologies 他
- ✓ IEA GHG (2013) Toward a Common Method of Cost Estimation for CO2 Capture and Storage at Fossil Fuel Power Plant
- ✓ US DOE/NETL (2015) Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants Vol. 1a, 1b 他
- ✓ (独法) 新エネルギー･産業技術総合開発機構, ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト関連報告書･資料
- ✓ (公財) 地球環境産業技術研究機構 (2006) 平成17年度 二酸化炭素固定化･有効利用技術対策事業, 二酸化炭素地球貯留技術研究開発 成果報告書 他



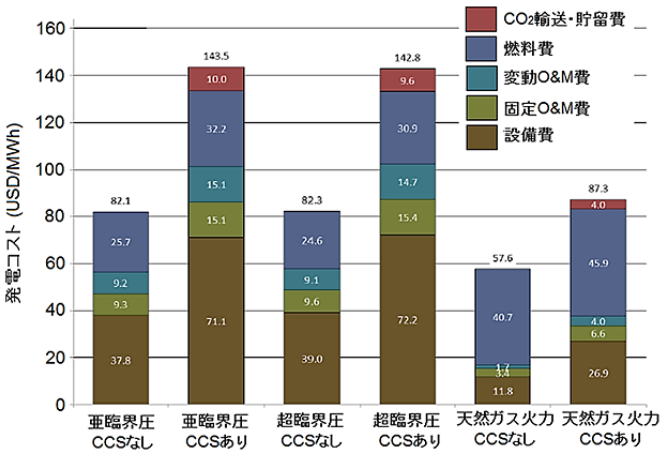
# CCSコスト試算事例: コスト構造

- IEA GHG (2013) で提示されたコスト構造が最もよくまとまっている

| Information Needed | Reports | Papers | Presentations |
|---|---|---|---|
| **Power plants without $CO_2$ capture (reference/base line plants)** | | | |
| **Battery limits** | X | | |
| Fuel type (class of hard coal, lignite, gas) | X | X | X |
| – Moisture and ash contents | X | X | |
| – LHV and HHV, (state "as received", dry matter, dry and ash free). | X | X | |
| – Definition of LHV | X | | |
| Power plant type (e.g. PF, BFB, CFB or NGCC) | X | X | X |
| – Steam parameters (pressures/temperatures) | X | X | |
| – GT-class (e.g. F-class, H-class) | X | X | |
| – Gasifier type (for IGCC) | X | X | |
| Plant location type (immediate to port, inland) | X | X | |
| – Ambient conditions (ISO, other conditions) | X | X | |
| Cooling water (cooling tower or once through sea/lake/river water) | X | X | |
| Plant capacity (MW electric) | | | |
| – Gross (to define boiler/GT size class) | X | X | X |
| – Net | X | X | X |
| Net electric efficiency and/or heat rate (state if based on LHV or HHV) | X | X | X |
| $CO_2$ emissions (per MWh net electricity or per MWh fuel; state if LHV or HHV) | X | X | X |
| Environmental control requirements (for major pollutants) | X | X | X |
| **In addition to the above, for power plants with $CO_2$ capture** | | | |
| Plant capacity (is the boiler/GT capacity or the gross or net output the same as the reference plant) | X | X | |
| Type of concept for power plant with $CO_2$ capture; e.g. post-combustion, oxy-fuel, IGCC with pre-combustion | X | X | X |
| Capture technology (e.g. MEA, advanced amine, chilled ammonia, Selexol etc or solid absorption/desorption process | X | X | X |
| Delivered captured $CO_2$: | | | |
| – Pressure, temperature | X | X | |
| – Purity requirements anticipated (at least state if sufficient for transport in carbon steel pipelines or ships) | X | | |
| Captured $CO_2$ per MWh net electricity or per MWh fuel (state if LHV or HHV), or "capture rate" (% of produced $CO_2$) | X | X | X |
| **Capital costs** | | | |
| Type of plant, e.g. first-of-a-kind, N$^{th}$-of-a-kind | X | X | X |
| Year and currency of cost estimate | X | X | X |
| EPC, TPC or similar: | X | | |
| – Minimum is a "lump sum" cost, plus define: | X | | |
| ○ Which major process units, buildings, construction and other major cost items are included | X | | |
| ○ Method used, e.g., "EPC" bids for major process units, step-count exponential costing method, etc. | X | | |
| – Cost breakdowns if available | X | | |
| Owner's costs: | X | | |
| – Minimum is a "lump sum" cost, plus define: | X | | |
| ○ Which major cost items are included here; e.g. own engineering, planning and project management, commissioning/start-up costs, working capital | X | | |
| ○ Method used; e.g. "EPC" bids for major process units, step-count exponential costing method | X | | |
| – Cost breakdowns if available | X | | |
| Contingencies | X | | X |
| – Project contingency (% of EPC, TPC w/o contingencies or similar) | X | X | |
| – Process contingency for novel processes (if included) | X | X | |

CCSコストの報告などにおいて提示すべき情報 (部分)

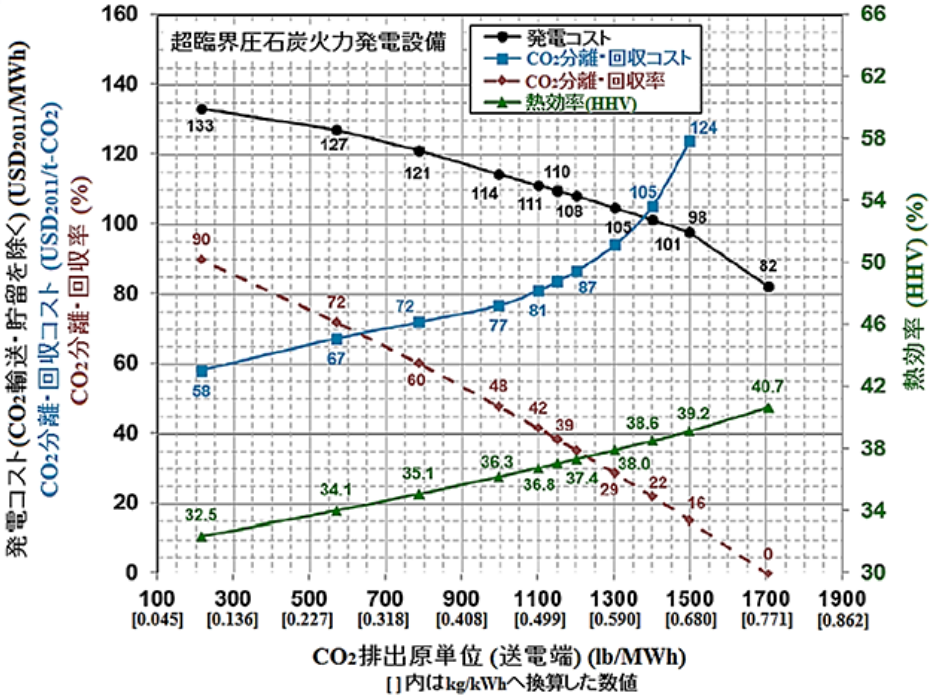
出典: IEA GHG (2013) Toward a Common Method of Cost Estimation for CO2 Capture and Storage at Fossil Fuel Power Plant




米国におけるCCSコスト試算事例

出典: US DOE/NETL (2015) Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants Vol. 1a

# コストへの影響要因: $CO_2$分離･回収率

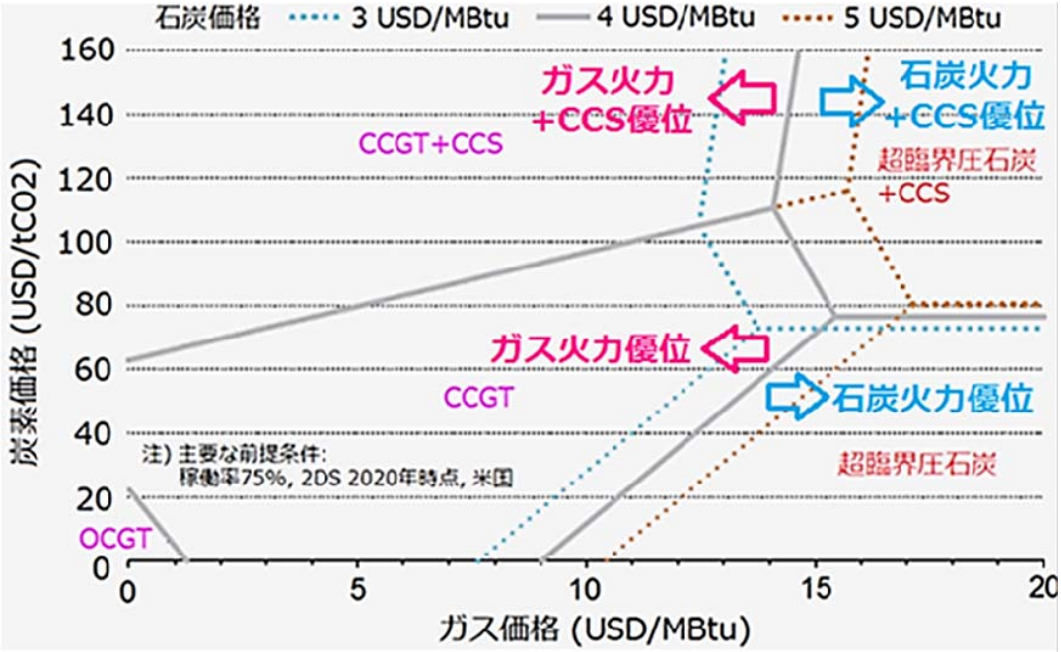



超臨界圧石炭火力発電コストにおける$CO_2$分離･回収率の感応度 (米国)

出典: US DOE/NETL (2015) Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants Supplement: Sensitivity to $CO_2$ Capture Rate in Coal-Fired Power Plant



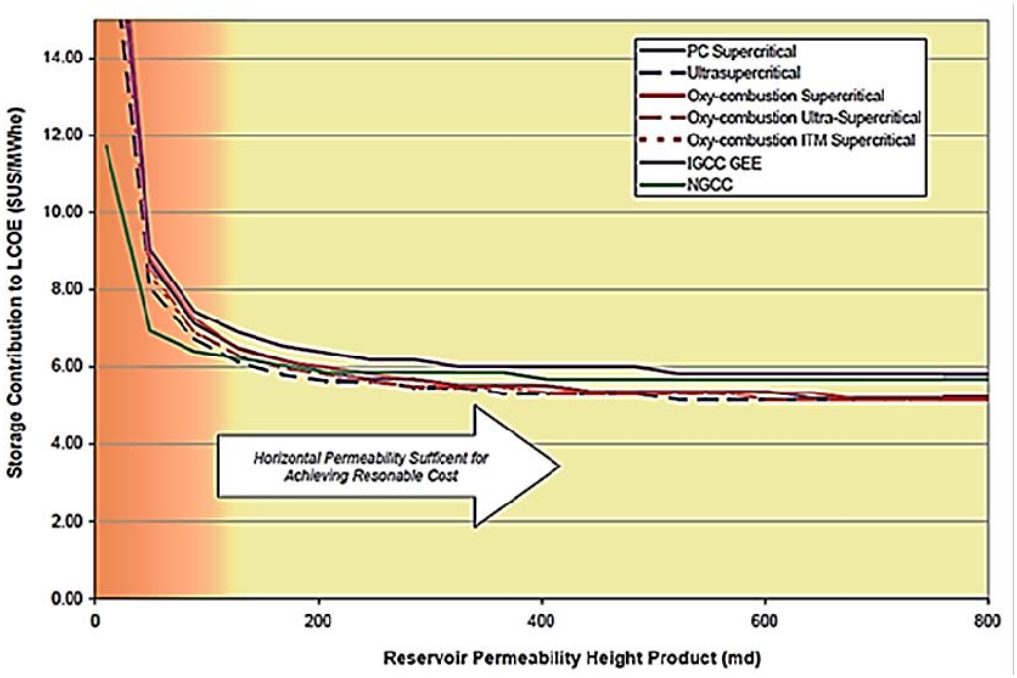
# コストへの影響要因: 発電燃料価格




石炭火力発電･ガス火力発電におけるコスト優位性の分岐線

出典: IEA (2014) Energy Technology Perspective 2014 に筆者加筆

# コストへの影響要因: 貯留層の浸透率




化石燃料発電コストにおける貯留層浸透率の感応度

出典: GCCSI (2011) Economic assessment of carbon capture and storage technologies, 2011 update

