

4. 実証試験の実施に向けた検討

4.1. 実証サイトの検討

4.1.1. 背景及び目的

実証サイトの検討背景について、以下に箇条書きにする。

- ・ 本事業の実証サイトは、まだ決まっていない。
- ・ 実証サイトの候補地となる貯留適地は、経済産業省・環境省が実施する二酸化炭素貯留適地調査事業（以後、適地調査と呼ぶ）の計画や調査状況を活用して検討する。
- ・ 実証サイトの検討は、分離回収・シャトルシップ輸送等と相互に深い関係があり、それらの実施者と意見交換・調整を行いながら実施する必要がある。
- ・ CO₂ 排出源と貯留サイト間の輸送距離や、その周辺海域の海象条件はシャトルシップの稼働率等に影響するため、配慮する必要がある。

こうした背景を踏まえ、適地調査で実施される予定の 2 次元・3 次元弾性波探査、ドリリング調査、シミュレーションの状況と本事業と調整を図り、実証サイトを検討する。また、実証サイト選定に必要な追加調査があれば、その調査計画を策定する。

4.1.2. 方法

適地調査の有識者委員会にオブザーバとして出席し、同委員会で配布される資料他を収集し、適地調査の計画や調査結果について把握する。その上で、実証試験の実施に向けて、適地調査では不足する調査項目・方法がないか検討する。また、海底面調査等、シャトルシップ輸送方式固有の調査の内、適地調査の際に実施することにより、コスト低減が図れる項目があれば、検討を行う。

適地調査では、所定の貯留性能・圧入性能・遮蔽性能に関する評価が行われるとの前提に立ち、排出源からの距離や実証サイト周辺の海象条件等の観点から、実証サイトを検討する。

4.1.3. 結果及び考察

平成 26 年度に実施された以下の適地調査にオブザーバとして出席し、適地調査に関する計画や調査結果に関する資料を入手した。

- ・ 平成 26 年度二酸化炭素貯留適地調査事業に係る有識者委員会（第 1 回）
（2014 年 8 月 18 日、日本 CCS 調査株式会社 会議室）
- ・ 平成 26 年度二酸化炭素貯留適地調査事業に係る有識者委員会（第 2 回）

(2014年10月1日、日本 CCS 調査株式会社 会議室)

・平成 26 年度二酸化炭素貯留適地調査事業に係る有識者委員会 (第 3 回)
(2014 年 12 月 16 日、日本 CCS 調査株式会社 会議室)

・平成 26 年度二酸化炭素貯留適地調査事業に係る有識者委員会 (第 4 回)
(2015 年 3 月 19 日、日本 CCS 調査株式会社 会議室)

適地調査では、平成 25 年度に環境省が抽出した海域[1]と経済産業省が抽出した海域[2]を合わせた 10 海域程度において貯留層の評価を実施している。これらの海域で行われる 2 次元弾性波探査の結果から抽出される 6 海域で 3 次元弾性波探査を実施し、さらに 3 次元弾性波探査によって抽出される 3 海域で調査井を掘削し、シミュレーション、総合評価を実施する予定となっている (図 4-1)。平成 26 年度は、既存の 2 次元弾性波探査の再解析と、新規の 2 次元弾性波探査が実施された。本事業との位置づけは、資料編 4-5 にまとめた。

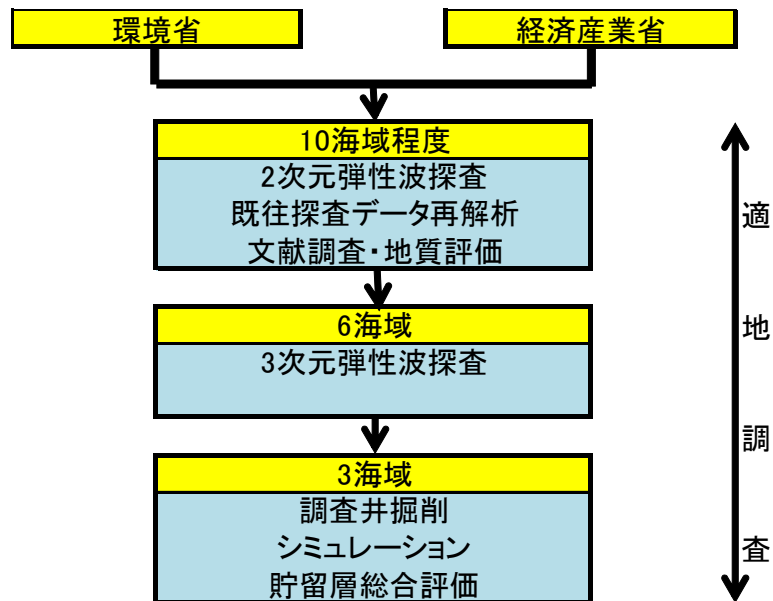


図 4-1 適地調査の概要

適地調査では、2 次元弾性波探査、3 次元弾性波探査、調査井掘削とシミュレーションによって貯留層や遮蔽層に焦点を当てた解析が実施されることを踏まえ、実証サイトの実施に向けて追加的に必要になると予想された補足調査項目の案を一覧にした (表 4-1)。

表 4-1 追加調査項目（案）

項目	1. 調査井の追加	2. 浅部地下構造調査	3. 表層調査	4. 物性・岩相等評価
概要	適地調査では、調査井は1坑だけとなっている。候補地の既往調査資料の質と量、地質構造の複雑さ等にもよるが、追加の調査井が必要になる場合がある。	適地調査では、貯留層・遮蔽層に焦点を当てた解析を実施すると想定され、浅部地下構造は、詳細には解析されない可能性がある。その場合、弾性波データ（既往調査データを含む）を利用して、浅部地下構造に焦点を当てて再解析を実施する。また、必要に応じ、新たなデータ取得も検討する。	海底面下浅部の地質を音波探査・サンプリングにより調査する。	2D・3D弾性波探査以外の物理探査他を利用した物性・岩相評価法、モニタリング補間手法を検討し、妥当な手法があれば実施する。
目的	候補地の地質・物性評価	万一の場合の漏洩経路検討、CO ₂ ハイドレート検討、活断層検討他	掘削リグ等の係留、FRP（Flexible Riser Pipe）の海底設置検討、海底地滑り検討	地質・物性評価、モニタリング補間
備考	適地調査の結果により要否を検討する。	適地調査の結果により要否を検討する。		候補地の特質を踏まえ、手法検討する。開発途上技術の利用も検討する。

表 4-1 の項目 1 と項目 2 は適地調査で不足する調査項目に該当し、項目 3 はシャトルシップ輸送方式固有の調査の内、適地調査の際に実施することにより、コスト低減が図れる項目に該当する。項目 4 の物性・岩相等評価は、少ない予算で広い範囲の地質・物性を把握し、貯留層・遮蔽層の性能を評価することにより、実証事業の低コスト化に寄与する方法として提案するものであり、以下に内容を記す。

項目 4 の物性・岩相等評価として提案する技術テーマは以下の三つである。

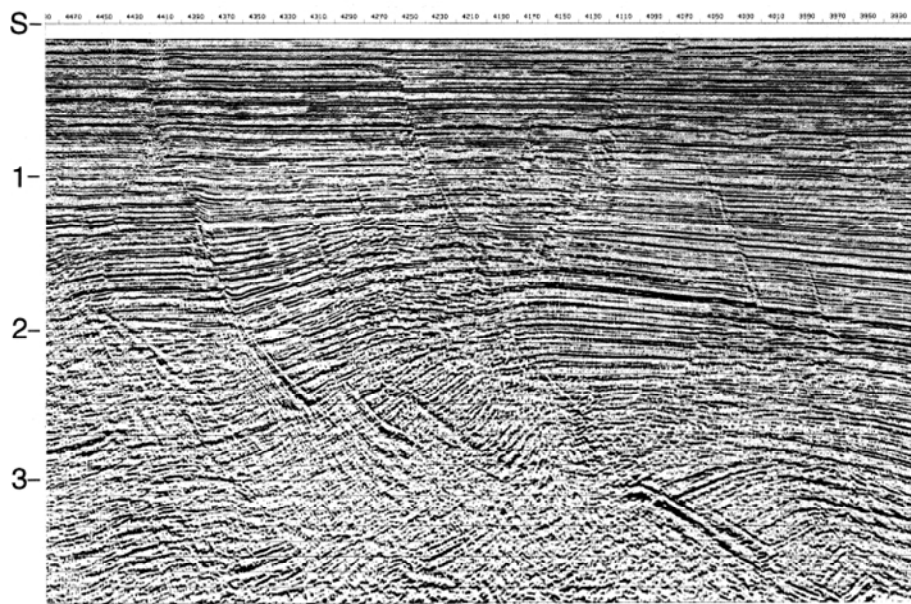
- ・フルウェーブインバージョンによる V_p/V_s の把握
- ・3D シーケンス層序学的解析
- ・3D 地震波岩相解析

これらの提案項目はいずれも、適地調査の弾性波探査データを利用するもので、新たなデータ取得を必要としない項目である。また、フルウェーブインバージョンによる V_p/V_s の把握を 3D で実施する場合を除いて、研究開発段階は終了し実用段階にある技術である。

(1) フルウェーブインバージョンによる V_p/V_s の把握

CCS 適地調査においては、候補地の地下構造を調べるために、2次元(2D)／3次元(3D)弾性波探査(反射法地震探査)が中心的な技術として使われている。反射法地震探査は、海面付近で地下に向けて発せられた人工地震波が地層境界で反射して戻ってくる現象を利用する地下探査技術であり、各位置で測定した波形を(意味合いとしては)そのまま並べて表

示することにより、(地層境界の深度に応じて遅れて到着する) 反射パルスが地層境界の形状を直接的に描き出すため、「形」を知る手法としては極めてすぐれている。例えば図 4-2 に示す例においては、(岩石の微弱な圧縮と膨張の連鎖として上昇してくる反射波の膨張センスの信号を黒く塗ると規定されている) 断面において、下側により柔らかい岩石がある場合の地層境界が比較的水平的な黒い線(イベント)として描かれるとともに、多数の断層面がより高角度のイベントで表示されている(Yilmaz, 2001) [3]。従って、各イベント形状が得られた理由を地質学的に考察することによって地下構造を推定することができる。



出典 : Yilmaz, O., 2001 [3]

図 4-2 反射法地震探査の断面例

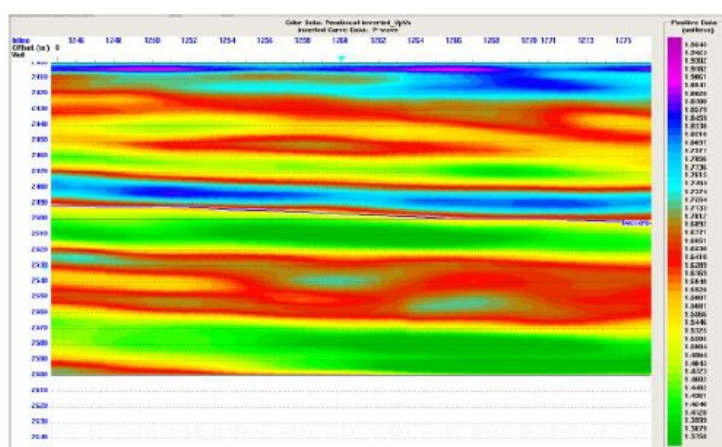
一方で、反射法地震探査の(通常の)断面は、地層(つまり線と線で挟まれた区間)がどのような岩石から構成されているかという情報は提供しない。そこで、現行の CCS 適地調査の初期段階では、既存の坑井と反射断面とを比較し、坑井において砂岩あるいは泥岩が認められた地層の上下境界に対応するイベントを延々と追跡し、境界に挟まれた区間には坑井で確認されたと同じ砂岩・泥岩がどこまでも分布するものと考えられる方法が用いられている。しかし、砂岩や泥岩が堆積した環境は時間的(おおむね反射断面での上下方向と考えてよい)にも空間的にも変化に富むのが普通であり、このような解釈には相当の不確実性が伴う。そして、この不確実性は、3D 弾性波探査を適用しても基本的には軽減しない。

ところが、3D 弾性波探査データは、反射波の到着時刻以外にも多くの地下情報を含んでいる。実際、石油天然ガス探査においては、弾性波探査データに含まれるさまざまな情報を、主として石油天然ガスの直接検出や貯留層の性状把握のために利用することによって成功

を収めてきている。これらの手法を、遮蔽層を対象として適用することを行えば、CCS 適地調査においても大きな効果が得られると予想される。

弾性波探査で主として着目する地震波は、(前述のとおり) 岩石の微弱な圧縮と膨張の連鎖として伝播する波 (P 波) である。P 波は地層境界に垂直に入射すると P 波反射波だけを発生させる。ところが地層境界に斜めに入射すると、P 波の反射波とともに (岩石の横ずれの連鎖として伝播する) S 波の反射波をも発生させる。P 波速度は岩石の体積弾性率 (圧縮力に対する抵抗の大きさ) と剛性率 (せん断力に対する抵抗の大きさ) の両方の情報を含むのに対して、S 波速度は岩石の剛性率の情報だけを含むから、両方の波の速度を知るとは岩石の体積弾性率と剛性率の両方を知ることにつながる。S 波は海水中を伝わらないため、S 波反射波は海域での弾性波探査データとしては直接的には観測されないが、2 種類の反射波の振幅は互いに関係しており、P 波反射波の振幅には実は地層境界での S 波速度の変化に関する情報も含まれている。従って、P 波反射波の振幅を詳細に分析すれば、S 波速度に関する情報をも取得することができ、最終的には、岩石の体積弾性率と剛性率の両方を知ることが原理的には可能である。

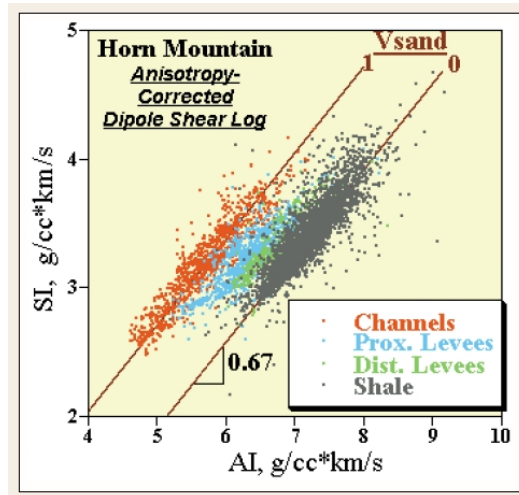
図 4-3 は、カナダ・ノバスコシア州南東沖の島で行われた弾性波探査の結果であり、簡易的な方法で逆解析した P 波速度と S 波速度の比をカラーで表示してある (Arpaci, 2013) [4]。孔隙を埋める流体が水である場合より炭化水素 (とくにガス) である場合のほうが、岩石の体積弾性率は低下するから P 波速度 (V_p) は下がるが、S 波速度 (V_s) はほとんど変化せず、密度の低下によってむしろ若干上昇する。従って両者の比 (V_p/V_s) は炭化水素の存在によって相当に低下することになる。図 4-3 においては、中央付近の緑色 (低 V_p/V_s) のアノマリーが炭化水素の兆候を示しているものと解釈されている。



出典 : Arpaci, T., 2013 [4]

