長岡における二酸化炭素圧入実証試験*

棚瀬大爾¹ 薛自求² 嘉納康二³Pilot CO₂ injection into an onshore deep saline aquifer in Nagaoka, Japanby Daiji TANASE^a, Ziqiu XUE^b and Koji KANO^c

- a. Safety and Environmental Center for Petroleum Development, Engineering Advancement Association of Japan, Deputy General Manager, Nishishinbashi1-4-6, Minato-ku, Tokyo 105-0003, Japan (Corresponding author E-mail: daiji_tanase@jpower.co.jp)
- b. Research Institute of Innovative Technology for the Earth
- c. Safety and Environment Center for Petroleum Development, Engineering Advancement Association of JAPAN, General Manager of Administration & Planning Dept.

A pilot test of geological sequestration of CO₂ is been performed by RITE in cooperation with ENAA from 2000. The test site is located at the Minami-Nagaoka gas field in Nagaoka city, 200km north of Tokyo. One injection well and three observation wells were drilled. CO₂ of supercritical phase was injected into an onshore deep saline aquifer of 1100m in depth. The injection was conducted at the rate of 20 to 40tonnes per day over the 18 month period between 2003 and 2005 with a cumulative amount of 10405tonnes. A series of monitoring consisted of time-lapse well logging, time-lapse crosswell seismic tomography, bottom-hole pressure/temperature measurement, fluid sampling and micro-seismicity monitoring has been successfully carried out to grasp the movement of injected CO₂ during and after the injection. History-matching simulation was performed to interpret the measured results. Long-term fate of injected CO₂ was predicted using the last model of history matching, implying the location and size of the CO₂ to remain almost unchanged from those at the end of injection in the test area over a period as long as 1000years. The monitoring at the test site will be continued until 2007.

KEY WORDS: CO₂, Geological Sequestration, Deep Saline Aquifer, Injection, Monitoring

1. はじめに

1997年12月に開催された「国際連合気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3)」において、第1約束期間(2008年～2012年)におけるわが国の温室効果ガス排出削減量が1990年比で6%という目標が合意されている。また、2005年2月には京都議定書が発効され、同年9月に「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」において「二酸化炭素の回収・貯留」を「大気中の温暖化ガス濃度を安定化させる方策の1つ」とした特別報告書¹⁾がまとめられたように、温室効果ガス、特に二酸化炭素の排出削減は喫緊の課題となっており、世界各国で研究が進められている。わが国では、財団法人「地球環境産業技術研究機構(以下 RITE)」が中心となり、二酸化炭素隔離固定化技術の実用化への研究開発に取り組んでいる。

「二酸化炭素の回収・貯留」とは、主要な温室効果ガスである二酸化炭素を分離・回収し、地下の地層が有する貯留能力(地中貯

留)や海洋の持つ二酸化炭素溶解能力(海洋隔離・貯留)を利用して隔離・固定するものであり、わが国経済産業省の技術戦略ロードマップ²⁾においても、「ポテンシャル・コスト両面から有効な技術群で導入に向けた取り組みが進められるべきもの」として位置づけられている(Fig. 1)。中でも「二酸化炭素地中貯留」は、二酸化炭素を分離回収し、地下の地層が有する貯留能力を利用して隔離固定するもので、枯渇油田・ガス田への貯留、石油・ガス増進回収(EOR, EGR)による貯留、地下深部塩水層 Deep saline aquifer への貯留、増進炭層メタン回収による炭層への貯留などがあり、これまでの石油・天然ガスの掘削開発、地下貯蔵や石油増進回収等で蓄積した技術を応用できることから、即効性がある実用可能な技術として大きな期待がかけられている。

「二酸化炭素地中貯留」と対象となる地層のうち地下深部塩水層は、粒子間の空隙が大きく透水性が比較的高い砂岩などで構成され地下水(塩水)で飽和された地層であり、世界的にも油・ガス田や炭層に比べ広い範囲に分布している。地下深部塩水層は、我が国においても陸域、海域に広く分布しているため、将来の地中貯留の対象として最も有望と考えられている。

本稿では、RITEが、経済産業省の補助金交付を受けてエンジニアリング振興協会(以下 ENAA)の協力のもと「二酸化炭素地中貯留技術研究開発(平成12年度よりの8ヵ年計画)³⁻⁷⁾」の一環として新潟県長岡市で、地下1,100mの陸域地下深部塩水層を対象として実施した「二酸化炭素圧入実証試験」の概要を紹介する。

* 2007年2月1日受付 5月12日受理

1. (財)エンジニアリング振興協会 石油開発環境安全センター 研究主幹(現 電源開発(株)火力エンジニアリング部 調査役)

2. 普通会員 (財)地球環境産業技術研究機構 主任研究員(現 京大大学院工学研究科)

3. (財)エンジニアリング振興協会 石油開発環境安全センター 総務・企画部長

[著者連絡先] FAX: 03-3546-9482

E-mail: daiji_tanase@jpower.co.jp

キーワード: 二酸化炭素, 地中貯留, 地下深部塩水層, 圧入, 観測

Fig.1 Road map of the CCS in Japan.

Table 1 Current geological storage projects.

