

# ハイドレートメカニズムを利用した CO<sub>2</sub>地中貯留に関する研究

2020年10月14日

電源開発（株）技術開発部 茅ヶ崎研究所

鳥羽瀬 孝臣

---

## 1. CCS (CO<sub>2</sub>地中貯留) に関する背景

2. CO<sub>2</sub>ハイドレート貯留の概念

3. CO<sub>2</sub>ハイドレート貯留の研究課題

# 第5次エネルギー基本計画（2018年7月閣議決定）



## 情勢変化

①脱炭素化に向けた  
技術間競争の始まり

②技術の変化が増幅  
する地政学リスク

③国家間・企業間  
の競争の本格化

### 2030年に向けた対応

～温室効果ガス26%削減に向けて～

～エネルギー・ミックスの確実な実現～

- 現状は道半ば
- 計画的な推進
- 実現重視の取組
- 施策の深掘り・強化

### 2050年に向けた対応

～温室効果ガス80%削減を目指して～

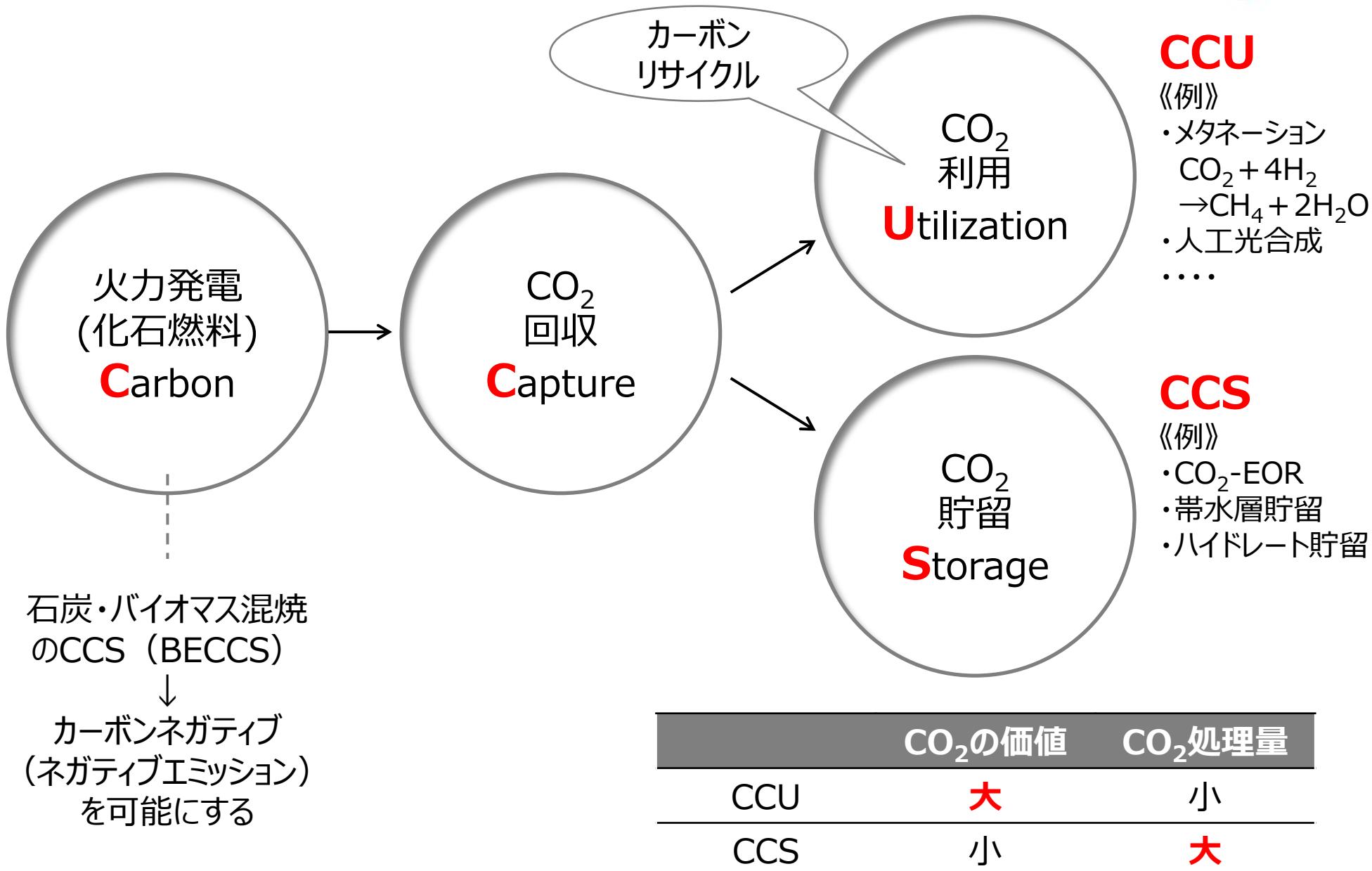
～エネルギー転換・脱炭素化への挑戦～

- 可能性と不確実性
- 野心的な複線シナリオ
- あらゆる選択肢の追求
- 科学的レビューによる重点決定

## 第3章 2050年に向けたエネルギー転換・脱炭素化への挑戦

2050年シナリオに伴う不確実性、先行する主要国情勢から得られる教訓、我が国固有のエネルギー環境から判断し、再生可能エネルギーや水素・CCS、原子力など、あらゆる選択肢を追求する「エネルギー転換・脱炭素化を目標とした全方位での野心的な複線シナリオ」を採用する。

# CCUS (Carbon Capture and Utilization/Storage)



## CCU

《例》

- ・メタネーション  
 $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
- ・人工光合成
- ....

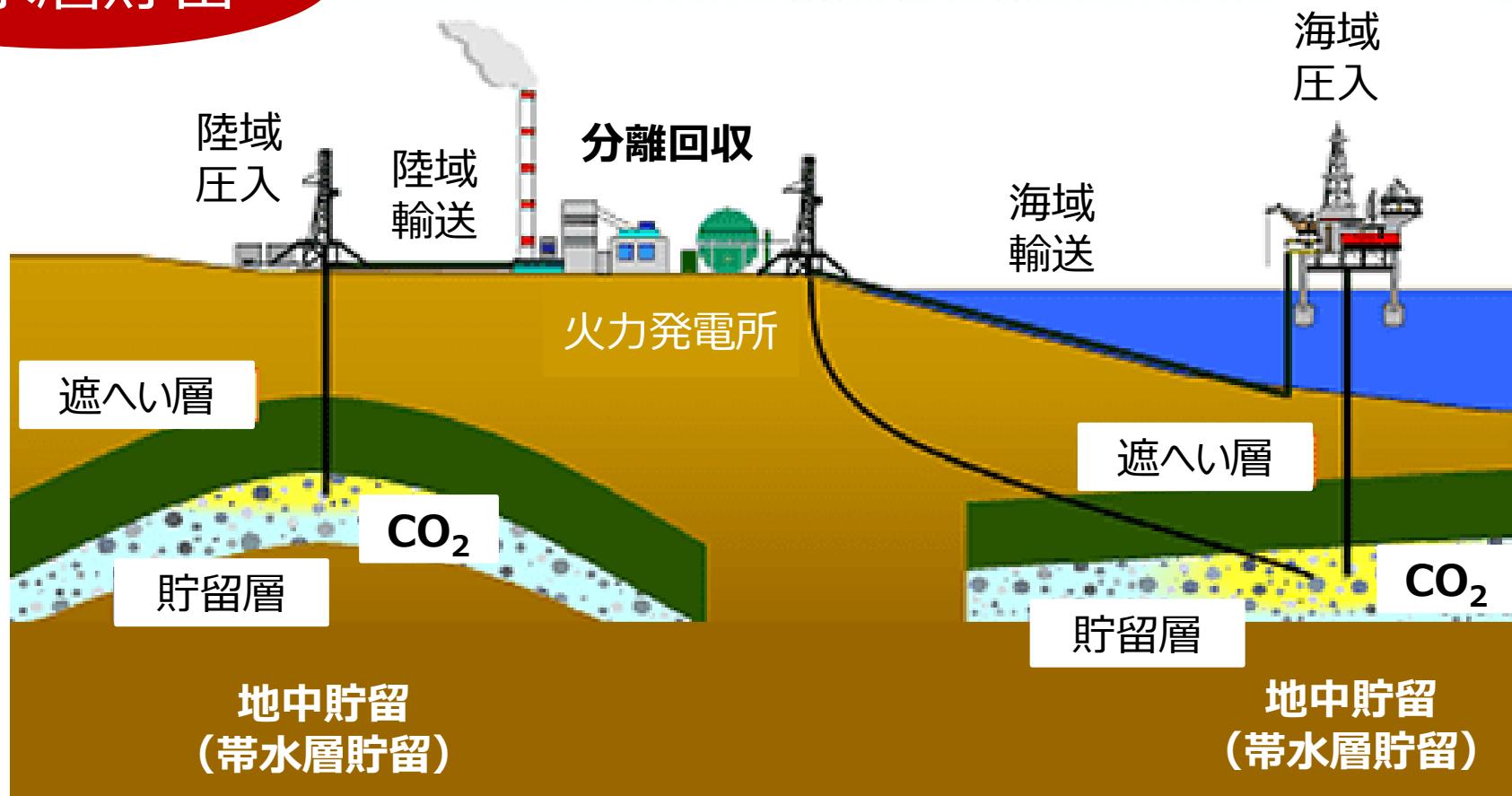
## CCS

《例》

- ・CO<sub>2</sub>-EOR
- ・帶水層貯留
- ・ハイドレート貯留

化石燃料（石炭等）を使って発電しても、CO<sub>2</sub>を大気中に排出しない

## 帯水層貯留



# 世界の主要なCCSプロジェクト（帯水層貯留）



表1 世界の大規模CO2貯留事業（2018年に運転中のもの）

	名称	開始年	国	貯留	処理量 トン/年	排出量
1	Val Verde Natural Gas Plants	1972	米国	油ガス田 (EOR)	130万	天然ガス
2	Enid Fertilizer	1982	米国	油ガス田 (EOR)	70万	肥料生産
3	Shute Creek Gas Processing Facility	1986	米国	油ガス田 (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	油ガス田 (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	油ガス田 (EOR)	840万	天然ガス
8	Air Products	2013	米国	油ガス田 (EOR)	100万	水素製造
9	Coffeyville Gasification Plant	2013	米国	油ガス田 (EOR)	100万	肥料生産
10	Lost Cabin Gas Plant	2013	米国	油ガス田 (EOR)	90万	天然ガス
11	Petrobras Lula	2013	ブラジル	油ガス田 (EOR)	約100万	天然ガス
12	Boundary Dam	2014	カナダ	油ガス田 (EOR)	100万	発電所
13	Uthmaniayah	2015	サウジアラビア	油ガス田 (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	油ガス田 (EOR)	80万	製鉄所
16	Petra Nova	2016	米国	油ガス田 (EOR)	140万	発電所
17	Illinois Industrial	2017	米国	陸上帯水層	100万	化学品生産(エタノール)
18	CNPC Jilin Oil Field CO2EOR(Phase3)	2018	中国	油ガス田 (EOR)	60万	天然ガス

出典：GCCSI The Global Status of CCS 2017

Gorgon

2019.8～

豪州

帯水層

340万

# 日本の帶水層貯留のポテンシャル



## 我が国の貯留ポテンシャルは大きそう…

- 貯留可能量は約**1,460～2,360億トン**（我が国の1年間のCO<sub>2</sub>排出量は11.9億トン、うち石炭火力由来は約3億トン）
  - 我が国の年間CO<sub>2</sub>排出量の約100～200年分※

