CO₂ 炭層固定化技術開発予備実験の成果*藤岡昌司¹ 古川博文² 名子雅夫³The Outcome of CO₂-ECBM Yubari Pilot Testby Masaji FUJIOKA^{a*}, Hirofumi FURUKAWA^a and Masao NAKO^b

a. Japan Coal Energy Center, Minato-ku, Tokyo 108-0073 Japan

(*Corresponding author E-mail: fujioka@jcoal.or.jp)

b. The General Environmental Technos Co., Ltd., Chuou-ku, Osaka 541-0052 Japan

The feasibility of extracting gas from the coal seam while storing carbon dioxide underground in Japan was evaluated. A CO₂-ECBM project had begun near the town of Yubari on the island of Hokkaido in northern Japan. The primary coal seam of interest was 5-6m thick Yubari coal seam located at the depth of 900m. A micro-pilot and two multi-wells CO₂ injection tests, involving an injection and production wells, were carried out in the period between May 2004 and October 2007. There were a variety of tests conducted in the injection well, including an initial water-injection falloff test and series of CO₂ injection and falloff tests. Although gas production was obviously enhanced by CO₂ injection, water production was not clearly affected by CO₂ injection. Several injection tests suggested that injectivity of CO₂ into the virgin coal seam saturated with water was eventually increased as the water saturation near the injector was decreased with the injected CO₂. It was believed that low injectivity of CO₂ was caused by the reduction in permeability that swelling in coal matrix induced. So N₂ flooding test was performed in 2006 to evaluate the effectiveness of N₂ flooding on improving well injectivity. The N₂ flooding test showed that daily CO₂ injection rate was boosted, but only temporary. On the top of that, the permeability might not return after CO₂ and N₂ were repeatedly injected. It is likely that the matrix swelling might create a high stress zone near to the injection well.

KEY WORDS: CO₂-ECBM, N₂ Flooding Test, Swelling, Change of Permeability

1. はじめに

二酸化炭素の炭層固定化とメタンガス (CBM) 回収技術は地球温暖化問題の解決に向けて二酸化炭素 (以下 CO₂ という) の大気中への放出を抑制するため、発生源から回収した CO₂ を石炭層 (以下 炭層 という) に圧入して安定的に固定化するとともに、炭層中で CO₂ と置換した未利用のメタンガス (以下 CH₄ という) をクリーンエネルギーとして回収する技術である。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」の一環として平成 14 年 8 月から開始された「二酸化炭素炭層固定化技術開発」は全体システムの実用化・事業化を検討することを目的とした我が国で最初の CBM-ECBM 試験であり、平成 19 年度を最後に終了した。本事業によって我が国の炭層メタンガス開発や CO₂ 炭層固定化開発に必要な基礎データが得られ、また、CO₂-ECBM において克服しなければならない課題が明らかになった。

2. ECBM メカニズムと特長

石炭の構造はクリートと呼ばれる天然亀裂と、クリートを挟むマトリックスと呼ばれる非常に微細な空隙の集合体からなっている¹⁾。このマトリックスの空隙により石炭は膨大な表面積を持ち、ガスの吸着材となっている。石炭層内の CH₄ (CBM) は大部分がマトリックス内に吸着した形で貯留されている。CH₄ はダルシー則に従って圧力勾配によってクリート内を移動し孔井から生産される。クリート内の CH₄ 濃度 (圧力) が低下するとマトリックスに吸着している CH₄ は濃度勾配によってクリートへ移動 (拡散) する²⁾。1980 年代の初頭において、CBM 生産が不活性ガスの炭層への圧入によって増進されるとの提案があった。これは、石炭に貯留されている CH₄ 量は全圧よりも CH₄ の分圧に依存すると言う原理に基づいている。炭層へ圧入する不活性ガスとして窒素と CO₂ を使用した商業的 ECBM が 1990 年代に米国サンファン炭田で実施された³⁾。吸着力の弱い窒素はクリートを通じて素早く広い範囲へ拡散し、早期の CH₄ 増産効果をもたらすが、吸着力が弱い CH₄ と一緒に生産ガスに混入する。CO₂ は吸着力が CH₄ より強い CH₄ に替わってマトリックス内へ吸着貯留されるので、生産ガスへの混入は極めて遅い時期となる。

* 2008 年 6 月 10 日受付 9 月 21 日受理

1. (財) 石炭エネルギーセンター 資源開発部

2. 普通会员 (財) 石炭エネルギーセンター アジア太平洋コールフローセンター

3. (株) 環境総合テクノス CO₂ 炭層固定化プロジェクト室

[著者連絡先] FAX: 03-6400-5207

E-mail: fujioka@jcoal.or.jp

キーワード: CO₂-ECBM, N₂ 注入試験, 膨潤, 浸透率の変化

Fig.1 Location of the Ishikari Coal Basin and Yubari.