Project	Nagaoka	Frio	Sleipner	Weyburn	InSalah	
Country	Japan	USA	Norway	Canada	Algeria	
Lead Organization	RITE, ENAA	University of Texas (BEG)	Statoil, IEA	EnCana, IEA	Snatrach, BP, Statoil	
Scale	Demo	Pilot	Commercial	Commercial	Commercial	
Injection start date	July 2003	Oct. 2004	Oct. 1996	May 2000	2004	
Injection period	18 months	9 days	20 years (Planned)	20 years (Planned)		
Injection rate	20 – 40 t/d	Approx .177 t/d	3,000 t/d	3,000 – 5,000 t/d	3,000 – 4,000 t/d	
Total storage	10,400 t	1,600 t	20,000,000 t (Planned)	20,000,000 t (Planned)	17,000,000 t (Planned)	
Storage type	Deep saline aquifer	Deep saline aquifer	Deep saline aquifer	Oil reservoir - EOR	Gas reservoir	
Storage formation	Name	Haizume Formation	Frio Formation	Utsira Formation	Midale Formation	Krechba Formation
	Age	Pleistocene	Tertiary	Tertiary	Carboniferous	Carboniferous
	Lithology	Sandstone	Sandstone	Sandstone	Carbonate	Sandstone
	Thickness	60 m 12 m: perforated zone	24 m 7 m: perforated zone	300 m	30 m	24 m
	Depth	Approx. 1,100 m	Approx. 1,500 m	Approx. 800-1,000 m	Approx. 1,000 m	Approx. 1,500 m
	Permeability	Average 6.7 md (1.6-11.2 md)	2,500 md	2,000 md	10-15 md	5 md
	Porosity	22.5 %	24 %	35-40 %	11-26 %	

(after IPCC Special Report, Carbon Dioxide Capture and Storage with some modification)

2. 実証試験の目的

長岡市での「二酸化炭素圧入実証試験」は、我が国の地下深部塩水層に対して、実際に二酸化炭素を地中に圧入して、貯留層中の二酸化炭素挙動に関する実測データを取得することにより、以下を達成することを目指して実施した。

- ・日本の地下深部塩水層において、二酸化炭素の地中貯留が可能であることを示す。
- ・圧入した二酸化炭素の挙動を観測することによってその貯留メカニズムの理解を得る。
- ・既存技術（石油・天然ガス分野等）の二酸化炭素地中貯留への適用性を検証する。
- ・これらにより、将来のより大規模な圧入のための経験を得る。

Table 1 に世界において実施中の二酸化炭素地中貯留プロジェクト

クトの代表的事例を示す。

実験プロジェクトである長岡市での圧入実証試験やアメリカ合衆国の Frio 計画においては、圧入規模は小さいものの坑井を利用した二酸化炭素の挙動観測（モニタリング）が集中的に行われている。ノルウェー（Sleipner）、カナダ（Weyburn）、アルジェリア（In Salah）における計画は、石油産出増進のための EOR（Enhanced Oil Recovery）計画あるいは天然ガスに随伴する二酸化炭素を地中貯留するもので、それぞれに経済的インセンティブを持っており、その圧入規模は 100 万 t/年～200 万 t/年の商用スケールとなっている。二酸化炭素の地中貯留では、その密度が大きく低粘度で、高い浸透性と拡散性を有する「超臨界状態」（7.39MPa, 31.1℃以上）で圧入することが有効であるとの観点から、いずれの計画においても深度約 800m 以深の地層を貯留層としている。

Sleipner 計画の貯留層のように、海外の地下深部塩水層には、

Fig.2 Location and simplified geological structure of the test site.

厚さが数 100m で浸透率 1000md (ミリダルシー) を超えるものが認められるのに対して、我が国の地下深部塩水層は、層厚が 100m 未満で最大浸透率が数 10md 程度のもので一般的である。長岡の試験地点の既存資料による事前調査では、貯留層となる地下深部塩水層は厚さ約 60m、浸透率数 10md と予想され、我が国の地下深部塩水層を代表する性状のものと考えられた。その後の調査により、貯留層の浸透率はさらに低いことが判明したが、将来我が国でより大規模な地下深部塩水層貯留を実現させるには、このような条件での実証試験から得られる知見は非常に貴重なものになると期待された。

3. 試験地点の概要

3・1 試験地点の選定

試験地点の選定は 2000 年度に行った。試験地点は地層の状態が良く調査されている国内の油・ガス田地域から選定することとし、有力な候補地点として挙げられた複数の地点について、「貯留層」、「試験場所」、「作業区」の 3 つのカテゴリーに分け、下記の基準に基づいて選定を行った。

「貯留層」に関しては、①シール性が高く、連続性のあるキャップブロックが存在する、②深度が 800 ～ 1200m 程度、③連続性のある 10m 以上の有効層厚、④地層傾斜が緩やかである、⑤面積 1.5km² の範囲内に影響を及ぼす断層等が存在しない、を基準とした。

「試験場所」については、①圧入井および圧入施設の敷地が確保される、② 3 坑の観測井の敷地が確保される、③坑井掘削、圧入施設の建設および操業中に発生する騒音や、周辺の景観を損なうことが、社会問題とならず地域社会に容認される、④二酸化炭素購入およびローリによる搬入が可能な経済的距離内にある、⑤ワークショップや宿舎などのインフラが整備されている、を基準とした。

「作業区」については、①他の 2 つのカテゴリーの条件に適合した鉱区を保有している、②二酸化炭素あるいは天然ガス地中圧入の経験を有する、③保安体制が確立されている、を基準とした。これらにより総合評価が最も高かった帝国石油(株)南長岡ガス田岩野原基地を選定し、試験地点として借用することとした。

3・2 地形・地質

岩野原基地は、新潟県長岡市南西部、JR 長岡駅から距離約 9km の信濃川支流洪海川左岸に位置する。試験地点およびその付近には河岸段丘が発達し、その西は標高 200 ～ 300m の西山丘陵となっている。丘陵の稜線は北北東—南南西方向に延びており、

この地域の褶曲軸方向と調和的である。試験地点の東では洪海川が南西から北東へ向かって流下し、試験地点の北東約 5.5km 地点で信濃川に合流する (Fig. 2)。

試験地点の位置する西山丘陵地域には西山層、灰爪層、魚沼層、段丘堆積物、沖積層が分布している。「新潟県地質図説明書 (2000 年版) 1/20 万および同説明書⁸⁾」の記載に基づく層序、岩相、褶曲構造は以下のとおりである。