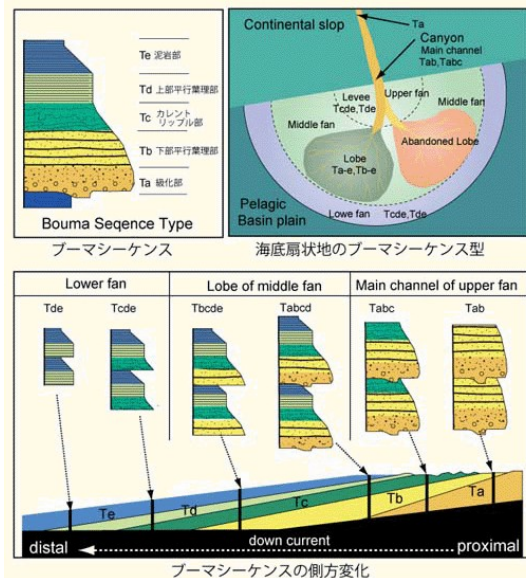
図 4-3 V_p/V_s 比断面に見られる炭化水素兆候
(中央の緑色の層)

一方で V_p と V_s の比は、砂岩泥岩の含有率を表す指標にもなりえる。図 4-4 はメキシコ湾の海底扇状地で取得された速度データを、横軸と縦軸に P 波と S 波のインピーダンス (AI と SI : P 波と S 波の速度に岩石密度を乗じた量) をとって整理したものである (Vernik et al., 2002) [5]。サンプルの採取位置が、チャンネル⇒Levee (扇状地堤防) 中央部⇒Levee 縁辺部⇒海底扇状地外側と移るにつれて砂岩相から泥岩相に変化し (図 4-5)、それにつれて、SI はほとんど変化せず AI だけが上昇する ($AI/SI = V_p/V_s$ が上昇する) ことがわかる。



出典 : Vernik, L. et al., 2002 [5]

図 4-4 メキシコ湾の海底扇状地における P 波インピーダンスと S 波インピーダンス

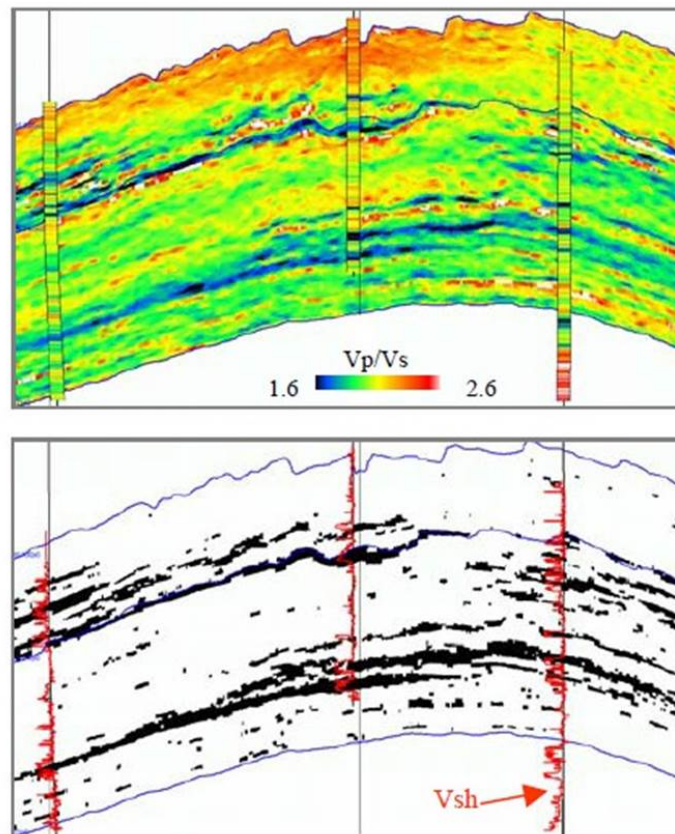


出典 : 柴正博, 2014 [6]

図 4-5 海底扇状地における砂岩泥岩含有率の変化
(扇状地堤防中央部 (proximal) では砂岩相、縁辺部 (distal) では泥岩相に富む)

図 4-6 はこの現象を利用して、海底扇状地の岩相の分布を詳細に検討した結果である (Coulon et al., 2006) [7]。Vp/Vs が低値を示す層 (上段の寒色、下段の黒着色ゾーン) は、坑井で解析された Vsh (泥岩含有量) が低い深度区間とよく一致しており、砂相を示していることがわかる。逆に、上段に暖色で示された高 Vp/Vs ゾーンは泥岩含有率は高いと判断できる。

このような手法を CCS 適地調査に取り入れれば、泥岩層の分布域やその厚さが詳細に把握でき、シール性能の予測性能は各段に向上するものと思われる。



出典 : Coulon, J-P. et al., 2006 [7]

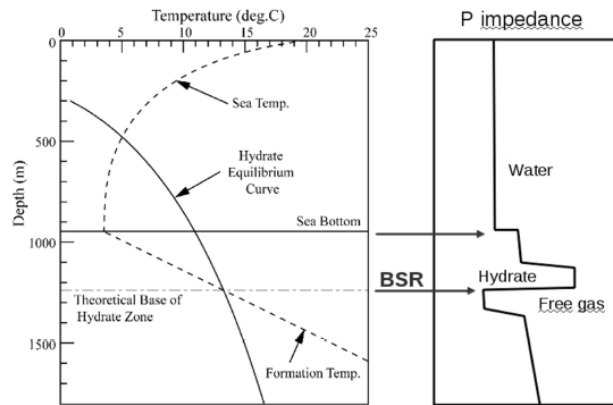
図 4-6 Vp/Vs 断面および低 Vp/Vs ゾーンと坑井での低 Vsh 値の比較

ところで、前述のとおり、弾性波探査データに含まれる (P 波の) 反射波の振幅には S 波速度の情報が含まれており、図 4-6 もその情報を利用して解析したものである。しかし、地震波速度の推定精度は、距離を時間で割り算する本来の方法で求めた方が、はるかに精度が良い。S 波が海中を伝播せず、そのためにその (伝播時間に関する) 情報が、直接的には弾性波探査データに含まれないことは前述のとおりである。しかし、地層境界に斜めに入射することによって発生する S 波は、岩石中においては実際に伝播する。そして、岩石中を

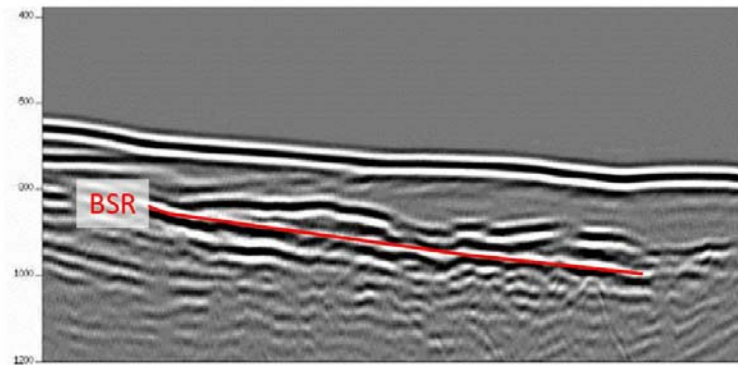
伝播した S 波は海底面で再び P 波に変わり、観測されるのである。従って、このような P 波⇒S 波⇒P 波変換反射波の到着時刻には、岩石中を S 波速度で伝播した情報が含まれている。変換反射波は、P 波モードのまま伝播して観測される反射波とは位相が一致しないため、通常は (S/N 比向上のための作業である重合操作の段階等で) 除去されている。従って、変換波をも利用できる技術を用いれば、S 波速度の解析精度は各段に向上し、石油天然ガス探査では着目されない浅層部についても、分解能が高い結果を得ることが原理的にはできる。このような解析は、全波動場をインプットデータとして使用するフルウェーブインバージョンによって実現可能である。

海域で取得された弾性波探査データを用いたフルウェーブインバージョンは新しい手法であるが、日本近海においても、南海トラフ海底面下のごく浅部に胚胎するタービダイト中のメタンハイドレートを対象にして、すでに行われている。

一般に、海底面～メタンハイドレート層～フリーガスゾーンの深度区間においては、P 波インピーダンス (AI) が図 4-7 (a)に示すように変化するのが典型的である (Barnes and Noble, 2007) [8]。そして、とくにメタンハイドレート層とフリーガスゾーンの境界に大きなインピーダンスコントラストがあることから、この境界面からは強い反射波 (BSR) が得られることが多い。そこで、弾性波探査によるメタンハイドレート濃集体の探査において BSR は、有力な手掛かりとなっている。



(a) メタンハイドレート濃集体の P 波インピーダンスプロファイル



(b) 弾性波探査断面上に現れた BSR (赤線)

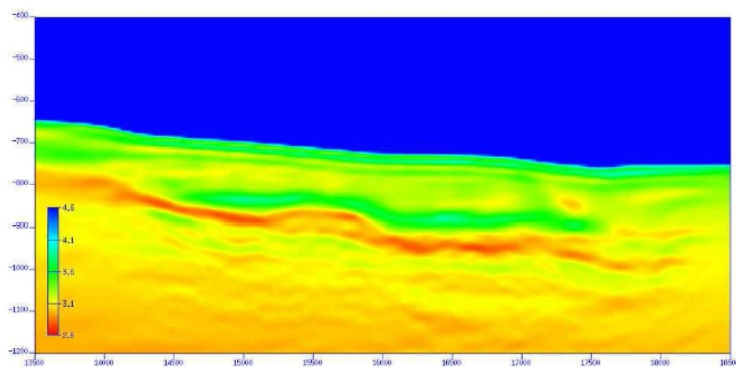
出典：Barnes, C. and Noble, M., 2007 [8]

図 4-7 メタンハイドレート濃縮帯における P 波インピーダンスプロファイルと BSR

図 4-7 (b)に示した南海トラフにおける弾性波探査断面でも、BSR (赤線) が明瞭に観測されている。一方で、同断面上で BSR より下位にあるはずのフリーガスゾーンの下を識別するのは容易ではない。

フリーガスゾーンにおいては、ガスが水に比べて低い体積弾性率をもつことによって P 波インピーダンスは大きく低下するが、剛性率は変化しないため (密度の低下によって) S 波インピーダンスの低下はわずかな程度に留まるため、インピーダンス比 $A_I/S_I (=V_p/V_s)$ は低いアノマリーを示すと予想される。フルウェーブインバージョンはこの特徴に着目して行われ、図 4-8 に示す結果 (V_p/V_s 比) を得た (Barnes and Noble, 2007) [8]。図 4-8 においては寒色で高い V_p/V_s 比を表現しているが、BSR 直下に高 V_p/V_s 値を示す緑色のゾーンが現れるとともに、その直下に低 V_p/V_s 値を示す赤のゾーンが現れており、それぞれがメタンハイドレート層およびフリーガスゾーンを高分解能で示していることが明瞭に見て

取れる。



出典：Barnes, C. and Noble, M., 2007 [8]

図 4-8 フルウェーブインバージョンによって得た V_p/V_s 断面

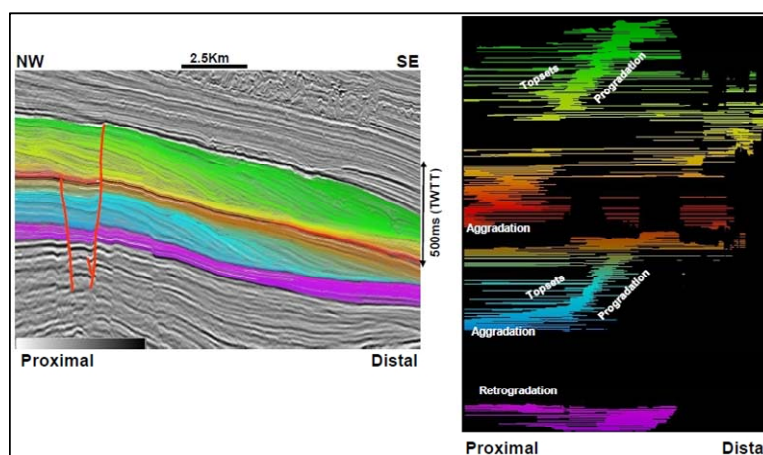
図 4-8 に現れたフルウェーブインバージョンの強力な性能は、浅部地層に対しても同様に発揮されうる。従って、CCS 適地調査においても、今後取得する 3D 弾性波探査のデータに対してフルウェーブインバージョンを適用することによって、浅部地層を含めた対象エリアの V_p/V_s 値の分布を詳細に知ることが可能になる。 V_p/V_s 値は、(前述のとおり) 泥岩含有率と正の相関をもつと考えられるので、フルウェーブインバージョンの結果を適切に解釈すれば泥岩相の分布や厚さを推定することが可能になり、ひいては遮蔽層のシール性能をより精度よく予測することが可能になると考えられる。

(2) 3D シーケンス層序学のアプローチ

砂岩泥岩の分布は、堆積学に基礎を置くシーケンス層序学的なアプローチによっても推定することができる。前項で述べたとおり、現行の CCS 適地調査においては、既存の坑井と弾性波探査断面とを比較し、坑井において砂岩あるいは泥岩が認められた地層の上下境界に対応するイベントを延々と追跡し、境界に挟まれた区間には坑井で確認されたと同じ砂岩・泥岩がどこまでも分布するものとする方法が用いられている。そしてその際、追跡する主要イベント以外のマイナーな反射イベントについては、基本的には注意が払われていない。ところが、砂岩層、泥岩層とひとくくりにする深度区間の中にも、マイナーな反射波イベントは多数観測されるのが普通であり、これらのマイナーイベントは堆積環境についての情報を豊富に含んでいることが多い。

図 4-9 (左図) に示した弾性波探査断面にも、着色して示した多数のマイナーイベントが現れている (dGB Earth Science, 2014) [9]。これらのマイナーイベントは、主要なイベントとは異なり、長い距離にわたって連続するとは限らず、その多くは他のイベントに取れん

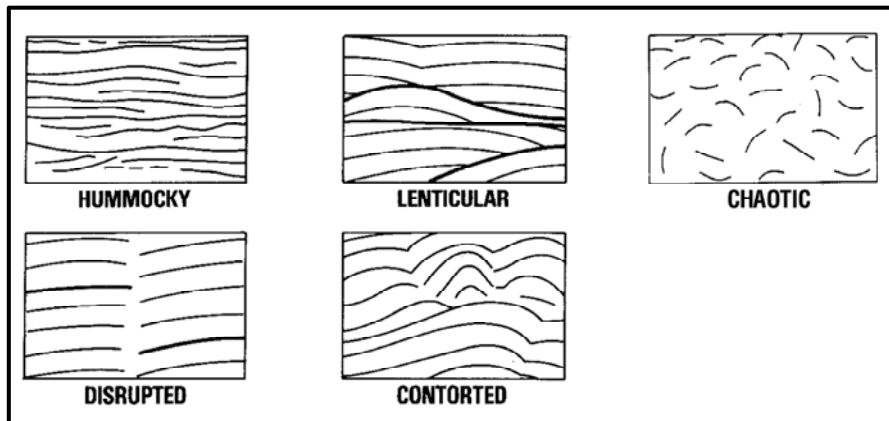
したり遮られたりして途切れている場合が多い。しかし、マイナーイベントは同じ堆積時期を示す面とも考えられるので、それらを水平線分に置き換えた上で、下位から上位に向けて順に並べて表示してやれば、その結果できあがるグラフ（図 4-9 右図）は、堆積時期を縦軸にとった時間層序断面とみなせるものとなる。これを **Wheeler** ダイアグラムという。**Wheeler** ダイアグラムは、各マイナーイベントが途切れる様子をその時期（縦座標）と位置（横座標）を含めて表示することになるが、それらは、その時期にその場所が堆積物の最遠到達点であったり堆積が休止する環境にあったりした（海中での堆積空間の減少や地表面の陸上への露出によって堆積が止まった）ことを物語る。また、途切れる場所が縦軸上方に向かうにつれて水平に移動するようであれば、それは海進海退作用によって海岸線が移動した痕跡であると解釈できる。



