

# 夕張市炭層メタンガス(CBM)開発調査事業報告書

平成 30 年 10 月

夕張市  
株式会社レアックス  
特定非営利活動法人地下資源イノベーションネットワーク

## 目 次

1. はじめに.....	1
2. 背景と目的.....	3
2.1 CBM とは.....	3
2.2 夕張の CBM 資源量 .....	4
2.3 CBM の生産と二酸化炭素（CO <sub>2</sub> ）炭層固定.....	5
2.4 地域エネルギーとしての CBM の活用.....	6
2.5 CBM 開発計画.....	7
3. CBM 開発への取組の経過 .....	10
4. 調査井掘削・生産テストの実績 .....	12
4.1 調査井掘削.....	13
4.2 坑内状況調査 .....	20
4.3 生産テスト.....	24
4.4 廃坑.....	35
5. 取組の成果.....	37

## 1. はじめに

石炭層に含まれる炭層メタンガス（CBM：コールベッドメタン）は爆発の危険性があるために石炭の坑内採掘にとっては厄介者であり、過去に幾多のガス爆発災害を引き起こしてきた。しかし一方で CBM は、非在来型天然ガスに分類され、石炭や石油と比べて燃焼時の二酸化炭素、窒素酸化物、硫黄酸化物等の排出が少ないクリーンなエネルギー資源でもある。国内で石炭採掘が盛んであった頃には、坑内の安全を確保するために、ガス抜きボーリング等により、地下の採掘現場から CBM を取り出す対策が講じられていたが、回収された CBM は自家消費用の熱源や発電用燃料として広く利用されていた。しかし、石炭需要のほぼ全てを輸入に依存している現在、CBM は未利用エネルギー資源として地中深く眠ったままである。

北海道の石狩炭田は CBM を多く含むことで知られており、その資源量は国内の天然ガス埋蔵量に匹敵するとも言われている。CBM 資源が豊富なアメリカ、オーストラリア、中国などでは、既に大規模な商業開発が行われているが、我が国では石炭層の構造が複雑（断層や褶曲が多い）、あるいはガスの浸透率が低いなどの理由から、大規模な CBM 開発は難しいと考えられている。しかしながら、小規模開発であっても地域社会にクリーンなエネルギーを安定供給する、いわゆる分散型エネルギーシステムのベースエネルギーとしての活用が期待できる。

CBM 開発・活用に関しては、2008 年 5 月に設立された特定非営利活動法人地下資源イノベーションネットワーク（以下「NPO」という。）が、その設立当初より北海道内でも最も有望な地域である夕張地域を対象として、既存の情報収集、CBM 生産シミュレーションや事業モデルの構築、経済性の検討を進め、地域に眠るエネルギー資源の地産地消をベースとしたローカルエネルギー供給モデルを提案してきた。

夕張市は、2012 年 3 月に「夕張市まちづくりマスタープラン」（以下「まちづくりマスタープラン」という。）を策定し、コンパクトで低炭素なまちづくりを目指すこととしたところであり、その柱の一つとして、地域資源である CBM を有効活用する施策の推進に舵を切った。2015 年 1 月には、CBM の活用が盛り込まれた「地域再生計画（コンパクトシティと夕張再生エネルギー活用による元気創造への挑戦）」<sup>2</sup>が政府により認定されたことを受け、CBM 開発の可能性を探るための試掘に向けた国などからの具体的支援策の検討に入った。

---

1 メタンの空気中での爆発範囲は 5～15%

2 夕張市地域再生計画：

<http://www.city.yubari.lg.jp/gyoseijoho/shisaku/keikaku/kihonkosokeikaku/chiikisaiseikeikaku.files/keikaku.pdf>

この過程において、調査井掘削、生産テスト、トライアル事業（小規模な CBM 活用事業）の計画が策定され、夕張市における CBM 有効活用事業の実現に向けての取組が本格化した。その後、夕張市と関係各機関との調整を経て、2016 年 4 月に日本初の事業化に向けた CBM 開発事業に着手することが決定したところである。2016 年 9 月から夕張市清水沢清陵町にて夕張層を対象とする調査井（944m）の掘削を開始し、更に 2017 年 10 月から 7 か月以上に及ぶ CBM 生産テストを実施した。なお、調査井の掘削は、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）の操業現場技術支援事業補助金や企業版ふるさと納税<sup>3</sup>等を、生産テストは北海道先進的エネルギー関連技術開発支援事業補助金等を活用して、夕張市と NPO や民間企業が連携<sup>4</sup>して取り組んだものである。

生産テストの結果、CBM 生産量が予想を下回り、トライアル事業の実施に足りる十分な量の確保が難しいことから、トライアル事業への移行は見送られたが、調査井掘削や生産テストにより、多くの知見やノウハウを得ることができた。

本報告書は、得られた知見やノウハウが、将来的な CBM 開発・活用の事業化に向けての新たな実施主体の参入やその取組に活かされることを期待して、夕張市における CBM 開発事業への取組の背景や経緯を含め、その実績や成果を取りまとめたものである。

---

<sup>3</sup> 地域再生計画（「コンパクトシティの推進加速化と地域資源エネルギー調査」）が 2016 年 8 月に政府により認定を受け、(株)エトリホールディングスからの企業版ふるさと納税による支援が決定したもの。

<http://www.city.yubari.lg.jp/gyoseijoho/shisakukeikaku/kihonkosokeikaku/chiikisaiseikeikaku.files/160802keikaku.pdf>

<sup>4</sup> 夕張市、株式会社レアックス、NPO の 3 者による「夕張 CBM 清陵-1 生産テストに係る協定書」に基づく。

## 2. 背景と目的

近年、地域分散型のエネルギー供給システムの重要性が指摘され、また二酸化炭素排出抑制の観点からも、太陽光や風力等の再生可能エネルギーの利用拡大が進められている。しかしながら再生可能エネルギーの利用拡大は、エネルギー供給の不安定さやエネルギーコストの増加に繋がる懸念も指摘されている。一方で、地域分散型のエネルギーの活用を目指す地方都市では、人口減少等による様々な課題を抱えている。

夕張市は、明治以降、石炭産業の活況と共に都市として発展したが、石炭産業の衰退、市政方針の転換（「炭鉱から観光へ」）及び財政破綻を経て、人口減少が急速に進み、最も人口減少率の高い都市となっている。そのような中、夕張市は、人口減少を前提としつつも市民が豊かさを実感できるまちづくりを目標に掲げ、2012年3月に「まちづくりマスタープラン」を策定し、市内の各地域の特性を生かしたまちの将来像を描きながら、地域の再生に取り組んでいる。炭鉱毎に形成され発達し、炭鉱閉山後、衰退・分散した集落の集約化を進める持続可能な地域社会（コンパクトシティ）の構築と、あらゆる地域資源を活用する地域振興を柱とするこの計画に基づく取組は、2014年5月に、政府により「地域活性化モデルケース」に選定され<sup>5</sup>、2015年1月には「地域再生計画」が認定されたことを受け、夕張市は、地域資源の活用により地域に電気や燃料を供給し、地域で消費する「エネルギーの地産地消」を目指し関連施策を推進することとしている。その地域資源の一つが、地下深部に未採掘で残された石炭層に含まれるCBMである。北海道の石狩炭田の資源量だけで我が国の天然ガスの可採埋蔵量に匹敵すると言われており、特に夕張地区はCBM開発の最有望地域として評価されている。

一般的にエネルギー資源の開発は、スケールメリットを生かすために大規模な開発が行われるが、夕張地域のCBM賦存区域はそのほとんどが山間部にあり、断層や褶曲等の地質構造も複雑で、大規模開発に適しているとは言い難い。また、環境破壊の懸念や資源枯渇後の事業撤退による地域への影響も大きい。しかしながら、小規模な開発により地域内のエネルギー消費に対応でき、地域内での資本循環が図られるローカルエネルギー供給システムを構築することで、環境負荷の少ない持続可能な地域貢献につながると考えられる。

### 2.1 CBM とは

---

<sup>5</sup> 夕張市ウェブサイト

<http://www.city.yubari.lg.jp/gyoseijoho/shisakuikaku/kihonkosokeikaku/chiikisaiseikaku.html>

CBM は非在来型天然ガスに分類され、一般にその大部分がメタンガスであり、天然ガスと同じように燃焼に伴う CO<sub>2</sub> や窒素酸化物、硫黄酸化物などの排出が少ないクリーンなエネルギーである。石炭が形成される石炭化の過程において、熱作用と微生物を起源とするメタンなどが生成されるが、CBM はそのメタンが石炭層外部に逸散することなく石炭に吸着した状態で留まっているもので、その包蔵量は瀝青炭で最も多いと言われている（図 2-1 参照）。また石炭には、図 2-2 に示すように生成時に形成されたクリートと呼ばれる亀裂網が発達しており、炭層内のガスの移動はこのクリートを通して行われる。通常クリート内は水で満たされており、石炭内に包蔵されるガスの大半はこのクリートに囲まれたマトリックスと呼ばれる組織内の細孔表面に吸着ガスとして存在している。従って、CBM を生産する場合には、一般的には炭層内の水を汲み上げることでクリート内の水を排出し、間隙圧を低下させ、石炭に吸着しているメタンを脱着させる必要がある。

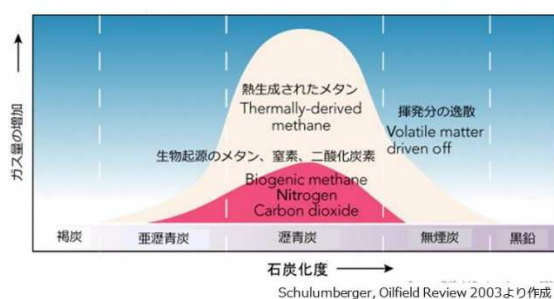


図 2-1 石炭化度とガス量

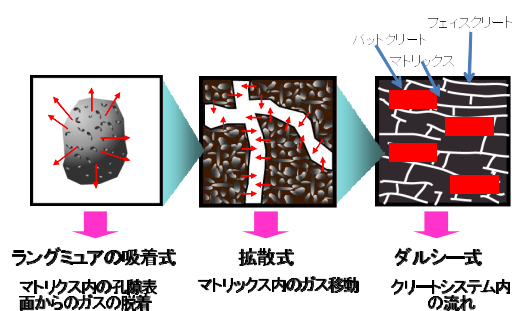


図 2-2 石炭層内のガスの挙動

## 2.2 夕張の CBM 資源量

北海道石狩炭田の CBM 資源量については、これまでいくつかの調査が行われているが、2009 年の北海道大学の報告<sup>6</sup>によれば、石狩炭田全体で約 400 億 m<sup>3</sup> の CBM 資源量が推定されている。この CBM 資源量は、我が国の天然ガス可採埋蔵量<sup>7</sup> (290 億 m<sup>3</sup>) を上回る量であることから、エネルギー資源の自給率向上を目指す我が国にとって無視できないものと考えられる。また、1998 年の NEDO の調査<sup>8</sup>では、図 2-3 に示すように、石狩炭田南部で清水沢・南大夕張区域と夕張西部区域（清水沢の西側）の二区域が CBM 有望区域として選定され、それぞれの区域の石炭埋蔵量や CBM 資源量等が報告されている。二区域合計での 77 億 m<sup>3</sup> という CBM 資源量は、夕張市全世帯のエネルギー消費量の 1,000 年分にも相当する量である。この調査では、石炭 1 トン当たりの CBM 包蔵量は平均 9.5m<sup>3</sup>/t とし

<sup>6</sup> 大賀 他：我が国の CBM 資源量と開発可能性、資源素材 2009, 札幌, 講演要旨集, A13-9, 2009

<sup>7</sup> 天然ガス鉱業会：石油・天然ガスノート, 2018

<sup>8</sup> NEDO：平成 9 年度海外炭輸入基盤整備促進調査・国内 CBM 資源調査可能性調査報告書, 1998

て CBM 資源量を算出しているが、南大夕張で実施された二酸化炭素炭層固定化技術開発（南大夕張 ECBM）のボーリング調査では、 $22\text{m}^3/\text{t}$  という CBM 包蔵量が実測されており、清水沢・南大夕張区域の資源量が更に多いことも推測できる。