- ・魚沼層：前期～中期更新世
- ・灰爪層：前期更新世
- ・西山層：前期鮮新世～前期更新世

西山層は青緑色～灰色の塊状泥岩からなり、黄褐色砂岩や白色火山灰の薄層を挟む。灰爪層は細～中粒砂岩、砂質シルト岩、砂岩・泥岩互層からなり、石灰質の砂岩を伴い、西山丘陵では下位の西山層を不整合で覆うとされる。魚沼層は下位から砂岩層、砂岩・泥岩・礫岩層、礫岩・砂岩・シルト岩互層に区分されているが岩相の指交関係が著しい。西山丘陵では下位の灰爪層を不整合に覆うとされる。西山層の下位には、寺泊層 (中期中新世～後期中新世)、椎谷層 (後期中新世～前期鮮新世) などが分布し、西山層～椎谷層準には安山岩質集塊岩が挟存する。

上記の地層は北北東—南南西方向の軸を有する顕著な褶曲構造を形成しており、石油・天然ガス鉱床の重要なトラップとなっている。現在の地形と深くかかわる褶曲構造の形成は、後期中新世～後期鮮新世に始まり、魚沼層堆積後、高位段丘形成前 (中期更新世) に頂点に達したものと考えられている。

火山灰鍵層の追跡に基づく調査では、西山層上部から灰爪層にかけての地層が、魚沼層の下部から中部と同時異相にあると解釈されている⁹⁾。

圧入実証試験のための新規坑井掘削に先立つ試験地点およびその周辺の地質状況調査は、岩野原基地の既存坑井 2 坑を含む周辺の坑井 (約 30 坑) の検層データおよび既往地震探査結果等に基づいて実施した (Fig. 3)。これらにより、二酸化炭素の貯留層として、同基地の深度約 1100m に分布する地下深部塩水層 (灰爪層の砂岩卓越部) を、キャップブロック層として貯留層上位の同じく灰爪層の泥岩卓越部を選定した。なお南長岡ガス田では寺泊層以深が天然ガス産出層となっており、岩野原基地周辺では深度 4700m 以深が探鉱対象となっている。

帝国石油 (株) による岩野原基地の既存坑井の有孔虫化石調査結果は、西山層から魚沼層にわたって堆積環境が浅くなる傾向 (水深 150m から水深 50m 前後あるいは陸化) があることを示し、圧入対象貯留層は浅海 (水深 50m 前後よりも浅い環境) で堆積し

Fig.3 Contour map of the upper surface of the reservoir.

たことを示唆している。

既存坑井間の層序対比によれば、貯留層およびキャップロックの連続性は良好で、Fig. 3 および Fig. 4 に示すように、貯留層の上限は、概ね北北東－南南西方向の軸を有する褶曲構造をなし、2 箇所の凸部を伴う背斜構造を形成し、試験地点は背斜構造の南翼に位置している。貯留層の層厚は試験地点付近では 60m 程度で、西北西方向へ向かって薄くなり尖滅していると考えられ、既存坑井の検層結果では、地表とキャップロックの間にも高い遮断性が予想される泥岩が数多く確認されている。

試験地点の西方約 500m には「新編 日本の活断層 (1991) ¹⁰⁾」に親沢断層として記載されているリニアメントが通過している。既往の地震探査結果では、親沢断層に対比できると思われる不連続面が検出されているが、地下方向へ約 250m 以深には追跡できず、キャップロックへは達していない。同じく既往の地震探査結果では、地表付近とキャップロックの間に連続性のある不連続面、貯留層を切る不連続面は認められない。

4. 坑井掘削および坑井内調査

4・1 坑井の掘削と配置

試験地点では、2000 年度から 2002 年度にかけて、貯留層およびキャップロックの地質工学的特性の調査と圧入井および観測井としての利用を目的として、圧入井 IW-1 坑、観測井 OB-2 坑、OB-3 坑、OB-4 坑を掘削した。観測井については、測定対象となる貯留層区間に比抵抗検層（後述）が可能な FRP ケーシングを設置し、それ以外の区間は鋼管ケーシングとした。試験地点における坑井の一覧を Table 2 に示す。

試験地点の貯留層深度での坑井の配置を Fig. 5 に示す。図中には地表部における坑井坑口位置、地表設備の概要配置および各種の観測項目（後述）も合わせて示す。地表部における各観測井の圧入井 IW-1 坑からの離間距離は 20m 以内であり、貯留層標高において所定の位置関係となるように傾斜掘りを行った。

坑井の配置は、事前のシミュレーション・スタディによる二酸化炭素の地下での挙動予想に基づき、以下を考慮して、観測井が圧入井からの距離が異なる不等辺三角形の各頂点に位置する形と

Fig.4 3D geological structure of the reservoir.

したものである。

- ・観測井で実施する物理検層により、観測井 OB-2 坑、OB-4 坑で、ダウンディップおよびアップディップ方向への圧入二酸化炭素のフロントの到達（ブレイクスルー）を物理検層により確認し、ブレイクスルー後の経時変化を観測することができること。
- ・浸透範囲が推測されるものよりも大きい場合には観測井 OB-3 坑でも同様なブレイクスルーとその後の経時変化を観測することができること。
- ・観測井 OB-2 坑と OB-3 坑の坑井間弾性波トモグラフィにより、圧入時の二酸化炭素のフロントを複数回検出できること。
- ・坑井間弾性波トモグラフィを実施する観測井 OB-2 坑と OB-3 坑の坑井間距離は、貯留層の弾性波速度が遅く（約 2.5km/s）、弾性波の減衰も大きいと考えられることから、200m 以内とすること。

4・2 坑井を利用した調査

2000 年度から平成 2002 年度の坑井掘削時に、圧入井 IW-1 および観測井 OB-2 坑、OB-3 坑、OB-4 坑において、坑井内およびそれらから採取したコア試料等を利用して Table 3 に示す調査・試験を実施した。2003 年度および 2004 年度には圧入井 IW-1 坑において揚水試験を、2005 年度の二酸化炭素圧入中には、圧入井 IW-1 坑においてスピナーテストを行った。これらの調査・試験は、キャップロックおよび貯留層の分布・性状の把握、および二酸化炭素圧入時の貯留状況把握（モニタリング）のベースライン得ることを目的として実施したものである。