# 3)　CO2輸送技術

既存の輸送技術と船舶海上輸送におけるインフラ
構築技術の紹介

千代田ユーテック
小俣　明



# 本資料に含まれる公開報告書の目次と執筆担当者

5･1　CO2輸送技術：千代田ユーテック㈱
小俣　明

6･4　船舶海上輸送におけるインフラ構築技術：
㈱大林組　鈴木健一郎、
大成建設㈱山本肇、
千代田ユーテック㈱　小俣明

# ローリー車輸送　1

- 実証試験等のように年間輸送量も累積総輸送量も少なく，輸送距離が決して短くない場合に採用される場合がある．
- 国内で運行されている販売用液化$CO_2$のタンクローリー車の殆どは，積載量が8t又は10tであり，温度圧力は-20℃，2 MPaである．この積載量では，年間輸送量10万t$CO_2$（平均日量300t$CO_2$）の計画輸送量に対し，一日約30台以上のタンクローリー車の往復が必要となり，道路交通上も課題が多くなる．この場合の輸送距離は数百km（200～最大500km）に及ぶ（新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)，2013a）．
- 海外ではより大きな積載量のタンク車で輸送する事例もある．また，タンクローリー車のタンクだけを鉄道の貨車に積降して，輸送することも可能である．



# パイプライン輸送　1
# 概要

- 年間輸送量・累積総輸送量が大きく，輸送距離が短～中距離程度の場合に最も低コストな輸送方法とされる．また，輸送量が大きく，排出源と貯留サイト間に海が無い場合には，長距離であってもパイプライン輸送が採用される．
- 海外では陸上，海上両方を通って運ぶ実績があり、砂漠，山岳地帯，人口密集地帯，農地，平野，北極および亜寒帯，および水深2,200mまでの海中に敷設されている．米国西部では2,500km以上にわたって設置され，自然排出源からテキサス州西部やその他地域の原油増産回収プロジェクトに年間50Mt$CO_2$を運ぶ（IPCC，2005）．
- 国内では$CO_2$の長距離パイプライン輸送の実績が無いため，海外の$CO_2$パイプライン事例や，国内における天然ガス等のパイプライン事例を参考にして，わが国の地理的・地質的特性に適した輸送システムを検討する必要がある．

# パイプライン輸送　2
# 適用法規・輸送圧力

- **適用法規**：適用可能と考えられる現行の法規は高圧ガス保安法と，一部，限定的に電気事業法である（NEDO，2013a）。
- **輸送圧力**：海外の実績を見ると，運転上の困難があるため，敷設地域の温度を考え，2相流を避け気相または液相・超臨界相（Dense Phaseと呼ばれる）のいずれかの状態で輸送している．輸送温度条件が5～25℃の範囲と想定される場合には，気相の場合4.5MPa 以下であり，液相・超臨界相の場合10MPa以上となる（NEDO，2013a）．気液二相流には単相流にはない複雑な現象があるが，その特性を十分に理解し，設計，操業上の留意点に配慮すれば，気液二相流輸送が可能である．二酸化炭素を人口集中地域内でパイプライン輸送することは，設計要因，過圧予防策，漏洩探知に注意を払うことを必要とする．$CO_2$は大気より重い気体であり，緊急に放散する場合には，放散塔の設置が必要となる．



# パイプライン輸送　3
## ガス成分・ルート選定・課題

- **ガス成分**：高圧ガス保安法では，ガス成分に応じた保安措置等の対応をとればよく，$CO_2$濃度や不純物に対する特段の規定はない．しかしながら貯留する$CO_2$については，海洋汚染防止法で「アミン法で分離回収された濃度99%以上（石油精製に使用する水素製造で回収されたものは98%以上）の$CO_2$であり，廃棄物等が加えられていないもの．」と規定されている．国内外のパイプラインでは，通常の（経済的な）炭素鋼が用いられており，その腐食防止の理由により，硫化水素，水分を出来るだけ削除することが要求される．両者を含有する場合には，耐食パイプラインを検討する必要がある．（IPCC，2005）．
- **ルート選定**：国内の陸上パイプライン（天然ガス/都市ガス，石油，水道，他）は，ほとんどが道路下に埋設されている．民地は細かく文筆され地権者が多く，用地交渉に時間と手間を要することがその主要な理由である．海域では漁業補償等の問題が懸念される漁場・養殖場を回避する他，出来るだけ短距離になるようルート選定を行う
- **課題**：パイプライン輸送技術については，ほぼ完成された技術と言える．しかしながら，国内でパイプライン輸送を行う場合には，陸上に於いては高人口密度地域の地元交渉，海域に於いては沿岸域の高度に利用が進んだ漁業交渉などが想定され，計画遂行のスケジュールが組み難いなどの課題がある．また，7MPa以上の実績が無いため，許認可に多くの時間を要すことが想定されるなど，コスト以外の課題がある．
- パイプライン輸送は，年間輸送量・累積総輸送量が大きい場合に有利な方法となるが，一度敷設すると移動が困難で，貯留ポテンシャルの小さい貯留サイトには適さない．貯留層の不均質性や断層の存在等により，貯留ポテンシャル評価にリスクがある場合にも，当初は船舶輸送を行い，貯留ポテンシャルが十分に期待できると判明した後にパイプライン輸送を検討するなどの配慮が必要になる場合もあると想定される．

# 船舶輸送

- 年間輸送量・累積輸送量がパイプライン輸送と比べて少なく，排出源と貯留サイト間に海があり，輸送距離がパイプライン輸送に比べて長い場合に採用される.
- 現在，$CO_2$船舶輸送の検討はまだ初期段階であり，世界的に本目的で使用されているのは数艘の少規模船のみである（IPCC，2005）．また，CCS用に船舶輸送した事例はなく，ノルウェー・韓国・日本等において設計研究が行われている.



# 船舶輸送　NEDO検討事例　1
## 概要

- NEDOでは、積載量3400tCO2の実証機と21000tCO2の商用機について検討している。
- また、後述するように船舶輸送のインフラとして、下記についても検討を行っている。

1）陸上の一時貯留タンク

分離回収設備近傍に設置。出荷設備等も設置。

2）洋上浮体基地・洋上着底基地

圧入貯留サイト近傍に設置。荷受側設備、昇温・昇圧設備も設置。

# 船舶輸送　NEDO検討事例　2
# 規制法規・カーゴタンク・課題

- **規制法規**：船舶は国籍および船籍港が登録され，船籍国の法律が適用されることになる．その法律は関係する国際条約の内容を反映させたものとなっている．国際条約の主なものは，海上人命安全条約，海洋汚染防止条約，国際満載線喫水条約である．液化$CO_2$輸送船は液化ガスばら積船に分類され、適用される法律には，1) 船舶法，2) 船舶安全法，3) 海上衝突予防法，4) 海洋汚染および海上災害の防止に関する法律，5) 鋼船規則（液化ばら積船規則・日本海事協会）がある．
- **カーゴタンク**：液化$CO_2$輸送船の類似の船種としてはLPG 船，LNG 船がある．LPG 船は圧力および温度の組合せにより加圧式，低温式およびこれらの中間のセミレフ式の3種類がある．小型である内航船は圧力式およびセミレフ式で，外航の大型船は低温式が一般的である（NEDO，2013a）．LPG輸送船等では，常温/高圧から低温/大気圧までの様々な積荷条件で適用できるように設計されているタンカーもある．（IPCC，2005）．一般に，タンク内の温度が高いほど圧力は高くなり，構造応力的に厚板が必要になる．逆に，温度を下げるほど圧力は低くなり，必要なタンクの板厚は薄く容器は軽くなるが，低温に耐える高級な材料が必要となる（NEDO，2013a）．輸送するためには低温・低圧に，圧入するためには0℃以上に昇温する必要があるため，エネルギーロスを低減するためには，輸送温度は液体状態で出来るだけ高い温度が望ましいが，タンク設計上は低温・低圧が選択される．NEDO(2013a)で検討した2タイプの輸送船は，いずれも温度-46℃，圧力0.7MPaである．タンク形状は，主として単胴および双胴タンク方式が小型のLPG 船，球形タンク方式が大型のLNG 船に採用されてきた（NEDO，2013a）．
- **課題**：液化$CO_2$用の大型タンクの製造は実績が無く，材料の曲げ加工性，溶接性など施工面での詳細な検討・開発が必要である．大型タンクを製造するに際して，加工能力，製作効率向上のための設備投資が必要である．(NEDO，2013b)



# 船舶輸送　シャトル船方式　1
# 概要

- 船舶輸送の低コスト化を図るために，東京大学尾崎雅彦教授が発案し，一般財団法人 電力中央研究所，GCCSI（Global CCS Institute），NEDO（国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）それぞれの委託・資金援助等により設計研究が逐次進められてきた手法であり，環境省が推進しているCCS実証試験における船舶輸送手法の一つとして検討されている手法である．

# 船舶輸送　シャトル船方式　2
# コンセプト

・複数の排出源から海域貯留サイトまで船舶輸送し，シャトル船搭載の設備により昇温・昇圧後，フレッキシブル・ライザー・パイプを用いて船上から直接圧入する.
・$CO_2$積載量は3000tとし，年間100万t-$CO_2$を輸送・圧入する.
（3000t／日＊330日／年 → 100万t／年）
・洋上設備は，無人とする．一時貯留タンクは，積出港の陸上だけに設置.



# 船舶輸送　シャトル船方式　3
## 長所・短所

**長所**
・輸送距離の増加によるコスト増が少ない.
・フレッキシブル・ライザー・パイプを用いることにより水深の制限を緩和できる.
・洋上一時貯留設備が不要となる.
・輸送量の変化，排出源・貯留サイトの変更など，計画変更に対する柔軟性（スケールメリット⇒ユニット化）がある.
・撤去，移設・再利用などへの対応が容易である.
**短所**
・最適化されたパイプライン輸送と比べ，コスト高（短～中距離輸送）になる.
・海象の影響を受ける.
・船舶燃料消費による$CO_2$排出がある

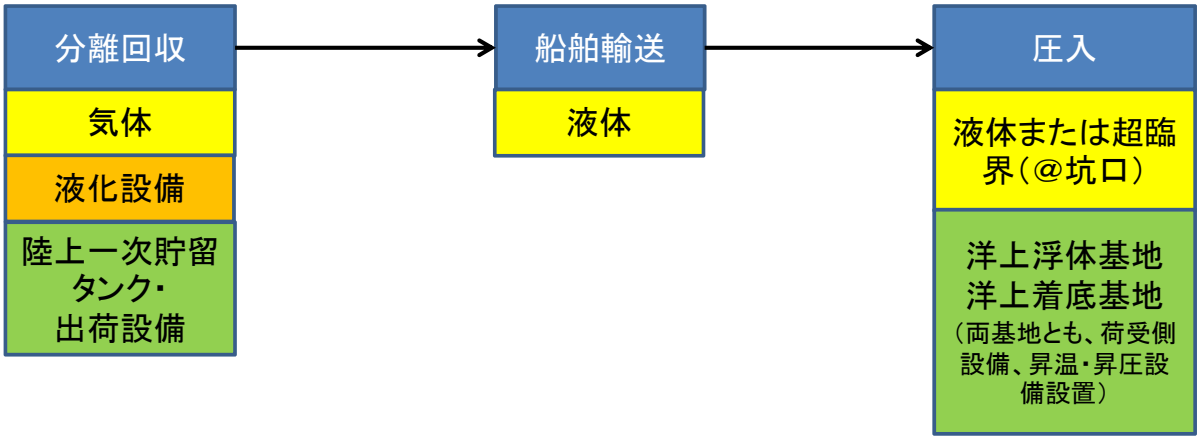
# 船舶輸送引用文献


- 東京大学，(株)システム工学研究所船舶による$CO_2$輸送および海底下地層への圧入システムに関する技術調査とコスト試算業務報告書，平成22年3月，（電力中央研究所）
- GCCSI（Global CCS Institute）：Preliminary Feasibility Study on $CO_2$ Carrier for Ship-based CCS, 2011.
- GCCSI（Global CCS Institute）：Preliminary Feasibility Study on $CO_2$ Carrier for Ship-based CCS（Phase-2 – unmanned offshore facility），2012.
- GCCSI（Global CCS Institute）：Preliminary Feasibility Study on $CO_2$ Carrier for Ship-based CCS（Phase-2 – unmanned offshore facility）- VOLUME 2 - Storage Site Identification beyond the Japanese Continental Shelf，2012.
- IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）：Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage，2005
- 環境省：平成25年度シャトルシップによるCCSを活用した二国間クレジット制度実現可能性調査委託業務報告書，2014.
- 環境省：平成26年度環境配慮型CCS導入検討事業委託業務報告書，2015.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：平成20年度～平成24年度成果報告書，革新的ゼロエミッション石炭ガス化発電プロジェクト 発電から$CO_2$貯留までのトータルシステムのフィージビリティ・スタディ$CO_2$輸送システムの概念設計報告書，2013a.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：平成20年～平成24年度成果報告書 革新的ゼロエミッション石炭ガス化発電プロジェクト 発電から$CO_2$貯留までのトータルシステムのフィージビリティ・スタディ 全体システム評価（発電から$CO_2$貯留に至るトータルシステムの評価）報告書，2013b.
- Ozaki, M.: Shuttle ship transport of $CO_2$ ,Webinar – 30 April 2013, 1400 AEST,GCCSI




# 船舶輸送インフラ構築技術　1

## 陸上一時貯留タンク、洋上浮体基地・洋上着底基地



# 船舶輸送インフラ構築技術　2
## 陸上一次貯留タンク

回収された$CO_2$を滞りなく船舶輸送するために$CO_2$を一時的にバッファ貯蔵するタンクの他、出荷設備が必要となる．$CO_2$出荷設備の概念設計の例では，船舶積載時と同じ低温高圧（0.8MPa, -46～-50℃）とし，容量1.2万tの球形タンクを2基配置したものである．その他に昇圧設備，ローディング・アーム，ボイルオフ・ガス（BOG）回収設備など，諸設備が付帯する．



# 船舶輸送インフラ構築技術　3
## 洋上浮体基地　規制法規

**規制法規**

国内では，$CO_2$輸送での貯蔵圧入用浮体洋上基地建設の実例がないこともあり，現行法下では包括的に適用できる法規は存在しない．最終的には建設時に関係官庁・機関・団体と協議して適用規則を確定する必要がある（NEDO，2013）．

# 船舶輸送インフラ構築技術　4
## 洋上浮体基地　長所

長所

洋上浮体基地は，比較的低コストで短期間に建設でき，浮体式のため陸上設備と異なり他の地点へ比較的簡単に移動させられるというメリットがある.

