総 説
Review

メタンハイドレート資源量評価と陸上産出試験

山本 晃司*・佐伯 龍男*

(Received July 31, 2009 ; accepted August 4, 2009)

Resource assessment and onshore production tests of methane hydrate

Koji Yamamoto and Tatsuo Saeki

Abstract: Methane hydrate, often called “fiery ice”, has been examined as a possible future energy source. MH21 (the Research Consortium for Methane Hydrate Resources in Japan) has advanced methane hydrate exploitation study covering the resource assessment around the Japan arc and the development of methane hydrate production technology since 2002. The existence of more than 10 methane hydrate concentrated zones were delineated in the Eastern Nankai Trough area and it was calculated that methane hydrate resources (in-place) in those methane hydrate concentrated zones corresponded to 20 tcf of methane gas. To verify the production techniques, twice onshore production tests have been conducted in the Canadian Arctic under international collaborations. Following the first production test in 2002 in which the thermal stimulation technique lead to the world's first gas production from methane hydrate-bearing sediment, the second test was performed to realize the depressurization for in-situ methane hydrate dissociation in 2007 and 2008. The discovery of the methane hydrate concentrated zones and the applicability of the energy efficient depressurization technique are important milestones to bring methane hydrate from an exotic material to real resource.

Keywords: methane hydrate, resource assessment, onshore production test, depressurization method

1. はじめに

「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」(経済産業省メタンハイドレート開発検討委員会, 2001)の下で実施されたメタンハイドレート開発のフェーズ1 (2001 ~ 2008 年度) の成果は, メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (2008) に総括成果報告書として発表されているが, 本論においてはそのうち JOGMEC (独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, プロジェクト開始時は石油公団) が担当した資源量評価に関する研究について概要を述べる。

非在来型資源の資源量評価には, 探査と開発技術の実証の両方の側面があり (坂口, 2008), はじめに我が国周辺海域における探査とそれにもとづく資源量 (in place) の評価について述べ, さらにメタンハイドレート (以下, MH) の資源化に必要な開発技術の実証のプロセスとして, カナダ北部で行われた第2回陸上産出試験について述べる。

2. メタンハイドレート資源量評価

2.1 MH21 以前

メタンを含む水分子の包摂化合物である MH は, 低温

高圧の条件下で安定な物質であり, 自然状態では, 永久凍土地域の地下や 500 m 以深の大水深の海底下に存在する。MH が分解すると, 約 160 ~ 170 倍の体積のメタンガスが発生することから, 天然ガス資源の存在形態の1つとした見方がされている。

MH の安定領域の下限を示唆する BSR (Bottom Simulating Reflector: 海底擬似反射面) の分布から, 日本周辺海域の海底下にも MH が賦存していると推定されており, 佐藤ほか (1996) は, 推定されていた BSR 分布面積を基に, MH と下位のフリーガスの総量 (メタンガス換算) として, 1994 年当時の日本の天然ガス年間消費量と比べて2桁大きいという試算を行っている。また, 松本ほか (1994) による「メタンハイドレート 21 世紀の巨大天然ガス資源」が出版されるなど, MH を将来的なエネルギー資源のひとつと見なす下地が形成されていた。

このような背景を踏まえて, 石油公団 (現, (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構) と民間石油開発会社他 10 社による共同研究「メタンハイドレート開発技術」が 1995 年から 2000 年にかけて実施された (石油公団他, 2000)。この研究期間中の 1999 年度に実施された基礎試験「南海トラフ」の掘削地点は, 東部南海トラフ海域の BSR 分布域内に位置しており, 検層データにおいて BSR 上位に MH の集積を示唆する特徴 (電気的高比抵抗, 地震波の

* (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 Japan Oil, Gas and Metals National Corporation

高速度など)を確認するとともに、原位置の温度圧力を保持したままコアを回収する PTCS (Pressure-Temperature Core Sampler: 圧力・温度保持コアサンプラー) を用いて、MH の回収に成功するなどの成果をおさめた (Tsuji *et al.*, 2004)。

2001 年度から、経済産業省の下、MH の商業生産への移行を視野に入れた「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」が実施され、石油公団・(独)産業技術総合研究所・財団法人 エンジニアリング振興協会によって組織されたメタンハイドレート研究開発コンソーシアム (以下、MH21) による本格的な調査がはじまった。

このプロジェクトの目標は、日本周辺海域の MH を将来的なエネルギー資源として利用していくことであるが、そのためには、①日本周辺に資源として利用可能な MH が存在していることを確認し、②それらが安全かつ経済的に開発可能である技術を確立することが重要となる。

本プロジェクトのフェーズ 1 となった 2001～2008 年度では、①については、東部南海トラフ海域を主要対象として、資源として利用可能な MH 賦存エリアの推定と、その原始資源量の算定が、②については、永久凍土地域における MH の陸上産出試験による MH の生産技術の開発が、重点的な達成目標と位置づけられた。

本稿の前半部である第 2 節では、このうち、東部南海トラフ海域における MH の原始資源量算定に係わる調査の概略を紹介する。

2.2 東部南海トラフ海域における調査

静岡県から和歌山県の沖合の一部を調査対象海域に (MH21 では、上記海域を東部南海トラフ海域と呼称している)、二次元反射法地震探査として 2001 年度に二次元基礎物理探査「東海沖～熊野灘」(総測線長 2,802 km) が、三次元反射法地震探査として 2002 年度に三次元基礎物理探査「東海沖～熊野灘」(総面積 1,960 km²) が実施さ