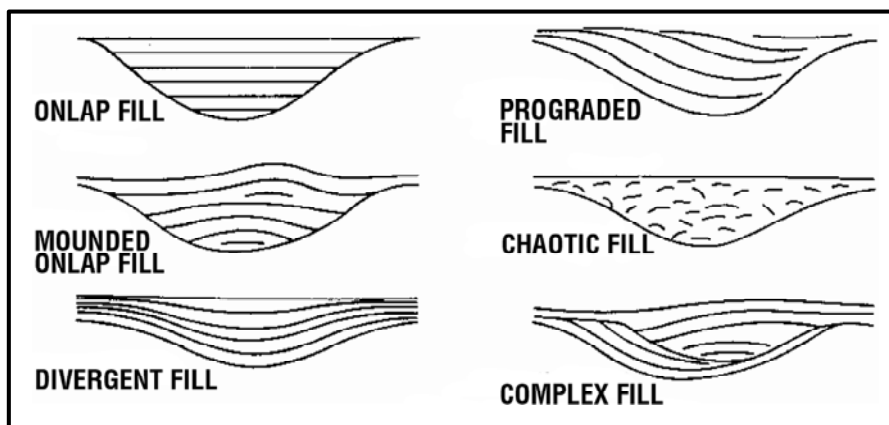
出典：dGB Earth Science, 2014 [9]

図 4-9 マイナーイベントの解釈と Wheeler ダイアグラム

一方、マイナーイベントは、その形状自体（図 4-10(a)）や谷状構造を埋める様子（図 4-10(b)）などにさまざまな特徴をもって現れることが多い（Stoker et al., 1997）[10]。例えば **Contorted**（屈曲）なパターンは泥質の土石流である場合が多い。そしてマイナーイベントの各パターンは、過去に蓄積されてきた膨大な知見を活用して識別することによって、それらが生じた堆積環境の意味自体もが解釈できる場合が少なくない。従って、これらのマイナーイベントの出現様式を、主要イベントによって解釈される地下構造や **Wheeler** ダイアグラムから解釈される海水準情報等に照らして詳細に解釈することを行えば、多数のイベント兆候の中から砂泥分布を示す情報を選択的に抽出することも相当程度可能である。



(a) マイナーイベントのパターン



(b) マイナーイベントによる谷状地形の埋め方のパターン

出典：Stoker et al., 1997 [10]

図 4-10 マイナーイベントの出現パターン

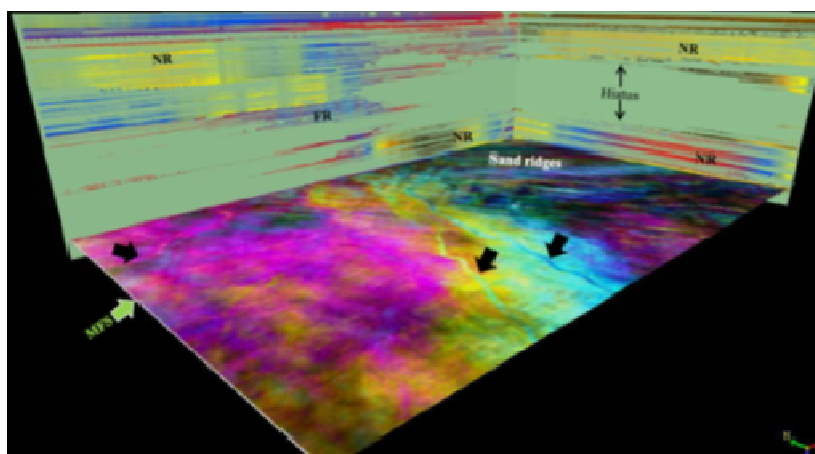
このようなシーケンス層序学的なアプローチは、2D 弾性波探査段階においても採用することができる。しかし、2D 探査の測線は必ずしも堆積物の動きに沿っているとは限らず、測線配置によっては解釈が困難である場合も少なくない。それに対して 3D 弾性波探査においては、任意の方向に沿った断面を表示したり、水平面（スライス）を表示したりすることもできるため、相当に有利である。

図 4-11 は 3D 弾性波探査データによる Wheeler ダイアグラムと一つの等時間スライスをと、ともに周波数成分の RGB ブレンド法（図 4-12）を用いて立体表示したものである（dGB Earth Science, 2014） [9]。RGB ブレンド法は、弾性波探査波形を小時間区間ごとに周波数分解し、有意な 3 周波数に光の三原色（赤、緑、青）を割り当てて、各周波数成分の強弱を各原色の濃淡で表示したものを重ねて表示する方法であり、地震波の周波数特性を視覚的

に示すことができる。これらの表示法を複合的に用いれば、等時間スライス上に現れるさまざまな地形学的特徴（例えば蛇行河川の痕跡）や、それらと海岸線との平面的な位置関係などの堆積環境などを総合的に考察することが可能になり、堆積学的に詳細な解釈ができる。

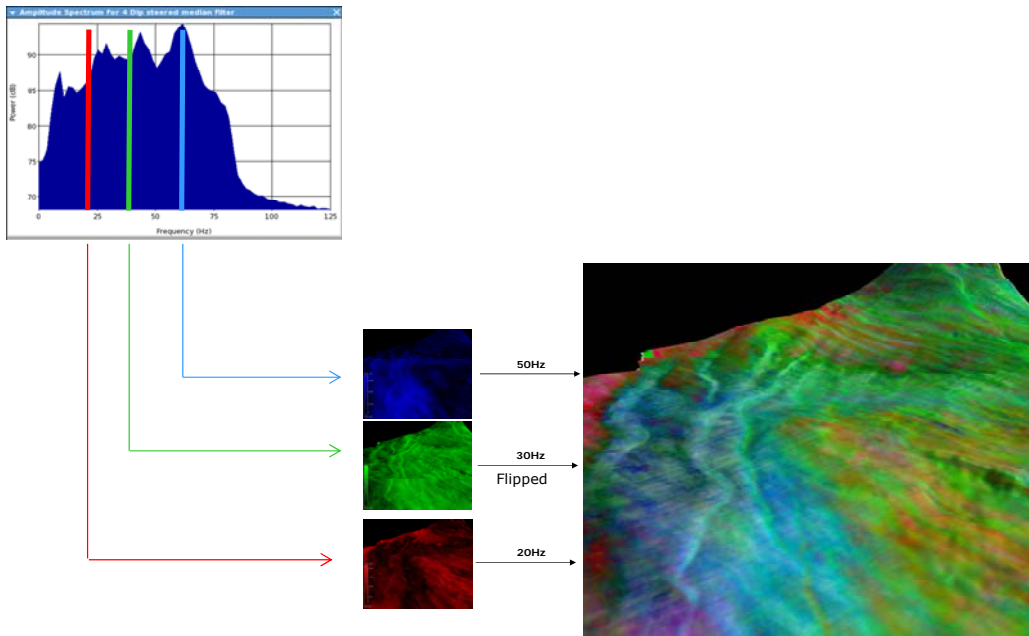
また、図 4-13 は、特徴的なマイナーイベントで分割した複数の区間の時間層厚を、その水平変化を色で表現することによって表示したものであり、供給された堆積物が前進平衡作用を示しつつ堆積した様子が明瞭に解釈できるものになっている（dGB Earth Science, 2014） [9]。ここで、前進平衡作用とは、陸地から供給される堆積物によって、浜堤平野・デルタ・海底扇状地などの堆積地形が沖側に進出することである。

以上に述べたようなシーケンス層序学的アプローチを 3D 弾性波探査のデータを用いて行えば、堆積物が堆積した環境を相当程度推定することができ、その結果から貯留層・遮蔽層の分布や厚さを推定することや、ひいては遮蔽層のシール性能をより精度よく予測することが可能になると考えられる。



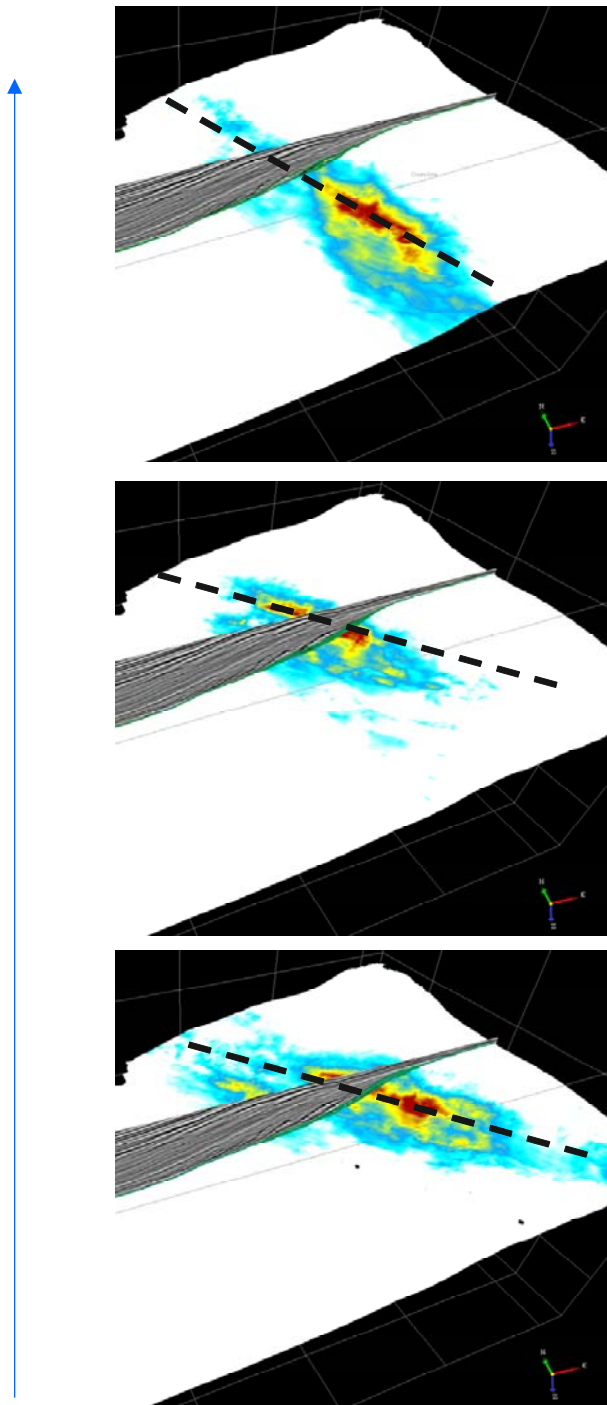
出典：dGB Earth Science, 2014 [9]

図 4-11 3D-Wheeler ダイアグラムと等時間スライスの RGB 法による立体表示の例



出典：dGB Earth Science, 2014 [9]

図 4-12 周波数成分の RGB ブレンド法による表示例



出典：dGB Earth Science, 2014 [9]

図 4-13 マイナーホライズン間の時間層厚の変化から前進平衡作用が解釈できる例
 (青の矢印は時間の進行を、黒の破線は海岸線の位置を示す)

(3) 3D 地震波岩相解析

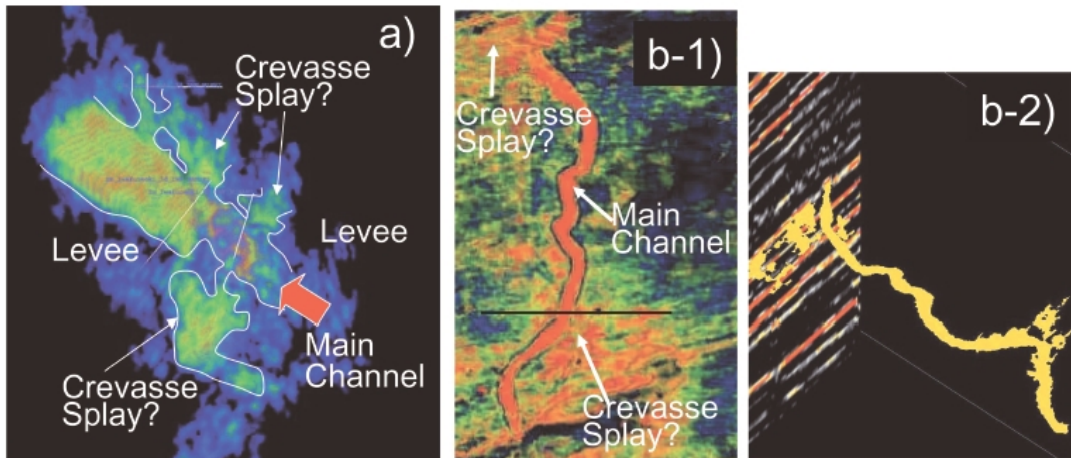
(1)、(2)では、3D 弾性波探査の結果を、フルウェーブインバージョンや Wheeler ダイアグラムといった方法で処理した上で、岩石物理的あるいは堆積学的な方法によって解釈して遮蔽層のシール性能を予測するアプローチについて述べた。同様なことは、反射イベントが有する属性のうちの一部だけを強調して表示したり、さまざまな属性に多変量解析を施してクラスタリングを行った上で表示したりするといった工夫を行うことによっても行える。このような手法を地震波岩相解析という。

前項で述べたように、反射イベントは地層境界近傍の地質状況を反映して、さまざまなパターンとなって現れる。従って、例えば反射イベントの振幅に着目して、それがある基準をみたく場合だけを選択的に表示するというようなことを行えば、その基準がなんらかの地質的变化に合致しているとき、そのような表示によって地質状況が視覚的に浮き彫りになるということがあり得る。例えば図 4-14 は、強い正振幅のイベントだけを表示して、負の振幅は非表示とする方法によったスライス例である (高野・西村, 2009) [11]。海底扇状地のチャンネル跡や扇状地堤防が視覚的に表示されており、とくに砂岩の発達域を解釈するために極めて効果的な図となっている。

さらに、多くの反射イベントは、反射波の振幅ばかりでなく、位相、周波数、およびそれらの時間的な変化率や空間的な連続・不連続など、さまざまな属性を有している。(前項で説明した周波数成分の RGB ブレンド法による表示は、反射イベントがもつ周波数特性という属性を抽出して視覚化した例である。) 従って、多くの属性を扱える多変量解析的な方法を用いれば、各反射イベントを有意にクラスタリングすることが可能である。またこのとき、例えば検層データを教師データとするなどの方法をも取り入れることによって、クラスタリングの結果を地質的により意味のあるものにすることができる。

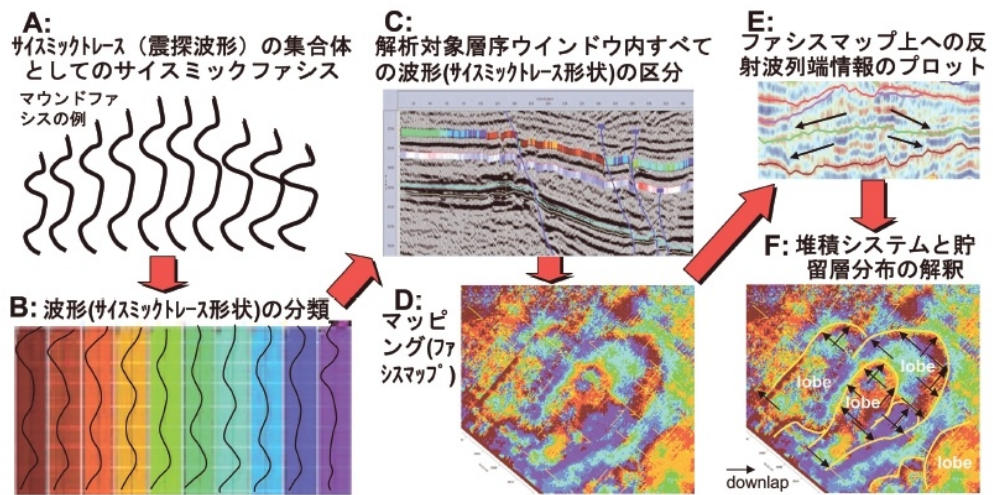
図 4-15 はこのような解析を行った例である (高野・西村, 2009) [11]。この例においては、地震波形を岩相の最小構成要素ととらえ(A)、指定した数の波形パターンに分類し(B)、マッピングを行っている (C、D)。その上で、分布パターン (D) とマイナーイベントのパターン情報 (E: 前項で述べた内容) の両方を使うことにより、舌状体として分布する砂岩相を解釈することに成功している (F)。

