石炭層を利用した炭酸ガスの地中固定*

島田 荘平¹

Geological Sequestration of CO₂ by Coal Seam

by Sohei SHIMADA^a

a. Associate Prof., Institute of Environmental Studies, Graduate School of Frontier Sciences,
The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

There are many types of geological formations used for CO₂ sequestration. Coal seam is one of them. The characteristics of the coal seam used for CO₂ sequestration are the methane recovery when CO₂ is sequestered. CO₂ is injected into coal seam not only for the CO₂ sequestration but also for CH₄ recovery (ECBMR).

This paper reports the sequestration mechanism of CO₂ in the coal seam and the world R&D status in this field.

The adsorption is a main sequestration mechanism of CO₂ in the coal seam. In the field scale sequestration, pressure of CO₂ is super-critical. The adsorption volume of CO₂ in coal in that condition is not yet clarified. This adsorption volume is very important for the prediction of sequestrable CO₂ volume.

The present activities on this subject in the United States, Canada, Australia, Netherlands and Japan were reported. For the further studies, the international cooperative R&Ds are necessary. Items for the further R&Ds are summarized.

KEY WORDS : Coal Seam, Carbon Dioxide, Geological Sequestration, Coalbed Methane

1. ま え が き

1997年に京都で開催された第3回気候変動枠組み条約締約国会議(COP3)で採択された、いわゆる京都議定書の地球温暖化ガス放出削減の目標値を達成するため、各国は京都メカニズムも含めた、いろいろな削減対策を検討している。この地球温暖化ガスの主要な成分である炭酸ガスを地中内部に固定あるいは貯蔵する方法が、最近特に注目を浴びている。英語では Geological Sequestration という用語が用いられているが、日本語では、地中固定、地中貯蔵、地中貯留、地中隔離などいろいろな用語に訳され、地下での CO₂ の状態によって使い分けられているが、まだ定訳には至っていない。炭酸ガスの主要排出源は化石燃料の使用、すなわち燃焼であり、燃焼によって発生した炭酸ガスを化石燃料が賦存していた地中に戻すという考えは、カーボンサイクルという面から見ると、最も自然な形でのサイクルといえる。

CO₂ の地中隔離では、いろいろな地層がその対象となりうるが、主な隔離場所としては、(1)帯水層、(2)石油貯留層、(3)枯渇ガス層、(4)石炭層、などがある。石油貯留層に関していえば、石油増産のために CO₂ を使用した EOR がすでに普及しており、直接 CO₂ の地中隔離を目的とはしていないものの、CO₂ の地中隔離はすでに普及している技術といえる。一方、これから新たに CO₂ 固定技術が開発されているものとして、石炭層を使用した方法がある。石炭はその微細な空隙構造から吸着剤として使用されている。この吸着剤としての性質を利用して、石炭層は空隙に存在する遊離ガスのほかに多量の吸着ガスを包蔵できる。CO₂ の固定を考える場合、石炭のこの性質は大きな利点である。

石炭層を CO₂ 固定の対象とする場合には、さらに次の利点も考えられる。

① 石炭層は世界に広く賦存する資源で偏在性が少ないので、世界のあらゆる国で石炭層を使用した CO₂ 地中固定プロジェクトを実施できる。

② 世界的に見れば石炭火力発電所は石炭採掘地と隣接した地域に多く建設されており、発電所から排出される CO₂ を利用すれば、近くの炭層にすぐ固定できるので CO₂ の運搬コストを削減できる。

③ さらに、CO₂ を固定する際に石炭中のメタンを回収することができるので、このメタンを利用して発電すれば、発電⇒CO₂ 分離⇒CO₂ の炭層内注入・固定⇒メタンの生産⇒メタン利用発電、というカーボンサイクルを形成できる。石炭層を利用した CO₂ 固定・メタン回収利用の概念図を図1に示す¹⁾。

CO₂ の地中固定を考える場合、(1)固定量はどれだけか、(2)技術的に可能であるか、(3)固定した CO₂ が大気に漏洩しないか(環境面で十分信頼できるか)、(4)経済性はあるか、などが問題となる。

