

# 二酸化炭素炭層固定化技術開発 CO<sub>2</sub>圧入予備実験について

小 牧 博 信<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

温室効果ガスの一つである二酸化炭素(以下, CO<sub>2</sub>と称す)の削減方法として, 地中(帯水層)貯留技術が有望視されているが, 石炭層にCO<sub>2</sub>を圧入することによって, 包蔵されている炭層メタンガス(以下, CH<sub>4</sub>と称す)を天然ガス資源として回収するCO<sub>2</sub>炭層固定化技術が新たな技術として期待されている(第1図).

既に米国等の海外諸国では, 炭層固定を有望なCO<sub>2</sub>隔離技術として位置付けて研究開発を進めており, 日本でも平成14年度に経済産業省の「二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業」の一つとして二酸化炭素炭層固定化技術開発が着手された(林関西総合環境センター(2004), 林環境総合テクノス(2004), 林環境総合テクノス(2005)).

我が国の地層は地質年代的に新しく, 地層構造は褶曲し, また, 断層も多いという特性を有していることから, その特性に適用できる独自の技術確立として, CO<sub>2</sub>分離回収からCH<sub>4</sub>回収までのシステムを構築

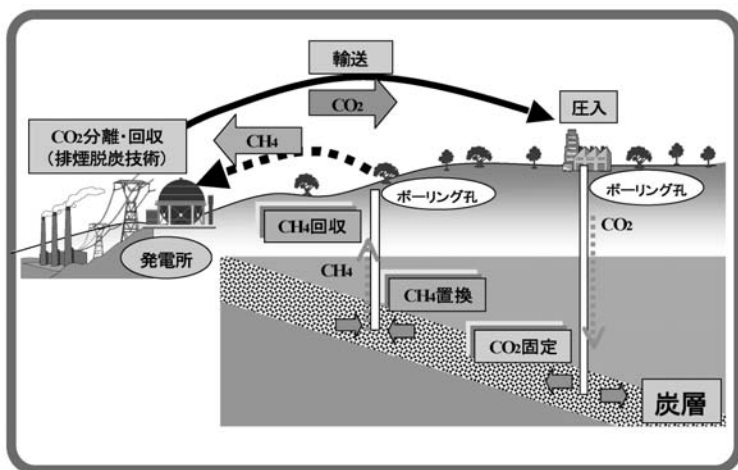
し, 事業化に向けた検討が必要となる. そのためには, 基礎技術確立のための予備実験後に, 実用化レベルの技術確立を目標とした実証試験を通して実用化の検証と本技術が経済的に優れたCO<sub>2</sub>隔離技術であることを検証することが必要である. 本稿では, 現在, 北海道夕張市の保安林内で実施しているCO<sub>2</sub>圧入予備実験の現状について報告する.

## 2. 二酸化炭素炭層固定化技術開発の概要

### 2.1 固定概念

石炭は, 炭化度が進むにつれて, 泥炭, 褐炭, 亜瀝青炭, 瀝青炭および無煙炭と変化するが, 特に原料炭, 燃料炭として採掘される亜瀝青炭, 瀝青炭には, 天然ガスの主成分であるCH<sub>4</sub>が多く含まれ, 回収してエネルギー資源として有効利用されている(緒方, 2001).

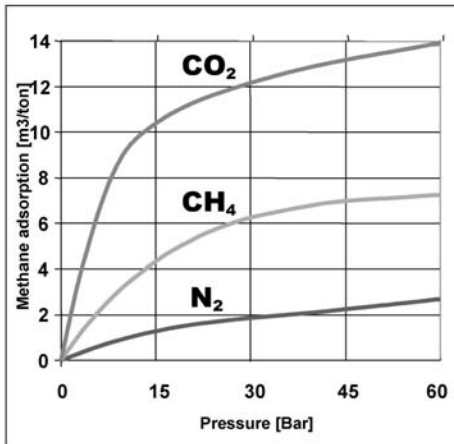
石炭に対するガスの吸着力は, 第2図に示したように, CO<sub>2</sub>は, CH<sub>4</sub>やN<sub>2</sub>よりも吸着力が大きい. 従って,



第1図  
二酸化炭素炭層固定化技術開発のイメージ.

