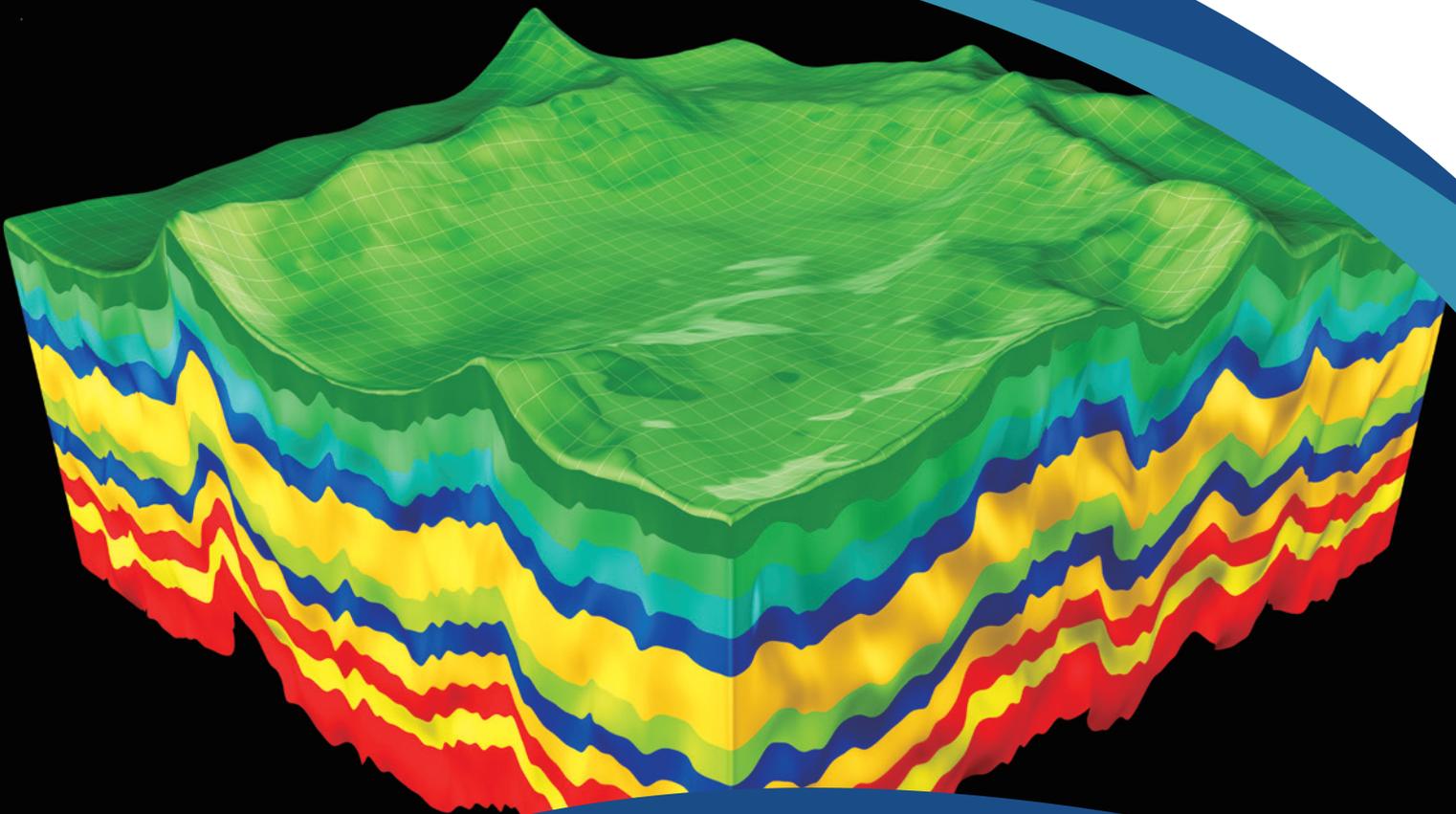




二酸化炭素地中貯留
技術研究組合

Geological Carbon Dioxide Storage
Technology Research Association



CO₂ 地中貯留技術事例集

Phase 03

サイト特性評価

第3章 サイト特性評価

目次

| | |
|---|------|
| 第3章 サイト特性評価..... | 1 |
| 3.1 はじめに..... | 1 |
| 3.2 評価の流れ..... | 1 |
| 3.2.1 地質／貯留システムフレームワーク評価..... | 2 |
| 3.2.2 貯留層評価..... | 3 |
| 3.2.3 遮蔽層評価..... | 4 |
| 3.2.4 地質モデルとシミュレーション..... | 4 |
| (1) 地質モデル..... | 5 |
| (2) 貯留層シミュレーション..... | 5 |
| (3) 貯留可能量（静的可能量と動的可能量）..... | 5 |
| 3.3 リスクアセスメント..... | 6 |
| 3.4 概念設計と実現可能性調査..... | 6 |
| 3.5 総合評価..... | 6 |
| 付録 | |
| S1 長岡 CO ₂ 圧入実証試験プロジェクト..... | s1-1 |
| S2 苫小牧大規模実証試験のサイト特性評価..... | s2-1 |

第3章 サイト特性評価

3.1 はじめに

サイト特性評価では、サイト選定において抽出されたサイト候補について、貯留能力の評価精度向上のため必要に応じて新規の地質データ取得（弾性波探査、調査井掘削）を行い、CO₂貯留サイトの適性および貯留能力の検証を行う。まず詳細な地質モデルおよび貯留層モデルを構築し、貯留層モデルを用いたシミュレーションにより、CO₂の圧入挙動さらには長期挙動予測を行う。そして貯留の安全性を前提とした貯留可能量の推定、検証された圧入計画に基づく圧入設備の概念設計、さらにはコスト計算も含めたフィージビリティスタディ（FS）を行ったうえで、最終的にサイトを確定する。同時に、輸送も含めた地上条件などの非地質的評価項目（第2章参照）についても再確認の上、リスクアセスメントと共に社会受容性活動（PO/PA）を本格的に開始することになる。前述のように追加地質調査が予想される場合あるいは法的規制が明確な場合は、初期段階からの活動が必要となる。また当然のことながら関連法規で要求される評価項目についてはあらかじめこの段階で網羅しておく必要がある（例：海洋汚染防止法、UIC Class VI-米国）。

3.2 評価の流れ

特性評価段階のスタートとなる新規の追加調査は、3次元弾性波探査（以下、3D弾性波探査）と調査井掘削が基本であり、前者により3次元かつシームレスな構造形態とアコースティックな物性情報、後者（物理検層、生産テスト等）により直接的な地質・貯留層／遮蔽層データ（孔隙率、浸透率、圧入能力、等）を取得する。3D弾性波探査は、分布が様でない堆積体（貯留層）やリークや誘発地震の原因となりうる断層形態の把握において有効であり、また圧入開始後のモニタリングにおけるベースラインデータとして極めて重要な意味を持つ。理想的には両者の統合により貯留システム（貯留層／遮蔽層）の3D的形態と物性の把握が可能となるため、3D弾性波探査による予察の上でその情報を最大限活用できるように調査井を配置するのが望ましい。

次に、新規調査において得られたデータを加え、以下の手順で詳細評価を進める。

- ・貯留システムのフレームワーク（構造／トラップ）についてその適性を再確認する。
- ・貯留層および遮蔽層の物性やモデル化のためのパラメータを評価する。
- ・地質モデル（地質構造や貯留層の孔隙率、浸透率）を作成し、容積法に基づく静的な貯留可能量を推定する。
- ・地質モデルをベースに、貯留層内流動に関するパラメータ（浸透率等）を加えた貯留層モデルを構築する。そのモデルを用いた流動シミュレーションにより、圧入挙動および圧入後の長期挙動予測も含め貯留の安全性を検証し、動的な貯留可能量と技術的に実施可能な圧入計画を提示する。長期挙動予測において示されるCO₂プルームの拡がり／移動や貯留層内での圧力上昇／伝搬は、その後のリスクアセスメントやモニタリング計画に反映される。

サイト選定から特性評価に至る評価の流れを、表 3.2-1 に示す。

表 3.2-1 サイト選定～特性評価までの流れ

| 事業フェーズ | 基本計画・サイト選定 | 特性評価 前期 | 特性評価 後期 |
|------------|---|--|---|
| 目的 | <ul style="list-style-type: none"> ・構造形態の把握 ・貯留層／遮蔽層の広域分布把握 ・貯留システム検討 ・想定エリアの選定 | <ul style="list-style-type: none"> ・貯留システムレビュー (サイト範囲) ・サイト候補の選定 ・追加調査準備 (3D 弾性波探査／調査井) | <ul style="list-style-type: none"> ・貯留システムの詳細評価 ・静的／動的貯留可能量の推定 ・概念設計 ・サイト確定 |
| 実施作業 | <ul style="list-style-type: none"> ・広域地質評価 ・広域概念地質モデルの構築 | <ul style="list-style-type: none"> ・詳細地質評価 ・追加調査仕様検討 ・PO/PA 活動計画 | <ul style="list-style-type: none"> ・詳細地質評価 ・地質モデル／貯留層モデルの構築 ・流動シミュレーション ・PO/PA 活動 |
| 取得すべき必要データ | <ul style="list-style-type: none"> ・既存地質情報 (文献等) ・既往 2D/3D 弾性波探査／坑井データ | <ul style="list-style-type: none"> ・既往地質データ (同左) | <ul style="list-style-type: none"> ・3D 弾性波探査 (モニタリングベース) ・調査井、試料分析 |

3.2.1 地質／貯留システムフレームワーク評価

基本的にはサイト選定時の評価と同様の基準に基づき、より詳細にサイト／想定圧入範囲内で貯留システムに欠陥がないことを確認することになる。遮蔽層については、漏洩リスクの観点から、浸食や断層等による欠如がないことが必須である。大規模断層は、相対的に漏洩リスクのもっとも高い経路であるため、3D 弾性波探査による詳細なイメージングを行い、浅部の帯水層の評価と併せて、モニタリング計画の作成に役立つ。また、複数の遮蔽層を想定した seal complex の考え方も許容され、挟在する貯留層は貯留層からの漏洩に対するバッファーとなると同時に、強反射 (gas effect) により弾性波探査等による検出も比較的容易になることが期待できる。

一方、貯留層に関しては、経済性に直結する圧入性能の観点から、その分布／性状は一様であり、また断層によるコンパートメント化もないことが望ましい。逆に、分布の不均質性はプロジェクトにとって致命的になる可能性もあり、堆積システム／環境の認識と 3D 弾性波探査等による貯留層分布形態の把握は重要な意味を持ち、一定のリスクが想定される場合は、代替プランの圧入層／圧入井／サイト等を考慮しておく必要がある。例えば、ノルウェーの Snøhvit プロジェクトでは、一般に貯留層の不均質性が予想される河川～デルタ成環境の砂岩層への圧入により想定外の急激な圧力上昇が観測されたが、近傍の断層と貯留層の想定以上の不均質性に起因するフローバリアー効果によるものと推定されている。このプロジェクトでは、その後代替層への圧入に切り替え、事業は無事に継続された。また貯留層内の大規模断層については、誘発地震の観点から圧入井／CO₂ プルームとの近接度に留意すべきで、定量的にはシミュレーションによる圧力伝搬の検討が必要となる。

3.2.2 貯留層評価

- ・ 孔隙率、浸透率分布

周辺坑井、新規掘削坑井の物理検層、コア分析で得られた貯留層における孔隙率と浸透率の分布を図面化する。コアや物理検層（音波検層、密度検層、中性子検層、核磁気共鳴検層など）で得られた孔隙率と検層データから得られる音響インピーダンス（密度×音速で定義される）に相関が認められる場合、弾性波探査記録に基づく音響インピーダンス・インバージョン結果から孔隙率分布を3次的に推定することもできる。

- ・ 貯留層の鉱物組成、地層流体の化学組成

圧入されたCO₂と貯留層、遮蔽層との化学反応には、圧入層の孔隙率および浸透率の変化、遮蔽層の安定性に影響しうる地層流体のpHの低下、CO₂を化学的にトラップするCa²⁺、Mg²⁺、またはFe²⁺などのイオンを含む炭酸塩沈殿物を形成する反応がある。特性評価でのシミュレーションでこの過程を評価するためには、地質モデルに鉱物組成を組み込む必要がある。

- ・ 貯留層の地層圧

地層圧に関する情報は、特性評価にとって不可欠である。坑井試験（圧入テスト、産出テストなど）で得られる精度の高い地層圧測定により、水理地質学的モデリング、圧入性調査、遮蔽能力推定、シミュレーションによる貯留可能量評価、貯留層全体としての浸透率、そして水平、および垂直方向の流体の導通性に関する推定などが可能となる。サイト近傍に生産中あるいは枯渇した油・ガス田が存在し、そこでの生産履歴や圧力減退のデータが得られれば、シミュレーションのキャリブレーションに有効に利用される。

- ・ 岩石力学的特徴

CO₂貯留の安全性を確実にするために、地質モデリングとシミュレーションを利用して圧入層に対するCO₂貯留の力学的影響を評価することが望ましい。

- ・ 圧入能力

圧入能力は、貯留層中の孔隙に圧入可能なCO₂量（単位時間あたり）と、CO₂プルームが、圧入地点から移動する速度によって示され、これを高精度に評価するためには調査井で得られる貯留層の地層圧力・温度、グロス層厚、ネット層厚、孔隙率、水平/垂直浸透率などの物性値が必要である。また、近傍の油・ガス田における生産履歴や、調査井における圧入試験、生産試験（揚水試験）などの坑井試験によって得られるデータも貯留層の圧入能力を推定する重要なデータである。最も重要なデータは、石油・天然ガス生産分野でいうところの生産（産出）指数（**Production Index**）であり、これは流動坑底圧と密閉坑底圧の差圧（**Draw Down**）と産出量との関係から得られる単位差圧あたりの産出量である。CO₂圧入では揚水試験やフォール・オフ試験での圧力変化を測定し、生産指数に対応するCO₂圧入能力（圧入レートを圧入中の坑底圧力と圧入停止中の坑底圧力の差で除した指数）値が得られ、圧入能力の直接的データとなる。また、これら生産試験によって得られる浸透率は、コア分析によって得られる浸透率が分析点の一点のデータであるのに比べ、坑井近傍を代表する浸透率が得られるという利点がある。

これまでに述べてきた貯留層パラメータは、貯留層の堆積環境と不均質性、層序、続成作用による変質、地層傾斜、断層分布と断層シール能力、圧力分布、そして地層流体といった変数に左右されることになる。また、これらのパラメータが空間的に、どのように変化するかをモデル化するために、貯留層の堆積環境的考察が不可欠であり、入手できるあらゆる情報、つまり既存坑井データの対比、研究資料、坑井データや弾性波探査データを利用したシークエンス層序学的検討や地球統計学的検討が必要である。

以上のような貯留層パラメータや空間分布は地質モデルとして統合され、貯留可能量の推定、圧入CO₂の地下における挙動や貯留層内での圧力伝搬などについてシミュレーションが実施される。

3.2.3 遮蔽層評価

圧入された超臨界CO₂はそれ自体に圧力が作用していることに加えて、水よりも密度が低く、浮力により上向きに駆動される。このため、貯留システムにおける遮蔽層の存在は貯留システムを機能させるために不可欠の要素であり、特性評価においても以下の項目を含む十分な評価が必要である。

- ・遮蔽層自体の物性

調査井において遮蔽層のコアを採取し、スレッシュホールド圧力（毛細管圧）を測定することが望ましい。

- ・厚さと広がり

遮蔽層の厚さに関しては、必要とされる最小限の厚さを示すことはできないが、数10mは少なくとも必要と考えられる。挟在する粗粒岩層が薄い、つまりネット遮蔽層が厚い方が望ましい。また、複数の遮蔽層の存在は漏洩リスクを考えるうえで遮蔽能力の信頼性を増すことになる。広がりに関しては措定されるCO₂プルームの広がりを十分余裕をもって被覆することが求められる。広がりや異方性の評価には貯留層と同様、周辺の既存坑井との対比や坑井データ、弾性波探査データを利用したシークエンス層序学的検討なども必要と考えられる。

3.2.4 地質モデルとシミュレーション

地質モデル構築とシミュレーションの実施は、CO₂貯留能力やリスクの評価、動的貯留可能量算定に不可欠であり、サイト特性評価における最重要の部分と位置づけられる。サイト特性評価においてはCO₂挙動をはじめとしたCO₂地中貯留に関連した一連の物理的、あるいは化学的プロセスを再現・予測し、対象とする貯留サイトにおける貯留可能量を算定・評価すると同時に、潜在するリスクを明らかにし、その程度を評価し対策を施すことが重要である。この目的を達成するために、これらのプロセスを可能な限り現実に近い姿で再現する数値シミュレーションの手法を用いる必要があり、対象サイトの地質状況を記述した地質モデルの構築が前提となる。すなわち、以下のようなステップを踏むこととなる。

- ・全てのシミュレーションモデルの基礎（器）となるデジタル3次元地質モデルの構築。
- ・考えられるCO₂挙動がすべて表現可能で、トラップ機構の効果や時間に対する温度、および圧力応答、さらにはリスクに対して取り得る措置の有効性などの評価に対応できるデジタル3次元数値シミュレーションモデルによるフロー（流体流動）シミュレーションの実施。

- ・貯留層の圧入性と貯留能力、遮蔽層の遮蔽強度、および坑井のケーシングならびにセメントに CO₂ がおよぼす影響を評価する地球化学的シミュレーションの実施。
- ・圧力・温度変化によって誘発する応力変動が、遮蔽層、および坑井の健全性、地表・地層変形の程度、ならびに誘発地震の発生頻度と強度などに与える影響を評価する地質力学シミュレーションの実施。
- ・各シミュレーションモデル間の連携、相互フィードバック（例えば地層・地層水と CO₂ との地化学反応による貯留層特性（孔隙率、浸透率など）の変化とその流動モデルへの反映など）の検討・評価の実施。

(1) 地質モデル

地質（静的）モデル構築のフローは、

- ・解釈して作成された地質構造図を基に、コンピューター上で貯留サイトの形状モデル (the shape model of the storage complex) を作成する。
- ・様々な地質特性を表現できるように形状モデル内部を小区画に分割、すなわちグリidding (gridding) を行う。
- ・貯留層内の岩相・堆積相の分布を設定 (facies modeling) する。岩相・堆積相は貯留層特性の中でも最も不確実性が高いもので取り扱いには注意が必要である。

CCS においては、地質モデルのほかにも、圧入された CO₂ と地層水、あるいは CO₂ を溶存した地層水と地層（鉱物）との地球化学反応など評価するための地球化学モデルや、地殻変動や流体圧入による圧力変動に起因して発生するジオメカニカルな反応を評価するジオメカモデルなどがある。

(2) 貯留層シミュレーション

地中での流体、特に CO₂ の挙動を把握することを目的として、構築された地質（静的）モデルに、サイトが持つ貯留層特性（孔隙率、浸透率等）や胚胎する流体（CO₂、地層水等）の流動特性を与えて、CO₂ の挙動、分布を計算、予測する。実際の圧入操業に伴って集積されるデータ（圧入量、温度、および圧力等）に基づいて、事前の予測と実際を比較することでモデルのアップデートを行うことが重要である。

(3) 貯留可能量（静的可能量と動的可能量）

地質（静的）モデルにおける容積法による貯留量の計算では、基本的には貯留空間における貯留可能領域 (= in place) の容積、容量を計算している。一方、貯留層シミュレーションにおける貯留量の計算では、模擬的に流体 (CO₂) を流動させることで、その移動や滞留も考慮に入れ、より現実に近い貯留量の計算が可能となる。このため、実質の貯留ポテンシャルの評価には貯留層（動的）モデルに基づく動的貯留可能量の計算が必須である。

3.3 リスクアセスメント

CCS 事業にとっての最重要事項は安全な CO₂ 地中貯留の実現である。貯留層や遮蔽層の組み合わせによる貯留システムの健全性は、上述のような各種既存、および新規取得データの幅広い解析、評価作業によって行われ、想定された貯留量の CO₂ が、安全に貯留されることが、本フェーズにおいて示される。それにも拘わらず、地下を扱う事業にとって、不確定な要素があるのは当然であり、各種リスクが潜在的に存在することを予想しつつ対策を検討しておく必要がある。日本において特に注目すべきリスクは既存坑井からの漏洩可能性と誘発地震である。