Fig.2 Conceptual design for the Yubari pilot test.

3. 二酸化炭素炭層固定化技術開発の概要

本技術開発は、(株)環境総合テクノスが補助事業者となり、Fig. 1に示す石狩炭田にある夕張市で実施された。石狩炭田は北海道のほぼ中央に位置し、東西方向の幅が7～20km、南北方向の長さ80km、総面積約800km²の日本で最大の炭田である。JCOALは実施体制の中で現場予備実験を担当し、深度約900mの未開発炭層を対象としたCO₂固定化とCBM回収試験を行った。現場予備実験の概念はFig. 2に示すように、垂直孔井であるCO₂圧入井(IW-1井)とCBMと炭層水を回収する傾斜孔井の観測井(PW-1井)の2孔井からなっている。

3・1 試験経歴

- ①平成14年度：サイト選定
- ②平成15年度：IW-1井の掘削、孔井物理検層試験、コアによるガス包蔵量調査、ガス吸着特性試験、石炭分析、孔井試験
- ③平成16年度：IW-1井での初期生産試験、IW-1井でのハフパフ試験、PW-1井掘削、2孔井によるパイロット試験（一回目の連続CO₂圧入；11月9日～25日）
- ④平成17年度：2回目の連続CO₂圧入試験（8月26日～10月6日）、産出試験（7月31日～12月11日）
- ⑤平成18年度：窒素連続圧入試験（5月11日～19日）、第3回連続CO₂圧入試験（5月25日～9月11日）、産出試験（4月13日～11月16日）
- ⑥平成19年度：水圧破碎工事（5月14～26日）、第4回連続CO₂圧入試験（5月29日～10月1日）、産出試験（4月27日～10月4日）

3・2 地質概要

試験対象となっている夕張炭層は古第三紀に属し、夕張炭層の上位層である幌内層は全層均質な泥岩からなるキャップロックとして重要な役割を担っている。IW-1井において3炭層が確認された。炭層傾斜は約25度であり、3層の見掛け総厚さは10.5mになる。試験評価を簡単にするために、最下部の最も厚い下層（見掛け厚さ6.22m、正味厚さ5.55m）を試験対象とした。

3・3 孔井仕上げ

IW-1井はセメンチング仕上げで、炭層と孔井の導通を得るために炭層深度890-895.5m間にパーフォレーションを打っている。PW-1井の炭層部では約24度の傾斜掘削によって孔井が貫通されている。PW-1井での炭層部は裸坑仕上げで、ストレーナーを吊り下げた形で仕上っている。両孔井とも圧入量や生産量を拡大するための刺激策（水圧破碎やキャビテーション）を施工していない。Fig. 3に両孔井のケーシングプロファイルを示す。

3・4 吸着特性と工業分析

ガス吸着特性を把握するためにIW-1井で回収したコアを使ったキャニスター試験と吸着等温試験を実施した。キャニスター試験と吸着等温試験から、炭層はガス飽和状態にあり石炭ランクから推定されるよりも遙かに高いガス包蔵量を持っていることが判明した。Fig. 4に温度30℃におけるCH₄、CO₂そしてN₂に関する吸着等温線図を示しているが、貯留層圧力でのCH₄、CO₂そしてN₂の吸着能力はそれぞれ23.8m³/t、40.2m³/tそして13.3m³/tである。CO₂/CH₄の吸着能力割合は1.69となった。さらに、採取したコアに基づいて工業分析や組織分析を行い、吸着特性との比較を実施した。

3・5 貯留層特性

圧入量や生産量のポテンシャルを評価する上で重要となる貯留層特性値を注水による孔井試験で推測した。その結果、IW-1井での絶対浸透率は1.0md、貯留層圧力10.2MPa、クリート開口圧力15.8MPa（ステップレート試験結果をFig. 5に示す）、クリート開口圧力10.9MPaであると推測された。

