

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研究
報 告 書

平成 23 年3月

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

KEIRIN



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

<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、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が、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。

政府は、2009年9月に二酸化炭素を2020年までに1990年比25%削減し、温室効果ガス排出量を大幅に抑制すると表明しました。地球温暖化防止に向けた技術開発は、火急にあると言って過言ではありません。二酸化炭素を削減するための具体的な手法は、様々ありますが、その中でも二酸化炭素地中貯留技術については、国内外でも注目されている技術の一つであります。ところが、そのコストは、6,000～7,000円/t-CO₂と言われ、実用化するまでにコストダウンを図ることが課題となっています。

また、大規模な排出源近傍での二酸化炭素地中貯留は、大量の二酸化炭素を圧入することでコストダウンを図れる長所があるものの、小規模排出源近傍からの二酸化炭素地中貯留は、輸送コスト負担が大きくなるという短所を有しているのが実情です。また、排ガスからCO₂を分離回収する技術が、大部分のコストを占めていますが、圧入コストや輸送コストについてもコストダウンを求められています。

マイクロバブルは、二酸化炭素を溶解する特性を持っており、マイクロバブルによる二酸化炭素地中貯留技術は、CO₂を比較的浅い塩水帯水層に貯留することが可能で、沿岸地域に点在する中小規模排出源に対応可能であり、分離回収・圧入・運搬などのコスト削減が見込まれる斬新な技術です。このような背景から、「マイクロバブル」を活用する二酸化炭素地中貯留技術に着目したものです。

本調査研究では、マイクロバブルによって排ガスを直接地中貯留するシステムを含め、マイクロバブルによる比較的深度の浅い地層に地中貯留できるシステムの概念をまとめ、システムモデルを構築し、そのシステムを可能にする地層と地域を選定し、その可能性を追求したもので、実用化に向け、このシステムにかかわる技術的課題を抽出して整理したものです。マイクロバブルを活用する二酸化炭素地中貯留においては、新たなコストダウンできる手法として画期的な技術であることも判明するなど、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23年3月

財団法人エンジニアリング振興協会
会 長 増 田 信 行

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研究
委員名簿

委 員 長	當 舍 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 博士(工学)
委 員	駒 田 広 也	(財)電力中央研究所 研究顧問
委 員	海江田秀志	(財)電力中央研究所 研究顧問 地球工学研究所 地圏科学領域 上席研究員 博士(工学)
委 員	石 島 洋 二	(財)北海道科学技術総合振興センター 幌延地圏環境研究所(幌延ライズ)所長 博士(工学)
委 員	平 松 晋 一	応用地質(株) エネルギー事業部 執行役員 事業部長
委 員	松 田 隆	(株)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) 代表取締役社長
委 員	中 西 繁 隆	電源開発(株) 火力エンジニアリング部 部長代理
事 務 局	三井田英明	(財)エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 技術開発第一部 研究主幹
委 員	佐 藤 一 浩	(財)エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 技術開発第一部 研究主幹

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研究
作業部会 委員名簿

委 員 長	鈴木健一郎	(株)大林組 技術本部 技術研究所 地盤技術研究部 上席研究員
委 員	松下 典史	応用地質(株) エネルギー事業部技術部 グループリーダー
委 員	下山 真人	(株)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
委 員	人見 尚	(株)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
委 員	笹倉 剛	鹿島建設(株) 技術研究所地下水・地盤環境グループ 上席研究員
委 員	山本 高司	川崎地質(株) 本社 技術本部 技術統括部 部長
委 員	堀川 滋雄	サンコーコンサルタント(株) 地盤調査・防災部 副部長
委 員	中野 勝志	大成基礎設計(株) 技術研究所 資源エネルギー事業部 事業部長
委 員	小川 豊和	大成建設(株) 技術センター土木技術研究所 地盤・岩盤研究室 岩盤チーム 主任研究員
委 員	稲葉 薫	(株)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
委 員	志田原 巧	(株)ニュージェック 国内事業本部 技師長
事 務 局	三井田英明	(財)エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 技術開発第一部 研究主幹
事 務 局	佐藤 一浩	(財)エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 技術開発第一部 研究主幹

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研究

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
第 2 章 貯留概念の整理とシステム概念の検討	7
2.1 情報収集とマイクロバブルの特性の整理	7
2.1.1 マイクロバブルの特性	7
2.1.2 CO ₂ の性質	22
2.1.3 既往の CO ₂ 貯留方式	39
2.1.4 まとめ	40
2.2 貯留システム概念の構築	43
2.2.1 基本コンセプト	43
2.2.2 基本シナリオの検討	43
2.2.3 深部塩水帯水層貯留との比較	52
2.3 技術的に貯留が成立する地質条件の整理	55
2.3.1 地質条件の設定	55
2.3.2 貯留深度・地質構造の考え方	57
2.3.3 貯留可能領域の検討	58
2.3.4 重要なパラメータの設定	63
2.3.5 貯留可能領域の評価法	66
2.4 貯留概念のまとめ	71
第 3 章 CMS 貯留システムのモデル構築	73
3.1 想定モデル地点での貯留可能量の評価	73
3.1.1 モデル地点の選定	73
3.1.2 A 地域の地質概要	73
3.1.3 A 地域の貯留可能領域と貯留可能量	80
3.2 CO ₂ ガス注入方法・位置の検討	85
3.2.1 ガス注入方法	85
3.2.2 地下環境条件に応じた溶解度の変化	85
3.2.3 効率的注入深度	87

3.2.4	排ガス注入の検討	89
3.3	物理・力学特性による貯留可能範囲の検討	99
3.3.1	貯留サイトの検討	99
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	105
3.3.3	貯留範囲の設定	112
3.3.4	貯留システムのレイアウトの検討	115
第4章	まとめと課題	117
4.1	まとめ	117
4.2	課題の整理	118
4.3	技術的成立性の課題	119
4.4	経済性・安全性の検討準備	120
4.4.1	経済性について	120
4.4.2	安全性に関する課題	122

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。CCS は、現在、排ガスから回収した CO₂ を、GL-800m 以深の遮蔽層下位の貯留層(砂層など)に、超臨界状態で圧入し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っているのが現状である。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。CO₂ を地下水に溶解すると、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 溶解水を地表で作成して注入するのでは、多量の水を必要とするため、非常に非効率である。排ガスを対象として、CO₂ を安定に貯留できれば、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。

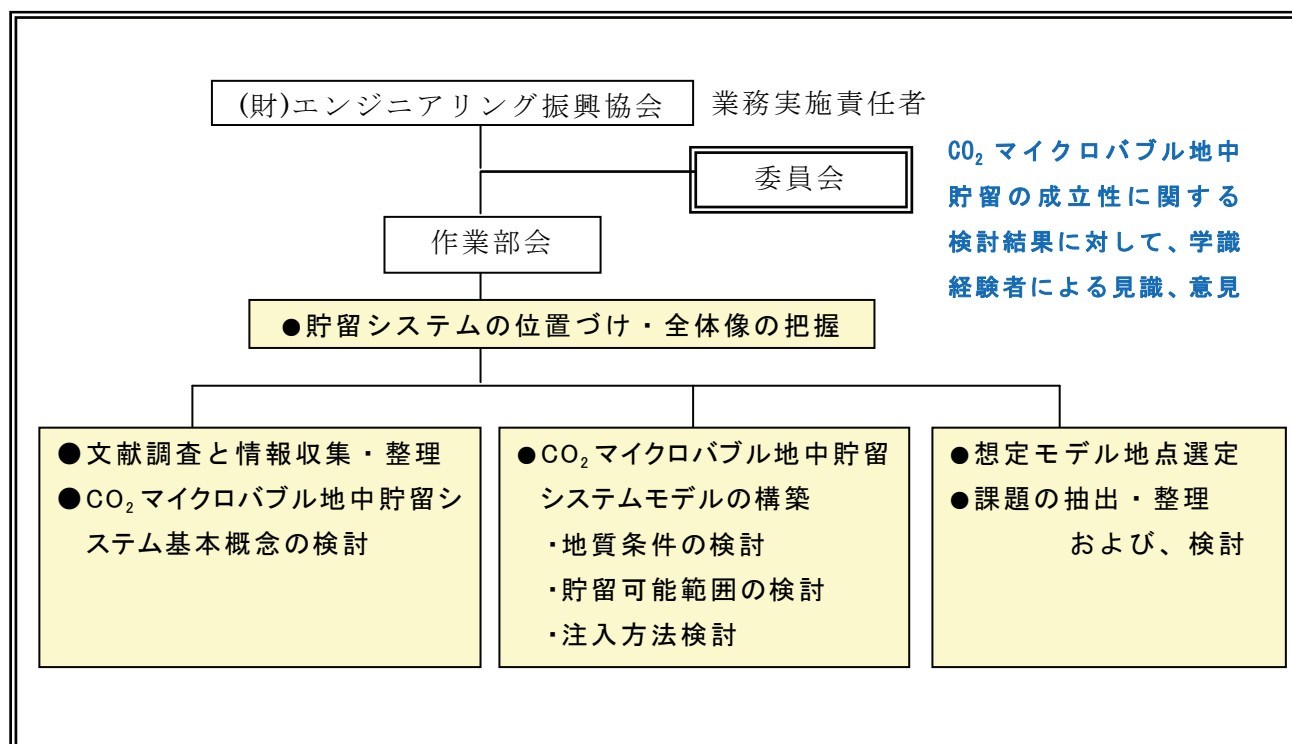
本調査研究は、地下水に溶解しやすいマイクロバブルの特性を活かし、既往の深部塩水帯水層貯留に対し、CO₂ をマイクロバブル化することによって地中貯留する概念の成立性に関する調査研究をしたものである。特に安全性と経済性に関して留意した検討を進めた。

本年度は、マイクロバブル地中貯留に関する資料を収集整理し、マイクロバブルによる貯留システム概念の検討から CO₂ マイクロバブル地中貯留のモデルを構築して成立性を検討したものである。

また、本調査研究の成立性を図るための経済性検討の準備として、環境面への影響や技術的課題を整理してまとめた。

1.2 調査研究の進め方

・実施体制は以下のとおり。



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。

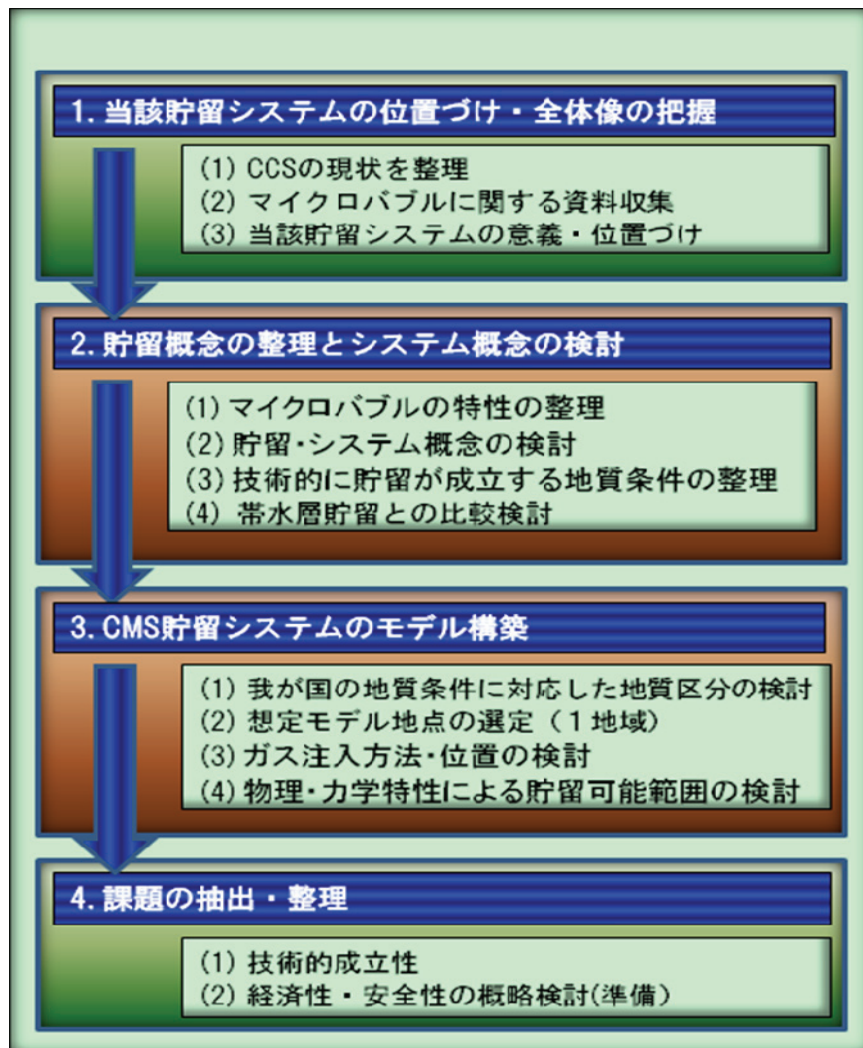


図 1.3-1

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22年6月24日(木)	1. 実施計画書 2. 作業部会の設置
第2回委員会	平成22年11月18日(木)	1. 中間成果報告
第3回委員会	平成23年2月9日(水)	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、7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。作業部会の開催回数は、平成22年7月から平成23年3月まで計15回開催して検討した。

表 1.3-2 実施工程表

	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月
1.当該貯留システムの位置づけ・全体像の把握									
(1)CCSの現状の整理									
(2)マイクロバブルに関する資料収集									
(3)当該貯留システムの意義・位置づけ									
2.貯留概念の整理とシステム概念の検討									
(1)マイクロバブルの特性の整理									
(2)貯留・システム概念の検討									
(3)技術的に貯留が成立する地質条件の整理									
(4)帯水層貯留との比較検討									
3.CMS貯留システムのモデル構築									
(1)我が国の地質条件に対応した地質区分の検討									
(2)想定モデル地点の選定(1地域)									
(3)ガス注入方法・位置の検討									
(4)物理・力学特性による貯留可能範囲の検討									
4.課題の抽出・整理									
(1)技術的成立性									
(2)経済性・安全性の概略検討(準備)									

1.3.1 貯留概念の整理とシステム概念の検討

マイクロバブルの特性や、貯留概念、システム概念に関して、既往の研究事例や検討事例を調査した。また、マイクロバブルによる地中貯留・システム概念について、既往の帯水層貯留技術などと比較しながら、その特徴を整理した。

1) 文献調査

文献調査については、①マイクロバブルや CO₂ の特性の文献調査、②既往の CO₂ 地中貯留方式や CO₂ マイクロバブル地中貯留システムに関する文献調査などを行った。

2) CO₂ マイクロバブル地中貯留の概念の検討

文献・資料の調査結果などから、マイクロバブルによる CO₂ 貯留概念を整理してまとめるとともに、基本的な貯留構想を立案した。

- ①マイクロバブル化することで急速に溶解することを前提とする。また、CO₂ 溶解水は地下水より重く、浮力による上方への漏えいリスクが小さくなる。
- ②かん水を汲み上げ地下に再注入し、地下の圧力や化学成分を極力変えない、注入井・揚水井併用方式を主体に考える。
- ③長期的にはイオン化や岩石との反応による炭酸塩化、微生物固定などの高度固定の促進が期待できる。
- ④マイクロバブル化による注入 CO₂ の全溶解（または飽和に達する溶解）を基本とする。

マイクロバブルは原則的に地盤中に浸透しない。しかし現実には、マイクロバブルや大口径気泡浸透の可能性がある。

- ⑤大きな浮力の働くプリュームを作らないのでキャップロックは不要だが、安全性を考慮して、遮蔽層の存在するサイトを推奨する。

CO₂マイクロバブル地中貯留システムの貯留フロー概念を、図 1.3-2、図 1.3-3 に示す。

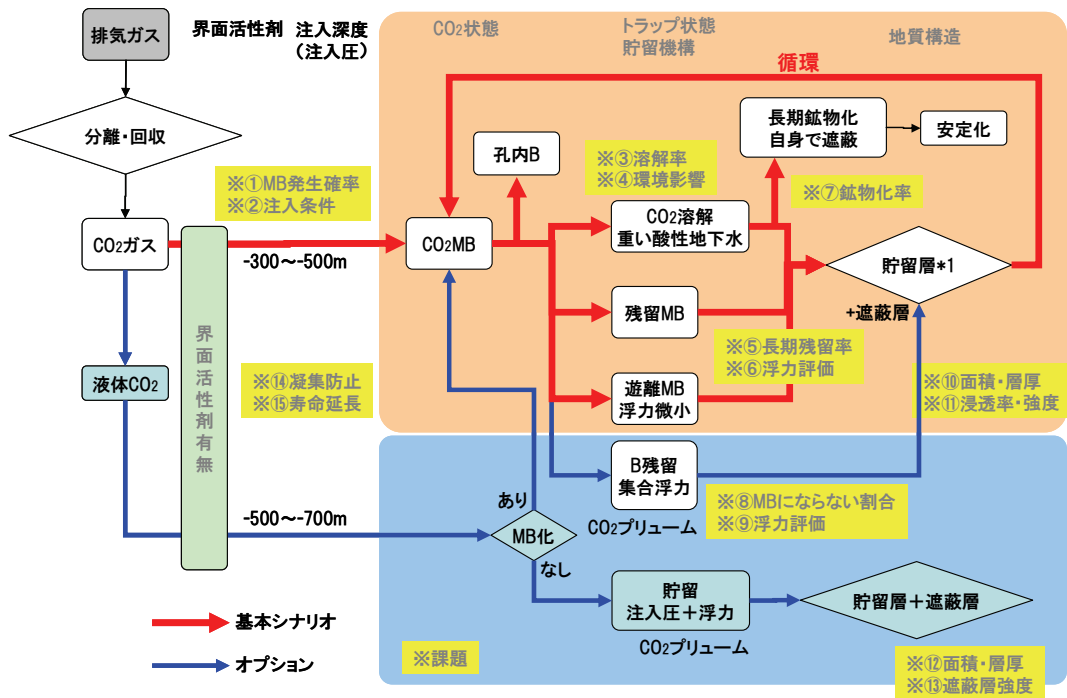


図 1.3-2 CO₂ がソースの場合の貯留フロー図

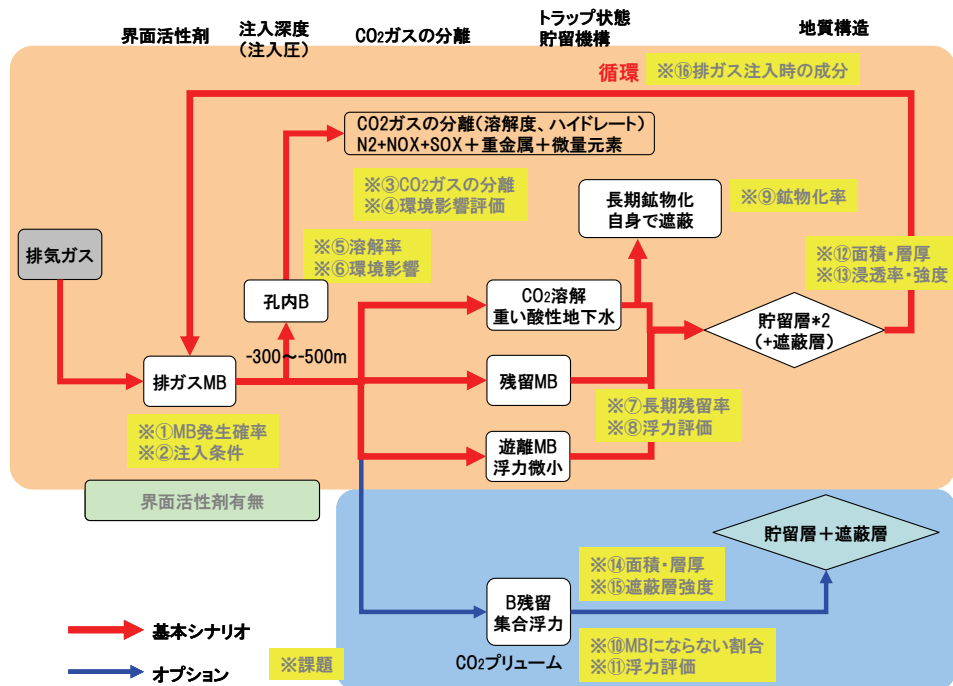


図 1.3-3 排ガスがソースの場合の貯留フロー図

3) 技術的に貯留が成立する条件の整理

マイクロバブルによる貯留システムの構築にあたって、以下の成立条件を設定した。

- ①マイクロバブル注入により溶解速度を大幅に促進させ、注入 CO_2 の全溶解を期待する。
- ②温度、圧力、塩分濃度に依存した溶解度を設定する。過飽和状態は想定しない。
- ③溶解水の移行を主体と考える。
- ④ CO_2 全量に対して気泡残留分は少ないと考える。
- ⑤遊離したマイクロバブルの浮力は小さいが、大口径気泡が存在する可能性も残るので、安全性を考慮して、貯留層上位に遮蔽層が存在する条件とする。

マイクロバブルの貯留で期待されるトラップメカニズムを整理して、図 1.3-4 に示す。

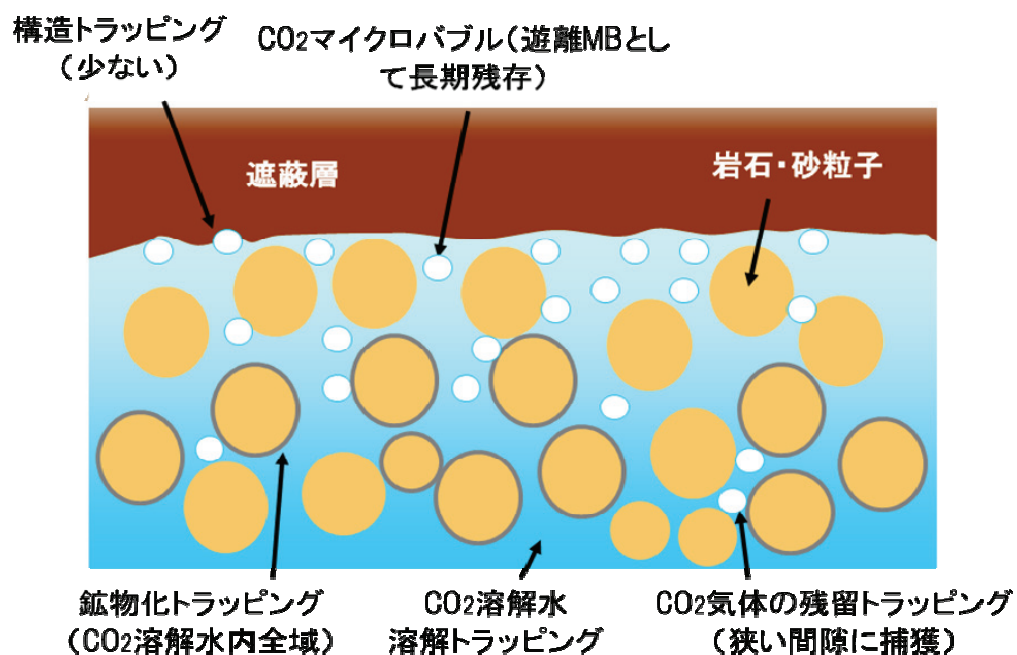


図 1.3-4 CO_2 マイクロバブル地中貯留のトラッピングメカニズム

上記の成立条件を考慮すると、我が国においては、新第三紀鮮新統～第四紀更新統の堆積岩が候補となる。砂岩を貯留層とし泥岩を遮蔽層とすることが可能な地質条件を有する堆積盆が適するものと判断した。有望な堆積盆は、十勝平野、内浦湾、庄内平野、房総半島、掛川地区、伊勢湾、大阪湾、宮崎地区、別府湾および沖縄本島の 10 地区であった。

1.3.2 CO_2 マイクロバブル地中貯留システムのモデル構築

CO_2 マイクロバブル地中貯留システムは、わが国の地質条件に広く適用可能と考えているが、仮想の地質条件を想定して、マイクロバブル化 CO_2 の注入・貯留システムについて検討することにより、貯留システムモデルを構築できることを示した。

1) 貯留概念を考慮した注入井・揚水井併用方式

モデル地点のサイト条件に応じた注入井・揚水井併用方式モデルの検討をした結果、貯留ユニットは、図 1.3-5 に示す 1 本の注入井とそれを円周上に取り囲む 4 本の揚水井

で構成される孔井群と設定した。

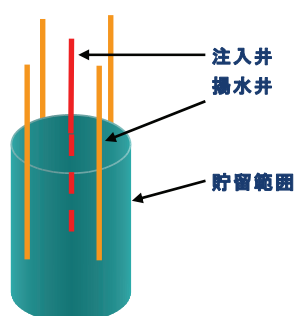


図 1.3.-5 貯留ユニットの説明図

2) 想定モデル地点での貯留システムモデルの構築

地質条件が適切であり、地質データが豊富な A 地域を想定モデル地点として、注入井・揚水井併用方式の地中貯留システムが、技術的に成立性することを例示した。深度 300m～500m の貯留層を対象に、1 万トン・CO₂/年、25 年間の貯留条件では、200m 直径の貯留ユニットが 6 つ確保できればよく、10km 平方程度の仮想貯留サイトでは、その半分も使用しなくても、十分に余裕をもって設置可能であることを示した。

図 1.3-6 に、想定したモデル地点 A 地域の沿岸域（臨海）海域、陸域における、CO₂ マイクロバブル地中貯留イメージを示す。

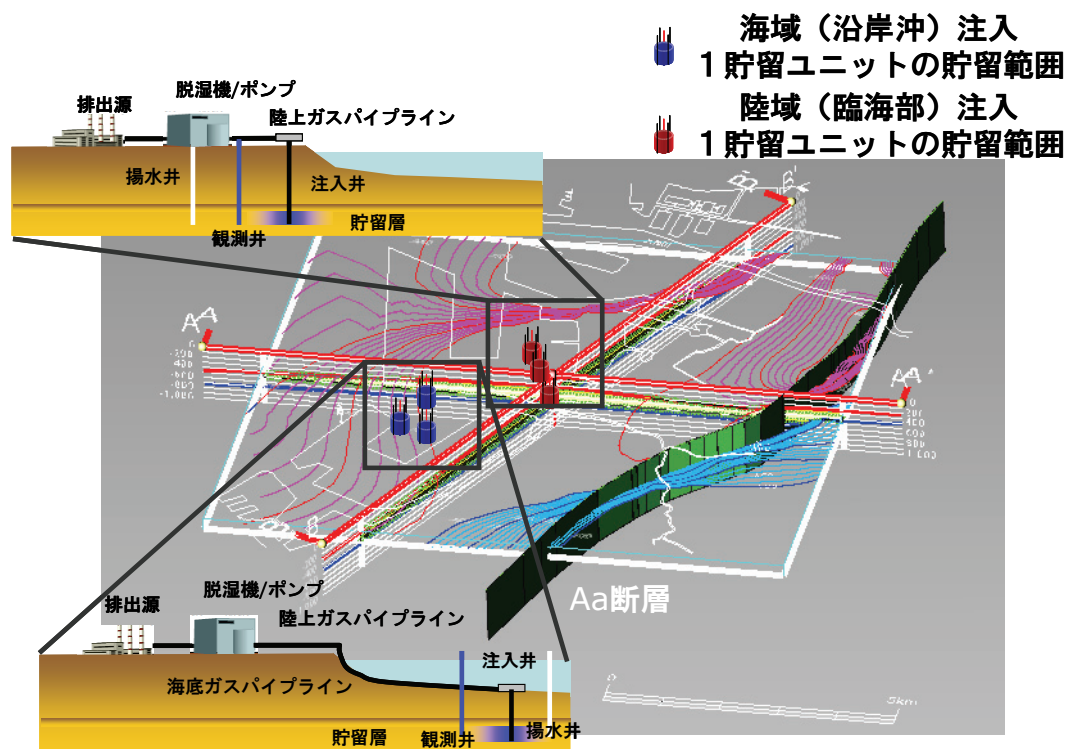


図 1.3-6 仮想貯留サイトにおける貯留範囲

第2章 貯留概念の整理とシステム概念の検討

二酸化炭素 CO_2 をマイクロバブル化して、地下水に溶解およびそのままのマイクロバブル状態で地下水利用深度以下の帯水層に貯留するという概念が成立するか、検討するのがこの調査研究の目的である。

この章では、まず 2.1 節において CCS の現状およびマイクロバブルの特性について情報収集して整理した結果をまとめた。これらを受けて 2.2 節では貯留システム概念を構築し、2.3 節においてマイクロバブル化による CO_2 貯留システムが技術的に成立するための条件について、地質条件、貯留層・遮蔽層の物性条件について述べる。最後に 2.4 節で CO_2 マイクロバブル化貯留システムと深部塩水帯水層(Deep Saline Aquifer)貯留との比較を通してこの貯留概念を明確にする。

2.1 情報収集とマイクロバブルの特性の整理

マイクロバブルは、直径が 1mm の 1/1000 以下、すなわちマイクロメータオーダーの微細な気泡で、明確な径の定義は曖昧であるが、通常の気泡とは異なった性質が現れる直径 $50\mu\text{m}$ 程度以下のものといわれている。この節では、マイクロバブルとは何か、発生方法、マイクロバブルの特性、および CO_2 をマイクロバブル化して地中に貯留することを想定し、地盤中での挙動について述べる。



図 2.1.1-1 マイクロバブルの発生状況
(加圧溶解法、産総研 高橋研にて撮影)

2.1.1 マイクロバブルの特性

1) マイクロバブルの定義

環境条件によって気泡の特性は大きく変わる。ひとつの目安として、マイクロバブルは直径が $50\mu\text{m}$ 以下の気泡であり、マイクロナノバブルは $300\text{nm} \sim 3\mu\text{m}$ 、ナノバブルは 100nm 以下の極微小気泡である¹⁾。なお、その生成のメカニズムから推測すると、マイクロナノバブルやナノバブルはマイクロバブルから作られるものであり、気泡発生装置から直接的に生成できるものではない。特徴をまとめると表 2.1.1-1 および図 2.1-1.1 のようになる¹⁾。

表 2.1.1-1 気泡の概略区分¹⁾

通常気泡	水中を急速に上昇していき、表面ではじけて消える。
マイクロバブル	水中で縮小してついには消滅（完全溶解）する気泡
マイクロナノバブル	一時的に安定化した気泡
ナノバブル	長期に安定化した気泡

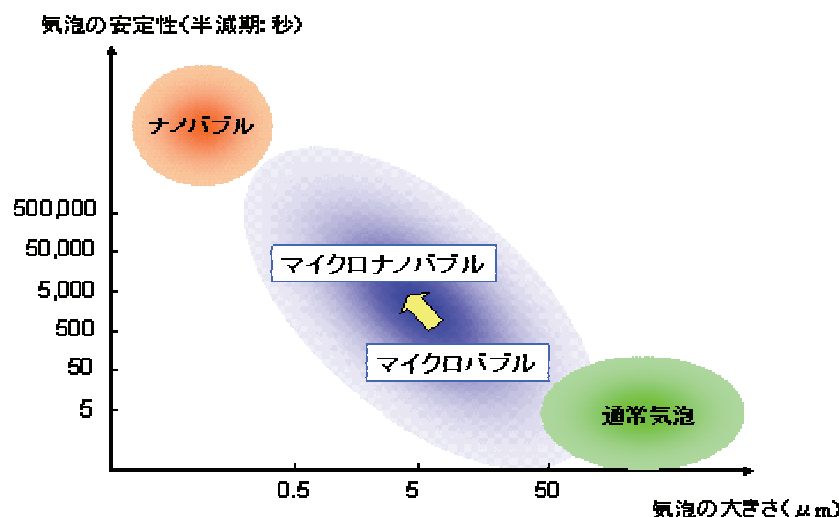


図 2.1.1-1 特性から考えたときの微小気泡の分類

出典： http://staff.aist.go.jp/m.taka/RS_Characteristics_of_マイクロバブル.html

： 2.3 マイクロバブルの特徴

マイクロナノバブルはマイクロバブルが経時的に変化したもので、別の名称を付ける必要がないが、あえて名称を区別した理由は、その応用面における相違を考えてのことである。すなわちマイクロバブルはダイナミックな変化の中に優れた応用の可能性が存在しているのに対して、マイクロナノバブルはその存在そのものに応用のための特異性を見いだすことができる。マイクロバブルのダイナミックな変化とは気泡の縮小に伴う内部圧力の上昇や電荷（イオン）密度の増加であり、過飽和に至る気体の溶解やフリーラジカルの発生などに関連している。一方、擬似的に安定化したマイクロナノバブルには植物や魚類などに対するある種の活性効果を期待することができる。

2) マイクロバブルの発生方法および発生装置

マイクロバブルの発生方法には、主に次の3つがある。

(1) 加圧溶解による方法

ある程度の高圧（0.3～0.4MPa）で十分な量の気体を水の中に溶解させた後、その圧力を解放すると、水は過飽和状況になる。口元で急激に減圧することで、溶解しきれずに気泡となって出てくるものがマイクロバブルとなる。この方法では、気泡密度の濃い状態を作成できる。気泡径は10～15 μm 付近にピークを持つ分布を示し、気泡個数は数千個/mL以上で、見た目は牛乳のような状態となる。マイクロバブルの水に対する密度は、1%v程度である。この方法は、溶存イオンの影響を受けるので、海水を用いると発生させにくい。

加圧溶解方式で発生させた気泡粒径分布を図2.1.1-2に示す。高濃度のマイクロバブルの場合、小さな径と大きな径の二つのピークが存在する。この理由は明確ではない。

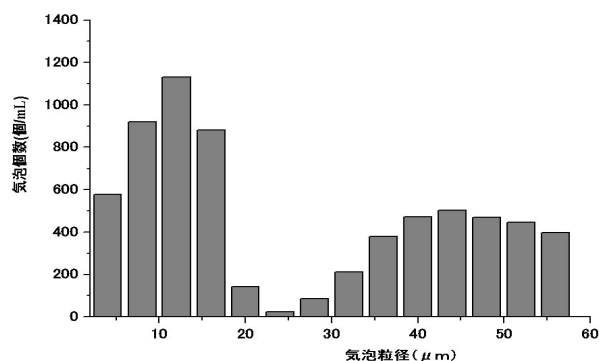


図 2.1.1-2 加圧溶解方式（高濃度タイプ）の気泡径分布の例

出典： http://staff.aist.go.jp/m.taka/RS_Generation_methods_of_マイクロバブル.html：2.2 マイクロバブルの発生法

(2) 二相流旋回による方法（気液せん断による方法）

渦流（毎秒 400～600 回転）の中に気体を巻き込み、その渦流をファン等によりせん断、粉碎させてマイクロバブルを作成する方法である。海水では、この方法の方がマイクロバブルを発生させやすい。二相流旋回方式で発生させた低濃度の気泡粒径分布を図 2.1.1-3 に示す。直径が 30μm 付近に分布のピークがあり、気泡濃度としては数百個/mL 程度。見た目は水が少し曇った状態になる。

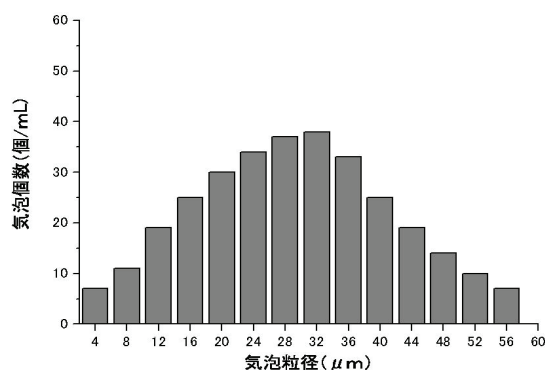


図 2.1.1-3 気液二相流旋回方式(低濃度タイプ)の気泡径分布の例

出典： http://staff.aist.go.jp/m.taka/RS_Generation_methods_of_マイクロバブル.html：2.2 マイクロバブルの発生法

渦を起こす方法としては図 2.1.1-4 に示す 3 つが主なものである。渦を壊す方法としては、例えば止まっている水の中に旋回流を放出することで可能となり、(a)図と(b)図がこれに当たる。水槽内の水は渦流から見た場合に止まった状態に相当するので、水槽内に吐き出された瞬間に渦は崩壊する。また、(c)図はプロペラの旋回力を変えることで渦を壊すことができる。気泡の濃度は発生装置内の圧力に依存し、(a)図の場合、ポンプ圧を有効に利用できる所以で容易に高濃度が得られる。

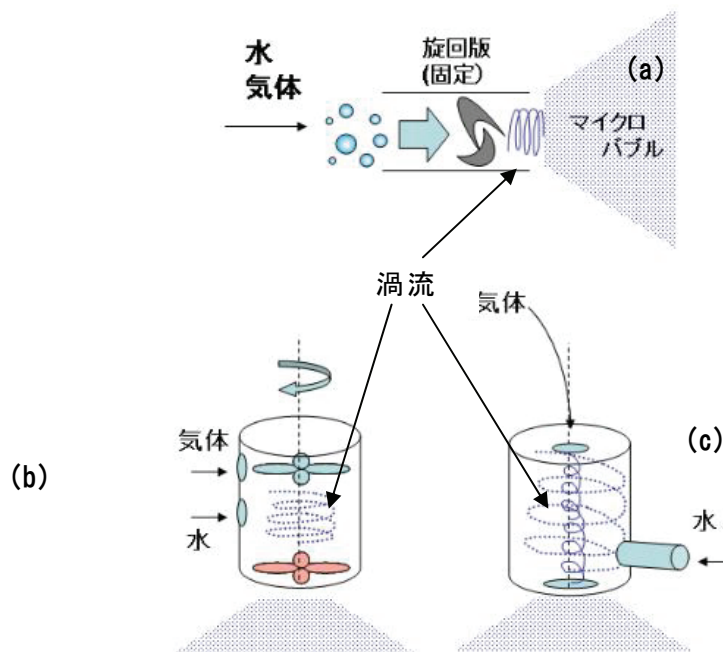


図 2.1.1-4 渦を起こす 3 つの方法

出典： http://staff.aist.go.jp/m.taka/RS_Generation_methods_of_マイクロバブル.html：2.2 マイクロバブルの発生法に加筆

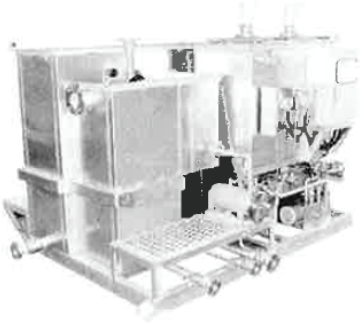
(3) その他の方法：

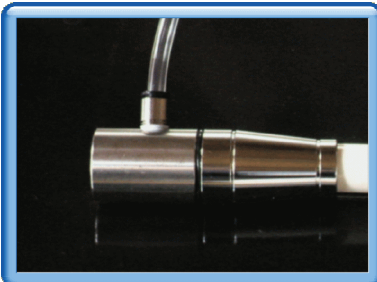
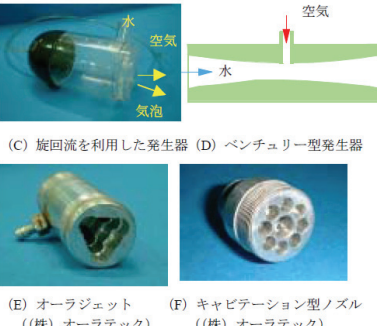
微細多孔質管を通過させてバブルを発生させる方法がある。

以上の発生方法により、具体的に様々なマイクロバブル発生装置が開発されている。それらの一例を表 2.1-2 にまとめた。表に示したのは、一例であり、これらの他にも様々なマイクロバブル発生装置があり、それらの特徴を鑑み、地上またはボーリング孔内で効率的に発生できる装置の選択、および開発が CO₂ マイクロバブル化貯留において必要となる。^{*1}

表 2.1.1-2 マイクロバブル発生装置の例

会社	装置概観	装置特徴
マイクロバブルジュネレータ（微細気泡発生装置）(株)ニクニ	過流ターボミキサー 溶解促進タンク 気液分離タンク http://www.nikuni.co.jp/equip/s-0250.html	気泡混合が可能な特殊ポンプとして作り出した渦流ターボミキサー（KTM）を搭載したマイクロバブルの発生装置。溶解させるガスは空気、他、酸素ガス、オゾンガスなどの選択が可能 ^{*1} 。

マイクロバブル発生ユニット：西華産業(株)		気泡混合比の高い混合ポンプと、ワンプラスで超微細にくだく静止型ミキサーの採用により、様々なガスを液中に注入し高密度マイクロバブルを生成することができる。加圧方式と比べてマイクロバブル生成量が3～5倍、気泡径は1/2～1/3となり、同方式では対応不可能な用途にも適用可能*1。
マイクロバブル発生装置 超高速巡回式： (株)ナノプラネット研究所	 http://www.nanoplanet.co.jp/NP_mnbresearch6.html	気液二相流体の超高速巡回によって負の電位を帯びたマイクロバブルを安定かつ大量に発生させる。ゆるやかな流動と広範囲の拡散性を有し、また、狭い空間に高密度で存在する凝集性にも優れている*1。 吐出量：M2-LM型 15L/min
ミューグリーンリアクター (株)ミューカンパニーリミテッド http://www.mu-company.com/mu_green_reactor.html#1		流体に発振現象を励起させる発振素子により気体から液体への物質移動を高効率で達成する。発振素子は螺旋状の羽根体で構成され、10m/s以上の気体速度で通流させる。噴出する気体は螺旋状と羽根体の機能により発振現象を励起する。この気体と吸引される液体とは多数の羽根体で形成されている「ミューミキサー」の下方から上方に通流して、回転・多分割・せん断・合流・反転作用を受けながら気・液混相の噴流となって噴出する。この強力な混合・せん断・破碎作用により微細な気泡の生成と垂直・水平方向に強力な循環流が発生する。大容量のマイクロバブルを生成でき、最大生成量 4,000m³/h*1。

マイクロバブル発生器 YJ ノズル エンバイロ・ビジョン(株)		一般汎用ポンプでの給水により、吸気部より自然吸気させてマイクロバブルを含んだ大量の曝気水を水中に放出することが出来る。通水量の役30%の気体を混入させることができる*1。
ループ流式マイクロバブル発生ノズル OKE-マイクロバブル 01FJ (有)OKエンジニアリング	 http://www.k3.dion.ne.jp/~matrix/	複合多段階乱流方式＝ループ式でマイクロバブルを発生させ、発生効率が良く、真空度が高いのが特徴。使用水压 0.15MPa～0.20MPa にてマイクロバブル発生密度が高い。家庭用～工業用*1。
散気管ポラリス 栗田工業(株)		従来の散気装置に比べ 1.5～2.0 倍以上の酸素溶解効率（多孔質超微細気泡散気装置に匹敵）をもった超微細気泡散気装置。目詰まりを起こさず長期間安定したエアレーションが行なえる。フレキシブルチューブ型である。5～200L/分の範囲で送気量をコントロールできる*2。 出典：栗田工業(株)散気管ポラリスパンフレット
マイクロバブル・ノズル (株)オーラテック	 (C) 旋回流を利用した発生器 (D) ベンチュリー型発生器 (E) オーラジェット ((株) オーラテック) (F) キャビテーション型ノズル ((株) オーラテック)	発生状況を次ページ図 2.1.1-5 に示す*3。