また、リスクの構成要素は CO₂ 地中貯留全般に共通するものもあるが、サイトに特有な部分も多い。このため、サイト特性評価の段階で十分な評価が必要となる。特性評価では、最終サイト候補を対象に、考えられるリスクを抽出し、できればランク付けしておいた方が良い。それぞれのリスクに対する本格的な対応計画は、次のフェーズである実施計画段階で策定されることになるが、特性評価段階でも PO/PA は開始されていなければならず、利害関係者に説明できるような対応策はあらかじめ検討しておく必要がある。リスク評価では、最終サイト候補の様々な特徴を考慮して実施されるが、リスク要素に関する FEP (F=Features、E=Events、P=Processes) データベースが利用可能であれば、これらを参考にする方法もある。

3.4 概念設計と実現可能性調査

特性評価では、集積された各種評価結果をもとに、概念設計と実現可能性調査を行う必要がある。主な目的は以下の通りである。

- ・各圧入サイト候補への CO₂ 貯留における開発シナリオを作成すること。
- ・物理的および技術的に実現可能なシナリオかどうか検討すること。法規制による実現可能性の検討も含む。
- ・技術的に可能な圧入サイト候補の中から概算コストを見積り、開発シナリオの候補を絞り、可能であれば1つに限定すること。
- ・地上設備に係る具体的な適用法規を調査し、官公庁への申請・届出に必要なアクションプランを作成すること。

3.5 総合評価

特性評価では、詳細な地質モデルの構築、シミュレーションによる CO₂ 貯留可能量評価、圧入性能の評価、圧入後の CO₂ 挙動予測などの成果、また、CO₂ 圧入、貯留に係る各種リスク評価を軸に、自然環境ならびに経済的要件も加えて、サイト候補が CO₂ 地中貯留サイトとして適切かを最終的に判断する。CO₂ 貯留事業の実現には、地域社会との円滑な関係構築も必須であり、利害関係者の特定を含む、社会的要件の評価も重要である。

S1 長岡 CO₂ 圧入実証試験の事例

S1.1 概要

経済産業省からの委託業務を受託した RITE が2000年度から「二酸化炭素地中貯留技術開発」として、基礎実験、モニタリング手法の検討、シミュレーション技術開発、システム研究などの基礎研究に加え、CO₂圧入実証試験を実施した。CO₂圧入実証試験では、実際の帯水層に CO₂を圧入し、地中での挙動などに関するデータを取得し、安全性などの検証を行い、本技術の適用性を確認することを目的とした。

2000年に実施された CO₂圧入実証試験地点の選定では、3か所の候補（秋田県申川油田、新潟県南阿賀油田、新潟県南長岡ガス田）から新潟県南長岡ガス田が選定され、圧入敷地として同ガス田の鉱区を保有する帝国石油（株）（当時）の岩野原基地が想定された。

この候補地が CO₂圧入実証試験のサイトとして適当であり、実証試験の実現性があるかの評価（サイト特性評価）が実施された。推進委員会で特性評価計画が審議され、坑井掘削を含む新規地質データ取得、シミュレーションの実施などが決定された。サイト特性評価として、2001年から2002年にかけて調査井3坑を掘削し、各坑井で物理検層を実施した。また、2坑でコア掘り（スポットコア）を実施、そこで得られたコアの分析など坑井資料を総合的に解釈され、地質モデルの修正が逐次実施された。2002年には調査井において揚水テストなども実施され、各種地質工学的情報を使ってシミュレーションを行って、岩野原基地における CO₂地中貯留実証試験の実施可能性が示され、研究推進委員会において実施の最終決定がなされた。2003年には3本目の観測井も掘削され、先に掘削された坑井はそれぞれ圧入井と観測井に転用された。

圧入やモニタリングに係る実施計画が策定された後、2003年7月から当初、20トン／日のレートで圧入開始、その後40トン／日に圧入レートが変更された。圧入は2004年10月の中越地震の発生による中断期間をはさんで2005年1月まで継続し、累計圧入量は10,405トンであった。

長岡実証試験で実施されたモニタリングの種類は多様であり、観測井3坑での物理検層、それらを使用した坑井間弾性波トモグラフィや繰り返し3次元弾性波探査、微小振動観測なども実施され、情報も多く得られた。長期挙動把握のために CO₂ 圧入終了後も、15年にわたってモニタリングが継続して行われた。

S1.2 サイト特性評価

S1.2.1 調査井の掘削

サイト選定の過程で利用された地質を含む各種資料は、基本的に公表された既存資料であったが、サイト特性評価のために、新規にデータの取得が行われた。岩野原基地が選定された理由のひとつが、坑井掘削、CO₂圧入施設、モニタリング施設建設に十分な広さを有する整地済み敷地が存在することであった。

掘削された調査井は図 S1.2-1 に示すが、CO2-1 は CO₂圧入井を想定し、ほぼ垂直（偏

距は貯留層上面深度で南へ約 20m) に掘削された。2 坑目、3 坑目は、1 坑目の掘削によって得られた地質資料を使った初期シミュレーションをもとに、将来の観測井として利用することを想定した掘削位置に選定された。CO2-2(OB-2)は傾斜井(貯留層上限で東に 97m)、CO2-3 (OB-3) は傾斜井 (同、西南西へ 153m) であった。また、2003 年には、事業計画のステージとなるが、より詳細なシミュレーションによる CO₂ 移行予測に基づいて決定された位置において観測井 CO2-4 (OB-4) が掘削された。モニタリング計画で、より効率的であるとされた、貯留層上限深度において西北西へ 78m に掘削された傾斜井である。

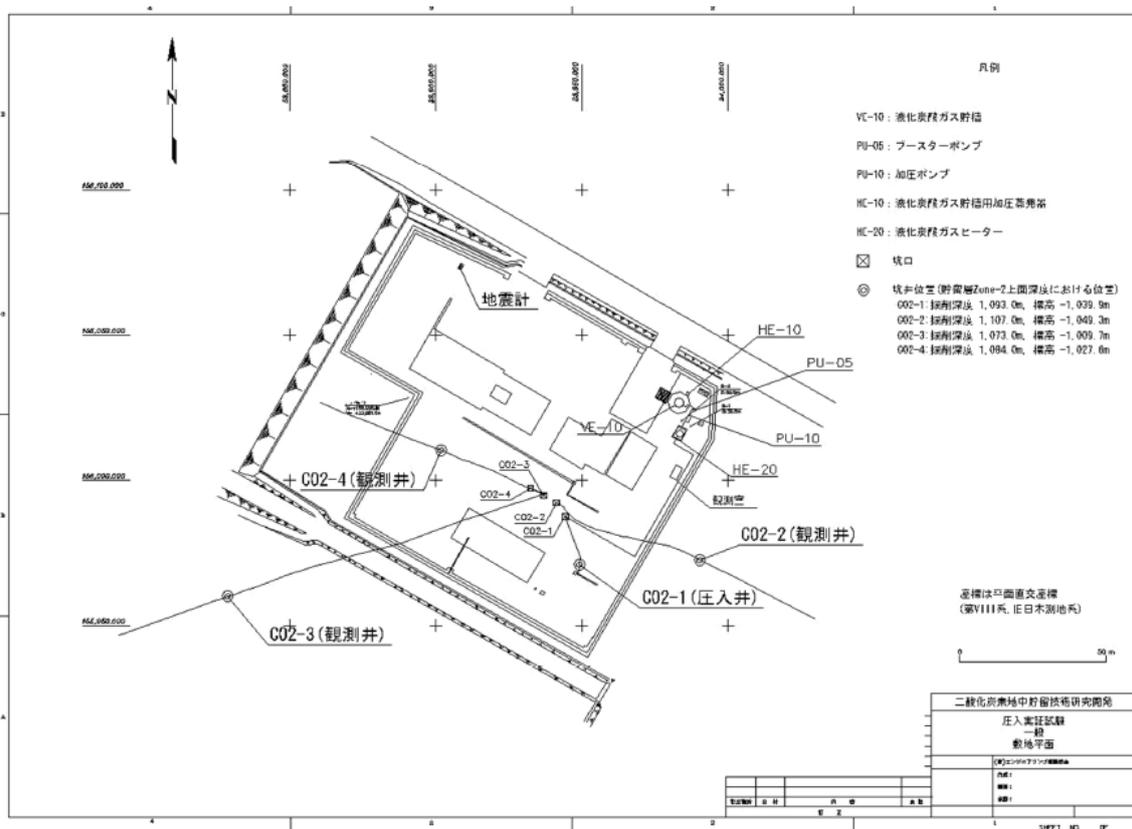


図 S1.2-1 長岡実証試験敷地内の坑井配置 (RITE, 2003)

S1.2.2 調査井でのデータ取得

各坑井の掘削中および掘削後、以下のような調査、サンプル採取が実施された。

- ・ カッティングス調査および採取：CO2-1 では 300m 以深、他の坑井は 900m (灰爪層上限付近) 以深でカッティング調査 (岩質調査) が行われた。
- ・ マッドガス測定：約 300m 前後以深において測定が実施された。
- ・ コア採取および観察：CO2-1 において 45.0m、CO2-2 において 17.5m のコアが貯留層で採取され、同時に地質観察、記録が実施された。
- ・ 地層水採取：揚水試験実施時に貯留層から流体サンプル (3 試料) 採取が実施された。

- ・ 物理検層：調査井 3 坑において自然電位検層、ガンマ線検層、比抵抗検層に関しては深度約 300-350m 以深、また坑径検層、密度検層、音波検層、中性子検層、比抵抗坑壁イメージング検層（FMI：Fullbore Formation Microimager）、核気共鳴検層（CMR：Combinable Magnetic Resonance Tool）は深度 900m 前後以深において実施された。また、地層圧力・浸透率検層（MDT：Modular Dynamic Tester）が CO2-1、CO2-2 の 27 点で実施された（図 S1.2-2、表 S1.2-1 参照）。

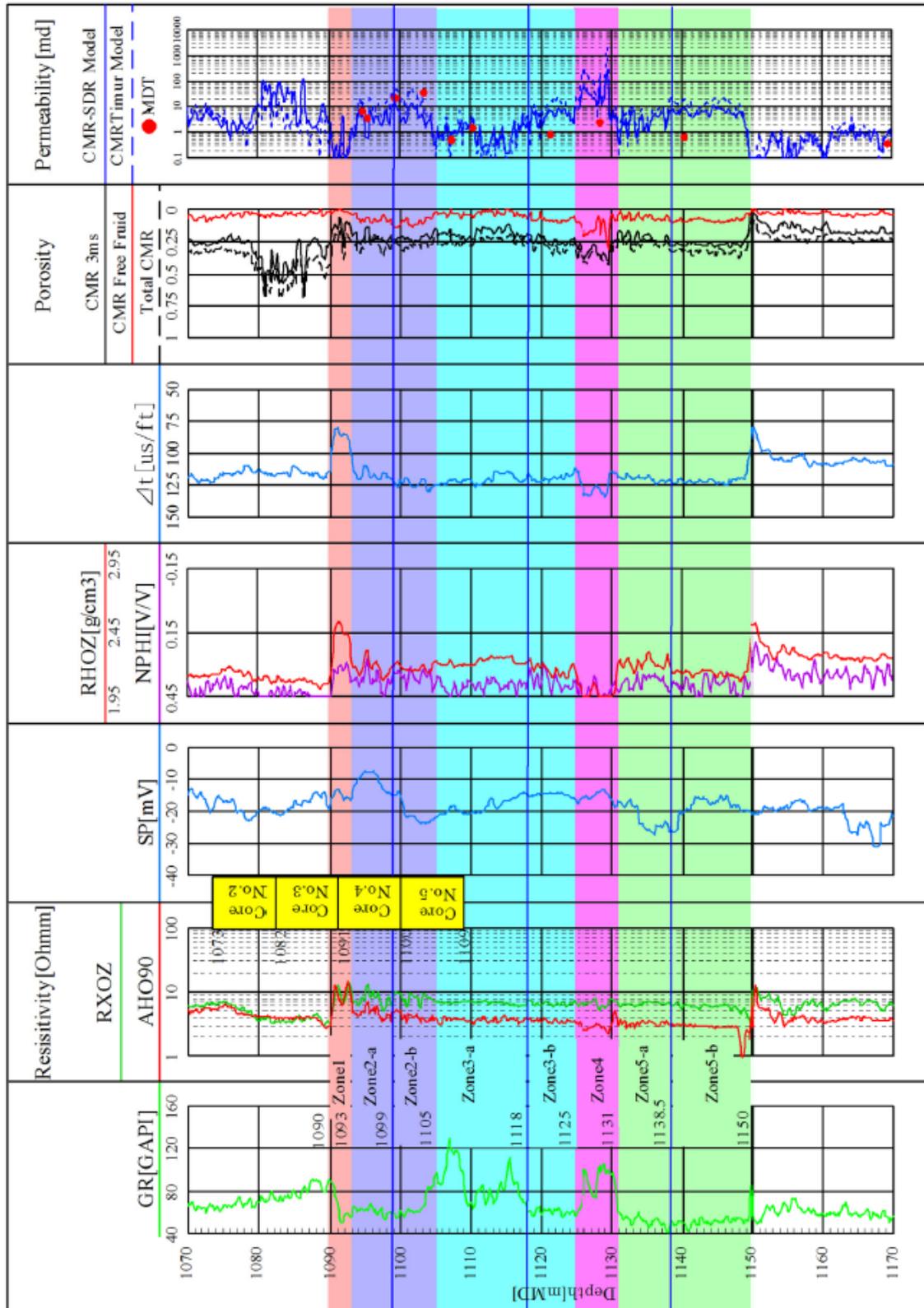


図 S1.2-2 C02-1 物理検層総合図 (RITE, 2002)

表 S1.2-1 Ic 層における各 ZONE の物理検層結果一覧 (RITE, 2003)

| ZONE | 層厚 (m) | 岩質 | 比抵抗 (Rt) Ω m | 密度 (ρ b) g/cm ³ | 音波速度 (Δt) Ms/ft | ガンマ線 (GR) API | 核磁気共鳴 | 地層圧力・ 浸透率 MDT |
|--------|-----------|----------------|--------------------|----------------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| ZONE 1 | 3.0-4.8 | 石灰質砂岩 | 2~15 | 2.10-2.60 | 80-115 | 60-90 | タイト | タイト |
| ZONE 2 | 9.0-12 | 極細粒～ 細粒砂岩 | 4~7 | 2.00-2.35 | 100-130 | 55-120 | 浸透率 数 10mD オーダー | 浸透率 数 10mD オーダー |
| ZONE 3 | 20.0-23.5 | 細礫岩、砂岩 | 3~5 | 2.00-2.40 | 100-130 | 60-160 | 浸透率 不良/やや良好 | |
| ZONE 4 | 5.5-7.5 | 凝灰質砂岩 極細粒砂岩 | 3~4 | 1.80-2.25 | 120-130 | 50-110 | 浸透率 ～数 100mD | モビリティ 2-4md/cp |
| ZONE 5 | 16.8-20.5 | シルト質砂岩 | 2~5 | 2.10-2.40 | 90-130 | 50-70 | | |

S1.2.3 コア分析による評価

坑井 CO2-1 と CO2-2 ではスポットコアが採取され、表 S1.2-2 に示すような分析が実施された。

表 S1.2-2 コア室内試験項目 (RITE, 2001)

| 試験種別 | 試験項目 | | 遮蔽層 | 貯留層 | 備考 |
|---------------|----------|-----------|-----|-----|-------------------------|
| カッティングス 分析 | 蛍光 X 線分析 | | 0 | 11 | |
| 一般コア試験 | 粒子密度 | 周方向 | 0 | 33 | プラグサイズ 1 試料を含む |
| | | 長さ方向 | 0 | 9 | |
| | 孔隙率 | 周方向 | 0 | 33 | プラグサイズ 1 試料を含む |
| | | 長さ方向 | 0 | 9 | |
| | 空気浸透率 | 周方向 | 0 | 33 | 乾燥状態, プラグサイズ 1 試料を含む |
| | | 長さ方向 | 0 | 9 | 乾燥状態 |
| 特殊コア試験 | 相対浸透率 | ガスフラッド | 0 | 5 | |
| | | ウォーターフラッド | 0 | 5 | |
| | 毛細管圧力測定 | | 0 | 5 | 空気/水 |
| | 超音波速度 | 乾燥状態 | 0 | 2 | |
| | | 飽和状態 | 2 | 2 | |
| | 置換圧力 | ホールサイズ | 2 | 0 | |
| | | プラグサイズ | 2 | 0 | |

● 一般コア試験

Ic 層を対象にして孔隙率測定と絶対浸透率測定の一般コア試験が実施された。サンプル箇所が偏らない様に対象となるコアの全域からサンプルを 42 個採取した。ここで得られたデータは圧入計画や貯留層の貯留能力の評価などに使用された。

例として表 S1.2-3 に浸透率の測定結果のまとめを示す。

表 S1.2-3 一般コア試験による浸透率測定結果まとめ (RITE, 2003)

| ゾーン区分 | 空気浸透率 (md) | | | | 水浸透率 (md) | | | |
|-------|------------|-------|-----|---------|-----------|------|------|-------|
| | 平均 | 最小 | 最大 | データ数 | 平均 | 最小 | 最大 | データ数 |
| 遮蔽層 | - | - | - | 0 | - | - | - | 0 |
| 貯留層 | Zone-1 | 27.7 | - | - | 1 | - | - | 0 |
| | Zone-2 | 233.7 | 3.0 | 1,070.5 | 41 | 95.0 | 47.3 | 143.0 |
| | Zone-3 | 39.9 | 7.4 | 87.6 | 11 | 4.4 | - | 1 |
| | Zone-4 | - | - | - | 0 | - | - | 0 |
| | Zone-5 | - | - | - | 0 | - | - | 0 |

● 特殊コア試験

Ic 層貯留層を対象として相対浸透率測定 (ガスフラッドおよびウォータフラッド)、毛细管圧力測定、3 種目よりなる特殊コア試験を実施した。いずれの試験もサンプル数は 5 つであるが、サンプル箇所が偏らず、なるべく対象コアの全域に広がるようにサンプリングした。採取データはシミュレーションの入力パラメータなどに利用した。

また、Ic 層上位の遮蔽層を対象にスレッシュホールド圧力測定 (Threshold Pressure) が実施され、遮蔽能力評価に使用された。また、P/S 波伝播速度測定の試料サンプル対象は、Ic 層および遮蔽層である。採取データは坑井間トモグラフィの適用検討に使用された。

S1.2.4 貯留層評価

物理検層やコア分析結果から、貯留層における各 Zone は以下のように評価された。

- Zone-1 : 石灰質砂岩を主体とし、硬質、緻密である。コア観察から不透水性の Zone であるとされ、物理検層結果からも貯留層としての性状は不良と判断された。
- Zone-2 : 主に細粒～中粒砂岩よりなり、礫岩層の挟在および細礫の含有が見られる。核磁気共鳴検層を含め物理検層結果 (地層圧力・浸透率検層) では最も高い浸透性が示された。また、コア試験でも同様の評価がなされた。
- Zone-3 : 塊状の極細粒砂岩からなり、ガンマ線検層の値が 70～105 API と高く Zone-1、2 と比較して、より泥質である。物理検層結果 (地層圧力・浸透率検層) でも低い浸透率を示す。
- Zone-4 : 凝灰質砂岩、極細粒砂岩からなり、泥質であり、物理検層結果では核磁気共鳴検層ではやや高い浸透率を示すが、地層圧力・浸透率検層では低い浸透率を示す。
- Zone-5 : シルト質砂岩、砂質部と泥質部が混在している。ガンマ線検層、中性子検層などの結果は Zone-2 に類似するものの、物理検層結果 (地層圧力・浸透率検層) では低い浸透率を示す。

S1.2.5 揚水試験

Zone 2-5 の圧入能力を把握するために圧入井 CO2-1 において揚水テストを実施した。本テストの目的は、以下の 3 点であり、坑内図を図 S1.2-3、図 S1.2-4 に示す。

- ・ CO₂ 圧入対象層の生産指数 (PI) を算出し、CO₂ 圧入能力を推定すること。
- ・ 圧力解析を行い、その結果から坑井周辺の浸透率、スキンを算出すること。
- ・ 産出水をサンプリングし、地層水の情報を得ること。