※ 2017年度(速報値)のCO<sub>2</sub>排出量(11.9億トン)を用いて算出

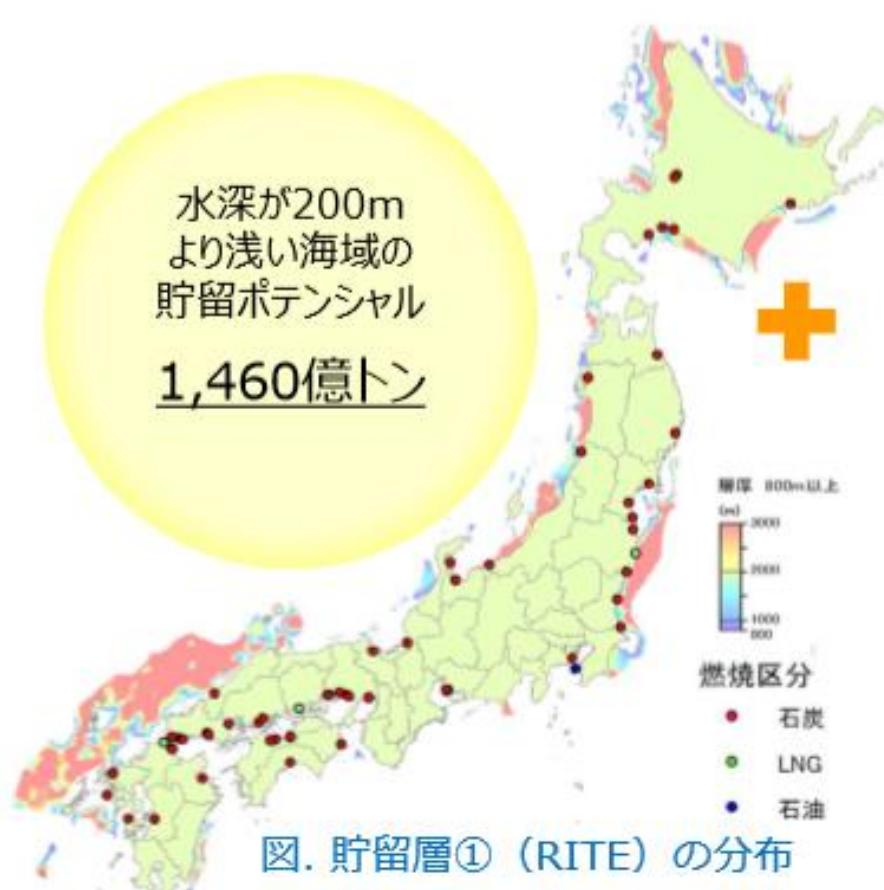


図. 貯留層① (RITE) の分布

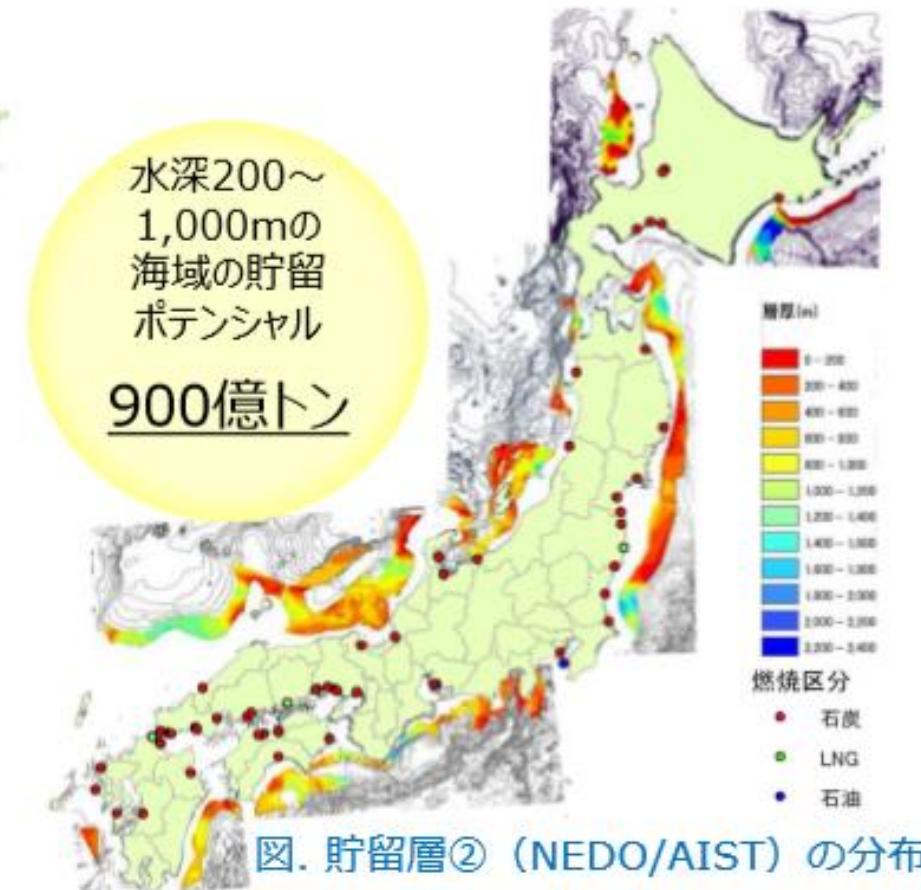


図. 貯留層② (NEDO/AIST) の分布

【出典】RITE「全国貯留層賦存量調査」、NEDO/AIST(2012)「発電からCO<sub>2</sub>貯留に至るトータルシステムの評価報告書」等をもとにみずほ情報総研が作成