れ、その BSR 解釈結果等に基づき、2003 年度に基礎試錐「東海沖～熊野灘」として、16 箇所のサイトに 32 坑井が掘削された (図 1)。

坑井掘削の結果、BSR 分布から推定されていたように、調査海域広域において MH の賦存が確認され、砂層の孔隙を充填する形態の MH のコアサンプルが複数回収されるなどの成果が得られたものの、MH の集積量は、掘削箇所によって一様ではなく、BSR 分布域のすべてが資源開発の対象となりうる可能性については、疑念が示されることとなった。一方、MH の濃集を示唆する 3 Ω m を超える電気的高比抵抗箇所の総層厚が 100m 以上を超える場所もあり、タービダイト砂層を貯留層とする MH 濃集層の存在が確認された (Tsuji *et al.*, 2008; Fujii *et al.*, 2008a)。

上記により、MH21 における MH の探査は、MH 賦存層全体を当面の対象としてきた従来の考え方から、個々の MH 濃集帯 (連続的に分布するタービダイト砂泥互層を一連の貯留層とし、その BSR 上位部分に MH が濃集すると想定したもの) を対象とする考え方に変わり (図 2)、地震探査データを用いて、MH 濃集帯の推定を行う手法を確立した。この手法では、① BSR 解釈により MH の賦存エリアを絞り込むとともに、②タービダイト層の分布をチャネルやロープといった三次元地震探査データのイメージから解釈し、③強振幅反射面、④高速度異常、といった MH

図 2 メタンハイドレート賦存層に関する考え方の変遷

図 1 東部南海トラフ海域におけるメタンハイドレート調査

の濃集を示唆する地震学的特徴によって、濃集帯が成立している可能性の高い箇所を推定するものである (Saeki *et al.*, 2008)。

また、資源量評価についても、MH 濃集帯を基本とする考え方が導入され、対象海域である東部南海トラフ海域の資源量が算定された (Fujii *et al.*, 2008b)。

2.3 メタンハイドレート原始資源量

東部南海トラフ海域における資源量算定の主なポイントを以下に挙げる。

- ① MH 濃集帯を基本単位とすることにより、在来型の石油・天然ガス鉱床におけるプロスペクト・リード単位での資源量評価に近いものとなった。
- ② 総岩石容量、ネットグロス、孔隙率など、地震探査データ・坑井データに基づく実測値や推定値を元に、確率論的手法による算定作業を行い、天然ガス換算で約 20 tcf と試算した。
- ③ MH のみを対象とし、下位のフリーガス層は算定の対象から除外した。
- ④ 海洋 MH からメタンガスを回収する生産技術が確立されていないことから、回収率を入れずに、可採・非可採をとわず、対象となる地層中に含まれる MH の総量である、原始資源量を算定した。
- ⑤ 対象海域における、濃集帯以外の原始資源量を、BSR 分布面積に基づき算定し、天然ガス換算で約 20 tcf と試算した。

このうち、①と②は、基本的には、在来型の石油・天然ガス鉱床の評価と同様なものであり、これまでと比較して、きわめて具体的な対象に対して評価が行われたことを示している。

日本周辺海域全域と比較すると、対象となったのはごく一部の限定されたものであり、石油公団ほか (2000) がまとめた BSR 面積 (44,000 km²) と比較すると、その約 10 分の 1 の調査対象海域 (5,000 km²) にすぎない。MH 濃集帯は、さらに 6 分の 1 のエリアに、10 箇所以上に分散しており、その原始資源量が算定されたわけである。

資源開発という観点からは、比較的狭いエリアに、ある程度の量の MH が集積しているほうが経済的であり、従来にくらべて、現実的なモデルによる資源量評価が行われたといえる。

さらに、これらの MH 濃集帯が、フェーズ 2 で予定されている海洋産出試験地の候補となりうるものであることを考えると、今後の開発技術の確立を経て、将来的には、商業生産の対象となっていくことも期待される。

また、あわせて算定された⑤濃集帯以外の原始資源量は、BSR 面積に単位面積あたりの平均的な MH 量に乗じたものであり、佐藤ほか (1996) の算定方法に近いものである。この結果が、濃集帯の原始資源量にほぼ近い結果が得られたのは、偶然といってよいであろうが、逆にみれば、同量の MH が限定されたエリアに分布する MH 濃集帯は、MH の集積システムとして効率的なものであることを示している。

③のフリーガス層は、MH の安定領域下限である BSR の下位に存在すると考えられているが、基礎試錐「東海～熊野灘」では、生産対象となるようなガスの徴候は確認できず、少なくとも東部南海トラフ海域では、ガス飽和率 10% 以下、低飽和ガス層に相当する可能性が示唆されることから、算定対象から外している。

残念ながら、海洋 MH に対する生産手法が開発中の段階である現状では、④原始資源量に限定した資源量に留めざるをえないが、MH 濃集帯の砂層の孔隙充填型という明確な対象が確認され、それらの原始資源量として、ある程度の量が確認できたことは、今後の研究開発の進捗の動機付けとしては、重要なものであった。

2.4 資源量評価における当面の展開

MH の資源量評価については、2 つの大きな流れが存在する。

東部南海トラフ海域において確認された MH 濃集帯あるいは、それに相当するものを対象として、今後、海洋産出試験が実施され、MH 生産技術の確立が進められていく計画である。これと連動して、回収率の評価が行われていくことから、資源量評価作業は、原始資源量から可採埋蔵量の算定へと移行していくことになる。これには、MH 濃集帯内部の砂層部分の分布や性状などの地質解釈や貯留層評価といった、さらに詳細な解析が要求されていく他、生産予測や生産モニタリングなどの、探鉱段階から生産段階への技術の進化も行われていくであろう。第 3 節の陸上産出試験の結果には、これらの作業の指針となるものも含まれている。