世界の石油層や石炭層での CO₂ 固定量に関してはいろいろな報告があるが²⁾⁻⁴⁾、IEA は世界での地中固定量とコストの関係の調査結果を発表している⁵⁾。図2は枯渇油田への CO₂ 固定の場合、図3は石炭層への固定の場合を示している。図2では原油価格 \$15/bbl を仮定している。この場合、経済的に可能な CO₂ 固定量は 120Gt と見積もられている。図3の石炭層を利用した CO₂ 固定では CO₂ の供給価格を EOR の場合と同じとした場合(下方のライン)、固定量は 18Gt と見積もられている。石炭層への固定可能量は油田の場合よりもかなり小さくなっているが、石炭層での ECBMR 技術はこれから開発される技術であり、歴史のある EOR よりも小さい固定可能量となるのは当然ともいえる。これからの技術開発により、石炭層での CO₂ 固定可能量は大きく変化するものと思われる。

* 2001年8月2日受付 9月25日受付

1. 正会員 工博 東京大学大学院助教授 新領域創成科学研究科環境学専攻
[著者連絡先] FAX 03-3818-7492 (東大・新領域)

E-mail: s-shimada@k.u-tokyo.ac.jp

キーワード: 石炭層, 炭酸ガス, 地中固定, コールベッドメタン

図1 炭層を利用したCO₂固定・メタン回収利用概念図 図2 油田へのCO₂固定可能量と固定コスト 図3 石炭層へのCO₂固定可能量と固定コスト

2. リザーバとしての石炭層

2・1 石炭層とガス吸着

石炭とメタン等のガスの吸着様式は単分子層吸着であり、Langmuir型の吸着等温線がよく当てはまるといわれている。石炭と各種ガスの吸着の強さは、CO₂、CH₄、N₂の順であり、単一ガスでの吸着量はCO₂の場合を1とすると、CH₄では約1/2、N₂では約1/4となる測定結果が多い^{6)~9)}。図4に米国のSewickley炭での、純粋なCO₂、純粋なCH₄、CO₂-CH₄混合ガスでの吸着等温線の例を示す⁶⁾。

混合ガスの場合には、単一成分ガスの場合と同様に、吸着量は混合ガスでの拡張Langmuir型の吸着式によって表せる。混合ガス

の場合には吸着の強いガスはガス相のガス混合比以上に多量のガスが吸着されることに注意しなければならない。図5と図6にその例を示す¹⁰⁾。図5はCO₂とCH₄の混合ガスを石炭に吸着させた場合の吸着量の比を示している。CO₂はCH₄よりも吸着力が強いので、例えばガス混合比が1:1であっても、CO₂は単一成分ガスの吸着量の1/2以上の吸着量となる。図6はCH₄とN₂の混合ガスでの吸着量を示している。N₂よりもCH₄の方が吸着力が強いので、メタンは上に凸の形となる。CBMを包蔵している石炭層にCO₂を注入すると、吸着していたメタンは炭酸ガスと置換され、石炭表面からフラクチャー部の遊離ガスに変化し、生産井に排出される。この際、CO₂注入圧力自体もメタン生産促進の作用をする。

図4 石炭の吸着等温線の例 (Sewickley 炭, CO₂ および CH₄) 図5 CO₂-CH₄ 混合ガスの吸着量 (Fruitland 炭, 500psia, 115F) 図6 CH₄-N₂ 混合ガスの吸着量 (Fruitland 炭, 500psia, 115F)

 図7 高压下での石炭のCO₂吸着量

石炭のCO₂吸着量に関していえば、石炭へのCO₂とCH₄の吸着量の比はおおよそ2:1であることは上に述べた。しかし、この比について、2:1ではないという測定結果も報告されている。特にCO₂の臨界点である75.3bar以上の圧力では、CO₂の吸着量はLangmuir型からずれてくるという報告がある¹¹⁾。これは単分子吸着が多分子層吸着に変化するためと説明されている。オランダの研究グループに所属しているアーヘン工科大学での測定例では、80bar付近で吸着量が急激に増減する領域が見られている(図7)¹²⁾。また、デルフト工科大学の置換実験では、超臨界圧力のCO₂では低圧の場合よりも置換率が大きくなっている¹³⁾。この高压下でのCO₂吸着量は、CO₂固定可能量に直接影響することから、今後特に超臨界圧力でのCO₂吸着量の解明が望まれる。

