



低炭素社会の実現に向けた  
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく  
イノベーション政策立案のための提案書

## 液体二酸化炭素の深海堆積物層中での貯留 －日本における適地の探索－

令和4年3月

Storage of Liquid Carbon Dioxide in Deep-sea Sediment Layer:  
Site Proposal in Japan

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action  
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構  
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2021-PP-06

## 概要

沖合の CCS 貯留サイトに向けて圧入施設から海底坑口までを含め海底敷設のパイプラインを利用することを前提に、液体二酸化炭素の深海堆積物層内貯留について国内での適地を検討した。陸地から 100 km の距離以内に同定された貯留適地は 11 ヶ所である。それぞれについて、10 ～ 30 億トン以上の貯留容量が期待できる。

## Summary

Suitable sites for the storage of liquid CO<sub>2</sub> in the deep-sea sediment layer in Japan were examined on the premise of using a pipeline laid on the seafloor toward the offshore CCS storage site, including from the press-in facility to the wellhead on the seafloor. There are eleven suitable storage sites identified within 100 km from the land. For each site, a storage capacity of one to three billion tons or more can be expected.

## 目次

### 概要

1. はじめに .....	1
2. 深海堆積物層内二酸化炭素液体貯留の原理 .....	1
3. 深海堆積物への液体二酸化炭素貯留実現のための技術 .....	4
4. 候補地点選定 .....	4
5. 結論 .....	7
6. 政策立案のための提案 .....	7
参考文献.....	8

## 1. はじめに

1993年以來、我が国のCCS地中貯留の研究開発は「帯水層貯留」の国内適用を念頭に実施されてきた。エンジニアリング振興協会（当時）の石油開発環境安全センターがその拠点であった。背景として、EOR（Enhanced Oil Recovery: 1960年代から北米大陸において実施されてきた、二酸化炭素の油田への圧入によって石油の二次回収を図ろうとする技術）ないし天然ガスの地下貯蔵技術（20世紀初頭から各国で数多くの実用化事例が存在する）の延長線上に、石油開発企業の主導によって我が国でもCCS技術の早期の実用化が可能であるとの判断があったものといえる。この努力は沖合帯水層を中心に、貯留適地を選定する段階に至っている。2022年1月の段階で、確定的に貯留容量が算出されているのは10地点であり、その総計は160億トンCO<sub>2</sub>であるとされる[1]。この数字を実現するためには多くの障壁が残されている。すなわち10地点の圧入候補箇所での試験掘削が実施されていないという問題である。「帯水層貯留」の場合に、調査井データが得られた時点で推定貯留容量が大幅に小さくなってしまいう例は数多い。よって、適地とされた地点での調査井掘削の結果に基づいて確実な貯留容量が提示されてから、我が国での「帯水層貯留によるCCS」の実現性を論じるべきであろう。

「帯水層貯留」技術では、二酸化炭素は超臨界流体として地層内に貯留される。北海でスタットオイル社（当時）が操業する天然ガス鉦区スライプナーにおけるCCS商用化は、このケースにあたる。1996年に貯留開始され、既に25年以上の実績がある。2005年に出版されたIPCC特別報告書[2]の「地中貯留」の章は、上記「帯水層貯留」の実績を参照して執筆され、その後の各国での技術開発ないし技術適用の指針の役を果たした。

この提案書では液体二酸化炭素としての深海堆積物内への貯留について検討した。その際、陸域からの二酸化炭素の海底パイプライン輸送で水深4,000m以深の深海堆積物層へと圧入するという具体的な技術に即して、その適地を選定した。

## 2. 深海堆積物層内二酸化炭素液体貯留の原理

二酸化炭素の海域地中貯留がスライプナーにおいて商用化規模で企画されていることが、ようやく注目され始めた1996年のことである。米国ボストンで開かれた第3回二酸化炭素除去国際会議において小出仁は、深海底堆積物中で液体二酸化炭素が重力的に安定に貯留できることを指摘した[3]。それは、スライプナーでの「(超臨界状態二酸化炭素の浅海海底下の)帯水層貯留」のコンセプトを大きく広げ、より深い水深の領域を含め二酸化炭素海域地中貯留の可能性を広く探る中で生まれたコンセプトである。