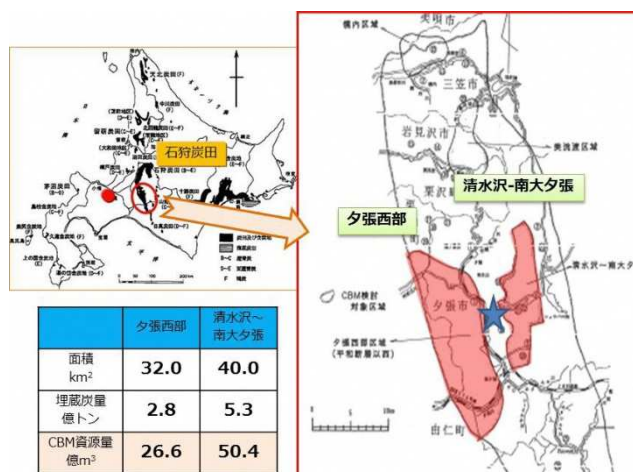


図 2-3 北海道の CBM 有望区域と CBM 資源量

### 2.3 CBM の生産と二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 炭層固定

図 2-4 に CBM の生産の概念を示す。図中左側は CBM の典型的な生産井を示しており、地表より対象とする炭層に坑井を掘削する。CBM は石炭生成時に生成した亀裂（クリート）に囲まれた石炭マトリックス内の孔隙内と表面に自由ガスや吸着ガスの状態で存在し、クリートを通して生産井を介して地表へと湧出するが、通常の方法では吸着している CBM 全てを回収することは難しく、回収率は数割程度であると言われている。一方で、図の右側のように隣接した坑井よりガス発電所等の排ガスから回収する二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) を圧入して貯留 (Carbon Capture and Storage, CCS) すると、CO<sub>2</sub> はメタンよりも石炭に吸着しやすいため、マトリックス内に吸着していたメタンが CO<sub>2</sub> に置換され放出され、生産井へと追い出される。これにより CBM の増産が図られ、回収率が大幅に向上すると同時に、CO<sub>2</sub> は石炭層に固定される。窒素 (N<sub>2</sub>) を圧入することでも原理は異なるが CBM の増産効果が認められる。このようにガス等を圧入し、CBM を増産する技術を ECBM (CBM の増進回収) と呼ぶ。こうした CO<sub>2</sub> による ECBM の試験は、2002 年～2007 年に経済産業省の補助事業として北海道夕張市で現場試験が行われた (南大夕張 ECBM)<sup>10</sup>。その結果、CO<sub>2</sub> の圧入による CBM の増産効果及び CO<sub>2</sub> の固定が可能であることが確認されたが、石狩炭田の炭層の浸透率は一般的に CO<sub>2</sub> の貯留が実施される帯水層の浸透率に比べ低いため、大

<sup>9</sup> 株式会社環境総合テクノス：二酸化炭素炭層固定化技術開発成果報告書, 2002

<sup>10</sup> 株式会社環境総合テクノス：二酸化炭素炭層固定化技術開発成果総括報告書, 2008

規模な火力発電所等から放出される大量の CO<sub>2</sub> の貯留には不向きであると考えられた。しかしながら、比較的小規模な発生源からの CO<sub>2</sub> の回収・固定を考えた場合、CBM の増産効果だけでなくゼロエミッション発電の可能性も見いだせることから、ローカルエネルギー供給としての CBM 開発にとっては有益な手段であると考えられる。

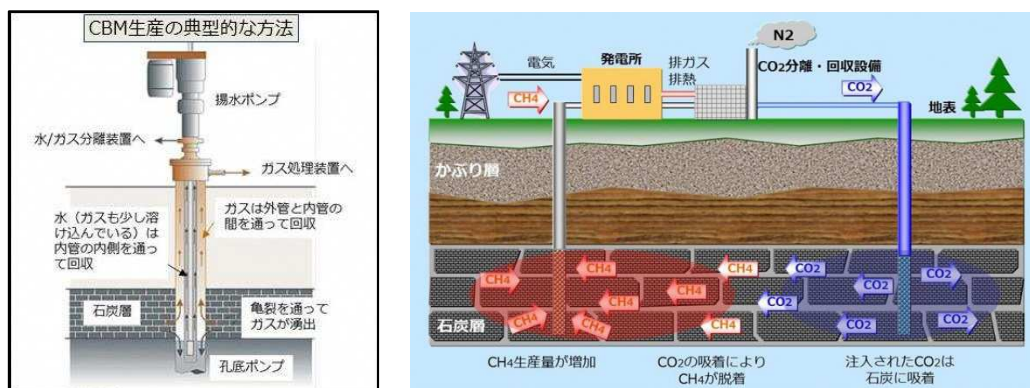


図 2-4 CBM 生産の典型的な方法 (左) と CO<sub>2</sub> 圧入による CBM 増産方法

## 2.4 地域エネルギーとしての CBM の活用

NPO は夕張市とも連携して、低炭素社会に対応した地産地消型のエネルギー供給システムの一つとして、CBM を活用したローカルエネルギー供給モデルを提言してきた。図 2-5 にその概念図を示す。このエネルギー供給モデルは、電力グリッドあるいは圧縮天然ガス (CNG) グリッドで構成される。

電力グリッドは CBM を発電プラントで電気に変換し、一般住宅、公共施設、商業施設、工場等各需要先等に供給する。また、発電プラントでは一部の発電装置をコージェネレーションとすることで、電・熱グリッドを介して発電プラント周辺の需要先に熱と電気の両方を供給することも可能である。電力グリッドには太陽光発電や風力発電等の再生可能エネルギーからの電力を連結し、天候や時間帯による発電電力の変動を CBM 発電による電力供給で調整することもできる。

CNG グリッドは、CNG プラントで CBM を高圧で圧縮してパイプラインや高圧ポンプ等により各需要先に供給する。電力と熱の需要が期待される集合住宅、公共施設、工場等にはガスエンジンや燃料電池等によるコージェネレーション設備の燃料として、その他 CNG 自動車の燃料、あるいは冷暖房の燃料としての利用などが考えられる。石炭層に圧入・固定する CO<sub>2</sub> の回収は、比較的小規模の大きな発電施設及び燃料電池用の CO<sub>2</sub> 分離型水素製造装置等からの回収が可能と考えられる。



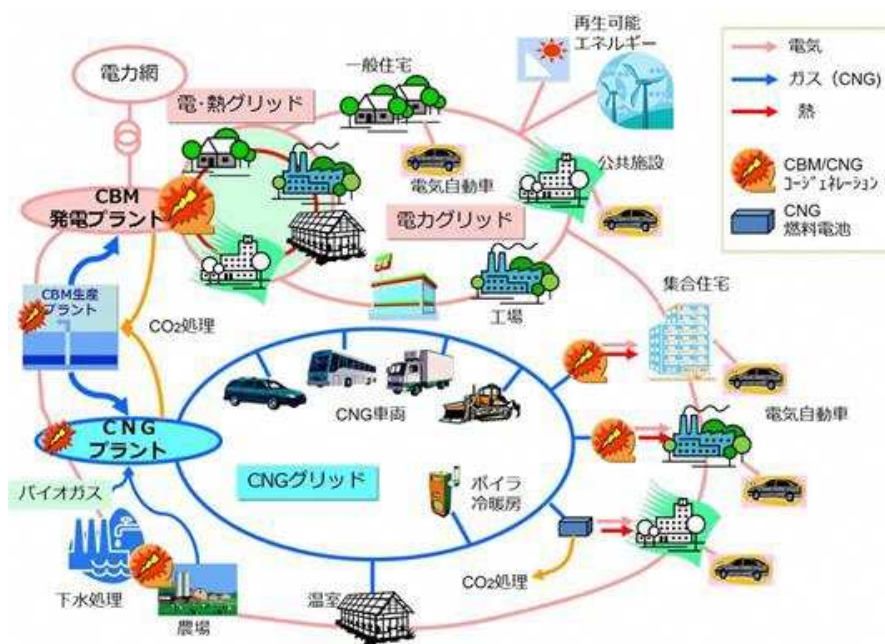


図 2-5 CBM によるローカルエネルギー供給モデル

夕張市は、「分散化する地域の集約化を進め、持続可能な地域社会の構築」と「地域資源を活用した地域振興」を柱とするまちづくりマスタープランを策定し、地域の再生に取り組んでいる。この取組が評価され、2014年5月29日には「持続可能な地域社会の構築と地域エネルギーの有効活用による元気創造への取組」として内閣府地方創生推進事務局より「地域活性化モデルケース」に選定され、2015年1月22日には地域再生計画「コンパクトシティと夕張再生エネルギー活用による元気創造への挑戦」として政府から認定を受けた。

未採掘で残されている石炭層に豊富に存在するCBMの活用については、ガス燃料としての利用のほか、発電やそれに伴う熱の利用が見込まれ、それらを公共施設、地域公共交通車両、地元企業や農家等に供給することで、地元企業の経営安定、地域雇用の安定、更には定住促進などの効果が期待されている。夕張市においては、CBMを含む地域資源を活用した「エネルギー地産地消」を、コンパクトシティの推進と連動させ、まちの価値を高める地域活性化の切り札として位置付けているところである。

## 2.5 CBM 開発計画

図2-6にCBM開発の行程を示す。図2-6の右側はCBMの商業生産に至る行程であるが、以下のような順に進められることが一般的である：

- ① 複数の調査井を掘削し、坑井試験、生産テストにより鉱区全体の資源量や生産性に係る基礎データを収集する。

- ② 鉱区全体の資源量や生産性を把握した後、採掘計画を立てる。
- ③ 採掘計画に合わせた生産モデルを構築し、長期的な生産性や経済性等のシミュレーションを行い、採掘計画を見直す。
- ④ 商業生産に向けた生産井の掘削や生産設備の建設を開始する。
- ⑤ 本格的な商業生産を開始し、地域での CBM 利用向けに供給を開始する。

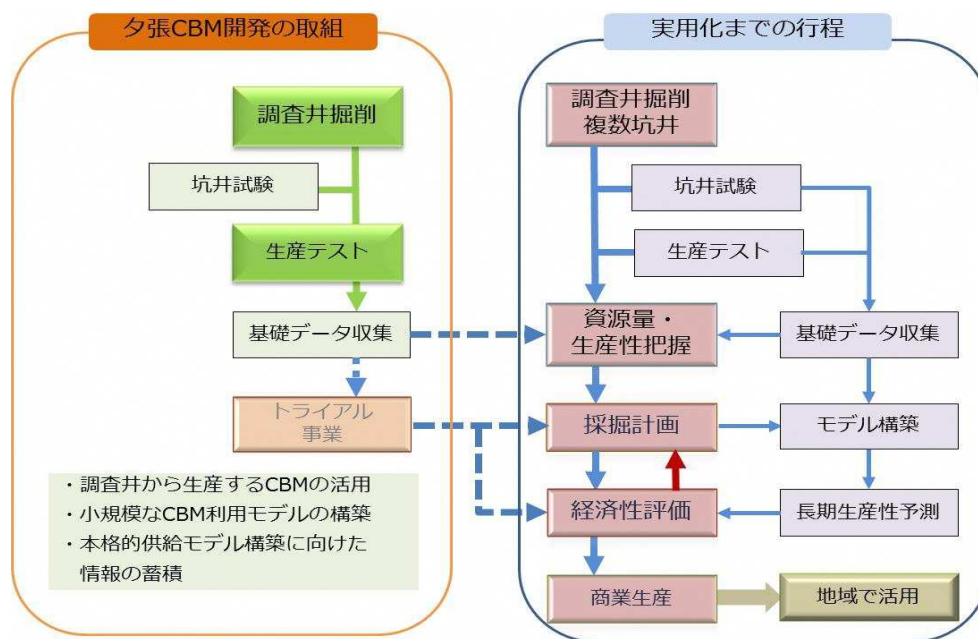


図 2-6 CBM 開発の行程

一方で、現時点では民間事業者が複数の調査井を掘削して調査に乗り出すには、大規模な投資を伴い、克服すべき様々な課題が残されている。まちづくりマスタープランにおいてその活用が期待されている商業ベースでの CBM ローカルエネルギー供給モデルを実現させるためには、予算や時間の制約を考慮し、まずモデル鉱区での単一調査井による生産ポテンシャルの確認や、その調査井を利用して長期に亘る生産テストを継続しつつ、地域エネルギーとしての地産地消の可能性を調査するためのトライアル調査事業を経て、本格的な CBM 開発事業へと移行していくことが望ましいと考えられる。これらの取組で得られる情報や経験・ノウハウは、将来の民間主導での CBM 開発の誘致やその開発行程に活かされることになる。

図 2-7 に当初実施を計画していたトライアル事業の一例を示す。トライアル事業は、調査井から生産される CBM の一部を活用し、CBM 生産テスト事業所内部やトライアル事業で消費する電力の供給、農業分野等でのコージェネによる電気と熱の供給・利用、CNG とし

ての自動車燃料やボイラ燃料の供給・利用などについての技術的・経済的な可能性を評価するものである。

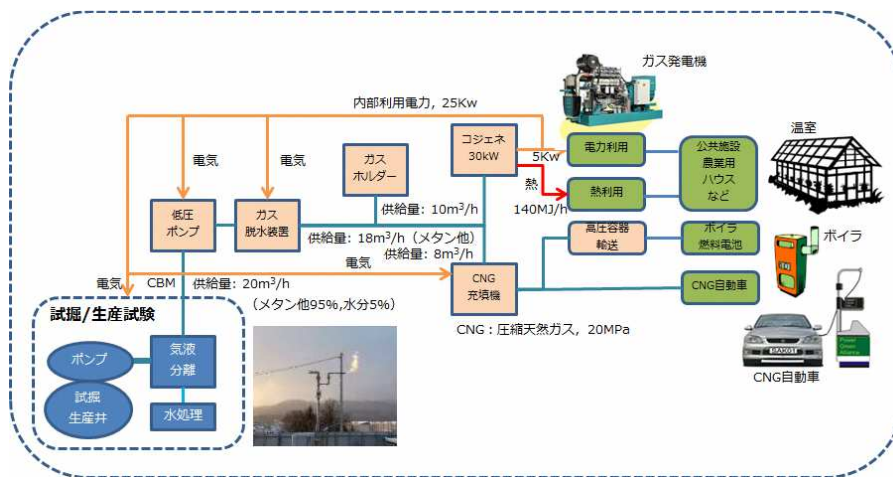


図 2-7 夕張市におけるトライアル事業の一例

### 3. CBM 開発への取組の経過

これまでの夕張市の CBM 開発に係る取組の経緯を表 3-1 に示す。2008 年 5 月の NPO 設立以降、NPO は CBM 開発の最有望地域である夕張を対象として、既存の情報収集、CBM 生産シミュレーションや経済性の検討を進め、地域に眠るエネルギー資源の地産地消をベースとしたローカルエネルギー供給モデルを各方面に提案してきた。また、夕張市はこの NPO の活動に呼応して、まちづくりマスタープランにおいて目標としたコンパクトで低炭素なまちづくりに向けて、地域資源の一つである CBM を活用する方策を模索してきた。2013 年 11 月に札幌市で開催されたエネルギーチャレンジセミナーは、民間資金による CBM 試掘事業の実施主体としてのコンソーシアムへの参加を呼びかけるもので、NPO や北海道大学からの CBM 開発についての説明の他、鈴木直道夕張市長からも「夕張市が目指すコンパクトシティと CBM への期待」と題して講演を行った。参加した企業の一部からはコンソーシアムへの参加の意向が示されたが、目標とする資金に到達することは難しく、民間資金での試掘事業は実現しなかった。