以上に述べたような地震波岩相解析を 3D 弾性波探査のデータを用いて行えば、堆積物のとくに地形学的な形状を視覚的に表現することができ、その結果から貯留層・遮蔽層の分布や厚さを推定することや、ひいては遮蔽層のシール性能をより精度よく予測することが可能になると考えられる。



出典：高野修・西村瑞恵, 2007 [11]

図 4-14 反射イベントの振幅に着目した選択的な表示の例



出典：高野修・西村瑞恵, 2007 [11]

図 4-15 多変量解析による地震波岩相解析の例

最後に、実証サイトの検討に向けて収集・整理したデータについてまとめる。

適地調査では、地質探査データや地質構造解析によって、二酸化炭素の貯留適地を評価することが目的であるため、二酸化炭素の排出源の位置や輸送方式は考慮されない。そのため、シャトルシップを活用した輸送と、シャトルシップからの海底下への直接圧入を想定した場合に必要な諸元を収集・整理した（表 4-2）。なお、諸元を収集する海域については、適地調査の調査海域の候補になる可能性があると考えられた 8 海域を対象とした（資料編 4-6 参照）。

表 4-2 8 海域における諸元一覧表

ランキング	S	S	S	S	A	A	A	B
名称	山陰-九州北部沖				石狩湾	北陸-隠岐沖		天草-五島沖
	11b	11c	11d	11f, B9-4	2	10a	10b, B8-1	B14-1
	島根・山口	長崎	山口・福岡	島根	北海道	鳥取・兵庫	石川・福井	鹿児島
貯留可能量(億トン)	40.73	116.04	16.37	35.46	16.56	5.86	4	73
面積(km ²)	718	1195	839	1433	111	140	230	338
単位面積貯留可能量(MMt/km ²)	5.7	9.7	2	2.5	14.9	4.2	1.7	21.6
平均水深(m)	≥180	130-180	100	150	20~30	290	400	835
離岸距離(km)	110	5~15	20~40	20	5~10	30	70	67
輸送距離(km)	548	351	426	600	2080	705	970	185
平均傾斜(°)	0.9	0.3	0.8	1.8	2.9	1.0	0.8	1.2
地層傾斜(°)	7	1	7	8	4	1	2	2
海水面温度(°C)	18.52	20.44	20.61	18.82	13.71	17.67	18.15	22.17
海底面温度(°C)	0.41	14.31	6.84	0.48	1.29	1.05	1.02	5.80
経度	130.855	129.166	130.628	132.321	141.055	134.184	136.264	129.462
緯度	35.744	34.406	34.395	35.874	43.533	35.919	36.878	31.774

出典：各種報告書を基に作成[1] [2]

輸送距離：三池港からの距離

平均傾斜：海底面の平均傾斜

海水面・海底面温度：JODC(日本海洋データセンター) の年平均値データを参照

参考文献

- [1] 日本 CCS 調査株式会社. 全国二酸化炭素貯留層基礎調査報告書. H26 年 3 月.
- [2] みずほ情報総研株式会社、産業技術総合研究所、千代田化工建設株式会社. 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. H26 年 3 月.
- [3] Yilmaz, O., 2001; Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data: 2nd ed., SEG.
- [4] Arpaci, T., 2013; Comparison of AVO, Prestack Impedance Inversion, and Poststack Impedance Inversion: Lithology and Pore Fluid Discrimination in the Scotian Basin, Nova Scotia, Canada, SEG ann. Mtg., 2341-2346.

- [5] Vernik, L. et al., 2002; Estimation of Net-to-Gross from P and S Impedance in Deepwater Turbidites, *The Leading Edge*, 380-387.
- [6] 柴正博, 2014; 地質調査入門: 第4版, 駿河湾団体研究グループ
- [7] Coulon, J-P. et al., 2006; Stratigraphic Elastic Inversion for Seismic Lithology Discrimination in a Turbiditic Reservoir, *SEG ann. Mtg.*, 2092-2096.
- [8] Barnes, C. and Noble, M., 2007; Feasibility Study to Quantify Gas Hydrates using an Anisotropic Full Waveform Inversion in the Time Domain, *SEG ann. Mtg.*, 1825-1829.
- [9] dGB Earth Science, 2014; Training Course Materials.
- [10] Stoker et al., 1997; Seismic Methods and Interpretation, in *Glaciated Continental Margins*, 9-26, Springer.
- [11] 高野修・西村瑞恵, 2007; 三次元サイスミック地形学 (seismic geomorphology) 手法による貯留層のイメージングと分布解析: 海底扇状地タービダイト砂岩を例として, *石油技術協会誌*, 40-51.

4.2. モニタリング手法の検討

CO₂ 海底下地層貯留の実施により、万が一、CO₂ が海底下から漏出した場合を想定した海洋環境への影響評価のための事前環境調査、及び、漏出がないこと又は漏出の検知のためのモニタリングについては、「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律」（昭和 45 年法律第 136 号、以下、「海防法」という。）の枠組みで、それらの手法検討が行われている（環境省水・大気環境局）。しかしながら、その検討は、基本的には、現在、国内唯一の CO₂ 海底下地層貯留の候補地点である苫小牧沖をはじめとした沿岸域を想定した枠組みであり、一方で今般の検討対象は、水深 200m 程度あるいはそれ以上の大水深海域が対象となる点が大きく異なることから、この状況に対応した検討が必要である。

CO₂ 海底下地層貯留は、新しく社会に導入されようとしている技術であり、その実施に当たっては、安全性に関して生ずるであろう市民の警戒感・疑念に応じ、それらを払拭する必要がある。したがって、本「モニタリング手法の検討」の目的は、海防法における検討と同様、以下の 2 点である。

- ・ CO₂ が海底下から漏出した場合を想定した海洋環境への影響評価のための事前環境調査（ベースライン調査）手法の確立
- ・ CO₂ 圧入開始後に行う、漏出がないこと又は漏出の検知のためのモニタリング手法の確立

海底下 CCS 技術において正確な漏洩箇所を事前に把握することが極めて難しいことから、モニタリングは圧入地点を中心とした広い面積をカバーすることが必要である。また影響を最小限に抑えるためには、いち早く漏洩 CO₂ を検知し、圧入中断などの緩和処置を行うことが重要である。そのためには時間的・空間的に密な連続モニタリングの適用が不可欠である。

さらに、水深 200m を超える海底下では、温度圧力条件から CO₂ がハイドレート化する可能性が高い。このため、大水深海底下を対象とした CO₂ 地層貯留では、万が一、海底下貯留層から上方の海底下地層中へ CO₂ が漏出した場合でも、CO₂ ハイドレートが漏出経路を閉塞し、海水中への CO₂ 拡散が免れられる可能性がある。この特性は、沿岸部の浅海底を対象とした場合と比較して、大水深海底下を対象とした CO₂ 地層貯留が持つ、環境保全面でのアドバンテージであると考えられ、本事業がうたっている「環境配慮型 CCS」の目的達成のための重要な要素とみなされることから、上記に加えて、下記の目的が加えられるべきである。

- ・ 漏出 CO₂ のハイドレート化の可能性の検討、及びハイドレート化を加味した漏出 CO₂ の海水中挙動の検討

これらの目的の達成のため、水深 200m 以深の海底下への二酸化炭素貯留における二酸化炭素連続モニタリングの必要性及びその手法を検討し、以下の 6 つの課題を立てて技術開発等を行った。モニタリング手法の検討における各課題の位置づけを図 4-16 に示す。

- a. 海底下地下における CO₂ ハイドレートバリア層の基礎特性調査
 - a-1. 海底下地下におけるハイドレートバリア層の基礎特性試験 (4.2.1 に記載)
 - a-2. 海底下地下におけるハイドレートバリア層形成に関する数値シミュレーション (4.2.2 に記載)
- b. 海底地形を考慮した漏洩 CO₂ の海中漏出・拡散シミュレーション
 - b-1. 複数計測点情報からの CO₂ 漏出位置推定法の開発 (4.2.3 に記載)
 - b-2. 海底面漏出形態予測法の開発 (4.2.4 に記載)
- c. 水深 200m 以深における CO₂ 漏洩のための連続モニタリングシステムの最適化
 - c-1. 連続モニタリングシステムに係る技術動向調査および開発 (4.2.5 に記載)
 - c-2. 連続モニタリングセンサーの開発及び性能評価 (4.2.6 に記載)

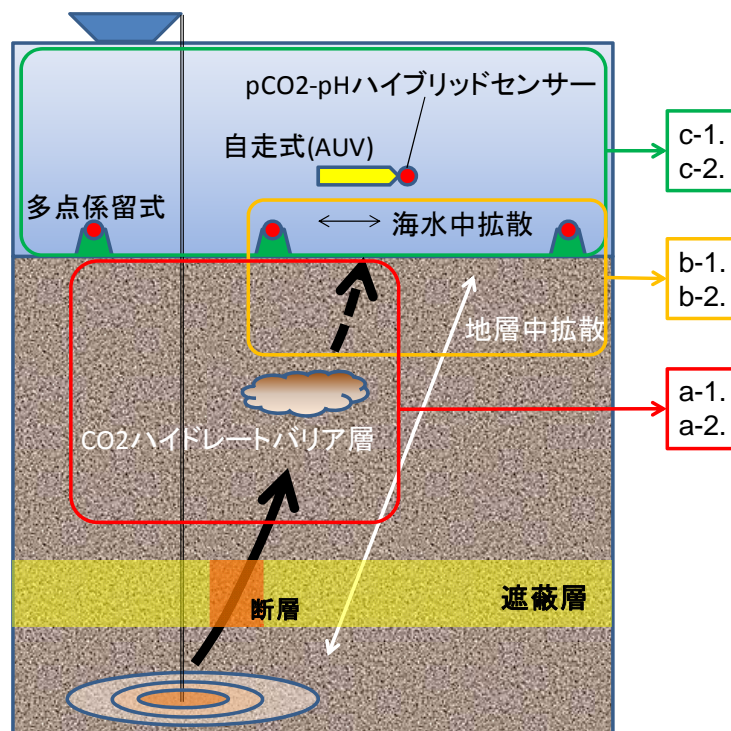


図 4-16 モニタリング手法の検討における各課題の位置づけ

4.2.1. 海底下地下におけるハイドレートバリア層の基礎特性試験

4.2.1.1. 背景及び目的

純水中における CO₂ ハイドレートに関する平衡物性の測定に関する試験研究がこれまで行われてきた。しかし、生成解離の制御が困難であるため、平衡以外の条件におけるデータが不足しており、個々の状況に応じた試験研究が不可欠である。特に多孔質中の CO₂ ハイドレートに関する研究例は不足しており、大深度海底下地下における CO₂ ハイドレートバリア層生成の有無、ハイドレート層の浸透率や強度などに関する研究が必要である。バリア層を透過して海水中に流出し得る CO₂ の漏洩プロセスや漏洩量の理解は、モニタリング条件の検討に不可欠である。そこで本項目では CO₂ バリア層形成をラボ試験で確認するとともに、浸透率等の基礎特性を明らかにする（資料編 4-7）。

4.2.1.2. 方法

H26 年度はまず、基礎特性データ取得用の試験装置を構築する。また、各種測定システムを構築する。純水の浸透率の測定実験結果を既往の研究と比較して、特性試験評価法の妥当性を検証する。更に、CO₂ バリア層形成試験のプロセスを検討しつつ、ハイドレートバリア層形成の有無を確認し、浸透率や破断圧力といったバリア層の基礎特性の評価を開始する。

4.2.1.3. 結果及び考察

①試験装置

ハイドレートバリア層を形成し、その浸透率や破断圧等の基礎特性を評価するため、試験システムを構築した（資料編 4-8）。試験ではハイドレート形成前の温度、圧力、CO₂ 圧入量を初期設定条件とし、ハイドレートバリア層形成の有無及び形成された部位の多孔質中に設置した複数の熱電対の温度変化から判断することとした。また、ハイドレート生成後に高圧定量ポンプで通水し、バリア層上流及び下流の差圧を測定することでその浸透率を求める。ほぼ通水できずに差圧が上昇し続ける場合も、そのまま通水を続け、差圧が急激に変化する直前の最大差圧を破断圧力として測定する。

堆積層の砂としては 7~8 号(75~125 μ m)の大きさの珪砂が想定されることが多い。本試験では再現性と一般性の観点から、主成分が同じ SiO₂ であるガラスビーズを利用することとした。本年度は粒径 100 μ m(105~125 μ m)のビーズを用いることとした。

本事業では水深約 800m までを想定しており、安全性の観点から試験容器には耐圧 20MPa の円管を利用した。この円管は高さ 250mm、内径 49.5mm、内容積 481ml である。試験システムの全圧測定は 20MPa まで測定可能な歪式圧力計を円管の上流川下流側にそ

れぞれ設置して行う。ハイドレート生成の有無を検出するための温度計は T 型熱電対 (1/16inch) を利用することとし、ハイドレート生成部位の把握ができるよう、10 本を円管に設置した。浸透率等を評価するための差圧計は測定レンジの異なるものを複数用意し、予備試験結果を踏まえて測定レンジを決定することとした。浸透率等の測定時に必要な通水用のポンプは、常圧の水を高圧環境下に圧入するタイプの二連プランジャ式ポンプを準備した。最低-40°C まで冷却可能な冷凍機とヒーターを組合せて任意の温度に数十リットルの水温を制御できる温調システムを用意し、これを用いた温調した水に試験システム全体を浸けて円管の温度制御を行った。試験システム構築においてはハイドレート生成等に起因すると思われる破砕ビーズによる継手類センサ類などの機器損傷が多く発生するため、健全性を頻回に確認するとともに焼結フィルタ設置等による対策を施した。

② 予備試験

構築した試験システムを用いて、予備試験を行った (資料編 4-9)。予備試験では、システムの動作確認を行うとともに、CO₂ の圧入方法や圧入位置を検討した。また、差圧系のレンジを選定するための試験も行った。

浸透率測定の際の通水について、高圧条件で通水する場合もシステム全圧力の上昇を抑制して試験条件を保つ必要があるため、ガス緩衝器を作成した。ポンプ通水量、差圧の大きさと圧力上昇を抑制するためのガス緩衝器の容量のバランスを確認する予備試験についても実施した。また、既所有の高圧ポンプは二連プランジャ式のもののみであり、通水時に一定の圧力脈動が生じる可能性がある。この圧力脈動が差圧に対して十分に小さくなる通水条件を調べるための試験も実施した。更に、円管に充填するビーズの間に 10 本の熱電対を設置してハイドレート生成の有無や生成場所を確認するが、一般的に個々の熱電対の熱起電力には 1°C 以上のばらつきがあるため、標準温度計を用いてこれらの較正試験を行った。