1) 株式会社 環境総合テクノス

キーワード: CO<sub>2</sub>, 炭層固定, CO<sub>2</sub>圧入予備実験



(Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO)

第2図 石炭におけるCO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>の吸着等温線。

CH<sub>4</sub>が吸着している石炭にCO<sub>2</sub>を接触させると、吸着力の相違によるCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の置換現象が生じ、CO<sub>2</sub>が吸着するとともにCH<sub>4</sub>が脱着する。この特性に着目し、石炭層にCO<sub>2</sub>を圧入し、脱着されるCH<sub>4</sub>を回収することによって、経済性に優れたCO<sub>2</sub>隔離技術の構築をねらうものである。

## 2.2 本技術開発の目的

本技術開発の目的は、大規模発生源の排ガスから

CO<sub>2</sub>を分離回収し、炭層に安定かつ安全にCO<sub>2</sub>を固定するとともに、CH<sub>4</sub>を回収するまでの要素技術を確立し、経済的な全体システムの構築を目指すものである。そのために第3図に掲げたように、目標を達成するための要素技術の開発が重要である。

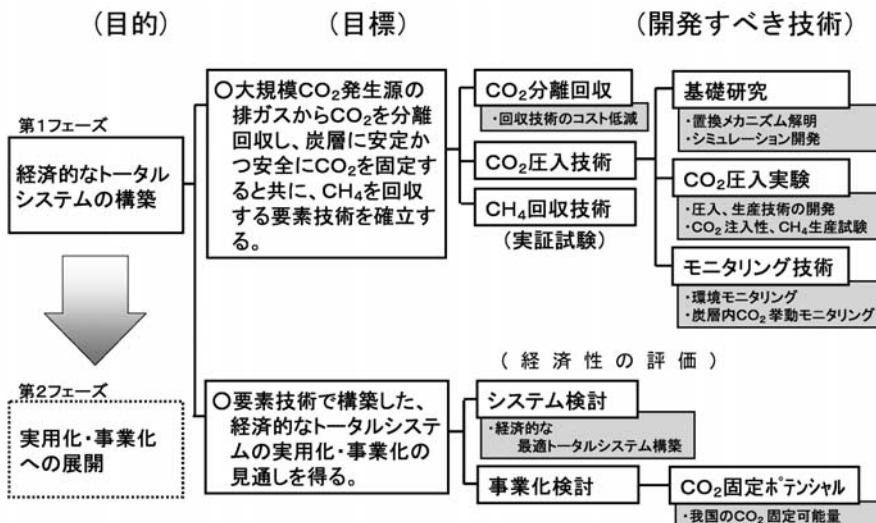
## 2.3 実施概要

本技術開発は、大学等の研究室における基礎研究と、フィールドにおける予備実験から成り立っており、個別のテーマについて技術開発を進めている。

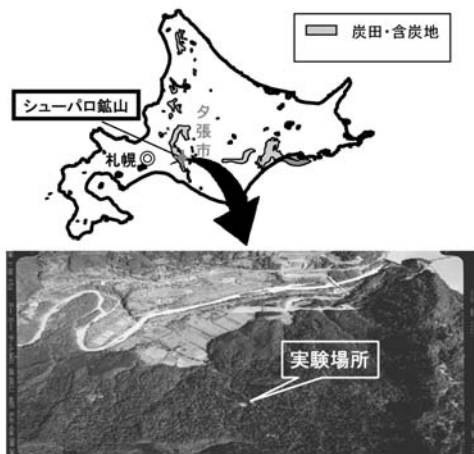
基礎研究では、石炭に対するCO<sub>2</sub>の吸着に関する実験等を実施し、CO<sub>2</sub>の炭層内挙動を対象としたシミュレーションモデルの構築を行った。また、国内の炭田に固定可能なCO<sub>2</sub>量について調査した結果、1,200m以浅の既存炭田によるCO<sub>2</sub>固定量は約6億トン、既存炭田縁辺部の未開発炭田におけるCO<sub>2</sub>固定量は約4億トンと試算され、全体で約10億トンと評価された。

予備実験では、石炭埋蔵量および炭鉱ガスに関する資料収集および文献調査を行うとともに、科学的根拠に基づいて実験サイトの選定を行った結果、北海道夕張市の石狩炭田の一部に決定し、連続CO<sub>2</sub>圧入試験を実施している(第4図)。本技術開発の安全性および環境に関するモニタリングも併せて実施している。