その後、夕張市の地域再生計画（コンパクトシティと夕張再生エネルギー活用による元気創造への挑戦）が政府により認定（2015 年 1 月）されたことを受け、CBM 開発の可能性を探るための試掘事業の実施に向けた国などからの具体的支援策の検討を行った。この過程において、CBM 資源量の調査と基礎データを収集する試掘事業と地域でのイノベーションサイクルを検証するトライアル事業（小規模な CBM 活用事業）の計画が策定され、夕張市における CBM 有効活用事業の実現に向けての取組が本格化した。その後、夕張市と民間企業、NPO との包括連携協定に基づき、2016 年 9 月には独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）の採掘現場技術支援事業の補助金を活用した調査井の掘削が開始され、2017 年 10 月には調査井を使つての CBM 生産テストが始まった。このテストは、北海道先進的エネルギー関連技術開発支援事業補助金を活用しており、厳冬期を含む 7 か月間に亘って実施された我が国では初めての本格的な CBM 生産テストであった。

生産テストでの CBM 生産量がトライアル事業を実施できる量には達していなかったことから、CBM の増産をもたらす坑井刺激策<sup>11</sup>を講じる計画も検討されたが、費用負担の課題が解決できず、実施は見送られた。また、調査井をそれ以上維持していくことは、保安管理面での市の負担を考慮すると現実的ではないとの判断から、生産テスト終了後、直ちに調査井を廃坑とすることが決められた。今回の調査井掘削や生産テストにより、多くの

<sup>11</sup> 貯留層の浸透率を向上させるために、高圧水（ウォータージェット）を用いて開口部を洗浄あるいは亀裂の開口を促す技術や、CO<sub>2</sub>や N<sub>2</sub>を圧入する技術など。

知見やノウハウを得ることができたが、それらについては第4章で述べる。

表 3-1 夕張 CBM 開発に係る取組の経過

年月	項目
～2013年	夕張市、NPO、北海道大学が連携して、夕張 CBM 開発に向けたモデルの構築、シミュレーションによる経済性の検討、各方面へのプロジェクトの提案等を継続。
2013年11月	エネルギーチャレンジセミナーを札幌市にて開催（NPO 主催、鈴木市長講演）：100 名程の参加者に向けコンソーシアムの設立を呼び掛け、民間資金による CBM 試掘事業の実現を目指す。予定調達資金に達せず計画を断念。
2014年2月	CBM 開発セミナーを夕張市にて開催（夕張商工会議所主催）：夕張市内の事業者、市民を対象に夕張 CBM 開発の概要説明。
2014年5月	夕張市の「持続可能な地域社会の構築と地域エネルギーの有効活用による元気創造への取組」が政府より「地域活性化モデルケース」に選定。
2015年1月	夕張市の地域再生計画「コンパクトシティと夕張再生エネルギー活用による元気創造への挑戦」が政府より認定。 CBM 開発に向けた各関係機関との事業費確保の調整。
2015年3月	夕張市民フォーラムを夕張市にて開催（夕張市主催）：夕張市民向けに夕張市の地域再生計画と CBM 開発の関わりについて紹介。
2016年4月	CBM 開発に向けた包括連携協定（夕張市、(株)レアックス、石油資源開発(株)、NPO）及び夕張 CBM 調査井掘削に係るパートナー契約（夕張市、(株)レアックス、石油資源開発(株)）を締結し、関係者間で調査井掘削仕様・調査内容等について検討。 石油資源開発(株)が夕張市清水沢に所有する試掘権を夕張市と(株)レアックスに無償譲渡した後、夕張市と(株)レアックスが事業主体（鉱業権者）となり当面の調査性掘削・調査を進めることに合意。
2016年9月	独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）の操業現場技術支援事業他の制度を活用して、調査井（夕張 CBM 清陵・1号井）掘削・調査開始
2016年12月	調査井掘削・調査終了
～2017年4月	調査井一次休止、保安巡回のみ継続
2017年4月	夕張 CBM 清陵・1 生産テストに係る協定書（夕張市、(株)レアックス、NPO）：夕張市と(株)レアックスが事業主体となり生産テストを実施し、NPO が技術的な支援をすることで合意。
2017年4月	坑井内状況調査実施（湧水量・水質調査、ボアホールカメラによる坑井内状況観測などの調査）。 生産テストの仕様検討。
～2017年9月	調査井一次休止、保安巡回のみ継続。
2017年10月	北海道先進的エネルギー関連技術開発支援事業他の資金により CBM 生産テスト開始。
2018年4月	調査井からの CBM 生産量はトライアル事業の実施には不十分であると判断。トライアル事業への移行は行わず、5月末の生産テスト終了と調査井の廃坑を決定。
2018年5月	CBM 生産テスト終了。廃坑作業完了。
2018年10月	夕張 CBM 開発の取組の実績・成果・今後の展望等を取りまとめた報告書作成。

#### 4. 調査井掘削・生産テストの実績

調査井の掘削は、従来の主に石炭層の厚さによる評価<sup>12</sup>では最良のポテンシャルが期待される位置ではないものの、今後の地元での効率的なガス利用を勘案し、夕張市が将来の都市拠点と位置付けている清水沢地区、その中でも清陵地区を選定して実施することとした。図4-1に調査井掘削及び生産テストの全体工程を示す。本事業は鉱業法と鉱山保安法に則り実施する必要があるため、2016年4月から北海道経済産業局ならびに北海道産業保安監督部への申請や対応を開始した。5月に掘削位置の地質調査を実施し、掘削設備の据え付けに問題がないことを確認した後、関係機関の認可を待って8月に敷地の整地他の工事を行い、9月から掘削装置を設置して掘削工事を開始した。11月末には予定深度までの掘削を完了し、その後坑井仕上げ、パーフォレーション<sup>13</sup>によるガンパー孔<sup>14</sup>の穿孔、圧入テスト等を実施して一旦調査井を閉じた。

2017年4月には、生産テストの実施に向けて排水ポンプの容量決定や排水処理計画を立てるためにエアリフト法により揚水試験を実施した。また併せて坑井内の状況を確認するために、ガンパー孔区間を中心としてボアホールカメラによる画像観察も行った。

その後、生産テストの計画立案、生産設備や観測機器の準備等の期間を経て、10月より生産テストを開始し、2018年5月までのおよそ7か月間生産テストを継続した。この間、調査井から湧出するCBMの量がトライアル事業で使用するに十分な量に達することはなかったことと、CBMの増産を目的とする坑井刺激対策の実施に向けた費用確保の目途が立たないため、それ以上の調査井の運用を断念し、2018年5月末に調査井の密閉工事を伴う廃坑措置を講じ、試験用地の原状復帰を完了した。

以下、個別の業務ごとにその実績について述べる。

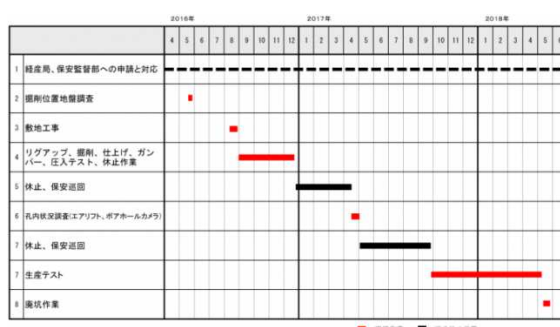


図4-1 調査井掘削及び生産テスト全体工程

<sup>12</sup> NEDO：平成9年度海外炭輸入基盤整備促進調査・国内CBM資源調査可能性調査報告書、1998

<sup>13</sup> 坑井仕上げ時、生産層から油・ガスが坑井内に流入できるよう、ケーシングとその外側のセメントを貫いて生産層に達する孔を開ける作業。

<sup>14</sup> ガン・パーフォレーション孔の略。

#### 4.1 調査井掘削

調査井は夕張市清水沢清陵町の旧清陵小学校跡地で掘削した。図 4-2 にその掘削位置と掘削作業の状況を示す。また、掘削の主な仕様を表 4-1 に示す。掘削作業は当初 40 日（物理検層・仕上げ除く）を予定していたが、岩盤が予想より硬かったことなどから、最終的には 70 日を要した。掘削作業に際しては、事前に保安教育や勉強会を開催し、作業員全員への安全作業意識向上を図ると共に、近隣住民への安全・環境配慮として以下の事を徹底した。

- ① 防音対策（防音壁の設置の他、コンプレッサー等の個別機器への防音対策）
- ② 住民への聞き取り（夕張市対応）
- ③ 立入り禁止の囲い設置
- ④ 保安教育（町内徐行、現場侵入時の注意など）

また、以下の対策を徹底することで、無事故・無災害での作業完了を目指した。

- ① 保安教育と作業内容の徹底
- ② 新規入場者教育
- ③ 毎朝の KY（危険予知活動）
- ④ 重要な作業前の作業手順確認会議の実施
- ⑤ 保安管理者と現場監督による巡回（巡回日誌の記載）
- ⑥ 経産省産業北海道産業保安監督部との連携（鉱山保安法の順守、資料の提出、保安検査 3 回）
- ⑦ 防犯監視カメラ 4 台及び監視システムを利用した保安面の強化

その結果、近隣住民との大きなトラブルもなく、無事故・無災害にて作業を完了させることができた。

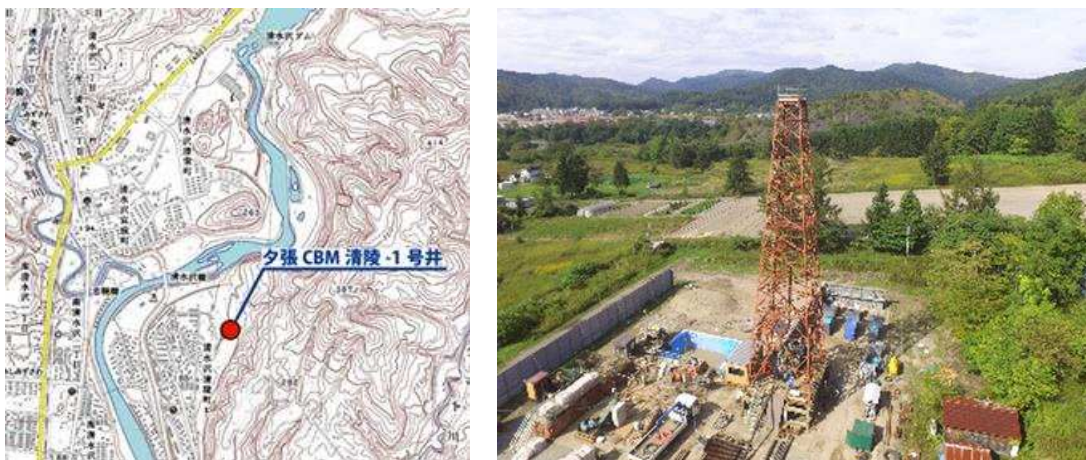


図 4-2 調査井掘削位置（左）及び調査井掘削現場の状況（右）

表 4-1 調査井掘削の主な仕様

項目	仕様
鉱区番号	石狩国試掘権登録第 15421 号
鉱業権者	北海道夕張市（代表）、株式会社レアックス
坑井名	夕張 CBM 清陵-1
掘削位置	夕張市清水沢清陵町 39（旧清陵小学校跡地）
掘削作業期間	2016 年 9 月～11 月
掘削装置	TSL-1D（東和利根社製）1,200m級
やぐら	4 本脚鉄製（ボルト接続）スタンダード型 高さ 28m 耐風圧 40m/sec
泥水	ベントナイト泥水
予定掘削深度	950 m
孔径（インチ）	～21m 17-1/2（ケーシング 14） 21～392m 12-1/4（ケーシング 9-5/8） 392～944m 8-1/2（ケーシング 5-1/2）
坑井仕上げ	全区間フルセメンチング・開発炭層部（計 10m 区間）のみガンパー孔
確認主要炭層	夕張層（上層、6・8 尺層、10 尺上層、10 尺層、10 尺下層）
コア採取	夕張層上層（677.42～678.42m）
主要調査項目	坑井地質調査（カッティングス <sup>15</sup> による） 物理検層（石炭地層評価：比抵抗・音波－ガンマ線検層、傾斜孔径） 石炭コア採取・ガス包蔵量調査（夕張層上層 677.42～678.42m 区間） 圧入テスト（貯留槽圧力・石炭層浸透率評価のためのデータ採取）