予備試験の結果、CO₂ を容器下部から注入する場合、模擬堆積層中の温度変化が見られず、入り口配管内でハイドレート生成したと考えられるケースが多かった。容器内部の直接観察はできないが、確実に模擬堆積層中にハイドレートを形成するため、試験容器側面から CO₂ を圧入する方式を選択した。液体 CO₂、CO₂ 溶解水を圧入し、一定の生成誘導時間内におけるハイドレート層の形成有無について確認した。このとき各種分注器や指示薬を用いた CO₂ 溶解水の濃度検定も実施した。最終的には、試験システムのガス緩衝器容量等を考慮し、液体 CO₂ を圧入する方式を選定し、圧入時の圧力及び圧入 CO₂ の体積から液体 CO₂ 圧入量を制御した (資料編 4-10)。

③ハイドレートバリア層基礎特性評価

予備試験を通じてハイドレートバリア層の浸透率や破断圧といった特性を評価するための試験プロセスについて検討した(資料編 4-11)。また、ハイドレート層の無い純水のみで浸透率を測定した結果、先行研究とほぼ等しい値を得たことから、評価測定方法として妥当であることを確認できた。ハイドレートを形成した条件においても浸透率、破断圧の測定を行い、これらを実現可能であることを確認した。例えば、11°C、5MPa の条件でCO₂ を圧入し、その後、3~5°C まで温度を低下させてハイドレートバリア層を形成させ、3~5°C、5~6MPa で数時間維持して温度圧力が安定した後に浸透率を測定した結果、浸透率 3.8~4.8[μm²]との結果を得た。また、通水時に差圧が一定とならずに上昇を続けたケースも見られたが、例えば 7kPa で差圧が急減少したことから、この場合は 7kPa の差圧でハイドレート層が破断したと考えられる。以上のように、ハイドレートバリア層の基礎特性試験を開始した。

また、想定される海底の温度圧力条件を検討した結果、3~8°C、5~10MPa の範囲で実験を行う必要があると考えられたため、H27 年度はこれらの条件で浸透率/破断圧、誘導時間を測定することを計画している。H27 年度は孔隙率、CO₂ 圧入量についてもパラメータとし、その影響を調べる。模擬堆積層の砂径として最大 0.5mm までの範囲を想定して試験を行う。

4.2.2. 海底下地下におけるハイドレートバリア層形成に関する数値シミュレーション

4.2.2.1. 背景及び目的

水深約 200m 以深の海底下に CO₂ を貯留する場合、万が一漏洩が起きた場合でも、CO₂ が浮力あるいは注入時の内圧によって海底面近くまで上昇してくると、低温・高圧のためにハイドレート化し、これが漏洩のバリアとなって海底への漏出を抑制することが期待される。

地層中を浮力で上昇する CO₂ が温度・圧力的にハイドレート安定領域に入ると、移動しながらハイドレートが生成する。この生成速度と CO₂ の移動速度の大小が閉塞現象に大きく関与している。ところがこれまで国内外で行われた CO₂ ハイドレート生成に関する数値シミュレーションは気相液相とも静止状態が主であった。

そこで、孔隙内を、水を押出しながら移動する CO₂ がハイドレート化する現象を対象に、砂層中への CO₂ 圧入および CO₂ ハイドレート生成を模擬した三次元数値シミュレータを、メタンハイドレート回収用プログラム TOUGH+ HYDRATE v1.0 [1] を改良することで作成する（資料編 4-12）。各モデルおよびモデル内で用いられているパラメータに関しては乾ら[2] が行った実験とのフィッティングによって求めることとする（資料編 4-13）。シミュレーションを通じて、生成モデル内で使われているハイドレート膜における亀裂の割合について、既存のモデルの検証を行うとともに、新規モデルを提案する。

4.2.2.2. 方法

(1) 気液二相流動モデル

砂層中の気液の流れは Darcy 則に従うとし、流束を計算する上での相対浸透率モデル、毛管圧力モデルとしては以下の Brooks and Corey モデルを用いた。

$$k_{rG} = (1 - S_e)^{n_{kG}} (1 - S_e^2) \quad (4.2.2-1)$$

$$k_{rA} = (S_e)^{n_{kA}} \quad (4.2.2-2)$$

$$P_c = -P_d (S_e)^{n_{Pc}} \quad (4.2.2-3)$$

ここで、 S_e は有効液相飽和率、 k_{rG} は気相の相対浸透率、 k_{rA} は液相の相対浸透率、 P_c はキャピラリ圧、 P_d はキャピラリ圧の基準値である。式(4.2.2-2)の液相相対浸透率の次数 n_{kA} に関しては Corey モデルと等しく 4.0 とし、式(4.2.2-1)中の気相相対浸透率の次数 n_{kG} および式(4.2.2-3)中の毛管圧力モデルの次数 n_{Pc} に関しては実験結果とのフィッティングにより求めることとした。

(2) 液相中への気相溶解モデルの導入

従来の TOUGH+ HYDRATE の支配方程式は、液相（ここでは水）、ハイドレートのガス

ト分子となる気相（ここでは CO₂）、ハイドレートの 3 物質の質量保存則および熱の収支式の 4 つである。ここで液相中の CO₂ 濃度は陰的に解かれる変数に含まれず、常に液相の CO₂ 飽和濃度に設定される。本検討では、CO₂ が溶解していない水に CO₂ ガスを圧入する実験を再現するため、ガスが徐々に溶解する過渡的な状態を表現できるようプログラムを改良する必要がある。このため、液相中 CO₂ 物質収支式を陰解法マトリックスの中に組み込み、元々は 4 次元であったニュートン法を解くプログラムを 5 次元に変更した。

CO₂ の液相への溶解速度は以下の式(2.4.4-4)で表される。式中の物質移動係数 k_f の値に関してもフィッティングパラメータとした。液相 CO₂ 濃度 $c_{CO_2}^l$ と平衡 CO₂ 濃度 $c_{CO_2}^{eq}$ の差を駆動力としている。

$$Q_{CO_2, sol} = -k_f A_f (c_{CO_2}^l - c_{CO_2}^{eq}) \quad (4.2.2-4)$$

ここで、 A_f は気液界面の面積、 $Q_{CO_2, sol}$ は CO₂ の水への溶解速度である。

(3) CO₂ ハイドレート生成モデル

ハイドレート生成速度モデルには以下の乾ら[2] によって提唱された式を用いた。

$$Q_H = k_f^i (x A_f) (f_{CO_2}^g - f_{CO_2}^{eq}) + (1-x) A_f \frac{(f_{CO_2}^g - f_{CO_2}^{eq})}{\left(\frac{h}{k_d^h}\right) + \left(\frac{1}{k_f^i}\right)} + k_f^l A_s (f_{CO_2}^l - f_{CO_2}^{eq}) \quad (4.2.2-5)$$

ここで、 Q_H はハイドレート生成率、 k_f^i はハイドレート生成速度定数、 $f_{CO_2}^g$ は CO₂ ガスのフガシテ、 $f_{CO_2}^{eq}$ はハイドレートと平衡状態の CO₂ が溶解した水のフガシテ、 $f_{CO_2}^l$ はある CO₂ 濃度の水のフガシテ、 k_d^h は CO₂ 分子がハイドレート膜を通過する速度定数、 k_f^i はハイドレート生成速度定数、 h は気液界面に生成されたハイドレート膜の厚さである。ハイドレート生成速度定数に海外ヒアリングで得た値を使用した（資料編 4-15）。式(4.2.2-5)の右辺第 1 項は新規気液界面でのハイドレート生成速度、第 2 項は生成したハイドレート膜の膜成長速度、第 3 項は液相中に溶解した CO₂ と水との反応によるハイドレート生成速度を表す。

ハイドレート化することで、使われた水の体積に対しハイドレートの体積は増加する。これにより砂粒にはさまれた気液界面に生成するハイドレート膜は面内圧縮を受ける。そこで

気液界面で生成されたハイドレート膜にある割合 x で亀裂が生じると考え、気液界面の面積にかけ合わせることで新規な気液界面の面積を表現している。

また、ハイドレートが形成された計算格子内では流動抵抗の増加により浸透率 k が変化すると考えた。その低減率の計算には以下の Masuda et al. [4] のモデルを用いた。

$$k_{rH} = (1 - S_H)^N \quad (4.2.2-6)$$

ここで、 k_{rH} はハイドレートの存在による有効浸透率、 S_H はハイドレート飽和率（孔隙中のハイドレートの体積分率）である。式(4.2.2-6)中の N についても実験結果とのフィッティングにより求める。

(4) ハイドレート膜における新規気液界面の割合モデルの提案

亀裂の割合モデルとしてハイドレート膜厚に依存する Takahashi et al. [3] のモデルがある。

$$x = \exp(-ah^2) \quad (4.2.2-7)$$

ここで、 a はモデル定数である。ただしこの亀裂モデルは静止している気液界面におけるものであり、今回対象とする砂層中の水を押し出しながら進行する CO₂ ガスのフロントの表面に生成するハイドレート膜の亀裂とは発生メカニズムが異なる。フロントのハイドレート膜の亀裂は、主に、進行するフロントが砂粒子と接触したり、乖離したりすることによると考えられる。従って新規気液界面の割合はハイドレート膜の厚さ関数ではなく、ハイドレートに囲まれる水の易動性と、それを置換しようとするガスの速度に依存する関数であると考えた。すなわち液相浸透率が高く、周りのガスの速度が大きい環境ほどハイドレート膜の亀裂の割合は大きくなるようなモデルとして、新たに以下の(4.2.2-8)式を提唱した。

$$x = \chi p_G M_A \quad (4.2.2-8)$$

$$M_A = \frac{kk_{rA}}{\mu_A} = \frac{k_S (1 - S_H)^N (S_e)^2}{\mu_A} \quad (4.2.2-9)$$

ここで、 M_A は水の易動性、 χ はモデルパラメータ、 p_G は圧力、 μ_A は水の粘性係数、 k_S は絶対浸透率である。

4.2.2.3. 結果及び考察

x_0 の値に 6.125×10^{-2} を代入し、 $N=20$ [5] として計算したところ、表 4-3 に示す Exp. 1 で実験結果とおおよそ合致する結果が得られた。また Exp. 2 の条件でシミュレーションを行ったところ、Takahashi et al. [3] のモデルのみでは再現できていなかった温度変化や差圧を実験データに近づけることができた。図 4-17 に、新規モデルを用いた場合の Exp. 1 および Exp. 2 の実験結果を示す。図中 T1~T7 は圧力容器に注入側から 5cm おきに設置された温度計を意味している。ハイドレート生成による流動抵抗の増加および液相の易動性によって、亀裂発生の抑制を評価することの妥当性が示された（資料編 4-14）。

表 4-3 実験の初期条件
(出典) Takahashi et al. [3]

	Exp. 1	Exp. 2
初期温度 [K]	275.15	278.15
初期圧力 [MPa]	3.1	3.1
CO2 注入速度 [Nml/min]	300	300

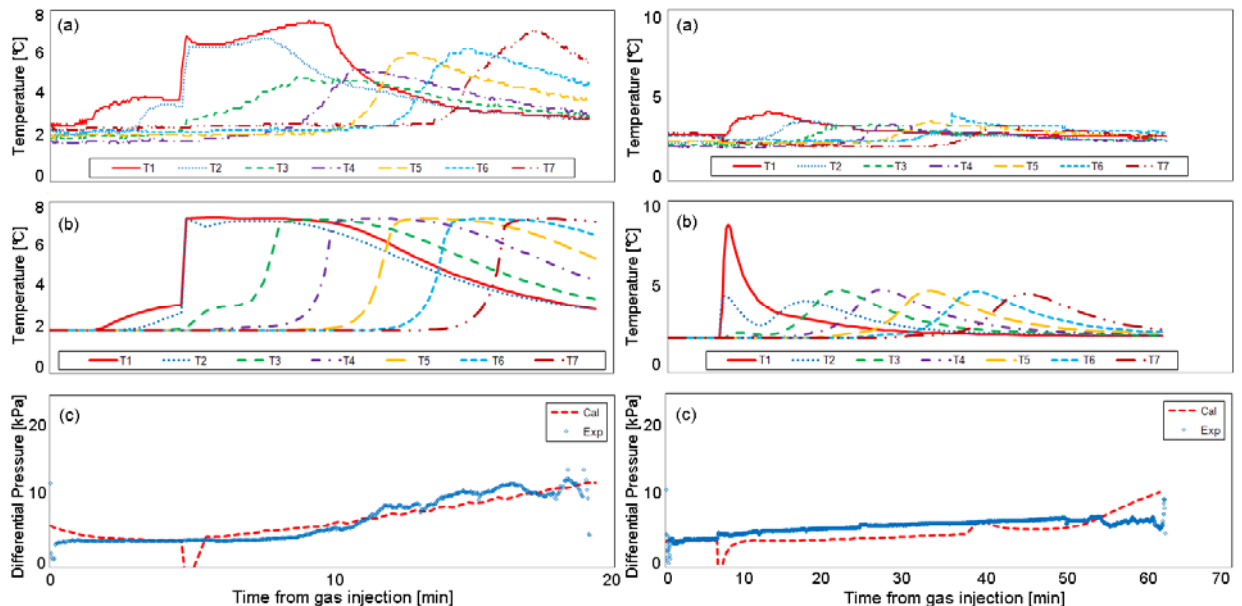


図 4-17 圧力容器内での温度上昇と差圧の時間変化に関する計算結果
(左 : Exp. 1、右 : Exp. 2、(a)は温度変化の実験値、(b)は温度変化の計算値、
(c)は差圧の実験値と計算値)

砂層中気液二相流シミュレータである TOUGH+ HYDRATE に CO₂ ハイドレート生成モデルを組み込むと同時に、CO₂ ガスの液相への溶解を再現できるような三次元地層中気液二相流シミュレータを開発した。

シミュレータに用いるモデルパラメータおよび既存のハイドレート生成モデルに関するパラメータについて、実験データとのフィッティングを行い適切な値を検討した。新規気液界面の面積モデルとして、ガスフロントが過ぎ去ったあとの非流動状態にある水にできるハイドレート膜の亀裂モデルには既存文献のハイドレート膜厚に依存したモデルを採用し、ガスフロント上で生成したハイドレート膜の亀裂には、新たにガスフロントの移動速度を基にしたモデルを開発し、これを導入した。その結果、おおよそ実験結果を再現できるパラメータ値が得られ、ハイドレート生成時の温度変化や差圧の挙動などを再現性することができた。

参考文献

- [1] G.J. Moridis, M.B. Kowalsky, K. Pruess: TOUGH+HYDRATE v1.0 User's Manual: A Code for the Simulation of System Behavior in Hydrate-Bearing Geologic Media (2008) 1-261.
- [2] 乾正幸, 佐藤徹, 駒井武, 影本浩: 資源と素材 127 (2011) 194-201.
- [3] T. Takahashi, T. Sato, M. Inui: Chem. Eng. Technol. 35 (2011) 1751-1758.
- [4] Y. Masuda, M. Kurihara, H. Ohuchi: *Proc. 4th Int. Conf. Gas Hydrate*, Yokohama, Japan (2002) 40-46.

