

平成23年度
CO₂マイクロバブル地中貯留の成立性に関する調査研究
報告書

平成24年3月

一般財団法人 エンジニアリング協会
地下開発利用研究センター

日本が生んだ世界のスポーツ

KEIRIN



この事業は、競輪の補助を受けて実施しています。

<http://ringring-keirin.jp>

序

本報告書は、財団法人JKAから機械工業振興資金の補助金を受けて、一般財団法人エンジニアリング協会 地下開発利用研究センターが、平成23年度「CO₂マイクロバブル地中貯留の成立性に関する調査研究」として検討を進め、その成果を取りまとめたものです。

平成23年3月11日に発生した東北地方を中心とする東日本大震災は、福島第一原子力発電所の被災事故を引き起こし、日本のエネルギー戦略に大きな衝撃を与えました。

わが国の電力供給は、原子力発電のシェアが減少し、火力発電に委ねる事態へと大きく変化しました。こうした事態を受けて、CO₂の排出量は、削減努力にもかかわらず、増加傾向へと変わりつつあります。一方、国際社会へ約束した1990年比25%の削減は、今や待ったなしの状況下であり、地球温暖化防止に向けたCO₂削減対策としての二酸化炭素地中貯留技術（CCS）が再び脚光を浴びています。

本調査研究のマイクロバブルによるCO₂地中貯留は、マイクロバブルの特性を活かし、CO₂を溶解し比較的浅い塩水帯水層に貯留することを可能とするもので、沿岸地域に点在する中小規模の排出源に適用でき、排ガスからのCO₂の分離回収・圧入・運搬などのコスト削減をも可能とする斬新な技術です。

本調査研究は、マイクロバブルによってCO₂を溶解するシステムを含め、比較的深度の浅い地層に地中貯留するシステムの概念をまとめ、システム建設と貯留を可能にする地層と地域を選定し、その経済性を追求したもので、合わせて実用化に向けての技術的課題の整理と実証試験までのロードマップなどをまとめたものです。マイクロバブルを活用する二酸化炭素地中貯留技術は、CO₂地中貯留のコストを低減できる新たな手法として画期的な技術であり、広く、社会に貢献できる成果を挙げることが出来ました。

本調査研究は、地下開発利用研究センターの研究企画委員会の下で、学識経験者、関係官庁ならびに当協会会員企業の専門家からなる調査研究委員会（委員長 独立行政法人産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門 當舎利行主幹研究員）と作業部会を編成して、実施してまいりました。なお、本調査研究の取りまとめにあたっては、株式会社大林組が中心となって行いました。

本調査研究にご協力いただいた関係各位に対して心から謝意を表するとともに、本報告書の成果が各方面で有効かつ広範囲に活用されることを心より期待する次第です。

平成24年3月

一般財団法人 エンジニアリング協会
理事長 久保田 隆

平成 23 年度
CO₂ マイクロバブル地中貯留の成立性に関する調査研究
委員会名簿

| | | |
|--------|-------|---|
| 委員 長 | 當舎 利行 | 独立行政法人 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 主幹研究員 |
| 委員 | 長田 昌彦 | 国立大学法人 埼玉大学 地圏科学研究センター 准教授 |
| 委員 | 植村 豪 | 国立大学法人 東京工業大学 大学院理工学研究科 機械制御システム専攻 助教 |
| 委員 | 五十嵐敏文 | 国立大学法人 北海道大学 大学院工学研究員 環境循環システム部門地圏物質移動学研究室 教授 |
| 委員 | 高橋 正好 | 独立行政法人 産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門 水環境工学研究グループ 主任研究員 |
| 委員 | 薛 自求 | 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 CO ₂ 貯留研究グループ 副主席研究員 |
| 委員 | 駒田 広也 | 財団法人電力中央研究所 名誉研究顧問 |
| 委員 | 海江田秀志 | 財団法人電力中央研究所 地球工学研究所 地圏科学領域 上席研究員 |
| 委員 | 村上 嘉孝 | 財団法人エネルギー総合工学研究所 主管研究員 |
| 委員 | 平松 晋一 | 応用地質株式会社 エネルギー事業部 執行役員 事業部長 |
| 委員 | 松田 隆 | 株式会社大林組 技術研究所 副所長 |
| 委員 | 小出 仁 | 温暖化防止地球システム株式会社 代表取締役社長 |
| 委員 | 中西 繁隆 | 電源開発株式会社 火力建設部 主管技師長 (地熱技術担当) |
| 委員 | 熊谷 司 | 日揮株式会社 中国事業開発室 室長代理 |
| オブザーバー | 松本 康夫 | 経済産業省 経済産業政策局 産業施設課 課長補佐 |
| オブザーバー | 佐藤 克哉 | 一般財団法人石油エネルギー技術センター 自動車・新燃料部 主任研究員 |
| 事務局 | 三井田英明 | 一般財団法人エンジニアリング協会 地下開発利用研究センター 技術開発部 部長 |
| 事務局 | 和田 弘 | 一般財団法人エンジニアリング協会 地下開発利用研究センター 技術開発部 研究主幹 |
| 前事務局 | 佐藤 一浩 | 一般財団法人エンジニアリング協会 地下開発利用研究センター 技術開発部 研究主幹 |

平成 23 年度
CO2 マイクロバブル地中貯留の成立性に関する調査研究
作業部会 部会員名簿

| | | |
|---------|-------|--|
| 部 会 長 | 鈴木健一郎 | 株式会社大林組 技術本部 技術研究所 地盤技術研究部 上席研究員 |
| 部 会 員 | 松下 典史 | 応用地質株式会社 エネルギー事業部 技術部 グループリーダー |
| 部 会 員 | 下山 真人 | 株式会社大林組 技術本部 技術研究所 地盤技術研究部 副主任研究員 |
| 部 会 員 | 人見 尚 | 株式会社大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 副主任研究員 |
| 部 会 員 | 笹倉 剛 | 鹿島建設株式会社 技術研究所 地下水・地盤環境グループ 上席研究員 |
| 部 会 員 | 海老 剛行 | 鹿島建設株式会社 土木管理本部 土木技術部 課長 |
| 部 会 員 | 山本 高司 | 川崎地質株式会社 本社 技術本部 技術統括部 部長 |
| 部 会 員 | 田上 雅彦 | 川崎地質株式会社 事業本部 保全・エネルギー部 部長 |
| 部 会 員 | 堀川 滋雄 | サンコーコンサルタント株式会社 地盤調査・防災部 副部長 |
| 部 会 員 | 戸沢 正徳 | 株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング 資源エネルギー事業部 課長 |
| 部 会 員 | 小川 豊和 | 大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所 地盤・岩盤研究室 地下水チーム 主任研究員 |
| 部 会 員 | 稲葉 薫 | 株式会社竹中工務店 技術研究所 先端技術研究部 エコエンジニアリング部門 主任研究員 |
| 部 会 員 | 山浦 昌之 | 株式会社ダイヤコンサルタント 地圏環境センター 地盤解析グループ グループリーダー |
| 専 門 委 員 | 志田原 巧 | 株式会社ニュージェック 国内事業本部 技師長 |
| 事 務 局 | 三井田英明 | 一般財団法人エンジニアリング協会 地下開発利用研究センター 技術開発部 部長 |
| 事 務 局 | 和田 弘 | 一般財団法人エンジニアリング協会 地下開発利用研究センター 技術開発部 研究主幹 |
| 前 事 務 局 | 佐藤 一浩 | 一般財団法人エンジニアリング協会 地下開発利用研究センター 技術開発部 研究主幹 |

平成 23 年度 CO₂ マイクロバブル地中貯留の成立性に関する調査研究報告書 目 次

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 第 1 章 調査研究の概要 | 1 |
| 1.1 背景と目的 | 1 |
| 1.2 調査研究の進め方 | 1 |
| 1.3 調査内容と成果概要 | 2 |
| 1.3.1 CMS システムに関する課題に対する検討 | 3 |
| 1.3.2 想定モデル地点の選定と CMS 貯留システムのモデル構築 | 5 |
| 1.3.3 CMS システムの経済性に関する概略検討 | 5 |
| 1.3.4 CMS システムの実用化に向けた検討 | 5 |
| 第 2 章 CMS システムに関する課題に対する検討 | 9 |
| 2.1 はじめに | 9 |
| 2.2 技術的課題の検討 | 17 |
| 2.2.1 MB の発生法、管理法における課題 | 17 |
| 2.2.2 注入方法 | 22 |
| 2.2.3 キャップロックの力学的安定 | 30 |
| 2.2.4 地中挙動 | 31 |
| 2.2.5 地中挙動の解析 | 40 |
| 2.3 CMS システムの周辺環境への影響の検討 | 87 |
| 2.3.1 CO ₂ 漏洩による影響 | 87 |
| 2.3.2 酸性水の影響 | 92 |
| 2.3.3 排ガス注入における影響 | 95 |
| 2.4 PA 対策と法制度に関する検討 | 98 |
| 2.4.1 CCS に関する法規制の動向と課題 | 98 |
| 2.4.2 CCS における環境影響評価 | 105 |
| 2.4.3 CCS の各過程における環境影響評価および PA に必要な項目 | 106 |
| 2.4.4 CMS における環境影響評価項目 | 111 |
| 2.4.5 まとめと提言 | 114 |
| 第 3 章 想定モデル地点の選定と CMS 貯留システムのモデル構築 | 117 |
| 3.1 想定モデル地点の選定 | 117 |
| 3.1.1 貯留層の地質条件 | 117 |
| 3.1.2 貯留の考え方 | 119 |
| 3.1.3 新第三紀鮮新統～第四紀更新統の分布 | 121 |
| 3.1.4 貯留有望地域の選定 | 121 |
| 3.1.5 B モデル地域 | 123 |

| | | |
|-------|------------------------------|-----|
| 3.2 | サイト条件に応じた注入・貯留モデルの検討 | 124 |
| 3.2.1 | Bモデル地域の地質概要 | 124 |
| 3.2.2 | Bモデル地域の貯留可能量と物性値 | 128 |
| 3.3 | マイクロバブルの地中挙動に関する検討 | 131 |
| 3.3.1 | 注水井・揚水井併用方式でのコントロール方法の検討 | 131 |
| 3.3.2 | 注入井・揚水井方式による1貯留ユニットの貯留可能量の検討 | 132 |
| 第4章 | CMSシステムの経済性に関する概略検討 | 145 |
| 4.1 | はじめに | 145 |
| 4.1.1 | CCSにおけるコスト | 145 |
| 4.1.2 | コスト試算に当たっての前提 | 150 |
| 4.2 | コストの試算 | 151 |
| 4.2.1 | 掘削コスト | 151 |
| 4.2.2 | モニタリングコスト | 151 |
| 4.2.3 | 維持管理コスト | 151 |
| 4.2.4 | 輸送コストについて | 152 |
| 4.2.5 | 操業コスト | 154 |
| 4.2.6 | 再生可能エネルギーとの比較 | 154 |
| 4.3 | 推進要因 | 157 |
| 4.3.1 | 炭素税 | 157 |
| 4.3.2 | クリーン開発メカニズム(CDM) | 157 |
| 4.3.3 | COP17での成果 | 159 |
| 4.4 | CMSシステムの経済性に関する概略検討のまとめ | 160 |
| 第5章 | CMSシステムの実用化に向けた検討 | 161 |
| 5.1 | 開発のための手順(ロードマップ)の検討 | 161 |
| 5.1.1 | CCSのロードマップ | 161 |
| 5.1.2 | CMSのロードマップ | 164 |
| 5.2 | 試験計画等の立案 | 166 |
| 5.2.1 | 室内模型試験による検証 | 167 |
| 5.2.2 | 原位置試験による検証 | 170 |
| 第6章 | まとめ | 173 |
| 6.1 | CMSシステムに関する課題のまとめ | 173 |
| 6.2 | 想定モデル地点の選定とCMS貯留システムのモデル構築 | 174 |
| 6.3 | CMSシステムの経済性に関する概略検討 | 174 |
| 6.4 | CMSシステムの実用化に向けた検討 | 174 |
| ○付録 | 略語表 | 付-1 |

第 1 章 調査研究の概要

1.1 背景と目的

地球温暖化対策の方法として、CCS（Carbon Dioxide Capture & Storage）に期待がかかっている。現在の CCS は、排ガスから回収した CO₂ を、GL-800m 以深の遮蔽層となる地層下位の貯留層（砂層など）に、超臨界状態で圧入貯留する概念が主流であるが、CO₂ の分離・回収および輸送に大きなコストがかかるといった課題がある。また、超臨界状態の CO₂ には大きな浮力が働き、上昇しやすいといった問題もある。一方、CO₂ を地下水に溶解した場合、溶解水は地下水より重くなるため、安定な状態で地中に隔離することができる。しかし CO₂ を地表で溶解し、注入すると多量の水を必要とするため、非常に非効率である。こうした点を解決し、排ガスを対象として CO₂ を地下水に溶解し、安定的に貯留できれば、回収コストがかからず経済的で安全な地中貯留システムとなることが期待されている。

本調査研究は、地下水に溶解しやすいマイクロバブルの特性を活かし、既存の深部塩水帯水層を貯留層とし、マイクロバブルによって CO₂ を地中貯留する概念の成立性に関する調査研究を行うものである。

本年度は、特に安全性と経済性に留意した検討を主とし、平成 22 年度の調査研究成果をもとに、マイクロバブル地中貯留（Carbon Dioxide Micro Bubble Storage 以下 CMS という）に関する資料を再収集整理するとともに、マイクロバブル地中貯留システムのモデルを構築し、経済性を検討することで、その成立可能性を検討した。また、環境面への影響評価に関する課題整理とその対策検討を行い、実用化に向けたロードマップの立案と試験計画を検討した。

1.2 調査研究の進め方

実施体制は、図 1.2-1 のとおり。

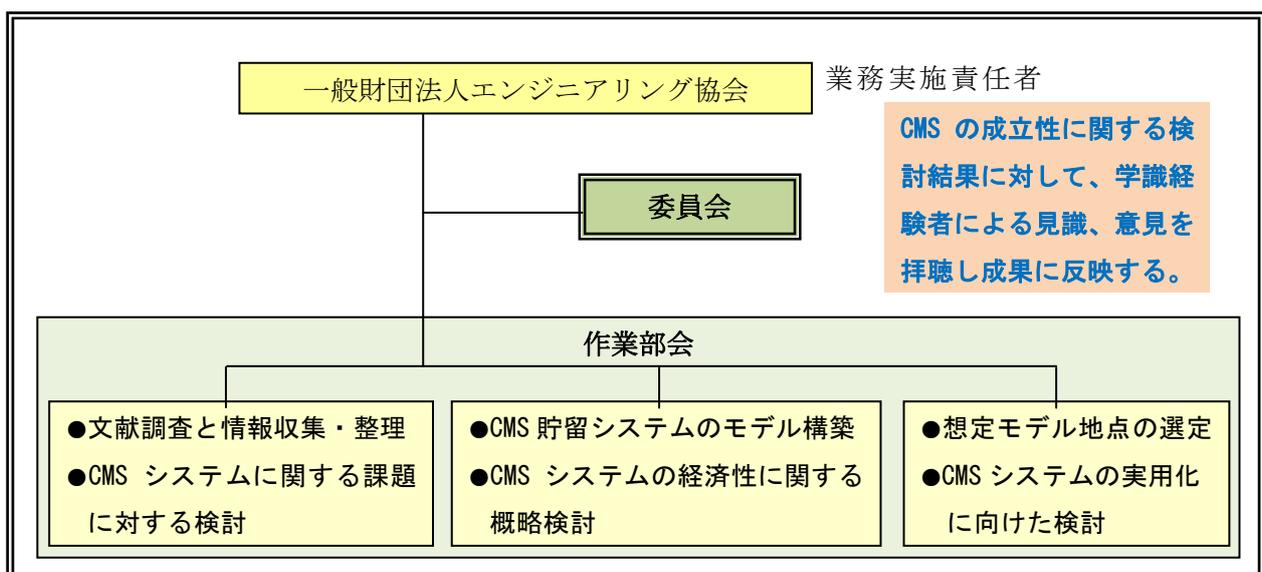


図 1.2-1 調査研究実施体制

1.3 調査内容と成果概要

調査研究は、図 1.3-1 の実施手順に沿って進めた。

また、委員会の活動実績は、表 1.3-1 に示すとおりである。



図 1.3-1 平成 23 年度調査研究の実施手順

表 1.3-1 委員会活動実績

| 委員会 | 開催日時 | 審議内容 |
|----------|----------------------|------------------------|
| 第 1 回委員会 | 平成 23 年 6 月 17 日(金) | 1. 実施計画書 2. 作業部会の設置 |
| 第 2 回委員会 | 平成 23 年 11 月 14 日(月) | 1. 中間成果報告 |
| 第 3 回委員会 | 平成 24 年 3 月 9 日(金) | 1. 成果報告 |

第 1 回委員会で設置が承認された作業部会は、平成 23 年 6 月より本格的に作業を進め、表 1.3-2 に示す実施工程表に沿って検討を進めた。作業部会は、平成 23 年 6 月から平成 24 年 2 月までに計 14 回開催した。

表 1.3-2 実施工程表

| | 平成 23 年度 | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|----------|---|---|---|---|---|----|----|----|---|---|---|--|
| | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | |
| (1) CMS システムに関する課題に対する検討 | | | | | | | | | | | | | |
| ① 技術的課題の検討 | | | | ■ | | | | | | | | | |
| ② 周辺環境への影響評価 | | | | ■ | | | | | | | | | |
| ③ PA 対策や法制度に関する検討 | | | | ■ | | | | | | | | | |
| (2) 想定モデル地点の選定と CMS 貯留システムのモデル構築 | | | | | | | | | | | | | |
| ① 想定モデル地点の選定・検討 | | | | ■ | | | | | | | | | |
| ② サイト条件に応じたモデル検討 | | | | ■ | | | | | | | | | |
| (3) CMS システムの経済性の概略検討 | | | | | | | | | | | | | |
| ① 開発のための手順の検討 | | | | | | | | | | | | | |
| ② 試験計画等の立案 | | | | | | | | | | | | | |

1.3.1 CMS システムに関する課題に対する検討

CMS システムに関する課題を検討するに当たり、システムのコンセプトから抽出した技術的課題、CO₂ が漏洩した場合の環境への影響、および、社会的受容性と法規制についての検討を行った。

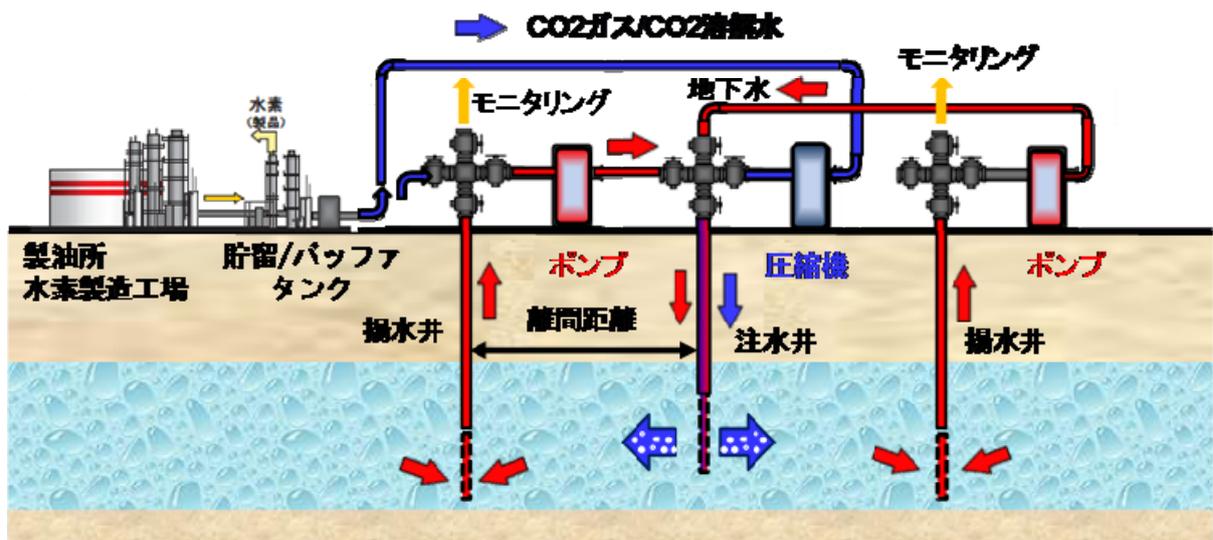


図 1.3-2 CMS システムのコンセプト (RITE H17 報告書 P1097 から一部引用)

これらの検討結果の要約は、以下のとおりである。

- 1) 今後の溶解特性把握には、マイクロバブルの発生を圧力下で行い、マイクロバブルによる CO₂ 飽和溶液作成までの時間の検証、ミリバブルが圧力下でマイクロバブルとなった場合にどこまで溶解させることができるかの検証が必要である。
マイクロバブルの寿命は数分から数 10 分程度とされているが、間隙構造にトラップされたバブルが数分後に消滅するか、消滅するなら流動障害挙動が現れるのは何故か、などの問題を解決していかねばならない。
- 2) 原位置でのマイクロバブル作成法によっては、1)の課題が解決される可能性があるが、現状の解析においてもバブルの存在は無視している。間隙構造中のバブルの移動は、セメントミルクの注入を参考に考えると、粒径が間隙構造の 1/3 以下であれば、それらが目詰まりを起こす確率が低いことから、作成されるマイクロバブル径が 50 μm 以下であれば、間隙径の最小値が 150 μm 程度の地盤であれば問題ないと考えられる。
- 3) 地中挙動をモニタリングするためには、CO₂ 濃度およびそれに依存する地下水の pH や伝導率を直接計測、その後もモニタリングしていくことが望ましい。
- 4) CO₂ 溶解水は地下水よりも極僅かに密度が大きいため地下水流動に従ってほぼ下方に移動する。ただし、流動が上方に向かえばそのわずかの密度差では流線の方角に従って移動する可能性はある。さらに長期的には拡散する。
注入井/揚水井併用方式では、常に上方の流れを作らないように地下水管理をしていく必要がある。
- 5) 揚水井に高濃度の CO₂ 溶解水が到達し、それを揚水した場合には、急激な CO₂ の気化は当然起こる。これを防ぐには、揚水井で揚水された地下水の水質モニタリングを連続的に実施し、それに基づいた注入/揚水の管理をする必要がある。
- 6) 深度-300m で飽和状態にある CO₂ 溶解水は pH 4 程度の酸性である。そのため、周辺岩石からの有害金属や硫酸塩、塩化物溶出の可能性はある。
貯留サイトの岩盤における溶出可能元素の特定とその溶出速度について事前に検討して把握することが必要である。また地下水水質のモニタリング項目に有害金属などの飲料水基準を設けておく必要がある。
- 7) 遮蔽層については、引張強さを考えると貯留層での条件を満たせばせん断破壊は生じないが、引張を考えると遮蔽層/貯留層境界では 0.16~4.2MPa（一軸圧縮強度の約 1/6、C の 1/3）となり、上述のように過剰間隙水圧が生じないよう境界から下でケーシングをしておく必要があるかも知れない。
- 8) キャップロックがある場合では、キャップロックより下部で注入すればキャップロックへの過剰間隙水圧の影響は低減され、上部での圧力分布の異方性も緩和されるため効率的である。
- 9) 水平方向に異方性がある場合、同一水位まで揚水するには方向により揚水量が異なるので、低下水位で制御すると貯留範囲も限られ、揚水量と注水量もバランスしない。そのため、注水井/揚水井併用方式で制御するには、透水係数の異方性も考慮した制御が必要である。
- 10) 地中に侵入したマイクロバブルの挙動、鉱物化などの地化学反応、生物膜等に関する目詰まり現象などの生物的な問題も、今後の課題となる。

1.3.2 想定モデル地点の選定と CMS 貯留システムのモデル構築

FS に向けた予備検討を進めるために、想定モデル地点を選定し、貯留システムのモデル構築を行い、貯留可能量の試算を行った。その結果概要は次のようである。

- 1) 排出源と地質条件から B モデル地点を選定した。
- 2) B モデル地点での貯留可能量は、240 万 t-CO₂ と推定された。
- 3) 注入井 1 本、揚水井 4 本の 1 貯留ユニットでは、4 %濃度で溶解させた CO₂ は、注入井－揚水井の離間距離 200m の場合、15 万 t-CO₂、300m で 34 万 t-CO₂ となる。

1.3.3 CMS システムの経済性に関する概略検討

CMS システムにおけるコスト試算を行い、大規模集中型 CCS との比較を行った。コスト試算の前提は次のとおりである。

- ・対象排出源：年間 1 万 t-CO₂～10 万 t-CO₂ 程度の小規模排出源。ただし、高純度 CO₂ 排出源となる水素製造工場を対象とし、CO₂ の分離・回収費用は計上しない。
- ・貯留サイトまでの距離：地域分散型の特徴である排出源、事業所直下または近傍の陸域からの注入であるため、パイプラインや船舶などの長距離輸送を伴わない。
- ・注入 CO₂ の状態：貯留域周辺の地下水を揚水して使用。注入井内においてマイクロバブルを発生させ、地下水に溶解させて貯留層に注入する。超臨界 CO₂ を注入するための高圧注入設備は不要。

また、再生可能エネルギーとの CO₂ 削減効果の比較をも行った。再生可能エネルギーとの比較では、石油火力発電で 1 t-CO₂ を排出する発電量を標準として、同一発電量を確保するための再生可能エネルギー発電費用に一般単位発電単価を乗じたものと比較した。

これら経済性に関する検討結果は次のとおりである。

- 1) コスト試算では、CMS システムのコストは、4,600～6000 円/t-CO₂ と試算された。
- 2) スケールメリットがあるため、設備費用に関しては、大規模 CCS より高価となるが、輸送コストを考慮すると同等または優位となる。
- 3) CO₂ 削減効果を再生可能エネルギーでの発電による削減効果と比較すると、太陽光発電、マイクロ水力発電、バイオマス発電よりは高く、地熱発電や風力発電よりは低かった。ただし、この比較は、再生可能エネルギーの売電価格に依存することに注意されたい（ここでは一律 25 円/kWh とした）。

1.3.4 CMS システムの実用化に向けた検討

CMS システム実用化に向けた開発手順をロードマップとして整理し、この実現に向けた課題抽出と解決のための最初の段階として、模型地盤による室内試験計画と小規模の原位置実証試験計画を立案した。

- 1) 内閣府、RITE、IEA の CCS に関するロードマップを参考に、CMS システムのロードマップを作成した。2020 年までに室内、原位置での研究開発を終了し、実用化を目指すものとした（図 1.3-3）。
- 2) 実用化のため、安全性および社会的受容性を得るための室内模型試験および原位置実証試験の立案を行った（図 1.3-4～図 1.3-5）。

CMSシステムのロードマップとマイルストーン

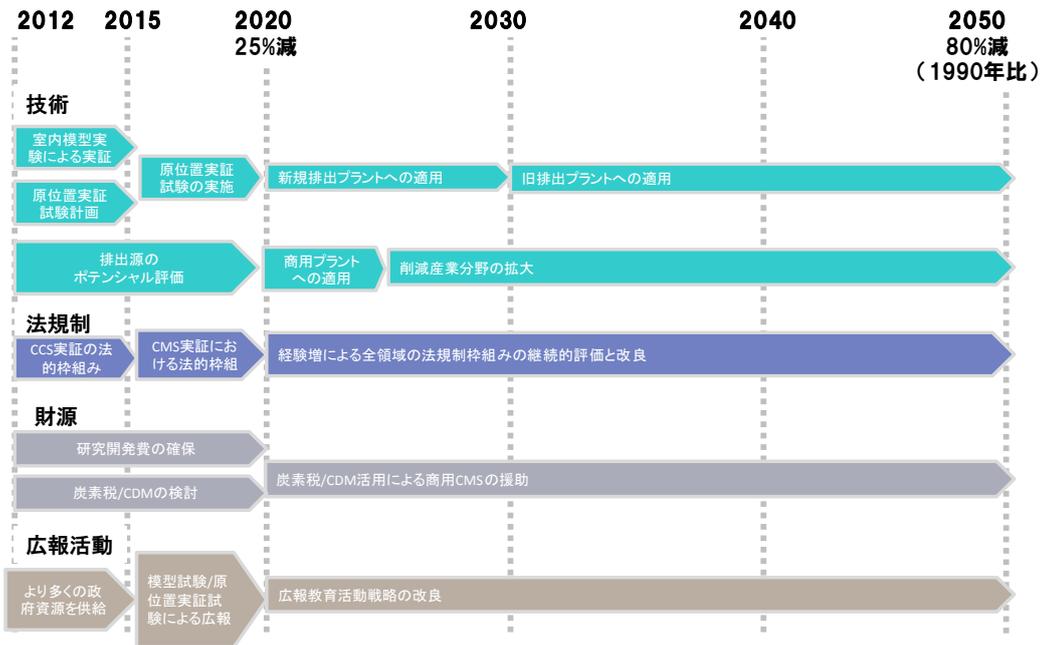


図 1.3-3 CMS のロードマップとマイルストーン

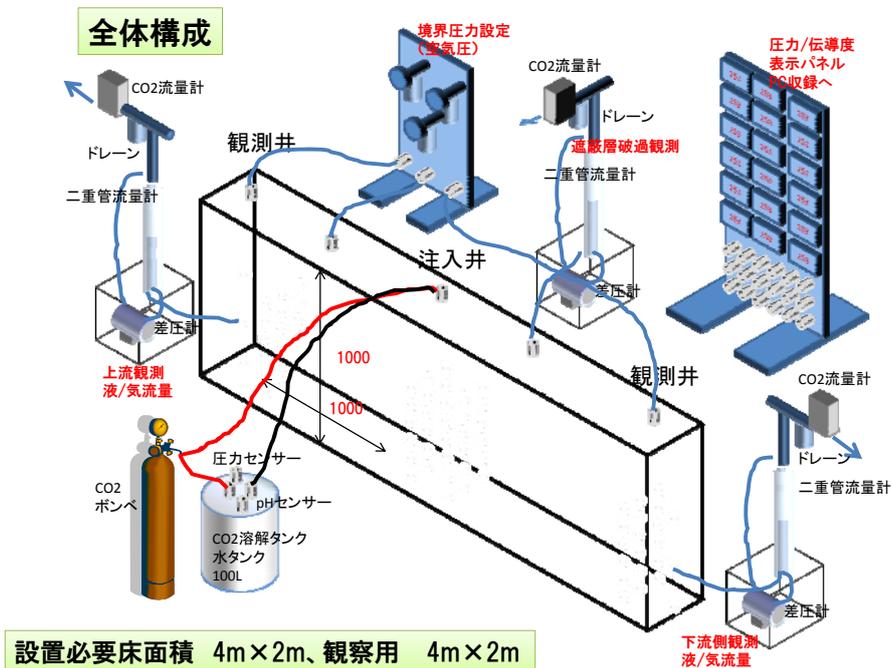
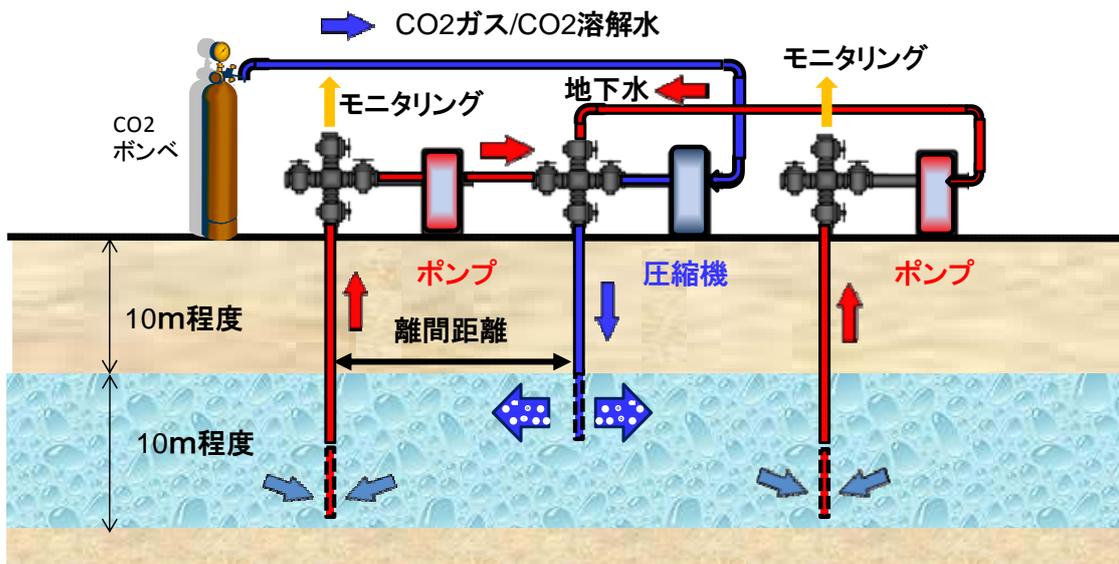
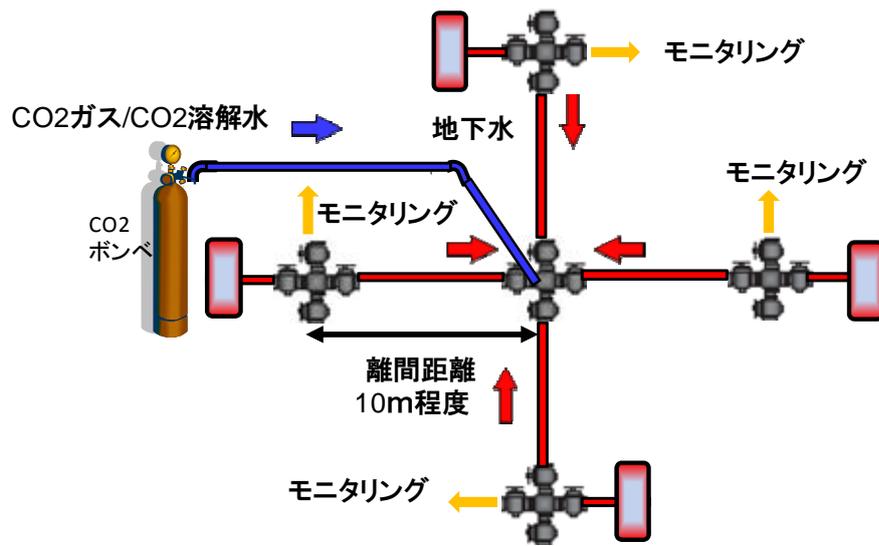


図 1.3-4 室内模型試験全体構成



(鉛直断面)



(平面図)

図 1.3-5 原位置試験概略図

第2章 CMSシステムに関する課題に対する検討

2.1 はじめに

CO₂マイクロバブル地中貯留システムは、地域分散型の排出源直下またはその近傍の地下300mから500m深度の帯水層にマイクロバブルでCO₂を地下水に溶解させて貯留するシステムである。その概念図を図2.1-1に示す。

図2.1-1では、高純度CO₂排出源と言われる水素製造過程で排出されるCO₂を対象として、地下の注入井中において、CO₂をマイクロバブルとして揚水した地下水に溶解させて貯留するシステムを示した。後述するように、注入井においてCO₂を完全にマイクロバブルによって溶解させる方法、およびマイクロバブルが地中に浸入した場合、移動する間に溶解していくかの挙動については技術的課題である。

従って、今年度は、CO₂溶解水が地中で生成出来る、または、マイクロバブルが地中に浸入して移動する間に溶解する、という前提で検討を行った。なお、検討にはCO₂回収システムは含めていない。

また、他産業排出源においては、回収システムが必要となる場合も当然あるため、このような概念のCMSシステムにおいて、CO₂の回収から長期貯留までのシナリオ、および注入から長期貯留時のリスクシナリオを図2.1-2のように考え、網掛け部分を検討の前提とした。

2.2節では、システムの課題を検討するに当たり、シナリオから抽出した技術的な課題について、2.3節では、漏洩した場合の広く環境への影響について、2.4節では、社会的受容性と法規制について検討した。

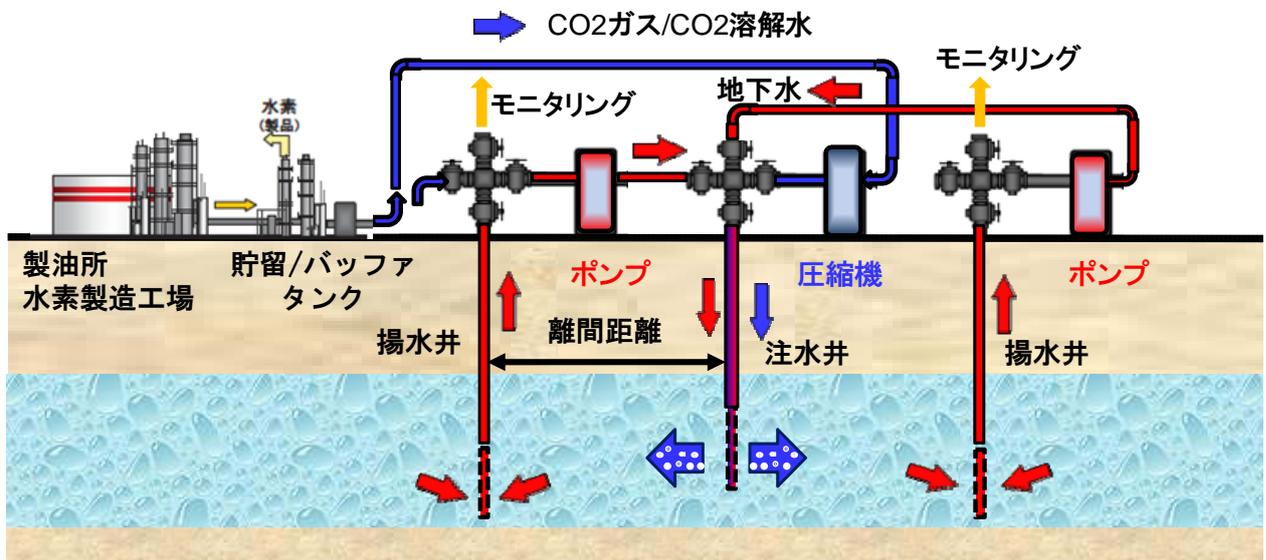


図 2.1-1 CMS システムのコンセプト
(RITE H17 報告書 P1097 から一部引用)

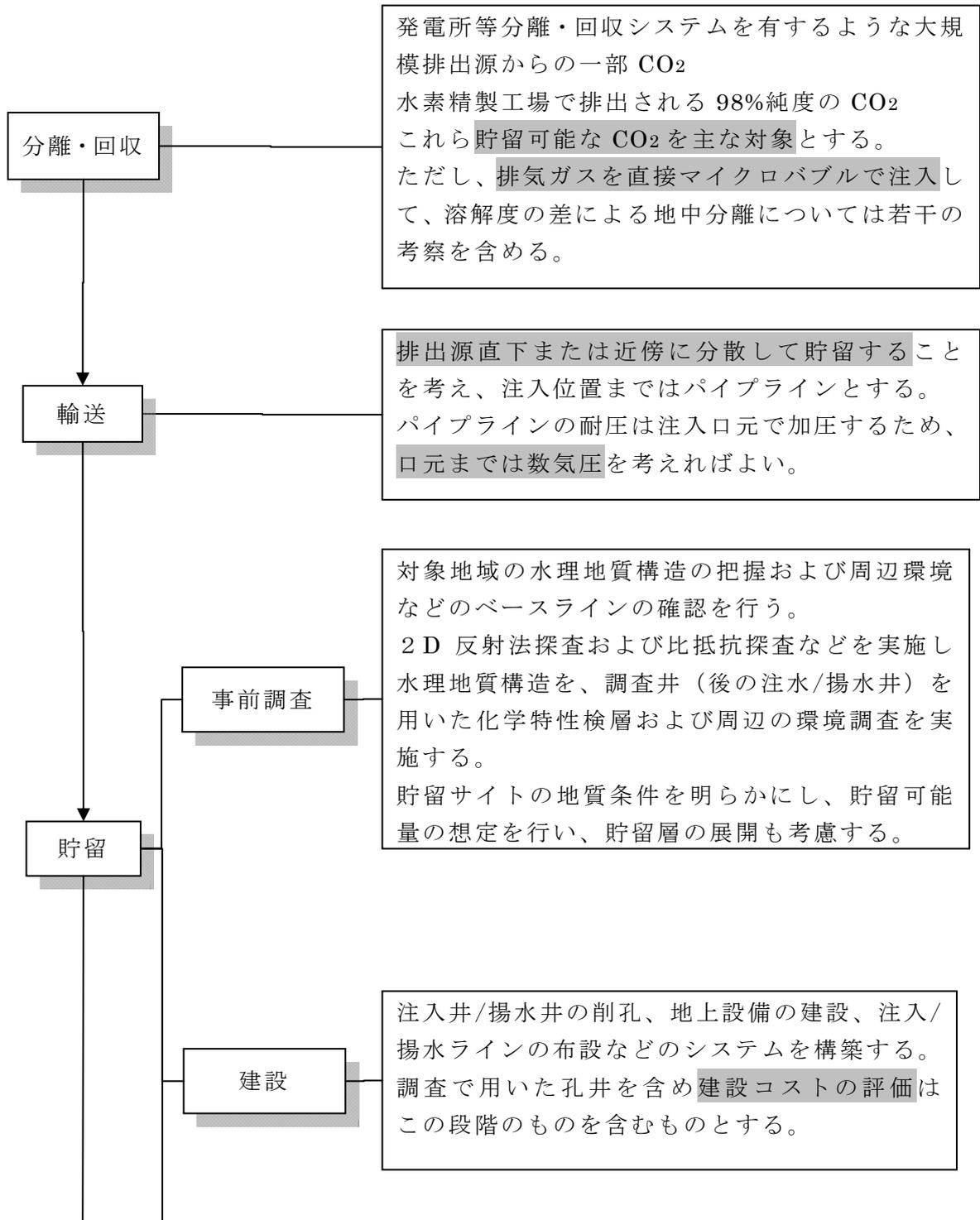


図 2.1-2 CMS システム全体のシナリオとそこに含まれるリスク（課題）

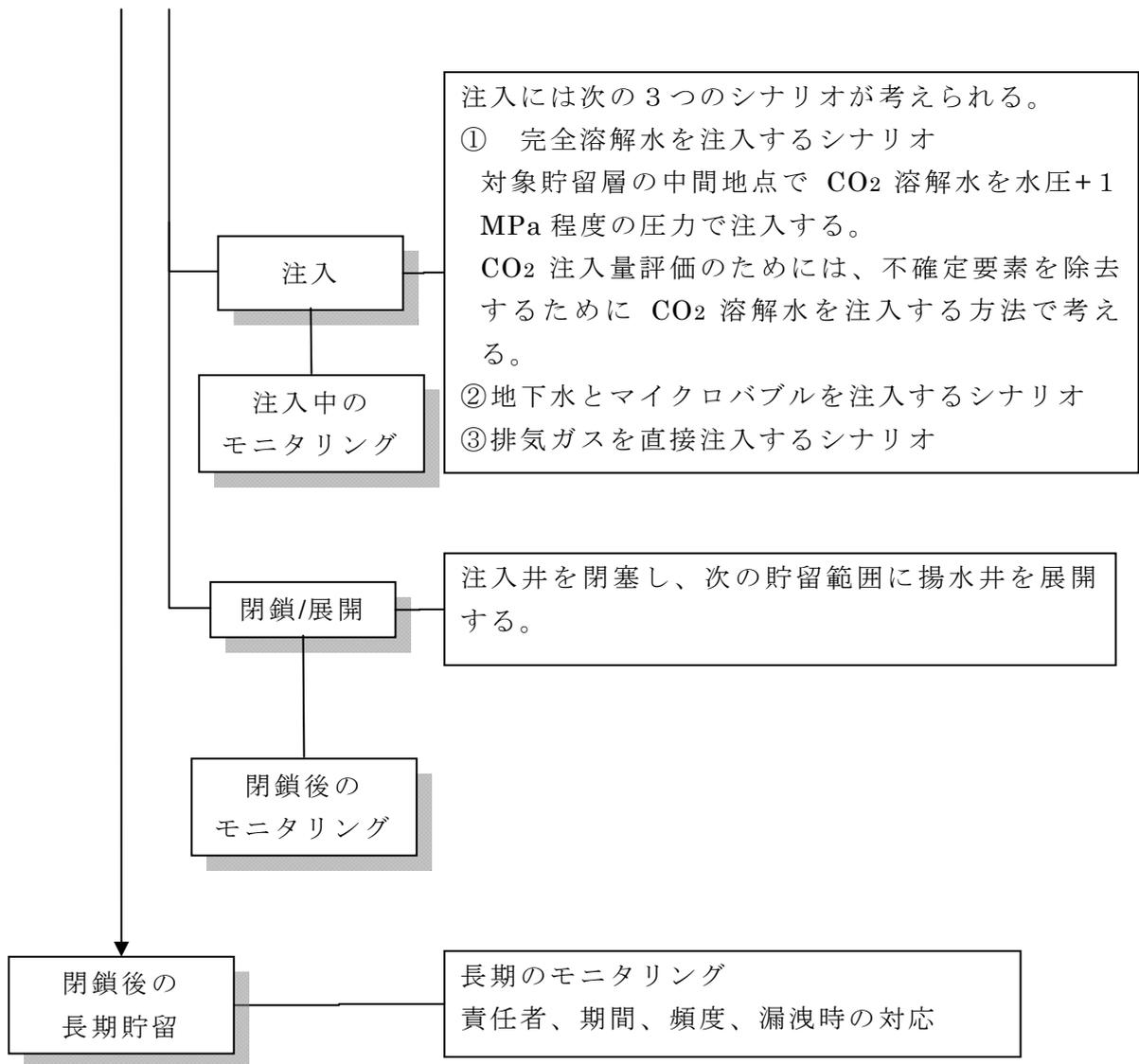


図 2.1-2 (つづき) CMS システム全体のシナリオとそこに含まれるリスク (課題)

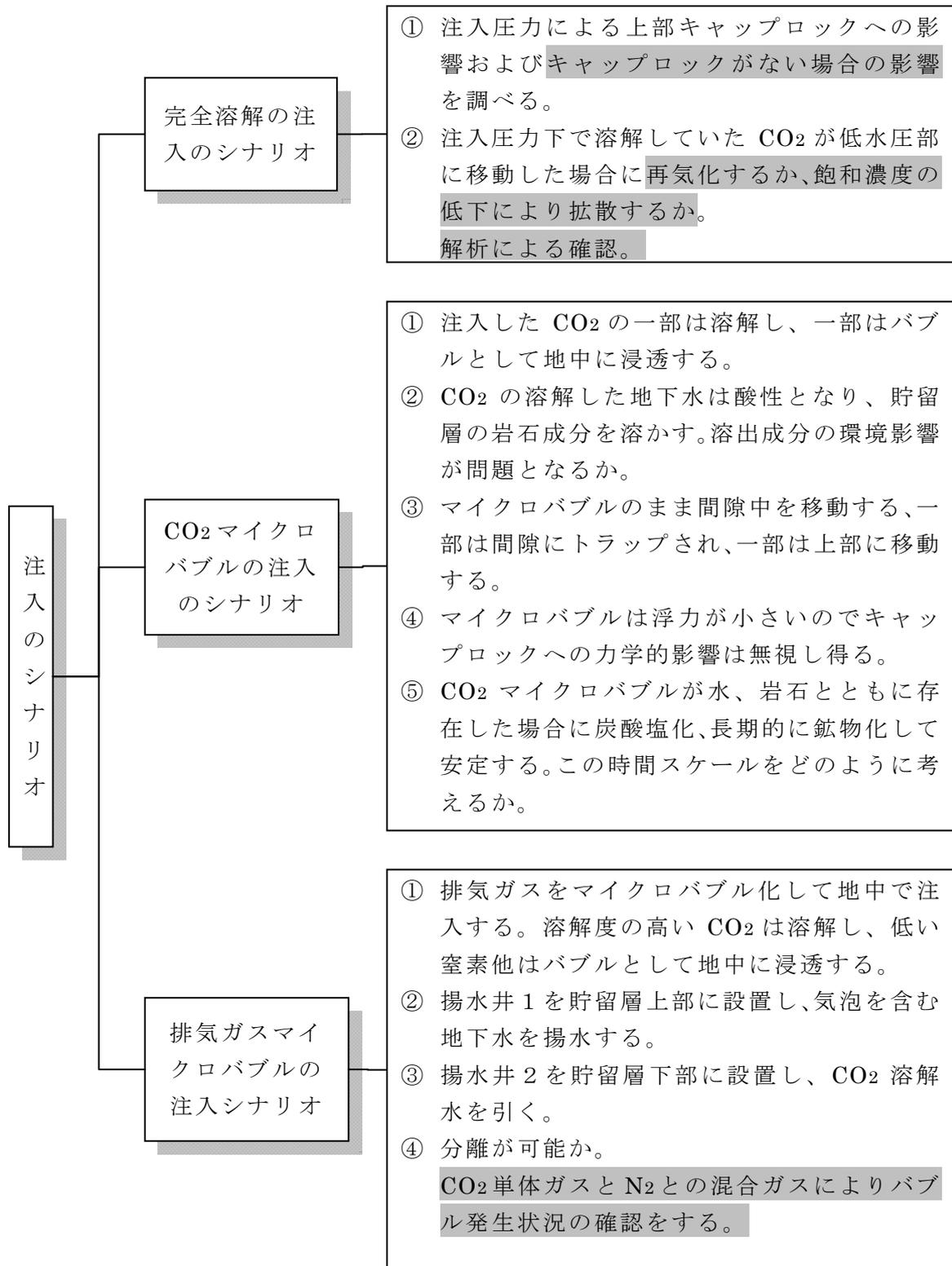


図 2.1-3 マイクロバブル注入のシナリオとそこに含まれる課題

2.2節では、技術的な課題を検討した。CMSの技術的課題は以下のようである。

①マイクロバブルの発生法・管理法

昨年度検討した内容から課題を抽出し、今後実施すべき検討項目を提示した。

②マイクロバブル法によるCO₂の溶解

溶解に関する基本的事項をまとめ、溶解速度について議論し、その課題と解決策を示した。

③注入方法の検討

マイクロバブルの注入位置を変化させた場合に起こる影響を試解析を通して示した。ここでは、CO₂ガスを所定の深度で注入した場合で考えている。実際の挙動に関してどのような解析が必要かについては⑤地中挙動で述べる。

④キャップロックの力学的安定

ここでキャップロックとは、貯留層を覆っている緻密な地層のことで、頁岩、泥岩から構成されており水、空気を透さない遮断性を有するものとし、特に背斜構造を形成しているものだけでなく、水平帯水層上部の遮水性を有する岩相を意味する。

⑤地中挙動

マイクロバブルの地中挙動については、シンプルな地質条件のもとで解析的検討を行った。溶解CO₂の地中挙動を再現し、長期安定的に貯留可能であることを示すことが解析の目的となる。モデルに関して、IEAは「CCS規制枠組み」の中で次のように述べている¹⁾。

IEA Carbon Capture and Storage Model Regulatory Framework

BOX14 貯留境界表現のフレキシビリティの必要性

複雑性が高いCO₂の地下貯留は、許認可過程の多くの部分を占めるので、その複雑性を事前に表現するには非常に高い不確実性があることを認識することが重要である。第1に、たとえ地下に関するよいデータセットがあり、先進の貯留層コンピューターシミュレーターモデルがあったとしても、不確実性は存在する。第2にCO₂注入の開始とともに、地下の知識と理解が急速に進むからである。

つまり、事前に貯留層構造が解釈され、事後に修正されるある程度のフレキシビリティが必要である。これは次の3つの方法で達成される。

- ・貯留層の複雑な境界条件を記述する時の誤差を考慮できる技術を確保しておく。実務的には石油・ガス分野で用いられている正方格子システムで境界条件を記述する。それにより予測にある程度の誤差が考慮される。
- ・CO₂の地下での挙動と寿命を監視し、監視結果からモデルを再構築し、再予測を行う（ヒストリーマッチング）。
- ・予測からの逸脱が起こる貯留層境界の事後修正が可能な境界条件設定のダイナミックなアプローチを行うこと。この修正は、過去の問題と漏洩リスクとなるのか第3者に影響を与えることになるのかを考慮しなければならない。

出典：IEA: Carbon Capture and Storage Model Regulatory Framework, Information paper, 2010, Nov.

したがって、ここではシンプルな地質モデルにおいて解析評価に必要な機能、必要なインプット/アウトプットをまとめ、現状でのツールを用いて CMS の特性についてパラメータステディを実施した結果について述べた。

2.3 節では、漏洩した場合の周辺への環境影響の検討として、IPCC の言うローカルなリスク（後述）に相当すると考えられる帯水層への CO₂ の漏洩を考えた。この時、CMS では、もともと帯水層に CO₂ を溶解させて貯留することから、酸性となった地下水の影響、貯留媒体としての地層中に含まれる成分が酸性水中に溶出することが考えられる。

近年、世界中で集中型 CCS の普及を目指した技術および環境影響評価の研究が進められている中で、多くの規制に関する課題が浮き彫りになったとして、IEA は規制枠組みを 2010 年末にまとめた。このまとめを中心に規制の問題についても、社会的受容性と法規制の課題を明確にして今後検討していくべき方向を 2.4 節で示した。

PA、すなわち社会的受容性は、人の要求に依存するものである。人の要求には、米国の心理学者マズローの要求階層にあるように、低次の要求が満たされると高次の要求が満たされるように動機付けられる様々な要因が考えられるが、ここでは、最低限度の要求である安全の確保が満足されることを考えるものとした。マズローの 5 段階の階層の第 2 階層に当たる安全の欲求（safety need）とは、安全性・経済的安定性・良い健康状態の維持・良い暮らしの水準、事故防止、保障の強固さなど、予測可能で秩序だった状態を得ようとする欲求である。従って、CMS の社会的受容性において考えるべきは、まず人間の健康への影響である。短期的には大量の CO₂ が漏洩して健康被害を及ぼすような場合が、長期的には周囲の環境変化から身に危険が及ぶ場合がそれぞれ考えられる。そこで、表 2.1-1 に示した貯留におけるリスクシナリオがどのように人間の健康および周辺の環境に影響を及ぼすかの調査結果を示した。

法律による規制は、国家がこの最低限の要求である安全の確保を目的として、CMS を実施する事業者に対して、すべき行為、また、すべきでない行為、遵守すべき基準を法・政令等で示し、違反する行為に対しては罰則により、経済的、社会的なペナルティを課すものである。我が国では商用 CCS の実績がないことから実証試験における規制になるが、CCS 研究会の報告を基本に、海外での規制の事例と比較しながら、CMS の規制の課題を整理した。

法律の問題としては、IPCC の報告では、「監視および確認の体制と漏出のリスクは法的責任を決定するのに重要な役割を果たすであろうし、逆もまた真である。組織の寿命や、進行中のモニタリング、組織の知識の移転可能性など考慮すべき点もある。貯留期間は気候変動問題と同様、数世代にわたって存続するものであるから、CCS の法的枠組みには長期的な展望が不可欠である。」としている。従って、法規制は IEA での CCS の法的枠組みを中心に、国内外の法規制から関連する環境影響評価項目を抽出し、体制や長期責任についてまとめ、問題点を探った。

IPCC の特別報告（2005）²⁾では、地中貯留層における CO₂ の漏出によるリスクは、世界規模のリスクとローカルなリスクという 2 つのカテゴリーに大きく分類でき、ローカル

なリスクに関して、起こるかもしれない漏出についての2種類のシナリオがあるとしている。潜在的な漏出経路のいくつかが示されており、潜在的漏出経路が明らかになれば、漏出の可能性に対処するため監視および修正の方策をとることができるとしている。

表 2.1-1 IPCC によるリスクの分類と内容

| | | |
|----------|--|---|
| 地球規模のリスク | 貯留層から大気へその一部でも漏出すれば気候変動を大きく促進する可能性のある CO ₂ の放出に関連するもの | |
| ローカルなリスク | 人間や生態系、地下水にとっての地域的な危険 | |
| | 注入井が破損するか、廃棄された井戸からの漏出 (急激な放出) | 放出時にその近くにいた労働者や、破裂を抑え込むために呼び出された労働者に及ぶ。7~10%を越える CO ₂ 濃度は人間の生命および健康に差し迫った危険を引き起こす。これらの種類の危険は、石油およびガス産業では、工学および管理制御を用いて定期的実施すれば効果的に管理することができる。 |
| | 検知されていない欠陥や裂け目、漏れている井戸などを通して漏出 (緩やかな放出) | CO ₂ が表面と地下水面上部との間の層に蓄積する場合、危険は主として飲料水の帯水層や生態系に及ぶ。地下水は、CO ₂ が直接帯水層へ漏れ出すことによっても、注入過程で CO ₂ により押し出された塩水が帯水層へ入り込むことによっても影響を受けうる。このシナリオだと、土壌の酸性化や土壌中の酸素の置換も起こる可能性がある。さらに、大気への漏出が、風のほとんどない低平地や、これらの拡散漏出の上に横たわる汚水溜りか基盤で起こる場合、漏れに気づかなければ人間も動物も害を受けるだろう。 |

また、下田ら³⁾は事例調査によって、リスクシナリオを表 2.1-2 のようにまとめている。

2.1 節の参考文献

- 1) IEA: Carbon Capture and Storage Model Regulatory Framework, Information paper, 2010, Nov.
- 2) IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage 2005
- 3) 下田昭郎、窪田ひろみ、横山隆壽：CCS 普及障壁に係る不確実性の事例調査、電中研調査報：V10012、2011/4

表 2.1-2 CO₂ 貯留のリスクシナリオ

| リスクシナリオ | 緩和/修復 オプション |
|--------------------|---|
| 断層、亀裂、スピルポイントからの漏洩 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 圧入停止のためのバルブ閉鎖 ■ 圧入レート・圧力の低減 ■ 水抜きによる貯留層の圧力低減 ■ 漏洩地点上流部での圧力増加による水理バリアの構築 ■ 化学的密封剤 ■ 圧入中止、貯留CO₂の抽出、他の最適貯留層への再圧入 |
| 運用井、放棄井からの漏洩 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 漏洩井のセメント詰めによる修復 ■ 圧入管やパッカーの取替えによる漏洩井の修復 ■ 修復不能な井戸の閉栓・放棄 ■ 漏洩地点上流部での圧力増加による水理バリアの構築 ■ 化学密封剤 ■ 圧入中止 |
| 自由水帯への漏洩および土壌への蓄積 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 蒸気抽出法の適用による自由水帯と土壌ガスからのCO₂の抽出 ■ CO₂の吸上げおよび再圧入 ■ 一時的なCO₂放出を停止するための吸引等の手段 ■ 水抜きあるいはCO₂による酸性化土壌の中和のためのアルカリ添加剤の使用 ■ 漏洩地点上流部での圧力増加による水理バリアの構築 ■ 化学密封剤 ■ 圧入中止 |
| 地下水への蓄積 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 気相のCO₂あるいは地下水に溶解したCO₂を抽出するための井戸の掘削 ■ CO₂を水に溶解させその水を抽出 ■ CO₂混濁水のくみ上げ(その後換気により大気放出。微量成分については化学処理も必要) ■ 水理バリアによる混濁水の拘束 ■ 生物化学的なプロセスによる浄化 ■ 化学密封剤 ■ 圧入中止 |
| 微量な長期漏洩による室内環境への蓄積 | <ul style="list-style-type: none"> ■ ガス抜きや室内加圧による室内環境の管理 ■ 漏洩地点上流部の圧力増加による水理バリアの構築 ■ 圧入中止 ■ 拡散用のファンの使用 |
| 地表面水への蓄積 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 浅い湖沼ではターンオーバーにより、流水では乱流効果によりCO₂は大気へ拡散 ■ 水深の深い湖沼近くでのプロジェクトの非実施(もし深い湖沼へとCO₂が漏れた場合には工学的なガス抜きが可能) ■ 漏洩地点上流部での圧力増加による水理バリアの構築 ■ 化学密封剤 ■ 圧入中止 |
| 大気への大規模放散 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 建物内や閉鎖空間での濃度希釈のための大型ファンの設置 ■ 通常は換気の改善で十分 ■ 化学密封剤 ■ 圧入中止 |

出典：下田昭郎、窪田ひろみ、横山隆壽：CCS 普及障壁に係る不確実性の事例調査、電中研調査報：V10012、2011/4

2.2 技術的課題の検討

2.2.1 MBの発生法、管理法における課題

1) マイクロバブルの発生法

マイクロバブルの発生法について、平成 22 年度報告書では、主に 3 つの方法について述べた。CMS を対象にした課題を含めてまとめると表 2.2-1 のようである。

表 2.2-1 マイクロバブルの発生機構と課題

| 発生機構 | 概要 | 課題 |
|------------------|--|--|
| 加圧溶解法 (過飽和析出) | 冷却、加圧などにより定常状態よりも気体の溶解度を上げておき、定常状態に戻すことで過飽和状態にし、乱流などの刺激を与えることにより、溶存気体が析出し、気泡核が気泡に成長する現象である。さらに圧壊が引き続いて起こる場合がある。 | ボーリング孔内でシステムを組むことは難しく、先端まで発生させたマイクロバブルを輸送する必要がある。地上で CO ₂ 溶解水を作成して注入する方法においては選択肢に入る。バブル密度は最も高い。 |
| せん断法 (乱流) | ガスと水が共存する状態を乱流にして、ガスを千切るようにして気泡として分離する。超音波による微小乱流を起こせば、非常に小さいマイクロバブルを作ることにも可能。乱流を作る方法として、ベンチュリー管や旋回流を起こす方法などがある。 | 深部で発生させるには 3 者の中で最適である。流量があればガスは自然吸引の可能性があり経済的か。ただし、ガスをせん断するため流量を十分確保する必要があり、CO ₂ 溶解量の制御については検討課題となる。 |
| 微細孔による | ガラス、金属、セラミックなどの微粒子を弱く結合したポーラスフィルター、ガラス管や空洞繊維などにガスで加圧する。流れで出口の気泡を切る場合もある。 | 微細孔の抵抗で流量を確保することが難しい。ガス圧の調整により発生および CO ₂ の溶解量を制御できるので、過飽和させないガス圧の調整など実験室向き。 |

その他に、上山ら¹⁾は次の機構がある(表 2.2-2)としているが、CO₂ 溶解に用いることは不適である。南川ら²⁾は論文の中で、「深いところにマイクロバブルを注入するには、散気管では水圧上昇のために困難であり、水圧に影響されないように底部まで配管し、そこからマイクロバブル水を放出するベンチュリー管方式が有利である」としている。

問題は、表 2.2-1 に示したように、乱流を発生させるために流量が必要であり、マイクロバブルとして地中への浸入をなるべく少なくするためには発生量と溶解量のバラ

ンスを取るように制御することが大きな課題である。バブルの浸入を少なくする意味は、小さな間隙でバブルがトラップされ抵抗を増加させる可能性があること、高圧下ではバブルの結合が起こる可能性があり、マイクロバブルよりも浮力が生じる危険があり、キャップロックが必要条件となるからである。

表 2.2-2 その他のマイクロバブル発生機構

| 発生機構 | 概要 |
|------|--|
| 固体包埋 | ガラストークや氷中に封入されたマイクロバブルが、固体が水中で溶けることにより放出される。 |
| 電解 | 電極上に微細な凹凸などを設け、水中で電気分解を行う。負極側で水素が発生するとき、一部の水素がマイクロバブルになる。 |
| 化学反応 | 化学薬品を投入し、化合反応により生成物質を微細気泡として発生させる方法 |
| 縮小 | 基本的に、大きな気泡を、加圧、冷却、反応、溶解などの物理化学的手段でそのまま小さくするもの。 |
| 圧壊 | 超音波、衝撃波などで急激な圧力変動を与えて、気泡を一旦膨張させた後加圧し崩壊させる。10 μm 以下の気泡ができるが、再度合体して通常の気泡に戻る。 |

マイクロバブルの発生と溶解量を制御するには、溶解速度について検討しなければならない。次に溶解速度について簡単な実験を踏まえて考察する。

2) マイクロバブルによる CO₂ の溶解速度

溶解速度を検討する前に、平成 22 年度報告書で述べた CO₂ の溶解について簡単にまとめておく。

二酸化炭素 (CO₂) が水に溶けると、水と反応し水中で溶存二酸化炭素 (CO_{2, aq}) と炭酸イオン (CO₃²⁻)、炭酸水素イオン (HCO₃⁻) という異なる 3 つの化学種として存在する (厳密には炭酸-H₂CO₃ という形でも存在するが、存在量が少ないので無視する)。これらを炭酸化学種と呼び、以下の反応が起こる。

大気中の二酸化炭素と溶存二酸化炭素の間の平衡：



溶存二酸化炭素から炭酸水素イオンの生成：



炭酸水素イオンの電離平衡：



式 2.1-1 から 2.1-3 の化学平衡定数 (K_i) は次のように書ける。

$$K_H = [\text{CO}_2 (\text{aq})] / P_{\text{CO}_2} \quad (2.1-4)$$

$$K_1 = [\text{HCO}_3^-] [\text{H}^+] / [\text{CO}_2 (\text{aq})] \quad (2.1-5 ; \text{水のモル濃度は無視する})$$

$$K_2 = [\text{CO}_3^{2-}] [\text{H}^+] / [\text{HCO}_3^-] \quad (2.1-6)$$

水温 25°C の時、 $K_H = 0.03405$ ($10^{-1.468}$)、 $K_1 = 4.448 \times 10^{-7}$ ($10^{-6.352}$)、 $K_2 = 4.690 \times 10^{-11}$ ($10^{-10.329}$) である。

式 2.1-4 と 2.1-5 を変形すると、溶存二酸化炭素、炭酸水素イオン、炭酸イオンの濃度は全て二酸化炭素分圧と水素イオン濃度の関数として表わされる。

$$[\text{CO}_2(\text{aq})] = K_H \text{PCO}_2 \quad (2.1-7)$$

$$[\text{HCO}_3^-] = K_H K_1 (\text{PCO}_2 / a\text{H}^+) \quad (2.1-8)$$

$$[\text{CO}_3^{2-}] = K_H K_1 K_2 (\text{PCO}_2 / (a\text{H}^+)^2) \quad (2.1-9)$$

なお、水素イオン濃度と pH の関係は、

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] \quad (2.1-10)$$

である。従って、式 2.1-8 と 2.1-9 は、

$$[\text{HCO}_3^-] = K_H K_1 \text{PCO}_2 10^{\text{pH}} \quad (2.1-11)$$

$$[\text{CO}_3^{2-}] = K_H K_1 K_2 \text{PCO}_2 10^{2\text{pH}} \quad (2.1-12)$$

とも書ける。つまり、 PCO_2 が一定であれば、 $[\text{CO}_2(\text{aq})]$ も一定であるが、 $[\text{HCO}_3^-]$ と $[\text{CO}_3^{2-}]$ は、pH とともに増加する。

溶存二酸化炭素、炭酸水素イオン、炭酸イオンの濃度を合計したものは全炭酸 (ΣCO_2) と呼ばれる。

$$\Sigma \text{CO}_2 = [\text{CO}_2(\text{aq})] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{H}_2\text{CO}_3] \quad (2.1-13)$$

二酸化炭素の溶解度は、溶解する地下水の成分、温度、圧力に依存することは平成 22 年度報告書に示した。これらは化学計算ソフト **phreeqc**³⁾ を用いて任意の成分、温度、圧力について計算でき、地温勾配と水圧を考慮して純水および海水について計算すると図 2.2-1 のようになる。

理論計算では、深度 2,000m (20MPa) まで濃度は増加傾向となるが、図 2.2-2 に示したように小出らの実験結果⁴⁾では、600m (6 MPa) 程度で頭打ちとなる。しかし、理論計算は 600m まではよく一致しており、CMS が対象とする深度 (-300m ~ -500m 程度) においては、サイトでの溶解度の予測においてこの計算が適用可能であることが示された。

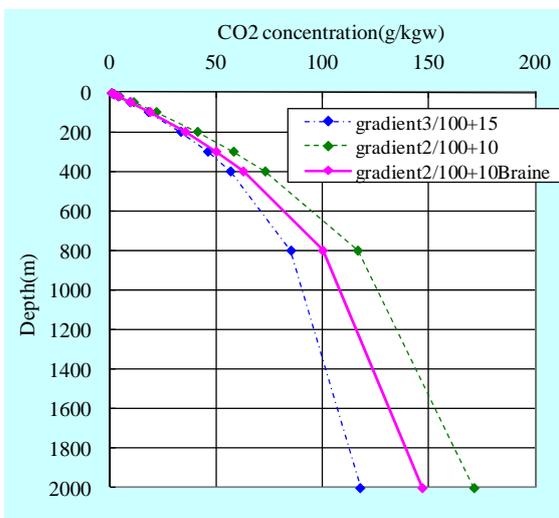


図 2.2-1 phreeqc 計算例

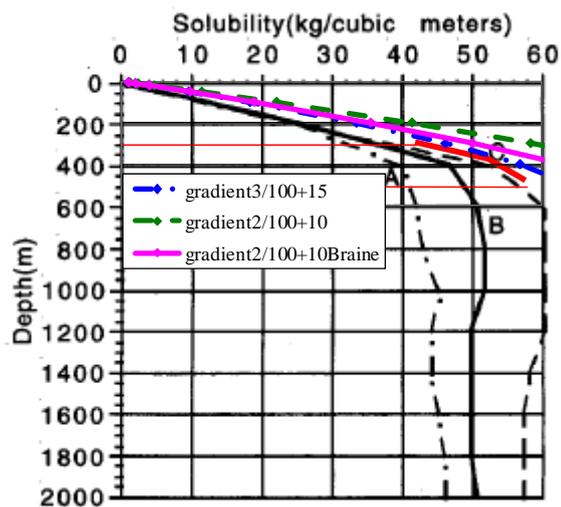


図 2.2-2 左計算結果と実験結果の比較

次に、溶解する速度を考える。気体を溶解する手段としてマイクロバブルが使われることが多い。溶解は、気体側から液体側に気液界面を気体が通過する現象である。これは二重境膜説で簡略にモデル化されることが多い。青木ら⁵⁾によると気体の大気から水中へ二酸化炭素が溶解するとき、気相と液相の境界に薄い境膜が形成され、この境膜が物質移動の抵抗となる。水への溶解度の低い気体の場合、液境膜での拡散速度が律速となる。ここで、液境膜拡散による反応速度は、大気と平衡状態にある H_2CO_3 濃度を C_s とおき、水中の H_2CO_3 濃度である C との差の一次反応で表現できる。すなわち、

$$dC/dt = \left(D_{\text{CO}_2} / \delta \right) (A/V) (C_s - C) \quad (2.1-14)$$

ここで、 K ：速度係数。理論的には、 K は以下の式で表現される。

$$K = \left(D_{\text{CO}_2} / \delta \right) (A/V) \quad (2.1-15)$$

ここで、

D_{CO_2} ：液境膜拡散係数 ($1.97 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$) であり、Donaldson and Nguyen(1980) が提案した値で一般的にデータベースとして用いられているものである。

δ ：液境膜厚さ（攪伴等の影響のない静置状態では $40 \mu\text{m}$ ）

A ：気液接触面積

V ：水の体積

式(2.1-14)を $t=0$ のとき $C=C_0$ 、 $t=t$ のとき $C=C$ として解くと、

$$C = C_s - (C_s - C_0) \exp(-Kt) \quad (2.1-16)$$

この式は、時間の経過にともなう H_2CO_3 濃度の変化を示している。

この関係から、マイクロバブルによる溶解速度を計算する。マイクロバブルの効果は、気液接触面積に置き換えられ、マイクロバブルの径を $100 \mu\text{m}$ で一様分布と仮定すると、結局、1 ml 当たりの発生個数、すなわちバブル密度に依存する。これをパラメータとし、液境膜拡散係数、液境膜厚は上記の値を採用して計算する。

1 ml 当たり 1,000 個と 100 個のマイクロバブルが発生する場合、 A/V (表面積/1 ml) はそれぞれ、0.03 と 0.003 となる。 $A/V=0.05$ も含めて (2.1-16) 式をプロットすると 図 2.2-3 のようになる。