一方、東部南海トラフ海域以外の海域における MH 賦存状況への関心も低くはなく、日本周辺海域における BSR 分布面積の見直し結果がまとめられ、122,000 km² に拡大することが、2009 年、経済産業省 (平成 21 年 7 月 8 日開催：第 16 回メタンハイドレート開発実施検討会資料) および MH21 ホームページ (<http://www.mh21japan.gr.jp/>) から公表されている。

ただし、BSR は、MH 濃集帯の有無とは無関係に、MH の賦存を示すにすぎず、直接的に資源量の増大を意味するものではない。実用性という点では、MH の回収技術の確立が、当面の重要課題となる。

3. 陸上産出試験

3.1 陸上産出試験の目的

前章で述べたように MH は物質としては地下に大量にかつ高い集積度で存在していることが分かってきたが、いまだ一般的にエネルギー資源の一種とは認識されていない。それが現在のオイルサンドのような非在来型の炭化水素資源の 1 つと認められるには、経済的な生産手法が開発され、それがフィールドで実証されるプロセスが必要である。MH21 は、海底面下の MH からのガス生産には、開発コストや環境影響の観点から、地下の原位置で加熱・減圧などの手法によって水とメタンガスに分解させて、在来型の油ガス同様に坑井から生産する分解採取法が現実的であ

ると考えている。その生産挙動と地下の条件における適用性は室内実験と数値シミュレーションである程度評価できるが、地下の条件でそれが現実にくまどくかを知らずには、実際にフィールドで実証するしか方法がない。

MHは地球上では大水深の海底面下と極地の永久凍土層下に存在するが、MH21 コンソーシアムでは、日本近海での資源量評価と並んで、大水深海域より地層にアクセスしやすい極地陸上での産出試験を行い、生産手法の実証を進めてきた。本章では、MH21 のフェーズ1 研究期間（2001～2008 年度）中に実施された2回の陸上産出試験の目的と成果について説明する。

3.2 第1回陸上産出試験とその成果

2002年に石油公団をはじめとする5カ国（日本・カナダ・インド・米国・ドイツ）の共同研究としてカナダ北西準州のマッケンジーデルタのMallikサイトで実施されたMH第1回陸上産出試験では、温水循環による熱刺激法により世界で初めて地下のMHからのメタンガス生産に成功した（Hancock *et al.*, 2005a）。この試験では124時間の試験期間に468 m³（標準状態、以下同様）、最大生産レート約350 m³/dayのメタンガスが生産されたが、この量は商業生産に結びつくものではなく、特に生産レートの安定性に大きな課題が残った。その一方、熱刺激法の前にケーシングを穿孔して行われた圧力検層ツールMDT[†]（Modular Dynamics Formation Tester）による減圧実験で地層内を減圧することに成功し（Hancock *et al.*, 2005b）、MH胚胎層に連続した孔隙と一定の浸透率があることが確かめられた（Dallimore and Collett, 2005）。

単純減圧法は一坑井で坑内の水頭を下げて地層の圧力を降下されることで実現され、外部からのエネルギー供給を行わず地層自体の熱のみで分解を行うため、石油の1次回収に相当する基本的な生産であるといえる。この手法が有効に働くためには、MHを胚胎する地層がある程度浸透率を持ち、地層内部まで減圧が通じることが必要であり、2002年のMallikにおける減圧実験の結果は、核磁気共鳴検層ツールCMR[†]（Combinable Magnetic Resonance tool）検層による浸透率評価と並んで（Kleinberg *et al.*, 2005）、単純減圧法が一定の有効性を持つことを示しており、数値シミュレーションでMallikでの適用性が示された（Kurihara *et al.*, 2005；Moridis, *et al.*, 2005）。

また、人工および天然のMHサンプルを使った分解実験を進め（Okui *et al.*, 2005；Kawasaki *et al.*, 2005）、さらに数値解析による室内実験とフィールドでの生産挙動のシミュレーションから、減圧法の適用条件が明らかとなり、原位置条件では主として熱の輸送がMH分解を律速し、主として地層温度、初期および絶対浸透率（MH分解前およびMH分解後の浸透率）が減圧法の適用性を支配することを示した（Kurihara *et al.*, 2004；Masuda *et al.*, 2005；今野ほか, 2009）。

一方で、基礎試錐「東海沖～熊野灘」においては東部南海トラフの代表的なMHの賦存状態はタービダイト砂泥互

層中の砂層における孔隙充填型であり、第1回陸上試験サイトのMH胚胎層と、温度・圧力・孔隙率・浸透率といった物理的特性が類似していることが分かった。また、第2節で述べた検層やコアによる地層物性の評価と並んで、実証実験坑井でのCHDT[†]（Cased-Hole Dynamics Tester）における小規模な加圧・減圧実験を行い、MH層の圧力・応力と浸透率評価を実施した（Yamamoto *et al.*, 2005）。

これらの情報から、東部南海トラフのタービダイト砂泥互層中の砂層が陸上産出試験サイトと比較的に似た物理的条件を満たすことが分かり、我が国の資源フィールドにおいても減圧法の適用が期待できることとなった。

3.2 第2回陸上産出試験

以上の理由から、JOGMECは経済産業省資源エネルギー庁の委託を受けて、2002年と同じMallikサイトにて減圧法の適用性を実証するための第2回陸上産出試験を行うこととした。

第2回試験はJOGMECとカナダ天然資源省（Natural Resources Canada, NRCan）の共同研究として行われ、北西準州の教育・研究機関であるAurora Collegeがオペレータを担当し、Inuvialuit Oilfield Services (IOFS) がプロジェクトマネジメントを実施した。2007年冬（1～4月）と2008年冬の2冬にわたって行われる計画で作業が準備された。