# 日本の帯水層貯留のポテンシャル

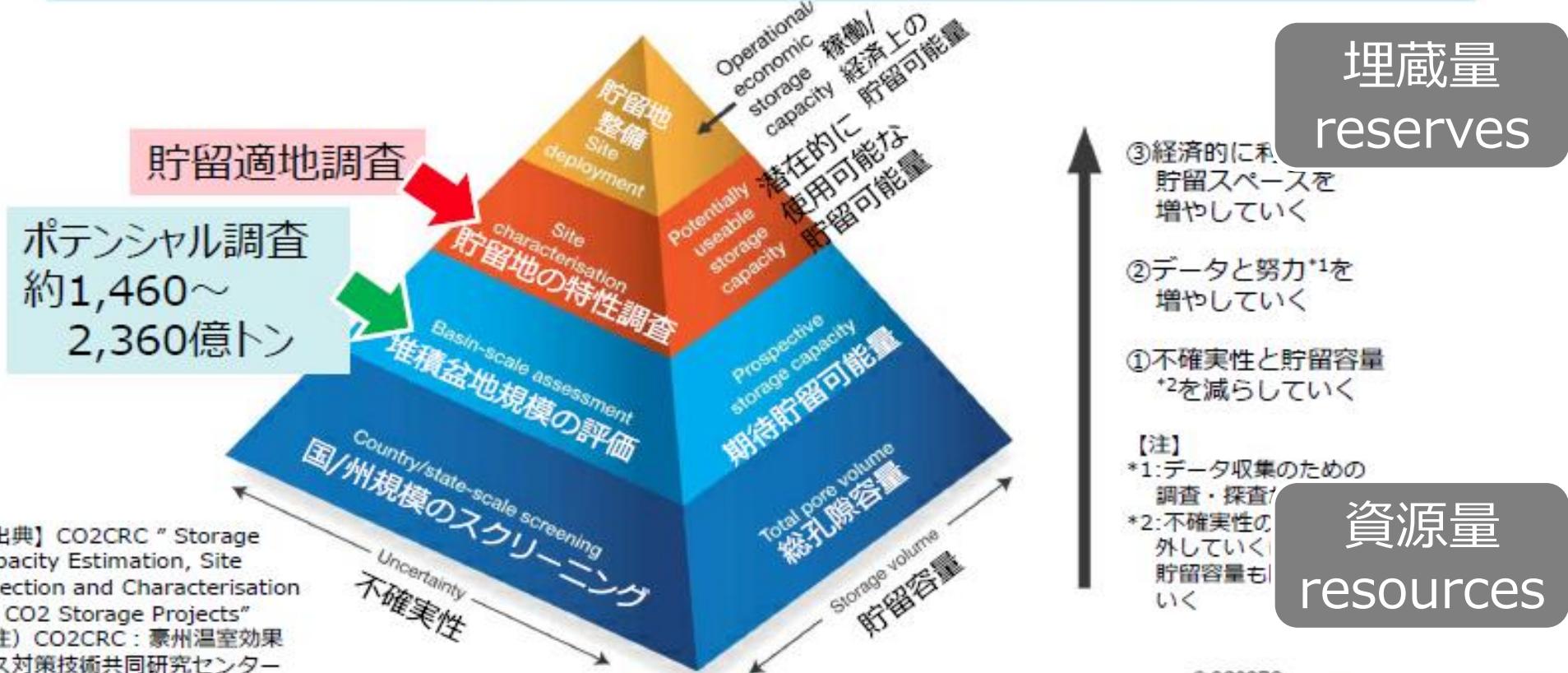


…だが、どのくらい貯留できるかはまだわかっていない

- 確実に貯留できる量を調べるには、さらなる探査、評価が必要。

資源分野

豪州の研究機関 (CO2CRC) による適地選定ピラミッド



# CCS (CO<sub>2</sub>地中貯留) に関する国の施策

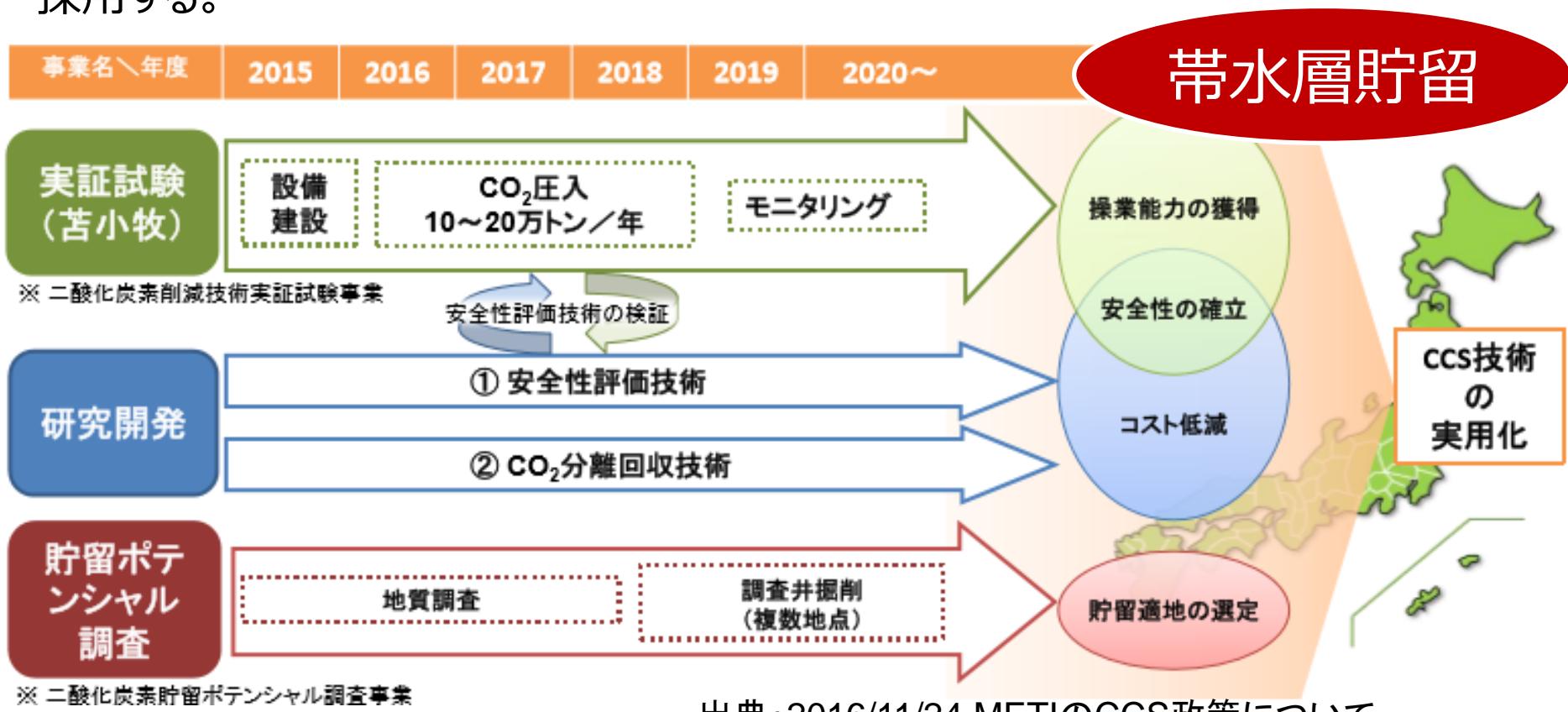


## ✓ 第4次エネルギー基本計画 (2014年4月閣議決定)

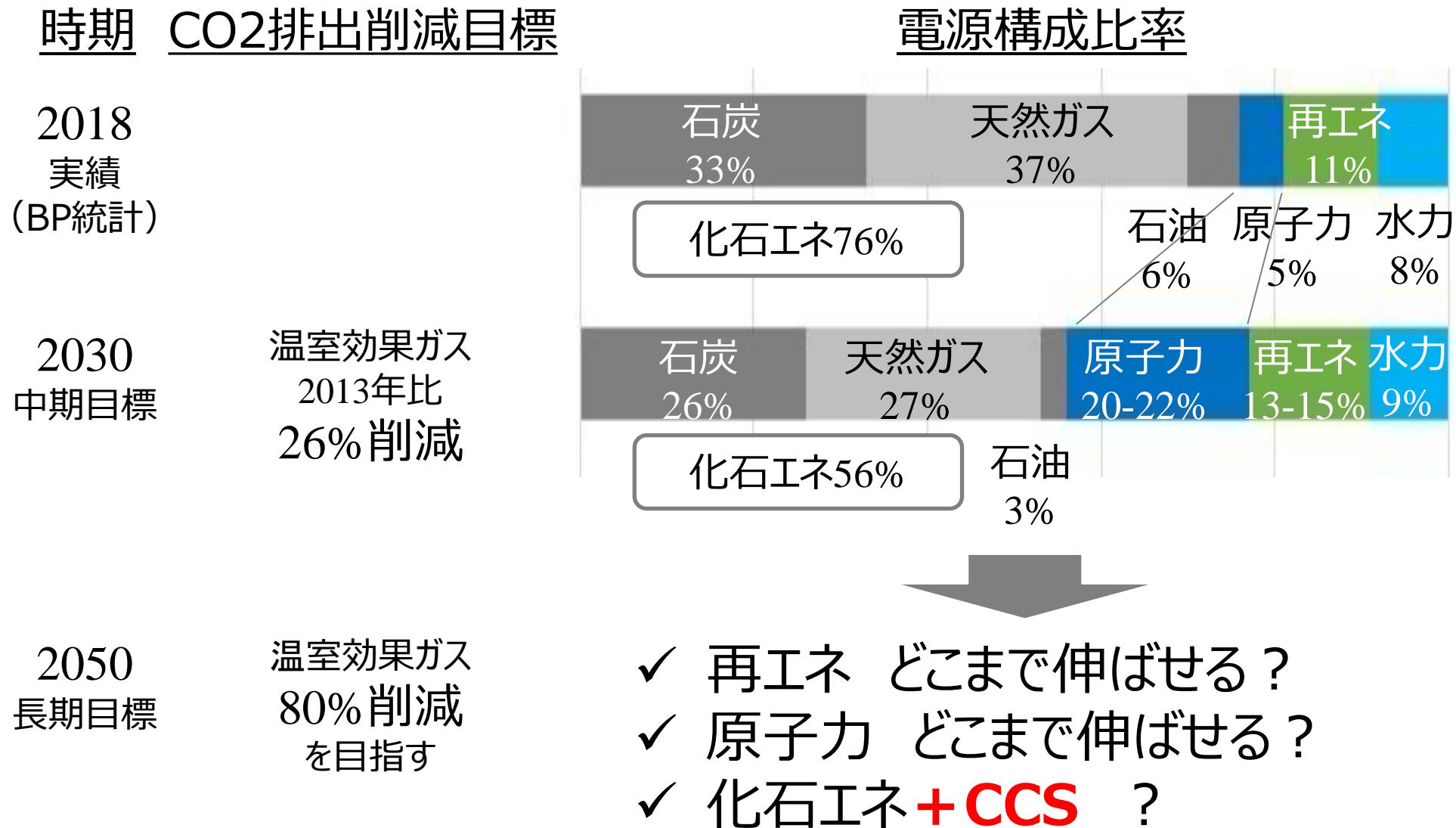
2020年頃のCCS技術の実用化を目指した研究開発や、CCS商用化の日途等も考慮しつつできるだけ早期の**CCS Ready**導入に向けた検討を行う。