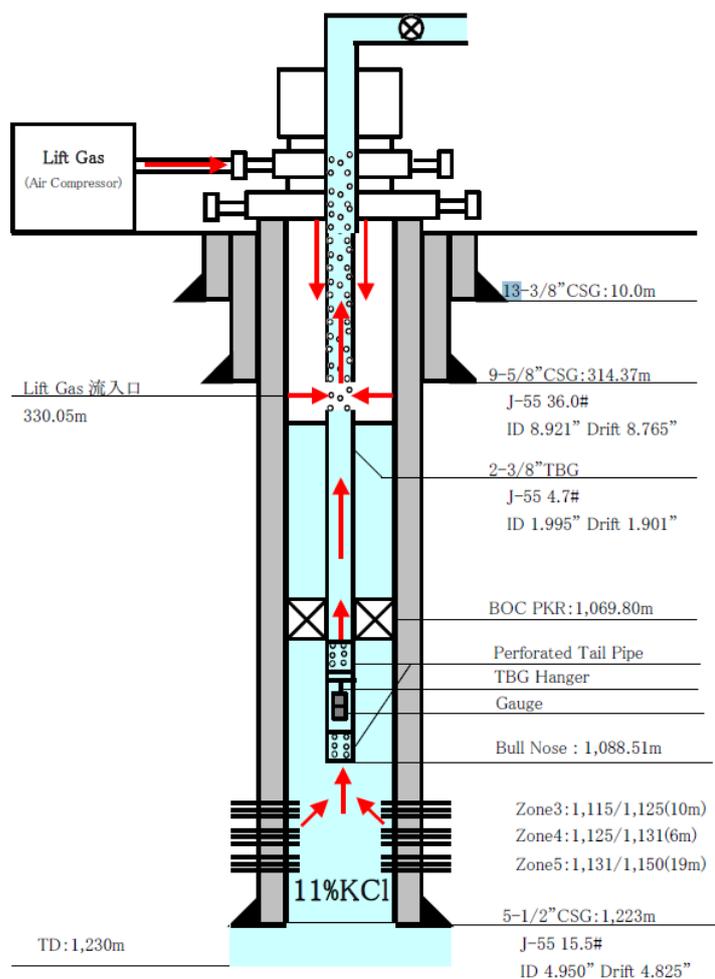


図 S1.2-3 Zone-3~5 (No. 1) を対象とする揚水テスト坑内図 (RITE, 2003)

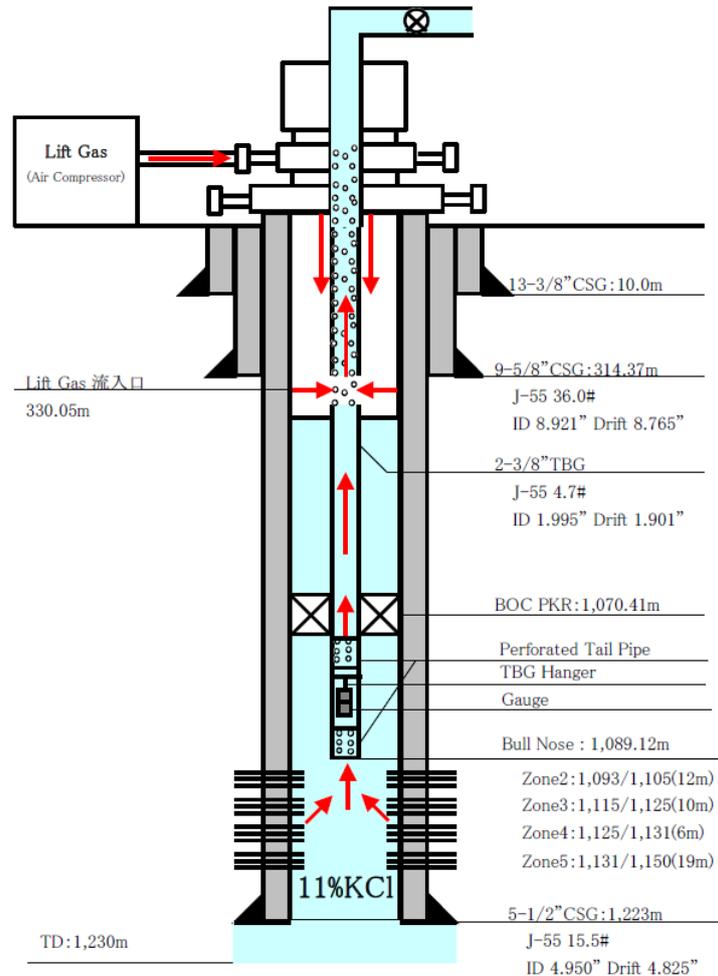


図 S1.2-4 Zone-2~5 (No. 2) を対象とする揚水テスト坑内図 RITE, 2003)

● 揚水テストの結果

No.1 テストでは、浸透性が比較的低いと考えられた Zone-3、4、5 の区間を対象に実施した。No.2 テストでは、浸透性が高いと考えられる Zone-2 の区間を加えて揚水を行った。以下のように目的を達成した。

- ・ No.1 テストでは Zone-3、4、5 の区間を対象に行い、比較的浸透性が低いと予想されたが 5.6kl/d の安定レートでフローさせることができた。No.2 テストでは Zone-2 の区間を対象に加えて行い、21.4kl/d の安定レートでフローさせることができた。
- ・ No.2 テストの最後に、地層水サンプルを取得した。
- ・ 坑底圧力測定の結果をもとに生産指数 (PI) を求めた。No.1 テストから Zone-3、4、5 の区間の PI は 0.17kl/d/ksc、No.2 テストから Zone-2 を含めた全体の PI は 0.70kl/d/ksc という結果を得た。
- ・ 密閉中の坑底圧力測定の結果を用いて圧力解析を行った。No.1 テストから Zone-3、4、5 の浸透率は約 0.52mD、No.2 テストから Zone-2、3、4、5 の浸透率は約 2.1mD という結果が得られた。これらから Zone-2 の浸透率を計算すると 6.43mD となる。

以上の坑井テストの結果、圧入層は Zone2 とすることが決定された。予想された浸透率より低い値であり、PI は想定より悪かったが、想定されていたコンプレッサーでも 40 トン/日を圧入できる可能性は高く、もし krg が小さく定常状態時に 40 トン/日を圧入できない場合でも、酸処理などを実施しスキンを減少さえすれば 40 トン/日で圧入できると考えられた。表 S1.2-4 に結果を示す。

以上の揚水試験の結果は地質モデルの構築とシミュレーションの重要な情報となった。

表 S1.2-4 2002 年実施の揚水試験結果 (RITE, 2003)

| | | No.1 揚水試験 | | No.2 揚水試験 | |
|---------------------|-------------|-------------------------------|--|-------------------|--|
| P _i | [psia] | 1591 | | | |
| r _w | [ft] | 0.354 | | | |
| C _t | [l/psi] | 7.00E-06 | | | |
| μ | [cp] | 0.61 | | | |
| B _t | [rb/stb] | 1.00 | | | |
| φ | [fraction] | 0.22 | | | |
| h | [ft] | 114.8 | | 154.2 | |
| q | [stb/d] | 35.22 | | 134.59 | |
| T _P | [hours] | 47.20 | | 45.04 | |
| p _{wf} | [psia] | 1120.72 | | 1162.38 | |
| | | PDD* ¹ | | PBU* ² | |
| C | [stb/psi] | 4.65E-05 | | 0.0477 | |
| skin | [-] | 6.88 | | 6.88 | |
| Reservoir Model | | Homogeneous & infinite Acting | | | |
| k | [md] | 0.68 | | 2.33 | |
| r _{inv} | [ft] | 125 | | 314 | |
| PI | [stb/d/psi] | 0.075 | | 0.314 | |
| | [kl/d/ksc] | 0.169 | | 0.710 | |
| ΔP _s | [psi] | 267.36 | | 221.99 | |
| PI _{ideal} | [stb/d/psi] | 0.174 | | 0.651 | |
| | [kl/d/ksc] | 0.392 | | 1.473 | |

*1 PDD : Pressure Draw-Down

*2 PBU : Pressure Build-Up

S1.2.6 遮蔽層評価

遮蔽層は、灰爪層 Ic 層、Zone 1 直上の泥質岩である。見かけ層厚は 131.5~149.5m であり、貯留層（見かけ層厚は 56.6~66.0m）の約 2 倍の厚さとなっている。岩相は泥岩を主体とし、極細粒~細粒砂岩を挟む。泥岩は灰色~暗灰色を呈し、部分的にオリーブ色を

帯びる。また、新規の調査井掘削の範囲（CO2-1を中心とした半径約120mの範囲）では坑井間の層序および岩相対比は良好であり、遮蔽層の連続性は良好と判断された。

また、本層準での地層圧力・浸透率検層結果は1か所のみ（CO2-1坑深度1,055.2m）であるが、換算浸透率は0.14mDと小さい。また、コア試験で得られたスレッシュホールド圧力の値は1.38MPaを超え、ガスカラム換算で176m以上となる（表S1.2-5）。

表 S1.2-5 CO2-1 坑での遮蔽層における置換（スレッシュホールド）圧力（RITE, 2002）

| 坑井名 | 試料 No. | 深度 (m) | 層準 | 岩質 | 試料種別 | 置換圧力 (MPa) | ガスカラム (m) |
|-------|--------|-------------------|--------|----|--------------|------------|-----------|
| CO2-1 | C-1 | 985.09-985.32 | 遮蔽層 | 泥岩 | プラグ | > 1.38 | 176 |
| CO2-1 | B-1 | 1,087.03-1087.30 | 遮蔽層 | 泥岩 | フルダイアメーター・コア | > 5.52 | 706 |
| CO2-1 | B-2 | 1,087.71-1087.89 | 遮蔽層 | 泥岩 | プラグ | > 2.76 | 353 |
| CO2-1 | A | 1,090.69-1,090.95 | Zone-1 | 泥岩 | フルダイアメーター・コア | > 13.79 | 1,764 |

（ガスカラムの計算で、ガス密度は0.5g/cm³を使用。プラグ＝直径1“1/2、長さ5-7cm、フルダイアメーター・コア＝直径3“6/8、長さ約20cm）

以上のデータから、この遮蔽層は貯留層内のCO₂に対して十分な遮蔽性を有していると判断される。また、遮蔽層と地表の間にも数多く泥岩層が発達することが既存坑井、新規掘削坑井で知られている。

また、遮蔽層と地表との間に何らかの漏出経路となりうる断層などの不連続面が存在する可能性について、下記の点から小さいと考えられる。

- ・ 貯留サイト内の調査井の間、およびそれらとサイト外の既存坑井の間での地層対比は構造（地層傾斜）と調和して容易に可能であり、それらの中に断層を想定する必要はない。
- ・ 既存の弾性波探査結果では地表付近から貯留層に達する断層は認められない。
- ・ 親沢断層に対比できる可能性を持つ不連続面は貯留層深度まで伸びていない。

以上のように、Ic層（圧入層）の上位に発達する泥質部の検層やコア分析結果によって示される遮蔽層としての性質、泥質部の厚さ、水平的広がり、それを切る断層の有無などにより、灰爪層泥質部は、遮蔽層として十分機能すると評価される。

S1.2.7 地質モデル更新と CO₂ 圧入挙動予測シミュレーション・スタディ

ー新規データ

圧入実証試験に係わる長岡サイト特性評価の一環として、2000 年度は調査井 CO2-1 のコアデータを反映した貯留層モデルの更新を行い、圧入実証試験における CO₂ の分布を予測した。

2001 年度では調査井 CO2-1 の検層解析、コア分析結果、CO2-2、CO2-3 坑井での検層結果、特に地層圧力・浸透率検層と核磁気共鳴検層データを入手、地質モデルの修正がなされ、シミュレーションが実施された。

ーパラメータの見直し

● 有効浸透率 (Effective Permeability)

特殊コア分析では 5 個のコアプラグで周圧をかけ、相対浸透率が測定され、その過程で水飽和率 100%での浸透率が観測されている。この浸透率は地層応力、不動水飽和率の影響を反映した地下状態での有効浸透率に相当するものである。図 S1.2-5 はこの特殊コア分析で得られた水浸透率と同じコアプラグで測定した空気浸透率をプロットしたものだが、非常に良く相関していることが明らかである。また、磁気共鳴検層による浸透率との一致も良好である。以上から、コア分析結果からかなり現実的な貯留層の有効浸透率が求められたと判断された。

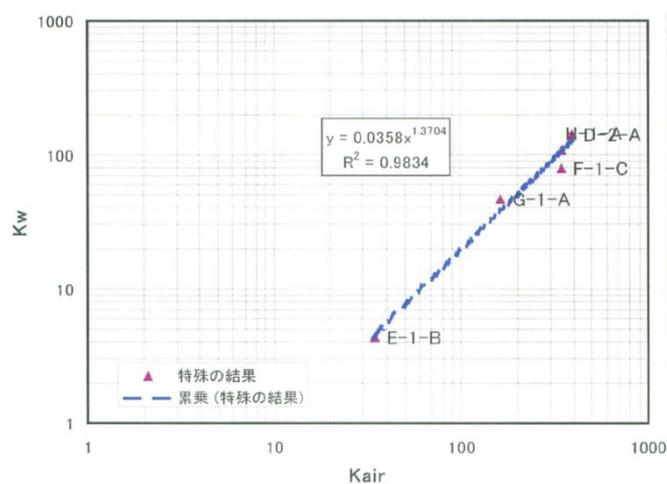


図 S1.2-5 有効水浸透率と空気浸透率の相関 (RITE, 2002)

図 S1.2-6 に見られるように一般コア分析の Zone-2 の空気浸透率はほぼ対数正規分布を示し、上記の相関を使って変換した有効浸透率も同様の分布を示すと考えられる。分布が不規則なのはデータ点数が不十分であることが原因である。したがって、Zone-2 全体の有効浸透率としては単純な算術平均ではなく、中央値 (Median) を採用し 23.0mD とした。また Zone-2 以外の Zone の浸透率は Zone-1=0mD、Zone-3=0.88mD、Zone-4=1.42mD、Zone-5=0.35mD とした。

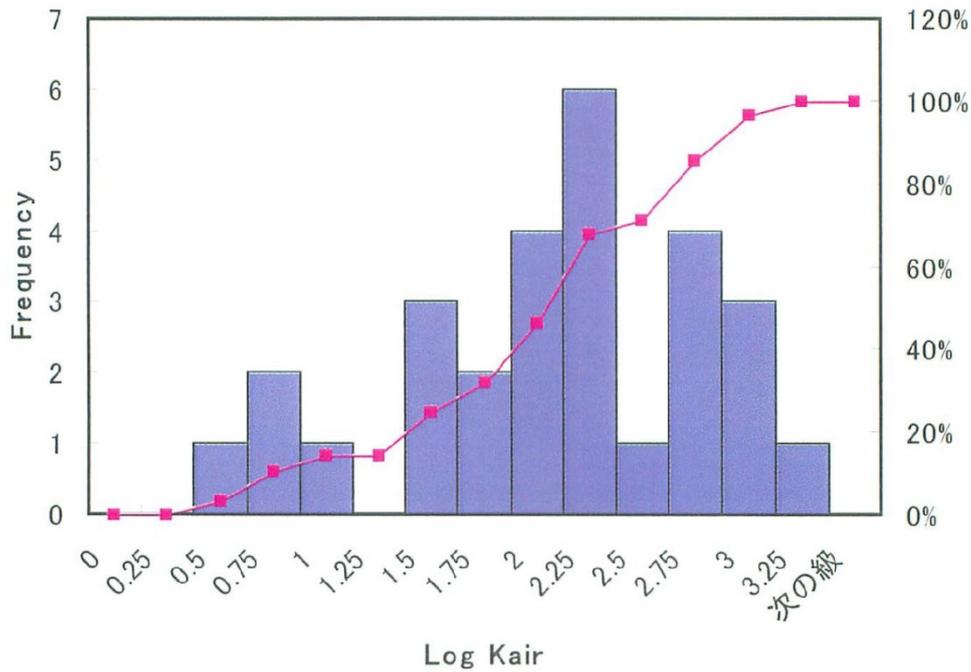


図 S1.2-6 コア分析で得られた空気浸透率の頻度分布 (RITE, 2002)

● 不動水飽和率 (Irreducible Water Saturation、 S_{wir})

図 S1.2-7 に認められるように特殊コア分析を行った 5 個のコアプラグに関して不動水飽和度と $\sqrt{(k_w/\phi)}$ の間で強い相関が得られた。相関近似式に Zone-2 の代表値 $\phi=31.5\%$ 、 $k_w=23\text{mD}$ を適用すれば、この Zone の不動水飽和率は 81.8%となる。

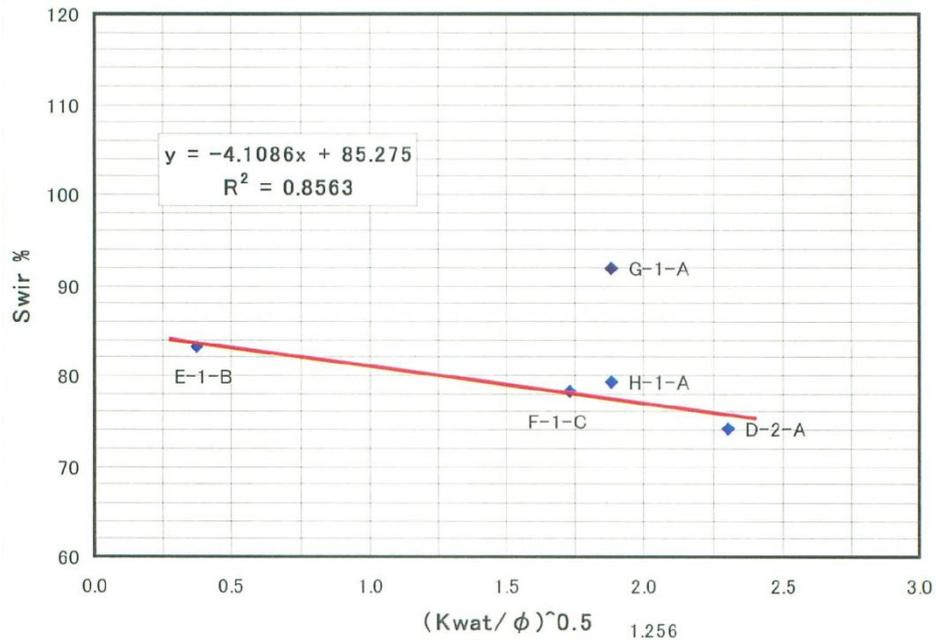


図 S1.2-7 不動水飽和率と $\sqrt{(k_w/\phi)}$ の相関 (RITE, 2002)

- 残留ガス飽和度 (Residual Gas Saturation、 S_{gr})

残留ガス飽和率と初期ガス飽和率に強い相関があり、この相関から Zone-2 の残留ガス飽和率は 13.1%とされた。なお、特殊コア分析が行われた 5 個のコアプラグはいずれも臨界ガス飽和度 (Critical Gas Saturation、 S_{gc}) が極めて小さいことを示し、 $S_{gc}=0\%$ とすることに問題はないと判断された。

不動水飽和率におけるガス有効浸透率、 $k_g@S_{wir}$

コアデータを尊重して、Zone-2 の $k_w=23mD$ に対しては $k_g@S_{wi}$ 面=1.65、 $k_{gr}@S_{wir}=0.0717$ と設定した。

- 相対浸透率曲線 (Relative Permeabilities)

測定された相対浸透率曲線をエンドポイントに関してノーマライズすると図 S1.2-8 に見られる曲線群が得られる。ばらつきが大きく、これらの曲線をそのまま平均化するのは必ずしも適当ではない。そこで G-1-A データを除いた 4 曲線を平均化して、Zone-2 の代表曲線とした。上述の Zone-2 のエンドポイントの値を使用して得られたのが図 S1.2-9 に示すガス-水相対浸透率曲線である。

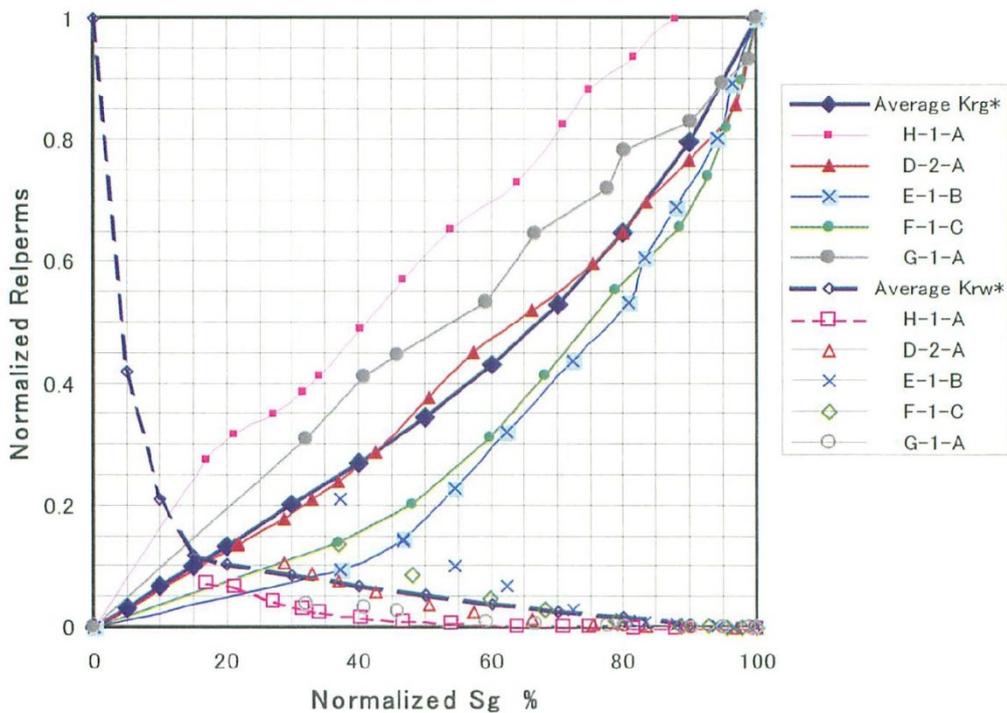


図 S1.2-8 ノーマライズした相対浸透率曲線の平均化 (RITE, 2002)