(1) 実施環境と地質とメタンハイドレート層の条件

図3に試験実施地点の位置を示す。試験地域はマッケンジー川河口付近で、カナダ南部と道路で接続された最も近隣の町（Inuvik, 人口3,500人）から約100 km離れており、アクセス可能なのはマッケンジー川とボーフォート海が結氷し、その上にアイスロードが建設可能な冬季に限られる。また、きわめて脆弱な極地の生態系の下にあり、ホッキョクグマやベレーガクジラなどの希少動物もおり、さらに狩猟で生計を立てる先住民の生活の場でもあるため、環境保護には最大限の注意が払われた。

図3 マリックサイトの位置（カナダ北西準州マッケンジーデルタ）（after Dallimore and Collett, 2005）

[†] Mark of Schlumberger

図4 Mallik 2L-38 試験対象区間の貯留層特性（孔隙率・浸透率（md）・MH 飽和率）

Mallik サイトの MH 貯留層はマッケンジー川のデルタ堆積物中にあり、厚さ約 650 m の永久凍土層の下位に位置する。この地域では 1970 年から MH の存在が知られており、1998 年には MH の研究に特化して集中的なデータとコアの取得を目的とした日加共同研究のための坑井、JAPEx/JNOC/GSC Mallik 2L-38 が掘削されており (Dallimore *et al.*)、また 2002 年の第 1 回陸上産出試験に際しては、生産井 Mallik 5L-38 と、坑井間トモグラフィと温度計測を目的としたモニタリング井 Mallik 3L-38 および 4L-38 が掘削されていて、MH の存在状態は比較的良く知られていた。

MH の安定下限は深度約 1,100 m MSL（平均海水面からの深度、以下同様）にあり、MH はそのうち約 890 ～ 1,100 m の約 210 m の区間にそれぞれ数 10 m の厚さを持つ 4 から 5 層の MH 胚胎層に存在して、それらの間と MH 層に挟在する泥・シルト層から構成される (Dallimore and Collett, 1999)。

産出試験は 1,059 ～ 1,100 mMSL の最下層部で実施した。MH 層基底における地層温度は約 12℃あり、減圧法に適した条件であるといえるが、最深部において砂層中に MH が存在するため、その下は帯水層に接しており、水のブレイクスルーの懸念があった。

本層は一部シルト層を挟む細粒～中粒の砂層の孔隙を MH が飽和率 70 ～ 80% 程度で占有している。産出試験に先立って実施された物理検層から、砂層の平均的な絶対浸透率は 100 ～ 1,000 mD、初期浸透率は 0.1 ～ 1 mD 程度と推定された (図 4)。

これらの情報に基づき、また下位の帯水層との導通防止も考慮して、生産対象区間を 1,081 ～ 1,093 mMSL の 12 m 区間と設定した。

(2) 生産技術の検討要素

本試験の実施においては、以下に示すように、自噴する通常の油ガス田における坑井テストとは異なるさまざまな

技術要素の検討が必要であった。

・人工採油

坑内の水をポンプなどの人工採油機器で排除して減圧を実現することとしたが、ガス・水それぞれの生産レートが事前に予測しがたく、また大きな変動が見込まれること、温度が低いこと、生産流体が水とガスで潤滑性が望めないこと、出砂が予想されることなどを考慮して使用する機器を選択する必要がある。水溶性天然ガス田開発の知見などを参考にして、最終的には電動水中ポンプ (Electrical Submersible Pump, ESP) を用いることとした。

・減圧に対応した地層間隔離とウェルインテグリティ

MH 分解を進めるために、坑底流動圧力を初期の約 11 MPa から最大 3 MPa まで減圧する計画であった。しかし、先に述べたように MH 層は水層と接しており、セメントの不良などで水層とのコミュニケーションが生じれば減圧は不可能になる。そのため、超音波のセメントボンドログツール IsolationScanner[†]などの技術を適用して、事前に十分なセメントの検討を行った。

・掘削と仕上げ

環境保護の観点から固体掘削廃棄物はすべてカナダ南部まで輸送することとしたため、廃棄物の量を減らすために、1998 年に掘削された 2L-38 井を延長、拡張して再利用することとした。同坑井はパーマフロストケーシング以下では裸坑であったが、帯水層からの隔離の必要性から、MH 層もケーシング・セメンチング上のパーフォレーション仕上げとした。モニタリング用のケーブルをケーシングに沿わせて設置するために、生産区間の最終坑径は 14", ケーシング径は 9-5/8" とした。

第 1 冬試験の坑内仕上げ機器の設置状況を図 5 に、第 2 冬試験の坑内仕上げ機器の概念図を図 6 に示す。ESP を坑内に設置し、坑内から排水する間接減圧法を選択したが、生産水を地表に汲み上げて処理する許認可が産出試験開始まで間に合わない恐れがあったため、生産ガスと生産水を地下で分離し生産水を MH 胚胎層下面から 110 ～ 160 m 下の帯水層に圧入する方式をとった。

生産される流体は MH 安定領域に近い温度・圧力であるため、ポンプによる昇圧で容易に MH が再生成する。そのため生産ガスと生産水の分離が重要であった。第 1 冬試験、ポンプのインテークはパーフォレーション区間下面のさらに 27 m 下に設置した。生産水はポンプに引かれて下方に送られ、生産されたガスは密度差で自然分離されて上方に向かうような設計とした。このガスは 638 mMSL に設置されたパーフォレーテッドジョイントよりチュービングに流入し、地上の生産ラインで計量されたあとフレアで焼却放散される予定であった。

