

講 演
 Lecture

油層エンジニアから見たメタンハイドレート研究開発の現状と今後*

大 槻 敏**

(Received January 31, 2019 ; accepted February 20, 2019)

Current status and future perspectives of methane hydrate production R&D from viewpoints of reservoir engineer

Satoshi Ohtsuki

Abstract : Natural gas hydrates have huge potential as an unconventional gas resource. It is necessary for utilization of these resources to establish a gas production technology and investigate suitable conditions for extraction of methane gas from gas hydrate bearing reservoirs. In this paper, the main outcomes of past field tests for gas hydrate production are briefly introduced. Also, this paper describes current status of gas hydrate production R&D that include initial physical properties and their changes of gas hydrate reservoir due to gas hydrates dissociation by depressurization, and pressure-temperature monitoring systems and reservoir simulation as the technologies to evaluate reservoir response during the field production test.

Many methods have been proposed for gas production from the gas hydrate reservoir, but production methods superior to the depressurization have not been proposed at the present time. The stable and long-duration production by depressurization has not been accomplished yet. It is important not only to understand possible phenomena during production but also to identify unknown problems to be overcome and examine practical countermeasures for them.

Keywords : methane hydrate, depressurization, field test, reservoir response

1. はじめに

メタンハイドレートは、資源小国の日本において貴重な国産エネルギーとして期待されている。その研究動向には高い関心が寄せられており、やりがいはあるが難易度の高いプロジェクトである。

2001 年 7 月に発表された「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」を実現するため、翌 2002 年 3 月に「メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム（通称：MH21）」が設立され、メタンハイドレートの研究開発が本格的にスタートした。現時点では、在来型資源と比較して実フィールドにおける生産データが極めて少なく、国主導による研究段階にあるが、民間企業が主導する商業化の実現に向けて、中長期的なスパンで取り組む必要がある。

メタンハイドレート層からのガス生産については、さま

ざまな手法が提案されているが、現在のところ、減圧法に優る生産手法は提唱されていないのが現状である（栗原，2014）。本稿では主に生産挙動と予測の観点から、これまでの陸上および海洋におけるガス生産試験の主要な成果を振り返りたい。また、生産に伴い貯留層内部で生じると考えられる現象とその評価技術（モニタリングやレザバースミュレーションなど）の現状を紹介し、最後に我々が抱える課題について述べたい。

2. これまでの主なガス生産試験

表 1 は、これまでの主なガス生産試験をまとめたものである。以下に概要を述べる。

2.1 陸上産出試験

第 1 回陸上産出試験（2002 年）は、カナダ北西準州のマッケンジーデルタ地域マリックサイトにおいて、温水循環法によって 5 日間で約 470 m³ のガスを生産することに成功した（Dallimore and Collett, 2005 ; Hancock *et al.*, 2005a）。また、圧力検層ツール MDT（Modular Formation Dynamics Tester : Schlumberger 社登録商標）による減圧過程の観察を行い、ガスの発生を確認した（Hancock *et al.*, 2005b）。この圧力解析の結果などから、メタンハイドレート層に一定の浸透率があることが確認され、減圧法の

* 平成 30 年 11 月 1 日、平成 30 年度石油技術協会秋季講演会「若手技術者一何を考えて何を指す」で講演 This paper was presented at the 2018 JAPT Autumn Meeting entitled “Young technical experts—what they think and where they are going” held in Tokyo, Japan, on November 1, 2018.

** 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 Japan Oil, Gas and Metals National Corporation

表1 これまでの主なガス生産試験

	第1回陸上産出試験 Mallik (2002)	第2回陸上産出試験 Mallik (2007/2008)	アラスカ陸上試験* Ignik Sikumi (2012)	第1回海洋産出試験 Nankai (2013)	第2回海洋産出試験 Nankai (2017)
場 所	カナダ北西準州 マッケンジーデルタ地域 マリックサイト		米国アラスカ州 ノーススロープ	東部南海トラフ海域 第二渥美海丘	
時 期	2002年	2007/2008年	2012年	2013年	2017年
参 加 国	日本, カナダ, 米国, ドイツ, インド	日本, カナダ	米国, 日本	日本	日本
生産手法	温水循環法	減圧法	CO ₂ 置換法, 減圧法	減圧法	減圧法
ガス累計 生産量	約 470 Sm ³ (5日間)	約 830 Sm ³ (12.5時間) 約 13,000 Sm ³ (6日間)	約 24,000 Sm ³ (30日間)	P井: 約 119,000 Sm ³ (6日間)	P3井: 約 40,850 Sm ³ (12日間) P2井: 約 222,600 Sm ³ (24日間)
結 果	・世界で初めて意図的にMH層からガスを生産 ・簡易的な減圧法試験でMH層の浸透性を確認し, 減圧法の有効性を認識	・減圧法を適用したガス生産に成功(世界初)	・メタンとCO ₂ の置換を確認	・減圧法による連続生産に成功(海洋では世界初)	・第1回海洋産出試験を上回る生産期間
課 題	・生産の継続 ・エネルギー効率	・長期試験の必要性	・置換効率	・生産障害の克服	・長期生産挙動の把握 ・生産量の向上