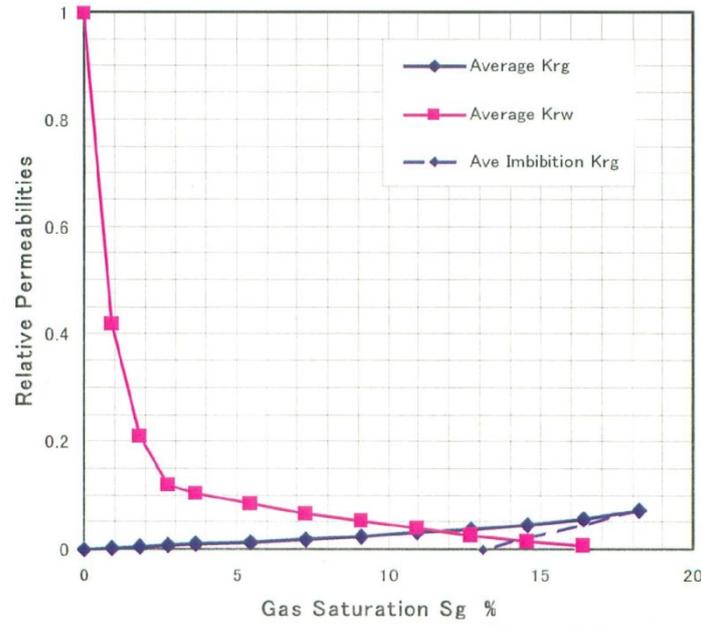


図 S1.2-9 Zone-2 のガス-水相対浸透率曲線 (RITE, 2002)

その他のパラメータ (表 S1.2-6)

表 S1.2-6 貯留層モデルの主要パラメータ (RITE, 2002)

| | | |
|--|---------------------------|---|
| Formation Pressure | 114.3 | kgf/cm ² @ 1,049.2 mSS |
| Formation Temperature | 50 | C |
| Gross Thickness | 10-60 | m |
| Net/Gross Ratio | 1.0 | |
| Porosity (=constant) | 20-25 | % |
| Horizontal Permeability (k _x =k _y =constant) | 1-23 | md |
| Vertical-Horizontal Permeability Ratio | 0.25 | |
| Pore Compressibility | 4*10 ⁻⁶ | psi ⁻¹ |
| Irreducible Water Saturation | 81.8 | % |
| Critical Gas Saturation | 0 | % |
| Residual Gas Saturation | 13.1 | % |
| Gas Relative Permeability @ S _{wir} | 0.0717 | |
| Relative Permeability | Curves from Core Analysis | |
| CO ₂ Gas Phase Density | 0.477 | g/cc @ Reference Reservoir Condition |
| CO ₂ Solubility in Water | 27 | Nm ³ /Nm ³ of water |
| CO ₂ Injection Rate | 40 | tons/day (21,500 Nm ³ /day) |
| Cumulative CO ₂ Injected | 20,000 | tons (10,750,000 Nm ³) |
| Perforation Interval | Zone 2-5 | (56 m) |
| Simulation Grid | 89*142*5 | (No. of Grid Blocks=63,190) |
| Areal Dimensions of a Grid Block | 25m*25m | in the area of CO ₂ distribution |
| | 50m*50m | in the injection well - structure top area |
| | 200m*200m | outside the refined area |
| Vertical Dimension of a Grid Block | 4-22 | m according to the layering of the Ic formation |

－2001年度シミュレーション・スタディとその結果

計算結果のうち2万トン圧入時のZone-2におけるガス相飽和度分布を図 S1.2-10、圧入井を通るWNW-ESE断面でのガス相飽和度分布を図 S1.2-11に示した。また、2万トン圧入時のZone-2における単位貯留層体積当たりの溶解ガス量分布を図 S1.2-12に、WNW-ESE断面における溶解ガス量を図 S1.2-13に示した。

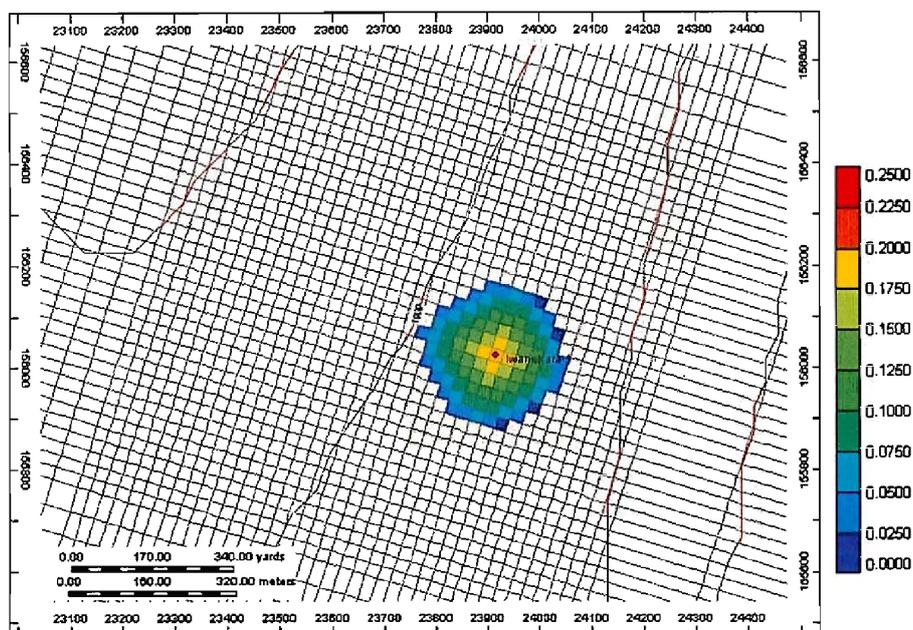


図 S1.2-10 2001年モデルによる2万トン圧入時のZone-2におけるガス相飽和度 (fraction) 分布 (RITE, 2002)

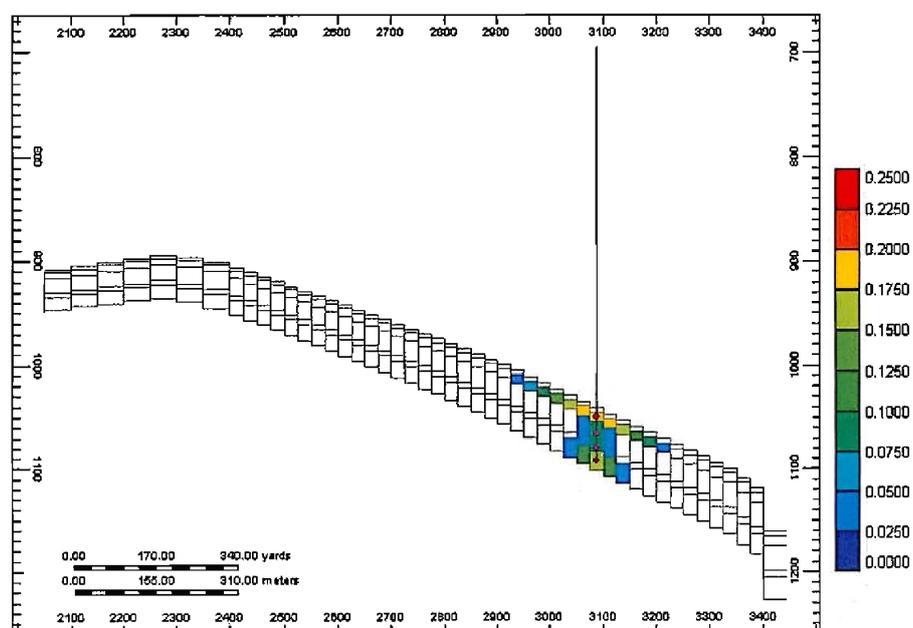


図 S1.2-11 2001年モデルによる2万トン圧入時のWNW-ESE断面におけるガス相飽和度 (fraction) 分布 (RITE, 2002)

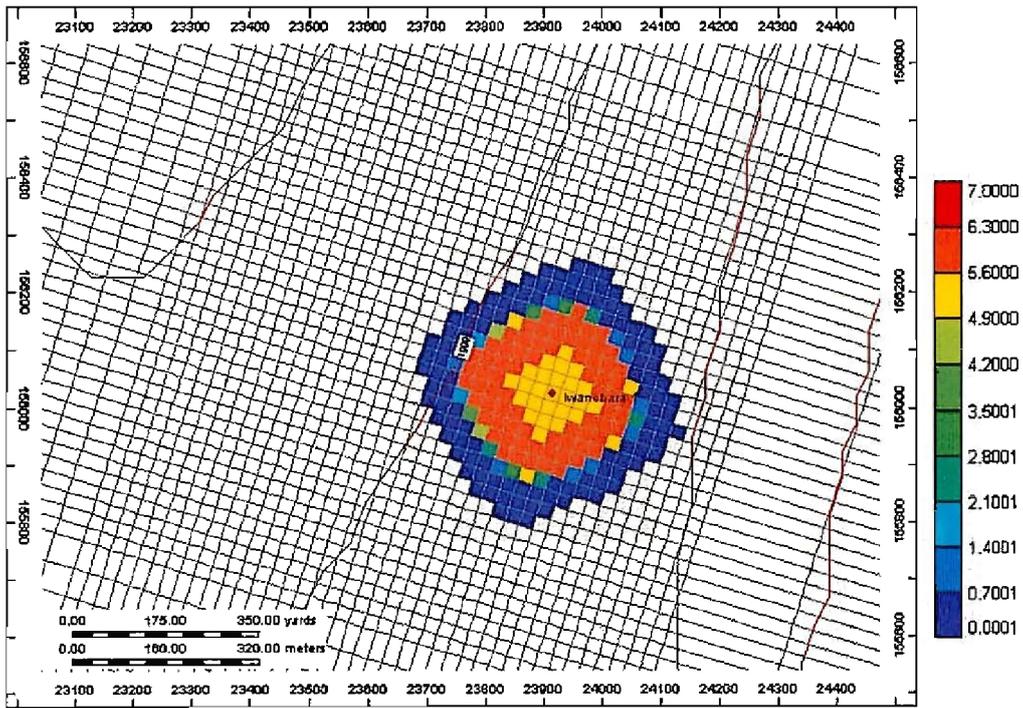


図 S1.2-12 2001年モデルによる2万トン圧入時のZone-2における単位貯留層体積当たりの溶解ガス量 ($\text{sm}^3\text{CO}_2/\text{m}^3$ reservoir) 分布 (RITE, 2002)

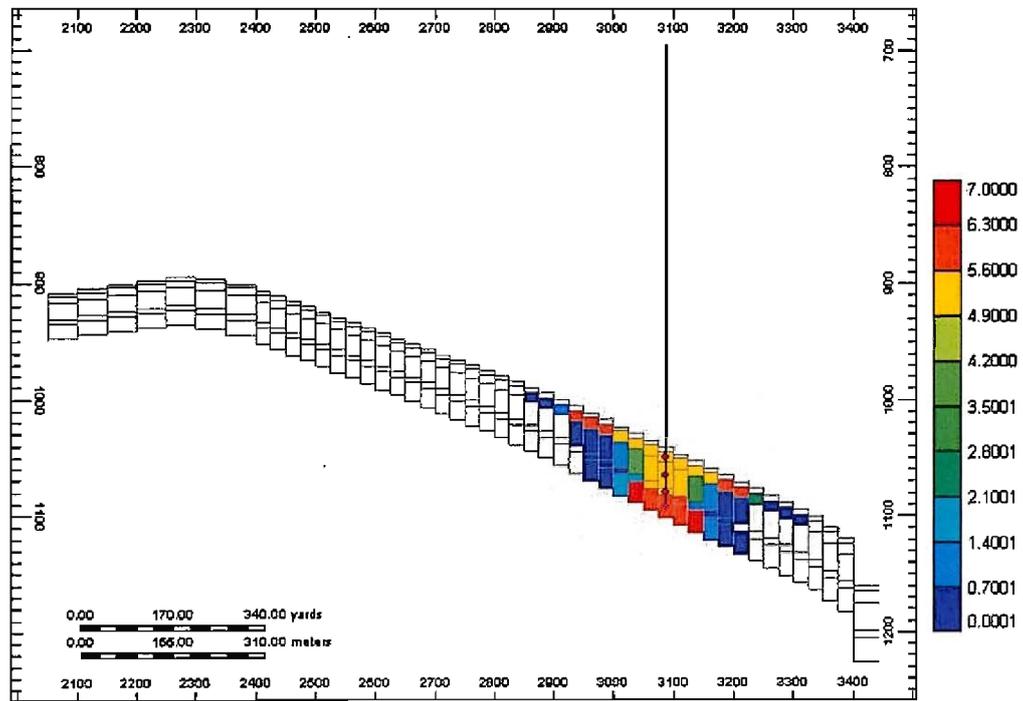


図 S1.2-13 2001年度モデルによる2万トン圧入時のWNW-ESE断面における単位貯留層体積当たりの溶解ガス量 ($\text{sm}^3\text{CO}_2/\text{m}^3$ reservoir) 分布 (RITE, 2002)

図 S1.2-14 は 2 万トン圧入完了時における Zone-2 内の圧力分布（初期圧からの圧力増加分）を示す。圧入井のごく近傍で 23kgf/cm^2 、半径 200m 地点での圧力上昇は 6.5kgf/cm^2 程度と予想される。図 S1.2-15 は 2 万トン圧入完了時の WNW-ESE 断面における初期圧からの変化 (kgf/cm^2) 分布を示す。図 S1.2-16 に見られるように、圧入坑底圧力は圧入井近傍にある程度ガス相飽和度が形成されるまでは若干高くなるが、圧入開始後 100 日後にはほぼ一定となり、初期地層圧力より 44kgf/cm^2 高い程度となる。必要とされる坑口圧入圧力は最大 158kgf/cm^2 であり、圧力が定常状態になった後は 80kgf/cm^2 前後と予想された。

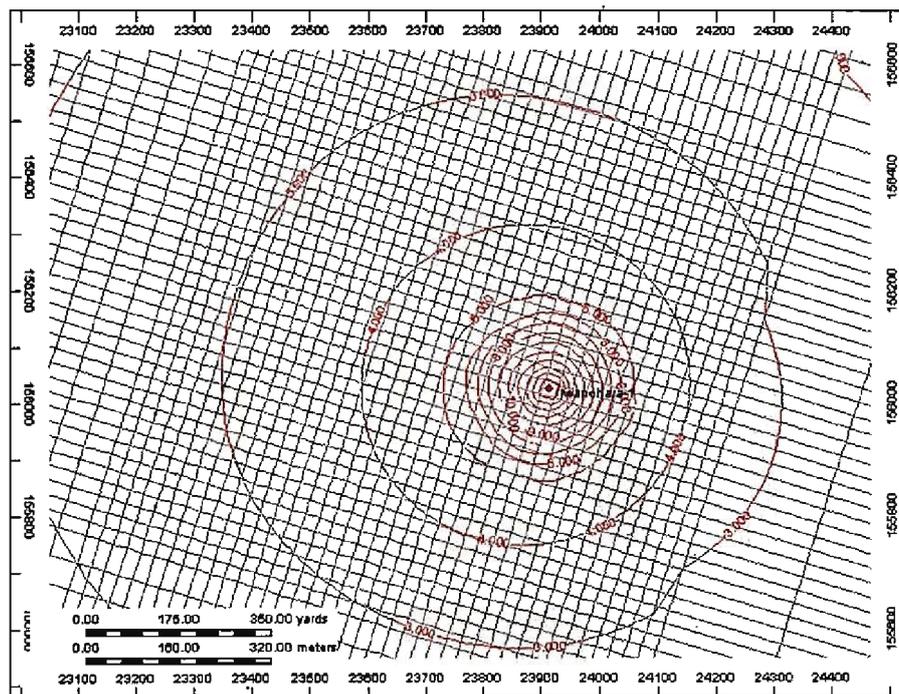


図 S1.2-14 2001年モデルによる20,000トン圧入完了時でのZone-2における初期圧力からの変化 (kg/cm^2) (RITE, 2002)

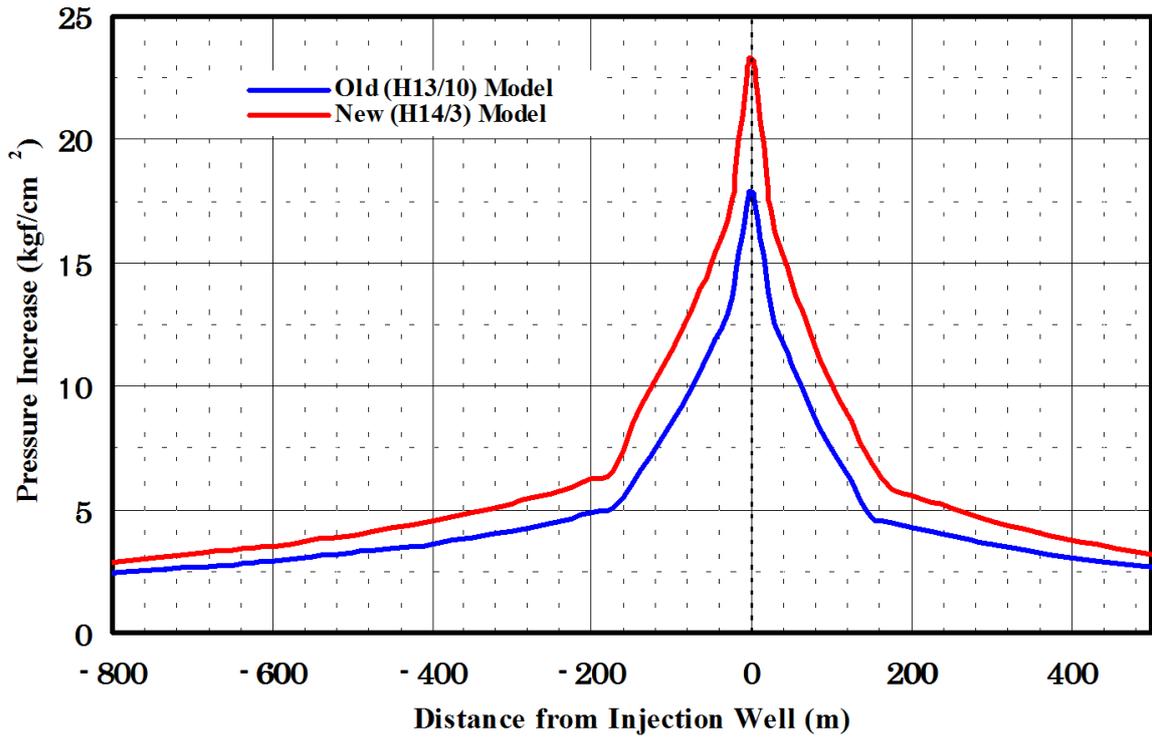


図 S1.2-15 2万トン圧入完了時のWNW-ESE断面における初期圧からの変化 (kgf/cm² 分布、赤が2001年度最終版 (RITE, 2002)