4.2.3. 複数計測点情報からの CO2 漏洩位置推定法の開発

4.2.3.1. 背景及び目的

海底下地中貯留においては設備の亀裂や貯留層から CO2 が漏洩した際の生態系への悪影響が懸念されている。したがって、漏洩が起きた際に漏洩箇所を素早く発見することは重要である。また、漏洩時間や漏洩量も重要な情報である。本検討では二酸化炭素濃度を観測する検知器のデータから漏洩位置や漏洩時間、漏洩量を推定する手法を開発する。

4.2.3.2. 方法

漏洩情報推定シミュレーションには Marginal Sensitivity Method [1]を用いる。この手法では移流拡散方程式のアジョイント方程式

$$\frac{\partial \psi^*}{\partial \tau} - \frac{\partial V_j \psi^*}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[v_c \frac{\partial \psi^*}{\partial x_j} \right] + (-q_o \cdot \psi^*) \quad (4.2.3-1)$$

を逆時間方向に解き、その解を利用して漏洩位置と漏洩濃度を推定することができる。ここで、 ψ^* は限界感度、 x_j は座標、 τ は逆時間、 v_c は渦動粘性係数、 V_j は移流速度、 q_o はである。しかしながら Dimov [1]では時間が既知の状態かつ一次元の定常流における放出問題しか解かれていない。この手法を参考に、潮汐のような複雑な流れ場の中で漏洩情報が全て未知の状態から、それらの情報を得ることを目指した。

本検討では、放出濃度に対する観測濃度の比を(4.2.3-1)式で表わされるアジョイント方程式の解である限界感度とした。複数の観測濃度に対してアジョイント方程式が解かれ、これにより、放出点の濃度が推定される。放出点においては各観測データに基づき計算された推定濃度は等しくなる。これにより漏洩位置を推定するが、数値計算では複数の推定濃度が同じ値にはなりえない。従って推定濃度の差をとり（関数 $DIF(x, \tau)$ とする）、これが最小値となる位置・時間を放出位置・放出時間、そしてこのとき計算される推定濃度を放出濃度と推定することとした。これを式(4.2.3-1)に基づき逆時間に計算し、DIF 値が最小となる位置を漏洩位置と推定する（資料編 4-16）。

4.2.3.3. 結果と考察

図 4-18 で示される $i \times j = 60 \times 40$ の二次元の領域において、赤い点を CO2 放出点、青い点を検知器位置として設定した。格子間隔は 20 m、時間刻みは 0.5 sec である。また、流速は潮汐に類似した条件とするため、以下の関数で全領域に与えた。

$$\begin{aligned}
 u &= 1.5 [m/sec] \times \cos\left(\frac{t}{180}\right) \\
 v &= 1.5 [m/sec] \times \sin\left(\frac{t}{180}\right)
 \end{aligned}
 \tag{4.2.3-2}$$

CO₂ は t=0 に 1.0×10⁻⁴ [kg/m²] で瞬間的に放出される。まずは順方向に CO₂ 数値拡散シミュレーションを行い、得られた濃度情報により漏洩情報推定シミュレーションを行った。

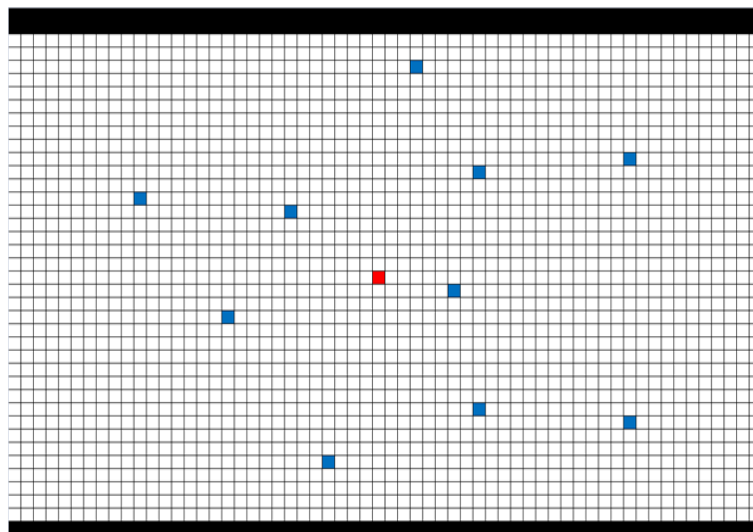


図 4-18 二次元計算領域

赤点から漏出した CO₂ を青点で検知し、アジョイント法により漏出位置・時間・濃度を推定

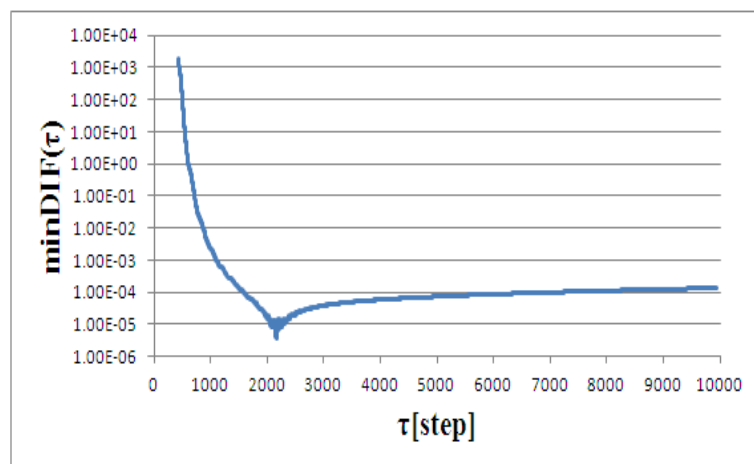


図 4-19 各タイムステップにおける DIF の最小値の推移

図 4-19 で示されるのは $DIF(x,\tau)$ の各時間の全領域における最小値 ($\min DIF(\tau)$ とする) をプロットしたものである。 $\min DIF(\tau)$ は $\tau=2163$ [step] で最少となっている。これは実際の放出時間 $\tau=2160$ [step] に近い値である。

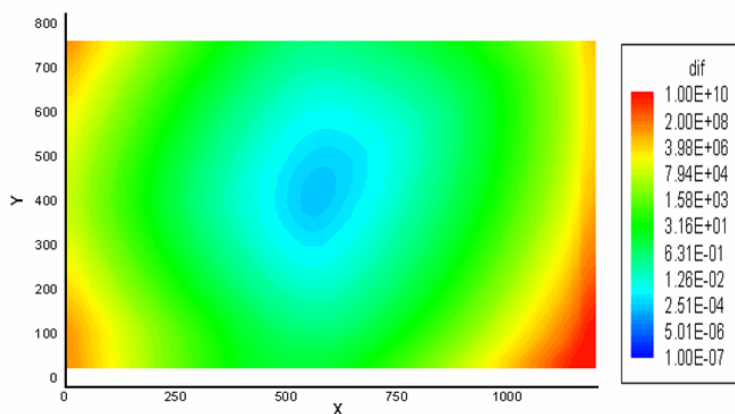


図 4-20 図 4-18 内の各青点から計算された限界感度の差の二乗平均のコンター図
(差の最低位置が推定された漏出位置を表す)

図 4-20 は図 4-18 内の各青点からわきだした限界感度を式(4.2.3-1)を用いて計算し、図 4-19 で $DIF(x,\tau)$ が最小となった時間 $\tau=2163$ [step] におけるすべての限界感度の差の二乗平均のコンター図である。差の最低位置が推定された漏出位置を表す。この最小値をとる座標は(30,20)で、これは放出点 (図 4-18 内の赤点) と同一である。また、 $\tau=2160$ [step] に位置(30,20)でそれぞれの検知器におけるデータから推定される濃度の平均値は 1.01×10^{-4} [kg/m²/sec] であり、実際の設定値である 1.00×10^{-4} [kg/m²/sec] と非常に近い値となった。

漏洩情報推定シミュレーションでは、手法を二次元の瞬間放出のケースでの検証を行うことが出来た。それぞれ放出位置や放出時間、放出濃度や放出フラックスに関して、実際の設定値に近い値を推定することが出来た (資料編 4-17)。

今後は、同様の二次元領域にて連続放出に関しても試行問題を計算する。また QICS 実験[2]がおこなわれた Ardmuchnish 湾の物理場に関して、本検討で開発された手法により漏洩情報推定シミュレーションを行う予定である。

参考文献

- [1] I. Dimov. Computers Math. Applic. 32 (1996) pp. 31-42.

- [2] J. Blackford et al. Detection and impacts of leakage from sub-seafloor deep geological Carbon Dioxide Storage. *Nature Climate Change* (2014) DOI: 10.1038/NCLIMATE238.

4.2.4. 海底面漏出形態予測法の開発

4.2.4.1. 背景及び目的

海水中における CO₂ 気泡の海水への溶解速度は、気泡上昇速度が速くなると早くなり、気泡上昇速度は気泡径によって決まる[1]。気泡径は海底面漏出形態、すなわち堆積層内における気道の大きさによって決まると考えられる（資料編 4-18 参照）。

気泡サイズは海中の上昇速度や溶解に関わっているものの、砂堆積物を通して放出される気泡サイズやその性状については未だ研究が進められていない。Xilin Cui et al. [2]は、海底に埋まったパイプから流体が漏れ出す状況を想定し、上部の砂堆積物の挙動をシミュレーションした。しかしこれは液中に液体を放出したもので、今回対象となる気液二相ではない。そこで本検討では砂堆積物から放出される気泡サイズを計測し、気泡サイズの決定メカニズムについて考察する。

4.2.4.2. 方法

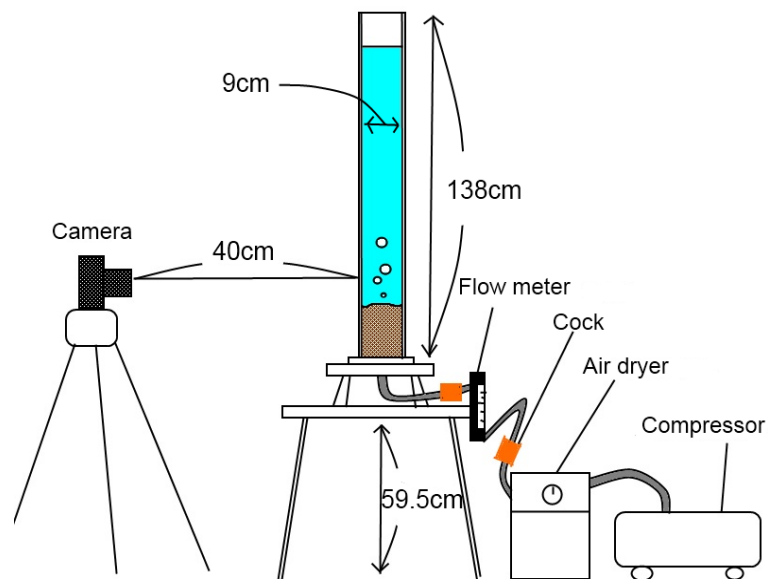


図 4-21 実験装置の概略図

実験には外径 10 cm × 10 cm、内径 9 cm × 9 cm で高さ 138 cm の水槽を用いた。まず水槽内に砂をいれ上から水を注ぐ。そして水槽の下部から乾燥させた空気を圧入し、砂表面から出てくる気泡を CCD カメラで撮影した。カメラのピントは水槽の中心に合わせたが、それによる気泡サイズの誤差は±7.8%ほどであった。気泡は各ケースについて 50~300 個の気泡について計測をし、流量は 100、200、300、400、500 ml/min の 5 段階で実験をした。砂は全て 1.0 kg ずつ用意し砂の高さを 8.1(±0.5)cm、砂表面からの水の高さを 92(±0.5) cm

とした。

実験には細砂(粒径 $\sim 3000\ \mu\text{m}$)、珪砂(粒径 $75\sim 1200\ \mu\text{m}$)、豊浦砂(粒径 $\sim 300\ \mu\text{m}$)、苫小牧の海底砂の4種類を用意し、さらにふるいを用いて粒径分布の異なるいくつかの試料に分けた(表 4-4)。さらに苫小牧の海底砂について、精細にふるい分けをしたところ $0\sim 4750\ \mu\text{m}$ 程度の幅広い粒度分布を持つことがわかった(資料編 4-19)。

表 4-4 実験に使用した砂の性状

砂の名称	直径 (μm)	孔隙率	密度 (g/cm^3)
1 細砂 (小)	~ 600	0.3393	2.4207
2 細砂 (中)	$600\sim 1180$	0.2695	2.4691
3 細砂 (大) div	$1180\sim 2000$	0.3373	2.5195
4 珪砂 (小) div	~ 600	0.3418	2.5195
5 珪砂 (大) div	$600\sim 1200$	0.3241	2.3741
6 珪砂 (大)	$600\sim 1200$	0.4092	2.5195
7 豊浦砂 (小)	~ 250	0.3186	2.5720
8 苫小牧砂	~ 4750	0.2797	2.3742

4.2.4.3. 結果と考察

写真から画像解析ソフトを用いて気泡の最大径 $2\times a$ と最少径 $2\times b$ を求め気泡を回転楕円体と見なして体積 V の計算を行った。またこれにより求めた体積を球体の体積と仮定したときの球の直径 D を求めた。

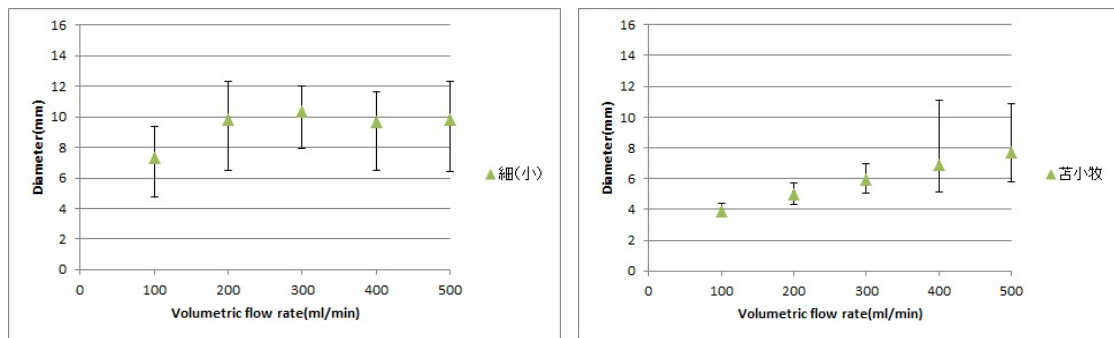


図 4-22 代表的な砂による気泡サイズの流量依存性
(左：細砂 (小)、右：苫小牧沖で採取された砂)

計測した気泡の体積の中央値を図 4-22 に示す。このグラフから砂の粒径の小さい豊浦砂や細砂 (小) を使用したときは大きい気泡が多くなり、逆に細砂 (大) や苫小牧の砂など粒径が大きい砂で比較的小さい気泡が出ていることがわかる。

また、気泡を放出する際の砂の挙動をおおまかに3つに分けた。

A) 断続大量放出型

豊浦砂など、粒径の細かい砂で多く見られた。下からの空気の圧入により砂内部に空気層が形成され、それが崩壊することで比較的大きな気泡が出る。放出間隔は長い。気泡の生成タイミングは空気層が上部の砂を押し破って出てくる瞬間であると予想される。

B) 断続放出型

珪砂や苦小牧の砂で見られた。断続大量放出型と比べて小規模の空気層ができるが連続的な空気の圧入により気泡の放出ペースは断続大量放出型より早い。気泡の生成タイミングは断続大量放出型と同じく空気層から気泡が出る瞬間と考えられる。

C) 連続放出型

細砂（大）で確認され、吹き出し口の周りにはほとんど動かず連続的に気泡が放出される。砂表面近くにガスの通り道が確認でき、気泡はガス道の幅より大きくならないため気泡は小さい。砂表面近くではすでに気泡となっているのが見えるため、砂内部で砂粒の隙間を通るときに分裂して気泡となると考えられる。



図 4-23 気泡放出の様子

(珪砂の場合、気泡一つ一つが放出されるたびに、砂層表面が開き、またすぐ閉じる)

流量の増加によって気泡サイズが単調に増加するとは言えないが、Walters et al. [3]のノズルから液滴を噴出する実験でも、流量増加による単調な液滴サイズの肥大は確認されていない。

水深の違いによる気泡サイズの変化も考慮する必要がある。断続大量放出型や断続放出型

のように空気層ができるタイプについては水圧と空気層の圧力が釣り合った状態で砂を持ち上げるため、空気層の限界容積は水圧に関係なく決まり、気泡サイズも大きく変わらないと考えた。連続放出型でも気泡の圧力と水圧がつり合っており、ガス道を形成するのは下から圧入される空気の推力によるものであると考えられるため水圧による気泡サイズへの影響は少ないと考えられる。しかしいずれの場合も気泡内の密度は高くなる。

本実験より次のようなことがわかった。

- (ア)砂の粒径が細かいほど空気層が形成されやすく大きめの気泡が出やすい。逆に粒径が荒い砂は小さめの気泡が多く出る傾向がある。
- (イ)流量に応じて単調に気泡サイズが増加するわけではない。
- (ウ)水圧は気泡サイズを決定する大きな要因にはならないと予想される。将来、実験やシミュレーションを重ねてより詳細な解析がなされることが期待される。

今後、固気液三相流シミュレータを開発し、細砂堆積層中の気道形成メカニズムとそのサイズを明確化する(資料編 4-20)。気相の運動の解析に、気泡数密度と空隙率を変数として格子毎に解く Eulerian 法(海外ヒアリング先で使用)か、気泡一つ一つの運動方程式を解く lagrangean 法かの選択は、両手法を比較した文献調査の結果から判断する(資料編 4-21 参照)。

参考文献

- [1] Yuki Kano, Toru Sato and Jun Kita et al, International Journal of Greenhouse Gas Control 3 (2009) 617-625.
- [2] Xilin Cui, Jun Li and Andrew Chan et al, Particuology 10 (2012) 242-252.
- [3] T.W.Walters and E.Marschall, Experiment in Fluids 7 (1988) 210-213.