4. 圧入試験と産出試験

市販のCO₂を気化器でガスにして孔井内に圧入したが、地温により炭層へは液体CO₂状態で圧入している。炭層深度での圧入圧力がクリート開口圧力である15.8MPa以下になるように圧入圧力を設定して圧入試験を実施した。産出試験は、揚水ポンプによってチュービングパイプを通して炭層水を地表タンクへ汲み上げ、ガスはケーシングとチュービング間のアニュラスを経由して計測システムへ送った。

4・1 平成16年度試験

平成16年度においてPW-1井完成後の最初の産出状況やIW-1井での圧入影響が及ぼす産出挙動の変化も観測することができた。IW-1井においても初めてのCO₂連続圧入試験を実施し、CO₂圧入レートが事前にシミュレーション（吸着膨潤による浸透率低下を考慮しないモデル）で予測した15.6～25.3t/日に比較して約1/10程度の実績となった。Fig. 6に平成16年10月からの産出量とCO₂圧入量の推移を示している。

4・2 平成17年度試験

平成17年度において圧入中のCO₂の温度状態を確認する検層試験を実施し、30℃以下の地温影響によってCO₂が液体状態で炭層へ圧入されていたと認識した。超臨界CO₂圧入を達成するために断熱効果の高いサーマルチューブの一部使用や、地上でのCO₂高温維持作業を行ったが、注入レートが低く結果として超臨

Fig.3 Casing profile (right: PW-1, left: IW-1).

Fig.4 Isotherm at 30°C (source: Kyoto Univ. Prof. Tamon).

界圧入は試験を通じて達成できなかった。Fig. 7 に平成 17 年度の圧入・産出試験結果を示している。圧入レート範囲は 1.6 ～ 3.5t/day で圧入に伴い徐々に上昇した。圧入量の増加理由は、① 圧入 CO₂ により孔井近傍の水飽和率が減少しガスの移動性が徐々に改善された、② 15.5MPa の高圧圧入により、孔井近傍のクリートが拡大し、浸透率を押し上げたことが考えられる。CO₂ 圧入開始 (8 月 26 日) 以前のベースラインとなるガス産出量は、揚水作業に影響されるが、75 ～ 80m³/日と判断される。Fig.7 に示すように、ガス産出量は CO₂ 圧入に対して極めて高い感応性を示し、圧入が開始された 8 月 26 日直後からガス産出量は増加し、CO₂ 圧入が終了した 10 月 6 日から減少している。CO₂ 圧入による CH₄ ガス増産効果が明瞭に認識できる。

4・3 平成 18 年度試験

CO₂ 注入性が低い原因は、吸着量の増加によるマトリックス膨潤が招く浸透率の低下であると考え、石炭への吸着量が少ない窒

素を圧入することで膨潤を軽減して浸透率を改善させることを目的として 5 月に窒素圧入を実施した。Fig. 8 に平成 18 年度における圧入産出試験結果を示している。

CO₂ が石炭マトリックス内へ多量に吸着することによってマトリックスが膨張し、それによってマトリックスを囲むクリートが圧迫され浸透率を低下させる所謂膨潤効果により注入性が低下した原因と考えられた。吸着による浸透率の変化は吸着量に依存するため、吸着量の少ない窒素の場合では逆に浸透率が高くなる。この試験は浸透率の吸着量依存性を世界で最初に現場試験で実証したものであり、窒素圧入による浸透率改善と CO₂ 圧入による膨潤作用を確認したものである⁴⁾。さらに、この窒素圧入試験には、CO₂ よりブレイクスルー時期が早い窒素ガスを先行ガスとして注入することによって CO₂ のブレイクスルー時期予測の精度を向上させることや、窒素のメタン増産効果を確認する目的も含まれていた。Fig. 9 に窒素連続圧入試験期間を含む CO₂ 圧入実績を示している。窒素圧入前の CO₂ 圧入レートは 130-160kg/hr であり、窒素圧入によって 5 月 25 日～27 日の 3 日間の CO₂ 圧入レートは 2 ～ 3 倍に増えた。この注入性の改善は窒素によるマトリックス収縮が浸透率を上げたことによるものである。一方で、注入性改善効果が極めて短期間であることも明らかになった。圧入した窒素が PW-1 孔井の産出ガスに混入してくるブレイクスルー時期は窒素濃度が明確に増加した 5 月 20 日と判断される。一方で、ガス産出量は試験開始前には約 100m³/日であったものが、N₂ 圧入により最大 700m³/日まで増産した。N₂ 圧入後の CO₂ 圧入時には徐々に低下し 500m³/日前後の産出となり、圧入する不活性ガスの種類によって増産効果の出現状況が異なることが認識された。

4・4 平成 19 年度試験

平成 19 年度は二酸化炭素炭層固定化技術開発の最終年度であ

Fig.5 Step rate injection test analysis (Year 2003).