2・2 石炭層内のガス流れと置換

CBMの強制回収(ECBMR)でN₂を炭層に注入する場合を考える。吸着平衡状態にあるCH₄とN₂のモル比は約2:1であるが、遊離状態のガスの比ではN₂のモル数が多い。N₂が注入されると、N₂はクリート中のメタンを掃出し、クリート内のガスはN₂が100%に近くなる。クリート内のCH₄分圧はゼロに近くなる。この結果、吸着状態のメタンがクリート内に脱着される。すなわち、遊離ガスの分圧がクリートへのメタン移動の起動力となる¹⁴⁾。したがって、N₂を使ったECBMRは"methane stripping"と表現されている。

一方、CO₂が炭層に注入されると、CO₂が選択的に石炭に吸着され、メタンと置換する。この場合は、メタンはクリートの方向に吸引されるのではなく、CO₂によって押し出される。すなわち、メタンを移動させる起動力はCO₂の吸着・置換である。CO₂の固定と天然ガスの生産を実現できる、一石二鳥の原理である。CO₂の置換による生産ばかりでなく、methane strippingと置換を組み合わせるとより効果的にメタンを生産できるという考えもある。これが、排煙を直接炭層に注入し、生産されるメタン(+窒素)を回収後に分離しようとするものである。

2・3 ガス吸着と浸透率

石炭層へのガス吸着と浸透率には密接な関係がある。メタンが脱着されると石炭マトリックスの収縮が起こり炭層への作用応力が減少し、見掛けの浸透率は増加する。この浸透率の増加は以外に大きく、長期にわたるガス生産では生産性が向上する。

しかし、CO₂を炭層に注入すると逆の現象が起こり、すなわちマトリックスが膨張し、応力が増加し浸透率は減少する¹⁵⁾¹⁶⁾。これは実験室では確認されているが、今後、現場での検証も必要である。

CO₂を注入すると、石炭・水・CO₂の反応により微細な反応生成物を生成し、これが浸透率を減少させる原因となることも予想される。この反応は非常に遅い反応速度であるため、短時間での測定は難しい。今後、この反応が浸透率に及ぼす影響の解明も必要である。

3. 世界の研究開発動向

3・1 米国

(1) Tiffany Unit (San Juan Basin) ECBMRの最初のフィールドテストはSan Juan Basin北部のTiffany Unitで実施された(オペレーターはBP Amoco)¹⁷⁾¹⁸⁾(図8)。Tiffany Unitでは生産開始後9年目の井戸に、N₂を注入してCBMを増産させた。新たに掘削した注入井は10本で、さらに既存の2本の生産井も注入井として使用した。総計12本の井戸の注入量は680~790km³/dであった。N₂注入前の生産量は142km³/dであったが、N₂注入により1999年3月の生産量は820km³/dと、5倍以上の生産量となった(図9)。パイプラインの容量の関係から、N₂注入は1999年3月で終了した。BP Amocoでは付近のFlorida RiverにTiffany UnitにN₂を供給したガス精製プラントがあるが、この工場ではCO₂も同時に生産されることから、BP Amocoでは今後N₂/CO₂混合ガスを使ったガス強制回収を計画している¹⁹⁾。

(2) Allison Unit (San Juan Basin) CO₂の地中固定を目的としたものではないが、Burlington Resourcesは1995年からSan Juan Basin北部のAllison UnitでCO₂によるCBMの強制回収を実

図8 Tiffany UnitおよびAllison Unitの位置図

 図9 Tiffany UnitでのN₂-ECBMガス生産推移

図 10 Allison Unit の CO₂ 注入実績 (下方ライン) と CH₄ 総生産量 (上方ライン)

施した²⁰⁾。対象炭層は Fruitland 層、平均深度 3,250ft、平均炭丈 35ft、初期ガス圧 1,650psi、水飽和 100% である。CO₂ 注入井は 1989 年に生産を開始した井戸で (坑井密度 320 エーカー)、4 本の注入井を坑井密度 160 エーカーで掘削し、1995 年から CO₂ 注入を開始した。CO₂ 供給ラインは、油田の EOR に使用する CO₂ 供給パイプラインから分岐して供給した。CO₂ と CH₄ の置換を促進させるためシャットイン等を実施した。周囲の 9 本の井戸を生産井とした。貯留層評価のために一時 CO₂ 注入を中止したこともあったが、図 10 のような生産実績を示した。このプロジェクトでは、CO₂ のブレイクスルーは最大の関心事であったが、CO₂ の大きなブレイクスルーは見られなかった。