*アラスカ陸上試験(2012年)は, DOE/NETLとConocoPhillips社のプログラムにJOGMECが参加

適用可能性が示唆された(MH21, 2008)。

第2回陸上産出試験(2007, 2008年)は, 同サイトにて減圧法を主体に実施された。2007年(第1冬)は, 12.5時間で累計約830 m³のガスを生産したが, 出砂のため, 試験を中断せざるを得なかった。2008年(第2冬)は, 前年の教訓から第1冬と同じ仕上げ区間にサンドスクリーンが設置された。坑井の圧力は最終的に4 MPaまで減圧され, 6日間にわたって, 日産2,000~4,000 m³, 累計約13,000 m³のガスを生産することに成功した(Yamamoto and Dallimore, 2008; Kurihara *et al.*, 2012)。ここまでの詳しい成果については, 山本と佐伯(2009)を参照されたい。

Ignik Sikumi プロジェクト(2012年)は, 米国アラスカ州ノーススロープで実施されたCO₂置換法(CO₂とN₂の混合ガスをメタンハイドレート層に圧入し, メタンを含む生産流体をフローバックさせる)の実証試験であった(Farrell *et al.*, 2010; JOGMEC, 2012; Schoderbek *et al.*, 2012; Anderson *et al.*, 2014; Boswell *et al.*, 2017)。また, CO₂置換法によるガス生産が確認された後, 減圧法による生産が実施された。両方の生産手法によって, 延べ30日間で約24,000 m³のガスを生産した。特に, 減圧法による生産(試験後半)では, 坑底圧を最終的に2 MPaまで下げ, 連続19日間の生産を達成している。

2.2 海洋産出試験

第1回および第2回陸上産出試験の試験結果を踏まえ, 第1回海洋産出試験(2013年)が渥美半島から志摩半島の沖合(第二渥美海丘)で実施され, 減圧法により6日間

で累計約119,000 m³のガスを連続生産した(Konno *et al.*, 2017)。

第2回海洋産出試験(2017年)では生産井2坑で, それぞれ12日間(累計約40,850 m³), 24日間(累計約222,600 m³)の連続生産を達成している(JOGMEC, 2017; 山本, 2017)。出砂対策としては一定の成果が得られたものの, 安定的な生産という点においては依然課題を残す結果となった。

図1は, 前述の5つのガス生産試験におけるガス, 水それぞれの産出指数およびガス水比を簡易的に比較したものである。なお, メタンハイドレートの場合, ある温度に対する相平衡圧より地層内の圧力が下がった後に, メタンハイドレートの分解に起因するガスが生産され始める点には注意されたい。いずれの生産試験も後述の貯留層応答の評価に十分な長さの生産期間だったとは言いがたく, メタンハイドレート層からのガス生産挙動に関して結論付けることは難しい。しかし, Ignik Sikumi プロジェクト(2012年)のガス産出指数に若干の増加傾向が認められる他は, シミュレーションでの予測とは異なり, ガス生産レートの増加傾向は見いだせていないのが現状である。

また, 第1回海洋産出試験(2013年)では, ガス水比が約100(これはメタンハイドレート分解起源の水と地層水を同じ割合で生産していることを意味する)であったのに対し, 第2回海洋産出試験(2017年)のガス水比は, 第1回海洋産出試験の半分以下であり, ハイドレート飽和率が低い, つまり水飽和率が高い層において主にドロウダ