## ✓ 第5次エネルギー基本計画 (2018年7月閣議決定)

2050年の80%削減(脱炭素化)を目指した「全方位での野心的な複線シナリオ」を採用する。

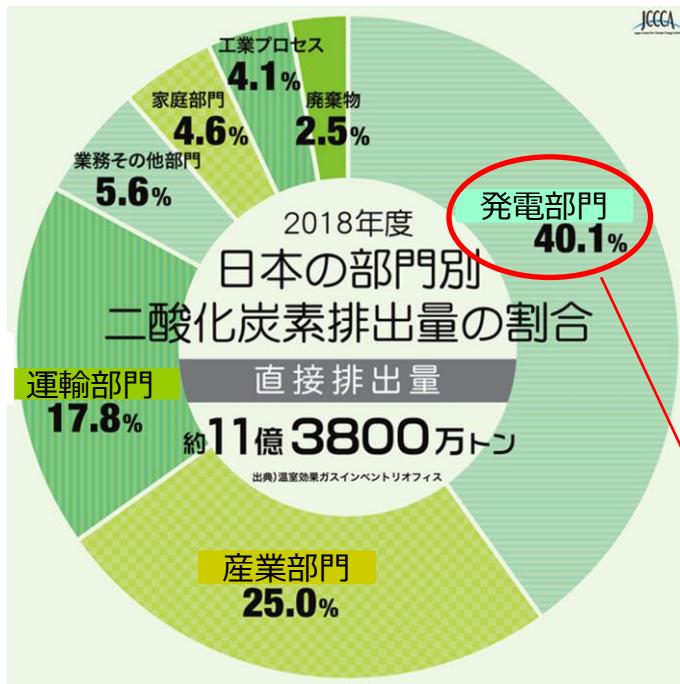


# 日本のCO2排出削減目標と電源構成

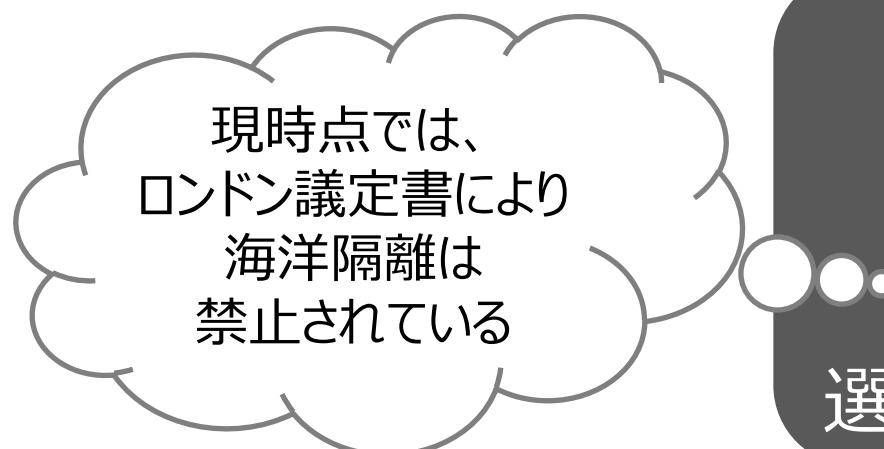


脱炭素シナリオをどう描くか？

# 貯留サイトの確保



出典：JCCCA



長期目標：2050年 GHG 80%削減（発電部門ゼロ）  
《仮定》

電源構成：水力 10%、再エネ 40%、原子力 20%、  
**CCS付き火力 30%**

100万ton-CO2/年の貯留層  
(Quest、Illinoisと同等)  
が何か所必要か？

CO2処理量

発電部門で排出される  
CO2の30%を処理する  
1.5億ton-CO2/年

日本国内で処理する場合  
150か所

## 《問題意識》

帯水層貯留だけで足りるか？

地中貯留サイトの  
選択肢を広げる必要があるのでは？

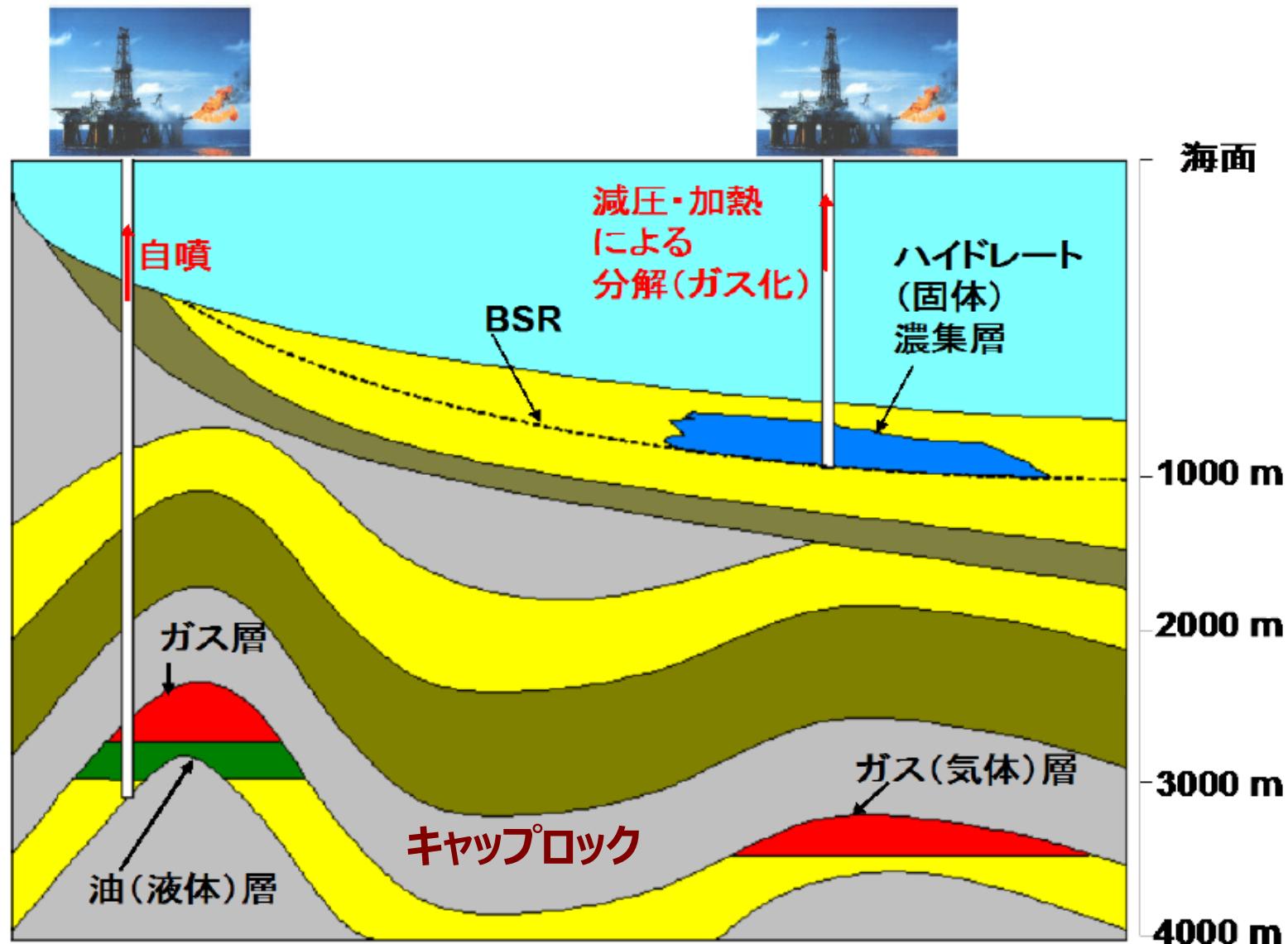
---

1. CCS (CO<sub>2</sub>地中貯留) に関する背景

## 2. CO<sub>2</sub>ハイドレート貯留の概念

3. CO<sub>2</sub>ハイドレート貯留の研究課題

# 油ガスとメタンハイドレートの生産概念



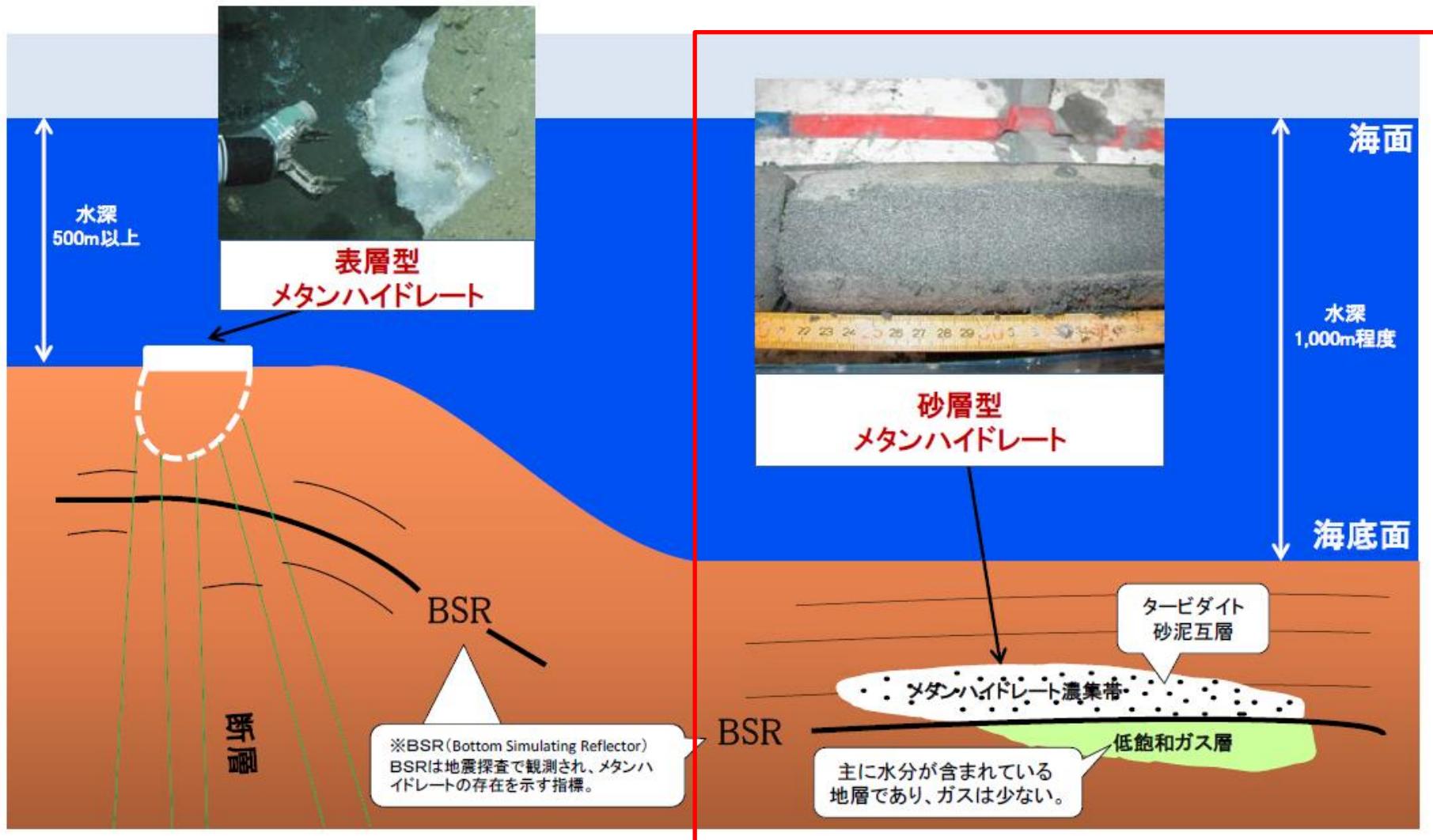
海洋エネルギー・鉱物資源開発計画（平成25年12月24日）資料より

[https://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shigen\\_nenryo/pdf/report01\\_01\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shigen_nenryo/pdf/report01_01_00.pdf)

# 海域におけるメタンハイドレートの賦存形態（参考情報）



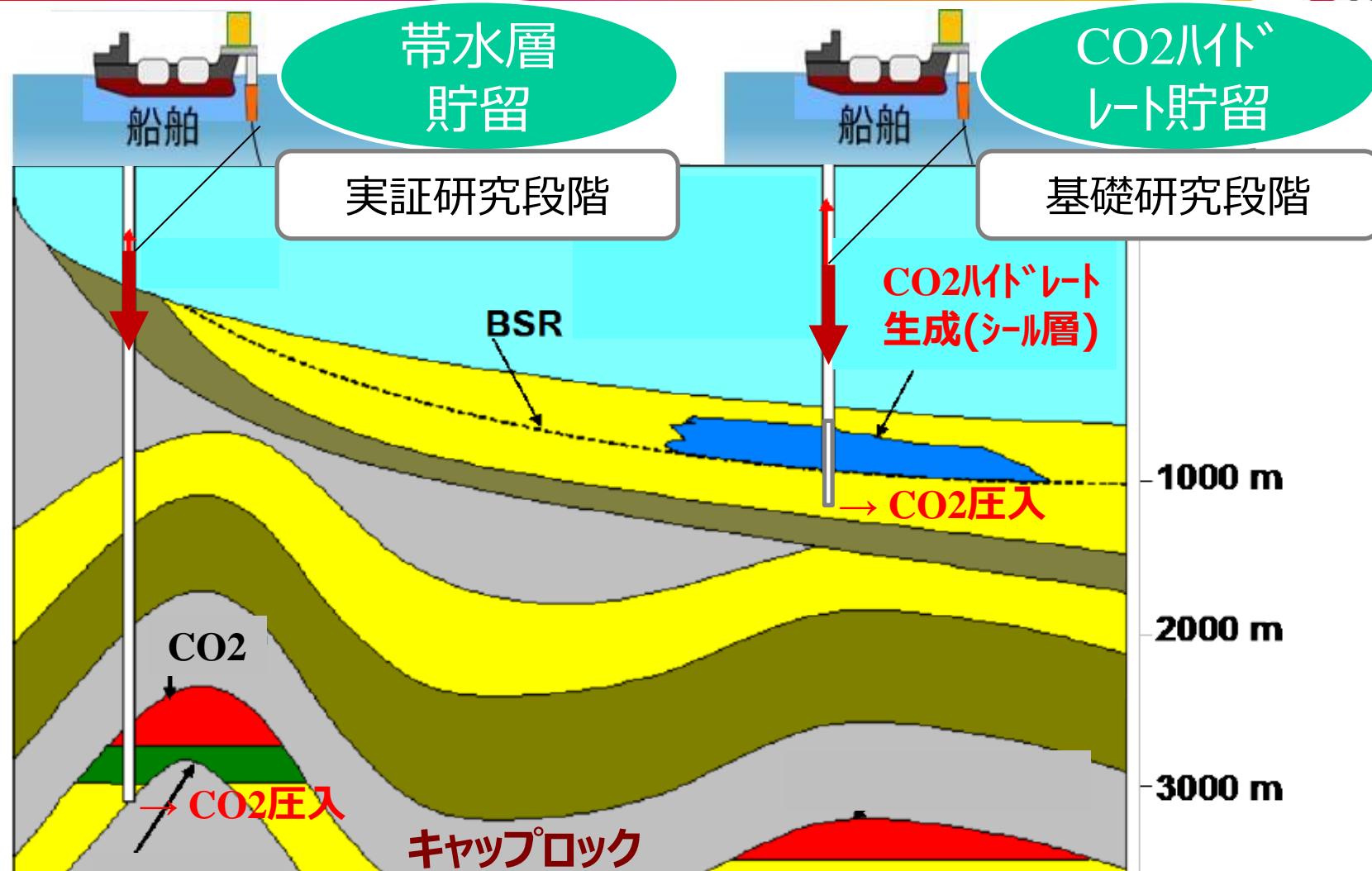
BSR : Bottom Simulating Reflector 海底模擬反射面



海洋エネルギー・鉱物資源開発計画（平成25年12月24日）資料より

[https://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shigen\\_nenryo/pdf/report01\\_01\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shigen_nenryo/pdf/report01_01_00.pdf)

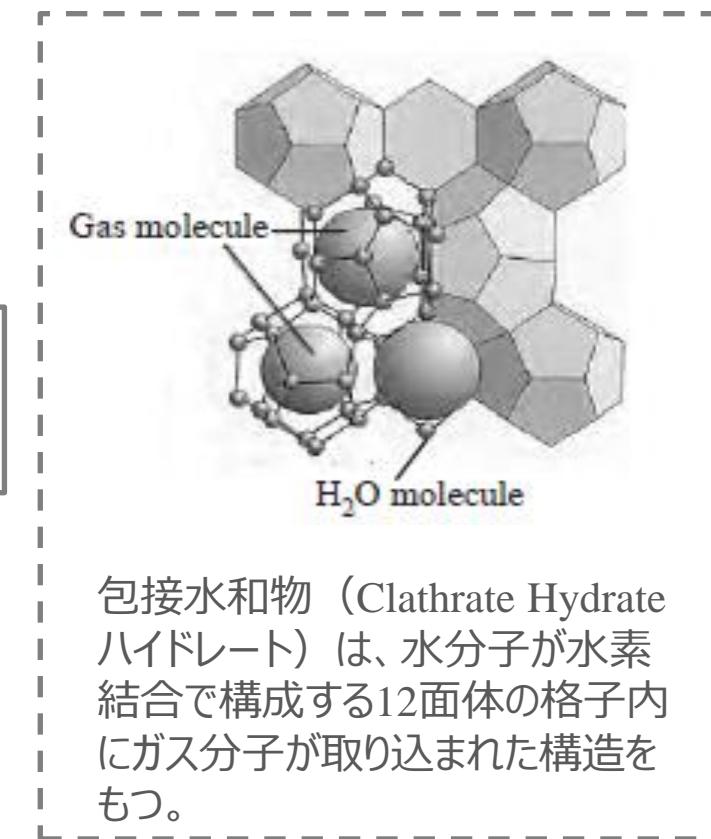
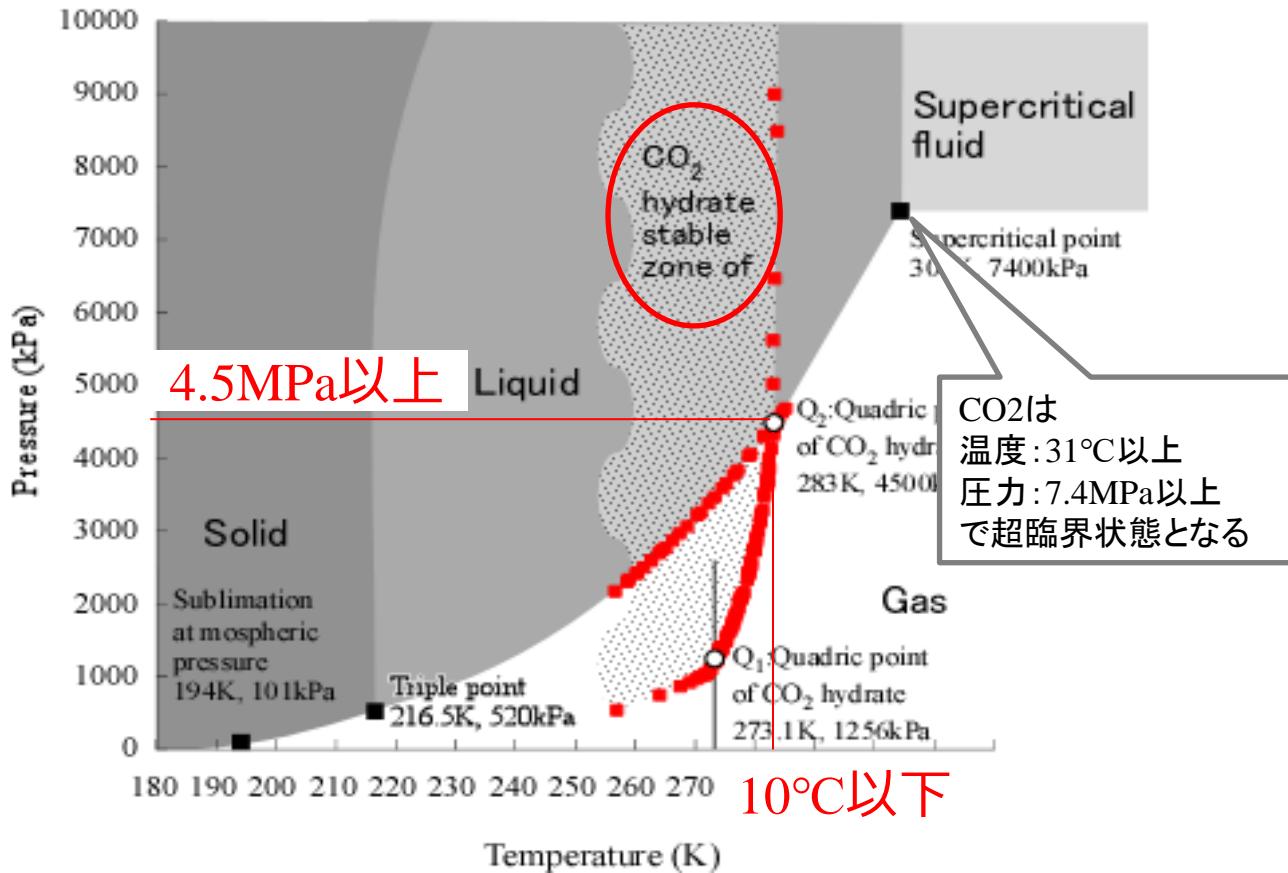
# 帶水層貯留とCO2ハイドレート貯留の違い