CO₂ 注入の CH₄ 生産に及ぼす影響を見るため、リザーバー・シミュレーションにより CO₂ 注入無しの場合とありの場合の CH₄ 生産量を予測した。その生産量の差から CO₂ 注入と CH₄ 生産量増分の関係を求めている。その結果 (図 11) によると、このプロジェクトでの CO₂ 注入量は 4.6BCF で、その結果による CH₄ 生産量は 1.6BCF であり、メタン生産量の約 3 倍の炭酸ガスを注入している。

(3) US DOE DOE は炭酸ガス固定に大きな関心を寄せており、NETL (National Energy Technology Laboratory) では CO₂ 固定のプログラム計画を発表している²¹⁾。2050 年での CO₂ 固定コストを、固定プログラムで実施すれば US\$10/t、実施しない場合には US\$300/t で、その経済効果は US\$2.7×10¹² と試算している。地中固定に関しては、石油・ガス田、石炭層、帯水層などが固定の対象地層としている。石炭層に関していえば、次のような年次計画が立てられている。

- 2003 年：石炭の炭酸ガス吸着技術の確立
- 2004 年：CO₂ 固定に適した炭層の選定
- 2006 年：CBM 生産と CO₂ 固定の最適化
- 2006 年：環境影響評価手法の確立とモニタリ

ング手法の確立

2008 年：深部石炭層への大規模な CO₂ 固定の環境影響評価

2010 年：大規模試験のためのエンジニアリング・モデルの確立

2012 年：石炭層でのフィールドテスト実施

(4) Northwest Fuel Development Inc. 地上での化学プラントの吸着塔のような作用を地下の炭層を用いて行う方法も提案されている。Northwest Fuel Development Inc. では、いわゆる Pressure Swing Adsorption (PSA) により、CO₂ を濃縮する方法を提案している²²⁾。この方法では、廃止炭鉱を利用し、1 ユニットごとに地下に 3 箇所のセル (化学プラントでいう装置 1 基に相当) を設け、最初のセルに地上から排煙を注入し、その後隣のセルに前のセルで濃縮された CO₂ を繰り返し注入し徐々に CO₂ を濃縮していき、最終的に深度の大きな炭層に CO₂ を注入・固定するものである (図 12)。

3・2 カナダ

ARC (Alberta Research Council) が中心となり、USDOE、IEA、石油会社等からなる研究開発組織を構成し、Alberta 州の深部炭層に CO₂ を注入し、同時に CBM を回収するプロジェクトが進行して

Cumulative Incremental Methane Production

図 11 CO₂ 注入量と CH₄ 生産量の推移

図 12 圧カスイング法による CO₂ 濃縮と固定の概念図

表1 炭酸ガス注入と排煙注入の経済性比較

	100%CO ₂	13%CO ₂ / 87%N ₂
注入量とCBM生産量の比	2.00	0.73
CBM生産コスト内訳：		
掘削コストと坑井維持費	0.60	0.38
他のサービスコスト	0.29	0.34
N ₂ 分離コスト (@US\$0.49/Mscf)	---	0.49
13%CO ₂ /87%N ₂ ガスのコスト (@US\$0.50/Mscf)	---	0.37
CO ₂ コスト	2.00	---
CBM生産コスト 計	2.89	1.58

いる²³⁾。本プロジェクトの特徴は、CO₂の注入ばかりでなく、発電所等から排出される排煙を直接炭層に注入することも計画していることである。

プロジェクトは次のように3フェーズに分かれている。研究予算は1500万カナダドルである。

フェーズⅠ(1997年6月終了)：CO₂、N₂、排煙を注入することの概念研究

フェーズⅡ(1999年4月終了)：マイクロ・パイロットの設計およびインプレメンテーション：(1)地質・エンジニアリング作業、(2)数値解析、(3)マイクロ・パイロットテストからなる。

フェーズⅢ(1999-2003)：フェーズⅢAとⅢBで構成

フェーズⅢA：マイクロ・パイロットテストにより、N₂・CO₂混合比の異なるガスを炭層に注入し、CO₂固定とメタン回収がベストの混合比を調査。これまで行ってきたマイクロ・パイロットテストのサイトより浅い炭層の貯留層特性調査