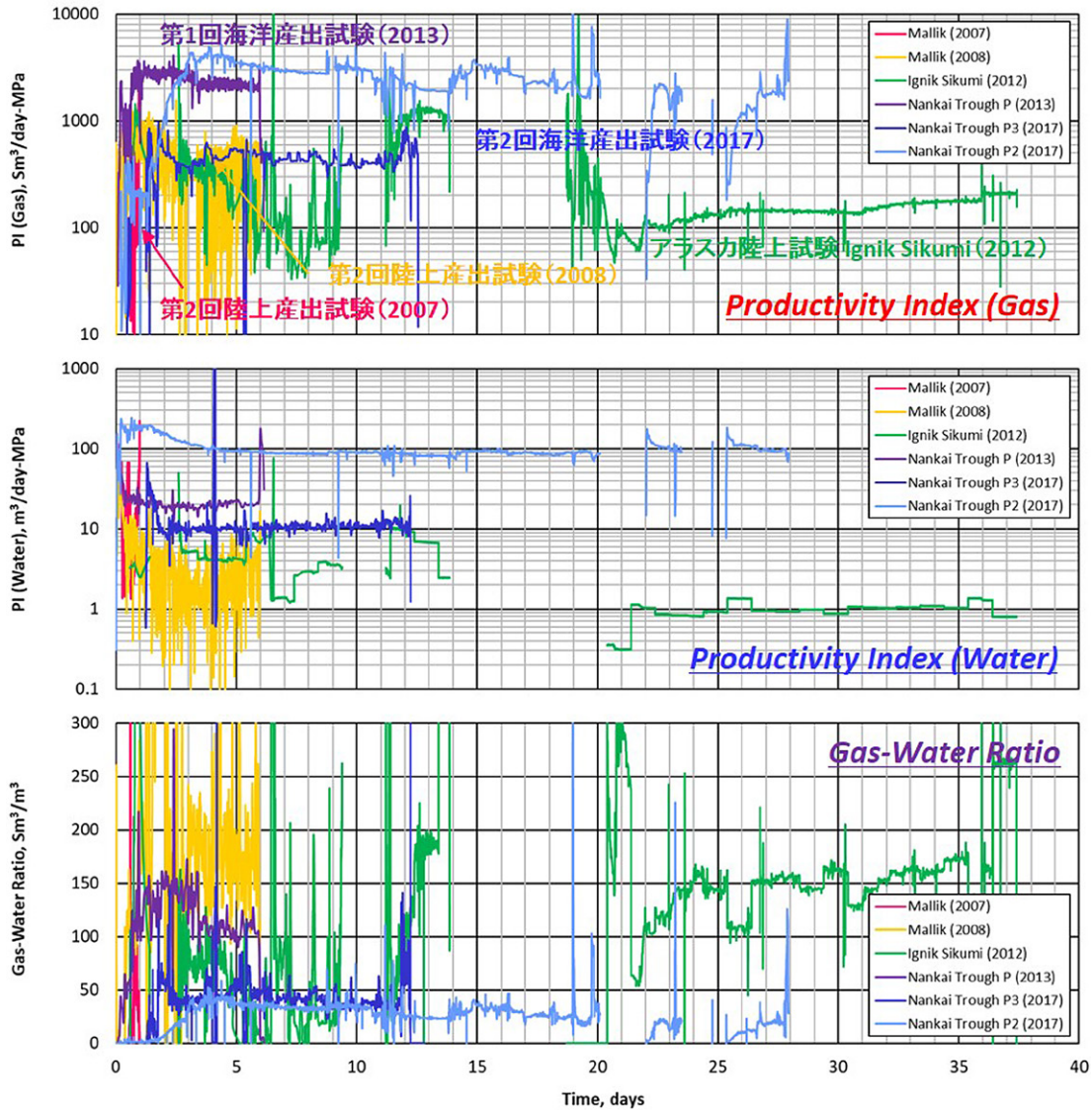


図 1 これまでのガス生産試験の生産挙動
(上段：ガス産出指数，中段：水産出指数，下段：ガス水比)

ウンが発生して生産しており，メタンハイドレート層に減圧が効率良く伝わっていないことを示唆する結果と言える。

3. 貯留層応答評価

3.1. 貯留層初期物性と生産に伴う物性変化

第二渥美海丘においては，第1回海洋産出試験の事前掘削（2012年）における物理検層およびコアデータと地震探査データを解析することにより，タービダイトの貯留層特性に関する貴重な情報・知見が得られている（藤井ほか，2016）。また，第2回海洋産出試験の事前掘削（2016年）では，それ以前に掘削された坑井も含めた坑井対比の結果，比較的良好的な水平方向の連続性を有する砂層であっても，ハイドレートの胚胎は不均質である場合があることが確認された（Tamaki *et al.*, 2017）。地層の不均質性は生産挙動にも影響を与える可能性があり，完全なる把握は難しいも