小出らは表1に示すように、「人工的な流路を介して二酸化炭素流体を（未固結堆積物を含む）海底下地層内に導き、その場での温度・圧力ならびに物理・化学条件で安定的な貯留を実現しようとする技術コンセプト」について、深海を含めての適用水深を広く考察の対象とした。海域での石油・天然ガス開発にとどまらず、海底ケーブルの敷設や運用の技術、深海鉦物資源採掘、また深海底下の科学掘削の実現などの技術実績を踏まえて広く技術的可能性を探ったものである。

その後、深海堆積物内液体二酸化炭素貯留に適した条件を定量的に示し、貯留候補海域ならびに貯留可能量の見積りを米国に即して示したのはHouseらであった[4]。その議論を紹介する。図1は1,027 kg/m<sup>3</sup>の密度をもつ海水（あるいは堆積物内の間隙水）と液体二酸化炭素との密度差を温度・圧力との関係で示したものである。世界の大洋の深海部では底層水温度は1～3℃であるので、水深2,800m（水深100mが圧力1MPaにほぼ相当する）程度で、深海底の窪地に液体二酸化炭素の溜まり（CO<sub>2</sub> Lake）の生成条件が満たされることになる。

表1 海域地層内二酸化炭素貯留技術の類型

貯留コンセプト*	CO <sub>2</sub> の温度圧力**	貯留されたCO <sub>2</sub> 密度 kg m <sup>-3</sup>	備考 貯留が成立する条件
塩水帯水層貯留 (Shallow Sub-seabed Disposal)	>31.1℃, >73.9 bar	500~800 超臨界状態 CO <sub>2</sub> (sc)	天然のシール層が必要
水和物シール貯留 (Deep Sub-seabed Disposal)	CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O系の四重点 (8.7℃ 4.5 MPa)の 低温高圧側で水和物固 体が安定	1,050	二酸化炭素流体が上方移 行する際に孔隙内の水と 混合し水和物固体を生成 しシールとなることを期 待
	水和物シールの下位に 液体CO <sub>2</sub>	不定	
深海堆積物内貯留 (SuperDeep Sub-seabed Disposal)	CO <sub>2</sub> 相図で三重点 (-56.5℃, 5.1 atm)の 高温・高圧側	> 1,028	底層水温度と水深ならび に地温勾配で海底下の地 層中の安定領域の厚みが 決まる

\* 括弧内英語が原報での呼称

\*\* 十分条件ではないことに注意 (本文参照)