宮澤ら⁶⁾のデータから、溶解実験の結果は 図 2.2-4 のようである。大気圧中での CO_2 の溶解度は約 1.7g/L であるから、 図 2.2-4 の上のプロットであるマイクロバブル ($50 \mu\text{m}$ 以下) 注入では 100 分で飽和し、その濃度は大気圧の CO_2 溶解度とほぼ一致する。しかし、バブリング法 (数 mm~30mm) では、250 分では定常にならない。マイクロバブルとミリバブルでは、溶解量および溶解速度において顕著な差が生じ、マイクロバブルによる注入では非常に効率的な溶解が可能であることが示された。

CO_2 溶解水の通水を止めた後の低下は、大気接触により、 CO_2 分圧が大気と同じ (約 370ppm) になるまでの低下過程と思われる。

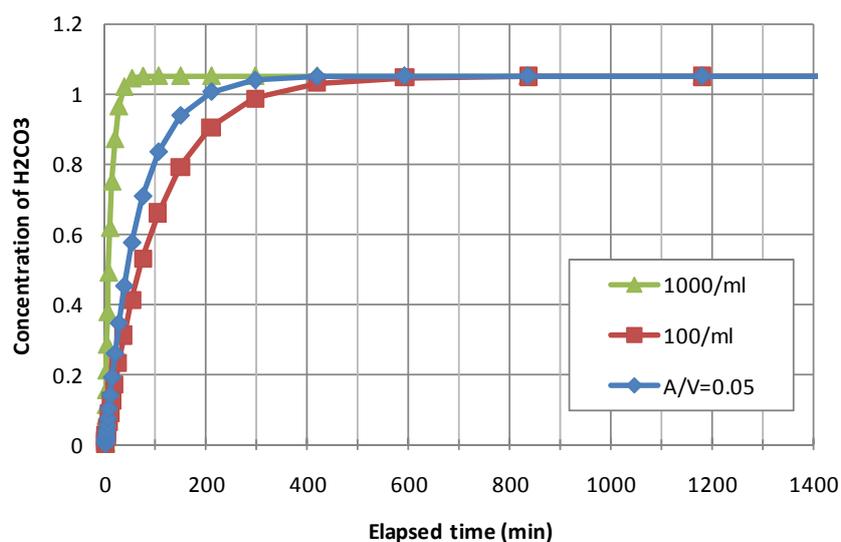


図 2.2-3 溶解速度式 2.1-16 の計算結果

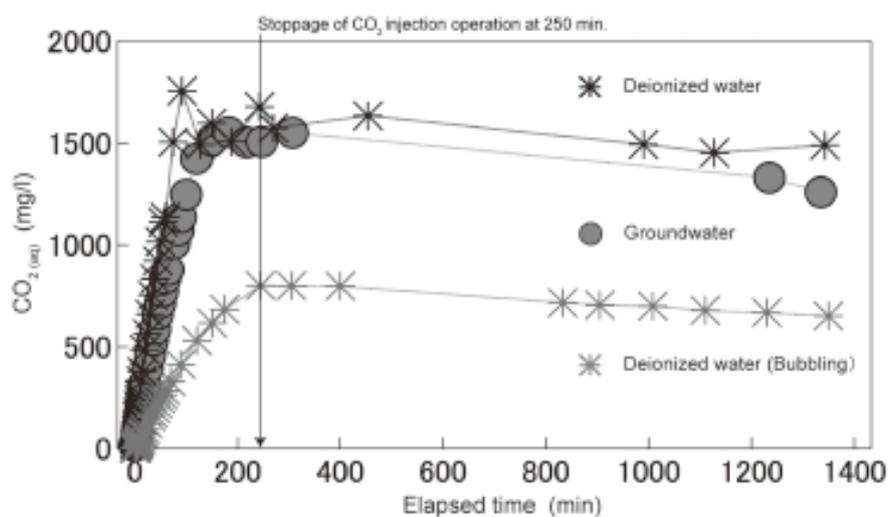


図 2.2-4 宮澤ら⁶⁾の溶解実験結果

出典：宮澤大輔、井岡聖一郎、木山 保、高橋正好、石島洋三：CO₂MB 注入法に関する基礎的研究—CO₂MB 注入法による CO₂ 溶解の特徴—, Journal of MMIJ Vol.127, p.189-193(2011)

大気圧下における溶解速度については、マイクロバブル発生数は 100~1,000 個/ml 程度の範囲にあり、溶解時間は 100 分程度である。簡単な追試により溶解時間は同程度の時間であることを確認した。

ここで、2つの問題が浮かび上がる。第1点は、飽和となるまで 100 分ではマイクロバブルが岩盤内に入り、岩盤中の空隙にトラップされ流動阻害となる。すなわち透水性

を低下させる可能性がある。また、流動障害は、岩盤の間隙率に依存する可能性がある。従って、できるだけ早く飽和溶解に近づける必要がある。第2点は、圧力下において式 2.1-16 が成立するかどうかである。

以上より、今後の溶解特性把握には、マイクロバブルの発生を圧力下で行い、マイクロバブルによる CO₂ 飽和溶液作成までの時間の検証、ミリバブルが圧力下でマイクロバブルとなった場合にどこまで溶解させることができるかの検証が必要である。

マイクロバブルの寿命は数分から数 10 分程度とされているが、間隙構造にトラップされたバブルが数分後に消滅するか、消滅するなら流動障害挙動が現れるのは何故か、などの問題を解決していかなければならない。

2.2.2 注入方法

注入深度の想定をするための一つの条件としては、注入深度での圧力が貯留層に与える影響を調べねならない。そのため、ここでは単純な貯留層、キャップロックの組み合わせのモデルを考え、貯留層の異方性の影響、貯留深度の影響、貯留圧力の影響を水圧分布から考察した。

1) モデル基本条件

モデルは図 2.2.2-1 に示す 3 次元モデルであり、その条件は、表 2.2.2-1 に示すようである。

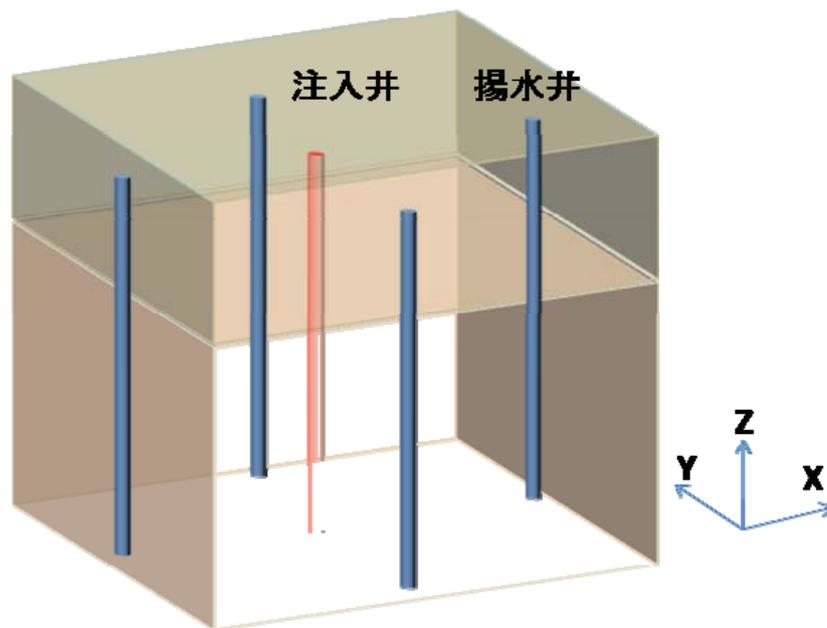


図 2.2.2-1 解析モデル

表 2.2.2-1 モデル条件

| | | |
|---------|-----------------------------------|-------------------------------|
| キャップロック | 深度 | -250m~-300m |
| | 透水係数 | $1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ |
| | 比貯留係数 | $1 \times 10^{-9} \text{m}^2$ |
| 貯留層 | 深度 | -300m~-500m |
| | 透水係数 | $1 \times 10^{-6} \text{m/s}$ |
| | 比貯留係数 | $1 \times 10^{-6} \text{m}^2$ |
| 注水井 | 注水位置：-300m と -400m、注水水頭：100m、200m | |
| 揚水井 | 全体で揚水、揚水による水位低下 10m として圧力一定境界 | |

解析ケースは、表 2.2.2-2 のとおりとした。ケース 1～6 では、透水性について、ケース 1 と 4 は水平面内等方とし、鉛直方向は水平方向の 1/10 とした。ケース 2 と 5 は水平面内に異方性を設定し、Y 方向と Z 方向は等方である。ケース 3 と 6 では水平面内をケース 1 と 4 と同様とし、鉛直方向を水平方向の 1/100 としたものである。注入深度と注水圧は表 2.2.2-2 に示すとおりである。また、ケース 0、00、および 000 は、透水性について 3 方向とも等方性の地盤であり、注入深度および注入圧が表 2.2.2-2 に示すようにそれぞれ異なる。

表 2.2.2-2 解析条件一覧表

| 解析条件 | 深度 (m) | 注水圧 (MPa) | 透水係数(m/s) | | |
|--------|--------|-----------|-----------|----------|----------|
| | | | X | Y | Z |
| ケース0 | -300 | 1 | 1.00E-06 | 1.00E-06 | 1.00E-06 |
| ケース000 | -300 | 2 | 1.00E-06 | 1.00E-06 | 1.00E-06 |
| ケース1 | -300 | 1 | 1.00E-06 | 1.00E-06 | 1.00E-07 |
| ケース2 | -300 | 1 | 1.00E-06 | 1.00E-07 | 1.00E-07 |
| ケース3 | -300 | 1 | 1.00E-06 | 1.00E-06 | 1.00E-08 |
| ケース00 | -400 | 1 | 1.00E-06 | 1.00E-06 | 1.00E-06 |
| ケース4 | -400 | 1 | 1.00E-06 | 1.00E-06 | 1.00E-07 |
| ケース5 | -400 | 1 | 1.00E-06 | 1.00E-07 | 1.00E-07 |
| ケース6 | -400 | 1 | 1.00E-06 | 1.00E-06 | 1.00E-08 |

XY；水平方向

Z；鉛直方向（深度方向）

2) 注入時からの定常時間

非定常解析により、注入圧力 1 MPa での注入を開始してから定常になるまでの時間を求めた。結果を図 2.2.2-2 に示す。圧力伝播は 7 日程度で定常となった。

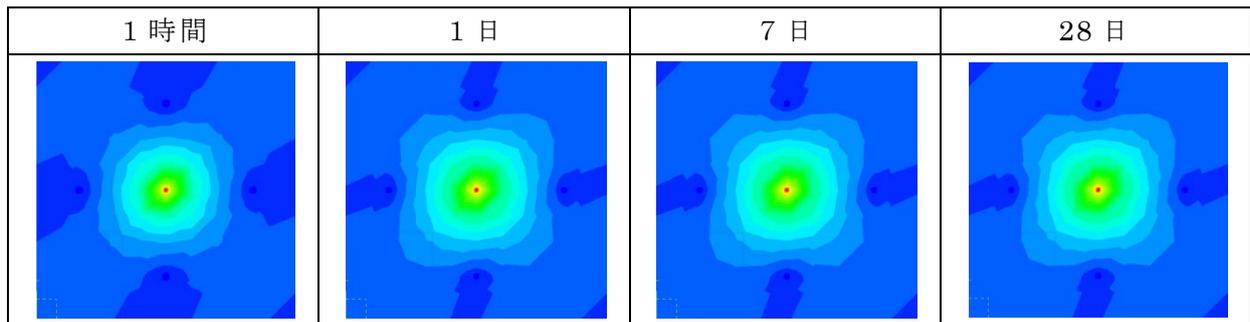
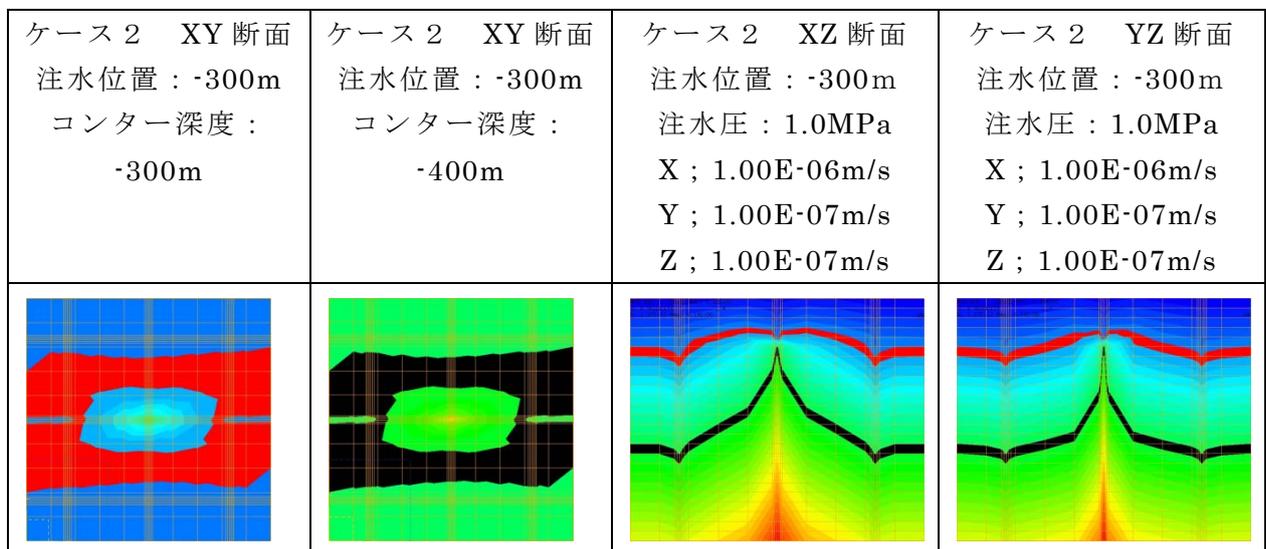


図 2.2.2-2 -300m における圧力伝播

3) 異方性における圧力伝播 (28 日後参照)

水平面内異方透水地盤における定常時圧力状況を図 2.2.2-3 に示す。赤で示したラインは全水頭-300m から-310m の範囲である。黒で示したラインは、全水頭-400m から-410m の範囲である。全水頭分布で、-300m の位置に 1 MPa の注入圧で注入した場合 (ケース 2) の結果である。左から XY 断面 (水平断面) -300m での全水頭分布、-400m での全水頭分布、XZ 断面 (鉛直断面、透水係数 10^{-6}m/s)、YZ 断面 (鉛直断面、透水係数 10^{-7}m/s) である。水平面内に透水性の異方性がある場合、当然、透水係数が小さい Y 方向では圧力分布範囲が狭くなり、この圧力下で CO_2 が溶解得る範囲が狭くなることを示している。さらに赤の範囲の内側では、注入圧相当の過剰間隙水圧がキャップロックに作用することになり、キャップロックと貯留層の境界 (-300m) 直下から注入するとキャップロックの強度が小さい場合には、その強度を考慮しなければならないことを意味する。



黒が水頭 400m (両端上端深度-400m)、赤が水頭 300m のライン (両端上端深度-300m)

図 2.2.2-3 ケース 2 における全水頭分布

同様に図 2.2.2-4 がケース 5 の全水頭分布であり、-400m 位置において 1 MPa で注入した場合である。-400m の注入位置付近では異方性の影響を受けるが、-300m 位置で

はほとんど影響を受けないことに注目される。すなわち、所定の深度で溶解し得る CO₂ を効率的に貯留するには、貯留層上部からではなく、ある程度下部から注入の方が貯留層を効率的に使用できることになる。

| | | | |
|---|---|--|--|
| ケース 5 XY 断面 注水位置：-400m コンター深度： -300m | ケース 5 XY 断面 注水位置：-400m コンター深度： -400m | ケース 5 XZ 断面 注水位置：-400m 注水圧：1.0MPa X；1.00E-06m/s Y；1.00E-07m/s Z；1.00E-07m/s | ケース 5 YZ 断面 注水位置：-400m 注水圧：1.0MPa X；1.00E-06m/s Y；1.00E-07m/s Z；1.00E-07m/s |
| | | | |

黒が水頭 400m（両端上端深度-400m）、赤が水頭 300m のライン（両端上端深度-300m）

図 2. 2. 2-4 ケース 5 における全水頭分布

ケース 2 とケース 5 の-300m のキャップロックに作用するであろう水圧分布を図 2. 2. 2-5 と図 2. 2. 2-6 にそれぞれ示す。キャップロックが有る場合、その直下で注入すると注入圧がそのまま過剰間隙水圧として作用するが、下部で注入した場合には、圧力は、ほぼ影響がない程度まで減少することがわかる。

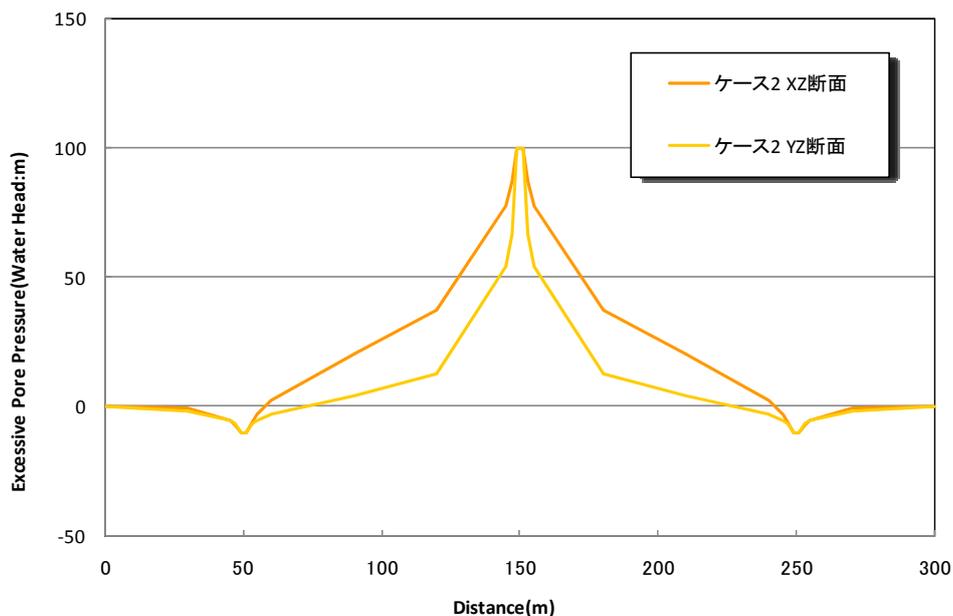


図 2. 2. 2-5 ケース 2 における-300m での過剰間隙水圧分布

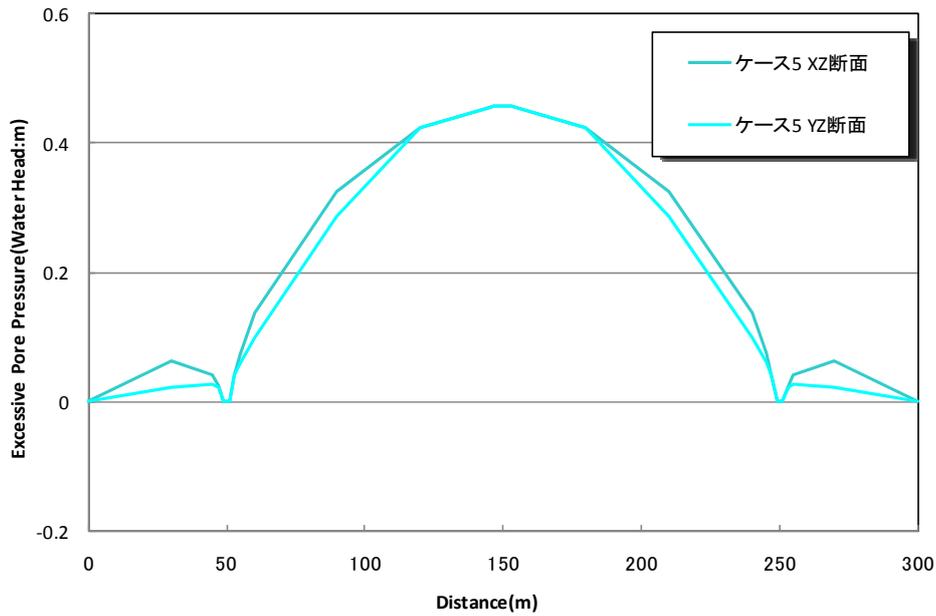
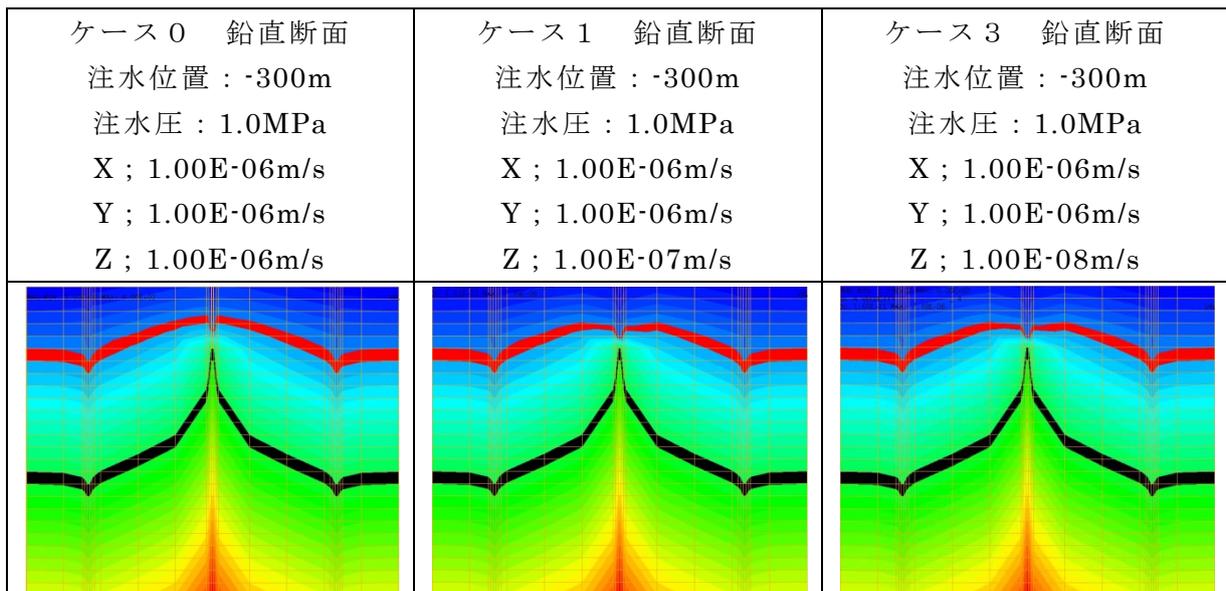


図 2. 2. 2-6 ケース 5 における-300m での過剰間隙水圧分布

図 2. 2. 2-7 では、同じ深度-300m で 1 MPa の注入圧で注入した場合の鉛直方向の透水係数の大きさによる違いを示した。ケース 0 が水平方向と同じ透水係数、ケース 1 が 1/10、ケース 3 が 1/100 である。3 者の圧力分布はほとんど同じで、圧力分布が鉛直方向の透水係数の大きさに影響されないことを示している。図 2. 2. 2-8 は、これらのケースの間隙水圧（圧力水頭）を示したもので、キャップロックに作用するであろう水圧を示している。3 ケースともほぼ同じ水圧となっている。



黒が水頭 400m（両端上端深度-400m）、赤が水頭 300m のライン（両端上端深度-300m）

図 2. 2. 2-7 鉛直方向透水係数の違いによる全水頭分布

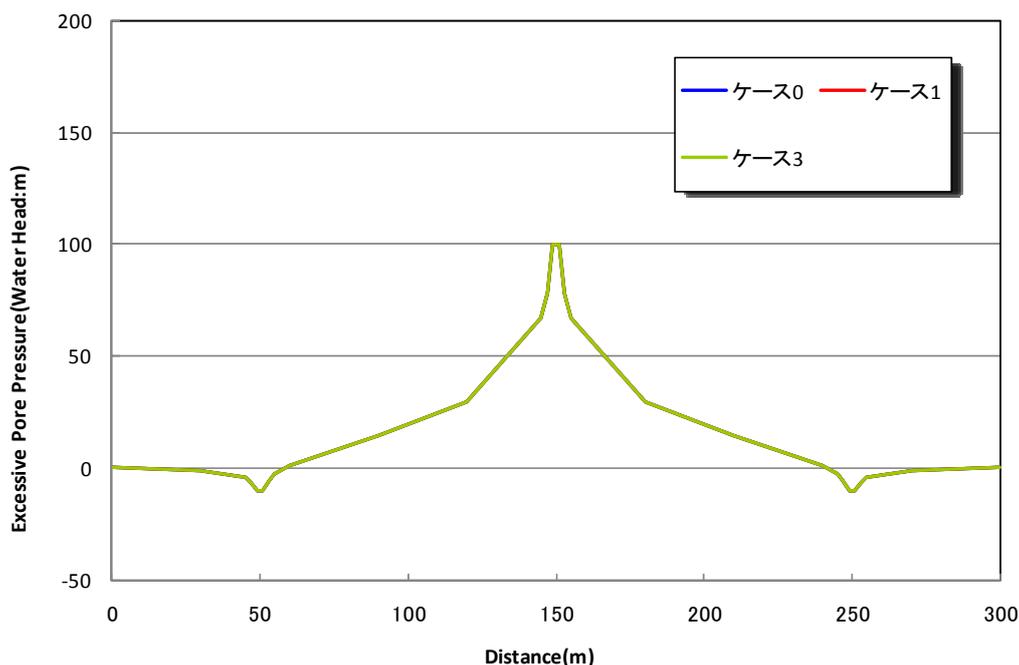
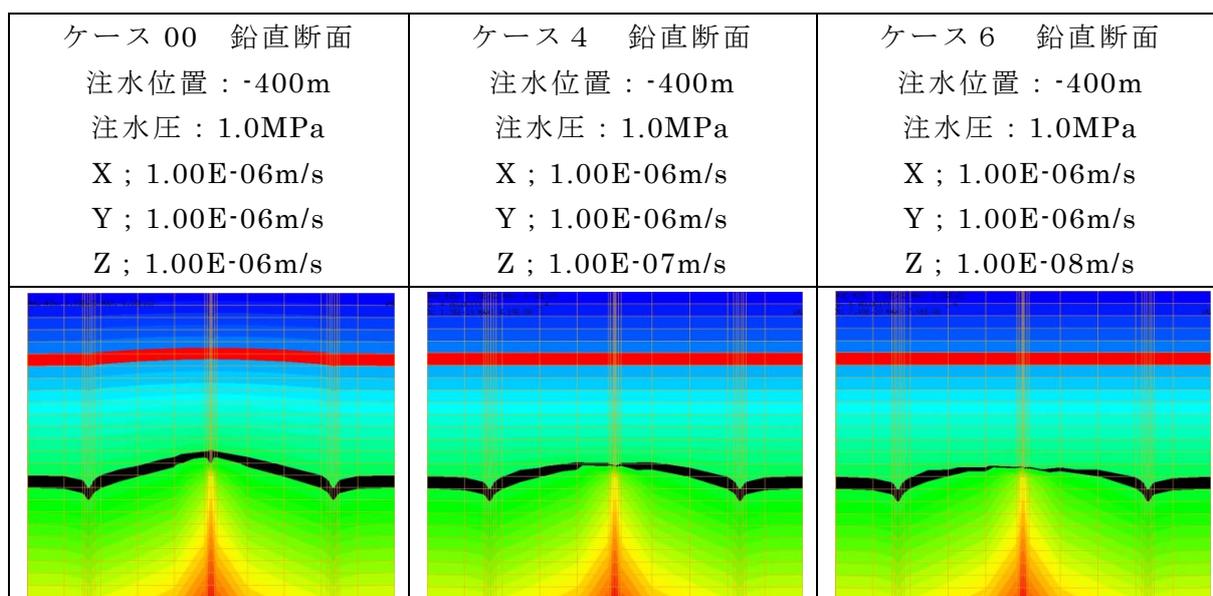


図 2.2.2-8 鉛直方向透水係数の違いによる-300mでの過剰間隙水圧分布

図 2.2.2-9 は-400m で注入した場合の水平方向と鉛直方向の透水性に異方性がある場合の影響を全水頭分布で示したものである。また図 2.2.2-10 は-300m のキャップロックに作用する過剰間隙水圧を抽出したものである。鉛直方向の透水係数が水平方向のそれより小さくなると等方状態に比べてほとんど影響が出ないことがわかる。



黒が水頭 400m (両端上端深度-400m)、赤が水頭 300m のライン (両端上端深度-300m)

図 2.2.2-9 -400m 注入時の水平方向と鉛直方向の異方性の影響

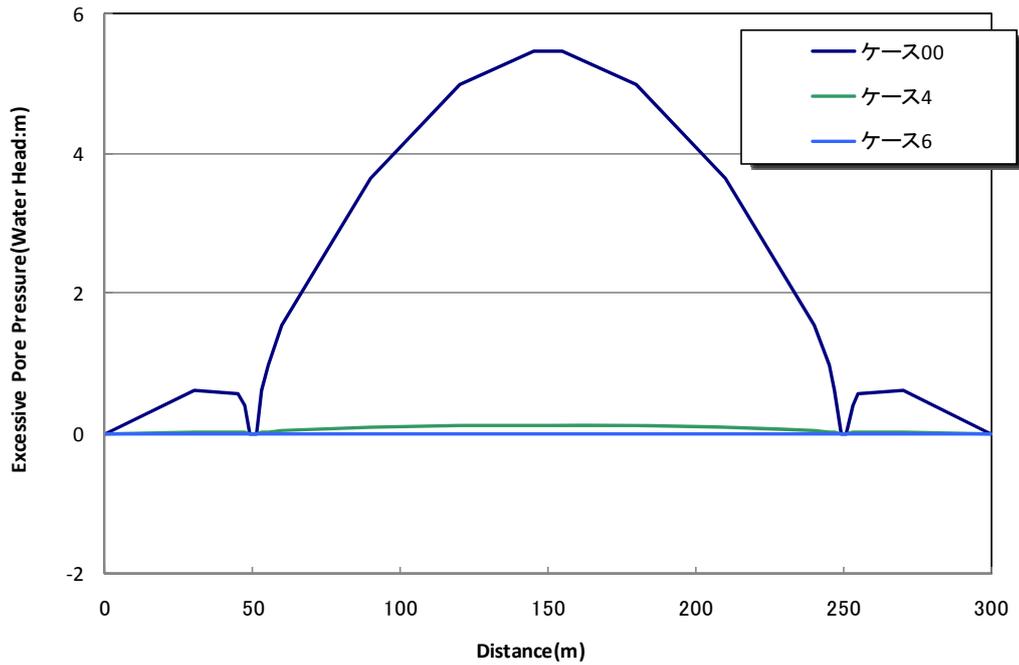
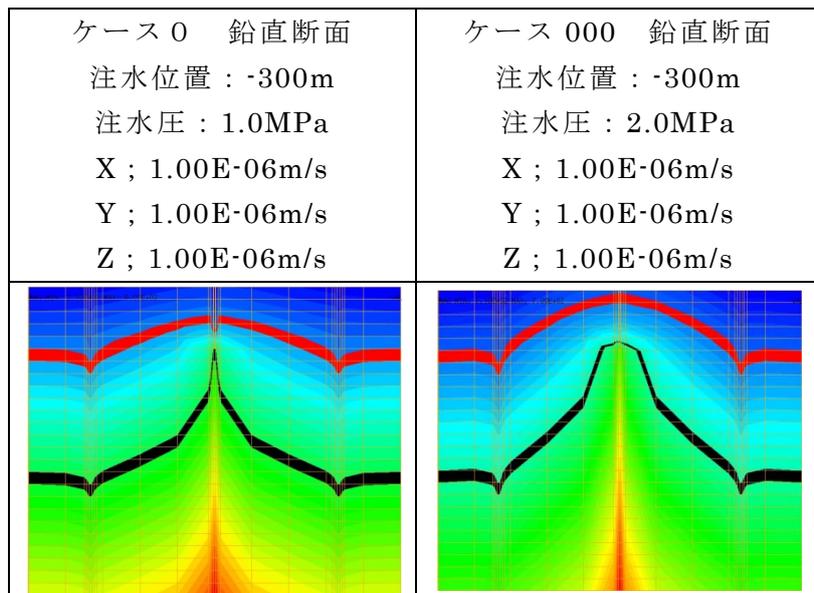


図 2.2.2-10 -300m での過剰間隙水圧分布

注入圧の影響を図 2.2.2-11 に示す。キャップロック直下での注入では、注入井周辺に注入圧相当の圧力が作用することがわかる。



黒が水頭 400m (両端上端深度-400m)、赤が水頭 300m のライン (両端上端深度-300m)

図 2.2.2-11 注入圧力の影響

各ケースにおける注水量、および揚水量を表 2.2.2-3 に示す。解析では、ケース 0 で注入量と揚水量のバランスを取るように入水井および揚水井を全水頭固定としているため、バランスは崩れる。ケース 2 とケース 5 が水平面内異方性が存在するケースである。他は X 方向揚水井と Y 方向揚水井で同量の揚水量であるが、ケース 2 とケース 5 では、揚水量が異なり、当然注水量も等方の場合と異なる。したがって、透水性の異方性が水平方向に存在する場合には、注水・揚水の制御が課題となることがわかる。

表 2.2.2-3 各ケースの注水量および揚水量

| ケース名 | 注水量 ($\text{リットル}/\text{min}$) | 揚水量 ($\text{リットル}/\text{min}$) | | |
|--------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------|
| | | X ₁ ,X ₂ | Y ₁ ,Y ₂ | 計 |
| ケース0 | -1802 | 703 | 703 | 1405 |
| ケース000 | -3533 | 1057 | 1057 | 2114 |
| ケース1 | -1802 | 703 | 703 | 1405 |
| ケース2 | -653 | 343 | 135 | 478 |
| ケース3 | -1802 | 703 | 703 | 1405 |
| ケース00 | -1037 | 345 | 345 | 690 |
| ケース4 | -959 | 355 | 355 | 709 |
| ケース5 | -353 | 171 | 72 | 244 |
| ケース6 | -935 | 360 | 360 | 720 |

*孔井名は図 2.2.2-12 を参照

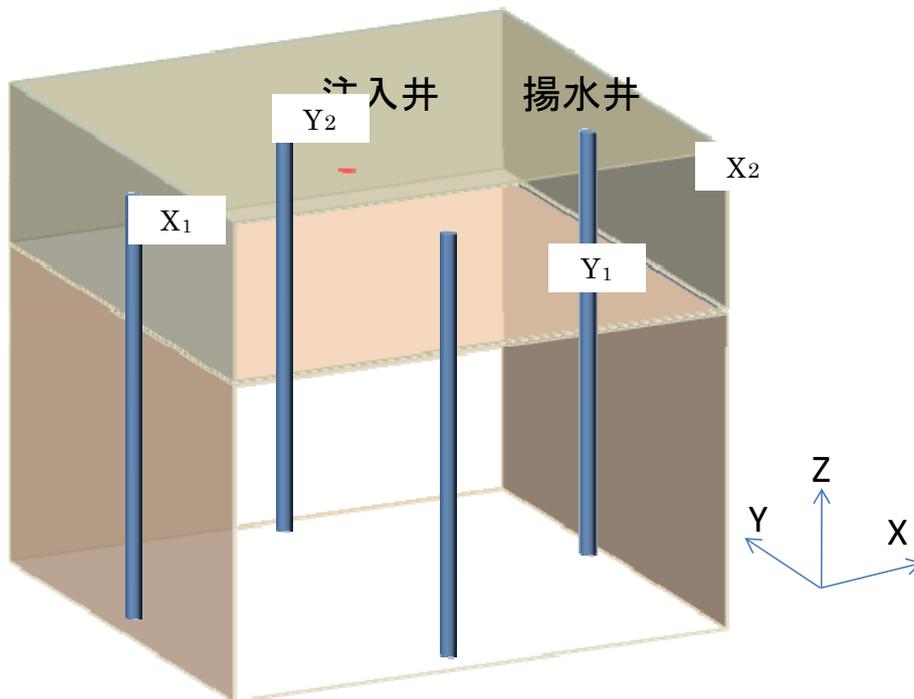


図 2.2.2-12 表 2.2.2-3 に対応する孔井名

以上のように、注入深度を変えた場合の全水頭分布を等方性地盤と異方性地盤において解析的に検討した結果、次のような課題が示された。

- ・キャップロックがある場合では、キャップロックより下部で注入すればキャップロ

ックへの過剰間隙水圧の影響は低減され、上部での圧力分布の異方性も緩和されるため効率的である。

- ・ 水平方向に異方性がある場合、同一水位まで揚水するには方向により揚水量が異なるため、水位での制御では、貯留範囲も限られ、揚水量と注水量もバランスしない。そのため、注水井・揚水井併用方式で制御するには、透水係数の異方性を考慮した制御が必要である。

2.2.3 キャップロックの力学的安定

CMS システムは、貯留層上部にキャップロックがなくとも成立するが、ここまではキャップロックがある場合のモデルを用いて解析によるパラメータステディを実施した。キャップロックが存在する場合でもキャップロックよりある程度離れた下部において、低圧にて圧入すればキャップロックには過剰間隙水圧として大きな圧力が負荷されないことを前款で示した。

次に、同様の解析をキャップロックがある場合とない場合について実施し、過剰間隙水圧分布を調べた。結果を図 2.2.3-1 および図 2.2.3-2 に示した。深度 300m で 1 MPa の注水圧で注入した場合には、過剰間隙水圧は注入井から離れるに従い、すぐに低下した。また深度 400m で注入した場合には、過剰間隙水圧はキャップロックがある場合より小さく、水頭で 4 m (40Pa) 程度であった。

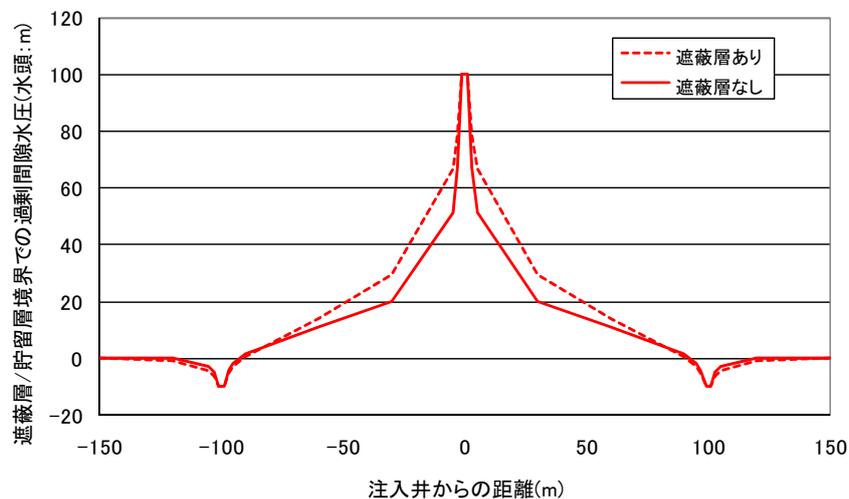


図 2.2.3-1 -300m で注入した場合のキャップロックの影響

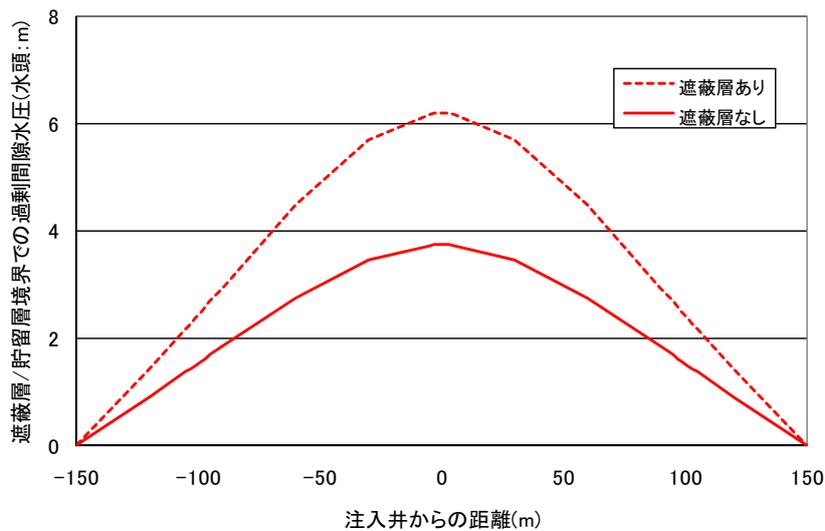


図 2.2.3-2 -400m で注入した場合のキャップロックの影響

3章で述べる今年度モデル地点の島尻層の泥岩および砂岩の強度定数(表 3.1.5-1 参照)から、対象深度の拘束圧を被りの 1/2 として計算すると表 2.2.3-1 のようである。ただし、砂岩/泥岩とも湿潤密度を 2.1g/cm^3 とした。

表 2.2.3-1 島尻層の泥岩/砂岩の強度

| 深度(-m) | 泥岩 | 砂岩 |
|--------|------------|------------|
| | せん断強さ(MPa) | せん断強さ(MPa) |
| 100 | 1.0~1.9 | 0.8~1.7 |
| 200 | 1.5~2.5 | 1.3~2.1 |
| 300 | 2.1~3.2 | 1.7~2.6 |
| 400 | 2.6~3.8 | 2.1~3.1 |

貯留層の深度を-300mからとすると、貯槽内でのせん断強さは $1.7\sim 2.6\text{MPa}$ となり、強度の安全率を 1.2 とすれば、 1.4MPa 程度までの注入圧となる。キャップロックである泥岩については、引張強さを考えると貯留層での条件を満たせばせん断破壊は生じないが、引張応力が働くことを考えるとキャップロック/貯留層境界では $0.16\sim 0.42\text{MPa}$ (一軸圧縮強さの約 1/6、C の 1/3) となり、上述のように過剰間隙水圧が生じないよう境界から下でケーシングをしておく必要があるかも知れない。

2.2.4 地中挙動

1) CO_2 溶解水の挙動

一般的な溶解 CO_2 の挙動として、理論解析上、キャップロックがある場合には気体状態で深度 400m に注入すると、溶解が主体となり比重差により貯留層下部に滞留する。この場合の例と深度は異なるが超臨界貯留の例を示す。

図 2.2.4-1 に CO_2 溶解水の解析例を示す。詳細は 2.2.5 款の解析例で述べるが、図 2.2.4-2 に示す超臨界状態の貯留状況が、キャップロックに沿ってガスが分布しているのと比較して、図 2.2.4-1 では、上方への広がりが少ないことがわかる。

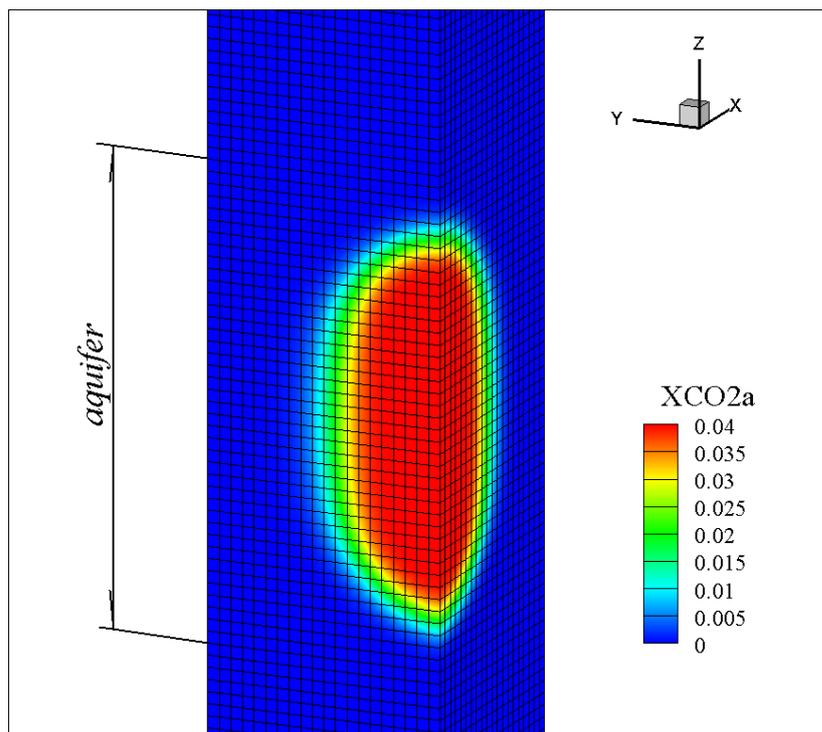


図 2.2.4-1 1年後のCO₂濃度割合の分布

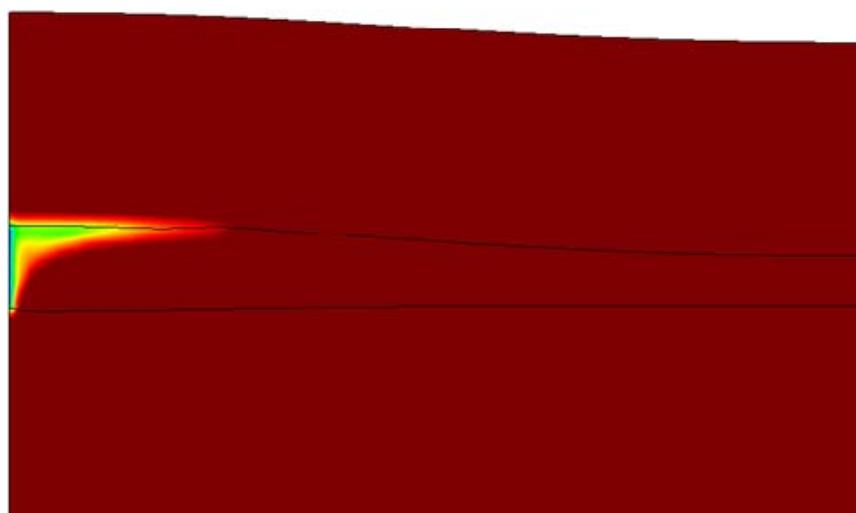


図 2.2.4-2 超臨界CO₂注入の場合(200日後の飽和度の分布)

2) CO₂溶解水のモニタリング法

モニタリングに関しては、IEAのホームページ (<http://www.ieaghg.org/>) の上部タブの CCS resources をクリックすると Interactive Design of Monitoring Programmes for the Geological Storage of CO₂ が出てくる。ここに、Monitoring Selection Tool があり、

CCS の実施に際して用いられるモニタリング手法、全 40 手法からそれぞれの条件の入力により適切な項目が抽出されるようになっている。

このツールのコントロールパネルは図 2.2.4-3 のようであり、上から貯留位置（陸上、沖合、両方の 3 種類から選択）、貯留深度、貯留層タイプ、注入量、周辺の土地利用状況、モニタリング段階、目的などがそれぞれ選択、入力できるようになっている。

下部の”Tool catalogue”には 40 種の手法があり、チェックした項目に対して”Run”をクリックし実行すると、40 種の手法の内、何が適切かが出力される。

図 2.2.4-3 のような選択、入力を行い、実行すると表 2.2.4-2 のような CSV ファイルにて保存することが可能である。

表 2.2.4-2 実行結果の CSV ファイル

| Tool | Rating % | Plume | Migration | Leakages | Seismicity |
|---------------------------------|----------|-------|-----------|----------|------------|
| 3D surface seismic | 56 | 4 | 4 | 1 | 0 |
| Downhole fluid chemistry | 38 | 1 | 2 | 3 | 0 |
| 2D surface seismic | 31 | 2 | 2 | 1 | 0 |
| Downhole pressure/temperature | 25 | 1 | 1 | 0 | 2 |
| Soil gas concentrations | 21 | 0 | 0.7 | 2.7 | 0 |
| Geophysical logs | 19 | 1 | 2 | 0 | 0 |
| Non dispersive IR gas analysers | 17 | 0 | 0.7 | 2 | 0 |

hide Control panel help

Scenario
New Scenario

| Reservoir location | | |
|--------------------|----------|------|
| Onshore | Offshore | Both |
| ✓ | ✗ | ✗ |

| Reservoir depth [m] | | | |
|---------------------|-----------|-----------|-------|
| 500-1500 | 1500-2500 | 2500-4000 | >4000 |
| ✓ | ✗ | ✗ | ✗ |

| Reservoir type | | | |
|----------------|-----|-----|------|
| Aquifer | Oil | Gas | Coal |
| ✓ | ✗ | ✗ | ✗ |

Quantity of injected CO₂

Injection rate [Mt/year] Duration [years]

| Landuse at proposed storage site | | | | |
|----------------------------------|--------------|--------|------|-----------|
| Populated | Agricultural | Wooded | Arid | Protected |
| ✓ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ |

| Monitoring phase | | | |
|------------------|-----------|----------------|--------------|
| Pre-injection | Injection | Post-injection | Post-closure |
| ✗ | ✓ | ✗ | ✗ |

| Monitoring aims | | | | |
|-----------------|----------|-----------|----------------|------------|
| Plume | Top-Seal | Migration | Quantification | Efficiency |
| ✓ | ✗ | ✓ | ✗ | ✗ |

| Calibration | Leakages | Seismicity | Integrity | Confidence |
|-------------|----------|------------|-----------|------------|
| ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |

| Monitoring package | | |
|--------------------|------------|-----|
| Core | Additional | All |
| ✓ | ✗ | ✗ |

Tool catalogue Run

Print-friendly page Create CSV

CO₂ Monitoring Selection Tool
Version 2.2.2, 8 October 2010

図 2.2.4-3 Monitoring Selection Tool のコントロールパネル

表 2.2.4-1 モニタリング手法一覧

| |
|---|
| 2D surface seismic |
| Airborne EM |
| Boomer/Sparker profiling |
| Bubble stream detection |
| Cross-hole ERT |
| Downhole fluid chemistry |
| Ecosystems studies |
| Electric Spontaneous Potential |
| Geophysical logs |
| High resolution acoustic imaging |
| Land EM |
| Long-term downhole pH |
| Multibeam echo sounding |
| Non dispersive IR gas analysers |
| Seabottom EM |
| Seawater chemistry |
| Single well EM |
| Surface gas flux |
| Tiltmeters |
| Vertical seismic profiling (VSP) |
| 3D surface seismic |
| Airborne spectral imaging |
| Bubble stream chemistry |
| Cross-hole EM |
| Cross-hole seismic |
| Downhole pressure/temperature |
| Eddy covariance |
| Fluid geochemistry |
| Ground penetrating radar |
| IR diode lasers |
| Land ERT |
| Microseismic monitoring |
| Multicomponent surface seismic |
| Satellite interferometry |
| Seabottom gas sampling |
| Sidescan sonar |
| Soil gas concentrations |
| Surface gravimetry |
| Tracers |
| Well gravimetry |

3) CMSでのモニタリング法

CMSでの主な課題は、溶解CO₂の移動をどのように捉えるかである。例えば、尾西ら⁷⁾および窪田⁸⁾は、砂岩に気体、液体、および超臨界状態のCO₂を圧入して比抵抗変化を調べている。この時、溶解の影響を除去するために注入圧力に相当する飽和CO₂溶解水で試料を飽和させ、置換状態で比抵抗を測定している。窪田も同様である。絶縁体であるCO₂が間隙体積を置換した場合の比抵抗の増加を調べている。しかし、CMSシステムでは、地下水をCO₂溶解水で置換することを考える。地下水中の成分によりCO₂の溶解度は異なるが、電気伝導度は僅かに増加する程度であり、その変化を比抵抗測定などの物理的手法で捉えることは難しい。

そのために、観測井を兼ねた揚水井を、注入井を囲むように4本設置することとしている。注入前の地質構造把握には、物理探査を用い、その手法もコストを考慮して2次の地震探査や比抵抗探査などとする。注入時および注入後のモニタリングの中心は、揚水井から揚水された地下水水質分析が主となるものと考えられる。

CMSでは、2)で示したような大規模な3次元反射法探査などは必要なく、揚水井を用いた検層が有効であると考えられる。従って、表2.2.4-1からCMSに有効なモニタリング手法を抽出すると図2.2.4-3のようである。

一方で、マイクロバブルによる溶解方法からは、マイクロバブル破壊時に発生し、流体中を伝わる破泡音の微小波形を観測することで移行の様子が捉えられると考えられる。この方法として、岩盤での微小振動を捉えるAEセンサーによるモニタリングと音響センサーによるモニタリングのどちらがよいかは今後の検討課題である。

マイクロバブルの破泡時の音響に関しては、図2.2.4-1に示す大気中での計測例がある。

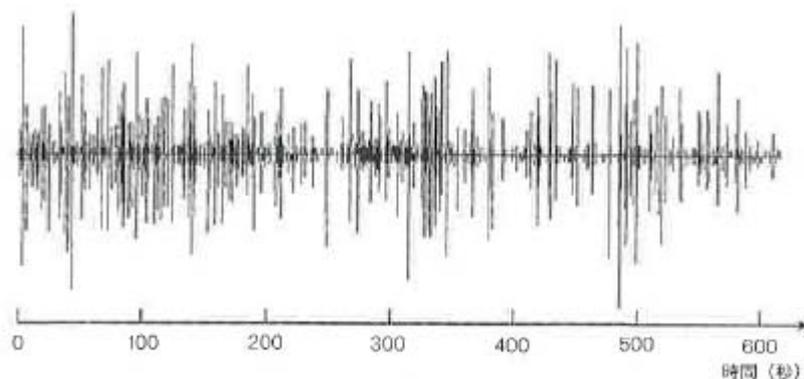


図 2.2.4-1 マイクロバブル破泡時の音響

出典：ジェラルド・リジェ・ベレール（著）、立花 峰夫（翻訳）：シャンパン 泡の科学、p111、白水社、2007

以上を考慮して、CMSでのモニタリング方法を事前調査時の地質構造モニタリングと注入中および注入後のモニタリングに分けてそれぞれ、表2.2.4-3と表2.2.4-4にまとめた。表2.2.4-3はIEA Monitoring Selection Toolより抽出したCMSに必要な探査

および調査方法である。また、表 2.2.4-4 は IPCC のガイドライン 2006¹⁰⁾ における漏洩検知技術の抜粋である。

表 2.2.4-3 事前調査における探査手法一覧

| モニタリング 手 法 | 概 要 |
|----------------------------|---|
| 2D 地表面反射 法探査 | 通常の 2D 地表面反射法探査で、CO ₂ 注入による変化を捉えるため、時間経過とともに実施する。海域と陸域での配置が可能。3D 反射法探査より安価であるが、貯留層全般をカバーできない。 |
| 3D 地表面反射 法探査 | 3D 反射法探査は、多くの発信・受信子を用いることで、貯留層から地表までの地下構造の 3次元イメージを作るための深部反射法探査である。モニタリングの目的から反射法探査の主な適用は、CO ₂ 分布の変化を時間間隔を置いてマッピングすることができる 4D モード、すなわち、繰り返し調査が必要である。 |
| ブーマー/スパーカー プロファイ リング | スパーカー調査は、高周波の発信子と受信子を用いた沖合で実施される地震探査手法で、浅い地下の高解像度の 2D イメージが得られる。CO ₂ の移行や漏洩を検知するためには時間経過に伴うデータが必要である。 |
| 気泡流検知 | 気泡流は高周波音響イメージにより捉えることができる。船舶に取り付けた魚群探知用のソナーで、泡の 3次元的な流れを沖合貯留サイトで捉えることが可能である。この技術は淡水でも適用できるので、陸域貯留サイトのモニタリングでも適用できる。 |
| 気泡流化学調査 | 水中内に漏洩した気泡は、海水であれ淡水であれ、逆漏斗を用いて比較的簡単に採取できる。気泡の漏洩している正確な位置標定は、高周波音響イメージなどの探査を用いる必要がある。 |
| 生態系モニタ リング | 生態系モニタリングは、陸域および海域の貯留サイトからの CO ₂ の漏洩が生態系に与えるインパクトを評価できる様々な手法を用いる。調査結果の比較となる初期データの取得が必要である。 |
| ダウンホール流 体化学調査 | <p>孔内の流体化学成分の変化で、CO₂ プリュームの移動に関する様々な知見、間隙水への CO₂ の溶解、流体と岩石の反応および孔井状態、が得られる。地層水に溶解した CO₂ の量の計測は最も重要なモニタリング項目である。モニタリングは貯留層を貫通した孔井、帯水層に届いた観測井、または水供給の孔井で行われる。計測項目は、pCO₂、pH、HCO₃⁻、アルカリ度、溶存ガス、石油類、陽イオンおよび安定同位体である。初期値計測は室内実験で行え、地化学的反応のしやすさの予測も有用である。</p> <p>試料の採取では、採取中に過剰にガスが抜けないように貯留圧を保持して採取することが重要である。このことを考慮して、Frio プロジェクト研究者は、U チューブサンプラーとして知られる流体サンプラーを開発した。これは、永久または半永久的に孔内に設置される SUS 製のチューブによって貯留層圧でサンプルを地表に取り出せるものである。圧をかけた窒素によってサンプルを地表に時々または連続的に押し出すようにするものである。このシステムは Otway と Cranfield</p> |

| | |
|-----------------------|--|
| | <p>サイトできうまく運用されている。Ketzin では、ガス透過膜を通してガスをダウンホールサンプリングし、高圧アルゴンガスを用いた毛管を通して地表まで押し上げている。</p> <p>様々なワイヤライン器具がオープン孔やケーシング孔でダウンホール流体サンプルを採取するのに役立っている。例えば、CHDT(ケーシング孔ダイナミックテスター)は長岡で用いられた。分光学を用いて流体を分析するワイヤライン検層装置もある。これは、流体タイプ、ガス成分および濃度 (CO₂ を含む) とガス・油比などがアウトプットとなる。同じ装置で、pH 感応染料を用いて 0.1pH の精度で pH を測ることができる。長期 pH 計測ワイヤライン装置は試験的に使用されているが、連続的なダウンホール pH モニタリングは現状では適用できていない。CO₂ 貯留サイト用のダウンホール CO₂ 検知の光ファイバー化学センサー (FOCS) も開発中であり、10bar までの CO₂ 分圧を計測できる。最新モデルでは、Ketzin で深度 800m までのアップホール検知器を備えるダウンホールプローブでの試験が成功している。</p> |
| <p>長期孔内 pH モニタリング</p> | <p>長期孔井モニタリングで地下水の pH 計測は重要な役割を果たす。地層水の pH は CO₂ 貯留の中で重要な地化学パラメータである。なぜなら pH は、地層水中に解ける CO₂ の量を示し、鉱物化トラッピングを含む水-岩石相互作用の特性に知見を与えてくれる。さらに上部地層への CO₂ の移動の指標にもなるからである。</p> <p>地層の間隙水の pH は CO₂ の溶解量に敏感で、CO₂ 溶解が多ければ、pH は小さくなり、CO₂ 溶解水の移動の指標となる。pH は多くの地化学的な反応に影響し、貯留層挙動の高精度な地化学モデル作成を容易にするためにも必要である。pH センサーは非常に高価で、非常に限られた時間しか設置できない。計器の開発では、長期間のキャリブレーションを維持し、半永久的に観測孔に設置しておくことが可能な、より安価な pH 測定方法が求められている。</p> <p>模擬貯留層で pH センサーの室内試験を行う必要があり、機器開発では同時にダウンホールモニタリング機器への展開も考える。特に興味深いのは、低価格の光ケーブルで地表と連結した低価格の光ファイバーセンサーの応用である。代替方法としては、孔内から採取した試料の pH を地表で計測することが考えられるが、試料採取時にガスが抜けないように注意しなければならない。</p> |
| <p>トレーサー調査</p> | <p>超微細粒子、溶解ガスまたは液のトレーサーは、プルームの移動をモニターするため、CO₂ の注入に加えることが可能である。トレーサーは CO₂ の注入それだけに固有のものであり、CO₂ それ自身を簡単に検知し、計測できるという特性が必要である。</p> <p>トレーサー試験では、注入 CO₂ に新規の成分として投入された分の追跡を含み、別期限のものと区別できることが必要である。二つの主な目的は、貯留層およびその上下の地層内への CO₂ の移動の評価と確認、上下の地層への流入量と速度の見積りと連結性の検知である。トレーサーの目視観察には、プルーム内およびその周囲に多くの観測孔が必要である。</p> <p>検知限界の低い多くのトレーサー、例えば完全フッ化炭化水素、がよく用いられ</p> |

| | |
|------------------------|--|
| | <p>る。他は開発中である。ラドンガスといったいくつかの自然由来のガスは、ガス移動の指示物となる（土壌ガス技術が参考）。相分割トレーサーも不動相の量を決定するのに用いられる。Frio プロジェクトで、残留ガストラッピングの量を見積もるのに相分割トレーサーの適用性が試験された。</p> |
| CO ₂ 濃度連続計測 | <p>大気や水の溶存 CO₂ を計測する装置は一般的に市販されているが、地下水圧の作用する位置での計測装置は研究段階である。レーザーラマン分光を利用した水溶存 CO₂ の遠隔計測に向けた研究がなされている。</p> |
| pH 連続計測 | <p>pH 計測を高圧下で実施する場合には、ガラス電極では不適である。近年、セラミックスの電極を用いた pH 計が開発されたが、コストは未だ高い。</p> |
| EC 連続計測 | <p>pH に比べ応答が悪い。</p> |
| 観測井 | <p>CO₂ 飽和度、流体圧力、温度計測を含む多機能。 セメントやまたはケーシングの劣化および破損。 検層。 トレーサー検知・移動の早いトレーサーを用いることで、注入圧などの運転パラメータの改良によって漏出回避することが可能になる。 貯留層中の地下水の地球化学的変化の検知 岩石および地下水の採取 挿入式傾斜計による CO₂ 注入による地盤変動 貯留層上部堆積層のモニタリング これらの計測のうち、ケーシング前だけ実施できるものがあり、他のものは間隔をおいてケーシングに穴を開けて実施する。費用は限定的である。例えば、天然ガス貯留工場では採用されている。石油/ガス会社では、計器も高度に開発されており、ルーチンとして観測井が用いられている。</p> |

注：二重線以下は、IPCC ガイドライン 2006¹⁰⁾ から追加した。

表 2.2.4-4 大気および土壌の CO₂ レベルの上昇決定技術（漏洩検知）

| 技術 | 能力 | 検知限界 | 適用、コスト限界 | 現状 |
|-----------------|--|---|--|---------------------------------------|
| 長尺オープン経路赤外線ガス分析 | レーザービームに沿って空気中の CO ₂ 吸収量を計測。計測値からトモグラフィーマップを作成することが可能。 | 開発が必要。 推定能力は周辺濃度の±3%かそれ以上 | 1 計器で数 km 四方の範囲をカバー。数 \$ 1,000/台。 | 実証、開発段階。 |
| 土壌ガス分析 | 地表からのバックグラウンド流量とその変化を既知とすることがクリティカルとなる。CO ₂ レベルと流量を計測、地中に 50cm~100cm 程度打ちこんだプローブを用いる場合と孔井から採取する場合がある。プローブまたは孔井に挿入したチューブを貫入させ、土壌ガスを採取し、現地で携帯 IR ガス分析に掛けるか実験室で分析する。 | ポータブル赤外線ガス分析器は 1~2ppm の精度で CO ₂ 濃度を検知できる。土壌ガス中の CO ₂ の絶対値は 0.2~4% で空気中よりも高い。バックグラウンドの流量変化は地上より地下の方が小さいので、地下からの少量でも検知できる。他のガスでの同位体との比から CO ₂ の発生源の予測ができる。 | Weyburn および Rangely サイトや火山・地熱地域で技術の適用が認められている。詳細計測、特に低流量漏洩地点周辺での計測に有用である。各測定には多くの時間がかかる。広域を精度よく計測するには比較的高コストで時間もかかる。 | 研究段階で採用されている。 |
| 携帯赤外線ガス分析器 | 空中の CO ₂ レベルの計測 | 代表的なもので 100ppm | 陸上、海上で使用可。\$1,000 以下/台。ピンポイントの高濃度漏出での適用可。 | 広く商用 |
| 空中赤外線ガス分析器 | ヘリコプターまたは飛行機搭載のオープン経路/クローズド経路のレーザー計測装置。数 10m 毎に計測。 | クローズドで a ± 1 ppm。オープンは精度が落ち、± 1 % 以下。 | 非常に大量の漏出個所でメタンおよび CO ₂ の検知。地下からの集中漏出、パイプライン、インフラからの CO ₂ 漏出に適用。 | 天然ガスパイプラインで使用。CO ₂ 検知ではない。 |

出典：IPCC 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2 Energy Chapter 5 Carbon Dioxide Transport, Injection and Geological Storage

2.2.5 地中挙動の解析

1) 解析評価において必要な機能の抽出

(1) 解析で予測・評価が必要となる CO₂ の挙動の想定

CMS に関して解析により評価を必要とする事象は多岐にわたると考えられる。もっとも重要であるものは、貯留自体の成立性に関する評価となる。また、広域周辺環境への影響、CO₂ の挙動に関するものなども評価を必要とすると考えられる。ここでは、これらの項目についてまとめ、解析に必要となる機能を抽出した。

(a) 貯留の成立性

貯留の成立性には、貯留可能量や貯留 CO₂ の短期-長期挙動、さらに貯留層への影響など、これらに関する機能の評価が必要と考えられる。

まず、挙げられるのは、この貯留コンセプトで可能となる CO₂ 貯留量の算出である。これは、貯留シミュレーションを行い、モデル構成要素の CO₂ 含有量の積分を行うことで求められる。このためには、孔井および貯留層をモデル化し、CO₂ イオンを含む注入水の移流・拡散を求めることが必要となる。

また、モデル構成要素における CO₂ の飽和量が重要となる。飽和量を求めるには、地下水の圧力と温度、およびその他のイオンの溶存状態が必要であり、これらを併せた地球化学的な手法による推定が必要となる。

貯留層は、対象とする深度領域を大きくとらえても複数の積層構造になっていると考えられる。このため、貯留層のモデル化では、局所的に透水係数等の物性値が異なる入力条件が必要と考えられる。解析上、系の単純化のためには、すべての領域において極力均一な物性値を使うことが望ましいが、まずは、実際に即したモデルでの解析を経て、より均質な物性値を導出することが望ましい。

(b) CO₂ の相変化

CO₂ 溶解水は、周囲の地下水に比べ比重が若干高いため、ゆっくりとではあるが沈降していくと考えられる。しかし、移流経路など何らかの理由により、浅い深度方向に飽和状態のまま移動した場合、静水圧の減少に伴う圧力低下によりガス化することが懸念されている。ガス化した CO₂ は、貯留層上部に滞留するのか、さらに上部の地層に浸入するのか、そのために帯水層は必要なのかが問われることになる。解析において、このようなシナリオを想定した場合には、相変化をシミュレートできるツールが必要となる。

(c) 貯留層周囲岩盤への影響評価

CO₂ を溶解させた水は、圧力をかけて貯留層へ注入される。貯留層の透水係数が低い場合、移流速度が低いために圧力伝達も狭い範囲となり、応力集中が起きることが予想される。このため、解析による注入時の周辺地盤への応力分布状態の算出が必要となる。

(d) 広域地下水流動の考慮

短期的には、注入した CO₂ が設定した貯留域で保持されているか、設計どおりの

貯留形態となっているかを予測することが必要となる。貯留層の構造や注水井と揚水井の条件設定に加え、バックグラウンドとして貯留域における地下水流動も重要となる。すなわち、貯留の成立性で検討する CO₂ イオンの拡散解析に加え、注入水の移流に広域地下水流動を加えた検討が必要となる。一般的に我が国における広域地下水流動の流速は非常に遅く、数年でセンチメートルのオーダーと考えられるが、貯留状況のモニタリングに CO₂ のイオン濃度の計測を用いた場合、より精密な濃度変化を把握しないとモニタリングが困難となる。

長期的には、CO₂ が長距離の移流によって動き、生活利用水圏に到達する可能性も否定できない。この場合においては、長期の移流・拡散解析を行い、まず地下水がそのような範囲に到達する可能性の有無、さらに到達が懸念される場合には、それまでの時間、流れの乱れや拡散の影響を考慮した上での到達 CO₂ イオン濃度の評価が必要となる。

(e) 岩盤中での微視的な CO₂ の挙動

ルジオン値などから求まる貯留層における透水係数や予測される CO₂ イオンの拡散係数を用いた解析結果がモニタリング結果と異なる場合、原位置での調査を踏まえて、対象となる地層の透水係数や CO₂ イオンの拡散係数を求める必要が生じる可能性がある。

このような場合には、対象域での地盤試料のサンプリングと試験を行い、そこから得られる空隙データなどを入力値としてマイクロな移流拡散解析により、岩としての物性値を求める必要がある。

さらに、対象地層が多孔質である場合、何らかの理由でガス化した CO₂ もしくはその他の気体が孔を塞ぎ、水の経路の目詰まりを起こす可能性が考えられる。これに関してもこのような多孔質媒質中の気泡がその物性値に与える影響が検討課題となり得る。

ガス化とは異なり、多孔質媒質中を移動する CO₂ イオンが、例えば移流速度が非常に遅く、また周囲の岩種にもよるが、岩と結合し固体として析出する場合がある。この場合、析出が非常に速いと移流経路となる岩の孔を塞ぐ恐れがある。反対に閉塞には至らないような析出速度の場合には、移流と拡散で広がった CO₂ が固体として貯留層に沈殿し、上述のような生活圏への移動の懸念が低くなることや、そもそも飽和濃度に達する可能性が低くなるために、同じ貯留層でも貯留量は格段に大きくなると考えられる。

(2) 想定から導かれる解析に求められる機能

これまでにまとめたケースに基づく解析に求められる機能を、マクロ領域の CO₂ の挙動とマイクロ領域での CO₂ の挙動に分けて整理した。

(a) マクロ領域での CO₂ の挙動に関する求められる機能

貯留計画域における注水井および揚水井からなるユニットを中心とした貯留層のモデルを入力値とした移流・拡散を扱えることが必要となる。注水井と揚水井に

よる制御、すなわち、任意の注入量、位置での注水および揚水が可能であること、および広域地下水流動が扱え、CO₂の濃度分布を求めたのちに積分を行うことで、貯留量の算出が可能になる。さらに、岩盤破壊が懸念されるような圧力を考慮した場合、周辺地盤への影響を解析できる機能があることが望ましい。加えてCO₂が溶解状態を保てずガス化した場合、液相と気相の2相の連成解析が可能であることが望ましい。

また圧力・温度・地下水のイオン種によって、CO₂の飽和濃度は異なると考えられる。これを求めるには地球化学的な解析による予測が必要となる。

(b) ミクロ領域でのCO₂の挙動に求められる機能

岩盤中の地下水およびCO₂マイクロバブルの移流・拡散を解くことが必要となるために、多孔質媒体中の移流・拡散を解くことができる機能が求められる。さらに、中途の孔部分に気泡が存在するような2相の連成解析機能が求められる。また、CO₂の析出といった化学的な変化に対応するような非線形の効果を盛り込むことのできる機能を有することが望ましい。

2) 評価において有効と考えられる解析ツール

(1) Tough2

Tough2は、米国ローレンスバークレー国立研究所で開発された多孔質媒体や破碎性媒質の中の多相流れの数値シミュレーションソフトである。主たる用途、解析対象は、地熱貯留層工学、放射性廃棄物の単離研究、環境影響評価および飽和媒質や帯水層での輸送問題である。

1991年にTough2は、5種類の異なる流体の物性モジュールを含む形で公表された。モジュールはEOS(Equation-Of-State)と呼ばれ、EOS1~EOS5で構成されている。各モジュールの扱う対象は、EOS1は水及びトレーサーを含む水、EOS2は水とCO₂、EOS3は水と空気、EOS4は水、空気および蒸気、EOS5は水と酸素である。その後、水、塩水、空気を含むEOS7、これに放射性核種を含めたEOS7R、水、油、非凝集性の気体を含めたEOS8などのモジュールが追加されている。Tough2のコードはFortranで記述され、そのすべてが公開されている。このため、多くの研究者によって改良や検証がなされている。

Tough2では、流体と熱を質量とエネルギーの保存則より解いている。移流はダルシー則に則っており、これに物質拡散が加わっている。熱の流れは伝達に則っている。これらは局所平衡を満たすように求められる。Tough2の数値解法は有限差分法を用いている。Tough2の起源は、1980年代にローレンスバークレー国立研究所で開発されたMULKOMと呼ばれるプログラムにあり、数値解法などはMULKOMの手法を引き継いでいる。