の、地震探査，物理検層，コアデータを統合化して貯留層性状を把握することでその影響を評価できる。ここで得た知見は，今後の有望な濃集帯の探査へのフィードバックとしても期待できる。

減圧法によるメタンハイドレート層からのガス生産は，メタンハイドレートの分解反応，流動，伝熱のうち，最も速度の遅い現象に律速される。今野ほか（2009）は，メタンハイドレートの模擬コアを用いた減圧実験の結果から，実フィールドでは，流動および伝熱が律速因子になることに言及し，今後の課題は，実フィールドスケールで減圧法を適用した場合のガス生産律速因子の評価であるとしている。

図2は，減圧法の適用時における貯留層性状の変化を概念的に示したものである。メタンハイドレート層の初期有効浸透率（ハイドレート存在下における浸透率）や絶対浸

透率は、生産性に大きな影響を与える重要な物性値である。メタンハイドレートの分解に伴い、初期有効浸透率が絶対浸透率に向かって回復していくと考えられるが、その回復過程では有効応力の増加に伴い、堆積物が元々有していた浸透率ではなく、圧密の影響によって低下した絶対浸透率に向かって変化することも考えられる。

第1回海洋産出試験の事前掘削（2012年）では地層圧力測定（XPT：Xpress Pressure Tool：Schlumberger社登録商標）および圧力コアの分析から1～100 mdの測定値が得られ（Fujii *et al.*, 2015；Konno *et al.*, 2015）、核磁気共鳴検層から推定された値（0.01～1 md）よりも数オーダー大きいことが示唆された（藤井ほか, 2016）。

原位置の圧力保持機構を備えた特殊コアリングツールによって回収された圧力コア（Yoneda *et al.*, 2017；山本ほか, 2018）に関する研究開発は、日本がリードして進めてきたメタンハイドレート研究の中でも特に重要な成果の1つであると言える。第2回海洋産出試験の翌年（2018年）、追加データ取得作業として新たに調査井2坑を掘削し、地下の圧力を保持した状態のコアを取得しており、現在も国立研究開発法人産業技術総合研究所を中心として分析が進められている。特に、貯留層の流動や熱に関する物性データが増えることは、貯留層の初期性状の把握と生産挙動予測精度の向上に寄与すると期待される。

3.2 圧力温度のモニタリング

生産井に減圧が施されることにより、坑井周りの地層の圧力が減少し、メタンハイドレートの分解が誘起される。この時、メタンハイドレートの分解に伴い、地層温度が低下することが予測される。生産井とモニタリング井で圧力および温度を観測することは、原位置でのメタンハイドレートの空間的・時間的な分解状況の把握に非常に有効な

手段の1つである。

第1回海洋産出試験では温度のみのモニタリングであったが、メタンハイドレート分解区間の推定や分解挙動などに関する多くの知見が得られている（Yamamoto *et al.*, 2017）。第2回海洋産出試験では、温度に加えて圧力のモニタリングにも成功し、試験結果を解釈するにあたり、大きな進展であったと言える。

モニタリングシステムの一例として、第2回海洋産出試験の坑井概念図を示す（図3）。モニタリング井における温度測定には、光ファイバセンサを用いるDTS（Distributed Temperature Sensing）と白金測温抵抗体を用いるRTD（Resistance Temperature Detector）を併用した。DTSは坑底から坑口までの区間に設置され、RTDは複数のセンサがメタンハイドレート層を集中的にカバーするように設置された。また、圧力計は、メタンハイドレート層の上部と下部に1か所ずつ設置された。温度、圧力ともに、モニタリング装置の設置から廃坑までの約2年にわたる長期計測を実施した。現在、取得したモニタリングデータを含めた生産試験データを活用し、メタンハイドレートの分解範囲のみでなく、地層の流動や熱に関する物性の推定を試みているところである。