フェーズⅢB：フェーズⅢAが成功すれば、5スポットパターンの坑井配置で注入ガスを実施する。

排煙を直接、炭層に注入する場合には、生産井から回収される窒素とメタンを、回収後に分離しなければならない。一方、炭酸ガスを注入する場合には、注入する前に炭酸ガスを分離しなければならない。ARCでは、Alberta州の炭層を対象とし、これらの分離方法の違いを考慮したCO₂固定・CBM回収の経済性評価を実施している⁶⁾。それによれば、CO₂炭層内固定コストは、100%CO₂注入ではUS\$2.89/Mscf、排煙注入ではUS\$1.58/Mscfとなっており、排煙注入の方が有利と報告されている²⁴⁾(表1)。

3・3 オランダ

現在オランダには炭鉱は存在しないが、その地下には石炭層が多く賦存している。ドイツのルール炭田、ザール炭田の炭層は北に向かって緩やかに傾斜し北海にまで延びている。オランダ付近では深度が1,000m程度となっている。この深度にある炭層を対象としてCO₂を利用したECBMRにつき、オランダは大きな関心を示している。

実際のフィールドテスト等ははまだ実施していないが、TNO(オランダ地質科学研究所)、デルフト工科大学、ユトレヒト大学が中心となり、フィールドテストへ向けての基礎調査を行っている^{25)~28)}。主な内容は、オランダのCBM賦存量調査、CO₂固定可能量調査、実験室でのCO₂-CH₄置換実験、CO₂供給源と国内CO₂パイプライン網建設を含めた供給コスト評価、E-CBM-Rの炭田別経済性評価等である。

CO₂の固定可能量に関しては、地質条件の不確定さを基にモンテカルロシミュレーションによりメタン資源量を計算し、これをもとにオランダでの炭田別CO₂固定可能量を求めた(図13)。

経済性評価に関しては、次の項目を考慮している。

- ① オランダでのCO₂供給可能量および輸送可能量
- ② ECBMRによるCBM生産量とCO₂注入量予測
- ③ 長期にわたるCBM生産を考慮した経済性評価

表2 オランダでのECBMRコスト予測

生産井	
初期投資	0.75MUS\$ (最初の生産までの2年間で)
沿層ボーリングコスト	1.5kUS\$/m
運転・補修費	初期投資の1%
注入井	
初期投資	0.43MUS\$ (最初の注入までの1年間で)
運転・補修費	初期投資の4%
生産量に依存する項目	
坑口CO ₂ 価格	13US\$/t
ガス収集・処理・圧縮	5.4 × 10 ⁻³ US\$/m ³
水処理・排水	15US\$/m ³
年利	10%

図13 オランダでの炭田別CBM資源量と炭層内CO₂固定可能量 (P90は90%の確率であることを示す)

図14 CO₂供給価格とCBMコストの関係(メタン回収、CO₂固定には水平孔を使用)

④ 環境影響評価および不確定要因の評価

現在③まで作業が進んでいる。経済性評価に用いた基本パラメータを表2に示す。CBMの回収とCO₂注入は水平坑井を利用する予定である。経済性評価によって得られたCBMコストの例を図14に示す²⁹⁾³⁰⁾。井戸元CO₂価格は15ユーロ/tであり、CO₂固定のクレジットがない場合、CBMコストは6~8ユーロ/GJの範囲にある。

3・4 オーストラリア

オーストラリアは有数な石炭生産国であり、CO₂の炭層内固定には大きな関心を寄せている。IEAが行った「CO₂の炭層内固定に適した世界の炭田調査」で、Queensland州のBowen Basinが最適との評価を得た³¹⁾。この調査では、次の5項目につき得点(スコア)をあげ、その総計でランク付けを行っている。

- ① マーケット・ポテンシャル(基幹パイプラインまでの距離、ガス需要、国のCO₂固定の必要性)
- ② 生産性(浸透率、掃攻率)
- ③ CBM資源量・CO₂固定量(ガス資源密度、CO₂・CH₄置換

図 15 Nine-Pattern Test の坑井配置
(○注水井, ●生産井)

率, 地質条件)

④ CO₂ 供給ポテンシャル (CO₂ 供給源までの距離, CO₂ 濃度, CO₂ 供給可能性)

⑤ インフラコスト

対象とした国は, インド, ポーランド, 中国, オーストラリアである。その結果, オーストラリアの Bowen Basin, Dawson River 地区が CO₂ の石炭層内固定に最適な炭田であるとの結論を得た。この結果をふまえ, デモンストレーション・プラントまでの R&D に要する費用を計算している³²⁾。

商業プロジェクトまでのステップは次の段階となっている,

ステージ 1: Micro-Pilot Test (1 本の坑井による CO₂ 注入とメタン生産: 費用 70 万 US\$)