また、本技術の経済性評価に関し、CO<sub>2</sub>発生源、



第3図 技術開発の目的、目標および要素技術。



第4図 CO<sub>2</sub>圧入予備実験サイト。

CO<sub>2</sub>固定量を考慮した実用規模モデルを想定し検討を行っている。

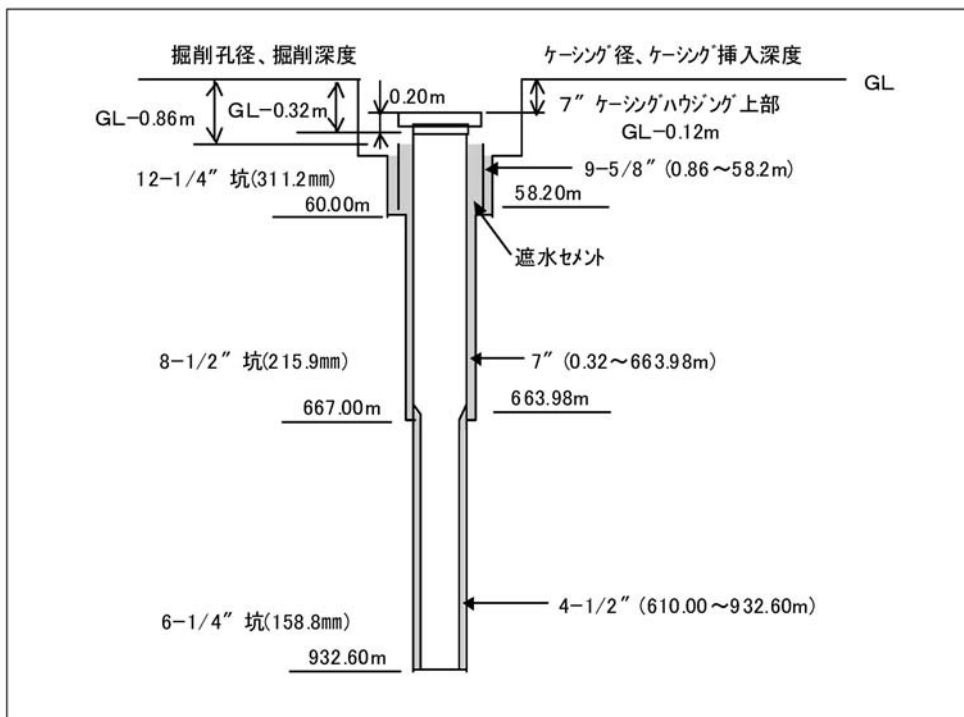
### 3. CO<sub>2</sub>圧入予備実験

#### 3.1 実験サイトの地質構造と孔井構造

CO<sub>2</sub>を圧入する孔井(以下、圧入井と称す)の掘削は平成15年9月に実施した。圧入井の構造は垂直井とし、孔径は深度によって変更し、地表から深さ60mまでを12・1/4インチ、それ以深667mまでの間を8・1/2インチ、それ以深933mまでの間を6・1/4インチとした。坑壁の崩壊防止のため、オールケーシング仕上げとし、ケーシングの外部と掘削裸孔間にセメンチングを実施した。

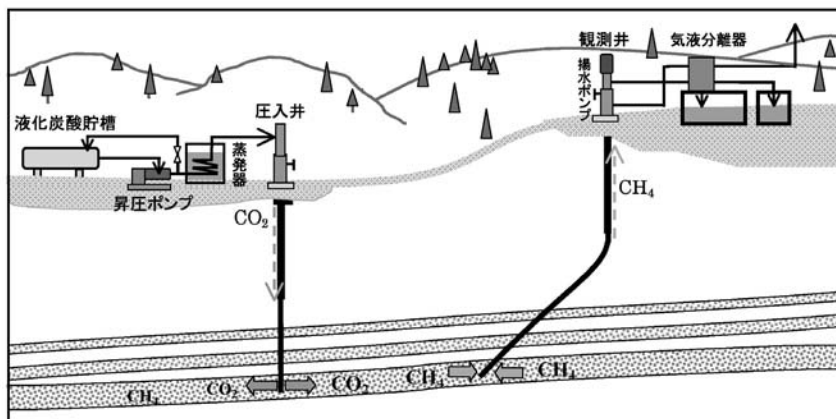
地表から667mまでの地層は幌内層と呼ばれる塊状泥岩であることから、コアを採取しなかったが、それ以深では、炭層、夾炭層を含んでおり、地層の特性を詳細に把握するため、すべての深度でコアを採取した。圧入井のプロファイルを示す。