3.3 レザバースミュレーション

シミュレーションで全てが解決するわけではないが、現象の理解や経済性評価の手段として、シミュレーションに頼るところは大きい。メタンハイドレート層からのガス生産挙動予測には、熱-流動-力学-化学（Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical：THMC）の要素が相互に関連する複雑な現象のモデリングが必要となる。前述のとおり、現状では、シミュレーションによる予測と現実に乖離がある。この原因が貯留層モデルと実際の貯留層のギャップにある

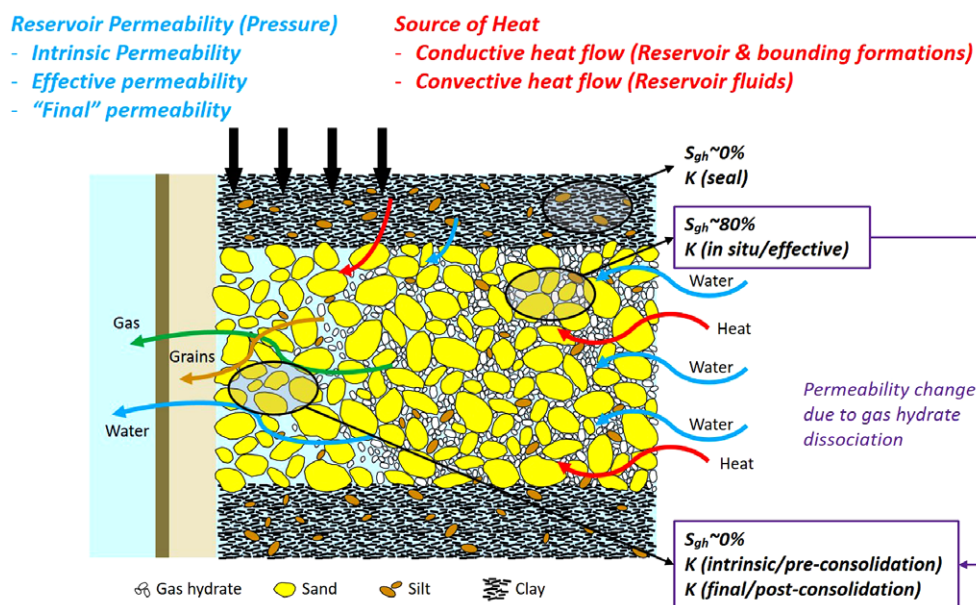


図2 減圧法の適用時における貯留層性状の変化（Collett, 2018に基づき、筆者作成）

のか、またシミュレータの物理モデルが不十分なのか、いまだ明らかになっていない点が多々ある。貯留層モデル、物理モデルの双方に不確実性があり、これらを同時に解決することが難しいことは言うまでもないが、なるべく複雑でない地質条件下での実際の長期生産データとの比較・検証が望まれる。

また、レザバシミュレータの開発に関わる取り組みとして、国際シミュレータ比較プロジェクトを紹介しておきたい。米国エネルギー省国立エネルギー技術研究所 (National Energy Technology Laboratory : NETL) と米国地質調査所 (United States Geological Survey : USGS) が主導して、メタンハイドレート生産シミュレータ比較のための国際共同プロジェクトが開始された。このプロジェクトは、世界のシミュレータが同一の問題を解いて、相互の計算結果を比較・検討することで、メタンハイドレートの分解・生産を対象としたシミュレーションに関する知見を共有するとともに、シミュレータに対する信頼性の向上を目的としている (Anderson *et al.*, 2007 ; Wilder *et al.*, 2008 ; 栗原ほか, 2009 ; Anderson *et al.*, 2011)。ここでは、単純な次元のモデルから、アラスカにおけるメタンハイドレート貯留層を想定した実際的なフィールドスケールでの挙動予測まで、段階的に難易度が増していく問題構成であった。

2017年11月からは、第1回と同様、NETLとUSGSの主導の下、第2回国際シミュレータ比較プロジェクト (White *et al.*, 2017) が本格的に始動しており、現在も活発な議論が続けられているところである。第1回目は、熱-

流動-化学 (Thermo-Hydro-Chemical : THC) の連成解析がメインであったのに対し、第2回目はそれにジオメカニクスの要素を加えた熱-流動-力学-化学 (Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical : THMC) の連成シミュレータでの比較である。計算負荷の高いシミュレーションであり、複雑な貯留層モデルへ適用は難しいかも知れないが、地層の圧密や変形が生産挙動に与える影響を把握するツールとしては有効であるだろう。