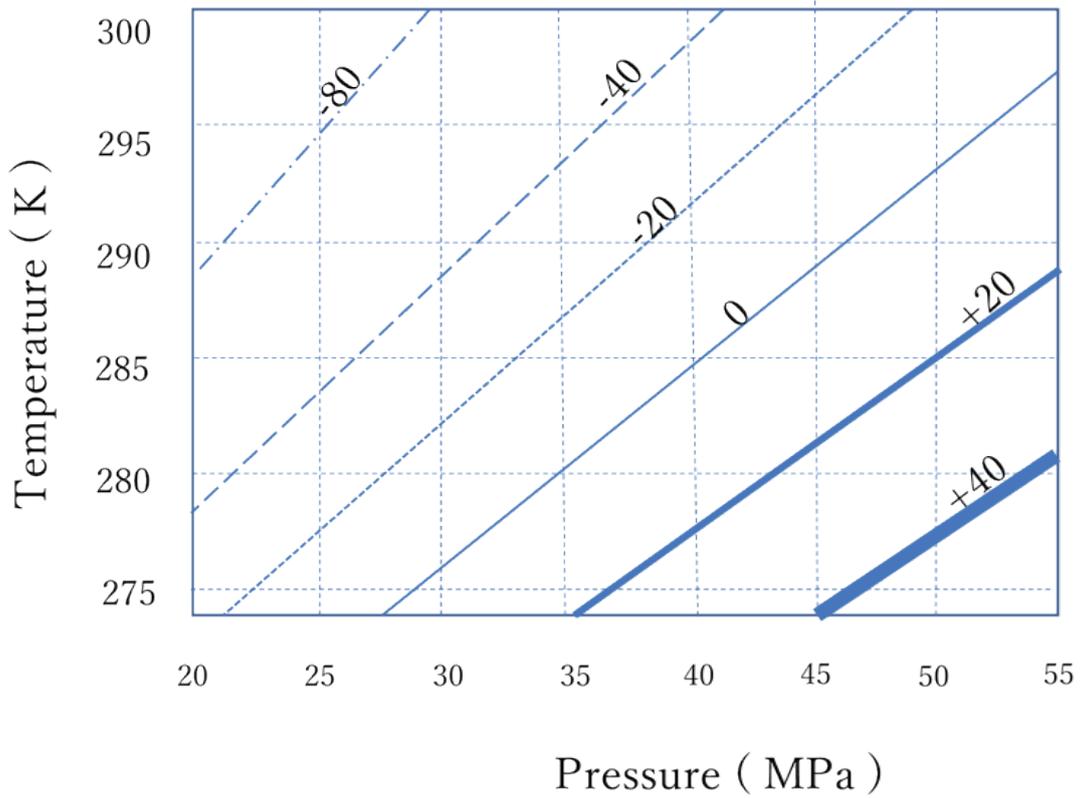


図1 液体二酸化炭素と海水（密度  $1,027 \text{ kg m}^{-3}$ ）との密度差  
 原図 [4] を一部省略

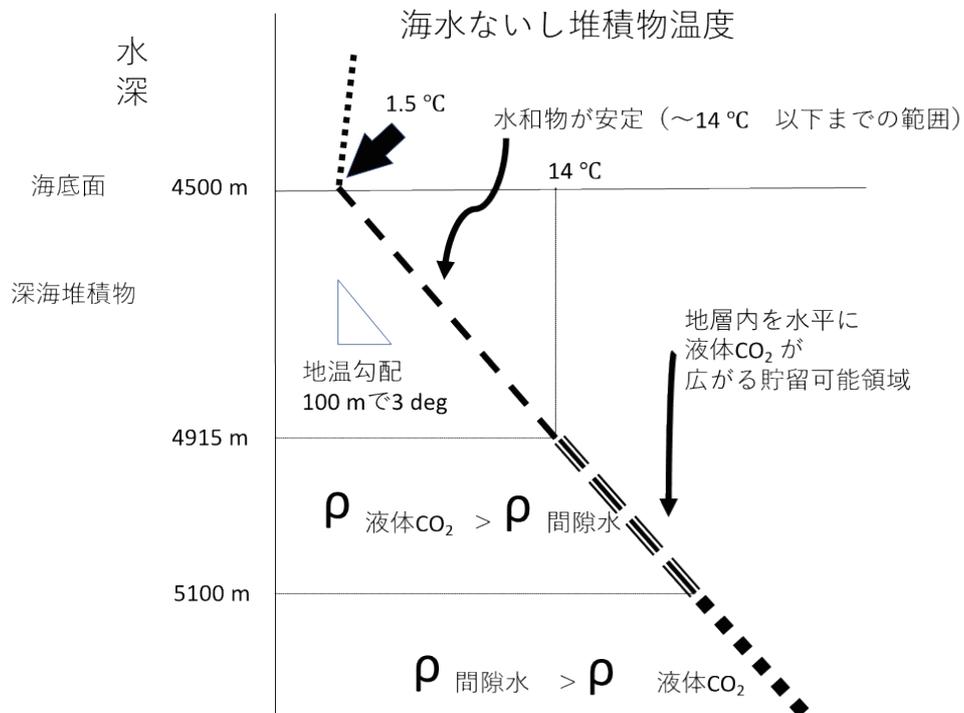


図2 水深4,500 mの海底の堆積物を掘り進んだときの温度変化と二酸化炭素の状態

ところで、深海底の代表的な地温勾配は、堆積物中であっても深度増加 100 m で 3 度の温度上昇を示す。図 2 の模式図は水深 4,500 m の海底付近での深度方向の温度分布の例である。海底から堆積物中を掘削していくと、二酸化炭素が圧縮されて密度が上昇する効果よりも、地温勾配にしたがった温度上昇による（膨張の結果の）密度低下効果が上回って、液体二酸化炭素が間隙水に対して浮力を持つ深度が存在することが分かる。水深 4,500m の海底に設置し、その地温勾配が 3 deg/100 m であるケースでは、掘削深度 600 m 当たりで液体二酸化炭素が浮力を示すことになる。ところで、海底下 600 m までの堆積物のうち、その上部 400 m ほどでは、液体二酸化炭素が地層内に浸透し難いことが想定される。この圧力では二酸化炭素水和物固体が安定な温度領域であり、送り込まれた液体二酸化炭素の周囲には水が豊富に存在するからである。液体二酸化炭素が間隙水を押しよけて進んでゆく過程で、水分子と二酸化炭素が分子比で 6:1 ないし 8:1 程度に混合されれば、微小領域で水和物固体が生成しやすい条件を満たす。水和物固体が流路の閉塞をもたらすと坑井から遠方へは、なかなか液体二酸化炭素を浸透させにくいであろうことが想像されるのである。したがって、液体二酸化炭素の深海堆積物内貯留に適しているのは、海底下の地温がほぼ 14°C までの範囲は除外した、その下位層であるというのが House ら [4] の指摘である。もちろん図 1 に示すように、（液体二酸化炭素と地層内間隙水との）密度差 0 の線より低温高压側でない、重力安定な液体二酸化炭素貯留は実施できない。