洋上浮体基地の主な要件を，以下に箇条書きで示す（NEDO, 2013）.

・輸送された液体$CO_2$を輸送船の運航を考慮した規模の貯蔵容量の設備に格納できる.

・選定された貯留サイトの海底貯留層へ圧入するための機器を搭載する.

・輸送船の接舷及び液体$CO_2$を効率的に積み降ろすことができる.

・貯留サイト内にある圧入井坑口直上に位置を保持することができる.



# 船舶輸送インフラ構築技術　5
## 洋上浮体基地　課題

**コスト低減**：洋上浮体基地方式は，建造費・運営費が高コストとなっており，NEDOでも検討されているが，低コスト化の更なる検討が必要である.

荒天時の対応：日本は台風が多く，万一の場合の洋上浮体基地の避難方法について検討が必要である.

**洋上設備の電力供給**：ディーゼル発電機を予定しているが，以下の課題がある（NEDO，2013）.

- 非常用対応機は多いが，常用対応機はメーカーが限られる.
- 燃料補給（悪天候時）
- 排ガスの処理

**導入に向けた検討・実証試験**：液化$CO_2$は，温度－46℃，圧力0.7MPa という過酷な温度圧力条件での$CO_2$の大量輸送・大量貯蔵となる. このような条件での輸送・貯蔵については. 過去に実績がなく，具体的に導入を検討する場合には，海象条件による稼働率への影響，設置方法，メンテナンス方法等も含め，詳細な検討と実証試験により，運転の安全性・安定性を確認することが必要不可欠である（NEDO，2013）.

# 船舶輸送インフラ構築技術　6
# 洋上着底基地　概要・課題

- 設置海域の水深が浅い場合，着底式が適する．設置地点は，貯留サイト近傍で，$CO_2$輸送船の入港，漁業等への影響を考慮して離岸距離5km・水深15mの外洋に設定した．従って，高波浪が作用し，わが国特有の地震の影響も受ける．
- LNG洋上着底基地と同様のコンクリート函体を採用した．コンクリート函体は，タンクを搭載し，$CO_2$ 輸送船が着桟できる規模で，以下の形状寸法とした．
- 実証機：長さ115m × 幅30m × 高さ25m
- 商用機：長さ250m × 幅42m × 高さ25m
- 基礎形式は外洋であること，また，設置海域の地盤条件等を考慮してコンクリートプラットフォーム等にて実績のあるスカート・サクション基礎を採用した．

課題

- 構築可能なサイト（陸上施設・ドライドック・岸壁等）の確保
- 設置海域の自然環境条件の明確化
- 構造部材の形状・寸法の最適化
- 構築サイトの詳細条件の明確



# 船舶輸送インフラ構築技術
# 引用文献


- 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成22 年度成果報告書，革新的ゼロエミッション石炭ガス化発電プロジェクト 発電からCO2貯留までのトータルシステムのフィージビリティ・スタディ CO2輸送システムの概念設計，2011.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：平成20年度～平成24年度成果報告書，革新的ゼロエミッション石炭ガス化発電プロジェクト 発電からCO2貯留までのトータルシステムのフィージビリティ・スタディ CO2輸送システムの概念設計報告書，2013.
- 三井海洋開発株式会社のウェブサイト：http://www.modec.com/jp/business/domain/fps.html（2016年11月28日閲覧）
- 湯浅城之，古川博宣，酒見卓也，小島令一，石川嘉一，増井直樹，矢野州芳，藤田秀雄：茅陽一　監修，（財）地球環境産業技術研究機構編集：CCS技術の新展開，第10章$CO_2$輸送技術，pp. 97-113, 2011.
- Suzuki, T. M. Triumi, T. Sakemi, N. Masui, S. Yano, H. Fujita, H. Furukawa: Conceptual design of CO2 transportation system for CCS, Energy Procedia, 37, pp.2989 – 2996, 2013.

# $CO_2$貯留サイト評価技術について

電力中央研究所　地球工学研究所

末永　弘

土木学会エネルギー委員会CCS小委員会　成果報告会

2018年1月26日

電力中央研究所

© CRIEPI





# 本日のお話の内容

- 既往の$CO_2$貯留サイト評価技術のご紹介
  - サイト評価のための調査・試験方法
  - 貯留可能量評価技術
- 比較的新しいサイト評価技術として$CO_2$漏洩に関する事例をご紹介
  - 陸域における$CO_2$漏洩評価技術
  - 海域における$CO_2$漏洩評価技術

© CRIEPI

# 既往の$CO_2$貯留サイト評価技術

◆サイト評価のための調査・試験方法

- 文献調査
- 地表地質調査
- 物理探査
- 坑井調査・試験

◆貯留可能量評価技術

- サイトごとの貯留可能量の評価方法





# 文献調査結果に基づく貯留層分布

これまでに実施された地下深部を対象とした地質調査として，石油・天然ガス資源調査，地熱資源調査，活断層調査，地下水調査が挙げられる．これらの調査結果を収集・整理することにより，初期段階におけるサイト評価を行うことができるものと考えられる．$CO_2$貯留においては，地下深部における貯留層・遮蔽層の分布や性状，貯留された$CO_2$の漏洩経路となり得る断層の分布や性状を把握する必要がある．

貯留層・遮蔽層の分布に関しては，公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)により反射法地震探査および坑井掘削の結果に基づくデータの収集，整理結果が示されている(RITE，2008)．

# $CO_2$貯留に関わる断層の調査フロー

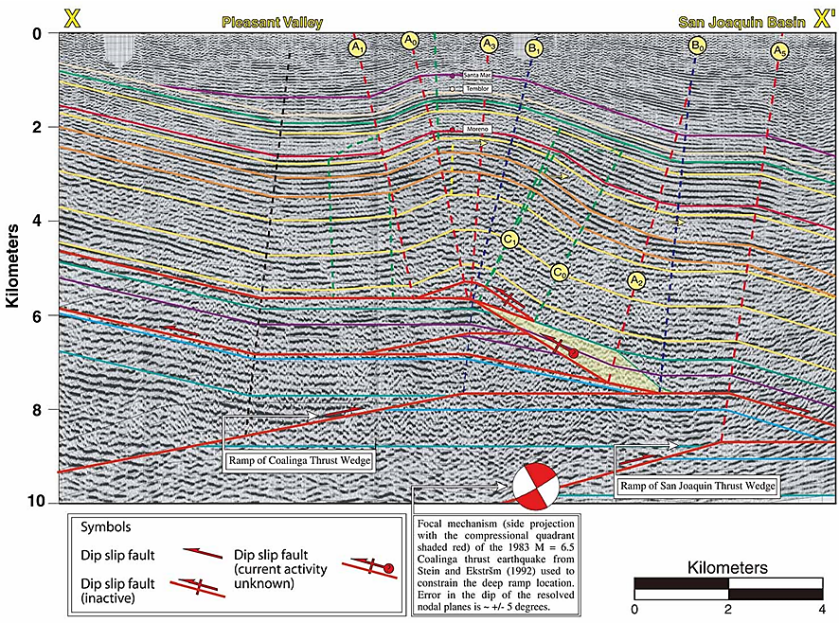
$CO_2$の漏洩経路となりうる断層については，活断層の分布や性状については活断層研究会により取りまとめられている他，産業技術総合研究所による出版物や地方自治体における調査報告書が利用できる．

しかしながら，$CO_2$の漏洩に関わる断層の物性評価や海域の断層についての分布，性状については評価事例が少ないのが現状である．$CO_2$貯留に関わる断層の調査フロー例を報告書本文図5.2-2に示す(海江田他，2012)．





# $CO_2$貯留サイトの地下構造評価技術(反射法地震探査)の例




（Guzofski and Shaw, 2005）

$CO_2$貯留サイト評価のための地質構造ならびに物性を評価するための物理探査手法として，反射法地震探査，屈折法地震探査，微動アレイ探査，電磁探査，重力探査などが挙げられる．現状では$CO_2$貯留サイトの地質構造評価に関しては反射法地震探査が最も優れていると考えられる．

反射法地震探査は，地震波(弾性波)を人工的に発生させ，地下深くの地層境界面で反射して地表に返ってきた振動を受振機によって観測することにより，反射波の走時から主に境界面(反射面)の深さを推定する方法である．左図に反射法地震探査の測定例を示す．

# 貯留可能量算出式

サイト評価の初期の段階において評価する貯留可能量は，石油・天然ガス資源における原始埋蔵量に類似した概念であり，理論的に地層に貯留可能な$CO_2$の量を表す．我が国ではRITEにより示された以下の式(RITE，2006)がある．

$$\text{貯留可能量} = S_f \times A \times h \times \varphi \times \frac{S_g}{B_{gCO2}} \times \rho$$

ここに，$S_f$：貯留率，A：貯留層の面積，h：有効層厚，φ：貯留層の間隙率，$S_g$：超臨界$CO_2$の飽和率，$B_{gCO2}$：$CO_2$の容積係数，ρ：$CO_2$の密度である．





# $CO_2$貯留可能量の評価フローの例

貯留可能量評価のフローの例を報告書本文図5.2-5に示す．貯留可能量算出式において，貯留層の有効層厚hについては，貯留層の全層厚に砂泥比率を掛け合わせたもの，$S_g$については0.2，0.5，0.8をそれぞれ用いている．$B_{gCO2}$，ρは貯留する地点における温度・圧力条件に依存するが，深度2000mで一般的な地温勾配(100m当たり3℃)の場合，それぞれ0.003，630kg/m$^3$程度となる．

海外では，CSLF(Carbon Sequestration Leadership Forum)による方法(Bachu et al., 2007)やこれをベースとした改良版(Gorecki et al., 2009)，USDOE(米国エネルギー省)による方法(USDOE, 2007)などが提唱されている(Bachu, 2015)が，基本的にはRITEによる方法と同様の考え方に基づくものである．

# 比較的新しい$CO_2$貯留サイト評価技術

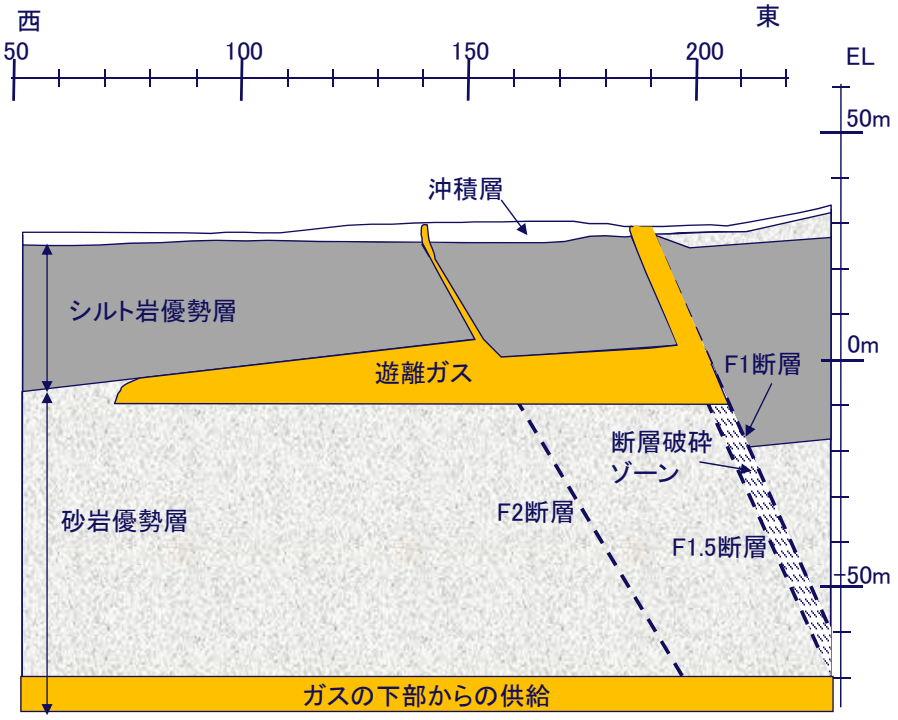
$CO_2$貯留においては，貯留層からの万一の$CO_2$漏洩リスクへの対応が必要になるものと考えられる．この漏洩リスクを最大限低減させるためには，貯留した$CO_2$が漏洩するメカニズムを明らかにするとともに，万一漏洩した場合に検知する技術を開発しておく必要がある．このような観点から以下の研究事例を紹介する．