幌内層の下位には、泥岩と砂岩の互層に石炭層を挟んだ夕張層が分布し、その中に上層、本層、下層の三枚の炭層が確認できた(第1表)。CO<sub>2</sub>を圧入する対象層は、炭層厚約6mが確認された下層に決定した。また、ケーシング仕上げされた孔井と炭層部の導通を得るため、対象炭層部にガンパーフォレーション(圧入井ケーシングの炭層部分のケーシング壁に穿孔する)を実施した。

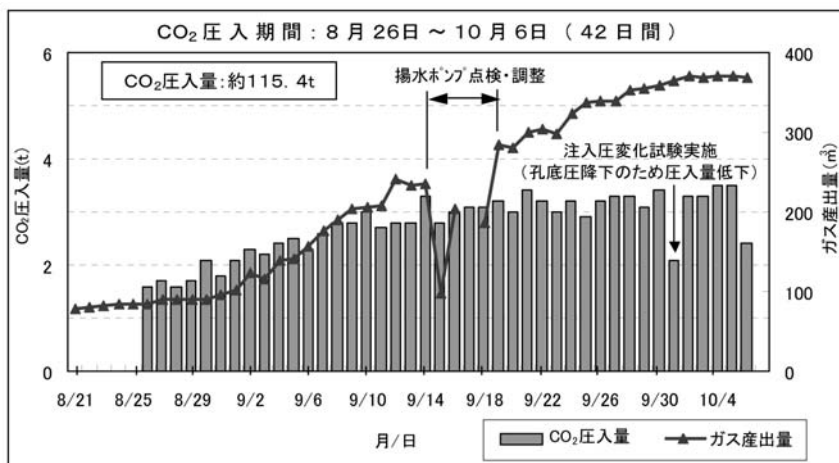


第5図 圧入井のプロファイル。





第7図  
CO<sub>2</sub>圧入予備実験イメージ。



第8図  
CO<sub>2</sub>圧入実績(平成17年度)。

### 3.2 連続CO<sub>2</sub>圧入試験

予備実験サイトに設置したCO<sub>2</sub>圧入設備(液化炭酸貯槽および気化装置)を使用して、連続圧入を行った(第7図)。

2004年度の連続CO<sub>2</sub>圧入試験は、11月9日から11月24日まで実施し、期間中のCO<sub>2</sub>圧入量は35.7t、1日当たりのCO<sub>2</sub>圧入量は2～3tであった(名子・藤岡, 2005)。数値シミュレーションによる検証の結果、炭層自体の浸透率が低下していることと、圧入した気体CO<sub>2</sub>がケーシング周辺の地下水によって冷却され、液体となって浸透性を下げていることが示唆された。

2005年度ではCO<sub>2</sub>注入性改善対策として、圧入井の対象炭層部にてパーフォレーションを追加実施するとともに、CO<sub>2</sub>の配管に保温処置を施して地下水による冷却影響を軽減し、超臨界CO<sub>2</sub>による浸透改善を図った。8月26日から10月6日までの間に、115.4tの

CO<sub>2</sub>を圧入した。1日当たりのCO<sub>2</sub>圧入量は、試験開始当初では16年度より低かったが、20日目以降は3t前後となり、その後3～3.5tと推移した(第8図)が、予備実験における設定目標(5t/日)には及ばなかった。

一方、観測井におけるガス産出量は、揚水ポンプ

第2表 観測井ガスの成分分析結果。

採取日		11月19日	11月29日
CH <sub>4</sub>	%	94.9	95.6
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	%	0.22	0.14
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	%	0.24	0.18
Ar	%	0.006	0.004
N <sub>2</sub>	%	0.59	0.12
O <sub>2</sub>	%	0.17	0.48
CO <sub>2</sub>	%	2.89	2.5
その他	%	0.984	0.976
合計	%	100.00	100.00

(提供：産業技術総合研究所)

運転に伴い、CO<sub>2</sub>圧入前には80m<sup>3</sup>/日で推移していたが、CO<sub>2</sub>圧入後には370m<sup>3</sup>/日まで増加し、ガスの増産効果が確認された。また、産出ガスの成分分析の結果、約95%がCH<sub>4</sub>であることが判明した(第2表)。