(2) Code_Bright

Code_Brightは、スペインのカタルーニャ工科大学地盤工学研究室によって開発された、地盤や岩盤などの多孔質媒体の流れと物質拡散、およびそれに伴う応力や変形

状態に関する数値シミュレーションソフトである。数値解析法は FEM を用いている。機能としては Tough2 に近いと考えられるが、応力による解析対象の変形を考慮できることが特筆される。Code_Bright は、塩水環境における解析用として開発され、様々な構成則を加えることで発展した。Code_Bright のコードも Tough2 同様に Fortran で記述されている。

Code_Bright では、物性などの初期情報の詳細を与えることでメッシュを自動生成する機能を有しており、結果のメッシュ依存性などの問題を回避できる。また、CAD データなど外部ファイルからモデルデータを導入することができる。これに加えて、GiD と呼ばれる可視化モジュールを有し、解析結果の出力が可能となっている。

Code Bright では、岩盤および岩盤中のガス、間隙水を解析対象とする。ガスおよび間隙水はたがいに相変化を織り込んであるため、温度や圧力に応じて変化する。さらにこれらの分布による周辺岩盤への応力状態の伝播、さらには、それに伴う変形へと構成則を連成させることで解析を行う。水は塩水環境を基本にしているため、海水系地下水への対応が可能である。オリジナルの Code_Bright では CO₂ を対象としていないが、CO₂ へ対応できるよう改良したコードを使用することで、CO₂ の移流・拡散をも解析対象とすることができる。また、Code_Bright では不飽和地盤も対象とすることができるため、ベントナイト圧密などの地盤自体が大きく変形する事象や地盤中に空気を多く含む場合の水の挙動解析などへの適用も考えられる。

(3) Lattice Boltzmann Method

Lattice Boltzmann Method(以下、LBM と略記)は、セルオートマトンに起源を有する流体と物質拡散の数値解析法である。現状では、前述の Code_Bright のように地盤や岩盤の有効応力を用いた解析、特に変形には対応していない。

LBM の特徴は次の 3 点にまとめられる。①解析のアルゴリズムがきわめて単純である。②流体、拡散ともほぼ同等の計算式を用いる。③複雑形状の境界条件に対して計算負荷を上げることなく解析の実行が可能である。

前者の 2 項目は、LBM は空間を分割した要素を格子点で代表し、流体や拡散の情報を隣接する格子点に向かって伝播させるという構成則に基づいているため、流体や拡散でその構成則がほとんど変わらないところに由来する。構成則は移動する流れや物質の濃度を表す分布関数と流れや移動の無い平衡状態を表す平衡関数の二種類で構成される。隣接する格子点へは、これら関数の線形結合で情報が伝えられる。二種の関数の比率は緩和定数で定められ、分布関数に比べて平衡関数の比率が多い状態での隣接格子点への情報伝達は、ゆっくりした変化の伝播を表すことになる。すなわち、緩和定数が流体の粘性係数であり、物質の拡散係数に相当する。また、解析対象が流体か拡散かの区別は平衡関数の取り方による。これは、平衡関数を変えるだけで、流体計算と拡散計算が同じプログラムで実行できることになり、移流場における拡散体の挙動といった流体と拡散の連成解析が容易に実行できることを示している。

この単純な LBM の構成則は、流体の支配方程式であるナビエ=ストークス方程式と 2 次のオーダーで等価であることが示されている。同様に拡散方程式とも等価であることも示されている。ただし、レイノルズ数が 10,000 以上の高速の流れには対応

できないことが明らかになっており、この点を回避したコードが提案されている。

LBM では境界条件の設定が単純である。境界（岩盤）と指定した格子点に流れや拡散の無い条件の分布関数を定義し、境界ではそれぞれの物理条件にあった反射の境界条件を与えるだけでよい。このため、多孔質媒体など複雑形状の媒質での流れや拡散の解析に適すると判断されることも多い。

LBM 自体はマルチスケール性を有し、解析対象の大きさの制限は無いため、様々なオーダーの解析に対応できるが、多孔質媒体の解析に適すると判断されることからマイクロ～メゾスケールでの解析への適用例が多い。また、近年明瞭な境界を有する気体-2相流の解析に関し、CO₂ の貯蔵分野においても植村らの解析例に見られるようにメゾスケールでの多孔質砂岩中の CO₂ の移動解析にも適用されている。

前述のとおり、LBM は解析空間を格子要素に区切り、格子点が要素を代表し、隣接する格子点間で値のやり取りを行うことで、決定論的に現象を再現する解析手法である。このため、解の収束のための繰り返し計算や FEM のような全ての要素の結合を示す剛性マトリックスを必要としないため、本研究で扱う複雑境界を含む媒質の拡散解析に適している。

(4) 解析ツールの特徴のまとめ

それぞれの解析ツールの特徴を表 2.2.5-1 にまとめる。

表 2.2.5-1 解析ツールの特徴のまとめ

| | Tough2 | Code_Bright | LBM |
|----------|------------------------------|------------------------------|---------------|
| 最大相 | 2相(液、気) | 3相(液・気・固) | 2相(液・気) |
| 最大次元 | 3次元 | 3次元 | 3次元 |
| 相変化 | ○ | ○ | △ (構成則の追加) |
| ガス溶解・ガス化 | ○ | ○ | △ (構成則の追加) |
| 移流(気体) | ○ | ○ | ○ |
| 移流(液体) | ○ | ○ | ○ |
| 拡散(イオン) | ○ | ○ | ○ |
| 力学変形 | × | ○ | × |
| 熱伝播 | ○ | ○ | ○ |
| 媒質 | 均質・不均質、等方・非等方の多孔質、二重間隙による亀裂系 | 均質・不均質、等方・非等方の多孔質、二重間隙による亀裂系 | 均質・多孔質 |
| 開発 | LBNL | UPC | (株)大林組 |

(5) 各解析ツールによる解析例

(a) Tough2 の解析例

CMS におけるフィールド規模での CO₂ の挙動に関する数値解析を Tough2 と ECO2N オプション (P.61 参照) によって実施し、難透水性のキャップロックの有無、注入井における注入箇所鉛直位置および注入井と揚水井の距離の影響について調べた。

解析では、図 2.2.5-1 のようなモデルを設定した。このモデルでは、地下 300m 以深に厚さ 200m の帯水層を設定し、その帯水層中の中間深度 (100m) の位置から毎秒あたり 7.0kg (22 万 t-CO₂) の注入量で CO₂ 飽和水を注入するとした。また、それぞれの揚水井における揚水流量は注入量の 1/4 とした。

xy 座標の原点に注入井、x、y 軸上に揚水井を配置するという 1/4 モデルによって CMS をモデル化した。解析モデルの概要を図 2.2.5-2 に示す。標準ケースとして、表 2.2.5-2 の物理特性を用い、前述のとおり帯水層の中間深度 (100m) からの注入とし、注入井と揚水井の距離は 100m と設定した。

注入された CO₂ は、地下水の中では飽和状態の重炭酸イオンの状態で存在することを前提とした。実際には、CO₂ のマイクロバブルは地下水中の CO₂ を過飽和させることが期待される。このため、CO₂ 注入量の見積もりの点では前述の前提条件は安全側と言える。解析では、注入される水の CO₂ の質量分率を 4.0% と設定したが、この値は、地下 400m で想定される静水圧 4.1MPa における CO₂ の溶解度 4.4% よりも小さい。なお、この溶解度は、Spycher と Pruess (2005)¹⁸⁾ による熱力学的検討に準じて計算したものである。

標準ケースのほかに、次の追加ケースを設定した。すなわち、キャップロック層がないケース、注入井における注入位置を帯水層中の上部 100m または下部 100m としたケース、および注入井と揚水井の距離を 200m としたケースである。

解析結果の例を図 2.2.5-3 に示す。これは、標準ケースでの注入後 1 年での CO₂ 質量分率分布の 3 次元等値図である。重炭酸イオンのプルームが帯水層中に広がっていることがわかる。プルームの先頭付近では、動力学的分散により CO₂ の質量分率は注入された溶解水のそれよりも小さい。

これらの検討により次の結論が得られた。

- ① 注入により生じる過剰間隙圧は、注入井周辺の岩盤の安定が保たれる程度に十分小さい。
- ② CO₂ 飽和水は帯水層中に広がり、気化ガス相は生じない。
- ③ 注入後は、解析を行った期間 (数百年間) では拡散によるリークは無視できるほど遅い。

表 2.2.5-2 固有透過係数と間隙率（砂層および粘土層）

| 物性 | 砂層 | 粘土層 |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 固有透過係数(m ²) | 1.0×10^{-13} | 1.0×10^{-16} |
| 間隙率 (-) | 0.35 | 0.30 |

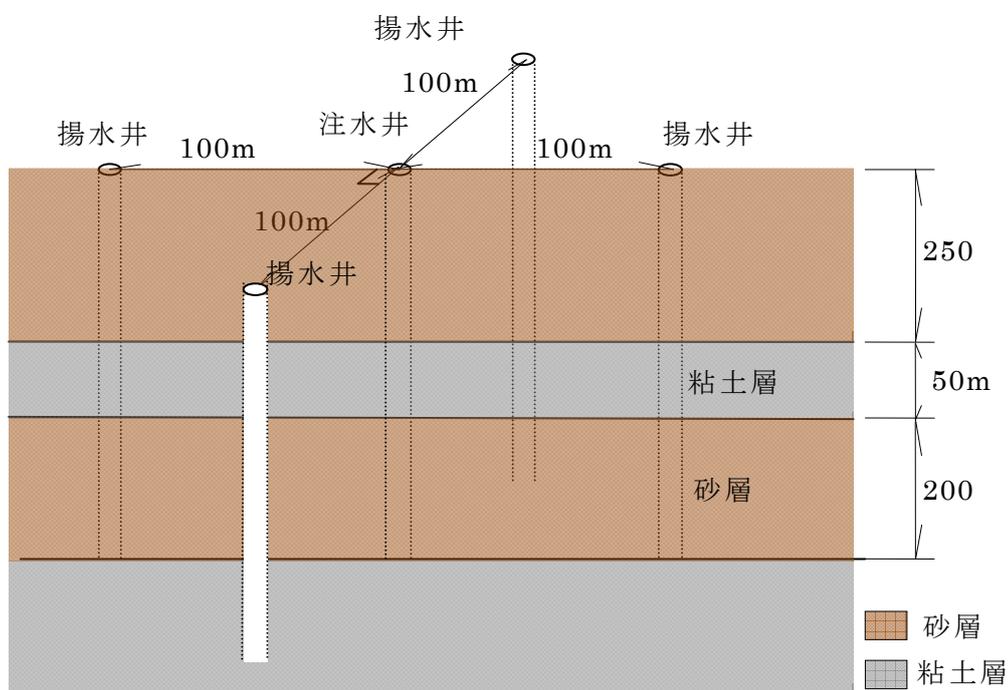


図 2.2.5-1 CMS における注入井と揚水井の配置

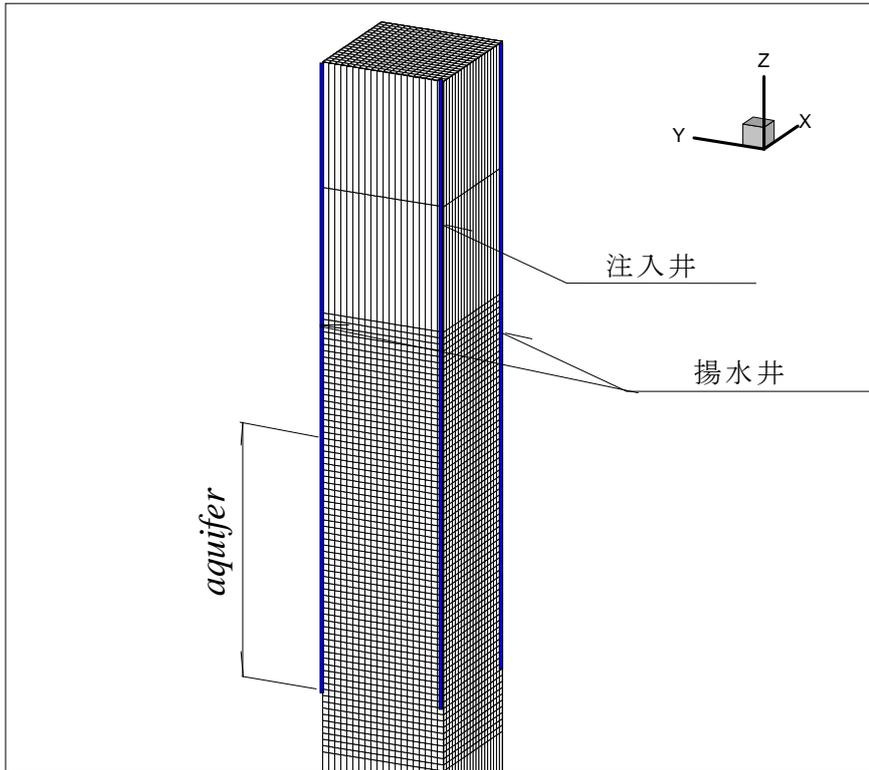


図 2. 2. 5-2 解析モデルの外観

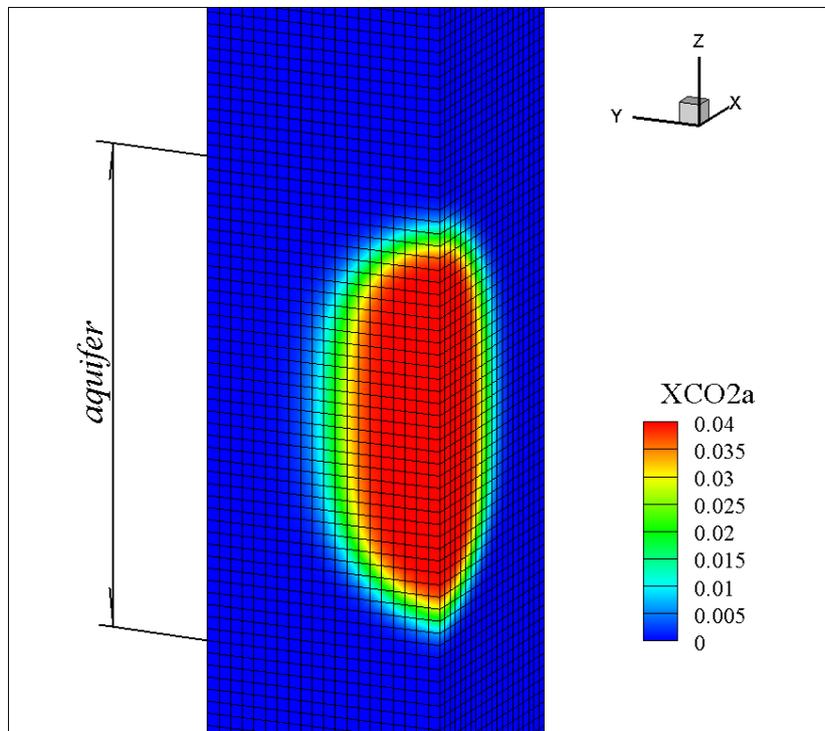


図 2. 2. 5-3 1年後のCO2の濃度割合の分布

(b) Code_Bright の解析例

超臨界 CO₂ を帯水層～キャップロックシステムへ注入する場合の力学連成多相流解析結果を例とし紹介する。解析条件は表 2.2.5-3 のようである。

表 2.2.5-3 解析条件

| 条件等 | 諸元 | 詳細 |
|----------------------|-------------|-------------------------------|
| 使用コード | Code_Bright | 超臨界 CO ₂ 物性対応版 |
| 境界条件 | 上部 | 静水圧、一定土被り圧 |
| | 下部 | 不浸透、鉛直変位拘束 |
| | 側部 | 不浸透、水平変位拘束 |
| 初期条件 | 水圧 | 静水圧 |
| | ガス圧 | 大気圧 |
| | 全応力 | 土被り圧（水圧＋有効拘束圧） |
| | 側圧係数（有効応力） | 2/3 |
| | 温度 | 全領域 40℃ 一定 |
| CO ₂ 注入条件 | 帯水層のモデル対称軸上 | 100m 層厚全域に CO ₂ 注入 |
| 注入レート | ケース 1 | 10kg/sec |
| | ケース 2 | 50kg/sec |

(2.4 時間で所定の注入レートまで漸増させ、その後一定注入レートを維持)

注) 解析上の CO₂ 注入は t=1.0~1.1 (day) で漸増、t=1.1 (day) 以降は所定の一定レート

図 2.2.5-4 に解析メッシュを示す。本モデルでは、1000m より深い深度での 100m 厚さの帯水層を対象とし、上方には泥岩質のキャップロック層を想定している。

軸対称軸

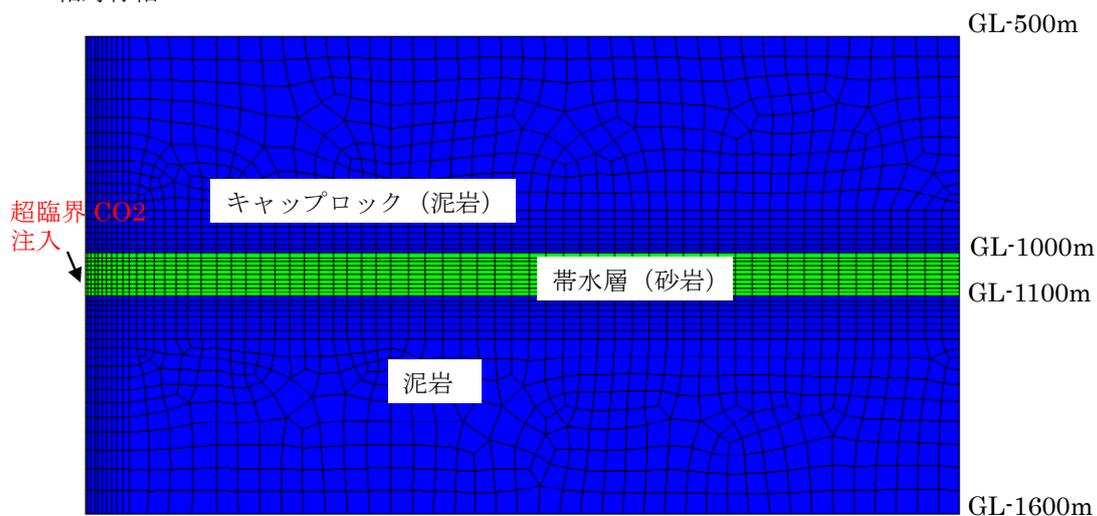


図 2.2.5-4 解析メッシュ（軸対称 2 次元）

表 2.2.5-4 に解析に用いた材料物性のうち浸透・変形に関する物性を示す。また、表 2.2.5-5 には固相、液相、気相の物性を示す。

表-2.2.5-4 浸透、変形に関する物性

| 物性 | 単位 | 砂岩 | 泥岩 |
|-----------------------------|------------------|--|---|
| 浸透率 k | m ² | 1.0 × 10 ⁻¹³ 間隙率の変化の影響を無視 | 1.0 × 10 ⁻¹⁸ 間隙率の変化の影響を無視 |
| 間隙率 φ | - | 0.35 | 0.30 |
| 比貯留係数 S _s | m ⁻¹ | 3.2 × 10 ⁻⁵ | 3.7 × 10 ⁻⁶ |
| 相対浸透率: | | | |
| van Genuchten* ¹ | | | |
| λ (=m) | - | 0.457 | 0.457 |
| Slr | - | 0.30 | 0.30 |
| Sls | - | 1.0 | 1.0 |
| Sgr | - | 0.05 | 0.05 |
| Sgs | - | 1.0 | 1.0 |
| 毛管圧力: | | | |
| van Genuchten* ² | | | |
| λ (=m) | - | 0.457 | 0.457 |
| Slr | - | 0.0 | 0.0 |
| 1/P ₀ | Pa ⁻¹ | 5.1x10 ⁻⁵ | 5.1x10 ⁻⁵ |
| (P ₀) | Pa | 0.196 x10 ⁵ | 0.196 x10 ⁵ |
| Pmax | Pa | 1.0x10 ⁷ | 1.0x10 ⁷ |
| Sls | - | 0.999 | 0.999 |
| 弾性係数 E | GPa | 0.23 | 3.1 |
| ポアソン比 ν | - | 0.3 | 0.3 |
| Biot 定数 α | - | 0.995 → 1.0 | 0.93 → 1.0 |
| Bishop 定数 χ | - | =S _w (p _l <p _g)、 =0 (p _l >=p _g) | |

van Genuchten モデル¹²⁾

$$*1 \quad k_r = \sqrt{S_{we}} (1 - (1 - S_{we}^{1/m})^m)^2 \quad S_{we} = (S_w - S_{wr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr}) \quad m = 1 - 1/n$$

$$*2 \quad P_c = P_0 (S_{we}^{-1/m} - 1)^{1/n} \quad S_{we} = (S_w - S_{wr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr}) \quad m = 1 - 1/n$$

表-2.2.5-5 固相、液相、気相の物性

| 相 | 物性 | 単位 | 値 |
|----|--|-----------------------------|-----------------------|
| 固相 | 土粒子密度 ρ_s | Mg/m ³ | 2.7 |
| | 圧縮率 $1/K_s$ | MPa ⁻¹ | 0 |
| 液相 | 密度 ρ_l : $\rho_l = \rho_{l0} \exp(\beta(P_l - P_{l0}) + \alpha T + \gamma \omega_l^h) (1 + \delta \omega_l^{CO_2})$ $\delta = 1 - \rho_l \frac{V_\phi}{M_{CO_2}}$ V_ϕ : Garcia、2003*3 ρ_{l0} : 参照密度 β : 圧縮率 α : 体積熱膨張係数 P_{l0} : 参照圧力 M_{CO_2} : CO ₂ 分子量 | Mg/m ³ | |
| | | Mg/m ³ | 1100 |
| | | MPa ⁻¹ | 4.4×10^{-4} |
| | | °C ⁻¹ | -3.4×10^{-4} |
| | | MPa | 0.1 |
| | | kg/mol | 0.044 |
| 液相 | 粘性 μ_l : $\mu_l = A \exp\left(\frac{B}{273.15 + T}\right)$ A B | MPa s | |
| | | MPa s | 2.1×10^{-12} |
| | | K | 1808.5 |
| 気相 | 密度 ρ_g : Spycher et al、2003*4 分子量 M_{CO} | Mg/m ³ kg/mol | 0.044 |
| | 粘性 μ_g : Altunin & Sakhabetdinov、1972*5 | MPa s | |

表中に用いた値や式の出典、およびその導出を示す。

*3 : Garcia, 2003¹³⁾

Garcia, J.E. (2003). Fluid Dynamics of Carbon Dioxide Disposal into Saline Aquifers. PhD thesis, University of California, Berkeley.

$$V_\phi = (37.51 - 9.585 \times 10^{-2} T + 8.740 \times 10^{-4} T^2 - 5.044 \times 10^{-7} T^3) \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}$$

*4 : Spycher et al, 2003¹⁴⁾

Spycher, N, Pruess, K & Ennis-king, J (2003). CO₂-H₂O Mixtures in the Geological Sequestration of CO₂. I. Assessment and calculation of mutual solubilities from 12 to 100°C and up to 600 bar. Geochim. Cosmochim. Acta, 67:3015-3031.

$$\rho_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{v}$$

$$v^3 - \left(\frac{RT}{P}\right)v^2 - \left(\frac{RTb}{P} - \frac{a}{P\sqrt{T}} + b^2\right)v - \left(\frac{ab}{P\sqrt{T}}\right) = 0$$

$$b = 2.78 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$$

$$a = a_1 + a_2 \times T \text{ m}^6\text{PaK}^{0.5}/\text{mol}^2$$

$$a_1 = 7.54 \quad a_2 = -0.00413$$

$$R = 8.314 \text{ J/molK}$$

*5 : Altunin & Sakhabetdinov, 1972¹⁵⁾

Altunin, VV & Sakhabetdinov, MA (1972). Viscosity of liquid and gaseous carbon dioxide at temperatures 220-1300 K and pressure up to 1200 bar. Teploenergetika, 8:85-89.

$$\mu_g = \mu_0 \exp\left(\sum_{i=1}^4 \sum_{j=0}^1 \frac{a_{ij} \rho_R^j}{T_R^i}\right)$$

$$\mu_0 = T_R^{0.5} \left(27.2246461 - \frac{16.6346068}{T_R} + \frac{4.66920556}{T_R^2} \right)$$

$$T_R = \frac{T}{T_c}, \quad T_c = 304 \text{ K} \quad \rho_R = \frac{\rho_{CO_2}}{\rho_c}, \quad \rho_c = 468 \text{ kg/m}^3$$

$$a_{10} = 0.248566120 \quad a_{11} = 0.004894942$$

$$a_{20} = -0.373300660 \quad a_{21} = 1.22753488$$

$$a_{30} = 0.363854523 \quad a_{31} = -0.774229021$$

$$a_{40} = -0.0639070755 \quad a_{41} = 0.142507049$$

解析結果のうち、時間経過（5日、50日、200日後）のガス圧と水飽和度の分布を図 2.2.5-5 に示す。CO₂ 注入は t=1.0 (day) からである。

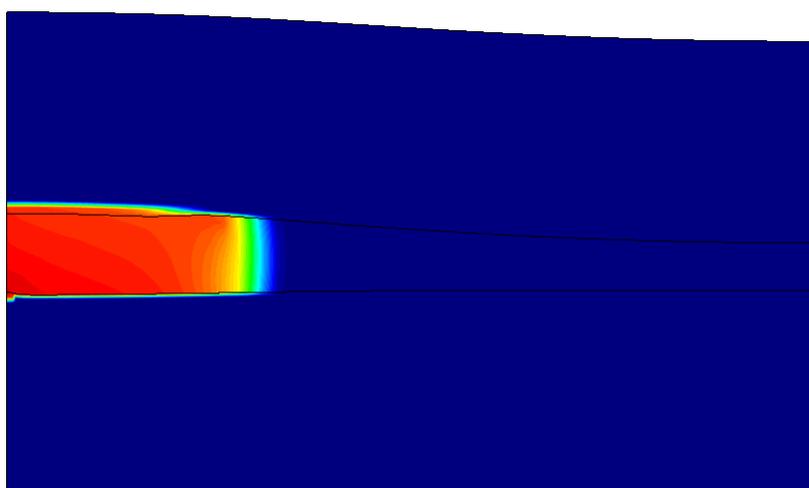
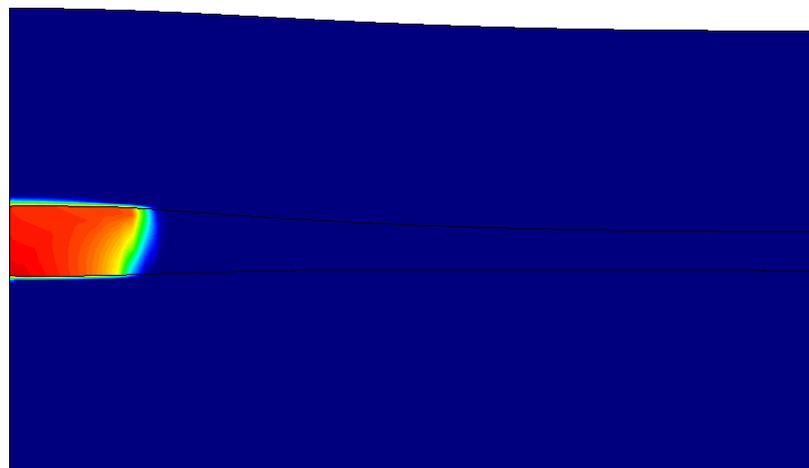
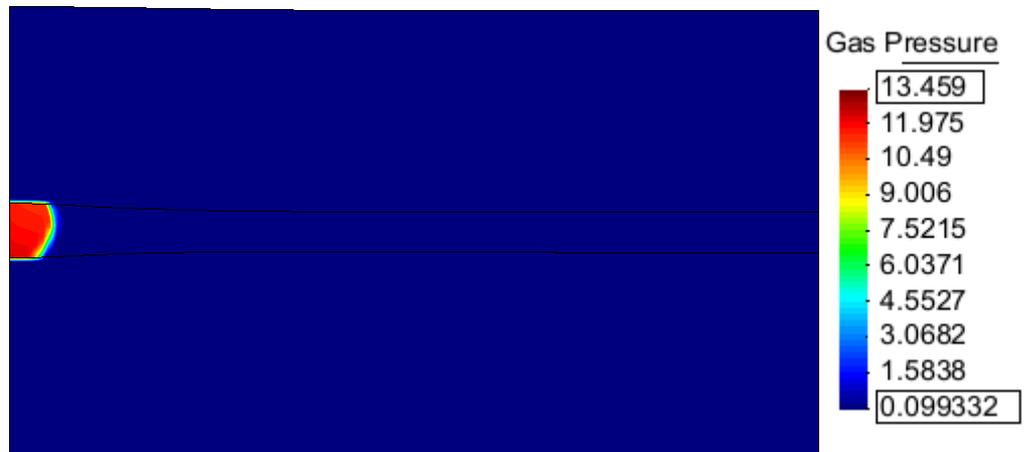
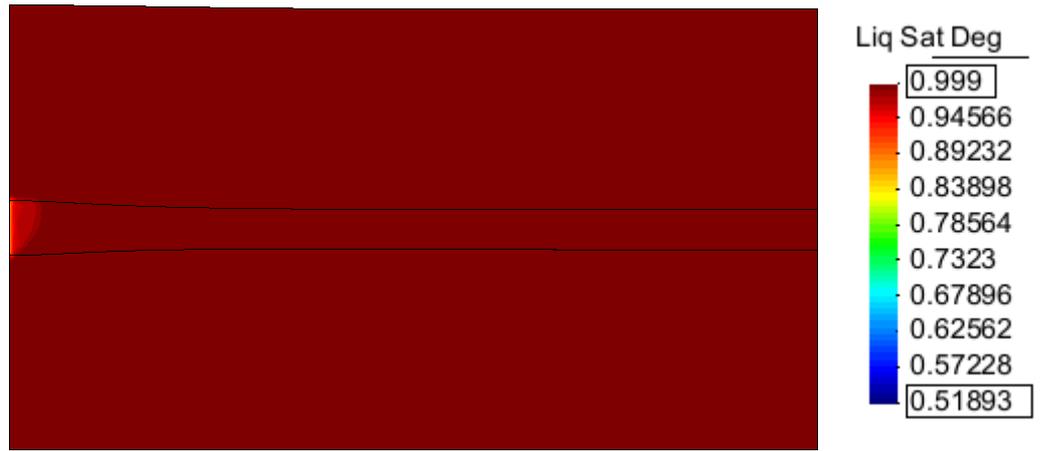
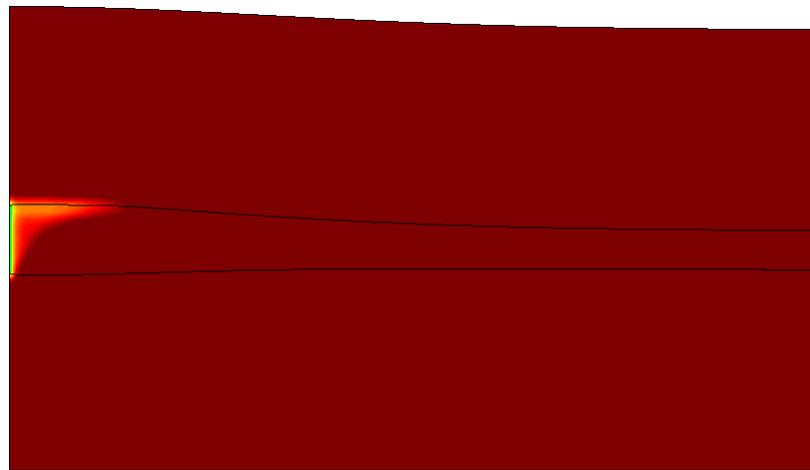


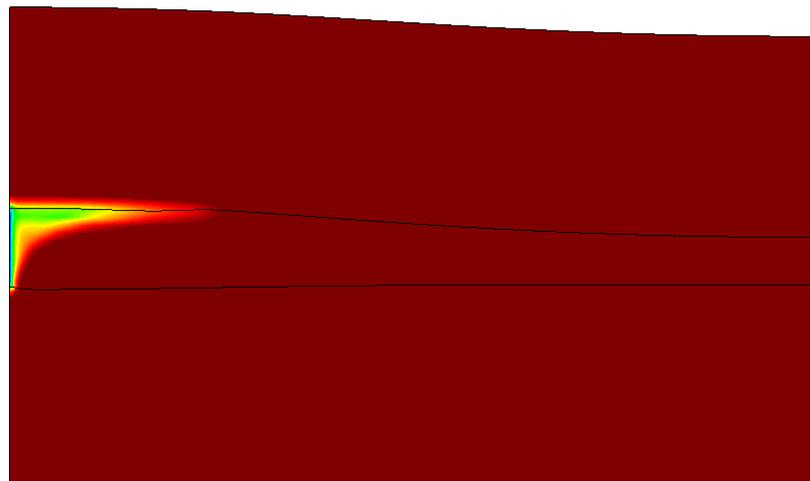
図 2.2.5-5(1) 間隙ガス圧の分布



t=5.0(day)



t=50(day)



t=200(day)

図 2. 2. 5-5 (2) 水飽和度の分布

図 2. 2. 5-6 にガスの浸入に伴う空隙率の変化を示す。

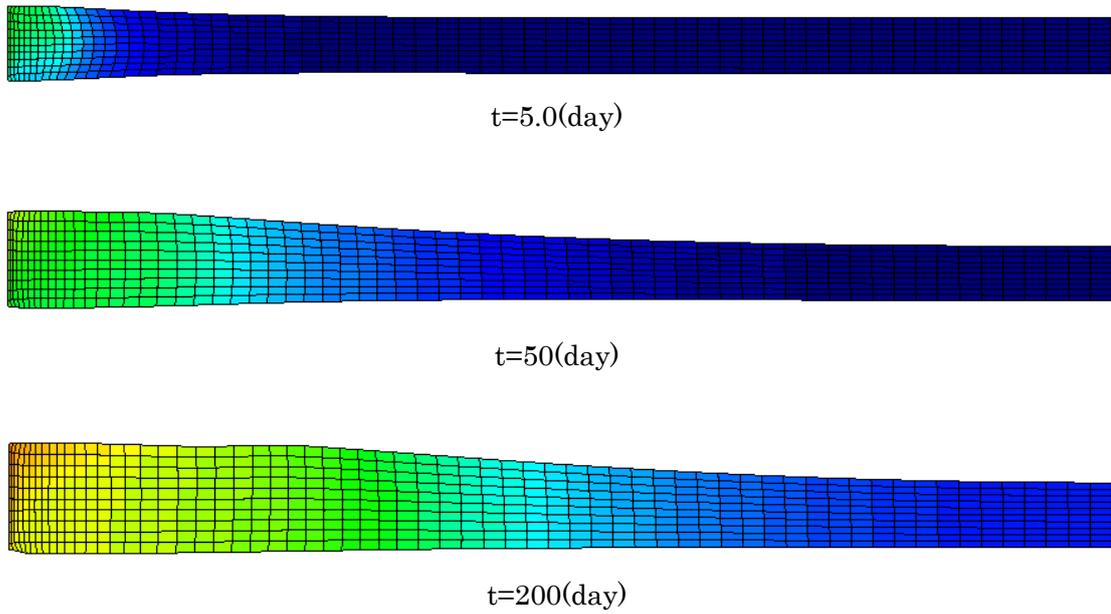


図 2. 2. 5-6 帯水層の間隙率の分布 (変形倍率 : 300)

図 2. 2. 5-7 に、ガスの浸入に伴う、局所安全率の変化を示す。

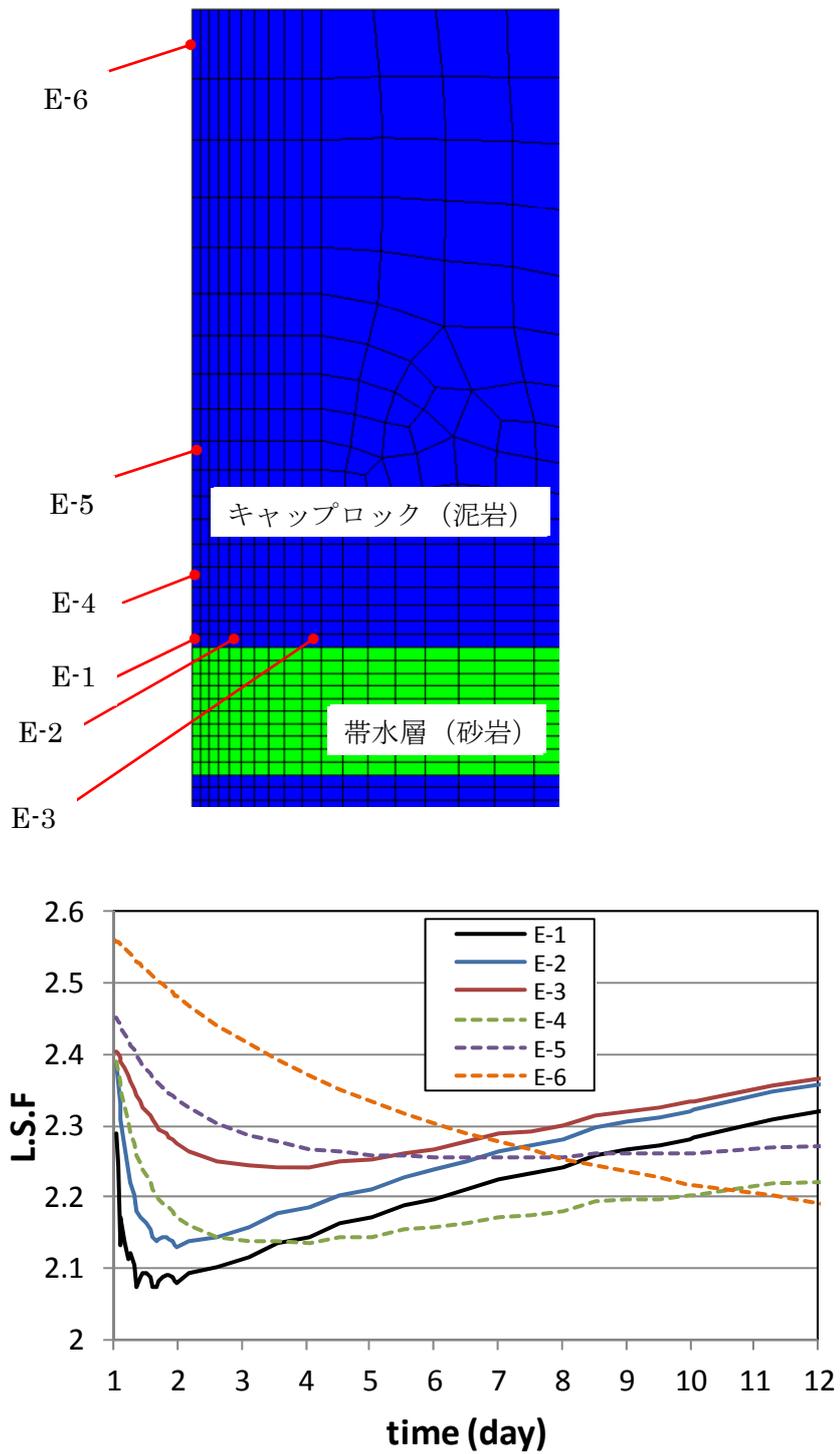


図 2. 2. 5-7 キャップロックの局所安全率（有効応力ベース）経時変化（ $c' = 0$ 、 $\phi' = 30^\circ$ と仮定）

図 2.2.5-8 に 500 日後の飽和度と、ガスの圧力分布を示す。岩盤の破壊には至らず、帯水層に沿って概ね移行している様子が示されている。

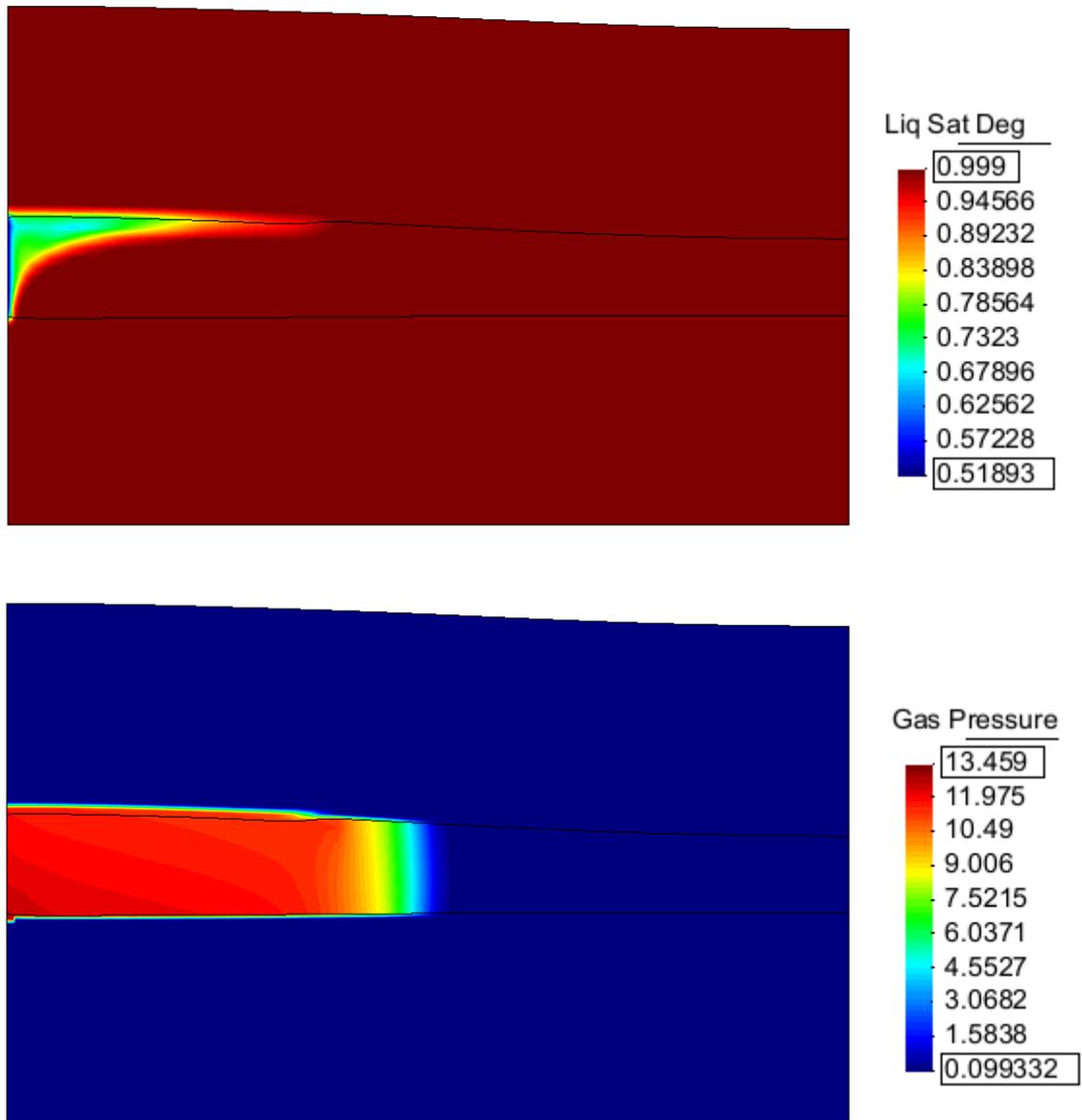


図 2.2.5-8 500 日後の飽和度（上）およびガスの圧力分布（下）

(c) LBM の解析例

LBM では、注水および揚水による地下水の移流場とその地下水に溶存している CO₂ イオンの拡散を連成して求めることができる。なお、ガスおよび地下水の二相流も計算が可能であるが、今回使用した実行プログラムでは二相流の計算モジュールを実装していない。このため、移流および拡散の影響評価の予備的なケーススタディとして、注入および揚水位置を変えた 2 種類の例について解析を実施した。

LBM において、地下水の物性として与えることのできるパラメータは粘性係数である。そのほかのパラメータとしては、CO₂ イオンの拡散係数、注入井と揚水井の圧力が必要となる。多くの場合、地下水の物性は岩盤に依存し、透水係数で与えられる。このため粘性係数を透水係数から換算する必要がある。以下に、東京工業大学の植村助教による換算方法¹¹⁾を示す。

岩盤中の単相流れの場合のダルシー則は以下の式であらわされる。

$$U = (k/\mu) \cdot (\Delta P/L)$$

ここで、U：ダルシー速度、k：透水係数、 μ ：地下水の粘性係数、
 ΔP ：圧力勾配、L：単位長さを表す。

また、岩盤中の細孔中の流れを巨視的な流れに模擬したダルシー流れは以下の式であらわされる。

$$U = (1/\mu') \cdot (\Delta P/L)$$

ここで、 μ' は岩盤中の細孔中の流れを巨視的な流れに模擬した場合の水の粘性である。

これらの式を比較し、以下の式を得る。

$$(1/\mu') = (k/\mu)$$

以下の解析では、この換算方法を用いた。

CO₂ イオンの拡散係数は、多くの水中のイオンの拡散係数と同様と考え、 $1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ と仮定した。

イ. ケース 1 : 注入位置と揚水位置が同一軸上に並ぶ場合

モデル作成の最初の段階として、移流が作られるかを検証することを目的とした解析を行った。図 2.2.5-9 に解析領域の設定を示す。領域は立方体形状の空間とし、上部の中心に注入井を模した円の領域を設定し、ここに圧力を加えることとした。計算領域の境界条件は、上部および下部は低透水層を想定し、反射境界、側面は周期的境界条件を課した。周期的境界条件の模式図を図 2.2.5-10 に示す。周期的境界条件は相対する境界面をつなげる境界設定法で、図の中心にあるのが真の解析領域であるが、周囲に解析領域のコピーを配置したことと同等になる。境界の外に出る流れは、そのまま反対側の境界から流入する流れになる。

解析領域の大きさは、横方向を 50m、縦方向を 100m とした。格子点数は $50 \times 50 \times 100$ 、格子間隔は 1 m とした。表 2.2.5-6 に解析に用いた物性値の一覧を示す。

表 2.2.5-6 解析に用いた物性値一覧

| 物性 | 値 |
|--------------------------|--------------------|
| 透水係数 (cm/s) | 1×10^{-5} |
| 水の粘性係数 (Pa·s) | 1×10^{-6} |
| CO ₂ イオンの拡散係数 | 1×10^{-6} |

図 2.2.5-11 に 50 日経過後の流線分布を、図 2.2.5-12 に同時期の CO₂ 濃度分布を示す。上方から下方への流れ場が励起されている結果となった。また、上端部に近い領域では渦状の流れ場が励起されている。これは、周期的境界条件により上部で対流的な効果が生まれている結果である。この渦のために、CO₂ は下方にそのまま向かわず、上部で広がる様子を見せている。全体的に 50 日程度では CO₂ の動きは緩慢で下流には到達していないと言える。

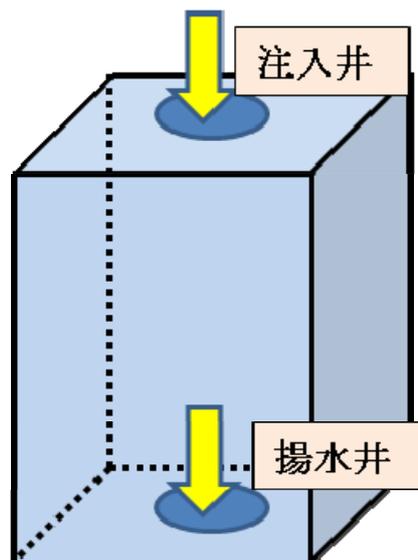


図 2.2.5-9 解析領域の設定

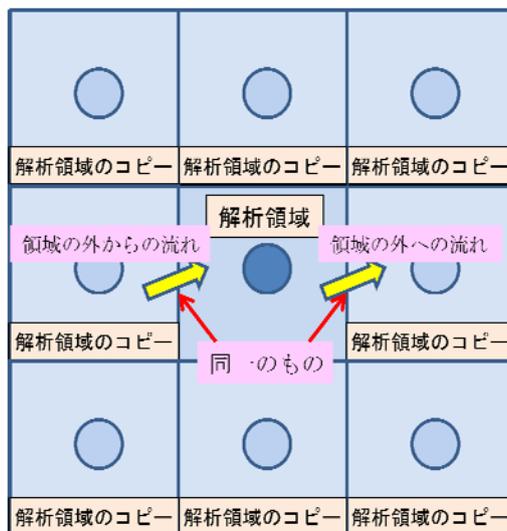


図 2.2.5-10 周期的境界条件の模式図

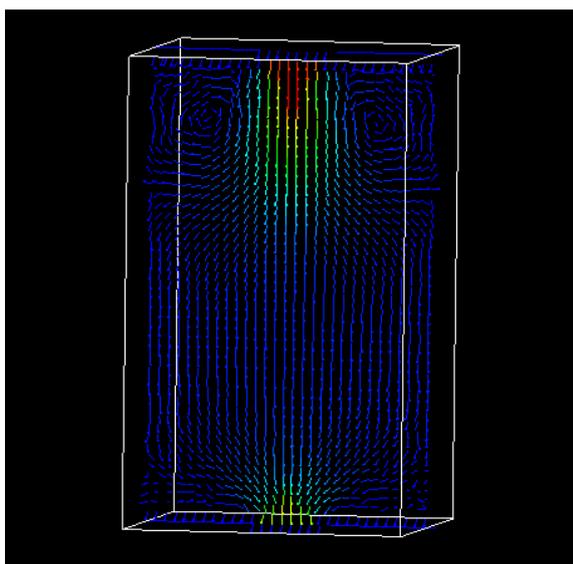


図 2.2.5-11 50 日後の流線分布

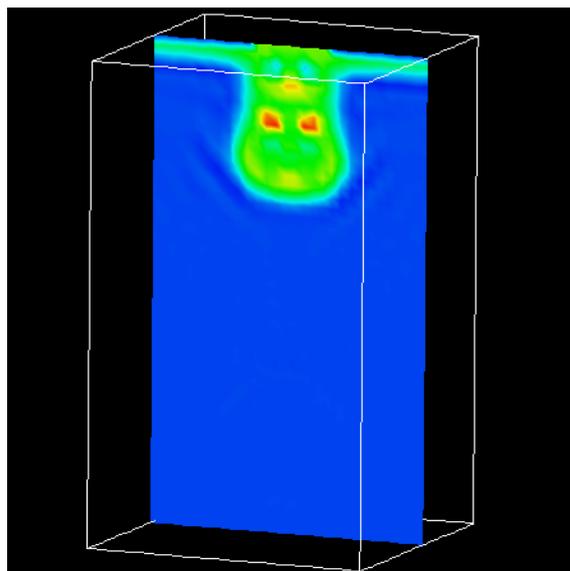


図 2.2.5-12 50 日後の CO₂ 濃度分布

ロ. ケース 2 : 注入位置と揚水位置がずれた位置に並ぶ場合

本調査研究で想定している CMS システムでは、1本の注入井を取り囲むように同心円状に4本または6本の揚水井を配置することになっている。これを1ユニットとして、複数のユニットが隣接するように多数設置された場合、揚水井と注入井が1本ずつの組み合わせとみなすことができる。この前提にもとづいて図 2.2.5-13 に示す解析領域で解析を行った。計算領域は、 $100 \times 100 \times 100\text{m}$ の領域とし、格子間隔は 1m とした。表 2.2.5-7 に解析に用いた物性値の一覧を示す。

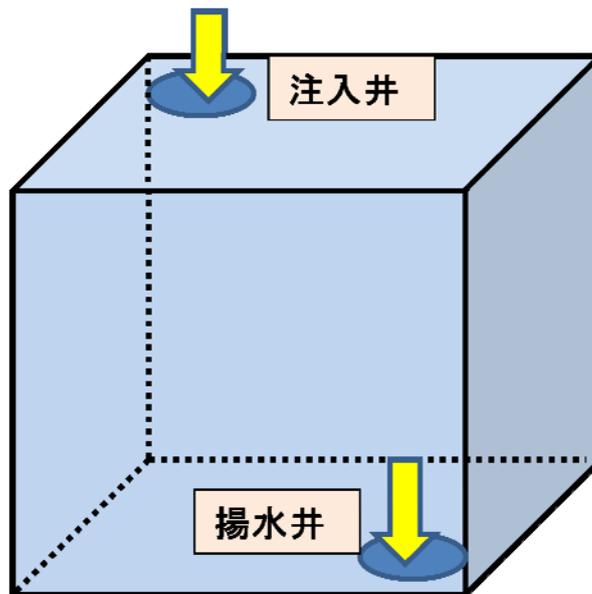


図 2.2.5-13 解析領域の模式図

表 2.2.5-7 解析に用いた物性値一覧

| 物性 | 値 |
|--------------------------|--------------------|
| 透水係数 (cm/s) | 1×10^{-5} |
| 水の粘性係数 (Pa·s) | 1×10^{-6} |
| CO ₂ イオンの拡散係数 | 1×10^{-6} |

解析結果のうち流線の分布を図 2.2.5-14 に示す。注入された溶解水が揚水井に向かって移動する様子が表れている。また、ケース 1 と同様に上部で渦状の流れが励起されている。図 2.2.5-15 に CO₂ の濃度分布を示す。色の濃い部分ほど濃度が高い状態を示している。CO₂ は流線に沿って下部に移動し、濃度の高い部分を形成している。図 2.2.5-16 に CO₂ の拡散係数を $1/10$ にした場合の結果を示す。この場合は、濃度分布はほとんど変化せず、CO₂ は移流によって運ばれると考えられる。

この結果からは、CO₂ 濃度分布が注入井と揚水井の配置によって影響を受けると考えられる。このため、注入や揚水を行う深度や配置を十分に検討することが重要と考えられる。

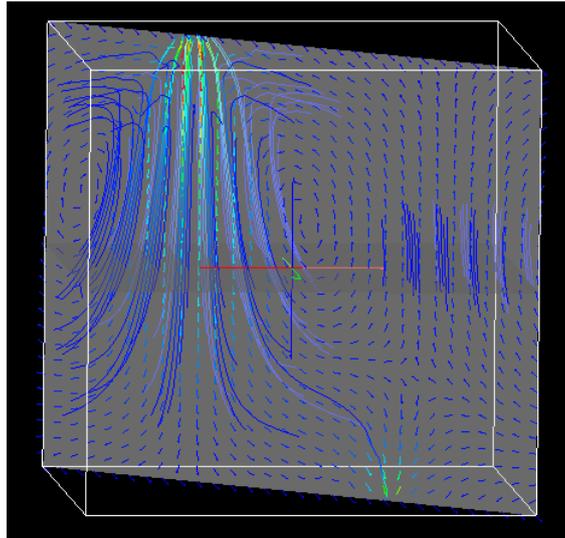


図 2. 2. 5-14 50 日経過後の流線分布図

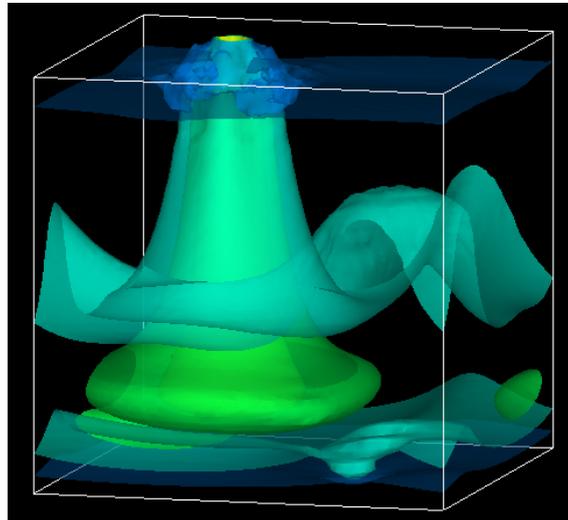


図 2. 2. 5-15 50 日経過後の CO₂ の濃度分布

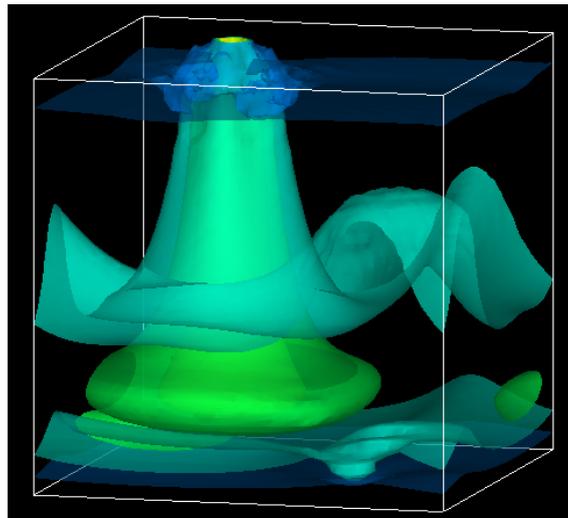


図 2. 2. 5-16 拡散係数を 1/10 にした場合の CO₂ の濃度分布

3) Tough2によるパラメータスタディ

(1) 目的

ここでは、CMSにおけるいくつかの操業方式によって、注入されたCO₂の挙動がどのような影響を受けるかについて数値シミュレーションを用いて検討し、合理的で経済効率のよい操業方式について考察した。

(2) 前提条件

マイクロバブルとして地層中に圧入されたCO₂は、通常の熱力学的原則に応じて間隙水に溶解するものとし、溶解度を超えるCO₂は供給されないものとする。通常の熱力学的原則に応じてという意味は、圧入された余剰のマイクロバブル態CO₂が気相として長期間の耐久性を示す効果、およびバブル表面積の増大などにより、熱力学平衡から定まる値よりも大きな溶解度を示す効果は期待しないということである。

CO₂を圧入する帯水層は、地表からの深度300mから500mに分布する砂岩層とし、その上下には難透水性の泥質岩が分布するものとする。注入井と揚水井の配置は、CO₂を注入する鉛直ボーリング孔から水平方向に100m離れた4つの孔井からの揚水で地下水流動を制御し、溶解したCO₂を帯水層中に広く分散させることを考える。注入量および揚水量は、安定的な操業のために両者をバランスさせることとする。また、CO₂溶解水の注入流量を7.0kg/sec (22万t・CO₂溶解水/y)とした。

(3) 考慮する操業方式

揚水井では帯水層全体から均一に揚水することとする。また、CO₂を注入する深度は、帯水層の中間(深度400m)からを標準(ケース1)とし、これに加えて次のケース2からケース5についてシミュレーションを実施した。

(ケース1) 帯水層の中央部100m(深度400m)から注入(標準ケース)

(ケース2) 帯水層の下部100m(深度500m)から注入

(ケース3) 帯水層の上部100m(深度300m)から注入

(ケース4) キャップロック層がない場合(注入深度は標準ケースと同じ)

(ケース5) 注入井と揚水井の距離を200mとする(//)

また、数値シミュレーションによる評価事項は次の3点とした。

①帯水層中にCO₂溶解水が満遍なく行き渡るかどうか

②揚水井以外の箇所、例えば、帯水層上部などにおいて気相のCO₂を生じる可能性の有無

③注入箇所での間隙圧力の増加の程度

①は溶解態CO₂の濃度分布の時間変化を3次元等値図等によって確認する。

②については、気相は静粘性係数が地下水の10⁻³倍程度であることから、地下水に比べ10³倍程度透過性が高くなるとともに、大きな浮力が働くため、気相化すればキャップロック層を透過するCO₂のフラックスは大きくなる。その場合、キャピラリーバリアとしてのキャップロック層の性能に依存する度合いが高くなり、地表への漏洩リスクが高まる。溶解態であれば、CO₂が溶解した間隙水の密度は、周辺の地下水の密度よりやや大きいことから、通常の地下水環境において自発的に上昇するフラックスは生じない。このことから、CMSにおいては、気相化しない

範囲での CO₂ 注入が重要となる。ここでは、ガス飽和度（岩盤の間隙におけるガス相の体積比率）分布の時間変化を 3 次元等値図等によって確認する。

③については、間隙圧力の増加に伴う有効応力の減少によって岩盤内の応力分布が変化し、せん断破壊を生じることが考えられる。破壊に至る応力状態は、初期応力状態によって異なるので、一般的には閾値としての間隙圧力を決定することは難しいが、例えば、地下水位の変動程度（数十 m）の範囲の間隙圧力変化であればせん断破壊には至らないと考えられる。ここでは、特に注入井周辺の間隙圧力の時間変化を等値図等によって確認する。

(4) 数値シミュレータ

溶解態の CO₂ の挙動は、移流分散（拡散）によって支配されるが、ここでは、CO₂ の気相化の有無を評価する必要があることから、地下水流動・移流分散（拡散）のほかに、相と相の間での物質のやり取りを含む多相流挙動をシミュレートすることができる数値シミュレータを用いる必要がある。ここでは、多相流体挙動シミュレータ Tough2¹⁶⁾、および、EOS モジュール（後述）¹⁷⁾として、塩水および CO₂ の物性を実装している ECO₂N²⁾を使用した。以下にその概要を述べる。なお、詳細については参考文献を参照されたい。

Tough2 は、米国ローレンスバークレー国立研究所の K.Pruess 博士らが開発した地熱、放射性廃棄物、有害物質（揮発性有機溶媒）等の多成分系多相状態の 3 次元地下水流動を取り扱う有限差分法数値シミュレータである。Tough2 では、流体の状態方程式等を記述したモジュール（EOS モジュール）を交換することによって、次のように多様な物質の組み合わせによる地下水流動に対応することができる。

- ・ Richard の式による飽和・不飽和流動（当温状態）
- ・ 水・空気
- ・ 水・水素ガス
- ・ 水・トレーサー
- ・ 水・油（揮発性ガスを含む）
- ・ 水・空気・揮発性有機溶媒
- ・ 水・核種・NaCl（溶解）
- ・ 水・CO₂（超臨界状態含む）・NaCl（溶解）

この内、最後に示した物質の組み合わせに対応した EOS モジュールを ECO₂N と言い、超臨界状態の CO₂ を圧入する CCS における貯留性能評価に用いられた実績も多い。

Tough2 本体は、入出力やソルバーなどを含む数値シミュレーション全体のフレームワークを形づくっているが、様々な構成関係や流体の物性は EOS モジュールで与えられる。ECO₂N では、10℃から 110℃までの温度、大気圧から 60MPa までの間隙圧力、および、飽和溶解度以下の濃度の NaCl という条件下での水および CO₂ の状態に対応している。従って、常温・常圧から CO₂ の超臨界状態までの状態においてこれらの混合系流体の流動シミュレーションが可能である。

水・CO₂・NaCl の混合系流体の挙動において重要な点は、(a)水と CO₂ の相分離特性、(b)混

合状態での熱力学的特性、の2つである。(a)水とCO₂の相分離特性とは、ある温度・圧力・NaCl濃度の条件下で、水とCO₂が気相および液相においてそれぞれどのような比率で存在するかというモデルのことであり、(b)混合状態での熱力学特性とは、混合物としての液相および気相それぞれの熱力学特性、ここでは特に、流動シミュレーションに用いる密度、静粘性係数、および比エンタルピーのことである。ECO₂Nでは上記(a)、(b)について次のように実装している。

(a) 水とCO₂の相分離特性

CO₂は温度・圧力条件によって、気体および液体として存在し、それぞれの熱力学的特性データも存在するが、数値シミュレーションの中でCO₂の気相および液相を別の相として区別して取り扱う方法やそれぞれの相の間の変化を取り扱う方法はない。このため、ECO₂Nでは、CO₂の存在形態として、水相への溶解態、気液相および超臨界状態を合わせた独立相(便宜上、気相と呼ぶ)、およびそれらの混合状態の3状態をモデル化している。

また、10℃以上の水は気相および液相として存在するので、気相は蒸気とCO₂の混合物となり、温度・圧力に応じて混合比率が異なる。

NaClは溶解イオンとして液相にのみ存在する。その濃度が異なれば、水と溶解態CO₂の自由エネルギーも異なるため、各相における水とCO₂の存在比率が異なる。

以上から、水とCO₂の相分離特性は、温度、圧力、および、NaCl濃度の関数となる。

様々な温度、圧力、およびNaCl濃度の条件において、水のCO₂の相分離特性に関する実験が行われており、それら実験データを用いて、Spycherほか(2003)¹⁴⁾、SpycherとPruess(2005)¹⁸⁾によって熱力学的な考察に基づく数値モデルが提案された。ECO₂Nは、その数値モデルを実装している。

(b) 混合状態での熱力学特性

前記の相分離特性モデルにおいて、気相における水の蒸気の質量比率は1%未満であることから、気相の熱力学特性をCO₂の独立相として近似しても誤差は非常に小さいと考えられる。ECO₂Nでは、気相(すなわちCO₂単独相)の密度と静粘性係数は、Altunin(1975)¹⁹⁾の温度、圧力による内挿モデルを用いている。なお、気相の比エンタルピーのモデルは、Pruess(2005)¹⁷⁾を参照されたい。また、液相の密度、静粘性係数、および比エンタルピーは、それぞれGarcia(2001)²⁰⁾のモデル、静粘性係数はPhillips(1981)²¹⁾のモデル、およびLorenzほか(2000)²²⁾によって与えられる。

ECO₂Nでは、これらのモデルを用いて、液相および気相の熱力学特性を温度、圧力、NaCl濃度に関する不連続なテーブル関数として予め与えておき、プログラムの実行時に温度、圧力、およびNaCl濃度の3変数による線形内挿によって関数値を求めるようになっている。

(5) 数値シミュレーションの条件

(a) 離散化モデル

注入井および揚水井を含む水平(xy平面)500×500m、地表から深度(z軸)900mまでの領域を、x、y、z軸方向に10×10×10mのグリッドに分割し、端部100m、および地表から深度200mまでと下端部300mの分割幅は100mとした。注入井は、モデル中央部の隣接する

4つのグリッドの下部、深度 350~450m (標準ケース) に含まれるグリッドからの均等な湧き出し、揚水井は、それぞれ2つのグリッドの下部、深度 300~500m に含まれるグリッドからの均等な吸出しとして表現し、孔井および孔井周辺の詳細なモデル化は行っていない。また、深度 250~300m をキャップロック層として低透水性の地層 (標準ケース)、その下部に深度 300~500m まで高透水性の砂層がそれぞれ水平に存在するとして離散化した。

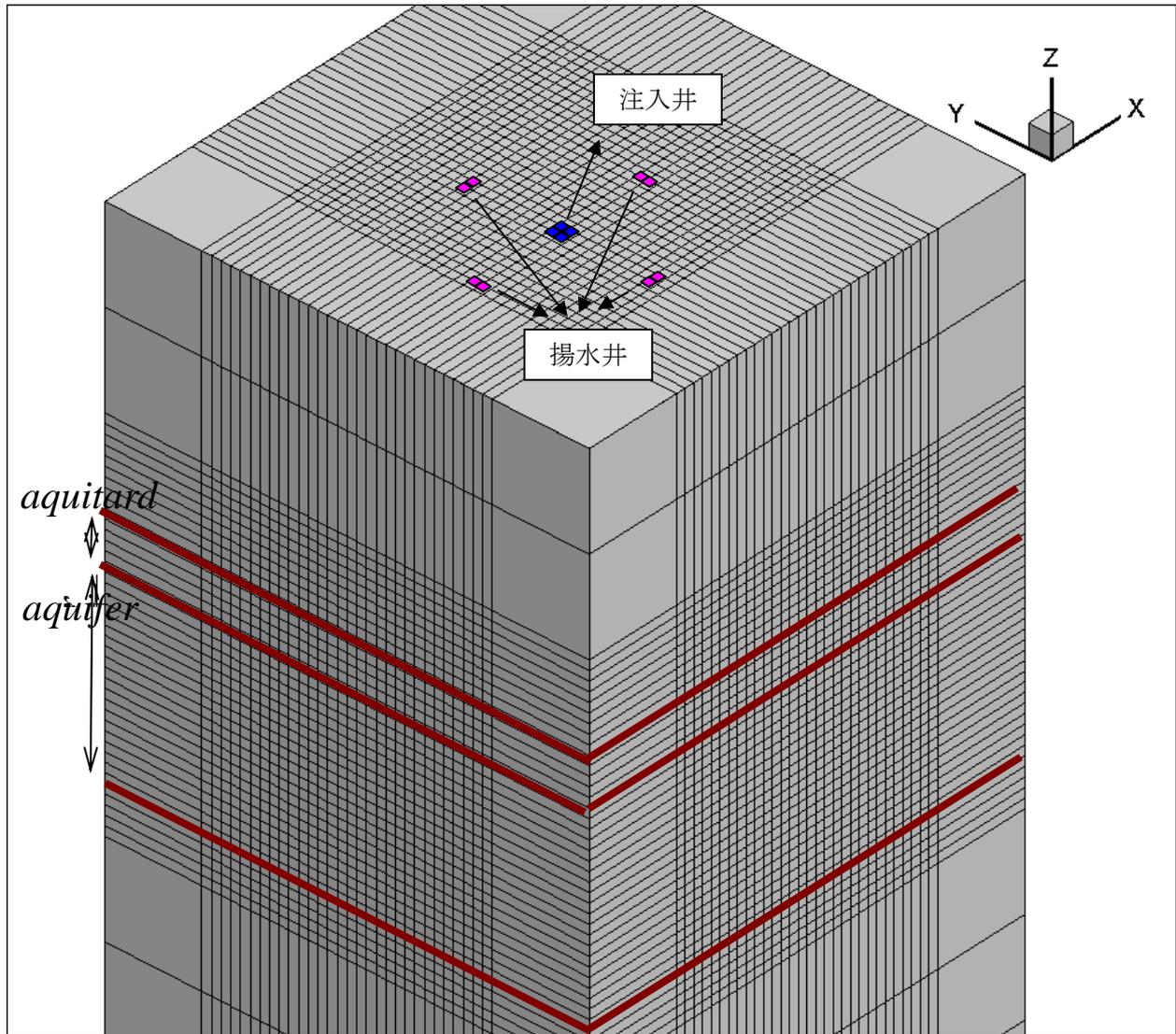


図 2.2.5-17 数値シミュレーションのための離散化モデル図

(b) 入力諸条件

境界条件は、上部が大気圧 ($\approx 100\text{kPa}$) および 15°C で一定とし、側部と下部はフラックス 0 の境界とした。初期条件は、温度は地表から地温勾配 $2.5^\circ\text{C}/100\text{m}$ 、圧力は静水圧勾配 $1\text{MPa}/100\text{m}$ で定め、 CO_2 濃度は全グリッドについて 0 とした。

砂岩層および泥質岩層の透過係数および間隙率は表 2.2.5-8 のように設定した。

また、気相化を考慮することから、液相（水の優勢相）と気相（CO₂の優勢相）による2相流特性を表 2.2.5-9 のように設定する²⁾。砂岩層と泥質岩層について同一の値を用いた。これは、キャピラリーバリアとしてのキャップロック層の性能について保守的な設定である。図 2.2.5-18 および図 2.2.5-19 はそれぞれ相対浸透率および毛管圧のプロットである。

表 2.2.5-8 砂岩層および泥質岩層の透過係数と間隙率

| | 砂岩層 | 泥質岩層 |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 透過係数(m ²) | 1.0×10^{-13} | 1.0×10^{-16} |
| 間隙率 | 0.35 | 0.30 |

表 2.2.5-9 砂岩層および泥質岩層の2相流特性（相対透過係数、毛管圧）

| | 相対透過係数 van Genuchten function (van Genuchten, 1980) | | 毛管圧 van Genuchten-Mualem model (Mualem,1976; van Genuchten, 1980) | | |
|-----------|---|-------|---|----------------------|----------------------|
| | 砂岩層 | 泥質岩層 | | 砂岩層 | 泥質岩層 |
| λ | 0.457 | 0.457 | λ | 0.457 | 0.457 |
| S_{lr} | 0.30 | 0.30 | S_{lr} | 0.0 | 0.0 |
| S_{ls} | 1.0 | 1.0 | $1/P_0$ | 5.1×10^{-5} | 5.1×10^{-5} |
| S_{gr} | 0.05 | 0.05 | P_{max} | 1.0×10^7 | 1.0×10^7 |
| | | | S_{ls} | 0.999 | 0.999 |