- ◆天然ガスの地表への湧出を$CO_2$漏洩の天然類似例と見た場合のガス漏洩メカニズム評価技術
- ◆海底下の地層に$CO_2$を貯留した場合において，海底面で漏洩してきた$CO_2$を検知するための技術





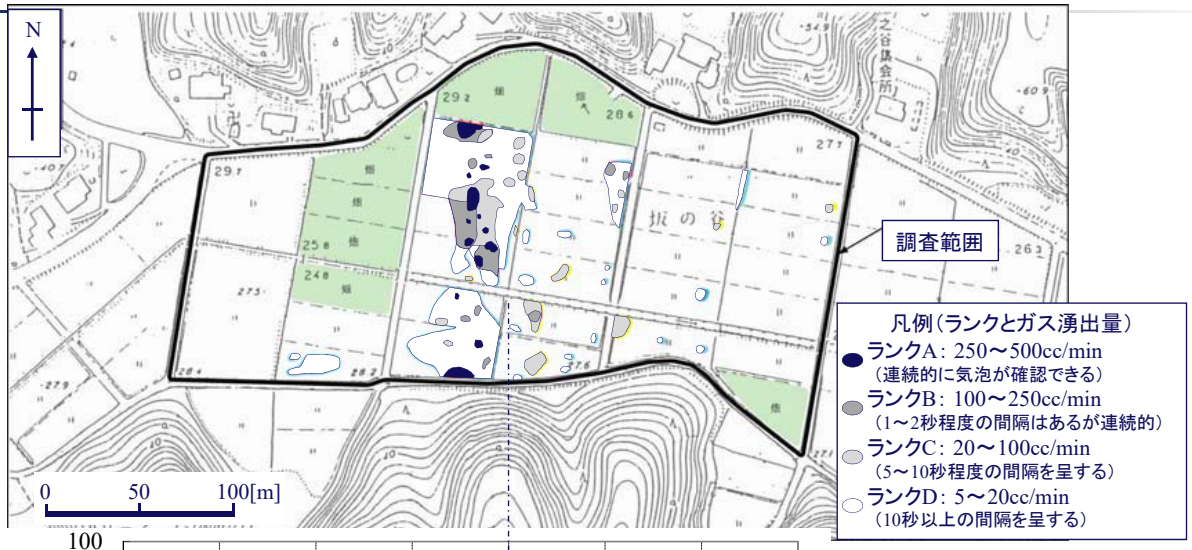
# 天然ガスの地表への湧出(ガス徴)に関するモデル

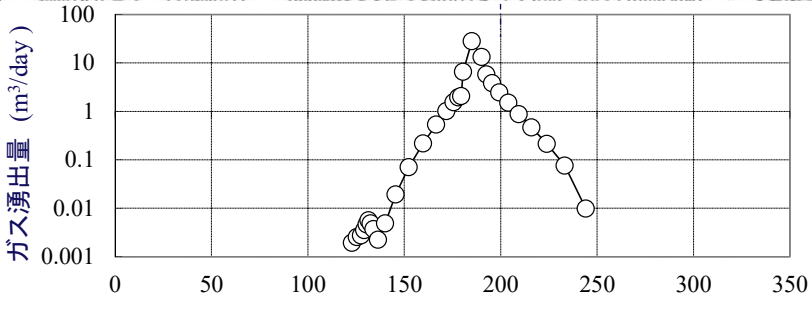



（末永他, 2013）

地質調査結果から，標高-70～0mに砂岩優勢層が分布し，これをシルト岩優勢層が覆っていること，中央部には主な3条の断層が存在し，F1とF1.5の間，ならびにF2には破砕帯があること，最上部には沖積層が分布することが考えられる．また，現場湧出ガス調査結果から，ガスは深度200m以深から供給されている可能性，地下から供給されたガスはシルト岩優勢層よりも下部に多く湧出していることが分かった．さらにシルト岩の鉛直方向の透水係数は砂岩よりも2オーダー程度小さく，断層の透水係数は砂岩よりも1オーダー程度大きいことから，ガスは深度200m以深の地下深部で発生し，断層内を上方へ移行するもののシルト岩の低透過性のためにシルト岩優勢層の下位で一旦停留し，ガス飽和率の高い領域が砂岩優勢層の上位に形成され，一部のガスは断層沿いをさらに上方へ移行し，地表に湧出するモデルが考えられた．

# ガスフラックス計算結果と実測との比較




ガス湧出が多い箇所と解析上のガス湧出フラックスのピークが一致し，フラックス測定総量は150～300m$^3$/dayとなり，計算値である70m$^3$/dayに近い．
この他，鉛直方向の間隙水圧・温度分布も再現．
⇒モデルの妥当性が示された

（末永他，2013）





# 海底$CO_2$漏洩検知・モニタリングシステム

海底音響トモグラフィ(Munk and Munsch, 1979)の原理を応用し，2箇所の音響局間の音波の伝搬時間から密度場の乱れを計測することにより$CO_2$漏洩を検知するための海底設置型音響トモグラフィ装置が開発されており(報告書本文図6.3-8)，竹富島海底温泉地帯において，海底から噴出する温泉水の検知および挙動の計測をすることが可能であることを確認している(下島，2010).

また漏洩$CO_2$モニタリングのため，複数の現場型pH/p $CO_2$センサを配したケーブルを曳航して，海中のpHやp $CO_2$をリアルタイムで観測する曳航式観測システムが開発されており(報告書本文図6.3-11)，このシステムを用いてマリアナ海域北西栄福海山山頂から噴出する液体$CO_2$の拡散挙動を観測し，作動確認している(下島，2010) .

# 漏洩$CO_2$検知・モニタリング手順

$CO_2$漏洩の検知・モニタリング手順(下島, 2010)

a) $CO_2$の海底下貯留地層上位の海底に広範囲に展開した複数の音響トモグラフィ装置を用いて，海底上の$CO_2$漏洩を検知する.
b) 海底上の$CO_2$漏洩が検知された場合，現場型pH/p$CO_2$センサやサイドスキャンソナーを搭載したAUV(Autonomous Underwater Vehicle，自律型無人潜水機)による自動マッピング観測を行い，漏洩箇所の絞込を行う.
c) $CO_2$漏洩箇所が絞込まれた後，既存のROV(Remotely Operated Vehicle：有索海中ロボット)を用いた目視観測により$CO_2$漏洩箇所を特定し，$CO_2$漏洩の規模や状態を確認する.
d) $CO_2$漏洩箇所が特定された後，その箇所において$CO_2$漏洩の状況や漏洩$CO_2$の拡散挙動のモニタリングを実施する．定期的観測は，漏洩箇所近傍で$CO_2$漏洩状況を重点的に監視する目的に適している．曳航式観測システムやROVにより定期的な漏洩$CO_2$の拡散挙動観測を行う.
e) 継続的観測は，漏洩場所近傍で$CO_2$漏洩状況の長期間にわたる変化を監視する目的に適している．海底設置型自動昇降装置によって継続的な漏洩$CO_2$の拡散挙動モニタリングを行う.





# まとめ

- 既往の$CO_2$貯留サイト評価技術のうち，サイト評価のための調査・試験方法として，事前に実施する文献調査に基づく貯留層・遮蔽層の分布や性状に関する評価方法，地下構造を推定するために用いられる物理探査手法である反射法地震探査について紹介した．また貯留可能量評価技術として，RITE等で実施されている$CO_2$貯留可能量算出方法について紹介した.

- 貯留層からの$CO_2$の万一の漏洩に関して，そのリスク低減に資する技術として，天然ガス湧出を$CO_2$漏洩の天然類似例と見た場合のガス漏洩メカニズム評価技術，貯留$CO_2$の海底面における漏洩を検知・モニタリングするための技術について紹介した.

# ご清聴ありがとうございました

© CRIEPI

「$CO_2$輸送・貯留に関する技術動向と今後の課題」

# $CO_2$地中貯留シミュレーション技術

土木学会エネルギー委員会
二酸化炭素回収・貯留(CCS)
における調査・研究小委員会

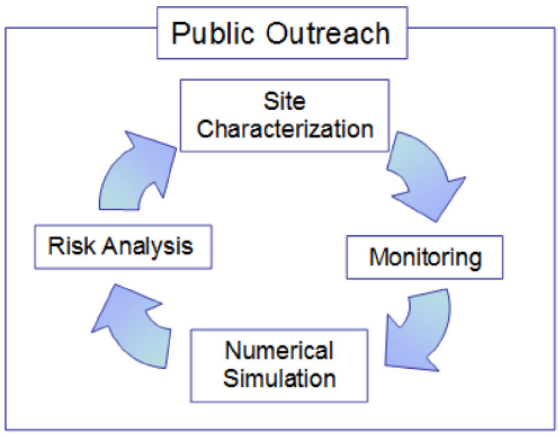
## シミュレーションの目的

貯留サイトの選定・計画段階

- 圧入可能量，移行範囲，封じ込め性能などの予測と評価

貯留開始後

- $CO_2$挙動を監視するモニタリングとあわせ、貯留$CO_2$の移行範囲や安定性を確認

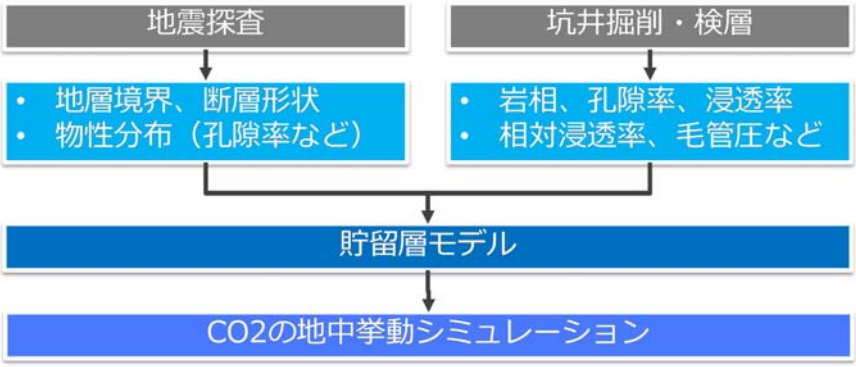



サイト特性評価、モニタリング、数値シミュレーション、リスク分析の繰り返しアプローチは、CO2貯留事業の安定かつ安全な操業や社会的な受容性にも寄与

（DOE/NETL, 2011）

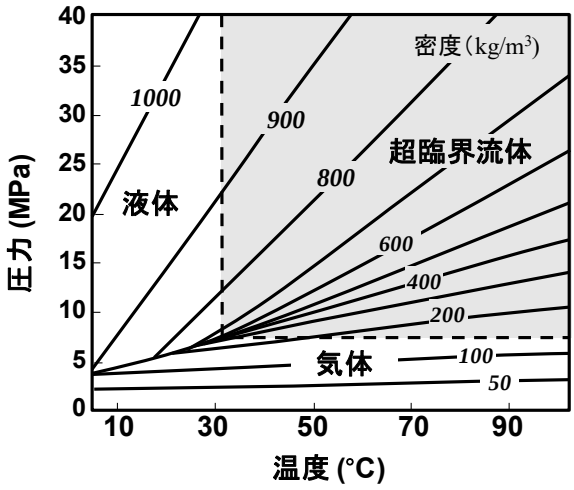
# シミュレーションの手順

- 貯留サイトで取得された地震探査や坑井データに基づいて貯留層モデルを作成
- 貯留層モデルは、地質構造や浸透率や孔隙率などの物性値の空間分布を規定
- $CO_2$の地中挙動シミュレーションは、貯留層モデルを用いた$CO_2$と水の多相流れの数値解析で行うのが一般的