Fig.6 Daily injection and production rates (Year 2004) .

Fig.7 Daily injection and production rates (Year 2005).

Fig.8 Daily injection and production rates (Year 2006).

Fig.9 Daily injection and production rates (N₂ Flooding Test, Year 2006).

り、10月中旬の現場予備実験終了をもって、実験で使用した2坑井を埋坑処理した。

平成19年5月に注入性向上の有望な方策としてIW-1井において水圧破碎による亀裂形成を試みた。工法としては、脆弱な孔井に適したジェット穿孔を用いたサージフラック (Surgi Frac) ピンポイントフラクチャー方法を採用することにした。Fig. 10にSurgi Fracの概要と孔底でのジェット装置を示す。従来の水圧破碎法ではパッカーを設置してフラック作業のためのポンピングをするが、Surgi Fracではパッカーを使用しないで、チュービングパイプ内に高圧をかけるので、圧力制限のケーシングや孔口装置への付加が少ない特徴を持つ。また、櫓を使用しないで、クレーンでの作業が可能であり、作業費用を抑制できた。しかしながら、ジェット穿孔によるケーシングの貫通およびケーシング背後の石炭層内での空洞形成はできたものの、炭層内への亀裂伸張ができずCO₂の注入性向上に寄与する亀裂伸張は達成できなかった。この理由としてパーフォレーション背後の石炭が既に破碎されていてSurgi Fracに不適当な状態であったことと、亀裂開口圧力が上昇した可能性が高いことであった。IW-1孔井では、Surgi Frac作業後の貯留層特性変化を推測するために7月13日から7月18日までの5日強の間にシャットインを実施した。シャットイン期間中の孔底圧力の推移変化を解析した結果、スキンプクターが

-1.89と推測され、孔井からの流動抵抗が大幅に改善されていた。これは、Surgi Frac作業によって孔井近傍の石炭層に空洞が形成されたことが原因と考えられる。Table 1に平成15年から実施したfall-off試験結果を示している。

Fig. 11に平成19年度の圧入および産出日量の推移を示している。Surgi Frac後の5月29日からCO₂連続圧入試験を開始したが、開始時のIW-1井は水没状態であり、Surgi Frac時の注水と合わせるとIW-1井近傍の炭層は水飽和率が相当高い状態になっていたと考えられる。平成17年度のCO₂連続圧入試験の開始も孔井作業後のために孔井が満水になった状態からCO₂圧入を行った。孔井が満水になった状態からCO₂連続圧入試験を開始したのは平成17年度と平成19年度の2回であり、両年度のCO₂連続圧入試験開始直後のCO₂圧入状況は極めて類似したものである。両年度の圧入試験では、圧入レートが徐々に増加していった。これは、孔井内の水がCO₂圧入に伴って炭層に入り、クリート内の水飽和率を高めCO₂相対浸透率が低くなってCO₂注入性が低かったためと考える。CO₂圧入進行に伴い、IW-1孔井近傍のクリート内ではCO₂飽和率の高まりと共に、CO₂圧入レートが徐々に改善されたと考えられる。前述したようにSurgi Fracによって孔井近傍に空洞が形成されスキンプクターが大幅に低下したが、CO₂注入性は平成17年度と平成19年度では大きな違いは生

Fig.10 Concept of Surgi Frac operation and bottomhole assembly.

Table 1 Summary of injection falloff tests .

Parameter	Units	Nov.2003 Water Falloff	Nov.2004 CO ₂ Falloff	Nov.2006 CO ₂ Falloff	July.2007 CO ₂ Falloff
Static	kPa	10,214	9,979	10,337	10,105
Pressure Depth	m	889.7	889.7	889.7	889.7
Pressure Gradient	kPa/m	11.5	11.1	11.5	11.2
Temperature	°C	29.55	29.55	29.55	29.55
Effective thickness	m	5.55	5.55	5.55	5.55
Effective Permeability to Liquid CO ₂	md	—	0.0923	0.0812	0.07
Absolute permeability	md	1.1	0.0923	0.0812	0.07
Natural Fracture Porosity	fraction	—	0.0004	0.0004	0.0004
Skin Factor	—	0.24	1.3	1.39	-1.89
Radius of Investigation	m	40.6	59	34	25