*1 出典：環境浄化技術 2011.1-2 Vol.10 No.1, pp118-120

ただし、装置特徴は、出典を参考に加筆した。

*2 栗田工業(株)散気管ポラリス パンフレット

*3 芹澤昭示、八尋俊彦：マイクロバブル・ノズルとその性能評価



図 2.1.1-5 マイクロバブルの発生状況

左列：液大、空気小、右列：液大、空気大

出典：芹澤昭示、八尋俊彦：マイクロバブル・ノズル
とその性能評価

3) マイクロバブルの特性

マイクロバブルの一般的特徴として次の5点が挙げられる。

- ① 界面面積/総体積が大きい

- ②浮上速度が遅い（浮力が小さい）
- ③内部圧力が高い
- ④表面が負に帯電している
- ⑤自己圧壊性を有する（圧壊時にフリーラジカルを発生する）

①に関して、球体の体積は $V_i = \frac{3}{4}\pi(D_i/2)^3$ 、表面積は $S_i = 4\pi(D_i/2)^2$ であるから、界面

面積/総体積は、 $\sum_{i=1}^n 4\pi(D_i/2)^2 \bigg/ \sum_{i=1}^n \frac{3}{4}\pi(D_i/2)^3$ である。径の分布は正規分布であるが、分布が

小さい場合に一様分布を仮定できるとすると $4\pi(D_{av}/2)^2 \bigg/ \frac{3}{4}\pi(D_{av}/2)^3 = 32/3D_{av}$ となり、生成される気泡の平均径に反比例する。すなわち、気泡平均径が小さくなれば界面面積/総体積は大きくなる。したがって同体積の気体に比べて、マイクロバブル化することにより液体との接触面積が相対的に大きくなり、溶解する量も増加する。

②に関しては、ストークスの式で説明される。微小粒子が流体中を沈降する場合の終端速度とは、粒子に上向きの力を及ぼす抵抗力および浮力と下向きの重力とが釣り合ったときの速度である。粒子が一度その速度に達すると、その後、速度は変化せず一定になる。この釣り合い式が次のストークスの式である。

$$\text{ストークスの式： } v = \frac{D^2(\rho_f - \rho_p)g}{18\eta} \quad (2.1.1-1)$$

ここで、 v は速度、 D は粒子直径、 η は粘性、 ρ は密度で添字はそれぞれ f が流体、 p が粒子を表わす。気泡の場合は、密度 ρ_p が流体の密度 ρ_f より小さいため、負の沈降速度、すなわち上昇速度となる。直径 $10\mu\text{m}$ の空気気泡が 25°C の純水中の浮上速度は、純水の粘性を $0.89 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$ 、密度 997kg/m^3 、空気の密度 1.184 kg/m^3 とすると、 $60\mu\text{m/s}$ 程になる。計測結果の例を図 2.1.1-6 に示す。

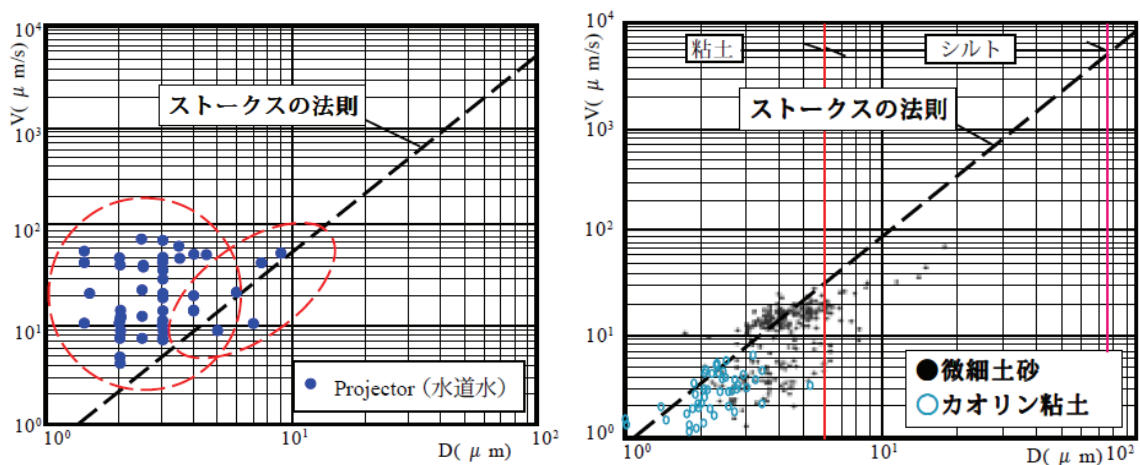


図 2.1.1-6 計測された気泡および粒子の径と上昇速度の関係

出典：中山ら：マイクロナノバブルの上昇過程、

第 59 回土木学会年次学術講演会、pp509-510、2004

ここで、左図に示した気泡の径と上昇速度の関係では $5\mu\text{m}$ 程度まではストークスの法則に従うが、それより小さいナノバブルの領域では若干速い上昇速度となっていることが示されている。

③の内部圧力は、気相と液相の二相間で形成される界面の張力による加圧で生じるものである。図 2.1.1-7 の微小部分 $\delta x \delta y$ に注目すると、ここに働く力は液滴内外の圧力と表面張力 σ である。注目する微小部分を平面として近似すると δy の線状に働く表面張力の液滴内部の方向の力の総和は $2\sigma \sin \theta_1 \delta y$ 、同様に δx の線状に働く液滴内部方向の表面張力の総和は、右図と同様に δx 方向に作用する表面張力の働く角度を θ_2 として $2\sigma \sin \theta_2 \delta x$ となる。また、微小部分に働く外圧による力は $p \delta x \delta y$ である。一方、液滴の内圧を $p + \Delta p$ とすると、微小部分には液滴の外側方向に $(p + \Delta p) \delta x \delta y$ の力が作用する。

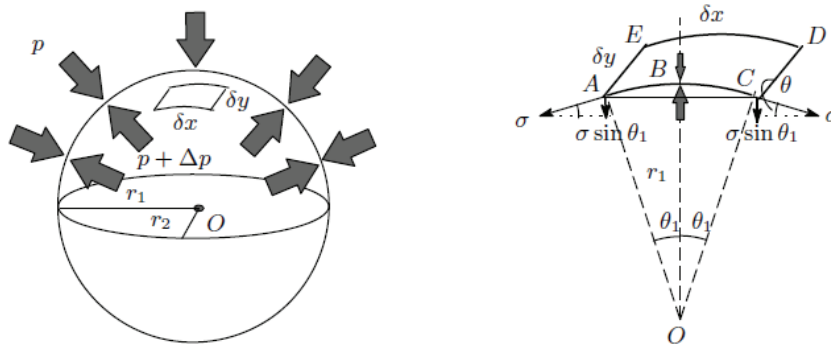


図 2.1.1-7 液泡に作用する力

出典： <http://hb3.seikyoku.ne.jp/home/E-Yama/Fluid.pdf#search=流体力学講和>

これらの力の釣り合いから

$$2\sigma \sin \theta_2 \delta x + 2\sigma \sin \theta_1 \delta y + p \delta x \delta y = (p + \Delta p) \delta x \delta y$$

が得られる。 θ_1 、 θ_2 は微小であるから $\sin \theta \approx \theta$ と近似すると、 $\delta x = 2r_1 \theta_1$ 、 $\delta y = 2r_2 \theta_2$ となるので

$$2\sigma \theta_2 \delta x + 2\sigma \theta_1 \delta y = \Delta p \delta x \delta y \rightarrow \Delta p = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) : \text{ヤング-ラプラスの式} \quad (2.1.1-2)$$

が得られる。球体であれば $r_1 = r_2$ であるから

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r} \quad (2.1.1-3)$$

となる。ここで、 Δp は内部圧力増加分、 σ は界面張力、 r は気泡半径である。気泡の大きさに反比例して気泡に加わる圧力が高まる。

気泡の直径が $10\mu\text{m}$ の場合には水の界面張力が 72.75mN/m (20°C) であるから、 29kPa 程内部圧力が上昇する。気泡径と内部圧力増加の関係は図 2.1.1-8 のようになる。

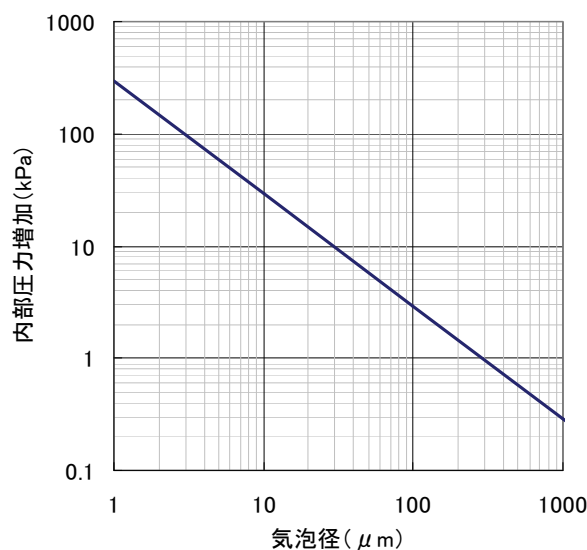


図 2.1.1-8 気泡径と内部圧力増加の関係（ヤングーラプラスの式）

このため、微細気泡は圧力により一層小さくになり、さらに圧力が高まる。理論上、無限の圧力が生じる。これを自己加圧効果という。後述するヘンリーの法則にしたがって、加圧効果により効果的に気体が水中に溶解する。

④に関して、マイクロバブルはコロイドとしての側面があり、負に帯電をしている。このため、マイクロバブル同士は反発し合う。この性質のため、マイクロバブル同士の結合がなく、気泡濃度が減ることがない。

⑤の自己圧壊作用により、水や窒素などが分解されラジカルが生成される。ラジカルは不対電子をもつ原子や分子、あるいはイオンのことを指し、通常、反応性が高いため、生成するとすぐに他の原子や分子との間で酸化還元反応を起こし安定な分子やイオンとなる。生成メカニズムに関しては、諸説あり未だ決着が着いていない。

これらの特性から、CO₂をマイクロバブル化して地層水へ注入する場合に、通常の注入方法よりも溶解量が増加し、地層水の流れや濃度差による移流・拡散や、溶解したCO₂と岩石との化学反応による鉱物化固定などにより安全性の高い貯留メカニズムの促進及び、漏洩の危険性の低減も期待できると考えられる。ただし、これらの特性については今後実験を通して確認する必要がある。

5) マイクロバブルの地盤中での特性－残留マイクロバブルと遊離マイクロバブル

マイクロバブル水を地盤に注入した場合、マイクロバブル径より大きな空隙は透過し、小さな空隙ではトラップされる。では、透過と残留の割合はどの程度であろうか。当然、空隙径の分布によりそれは異なる事が予想され、一般的な割合を出す事は難しい。ここに一つの実験結果がある。実験を図 2.1.1-9 に示す。

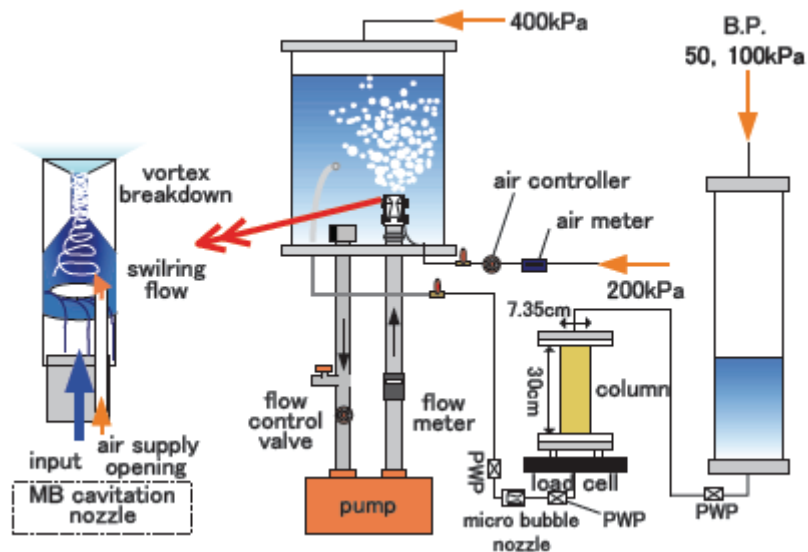


図 2.1.1-9 マイクロバブル水混入実験装置概要

出典：小林森雄、末政直晃、永尾浩一、岡庭一憲：マイクロバブル水の混入における飽和度低下効果の検討、第 65 回土木学会年次学術発表会、Ⅲ-091、2010

マイクロバブル水を注入してマイクロバブル水で試料を満たした後、脱気水をフラッシングさせてマイクロバブルがどの程度残留するかを調べている。液状化を抑制するための効果をマイクロバブルに期待するためこの残留状態を小林ら³⁾は耐久性と呼んでいる。結果を図 2.1.1-10 に示す。

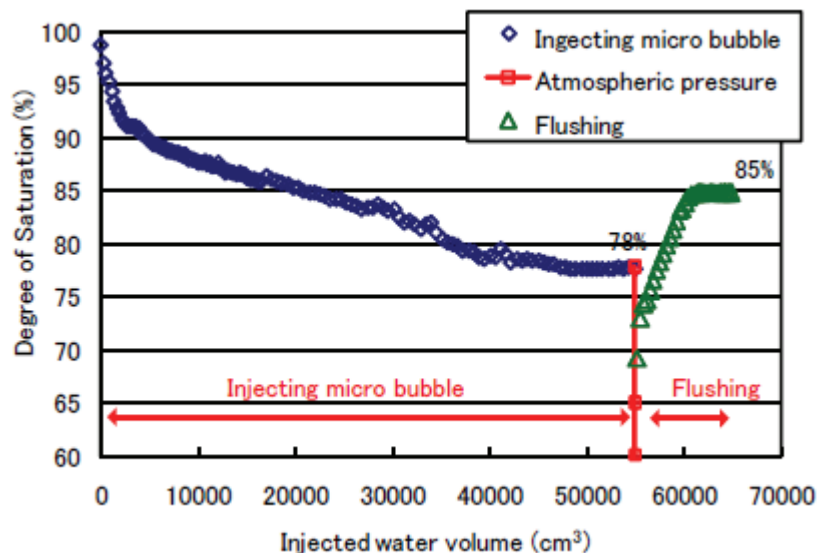


図 2.1.1-10 フラッシングによるマイクロバブルの耐久性

出典：小林森雄、末政直晃、永尾浩一、岡庭一憲：マイクロバブル水の混入における飽和度低下効果の検討、第 65 回土木学会年次学術発表会、Ⅲ-091、2010

これによると、マイクロバブル水を混入することで間隙体積のうち水が 78%低下し

て、その後、脱気水を通水することで、85%まで飽和度が回復している。換言すれば、マイクロバブルで間隙中の 22%が満たされ、脱気水を通水することで、間隙の 15%にマイクロバブルが残留し、7%が流れとともに移行していったものと考えられる。

間隙条件は、記述から間隙率 42%、透水係数 2.0×10^{-5} m/s と推定される。このような砂層の場合には、マイクロバブル水は瞬間的には間隙体積の 22%を占め、そのままマイクロバブル水を流し続ければ空隙の 22%の体積を占める。一方、脱気水を通水すれば流れとともに移行するマイクロバブルは、22%のうち 7%、すなわちマイクロバブル体積のうち 32%が移行し、残り 68%が残留すると考えられる。

これは溶解以外のマイクロバブルの砂層中での体積と見なせる。この実験では、圧力は、通水するための透水圧が 400kPa、背圧 100kPa である。

空隙容量 1m^3 にマイクロバブル水を通水すると、残留マイクロバブルは 0.15m^3 ($1\text{m}^3 \times 22\% \times 68\%$)、遊離マイクロバブルは 0.07m^3 ($1\text{m}^3 \times 22\% \times 32\%$) である。圧力は背圧 0.1MPa の場合である。 0.15m^3 は $0.294\text{g} \cdot \text{CO}_2$ であるから、 $0.294\text{g}/1000\text{kg} = 0.03\%$ となり、これが残留バブルの量となる。

この実験は、空気のマイクロバブルを対象としての実験結果であり、 CO_2 より溶解度がおよそ 60 倍も低い窒素が主体のものである。残留バブルの量は、間隙率および溶解度に依存することが推定されるため、 CO_2 によって同様の実験により、残留、遊離の割合を決定する必要がある。

しかし、空隙全てがマイクロバブルによって飽和した場合でも、間隙率相当であるから最大で 3 倍程度、圧力が大気圧から 300m 深度の圧力で 30 倍として合計 90 倍程度である。したがって、残留トラップの最大値として $0.03 \times 90 = 2.7\%$ まで期待できない。なぜなら、図 2.1.1-11 に示すように、地盤の空隙には、マイクロバブル水の移動、残留マイクロバブル、および遊離マイクロバブルの占有率が存在するからである。

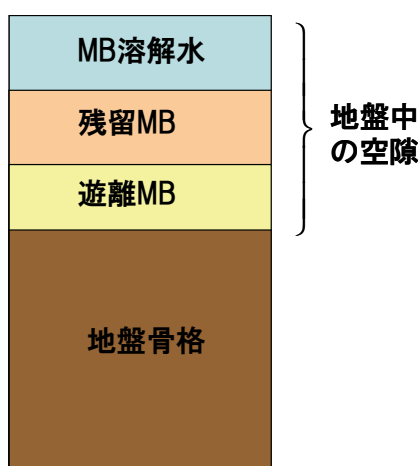


図 2.1.1-11 溶解、残留、遊離 CO_2 の占めるイメージ

砂層や砂岩などの多孔質媒体内にマイクロバブル水を通水させると、空隙壁面に吸着する。この時、マイクロバブルは、球の状態から、付いた空隙に沿った曲率を持つように変形し、さらに水中の気体を取り込み、体積を増加させる。

超音波振動を与えるとバブルは結合し、大きくなる。これは地震時に断層などを通してマイクロバブルといえども上昇することを意味する。

6) マイクロバブル水の抵抗

マイクロバブルを含む水の粘性抵抗は透水係数および拡散係数に関する。マイクロバブルを乱流境界層に注入した場合、壁面の摩擦抵抗を低減することが実験により示されている。低減の幅は 20%～80%程度と実験により開きがあるが、いずれの場合も噴出するマイクロバブルの量と抵抗低減量には、ほぼ比例関係がある。

神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻 混層熱流体工学研究分野では、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果を調べるため、垂直円管上昇流において、圧力損失を測定し、図 2.1.1-12 に示すような結果を得ている。図は、縦軸が管摩擦係数、横軸がレイノルズ数である。すなわち、マイクロバブル流れでは水単相流に比べ、層流から乱流への遷移が遅れており、マイクロバブル流れにおいて層流から乱流へ遷移する辺りで摩擦損失の低減が確認されている。

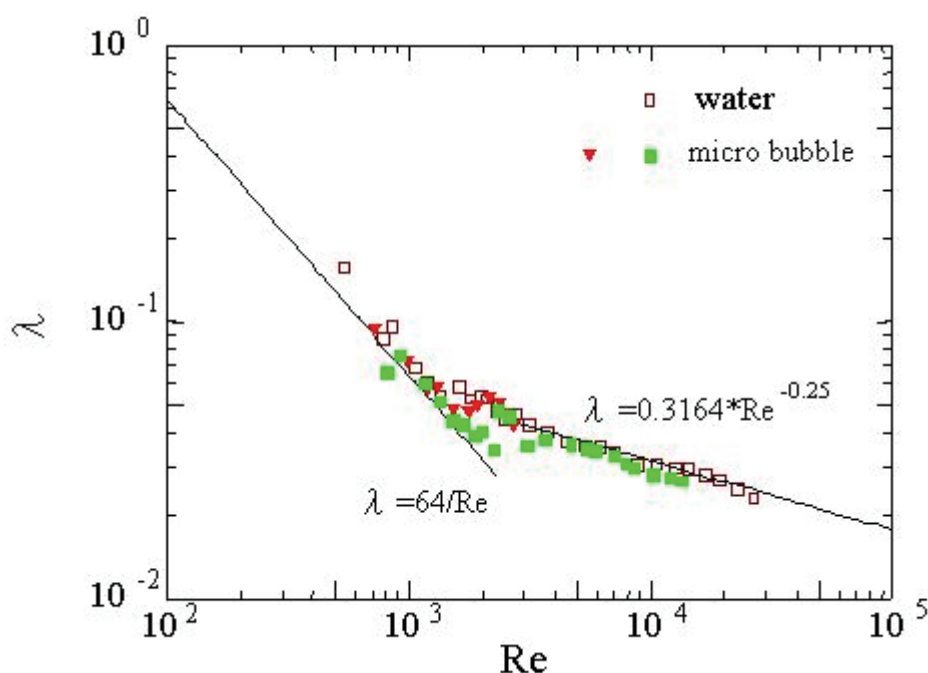


図 2.1.1-12 マイクロバブル水流における摩擦係数

出典：神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻 混層熱流体工学研究分野 HP
<http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-multiphase/research/research3.html>

注入孔から地盤中に水が浸透する付近では、乱流状態と云われている。マイクロバブル水は若干、粘性が低下する。さらに比重も若干小さくなるため、媒体の透水に対する抵抗値、透水係数は、小さくなる。

7) マイクロバブルの溶解特性に関する物理的考察

マイクロバブル化すると溶解速度はどのようになるか、ひとつの考え方を示す。

溶解現象は物質移動の問題である。これらの物質移動速度 NA [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] の大きさに関与する物理量は、濃度差 ΔCA [mol/m^3]、拡散係数 DAB [m^2/s]、速度 u [m/s]、流体の密度 ρ [kg/m^3]、粘性係数 μ [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$]、単位長さ L [m] である。これらの物理量が 7 に、次元が mol , M , L , T の 4 つであるから関係する無次元数の数は 3 つであると予想できる。3 つの無次元数はそれぞれシャーウッド数 Sh 、ペクレ数 Pe 、シュミット数 Sc と呼ばれる。

球形気泡の液体中への溶解速度は一般的にシャーウッド数 (Sh 数) によって評価され、シュミット数 (Sc 数)、ペクレ数 (Pe 数) そして層流乱流などの流れの状態を識別するレイノルズ数 (Re 数) のうちの二つで整理される。それぞれは

$$Sh = \alpha R / D, \quad Re = 2RU/\nu, \quad Sc = \nu/D, \quad Pe = 2RU/D$$

である。ここで、 α は物質伝達率 (mm/s)、 ν は液体の動粘性係数 (水道水 24°C で $0.92\text{mm}^2/\text{s}$)、 R は気泡半径 mm 、 D は拡散係数で二酸化炭素の水中の拡散係数で $1.85 \times 10^{-3}\text{mm}^2/\text{s}$ 、 U は気泡の上昇速度 mm/s で気泡径からストークスの式 (2.1-1 式) より計算される。今、溶解速度に関するシャーウッド数は、気泡径変化速度と気泡内圧力の時間変化、無限遠濃度に相当する圧力について評価する必要があるが、界面が動かない場合の溶解過程における Sh 数を評価する推定式として

$$Sh = 1 + (Pe + 1)^{1/3} Re^{0.77} \quad (2.1.1-4)$$

が提案されている⁵⁾。これを用いて、マイクロバブルが自然に上昇する過程での Sh 数と Re 数の関係を調べた結果を図 2.1.1-13 に示す。また気泡径と Sh の関係を図 2.1.1-14 に示す。

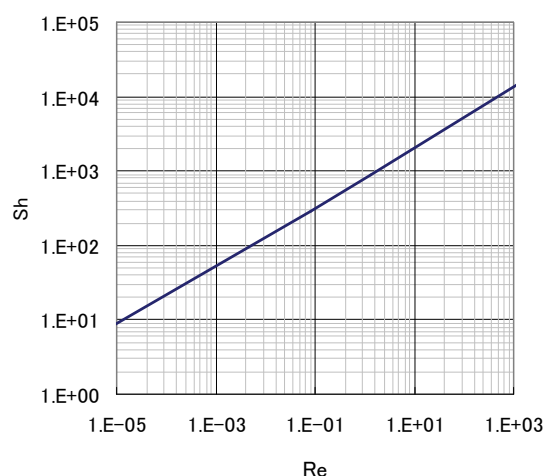


図 2.1.1-13 Re と Sh の関係

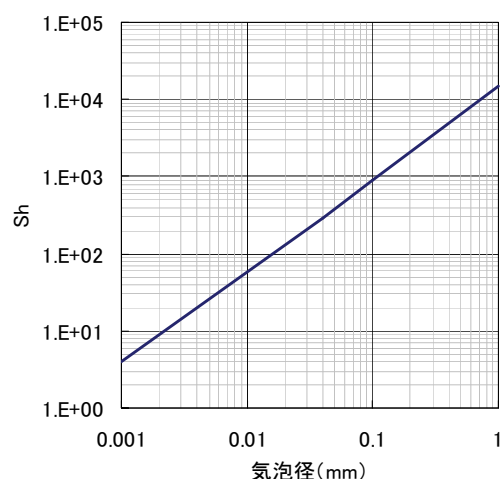


図 2.1.1-14 気泡径と Sh の関係

結局、気泡径が小さくなると Sh が大きくなるので溶解速度は上がることはなくマイクロバブルの効果は、別の効果と考える必要がある。すなわち、図 2.1.1-5 のマイク

ロバブルの発生状況から、噴出口では、相当の流速を持っているものと推定される。つまり図 2.1.1-13 に示されるように乱流効果で Re が大きくなり、溶解速度が高いことが予測される。マイクロバブル自身の溶解速度は径が小さいため速くはないが、界面面積/総体積が大きいこと、mL 当り数百個という密度、および発生させて水中に噴出される時の高流速による効果により溶解速度は速いものと推定される。杉山ら⁶⁾は、気泡周囲の乱流によるマイクロバブルの溶解促進に関する知見を得るため、単純せん断流を対象とした理論、数値解析、および水噴流を対象とした実験を行なって、乱流がマイクロバブルの溶解を顕著に促進することを観測している。

8) CO₂ マイクロバブルの性質

CO₂ マイクロバブル水では、過飽和状態となる。大気圧下でおよそ 1.5 倍、10 気圧の場合で 1.05~1.1 倍の過飽和となる。過飽和溶液中では、マイクロバブルが小さくなり溶けると同時に、溶液中の CO₂ を吸収して大きくなるマイクロバブルも存在する。CO₂ マイクロバブルの発生状況を空気のマイクロバブルと比較して図 2.1.1-15 に示す。

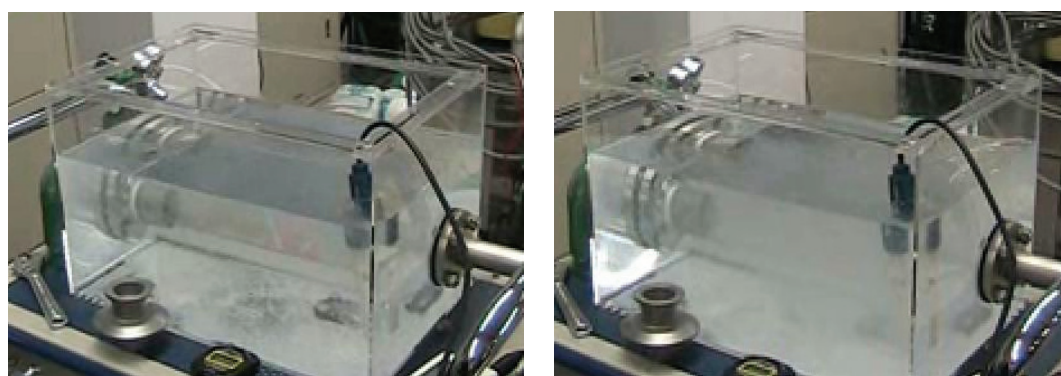


図 2.1.1-15 マイクロバブル発生状況（産総研 高橋研究室にて撮影）

左：CO₂ 右：空気

この図より、CO₂ は空気に比べて溶解しやすいので白濁が空気に比べて少なく透明に近いことがわかる。

2.1.2 CO₂の性質

CO₂は、大気中で 370ppmv という少量存在し、植物や動物の生命循環において地球環境に必要な成分として不可欠な役割を担っている。光合成によって植物は CO₂ を吸収し、酸素を放出する。CO₂ 排出の原因となる人間活動は、化石燃料や他の炭化材料の燃焼、砂糖のような有機物の発酵や人の呼吸を含んでいる。人は呼吸により年間 16.8 万リットルの CO₂ を排出している。世界人口で 65.12 億人の場合、年間で 10.96 億リットル (21.49 億 t・CO₂) の量になる。

CO₂ ガスは少しいらいらするような匂いを持ち、無色で空気より重い。空気中の構成において、より少なければ無害であるけれども、高濃度の CO₂ は危険となる。

1) CO₂ の物理的性質

通常の温度、圧力下では、CO₂ は気体である。圧力 5.1bar より低い場合には、固体から直接気体状態に昇華する。三重点 (triple point) である -56.5℃ と臨界点 (critical point) である 31.1℃ の中間温度では、対応する液化圧力まで圧縮により気体から液体に変化する (図 2.1.2-1)。

31.1℃ より高温でかつ 73.9bar (臨界圧力) より高压では、超臨界状態となる。そこでは、表 2.1.2-1 に示すように CO₂ の密度は液体に近く、粘性は気体に近く、気体のように挙動する。超臨界状態の CO₂ は、高压下においては、気体密度は非常に高く、水の密度に近づく。また、液体 CO₂ の密度は、水の密度より大きくなる。(図 2.1.2-2) これが CO₂ の特異な挙動で、超臨界状態での貯留に特に重要な点である。

CO₂ の密度は気体、液体、固体、超臨界状態でそれぞれ次のようである。(表 2.1.2-1)

表 2.1.2-1 CO₂ の各相における密度、粘性、拡散係数

物性	相			
	気体	超臨界	液体	固体
密度 [kg/m ³]	1.977 (0℃、1atm)	200～900	1030 (-20℃、1.967MPa)	1566 (-80℃)
粘性 [Pa・s]	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵ ～10 ⁻⁴	10 ⁻³	—
拡散係数 [m ² /s]	10 ⁻⁵	10 ⁻⁷ ～10 ⁻⁸	<10 ⁻⁹	—

固体-気体、固体-液体、液体-気体の境界を越えて相変化が起こる場合には、熱が放出または吸収される。しかし、超臨界から液体、超臨界から気体への相変化では、放熱、吸熱はない。この性質は CO₂ 圧縮施設の設計に有利である。なぜなら液体-気体の相変化に付随する熱の扱いの必要がないからである。

図 2.1.2-3 には、CO₂ 粘性の温度と圧力の関係を、図 2.1.2-4 には圧力-エンタルピーチャートを示した。

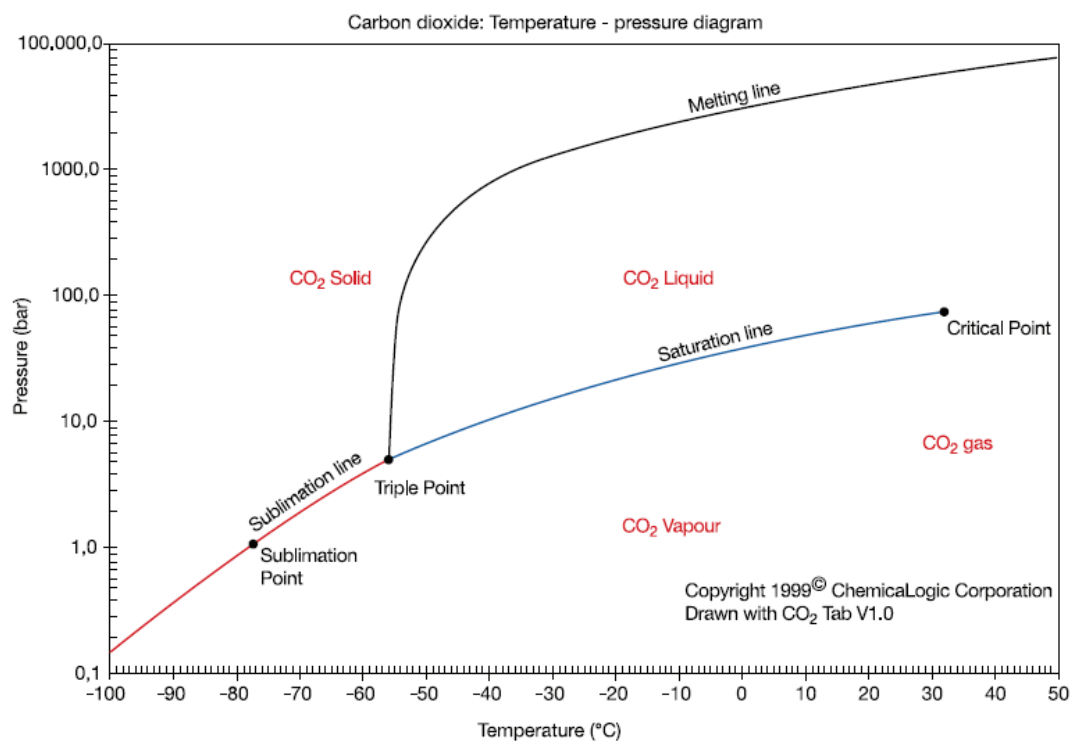


図 2.1.2-1 相ダイアグラム

出典：IPCC Special Report Carbon Dioxide Capture Storage 2005

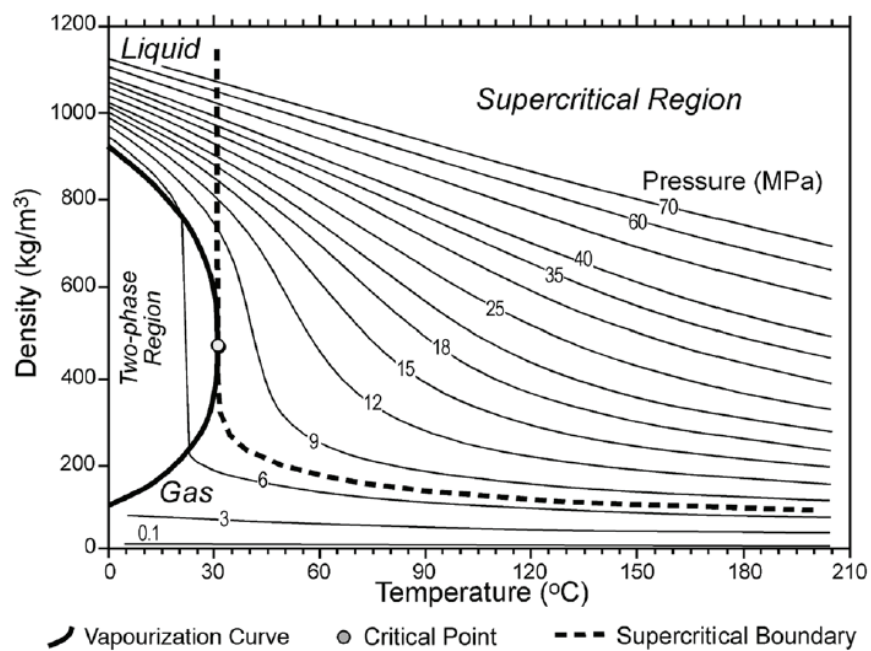


図 2.1.2-2 CO₂ 密度の温度、圧力関係 (Bachu, 2003)

出典：IPCC Special Report Carbon Dioxide Capture Storage 2005

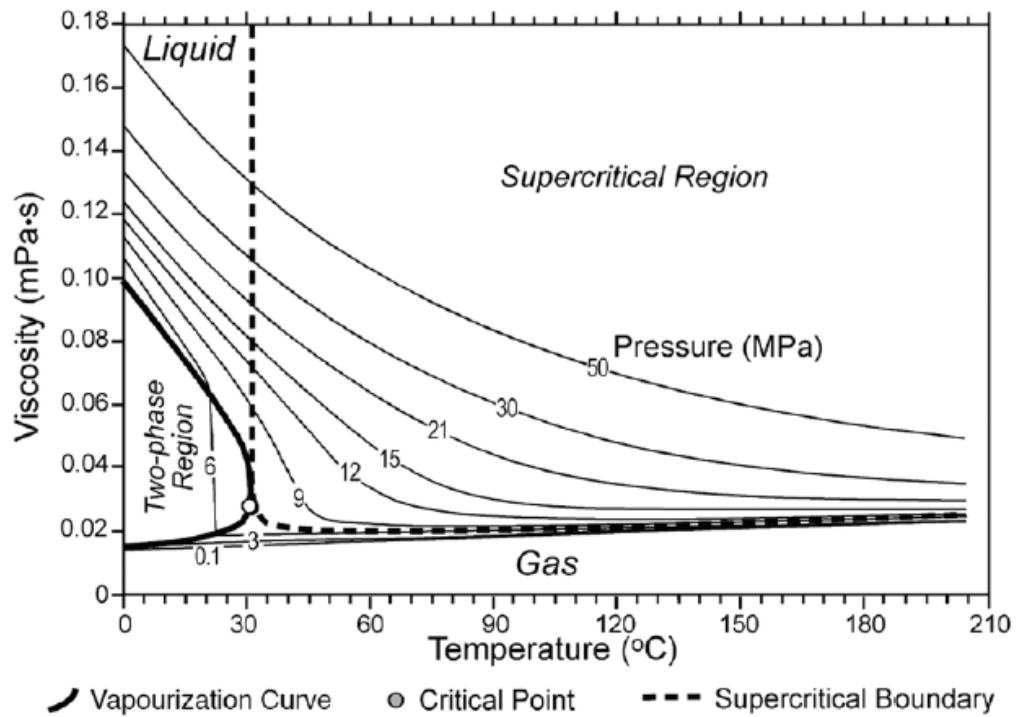


図 2. 1. 2-3 CO₂ 粘性の温度と圧力の関係 (Bachu, 2003)

出典 : IPCC Special Report Carbon Dioxide Capture Storage 2005

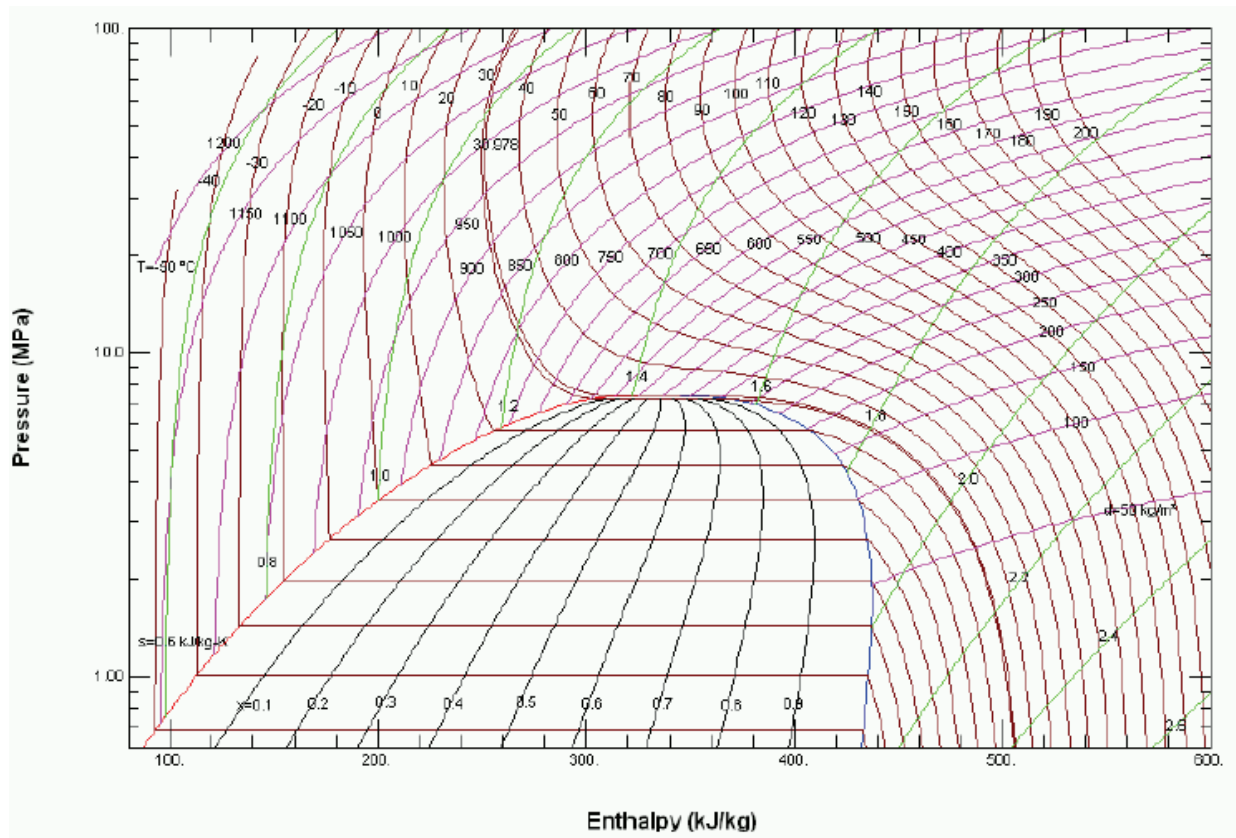


図 2. 1. 2-4 CO₂ の圧力-エンタルピーチャート

出典 : IPCC Special Report Carbon Dioxide Capture Storage 2005

2) CO₂ の化学特性

(1) CO₂ 溶解に関する基本的事項

(a) 水への溶解形態

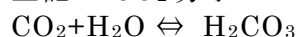
液体に気体、液体または固体が混合して均一な液相を形成する現象を溶解 (dissolution) という。CO₂ ガスを水に溶解させた際の CO₂ の水中での存在形態は次の4つである。

i) CO₂ 分子の形：

CO₂ 分子が水のマクロな構造の空孔 (水素結合で繋がった水分子相互の間) に収まって存在する形である。多くの気体の溶解や非イオン性物質の溶解にはこの形式が関わっている。化学変化を伴わないことから、ii) ~ iv) と区別して物理的溶解と呼ばれることもある。

ii) 炭酸 (H₂CO₃) の形：

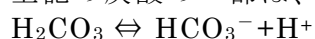
上記の CO₂ 分子の一部は水分子と反応して炭酸になる。



この反応の平衡定数は 1.7×10^{-3} (25℃) と小さく、平衡状態は著しく左辺に偏っている。すなわち、通常の水中では上記 i) の CO₂ 分子としての存在が圧倒的に多い。

iii) 炭酸水素イオン (HCO₃⁻) の形：

上記の炭酸の一部は、炭酸水素イオンと水素イオンに解離する。

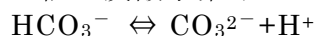


この反応の平衡定数は 2.5×10^{-4} (25℃) と小さく、平衡状態は著しく左辺に偏っている。換言すると、炭酸は弱酸 (水素イオンの発生力が弱い酸) である。

なお、炭酸水素イオンは重炭酸イオンと呼ばれることもある。

iv) 炭酸イオン (CO₃²⁻) の形：

上記の炭酸水素イオンの一部は、さらに炭酸イオンと水素イオンに解離する。



この反応の平衡定数は 4.7×10^{-11} (25℃) と非常に小さく、平衡状態は著しく左辺に偏っている。換言すると、通常の水に CO₂ ガスを溶解させた際の炭酸イオンの量は無視できるほど小さい。