# $CO_2$の物性と貯留の考え方

- $CO_2$貯留に適する地層は，遮蔽層（浸透性の低い泥岩など）で覆われた多孔質で浸透性の高い地層（砂岩層など）
- $CO_2$は圧力7.38MPa， 温度31℃以上の温度・圧力で超臨界流体となる。
- 超臨界$CO_2$は気体より密度が大きく，液体より粘性が小さいため貯留に有利
- 超臨界状態のCO2密度は概ね0.4～0.8 g/cm$^3$であり，地下水中で浮力が働く
- 貯留層の上部が泥岩層などの遮蔽層で覆われていれば，$CO_2$を貯留層内に長期間留めることが可能



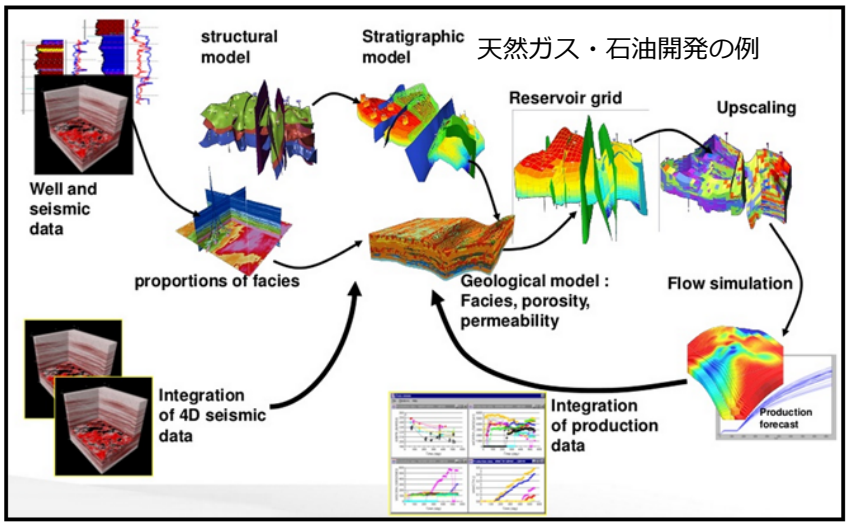
# $CO_2$のトラップ機構

- **構造・層序トラップ**：$CO_2$が低浸透性の地層（遮蔽層）の下に物理的にトラップ
- **残留ガストラップ**：気泡が貯留層の空隙に取り残されて動けなくなる
- **溶解トラップ**：地下水中に$CO_2$が溶解すると浮力を失う
- **鉱物トラップ**：炭酸塩鉱物化による固定化．ただし，炭酸塩鉱物の生成には1000年以上の長期を要すると考えられている

シミュレーションではこれらのトラップ機構の考慮が必要

# 貯留層モデル

- 坑井検層や物理探査（地震探査など）の調査データで構築
- 地層ならびに断層の面形状は主として地震探査データと坑井データを組み合わせて解釈することにより決定される。
- 物性値：貯留層の浸透率，孔隙率，相対浸透率，毛管圧力，地層水ならびに岩石鉱物の組成，温度・圧力条件など、地震探査、坑井検層に加えて、室内コア分析，坑井試験などの結果と合わせて求める
- 貯留層の孔隙率などの不均質な空間分布も、地震探査データ波形のアトリビュートなどから推定する技術も開発されて広く用いられている。




http://www.oil-gasportal.com/reservoir-management/integrated-reservoir-modeling/

# $CO_2$の地中挙動シミュレーション

種々の貯留メカニズムを考慮するため，石油や地熱開発用の多相系流体シミュレータをベースに次のような機能追加を施したものが用いられている

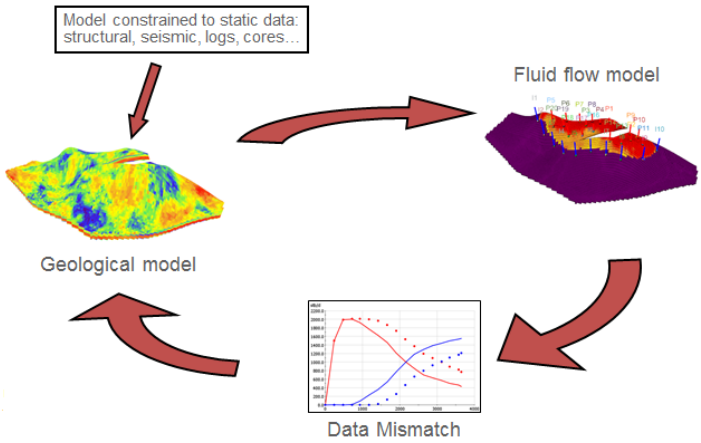
- 超臨界$CO_2$の流体物性（密度，粘性，比エンタルピーなど）
- 相対浸透率や毛管力曲線のヒステリシス（残留ガストラップ）
- 塩水中への$CO_2$の溶解（溶解トラップ）
- $CO_2$－水－岩石の地球化学反応（鉱物トラップ）

代表的な解析コード
- ECLIPSE（Schlumberger社、石油開発用を改良）
- GEM（CMG社、石油開発用を改良）
- TOUGH2（LBNL、地熱や地層処分用などの汎用コード）
- STOMP-WCSE（PNNL、地熱や地層処分などの汎用コード）

これら解析コードの比較研究（例えば, Pruess et al., 2002）により，いずれのコードでも同等の結果が得られることが示されている.

# ヒストリーマッチング

数値シミュレーションの精度は、貯留層モデルに大きく依存する。事業開始段階では十分なデータ取得は困難であり，貯留層モデルの信頼性は乏しいのが通常である．しかし，地震探査や坑底圧力などのモニタリングデータに基づいて繰り返しモデルを補正（ヒストリーマッチング）すれば，予測シミュレーションの信頼性を次第に高めることか可能になる.




http://www.oil-gasportal.com/reservoir-management/integrated-reservoir-modeling/

# シミュレーション事例

**米国Frioパイロット試験**

- 米国テキサス州のFrioパイロット試験では，$CO_2$の到達時間や２次元弾性波トモグラフィによる$CO_2$の分布状況などに対してヒストリーマッチングが実施されている.
- 観測井の$CO_2$到達時間や圧入井，観測井での圧力と$CO_2$飽和率の変化に対するヒストリーマッチングを行っている.
- シミュレーション結果は，孔間弾性波トモグラフィにより評価された貯留層内の$CO_2$分布域を良く再現している.

**ノルウェーSleipnerプロジェクト**

- 北海油田の天然ガスから回収した$CO_2$を地中に圧入（1996年～、約100万t/年）.
- Utsira砂岩と呼ばれる高浸透性（数ダルシー）、層厚100m以上の良好な貯留層貯留層内には薄い泥層を数枚はさんでいる.
- 4次元地震探査によって$CO_2$の3次元的な移動が20年の長期にわたって経時的に把握されており，これとシミュレーションとのマッチングが試みられている.

# シミュレーション事例

**長岡$CO_2$貯留プロジェクト**

- 圧入完了後の$CO_2$移行を長期にわたって観測して検証した事例は少ない.
- 我が国の新潟県長岡市で2002～2005年にかけて実施された$CO_2$貯留試験では，圧入完了後も10年以上にわたって$CO_2$挙動モニタリングを継続して貴重なデータを取得し，$CO_2$の安定性を確認している.
- 圧入中～圧入完了後の約10年間、物理検層（比抵抗検層、中性子検層、弾性波検層）、孔間弾性波トモグラフィー、地層水サンプリングが繰り返し実施されている（例えば、Sato et al., 2011)。

**モデリング比較プロジェクト SimSEQ**

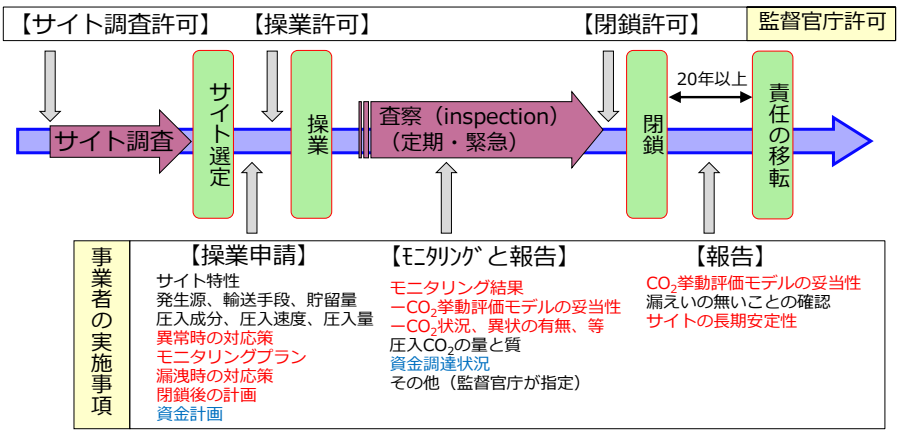
- 数値予測の信頼性に関し、シミュレーションモデルは，作成者によって着目する物理化学プロセスや地質・水理データの解釈などの違いから，大きく異なる予測結果を導く場合がある.
- 米国エネルギー省のSimSEQは，米国で行われた実証試験のデータを共有し，複数のモデリングチームによる予測結果の相互比較を通じて，CO2の地中挙動モデルに係る不確実性の程度や原因の理解を目指した国際共同研究プロジェクト，世界8か国の15チームが参加.

# まとめと今後の課題

- シミュレーション技術は、ガス・石油開発の技術をベースに進歩し、ほぼ確立されつつある
- 世界各国の実証試験や商業プロジェクトや国際的な協力、知識共有により、検証や限界の理解も進んでいる。
- シミュレーションの精度は、貯留層モデルに含まれる種々の仮定や不確実性に大きく依存する。
- 特に地下情報が不十分な操業開始前の地中挙動シミュレーション結果の不確実性には十分に注意する必要がある。この段階での予測誤差は、貯留事業の経済性あるいは安全面の成立性を大きく左右する。
- 貯留開始後は、モニタリングデータとのヒストリーマッチングによりモデルの信頼性を徐々に向上できる。

# まとめと今後の課題

- サイト閉鎖後の$CO_2$の長期安定性については、モニタリングで検証された予測シミュレーションで示すことが重要であり、例えばEUのCCS指令ではそれが民間事業者から国などへの責任移管の条件とされている。
- 長期的なシミュレーションの信頼性については、主としてフィールドでの実証データの欠如から、比較的多くの課題が残されている。例えば、$CO_2$が炭酸塩鉱物に固定化される長期的な地化学シミュレーションの検証は非常に困難である。
- ただし、このような不確実性が貯留事業の経済性や安全性に与える影響は小さいと考えられる。今後のCCSの進展と並行して時間をかけて検証されるべき課題であろう。



# $CO_2$化学的影響評価技術

平成30年1月26日

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター　地圏資源環境研究部門
徂徠 正夫

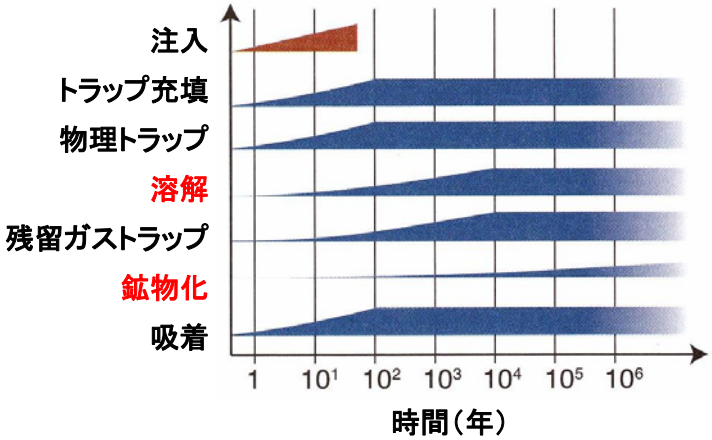




## 発表内容

- $CO_2$の地化学トラップ
- 地化学プロセスが及ぼす影響
- 地化学影響評価のためのアプローチ
- 地化学トラップの観測事例
  - 溶解トラップ
  - 鉱物トラップ（玄武岩貯留の可能性）
- 今後の課題

# $CO_2$の地化学トラップ




**溶解トラップ： 溶存態としての$CO_2$の固定**

$CO_{2\,(sc)} \rightleftarrows CO_{2\,(aq)}$

$H_2O + CO_{2\,(aq)} \rightleftarrows H_2CO_3$

$H_2CO_3 \rightleftarrows H^+ + HCO_3^-$

$HCO_3^- \rightleftarrows H^+ + CO_3^{2-}$

**鉱物トラップ： 固相としての$CO_2$の固定**

$CaAl_2Si_2O_8 + 2H_2CO_3 + H_2O \rightleftarrows Ca^{2+} + 2HCO_3^- + Al_2Si_2O_5(OH)_4$