また坑井掘削時には、その健全性評価のためのセメント評価試験も実施し、その後の同試験のベースラインとした。

Fig. 6 に、坑井を利用したこれらの調査・試験と、二酸化炭素の圧入に合わせて実施した二酸化炭素挙動把握のための観測（モニタリング）の関係を示す。

4・3 貯留層およびキャップロックの地質工学的性質

2000 年度から 2004 年度にかけて実施した調査・試験の結果に基づく貯留層およびキャップロックの地質工学的性質を以下に記載する。

(1) 地質構造

新たに掘削した 4 坑井のカッティングスおよびコア地質観察と物理検層データによれば、坑井掘削を行った局所的な範囲においては、貯留層およびキャップロック付近の地層の走向・傾斜は N10° E15° E(走向 N100° , アップディップ 15° W) で傾斜する単斜構造を示し、断層などの明瞭な構造不連続面は認められない。

(2) 地圧・地温

貯留層の地圧は、圧入井 IW-1 坑および観測井 OB-2 坑で実施したテストング検層および圧入井 IW-11 坑、観測井 OB-4 坑

Table 2 Well catalogue of the test site.

Well name	Injection well IW-1	Observation well OB-2	Observation well OB-3	Observation well OB-4
Well head elevation	53.00m	53.43m	53.43m	53.44m
Well bottom elevation	-1,176.83m	-1,256.72m	-1,202.66m	-1,261.38m
Drilled depth (mMD)	1,230.00m	1,319.00m	1,270.00m	1,322.00m
Well diameter (inch)	Down to 320m: 12-1/4 320m - 1,230m: 8-1/2	Down to 317m: 12-1/4 317m - 1,319m: 8-1/2	Down to 324m: 12-1/4 324m - 1,270m: 8-1/2	Down to 321m: 12-1/4 321m - 1,322m: 8-1/2
Final casing diameter (inch)	5-1/2	5-1/2	5-1/2	5-1/2
FRP casing Interval (mMD*)	None	945.12 ~ 1212.04 m	1045.98 ~ 1143.90 m	926.68 ~ 1154.67 m
Cap rock depth (mMD)	954.0 - 1,090.0m	954.0 - 1,103.5m	938.0 - 1,069.5m	947.0 - 1,079.2m
Reservoir depth (mMD)	1,093.0 - 1,150.0m	1,107.0 - 1,169.5m	1,069.5 - 1,129.0m	1,079.2 - 1,135.8m
Drilled year (FY)	2000	2001	2002	2003

* Measured Depth

Fig.5 Schematic configuration of the injection well and the wells at the depth of the reservoir.

の坑内に設置した圧力計により測定した。貯留層区間における地圧は概ね 11.0 ~ 11.8MPa の範囲であり、圧入の対象となる貯留層 Zone-2 (後述) での地圧は 11.1 ~ 11.3MPa の範囲であった。地温は IW-1 坑および観測井 OB-4 坑に設置した温度センサーにより測定し、圧入開始前の貯留層の地温は 47 ~ 48℃であった。

(3) 貯留層

坑井掘削を行った範囲における貯留層は、上下を泥岩によって挟まれ、薄い泥岩を挟在する砂岩あるいは礫岩であり、その層厚は 56.5 ~ 59.5m とほぼ一定である。貯留層は、岩相の相違から大きく 5 つのゾーン Zone-1 ~ Zone-5 に区分され、それらは岩野原基地内および周辺の既存坑井で連続的に追跡可能である (Fig. 7)。

貯留層の 5 つのゾーンのうち上位から 2 つ目の Zone-2 (圧入井における層厚約 12m) の浸透率が、物理検層結果およびコア試験結果により最も良好であると判断されたことから、圧入井 IW-1 坑の Zone-2 区間をケーシングの穿孔区間 (深度 1093.0 ~ 1105.0mMD) として、二酸化炭素の圧入を Zone-2 に集中することとした。

貯留層の各ゾーンの特徴は以下のとおりである。

a. 貯留層 Zone-1 (層厚 3.0 ~ 4.8 m) 石灰質砂岩を主体とする。暗灰色〜オリーブ色を呈し、貝殻片を含む。貯留層の中では比較的固結度が高く、最も堅硬・緻密な岩層を呈する。

ガンマ線強度 60 ~ 90GAPI, 比抵抗 2 ~ 15Ωm, 密度 2.10 ~

Table 3 In-situ and laboratory tests using well bore s and core samples.

Item	Well Name	Application
Cuttings observation	IW-1, OB-2,3,4	Stratigraphy/Lithofacies
Coring and observation	IW-1, OB-2	Stratigraphy/Lithofacies, Geological structure
Well test	Spontaneous potential	IW-1, OB-2,3,4
	Gamma ray	IW-1, OB-2,3,4
	Density	IW-1, OB-2,3,4
	Resistivity	IW-1, OB-2,3,4
	Sonic	IW-1, OB-2,3,4
	Neutron	IW-1, OB-2,3,4
	Imaging (FMI*)	IW-1, OB-2,3,4
	Testing (MDT*)	IW-1, OB-2
	Nuclear magnetic resonance (CMR*)	IW-1, OB-2
	Cement evaluation (CBL*, USI*)	IW-1, OB-2,3,4
Laboratory test	Pumping	IW-1
	Step-rate test	IW-1
	Spinner survey (PLT)	OB-2
	Routine core analysis	IW-1, OB-2
	-Porosity	
	-Permeability (air)	
	-Specific gravity	
	-Density	
	Special core analysis(SCAL)	IW-1, OB-2
	-Acoustic velocity	
	-Threshold pressure	
	-Relative permeability	
	-Capillary pressure	

*Mark of Schlumberger

Fig.6 Flow of the investigation works.

Fig.7 Comparison of logs of drilled wells.