図 16 未採掘深部炭田を利用した炭層内 CO₂ 固定とメタン回収

ステージ 2: Five-Spot Pilot test (注入井 4 本, 生産井 1 本から成る坑井配置: 費用 620 万 US\$)

ステージ 3: Nine-Pattern Test (商業デモプラント: 注入井 16 本, 生産井 25 本 (図 15)。費用: 不明)

商業用デモプラントまでの期間は 3 ~ 4 年を考えている。

3・5 日本

(1) 関西電力(株) 関西電力の子会社である関西総合環境センターが中心となり, 2000 年度に CO₂ 炭層固定の研究会が持たれた。この研究会は通称「ECBMR 研究会」と呼ばれていたが, 研究会の活動目的は, CO₂ 炭層固定の世界の技術動向を情報収集し, 国内および国外でのプロジェクトファイナディングであった。国内炭田を使った CO₂ 固定では, ①国内移動炭鉱を使用した基礎試験, ②廃止炭鉱を使用した実証試験, ③未採掘海底炭田を利用した CO₂ 固定 (図 16) などのオプションについて検討された。特に③に関しては, CO₂ 排出権取引をも視野に入れ, 海外プロジェク

表 3 わが国での炭層内 CO₂ 固定の有望地域

炭 田	発 電 所						後 援 地				炭 田 状 況
	発電所	所有会社	炭田からの距離 (km)	燃料種類	発電量 (MW)	CO ₂ 発生量 (ton/yr)	工業都市 CO ₂ 発生地・CH ₄ 消費地		都 市 (CH ₄ 消費地)		
							距離 (km)		距離 (km)		
石狩炭田											
空知地区	砂川	北海道電力	0	石炭	250	614,900	-	-	旭川・札幌	35 - 50	内陸、西側深部への炭田拡大の可能性
	奈井江 (計)	北海道電力	0	石炭	350	964,600					
					600	1,579,500					
夕張地区	-	-	-	-	-	-	-	-	札幌・苫小牧	50	内陸、西側深部への炭田拡大の可能性
常磐炭田											
常磐炭田	勿来	常磐共同火力	0	石炭・重油	1,625	2,953,700	いわき 日立	0 15	いわき 原町・相馬 日立・水戸	0 0 - 20 15	太平洋海底下の炭層賦存
	原町	東北電力	40 - 60	石炭	2,000	4,658,200					
	常陸那珂 (計)	東京電力	60 - 80	石炭	1,000	2,296,800					
					4,625	9,908,700					
北西部九州 (含:山口)											
宇部炭田	新小野田	中国電力	0	石炭・重油	3,000	5,798,200	宇部・防府	0 - 25	宇部・小野田	0	瀬戸内海海底下の炭層賦存
大瀬炭田	新小野田	中国電力	25	石炭・重油	3,000	5,798,200					
	三隅 (計)	中国電力	25	石炭	1,000	2,238,800					
					4,000	8,037,000					
小倉炭田	下関	中国電力	10	石炭・重油	750	2,380,300	北九州	10	下関・北九州	0 - 10	日本海海底下の炭層賦存
	新小倉	九州電力	0	LNG	2,112	2,770,000					
	珂田	九州電力	15	石炭・LPG	740	1,827,100					
	戸畑共同 (計)	戸畑共同火力	0	LNG	781	3,819,000					
					4,383	10,796,400					
筑豊炭田	新小倉	九州電力	25	LNG	2,112	2,770,000	北九州	25	北九州	25	内陸、山間部、閉山炭鉱多し、地上部既開発地多し
	珂田	九州電力	25	石炭・LPG	740	1,827,100					
	戸畑共同 (計)	戸畑共同火力	20	LNG	781	3,819,000					
					3,633	8,416,100					
福岡炭田	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	地上部既開発地多し
唐津炭田	唐津	九州電力	0	油	875	1,357,500	佐世保	20	唐津・佐賀 佐世保	0 - 20	内陸、山間部
	相浦	九州電力	20	油	875	2,817,600					
	松浦	九州電力	20	石炭	1,400	3,164,000					
	松浦火力 (計)	電源開発	20	石炭	2,000	4,323,300					
					5,150	11,662,400					
佐世保炭田	相浦	九州電力	0	油	875	2,817,600	佐世保	0	佐世保	0	日本海海底下の炭層賦存
	松浦	九州電力	0	石炭	1,400	3,164,000					
	松浦火力 (計)	電源開発	0	石炭	2,000	4,323,300					
					4,275	10,304,900					
三池炭田	港	九州電力	0	石炭	156	371,000	大牟田	0	大牟田	0	有明海海底下の炭層賦存
崎戸・松島炭田	松島火力	電源開発	0	石炭	1,000	2,193,600	長崎・佐世保	30	長崎・佐世保	30	東シナ海海底下の炭層賦存
高島炭田	大村	九州電力	20	石炭	156	382,600	長崎	10	長崎	10	東シナ海海底下の炭層賦存
天草炭田	苓北	九州電力	0	石炭	1,400	3,164,000	八代・熊本	30 - 40	八代・熊本	30 - 40	東シナ海海底下の炭層賦存