$Ca^{2+} + 2HCO_3^- \rightleftarrows CaCO_3 + CO_{2\,(aq)} + H_2O$

$CaAl_2Si_2O_8 + 2H_2O + CO_2 \rightleftarrows CaCO_3 + Al_2Si_2O_5(OH)_4$

炭酸塩鉱物　粘土鉱物



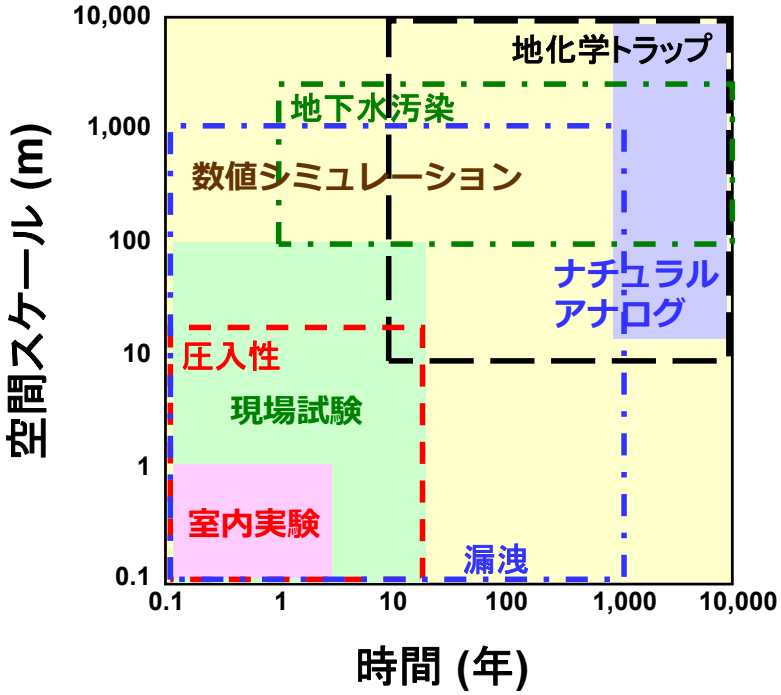


# 地化学プロセスが及ぼす影響

| 対象 | 地化学プロセス | 効果／リスク | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 圧入性 | 漏洩 | 地下水汚染 |
| 貯留層 | $CO_2$の地層水への溶解 | | | (●) |
| | $CO_2$-水-岩石相互作用 | ○/● | | (●) |
| キャップロック | $CO_2$-水-岩石相互作用 | | ● | |
| き裂／断層 | セメント物質との反応 | | ● | |
| 坑井 | セメントとの反応 | | ○/● | |
| | ドライアウト | ● | ○ | |
| 上部帯水層 | $CO_2$の地層水への溶解 | | ○ | ● |
| | $CO_2$-水-岩石相互作用 | | ○ | ● |
| | ハイドレート形成 | | ○ | |

○：プラスの影響、●：マイナスの影響

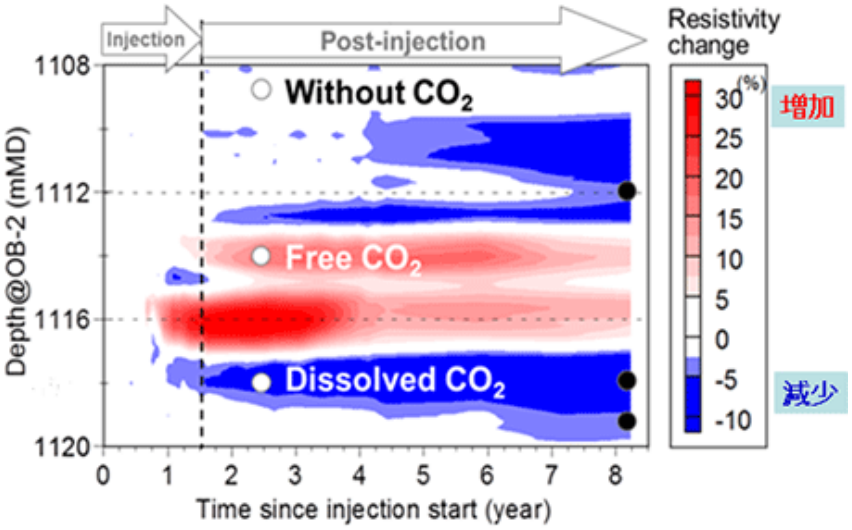
# 地化学影響評価のためのアプローチ








# 地化学トラップの観測事例（溶解トラップ）




長岡実証サイトにおける比抵抗の経時変化(RITE)

（RITEホームページ：http://www.rite.or.jp/co2storage/safety/）

- 圧入後の時間の経過とともに貯留層中の超臨界$CO_2$の飽和度が低下し、その上下の地層で超臨界$CO_2$の地層水への溶解が進行。
- 溶解トラップの観測は世界的にも例がなく、圧入後の$CO_2$の長期計測により初めて判明。

# 地化学トラップの観測事例（鉱物トラップ）

19 東京 夕刊 13版 2016年(平成28年)6月30日 木曜日 専門

## 地中にCO2 2年で石に

### 予想外の速さ、温暖化対策に新展開

アイスランドのCCSの実験場所で掘り出された岩石＝米コロンビア大提供

アイスランドのCCS（$CO_2$回収・貯蔵）の仕組みのイメージ

地熱発電所 $CO_2$ 二酸化炭素 混合 地下水 0m 400m 玄武岩質 注入 1000m

石 $CaSiO_3$ ＋ 気体 $CO_2$ 玄武岩質中のケイ酸塩鉱物 二酸化炭素 約2年 石 $CaCO_3$ ＋ 石 $SiO_2$ 炭酸塩 二酸化ケイ素 カルシウムと反応する場合

### 高い安定性 貯蔵の弱点解消か

米コロンビア大

地球温暖化の原因となる二酸化炭素（$CO_2$）を地中に注入したら2年で石になった――。米コロンビア大などが10日付の米科学誌サイエンスに発表した研究報告が世界を驚かせている。$CO_2$回収・貯蔵（CCS）と呼ばれる技術の「弱点」を解消する可能性があるからだ。温暖化対策の切り札になるのか。

「$CO_2$を水溶と固定化する新しいアプローチだ」米マイクロソフト創業者で地球環境問題の解決をめざすビル・ゲイツ氏は、論文が掲載されると、フェイスブックでこう紹介した。

実験が行われたのは、アイスランドの首都レイキャビクから東へ25キロの地熱発電所。発電に使う高空熱水のくみ上げに伴って、$CO_2$や硫化水素などを含む火山性ガスが発生する。

米コロンビア大などの研究チームは、この発電所から出た$CO_2$約2330トンを水に溶かして、近くの地下400～800メートルに圧力をかけて注入した。ボーリングをして、注入地にまぜた放射性炭素などを追跡すると、2年以内に$CO_2$の95％以上が炭酸塩鉱物になっていたという。

鉱物化した理由は、地下の玄武岩質の岩石に含まれるカルシウムやマグネシウムなどが多くある、ケイ酸塩鉱物が多く含まれる地下水を注入すると、カルシウムやマグネシウムなどの成分が溶け出し、$CO_2$と反応して炭酸塩鉱物になる。

$CO_2$の鉱物化を研究する貯留研究グループの藤井孝志・主席研究員は、予想以上に早く鉱物化することが現実験で分かったことで「地中貯留の長期安全性に大きく寄与する」と話す。

玄武岩質は陸地の約10％と極端のほとんどを覆っている。研究チームのマーティン・スチュート氏は「これが自然の解決法」といい、「つくりだすはずはない、大きな資産をまるごろう」と話した。

### 分離回収コスト課題

新しい温暖化対策の国際枠組み「パリ協定」は、気温上昇を2度未満に抑える目標を掲げる。CCSは石炭・天然ガス・石油などの化石燃料依存から抜け出すための「つなぎの技術」として重要性が高まっている。

課題はコストだ。アイスランドの実験は1トンあたり30ドル（約3千円）程度だったが、化石燃料から$CO_2$を分離回収する場合は60～130ドルに上がるという。

日本では2020年ごろのCCS実用化を目指し、電力や石油会社など36社で作る日本CCS調査が今年4月に北海道苫小牧市沖で実証試験を始めた。製油所から分離した$CO_2$を海底下千メートル近くの地層に年間10万トン程度圧入する。物理的に安全に閉じ込めることが重視され、鉱物化を期待したものではない。RITEの試算ではCO2トン当たり7300円。6割は$CO_2$の分離回収にかかる。経済産業省は20年までに分離回収コストを2千円台に下げる目標だ。

$CO_2$はこれまで大気中に自由に捨てていた。経産省でCCS事業に携わった東京電力大の名久井忠教授は「今のままでは自発的に事業化する会社はない」と話す。排出量の規制や炭素税、補助金などで実現を後押しする仕組みが必要だとみている。（西尾啓介）

技術を社会へ－Integration for Innovation

**CarbFixプロジェクト（アイスランド）**

**貯留層： 深度 400～800 m、20～33ºC**
**浸透率：水平0.3 darcy、鉛直1.7 darcy**
**Phase I: $CO_2$ 175トン+$H_2O$（2012年1～3月）**
**Phase II: $CO_2$ 55トン+$H_2S$+$H_2O$（2012年6～8月）**

**550日以内に圧入$CO_2$の95%以上が炭酸塩化**

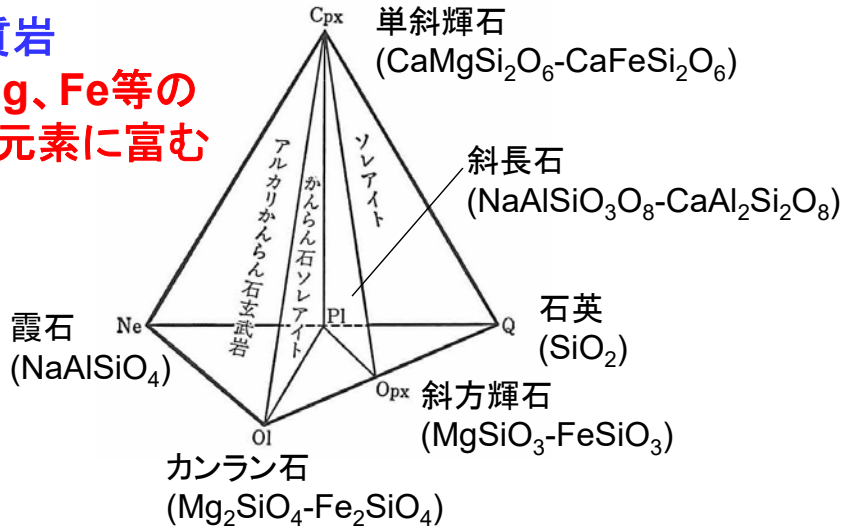




# 玄武岩とは

【組成】全岩$SiO_2$量が45～52 wt%、$Na_2O+K_2O<5$ wt%の火山岩

**苦鉄質岩**
**Ca、Mg、Fe等の2価の元素に富む**




【産地】大陸： 洪水玄武岩、ホットスポット、島弧
海洋： 海嶺、海洋底

# 玄武岩貯留における課題と解決策

| 項 目 | 課 題 | 想定される解決策 |
|---|---|---|
| 貯留ポテンシャル | ・一般的に玄武岩は堆積岩と比較して、孔隙率・浸透率が著しく低い。<br>・仮に圧入により直ちに炭酸塩化が進めば、圧入井近傍の浸透率が低下し、圧入自体が困難になる。 | ・水圧破砕等による孔隙率・浸透率の向上（微小地震を起こさないことが前提） |
| 貯留サイト | ・玄武岩の産出地域は必ずしも$CO_2$排出源に近くない。<br>・海洋底は玄武岩でできているが、そのような深い深度の硬い岩盤中に$CO_2$を圧入することは技術的に困難。 | ・高精度の適地選定（貯留ポテンシャル、漏洩経路となるチムニー等の回避）<br>・海底下大深度での圧入技術、モニタリング技術の確立 |
| 炭酸塩化（反応性） | ・大容量の$CO_2$の炭酸塩化には、大容量の水が必要。<br>・効率的に炭酸塩化させるためには、$CO_2$と水の混合や交互の圧入が不可欠。 | ・地熱域などの高温環境、あるいは高アルカリ環境の選定<br>・炭酸塩化促進物質の選定<br>・微生物活動の活用 |





# 今後の課題

## 地化学プロセスの特徴

- 漏洩に対してより安全な溶存態や固体などの形態に$CO_2$を移行させる
- 貯留層そのものの水理特性を変化させる

## 地化学プロセス応用の可能性

- 貯留層鉱物の溶解 ⇒ 圧入性の改善
- $CO_2$のゲル化・鉱物化 ⇒ 緊急時の$CO_2$漏洩停止
- $CO_2$の鉱物化促進 ⇒ モニタリングの早期終了

**地化学プロセスを活用した$CO_2$の増進貯留技術の開発**

**(ECS: Geochemically Enhanced $CO_2$ Storage)**

土木学会エネルギー委員会二酸化炭素回収・貯留(CCS)における調査・研究小委員会　報告会
「CO2輸送・貯留に関する技術動向と今後の課題」
平成30年1月26日, 東京