2.60g/cm³、音波伝播速度 2.65 ～ 3.81 km/s を示す。核磁気共鳴検層 (CMR) の結果から浸透率の極めて低いゾーンと判断した。

b. 貯留層 Zone-2 (層厚 9.0 ～ 13.2 m) 極細粒～細粒砂岩を主体とし、一部は中粒砂岩よりなる。単層の厚さが 20cm 以下の泥岩および砂礫岩を挟在する。圧入井 IW-1 坑の深度 1095.1m 付近の砂礫岩は未固結である (Fig. 8)。暗灰色～明灰色を呈し、オリーブ色を帯びる。塊状となっている部分が多いが、一部に級化層理

あるいは葉理の発達が見られる。Zone-2 基底部付近の砂岩には貝殻片および細礫が含まれている。

ガンマ線強度 55 ～ 120GAPI、比抵抗 4 ～ 7Ωm、密度 2.00 ～ 2.35g/cm³、音波伝播速度 2.34 ～ 3.05km/s を示す。テストング検層 (MDT) および核磁気共鳴検層 (CMR) の結果より、最大で数 10md オーダーの浸透性が予想され、貯留層内で最も良好な二酸化炭素の圧入性が期待された。

Fig.8 Photograph of drilled cores of Zone-2 from injection well IW-1.

c. 貯留層 Zone-3 (層厚 20.0 ~ 21.3 m) 細礫岩および砂岩を主体とし、泥岩の偽礫および貝殻片を含む。Zone-3 下部には、亜円礫からなり淘汰は不良であるが固結している礫岩層が挟在される。

ガンマ線強度 60 ~ 160GAPI, 比抵抗 3 ~ 5Ωm, 密度 2.00 ~ 2.40g/cm³, 音波伝播速度 2.34 ~ 2.77km/s を示す。テストング検層 (MDT) の結果および核磁気共鳴検層 (CMR) の結果より、浸透率が低い区間 Zone-3Upper と浸透率が相対的に高い区間 Zone-3Lower に区分される。

d. 貯留層 Zone-4 (層厚 5.5 ~ 7.5 m) 凝灰質砂岩および極細粒砂岩を主体とし、シルト岩の薄層を挟在する。砂岩は暗灰色～明灰色を呈し、軽石質である。葉理が発達し、層理面に沿って割れやすい。部分的に塊状。シルト岩は淡黄褐色を呈する。

ガンマ線強度 50 ~ 110GAPI, 比抵抗 3 ~ 4Ωm, 密度 1.80 ~ 2.25g/cm³, 音波伝播速度 2.34 ~ 2.54km/s を示す。核磁気共鳴検層 (CMR) で得られた高い浸透率は軽石質の岩相の影響であると考え、テストング検層 (MDT) の結果により浸透率が低いゾーンと判断した。

e. 貯留層 Zone-5 (層厚 16.8 ~ 20.5 m) シルト岩質砂岩層よりなる。石灰質で灰色～暗灰色を呈し、塊状。泥岩の偽礫および貝殻片をわずかに含む。

ガンマ線強度 50 ~ 70GAPI, 比抵抗 2 ~ 5Ωm, 密度 2.10 ~ 2.40g/cm³, 音波伝播速度 2.34 ~ 3.39km/s を示す。テストング検層 (MDT) の結果および核磁気共鳴検層 (CMR) の結果より浸透率が低いゾーンと判断した。

(4) キャップロック

キャップロックの岩相、層厚・連続性、遮断性は以下の通りである。

a. 岩相 泥岩を主体とし、極細粒～細粒砂岩を挟在する。泥岩は灰色～暗灰色を呈し、部分的にオリーブ色を帯びる。塊状であることが多く、シルト岩偽礫および貝殻片を含む。

b. 層厚・連続性 坑井掘削範囲におけるキャップロックの層厚は 131.4 ~ 134.7m と貯留層の 2 倍以上の厚さとなっている。坑井間の層序と岩相の対比は良く、キャップロックの連続性は良好である。

c. 遮断性 特殊コア試験 (置換圧力測定) で得られたスレッシュホールド圧力の値は 1.38MPa を超え (1.38 ~ 13.79MPa), ガスコラム換算で 176m 以上 (176 ~ 1646m) となる。物理検層における自然電位 (SP) の値は全体的に高く、-20mV を超える連続した区間が 50m 以上存在すること、テストング検層 (MDT) による換算浸透率は 0.14md と小さいことから、キャップロックは十分な遮断性有していると判断される。

(5) 地層破壊圧

圧入井 IW-1 坑において、圧入運転時に予想される圧入井近傍

の圧力が地層破壊圧を超えていないことを確認すること目的として、水 (塩化カリウム溶液) および超臨界二酸化炭素の 2 種類の圧入流体によりステップレートテスト実施した。その結果、貯留層 Zone-2 における地層破壊圧は、圧入運転時の圧入井での予想最大坑底圧 18.6 MPa (190kgf/cm²) を超えていることが確認された。

(6) 圧入性

圧入井 IW-1 坑においては、原位置における貯留層の圧入性を調査するために揚水試験およびスピナーテストを実施した。

a. 揚水試験結果 圧入区間となる貯留層 Zone-2 では、圧入性改善のための酸処理を挟んで、2002 年度および 2003 年度に、揚水試験を実施し酸処理の前後の浸透性を調査した。これにより超臨界二酸化炭素の圧入性は酸処理前 0.494t/日 / (kgf/cm²) から、酸処理後 1.323t/日 / (kgf/cm²) と大きく改善されていることが判明し、計画圧入レート 20t/日での圧入運転は十分に可能と判断した。また揚水試験により、Zone-2 の平均浸透率は 6.7md と算定された。