(b) 溶解形態と pH の関係

CO₂ 溶解形態のうち上記の ii) ~ iv) の化学的溶解は、図 2.1.2-5 のように溶液の pH の影響を受ける。なお、この図では物理的溶解は扱われていない。

例えば、大気中の CO₂ 濃度 (約 350ppm) と溶解平衡にある水の pH は 5.6 程度であるが、その化学的溶解の全体を 100% とした場合、約 70% は炭酸 (H₂CO₃)、約 30% は炭酸水素イオン (HCO₃⁻) の形で存在し、炭酸イオン (CO₃²⁻) は存在しない。

炭酸と炭酸水素イオンが等量ずつ存在するときの pH は約 6.0 (解離定数を pK₁ から計算できる)、また炭酸水素イオンと炭酸イオンが等量ずつ存在するときの pH は約 9.0 (解離定数 pK₂ から計算できる) である。

図 2.1.2-6 には、海水に CO₂ を溶解させたときの溶解量と海水の pH の関係を示した。CO₂ を何らかの方法で (例えば、昇圧により) 溶解を促進させると、溶解量とともに i) の物理的溶解量が増え、ii) ~ iv) の反応が進行し、水素イオンの生成量が増え、pH が低下する。このように CO₂ 溶解水は溶解量と平衡定数に応じて水素イオン濃度が決まり、弱酸性～強酸性を示す。純水による CO₂ 溶解水アルカリ性を示すことはない。また、純水による CO₂ 溶解水の pH 値と CO₂ 形態の関係は、図 2.1.2-5 のようになる。一方、CO₂ 溶解水に別途、酸またはアルカリを添加して pH を変化させると、溶液中の CO₂ の形態は、図 2.1.2-5 の平衡状態図のように変化する。高アルカリ性域では炭酸イオン (CO₃²⁻)、弱アルカリ性～中性域では炭酸水素イオン (HCO₃⁻)、酸性側では、炭酸 (H₂CO₃) がそれぞれ主体となる。

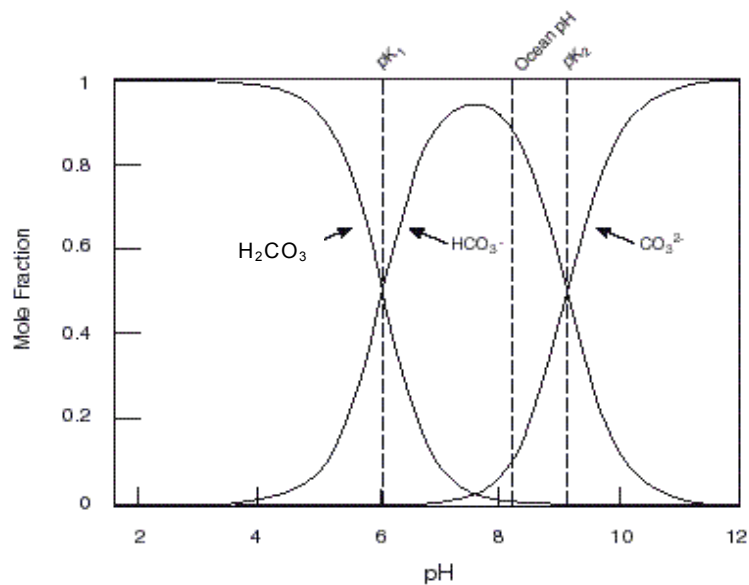


図 2.1.2-5 pH による CO_2 の形態変化

出典：Daniel J. Jacob, Introduction to Atmospheric Chemistry, Princeton University Press, pp96,1999

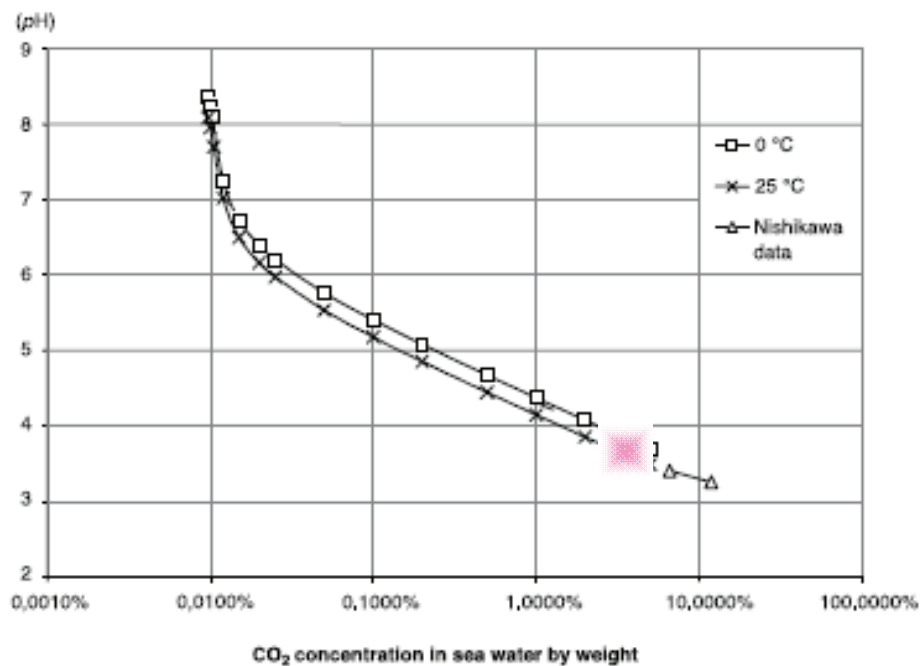


図 2.1.2-6 海水中の pH と CO_2 濃度の関係

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

(c) 溶解度および濃度の定義

溶解度 (Solubility) とは、一定量の溶媒に対して溶解する溶質の最大量である。たとえば、水 1 L 当りに CO_2 がどれだけ溶けるかを表す、mg/L、g/L、モル/L、kg/m³、g/kg などの単位がある。溶解量ともいう。ディメンジョンがそろっている場合には、%や ppm などでも表現することも可能である。

一方、濃度（Concentration）とは、溶液の一定量に含まれる溶質の量である。たとえば、CO₂ 含有水 1L 当りに CO₂ がどれだけ含まれているかを表す。mg/L、g/L、モル/L、kg/m³、g/kg などの単位がある。ディメンジョンがそろっている場合には、% や ppm などでも表現することも可能である。

(d) 溶解量に対する圧力、温度の影響

一般に固体や液体の溶解度は温度のみの関数であるが、気体の溶解度は温度と圧力の関数になる。気体の溶解度は、低圧ではヘンリーの法則に従って、圧力に比例して上昇する。

（一定温度のもとでの溶解）

ヘンリーの法則

$$n = kP \quad (2.1.2-1)$$

n : 溶媒にとける気体の物質質量 (mol)

P : 溶液と平衡にある気体の圧力 (または分圧)

k : 比例定数

ここで物質質量でなく質量で表すとする。気体の質量を m (単位 g) とし、気体のモル質量 (1mol の気体の質量を M (単位 g/mol) とすると質量 = 物質質量 × モル質量の関係から、(2.1.2-2) 式のようになる。

$$m = nM \quad (2.1.2-2)$$

(2.1.2-2) を (2.1.2-1) に代入すると

$$m \text{ (g)} = k \cdot M \text{ (g/mol)} \cdot P \text{ (atm)} \quad (2.1.2-3)$$

となる。

なおそのときの温度、圧力、体積の関係は、 $PV = nRT$ で表せる。

（一定圧力のもとでの溶解）

液体中への気体の溶解度は、一般に溶液中に存在する溶質（気体分子）のモル分率 x_2 で表すが、気体の圧力が一定のとき、溶解度の温度依存性は、データが十分多いとき、次式で表される。

$$\ln x_2 = A + \frac{B}{(T/100K)} + C \ln \left(\frac{T}{100K} \right) \quad (2.1.2-4)$$

ここで、 T は温度 (K)、 A 、 B 、 C は気体による定数（無次元）、分圧 $p_2 = 101.3 \text{ kPa}$ である。代表的な例として、水中に酸素(O₂)、窒素(N₂)、二酸化炭素(CO₂)が溶解しているときの溶解度 (x_2) の温度依存性を表 2.1.2-2 に示した。

なお、同表の CO₂ の 25℃ のモル分率 6.1×10^{-4} は、溶解度 (g/L) に換算すると、 $(6.1 \times 10^{-4}) \times (1000 \div 18) \times 44 = 1.49 \text{ (g/L)}$ となる。ここで、18 および 44 は、それぞれ水および二酸化炭素の分子量である。

表 2.1.2-2 水に対する気体の溶解度（モル分率、25℃の例）

気体	$10^{-4}x_2(25^\circ\text{C})$	A	B	C	温度範囲
O ₂	0.229	-66.73538	87.47547	24.45264	273-349
N ₂	0.118	-67.38765	86.32129	24.79808	273-350
CO ₂	6.10	-60.069	87.424	21.671	273-353

(注)CO₂ のような水と反応性の気体分子の場合は、水和された気体分子と水との反応によって生じた化学種との総和を気体分子の溶解量とみなす。

出典：<http://www.con-pro.net/readings/water/doc0038.html>、小林 映章、水の化学 第4章 水の係わる反応

図 2.1.2-7 に、二酸化炭素の溶解度の温度効果を 2.1.2-4 式に従って計算した結果を示す。

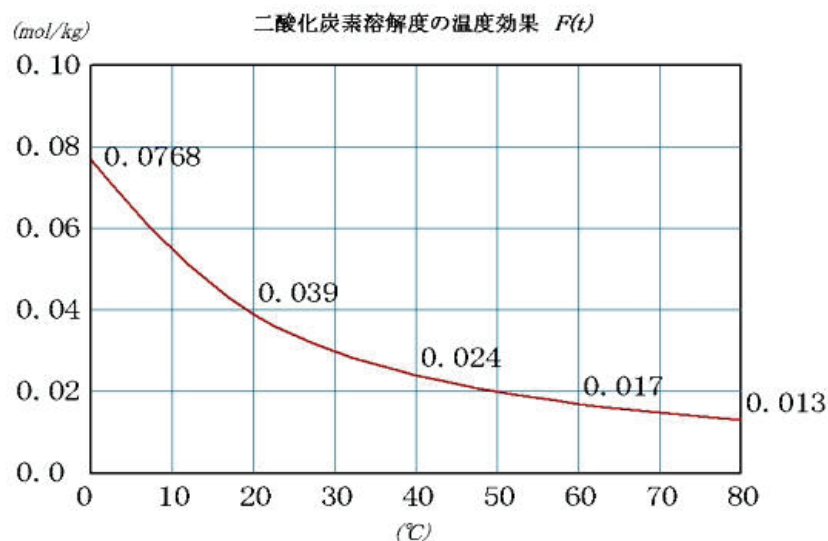


図 2.1.2-7 二酸化炭素の温度効果

水と反応する気体、例えば、 CO_2 、 NH_3 、 SO_2 などの水への溶解度は大きい値を示すが、非反応性気体の溶解度は他の多くの有機溶媒に比較しても非常に小さいことが知られている。表 2.1.2-2 から、 O_2 、 N_2 の溶解度は、反応性の CO_2 の溶解度に比して著しく小さいことがよく分かる。

(2) CO_2 の水への溶解に関する既往研究

(a) 温度、圧力の影響

圧力と溶解度の関係を、温度をパラメータとして図 2.1.2-8 に示した。40atm までの破線で示した直線がヘンリーの法則であるが、どの温度のデータも 25atm 程度から線形関係でなくなる。したがって、溶解度の圧力依存性は実験値を参考しなければならないことがわかる。

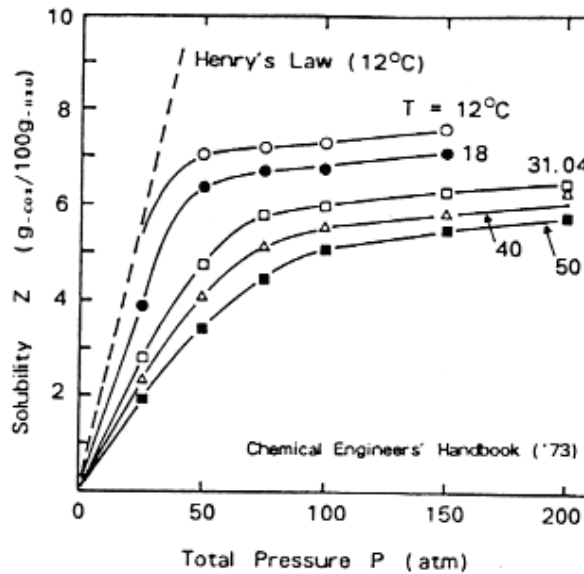


図 2.1.2-8 圧力と二酸化炭素溶解度の関係

出典：染矢 聡、坂東 茂、西尾 匡弘：CO₂の水への溶解度に対する圧力の影響（ガス析出法によるCO₂溶解度計測）、機械学会論文集、B,71-704,pp.151-155,2005

図 2.1.2-9 は、圧力をパラメータとした温度と溶解度のチャートであるが、CO₂ マイクロバブル地中貯留の対象となる圧力 30 気圧～50 気圧(対象範囲は、後述)、地下水温 30℃以下を対象範囲としてマーキングした。対象範囲の温度 10～30℃、圧力 30～50 気圧では CO₂ 溶解度は 30～65g/L である。

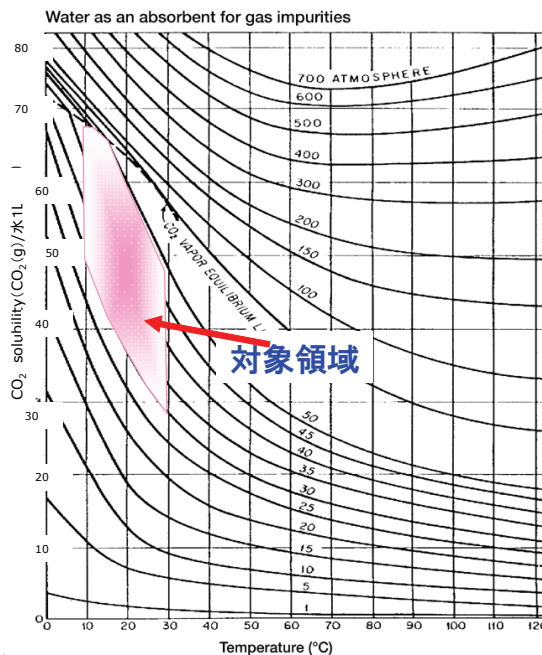


図 2.1.2-9 温度、圧力と CO₂ 溶解度の関係

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

実験値による CO₂ 溶解度を知るために、以下に実験による CO₂ 溶解度の温度と圧力の関係のデータと理論的關係を比較した。

染矢ら⁸⁾は、ガス抽出法によって純水への CO₂ 溶解度（モル分率）を計測し、図 2.1.2-10 のように報告している。圧力 7～12MPa、温度 282～294K(9℃～21℃)の範囲において、CO₂ 溶解度は、温度上昇とともに線形に減少し、圧力増加とともに増加する。図 2.1.2-10 に示されている相関式は、絶対温度とモル分率の関係で示されているので、摂氏温度 T (℃) と溶解度 C (kg/m³) の関係に変換すると、図 2.1.2-11 のようになる。また、この図より、温度をパラメータとして圧力と溶解度を示したのが図 2.1.2-12 である。これらの図より、CO₂ 溶解度は、温度が 10℃ から 20℃ に上昇すると、約 15% 減少するが、圧力 7 MPa と 12MPa の範囲では数 g/L の増加となる。

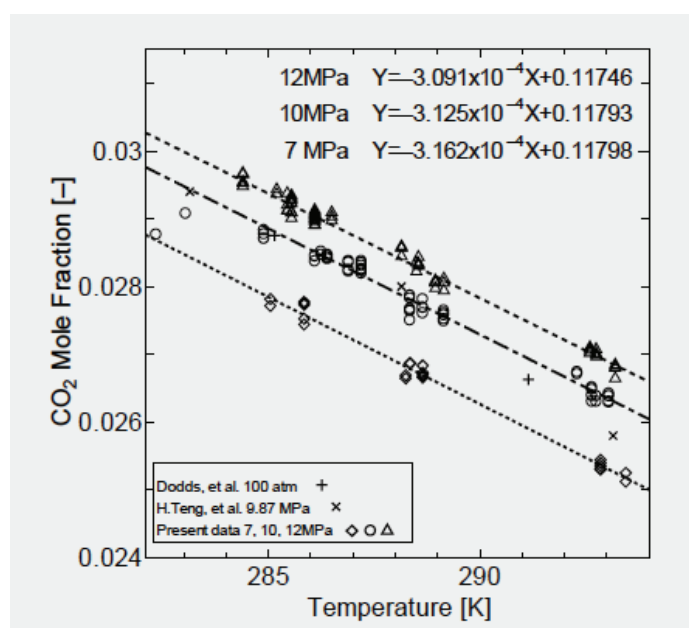


図 2.1.2-10 温度、圧力と CO₂ 溶解度（モル分率）の関係（染矢ら²⁾）

出典：染矢 聡、坂東 茂、西尾 匡弘：CO₂ の水への溶解度に対する圧力の影響（ガス析出法による CO₂ 溶解度計測）、機械学会論文集、B,71-704,pp.151-155,2005

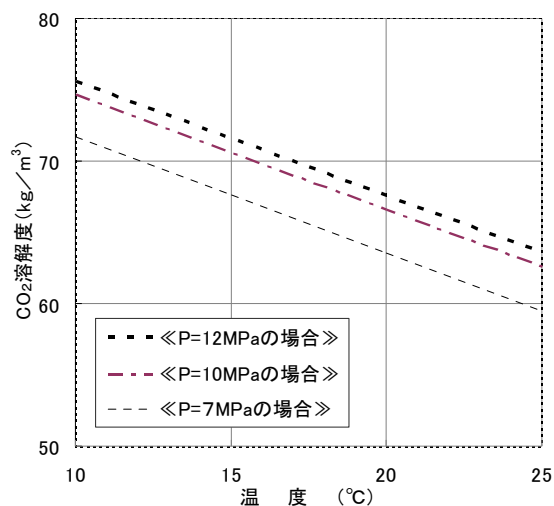


図 2.1.2-11 温度と CO_2 溶解度の関係
(文献 8 を変換)

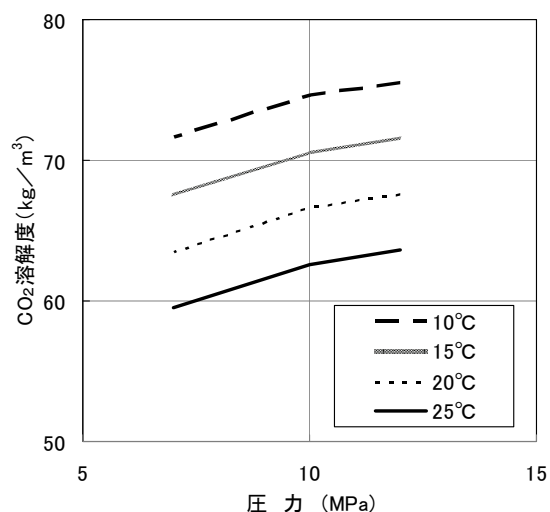


図 2.1.2-12 圧力と CO_2 溶解度の関係
(文献 8 を変換)

またいくつかの実験データ^{7), 8)}から圧力と溶解度 C (kg/m^3) の関係を、温度をパラメータとして図 2.1.2-13 に示した。図 2.1.2-10 で示した染谷ら⁸⁾の結果と同様、高压では CO_2 の溶解度は頭打ちになることがわかる。

CO_2 マイクロバブル地中貯留の対象圧力は、後述するようにおよそ圧力 30 気圧 (3MPa) から 50 気圧 (5MPa) であるので、その範囲を斜線で示した。同図より注入圧 1 MPa を作用させた場合の地下 300m での CO_2 溶解度は 45 g/L ($4.5\text{wt}\% \cdot \text{CO}_2/\text{m}^3$) であると想定される。

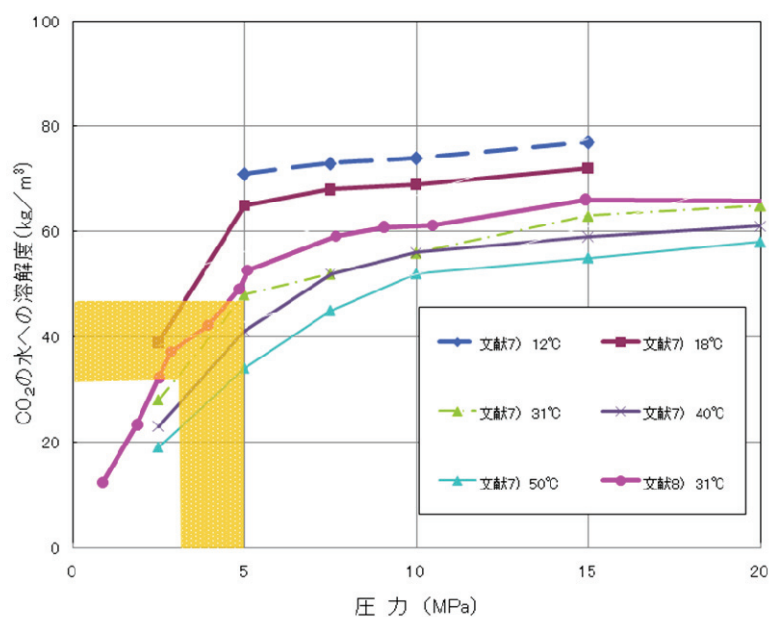


図 2.1.2-13 圧力と CO_2 溶解度の関係

図 2.1.2-13 に示したデータは、以下の計算過程によった。

- ・ 温度 30～31℃、圧力 30 ata、溶解度は $19.5 \text{ Nm}^3\text{-CO}_2/\text{m}^3\text{-H}_2\text{O}$

重量の単位に換算する。

$$N = PV/RT = 1 \times 19.5 \times 1000 / 0.082 \times 273 = 871.0 \div 871 \text{ モル}$$

CO₂ の分子量は 44 なので、

$$871 \times 44 = 38324 \div 38300 \text{ g} = 38.3 \text{ kg}$$

したがって

$$19.5 \text{ Nm}^3\text{-CO}_2/\text{m}^3\text{-H}_2\text{O} = 38.3 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3\text{-H}_2\text{O} = 38.3 \text{ kg-CO}_2/1000 \text{ ℓ} \cdot \text{H}_2\text{O}$$

$$= 38.3 \text{ g-CO}_2/\text{L}$$

$$= 0.0383 \text{ t-CO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{H}_2\text{O}$$

$$= 3.83 \text{ wt\%-CO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{H}_2\text{O}$$

$$= 3.83 \text{ wt\%-CO}_2/\text{m}^3\text{-液}$$

(CO₂ 溶解による体積変化は微小なので無視)

- ・ 温度 30～31℃、圧力 50 ata の時の溶解度は $27 \text{ Nm}^3\text{-CO}_2/\text{m}^3\text{-H}_2\text{O}$

重量の単位に換算する。

$$N = PV/RT = 1 \times 27 \times 10000 / 0.082 \times 273 = 1206.1 \div 1206 \text{ モル}$$

CO₂ の分子量は 44 なので、

$$1206 \times 44 = 53064 \div 53100 \text{ g} = 53.1 \text{ kg}$$

したがって

$$27 \text{ Nm}^3\text{-CO}_2/\text{m}^3\text{-H}_2\text{O} = 53.1 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3\text{-H}_2\text{O} = 53.1 \text{ kg-CO}_2/1000 \text{ ℓ} \cdot \text{H}_2\text{O}$$

$$= 53.1 \text{ g-CO}_2/\text{L}$$

$$= 0.0531 \text{ t-CO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{H}_2\text{O}$$

$$= 5.31 \text{ wt\%-CO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{H}_2\text{O}$$

$$= 5.31 \text{ wt\%-CO}_2/\text{m}^3\text{-液}$$

(CO₂ 溶解による体積変化は微小なので無視)

上述の計算より求めた CO₂ マイクロバブル地中貯留の対象となる深度 300m（後述する。）から 500m の圧力 3 MPa、5 MPa のデータを表 2.1.2-2 に示す。

表 2.1.2-2 温度と圧力の変化に伴う CO₂ 溶解度一覧

単位：wt%-CO₂/m³-液

() の単位：g-CO₂/L

		圧 力	
		3MPa	5MPa
温度	30 ℃	3.8 (38.3)	5.3 (53.1)

	50	2.2 (21.6)	3.4 (34.6)
--	----	---------------	---------------

次に溶解速度を実験結果から調べた。図 2.1.2-14 は、20MPa における温度の違いによる CO₂ 溶解度の時間変化である。これはセル内で水道水と CO₂ を静置して時間経過とともに溶解度を調べたもので、この場合 180 分経ても溶解度は増加傾向にある。CO₂ 溶解度は、経過時間 30 分までは水温 100℃の溶解度が高くなるが、経過時間 60 分以降は水温 70℃、100℃より、水温 30℃、50℃の溶解度が高い。また温度が高くなるにつれて溶解度は低くなる傾向がある。

ただし、水温 70℃と水温 100℃では、水温 100℃の溶解度が高いという結果になっている。この理由は、不明である。

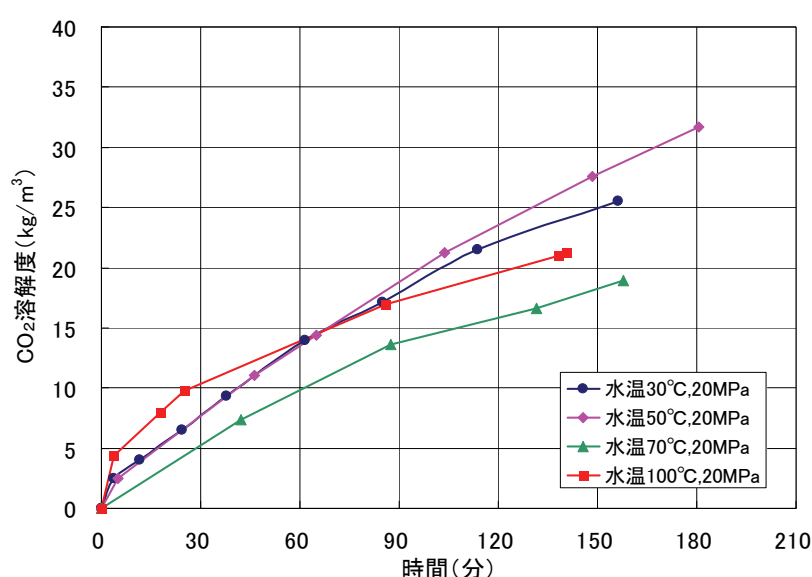


図 2.1.2-14 水温の違いによる CO₂ 溶解度の経時変化

(b) 攪拌の影響

溶解速度促進のため、平成7年度 二酸化炭素の隔離技術に関する調査研究⁹⁾では攪拌を行なっている。攪拌は容器内の水と CO₂ を攪拌することで溶解の均一状態を乱流効果により速めるものである。図 2.1.2-15 に試験結果を示す。攪拌とマイクロバブルとの溶解速度を直接これら実験データからは比較できない。前述のようにマイクロバブルの溶解速度は、乱流に支配されることから、攪拌による容器内の乱れによりマイクロバブルによる効果と同様の傾向になるものと考えられる。

攪拌なしの静止時は、圧力 20MPa の試験であり、攪拌時は 10MPa の試験であり、攪拌の有無による比較は圧力条件が異なる点を考慮に入れる必要があるが、攪拌することで圧力が 10MPa でも、静止時の圧力 20MPa より溶解する。すなわち乱流効果は溶解促進効果があるといえる。

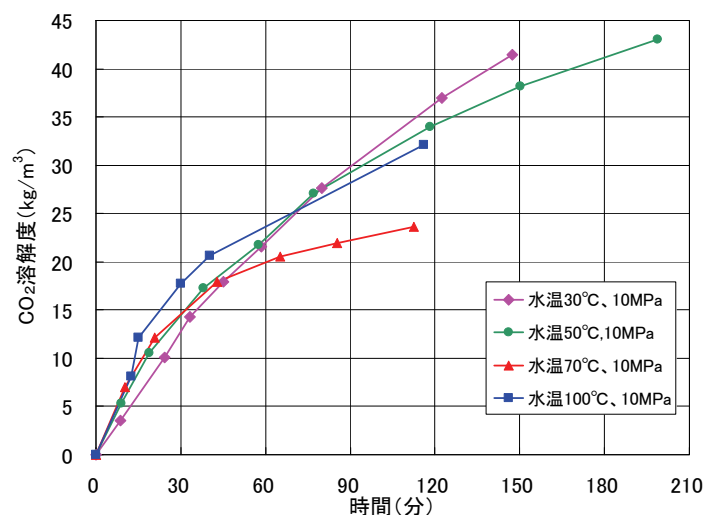


図 2.1.2-15 攪拌時の CO₂ 溶解度の経時変化

(c) 塩水の影響

ア. 温度、圧力との関係

塩分濃度と純粋な NaCl（塩）水への CO₂ の溶解度の関係を図 2.1.2-16 に示す。

塩分濃度が高くなると CO₂ 溶解度は下がる。IPCC の Special Report(2005)によると、塩分濃度の CO₂ の溶解量に与える影響は下記の式のように示されている。

$$w_{co_2,b} = w_{co_2,w} \times (1.0 - 4.893414 \times 10^{-2} S + 0.1302838 \times 10^{-2} S^2 - 0.17871199 \times 10^{-4} S^3) \quad (2.1.2-5)$$

ここで w_{co_2} は、CO₂ 溶解度である。 b は塩水を示し $w_{co_2, b}$ は、塩水の CO₂ 溶解度である。 w は、純水を示し、 $w_{co_2, w}$ は、純水の CO₂ 溶解度である。 S は塩分濃度である。

平均的海水塩分濃度への CO₂ 溶解度は、それを 3.5% として、2.1.2-5 式に代入すると、84% となる。

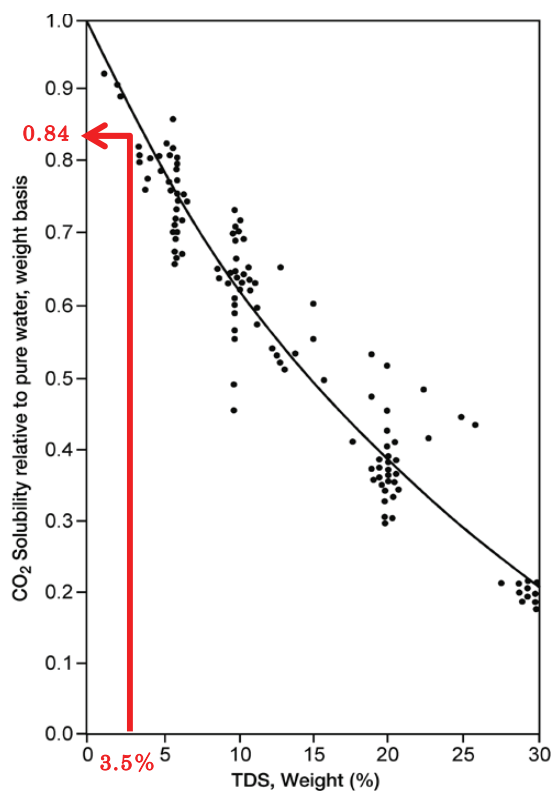


図 2.1.2-16 全蒸発残留物で表した塩水濃度と塩水の CO₂ 溶解度
(純水の溶解度 1 に対する比率)

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

図 2.1.2-17 に塩分の有無による CO₂ 溶解度の経時変化を示す。塩分有無における水温の違いによる溶解度の関係は、塩分なしの CO₂ 溶解度(150 分時点)は、水温低温(30℃、50℃)＞水温高温(70℃、100℃)である。塩分ありの CO₂ 溶解度は、水温低温(50℃)＜水温高温(70℃)である。

ただし、水温 50℃、70℃における溶媒の塩分の有無による比較では、塩分がある方が溶解度は低い。温度の影響を含むと、塩分有りは、水温 50℃と 70℃の比較では、水温 70℃の方が、溶解度が高いが、一方の塩分なしは、水温 50℃の方が、溶解度が高いという逆転が生じている。また、塩分なしの溶解度だけを見ても、150 分時点では、水温 50℃＞水温 30℃＞水温 100℃＞水温 70℃となり、低温の方が高温より溶解度が高いという関係はあるが、温度によりばらつきがある。

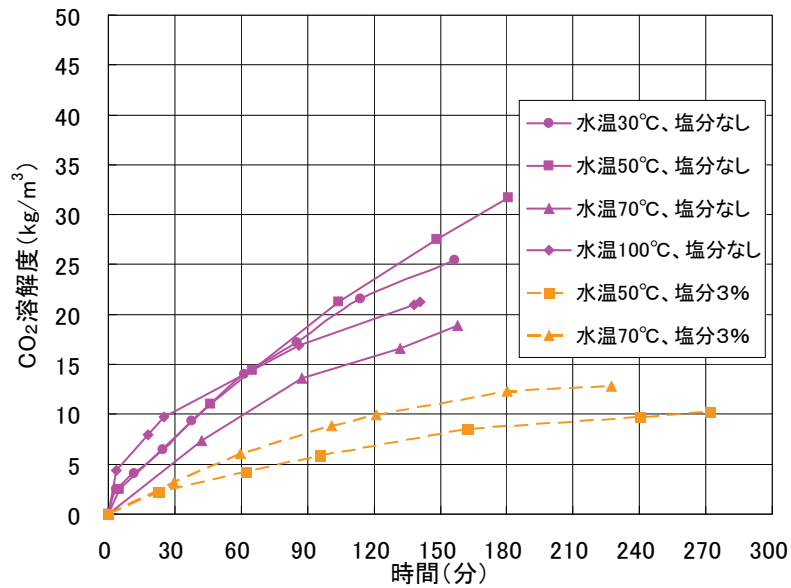


図 2.1.2-17 塩分有無による CO_2 溶解度（静止）の経時変化

同一圧力条件における塩分の有無による CO_2 溶解度は、図 2.1.2-18 に示す。塩分濃度が 0 %の方が CO_2 の溶解度は大きい。同じ圧力でも塩分濃度が 0 %の方が CO_2 は、溶解する。

圧力の違い、塩分濃度の違いによる CO_2 溶解度を図 2.1.2-19 に示す。20MPa の試験ケースの方が、10MPa の試験ケースより CO_2 溶解度が高い。塩分濃度 3 %の試験ケースの方が、塩分濃度 6 %の試験ケースより CO_2 溶解度が高い。水の塩分濃度が同一の場合、溶解度は圧力が高い方が高い。

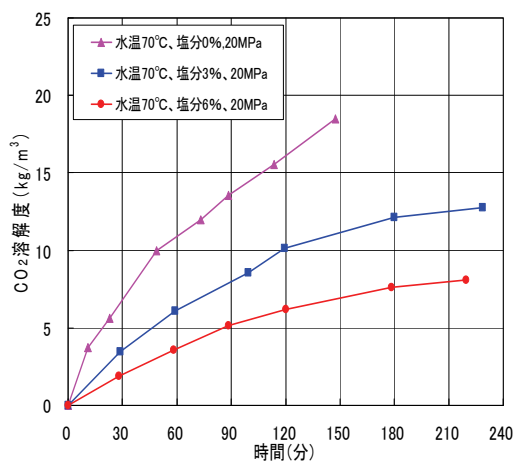


図 2.1.1-18 塩分濃度の違いによる
溶解度の経時変化（静止時）

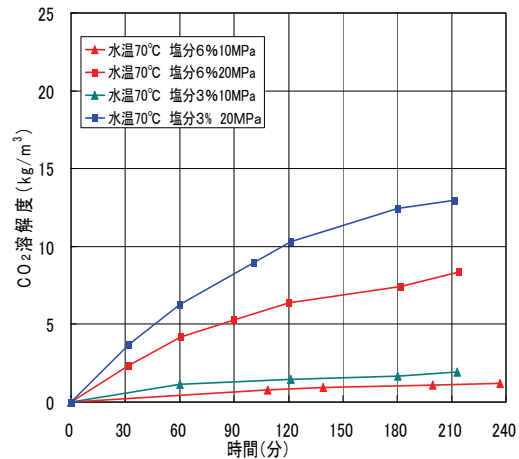


図 2.1.2-19 圧力の違いによる CO_2
 CO_2 溶解度の経時変化
（静止時）

イ. 攪拌の有無による溶解度の違い

塩水を溶媒とした攪拌時の CO_2 溶解度の経時変化を図 2.1.2-20 に、塩水を溶媒と

した静止時の CO_2 溶解度の経時変化を図 2.1.2-21 に示す。また攪拌時における CO_2 溶解度経時変化を塩分の有無をパラメータとして図 2.1.2-22 に示す。

図 2.1.2-20 と図 2.1.2-21 を比較すると、攪拌の効果により溶解速度が速いこと、また攪拌時でも高压の溶解速度が速いことがわかる。

図 2.1.2-22 の塩分濃度 0 %、3 %、10MPa、20MPa の攪拌の条件では、塩分 0 %、20MPa の CO_2 溶解度が高い。

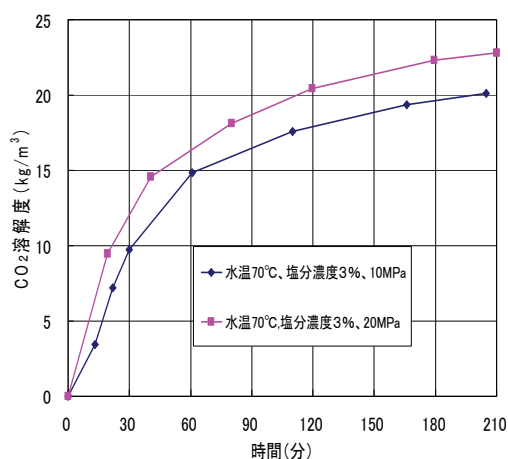


図 2.1.2-20 攪拌時の圧力の違いによる CO_2 溶解度の経時変化

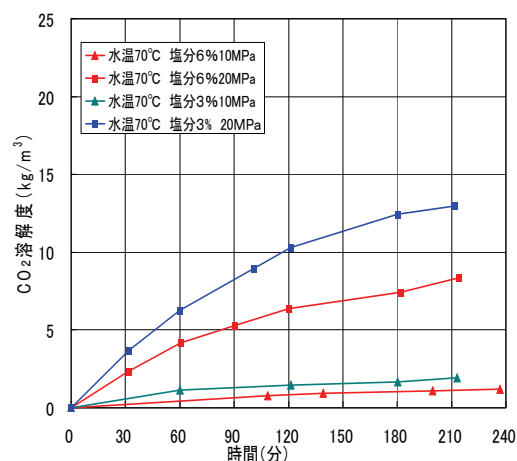


図 2.1.2-21 静止時の圧力の違いによる CO_2 溶解度の経時変化

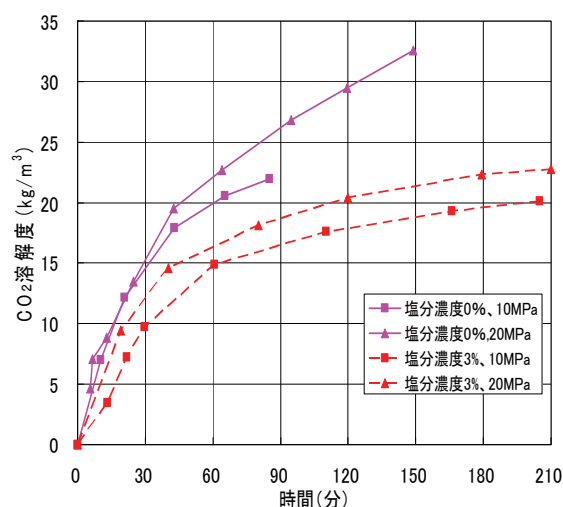
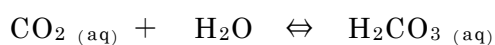


図 2.1.2-22 攪拌時の CO_2 溶解度の経時変化

ウ. 塩基との反応 —海水への CO_2 の溶解に伴う反応—

CO_2 が水に溶解すると炭酸(H_2CO_3)になり、炭酸水素イオン HCO_3^- と H^+ が生成し、pH が低くなる。



その後、その水に Ca^{2+} などがある海水では、炭酸イオン CO_3^{2-} が塩水中の Ca^{2+} などと反応し、炭酸水素イオン HCO_3^- が生成する。



また、高アルカリ度(高 pH)のもとで存在する炭酸イオン CO_3^{2-} は、塩水中の Ca^{2+} などと反応して炭酸塩が生成する。



上記の反応は、海水中の成分やバクテリアなどが触媒となり鉱物化を促進する可能性がある。

3) その他の CO_2 の性質

ここでは、前述の CO_2 の物理・化学的性質以外の性質についてまとめる。大気における通常の構成（現在 370ppmv という低い濃度で存在する）では、 CO_2 は危険でない。非引火性である。

常温常圧の空気より 1.5 倍の密度なので、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 CO_2 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。

圧力下にあるとき、 CO_2 の漏洩は非常に危険である。例えば、窒息、圧力解放中の騒音、凍傷、ハイドレート/アイスプラグ、高圧力などの状況が生じる可能性が想定される。

CO_2 の扱いと処理にはどんな CO_2 関連施設においても健康、安全、環境計画を準備期間に考慮しなければならない¹⁾。とされている。

4) CO_2 溶解水の密度

溶解による CO_2 の貯留においては、 CO_2 の密度が重要なパラメータとなる。 CO_2 の密度を計測した例を図 2.1.2-23 に示す。図では、横軸に CO_2 溶解水の濃度を、縦軸に CO_2 溶解水の密度を水の密度との差で示してある。濃度上昇に伴い、密度も上昇し、地下水より次第に重くなることがわかる。例えば、20℃の場合、勾配は 2.84 なので、4 wt%濃度の溶解水では密度差は $11.36 \times 10^{-3} \text{kg/L}$ であるから、4 wt% CO_2 溶解水の密度は約 1011kg/m^3 となる。