# CO2モニタリング技術－現状と課題－

高橋　亨
（公益財団法人 深田地質研究所）

# 話の内容（報告書の構成）

- モニタリングの目的 (5.5.1)
- モニタリング技術 (5.5.2)
- 最適なモニタリング技術の選択 (5.5.3)
- モニタリング技術の適用の現状と課題 (5.5.4)
- 今後の課題と展望 (6.1.1-6.1.3の一部)

# モニタリングの目的（5.5.1）

表 5.5-1　モニタリングの目的（當舎・中尾(2008)を一部修正）

| 事業の段階 | 想定される期間 | モニタリングの目的 |
|---|---|---|
| 圧入前 | 3-5年間 | ・環境影響評価<br>・貯留層モデルの改良<br>・貯留計画の見直し<br>・ベースライン測定 |
| 圧入中 | 5-50年間 | ・安全で効果的な操業の実現（操業管理）<br>・貯留されたCO2の分布や量の把握<br>・貯留量の検証<br>・海中や大気中への漏洩の確認<br>・サイト周辺地域のHSE基準のクリアー<br>・貯留層モデルの改良<br>・関係者の信頼性の確保(PA) |
| 圧入後 | 50-100年間 | ・圧入中の目的に加え、閉鎖判断のための情報提供 |
| 閉鎖後 | 10,000年 | （原則不要と考えるが、今後の検討課題） |

# モニタリング技術（5.5.2）

- **物理探査法**

  それぞれの手法が対象とする物性（例えば、地震探査であれば、地層の弾性的特性）の違いに着目して、地下に圧入されたCO2を検知する手法。例えば、CO2は弾性波速度や密度が小さく、比抵抗は大きい。

- **測位・地形解析**

  圧入されたCO2が原因で生じる地表あるいは海底面の変位を検知し、その変動範囲や変位量から地下のCO2の分布範囲や貯留量を推定する技術。

- **孔内流体・地球化学・生物学的調査**

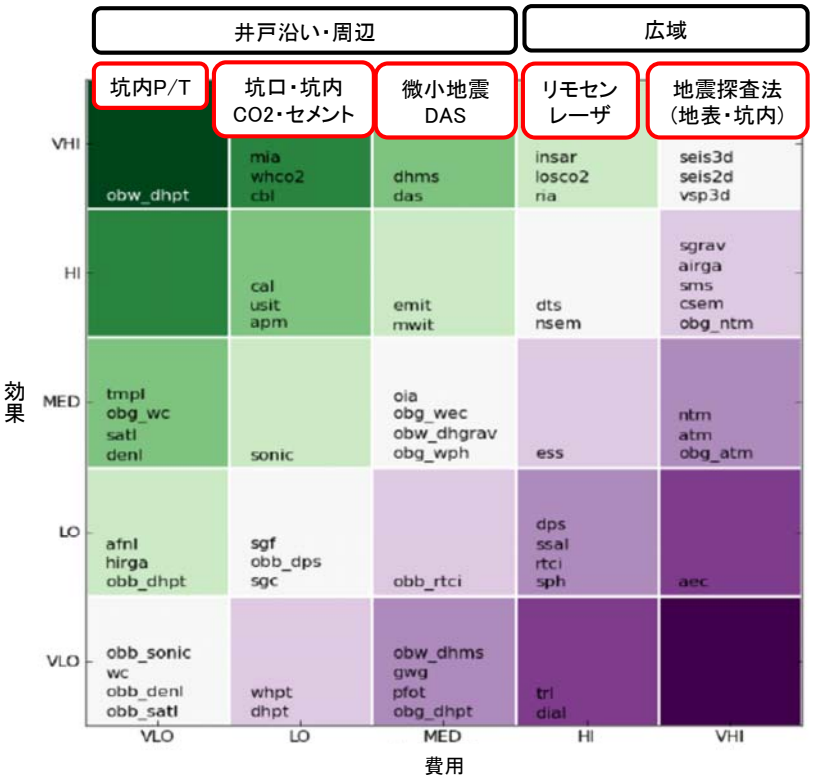
  孔内流体や土壌・大気中のCO2を直接計測し、CO2の漏洩を監視する技術。CO2が漏洩した場合、サイト周辺の生態に変化が生じる可能性があるため、生態の変化をモニタリングする。

# モニタリング技術（5.5.2）

表 5.5-2　適用実績のあるモニタリング手法

| 手法 | | 場所 | 測定方法 | 把握可能な情報 |
|---|---|---|---|---|
| 物理探査 | 地震探査<br>（能動的探査） | 地表<br>海上<br>海底 | ・3D/4D反射法<br>・(繰り返し)2D反射法<br>・3C/4D反射法 | ・地質構造、<br>・貯留層/キャップロックの構造<br>・*CO2の分布範囲・飽和度* |
| | | 孔内 | ・(繰り返し)3DVSP<br>・(繰り返し)トモグラフィ | ・孔周辺/孔間の地震波速度分布、地質構造<br>・*孔周辺/孔間のCO2分布範囲・飽和度* |
| | 地震探査<br>（受動的探査） | 地表<br>海底 | ・(繰り返し)微動探査 | ・地質構造<br>・地層のS波速度構造、*強度分布* |
| | | 孔内 | ・(連続)微小地震観測 | ・微小地震の震源分布、・*CO2フロント位置、地殻応力* |
| | 電気／電磁探査 | 地表 | (繰り返し)電気/電磁探査 | ・地質構造、・*CO2の分布範囲・飽和度* |
| | | 孔内 | (繰り返し)トモグラフィ | ・孔間の比抵抗分布、・*孔間のCO2分布範囲・飽和度* |
| | 重力探査 | 地表<br>海底 | (繰り返し)重力探査<br>(連続)重力測定 | ・地下の密度分布<br>・*孔間のCO2分布範囲* |
| | 検層 | 孔内 | (繰り返し)検層 | ・孔周辺の地層の物性変化、*CO2の分布範囲* |
| 測位地形 | リモートセンシング | 地表 | (繰り返し)地表変位観測 | ・地表変動、・*CO2の分布範囲*、・*地層の変形特性* |
| | 海底地形測定 | 海底 | (繰り返し)海底地形測位・測深<br>(繰り返し)サイドスキャンソナー | ・海底面変動<br>・*CO2の分布範囲* |
| | 地表傾斜 | 地表 | (繰り返し)地表傾斜測定 | ・地表変動、・*CO2の分布範囲* |
| 孔内流体地球化学生物 | 孔内流体 | 孔内 | (連続)温度/圧力測定<br>(繰り返し)流体組成分析 | ・孔口、孔内での温度、圧力変化<br>・孔内流体組成変化 |
| | 地球化学的調査 | 地表<br>海中<br>孔内 | (繰り返し)地下水分析 | ・地下水位<br>・水質変化 |
| | | 地表 | (連続/繰り返し)土壌ガス測定 | ・土壌ガス成分の変化 |
| | | 地表 | (連続/繰り返し)地表ガス測定 | ・地表でのCO2濃度の変化 |
| | 生物学的調査 | 地表<br>海底 | (繰り返し)生態/植生調査 | ・生態、植生の変化 |

# 最適なモニタリング技術の選択（5.5.3）




適用可能技術（61手法）のランキング

| Value | Ranking | |
|---|---|---|
| 4.4 | obw_dhpt | Down-hole pressure-temperature monitoring |
| 2.8 | whco2 | Well-head CO2 monitoring |
| 2.8 | cbl | Cement bond Log |
| 2.7 | mia | Multi-spectral image analysis |
| 2.7 | apm | Annulus pressure monitoring |
| 1.9 | obg_wc | Water chemistry monitoring |
| 1.9 | tmpl | Time-lapse temperature logging |
| 1.6 | usit | Time-lapse ultrasonic casing imaging |
| 1.5 | cal | Time-lapse multi-finger caliper |
| 1.5 | insar | Interferometric Synthetic Aperture Radar |
| 1.4 | obb_dhpt | Down-hole pressure-temperature monitoring |
| 1.4 | satl | Time-lapse saturation logging |
| 1.3 | dhms | Down-hole microseismic monitoring |
| 1.2 | emit | Time-lapse EM casing imaging |
| 1.1 | afnl | Time-lapse annular flow noise logging |
| 1.1 | denl | Time-lapse density logging |
| 1.1 | sonic | Time-lapse sonic logging |
| 1.1 | das | Distributed acoustic sensing |
| 1.0 | ria | Radar image analysis |
| 0.9 | mwit | Mechanical Well Integrity Testing |
| 0.9 | losco2 | Line-of-sight CO2 gas flux monitoring |
| 0.7 | obb_satl | Time-lapse saturation logging |
| 0.5 | obb_sonic | Time-lapse sonic logging |
| 0.5 | obg_wec | Down-hole electrical conductivity monitoring |
| 0.4 | dts | Distributed temperature sensing |
| 0.4 | obb_denl | Time-lapse density logging |
| 0.1 | vsp3d | Time-lapse 3D vertical seismic profiling |
| 0.1 | sgc | Soil CO2 gas concentration surveys |
| 0.1 | hirga | Hand-held infra-red gas analysers |
| 0.1 | nsem | Magnetotelluric - natural source EM |
| 0.1 | obg_wph | Down-hole pH monitoring |
| 0.1 | sgf | Soil CO2 gas flux surveys |
| -0.1 | oia | Operational integrity assurance system |
| -0.1 | seis2d | Time-lapse 2D surface seismic |
| -0.2 | seis3d | Time-lapse 3D surface seismic |
| -0.2 | obw_dhgrav | Time-lapse down-hole microgravity |
| -0.2 | sgrav | Time-lapse surface microgravity |
| -0.3 | obb_dps | Fibre-optic distributed pressure sensing |
| -0.4 | wc | Water chemistry monitoring |
| -0.6 | obb_rtci | Real time casing imager |
| -0.9 | whpt | Well-head pressure-temperature monitoring |
| -0.9 | airga | Airborne infra-red laser gas analysis |
| -1.0 | sms | Surface microseismic monitoring |
| -1.0 | dhpt | Down-hole pressure-temperature monitoring |
| -1.1 | obg_dhpt | Down-hole pressure-temperature monitoring |
| -1.2 | ess | Ecosystem Studies |
| -1.3 | obg_atm | Artifical tracer monitoring |
| -1.4 | obg_ntm | Natural tracer monitoring |
| -1.5 | csem | Time-lapse surface controlled source EM |
| -1.5 | gwg | Ground water gas monitoring |
| -1.6 | atm | Artifical tracer monitoring |
| -1.6 | pfot | Pressure fall-off test |
| -1.8 | ntm | Natural tracer monitoring |
| -1.9 | dps | Fibre-optic distributed pressure sensing |
| -2.2 | tri | Tracer injection and gamma logging |
| -2.3 | rtci | Real time casing imager |
| -2.6 | ssal | Soil salinity monitoring |
| -2.6 | sph | Soil pH monitoring |
| -2.7 | obw_dhms | Down-hole microseismic monitoring |
| -3.1 | aec | Atmospheric eddy correlation |
| -3.2 | dial | DIAL - Differential absorption LIDAR |

モニタリング技術の効果と費用のマトリックス（Shell,2011）

# 最適なモニタリング技術の選択 (5.5.3)

## Monitoring Selection Tool

| HIDE PANEL | You are not logged-in | LOGIN | Enter scenario name here ... | NEW | | | RUN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|

| Reservoir location | Reservoir depth | Reservoir type | Landuse at site | Monitoring phase | Monitoring aims | | Tool package |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (●) Onshore | (●) 0.5-1.5 km | (●) Aquifer | ( ) Settled | ( ) Pre-injection | [x] Plume | [ ] Calibrate | (●) Core |
| ( ) Offshore | ( ) 1.5-2.5 km | ( ) Oil | ( ) Agricultural | (●) Injection | [x] Top-seal | [x] Leakage | ( ) Extra |
| ( ) Both | ( ) 2.5-4 km | ( ) Gas | ( ) Wooded | ( ) Post-injection | [x] Migration | [ ] Seismicity | ( ) All |
| | ( ) >4 km | ( ) Coal | ( ) Arid | ( ) Closure | [ ] Quantify | [ ] Integrity | |
| | | | ( ) Protected | | [ ] Efficiency | [ ] Confidence | |

| 0.2 | Injection rate (Mt/year) | 3 | Duration (years) | EXPORT CSV | BENCHMARK | TOOL CATALOGUE | HELP | PRINT |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

| | |
|---|---|
| Scenario name | Enter scenario name here ... [2016-08-19 02:49:33] |
| Location | Offshore |
| Depth | 500 to 1500 m |
| Type | Aquifer |
| Quantity | 0.600 Mt (0.200 Mt/yr for 3.0 yrs) |
| Package | Non-protected+Syn-injection+Core |

| Tool | Rating % | Plume | Seal | Migration | Leakages |
|---|---|---|---|---|---|
| 3D surface seismic | 54 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 0.7 |
| Downhole pressure/temperature | 38 | 1.0 | 4.0 | 1.0 | 0.0 |
| Downhole fluid chemistry | 33 | 0.7 | 1.3 | 1.3 | 2.0 |
| Geophysical logs | 31 | 1.0 | 2.0 | 2.0 | 0.0 |
| 2D surface seismic | 29 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 0.7 |
| Bubble stream detection | 10 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 1.3 |
| Multibeam echo sounding | 6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.0 |