4.2.5. 連続モニタリングシステムに係る技術動向調査および開発

4.2.5.1. 背景及び目的

海底下 CCS の実施に当たっては、安全性に関して生じる社会の警戒感・疑念、特に貯留層から海洋環境への CO₂ の漏洩の可能性に関して、それらを払拭する必要がある。

海底下 CCS において正確な漏洩箇所を事前に把握することは極めて困難であり、広い面積をカバーしながら時間的にも密な連続モニタリングの適用が不可欠である。そのためには、多点繫留式(海底設置)と自走式(AUV 等)のモニタリングシステムが想定される。また漏洩 CO₂ を検出するセンサー(pCO₂、pH)についても、コストや性能に係る客観的な評価のもと、海底下 CCS に最適化していくことが求められる。さらに長期モニタリングにおいては、センサー類への生物付着を防止する技術も必要とされる。

当項目では、CCS のモニタリングに利用可能な各種センサー類、設置型及び自走式の観測機器に加えて、生物付着防止に係る技術動向について資料等を収集し、海底下 CCS に最適化したモニタリングシステムの構築に資する情報を収集・整理することを目的とする。

平成 26 年度は、これまで国内外で行われた大水深海域におけるモニタリングシステムの技術動向に関して調査し、情報整理をおこなった。

4.2.5.2. 方法

① pCO₂ 及び pH センサーに関する技術動向の調査と情報整理

大水深での海洋観測に用いられている pCO₂ 及び pH センサーについて、既往報告書や発表会資料、機器のカタログ等から情報を収集、整理した。不明な点は、関連する機器・技術メーカーや取扱業者などへヒアリングを行った。

② 海域設置システムにおける生物付着の対策手法に関する情報の収集・整備

大水深における海洋観測システムの中で、生物付着防止技術に関する情報を収集すると同時に一般的な付着生物対策についての情報を収集した。

③ 大水深における海洋モニタリング技術に用いられている設置型及び自走式観測システムの情報の収集・整理

大水深における海底設置式の海洋観測システムや AUV(自走式観測システム)について、既往報告書や発表会資料、機器のカタログ等から情報を収集、整理した。不明な点は、関連する機器・技術メーカーや取扱業者などへヒアリングを行った(資料編 4-39、資料編 4-40 参照)。

4.2.5.3. 結果及び考察

① pCO₂ 及び pH センサーに関する技術動向の調査と情報整理

pCO₂ 及び pH センサーの情報収集結果のまとめを表 4-5 に示す。一覧表は、資料編 4-22 から資料編 4-26 にまとめた。

pCO₂ 及び pH を同時に測定できる機種として「pH-CO₂ ハイブリッドセンサ」及び「ISFET pH/pCO₂」があった。

CO₂ センサーの反応速度は、7 秒、45 秒、3 分、5 分の機種があり、pH センサーに比べ律速因子になると考えられた（同じメーカーの機種を使った場合）。

表 4-5 pCO₂ 及び pH センサーの情報

機種	CO ₂ センサー							pHセンサー				
	センサー名	HydroC™ CO2	CO ₂ -Optode	pH-CO ₂ ハイブリッドセンサ	ISFET pH/pCO ₂	水中質量分析計 SRI international	PSI CO ₂ -pro	SAMI-CO ₂	MAPCO ₂	pH-CO ₂ ハイブリッドセンサ	ISFET pH/pCO ₂	SBE18
耐圧	水深 2,000m 水深 4,000m 水深 6,000m	水深 6,000m (オプション 12,000m)	水深 3,000m	水深 3,000m	水深 1000m	水深 1,000m (水中ハウジング)	水深 600m	-	水深 3,000m	水深 3,000m	水深 1,200m	水深 600m
測定範囲	0-6000 μ atm	0-50000ppm*	300-2000 μ atm	~45000(μ atm)	(検出限界 20nmol/L)	0-600 μ atm*	150-700 μ atm	100-600 μ atm*	6.0-8.3pH	7.3-8.1pH	0-14pH	7-9pH
応答速度	外付けポンプ使用時45秒以下 (63%応答)	5分 (63% 応答)	3分以内 (90% 応答)	60秒程度	7秒	約3分(ポンプ流量に依存)	5分以内	-	20秒以内 (90% 応答)	0.1秒程度	1分 (63% 応答)	3分
参考価格	500万円	*パーツ 価格あり	800万円 (pHとセット)	-	1,500万円	550万円	200万円 (+20万/半年)	-	800万円 (CO ₂ とセット)	-	45万円	150万円

* μ atm は、100 万分の 1 気圧。1ppm ≒ 1 μ atm で換算した値

② 海域設置システムにおける生物付着の対策手法に関する情報の収集・整備

海洋における生物付着の対策は、防汚塗料、防汚金属、塩素処理、直接的な除去に分類できる。防汚塗料による方法は効果期間に限りがあり、概ね 1~数年で再塗布が必要となる。防汚金属による方法には、センサー等の機器類等を銅やチタン膜で覆う事例があった。塩素処理は、主に海水を電気分解して次亜塩素酸ソーダを生成し、その酸化力を利用するものである。その他、ブラシやスクレーパーで付着物を除去する方法、高圧水を噴射する方法などの物理的な方法があった。

③ 大水深における海洋モニタリング技術に用いられている設置型及び自走式観測システムの情報の収集・整理

設置型の海洋観測システムとしては、水中自動昇降装置（海底設置型）の情報を中心に得た。準リアルタイムでデータ取得を求める場合、現況では水深 150-200m の標準品のウィンチ本体及びロープ長等を改良すること、また水平方向に多点係留を模索した場合、水中内でデータの受渡しシステムを構築する必要があった。

一方、自走式の海洋観測システムとして AUV の情報収集結果のまとめを表 4-6 に示す。一覧表は、資料編 4-27 から資料編 4-38 にまとめた。

表 4-6 AUV の情報

名称	REMUS 6000	Explorer AU	HUGIN 4500	Bluefin-21	HUGIN 3000	REMUS 600	MUNIN	HUGIN 1000
耐圧性能	6000m (4000m)	300m, 1000m , 3000m and 5000m	4500m	4500m	3000m	600m (1,500m or 3,000m)	600m、 1500m	1000m
稼働可能時間 水中速度	22時間 (4kts) 5kts (2.6m/s) 4kts (2.05m/s)	22時間 (稼働距離と速度から算出) 速度0.5- 2.5m/s 距離120km	60-74時間 (4kts) 速度2-6kts	25時間 (3kts) 最大速度 4.5kts	60-74時間 (4kts) 速度2-6kts	24-70時間 最大速度 5kts	12-24時間 速度4.5kts	24時間 (4kts) 速度2-6kts
サイズ	重さ 862kg 長さ 3.84m 径 0.71m	重さ 750- 1250kg 長さ 4.5- 6.0m 径 0.69m	重さ 1400kg 長さ 5.5m, 径 1.0m	重さ 750kg 長さ 4.93m 径 0.53m	重さ 1400kg 長さ 5.5m 径 1.0m	重さ 240kg 長さ 3.25m 径 0.32m	重さ 300kg 長さ 3-4m, 径 0.34m	重さ 650- 850kg 長さ 4.5m 径 0.75m
参考価格	5~10億円 (ランチ・リカバリーシステム含む)	5.5億円 (2隻で11億円)	6億円	-	3.5億円	3.5億円~ (ランチ・リカバリーシステム含む)	3.5億円~ (ランチ・リカバリーシステム含む)	1億円
納期	18ヶ月					12ヶ月		

稼働可能時間は、AUV の水中速度によっても異なるが、概ね 22~74 時間であった。各 AUV の水流速度と稼働可能時間から航行距離を求めた (図 4-24 左図)。稼働可能時間が短い機種では 120 km、長い機種では 540 km の航行が可能と考えられた。

また、時間的空間的に細かなデータ取得するには CO₂ センサー反応速度が速いほど好ましい。CO₂ センサーの反応速度は、7 秒、45 秒、3 分、5 分の機種があった。AUV の水中速度に対し、CO₂ センサーの反応速度の違いによるおよその計測間隔を求められるものと考えた (図 4-24 右図)。以上の国内外の知見は、資料編 4-41、資料編 4-42 にまとめた。

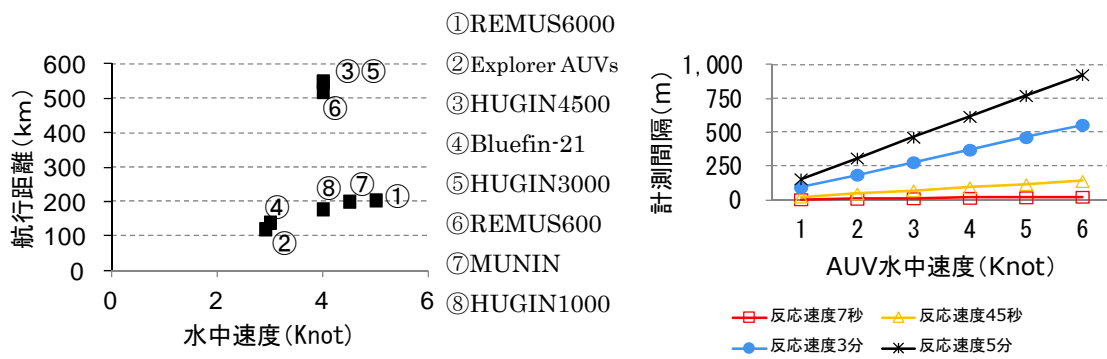


図 4-24 水中速度と航行距離、モニタリング間隔の比較

4.2.6. 連続モニタリングセンサーの開発及び性能評価

4.2.6.1. 背景及び目的

水深 200m 以深の広範な海域において海水中に漏洩した CO₂ を検出する手法は、物理、生物および化学的手法に大別される。音響探査等の物理的手法は気泡検出に有効であるが、海水に溶解した CO₂ の検出は不可能である。生物を指標とした検出法は長期的な影響の蓄積を把握する上では有用となる可能性があるが、短期的な検出は極めて難しく、そもそも深海域では生物量自体が少ない等の問題点もある。従って、CO₂ の漏洩を着実に検出するためには化学的手法の適用と展開が必要である。そのための連続モニタリング手法では、多点繫留式（海底設置）と自走式（AUV 等）が想定される。また、繫留式は時間的な連続モニタリング、自走式は繫留式の空間的不備を埋める手法として、両者の特徴を最適化して組み合わせさせたシステムが有望である。これらに搭載する CO₂ の化学的検出装置（センサー）については、繫留式と自走式のそれぞれにおいて、応答性や消費電力などについて最適化を図ることが求められる。本プロジェクトでは、性能・コストの最適化、pCO₂-pH ハイブリッド型センサーの採用、生物付着防除性能という点を兼ね備えた、従来に無い化学的 CO₂ 漏洩連続モニタリングシステムの開発を目指す。

近年、地球環境変動研究や熱水鉱床探査などに関わる種々の CO₂ センサーが提案されている。これら既存の技術は CCS 漏洩モニタリングに対しても適用可能と考えられるが、例えば多数のステーションを必要とする多点繫留式の場合、オーバースペックな機器の採用はコストの増大やシステムの複雑化といった問題を引き起こすことが懸念される。このような点を考慮し、大深度 CCS に特化・最適化した性能・コストのセンサーの開発を進める。炭酸系化学センサーのうち、pCO₂（二酸化炭素分圧）と pH は比較的計測が容易であると同時に、直接計測することが困難な全炭酸濃度をこれらの 2 パラメータから算出することが可能である。沿岸海域における CCS モニタリングでも全炭酸を指標とする監視・漏洩評価の重要性が指摘されていることから、pCO₂-pH のハイブリッド型センサーの開発を進める。

また、海域での連続モニタリングにおける重大な課題として、センサーへの生物付着が挙げられる。太陽光の届かない深海では藻類の付着を考慮する必要はないが、細菌など原核生物によるバイオフィルムの生成（biofouling）を防止する技術の適用が必要となる。当該プロジェクトでは、外洋深層海水を培養して増殖する付着細菌叢のメタゲノム解析を行い、水深や海域の違いによる付着細菌群集の特性を評価する。また低電力で動作する紫外線の照射、センサー材料への触媒担持による制菌技術の評価実験を行なう。

4.2.6.2. 方法

①pCO₂ センサー試作機の仕様の検討・開発

海底下 CCS 漏洩検知モニタリングに適した pCO₂ センサーを開発するため、既存の pCO₂ センサーについて比較検討し、試作器で使用する測定原理と仕様の概要を決定した。試作に先立ち、下記のセンサー構成要素について検討を行った。

②ガス透過膜評価（耐圧試験・ガス透過速度評価）

シリコン樹脂やアモルファステフロン等種々の素材によるガス透過性フィルムを収集し、耐圧試験を行った。各フィルムを直径 47mm の円形に切り抜き、試験に供した。試験装置として、耐圧性のある容器の一部を開口し、焼結フィルターをはめ込んだ上に各素材フィルムをセットした。高圧チャンバー中内に海水を満たして上記試験装置を入れ、高圧下でフィルターを通した海水の容器内部への浸透の有無を観察した。

シリコンやアモルファステフロンフィルムのガス透過速度について、産総研阿賀臨海実験場において評価試験を行った。実験場に引き込んである海水を水槽に掛け流し、連続測定試験を行った。上記耐圧試験と同様に、耐圧性のある容器の開口部にフィルムをセットし、容器内部に小型の NDIR センサーモジュールを組み込み、この容器全体を水槽の中に設置した。同時に、同じ水槽海水を可搬型 pCO₂ 測定装置（紀本電子製）で測定した。また、採水試料を一定時間毎に採取し研究室に持ち帰り、塩分、全炭酸、アルカリ度、栄養塩等の化学パラメータの時系列測定を行った。