### 3. 深海堆積物への液体二酸化炭素貯留実現のための技術

小出らの原提案 [3] では未固結堆積物への自由落下のペネトレータ経由での液体二酸化炭素圧入を示唆し、大深度での海底掘削の困難を回避しようとしている。また末包 [5] は海洋構造物係留用のアンカー技術を参考に所定の海底下深度への液体二酸化炭素の圧入が可能ではないかと論じている。両者とも深海底掘削が技術的に不可能ではないことを承知しつつ、リグ・レート（日割り計算の備船料）が高額となる深海掘削船の利用を避けるべく、こうした技術提案となっているものと思われる。

末包も指摘するように深海掘削船の利用により圧入坑の掘削は確実に可能であり、また海底坑口設備の設置にも技術的困難は少ない。現在の最大水深記録は 2009 年に設置されたメキシコ湾の Tobago の水深 2,934 m に設置された海底仕上坑井である [6]。

以上を踏まえ、液体二酸化炭素の輸送ならびに圧入操作中の設備の維持管理や稼働率の向上には、海底パイプラインの利用が効果的であろうと考える。参考になるのは、ノルウェーの Snohvit ガス田での CCS プロジェクトである [7]。ここでは天然ガス生産設備は海底にあり陸上から遠隔操作されている。天然ガスは Hammerfest という町の近くの小さい島（Melkoya）にある LNG プラントまで、パイプラインで運ばれている。ガスから分離された CO<sub>2</sub> はガス田まで海底敷設パイプラインで運ばれて、ガス層より深部にある帯水層に圧入されている。2008 年に開始された CO<sub>2</sub> 貯留の実績は年間 70 万トンである。海底坑口水深は 330 m であるが、パイプライン長は 160 km である。次項で我が国での適地を選定する際の参考にした。

### 4. 候補地点選定

ここでは、我が国の排他的経済水域内で、島嶼を含む陸域からの離岸距離 100 km 以内の水深 4,000 m を超える海域を対象とした。深海底堆積物内液体二酸化炭素貯留に適した候補海域として選び出す作業にあたっては Google Earth ならびに市販の地図 [8] を利用した。

結果の概略は以下の通り。

- 1) 日本海の最深部は 3,700 m であり候補から除外される。
- 2) 日本海溝の最深部（水深 7,000 m 以上）は陸から 130 km ~ 200 km 沖合であり、水深 4,000 m

の等深線が 100 km 以内に近づくのは、房総半島沖に限られる。

3) 南海トラフの最深部の水深が 4,000 m を超えるのは遠州灘沖より西方であり、その平坦部が陸に最も近いのは紀伊半島の南方であり離岸距離は近接部で 85 km ほどである。

4) 南西諸島海溝については、南西諸島から 120 km 以上離れて最深部が連続し、水深 5,000 m 等深線が 100 km 以内に近接するのは喜界島および沖縄本島であること。

以上を含め調査結果は、表 2 および表 3 にまとめた。

表 2 陸域からの離岸距離が 100km 以内の水深 4,000 m 海域（表 3 に示したものを除く）

海底パイプラインの始点	堆積物中貯留の 対象海域	等深線の離岸距離(km)	
		4,000 m	5,000 m
千葉県 銚子市	日本海溝陸側斜面	91	99
沖縄本島 東岸	南西諸島海溝陸側斜面	64	86
沖縄県 波照間島	沖縄・宮古深海平坦面の西方延長	45	-
沖縄県 南大東村 南大東島	南大東海盆西部	15	-
沖縄県 北大東村 沖大東島	沖大東島西部の平坦面	47	-
東京都 小笠原村 沖ノ鳥島	フィリピン海盆	13~16	35~73
東京都 小笠原村 南鳥島	北太平洋海盆南部	14	23