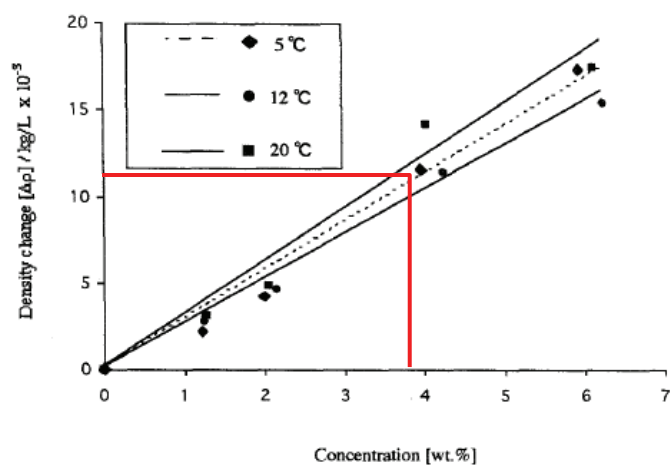


図 2.1.2-23 溶存 CO_2 濃度－ CO_2 溶解水の密度変化

出典：小島、山根、綾：二酸化炭素溶液密度の絶対計測、National Marine Institute

2.1.3 既往の CO₂ 貯留方式

既往の CO₂ 貯留について、石油や天然ガスの増進回収や研究段階のものを含めて表 2.1.3-1 にまとめる。

表 2.1.3-1 既往の CCS 方式とその概要

CCS 方式	貯留方法の概要
深部塩水帯水層（Deep Saline Aquifer）貯留	CO ₂ を超臨界状態となる温度・圧力で地下 800m 以深の帯水層に注入し、貯留する。モニタリング必要。
溶解方式の浅部貯留	CO ₂ を飽和濃度レベルまで溶解させた炭酸ガス溶解水を地上で生成し、このガス溶解水を地中の帯水層に注入する。
マイクロバブル法による地中貯留	CO ₂ を飽和濃度レベルまで溶解させた CO ₂ 溶解水を地上で生成し、この溶解水を地中の帯水層に圧入する。
液体バブル法	高圧で液化した CO ₂ をマイクロバブルとして水と混合することで、エマルジョンを作り、地層の間隙に貯留する方法。
ジオリアクター	地中高温地域に排ガスを注入した場合、岩石中の Ca 等との反応により炭酸塩が生成し、CO ₂ の固定化が促進されるとともに、岩石亀裂中で炭酸塩が沈殿する場合には、セルフシーリング効果により、その下部に CO ₂ を安定的に貯留するシステムを形成することが期待される。
炭層固定	CO ₂ を石炭層に注入して、石炭中の微小空隙に吸着させ、元々吸着されていたメタンガスを置換して、メタンを回収する。
石油・ガス増進回収（EOR、EGR）	CO ₂ を超臨界状態で油田、ガス田に注入し、油田の場合は超臨界 CO ₂ と油が混ざり、粘性が低下し、油の回収が増進される。ガスの場合は、炭層固定と同じ。
枯渇油・ガス層貯留	枯渇した油田、ガス田に超臨界状態の CO ₂ を注入して、そこに貯留する。
蛇紋岩層固定	蛇紋岩岩盤中の地下水に CO ₂ を注入して、酸性化することで Mg の溶解を促進し、Mg 炭酸塩鉱物を沈殿させることで CO ₂ を固定する。貯留ポテンシャルは、11.1～14.7 億 tCO ₂ /y（国内蛇紋岩体）。高アルカリ地下水を伴う蛇紋岩体は CO ₂ を炭酸塩鉱物として固定する能力を有している。蛇紋岩体への CO ₂ 注入によって地下水が酸性化し、蛇紋石（Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ ）およびブルーサイト（Mg(OH) ₂ ）の溶解反応が促進され、

	Mg が地下水に供給される。この地下水が移行する過程で接触した鉱物が溶解して地下水は徐々にアルカリ性へ回復し、余剰な Mg が Mg 炭酸塩鉱物として沈殿する可能性がある。
コールベッドメタン増進回収	石炭は、木材から亜炭、褐炭、亜瀝青炭、瀝青炭、無煙炭と石炭化が進行していく過程で水分とメタンを放出する。このメタンはコールベッドメタンと呼ばれ、効率的に回収すると天然ガス資源として活用することができ、天然ガスとしてのコールベッドメタンを増進回収する方法を、コールベッドメタン増進回収(ECBM)と呼ぶ。 増進回収には、CO ₂ 、N ₂ 、燃焼排ガス等を注入井から高圧で注入し、石炭層内で注入ガスとメタンを置換させ、生産井からメタンを生産する方法となる。

2.1.4 まとめ

CO₂ マイクロバブル地中貯留の基本コンセプトを考えるにあたり、マイクロバブルおよび CO₂ の特性をまとめると表 2.1.4-1 のようである。

表 2.1.4-1 マイクロバブルおよび CO₂ の特性

マイクロバブル特性	地中貯留におけるメリット
①界面面積/総体積が大きい	直径 10 μ m のマイクロバブルの界面面積/総体積は直径 1mm のミリバブルのその 100 倍、そのため溶解しやすい。
②浮上速度が遅い	浮力が小さいため、遮蔽層に到達した場合でも大きな浮力が働かない。
③内部圧力が高い	径に反比例して内部圧力が高くなるため、ミリバブルよりマイクロバブル化すると圧力は高くなり、圧力効果により溶解度も向上する。
④表面が負に帯電している	マイクロバブル同士の結合は帯電の反発により抑制される。そのため①の性質が保持される。
⑤自己圧壊性を有する	反応性が高くなる。
⑥高密度でのマイクロバブルの発生と吐出	加圧溶解法では数千個/mL、二相流旋回法では数百個/mL 程度のマイクロバブルが発生し、二相流旋回法では、大量吐出のため溶解速度が速くなる。
⑦CO ₂ 溶解水の密度	CO ₂ が溶解した地下水の密度は、溶解していない地下水に比べて重くなる (4wt% の CO ₂ 溶解水 1011kg/m ³) ので溶解水は下降する。
⑧マイクロバブルの残留	大気圧状態で水 1m ³ 当りに 1.73kg の CO ₂ が溶ける。

	高濃度マイクロバブルで直径 $10\ \mu\text{m}$ のものが 2000 個/mL の場合、体積にして 1m^3 当り 4.7cc しか存在しないことになる。4.7cc は $4.7/44=0.1\text{g}$ となり溶解量の 1/10,000 以下の量である。高圧状態では、溶解量が増加し、気泡直径は小さくなるのでそれらの差はより大きくなり、残留分は無視できる。
--	--

以上のことから、ほぼ全溶解で CO_2 溶解水を貯留層に注入し、貯留する方法を考えることが可能である。

2.1 節 参考文献

- 1) http://staff.aist.go.jp/m.taka/RS_Characteristics_of_マイクロバブル.html : 2.3 マイクロバブルの特徴
- 2) http://staff.aist.go.jp/m.taka/RS_Generation_methods_of_マイクロバブル.html : 2.2 マイクロバブルの発生法
- 2) 小林森雄、末政直晃、永尾浩一、岡庭一憲：マイクロバブル水の混入における飽和度低下効果の検討、第 65 回土木学会年次学術発表会、Ⅲ-091、2010
- 3) 川村隆文：マイクロバブルによる抵抗低減メカニズムに関する数値的・実験的解明、ながれ 25、pp199-208、2006
- 4) <http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-multiphase/research/research3.html> : マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果に関する研究
- 5) 竹村文男、矢部彰：水中における上昇二酸化炭素気泡のガス溶解速度に関する研究、日本機械学会論文集（B 編）64 巻 623 号（1998-7）
- 6) 杉山和靖、川島久宜、藤原暁子、菱田公一、羽田智信、亀田正治、児玉良明：マイクロバブル溶解に対する乱流影響に関する研究、海上技術安全研究所報告、6(2), pp. 139-154、2006
- 7) 染矢 聡、坂東 茂、西尾 匡弘： CO_2 の水への溶解度に対する圧力の影響（ガス析出法による CO_2 溶解度計測）、機械学会論文集、B, 71-704, pp.151-155, 2005
- 8) 新エネルギー・産業技術総合開発機構・財団法人 地球環境産業技術研究機構・社団法人 化学工学会、平成 7 年度 二酸化炭素の隔離技術に関する調査研究、平成 8 年 3 月

2.2 貯留システム概念の構築

2.2.1 基本コンセプト

CO₂ マイクロバブル地中貯留システムの基本コンセプトを表 2.2.1-1 にまとめた。

表 2.2.1-1 CO₂ マイクロバブル地中貯留システムの基本コンセプト

	深部塩水帯水層貯留	マイクロバブル法貯留
CO ₂ の状態	超臨界	全溶解
注入方法	単孔注入	注入井・揚水井併用方式 注水－揚水間において CO ₂ 貯留を制御することが可能となる。 注水－揚水のセットにより注入圧を低減させられる。 CO ₂ 溶解の溶媒としての地下水を確保すること、それを用いることによる環境負荷を低減させる。
遮蔽層	超臨界状態の CO ₂ 密度は 200～900kg/m ³ であり、地下水より小さいため、遮蔽層で浮力を抑える必要がある。十分な強度と低透水の遮蔽層が必要となる。	CO ₂ 溶解水は地下水より密度が大きいので下降することが期待される。 深部塩水帯水層貯留に比べて、地上までの漏洩距離が短いので、遮蔽層には、低透過性、低拡散性が要求される。透過性には、発生時や残留マイクロバブルの長期的な浮上に対する気化 CO ₂ の透気性と遮蔽層に溶解水の圧力が作用した場合の透水性が含まれる。
貯留深度	-800m 以深	地下水利用深度以下の浅部地層で可能（およそ-300m～-500m）

2.2.2 基本シナリオの検討

1) 地域分散型貯留の概念とその必要性

我が国の産業別の CO₂ 排出量一覧の例として、2007 年度調査結果を事業所あたり排出量の多い順に表 2.2.2-1 に示す。これより少ない排出量のものは省略した。この表より、4 位以下は 1 事業所あたりの排出量が、ほぼ 10 万 t-CO₂ 以下がほとんどを占めている。

表 2.2.2-1 産業別 CO₂ 排出量一覧

	業種	2007 年度排出量(t-CO ₂)		事業所数	事業所あたり排出量(t-CO ₂)
		直接	間接		
1	電気業	439,552,874	24,166,489	232	1,894,624
2	鉄鋼業	186,889,270	204,343,459	477	391,801
3	石油精製	33,546,182	35,711,082	120	279,552
4	窯業・土石製品製造	71,122,471	71,680,166	559	127,232

	業				
5	パルプ・紙・紙加工 品製造業	28,498,646	31,151,346	388	73,450
6	化学工業	80,682,372	90,032,012	1,141	70,712
7	サービス業(清掃工 場など)	13,960,325	15,452,291	607	22,999
8	繊維工業	6,556,260	8,728,720	336	19,513
9	鉱業	1,209,580	1,458,907	64	18,900
10	電子部品・デバイ ス・電子回路製造業	12,852,420	21,743,274	687	18,708

さらに、特に排出量の多い電気業、鉄鋼業について事業所排出量のヒストグラムを図 2.2.2-1 に示す。これによると、事業所ごとの排出量で年間 10 万 t を超えていた。これらの産業においても、年間排出量が 10 万 t 以下の事業所を多く抱えている。さらに全産業においても事業所の大部分は年間 10 万 t 以下であることが推測される。

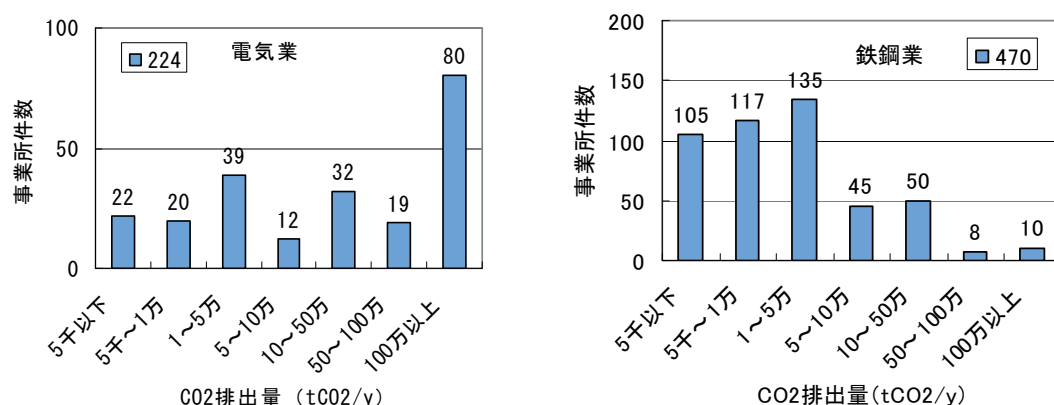


図 2.2.2-1 電気業、鉄鋼業について事業所排出量のヒストグラム

本報告では、年間 10 万 t の CO₂ を排出する事業所を大規模排出事業所と年間 10 万 t 未満の CO₂ を排出する事業所を中小規模排出事業所と定義する。図 2.2.2-1 に示すように事業所の大部分を占める中小事業所の CO₂ 貯留方法が必要であることは容易に推測される。

中小事業所の CO₂ 貯留を検討する場合、定める必要のあるスペックは、貯留位置、貯留規模、貯留深度および貯留方法である。貯留位置は、輸送コストを下げるために事業所の直下または近傍が望ましい。貯留規模は、これまでの事業所排出量の結果より、年間 1～10 万 t 程度と考えられる。下限の年間 1 万トンはいくまでも目安であり、コストなどの検討より導かれるものとするが、暫定的に定めた値である。深度は、超臨界貯留の場合より浅部となり、物理的に定まることは無い。さらにコストの面からはできるだけ浅いのが望ましいが、井戸による地下水利用が行われているために、利用地下水に影響の無い深度を確保する必要がある。また、利用地下水への影響排除のため、利用地

下水圏よりも低い位置にある低透水層を把握の上、その下層に貯留することが必要となる可能性が考えられる。貯留方法は、注入位置での地下水組成への影響を抑えるために、かん水に CO_2 を溶解させたものを注入する方法が適すると考える。

このような貯留方式では、事業所近傍での注入のため、液化、輸送のコストがなくなることに加え、ボーリング深さも浅くなることが予想されるため、ボーリング費用が軽減されることが考えられる。このため、注入コストが安価になることより、中小規模排事業所でも導入の容易な注入方式であると考えられる。

図 2.2.2-2 に現在考えられる CO_2 地中貯留のイメージ図を示す。地上に注入設備を設置し、直下に注入井を設ける。注入井は、遮へい層となる低透水性地層の下位の孔隙率の大きい地層（砂層：砂礫層も含む）に到達させる。

ただし、未固結堆積物は、強度の面で避けるべきである。距離を離れた地点に揚水井を設置し、地下水をくみ上げる。このかん水に CO_2 を溶解させ地中に注入する。注水井および、揚水井の間での移流を基本的には利用し CO_2 を注入する。砂層に元々地下水流動がある場合はそれを利用して効率化を図る。

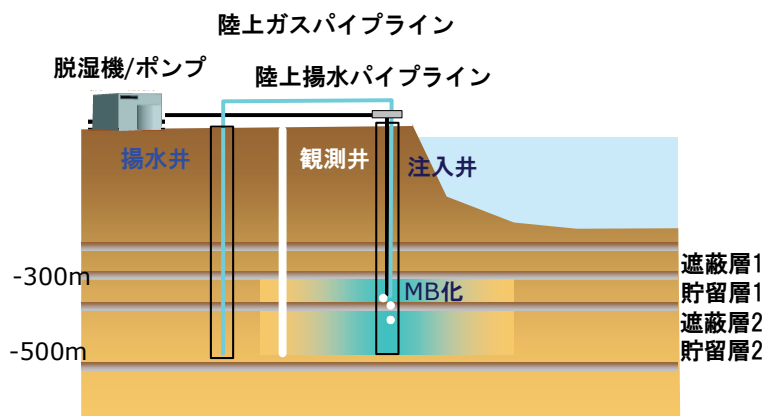


図 2.2.2-2 CO_2 の地層貯留のイメージ

2) 基本シナリオの設定

(1) 発生ガスの分離の有無

事業所より排出されるガスには、 CO_2 以外にも多くの気体が含まれている。例えば空気の大部分を占める窒素ガスなどは相当量が含まれると推定される。 NO_x などの化合物になっていない窒素ガスは、不活性であり、水への溶解度が低い。これを CO_2 とともに地中に注入すると CO_2 の貯留効率を下げることとなる。排ガスをそのまま注入しない場合、分離回収作業が発生することになり、そのコストを考慮することが必要となる。また、分離しない排ガスをマイクロバブル化し水に注入しても、窒素ガスは溶解しにくいいため、気体として分離し回収することができれば、 CO_2 を主体に注入し溶解させることになる。この場合は、 NO_x や SO_x などの通常有害とされるガスも溶解させる可能性がある。

このように、排ガスからの CO_2 分離の有無により、コストや不溶ガス回収技術や有害ガスの環境への影響評価などの検討が必要になるが、現在は、それぞれのシナ

リオを提示するにとどめる。

(2) 貯留 CO₂ の状態

CO₂ を貯留する場合の状態は、容積の観点からすると液体もしくは固体が望ましい。CO₂ の状態図を図 2.2.2-2 に示すように、固体は極低温もしくは高圧領域、さらに液体は例えば地温が 20～35℃あたりでは、およそ 500m より深い領域の圧力で存在可能となる。本貯留法では、貯留深度をできるだけ浅くすることを前提に、温泉井戸を除く一般的な利用地下水圏よりも深いと考えられる 300m から 500m の間の貯留層を対象としている。

地下 300m から 500m の間では温度 20～35℃が想定され、CO₂ は気体として存在する。地上への上昇をできるだけ避けることのできる CO₂ の状態としては、地下水への溶解が適切と考えられる。CO₂ 溶解水を作成する最も効率の良い方法として、CO₂ のマイクロバブルを発生させ、急速な溶解に期待することとした。

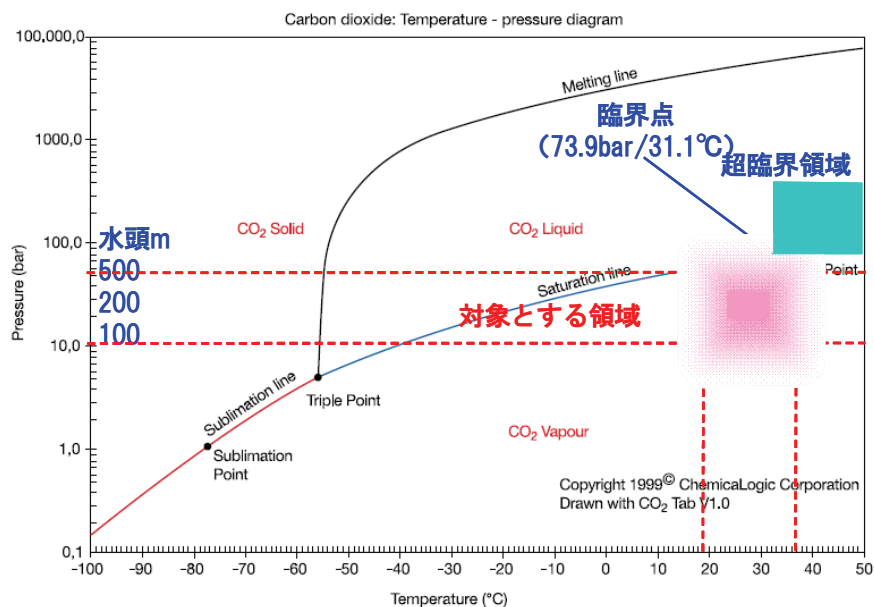


図 2.2.2-2 CO₂ の状態図

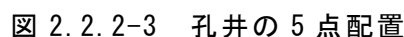
(3) 注入井配置（水平方向、深さ方向）

孔井は、注入井、揚水井、モニタリング井から構成される。このうち、注入井とモニタリング井は必須である。

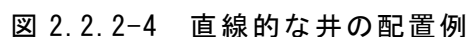
揚水井は、貯留層の地下水の移流速度が小さく、注入に伴い注入位置での CO₂ 濃度が上昇し飽和にいたる懸念が大きい場合は、周囲への移流を喚起すること、注水量、揚水量の制御により溶解水の移流をコントロールすることを目的としている。また溶媒水となる水の確保により、コストメリットもある。

貯留層に移流の存在が期待され、その速度が大きいために注入量よりも移流によって CO₂ 溶解水が移動し注入位置での CO₂ 濃度が飽和にいたることの無い場合、これに揚水井を加える必要は無いと考えられる。この場合は、CO₂ 溶解水の移動を

揚水井の配置に関しては、平面方向および深さ方向で様々な組み合わせが考えられる。本報告ではその例を示す。これらの優劣に関しての評価は今後の課題とする。平面的な孔井の配置パターンの一般的なものに、図 2.2.2-3 に示すような 5 点配置がある。これは、注入井を中心に設置し、周囲の正方形の頂点に揚水井を配置する配置である。



● : 注入井 ● : 揚水井 ● : 未使用井
● : 使用済井 ● : モニタリング井



47

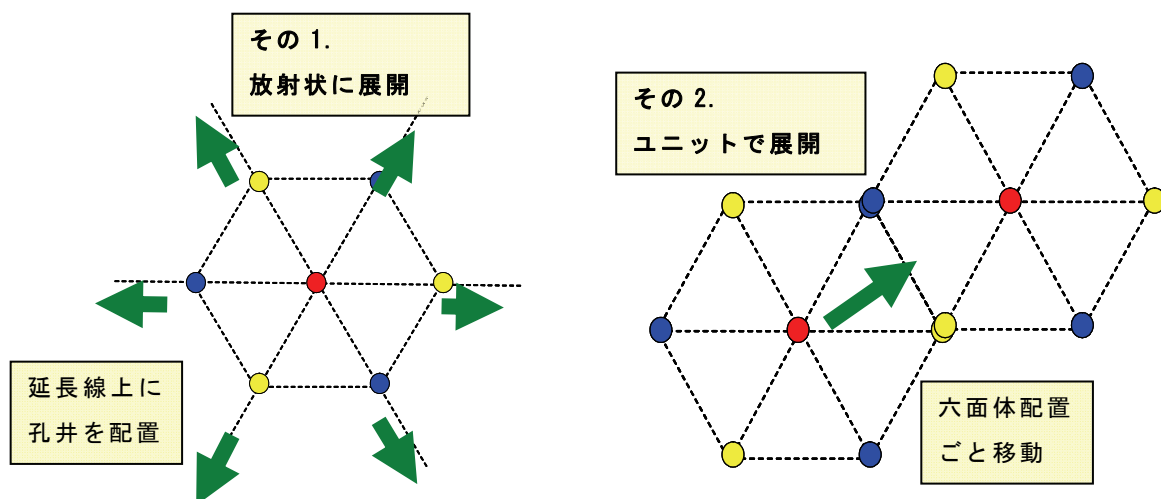


図 2.2.2-5 平面的な井の配置

(4) CO₂ マイクロバブル地中貯留システムのまとめ

概念検討の段階であるが、これまでに示した CO₂ をマイクロバブル化して注入する CO₂ マイクロバブル地中貯留システムの特徴を以下に示す。

・貯留深さを浅くできる

現在検討されている深部塩水帯水層における大規模 CO₂ 貯留は、超臨界状態 CO₂ を対象としており、貯留深度が 800m 以深とされている。ボーリングコストおよび、漏洩管理などを考えると、深地層での技術的な困難さや経済性は大きな課題であるが、本貯留システムでは 300～500m の深度を対象とするために、これらの困難さは大幅に軽減されるものと考えられる。

・システムがコンパクトである

中小規模排出源を対象とするために、CO₂ の排出量が少なく貯留範囲を制限できるとともに貯留深度が浅いため、注入のためのシステムは深部塩水帯水層における大規模 CO₂ 貯留に比べコンパクトなシステムで対応可能と考えられる。

・注入および、貯留 CO₂ をモニタリングおよびコントロールできる

貯留 CO₂ の挙動に関し相当期間のモニタリング義務が生じる可能性があるが、循環を中心としたシステムでは、新たに設置しなくても注入井や揚水井として使用した孔井をモニタリング井として用いることができる。これによって、効率的・効果的に周囲環境影響を精度よく把握することが可能になると考えられる。モニタリングが可能であれば、注入 CO₂ 量をコントロールすることは容易になると考えられる。

・マイクロバブルを用いるために貯留層上部に CO₂ プリュームが形成される可能性が低い

マイクロバブルは浮力が小さく、互いに退け合い、最終的に溶解するなど大きな気泡と異なる性質を持ち、CO₂ プリュームや大きな気泡が発生して貯留層上部に上昇する可能性は低いと考えられる。さらに、CO₂ 溶解水はかん水に CO₂ を溶解させたものであるため、密度は地下水よりも大きく、貯留層下部に沈降していくと考えられる。

このため、CO₂ のガスや液体がプリュームを作り貯留層を押し上げ、破壊する可能

性は低いと考えられる。

(5) マイクロバブル発生方法・発生場所

マイクロバブルの発生方法としては、加圧溶解型と回転せん断型がある。このうち、加圧溶解型は、 CO_2 の過飽和を利用するため、注入圧に加えてさらに大きい圧力を発生位置で加えることが必要となる。このため、マイクロバブルの発生位置が地下になる場合は圧力の確保や、周囲岩盤への影響などを考慮すると加圧溶解型の発生法は適さないと考えられる。

気体 CO_2 が発生しプルームが形成されると、地上への漏洩が懸念される。また、注入位置では温度は $20\sim 35^\circ\text{C}$ 程度と見込まれ、ジオリアクターのように化学反応による鉱物化を促進する作用も見込めない。このため、 CO_2 は溶解水としての注入が望ましい。ただし、マイクロバブルの発生後に大きな気泡も生じてしまうことや、一部のマイクロバブルは溶解せずナノバブル化して長い間存在することが指摘されている。大きな CO_2 の気泡回収のため発生位置では CO_2 ガスの捕集を行う設備が必要となり、これが単純な地下水の圧送と異なる点となる。

これらを考慮したうえで、マイクロバブルの発生場所について検討した。まず、地上で CO_2 溶解水を作成し地中に注入する場合は、そのままでは圧力が低いために溶解水の濃度は、貯留位置での飽和濃度より低くなると思われる。このため、加圧状態を維持できる密閉型の地上施設が必要となり、耐圧の仕様を維持したまま貯留位置までの圧送ラインも必要となると考えられる。一方で、地上でマイクロバブルによる溶解を行う場合、大きな気泡の回収や、マイクロバブルの状態のモニタリングは容易であると考えられる。

直接深部の地中に注入する場合は、 CO_2 のラインとかん水のラインの 2 系統で貯留位置までこれらを送り、マイクロバブル化する。この場合は、注入井と揚水井および地下水分布状態で定まる水頭による管理のみで良いために、地上での溶解方式に比べ地上施設は簡略化が可能であると考えられる。ただし、原位置でのマイクロバブル発生のため、注入孔出口付近での大きな気泡の回収や、マイクロバブルのモニタリングが必要となるため、注入位置での設備が複雑化する可能性がある。

浅/中深度での場合は、特に中深度でマイクロバブルを生成すると貯留層に近い圧力条件での生成となり、貯留深度に近い条件の設備性能で可能と思われる。貯留層までの到達に時間を要するため、マイクロバブルの溶解に必要な時間を確保できると考えられる。さらに、大きな気泡は注入孔を逆流する形で上昇するために、回収のための設備を要しないと考えられる。

表 2.2-1 に各注入方法の特徴をまとめる。

表 2.2-1 各注入方法の特徴

注入位置	地上	浅/中深度	深部の貯留層深度
溶解水濃度	低い	高い	飽和
地上施設	加圧装置	圧送のみ	圧送のみ
大きな気泡	考慮せず	ラインで回収	貯留層に注入
気泡のモニタリング	不要	不要	必要

- ・ 注入圧は静水圧＋注入圧であるため、あまり高圧にすると遮蔽層の破壊が起きることが懸念される。なお、注入区間長が長い場合は、特に注意が必要である。

(6) 基本シナリオ

図 2.2.2-6 に排ガスより分離回収を行った場合の CO₂ の貯留システム(貯留シナリオ)の概念をブロック図として示す(図ではマイクロバブルを MB: 気泡を B と標記)。

まず、貯留深度により CO₂ の状態が異なる。本検討で扱うのは上段の深度 300～500 m への貯留である。この場合はマイクロバブルに変換し CO₂ 溶解水を作成する。下段では深度 500～700m の領域となりこの範囲では液体 CO₂ を貯留することになり、今年度の検討では範囲外となる。

上段のマイクロバブル化した CO₂ では、CO₂ の状態によって大きな気泡の場合は孔井内を CO₂ として回収されるが、地盤中に注入される可能性もある。CO₂ が溶解した場合は溶解の分だけ周囲の地下水より比重を増して存在することになるが、溶解されなかったものがある場合には貯留層の空隙にトラップされるなどして残留するマイクロバブルやマイクロバブルの形状のまま遊離して移動するマイクロバブルが存在する可能性がある。溶解した CO₂ は、貯留層に留まり、将来的には鉱物化し、固定化されることが期待される。しかし、残留および遊離マイクロバブルには、集合し気泡を作る懸念もある。この場合は、気泡は浮力が大きいため、貯留層の上方へ移動することになる。これを利用地下水範囲へ到達させないための遮蔽層が必要となる。

なお、液体 CO₂ は密度が地下水よりも小さいため、CO₂ のプルームを形成し浮力による上昇が考えられる。この場合も貯留層の上方に遮蔽層を必要とする。

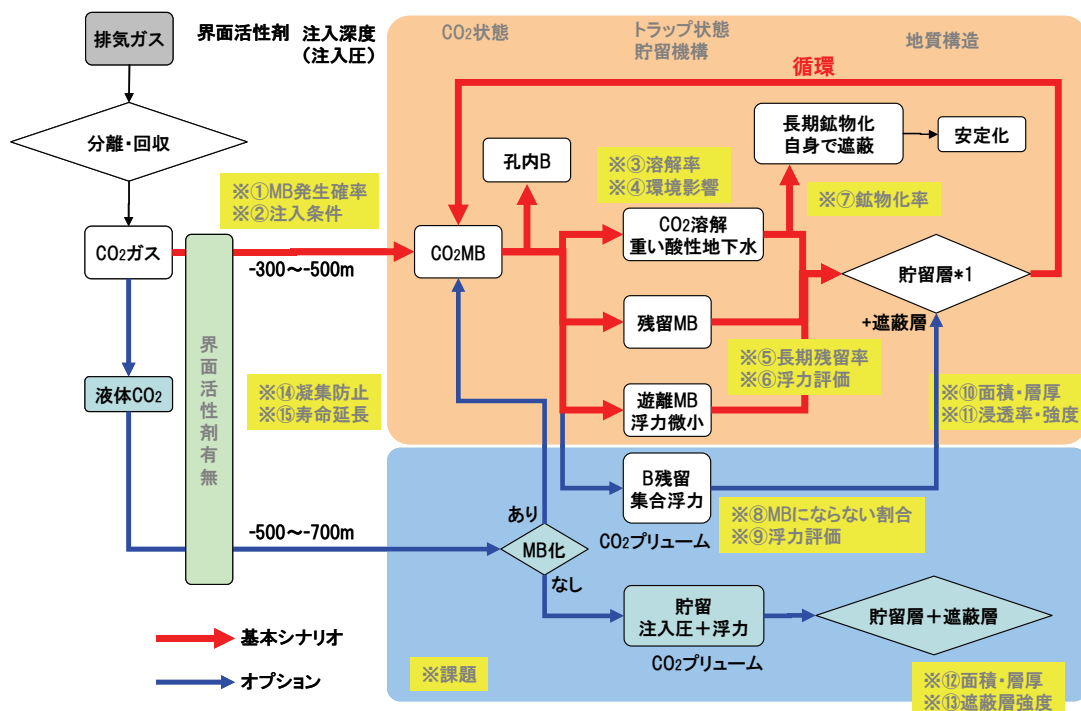


図 2.2.2-6 CO₂ がソースの場合の貯留フロー図

CO₂を分離せず、排ガスをソースとしてCO₂を貯留するシナリオのブロック図を図2.2.2-7に示す。マイクロバブルとして注入された排ガスのうちCO₂より溶解度の低いN₂やO₂、NO_xなどは結合し大きな気泡となり浮力により注入井を逆流することで回収できる可能性がある。また、孔内にSO_xや重金属などの回収装置などを設けることが可能であればこれらの回収をおこなう。残りは、CO₂ガスとなるため、図2.2.2-2のCO₂がソースの場合の貯留シナリオと同じとなる。

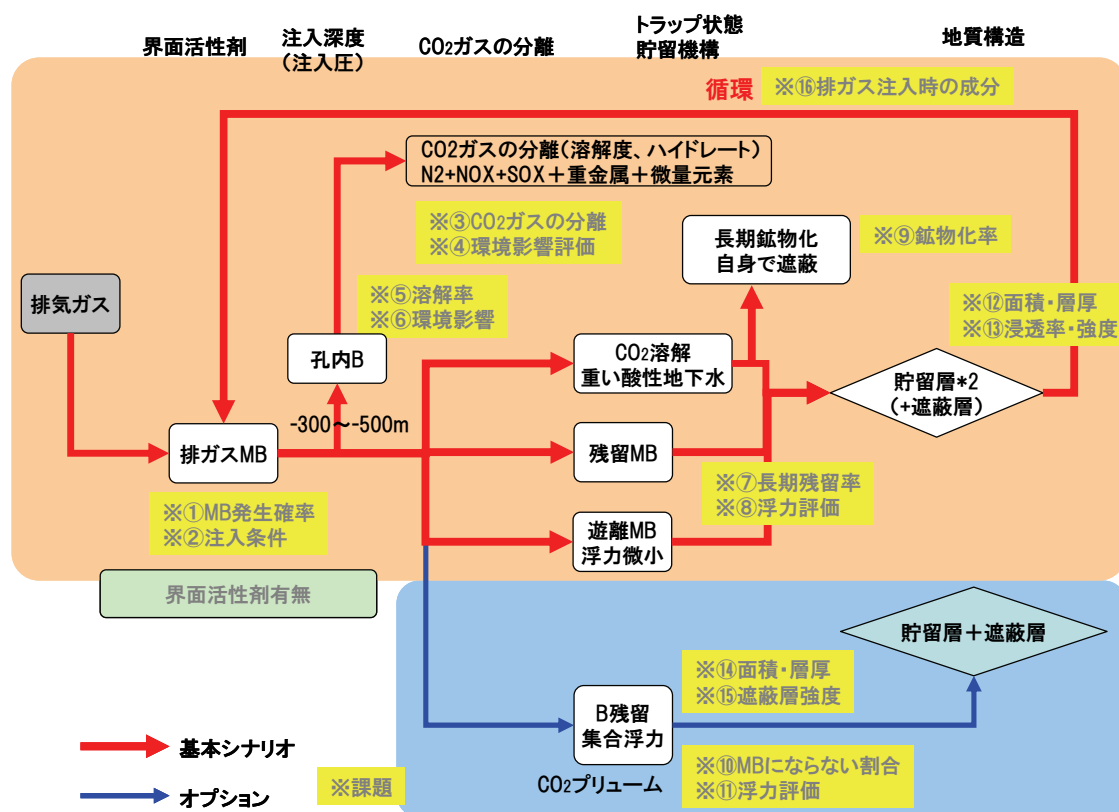


図 2.2.2-7 排ガスがソースの場合の貯留フロー図

2.2.3 深部塩水帯水層貯留との比較

IPCC では、CO₂ の深部貯留の方法として図 2.2.3-1 のような例を示している。

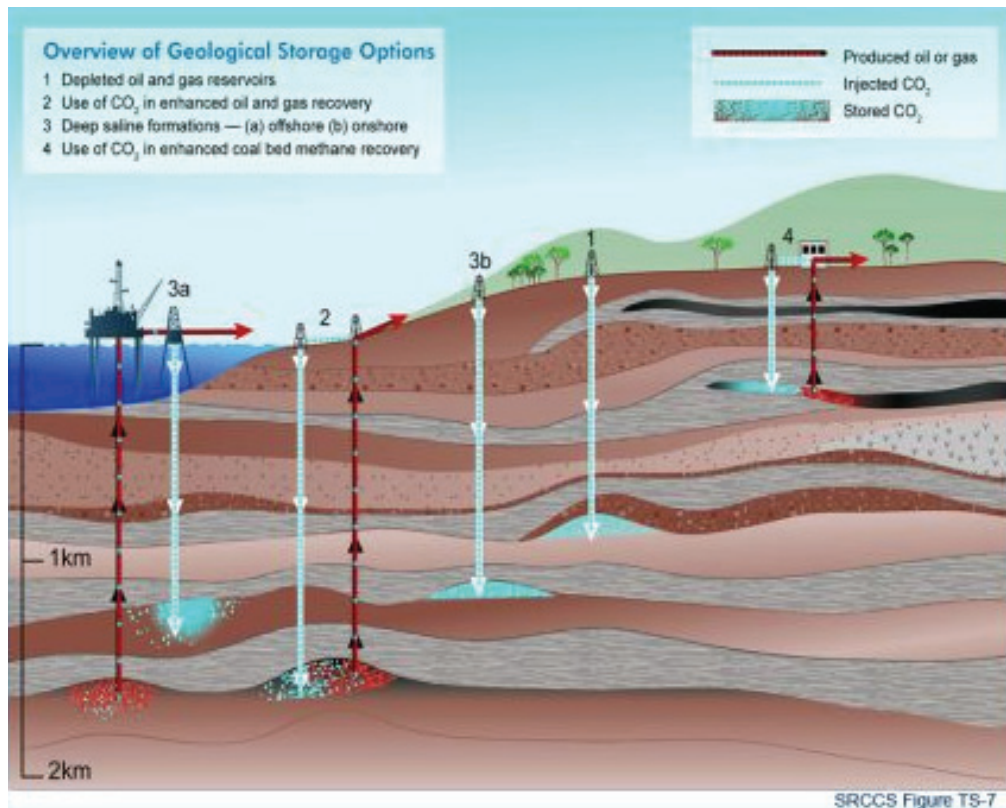


図 2.2.3-1 深部地層への CO₂ の貯留方法

出典：IPCC SR2005

図 2.2.3-1 中の 1 は枯渇油・ガス田での貯留方法、同じく 2 は、EOR または EGR と呼ばれる CO₂ の注入による油およびガスの増進回収することで CO₂ を油・ガスと置換して貯留する方法、同図中の 3 は、深部塩水帯水層貯留で(a)が沿岸海域貯留、(b)が沿岸陸域貯留である。同図中の 4 は、ECBM (Enhanced Coalbed Methane Recovery : コールベッドメタン増進回収) と呼ばれる天然ガスとしてのコールベッドメタンを増進回収するために CO₂ を注入して、置換貯留する方法である。コールベッドメタンとは、木材から亜炭、褐炭、亜瀝青炭、瀝青炭、無煙炭と進行する石炭化の過程で放出され、石炭層中に貯留されたメタンガスをいう。大部分のガスは石炭層中のミクロ（直径：数 nm オーダー）な孔隙表面に吸着（ファンデルワールス力による物理吸着）した形で存在している。吸着性が CO₂ のほうがはるかに良いことを利用した方法である。

深部塩水帯水層貯留では、CO₂ の地中貯留を維持してくれる、次のようなトラッピングメカニズムが考えられている。まとめると表 2.2.3-1 のようになる。

表 2.2.3-1 深部塩水帯水層貯留におけるトラッピングメカニズム

トラッピングの種類	概念図	内 容
水理的、物理的または構造的トラッピング (Hydro-dynamic or Physical or Structural trapping)		地下水を排斥/置換して浸透した超臨界状態 CO₂ は、帯水層内の水との密度差により、上方に移行しようとする。このとき、砂（礫）岩層上位のキャップロックである泥岩層が難透過性であれば、鉛直上方への移行は妨げられる。これを構造的トラップという。
残留トラッピング (Residual trapping)		帯水層中の二酸化炭素と水の二相流の特性の一つであるガス相対浸透率のヒステリシスに起因して、孔隙中に二酸化炭素が残留して貯留される。 帯水層内で CO₂ が移行しようとするとき、砂（礫）岩層内の空隙形状の不均一性から、一様に動くことはなく、徐々に捕捉されていくと考えられている。
溶解トラッピング (Solubility trapping)	注：超臨界 CO₂ の溶解初期を示した。	CO₂ は水への溶解度が大きく、いずれはすべて帯水層内の水に溶解すると考えられる。溶解水の比重は帯水層内の水より大きくなるため、上昇することなく帯水層内にとどまることになる。溶解は界面から濃度勾配により進行し、図は溶解初期を示している。 上位キャップロック側にも長期的には溶解が進む。
鉱物トラッピング (Mineral trapping)		帯水層内の空隙水に溶解した CO₂ が直接・間接的に鉱物及び有機物と反応し、二次的な炭酸塩鉱物の析出・沈殿や有機物の溶解として貯留される。 超臨界 CO₂ の中では起きず、地下水内に溶解した CO₂ と岩石成分との反応で起きる。

これらの地化学的現象の素過程は、

- ① 注入した CO₂ ガスによる坑井近傍の地下水の排斥/置換
- ② CO₂ ガスの地下水への溶解

- ③溶解した CO_2 成分と貯留層を校正する岩石との反応（岩石成分の溶解）
- ④溶解した CO_2 成分の貯留層内の移流/拡散過程（ CO_2 分圧の減少や地下水との混合/希釈過程を含む）
- ⑤溶存した CO_2 成分と貯留層を校正する岩石からの溶解成分との反応（沈殿）

の5つであり、①～③は坑井近傍に、④～⑤は貯留層縁辺に生じる。残留トラップは過程①、②、④において貯留層の孔隙に捕獲されて移動/反応できないものを、溶解トラップは過程②を、鉱物トラップは過程⑤を主とする。

CO_2 マイクロバブル地中貯留システムにおいては、地上または孔内においてマイクロバブルの特性を用いて、 CO_2 は、溶解水として注入される。そのため、②の溶解トラッピングが主体となる。（図 2.2.3-2 参照）。

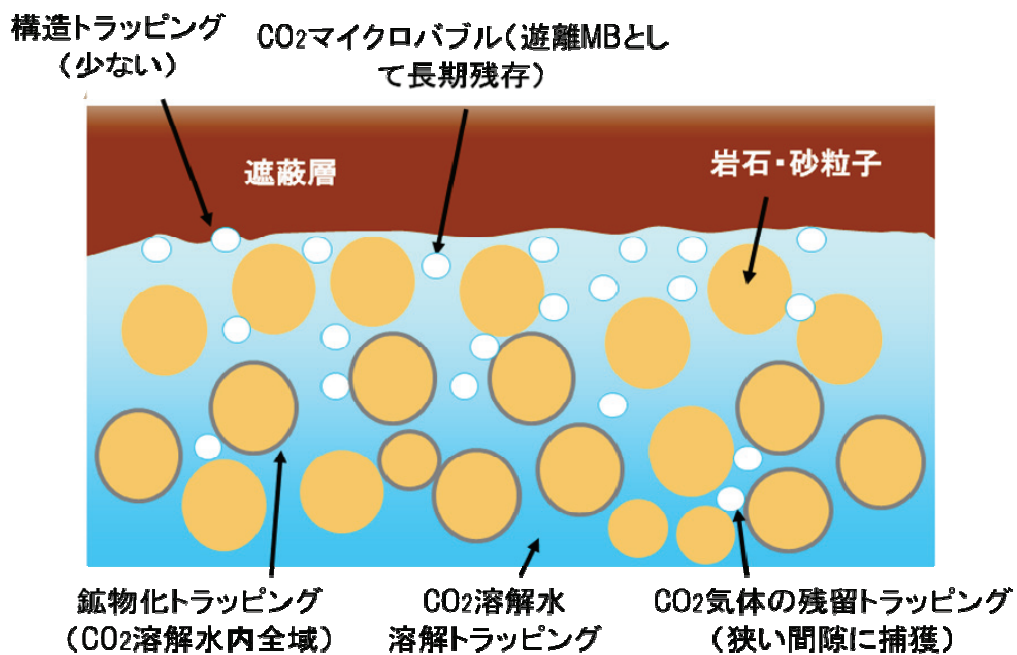


図 2.2.3-2 CO_2 マイクロバブル地中貯留におけるトラッピングのイメージ

注：下部に溶解水が下降しているイメージとしたが、移流を示している意味ではない。また、鉱物化は CO_2 溶解水中に溶出した岩石中の Ca や Mg イオンとの間で起こるため上部地下水の岩石・砂粒子には示していない。