### （1）坑井地質調査

調査井の地質は、周辺で過去に掘削された探査ボーリング（清水沢-12 号）の結果等から判断し、地表から幌内層（～390m）、幾春別層（～460m）、若鍋層（～660m）、夕張層（～860m）、幌加内層（～950m）と予想されていた。調査井の掘削中は、地表部から坑底まで数 10cm～10m 毎にカッティングスを採取し（当初仕様では 600m 以深 10m 間隔でサンプリング）、カッティングス調査（洗浄、実体顕微鏡による観察等）を実施して岩相を評価した。石炭層に関してはカッティングスサンプルを完全採取し、詳細な炭層情報（深さやガスによる発泡状況）を得ることに努めた。採取した石炭層カッティングスの一部はロックエバル分析<sup>16</sup>による各石炭の熟成度の推定に使用したが、その他はサンプルとして掘削完了後も保管されているので、今後の CBM 開発時に比較標本として活用することができる。

また、600m 以深の掘削作業中、マッドロギング（泥水検層）を実施した。マッドロギングは、掘削に使用する泥水流路に配置する各種センサにより、泥水に含まれるガス量、掘進率、送水量、泥水タンク量、ラグタイム（孔底から地表まで泥水が上昇する時間）など

<sup>15</sup> 坑井掘削時に、ビットによって掘り起こされた岩石の小片のこと。

<sup>16</sup> ロックエバル分析装置は石油開発産業で用いられる特殊な装置で、根源岩の熱分解傾向や生成物から有機物タイプ（油生成・ガス生成）や熟成度を推定することが可能。



の項目を自動計測できるもので、これらの情報から石炭層の存在、逸泥の有無、掘削の状態、地層の硬軟を把握することができた。

物理検層は、主に石炭層の位置を把握する目的で、590m 以深で比抵抗・音波・ガンマ線検層を実施したが、その他、セメンチング作業に資する目的で 390m 以深の孔径計測や孔傾斜計測、更にはセメンチング作業終了後には 5・1/2 インチケーシングの外側のセメンチング状態を評価するためのセメントボンドテストも実施した。比抵抗・音波・ガンマ線検層では、石炭層が比抵抗値の上昇、音波速度のスパイク状変化、ガンマ線の低下により判断できる（図 4-3 参照）。

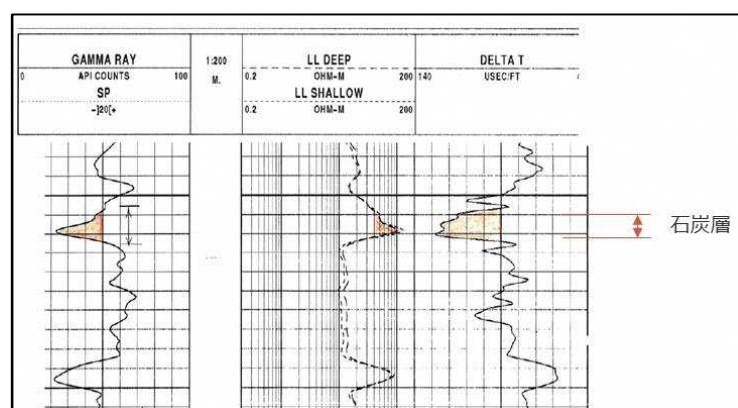


図 4-3 物理検層結果の一例（左からガンマ線、比抵抗、音波）

これらの結果から、調査井ではほぼ過去の試錐で得られた結果と同じ層序が確認でき、生産試験の対象となる夕張層において、上位に上層群（合計炭丈 2.8m）、中位に 6・8 尺層（合計炭丈 1.9m）、下位に 10 尺上層、10 尺層、10 尺下層（合計炭丈 5.0m）の各層を特定することができた。この調査井付近では、周辺の炭鉱で確認されている平安 8 尺層は確認できず、この炭層は薄化・尖滅しているものと考えられる。図 4-4 に今回の調査結果から推定した本調査井を通る地質断面図を、図 4-5 に確認できた夕張層の石炭層の柱状図を示す。

最終的に夕張層の下位に存在する三枚の炭層（10 尺上層、10 尺層、10 尺下層）を生産テストの対象炭層とすることとしたために、掘削終了後、ケーシングと坑井壁面との間を比重 1.6~1.85 のセメントスラリーで全て充填し（セメンチング）、その後生産テストの対象とする石炭層の区間にケーシング及びセメンチング層を貫通するガンパー孔を特殊な爆薬を使用して穿孔した（パーフォレーション）。ガンパー孔は三区間に分けて（図 4-5 参照）施工したが、合計で 10m の区間に 200 個の孔を穿孔した。これらの処置により、対象石炭層以外の地層区間から調査井への湧水等が遮断されると同時に、対象石炭層区間との連結が確保できる坑井仕上げとした。

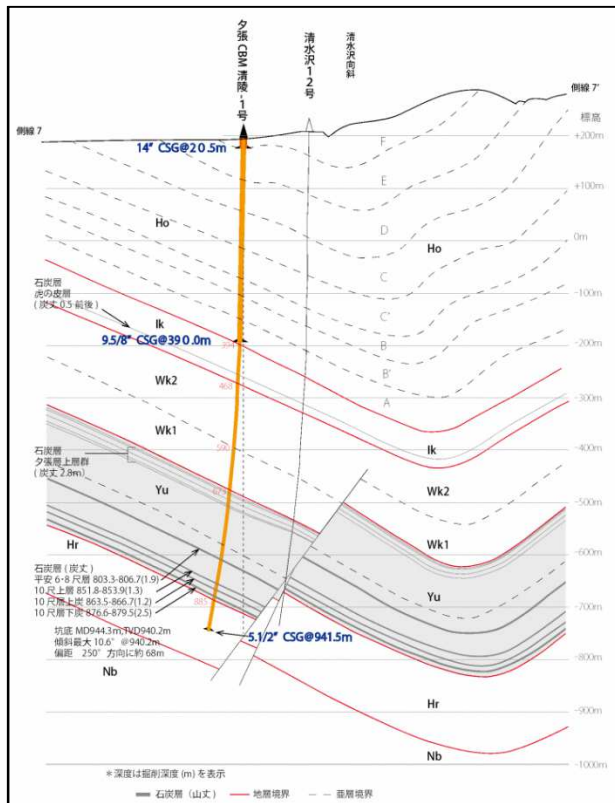


図 4-4 地質断面図(北東-南西断面)

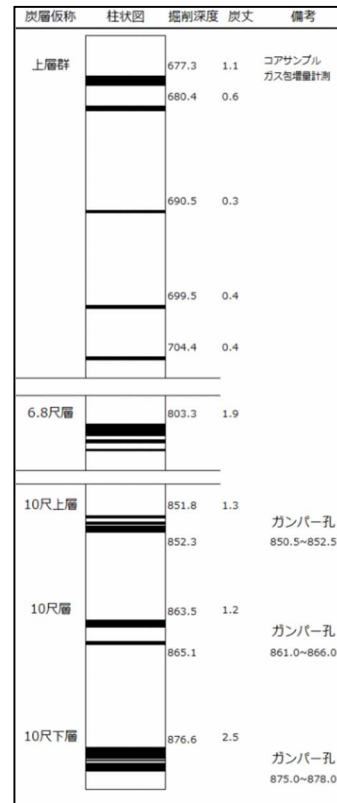


図 4-5 出現した石炭層(夕張層)

## (2) 石炭コア採取とガス包蔵量調査

本調査井では、石炭コアの採取(3m 区間×1回)を計画した。夕張層の中位より深い位置に存在する10尺層を採取対象とすることが適切であると考えられたが、断層等の影響でそれらの炭層が出現しないリスクもあったため、夕張層に入って最初に出現した炭層(後に上層と特定)でコア採取を実施した。この炭層に到達した直後のカッティングス調査やマッドロギングではガスの兆候も認められたので、ガス包蔵量調査対象の炭層としても適切であると判断した。図4-6に回収した石炭コアを示す。コア掘削は3mの予定であったが、途中コアチューブの詰まりのために掘削不能となったため、掘削長1.03mとなった。回収されたコアの長さは、一部が流出していたために0.85m(回収率80.9%)であった。

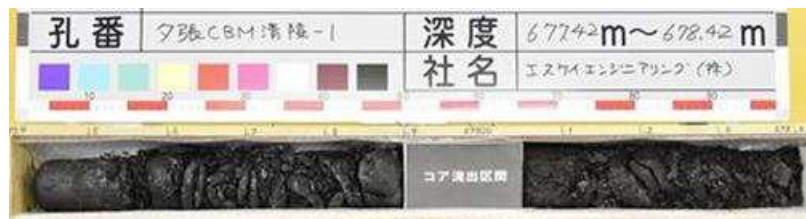
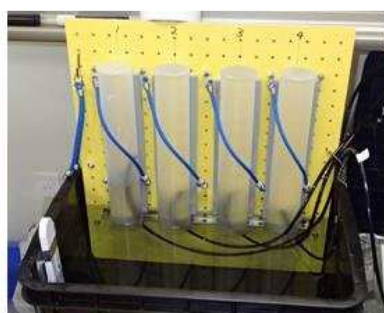


図 4-6 回収された石炭コア

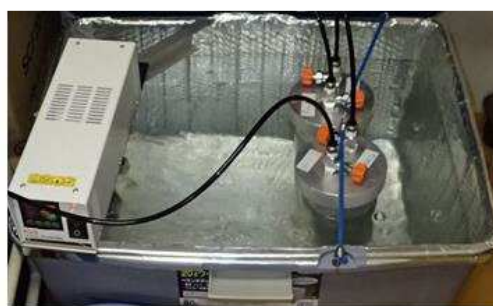
この石炭コアを用いてガス包蔵量を測定した。ガス包蔵量 (cc/g) は以下の式で求めた：

$$\text{ガス包蔵量(cc/g)} = [\text{脱着ガス量(cc)} + \text{損失ガス量(cc)} + \text{残存ガス量(cc)}] / \text{試料乾燥重量(g)}$$

石炭に吸着されているガスは、大気圧下に解放されると、急激に脱着し放出されるので、可能な限り速やかにバブル付き密閉容器（図 4-7 右参照）に入れ、その後、採取箇所の推定温度（30℃）に設定した恒温槽にて管理し、コアサンプルから脱着するガス量を水上置換法にて計測した（図 4-7 左参照）。計測開始から 3 時間までは 10 分間隔で、その後は徐々に計測間隔を長くし、放出ガス量に変化しなくなるまでおよそ 2 週間計測を継続した。図 4-8 にその計測結果を示すが、ここで計測されたガス量を脱着ガス量と呼んでいる。



水上置換による脱着ガス量の計測



キャニスターと恒温槽

図 4-7 ガス包蔵量計測装置

損失ガス量とは、石炭コアが切削されて地表まで運ばれ、容器に密封されるまでに放出されたガス量で、実測することは難しい。損失ガス量を推定する方法として、図 4-9 に示すように、実測した脱着ガス量を横軸が時間の平方根で表したグラフにプロットし、計測当初の直線部分の傾きをガス脱着の開始時間（脱着ガスの計測開始までに要した時間：損失時間）まで延長して求める方法がある。今回のケースでは、損失時間をコア切削から容器密封までに要した時間の 1/2 として求めた。

残存ガス量は、大気圧下では脱着することなく石炭に吸着しているガス量のことと、本来は脱着ガス量を計測した石炭試料を密閉型の粉砕機で細かく粉砕し、真空ポンプでガスを吸引することで求めるが、これまでの様々な調査により、残存ガス量は脱着ガス量と損失ガス量の和の概ね 5%程度であることが分かっているので、今回の調査では実測せずこの値を用いて計算で求めた。

最後に用いた石炭試料の重量と含水比を測定し、石炭の乾燥重量を求めて上記の式よりガス包蔵量を求める。今回の場合、ガス包蔵量は 9.6 (cc/g または m<sup>3</sup>/t)であった。この値

は、NEDOが実施したCBMの調査で用いられた石狩炭田の平均的な炭層のガス包蔵量(9.5 cc/g)<sup>17</sup>の値にほぼ等しいが、南大夕張でのECBM調査で実測された22(cc/g)<sup>18</sup>と比べると低い値であった。ただし、今回の計測は夕張層の上層についての値であり、下位の10尺層や10尺下層ではカッティングスの発泡状態(図4-10参照)がより良好であったことや、一般に深部に行くほどガス包蔵量が増加する、あるいは南大夕張の計測結果が夕張層下層(炭鉱により炭層の呼び方が異なるが本調査井の10尺下層に対応する)の結果であったことなどを考慮すると、生産テストの対象とした炭層では9.6(cc/g)より大きなガス包蔵量が期待できる可能性はある。

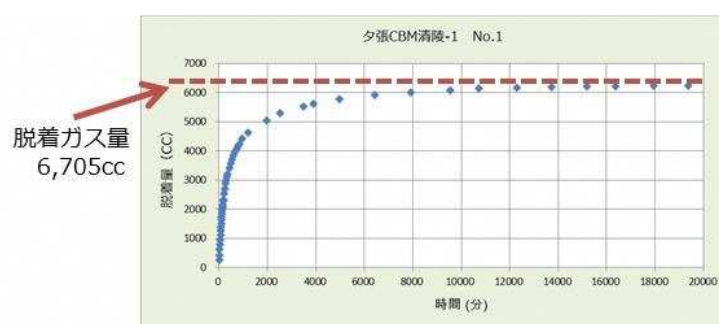


図4-8 脱着ガス量計測結果

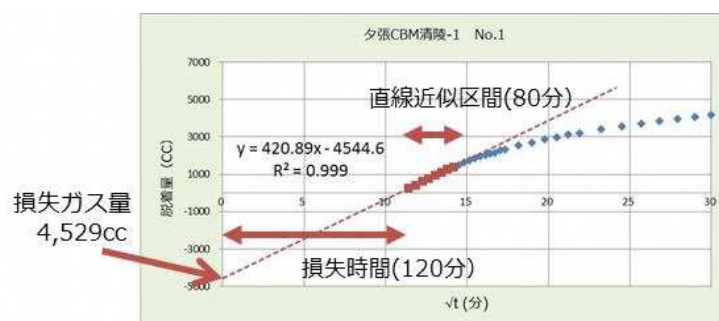


図4-9 損失ガス量推定結果



図4-10 採取されたカッティングスの発泡状態

(泥水混じりのカッティングスはガス発泡により体積が増加している)