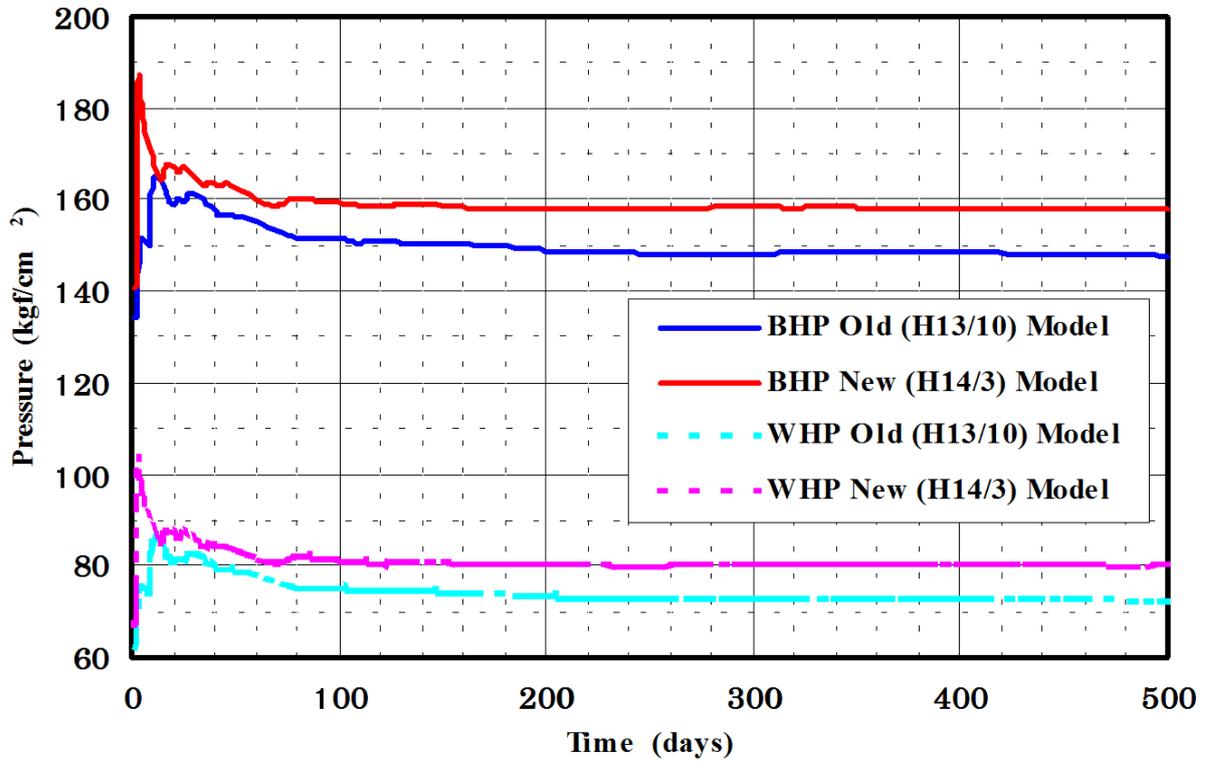


図 S1.2-16 圧入坑底圧と坑口圧の経時変化、赤が2001年度最終版 (RITE, 2002)

参考文献

- 1) RITE (2001) : 平成12年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業二酸化炭素地中貯留技術研究開発 成果報告書
- 2) RITE (2002) : 平成13年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業二酸化炭素地中貯留技術研究開発 成果報告書
- 3) RITE (2003) : 平成14年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業二酸化炭素地中貯留技術研究開発 成果報告書
- 4) RITE (2004) : 平成15年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業二酸化炭素地中貯留技術研究開発 成果報告書

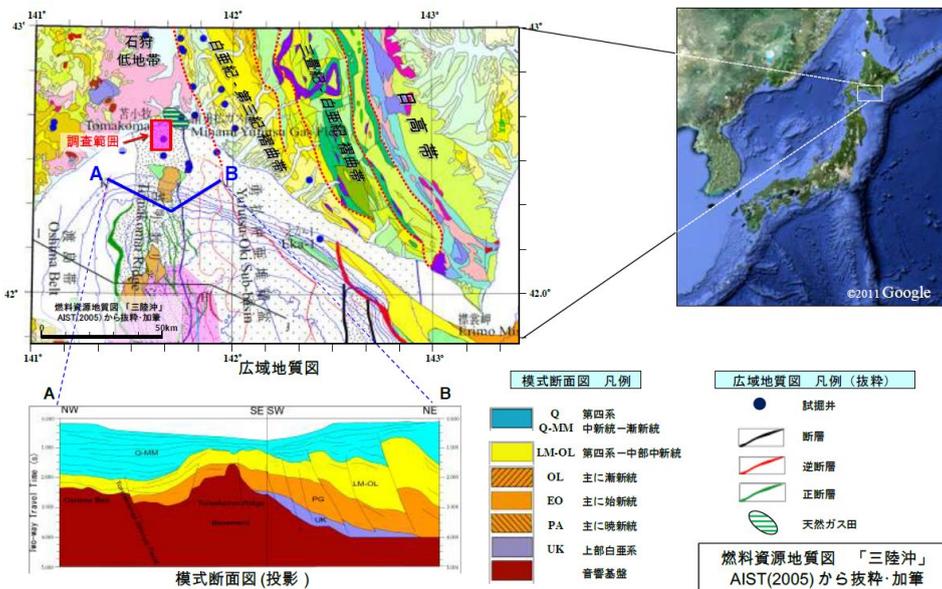
S2 苫小牧大規模実証試験のサイト特性評価

S2.1 目的

経済産業省の「CCS実証事業の安全な実施にあたって」（ガイドライン）に基づいて、苫小牧実証試験サイトの貯留層と遮蔽層の適正性のほかに、大規模実証試験の安全面・環境面の遵守事項も含めてサイト特性評価が行われた。以下では経済産業省による専門家検討会の評価報告書（経済産業省, 2011）を基に、苫小牧大規模実証試験サイトの特性評価概要を紹介する。

S2.2 広域地質調査概要

国による基礎物理探査、民間企業による石油・天然ガス開発活動により、広域地下情報は多く存在する。図S2.2-1は苫小牧周辺の広域地質概要を示している。この調査地域では東方に向けて南北ないし北北西-南南東方向に、10km 程度の間隔で褶曲構造が並列して認められている。また、東側の背斜構造群は逆断層を伴った変形を受けているが、調査区域を含む西側の背斜構造群はいずれも比較的弱い変形と解釈されている。



図S2.2-1 苫小牧周辺の広域地質図と模式断面図（経済産業省, 2011）

S2.3 新規地質調査概要

苫小牧港西港区沿岸海域では、石油・天然ガス開発のための弾性波探査調査、大深度（深度：3,000m）坑井掘削がすでに行われていることから、CO₂貯留対象層として、海底下約1,000m～約3,000mに分布する萌別層および滝ノ上層T1部層が知られていた。大規模実証試験を実施するために、2009年度から2011年度において、以下の地質調査を新たに実施された。

1) 三次元弾性波探査

苫小牧港西港区沖合において、2009年度には東西約3.8km、南北約4.1kmの範囲で、2010年度には東西約5.9km、南北約7.6kmの範囲（図S2.3-1）で三次元弾性波探査のデ

ータが取得された。この追加調査範囲には、民間坑井Aが含まれている。

2) 調査委掘削

2010年度には苫小牧CCS-1が掘削され、物理検層、リークオフテスト（遮蔽層の強度測定）、コア試料・カッティングス試料の採取、貯留層の圧入テスト等が実施された。コア試料およびカッティングス試料を物性分析では、孔隙率、浸透率、スレシールド圧力が測定された。2011年度には苫小牧CCS-2が掘削され、同様な物性分析試験が行われた。

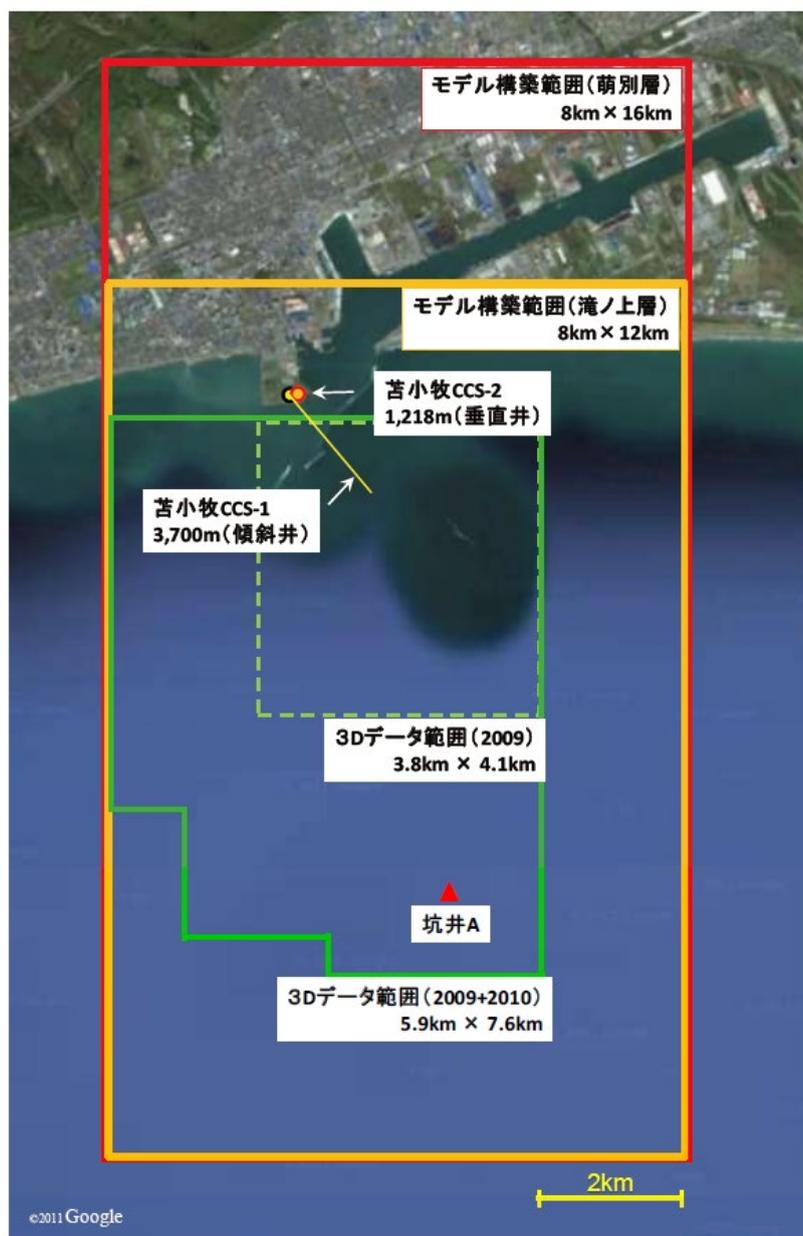


図 S2.3-1 調査範囲位置図（経済産業省，2011）

表S2.3-1は貯留層の評価に用いた、既存地質データおよび新規取得地質データを示している。

表S2.3-1 貯留層評価の使用データ一覧（経済産業省，2011）

| 使用データ | 使用方法 | データソース |
|---------------------|--|---------------------------------------|
| 三次元弾性波探査データ (3D) | 地質構造解釈、堆積学的検討、音響インピーダンス等の物性値推定 | 3Dデータ (リファレンスデータ: 坑井A・苫小牧CCS-1) |
| コア分析データ | 岩石学的評価の他、孔隙率、浸透率、相対浸透率、毛細管圧、スレシヨルド圧等の基礎物性値の提供 浸透率-孔隙率相関 | 周辺坑井 坑井A 苫小牧CCS-1 苫小牧CCS-2 |
| 坑井速度測定データ | 弾性波データの時間-深度変換 | 坑井A 苫小牧CCS-1 |
| 物理検層データ | 岩相区分の判定 インピーダンス推定 岩相分布・孔隙率分布の作成 | 坑井A 苫小牧CCS-1 |
| 温度・圧力データ | 地温勾配 坑底圧力(貯留層圧力&地層破壊圧力)決定 | 坑井A 苫小牧CCS-1 苫小牧CCS-2 |
| 二次元弾性波探査データ (2D) | 地質構造解釈、堆積学的検討、音響インピーダンス等の物性値推定 | 陸海域の既存2Dデータ |

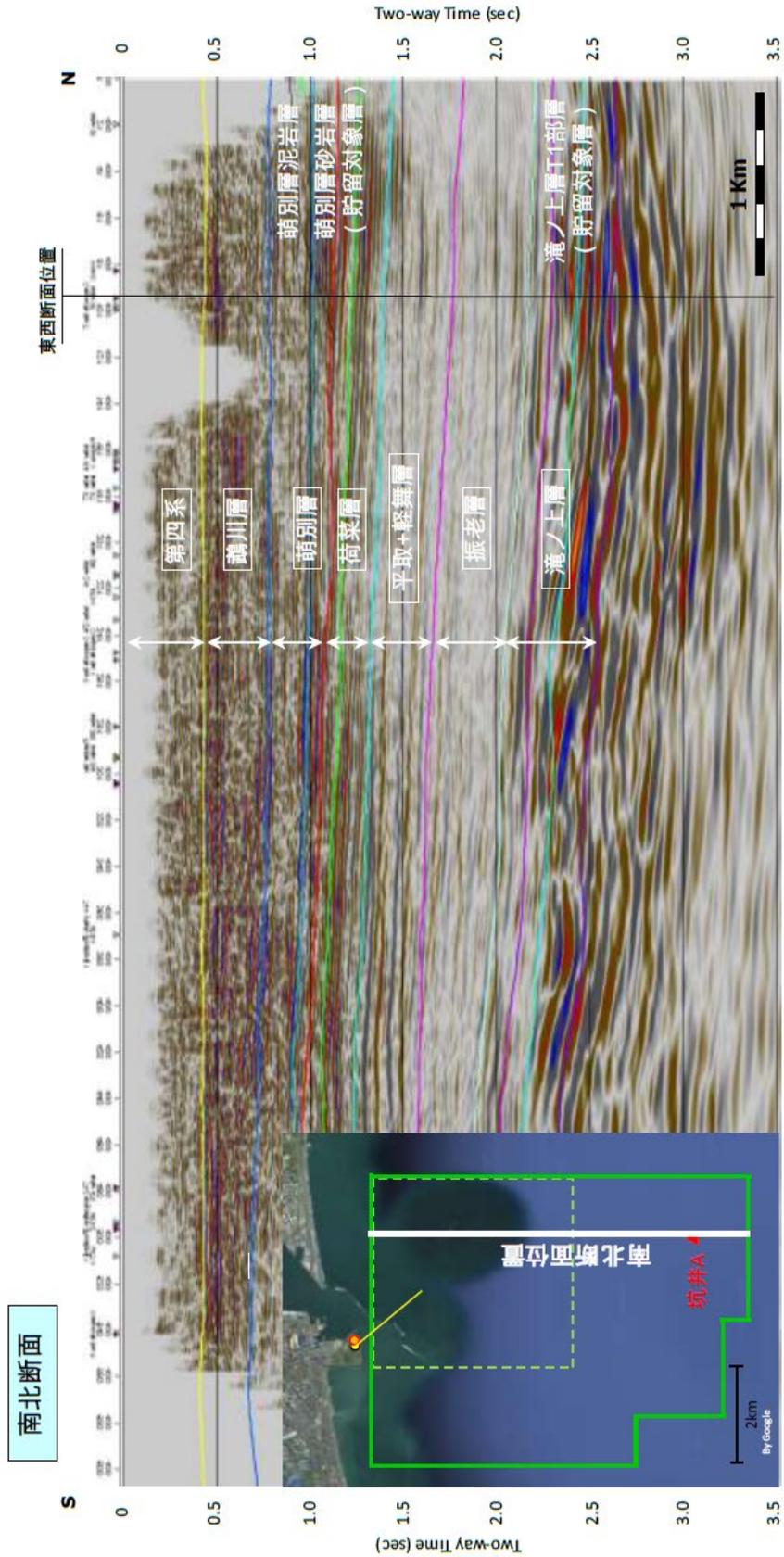
図S2.3-2および図S2.3-3は追加調査データ取得後の解析結果を示している。この解析では層序のコントロールポイントとして坑井Aおよび苫小牧CCS-1を使用した。

1) 滝ノ上層

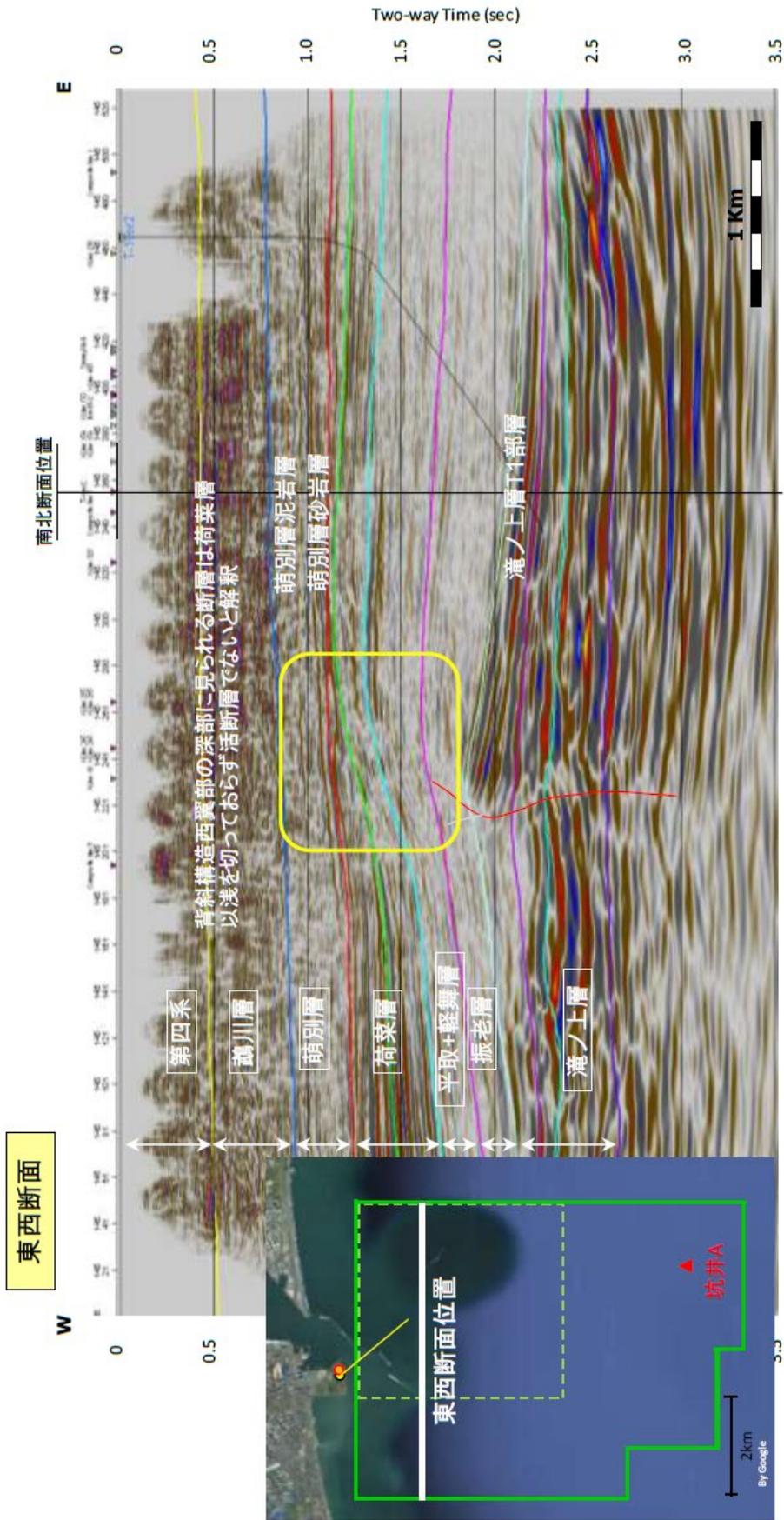
滝ノ上層は火山岩/凝灰岩からなる上部の滝ノ上層T1部層と下部の泥岩層からなり、さらに滝ノ上層T1部層は上部の凝灰岩卓越層と下部の溶岩～凝灰角礫岩卓越層とに分けられる。滝ノ上層上限の背斜構造に沿って北北東-南南西に延び、荷菜層にまで達する断層が存在すると解釈した。断層の落差は一樣ではなく、検討海域の中央付近では若干の落差が認められるが、北部や南部では落差は認められない。滝ノ上層T1部層下部の溶岩～凝灰角礫岩卓越層は全体的に強反射で水平方向の連続性が良く、溶岩～凝灰角礫岩の粗粒堆積物が比較的安定して分布していると推定される。

2) 萌別層

萌別層の上部と下部においては反射波の特徴が異なっている。上部は連続性の悪い弱反射となっていることから、シルト岩～泥岩が発達していると予想され、下部は連続性の良い強反射であることから、坑井Aで確認された礫岩、砂岩のような粗粒堆積物（粗粒相）の発達予想される。この強反射は南西方向へ薄化して不明瞭になることから、粗粒相は検討海域の北東部を中心に発達していると考えられる。海底面から萌別層までの間では反射波はほぼ平行で、一連の堆積層として識別される。粗粒相発達域（萌別層下部）の上面は、北西から西に向かって緩く傾斜している。