③NDIR センサーモジュールの性能評価

pCO₂ センサーの検出部となる NDIR モジュールについて、センスエアー社 CO₂EngineK30 とオプトクエスト社開発品について、性能評価を行った。これら二つのモジュールを直列につなぎ、CO₂ 標準ガス（0, 360ppm）を交互に流してその濃度を測定し、安定性、応答性などを評価した。

④深海の付着細菌の解析

中深層（200m 以深）における付着細菌の特性を評価するため、白鳳丸 KH14-3 次航海において、西経 170 度線上の海域の異なる 3 つの観測点（北緯 10 度、35 度、50 度）の水深 200 および 1000m で採取した海水にスライドガラスを浸漬し、付着細菌数、付着細菌叢（メタゲノム解析用）およびバイオフィルムについて分析するための試料を採取した。

⑤細菌の単離培養

生物付着防止技術開発の室内実験に用いる検討用モデル細菌を水深 1000m の海水から単離した。白鳳丸 KH14-3 次航海、西経 170 度の北緯 35 度および 50 度において採取した海水（海洋細菌用培地を添加）にスライドガラスを浸漬し、ガラス表面上に付着した細菌を寒天培地上で単離・培養した。室内実験に適切な細菌株を探索するために、単離した細菌の成長速度を計測した。

⑥生物付着防止技術の室内実験

上述の実験で単離した細菌を用いて、カバーガラスを担体とした細菌付着実験を実施した。あらかじめ脱脂・滅菌したカバーガラス（直径 15mm）を、細菌を添加した人工海水に浸漬・培養し、カバーガラスに付着した細菌について、細菌数計数用試料を調整した。併せて、紫外線による付着防止効果について基礎検討を行うために、カバーガラスおよびガラス pH 電極用素材上に紫外線 LED を設置した試験装置を試作した。コーティングによるガラス担体への細菌付着を検証するため、2 種類の酸化チタン触媒調整液を用いて検討を行った。

4.2.6.3. 結果及び考察

①pCO₂ センサー試作機の仕様の検討・開発

既存の現場型 pCO₂ 計のうち、センサー内部の測定液を海水の pCO₂ 濃度と平衡にさせ、その pH を測定するタイプ（Sunburst Sensors 社 SAMI-CO₂、電力中央研究所／九州大学 ISFET pCO₂ センサー、独立行政法人海洋研究開発機構と紀本電子工業（株）開発 pCO₂ センサーなど）は、耐圧性に比較的優れ、長期モニタリングや自立型無人潜水機での運用実績もある。しかしながら、これらは試薬やセンサー部の劣化が予想される他、メンテナンスや校正が困難である。NDIR 方式では気体の測定となるため、センサー部の劣化が少なく、標準ガスによる校正が可能のため長期ドリフトの管理が容易であると考えられる。既存の NDIR 式現場センサーは CO₂ 濃度変動が微少な外洋域での測定を目的としているため、CCS 漏洩検知のように多点でのモニタリングが想定される場合には、過度に高性能・高価格である。本研究では、より適度な性能で低価格な装置を開発することとし、安価な小型 NDIR モジュールを搭載したシステムを試作・評価することとした。下記②③の評価結果も加味し、測定気体の循環がなくより単純な構造のパッシブタイプと、測定気体を循環させて応答性を高めたフロータイプの 2 種について仕様を決定し（資料編 4-43）、試作器の製作を行った（資料編 4-46、資料編 4-47）。

②ガス透過膜評価（耐圧試験・ガス透過速度評価）

ガス透過膜として、15種の市販薄膜フィルム製品を入手し、耐圧試験を行った（資料編4-44）。その結果1000m水深相当の圧力まで海水の浸透が認められなかったのは、シリコーン、アモルファステフロンおよびニトスルー（日東ライフテック）であった。併せて、ゴアテックスのチューブについても評価を行ったが、100m水深相当で海水の浸透が観察された。一般に、多孔質フィルムはガス交換能が高いとされるが、耐圧性が低く、中深層モニタリングには不向きであることがわかった。

シリコーン、アモルファステフロンフィルムについてのガス透過速度について、臨海実験場の海水の連続観測結果を標準器（応答速度3分以内）と比較したところ、本実験の条件下では、いずれも数十分の応答速度となることが示された。これについては、NDIR格納容器の内部の低容量化や簡易的な試料気体循環装置の付加などによって改善する可能性がある。標準器の測定結果と各採水化学パラメータ（全炭酸・アルカリ度など）の結果は良く一致していた。また、採水化学パラメータの測定結果より、本試験場の水槽海水は全炭酸濃度が大きく変動していることがわかり、来年度に実施を検討しているセンサー連続運転試験にも適したフィールドであることが示された。

③NDIRセンサーモジュールの性能評価

標準ガスの連続測定の結果、安定性（30分間の1分毎測定値の標準偏差）はセンスエア社製およびオプトクエスト社製ともに、ゼロガスおよびスパンガス（360ppm）ともに0.6ppm以下で本研究目的には十分な性能を示した（資料編4-45）。応答性についてはオプトクエスト社製の方が若干早く、ほぼガス濃度の変化に追従しているものと考えられた。センスエア製はセル内部容量が若干大きく、内部ガスの交換に若干の時間がかかったものと思われる。

④深海の付着細菌の解析

中深層の海水試料に浸漬したスライドガラスに付着した細菌と付着細菌が生成したバイオフィームについて調べたところ、いずれの海水でも細菌の付着が認められ、北緯35度および50度の試料では、水深1000mで200mよりも多くのバイオフィーム形成が確認された（資料編4-48）。バイオフィームはガス交換やpH電極の応答性に影響を及ぼすと考えられることから、表層に比べて生物量の少ない大水深においても、モニタリングセンサー類に対する生物付着防止対策を行う必要性のあることが実証された。

⑤細菌の単離培養

西経 170 度、北緯 35 度および 50 度、水深 1000m の海水に浸漬したスライドガラスから、それぞれ 2 種類の付着細菌を単離した（資料編 4-49）。これら 4 種類の細菌について培養実験により成長曲線を調べ、成長速度が速く、繰り返し実験の結果が安定していた 1 種類（北緯 35 度の試料から単離）をモデル細菌として選定した。

⑥生物付着防止技術の室内実験

カバーガラスを参照材料として細菌添加海水に浸漬する室内実験手法を検討し、6 時間程度の培養で評価が可能なことを示した（資料編 4-50）。紫外線-LED 照射式培養試験装置を試作し、波長 265nm、340nm、400nm および可視光の LED を照射した培養実験を実施した。スピコート法によるカバーガラスへの酸化チタンコーティングを検討したが、浸漬実験に求められるカバーガラスの両面への欠損の無い均質なコーティングにはさらに検討が必要であった。

4.3. 二酸化炭素回収・貯留一貫実証試験の実施計画

4.3.1. 背景及び目的

平成 28 年度以降、石炭火力発電所からの二酸化炭素の分離・回収、シャトルシップを活用した輸送、シャトルシップから海底下への直接圧入による二酸化炭素の貯留、さらにはモニタリングまで一貫した実証試験（以降「CCS 一貫実証試験」と称する。）を全体の連携を保ちつつ適切に実施するためには、個々の構成システムの検討結果に基づいて、システム全体を俯瞰して最適化した試験計画の策定が重要となる。また、CCS 一貫実証試験のためには、技術面の検討のみならず、予算計画やスケジュール等を考慮したプロジェクト全体としての最適化の取り組みが重要である。

このため、平成 26～27 年の 2 年間に亘り CCS 一貫実証試験を行うためのシステム（以降「一貫システム」と称する）の基本的考え方を整理して仕様を設定するとともに、課題及びリスクを整理してリスク低減方策の検討を行い、一貫システムを構成する各要素の検討にフィードバックするとともに、CCS 一貫実証試験計画ならびにコスト及びスケジュールを含むプロジェクト実施計画を検討する計画としている。平成 26 年度はこのうち一貫システムの基本的考え方の整理と、課題及びリスクの整理を行い、CCS 一貫実証試験計画案の策定を行った。

4.3.2. 方法

4.3.2.1. 一貫システムの設計思想の整理

① 一貫システムの説明及び一貫システムの基本フロー図

CCS 一貫実証試験のためには、システム全体を最適化した試験計画を策定するとともに、予算計画やスケジュール等を考慮したプロジェクト全体の最適化の取り組みを行う必要がある。以下に示す個別システムから成る CCS 一貫実証試験を行うためのシステム全体を「一貫システム」と定義し（資料編 4-51 参照）、その基本フロー図を作成した。

- 石炭火力発電所からの二酸化炭素の分離・回収
- シャトルシップを活用した輸送
- シャトルシップから海底下への直接圧入による二酸化炭素の貯留
- モニタリング

② 感度解析及び基本的考え方

作成した全体フロー及び物質収支に基づき、一貫システムに大きな影響を与えうる因子を抽出し、一貫システムへの影響内容を、それぞれ全体計画、プロセス技術、規制、環境安全、

船舶技術の観点から、多面的な考察による感度解析を実施し、一覧表に整理することで、モニタリングを除く一貫システムの基本的考え方を整理した。一貫システムに大きな影響を与える因子の抽出に際しては、「全体計画」「プロセス技術」「規制」「環境安全」「船舶技術」の属性別に抽出して整理した（資料編 4-53）。

表 4-7 影響因子の属性分類

属性	着目した影響因子	関連項目
全体計画	実証試験プロジェクト全体の計画・遂行に関わる因子	試験目的、試験設備仕様(処理能力)、全体稼働率
プロセス技術	各要素技術の性能に関わる因子	アミン類分析法、吸収塔運転温度、CO2 含水率
規制	一貫システム及び要素技術を計画・遂行する上で制約となり得る法規制、対外折衝等に関わる因子	高圧ガス保安法、港湾法、船舶安全法、官庁説明、漁業権
環境安全	周辺環境または従事者の安全性に関わる因子	環境影響評価、輸送・圧入作業の緊急離脱
船舶技術	シャトルシップの運航・操業性能に関わる因子	作業可能条件、FRP ピックアップ/嵌合、船体設計
圧入技術	圧入量の目標達成に影響を及ぼす因子	圧入井の材質、貯留層要件、坑口制御方法

4.3.2.2. 一貫システムの課題及び対応策の整理

4.3.2.1 で抽出した、一貫システムに大きな影響を及ぼし得る各影響因子に対して課題を整理するとともに対応策の検討を実施した。課題の整理及び対応策の検討をする際には、特に、液化炭酸ガス取扱い技術ならびに内航船運航技術に関して、専門知識及び実績を有する液化炭酸ガス製造・供給事業者や海上運送/内航海運業者へヒアリングを行い、それらの知見を反映して整理・検討結果の妥当性を確認した（資料編 4-61～資料編 4-63）。

4.3.2.3. 実証試験計画の検討

① 実証試験へのフィードバック及び実証試験計画

4.3.2.2 で整理した一貫システムの課題及び対応策に基づき、CCS 一貫実証試験において確認もしくは実証する必要がある事項とともに、一貫実証試験を計画するために確認しておく必要のある事項を検討した。

4.3.3. 結果及び考察

4.3.3.1. 一貫システムの設計思想の整理

① 一貫システムの基本フロー図

一貫システムの基本フロー図を資料編 4-52 に示す。本整理結果に基づき次項以降に示す感度解析及び基本的考え方の整理、一貫システムの課題及び対応策の整理、ならびに実証試

験計画へのフィードバックを実施した。

② 感度解析及び基本的考え方

感度解析結果を資料編 4-54 から資料編 4-60 に示す。尚、当該結果には基本的考え方の整理結果、「4.3.3.2 一貫システムの課題及び対応策の整理」及び「4.3.3.3 実証試験計画の検討 ①実証試験へのフィードバック」の結果も一覧表内に含めて整理した。

全体計画、プロセス技術、規制、環境安全及び船舶技術の観点から、リスク要因を抽出検討した結果、圧入地点の特定及び周辺海域の海象条件、港湾使用・設備条件、運航条件、船上作業条件、ユーティリティ確保、環境基準整備等、実証試験計画の検討を進めていく上で前提となる基本条件が明確に定まっていないものがある。これらの多くは、今後選定される圧入地点や港湾の条件に依存するもので、それらの早期選定が望まれるところである。これらが選定されていない現段階では、想定される条件範囲を暫定的に設定して計画検討を進めざるを得ない面があるが、圧入地点が未定であることに起因して大きな不確実性が存在することは常に念頭に置く必要がある。技術的な面では、FRP や坑口設備・圧入井等の圧入技術に関わる課題が特に重要である。

4.3.3.2. 一貫システムの課題及び対応策の整理

本項の検討結果は前述した「4.3.3.1 ②感度解析及び基本的考え方」の結果の一覧表内に含めて整理した（資料編 4-54～資料編 4-60）。

前述の「感度解析及び基本的考え方」で指摘したとおり、圧入地点や港湾の条件に依存する基本条件については、ある程度幅広く設定する必要があるため、それら課題に対する対応策についても、種々のケースを想定したケーススタディによって幅広く対応策を用意する必要がある。特に、圧入地点及び貯留検討事業者が未定のため、坑口設備・圧入井については、技術的な検討が進んでいない状況であることから、早期に貯留検討事業者を決定して暫定的にでも検討を進める必要がある。

4.3.3.3. 実証試験計画の検討

① 実証試験へのフィードバック

本項の検討結果は前述した「4.3.3.1 ②感度解析及び基本的考え方」の結果の一覧表内に含めて整理した（資料編 4-54～資料編 4-60）。

特に、貯留検討事業者による坑口設備・圧入井の検討を進めること、並びにシャトルシップ方式実現のためのクリティカル技術である FRP ピックアップ/嵌合の単体試験による実証を、一貫システムの実証試験に先立ち実施することが重要と考える。

② 実証試験計画の検討

今回の検討結果では表 4-8 に示す通り、実証試験を計画する上で確認が必要となる項目と、実証試験の対象候補とする試験項目を選定した。

表 4-8 実証試験計画の検討結果

<p>実証試験を計画する上で確認が必要な項目</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 圧入地点の特定及び周辺海域の海象条件、運航条件、船上作業条件の整理 ・ 貯留検討事業者の特定および圧入技術の知見の反映 ・ 港湾施設の詳細条件（着岸可能な船の大きさ、港湾での作業可能時間、など） ・ 実証試験設備へのユーティリティ（電気、水など）の条件の整理 ・ 折衝が必要となる関係官庁、自治体、地域住民の特定と事前説明 ・ 「環境安全」の項で抽出した緊急作業中断時などの想定事象に関する確認事項 ・ 「船舶技術」の項で抽出したシャトルシップ上での作業の妥当性に関する確認事項 ・ 「圧入技術」の項で抽出した圧入作業時における FRP や坑井の信頼性に関する確認事項
<p>実証試験の対象候補として抽出された試験項目</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 「プロセス技術」の項で抽出した CO2 分離工程での確認事項 ・ 「圧入技術」の項で抽出した貯留層の不確実性対応並びに圧入条件、坑底環境条件に関する確認事項

次年度以降において実証試験を計画する上で確認が必要となる項目の具体的な確認方法の検討を行うとともに、モニタリング及び実証試験の対象候補として抽出した試験項目を実施するために必要となるコストやスケジュールを試算した上で、プロジェクト実施計画を策定する必要がある。