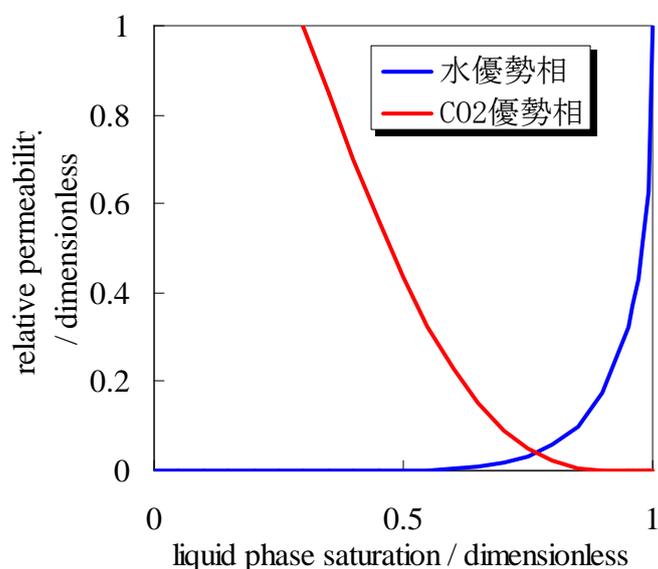


図 2.2.5-18 水優勢相および CO₂ 優勢相の相対透過係数の関数

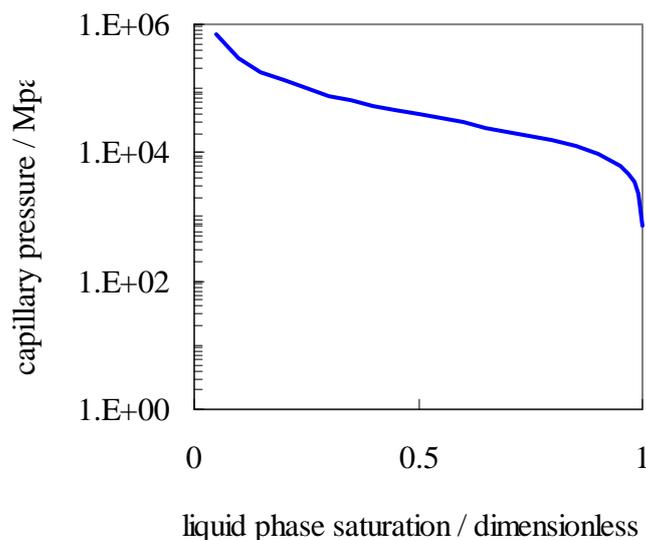


図 2. 2. 5-19 毛管圧の関数

また、圧入時の CO₂ の質量分率は、CO₂ 分圧 4Mpa (≒深度 400m における静水圧) における溶解度 4.4%³⁾よりも小さい 4.0%とした。

(c) シミュレーションケース

シミュレーションのケースは表 2. 2. 5-10 のように設定した。

表 2. 2. 5-10 シミュレーションケース

| | |
|---------------|-----------------------------|
| ケース 1 (標準ケース) | 深度 350m から 450m で注入 |
| ケース 2 | 下部 (深度 400m から 500m) で注入 |
| ケース 3 | 上部 (深度 300m から 400m) で注入 |
| ケース 4 | キャップロック層なし。他はケース 1 と同等 |
| ケース 5 | 注入井と揚水井の距離 200m。他はケース 1 と同等 |

(6) 結果と考察

(a) ケース 1 : 帯水層の中央部 100m から注入 (標準ケース)

ケース 1 のシミュレーション結果例を図 2. 2. 5-20~図 2. 2. 5-22 に示す。これらはシミュレーション開始から 4 年後の CO₂ の質量分率、ガス飽和度、圧力の分布を等値面図や等高線図により示したものである。

図 2. 2. 5-20 は注入時の質量分率 4.0%よりやや小さい 3.8%の等値面 (赤色) と帯水層の中央での等値線図を合わせて示した図である。CO₂ 溶解水がモデル中央部の注入井より帯水層中を水平方向に移行していることがわかる。

図 2.2.5-21 は、ガス飽和度 5%の等値面と帯水層の上端、中央、下端での等値線図を合わせた図である。揚水井に相当するグリッド以外には CO_2 の気相化は生じていないことがわかる。揚水井に相当するグリッドで気相化するのは、原理的には揚水により減圧するためである。ただし、孔井内の流動は本来多孔質流れではないため Tough2 による厳密なシミュレートは難しいため、この気相化については考察の対象外とした。

図 2.2.5-22 は帯水層中央部の圧力分布である。凡例の数値の単位は Pa である。すなわち、注入井がある中央部では、周辺に比べてやや間隙圧力が増加し、揚水井の周辺では減少しているが、注入井を含むグリッドでの圧力増加はせいぜい 200kPa 以内であることがわかる。

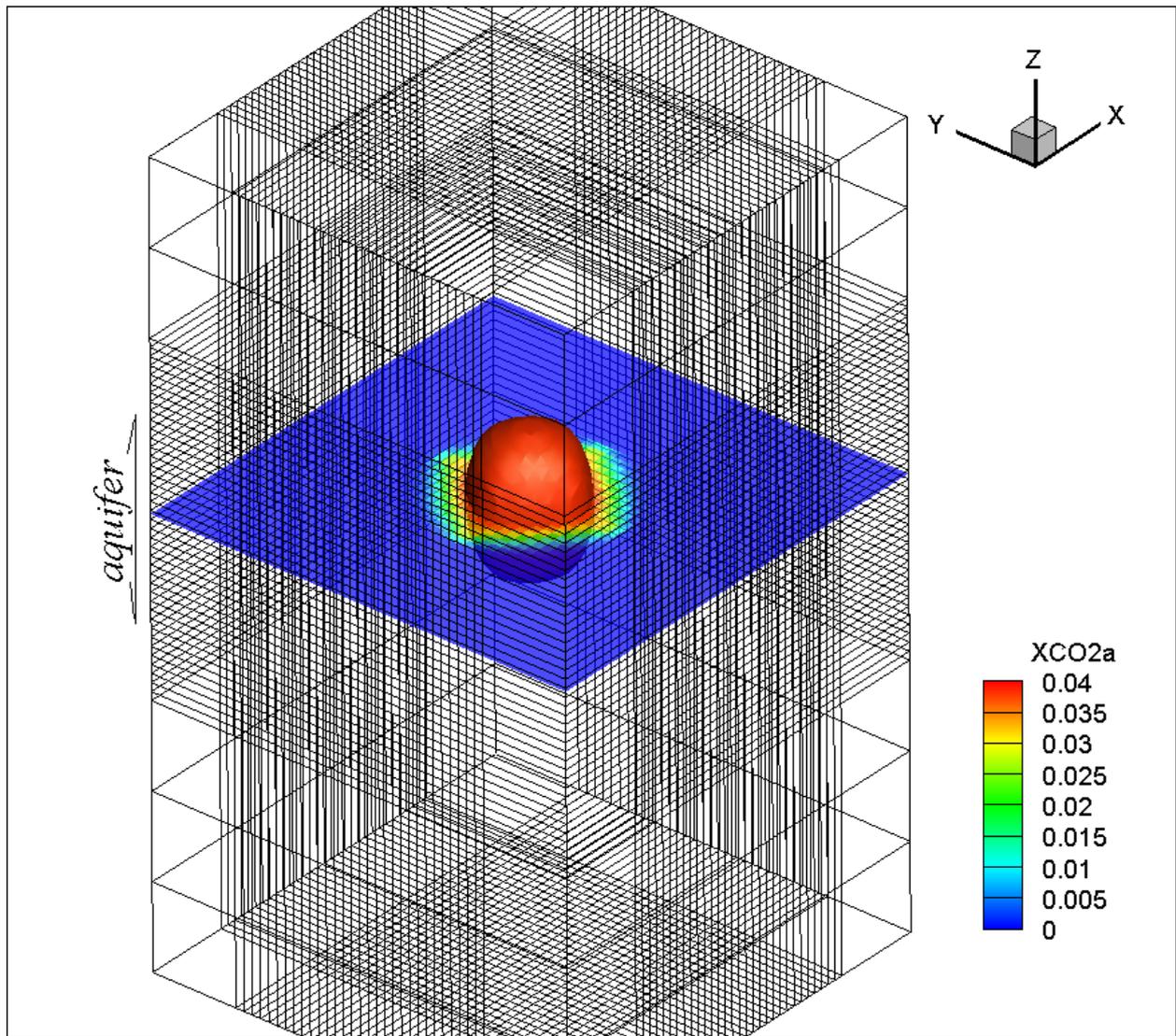


図 2.2.5-20 シミュレーション開始後 4 年における CO_2 の質量分率の分布 (ケース 1)

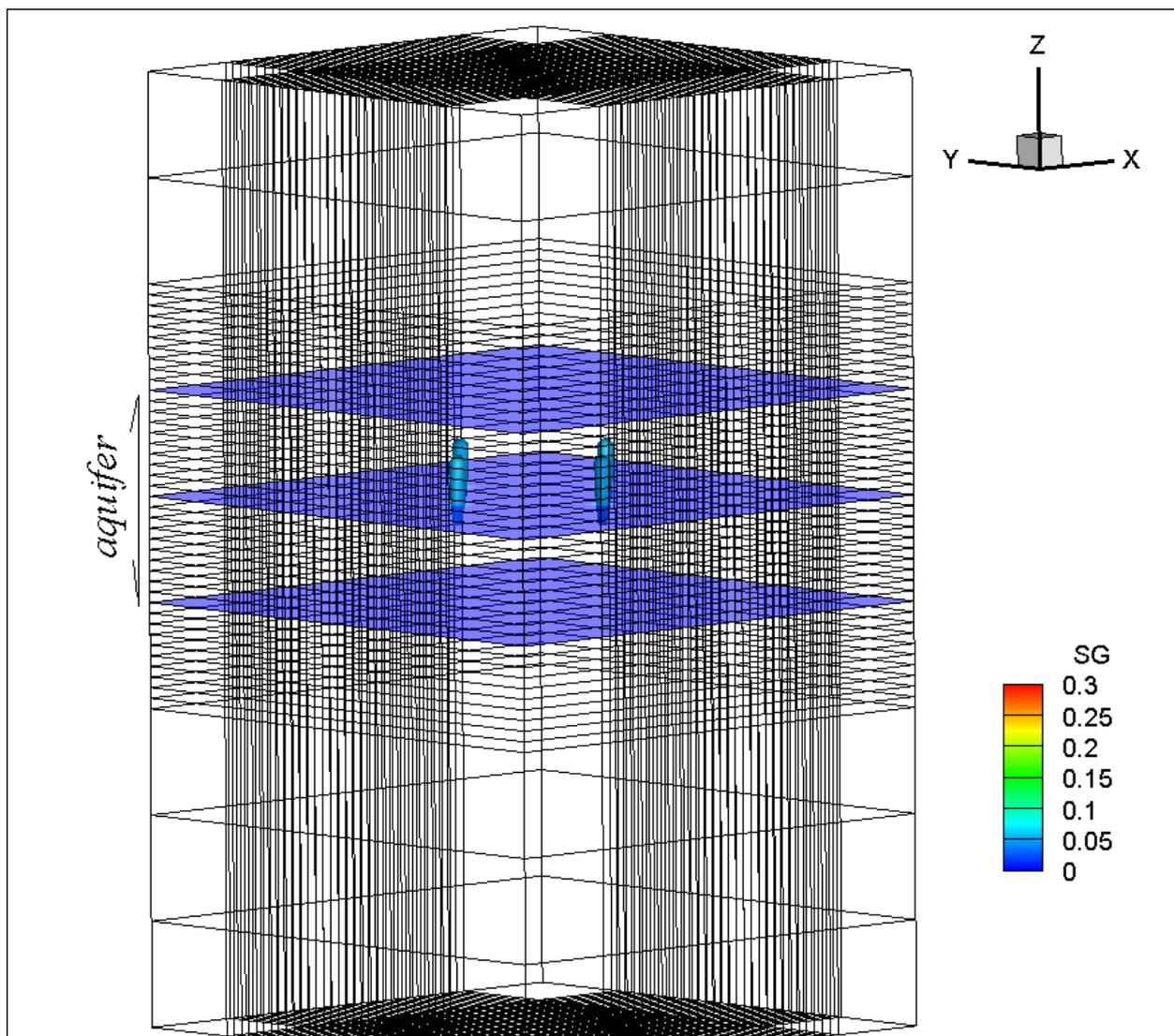


図 2.2.5-21 シミュレーション開始後4年におけるガス飽和度の分布（ケース1）

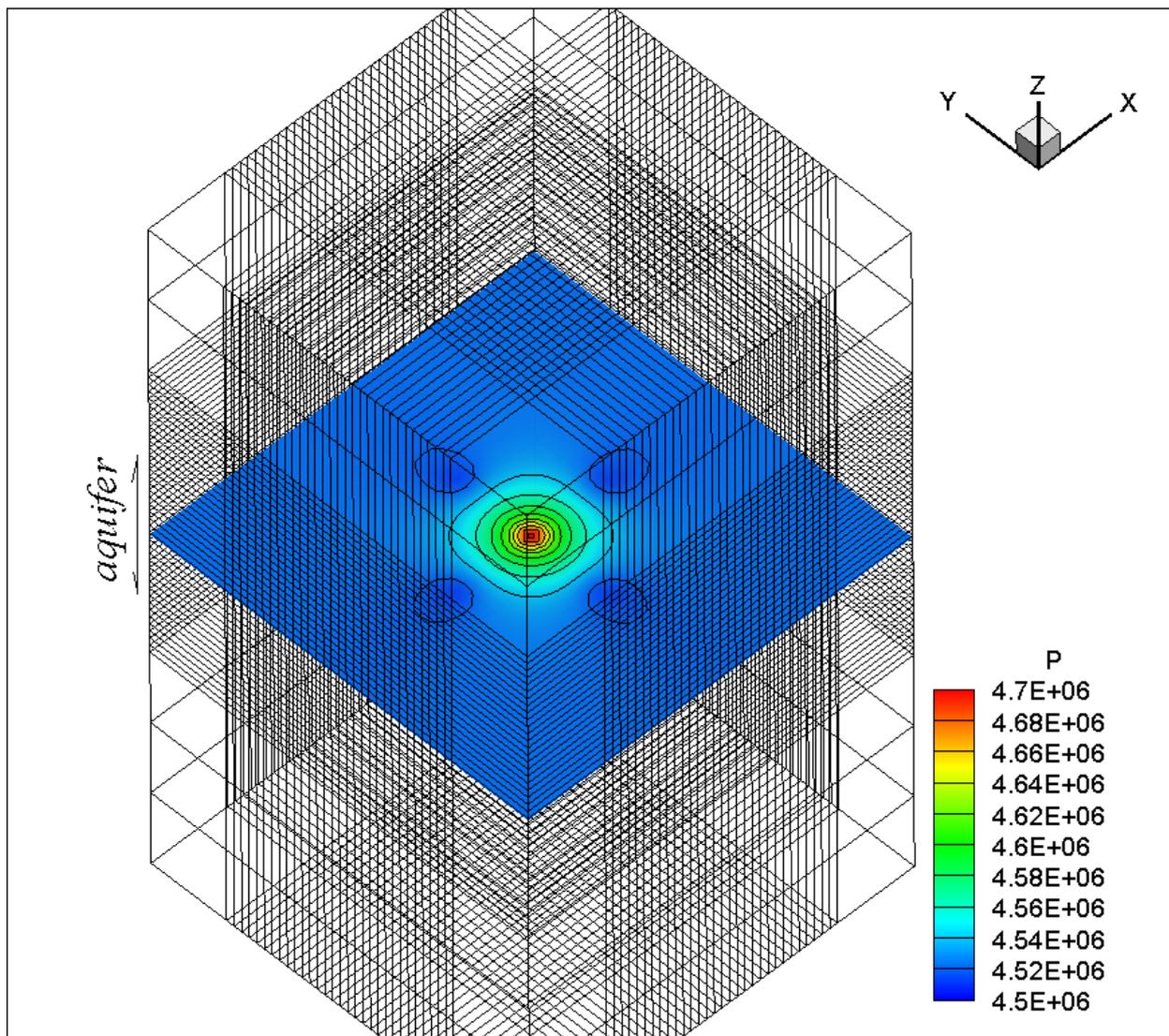


図 2.2.5-22 シミュレーション開始後 4 年における間隙圧力の分布（ケース 1）

(b) ケース 2：帯水層の下部 100m から注入

ケース 2 のシミュレーション結果例を図 2.2.5-23～図 2.2.5-25 に示す。これらはシミュレーション開始から 4 年後の CO_2 の質量分率、ガス飽和度、圧力の分布を等値面図や等高線図により示したものである。

図 2.2.5-23 には注入時の質量分率 4.0% よりやや小さい 3.8% の等値面（赤色）と帯水層の上端および下端での等値線図を合わせて示した。 CO_2 溶解水が帯水層中を水平方向に移行しつつ、帯水層上部にも少し分散していることがわかる。揚水井に相当するグリッドに CO_2 の質量分率が高い箇所が見られるが、揚水井における流体の挙動は多孔質流動ではないためこれを厳密に再現することは Tough2 では難しく、考察の対象外とした。

図 2.2.5-24 には、ガス飽和度 5% の等値面と帯水層の上端および下端での等値線図を合わせて示した。ケース 1 と同様、揚水井に相当するグリッド以外には CO_2 の気相化は生じていな

いことがわかる。揚水井における気相化は、前述と同様である。

図 2.2.5-25 は、帯水層中央部の圧力分布である。注入井がある中央部では、周辺に比べてやや間隙圧力が増加しているが、ケース 1 と同様、増加の幅は 200kPa 以内である。

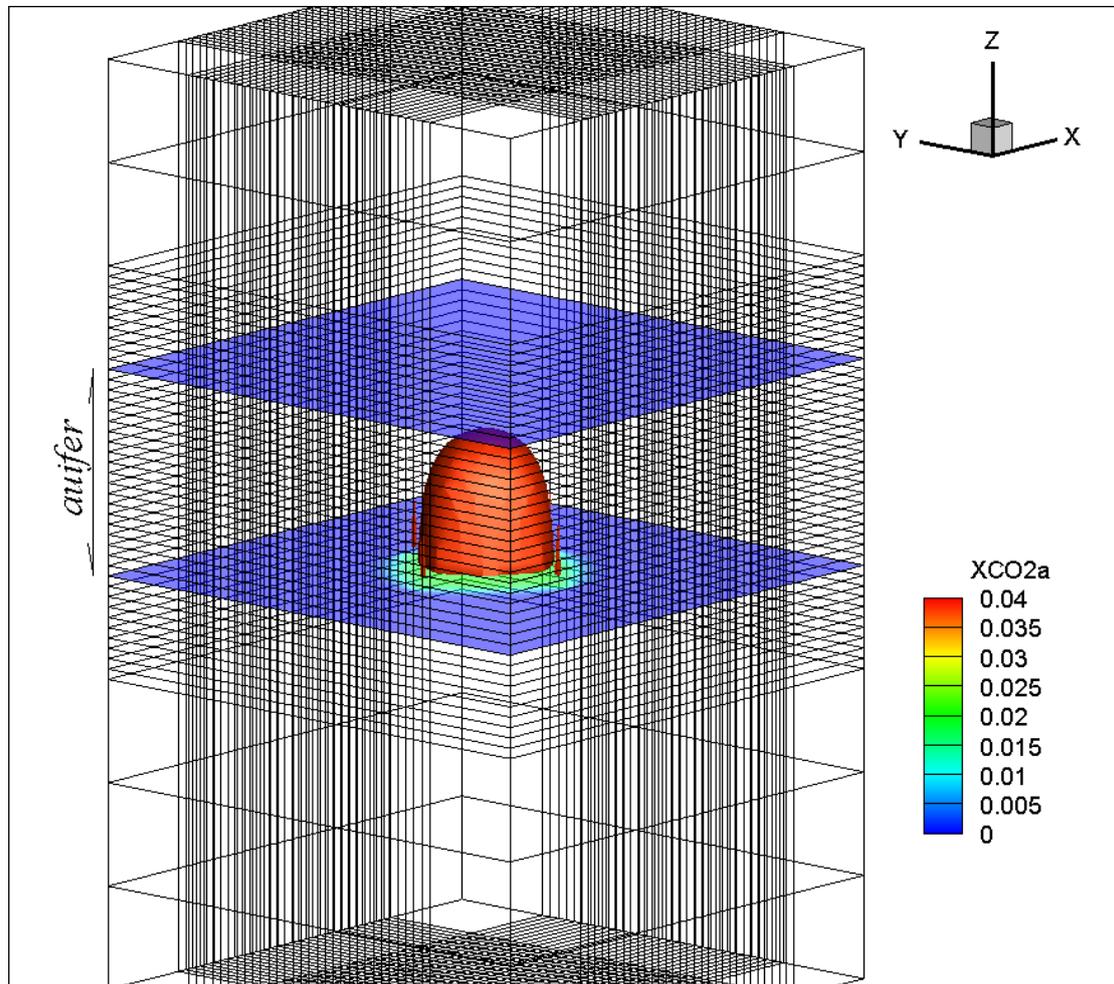


図 2.2.5-23 シミュレーション開始後 4 年における CO₂ の質量分率の分布 (ケース 2)

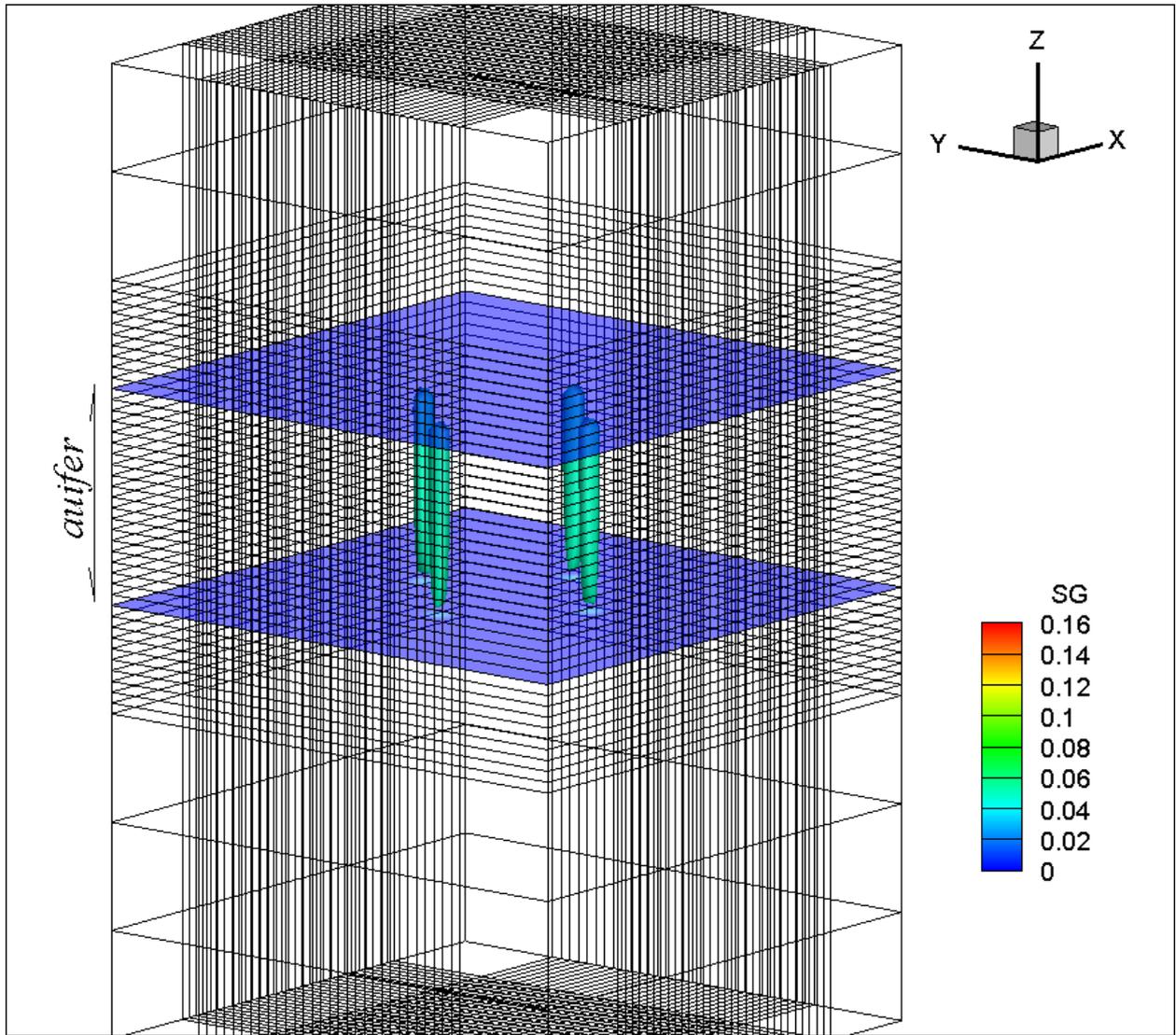


図 2.2.5-24 シミュレーション開始後4年におけるガス飽和度の分布（ケース2）

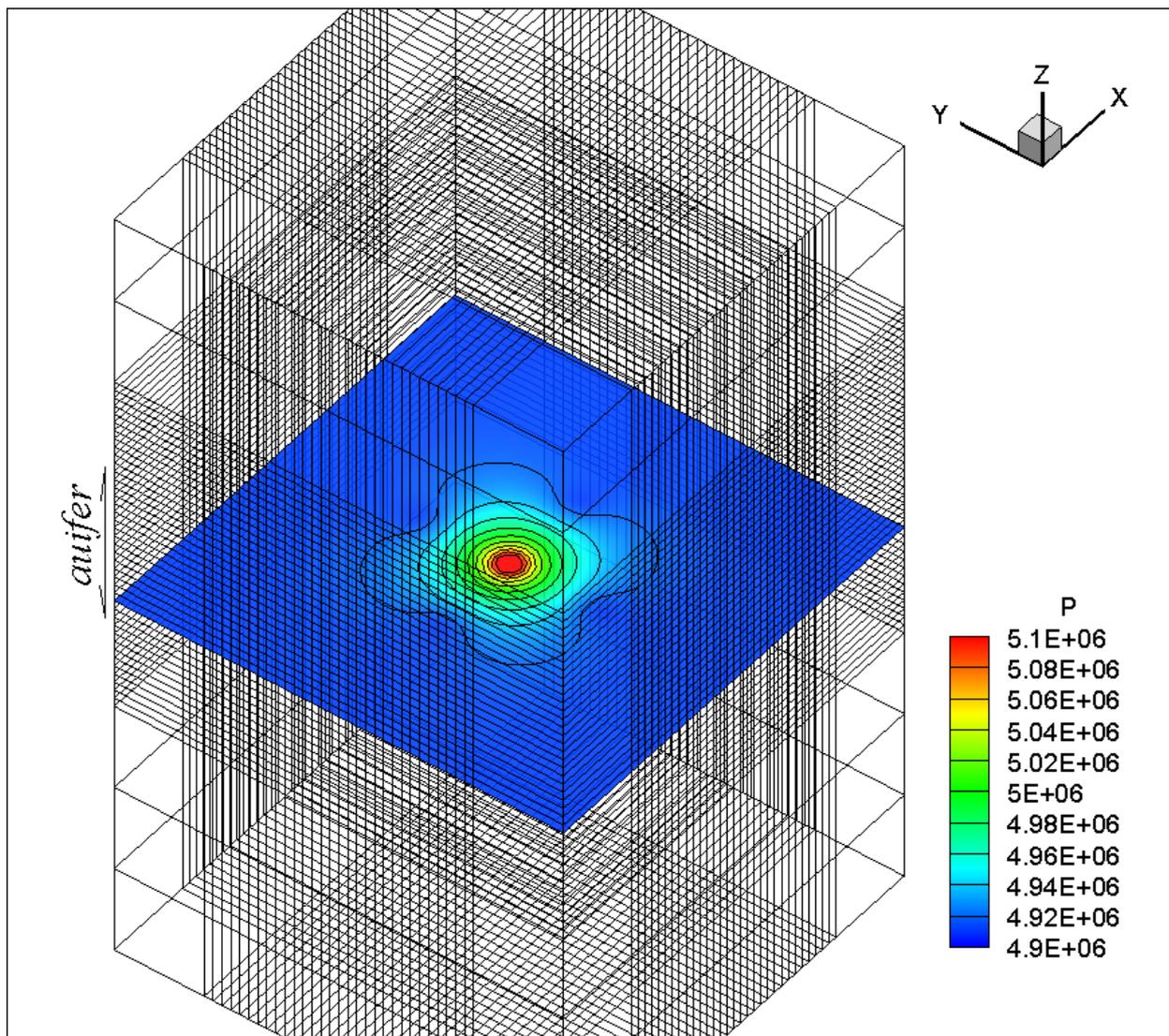


図 2.2.5-25 シミュレーション開始後 4 年における間隙圧力の分布（ケース 2）

(c) ケース 3 : 帯水層の上部 100m からの注入

ケース 3 のシミュレーション結果例を図 2.2.5-26～図 2.2.5-28 に示す。これらはシミュレーション開始から 4 年後の CO_2 の質量分率、ガス飽和度、圧力の分布を、等値面図や等高線図により示したものである。

図 2.2.5-26 には注入時の質量分率 4.0% よりやや小さい 3.8% の等値面（赤色）と、帯水層の上端、中央、下端での等値線図とを合わせて示した。 CO_2 溶解水が帯水層中を水平方向に移行しつつ、帯水層下部にも少し分散していることがわかる。

図 2.2.5-27 には、ガス飽和度 5% の等値面と、帯水層の上端、中央、下端での等値線図を合わせて示した。ケース 1 と同様、揚水井を含むグリッド以外には CO_2 の気相化は生じていないことがわかる。

図 2.2.5-28 は、帯水層中央部の圧力分布である。注入井がある中央部では、周辺に比べて

やや間隙圧力が増加しているが、ケース 1 同様、増加の幅はせいぜい 200kPa 以内である。

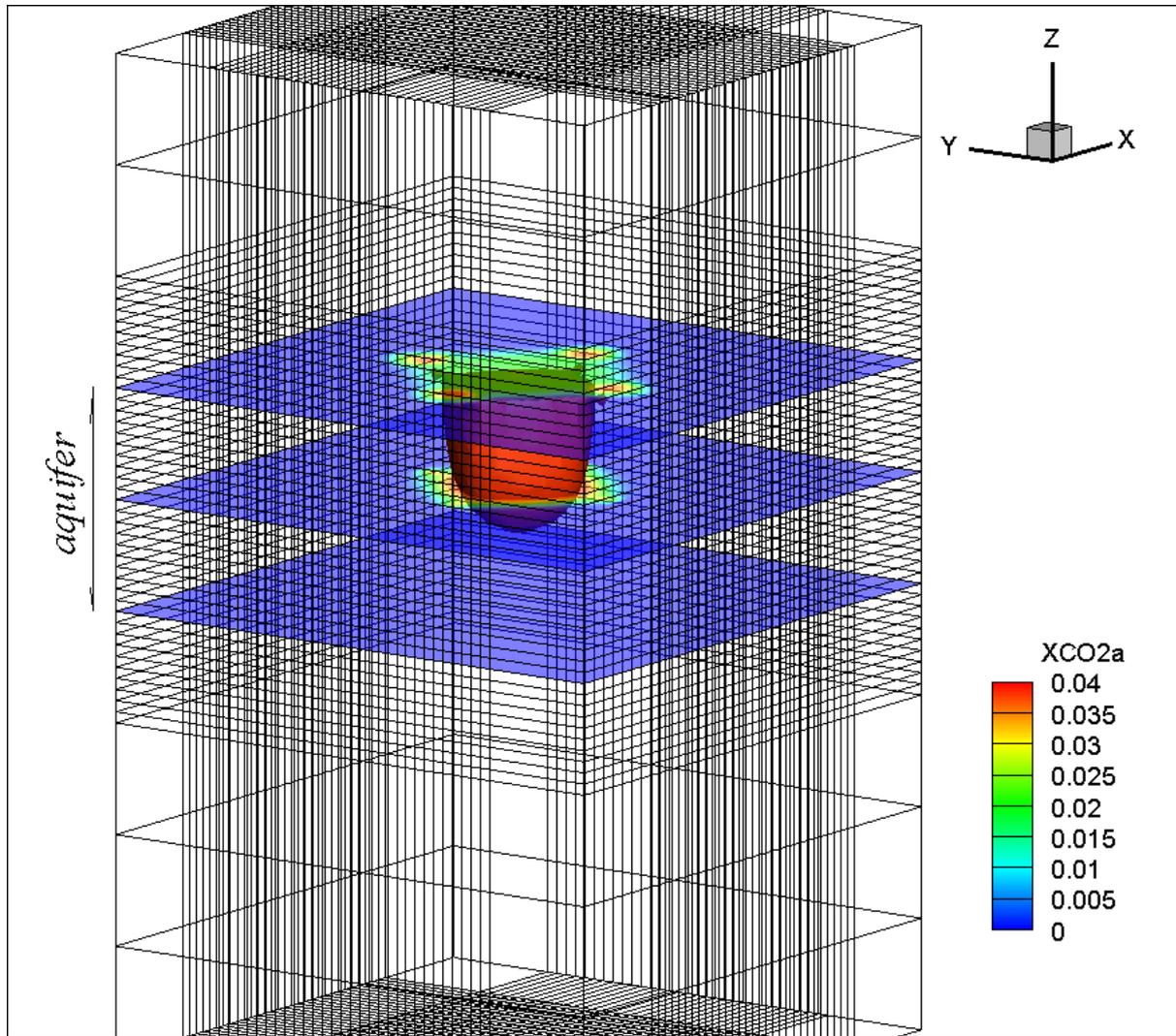


図 2.2.5-26 シミュレーション開始後 4 年における CO₂ の質量分率の分布 (ケース 3)

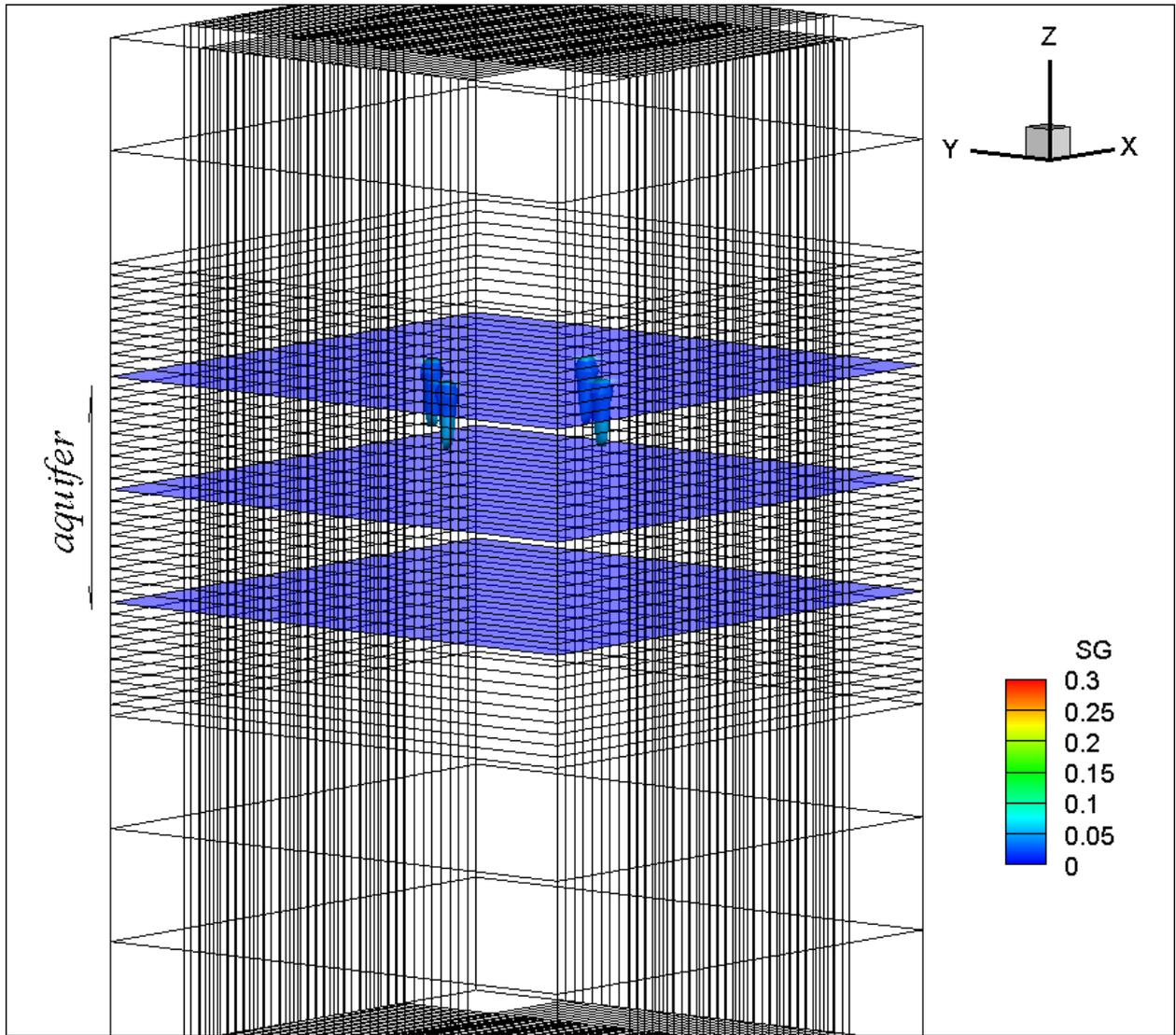


図 2.2.5-27 シミュレーション開始後4年におけるガス飽和度の分布（ケース3）

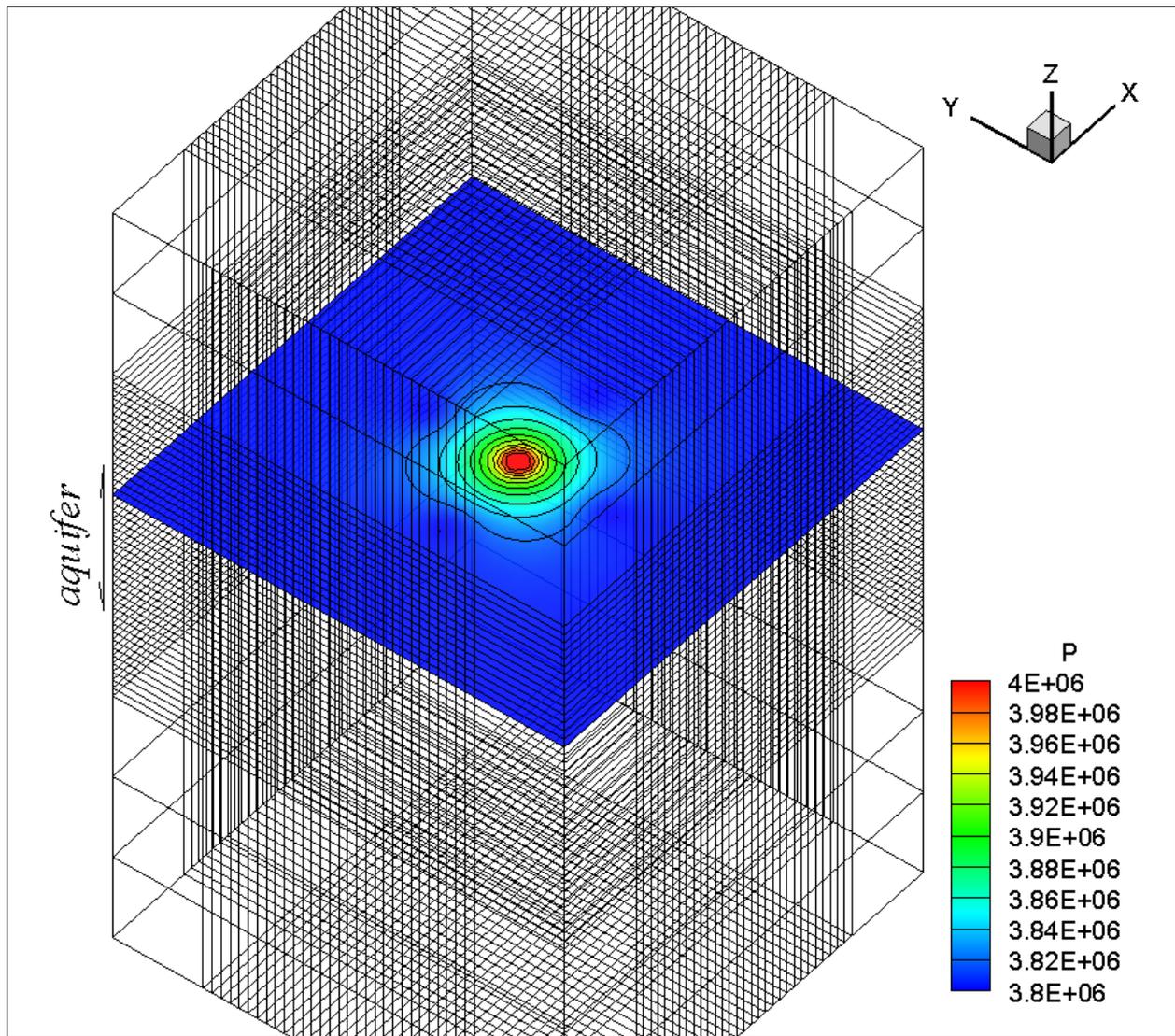


図 2.2.5-28 シミュレーション開始後 4 年における間隙圧力の分布（ケース 3）

(d) ケース 4：キャップロック層なし（注入深度はケース 1 と同じ）

ケース 4 のシミュレーション結果例を図 2.2.5-29～図 2.2.5-31 に示す。これらはシミュレーション開始から 4 年後の、CO₂ の質量分率、ガス飽和度、圧力の分布を等値面図や等高線図により示したものである。

図 2.2.5-29 には注入時の質量分率 4.0% とほぼ同等の 3.8% の等値面（赤色）と帯水層の上端、中央、下端での等値線図を示した。CO₂ 溶解水は帯水層上下に少し分散しているが上方に逸散せず、帯水層中を水平方向に移行し揚水井にキャプチャされていることがわかる。

図 2.2.5-30 には、ガス飽和度 5% の等値面と帯水層の上端、中央、下端での等値線図を示した。揚水井に相当するグリッド以外には CO₂ の気相化は生じていないことがわかる。

図 2.2.5-31 は、帯水層中央部の圧力分布である。注入井がある中央部では、周辺に比べてやや間隙圧力が増加しているが、増加の幅はせいぜい 200kPa 以内である。注入井周辺の圧力

増加がケース1より少ないのはキャップロック層がなく圧力が上方に散逸するためである。

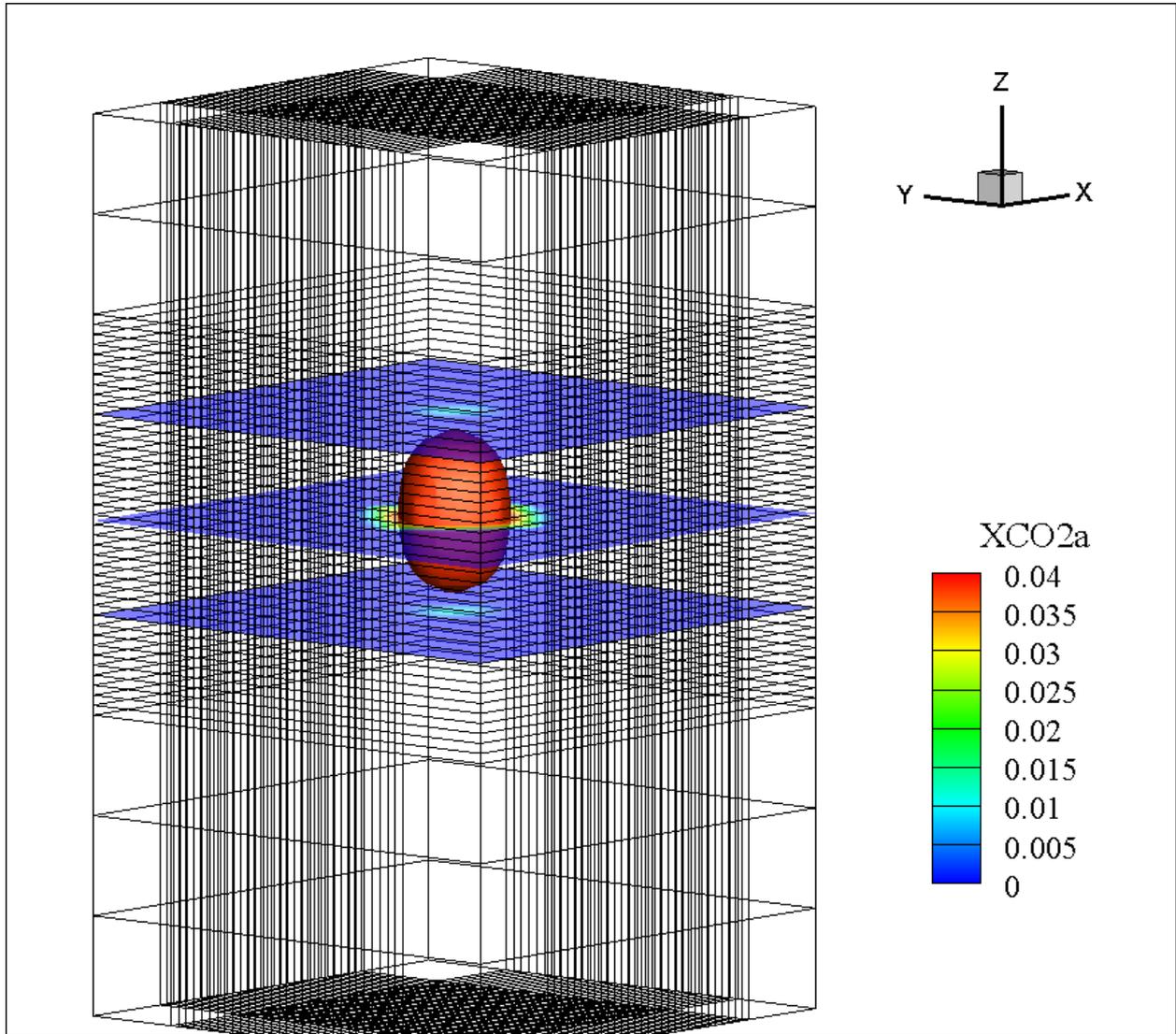


図 2.2.5-29 シミュレーション開始後4年におけるCO₂の質量分率の分布(ケース4)

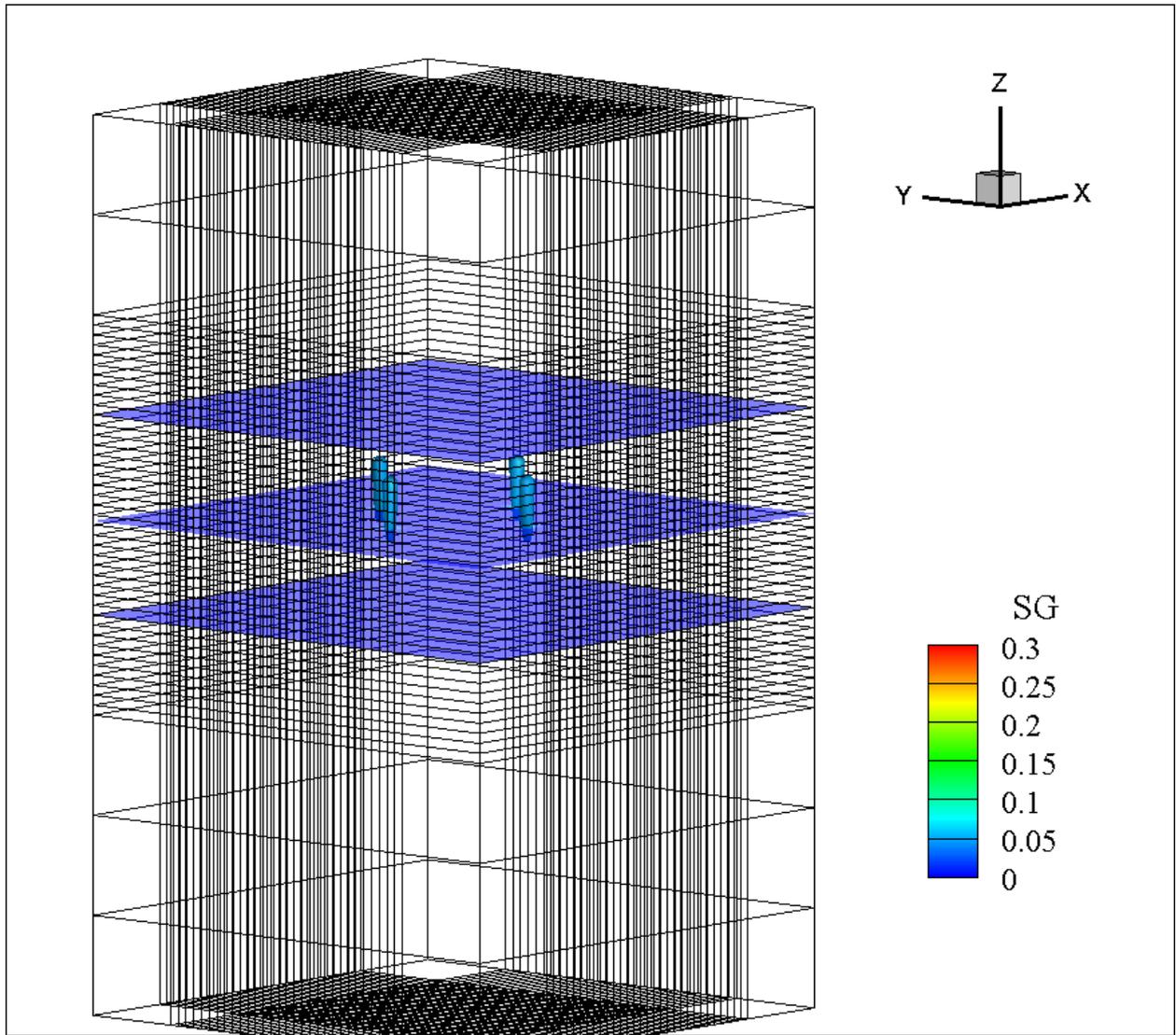


図 2.2.5-30 シミュレーション開始後4年におけるガス飽和度の分布（ケース4）

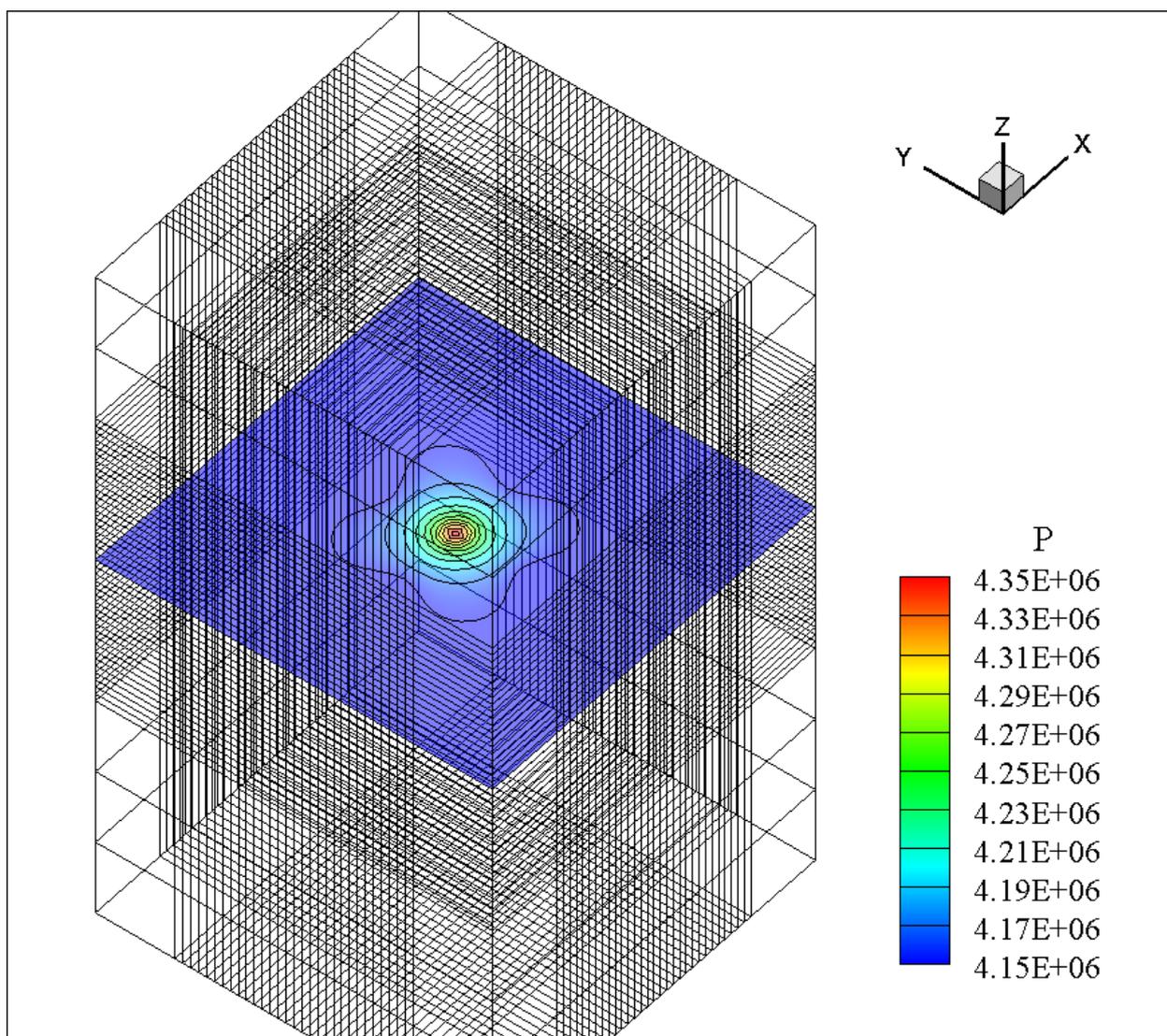


図 2.2.5-31 シミュレーション開始後 4 年における間隙圧力の分布 (ケース 4)

(e) ケース 5 : 注入井と揚水井の離間距離 200m (注入深度はケース 1 に同じ)

ケース 5 で用いた離散化モデルを図 2.2.5-32 に示す。ケース 1 (標準ケース) と同様、注入井をモデル中央部の 4 つのグリッドとその鉛直下部のグリッド、揚水井は注入井から x、y 軸方向にそれぞれ 200m 離れた位置で、それぞれ 2 つずつのグリッドとその鉛直下部のグリッドとした。

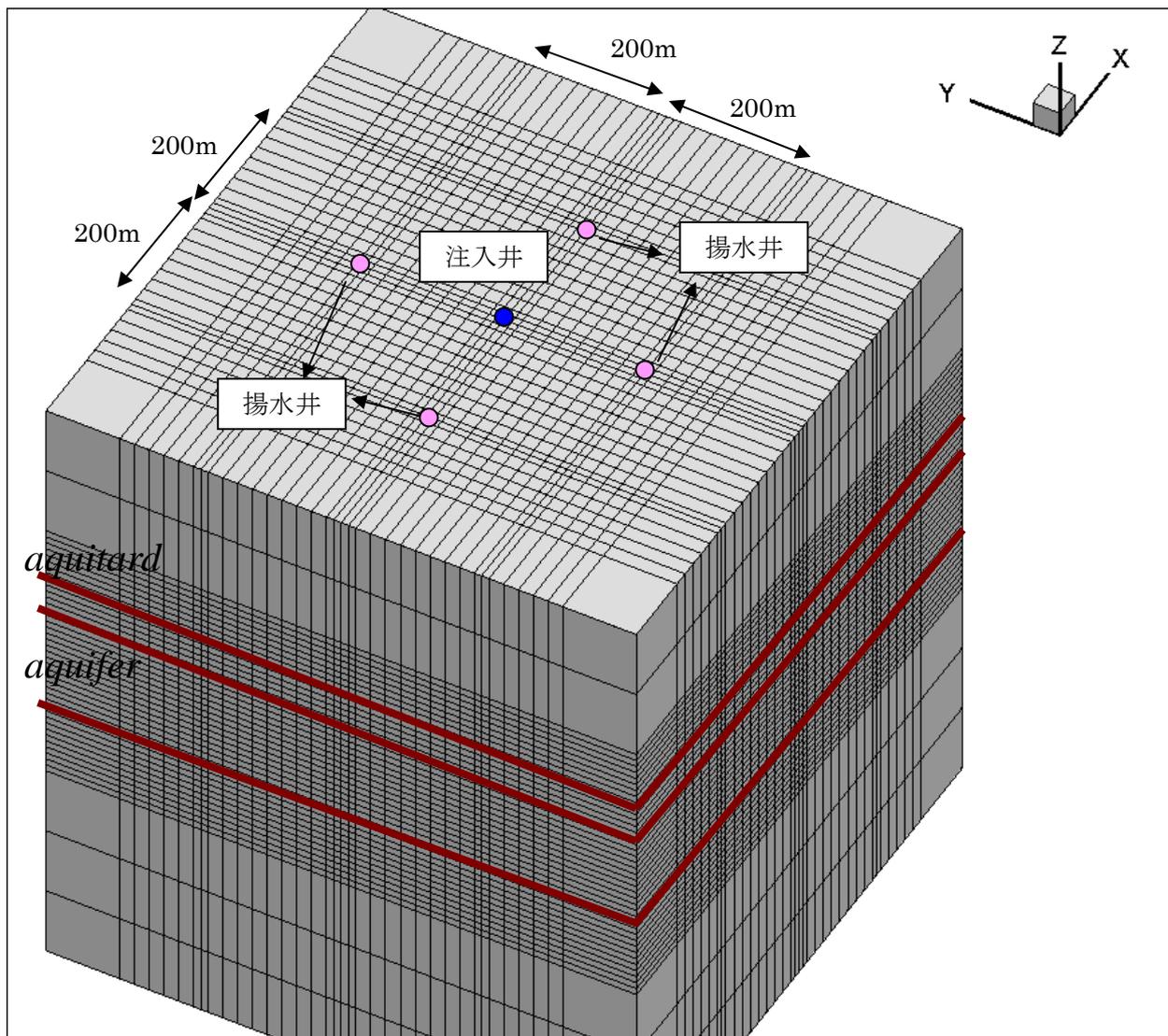


図 2. 2. 5-32 注入井と揚水井の距離を 200m とした場合の離散化モデル

ケース 5 のシミュレーション結果例を図 2. 2. 5-33～図 2. 2. 5-36 に示す。これらはシミュレーション開始から 6 年後の CO_2 の質量分率、ガス飽和度、圧力の分布を等値面図や等高線図により示したものである。

図 2. 2. 5-33 には、注入時の質量分率 4.0% とほぼ同等の 3.8% の等値面（赤色）と帯水層中央での等値線図を合わせて示した。 CO_2 溶解水は、帯水層上下にやや分散しながら帯水層中を水平方向に移行していることがわかる。

図 2. 2. 5-34 は、帯水層中央部の深度での断面を xy 平面に投影したものである。孔井間隔が 200m の場合は、6 年後でも溶解態 CO_2 のプルームヘッドが揚水井に到達していないことがわかる。

図 2. 2. 5-35 には、帯水層の上端と下端でのガス飽和度の等値線図を示した。この図からは、 CO_2 の気相化は生じていないことがわかる。

図 2.2.5-36 は、帯水層中央部の深度での間隙圧力分布である。注入井がある中央部では、周辺に比べてやや間隙圧力が増加しているが、増加幅はせいぜい 200kPa 以内である。

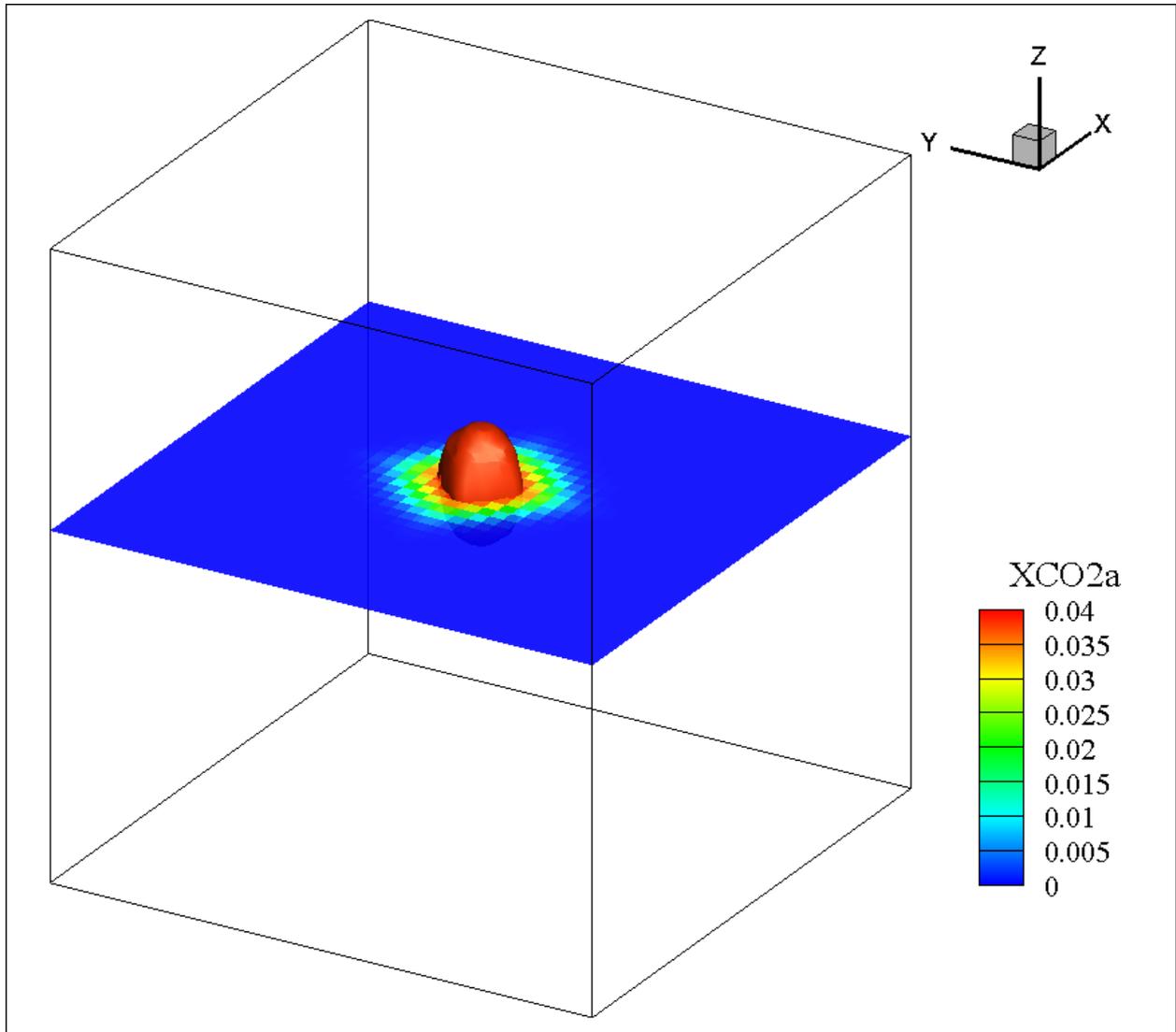


図 2.2.5-33 シミュレーション開始後 6 年における CO₂ の質量分率の分布 (ケース 5)

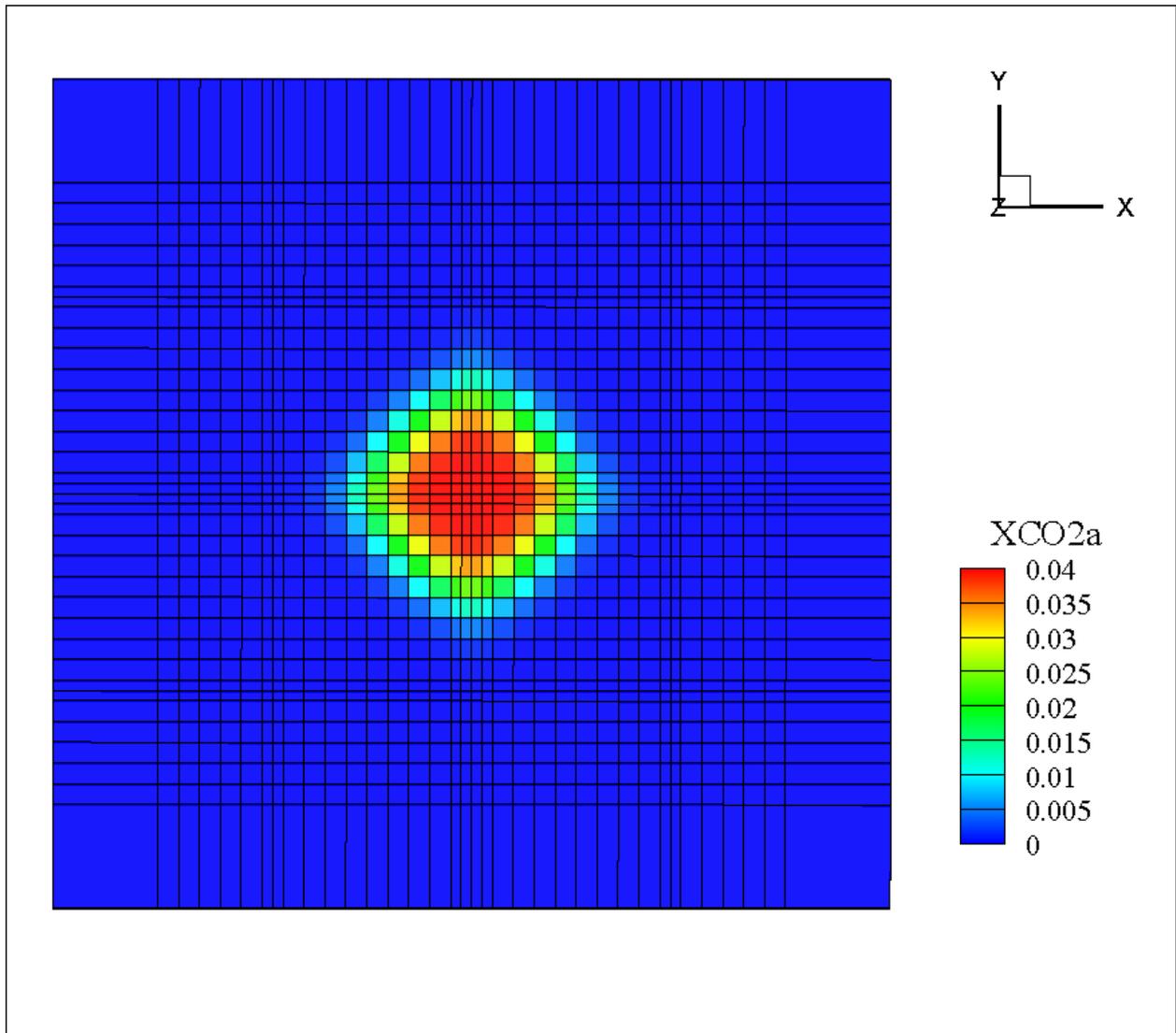


図 2. 2. 5-34 シミュレーション開始後 6 年における CO₂ 質量分率の xy 平面での分布 (ケース 5)

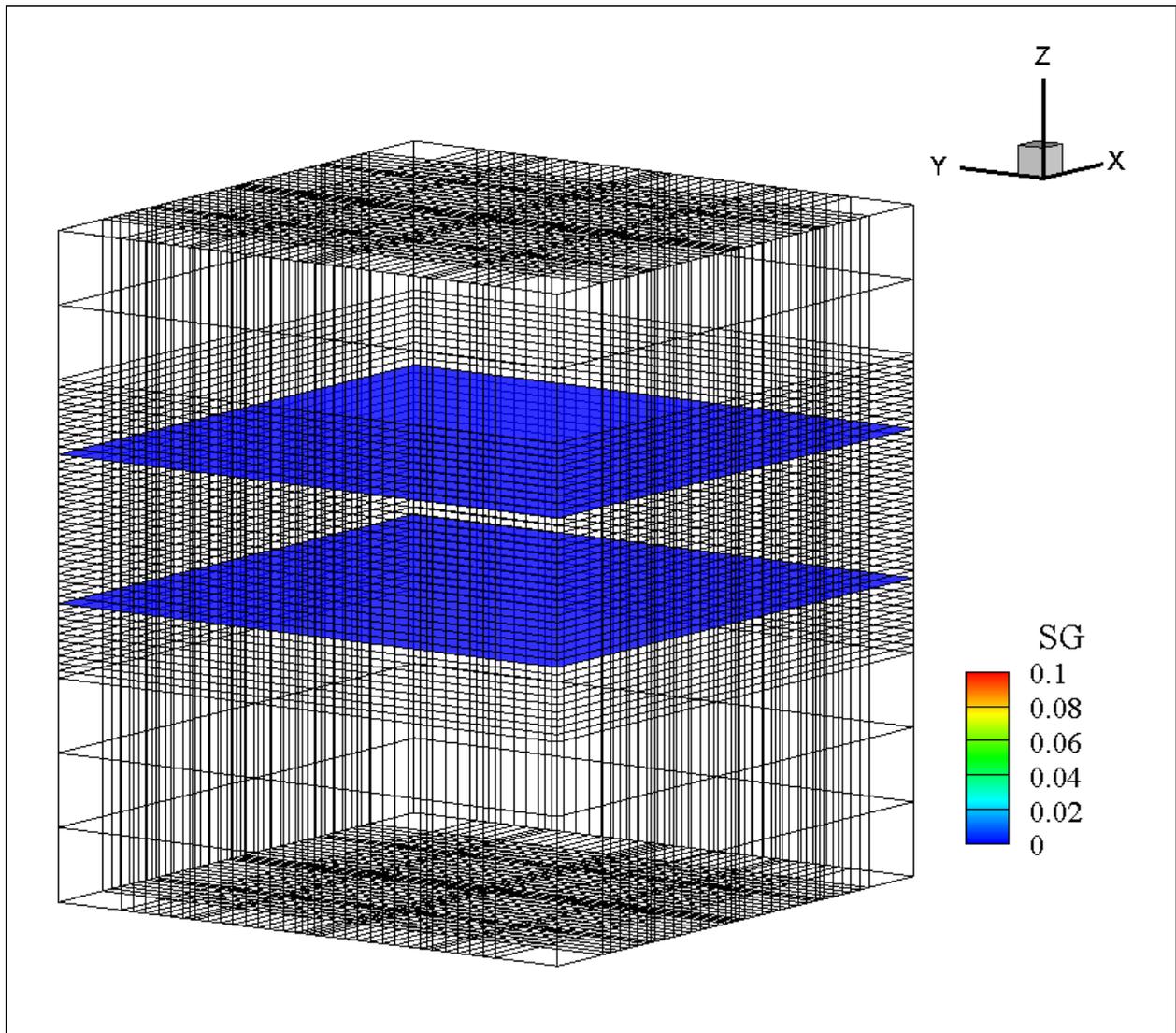


図 2. 2. 5-35 シミュレーション開始後 6 年におけるガス飽和度分布 (ケース 5)