3.4 今後のフィールド試験に向けて

2018年12月には、米国アラスカ州ノーススロープに位置する将来の長期生産試験の候補地にて、層序試錐井1坑を掘削し、2枚の砂層にてメタンハイドレートの胚胎を確認した (JOGMEC, 2018; JOGMEC, 2019)。同試験候補地は、第1回および第2回海洋産出試験が実施された第二渥美海丘と比較すれば、比較的単純な構造の貯留層であると言え、(地層温度や熱の供給の面では海洋より不利かも知れないが) 長期の生産データを取得することで、より純粋なメタンハイドレート層特有の貯留層応答の把握が期待される。

4. 今後の課題と展望

本稿では、減圧法を中心に、メタンハイドレート層からのガス生産に伴い貯留層内部で生じると考えられる現象とその評価技術の現状について紹介してきた。ただし、現象の理解と再現をするための研究開発のみを進めても、経済性に見合うだけの生産レートの飛躍的な向上は期待できない。したがって、サイエンス的な視点だけでなく、エンジニアリング的な視点を持って進めていくことも必要であ

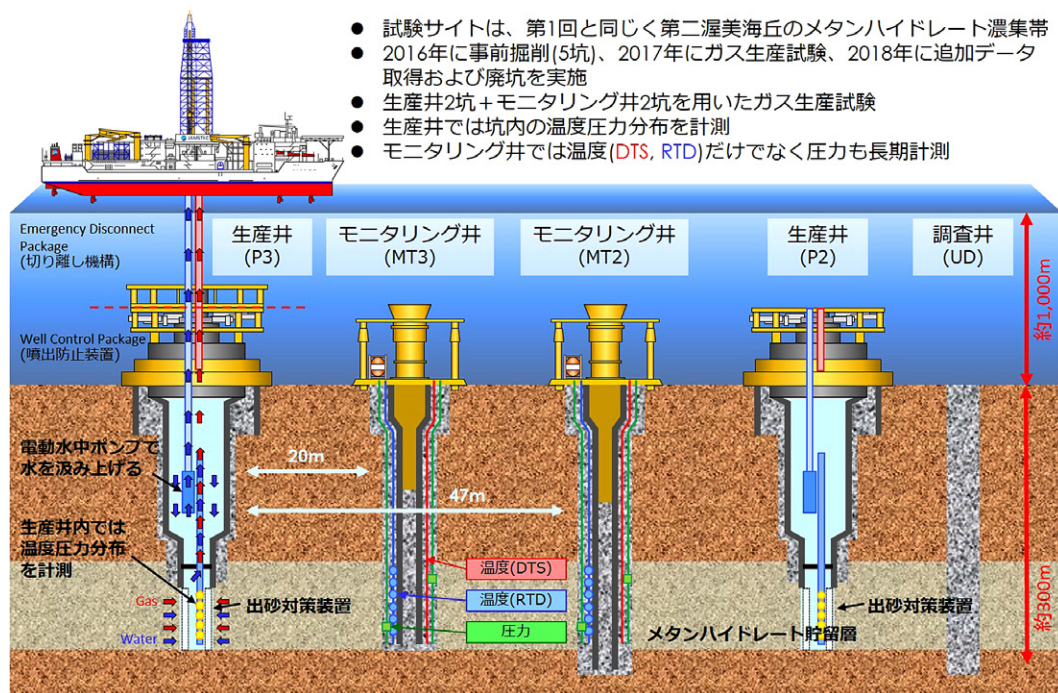


図3 第2回海洋産出試験における生産井およびモニタリング井の概要

る。特に、期待する安定的な生産レートはいまだ得られておらず、その阻害要因の抽出とその対策の準備は必須である。また、減圧法の効果を促す、あるいは減圧後に適用する手法の開発も並行して検討し続ける必要がある。

最後に、コンソーシアムの中だけではなく、民間企業やその他研究機関の知見を広く取り込むことができる仕組みも必要である。本稿でメタンハイドレートに関心を持って頂き、今後も多くの知恵が集まれば幸いである。

謝 辞

本研究はメタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (MH21) の研究の一環として実施した。本成果の公表を許可いただいた経済産業省およびMH21に謝意を表します。