 図 17 排煙の CO₂ 分離パイロットプラントのフローシート

トへの展開が可能である。わが国の CO₂ 固定可能地域に関しては表 3 のようにまとめられている。

関西電力は三菱重工と共同で、発電所から排出される排煙からの CO₂ 分離技術を開発している。排煙からの CO₂ 分離・濃縮技術には、現在、化学吸収法、物理吸収法、膜分離法、蒸留法、酸素燃焼などがあるが、関西電力等の技術はアミン溶液を用いた化学吸収法である。開発した KS-3 吸収液により、CO₂ 回収率の向上、プラント運転中のアミン損失の低減、同プラントの腐食低減などの技術改良が行われた^{33) 34)}。図 17 にパイロットプラントのフローシートを示す。

(2) 住友石炭鉱業(株) 住友石炭鉱業(株)では、旧赤平炭鉱の密閉口から回収されるメタンガスを利用して、発電するプロジェクトを進めている。2000 年度には、メタンガス資源量の推定、自噴によるメタンガス湧出量を計測した。その結果、自噴湧出量は気圧変動に大きく左右され、特に高気圧接近時にはメタンガス

の自然湧出が停止することもあることが確認された。安定的なメタン生産を行うため、吸引による回収が必要であり、その最適吸引量の検討が行われた。今夏からマイクロガスタービンを用いた約 150kW 出力の発電実証試験が開始される³⁵⁾。

4. ま と め

これまで、炭層を利用した CO₂ 固定とメタン回収・利用について、その技術的な基礎事項と世界の研究開発動向について述べてきた。この技術が信頼性のある CO₂ 固定技術となるためには、今後解決しなければならない課題が数多く存在する。

① 石炭の吸着量に関しては、CO₂ の超臨界圧での吸着量の把握が重要である。この吸着量は CO₂ 固定量評価の基礎となるものである。最初に取り組みなければならない課題である。

② 超臨界圧 CO₂ では石炭との化学反応も考えられる。この化学反応によって生成される物質や石炭層内きれつ表面での CO₂ と

石炭の反応がきれつ系にどのような変化をもたらし、ひいてはガス流れにどのように影響を与えるかも把握する必要がある。

③ CO₂ の吸着に限らず、CH₄、N₂ の高圧での吸着量測定も必要である。さらに、石炭中の CH₄ と CO₂、N₂ の置換実験も必要である。さらに進んで、置換のメカニズムの解明と、そのメカニズムを表現できるシミュレータの開発が望まれる。

④ 経済性に関していえば、CO₂ 分離後の注入が経済的に有利か、排煙を直接注入して回収したメタンから窒素を分離するのが有利か詳細に検討する必要がある。この点に関しては、両論があるのが現状である。

⑤ ECBMR による CO₂ 固定の大きな特長は、同時に CH₄ を回収できることである。CO₂ 固定に必要な坑井類はメタン回収にも利用できる。また、天然ガスである CH₄ を発電に使用することにより、システムとしての環境負荷は小さくなることが予想される。本 CO₂ 固定システムの環境負荷はどの程度か、LCA などを用いた環境影響評価が望まれる。

わが国での本技術の発展を考えると、次のような作業が必要である。

⑥ わが国での炭層の CO₂ 固定可能量調査。石炭資源量に関しては古い調査報告があるものの、CO₂ 固定やメタン回収といった視点を考慮した調査はまだなされていない。