第 2 冬試験では、生産水は地表にくみ上げて別の圧入井より地下に還元することとした。そのため ESP をパーフォレーションより上に設置したが、昇圧をなるべく小さくしつつ、水頭位置をできるだけ下げ、かつ MH 層や永久凍土層に熱の影響が生じないように、永久凍土層下限と MH 賦存領域上面の間の深度約 800 m に ESP を設置した。これ

図5 第2回陸上産出試験第1冬試験（2007年）における坑内仕上げの概念図

により、4 MPa までの減圧が可能となった（パーフォレーションからポンプインテークまで 300 m + ガスの流入を防止するための 100 m の余裕）。また、水・ガス分離は遠心式のセパレータをポンプインテークに設置して実現した。この仕上げでは、生産流体が低温の地表側に移動するため、MH 再生防止の観点ではより厳しい条件である。そのため、インダクションヒーターもポンプインテーク下に設置して流入流体の温度を上げることとした。

・出砂対策

2002 年の第1回試験は温水循環法で坑内から約 0.22 m³ の砂が回収され地表でも砂が検出され（Hancock *et al.*, 2005a），MDT による減圧実験でも3箇所でのポンプの砂によるプラグが認められ（Hancock *et al.*, 2005b），また室内実験（Yamamoto *et al.*, 2007）でも出砂は不可避と判断されていた。しかし、第1冬試験では、ポンプ位置をパーフォレーション下にするため内径の制約が生じること、およびスクリーンなどのサンドコントロール機器を設置することにより生産挙動が複雑になり、またケースドホール検層にも制約が生じること、また試験期間が短期間であることなどから砂の生産を許しながら水・ガスを生産することとした。そのため、出砂がポンプに悪影響を与えさせないため、ポンプ上部を覆うようにシュラウドを設置した。水と共に

図6 第2回陸上産出試験第2冬試験（2008年）における坑内仕上げの概念図

生産された砂はシュラウド下部で分離され、サンプルホール（バッカーからセーフティーシェアジョイントまでの 70 m，約 2.5 m³）に落ちるように計画された。

また、パーフォレーションは、出砂防止の観点からフローエリアを最大化しつつ個々のパーフォレーション孔径を最小化するように、チュービングで降下する穿孔装置（Tubing Conveyed Perforator, TCP）を利用して 120 度フェーシングで 12 m 区間に約 1,060 ショットを穿孔した。

しかし、結局第1冬試験は出砂により早期に終了を余儀なくされたので、第2冬試験では、プレミアムスクリーンによる出砂対策がとられた。スクリーンの性能（通過する砂の量と粒径、砂の集積による浸透率低下など）は事前に室内実験で評価した。

・モニタリング技術

第1冬、第2冬ともポンプ周辺で温度・圧力を計測した他、パーフォレーション近くにメモリーゲージを設置して温度・圧力を計測した。

また、ケーシング後にセメントボンドと地層の初期状態の把握のために2種類の中性子検層ツール RST[†]（Reservoir Saturation Tool），APS[†]（Accelerator Porosity Sonde），ならびに音響および超音波検層ツール SonicScanner，IsolationScanner を利用したケースドホール検層を実施し、同様の種目は試験終了後にも取得して MH 分解状態の把握を行った（Fujii, T. *et al.*, 2008c）。

生産区間のケーシング外側には地表から連続的に温

度データを取得する光ファイバー温度計 (Distributed Temperature Sensor, DTS) と、流動ポテンシャル計測用の電極が設置されたが、DTS の計測は断線のため生産対象層の上の 1,048 m までしか計測できなかった (Fujii K. *et al.*, 2008)。

(3) 第 1 冬試験

2007 年冬は例年にもまして強い寒気が押し寄せ作業に影響を与えた。このような状況のもと作業の遅れが発生して、当初予定されていたモニタリング井の掘削計画が断念されるなどの影響が出たが、2007 年 4 月 2 日にはテスト編成を降下、地表設備と接続して 15:53 (現地時間) にポンプの運転にこぎつけた。

生産過程の詳細は、安田ほか (2007), Numasawa *et al.* (2008), Kurihara *et al.* (2008) に述べられている。生産試験開始当初は順調に坑井内排水による減圧が進んだが、約 1 時間後にポンプは動作し続けるものの吐出圧が低下し減圧が進まなくなるトラブルが発生しポンプを停止した。その後再度運転を開始したところ、坑底圧力 7.6 MPa までの減圧に成功し、4 月 3 日 02:00 に地表でガス産出が検知されたためケーシングバルブを閉じた。しかし、同様のトラブルが始まったために再度ポンプを停止した。4 月 3 日 05:00 にポンプ運転を開始したところ、順調に減圧が進むとともにケーシング内にガスが蓄積してアニュラス圧力が上昇した。坑底圧力は 7.5 MPa 程度で推移し、15:00 に一時的に水位がパーフォレーテッドジョイントまで低下したためチュービング内にガスが流れ込みフレアを点火させることができた。しかし、同時にポンプの調子が悪化したため運転を中止した (15:52)。このステージで達した最低坑底圧力は約 7 MPa である。

以後さらに 4 回の減圧を試みたが、いずれも短期でポンプ不調が発生した。その後、サンプホールのセーフティージェアジョイント付近の深度まで砂の堆積が認められたために、試験は終了した。このときサンプホールに堆積した砂の量は約 2.5 m³ である。

MH 胚胎層から生産されたガスの大部分はケーシング内に溜まっていたため、その期間の坑内の水位は坑底圧力と地表のケーシング圧力の差とガス・水の密度から算出することができる (Kurihara *et al.*, 2008)。また、地表から液面までの容積は、地層から流入したガスで満たされているため、状態方程式を解くことにより生産されたガス量を計算することができて、ケーシング内のガス量は約 830 m³ と算出された。この量にフレアされたガスの量が加わったものが実際のガス生産量である。