<sup>17</sup> NEDO：平成9年度海外炭輸入基盤整備促進調査・国内CBM資源調査可能性調査報告書, 1998

<sup>18</sup> 榊環境総合テクノス：二酸化炭素炭層固定化技術開発成果総括報告書, 2008

### (3) 圧入テスト

石炭層の貯留層としての特性と生産性を評価し、また生産テストの仕様検討に必要なデータを取得することを目的として、対象炭層区間に対して多段レートでのブライン（塩水）圧入試験とフォールオフ試験を実施した。

ブライン圧入試験は、圧入性が低いと予想されたことから、低流量での圧入が可能なエア駆動ポンプを使用し、テスト対象である石炭層を破壊しない圧力で実施した。当初、掘削時のテストで得られたリークオフ圧力の70%（坑口で1.63MPa、坑底で11.58MPa）として3段階の多段レートによる圧入を計画したが、圧入性が非常に低いためにポンプの下限レート付近での圧入でなければポンプ圧の上昇傾向が続いたことから、平均で211ℓ/d及び134ℓ/dの2段階レートでの試験となった。本試験は合計で22時間15分間実施し、累計圧入量は189.6ℓであった。ブライン圧入試験の後、坑井をシャットイン状態にし、圧力のフォールオフ試験を実施した。シャットインは25時間行い、坑内に設置したスリックラインツールズを用いて坑底圧力及び坑内温度を測定・記録した。

図4-11に実施した圧入テストの記録を示す。また、これらの結果を解析した結果、表4-2に示すような貯留層に関する種々のパラメータを評価することができた。ガス湧出量に影響する重要な指標である浸透率は0.195 md という値であったが、この値は夕張地区での一般的な石炭層の値と考えられている1.0 md を大幅に下回る低い値となった。ちなみに南大夕張のECBM調査では、0.93~1.66 md という浸透率が評価されている。また、スキnfアクターの-0.37 という値は、調査井近傍での地層のダメージは確認されないことを示している。さらに、圧入指数から予想される地層水の湧水レートは、1日当たり最大でも1kℓであり、非常に排水性が悪いことが予想される結果となった。

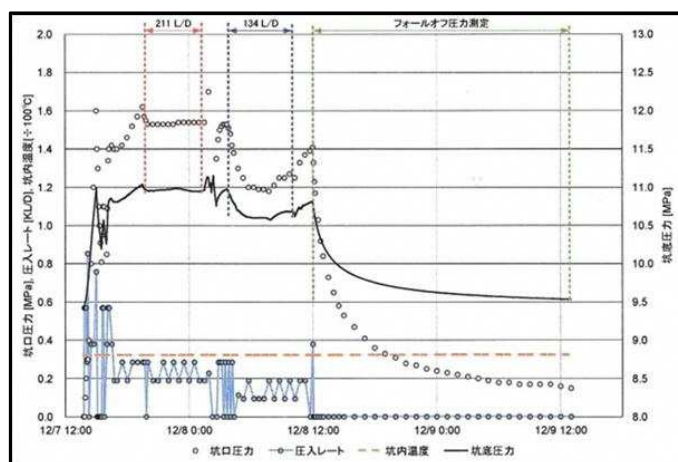


図4-11 圧入テストの記録

表 4-2 圧入テストで評価した石炭層の主要パラメータ

パラメータ	単位	値
貯留槽圧力	MPa	9.39
坑底温度	℃	32.3
浸透率	md	0.195
スキんファクター		-0.37
圧入指数	kℓ/d/MPa	0.12
最大湧水レート	kℓ/d	1.0

#### 4.2 坑内状況調査

調査井（夕張 CBM 清陵-1）での生産テストに先立ち、生産テスト実施時の揚水量を推定する目的で、エアリフト法による揚水テストを実施した。この際に採取した石炭層から湧水したと考えられる地層水を採水し、水質汚濁防止法に基づく水質分析を実施して生産テストにおける排水処理計画を立てるための基礎データとした。さらに、調査井のガンパー孔より深い位置に揚水ポンプを設置することから、坑井内部の状況を確認する目的でボアホールカメラによるケーシング内壁面の調査を実施した。以下にその概要を述べる。

##### （1）揚水テスト

揚水テストは、エアリフト法により実施したが、図 4-12 にその概念図を示す。エアリフト法では、坑底近くまで挿入した揚水管の途中にエア管によって圧縮空気を送り込むことで、揚水管内部の水頭圧が低下し、揚水管の外側と内側に差圧が生じる。その結果坑内水が地表に押し上げられる。

今回の揚水テストでは、第一段階としてエア管を深度 202.5m に設置し、第二段階では 505.5m に設置して、圧縮空気を送り込むコンプレッサーの圧力が安定した以降の揚水量を計測した。それらの値から、生産テストを実施する際の深度 900m まで水位を下げた状態での揚水量（石炭層からの湧水量）を試算した。第一段階ではコンプレッサーの稼働開始から 2 分後には排水を確認でき、50 分後からコンプレッサーの圧力が 0.79MP で安定する傾向を示した。第二段階では、14 分後に排水を確認し、240 分後から 1.36MPa 付近で安定化した。第一段階及び第二段階での平均揚水量の値と、これらの値を用いて計算で求めた 900m まで水位を下げた場合の推定揚水量を表 4-3 に示す。その結果、生産テスト実施時の推定平均揚水量は 0.19ℓ/分（273.6ℓ/日）で、試錐井の圧入テストの結果から予想された湧水量（1,000ℓ/日）の 1/3 以下と少ない値となった。このことは、調査井での圧入テスト実施後 5 か月が経過したことで、ガンパー孔あるいはその周辺の石炭層の亀裂に粉炭や坑内水の汚濁物質が詰まったことが影響しているとも考えられる。

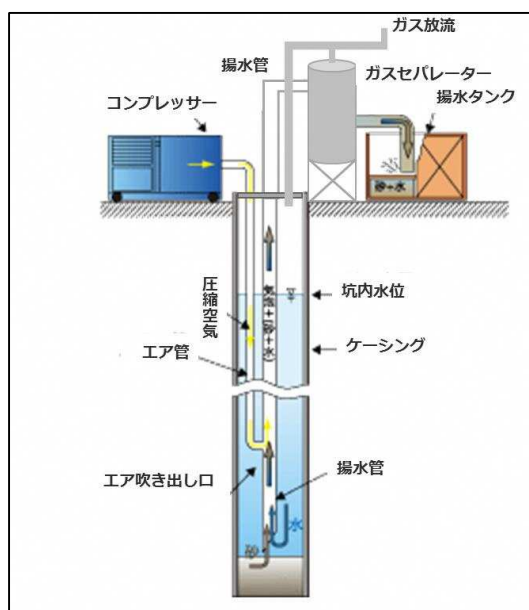


図 4-12 エアリフト法による揚水テスト概念図

表 4-3 揚水テストより求めた平均揚水量と生産テスト時の揚水量推定値

	換算水位 <sup>19</sup> m	水位安定後の平均揚水量 ℓ/分 (ℓ/日)
第1段階	-123.5	0.04 (57.6)
第2段階	-369.5	0.10 (144.0)
生産テスト時推定値	-900.0	0.19 (273.6)

## (2) 地層水の水質分析

水質分析の結果、基準値を超過した項目は、「水素イオン濃度 (pH)」と「浮遊物質 (SS)」の2項目であった (表 4-4 参照)。水素イオン濃度 (pH) は 9.5 とアルカリ性を示したが、この値は、一般的な夕張層の地層水とは考えにくい。揚水量が少ないために、エアリフト時に空気に触れることにより発生した酸化鉄の沈殿物などに大きく影響された可能性がある。また、浮遊物質 (SS) は流体内の濁質度を表す数値で、200mg/L の排出基準に対し、300mg/L であったが、坑内の沈殿物の影響が大きいと考えられることから、生産テスト実施時には再度水質分析を実施し、必要な対策を講じる必要があると考えられる。一方で、重金属や所謂有害物質は含まれていないことから、特別な水処理対策を講じる必要はなく、清水で希釈後放流することで対応可能であることも明らかとなった。

<sup>19</sup> コンプレッサーの圧力が安定した値から求めた坑内水位。

表 4-4 水質分析結果

計量の対象	JE90051			
	1号井原水 H23.4.24	定量下限値	抽出基準	
水素イオン濃度(pH)	9.5(9.7)	-	5.8~8.6	
生物化学的酸素要求量(BOD)	10	1	100	
化学的酸素要求量(COD)	96	0.1	100	
浮遊物質量(TSS)	31.0	1	200	
ホルムルヘキサン抽出物質量(総抽出)	<1	1	5	
ホルムルヘキサン抽出物質量(個別抽出)	<1	1	30	
フェノール類含有量	<0.5	0.5	5	
銅含有量	0.02	0.01	3	
亜鉛含有量	<0.01	0.01	2	
溶解性鉄含有量	0.55	0.01	10	
溶解性マンガン含有量	<0.01	0.01	10	
クロム含有量	<0.01	0.01	2	
大腸菌群数	<1.3	-	-	
窒素含有量	15	0.5	120	
リン含有量	0.12	0.05	16	
カドミウム及びその化合物	(Cd)	<0.005	0.005	0.03
シアン化合物	(CN)	<0.1	0.1	1
有機リン化合物	(Or-P)	<0.1	0.1	1
鉛及びその化合物	(Pb)	<0.01	0.01	0.1
六価クロム化合物	(Cr+6)	<0.01	0.01	0.5
砒素及びその化合物	(As)	<0.01	0.01	0.1
総水銀	(T-Hg)	<0.0001	0.0001	0.005
メチル水銀化合物	(M-Hg)	<0.0001	0.0001	検出されないこと
ポリ塩化ジブフェル	(PCB)	<0.0001	0.0001	0.003
トリクロエチレン		<0.001	0.001	0.1
テトラクロエチレン		<0.001	0.001	0.1
ジクロロメタン		<0.001	0.001	0.2
四塩化炭素		<0.001	0.001	0.02
1,2-ジクロロエタン		<0.001	0.001	0.04
1,1-ジクロロエチレン		<0.001	0.001	1
シス-1,2-ジクロロエチレン		<0.001	0.001	0.4
1,1,1-トリクロロエタン		<0.001	0.001	3
1,1,2-トリクロロエタン		<0.001	0.001	0.06
1,2-ジクロロプロパン		<0.001	0.001	0.02
チグム		<0.005	0.005	0.05
シマジン		<0.005	0.005	0.03
チオベンカルブ		<0.02	0.02	0.2
ベンゼン		0.005	0.001	0.1
ゼレン及びその化合物		<0.1	0.1	0.1
フタル酸及びその化合物	(F)	<0.3	0.3	8
ボツ酸及びその化合物	(B)	0.25	0.01	10
1,4-ジオキサン		<0.05	0.05	0.5
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		2.9	0.5	100

(2) ボアホールカメラ調査

調査に使用した BIP-V システムの構成図を図 4-13 に示す。このシステムは、現場システムと室内システムからなる。現場システムは、ボーリング孔内に挿入するプローブ、ノートパソコン、ウィンチ、深度カウンターなどで構成されている。室内システムは、Windows パソコン、デジタルビデオカメラ、ハードディスクレコーダーおよび専用解析ソフトウェアなどから構成される。なお、BIP-V システムは観察深度により 300m 級と 1500m 級があるが、本業務では 1,500m 級のアーマードケーブルウインチ架装検層車を使用した。プローブには「ライブビデオプローブ」を採用した。ライブビデオプローブは DVS (Dual-mode Video System) プローブと呼ばれ、前方視カメラと側方視カメラの組み合わせにより孔内を詳細に撮影・観察できるものである。