新潟県長岡市において、(財)地球環境産業技術研究機構による「二酸化炭素地中貯留技術研究開発」の実証試験が行われている。この試験では、上部にキャップロックを有する地下約1,100mの帯水層に2003年7月から2005年1月にかけて約1万tのCO<sub>2</sub>を圧入し、現在もモニタリングを行っており、圧入期間中の1日当たりの圧入量は、40t(当初は20t)であった((財)地球環境産業技術研究機構, 2005)。これに対し、今回の予備実験における圧入量は、1日当たり2~3.5tと低い値であり、今後の実証規模での試験に際し、20t/日の圧入量が必要と考えている。

2006年度の連続圧入試験では、圧入量を引き上げる方法として、圧入圧力の上昇と、水圧破碎の施工を検討している。圧入圧力の上昇は、現在CO<sub>2</sub>の圧入圧力を石炭層の開口圧力以下に抑えているが、より多くのCO<sub>2</sub>を炭層に圧入するためには、圧力を高めることが必要と考えられる。しかしながら、圧力の上昇は、炭層内に想定以外の亀裂を新たに発生させるリスクもあり、十分な検討が必要である。

水圧破碎は、石炭層におけるCO<sub>2</sub>と石炭との接触面積を拡大する方法として、液体を高压で炭層に圧入し、強制的に亀裂を開くとともに開いた亀裂に砂粒等押し込んで、亀裂を確保する方法である。海外の炭層ガスの採取現場における水圧破碎技術の実績は多いが、CO<sub>2</sub>を圧入する孔井に対して実施された

例はなく、亀裂の方向制御、最適な圧力と間隙材の選定など課題は多く、慎重な検討が必要である。

## 4. モニタリング技術の検討

### 4.1 モニタリングの概念

米国では、DOE(エネルギー省)が多くのCO<sub>2</sub>の地中隔離プロジェクトを推進しており、開発すべき重要課題としてSMV(Safety, Monitoring, Verification; 安全, 監視, 検証)プログラムを、個々に取り組んでいる。そこで、本技術開発においても、炭層へのCO<sub>2</sub>固定化技術が安全であること、環境への影響がないこと、温暖化対策技術として有効であることを確認するため、地下を対象とした事業事例を参考として環境モニタリング技術の開発を進めるとともに、固定効果を把握するための炭層内CO<sub>2</sub>挙動モニタリング手法について検討を行っている。

### 4.2 環境モニタリング

地中深部の炭層に圧入したCO<sub>2</sub>は、炭層の上のキャップロックによって遮蔽されるため、地表にリークすることはないと考えられるが、今後の事業化に際して、周辺環境に影響がないことを確認するため、圧入したCO<sub>2</sub>が地表付近の環境に及ぼす影響について、CO<sub>2</sub>圧入予備実験場所周辺の物理的、化学的および生物学的な環境変化について調査を実施している。

現地踏査の結果、CO<sub>2</sub>圧入予備実験サイト周辺には断層が多いことが判明したため、環境モニタリングの調査点については、最も影響が大きいと想定され

第3表 CO<sub>2</sub>圧入予備実験における環境モニタリング。

測定項目		目的	内容
地盤変位 モニタリング	水準測量	断層や試錐跡からのガス漏洩による地形変形の有無を監視する。	設置した水準点間の位置関係を水準儀を用いて、実験地の正確な高度、位置を測定し、地形変形を調べる。
	傾斜計観測	水準測量を補完するため、傾斜計を用いて、地表での地形変形の有無を監視する。	変化がもっとも大きいと予測される場所に傾斜計を設置し、連続的に測定する。
ガス モニタリング	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> 土壌 ガス濃度測定	大気中、土壌中でのCO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> ガス濃度、炭素同位体比を把握する。	一般的分析機器を用いて、孔井の周辺などで土壌中のCO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> ガス濃度、炭素同位体比の測定を行う。
	地下水測定	地中におけるCO <sub>2</sub> の地下水との干渉程度を把握する。	湧水箇所における水質(電気伝導度, pH, 水温など)を測定する。
	γ線 スペクトル測定	地中におけるCO <sub>2</sub> 圧入, CO <sub>2</sub> 漏洩の監視する。	測定孔(深さ40cm)において、ラドン、トロンの娘元素 <sup>214</sup> Bi, <sup>208</sup> Tlの測定を行う。