一般コア試験で求めた空気浸透率を水浸透率に変換したものは、テストング検層 (MDT) および核磁気共鳴検層 (CMR) で得られた浸透率とよい一致を示す。揚水試験で求められた浸透率 (平均 6.7md) は最も信頼性が高いと判断されるため、シミュレーション・スタディ (後述) に使用した各ゾーンの浸透率は、揚水試験で得られた浸透率をコアの室内試験結果 (空気浸透率を水浸透率に変換したもの) から得られた各ゾーンの浸透率の比で割り振ったものを基本とした。

b. スピナーテスト結果 圧入井 IW-1 坑の Zone-2 (1093.0 ~ 1105.0mMD) の圧入状況把握を目的として、2004 年度の二酸化炭素圧入中に二酸化炭素流量を PLT 測定器により測定し、穿孔区間各深度での圧入量を算定した。この結果、圧入している二酸化炭素流量の 70% が、1110 ~ 1105mMD 区間に圧入されており、圧入対象区間における圧入寄与率のプロファイルは、テストング検層 (MDT) の結果および核磁気共鳴検層 (CMR) の結果から評価した浸透率やコア試験による浸透率と整合的であることが確認された。

(7) 坑井の健全性

圧入性 IW-1 坑、観測井 OB-2 坑、OB-3 坑、OB-4 坑では、セメンテーション実施後に USI および CBL によるセメント評価検層を実施した。その結果全ての坑井においてセメントと、ケーシングおよび地層の膠着状況 (ボンディング) 状況は良好であり、二酸化炭素圧入時の坑井からの二酸化炭素漏洩する可能性はないと判断された。

観測井 3 坑については、後述の新潟県中越地震の直後にも坑井の健全性確認のためにセメント評価検層を実施し、ボンディングの状況が地震後も良好であることを確認した。2007 年度には、岩野原基地の坑井は封鎖する予定となっており、その際にもセメント評価検層を実施する予定である。

5. 圧 入

5・1 圧入設備

2002 年から 2003 年度にかけて、圧入設備の設計および施工を並行して実施した。圧入設備の施工については、2002 年には土木・建築基礎工事を、2003 年度には設備の設置工事を行った。

設備設計においては、圧入する二酸化炭素を圧入井の坑口から坑底まで超臨界状態に保つことを要点として、そのための圧力・温度制御の検討、配管材料の選定を行った。

圧入設備は、液化炭酸ガス受入・貯蔵・払出設備、液化炭酸ガス加圧設備、液化炭酸ガス加温設備および給水設備によりなり、

その機能・構成は以下の通りである。

(1) 液化炭酸ガス受入・貯蔵・払出設備

液化炭酸ガスローリからの液化炭酸ガス受入、貯蔵、および受入／払出のための加圧を行う設備である。液化炭酸ガス貯槽 (Liquified CO₂ Vessel)、ポンプ時の液面低下による系内の圧力低下防止のための液化炭酸ガス貯槽用加圧蒸発器 (Evaporator)、ローリ充填ホース、およびローリ均圧ホースを主要機器とする。

(2) 液化炭酸ガス加圧設備

液化炭酸ガス貯槽からの液化炭酸ガスを所定の圧力まで加圧する設備であり、液化炭酸ガス加圧ポンプ (Main Pump) と、液化炭酸ガス加圧ポンプを動作させるための予備加圧機として液化炭酸ガス貯槽と液化炭酸ガス加圧ポンプの間に設置したブースターポンプ (Booster Pump) を主要機器とする。

(3) 液化炭酸ガス加温設備

液化炭酸ガス加圧ポンプからの液化炭酸ガスを所定の温度まで加温する設備であり、液化炭酸ガスヒータ (Heater) を主要機器とする。

(4) 給水設備

液化炭酸ガス貯槽用加圧蒸発器および液化炭酸ガスヒータに熱媒の清水を供給する設備であり、取水ポンプおよび給水タンクを主要機器とする。

圧入設備の概要を Fig. 9 に、貯留層を含めた圧入全体の概略イメージを Fig. 10 に示す。

5・2 圧入運転

二酸化炭素圧入運転は 2003 年 7 月 7 日に開始した。開始当初には、圧入運転時に予想される圧入井近傍の圧力が地層破壊圧を超えていないことを確認するステップレートテスト、機器調整、圧入レート 10t/日での慣らし運転等を行い、同年 8 月 12 日より圧入レート 20t/日での連続圧入運転を開始した。2003 年度の圧入運転は、2004 年 3 月 9 日まで実施し、累計圧入量 4000t をもって二酸化炭素供給工場の定期点検・整備による圧入休止期間 (2004 年 3 月 10 日～4 月 29 日) に入った。

2004 年度の圧入運転は、2004 年 4 月 30 日より圧入レート 40t/日で開始した。連続圧入運転は、夏季の二酸化炭素供給逼迫期の圧入休止 (7 月 7 日～8 月 11 日)、10 月 23 日午後 17 時 56 分発生の新潟県中越地震による圧入中断 (10 月 24 日～12 月 5 日) を経て、2005 年 1 月 11 日まで継続し、同日正午に最終累計圧入量 10405t をもって完了した。

圧入レートおよび累計圧入量の推移を Fig. 11 に示す。

6. 観 測 (モニタリング)

6・1 観測計画

地下深部塩水層への超臨界状態の二酸化炭素の圧入により、地層内の孔隙は、地層水と超臨界二酸化炭素の 2 相となり、弾性波速度分布、比抵抗分布、地層水の飽和率などが変化する。また圧入圧により圧力分布が変化し、圧入二酸化炭素の温度やその地層水への溶解熱により温度分布が変化する。

圧入した二酸化炭素の挙動を把握するためには、上記の変化を検知することが必要であり、それらの検知方法としては、経時的に繰返し実施する物理検層と坑井間弾性波トモグラフィ、地層流体試料の採取・分析、および継続的な温度・圧力計測が最も適当であると判断した。

坑井間弾性波トモグラフィは、二酸化炭素の圧入による弾性波速度の変化を坑井間断面で面的に捉えることができる。一方物理検層は、取得データは坑井に沿う線であるものの、坑井間弾性波トモグラフィと比べ高い精度で二酸化炭素圧入による各種物性値

Fig.9 CO₂ injection facilities.

Fig.10 Sketch of the CO₂ injection.