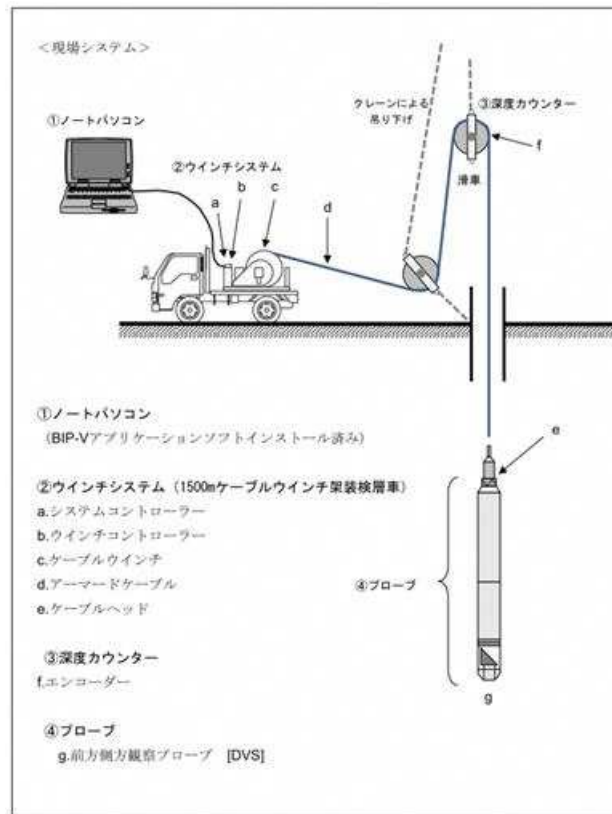


図 4-13 ボアホールカメラ (BIP-V) システムの構成図

ボアホールカメラ調査は、特に揚水ポンプ挿入の障害になるようなケーシングの損傷や変形が生じていないかを確認するために実施した。ガンパー孔を施工した区間では、画像上でガンパー孔の開口状態や貫通径を測定した。観察結果の概要図を図 4-14 に示す。観察結果からは次のようなことが明らかとなった：

- ① 観察開始時の坑内水位は深度 75.17m (管頭基準) であり、水面には赤褐色浮遊物や気泡が確認された。
- ② ケーシング区間や繋ぎ目に顕著な損傷等は認められなかった。
- ③ ガンパー孔は設計区間とほぼ一致する区間で確認できた。
- ④ ガンパー孔区間では、坑井内壁に豆状の損傷痕跡が多く認められたが、これはガンパー孔の施工影響によるものと思われる。
- ⑤ 観察したガンパー孔には地層まで到達していない、あるいは孔の中の表面が「鏽や泥」で覆われたように見えるものが全体の 3 割程度見られた。残りの 7 割は、ガンパー孔が黒く見えることから、孔の径に大小はあるものの石炭層まで到達しているものと思われる。

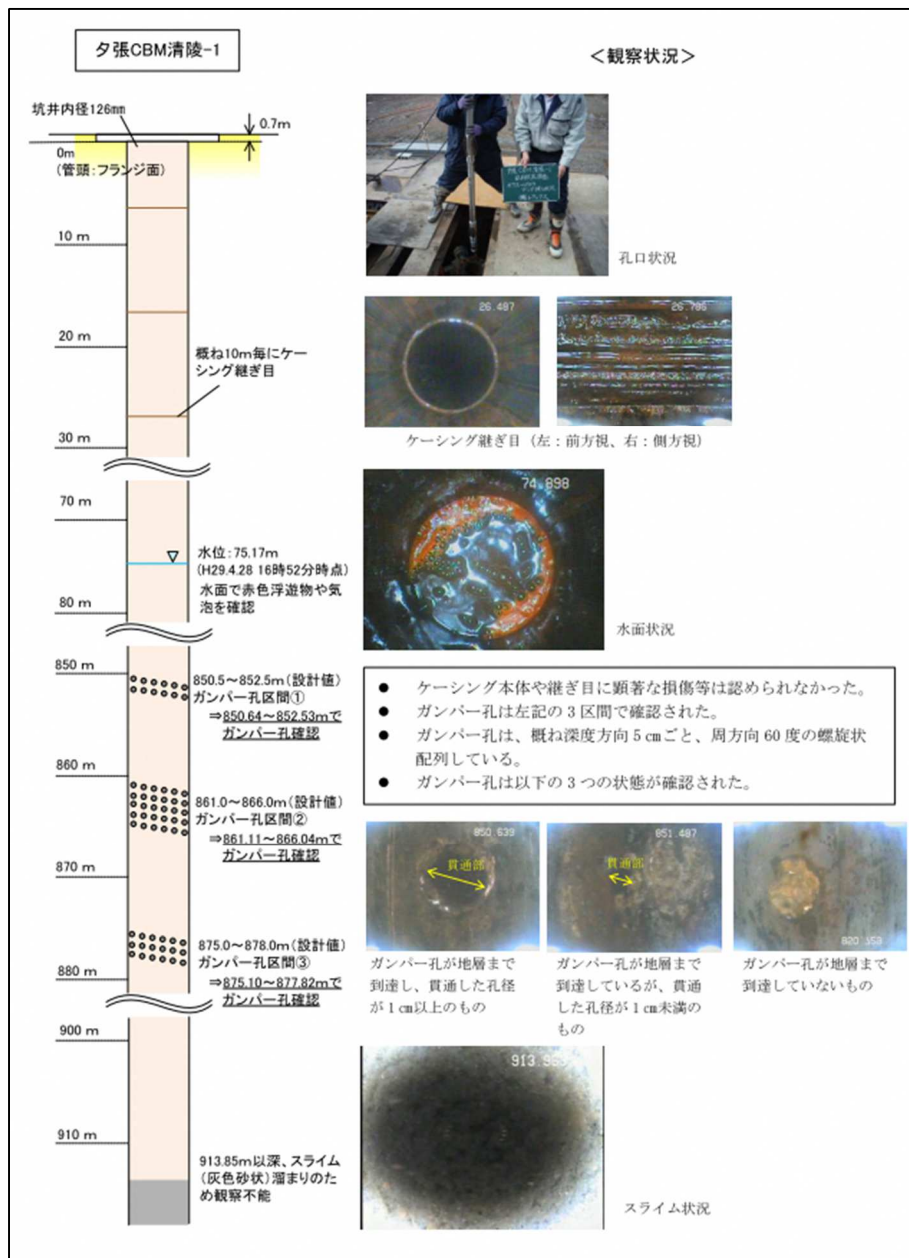


図 4-14 ボアホールカメラ観察結果概要図

### 4.3 生産テスト

まちづくりマスタープランにおいて、その活用が期待されている商業ベースでの CBM ローカルエネルギー供給モデルを実現させるために、今回掘削した調査井を活用して長期に亘る生産テストを継続し、その生産ポテンシャルを評価すると同時に、安定した安全操業が可能な生産システムを稼働させて、本格的な商業開発に活かせる様々な情報やノウハウを取得することが重要である。

以下に生産テストの実施体制、生産システム及び生産テストの結果について述べる。

## (1) 生産テストの実施体制及び実施工程

夕張市、(株)レアックス、NPOの三者の連携で生産テストを円滑に進めるために、「夕張CBM 清陵-1 生産テストに係る協定書」を交わし、また北海道先進的エネルギー関連技術開発支援事業補助金を活用するために、同じく三者が「CBM 開発コンソーシアム」を構築して生産テストに取り組んだ。生産テストの実施に当たっては、研究機関、大学、経済団体及びコンソーシアムのメンバーで構成する「夕張CBM 活用推進会議」を設置し、事業や技術に関する確認や意見交換を行うと共に、助言を得る体制を整えた。また、北海道立総合研究機構地質研究所には現地視察等を依頼し、技術的な助言を得つつ生産テストを進めた(図4-15 参照)。

生産テストは、鉱業法及び鉱山保安法に従い安全性を十分確保すると共に、周辺住民や環境にも十分配慮して進めた。2017年9月末に資材搬入、生産システム・観測システムの設置を開始し、10月初旬に試運転を開始して、その後生産テストを開始した。生産テストは翌2018年5月初旬まで継続している。この間、定期的な保安管理者や作業員の巡回時以外は、原則無人化にてテストを進めるシステムを整えた。

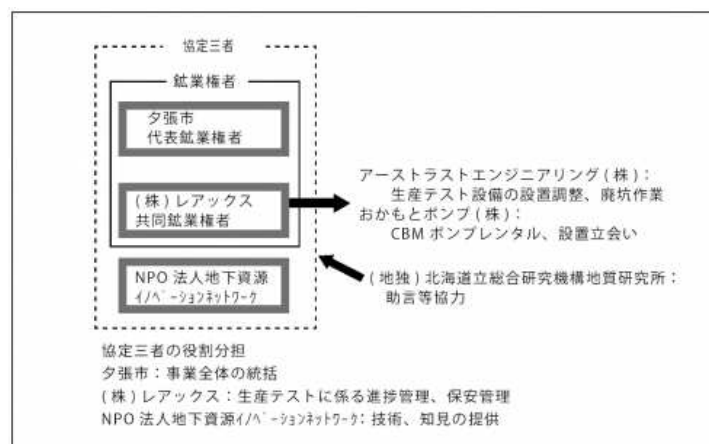


図4-15 生産テストの実施体制

## (2) 生産テストのシステム概要

図4-16に生産テストのシステム概要を示す。CBM開発の場合、石炭層からCBMを効率よく湧出させるために、一般的に坑内水の水位を常に石炭層より深いレベルに保つ必要がある。このため、ポンプを用いて地層水を連続的に汲み上げるが、今回のテストでは、揚水管の先端に取り付ける坑井投入型のポンプ(CBMポンプ)を採用した。連続的に汲み上げられた地層水は、ガスセパレータを通過して循環タンクに流れ込む。大部分のCBMは、揚水管と調査井のケーシングとの間(アニュラス)を通過して地層水とは別系統でガスセパ

レータに入る。一部の炭層メタンガスは地層水にも溶解していると考えられるが、ガスセパレータ内部で分離し、アニュラスを通して回収した CBM と併せてセパレータ上部の放流塔に導かれ、大気に放流される。セパレータ上部の放流管には CBM の流量を計測する超音波型の流量計が取り付けられている。

一般的に坑井からの地層水の汲み上げは、所定のレベルまで水位が下がるまでポンプを運転し、その後ポンプを一旦停止して設定水位まで上昇した時点でポンプを再稼働させ、以後この動作を繰り返す制御が行われる。地層水の湧水量とポンプ容量の組合せによっては、この動作が頻繁に繰り返され、ポンプの故障の要因ともなる。今回の生産テストでは、採用した CBM ポンプを安定的に連続運転させることでこのようなリスクを回避し、かつ坑井内水位を一定範囲内に維持するために、一旦汲み上げた地層水の一部を地表に設置したブランチャーポンプにより、コイルドチューブと呼ばれるステンレス管を介して坑井内に戻すという新しい制御技術を試みた。図 4-17 には生産テスト設備の概観を示す。

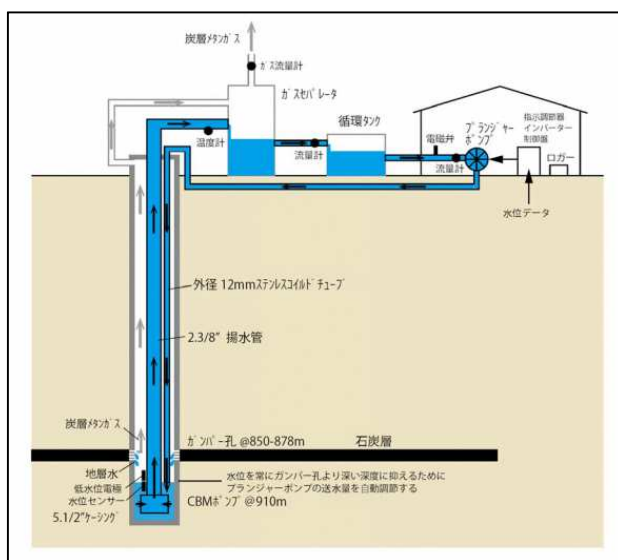


図 4-16 生産テストのシステム概要



図 4-17 生産テスト設備概観

生産テストにおける計測・観測項目を表 4-5 に示す。ガス成分以外の連続計測データは、データレコーダで記録した。このデータレコーダをネットワークに接続することで、全ての計測結果を遠隔地の PC から確認・監視できるシステムを構築した。

表 4-5 計測・観測項目

項目	計測・観測方法
CBM 湧出量	超音波流量計による連続計測
揚水量	水流量計による連続計測
注水量	水流量計による連続計測
注水ライン圧力	圧力センサによる連続計測
坑井内水位	坑底水压センサによる連続計測
揚水温度	地表部揚水配管温度計による連続計測（冬季は加温温度）
揚水の pH	循環タンクの pH センサによる連続計測
気温・気圧	気温・気圧センサによる連続計測
CBM ガス成分	不定期サンプリング・マイクロガスクロによる分析

### (3) 使用した主要機器の概要

以下に生産テストで使用した主要機器の概要を述べる。

#### a) 揚水ポンプ（CBM ポンプ）

用途：地層水の汲み上げ。

メーカー型式：Franklin Electric 社製 型式 150FCP10/7.5B4

仕様：380V・7.5kw・50Hz、電源ケーブル 920m、揚水量 10ℓ/分（揚呈 900m）

特徴：米国での CBM 生産のために開発された専用モデルで、石炭粉やガスを含む流体を汲み上げるのに適している。また、揚水量が少なく高揚呈に適している最大 1,000m の高揚呈のタイプ。



図 4-18 CBM ポンプの概観と各部位の名称

## b) CBM ポンプ制御盤

用途：CBM ポンプへの電源の供給。インバータ制御によるポンプ揚水量の調整。

メーカー型式：おかもとポンプ 専用インバータ運転制御盤サージフィルター付き

特徴：CBM ポンプ専用に設計されたインバータ内蔵の制御盤で、タッチパネルにより周波数の調整、運転開始・停止の操作が可能。緊急停止ボタン付き。



図 4-19 CBM ポンプ制御盤 (左) とタッチパネル (右)

## c) 送水ポンプ (プランジャーポンプ)

用途：坑内への送水

メーカー型式：(株)イワキ RO-3HA

仕様：3.7kw・200V・3相(50Hz)、送水量 10ℓ/分 (10Mpa)、ステンレス製

特徴：送水管のコイルドチューブは内径 10mm、全長約 900m と管内の圧力損失が高くなる可能性があるため、10Mpa の高圧仕様。水が通る部分はステンレス製であり、塩分を含んだ地層水に耐性がある。