CO2ハイドレート貯留の特徴（帶水層貯留と比較して）

- ✓ キャップロックが不要（ただし、温度圧力条件が必要）
- ✓ 貯留層が浅いため圧入坑井の長さが短い

# CO<sub>2</sub>ハイドレートとは？



CO<sub>2</sub>は水が存在する中で、  
温度10°C以下、圧力4.5MPa（水深450m）以上で  
水分子に取り囲まれてハイドレートを生成する。

# CO<sub>2</sub>ハイドレートは自然界に存在するのか？

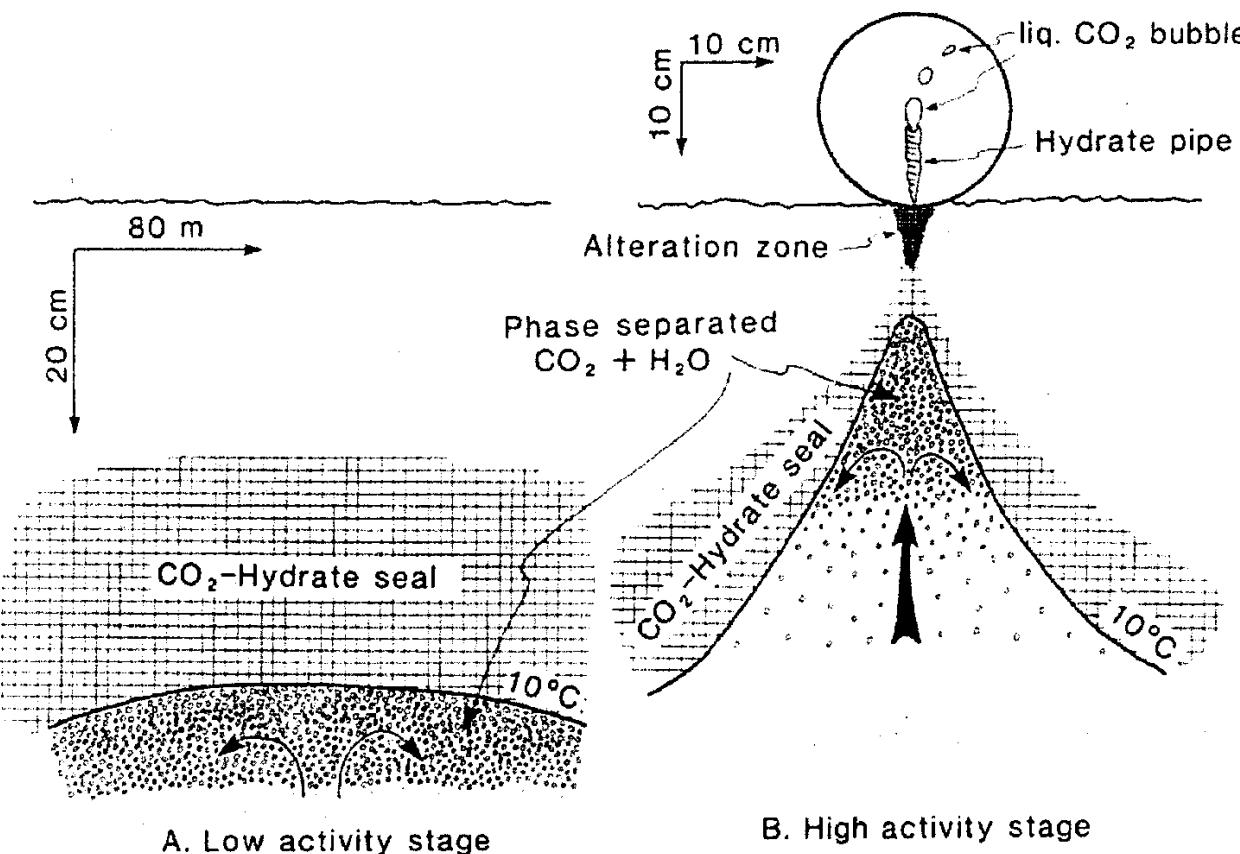


図 8 热水域海底下の液体 CO<sub>2</sub> の貯留モデル (A: 热水フラックスが低い场所、B: 热水フラックスが高い场所). 10°C等温线はこの水深において CO<sub>2</sub> ハイドレートが安定して存在できる温度に相当する (酒井ほか, 1990).

出典：酒井均、他（1990）、「しんかい2000」による伊是名海穴熱水系の地球化学的研究 –第413回及び第415回潜航報告、及び第424回潜航で採取した二酸化炭素液泡と包接化合物について、「しんかい2000」研究シンポジウム報告書

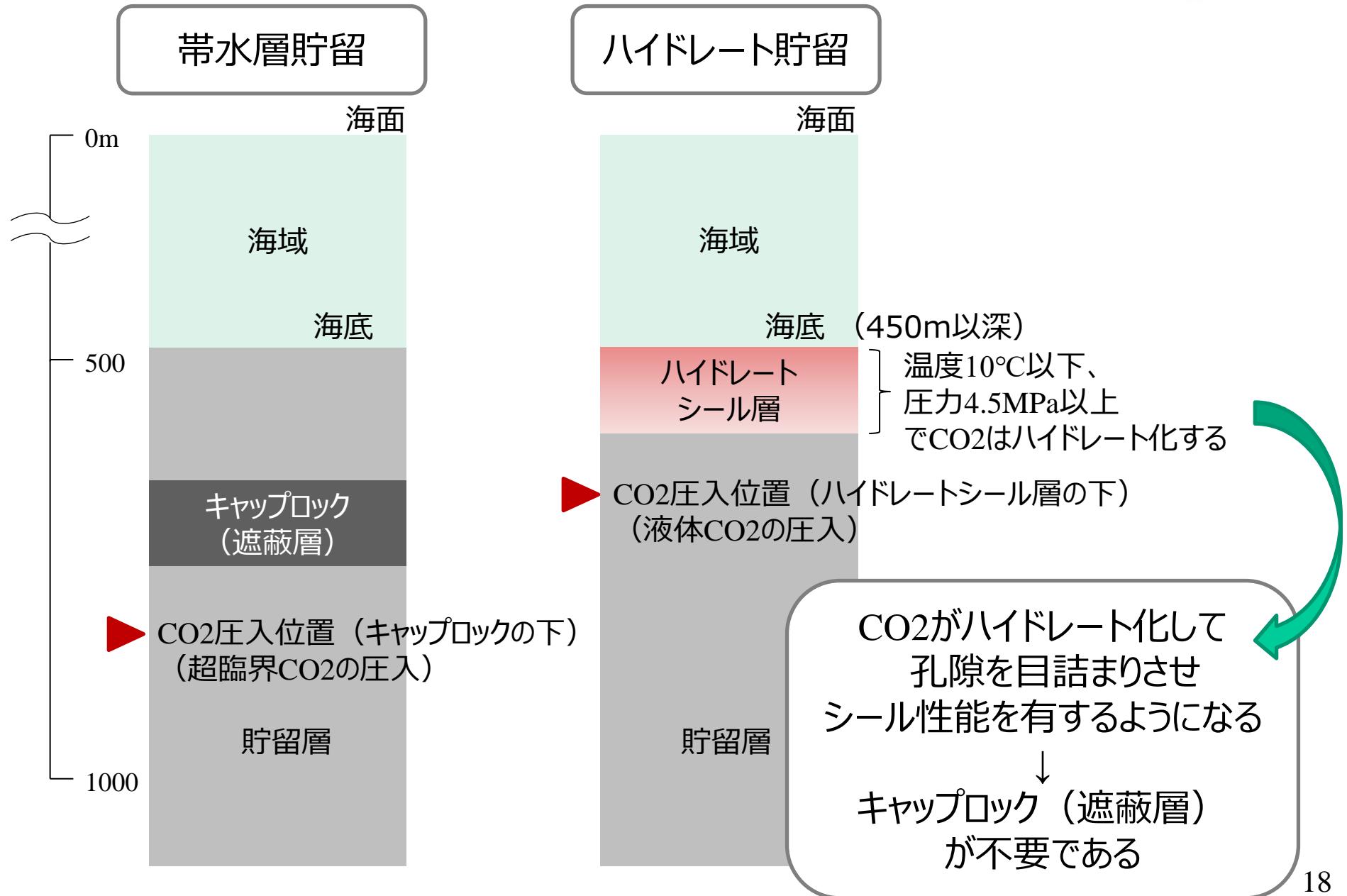
沖縄トラフ（水深1,500m）の海底面付近でCO<sub>2</sub>ハイドレートの存在を確認

(Sakai, 1990, Science)

海底面下でハイドレートが形成され堆積物の空隙を埋めることで液体CO<sub>2</sub>の湧出を抑制する「液体CO<sub>2</sub>の貯留モデル」を提案

理学の世界では、CO<sub>2</sub>ハイドレートの存在とそのシールメカニズムについての理解が進んでいる

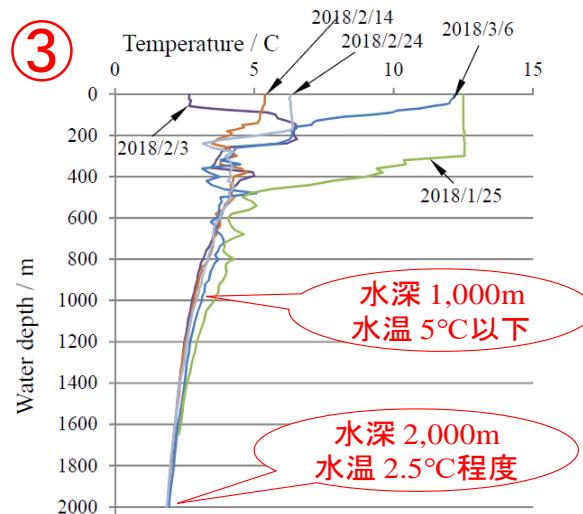
# 「帯水層貯留」と「ハイドレート貯留」の違い



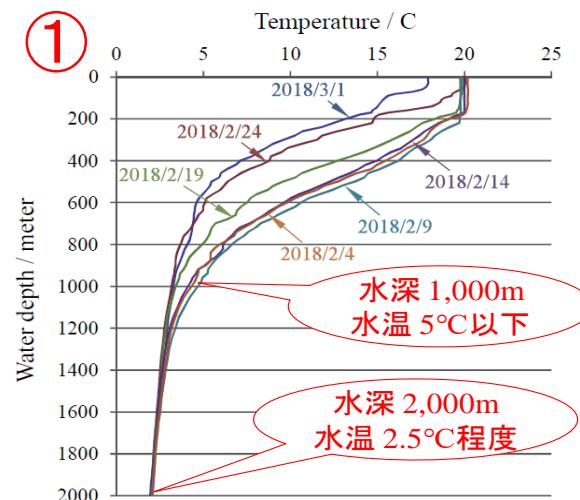
# 日本周辺海域において、CO<sub>2</sub>ハイドレートは生成可能か？



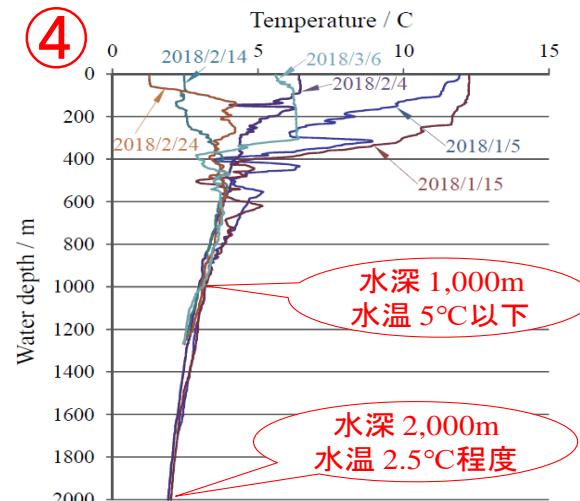
## Argo Float



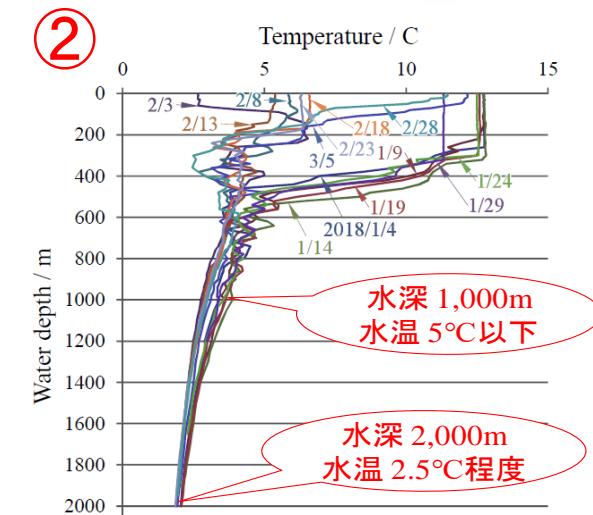
Argo Float ID:2902479  
2018年1/25-3/6の水温変化