⑦ 本技術は、対象が自然で、処理量が大きいことからスケールの大きなプロジェクトになることが予想される。このような大型プロジェクトの最近の傾向として、国際共同研究開発プロジェクトがある。わが国もこのような国際プロジェクトに積極的に参加し、この分野で進んだ技術を吸収する必要がある。

⑧ そのような国際プロジェクトへの参加を通じて、わが国独自の得意領域を開発し、アジア諸国の石炭層を利用したプロジェ

クトに発展させるのが望ましい。

引用文献

- 1) 島田：炭層への CO₂ 固定技術、JCOAL news, No.4, p.12-16, (2001)
- 2) Stevens, S.H. and Gale, J.: Oil and Gas Journal, May 15, p.40-44, (2000)
- 3) Scott, H.S. et al.: Proc. Fifth Intern. Conf. On Greenhouse Gas Technology (GHGT5), p.278-283, (2000)
- 4) Stevens, S.H. et al.: Proc. GHGT4, p.175-180, (1998)
- 5) Freund, P.: Proc. GHGT5, p.272-277, (2000)
- 6) Gas Research Institute: A Guide to Determining Coalbed Gas Content, Chapter 4, p.8, (1995)
- 7) Arri, L.E., Yee D. and Jeansonne, M. W.: SPE24363, (1992)
- 8) Harpalani, S. and Pariti, U. M.: Proc. Intern. CBM Symp., p.151-160, (1993)
- 9) Stevenson, M.D. et al. SPE23026, p.741-756, (1991)
- 10) Law, B.E. and Rice, D.D.: Hydrocarbons from Coal, AAPG, p.203-218, (1993)
- 11) Hall, F.E. et al.: SPE29194, (1994)
- 12) Kroos, B.M. et al.: Proc. Intern. CBM Symposium, p.177-191, (2001)
- 13) NOVEM: Potential for CO₂ Sequestration and Enhanced Coalbed Methane Production in the Netherlands, Program No. 234.1, (2000)
- 14) Puri, R. and Yee, D.: SPE20732, (1990)
- 15) Harpalani, S. and Chen, G.: Proc. Intern. CBM Symp., p.285-294, (1993)
- 16) Palmer, I. And Mansoori, J.: SPE36737, p.557-564, (1996)
- 17) Reeves, S. R. and Stevens, S.H.: World Coal, Dec., p.1-4, (2000)
- 18) Reeves, S. R. and Schoeling, L.: Proc. GHGT5, p.593-598, (2000)
- 19) Erickson, D. and Jensen, J.R.: Proc. GHGT5, p.589-592, (2000)
- 20) Schoeling, L. and McGovern, M.: World Oil, Supplement Sept., (2000)
- 21) NETL: Carbon Sequestration - Overview and Summary of Program Plans -, (2000)
- 22) Soot, P.M. and Smith, M.E.: CO₂ Capture and Concentration with Ohio Coal in Underground Mines, Preprint, First Ohio CO₂ Reduction, Sequestration & Capture
- 23) Mourits, F.: Advances in CO₂ Capture and Storage and Zero Emission Technology in Canada, JCOAL セミナー配布資料, 1 月, (2001)
- 24) Wong, S. et al.: Proc. GHGT5, p.543-548, (2000)
- 25) van Bergen, F and Pagnier, H.J.M.: Enhanced Coalbed Methane Production with CO₂ Sequestration, A Possible Source for Clean Energy in the Netherlands?, JCOAL セミナー配布資料, 1 月, (2001)
- 26) van Bergen et al.: Proc. GHGT5, p.555-560, (2000)
- 27) Wolf, K.H.A.A. et al.: Proc. GHGT5, p.561-566, (2000)
- 28) van Bergen et al.: Proc. Intern. CBM Symposium, p.271-282, (2001)
- 29) NOVEM: Potential for CO₂ Sequestration and Enhanced Coalbed Methane Production in the Netherlands, Program No. 234.1, (2000)
- 30) Faaij, A. et al.: Proc. GHGT5, p.583-588, (2000)
- 31) Wong, S., Gunter, W. D. and Gale, J.: Proc. GHGT5, p.531-536, (2000)
- 32) Wong, S. et al.: Proc. Intern. CBM Symposium, p.75-86, (2001)
- 33) 三村他：化学工学論文集, 第 26 巻, 第 1 号, p.6-10, (2000)
- 34) Iijima, M.: SPE39686, (1998)
- 35) 眞田他：資源素材学会春季大会講演集, (資源編) No.1203, p.85-86, (2001)