图S2.3-2 三次元弹性波探查結果解釈断面図 (南北断面) (經濟産業省, 2011)



図S2.3-3 三次元弾性波探査結果解釈断面図（東西断面）（経済産業省，2011）

2010年度に掘削した傾斜井深度 3,700m（垂直深度 3,046m） 苫小牧CCS-1の地質調査結果地質調査結果を表 S2.3-2 に記す。

表 S2.3-2 地質層序と岩相（経済産業省，2011）

| 地層名 | 掘削深度 mMD (垂直深度 mVD) | | 岩 相 |
|--------------|------------------------|--------------------|---|
| 第四系 | 0 | - 458 | 未固結砂礫等 |
| 鷓川層 | 458 | - 873 | 砂礫岩を主体とし、シルト岩を伴う |
| 萌別層 | 873 | - 1,230 (1,211) | 上部はシルト岩～泥岩主体とし、下部は砂岩からなる。 |
| 荷菜層 | 1,230 (1,211) | - 1,638 (1,524) | シルト岩～砂岩を主体とし泥岩を伴う。稀に凝灰質シルト岩～砂岩・マールの薄層を挟在する。 |
| 平取+軽舞層 | 1,638 (1,524) | - 2,289 (2,006) | シルト岩～砂岩主体とし泥岩を伴う。稀に凝灰質シルト岩～砂岩・マールの薄層を挟在する。 |
| 振老層 | 2,289 (2,006) | - 2,826 (2,404) | シルト岩～砂岩を主体とし泥岩を伴う。稀に凝灰質シルト岩～砂岩・マールの薄層を挟在する。 |
| 滝ノ上層 T1部層 | 2,826 (2,404) | - 3,700 (3,046) | 火山角礫岩・凝灰岩等の火山岩再堆積相を主体とし、一部に枕状溶岩を確認した。 |

S2.4 滝ノ上層解析結果

S2.4.1 貯留層

滝ノ上層は火山性碎屑物を含む火山岩層であり、火山岩・凝灰岩からなる滝ノ上層T1部層とその下部の泥岩層からなる。滝ノ上層T1部層（層厚が約 600m）は、さらに下部の溶岩～凝灰角礫岩卓越層と上部の凝灰岩卓越層とに分けられる。実地調査から得られた貯留層性状の概要を表 S2.4-1 にまとめる。

表 S2. 4-1 滝ノ上層T1部層 貯留層性状一覧（経済産業省，2011）

| 項目 | |
|----------------------|--|
| 対象深度 | 約2,400～3,000m(垂直深度) |
| 層厚 | 約600m |
| 岩相 | 溶岩～凝灰角礫岩、凝灰岩 |
| 孔隙率 | 5～18%(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下) 3～19%(周辺坑井のコア試験:封圧下) |
| 浸透率 | 0.68～1.18mD(苫小牧CCS-1圧入テスト解析結果)* 0.001～0.01mD(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下、空気) 0.002～7mD(周辺坑井のコア試験:封圧下) 0.01mD～2.6D(坑井Aでの物理検層解析結果) |
| 水圧入テスト (苫小牧CCS-1) | 最大650kl/日(掘削深度2,907～3,698mのうち186m)* |

*圧力・温度測定結果から圧入区間は 2,907～2,931m のみと判断した。

S2. 4. 2 遮蔽層

遮蔽対象層となる振老層および平取+軽舞層は、約 1,100m の層厚を有する。苫小牧CCS-1におけるリークオフテスト結果から、振老層下部で等価泥水比重 1.96 の強度を持つことを確認した。

苫小牧沖構造の西翼には断層が存在するものの、振老層および平取+軽舞層は主に泥岩からなることと、周辺坑井データを用いた地層水塩分濃度分布と地層圧力分布から、過去に遮蔽層を超えた垂直方向の地層水の移動はないと考えられる。

振老層で採取したコア試料では、水浸透率が 8.2×10^{-6} ～ 36.7×10^{-6} mD、スレシヨルド圧力が 1.29MPa～15.02MPa 以上の実測データが得られている。後者については、1.29MPa といった比較的低い分析値が得られているものの、CO₂貯留条件と同様の条件で分析をしたところ、11.72MPa 以上の値が得られている。

以上の条件・データから、振老層および平取+軽舞層は、良好な遮蔽性能を有する地層であると考えられる。実地調査から得られた遮蔽層性状の概要を表 S2.4-2 にまとめる。

表 S2. 4-2 滝ノ上層T1部層に対する遮蔽層性状一覧（経済産業省，2011）

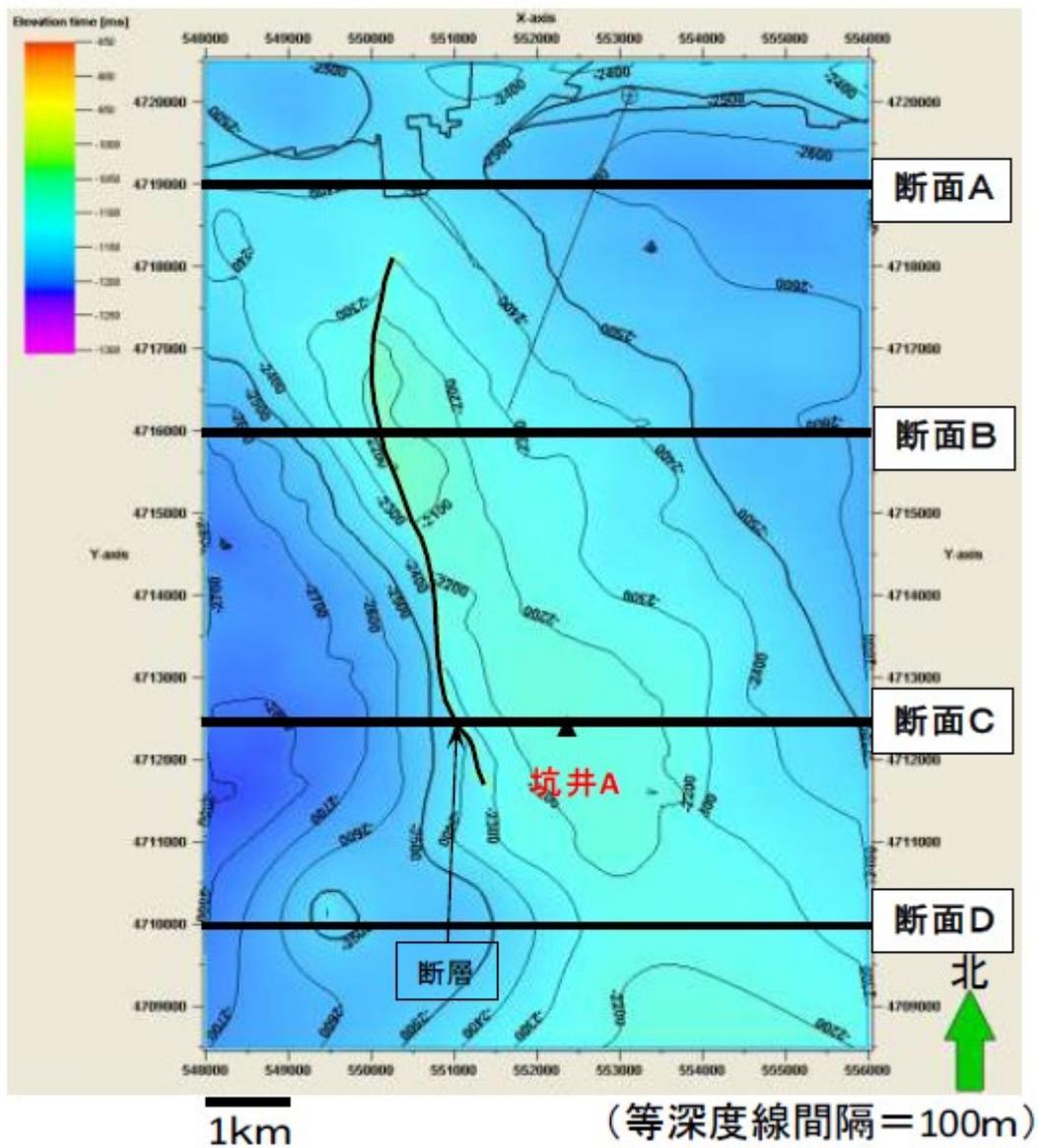
| 項目 | |
|-----------------------------------|--|
| 層序 | 振老層および平取+軽舞層 |
| 岩相 | 泥岩 |
| 層厚 | 約1,100m |
| 孔隙率 | 12.4～18.0%（苫小牧CCS-1コア試験：封圧下） |
| 浸透率 | $8.2 \times 10^{-6} \sim 36.7 \times 10^{-6} \text{mD}$ （苫小牧CCS-1コア試験：水浸透率） |
| スレシヨルド圧力 | 1.29～12.3MPa※以上（苫小牧CCS-1コア試験：N ₂ -水系残差圧力法） 11.72MPa※以上（苫小牧CCS-1コア試験：CO ₂ -水系段階昇圧法） ※ブレイクスルーしなかったことから測定値以上のスレシヨルド圧力を有すると判断。 |
| リークオフ圧力 （苫小牧CCS-1 リークオフテスト） | 45.3MPa（等価泥水比重1.96） （振老層（苫小牧CCS-1）2,352mVD（垂直深度）） |

S2. 4. 3 地質モデル構築

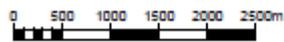
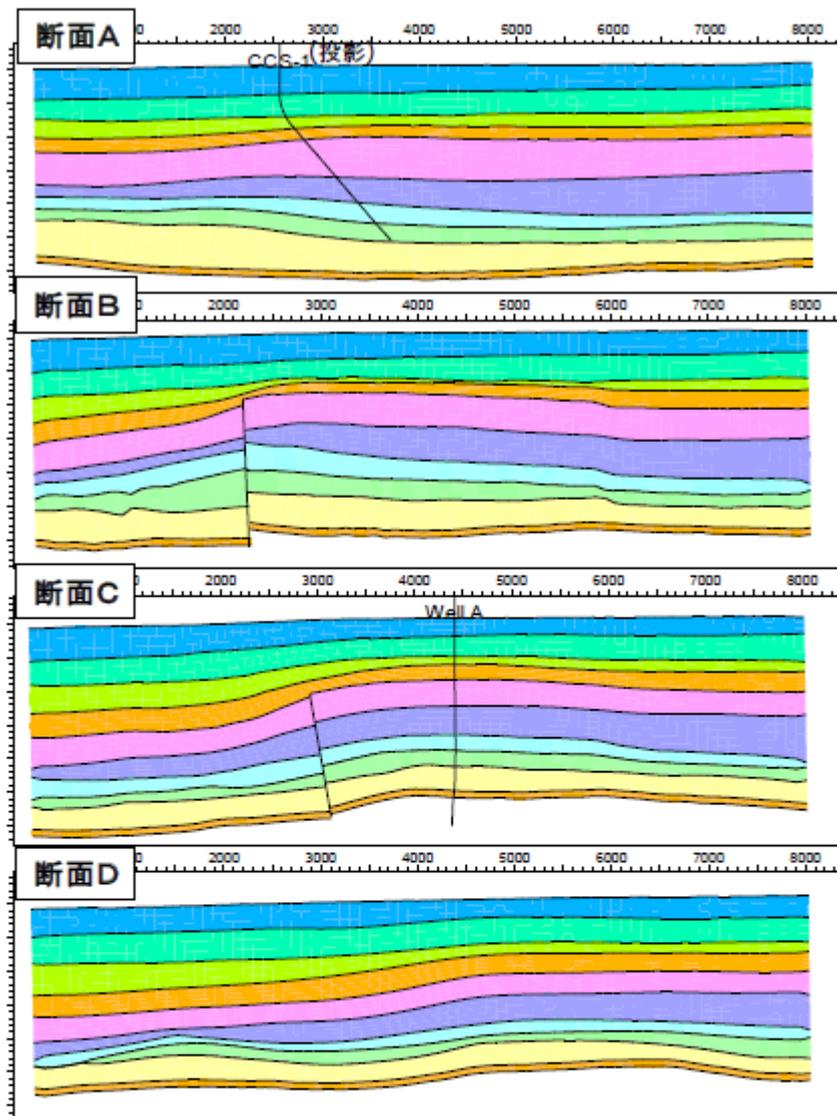
滝ノ上層は、火山岩起源であることから、砂岩などの堆積岩層と比較して不均質性が高く、CO₂挙動予測シミュレーションを実施するためには、空間的な岩相分布およびその性状分布の推定が特に重要となる。このため、3Dデータを活用した岩相分布・性状分布の推定を実施し、CO₂挙動予測シミュレーションの地質構造モデルへ反映させた。

CO₂の挙動予測シミュレーションに必要な貯留層モデルを構築するため、3Dデータで解釈に用いた各層準の時間構造を深度構造へ変換した。

地質構造モデルの構築には、構造地質解釈で作成された層準（上位より、第四系基底・鶴川層基底・萌別層基底・荷葉層上部基底・荷葉層下部基底・平取+軽舞層基底・滝ノ上層上限（振老層基底）・滝ノ上層T1部層上部基底・滝ノ上層T1部層基底・滝ノ上層基底）を用いた。深度変換された滝ノ上層T1部層上限のモデル断面位置を図 S2.4-1 に、主要な層準の東西断面（地質モデル断面）を図S2.4-2 に各々示す。



図S2. 4-1 モデル断面位置（構造図は滝ノ上層T1部層上限）（経済産業省，2011）
 （図中のX軸およびY軸は世界測地系WGS84のUTM54系の座標）



- 第四系
- 鷓川層
- 萌別泥岩層【遮蔽層】
- 萌別砂岩層【貯留対象層】
- 荷葉層【遮蔽層】
- 平取+軽舞層【遮蔽層】
- 振老層【遮蔽層】
- 滝ノ上層T1部層(上部)【貯留対象層】
- 滝ノ上層T1部層(下部)【貯留対象層】

図S2.4-2 地質モデル断面（経済産業省，2011）

（苫小牧CCS-1は投影表示）

・属性モデル構築

作成した構造モデルの滝ノ上層T1部層とそれ以外の層準に属性（岩相、孔隙率および浸透率）をそれぞれ与え、CO₂挙動予測シミュレーションのための地質モデルを作成した。

まず、CO₂圧入対象層である滝ノ上層T1部層における属性値分布は、3Dデータ、苫小牧CCS-1および坑井Aのデータより、地球統計学的手法を用いて、岩相、孔隙率および浸透率の分布が確率的に50個の具現モデルを作成した。

他の層準における属性値は、苫小牧CCS-1の振老層から採取されたコアの分析値を一様に分布させた。50個の地質モデルを用いて、CO₂挙動予測シミュレーションを行い、貯留層および遮蔽層の性能評価を実施した。シミュレーションでは、CO₂を25万トン/年×3年間圧入し、圧入期間中の圧入性やその後の貯留CO₂の挙動予測等を行った。

S2.5 萌別層解析結果

萌別層はシルト岩～泥岩からなる上部（萌別層泥岩層）と主に砂岩からなる下部（萌別層砂岩層）に分けられる。萌別層砂岩層を貯留層とし、萌別層泥岩層を遮蔽層と想定した。

S2.5.1 貯留層

萌別層砂岩層は、沖合に前進しながら陸棚に堆積したファンデルタからなり、砂岩を主体とし、砂礫岩、シルト岩を伴う。緩やかな西傾斜を示し、層厚は約 100m である。三次元弾性波探査では、萌別層下部に連続の良い強反射が認められることから砂礫岩層の発達を示唆される。この強反射は検討地域の北東部で顕著であり、南および西に向かって減衰するため、砂礫岩層は北東部を中心に発達していると解釈される。実地調査から得られた貯留層性状の概要を表 S2.5-1 にまとめる。

表S2.5-1 萌別層砂岩層 貯留層性状一覧（経済産業省，2011）

| 項目 | |
|----------------------|--|
| 対象深度 | 約1,100～1,200m(垂直深度) |
| 層厚 | 約100m |
| 岩相 | 砂岩(礫質砂岩、シルト岩を伴うファンデルタ堆積物) |
| 孔隙率 | 25～40%(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下) 20～40%(物理検層解析結果) |
| 浸透率 | 9～25mD(苫小牧CCS-1圧入テスト解析結果) 1～1,000mD(苫小牧CCS-2コア試験:封圧下、空気) 1～120mD(物理検層解析結果) |
| 水圧入テスト (苫小牧CCS-1) | 最大1,200kl/日(掘削深度1,077～1,217mのうち57.5m) |

S2.5.2 遮蔽層

萌別層泥岩層は、層厚約 200m のシルト岩～泥岩からなる。微化石分析による堆積環境解析により、水深数 10～数100m の比較的浅い海底で安定的に堆積したと推定される。周辺坑井間で対比できることから、貯留対象領域を覆う領域で十分な厚さがあり、コア試験や調査井における萌別層泥岩層下部でのリークオフテスト結果から、萌別層泥岩層は良好な遮蔽性能を有すると考えられる。実地調査から得られた遮蔽層性状の概要を表 S2.5-2 にまとめる。

表 S2.5-2 萌別層泥岩層 遮蔽性状一覧（経済産業省，2011）

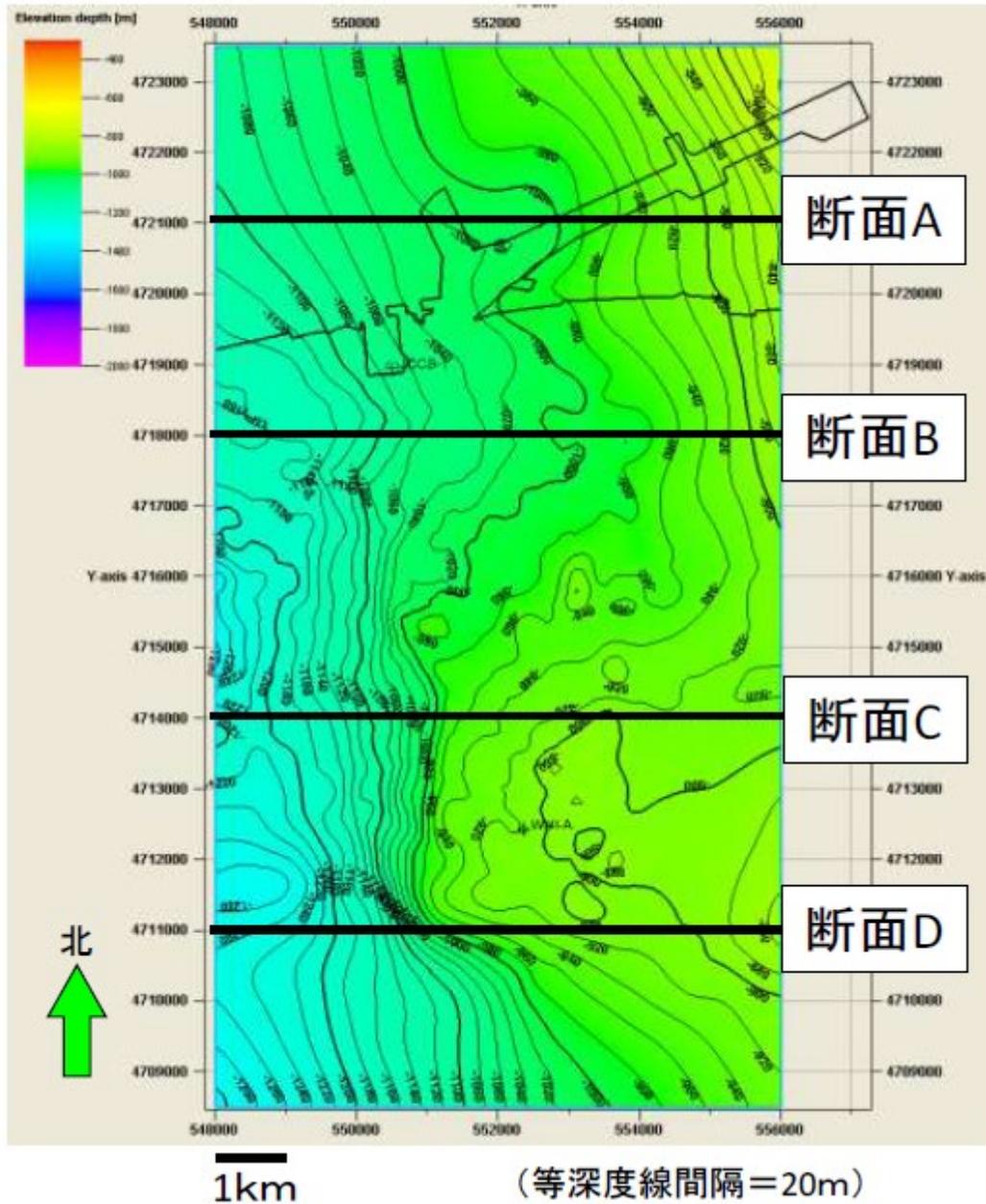
| 項目 | |
|-----------------------------------|--|
| 層序 | 萌別層泥岩層(萌別層上部) |
| 岩相 | シルト岩～泥岩 |
| 層厚 | 約200m |
| 孔隙率 | 32.4～37.2%(苫小牧CCS-2コア試験:封圧下) |
| 浸透率 | $0.80 \times 10^{-3} \sim 1.73 \times 10^{-3} \text{mD}$ (苫小牧CCS-2コア試験:水浸透率) |
| スレシヨルド圧力 | 0.75, 1.65, 1.67MPa(苫小牧CCS-2コア試験:CO ₂ -水系段階昇圧法) |
| リークオフ圧力 (苫小牧CCS-2 リークオフテスト) | 14.6MPa(等価泥水比重:1.50) (萌別層泥岩層(苫小牧CCS-2)991mVD(垂直深度)) |