る圧入井近傍および断層周辺に設定し、調査項目および内容を決定した(第3表)。

#### a. ガスモニタリング

ガスモニタリングについては、予備実験場所の環境特性について、CO<sub>2</sub>圧入前の現況把握と、圧入中のモニタリングを行うとともに、特に圧入井近傍については、連続監視も実施している。

##### (a) 土壌ガス

地表付近のガス濃度を調べるため、土壌中に100mm径、1m長の土壌ガスサンプラーを挿入し、定期的にサンプラー内のガスをポンプで採取し、ハンディ型計測器で測定するとともに、サンプルバッグに採取して持ち帰り、ガスクロマトグラフでCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の分析を行っている。さらに、注入したCO<sub>2</sub>と自然発生したCO<sub>2</sub>を識別するための炭素同位体比分析も実施している。

##### (b) 地下水分析

実験場所周辺の湧水を採取して分析し、CO<sub>2</sub>が地中で地下水と接触した場合に生じる水質変化について調査をしている。水温、pHを測定するとともに、採水して持ち帰り、分析を行っている。

##### (c) 植生等

CO<sub>2</sub>による陸上生物への影響を調べるため、圧入予備実験場所周辺において、動植物調査を実施している。植物相では階層ごとに出現種を記録し、種組成を調べた。また、動物はとくに哺乳類、鳥類、両生・爬虫類について林道沿いを中心に生息状況を調査している。

#### b. 地盤モニタリング

地表付近の地質構造における変化については、圧入井を中心として選定した場所に傾斜計を設置するとともに、実験場所周辺で水準測量を行い、時間的および空間的な地盤の変化について調査している。圧入前の現状把握調査ではボーリング孔掘削によるわずかな変化が見られたが、CO<sub>2</sub>の注入を開始した平成16年11月以後では、変化なくCO<sub>2</sub>圧入に関連する現象はみられていない。

#### 4.3 CO<sub>2</sub>挙動モニタリング

炭層内に圧入したCO<sub>2</sub>の挙動を把握するモニタリング技術については、CO<sub>2</sub>-EOR(CO<sub>2</sub>を注入して石油を増進回収する法)や地中貯留(地中深部の帯水層にCO<sub>2</sub>を貯留する技術)において、弾性波探査技術が適用されている。しかし、現有のトモグラフィ技術では、石炭層におけるCO<sub>2</sub>挙動を捕捉できないことから、海外のプロジェクトにおいても検討課題となっている。そこで、地中におけるCO<sub>2</sub>挙動モニタリング手法の開発のため、予備実験におけるCO<sub>2</sub>圧入に伴う基礎データを取得することを目的として、様々な探査技術について、CO<sub>2</sub>炭層固定化技術における適用性について検討を進めている。CO<sub>2</sub>挙動モニタリング技術は、炭層内でのCO<sub>2</sub>の挙動を把握するとともに、炭層以外への地層にCO<sub>2</sub>が逸散しないことを明らかにするための重要な技術である。海外事例もないことから、我が国の独自技術として、開発に取り組んでいる。