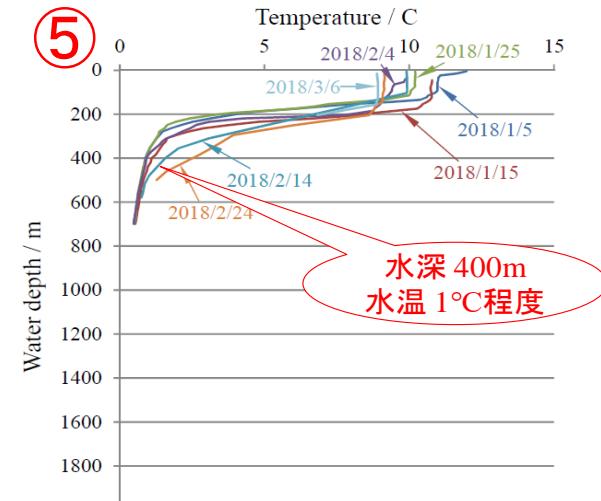
Argo Float ID:2903187  
2018年2/4-3/1の水温変化



Argo Float ID:2902969  
2018年1/5-3/6の水温変化

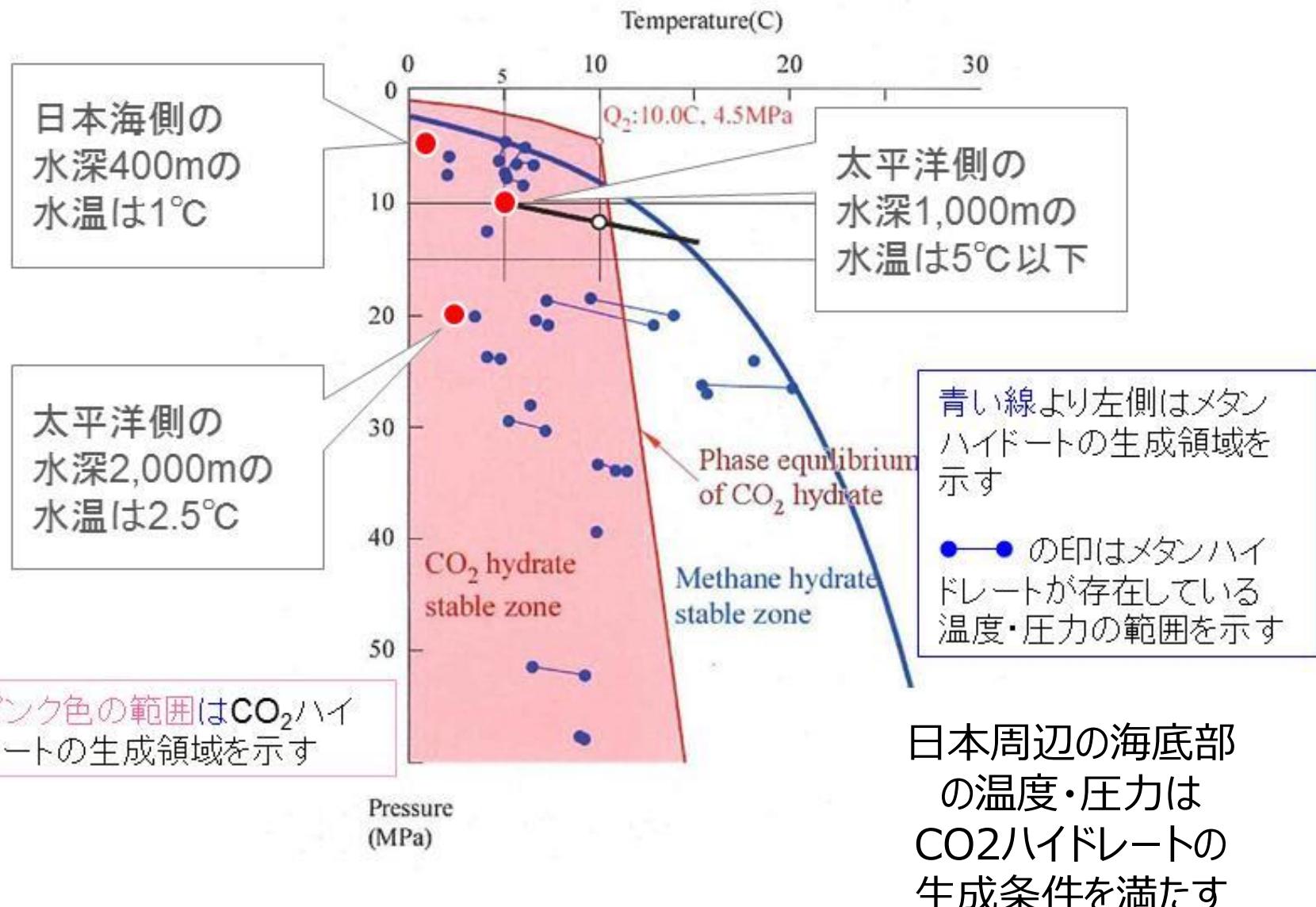


Argo Float ID:2902991  
2018年1/9-3/5の水温変化



Argo Float ID:2900612  
2018年1/5-3/8の水温変化

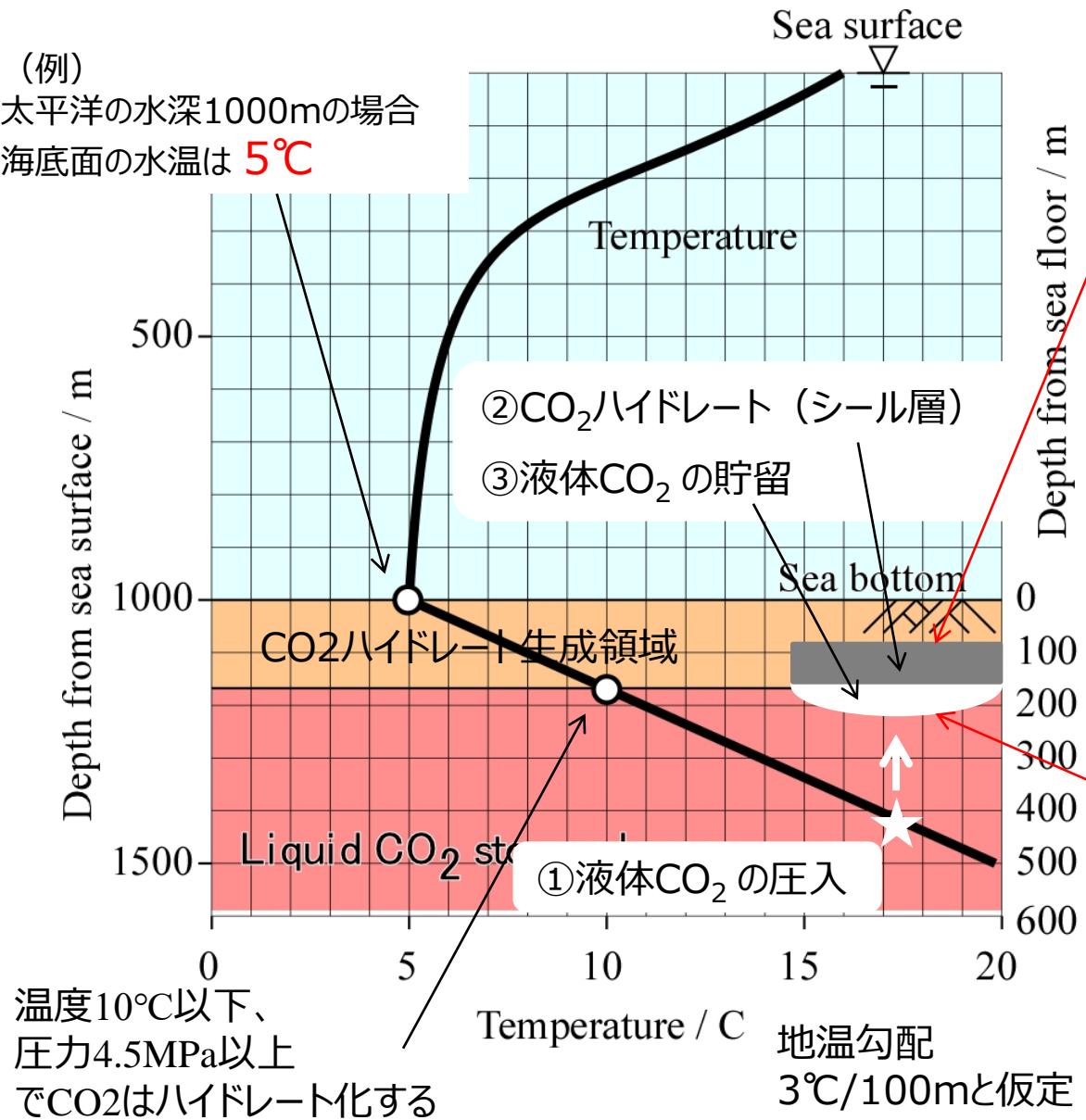
# 日本周辺海域において、CO<sub>2</sub>ハイドレートは生成可能か？



# CO<sub>2</sub>ハイドレート貯留の概念（太平洋側）



(例)  
太平洋の水深1000mの場合  
海底面の水温は 5°C



## CO<sub>2</sub>ハイドレート生成領域 TP seal layers

- ② CO<sub>2</sub>が密度差により上方へ移動し、TP seal layers へ到達したところでハイドレートを生成し、地層の孔隙内を充填して自己シール性能を有するようになる

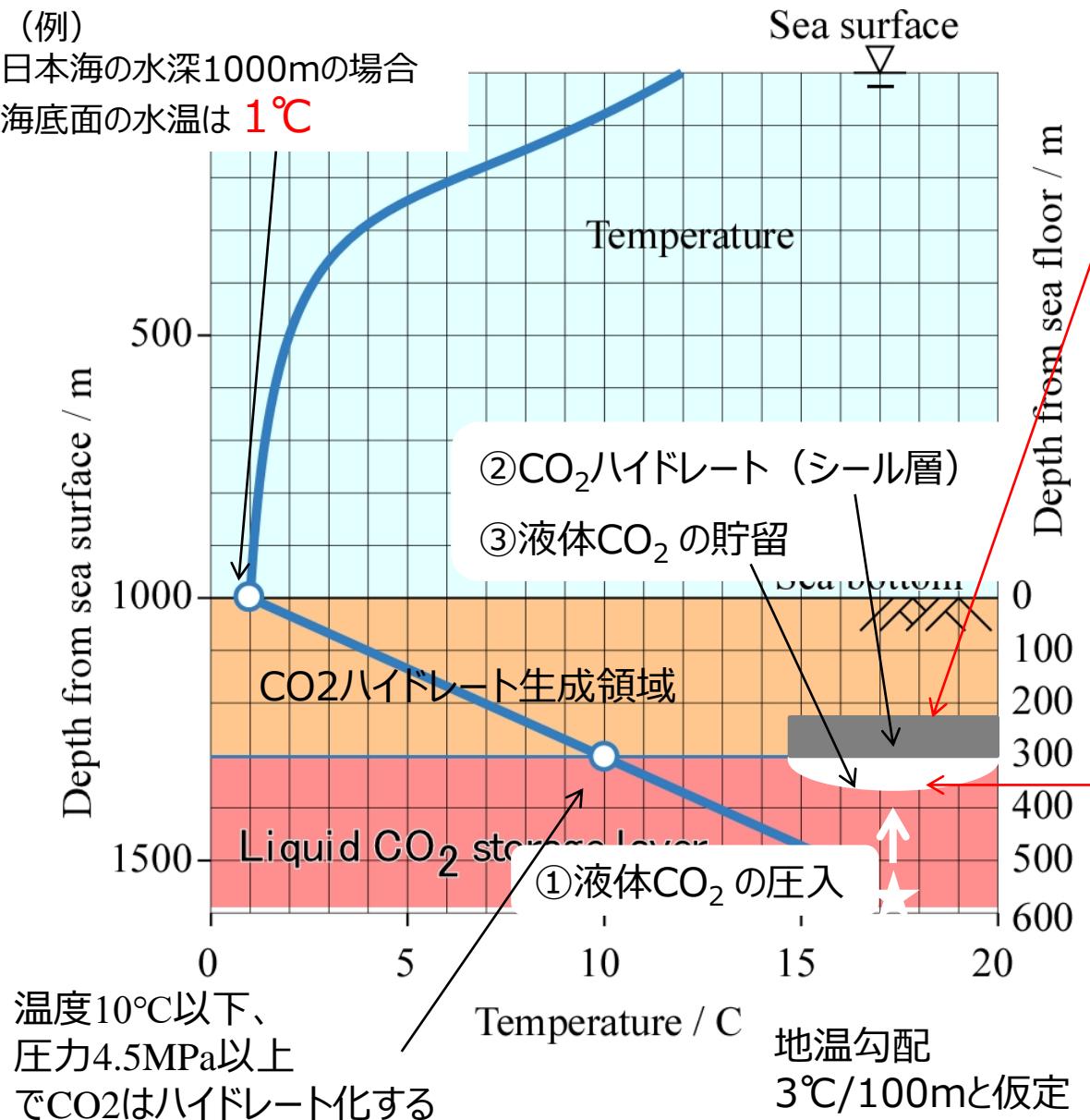
## CO<sub>2</sub>圧入・貯留領域 CO<sub>2</sub> injection/storage layers