2.3 技術的に貯留が成立する条件の整理

2.3.1 地質条件の設定

技術的に貯留が成立する地質条件としては、貯留対象地域における地質構造と貯留層・遮蔽層の物性が重要である。

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。そのようなことから、安全側を考慮すれば貯留層の上位に遮蔽層が存在する地質構造が必要な地質条件といえる。さらに、少なくとも貯留範囲においては遮蔽層が連続する必要がある。

■地質構造の条件：貯留層上位に遮蔽層の連続

2) 貯留層・遮蔽層

マイクロバブルが注入されるには貯留層が高い孔隙率を有することが条件であり、堆積岩分布地域を想定するならば、貯留層の対象は砂岩（高孔隙率の凝灰岩でも可能）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、厚い粗粒の砂岩の分布域が有望と考えられる。

一方、遮蔽層は先の条件で示したように貯留層の上位にあり、透水性が低いことが条件である。堆積岩分布地域を想定するならば、遮蔽層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。地域分散型貯留では、通常の深部塩水帯水層貯留に対して、貯留域の大きさは、限定されるので、貯留層、遮蔽層は、10km²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）

■遮蔽対象層の条件：透水性が低く連続性の高い堆積岩（泥岩）

地域分散型貯留では、遮蔽層の連続性は限定(10km²程度を想定)

3) 地質時代

深部塩水帯水層貯留においては、超臨界状態 CO₂を対象とするため、深度 800m 以深が貯留対象域となる。このため、地質的に生成時代の新しい堆積岩類を対象と出来ない場合が多く、対象深度に中生代以前の岩石が分布する地域では、孔隙率が小さく、遮蔽層にも亀裂が多いため貯留対象域から外さざるを得ない場合が多かった。

マイクロバブルによる注入であれば、超臨界状態である必要がないため、浅部を対象とすることが可能になり、表層に地質時代の新しい堆積岩(堆積物)が分布する地域であれば貯留対象域となるメリットがある。また、地域分散型貯留を想定すれば、貯留範囲が小規模で良く、その分布域も比較的限定することが可能である。

排出源近傍の貯留を考えれば、平野部ないしは沿岸域が対象となり、遮蔽層に注入圧

以上の強度が必要であることを考えると、新第三紀鮮新統～第四紀下部更新統が候補と想定される。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場合は、貯留対象域となり選択対象は広がる。

■貯留深度条件：対象深度が超臨界状態に至らない深度(深 800m 以浅)

■地質対象：新第三紀鮮新統～第四紀下部更新統

4) 貯留位置

貯留位置については、排出源近傍が有望でありコスト面を考えるならば、排出源直下もしくは臨海部を対象とする。また、地域分散型貯留を考えるならば、1 万 t-CO₂/y～10 万 t-CO₂/y の貯留規模が想定される。

貯留位置選定に際して、事前に留意する条件として活断層の有無がある。遮蔽層と交叉する断層は漏洩の原因となるが、現在は活動していない地質断層と活断層は別の取り扱いを必要とするであろう。すなわち、地質断層は過去の構造運動において形成された工学的弱層として捉えることが出来るため、局所的なものに関しては強度や透水性の改良が可能である。仮に、想定した貯留位置で小規模の地質断層が出現しても、掘削孔を利用した改良が可能と判断されるものも少なくない。

一方、活断層は、新たな断層運動により変位が生じる可能性を有しているため、貯留サイトのある場所で漏えい防止のための改良を実施しても、その後の断層活動により新たな断層を形成する可能性がある。そこで、事前に既往地質資料により活断層が分布することが判明している地点は避けることが望ましい。

■貯留位置条件：排出源直下もしくは臨海部を想定（分散型貯留）

2.3.2 貯留深度・地質構造の考え方

貯留深度はマイクロバブルを利用した地中貯留を考えるならば、特に貯留深度を限定する必要はない。ただし、浅部では地下水利用が行われており、出来れば、利用地下水に影響しない深度での貯留が理想である。この利用地下水深度を利用水深と定義し、仮に深度300m以下として、-300m～-500mを貯留対象深度と設定した。利用地下水深度を考慮して、遮蔽層位置を基本とする貯留層構造を考えた場合、図2.3.2-1に示すようにa領域、b領域が存在する。

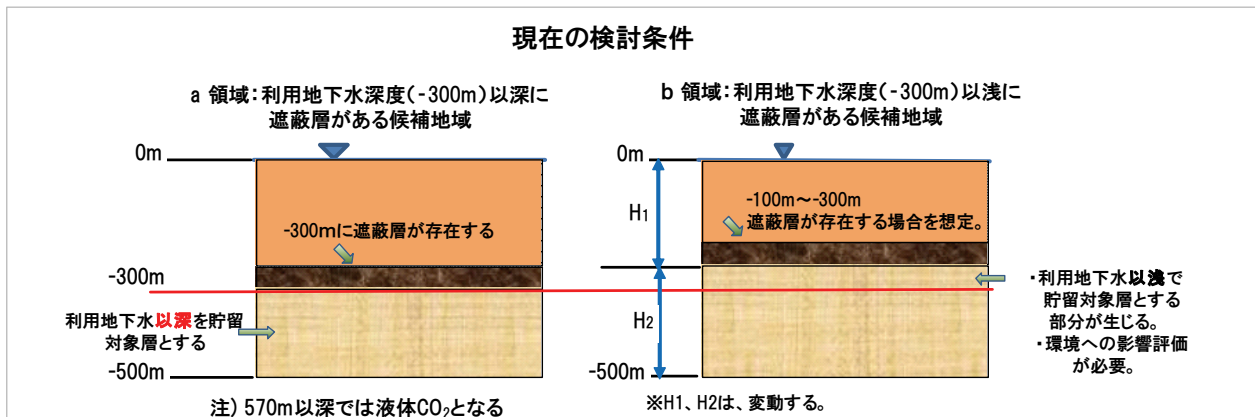


図 2.3.2-1 遮蔽層深度の違いによる検討条件

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 領域と b 領域の定義は、以下のとおりである。

a 領域：利用地下水深度（-300m）以下に遮蔽層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）以上に遮蔽層がある候補地域

■利用地下水が浅い貯留対象となる部分が生じる

（CO₂の大口気泡の上昇などが考えられる）→環境への影響評価が必要となる

2.3.3 貯留可能領域の検討

CO₂ マイクロバブル地中貯留が可能となる地域を、前項で示した条件に基づいて検討する。

1) 地域分散型貯留を考え、排出源直下もしくは臨海部を想定

図 2.3.3-1 に日本の主な CO₂ 排出源を示す。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～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。なお、図 2.3.3-1 で対象としている排出源は、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に取り上げられている。

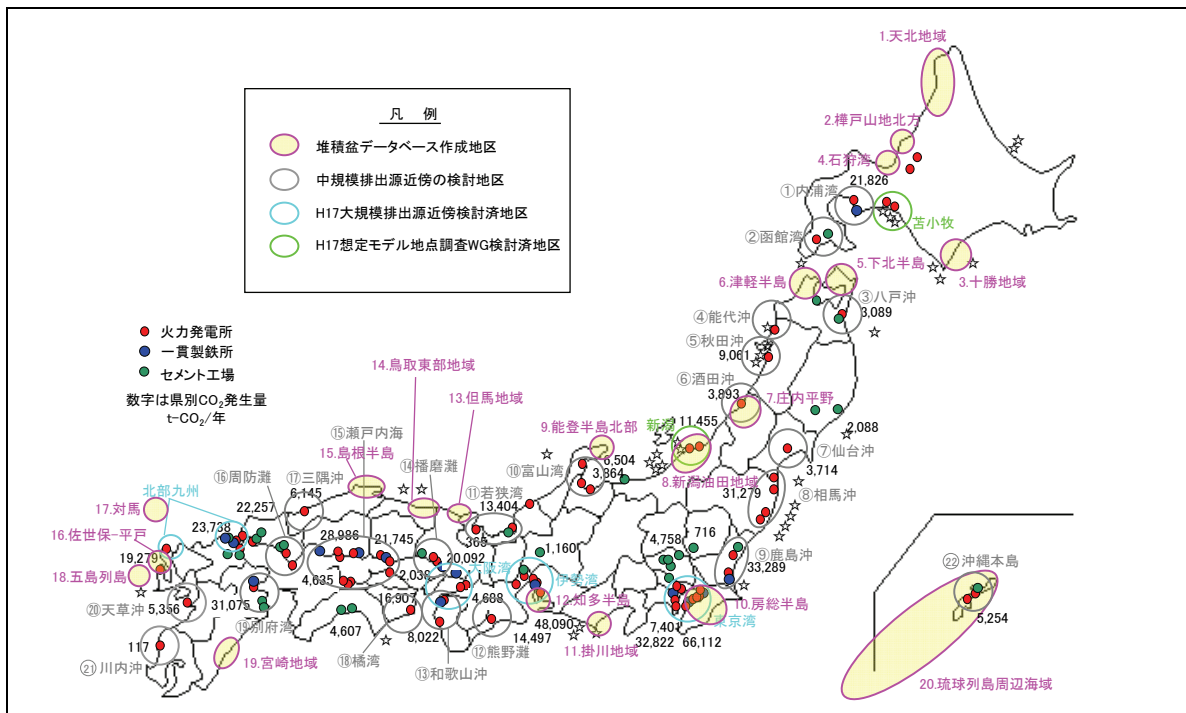


図 2.3.3-1 全国の CO₂ 排出源位置図

出典：(財)地球環境産業技術研究機構／(財)エンジニアリング振興協会

全国貯留層賦存量調査成果データベース（2009）

((財)地球環境産業技術研究機構；以下、RITE という。)

((財)エンジニアリング振興協会；以下、ENAA という。)

2) 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。

日本においては、新第三紀以前の地質は固結度が高く上記条件には当てはまらないため、新第三紀鮮新統～第四紀更新統が分布する地区を対象に検討する。図 2.3.2-2 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分布しており、CO₂ の排出源と位置的に合致している。このため、図 2.3.2-1 に示される「RITE／ENAA 全国貯留層賦存量調査成果データベース（2009）」に示される地区が対象と考えられ、ここでは同地区について地質の分布状況とその特長についてまとめる。その際には、CO₂ マ

イクロバブル地中貯留が海拔-300～-500mを対象としていることに留意する。

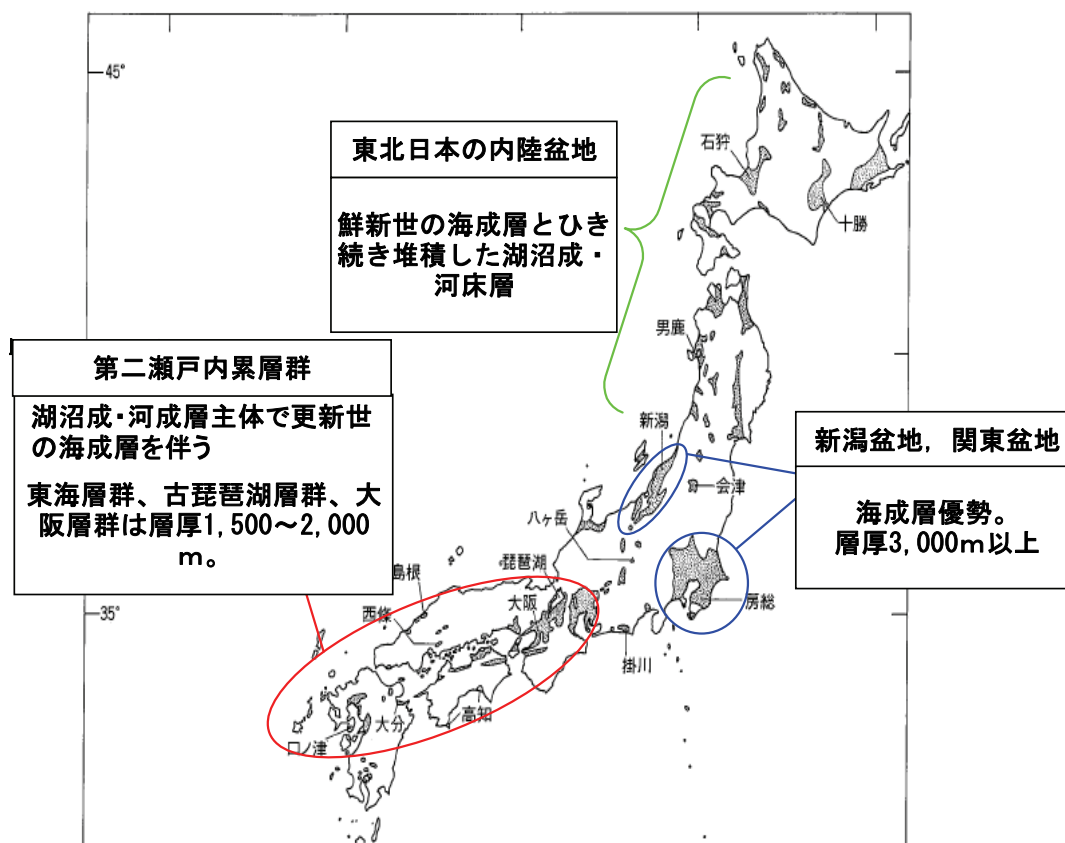


図 2.3.3-2 日本の新第三紀鮮新統～第四紀更新統の分布

出典：市原実（1993）大阪層群に一部加筆

CO₂ マイクロバブル地中貯留成立可能性についての地質的判定は、主に以下によった。

- ・ 貯留層となりえる砂岩層と、遮蔽層となりえる泥岩層の存在
- ・ 十分な貯留層の分布(広さ)
- ・ 貯留候補域の活構造の分布

検討の結果を表 2.3.3-1 にまとめる。有望な地区として、十勝平野、内浦湾、庄内平野、房総半島、掛川地区、伊勢湾、大阪湾、宮崎地域、別府湾および、沖縄本島の 10 地区が上げられる。このうち、伊勢湾と大阪湾については、既存データも多く、その信頼性も高いため最有望とした。

表 2.3.3-1 CO2 マイクロバブル地中貯留堆積盆整理表

地域名	堆積盆No.	地区名		対象となる地層		特徴	判定
				遮蔽層	貯留層		
北海道	1	天北地域＊幌延含む		更別層		第四系更新統が対象。遮蔽層の連続性が課題？	○(△)
	2	樺戸山地北方		深川層群及びその相当層		軽石を含む砂岩主体。遮蔽層の連続性が課題？	△
	3	十勝地域		十勝層群		鮮新統～下部更新統が対象。下部層は砂岩と泥岩。	○
	4	石狩湾 ＊石狩低地帯含む		(材木沢層) 西野層、当別層など		鮮新統が対象。第四系更新統の材木沢層は遮蔽層の連続性が課題？	△
	①	内浦湾		黒松内層(主に上部層)		黒松内層のうち、上部のシルト岩部層(一部、砂岩を挟む)が対象。近くに活構造が存在。	○
	②	函館湾		館層 厚沢部層		黒松内層に相当し、砂岩、泥岩、シルト岩、灰岩などの互層。遮蔽層の連続性が課題か？	△
		苫小牧		(未検討)		(未検討)	(未検討)
東北	5	下北半島		蒲野沢層		新第三系中新統が対象。貯留層の砂岩の連続性が課題か？	△
	6	津軽半島		蟹田層 塩越層		新第三系が対象。塩越層は主に珪質泥岩、蟹田層は主に砂岩。貯留モデルが成り立つか？	△
	7	庄内平野		常禅寺層、観音寺層、丸山層、楯山層など		新第三系鮮新統が対象。出羽丘陵西縁の逆断層の活動による構造盆地。	○
	③	八戸沖		鷹架層(市ノ渡層)		新第三系中新統のが対象。八戸付近のデータが少なく詳は不明。	△
	④	能代沖		中沢層(鮎川層)、笹岡層 天徳寺層(主に上部)		新第三系鮮新統、第四系が対象。第四系は遮蔽層を欠く可能性あり。能代断層群あり。	△
	⑤	秋田沖		天徳寺層		新第三系鮮新統が対象となる。酸性凝灰岩を挟む泥岩ないしシルト岩。北由利断層あり。	△
	⑥	酒田沖		(庄内平野と同じ)		(庄内平野と同じ)	(庄内平野と同じ)
	⑦	仙台沖		(志田層群)、松島湾層群		志田層群は、遮蔽層を欠く可能性あり。松島湾層群は分布範囲が狭い可能性あり。	△
関東・甲信越	8	新潟油田地帯		魚沼層群 西山層、(灰爪層)		魚沼層群は遮蔽層の連続性が課題。西山層上部は褶曲構造群(活構造)に規制される。	△
	10	房総半島		上総層群中部層 (主に大田代層から上部)		新第三系鮮新統～第四系更新統が対象。砂岩・泥岩互層からなり複数の貯留モデル。	○
	11	掛川地域		掛川層群		新第三系鮮新統が対象。掛川層群はタービダイト起源のフリッシュ方の地層で、複数の貯留モデルが考えられる。	○
	⑧	いわき沖	いわき～ 鹿島沖	多賀層群 高久層群 白土層群 湯長屋層群		新第三系中新統が対象。相馬～双葉付近、水戸～鹿島付近が深度的に適。	△
	⑨	鹿島沖					
		東京湾		(未検討)		(未検討)	(未検討)
近畿・中部	9	能登半島北部		飯塚珪藻泥岩層、南志見泥岩層、飯田層、赤神泥岩層、法住寺泥岩層、東印内互層等		東印内互層以外の各層はほとんど泥岩主体。陸域での分布層厚は定かではない。	△
	12	知多半島		常滑層群(東海層群) 師崎層群(豊浜累層、山海累層など)		新第三系中新統が対象。常滑層群(東海層群)は砂泥互層からなるが正確な層厚は不明。	△
	13	但馬地域		城之崎層群(村岡累層など)		新第三系中新統が対象。陸域での正確な層厚は不明。	△
	⑩	富山湾		埴生層、氷見層、音川層、東別所層、黒瀬谷層等		第四系更新統が対象。丘陵地では新第三系中新統ないし鮮新統が対象。平野と丘陵地の境は活断層に規制。	△
	⑪	若狭湾		北但層群(網野累層、豊岡累層等)		グリーンタフが卓越。一部で北但層群の砂岩・泥岩が分布。陸域での正確な層厚は不明。	△

地域名	堆積盆No	地区名		対象となる地層		特徴	判定
				遮蔽層	貯留層		
近畿・中部	⑫	熊野灘		尾鷲層群 熊野層群		熊野酸性岩類が大規模に貫入。堆積盆の北部に対象層が分布。いずれもやや硬質。	△～×
	⑬	和歌山沖		菖蒲谷層(大阪層群相当層)		大阪層群最下部層もしくはその下位層に相当すると考えられているが、詳細は不明。	△
	⑭	播磨灘		明石累層(大阪層群下部層)		中世界の流紋岩類が広く分布。貯留対象となるのは東部の明石累層のみ。	△
		伊勢湾		尾張層群 東海層群(米野累層)	東海層群(大泉累層及びその下位の地層)	遮蔽層／貯留層が深度300～500m付近に分布する濃尾平野東側(名古屋市街付近)が対象地域。	◎
		大阪湾		大阪層群上部層(Ma3及びMa4海成粘土)	大阪層群下部層(Ma3とMa2海成粘土との間)	海成粘土層は連続性がよい。貯留モデルも比較的広範囲に適用できるものと考えられる。	◎
中国・四国	14	鳥取中部地域		鳥取層群		新第三系中新統が対象。かなり内陸山地部に限られる可能性あり。	△～×
	15	島根半島		古江層	牛切層	新第三系中新統が対象。層厚は十分あり分布深度が合致する場所が存在すると考えられる。	△
	⑮	瀬戸内海		西条層、三豊層群、岡村層等、備北層群(勝田層群)、土庄層群等		新第三系中新統が局所的に分布。いずれも分布が狭小で層厚も薄いため不向き。	×
	⑯	周防灘		宇部層群(幡生累層含む)		宇部地域の宇部層群は宇部夾炭層と呼ばれ硬質な岩石。CMSの適用可能な厚さと考えられる。	△？
	⑰	三隅沖		益田層群安田層	益田層群豊田層	新第三紀中新統が対象。益田層の下底面はほぼ海拔0m程度、深度が不足すると見られる。	×
九州	⑱	橋湾		—		対象となる地層は分布しない。	×
	16	佐世保～平戸		南田平層 前加勢黒色泥岩層	深月層 楠泊礫質砂岩層	新第三紀中新統が対象。佐世保層群には炭層が多く挟まれる。	△
	17	対馬		対州層群		古第三紀漸新統～新第三紀中新統が対象。地質構造は褶曲が発達し複雑である。	△
	18	五島列島		津和崎層下部 有川層	五島層群	新第三紀中新統が対象。地質データが少なく不明点が多い。	△
	19	宮崎地域		妻相:高鍋部層、妻部相 宮崎相:綾部層	妻相:川原部層 宮崎相:田野部層 青島相:双石部層	新第三紀後期中新統～鮮新統が対象。海成の陸棚堆積物で砂岩頁岩互層が多い。	○
	⑲	別府湾		判田層	東庄内層	新第三紀鮮新世から第四紀更新統が対象。活断層とされる断層が多く、地質データも少ない。	○
	⑳	天草沖		砥石層 一町田層	逆瀬川層	古第三系が対象だがやや硬質。向斜構造の翼部となる。	△
	21	川内沖		—		新第三系～第四系は火山岩類から構成される。	×
		北部九州	小倉	遠賀層泥岩層	出川層砂岩層	炭層を挟む始新統が対象。層厚は、いずれも300mを越える。	△
			松浦	佐世保層群上部 相浦層群上部	佐世保層群下部 相浦層群下部	炭層を多く挟む中新統が対象。	△
沖縄	22	沖縄本島		島尻層群と那原層	島尻層群豊見城層	新第三紀中新統が対象。地層は南東下がりの傾斜で分布しており、深度的にも可能性はある。	○

◎:最有望

○:有望

△:可能性

×:不適

2.3.4 重要なパラメータの設定

1) 地域分散型排出源のCO₂排出量

地域分散型CO₂貯留が想定する事業所のCO₂排出規模は、年間1～10万t・CO₂である。表2.2.2-1に示した事業所あたりの排出量の大きい産業の1～5位について、事業所の排出量のヒストグラムを図2.3.4-1に示す。電気業での排出規模の大きい事業所が多いことを除けば、いずれの産業においても10万トン以下の排出量の事業所数が、大半を示す傾向が明らかで、これらの事業所に対する有効なCO₂の貯留手段が必要とされていることが分かる。

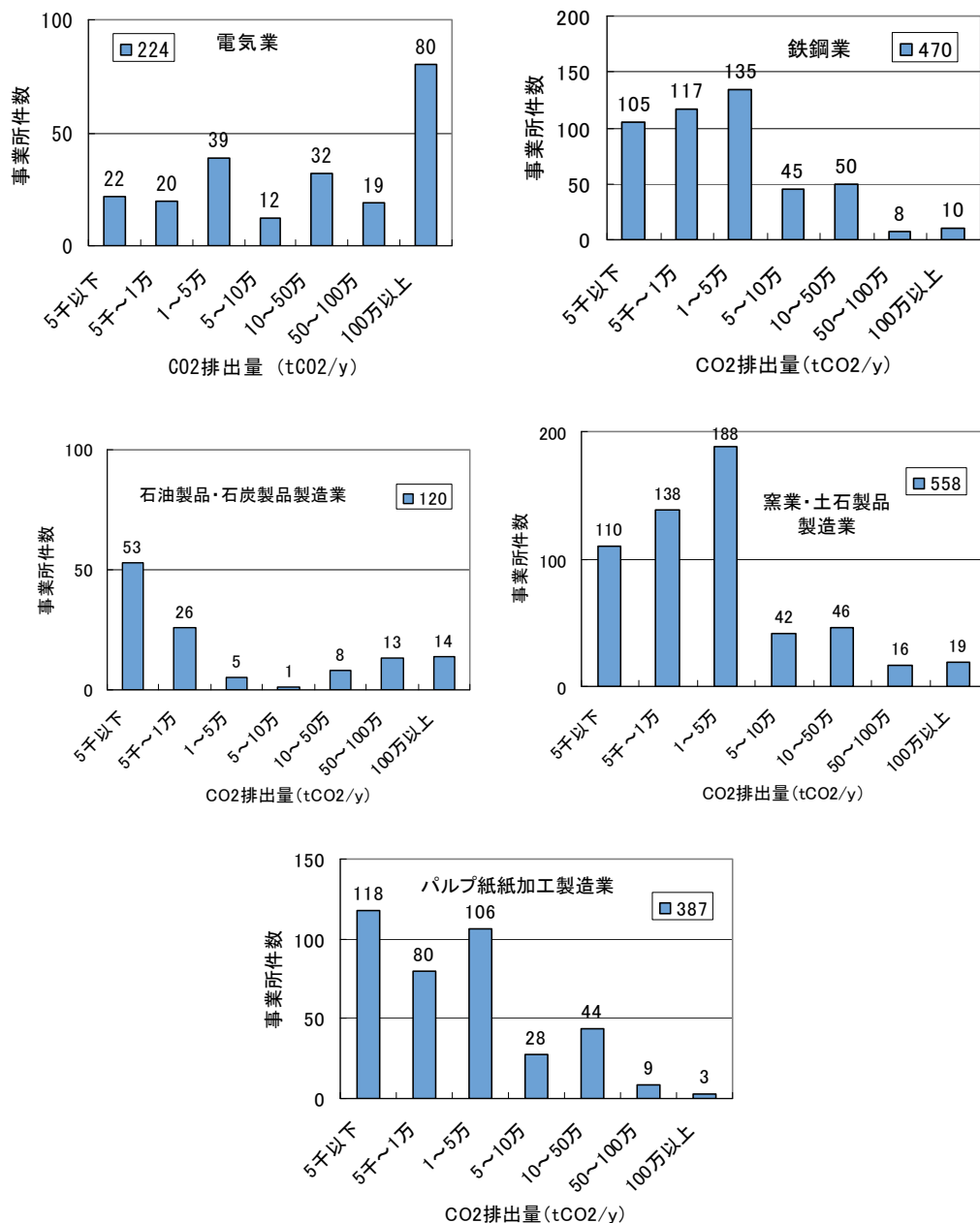


図 2.3.4-1 各産業ごとのCO₂排出量規模のヒストグラム

2) マイクロバブルの発生確率

気体からなるマイクロバブルは、発生直後に大きな気泡となったものは上昇し水面より散逸し、残ったものの大部分が数十分にて消失・溶解するものと思われる。この消失までの時間は長いもので 100 分程度といわれている。ごく少量のマイクロバブルは周囲の水へ溶解しながらその直径を狭め‘ナノバブル’と呼ばれる状態へと移行する。

3) 想定される溶解度

(1) 地層データより推定される貯留域の環境

例として、A 地域のボーリングデータを図 2.3.4-2 に示す。A 地域を例示した根拠は、空港建築のために地質調査が詳細に行われ、データが豊富に入手できるためである。赤線で囲った領域が貯留層として活用できると考えられる。主な構成材は中粒からごく粗粒の砂層であり、ここで見られる地層の多くは、海成粘土層に挟まれており、貯留域の地下水は海水由来の成分からなると考えられる。

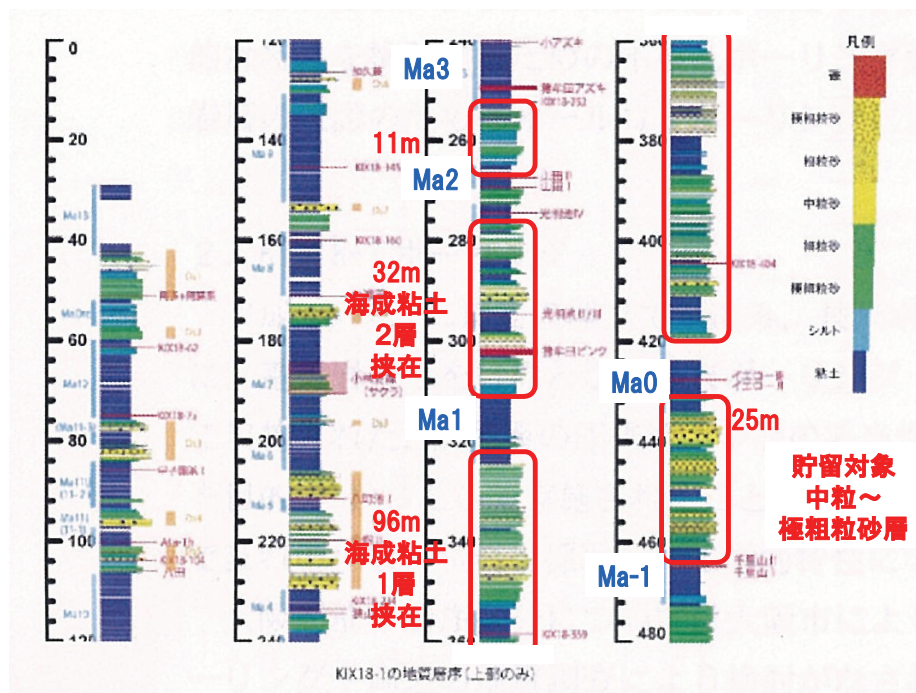


図 2.3.4-2 大阪湾の地質データの例

(2) 環境より推定される CO₂ の溶解度

現在検討されている貯留は、沿岸域の地下が対象である。

前述のとおり、地下においても海水由来の環境に近いことが推定されている。

2.1 節および、図 2.1.2-16 に示されているように、濃度 5 % の塩水中での CO₂ の溶解度は、水に比べ 77% まで低下することが、示されている。さらに、同じく IPCC の Special Report(2005)¹⁾によると、海水中の pH と CO₂ 濃度の関係は図 2.3.4-3 に示すような関係となっている。これによると、地下水の pH が酸性傾向にあると濃度は高くなる傾向にあることが示されている。

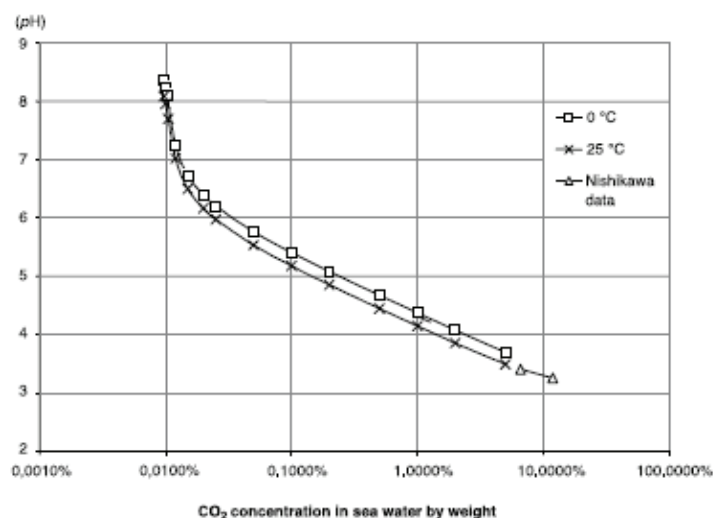


図 2.3.4-3 海水中の pH と CO₂ 濃度の関係

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

3) 貯留層の条件

貯留量の正確な算定や、周囲影響を検討する場合、貯留層を中心とした周囲の地盤の持つ力学条件の設定が必要となる、これらの物性値として、内部摩擦角、地盤反力係数、一軸圧縮強度などが考えられる。現在考えられている貯留層への 10 万 t・CO₂ 程度の貯留では、きわめて局所的な注入となる。ただし、注入に伴う重量の増加は極めて少ないため、注入井周囲の岩盤の地盤反力係数、一軸圧縮強度が必要となると考えられる。内部摩擦角は注入に伴うせん断力が小さいために、前述の物性値と比べその必要性は低いと考えられる。

4) その他

モニタリングによる原位置での CO₂ 溶解の性状把握が最も優先されるが、地下水中で CO₂ モニタリングは困難と考えられるため、解析による貯留量の正確な算定や、周辺環境への影響を検討する場合、注入された CO₂ 溶解水の周囲への挙動を検討する必要がある。CO₂ 溶解水の挙動解析には、CO₂ 溶解水と貯留層および周囲岩盤のモデル化が必要となる。

・ CO₂ 溶解水のモデル化

CO₂ 溶解水は、かん水と CO₂ イオンから構成される。CO₂ 溶解水の挙動解析を行う場合、流体の移流とそこに溶存するイオンの拡散との連成の現象が対象となる。このため、正確なモデル化には、かん水の粘性係数と CO₂ イオンの拡散係数が必要となる。多くの水中に溶存するイオンの水中での拡散係数は 10⁻⁹[m²/s]程度の値²⁾である。これより、1 年間に移動する CO₂ イオンの距離を求めると、0.35m 程度となる。すなわち、ほとんどの CO₂ イオンの移動は移流によって支配され、拡散の効果は、CO₂ 溶液と周囲の地下水の境界をわずかに希釈するのみと考えられる。また、貯留層となる砂岩は多孔質媒体と考えられるので、CO₂ 溶解水のモデル化には、貯留層の多孔質媒体を考慮した溶解水の

実効粘性係数が必要となる。

- ・貯留層のモデル化

貯留層を移流の媒質として扱うためには、貯留層における溶解水の粘性係数が必要となる。これを求めることが困難な場合や、位置による差が大きいと見込まれる場合は、目的とする貯留層のミクロな多孔質媒体の空隙の 3 次元情報を求め、これを入力値とした、局所領域での移流解析を行い、貯留層の空隙を考慮した実効粘性係数を求める必要がある。

- ・周囲岩盤のモデル化

解析条件として境界条件を設定する必要がある。この場合は貯留層周囲の地盤での CO₂ の粘性係数が必要となる。また粘性係数が想定より高い、すなわち、周囲への移流がおきにくく、溶解水が注入位置にとどまる場合は、注入圧を高める必要があり、圧力による周囲の力学的評価が必要となるため、前項の貯留層の条件が使われる。

マイクロバブルによる貯留層地盤への捕獲過程においても、貯留層のミクロな多孔質媒体の空隙の 3 次元情報は必要となる。貯留層空隙をモデル化し、マイクロバブルがどれほどその空隙に捕獲されるかを評価する必要がある。この場合には、捕獲に至る過程のモデル化や、その後のマイクロバブルの挙動、さらに鉱物化に至るかなどのシナリオに基づく検討が必要となる。

2.3.5 貯留可能領域の評価法

1) CO₂ マイクロバブル地中貯留のための貯留可能量算出式

(1) 溶解のみの場合

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

ここで、

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

A : 貯留面積

h : 有効層厚、地層全体の層厚に対し貯留対象層となる層相との割合を乗じたもの

φ : 孔隙率

である。

(2) 深部塩水帯水層貯留における貯留可能量算出式との比較

$$\text{貯留可能量} = S_f \times A \times h \times \phi \times S_g / B_g \text{ CO}_2 \times \rho$$

ここで、

S_f : 貯留率

A : 貯留面積

h : 有効層厚、地層全体の層厚に対し貯留対象層となる層相との割合を乗じたもの

φ : 孔隙率

S_g : 超臨界 CO₂ 飽和率

B_gCO₂ : CO₂ の容積係数

ρ : CO₂ 密度

である。

貯留率 Sf は、深部塩水帯水層での超臨界状態 CO₂ の貯留において考慮された係数で、石油換算で用いられる「掃攻効率」に対応する用語である。RITE の二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書³⁾によると、「掃攻効率」は、油層からの原油の採収率を向上させるために液体を注入する二・三次回収において、油層の総孔隙容積に対する注入流体の接触した部分の容積比率として定義されている。ただし、掃攻効率は孔隙率、浸透率、岩相変化などの貯留層特性によって変化するだけでなく、孔井設計や孔井配置などの開発計画を行うことで求められる数値である。全国貯留層貯存量調査においては、全ての貯留対象に対して開発計画を策定するのは非現実的であるため「掃攻効率」ではなく「貯留率」という用語を用いている。また、CO₂ 地中貯留に際しても帯水層に超臨界 CO₂ を注入する場合、帯水層の総孔隙容積に対する注入流体の接触した部分の容積比率として貯留率（掃攻効率）を考慮する必要があることが指摘されている。

H17 年度の検討では、非構造的帯水層を対象とするカテゴリー B については、比重差による重力分離効果とともに垂直方向の貯留層の不均一性を考慮し貯留率 25%として設定を行った。また、カテゴリー B1 の水溶性ガス田においても貯留率は対象とした 3 地域（南関東ガス田、新潟ガス田、宮崎ガス田）全てについて 25%としている。

以上のような経緯から、非構造的の帯水層を貯留対象とする CO₂ マイクロバブル地中貯留法による貯留可能量の概算見積もりでは、貯留率 25%を参考に、不確実性を表す係数として、低減率は 25%をそのまま用いることとした。

2) 注入井・揚水井併用方式による貯留領域の推定

2.2 節のマイクロバブル貯留の貯留システム概念に示したように、本貯留方式は、かん水を地下から揚水し、CO₂ を溶解させた後に地中へ還元する方式を前提としている。このため、CO₂ 溶解水を地中に復水する注入井の周囲に、溶媒となるかん水を確保するための揚水井を配置する組み合わせを 1 貯留ユニット（図 2.3.5-1）とした。

揚水井設置の副次的効果として、揚水により注入井周辺の圧力が低下することによって、注入に伴う注入層の水圧上昇による遮蔽層や注入井のシール構造へのダメージを低減させる効果を期待することができる。なお、CO₂ 溶解水による地下水の pH 上昇や炭酸塩の生成などの環境影響確認のため、必要に応じて注入井と揚水井の間にモニタリング井を設けることも考える。

この方式によると、1 貯留ユニット当りの水循環は群井の井戸理論式を用いて検討することができる。検討手順は、図 2.3.5-2 および図 2.3.5-3 に示すように、まず、所定量の CO₂ の貯留に必要な水循環量を確保するための必要注入水頭差を算定し（式 2.3.5-1）、これに揚水による注入井位置での水頭低下量（式 2.3.5-2）を加えることにより注入井での必要注入圧が求まる。図中の計算式は以下に示すとおりである。揚水・注水による地下水圧変化の影響半径の考え方について、式 2.3.5-1 で必要注入水頭を求めるときに注入の影響範囲を揚水井位置と設定して揚水による水循環促進効果を積極的に考慮することも可能であるが、3 章で後述する水循環計算結果から揚水の影響範囲は注入

の影響範囲に比べ限定的であることから、注入の影響範囲を外側の計算境界とした。

$$Q = \frac{2\pi R_c k D s}{\ln(R/r_0)} \quad (2.3.5-1)$$

$$s = \frac{1}{2\pi R_c k D} \sum_{i=1}^n \left(q_i \ln \frac{R}{r_i} \right) \quad (2.3.5-2)$$

ただし、

Q : 注入井からの注水量 (m^3/s)

R_c : CO_2 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

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 (m^3/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)

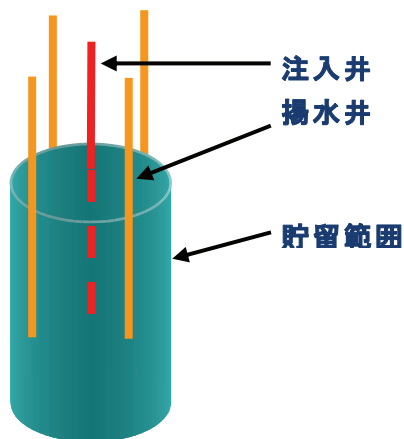


図 2.3.5-1 貯留ユニットの説明図

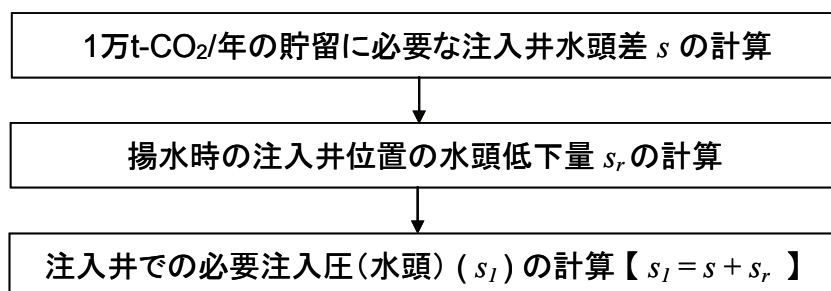


図 2.3.5-2 注入井・揚水井併用方式による水循環の検討手順

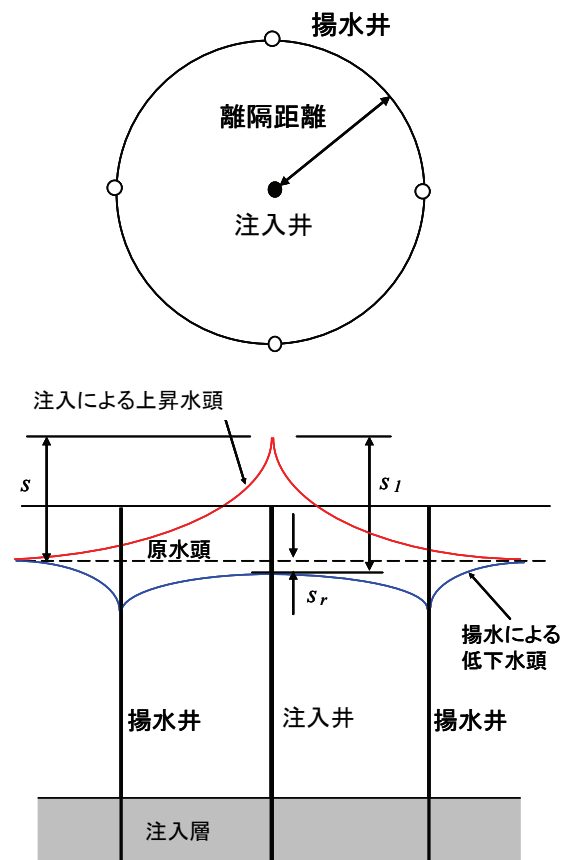


図 2.3.5-3 水循環量の計算方法説明図

2.3 節 引用および参考文献

- 1) IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage 2005
- 2) 渡辺正、中林誠一郎；電気移動の化学－電気化学入門、朝倉書店、(1996)、pp.124-125.
- 3) RITE/ENAA 平成 17 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．(2006)