参 考 文 献

- Anderson, B.J., Wilder, J.W., Collett, T.S., Hunter, R.B., Kurihara, M., Masuda, Y., McGrail, P., Moridis, G.J., Narita, H., Pooladi-Darvish, M., White, M.D. and Wilson, S.J., 2007 : International Methane Hydrate Code Comparison Project Simulates Relevant Problems. *Fire in the Ice*, Methane Hydrate Newsletter, U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, **7** (2), 5-7.
- Anderson, B.J., Kurihara, M., White, M.D., Moridis, G.J., Wilson, S.J., Pooladi-Darvish, M., Gaddipati, M., Masuda, Y., Collett, T.S., Hunter, R.B., Narita, H., Rose, K. and Boswell, R., 2011 : Regional long-term production modeling from a single well test, Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope. *Marine and Petroleum Geology*, **28** (2), 493-501, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2010.01.015.
- Anderson, B., Boswell, R., Collett, T.S., Farrell, H., Ohtsuki, S., White, M. and Zyrianova, M., 2014 : Review of the findings of the Ignik Sikumi CO₂-CH₄ gas hydrate exchange field trial. Proceedings of the 8th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2014), Beijing, China, July 28- August 1.
- Boswell, R., Schoderbek, D., Collett, T.S., Ohtsuki, S., White, M. and Anderson, B.J., 2017 : The Ignik Sikumi Field Experiment, Alaska North Slope: Design, Operations, and Implications for CO₂-CH₄ Exchange in Gas Hydrate Reservoirs. *Energy Fuels*, **31** (1), 140-153, doi: 10.1021/acs.energyfuels.6b01909.
- Collett, T.S., 2018 : Methane Hydrate Advisory Committee Meetings, March 1-2, <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/03/f49/GH%20International%20Collett%20and%20Boswell.pdf>.
- 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, ed. : Dallimore, S. R. and Collett, T. S., *Geological Survey of Canada, Bulletin* 585, 1-36.
- Farrell, H., Boswell, R., Howard, J. and Baker, R., 2010 : CO₂-CH₄ exchange in natural gas hydrate reservoirs: Potential and challenges. *Fire in the Ice*, Methane Hydrate Newsletter, U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, **10** (1), 19-21.
- Fujii, T., Suzuki, K., Takayama, T., Tamaki, M., Komatsu, Y., Konno, Y., Yoneda, J., Yamamoto, K. and Nagao, J., 2015 : Geological setting and characterization of a methane hydrate reservoir distributed at the first offshore production test site on the Daini-Atsumi Knoll in the eastern Nankai Trough, Japan. *Marine and Petroleum Geology*, **66** (2), 310-322, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2015.02.037.
- 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, ed.: Dallimore, S.R. and Collett, T.S., *Geological Survey of Canada, Bulletin* 585, 135.
- Hancock, S.H., Dallimore, S.R., Collett, T.S., Carle, D., Weatherill, B., 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, ed.: Dallimore, S. R. and Collett, T. S., *Geological Survey of Canada, Bulletin* 585, 134.
- JOGMEC, 2012: アラスカ CO₂ 置換ガス回収実証プロジェクトの現地試験終了～世界初のフィールド CO₂/CH₄ 置換試験～, <http://www.jogmec.go.jp/news/release/release0405.html> (accessed 2012/05/02).
- JOGMEC, 2017 : 第2回メタンハイドレート海洋産出試験(現場作業)の終了について, http://www.jogmec.go.jp/news/release/news_06_000283.html (accessed 2017/07/07).
- JOGMEC, 2018 : 米国アラスカノーススロープでメタンハイドレートの試掘井掘削を計画, http://www.jogmec.go.jp/news/release/news_10_000289.html (accessed 2018/12/06).
- JOGMEC, 2019 : 米国アラスカノーススロープでメタンハイドレートの試掘井掘削を完了, http://www.jogmec.go.jp/news/release/news_10_000300.html (accessed 2019/01/24).
- Konno, Y., Yoneda, J., Egawa, K., Ito, T., Jin, Y., Kida, M., Suzuki, K., Fujii, T. and Nagao, J., 2015 : Permeability of sediment cores from methane hydrate deposit in the