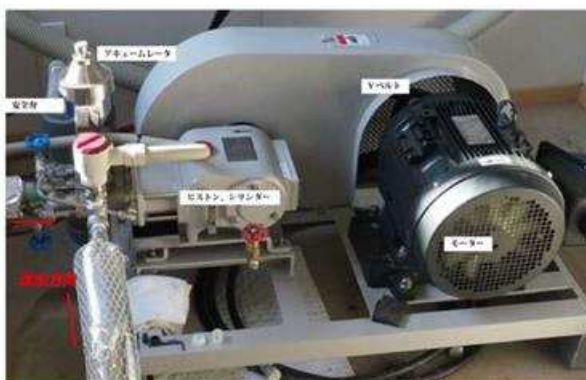


図 4-20 プランジャーポンプ

d) プランジャーポンプ制御盤

用途：電源の供給、指示調節計及びインバータによるプランジャーポンプ送水量制御

メーカー型式：(株)安川メカトレック 指示調節計およびインバータ運転制御盤付き

特徴：水位センサからの信号に基づいてプランジャーポンプの周波数をインバータ制御することで送水量を調節し、坑井内の水位を一定幅の深度に保つようにする。



図4・21 プランジャーポンプ制御盤

e) データロガー

用途：各種センサの電気信号のデジタル変換と単位換算、データ記録・表示

メーカー型式：横河電気(株) GP10

特徴：入力点数 20ch。内部ハードディスクと SD カードにデータ保存。USB メモリーに CSV ファイル<sup>20</sup>として取り出し可能。5.7 型液晶モニタ付き。ネットワーク接続機能を有し、外部のパソコンやスマートフォンからモニタリング可能。



図4・22 通信用モデム（左）とデータロガー（右）

<sup>20</sup> Comma Separated Value の略で、カンマで区切った値のファイル。

#### f) その他の機器

保安管理並びに防犯システムとして、調査井周辺には防爆型の照明を、施設の周囲にはLED照明を取り付けた。また、施設内外を監視する監視カメラを4台設置し、施設内での表示・記録に加えて、ネットワークに接続して遠隔地からの監視を可能にした。



図 4-23 防犯監視システム (左) とスマートフォンでの監視 (右)

#### (4) 生産テストの結果

2017年9月25日～10月9日の間に、ポンプ設置等の準備及び機器の調整作業を行い、坑内水位が最深部のガンパー孔より下位で安定することを確認後、10月10日から生産テストを開始した。その後、2018年5月8日まで210日間に亘って生産テストを継続した。生産テストの終了後、炭層からの地層水の湧水による坑内水位の回復状況を調査するために、28日間の水位回復試験も実施した。

テスト期間中、坑内水の入替等の一部の作業時を除いて、坑内水位は最深部のガンパー孔より下位の890m～900mの範囲で制御することができた(図4-24参照)。テスト開始当初は、送水ポンプを停止した際に、送水管内に残された水が坑井内に落ち込むことにより坑内水位が設定値を上回る現象が認められたが、送水ラインに電磁バルブを取り付けることでこの問題は解決した。この間、坑内水の汚れ等に起因すると思われる揚水ポンプの能力低下傾向は認められたものの、揚水、注水の両ポンプの運転や制御システムに大きなトラブルが発生することはなかった。



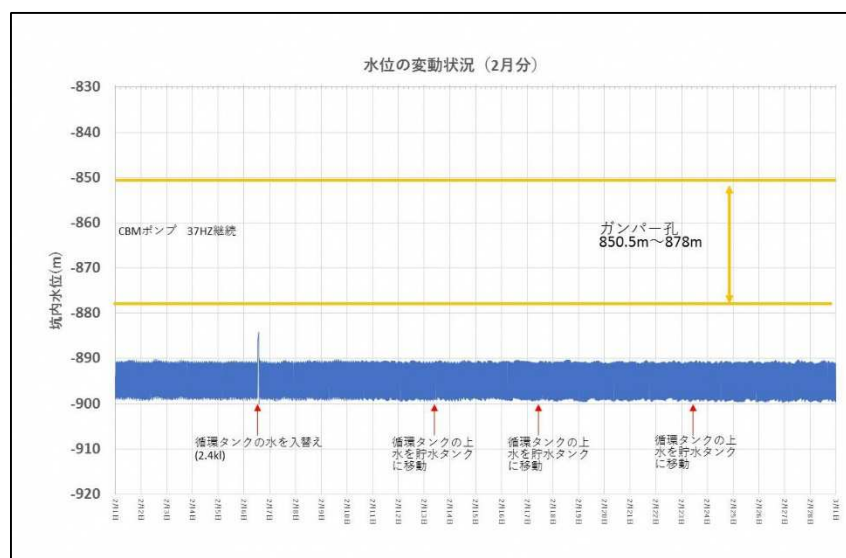


図 4-24 1 か月間の坑内水位の変化

図 4-25 に生産テストの全期間中の 1 時間当たりのガス湧出量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) と石炭層からの 1 日当たりの湧水量 ( $\text{l}/\text{d}$ ) の変化を示す。湧水量は、生産テスト開始当初の  $90 \text{ l}/\text{d}$  から  $30 \text{ l}/\text{d}$  まで徐々に減少している。この量は、数か月前に実施した揚水試験の結果から推定した湧水量  $274 \text{ l}/\text{d}$  と比べて大幅に少ない量であり、元々浸透率が低かったことに加えて、時間の経過に伴い炭層内の亀裂やガンパー孔周辺に粉炭等が詰まる現象が進展したことが影響していると考えられる。

ガス湧出量は、テスト開始当初の  $2.9 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $70.3 \text{ m}^3/\text{d}$ ) から徐々に増加し 10 月 17 日に  $3.2 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $76.3 \text{ m}^3/\text{d}$ ) の最大値を示したが、その後は短期間での増減を繰り返しながら、全体としては減少傾向を示し、最終的には  $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $36 \text{ m}^3/\text{d}$ ) にまで減少した。2018 年 2 月から 3 月初旬にかけて、ガス湧出量が大幅に減少している期間が存在している。この現象は、この時期最低気温が  $-10^\circ\text{C}$  を下回ることが多く、地表の配管系統や流量計の内部で結露した水分が凍結するような事象が発生したことに起因しているのではないかと考えられる。気温が急上昇した 3 月 9 日にこの事象は改善され、ガス湧出量は全体の減少傾向に沿った形に戻っている。

湧出ガスのサンプルを不定期に採取し、マイクロガスクロを用いてガス成分の分析を実施した。その結果、平均メタン濃度は  $98.9\%$  と非常に高く、その他二酸化炭素が  $0.93\%$ 、エタンが  $0.1\%$ 、プロパンが  $0.06\%$  含まれることが分かった<sup>21</sup>。また、ガス成分濃度から求めた湧出ガスの平均発熱量は  $39.6 \text{ MJ}/\text{m}^3$  と一般的な天然ガスとほぼ等しい値であり、CBM が質の高い可燃性ガスであることは確認できた。

<sup>21</sup> これらの値は水分を除いた値に補正後の値である。

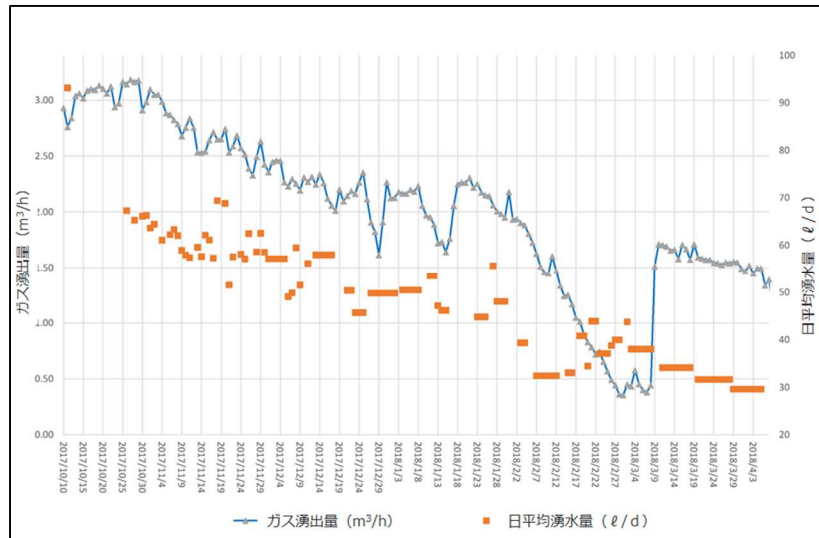


図 4-25 1 時間当たりのガス湧出量と 1 日当たりの湧水量

気温・気圧の変化も連続記録したが、ガス湧出量や湧水量との明確な相関関係は認められなかった。pH は pH センサを揚水ラインに取り付けて連続計測した。テスト開始時には pH9 前後の高い値を示したが、これはケーシング内に薄く付着しているセメントとケーシングの外側にあるセメントを通過することで高い pH 値を示した可能性が高い。その後徐々に pH 値が低下する傾向がみられたが、12 月 20 日以降センサ異常が認められたために、以後不定期に手動式の pH メーターで計測を実施することとした。テスト期間中のマニュアル計測の pH 値は最大 8.1 であった。

今回の生産テストでは、湧出した CBM の発熱量も非常に高く、質的には問題のないガスを生産することができたが、湧出量が 1 日当たり 36 m³ にまで減少し、トライアル事業に移行するのに十分な CBM の量を確保することはできなかった。このことは、石炭層の浸透率の低さ (0.195 md) に起因するところが大いと考えられる。調査井掘削以前に実施したシミュレーションでは、炭層厚さが 5m、ガス包蔵量 20m³/t、浸透率が 1 md であれば、500 m³/d 以上の生産量が期待できることが示されていた。調査井での炭層ガス包蔵量が 9.6 m³/t と低かった（生産対象の石炭層ではなく、上部の石炭層の値）ことを考慮しても、200~300 m³/d の生産量が予想されていた。しかしながら、圧入テストで評価された浸透率は 0.195 md という低い値であったことから、ガスの生産量も大幅に予想を下回る結果になったと考えられる。石炭層の浸透率を坑井の掘削前に予測することは難しいが、一般に夕張地区では 1 md という値がよく用いられており、南大夕張 ECBM においても 0.93~1.66 md という値が示されている。石炭の浸透率は炭層内の亀裂分布に大きく左右され、深度や場所によってもかなりのばらつきが予想されることから、浸透率が低い箇所では、より石

炭層との接触面積が確保できるオープンホール方式（ケーシング、セメンチングを行わない）や積極的に浸透率を改善する方法（キャビテーションや水圧破碎など）を採用することも検討すべきである。

#### （５）回復試験

2018年4月10日に揚水及び注水ポンプを停止し、石炭層からの湧水量による坑内水位の回復を調査する回復試験を5月8日まで実施した。この間、ガス湧出量等のデータ観測は継続した。

回復試験期間中の水位上昇はほぼ直線的であり、湧水量の減衰は見られなかった。1日平均の水位上昇は2.76mであり、ケーシング内容積を11.1ℓ/mとして計算すると、湧水量は30.6ℓ/dとなる。この値は生産テストにおいて揚水量と注水量の差から求めた湧水量とほぼ一致する。回復試験期間中に坑内水位がガンパー孔より上位にまで上昇したために、4月14日のガス湧出量の平均値は28.3 m<sup>3</sup>/d、5月1日～5月8日の平均値の平均は24.7 m<sup>3</sup>/dとなり、生産テスト終了時より更に低下する傾向が見られた。これは水位の上昇により水頭圧が上昇し、石炭層に作用する水圧が高まったためであると考えられる。

#### （６）ボアホールカメラ観察

生産テスト終了時点でのガンパー孔周辺の坑内状況を観察するために、再度ボアホールカメラ（BIP-V：図4-13参照）による調査を2018年5月15日、16日に実施した。15日にはODS（360°孔壁展開画像取得）により845m～894mの区間を、16日はDVS（前方視・側方視カメラによる詳細観察）により788m～880mの区間を調査した。

ODS、DVSいずれのケースにおいても、水面表面では多数の気泡が確認できた。しかしながら、水位が深くなるにつれガンパー孔から湧出するガスの影響で坑内水が攪拌され、濁りが激しく、明瞭な孔壁画像を得ることは難しかった。展開画像において876.6～877mの区間にガンパー孔が確認できたが、開口状況に関しては濁りがあるため確認できなかった。DSV調査では、788.8～877.5m間は同じく坑内水の濁りに起因してガンパー孔施工区間で孔壁面の確認はできなかった。しかしながら、水中の気泡（ガス）は最も深い深度で876.6mで確認され、それ以浅の各所で気泡が確認された。また、876.1mではガスが坑井内に流入する状況が視認できた。観察結果の概要を図4-26に示す。

ガンパー孔区間では濁りがあり、孔壁はほとんど観察できなかったため、カメラに映る気泡の速度や方向によって発生個所を推定した。ガンパー孔区間は孔の傾斜が10°程度あることから、発生した気泡はガンパー孔の頂上部のケーシングを伝って上昇し始め、その