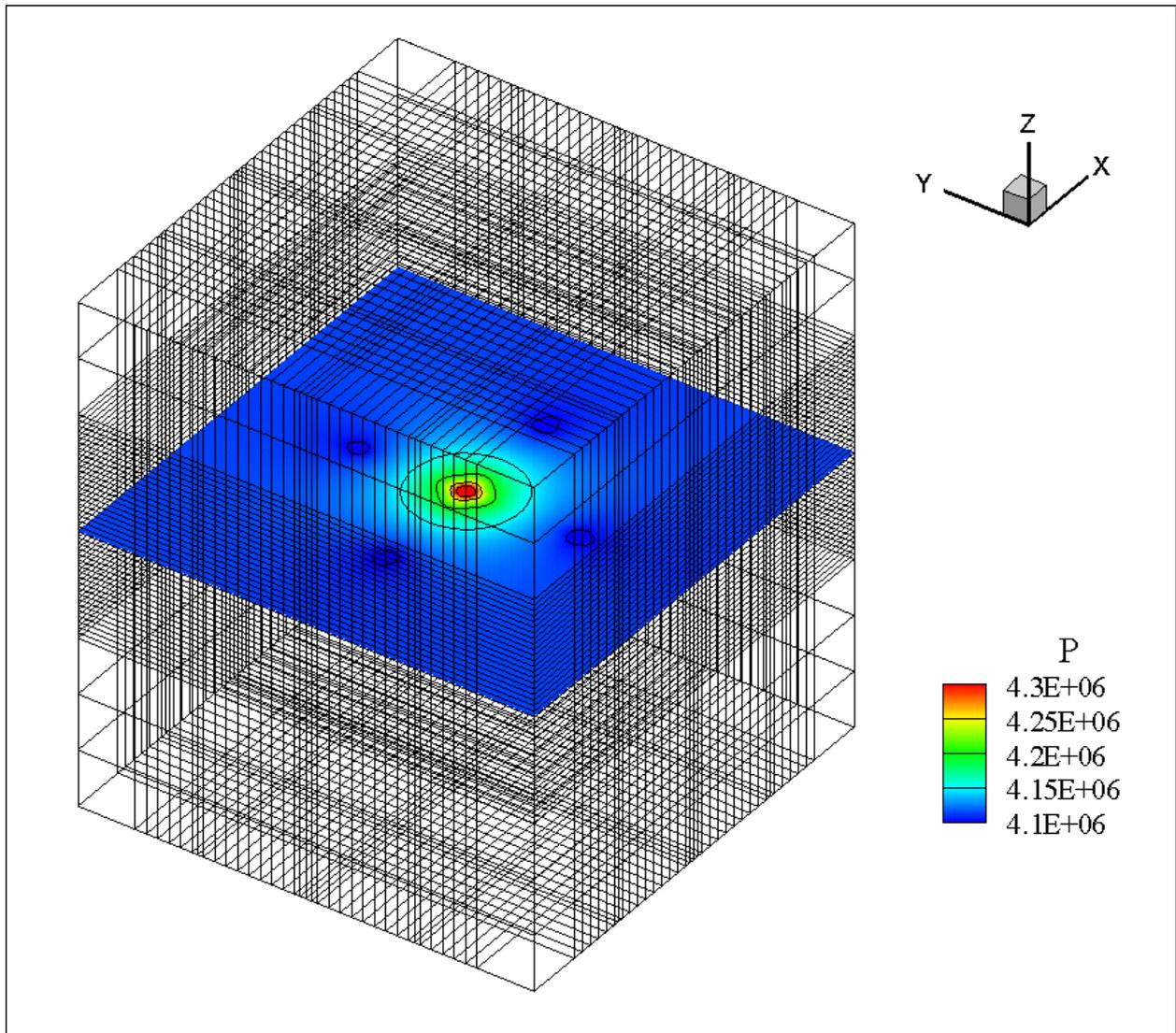


図 2.2.5-36 シミュレーション開始後 6 年における間隙圧力の分布（ケース 5）

(7) まとめ

以上のケーススタディから、注入井における注入深度や孔井間隔にかかわらず、注入された CO_2 は、帯水層中において気相化せずに分散すること、また、間隙圧力の増加も問題にならない程度であることがわかった。

さらに、キャップロック層がないケースにおいても、 CO_2 の挙動は標準ケースと同様であった。これは CO_2 溶解水の密度が周辺の地下水の密度よりやや大きいため、気相の CO_2 のような浮力を生じないことによる。ただし、 CO_2 溶解水と周辺の地下水の密度差は微小であるため、注入によって、注入箇所から周囲全方向にもほぼ均等に圧力勾配が生じる。その結果、上方への CO_2 溶解水のフラックスが生じており、操業が長期間となる場合、キャップロック層がないところでは CO_2 溶解水が上部に到達することがありうる。その場合、減圧により気相化し、上方へのフ

ラックスが急増することが考えられる。このように、キャップロック層として有効な層がない地点での操業では、注入期間や注入流量などを適切に設定し、CO₂ 溶解水の上方への到達を確実にモニタリングするなど、地質環境などの環境条件に応じた対応が必要となる。こうしたケースでは、本研究で実施したような気相化を扱える多成分多相流動系の物質移行シミュレータは有効なツールとなる。

数値シミュレーションの特性から揚水井を含むグリッドにおいて気相化が見られたが、これは地下水解析では原理的に多孔質体を前提とした構成関係を用いるのに対し、実際の孔井内の流れは多孔質流れではないことに由来する。このため、孔井を含むグリッドでの解析結果は、現状では考察の対象外としている。しかし、孔井内の流れは周辺岩盤における流体流動に影響を及ぼすため、ハイブリッド方式などによって揚水井内の解析精度を向上させることは今後の課題である。

2.2 節の参考文献

- 1) 山智嗣、宮本誠「マイクロバブルの世界」 Kbooks series 192 工業調査会、2007
- 2) 南川久人「湖沼や河川の水質浄化と溶存酸素濃度増加」、混相流学会レクチャーシリーズ マイクロバブルの魅力とその利用技術、日本混相流学会、2003
- 3) David L. Parkhurst and C.A.J. Appelo: USER'S GUIDE TO PHREEQC (VERSION 2)—A COMPUTER PROGRAM FOR SPECIATION, BATCH-REACTION, ONE-DIMENSIONAL TRANSPORT, AND INVERSE GEOCHEMICAL CALCULATIONS、Water-Resources Investigations Report 99-4259 (1999)
- 4) 新エネルギー・産業技術総合開発機構、RITE、社団法人化学工業会、閉鎖い7年度 二酸化炭素の隔離技術に関する調査研究、平成7年度調査報告書 NEDO-GET-9538
- 5) 青木卓也、五十嵐敏文、飯尾佳浩、西尾英明：大気中二酸化炭素の溶解によるアルカリ性トンネル排水の pH 低減、応用地質、第 51 巻、第 5 号、pp.220-228、2010
- 6) 宮澤大輔、井岡聖一郎、木山保、高橋正好、石島洋二：CO₂MB 注入法に関する基礎的研究 - CO₂MB 注入法による CO₂ 溶解の特徴 -、Journal of MMIJ Vol.127 p.189-193(2011)
- 7) 尾西恭亮、石川慶彦、松岡俊文、岡本征雄、薛自求：気体、液体、および超臨界状態の CO₂ 圧入による砂岩資料の比抵抗変化、物理探査 第 60 巻第 5 号、pp.435-443 (2007)
- 8) 窪田健二：CO₂ 地中貯留における比抵抗および自然電位モニタリング—岩石コア資料への CO₂ 注入実験 -、電力中央研究所 地球工学研究所 環境科学研究所 研究概要—2005 年度研究成果一、pp.93-94、2005
- 9) ジェラルド・リジェ・ベレール (著)、立花 峰夫 (翻訳)：シャンパン 泡の科学、p111、白水社、2007
- 10) IPCC 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2 Energy Chapter 5 Carbon Dioxide Transport, Injection and Geological Storage

- 11) 植村豪, 鹿野太志, 片岡亮人, 深堀大地, 津島将司, 平井秀一郎 : 地中貯留における多孔質内水-CO₂ 二相流の X 線 CT 解析と LBM シミュレーション、資源・素材学会春季大会講演集, No.1 Page.KIKAKU.61-KIKAKU.64 (2010.03.30)
- 12) 例えば、小杉賢一朗 : 古典を読む Y.Mualem 著「不飽和多孔質体の透水係数を推定する新たなモデルについて」ならびに M.Th.van Genuchten 著「不飽和土壌の透水係数を推定する閉形式解について」、J.Jpn. Soc. Soil Phys.No.106, p. 47~60 (2007)
- 13) Garcia, J.E. (2003). Fluid Dynamics of Carbon Dioxide Disposal into Saline Aquifers. PhD thesis, University of California, Berkeley.
- 14) Spycher, N, Pruess, K & Ennis-king, J (2003). CO₂-H₂O Mixtures in the Geological Sequestration of CO₂. I. Assessment and calculation of mutual solubilities from 12 to 100°C and up to 600 bar. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 67:3015-3031.
- 15) Altunin, VV & Sakhabetdinov, MA (1972). Viscosity of liquid and gaseous carbon dioxide at temperatures 220-1300 K and pressure up to 1200 bar. *Teploenergetika*, 8:85-89.
- 16) Pruess, K. and Garcia, J (2002): Multiphase flow dynamics during CO₂ disposal into saline aquifers, *Environmental Geology*, 42, 282-295
- 17) Pruess, K. (2005): ECO₂N: A TOUGH2 Fluid Property Module for Mixtures of Water, NaCl, and CO₂, LBNL-57952
- 18) Spycher, N. and K. Pruess. (2005): CO₂-H₂O Mixtures in the Geological Sequestration of CO₂. II. Partitioning in Chloride Brines at 12–100 °C and up to 600 bar, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69, 3309–3320, doi:10.1016/j.gca.2005.01.015
- 19) Altunin, V.V. Thermophysical Properties of Carbon Dioxide, Publishing House of Standards, 551pp., Moscow (in Russian)
- 20) García, J.E. (2001): Density of Aqueous Solutions of CO₂, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-49023, Berkeley, CA
- 21) Phillips, S.L., A. Igbene, J.A. Fair, H. Ozbek and M. Tavana. (1981): A Technical Databook for Geothermal Energy Utilization, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBL-12810, Berkeley, CA, 46 pp.
- 22) Lorenz, S., D. Maric and C. Rirschl. (2000): Eine analytische Funktion zur Bestimmung der Enthalpie wässriger NaCl Lösungen, draft report, Institut für Sicherheitstechnologie, Köln, Germany

2.3 CMS システムの周辺環境への影響の検討

2.3.1 CO₂ 漏洩による影響

CO₂ の漏洩による貯留域周辺の地質・地下水環境への影響については、電力中央研究所により深部塩水帯水層貯留を対象とした検討が報告されており、評価の重要性や課題も含めて整理するとともに、室内試験による検討も行われている（田中ほか（2009）²⁾）。

この報告書では IPCC の特別報告書（2005¹⁾）をもとに、大局的には貯留層からの漏洩はないものと考えているが、地域的な個々の条件を考慮した時には、漏洩による人や生物圏、および地下水へのリスクがあるとしている。

漏洩のシナリオとしては、IPCC の報告書（2005¹⁾）をもとに、注入井からの爆発的な漏洩シナリオと断層・割れ目や壊れた孔井などから徐々に拡散して放出される漏洩シナリオの2つを抽出しており、前者は検知および対策が可能であるが、後者については、飲料水用の帯水層にリスクを生じる可能性があるとして指摘している。IPCC（CCSSR）¹⁾の図をもとにして RITE は、図 2.3.1-1 に深部塩水層からの超臨界状態 CO₂ の潜在的な漏洩経路を想定している。

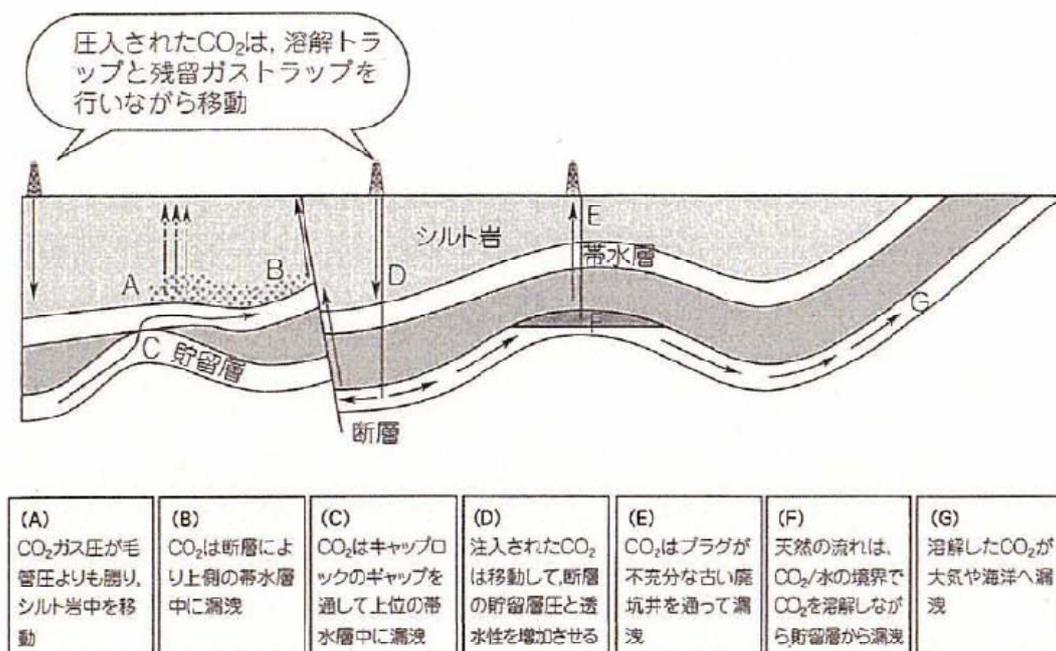


図 2.3.1-1 深部塩水層における CO₂ の潜在的漏洩経路
(IPCC¹⁾ をもとに RITE が作図) (田中ほか (2009))²⁾

さらに IPCC は 2006 年にガイドライン³⁾として考えるべき漏洩経路を表 2.3.1-1 のように 9 個指摘している。CMS に関連しては、注入井および揚水井からの直接的噴出、溶解時の低透水のキャップロックからの漏洩が指摘されており、適切なサイト選定により漏洩確率は低減できるとしている。

表 2.3.1-1 貯留層からの潜在的漏洩経路³⁾

| 漏洩のタイプ | 潜在的経路/ソース | 備考 |
|-----------------------|---|---|
| 井戸および鉱山に形成された直接的な漏洩経路 | 運転中または枯渇井戸 | 枯渇井戸に留意すべきである。不適切に掘られ、シールされるかまたはプラグで閉鎖された井戸には大きな潜在的な漏洩リスクが存在する。漏洩井戸の修復技術は開発されており、必要なら対処しておくべきである。 |
| | 井戸の噴出（注入井からの制御できない漏洩） | 高流量漏洩の潜在的ソースは、通常、短時間で終了する。噴出は修復して、まれである。 |
| | CO ₂ 貯留層の将来の掘削 | 石炭層の場合の問題 |
| 自然漏出および移動経路（長期の放出となる） | 毛管侵入圧を超えたり、CO ₂ が溶ける場合には、低透水のキャップロックの間隙構造 | 適切なサイト評価と注入圧の制御で漏出のリスクを低減できる。 |
| | キャップロックが部分的に存在しない箇所 | 適切なサイト評価で漏出のリスクを低減できる。 |
| | 貯留層がいっぱいになった場合の浸出点 | 水理地質の評価を含む適切なサイト評価と選定で漏出のリスクを低減できる。 |
| | CO ₂ /水/岩石の反応の結果としてキャップロックの劣化部分 | 適切なサイト評価と選定で漏出のリスクを低減できる。キャップロックおよび地球化学要因の詳細分析が有用である。 |
| | CO ₂ が間隙水に解け、地下水流動によって貯留サイトから移動して漏洩 | 水理地質の評価を含む適切なサイト評価と選定で漏出のリスクを特定/低減できる。 |
| | 存在したまたは誘発された断層やまたは亀裂を通して漏洩 | 高流量漏出の潜在的な経路であり、適切なサイト評価と注入圧の制御で漏出のリスクを低減できる。 |
| 他の大規模放出 | 大規模メタン放出が、CH ₄ がCO ₂ によって置換されて起こる。これはECBM、EORのケースや枯渇油/ガス田でのケース。 | 適切な評価が必要。 |

出典：IPCC 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2
Energy Chapter 5 Carbon Dioxide Transport, Injection and Geological Storage

田中ほか（2009）²⁾は、図 2.3.1-2 に示すように、貯留した CO₂ の上方移行と地化学概念モデルを設定している。IPCC ガイドラインでも同様の潜在経路を想定している。これらのモデルにおいて

は、①超臨界状態 CO_2 が上昇してガス化し溶解水が浅部で生じるモデル、②地下深部の CO_2 が溶解した地下水が断層などを経由して上昇し浅部に至るモデル、③深部の CO_2 溶解水が広域地下水流動により上昇するモデルが考えられている。CMS にあてはめると、地中で注入した CO_2 ガスの一部がマイクロバブルにならず、 CO_2 ガスとして上昇する場合は①のモデルである。CMS では基本的には CO_2 溶解水として貯留するため溶解水は下方に移動することになるが、長期的な拡散によって上昇する可能性もあり、それが②のモデルに相当する。また、地中に貯留した CO_2 溶解水が広域地下水流動などにより上昇、減圧して CO_2 ガスが生じる場合は③のモデルに相当する。その他、CMS では、地下水圧低下による減圧で溶解水中の CO_2 がガス化して上昇、周辺環境に再度溶解することで酸性水が生じる場合も想定される。

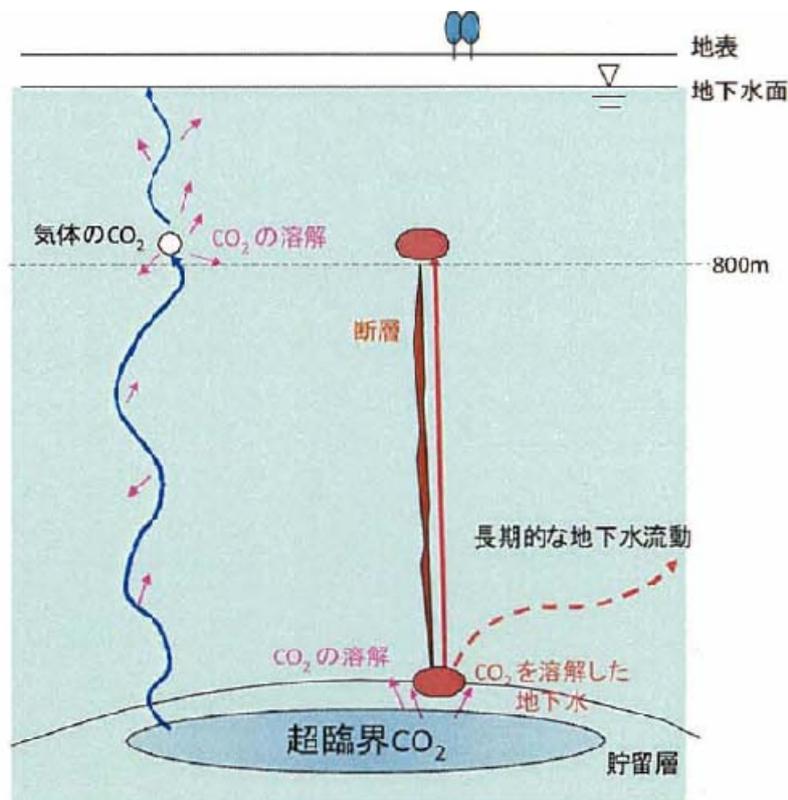


図 2.3.1-2 貯留した CO_2 の上方移行と地化学概念モデル (田中ほか (2009))²⁾

田中の概念モデルと同様な指摘を IPCC のガイドラインでは図 2.3.1-3 のように示している。

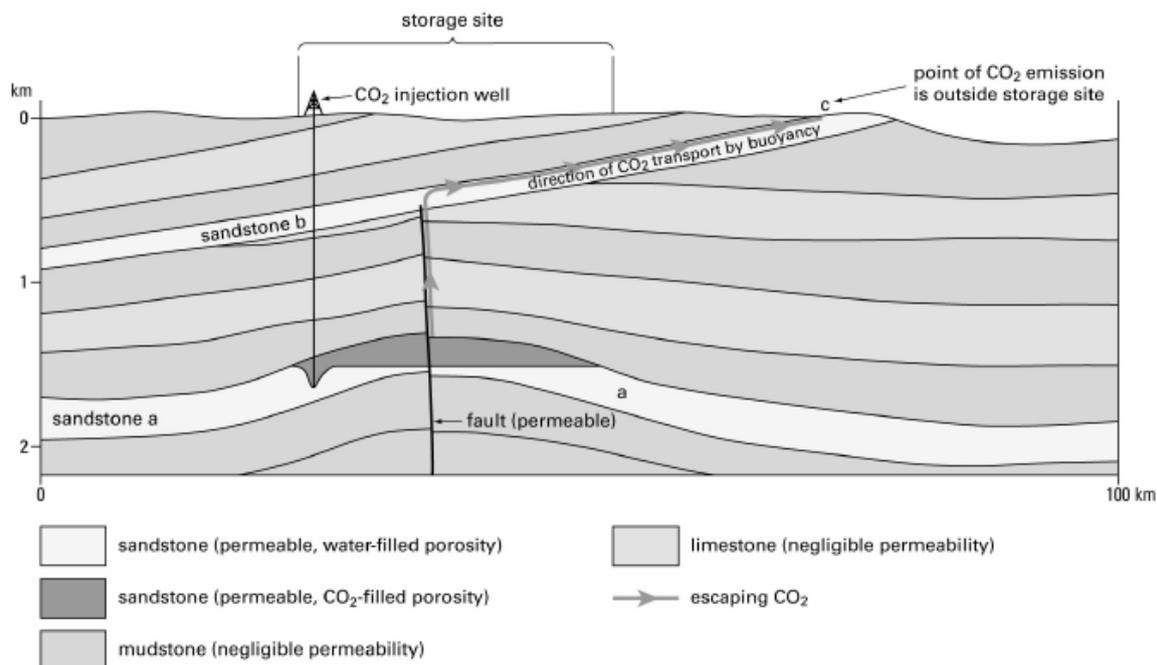


図 2.3.1-3 貯留層からの CO₂ の潜在的漏洩経路³⁾

出典 : IPCC 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2
Energy Chapter 5 Carbon Dioxide Transport、 Injection and Geological Storage

CO₂ ガスの漏洩は、大気への漏洩と海洋への漏洩がある。

CO₂ は大気における通常の構成（現在 370ppmv という低い濃度にある）では危険はなく、非引火性である。CO₂ は常温常圧の空気より 1.5 倍の密度のため、管路または円管に集められる貯蔵や危険な状況を作り出す他の薄いライニングから漏れる傾向がある。放出された CO₂ の危険性は、気体で色も味も無く、一般に高濃度で存在しない限り無臭であることである。

表 2.3.1-3 に空気中の二酸化炭素濃度により、人体に及ぼす影響を示す。人体への影響は資料によると、通常の人で CO₂ が 0.5~1.5% までの濃度で 1 時間から数時間まで危険なしで耐えられる。しかし、長期の高濃度または放出は危険である。生命維持に必要な酸素濃度である 16% 以下に酸素濃度を減少させること、体内、特に血流に入ること、呼吸中に取り込まれる空気総量が変わるなどの理由で、CO₂ と酸素が置き換わり酸欠となる場合の影響よりも早く生理的影響が起こる。

このように CO₂ が漏洩した場合には、生物環境に影響を与えることが考えられる。

表 2.3.1-3 空気中の二酸化炭素濃度が人体におよぼす影響⁴⁾

| 二酸化炭素濃度(%) | 影響 (通常の酸素濃度における) |
|------------|---|
| 0.04 | 正常空気 |
| 0.5 (TLV) | 長期安全限界 8時間 CO ₂ にさらされる場合の最大許容濃度 (米国職業暴露基準) |
| 1.5 | 健康な大人では作業性および基礎的生理機能に影響を及ぼさずに長時間にわたって耐えることができるが、カルシウム・リン代謝に影響の出る場合がある。 |
| 2.0 | 呼吸が深くなる：一回の呼吸量が 30%増加 顕著な影響は、このレベルより上において、特に呼吸と血液 pH に起きる。これらは心拍増加、不快、吐き気、前後不覚を誘発する |
| 3.0 | ほとんどの人の健康に重大な影響を与える。聴覚障害と視覚の乱れが 3%以上の CO ₂ 濃度で起こる。Laboured breathing (苦しい呼吸)、頭痛、視覚障害、精神錯乱を含む悪い症状が出る。 |
| 4.0 | 呼吸がさらに深くなる：呼吸数が増加して、軽度のあえぎ状態になる。 相当の不快感。 |
| 5.0 | 呼吸が極度に困難になる：重度のあえぎ。多くの人がほとんど耐えられない状態になる。悪心 (吐気) の出現する場合がある。30 分の暴露で中毒症状。 |
| 7~9 | 許容限界：激しいあえぎ。約 15 分で意識不明。 窒息と同様となり、致命的となる。 |
| 10~11 | 調整機能不能：約 10 分で意識不明。 |
| 15~20 | さらに重い症候を示す。1 時間で死亡することはないと思われる。 |
| 25~30 | 呼吸低下：血圧低下。昏睡。反射能力喪失。麻痺。数時間後に死に至る。 |

出典：http://www.showa-tansan.co.jp/html/dryice/co2.htm に加筆

屋外での CO₂ 漏洩基準として参考となるのは、表 2.3.1-4 に示した値である。新宿路上やその他の閉空間での計測値、基準値である。屋外において集中的な CO₂ 漏洩経路がスポット状に存在し、無風状態という最悪の条件を想定した場合、空気中での拡散がどの程度かにより地上生物圏への影響を評価できる。

一方、海洋生態影響に関する確実な情報は少ないが、文献⁵⁾による情報を総合すると、二酸化炭素濃度の上昇による海洋生物への影響が認められた最小濃度としては、石灰質の殻を持つ動物の試験結果からの $\Delta p\text{CO}_2$ で 200ppm (IPCC 特別報告書の記述に基づけば $p\text{CO}_2$ で 560ppm) であった。また、動物プランクトンでの試験結果からは、無影響と想定される濃度は $\Delta p\text{CO}_2$ で 500ppm と考えることもできる。ただし、地域、水深、季節などによってバックグラウンドの観測値がこれらの値を上回ることも珍しくない。従って、これらの値を超えたから直ちに何らかの影響があると考えられるのではなく、問題となる現場の $p\text{CO}_2$ の変動や生物相等を考慮し、具体的に環境影響を評価検討する必要がある。

「適切に選択され管理された地中貯留サイトに二酸化炭素が留まる割合は、100 年後に 99%以上

である確率は 90～99% (very likely) であり、1000 年後に 99%以上である確率は 66～90% (likely) である。」とされている。従って、二酸化炭素海底下地層貯留において、適切な場所の選定と管理が行われれば、二酸化炭素が海洋に漏洩する可能性は非常に小さいと想定されるが、海洋に漏洩した場合における生物の慢性影響の評価も重要な課題である。海洋生物に関する慢性影響評価については、現時点では国際機関で承認された試験手法がないが、長期にわたる影響に関する科学的知見を収集し、許可申請時に最新の知見をもとに影響評価を行う必要がある。陸域においても同様である。

表 2.3.1-4 空気中の二酸化炭素濃度⁵⁾

身の回りの二酸化炭素(CO₂)濃度

| CO ₂ 濃度 | 測定場所 |
|--------------------|--------------|
| 450ppm | 東京・新宿の路上 |
| 700ppm | 地下鉄駅の改札口付近 |
| 1350ppm | 羽田空港の内エレベーター |
| 2800ppm | 首都高速道路 |
| 5000ppm | 閉め切った自動車内 |
| 1100ppm | 映画館内 |
| 1500ppm | 比較的すいた地下鉄車両内 |
| 3800ppm | かなり混んだ地下鉄車両内 |

出典：http://www.nonrisk.co.jp/co2jintai-eikyou.pdf より引用

2.3.2 酸性水の影響

1) 堆積岩の重金属類溶出特性⁴⁾

田本ら⁷⁾は、岩石ずりからの合理的な重金属類溶出源評価法の構築を目的に、堆積岩中の重金属類の溶出特性について検討している。重金属類の存在形態による溶出特性とその風化による影響は以下のようなものである。

(1) ヒ素

風化によって含有量に有意な差は生じない。しかし、難溶性鉱物態、吸着態、鉄マンガング態が減少し、有機態が増加する。この結果、風化によってヒ素の全含有量は変化しないものの、形態が異なることによって、ヒ素溶出量が増加するものと考えられる。環境省告示第 19 号による含有量試験での 1 規定塩酸に可溶な量が低下していることも、ヒ素の形態の変化で溶出特性が変化することをうかがわせる。ただし、連続溶出試験結果より、pH は未風化部でアルカリ性を示すが風化部では中性域に低下していることから、ヒ素溶出量の低下は pH の影響も受けている可能性がある。

(2) セレン

泥岩中のセレンは、底質調査法による含有量試験結果から風化によって低下する点と、分画抽出試験結果から風化によって吸着態、炭酸塩態、鉄マンガン態、有機態、難溶性鉱物態の含有量が全て低下して検出下限値以下となることから、泥岩中のヒ素と比較して風化による溶脱を受けやすい特性がある。

2) 酸性水による岩石からの重金属の溶出の化学的影響

CMS 貯留においては、CO₂ を溶解水として貯留することから酸性化した地下水を生じ、周辺地下水・地質環境への影響が課題となる。田中ほか (2009) ²⁾は、漏洩した CO₂ の影響として、2 つの要因を考えている。1 つは排ガス随伴物質の地下水への影響であり、2 つ目は CO₂ の地下水への影響である。

田中ほか (2009) ²⁾では、排ガス随伴物質として、NO_x、SO_x や微量元素を想定しているが、化学吸収法により CO₂ を回収した場合、石炭火力発電所の例では影響しないと結論づけている。CMS の場合は小規模排出源を対象としており、火力発電所は対象ではないので、対象とする排ガス成分により、新たに随伴物質の影響を検討しなければならないが、そもそも、排ガスは大気を汚染しないレベルにまで対策され、ガス組成より構成されているものと考えられるので、大きな影響はないものと想定される。

また、CO₂ の地下水への影響としては、地下水の化学組成への影響が考えられるとしている。溶存 CO₂ は炭酸を形成するために酸性化し、周辺岩石からの有害金属や硫酸塩、塩化物の溶出の可能性を指摘しており、最悪の場合、地下水が飲料水・工業用水・農業用水として使用できなくなることも考えられる。これらの元素の溶出による透水性の増大や、逆に鉱物生成による地層の変形なども指摘されている。CMS においては、貯留層の深度が浅いため、飲料用・工業用の地下水へ影響は重要な検討課題となる。

漏洩した CO₂ による地下水への影響については、田中ほか (2009) ²⁾は、地化学モデル計算の既往例を挙げて影響が生じることを示唆しているが、モデル計算では元素の溶出速度が不確実なため、この把握が必要としている。また、CO₂ が溶解した水が地下水水質に与える影響については、検討例が少ないとしている。

このような観点から、田中ほか (2009) ²⁾は、CO₂ 溶解水による岩石からの重金属等有害物質の溶出に関して、粉末試料を用いたバッチ試験を行い、検討している。バッチ試験は、3 種類の岩石 (砂岩、頁岩、石灰岩) を対象に、80°C、1 MPa の温度・圧力条件下で、1 または 2 週間の継続試験を行っている。主要な試験結果は次のようにまとめられている。①CO₂ 溶存により pH が減少するが、砂岩を除くと溶出する元素の緩衝作用により pH は上昇する。②緩衝作用の少ない砂岩からは、酸性領域で溶解しやすい遷移金属類が多く溶出した。③回収 CO₂ 由来の微量元素 < 溶出実験 < 地下水水質環境基準の順に濃度が大きくなったが、サイト固有の地質条件に合わせて溶出試験を行うべきである (図 2.2.1-3)。これらの成果をもとに、排ガス随伴物質の溶解量 < CO₂ 溶解水による溶出量 < 地下水基準 と結論づけている。

このバッチ試験の温度・圧力条件は、CMS における貯留条件と比較すると、圧力は深さ 100m

程度のものであり、貯留層から浅部に上昇してきた場合に相当すると考えられる。しかし、温度は80℃と高温であり、通常の地温勾配では2,000m以深に相当する温度を設定しており、加速試験といえるであろう。CMSの貯留条件では、温度も圧力もバッチ試験の条件より小さいため、この試験のように元素が溶出しない可能性が考えられる。また、バッチ試験の期間が、最大2週間と短いこともあり、実験初期に溶出しやすい鉱物のみ溶出していることも推察される。長期の溶出は推定できていないとも考えられるので、今後CMSの検討にあたっては、各サイト固有の貯留層を構成する岩石、および必要に応じてはキャップロックを構成する岩石を用いて適切な試験条件で同様の実験を行い確認すべき事項であろう。

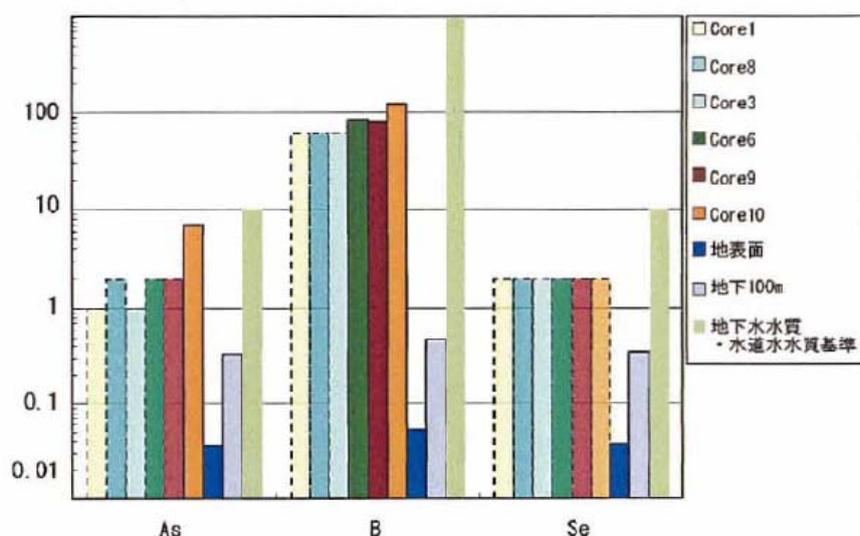


図 2.3.1-3 CO₂ を用いた実験終了後の溶出元素量と回収 CO₂ 由来の微量元素濃度のおよび地下水水質基準の比較（点線は定量化現地以下であり、その値以下であることを示す）
（田中ほか（2009）²⁾）

酸性水への対策は、中和化する以外にはない。中和化においては以下の点が問題となる。

- ・アルカリ材（消石灰、石灰岩、ゼオライト等）の投入は反応物の処理が問題となる
- ・長期的な構造物の劣化が避けられない（維持管理コストの増大）

アルカリ化中和剤の特徴を表 2.3.1-2 にまとめる。

表 2.3.1-2 通常のアルカリ化中和剤とその特徴

| | |
|---|---|
| ①苛性ソーダ (NaOH) | <ul style="list-style-type: none"> ・最も利用されている。 ・反応が早い。しかし、高価である。 ・固体状で購入した場合は水に溶解しなくてはいけない。 |
| ②生石灰 (CaO) | <ul style="list-style-type: none"> ・反応が早い。 ・反応時に高熱を発生させるので使用時は水を加えて消石灰 (Ca(OH)₂) にする必要がある。 <p style="text-align: center;">化学式 → $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca(OH)}_2$</p> |
| ③消石灰 (水酸化カルシウム : Ca(OH) ₂) | <ul style="list-style-type: none"> ・価格が安い。 ・反応が遅い。 ・硫酸があると難溶性の石こうが生成する。 ・溶解度 (0.126g/100g (20℃)) が低く、通常はスラリー状にして使用する。 |
| ④石灰石 | <ul style="list-style-type: none"> ・強い廃酸処理に利用することが多い。 ・反応が遅い (消石灰より遅い)。 ・溶解度は 0.072g/100g (30℃) である。 |
| ⑤水酸化マグネシウム | <ul style="list-style-type: none"> ・通常、排ガスの脱硫に使用される。 ・苛性ソーダより安い。 ・反応が極めて遅い。 ・溶解度は 0.00019g/100g (18℃) である。 ・溶解度が低いためスラリー状で硫酸の中和に使用される。 ・硫酸との中和反応で発生した硫酸マグネシウムは溶解度 (26.9g/100g (0℃)) が高いので沈殿などの弊害を起こさない。 |

2.3.3 排ガス注入における影響

日本における業種別の CO₂ 排出源からの排ガス成分について「平成 22 年度 CO₂ マイクロバブル地中貯留の成立性に関する調査報告書」⁵⁾において表 2.3.2-1 のように示した。排ガスの性状は、CO₂ 濃度は数 10% 台、窒素ガスは 50~80% で SO_x、NO_x は基準値以下に処理されているため量的にわずかである。

表 2.3.3-1 代表的な業種の排出ガスの成分例と CO₂ 排出総量 (—は、数値未入手)

| 業種等 | CO ₂ 排出 総量 (万 t/年) | 排ガス組成の例 (%、V/V) | | | | | | 備 考 |
|---------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------|-------------------|------------------|---|
| | | N ₂ | CO ₂ | O ₂ | SO _x | NO _x | H ₂ O | |
| 電力(石炭 火力発電 所) | 30,492 | 81.9 | 12.5 | 5.6 | 0.0030 (30ppm) | 0.0083 (83ppm) | 13.0 | N ₂ ~SO _x の値は H ₂ O を除外した 場合の値 |
| 鉄鋼(高 炉・転炉) | 13,145 | 51.0 | 24.5 | — | — | — | 7.2 | |
| セメント 製造業 | 3,252 | 64 | 32 | 0.04 | 0.0022 (22ppm) | 0.066 (660ppm) | 13.5 | N ₂ ~SO _x の値は H ₂ O を除外した 場合の値 |

出典：平成 22 年度 CO₂ マイクロバブル地中貯留の成立性に関する調査報告書

排気ガスをマイクロバブル化して浅部地層に CO₂ 溶解水として貯留する場合、N₂ ガスの分離が課題となる。本款では、まず、N₂ ガス分離ができた後の、排ガス中の SO_x、NO_x の影響を検討する。

排ガス中の SO_x、NO_x などの汚染物質は、排出源で基準値以下になるように処理されているが、微量な残留物は存在する。注入井において貯留深度中央で排気ガスをそのままマイクロバブル化して注入した場合、溶けない成分はマイクロバブルとして地中を移動することになる。その場合の溶出等の影響について考慮する必要がある。田中ら²⁾は、石炭火力発電所の排ガス中の CO₂ 随伴物質の影響を回収ガスで溶出試験を行い、地下水水質基準以下であるかを研究し、溶出実験結果と回収 CO₂ ガス中の As、B、Se は、地下水水質基準と比較しても小さく、影響がないという知見を得ている。このことから、排ガスは排出源で大気汚染放出基準値以下に処理されており、仮に地上に漏出しても問題にはならないといえる。一方、長期的に地中に蓄積された場合の影響は不明であるため、実験により蓄積状況を調べる必要がある。

次に、N₂ と CO₂ の地中分離について述べる。まず CO₂ の排ガス中の割合が 10%程度であることからマイクロバブル化しても飽和溶解度に達しない可能性があるが、ガス中の CO₂ はほぼ溶解する。一方、溶解度の低い N₂ ガスはマイクロバブルのまま地中に浸入する。これらを検証する必要がある。第一は、濃度の低い CO₂ 溶解水が浸透した場合の貯槽内に貯留される CO₂ 量の算定である。第二には、CO₂ 溶解水と N₂ マイクロバブルが地下水中に存在する場合に分離可能か、または、マイクロバブル作成時に孔内で分離できるかの検討である。CO₂ 溶解水は地下水よりわずかに高い密度のため、下方に移流し滞留する、N₂ はガスであるからマイクロバブルとして移流し、浮力により浮上する。しかし、どちらも移流方向は、地下水の流線と一致するであろうから分離は難しいと思われる。一方、孔内または地上で CO₂ 溶解水を作成する際の分離方法については検討の余地がある。すなわち、CO₂ を分離・回収して純度の高い CO₂ を作成するのではなく、必要な濃度で純度の高い CO₂ 溶解水の作

成を目標にすることは可能である。これらの検討方法については 5.2 節において述べる。

2.3 節の参考文献：

- 1) IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage 2005
- 2) 田中姿朗他：大規模排出源近傍における CO₂ 地中貯留可能性評価法 -深部帯水層貯留に向けた研究開発- 総合報告 NO7、電力中央研究所、総合報告、2009 年 8 月
- 3) IPCC 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2 Energy Chapter 5 Carbon Dioxide Transport, Injection and Geological Storage
- 4) <http://www.showa-tansan.co.jp/html/dryice/co2.htm> および 1)により作成
- 5) <http://www.nonrisk.co.jp/co2jintai-eikyou.pdf> より引用
- 6) 環境省 中央環境審議会地球環境部会 二酸化炭素海底下地層貯留に関する専門委員会 地球温暖化対策としての二酸化炭素海底下地層貯留の利用とその海洋環境への影響防止の在り方について、平成 19 年 2 月
- 7) 田本修一、岡崎健治、阿南修司、伊東佳彦（寒地土木研究所）、五十嵐敏文（北海道大学）：堆積岩中の重金属類の風化と溶出特性に関する考察、北海道大学、2009
- 8) 財団法人 エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 平成 22 年度 CO₂ マイクロバブル地中貯留の成立性に関する調査報告書、pp89

2.4 PA 対策と法制度に関する検討

2.4.1 CCS に関する法規制の動向と課題

ここでは CMS での PA 対策および法規制をどのように考えるかに当たり、現行 CCS で行われているそれらについてまとめ、CMS についての規制の在り方をまとめた。

CCS に関する法規制の動向としては、世界各国で CCS 実証プロジェクトや商用の事業のために、既存の環境影響評価の見直しに着手されている。また長期的には、CCS の大規模商業化を促進するために、その枠組みの検討に着手している。

IEA (2010) ¹⁾によると、例えば、欧州では 2009 年に欧州連合内の CO₂ の地中貯留を規定する枠組みを確立した。オーストラリアは、包括的な州および連邦での CCS を規定する枠組みを策定した。さらに、アメリカ、カナダ、ノルウェーおよび日本では現在、枠組みを策定中である。

同時に、国際社会は、CCS 開発を進めるために多くの国際的な法律文書の修正に着手した。海底への CO₂ 貯留のために、1996 年策定の廃棄物およびその他の投棄による海洋汚染防止に関する条約（ロンドン条約）の海洋汚染の予防に関する協定が 2006 年に修正され、さらに CO₂ の国境を越えた輸送を許可するために 2009 年に再び修正された。2012 年以降、CO₂ 貯留における国際的なモニタリングや査察、国境を越えた CO₂ の輸送等に関して国際的な法的規制について取り組んでいく（表 2.4.1-1 参照）。

IEA は、世界各国が法規制を行う際のベースとなるように、CO₂ の貯留において必要となる各段階での環境影響評価項目について枠組みを作成している。

海底下の地層での CCS では、万一 CO₂ が漏洩した場合、海水に溶け込んでその一部が酸性化したり、酸性化の度合いによっては、貝類や魚、海藻など、底生の生物やその水域に入った回遊生物が死んだり、育たなくなったりする恐れがある。しかし、現在、日本では CCS 施設を設置する際に実施すべき事前の環境影響評価に関する基準はない。経済産業省産業技術環境局では、CO₂ 貯留候補地が備えるべき地質条件、輸送基準、CCS 関連施設設置にかかわる安全確保、周辺への影響評価等に関する基準を検討している。実際の CCS の運用は、現在策定中の環境省の指針に基づくことになる。

CCS では貯留期間が長期におよぶため、法的枠組みには長期的かつ国際的な共通基準が不可欠であり、国際的な動向を注視していく必要がある。

1) 諸外国の法規制の動向

諸外国における法規制の動向を表 2.4.1-1 にまとめる。

表2.4.1-1 諸外国におけるCCS法規制^{1), 2), 3), 5), 7), 10), 11)}

| 国名・共同体 | 法規制の概要 |
|---------|--|
| オランダ | <ul style="list-style-type: none"> ・ 鉱業法（2003/1）が改正され、陸域および大陸棚に適用 ・ 地下100 m以深でのCCSは、経済省（Ministry of Economic Affairs）の許可が必要 ・ モニタリングの実施、CO₂貯留活動が中断した場合は30年間のモニタリングを規定 ・ 「CCSに関する欧州指令（2009/31EC）」（内容はEUの欄参照）に基づき、2011年6月25日までに鉱業法および環境管理法に反映 |
| オーストラリア | <ul style="list-style-type: none"> ・ 連邦資源エネルギー観光省（Department of Resources, Energy and Tourism）で洋上貯留、各州政府の担当で陸上貯留を管轄 ・ 「CCS-オーストラリア規制ガイド原則」（2005年）は、CCS促進のため、評価・承認プロセス、所有権、輸送、モニタリング、貯留後の責任、財政の規制のあり方を規定 ・ 洋上石油法（2008年11月改正）でCCS対応/石油権に対応するサイト探査、注入等の権利を創設/安全面、健康面、環境管理もカバー |
| イギリス | <ul style="list-style-type: none"> ・ エネルギー法（Energy Act）（2008/11）第3章の中で、CCSにおけるCO₂の海底下貯留の認可に関する規制の枠組みを設定 ・ 計画段階では市街地・地方計画法（Town and Country Planning Act）と電力法（Electricity Act）を、貯留段階では石油法（Petroleum Act）を適用 ・ 2010年に実証事業での報告の義務化、2011年に廃止予定の施設を展示施設等で再利用する場合の規定を追加 |
| アメリカ | <p>米国には、連邦レベルと州レベルでそれぞれ個別のCCS関連の法律がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ○環境保護局（Environmental Protection Agency: EPA）は、規制の策定、健康面・環境面のリスク評価、米国のインベントリへの地層貯留の組み込みを担当 ・ CO₂の地中貯留に関して、①地化学的サイト特性の把握、②モニタリング、③CO₂の貯留位置トラッキング試験、④貯留後のモニタリングとサイト管理、⑤財政的責任に関する条件（資金が井戸閉塞、サイト管理・閉鎖、緊急時対応や改善措置に利用可能であることを保証するため）を設定（2008/7） ・ CO₂地中貯留のための井戸に関して、安全飲料水法（SDWA）に基づく地下浸入管理（UIC）プログラムクラスVI（2010/12）で、①注入井の建設条件（CO₂貯留に適切であること）、②注入井の定期的評価、③飲料水の保護、④注入後の監視（注入圧力、CO₂の量、流速等）、⑤緊急時の対応（CO₂注入停止、処置、通知・報告等）、⑥財務的責任を規定した連邦必要条件の設定。 ・ CCS関連施設設置等に関する環境影響評価の実施は要求されておらず、それぞれの州法で対応 ○エネルギー省（Department of Energy: DOE）は、地層貯留技術の研究開発と普及を担当 ○州政府等は、EPAの許可を受けて安全飲料水法（SDWA）に基づくCO₂地下注入管理（UIC）プログラムの執行権を持つ |

表2.4.1-1 諸外国におけるCCS法規制（つづき）^{1), 2), 3), 5), 7), 10), 11)}

| 国名・共同体 | 法規制の概要 |
|----------|---|
| EU | <ul style="list-style-type: none"> ・ CCSに関する欧州指令（2009/31/EC）で、EU加盟国は2011年6月25日までに以下の本指令の要求事項を受けて各国の法律で対応 <ul style="list-style-type: none"> ①探査権と貯蔵権の許可：管轄当局が実施 ②回収したCO₂の構成の報告：事業者は、回収CO₂の組成と圧入されたCO₂の量を管轄当局に1年に1回報告 ③モニタリングと調査：事業者は、5年ごとに漏出リスクの評価、環境、人間の健康についてのリスク評価を見直し、管轄当局の許可を得る ④回収ガスの貯留および貯留後の義務：事業者は、監視結果を1年に1回、10年間連続して管轄当局に提出する ⑤権利の委譲：事業者から管轄当局への責任移管は、閉鎖後、最低20年間安全性が確認されること ⑥財政面の健全性と財政運営について規定：財政的な保証や手当てに関する内容 ・ 欧州指令85/337/EC（改正97年）で、CO₂を輸送する導管（直径800mm以上、全長40km以上）、CO₂の貯留サイトおよび回収装置は、人体、動植物、土壌、水、空気、気候、景観、文化遺産について環境影響評価を行う |
| 国際的な取り組み | <ul style="list-style-type: none"> ・ ロンドン条約改訂 2006年に海底へのCO₂貯留のため、1996年策定の廃棄物および他の問題（ロンドン条約）の海洋汚染の予防に関する協定に、投棄を検討できる廃棄物に二酸化炭素を追加するように修正。さらにCO₂の境界を越えた輸送を許可するために2009年に再び修正。 ・ 北東大西洋（OSPAR協定）の策定 2007年に北東大西洋（OSPAR協定）の海洋環境保護のための協定を策定 ・ 気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の改訂 2006年に気候変動に関する政府間パネル（IPCC）用のガイドラインを改訂 |

2) 日本の法規制の動向

深部塩水帯水層貯留については、大規模地中貯留実証試験の実施に際して環境省が検討しており、海洋汚染防止法の改訂で海底下貯留において注入するCO₂の濃度を規定している。地下にCO₂を貯留する場合に考えられる主な国内関連法規を抽出し、貯留との関係を表2.4.1-2にまとめた。

海底下貯留においては、「海防法に基づく特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄に当たっては、環境大臣に提出する許可（第18条の8第2項第2号）を受けるための申請書に「海底下廃棄事前評価書」を添付すること」とされている（注：この海底下廃棄事前評価は、特定二酸化炭素ガスを海底下廃棄することに伴う海洋環境におよぼす影響について調査するもの）。

この「海底下廃棄事前評価書」に記載が必要な項目は、表2.4.1-2の中にある「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可等に関する省令」に次のように定められている。

①海底下廃棄しようとする特定二酸化炭素ガスの特性

- ・ガス等の発生源及び当該ガス等からの特定二酸化炭素ガスの回収（二酸化炭素を他の物質から分離し、これを集める方法によるものをいう。以下同じ）の方法
- ・当該特定二酸化炭素ガスに含有される物質ごとの当該特定二酸化炭素ガス中に占める割合又は濃度

②海底下廃棄をされた特定二酸化炭素ガスが海洋に漏出したと仮定した場合に予想される当該特定二酸化炭素ガスの海洋への漏出の位置及び範囲並びに漏出量並びにその予測の方法（表 2.4.1-3）

③潜在的海洋環境影響調査項目

④潜在的海洋環境影響調査項目の現況及びその把握の方法

⑤特定二酸化炭素ガスが海洋に漏出したと仮定した場合に予測される潜在的海洋環境影響調査項目に係る変化の程度及び当該変化の及ぶ範囲並びにその予測の方法

⑥当該特定二酸化炭素ガスが海洋に漏出したと仮定した場合に予測される海洋環境に及ぼす影響の程度の分析及びこれに基づく事前評価の結果

⑦その他当該特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をすることが海洋環境に及ぼす影響についての調査の結果に基づく事前評価に関して参考となる事項

この事前評価書の策定に際して盛り込むべき事項等については、「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可の申請に係る指針（平成 20 年 1 月、環境省）」に示されている。

また、表 2.4.1-2 を CO₂ 貯留の各段階（図 2.4.1-1 参照）において参照すべき法規としてまとめると表 2.4.1-4 のようになる。

表2.4.1-2 関連国内法規とCO₂貯留との関連

| 法規 | | 主な内容と CO ₂ 貯留との関連 |
|---------------------------|---|--|
| 大気汚染防止法 | 第3条 | 事業所の排出ガス成分量の規定。CO ₂ は含まれないが、排気ガス直接注入時には関係する。 |
| 海洋汚染防止法 | 第18条の7 | 貯留CO ₂ の濃度基準は、施行令第11条の5に適合したものであることを規定 |
| | 第18条の8 | 環境大臣の許可で海底下廃棄可 |
| | 第18条の9 | 貯留場所が備えるべき、地質条件、漏出把握や防止措置の技術的可能性、自然保護的観点（特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可等に関する省令第2条）の基準を規定 |
| | 施行令第11条の4 | 法第18条の7第1号の海域とは、鉱害の防止、掘採にかかわる鉱業権の鉱区であることと規定 |
| | 施行令第11条の5 | アミン法で分離したCO ₂ ガス99%vol以上の濃度であること。水素製造法は98%vol以上と規定 |
| | 施行令第11条の6 | 政令で定める貯留海域は、CCSにおけるCO ₂ 濃度と圧力で規定した方法で貯留した海域であること |
| 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可等に関する省令 | 省令第1条 | 許可申請 |
| | 省令第2条 | 海域および方法に関する基準 |
| | 省令第4条 | 海域環境の事前評価事項 |
| | 省令第8条 | 監視を通常時、懸念時、異常時に分類。報告義務 |
| 環境省 | 告示第2 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 許可申請時に坑井閉鎖計画 ・ 事業者は、海底下廃棄に関する実施計画と汚染状況の監視に関する計画を環境大臣に提出 ・ 環境大臣は、CO₂の海底下廃棄海域の指定と解除を行う。許可期間は最長5年、CO₂が地中に存在する限り5年ごとの更新必要 ・ CO₂の海底下廃棄は、環境大臣が許可 |
| 指針 | 環境省「H20年1月 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の申請に係る指針」：環境影響評価の実施指針 | |
| 工業用水法 | 第3条 | 地下水の揚水規制 |
| 地盤沈下防止等対策要綱 各自治体の条例等 | | 地下水揚水による地盤沈下の監視 |

表2.4.1-2 関連国内法規とCO₂貯留との関連（つづき）

| 法規 | | 主な内容と CO ₂ 貯留との関連 |
|------------------------|---------------|--|
| 水質汚濁防止法 | 第3条 | 事業所からの排水の水質基準 |
| | 第8条 | 地下帯水層へ排水を浸透させる際の基準 |
| | 施行規則第9条の3の2項 | 地下水の浄化基準 |
| 環境基本法 | 第16条1項 | 人の健康の保護、生活環境を保全するための大気汚染、水質汚濁、土壌の汚染、騒音の望ましい基準を規定 (項目と基準値は、土壌汚染対策法、水質汚濁法、大気汚染防止法で規定) |
| | 環境庁告示第59号 | 公共用水域の水質汚濁に係る環境基準 |
| 水道法 | | 水道水質基準 50 項目 (pH は 5.8 以上 8.6 以下) |
| 土壌汚染対策法 | | Fe、Mn、Al、Cd、Cr、Cu、Pb、等の重金属溶出 |
| 鉱業法 | 第11条 | 掘削等に関する法令 |
| | 第18条 | 試掘権の存続期間は、登録の日から2年(石油または可燃性天然ガスを目的とする試掘権は4年)、期間の満了後、申請により2回に限り延長が可。延長期間は1回ごとに2年 |
| | 第63条第1項および第2項 | 掘削時の経済産業大臣の許可に関して規定 |
| | 施行規則第27条 | 採掘権者は、採掘するときは、施業案、説明図を経済産業局長に提出し、許可を得る |
| 石油及び可燃性ガス資源開発法 第35条第1項 | | 坑井の掘削・閉鎖 |
| 鉱山保安法 第13条 | | 坑井の掘削・閉鎖時の経済産業大臣への届出 |

表 2.4.1-3 海洋への漏出の位置および範囲、並びに漏出量並びにその予測の方法

| 項目 | 方法 |
|---------------|---|
| 圧入位置の及び範囲の明確化 | 漏出した位置の特定ができるように、下記に示す事項を網羅した平面図、断面図を作成する。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 海域の水深及び海底下廃棄をする深度 ・ 陸域の主な施設等との位置関係 ・ 海底下廃棄をする海域及びその周辺に設置された特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の用に供する設備の場所 ・ 海底下廃棄をされた特定二酸化炭素ガスが広がる範囲 ・ 海底下廃棄をする海域及びその周辺の海域における、海洋環境の保全上特に保護を図る必要があるものの所在 |
| 圧入条件の明確化 | 圧入圧力、温度、速度などの圧入条件に関する仕様の詳細、特定二酸化炭素ガスが廃棄された地層内の圧力の上昇見通しなどが判るように、以下の諸元を作成する。 <ul style="list-style-type: none"> ・ ガス等の発生源から海底下廃棄をする位置までの特定二酸化炭素ガスの回収及び輸送並びに圧入等に用いる設備及び機材等 ・ 特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時の温度等の圧入条件に関する詳細 ・ 特定二酸化炭素ガスの圧入等による地層内圧力及び温度の変化等の見通し ・ 特定二酸化炭素ガスの圧入井の維持管理の方法の概要（圧入井の機能の改善のために化学物質を使用する予定がある場合にはその種類、量、使用の頻度等を含む。） ・ 特定二酸化炭素ガスの圧入井を封鎖する場合の封鎖方法 |
| 漏出が生じる位置の予測 | 海洋環境保全の観点から、万一の漏出が生ずるとしたらどこで起こる可能性があるか推定できるように、例えば、圧入口、圧入井、観測井の位置、数、口径、延長といった施設の概要も示す |
| 漏出ケースの整理 | 漏出ケースは、以下の2つが考えられるので、貯留場所の条件に応じて整理する。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 施設からの漏出 ・ 廃棄した地層からの漏出 |

以上のように、大気汚染防止法、水質汚濁防止法、土壌汚染対策法には、CO₂に関する規制はないが、CO₂の溶解した地下水は弱酸性を示すため、貯留層に有害物質が存在した場合には、それを溶出させる可能性があり、それに対応する法規制に注意が必要である。

表 2.4.1-4 CCS の各段階における規制法規

| CCS の各段階 | 規制法規 (規制内容は表 2.4.1-2 参照) |
|----------|---|
| ①事前調査 | 海防法 第 18 条の 9 第 1 項第 1 号 |
| ②サイト選定 | 鉱業法 第 11 条・第 18 条 |
| ③サイト許可 | 海防法 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可等に関する省令第 1 条第 2 項第 1 号、同第 4 条 |
| | 環境省 告示第 2 |
| | 鉱山保安法 (省令) 鉱山保安法施行規則、鉱業上使用する工作物等の技術基準を定める省令 |
| | 鉱業法、鉱山保安法、石油及び可燃性天然ガス資源開発法 |
| ④注入中 | 海防法施行令第 11 条の 4、5、6、海防法第 18 条 7 第 2 号、第 18 条の 15、8 |
| | 工業用水法、地盤沈下防止等対策要綱 等 |
| | 都道府県の地下水に関する条令・要綱 (地盤沈下、塩類化防止、水質保全等) *1 |
| | 大気汚染防止法、水質汚濁防止法、土壌汚染対策法 |
| | 海防法 (省令第 1 条第 3 項、省令第 8 条、省令第 1 条第 2 項第 7 号) |
| ⑤閉鎖 | 石油及び可燃性ガス資源開発法 第 35 条第 1 項、鉱山保安法 第 13 条 |
| ⑥ポスト閉鎖 | 環境省 告示第 2 |

*1 : 詳細は各都道府県条例を参照されたい。または、佐藤邦明 編著「地下水環境・資源マネジメント」(埼玉大学出版会) に各都道府県条例がまとめられている。

2.4.2 CCS における環境影響評価

環境影響評価は、世界中のインフラ整備における標準的な手法であり、CCS プロジェクトにおける CO₂ 発生源、回収、貯留場所への輸送、貯留、貯留場所からの漏出、注入サイトの設備プラント等についても適用される。

以下に環境影響評価の標準的な流れを示す。

①リスク評価

サイトの特性から、予測に基づき最悪のシナリオにおけるリスクを評価する。

②影響評価分析

CO₂漏出のインパクト (度合い) による飲料水や農業用水用の井戸水などの水環境への影響、生態系への影響、大気への影響を評価する。

③周辺環境影響評価

CO₂漏出による貯留場所付近の動植物やコミュニティーの人的な潜在的影響を評価する。

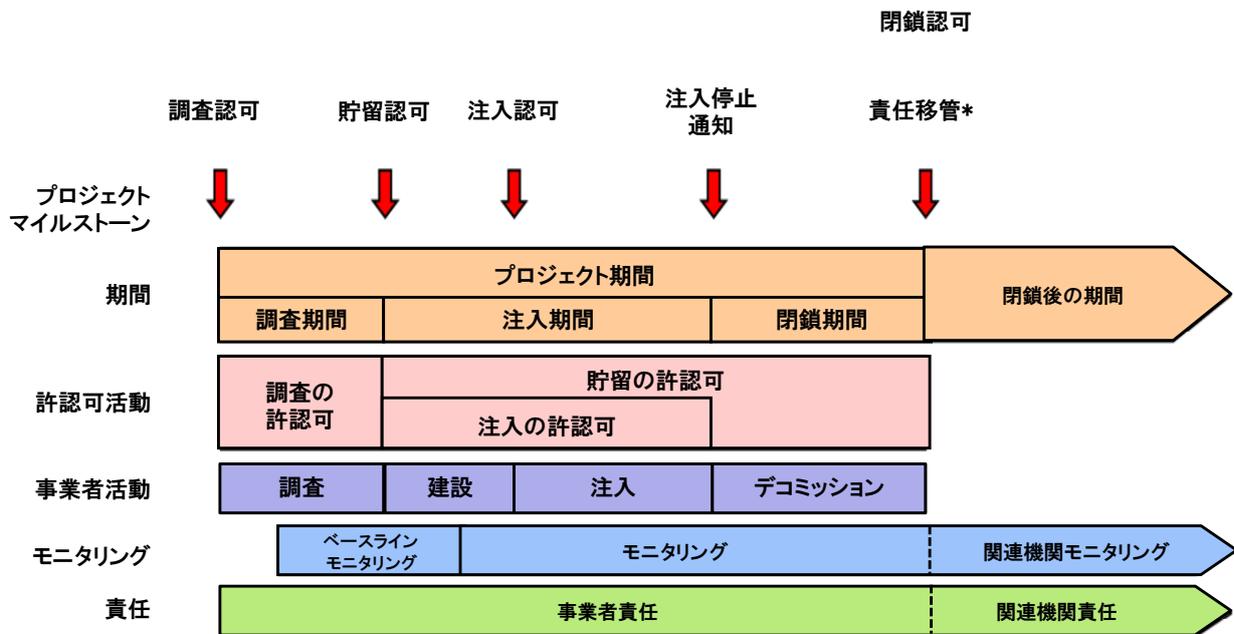
④評価

個々の環境影響評価分析結果を総合的に評価する。

2.4.3 CCSの各過程における環境影響評価およびPAに必要な項目

CCSのライフサイクルには、図2.4.3-1に示すように事前の調査を行い、貯留層として適当な地層の選定を行い、調査結果からそれを示して貯留の認可を得る。調査を行いながら初期値として様々なモニタリングを行いながら貯留設備の建設を行う。孔井や注入設備に対して認可を受け、注入が始まる。注入しながらのモニタリングを実施し、サイトの適切性の確認を随時行い、地質構造モデルを更新していく。所定量が注入された場合、注入を停止し、孔井の閉鎖、設備の撤去などを実施するデコミッションの期間がある。その後、安定的にCO₂が貯留されているかを長期にわたりモニタリングしていく必要があるが、IEAは、長期モニタリングは、事業者ではなく関連機関にその実施と責任が移管されるものとしている。

これらの過程における、事前調査、注入位置特定、注入許可、注入中、デコミッション、閉鎖後の長期モニタリングの6段階についてのIEAの環境影響評価項目、要求事項を表2.4.3-1に示す。同表には、我が国におけるCCS研究会での考え方も合わせて示す。



*長期責任は関連機関に移管される

図 2.4.3-1 CCSの開始から終了までの流れ

出典 4) : CARBON CAPTURE AND STORAGE Model Regulatory Framework、IEA、2010

表 2.4.3-1 CCS の流れにおける評価項目とその概要

| 段階 | 評価項目 | 概要 | CCS 研究会での考え方 |
|------|-----------|--|--|
| 事前調査 | 技術的評価 | 地質の間隙から算定したCO ₂ の貯可能量と貯留方法に関する技術的検討である。 | CO ₂ 貯留について地質面から検討する際には、水理地質および地質構造にかかる概念モデルおよび詳細モデルを構築し、その適確性を検討する。 |
| | 地質データ収集 | 地質図、検層記録、地震のデータ収集、試掘およびコアサンプリングのような様々な主要および二次的資料からのデータの収集を行う。 | 貯留層とキャップロックを含む領域の水理地質および地質構造モデル（詳細モデル）を利用して、貯留の可能性および貯留容量を適切な仮定と根拠に基づき確認する。 |
| | 環境影響評価 | 環境保護・保全・保存ゾーンのような環境配慮を必要とする立地におけるCO ₂ の貯留施設等の環境影響面での評価を行う。 | 漏洩は①注入井や廃坑井に沿って移動、②断層やフラクチャに沿って移動、③注入層に沿って移動、④キャップロックの孔隙中を移動するので、その見地に基づいて貯留施設等の環境影響面の評価を行う。 |
| | 経済的、政治的評価 | ①資源採掘、漁業あるいは飲料水用の真水供給など他の重要な経済活動に対して、CO ₂ 貯留が地質学的にどのような影響をおよぼすかを検証する。 ②排他的経済水域を越えるなどの国境を越えるような CO ₂ 貯留活動において、立ち入り禁止や係争地域あるいは侵略といった貯留活動行為による係争を防ぐために、政治的な障壁が存在するかどうかを検証すること。 | |

| | | | |
|--------------------|-------------------------------------|--|---|
| <p>注入位置 特定</p> | <p>貯留サイト 選定のため の条件</p> | <p>①貯留サイトとしての適合条件</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ CO₂の貯留場所は、十分な貯留容量と注入量を確保できること ・ CO₂の意図しない移行を生じる貯留層や井戸の欠点や破砕がないこと <p>②貯留サイトとして不適切な条件</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 貯留場所からの意図しないCO₂の移行の危険があること ・ CO₂漏出の危険性があること ・ 環境への危険性があること ・ 人体等の健康への危険性があること ・ 生活用水等他の資源への危険性があること | <ul style="list-style-type: none"> ・ 注入した CO₂が浸透し、拡がると予想される貯留領域およびその近傍に大規模断層がないこと ・ 地下流体の湧出が認められないこと ・ 貯留層およびキャップロックとなる地層（各層）の連続性があること。仮に断層等がある場合には、そのシール性および漏洩リスクについて慎重に確認すること ・ キャップロック層が十分な厚さを有し貯留層を覆う形で連続する状態で存在し、貯留層に注入された CO₂を漏洩することなく保持できることを確認すること ・ 坑井など人工構造物が存在する場合には、その位置や性状を十分に把握し、漏洩ルートとなる可能性がないか確認すること |
| | <p>貯留サイト 選定のため の評価事項</p> | <p>①地質データ収集</p> <p>②地質学、地球物理学と地球化学的な評価</p> <p>③貯留予定地盤の評価:</p> <p>④貯留井の評価</p> <p>⑤環境影響評価</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ 注入する地層深度、地質にかかる物性データに基づき、計画している注入レートによる注入が可能かについて確認すること ・ 詳細モデルを用いて、貯留層シミュレーションを行い、計画している量の CO₂の注入・貯留が可能か確認すること |
| <p>注入許可</p> | <p>サイトごとの特性や地域特性にもとづく適切な判断根拠で決定</p> | <p>貯留サイトにかかわる</p> <p>①開発と法体系や他の利用計画等などの基礎的事項</p> <p>②貯留サイトの位置</p> <p>③貯留対策</p> <p>④監視</p> <p>⑤報告体制</p> <p>⑥漏出等の対策</p> <p>⑦貯留サイトの閉鎖に伴う技術的対応</p> <p>⑧責任所在の明確化</p> <p>⑨資金的な裏付けと検査、報告体制を網羅していること</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ 貯留層上部に存在するキャップロック層が、必要なシール能力を保持し続けることが可能か確認すること ・ 計画している CO₂ 注入圧力によってもキャップロック層が破壊されないことを確認する ・ CO₂ 注入予定地点付近における過去の地震活動（震源分布等）について事前に確認するとともに、モニタリングデータと比較可能なバックグラウンド情報を取得すること |

| | | | |
|-----|------------------------|---|--|
| | | | <ul style="list-style-type: none"> ・漏洩は①注入井や廃坑井に沿って移動、②断層やフラクチャに沿って移動、③注入層に沿って移動、④キャップロック層の孔隙中を移動、に分類される。環境影響評価は、①～④の組み合わせで評価すること ・上記③および④の漏洩経路は、非常に長期にわたる漏出シナリオ(10万年～100万年)の一部を構成する可能性があると考えられるのに対し、①および②は比較的短期であっても漏出につながる可能性があるので時間的変化を考慮したリスクの検討が必要 ・CCSにおける環境影響は、影響の有無が明確になりにくい、影響が生じる時点が非常に遠い将来になること、他の類似した事業の事例がなく実施方法も国際的にも明確でないなど課題があり、国内実証事業での蓄積、国際的な議論の動向を踏まえた再検討が必要 |
| 注入中 | 漏出の早期発見、補修、検査、検査の頻度を規定 | <p>①坑井掘削中に地層流体が坑井内に流入し、坑口から吹き上げ、地表においては「暴噴」が発生しないようにする。</p> <p>②坑井掘削時には、リターン泥水のガス含有量、流量等を連続的に監視し、異常高圧層の存在、坑内への流体浸入の早期発見に努める。</p> <p>③注入するCO₂の漏洩を防止するため、坑井に降下したケーシングパイプと坑壁との間にセメントを必要区間充填する。</p> <p>④検査は、権限を持った第三者機関が行う。</p> <p>⑤注入中の検査は、注入設備自体の検</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・貯留層より浅い生活飲料水、工業用水への影響を回避する ・噴出防止対策 ・坑井の仕上げには、注入するCO₂による腐食を防止し、長期的な安定性に配慮するため、必要箇所には耐CO₂腐食材料で製作された資材、または耐CO₂腐食防止表面処理を施した資材を使用すること ・鋼管類、坑口装置の継ぎ手についても、注入するCO₂の圧力に対応して、十分なシール性が確保されるものを利用すること |

| | | | |
|---------|--|--|---|
| | | <p>査、適正な注入管理が行われているか等の注入運転記録、CO₂の漏洩の有無などのモニタリング結果の管理が行われているか把握する。</p> <p>⑥検査の頻度は、注入場所の地域特性や注入サイトの特性、住民との合意や注入場所の経過観察から柔軟に設定する必要がある。</p> | |
| デコミッション | <p>貯留後の例えば 1000 年の長期にわたる安定性評価を行うため定期的な監視が必要である</p> | <p>①注入井の設備の使用停止と撤去</p> <p>②注入井の安全対策 廃井はCO₂貯留における最も重大な漏出を生じる危険性がある。そのため将来のモニタリング目的で使用するもの以外は、適切にセメントプラグで閉塞し、正確な坑井位置を記録する。</p> <p>③モニタリングの実施</p> | |
| 閉鎖後長期 | <p>長期モニタリングや長期性能評価</p> | <p>①CO₂貯留安定化の証拠</p> <p>②CO₂貯留モデルの開発 安全なCO₂貯留ができるか、CO₂の移動および安定化の長期予測（1,000年以降）ができるモデルが確立していること。</p> <p>③リスク評価 最終的なリスク評価ができていること。</p> <p>④長期モニタリングの実施 安全な貯留を保証するために、潜在的な事象を含むモニタリングの実施。</p> <p>⑤財務的な枠組み 事業者から監督機関に権利を移転するにあたり、財務的なスキームの策定。</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・現在の海防法に基づく関連規定によれば、「許可期間内に2回程度（2年に1回程度）、地震探査等により廃棄した地層の監視を行う」とされている ・地震探査は、注入されたCO₂の挙動を観測し、地層の状態をモニタリングする上で、現状、最も有効な方法である ・上記の実施頻度は、プロジェクトの経済性に影響を与える可能性があるため、数値シミュレーションや地震探査を補完する他のモニタリング技術の活用やそれらの組み合わせで行うことが望ましい |

2.4.4 CMSにおける環境影響評価項目

現在、我が国においては、CCS を実施するための環境影響評価に関する基準はなく、環境省が策定に向けた作業中である。

今後、策定される基準では、海域は、海底下における CO₂ の貯留に関する現行の海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律（海防法）に基づくと思われる。また、陸上における CO₂ の貯留も含めて環境影響評価項目、モニタリング項目が選定されることになるとと思われる。さらに、策定中の環境省の指針では、IEAのCCSに関する環境影響評価項目の枠組みをベースにするものと予想される。

また、「CMP6でのCDM化の決定事項（後述）」では、CO₂の貯留サイトの選定、注入位置の選定、モニタリング計画とその基準、複数国にまたがるCCSプロジェクト、リスク・安全性評価、生態系修復（ミチゲーション）のあり方までの細部までを提言しており、今後のCMSの環境影響評価を行う上で大きな方向性を示すものとなると考える。