の変化を検知することが可能である。

二酸化炭素の全体的な挙動把握は坑井間弾性波トモグラフィで行い、二酸化炭素フロントの観測井へのブレイクスルーと、その後の細かな挙動は物理検層で確認をする、という使い分けを前提に、温度圧力計測、地層流体試料の採取・分析および微動観測を加えた Table 4 に示す項目についての観測を実施することとした。

温度圧力測定、弾性波トモグラフィ、物理検層および微動観測は、圧入前のベースライン把握のために圧入の開始に先立って観測を開始し、二酸化炭素の圧入中から圧入終了後まで観測を継続した。

6・2 観測結果

(1) 温度・圧力測定

圧力・温度計測は、圧入対象である貯留層 Zone-2 の圧力・温度変化を連続的に測定するもので、圧入井 IW-1 坑の穿孔区間 (深度 1093.0 ～ 1105.0mMD) につながるチュービング内の深度 1072.46mMD および観測井 OB-4 坑のケーシングの外側の深度 1090.83mMD の 2 箇所、二酸化炭素圧入開始前の 2003 年 6 月

Table 4 Monitoring at the test site.

Item	Quantity	Location	Term
Pressure and temperature measurement	Continuously	IW-1 (bottom and head) OB-4 (bottom)	Since Jun. 2003
Seismic tomography	6 times	Bet. OB-2 and OB-3	Since Feb. 2003
Geophysical logging	Induction	OB-2, OB-3 and OB-4	Since Jun. 2003
	Neutron	Ditto	Ditto
	Sonic	Ditto	Ditto
Fluid sampling	Once	OB-2	Dec. 2005
Micro-seismicity monitoring	Continuously	On ground surface	Since Feb. 2003
	Continuously	OB-2	Since July. 2003

Table 5 Surveys of the seismic tomography.

Baseline Survey	BLS	Before injection	Feb. 2003
		Injection started	Jul. 2003
	MS1	3,200t-CO ₂	Jan. 2004
	MS2	6,200t-CO ₂	Jul. 2004
Monitoring Survey	MS3	8,900t-CO ₂	Nov. 2004
		Injection ended	Jan. 2005
	MS4	10,400t-CO ₂	Jan. 2005
	MS5	10,400t-CO ₂	Oct. 2005

23日よりデータの取得を開始し、圧入による貯留層の圧力・温度変化を継続的に把握した。圧入井 IW-1 坑および観測井 OB-4 坑における圧力計測結果を Fig. 12 に示す。

(2) 坑井間弾性波トモグラフィ

坑井間弾性波トモグラフィでは、観測井 OB-2 坑～OB-3 坑間についての測定を、Table 5 に示すように、二酸化炭素圧入開始前の第 1 回測定 (BLS: ベースライン測定)、圧入中～圧入終了直後の第 2 回～第 5 回測定 (MS1～MS5: モニタリング測定) として実施した。

Fig. 13 に二酸化炭素圧入前地盤速度 (BLS) に対する二酸化炭素圧入 3200t 時 (MS1) および二酸化炭素圧入 10405t 終了後 (MS4) の坑井間の弾性波速度の変化率を示す。

弾性波トモグラフィにより、貯留層中の二酸化炭素の分布が弾性波速度の低下域として画像化され、圧入の進行に伴い二酸化炭素分布域が地層の傾斜方向に沿って拡大する状況が確認された。

(3) 物理検層

物理検層は、観測井 OB-2 坑、OB-3 坑および OB-4 坑において、以下に示す 3 種目について実施した。二酸化炭素圧入中の 2003 年度は 2 週間～2.5 ヶ月の間隔で、2004 年度は約 1 ヶ月の間隔で測定を行い、圧入終了後の 2005 年度は 4 回の測定を実施した 2006 年度には 3 回の測定を予定しており、2007 年 1 月現在累計 31 回の測定が終了している。

- ・音波検層 (Sonic Logging)
- ・比抵抗検層 (Induction Logging)
- ・中性子検層 (Neutron Logging)

観測井 OB-2 坑では、2004 年 2 月 12 日に実施した第 13 回物理検層までは、二酸化炭素が到達したことを示す変化は見られなかったが、同年 3 月 10 日に実施された第 14 回検層で、Zone-2 区間の音波検層、比抵抗検層および中性子検層結果に、二酸化炭素のブレイクスルーを示唆する変化 (P 波速度の減少、比抵抗値の増加、中性子孔隙率の減少) が認められた。

観測井 OB-4 坑では、2004 年 5 月 12 日に実施した第 16 回物理検層までは、二酸化炭素が到達したことを示す変化は見られなかったが、同年 6 月 14 日の第 17 回検層で、観測井 OB-4 坑の Zone-2 区間にも二酸化炭素のブレイクスルーを示唆する変化 (P 波速度の減少、中性子孔隙率の減少) が見られた。

その後の二酸化炭素圧入の進行に伴い、観測井 OB-2 坑および OB-4 坑で検出された物性値の変化に拡大傾向が継続した。観測井 OB-3 坑においては、二酸化炭素が到達したことを示す変化は認められていない。

観測井 OB-2 坑の Zone-2 における変化発生後の P 波速度の変化量を測定回数ごとに配列した変化図を Fig. 14 に示す。

(4) 地層流体試料採取・分析

地層流体採取・分析は、観測井における物理検層によって圧入後の二酸化炭素の到達が示されている深度において、実際に二酸化炭素の存在を直接確認することを目的として 2005 年 12 月に実

施した。観測井 OB-2 坑にワイヤラインにより坑内降下式採取器 (CHDT) を降下し、貯留層 Zone-2 区間の物理検層における反応の異なる 3 点、深度 1108.6mMD、1114mMD および 1118mMD における地層流体試料を採取・分析した。これにより、深度 1108.6mMD では二酸化炭素圧入の顕著な影響は認められないこと、深度 1114mMD では可動流体はほとんど超臨界二酸化炭素のみであること、深度 1118mMD では超臨界二酸化炭素は存在しないが地層水に顕著に二酸化炭素が溶解していたこと等、貯留層における二酸化炭素の性状が直接確認できた。これらの結果は、観測井 OB-2 坑での物理検層結果と整合的なものであった。