S2.5.3 地質モデル構築

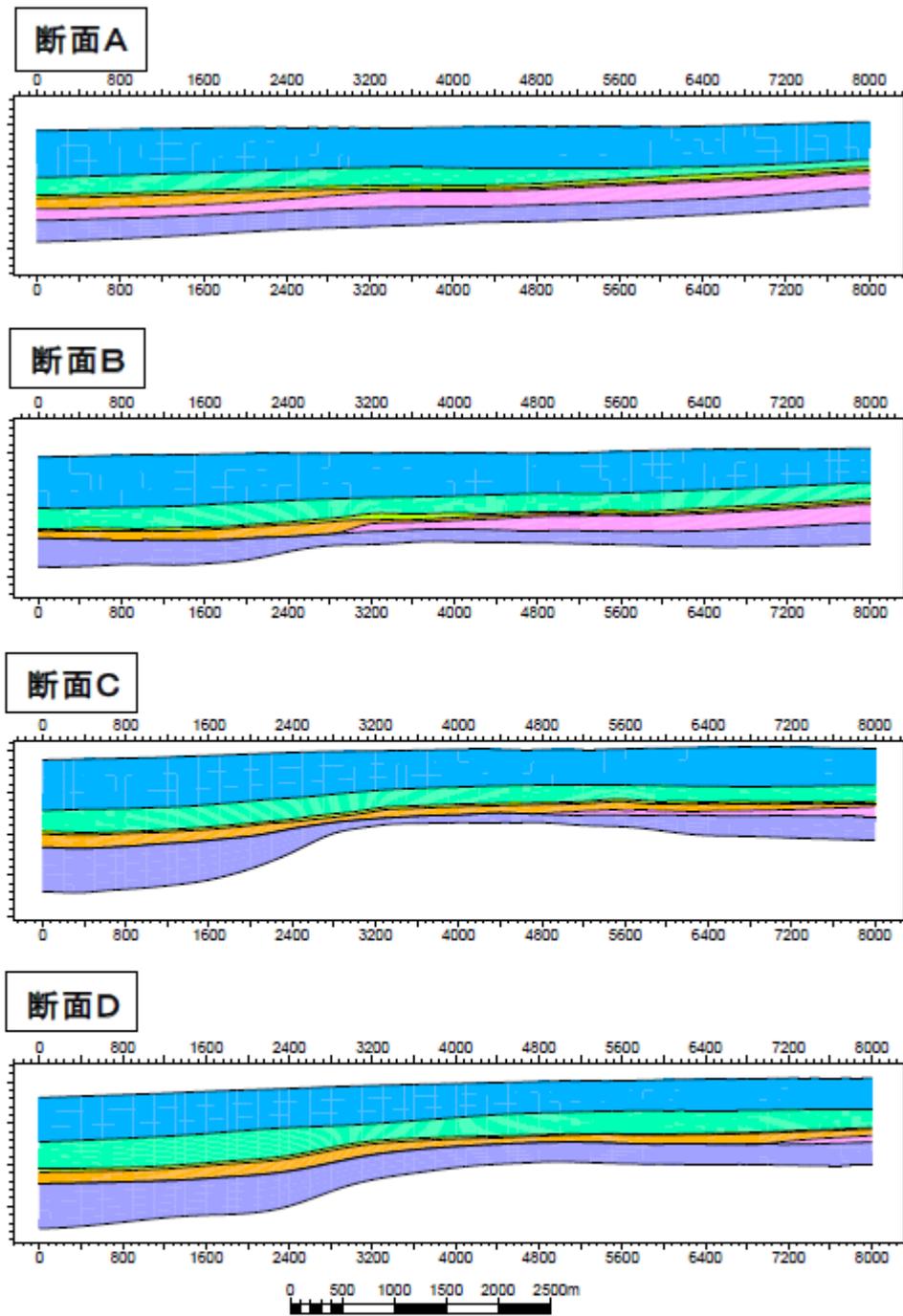
(1) 構造モデル構築

シミュレーションを実施する際に必要な地質モデルを構築するため、苫小牧3Dデータで解釈された各層準の時間構造を深度構造へ変換した。

構造モデル構築には、地質構造解釈で作成されたホライゾン（上位より、鵠川層上限、萌別層上限、萌別層海進期堆積体（TST）上限、萌別層高海水準期堆積体（HST）上限、萌別層HSTデルタ上部基底、萌別層HST基底、荷菜層上部基底）を用いた。深度変換された萌別層砂岩層上限（萌別層HST上限）のモデル断面位置図を図S2.5-1、主要な層準の東西モデル断面を図S2.5-2に各々示す。



図S2.5-1 モデル断面位置図（構造図は萌別層砂岩層（HST）上限）（経済産業省，2011）
 （図中のX軸およびY軸は世界測地系WGS84のUTM54系の座標）



図S2.5-2 モデル断面位置図（上から順に断面A～D、スケールはm）（経済産業省，2011）

主たる遮蔽層である萌別層上部は、CO₂貯留対象領域では十分な厚さがあり良好な遮蔽性能が期待できる。ただし、北東部の陸域では遮蔽層が徐々に薄化していく傾向が確認されていることから、北東部陸域においては薄い遮蔽層を設定した。

貯留層モデルを用いて、CO₂挙動予測シミュレーションを行い、貯留層および遮蔽層の性能評価を実施した。シミュレーションでは、CO₂を25万トン/年×3年を目途に圧入し、圧入期間中およびその後の長期間にわたって貯留CO₂の挙動予測等を行っている。

S2.6 貯留層の総合評価

貯留層総合評価においては、貯留層モデルを用いてCO₂挙動予測シミュレーションを実施し、その結果を基に計画通りのCO₂圧入が可能か、貯留層からのCO₂の漏出は生じていないか、長期間にわたって計画通りの範囲にとどまっているかを評価した。以下、滝ノ上層および萌別層の評価結果について示す。

S2.6.1 滝ノ上層評価結果

(1) 貯留層評価

滝ノ上層は火山性砕屑物を含む火山岩層であり、上部の火山岩・凝灰岩からなる滝ノ上層T1部層と下部の泥岩層からなる。滝ノ上層T1部層（層厚が約600m）は、さらに上部の凝灰岩卓越層と下部の火山岩卓越層に分けられる。

溶岩～凝灰角礫岩相では良好な圧入性状が期待できることから全体が圧入対象となり、凝灰岩相は部分的に高い孔隙率を有する領域が存在し、一部が圧入対象となり得ると考えられる。

(2) 遮蔽層評価

遮蔽対象層となる振老層および平取+軽舞層は、約1,100mの層厚を有する。苫小牧CCS-1におけるリークオフテスト結果から、振老層下部でリークオフ圧力が等価泥水比重1.96の強度を持つことを確認した。

苫小牧沖構造の西翼には断層が存在するものの、振老層および平取+軽舞層は主に泥岩からなることと、周辺坑井データを用いた地層水塩分濃度分布と地層圧力分布から、遮蔽層を超えた垂直方向の地層水の移動はないものと考えられる。

振老層で採取したコア試料では、水浸透率が $8.2 \times 10^{-6} \sim 36.7 \times 10^{-6}$ mD、スレシヨルド圧力が1.29MPa～12.3MPa以上の実測データが得られている。後者については、1.29MPaといった比較的低い分析値が得られているものの、CO₂-水系の条件で分析した場合には、11.72MPa以上の値が得られている。

以上の条件・データから、振老層および平取+軽舞層は、良好な遮蔽性能を有する地層であると考えられる。

S2.6.2 萌別層評価結果

(1) 貯留層評価

萌別層砂岩層は、沖合に前進しながら陸棚に堆積したファンデルタからなり、砂岩を主体とし、砂礫岩、シルト岩を伴う。緩やかな西傾斜を示し、層厚は約 100m である。

萌別層砂岩層は、比較的浅い海底で堆積した砂岩であると考えられる。シーケンス層序学という高海水準期堆積体（HST）に相当し、ファンデルタ・陸棚（Shelf）・斜面（Slope）の 3 つに分類できる。少なくとも 5 つファンデルタが北東から南西へ向かって前進して堆積したと解釈した。ファンデルタは北東部を中心に発達し、砂礫岩層は堆積物供給源である北東側がより粗粒で、南西に向かって細粒になる傾向にあると推定した。

以上のことから、ファンデルタと解釈した北東部に存在する砂礫岩層が圧入対象となり得ると考えられる。

(2) 遮蔽層評価

萌別層泥岩層は、層厚約 200m のシルト岩～泥岩からなる。微化石分析による堆積環境解析により、水深数 10～数 100m の比較的深い海底で安定的に堆積したと推定される。周辺坑井間で対比できることから、貯留対象領域を覆う領域で十分な厚さが分布する。コア試験結果からは水浸透率が $0.80 \times 10^{-3} \sim 1.73 \times 10^{-3} \text{mD}$ 、スレシヨルド圧力が 0.75MPa、1.65MPa、1.67MPa の結果が得られている。

また、調査井における萌別層泥岩層下部でのリークオフテスト結果から、等価泥水比重で 1.50 の強度を確認している。

以上の結果から、萌別層泥岩層は良好な遮蔽性能を有すると考えられる。

S2.7 シミュレーション概要

S2.7.1 概要

構築した貯留層モデルを用いて、CO₂挙動予測シミュレーションを実施した。シミュレータは、Computer Modelling Group Ltd.社のGEM（ver2010.12）を使用した。シミュレーションで考慮した貯留メカニズムは、泥岩の毛管圧力と低浸透性による物理的トラッピング、残留ガス飽和率とガス相対浸透率のヒステリシスによる残留CO₂トラッピング、CO₂の地層水への溶解による溶解トラッピングである。

S2.7.2 パラメータ

シミュレーションパラメータは、苫小牧CCS-1のデータ（圧入テスト、コア分析値、物理検層測定値など）および文献値により、表 S2.7-1 に示す値を用いた。

表 S2. 7-1 シミュレーションパラメーター一覧（経済産業省，2011）

| モデル | 滝ノ上層 T 1 部層 2011 モデル | | |
|----------------------------|--|----------|------------------------------------|
| サイズ | 8km×12km×4,000m (ideal volume 24km×24km×4,000m) | | |
| グリッド | 80×120×106 Grid | | |
| アクティブ・ブロック数 | 384,050 | | |
| 基準温度 | 91.0°C (2,419.4m) | | |
| 基準圧力 | 34,370kPa (2,419.4m) | | |
| CO ₂ 圧入レート、圧入期間 | 250,000 トン/年×3年 | | |
| 圧入圧力上限 | 41,853kPa | | |
| | | | |
| 岩石性状 | 溶岩（貯留層） | 凝灰岩（貯留層） | 泥岩（遮蔽層） |
| 平均孔隙率 | 0.125 Bennion (2005) ¹⁾ | 0.127 | 0.150 |
| 平均浸透率 (mD) | 2.7 | 0.0072 | 0.000035 |
| 圧縮率 (kPa ⁻¹) | 8.073 × 10 ⁻⁷ 測定値 | | |
| 塩分濃度 (ppm NaCl) | 35,100 ([Cl ⁻]=21,300ppm) | | |
| | | | |
| 相対浸透率 | 溶岩（貯留層） | 凝灰岩（貯留層） | 泥岩（遮蔽層） |
| 気相 相対浸透率 Krg | Bennion (2005) ¹⁾ | | Corey (1954) ²⁾ |
| 液相 相対浸透率 Krw | | | van Genuchten (1980) ³⁾ |
| 臨界ガス飽和率 Sgc | 0.04 Bennion (2005) ¹⁾ | | 0.05 |
| 不動水飽和率 Swir | 0.558 Bennion (2005) ¹⁾ | | 0.8 |
| 最大残留ガス飽和率 Sgrmax | 0.241 from default value of GEM | | — |
| | | | |
| 毛管圧力曲線 | 溶岩（貯留層） | 凝灰岩（貯留層） | 泥岩（遮蔽層） |
| | Bennion (2006) ⁴⁾ , van Genuchten (1980) ³⁾ | | 測定値 |
| Pc (kPa) | 28.8 | 428.1 | 469 |

S2.8 総合評価

S2.8.1 滝ノ上層評価のまとめ

滝ノ上層について行った貯留層および遮蔽層の評価ならびにCO₂挙動予測シミュレーションの結果を表S2.8-1にまとめる。

表 S2.8-1 滝ノ上層T1部層貯留層総合評価のまとめ（経済産業省，2011）

| 項目 | | |
|------------------------------------|---------|---|
| 構造 | | <ul style="list-style-type: none"> ●北北西-南南東に延びる背斜構造(苫小牧沖構造)の北東翼部。 ●圧入想定ポイントから2km程度西側に滝ノ上層下位から荷葉層に達する断層の存在が推定される。 |
| 貯留層 | 対象深度・層厚 | ●垂直深度:約2,400~3,000m ●層厚:約600m |
| | 岩相 | ●溶岩~凝灰角礫岩、凝灰岩 |
| | 物性 | 圧入対象岩相は滝ノ上層T1部層下部の溶岩~凝灰角礫岩相で孔隙率・浸透率が高いことが期待される岩相。 ●孔隙率:5~18%(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下), 孔隙率:3~19%(周辺坑井のコア試験:封圧下) ●浸透率:0.68~1.18mD(苫小牧CCS-1圧入テスト解析結果) ●浸透率:0.001~0.01mD(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下、空気) ●浸透率:0.002~7mD(周辺坑井のコア試験:封圧下) ●浸透率:0.01mD~2.6D(坑井Aでの物理検層解析結果) |
| | 圧入・貯留性能 | <ul style="list-style-type: none"> ●【貯留層評価】3Dデータなどの解析で良好と想定している岩相を調査井(苫小牧CCS-1)では未確認。 ●【シミュレーション】貯留性能が良好な岩相に圧入することで、25万トン/年×3年圧入可能。 |
| 遮蔽層 | 岩相 | ●泥岩(振老層~平取+軽舞層) |
| | 層厚 | ●層厚:約1,100m |
| | 物性 | <ul style="list-style-type: none"> ●孔隙率:12.4~18.0%(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下) ●浸透率:$8.2 \times 10^{-6} \sim 36.7 \times 10^{-6}$mD(苫小牧CCS-1コア試験:水浸透率) ●スレシールド圧力:1.29~12.3[*]MPa以上(苫小牧CCS-1コア試験:N₂-水系残差圧力法) ●スレシールド圧力:11.72MPa[*]以上(苫小牧CCS-1コア試験:CO₂-水系段階昇圧法) ※ブレイクスルーしなかった。 ●リークオフ圧力:45.3MPa(等価泥水比重:1.96)(振老層(苫小牧CCS-1)2,352m) |
| | 遮蔽性能 | ●【シミュレーション】遮蔽層へのCO ₂ の到達は確認されなかった。 |
| 坑井掘削難易度 | | ●大深度の高傾斜井となる。 |
| 圧入後CO ₂ の挙動(シミュレーション結果) | | <ul style="list-style-type: none"> ●(3年圧入後)気相CO₂の拡がりは400m×600m程度。溶解CO₂は550m×700m程度(P50モデル)。 ●圧入終了後は地層水への溶解等による下方への移動が認められる。 ●200年程度で、気相CO₂の拡がりに変化は見られなくなる。 |

S2.8.2 萌別層評価のまとめ

萌別層砂岩層について行った貯留層評価、遮蔽層評価、CO₂挙動予測シミュレーションの結果を表S2.8-2にまとめる。

表 S2.8-2 萌別層砂岩層総合評価のまとめ（経済産業省，2011）

| 項目 | | |
|------------------------------------|---------|---|
| 構造 | | ●緩やかな北西傾斜(1~3°)の単斜構造 |
| 貯留層 | 対象深度・層厚 | ●垂直深度:約1,100~1,200m ●層厚:約100m |
| | 岩相 | ●砂岩主体(礫質砂岩、シルト岩を伴うファンデルタ堆積物) |
| | 物性 | ●孔隙率:25~40%(苫小牧CCS-2コア試験:封圧下), 孔隙率:20~40%(物理検層解析結果) ●浸透率:9~25mD(苫小牧CCS-1圧入テスト解析結果) ●浸透率:1~1,000mD(苫小牧CCS-2コア試験:封圧下、空気) ●浸透率:1~120mD(物理検層解析結果) |
| | 圧入・貯留性能 | ●【苫小牧CCS-1圧入テスト】最大1,200kl/日(掘削深度1,077~1,217mのうち57.5m) ●【シミュレーション】25万トン/年×3年間圧入可能(低浸透率ケースを除く) |
| 遮蔽層 | 岩相 | ●シルト岩~泥岩(萌別層上部) |
| | 層厚 | ●層厚:約200m |
| | 物性 | ●孔隙率:32.4~37.2%(苫小牧CCS-2コア試験:封圧下) ●浸透率: $0.80 \times 10^{-3} \sim 1.73 \times 10^{-3}$ mD(苫小牧CCS-2コア試験:水浸透率) ●リークオフ圧力:14.6MPa(等価泥水比重:1.50)(萌別層泥岩層(苫小牧CCS-2)991m) ●スレシールド圧力:0.75, 1.65, 1.67MPa(苫小牧CCS-2コア試験:CO ₂ -水系) |
| | 遮蔽性能 | ●【シミュレーション】圧入終了時における貯留層上限での圧力(12.1MPa)が、圧入終了時における遮蔽層下限の圧力(10.9MPa)にスレシールド圧力(1.65MPa)を加えた圧力(12.55MPa)を超えていないことを確認した。 |
| 坑井掘削難易度 | | ●軟弱な第四系・鶴川層内での坑跡コントロールや水平に近い掘削のため、掘削障害のリスクあり。 |
| 圧入後CO ₂ の移動(シミュレーション結果) | | ●(3年圧入後)気相CO ₂ の拡がりは圧入井近傍で400m×600m程度、溶解CO ₂ は400m×600m程度(ベースケース)。 ●20年程度で、気相CO ₂ の拡がりに変化は見られなくなる。 ●1,000年後までは、周辺部での地層水へのCO ₂ の溶解が進み、CO ₂ 飽和率減少が確認される。 |

S2.9 活断層分布および地震活動

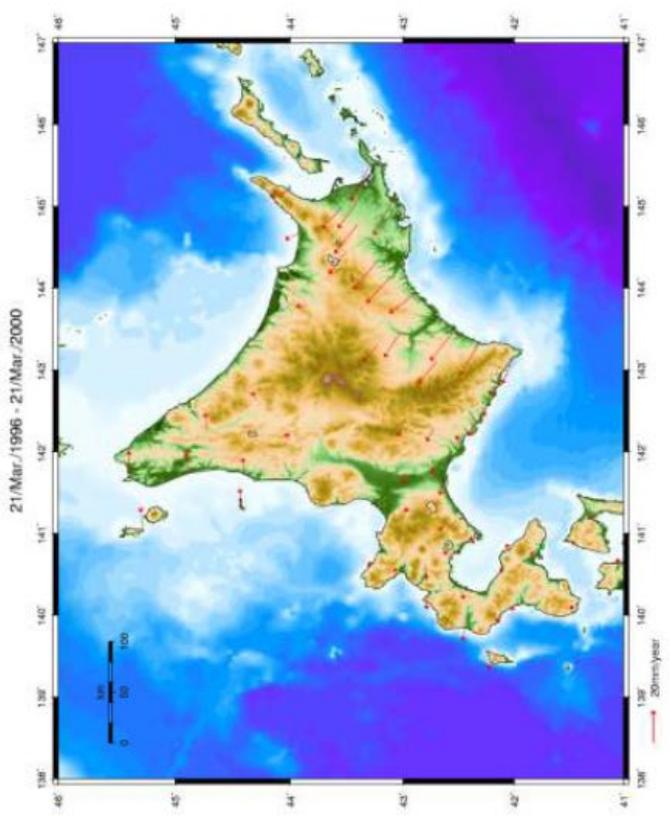
S2.9.1 北海道周辺の地殻応力分布

「CCS実証事業の安全な実施にあたって」では、CO₂貯留に際し地質面から検討すべき事項として、CO₂圧入地点付近における過去の地震活動が挙げられている。過去の地震活動の検討の一環としては、圧入地点周辺の地殻応力状態や歪みの蓄積状況を事前に把握する必要があることから、国土地理院によるGPS観測点網(GEONET)による年間平均変位速度ベクトルと、地殻応力データベースであるWorld Stress Map2(WSM)を利用して応力分布について調査した。