- Eastern Nankai Trough. *Marine and Petroleum Geology*, **66** (2), 487–495, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2015.02.020.
- Konno, Y., Fujii, T., Sato, A., Akamine, K., Naiki, M., Masuda, Y., Yamamoto, K. and Nagao, J., 2017 : Key findings of the world's first offshore methane hydrate production test off the coast of Japan: toward future commercial production. *Energy Fuels*, **31** (3), 2607–2616, doi: 10.1021/acs.energyfuels.6b03143.
- Kurihara, M., Sato, A., Funatsu, K., Ouchi, H., Yamamoto, K., Fujii, T., Numasawa, M., Masuda, Y., Narita, H., Dallimore, S.R., Wright, J.F. and Ashford, D., 2012 : Analysis of 2007 and 2008 gas hydrate production tests on the Aurora/JOGMEC/NRCan Mallik 2L-38 well through numerical simulation. in Scientific results from the JOGMEC/NRCan/Aurora Mallik 2007-2008 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada, ed.: Dallimore, S.R., Yamamoto, K., Wright, J.F. and Bellefleur, G.; *Geological Survey of Canada, Bulletin* 601, 217–259.
- MH21 (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 (平成20年8月版), http://www.mh21japan.gr.jp/pdf/seika/phase1_20100202.pdf
- Schoderbek, D., Martin, K., Howard, J., Silpngarmert, S. and Hester, K., 2012 : North Slope hydrate field trial: CO₂-CH₄ exchange. Offshore Technology Conference (OTC), Houston, Texas, USA, December 3-5, OTC-23725.
- Tamaki, M., Fujii, T. and Suzuki, K., 2017 : Characterization and prediction of the gas hydrate reservoir at the second offshore gas production test site in the eastern Nankai Trough, Japan. *Energies*, **10** (10), 1678, doi:10.3390/en10101678.
- 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, U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, **8** (3), 1–5.
- Yamamoto, K., Kanno, T., Wang, X.-X., Tamaki, M., Fujii, T., Chee, S.-S., Wang, X.-W., Pimenov, V. and Shako, V., 2017 : Thermal responses of a gas hydrate-bearing sediment to a depressurization operation. *RSC Advances*, **7**, 5554–5577, doi: 10.1039/c6ra26487e.
- White, M., Seol, Y. and Kneafsey, T., 2017: New Code comparison study of gas hydrate reservoir simulators, *Fire in the Ice*, Methane Hydrate Newsletter, U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, **17** (2), 9–11.
- Wilder, J.W., Moridis, G.J., Wilson, S.J., Kurihara, M., White, M.D., Masuda, Y., Anderson, B.J., Collett, T.S., Hunter, R.B., Narita H., Pooladi-Darvish, M., Rose, K. and Boswell, R., 2008: An International Effort to Compare Gas Hydrate Reservoir Simulators, Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008), Vancouver, British Columbia, Canada, July 6-10.
- Yoneda, J., Masui, A., Konno, Y., Jin, Y., Kida, M., Katagiri, J., Nagao, J. and Tenma, N., 2017 : Pressure-core-based reservoir characterization for geomechanics: Insights from gas hydrate drilling during 2012-2013 at the eastern Nankai Trough. *Marine and Petroleum Geology*, **86**, 1–16, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2017.05.024.
- 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, doi: 10.3720/japt.74.165.
- 栗原正典・船津邦浩・大内久尚・増田昌敬・成田英夫・海老沼孝郎, 2009 : メタンハイドレート生産シミュレータの開発. 石技誌, **74** (4), 297–310, doi: 10.3720/japt.74.297.
- 栗原正典, 2014 : 非在来型油ガス層のモデリング / シミュレーション例の紹介. 石技誌, **79** (6), 377–390, doi: 10.3720/japt.79.377.
- 藤井哲哉・鈴木清史・玉置真知子・小松侑平・高山徳次郎, 2016 : 東部南海トラフにおけるメタンハイドレート探査から分かってきたタービダイトの貯留層特性. 石技誌, **81** (1), 84–95, doi: 10.3720/japt.81.84.
- 山本晃司・佐伯龍男, 2009 : メタンハイドレート資源量評価と陸上産出試験. 石技誌, **74** (4), 270–279, doi: 10.3720/japt.74.270.
- 山本晃司, 2017 : 第2回海洋産出試験について. メタンハイドレートフォーラム2017, http://www.mh21japan.gr.jp/mh21wp/wp-content/uploads/mh21form2017_doc02_1.pdf
- 山本晃司・鈴木清史・西岡文維・米田純, 2018 : 地下のメタンハイドレートをそのまま取りだす～圧力コアリング, JOGMEC 石油・天然ガス資源情報, https://oilgas-info.jogmec.go.jp/info_reports/1004762/1007653.html (accessed 2018/12/05).