後徐々に孔壁から離れて上昇して行くと考えられる。従って、壁面近くを上昇する気泡は濁りのため、概ねカメラに映らない。また高速でゾンデと平行に上昇する気泡は、孔壁から離れた位置を上昇しているもので、ガンパー孔からやや離れた箇所撮影された気泡と考えられる。ここでは、カメラの前をゆっくりと斜めに横切る気泡をその直下で発生したものと推定し、カメラの位置情報から気泡の発生推定箇所を評価した（図 4-27 参照）。その結果、気泡の発生箇所とガンパー孔施工区間がほぼ一致し、それ以外の区間からはガスの湧出は認められないことが推測できた。坑内水の濁りによりガンパー孔表面の状況を見ることはできなかったため、ガンパー孔の詰まりの有無や炭層との連結状況を確認するには至らなかった。

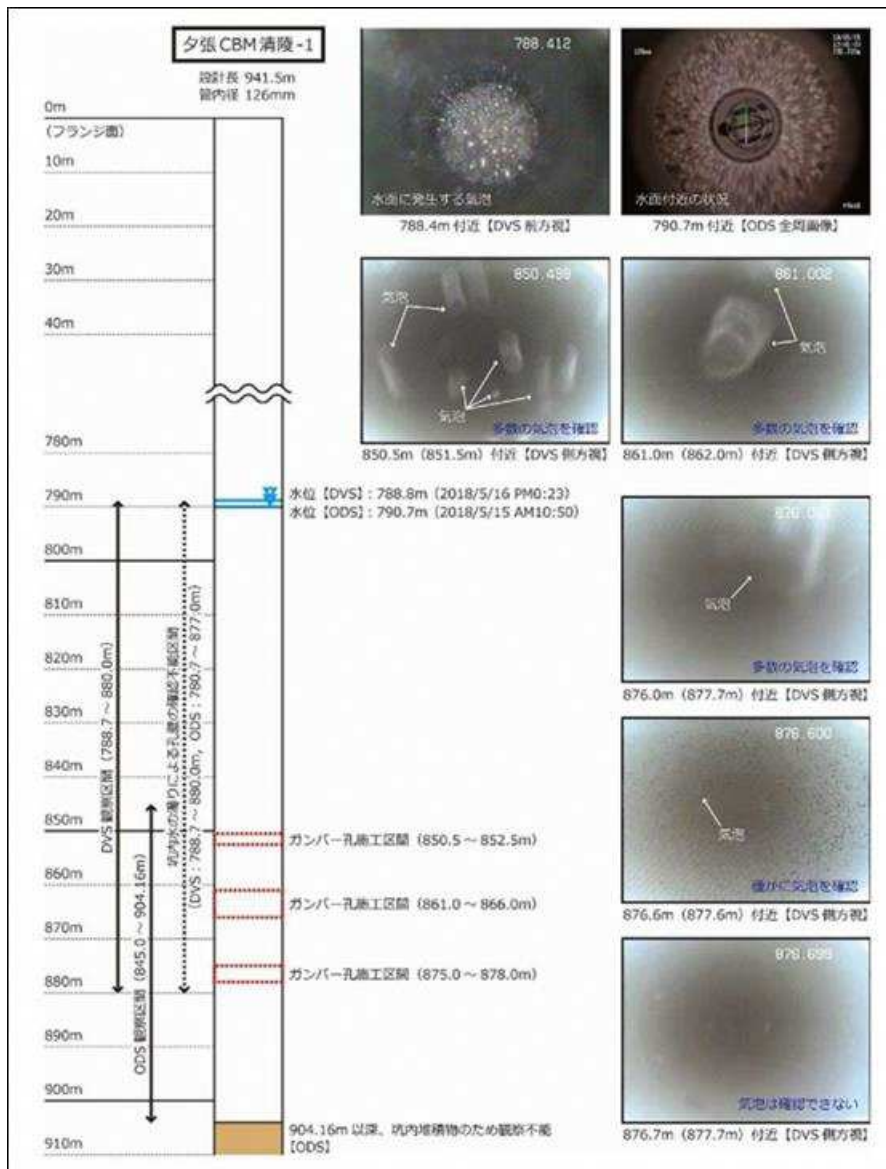


図 2-26 調査結果概要図

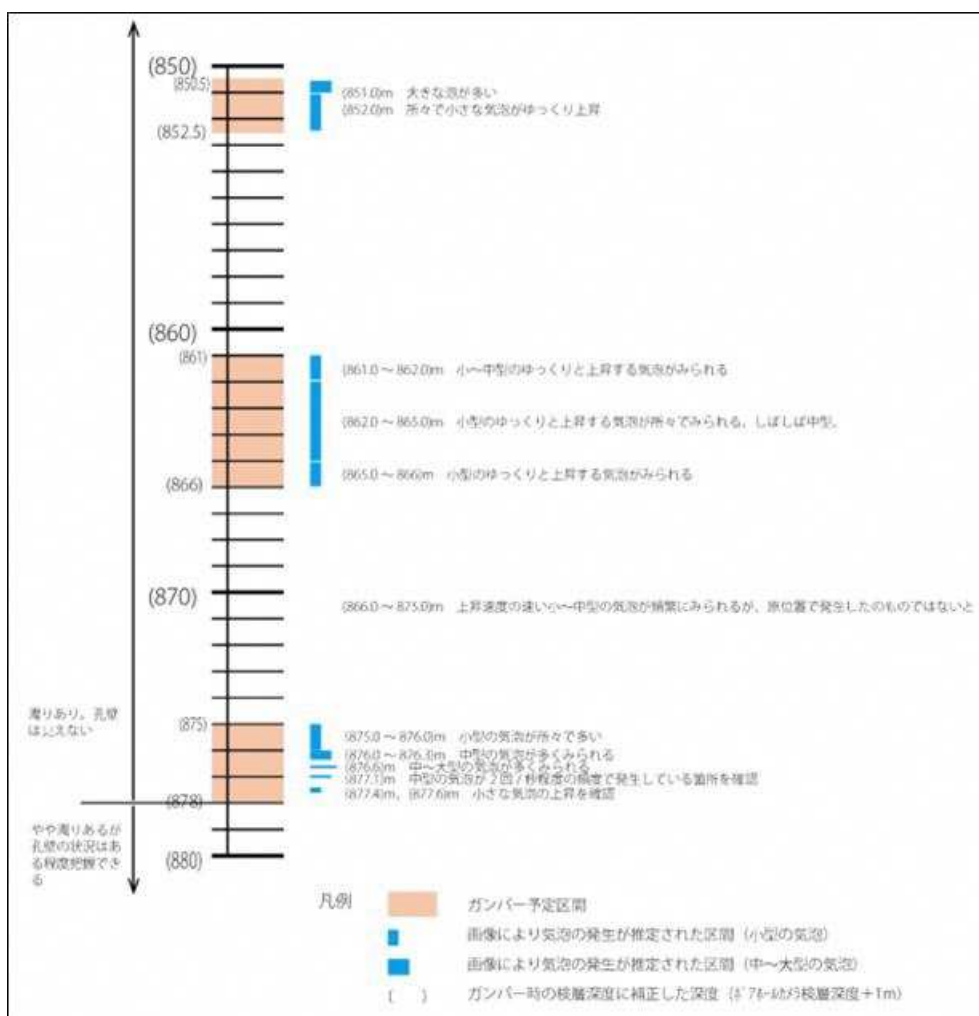


図 4-27 気泡の発生推定箇所

#### 4.4 廃坑

生産テストでの CBM 生産量がトライアル事業を実施できる量には達していなかったことから、その後の対応を様々な観点から検討したが、調査井をそれ以上維持していくことは、保安管理面での市の負担を考慮すると現実的ではないとの判断から、生産テスト終了後、直ちに調査井を廃坑として掘削箇所を原状復帰することとした。

廃坑はセメントスラリーを坑井内に全充填することで完了するが、1回目のセメンチングは深度 200m までボーリングロッドを降下し、グラウトポンプを使用して坑底までセメントスラリーを流し込み、2回目は1回目のセメントヘッド付近の深度 227m までパイプを降下し、パイプ先端からセメントスラリーを押し出すことで地上部までセメンチングを実施した。2回目のセメンチングに先立ち、5-1/2 インチのケーシングは深度 150m の位置でカットして除去している。図 4-28 に廃坑完了後の最終坑内図を添付する。図中の濃い灰色の部

分が廃坑のためのセメンチング部分で、9-5/8 インチケーシングの最上部は 1/2 インチ厚さの鉄板で溶接密封されている。地表部の 20cm は土砂で埋め戻して原状復帰した。

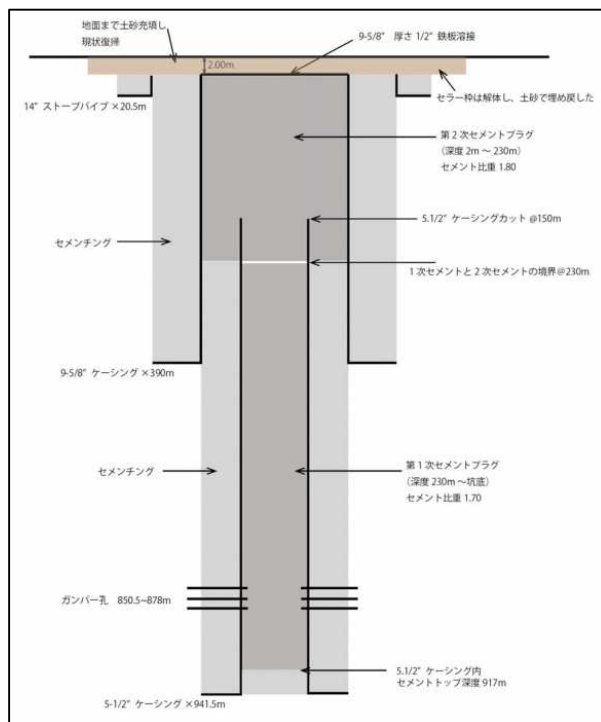


図 4-28 廃坑完了後の最終坑内図

## 5. 取組の成果

生産テストでのガス生産量は予想を下回る量であり、トライアル事業への移行は見送ったが、調査井掘削、坑内状況調査、及び生産テストにより将来の CBM 開発に資する技術的な成果・ノウハウを得ることができた。以下にその成果の概要をとりまとめる：

### (1) 調査井掘削

- ・既存の石油・天然ガス坑井掘削技術により CBM 調査井（944m）を掘削
- ・近隣の既存炭探ボーリングや炭鉱での石炭層賦存状況から予想した夕張層の石炭層を複数確認
- ・夕張層最上部の石炭層からコアを回収し、ガス包蔵量調査を実施して 9.6 m<sup>3</sup>/t というガス包蔵量の値を確認
- ・ケーシング、セメンチングにより生産テスト対象の石炭層区間以外からの湧水を遮断
- ・パーフォレーション仕上げ（ガンパー孔穿孔）により生産テスト対象石炭層区間と坑井との連結を確保
- ・カッティングス調査やマッドロギングが石炭層の確認、ガス包蔵の可能性把握に有効であることを確認
- ・圧入テストにより貯留層圧、浸透率等の基礎データを収集

### (2) 坑内状況調査

- ・エアリフト法により坑井内の水を汲み上げることで、石炭層からの湧水の水質と量の評価ができることを確認
- ・生産テストでの揚水ポンプの仕様を決定する基礎データを収集
- ・地層水に有害物質が含まれていないことを確認
- ・ボアホールカメラによる坑井内状況の映像化に成功

### (3) 生産テスト

- ・道内企業と開発した CBM 生産システムとデータ観測システムが安定稼働し CBM 生産及びデータの記録に成功
- ・揚水の一部を注入ポンプで坑井に再注入する方式を導入し、揚水ポンプを安定稼働させながら坑井内水位を所定の範囲内に維持することに成功
- ・無人化によるガス生産・データ記録・安全管理体制を確立（定期点検・作業時除く）
- ・石炭層の地層水の排出、CBM 生産量の確保には石炭層の浸透率が影響することを確認
- ・災害・公害を発生させることなく居住地域で CBM 生産テストを実施

## 6. まとめ

夕張市は、コンパクトで低炭素なまちづくりの実現に向け地域資源の活用を掲げ、地域資源の一つの柱として CBM 活用を推進すべく、CBM 開発の可能性を探りながら具体策を検討し、施策を推進してきた。限られた財源の中、各種補助金の活用や企業版ふるさと納税等の支援の下、道内企業等と強固に連携しつつ、夕張市における CBM 有効活用に向けた事業着手が実現した。結果として、調査井の掘削と生産テストの安定稼働という成果を上げ、将来的な CBM 開発・活用の事業化に向けて多くの知見・ノウハウを得たものである。

生産テストを実施した結果、トライアル事業で必要な CBM 生産量を確保することは難しいという判断から、調査井は廃坑としたが、このことをもって夕張市の豊富な CBM 埋蔵量が否定されたわけではない。今後も CBM 開発・活用に向けた取組を継続することが望まれるが、夕張市が財政再生団体であることを踏まえると、市の主導でこれ以上の事業負担を継続することは難しいのが現状である。

今後は、今回の調査井の掘削や生産テストで得た知見・ノウハウをベースとして、引き続き CBM 開発・活用事業の実現に向けて、新たな実施主体の可能性を模索することが肝要である。可能性の模索に当たっては、夕張市、(株)リアックス、NPO 法人地下資源イノベーションネットワークがこれまで培った連携関係を活かし、或いはそれぞれの立場で、国内外の技術革新の動向も踏まえながら、今後とも CBM 開発・活用事業の実現に向けた取組を進めていくこととする。