2.4 貯留概念のまとめ

CO₂ マイクロバブルの貯留概念を深部塩水帯水層貯留の概念と比較する。また、ここでは、液体マイクロバブルによる中間的な貯留方法についても示した。

表 2.4-1 各貯留概念のまとめ

CO ₂ の状態		気体マイクロバブル	液体マイクロバブル	超臨界状態
対象とする貯留工法の目的		CO ₂ 排出源近傍設置 地域分散型貯留	中間	大規模集中型貯留
貯留量評価法	必要なパラメータ (各パラメータは貯留層中の状態で算出される)	A: 貯留面積 (m ²) h: 有効層厚 (m) φ: 孔隙率 CO ₂ 濃度 (%) Rc: 低減率 = CO ₂ 溶解水の注水および揚水効率、調査の精度および地質不均質などによる不確実性を評価する係数	A、h、φ は同じ BgCO ₂ : CO ₂ の容積係数 (m ³ /m ³) 貯留層の温度圧力条件による ρ: CO ₂ 密度大気圧下での CO ₂ の密度 (1.976 kg/m ³ 標準状態) E: 貯留層の圧力温度条件下における液体 CO ₂ の水との混合率 (m ³ /m ³)	A、h、φ、BgCO ₂ 、ρ は同じ Sg: 超臨界 CO ₂ 飽和率 Sf: 貯留率 = 圧入される深部塩水より超臨界 CO ₂ 密度が小さいため掃攻する効率が重要となり、それを評価する係数
	貯留量評価式	貯留可能量 = Rc × A × h × φ × CO ₂ 濃度	貯留可能量 = Rc × A × h × φ × E / Bg CO ₂ × ρ	貯留可能量 = Sf × A × h × φ × Sg / BgCO ₂ × ρ
貯留機能		CO ₂ 溶解水溶液の貯留 マイクロバブルにより溶解 速度、溶解度の向上	CO ₂ マイクロバブルと 水のエマルジョン	超臨界状態の CO ₂
貯留深度		-300m ~ -500m	-570m ~	-800m ~
地質条件	地質構造	帯水層	帯水層	背斜構造・深部塩水帯水層
	貯留層	十分な孔隙率と透水性を有する	十分な孔隙率と透水性を有する	十分な孔隙率と透水性を有する
	遮蔽層の有無	未溶解の CO ₂ 気泡が生じた場合などを想定して必要	必ずしも必要でない	必要
	遮蔽層特性	低透水性、低拡散性を有する浮力が小さいので、せん断強度も小でよい	低透水性、低拡散性せん断強度を有する	低透水性、低拡散性十分なせん断強度を有する
トラッピング状態		短期: 溶解トラップ/残留トラップ 構造トラップが必要な場合も想定される。 中長期: 鉱物化トラップ	短期: 残留トラップ 長期: 溶解/残留/鉱物化	短期: 構造トラップ 長期: 溶解/残留/鉱物化

水循環の必要性	溶媒としての水供給、貯留範囲内での効率的な注入コントロールのために必要	なし	なし
圧力条件	注入深度+ α	5.7MPa+ α	7.4MPa+ α
温度条件	注入深度の温度により溶解度に変化	常温（15℃～）	31℃以上
水質条件	注入水および循環水：pH 地下水：残存イオンなど溶解度への影響	塩の効果により溶解しにくくなる。マイクロバブル維持には効果あり	置換のため問題なし 鉱物化を考えるとときのため極小さい
長期注入影響	循環の場合の貯留層の透水性の変化	中間的な流体圧	流体圧の変化が懸念される
環境影響	地下水および循環水の水質 / CO ₂ 漏洩	CO ₂ 漏洩のみ	CO ₂ 漏洩のみ プルーム周辺は溶解により酸性化する
加圧設備の規模	小規模	中間	大規模
揚水井	注入井・揚水井併用方式の場合必要	不要	不要
地上設備	①地上で溶解する場合、CO ₂ タンク、溶液タンク、水質調整装置など ②地下注入の場合、上部設備は軽微（二相流巡回方式適用のため）	貯留設備 輸送設備 圧入設備 水との混合設備必要	貯留設備 輸送設備 圧入設備
輸送手段の規模	パイプラインは短距離、コスト小	パイプラインは短距離、コスト小	パイプラインは長距離必要でコスト大
設備の規模	地下注入の場合：比較的小、中規模でコンパクト 地上で溶解水作成の場合、作成・貯留設備がプラス	地上で地下水との混合設備必要	大規模 （一次貯留タンクなど）
コスト	小 （今後、プラント規模等から正確なコスト試算必要）	小 （今後、プラント規模等から正確なコスト試算必要）	新設石炭火力（100万t・CO ₂ /y・20kmERD）の場合：トータル¥7,300t・CO ₂ （うち圧入¥2,300t・CO ₂ ） （RITE(2006)試算による）

第3章 CO₂ マイクロバブル地中貯留システムのモデル

構築

3.1 想定モデル地点での貯留可能量の評価

3.1.1 モデル地点選定

2.3.2 項で述べたように、地質条件に限った場合、日本で CO₂ マイクロバブル貯留が可能な堆積盆として、10 地域が有望とされ、そのうち 2 地域は地質データの豊富さで最有望とされた。これは、地盤沈下調査として行われた深層ボーリングや海域における地下構造調査としての反射法地震探査のデータが豊富にあり、うち一方の地域は、震災が生じた後、地質構造解明調査が行われたことで、多くの地質資料が蓄積されたことによる。

これらの調査資料のうち、ボーリング調査では、試料が採取され細部にわたる地質観察や、地質物性についての試験などが実施されている。また、温泉ボーリングも多く、その記録が残されている場合も多い。そして、最近では、空港建設に伴って深層ボーリングなどが行われている。(以下 A 地域という。)

A 地域の湾内および、平野部には、貯留に適すると考えられる新第三紀鮮新世～第四紀更新世の地層が広く分布し、上記の調査によってその分布の概要が広い範囲で把握されている。このため、A 地域を想定モデル地点として、貯留可能量の検討を行う。

なお、想定モデル地点として検討を進めるが、マイクロバブルによる CO₂ 地中貯留を実施する対象地域とは、想定していない。貯留可能量評価の方法を例示することのみに限って想定モデル地点とした。

3.1.2 A 地域の地質概要

表 3.1.2-1 に市原 (1991) ¹⁾ に示される A 地域の第三紀鮮新統～第四紀更新統の総合層序表を示す。この地層は、礫、砂、シルトおよび粘土層からなる半固結～未固結の堆積層であり、下部層の中部から上位にかけては Ma ナンバーで示される・1～10 の海成粘土層が挟まれる。それより下位は、砂層などの粗粒相を主とする陸成層である。これは、寒暖の差が繰り返す第四紀になって、堆積盆となる湾への海の侵入が認められるようになり、海成粘土層の分布範囲と厚さが上位に向けて徐々に増加したためとされている。

図 3.1.2-1 に、A 地域の北東地点で掘削されたボーリング GS-K1 の模式柱状図を示す。深度 580m 付近で Ma-1 の海成粘土層が出現し、上位の海成粘土層は徐々に厚くなり、深度 440m 付近の Ma3 海成粘土層では厚さが 35m 程となっている。そして、それより上位では、海成粘土層の占める割合が非常に多くなる。

海成粘土層は、連続性が良好な細粒相で、火山灰層と併せて対象地域の有効な鍵層となっており、その連続性から遮蔽層としての期待も高い。一方、Ma-1 の海成粘土層より下位では、砂層を主とする粗粒相が厚く分布するほか、Ma3 海成粘土層の下位にも海成粘土層に挟まれて粗粒相が多く分布している。

出典：市原（1991）¹⁾、アーバンクボタ

(市原・吉川・亀井, 1984に加筆)



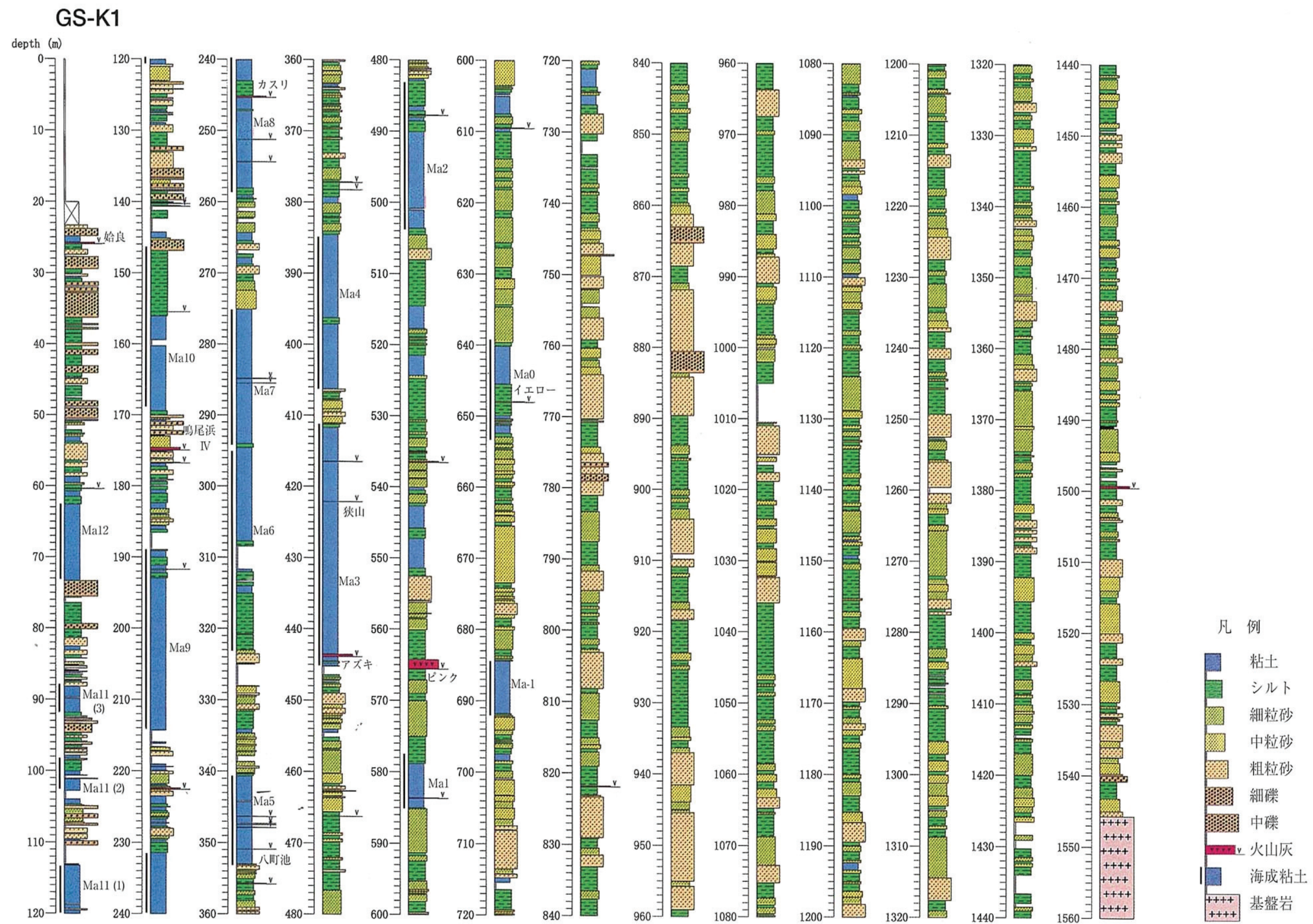


図 3. 1. 2-1 A 地域北東地区のボーリング GS-K1 の柱状図

出典：関西地盤情報活用評議会（1998）²⁾

A 地域には、活構造とされる断層も見られる。主なものとして、六甲山の南麓に Ab 断層帯とされる逆断層が位置し、六甲山と低地を画している。また、その延長域では、淡路島の東岸に位置する Ac 断層が見られる。A 地域湾の内では、Ac 断層の東側に北北西-南南東方向に続く北西側隆起の Ad 断層が存在する。Ad 断層は、長さ 39km の逆断層で、地震調査研究推進本部地震調査委員会（2005）³⁾ によれば、平均変位速度が 0.5～0.7m/千年とされ、活動度は B 級に相当する。A 地域東側の平野部においては、豊中市から大阪市を経て岸和田に至る Aa 断層が南北に続く。地震調査研究推進本部地震調査委員会（2005）³⁾ によれば、長さは 42km の東側隆起の逆断層で、平均的なずれの速度は 0.4m/千年とされる。岩淵（2002）⁴⁾ は、図 3.1.2-2 に A 地域湾内の表層部に認められる新しい時代に形成された断層を上げるとともに、図 3.1.2-3 に A 地域湾内の基盤に認められる断層の分布を示している。これらから、A 地域の湾内に認められている「新しい時代に形成された断層」は、新第三紀鮮新統～第四紀更新統の砂層内の小断層や変形である可能性が高い。

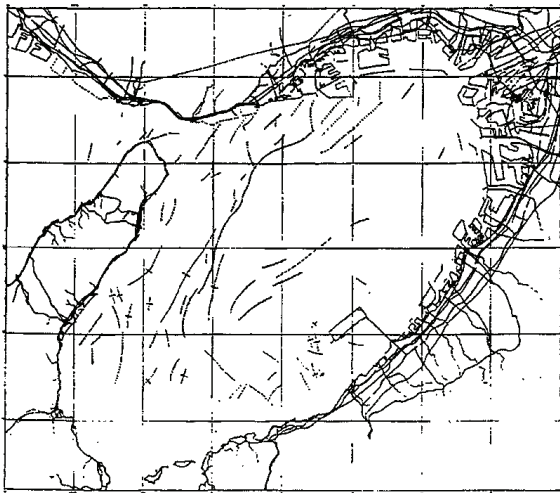


図 3.1.2-2 表層部に認められる新しい時代に形成された断層

出典：岩淵洋、コア精密対比による京阪神地域の地下地質、地質構造の高精度解読シンポジウム論文集、pp.129-142、岩淵（2002）⁴⁾

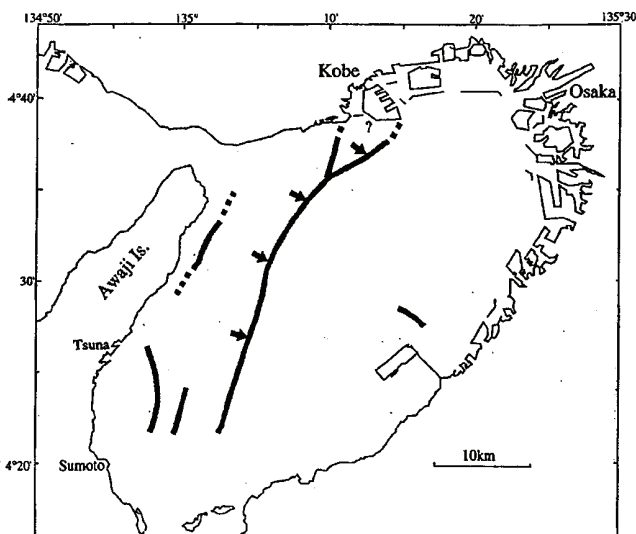


図 3.1.2-3 A 地域湾内の基盤に認められる断層

出典：岩淵洋、コア精密対比による京阪神地域の地下地質、地質構造の高精度解読シンポジウム論文集、pp.129-142、岩淵（2002）⁴⁾

3.1.3 A地域の貯留可能領域と貯留可能量

CO₂マイクロバブル地中貯留では、周辺での地下水の利用を考慮して、貯留可能量の算定は深度 300m以深とし、CO₂をガス状態で貯留することを念頭に置き、深度 500m以浅を想定した。

図 3.1.3-1 に、遮蔽層上限となる Ma3 海成粘土層の深度 300～500mの分布範囲と、下限となる Ma-1 海成粘土層の深度 300～500mの分布範囲を示す。また、A 地域の地質構造を考えた場合、活断層とされる Ad 断層と Aa 断層は、貯留範囲を制限する地質構造であるため、両断層にはさまれた地区の A 地域湾内東岸を対象とした。図 3.1.3-2 に、A 地域中央部東西方向の地質断面図を示す。

図 3.1.3-1 から貯留面積を求め、貯留可能量の算出は次式に依った。その結果、A 地域湾内では貯留可能量として 1.52 億 t-CO₂が見込まれる。

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

・ Rc : 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

・ A : 面積

・ h : 有効層厚

・ ϕ : 孔隙率

・ CO₂ 濃度* = 45 kg/m³H₂O

* : CO₂ 濃度は図 2.1.2-13 より注入圧 1MPa で 300m に
貯留することを想定。後述図 3.2.2-3 のデータより
保守的な値とした。

< A 地域の貯留可能量 >

貯留可能量 = 低減率 (0.25) × 面積 (450 × 106 m²)
× 有効層厚 (200 × 砂泥比 0.5) × 孔隙率 (0.3)
× CO₂ 濃度 (kg/m³)

貯留体積 = $Rc \times A \times h \times \phi = 33.75 \text{ 億 m}^3$

貯留可能量 = 33.75 億 m³ × 45 (kg/m³H₂O)
= 1.52 億 t-CO₂

3.1 節 参考文献

- 1)市原実、12 万 5 千分の 1 大阪とその周辺地域の第四紀地図、アーバンクボタ No.30、(1991)
- 2)関西地盤情報活用協議会、新関西地盤－神戸および阪神間、270p、(1998)
- 3)地震調査研究推進本部地震調査委員会、大阪湾断層帯の長期評価について、地震調査研究推進本部地震調査委員会ホームページ、(2005)
- 4)岩淵洋、コア精密対比による京阪神地域の地下地質、地質構造の高精度解読シンポジウム論文集、pp.129-142、(2002)

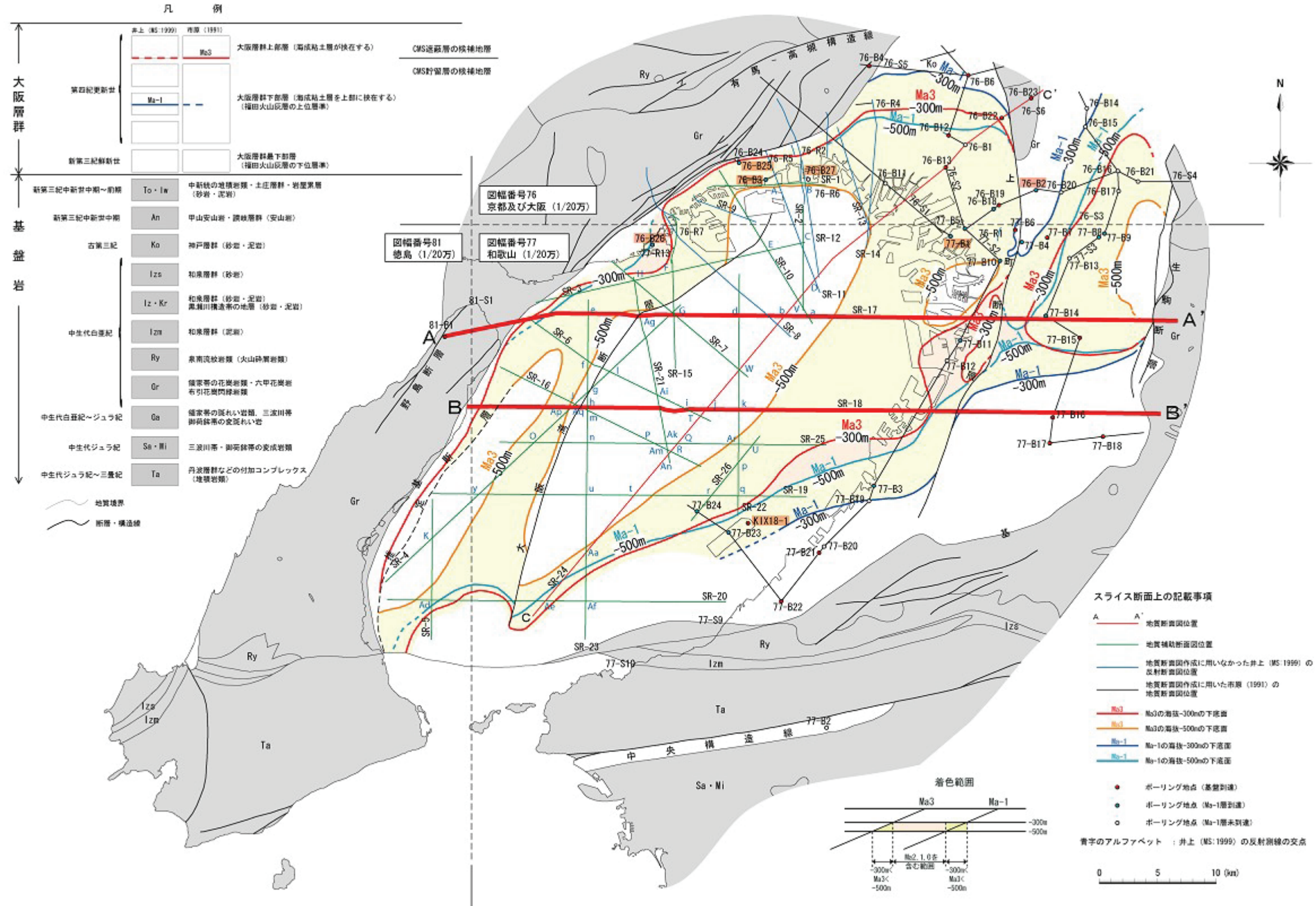
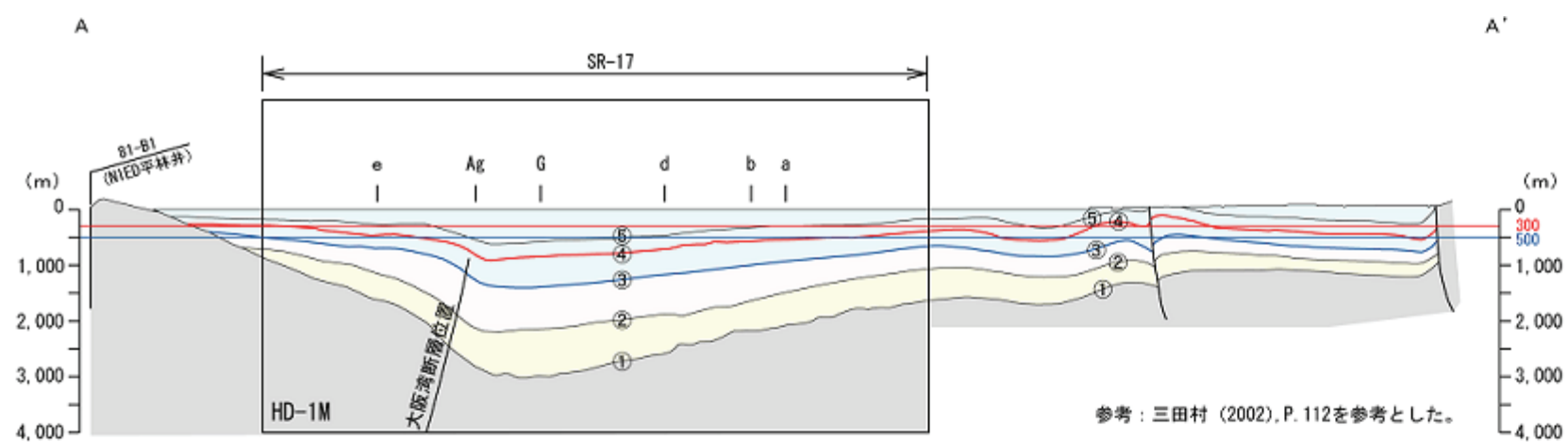
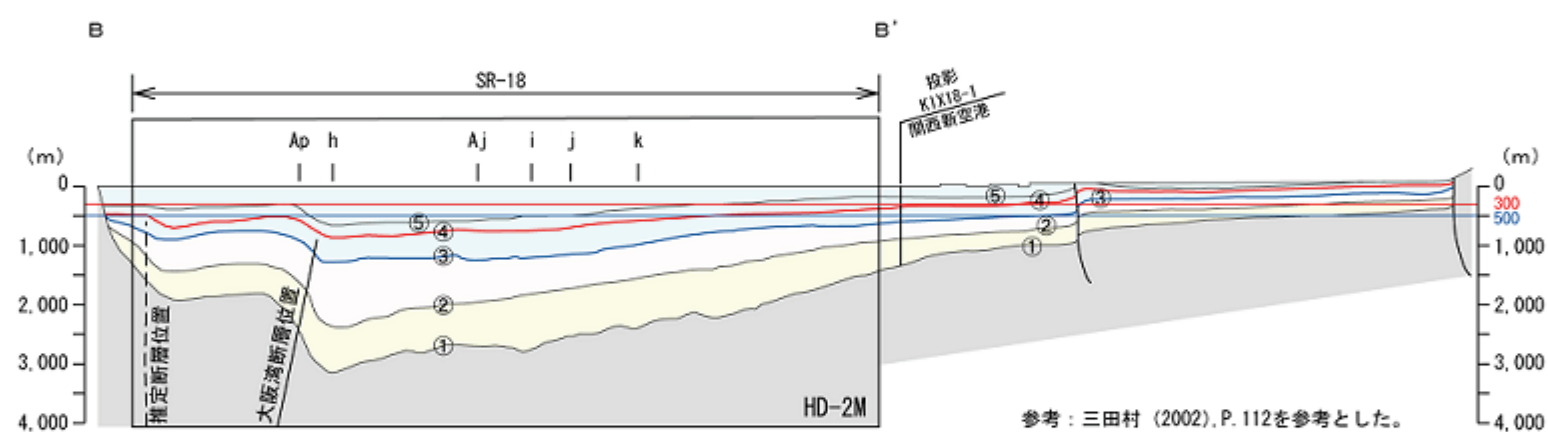


図 3.1.3-1 A 地域の新第三紀鮮新統～第四紀更新統の Ma3 と Ma-1 の分布



出典：井上（MS：1999）の反射断面図（基準面対比）

A-A' 測線地質断面図



出典：井上（MS：1999）の反射断面図（基準面対比）

B-B' 測線地質断面図

地質時代	地層区分	堆積環境		鍵層又は反射面	工学的判断
		井上 (MS:1999)	市原 (1991)		
第四紀更新世	大阪層群上部層	海成層	Ma6	⑤海成粘土：Ma6層	CO2遊離層の候補地層
	大阪層群下部層	海成層	Ma3	④海成粘土：Ma3層	
	大阪層群下部層	海成層	Ma-1	③海成粘土：Ma-1層	CO2貯留層の候補地層
新第三紀鮮新世	大阪層群最下部層	非海成層		②福田火山灰層	
先新第三紀鮮新世				①基盤岩	

※ 市原（1991）の下部層を三田村（2002）に従い2分割した。

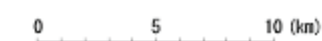


図 3.1.3-2 A 地域中央部東西方向の地質断面図

3.2 CO₂ ガス注入方法・位置の検討

3.2.1 ガス注入方法

ガス注入方法には、現在3種類の方法が考えられる。これらを以下に示す。

- 1) 地上でCO₂溶解水を作成しそれを地中に注入する方式
- 2) 目標とする貯留深度(直接深度)まで、気体のCO₂を送り込み、マイクロバブルとして貯留層に注入する方式
- 3) 貯留深度より浅い深度の孔井内でマイクロバブルを発生させ貯留深度で注入するまでに溶解水化する方式

3.2.2 地下環境条件に応じた溶解度の変化

1) 圧力温度条件による溶解度の変化

CO₂の溶解度と温度および気圧との関係を再掲する(IPCC SR2005¹⁾より)。現在、深度300～500m程度と考えられている貯留位置での温度は10～30℃程度、圧力は大気圧換算で35～50気圧程度と考えられる。この範囲を図に当てはめると溶解度は5～7%程度となる。深度が深くなると、溶解度は、圧力が上がるために高くなり、温度が高くなるために減少する。これらの効果は相殺する方向にはたらし、ほぼ溶解度の深度による変化は小さくなると考えられる。

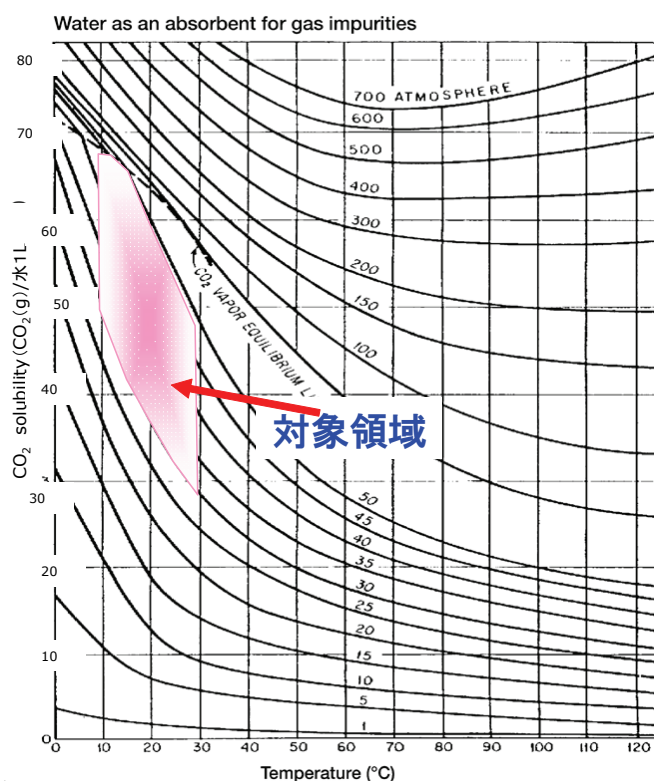


図 3.2.2-1 CO₂ マイクロバブル地中貯留における温度、圧力とCO₂溶解度の関係
(図 2.1.2-9 再掲)

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

対象とするA地域の深度500mまでの温度勾配をまとめると図3.2.2-2のようになる。

独立行政法人 産業技術総合研究所（以下、AIST という。）坑井温度データベースより作成した。平均的な温度勾配 $1.7^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ であった。

また、図 3.2.2-3 には温度勾配と圧力を考慮した溶解度を示している。C の破線が温度勾配 $2.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ のものに相当し、これより深度 400m では $50\text{kg}/\text{m}^3$ 程度の溶解度が想定できる。

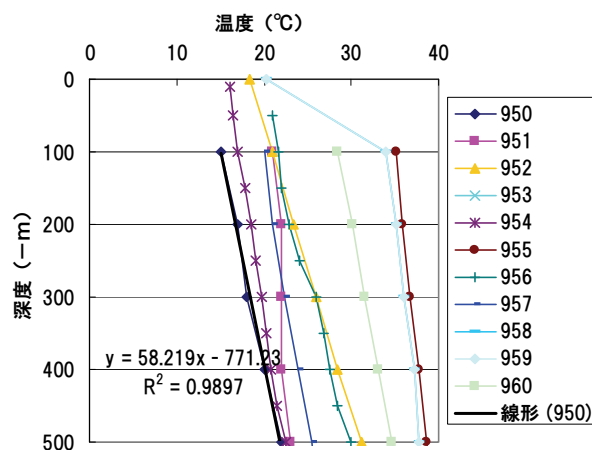


図 3.2.2-2 想定モデル地域の温度勾配

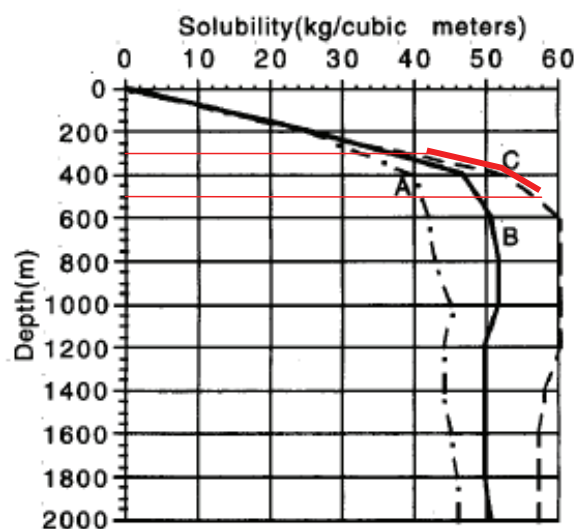


図 3.2.2-3 地下の温度圧力条件下に於ける CO_2 の水への溶解度の関係
(A: 温度勾配 $4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 、B: 温度勾配 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 、C: 温度勾配 $2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 、)

出典：平成 7 年度 二酸化炭素の隔離技術に関する調査研究、
新エネルギー・産業技術総合開発機構、RITE、
社団法人 化学工学会、平成 7 年度調査報告書 NEDO-GET-9538

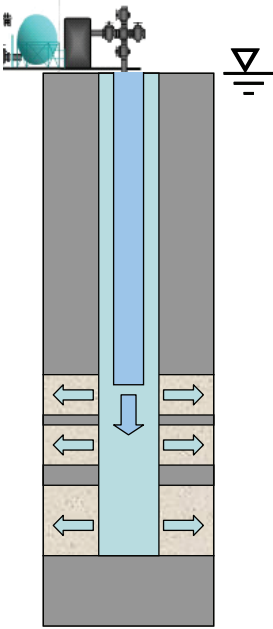
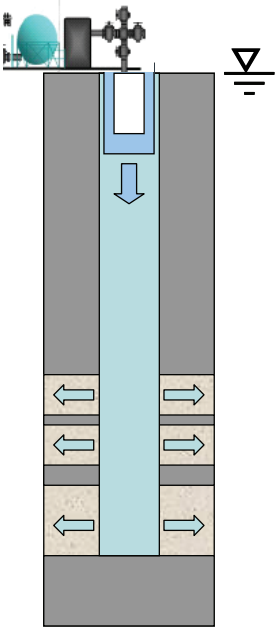
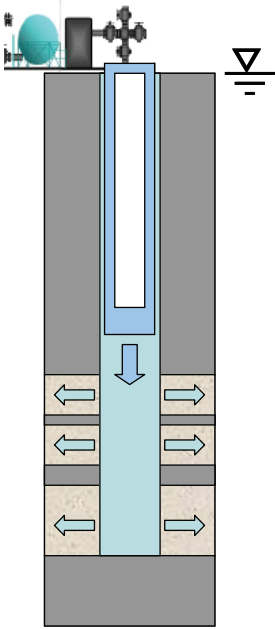
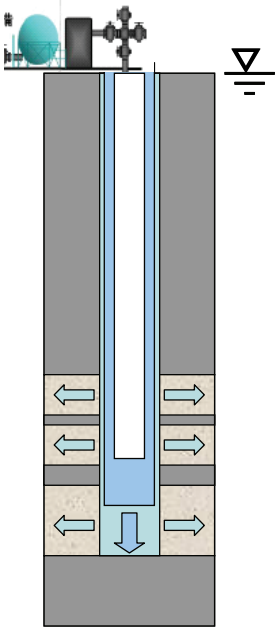
3.2.3 効率的注入深度

図 3.2.3-1 に注入深度を変えた状態の概念図を示す。地上で CO_2 溶解水を作成し地中に注入する場合は、そのままでは圧力が低いために溶解水の濃度は、貯留位置での飽和濃度より低くなると思われる。このため、加圧状態を維持できる密閉型の地上施設が必要となり、耐圧の仕様を維持したまま貯留位置までの圧送のラインも必要となると考えられる。一方で、地上でマイクロバブルによる溶解を行う場合、大きな気泡の回収や、マイクロバブルの状態モニタリングは容易であると考えられる。

貯留深度でマイクロバブルを注入する場合は、 CO_2 の注入ラインとかん水の注入ラインの 2 系統で貯留位置までこれらを送り、 CO_2 をマイクロバブル化する。この場合は、注入井と揚水井および地下水分布状態で定まる水頭による管理のみで良いために、地上での溶解方式に比べ地上施設は簡略化が可能であると考えられる。ただし、原位置でのマイクロバブル発生のため、発生孔付近での大きな気泡の回収や、マイクロバブルのモニタリングが必要となるため、注入位置での設備が複雑化する可能性がある。

浅/中深度での場合は、特に中深度で CO_2 のマイクロバブルを生成すると貯留層に近い圧力条件での生成となり、貯留深度で必要な設備で可能と思われる。貯留層までの到達に時間を要するため、マイクロバブルの溶解に必要な時間が確保できると考えられる。さらに、大きな気泡は注入井の孔内を逆流する形で上昇するために、回収のための設備を要しない可能性があると考えられる。

表 3.2.3-1 注入位置による特徴

CO ₂ 溶解水を地上で作成し、注入する方法	ボーリング孔上部でマイクロバブルにより注入	ボーリング孔中間部でマイクロバブルにより注入	ボーリング孔底部でマイクロバブルにより注入
			
陸上 CO₂ 圧力タンク 3MPa 以上が必要 浸透量と注入量のバ ランスが必要	注水圧 1MPa の場合 先端圧力 1MPa とな り、溶解度は小 気 体 CO₂ 注 入 圧 は 1MPa+α	注水圧 1MPa の場合 先端圧力は 1MPa+深 度相当圧(ex.200m)とな り、溶解度が決まる 気 体 CO₂ 注 入 圧 は 1MPa+水深 200m 相当 圧	注水圧 1MPa の場合 先端圧力は 1MPa+深 度相当圧(ex.500m)とな り、区間が広い場合、溶 解度は区間上部で決ま る 気 体 CO₂ 注 入 圧 は 1MPa+水深 500m 相当 圧

3.2.4 排ガス注入の検討

マイクロバブルを利用して浅部地層に CO₂ 溶解水として貯留する場合、排ガスをマイクロバブル化して地下水に溶解させる方法が考えられる。この場合、CO₂ は溶解度が高いため他の気体との分離の可能性が指摘されている。しかし、混合ガスとして注入する場合には、分圧によって溶解度が決まるため、ここでは、まず排ガスに含まれる成分とその割合を調べ、それらの成分についての溶解度をまとめた。

1) 排ガスの成分

日本における業種別の CO₂ 排出源として、代表的な火力発電所（排出量 1 位）、鉄鋼業（同 2 位）、セメント業界（同 4 位）、清掃工場（同 6 位）における排ガスの成分を調べた。なお、化学工業（同 3 位）については今回、成分データまでは把握できなかったため、省略する。（表 3.2.4-1）

「固定発生源（工場や事業場）から排出又は飛散する大気汚染物質は、大気汚染防止法により、物質の種類ごと、施設の種類・規模ごとに排出基準等が定められており、大気汚染物質の排出者等はこの基準を守らなければならない。」と定められ、汚染物質（ここで問題になる SO_x、NO_x）濃度は基準値以下になるように処理されている。

排ガス中の CO₂ 濃度(%)は、業種によって異なるが、数 10% 台に分布する。いずれの業種においても、最も多くを占めるのは窒素ガス(N₂)で 50% 台～80% 台を占める。排ガスをそのまま CO₂ 地中貯留に使う場合、この N₂ ガスの処理が大きな課題になる。また、SO_x、NO_x は、大気汚染防止法の基準値以下に処理して排出されているため、量的には僅かである。

表 3.2.4-1 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 *2	*1 81.9	*1 12.5	*1 5.6	0.0030*1 (30ppm)	0.0083*1 (83ppm)	*1 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 *2	*2 51.0	*2 24.5	—	—	—	*4 7.2	
セメント 製造業	3、252 *2	*7 64	*7 32	*7 0.04	0.0022*6 (22ppm)	0.066*6 (660ppm)	*4 13.5	N ₂ ～SO _x の値は H ₂ O を除外した 場合の値

出典：

*1：電力は石炭火力発電の排ガス成分で、排ガス成分は、「TSS 法を用いた CO₂ 回収液化装置のシステム化研究、エネルギー総合研究所 CO₂ 回収技術推進担当、香川 慶太」、「J-POWER グループ SUSTAINABILITY REPORT 2010」より引用

*2：NEDO 海外レポート No.1020、pp10、2008

*3：(社) 鉄鋼連盟 鉄鋼業の地球温暖化対策への取り組み 自主行動計画進捗状況報告

- *4:平成 21 年度 NEDO 先導調査 セメント産業における革新的 CO₂削減技術開発に関する先導調査
- *5:清掃工場は、清掃工場の調査資料による
- *6:経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課「平成 20 年度中小企業支援調査 セメント産業における非エネルギー起源二酸化炭素対策に関する調査報告書」による値を換算。
- *7:(インターネット検索による) 杉本主「技術仕様書確認:セメントプラント設備計画講義テキスト」より抽出

表に見られるように、いずれも N₂ が多くの割合を占めていることが分かる。また、一部では SO_x および、NO_x が含まれている。

排ガスを、そのまま地中に処分することは、効率および安全性の面から避けるべきであることが分かる。このため、排ガス中の CO₂ 以外の成分を分離および一部の成分については回収する必要がある。

排ガスに含まれる気体の溶解度を表 3.2.4-2 に示す。溶解度の単位は[cm³/cm³]で、1 気圧の気体が水の 1cm³ 中に溶解する容積である。CO₂ に比べ、N₂ は 1/50 以下、O₂ は 1/30 以下、および NO は 1/25 以下しか溶解せず、逆に、SO₂ は 40 倍以上の溶解度となる。すなわち、本検討で注目する CO₂ は S の化合物からなる気体を除き、他の気体より水に溶解しやすい気体であることを示している。CO₂ と共に溶解した NO_x、SO_x は環境基準値以下にクリアーするためにイオン交換樹脂で処理する必要がある。

表 3.2.4-2 気体ごとの溶解度

		N ₂	CO ₂	O ₂	SO ₂	H ₂ S	NO
溶解度	0℃	0.024(0.014)	1.71(1)	0.049	80	4.67	0.074
	20℃	0.016(0.018)	0.88(1)	0.031	39	2.58	0.047
	40℃	0.012	0.53(1)	0.023	19	1.66	0.035

(理科年表平成 15 年度版、pp501)

排ガスを直接注入するという点で類似した方法にジオリアクター²⁾がある。これは、温泉や火山などの地熱の高い地域における大深度地下の高温高压環境を反応炉と見立てるもので、注入する物質を反応させ安定な鉱物へ転化させることが目的の一つとなっている。現在検討している環境は、高压であるものの、温度は高々 40℃程度であるため、ジオリアクターの想定している反応速度には及ばず、鉱物化の速度はきわめて遅いと考えられる。

この方式では、地中で溶解および鉱物化を起こさなかった N₂ 気体と飽和に至っていない CO₂ 溶解地下水を回収し、N₂ を分離の後、再び地中に戻している。この方法では、気体 CO₂ を直接注入する。このため、貯留層の上に遮へい層を必要とすることや、大気への漏洩、地下水への噴出など CO₂ の生活圏への侵入が懸念される。これらをモニタリングする技術が求められるなど、課題も抱えている。

2) CO₂に関する法規制の動向

マイクロバブルで地中へ CO₂を注入する方式として排ガスを注入する場合には次の二つの事象が想定される。

①地中岩石からの重金属溶出

CO₂を地中に注入した際に CO₂が溶解した水による重金属の溶出による影響が懸念される。田中他³⁾によると室内バッチ実験では、「pH 緩衝能力の大きい堆積岩では重金属を中心とした微量元素の溶出が制えられることが示された。一方で頁岩や石灰岩からは、岩石中に多く含まれる元素が、多く溶出する傾向がみられた。」と報告されている。

このように CO₂水が貯留層から漏洩することがないような地質構造である適地の選定と施工中はモニタリングを行う必要がある。

②CO₂漏洩

CO₂は、可燃性、発火性、引火性、爆発性が少ない不活性ガスである。火災時に炭酸ガスを使用した自動消化設備において、消防隊が踏み込んだりして中毒になるといった事例があるに過ぎない。しかし、海外においては、カメルーン・ニオス湖からマグマ起源の CO₂ガスが噴出して住民が 1,746 名、家畜 8,000 頭以上が死亡した事例があるため、CO₂の地下への注入に際しては、CO₂の漏洩に対する危険性の事前調査や注入後のモニタリング等が必要である。

以上の 2 点について国内外の法規制についてまとめる。

日本国内では、未だ法規制は検討中である。諸外国における法規制の動向を以下にまとめる。(表3.2.4-3)