表3 代表的な貯留候補海域の諸元\*

貯留地点の地形	舟状海盆（トラフ）内の平坦面		海溝にいたる斜面	
	小笠原トラフ 最深部付近	南海トラフ	南西諸島海溝 陸側斜面	日本海溝 陸側斜面
容量試算対象の 貯留地点の地形				
海底坑口の位置	北緯 28度 24分 東経 141度 10分	北緯 32度 34分 東経 135度 45分	北緯 28度 00分 東経 130度 30分	北緯 34度 30分 東経 140度 52分
海底坑口の水深	4,200 m	4,800 m	5,000 m	5,000 m
圧入基地	東京都 小笠原村聳島	和歌山県潮岬	鹿児島県喜界町 喜界島	千葉県 房総半島南端
パイプライン敷設の 方向と距離	北西方向 88 km	真南 85 km	南東方向 60 km	南東方向 97 km
海底圧力**	42.4 MPa	48.5 MPa	50.5 MPa	50.5 MPa
底層水温度***	1.47℃	1.59℃	1.66℃	1.51℃
水和物が生成しなくなる 坑内深度#	400 m	410 m	420 m	420 m
液体 CO <sub>2</sub> が間隙水より 低密度となる坑内深度 (図1による)	~500 m	~800 m	~900 m	~900 m
液体 CO <sub>2</sub> 貯留に適した 領域の層厚	~100 m	~390 m	~480 m	~480 m
貯留面積 10 km <sup>2</sup> あた りの貯留可能量 <sup>§</sup>	2.5 億トン CO <sub>2</sub>	9.8 億トン CO <sub>2</sub>	12 億トン CO <sub>2</sub>	12 億トン CO <sub>2</sub>

\* 地温勾配を 3 deg/100 m と仮定して算出

\*\* 海域での水柱平均海水密度を 1.028 g/cm<sup>3</sup> とし水深から算出（絶対圧）

\*\*\* 日本海洋データセンターの 1 度メッシュ水温統計 [9] による

# 水和物が安定である温度圧力領域のモデル計算結果 ([10] の Table 2) から算出

§ House ら [4] の仮定（間隙率 50%のうち、その 50%を液体二酸化炭素に置き換え可能）を採用した

## 5. 結論

二酸化炭素の圧入設備を陸域に設置し、これと深海底に掘削した圧入坑井とを 100 km のパイプラインで連結する方式によれば、深海堆積物中への液体二酸化炭素貯留が可能であり（図 3）、我が国での適地を 11 ヶ所選定することができた。面積当たりの貯留可能量が「超臨界二酸化炭素貯留」に比べ大きいとため、本調査で同定されたサイトのそれぞれについて、10～30 億トン以上の貯留容量が期待できる。

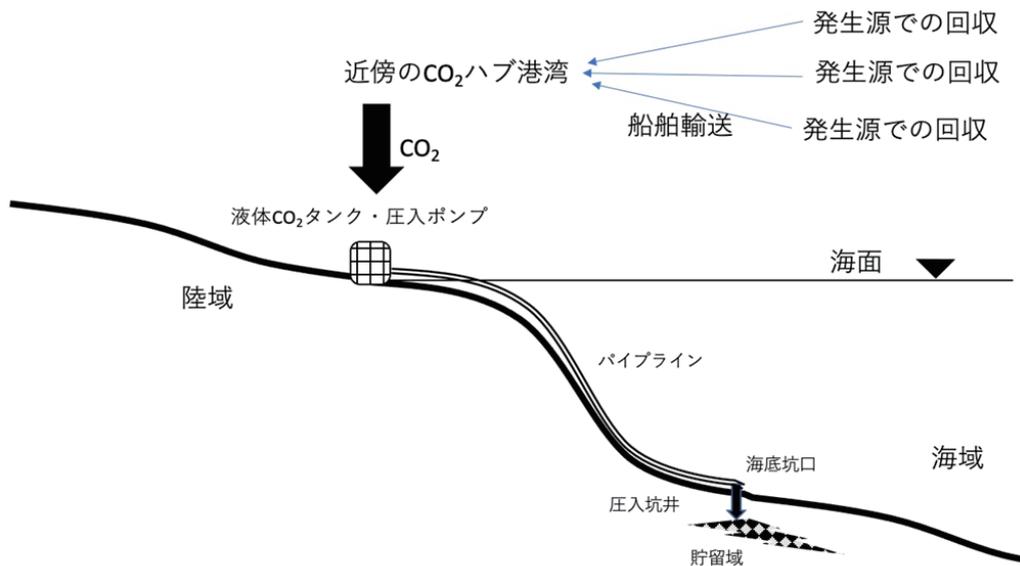


図 3 水深 4,000m 以深の深海底での深海堆積物内液体二酸化炭素貯留の事業イメージ

## 6. 政策立案のための提案

今回の検討で得られた一ヶ所当たり貯留容量 10～30 億トンは、一例として LCS で別途見積もった 2050 年における「CO<sub>2</sub> 削減率を 98%としたときのケース」での CO<sub>2</sub> 排出量 26 Mt/y [11] と比較すると、38～115 年分に相当する。最終的な排出量ゼロに向けての中間段階での CO<sub>2</sub> 貯留に対しては、十分な容量を確保できる可能性が見いだされた。