- ① 液体CO<sub>2</sub>の圧入  
→浸透性が確保され、目詰まり(閉塞)は生じない
- ③ CO<sub>2</sub>ハイドレート (シール層) の下位にCO<sub>2</sub>が液相の状態で貯留できる

# CO<sub>2</sub>ハイドレート貯留の概念（日本海側）



(例)  
日本海の水深1000mの場合  
海底面の水温は **1°C**



## CO<sub>2</sub>ハイドレート生成領域 TP seal layers

- ② CO<sub>2</sub>が密度差により上方へ移動し、TP seal layers へ到達したところでハイドレートを生成し、地層の孔隙内を充填して自己シール性能を有するようになる

## CO<sub>2</sub>圧入・貯留領域 CO<sub>2</sub> injection/storage layers

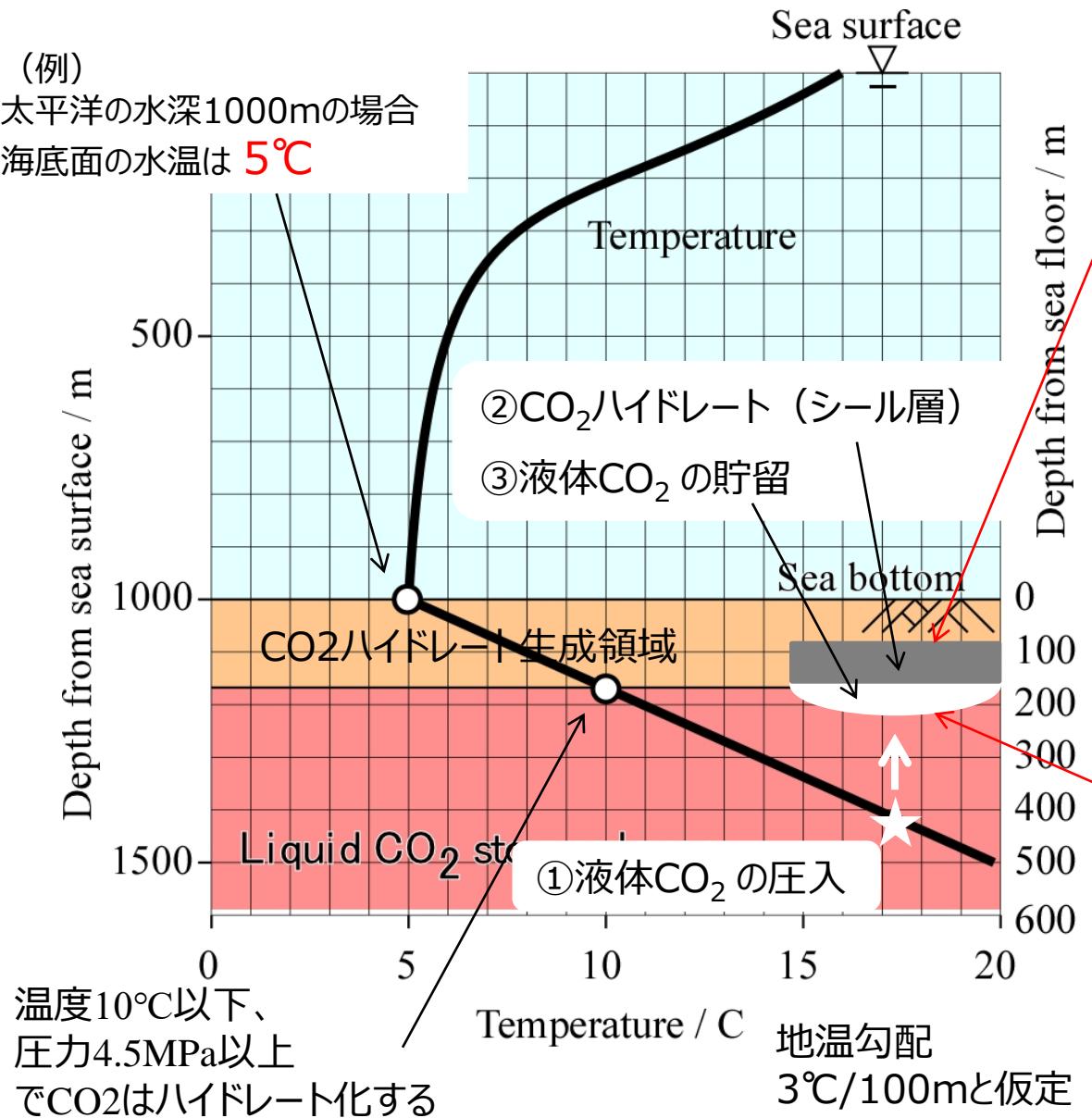
- ① 液体CO<sub>2</sub>の圧入  
→浸透性が確保され、目詰まり(閉塞)は生じない
- ③ CO<sub>2</sub>ハイドレート (シール層) の下位にCO<sub>2</sub>が液相の状態で貯留できる

- 
1. CCS (CO<sub>2</sub>地中貯留) に関する背景
  2. CO<sub>2</sub>ハイドレート貯留の概念
  - 3. CO<sub>2</sub>ハイドレート貯留の研究課題**

# CO<sub>2</sub>ハイドレート貯留の研究課題



(例)  
太平洋の水深1000mの場合  
海底面の水温は 5°C



**CO<sub>2</sub>ハイドレート生成領域**  
**TP seal layers**

シール性能評価

シミュレーション  
室内試験

**CO<sub>2</sub>圧入・貯留領域**  
**CO<sub>2</sub> injection/storage layers**

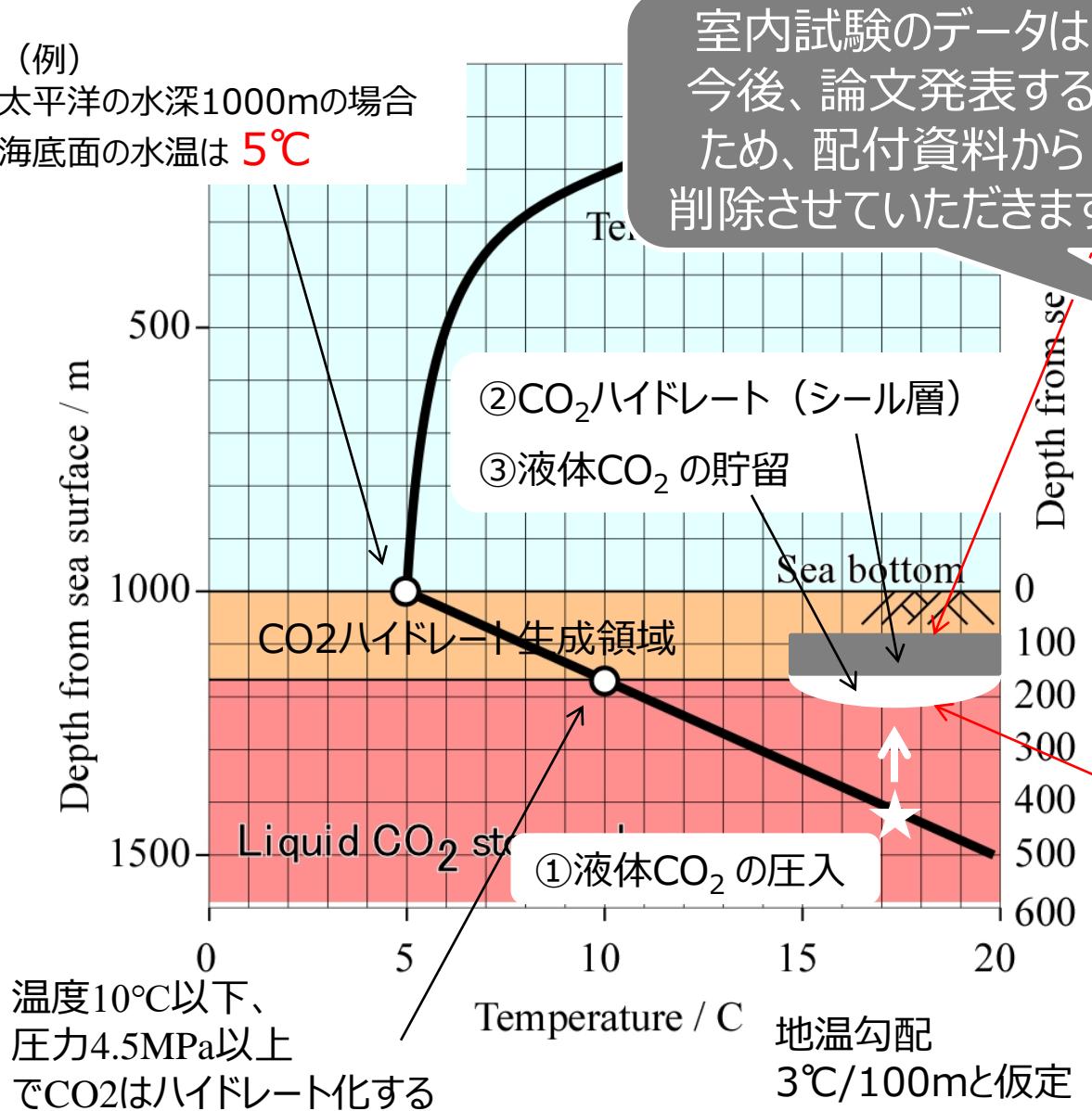
貯留性能評価  
(injectivity/capacity)