表3.2.4-3 諸外国における法規制

国名	概要
オランダ	2003年に鉱物法により規制が発効した。陸水およびオランダの大陸棚にまで適用される。二酸化炭素の貯留を「気体の貯留(storage of gases)」の一つとして明白にとらえている。オランダ国内の、地下100 mより深い場所での二酸化炭素の貯留についてはオランダ経済省 (Ministry of Economic Affairs) の許可が必要となる。さらに、鉱山活動による被害を受けた場合の取り扱い、操業中止後30年間の測定義務を負うとしている。
オーストラリア	一部の州で州法による対応がなされている。この中ではCO₂のパイプラインによる輸送および貯留に関して規制されているが、石油生産活動の一部として捉えている場合もあり、包括的な規制には至っていない。
アメリカ	米国では、連邦レベルと州レベルの法規制が存在する。連邦レベルに関しては、Environmental Protection Agency(EPA)は、CO₂の排出をClean Air Act の対象となる汚染物質としていない。また、その他の連邦法においても、CO₂の回収、輸送、圧入、圧入後の4つの各段階を対象としたものはない。その後、CCS関連の法案が何件か提案されているがいずれも成立には至っていない。 (http://www.ucl.ac.uk/cclp/ccsdedlegnat-US-Federal.php) 一方で、州間(Inter-states)パイプライン、有害廃棄物、地下圧入井における活動及びその管理を対象とした連邦法が存在してこれがCCSに適用される可能性がある。 Safe Drinking Water Act (SDWA) – 地下圧入管理 (UIC) プログラム ; Safe Drinking Water Act (SDWA)の下、地下圧入管理プログラム(UIC プログラムは、液体、ガス、スラリーといった全ての液体の圧入を対象としており(天然ガス貯蔵と水圧破砕は除く)、CO₂注入のための規制として新たなカテゴリーが設定された。 (Federal Requirements Under the Underground Injection Control (UIC) Program for Carbon Dioxide(CO₂) Geologic Sequestration (GS) Wells;Proposed Rule (Federal Register/Vol.73,No.144/Friday,July 25,2008)) (Bruce Kobelski & Anhar Karimjee、2005) National Environmental Policy Act(NEPA)では、連邦政府に対し、連邦政府の提案する施策や事業の環境影響を検討し、妥当な選択肢であるかどうか検討することを要求している。また、必要に応じ、詳細な環境影響評価書 (EIS) の作成が求められる。現在、エネルギー省のCO₂ 隔離計画 (Carbon Sequestration Programme) に対して、プログラム環境影響評価 (Programmatic Environmental Impact Statement) が求められており、準備書 (Draft Environmental Impact Statement) が提出された。

EU	EU 域内排出量取引制度指令が変更(2013～2020)され、取引の中に CCS を取り込むこととなった。取引にはオークション方式がとられ、その収益の一部を CCS 関連の研究開発に充てることとなった。さらに、CCS 指令が新設され、許可・運用・閉鎖後の責任移管などが規定された。 (欧州における CCS 関連政策と技術開発の現状：下田昭郎、電力中央研究所報告、V08062、2002)
----	---

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
二酸化炭素海底下地層貯留に関する専門委員会（第2回）参考資料2. 諸外国におけるCCS関連法令より (<http://www.env.go.jp/council/06earth/y068-02.html>)

(2) 日本の法規

CCSに関しては、大規模地中貯留実証試験のために環境省が検討しており、海洋汚染防止法の改訂において海底下へのCO₂注入濃度を決めている。

CO₂を地中に圧入した際に溶解した水による重金属の溶出や事故時の地中からの漏洩、水質汚染などに関連する法令として、大気汚染防止法、海洋汚染防止法（以下海防法と表示）、水質汚濁防止法、工業用水法がある。以下に主要な関連法令と要点を以下に示す。（表3.2.4-4）

表3.2.4-4 国内法規について

法規	概要	関連の深い条・項
大気汚染防止法	工場等の事故時を想定したものである。排出事業者における NO _x 、SO _x や煤塵の規制、事故時にはばい煙中の 28 物質を規定。CO ₂ 、N ₂ の規制はない。CCS に対応した法令はない。	大気汚染防止法：法律第 97 号
海防法 （海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律）	CO₂ 気体が温度 37.6℃において蒸気圧が 0.28MPa を超えない範囲で海底下廃棄が可能としており、法第 18 条の 7 第 2 号では、その詳細を規定している。 ・アミン吸収法による CO₂ 分離。 ・CO₂ 濃度 99%以上。 ・環境大臣は、CO₂ の海底下廃棄海域の指定と解除。 ・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。 ・CO₂ の海底下廃棄は、環境大臣が許可。 ・海底下の地層へ貯留する場合は、濃度基準がなく経済産業省「CCS 実証事業の安全な実施にあたって平成 21 年 8 月 経済産業省産業技術環境局 二酸化炭素回収・貯留（CCS）研究会」で課題と指摘。	施行令第 11 条の 4、5、6」の「法第 18 条 7 第 2 号及び法第 18 条の 15、8

工業用水法：	地下水の採取・利用に関する法律で、揚水利用については、揚水機の吐出口の径が 6cm^2 を超える場合には許可が必要。	工業用水法 法律第 146 号
地盤沈下防止等対策要綱	地下水の採取・利用による地盤沈下防止に関する要綱である。	各自治体の条例等
水質汚濁防止法	工場等の事故等による水質汚濁に関する、排水基準や健康被害に対する基準、水道法に基づく水質基準や法令である。なお CCS に対応した法令ではない。	工場等の事故時を想定した法令であり、以下の水質基準がある。なお CCS に対応した法令ではない。 ①水質汚濁に係わる環境基準（人の健康に関する環境基準）：環境庁告示第 59 号 ②地下水の水質汚濁に係わる環境基準：環境庁告示第 10 号 ③地下水の浄化基準：水質汚濁防止法施工規則第 9 条の三の二項 ④水道法に基づく水質基準（硝酸態 N など 50 項目）、水質管理標値（硝酸態 N を含む 27 項目）：水道法水質基準および水質管理目標設定項目（厚生労働省） ⑤排水基準：水質汚濁防止法第三条 ⑥地下浸透基準：水質汚濁防止法第 8 条「特定地下浸透水が有害物質を含むもの」 ⑦水質汚濁防止法施行規則：環境省令第 11 号
土壤汚染対策法	土壤汚染の状況の把握、土壤汚染による人の健康被害の防止を目的としたもので、重金属等の環境基準を定めている。	土壤汚染対策法：法律第 53 号及び環境基本法：法律第 132 号第 9 条

現状においては、海防法で CO₂ 地中貯留について手引き書の作成が継続中である。

CCS を直接に対応した法令はないが、以下に段階ごとに関連すると思われる法令を示す。

(a) 排出源

大気汚染防止法により、NO_x、SO_x、粉塵等の規制が定められている。一方、CO₂、N₂は、濃度、排出量の基準はない。

(b) 圧入処分

関連法令を以下に示す。海洋投棄に関するロンドン条約 1996 年議定書における規定があり、海防法で基準を定めている。

ア. 海底下廃棄をする海域及び海底下廃棄の方法に関し政令で定める基準

「施行令第 11 条の 4、5、6」の「法第 18 条 7 第 2 号及び法第 18 条の 15、8」で基準を定めている。

イ. 海底地下層へ貯留する場合

「CCS 実証事業の安全な実施にあたって 平成 21 年 8 月 経済産業省産業技術環境局 二酸化炭素回収・貯留 (CCS) 研究会」によると投入する CO₂ の濃度基準については、海防法への CO₂ 濃度追記検討が必要と指摘課題を指摘している。

(c) 地下水汲み上げ

地下水を汲み上げる場合、以下の法律が関係してくる。但し、前述したように CCS に対応した法令はない。

- ・ 地下水の採取・利用に関する法律 (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)

(d) 漏洩

地中からの漏洩といった事故時に関係する法令では、以下の大気汚染防止法、水質汚濁防止法が関係してくる。ただし事故時の対応は、工場等の事故時を想定した法令であり、CCS に対応した法令はない。

- ・ 大気汚染防止法：事故時のばい煙、28 特定物質の排出を規定
- ・ 水質汚濁防止法：①水道法に基づく水質基準 (硝酸態 N など 50 項目)、
水道法に基づく水質管理標値 (硝酸態 N を含む 27 項目)
 - ②排水基準
 - ③地下浸透基準
 - ④地下水環境基準
- ・ 土壌汚染対策法：土壌環境基準
- ・ 都道府県条令：地盤沈下、塩類化防止、水質保全等の条例

(e) 注水

注水するときには、地下浸透基準が関係してくる。表 3.2.4-5 に地下浸透基準を示す。同表では、「地下浸透基準値」を「地下水環境基準」で割って係数化した。より

0に近い項目は基準が厳しいことを示している。このように他の水質基準より基準値が厳しい。

表3.2.4-5 人の健康に係わる環境基準一覧

	(1)排水基準	(2)地下浸透基準	(3)地下水環境基準	(4)土壌環境基準	(2)／(3)
カドミウム及びその化合物	0.1mg/L	0.001 mg/L	0.01mg/L	0.01mg/L	0.1
シアン化合物	1mg/L	0.1 mg/L	検出されないこと	検出されないこと	1
有機リン化合物（パラチオン、メチル パラチオン、メチルジメトン及び EPN に限る。）	1mg/L	0.1 mg/L	検出されないこと	検出されないこと	—
鉛及びその化合物	0.1mg/L	0.005 mg/L	0.01mg/L	0.01mg/L	0.5
六価クロム化合物	0.5mg/L	0.04 mg/L	0.05mg/L	0.05mg/L	0.8
砒素及びその化合物	0.1mg/L	0.005 mg/L	0.01mg/L	0.01mg/L	0.5
水銀及びアルキル水銀その他の水銀化合物	0.005mg/L	0.0005 mg/L	0.0005mg/L	0.0005mg/L	1
アルキル水銀化合物	検出されないこと	0.0005 mg/L	検出されないこと	検出されないこと	—
ポリ塩化ビフェニル	0.003mg/L	0.0005 mg/L	検出されないこと	検出されないこと	—
トリクロロエチレン	0.3mg/L	0.002 mg/L	0.03mg/L	0.03mg/L	0.07
テトラクロロエチレン	0.1mg/L	0.002 mg/L	0.01mg/L	0.01mg/L	0.2
ジクロロメタン	0.2mg/L	0.002 mg/L	0.02mg/L	0.02mg/L	0.1
四塩化炭素	0.02mg/L	0.0002 mg/L	0.002mg/L	0.002mg/L	0.1
1、2-ジクロロエタン	0.04mg/L	0.0004 mg/L	0.004mg/L	0.004mg/L	0.1
1、1-ジクロロエチレン	0.2mg/L	0.002 mg/L	0.1mg/L	0.02mg/L	0.02
シス-1、2-ジクロロエチレン	0.4mg/L	0.004 mg/L 上	0.04mg/L	0.04mg/L	0.1
1、1、1-トリクロロエタン	3mg/L	0.0005 mg/L	1mg/L	1mg/L 以下	0.0005
1、1、2-トリクロロエタン	0.06mg/L	0.0006 mg/L	0.006mg/L	0.006mg/L	0.1
1、3-ジクロロプロペン	0.02mg/L	0.0002 mg/L	0.002mg/L	0.002mg/L	0.1
チウラム	0.06mg/L	0.0006 mg/L	0.006mg/L	0.006mg/L	0.1
シマジン	0.03mg/L	0.0003 mg/L	0.003mg/L	0.003mg/L	0.1
チオベンカルブ	0.2mg/L	0.002 mg/L	0.02mg/L	0.02mg/L	0.1
ベンゼン	0.1mg/L	0.001 mg/L	0.01mg/L	0.01mg/L	0.1
セレン及びその化合物	0.1mg/L	0.002 mg/L	0.01mg/L	0.01mg/L	0.2
ほう素及びその化合物	海域以外 10mg/L 海域 230mg/L	0.2 mg/L	1mg/L	1mg/L	0.2
ふっ素及びその化合物	海域以外 8mg/L、海域 15mg/L	0.2 mg/L	0.8mg/L	0.8mg/L	0.25
アンモニア、アンモニウム化合物亜硝酸化合物及び硝酸化合物	(※1)100mg/L	(※2)下記に表記	10mg/L		

(*1) アンモニア性窒素に 0.4 を乗じたもの、亜硝酸性窒素及び硝酸性窒素の合計量。

備考 「検出されないこと。」とは、環境大臣が定める方法により排出水の汚染状態を検定した場合において、その結果が当該検定方法の定量限界を下回ることをいう。

(*2) アンモニアまたはアンモニウム化合物にあつては、1 リットルにつきアンモニア性窒素 0.7mmg 以上、亜硝酸化合物にあつては1 リットルにつき亜硝酸性窒素 0.2 ミリグラム以上、硝酸化合物にあつては1 リットルにつき硝酸性窒素 0.2mmg 以上

3.2 節 参考文献

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

2) 財団法人 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・有効利用技術当対策事業 プログラム方式二酸化炭素固定化・有効利用技術開発 (ジオリアクターによる排ガス中 CO₂ の地中直接固定化技術開発) 成果報告書、pp188,平成 19 年 9 月

3) 田中姿朗他：大規模排出源近傍における CO₂ 地中貯留性評価法－深部帯水層貯留に向けた研究開発－、電力中央研究所報告、総合報告：No 7、pp.49、2009 年 8 月

3.3 物理・力学特性による貯留可能範囲の検討

本節では、前述してきた貯留システム（注入井・揚水井併用方式地中貯留システム）に基づき、貯留可能領域中に設定した仮想貯留サイトでの貯留システムレイアウトの例示により、貯留可能範囲を示すことにより、適地検討の流れを示す。

3.3.1 貯留サイトの選定

1) 仮想貯留サイトの選定理由

- ・仮想対象排出源選定と理由（図 3.3.1-1）

仮想貯留サイトの湾沿岸陸域に、A 火力発電所(LNG)(排出量 254 万トン・CO₂/年)、B 火力発電所(LNG)(同 197 万トン・CO₂/年)、製鉄所(同 11 万トン・CO₂/年)、非鉄金属工場(同 25 万トン・CO₂/年)そして化学工業プラント(同 48 万トン・CO₂/年)が、排出源として分布しており、我が国の大規模排出源の代表的なものがそろっている。セメント工場が存在しないくらいである。比較的小規模なものも含めて、多種の排出源が一定範囲に存在する排出源分布状況より、一例として、B 火力発電所を中心とした同範囲を、仮想貯留サイトとして選定した。地域分散型地中貯留としては、前述したように、特に大規模な排出源である火力発電所をソースとする必要はなく、実際のソースとしては、小規模な排出源である方が、排出量の多くを貯留の対象とすることが可能となり、適切と考えられる。

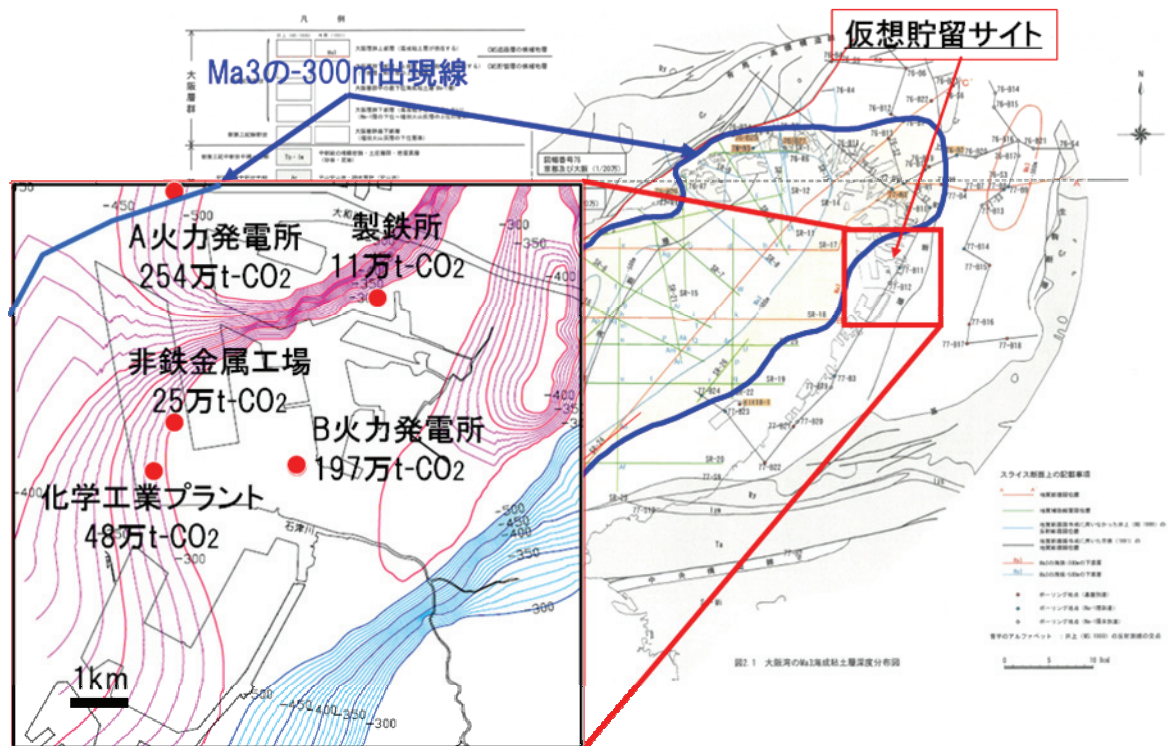


図-3.3.1-1 仮想貯留サイト位置図

RITE（2006）¹⁾の図を参考に作成、赤枠が仮想貯留サイト

- ・排出源近傍での仮想貯留サイト選定の理由

貯留可能領域は、図 3.3.1-2 の赤枠で示すように広く分布し、海上注入で沖合と沿岸海域、陸上注入で沿岸陸域のいずれもが貯留サイト候補として考えられる。図 3.3.1-2

の貯留可能領域内に、●印と●印で示したように、排出源近傍での貯留も、排出源から10～15kmの沖合海域での貯留も可能である。しかし、今回は、地域分散型地中貯留に有利な排出源近傍という条件を優先して、一例として、図3.3.1-2に示す緑枠で示した、仮想貯留サイト範囲内の排出源直近の海域および陸域を対象とし、仮想貯留サイト内の貯留位置（範囲）の検討を行った。

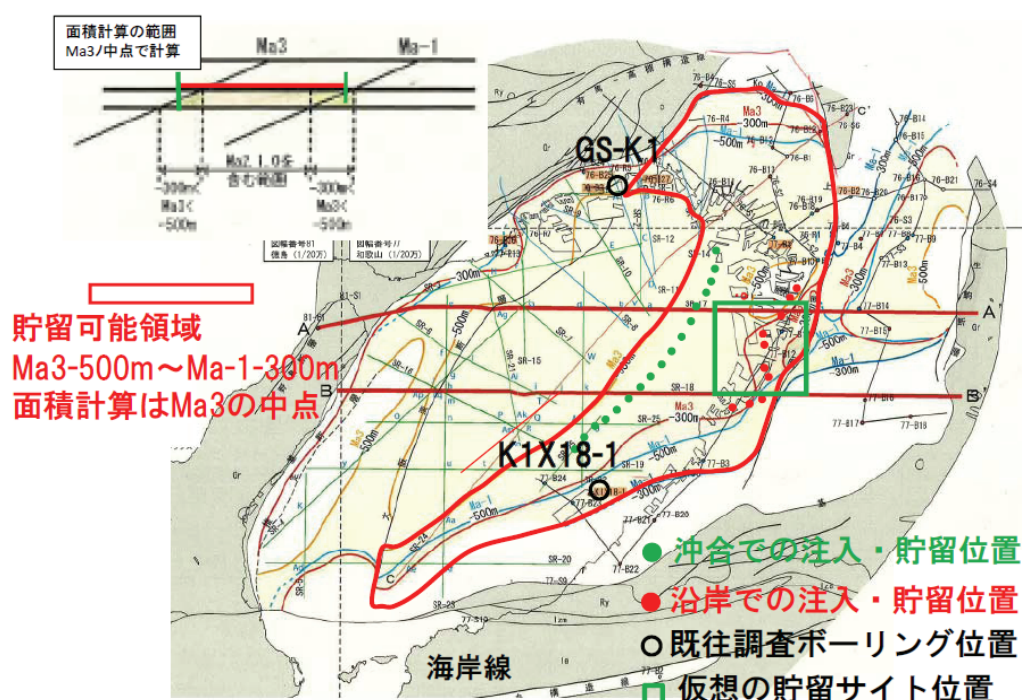


図 3.3.1-2 想定モデル A 地域の貯留可能領域位置図

赤枠内が貯留可能領域（Ma3～Ma-1 間、-300m～-500m）。緑枠内が仮想貯留サイト（10km 四方）。●印、●印は貯留可能位置の例。RITE（2006）¹⁾の図を参考に作成。

2) A 地域の貯留対象層・遮蔽対象層の物性

A 地域で貯留対象層となる新第三紀鮮新統～第四紀更新統の砂層の孔隙率は、RITE（2007）²⁾によると、図3.3.1-3に示すように、深度600m付近で、40%程度である（左図）。このデータは、GS-K1孔の密度検層の値をもとにした推定値であるが、同孔の室内物理試験の値も同程度である（右図）。また、同機構（2007）²⁾によると、図3.3.1-4に示すように、地表サンプルを用いた試験から孔隙率と浸透率の関係が求められており、孔隙率40%に相当する浸透率は2000md程度となる。地表サンプルによる値のため、深部では1桁小さい値となるものと想定しても100mdオーダーである。これらは、貯留能力のある地層の特性値であると考えられる。

遮蔽層となる海成粘土層の一軸圧縮強度は、土質工学会（1985）³⁾によると、図3.3.1-5に示すように、Ma3～Ma1(深度400m～700m)に限ると1.3～4.0MPa程度である。

また、中世古（1989）⁴⁾によると、海成粘土層 Ma1、Ma2 の透水係数は、 $10^{-8} \sim 10^{-10} \text{m/s}$ であり、非常に小さい。これらから、この海成粘土層には、地質的には、十分な遮蔽能力が期待されるとともに、貯留可能な強度も有していると考えられる。

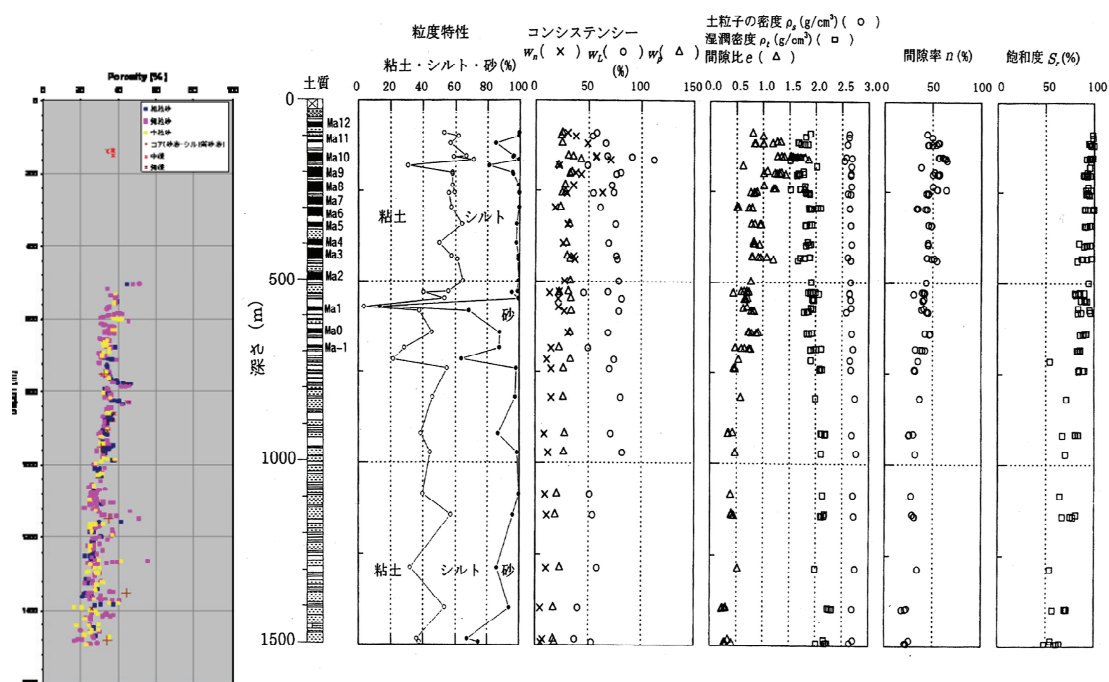


図 3.3.1-3 砂層の深度による孔隙率の変化

RITE (2007) ²⁾より引用し再構成。左図は GS-K1 孔の砂層部での密度検層結果よりの推定値。右図は、同孔の室内物理試験の結果。
出典 関西地盤情報活用協議会：新関西地盤－神戸および阪神間（1998）（右図）

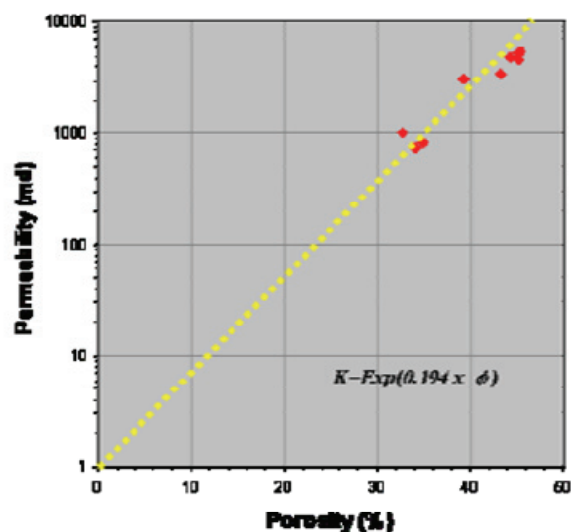


図-3.3.1-4 砂層の浸透率の変化

地表サンプルによる室内試験による孔隙率と透水試験結果(RITE(2006)¹⁾)の関係からの推定値

出典 RITE：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）

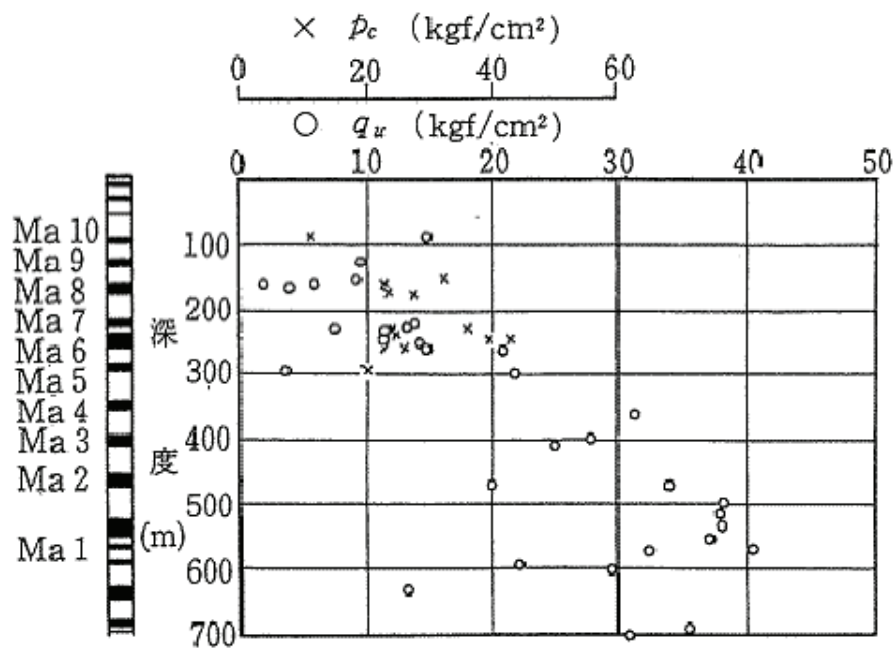


図 3.3.1-5 海成粘土層の一軸圧縮強度

出典 土質工学会・関西地質調査業協会：新編大阪地盤図．コロナ社（1985）

3) 仮想モデルサイトでの適地存在の検討

上記 1) 項に示す理由により、臨海の 10km 平方の範囲を、仮想の貯留サイトとし、その地質状況を検討した。

今回対象とした貯留層の下位にあたる海成粘土層 Ma-1 の下底面の分布は、図-3.3.1-6（深度 300m～500m の間で表示）および、図 3.3.1-7（深度 300m～500m の間で表示）に実線の等高線で示すように、仮想貯留サイトの南東側で、-500m より上位に位置し -300m 以浅に達する。今回対象としている範囲より下位の地層が対象深度に分布することとなる。

ただし、この範囲の地層が貯留に使用できないというわけではない。RITE（2006）¹⁾ が検討した深部塩水帯水層貯留では、Ma-1 以深の地層を貯留対象としている。今回対象としている範囲は、複数の海成粘土層が存在しているために、層状の複数の小部屋に CO₂ を隔離して貯留することとなり、遮蔽性能は、その下位より高いものと考えられる。Ma-1 下位の地層には海成粘土層は分布せず、砂層と泥層の互層のみからなり、最終的には上位の海成粘土層に遮蔽性能を期待している。しかし、今回検討の貯留対象層に比べて、貯留性能には大きな差はないと考えられる。

貯留対象層の上位にあたる海成粘土層 Ma3 の下底面の分布は、図 3.3.1-6（深度 300m～500m の間で表示）および図 3.3.1-7（深度 300m～500m の間で表示）に破線の等高線で示すように、仮想貯留サイトの西側および北東側から中央部に向けて、-500m より上位に分布し、中央部では -300m より浅くなる。

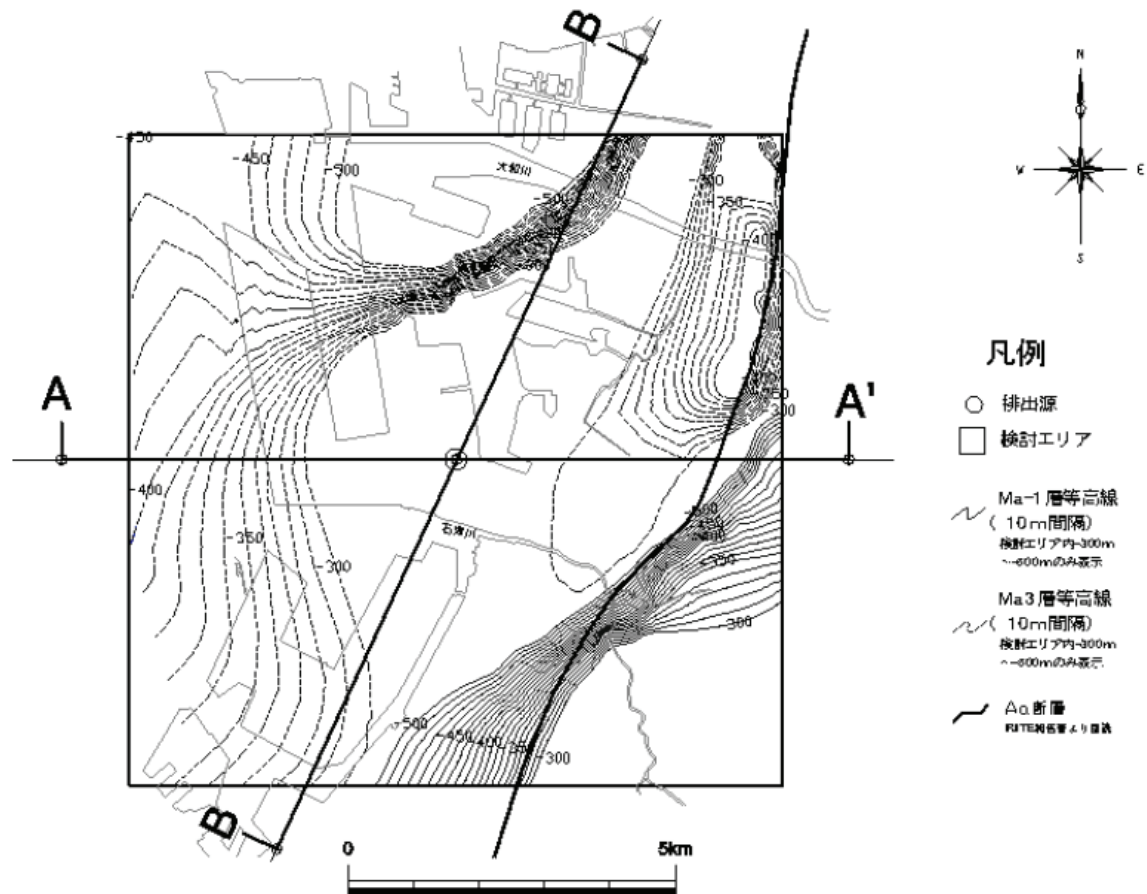


図 3.3.1-6 仮想貯留サイト内の Ma-1 層・Ma3 層下底面分布等高線図 (-300m~-500m 範囲)
海成粘土層 Ma-1、Ma3 の分布は、三田村 (2002) ⁵⁾ を図読し加筆。
太実線は Aa 断層位置 (RITE (2006) ¹⁾ より図読)

また、図 3.3.1-6 および図 3.3.1-7 に示す、南東側に分布する北北東-南南西方向の太実線は、活断層とされる Aa 断層の位置を示す (RITE (2006) ¹⁾ より推定)。北西部の東北東-西南西方向に分布する傾斜のやや急な部分は、延長方向が Aa 断層と交差しており、図 3.3.3-8 に示すように、Aa 断層から分岐する Ab 撓曲 (岡田 (2000) ⁶⁾) の南西側延長部に位置する可能性がある、このため、この位置に、安全側の評価として派生断層が存在するものと仮定した。ただし、三田村 (2002) ⁵⁾ では、派生断層の位置は明記されていない。

上述のように、-300m~-500m の 200m 間の全範囲で、Ma3~Ma-1 間の地層が分布するのは、この貯留サイトの中央部である。また活断層を避け、貯留対象層の効率的な使用の観点から、仮想貯留サイト中の貯留範囲は、10km 平方のサイトの中央部を対象とした。

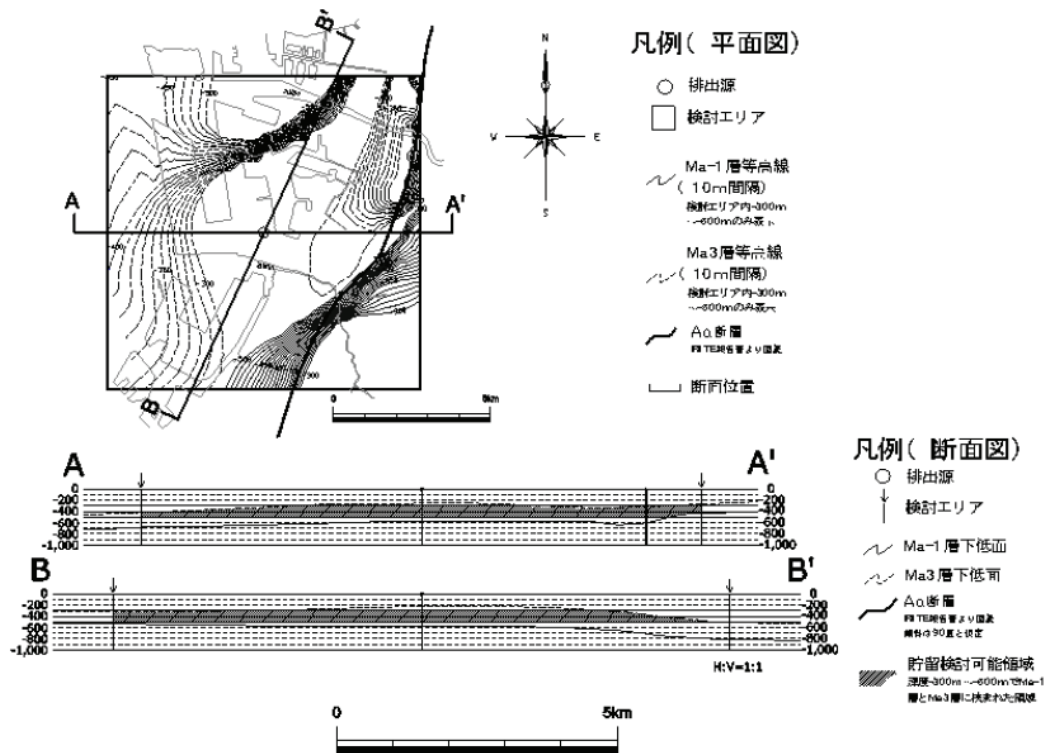


図 3.3.1-7 仮想貯留サイト内の地質断面図(-300m~-500m 範囲)

三田村 (2002) ⁵⁾ を図読し加筆した。太実線は Aa 断層位置 (RITE (2006) ¹⁾ より図読)。

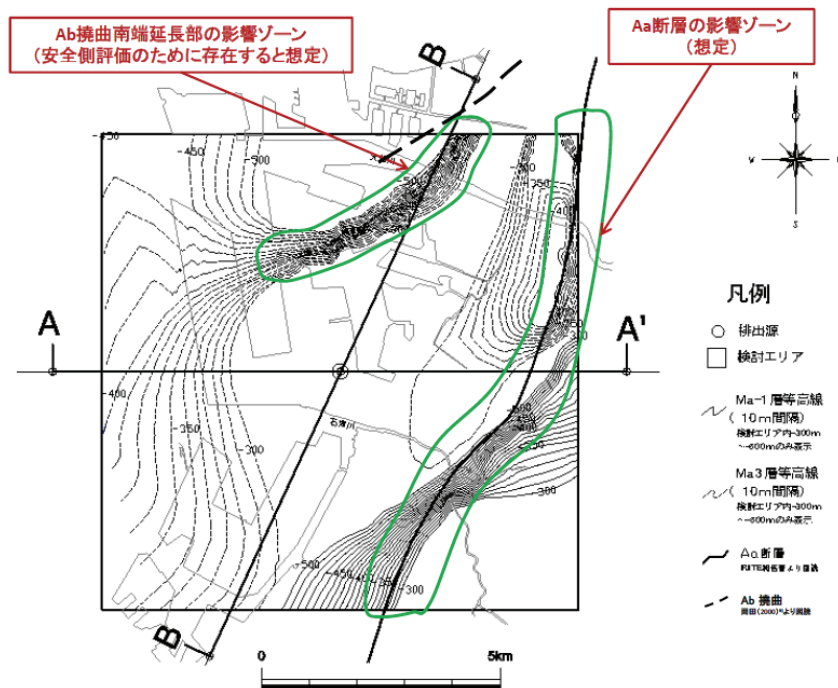


図 3.3.1-8 Aa 断層・Ab 撓曲の分布位置および影響範囲

三田村 (2002) ⁵⁾ を図読し加筆。太実線は Aa 断層位置 (RITE (2006) ¹⁾ より図読)、太破線は Ab 撓曲位置 (岡田 (2000) ⁶⁾ より図読)。

3.3.2 注入井・揚水井併用方式による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、図 3.3.2-1（図 2.3.5-1 を再掲）に示すように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低下させ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。

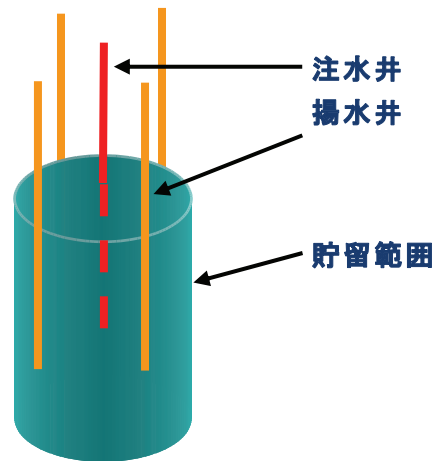


図 3.3.2-1 貯留ユニットの概念図（図 2.3.5-1 を再掲）

2) 検討方法

水循環の検討は、2.3.5 款の 2) 項で述べた、群井の井戸公式によって検討した。参考のため、検討手順と計算式を以下に再掲する（図 3.3.2-2（図 2.3.5-2 を再掲）、図 3.3.2-3（図 2.3.5-3 を再掲））。

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

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

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)

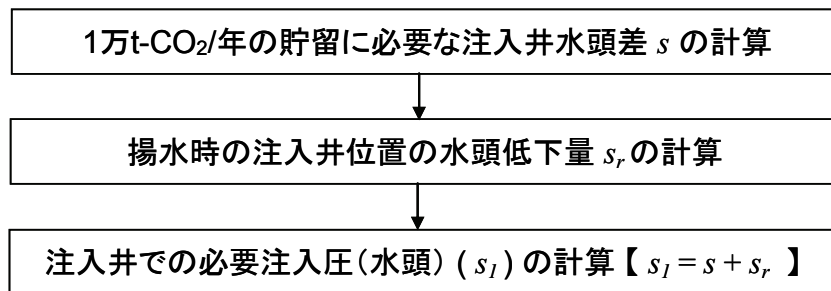


図 3.3.2-2 注入井・揚水井併用方式による水循環の検討手順（図 2.3.5-2 を再掲）

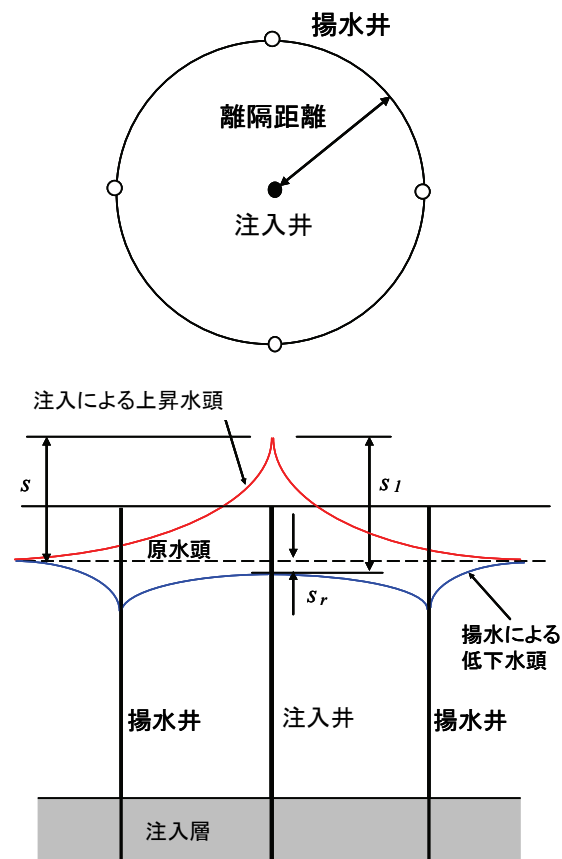


図 3.3.2-3 水循環量の計算方法説明図（図 2.3.5-3 を再掲）

3) 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、従来の超臨界状態 CO_2 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 CO_2 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	22.2 万 m ³ /年	1 万 t・CO ₂ 以上の貯留目標に対し溶解度 4.5%を設定 (溶解度は、図 2.1.2-13 より注入圧 1MPa で-300m に貯留することを想定。図 3.2.2-3 のデータより保守的な値とした。)
低減率	R_c	1、0.5、0.25	超臨界状態 CO ₂ 貯留時の貯留率(掃攻効率)0.25 を下限値と設定
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 ¹⁾ を参照
注入層の層厚	D	100m	注入対象全層厚 200m (GL-300m ~ -500m)×砂泥比率 0.5(H17 年度全国貯存量調査結果 ¹⁾ を参照)
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_o	58mm、100mm	標準ケース：φ 116mm、 揚水量確保ケース：φ 200mm
揚水井からの揚水量	q	$0.8 \times q_c$ $= 0.8 \times 2\pi r_o l \sqrt{Rck} / 15$	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	50m、100m、150m	3 水準を設定
揚水井の本数	n	4	円周上に 90 度毎に配置