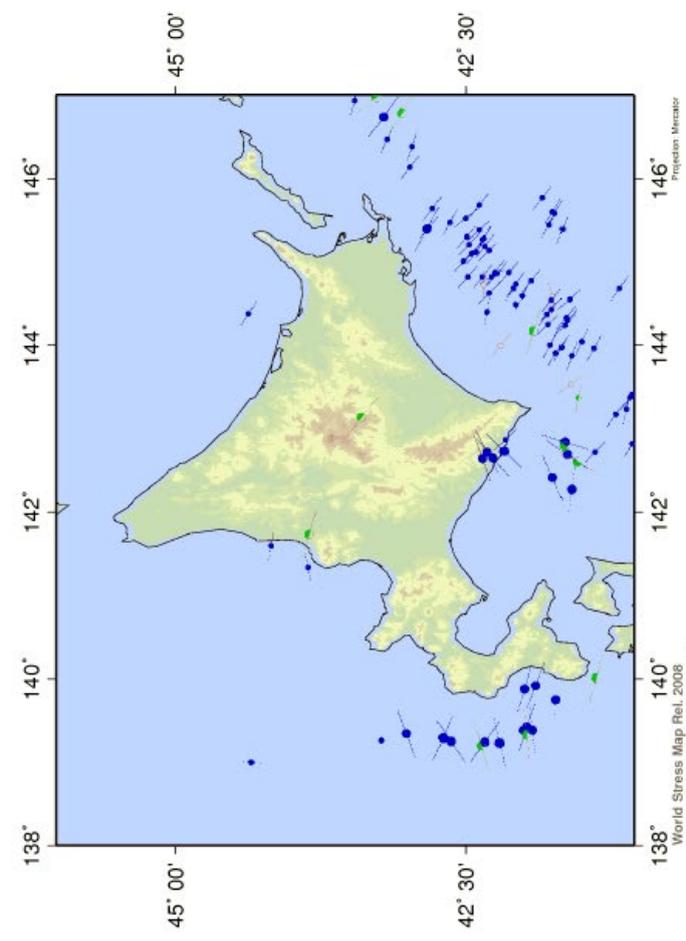
図S2.9-1に、WSMによる応力データ分布および札幌観測点を固定した変位速度図を示す。これらの図に現れた応力分布を反映すると考えられる特徴を列記する。

北海道南東部・日高山脈南部は、太平洋プレートの沈み込みによる千島弧の東北日本弧への衝突が生じている地域である。地殻変位速度はこの衝突と整合的な西から西北西への変位が顕著であり、南東ほどその変位速度が大きく、年間20mm以上に達している。応力データ分布図には陸域のデータが少ないが日高山脈南端付近に逆断層型の東西圧縮を示すデータが存在し、地動変位速度ベクトルと調和的である。

石狩低地帯内に存在する札幌観測点を固定点とした場合、北海道北部地域から苫小牧・室蘭に至る地域は相対的な変位は小さい。



Horizontal Displacement velocity during 1996-2000



Crustal Stress Data Map

図S2.9-1 北海道地域の地殻応力データ分布 (左) および水平変異速度分布図 (右) (経済産業省, 2011)

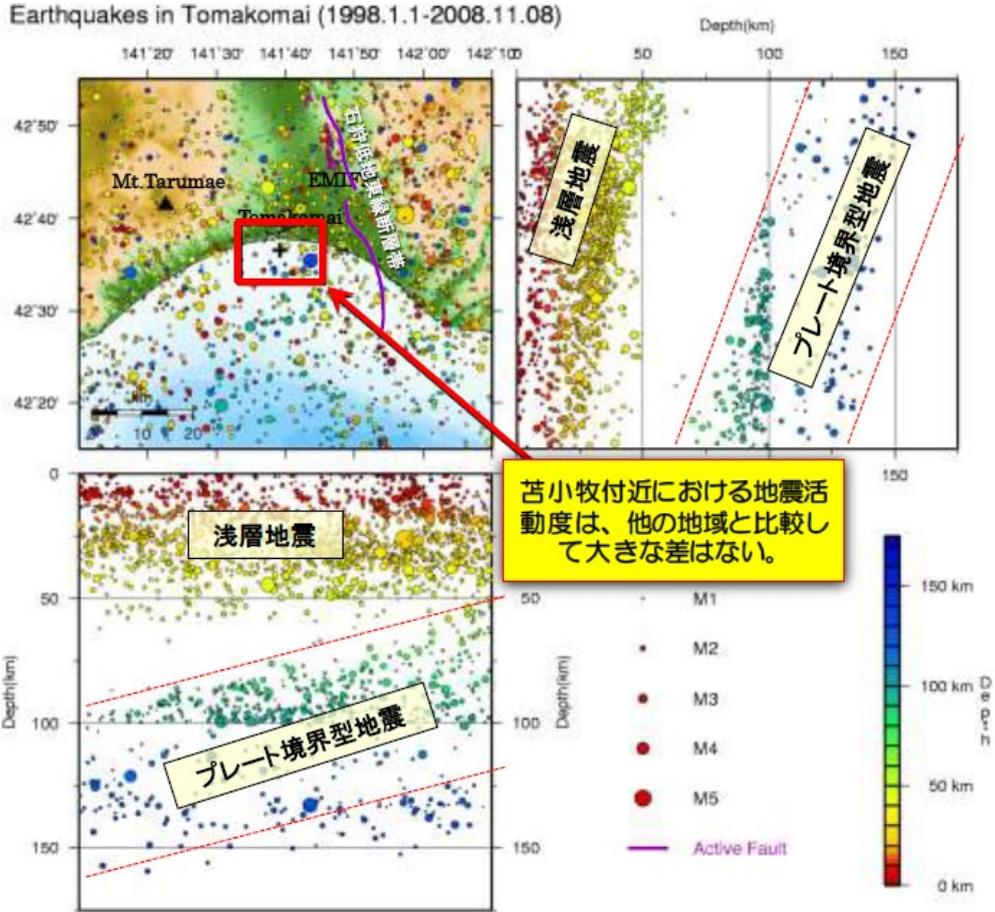
S2.9.2 北海道周辺および苫小牧周辺の地震活動

「CCS実証事業の安全な実施にあたって」においては、CO₂貯留に際し地質面から検討すべき事項として、CO₂圧入地点付近における過去の地震活動が挙げられている。そこで、過去や現在の地震活動状況を調べることにより、圧入地点周辺の断層運動の履歴や地殻の活動度を知ることを目的として調査を行った。

北海道周辺には、深部（100km 以深）の海溝型（プレート境界型）と浅部（20-40km 以浅）の内陸地震の2タイプの地震活動があり、千島海溝-日本海溝に沿って、津波を伴うマグニチュード

(M) 8クラスの海溝型巨大地震が繰り返し発生している（図S2.9-2）。北海道では、古文書に記録された古い地震は少ないが、津波堆積物の調査から、400-500年周期で巨大津波を経験してきたことが分かっている。

苫小牧周辺における現在の地震活動を図S2.9-3に示す。震源分布断面図からは、地下深部（100km 以深）の海溝型（プレート境界型）と浅部（20-40km 以浅）の内陸地震の2タイプの地震活動があることが分かる。平面分布図から、圧入想定地点周辺の地震活動度は、他の地域の活動度とほとんど差異はないことがわかる。苫小牧市南西側には、樽前山などの活火山があり、群発地震が発生することがある。ほとんどの場合 M5 以下であるが、まれに M5 より大きくなり、局所的に被害が生じることがある。群発地震の活動期間は、多くは1～3ヵ月の比較的短い時間で収まるが、1年を越えた例も知られている。



図S2.9-2 北海道周辺の地震活動

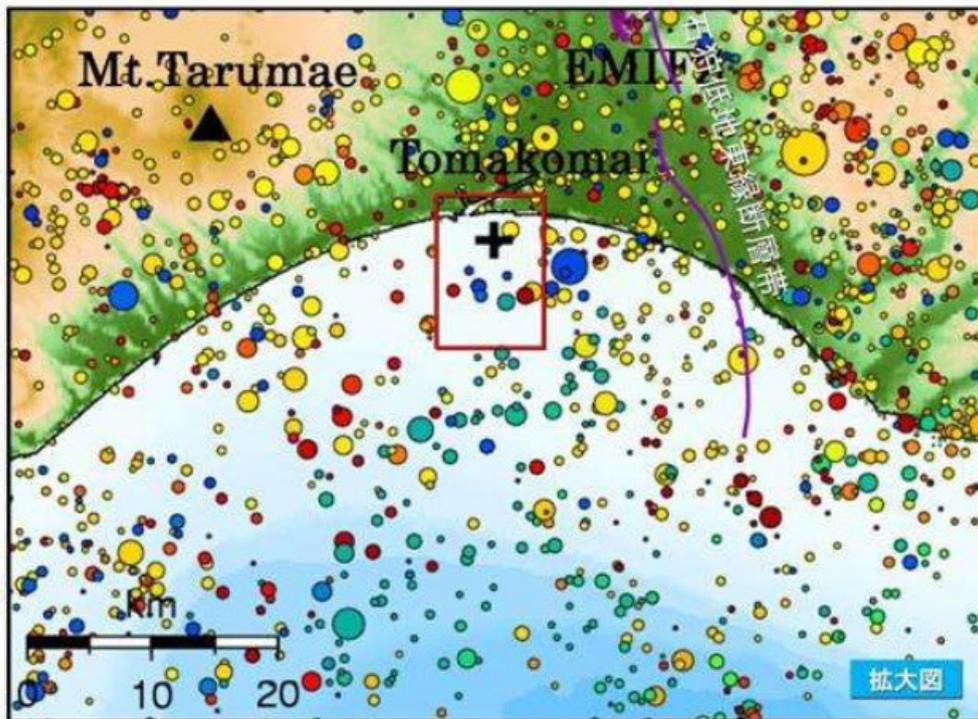


図 S2.9-3 苫小牧周辺の最近の地震活動（1998年～2008年、M>1）（経済産業省，2011）
（赤枠内は調査範囲）

S2.9.3 苫小牧周辺の活断層

ここでは、活断層とは、第四紀後期更新世（約13万年前）以降現在まで活動的である断層、と定義する。

北海道地方の活断層のほとんどは逆断層であり、北海道の中央部がほぼ東西方向に圧縮されていることを示している。地殻変動観測からもおおむね西北西－東南東方向の圧縮場にあることがわかる（図S2.9-1）。

苫小牧周辺の活断層としては、石狩平野の東縁に沿って南北方向に走っている「石狩低地東縁断層帯」がある。図S2.9-4は、地震調査研究推進本部による「石狩低地東縁断層帯」の分布図である。平成22年8月に改訂されて追加された南部延長部も含まれている。図中の南部延長部は、断層そのものではなく断層活動を伴う変形を表す背斜構造軸として表現されている。震度予測シミュレーションで用いられている断層は、背斜軸の10～20km東方に想定されており、想定圧入地点からは20km以上あり、十分離れていると言える。

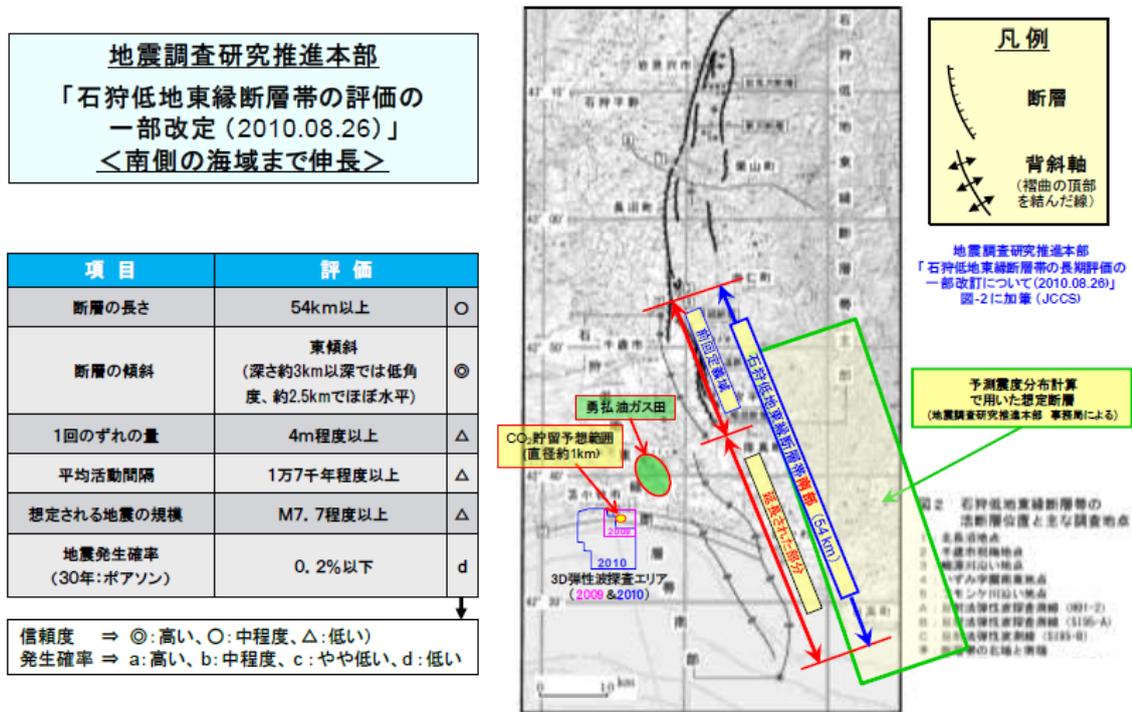


図 S2.9-4 石狩低地東縁断層帯（経済産業省，2011）

S2.9.4 三次元弾性波探査断面図に見られる断層

本地域で実施された三次元弾性波探査の断面図には、断層と判断される不連続面が確認されている。図S2.9-5はその一例で、滝ノ上層の想定貯留地点を横切る LineIL-145 の東西断面図である。断面図上のほぼ中央に認められる断層は、ほぼ南北方向の走向で、滝ノ上層から平取+軽舞層までを切っている。本断層は萌別層を切っておらず、活断層ではないと推定する。本断層は3Dデータの解析による振老層の分布形状から中新世の中期以前の引張応力場で形成された正断層と推定する。その後、荷菜層の堆積時に西側が下がるような活動があったと考えられ、萌別層堆積時以

降は活動を停止した。そのため、現在の圧縮応力場では再活動の可能性は低いと判断する。

また、地層水の塩分濃度分布から求めた水理地質構造から、本断層は不透水性と推定され、圧力の伝播と地層水の動きが断層にあたる影響は小さいと判断する。

以上により、本断層は滝ノ上層T1部層へのCO₂の圧入に対しては安定していると判断する。

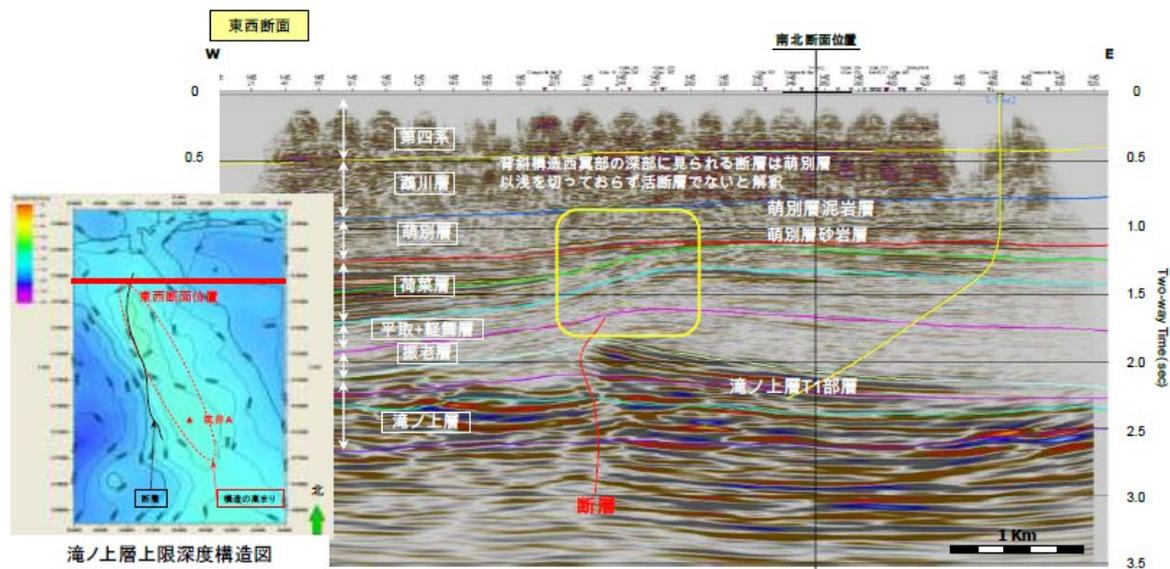


図 S2.9-5 三次元弾性波探査断面図上でみられる断層例（経済産業省，2011）

S2.9.5 CO₂漏出要因に関する検討のまとめ

苫小牧地点における貯留層総合評価の検討結果により、貯留後のCO₂が貯留対象層から漏出する要因の可能性として、以下の漏出経路が想定される。

- (1) 遮蔽層の毛管圧を超えて移動
- (2) 断層を通じた移動
- (3) 廃坑井を通じた移動
- (4) 圧入井等の設置予定の構造物に沿った移動

(1)～(4)について検討した結果のまとめは、以下の通りである。

(1) 遮蔽層の毛管圧を超えて移動

滝ノ上層T1部層および萌別層砂岩層の圧入圧力は、それらの遮蔽層の毛管圧（スレシヨルド圧力）を超えることはなく、CO₂は遮蔽層には浸透しない（滝ノ上層T1部層では、スレシヨルド圧力が十分に高い。萌別層砂岩層では、滝ノ上層T1部層に比べればスレシヨルド圧力が低いものの、シミュレーションの結果、CO₂は遮蔽層に浸透せず、良好な遮蔽性能が期待される）。

(2) 断層を通じた移動

シミュレーションによるCO₂長期挙動予測の結果、圧入後200年程度でCO₂の拡がりに変化は見られなくなり、1,000年を経てもCO₂は断層に到達しないことから、断層はCO₂の漏出要因にならないと考える。

(3) 廃坑井を通じた移動

シミュレーションによるCO₂長期挙動予測の結果、圧入後 200 年程度でCO₂の拡がりに変化は見られなくなり、1,000 年を経てもCO₂は廃坑井に到達しないことから、廃坑井はCO₂の漏出要因にならないと考える。

(4) 圧入井等の設置予定の構造物に沿った移動

圧入井等の構造物の設計・建設では、CO₂が接触する鋼材やセメント等を耐CO₂仕様にする等の対策を施すことで、これら構造物に起因したCO₂の移動を防止する。

以上から、圧入井等の構造物を耐CO₂仕様にするにより、基本的には、CO₂の漏出は生じないものとする。

参考資料

- 1) 経済産業省産業技術環境局 CCS実証試験実施に向けた専門検討会（2011年12月）：苫小牧地点における「貯留層総合評価」及び「実証試験計画（案）」に係る評価
- 2) 経済産業省産業技術環境局 二酸化炭素回収・貯留（CCS）研究会（2009年8月）：CCS実証事業の安全な実施にあたって



二酸化炭素地中貯留技術研究組合

Geological Carbon Dioxide Storage Technology Research Association

<http://www.co2choryu-kumiai.or.jp/>

「この成果は、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）の委託事業の結果得られたものです。」

This document is based on results obtained from a project (JPNP18006) commissioned by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) and Minister of Economy, Trade and Industry (METI) of Japan.

〈禁無断複製〉

本書の全部または一部を無断で複製複製（コピー）、磁気または光記録媒体に入力することは、著作権上での例外を除き、禁じられています。本書からの複製を希望される場合は、当組合メールアドレス（inquiry@co2choryu-kumiai.or.jp）にご連絡ください。