図 5.5-1 IEAGHGのウェブサイトのSelection toolでの選定結果例(IEAGHG,2016)

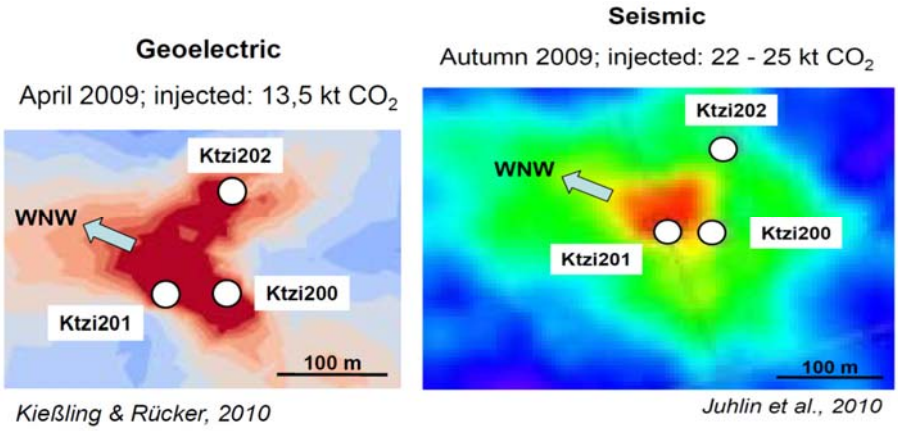
# モニタリング技術の適用の現状と課題 (5.5.4)

| | 名称 | 国 / 貯留層の種類 / 操業開始(年) | 貯留層の条件 | | | | | | | | 地下(貯留層)のモニタリング | | | | | | | | | 地表(付近)のモニタリング | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | 地震探査法 | | | | | 地震探査以外／孔内測定 | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | 4D反射法 | | 2D反射法 | VSP CWトモグラフィ | 受動/微小地震 | 電気/電磁 | 重力 | 検層 | 孔内流体 | 海底地形等 | 地表傾斜 | リモートセンシング | 地球化学的調査 | 生物学的調査 |
| | | | 地表条件 | 深度(m) | 層厚(net pay)(m) | 地質 | 透水係数(mD) | 間隙率(%) | 注入CO2量(Mt/年) | 注入CO2総量(Mt)(計画を含む) | 地表/海上 | 海底 | | | | | | | | | | | | |
| 商業段階 | In salah | アルジェリア 枯渇ガス層 2004 | 陸 | 1850～1950 | 20 | 亀裂性砂岩 | 10 | 13～20 | 1.2 | 2.5 (at 2008) | ● | | | ● | ● | | ● | | ● | | ● | ● | ● | ● |
| 商業段階 | Sleipner | ノルウェー 帯水層 1996 | 海 | 1012 | 250 (90) | 砂岩 | 1000～3000 | 30～40 | 1 | 1.1 (at 2009) | ● | | ● | | | ● | ● | | | ● | | | | ● |
| 商業段階 | Snøhvit | ノルウェー 帯水層 2002 | 海 | 2550 | 60 (50) | 砂岩 | 450 | 13 | 0.7 | 23 | ● | ● | | | | | ● | | | | | | | |
| 商業段階 | Weyburn | カナダ 枯渇油田 2000 | 陸 | 1450 | 16～28 | 石灰岩 苦灰岩 | 50 10 | 10 29 | 10000 t/d | 12 (at 2008) | ● | | | ● | ● | | | | ● | | | | ● | |
| 商業段階 | Gorgon | オーストラリア 帯水層 2008 | 海 陸 | 2500 | 200-500 | 砂岩 | 20-30 | 20 | 3.4 | 120 | ● | | ● | ● | | | | | | | | | ● | |
| 研究段階 | 長岡 | 日本 帯水層 2000 | 陸 | 1100 | 60 (12) | 砂岩 | (平均) 7 | 23 | 40t/d | 0.0104 | ● | | | ● | | ● | | ● | ● | | | | | |
| 研究段階 | 苫小牧 | 日本 帯水層 2016 | 海 | 1150 2700 | 100 600 | 砂岩 火山岩 | 17 2.7 | 28 12.5 | 0.1-0.2 | 0.5 | ● | ● | ● | | ● | | ● | | ● | ● | | | ● | ● |
| 研究段階 | Frio | 米国 帯水層 2004 | 陸 | 1500 | 24 (7) | 砂岩 | 2.5 | 24 | 160t/d | 0.0016 | | | | ● | | ● | | ● | ● | | | | ● | |
| 研究段階 | Ketzin (CO2SINK) | ドイツ 帯水層 2008 | 陸 | 630～710 | 80 | 砂岩 | 0.02～5000 | 5～35 | 0.01～0.03 | 0.6 | ● | | | ● | ● | ● | | | ● | | | | ● | ● |
| 研究段階 | Otway | オーストラリア 枯渇油ガス田 2005 | 陸 | 2000 | | 砂岩 | | | | 0.1 | ● | | | ● | ● | | | | ● | | | | ● | |
| 研究段階 | Lost Hills | 米国 枯渇油田 2000 | 陸 | 490～560 | | 珪藻質砂岩 | 0.1～20 | | 125M m3/d | | | | | ● | | ● | | | ● | | | | | |
| 研究段階 | Aneth | 米国 枯渇油田 2007 | 陸 | 1700 | 60 (12) | 炭酸塩岩 | ～10 | 5～30 | 0.136 | | | | | ● | ● | ● | | | ● | | | | ● | |

図 5.5-2 モニタリング技術の適用実績(●印で示された手法)(薛, 2013を一部修正)

# モニタリング技術の適用の現状と課題（5.5.4）
## －物理探査法－

地下1000mを超える地層に圧入されたCO2を検知する場合、**探査が実施できる測定場所の違いによってその地層分解能が大きく異なることに留意する必要がある**。一般的に、地表からの探査では、地層分解能は1～100m程度、ボーリング孔間で実施するトモグラフィでは、数10cm～数10mであるのに対して、ボーリング孔内での測定手法である検層では、数cm～数10cmと高い。反面、検層ではボーリング孔周辺数10cm程度以内の探査しかできず、広範囲におよぶ貯留層全体を把握するためには、地表探査との併用が不可欠である。**モニタリングを計画する場合、これら各手法の特徴を理解したうえで立案する必要がある。**



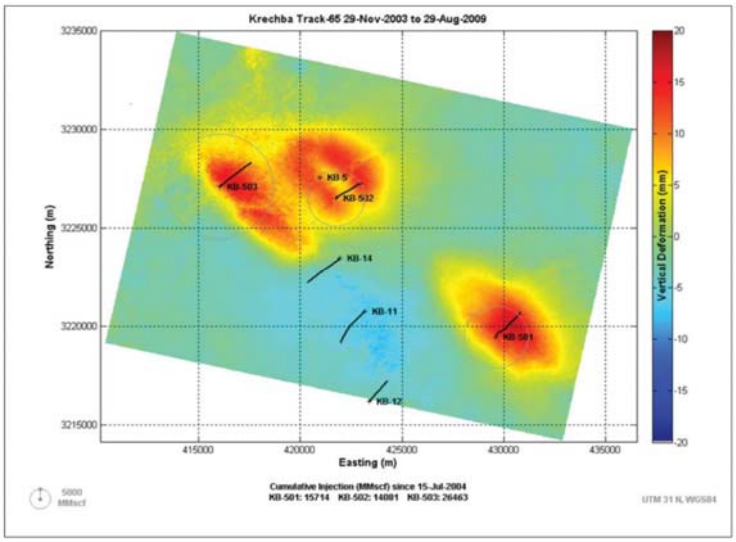

貯留層：630-710m(80m)

電気探査結果（赤色：高比抵抗）　　3D反射法地震探査探査結果（暖色系：低速度、寒色系：高速度）

図 5.5-7　Ketzinにおける3次元探査により推定されたCO2の拡がり（Matrtens and Ketzin team, 2010）

# モニタリング技術の適用の現状と課題（5.5.4）
## －測位・地形解析－

リモートセンシング技術の1つである衛星データを利用した**干渉SAR（合成開口レーダ）解析により、繰り返し圧入サイト周辺の地表変動を計測し、圧入状況のモニタリングに利用された例**が報告されている（下図）。地表の傾斜測定は、高精度傾斜計等を利用して、地表面の傾斜変化を継続的に観測し、圧入による地表の傾斜変化をとらえるという手法である。しかしながら、傾斜計を多くの地点に設置することは難しいため、上記リモートセンシングにより検知された地表変位の検証のための計測等への適用が考えられる。一方、**リモートセンシングは、陸域サイトしか適用できないため、海域では広範囲の海底面地形を高精度にイメージングできるサイドスキャンソナー等が利用されている**。




圧入層：1850-1950m（20m）
圧入井：KB-501, 502, 503
変位速度：3mm/year

図 5.5-10　In Salahにおける干渉SARデータの解析結果（2003年と2009年の差）（Mathieson et al., 2010）

# モニタリング技術の適用の現状と課題（5.5.4）
## －孔内流体・地球化学・生物学的調査－

**圧入時の孔口および孔内流体の温度・圧力のモニタリングは、安全かつ効率的な圧入を実現するための操業管理技術の1つとして利用されている**。地球化学的モニタリング項目として、観測井での孔内水の水位計測や組成分析、圧入サイト周辺の土壌中や空気中のCO2の濃度測定は、CO2の漏洩監視のための直接的なモニタリング手法として多くのサイトで実施されている。**サイト周辺の環境影響評価基準やHSE基準を満たすことを確認するためにも圧入前から継続的に実施される必要がある**。CO2が漏洩すると生態系への影響も懸念されるため、サイト周辺の植生などの生態変化のモニタリングも行われる場合がある。このような**地球化学的，生物学的モニタリングは陸域だけでなく，海域でも行われる**。

圧入層：1450m(16-28m)
観測：2001-2003間に3回
観測点：360点／16km2

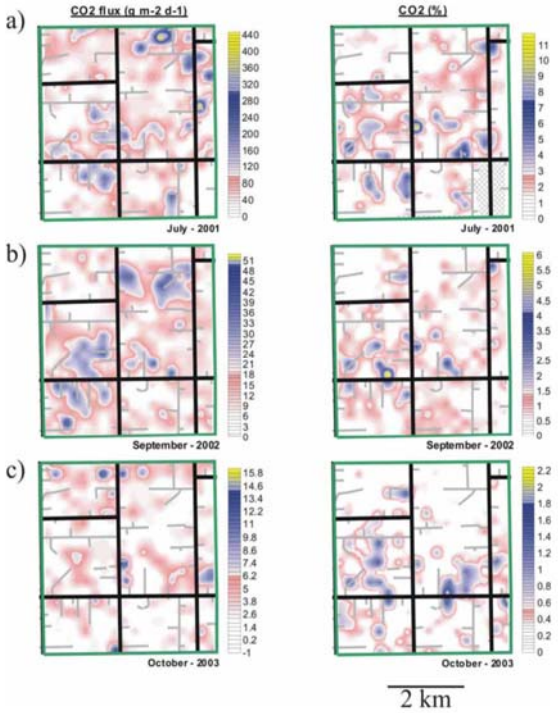



図 5.5-11　Weyburnにおける3回のモニタリング時(a,b,c)のCO2のフラックス（左）および土壌中のCO2ガス（右）の測定結果（Wilson and Monea, 2004）

# 今後の課題と展望（6.1.1-6.1.3の一部＋高橋私見）

- モニタリングの期間や繰り返し間隔の合理的決定
  - 事例研究を通じた経験的な挙動予測
  - ヒストリーマッチングによるモデル精度向上を通じた理論的挙動予測
- 複数の技術の効果的な併用や定量解析の向上
  - 3D反射法を補完する2D反射法や3DVSPの利用など
  - 貯留層モデル構築における物理モデルの活用など
- モニタリングコストの低減
  - 効果の大きいモニタリング技術のコスト低減化

例えば、

・小規模反射法システムの利用による3D探査
・雑微動を利用した反射法探査やVSP
・貯留層や遮蔽層だけにフォーカスした効果的モニタリング技術の開発
・・・

# CO2モニタリング技術－現状と課題－

ご清聴ありがとうございました。詳細については、報告書をご参照ください。

高橋　亨
（公益財団法人 深田地質研究所）