じていない。炭層内での CO₂ 圧入量が増加することで膨潤領域が広がり、浸透率が平成 17 年度よりも低下したことが影響したものと考えられる。

CO₂ 圧入レート (t / 日) の増加傾向は炭層クリート内の水飽和率の低下 (CO₂ 相対浸透率の増加) とクリート圧縮率 (Cleft Compressibility) として浸透率に影響を与える高い圧入圧力によるクリート幅の広がり原因と考えられる。特に、CO₂ 圧入初期では相対浸透率の影響が大きく、徐々に圧入圧によるクリート幅の広がり影響するものと考えられる。

水圧破碎で示唆された亀裂開口圧力の変化を確認するために、9 月において圧入 CO₂ を使ったステップレート試験を実施した。Fig. 12 に 9 月 19 日に実施したステップレート試験結果を示す。平成 15 年度で認識された圧力上昇傾向における変曲点は認められず、亀裂開口圧力に変化があったことを示唆している。Fig. 13 に 9 月 30 日に実施した CO₂ によるステップレート試験と、平成 15 年度に実施した水によるステップレート試験を比較している。

9 月 30 日のステップレート試験によってクリート開口圧力が 19MPa 以上になっている可能性があると推測された。また、19MPa までは圧力に比例した注入量の増加を見込めることが示唆された。平成 15 年度に実施した注水によるステップレート試験では、クリート開口圧力 (15.8MPa) までの注入レートと孔底圧力の関係式と比較すると、同じ注入レートでも平成 19 年度の CO₂ 圧入の方が高い圧力を必要とすることから注入性が悪化したと推測される。この開口圧力の上昇理由として、①膨潤により IW-1 井近傍において高応力ゾーンが形成された、②圧力が作用する炭層面がザクザクに破碎され亀裂開口圧力が適用されなかった、ことなどが考えられる。

平成 19 年 4 月 27 日からガス産出量と水産出量の計測を開始したが、Fig.11 に示されるようにシャットイン期間後の春には孔井から多量のガス産出が観察されたが、これはシャットイン中の孔井内及び孔井近傍クリート内に溜まっていた自由ガスであると考えられる。計測開始後も孔井近傍の自由ガス産出が続き、徐々に

Fig.11 Daily injection and production rates (Year 2007).

Fig.12 Step rate test at 19, Sep. 2007.

産出量を減少していった。5月29日からCO₂連続圧入試験が開始されたが、ガス産出量の減少傾向に変化が見られなかった。ガス産出は6月10日から13日の間に最低産出量である90m³/日を記録した後で安定した増加傾向に移った。平成17年度でのCO₂連続圧入試験開始時にはガス産出量はCO₂圧入に極めて高い反応を示し、CO₂連続圧入試験開始に伴いガス産出量は明確に増加した。しかし、平成19年度ではCO₂連続圧入試験開始日より2週間程度遅れてガス産出増加傾向を示している。7月14日から18日までに実施されたIW-1井におけるシャットインの影響によって安定した増産傾向を示していたガス産出量が7月19日に減少傾向を示し、7月25日において増加傾向に戻った。ガス産出量は測定最終日である10月4日において500m³/日に達した。このガス産出量の増加理由として、IW-1井におけるCO₂圧入の影響があり、CO₂圧入量の増加に伴ったものである。さらに、PW-1井近傍における水飽和率の低下によってガス相対浸透率が増加してガス移動性が向上したこともガス産出量の増加に寄与しているものと考えられる。Fig.11に示すように水産出量が日を追うごとに徐々に減少しているが、この水産出量の減少はPW-1井近傍における水飽和率が減少したことが原因と考える。

5. 二酸化炭素炭層固定化技術開発の成果

5・1 石狩モデル⁵⁾

我が国最初のCBM-ECBM試験において得られた貯留層特性や

Fig.13 Comparison of injectivities and step rate tests.