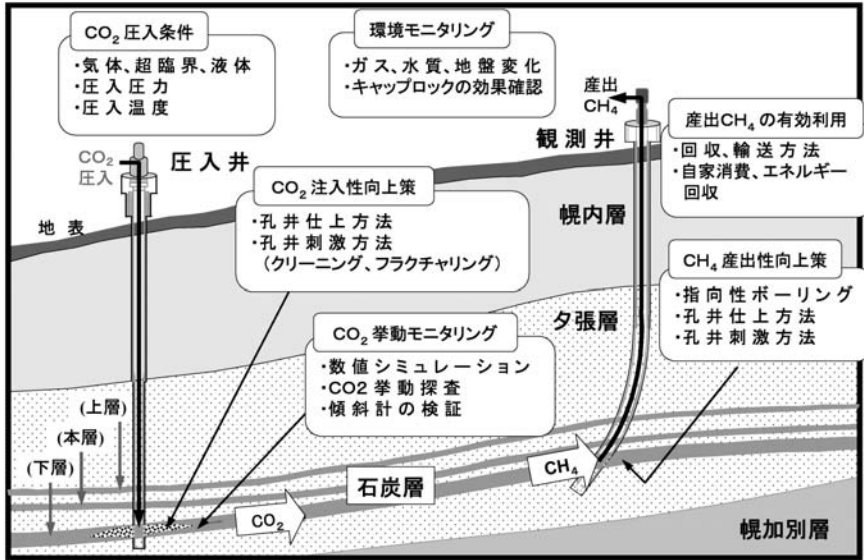
#### 5. 技術開発の課題

本技術開発の実用化展開に向け、達成すべき目標と課題を抽出し、主な課題について第9図にとりまとめた。

CO<sub>2</sub>圧入からCH<sub>4</sub>の回収までの工程の中で、重要な課題としてCO<sub>2</sub>圧入条件、注入性向上、炭層内でのCO<sub>2</sub>挙動モニタリング、CH<sub>4</sub>産出性向上、産出CH<sub>4</sub>の有効利用および環境モニタリングを取り上げた。特に、CO<sub>2</sub>注入性の向上は、CO<sub>2</sub>隔離を主目的とする本技術において最重要課題であり、今後の実用化のためには現在の注入性を大幅に改善する必要がある。これを解決する方法として、前述した圧入圧力の上昇や水圧破碎や指向性掘削(炭層とCO<sub>2</sub>の接触面積を増加させるため、炭層内を水平に掘削する技術)の技術がある。しかし、導入に際しては、国内炭層での実施例がないため海外事例を参考にして、確実な成果を得るために十分な検討が必要である。

#### 6. 今後に向けて

2005年7月にイギリスのグレンイーグルズで開催された主要国首脳会議(G8)においても、主要テーマの一つに地球温暖化防止が取り上げられ、行動計画の



第9図 二酸化炭素炭層固定化技術開発の課題。

中に、火力発電所等からのCO<sub>2</sub>回収・隔離技術の促進が掲げられている。米国においても、CO<sub>2</sub>の地中隔離は重要な対策技術として位置付けられており、CO<sub>2</sub>を用いて炭層中のCH<sub>4</sub>を増進回収するCO<sub>2</sub>-ECBMR (Enhanced Coal Bed Methane Recovery) 技術は、天然ガス資源の採掘という経済性が注目され、米国の他、カナダ、ポーランドの産炭国でも研究プロジェクトが進められている(島田, 2005)。

二酸化炭素炭層固定化技術は、我が国の地下に眠る膨大な石炭を活用し、CO<sub>2</sub>を固定するとともに、未利用資源のCH<sub>4</sub>を回収して利用することに大きな期待がある。しかしながら、実用規模への展開に向けては、CO<sub>2</sub>の注入性向上等、解決すべき重要な課題がある。さらには、本技術の事業化に当たっては、実用化の検証と経済性の立証が必要であり、CO<sub>2</sub>分離回収からCH<sub>4</sub>回収利用までの一連の全体システムの構築に向け、我が国の炭層特性に適合したCO<sub>2</sub>の炭層固定化技術を開発し、革新的なCO<sub>2</sub>削減技術として実用化すべく研究開発を遂行する所存である。

#### 参考文献

- (株)関西総合環境センター(2004):平成14年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業費補助金 二酸化炭素炭層固定化技術開発 成果報告書, 1-322.
- (株)環境総合テクノス(2004):平成15年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業費補助金 二酸化炭素炭層固定化技術開発 成果報告書, 1-468.
- (株)環境総合テクノス(2005):平成16年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業費補助金 二酸化炭素炭層固定化技術開発 成果報告書, 1-291.
- 名子雅夫・藤岡昌司(2005):「二酸化炭素炭層固定化技術開発」における圧入予備実験について, 資源と素材, 121, p. 461-464.
- 緒方善弘(2001):石炭層メタンの採掘技術・利用目的の現状と将来展望, 資源と素材, 117, p. 234-244.
- 島田荘平(2005):CO<sub>2</sub>貯留技術の動向 2) CO<sub>2</sub>炭層固定技術, エネルギー・資源, 26, (6), p. 26-29.
- (財)地球環境産業技術研究機構(2005):平成16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, 1-859.

KOMAKI Hironobu (2006): Pilot Test of Japan CO<sub>2</sub> Geosequestration in Coal Seams Project.

<受付:2006年4月3日>