少なく見積もっても 830 m³ というガス量 (MH 体積換算約 5 m³) は生産水に溶解していたガス量および砂とともに産出された MH から分解されたガス量では説明できず、大部分のガスは減圧によって分解した MH から生じたと考えられた。

産出試験前の生産シミュレータで予想した、坑底圧力を約 3 MPa まで減圧したときの初期のガス生産レートは 1,300 m³/day であり、24 時間後で 2,200 m³/day であった。しか

図 7 減圧法で分解されたメタンハイドレートからのガスの燃焼 (2008 年 3 月 10 日)

し、本産出試験では坑底圧力が 7 MPa 以上のにもかかわらず、ほぼ同様の生産レートが達成された。これは出砂に伴う坑井近傍の浸透率改善が寄与しているものと考えられる (Kurihara *et al.*, 2008)。

産出試験後に行われたケースドホール・ログでは、生産層近傍での APS ツールで観測された中性子孔隙率の上昇、RST ツールで計測された中性子捕獲断面積の上昇、音波検層によるせん断波速度の低下などが見られ、出砂と MH 分解の両方が影響してこれらの変化を引き起こしたと考えられる (Fujii T., *et al.* 2008c)。

期間は短かったものの、減圧法による MH の分解を地下で実現し、予想より高い生産量が得られたという事実は、MH 生産に対する減圧法の有効性実証の第一ステップとなりうると考えられたが、一方で技術課題も明らかになったために、それらの解決を図りながら第 2 冬試験に向かうこととなった。

(4) 第 2 冬試験

当初は、第 2 冬試験は非均質性が高いより浅部の MH 胚胎層で試験を行うことも検討されていたが、温度条件が生産に適した最深部での試験に集中することとし、第 1 冬試験と同じ区間で試験を継続することとした。

アイスロード建設、敷地造成、リグ設置に引き続いて坑内に仕上げ機器を再度降下し、地表生産設備に接続して、2008 年 3 月 10 日午後より減圧を開始した。3 段階で実施された減圧の各過程で安定した減圧が実現され、ポンプは 139 時間動作し続けた。この過程で、累計 13,000 m³ のガス (生産レート 2,000 ~ 4,000 m³/day) が実現された (Yamamoto and Dallimore, 2008)。図 7 に、減圧法で生産されたガスの地表でのフレアの写真示す。

2008 年は廃坑・原状復帰の上、アイスロード閉鎖前に完全撤収する必要があったため、3 月 16 日正午を持ってポンプを停止、以後廃坑作業に移行し、4 月初旬に現場よ

り撤収した。

3.3 陸上産出試験の成果

第2冬試験の結果から減圧法を主体とした生産手法を目指したMH21のアプローチの正しさが確認されたと考えている。試験中はガスおよび水の生産量、温度、圧力など多くのデータとサンプルが取得され、それらの現在分析・解析が進められている。生産挙動はほぼ予測の範囲内であったが、予測との違いについては坑井周囲で発生した現象の影響などを考慮してより詳細な分析が必要と考えている。

これらのデータを解析することにより、地下のMHの分解挙動に関する研究が進むと期待され、より効率的な生産手法の構築が可能になると考えられる。東部南海トラフにおける減圧法による生産挙動のシミュレーションの結果も発表されており (Kurihara *et al.*, 2009), 今回の結果とあわせて我が国の資源フィールドにおける資源量評価を進めることが可能となりつつある。

今回の試験は、ある特定の条件の下での結果に過ぎず、また試験期間も6日間と商業生産で考えられるような長期挙動の評価を行うために十分であるとはいえない。したがって、今後は我が国における将来の資源フィールド候補地での海洋産出試験の実施や、より長期の試験の可能性の模索が必要である。

海洋で試験を行うに際しては、大水深で安全に操作を行うための機器の検討、海底面と坑内の確実な地層隔離、環境影響など、陸とは異なる課題が存在し、そのための検討を進める必要があり2009年度に開始されたフェーズ2における主要な研究課題となっている。

4. ま と め

MHが浸透性のある砂層に濃集帯という形で集中していることが発見されたことと、減圧法により一定の条件下では大きなエネルギーの投入なしでMHの分解が進むことを実証できたことは、MHが非在来型資源の一角を占めるという認識が得られるための大きなステップとなったと考えられる。

経済性が議論できるには、実際の資源フィールドにおける生産技術の現実性と効率についてより確度の高い情報が必要になるが、フェーズ1の成果を持ってMHの研究は科学的な基礎研究から一歩踏み出して、資源化のための技術開発のフェーズの段階に進んだといえるであろう。

メタンハイドレート研究は2009年度よりフェーズ2に移行し、その中では2012年に我が国のハイドレート資源フィールドにおいて海洋産出試験が計画されている (メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム, 2009)。今後は、より実証的で現実的なハイドレート資源化研究が進められると期待している。

謝 辞

本稿の執筆にあたり、研究成果の公表を許可いただいた、経済産業省、メタンハイドレート研究開発コンソーシアム (MH21)、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、および