(5) 微動観測

二酸化炭素圧入期間中における地盤の微動発生状況を観測し、圧入に起因する誘発地震の有無を確認することを目的として、岩野原基地内地上に設置した地震計 1 箇所および観測井 OB-2 坑内のハイドロフォン 1 箇所の計 2 箇所で微動観測を実施した。

2003 年 3 月 18 日から 2005 年 3 月 31 日までの間に収録された合計 3052 個のイベントから、明らかにノイズと判断できるような記録、および気象庁や地震予知総合研究振興会などの地震情報から震源が特定された地震については除外し、ノイズ・地震除去後の記録数と二酸化炭素圧入量 (1 日ごとの圧入量、累計圧入量) の間の相関を検討し、二酸化炭素圧入量と微動の発生数に相関は認められないことを確認した。

7. シミュレーション・スタディ

シミュレーション・スタディは「二酸化炭素地中貯留技術研究開発」で開発した二酸化炭素長期挙動予測のためのシミュレータ GEM-GHG (天然ガス地下貯蔵シミュレータ GEM-UGS をベースとする) を使用して実施した。

観測されたデータ (坑底圧力の変化、観測井への二酸化炭素到達時期等) のヒストリーマッチングにより得られた最適貯留層モデルにより、圧入した二酸化炭素の現状の貯留状況と 1000 年後までの長期挙動についての予測計算を行った。その結果、浮力を駆動力とする二酸化炭素の移動は極めて小さく、二酸化炭素は試験地点の近傍に長期間貯留される、との予測が得られた。

8. 新潟県中越地震による圧入実証試験への影響

2004 年 10 月 23 日に、岩野原基地から約 20km の地点を震央とする新潟県中越地震 (6.8 JMA) が発生し、地震と同時に発生した停電により岩野原基地の圧入設備は自動停止した。同基地内の地表地震計では最大加速度約 705gal が記録され、二酸化炭素地中貯留地点が、世界で始めての大規模な地震を経験した形となった。

物理検層と弾性波トモグラフィによる地震前後の貯留層の比較、地震時の坑底圧力測定結果の見直し、セメント評価検層 (USI, CBL) およびボアホール・テレビュアによる坑井状況のチェック、圧入設備の点検および気密・耐圧テスト等により、坑井、貯留層および圧入設備が地震後も健全な状況であることを確認した後、2004 年 12 月に二酸化炭素の圧入を再開した。

9. ま と め

長岡における二酸化炭素の圧入実証試験により、地下 1100m の地下深部塩水層に我が国で初めて、また陸域の地下深部塩水層としては世界で初めて二酸化炭素が貯留された。坑井掘削時から二酸化炭素圧入時にかけての貯留層の性状の把握のための調査・試験、二酸化炭素圧入中から圧入終了後にかけての「二酸化炭素貯留状況の把握のための観測 (モニタリング) とシミュレーション・スタディにより、地中における二酸化炭素の貯留状況につい

Fig.11 Injection rates and cumulative amounts of the injected CO₂ toward elapsed days.

Fig.12 Result of the pressure measurement at the injection well IW-1 and the observation well OB-4.

Fig.13 P-wave velocity difference tomograms, after 3200t injection (left) and 10405t injection (right).

Fig.14 Change of sonic and induction logs after the breakthrough at the observation well OB-2.

での理解が大きく進展した。

平均浸透率が相対的に低い我が国の地下深部塩水層に対して、地層を破壊することのない計画圧力と圧入レートで、累計 10405t の二酸化炭素が圧入できたことは、我が国地下深部塩水層における二酸化炭素地中貯留の実現性の示したこととなり、貯留層、坑井、圧入設備が大規模な地震に遭遇しながらもその健全性を維持したことは、変動帯に位置する我が国においても、安全な地中貯留が可能であることへの確実な例証となった。また坑井の掘削から圧入、モニタリング、シミュレーション・スタディにいたる一連のプロセスは、資源工学等の既存技術の二酸化炭素地中貯留への適要性を実証したと同時に、シミュレーション予測技術に新たな進展をもたらした。

二酸化炭素の貯留状況についての解析と検討は現在も継続中で、長岡における観測は 2007 年度まで継続する。地中における二酸化炭素の挙動に関してはまだ解明すべき点が多く、地化学的アプローチを含めたさらなる検討が必要であるものの、原位置での実証試験がもたらした成果は非常に大きい。今後の我が国において二酸化炭素地中貯留を実現するための技術体系の確立には、排出源から地中貯留までの一貫した実証試験の実現が強く望まれる。

References

- 1) International Panel on Climate Change (IPCC): Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage (2005).
- 2) Ministry of Economy, Trade and Industry (METI): Road map of Technology Strategy of CCS in Japan (2005).
- 3) The New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) and The Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE): Report of Research and Development of Underground Storage Technology for Carbon Dioxide (2001).
- 4) The New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) and The Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE): Report of Research and Development of Underground Storage Technology for Carbon Dioxide (2002).
- 5) The Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE): Report of Research and Development of Underground Storage Technology for Carbon Dioxide (2003).
- 6) The Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE): Report of Research and Development of Underground Storage Technology for Carbon Dioxide (2004).
- 7) The Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE): Report of Research and Development of Underground Storage Technology for Carbon Dioxide (2005).
- 8) Niigata Prefecture Government: Geologic map (1:200,000) of Niigata Prefecture and its explanation (2000).
- 9) Koichi Hoyanagi et al.: Reconstruction of the delta and estuary system and sequence stratigraphy of the Plio-Pleistocene strata in the Higashikubiki Hills, Niigata Prefecture, central Japan: Earth Science (Chikyu Kagaku), **54** (2000), 393-404.
- 10) The Research Group for Active Faults of Japan: Active Faults in Japan: Sheet Maps and Inventories (Revised Edition), (University of Tokyo Press, Tokyo, 1991).