シミュレーション

# CO<sub>2</sub>ハイドレート貯留の研究課題



(例)  
太平洋の水深1000mの場合  
海底面の水温は **5°C**



室内試験のデータは  
今後、論文発表する  
ため、配付資料から  
削除させていただきます

## CO<sub>2</sub>ハイドレート生成領域 TP seal layers

シール性能評価

シミュレーション  
**室内試験**

## CO<sub>2</sub>圧入・貯留領域 CO<sub>2</sub> injection/storage layers

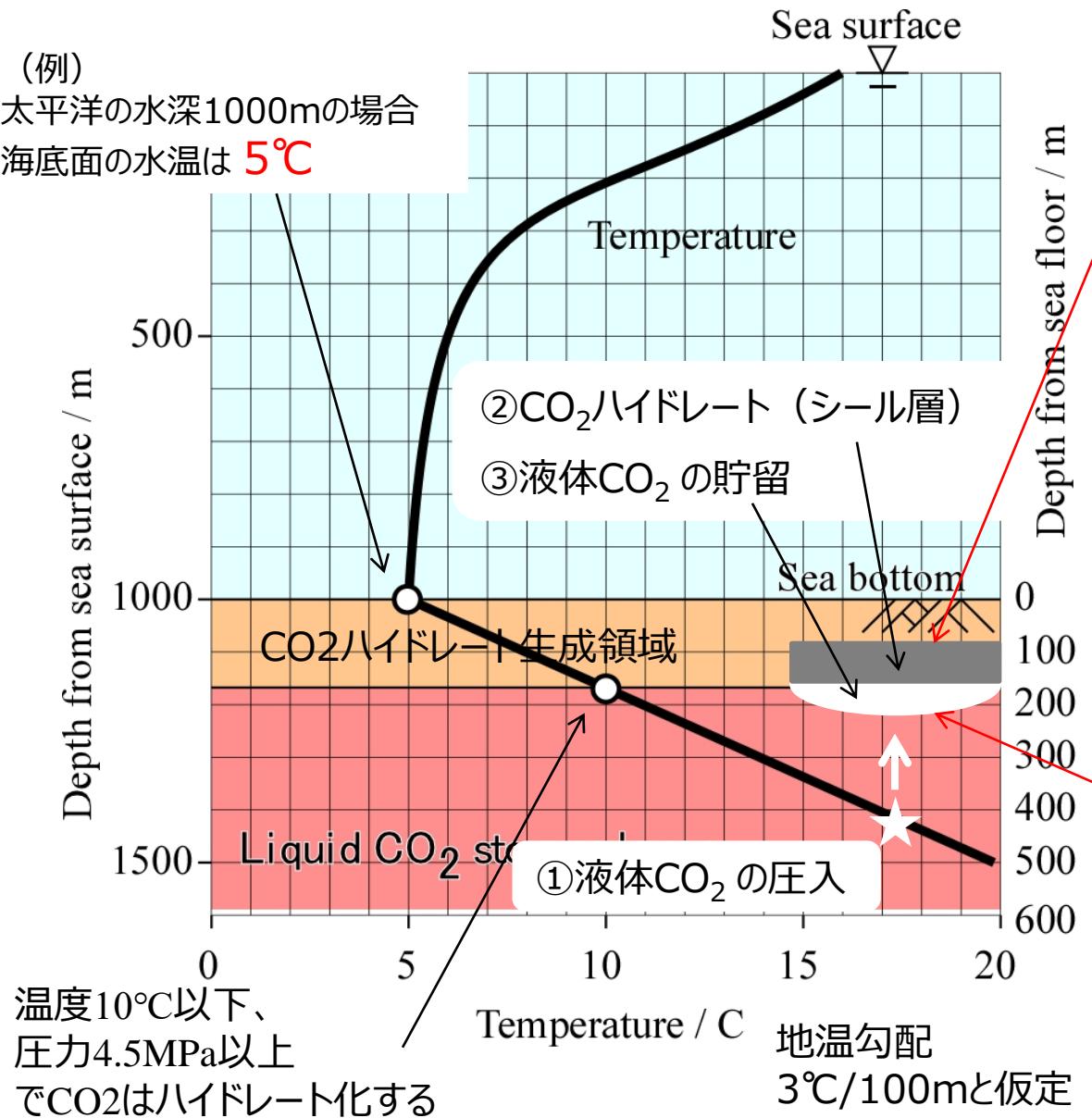
貯留性能評価  
(injectivity/capacity)

シミュレーション

# CO<sub>2</sub>ハイドレート貯留の研究課題



(例)  
太平洋の水深1000mの場合  
海底面の水温は 5°C



**CO<sub>2</sub>ハイドレート生成領域**  
**TP seal layers**

シール性能評価

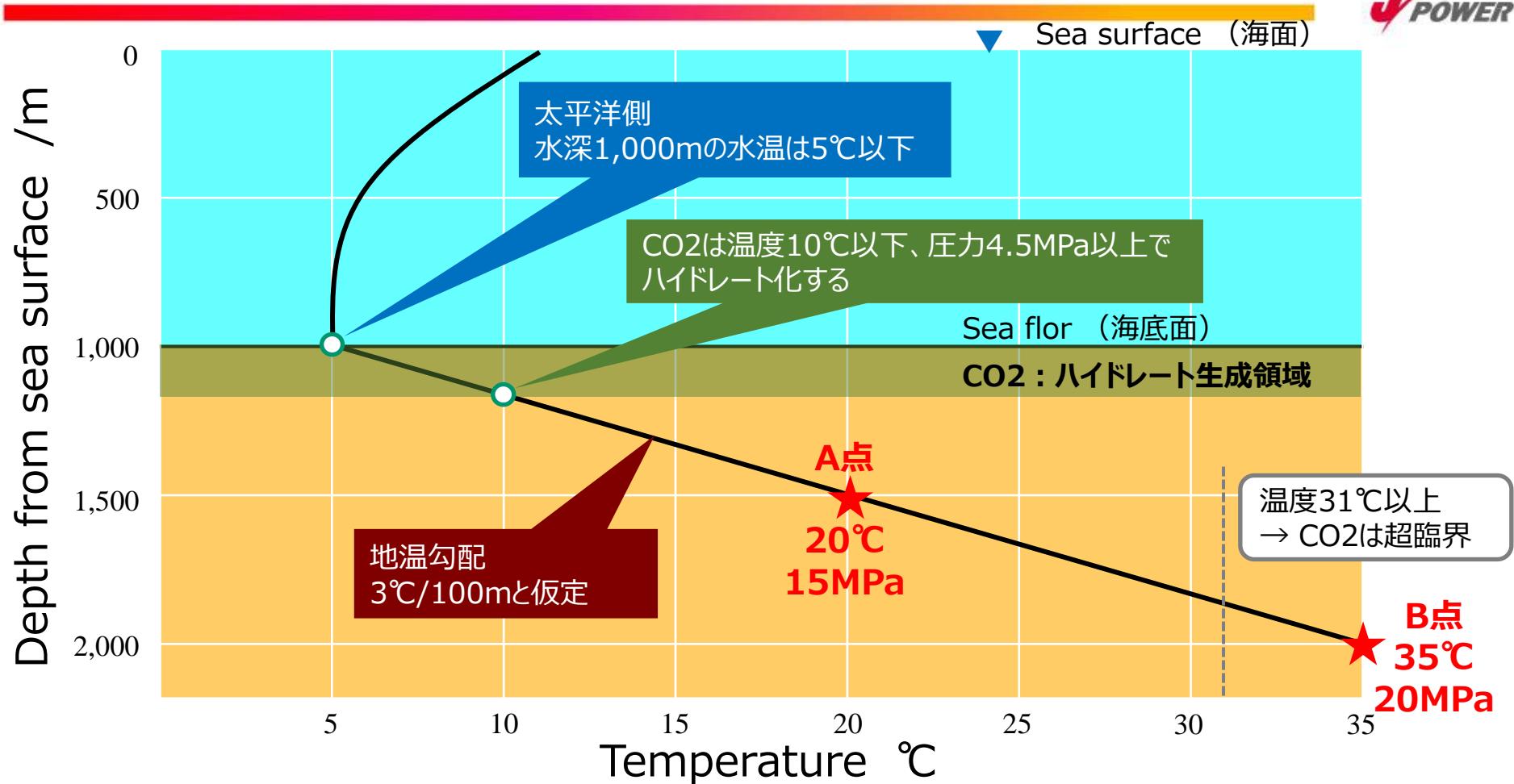
シミュレーション  
室内試験

**CO<sub>2</sub>圧入・貯留領域**  
**CO<sub>2</sub> injection/storage layers**

貯留性能評価  
(injectivity/capacity)

シミュレーション

# 貯留性能評価（シミュレーションの条件設定）



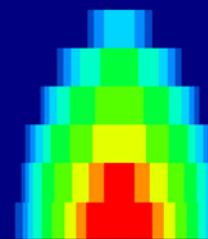
圧入点	温度	圧力	CO2の密度 (kg/m <sup>3</sup> )	CO2の粘度 (mPa·s)	CO2の相状態
A点 (海域)	20°C	15.0MPa	900	0.092	液体
B点 (海域)	35°C	20.0MPa	850	0.084	超臨界
C点 (陸域)	48°C	10.8MPa	520	0.038	超臨界

# 貯留性能評価（シミュレーションの結果概要）

VER

Case-A1

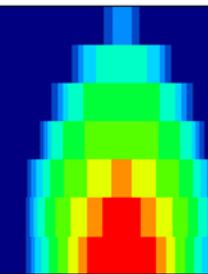
A点の温度圧力条件  
20°C、15MPa



A点：  
海底下貯留層に  
液体CO2圧入

Case-B1

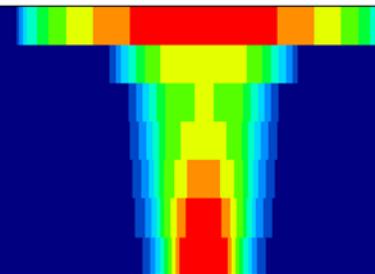
B点の温度圧力条件  
35°C、20MPa



B点：  
海底下貯留層に  
超臨界CO2圧入

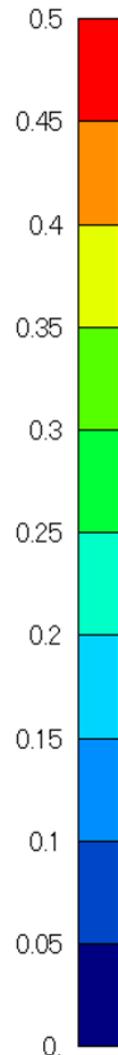
Case-C1

C点の温度圧力条件  
48°C、10.8MPa



C点：  
陸域貯留層に  
超臨界CO2圧入

20年後のCO2飽和度センター（断面図）



海底下の貯留層において、「A点での液体CO2圧入」と「B点での超臨界CO2圧入」では、CO2プルーム挙動に大きな違いがない。→液体CO2の圧入性能は確保される

# CO2ハイドレート貯留の研究課題（今後の研究の進め方）



評価項目	検討方法
① CO2ハイドレート生成領域の <b>シール性能評価</b>	✓ シミュレーション ✓ 室内試験
② CO2圧入・貯留領域の <b>貯留性能評価</b> (injectivity/capacity)	✓ シミュレーション
③ CO2ハイドレート貯留の <b>ポテンシャル評価</b>	✓ 日本周辺海域の温度・圧力条件適合 エリアを抽出 ✓ メタンハイドレートの類似性に基づき、 地質適合エリアを抽出 ✓ ②のシミュレーションにより、capacityの 評価→全体集計（ポテンシャル評価）
④ CO2ハイドレート貯留の <b>経済性評価</b>	✓ ②のシミュレーションにより、injectivityの 評価 ✓ 圧入坑井の諸元・配置等を設定して コスト試算（経済性評価）

あと30年しか残っていない

2050年の80%削減を目指して

帯水層貯留

CO<sub>2</sub>ハイドレート貯留



日本周辺海域において  
経済合理性を有した十分な  
貯留ポテンシャルを確保したい



Contents lists available at ScienceDirect

**Chemical Engineering Journal**journal homepage: [www.elsevier.com/locate/cej](http://www.elsevier.com/locate/cej)
**POWER**  

## Multiscale investigation of CO<sub>2</sub> hydrate self-sealing potential for carbon geo-sequestration

Jarand Gauteplass<sup>a,b,\*</sup>, Stian Almenningen<sup>b</sup>, Geir Ersland<sup>b</sup>, Tanja Barth<sup>a</sup>, Jinhai Yang<sup>c</sup>, Antonin Chapoy<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Department of Chemistry, University of Bergen, Norway

<sup>b</sup> Department of Physics and Technology, University of Bergen, Norway

<sup>c</sup> Institute of Petroleum Engineering, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK

**HIGHLIGHTS**

- CO<sub>2</sub> hydrate reduces the risk of leakage from carbon geo-sequestration.
- Integrity of the CO<sub>2</sub> hydrate seal strongly depends on rock properties.
- Sandstone showed greater potential than limestone for hydrate seal development.
- CO<sub>2</sub> trapped by a combination of pore-spanning hydrate structures and capillary forces.

**GRAPHICAL ABSTRACT****ARTICLE INFO**

**Keywords:**  
 CO<sub>2</sub> storage  
 Hydrate seal  
 Leakage rate  
 Secondary safety factor  
 Pore-level visualization

**ABSTRACT**

Storage of liquid CO<sub>2</sub> in shallow geological formations is a recently proposed concept that can facilitate increased storage capacity and improved mobility control. If stored below the gas hydrate stability zone (GHSZ), unwanted vertical migration of CO<sub>2</sub> can be effectively inhibited by the formation of solid hydrate layers. Lowering the risks of CO<sub>2</sub> leakage to the atmosphere is instrumental to accelerate the implementation of full-scale carbon sequestration in the North Sea and elsewhere.

In the laboratory, we have successfully visualized CO<sub>2</sub> trapping phenomena, measured CO<sub>2</sub> leakage rates, and demonstrated that the integrity of the hydrate seal strongly depends on fluid-rock interactions and initial water