以上のような背景を受けて、想定されるCMSにおける環境影響評価項目、モニタリング項目を検討した。なお、CMSではCO₂は、マイクロバブルにより全溶解して注入するため、CCSのようにCO₂が地表に漏れてくることはないと考え、CO₂溶解水浸透における影響に関して考慮する内容を表2.4.4-1と表2.4.4-2のように整理した。ただし、注入サイトの特性に応じて、実証試験により環境影響を検証し、環境影響評価項目を検証する必要があるため、ここでは共通事項として整理している。

表 2.4.4-1 CMSにおける環境影響評価項目と対策（陸域）

| 項目 | 影響の内容 | 陸域 | | | | |
|--------------------------|---|--|---|---|-------------------------------------|-------|
| | | 事前調査 | サイト選定 | 注入中 | 閉鎖 | ポスト閉鎖 |
| CO ₂ 溶解水浸透 | 植生 | 工事前の植生を定量的に評価 | | CO ₂ 注入に伴う工事による植生への影響の有無を定量的に評価 | | |
| | | 絶滅危惧種の有無/個体数 潜在的植生を含む植生の量/生息面積（初期値） | | 絶滅危惧種の有無/個体数 潜在的植生を含む植生の量/生息面積（変化値） | | |
| | 生態系 | 陸域、水域の動植物の生息環境、食物連鎖などの生態系に対して、CO ₂ 漏出や開発が及ぼす影響を定量的に評価する。 | | CO ₂ 注入に伴う生態系への影響の有無を定量的に評価 | | |
| | | サイトの生息種/量（初期値） | | サイトの生息種/量（変化値） | | |
| | 景観 | 環境保護・保全・保存ゾーンのような環境配慮を必要とする立地への環境影響 | | 環境保護・保全・保存ゾーンのような環境配慮を必要とする立地への環境影響 | | |
| | | 影響の内容とその規模 | | 影響の内容とその規模 | | |
| 生活飲料水の地下水源への水質汚染、環境等への影響 | ①生活飲料水の地下水源等への水質汚染や生態系への環境影響の有無 ②地下水に溶解したCO ₂ の貯留層以外への移動がないこと | ①地下水水質や重金属の溶出をモニタリング ②地下水に溶解したCO ₂ の貯留層以外への移動による漏出の有無をモニタリング | ①地下水水質や重金属の溶出をモニタリング ②地下水に溶解したCO ₂ の貯留層以外への移動による漏出の有無をモニタリング | 安全な貯留を保証をするために、潜在的なリスクに起因する事象を含むモニタリングの実施 | | |
| 生活飲料水の地下水源への水質汚染、環境等への影響 | ・ pH ・ HCO ₃ ⁻ ・ 濁度 ・ 水質一般項目、飲料水基準 ・ 重金属濃度、 ・ 水温等 (排ガスの場合NO _x 、Soxなど) (初期値) | ・ pH ・ HCO ₃ ⁻ ・ 濁度 ・ 水質一般項目、 ・ 重金属濃度、 ・ 水温等 (排ガスの場合NO _x 、Soxなど) (変化値) | ・ pH ・ HCO ₃ ⁻ ・ 濁度 ・ 水質一般項目、 ・ 重金属濃度、 ・ 水温等 (排ガスの場合NO _x 、Soxなど) (定期監視) | ・ pH ・ HCO ₃ ⁻ ・ 濁度 ・ 水質一般項目、 ・ 重金属濃度、 ・ 水温等 (排ガスの場合NO _x 、Soxなど) (定期監視) | | |
| 対応対策 | 漏出した場合の影響を数値シミュレーションモデルによる地質構造や水理地質面から地下水中へのCO ₂ の挙動や影響範囲を解析 | 環境影響評価から、リスクの時間的変化を考慮し総合的に評価を行う。 | 利用地下水の水質調査、解析による影響検討 | 利用地下水の水質調査、解析による影響検討 | 定期的なモニタリング（2年に1回）とモデルによる長期予測（1000年） | |

注：各項目の上段は実施内容、下段は測定項目を示す。

表 2.4.4-2 CMS における環境影響評価項目と対策（海域）

| 項目 | 影響の内容 | 海域 | | | | |
|--------------------------|--|---|--|---|---|---|
| | | 事前調査 | サイト選定 | 注入中 | 閉鎖 | ポスト閉鎖 |
| CO2溶解水浸透 | 植生変化 | 工事前の藻場植生を定量的に評価 | | CO2注入に伴う工事による藻場植生への影響の有無を定量的に評価 | | |
| | | 絶滅危惧種の有無/個体数 潜在的藻場植生を含む植生の量/生息面積（初期値） | | 絶滅危惧種の有無/個体数 潜在的植生を含む藻場植生の量/生息面積（変化値） | | |
| | 生態系 | 海域の動植物の生息環境、食物連鎖などの生態系に対して、CO2漏出や開発が及ぼす影響を定量的に評価する。 | | CO2注入に伴う生態系への影響の有無を定量的に評価 | | |
| | | サイトの生息種/量（初期値） | | サイトの生息種/量（変化値） | | |
| | 景観 | 環境保護・保全・保存ゾーンのような環境配慮を必要とする立地への環境影響 | | 環境保護・保全・保存ゾーンのような環境配慮を必要とする立地への環境影響 | | |
| | | 影響の内容とその規模 | | 影響の内容とその規模 | | |
| 生活飲料水の地下水源への水質汚染、環境等への影響 | ①生活飲料水の地下水源等への水質汚染や生態系への環境影響の有無 ②地下水に溶解したCO2の貯留層以外への移動がないこと | | ①地下水水質や重金属の溶出をモニタリング ②地下水に溶解したCO2の貯留層以外への移動による漏出の有無をモニタリング | ①地下水水質や重金属の溶出をモニタリング ②地下水に溶解したCO2の貯留層以外への移動による漏出の有無をモニタリング | 安全な貯留を保証をするために、潜在的なリスクに起因する事象を含むモニタリングの実施 | |
| | ・pH ・海水中のCO2濃度 ・水質一般項目 ・重金属濃度 (排ガスの場合NOx、Soxなど) (初期値) | | ・pH ・海水中のCO2濃度 ・水質一般項目 ・重金属濃度 (排ガスの場合NOx、Soxなど) (変化値) | ・pH ・海水中のCO2濃度 ・水質一般項目 ・重金属濃度 (排ガスの場合NOx、Soxなど) (定期監視) | ・pH ・海水中のCO2濃度 ・水質一般項目 ・重金属濃度 (排ガスの場合NOx、Soxなど) (定期監視) | ・pH ・海水中のCO2濃度 ・水質一般項目 ・重金属濃度 (排ガスの場合NOx、Soxなど) (定期監視) |
| 対応対策 | 漏出した場合の影響を数値シミュレーションモデルによる地質構造や水理地質面から地下水へのCO2の挙動や影響範囲を解析 | 環境影響評価から、リスクの時間的変化を考慮し総合的に評価を行う。 | 利用地下水の水質調査、解析による影響検討 | 利用地下水の水質調査、解析による影響検討 | 定期的なモニタリング（2年に1回）とモデルによる長期予測（1000年） | |

注：各項目の上段は実施内容、下段は測定項目を示す。

CO₂の漏出については、CMS では生じないとしているが、実証試験により CO₂が漏出しないか検証する必要があるので、万が一のリスクとして漏出した場合の環境影響評価項目について参考までに表 2.4.5-3 および表 2.4.5-4 に示す。

表 2.4.4-3 漏出した場合の環境影響評価（陸域）

| 項目 | 影響の内容 | 陸域 | | | | |
|--------------------|---|---|------------------------------|--|--|--|
| | | 事前調査 | サイト選定 | 注入中 | 閉鎖 | ポスト閉鎖 |
| CO ₂ 漏出 | 政治、経済 | 地下資源、漁業、飲料水源への経済的影響（当初） 貯留層が国境をまたぐ場合などに起因する国家間の政治的な係争などへの影響の有無 | | 地下資源、漁業、飲料水源への経済的影響（変化時） 貯留層が国境をまたぐことが判明した場合の国家間の政治的な係争などへの影響や対応 | | |
| | | 経済的影響や補償、政治的係争の内容、規模（想定値） | | 経済的影響や補償、政治的係争の内容、規模（変化値） | | |
| | 地下 | ①潜在的漏出経路の有無 ②漏出しないこと ③漏出した場合の環境/人体等の健康/生活用水等の影響の有無 | | 注入井近傍でのCO ₂ 濃度の監視 | ①注入井戸は、将来のモニタリングを行うもの以外に確実に閉塞すること ②貯留場所を含む周囲の土壌中、大気中、地下水の水質などのモニタリングする ③CO ₂ の移動を検知すること、 ④周囲の環境に与える著しい悪影響を検知すること | 安全な貯留を保証するために、潜在的なリスクに起因する事象を含むモニタリングの実施 |
| | | 周辺の土壌/大気中/地下水中のCO ₂ 濃度（初期値） | | 注入井周辺の土壌/大気中/地下水中のCO ₂ 濃度（変化値） 注入井の作業エリアにおけるCO ₂ 濃度（労働安全性） | 注入井周辺の土壌/大気中/地下水中のCO ₂ 濃度（定期監視） | 注入井周辺の土壌/大気中/地下水中のCO ₂ 濃度（定期監視） |
| 対応対策 | 漏出した場合の漏出過程や地下水や大気への拡散影響を地質構造や水理地質面から解析 | ①地質データ収集 ②地質学、地球物理学と地球化学的な評価 ③貯留予定地盤の評価 ④貯留井の評価 ⑤環境影響評価から、リスクの時間的変化を考慮し総合的に評価を行う。 | 注入井および揚水井での溶解水監視、地上での漏洩監視を行う | ①モニタリング結果を挙動予測と比較検証 ②貯留場所からの重大な漏出、意図しないCO ₂ の移動あるいは他の不測な事態を検知して評価すること ③重大な漏出やCO ₂ の意図しない移動が生じた事態に、監督機関に報告できるようにCO ₂ の量を測定すること | モニタリングとモデルによる長期予測 | |

注：各項目の上段は実施内容、下段は測定項目を示す。

表 2.4.4-4 漏出した場合の環境影響評価（海域）

| 項目 | 影響の内容 | 海域 | | | | |
|-------|--|---|------------------------------|---|--|--|
| | | 事前調査 | サイト選定 | 注入中 | 閉鎖 | ポスト閉鎖 |
| CO2漏出 | 政治、経済 | 地下資源、漁業、飲料水源への経済的影響（当初） 貯留層が国境をまたぐ場合などに起因する国家間の政治的な係争などへの影響の有無 | | 地下資源、漁業、飲料水源への経済的影響（変化時） 貯留層が国境をまたぐことが判明した場合の国家間の政治的な係争などへの影響や対応 | | |
| | | 経済的影響や補償、政治的な係争の内容、規模（想定値） | | 経済的影響や補償、政治的な係争の内容、規模（変化値） | | |
| | CO2漏出による人体や生態系、環境等への影響と基準 IPCCリスク評価参照 | ①潜在的漏出経路の有無 ②漏出しにくいこと ③漏出した場合の環境/人体等の健康/生活用水等への影響の有無 | | 注入井近傍でのCO2濃度の監視 | ①注入井戸は、将来のモニタリングを行うもの以外に確実に閉塞すること ②貯留場所を含む周囲の土壌中、大気中、地下水の水質などのモニタリングすること、 ③CO2の移動を検知すること、 ④周囲の環境に与える著しい悪影響を検知すること | 安全な貯留を確保するために、潜在的なリスクに起因する事象を含むモニタリングの実施 |
| | | 周辺の土壌/大気中/地下水中のCO2濃度（初期値） | | 注入井周辺の土壌/大気中/地下水中のCO2濃度（変化値） 注入井の作業エリアにおけるCO2濃度（労働安全性） | 注入井周辺の土壌/大気中/地下水中のCO2濃度（定期監視） | 注入井周辺の土壌/大気中/地下水中のCO2濃度（定期監視） |
| 対応対策 | 漏出した場合の漏出過程や地下水や大気への拡散影響を地質構造や水理地質面から解析 | ①地質データ収集 ②地質学、地球物理学と地球化学的な評価 ③貯留予定地盤の評価 ④貯留井の評価 ⑤環境影響評価、リスクの時間的変化を考慮し総合的に評価を行う。 | 注入井および揚水井での溶解水監視、地上での漏洩監視を行う | ①モニタリング結果を挙動予測と比較検証 ②貯留場所からの重大な漏出、意図しないCO2の移動あるいは他の不測な事態を検知して評価すること ③重大な漏出やCO2の意図しない移動が生じた事態に、監督機関に報告できるようにCO2の量を測定すること | モニタリングとモデルによる長期予測 | |

注：各項目の上段は実施内容、下段は測定項目を示す。

2.4.5 まとめと提言

1) 法規制のありかた

CCSは、超臨界法によるGL-800m以深へ大規模貯留であり、1億t以上の貯留容量を持った集中型の貯留となる。一方、CMSは年間1～10万t-CO₂程度の排出となる中小規模の排出源を対象としており、事業所ごとにそれらの近傍に分散して貯留することで輸送コストをほとんど無くすることができるメリットがある。しかし、現状の法規制は、超臨界CO₂をGL-800m以深の貯留層に地下水と置換して貯留することを前提としているため、遮蔽効果が得られない場合には、漏洩が大きな問題となることを踏まえた規制である。

CMSでは、GL-300mからGL-500mの貯留層へ低圧力で注入し、溶解によって貯留するため、気体としての漏洩の危険は比較的小さいが、浅部に貯留するため、生活飲料に対する影響が大きいと思われる。従って、地下水利用域への漏洩を抑えるように貯留を制御し、監視は飲料水の水質基準を適用していく必要がある。

国際的には、サイト閉鎖後のモニタリングやサイトの維持に係る財務的な保証について規定しているため、日本でも閉鎖後の財務的な保障を前提とした枠組みが必要であると考えられる。また、CO₂の地中貯留では、貯留層が国境をまたぐ可能性があるため、国ごとに異なる法規制を策定するよりは、国際的な共通基準があることが望ましく、各国はこの国際的な共通基準に基づいた国内法

規を整備すべきである。しかし、CMS のような小規模貯留では、我が国のように他国と直接隣接しないことのメリットを生かすことが可能と考える。また、CCS における法規制では、貯留期間が長期におよぶため、法的枠組みは長期的かつ国際的な共通基準が不可欠であり、また、地球温暖化の進行を見据えた国際的な動向を注視していく必要がある。

2) 環境影響評価の方向性

環境影響評価については、影響の有無が明確になりにくい点、影響が生じる時点が非常に遠い将来になるという点、他の類似した事業の事例がなく、実施方法も国際的にも明確でないなど課題がある。このことから、CMS においては、実証試験の結果を元に、法規制や環境影響評価のあり方について検討していくことが必要であると思われる。

3) CCS、CMS への社会的受容性 (PA) 対策の重要性

CCS、CMS の推進には、PA が大変重要である。PA とは社会的受容性のことであり、第 2 章の冒頭で記したように、人の要求においては安全性への要求が高い。貯留される CO₂ の漏洩という懸念から、米国グリーンビルでは、米国エネルギー省の補助金が付きながらも住民反対により計画中止に追い込まれた例がある。このように事業の推進には、住民の合意や理解は重要であり、場合によっては、実証プロジェクトを行う際にも計画の見直しや断念につながることになる。

ここで CCS による温暖化抑制効果についてみてみる。CCS 技術行程表(国際エネルギー機関 IEA)では、CO₂ 回収・貯留 (CCS) により 2050 年時点で 40 億トンの CO₂ 排出削減が可能であるとしている。このことから CCS の温暖化抑制効果は大きいことがわかる。これは、逆に CCS がない場合、太陽光発電や風力発電、バイオマス発電、地熱発電だけでは、十分な温暖化抑制が期待できないことを意味している。こうした点からも温暖化対策技術としての CCS、CMS の実証試験や事業推進についてのアピールや PA は重要である。

一方、日本においては、CCS は未だ認知されていない。CCS に対しては、地震による漏洩の不安、安全性への懸念などに加えて、そもそも CCS に関する情報や CCS の目的など温暖化抑制技術としての理解や啓蒙が進んでいない。現状の日本で CCS、CMS を温暖化抑制対策事業として進める上では、計画や実証試験の段階での国民への情報開示と理解が重要になる。そのためには、事業計画の段階からの住民への情報公開、事業への住民の意見反映や事業計画立案への住民参加などが必要である。このように、CCS、CMS 事業推進には、環境影響評価だけでなく、社会的・経済的影響、リスク分析、住民理解が大変重要であるといえる。

そのためには、まずは実証試験において、上述したように市民参加型で CCS、CMS の目的や安全性への理解を進めること、実証試験による安全性の証明を進めるという長期的な対応を行うべきと考える。

2.4節の参考文献

- 1) IEA: CARBON CAPTURE AND STORAGE Model Regulatory Framework、2010
- 2) NEDO 海外レポート NO.1065, 2010.8.11
- 3) Underground Injection Control (UIC) Program Requirements for Geologic Sequestration of Carbon Dioxide Final Rule
- 4) Carbon Capture and Storage Legal and Regulatory Review Edition 1
- 5) 2013 年以降に向けた EU 域内排出量取引制度 (EU-ETS) の改正指令
- 6) 経産省産業技術環境局 二酸化炭素回収・貯留 (CCS) 研究会、CCS 実証事業の安全な実施にあたって、2009 年 8 月
- 7) EU の環境影響アセスメント規制に関する調査・研究報告書 (社) 日本損害保険協会 安全防災部 2001 年 4 月
- 8) 経済産業省 WG 資料：二酸化炭素地中貯留を目的とした坑井の掘削・閉鎖に当たっての安全基準等
- 9) 経産省産業技術環境局 二酸化炭素回収・貯留 (CCS) 研究会、CCS 実施に係る安全基準検討ワーキンググループ (第 6 回) 周辺環境への影響評価等、2009 年 3 月
- 10) 環境省 中央環境審議会 地球環境部会 二酸化炭素海底下地層貯留に関する専門委員会 WG 資料：諸外国の関連制度について
- 11) 【イギリス】 2011 年エネルギー法の制定、外国の立法 国立国会図書館調査及び立法考査局、2012 年 1 月

第3章 想定モデル地点の選定と CMS貯留システムのモデル構築

3.1 想定モデル地点の選定

3.1.1 貯留層の地質条件

技術的に貯留が成立する地質条件として、平成23年度までの研究で以下のようにまとめられている。

1) 地質構造

現在の注入技術から、マイクロバブルの全溶解を期待するのは難しく、残留マイクロバブル、遊離マイクロバブルや部分的に発生する大口径気泡が存在する条件を考えざるを得ない。しかし、時間に伴う溶解も考えられ、地質構造として、貯留層上位のキャップロックが低透水であることは必ずしも必要でない。ただし、モデル地点の選定に当たっては、安全性を考慮した理想的な地質条件を選定することとした。さらに、少なくとも貯留範囲においては低透水のキャップロックの連続を理想とて選定した。

活構造（褶曲・断層）や活火山が近傍に無い事がさらに安全上の適合条件として挙げられる。活断層がキャップロック中にも存在した場合は破砕作用によって上昇流が存在する可能性がある。また活火山地域は活発な地熱活動による岩脈の貫入等や熱水の循環がキャップロックに悪影響を及ぼす可能性が考えられる。

ただし断層についてはガウジ等の形成によるトラップ効果を期待できるプラスの側面もあることから、存在自体が不適合を意味するものではない。

■地質構造の条件1：下位の貯留層と上位のキャップロックの配置関係

■地質構造の条件2：貯留域と周辺に活構造・活火山が無い事が望ましい

2) 貯留層・キャップロックの物性

CMS 貯留層では高い孔隙率を有することが条件であり、堆積岩分布地域であれば、貯留層の対象は砂岩層（または、高孔隙率の凝灰岩層）となる。また、砂岩は粒度が粗いほど一般的に透水性が高いことから、貯留層としては、粗粒分の卓越する砂岩層が厚く分布する地域が有望と考えられる。

一方、キャップロックは先の条件で示したように貯留層の上位にあり、透水性が低い。堆積岩分布地域を想定するならば、キャップロックの対象は泥岩となる。泥岩は連続性が高いこと、ある程度の層厚を有し、亀裂などを有しない塊状もしくは層状であることが望ましい。分散型貯留では、通常のCCS に対して貯留域は限定されるので、数キロ四方程度の連続性を有していれば問題がないと考えられる。

■貯留対象層の条件：高い孔隙率を有する堆積岩（砂岩）

■貯留層の上位層の条件：透水性が低く連続性の高い堆積岩（泥岩）

分散型貯留では、対象層の連続性は限定的
（数キロ四方程度を想定）

3) 対象とする地質の年代

これまでの CCS においては、CO₂ が超臨界状態となる深度 800m 以深が対象域とされていたため、その深度に分布する新第三紀中新統程度の堆積岩類を貯留層および低透水のキャップロックの対象としていた。中生代以前の岩石が分布する地域では、岩石の孔隙率は貯留層としては小さく、キャップロックにも亀裂が多いために貯留対象域として適さない地域が多かった。

一方で CMS においては、CO₂ が超臨界状態である必要がなく、CCS よりも浅部を貯留層とすることができ、キャップロックが無く、浅い深度に広く分布する高い孔隙率を有する、地質時代の新しい堆積岩（新第三紀鮮新統～第四紀更新統）を貯留対象層とできるメリットがある。また、CMS では小規模分散型貯留とできることから、その分布域も広域である必要がなく、サイト選定の幅も広げることができる。

CO₂ 排出源近傍での貯留を考えれば、国内では平野部ないしは沿岸域がその対象地域となり、注入圧を考慮すると、新第三紀鮮新統～第四紀系下部更新統の堆積岩（砂岩・凝灰岩など）が想定される。ただし、新第三紀中新統であっても十分な孔隙率を有している層は貯留対象域となり、選択範囲はより広くなる。

■貯留深度条件：超臨界状態に至らない深度（深度 800m 以浅）

■地質対象：新第三紀鮮新統～第四紀系下部更新統

4) 排出源との関係

貯留位置については、コスト面からも排出源近傍が有望であり、排出源直下もしくは近接する臨海部を検討対象とする。また、小規模分散型貯留での注入量として、年間 1 万 t～10 万 t の CO₂ 貯留規模を想定する。

■貯留位置条件：排出源直下、もしくは臨海部での小規模分散型貯留を想定

3.1.2 貯留の考え方

CMS の場合、特に貯留深度を限定する必要はない。ただし、浅部では人間活動による地下水利用が行われており、この深度を“利用水深”と定義し、この深度（ここでは仮に地表下 300m）以下の貯留を a 領域、以上を b 領域として、キャップロック深度を考慮して地質構造を考える。

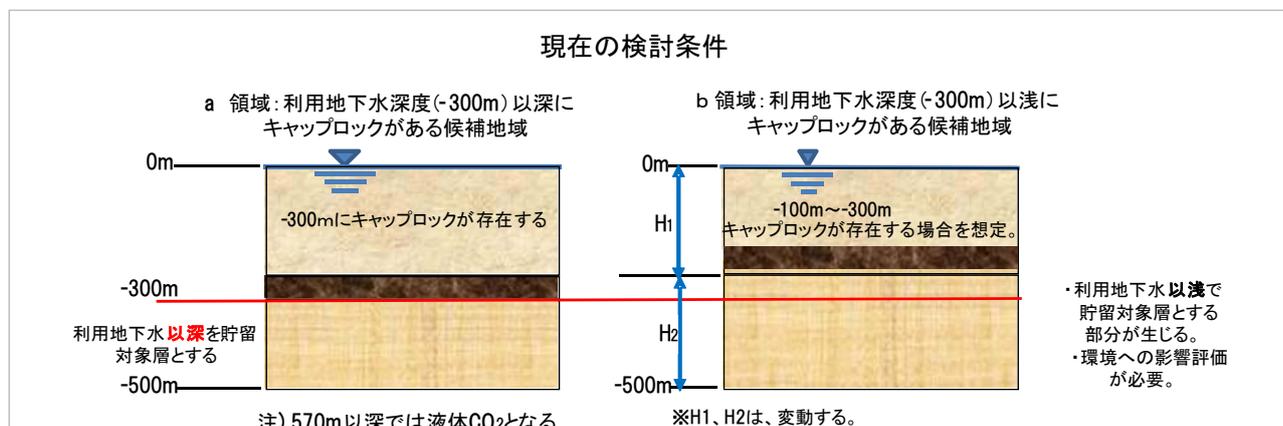


図 3.1.2-1 キャップロック深度の違いによる検討条件

利用地下水：飲料用地下水、工業用地下水をいう。ここでは、深度を一般的に利用されている-300mとして仮定した。

a 領域：利用地下水深度（-300m）以深にキャップロックがある貯留候補地域

■利用地下水以深を貯留対象層とする

b 領域：利用地下水深度（-300m）以浅にキャップロックがある候補地域

■利用地下水以浅で貯留対象を設定

→環境への影響評価が必要となる

RITE/ENAA の「全国貯留層賦存量調査」結果などを参考に、地質条件に対応する地質をわが国全体で俯瞰し、概略の地質区分を行なった。

CMS が可能となる地域は小規模分散型貯留を考え、前述の条件に基づいて排出源直下、もしくは臨海部に貯留位置を想定する。

図 3.1.2-2 に日本の主な CO₂ 排出源を示す。排出源は、火力発電所、製鉄所、セメント工場であり、排出量の大きなものを取り上げられている。排出源は各地に存在するが、臨海部に多くが集中し、特に東京湾、伊勢湾、および大阪湾の大都市域のほか、福島県～茨城県の沿岸部、瀬戸内海および北九州地域に多く位置する。

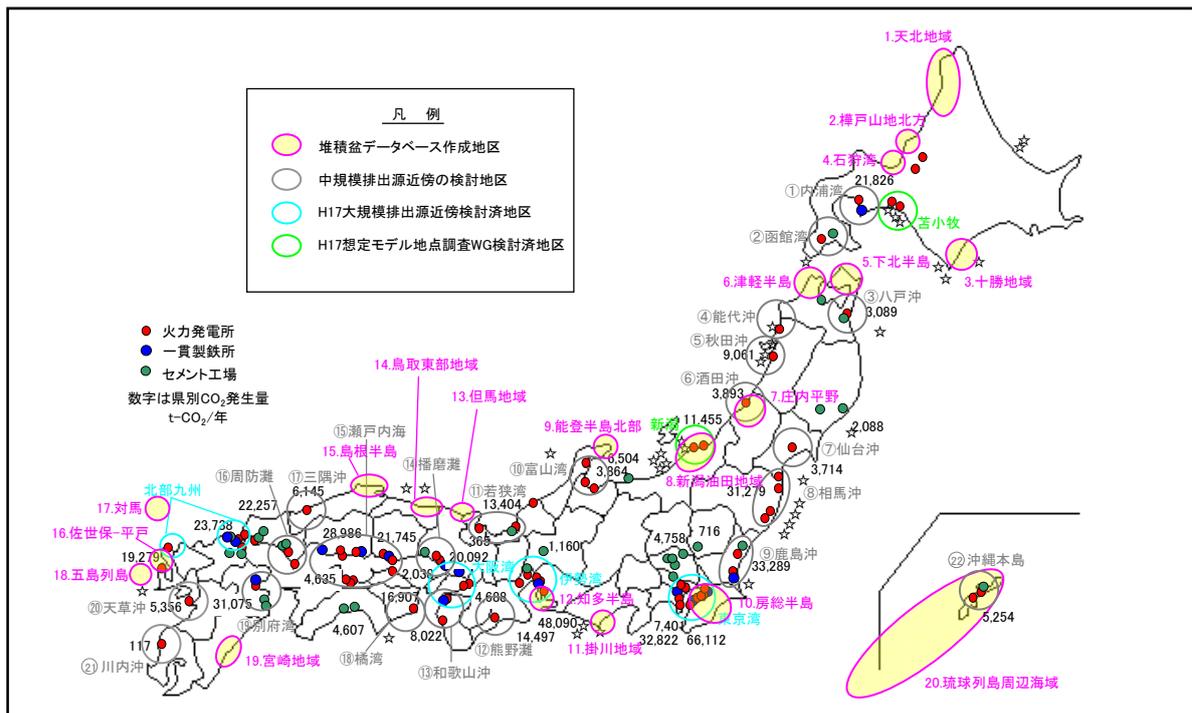


図 3.1.2-2 全国のCO2 排出源位置図

出典：RITE/ENAA 全国貯留層賦存量調査成果データベース（2009）¹⁾

3.1.3 新第三紀鮮新統～第四紀更新統の分布

3.1.1 で述べたとおり、CO₂ の地中貯留には高い孔隙率を有する堆積岩（砂岩）の上に透水性が低く連続性の良い堆積岩（泥岩）が分布するような地域が望ましい。

日本国内においては、一般に新第三紀より古い堆積岩は、固結度が高く貯留層としては不適當であること、CMS における貯留深度を考慮すると、新第三紀鮮新統～第四紀更新統が分布する地域の方が適切である。従って、CMS の対象地域としては、このような地質条件の地域を検討する。図 3.1.2-1 に示すように、対象となる地質は、主に日本の平野部から沿岸域にかけて分布しており、CO₂ の排出源の分布と合致している。

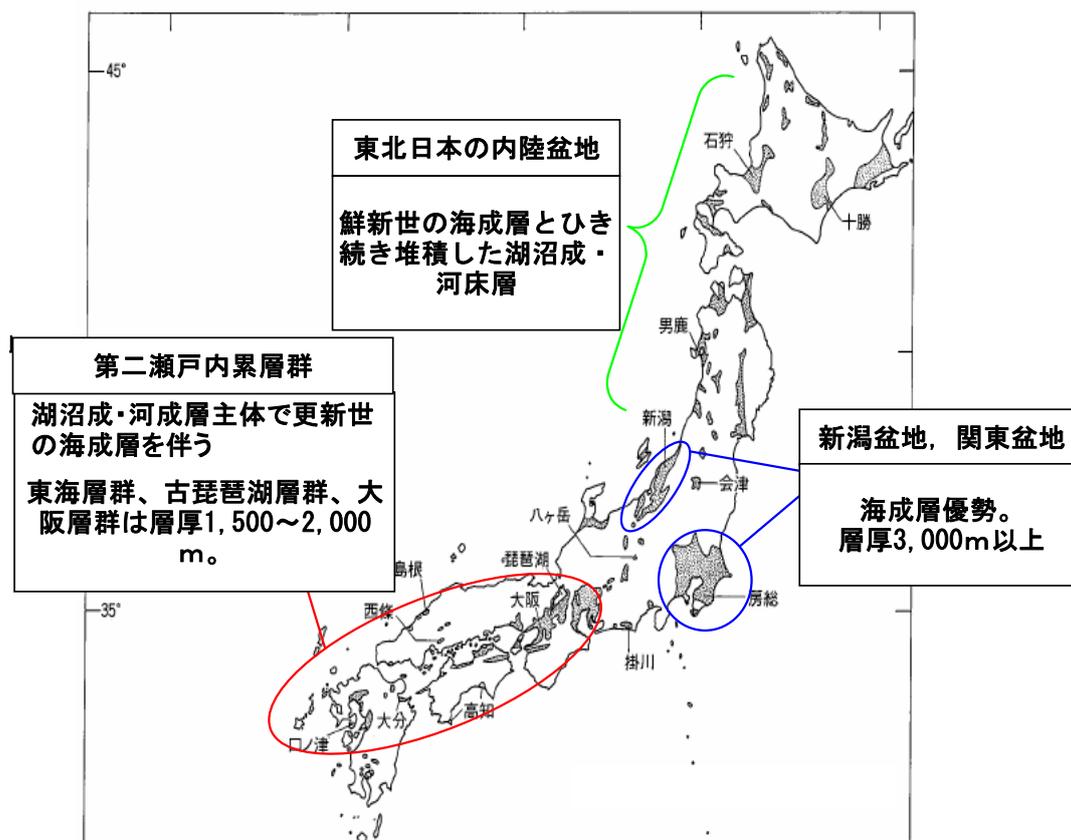


図 3.1.3-1 日本の新第三紀鮮新統～第四紀更新統の分布

出典：市原実（1993）²⁾ 大阪層群に一部加筆

3.1.4 貯留有望地域の選定

貯留に適した地質と排出源の分布を考慮すると、図 3.1.2-2 に示した「RITE/ENAA 全国貯留層賦存量調査成果データベース（2009）」に示される地域が対象と考えられる。ここではこれらの地域について、地質の分布状況とその特長についてまとめた。

CMS の対象地層は、平野部・臨海部に位置する排出源地下 300m～500m に分布すると想定される地層を検討対象とした。本調査研究では、小規模排出源、特に石油精製工場を排出源として対象地域を検討した。

「RITE/ENAA 全国貯留層賦存量調査成果データベース (2009)」を参考に、堆積盆の存在と排出源の位置から有望とみなせる大規模排出源地域を含めた 11 箇所（苫小牧、室蘭、能代、秋田、庄内、東京湾、伊勢湾、大阪湾、松浦、宮崎、沖縄）を選定し、地質特性・地質構造・排出源から総合的に比較検討した。

CMS 成立可能性評価のモデル地質構造の判定は、主に以下によった。

- ・貯留層となり得る砂岩層（高孔隙率）とキャップロック（低透水・連続性・強度）となり得る泥岩層の存在
- ・十分な貯留層の分布（広さ）
- ・貯留候補域の活構造の分布

検討結果を表 3.1.4-1 に示す。この結果、大規模排出源の東京湾・大阪湾、小規模排出源の沖縄が総合的に有望となった。この内、大阪湾は、既存データも多く信頼性が高いため、平成 22 年度の検討で最有望とされた。そこで、今年度はさらに B モデル地域として、小規模排出源である沖縄地域を検討対象とした。B モデル地域は地質条件が CMS 成立に適していることに加えて、排出源である発電所や製油所が対象地層の直上に位置している。

表 3.1.4-1 CMS 対象有望地域の検討

| 対象地域*1 | 対象地層*2 | 地質特性 | | | | | | 地質構造 | | | 排出源 | |
|--------|-------------------------|---------|--------|------|------|------|-----|---------------|--|----------|-------------------|---|
| | | キャップロック | | | 貯留層 | | | 遮蔽層/貯留層の組み合わせ | 活構造(褶曲・断層) 活火山に近接しない | 貯留対象域が近接 | 小規模排出源(10万t規模)が存在 | |
| | | 連続性 | 難透水性*3 | 強度*4 | 高孔隙率 | 高透水性 | 均一性 | | | | | |
| 苫小牧 | 第四紀～第三紀堆積岩 | △ | ○ | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | (キャップロック)伏在海成更新統(シルト・泥炭) (貯留層)伏在海成更新統(砂・砂礫) | × | ○ | ○ |
| 室蘭 | 第四紀～第三紀火山岩類 | × | △ | △ | △ | △ | × | △ | (キャップロック)留萌層上部 (貯留層)留萌層下部 | × | ○ | ○ |
| 能代 | 第三紀堆積岩 | ○ | ○ | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | (キャップロック)笹岡層 (貯留層)天徳寺 | × | △ | △ |
| 秋田 | 第三紀堆積岩 | ○ | ○ | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | (キャップロック)笹岡層 (貯留層)天徳寺 | × | ○ | ○ |
| 庄内 | 第四紀更新統 | ○ | ○ | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | (キャップロック)笹岡層 (貯留層)常禅寺層 | △ | △ | △ |
| 房総半島 | 上総層群中部層 (主に大田代層から上部) | ○ | ○ | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | (キャップロック) (貯留層)上総層群中部層 | ○ | ○ | ○ |
| 伊勢湾 | 尾張層群 東海層群(米野累層) | ○ | ○ | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | (キャップロック)米野累層 (貯留層)大泉累層及びその 下位の地層 | △ | ○ | ○ |
| 大阪 | 大阪層群下部層 | ○ | ○ | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | (キャップロック)Ma3～Ma-1の 海成粘土 (貯留層)Ma3以深の砂層 | ○ | ○ | ◎ |
| 松浦 | 古第三紀堆積岩 | ○ | ○ | ○ | △ | △ | △ | ○ | (キャップロック)佐世保層詳細 粒相 (貯留層)佐世保層群粗粒相 | △ | ○ | △ |
| 宮崎 | 第三紀堆積岩 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | (キャップロック)宮崎層群下部 (貯留層)宮崎層群上部 | ○ | △ | △ |
| 沖縄 | 第三紀堆積岩 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | (キャップロック)与那原層 (貯留層)豊見城層 | ○ | ○ | ◎ |

*1: 対象地区は、RITE/ENAA成果報告書を参考に堆積盆の存在と排出源の位置から8か所を抽出
 *2: 対象地層は排出源(主として臨海部・平野部)の地下300m～500mに分布すると想定される地層
 *3: キャップロックは亀裂が少なく、亀裂面も密着し極めて透水性が低い($k=10^{-9}$ m/sec以下)地層
 *4: キャップロックの強度は所定深度+注入圧で破壊しない程度の強度保持

<凡例>
 ○: 適
 △: やや適
 ×: 不適

3.1.5 Bモデル地域

Bモデル地域は新第三紀の島尻層群と第四紀琉球層群からなる。水溶性天然ガスが島尻層群の下部層である豊見城層の砂岩・泥岩互層中の砂岩に胚胎していることから、島尻層群中の豊見城層が貯留層とできる可能性が高い。一方、中部層である与那原層は泥岩の厚層からなり、天然ガス鉱床の保存に寄与してきたと考えられることから、与那原層がキャップロックとなる。平成18年度の成果報告書¹⁾では、深層ボーリング調査結果から CCS 貯留層としての評価を行なっている。

島尻層群の内、深部で砂岩を伴うとされている豊見城層は、走向直交方向での断面においては、南東側においてより深部に分布し、走向に平行方向の断面においては、断面中央部に発達する比較的大きな断層の変位の影響を受けて、北東部と南西部でより深部に分布している。既往の調査結果を基に対象層の物性値を整理した結果を表 3.1.5-1 に示す。

表 3.1.5-1 島尻層群における対象層の物性値

| 項目 | 島尻層群 | | 備考 | 引用文献 | |
|-----------------|------------------------------|-----------|----|---|---|
| | 泥岩 | 砂岩 | | | |
| 透水係数 (m/s) | 1E-12~1E-9 | 1E-6~1E-5 | 泥岩 | 米須地下ダム(深度86m)の設計値(島尻泥岩新鮮部)の値: 1E-7(cm/s) | 2 |
| | | | | 圧密試験結果から求めた透水係数: 1E-7(cm/s)オーダー | 3 |
| | | | | 圧密試験結果から求めた透水係数(深度:6.5~20m): 1E-9~1E-10(cm/s)オーダー | 5 |
| | | | 砂岩 | 米須地下ダム(深度86m)の設計値(島尻層砂風化部)の値: 1E-4(cm/s) | 2 |
| | | | | T1部層表層試料の浸透率: 454~932md=4.5E-4~9.3E-4(cm/s) | 4 |
| | | | | T5部層の浸透率: 42~119md=4.2E-5~1.2E-4(cm/s) | 6 |
| 間隙率 (%) | 30~40 | 30~40 | 泥岩 | 島尻層泥岩(深度6.5~24.5)の間隙率: 37.5~39.4(%) | 4 |
| | | | | 琉政2号井の含水率(深度60~720m): 35~20(%) | 6 |
| | | | 砂岩 | T1部層表層試料の間隙率: 32.4~44.2(%) | 4 |
| | | | | 琉政2号井の含水率(深度60~720m): 35~20(%) | 6 |
| 内部摩擦角 (°) | 27.2~31.1 | 23~24 | 泥岩 | 深度6.5~20mを対象としたCD試験結果 | 5 |
| | | | 砂岩 | 中圧三軸試験(CD)試験結果 | 7 |
| 粘着力 (MPa) | 0.47~1.26 | 0.36~1.20 | 泥岩 | 深度6.5~20mを対象としたCD試験結果 | 5 |
| | | | 砂岩 | 中圧三軸試験(CD)試験結果 | 7 |
| 一軸圧縮強度 (MPa) | 1.0(深度10m程度) 2.5(深度20m程度) | | | | 5 |
| 変形係数 (MPa) | 1E+2~2E+2 | | 砂岩 | 深度6.5~20mを対象としたCD試験結果 | 5 |
| ポアソン比 | 0.1~0.2 | | | | |

注: 引用文献は 3.2 節を参照

引用文献

- (1) (財)地球環境産業技術研究機構:平成18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、平成19年3月
- (2) (独)緑資源機構:地下水有効開発技術マニュアル、P.181、2004年
- (3) 内閣府沖縄総合事務局開発設計部:土木工事設計要領:参考資料-2 沖縄の地形・地質、2011年
- (4) 福田他:沖縄島南部・宮崎両ガス田の比較鉱床学的研究、琉球列島の地質学的研究、第4巻、107-118、1979年
- (5) 新城他:島尻層泥岩地盤の工学的性質、土と基礎、40-11、1992年
- (6) 福田他:第5次沖縄天然ガス資源調査・研究概報、地質調査所月報、第21巻 第11号

3.2 サイト条件に応じた注入・貯留モデルの検討

3.2.1 Bモデル地域の地質概要

Bモデル地域の地質とBモデル地域における既往の調査ボーリング（水溶性ガス田調査用の深層ボーリング）位置図を図3.2-1に示す。Bモデル地域は新第三紀の島尻層群と第四紀の琉球層群からなる。

図3.2-2に断面位置と地質構造推定範囲を示す。①～④の断面は、島尻層群の走向方向にほぼ直交する。⑤～⑥の断面は、島尻層群の走向方向にほぼ平行であり、⑤は沖縄本島中・南部の長軸上、⑥は中城湾のほぼ中央部を切る断面となっている。図3.2-3と図3.2-4にそれぞれの断面図を示す。島尻層群のうち深部で砂岩を伴うとされている豊見城層は、走向直交方向での断面においては、南東側においてより深部に分布し、走向平行方向の断面においては、断面中央部に発達する比較的大きな断層の変位の影響を受けて北東部と南西部でより深部に分布している。

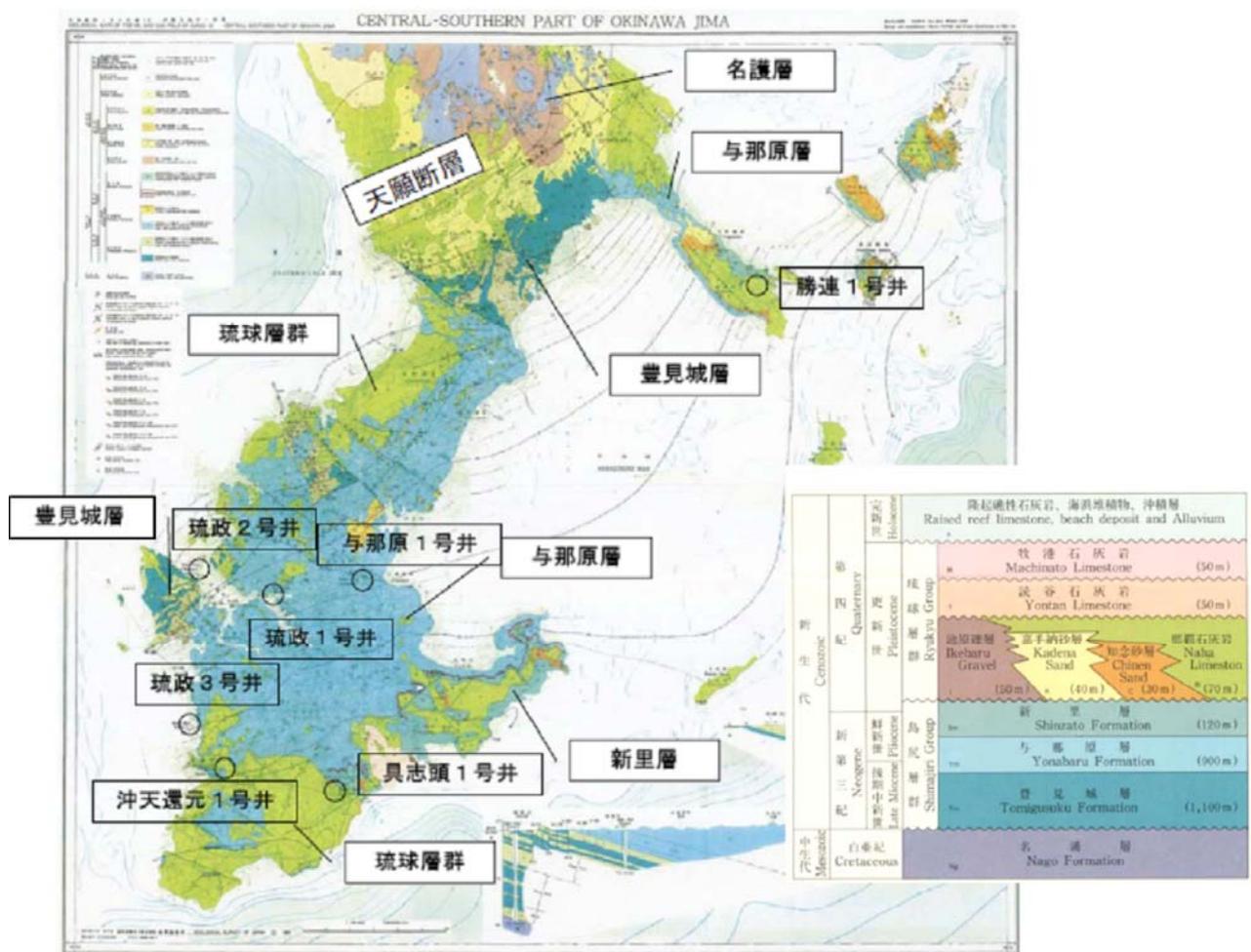


図 3.2-1 Bモデル地域の地質と旧地質調査所による深層ボーリング位置（図中の○位置）

出典：(財)地球環境産業技術研究機構：平成18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（2007）

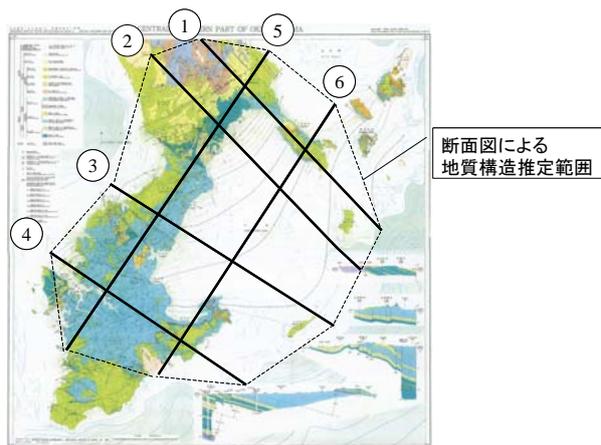


図 3.2-2 断面位置と地質構造推定範囲

出典：(財)地球環境産業技術研究機構：平成18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（2007）

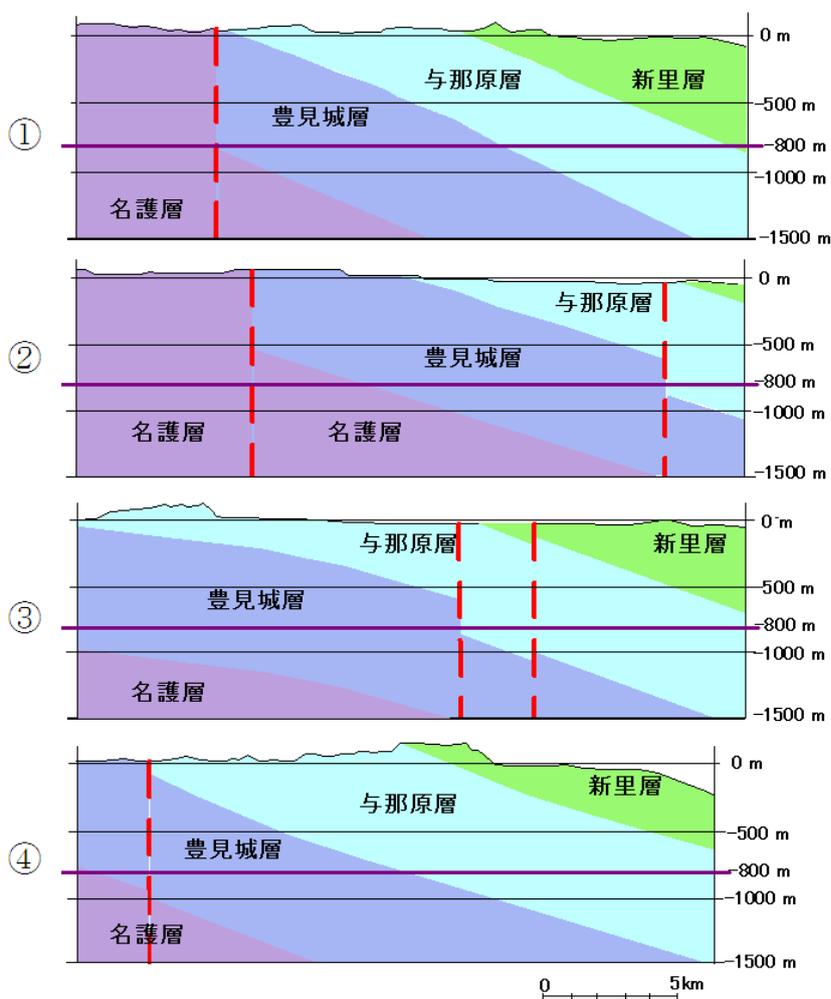


図 3.2-3 ①～④ 断面図

出典：(財)地球環境産業技術研究機構：平成18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（2007）

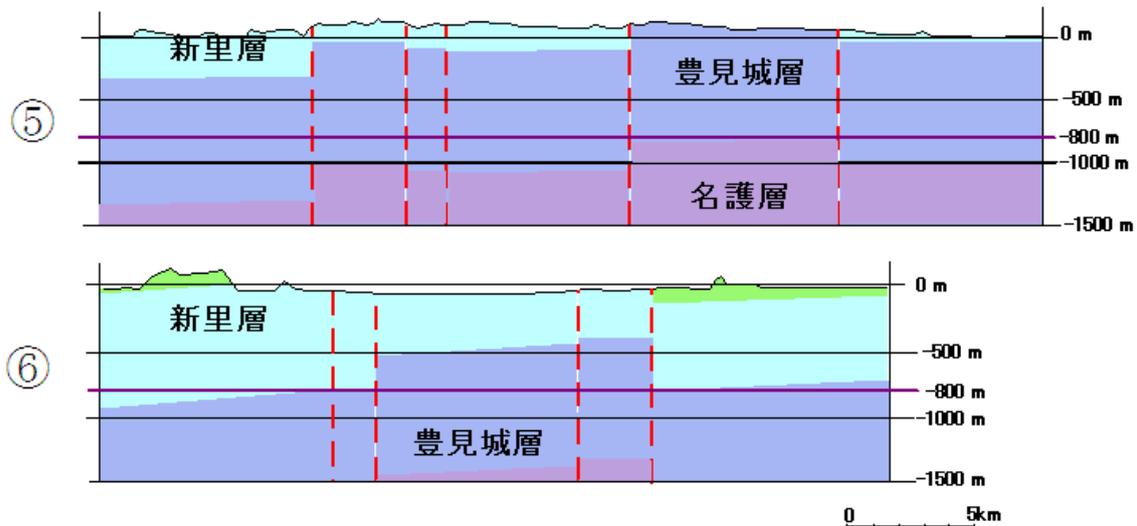


図 3.2-4 ⑤～⑥ 断面図

出典：(財)地球環境産業技術研究機構：平成 18 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（2007）

平成 18 年度の成果報告書¹⁾によると、B モデル地域では、図 3.2-1 に示した深層ボーリングの調査結果から貯留層の評価を行なっている。

B モデル地域の水溶性天然ガスが島尻層群の下部層である豊見城層の砂岩・泥岩互層中の砂岩に胚胎していることから、島尻層群中の豊見城層が貯留層とできる可能性が高い。一方、中部層である与那原層は泥岩の厚層からなり、天然ガス鉱床の保存に寄与してきたと考えられることから、与那原層がキャップロックとなる。

また、豊見城層は砂岩、泥岩の繰り返しからなり、最上部の砂岩から最下部の砂岩まで T1～T13 の 13 部層に細分できるとされている（図 3.2-5 参照）。これらの層のうち、奇数番号が砂岩層に、偶数番号が泥岩層に相当する。T1～T13 の範囲における層厚を、深層ボーリング調査から評価した結果を表 3.2-1 に示す。この結果から、平均的な層厚として砂岩層総厚が 470.8m、泥岩層総厚が 438.5m となり、豊見城層の砂岩・泥岩比は、ほぼ 1：1 と評価できる。

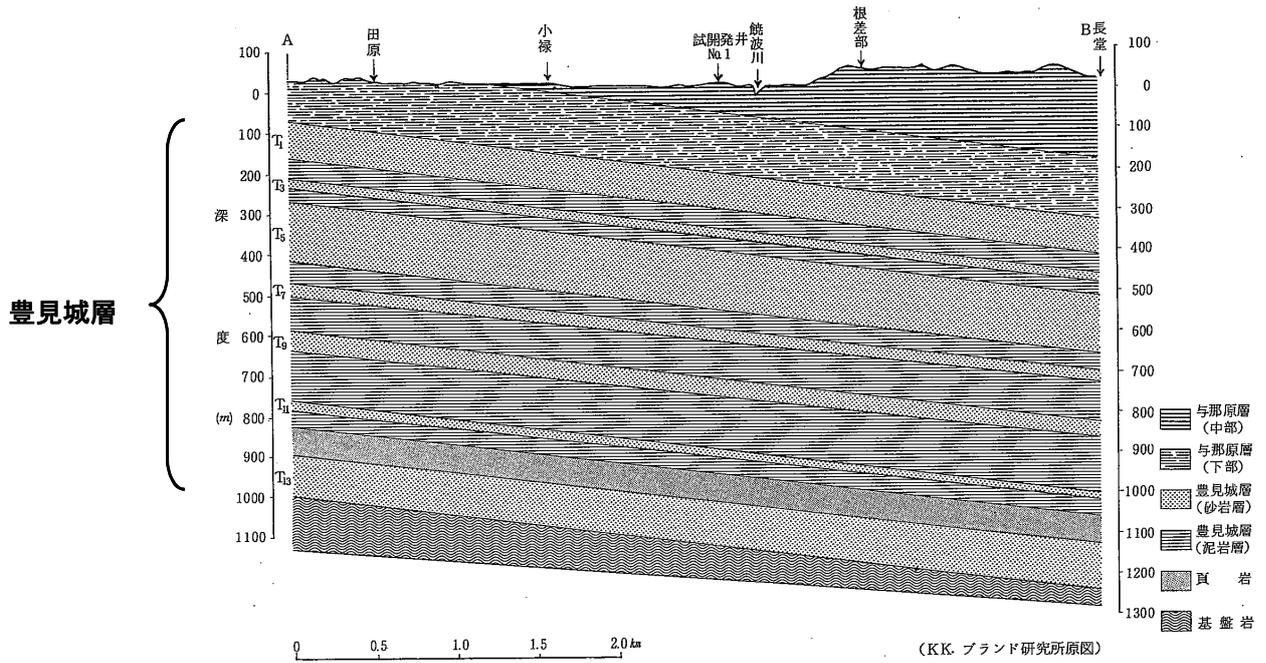


図 3.2-5 豊見城層の部層区分

出典：(財) 地球環境産業技術研究機構：平成 18 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（2007）

表 3.2-1 深層ボーリングによる砂岩・泥岩層厚

| 層区分 | 琉政2号井 | | 琉政3号井 | | 具志頭R-1 | | 平均層厚(m) | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|-------|
| | 砂岩層厚 (m) | 泥岩層厚 (m) | 砂岩層厚 (m) | 泥岩層厚 (m) | 砂岩層厚 (m) | 泥岩層厚 (m) | 砂岩層 | 泥岩層 |
| T1 | 87 | | 123 | | 105 | | 105.0 | |
| T2 | | 54 | | 90 | | 87 | | 77.0 |
| T3 | 16 | | 48 | | 46 | | 36.7 | |
| T4 | | 43 | | 35 | | 50 | | 42.7 |
| T5 | 146 | | 153 | | 139 | | 146.0 | |
| T6 | | 42 | | 31 | | 40 | | 37.7 |
| T7 | 21 | | 18 | | 不明 | | 19.5 | |
| T8 | | 99 | | 68 | | 不明 | | 83.5 |
| T9 | 52 | | 24 | | 不明 | | 38.0 | |
| T10 | | 127 | | 92 | | 104 | | 107.7 |
| T11 | 16 | | 0 | | 28 | | 14.7 | |
| T12 | | 112 | | 68 | | | | 90.0 |
| T13 | 111 | | | | | | 111.0 | |
| 合計 | 449 | 477 | 366 | 384 | 318 | 281 | 470.8 | 438.5 |
| | 926 | | 750 | | 599 | | 909.3 | |

3.2.2 Bモデル地域の貯留可能量と物性値

図 3.2-6 に示す位置での想定地質断面図を図 3.2-7 に示す。貯留層となる T1 部層の幅は約 2 km であり、貯留層の深度は 300m～500m と想定できる。一方、排出源となる製油所周辺の推定断層で囲まれた範囲（図 3.2-8 の想定貯留範囲）は、奥行きとして 2 km 程度である。

また、B モデル地域での既往の CCS 調査結果を基に遮断層と貯留層の物性値を整理した結果を表 3.2-2 に示す。

これらの情報を基に、貯留可能量は次式により算出した。その結果、B モデル地域では貯留可能量として 240 万 t・CO₂ が見込まれる。

$$\text{貯留可能量} = R_c \times A \times h \times \varphi \times \text{CO}_2 \text{ 濃度}$$

R_c : CO₂ 溶解水の注入、地質調査の精度、および地質の不均質性などによる不確実性を考慮した低減率 (=0.25)

A : 面積

H : 有効層厚

φ : 孔隙率

CO₂ 濃度 (=0.04t/m³H₂O)

(CO₂ 濃度は 300m に貯留することを想定した場合の CO₂ 溶解度から算定)

<Bモデル地域の貯留可能量>

$$\begin{aligned} \text{貯留可能量} &= \text{低減率 (0.25)} \\ &\quad \times \text{面積 (2,000} \times \text{2,000m}^2) \times \text{有効層厚 (200m)} \times \text{孔隙率 (0.3)} \\ &\quad \times \text{CO}_2 \text{ 濃度 (0.04t/m}^3) \\ &= 240 \text{ 万 t} \cdot \text{CO}_2 \end{aligned}$$

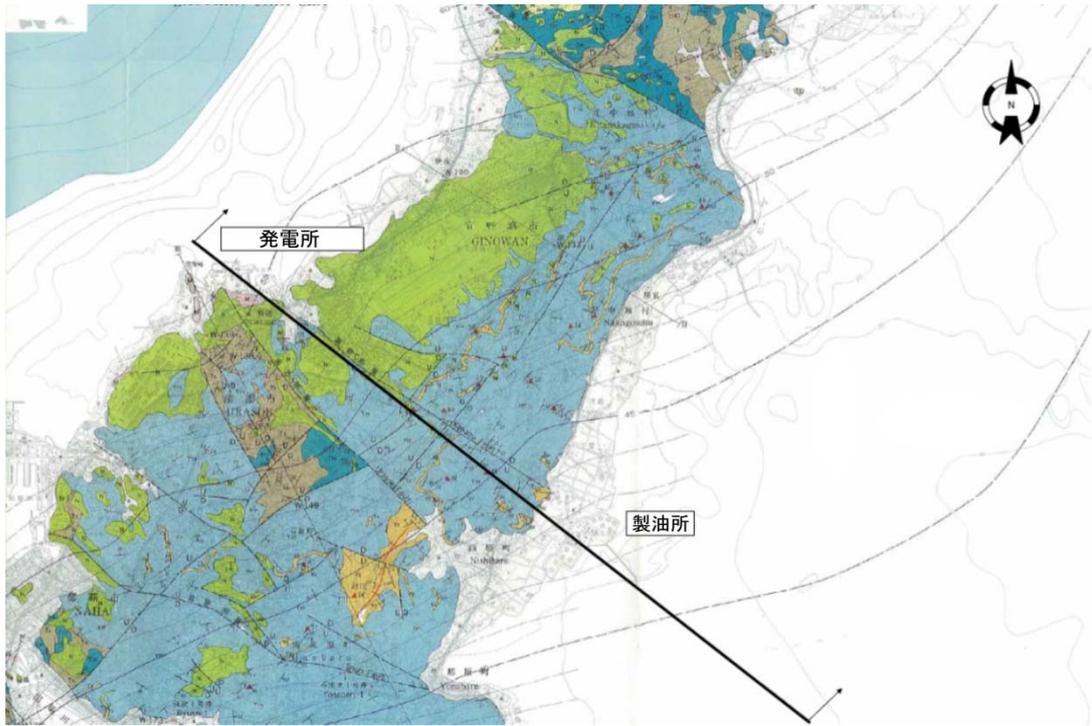


图 3.2-6 断面位置图

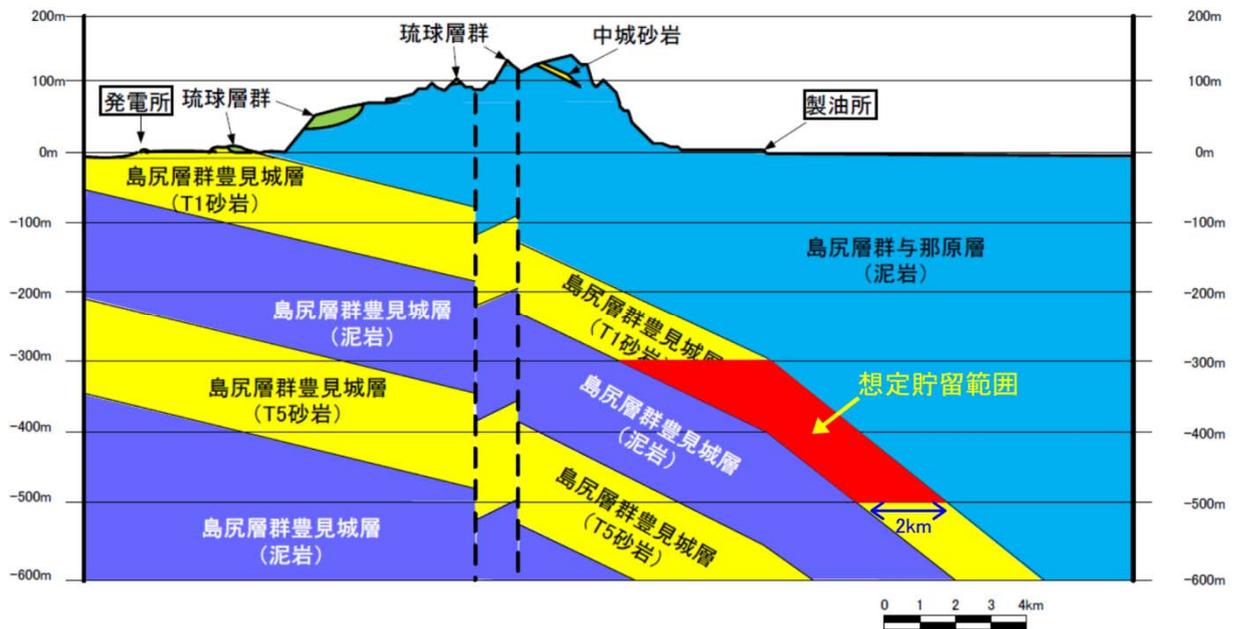


图 3.2-7 想定地質断面図と想定貯留範囲

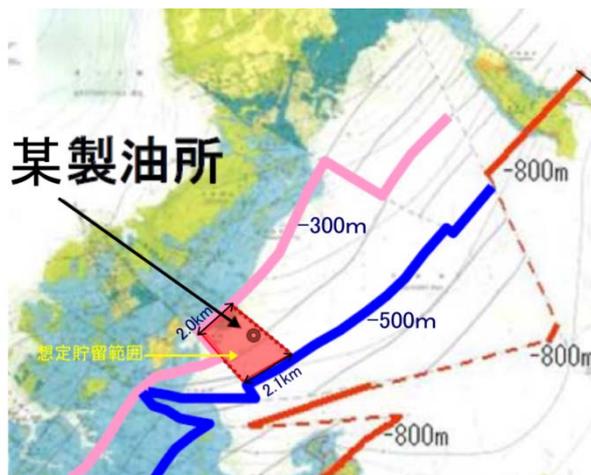


図 3.2-8 想定貯留範囲の平面図

表 3.2-2 B地点の物性値（表 3.1.5-1 再掲）

| 項目 | 島尻層群 | | 備考 | 引用文献 | |
|-----------------|------------------------------|-----------|----|---|---|
| | 泥岩 | 砂岩 | | | |
| 透水係数 (m/s) | 1E-12~1E-9 | 1E-6~1E-5 | 泥岩 | 米須地下ダム(深度86m)の設計値(島尻泥岩新鮮部)の値: 1E-7(cm/s) | 2 |
| | | | | 圧密試験結果から求めた透水係数: 1E-7(cm/s)オーダー | 3 |
| | | | | 圧密試験結果から求めた透水係数(深度:6.5~20m): 1E-9~1E-10(cm/s)オーダー | 5 |
| | | | 砂岩 | 米須地下ダム(深度86m)の設計値(島尻層砂風化部)の値: 1E-4(cm/s) | 2 |
| | | | | T1部層表層試料の浸透率: 454~932md=4.5E-4~9.3E-4(cm/s) | 4 |
| | | | | T5部層の浸透率: 42~119md=4.2E-5~1.2E-4(cm/s) | 6 |
| 間隙率 (%) | 30~40 | 30~40 | 泥岩 | 島尻層泥岩(深度6.5~24.5)の間隙率: 37.5~39.4(%) | 4 |
| | | | | 琉政2号井の含水率(深度60~720m): 35~20(%) | 6 |
| | | | 砂岩 | T1部層表層試料の間隙率: 32.4~44.2(%) | 4 |
| | | | | 琉政2号井の含水率(深度60~720m): 35~20(%) | 6 |
| 内部摩擦角 (°) | 27.2~31.1 | 23~24 | 泥岩 | 深度6.5~20mを対象としたCD試験結果 | 5 |
| | | | 砂岩 | 中圧三軸試験(CD)試験結果 | 7 |
| 粘着力 (MPa) | 0.47~1.26 | 0.36~1.20 | 泥岩 | 深度6.5~20mを対象としたCD試験結果 | 5 |
| | | | 砂岩 | 中圧三軸試験(CD)試験結果 | 7 |
| 一軸圧縮強度 (MPa) | 1.0(深度10m程度) 2.5(深度20m程度) | | | | 5 |
| 変形係数 (MPa) | 1E+2~2E+2 | | | | |
| ポアソン比 | 0.1~0.2 | | 砂岩 | 深度6.5~20mを対象としたCD試験結果 | 5 |

3.2 節 引用文献

- 1) (財)地球環境産業技術研究機構:平成18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(2007)
- 2) (独)緑資源機構:地下水有効開発技術マニュアル、P.181、(2004)
- 3) 内閣府沖縄総合事務局開発設計部:土木工事設計要領:参考資料-2 沖縄の地形・地質、(2011)
- 4) 福田理ほか:沖縄島南部・宮崎両ガス田の比較鉱床学的研究、琉球列島の地質学的研究、第4巻、pp.107-118、(1979)
- 5) 新城俊也ほか:島尻層泥岩地盤の工学的性質、土と基礎、pp.40-11、(1992)
- 6) 福田理ほか:第5次沖縄天然ガス資源調査・研究概報、地質調査所月報、第21巻、第11号、(1970)
- 7) 金他:板部大橋基礎工載荷試験に伴う地盤調査概要、土木学会第63回年次学術講演会、3-134-3-1.35,2008

3.3 マイクロバブルの地中挙動に関する検討

3.3.1 注水井・揚水井併用方式でのコントロール方法の検討

1) 基本的考え方

平成 22 年度の報告でまとめたように、想定する CMS モデルにおいて、井戸は注水井のみではなく、揚水井との併用方式であること、注水井の周囲に平面的に複数本の揚水性を配置することを基本的なコンセプトとした。この方式の利点は次のようである。

- (1) 注水井と揚水井を組み合わせることで移流を作り出し、計画した領域での貯留が可能になる。注入井のみの単井方式では、注入圧力を高める必要がある。少なくとも注入井と揚水井を対に組み合わせることで、注入井と揚水井の間での移流を生じさせ、そこに CO₂ を乗せて注入することができる。また揚水井を複数配置することで、CO₂ 貯留の平面的な制御が検討できる。
- (2) 注入後の CO₂ の挙動に関し、揚水井から採取された地下水の分析を行うことで、その時点での CO₂ の溶解形態や溶解度より、貯留可能量の補正・予測が可能になる。また CO₂ 濃度のモニタリングを行うことで、貯留状態の把握が可能になる。
- (3) 対象とする領域での広域地下水流動を求めることが可能になる。
- (4) 地下水流動が存在する場合、各揚水井の揚水量を制御することにより、CO₂ 貯留位置の制御が可能になる。

注水後の CO₂ 溶解水は、平面的な広がりを見せると考えられる。このため揚水井は、3 孔以上、精度を高めるためには 4 孔が望ましいと考えられる。これらの井戸の組み合わせをユニットと考えると、ユニットを変えることで貯留位置の変更が可能となる。

2) 広域地下水流動の考慮

貯留域周辺に広域地下水流動による地下水の大規模な流れがあることは十分に予想される。地下水の流れの小さい場合は、現状で想定した処分モデルで十分対応が可能であると考えられる。しかし、地下水の大きい場合は、貯留エリアより CO₂ が流され、別の場所に移動してしまうことが想定される。極端な場合は、管理期間に CO₂ の生活圏への到達などのシナリオを検討する必要も生じる。

想定地点での流れの大きさは調査を待たねばならないため、調査などにより測定・予測がなされている値を用いる。その値は、東濃地域での調査結果¹⁾では透水係数として $1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 程度と考えられている。また、大阪帯水盆での予測結果の例²⁾によると、原位置測定結果における透水係数は 0.3m/month ($1.16 \times 10^{-7} \text{m/s}$) と同等の値が観測されている。

図 3.2-2 から地層の傾斜に沿った動水勾配があると仮定すると、 $200\text{m}/4\text{km} = 0.05$ で透水係数は $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ であるから、広域地下水流動に沿った移動距離は 1 年間 1.5m 程度と考えられる。また貯留期間を 15 年程度と想定した場合、初めに注入した CO₂ は 24m 程度の流れの方向に多く移動すると考えられる。このような移動量は、事前調査から捉えて、注入井と揚水井の間隔および制御で対応していく必要がある。特に高透水の水みちが存在するような場合は注意が必要である。

3) 近接領域での新たな貯留

一つのユニットの貯留量が満了に達した場合、近接する領域に新たなユニットを構築し、CO₂の貯留を継続することは、周辺の地質・水質データがおおよそ予測できること、何よりも排出源に近いという観点から合理的である。

新たなユニットを構築する場合、揚水井の一つまたは二つを既存の井戸の再利用とすることで連続した位置での貯留とすることができる。この場合、井戸の掘削コストを2本分削減できることや隣接する閉鎖ユニットのモニタリングも可能となる。

3.3.2 注入井・揚水井方式による1貯留ユニットの貯留可能量の検討

1) 貯留ユニット

貯留ユニットは、1本の注入井とそれを円周上に取り囲む4本の揚水井で構成される井戸群と設定した。揚水井の設置目的は、CO₂を溶解させるための循環水を確保するとともに、注入井の周囲の水頭を揚水によって制御することによって水循環を容易にし、円滑な注入を促進させるためである。貯留ユニットの概念図を図3.3.2-1に示す。