吸着特性等の全データは生産性ポテンシャルを評価するシミュレーション（石狩モデル）に組み込まれ、生産や圧入試験のヒストリーマッチングより精度の高いものとなった。

5・2 サイト選定の留意点

実験場所は豪雪地帯であり、冬季の除雪は安全面と費用面から

断念し、試験を中断した。この結果、冬季期間に長いシャットインとなり、欧州 RECO₂POL の試験⁶⁾でも指摘されたように、孔井近傍でのクリート内ガスが浮力によって急傾斜炭層に沿って移動し、水飽和率が変化した可能性が考えられる。このため、地形や気候による影響を受けない長期連続試験が可能となるサイトを選定すべきである。また、炭層へ圧入される CO₂ 温度は地温に大きく依存し、浅い炭層や、夕張試験サイトのように低温地下水が存在する箇所では低い地温により超臨界 CO₂ 温度条件を坑底で満たすことが困難になる。超臨界 CO₂ 条件を満たす炭層を選定することも重要である。

5・3 CO₂貯留とCBM増産効果

本事業目的である我が国の炭層への CO₂ 固定化 CH₄ 生産の可能性を極めて単純な孔井において確認することができた。後述する膨潤作用によって注入量は 3-4t/日の範囲であるが、ガス産出と CO₂ 圧入量推移から明らかにように CO₂ 圧入により CBM 増産効果を確認した。Primary ガス（増産効果を受けない CBM）は坑井近傍でのスキンプアクターの影響を受けるが、CO₂ 圧入によって増産されたガスは生産井でのスキンプアクターの影響を受けないものと考えられる。

5・4 水飽和率の影響

CBM の生産量はポンプ排水による生産井近傍における炭層内の水飽和率を低下させることで増加する。これは、排水による圧力低下と水飽和率低下によるガスの相対浸透率の増加が、ガスの移動性を増加させるためである。このため、生成井における水生産はガス生成性を改善する方策でもある。CO₂ 圧入においても坑井近傍での水飽和率が圧入した CO₂ によって低下するに伴い圧入レートは増加すると考えられる。

5・5 膨潤作用と窒素による浸透率改善

膨潤作用とは CO₂ のマトリックス吸着によってマトリックスが膨潤して流体の通路であるクリート幅を押し縮めて浸透率を悪化させる現象である。夕張においても CO₂ 吸着によって浸透率が低下したと考えられたため、窒素圧入によりマトリックス内の吸着量を低下させて浸透率を改善する現場試験を世界で初めて実

施した。その結果を Fig. 5 に示す。窒素圧入により浸透率が大幅に改善しガスの圧入量の増加となった。しかし、浸透率改善効果は短期間であり、CO₂ 圧入再開に伴い浸透率は急激に低下した。この CO₂ 圧入による膨潤が CO₂-ECBM 事業化の最大なる課題と考える。

5・6 経済性検討

前述した石狩モデルにおいて 2 要素（炭層厚さとスキンプアクター）を変更した貯留層モデル想定し、経済性検討を行った。その結果、15 年間に亘り、年 100 万 t の CO₂ を約 20km² の面積（炭層厚 10m）に圧入し、年 3 億 m³ の CH₄ を生産するシナリオを作成することができた。この規模では圧入及び生産に各 300 程度の孔井が必要となるが、CH₄ の販売収入により明確な経済的優位性が期待できる。

6. む す び

CO₂ の注入性を向上させる様々な試験を実施し、膨潤効果に対するオプションとしての N₂ 圧入成果を確認することができた。しかし、操業上の問題も多々発生し、準備不足や設備能力の不十分さにより十分な成果を上げることが出来なかった。当該実験結果を礎にして石炭層が持つ温暖化削減能力とメタンガスの活用で経済的な CO₂-ECBM の実証試験を実施することを望む。

References

- 1) Warren, J.E. and P.J. Root: "The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs", Society of Petroleum Engineering Journal (1963), 245-255.
- 2) Mavor, M.J.: "Coalbed Methane Reservoir Properties", *A Guide to Coalbed Methane Reservoir Engineering*, Saulsberry, J.L., Schafer, P.S., and Schraufnagel, R.A. (Editor), Gas Research Institute Report GRI-94/0397, Chicago, Illinois (March 1996).
- 3) Scott Reeves: "Coal-Seq Project Update: Field Studies of ECBM Recovery/CO₂ Sequestration in Coalseams", GHGT6.
- 4) Ji Quan Shi, S. Durucan and M. Fujioka: "A reservoir simulation study of CO₂ injection and N₂ flooding at the Ishikari coalfield CO₂ storage pilot project", Japan, International Journal of Greenhouse Gas Control 2 (2008), 47-57.
- 5) Shinji Yamaguchi, Kotaro Ohga, Masaji Fujioka, Masao Nako, Shigeo Muto: "Field experiment of Japan CO₂ geosequestration in coal seam project (JCOP)", GHGT8.
- 6) W.F.C. van Wageningen and J.G. Maas: "Reservoir Simulation and Interpretation of the RECO₂POL ECBM Pilot in Poland", 2007 International Coalbed Methane Symposium.