日頃より多大なご尽力・ご協力をいただいているMH21の研究者の方々や陸上産出試験の関係者、その他関係各方面に、深く感謝します。

引 用 文 献

- Dallimore, S.R. and Collett, T.S., 1999 : Regional gas hydrate occurrence, permafrost conditions, and Cenozoic geology, Mackenzie Delta area, in *Scientific Results from JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 Gas Hydrate Research Well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada* edited by Dallimore, S. R. Collett, T. S. and Uchida, T., *Geological Survey of Canada Bulletin* 544.
- Dallimore, S. R., Collett, T. S. and Uchida, T., 1999 : Overview of science program, JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well. in *Scientific Results from JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 Gas Hydrate Research Well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada* edited by Dallimore, S. R. Collett, T. S. and Uchida, T., *Geological Survey of Canada Bulletin* 544.
- Dallimore, S.R. and Collett, T. S., 2005 : Summary and implications of the Mallik 2002 gas hydrate production research well program. in *Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada* edited by Dallimore, S. R. and Collett, T. S., *Geological Survey of Canada Bulletin* 585.
- Fujii, T., Namikawa, T., Okui, T., Kawasaki, K., Ochiai, K., Nakamizu, M., Nishimura, M., Takano, O. and Tsuji, Y., 2008a : Methane hydrate occurrence and saturation confirmed from core samples, eastern Nankai Trough, Japan, in Collett, T., Johnson, A., Knapp, C., and R.Boswell, eds., *Natural Gas Hydrates : Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards* : AAPG Special Publication (in press).
- Fujii, T., Saeki, T., Kobayashi, T., Inamori, T., Hayashi, M., Takano, O., Takayama, T., Kawasaki, T., Nagakubo, S., Nakamizu, M. and Yokoi, K., 2008b : Resource Assessment of Methane Hydrate in the Eastern Nankai Trough, Japan, Paper presented at the 6th International Conference on Gas Hydrates, Vancouver, Canada, 6–10 July.
- Fujii, T., Takayama, T., Dallimore, S.R., Nakamizu, M., Mwenifumbo, J., Kurihara, M., Yamamoto, K., Wright, J. F., Al-Jubori, A., Tribus, M. and Evans, R.B. 2008c : Wire-line logging analysis of the JOGMEC/NRCan/Aurora Mallik Gas Hydrate Production Test. Proc. 6th Int. Conf. on Gas Hydrates, Vancouver, B.C., Canada, July 6–10, 2008.
- Fujii, K., Cho, B., Ikegami, T., Sugiyama, H., Imasato, Y., Dallimore, S. R., and Yasuda, M. 2008 : Development of a monitoring system for the JOGMEC/NRCan/Aurora Mallik Gas Hydrate Production Test Program, this volume. Proc. 6th Int. Conf. on Gas Hydrates, Vancouver, B.C., Canada, July 6–

- 10, 2008.
- Hancock, S.H., Collett, T.S., Dallimore, S.R., Satoh, T., Inoue, T., Huenges, E. and Weatherill, B., 2005a : Overview of thermal stimulation production-test results for the JAPEx/JNOC/GSC *et al.* Mallik 5L-38 gas hydrate production research well, in *Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada* edited by Dallimore, S. R. and Collett, T. S., *Geological Survey of Canada Bulletin* 585.
- Hancock, S.H., Dallimore, S.R., Collett, T.S., Carle, D., Weatherill, B., T.S., Satoh, T. and Inoue, T., 2005b : Overview of pressure-drawdown production-test results for the JAPEx/JNOC/GSC *et al.* Mallik 5L-38 gas hydrate production research well, in *Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada* edited by Dallimore, S. R. and Collett, T. S., *Geological Survey of Canada Bulletin* 585.
- Kawasaki, T., Tsuchiya, Y., Nakamizu, M. and Okui, T., 2005 : Observation of methane hydrate dissociation behavior in methane hydrate bearing sediments by X-ray CT scanner. Proc. 5th Int. Conf. on Gas Hydrates, Trondheim, Norway, June 13–16, 2005. Paper 1041.
- Kleinberg, R. L., Flaum, C. and Collet, T. S., 2005 : Magnetic resonance log of JAPEx/JNOC/GSC *et al.* Mallik 5L-38 gas hydrate production research well : gas hydrate saturation, growth habit, and relative permeability. in *Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada* edited by Dallimore, S. R. and Collett, T. S., *Geological Survey of Canada Bulletin* 585.
- Kurihara, M., H. Ouchi, Y. Masuda, H. Narita, and Y. Okada. 2004 : Assessment of gas productivity of natural methane hydrates using MH21 Reservoir Simulator. Proc. AAPG Hedberg Conference, Vancouver, B.C., Canada, September 12-16, 2004.
- Kurihara, M., Ouchi, H., Inoue, T., Yonezawa, T., Masuda, Y., Dallimore, S.R. and Collett, T. S., 2005 : Analysis of the JAPEx/JNOC/GSC *et al.* Mallik 5L-38 gas hydrate thermal-production test through numerical simulation. in *Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada* edited by Dallimore, S. R. and Collett, T. S., *Geological Survey of Canada Bulletin* 585.
- Kurihara, M., Funatsu, K., Ouchi, H., Masuda, Y., Yasuda, M., Yamamoto, K., Numasawa, M., Fujii, T., Narita, H., Dallimore, S.R. and Wright, F., 2008 : Analysis of the JOGMEC/NRCan/Aurora Mallik gas hydrate production test through numerical simulation. Proc 6th Int. Conf. on Gas Hydrates, Vancouver, B.C., Canada, June 6–10, 2008.
- Kurihara, M., Sato, A., Ouchi, H., Narita, H., Masuda, Y., Saeki, T., and Fujii, T., 2009 : Prediction of gas productivity from Eastern Nankai Trough methane-hydrate reservoirs. SPE125481. *SPE Reservoir Eval. Eng.*, **12**, 477–499.
- Masuda, Y., Konno, Y., Kurihara, M., Ouchi, H., Kamata, Y., Ebinuma, T. and Narita, H., 2005 : Validation study of numerical simulator predicting gas production performance from sediments containing methane hydrate. Proc. 5th Int. Conf. on Gas Hydrates, Trondheim, Norway.
- Moridis, G. J., Collett, T. S., Dallimore, S. R., Inoue, T. and Mroz. T., 2005 : Analysis and interpretation of the thermal test of gas hydrate dissociation in the JAPEx/JNOC/GSC *et al.* Mallik 5L-38 gas hydrate production research well. in *Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada* edited by Dallimore, S. R. and Collett, T. S., *Geological Survey of Canada Bulletin* 585.
- Numasawa, M., Yamamoto, K., Yasuda, M., Fujii, T., Fujii, K., Dallimore, S. R., Wright, J. F., Nixon, F. M., Imasato, Y., Cho, B., Ikegami, T., Sugiyama, H., Mizuta, T., Kurihara, M. and Masuda, Y., 2008 : Objectives and operation overview of the 2007 JOGMEC/NRCan/Aurora Mallik 2L-38 Gas Hydrate Production Test. Proc. 6th Int. Conf. on Gas Hydrates, Vancouver, B.C., Canada, July 6–10, 2008.
- Okui, T., Uchida, T., Masuda, Y., Munakata, T. and Kawasaki. T., 2005 : Laboratory analysis of gas hydrate dissociation in cores from the JAPEx/JNOC/GSC *et al.* Mallik 5L-38 gas hydrate production research well : observational and experimental investigations using X-ray computed tomography. in *Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada* edited by Dallimore, S. R. and Collett, T. S., *Geological Survey of Canada Bulletin* 585.
- Saeki, T., Fujii, T., Inamori, T., Kobayashi, T., Hayashi, M., Nagakubo, S. and Takano, O., 2008 : Delineation of Methane Hydrate Concentrated Zone Using 3D Seismic Data in the Eastern Nankai Trough, Paper presented at the 6th International Conference on Gas Hydrates, Vancouver, Canada, 6-10 July.
- Tsuji, Y., Ishida, H., Nakamizu, M., Matsumoto, R. and Shimizu, S., 2004 : Overview of the METI Nankai Trough Wells : A Milestone in the Evaluation of Methane Hydrate Resources, *Resource Geology*, **54**, 3–10.
- Tsuji, Y., Fujii, T., Hayashi, M., Inamori, T., Kawasaki, M., Kitamura, R., Matsushima, J., Nagakubo, S., Nakamizu, M., Namikawa, T., Ochiai, K., Ohbi, K., Oikawa, N., Okui, T., Saeki, T., Shimizu, S., Yamamoto, K., 2008 : Methane Hydrate Occurrence and Distribution in the Eastern Nankai Trough, Japan—Findings of the “METI Toaki-oki to Kumano-nada” Methane Hydrate Drilling Program Multi-well hydrate exploration program and the findings on hydrate distribution in the Eastern Nankai Trough, off Central Japan, in Collett, T., Johnson, A., Knapp, C., and R. Boswell,