なお、超臨界二酸化炭素圧入による帯水層貯留の場合は対象層内での圧力上昇が貯留容量の上限を決めている。一方で本提案技術の場合には、パイプラインから圧入坑井経由で堆積物間隙内への流路全体での液体二酸化炭素の流体抵抗が坑井一本当たりの年間貯留可能量すなわち二酸化炭素貯留コストを決めている。この点の検討を来年度に進めることによって、液体二酸化炭素深海堆積物層中貯留のコストを明らかにしたい。

## 参考文献

- [1] 資源エネルギー庁, [https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/ccs\\_choki\\_roadmap/pdf/001\\_04\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/pdf/001_04_00.pdf), (アクセス日 2022年3月11日).
- [2] Benson, S., Cook, P., "Underground geological storage", IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press, p. 195-276, 2005.
- [3] H. Koide, Y. Shindo, Y. Tazaki, M. Iijima, K. Ito, N. Kimura, K. Omata, "Deep Sub-seabed Disposal of CO<sub>2</sub> - The Most Protective Storage -", Energy Conversion and Management, vol. 38, Suppl. pp. S253-S258, 1997.
- [4] K.Z. House, D.P. Schrag, C.F. Harvey, K.S. Lackner, "Permanent carbon dioxide storage in deep-sea sediments", Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 103, no. 33, 12291-12295, 2006.
- [5] 末包哲也, “二酸化炭素地下貯留技術の現状と展望”, スマートプロセス学会誌, Vol. 11, No. 1 pp. 29-36, 2022.
- [6] 上田善紹, “海洋石油生産システムに関する近年の技術動向の紹介”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, vol. 50, no. 5, p. 82-87, 2015.
- [7] 宮本善文, “ノルウェー：二酸化炭素の分離・回収, 貯留 (CCS) の現状”, JOGMEC 石油天然ガス情報ウェブサイト [https://oilgas-info.jogmec.go.jp/\\_res/projects/default\\_project/\\_project\\_/pdf/2/2008/0805\\_out\\_h\\_no\\_carbon\\_capture\\_storage\\_snohvit\\_sargas.pdf](https://oilgas-info.jogmec.go.jp/_res/projects/default_project/_project_/pdf/2/2008/0805_out_h_no_carbon_capture_storage_snohvit_sargas.pdf), (アクセス日 2022年2月2日).
- [8] 日本海洋地図, 昭文社, 2011.
- [9] 日本海洋データセンター, “JODC オンラインデータ提供システム (J-DOSS) 統計プロダクト”, [https://jdoss1.jodc.go.jp/vpage/bts\\_j.html](https://jdoss1.jodc.go.jp/vpage/bts_j.html), (アクセス日 2022年2月2日).
- [10] R.J. Bakker, J. Dubessy, M. Cathelineau, "Improvements in clathrate modelling: I. The H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> system with various salts", Geochimica Cosmochimica Acta, Vol. 60, pp1657-1.
- [11] 山田興一, “2030年政府案の実現性と2050年明るいゼロカーボン (ZC) 社会”, 2021年度低炭素社会戦略センターシンポジウム講演資料, [https://www.jst.go.jp/lcs/sympo20211203/item/20211203shiryo\\_yamada.pdf](https://www.jst.go.jp/lcs/sympo20211203/item/20211203shiryo_yamada.pdf), (アクセス日 2022年2月3日).

---

---

低炭素社会の実現に向けた  
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく  
イノベーション政策立案のための提案書

液体二酸化炭素の深海堆積物層中での貯留  
－日本における適地の探索－

令和4年3月

Storage of Liquid Carbon Dioxide in Deep-sea Sediment Layer:  
Site Proposal in Japan

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action  
toward Low Carbon Societies,  
Center for Low Carbon Society Strategy,  
Japan Science and Technology Agency,  
2022.3

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

---

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 特任研究員 大隅 多加志 (OHSUMI Takashi)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ 8階  
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273  
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2022 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。  
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。