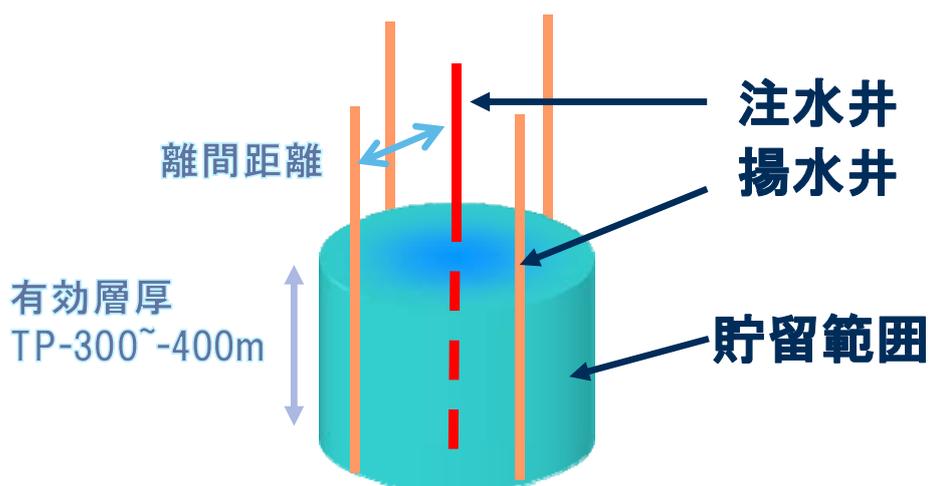


図 3.3.2-1 貯留ユニットの概念図

2) 実行貯留量および制御の検討の流れ

貯留量評価の流れを図3.3.2-2に示す。

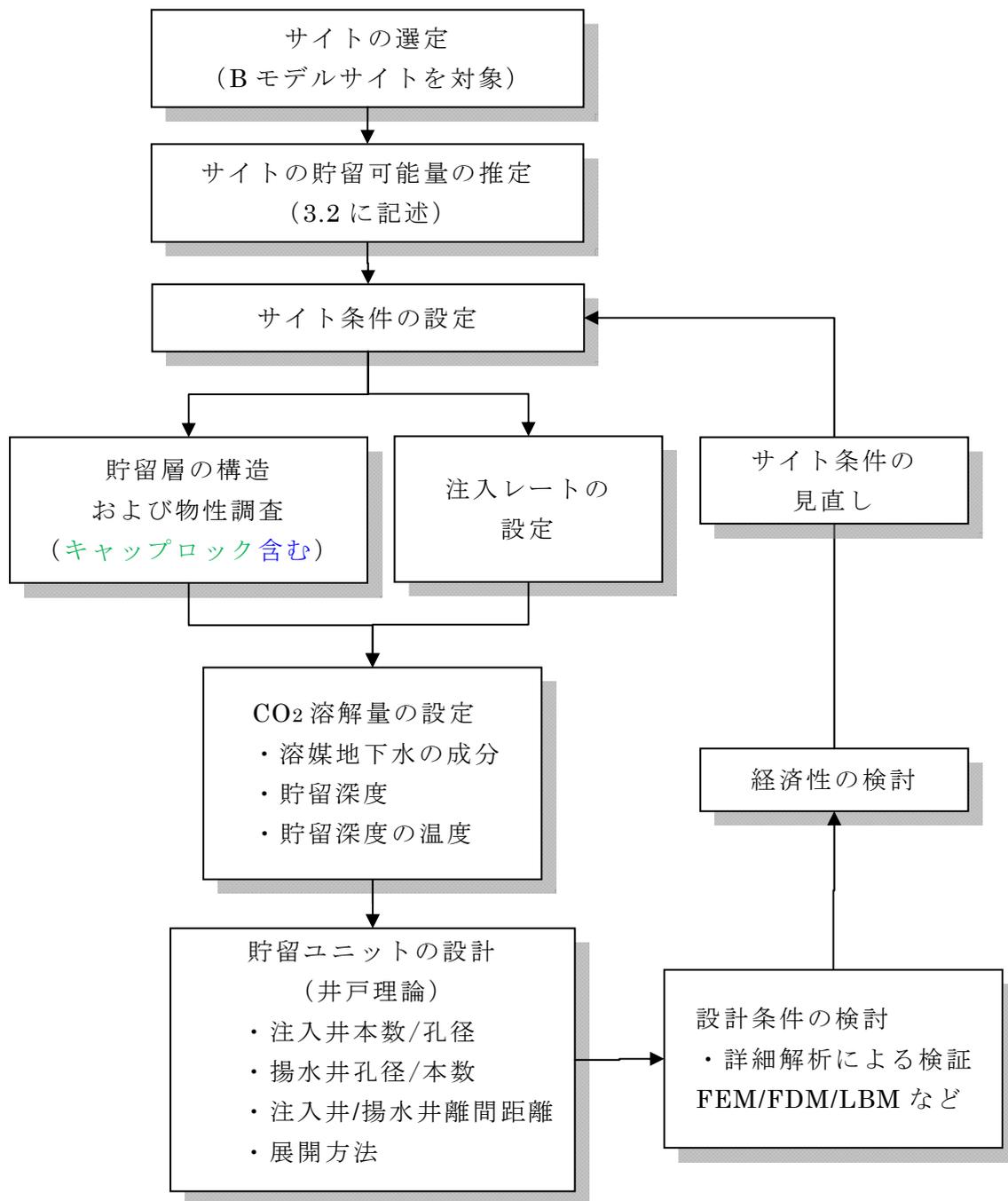


図 3.3.2-2 サイトの実行可能貯留量および注入方法の検討フロー

3) Bモデル地点の水質

西原浄水場入口における水質データから 23 年度平均値は表 3.3.2-1 のようである。

表 3.3.2-1 Bモデル地域水質データ^{*1}

| 項目 | 平均値 |
|----------------------------------|--------|
| 水温 (°C) | 23.9 |
| pH | 7.0 |
| カルシウム/マグネシウム (硬度 ^{*2}) | 28 |
| アルカリ度 ^{*3} | 21 |
| 導電率 ^{*4} (S/m) | 151 |
| 塩化物イオン(mg/l) | 26.3 |
| ナトリウムイオン(mg/l) | 13.6 |
| マンガン及びその化合物塩化物(mg/l) | 0.014 |
| ホウ素(mg/l) | 0.016 |
| アルミニウム(mg/l) | 0.0013 |
| 鉄 | 0.08 |

出典：沖縄県企業局 2011 年度 水質検査結果 日常検査 西原浄水場 入口より³⁾

*1：地下水のデータではない事に注意。実際は、対象深度の地下水の水質を考慮する必要がある。

*2：硬度：硬度[mg/l] = (カルシウム量[mg/l] × 2.5) + (マグネシウム量[mg/l] × 4.1)

*3：アルカリ度：[Alk] = [HCO³⁻] + [CO₃²⁻] + [OH⁻] - [H⁺]

自然水のアルカリ度は炭酸塩又は炭酸水素塩が主体をなすことが多く、雨水中に溶けている CO₂ や土壌中の生物の呼吸作用、地下水が石灰岩のような堆積岩(炭酸塩)を通過するとき、炭酸水素塩として Ca、Mg 等を溶出してくることに起因する。地下水はアルカリ度が高く 30~80mg/リットルで、表流水は通常 20~40mg/リットル、河川水は一般に上流は低く、下流に行くほど少しずつ増加する。

*4：導電率：電解質溶液の導電率は、溶液中のイオンに依存するが、金属の導体と同じようにオームの法則に従う。また、単位はジーメンズ毎メートル = ρ [S/m] で表される。

4) Bモデル地点温度勾配

温度勾配は「坑井温度データ」データベースから作成した。沖縄における坑井温度データは 1 点しかないが、データをプロットし、深度に対する近似を行うと地温勾配は 1.45/100m、地表温度は 27.8°C となる。

ただし、1 点しかデータがないため代表性には欠ける。

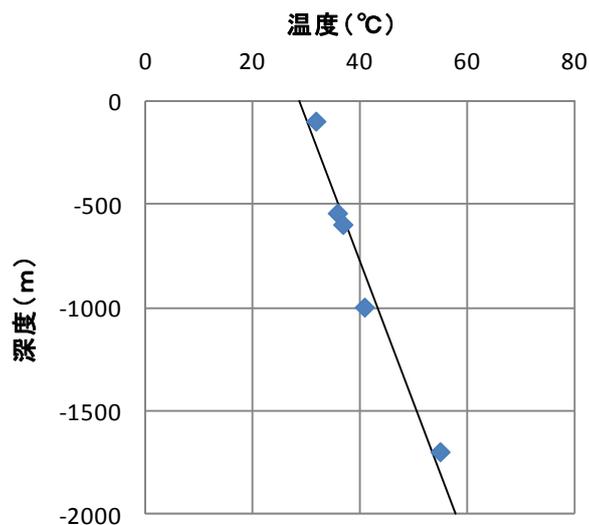


図 3.3.2-3 沖縄県の坑井温度データと近似
 (独立行政法人 産業技術総合研究所 坑井温度データベース⁴⁾より作成)

5) Bモデル地点溶解度および pH

温度勾配データおよび成分データから、`phreeqc` を用いて CO_2 溶解量を求めると図 3.3.2-4 のようである。図には、昨年度検討を行った Aモデル地域の検討も併記した。また、この時の各深度の pH の分布も図 3.3.2-5 に示した。

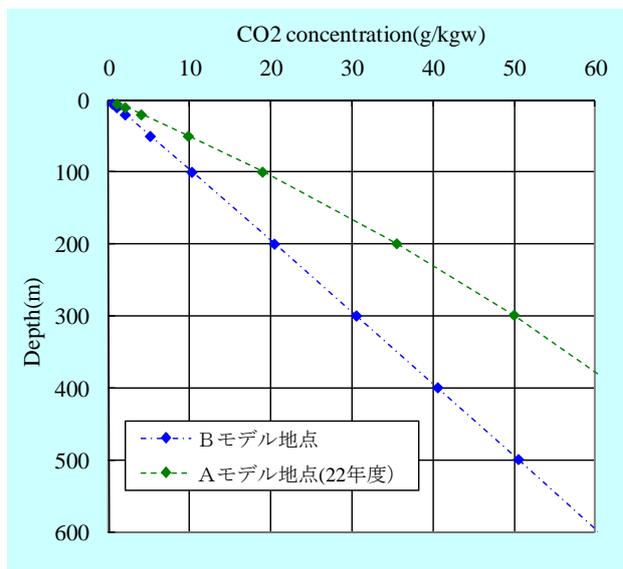


図 3.3.2-4 CO_2 溶解度の深度分布

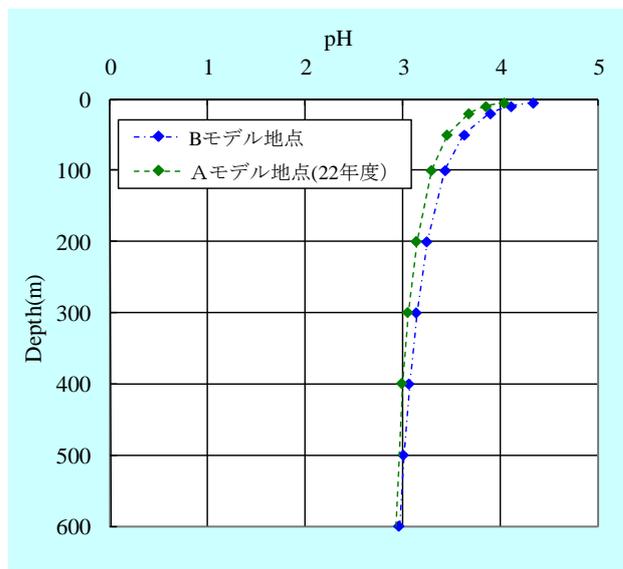


図 3.3.2-5 注入溶解水 pH の深度分布

6) 貯留量の計算

水循環の検討は、2.2.3 款の 2)項で述べた群井の井戸公式によって検討した。検討手順と計算式を以下に示す。

$$Q = \frac{2\pi R_c k D s}{\ln(R/r_0)} \quad (3.3.2-1)$$

$$s = \frac{1}{2\pi R_c k D} \sum_{i=1}^n \left(q_i \ln \frac{R}{r_i} \right) \quad (3.3.2.-2)$$

ただし、

- Q : 注入井からの注水量 (m³/s)
- R_c : 地質の不均一性による水循環効果の低減率
- k : 注入層の透水係数 (m/s)
- D : 注入層の層厚 (m)
- s : 水頭差 (m)
- R : 影響半径 (m)
- r_0 : 井戸半径 (m)
- q_i : 揚水井 i からの揚水量 (m³/s)
- r_i : 揚水井 i からの水頭計算地点までの水平距離 (m)
- n : 揚水井の本数 (本)

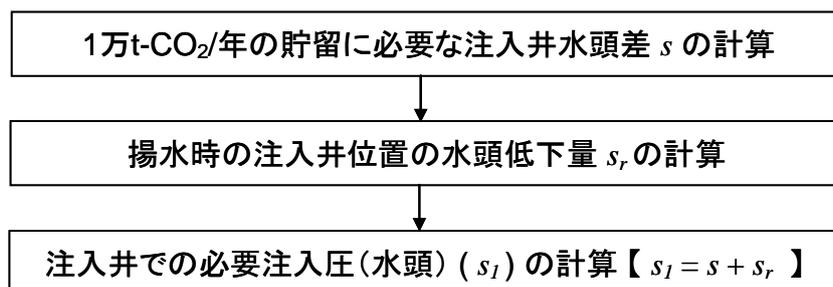


図 3.3.2-6 注入井・揚水井併用方式による水循環の検討手順

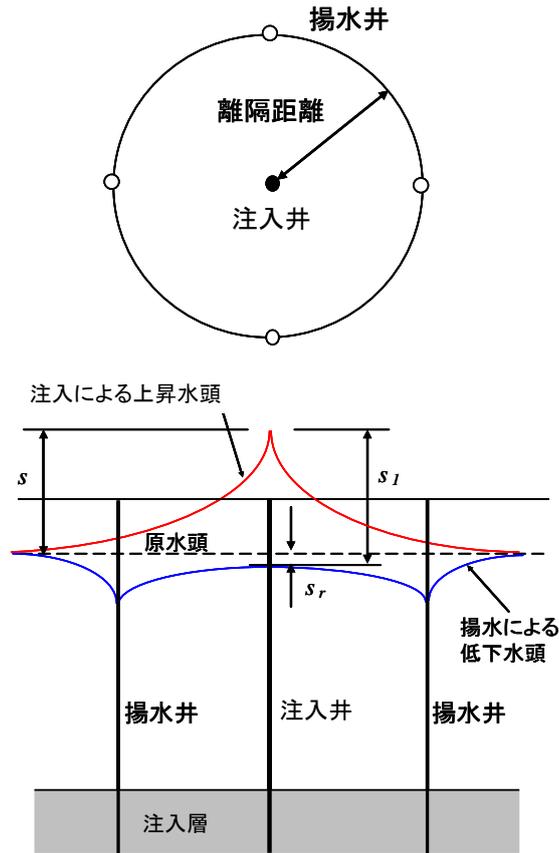


図 3.3.2-7 水循環量の計算方法説明図

7) 計算パラメータ

計算パラメータを設定根拠とともに表 3.3.2-1 に示す。計算式に導入した「低減率」(1 以上で割り増し、1 で低減なし、0 で最大低減)は、従来の超臨界貯留における貯留率(掃攻効率)に相当する概念であるが、全溶解を前提としたマイクロバブル貯留においては、注入流体と地下水の密度差が超臨界状態 CO₂ 貯留に比べ小さいため、地質の不均一性による水循環効果の低減のみを考慮したパラメータである。したがって、低減率は地質の不確実性が大きい場合には小さく、不確実性が排除された場合には 1 と設定される。

表 3.3.2-1 計算パラメータ一覧

| パラメータ | | 設定値 | 設定根拠等 |
|------------------|-------|---|---|
| 注入井からの注水量 | Q | 25 万 m ³ /年 (50 万 m ³ /年) | 1 万 t-CO ₂ 以上の貯留目標に対し溶解度 4.0%を設定 (溶解度は図 3.3.2-4 より -400m に貯留することを想定。) |
| 低減率 | Rc | 1、0.6 | 1.0 および 0.6 を設定 |
| 注入層の透水係数 | K | 1×10 ⁻⁶ m/s | H17 年度全国貯存量調査結果 ⁶⁾ を参照 |
| 注入層の層厚 | D | 100m | 注入対象全層厚 100m |
| 影響半径 | R | $R = 3000s\sqrt{\alpha k}$ | 揚水、注入いずれも左記経験式を適用 |
| 井戸半径 | r_0 | 58mm、73mm | φ 116mm、φ 146mm |
| 揚水井からの揚水量 | q | $0.8 \times q_c$ $= 0.8 \times 2\pi r_0 l \sqrt{Rck} / 15$ | 限界揚水量 q_c の 80% と設定 (l : 揚水井ストレーナ長 = 注入層の層厚 D) |
| 揚水井と注入井の 離隔距離 | r | 200m、300m | 2 ケースを設定 |
| 揚水井の本数 | n | 4 | 円周上に 90 度毎に配置 |

8) 計算ケース

計算ケースは、表 3.3.2-2 に示すように、注入量、井戸径、低減率をパラメータとした 5 ケースとした。ケース 1 を基本とし、注入レートを倍にしたケース 3、井戸径を大きくしたケース 4、低減率を 0.6 に低下したケース 5 について行なった。ケース 2 は井戸径を若干小さくした場合の影響を調べた。

表 3.3.2-2 計算ケース一覧

| Case | 低減率 | 井戸径 (mm) | 注入量 tCO ₂ /y | 注入井・揚水井 の離隔距離(m) | 揚水井 本数 (本) |
|------|-----|-------------|----------------------------|---------------------|------------------|
| 1 | 1.0 | 146 | 1 | 200 | 4 |
| 2 | 1.0 | 116 | 1 | 200 | 4 |
| 3 | 1.0 | 146 | 2 | 200 | 4 |
| 4 | 1.0 | 216 | 2 | 300 | 4 |
| 5 | 0.6 | 146 | 1 | 200 | 4 |

9) 計算結果

5 ケースの水循環計算結果の一覧を表 3.3.2-3 に示す。また、Case-1 について井戸

の孔径を変化させた場合の水頭分布図を図 3.3.2-8 に、注入井と揚水井の離隔距離を 200m と 300m にした場合の水頭分布図を図 3.3.2-9 に、低減率を下げた場合、すなわち調査が十分でなく不確実な地質構造であった場合との比較を図 3.3.2-10 示す。これらの結果から水循環特性について次のことがいえる。

- ・ 低減率を 1.0 とした場合、1 万 t-CO₂/年以上の貯留のための水循環を 200m 離間距離で確保するためには必要注水圧（水頭差）は 95～99m 程度であるが、低減率を 0.6 とすると必要注水圧は 1.6 倍に増加し、必要注水圧（水頭差）は 160m 程度にまで増加する。このような場合にはシール層や井戸のシール構造についての力学的安性検討が必要になる。
- ・ ここで示した計算結果は年間 1 万 t-CO₂ を注入することを想定したものであるが、注水量を倍にした場合の必要注水圧は、Case2 と Case3 の比較から倍程度の注水圧が必要となる。したがって、年間 2 万 t-CO₂ の注入のためには、注水井を 1 本のままとする場合には必要注水水頭差が 200m となり、注水層や井戸の安定性を考慮して必要注水水頭を 100m 程度の一定値とする場合には、ユニットを増やす必要がある。
- ・ 低減率 1.0 の場合には水循環のための地下水を揚水で確保することは可能であるが、低減率の減少とともに 4 本の揚水井では確保できなくなる。ただし、この対策として井戸径を 200mm にまで拡径することにより揚水可能量が増加し、循環水の確保は可能になる。
- ・ 注入井と揚水井の離隔距離を変化させた場合の大局的な水頭分布は、注水の影響範囲内において揚水位置近傍で局所的に水頭低下が生じる形態となり、注入水頭への影響は小さい。ただし、揚水井で囲まれる 1 貯留ユニット内の貯留可能量は離隔距離に応じて変化する。
- ・ 注入水の循環性を高めることを目的に注入井の周辺に揚水井を配置する場合、揚水井を揚水の影響範囲内になるように注入井からの距離を設定する必要がある。ただし、図 3.3.2-11 に示すように揚水の影響範囲は注入のそれに比べて限定的であるため、循環水確保を揚水の目的とする上では揚水位置の制約はないといえる。一方、キャップロック等注入帯水層の保護の観点からは水頭上昇の影響検討が必要になる。
- ・ ユニットの展開方法の一例を図 3.3.2-11 に示す。

表 3.3.2-3 注入井・揚水井併用方式による水循環計算結果一覧

| Case | 低減率 | 井戸径 (mm) | 井戸の離隔 (m) | 必要注水水頭 (m) | 注水の影響半径 (m) | 揚水の影響半径 (m) | 注水量 (m ³ /分) | 揚水量 (m ³ /分) |
|------|-----|----------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 1.0 | 116 | 200 | 95 | 286 | 66 | 0.42 | 0.42 |
| 2 | 1.0 | 143 | 200 | 99 | 278 | 66 | 0.42 | 0.42 |
| 3 | 1.0 | 143 | 200 | 200 | 609 | 119 | 0.84 | 0.85 |
| 4 | 1.0 | 143 | 300 | 200 | 576 | 119 | 0.84 | 0.85 |
| 5 | 0.6 | 146 | 200 | 160 | 498 | 66 | 0.42 | 0.42 |

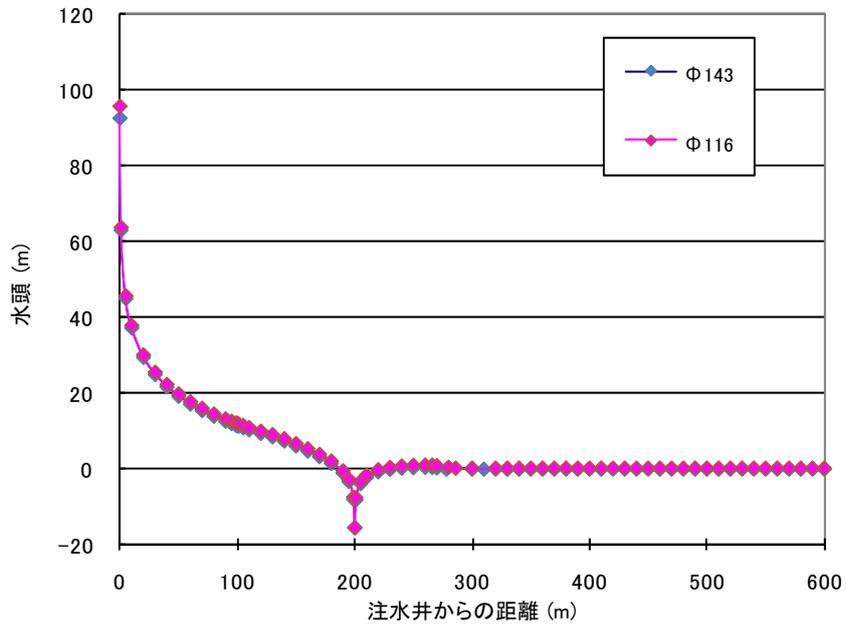


図 3.3.2-8 孔径の水頭分布への影響 (Case-1 と Case-2)

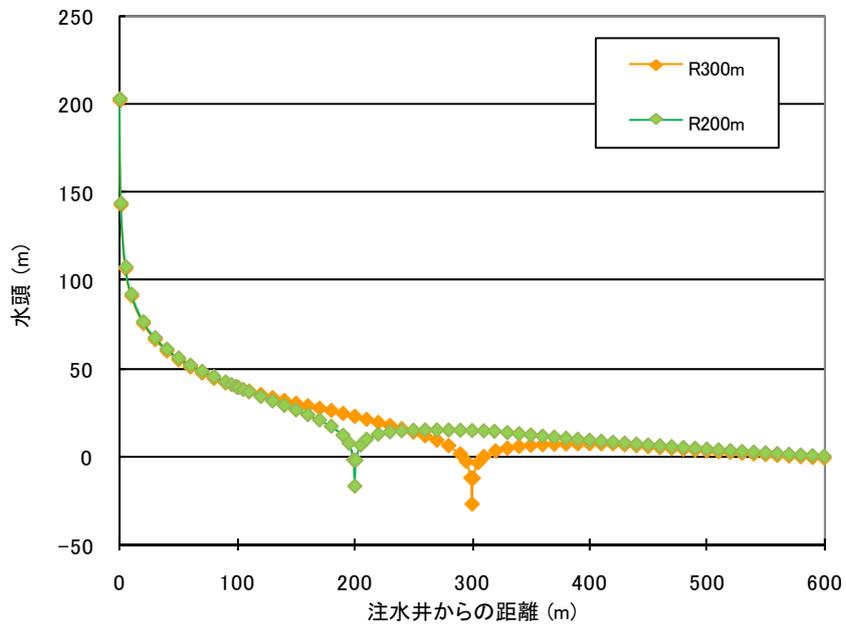


図 3.3.2-9 注入井-揚水井離間距離の水頭分布への影響 (Case-3 と Case-4)

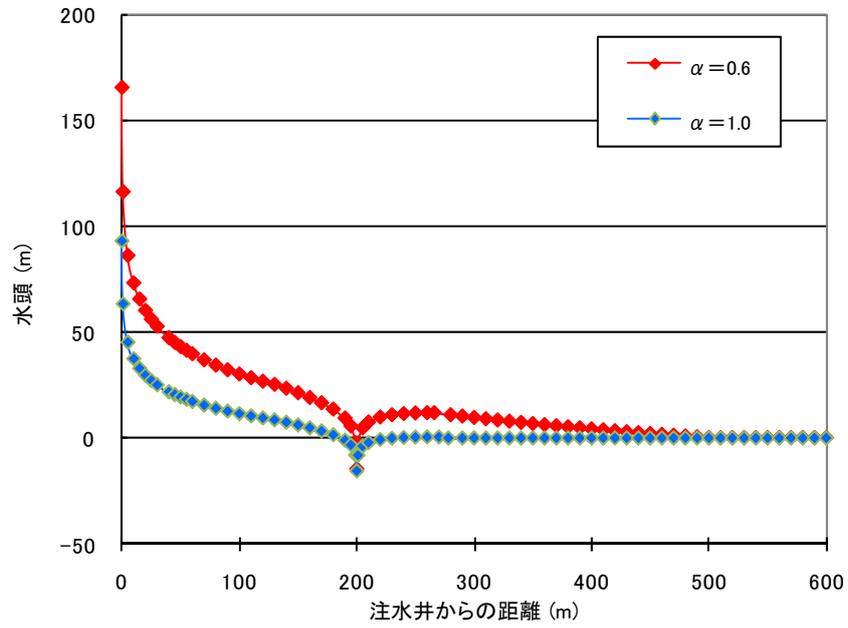


図 3.3.2-10 低減率の水頭分布への影響
(Case-1 と Case-5)

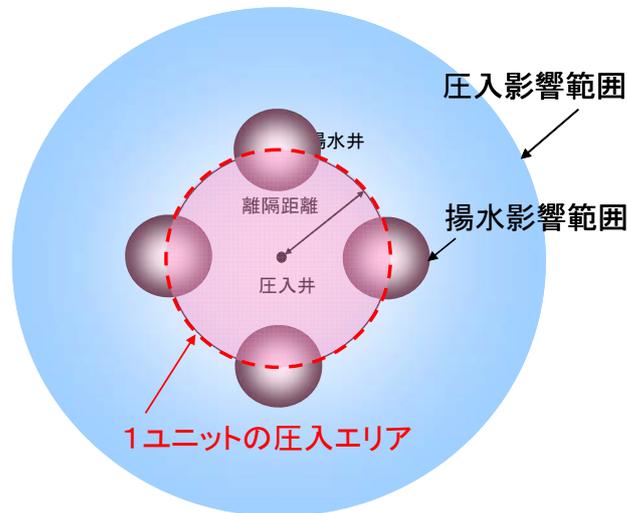


図 3.3.2-11 注入井・揚水井併用方式による水循環エリアの概念図

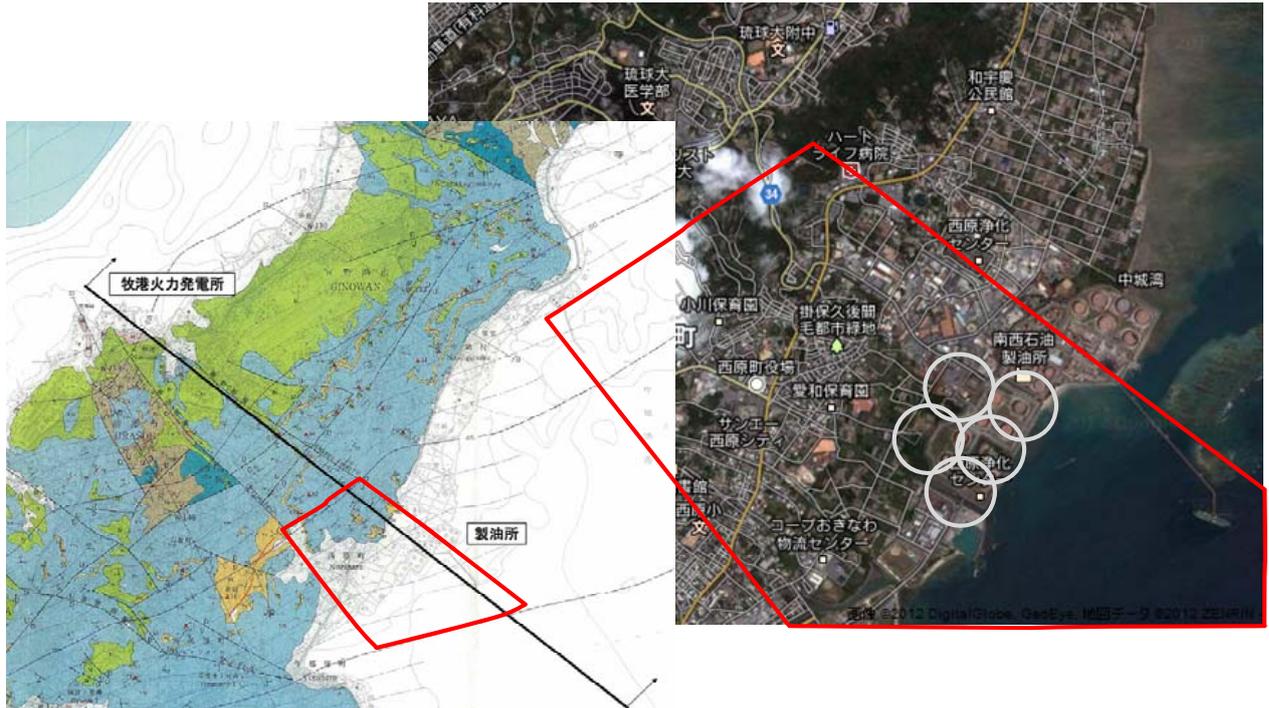


図 3.3.2-12 Bモデル地域での展開（円の直径は400m）

10) まとめと課題

以上の注入井・揚水井併用方式による水循環検討の結果を以下にまとめる。

- ・水循環は低減率の値に大きく影響されるが、現実的な条件で1万 t- CO₂/年の貯留は可能である。
- ・井戸径や注入圧力などを適切に設定することで溶媒となる地下水を揚水井でまかなうことが可能である。
- ・揚水による水頭低下効果は限定的であり、循環水確保のための揚水井の設置上は、位置の制約は少ない。一方、注入に伴う水頭上昇によるキャップロックや井戸のシールへの影響については検討が必要である。

検討結果から明らかになった課題を以下に示す。

- ・貯留の効率を示す低減率パラメータの値は、システム検討上影響が大きく、全溶解を前提とする場合の設定方法が課題である。
- ・CO₂溶解水を継続的に岩盤中に注水する場合、物理的な目詰まりや溶解水と岩石鉱物との化学反応によって透水性が変化する可能性があり、その定量的な評価が課題である。
- ・低減率を1.0として半径200mの1貯留ユニットあたりの水循環可能量を対象域の孔隙水容量として求めると、

$$\pi \times 100^2 \times 100 \times \text{孔隙率} 0.3 \times \text{低減率} 1.0 = \text{約} 377 \text{ 万 m}^3$$

となる。この値を1年当りの水循環量25万 m³で除すると15が得られる。つまり、半径200mの1貯留ユニットは、15年強で、飽和CO₂溶液水で満たされることになる。

- ・ 前述の議論はユニット内を均質条件で考えたが、岩盤は必ずしも均質ではなく、貯留期間の短縮も考えられるため、揚水井で囲まれた水循環域内にモニタリング井を設けて CO₂ 飽和状況をモニタリングする必要がある。

3.3 節の参考文献

- 1) 小出馨、前田勝彦：東濃地域を対象とした広域地下水流動研究の現状（その2）、サイクル機構技報、No. 12（2001）、pp107-122
- 2) 阿部信晴：大阪平野地下水盆における広域地下水流動解析、土木学会第59回年次学術講演会、（2004）、pp. 613～6
- 3) 沖縄県企業局 2011年度 水質検査結果 日常検査 西原浄水場 入口より
- 4) 独立行政法人 産業技術総合研究所 坑井温度データベース

第4章 CMS システムの経済性に関する概略検討

4.1 はじめに

4.1.1 CCS におけるコスト¹⁾

温室効果ガスの排出量管理に関する将来の要求の厳しさや予想される CCS コストなどによって、他の温室効果ガスの軽減オプションと比較した CCS 技術の将来の展開が決定される。ここでは、IPCC の特別報告における CCS の全体的コストを概観する。ここで、IPCC の報告書で使用されるコスト単価は、USD (米ドル) であるが 80JPY(日本円)/USD に変換して示した。

塩水層および枯渇した油田・ガス田における貯留コストの代表的な推測値は、通常 40～640JPY/注入 t-CO₂ である。実際は、これに加えて 8～24JPY/t-CO₂ のモニタリングコストが追加的に発生している。貯留コストが最も低くなるのは陸上の浅くて透水性の高い貯留層、または既存の油田・ガス田の井戸とインフラストラクチャが再利用できる貯留サイトである。表 4.1.1-1 は、IPCC の報告した CO₂ の回収・輸送・貯留コストおよび監視コストを要約したものである。また、表 4.1.1-2 では、パイプライン輸送を伴う 3 つの発電システムと 2 つの地中貯留オプションについて、CCS および発電の総コストを示すため各構成要素のコストを合算して表示している。

表 4.1.1-1 ある一定の種類発電所または産業排出源に適用される CCS システムの構成要素の 2002 年におけるコスト範囲

| CCS システム要素 | コスト範囲 | コメント |
|------------------------------|--|--|
| 石炭またガスを燃料とする 発電所からの回収 | 1,200～6,000JPY/正味回収 t-CO ₂ | 回収を行わない同種のプラントと比較、回収 CO ₂ の正味コスト |
| 水素アンモニア製造、または ガス処理施設からの回収 | 400～4,400JPY/正味回収 t-CO ₂ | 簡単な乾燥および圧縮を要する高純度排出源に適 用 |
| その他の産業排出源からの 回収 | 2,000～9,200JPY/正味回収 t-CO ₂ | この範囲は、多数の異なる技術と燃料の使用料を 反映 |
| 輸送 | 80～640JPY/輸送 t-CO ₂ | 250km のパイプライン/船舶輸送あたり流量;5 (ハ イエンド) から 40 (ローエンド) Mt-CO ₂ 年 |
| 地中貯留 | 40～640JPY/正味注入 t-CO ₂ | EOR または ECBM からの潜在的収益を除く |
| 地中貯留：監視および確認 | 8～24JPY/注入 t-CO ₂ | 注入前、注入時、注入後の監視、規制要件による |
| 海洋貯留 | 400～2,400JPY/正味注入 t-CO ₂ | 100-500km の輸送含む |
| 炭酸塩鉱物化 | 400～8,000JPY/正味鉱物化 t-CO ₂ | 最良事例 |

80JPY/USD として IPCC 表を換算

出典：IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage 2005

表 4.1.1-1 のそれぞれの構成要素のコストを単に合計して、JPY/削減 CO₂ で表した CCS システム全体のコストを計算することはできない。すべての数値は、天然ガスの価格を 224～352JPY/GJ、石炭の価格を 80～120JPY/GJ と想定した場合の、大規模な新設施設におけるコストを代表するものである。

表 4.1.1-2 瀝青炭または天然ガスを用いる新雪発電所に関する現在技術に基づいた
CO₂ 回収・輸送・地中貯留の総コスト範囲

| 発電所の性能およびコストパラメータ | PC プラント | NGCC | IGCC |
|--------------------------------------|-------------|-------------|--------------|
| CCS を行わない基準プラント発電コスト (JPY/kWh) | 3.44～4.16 | 2.48～4.00 | 3.28～4.88 |
| 回収を行う発電所 | | | |
| 燃料要求の増加(%) | 24～40 | 11～22 | 14～25 |
| 回収された CO ₂ (kg/kWh) | 0.82～0.97 | 0.36～0.41 | 0.67～0.94 |
| 削減された CO ₂ (kg/kWh) | 0.62～0.70 | 0.30～0.32 | 0.59～0.73 |
| 削減(%) | 81～88 | 83～88 | 81～91 |
| 回収および地中貯留を行う発電所 | | | |
| 発電コスト (JPY/kWh) | 5.04～7.92 | 3.44～6.16 | 4.40～7.28 |
| CCS コスト (JPY/削減 t- CO ₂) | 1.52～3.76 | 0.96～2.32 | 0.80～2.56 |
| 電気代の増加(%) | 43～91 | 37～85 | 21～78 |
| 削減コスト (JPY/削減 t- CO ₂) | 2,400～5,680 | 2,960～6,800 | 1,120～4,240 |
| 回収および EOR を行う発電所 | | | |
| 発電コスト (JPY/kWh) | 3.92～6.48 | 2.96～5.60 | 3.20～6.00 |
| CCS コスト (JPY/削減 t- CO ₂) | 0.40～2.32 | 0.48～1.76 | (-0.40)～1.52 |
| 電気代の増加(%) | 12～57 | 19～63 | (-10)～46 |
| 削減コスト (JPY/削減 t- CO ₂) | 720～3,520 | 1,520～5,440 | (-560)～2,480 |

80JPY/US\$として IPCC 表を換算

出典：IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage 2005

回収および地中貯留を行う発電所の場合、CCS コストは PC プラントでは 1.5～3.8JPY/kWh、NGCC プラントでは 1.0～2.3JPY/kWh である（どちらも燃焼後回収を用いている）。燃焼前回収を用いる IGCC プラントでの CCS コストは、CCS を行わない同種のプラントと比較して 0.8～2.6JPY/kWh となる。あらゆる電力システムで、CO₂ 貯留を伴う EOR を使用した場合には CCS コストを減らすことができる。しかし、我が国では、EOR を伴うことは望みにくい。

化石燃料ベースのエネルギー変換プロセスだけでなく、バイオマスを燃料とする発電所やバイオマスの混焼を伴う化石燃料プラントでも CO₂ を回収できる。現在のところ、バイオマスプラントは規模が小さい（100MWe 未満）。つまり、CCS の有無を問わず、結果として生じる製造コストが化石燃料の選択肢と比べて比較的高いことを意味する。バイオマスの場合の CCS の全コストは 8,800JPY/

削減 t- CO₂ である。バイオマスを燃料とする変換施設やバイオマスの混焼を行う変換施設に CCS を適用すると、CO₂ の排出量が低くなるかマイナス になることがあり、このため CO₂ 排出量削減の市価に応じて、このオプションのコストは低くなることもある。同様に、CO₂ はバイオマスを燃料とする水素プラントでも回収できる。コストは、100 万 m³(Normal)/日の水素を製造するプラントで、1,760 ~2,000JPY/削減 t- CO₂ と報告されており、水素製造コストの 216JPY/GJ の増加に相当する。

CCS のコストは、電力以外の用途については、これほど深く研究されてこなかった。これらの排出源は CO₂ 濃度やガスの圧力という点で非常に多岐にわたっているので、入手できるコスト研究成果も非常に幅広い範囲を示している。最低コストは、水素製造など製造過程の一部ですでに CO₂ を分離している工程で見られた。輸送および貯留を含む CCS の全コストは、地中貯留の場合は水素の製造コストを 80 から 264JPY/GJ 押し上げる (表 4. 1. 1-3 参照)。

表 4. 1. 1-3 現状に基づく、新しい水素プラントの CO₂ 回収コストの要約

| 性能およびコストの尺度 | 新しい NGCC プラント | |
|--------------------------|---------------|-----|
| | 範囲 | 代表値 |
| 回収を行わない場合の水素コスト (JPY/GJ) | 520~800 | 624 |
| 回収を行う場合の水素コスト (JPY/GJ) | 600~1,064 | 728 |
| 回収を行う場合の水素コスト増加 (JPY/GJ) | 80~264 | 104 |

出典 : IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage 2005

表 4. 1. 1-2 では「削減 CO₂」のコスト範囲も示している。CCS のエネルギー必要量は、正味電力出力単位に対する燃料入力量 (それに従い、CO₂ 排出量も) を押し上げる。その結果、製造単位 (1 kWh の電力) に対して生成する CO₂ の量は図 4. 1. 1-1 で示すとおり、基準プラントより CCS を行う発電所の方が多い。CCS に起因するとみなしうる CO₂ 削減量を判断するにあたって、回収を行うプラントの kWh あたりの CO₂ 排出量を、回収を行わない基準プラントの CO₂ 排出量と比較しなければならない。その差は「削減された排出量」と呼ばれる。

発電所への CCS は、こういった種類の発電所を設置すべきか、また、どの燃料を使用すべきかという決定が影響を受けることがある。従って、状況によっては、CCS プラントとは異なる基準プラントに基づいて、削減 CO₂ 1 トンあたりのコストを計算することが役立つ。表 4. 1. 1-2 は 3 つの基準プラントとそれに対応する地中貯留の場合の CCS プラントにつき、コストと排出量の因数を表示する。表 4. 1. 1-4 は CCS プラントと重要かもしれない最低コストの基準プラントとの様々な組み合わせにつき、推定コストの範囲を示したものである。例えばこの表によれば、当初 PC プラントを計画していた場合、そのプラントで CCS を使うと、CCS を行う NGCC プラントを選択した場合よりも、CO₂ 削減コストが高くなるかもしれない (天然ガスが利用できるとした場合)。削減コストの低いもうひとつのオプションは、PC プラントに回収施設を装備するのではなく、回収施設の付いた IGCC プラントを建築することだろうとしている。

表 4.1.1-4 基準プラントと CCS プラントの様々な組み合わせの緩和コストの範囲

| CCS プラントの種類 | NGCC 基準プラント | PC 基準プラント |
|-------------------------------|--------------|-------------|
| 回収および地中貯留を行う発電所 | | |
| NGCC (JPY/t-CO ₂) | 3,200~7,200 | 1,600~4,800 |
| PC (JPY/t-CO ₂) | 5,600~21,600 | 2,400~5,600 |
| IGCC (JPY/t-CO ₂) | 3,200~17,600 | 1,600~5,600 |
| 回収および EOR を行う発電所 | | |
| NGCC (JPY/t-CO ₂) | 1,600~5,600 | 0~2,400 |
| PC (JPY/t-CO ₂) | 4,000~19,200 | 800~3,200 |
| IGCC (JPY/t-CO ₂) | 1,600~15,200 | 0~3,200 |

80JPY/US\$として IPCC 表を換算

出典 : IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage 2005

CCS の経済ポテンシャルの評価は、将来の CCS の展開およびコストを、大気中の CO₂ 濃度の安定化に至る経済的に効率が良く最もコストの少ない経路を実現するシナリオとの関連で研究するエネルギーおよび経済のモデルに基づいている。

これらのモデルの定量的結果にはかなりの不確実さがあるが、どのモデルも大気への温室効果ガスの放出を実質的に制限する明白な方針がないうちは、CCS システムは大規模に配備展開されそうにないことを表している。温室効果ガスの排出制限が課されれば、重要な気候変動軽減体制の開始から数十年以内に、CCS システムが大規模に展開されると多くの統合評価が予見している。

エネルギーモデルおよび経済モデルは、CCS システムが電力部門で展開されない限り、このシステムは気候変動の緩和にあまり貢献できそうにないことを表している。これが行われるためには、二酸化炭素削減の価格が 2,000~2,400JPY/t-CO₂ を越えているか、または CO₂ 排出量に対するそれと同等の制限を命じなければならないであろうとしている。

現状では、CO₂ 排出量を制限する手段がないので、CCS 技術が展開されるためにはニッチ的な機会しか存在しないことを表している。これらの初期の機会には、高純度で低コストの排出源から回収される CO₂、50km 未満の距離の CO₂ 輸送、EOR などの付加価値用途における CO₂ 貯留と組み合わせることなどが含まれる。そのようなニッチ的オプションの潜在能力は年間に約 360Mt-CO₂ である。ここで提案している小規模分散型の CCS、CMS はこの領域に含まれる。

モデルは、CCS システムは、原子力や再生可能なエネルギー技術など、他の大規模な軽減オプションとの競合力を持つことも示している。これらの研究は、軽減ポートフォリオに CCS を含めると、CO₂ 濃度の安定化のコストが 30%以上軽減できることを示している。CCS 技術のコスト競争力の一面は、現在のほとんどのエネルギー基盤と互換性を持つということである。

大半のシナリオで、排出量の減少は、時の経過と共に次第に抑圧的になる。大半の分析は、2050 年までに CCS システムがかなり浸透するにもかかわらず、CCS 展開の大部分は今世紀の後半に行われることを示している。最も初期の CCS 展開は通常、先進国で行われ、最終的に世界全体へ普及すると予見されている。特定の排出量の制約を達成するために必要な様々な措置の特定の組み合わせと

量によって、様々なシナリオやモデルの結果が異なるが、CCS はエネルギー技術および排出量削減アプローチの広範なポートフォリオの重要な構成要素となり得る。実際の CCS の利用率は、これらのエネルギーモデルおよび経済モデルの示す経済ポテンシャルの推測よりも低くなりそうである。その理由は、技術の開発および展開に対する現実世界の障壁（環境への影響、明確な法規制上の枠組みの欠如、様々な技術に関する認識された投資リスク、CCS コストがどれぐらい速く研究開発と「行動による学習」を通じて減少するか不確実であること）を適正に考慮していない、最適化された最小コストの分析に基づいているためである。法的枠組みを早期に確立し、小規模分散型の CMS の導入により CCS の利用率を高めることが期待される。

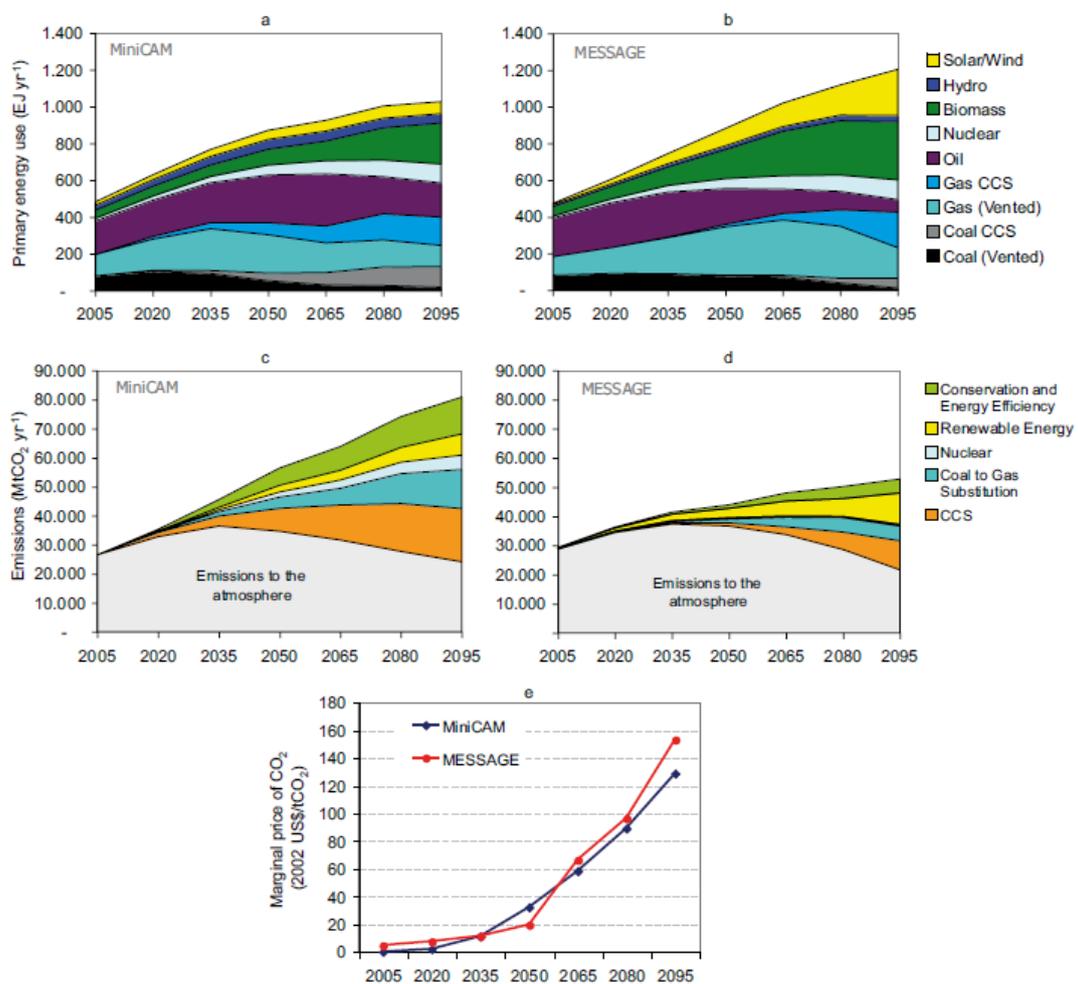


図 4.1.1-1 統合評価モデル (MESSAGE および MiniCAM) に基づく GHG 削減ポートフォリオへの CCS の貢献例

注) a)と b)は CCS の展開を含めた世界の一次エネルギー使用、c)と d)は、灰色で世界の CO₂ 排出量を示し、主たる排出削減対策の対応する貢献を色で示したもの、e)は、限界 CO₂ 削減費用の計算値

地球規模の温暖化対策を考えると、CO₂を450ppmvから750ppmvまでの間で安定化させるシナリオでは、今世紀中に地球全体で貯留される可能性のあるCO₂の累積量に関する公表された見積もりは、非常に小さな貢献から何兆トンものCO₂貯留まで広範囲にわたる。長期的な社会経済的、人口統計学的、そして特に将来のCO₂排出量の主な決定要因である技術的な変化の不確実さによるものである。しかし、450～750ppmvのCO₂という安定化シナリオの結果の大半がCCSの累積展開に関して220～2,200Gt-CO₂の範囲に集まる傾向があることに注意する必要がある。CCSがその経済ポテンシャルを実現するには、それぞれが年間1～5Mt-CO₂を回収する数百、数千ものCCSシステムが世界中で必要になる。

4.1.2 コスト試算に当たっての前提

コスト試算に当たってCMSシステムの概要から、その前提をまとめると次のようである。

- ◆対象排出源：年間1万t-CO₂～10万t-CO₂程度の小規模排出源を対象とする。その中でも、高純度CO₂排出源となる水素製造工場を対象とすることで、CO₂の分離・回収に要する費用はここでは計上しない。
- ◆貯留サイトまでの距離：地域分散型の特徴である排出源、事業所直下または近傍の陸域からの注入である。したがって、パイプラインや船舶などの長距離輸送を伴うことがない。
- ◆注入CO₂の状態：貯留域周辺の地下水を揚水により使用。注入井内においてマイクロバブルを発生させ、地下水に溶解させて貯留層に注入する（解析、評価に当たっては、地中での完全溶解または溶解水を地上で作成して注入することを前提とした点に注意）。超臨界CO₂を注入するための高圧注入設備は不要である。
- ◆現状、CO₂完全溶解を実現させるためには、地上で溶解させてからの注入となるが、ここでは地上溶解タンクにかかる費用は計上しない。

4.1 節の参考文献

- 1)IPCC 2005 Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press, UK. pp. 431
- 2)IPCC 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2 Energy Chapter 5 Carbon Dioxide Transport, Injection and Geological Storage

4.2 コストの試算

この節では、4.1 節 4.1.2 款に示した CMS におけるコスト試算の前提に従いコスト試算を試み、大規模集中型の CCS との比較、再生可能エネルギーとの比較を行った。再生可能エネルギーとの比較は、石油火力発電により発電する場合に 1 t-CO₂ を排出する発電量を標準として、それに対して同一発電量を確保するための再生可能エネルギーの発電費用に一般単位発電単価を乗じたものとの比較を行った。

4.2.1 掘削コスト

掘削コストは次の条件により試算した。

| | | |
|--|---------------|-----------------|
| 掘削（トリコンビット、ノンコア） | | |
| 0～5m | φ 311mm | 12-1/4in |
| 5～200m | φ 216mm | 8-1/2in |
| 200～500m | φ 143mm | 5-5/8in |
| このうち、400～500m 区間（キャップロックと圧入相当層を想定）は HQ でオールコア | | |
| ケーシング | | |
| 0～5m | 250A(φ 267mm) | SGP 管（JIS 規格） |
| 0～200m | φ 178.0mm | 7in（API 規格） |
| 0～500m | φ 114.3mm | 4-1/2in（API 規格） |
| ストレーナーは、ジェットパーフォレーションで実施 （このほうが、確実なセメンチングが可能） | | |

検層は、P 波、ガンマ線、キャリパー、傾斜方位連続、温度、セメントボンドの各検層を想定。

4.2.2 モニタリングコスト

モニタリングとして 3 次元反射法探査により CO₂ の移動挙動を可視化することは、溶解水の場合には非常に難しいと考えられる。従って、反射法探査に関しては、2 次元反射法探査を経過時間毎（5 回/20 年）に 2 断面実施する。

重要なモニタリング項目は、揚水井での地下水の分析である。CO₂ 溶解水の到達を含め、地下水の化学成分の自動分析を行うシステムを構築する。ただし、機器の耐久性については、今後検証していくことが必要である。

4.2.3 維持管理コスト

維持管理コストは、注入・揚水管理システム、揚水井地下水モニタリングシステムの維持管理を対象とする。ここでは、維持管理コストは設備費用の 3%とした。

○コスト集計

圧入設備（地下部分）と調査、モニタリングに必要な総コスト見込みをまとめると次のようであ

る。ここでケース 1 は注入レート 1 万 t-CO₂/y、ケース 2 は注入レート 2 万 t-CO₂/y (2 ユニットで貯留) とした場合である。

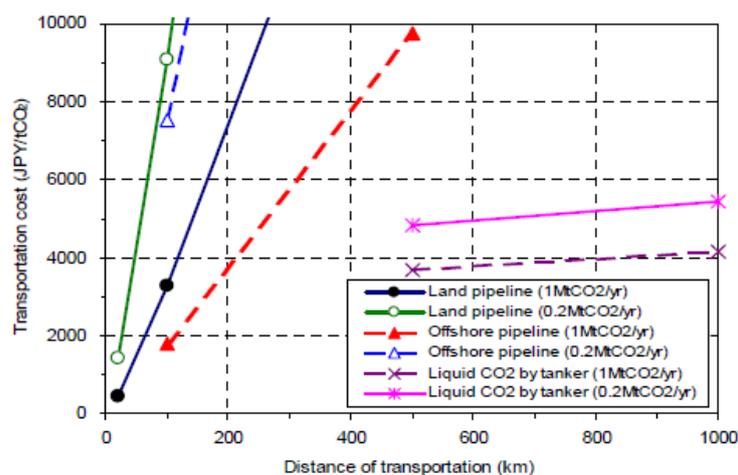
| 費目 | ケース 1 | ケース 2 | 備考 |
|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|
| 注水レート (万 t-CO ₂ /y) | 1 | 2 | |
| 注水井(本) | 1 | 2 | |
| 揚水井(本) | 4 | 6 | |
| 注入総量 (万 t-CO ₂ /20yrs) | 20 | 40 | |
| 孔内検層 | | | |
| 全孔井長 (本×m) | 5×500=2500m | 7×500=3500m | |
| 注入システム | | | 設備コスト=設備費×0.13/注入レート |
| 注入井 (500m×1 本) | 0.78 億円 | 0.78 億円×2 | 「15 年償却として設備費の 10%+メンテナンス費として設備費の 3%」 =13% |
| 揚水井 (500m×4 本) | 0.78 億円×4 | 0.78 億円×6 | |
| 設備費計 | 3.9 億円 | 6.2 億円 | |
| 設備コスト (円/ t-CO ₂) | 5,070 円/ t-CO ₂ | 4,056 円/ t-CO ₂ | |
| モニタリング | | | 探査 5」5 回分 |
| 2D 反射法探査 | 0.5 億円 | 0.5 億円 | 操業コスト=(探査費/20 年)/注入レート |
| 揚水井自動計測 | 0.5 億円 | 0.5 億円 | |
| 操業コスト | 50 円/ t-CO ₂ | 50 円/ t-CO ₂ | |
| 費用総計 | 4.9 億円 5,120 円/ t-CO ₂ | 6.7 億円 4,106 円/ t-CO ₂ | |

掘削コストを主とした費用を示したが、大規模 CCS での圧入レートは CMS のその 50~100 倍程度またはそれ以上になるので、スケールメリットを發揮する。RITE の試算例では、掘削コスト、事前調査 (3D 反射法探査) を含め、圧入レート 700 万 t-CO₂/y と 2300 万 t-CO₂/y でそれぞれ 439 円/t-CO₂ と 329 円/t-CO₂ となっている。これらの値からも大量貯留によるコスト効果は大きいことが伺える。しかし、全体的なコストでは、大量の CO₂ を排出源から貯留サイトへ輸送するために大きなコストが生じ、大量貯留でのデメリットとなる。

4.2.4 輸送コストについて

IPCC 特別報告書¹⁾では、年間 500~4000 万 t-CO₂ をパイプラインで 250km 輸送する場合のコストを 80~640JPY/t-CO₂ としている。これに対し、高木²⁾によると、年間 100 万 t-CO₂ を 20km 輸送した場合で 800JPY/t-CO₂ としている。図 4.2.4-1 に示すように日本で地中貯留を行う場合、パイプラインの建設コストは高く、また、CO₂ 輸送量は少ないと考えられるため、パイプラインでの輸送コストは世界での報告例よりもかなり高い。

RITE では、輸送コストについて図のような試算をしている²⁾。



注)陸域パイプラインコストには、土地の購入もしくは借地費用は含まれない。

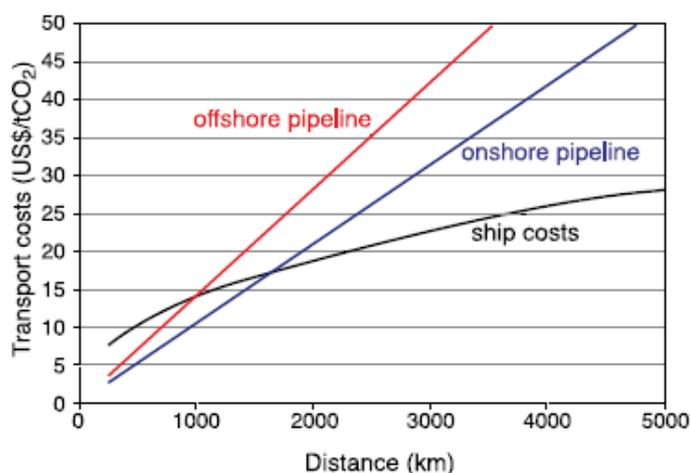


図 4. 2. 4-1 輸送コスト (上 : 我が国の現状 2007 年²⁾、下 : IPCC による現状 2005 年¹⁾)

大量の CO₂ をパイプラインで輸送する場合、耐圧、耐腐食性を考慮し、また、長距離輸送となるためコストはかかる。CMS では、輸送距離 1 km 以内程度で、ガス輸送のため圧力も小さくなる。ただし、輸送量が少ないためそのコストを次のように設定し、CMS の総コスト試算に加えた。

| 費目 | ケース 1 | ケース 2 | 備考 |
|---------------|---|---|---|
| 掘削・モニタリング | 4.9 億円 5,120 円/t-CO ₂ | 6.7 億円 4,100 円/t-CO ₂ | |
| 輸送費 パイプライン | 0.1 億円 1,000 円/t-CO ₂ | 0.1 億円 500 円/t-CO ₂ | |
| 総計 | 6,120 円/t-CO ₂ (9,120 円/t-CO ₂) | 4,606 円/t-CO ₂ (7,606 円/t-CO ₂) | () 内は分離回収費用を 3,000 円/t-CO ₂ とした値 |

4.2.5 操業コスト

操業には電力が必要であり、電力消費による CO₂ 排出とのインベントリを小規模貯留の CMS では考える必要がある。

コンプレッサー 1 台、ポンプ 4 台で 1 ユニットが構成されると、それぞれ電気を動力として運転することになり、電気代 40 円で 1 kg の CO₂ を排出すると考えると、注入量とそれに伴う排出量とのバランスも考慮する必要がある。ポンプ 4 台およびコンプレッサー 1 台での合計電気代は 1 t-CO₂ 当たり約 160 円となった。年間 1 t-CO₂ を CMS で貯留しようとするすると約 0.4% の CO₂ 排出があることになる。

| ポンプ等の消費電力 | 年間電気代 |
|----------------------------------|---|
| ポンプ 揚程 30m 消費電力 900W 程度 | 76 千円/年/台 (稼働率 60%、電気代 16 円/kWh) 303 千円/年/4 台 |
| コンプレッサー 5 MPa 対応 消費電力 15kW 程度 | 1,261 千円/年 (稼働率 60%、電気代 16 円/kWh) |
| 計 | 1,564 千円/年 (稼働率 60%、電気代 16 円/kWh) 156 円/ t-CO ₂ |

4.2.6 再生可能エネルギーとの比較

CMS により火力発電所から排出される CO₂ を年間 1 t-CO₂ 削減すると仮定する。表 4.2.6-1 に示す火力発電所の発電方式ごとの排出係数から石油火力方式を考えると、1 t-CO₂ を発生する電力量は、排出係数 0.704kg-CO₂/kWh を用いて、 $1,000\text{kg}/0.704\text{kg-CO}_2/\text{kWh}=1,420\text{kWh}$ に相当する。この電力量を再生可能エネルギーでの発電に置き換え、CMS のコストと比較した。電力量の排出係数として一般に用いられている値は、単一発電方式ではなく様々な発電方式（原子力や風力も含む）であるので、ここでは単一発電方式の中位である石油火力発電を用いたことに注意されたい。

一方、再生可能エネルギーにより発電された電気は売ることができるので、方式にかかわらず一律 25 円/kWh で売電できるとして発電単価より減じることとした。すなわち、

$$(\text{発電単価} - \text{売電単価 } 25 \text{ 円/kWh}) \times 1\text{t-CO}_2 / (\text{排出係数、例えば } 0.704\text{kg-CO}_2/\text{kWh})$$

として CO₂ 削減単価を算出した。再生可能エネルギーの発電単価は、図 4.2.6-1 および表 4.2.6-2 の最大値を用いた。

結果を表 4.2.6-3 と図 4.2.6-2 に示す。

表 4.2.6-1 火力発電方式による排出係数

| 発電方式 | 排出係数 |
|--------|------------------------------|
| 石炭火力 | 0.887kg-CO ₂ /kWh |
| 石油火力 | 0.704kg-CO ₂ /kWh |
| LNG 火力 | 0.478kg-CO ₂ /kWh |

表 4.2.6-2 発電方式別の発電原価試算結果 (1kWh 当たりの発電費用)

| 発電方式 | 発電単価 (円/kWh) | 設備利用率 (%) |
|------|--------------|-----------|
| 水力 | 8.2~13.3 | 45 |
| 石油 | 10.0~17.3 | 30~80 |
| LNG | 5.8~7.1 | 60~80 |
| 石炭 | 5.0~6.5 | 70~80 |
| 原子力 | 4.8~6.2 | 70~85 |
| 太陽光 | 46 | 12 |
| 風力 | 10~14 | 20 |

注) 設備利用率 (%) = 1年間の発電電力量 / (定格出力 × 1年間の時間数) × 100%

出典: 経産省 エネルギー白書 2008年度版 (2008)

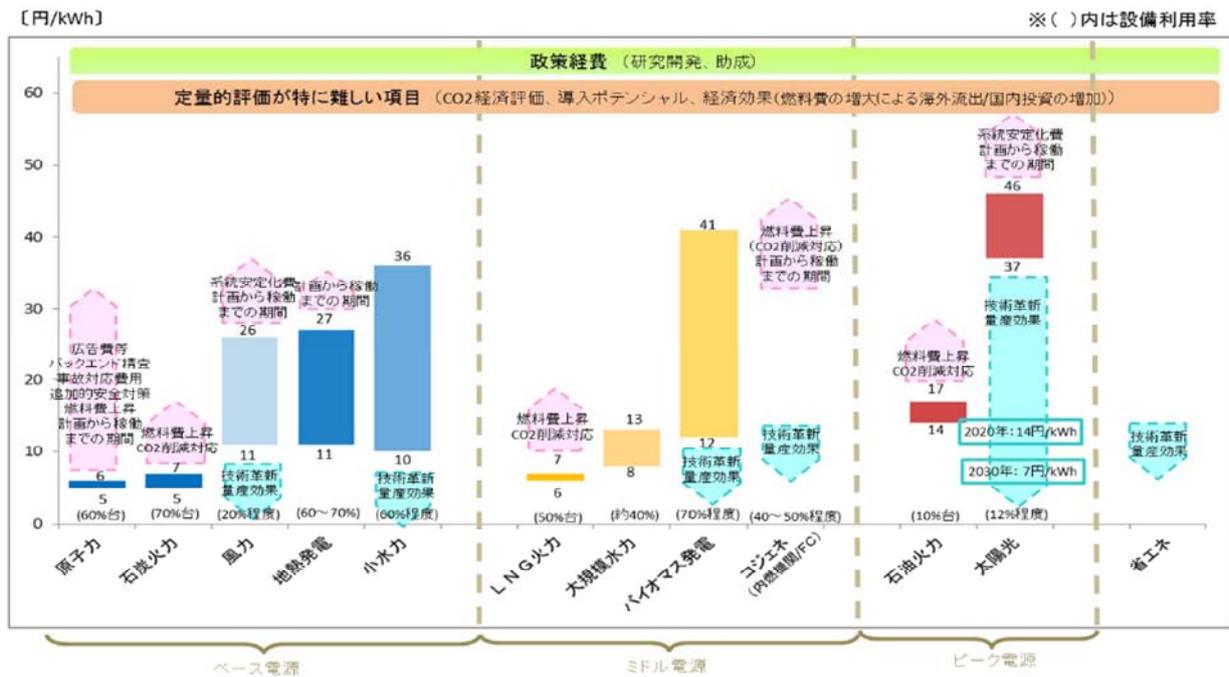


図4.2.6-1 再生可能エネルギーの発電単価

出典: エネルギー・環境戦略会議 「コスト等試算・検討委員会 (仮)」 2011/7

表4.2.6-3 発電単価（最大値）を基にした削減効率

| 発電方式 | 削減単価 (円/削減t-CO ₂) | 発電単価 (円/kWh) |
|--------|----------------------------------|-----------------|
| 太陽光 | 28,409 | 45 |
| 風力 | 1,420 | 26 |
| マイクロ水力 | 15,625 | 36 |
| バイオマス | 22,727 | 41 |
| 地熱 | 2,841 | 27 |
| 集中型CCS | 7,300 | |
| 分散型CCS | 4,606 | |

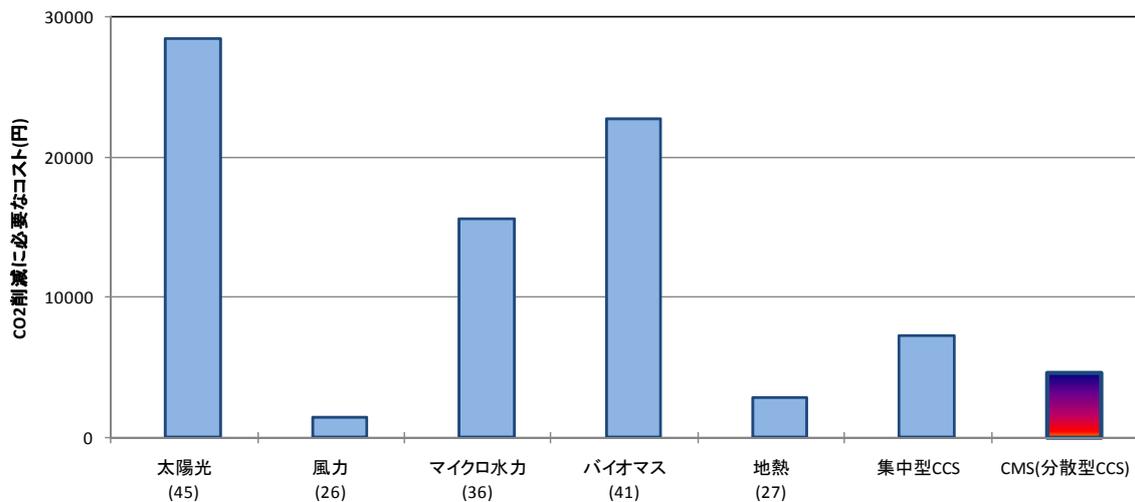


図 4.2.6-2 発電単価（最大値）を基にした 1t-CO₂ を削減するのに必要なコスト

表および図に併記した集中型 CCS のコストは、高木²⁾による 2007 年時点での国内の新設石炭火力を対象に 100 万 t-CO₂/y を輸送距離 20km で貯留したケースである。その内訳は、分離・回収 4,200 円/ t-CO₂、輸送 800 円/ t-CO₂、注入 2,300 円/ t-CO₂ である。分散型 CCS である CMS は分離・回収コストは計上していないので、単純に集中型 CCS の分離・回収コストを加えると集中型 CCS より若干コスト高になる。これは圧入レートが 100 万 t-CO₂/y と 2 万 t-CO₂/y の差に起因するが、50 倍のレートの差で同等のコストとなる点では評価されるものとする。

4.2 節の参考文献

- 1) IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage 2005
- 2) 高木正人：日本における地中貯留の経済性評価と有効性、CCS ワークショップ 2007 資料
- 3) エネルギー・環境戦略会議 「コスト等試算・検討委員会（仮）」2011/7 資料

4.3 推進要因

以上のように少なくとも貯留に関してはコストが発生し、諸外国で推進されている石油やガスの増産という生産を含めた CCS の形に対してはインセンティブに欠ける面が否めない。しかし、推進要因として考えられている炭素税または環境税、排出権の価格を考慮した場合について考えた。

4.3.1 炭素税

現在、国内での炭素税または環境税については、CO₂ 排出削減効果を引き出すことができる価格インセンティブを与えることと、各主体の過度の負担や社会の激変を抑えることを重視するものとして、化石燃料に対して課税の検討がされている。

炭素税研究会のパンフレット¹⁾によると、CO₂ 1 トン当たり約 1,600～4,100 円、電力に関しては、各燃料への炭素税が転嫁された場合の税額として 1.9 円/kWh (11%) が検討されている。従って、およそ 4,000 円/t-CO₂ が削減コストの目安になると考えられる。

表 4.3.1-1 に各国の導入動向をまとめた²⁾。

表 4.3.1-1 各国の炭素税/環境税の導入動向

| 国名 | 税種 | 導入年 | 課税対象 | ガソリンへの税率(円/ℓ) |
|---------|-----------|-----------|-----------------------|---------------|
| フィンランド | 燃料税 | 1997 | 炭素含有量 | 6.5 |
| スウェーデン | 二酸化炭素税 | 1991 | 炭素含有量 | 30 |
| ノルウェー | 二酸化炭素税 | 1991 | 炭素含有量 | 13 |
| デンマーク | 二酸化炭素税 | 1992 | 炭素含有量 | 4 |
| オランダ | 一般燃料税 | 1992 | 鉱油、石炭 | - |
| | エネルギー規制税 | 2004 | 小規模エネルギー規制 | - |
| イギリス | 炭化水素油税 | 1993～1999 | 炭化水素油 | 84 |
| | 気候変動税 | 2001 | 鉱油税が課税されない電気、石炭、天然ガス等 | - |
| ドイツ | エネルギー税 | 1999～2003 | 鉱油、石炭 | 88 |
| | 電気税 | 1999 | 鉱油税が課税されない電気 | - |
| イタリア | 鉱油税 | 1999～2005 | | 76 |
| | 石炭税 | 2007 | 消費税の課税されない石炭 | - |
| フランス | 炭素税 | 2010予定 | 炭素含有量 | - |
| スイス | 二酸化炭素税 | 2008 | 炭素含有量 | - |
| オーストラリア | 炭素税 | 2012 | 炭素含有量 | 石炭火力発電所などを対象 |
| 日本 | 環境税案 | 2008発表 | | 1.52 |
| | 地球温暖化対策税案 | 2009発表 | | 20.1 |