- eds., *Natural Gas Hydrates : Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards* : AAPG Special Publication (in press).
- Yamamoto, K., Yasuda, M., Nakamizu, M., Khong, C.-K., Kusaka, K., 2005 : Application of wireline conveyed through casing formation tester to methane hydrate research in Japan. Proc. *11th Formation Evaluation Symp. Japan*, Chiba, Japan, Paper F, Oct. 5–6, 2005.
- Yamamoto, K., Wu, B., Maney, B. and Kiewiet, L., 2007 : Mechanical properties of post dissociation methane hydrate bearing sediments and solid production mechanism, Proc. 18th Engineering Mechanics Division Conference of American Society of Civil Engineers, Blacksburg, VA, USA. June 3–6, 2007.
- Yamamoto, K., and Dallimore, S. R., 2008 : Aurora-JOGMEC-NRCan Mallik 2006-2008 Gas Hydrate Research Project Progress. *Fire in the Ice*, Methane Hydrate Newsletter, National Energy Technology Laboratory, Summer 2008.
- 今野義浩・増田昌敬・大山裕之・栗原正典・大内久尚, 2009 : メタンハイドレートコアの減圧法実験におけるガス生産律速因子の解析, 石技誌, **74**(2), 165–174.
- 坂口隆昭, 2008 : 2007 年 SPE 新基準における埋蔵量の定義・分類と評価手法, 石油・天然ガスレビュー, **42**, 15–26.
- 佐藤幹夫・前川竜男・奥田義久, 1996 : 天然ガスハイドレートのメタン量と資源量の推定, 地質学雑誌, **102**(11), 959–971.
- 石油公団・石油資源開発㈱・帝国石油㈱・東京ガス㈱・大阪ガス㈱・日本海洋掘削㈱・㈱テルナイト・電源開発㈱・AOC エネルギー開発㈱・インドネシア石油㈱・東邦ガス㈱, 2000 : メタンハイドレート開発技術総括報告書, 石油公団石油開発技術センター.
- 経済産業省メタンハイドレート開発検討委員会, 2001 : 我が国におけるメタンハイドレート開発計画.
- 松本 良・奥田義久・青木 豊, 1994 : メタンハイドレート 21 世紀の巨大天然ガス資源, 日経サイエンス社.
- メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (2008) : 「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」 フェーズ 1 総括成果報告書. http://www.mh21japan.gr.jp/seika/2008/pdf/fl_00.pdf.
- メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (2009) : フェーズ 2 の実行計画 (案). http://www.mh21japan.gr.jp/pdf/phase2_1.pdf
- 安田優人・Dallimore, S.R.・MH21 メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム・タスクフォース産出試験計画, 2007 : メタンハイドレート第二回陸上産出試験 (2007 年) の報告. 石技誌, **72**(6), 603–607.