4) 計算ケース

計算ケースは、表 3.3.2-2 に示すように、低減率と井戸径をパラメータとした 4 ケースとした。低減率を 1.0 としたケース 1 を基本とし、低減率が 0.5、0.25 に低下した場合と低減率を 0.25 とした場合については、循環水の確保を目的に井戸径を 200mm に拡大した場合について検討を行なった。各々のケースでは注入井と揚水井の離隔距離を 50、100、150m の 3 水準設定し、その影響について検討した。

表 3.3.2-2 計算ケース一覧

Case	低減率	井戸径 (mm)	注入井・揚水井の離隔 距離(m)	揚水井本数 (本)
1	1.0	116	50、100、150	4
2	0.5	116		
3	0.25	116		
4	0.25	200		

5) 計算結果

4 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 について井戸の離隔距離を変化させた場合の水頭分布図を図 3.3.2-4 に、注入井と揚水井の離隔距離を 100m とした場合の各ケースの水頭分布図を図 3.3.2-5 に示す。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確保するためには必要注水圧は、96～99m 程度であるが、低減率を小さくすると必要注水圧は著しく増加し低減率 0.25 の時には必要注水圧は 420 m 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、低減率を 0.5 にした場合に相当する。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 必要となり、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かん水を揚水した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 にまで拡張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 3.3.2-6 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、循環水確保を揚水目的とする上では揚水位置の制約はないといえる。一方、注水圧からの遮蔽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。

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 (m³/分)	揚水量 (m³/分)
1-1	1.0	116	50	99	288	66	0.42	0.47
1-2			100	96				
1-3			150	96				
2-1	0.5	116	50	204	424	64		0.33
2-2			100	200				
2-3			150	200				
3-1	0.25	116	50	421	626	60		0.23
3-2			100	417				
3-3			150	417				
4-1	0.25	200	50	424	584	113	0.40	
4-2			100	394				
4-3			150	389				

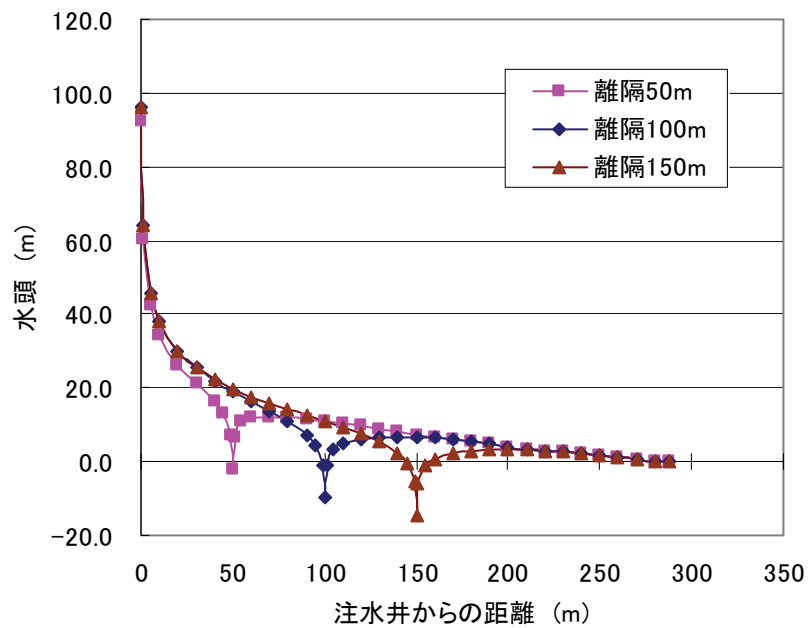


図 3.3.2-4 注入井と揚水井の離隔距離の水頭分布への影響 (Case-1)

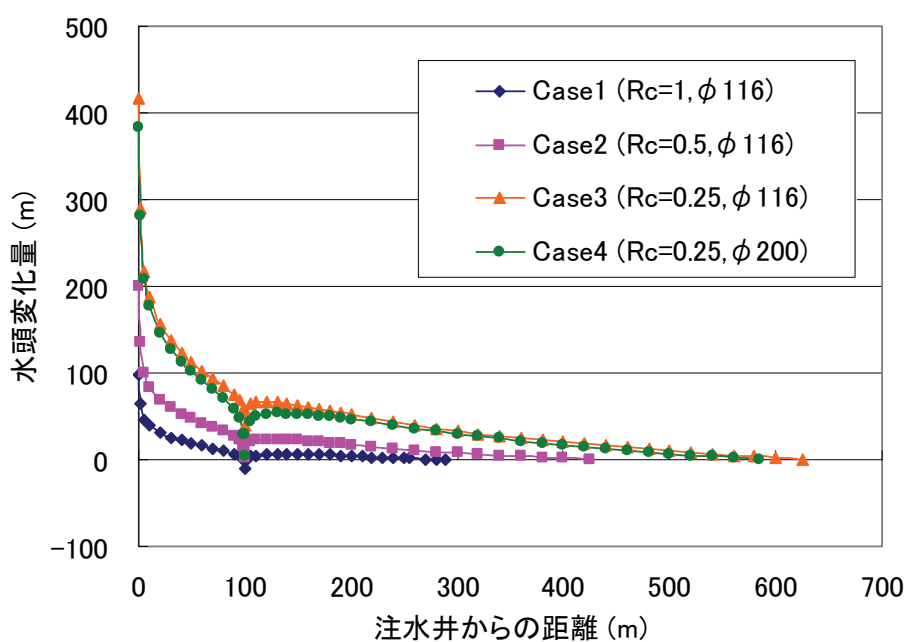


図 3.3.2-5 低減率と井戸径の水頭分布への影響

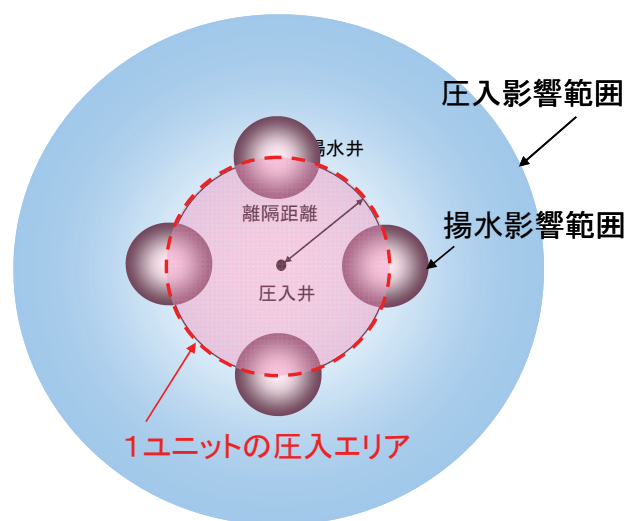


図 3.3.2-6 注入井・揚水井併用方式による水循環エリアの概念図

6) 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かん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、位置

の制約は少ない。一方、注入に伴う水頭上昇による遮蔽層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 100m 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、
$$\pi \times 100^2 \times 100 \times \text{孔隙率 } 0.3 \times \text{低減率 } 1.0 = \text{約 } 94.2 \text{ 万 m}^3$$
- ・ となる。この値を 1 年当りの水循環量 22.2 万 m³ で除すると 4.24 が得られる。つまり、半径 100m の 1 貯留ユニットでは、4 年強で、飽和 CO₂ 溶液水で満たされることになる。同様な条件で半径 200m を 1 貯留ユニットとすると、孔隙水容量は 4 倍の 337 万 m³ となり、注水圧力を同じに保てば、 $337/22.2 = 17.0$ 年分の貯留容量を確保できる。
- ・ 上記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いため、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。

3.3.3 貯留範囲の設定

1) 貯留ユニットを考慮した貯留必要範囲

- ・貯留条件を、以下のように設定する。

貯留規模； 1 万 t-CO₂/年

CO₂ 注入期間； 25 年間

総注入量； 25 万 t-CO₂/25 年

注入圧； 96m (0.96MPa)

注入深度； 300m - 500m (区間)

3.3.2 款の図-3.3.2-1 で示したように、貯留ユニットの直径は 200m であり、貯留深度は 300m～500m の 200m 間である。また、3.3.2 款で述べたように、地質構造の不確実性を考慮する必要があるものと考え低減率を 1.0 とすると、1 ユニットで 4.24 万トン・CO₂ の貯留総量となり、1 貯留ユニットで 4 年を超える貯留が可能となる。このことから、貯留条件である 25 年間での貯留総量を確保するには、6 ユニットあればよい。1 ユニットの直径が 200m であることから、貯留ユニットを 1 列で直線に並べた場合、影響範囲は図 3.3.2-4 のとおり約 300m であるものの水頭上昇範囲は注水井近傍に限られることを考慮して、隣接するユニット間の離隔距離を 200m とすると図 3.3.3-1 のように 1.2km×0.2km の範囲が確保できればよい。この程度の範囲の確保は容易と考える。

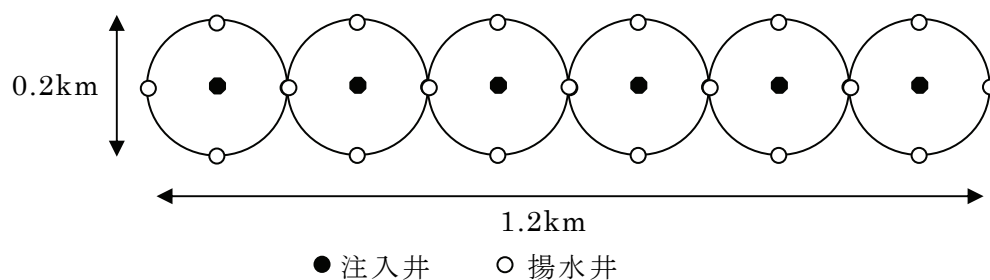


図 3.3.3-1 貯留ユニットの配置例

2) 沿岸域での貯留範囲設定の例

上記貯留条件を考慮した、仮想貯留サイト中の貯留範囲は、図-3.3.3-2 に示したように、サイト中央部では、海域の貯留ユニット（●印）、陸域の貯留ユニット（●印）を配置した範囲が、その例となる。また、断面で示すと、図-3.3.3-3 のようになる。図-3.3.3-2 に示すように、陸域、海域ともに 25 ユニット程度はレイアウト可能であり、各々の範囲で 100 万 t-CO₂ 程度の貯留が可能である。注入期間 25 年では、必要な貯留ユニットは 6 ユニットでよいので、各々 25 ユニットの配置範囲中では、隣接するユニット間の距離を離れたとしても、十分な貯留範囲が存在する。将来的には 10 万 t-CO₂/年の貯留も想定されるが、複数ユニットで同時に注入が可能であれば、図-3.3.1-2 に示すように、少し沖合では、十分な貯留が可能と考えている。また、仮想貯留サイト中の貯留対象範囲（中央部）においては、陸域・海域の両方が使用できるのであれば、図-3.3.3-2 に示すように、仮想貯留サイト（10km 平方）の中にも、緑枠で示すように適地がさらに存在するので、貯留

可能量は数 100 万トン-CO₂ を超える可能性があるものと想定される。なお、これらの遮蔽層・貯留層分布状況は、既往文献の図読による推定のため、その精度は不明であり、実際のサイト選定にあたっては地質調査による確認が必要である。

今回、貯留深度は、図-3.3.3-3 に示すように、300m～500m 間に設定している。これは利用地下水との位置関係を考慮したものであるが、AIST の全国井戸・水文データベース「いどじびき」(宮越他 (2005) 7)によると、図-3.3.3-4、図-3.3.3-5 に示すように、300m 以深での地下水利用は限られており、利用地下水への影響が生じる場合は少ないものと考えられる。なお、「いどじびき」に収録されている孔井総数は、34,859 本であり、そのうち深さ 300m を超える孔井数は 650 本である。しかし実際の貯留サイトの選定にあたっては、サイト周辺での井戸分布状況（位置、深度、使用目的など）の調査が必要であることは言うまでもない。なお、今回の検討では、温泉井戸については浅部からの揚水は少ないものと考え、検討対象から外しているが、実際の貯留サイトの選定にあたっては、その影響の調査が必要である。

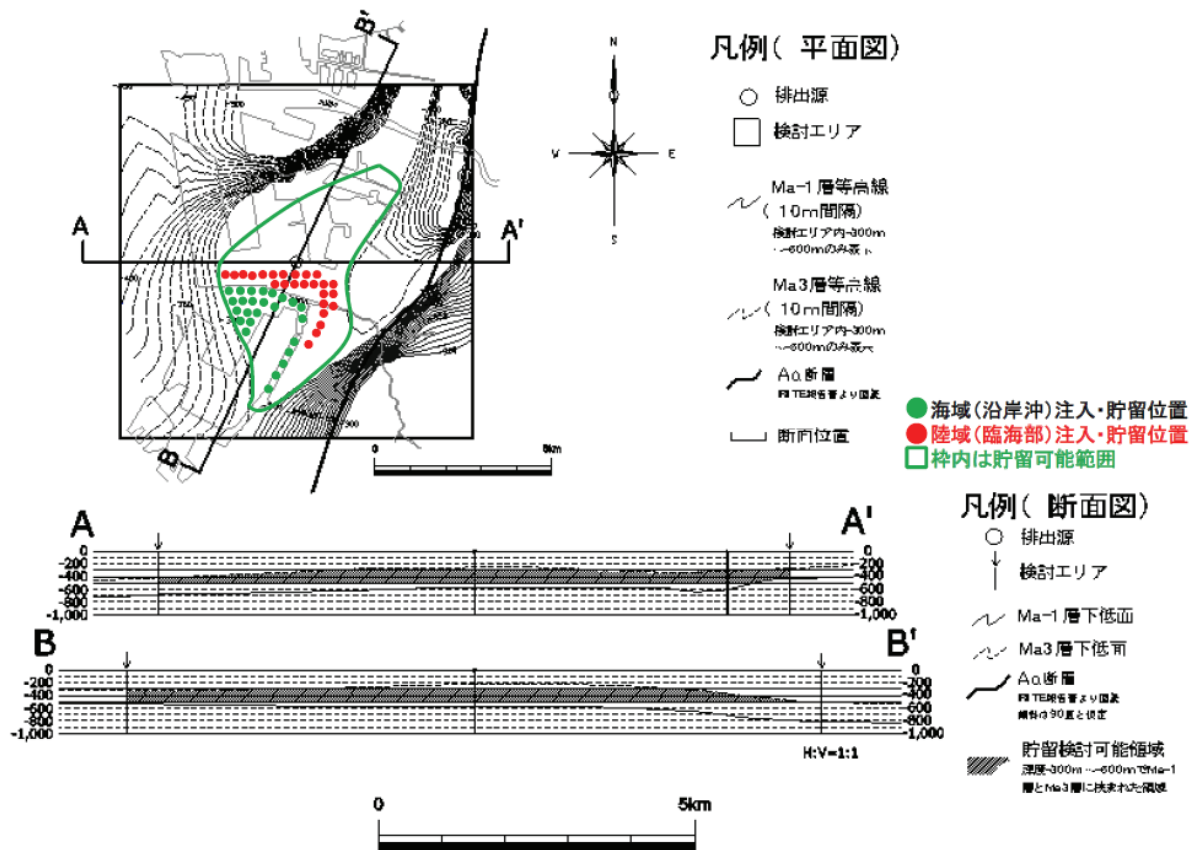


図 3.3.3-2 仮想貯留サイトにおける貯留範囲（平面）の例示
貯留ユニットは、海域、陸域、各々 25 ユニット配置。

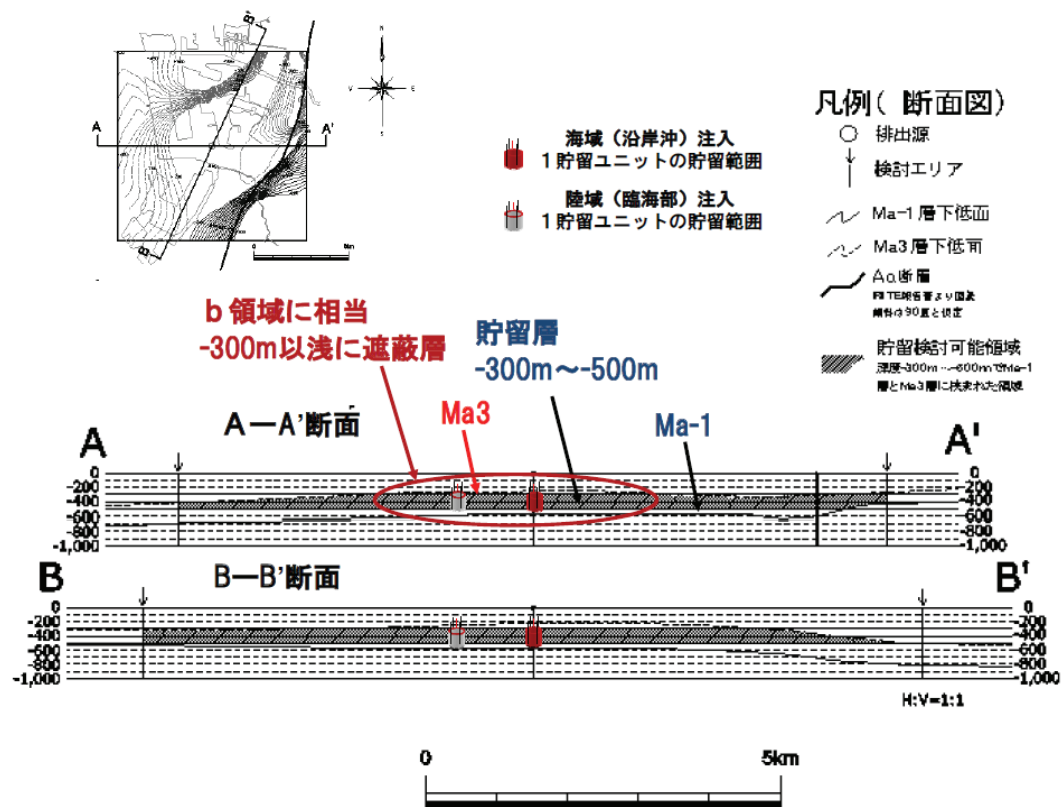


図 3.3.3-3 仮想貯留サイトにおける貯留範囲（断面）の例示

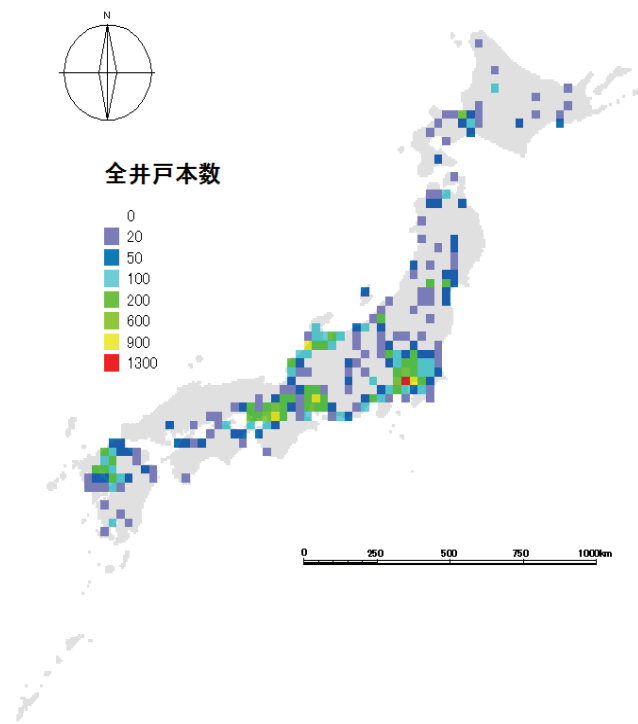


図 3.3.3-4 我が国の揚水井戸の分布（全井戸本数）
AIST「いどじびき」（宮越（2005）⁷⁾）のデータを引用し作図。

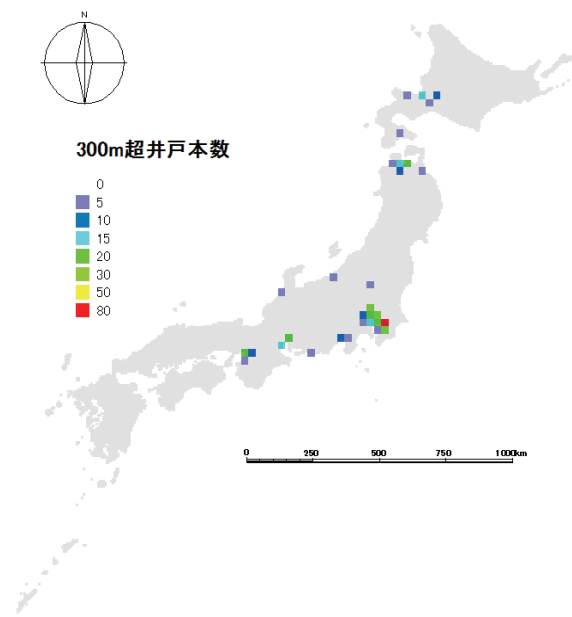


図 3.3.3-5 我が国の揚水井戸の分布（300m 以浅）
AIST「いどじびき」（宮越（2005）⁷⁾）のデータを引用し作図。

3.3.4 貯留システムのレイアウトの検討

図-3.3.3-2 に示したように、仮想貯留サイトの中央部で、各貯留ユニットが適切な位置にレイアウトされている。これを前提に、沿岸域でのレイアウトの例として、仮想の排出源からの全システムのレイアウトを、図-3.3.3-6 に示す。このようなレイアウトが、技術的には可能であると、現在、考えている。

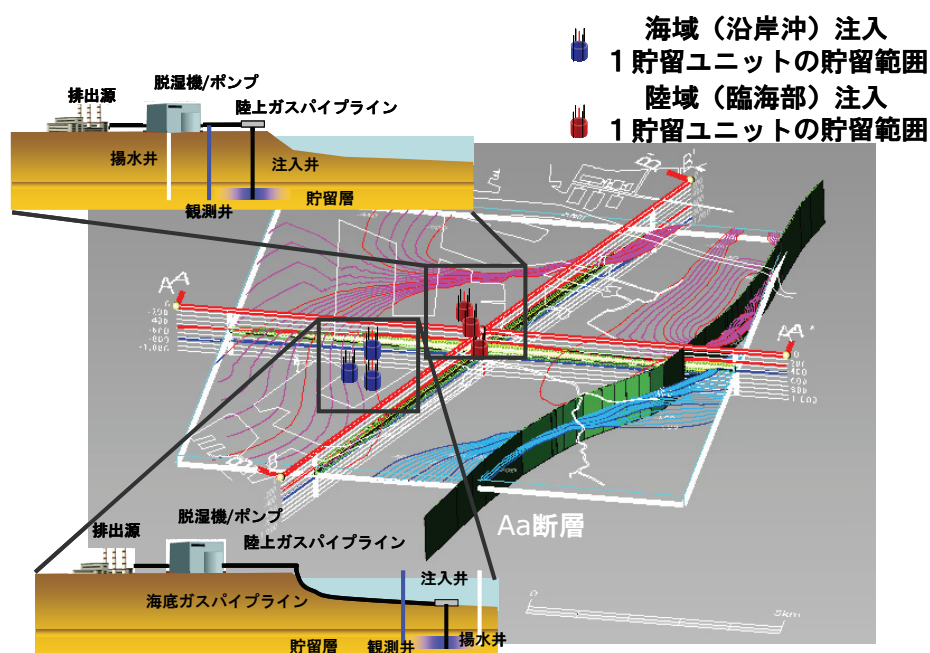


図-3.3.3-6 仮想貯留サイトにおける貯留システムレイアウトの例示

3.3 節 引用および参考文献：

- 1) 地球環境産業技術研究機構：平成 17 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．(2006)
- 2) 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)
- 3) 土質工学会・関西地質調査業協会：新編大阪地盤図．コロナ社 (1985)
- 4) 中世古幸次郎・橋本正：泉北ニュータウンの地盤の土質工学的性質．中世古幸次郎教授退官記念論文集 (1989)
- 5) 三田村宗樹：大阪平野地質構造図の作成．コア精密対比による京阪神地域の地下地質・地下構造の高精度解説 コア精密対比研究会、日本応用地質学会関西支部 (2002)
- 6) 岡田篤正・東郷正美編：近畿の活断層．東大出版会、p310-313 (2000)
- 7) 宮越昭暢・丸井敦尚：全国井戸・水文データベース「いどじびき」の改定と適用．地質ニュース、612 号 (2005)

第4章 まとめ

4.1 まとめ

本検討の主題であった、貯留システム概念の構築と課題の整理の概要を以下に示す。

1) 貯留概念の整理

マイクロバブルの特性について、文献調査、学識経験者へのヒアリングを通して検討し、微細で上昇しにくく、大きな気泡になりにくく、水に溶けやすいなどのため、注入した CO_2 のほぼ全部を溶解させることが期待できることを明らかにした。 CO_2 溶解水の特性として、地下水より、若干、重く、安全に貯留できるが、酸性であるために環境への影響評価が課題である。また、既往の貯留概念に比べて、浅部に貯留可能であることを示した。

2) 貯留システム概念の構築

地域分散型貯留の観点から、10 万 $\text{t}\cdot\text{CO}_2$ 程度以下の排出源に適することを示した。貯留システム概念について整理し、注入井と揚水井を組み合わせた注入井・揚水井併用方式を提案した。超臨界状態 CO_2 のため浮力による上昇を考慮しなければならない深部塩水帯水層貯留に比べて、地下浅部に CO_2 溶解水として安全に貯留できることが特徴である。排ガスをそのまま注入できれば、経済的であるが、大量の N_2 や汚染物質の対応に課題が残る。

3) 技術的条件

上記の貯留概念を考慮すると、我が国においては、新第三紀鮮新統～第四紀更新統の堆積岩が候補となる。砂岩を貯留層とし泥岩を遮蔽層とすることが可能な地質条件を有する堆積盆が適するものと判断した。有望な堆積盆は、十勝平野、内浦湾、庄内平野、房総半島、掛川地区、伊勢湾、大阪湾、宮崎地区、別府湾および沖縄本島の 10 地区であった。

4) 想定モデル地点での貯留システムモデルの構築

地質条件が適切であり、地質データが豊富な A 地域を例に、注入井・揚水井併用方式の貯留システムが、技術的に成立性するかを例示した。 CO_2 溶解水貯留に適する算定式を設定し、A 地域東側の深度 300m～500m に、1.5 億 $\text{t}\cdot\text{CO}_2$ の貯留可能量が存在することを示した。同深度の貯留層を対象に、地下水を揚水して注入する注入井・揚水井併用方式により、1 万 $\text{t}\cdot\text{CO}_2$ /年、25 年間の貯留条件では、200m 直径の貯留ユニットが、6 つ確保できればよく、10km 平方程度の貯留サイトには、余裕があることを示すとともに、沿岸域(臨海)の海域、陸域に同方式で貯留可能な貯留範囲が存在することを示した。

5) 注入井・揚水井併用方式地中貯留システムの今後の展望

これまで述べてきたように、本地中貯留システムでは、貯留層位置が浅いこともあり、ユニットを構成する注入井・揚水井群による段階的な調査により、調査精度の向上が見込まれ、適切な貯留位置の選定が容易に図れると思われる。また、注入前後のモニタリングによる注水および、揚水の管理が可能など、コントロールしやすい地中貯留システムである。本システムは、環境影響の評価・対策が可能であれば、有望な地域分散型貯留として期待される。

4.2 課題の整理

マイクロバブルの特性および、CO₂の特性について、既往の研究開発成果を整理し、CO₂をマイクロバブル化して地中貯留を行なう方法の概念を構築し、貯留量評価法、システムの検討を行なった過程で、以下のような課題が抽出された。

条件	課題
マイクロバブルの発生方法	効率的にマイクロバブルを発生させ、CO ₂ の溶解を速度および量ともに制御するため、現状の発生装置を用いてどのように地下水流量と気体混入量を制御していくか、検討課題である。
注入方法	溶解により CO ₂ を貯留する概念では、いかに飽和溶解液を作成するかが、課題となった。 地上で作成する場合は、地上設備の設計が課題となる。 孔内でマイクロバブルを発生させ、溶解する場合は、孔内の発生深度において、圧力と温度、コストも含めた最適な深度を選ぶことが課題である。
遮蔽層	深部塩水帯水層貯留においては、難透水性であり大きな浮力に対する力学的な条件が必要となった。ここでは大きな浮力は生じないが、十分低い透水性と拡散性を持って、遮蔽層内に移流・拡散していく CO ₂ の長期漏洩に対して十分バリアとなる条件が必要である。貯留サイトの選定に当たっては、連続性の評価が貯留量評価につながり、安全性にもつながるため、調査の重要な位置を占める。
管理とモニタリング	広域の地下水流動がある場合、CO ₂ 溶解水が地下水の排斥・置換によって移流する方向は、広域地下水流動方向に左右される。 地下水流動が非常に小さな領域においても、長期的に置換されたフロントから拡散が進行し、コントロール範囲を超える可能性がある。注水－揚水のセットで考えた場合のコントロール範囲での注水量および揚水量の管理をどのように行うか。 地表から地下水の CO ₂ 濃度を検出できる物理探査手法、孔井を利用した地下水流れのモニタリング方法が課題である。
環境への影響評価	CO ₂ が気体として漏洩することに対する評価は、深部塩水帯水層貯留と同様であるが、ここでは、地下水を揚水し、それに CO ₂ を溶解して注入するため、CO ₂ 溶解水としての課題がある。酸性水の注入に対する問題、注入後の貯留層内での化学反応、揚水井到達時の溶解水の揚水の問題が存在する。

4.3 技術的成立性の課題

- ・ マイクロバブルの溶解速度のコントロール

マイクロバブルの溶解速度はシステム設計上重要であり、全溶解を前提とする場合、マイクロバブル発生において、 CO_2 の供給量、地下水の供給量の設定値が課題である。地下水の供給量は、貯留層への注入量とバランスさせることが必要で、注入量は揚水量とのバランスが必要となり、これらを総合的にコントロールするシステムの設計が重要な課題となる。

また、マイクロバブル自身の溶解速度は径が小さいため速くはないが、界面面積/総体積が大きいこと、 mL 当り数百個という密度、および発生させて水中に噴出される時の高流速による効果により溶解速度は速いものと推定される。どの程度の溶解速度が期待されるかは、成立性のための重要なパラメータとなり、今後実証試験が必要である。その場合、室内でのマイクロバブルの発生と実際のボーリング孔内での発生との相似性を考慮することが必要である。

- ・ CO_2 溶解水の注水継続時の岩盤の透水性変化の影響評価

地下水中に陽イオンが存在するような場合には、特に Ca^{2+} や Mg^{2+} との反応による炭酸塩鉱物の生成は貯留領域内の移流経路となる間隙を減少させることになる。しかし、一方では、酸性水溶液となる CO_2 溶解水は、貯留層内の岩石または砂層を溶解させ間隙を増加させ、それにより透水性が増すことが考えられる。これらのバランスから長期にわたる透水性変化についての影響を評価しておくことが課題である。

- ・ 貯留領域でのモニタリングとコントロール

注入井から揚水井、および遮蔽層で囲まれた水循環域であり、貯留領域内の CO_2 の濃度を揚水井から揚水される水の水質からモニタリングし、注入圧力、注入井の位置、注入深度また揚水量などのコントロールを実施し、溶解水の状況、拡散状況などをモニタリングし、コントロールすることが課題である。

- ・ 排ガス注入における溶解度の向上

排ガス中には、およそ CO_2 は、数%~30%の構成比となっており、その構成比に依存した分圧で溶解度が決まる。すなわち、20%構成比の場合、5倍の圧力または5倍の溶解水量が必要となり、後述の経済性との関連で考えていく必要がある。

4.4 経済性・安全性の検討準備

4.4.1 経済性について

IPCC のレポートおよび、RITE レポートに深部塩水帯水層貯留についてのコストが試算されている。図 4.4.1-1 に圧入・モニタリングコストを、図 4.4.1-2 に現状技術での日本における CCS コストを示す。

圧入コストでは貯留層が陸地から離れるとパイプラインコストがかかる、また井戸 1 本当りの圧入量の影響が大きいことが示されている。現状での分離回収～貯留コストは ¥5,000～¥15,000 となっている。

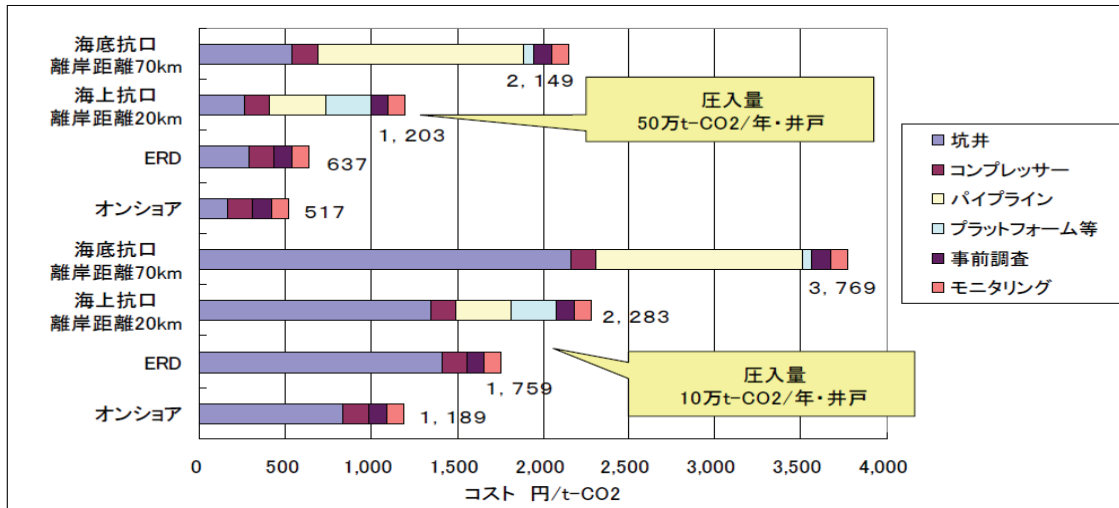
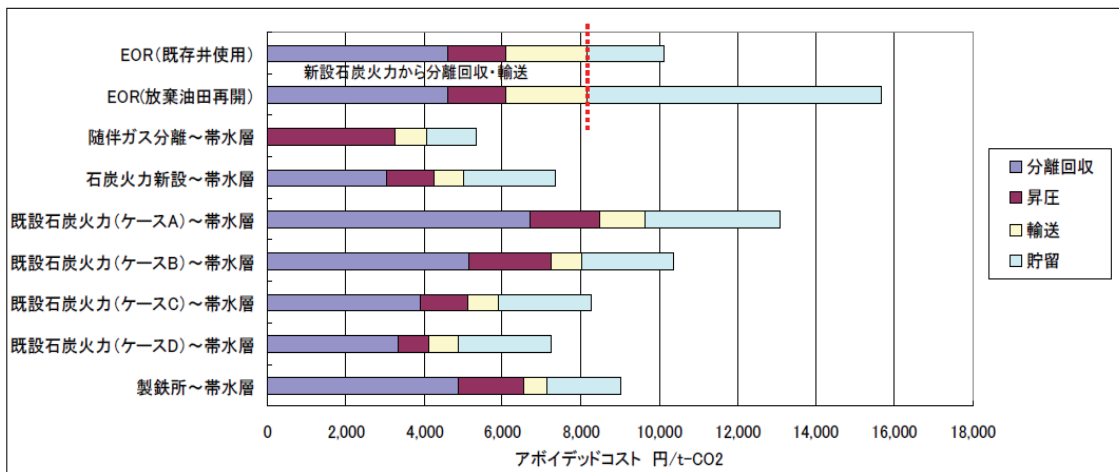


図 4.4.1-1 圧入・モニタリングコスト

出典：CCS ワークショップ 2007 日本における地中貯留の経済性評価と有効性 PPT



- 標準条件：回収隔離量 100万t-CO2/年、輸送距離20km、圧入10MPa、圧入法:ERD、坑井1本あたりの注入量:10万t-CO2/年
- 新設石炭火力:電気 5円/kWh
- 既設石炭火力: (ケースA)石炭焚補助ボイラー設置、電気 5円/kWh
(ケースB-D)蒸気タービンから低圧蒸気を抽気、電気: B 10円/kWh、C 5円/kWh、D 2.6円/kWh
- 鉄鋼: 蒸気2500円/t-蒸気、電気:10円/kWhで購買
- EOR: 新設石炭火力から20万t-CO2/年分離回収、輸送距離20km、費用から収入を差し引く
- 随伴ガス: 隔離量10万t-CO2、輸送距離9km

図 4.4.1-2 現状技術での日本における CCS コスト

出典：CCS ワークショップ 2007 日本における地中貯留の経済性評価と有効性 PPT

1)分離・回収コスト

CO₂ マイクロバブル地中貯留の場合、分離・回収が必要となる場合、発電所を対象とした場合その最小コストを、他の工業排出源からの回収の場合も IPCC の最小コストを当てはめた。分離・回収が必要な場合、CO₂ マイクロバブル地中貯留ではコスト高となる可能性は否定できない。

分離・回収せずに排ガスをそのまま注入する場合でも、分離された他の GHG の処理設備が必要となる。

表 4.4.1-1 IPCC レポートによる CCS 各段階のコスト

深部塩水帯水層貯留 の場合	最小コスト	最大コスト	単位	備考	円換算 ×¥85
①発電所からの回収	15	75	US\$/t-CO ₂		1,275～6,375
②ガス処理またはアンモニア生成からの回収	5	55	US\$/t-CO ₂		425～4,675
③その他の工業排出源からの回収	25	115	US\$/t-CO ₂		2,125～9,775
④輸送	1	8	US\$/t-CO ₂	250km当り	85～680
⑤注入	0.5	8	US\$/t-CO ₂		40～680
合計⑥＝①+④+⑤	16.5	91	US\$/t-CO ₂		
合計⑥×¥85	1,402	7,735	¥/t-CO ₂		1,400～7,735

出典：IPCC Special Report Carbon Dioxide Capture Storage

CO₂ マイクロバブル地中貯留の場合、輸送コストは、圧力 3MPa、距離 5km 以内のパイプラインを想定すれば、相当削減が可能であるが、年間 100 万 t・CO₂ を輸送するという事で算出されたコストを単純に比較できない。

3)注入コスト

注入コストには、孔井削孔費用とコンプレッサー費用が含まれるが、まず、削孔費用を考える。

削孔費用は、ERD1 本 2.3 億円、500m では 5000 万円とすると注入井削孔コストはほぼ 1/5 となる。しかし、1 孔当り深部塩水帯水層貯留では超臨界状態で 10 万 t・CO₂/y 注入するところ、CO₂ マイクロバブル地中貯留では、1 万 t・CO₂/y（4.5%水溶液では 22 万 t・H₂O/y）での注入となり注入効率はコンプレッサー費用に依存する。

CO₂ マイクロバブル地中貯留システムでは、溶解が大事であり、マイクロバブルは溶解促進（溶解の時間効率を上げる）ための手段と考えられる。浄化技術で用いられているエアレーションを考える。散気管 1 本で水に酸素 1 kg を溶解させるための電力は通常の 0.8kWh（産業用電気代 16 円/kWh×0.8＝13 円）である。酸素 1 kg を溶解させるためには空気を約 5 kg 噴出する必要がある。これは常圧の空気 3.9m³（＝5000÷29×22.4

÷1000) を噴射することになる。

これは、水深 5 m 位でのエアレーション (水圧 0.05MPa) を想定している。仮に水深 300m (3 MPa) に噴射するならば、60 倍の噴射圧になり、電気代は 60 倍と仮定すると、酸素 1kg 溶解当り 780 円となるが、そこまでは行かないとしても 100 円程度/kg、すなわち 10 万円/t 程度はかかる。これを CO₂ 溶解に当てはめるとどうなるか。

CO₂ が分離回収 (純度約 100%) された状態の場合、CO₂ の 1 kg は、 $1000 \div 44 \times 22.4 = 509\text{L}$ 、すなわち常圧で 0.5m³ である。常圧の空気 3.9m³ をエアレーションする時の電気代を示したが、純粋 CO₂ の 0.5m³ を噴射するには、その 1/8 程度の気体量であるので、水深 5m では一般散気管で 1.6 円/kg (=13 円÷8)、また水深 300m では 97 円/kg 以下 (=780÷8) となる。CO₂ の 1 t 当りでは、水深 5m でそれぞれ 1,600 円/t、また水深 300m で 1 万円/t 程度 (=10 万円÷8) になるのではないか。

なお、CO₂ を分離回収せずに排出ガスの状態に入れるとなると、数倍の排出ガスを入れなければならないので、電気代も数倍にはねあがる。CO₂ 噴射のための電力使用に伴う CO₂ 排出量も考えておく必要がある。

CO₂ 排出係数として 0.39kWh/kg-CO₂ がよく使われる。工業用電気代を 16 円/kWh とすると、電気代 40 円当り 1kg の CO₂ を排出している。仮に CO₂ の 1 t 噴射当りの電気代を 1,000 円とすると、電力使用により 25kg の CO₂ を排出していることになる (=1000 円÷40 円)。電気代が 1 万円/t になると、250kg の CO₂ 排出であり、マイクロバブル-CO₂ の「成立性評価」は、電気代、CO₂ インベントリーの面からも行う必要がある。

これらも踏まえた実験により、今後検証しておくことが必要となる。

4.4.2 安全性に関する課題

CO₂ マイクロバブル地中貯留では、CO₂ を溶解させるため大量の水を注入する。その水が CO₂ 飽和状態になっており、pH は、3 前後の強酸性水になると考えられる。専門委員会を立ち上げて環境アセスメントに対応しなければならない。このような強酸性水を地中に入れると、岩石中に含まれる鉛、砒素、クロム、カドミウム、銅、などの重金属やほう素、ふっ素などがかなりのレベルで溶出する。その溶出は長期にわたって続くことになる。

マイクロバブルによる CO₂ 地中貯留は、大量の CO₂ を溶解するためには、大量の水が必要となり、その水は揚水井から汲み上げたものを使用する注入井・揚水井併用方式を考えた。この時、揚水量と注水量のバランスにより、揚水量 > 注水量の場合は、地下水の処理が必要となる。一方、揚水量 < 注水量の場合は、溶媒としての水を購入しなければならない。バランスが取れた場合でも、一旦汲み上げた地下水に CO₂ を溶解させて地中に戻すことの影響評価は、今後の課題である。

広域の地下水流動がある場合、注水量の分がすべて回収できれば良いが、回収井戸からすべてが上がって来るという保証はない。その他の場所から一部が海底や地下水に混じって噴出する可能性を否定はできない。

以上のような環境影響評価が、今後の大きな課題となる。

書 名 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研究 報告書

発 行 平成 23 年 3 月 31 日

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

(G E C : Geo-space Engineering Center)

〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目 4 番 6 号

TEL 03 (3502) 3671 FAX 03 (3502) 3265

印 刷 株式会社 リョーサン

禁無断転・掲載