4.3.2 クリーン開発メカニズム (CDM)

CCS のクレジット (CDM) 化 は CMP6 (カンクン、2010) にて導入決定がされ、その CDM 適格性に関する決定は決定書³⁾によると次のようである。

CMP は、①非永続性 (長期的な永続性を含む)、②測定・報告・検証 (MRV)、③環境影響、④プロジェクト活動のバウンダリー、⑤国際法、⑥法的責任、⑦想定外の結果が起こる可能性、⑧安全性、⑨漏洩に起因する損害に対する保険の適用及び補償、が満足いく方法で対処・解決される場合には、陸上での CCS は CDM プロジェクト活動として適格性を有すると決定する。

CMP は、SBSTA35 (2011 年 12 月) において、CMP7 決定への勧告として、CCS を CDM 化する実施手順 (modalities and procedures) を策定するよう要請する。この実施手順には、以下の問題

への対処を含めるものとする。

- (a)CO₂ 貯留サイトの選定：CO₂ 貯留の長期にわたる永続性および貯留サイトの長期にわたる完全性を確保するために、厳格な基準（stringent and robust criteria）に基づくものとする。
- (b)モニタリング計画：環境十全性に対するリスク軽減のために、クレジット獲得期間中およびクレジット獲得期間後も、厳格なモニタリング計画を実施・適用すること。
- (c)モデルの利用：既存モデルに関する科学的不確実性を考慮しつつ、厳格なモニタリング要件を満たすモデルの利用の適格性についてさらに検討すること。特に 2006 年版 IPCC 国別 GHG インベントリ用ガイドライン（IPCC インベントリ GL 2006）を考慮に入れること。
- (d)サイト選定・モニタリング計画の基準：CMP によって決定されるものとする。なお、国際機関による適切なガイドライン（IPCC インベントリ GL 2006 など）を参考にしてもよい。
- (e)CCS のバウンダリー：地上部・地下部の全ての CCS 設備および貯留サイト、CO₂ を大気中に放出する可能性のある全ポイント（CO₂ の回収・処理・運搬・注入・貯留、可能性のある CO₂ 移動経路（CO₂ の地下水への溶解によるものを含む））を含めること。
- (f)バウンダリーについては、明確に同定しておくこと。
- (g)バウンダリー内からの CO₂ 放出：モニタリング計画により測定・算定すること。また、貯留庫内の気圧を連続測定すること。これらのデータは個別に検証すること。
- (h)複数国にまたがる CCS プロジェクト：プロジェクト開発が適切かどうか、また、その影響について、適切に対処すること。
- (i)CCS 配置に伴う排出量：プロジェクト排出量または漏洩時排出量を考慮すること。また、事前のプロジェクト排出量の推計を含むモニタリング計画に盛り込んでおくこと。
- (j)リスク・安全性評価：CCS 配置前に、独立機関によるリスク・安全性評価を徹底的に行うこと。この評価は、実施手順で規定される方法論を用いること。また、包括的な社会・環境影響評価も同時に実施すること。
- (k)リスク・安全性評価には、注入ポイントからの排出、地上部・地下部の設備および貯留サイトからの排出、漏出、側方流動からの排出、物質移動（液体中に溶解している CO₂ のプロジェクトバウンダリー外への移動を含む）、貯蔵 CO₂ の大量、かつ異常(catastrophic)な放出、並びに人体の健康および生態系への影響に関するリスクの評価とその軽減策の提案を含むこととし、併せて上記のような排出が気候に与える影響についての評価を行うこととする。
- (l)リスク・安全性評価と社会環境影響評価の結果は、CCS の技術面・環境面からみた実行可能性を評価する際に、考慮しなければならない。
- (m)短期的・中期的・長期的な法的責任（貯留 CO₂ の物理的漏出や、潜在的誘発地震・地質学的不安定性、その他による環境・財産・人の健康にかかる損害、法的責任の所在）：
 - (i)CCS を CDM プロジェクトとして承認する前に定義しておくこと。
 - (ii)クレジット獲得期間中およびクレジット獲得期間終了後にも適用されること。
 - (iii)京都議定書の趣旨に合致していること。
- (n)前記(m)の法的責任の準備ができたなら、次の点も考慮しておくこと。

- (i)貯留されていた CO₂ の放出により影響を被る締約国・コミュニティー・民間団体・個人に対する救済策。
- (ii)同一貯留サイトを共有する団体間での法的責任の配分規定についての用意（同意が取れていない場合も含めて）。
- (iii)クレジット獲得期間終了時（あるいは他の時点）における法的責任の承継について考慮しておくこと。
- (iv)法的責任の長期存在（漏出や地震・地理学的不安定性、その他環境・財産・公衆衛生を脅かす損害）を考慮に入れた救済策支弁の必要性を認識した上で、国家賠償についても考慮しておくこと。

- (o)生態系の修復およびコミュニティーへの補償：CO₂ 放出事故で損害を受けた生態系の修復、および同事故の影響を被ったコミュニティーへの完全補償に関する適切な規定を関連活動の開始までに構築しておくこと。

これらの中で、(k)項の安全評価では溶解液の移動も評価すること、(e)では溶解 CO₂ も含んだ放出点の推定を規定しているなど CMS システムも対象となるものである。

4.3.3 COP17 での成果

2011 年 12 月に開催された COP17 では、長期的法的責任は附属書 I 国またはホスト国のどちらかできり受け、不測の漏洩の対策コストのためにクレジットの 5%をとっておくこと、事業者はこのクレジットの余った分をプロジェクト終了時に請求できること等が決定された。

CMS のような小規模貯留に対する CDM も考慮されており以下の利点がある。ただし、CCS における小規模のカテゴリーに含まれるかは不明確である。

ここで、小規模 CDM プロジェクトについて

タイプ III：プロジェクト活動による直接排出量が年間 15,000t-CO₂ 未満であり、排出源による人為的排出削減を行うその他のプロジェクト

で 2001 年に提案され、現在では

タイプ III：年間排出削減量が 60,000t-CO₂ 以下のその他のタイプのプロジェクト

となっている。しかし、内容には CCS とは明記されておらず、今後 CMS への対応を要請していく必要がある。以下に小規模 CDM プロジェクトの利点をまとめる。現状では、大きなメリットではないとの声もある。

小規模 CDM プロジェクトの場合には、CDM の準備・実施のための取引費用 (Transaction cost) を低減するために以下のような簡素化された方法・手続きが認められている。

- ・ PDD (Project Design Document) フォーマットが簡素化されている (大規模 CDM プロジェクトとは別のフォーマット)
- ・ 簡素化された方法論が利用可能である。
- ・ バンドリング 4 (1つの CDM 活動もしくはポートフォリオを形成する複数のプロジェクト活動を一緒にすること) が認められている (但し、COP/MOP1 では、大規模プロジェクトもバンドリングが可能になった)。

- ・ 環境影響分析が簡素化されている。
- ・ 登録費用と SOP（収益分担金：Share of Proceeds）が低く抑えられている。ここで SOP とは以下のようなものである。

①事務局の手続き費用；

COP/MOP1 において、CDM 運営のための事務的費用として課されるレベルが決定されている。

(a) 毎年最初の CO₂ 換算 15,000 ton-CO₂ については CER(認証排出削減量: Certified Emission Reductions) 当たり US\$0.1 (10 セント)

(b) CO₂ 換算 15,000 ton-CO₂ を超える部分については CER 当たり US\$0.2 (20 セント)

* 登録料は、この事務的費用のための収益分担金から差し引かれることとなっている。

②適応支援のための費用；

発行された CER の 2% が気候変動の悪影響に対し、特に脆弱な開発途上締約国の適応費用を支援するために使用される。

4.3 節の参考文献

- 1)炭素税研究会、地球温暖化対策推進のための「炭素税」の早期導入に向けた制度設計提案
- 2)遠藤真弘：環境税をめぐる状況—温暖化関連諸税を中心に—、国立国会図書館 ISSUE BRIEF NUMBER 665(2009.11.27.)
- 3)Decision-/CMP.6「Carbon dioxide capture and storage in geological formations as clean development mechanism project activities」

4.4 CMS システムの経済性に関する概略検討のまとめ

CMS システムは地域分散型で、事業所毎に CO₂ の貯留を行うものであり、その成立は経済性に左右される。そのため設備コストを中心にコストの試算を実施した。

CMS システムのコストは、試算では 4,600~6,100 円/t-CO₂ となった。これには分離・回収コストは含まれていない。

集中型の CCS は、貯留の規模、注入レートにおいて CMS の 50~100 倍程度となるためスケールメリットが存在するが、輸送コストを考慮した場合、特に国内におけるパイプラインのコストをほとんど考えなくてよい CMS では、コストは CCS と同等かそれ以下に抑えられることを示した。

CMS による CO₂ 削減効果を再生可能エネルギーの発電による削減効果と比較すると、太陽光発電、マイクロ水力発電、バイオマス発電よりは高く、地熱発電や風力発電よりは低かった。ただし、この結果は、再生可能エネルギーの売電価格に依存することに注意されたい（ここでは一律 25 円/kWh とした）。

第5章 CMS システムの実用化に向けた検討

5.1 開発のための手順（ロードマップ）の検討

CMS のロードマップを検討するに当たり、まず、国内外の関連機関が提案している CCS に関するロードマップを参照した。これらの実用化に向けたマップから CMS システムのロードマップを作成した。

5.1.1 CCS のロードマップ

内閣府経済社会総合研究所(ESRI)¹⁾、公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)²⁾ および国際エネルギー機関 (International Energy Agency : IEA)³⁾ が発表している CCS に関するロードマップを、それぞれ図 5.1.1-1 から図 5.1.1-3 に示す。

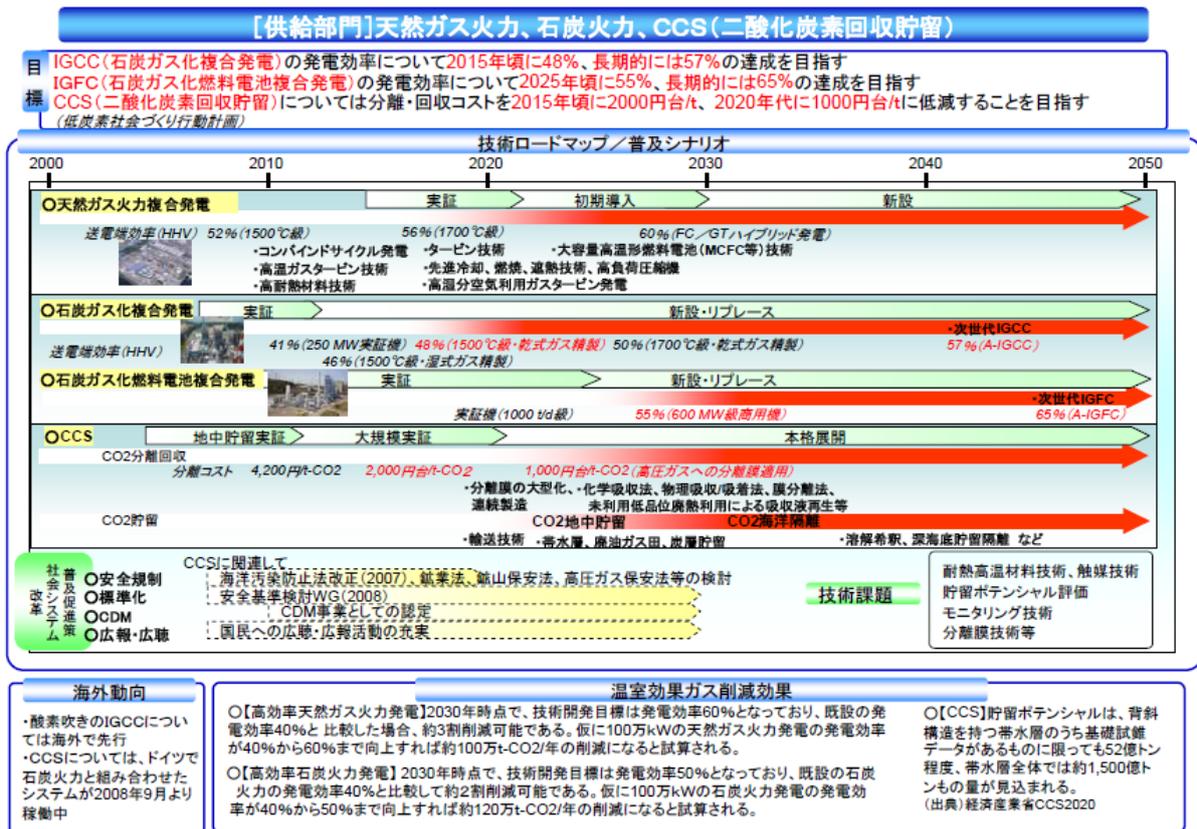
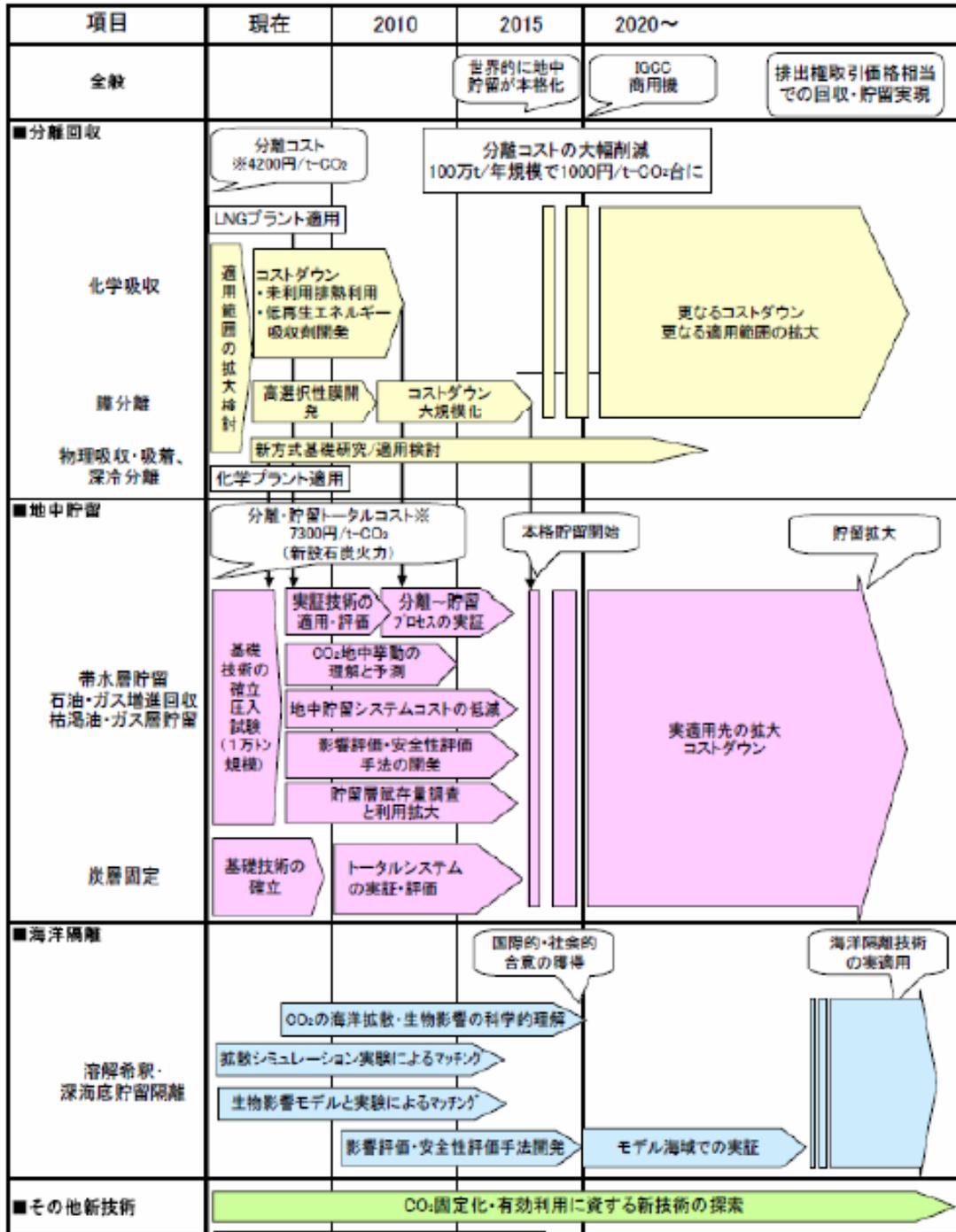


図 5.1.1-1 天然ガス火力、石炭火力、CCS のロードマップ
 (内閣府経済社会総合研究所(ESRI))



※分離回収: 新設石炭火力(830MW)、回収量: 100万t-CO₂/年、7MPaまでの昇圧含む、蒸気は発電所の蒸気システムから蒸気
 ※地中貯留: 上記分離回収コスト+パイプライン輸送20km+圧入(昇圧10MPa、10万t-CO₂/年・井戸)

(出所) (財)地球環境産業技術研究機構(RITE)「二酸化炭素固定化・有効利用技術戦略マップ」(2006年3月)

図 5.1.1-2 二酸化炭素固定化・有効利用技術戦略マップ²⁾
 (公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE))

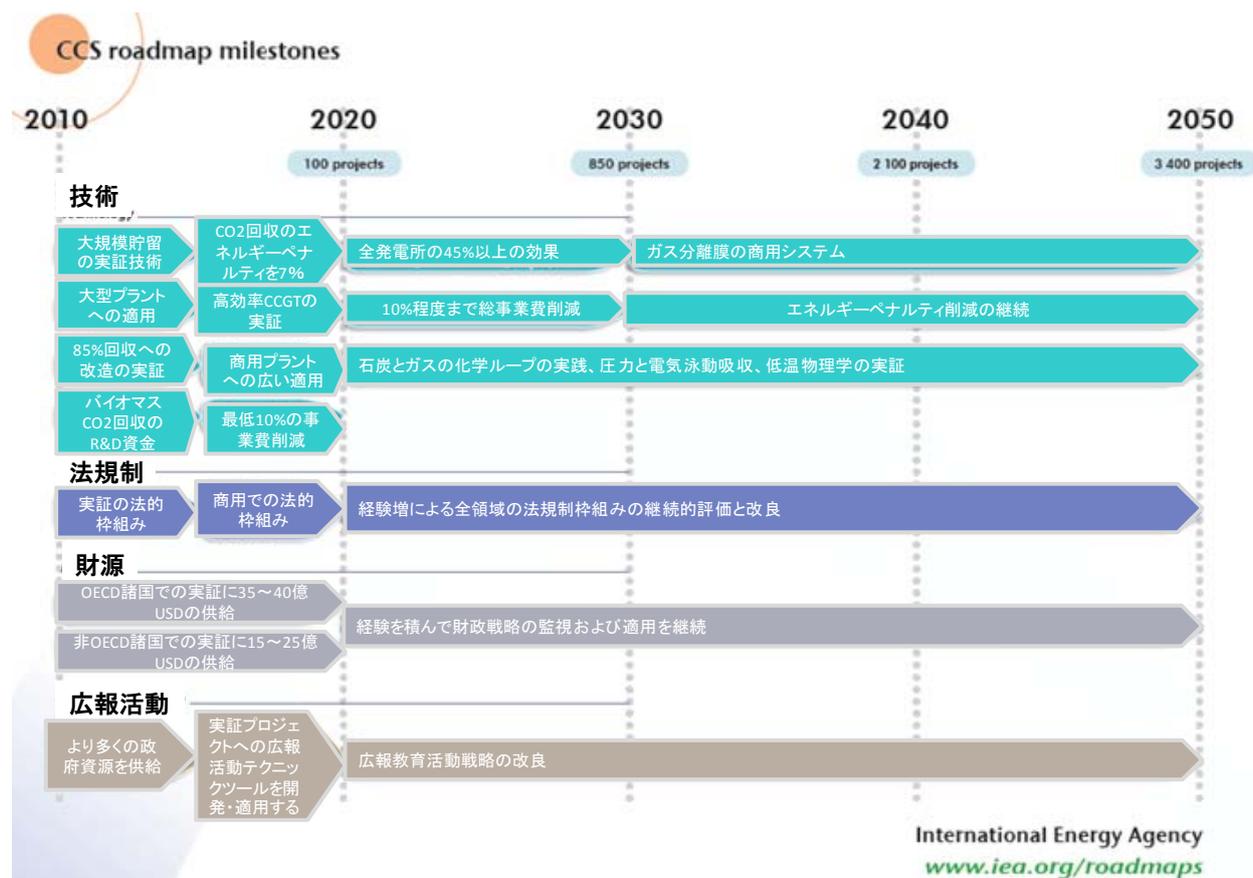


図 5.1.1-3 CCS ロードマップマイルストーン

(国際エネルギー機関 (International Energy Agency : IEA))

出典 : CARBON CAPTURE AND STORAGE ROADMAP IEA

IEA のロードマップは、技術マップともども法規制、財源確保および社会的受容性についての広報活動まで網羅しており、要点は、

- ・ 2020 年に 100 箇所、2030 年に 850 箇所、2050 年に 3400 箇所のプロジェクトが創出されると期待。
- ・ 2010~2020 年に 630 億 US \$、2020~2030 年に 6050 億 US \$ の調査費用が必要。

IEA は更に 2011 年に Technology Roadmap として「Carbon Capture and Storage in Industrial Application」⁴⁾ を示した。産業の発展は、雇用を創出し、所得をもたらし、生活スタイルを改善してきたが、気候変動には負の結果をもたらした。そこで産業界での CO₂ 削減に新たな技術導入が必要であるとし、低炭素での産業成長のためのロードマップである。ここで網羅される産業分野は表 5.1.1-1 の 5 分野である。

表 5.1.1-1 IEA 技術開発ロードマップの対象産業分野⁴⁾

| 分野 | 製造過程 |
|-------------------------|--|
| 高純度 CO ₂ 排出源 | 天然ガス処理（陸上・海上）、水素製造（天然ガス、石炭またはバイオマス）、酸化エチレン製造、石炭液化（CLT）、アンモニア製造 |
| バイオマス転換 | 生合成ガス、エタノール製造、バイオマスからの水素製造、バイオマス液化（BTL）、ブラックリカー（パルプ、製紙工場廃水）処理 |
| セメント | 乾燥過程、予備か焼装置 ありなしのセメント回転窯、火格子冷却機 |
| 鉄鋼 | 燃焼炉（銑鉄）、直接還元鉄（DRI）、直接還元炉（FINEX）、ヒサルナ製鉄法 |
| 製油所 | 水素製造（天然ガス水蒸気メタン改質 SMR、ガス化残物、流動接触分解および処理熱） |

天然ガス、石炭またはバイオマスからの水素製造、酸化エチレン製造、石炭液化（CTL）、アンモニア製造などの高純度 CO₂ 排出分野での早期 CCS 実証の機会が提供されることを提言している。

商用 CCS には 2010～2030 年に 2,560 億 US \$ の追加投資が必要であるとしている。

また、高純度 CO₂ 排出産業に対して、短期的に挑戦すべき技術として、

- ・ CCS に適用できることを実証するための水素、アンモニア、酸化エタノール製造技術の項目をコンパイルする
- ・ CCS の展開における主な技術障害（熱統合、CO₂ の利用、CO₂ 流に含まれる H₂S などの）の明確化
- ・ CO₂ 回収、ガス調整、追加配管、CO₂ 流の圧縮などにかかる費用の見積もり
- ・ 輸送、貯留実証プロジェクトの開始
- ・ 2020 年までに 29 プラント、2030 年までに 87 プラントでの実現

をうたっている。

5.1.2 CMS のロードマップ

国内では、2013 年度より 2016 年度までに 100 万 t-CO₂ 規模の実証試験が行われる予定である。その間に新たな技術的成立性および最適なサイトの選定が必要と考えられる。

その後、小規模排出源であるプラントにおいて実証から商用化という手順になる。

CMS の開発手順を CCS のロードマップを参考に作成した。マイルストーンには、日本の地球温暖化対策目標を記載した。IEA と同様、法規制、財源確保および社会的受容性についての広報活動までを考慮し、2020 年までに実証を完了し、商用プラントへの適用を目指すものである。

CMSシステムのロードマップとマイルストーン

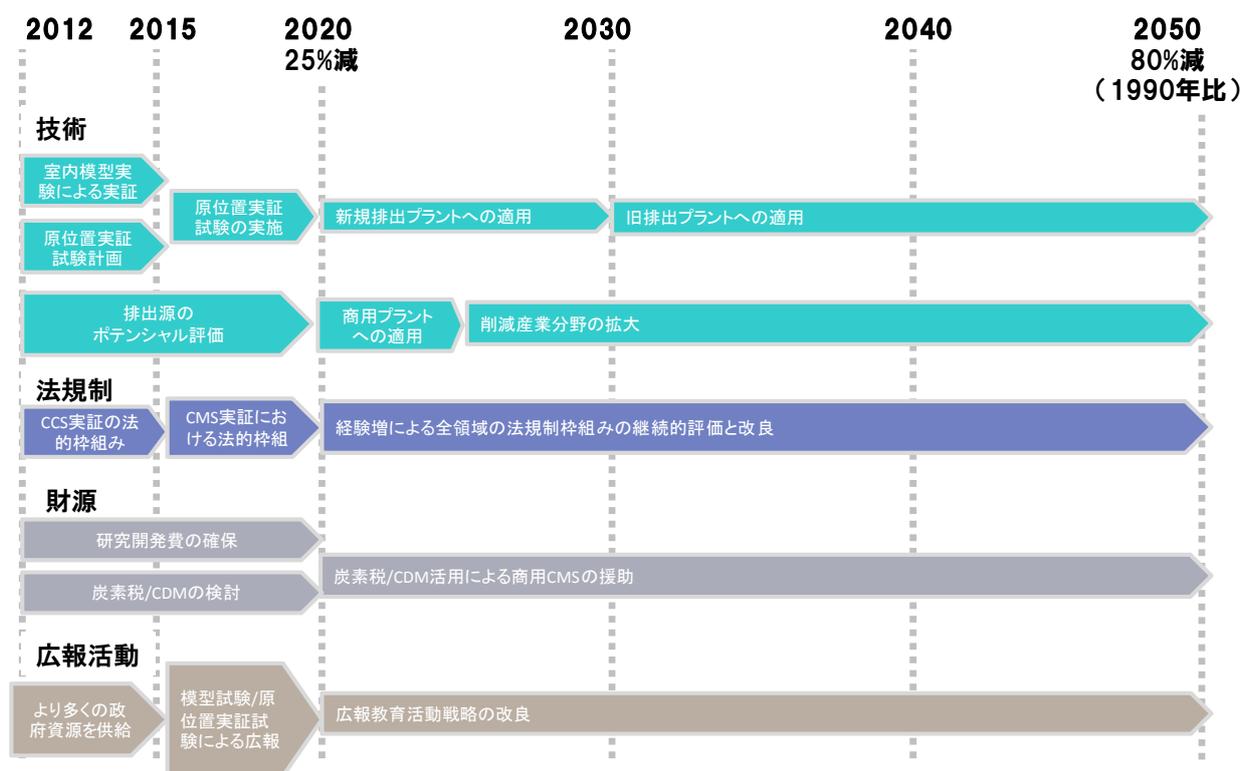


図 5.1.2-1 CMS のロードマップとマイルストーン

5.1 節の参考文献

- 1) 低炭素社会実現へ向けた部門別ロードマップ第一次案、内閣府 参考資料
- 2) (財) 地球環境産業技術研究機構 (RITE) 「二酸化炭素固定化・有効利用技術戦略マップ」(2006年3月)
- 3) IEA : Technology Roadmaps - Carbon Capture and Storage (foldout) 2010
www.iea.org/roadmaps)
- 4) IEA : Technology Roadmap Carbon Capture and Storage in Industrial Applications

5.2 試験計画等の立案

CMS システムは、地下浅部帯水層に CO₂ を溶解水として安定的に貯留できるメリットがあるが、溶解水の地下水環境への影響やひいては生物環境への影響を考慮する必要がある。また、小規模であるが故に、経済的に安価であることが必要であり、地中での MB の生成・注入や将来的には、排ガスの直接注入が望まれる。CMS システムの実現のための課題のうち、以下の検討を優先させることが必要と考える

- ・ 注入井・揚水井併用法式による、地下水の揚水・循環システムの実現性の確認
- ・ 地中でのマイクロバブル化と地中注入の実現性の確認
- ・ 浅部の堆積岩からの CO₂ 漏洩による地下水環境（飲料水）への影響の確認

上記を確認し、一般大衆への理解も求めるのであれば、原位置での CO₂ 注入・貯留実証試験が必要である。しかし、これらの技術は室内においても実証されていないために、室内試験から始め、原位置での小規模実証試験、大規模実証試験という段階的な検討が必要になると考える。

これらを考慮して、5.1 節で示したロードマップの実現のために、大規模な原位置実証試験をできるように室内模型地盤、原位置での小規模な地盤による検証試験を実施していくことを計画した。

その手順を図 5.1-1 に示す。

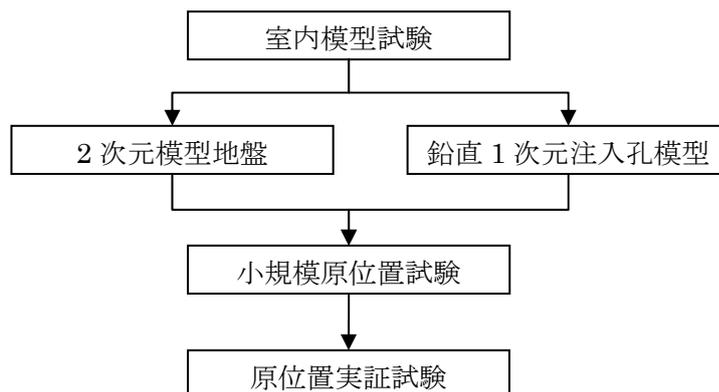


図 5.2-1 ゴール（原位置実証試験）までのステップ

今回、図 5.1.-1 に従い、室内模型試験と小規模原位置実証試験の計画を立案した。CMS システムでは集中型の超臨界 CO₂ 貯留と異なり、大型の模型地盤により CO₂ 溶解水の移動現象を再現することが可能である点が大きな利点となる。この模型試験により実際に低圧力状態での CO₂ 溶解水の移動を可視化して示すことで、PA 対策としての広報活動も実施することが可能と考える。

その上で危険性を伴わない条件で原位置での CO₂ マイクロバブル地中貯留の実証を行う計画を立案した。

これらの試験とは別に実際の圧力下での貯留を想定したマイクロバブルの溶解挙動、およびマイクロバブルそのものの挙動を調べる個別要素試験の実施も不可欠である。

5.2.1 室内模型試験による検証

システムモデルに対する技術的課題や周辺環境への影響などについて検討を進めるにあたり、実際の地盤に注入した場合の CO₂ 溶解水の地中での挙動について把握しておくことは、実用化に向け重要な検討事項である。

室内模型試験では、室内における CMS の模型モデルを作成し、実験によって CO₂ 溶解水の挙動を調べるとともに既存解析コードによるシミュレーションを提案する。そのために、様々な実験ケースでの計測によって、より明確な CMS による CO₂ の挙動を把握して CMS 実用化へ向けた合理的なコントロール手法を整備すること、実験データによるシミュレーション解析を実施して環境への安全性を検証するモニタリング手法を確立することが主な目的である。

以下に抽出された課題を示す。

- ・ マイクロバブルの発生と CO₂ 溶解水およびマイクロバブル溶解水の地中での挙動の確認。
- ・ CO₂ の移流・拡散に伴うキャップロック機能の確認。
- ・ 貯留領域における CO₂ の移動形態。移動範囲を注水・揚水でコントロールする方法とモニタリング方法の確立。
- ・ 排ガスの注入による CO₂ の挙動とその他ガスの挙動把握。

1) CO₂ 溶解水の地中挙動の把握

本 CMS システムは、わが国の地質条件に広く適用可能と見込まれているが、CMS の実施が可能と思われる地域の貯留層およびキャップロックを含むモデル地盤を参考にして、**図 5.2.1-1** に示すような類似する実験モデルを作成する。作成した実験モデルに対して、検証する内容は、以下の通りである。

(1) 層内での CO₂ 溶解水の挙動把握

- ・ CO₂ 溶解水を注入し、pH 指示薬溶液中での移動特性を観察し (**図 5.2.1-2** 参照)、電気伝導度、pH などを計測することでモニタリングの適用可能性を調べる。
- ・ CO₂ 溶解水の注入深度を変化させ、移動挙動を調べる。
- ・ 注入終了後の溶解水の拡散状況を観察、計測し、拡散の影響を調べる。

(2) 注水・揚水併用方式のコントロール方法

- ・ 注水量、揚水量をパラメータとして、キャップロックにかかる過剰間隙水圧を測定し、キャップロックの健全性の検討資料とする。

(3) 注入・揚水併用方式の循環システムの適用性

(4) 既存解析コードによるシミュレーション

- ・ CO₂ 溶解水の注入を二相流問題として解析し、実験結果との比較を行う。

2) マイクロバブル CO₂ 溶解水の地中挙動把握

マイクロバブル化 CO₂ 溶解水の移動特性を調べるため、注入孔において CO₂ マイクロバブルを作成し、溶解水をモデル地盤に注入する。溶解水の直接注入実験と比較し、その特性を明確にする。

(1) マイクロバブル化溶解水の挙動把握

- ・ マイクロバブル化 CO₂ 溶解水を注入し、pH 指示薬溶液中での移動特性を観察、電気伝導度、pHなどを計測することでモニタリングの可能性を調べる。
 - ・ マイクロバブルの挙動を目視およびレーザー光の散乱により観察し、トラップの状態を確認する。
- (2) マイクロバブル化深度の実験的検討
- ・ マイクロバブルを発生する深度を変化させ、その影響を実験的に調べる。
- 3) CMS 貯留システムのリスク把握および対策
- (1) キャップロック漏洩シナリオの設定と漏洩挙動
- ・ キャップロックに強制的に漏洩経路となる不連続面を作成し CO₂ 溶解水を注入、キャップロックからの漏洩量と注入量との関係を調べる。
 - ・ 注入を止めた場合の圧力消散および漏洩量を計測する。
- (2) 地下水成分による自己シール性の検討
- ・ 陽イオンの注入により鉱物化が促進され、自己シール層の形成にかかわることの実証

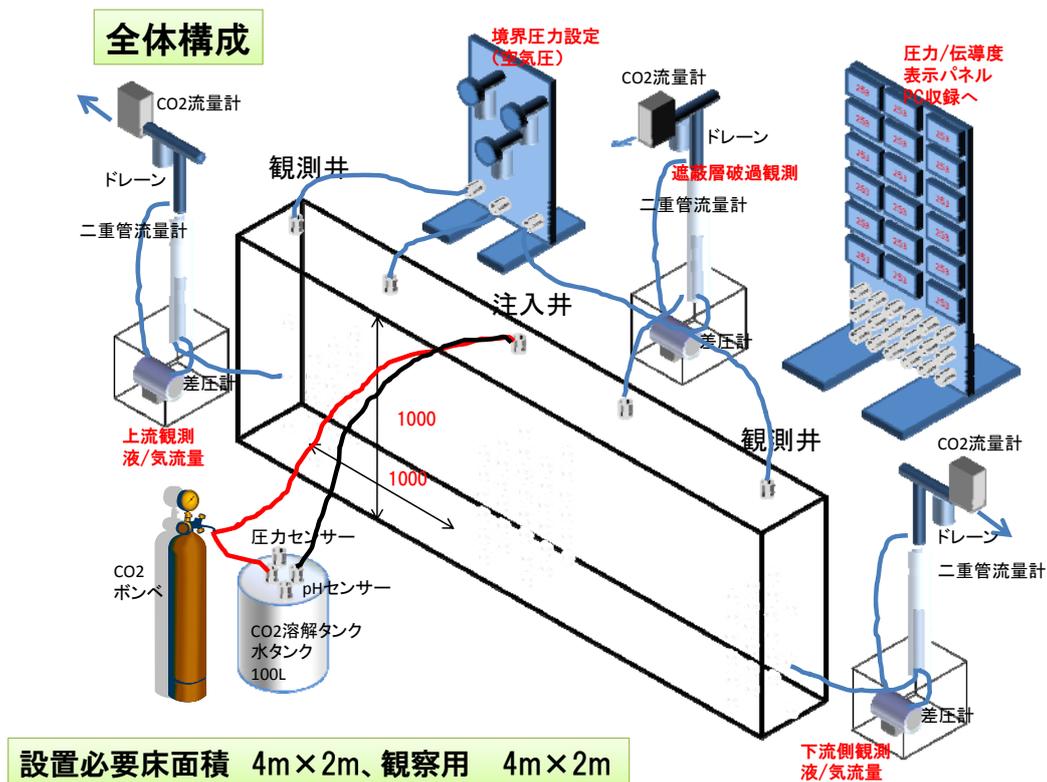


図 5. 2. 1-1 室内模型試験全体構成

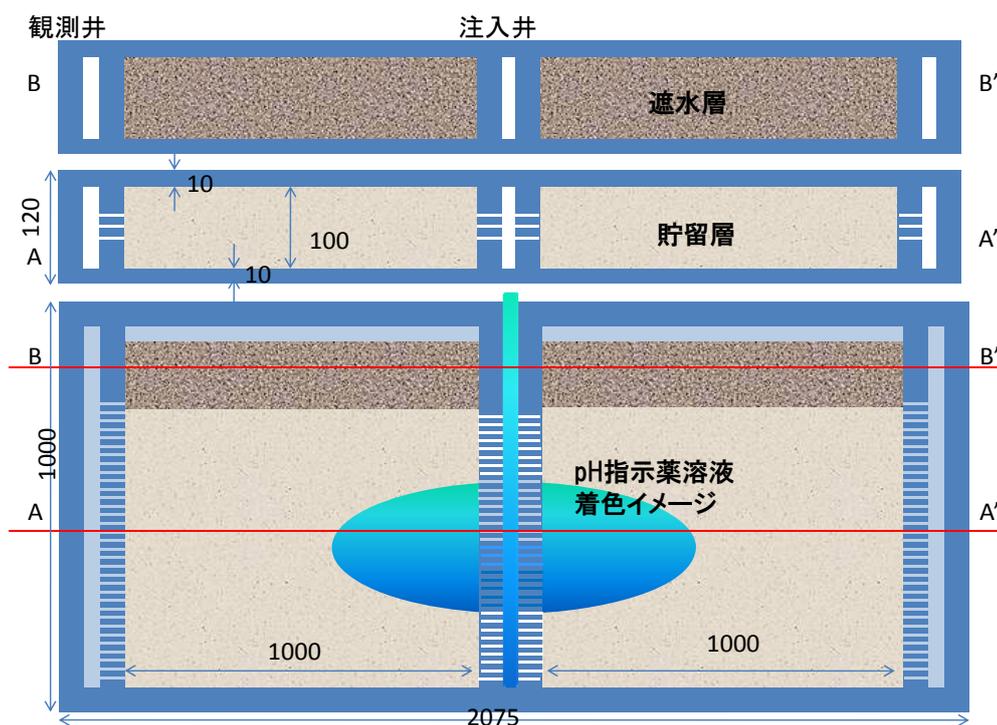


図 5. 2. 1-2 室内模型試験における CO₂ 注入可視化のイメージ

実験上の制約から、以下の点について考慮する。

- ・ 注入圧力は実際より低く、数十 m の水頭差に相当する低圧で実施する。
- ・ pH 指示薬を用いて移行特性を可視化する方法で実験を行う。pH 指示薬による pH 変色範囲、および色分析により CO₂ 濃度分布として十分な変換が可能かについて事前検討を行う必要がある。

これらの実験データを取得してシミュレーションに反映させる。

4) 実験結果の分析

実験結果を分析し、観察、計測結果の評価と挙動の確認を行い、以下の点を明らかにする。

- (1) 均一地盤における CO₂ 溶解水の挙動の確認
- (2) 合理的なシステムコントロール手法の整備
- (3) 効果的なモニタリングシステムの立案

5) 互層モデルにおける CO₂ 溶解水の挙動把握

均一地盤で実施された 1)~4)の実施項目に関して、より実際に近い状態のモデルを作成し、CO₂ 溶解水の挙動を実験的に把握し、解析に反映する。

- (1) 互層モデル地盤における CO₂ 溶解水の挙動を把握する。
- (2) 互層モデル地盤においてマイクロバブル CO₂ 溶解水の挙動を把握する。

(3) モデル地盤内に流動場を作り、その場合の挙動を確認する。

6) 排ガス注入による CO₂ 溶解水の実験的検討

排ガスのマイクロバブル化注入により、CO₂ を溶解水として注入し、他のガスは分離できる可能性について実験的に検討する。実験検討モデルを図 5.2.1-3 に示す。

- (1) 調査結果に基づく割合での混合ガスとして、その溶解特性と不溶ガスの注入孔での分離の可能性についての基礎資料を取得する。
- (2) 混合ガスのマイクロバブル注入による溶解特性の比較を行う。

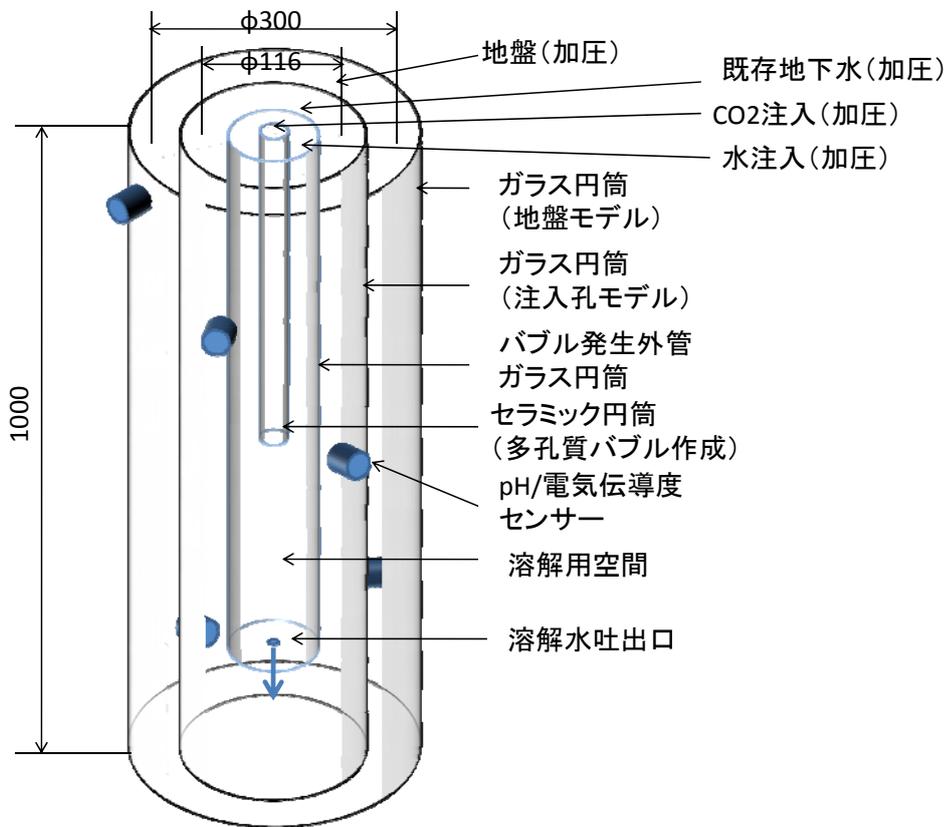


図 5.2.2-3 注入孔周辺モデル

5.2.2 原位置試験による検証

注入・揚水併用方式の管理技術を確認させるための実験計画の概念図を図 5.2.2-1 と図 5.2.2-2 に示す。基本は、CMS システムのミニチュアである。10m 程度の深さの帯水層を対象に CO₂ が漏れた場合に十分な大気拡散が得られるサイトにて実験を行う。

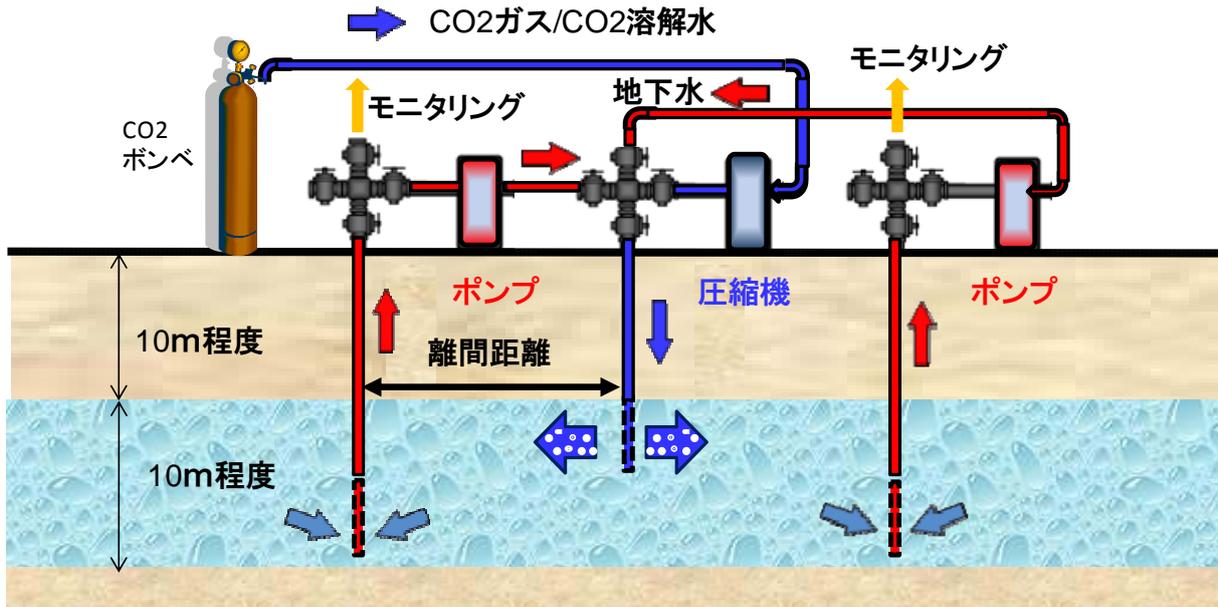


図 5. 2. 2-1 原位置試験概略図 (鉛直断面)

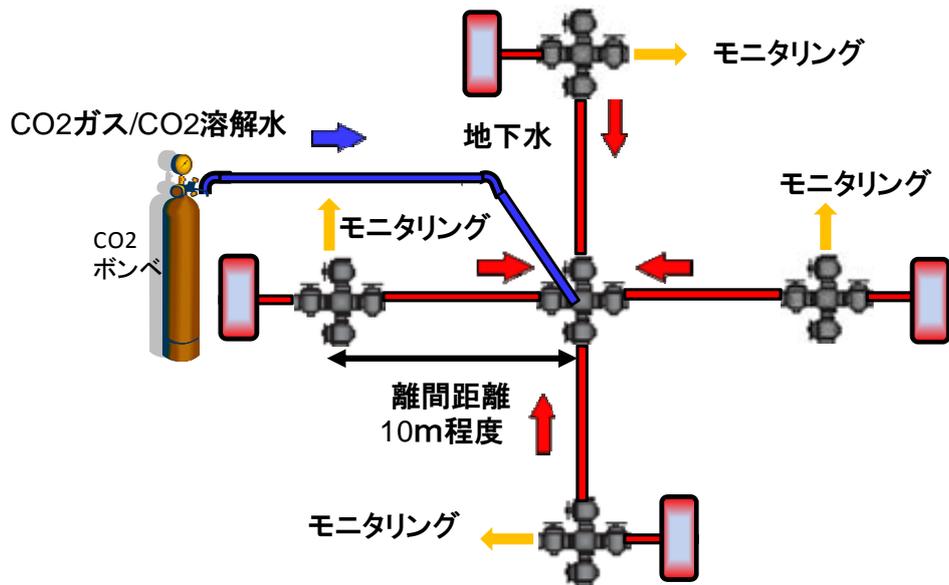


図 5. 2. 2-2 原位置試験概略図 (水平断面)

第6章 まとめ

6.1 CMS システムに関する課題のまとめ

- 1) 今後の溶解特性把握には、マイクロバブルの発生を圧力下で行い、マイクロバブルによる CO₂ 飽和溶液作成までの時間の検証、ミリバブルが圧力下でマイクロバブルとなった場合、どこまで溶解させることができるかの検証が必要である。
マイクロバブルの寿命は数分から数 10 分程度とされているが、間隙構造にトラップされたバブルが数分後に消滅するか、消滅するなら流動障害挙動が現れるのは何故か、などの問題を解決していかなければならない。
- 2) 原位置でのマイクロバブル作成法によっては、1)の課題が解決される可能性があるが、現状の解析においてもバブルの存在は無視している。間隙構造中のバブルの移動は、セメントミルクの注入を参考に考えると、粒径が間隙構造の 1/3 以下であったらそれらが目詰まりを起こす確率が低いということから、作成されるマイクロバブル径が 50 μm 以下であれば、間隙径の最小値が 150 μm 程度の地盤であれば問題がないと考えられる。
- 3) 地中挙動をモニタリングするためには、CO₂ 濃度およびそれに依存する地下水の pH や伝導率を直接計測し、その後も継続してモニタリングしていくことが望ましい。
- 4) CO₂ 溶解水は地下水よりも極僅かに密度が大きいため、地下水流動に従ってほぼ下方に移動する。ただし、流動が上方に向かえば、そのわずかの密度差では流線の方向に従って移動する可能性はある。さらに長期的には拡散する。
注入井・揚水井併用方式では、常に上方の流れを作らないように地下水管理をしていく必要がある。
- 5) 揚水井に高濃度の CO₂ 溶解水が到達し、それを揚水した場合には、急激な CO₂ の気化は当然起こる。これを防ぐには、揚水井で揚水された地下水の水質モニタリングを連続的に実施し、それに基づいた注入・揚水の管理をする必要がある。
- 6) 深度・300m で飽和状態にある CO₂ 溶解水は pH 4 程度の酸性である。そのため、周辺岩石からの有害金属や硫酸塩、塩化物の溶出の可能性はある。
貯留サイトの岩盤における溶出可能元素の特定とその溶出速度について事前に検討、把握することが必要である。また地下水水質のモニタリング項目に有害金属などの飲料水基準を設けておく必要がある。
- 7) キャップロックについては、引張強さを考えると貯留層での条件を満たせば、せん断破壊は生じないが、引張応力が働くことを考えると貯留層との境界ではその大きさは、0.16~0.42MPa（一軸圧縮強度の約 1/6、C の 1/3）となり、上述のように過剰間隙水圧が生じないよう境界から下でケーシングをしておく必要があるかも知れない。
- 8) キャップロックがある場合では、キャップロックより下部で注入すればキャップロックへの過剰間隙水圧の影響は低減され、上部での圧力分布の異方性も緩和されるため効率的である。
- 9) 水平方向に異方性がある場合、同一水位まで揚水するには方向により揚水量が異なるので、水

位のコントロールで制御すると貯留範囲も限られ、揚水量と注水量もバランスしない。そのため、注水井・揚水井併用方式での制御には、透水係数の異方性も考慮した制御が必要である。

6.2 想定モデル地点の選定と CMS 貯留システムのモデル構築

- 1) 排出源と地質条件から B モデル地点を選定した。
- 2) B モデル地点での貯留可能量は、240 万 t-CO₂ と推定された。
- 3) 注入井 1 本揚水井 4 本の 1 貯留ユニットに、4%濃度で溶解させた CO₂ は、注入井-揚水井の離間距離が 200m の場合で 15 万 t-CO₂、300m で 34 万 t-CO₂ 貯留可能である。

6.3 CMS システムの経済性に関する概略検討

- 1) コスト試算では、CMS システムのコストは、4,600~6,100 円/t-CO₂ と試算された。
- 2) スケールメリットがあるため、設備費用に関しては、大規模 CCS の方が安価となるが、輸送コストを考慮すると CMS は同等以上となる。
- 3) CO₂ 削減効果を再生可能エネルギーでの発電による削減効果と比較すると、太陽光発電、マイクロ水力発電、バイオマス発電よりは高く、地熱発電や風力発電よりは低くなる。ただし、この比較は、再生可能エネルギーの売電価格に依存する（ここでは一律 25 円/kWh とした）。

6.4 CMS システムの実用化に向けた検討

- 1) 内閣府、RITE、IRA の CCS に関するロードマップを参考に、CMS システムのロードマップを作成した。2020 年までに室内、原位置での研究開発を終了し、実用化を目指すものとした。
- 2) 実用化のため、安全性および社会的受容性を得るための室内模型試験および原位置実証試験の立案を行った。

付録：略語表

| | |
|-----------------------------|---|
| <p>Additionality</p> | <p>追加性とは、提案されたプロジェクトの排出量が、「当該プロジェクト活動が存在しなかった場合」と比較して追加的に削減されることを意味する。CDM プロジェクト実施者は、個別プロジェクトごとに追加性を立証しなければならない。</p> <p>『追加性の証明と評価のためのツール (Tool for the demonstration and assessment of additionality)』</p> |
| <p>AE</p> | <p>AE:申請書を提出した組織を AE(Applicant Entity: 申請組織)と呼ぶが、CDM 理事会によって認定(Accreditation)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 登録料は、PDD で記載された年間平均排出削減量に、以下の割合を乗じることで計算される。 <ul style="list-style-type: none"> (a) 最初の CO₂ 換算 15,000 ton- CO₂ については CER 当たり US\$ 0.1 (10 セント) (b) CO₂ 換算 15,000 ton- CO₂ を超える部分については CER 当たり US\$ 0.2 (20 セント) - 例えば、PDD で記載された年間平均排出削減量が 50,000 ton- CO₂ の CDM プロジェクトの登録料は、US\$ 8,500 となり、100,000 ton- CO₂ である CDM プロジェクトの登録料は、US\$ 18,500 となる。 - 但し、登録料には上限が決められており、最大で US\$ 350,000 となっている。また、年間平均排出削減量が 15,000 ton- CO₂ 未満の場合には、登録料がかからない。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 払い込まれた登録料は、後日、CER の発行にかかる事務的経費の SOP から控除される。言い換えれば、登録料は、事務的経費の収益分担金の“前払い”と考えることができる。もしプロジェクト活動が登録されなかった場合には、US\$ 30,000 までしか払い戻されない。 |
| <p>AM</p> | <p>Approved Methodology : 承認された方法論 廃棄物処分場から発生するメタンを回収するプロジェクト (回収したメタンを利用して発電する場合も含む) であれば、AM0002、AM0003、AM0010、AM0011 の4つの承認方法論が存在する。</p> <p>承認された統合化方法論 (Approved Consolidated Methodology : ACM) 4つの方法論の内容を含んだ一つの方法論を作成した。これが ACM0001 であり、統合化方法論と呼ばれるものである。統合化方法論は、ベースとなった承認方法論 (Approved methodology) を包含する形で作成されるので、自ずと適用範囲の広い方法論となる。</p> <p>「ユニラテラル (Unilateral)」とは、英語で「一方的な」という意味である。通常の CDM プロジェクトでは、附属書 I 国 (投資国) と非附属書 I 国 (ホスト国) の双方の企業がプロジェクトに参加するのに対して、非附属書 I 国 (ホスト国) 企業のみで実施されるプロジェクトを「ユニラテラル CDM」と言う。</p> |
| <p>Baseline</p> | <p>ベースラインとは、当該 CDM プロジェクト活動が存在しなかった場合に、生じていたであろう温室効果ガスの排出状況を予想するものであり、CDM における最重要概念で</p> |

| | |
|------------|---|
| | <p>ある。ベースラインと、プロジェクトの実施による実際の温室効果ガス排出量との差分が、クレジットとして発行されることになるため、ベースラインの設定方法は極めて重要となっている。ベースラインの設定には、CDM 理事会によって既に承認された方法論 2 を用いるか、新たな方法論をプロジェクト実施事業者が提案する。</p> |
| <p>CDM</p> | <p>Clean Development Mechanism：クリーン開発メカニズム（京都議定書 12 条） 先進国と途上国が共同で事業を実施し、その削減分を投資国（先進国）が自国の目標達成に利用できる制度</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆先進国が発展途上国と協力してプロジェクトを行い、その結果生じた排出削減量（または吸収増大量）に基づいて発行されたクレジットをプロジェクト参加者間で分け合うこと。 <ul style="list-style-type: none"> ・ CER は排出枠として活用可能 ・ クレジット名は CER （ Certified Emission Reduction ） ・ プロジェクトを実施する先進国 A を投資国、プロジェクトが行われる途上国 B をホスト国という ◆結果として、先進国の総排出枠の量が増大します。そのため、クレジット発行に際して審査が厳格になる。 第三者認証機関の指定運営組織（DOE）が、CDM プロジェクトがホスト国の「持続可能な開発」に寄与しているか、適正に温室効果ガスを削減するかなど CDM プロジェクトの的確性を審査する。 ◆2000 年にさかのぼってクレジットの取得が可能。 認証された排出削減量（Certified Emission Reduction：CER） CDM プロジェクトの基本的流れ CDM プロジェクトを行おうとする事業者が、最終的に CER を取得するまでには、諸々のステップを踏んで、DOE、CDM 理事会の審査を受ける必要がある。詳細は後述するが、投資国、ホスト国による CDM プロジェクトの承認、DOE の選定、地元関係者からのコメント及び環境影響評価の実施、プロジェクト設計書（Project Design Document：PDD）の提出、DOE による有効化審査、CDM 理事会による登録、CDM 実施事業者によるモニタリング、DOE による検証及び認証、CDM 理事会による CER の発行という一連のプロセスを踏まなければならない。また、CDM プロジェクトの登録や CER の発行の際には、国連に対して手数料を払う必要がある。 小規模 CDM プロジェクトの場合には、CDM の準備・実施のための取引費用（Transaction cost）を低減するために、以下のような簡素化された方法・手続きが認められている。 <ul style="list-style-type: none"> ・ PDD フォーマットが簡素化されている（大規模 CDM プロジェクトとは別のフォーマット） ・ 簡素化された方法論が利用可能である |

| | |
|------|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> ・ バンドリング 4 が認められている（但し、COP/MOP1 で大規模プロジェクトもバンドリングが可能になった） ・ 環境影響分析が簡素化されている ・ 登録費用と SOP が低く抑えられている |
| CER | 認証された排出削減量（Certified Emission Reduction : CER） |
| CFC | CFC（クロロフルオロカーボン フロン的一种） |
| HCFC | HCFC（ハイドロクロロフルオロカーボン） - 2 2 |
| CMP | 京都議定書締約国会合:条約の最高機関である COP（Conference of the Parties）が、京都議定書の締約国会合（MOP : meeting of the Parties）としての役割を果たす。この場合を CMP と呼ぶ。 |
| CMS | CO2 Microbubble Storage System（CO2 マイクロバブル地中貯留） |
| COP | <p>Conference of the Parties : 締約国会議</p> <p>気候変動枠組条約の条約事務局は、ドイツのボンにある。</p> <p>この条約の交渉会議には、最高意思決定機関である気候変動枠組条約締約国会議（Conference of the Parties、COP）のほか、常設の補助機関（SB）に、実施に関する補助機関（SBI）と、科学的、技術的な助言に関する補助機関（SBSTA）がある。</p> <p>締約国会議は、毎年開催されている。</p> <p>1997年12月に開催された第3回締約国会議（COP3、京都会議）においては、2000年以降の取り組みについての規定が不十分であるとして、法的拘束力のある数値目標を定める京都議定書が採択された。2007年12月3日にオーストラリアが京都議定書に調印、批准したため、先進国で京都議定書に批准していないのはアメリカ合衆国だけとなった。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.第1回締約国会議（COP1） 1995年 12/15 - 12/17 ドイツ ベルリン 2.第2回締約国会議（COP2） 1996年 07/08 - 07/19 スイス ジュネーヴ 3.第3回締約国会議（COP3） 1997年 12/01 - 12/10 日本 京都 <p>温室効果ガスの削減目標を定める「京都議定書」を採択。</p> <ol style="list-style-type: none"> 4.第4回締約国会議（COP4） 1998年 11/02 - 11/13 アルゼンチン ブエノスアイレス <p>京都議定書の早期発効を目指す「ブエノスアイレス行動計画」を採択。</p> <ol style="list-style-type: none"> 5.第5回締約国会議（COP5） 1999年 10/25 - 11/05 ドイツ ボン 6.第6回締約国会議（COP6） 2000年 11/13 - 11/24 オランダ ハーグ 7.第6回締約国会議（COP6） 2001年 07/16 - 07/27 ドイツ ボン（再会合） 8.第7回締約国会議（COP7） 2001年 10/29 - 11/10 モロッコ マラケシュ 9.第8回締約国会議（COP8） 2002年 10/23 - 11/01 インド ニューデリー <p>京都議定書の未批准国に対し、批准を強く求める「デリー宣言」を採択。</p> <ol style="list-style-type: none"> 10.第9回締約国会議（COP9） 2003年 12/01 - 12/12 イタリア ミラノ 11.第10回締約国会議（COP10） 2004年 12/06 - 12/17 アルゼンチン ブエノスアイレス 12.第11回締約国会議（COP11） 2005年 11/28 - 12/09 カナダ モントリオール |

| | |
|------|---|
| | <p>13.第12回締約国会議 (COP12) 2006年 11/06 - 11/17 ケニア ナイロビ</p> <p>14.第13回締約国会議 (COP13) 2007年 12/03 - 12/14 インドネシア バリ</p> <p>15.第14回締約国会議 (COP14) 2008年 12/01 - 12/12 ポーランド ポズナニ</p> <p>16.第15回締約国会議 (COP15) 2009年 12/07 - 12/18 デンマーク コペンハーゲン</p> <p>17.第16回締約国会議 (COP16) 2010年 11/29 - 12/11 メキシコ カンクン</p> <p>18.第17回締約国会議 (COP17) 2011年 11/28 - 12/11 南アフリカ ダーバン</p> |
| DNA | Designated National Authorities : 非附属書 I 締約国で指定国家機関 |
| DOE | DOE (Designated Operational Entity : 指定運営組織) とは、CDM プロジェクトを審査する第三者審査機関である。申請書を提出した組織を AE (Applicant Entity : 申請組織) と呼ぶが、CDM 理事会によって認定 (Accreditation) を受け、COP/MOP によって指定 (Designation) を受けることで、DOE となる。 |
| EB | Executive Board |
| GWP | Global-Warming Potential : 地球温暖化係数 |
| IGCC | Integrated coal Gasification Combined Cycle : 石炭ガス化複合発電 |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change : 気候変動に関する政府間パネル |
| JI | <p>京都メカニズムには、議定書第 6 条に基づく共同実施 (Joint Implementation : JI)、議定書 12 条に基づくクリーン開発メカニズム (Clean Development Mechanism : CDM)、議定書 17 条に基づく排出量取引の 3 つがあり、それぞれの概要は以下のとおりである。</p> <p>① JI</p> <p>附属書 I 国間で省エネプロジェクト等を共同で実施し、当該プロジェクトから得られる温室効果ガスの追加的削減量の全部又は一部をクレジットとして当事者間の合意に基づき移転する仕組み。JI を通じて発行されたクレジットを ERU という。</p> <p>② CDM</p> <p>非附属書 I 国において附属書 I 国が省エネプロジェクト等を実施し、当該プロジェクトから得られる温室効果ガスの追加的削減量または吸収量を第三者機関が認証してクレジットを発行し、その全部又は一部を当事者間の合意によって、移転する仕組み。排出削減の CDM を通じて発行されたクレジットを CER という。</p> <p>③排出量取引</p> <p>附属書 I 国間で初期割当量の一部や JI、CDM を通じて獲得したクレジットを売買する仕組み。</p> |
| MOP | Meeting of the Parties : 京都議定書の締約国会合 |
| NGCC | Natural Gas Combined Cycle ; 天然ガス複合発電 |
| PC | Pulverized Coal : 微粉炭焚き火力発電 |
| PDD | <p>PDD:プロジェクト設計書 (Project Design Document : PDD)</p> <p>PDD とは、プロジェクトの概要を記載した文書のことで、①ベースライン、②追加性の証明、③モニタリング等の内容を含む必要がある。CDM 実施事業者は、PDD と呼ばれ</p> |

| | |
|-------|--|
| | <p>る国連フォーマットに沿った計画書を作成しなければならない</p> <p>①ベースラインとは、当該 CDM プロジェクト活動が存在しなかった場合に、生じていたであろう温室効果ガスの排出状況を予想するものであり、CDM における最重要概念である。ベースラインと、プロジェクトの実施による実際の温室効果ガス排出量との差分が、クレジットとして発行されることになるため、ベースラインの設定方法は極めて重要となっている。ベースラインの設定には、CDM 理事会によって既に承認された方法論 2 を用いるか、新たな方法論をプロジェクト実施事業者が提案する。</p> <p>②追加性とは、提案されたプロジェクトの排出量が、「当該プロジェクト活動が存在しなかった場合」と比較して追加的に削減されることを意味する。CDM プロジェクト実施者は、個別プロジェクトごとに追加性を立証しなければならない。</p> <p>③モニタリングとは、プロジェクトの実施に伴う実際の排出量を計測・評価することである。ベースラインとモニタリングを通じて計測された実際の排出量との差分が CER の発行につながるため、ベースライン設定と並び、モニタリングの厳密な実施も極めて重要となっている。モニタリング計画の策定には、ベースラインと同様、既に CDM 理事会で承認した方法論 3 を用いることが求められる。</p> <p>CDM 実施事業者は、これを DOE に提出し、当該 DOE の有効化審査を受ける必要がある。</p> <p>CDM プロジェクトは、その規模によって、大規模 CDM プロジェクト (Large-scale CDM project) と小規模 CDM プロジェクト (Small-scale CDM project) とに区分されている。大規模 CDM プロジェクトは、小規模 CDM プロジェクトに該当しないものである。</p> <p>小規模 CDM プロジェクトには、以下の 4 つのタイプが認められている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 最大発電容量 15MW 以下の再生可能エネルギープロジェクト ・ 年間 15GWh 相当までのエネルギー消費削減となるエネルギー効率改善プロジェクト ・ プロジェクト活動による直接排出量が年間 15,000ton- CO₂ 未満であり、排出源による人為的排出削減を行うその他のプロジェクト ・ 吸収量が年間 8,000ton- CO₂ 以下の新規植林・再植林プロジェクト <p>小規模プロジェクトは、通常の CDM プロジェクトと比較して、ベースラインの設定やモニタリングの実施、CDM 実施プロセス等に関して、簡易な手続きが適用される。</p> |
| SB | <p>国連気候変動枠組み条約(UNFCCC)補助機関(SB=Subsidiary Body)第24回会合(SB24)は、ドイツ・ボン市で平成 18 年 5 月 18 日～26 日に開催された。わが国政府代表団としては、外務省、文部科学省、農林水産省、経済産業省、国土交通省、環境省、および関連機関から、40 名が参加した。小職は、文部科学省参与として、SB の分科会であり、実施に関する補助機関 (SBI=SB for Implementation)とともに SB を構成する。</p> |
| SBSTA | <p>科学上及び技術上の補助機関(SBSTA=SB for Scientific and Technological Advice)</p> |

| | |
|-------------|--|
| SOP | <p>収益分担金 (SOP: Share of Proceeds)</p> <p>①事務局の手続き費用</p> <p>COP/MOP1 において、CDM 運営のための事務的費用として課されるレベルが決定されている。</p> <p>(a) 毎年最初の CO2 換算 15000 ton-CO2 については CER 当たり US\$0.1 (10 セント)</p> <p>(b) CO2 換算 15,000 ton-CO2 を超える部分については CER 当たり US\$0.2 (20 セント)</p> <p>* 登録料は、この事務的費用のための収益分担金から、差し引かれることとなっている。</p> <p>②適応支援のための費用</p> <p>発行された CER の 2% が、気候変動の悪影響に対し、特に脆弱な開発途上締約国の適応費用を支援するために使用される。</p> |
| UNFCCC C | <p>UNFCCC:気候変動枠組条約</p> <p>気候変動枠組条約(正式名称:気候変動に関する国際連合枠組条約、英語:United Nations Framework Convention on Climate Change、略称:UNFCCC、FCCC)は、地球温暖化問題に対する国際的な枠組みを設定した条約。国連気候変動枠組条約、地球温暖化防止条約、温暖化防止条約ともいう。</p> <p>大気中の温室効果ガス(二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素[亜酸化窒素:N₂O]など、HFCs、PFCs、SF₆)の増加が地球を温暖化し、自然の生態系などに悪影響を及ぼすおそれがあることを、人類共通の関心事であると確認し、大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させ、現在および将来の気候を保護することを目的とする。気候変動がもたらすさまざまな悪影響を防止するための取り組みの原則、措置などを定めている。</p> <p>世界の動向</p> <p>1992年5月9日・ニューヨークで作成。</p> <p>1992年6月・リオ・デ・ジャネイロで開かれた環境と開発に関する国際連合会議(UNCED、地球サミット)で採択され、署名のために開放、155か国が署名。</p> <p>1994年3月21日・発効。</p> <p>2003年12月時点で、187か国および欧州共同体(EC)が締結している。</p> <p>日本の動向</p> <p>1992年・署名。</p> <p>1993年5月14日・国会で承認され、批准。</p> <p>1993年5月28日・受諾書を寄託。</p> <p>1994年3月21日・効力発生。</p> <p>1994年6月21日・公布(条約第6号)。</p> <p>2008年4月1日・京都議定書の約束期間開始(2012年まで)。</p> <p>特色</p> <p>この条約は、前文および26か条と2つの附属書から成る。枠組条約方式が採用され、具</p> |

体的な規制措置等を規定する議定書の採択が予定されている。

内容

気候変動枠組条約では、

1. 締約国の共通だが、差異のある責任
2. 開発途上締約国等の国別事情の勘案
3. 速やかかつ有効な予防措置の実施

などの原則のもと、先進締約国（「条約の附属書締約国」と呼ばれ、ロシア、旧東欧諸国を含む）に対し、温室効果ガス削減のための政策の実施などの義務が課せられている。

具体的には、附属書締約国に対して、1990年代末までに温室効果ガスの排出量を1990年の水準に戻すことを目指していくこと（そのための政策措置をとり、その効果の予測などを締約国会議に通報し、審査を受けること）、また、開発途上国に気候変動に関する資金援助や技術移転などを実施することを求めている。

附属書 I 国、附属書 II 国、発展途上国

気候変動枠組条約の締約国は、以下のように分類される。

附属書 I 国（先進国および経済移行国）

附属書 II 国（先進国）

発展途上国

附属書 I 国

オーストラリア、オーストリア、ベラルーシ、ベルギー、ブルガリア、カナダ、クロアチア、チェコ、デンマーク、エストニア、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、ハンガリー、アイスランド、アイルランド、イタリア、日本、ラトビア、リヒテンシュタイン、リトアニア、ルクセンブルク、モナコ、オランダ、ニュージーランド、ノルウェー、ポーランド、ポルトガル、ルーマニア、ロシア、スロバキア、スロベニア、スペイン、スウェーデン、スイス、トルコ、ウクライナ、イギリス、アメリカ合衆国、以上 40 か国と欧州連合。

附属書 II 国

オーストラリア、オーストリア、ベルギー、カナダ、デンマーク、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、アイスランド、アイルランド、イタリア、日本、ルクセンブルク、オランダ、ニュージーランド、ノルウェー、ポルトガル、スペイン、スウェーデン、スイス、イギリス、アメリカ合衆国、以上 23 か国と欧州連合。トルコも当初含まれていたが、2001年に経済移行国と認められ除外された。

書名 平成 23 年度 CO₂ マイクロバブル地中貯留の成立性に関する
調査研究報告書

発行 平成 24 年 3 月 31 日

一般財団法人 エンジニアリング協会

地下開発利用研究センター

(G E C : Geo-space Engineering Center)

〒105-0001 東京都港区虎ノ門三丁目 18 番 19 号

虎ノ門マリビル 10 階

TEL 03 (5405) 7203 FAX 03 (5405) 8201

印刷 邦美印刷株式会社